

Nghiên cứu đề xuất công thức tính sức kháng uốn cho dầm cầu dự ứng lực sử dụng bê tông siêu tính năng (UHPC) tại Việt Nam

Research to propose a formula to calculate bending resistance for prestressed bridge beams using Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in Vietnam

> NGÔ QUÝ TUẤN¹, NGUYỄN BÌNH HÀ², LÊ BÁ DANH²

¹Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông lâm, Đại học Huế

Email: ngoquytuan@hualf.edu.vn

²Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: ngbinhha@huce.edu.vn; danhlb@nuce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu công thức xác định sức kháng uốn dầm cầu dự ứng lực (DUL) căng trước sử dụng bê tông siêu tính năng (UHPC) tiết diện chữ I và chữ T, chế tạo từ các thành phần vật liệu sẵn có tại Việt Nam. Công thức tính toán sức kháng uốn được xây dựng trên cơ sở quy đổi biểu đồ phân bố ứng suất dạng khối chữ nhật tương đương cho cả vùng kéo và nén. Đường quan hệ ứng suất - biến dạng của UHPC được xây dựng trên cơ sở số liệu thực nghiệm từ các mẫu tiêu chuẩn được thực hiện tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Kết quả tính toán sức kháng uốn dầm cầu UHPC DUL căng trước được kiểm chứng và so sánh với kết quả thực nghiệm của một số nghiên cứu đã công bố trong thời gian gần đây. Kết quả so sánh cho thấy, tính toán sức kháng uốn theo công thức nghiên cứu có độ chênh lệch dưới 5% so với kết quả thực nghiệm đã công bố.

Từ khóa: Bê tông siêu tính năng; Dầm dự ứng lực; kết cấu công trình cầu; sức kháng uốn.

ABSTRACT

This paper presents the results of research on the formula for determining the bending resistance of prestressed bridge girders using ultra-high performance concrete (UHPC) with I and T-sections, made from material components available in Vietnam. The formula for calculating bending resistance is built based on converting an equivalent rectangular stress distribution chart for both tensile and compressive stress regions. The stress-strain relationship of UHPC is built based on experimental data tested from standard samples at the construction materials laboratory of Hanoi University of Civil Engineering. The results of calculating the bending resistance of pre-tensioned UHPC bridge girders are verified with the experimental results of several studies published recently. The comparison results show that the calculation of bending resistance according to the research formula has a difference of less than 5% compared to the published experimental results.

Keywords: "UHPC"; prestressed girder; bridges structure; flexural behavior.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng (Ultra-high performance concrete - UHPC) là một sản phẩm bê tông thế hệ mới, thành phần vật liệu chính bao gồm xi măng Poóc lăng, cát nghiền mịn, bột quắc, silica fume, phụ gia siêu dẻo, sợi thép và nước [1, 2]. UHPC thể hiện tính chất cơ học vượt trội với cường độ chịu nén lớn hơn 120 MPa [3], cường độ chịu kéo khi uốn lên đến 50 MPa [4], cường độ chịu kéo dọc trục từ 6 - 12 MPa [5], mô đun đàn hồi từ 42 - 55 GPa [4, 6]. Ngoài ra, UHPC có độ đặc chắc, tính dẻo dai cao, khả năng chống ăn mòn tốt giúp tăng độ bền và tuổi thọ công trình.

UHPC được nghiên cứu và ứng dụng đầu tiên vào những năm cuối thập niên 90 của thế kỷ XX. Trong hơn hai thập kỷ qua, UHPC đang thu hút sự quan tâm ở nhiều quốc gia khác nhau trong việc ứng dụng cho kết cấu công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp, công trình cầu, cảng biển, công nghiệp dầu khí, kết cấu ngoài khơi, kết cấu thủy lực, sửa chữa và phục hồi kết cấu [7]. Trong tất cả những ứng dụng này thì ứng dụng UHPC trong lĩnh vực cầu đường được xem là phổ biến nhất [8]. Ứng dụng UHPC cho kết cấu công trình cầu đã được thực hiện ở nhiều quốc gia khác nhau bao gồm Úc, Áo, Canada, Trung Quốc, Cộng hòa Séc, Pháp, Đức, Ý, Nhật

Bản, Malaysia, Hà Lan, New Zealand, Slovenia, Hàn Quốc, Thụy Sĩ và Hoa Kỳ [7].

Ở Việt Nam, nghiên cứu về UHPC được thực hiện trong khoảng 10 năm gần đây. Các nghiên cứu tập trung chủ yếu vào thành phần cốt liệu và hướng đến sử dụng các vật liệu địa phương để chế tạo UHPC [9-13]. Nhiều công trình đã tiến hành nghiên cứu ứng dụng UHPC cho kết cấu nhằm nâng cao khả năng chịu lực, độ bền trong môi trường đặc biệt và tải trọng nổ [14-19]. Tác giả Phạm Duy Hòa và đồng nghiệp [20] đã nghiên cứu về khả năng kháng uốn của dầm UHPC dự ứng lực dài 6,3m kết hợp giữa thực nghiệm và sử dụng các công thức của tiêu chuẩn Pháp NF P18-710 [21], FHWA [22]. Tuy nhiên, nghiên cứu này đang sử dụng phương pháp phân tích mặt cắt dựa trên các phương trình cân bằng và được giải lập khá phức tạp theo tiêu chuẩn sẵn có.

Việc áp dụng UHPC cho công trình cầu là một trong những hướng đi mới, mở ra cơ hội lớn cho sự phát triển cơ sở hạ tầng giao thông ở Việt Nam. Tuy nhiên, việc đi sâu nghiên cứu về các dạng ứng xử kết cấu khi tham gia chịu lực phục vụ công tác tính toán, thiết kế loại vật liệu này vẫn còn hạn chế. Điều này đã gây cản trở rất lớn trong việc ứng dụng loại vật liệu mới này cho kết cấu công trình cầu ở Việt Nam hiện nay. Cụ thể, đến nay mặc dù chúng ta đã có một số ứng dụng loại vật liệu này cho công trình cầu nhưng chỉ mới thử nghiệm đối với cầu quy mô nhỏ. Đồng thời, cũng chưa ban hành bất cứ tiêu chuẩn nào về thiết kế, thi công và nghiệm thu công trình cầu sử dụng UHPC.

UHPC có cường độ chịu kéo cao, vì vậy khi thiết kế uốn, cường độ chịu kéo của UHPC không bỏ qua như đối với bê tông thường. Sự lý tưởng hóa đường quan hệ ứng suất - biến dạng khi kéo và nén phục vụ thiết kế kết cấu UHPC là để tài được các nhà nghiên cứu quan tâm. Hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế, khuyến nghị thiết kế và một số nhà nghiên cứu đã đề xuất một đường tuyến tính (dạng hình thang) và dạng hình xấp xỉ dạng chữ nhật [23] [5, 21, 24] [25] [26] [27]. Khi nghiên cứu thiết kế uốn dầm UHPC DƯL, tác giả Graybeal [28] trình bày "Cho đến khi hoàn thành một số lượng đáng kể các thí nghiệm uốn mô hình thực, thì không thể đưa ra một tập hợp các tham số chuẩn để sử dụng trong thiết kế uốn dầm UHPC DƯL". Sau đó một số nhà nghiên cứu đã thực hiện các nghiên cứu thiết kế uốn kết cấu UHPC. Khi tính toán khả năng chịu uốn dầm UHPC, ứng suất khối Whitmey quen thuộc sử dụng cho kết cấu bê tông cốt thép truyền thống là không còn phù hợp và được thay thế bằng đường tuyến tính hoặc đường song tuyến cho các cấu kiện UHPC.

Trên thế giới, đã có các tiêu chuẩn và khuyến nghị thiết kế uốn dầm UHPC, trong đó đáng chú ý là tiêu chuẩn của Pháp P18-710 (AFNOR), Thụy Sĩ SIA 2052 (SIA) và Canada CSA S6: 19 (CSA). Trong các tiêu chuẩn này, phương pháp thiết kế uốn dựa trên phân tích mặt cắt sử dụng nguyên lý cân bằng và tương thích biến dạng, đồng thời sử dụng các biểu đồ đường cong UHPC để xác định ứng suất trên tiết diện ngang. Trong tiêu chuẩn thiết kế của Pháp và Canada, khả năng chịu mô men uốn của dầm UHPC cốt thép được tính toán từ điều kiện cân bằng lực trên tiết diện ngang với biểu đồ biến dạng tuyến tính gồm biên giới hạn biến dạng nén tương ứng với biến dạng phá vỡ UHPC và biên giới hạn biến dạng kéo tương ứng với kéo đứt cốt thép.

Tóm lại, để tính toán khả năng chịu uốn của dầm UHPC DƯL, cần phải có các mô hình cơ học vật liệu được suy ra từ kết quả thí nghiệm cơ học vật liệu phù hợp với nhóm vật liệu UHPC, các mô hình cơ học vật liệu này cần được lý tưởng và đơn giản hoá để phục vụ tính toán. Đồng thời, cần phải có một phương pháp tính toán khả năng chịu uốn cụ thể, thuận lợi bằng các công thức lập sẵn tương tự như các công thức tính toán được ban hành

trong tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ TCVN 11823:2017 để áp dụng chung cho kết cấu UHPC DƯL chịu uốn phục vụ thiết kế dầm cầu ở Việt Nam.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, với mong muốn cung cấp thêm các cơ sở khoa học phục vụ thiết kế uốn dầm cầu UHPC DƯL tại Việt Nam, nghiên cứu này đã thực hiện để xuất công thức tính sức kháng uốn cho dầm cầu DƯL căng trước. Nội dung đầu tiên của nghiên cứu sẽ xây dựng đường quan hệ ứng suất - biến dạng ứng với vật liệu UHPC tại Việt Nam. Phần tiếp theo sẽ tiến hành quy đổi biểu đồ phân bố ứng suất trên tiết diện ngang thành biểu đồ ứng suất khối chữ nhật tương đương từ đó xây dựng công thức xác định sức kháng uốn dầm cầu UHPC DƯL căng trước. Nghiên cứu kết thúc bằng phần kết luận và kiến nghị.

2. XÂY DỰNG ĐƯỜNG QUAN HỆ ỨNG SUẤT - BIẾN DẠNG UHPC

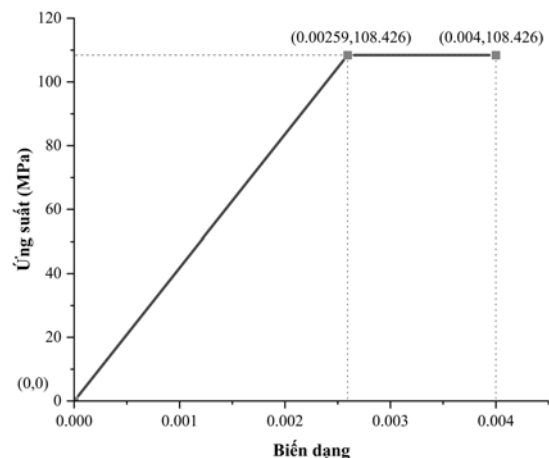
Đường quan hệ ứng suất - biến dạng UHPC được xây dựng theo tiêu chuẩn về chế tạo vật liệu và thí nghiệm (NF P18-470) [5] của Hiệp hội xây dựng Pháp ban hành. Số liệu kết quả thí nghiệm từ loại vật liệu được nghiên cứu và phát triển tại Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, được gọi là NUCE-UHPC thuộc chương trình nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp Bộ: "Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình" [16].

2.1 Đường quan hệ ứng suất - biến dạng nén

Kết quả các thông số đường quan hệ ứng suất - biến dạng nén UHPC phục vụ thiết kế uốn được trình bày ở Bảng 1 và Hình 1 dưới đây.

Bảng 1. Thông số đường quan hệ ứng suất - biến dạng nén

TT	Thành phần	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1.	Cường độ chịu nén đặc trưng	f_{ck}	MPa	127,56
2.	Hệ số cục bộ liên quan đến cường độ chịu nén	γ_c		1,00
3.	Hệ số tính đến các ảnh hưởng lâu dài đến	α_{cc}		0,85
4.	Cường độ chịu nén thiết kế	f_{cd}	MPa	108,43
5.	Biến dạng đàn hồi thiết kế lớn nhất	ϵ_{cod}		0,0026
6.	Biến dạng giới hạn thiết kế lớn nhất	ϵ_{cud}		0,0040



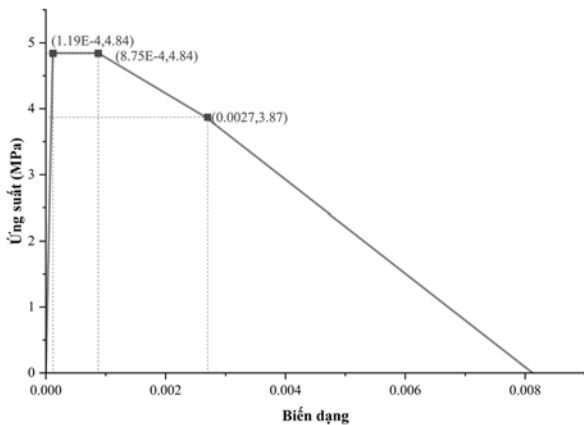
Hình 1. Đường quan hệ ứng suất - biến dạng nén UHPC

2.2. Đường quan hệ ứng suất - biến dạng kéo

Kết quả các thông số đường quan hệ ứng suất - biến dạng kéo UHPC được trình bày ở Bảng 2 và Hình 2 dưới đây.

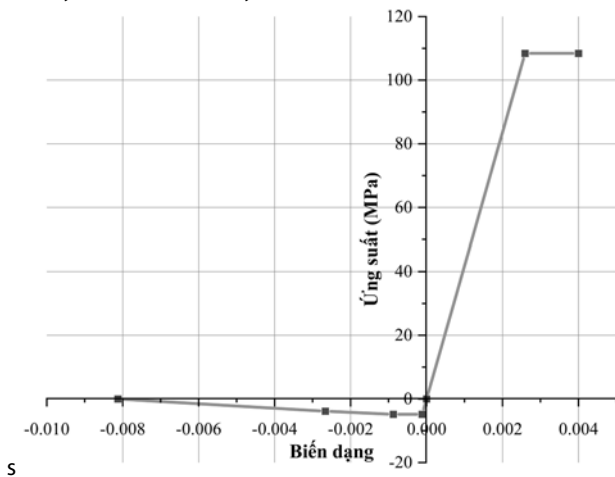
Bảng 2. Thông số đường quan hệ ứng suất - biến dạng kéo

TT	Thành phần	Ký hiệu	Đơn vị	giá trị
1.	Chiều cao tiết diện	h	m	0,40
2.	Chiều dài đặc trưng	L_c	m	0,40
3.	Hệ số định hướng	K		1,25
4.	Hệ số cục bộ	γ_{cf}		1,30
5.	Ứng suất kéo lớn nhất	f_t	MPa	4,84
6.	Biến dạng tại ứng suất kéo lớn nhất	$\epsilon_{u,0}$		0,0012
7.	Biến dạng kéo giới hạn	$\epsilon_{u,lim}$		0,0081



Hình 2. Đường quan hệ ứng suất - biến dạng kéo UHPC

Từ kết quả đường quan hệ ứng suất nén và đường quan hệ ứng suất kéo, ta có biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của UHPC được trình bày ở Hình 3 dưới đây:



Hình 3. Đường quan hệ ứng suất - biến dạng UHPC

3. XÂY DỰNG CÔNG THỨC TÍNH SỨC KHÁNG UỐN DẪM UHPC DƯỚI CĂNG TRƯỚC

Công thức tính toán sức kháng uốn được xây dựng cho hai tiết diện dầm cầu phổ biến đó là tiết diện chữ I và T. Để xây dựng công thức, sự phân bố ứng suất trên tiết diện ngang dầm được quy đổi về dạng khối chữ nhật tương đương cho cả vùng kéo và nén.

3.1. Sự phân bố ứng suất khối chữ nhật tương đương

Sự phân bố biến dạng và ứng suất trên tiết diện ngang của dầm được trình bày ở Hình 4.



Hình 4. Sự phân bố biến dạng và ứng suất trên tiết diện ngang dầm ở trạng thái giới hạn khả năng chịu uốn dầm UHPC

Trong đó:

- ϵ_{cu} : biến dạng nén giới hạn thứ trên cùng.
- ϵ_b : biến dạng kéo thứ dưới cùng.
- ϵ_{pt} : biến dạng kéo cấp DUL.
- f'_c : cường độ chịu nén UHPC (MPa).
- f_t : cường độ chịu kéo UHPC (MPa).
- h : chiều cao dầm (mm).
- d_p : khoảng cách từ thớ ngoài cùng chịu nén đến trọng tâm các bó cáp DUL (mm).
- d_n : khoảng cách từ trục trung hoà đến thớ ngoài cùng chịu nén.
- α_1, β_1 : các hệ số quy đổi hình khối ứng suất hình chữ nhật tương đương vùng chịu nén.
- β_2 : hệ số quy đổi hình khối ứng suất hình chữ nhật tương đương vùng chịu kéo.

Để xác định các hệ số $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ ta sử dụng các phương trình cân bằng dựa trên phương pháp phân tích tiết diện ngang dầm, cụ thể như sau:

Kết quả lực nén do phần bê tông ở vùng chịu nén (C) được trình bày theo công thức (1).

$$C = \int_0^{d_n} \sigma_c(\epsilon_c)b(x)dx \quad (1)$$

Kết quả lực kéo do phần bê tông ở vùng chịu kéo (T) được trình bày theo công thức (2).

$$T = \int_0^{h-d_n} \sigma_t(\epsilon_t)b(x)dx \quad (2)$$

Thành lập hệ phương trình xác định các hệ số $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ như sau:

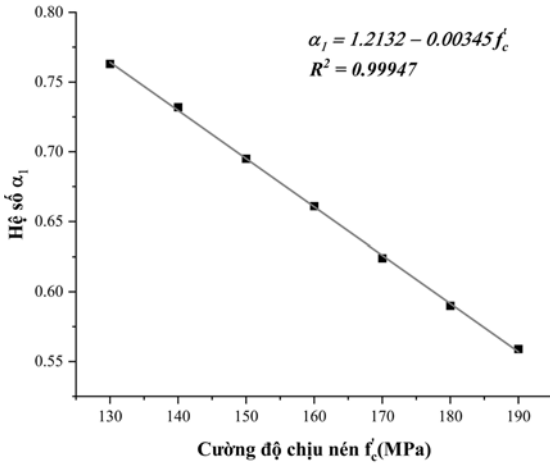
$$\begin{cases} \int_0^{d_n} \sigma_c(\epsilon_c)b(x)dx = \alpha_1 f'_c b h_f + \alpha_1 f'_c b_w (\beta_1 d_n - h_f) \\ \int_0^{h-d_n} \sigma_t(\epsilon_t)b(x)dx = f_t b_b h_b + f_t b_w [\beta_2 (h - d_n) - h_b] \\ d_n = \frac{A_{ps} f_{pu} + [(b_b - b_w)h_b + b_w \beta_2 h] f_t - \alpha_1 f'_c (b - b_w) h_f}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b_w + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p} + f_t b_w \beta_2} \end{cases} \quad (3)$$

Các hệ số $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ phụ vào cấp đường độ chịu nén UHPC, ta lần lượt giải hệ phương trình (3) ứng với các cấp cường độ chịu nén khác nhau thu được kết quả như trình bày ở bảng 3 dưới đây:

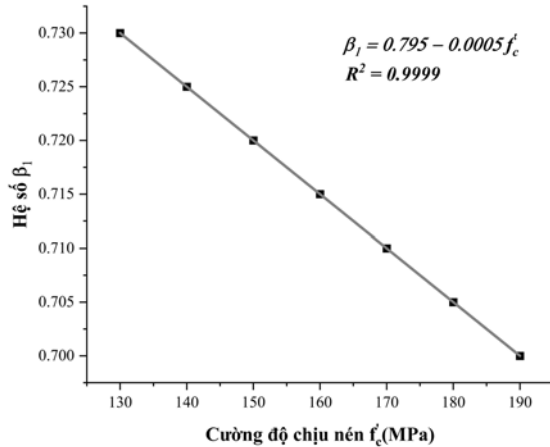
Bảng 3. Kết quả xác định $\alpha_1, \beta_1, \beta_2$ theo cấp cường độ UHPC

TT	f'_c	α_1	β_1	β_2
1	130	0,763	0,730	0,693
2	140	0,732	0,725	0,610
3	150	0,695	0,720	0,550
4	160	0,661	0,715	0,507
5	170	0,624	0,710	0,502
6	180	0,590	0,705	0,502
7	190	0,559	0,700	0,502

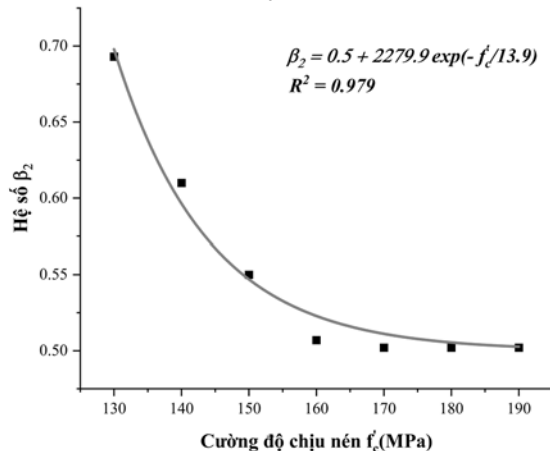
Mối liên hệ giữa các hệ số $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ và cường độ chịu nén được biểu diễn dưới dạng các biểu đồ hình 5, 6, 7 dưới đây:



Hình 5. Quan hệ giữa hệ số α_1 và f'_c .



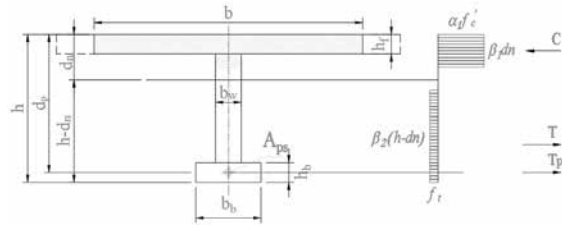
Hình 6. Quan hệ giữa hệ số β_1 và f'_c .



Hình 7. Quan hệ giữa hệ số β_2 và f'_c .

3.2. Công thức xác định sức kháng uốn

Dựa vào biểu đồ phân bố ứng suất khối tương đương trình bày ở Hình 4, sử dụng điều kiện cân bằng lực theo phương ngang tại tiết diện, ta thu được công thức xác định vị trí trục trung hoà d_n theo công thức (7), để đảm bảo tính tổng quát, việc phân tích được thực hiện trên tiết diện chữ T với các tham số hình học được trình bày ở Hình 8 dưới đây:



Hình 8. Sự phân bố ứng suất khối tương đương trên tiết diện dầm T - UHPC

Thành phần lực nén do phần bê tông UHPC ở thớ chịu nén:

$$C = \alpha_1 f'_c b h_f + \alpha_1 f'_c b_w (\beta_1 d_n - h_f) \quad (4)$$

Thành phần lực kéo do phần bê tông UHPC ở thớ chịu kéo:

$$T = f_t b_b h_b + f_t b_w [\beta_2 (h - d_n) - h_b] \quad (5)$$

Thành phần lực kéo do phần cáp DƯL ở thớ chịu kéo:

$$T_p = A_{ps} f_{pu} \left(1 - k \frac{d_n}{d_p} \right) \quad (6)$$

Dựa vào điều kiện cân bằng lực: $C = T + T_p$, ta suy ra được công thức xác định chiều cao trục trung hoà như sau:

$$\begin{aligned} &= \frac{A_{ps} f_{pu} + [(b_b - b_w) h_b + b_w \beta_2 h] f_t - \alpha_1 f'_c (b - b_w) h_f}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b_w + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p} + f_t b_w \beta_2} \quad (7) \end{aligned}$$

Trong đó:

- A_{ps} : diện tích cốt thép dự ứng lực (mm^2).
- f_{pu} : cường độ chịu kéo quy định của thép dự ứng lực (MPa).
- f_{py} : giới hạn chảy của thép dự ứng lực (MPa).
- b : chiều rộng có hiệu của bản cánh chịu nén (mm).
- b_w : chiều rộng của bản bụng (mm).
- b_b : chiều rộng của bản cánh chịu kéo (mm).
- h_f : chiều dày bản cánh chịu nén (mm).
- h_b : chiều dày bản cánh chịu kéo (mm).

Sức kháng uốn danh định của mặt cắt được xác định bằng cách lấy tổng mô men tại trọng tâm khối ứng suất tương đương chịu nén và được trình bày theo công thức (8) như sau:

$$\begin{aligned} M_n = & A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{\beta_1 d_n}{2} \right) + f_t (b_b - b_w) h_b \left(h - \frac{h_b}{2} - \frac{\beta_1 d_n}{2} \right) + \\ & f_t \beta_2 (h - d_n) b_w \left(h - \frac{\beta_2 (h - d_n)}{2} - \frac{\beta_1 d_n}{2} \right) + \alpha_1 f'_c (b - b_w) h_f \left(\frac{\beta_1 d_n}{2} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

Từ kết quả đề xuất công thức xác định khoảng cách trục trung hoà d_n (công thức 7), công thức xác định khả năng chịu uốn M_n (công thức 8), ta tiến hành kiểm chứng với các kết quả thực nghiệm dầm UHPC DƯL đã được công bố và trình bày ở Bảng 4.

Bảng 4. So sánh kết quả tính toán khả năng chịu uốn dầm UHPC DƯL với các kết quả nghiên cứu đã công bố.

TT	Thành phần	Dầm tham khảo		
		Graybeal [22]	Graybeal [28]	EI - Helou [29]
1	f'_c (MPa)	193,00	193,00	173,00
2	f_t (MPa)	8,30	9,00	9,30
3	α_1	0,55	0,55	0,62
4	β_1	0,70	0,70	0,71
5	β_2	0,50	0,50	0,51

6	d_n (mm)	309,43	307,44	-81,97
7	M_n^* (kN.m)	4515,32	4603,10	5517,39
8	M_{exp}^{**} (kN.m)	4802,00	4848,00	5684,00
9	M_n $/M_{exp}$	0,95	0,95	0,97

* Sức kháng uốn tính toán theo công thức đề xuất; ** Sức kháng uốn từ thực nghiệm.

Kết quả so sánh cho thấy, khi sử dụng các công thức tính toán khoảng cách trục trung hoà d_n và công thức xác định khả năng chịu uốn M_n đã đề xuất, giá trị mô men kháng uốn thu được là tương đương với kết quả nghiên cứu thực nghiệm, giá trị mô men kháng uốn tính toán thấp hơn giá trị thực nghiệm khoảng từ 5% là có thể chấp nhận được và thiên về an toàn.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu này đã giới thiệu công thức tính toán sức kháng uốn dầm UHPC DUL căng trước sử dụng nguồn vật liệu sẵn có tại Việt Nam do nhóm tác giả đề xuất trên cơ sở quy đổi sự phân bố ứng suất tiết diện ngang dầm dạng ứng suất khối chữ nhật tương đương cho cả vùng kéo và nén. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi áp dụng công thức đề xuất trong nghiên cứu để xác định sức kháng uốn của dầm và so sánh với một số kết quả thực nghiệm đã công bố có độ sai lệch thấp hơn 5%, điều này khẳng định công thức trên đảm bảo độ tin cậy khi sử dụng để xác định sức kháng uốn.

Kết quả nghiên cứu này sẽ cung cấp nguồn dữ liệu quan trọng trong việc nghiên cứu và ứng dụng vật liệu UHPC cho kết cấu công trình cầu tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Yu, R., P. Spiesz, and H.J.H. Brouwers, *Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC)*. Cement and Concrete Research, 2014. **56**: p. 29-39.
2. Wu, Z., et al., *Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2016. **103**: p. 8-14.
3. Bajaber, M.A. and I.Y. Hakeem, *UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review*. Journal of Materials Research and Technology, 2021. **10**: p. 1058-1074.
4. Graybeal, B.A., *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. 2006.
5. French-Standard, *NF P18-470 Concrete - Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete - Specifications, Performance, Production and Conformity*. 2016.
6. Lê Hoàng An and Bùi Thanh Bảo, *Nghiên cứu đánh giá tổng quan các đặc tính cơ học của bê tông chất lượng siêu cao UHPC - Kinh nghiệm từ Cộng hoà Liên bang Đức*. Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải, 2020: p. 77-82.
7. Voo, Y.L., S. Foster, and L.G. Pek. *Ultra-High Performance Concrete - Technology for Present and Future*. in *Building Construction Authority Joint Seminar on Concrete for Sustainability, Productivity and The Future*. 2017. Singapore.
8. Azmee, N.M. and N. Shafiq, *Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications*. Case Studies in Construction Materials, 2018. **9**: p. e00197.
9. Phạm Duy Hữu, Nguyễn Lộc Kha, and Phạm Duy Anh, *Nghiên cứu vật liệu chế tạo bê tông cường độ siêu cao (UHPC)*. Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải, 2011. **7**: p. 15-18.
10. Nguyễn Công Thắng, Nguyễn Văn Tuấn, and Phạm Hữu Hanh, *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam*. Tạp chí xây dựng, 2012: p. 71-

11. Nguyễn Công Thắng, Phạm Hữu Hanh, and Nguyễn Văn Tuấn, *Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiên cứu ở Việt Nam* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2013. **7(1)**: p. 83-92.
12. Văn Viết Thiên Ân, Hoàng Vĩnh Long, and Ngô Kim Tuấn, *Chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia tro trấu - xỉ lò cao*. Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng, 2016. **4**: p. 118-122.
13. Nguyễn Văn Tuấn, Nguyễn Công Thắng, and Phạm Hữu Hanh, *Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ siêu cao sử dụng phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng ở Việt Nam hướng tới phát triển bền vững*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2015. **24**: p. 11-18.
14. Lê Bá Danh, et al., *Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao (UHPC)*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2019. **13(3V)**: p. 12-21.
15. Hoa, P.D., et al., *Modeling the fracture behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete slabs under contact Blast Loading*, in *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020.
16. Phạm Duy Hòa, et al., *"Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình"*, in *Chương trình KH&CN cấp Bộ*, Hoà, Editor. 2019, Đại học Xây dựng: Hà Nội.
17. Cù Việt Hùng, et al., *Dự báo sức kháng uốn của dầm bê tông chất lượng siêu cao (UHPC)*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2018. **12(4)**: p. 1-13.
18. Trần Bá Việt and Lê Minh Long, *Nghiên cứu giải pháp kết cấu lắp ghép sử dụng bê tông tính năng cao cho công trình xây dựng trên đảo*, Việt, Editor. 2020: Hà Nội.
19. Tuấn, N.Q., et al., *Nghiên cứu đánh giá sức kháng uốn của bê tông chất lượng siêu cao: thực nghiệm và mô hình số*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN, 2022. **16(2V)**: p. 1-13.
20. Hoa D. Pham, T.K., Tuan V. Nguyen, Hung V. Cu, Danh B. Le and Thanh P. Trinh, *Investigation of flexural behavior of a prestressed girder for bridges using nonproprietary UHPC*. Advances in Concrete Construction, 2020. **Volume 10**(Number 1): p. 71-79.
21. French-Standard, *NF P 18-710 - Design of concrete structures : spécifique rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (uhprfc)*. 2016, Association Française de Normalisation (AFNOR).
22. Graybeal, B., *Structural behavior of ultra-high performance concrete prestressed I-girders*. 2006, Federal Highway Administration (FHWA): Washington, D.C.
23. JSCE, *Recommendations for Design and Construction of Ultra High - Strength Fiber - Reinforced Concrete Structures, - Draft*. Sep. 2004.
24. French-Standard, *NF P18-451 Concrete - Execution of concrete structures - Specific rules for UHPRFC*. 2018, Paris: AFNOR.
25. Gowripalan, N. and R.I. Gilbert, *Design guidelines for RPC prestressed concrete beams*. 2000.
26. Graybeal, B.A., et al., *Structural Behavior of Ultra-high Performance Concrete Prestressed I-girders*. 2006: Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center.
27. Kim, J.-S. and B.-S. Kim, *Design Guidelines for K-UHPC*. 2014, Korea.
28. Graybeal, B., *Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder*. journal of bridge engineering, 2008. **13**: p. 602-610.
29. El-Helou, G. and A. Graybeal, *Flexural Behavior and Design of Ultrahigh - Performance Concrete Beams*. Journal of Structural Engineering, 2022(ISSN 0733-9445): p. 1-20.