

# MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CĂNG SAU SỬ DỤNG CÁP KHÔNG BÁM DÍNH GIA CƯỜNG BẰNG TẦM CFRP

Huỳnh Thị Kim Phụng<sup>a,b</sup>, Trần Văn Phúc<sup>c</sup>, Nguyễn Minh Long<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,  
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>b</sup>Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>c</sup>Phòng Quản lý đào tạo, Trường Đại học Kiến trúc TP. Hồ Chí Minh,  
số 196 Pasteur, Phường Võ Thị Sáu, Quận 3, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 13/01/2023, Sửa xong 16/3/2023, Chấp nhận đăng 24/3/2023

## Tóm tắt

Bài báo này trình bày một mô hình mô phỏng số dùng để nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông căng sau dùng cáp không bám dính (UPC) gia cường tấm CFRP. Mô hình mô phỏng này có xét đến ứng xử bám dính của tấm gia cường CFRP - bề mặt dầm bê tông và ứng xử tương tác mặt giữa cáp ứng suất trước - ống lồng cáp trong dầm. Thông số khảo sát bao gồm mức độ giảm lực căng cáp (0%, 15% và 30%) và số lớp tấm CFRP gia cường (0, 2 và 4 lớp). Kết quả của mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm của chín dầm từ chương trình thực nghiệm đã được các tác giả tiến hành trước đó. Kết quả kiểm chứng cho thấy mô hình mô phỏng số trong nghiên cứu này có thể dự đoán tốt ứng xử uốn của dầm UPC gia cường tấm CFRP thể hiện qua chênh lệch trung bình giữa mô phỏng và thực nghiệm không vượt quá 4% trong việc dự đoán tải trọng cực hạn, 11% trong dự đoán chuyển vị giữa nhịp dầm và biến dạng của tấm CFRP kháng uốn và 14% trong dự đoán biến dạng kéo tăng thêm của cáp ứng suất trước.

**Từ khóa:** Mô phỏng số (FEM); ứng xử uốn; dầm bê tông căng sau dùng cáp không bám dính (UPC); gia cường; số lớp tấm CFRP; lực căng cáp.

FEM SIMULATION OF UNBONDED PRESTRESSED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY CFRP SHEETS

## Abstract

This paper presents a finite element method (FEM) simulation model on the bending behaviour of unbonded prestressed (UPC) beams strengthened by CFRP sheets. This numerical model took into account the bond-slip behavior between CFRP and concrete as well as the interacting model between the steel tendons and the duct's surface. The investigated parameters were the reduced level of jacking force (0%, 15%, and 30%), and the number of CFRP layers (0, 2, and 4 layers). The simulation results were verified with the experimental results in the author's previous study on nine large-scale UPC beams. According to the comparison results, the simulation model in this study could predict well the bending behavior of UPC beams strengthened with CFRP sheets, as evidenced by the average tolerance between simulation and experiment not exceeding 4% in estimating the maximum load at failure, 11% in estimating the corresponding displacement at mid-span and the tensile strain in CFRP sheets, and 14% in estimating the increase of tensile strain in steel tendons.

**Keywords:** FEM simulation; flexural behaviour; unbonded prestressed concrete beams (UPC); strengthening; number of CFRP sheets; jacking force.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(2V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(2V)-02) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [nguyenminhlong@hcmut.edu.vn](mailto:nguyenminhlong@hcmut.edu.vn) (Long, N. M.)

## 1. Đặt vấn đề

Trong xu thế xây dựng công trình hiện nay, bên cạnh các kết cấu sử dụng vật liệu bê tông cốt thép (BTCT) truyền thống, việc ứng dụng bê tông ứng suất trước (BTUST) đang được phát triển ngày một rộng rãi, đặc biệt là các công trình có những yêu cầu về không gian sử dụng do có ưu điểm lớn về khả năng chịu lực và kiểm soát biến dạng so với cấu kiện BTCT có cùng kích thước tiết diện. Tương tự như kết cấu BTCT, do sự xuống cấp sau một thời gian sử dụng đủ dài hoặc các sự cố gặp trong quá trình khai thác, kết cấu BTUST cũng cần phải được sửa chữa và gia cường nhằm kéo dài tuổi thọ của công trình hoặc chuyển đổi công năng sử dụng của kết cấu với các loại tải trọng có giá trị lớn hơn giá trị thiết kế ban đầu. Một số giải pháp gia cường đã và đang được ứng dụng trong thực tế hiện nay như tăng kích thước tiết diện cấu kiện bằng cách bọc thêm lớp bê tông hoặc BTCT xung quanh tiết diện đã có, bổ sung thêm cốt thép dọc hoặc căng cáp ngoài. Gần đây, phương pháp gia cố dùng vật liệu polyme gia cường sợi (FRP) được đánh giá là một phương pháp hiệu quả bên cạnh các giải pháp truyền thống vừa nêu do tính dễ dàng trong thi công, không ảnh hưởng đến tải trọng bản thân kết cấu, cường độ chịu kéo của tấm FRP cao, bền bỉ và không gây mất mỹ quan [1]. Cho đến thời điểm hiện tại, các nghiên cứu về tấm FRP ứng dụng trên kết cấu BTCT đã rất đầy đủ và phong phú, chứng minh được tính hiệu quả của phương pháp gia cường này trong thực tế [2–6]. Tuy nhiên đối với kết cấu BTUST, các nghiên cứu về hiệu năng gia cường kháng uốn của tấm CFRP trên cấu kiện BTUST chỉ mới được bắt đầu cách đây 15 năm, với số lượng khiêm tốn và hầu hết đều tập trung vào cấu kiện sử dụng cáp bám dính [7–9].

Một cách khách quan, phương pháp thực nghiệm thường được ưa dùng để nghiên cứu ứng xử của kết cấu nói chung và kết cấu BTUST gia cường bằng vật liệu FRP nói riêng do tính trực quan và rõ ràng của nó. Các cấu kiện dùng trong thí nghiệm thường được chế tạo với kích thước tương đương hoặc tỉ lệ với cấu kiện trong thực tế và khảo sát dưới điều kiện tải trọng làm việc tương ứng để phân tích khả năng chịu lực và kiểu phá hoại của cấu kiện. Mặc dù phương pháp này có thể đưa ra kết quả chính xác, phản ánh gần đúng với thực tế nhưng đòi hỏi rất nhiều thời gian và kinh phí. Đối với những cấu kiện lớn cần có quy mô thí nghiệm lớn và máy móc hiện đại. Do đó, việc ứng dụng các tiến bộ của khoa học máy tính để mô phỏng lại bài toán trong thực tế là một hướng đi giúp cho quá trình nghiên cứu trở nên thuận lợi hơn [10]. Nhiều phần mềm tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) như ABAQUS/CAE, ANSYS hay DIANA FEA với giao diện trực quan và tích hợp nhiều mô hình vật liệu, phần tử, liên kết gần đúng với thực nghiệm đã hỗ trợ cho việc nghiên cứu thuận lợi hơn rất nhiều so với trước đây [11].

Đối với cấu kiện BTUST, lực căng trong cáp một mặt giúp làm tăng mạnh khả năng chịu lực và kiểm soát biến dạng của cấu kiện do làm triệt tiêu được phần lớn trọng lượng bản thân của kết cấu nhưng mặt khác nó làm cho cấu kiện BTUST có ứng xử giòn hơn. Điều này dẫn đến số lượng vết nứt của cấu kiện BTUST cũng ít hơn so với của cấu kiện BTCT khi bước vào giai đoạn làm việc sau đàn hồi đến lúc bị phá hoại. Thực tế này dẫn đến tương tác giữa tấm gia cường CFRP với bề mặt bê tông không còn hoàn toàn giống như trong trường hợp BTCT [12]. Hơn nữa, đối với cấu kiện bê tông căng sau dùng cáp không bám dính (UPC), sự không bám dính giữa cáp và bê tông dẫn đến sự làm việc không đồng bộ giữa cáp với bê tông; cho nên, trong trường hợp này, cáp cũng không làm việc tương thích với tấm CFRP gia cường vốn được liên kết chặt với bê tông. Đối với kết cấu dầm BTUST sử dụng cáp bám dính gia cường tấm CFRP, nhiều nghiên cứu mô phỏng đã cho thấy CFRP làm tăng khả năng kháng uốn của dầm và kết quả sát với thực nghiệm đã có trước đó [13, 14]. Đối với các cấu kiện UPC, hầu hết các nghiên cứu mô phỏng số chỉ mới được thực hiện trên cấu kiện không được gia cường CFRP [15–18]. Tuy các mô phỏng trên cho kết quả tiệm cận với thực nghiệm nhưng hầu hết các nghiên cứu bỏ qua ma sát giữa cáp và bê tông trong quá trình làm việc. Trong thực tế, khi mới

bắt đầu gia tải đã có ma sát xuất hiện giữa cáp với bê tông và khi tải tác động tăng lên làm độ võng dầm tăng khiến ma sát tăng theo làm giảm biến dạng của cáp. Để giải quyết vấn đề này, ảnh hưởng của ma sát và sự tuột đầu neo đến tổn hao ứng suất trong cáp không bám dính đã được kể đến trong mô phỏng số của [19]. Kết quả của việc mô phỏng này đưa ra quan hệ lực – chuyển vị của cấu kiện BTUST khá chính xác khi kiểm tra với thực nghiệm.

Trong bối cảnh các hiểu biết về ứng xử của cấu kiện UPC gia cường kháng uốn hầu như còn rất khiêm tốn và việc nghiên cứu thực nghiệm đòi hỏi nguồn kinh phí lớn và tốn thời gian, việc thúc đẩy và thực hiện các mô phỏng bằng phương pháp số cho loại cấu kiện này nhằm bổ sung thêm hiểu biết cho cộng đồng khoa học cũng như các kỹ sư đang làm việc trong lĩnh vực thiết kế là hết sức cần thiết. Bài báo này trình bày một phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn (FEM) ABAQUS để khảo sát ảnh hưởng của sự thay đổi lực căng cáp đến ứng xử uốn của dầm UPC gia cường tấm CFRP. Nội dung mô phỏng bao gồm chín dầm UPC tiết diện chữ nhật kích thước lớn đã được thực nghiệm từ nghiên cứu đã có [20]. Thông số khảo sát bao gồm mức độ giảm lực căng cáp (0%, 15% và 30%) và số lớp tấm CFRP gia cường (0, 2 và 4 lớp). Các mô hình liên kết dính trượt giữa tấm gia cường CFRP và bề mặt dầm bê tông, mô hình tương tác bề mặt giữa cáp thép và ống cáp trong dầm cũng được kể đến trong mô hình mô phỏng số của nghiên cứu này. Mục tiêu nghiên cứu chính của bài báo là đưa ra một mô hình mô phỏng số khả dụng dựa trên phần mềm ABAQUS phục vụ cho công tác nghiên cứu ứng xử uốn của dầm UPC gia cường tấm CFRP khi lực căng cáp thay đổi.

## 2. Mô hình FEM

### 2.1. Thông tin chung

Dầm chịu uốn bốn điểm dưới tác dụng của tĩnh tải với các điều kiện căng cáp và gia cường tấm CFRP khác nhau được mô phỏng tương ứng với các thông số dầm thí nghiệm trong nghiên cứu thực nghiệm của [20] bằng phần mềm Abaqus/CAE. Các dầm thí nghiệm sử dụng bê tông với cấp phối như sau: xi măng PC40 (435 kg/m<sup>3</sup>); đá 1×2 (22 mm, 931 kg/m<sup>3</sup>); cát sông (0÷4 mm, 516 kg/m<sup>3</sup>); cát nghiền (0÷2 mm, 351 kg/m<sup>3</sup>); và phụ gia dẻo (5,4 l/m<sup>3</sup>). Cường độ chịu nén trung bình dọc trục  $f_{c,cube}$  và kéo chệch  $f_{sp,cube}$  thực tế của bê tông được xác định trên kết quả nén sáu mẫu lập phương 150 × 150 × 150 mm, cụ thể  $f_{c,cube} = 47,2$  MPa và  $f_{sp,cube} = 5,8$  MPa. Độ sụt bê tông xấp xỉ  $12 \pm 2$  cm. Giới hạn chảy fy và giới hạn bền fu trung bình của cốt thép dọc chịu kéo và cốt đai được xác định trên ba mẫu, kết quả như sau:  $f_y = 430$  MPa và  $f_u = 600$  MPa; cốt đai có  $f_{yw} = 342$  MPa và  $f_{uw} = 463$  MPa. Mô-đun đàn hồi của cốt thép  $E_s = 200$  GPa. Cáp sử dụng loại không bám dính loại 7 sợi, đường kính danh nghĩa của cáp = 12,7 mm, giới hạn chảy quy ước  $f_{py}$  và giới hạn bền  $f_{pu}$  lần lượt là 1675 MPa và 1860 MPa. Mô-đun đàn hồi của cáp  $E_p = 195$  GPa. Tấm sợi các-bon trục hướng (CFF) dày 0,166 mm, có cường độ kéo đứt  $f_{fu} = 4900$  MPa. Các mô hình vật liệu bao gồm bê tông, thép dọc, thép đai, cáp căng và tấm CFRP được khai báo dựa trên những thông số trên.

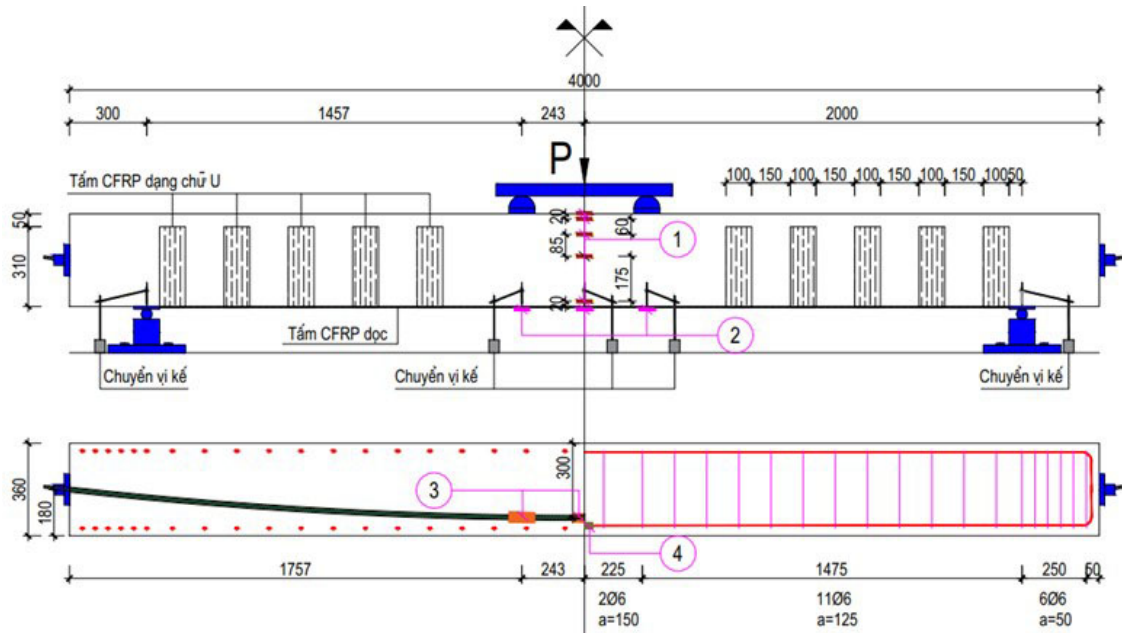
Chín mẫu dầm kích thước 120×360×4000 mm theo tỉ lệ mô hình 1 : 3 so với dầm thực (theo nhịp dầm) được mô phỏng bằng phần mềm Abaqus/CAE. Các dầm được chia làm ba nhóm 1, 2 và 3 (Bảng 1). Các dầm này được thiết kế để phân tích ảnh hưởng của sự suy giảm lực căng đến ứng xử của dầm UPC gia cường tấm CFRP, tương ứng với ba cấp độ suy giảm khác nhau lần lượt là 0%, 15% và 30%. Mỗi nhóm gồm có ba dầm, trong đó gồm một dầm không gia cường (dùng làm dầm đối chứng) và hai dầm gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP dán dọc theo đáy dầm có số lớp thay đổi lần lượt là hai và bốn lớp và có sử dụng neo bằng một lớp CFRP dạng dải U phân bố đều trong nhịp cắt của dầm để hạn chế sự bong tách sớm của tấm CFRP gia cường kháng uốn. Lực căng cáp tương ứng của ba nhóm dầm 1, 2, và 3 tương ứng là 128,5 kN, 109,2 kN và 90,0 kN. Các dầm được thiết kế dựa

trên ACI 318 (2014) [21] theo kiểu U, không nứt. Vì vậy, lực căng ban đầu trong cáp được thiết kế sao cho thỏa mãn điều kiện  $f_t < 0,62(f'_c)0,5$ , với  $f_t$  là ứng suất kéo lớn nhất trong tiết diện bê tông và  $f'_c$  là cường độ chịu nén của bê tông xác định trên mẫu lăng trụ. Thớ chịu kéo và chịu nén của dầm được bố trí cấu tạo lần lượt hai thanh có đường kính 12 mm và 10 mm. Cốt đai dùng thép đường kính 6 mm, bước cốt đai trong nhịp cắt và trong nhịp uốn lần lượt là 125 mm và 150 mm. Tại vị trí hai đầu dầm, trong đoạn 300 mm, để tránh hiện tượng bị phá hoại cục bộ do lực căng trước, cốt đai được bố trí dày hơn với khoảng cách 50 mm. Hình dạng tiết diện, sự phân bố cáp, cốt thép và sơ đồ dán tấm CFRP trong dầm được thể hiện qua Hình 1.

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của mẫu dầm thí nghiệm

STT	Nhóm	Tên mẫu	Kích thước (mm)	$f_{c,cube}$ (MPa)	$L_s$ (%)	$n_{FRP}$	$t_f$ (mm)	$w_f$ (mm)
1	1	P.B0-Cont	120×360×4000	47,2	0	0	-	-
2		P.B0-2CB			0	2	0,166	100
3		P.B0-4CB			0	4	0,166	100
4	2	P.B1-Cont	120×360×4000	47,2	15	0	-	-
5		P.B1-2CB			15	2	0,166	100
6		P.B1-4CB			15	4	0,166	100
7	3	P.B2-Cont	120×360×4000	47,2	30	0	-	-
8		P.B2-2CB			30	2	0,166	100
9		P.B2-4CB			30	4	0,166	100

Ghi chú:  $L_s$  là mức độ suy giảm lực căng cáp, %;  $f_{c,cube}$  là cường độ chịu nén bê tông mẫu lập phương MPa;  $n_{FRP}$  là số lớp tấm CFRP;  $t_f$  là chiều dày tấm FRP, mm;  $w_f$  là bề rộng dải gia cường, mm.



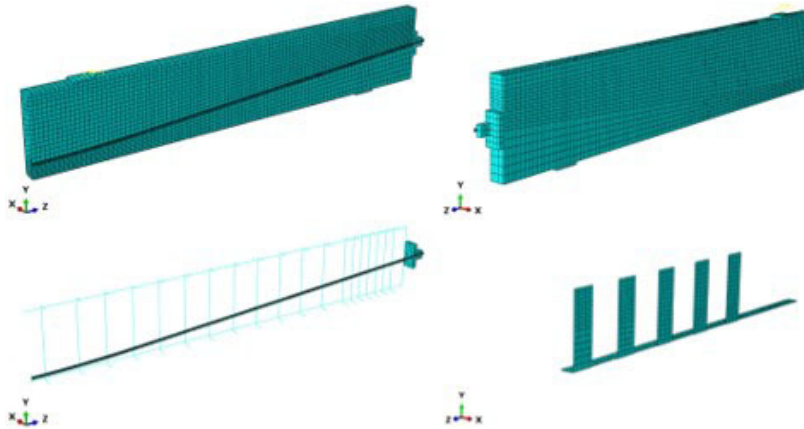
(a) Cấu tạo dầm và chi tiết bố trí cảm biến đo biến dạng của cáp và cốt dọc chịu kéo



(b) Mặt cắt giữa nhịp dầm

Hình 1. Cấu tạo của dầm thí nghiệm

Đồng thời, các mô hình dầm thí nghiệm đều có điểm chung là đối xứng theo hai phương lần lượt qua các mặt phẳng vuông góc và song song với trục chính của dầm. Do đó, để đơn giản mô hình mô phỏng số, kích thước hình học của dầm được khai báo vào phần mềm Abaqus/CAE cũng được tối giản còn 1/4 so với kích thước dầm thí nghiệm và được hiệu chỉnh bằng các khai báo điều kiện biên đối xứng cho dầm. Từ đó, số lượng phần tử hữu hạn cần được phần mềm xử lý cũng giảm đi và giảm thời gian hội tụ cho mô hình toán học (Hình 2).

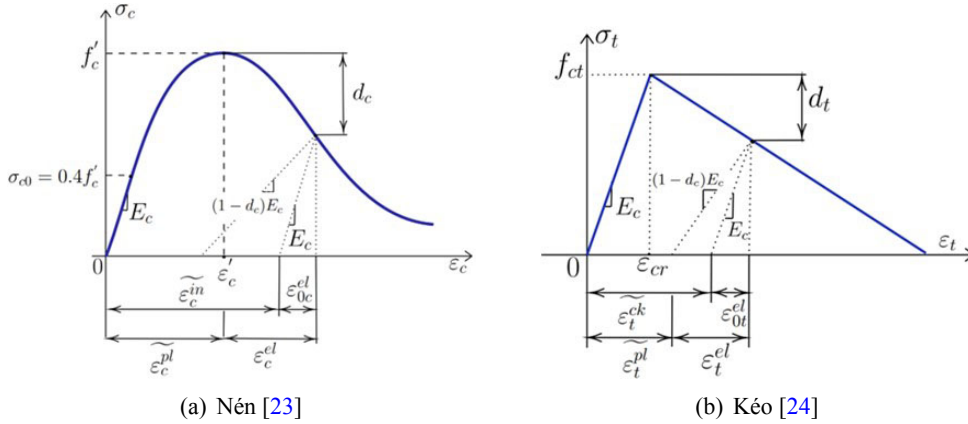


Hình 2. Mô hình của dầm điển hình có dán tấm CFRP trong mô phỏng Abaqus/CAE

## 2.2. Mô hình vật liệu và phân tử

### a. Bê tông

Mô hình bê tông phá hoại dẻo CDP (Concrete Damage Plasticity) được sử dụng để mô phỏng ứng xử của bê tông trong dầm UPC vì khả năng khảo sát được ứng xử đàn hồi và đàn dẻo của bê tông dưới tác dụng của ứng suất kéo và ứng suất nén. Các thông số được sử dụng trong mô hình CDP bao gồm góc dẫn nở, độ lệch tâm của bề mặt dẻo  $\varepsilon$ , tỉ số của ứng suất dẻo nén hai phương ban đầu với ứng suất dẻo nén một phương ban đầu, tỉ số của bất biến ứng suất thứ hai trên kinh tuyến kéo và nén  $K_c$  và tham số độ nhớt lần lượt có giá trị là  $30^\circ$ ; 0,1; 1,16; 0,667 và 0,001 [22]. Mô hình ứng suất – biến dạng nén và kéo của bê tông được dùng theo [23, 24] (Hình 3).



Hình 3. Mô hình đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông

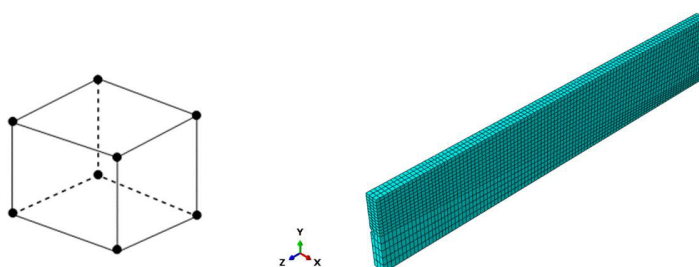
Mô hình vật liệu bê tông phá hoại dẻo tương ứng với vật liệu bê tông dẻo thí nghiệm [20] được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Mô hình vật liệu bê tông phá hoại dẻo

Ứng xử nén			Ứng xử kéo		
Ứng suất	Biến dạng	dc	Ứng suất	Biến dạng	dt
23,77217	0	0	2,657	0	0
26,0774	7,07E-05	0,025722623	2,391	8,15601E-05	0,1
28,16068	0,000104	0,034598925	2,125	0,00016312	0,2
30,01251	0,000144	0,04455136	1,86	0,00024468	0,3
31,6289	0,000191	0,055548515	1,594	0,00032624	0,4
33,01107	0,000246	0,06754816	1,328	0,000407801	0,5
34,16483	0,000307	0,080498443	1,063	0,000489361	0,6
35,09987	0,000376	0,094339176	0,797	0,000570921	0,7
35,8289	0,00045	0,109003182	0,531	0,000652481	0,8
36,36683	0,000531	0,12441769	0,266	0,000734041	0,9
36,72996	0,000617	0,140505737	0,05	0,000800252	0,981180459
36,93531	0,000708	0,157187545			
37	0,000803	0,174381837			
36,46309	0,001127	0,231260933			
35,14887	0,001475	0,290002825			
33,41132	0,001836	0,348486621			
31,49056	0,002202	0,405068066			
29,53711	0,00257	0,45860309			
27,63875	0,002936	0,508396569			
25,84234	0,003298	0,554115061			
24,16936	0,003657	0,595692193			
22,62619	0,004012	0,633243401			



Ứng xử nén			Ứng xử nén		
Ứng suất	Biến dạng	dc	Ứng suất	Biến dạng	dc
21,21063	0,004363	0,666997114	5,467893	0,014994	0,963897087
19,91594	0,004711	0,697243384	5,325559	0,015306	0,965496101
18,73324	0,005055	0,724297922	5,18951	0,015617	0,96699722
17,6529	0,005395	0,748478383	5,05936	0,015929	0,968407982
16,66537	0,005733	0,770089744	4,934756	0,01624	0,969735234
15,76158	0,006069	0,789416078	4,815369	0,016551	0,970985205
14,93315	0,006401	0,806716648	4,700896	0,016862	0,972163571
14,17245	0,006732	0,822224762	4,591055	0,017173	0,973275507
13,47263	0,007061	0,836148327	4,485587	0,017483	0,974325746
12,82757	0,007389	0,848671369	4,384249	0,017794	0,975318614
12,23179	0,007714	0,859956028	4,286815	0,018104	0,976258076
11,68046	0,008039	0,870144738	4,193077	0,018415	0,977147768
11,16927	0,008362	0,879362405	4,102838	0,018725	0,97799103
10,69438	0,008684	0,887718467	4,015917	0,019035	0,978790933
10,25241	0,009005	0,895308798	3,932143	0,019345	0,979550304
9,840335	0,009325	0,902217416	3,851357	0,019655	0,980271749
9,455459	0,009645	0,908518011	3,773411	0,019965	0,980957673
9,095386	0,009963	0,91427528	3,698164	0,020275	0,981610297
8,757969	0,010281	0,919546104	3,625486	0,020584	0,982231676
8,441291	0,010598	0,924380562	3,555255	0,020894	0,982823711
8,14363	0,010915	0,928822819	3,487355	0,021203	0,983388166
7,863439	0,011231	0,932911891	3,421677	0,021513	0,983926675
7,599328	0,011546	0,936682304	3,358121	0,021822	0,984440756
7,350039	0,011861	0,940164669	3,296589	0,022132	0,984931822
7,11444	0,012176	0,943386176	3,236992	0,022441	0,985401184
6,891503	0,01249	0,946371019	3,179244	0,02275	0,985850065
6,680297	0,012804	0,949140768	3,123265	0,023059	0,986279605
6,479976	0,013118	0,951714687	3,068979	0,023368	0,986690867
6,28977	0,013431	0,954110014	3,016314	0,023677	0,987084843
6,108977	0,013744	0,956342201	2,965202	0,023986	0,98746246
5,936955	0,014057	0,958425124	2,915578	0,024295	0,987824586
5,773118	0,014369	0,960371263	2,867382	0,024604	0,988172032
5,616928	0,014682	0,962191867	2,820557	0,024913	0,988505558



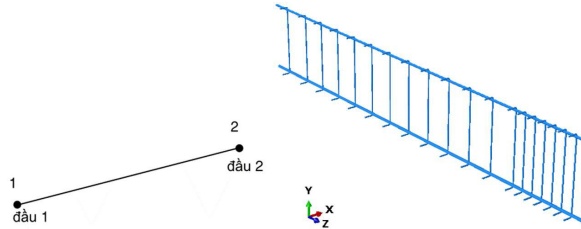
Hình 4. Mô hình phần tử bê tông với kích thước chia lưới 20 mm

Hình 4 thể hiện mô hình phần tử bê tông trong phần thân dầm UPC dùng trong mô phỏng. Phần tử được sử dụng để mô phỏng là phần tử C3D8R. Đây là dạng phần tử khối 8 nút với 3 bậc tự do và 3

chuyển vị thẳng theo 3 phương  $x, y$  và  $z$  tại mỗi nút. Mỗi cạnh của phần tử khối dùng trong mô phỏng có kích thước tối đa là 20 mm.

b. Cốt thép dọc và cốt thép đai

Quan hệ ứng suất – biến dạng của cốt thép theo mô hình đàn – dẻo được dùng trong mô phỏng này. Các thông số được khai báo vào mô hình là mô đun đàn hồi ( $E_s$ ), hệ số poisson ( $\nu$ ) và giới hạn chảy dẻo ( $f_y$ ) (Hình 7).



Hình 5. Mô hình phần tử cốt thép dọc và cốt thép đai

Mô hình phần tử của cốt thép dọc và cốt thép đai trong phần thân đầm UPC dùng trong mô phỏng được thể hiện trong Hình 5. Phần tử T3D2 được sử dụng để mô phỏng ứng xử đơn giản của cốt thép dạng thanh có đường kính tương đối nhỏ vì đây là dạng phần tử 2 nút đầu và cuối, với 3 bậc tự do ở mỗi nút.

c. Cáp ứng suất trước

Cáp ứng suất trước dùng mô hình của [25] (Hình 7), như sau:

$$f_{ps} = \varepsilon_{ps} \left[ A + \frac{B}{\left\{ 1 + (C\varepsilon_{ps})^D \right\}^{\frac{1}{D}}} \right] \leq f_{pu} \quad (1)$$

trong đó  $f_{ps}$  là ứng suất tương ứng với biến dạng cho trước  $\varepsilon_{ps}$ ;  $A = 887$ ,  $B = 27613$ ,  $C = 112,4$  và  $D = 7,36$  là các hằng số được xác định theo cáp loại 7 sợi dùng trong nghiên cứu [25].

Quan hệ ứng suất – biến dạng của cáp được khai báo trong mô hình như Bảng 3.

Hình 6 thể hiện mô hình của cáp ứng suất trước dùng trong mô phỏng. Phần tử dạng khối C3D8R cũng được sử dụng để mô phỏng cáp thép tương tự với mô hình phần tử bê tông. Do cáp ứng suất trước có diện tích mặt cắt lớn hơn nhiều so với cốt

thép thanh thông thường nên phần tử dạng thanh không phù hợp để mô phỏng ứng xử phức tạp cũng như ma sát giữa các bề mặt của cáp thép với ống cáp trong suốt quá trình thí nghiệm. Kích thước cạnh tối đa của khối phần tử trong mô phỏng là 10 mm cho cáp thép.

Bảng 3. Quan hệ ứng suất – biến dạng của cáp ứng suất trước [25]

Ứng suất (MPa)	Biến dạng
0	0
1565.020	0.009
1646.952	0.010
1698.504	0.010
1730.049	0.011
1750.042	0.012
1763.726	0.013
1773.996	0.014
1782.398	0.015
1789.751	0.016
1796.502	0.017
1802.896	0.018
1809.075	0.019
1815.119	0.020
1821.078	0.021
1826.982	0.022
1832.849	0.023
1838.692	0.024
1844.519	0.025
1850.333	0.026
1856.140	0.027
1861.940	0.028

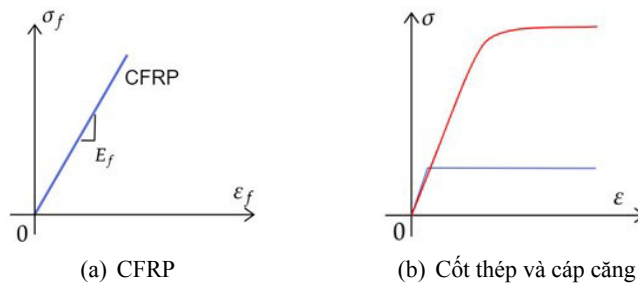




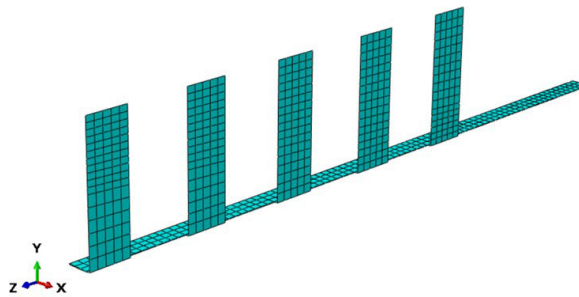
Hình 6. Mô hình phần tử cáp ứng suất trước với kích thước chia lưới 10 mm

#### d. Vật liệu CFRP

Biểu đồ ứng suất – biến dạng của CFRP được mô phỏng đàn hồi hoàn toàn cho đến khi phá hoại ( $\epsilon_{rup}$ ) [26] (Hình 7).



Hình 7. Quan hệ ứng suất biến dạng



Hình 8. Mô hình phần tử của tấm CFRP với kích thước chia lưới 20 mm

Mô hình phần tử của vật liệu CFRP gia cường ở mặt dưới của dầm được mô phỏng bằng phần tử khối C3D8R do độ dày của tấm CFRP cũng là một yếu tố cần khảo sát trong thực nghiệm [20] và hai mặt của tấm CFRP cũng có hai tương tác với hai loại phần tử khác nhau (giữa 2 lớp tấm CFRP dán dọc; giữa tấm CFRP dán dọc và tấm CFRP dạng U; và giữa tấm CFRP dán dọc và mặt bê tông dưới dầm UPC). Trong khi đó, tấm CFRP dạng U được mô hình bằng phần tử dạng tấm S4R do có bề dày tương đối nhỏ và chỉ có một mặt tương tác với phần tử khác.

### 2.3. Mô hình liên kết

#### a. Mô hình tương tác giữa cáp ứng suất trước và bê tông

Do nghiên cứu sử dụng cáp không bám dính, nên tương tác duy nhất giữa cáp với bê tông xung quanh là tương tác ma sát. Tương tác này được khai báo thông qua hệ số ma sát bằng 0,15 theo [27].

b. Mô hình liên kết dính – trượt giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông

Tương tác giữa tấm CFRP và bê tông được mô tả qua quan hệ ứng suất bám dính và độ trượt ( $\tau - \delta$ ). Trong nghiên cứu này, quan hệ ứng suất bám dính và độ trượt của liên kết tấm CFRP và bê tông dùng mô hình của [28].

c. Liên kết giữa các tấm thép dầm với bê tông dầm

Liên kết giữa các tấm thép dầm với bê tông dầm được khai báo bằng mối quan hệ tương tác cứng và tiếp tuyến với hệ số ma sát giữa bề mặt vật liệu thép và bê tông là 0,5 [29].

#### 2.4. Phương pháp giải và gia tải

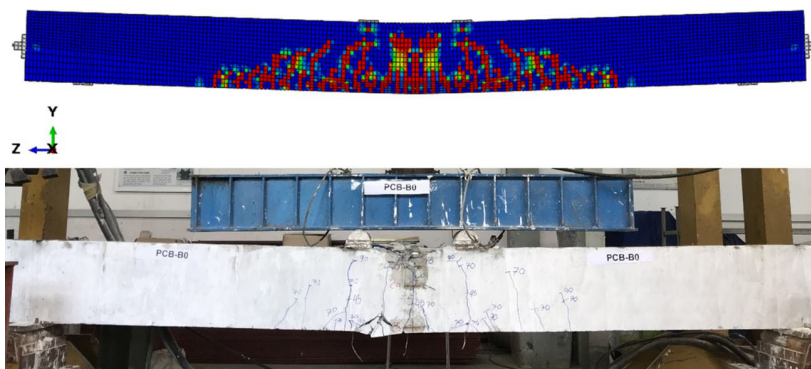
Phương pháp giải được lựa chọn sử dụng trong mô phỏng là Newton-Raphson theo phương thức kiểm soát chuyển vị. Để tiến hành gia tải cho dầm, tải trọng được khai báo theo ba bước như sau: (1) căng cáp đến ứng suất đã cho trước (tương ứng với các mức suy giảm 0%, 15% và 30% như mô hình thí nghiệm); (2) áp tải trọng bản thân lên dầm đã được căng cáp; và (3) áp chuyển vị lên hai vị trí đặt lực và tăng dần từ 0 mm đến 50 mm theo quy luật hàm đa thức bậc 3 (3rd order polynomial function [30]) và ngừng khảo sát.

### 3. Kết quả mô phỏng và so sánh với kết quả thực nghiệm

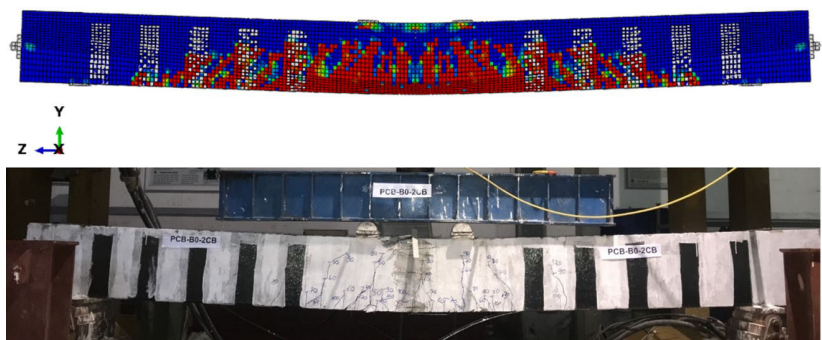
#### 3.1. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm

Kết quả về hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm mô phỏng so với dầm thí nghiệm được trình bày trong Hình 9–11. Hình thái và mật độ vết nứt quan sát được trên thân dầm của kết quả mô phỏng khá tương đồng với kết quả thực nghiệm. Kết quả mô phỏng cũng minh chứng được sự hiệu quả của tấm CFRP trong việc kiểm soát vết nứt và trì hoãn quá trình phát triển vết nứt nhờ khả năng phân tán ứng suất kéo đều lên thân dầm dưới cùng một giá trị tải trọng. Mật độ vết nứt giữa các dầm không gia cường tấm CFRP trong Hình 9(a), 10(a) và Hình 11(a) so với nhóm dầm gia cường hai lớp trong Hình 9(b), 10(b) và Hình 11(b) và nhóm dầm gia cường bốn lớp trong Hình 9(c), 10(c) và Hình 11(c) tỉ lệ thuận với số lớp gia cường. Khi số lớp gia cường gia tăng thì dầm càng có khả năng phân tán ứng suất kéo ở thớ dưới nhờ vào độ cứng của tấm CFRP trong phương làm việc của dầm.

Đồng thời, đối với nhóm dầm có cùng số lớp gia cường, các dầm có mức độ suy giảm lực căng cáp khác nhau (0%, 15%, 30%), cả kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng số đều cho thấy bề rộng vết nứt của các dầm có xu hướng gia tăng theo mức độ suy giảm lực căng cáp [20].



(a) Dầm P.B0-Cont

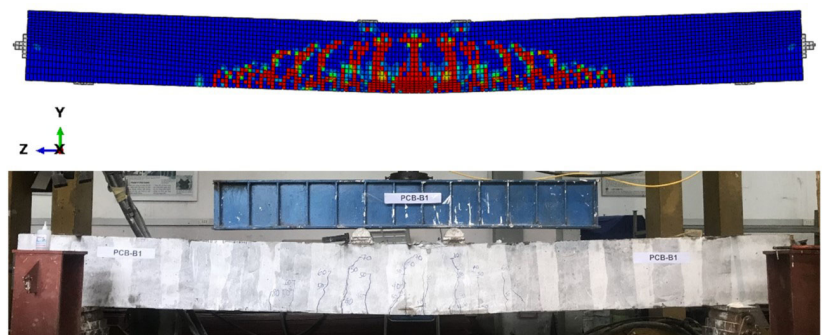


(b) Dầm P.B0-2CB

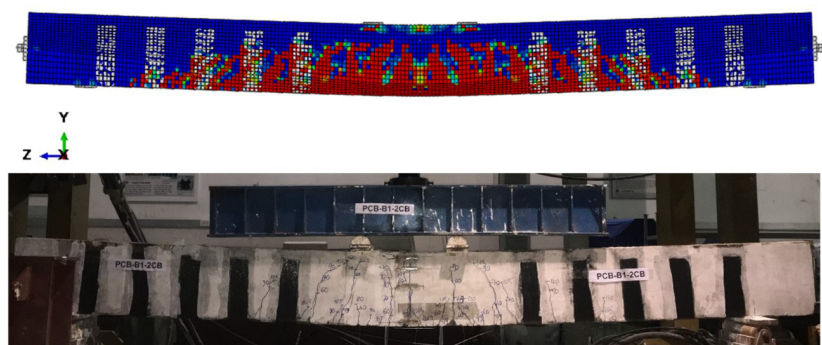


(c) Dầm P.B0-4CB

Hình 9. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm mô phỏng so với dầm thí nghiệm trong dầm nhóm 1



(a) Dầm P.B1-Cont



(b) Dầm P.B1-2CB



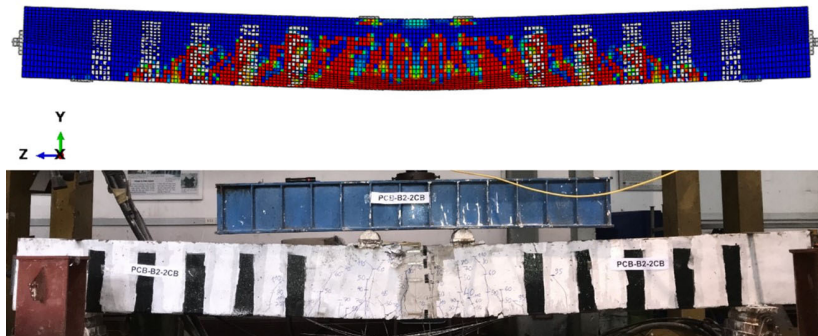


(c) Dầm P.B1-4CB

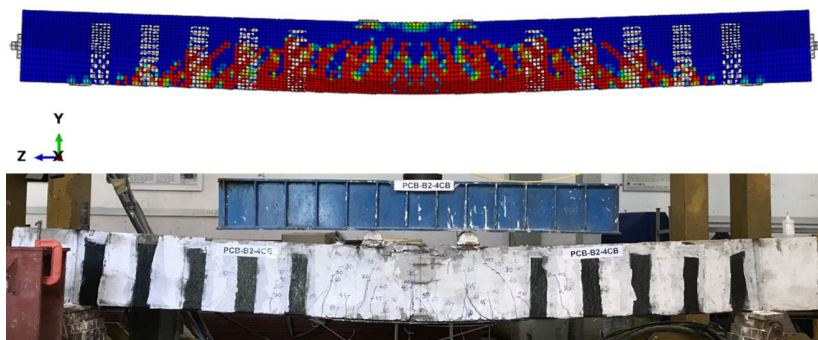
Hình 10. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm mô phỏng so với dầm thí nghiệm trong dầm nhóm 2



(a) Dầm P.B2-Cont



(b) Dầm P.B2-2CB

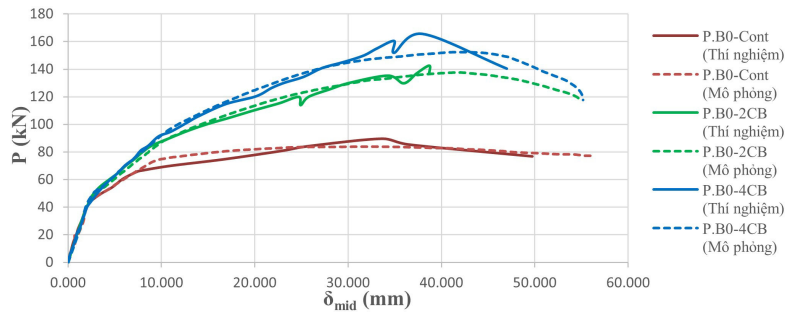


(c) Dầm P.B2-4CB

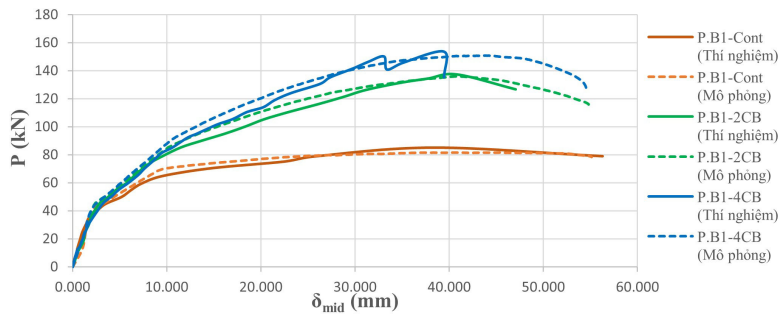
Hình 11. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm mô phỏng so với dầm thí nghiệm trong dầm nhóm 3

### 3.2. Quan hệ lực - chuyển vị và khả năng kháng uốn

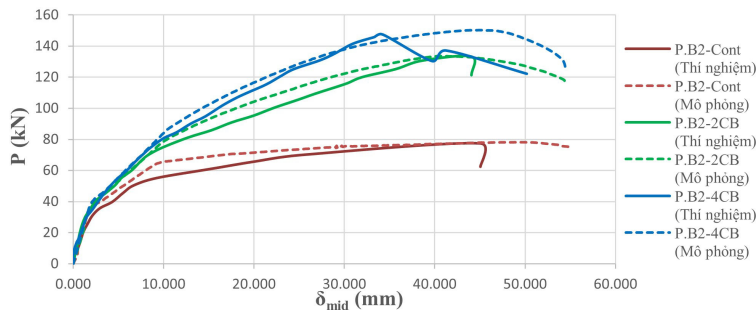
Biểu đồ quan hệ lực - chuyển vị của ba nhóm dầm trong Hình 12 cho thấy sự khác biệt không đáng kể giữa ứng xử tổng thể giữa dầm thí nghiệm và dầm mô phỏng bằng FEM. Cụ thể, ở nhóm dầm đầu tiên với mức độ suy giảm lực căng cáp 0%, ứng xử ở giai đoạn dầm làm việc trong giai đoạn đàn hồi và thời điểm bắt đầu hình thành vết nứt của dầm thí nghiệm và dầm mô phỏng số gần như trùng khớp. Lực gây ra phá hoại lớn nhất cho dầm B0 không gia cường tấm CFRP là 89,7 kN trong thực nghiệm và 83,9 kN trong mô phỏng số, nhỏ hơn 6%; chuyển vị tại vị trí giữa nhịp tương ứng với cấp tải này cũng nhỏ hơn 4% so với kết quả thực nghiệm (Bảng 4). Đối với hai dầm được gia cường lần lượt 2 và 4 lớp CFRP kháng uốn kèm tấm CFRP dạng U, tải trọng cực hạn mô phỏng được là 137,6 kN và 152,5 kN, chênh lệch lần lượt 4% và 8% so với tải thí nghiệm; chuyển vị tương ứng với hai cấp tải này tại giữa nhịp là 41,7 mm và 41,5 mm lớn hơn từ 8% đến 9% so với thực tế.



(a) Dầm nhóm 1



(b) Dầm nhóm 2



(c) Dầm nhóm 3

Hình 12. So sánh quan hệ lực - chuyển vị của dầm tại vị trí giữa nhịp giữa mô hình mô phỏng số và kết quả thực nghiệm

Đối với dầm ở nhóm 2 khi lực căng cáp đã suy giảm 15%, độ lệch tương ứng với số lớp gia cường 0, 2, 4 lớp lần lượt là 4%, 1% và 2% cho giá trị lực cực hạn của dầm và 1%, 0% và 9% cho giá trị chuyển vị tương ứng tại giữa nhịp dầm. Riêng với nhóm dầm cuối cùng, khi giảm lực căng cáp 30% so với giá trị ban đầu, kết quả mô phỏng về giá trị lực cực hạn của dầm vẫn tiệm cận rất tốt với kết quả thực nghiệm, nhỏ hơn lần lượt là 1%, 0% và 2% cho dầm với số lớp gia cường 0, 2 và 4 lớp. Tuy nhiên, đối với kết quả về giá trị chuyển vị tương ứng ở giữa nhịp dầm ở thời điểm ứng suất trong dầm lớn nhất thì sự chênh lệch trung bình giữa kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng lên đến 25%. Đặc biệt là đối với dầm B2 không gia cường tấm CFRP và dầm B2 với 4 lớp CFRP, tuy kết quả về giá trị lực cực hạn không chênh lệch đáng kể nhưng chuyển vị của dầm tại vị trí giữa nhịp ở thực nghiệm và mô phỏng lại có sự chênh lệch lớn (lần lượt là 34% và 23%). Điều này có thể giải thích nguyên nhân chủ yếu là đến từ hình thái phá hoại của dầm trong thực tế và thí nghiệm. Dầm B2 không gia cường bị phá hoại do vùng bê tông chịu nén bị vỡ [20], trong khi đó, kết quả mô phỏng cho thấy kiểu phá hoại của dầm là do cáp chảy (Hình 9). Tương tự, dầm B2 với 4 lớp CFRP bị phá hoại chủ yếu do tấm CFRP bong tách và bị tẽ, tuy nhiên trong mô phỏng chưa xuất hiện hiện tượng này.

Nhìn chung, kết quả mô phỏng đã có thể tiệm cận được xu hướng chung của kết quả thực nghiệm và thể hiện rõ được hiệu quả gia cường của tấm CFRP trong việc gia tăng khả năng chịu uốn của dầm. Trong thực nghiệm, hiệu quả gia cường của tấm CFRP trong việc gia tăng tải trọng cực hạn đối với dầm nhóm 1 (không suy giảm lực căng cáp) giữa dầm đối chứng không gia cường với dầm gia cường 2 lớp CFRP và tấm CFRP dạng U là 59%, giữa dầm gia cường 2 lớp và 4 lớp CFRP với cùng điều kiện gia cường tấm CFRP dạng U là 16%. Kết quả mô phỏng cho thấy sự tương đồng với hiệu quả lần lượt là 64% và 11% khi tăng số lớp gia cường từ 0 lớp lên 2 lớp và từ 2 lớp lên 4 lớp. Tương tự với dầm nhóm 2, lực gây ra phá hoại lớn nhất tăng 62% trong thực nghiệm và 68% trong mô phỏng khi dầm gia cường 2 lớp CFRP kháng uốn, tuy nhiên, lực này chỉ tăng thêm 12% trong thực nghiệm và 11% trong mô phỏng khi tăng cường thêm 2 lớp CFRP kháng uốn nữa. Đặc biệt đối với dầm nhóm 3, việc gia cường 2 lớp CFRP so với không gia cường đã gia tăng cấp tải phá hoại của dầm lên đến 72% trong thực nghiệm và 71% trong mô hình. Cùng chung xu hướng với hai nhóm dầm còn lại, sự gia tăng thêm 2 lớp CFRP kháng uốn nữa chỉ làm tăng nhẹ khả năng chịu tải của dầm thí nghiệm lên 11% và dầm mô phỏng lên 13%.

Bảng 4. Kết quả so sánh lực tác dụng và chuyển vị tại giữa nhịp của dầm ở giai đoạn cực hạn

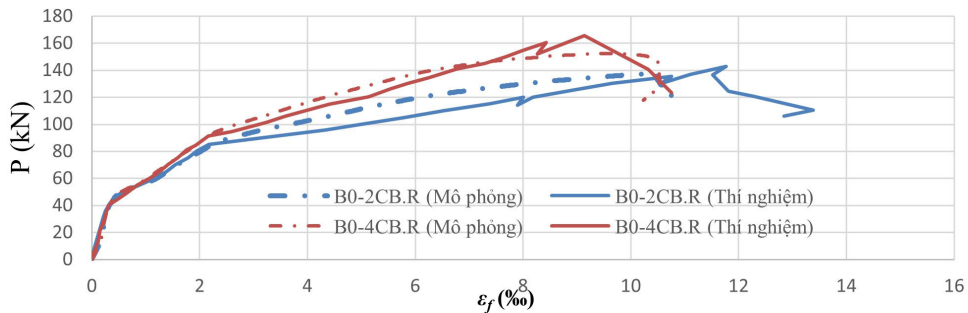
Nhóm dầm	Mẫu dầm	$n_{CFRP}$	$L_s$ (%)	$P_{u_e}$ (kN)	$P_{u_s}$ (kN)	$\delta_{u,mid_e}$ (mm)	$\delta_{u,mid_s}$ (mm)	$P_{u_s}/P_{u_e}$	$\delta_{u,mid_s}/\delta_{u,mid_e}$
1	B0-Cont	0		89,7	83,9	33,7	32,4	0,94	0,96
	B0-2CB	2	0	142,7	137,6	38,7	41,7	0,96	1,08
	B0-4CB	4		165,7	152,5	38,0	41,5	0,92	1,09
2	B1-Cont	0		85,1	81,6	38,4	37,9	0,96	0,99
	B1-2CB	2	15	137,5	136,1	40,8	40,9	0,99	1,00
	B1-4CB	4		153,8	150,9	39,4	43,4	0,98	1,10
3	B2-Cont	0		77,3	78,2	30,1	45,7	1,01	1,52
	B2-2CB	2	30	133,3	133,5	44,1	40,6	1,00	0,92
	B2-4CB	4		147,4	150,3	34,3	44,5	1,02	1,30

Ghi chú:  $n_{CFRP}$  là số lớp tấm CFRP;  $L_s$  là mức độ suy giảm lực căng cáp, %;  $P_{u_e}$  và  $P_{u_s}$  lần lượt là lực tác dụng gây ra phá hoại lớn nhất trong thực nghiệm và trong mô phỏng, kN;  $\delta_{u,mid_e}$  và  $\delta_{u,mid_s}$  lần lượt là chuyển vị giữa nhịp tương ứng với lực gây phá hoại lớn nhất trong thực nghiệm và trong mô phỏng, mm.

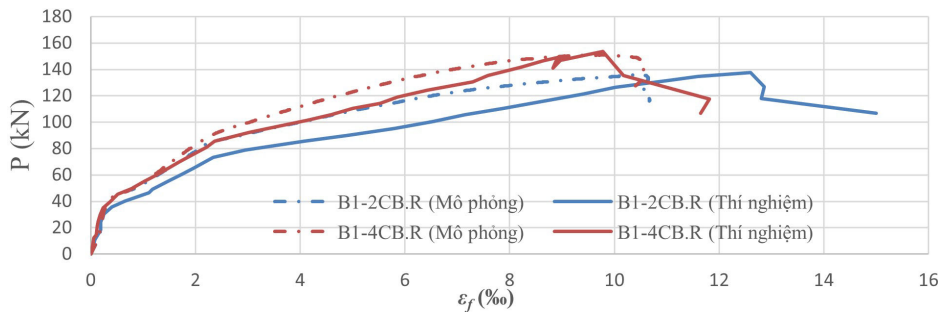


### 3.3. Biến dạng của tấm gia cường kháng uốn CFRP

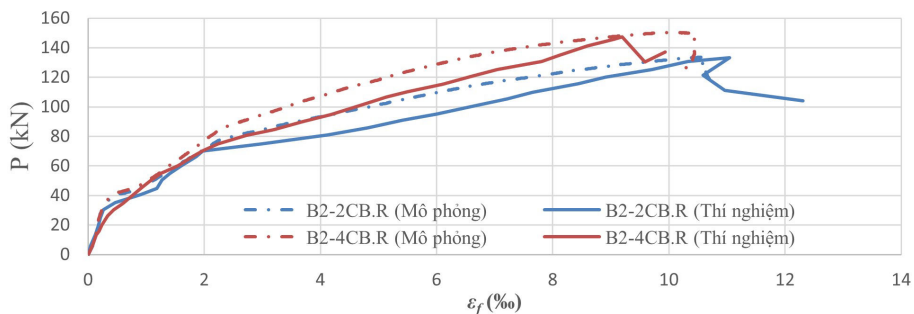
Đối với biến dạng của tấm CFRP, đường quan hệ lực – biến dạng của hai mô hình có kết quả khá tương đồng (Hình 13) ở giai đoạn làm việc trong miền đàn hồi. Ở giai đoạn làm việc cực hạn, từ kết quả của Bảng 5 có thể thấy rõ rằng mô hình mô phỏng số đối với dầm có gia cường 4 lớp CFRP tiệm cận tốt hơn với kết quả thực nghiệm. Cụ thể, chênh lệch về biến dạng của tấm CFRP tại thời điểm xảy ra phá hoại lớn nhất của kết quả mô phỏng số so với kết quả thực nghiệm lần lượt lớn hơn 3%, 1% và 9% (Bảng 5) cho dầm được gia cường 4 lớp CFRP kháng uốn với mức độ suy giảm lực căng cấp 0%, 15% và 30%. Trong khi đó, dầm gia cường 2 lớp CFRP có độ lệch lần lượt lớn hơn 11%, 10% và 20% cho mức độ suy giảm lực căng cấp 0%, 15% và 30%. Nguyên nhân dẫn đến sai lệch này có thể là do mô phỏng chưa thể kể đến tương tác phức tạp giữa các tấm CFRP kháng uốn và tấm CFRP neo dạng U.



(a) Dầm nhóm 1



(b) Dầm nhóm 2



(c) Dầm nhóm 3

Hình 13. So sánh quan hệ lực - chuyển vị của tấm CFRP giữa mô hình mô phỏng số và kết quả thực nghiệm

Bảng 5. Kết quả so sánh biến dạng của tấm gia cường kháng uốn CFRP ở giai đoạn cực hạn

Nhóm dầm	Mẫu dầm	$n_{CFRP}$	$L_s$ (%)	$P_{u_e}$ (kN)	$P_{u_s}$ (kN)	$\varepsilon_{fu_e}$ (‰)	$\varepsilon_{fu_s}$ (‰)	$\varepsilon_{fu_s}/\varepsilon_{fu_e}$
1	B0-Cont	0	0	89,7	83,9	-	-	-
	B0-2CB	2		142,7	137,6	11,8	10,5	0,89
	B0-4CB	4		165,7	152,5	9,1	9,4	1,03
2	B1-Cont	0	15	85,1	81,6	-	-	-
	B1-2CB	2		137,5	136,1	11,6	10,5	0,91
	B1-4CB	4		153,8	150,9	9,8	9,9	1,01
3	B2-Cont	0	30	77,3	78,2	-	-	-
	B2-2CB	2		133,3	133,5	13,2	10,5	0,80
	B2-4CB	4		147,4	150,3	9,2	10,0	1,09

Ghi chú:  $n_{CFRP}$  là số lớp tấm CFRP;  $L_s$  là mức độ suy giảm lực căng cáp, %;  $P_{u_e}$  và  $P_{u_s}$  lần lượt là lực tác dụng gây ra phá hoại lớn nhất trong thực nghiệm và trong mô phỏng, kN;  $\varepsilon_{fu_e}$  và  $\varepsilon_{fu_s}$  lần lượt là biến dạng kéo của tấm CFRP tương ứng với lực gây phá hoại lớn nhất, ‰.

### 3.4. Biến dạng của cáp và tương tác giữa tấm CFRP và cáp

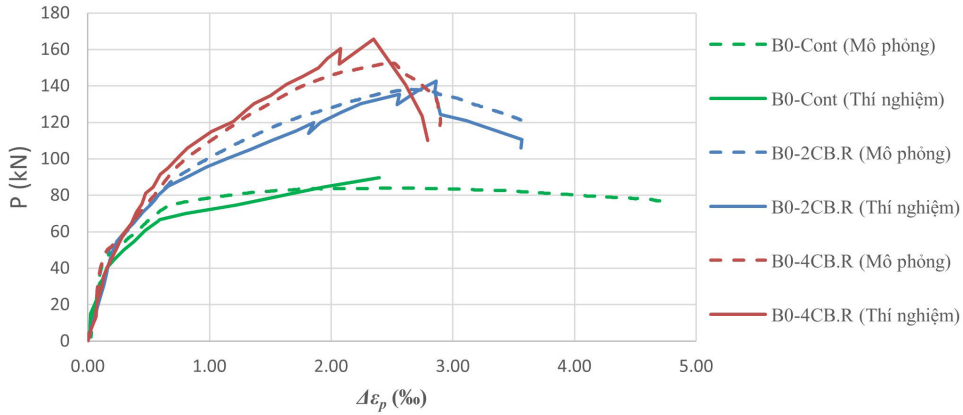
Bảng 6 cho thấy kết quả so sánh giữa biến dạng tăng thêm của cáp ứng suất trước sau khi bị biến dạng bởi ứng suất ban đầu  $\sigma_0$  (MPa). Độ lệch biến dạng cáp trung bình của dầm nhóm 1 nhỏ hơn 1%, dầm nhóm 2 là 6% và dầm nhóm 3 là 17%. Xét về xu hướng, biến dạng tăng thêm của cáp cũng tỉ lệ nghịch với mức độ suy giảm lực căng cáp. Nguyên nhân dẫn đến kết quả chênh lệch lớn của mô hình FEM có thể là chưa thể kể được hiện tượng tuột neo trong khi thí nghiệm. Tuy nhiên, xét về xu hướng chung, các đường quan hệ lực – biến dạng của cáp trong thí nghiệm và thực tế đã có xu hướng rất giống nhau (ngoại trừ dầm B2-2CB) (Hình 14). Bên cạnh đó, khi xét đến tương tác giữa tấm CFRP và cáp, có thể thấy được khi lực căng cáp suy giảm thì tấm CFRP cũng biến dạng nhiều hơn (Bảng 5).

Bảng 6. Kết quả so sánh biến dạng của tấm gia cường kháng uốn CFRP ở giai đoạn cực hạn

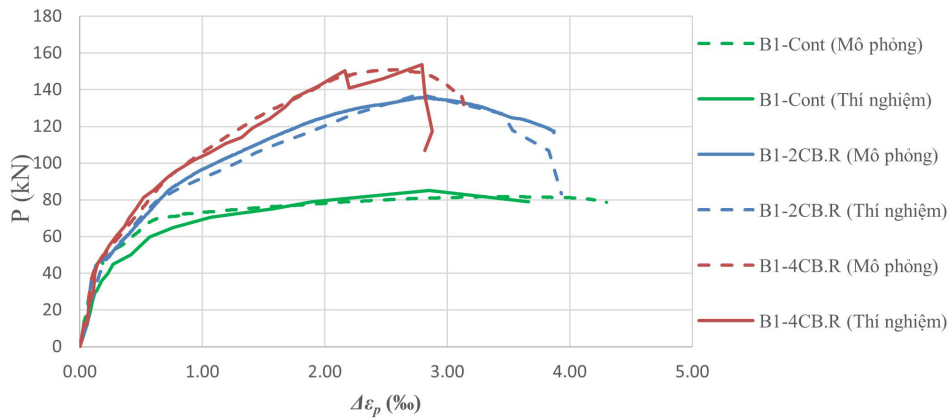
Nhóm dầm	Mẫu dầm	$n_{CFRP}$	$L_s$ (%)	$P_{u_e}$ (kN)	$P_{u_s}$ (kN)	$\Delta\varepsilon_{p_e}$ (‰)	$\Delta\varepsilon_{p_s}$ (‰)	$\Delta\varepsilon_{p_s}/\Delta\varepsilon_{p_e}$
1	B0-Cont	0	0	89,7	83,9	2,4	2,5	1,04
	B0-2CB	2		142,7	137,6	2,9	2,6	0,90
	B0-4CB	4		165,7	152,5	2,4	2,5	1,04
2	B1-Cont	0	15	85,1	81,6	2,9	3,6	1,24
	B1-2CB	2		137,5	136,1	2,8	2,8	1,00
	B1-4CB	4		153,8	150,9	2,8	2,6	0,93
3	B2-Cont	0	30	77,3	78,2	3,7	3,6	0,97
	B2-2CB	2		133,3	133,5	4,7	2,9	0,62
	B2-4CB	4		147,4	150,3	3,0	2,7	0,90

Ghi chú:  $n_{CFRP}$  là số lớp tấm CFRP;  $L_s$  là mức độ suy giảm lực căng cáp, %;  $P_{u_e}$  và  $P_{u_s}$  lần lượt là lực tác dụng gây ra phá hoại lớn nhất trong thực nghiệm và trong mô phỏng, kN;  $\Delta\varepsilon_{p_e}$  và  $\Delta\varepsilon_{p_s}$  lần lượt là biến dạng kéo tăng thêm sau khi căng trước của cáp thép tương ứng với lực gây phá hoại lớn nhất, ‰.

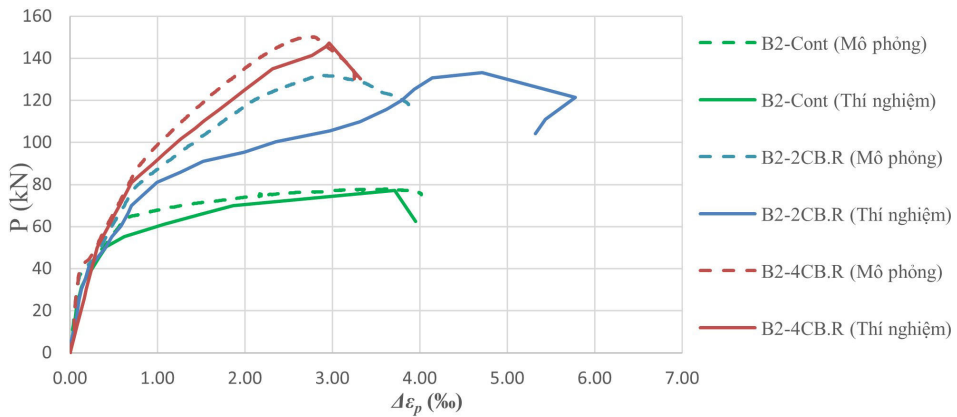
Đáng chú ý, kết quả mô phỏng đã cho thấy biến dạng tăng thêm của cáp ở giai đoạn phá hoại của dầm nhỏ hơn khi số lớp gia cường tăng thêm ở cả ba nhóm dầm. Kết quả mô phỏng này càng chứng minh được sự hiệu quả trong việc gia cường tấm CFRP cho dầm UPC.



(a) Dầm nhóm 1



(b) Dầm nhóm 2



(c) Dầm nhóm 3

Hình 14. So sánh quan hệ lực – biến dạng của cáp thép giữa mô hình mô phỏng số và kết quả thực nghiệm

#### 4. Kết luận

Bài báo này trình bày kết quả khảo sát ứng xử uốn của dầm dùng cáp căng sau không bám dính (UPC) được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP bằng cách sử dụng phần mềm mô phỏng số Abaqus/CAE theo FEM. Các tham số khảo sát bao gồm sự thay đổi lực căng cáp do kể đến tổn hao ứng suất (0%, 15% và 30%) và số lớp tấm CFRP gia cường dán ở mặt dưới dầm dọc theo chiều dài dầm (0, 2 và 4 lớp). Chương trình mô phỏng số được tiến hành trên chín dầm tiết diện chữ nhật đã được thí nghiệm trong nghiên cứu trước [20]. Căn cứ kết quả đạt được từ nghiên cứu này, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Mô hình FEM được thực hiện trong nghiên cứu này dự đoán được khả năng kháng uốn và chuyển vị của các dầm UPC với kết quả mô phỏng gần với kết quả thực nghiệm, với sai lệch dưới 10% đối với dầm có mức tổn hao ứng suất trong cáp dưới 15%. Riêng đối với dầm có mức tổn hao ứng suất trong cáp là 30%, mô hình FEM vẫn có thể dự đoán được khả năng kháng uốn của dầm tuy nhiên kết quả chuyển vị lớn nhất của dầm có sai lệch tương đối lớn (trung bình 25%). Nguyên nhân của hiện tượng này có thể là do sự khác biệt giữa trạng thái làm việc của cáp trong dầm thí nghiệm (chưa chảy) và dầm mô phỏng (đã chảy); cáp bị chảy trong mô hình FEM đã khiến cho độ cứng của dầm suy giảm nhanh và dẫn đến sự chênh lệch lớn về chuyển vị.

- Mô hình FEM được thực hiện trong nghiên cứu này có xu hướng dự đoán biến dạng của tấm CFRP nhỏ hơn so với của thực nghiệm (từ 4 đến 16%) và sự sai lệch này giảm dần khi số lớp gia cường CFRP tăng. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể là do mô hình FEM sử dụng trong nghiên cứu này chưa phản ánh được hoàn toàn ứng xử tương tác giữa tấm CFRP gia cường kháng uốn và các tấm CFRP dạng U.

- Mô hình FEM được thực hiện trong nghiên cứu này dự đoán biến dạng của cáp ứng suất trước của các dầm có mức độ tổn hao ứng suất căng trước dưới 15% an toàn và sai lệch nhỏ (từ 1% đến 6%); tuy nhiên, với các dầm có mức độ tổn hao ứng suất căng trước 30%, độ chênh lệch trung bình lên đến 17%. Sai lệch lớn này có thể là do mô hình FEM trong nghiên cứu chưa mô tả chính xác tương tác giữa cáp có lực căng trước bé với bê tông dầm, khiến cho cáp bị chảy dèo.

- Mô hình FEM được thực hiện trong nghiên cứu này đã góp phần làm rõ vai trò và ảnh hưởng của tấm CFRP trong việc làm giảm biến dạng của cáp trong giai đoạn phá hoại. Nói cách khác, mô hình này có thể miêu tả được tương tác giữa cáp căng và tấm CFRP gia cường kháng uốn; thể hiện qua hiện tượng khi lực căng cáp suy giảm làm cho tấm CFRP phải làm việc nhiều hơn dẫn đến biến dạng của tấm CFRP trở nên lớn hơn.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Việt Nam (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số 107.01-2018.302.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., Triantafillou, T. C. (2002). [Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review](#). *Journal of Composites for Construction*, 6(2):73–87.
- [2] Hasnat, A., Islam, M. M., Amin, A. F. M. S. (2016). [Enhancing the Debonding Strain Limit for CFRP-Strengthened RC Beams Using U-Clamps: Identification of Design Parameters](#). *Journal of Composites for Construction*, 20(1).

- [3] Rabinovitch, O., Frostig, Y. (2003). [Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites](#). *Composites Part B: Engineering*, 34(8):663–677.
- [4] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M. (2012). [Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets](#). *Construction and Building Materials*, 37:746–757.
- [5] Kotynia, R., Baky, H. A., Neale, K. W., Ebead, U. A. (2008). [Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP Systems: Test Results and 3D Nonlinear FE Analysis](#). *Journal of Composites for Construction*, 12(2):190–201.
- [6] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1991). [RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study](#). *Journal of Structural Engineering*, 117(11):3417–3433.
- [7] ElSafty, A., Graeff, M. K., Fallaha, S. (2014). [Behavior of Laterally Damaged Prestressed Concrete Bridge Girders Repaired with CFRP Laminates Under Static and Fatigue Loading](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1):43–59.
- [8] Larson, K. H., Peterman, R. J., Rasheed, H. A. (2005). [Strength-Fatigue Behavior of Fiber Reinforced Polymer Strengthened Prestressed Concrete T-Beams](#). *Journal of Composites for Construction*, 9(4): 313–326.
- [9] Nguyen-Minh, L., Phan-Vu, P., Tran-Thanh, D., Truong, Q. P. T., Pham, T. M., Ngo-Huu, C., Rovňák, M. (2018). [Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams](#). *Engineering Structures*, 166:1–15.
- [10] Li, W., Nee, A., Ong, S. (2017). [A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation](#). *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(3):17.
- [11] Jones, C. A., Dameron, R., Sircar, M. (2015). [Improving the state of the art in FEM analysis of PCCVs with bonded and unbonded prestress tendons](#). *Nuclear Engineering and Design*, 295:782–788.
- [12] Phan-Vu, P., Tran, D. T., Pham, T. M., Dang, T. D., Ngo-Huu, C., Nguyen-Minh, L. (2021). [Distinguished bond behaviour of CFRP sheets in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests](#). *Engineering Structures*, 234:111794.
- [13] Hu, H.-T., Lin, F.-M., Liu, H.-T., Huang, Y.-F., Pan, T.-C. (2010). [Constitutive modeling of reinforced concrete and prestressed concrete structures strengthened by fiber-reinforced plastics](#). *Composite Structures*, 92(7):1640–1650.
- [14] Ren, W., Sneed, L. H., Yang, Y., He, R. (2014). [Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1):45–54.
- [15] Huang, Y., Kang, T. H. K., Ramseyer, C., Rha, C. (2010). [Background to multi-scale modelling of unbonded Post-Tensioned concrete structures](#). *International Journal of Theoretical and Applied Multiscale Mechanics*, 1(3):219.
- [16] Kang, T. H. K., Huang, Y. Nonlinear finite element analyses of unbonded post-tensioned slab-column connections. *PTI Journal*, 8(1):4–19.
- [17] Huang, Y. (2012). *Finite element method for post-tensioned prestressed concrete structures*. The University of Oklahoma.
- [18] Kang, T. H.-K., Huang, Y., Shin, M., Lee, J. D., Cho, A. S. (2015). [Experimental and Numerical Assessment of Bonded and Unbonded Post-Tensioned Concrete Members](#). *ACI Structural Journal*, 112(6).
- [19] Kang, T. *Recent Advances in Computational Design and Analysis of Unbonded Post-Tensioned Concrete Structures*.
- [20] Tung, D. D., Tu, C. V., Phung, H. T. K., Long, N. M. (2022). [Effect of prestressing force on flexural behavior of unbonded prestressed concrete beams strengthened by CFRP sheets](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(1):1–18.
- [21] ACI Committee 318 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [22] Le, T. D., Pham, T. M., Hao, H. (2020). [Numerical study on the flexural performance of precast segmental concrete beams with unbonded internal steel tendons](#). *Construction and Building Materials*, 248:118362.
- [23] Carreira, D. J., Chu, K.-H. (1985). [Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression](#). *ACI Journal Proceedings*, 82(6):797–804.

- [24] Shamass, R., Zhou, X., Alfano, G. (2015). [Finite-Element Analysis of Shear-Off Failure of Keyed Dry Joints in Precast Concrete Segmental Bridges](#). *Journal of Bridge Engineering*, 20(6).
- [25] Devalapura, R. K., Tadros, M. K. (1992). [Stress-Strain Modeling of 270 ksi Low-Relaxation Prestressing Strands](#). *PCI Journal*, 37(2):100–106.
- [26] Nguyen-Minh, L., Vo-Le, D., Tran-Thanh, D., Pham, T. M., Ho-Huu, C., Rovňák, M. (2018). [Shear capacity of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP and GFRP U-wraps](#). *Composite Structures*, 184:1011–1029.
- [27] Gupta, P. R. (2006). *Post-tensioning manual*. PTI Post-Tensioning Institute.
- [28] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005). [Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete](#). *Engineering Structures*, 27(6):920–937.
- [29] Rabbat, B. G., Russell, H. G. (1985). [Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout](#). *Journal of Structural Engineering*, 111(3):505–515.
- [30] Abaqus Scripting User's Manual (2012). Abaqus 6.11. <http://130.149>, 89(2080):v6.