

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA BẢN MẶT CẦU SƯỜN MỎNG LẮP GHÉP CHẾ TẠO BẰNG BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO

Bùi Quốc Bảo^a, Nguyễn Thị Nguyệt Hằng^{b,*}, Khúc Đăng Tùng^b, Nguyễn Trung Hiếu^c,
Nguyễn Công Thắng^d, Vũ Minh Tú^e

^aCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^dKhoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^eCông ty Cổ phần tư vấn Xây dựng Công nghiệp và Đô thị Việt Nam (VCC),

10 phố Hoa Lư, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 26/8/2024, Sửa xong 24/9/2024, Chấp nhận đăng 26/9/2024

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu khả năng kháng uốn của bản mặt cầu sườn mỏng lắp ghép chế tạo bằng bê tông cường độ cao (HPC). Một cấp phối cho bê tông có cường độ 70 MPa từ nguồn vật liệu địa Việt Nam đã được đề xuất. Khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng làm từ loại bê tông này đã được nghiên cứu và tính toán dựa trên một số tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Kết quả chỉ ra rằng mặc dù có sự khác biệt về kích thước giả định của khối ứng suất nén hình chữ nhật tương đương cho bê tông HPC giữa các tiêu chuẩn, không có sự khác nhau nhiều về các kết quả tính toán khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng chế tạo bằng vật liệu HPC. Tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 đã được sử dụng để khảo sát các thông số ảnh hưởng đến khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC. Kết quả cho thấy, trong số các đại lượng được khảo sát, hàm lượng cốt thép có tác động lớn nhất đến khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC.

Từ khóa: bản sườn mỏng; bê tông chất lượng cao (HPC); bê tông đúc sẵn; xây dựng nhanh công trình cầu; khả năng kháng uốn.

STUDY ON THE FLEXURAL RESISTANCE OF PRECAST WAFFLE DECK SLABS FABRICATED USING HIGH-PERFORMANCE CONCRETE

Abstract

This paper investigates the flexural capacity of precast waffle deck slabs using high-performance concrete (HPC). A mix design for 70 MPa concrete from local Vietnamese materials has been proposed. The moment capacity of the waffle deck slabs made from C70 concrete was studied and calculated based on current standards. The results indicate that, although there are differences in the assumed dimensions of the equivalent rectangular stress block for HPC concrete between investigated standards, there is minimal variation in the calculated flexural capacity of HPC waffle slabs. The TCVN 11823:2017 standard was used to investigate parameters affecting the flexural capacity of HPC waffle slabs. The findings show that, among the parameters examined, the amount of reinforcement has the greatest impact on the flexural strength of HPC waffle slabs.

Keywords: waffle deck slab; high-performance concrete (HPC); precast concrete; accelerated bridge construction (ABC); moment resistance.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-01) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hangntn@huce.edu.vn (Hằng, N. T. N.)

1. Giới thiệu

Tại Việt Nam, bản mặt cầu bằng bê tông cốt thép (BTCT) là loại kết cấu chính trong công trình cầu, tuy nhiên lại hầu như chưa được áp dụng biện pháp thi công lắp ghép. Sau khi các dầm cầu đã được thi công lắp ghép vào vị trí, bản mặt cầu BTCT thường sẽ sử dụng biện pháp đổ bê tông tại chỗ với chiều dày bản khoảng 20 cm. Với biện pháp thiết kế và thi công như vậy, một số nhược điểm có thể kể đến như: (i) trọng lượng bản mặt cầu lớn và chiếm một phần đáng kể khi so sánh với trọng lượng bản thân của dầm cầu, đặc biệt với cầu dầm thép; (ii) thi công ván khuôn phức tạp; (iii) thời gian thi công kéo dài. Với những nhược điểm kể trên, thi công bản mặt cầu hiện đang là nút thắt của quy trình xây dựng nhanh kết cấu nhịp cầu tại Việt Nam.

Trên thế giới, xây dựng nhanh công trình cầu (Accelerated Bridge Construction - ABC) là hướng nghiên cứu các giải pháp công nghệ tiên tiến trong xây dựng công trình cầu tại nhiều nước phát triển. Các giải pháp thi công nhanh thường liên quan đến các công nghệ lắp ghép hoặc cấu kiện nhẹ, giúp đẩy nhanh quá trình thi công cầu (đặc biệt với các cầu trong đô thị), giúp giảm chi phí xây dựng, và có tính an toàn cao cho công nhân và kỹ sư. Một nhóm nghiên cứu từ Pháp đã có ý tưởng đầu tiên về việc thiết kế bản mặt cầu chất lượng siêu cao dạng sườn mỏng làm việc một phương. Các nghiên cứu sau đó đã kế thừa ý tưởng loại bản này và được phát triển để có thể liên kết với hệ thống dầm chủ hình thành kết cấu liên hợp có khả năng tăng cường chịu lực cho dầm chủ [1]. Gần đây, một nhóm các tác giả từ Hoa Kỳ dẫn đầu bởi giáo sư Amir Mirmiran từ trường đại học Texas at Tyler đã thiết kế một dạng bản sườn mỏng lắp ghép có trọng lượng siêu nhẹ để thay thế cho mặt cầu thép của hệ thống cầu quay, thường rất dễ bị hư hỏng trong quá trình sử dụng [2]. Trọng lượng bản mặt cầu theo thiết kế của nhóm nghiên cứu này đã đạt được giá trị khoảng 100 kg/m^2 [3]. Nhóm nghiên cứu này cũng thực hiện các thí nghiệm trong phòng để kiểm tra sự làm việc của bản sườn mỏng và các vị trí mối nối giữa dầm với bản, bản với bản [4]. Các nghiên cứu về sự làm việc của bản sườn mỏng trong điều kiện thực tế cũng đã được nghiên cứu thực hiện và đánh giá hiệu quả khi thay thế bản mặt cầu bê tông thông thường [5]. Một vài nghiên cứu sâu hơn gần đây liên quan đến mối nối và liên kết neo giữa bản mặt cầu dạng sườn với hệ thống dầm thép hoặc bản mặt cầu trực hướng sử dụng bê tông cường độ siêu cao cũng đã được thực hiện với một số nhóm tác giả [6, 7]. Ở Hoa Kỳ, Cơ quan Quản lý Đường cao tốc Liên bang Hoa Kỳ (FHWA) đã ban hành quy trình chế tạo tấm bản sườn mỏng đúc sẵn tại nhà máy [8]. Bản mặt cầu loại này thường được áp dụng cho kết cấu cầu dầm nhịp giản đơn.

Do những tính chất ưu việt của bê tông cường độ siêu cao, hệ thống sườn mỏng có thể giảm khoảng 30-40% trọng lượng bản thân so với bản thông thường mà vẫn đảm bảo khả năng tải trọng [8]. Việc giảm trọng lượng bản thân có lợi ích đáng kể. Ví dụ, tăng chiều dài nhịp và khoảng cách dầm, từ đó sẽ giảm được số lượng dầm và kích thước kết cấu phần dưới. Do vậy, bản mặt cầu sườn mỏng đang được sử dụng khá phổ biến ở Hoa Kỳ. Tuy nhiên, cần được nhấn mạnh rằng các bản mặt cầu dạng sườn mỏng hiện hay đang được nghiên cứu và áp dụng sử dụng bê tông cường độ siêu cao UHPC. Theo khảo sát sơ bộ của nhóm nghiên cứu, với điều kiện kinh tế của Việt Nam hiện nay, việc sử dụng bê tông UHPC với giá thành đắt (khoảng 10 đến 15 lần so với bê tông thường) trong kết cấu bản mặt cầu chưa khả thi. Do vậy, việc nghiên cứu khả năng chế tạo của bản sườn mỏng đúc sẵn, được chế tạo bằng bê tông chất lượng cao (High-Performance Concrete – HPC) có cường độ chịu nén trong khoảng 60 đến 80 MPa (gấp 2,0 đến 2,7 lần bê tông cường độ 30 MPa), nhưng có giá thành xấp xỉ bê tông thường để áp dụng cho các công trình cầu hay các công trình dân dụng tại Việt Nam là cần thiết và có tính thực tiễn.

Nằm trong chuỗi nghiên cứu khả năng chế tạo bản sườn mỏng đúc sẵn HPC tại Việt Nam, bài báo này trình bày tính toán khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng đúc sẵn chế tạo bằng bê tông HPC. Đầu tiên, một cấp phối bê tông HPC với các vật liệu có sẵn trên thị trường Việt Nam được đề xuất. Thông

qua các thí nghiệm vật liệu, các đặc trưng cơ học chính của HPC như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi ép chế, mô đun đàn hồi của bê tông sẽ được xác định. Kết quả thí nghiệm sẽ cho phép đánh giá tính khả thi trong việc chế tạo HPC trong điều kiện Việt Nam. Bên cạnh đó, để làm rõ việc áp dụng bê tông cường độ cao C70 cho bản mặt cầu dạng sườn mỏng lắp ghép, một dạng cấu kiện đang được nghiên cứu áp dụng phổ biến hiện nay trong các công trình cầu, sức kháng uốn của bản sườn mỏng chế tạo bằng bê tông C70 được tính toán dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành. Thông qua việc tính toán và so sánh các tiêu chuẩn, nghiên cứu đã đánh giá tính phù hợp khi áp dụng các tiêu chuẩn khác nhau cho việc tính toán khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng HPC đồng thời xác định được tham số ảnh hưởng tới khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng sử dụng bê tông cường độ cao. Nghiên cứu này góp phần phát triển các giải pháp bê tông chất lượng cao, đẩy nhanh tốc độ xây dựng cầu trong các công trình giao thông tại Việt Nam. Tuy nhiên, cần được nhấn mạnh rằng, nghiên cứu này chỉ đề cập đến khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC mà chưa đề cập đến các nội dung khác như sức kháng cắt, độ võng hay ứng suất/nứt, ... Ngoài ra, nghiên cứu mới chỉ đề cập đến bản sườn mỏng sử dụng bê tông cốt thép thường mà chưa đề cập đến bản sườn mỏng HPC sử dụng cáp ứng suất trước. Đây là các điểm hạn chế của nghiên cứu và các nội dung này nên được làm rõ trong các nghiên cứu tiếp theo.

2. Khả năng chế tạo bê tông cường độ cao từ nguồn vật liệu địa phương tại Việt Nam

Với mục đích chế tạo được và đưa bản sườn mỏng lắp ghép bằng vật liệu HPC áp dụng vào các công trình cầu tại Việt Nam, bê tông cường độ cao cần được chế tạo bởi các vật liệu tại Việt Nam. Trong nghiên cứu này, một cấp phối cho bê tông C70 được nhóm nghiên cứu tính toán và đề xuất (Bảng 1). Có thể thấy rằng, tương tự như bê tông thường, thành phần cấp phối của bê tông C70 bao gồm xi măng, cát, đá, nước, phụ gia khoáng và phụ gia dẻo (Hình 1). Trong đó, xi măng sử dụng trong nghiên cứu là PC40 Nghi Sơn, cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày của xi măng đạt 48,6 MPa. Cát sử dụng là cát vàng Sông Lô có mô đun độ lớn của cát đạt 2,36 MPa. Đá sử dụng trong nghiên cứu là đá bazan tại mỏ Sunway, với cỡ hạt từ 5 đến 20 mm và có cường độ nén đạt trên 120 MPa. Phụ gia khoáng sử dụng là silica fume (SF) dạng hạt rời của hãng Elkem. SF có kích thước hạt trung bình khoảng 0,15 μm và chỉ số hoạt tính của xi măng đạt 105%. Bên cạnh đó, để giảm lượng nước sử dụng đồng thời vẫn cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông, nhóm nghiên cứu sử dụng phụ gia siêu dẻo



Hình 1. Nguyên liệu chế tạo xi măng C70

MasterEase 3054 của hãng Sika. Việc sử dụng phụ gia này sẽ giúp cải thiện đáng kể tính lưu biến của hỗn hợp bê tông, làm cho bê tông có ứng suất và độ nhớt thấp, tính công tác được duy trì trong thời gian dài.

Bảng 1. Thành phần cấp phối HPC cho 1 m³ bê tông C70

Thành phần cấp phối – Đơn vị (kg)					
Xi măng	Silica fume	Cát	Đá	Nước	Phụ gia dẻo
530	48	834	928	154	6,16

Các mẫu bê tông hình trụ với kích thước tiêu chuẩn 150 × 300 mm đã được chế tạo. Quy trình đúc mẫu bê tông thí nghiệm và bảo dưỡng mẫu được tuân theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3105:2022 [9]. Sau khi bê tông đủ 28 ngày tuổi, 3 mẫu được dùng để xác định cường độ chịu nén của bê tông, 3 mẫu được dùng để xác định cường độ chịu kéo thông qua thí nghiệm ép chèn, và 2 mẫu còn lại được sử dụng để xác định mô đun đàn hồi của bê tông. Kết quả thí nghiệm được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm cường độ bê tông

	Cường độ chịu nén (MPa)	Cường độ chịu kéo ép chèn (MPa)	Mô đun đàn hồi (MPa)
Mẫu 1	82,02		
Mẫu 2	85,77		
Mẫu 3	79,39		
Mẫu 4		6,79	
Mẫu 5		6,20	
Mẫu 6		5,99	
Mẫu 7			48.201
Mẫu 8			50.868
Trung bình	82,39	6,33	49.534,5

Có thể thấy trên Bảng 3 rằng các mẫu bê tông đều cho ra kết quả với cường độ chịu nén lớn hơn 70 MPa, với giá trị cường độ trung bình bằng 82,39 MPa và độ lệch chuẩn là 2,62 MPa. Kết quả thí nghiệm ép chèn cho thấy, cường độ chịu kéo của bê tông thiết kế nằm trong khoảng 5,99 đến 6,79 MPa với độ lệch chuẩn 0,41 MPa. Theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [10], cường độ chịu kéo của bê tông C70 được tính theo công thức

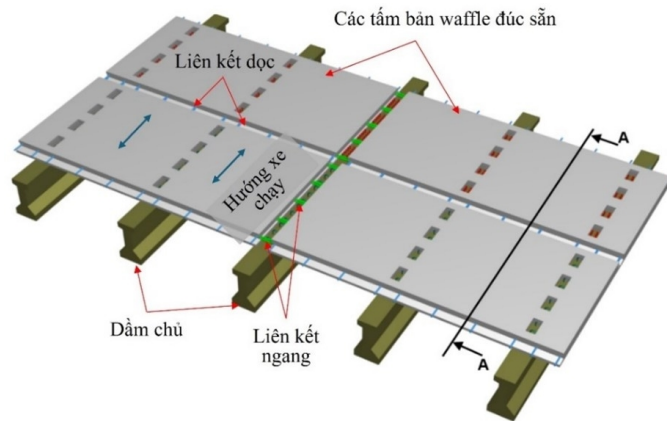
$$f_{ctm} = 2,12 \times \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right) \quad (1)$$

trong đó f_{ctm} là cường độ chịu kéo trung bình, f_{cm} là cường độ chịu nén trung bình của bê tông ($f_{cm} = f'_c + 8$ MPa, đối với bê tông C70). Theo công thức (1), đối với bê tông C70, cường độ chịu kéo trung bình của bê tông là 4,6 MPa. Theo tiêu chuẩn AASHTO 2017 và TCVN 11823:2017, cường độ chịu kéo tính toán của bê tông C70 là 5,05 MPa. Kết quả thí nghiệm cho thấy các mẫu bê tông thí nghiệm đều đạt yêu cầu về cường độ chịu kéo đối với bê tông C70 theo tiêu chuẩn của châu Âu, Mỹ và Việt Nam. Tương tự, mô đun đàn hồi tính toán cho bê tông C70 theo tiêu chuẩn Eurocode 2, AASHTO 2017, ACI 318-19 và TCVN 11823:2017 cho kết quả dao động từ 39.323 MPa (theo ACI 318-19) đến 41.000 MPa (theo Eurocode 2). So sánh giá trị mô đun đàn hồi tính toán theo các tiêu chuẩn khảo sát và mô đun đàn hồi từ kết quả thí nghiệm trên Bảng 3, có thể thấy rằng kết quả thí nghiệm đều cho ra giá trị lớn hơn giá trị mô đun đàn hồi tính toán. Kết quả từ nghiên cứu thực nghiệm cho thấy khả năng thành công của việc chế tạo bê tông C70 từ nguồn vật liệu trong nước. Tuy nhiên

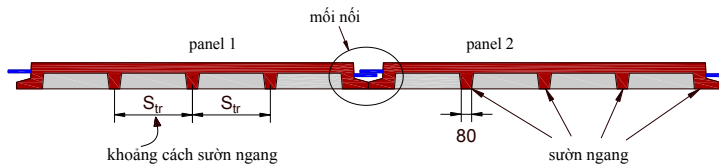
cần kiểm soát chặt chẽ quá trình đổ bê tông để các mẻ đổ có chất lượng đồng đều và đạt yêu cầu về cường độ.

3. Cấu tạo và thiết kế bản sườn mỏng

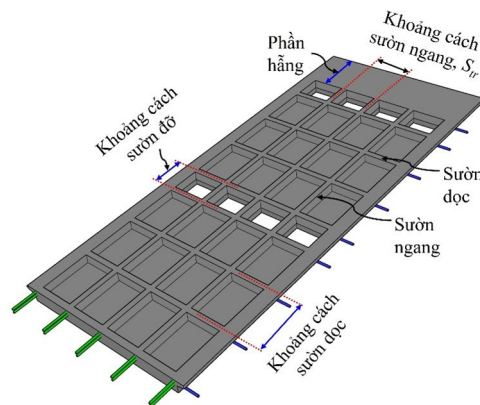
Tổng quan của bản sườn mỏng UHPC đúc sẵn theo thiết kế của FHWA [8] được thể hiện trên Hình 2. Bản sườn mỏng gồm các tấm có hình dạng miếng bánh waffle đúc sẵn được liên kết với nhau theo phương dọc và phương ngang cầu (Hình 2(a)). Các mối nối sử dụng bê tông UHPC và được thi công sau tại công trường. Trong hệ thống bản sườn mỏng, sườn ngang (sườn chính) làm việc như dầm chữ T, có tác dụng chịu và truyền tải trọng (bao gồm tĩnh tải phần 2 và tải trọng bánh xe) sang các dầm chủ. Các sườn dọc giúp phân phối tải trọng tới các bản đúc sẵn liên kế thông qua hệ thống mối nối [8]. Bố trí sườn dọc và sườn ngang được thể hiện trên Hình 2(c).



(a) Phối cảnh 3D của bản sườn mỏng lắp ghép trên kết cấu nhịp cầu



(b) Chi tiết Mặt cắt ngang A-A



(c) Mặt dưới của một tấm bản waffle đúc sẵn

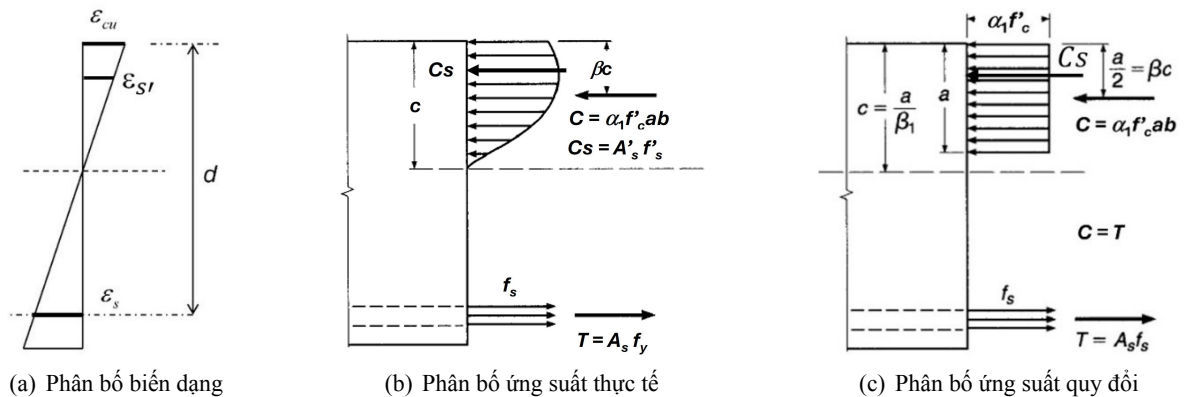
Hình 2. Cấu tạo chung về bản sườn mỏng

FHWA sử dụng phương pháp dải bản để phân tích, thiết kế bản sườn mỏng. Ở phương pháp này, bản được cắt thành các dải bản có bề rộng S_w dọc theo cầu (cùng hướng xe chạy). Khi tính tĩnh tải, S_w có thể lấy bằng một đơn vị chiều dài. Khi chịu hoạt tải, chiều rộng làm việc của dải bản tương ứng với một dây bánh xe của bản mặt cầu là S_w . Phương pháp dải bản được áp dụng cho bản làm việc theo 1 phương (bản kiểu dầm), ví dụ như bản chỉ kê hoặc ngàm vào 2 sườn dầm; bản kê hoặc ngàm lên 4 cạnh nhưng tỷ số cạnh dài trên cạnh ngắn lớn hơn 1,5 (khi đó bản sẽ làm việc theo phương cạnh ngắn). Nội lực khi đó sẽ được tính toán cho một bề rộng dải bản và cốt thép cũng được tính toán, bố trí cho bề rộng dải bản đó và lấy thiết kế đó để áp dụng cho các dải bản khác trên toàn bộ chiều dọc của bản.

4. Khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng HPC

4.1. Cơ sở lý thuyết về tính sức kháng uốn của cấu kiện bê tông cường độ cao

Khi tính toán sức kháng uốn của cấu kiện bê tông, hai điều kiện cần phải thỏa mãn đó là (i) điều kiện tương thích về biến dạng và (ii) điều kiện cân bằng về lực. Hình 3 trình bày các bước phân tích tiết diện để tính sức kháng uốn của một tiết diện bê tông cốt thép, trong đó C là tổng hợp lực nén của bê tông vùng nén, C_s là tổng lực nén do cốt thép vùng chịu nén, T là tổng lực kéo, α_1 và β_1 là hệ số quy đổi khối ứng suất, từ dạng ứng suất thật về khối ứng suất chữ nhật tương đương, f'_c là cường độ chịu nén của bê tông, a là chiều cao vùng chịu nén quy đổi, b là bề rộng tiết diện, A_s là diện tích cốt thép dọc ở biên chịu kéo, ϵ_s và f_s lần lượt là biến dạng và ứng suất trong cốt thép chịu kéo tại thời điểm bị phá hoại, c là khoảng cách từ trục trung hòa đến biên chịu nén, ϵ_{cu} là biến dạng cực hạn của bê tông tại thời điểm bị phá hoại. Eurocode 2 giả thiết $\epsilon_{cu} = 0,0027$ đối với bê tông C70 trong khi ACI 318-19, AASHTO 2017 và TCVN 11823:2017 cho rằng $\epsilon_{cu} = 0,003$.



Hình 3. Các bước phân tích tiết diện để tính sức kháng uốn

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng cường độ của bê tông ảnh hưởng đến mối quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu này [11–14]. Do đó đường quan hệ ứng suất biến dạng của bê tông chất lượng cao khác với bê tông thường. Điều này ảnh hưởng tới kích thước hình học của khối ứng suất hình chữ nhật tương đương (Hình 3), biến dạng cực hạn của bê tông và khả năng kháng uốn của tiết diện. Các tiêu chuẩn trên thế giới đã có những kiến nghị về giả thiết kích thước của khối ứng suất tương đương trong việc thiết kế cấu kiện bê tông cốt thép sử dụng HPC. Các hệ số xác định khối ứng suất tương đương theo các tiêu chuẩn Eurocode 2 [10], ACI 318-19 [15], AASHTO 2017 [16], và TCVN 11823:2017 [17] được trình bày trên Bảng 3.

Bảng 3. Hệ số xác định khối ứng suất tương đương theo các tiêu chuẩn thiết kế

	Cường độ bê tông (MPa)	α_1	β_1
Tiêu chuẩn Eurocode 2	$f'_c \leq 50$ $50 < f'_c < 90$	1,0 $1,0 - (f'_c - 50)/200$	0,8 $0,8 - (f'_c - 50)/400$
Tiêu chuẩn ACI 318-19	$17 \leq f'_c \leq 28$ $28 < f'_c < 55$ $f'_c < 55$	0,85 0,85 0,85	0,85 $0,85 - (0,55(f'_c - 28))/7$ 0,65
Tiêu chuẩn AASHTO 2017	f'_c	với $f'_c \leq 69$ MPa, $\alpha_1 = 0,85$ với $f'_c > 69$ MPa, α_1 giảm 0,02 cho mỗi 6,9 MPa vượt quá 69 MPa nhưng không nhỏ hơn 0,75	với $f'_c \leq 27,6$ MPa, $\beta_1 = 0,85$ với $f'_c > 27,6$ MPa, β_1 giảm 0,05 cho mỗi 6,9 MPa vượt quá 27,6 MPa nhưng không nhỏ hơn 0,65
Tiêu chuẩn TCVN 11823:2017	f'_c	với $f'_c \leq 70$ MPa, $\alpha_1 = 0,85$ với $f'_c > 70$ MPa, α_1 giảm 0,02 cho mỗi 7,0 MPa vượt quá 70 MPa nhưng không nhỏ hơn 0,75	với $f'_c \leq 28$ MPa, $\beta_1 = 0,85$ với $f'_c > 28$ MPa, β_1 giảm 0,05 cho mỗi 7 MPa vượt quá 28 MPa nhưng không nhỏ hơn 0,65

4.2. Bản sườn mỏng khảo sát

Đối với bản sườn mỏng UHPC được FHWA khuyến nghị, bản sườn mỏng thường có tổng chiều cao chịu lực là 200 mm, bản cánh trên dày 70 mm. Khoảng cách các sườn ngang bằng khoảng các các sườn dọc và có kích thước thay đổi từ 450 đến 900 mm. Khoảng cách các dầm chủ được thay đổi từ 1200 đến 3000 mm để phù hợp với khoảng cách các dầm chủ của cầu đơn giản trong thực tế.

Theo FHWA, khi xét khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng, nội lực của bản sẽ được tính sử dụng phương pháp dải bản còn khả năng chịu uốn của bản có được xác định dựa trên khả năng chịu uốn của các dầm chữ T đơn lẻ được cắt ra từ dải bản (Hình 4) với bề rộng cánh có hiệu khi chịu mô men âm và mô men dương lần lượt là b_f^- và b_f^+ .

Bề rộng cánh có hiệu khi chịu mô men âm (b_f^-) và mô men dương (b_f^+) theo khuyến nghị của FHWA được xác định từ công thức (2) đến (5):

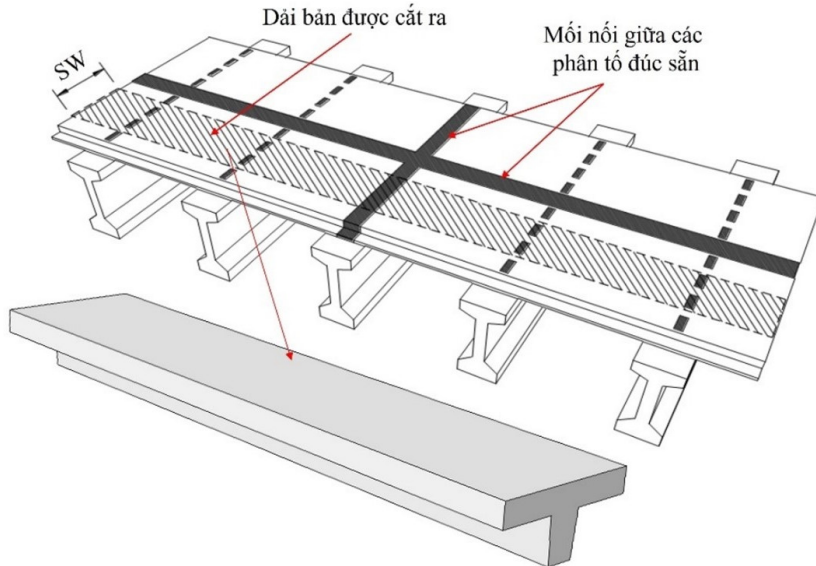
$$b_f^+ = \frac{S_w^+}{\left(1 + \text{phần nguyên} \left[\frac{S_w^+}{S_s} \right]\right)} \quad (2)$$

$$b_f^- = \frac{S_w^-}{\left(1 + \text{phần nguyên} \left[\frac{S_w^-}{S_s} \right]\right)} \quad (3)$$

$$S_w^+ = 660 + 0,55 \times S \quad (4)$$

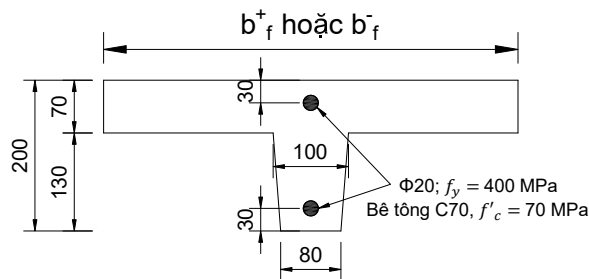
$$S_w^- = 1220 + 0,25 \times S \quad (5)$$

trong đó b_f^+ là bề rộng cánh chữ T khi tính sức kháng mô men dương, b_f^- là bề rộng cánh chữ T khi tính sức kháng mô men âm, S_w^+ là bề rộng dải bản có hiệu khi chịu hoạt tải trong trường hợp tính mô men dương, S_w^- là bề rộng dải bản có hiệu khi chịu hoạt tải trong trường hợp tính mô men âm, S là khoảng cách giữa các dầm chủ, S_s là khoảng cách giữa các sườn ngang.



Hình 4. Cắt một dải của bản sườn mỏng để khảo sát

Công thức (2) đến (5) chỉ ra rằng bề rộng có hiệu của dầm T khi tính sức kháng của bản sườn phụ thuộc vào khoảng cách của các dầm chủ cũng như khoảng cách giữa các dầm ngang trong bản sườn mỏng. Ở nghiên cứu này, dầm chữ T cắt ra từ dải bản sườn mỏng có kích thước mặt cắt ngang như Hình 5. Bản sườn mỏng khảo sát sử dụng cốt thép CB400-V với đường kính $\varnothing 20$ có cường độ chảy $f_y = 400$ MPa được bố trí cả phía trên và phía dưới của dầm (sườn ngang trong bản sườn mỏng). Khoảng cách từ biên trên và biên dưới tới trọng tâm cốt thép trên và cốt thép dưới là 30 mm. Bê tông HPC sử dụng là bê tông cấp 70 (C70) có cường độ chịu nén bằng 70 MPa. Khảo sát với trường hợp khoảng cách giữa các dầm chủ (S) là 2 m, khoảng cách giữa các sườn dọc bằng khoảng cách giữa các sườn ngang (S_s) và bằng 500 mm. Từ $S = 2$ m và $S_s = 500$ mm, tính toán bề rộng cánh có hiệu theo công thức (2) và (3) cho kết quả $b_f^+ = 440$ mm và $b_f^- = 425$ mm.

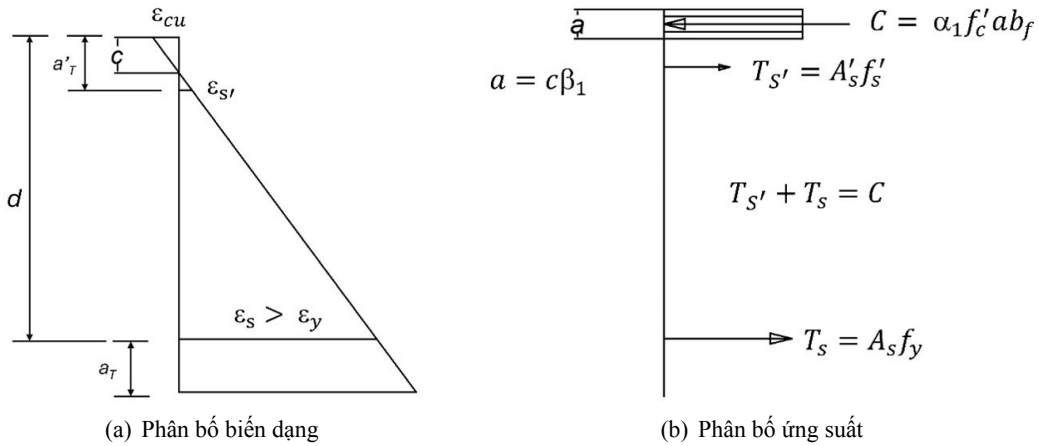


Hình 5. Mặt cắt sườn ngang của bản sườn mỏng HPC khảo sát

4.3. Khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng khảo sát theo các tiêu chuẩn hiện hành

a. Khả năng kháng mô men dương

Đối với tiết diện sườn ngang trình bày ở Hình 5, khi tính sức kháng mô men dương, cốt thép biên dưới là cốt thép chịu kéo và được giả thiết đạt tới chảy trong quá trình tính toán. Tương tự, bê tông phía trên sẽ chịu nén và đạt tới giá trị cực hạn ϵ_{cu} trước khi bị phá hoại do uốn. Cốt thép phía trên sẽ chịu nén nếu nằm bên trên trục trung hòa và sẽ chịu kéo nếu nằm phía dưới trục trung hòa. Ứng suất trong cốt thép biên trên phụ thuộc vào biến dạng của nó ngay trước thời điểm bị phá hoại do uốn.



Hình 6. Biểu đồ phân bố biến dạng và ứng suất với giả thiết trục trung hòa đi qua cánh và nằm phía trên cốt thép biên trên

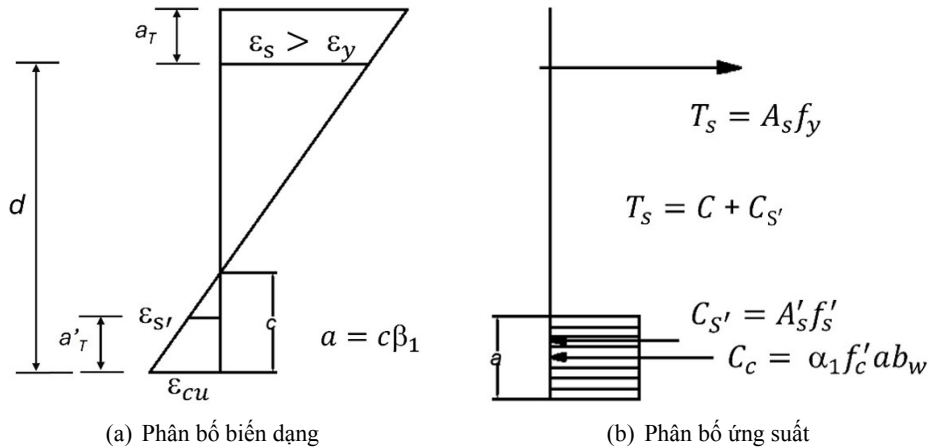
Dựa vào tính toán sơ bộ điều kiện cân bằng lực, ở bài toán này trục trung hòa đi qua cánh chữ T của sườn ngang và nằm phía trên cốt thép biên trên. Biểu đồ phân bố biến dạng và ứng suất tại mặt cắt tiết diện được thể hiện trên Hình 6. Từ điều kiện tương thích về biến dạng và cân bằng lực, chiều cao vùng chịu nén và sức kháng uốn của tiết diện được xác định. Kết quả tính sức kháng mô men dương của tiết diện sườn ngang của bản sườn mỏng HPC khảo sát theo các tiêu chuẩn ACI 318-19, AASHTO 2017 và tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 được thể hiện trên Bảng 4.

b. Khả năng kháng mô men âm

Đối với tiết diện sườn ngang trình bày ở Hình 5, khi tính sức kháng mô men âm, cốt thép biên trên là cốt thép chịu kéo và được giả thiết đạt tới chảy trong quá trình tính toán. Bê tông ở phía dưới chịu nén và đạt tới giá trị cực hạn ϵ_{cu} trước khi bị phá hoại do uốn. Cốt thép phía dưới nếu nằm trong vùng chịu nén của bê tông sẽ tham gia chịu nén và sẽ tham gia chịu kéo nếu nằm ngoài vùng chịu nén của bê tông và không nằm ở vị trí trục trung hòa. Ứng suất trong cốt thép biên dưới phụ thuộc vào biến dạng của nó ngay trước thời điểm bị phá hoại do uốn. Trường hợp cốt thép phía dưới nằm đúng vị trí trục trung hòa, biến dạng của nó bằng 0 và cốt thép này sẽ không tham gia chịu kéo hay nén.

Đối với bài toán tính sức kháng mô men âm, giả thiết trục trung hòa đi qua sườn của tiết diện chữ T và nằm phía trên cốt thép biên dưới. Biểu đồ phân bố biến dạng và ứng suất tại mặt cắt tiết diện được thể hiện trên Hình 7. Chiều cao vùng chịu nén được xác định từ điều kiện cân bằng lực và tương thích về biến dạng. Nếu $c > a'_T$, giả thiết ban đầu đó là trục trung hòa đi qua sườn và nằm phía trên cốt thép biên dưới là đúng. Ứng suất trong cốt thép biên dưới sẽ được xác định từ biến dạng thực tế của cốt thép biên dưới. Trường hợp kết quả tính chiều cao vùng chịu nén $c < a'_T$, giả thiết ban đầu là sai. Khi đó trục trung hòa vẫn đi qua sườn nhưng nằm ở phía dưới cốt thép biên dưới. Khi đó, chiều cao vùng chịu nén c sẽ tiếp tục được xác định dựa trên giả thiết mới đến khi điều kiện tương thích

về biến dạng và điều kiện cân bằng lực được thỏa mãn. Kết quả tính sức kháng mô men âm của tiết diện sườn ngang của bản sườn mỏng HPC khảo sát theo các tiêu chuẩn ACI 318-19, AASHTO 2017 và tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 được thể hiện trên Bảng 5. Cần được chú thích rằng bề rộng sườn trung bình từ biên dưới dầm tới cốt thép dọc biên dưới sườn có giá trị bằng 82 cm. Do vậy, $b_w \approx 82$ mm được sử dụng trong tính toán này.



Hình 7. Biểu đồ phân bố biến dạng và ứng suất với giả thiết trục trung hòa đi qua sườn và nằm phía trên cốt thép biên dưới

Bảng 4. Kết quả tính toán sức kháng uốn mô men dương của bản sườn mỏng theo các tiêu chuẩn hiện hành

Biến số	Tiêu chuẩn Eurocode 2	Tiêu chuẩn ACI 318-19	Tiêu chuẩn AASHTO 2017	Tiêu chuẩn TCVN 11823:2017
f'_c (MPa)	70	70	70	70
b_f (mm)	440	440	440	440
a'_T (mm)	30	30	30	30
a_T (mm)	30	30	30	30
A_s (mm ²)	314,2	314,2	314,2	314,2
A'_s (mm ²)	314,2	314,2	314,2	314,2
f_y (MPa)	400	400	400	400
E_s (GPa)	200	200	200	200
α_1	0,90	0,85	0,85	0,85
β_1	0,75	0,65	0,65	0,65
ϵ_{cu}	0,0027	0,003	0,003	0,003
c (mm)	12,08	14,77	14,77	14,77
a (mm)	9,06	9,60	9,60	9,60
$T_{s'}$ (kN)	125,60	125,66	125,66	125,66
T_s (kN)	125,60	125,66	125,66	125,66
j_s (mm)	165,47	165,47	165,47	165,47
j'_s (mm)	25,47	25,47	25,47	25,47
M_n^+ (kNm)	23,98	23,93	23,93	23,93

Bảng 5. Kết quả tính toán sức kháng uốn mô men âm của bản sườn mỏng theo một số tiêu chuẩn hiện hành

Biến số	Tiêu chuẩn Eurocode 2	Tiêu chuẩn ACI 318-19	Tiêu chuẩn AASHTO 2017	Tiêu chuẩn TCVN 11823:2017
f'_c (MPa)	70	70	70	70
b_w (mm)	82	82	82	82
a'_T (mm)	30	30	30	30
a_T (mm)	30	30	30	30
A_s (mm ²)	314,16	314,16	314,16	314,16
A'_s (mm ²)	314,16	314,16	314,16	314,16
f_y (MPa)	400	400	400	400
E_s (GPa)	200	200	200	200
α_1	0,90	0,85	0,85	0,85
β_1	0,75	0,65	0,65	0,65
ε	0,0027	0,003	0,003	0,003
c (mm)	31,00	33,47	33,47	33,47
a (mm)	23,25	21,75	21,75	21,75
$C_{s'}$ (kN)	5,48	24,86	24,86	24,86
C_c (kN)	120,12	106,14	106,14	106,14
$j_{s'}$ (mm)	140,00	140,00	140,00	140,00
j_c (mm)	158,37	159,12	159,12	159,12
M_n^- (kNm)	19,79	19,62	19,62	19,62

c. Nhận xét kết quả

Kết quả tính sức kháng mô men uốn dương và âm thể hiện trên Bảng 4 và Bảng 5 cho thấy mặc dù có những giá thiết khác nhau về kích thước của khối ứng suất chịu nén cũng như biên dạng cực hạn của bê tông tại thời điểm bị phá hủy, việc sử dụng các tiêu chuẩn khác nhau như Eurocode 2, ACI 318-19, AASHTO 2017 hay TCVN 11823:2017 để tính sức kháng uốn của bản sườn mỏng HPC đều cho kết quả tương tự với độ sai khác rất nhỏ (< 0,01%).

Kết quả tính toán cho thấy đối với sườn ngang có mặt cắt dạng chữ T với các thông số chi tiết như Hình 5, bản có sức kháng mô men dương lớn hơn sức kháng mô men âm (khoảng 20%). Nguyên nhân là do bề rộng bản cánh đã góp phần thu hẹp chiều cao vùng chịu nén dẫn tới việc cánh tay đòn được tăng lên, từ đó tăng sức kháng uốn cho tiết diện. Ngược lại, bề rộng sườn có kích thước nhỏ hơn đáng kể so với bề rộng cánh có hiệu của mặt cắt sườn ngang dạng chữ T làm tăng chiều cao vùng chịu nén dẫn tới việc giảm cánh tay đòn khi tính sức kháng uốn. Với tiết diện khảo sát, việc thay đổi khoảng cách giữa các sườn ngang, khoảng cách giữa các dầm chủ sẽ làm thay đổi bề rộng có hiệu của bản cánh, từ đó thay đổi sức kháng uốn của tiết diện. Tương tự, việc thay đổi hàm lượng cốt thép cũng như cường độ bê tông sẽ làm thay đổi khả năng kháng uốn của tiết diện. Các đại lượng này sẽ được khảo sát tại Mục 4.4.

4.4. Các tham số ảnh hưởng tới khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng

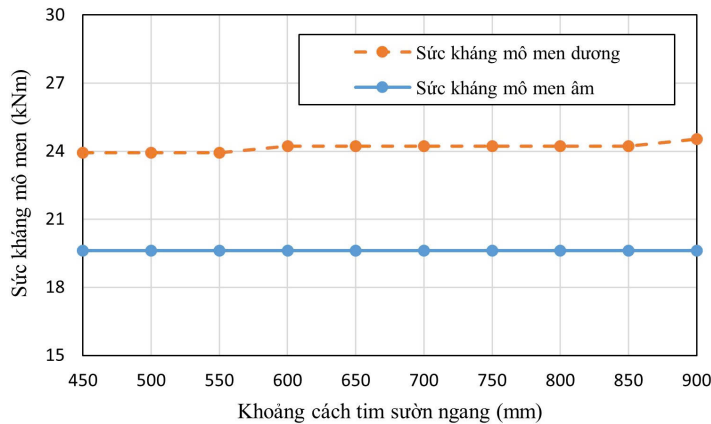
Như đã trình bày ở Mục 4.2 và 4.3, việc sử dụng các tiêu chuẩn khảo sát trong nghiên cứu này không làm thay đổi kết quả tính toán sức kháng mô men của bản sườn mỏng HPC. Do vậy, Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 11823:2017 sẽ được sử dụng để khảo sát các tham số ảnh hưởng tới khả năng chịu uốn của bản sườn mỏng HPC có các thông số như trên Hình 5.

a. Khoảng cách giữa các dầm ngang

Dựa vào các kích thước khuyến nghị của FHWA, bản sườn mỏng lắp ghép bao gồm các sườn dọc và các sườn ngang với khoảng cách các sườn trong khoảng 450 đến 900 mm. Tại mục này, ảnh hưởng của khoảng cách các sườn ngang tới sức kháng mô men của bản sườn mỏng sẽ được khảo sát. Với khoảng cách giữa các dầm chủ giữ nguyên bằng 2 m, khoảng cách các sườn ngang thay đổi từ 450 đến 900 mm với bước thay đổi là 50 mm, bề rộng có hiệu của bản cánh trên khi chịu mô men âm và mô men dương thay đổi. Kết quả tính bề rộng có hiệu của bản cánh trên được thể hiện trên Bảng 6. Sự thay đổi sức kháng mô men dương và mô men âm theo sự biến thiên của khoảng cách các sườn được thể hiện trên Hình 8.

Bảng 6. Bề rộng cánh có hiệu theo sự biến thiên của khoảng cách tim sườn

	Khoảng cách giữa các tim sườn ngang, S_s (mm)									
	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
b_f^+ (mm)	440	440	440	587	587	587	587	587	587	880
b_f^- (mm)	425	425	425	567	567	567	567	567	567	850

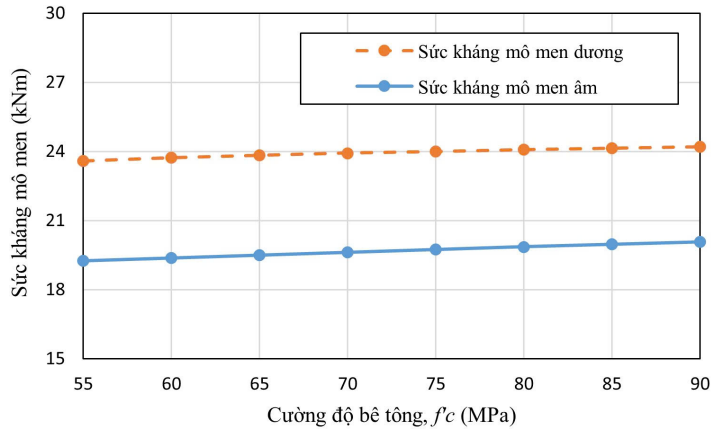


Hình 8. Sức kháng mô men của bản sườn mỏng theo sự thay đổi khoảng cách các sườn ngang

Có thể thấy trên Hình 8, sức kháng mô men âm không thay đổi trong khi có sự thay đổi nhỏ (tăng khoảng 2,5%) về sức kháng mô men dương khi khoảng cách sườn ngang thay đổi từ 450 đến 900 mm. Nguyên nhân dẫn tới sự bất biến về sức kháng mô men âm là bản cánh trên của dầm chịu kéo và biên dưới (phần sườn) chịu nén sự thay đổi bề rộng bản cánh có hiệu không làm thay đổi vị trí trục trung hòa, do vậy sức kháng mô men âm không thay đổi. Trong khi đó, khoảng cách sườn có tác động đến bề rộng bản cánh trên tính toán. Khi tính sức kháng chịu mô men dương, một phần bản cánh trên nằm trong vùng chịu nén, khi bề rộng bản cánh trên tăng lên dẫn tới chiều cao vùng chịu nén bị thu hẹp lại để đảm bảo điều kiện cân bằng về lực dẫn tới cánh tay đòn tăng và sức kháng uốn tăng. Tuy nhiên, kết quả trên Hình 8 cho thấy việc thay đổi khoảng cách sườn không tác động nhiều đến sức kháng mô men trong bản sườn mỏng.

b. Cường độ bê tông

Để khảo sát ảnh hưởng của cường độ bê tông đến khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC, cường độ bê tông được thay đổi từ 55 đến 90 MPa. Khoảng cường độ bê tông khảo sát nằm trong khoảng cường độ của bê tông cường độ cao theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [10]. Sức kháng mô men dương và mô men âm với sự thay đổi cường độ bê tông được biểu thị trên Hình 9.

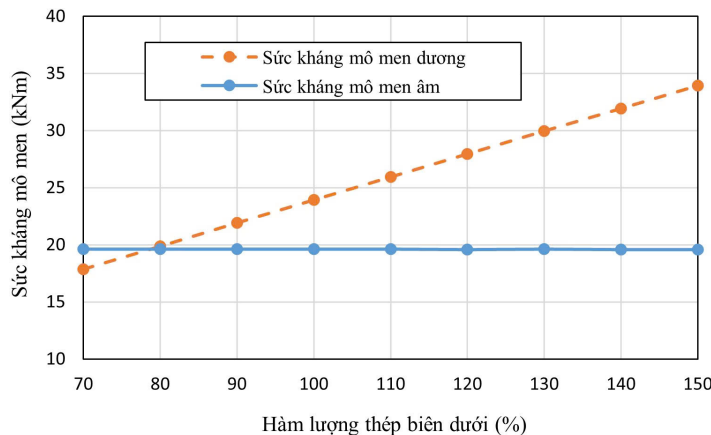


Hình 9. Sức kháng mô men của bản sườn mỏng với sự thay đổi cường độ bê tông

Kết quả tính sức kháng mô men với sự thay đổi cường độ bê tông trên Hình 9 cho thấy có một sự tăng nhẹ sức kháng mô men dương (khoảng 2,5%) của bản sườn mỏng khi cường độ bê tông tăng từ 55 đến 90 MPa (cường độ của bê tông HPC). Tương tự, khi cường độ bê tông tăng từ 55 tới 90 MPa, sức kháng mô men âm tăng khoảng 4%. Lý do cho sự tăng nhẹ sức kháng mô men đó là khi cường độ bê tông tăng dẫn tới chiều cao vùng chịu nén giảm, cánh tay đòn tăng và sức kháng tăng. Tuy nhiên, kết quả khảo sát ảnh hưởng của cường độ bê tông đến khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC cho thấy dù cường độ bê tông tăng từ 55 đến 90 MPa, sự thay đổi về sức kháng mô men dương và mô men âm của bản sườn mỏng khảo sát tương đối nhỏ (< 5%).

c. Hàm lượng cốt thép

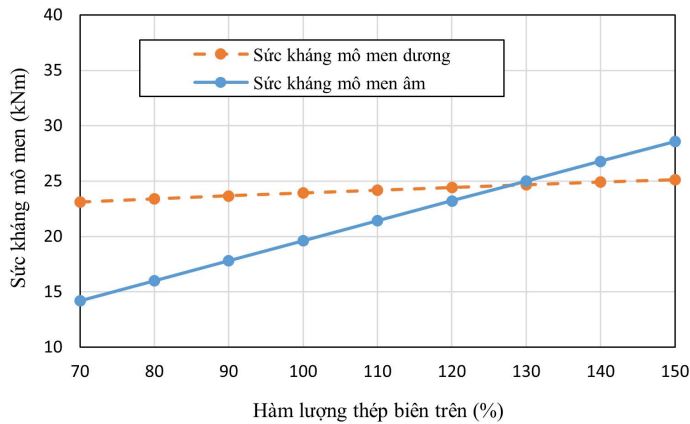
Bản sườn mỏng đang khảo sát có cả cốt thép đặt biên trên và biên dưới với đường kính cốt thép bằng 20 mm có diện tích cốt thép $A_s = A'_s = 314,16 \text{ mm}^2$. Để khảo sát sự ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến sức kháng mô men của bản sườn mỏng, hàm lượng cốt thép biên trên, biên dưới và cả biên trên lẫn biên dưới sẽ được thay đổi. Hình 10 biểu thị kết quả tính sức kháng mô men dương và mô men âm khi diện tích cốt thép thay đổi từ 70 đến 150% so với hàm lượng cốt thép ban đầu. Với diện tích cốt thép thay đổi từ 70 đến 150%, hàm lượng cốt thép sử dụng vẫn nằm trong giới hạn về hàm lượng cốt thép tối thiểu và cốt thép tối đa theo tiêu chuẩn TCVN 11823:2017. Cần được chú thích rằng, hàm lượng cốt thép tối đa trong tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 được không chế thông qua việc khống chế tỷ số chiều cao vùng chịu nén và chiều cao có hiệu của tiết diện (c/d).



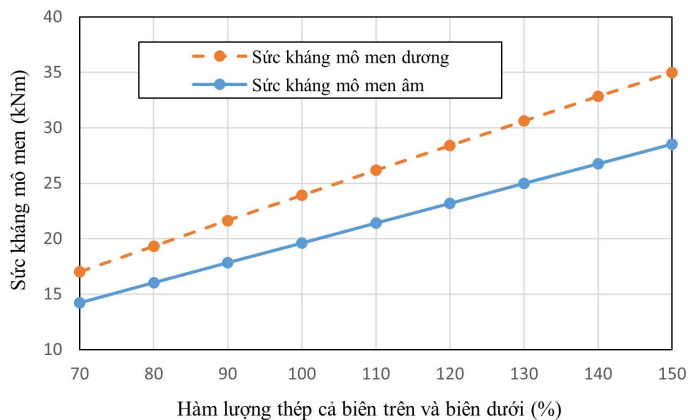
Hình 10. Sức kháng mô men của bản sườn mỏng theo sự thay đổi diện tích cốt thép biên dưới

Có thể thấy trên Hình 10, khi hàm lượng thép biên dưới tăng, sức kháng mô men âm thay đổi không đáng kể (0,22%) trong khi sức kháng mô men dương tăng đáng kể (90%). Nguyên nhân là do đối với sức kháng mô men dương, cốt thép biên dưới là cốt thép chịu kéo, do vậy tăng lượng diện tích cốt thép sẽ dẫn tới tăng tổng lực kéo và tăng sức kháng uốn cho tiết diện. Ngược lại, việc tăng diện tích cốt thép biên dưới không ảnh hưởng nhiều đến sức kháng mô men âm vì thép biên dưới nằm trong vùng chịu nén của sườn ngang. Tại thời điểm bị phá hoại do uốn âm, ứng suất tính toán của cốt thép biên dưới khá nhỏ dẫn tới ứng suất trong thép biên dưới nhỏ. Do vậy, tổng lực nén do cốt thép biên dưới tương đối nhỏ hơn so với tổng lực nén của bê tông dẫn tới việc thay đổi sức kháng mô men âm không đáng kể khi thay đổi hàm lượng thép biên dưới.

Hình 11 thể hiện sức kháng mô men tính toán của bản sườn mỏng khi diện tích thép biên trên thay đổi từ 70 đến 150% diện tích cốt thép ban đầu. Có thể thấy rằng, khi tăng diện tích cốt thép biên trên, cả sức kháng mô men âm và mô men dương cùng tăng. Tuy nhiên, khi sức kháng mô men âm tăng đến 100%, sức kháng mô men dương chỉ tăng 8,5%. Điều này có thể giải thích bằng việc khi tính sức kháng mô men âm thì cốt thép biên trên là cốt thép chịu kéo và đạt tới ứng suất chảy ở trạng thái giới hạn. Do vậy, diện tích cốt thép biên trên tăng dẫn tới tổng lực kéo và sức kháng mô men âm tăng. Khi tính sức kháng mô men dương, theo tính toán, cốt thép phía trên cũng nằm trong vùng chịu kéo và đạt tới chảy. Tuy nhiên, do khoảng cách từ cốt thép biên trên tới trọng tâm vùng chịu nén (điểm lấy mô men) nhỏ, mặc dù lực kéo tại cốt thép biên trên tăng, sức kháng mô men do sự đóng góp của cốt thép biên trên không nhiều.



Hình 11. Sức kháng mô men của bản sườn mỏng theo sự thay đổi diện tích cốt thép biên trên



Hình 12. Sức kháng mô men của bản sườn mỏng theo sự thay đổi hàm lượng cốt thép cả biên trên và biên dưới

Hình 12 trình bày sự thay đổi về sức kháng mô men âm và mô men dương khi diện tích cốt thép của cả biên trên và biên dưới đều thay đổi so với diện tích ban đầu. Có thể thấy rằng, khi diện tích cốt thép cả biên trên và biên dưới đều tăng, sức kháng mô men dương và mô men âm đều tăng. Tuy nhiên có thể nhận thấy sự tăng sức kháng mô men dương nhiều hơn so với sức kháng mô men âm (105 so với 100%). Nguyên nhân là do khi tính sức kháng mô men dương, kết quả tính toán cho thấy cốt thép biên trên và biên dưới đều nằm trong vùng chịu kéo và đạt tới giới hạn chảy. Trong khi đó, khi tính sức kháng mô men uốn âm, cốt thép biên dưới nằm trong vùng chịu nén và tại trạng thái giới hạn, biến dạng trong cốt thép biên dưới vẫn nhỏ. Do vậy, sự đóng góp vào sức kháng uốn âm của cốt thép biên dưới nhỏ hơn so với sự đóng góp vào sức kháng uốn dương của cốt thép biên trên.

5. Kết luận

Một cấp phối bê tông đã được đề xuất để đánh giá khả năng chế tạo bê tông cường độ cao C70 từ nguồn vật liệu tại Việt Nam. Các thí nghiệm xác định đặc trưng cơ học như thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông đã được tiến hành. Khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC với cường độ C70 đã được tính toán dựa trên một số tiêu chuẩn hiện hành. Các tham số ảnh hưởng tới khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC đã được khảo sát. Thông qua kết quả thí nghiệm và tính toán, một số kết luận sau được rút ra:

- Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén cho thấy mẫu bê tông đạt cường độ 70 MPa. Các kết quả cường độ chịu kéo thông qua thí nghiệm ép chế và mô đun đàn hồi của bê tông chỉ ra rằng thí nghiệm đều cho kết quả về cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi lớn hơn giá trị dự đoán bởi Eurocode 2. Quy trình đổ mẫu và thí nghiệm xác định cường độ bê tông cho thấy khả năng chế tạo và ứng dụng bê tông C70 trong thực tế với các vật liệu địa phương.

- Kết quả tính sức kháng mô men dương và mô men âm của bản sườn mỏng HPC cho thấy, mặc dù có sự khác nhau về giả thiết về kích thước của khối ứng suất chữ nhật tương đương và biến dạng cực hạn của bê tông giữa tiêu chuẩn Eurocode 2 và các tiêu chuẩn của Mỹ (ACI 318-19, AASHTO 2017) hay tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 11823:2017 (được biên soạn dựa trên tiêu chuẩn của AASHTO 2014), không có sự khác nhau nhiều về kết quả tính toán sức kháng của bản sườn mỏng HPC khảo sát khi sử dụng các tiêu chuẩn này (< 0,01%). Do vậy, hoàn toàn có thể sử dụng bất cứ một trong bốn tiêu chuẩn khảo sát để tính toán khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC.

- Thông qua việc khảo sát các tham số ảnh hưởng tới sức kháng uốn của bản sườn mỏng HPC, kết quả tính toán cho thấy trong khi khoảng cách giữa các sườn ngang, khoảng cách giữa các dầm chủ hay cường độ bê tông gần như không ảnh hưởng tới sức kháng mô men của bản sườn mỏng thì hàm lượng cốt thép có tác động lớn tới khả năng kháng uốn của bản sườn mỏng HPC. Kết quả tính toán chỉ ra rằng, sức kháng mô men uốn dương có thể tăng đến 90% khi diện tích cốt thép biên dưới tăng từ 70 đến 150% diện tích cốt thép ban đầu. Tương tự, sức kháng mô men uốn âm tăng đến 100% khi diện tích cốt thép biên trên bằng từ 70 đến 150% diện tích cốt thép của $\varnothing 20$. Kết quả tính toán đã định lượng hóa được tác dụng của việc tăng diện tích cốt thép tới sức kháng uốn của bản sườn mỏng sử dụng bê tông cường độ cao.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo với mã số đề tài B2023-XDA-02.

Tài liệu tham khảo

- [1] Toutlemonde, F., Resplendino, J., Sorelli, L., Bouteille, S., Brisard, S. (2005). Innovative design of ultra high-performance fiber reinforced concrete ribbed slab: experimental validation and preliminary detailed analyses. *7th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Washington DC (USA)*, 1187–1206.

- [2] Aaleti, S., Sritharan, S. (2014). [Design of ultrahigh-performance concrete waffle deck for accelerated bridge construction](#). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2406(1):12–22.
- [3] Ghasemi, S., Mirmiran, A., Xiao, Y., Mackie, K. (2016). [Novel UHPC-CFRP waffle deck panel system for accelerated bridge construction](#). *Journal of Composites for Construction*, 20(1).
- [4] Saleem, M. A., Mirmiran, A., Xia, J., Mackie, K. (2015). [Experimental characterization of ultrahigh-performance concrete bridge deck system](#). *Journal of Bridge Engineering*, 20(9).
- [5] Honarvar, E., Sritharan, S., Matthews Rouse, J., Aaleti, S. (2016). [Bridge decks with precast UHPC waffle panels: A field evaluation and design optimization](#). *Journal of Bridge Engineering*, 21(1).
- [6] Shao, X., Deng, L., Cao, J. (2019). [Innovative steel-UHPC composite bridge girders for long-span bridges](#). *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(4):981–989.
- [7] Zhu, J.-S., Wang, Y.-G., Yan, J.-B., Guo, X.-Y. (2020). [Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck](#). *Composite Structures*, 234:111678.
- [8] Aaleti, S., Petersen, B., Sritharan, S. (2013). *Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections*. Federal Highway Administration (FHWA), United States.
- [9] Kachlakev, D. I., Miller, T. H., Potisuk, T., Yim, S. C., Chansawat, K. (2001). *Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates*. Report for Oregon Department Of Transportation. Research Group.
- [10] Zhang, S. S., Wang, J. J., Lin, G., Yu, T., Fernando, D. (2023). [Stress-strain models for ultra-high performance concrete \(UHPC\) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete \(UHPFRC\) under triaxial compression](#). *Construction and Building Materials*, 370:130658.
- [11] Lee, I. (2002). *Complete stress-strain characteristics of high performance concrete*. New Jersey Institute of Technology.
- [12] Momin, A. I., Khadirnaikar, R. B., Zende, A. A. (2021). [Flexural strength and behavioral study of high-performance concrete beams using stress-block parameters](#). *International Journal of Engineering*, 34(11): 2557–2565.
- [13] EN-1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures. In Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels.
- [14] ACI 318 (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute.
- [15] AASHTO (2017). *AASHTO LRFD bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [16] TCVN 11823:2017. *Thiết kế Cầu Đường bộ*. Bộ Khoa học Công nghệ.
- [17] TCVN 3105:2022. *Hỗn hợp bê tông và bê tông - lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*. Bộ Khoa học Công nghệ.