

Tối ưu hóa trọng lượng dầm thép đơn giản tiết diện chữ I tổ hợp bản cánh vát

Optimizing the weight of the tapered-flange I-section simple steel beam

Vũ Huy Hoàng

Tóm tắt

Tiết diện dầm thép nên được thay đổi dọc chiều dài dầm theo biểu đồ mô men để đạt hiệu quả kinh tế.

Có nhiều giải pháp đã được áp dụng trong thực tế như thay đổi chiều cao dầm hoặc thay đổi bề rộng bản cánh dầm hoặc thay đổi số lượng bản phủ cánh dầm, trong đó, giải pháp giữ nguyên chiều cao dầm, chỉ thay đổi bề rộng bản cánh được áp dụng rộng rãi bởi dễ chế tạo. Các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào phương pháp thay đổi bề rộng bản cánh theo hình thức giạt cấp. Bài báo đề xuất cách cắt vát đều bản cánh như một phương pháp thay đổi bề rộng cánh khác và tìm hiểu cách thức cắt vát tiết diện bản cánh của dầm thép chữ I để đạt trọng lượng dầm tối ưu nhất. Nghiên cứu cho thấy trong một số trường hợp, thay đổi bề rộng bản cánh bằng cách cắt vát đều có hiệu quả hơn giải pháp giạt cấp.

Từ khóa: dầm thép, bản cánh vát đều, tối ưu, tiết diện chữ I, tiết diện tổ hợp

Abstract

The section of a built-up beam should be adjusted along its length according to the moment diagram to maximize economic efficiency. There exist solutions in practice to deal with the problem, such as adjusting the web of the beam, changing the flange width, or shrinking some of the flange plates. Among these, the solution of changing the flange width while keeping the beam height is widely used due to its simplicity in fabrication.

Previous studies have only focused on stepping the flange width. This paper proposes a new section design method by tapering the beam flange and studying the corresponding parameters to optimize the beam weight.

The study revealed that the method of tapering the beam flange is more efficient than that of stepping the flange width in some cases.

Key words: steel beam, tapered-flange, optimizing, I-shape, built-up

Vũ Huy Hoàng

Bộ môn Kết cấu thép - gỗ, Khoa Xây dựng

Email: hoangvptv@yahoo.com

ĐT: 0912348810

Ngày nhận bài: 31/3/2021

Ngày sửa bài: 19/4/2021

Ngày duyệt đăng: 12/4/2023

1. Đặt vấn đề

Tối ưu hóa trọng lượng dầm thép là một bài toán cơ bản đối với các đơn vị thiết kế cũng như chế tạo kết cấu thép chuyên nghiệp. Theo đó, tiết diện dầm thép sẽ được thiết kế biến đổi theo biểu đồ mô men của dầm. Tuy nhiên, thay đổi tiết diện dầm liên tục theo biểu đồ mô men là không khả thi vì làm quá trình chế tạo trở nên rất phức tạp. Vì thế, giải pháp chia dầm thành một số đoạn có tiết diện khác nhau được sử dụng phổ biến. Đối với dầm đơn giản, khi chiều dài dầm nhỏ hơn 10m, nên giữ nguyên tiết diện dầm. Chỉ khi nhịp dầm lớn hơn 10m, việc thay đổi tiết diện mới đem lại hiệu quả kinh tế [1]. Có nhiều phương pháp thay đổi tiết diện như thay đổi chiều cao dầm, thay đổi bề rộng bản cánh, thay đổi số lượng bản phủ cánh dầm [1], được thể hiện trong Hình 1. Bài toán tối ưu liên quan đến việc xác định vị trí thay đổi và các thông số khác liên quan. Đối với dầm có bản cánh vát đều như Hình 1c, các thông số tối ưu sẽ được trình bày trong bài báo này.

2. Xác định các thông số thay đổi bề rộng bản cánh vát đều

Xét dầm thép đơn giản nhịp L, chịu tải trọng phân bố đều q, bản cánh vát đều một lần, các thông số liên quan đến việc thay đổi tiết diện dầm là khoảng cách điểm thay đổi tiết diện đến đầu dầm d, bề rộng cánh dầm tại vị trí đầu dầm.

a) Xác định vị trí điểm thay đổi tiết diện

Mô men tại tiết diện cách đầu dầm một khoảng x bằng:

$$M = \frac{qx(L-x)}{2} = \frac{qx(L-x)}{2} M_{\max} \frac{8}{qL^2} = \frac{4x(L-x)}{L^2} M_{\max}$$

Mô men kháng uốn cần thiết

$$W = \frac{M}{f_{yc}} = \frac{4x(L-x)}{L^2} \frac{M_{\max}}{f_{yc}} = \frac{4x(L-x)}{L^2} W_{\max} \quad (1)$$

trong đó:

M_{max}, W_{max} - mô men lớn nhất và mô men kháng uốn tại vị trí giữa dầm;

f - cường độ tính toán của thép;

yc - hệ số điều kiện làm việc.

Mối quan hệ giữa W và x được thể hiện trên Hình 2c.

Đối với dầm chỉ thay đổi tiết diện bản cánh

$$I = I_w + 2I_f = \frac{t_w h_w^3}{12} + 2 \left(\frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{b_f t_f h_f^2}{4} \right) = \frac{t_w h_w^3}{12} + \frac{t_f}{2} \left(\frac{t_f^2}{3} + h_f^2 \right) b_f$$

$$W = \frac{2I}{h} = \frac{t_w h_w^3}{6h} + \frac{t_f}{h} \left(\frac{t_f^2}{3} + h_f^2 \right) b_f \quad (2)$$

trong đó:

t_w, h_w - chiều dày và chiều cao của bản bụng;

t_f, b_f - chiều dày và chiều rộng của bản cánh;

h - chiều cao dầm;

h_f - khoảng cách tâm hai bản cánh.

Có thể thấy quan hệ giữa W và b_f là quan hệ bậc nhất.

Gọi mô men kháng uốn của tiết diện đầu dầm là W₀ (tương ứng với điểm A trên đồ thị), điểm B là điểm bắt đầu thay đổi tiết diện dầm thì đường

gãy khúc ABC chính là đường mô tả mô men kháng uốn thực tế của dầm.

Để mô men kháng uốn thực tế của dầm luôn lớn hơn hoặc bằng mô men kháng uốn yêu cầu, đoạn AB phải nằm trên đường cong mô men kháng uốn yêu cầu (tức không được cắt qua). Trường hợp tối ưu là AB tiếp xúc với đường cong W tại điểm D.

Điểm D thỏa mãn phương trình:

$$\frac{W - W_0}{x} = \frac{dW}{dx} \quad (3)$$

Từ (1) ta có:

$$\frac{dW}{dx} = \frac{4W_{\max}}{L^2}(L - 2x) \quad (4)$$

Kết hợp (3) và (4)

$$\begin{aligned} W - W_0 &= \frac{dW}{dx} x \\ \frac{4x(L-x)}{L^2} W_{\max} - W_0 &= \frac{4W_{\max}}{L^2}(L - 2x)x \\ x(L-x) - \frac{W_0}{4W_{\max}} L^2 &= (L - 2x)x \end{aligned} \quad (5)$$

Đặt

$$C = \frac{W_0}{W_{\max}} = \frac{W_0 h/2}{W_{\max} h/2} = \frac{I_0}{I_{\max}} > 0$$

(5) rút gọn thành

$$\begin{aligned} x(L-x) - \frac{CL^2}{4} &= (L-2x)x \Leftrightarrow Lx - x^2 - \frac{CL^2}{4} = Lx - 2x^2 \\ \Leftrightarrow \frac{CL^2}{4} &= x^2 \end{aligned}$$

Thu được

$$x_D = x = \frac{L\sqrt{C}}{2}$$

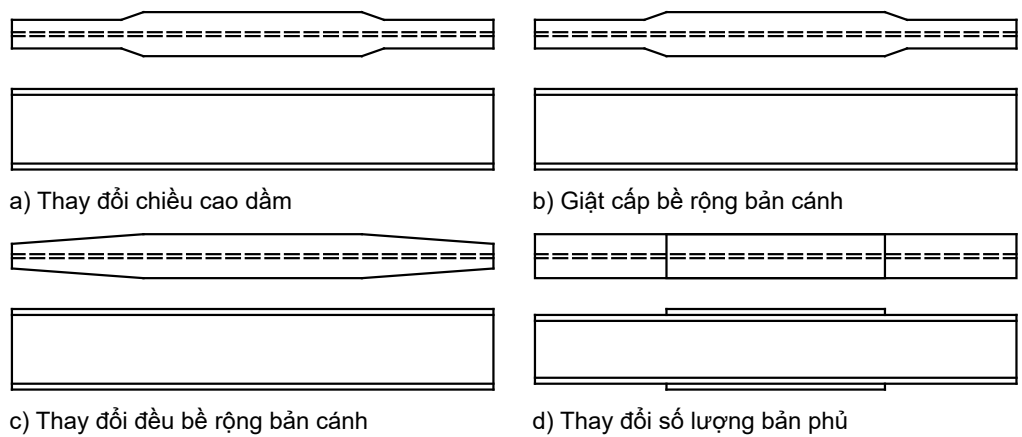
(6)

Vị trí điểm thay đổi tiết diện xác định từ phương trình:

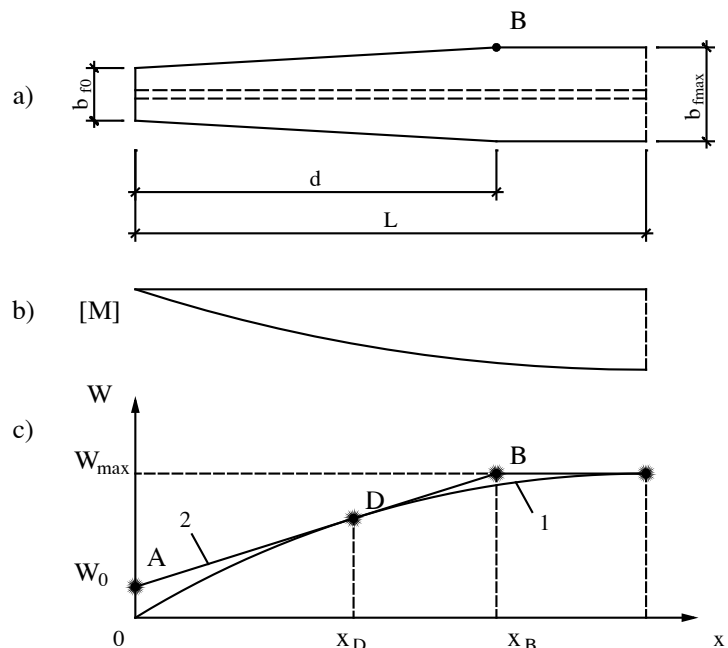
$$\frac{W_{\max} - W_0}{d} = \frac{dW}{dx} \Big|_{x=x_D} = \frac{4W_{\max}}{L^2}(L - 2x_D) \quad (7)$$

Thay (6) vào (7) ta có:

$$\begin{aligned} d &= \frac{W_{\max} - W_0}{\frac{4W_{\max}}{L^2}(L - 2x_D)} = \frac{(1-C)L^2}{4(L - 2x_D)} = \frac{(1-C)L^2}{4\left(L - 2\frac{L\sqrt{C}}{2}\right)} \\ &= \frac{(1-C)L}{4(1-\sqrt{C})} \end{aligned}$$



Hình 1. Các phương pháp thay đổi tiết diện dầm thép chữ I tổ hợp



Hình 2. Thông số thay đổi tiết diện dầm

- 1- Đường cong mô men kháng uốn yêu cầu
2- Đường cong mô men kháng uốn thực

$$\text{Hay } d = \frac{(1+\sqrt{C})L}{4} \quad (8)$$

b) Xác định bề rộng cánh đầu dầm

Bề rộng cánh đầu dầm được xác định từ điều kiện tối ưu hóa trọng lượng cánh dầm (cũng là trọng lượng dầm). Đối với bản cánh có chiều dày không đổi, điều này tương đương với diện tích bề mặt cánh dầm là nhỏ nhất hoặc diện tích giảm bớt của cánh dầm là lớn nhất.

Phân giảm diện tích cánh dầm bằng:

$$A = \frac{b_{f\max} - b_{f0}}{2} d \quad (9)$$

trong đó:

$b_{f\max}$, b_{f0} - bề rộng cánh dầm tại tiết diện giữa dầm và đầu dầm;

d - xác định theo công thức (8);

Từ (2) ta có:

$$\frac{t_f}{h} \left(\frac{t_f^2}{3} + h_f^2 \right) b_f = W - \frac{t_w h_w^3}{6h} = W - W_w \quad (10)$$

Với W_w là mô men kháng uốn của phần bụng dầm.

Áp dụng (10) cho tiết diện đầu dầm và giữa dầm, sau đó chia hai biểu thức, ta có:

$$\frac{b_{f0}}{b_{fmax}} = \frac{W_0 - W_w}{W_{max} - W_w} \quad (11)$$

Lấy 1 trừ đi hai vế của (11) và biến đổi thu được:

$$b_{fmax} - b_{f0} = \frac{W_{max} - W_0}{W_{max} - W_w} b_{fmax} = \frac{1 - C}{1 - C_w} b_{fmax} \quad (12)$$

Với

$$C_w = \frac{W_w}{W_{max}} = \frac{I_w}{I_{max}}$$

Thay (8) và (12) vào (9) ta có:

$$A = \frac{b_{fmax} (1 - C) (1 + \sqrt{C}) L}{2(1 - C_w) 4} \quad (13)$$

Đạo hàm A theo C và cho bằng 0:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dC} &= \frac{b_{fmax} L}{8(1 - C_w)} \left[- (1 + \sqrt{C}) + \frac{1}{2\sqrt{C}} (1 - C) \right] \\ &= \frac{b_{fmax} L}{8(1 - C_w) 2\sqrt{C}} [-2\sqrt{C} - 2C + 1 - C] \\ &= \frac{b_{fmax} L}{8(1 - C_w) 2\sqrt{C}} [-2\sqrt{C} - 3C + 1] = 0 \Rightarrow -2\sqrt{C} - 3C + 1 = 0 \end{aligned}$$

Thu được phương trình:

$$3C + 2\sqrt{C} - 1 = 0 \quad (14)$$

Giải phương trình trên cho kết quả

$$C = \frac{1}{9} \quad (15)$$

Thay vào giá trị của C vào công thức (8) ta có:

$$d = \frac{(1 + \sqrt{C}) L}{4} = \frac{\left(1 + \frac{1}{3}\right) L}{4} = \frac{\left(\frac{4}{3}\right) L}{4} = \frac{L}{3} \quad (16)$$

Để dàng chứng minh tại giá trị $C = 1/9$, diện tích chiết giảm A đạt cực đại. Khi $C > 1/9$, C tăng thì A giảm. Theo yêu cầu cầu cấu tạo, bề rộng bản cánh dầm thép tổ hợp không được lấy nhỏ hơn 180mm, dẫn đến giá trị C thường lớn hơn 1/9. Do đó, diện tích chiết giảm lớn nhất trong trường hợp này tương ứng với giá trị bề rộng cánh đầu dầm lấy theo giá trị cấu tạo 180mm và vị trí thay đổi tiết diện lấy theo công thức (8).

3. So sánh phương án giảm tiết diện bằng bản cánh giạt cấp và bản cánh vát đều

Tính toán hiệu quả giảm tiết diện của hai phương án:
Phương án 1: Bản cánh giạt cấp 1 lần tại vị trí $x = L/6$;
Phương án 2: Bản cánh chế tạo vát đều một lần thay đổi, kết quả được lập thành bảng 1 dưới đây. Trong cả hai phương án, bề rộng bản cánh nhỏ nhất được lấy theo cấu tạo là 180mm.

Nhận xét:

Phương án bản cánh vát đều hiệu quả hơn phương án bản cánh giạt cấp từ 2~8% tổng trọng lượng dầm. Bề rộng bản cánh càng lớn càng cho thấy rõ hiệu quả của phương án bản cánh vát đều.

Bảng 1. Hiệu quả giảm tiết diện của 2 phương án bản cánh giạt cấp và bản cánh vát đều

TT	Thông số							Phương án giạt cấp				Phương án vát đều			
	L	q	t_w	t_f	h	b_f	V	x	b_{f1}	ΔV_f	r	b_{f0}	d	ΔV_f	r
	m	kN/m	m	m	m	m	m ³	m	m	m ³	%	m	m	m ³	%
1	12	96	0.01	0.02	1.2	0.24	0.25	2	0.18	0.010	3.8	0.180	5.72	0.014	5.4
2	12	120	0.01	0.02	1.2	0.32	0.29	2	0.18	0.022	7.7	0.180	5.44	0.030	10.4
3	12	144	0.01	0.02	1.2	0.4	0.33	2	0.18	0.035	10.6	0.180	5.23	0.046	13.9
4	12	168	0.01	0.02	1.2	0.48	0.37	2	0.23	0.040	10.8	0.180	5.07	0.061	16.5
5	16	96	0.012	0.02	1.5	0.32	0.49	2.67	0.18	0.030	6.2	0.180	7.34	0.041	8.5
6	16	144	0.012	0.02	1.5	0.55	0.63	2.67	0.24	0.066	10.5	0.180	6.73	0.100	15.8
7	16	192	0.012	0.022	1.5	0.71	0.78	2.67	0.34	0.087	11.2	0.180	6.43	0.150	19.2
8	16	240	0.012	0.024	1.5	0.85	0.93	2.67	0.42	0.110	11.8	0.180	6.22	0.200	21.5
9	20	96	0.014	0.02	1.6	0.5	0.84	3.33	0.20	0.080	9.6	0.180	8.63	0.110	13.2
10	20	144	0.016	0.02	1.8	0.66	1.09	3.33	0.27	0.104	9.5	0.180	8.39	0.161	14.8
11	20	192	0.016	0.022	2	0.74	1.28	3.33	0.31	0.126	9.9	0.180	8.25	0.203	15.9
12	20	240	0.016	0.024	2	0.91	1.50	3.33	0.41	0.160	10.7	0.180	7.95	0.279	18.6

Ký hiệu trong bảng:

V, ΔV_f - thể tích dầm và thể tích phần giảm tiết diện bản cánh;

r - tỷ lệ giữa thể tích phần giảm tiết diện bản cánh với thể tích dầm;

b_{f1} - bề rộng bản cánh sau khi thay đổi của phương án bản cánh giạt cấp;

b_{f0} - bề rộng bản cánh đầu dầm của phương án bản cánh vát đều;

4. Kết luận

Dầm cánh vát là một trong những giải pháp giảm trọng lượng thép dầm hiệu quả, đặc biệt nhờ cắt vát đều nên có thể đưa ra những cách thức cắt thép tối ưu, không gây ra hiện tượng lãng phí.

Đối với dầm đơn giản, trọng lượng dầm tối ưu khi mô men quán tính tiết diện đầu dầm có giá trị bằng 1/9 mô men quán tính tiết diện giữa dầm, điểm thay đổi tiết diện tương ứng nằm tại vị trí 1/3 chiều dài dầm. So với dầm thay đổi bản cánh bằng cách giạt cấp bề rộng, điểm này nằm sâu gần giữa dầm hơn, vì thế đem lại hiệu quả cao hơn.

Thông thường tỷ lệ giữa mô men quán tính tiết diện đầu dầm và giữa dầm lớn hơn 1/9. Khi đó, bề rộng cánh đầu dầm càng nhỏ thì trọng lượng dầm càng nhỏ, tức bề rộng cánh đầu dầm cần lấy theo giá trị cấu tạo nhỏ nhất.

Phương án bản cánh vát đều hiệu quả hơn phương án bản cánh giạt cấp về khối lượng thép, tuy nhiên trong thực tế chiều dài đường hàn đối đầu nổi bản cánh của phương án

trước lớn hơn phương án sau. Người thiết kế cần cân nhắc thêm yếu tố này khi tính toán chi phí tối ưu tổng thể của dầm.

Tối ưu bằng bản cánh vát cũng tương tự như các giải pháp tối ưu trọng lượng dầm khác đều là bước nghiên cứu sơ bộ ban đầu về hình dạng của dầm. Tiết diện dầm sẽ tiếp tục được hiệu chỉnh trong quá trình thực hiện các phép toán kiểm tra bền, ổn định và biến dạng theo tiêu chuẩn. Các hiệu chỉnh này thông thường chỉ là thay đổi giá trị của các tham số d , b_f trong phạm vi nhỏ chứ không thay đổi toàn bộ hình dạng dầm./.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Văn Hội, *Kết cấu thép 1 - Cấu kiện cơ bản*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, 2006
2. TCVN 5575-2012 *Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế*, Nhà xuất bản xây dựng
3. Đoàn Tuyết Ngọc, *Thiết kế hệ dầm sàn thép*, Nhà xuất bản xây dựng, 2006

Đề xuất công thức xác định hệ số...

Vậy, ổn định tổng thể của cột:

$$\sigma_1 = \frac{N}{\varphi_e A} = \frac{372,05}{0,0972 \cdot 0,01865} = 20,53 \text{ kN/cm}^2 < f_{yc}$$

Bằng cách tương tự, thực hiện đối với sơ đồ tính (ii) như ở sơ đồ Hình 6c, các kết quả được liệt kê ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán cho các sơ đồ tính cột

Tham số	Sơ đồ (i)	Sơ đồ (ii)
Hệ số n	0,00428	0,00248
Hệ số chiều dài tính toán μ	1,6813	2,0025
Chiều dài hình học L (m)	18,00	15,00
Chiều dài tính toán L_0 (m)	30,26	30,4
Độ mảnh λ	115,357	114,492
Độ mảnh tương đương $\bar{\lambda}$	3,65	3,62
Hệ số ảnh hưởng của hình dạng tiết diện η	1,10	1,10
Độ lệch tâm tính đối m_e	11,01	11,01
Hệ số φ_e	0,0972	0,975
Ứng suất σ (kN/m ²)	20,53	20,47

Thấy rằng, nếu lấy chiều dài hình học của cột đỡ đến tâm bảng ($L^* = L_1 + 0,5 L_2 = 15,0$ m) và sơ đồ tính là thanh

(tiếp theo trang 56)

công xon với hệ số chiều dài tính toán $\mu = 2,0$ (không xét đến ảnh hưởng của trọng lượng bản thân cột) thì sẽ cho kết quả $L_0 = \mu L^* = 30$ m. Giá trị này so với kết quả chiều dài tính toán theo sơ đồ (i) chênh lệch 0,39%, là khá nhỏ. Như vậy, trong tính toán thực hành đối với trường hợp này có thể lấy chiều dài hình học của cột tính đến trọng tâm tấm bảng với hệ số chiều dài tính toán $\mu = 2,0$.

Kết luận và kiến nghị:

Qua kết quả của nghiên cứu trên, cho thấy:

Công thức xác định hệ số chiều dài tính toán μ , được tác giả thiết lập cho 02 nhóm sơ đồ tính cột của Bảng quảng cáo, có đủ tin cậy, có thể áp dụng trong tính toán thực hành. Đồng thời, các công thức này sẽ thay thế sự phức tạp khi phải sử dụng bảng tra ở trong tiêu chuẩn TCVN 5575:2012, cũng sẽ dễ dàng hơn cho việc tự động hóa tính toán;

Trong tính toán thực hành, có thể đơn giản hóa việc xác định chiều dài tính toán cột bằng cách lấy chiều dài hình học tính từ chân cột đến điểm giữa của chiều cao tấm bảng và với hệ số chiều dài tính toán $\mu = 2,0$.

Ảnh hưởng của trọng lượng bản thân cột đến hệ số chiều dài tính toán là khá nhỏ (như ở mục 2.3.b), có thể bỏ qua trong tính toán thực hành trong trường hợp ở ví dụ này./.

Tài liệu tham khảo

1. TCVN 2737:1995 (1995). *Tải trọng và Tác động – Tiêu chuẩn thiết kế*. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
2. TCVN 5575:2012 (2012), *Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế*, Tiêu chuẩn Việt Nam, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
3. Lê Thọ Trình, Đỗ Văn Bình (2008), *Ổn định công trình*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
4. Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
5. ANSI/AISC 360-16 *An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings*.
6. ASCE/SEI 48-11 (2011), *Design of Steel Transmission Pole Structures*, American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.
7. Исаев, А.В. 2005 *Методика расчета и совершенствование конструктивных форм рекламных конструкций*, кандидат технических наук. Автореферат дисс. кандидата техн. наук. Казань.: КГ АСУ, 2005. - 186 с.
8. СП 16.13330.2016. *Стальные конструкции*. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. — М.: [б.и.], 2017. — 145 с.
9. 07SG526 (2007), 户外钢结构独立柱广告牌结构图集, 工程图集, 北京: 中国计划出版社(inChina), (tạm dịch: *Bảng quảng cáo cột độc lập kết cấu thép ngoài trời - Thiết kế điển hình kết cấu thép*).
10. CECS148 (2003) 户外广告设施钢结构技术规程[SJ]. 北京: 中国计划出版社 (inChina) (tạm dịch: *Thông số kỹ thuật cho kết cấu thép của các Kết cấu quảng cáo ngoài trời*).