

TÍNH TOÁN SỨC KHÁNG UỐN CỦA DẦM THÉP LIÊN HỢP

CALCULATION OF FLEXURAL RESISTANCE FOR COMPOSITE STEEL GIRDER

➤ **ThS. Võ Thành Nam** - Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Thành phố Hồ Chí Minh,
Việt Nam / Email: vothanhnam@tdtu.edu.vn

➤ **TS. Phạm Hải Chiến** - Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Thành phố Hồ Chí Minh,
Việt Nam. / Email: phamhaichien@tdtu.edu.vn

TÓM TẮT: Tiêu chuẩn kỹ thuật trong thiết kế cầu ngày càng được cập nhật những kiến thức mới nhất, các phiên bản sau luôn được phát triển bởi những nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm hiện đại. Từ tiêu chuẩn 22TCN 272-05 cho đến tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 đã có nhiều sự khác biệt mà người thiết kế cần phải đặc biệt xem xét. Một trong những thay đổi đó là ở phần Kết cấu thép, tính toán đánh giá khả năng chịu uốn của tiết diện liên hợp. Bài báo này sẽ trình bày ngắn gọn những ý chính khi tính toán sức kháng uốn của tiết diện theo cả hai tiêu chuẩn 22TCN 272-05 và TCVN 11823:2017. Để minh họa cụ thể hơn, một ví dụ so sánh đối với kết cấu nhịp cầu tiết diện hình chữ I liên hợp với bản bê tông mặt cầu được thực hiện. Từ đó, bài báo đưa ra một số kết luận về kết quả tính toán giữa hai tiêu chuẩn, sự khác biệt ở các bước thiết kế.

Từ khóa: tiêu chuẩn kỹ thuật, sức kháng uốn, dầm thép liên hợp, mất ổn định, tiết diện đặc chắc.

1. Mở đầu

Năm 2001, Bộ Giao thông vận tải ban hành thử nghiệm tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-01, được biên soạn chủ yếu dựa trên tiêu chuẩn AASHTO LRFD 1998 của Hoa Kỳ thay cho tiêu chuẩn 22TCN 18-79 [1, 2]. Đến năm 2005, khi ngành công trình giao thông đã quen với triết lý thiết kế theo hệ số sức kháng và hệ số tải trọng (Load and Resistance Factor Design LRFD) thì Bộ Giao thông vận tải ban hành chính thức tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05, về cơ bản thì không khác nhiều so với 22TCN 272-01 [3]. Sau đó, đến năm 2017, Bộ GTVT tổ chức biên soạn, Bộ Khoa học và công nghệ công bố tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ TCVN 11823:2017, chủ yếu tham khảo tiêu chuẩn AASHTO 2012 [4, 5]. Phiên bản mới này tuy không có sự thay đổi về triết lý thiết kế (LRFD) nhưng lại có rất nhiều sự khác biệt trong các công thức tính toán như là các tính chất cơ lý của vật liệu, sức kháng tính toán của các mặt cắt ngang... đặc biệt là đối với kết cấu thép.

Công trình cầu vượt thép hiện nay được áp dụng nhiều tại các nút giao ở đô thị lớn như thành phố

ABSTRACT: Technical standards in bridge design are constantly updated to integrate the latest knowledge, with each new version created from new theoretical and experimental research. There are notable differences between standard 22TCN 272-05 and TCVN 11823:2017 that designers must consider account. A significant change relates to the steel structure, particularly in the assessment of the bearing capacity of specific connections. This article aims to provide a concise overview of the key concepts in calculating external strength according to both standards. To illustrate this more specifically, a comparative example is conducted on an I-shaped composite bridge girder with a concrete deck. The paper draws several conclusions and recommendations regarding the calculation results between the two specifications and the differences in the design steps.

Keywords: technical specifications, flexural resistance, composite steel girder, buckling, compact section.

Hồ Chí Minh (ngã tư Hàng Xanh, ngã tư Thủ Đức, bùng binh Cây Gõ, ngã sáu Gò Vấp,...) và Hà Nội (nút giao Nguyễn Chí Thanh – Trần Duy Hưng, nút giao Nam Hồng, nút giao Bạch Mai – Phố Huế,...), góp phần giảm thiểu đáng kể tình trạng ùn tắc giao thông ở hai thành phố này. Kết cấu cầu được sử dụng gọi là cầu dầm thép liên hợp, bao gồm dầm chủ, hệ liên kết ngang sử dụng vật liệu thép, còn bản mặt cầu bên trên sử dụng vật liệu bê tông cốt thép tương tự như cầu bê tông dự ứng lực được liên kết với dầm chủ bằng các neo chống cắt. Ưu điểm lớn nhất của việc lựa chọn dầm thép là khả năng thi công nhanh để sớm đưa vào khai thác và giải phóng mặt bằng thi công cho các con đường có lượng xe cộ lưu thông lớn. Các dầm thép này có hai dạng mặt cắt ngang là hình chữ I và hình hộp. Về sơ đồ kết cấu, có hai dạng là nhịp giản đơn và nhịp liên tục [6, 7]. Như vậy, trong quá trình tính toán kiểm tra điều kiện chịu uốn, sẽ có những vị trí mà tiết diện chịu mômen dương, có vị trí mà tiết diện chịu mômen âm. Trong phạm vi bài báo này sẽ trình bày các kết cấu cầu dầm thép liên hợp nhịp đơn giản có tiết diện đặc chắc.

2. Lý thuyết tính toán sức kháng uốn của tiết diện thép liên hợp

2.1. Tiêu chuẩn 22TCN 272-05

Tính chất tiết diện

Bước đầu tiên là xác định tính chất của tiết diện, phụ thuộc vào sự ổn định cục bộ của các bộ phận chịu nén như là bản cánh và một phần bản bụng. Ngoài ra còn phụ thuộc vào tính chất ổn định tổng thể (xoắn ngang) của toàn bộ dầm, liên quan đến khoảng cách các liên kết ngang. Tuy nhiên đối với tiết diện liên hợp chịu mômen dương thì bản cánh trên đã được liên kết với bản bê tông mặt cầu nên luôn đảm bảo ổn định cục bộ, ngoài ra bản mặt cầu cũng được xem là chi tiết giằng cho dầm thép suốt toàn bộ chiều dài nhịp nên không xảy ra hiện tượng mất ổn định tổng thể. Do vậy, chỉ cần kiểm tra điều kiện ổn định cục bộ của bản bụng chịu nén theo công thức

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (1)$$

Trong đó D_{cp} là chiều cao bản bụng chịu nén so với trục trung hòa dầm, t_w là chiều dày bản bụng, E là môđun đàn hồi của vật liệu thép, F_{yc} là cường độ chảy dẻo của bản cánh chịu nén. Nếu điều kiện này thỏa mãn thì tiết diện được kết luận là đặc chắc.

Mômen chảy M_y

Mômen chảy M_y được định nghĩa là mômen làm cho thớ đầu tiên bị chảy, nói cách khác là ứng suất tại vị trí đó đạt đến giá trị cường độ chảy F_y . Việc tính toán giá trị này dựa vào kiến thức cơ học với công thức tính toán ứng suất phụ thuộc vào mômen tính toán M_u và mômen chống uốn S . Các công thức cơ bản được trình bày lại như sau.

$$M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD} \quad (2)$$

Trong đó M_{D1} , M_{D2} và M_{AD} là mômen do tải tại giai đoạn 1, mômen do tải tại giai đoạn 2 và mômen chất thêm để thớ đầu tiên của tiết diện bị chảy. Giá trị mômen thêm này được tính toán từ công thức sau.

$$F_y = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{AD}}{S_{ST}} \quad (3)$$

Trong đó S_{NC} , S_{ST} và S_{LT} là môđun mặt cắt của tiết diện không liên hợp, tiết diện liên hợp ngắn hạn và tiết diện liên hợp dài hạn.

Mômen dẻo

Mômen dẻo M_p là mômen làm cho ứng suất tất cả các thớ thép đạt giá trị F_y và ứng suất trong bản mặt cầu đạt giá trị $0,85f'_c$. Các giá trị ứng suất này sẽ tương ứng với lực dẻo trong từng bộ phận của tiết diện. Tùy thuộc vào mối quan hệ giữa các lực dẻo thì có thể biết được vị trí của trục trung

hòa dầm có thể nằm ở vị trí bản bụng, bản cánh hoặc bản mặt cầu. Tiếp theo, sẽ tính toán các cánh tay đòn của lực dẻo và mômen dẻo cho từng bộ phận. Cuối cùng, tổng các giá trị mômen này sẽ là mômen dẻo M_p của tiết diện. Trong tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 có hướng dẫn rất chi tiết để tính toán trong phụ lục D [4].

Sức kháng uốn M_n

Tiết diện có tính chất đặc chắc thì sức kháng uốn M_n sẽ bằng mômen dẻo M_p nếu $D_p \leq D'$ với D_p là khoảng cách từ đỉnh bản mặt cầu tới trục trung hòa dầm và D' là tích của chiều cao dầm thép D_t kể cả phần vát bê tông bản mặt cầu với tỉ số $(\beta/7,5)$, hệ số β này phụ thuộc vào cường độ chảy dẻo của thép. Nếu sử dụng thép cấp 250 thì hệ số này là 0,9; còn nếu sử dụng thép 345 thì hệ số này là 0,7.

Trong các trường hợp khác thì sức kháng uốn M_n tính theo công thức sau phụ thuộc vào mômen chảy M_y và mômen dẻo M_p .

$$M_n = \frac{5M_p - 0,85M_y}{4} + \frac{0,85M_y - 5M_p}{4} \left(\frac{D_p}{D'} \right) \quad (4)$$

2.2. Tiêu chuẩn TCVN 11823:2017

Để thỏa mãn tính chất đặc chắc của tiết diện thì ngoài điều kiện ổn định cục bộ của bản bụng chịu nén tương tự tiêu chuẩn 22TCN 272-05 thì phải thỏa mãn điều kiện cường độ chảy của bản cánh không vượt quá 485 MPa. Ngoài ra tỉ lệ giữa chiều cao D và chiều dày bản bụng t_w không vượt quá 150 nếu dùng sườn tăng cường dọc và không quá 300 nếu có dùng sườn tăng cường dọc cho bản bụng.

Khi đó sức kháng uốn M_n sẽ được tính theo công thức sau.

$$M_n = M_p \text{ nếu } D_p \leq 0,1Dt \text{ hoặc}$$

$$M_n = M_p \left(1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right) \quad (5)$$

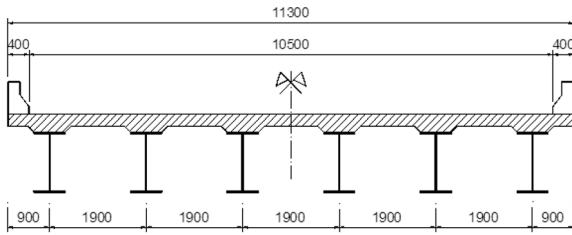
Trong đó D_t là chiều cao tổng cộng của mặt cắt liên hợp bao gồm cả phần vút và bản bê tông mặt cầu; D_p là khoảng cách từ mặt trên của bản mặt cầu đến trục trung hòa dầm.

3. Ví dụ minh họa

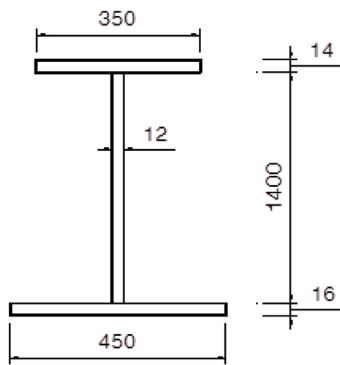
Cho hệ kết cấu nhịp cầu dài 30m có mặt cắt ngang như hình 1. Bản mặt cầu bê tông cốt thép có cường độ chịu nén $f'_c=30\text{MPa}$, chiều dày bản mặt cầu là 190mm và phần vút là 25mm, phần này đảm bảo yêu cầu cấu tạo cho neo liên kết giữa dầm thép và bản mặt cầu và sẽ bỏ qua khi tính toán các đặc trưng hình học. Dầm chủ tổ hợp từ các tấm thép cấp 345 (cường độ chảy $F_y=345\text{MPa}$ và cường độ kéo $F_u=450\text{MPa}$); môđun đàn hồi $E=200\text{GPa}$; mặt cắt ngang như hình 2.

3.1. Xác định mômen uốn do tải tĩnh.

Với hệ dầm như trên, theo các tiêu chuẩn thiết



Hình 1. Mặt cắt ngang cầu (đơn vị mm)

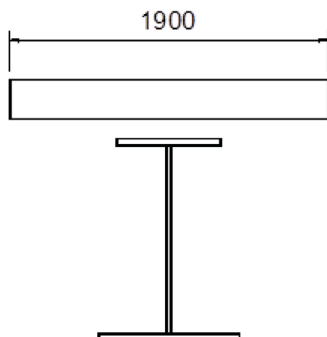


Hình 2. Mặt cắt ngang dầm chủ (đơn vị mm)

kế thường sử dụng phương pháp tách riêng từng dầm để kiểm toán. Điều đó có nghĩa sẽ xác định tải trọng tác dụng lên từng dầm, tính toán nội lực và sức kháng uốn cho từng dầm riêng lẻ. Tải trọng bản thân do bê tông có trọng lượng riêng là 24 kN/m^3 và thép có trọng lượng riêng là $78,5 \text{ kN/m}^3$. Từ kích thước hình học, tính toán được diện tích mặt cắt ngang các bộ phận và có tải trọng bản thân $DC = 2,27 + 8,66 = 10,93 \text{ kN/m}$. Tải trọng lớp phủ mặt cầu sẽ giả định lớp bê tông nhựa dày 70 mm , trọng lượng riêng là $22,5 \text{ kN/m}^3$. Tương tự như trên sẽ tính toán được tải trọng lớp phủ là $DW = 3 \text{ kN/m}$. Với kết cấu nhịp giản đơn thì mômen uốn lớn nhất sẽ xuất hiện ở giữa nhịp, do đó sẽ tính toán mômen uốn do tĩnh tải giai đoạn 1 có xét hệ số tải trọng $1,25$ là $MD1 = 1476 \text{ kN.m}$. Mômen uốn do tĩnh tải giai đoạn 2 có xét hệ số tải trọng $1,5$ là $MD2 = 485 \text{ kN.m}$.

3.2. Tính sức kháng uốn theo tiêu chuẩn 22TCN 272-05.

Tiết diện tính toán sức kháng uốn bao gồm dầm thép và bản mặt cầu có hiệu như hình 3. Chiều rộng



Hình 3. Mặt cắt sử dụng để tính toán sức kháng uốn (đơn vị mm)

có hiệu được trình bày trong phần 4 của tiêu chuẩn [3]. Với các thiết kế thông thường thì chiều rộng này thường bằng khoảng cách của tim 2 dầm chủ. Ngoài ra, bản mặt cầu cũng được bỏ qua phần vút để việc tính toán được đơn giản hơn.

Mômen chảy My

Đầu tiên phải tính toán mômen chảy M_y , giá trị này phụ thuộc vào các đặc trưng hình học của tiết diện không liên hợp, liên hợp ngắn hạn và dài hạn. Do tiết diện bao gồm 2 loại vật liệu khác nhau là bê tông và thép nên cần phải quy đổi 2 loại vật liệu này thành một. Thông thường tỉ số quy đổi n sẽ theo tỉ lệ của giá trị môđun đàn hồi giữa thép và bê tông. Tuy nhiên, tiêu chuẩn 22TCN 272-05 cho phép lấy giá trị n gần đúng là 8 tương ứng với cường độ chịu nén của bê tông là $f'_c = 30 \text{ MPa}$. Khi xét đến tính chất từ biến dài hạn, tỉ số này là $3n = 24$. Chọn gốc tọa độ dưới đáy dầm chủ và các đặc trưng hình học được trình bày trong các bảng 1, 2 và 3.

Bảng 1. Đặc trưng hình học của tiết diện không liên hợp

Thành phần	A (mm ²)	y (mm)	Ay (mm ³)	$A(y-\bar{y})^2$ (mm ⁴)	I_o (mm ⁴)
Cánh dưới	7200	8	$5,76 \times 10^4$	$3,06 \times 10^9$	$1,54 \times 10^5$
Bụng	16800	716	$1,20 \times 10^7$	$5,37 \times 10^7$	$2,74 \times 10^9$
Cánh trên	4900	1423	$6,97 \times 10^6$	$2,86 \times 10^9$	$8,00 \times 10^4$
Tổng	28900	659,48	$1,91 \times 10^7$	$5,97 \times 10^9$	$2,74 \times 10^9$

Bảng 2. Đặc trưng hình học của tiết diện liên hợp ngắn hạn

Thành phần	A (mm ²)	y (mm)	Ay (mm ³)	$A(y-\bar{y})^2$ (mm ⁴)	I_o (mm ⁴)
Cánh dưới	7200	8	$5,76 \times 10^4$	$1,03 \times 10^{10}$	$1,54 \times 10^5$
Bụng	16800	716	$1,20 \times 10^7$	$3,97 \times 10^9$	$2,74 \times 10^9$
Cánh trên	4900	1423	$6,97 \times 10^6$	$2,39 \times 10^8$	$8,00 \times 10^4$
Bản mặt cầu	45125	1550	$6,99 \times 10^7$	$5,45 \times 10^9$	$1,36 \times 10^8$
Tổng	74025	1202,34	$8,90 \times 10^7$	$1,99 \times 10^{10}$	$2,88 \times 10^9$

Bảng 3. Đặc trưng hình học của tiết diện liên hợp dài hạn

Thành phần	A (mm ²)	y (mm)	Ay (mm ³)	$A(y-\bar{y})^2$ (mm ⁴)	I_o (mm ⁴)
Cánh dưới	7200	8	$5,76 \times 10^4$	$6,58 \times 10^9$	$1,54 \times 10^5$
Bụng	16800	716	$1,20 \times 10^7$	$1,04 \times 10^9$	$2,74 \times 10^9$
Cánh trên	4900	1423	$6,97 \times 10^6$	$1,03 \times 10^9$	$8,00 \times 10^4$
Bản mặt cầu	15041,67	1550	$2,33 \times 10^7$	$5,16 \times 10^9$	$4,53 \times 10^7$
Tổng	43941,67	964,32	$4,24 \times 10^7$	$1,38 \times 10^{10}$	$2,79 \times 10^9$

Sau đó sẽ tính toán được các giá trị mômen quán tính chính trung tâm của 3 tiết diện, môđun mặt cắt S cho mép cánh trên và cánh dưới của dầm thép.

Tiết diện không liên hợp: $I_{NC} = 8,71 \times 10^9 \text{ mm}^4$; $1,13 \times 10^7 \text{ mm}^3$; $1,32 \times 10^7 \text{ mm}^3$

Tiết diện liên hợp ngắn hạn: $I_{ST} = 2,28 \times 10^{10} \text{ mm}^4$; $1,00 \times 10^8 \text{ mm}^3$; $1,90 \times 10^8 \text{ mm}^3$

Tiết diện liên hợp dài hạn: $ILT = 1,66 \times 10^{10} \text{ mm}^4$; $3,56 \times 10^7 \text{ mm}^3$; $1,72 \times 10^7 \text{ mm}^3$

Ứng suất mép dưới của dầm đạt giới hạn chảy trước. Từ công thức 3, tính toán được mômen chất thêm $M_{AD} = 3892 \text{ kN.m}$ và mômen chảy $M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD} = 5853 \text{ kN.m}$ theo công thức 2.

Mômen dẻo M_p

Các lực dẻo của cánh chịu kéo P_t , bản bụng P_w , cánh chịu nén P_c và bản mặt cầu P_s lần lượt là $2,48 \times 10^6 \text{ N}$; $5,80 \times 10^6 \text{ N}$; $1,69 \times 10^6 \text{ N}$ và $9,21 \times 10^6 \text{ N}$. Với các giá trị này suy luận được vị trí trục trung hòa dẻo nằm ở cánh trên. Áp dụng công thức được trình bày trong phụ lục 5 [4] xác định được trục trung hòa dẻo cách mép trên của bản cánh chịu nén 3,17mm. Từ vị trí này sẽ tính toán được các cánh tay đòn đối với lực dẻo của bản cánh dưới, bản bụng, bản cánh trên chịu kéo, bản cánh trên chịu nén và bản mặt cầu lần lượt là 1418,8mm; 710,8mm; 5,4mm; 1,58mm và 123,17mm. Cuối cùng, có mômen dẻo cho tiết diện liên hợp là $M_p = 5713,7 \text{ kN.m}$.

Sức kháng uốn M_n

Từ công thức 1, tiết diện thỏa mãn điều kiện ổn định bản bụng chịu nén, suy ra tính chất của tiết diện là đặc chắc. Tiếp theo, tính toán được $D_p = 218,17 \text{ mm}$ và $D' = 153,5 \text{ mm}$. Vì vậy, sức kháng uốn sẽ tính toán theo công thức 4 và $M_n = 5604,1 \text{ kN.m}$.

3.3. Tính sức kháng uốn theo tiêu chuẩn TCVN 11823:2017

Theo tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 thì không cần tính toán mômen chảy M_y . Việc tính toán mômen dẻo M_p và công thức kiểm tra điều kiện ổn định cục bộ của bản bụng chịu nén cũng tương tự tiêu chuẩn 22TCN 272-05.

Các chiều cao $D_p = 3,17 + 25 + 190 = 218,17 \text{ mm}$; $D_t = 1430 + 25 + 190 = 1645 \text{ mm}$;

Vì $D_p > 0,1 D_t$ nên sức kháng uốn M_n tính toán theo công thức 5.

$$\begin{aligned} M_n &= M_p \left(1,07 - 0,7 \frac{D_p}{D_t} \right) = \\ &= 5713,7 \left(1,07 - 0,7 \frac{218,17}{1645} \right) = 5583,2 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

4. Kết luận

Sau khi tính toán sức kháng uốn cho dầm thép liên hợp nhịp giản đơn như trình bày ở trên, có thể

rút ra một số kết luận sau đây.

Sự sai lệch khi tính toán sức kháng uốn M_n đối với 2 tiêu chuẩn 22TCN 272-05 và TCVN 11823:2017 là không đáng kể, Giảm 0,37% ($5604,1 \text{ kN.m}$ so sánh với $5583,2 \text{ kN.m}$).

Công thức sử dụng để tính sức kháng uốn M_n của tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 là ngắn gọn và dễ sử dụng hơn so với tiêu chuẩn 22TCN 272-05. Theo đó, khi tính toán sức kháng uốn không cần phải thông qua giá trị mômen chảy M_y , công việc mà yêu cầu người thiết kế phải nắm vững lý thuyết tính toán ứng suất qua các giai đoạn làm việc của dầm và hiểu rõ cách tính toán các đặc trưng hình học như trọng tâm, mômen quán tính chính trung tâm I, môđun mặt cắt S. Mặt khác, giá trị mômen chảy M_y còn phụ thuộc vào mômen do tải trọng bản thân DC và lớp phủ DW.

Để đảm bảo rằng biên chịu kéo của dầm thép đạt biến dạng hóa cứng trước khi bê tông bị vỡ, phải giới hạn tỉ lệ chiều cao giữa phần chịu nén D_p và chiều cao toàn bộ của tiết diện liên hợp D_t . Trong tiêu chuẩn 22TCN 272-05 xét đến hệ số β phụ thuộc vào cấp thép ($\beta = 0,9$ đối với thép cấp 250 và $\beta = 0,7$ đối với thép 345). Theo cách tính toán như vậy thì tỉ số này sẽ tương ứng với 0,09 và 0,12. Tuy nhiên, theo tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 thì tỉ số này luôn cố định là 0,1 với cả hai loại thép. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Giao thông vận tải (1979). 22TCN 18-79 Quy trình thiết kế cầu cống theo trạng thái giới hạn.
- [2] Bộ Giao thông vận tải (2001). 22TCN 272-01 Tiêu chuẩn thiết kế cầu.
- [3] Bộ Giao thông vận tải (2005). 22TCN 272-05 Tiêu chuẩn thiết kế cầu.
- [4] Bộ Khoa học và công nghệ (2017). TCVN 11823:2017 Tiêu chuẩn quốc gia Thiết kế cầu đường bộ.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Design Specifications 2012.
- [6] Richard M. Barker, Jay A. Puckett (2013). Design of Highway Bridge. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [7] Narendra Taly (2015). Highway Bridge Superstructure Engineering LRFD Approaches to Design and Analysis. Taylor & Francis Group, LLC.