

**NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA
BẢN SÀN BÊ TÔNG CỐT THÉP LOẠI DẦM ĐƯỢC GIA CƯỜNG
LỚP BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG UHPC**

NUMERICAL SIMULATION FOR ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF ONE-WAY REINFORCED CONCRETE SLABS STRENGTHENED WITH AN ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE LAYER

LÊ HOÀNG LONG^{a,*}, NGUYỄN VĂN TÚ^b, MAI VIỆT CHINH^b

^aHệ quản lý học viên đào tạo sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự

^bViện Kỹ thuật CTĐB, Học viện Kỹ thuật Quân sự;

*Tác giả đại diện: Email: lehoanglong@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận 07/03/2025, Ngày sửa 19/03/2025, Chấp nhận 25/03/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol1-8>

Tóm tắt: Nghiên cứu hiện tại đánh giá khả năng chịu lực của bản sàn bê tông cốt thép thường (BTT) được gia cường bằng lớp bê tông siêu tính năng (UHPC). Các mô phỏng số được sử dụng để xác định khả năng chịu tải lớn nhất, sự hình thành và phát triển của vết nứt trong kết cấu bản sàn được gia cường. Mô hình số được kiểm chứng thông qua việc so sánh với kết quả từ thực nghiệm. Các phân tích tham số mở rộng được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp gia cường UHPC, hàm lượng cốt thép dọc trong vùng chịu kéo đến khả năng chịu lực của bản sàn liên hợp. Kết quả cho thấy, lớp gia cường UHPC giúp cải thiện 34% khả năng chịu uốn lớn nhất so với trường hợp bản sàn bê tông cốt thép thông thường.

Từ khóa: Bê tông, bê tông siêu tính năng, khả năng chịu lực, mô phỏng số, bản sàn liên hợp.

Abstract: The current study evaluates the load-bearing capacity of a conventional reinforced concrete (RC) slab strengthened with an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) layer. Numerical simulations are used to determine the maximum load capacity, crack formation, and crack propagation in the reinforced slab strengthen structure. The numerical model is validated by comparing its results with experimental data. Parametric analyses are conducted to assess the influence of the UHPC layer thickness and the longitudinal reinforcement content in the tensile region on the load-bearing capacity of the composite slab. The results show that the UHPC layer enhances the slab's performance, improving the maximum bending capacity by 34% and the cracking load capacity by 41% compared to a conventional reinforced concrete slab.

Keywords: Concrete, Ultra-High Performance Concrete (UHPC), loading capacity, numerical simulation, composite slab.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, nhu cầu nâng cao khả năng chịu lực và độ bền của các kết cấu bê tông cốt thép thường (BTT) trong lĩnh vực xây dựng đã thúc đẩy các nghiên cứu về các vật liệu mới và các phương pháp gia cường hiện đại [1-3]. Bê tông siêu tính năng (UHPC), một loại bê tông có cường độ nén tối thiểu 120 MPa [4]. UHPC đã được chứng minh là một vật liệu vượt trội, với khả năng chịu nén và chịu kéo cao, độ bền môi tốt, và khả năng kiểm soát nứt hiệu quả [5-7]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc bổ sung lớp UHPC trong kết cấu bê tông thường có thể cải thiện đáng kể tính năng cơ học của hệ kết cấu. Bằng phương pháp thực nghiệm, Sun et al. (2024) [8] đã chỉ ra rằng lớp UHPC bố trí trong vùng nén của bản sàn BTT giúp cải thiện độ cứng và khả năng chịu uốn tổng thể, đồng thời giảm thiểu sự phát triển của vết nứt nhờ tính dẻo và cường độ nén cao của UHPC. Habel [9] và cộng sự đã chứng minh tính hiệu quả của việc thay thế lớp bê tông bề mặt bằng lớp UHPC dày 3 cm trên mặt sàn công trình cầu, giúp ngăn chặn sự xuống cấp đáng kể của kết cấu. Nghiên cứu của Paschalis và Hor [10, 11] cũng đã chứng minh rằng UHPC không chỉ giúp kiểm soát chiều rộng và khoảng cách của vết nứt mà còn tăng độ bền của cấu kiện, từ đó nâng cao tuổi thọ của công trình. Các nghiên cứu thực nghiệm khác của Al-Osta [12] và Hussein [13-15] cho thấy lớp UHPC khi kết hợp với các phương pháp chuẩn bị bề mặt và sử dụng liên kết hiệu quả có thể giúp tăng độ bền của bề mặt tiếp xúc giữa UHPC và kết cấu chính, qua đó cải thiện khả năng chịu lực của hệ liên hợp. Tuy nhiên, kết quả từ nghiên cứu của Yin [16] chỉ ra rằng độ dày lớp UHPC, tỷ lệ cốt thép, và đặc điểm liên kết giữa UHPC và lớp bê tông thường vẫn cần được tối ưu hóa để đạt hiệu quả cao nhất.

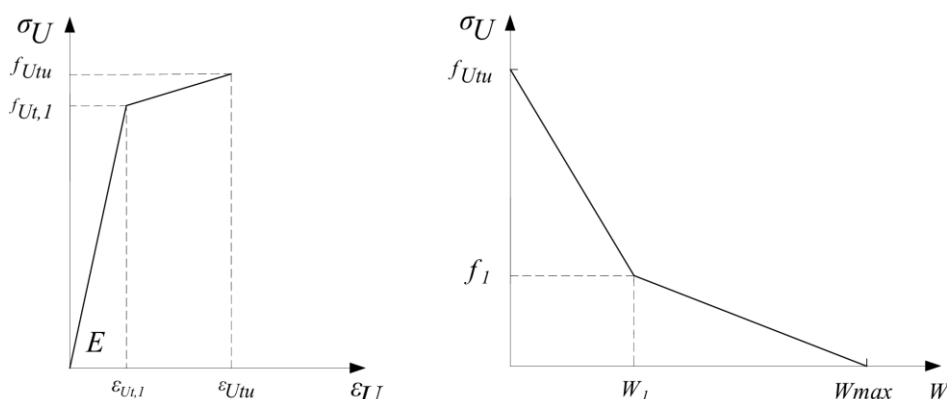
Tại Việt Nam, số lượng nghiên cứu về gia cường kết cấu bê tông cốt thép thường, sử dụng UHPC còn khiêm tốn. Có thể kể đến trong đó đề tài nghiên cứu giải pháp kết cấu lắp ghép sử dụng bê tông UHPC

cho công trình xây dựng trên đảo do Viện Khoa học công nghệ xây dựng (IBST) chủ trì hay dự án giải pháp cải tạo mặt cầu Thăng Long (Hà Nội) bằng UHPC [17, 18]. Một số nghiên cứu khác đáng chú ý có thể được kể đến bao gồm [5, 19]. Cần thêm nhiều nghiên cứu, nhất là trong lĩnh vực mô phỏng số để phân tích ứng xử của kết cấu bê tông thường được gia cường bằng UHPC. Từ đó mang lại nhiều hiểu biết quan trọng, đặc biệt trong việc dự báo khả năng chịu tải của các cấu kiện chịu tác động của tải trọng uốn và cắt. Bài báo hiện tại sẽ sử dụng phương pháp mô phỏng số để phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lực, sự hình thành, phát triển vết nứt của bản sàn bê tông thường được gia cường bằng UHPC. Trong đó lớp UHPC được đặt trong vùng chịu nén của cấu kiện. Các kết quả đạt được giúp bổ sung các kiến thức quan trọng liên quan đến lĩnh vực gia cường kết cấu ứng dụng các loại vật liệu tiên tiến. Đồng thời, nghiên cứu cũng đưa ra các kiến nghị quan trọng để việc gia cường đạt được hiệu quả cao nhất về mặt chịu lực.

2. Phương pháp tính toán theo mô phỏng số

Phương pháp mô phỏng số có nhiều ưu điểm hơn so với các phương pháp tính toán truyền thống. Mô phỏng số cho phép phân tích đa dạng các kịch bản của kết cấu, điều mà cách tiếp cận thực nghiệm không thể bao quát hết. Ngoài ra, mô phỏng số cung cấp các thông số chi tiết về phân bố ứng suất và biến dạng trong kết cấu. Một ưu điểm khác của phương pháp này là tiết kiệm chi phí và thời gian. Để thiết lập được mô hình số mô phỏng số khả năng chịu uốn của kết cấu UHPC, cần phải xác định được đường cong ứng suất biến dạng của vật liệu.

Mối quan hệ ứng suất – biến dạng khi kéo của UHPC là một mô hình 2 giai đoạn, như được minh họa trên hình 1 [20]. Ứng xử sau khi nứt liên quan đến chiều rộng của vết nứt. Để đơn giản hóa trong tính toán, mối quan hệ ứng suất-biến dạng khi kéo của UHPC được thể hiện qua phương trình 1.



Hình 1. Mối quan hệ ứng suất, biến dạng khi kéo của UHPC

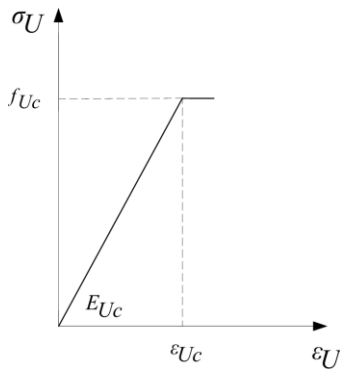
$$\sigma_{U(\varepsilon)} = \begin{cases} f_{Utu}(\varepsilon_1 - 0,85\varepsilon - 0,15\varepsilon_{Utu}) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_{Utu}) & \varepsilon_{Utu} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ 0,15\varepsilon_{Utu}(\varepsilon_2 - \varepsilon) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) & \varepsilon \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_2 \\ 0 & \varepsilon > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (1)$$

Ở đây f_{Utu} là ứng suất kéo cực đại của UHPC; ε là biến dạng khi kéo của UHPC; ε_1 là biến dạng kéo tương ứng với điểm phi tuyến của đường cong ứng suất UHPC, với $\varepsilon_1 = w/Leq$; ε_2 là biến dạng kéo lớn nhất của UHPC, $\varepsilon_2 = w_{max}/Leq$; Leq là khoảng cách của vết nứt. Các giá trị thể của Leq được tham khảo từ tài liệu [20].

Đường cong ứng suất - biến dạng nén của UHPC áp dụng mô hình song tuyến tính, được coi là đàn hồi trước khi đạt đến cường độ nén cực đại.

Sau đó ứng suất bước vào giai đoạn chảy dẻo. Mối quan hệ cấu thành của nó được thể hiện trong hình 2 và theo công thức 2.

Ưu điểm của đường cong ứng suất, biến dạng khi kéo và nén của UHPC được đề cập trong hình 1 và 2 là đơn giản trong tính toán, mặc dù có xét đến tính phi tuyến của vật liệu. Tuy nhiên, các đường cong này chưa thể hiện rõ giai đoạn đi xuống của đường cong ứng suất – biến dạng, nhất là với trường hợp chịu nén. Từ đó, việc đánh giá sự phá hoại của kết cấu UHPC sẽ gặp khó khăn.



Hình 2. Mối quan hệ ứng suất, biến dạng khi nén của UHPC

$$\sigma_{U(\epsilon)} = \begin{cases} E_{Uc} \epsilon_U & \epsilon_U < \epsilon_{Uc} \\ f_{Uc} & \epsilon_U \geq \epsilon_{Uc} \end{cases} \quad (2)$$

Ở đây ϵ_{Uc} là biến dạng nén cực đại của UHPC.

3. Thực hành tính toán cấu kiện sàn BTT gia cường bằng UHPC theo phương pháp mô phỏng

Trong mục này, kết cấu bản sàn liên hợp UHPC- BTT sẽ được xây dựng để phân tích ứng xử cũng như khả năng chịu uốn của cấu kiện. Để đảm bảo mô hình số có đủ độ tin cậy để thực hiện các nghiên cứu tham số mở rộng, cần phải tiến hành kiểm chứng mô hình dựa trên việc so sánh với các nghiên cứu thực nghiệm.

3.1 Lựa chọn mô hình từ thực nghiệm

Bảng 1. Thông số vật liệu thép thanh dùng trong thí nghiệm của Sun [8]

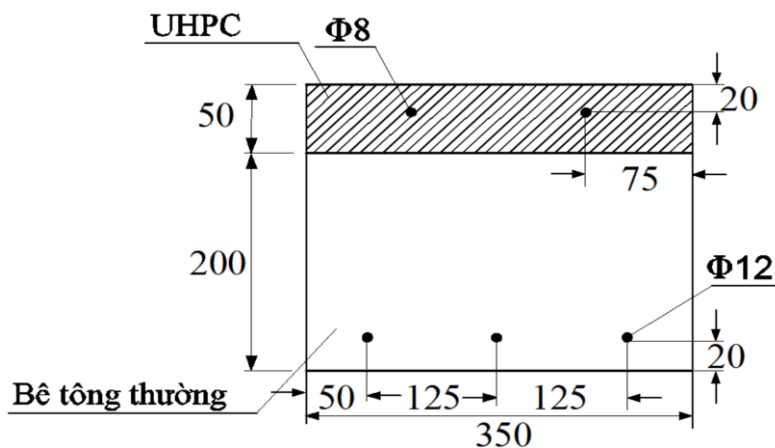
Tên cấu kiện	Loại thép sử dụng	Mô đun đàn hồi E_s (MPa)	Cường độ chảy dẻo của thép (MPa)	Cường độ kéo đứt (MPa)
B1-F	HRB400	206e3	507.5	702.5

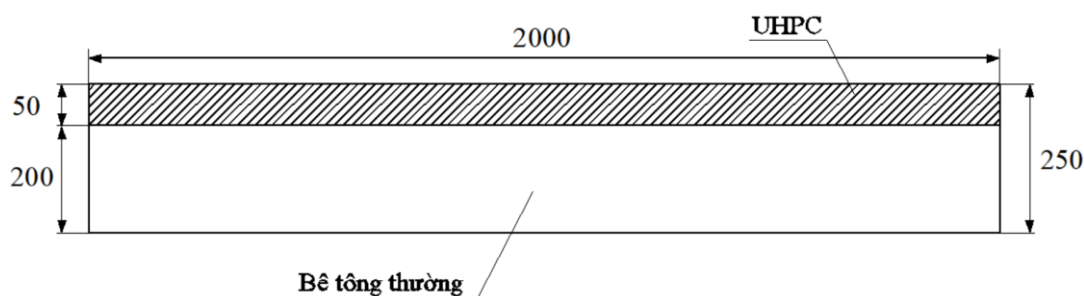
Bảng 2. Thông số vật liệu bê tông dùng trong thí nghiệm của Sun [8]

Tên cấu kiện	Loại bê tông	Mô đun đàn hồi E_c (MPa)	Cường độ nén (MPa)	Cường độ kéo (MPa)
B1-F	UHPC	47600	122,8	11,3
	BTT	34500	43,6	2,8

Nghiên cứu thực nghiệm của Sun và đồng nghiệp [8] được lựa chọn cho mục đích xác minh độ tin cậy của mô hình số. Nghiên cứu của Sun nhằm kiểm tra khả năng chịu uốn của bản sàn bê tông thường được gia cường bằng UHPC. Sàn liên hợp có mặt cắt ngang 350×250 mm và chiều dài 2000 mm. Trong đó lớp UHPC được bố trí ở vùng chịu nén có chiều dày 50mm, được tăng cường bằng 2 ϕ 8. Bản sàn bê tông thường có chiều dày 200mm

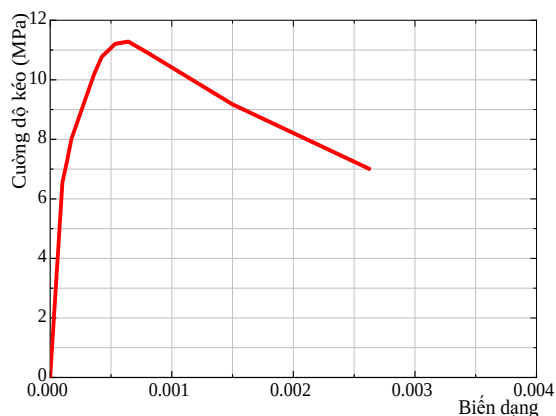
được gia cường bằng 3 ϕ 12. Chi tiết cấu tạo cho bản sàn liên hợp trong thí nghiệm của Sun được thể hiện trên Hình 3. Bản sàn được thí nghiệm đến trạng thái phá hoại dưới thí nghiệm uốn bốn điểm. Các thông số về vật liệu của kết cấu được thể hiện trên Bảng 1 và Bảng 2. Trong đó, cường độ chịu nén đặc trưng tối thiểu 122,8 MPa của bê tông áp dụng trên mẫu trụ 110x220 mm, thỏa mãn điều kiện là bê tông siêu tính năng [21-24].



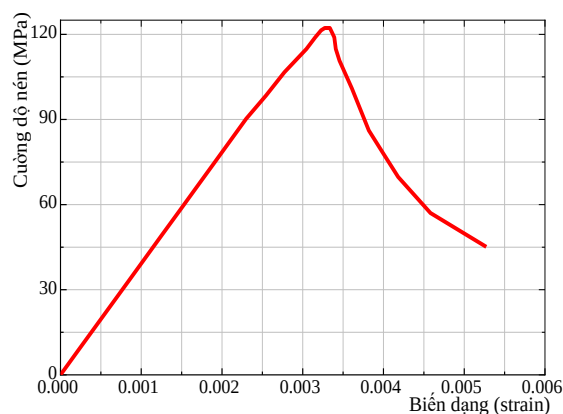


Hình 3. Chi tiết mặt cắt ngang và dọc bản sàn liên hợp UHPC-BTT trong thử nghiệm của Sun [8]

3.2 Xây dựng mô hình mô phỏng số



(a) Khi kéo

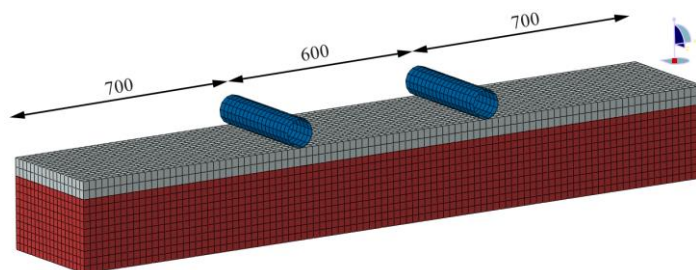


(b) Khi nén

Hình 4. Đường cong ứng suất biến dạng khi kéo và nén của UHPC

Phần mềm Abaqus Explicit được lựa chọn để xây dựng mô phỏng số bản sàn bê tông thường gia cường bằng UHPC. Mô hình kết hợp giữa lý thuyết dẻo và lý thuyết cơ học phá hủy (Concrete Damaged Plasticity - CDP) được xem là một trong những mô hình phù hợp nhất để nắm bắt hành vi phi tuyến của vật liệu bê tông [25]. Lý thuyết và công thức của mô hình CDP có thể được tham khảo

trong tài liệu [26, 27]. Trong Abaqus [28], mô hình CDP được triển khai thông qua các tham số có sẵn cho bê tông thường và bê tông UHPC. Hình 4 minh họa đường cong ứng suất, biến dạng của UHPC khi kéo và nén dùng trong mô phỏng. Trong đó, ứng suất kéo lớn nhất của UHPC là 11,3 MPa tại giá trị biến dạng $6.4E^{-4}$, ứng suất nén lớn nhất là 122,8 MPa tại giá trị biến dạng 0,00334.



Hình 5. Mô hình mô phỏng 3D của bản sàn liên hợp UHPC-BTT

Mô hình mô phỏng 3D của bản sàn liên hợp UHPC được xây dựng dựa trên số liệu từ nghiên cứu thực nghiệm của Sun [8], như được thể hiện trên hình 5. Cấu kiện được thử nghiệm dưới chế độ uốn bốn điểm. Trong mô hình Abaqus, phần tử 3D tích hợp giảm tuyến tính (C3D8R), được chọn để mô hình hóa bê tông. Phần tử thanh tuyến tính 3D (T3D2) chỉ bao gồm ứng suất kéo và nén trong

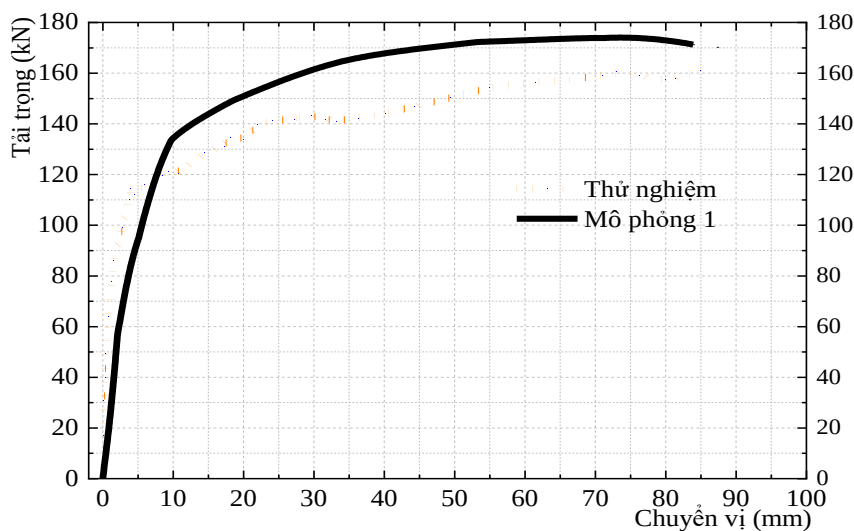
phần tử, được sử dụng để mô hình hóa cốt thép. Việc lựa chọn kích thước phần tử được đánh giá thông qua phân tích hội tụ lưới, trong đó các mô hình với kích thước phần tử khác nhau (20mm, 12mm, 10mm và 8mm) được phân tích. Sau đó được so sánh về độ chính xác. Kết quả cho thấy với kích thước phần tử 10 mm, mô hình đạt được sự hội tụ, tức là sai số giữa các bước lưới nhỏ hơn

không đáng kể so với các kích thước nhỏ hơn, trong khi vẫn tối ưu hóa được thời gian phân tích. Điều kiện biên được thực hiện với mô hình dầm đơn giống như trong thử nghiệm. Theo các nghiên cứu [13, 29, 30], sự liên kết bề trên bề mặt của UHPC-BTT khi được xử lý tạo nhám bề mặt trước khi đổ bê tông lớp gia cường UHPC đảm bảo điều kiện chịu lực và không cần thêm bất kì neo liên kết nào. Phương pháp này được Sun và cộng sự áp dụng cho thí nghiệm trên. Do đó, trong mô phỏng, liên kết bề mặt UHPC-BTT được giả thiết là dạng liên kết 'Tie', nghĩa là không có sự trượt giữa hai bề mặt cấu kiện UHPC và bê tông thường. Liên kết này phù hợp với sự làm việc thực tế trong mô hình thí nghiệm của Sun [8]. Ngoài ra, tương tác Tie có thể được dùng để ngăn cản chuyển vị thẳng, chuyển vị xoay, cũng như làm cho các bậc tự do khác trên các cặp mặt tiếp xúc bằng nhau. Khi đó, một mặt sẽ là mặt chính "Master surface" và mặt còn lại là mặt phụ thuộc "Slave surface". Tương tác này được dùng để mô tả sự tiếp xúc giữa hai loại bê tông khác nhau bao gồm bê tông và các gối tựa thép. Tương tác Tie không cho phép các phần tử xâm

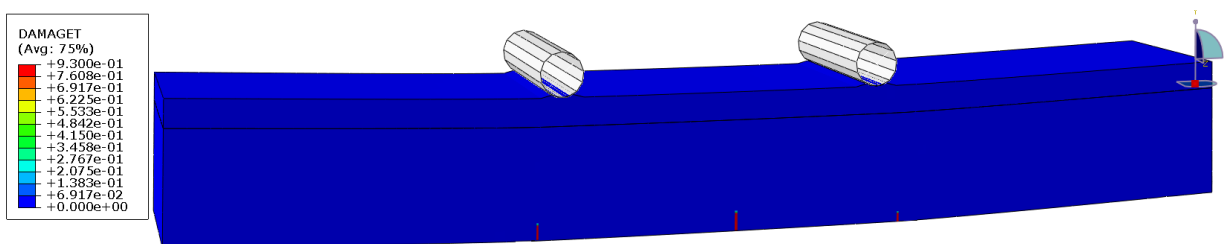
nhập vào nhau nên tránh được hiện tượng phá hoại cục bộ tại bề mặt tiếp xúc.

3.3 Kiểm chứng mô hình mô phỏng số

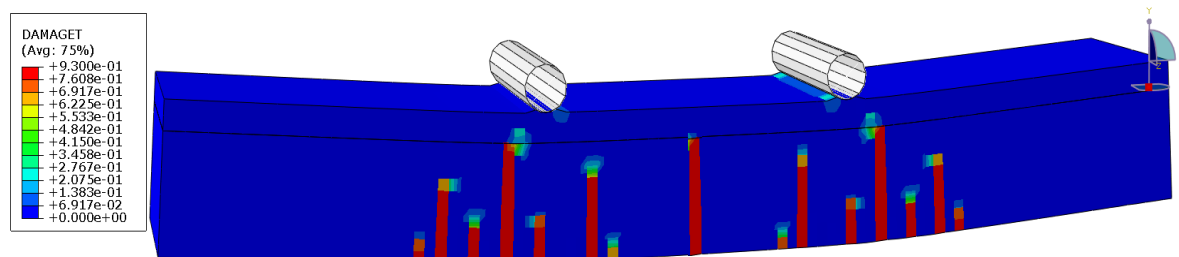
Từ đồ thị hình 6, có thể thấy đường cong tải trọng, độ võng của cấu kiện vẫn tuân theo quy luật của cấu kiện chịu uốn thông thường, bao gồm các giai đoạn điển hình: tuyến tính, phi tuyến, chảy dẻo và sau đó là phá hoại. Trong thí nghiệm của Sun và đồng nghiệp, khi tải trọng tăng lên 60 kN, vết nứt đầu tiên bắt đầu xuất hiện ở giữa nhịp. Giá trị này trong mô phỏng là 68,4 kN, như minh họa trên hình 7. Ngoài ra, quan sát qua mô phỏng cho thấy, trong giai đoạn đầu của quá trình gia tải, chế độ phát triển vết nứt trong mẫu vật tương tự như của tấm bê tông thông thường. Tuy nhiên, khi vết nứt phát triển đến giao diện giữa UHPC và bê tông thường, nó có xu hướng dừng lại (Hình 8). Tiếp tục tăng tải trọng, chỉ một số vết nứt nhỏ xuất hiện trong lớp UHPC. Chiều rộng vết nứt và chiều cao vết nứt nhỏ hơn đáng kể so với trong cấu kiện bê tông thường. Kết quả này chứng minh rằng lớp UHPC giúp hạn chế đáng kể sự hình thành và phát triển vết nứt trong cấu kiện liên hợp.



Hình 6. So sánh đường cong tải trọng của bản sàn liên hợp UHPC-BTT theo thí nghiệm của Sun [8] và theo mô phỏng



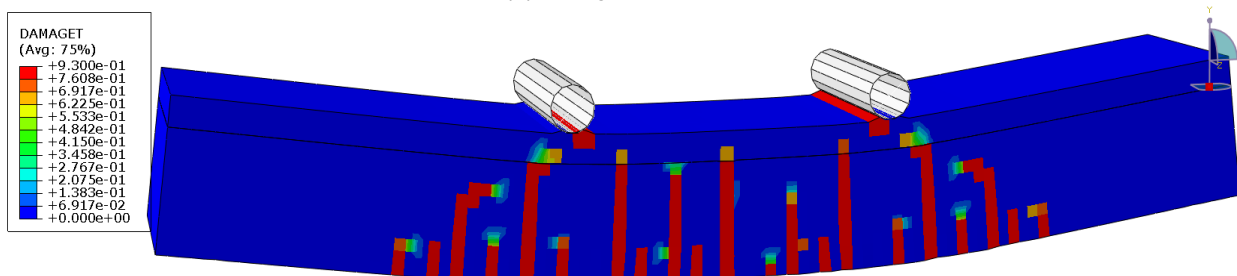
Hình 7. Vết nứt đầu tiên trong mô phỏng bản sàn liên hợp UHPC-BTT tại tải trọng 68,4 kN



Hình 8. Sự phát triển vết nứt trong giai đoạn chảy dẻo



(a) Thí nghiệm của Sun

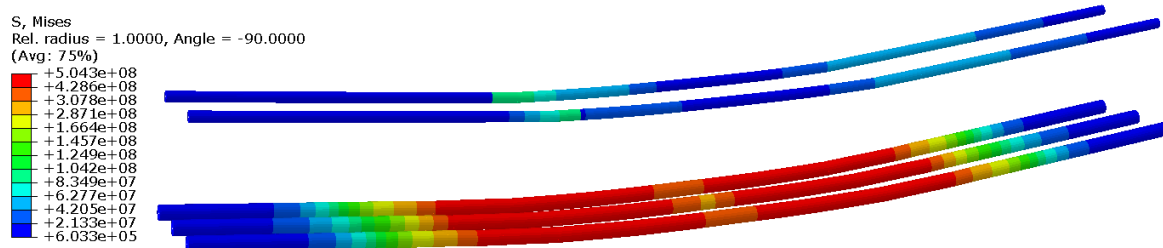


(b) Theo mô phỏng

Hình 9. Mô hình phá hoại của bản sàn liên hợp UHPC-BTT tại tải trọng lớn nhất theo thực nghiệm và mô phỏng

Hình 9 thể hiện mô hình vết nứt của bản sàn liên hợp theo thực nghiệm và mô phỏng. Có thể thấy, tại thời điểm này, có nhiều vết nứt lớn được hình thành tại vị trí giữa nhịp của dầm, trong đó chiều cao vết nứt bắt đầu từ mặt dưới của lớp bê tông thường, kéo dài đến vị trí lớp gia cường UHPC. Mô hình và dạng vết nứt từ thực nghiệm và mô phỏng cho thấy sự tương

đồng. Hình 10 thể hiện giá trị ứng suất của cốt thép vùng chịu nén và chịu kéo của bản sàn liên hợp. Giá trị ứng suất của thanh thép ở mặt dưới vùng chịu kéo của dầm, trong tiết diện bê tông thường đã đạt tới trạng thái chảy dẻo ($5.04e^8$ Pa), trong khi ứng suất trong cốt thép thanh ở phần chịu nén UHPC chưa đạt đến trạng thái chảy dẻo.



Hình 10. Minh họa ứng suất trong cốt thép (Pa)

Bảng 3. Kết quả so sánh giữa thực nghiệm của Sun [8] và mô phỏng số

Trường hợp nghiên cứu	Tải trọng gây nứt P_n (kN)	Tải trọng lớn nhất P_{max} (kN)	Độ võng tại P_{max} (mm)
Thực nghiệm (a)	60	161	85
Mô phỏng số (b)	68.4	174.3	75.8
Chênh lệch (b)/(a)	1.14	1.08	0.9

Bảng 3 tóm tắt các kết quả đạt được từ mô phỏng và thực nghiệm. Vì thực nghiệm của Sun không cung cấp giá trị độ võng ứng với tải trọng gây nứt, nên không có cơ sở so sánh kết quả độ võng tại tải trọng gây nứt P_n . Chênh lệch lớn nhất tại giá trị tải trọng gây nứt theo mô phỏng và thực nghiệm là 14%. Các giá trị tải trọng lớn nhất P_{max} và độ

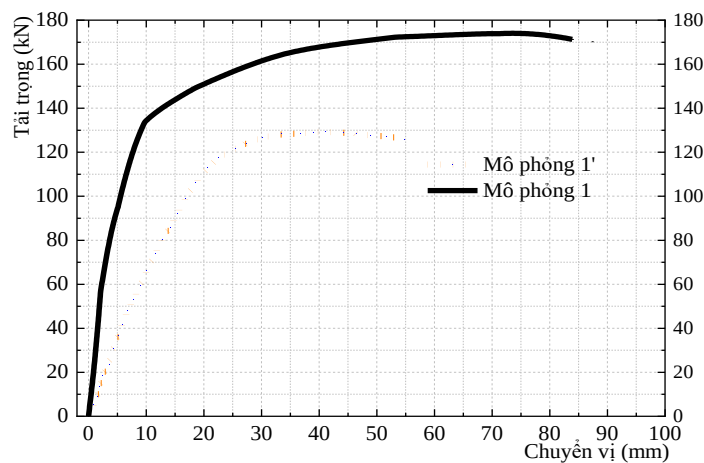
võng tương ứng với P_{max} cho thấy mức chênh lệch nhỏ hơn. Từ các kết quả đạt được, có thể thấy mô hình mô phỏng đảm bảo độ tin cậy để thực hiện các nghiên cứu tham số mở rộng.

3.4 Nghiên cứu tham số mở rộng

3.4.1 Vai trò gia cường của tấm UHPC

Bảng 4. Các thông số dùng trong trường hợp mô phỏng MP1 và MP1'

Trường hợp	Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều dày tổng cộng (mm)	Chiều dày lớp UHPC (mm)	Chiều dày lớp BTT (mm)	Cốt thép chịu kéo	Hàm lượng cốt thép
MP1'	2000	350	250	0	250	3Φ12	0,42%
MP1	2000	350	250	50	200	3Φ12	0,42%



Hình 11. So sánh đường cong tải trọng – độ võng của cầu kiện trong 2 trường hợp có gia cường UHPC và không gia cường UHPC

Hình 11 thể hiện đường cong tải trọng độ võng của bản sàn bê tông thường được gia cường bằng lớp UHPC (Mô phỏng 1 – MP1) và không được gia cường bằng UHPC (Mô phỏng 1' - MP1'). Các thông số dùng trong mô phỏng được thể hiện như trên bảng 4. Cả hai tiết diện có cùng chiều cao, bố trí cốt thép như nhau. Có thể thấy mặc dù cả 2 đường cong với hai trường hợp mô phỏng đều tuân theo quy luật của cầu kiện chịu uốn thông thường, tuy

niên đường cong với trường hợp MP1 cho thấy giai đoạn chảy dẻo lớn hơn đáng kể so với trường hợp MP1'. Bảng 5 so sánh kết quả tải trọng theo hai trường hợp có gia cường và không gia cường UHPC. Mức độ chênh lệch giữa tải trọng gây nứt và tải trọng phá hoại lớn nhất lần lượt là 41% và 34%. Từ các kết quả đạt được, có thể thấy rõ vai trò của việc gia cường lớp UHPC trong kết cấu sàn chịu uốn thông thường.

Bảng 5. Kết quả so sánh theo hai trường hợp mô phỏng có gia cường UHPC (MP1) và không gia cường UHPC (MP1')

Trường hợp nghiên cứu	Tải trọng gây nứt P_n (kN)	Tải trọng lớn nhất P_{max} (kN)
Mô phỏng số MP1'	48,2	129,2
Mô phỏng số MP1	68,4	174,3
Chênh lệch (MP1/ MP1')	1,41	1,34

3.4.2 Ảnh hưởng của chiều dày lớp gia cường UHPC

Để nghiên cứu ảnh hưởng chiều dày lớp gia cường UHPC đến khả năng chịu uốn của bản sàn

bê tông cốt thép thường, sáu trường hợp mô phỏng số đã được phân tích. Số liệu đầu vào của các mô hình này được thể hiện như trên bảng 6. Trong đó,

kích thước chiều dài, chiều rộng và chiều dày tổng cộng của mặt cắt liên hợp được giữ nguyên. Chiều dày lớp UHPC tăng từ 0 đến 125 mm. Ngược lại,

chiều dày lớp bê tông thường giảm từ 250 mm xuống 125 mm. Hàm lượng cốt thép chịu kéo trong các cấu kiện giống nhau là 0,42% (3Φ12).

Bảng 6. Ảnh hưởng của chiều dày lớp gia cường UHPC đến khả năng chịu uốn của sàn bê tông cốt thép

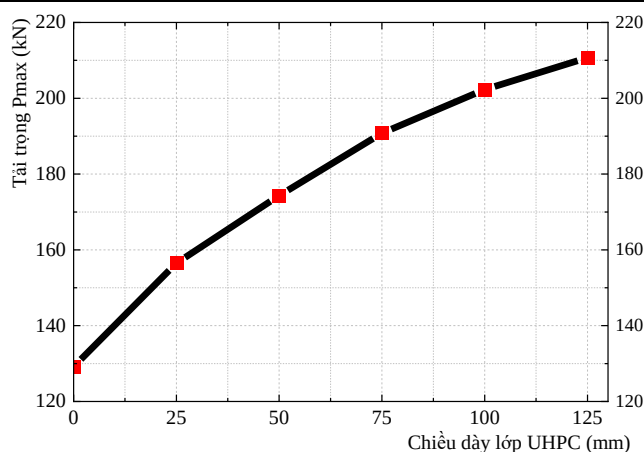
Trường hợp	Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều dày tổng cộng (mm)	Chiều dày lớp UHPC (mm)	Chiều dày lớp BTT (mm)	Cốt thép chịu kéo	Hàm lượng cốt thép	Tải trọng đỉnh P _{max} (kN)
MP1'	2000	350	250	0	250	3Φ12	0,42%	129,2
MP1''	2000	350	250	25	225	3Φ12	0,42%	156,5
MP1	2000	350	250	50	200	3Φ12	0,42%	174,3
MP2	2000	350	250	75	175	3Φ12	0,42%	190,8
MP3	2000	350	250	100	150	3Φ12	0,42%	202,3
MP4	2000	350	250	125	125	3Φ12	0,42%	210,7

Bảng 7 và hình 12 thể hiện ảnh hưởng của chiều dày lớp gia cường UHPC đến khả năng chịu tải trọng lớn nhất P_{max} trong mô hình uốn 4 điểm của bản sàn liên hợp UHPC-BTT. Có thể thấy, trong giai đoạn đầu, mức độ gia tăng khả năng chịu tải của bản sàn liên hợp đạt mức tăng lớn khi chiều dày lớp gia cường UHPC thay đổi từ 0 đến 75 mm (bằng 43% chiều dày lớp bê tông thường). Mức tăng này đạt được là 47,7%. Tuy nhiên khi chiều dày lớp UHPC thay đổi từ 75 mm lên 125 mm (bằng chiều

đầy lớp bê tông thường), mức tăng khả năng chịu lực của bản sàn liên hợp chỉ đạt 10,4 %. Các kết quả này thể hiện việc tăng chiều dày lớp UHPC nên được giới hạn ở một nửa chiều dày của lớp bê tông thường. Trong nghiên cứu hiện tại chiều dày lớp UHPC bằng 1/4 chiều dày lớp bê tông thường mang lại hiệu quả cao nhất về mặt chịu lực. UHPC là một loại vật liệu có chi phí cao hơn đáng kể so với bê tông thường. Việc tối ưu hóa tiết diện gia cường sẽ giúp giảm đáng kể chi phí xây dựng.

Bảng 7. Mức gia tăng tải trọng đỉnh khi thay đổi chiều dày lớp gia cường UHPC

Trường hợp	Chiều dày tổng cộng (mm)	Chiều dày lớp UHPC (mm)	Chiều dày lớp BTT (mm)	Tải trọng đỉnh P _{max} (kN)	Chênh lệch
MP1'	250	0	250	129.2	//
MP1''	250	25	225	156.5	1.21 (MP1''/ MP1')
MP1	250	50	200	174.3	1.11 (MP1/ MP1'')
MP2	250	75	175	190.8	1.09 (MP2/ MP1)
MP3	250	100	150	202.3	1.06 (MP3/ MP2)
MP4	250	125	125	210.7	1.04 (MP4/ MP3)



Hình 12. Đồ thị quan hệ chiều dày lớp gia cường UHPC và khả năng chịu uốn của bản sàn liên hợp

3.4.3 Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo

Để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo đến khả năng chịu uốn của bản sàn liên hợp UHPC-BTT, năm trường hợp mô hình số đã

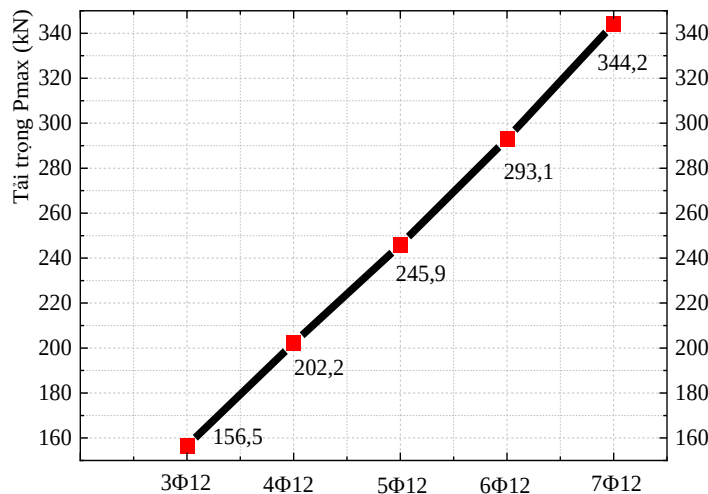
được phân tích, như thể hiện trên Bảng 8. Hàm lượng cốt thép dọc được tăng cường từ 3Φ12 đến 7Φ12, tương ứng với mức tăng từ 0,42% đến 0,98%. Chiều dày lớp UHPC được thay đổi từ 25 mm lên 125 mm.

Bảng 8. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo đến khả năng chịu lực của bản sàn liên hợp UHPC-BTT

Trường hợp	Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều dày tổng cộng (mm)	Chiều dày lớp UHPC (mm)	Chiều dày lớp BTT (mm)	Cốt thép chịu kéo	Hàm lượng cốt thép	Tải trọng đỉnh P_{max} (kN)
MP1"	2000	350	250	25	225	3Φ12	0.42	156.5
MP5	2000	350	250	50	200	4Φ12	0.56	202.2
MP6	2000	350	250	75	175	5Φ12	0.96	245.9
MP7	2000	350	250	100	150	6Φ12	0.84	293.1
MP8	2000	350	250	125	125	7Φ12	0.98	344.2

Bảng 9. Mức gia tăng tải trọng đỉnh khi thay đổi hàm lượng thép dọc chịu kéo

Trường hợp	Chiều dày tổng cộng (mm)	Chiều dày lớp UHPC (mm)	Chiều dày lớp BTT (mm)	Cốt thép chịu kéo	Tải trọng đỉnh P_{max} (kN)	Mức gia tăng
MP1"	250	25	225	3Φ12	156.5	//
MP5	250	50	200	4Φ12	202.2	1,29(MP5/MP1")
MP6	250	75	175	5Φ12	245.9	1,22 (MP6/MP5)
MP7	250	100	150	6Φ12	293.1	1,19 (MP7/MP6)
MP8	250	125	125	7Φ12	344.2	1,17 (MP8/MP7)



Hình 13. Đồ thị quan hệ hàm lượng cốt thép dọc và khả năng chịu uốn của bản sàn liên hợp

Bảng 9 và hình 13 thể hiện ảnh hưởng của việc thay đổi hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo đến khả năng chịu tải trọng của bản sàn liên hợp. Có thể thấy, kết hợp với việc thay đổi chiều dày lớp gia cường UHPC, việc tăng hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo giúp tăng cường đáng kể khả năng chịu lực của bản sàn liên hợp. Chẳng hạn, với trường hợp MP1", tải trọng lớn nhất trong sơ đồ uốn 4 điểm là 156,5 kN đã tăng lên 344,2 kN, tương ứng là 199% khi chiều dày lớp gia cường UHPC tăng từ 25 mm lên 125 mm và cốt thép dọc từ 3Φ12 đến

7Φ12. Ngoài ra, với mỗi cấp độ thay đổi chiều dày lớp UHPC kết hợp với tăng số lượng thép dọc, khả năng chịu lực của bản sàn liên hợp cũng tăng từ 17% đến 29%. Rõ ràng, việc tăng đồng thời chiều dày lớp UHPC và hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo đem lại hiệu quả đáng kể về mặt gia cường.

4. Kết luận và kiến nghị

Bài báo thông qua phương pháp mô phỏng số đã đánh giá ảnh hưởng của việc gia cường bản sàn bê tông cốt thép thường bằng vật liệu UHPC. Mô

hình số được kiểm chứng thông qua so sánh với kết quả từ thực nghiệm. Các kết luận có thể được rút ra như sau:

- Bản sàn bê tông cốt thép thường được gia cường bằng lớp UHPC tuân theo quy luật của cấu kiện chịu uốn thông thường. Trong mô phỏng số, giả thiết bề mặt giữa UHPC và bê tông thường là liên kết không có hiện tượng trượt cho kết quả phân tích sát với thực nghiệm;

- Nghiên cứu hiện tại chỉ ra rằng việc gia cường lớp UHPC giúp tăng 34% khả năng chịu tải trọng uốn lớn nhất của kết cấu sàn bê tông cốt thép thường. Ngoài ra, lớp gia cường UHPC giúp hạn chế sự hình thành và phát triển vết nứt trong cấu kiện. Chiều dày gia cường bằng 1/4 chiều dày lớp bê tông thường đem lại hiệu quả tối ưu về mặt chịu lực;

- Cốt thép dọc trong vùng chịu kéo có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn của cấu kiện bản sàn liên hợp. Việc gia cường kết cấu sàn bê tông cốt thép thường cần kết hợp cả việc tăng chiều dày lớp UHPC đồng thời với việc tăng hàm lượng cốt thép dọc trong vùng chịu kéo.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng theo các hướng sau: Tiến hành đối chiếu giá trị biến dạng tỷ đối của bê tông vùng nén và cốt thép thu được từ mô hình số với kết quả thực nghiệm. Trong đó, mở rộng luận giải về cách xác định khả năng chịu lực tối đa của bản sàn từ mô hình số và thực nghiệm, qua đó làm rõ biến dạng tỷ đối của bê tông tại thớ ngoài cùng vùng nén tại thời điểm đổ để hiểu rõ hơn về cơ chế phá hủy. Ngoài ra, nghiên cứu đề xuất một phương pháp tính toán lý thuyết để xác định khả năng chịu lực tới hạn của bản sàn theo tiết diện thẳng góc khi chịu uốn. Điều này sẽ giúp thiết lập các công thức toán học nhằm tối ưu hóa chiều dày của lớp UHPC, hỗ trợ quá trình thiết kế kết cấu hiệu quả hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tiến, T.N. và A.N. Tuấn (2023), *Thí nghiệm xác định modun đàn hồi theo phương dọc và hệ số nở ngang của vật liệu polyme gia cường sợi thủy tinh (GFRP)*. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 74(2): p. 147-159.

[2] Hùng, N.M. và N.n.T. Hiếu (2021), *Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường vai cột bằng tấm sợi composite gốc các bon CFRP*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 15(5V): p. 146-156.

[3] Hùng, H.M. và N.N.T. Hiếu (2021), *Hiệu quả gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi các bon*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 15(1V): p. 102-111.

[4] Akhnoukh, A.K. and C. Buckhalter (2021), *Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges*. Case Studies in Construction Materials, 15: p. e00559.

[5] Việt, H.H.(2023), *Thực nghiệm ứng xử chịu uốn bản bê tông cốt thép được tăng cường bê tông siêu tính năng (UHPC)*. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 74(9): p. 1100-1109.

[6] Nguyễn, N.T. (2024), *Khả năng ứng xử uốn của bê tông tính năng siêu cao sử dụng nguyên vật liệu địa phương*. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng, 14(02): p. 66-Trang 71.

[7] Hưng, C.V., nnk.(2019), *Ứng dụng tấm ván khuôn bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) thi công bản mặt cầu bê tông cốt thép*. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 13(2V): p. 1-12.

[8] Sun, Z., X. Li, and C. Liu (2024), *Study on the Flexural Performance of Ultrahigh-Performance Concrete–Normal Concrete Composite Slabs*. Materials, 17(18): p. 4675.

[9] Brühwiler, E., E. Denarié, and K. Habel (2005). *Ultra-High performance reinforced concrete for advanced rehabilitation of Bridges*. in *Proceedings of the Fib Symposium “Keep Concrete Attractive”*, FIB Symposium, Budapest, Hungary.

[10] Yin, H., W. Teo, and K. Shirai (2017), *Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete*. Construction and Building Materials. 155: p. 463-474.

[11] Paschalis, S.A., A.P. Lampropoulos, and O. Tsioulou (2018), *Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of*

- full scale reinforced concrete members*. Construction and building materials, 186: p. 351-366.
- [12] Al-Osta, M., et al. (2017), *Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 134: p. 279-296.
- [13] Hussein, L. and L. Amleh (2015), *Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members*. Construction and Building Materials, 93: p. 1105-1116.
- [14] Hussein, H.H., et al.(2016), *Interfacial properties of ultrahigh-performance concrete and high-strength concrete bridge connections*. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(5): p. 04015208.
- [15] Hussein, H.H., et al.(2017), *Modeling the shear connection in adjacent box-beam bridges with ultrahigh-performance concrete joints. I: Model calibration and validation*. Journal of Bridge Engineering, 22(8): p. 04017043.
- [16] Yin, H., K. Shirai, and W. Teo (2019), *Numerical model for predicting the structural response of composite UHPC-concrete members considering the bond strength at the interface*. Composite Structures, 215: p. 185-197.
- [17] Áp dụng công nghệ mới sửa chữa mặt cầu Thăng Long. 2024 [cited 2024; Available from: <https://baoxaydung.com.vn/ap-dung-cong-nghe-moi-sua-chua-mat-cau-thang-long-284783.html>].
- [18] *Nghiên cứu giải pháp kết cấu lắp ghép sử dụng bê tông tính năng cao cho công trình xây dựng trên đảo*. 2020.
- [19] Nguyen, N.L., T.D. Pham, and V.H.H. Van Minh Ngo (2023), *Strengthening of shear capacity of bridge steel girder by using ultra high performance concrete: technical solution and numerical analysis*. Transport and Communications Science Journal.
- [20] Han, X. (2018), *Scheme design and performance study of shipborne lidar wind measuring system [Master' s thesis]*. Zhenjiang: Jiangsu University of Science Technology.
- [21] Mishra, O. and S. Singh (2019), *An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 8(2): p. 97-143.
- [22] C1856/C1856M-17, A., *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*. 2017, PA, USA.
- [23] Azreen, N., et al. (2018), *Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass*. Construction and Building Materials, 172: p. 370-377.
- [24] Amran, M., et al. (2022), *Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects*. Construction and Building Materials, 352: p. 129029.
- [25] Szczecina, M. and A.J.P.e. Winnicki (2017), *Relaxation time in CDP model used for analyses of RC structures*. 193: p. 369-376.
- [26] Lee, J. and G.L.J.J.o.e.m. Fenves (1998), *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. 124(8): p. 892-900.
- [27] Lubliner, J., et al.(1989), *A plastic-damage model for concrete*. 25(3): p. 299-326.
- [28] Systèmes, D. (2016), *Abaqus/CAE User's Guide*.
- [29] Prem, P.R. and A.R. Murthy (2016), *Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay*. Construction Building Materials, 123: p. 481-492.
- [30] Tayeh, B.A., et al.(2014), *Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC*. Journal of Adhesion Science Technology, 28(18): p. 1846-1864.