

# DỰ BÁO SỨC KHÁNG UỐN CỦA DÂM BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO (UHPC)

Cù Việt Hưng<sup>a,\*</sup>, Nguyễn Đức Phúc<sup>a</sup>, Nguyễn Công Thắng<sup>b</sup>, Nguyễn Ngọc Tuyền<sup>a</sup>, Phạm Duy Hòa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

## Lịch sử bài viết:

Nhận ngày 12/1/2018, Sửa xong 9/5/2018, Chấp nhận đăng 30/5/2018

## Tóm tắt

Xác định khả năng kháng uốn của các kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) là một trong những nội dung quan trọng trong công tác thiết kế. Công thức tính sức kháng uốn của kết cấu BTCT đã được quy định rõ trong các quy trình, tiêu chuẩn thiết kế của mỗi nước. Tuy nhiên, đối với kết cấu bê tông chất lượng siêu cao (Ultra High Performance Concrete - UHPC), trên thế giới mới chỉ có một số hướng dẫn đề cập đến việc xác định sức kháng uốn bởi loại vật liệu này có ứng xử khác với bê tông thường.Thêm nữa, việc tổng hợp và phân tích các hướng dẫn này cho việc tính toán khả năng kháng uốn của kết cấu UHPC còn hạn chế và gây nhiều khó khăn cho các kỹ sư khi thiết kế các công trình sử dụng UHPC. Do đó, đầu tiên bài báo này sẽ tổng hợp các hướng dẫn về thiết kế sức kháng uốn của kết cấu UHPC. Tiếp theo đó thí nghiệm uốn phá hoại các mẫu dầm với hàm lượng cốt sợi thay đổi được thực hiện để so sánh kết quả với các lý thuyết dự báo trong các hướng dẫn.

Từ khoá: sức kháng uốn; bê tông chất lượng siêu cao; ứng xử uốn.

ESTIMATION OF FLEXURAL CAPACITY OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) BEAMS

## Abstract

Estimating the flexural capacity of RC members is a crucial work for engineers in the design of structures. Equations and procedures for determining flexural strength of structures using conventional concrete are available and quite clear in the design specifications of each country. For UHPC structures, however, there are only a few guidances on flexural capacity estimation because of the differences between UHPC and typical concrete in flexural behavior. Furthermore, the overview and analysis of these recommendations for estimating the bending strength of UHPC members are inadequate, leading to many difficulties and confusions for engineers. For these reasons, this paper firstly reviews some previous studies and current recommendations for designing UHPC structures. In the next step, an experimental investigation on flexural strength of UHPC beams is conducted to compare with the results estimated from the current recommendations.

Keywords: flexural capacity; ultra high performance concrete; flexural behavior.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(4\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(4)-01) © 2018 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

## 1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) với những ưu điểm vượt trội về cường độ và độ bền lâu đã được ứng dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng trong những năm gần đây. Với cường độ chịu

\*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: [hungcv@nuce.edu.vn](mailto:hungcv@nuce.edu.vn) (Hưng, C. V.)

nén có thể lên tới 250 MPa và cường độ chịu kéo khi uốn có thể đến 50 MPa [1], UHPC đã mang đến nhiều thành tựu mới trong ngành xây dựng, đặc biệt là trong xây dựng công trình cầu. Ở Mỹ, kết cấu cầu đầu tiên áp dụng UHPC là cầu Mars Hill ở Wapello, Iowa được khánh thành vào năm 2006 [2]. Cây cầu này sử dụng dầm UHPC tiết diện chữ I tiêu chuẩn của Iowa với chiều cao và bề dày sườn dầm giảm đi đáng kể so với dạng dầm này khi sử dụng bê tông thường. Tiếp sau đó, UHPC cũng được áp dụng cho một số các công trình khác như cầu Cat Point Creek ở Richmond, Virginia [3]. Tại châu Á, ứng dụng UHPC vào trong các công trình cầu phổ biến tại một số nước như Nhật Bản, Hàn Quốc, Trung Quốc và đặc biệt là ở Malaysia. Công ty Dura của Malaysia đã ứng dụng UHPC xây dựng hơn một trăm cây cầu trong đó có cầu Batu 6 với một nhịp dầm đơn giản dài 100 m [4]. Ở Việt Nam, nghiên cứu về UHPC được thực hiện trong khoảng chục năm gần đây và chủ yếu tập trung vào hướng thay đổi thành phần vật liệu để nâng cao chất lượng cũng như cường độ của bê tông. Thắng và cs. [5, 6] đã sử dụng các vật liệu địa phương để chế tạo UHPC áp dụng cho các công trình biển. Ân và cs. [7] đã chế tạo thành công UHPC sử dụng hỗn hợp phụ gia tro trấu - xỉ lò cao. Một số tác giả của Trường Đại học Giao thông Vận tải [8] đã thực hiện nghiên cứu sử dụng UHPC cho kết cấu cầu. Đến nay, ở Việt Nam đã bắt đầu áp dụng UHPC trong xây dựng thực tế một số công trình cầu nhỏ và các kết cấu khác trong lĩnh vực xây dựng, nổi bật là các thành tựu nghiên cứu của nhóm tác giả của Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng do TS. Trần Bá Việt chủ trì [9, 10]. Rõ ràng với những ưu việt về chất lượng, UHPC hứa hẹn sẽ mang lại nhiều thành tựu trong ngành xây dựng của thế giới và trong nước.

Do có ứng xử khác với bê tông thông thường, các công thức truyền thống xác định sức kháng uốn của kết cấu BTCT thông thường sẽ không còn phù hợp đối với kết cấu UHPC. Cụ thể như trong tiêu chuẩn thiết kế cầu AASHTO LFRD [11] có ghi rõ phạm vi áp dụng của tiêu chuẩn này cho bê tông có cường độ chịu nén trong khoảng từ 16 MPa đến 70 MPa. Hiện nay, một vài quốc gia có ban hành một số hướng dẫn cho việc xác định khả năng kháng uốn của tiết diện dầm UHPC. Hướng dẫn sớm nhất được đề xuất bởi Hiệp hội kỹ sư dân dụng Pháp (AFGC\SETRA) [12], theo sau đó là các hướng dẫn của Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE) [13], các nghiên cứu của Hiệp hội đường cao tốc Hoa Kỳ (FHWA) [14] và nghiên cứu của Almansour và Lounis [15] ở Canada. Ngoại trừ [15], các hướng dẫn này đều có đặc điểm chung là kể đến sự làm việc chịu kéo của bê tông vào trong lý thuyết xác định sức kháng uốn của dầm UHPC.

Ở nước ngoài, một nghiên cứu tổng quan về các vấn đề trong thiết kế kết cấu UHPC đã được thực hiện bởi [16]. Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ dừng lại ở việc tổng hợp và giới thiệu các lý thuyết tính. Còn ở Việt Nam, nghiên cứu tổng hợp, phân tích, so sánh về các phương pháp xác định sức kháng uốn của kết cấu UHPC chưa được thực hiện đầy đủ. Do đó, mục tiêu và nội dung của bài báo này là: (1) Nghiên cứu tổng quan các lý thuyết về dự báo sức kháng uốn của dầm UHPC theo các hướng dẫn và các nghiên cứu trên thế giới; (2) Thí nghiệm uốn phá hoại dầm UHPC cốt thép thường; (3) So sánh kết quả thí nghiệm với giá trị sức kháng dự báo theo các hướng dẫn và nghiên cứu; (4) Kiến nghị phương pháp xác định sức kháng uốn của cấu kiện UHPC.

## 2. Lý thuyết dự báo sức kháng uốn dầm

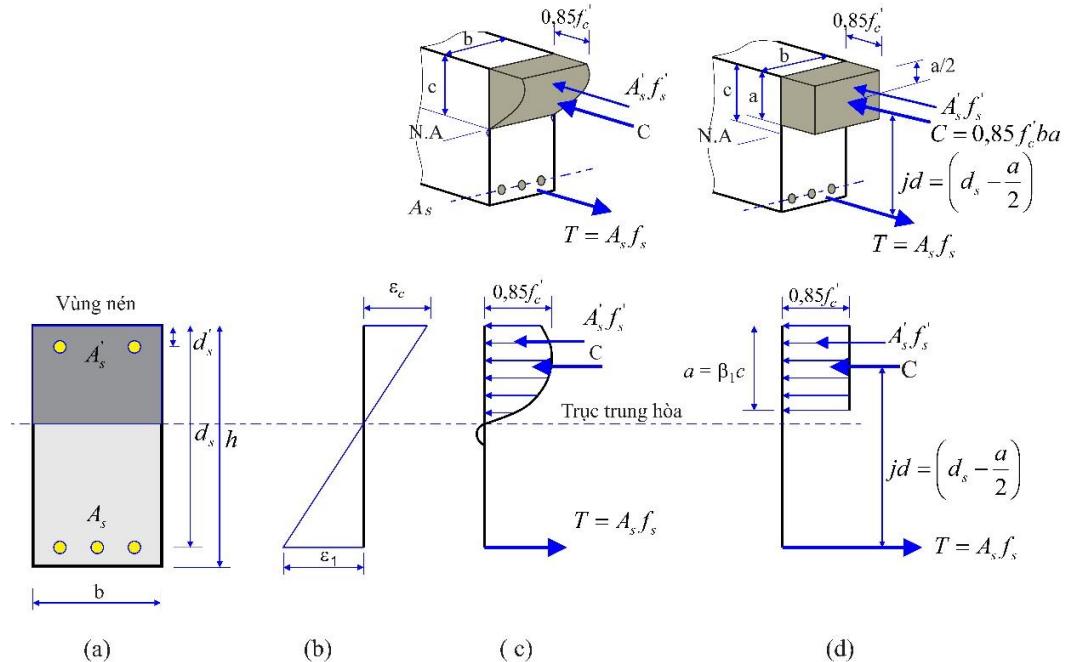
### 2.1. Sức kháng uốn theo AASHTO LRFD

Lý thuyết dự báo sức kháng uốn của [11] được sử dụng cho cả dầm BTCT thường và BTCT dự ứng lực. Để đơn giản hóa trong việc xác định chiều cao vùng nén của tiết diện,  $c$ , [11] sử dụng đề xuất của [17] về quy đổi từ khối ứng suất thực tế (Hình 1c) về khối ứng suất hình chữ nhật tương đương (Hình 1d).

Từ giả thiết trên, công thức xác định khoảng cách từ trục trung hòa dẻo đến thó chịu nén xa nhất của đầm BTCT thường như sau:

$$c = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0,85 f'_c \beta_1 b} \quad (1)$$

trong đó  $A_s$  và  $A'_s$  lần lượt là diện tích cốt thép đặt ở vùng chịu kéo và chịu nén của đầm;  $f_s$  và  $f'_s$  là cường độ kéo chảy của cốt thép đặt ở vùng kéo và cốt thép đặt ở vùng nén;  $f'_c$  là cường độ chịu nén của bê tông;  $\beta_1$  là hệ số phụ thuộc vào cường độ của bê tông và  $b$  là bề rộng của tiết diện.



Hình 1. Phân bố ứng suất và biến dạng theo chiều cao đầm:

(a) Tiết diện dầm; (b) Biến dạng; (c) Khối ứng suất thực tế; (d) Khối ứng suất hình chữ nhật tương đương

Từ đó, sức kháng uốn danh định của đầm bê tông cốt thép thường tiết diện chữ nhật được tính như sau:

$$M_n = A_s f_s \left( d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_s \left( d'_s - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

trong đó  $a$  là chiều cao khối ứng suất chữ nhật,  $a = \beta_1 c$  (Hình 1d).

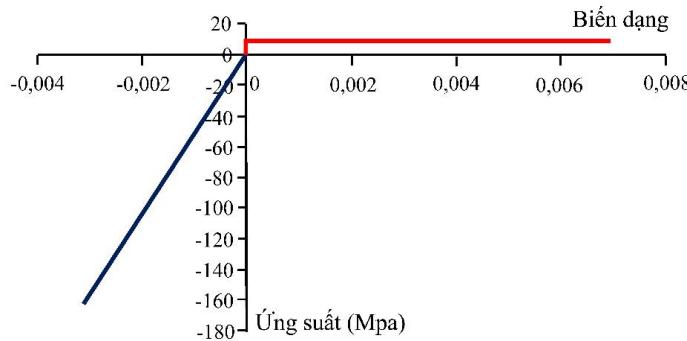
Việc sử dụng các công thức của [11] để dự báo khả năng kháng uốn của đầm BTCT là tương đối rõ ràng và đơn giản với giả thiết bỏ qua sự làm việc chịu kéo của bê tông. Điều này dẫn đến kết quả dự báo sức kháng uốn quá an toàn và có thể không phù hợp khi áp dụng cho đầm UHPC khi mà cường độ chịu kéo cao hơn gấp 5 đến 10 lần bê tông thường [1].

## 2.2. Sức kháng uốn theo Hiệp hội đường cao tốc Hoa Kỳ (FHWA)

Dựa trên các kết quả thí nghiệm uốn của một đầm loại II của AASHTO sử dụng UHPC, [14] đã phát triển phương pháp dự báo sức kháng uốn cho đầm chữ I dựa trên quan hệ ứng suất - biến dạng như thể hiện trong Hình 2. Với các giả thiết: thứ nhất, bê tông có ứng xử đàn hồi tuyến tính trong vùng nén tối 0,85 lần cường độ nén của bê tông với biến dạng tương ứng bằng 0,0032; thứ hai, ứng xử trong

vùng kéo được giả thiết là đàn hồi - dẻo với cường độ chịu kéo bằng 0,5 lần cường độ kéo của bê tông ở thời điểm trước khi bắt đầu nứt và giới hạn biến dạng kéo tương ứng là 0,007 và thứ ba là mô đun đàn hồi của UHPC cần được xác định thông qua thí nghiệm mẫu hình trụ.

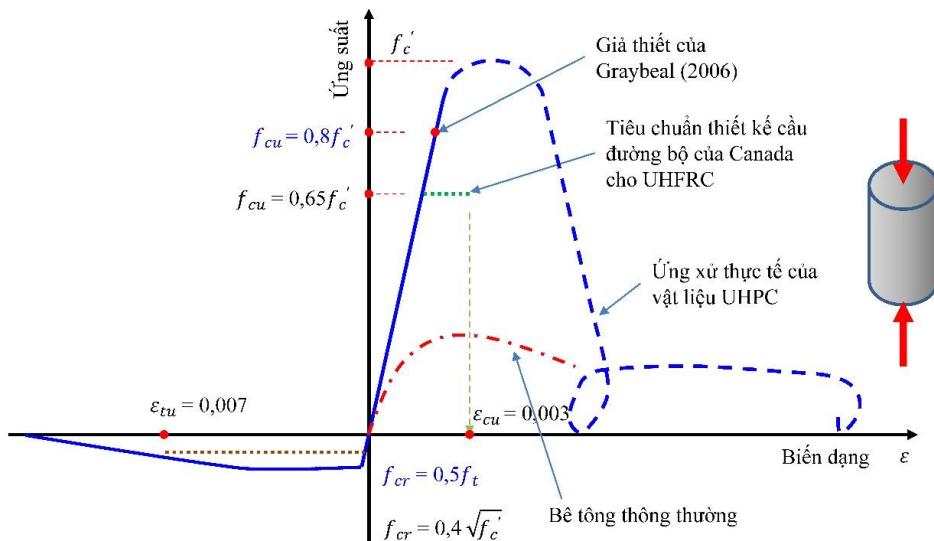
Phương pháp dự báo sức kháng uốn dựa trên biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng (Hình 2) theo đề xuất của [14] đã kể đến sự làm việc chịu kéo của bê tông. Quan hệ ứng suất - biến dạng này là đơn giản và thuận tiện cho việc tính toán. Tuy nhiên, việc đưa ra mỗi quan hệ ứng suất - biến dạng tương đối đơn giản và chỉ lấy cường độ chịu kéo bằng 0,5 lần cường độ chịu kéo trước khi nứt có thể dẫn đến kết quả dự báo sức kháng uốn quá an toàn.



Hình 2. Quan hệ ứng suất - biến dạng sử dụng cho dự báo sức kháng uốn dầm I - UHPC [14]

### 2.3. Sức kháng uốn theo tiêu chuẩn thiết kế cầu của Canada

Với mục đích làm đơn giản hóa việc xác định sức kháng uốn của dầm bê tông ứng suất trước sử dụng UHPC, dựa trên những hướng dẫn của [12] và sửa đổi để phù hợp với [18], [15] đã kiến nghị như sau: Ở trạng thái giới hạn cường độ, một quan hệ bao gồm 2 đường tuyến tính giữa ứng suất - biến dạng được giả thiết như trong Hình 3.



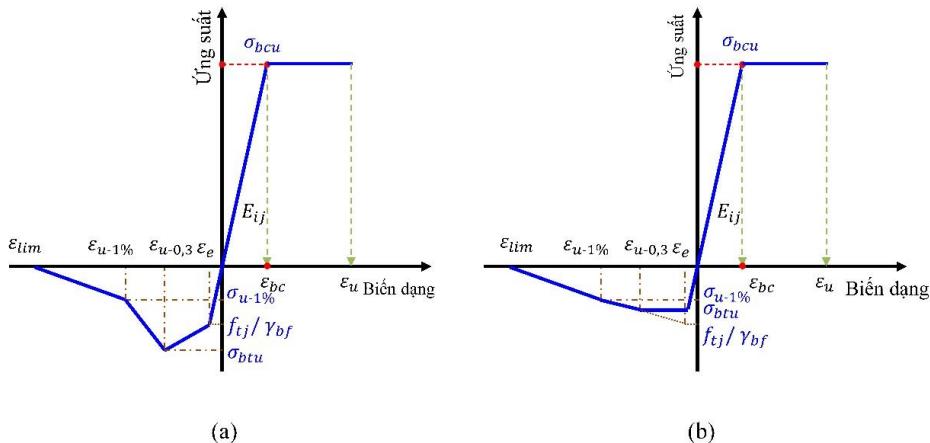
Hình 3. Quan hệ ứng suất - biến dạng theo Can06 so sánh với FHWA ứng xử thực tế của bê tông UHPC [15]

Trong đồ thị quan hệ này, đường đầu tiên bắt đầu từ điểm ứng suất và biến dạng bằng không đến điểm ứng suất bằng  $f_{cu}$  và biến dạng bằng  $\left(\frac{f_{cu}}{E_{uhpc}}\right)$ ; đường thứ hai là đường nằm ngang kéo dài đến điểm biến dạng bằng  $\epsilon_{cu} = 0,003$ . Cường độ nén,  $f_{cu}$ , có thể được lấy  $f_{cu} = 0,65 f'_c$  để thiên về an toàn. Theo [15], cường độ chịu kéo của bê tông có thể bỏ qua là một cách an toàn để tính toán sức kháng uốn của cấu kiện dầm dự ứng lực căng trước. Để đảm bảo phá hoại dẻo xảy ra ở trạng thái giới hạn cường độ, theo [18] chiều cao tương đối của trục trung hòa  $\left(\frac{c}{d_e}\right)$  nên lấy nhỏ hơn 0,5, trong đó  $c$  là khoảng cách từ trục trung hòa đến thớ chịu nén xa nhất và  $d_e$  là khoảng cách từ thớ chịu nén xa nhất đến trọng tâm cốt thép chịu kéo.

#### 2.4. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư dân dụng Pháp (AFGC\SETRA)

Mặc dù không có bất kỳ một chương nào về hướng dẫn thiết kế sức kháng uốn trong [12]; tuy nhiên, dựa trên những đề xuất về mô hình vật liệu UHPC của [12], việc thiết kế kháng uốn của tiết diện sử dụng UHPC có thể được tính toán bằng các phương pháp phân tích tiết diện thông thường. Mô hình UHPC chịu nén theo [12] được giả thiết là tổ hợp của hai đường tuyến tính (Hình 4). Các tham số bao gồm  $\sigma_{bcu}$  và  $\epsilon_u = 0,003$ .

$$\sigma_{bcu} = \frac{0,85 f_{cj}}{\theta_{yb}} \quad (3)$$



Hình 4. Quan hệ ứng suất - biến dạng theo kiến nghị của AFGC\SETRA [12]

Đối với mô hình UHPC chịu kéo, để áp dụng mô hình ứng suất - độ mở rộng vết nứt ( $\sigma - w$ ) vào trong tính toán ứng suất kéo trong tiết diện, mô hình này cần được chuyển sang dạng ứng suất - biến dạng ( $\sigma - \epsilon$ ) bằng cách sử dụng chiều dài tương đương,  $l_c$ , trong đó  $l_c = \frac{2}{3}h$  cho trường hợp tiết diện dạng chữ T hoặc chữ nhật,  $h$  là chiều cao tiết diện.

Để nhận được mô hình ( $\sigma - \epsilon$ ), biến dạng đàn hồi và biến dạng ở bề rộng vết nứt 0,3 mm và 1% của chiều cao tiết diện cần được tính toán như sau:

$$\epsilon_e = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{u-0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{u-1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}} \quad (6)$$

trong đó  $\epsilon_e$  là biến dạng đàn hồi;  $w_{0,3}$  là vết nứt với bề rộng 0,3 mm;  $\epsilon_{u-0,3}$  là biến dạng tương ứng với vết nứt rộng 0,3 mm;  $w_{1\%}$  là bề rộng vết nứt tương ứng với  $0,01h$  ( $h$  là chiều cao tiết diện);  $\epsilon_{u-1\%}$  là biến dạng tương ứng với bề rộng vết nứt  $0,01h$  và  $\gamma_{bf}$  là hệ số an toàn.

Biến dạng cực hạn khi chịu kéo được xác định theo  $\epsilon_{lim} = \frac{L_f}{4l_c}$ , trong đó  $\epsilon_{lim}$  là biến dạng kéo cực hạn và  $L_f$  là chiều dài của cốt sợi. Ứng suất ở hai điểm  $w_{0,3}$  và  $w_{1\%}$  được tính toán như sau:

$$\sigma_{btu} = \frac{f(w_{0,3})}{K\gamma_{bf}} \quad (7)$$

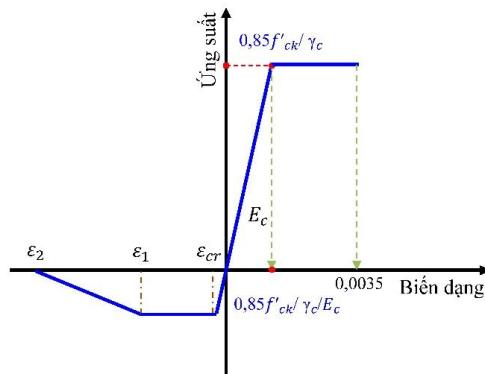
$$\sigma_{u-1\%} = \frac{f(w_{1\%})}{K\gamma_{bf}} \quad (8)$$

trong đó  $\sigma_{btu}$  là ứng suất tương ứng với bề rộng vết nứt 0,3 mm và  $\sigma_{u-1\%}$  là ứng suất tương ứng với bề rộng vết nứt bằng  $0,01h$ ;  $K$  là hệ số kể đến ảnh hưởng của hướng cốt sợi đến ứng suất kéo của bê tông,  $K = 1$  sử dụng cho phương pháp đổ đã được kiểm chứng từ kết quả thí nghiệm,  $K = 1,25$  sử dụng cho tính toán các hiệu ứng tổng thể và  $k = 1,75$  để tính toán các hiệu ứng cục bộ.

Dựa trên khả năng chịu kéo của vật liệu, [12] đã kiến nghị phân thành hai luật ứng xử kéo: (Hình 4a) luật biến mềm (Strain-softening Law) khi  $(f_{tj} > \sigma_{btu})$  và (Hình 4b) luật biến cứng (Strain-hardening Law) khi  $(f_{tj} < \sigma_{btu})$ .

## 2.5. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE)

Dựa trên những kết quả đo đạc và kiểm tra cầu Sakata-Mirai Foot Bridge [19] và sử dụng những hướng dẫn từ [12], Ủy ban về bê tông của Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE) đã đưa ra những kiến nghị cho việc thiết kế và thi công kết cấu UHPC [13]. Đường cong ứng suất nén - biến dạng của UHPC được lý tưởng hóa như trong Hình 5 dùng để thiết kế những cấu kiện chịu lực dọc hoặc cấu kiện chịu uốn ở trạng thái giới hạn cường độ. Đối với trạng thái giới hạn sử dụng, đường cong ứng suất nén - biến dạng có thể được xem như tuyến tính. Mô đun đàn hồi được lấy là 50 GPa.



Hình 5. Đường cong ứng suất - biến dạng theo JSCE [13]

Với các tham số về biến dạng trong mô hình được xác định như sau:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{tk}}{\gamma_c E_c} \quad (9)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{cr} + \frac{w_{1k}}{L_{eq}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{w_{2k}}{L_{eq}} \quad (11)$$

trong đó  $\varepsilon_{cr}$  là biến dạng kéo trong giai đoạn ứng xử kéo đàn hồi của vật liệu;  $f_{tk}$  là ứng suất kéo ở  $w_{1k} = 0,5$  mm;  $\gamma_c$  là hệ số an toàn. Để chuyển đổi từ đồ thị quan hệ ứng suất - độ rộng vết nứt sang dạng quan hệ ứng suất kéo - biến dạng, [13] sử dụng chiều dài tương đương  $L_{eq}$ . Chiều dài tương đương  $L_{eq}$  cho một tiết diện hình chữ nhật được tính toán theo công thức sau:

$$\frac{L_{eq}}{h} = 0,8 \left\{ 1 - \frac{1}{\left( 1,05 + \frac{6h}{l_{ch}} \right)^4} \right\} \quad (12)$$

trong đó  $l_{ch} = 1,06 \times 10^4$  mm và  $h$  là chiều cao tiết diện.

$$l_{ch} = \frac{G_F E_c}{f_{tk}^2} \quad (13)$$

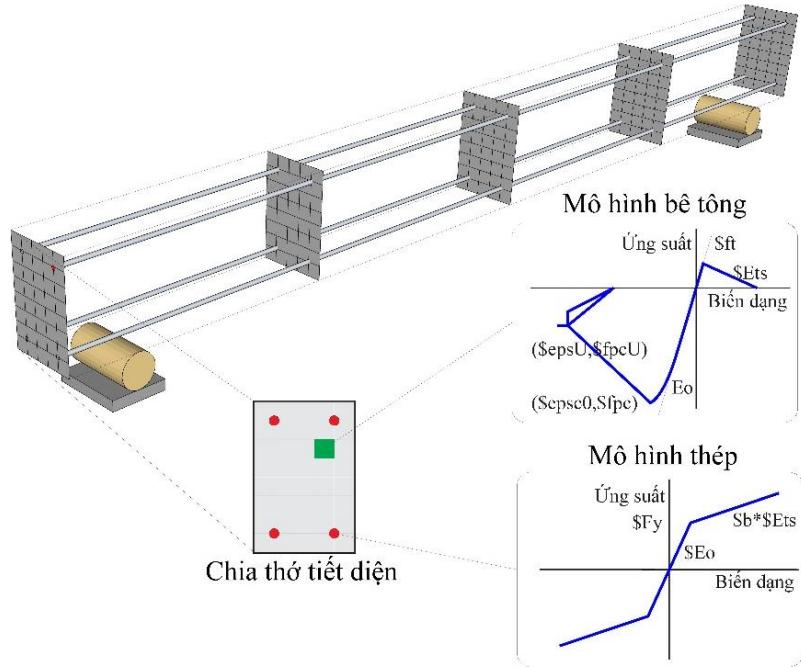
### 3. Phương pháp phân tích mặt cắt

Các hướng dẫn ở trên không đưa ra bất kỳ công thức nào để xác định sức kháng uốn mà chỉ đưa ra đường quan hệ ứng suất - biến dạng, theo đó người kỹ sư thiết kế có thể tính toán sức kháng uốn danh định của một cấu kiện UHPC thông qua việc xây dựng biểu đồ quan hệ mô men - độ cong của tiết diện. Phương pháp xây dựng biểu đồ mô men - độ cong có thể sử dụng các phần mềm như Sap2000, Midas/Civil và Response2000 hoặc có thể áp dụng trình tự tính như được đề cập trong [16]. Tuy nhiên, nhược điểm của các phần mềm kể trên là sử dụng các mô hình bê tông đã được xây dựng sẵn, người dùng không thể thay đổi các mô hình này dẫn đến khó cho ra kết quả chính xác với UHPC.

Trong bài báo này, các tác giả kiến nghị sử dụng phần mềm OpenSEES [20] để dự báo sức kháng uốn của đàm UHPC. Đây là phần mềm mã nguồn mở được phát triển tại Đại học California ở Berkeley (Mỹ) cho phép người dùng tự định nghĩa các loại vật liệu. Chi tiết về những ưu điểm và cách mô hình trong OpenSEES có thể tham khảo [21]. Để xây dựng đường quan hệ giữa mô men và độ cong, tiết diện ngang sẽ được chia thành các thớ như thể hiện trên Hình 6, sau đó phần tử *zeroLengthSection* được sử dụng để mô hình đàm, sử dụng loại vật liệu *uniaxialMaterial ElasticMultiLinear* để khai báo UHPC. Độ cong của tiết diện sẽ được tăng dần từ đó mô men sẽ được tính toán thông qua câu lệnh *integrator DisplacementControl* và cuối cùng kết quả biểu đồ mô men - độ cong được xác định. Từ biểu đồ này, sẽ tính được khả năng kháng uốn của tiết diện.

### 4. Thí nghiệm xác định khả năng kháng uốn của đàm UHPC cốt thép thường

Để xác định khả năng chịu uốn của đàm UHPC cốt thép thường, các tác giả đã thí nghiệm uốn với 3 mẫu đàm UHPC có kích thước giống nhau nhưng thay đổi hàm lượng cốt sợi thép với tỉ lệ lần lượt là 0%, 1% và 2% thể tích. Cốt thép sử dụng trong kết cấu đàm này có cường độ kéo được thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 197: 2004 bao gồm thép tròn trơn R6 mác CB-240T, thép thanh có gờ D10 và D12 mác CB-300V theo tiêu chuẩn TCVN 1651-2: 2008. Thí nghiệm được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định Công trình, Trường Đại học Xây dựng.



Hình 6. Mô hình chia thớ vật liệu sử dụng phần mềm mã nguồn mở OpenSees

#### 4.1. Thành phần vật liệu

Thành phần vật liệu của UHPC sử dụng trong thí nghiệm này được thể hiện chi tiết trong Bảng 1. Cốt sợi thép sử dụng có đường kính là 0,2 mm, chiều dài là 13 mm với các tính chất được thể hiện trong Bảng 2. Tính chất của vật liệu UHPC được thống kê trong Bảng 3.

Bảng 1. Cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu

Hàm lượng cốt sợi	Lượng vật liệu tính cho một m <sup>3</sup> , kg				
	Nước	Xi măng	Silica fume	Cát quartz	SD (%)
0%	165	902	226	1130	40
1%	163	895	224	1120	39,8
2%	162	886	222	1109	39,5

Bảng 2. Tính chất của cốt sợi thép sử dụng trong nghiên cứu

$d_f$ (mm)	$L_f$ (mm)	Tỉ số $L_f/d_f$	$D \left( \frac{g}{cm^3} \right)$	$f_t$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	Ảnh
0,2	13,0	65,0	7,9	2500	200	

Ghi chú:  $d_f$  đường kính cốt sợi;  $L_f$  chiều dài cốt sợi;  $f_t$  cường độ kéo của cốt sợi và  $E_f$  mô đun đàn hồi của cốt sợi.

Bảng 3. Bảng tính chất vật liệu UHPC sử dụng nghiên cứu

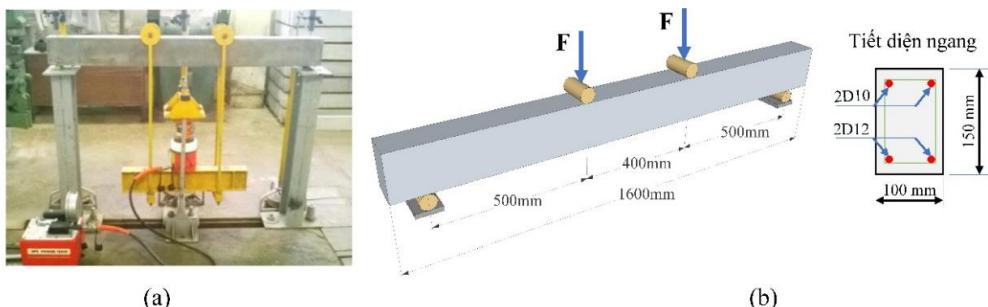
Hàm lượng cốt sợi (%)	Cường độ chịu nén $f'_c$ (Mpa)	Cường độ chịu kéo $f_t$ (Mpa)	Mô đun đàn hồi $E$ (Gpa)
0%	120	8	48
1%	120	12	48
2%	120	15	48

Ghi chú:

- Cường độ chịu nén của UHPC được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C39M trên mẫu trụ có kích thước đường kính mẫu là 100 mm và chiều cao mẫu là 200 mm.
- Cường độ chịu uốn của UHPC được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1609M trên mẫu dầm tiết diện hình vuông 100×100 mm dài 400 mm.
- Mô đun đàn hồi của UHPC được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C469M trên mẫu trụ có kích thước đường kính mẫu là 100 mm và chiều cao mẫu là 200 mm.
- Các giá trị cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi trong bảng được làm tròn để đưa vào xác định sức kháng uốn theo lý thuyết.

#### 4.2. Sơ đồ thí nghiệm

Sử dụng sơ đồ thí nghiệm uốn 4 điểm để xác định sức kháng uốn của dầm UHPC cốt thép thường như thể hiện trong Hình 7. Chiều dài dầm thí nghiệm  $L = 1600$  mm với chiều dài nhịp  $L_t = 1400$  mm. Tiết diện ngang hình chữ nhật với kích thước  $h \times b = 150 \times 100$  mm, cốt thép thó 2D10 trên và thó dưới 2D12.

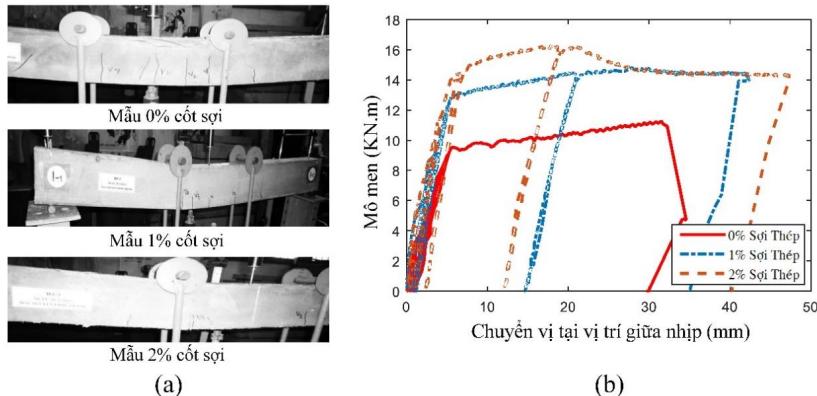


Hình 7. Sơ đồ thí nghiệm: (a) Bố trí thiết bị thí nghiệm; (b) Kích thước hình học và mặt cắt ngang của dầm

## 5. Kết quả thí nghiệm và các kết quả dự báo theo lý thuyết

### 5.1. Kết quả thí nghiệm

Dầm thí nghiệm được gia tải đến khi phá hoại, giá trị lực trên kính được đo thông qua một dụng cụ đo lực điện tử và chuyển vị dầm được đo bằng 03 cảm biến đo độ võng, một lắp tại giữa nhịp và hai tại vị trí 2 gối. Kết quả đo đặc từ thiết bị đo lực và chuyển vị sẽ được ghi tự động bằng máy tính. Hình 8a thể hiện 3 mẫu dầm ở thời điểm bị phá hoại và Hình 8b thể hiện mối quan hệ giữa mô men và chuyển vị tại giữa nhịp dầm. Mặc dù giá trị đo là lực kính tuy nhiên với mục đích nghiên cứu về sức kháng uốn của dầm, giá trị lực kính đã được tính toán chuyển đổi về giá trị mô men uốn tại tiết diện giữa nhịp như trong Hình 8b.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm uốn phá hoại dầm: (a) Hình ảnh dầm bị uốn phá hoại; (b) Kết quả quan hệ giữa mô men uốn và chuyển vị giữa nhịp

Kết quả thí nghiệm cho thấy sức kháng uốn của dầm tăng khi tăng hàm lượng cốt sợi mặc dù kích thước tiết diện và cốt thép thường không thay đổi trong cả 3 mẫu thí nghiệm. Cụ thể, đối với mẫu không sử dụng cốt sợi giá trị mô men lớn nhất dầm có thể chịu được là 11,4 KNm, đối với mẫu dầm sử dụng 1% cốt sợi giá trị mô men lớn nhất là 14,6 KNm và khi sử dụng 2% cốt sợi sức kháng uốn của dầm tăng lên đến 16,5 KNm (tăng 45% so với mẫu không sử dụng cốt sợi). Điều này có thể thấy rằng hàm lượng cốt sợi tăng dẫn đến tăng khả năng chịu kéo cho dầm và có thể thấy cốt sợi đóng góp một phần lớn vào sức kháng uốn của dầm.

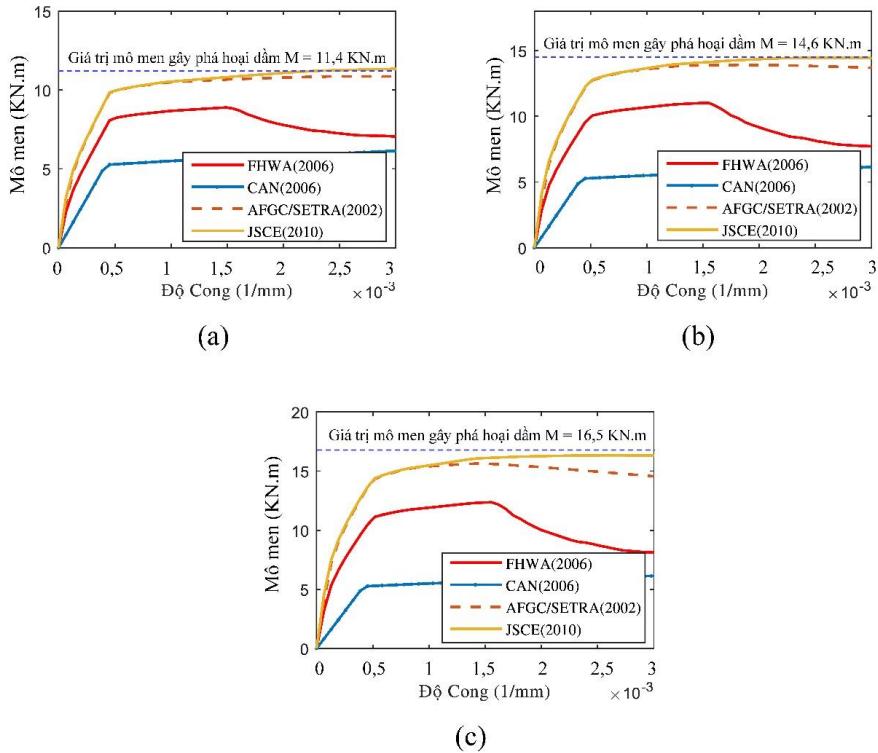
### 5.2. So sánh kết quả thí nghiệm với lý thuyết

Từ lý thuyết dự báo sức kháng uốn theo các hướng dẫn, nghiên cứu đã được đề cập ở Mục 2, sử dụng OpenSEES để phân tích mặt cắt kết quả quan hệ giữa mô men và độ cong của tiết diện được thể hiện trong Hình 9. Giá trị mô men lớn nhất trên biểu đồ quan hệ mô men - độ cong được xem là sức kháng uốn của dầm. Kết quả này được so sánh với kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 10. Tỷ số giữa giá trị sức kháng uốn dự báo theo các lý thuyết và theo thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 4.

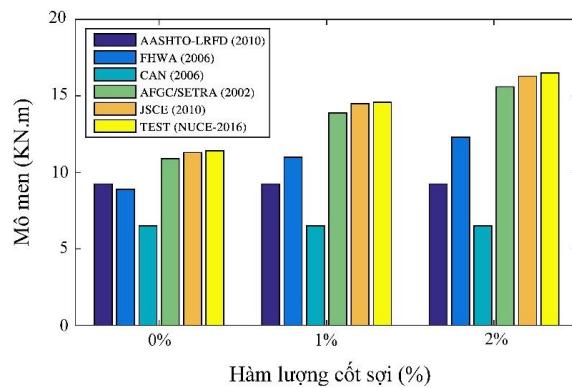
Bảng 4. Kết quả tỉ lệ giữa sức kháng uốn theo các tiêu chuẩn so với thí nghiệm

Hàm lượng cốt sợi	AASHTO - LFRD (2010)	FHWA (2006)	CAN (2006)	AFGC\SETRA (2002)	JSCE (2010)
0%	0,811	0,780	0,568	0,952	0,995
1%	0,634	0,754	0,444	0,953	0,990
2%	0,561	0,750	0,393	0,948	0,990

Có thể thấy rằng với hàm lượng cốt sợi 0%, dự báo sức kháng uốn theo [11] cho kết quả ước tính bằng 81% giá trị sức kháng uốn theo thí nghiệm. Tuy nhiên, khi tăng hàm lượng cốt sợi đến 2%, kết quả dự báo theo [11] bằng 56% kết quả thí nghiệm. Điều này có thể giải thích được là do các công thức [11] đã bỏ qua thành phần chịu kéo của bê tông khi ước tính sức kháng uốn dẫn đến khi khả năng chịu kéo của bê tông tăng thì kết quả dự báo sức kháng uốn sẽ sai lệch lớn.



Hình 9. So sánh biểu đồ mô men - độ cong của đầm giữa lý thuyết và thí nghiệm:  
 (a) Không sử dụng cốt sợi thép; (b) 1% cốt sợi; (c) 2% cốt sợi thép



Hình 10. So sánh giá trị ước tính sức kháng uốn theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn với kết quả thí nghiệm

Kết quả theo [14] cho ra giá trị dự báo bằng khoảng 75% giá trị theo thí nghiệm. Kết quả này là gần tương tự như thí nghiệm của [22] đối với đầm dự ứng lực. Giá trị dự báo sức kháng uốn được thực hiện bởi [22] cho ra kết quả khoảng bằng 76% giá trị thí nghiệm.

Kết quả theo [15] cho ra giá trị sức kháng uốn quá an toàn do bỏ đi sức kháng kéo và sức kháng nén của UHPC chỉ lấy bằng  $0,65f'_c$ .

Đáng chú ý là kết quả dự báo sức kháng uốn của [12] và [13] khá chính xác so với thí nghiệm. Điều này cũng được khẳng định từ những phân tích và kết quả thí nghiệm trong [23].

## 6. Kết luận

Qua kết quả thực nghiệm cùng với sự tổng hợp các lý thuyết để dự báo sức kháng uốn của đầm sử dụng UHPC theo các tài liệu hướng dẫn, các tác giả đưa ra một số kết luận như sau:

- Việc sử dụng sợi thép phân tán đã làm tăng đáng kể khả năng chịu kéo của UHPC, do vậy khi tính toán sức kháng uốn cần kể đến sự làm việc chịu kéo này.

- Nếu sử dụng các công thức trong [11] để xác định khả năng kháng uốn của kết cấu BTCT với việc bỏ qua sự làm việc chịu kéo của bê tông sẽ dẫn đến kết quả dự báo trở nên quá an toàn, đặc biệt là khi áp dụng cho kết cấu sử dụng UHPC với cường độ chịu kéo lớn.

- Áp dụng lý thuyết của [12] và [13] để dự báo sức kháng uốn của đầm UHPC cho kết quả tương đối chính xác.

- Hiện nay có rất nhiều công cụ để mô hình phân tích xác định mô men - độ cong của tiết diện, tuy nhiên việc sử dụng phần mềm mã nguồn mở OpenSEES cho phép người sử dụng có thể chỉnh sửa các mô hình bê tông phù hợp với UHPC. Do đó, ứng dụng OpenSEES trong việc xác định sức kháng uốn của đầm UHPC là hữu ích.

Nghiên cứu đã thành công trong việc tổng hợp lý thuyết, phân tích kết quả và so sánh với số liệu thí nghiệm về sức kháng uốn của đầm UHPC sử dụng cốt thép thường. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần tiến hành đổi mới với đầm UHPC sử dụng cáp dự ứng lực để phản ánh được đầy đủ ứng xử của kết cấu sử dụng UHPC.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo cho đề tài “Nghiên cứu ứng dụng bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình”; Mã số: CTB-2017-01.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Graybeal, B. A. (2006). *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. Federal Highway Administration, No. FHWA-HRT-06-103.
- [2] Bierwagen, D., Abu-Hawash, A. (2005). Ultra high performance concrete highway bridge. In *Proc. of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa*.
- [3] Ozyildirim, C. (2011). *Evaluation of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete*. Federal Highway Administration, No. FHWA/VCTIR 12-R1.
- [4] DURA (2011). *Single Span 100m long by 5.0m wide (MTB-R1) UHPC box bridge system*.
- [5] Thắng, N. C., Tuấn, N. V., Hanh, P. H., Lâm, N. T. (2012). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng vật liệu sẵn có ở Việt Nam. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 12:71–74.
- [6] Thắng, N. C., Thắng, N. T., Hanh, P. H., Tuấn, N. V., Thành, L. T., Lâm, N. T. (2013). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng Silica fume và xỉ lò cao nghiên mịn ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng*, 7(1):76–83.
- [7] Ân, V. V. T., Long, H. V., Tuân, N. K. (2016). 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*, 4:118–122.
- [8] Hữu, P. D., Sang, N. T., Anh, P. D., Kha, N. L. (2011). Nghiên cứu vật liệu chế tạo bê tông cường độ siêu cao (UHPC). *Tạp chí Giao thông Vận Tải, Bộ Giao thông Vận tải*, 7:15–18.
- [9] Việt, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Research design UHPC bridge with HL93 load at the Vietnam township. In *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”*, Hanoi, Vietnam.
- [10] Việt, T. B., Long, L. M., Hoa, N. T. (2016). Studying on the construction of 18m-span UHPC bridge for two-wheel transportation means in Hau Giang, Vietnam. In *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation “Sustainable concrete for now and the future”*, Hanoi, Vietnam.

- [11] AASHTO LRFD (2010). *Bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- [12] AFGC/SETRA (2002). *Ultra high performance fiber-reinforced concrete-interim recommendations*. Report, Association Française de Génie Civil, Paris, France.
- [13] JSCE (2010). *Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures*. Japanese Society of Civil Engineers (Draft Version).
- [14] Graybeal, B. A. (2006). *Structural behavior of ultra-high performance concrete prestressed I-girders*. Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, Turner-Fairbank Highway Research Center.
- [15] Almansour, H., Lounis, Z. (2010). [Design of prestressed UHPFRC girder bridges according to Canadian highway bridge design code](#). *Designing and Building with UHPFRC*.
- [16] Yoo, D. Y., Yoon, Y. S. (2016). [A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2):125–142.
- [17] Whitney, C. S. (1948). Application of plastic theory to the design of modern reinforced concrete structures. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 35(1):30–53.
- [18] Canadian Standards Association (2006). *Canadian highway bridge design code*.
- [19] Tanaka, Y., Musya, H., Ootake, A., Shimoyama, Y., Kaneko, O. (2002). Design and construction of Sakata-Mirai footbridge using reactive powder concrete. In *Proc. of the 1st fib Congress*, Osaka, Japan, 417–424.
- [20] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L. *The open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) user command-language manual*.
- [21] Đạt, T. T., Phúc, N. D., Bình, T. A. (2016). Ứng dụng phần mềm mã nguồn mở OpenSees trong lập trình mô phỏng cầu chịu động đất. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, 4:12–20.
- [22] Graybeal, B. A. (2008). [Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete I-girder](#). *Journal of Bridge Engineering*, 31(6):602–610.
- [23] Yoo, D., Banthia, N., Yoon, Y. S. (2016). [Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars](#). *Engineering Structures*, 111:246–262.