

Nghiên cứu mô phỏng xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và polyme sợi thủy tinh

Nguyễn Quang Sĩ^{1*}, Nguyễn Hoàng Quân²

¹ Khoa Công trình, Phân Hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, 450-451 Lê Văn Việt, Phường Tăng Nhơn Phú A, Tp. Thủ Đức (Quận 9 cũ), TP. Hồ Chí Minh.

² Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, 3 Cầu Giấy, Láng Thượng, Đống Đa, Hà Nội.

TỪ KHÓA

Mô phỏng số
Dầm
Cốt thép
GFRP

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm xác định ứng xử chịu uốn của kết cấu dầm bê tông sử dụng cốt thép và composite polyme sợi thủy tinh (GFRP). Kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thực nghiệm trên mẫu dầm chịu uốn bốn điểm. Kết quả thu được cho thấy sự tương đồng giữa mô hình mô phỏng số và kết quả thí nghiệm trên các phương diện như đường cong lực chuyển vị, dạng phá hoại. Bên cạnh đó, một số tham số ảnh hưởng đến ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và GFRP như hàm lượng cốt GFRP và cường độ của bê tông cũng được khảo sát.

KEYWORDS

Numerical
Beam
Reinforced
GFRP

ABSTRACT

This paper presents the numerical simulation study using the finite element method to determine the bend behaviour of concrete beam using steel and glass fiber reinforced polyme (GFRP). Numerical simulation results are compared with experimental results on four points bending test in this study. The obtained results show the similarity between numerical simulation model and experimental results in aspects such as displacement force curve, failure mode. Besides, some parameters affecting to flexural behavior of RC beam using steel and GFRP such as GFRP ratio and concrete strength were also investigated.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, các kỹ sư xây dựng luôn tìm kiếm các vật liệu mới để thay thế cho cốt thép trong các kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Vật liệu BTCT tuy có nhiều ưu điểm như khả năng chịu lực lớn, dễ thi công, giá thành rẻ, nhưng dạng vật liệu này có nhược điểm lớn là cốt thép bị ăn mòn sau một thời gian sử dụng. Đặc biệt là do Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, với đặc tính cơ bản là nóng ẩm và phân bố theo mùa. Ngoài ra, nước ta có vùng biển dài hơn 3200 km, trải dài từ vĩ độ 8 đến vĩ độ 24. Đây là điều kiện thuận lợi thúc đẩy quá trình ăn mòn cốt thép từ đó làm nứt vỡ, phá hủy kết cấu bê tông cốt thép, làm kết cấu bị hư hỏng sớm, không đảm bảo tuổi thọ công trình, gây thiệt hại về người và của. Mặt khác, các kết cấu cũ không còn đáp ứng được nhu cầu tải trọng ngày càng lớn khi thay đổi công năng sử dụng. Từ đó, làm gia tăng chi phí để sửa chữa và gia cường các công trình bằng BTCT.

Để hạn chế hiện tượng cốt thép bị ăn mòn, nhiều biện pháp được sử dụng như: dùng các chất phụ gia tăng khả năng chống thấm cho bê tông, dùng các chất ức chế ăn mòn, dùng các lớp sơn phủ, bố trí lớp bê tông bảo vệ có chiều dày lớn. Biện pháp sơn phủ, sử dụng chất phụ gia đều mang tính thụ động, do đó khó kiểm soát chất lượng và về lâu dài cốt thép vẫn bị gỉ do các tác động của môi trường [1]. Giá trị chiều dày lớp bê tông bảo vệ, trong các kết cấu BTCT được xây

dựng ở vùng có điều kiện thời tiết khắc nghiệt, được quy định trong Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018 về thiết kế kết cấu bê tông và BTCT có thể lên tới 50 đến 100 mm. Điều này làm cho kết cấu BTCT trở nên nặng nề và tốn vật liệu.

Bên cạnh giải pháp chống ăn mòn cho cốt thép, giải pháp thay thế cốt thép bằng các loại vật liệu phi kim loại không bị ăn mòn đang ngày càng được áp dụng nhiều. Trong số đó, cốt thanh composite polyme (FRP) là loại vật liệu có tiềm năng lớn để thay thế cho cốt thép. Đây là loại vật liệu được tạo nên bằng cách gắn kết các sợi (ví dụ: thủy tinh, aramid, các bon, bazan) bởi các chất nền là nhựa polyme. Vật liệu này có ưu điểm lớn là tuổi thọ cao, cường độ chịu kéo lớn, trọng lượng nhẹ, không nhiễm từ và đặc biệt là không bị ăn mòn [2], do đó có thể thay thế cốt thép trong các công trình có tải trọng lớn và nhất là những công trình nằm trong môi trường khắc nghiệt.

Trên thế giới, vật liệu bê tông cốt FRP đã và đang được nghiên cứu và phát triển. Một số tiêu chuẩn đã đưa ra chỉ dẫn tính toán và thiết kế các cấu kiện sử dụng loại vật liệu này [2-4]. Ở Việt Nam, chủ đề này cũng đang ngày càng thu hút nhiều sự chú ý của các nhà nghiên cứu trong nước [5,6]. Loại vật liệu này đã được đưa vào hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam từ năm 2015 [7, 8]. Đây là cơ sở pháp lý cho sự phát triển loại vật liệu này ở nước ta. Thêm vào đó, cốt thanh FRP đã được sản xuất trong nước và đang được thúc đẩy để đưa vào thay thế cốt thép. Trên thực tế, một số công trình sử dụng bê tông cốt

*Liên hệ tác giả: sinq_ph@utc.edu.vn

Nhận ngày 04/05/2022, sửa xong ngày 06/06/2022, chấp nhận đăng 04/08/2022

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2022.385>

FRP đã được triển khai ở Việt Nam. Trong tương lai gần, loại vật liệu này hứa hẹn sẽ chiếm tỷ trọng lớn trong ngành xây dựng ở nước ta. Tuy nhiên, khác với cốt thép, FRP có ứng xử đàn hồi giòn. Điều này dẫn đến ứng xử của dầm bê tông cốt FRP không có tính dẻo như dầm bê tông cốt thép. Ngoài ra, để khai thác được cường độ chịu kéo thì cần cốt FRP có biến dạng lớn, tuy nhiên, điều này gây ra các hư hỏng cho bê tông như vết nứt có độ rộng lớn hoặc phá hoại bê tông ở vùng nén do đạt đến biến dạng cực hạn. Đây là một trong những lý do chính hạn chế sự phổ biến của vật liệu này trong xây dựng.

Một trong những cách phối hợp vật liệu là sử dụng cả cốt thanh GFRP và cốt thép để làm cốt cho kết cấu bê tông. Cốt GFRP sẽ được bố trí ở gần bề mặt ngoài của bê tông, cốt thép sẽ được đặt ở các lớp phía trong (gần trục trung hòa hơn), khi đó, sẽ thỏa mãn được hai vấn đề: (i) một cách gián tiếp làm chiều dày lớp bê tông bảo vệ cho cốt thép, (ii) cốt GFRP sẽ có biến dạng lớn do ở xa trục trung hòa nên sẽ khai thác được cường độ chịu kéo của chúng [9].

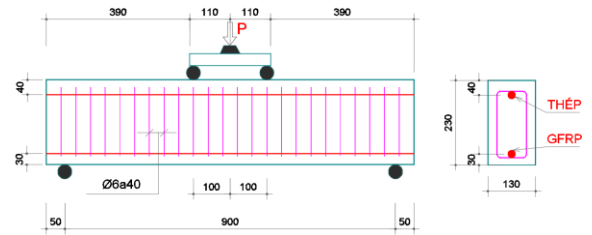
Hiện nay, với sự hỗ trợ của máy vi tính và sự phát triển của lý thuyết phần tử hữu hạn (PTHH) đã cho phép phân tích được sự làm việc của các kết cấu một cách khá chính xác. Các Nghiên cứu của Kara [10] và Qin [11] đã chỉ ra sự phù hợp của phân tích bằng mô hình mô phỏng số với kết quả thí nghiệm đối với kết cấu dầm sử dụng cốt GFRP. Trong bài báo này, phần mềm PTHH Cast3M được sử dụng để nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm sử dụng hỗn hợp cốt thép và GFRP làm cốt dọc chịu lực. Kết quả mô phỏng được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm được thực hiện bởi Iman Chitsanzan và cộng sự [12]. Từ mô hình đã được kiểm chứng bằng thí nghiệm, một số tham số như hàm lượng cốt GFRP và cường độ bê tông cũng được khảo sát để xem xét ảnh hưởng của các tham số này đến ứng xử của kết cấu dầm bê tông cốt thép và GFRP.

Bộ cục bài báo gồm các phần sau: phần 1 đặt vấn đề, phần 2 trình bày tóm tắt các kết quả thí nghiệm. Tiếp đó, phần 3 trình bày mô hình mô phỏng, so sánh kết quả mô phỏng số và thí nghiệm. Cuối cùng phần 4 là phần kết luận.

2. Thí nghiệm xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt GFRP

2.1 Bố trí thí nghiệm

Nhằm xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và GFRP, mẫu dầm NCF1 có kích thước 130x230x1000 (mm) được chế tạo và tiến hành thí nghiệm chịu uốn bốn điểm [12]. Hình 1 thể hiện cấu tạo mẫu dầm được thí nghiệm. Mẫu dầm sử dụng 1 thanh GFRP ở thớ dưới với đường kính $\phi = 12,7\text{ mm}$, 1 thanh thép ở thớ trên có đường kính $\phi = 20\text{ mm}$, cốt thép đai sử dụng trong dầm có đường kính $\phi = 6\text{ mm}$, khoảng cách giữa các thanh thép đai là 40 mm. Bê tông chế tạo dầm có cường độ chịu nén bằng 41,4 MPa. Bảng 1 thể hiện thành phần cấp phối của bê tông. Bảng 2 trình bày các thông số vật liệu thép và Bảng 3 thể hiện các thông số của vật liệu GFRP.



Hình 1. Cấu tạo chi tiết các mẫu dầm thí nghiệm [12].

Bảng 1. Thành phần cấp phối của bê tông (kg) [12].

Xi măng (X)	Nước (N)	Cốt liệu thô	Cốt liệu mịn	Tỷ lệ N/X
450	235	980	810	0,52

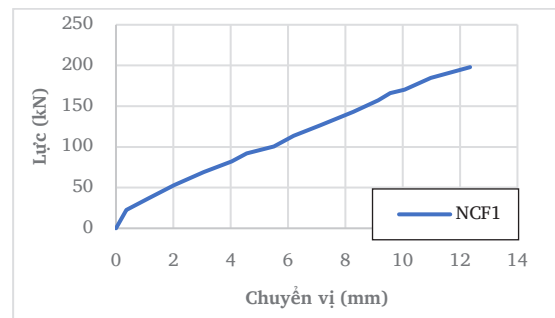
Bảng 2. Thông số thép thanh trong thí nghiệm [12].

Đường kính thép d_s (mm)	Diện tích mặt cắt ngang thanh thép A_s (mm ²)	Mô đun đàn hồi E_s (MPa)	Giới hạn chảy f_y (MPa)	Cường độ giới hạn f_u (MPa)
6	28,3	200000	400	600
20	314	200000	300	500

Bảng 3. Thông số GFRP trong thí nghiệm [12].

	Đường kính d_f (mm)	Mô đun đàn hồi E_f (MPa)	Cường độ f_{fu} (MPa)	Diện tích FRP A_f (mm ²)
GFRP	12,7	40810	690	126,7

2.2 Kết quả thí nghiệm



(a) Mối quan hệ lực chuyển vị của mẫu dầm TN



(b) Dạng phá hoại của dầm TN

Hình 2. Kết quả thí nghiệm (a) Mối quan hệ lực - chuyển vị của mẫu dầm (b) Dạng phá hoại của dầm [12].

Hình 2 thể hiện mối quan hệ lực tác dụng và chuyển vị cũng như dạng phá hoại trên hai mẫu dầm thí nghiệm. Quan sát trên Hình 2 thấy rằng, tại giá trị lực bằng 23,46 kN, mẫu dầm xuất hiện vết nứt

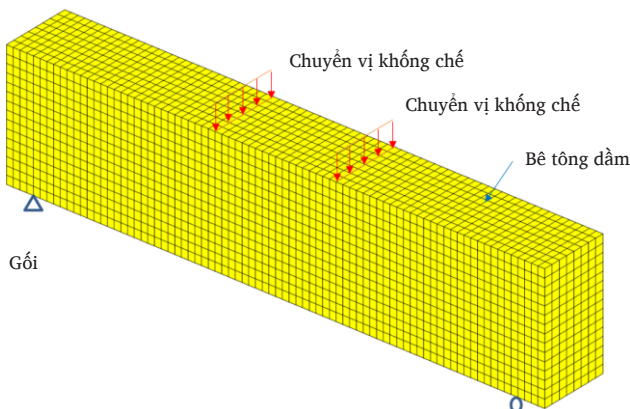
đầu tiên do uốn tại vị trí giữa hai vị trí gia tải của dầm. Tại thời điểm này, đường cong lực - chuyển vị thể hiện sự suy giảm độ cứng do có vết nứt xuất hiện. Khi tải trọng tăng lên, các vết nứt do uốn khác xuất hiện ngày càng nhiều và phát triển về biên chịu nén. Ở giá trị lực bằng 180 kN, xuất hiện một vết nứt (do cắt) hợp với trục dầm một góc 45° gần vị trí gối. Khi tiếp tục tăng tải trọng, các vết nứt kể trên có xu hướng phát triển về điểm kê gối và điểm đặt lực. Cuối cùng, ở giá trị lực bằng 197,71 kN, dầm bị phá hoại. Lúc này, tại vị trí đặt lực, bê tông bị nén vỡ.

3. Mô hình mô phỏng

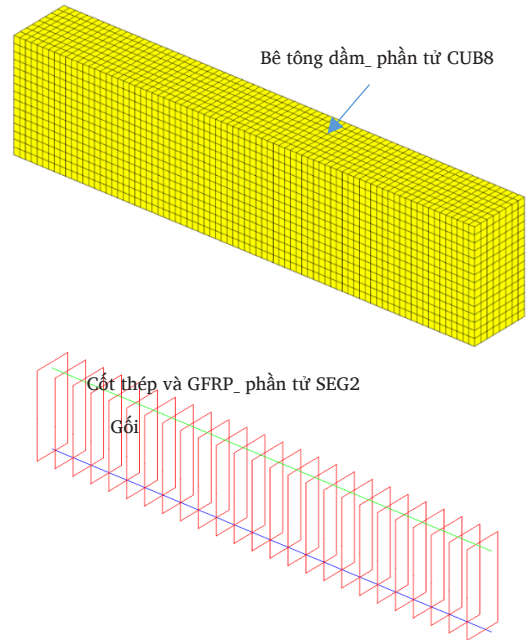
3.1 Xây dựng mô hình

Mẫu dầm thí nghiệm được tiến hành mô phỏng bằng phần mềm phần tử hữu hạn Cast3M. Đây là phần mềm có mã nguồn mở, được nghiên cứu và phát triển triển bởi viện nghiên cứu năng lượng nguyên tử (CEA) của Cộng Hòa Pháp [13].

Phần tử lục diện 8 nút (CUB8), mỗi nút có ba bậc tự do là ba chuyển vị thẳng đứng theo ba phương U_x, U_y, U_z được dùng để miêu tả cho phần tử bê tông. Các phần tử này có kích thước bằng 12,5mm để đảm bảo điều kiện hội tụ của bài toán. Thanh thép và thanh GFRP được mô phỏng bằng phần tử thanh tuyến tính 2 nút (SEG2), diện tích của mỗi thanh được lấy bằng diện tích của các thanh như trong Bảng 2 và Bảng 3. Các điểm nút của phần tử thanh và phần tử hình chữ nhật được xác định trùng nhau. Hình 3 thể hiện lưới phần tử hữu hạn dùng trong mô hình. Gối bên trái được khống chế chuyển vị theo phương đứng và phương ngang, gối bên phải được khống chế chuyển vị theo phương đứng. Dầm mô phỏng được gia tải bằng chuyển vị với số gia chuyển vị $\Delta U = -0,01mm$. Hình 4 thể hiện các phần tử trong mô hình mô phỏng.



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn.

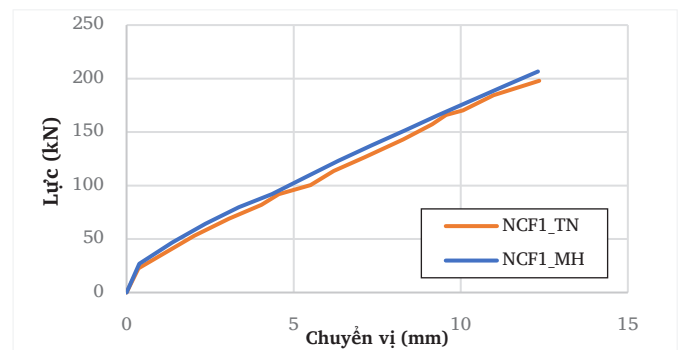


Hình 4. Các phần tử trong mô hình mô phỏng.

Ứng xử của bê tông được mô phỏng bằng cách sử dụng mô hình bê tông phá hoại của Mazars [14]. Mô hình này có trong thư viện các mô hình vật liệu phần mềm Cast3M. Mô hình này cho phép miêu tả các ứng xử phức tạp của vật liệu bê tông như ứng xử chịu nén một, hai, ba trục thông qua đại lượng hư hại có hiệu d . Đại lượng này cho phép miêu tả sự suy giảm độ cứng của mẫu. Ở trạng thái mẫu bị nứt, đại lượng này cho phép miêu tả sự phát triển của vết nứt đồng thời tránh cho các vết nứt bị xâm nhập vào nhau (unilateral contact). Bên cạnh đó, mô hình mô phỏng tương đối chính xác các loại tải trọng khác nhau: tải trọng động, tải trọng tĩnh, tải trọng lặp [9]. Các thanh GFRP được miêu tả bằng ứng xử đàn hồi tuyến tính đến khi bị phá hoại. Các thanh thép dọc và thép đai được miêu tả bằng ứng xử đàn hồi - dẻo lý tưởng.

3.2 Kết quả mô phỏng

3.2.1 Mối quan hệ lực chuyển vị



Hình 5. So sánh lực - chuyển vị của dầm mô phỏng với kết quả thí nghiệm.

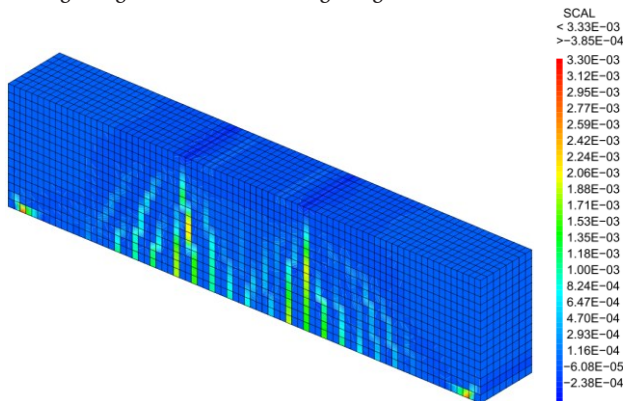
Hình 5 thể hiện sự so sánh mối quan hệ lực chuyển vị thu được từ mô hình mô phỏng và kết quả thí nghiệm. Quan sát thấy rằng đường cong thu được từ mô hình mô phỏng thể hiện sự tương đồng với kết quả thí nghiệm. Đường cong mô phỏng thể hiện được sự thay đổi độ cứng của dầm khi có vết nứt xuất hiện. Giá trị lực lớn nhất không có sự khác biệt nhiều so với kết quả thí nghiệm (Bảng 4), với sai số nhỏ hơn 5 %.

Bảng 4. So sánh kết quả của các dầm thí nghiệm và mô phỏng trong nghiên cứu.

Dầm	Lực lớn nhất P_u (kN)		
	Thí nghiệm (TN)	Mô phỏng số (MH)	Sai số
NCF1	197,71	206,62	4,5%

3.2.2 Dạng phá hoại.

Hình 6 thể hiện hình ảnh phá hoại của mẫu dầm thí nghiệm thu được từ mô hình mô phỏng. Quan sát thấy rằng dạng phá hoại thể hiện sự tương đồng với kết quả thí nghiệm khi trên mẫu có các vết nứt thẳng đứng do uốn và vết nứt nghiêng do cắt.



Hình 6. Hình ảnh phá hoại mẫu dầm từ mô hình mô phỏng.

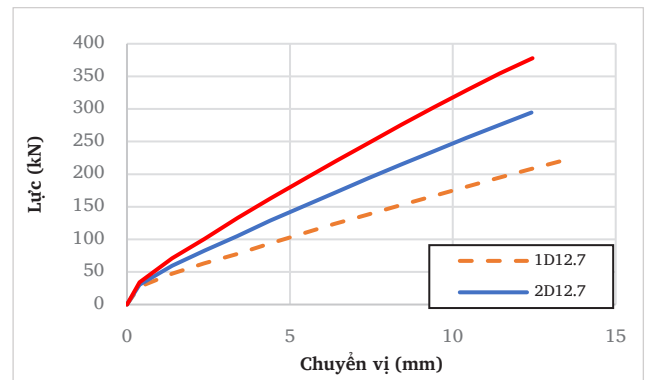
3.3 Ảnh hưởng của một số tham số tới ứng xử chịu uốn của dầm GFRP

Mô hình mô phỏng số kể trên cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm về đường cong lực – chuyển vị, dạng phá hoại của dầm. Trên cơ sở đó, mô hình này được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của một số tham số tới ứng xử chịu uốn của dầm sử dụng hỗn hợp cốt thép và GFRP, bao gồm: hàm lượng cốt dọc GFRP và cường độ của bê tông.

3.3.1 Ảnh hưởng của hàm lượng cốt dọc GFRP

Để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt GFRP đến ứng xử của dầm, số lượng cốt GFRP chịu kéo được thay đổi từ 1 thanh (hàm lượng cốt GFRP trong dầm là 0,00487) thành 2 thanh và 3 thanh, tương ứng với hàm lượng cốt GFRP là 0,00974 và 0,01462 và các thông số của bê tông được giữ nguyên. Biểu đồ quan hệ lực – chuyển

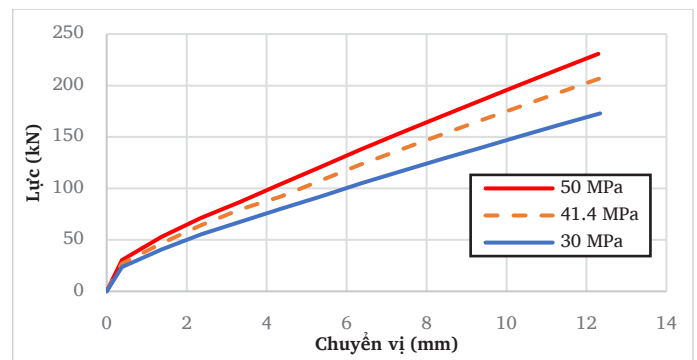
vị của các mẫu dầm có hàm lượng cốt GFRP khác nhau được thể hiện trong Hình 7. Quan sát thấy rằng, hàm lượng cốt GFRP ảnh hưởng đến sức kháng của dầm, khi tăng hàm lượng cốt GFRP lên thì khả năng chịu lực lớn nhất của các dầm cũng tăng lên. Khi tăng số lượng cốt GFRP từ 1 thanh lên thành 2 thanh và 3 thanh thì khả năng chịu lực tăng lần lượt là 33,8 % và 71,7 %. Dầm có hàm lượng GFRP nhỏ có độ cứng thấp hơn sau khi dầm nứt, cũng như khả năng chịu lực nhỏ hơn nhưng lại có chuyển vị lớn hơn.



Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt dọc GFRP.

3.3.2 Ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông.

Cường độ chịu nén của bê tông là một trong những thông số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến sức kháng và độ cứng của dầm bê tông. Trong phần thí nghiệm, cường độ chịu nén của bê tông là 41,4 MPa. Trong phần này, để đánh giá ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông dầm đến ứng xử của dầm, bê tông có cường độ 30 MPa và 50 MPa được lựa chọn để khảo sát với các thông số của cốt thép và GFRP được giữ nguyên. Hình 8 thể hiện so sánh biểu đồ lực – chuyển vị của mẫu dầm với cường độ bê tông khác nhau. Có thể nhận thấy rằng, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông, độ cứng ban đầu của dầm tăng lên. Ngoài ra, biểu đồ cũng cho thấy, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông từ 30 MPa lên 41,4 MPa và 50 MPa thì sức kháng của dầm cũng tăng lên lần lượt 19,5 % và 33,5 %.



Hình 8. Ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và GFRP. Mô hình mô phỏng cho thấy sự tương đồng với kết quả thí nghiệm trên các phương diện như dạng vết nứt, mối quan hệ lực chuyển vị. Sai số giữa giá trị lực lớn nhất của mô hình và thí nghiệm là nhỏ hơn 5%.

Bên cạnh đó, dựa trên mô hình mô phỏng số, nghiên cứu tham số được tiến hành để xác định ảnh hưởng của một số tham số tới ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép và GFRP. Các phân tích khảo sát tham số cho thấy rằng, khi tăng số lượng cốt GFRP chịu kéo từ 1 thanh lên thành 2 thanh và 3 thanh thì giá trị chịu lực của dầm tăng lần lượt là 33,8 % và 71,7 %. Ngoài ra, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông từ 30MPa lên 41,4 MPa và 50 MPa thì độ cứng ban đầu của dầm cũng tăng lên, giá trị lực lớn nhất cũng tăng 19,5 % và 33,5 %.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyễn Quang Sĩ (2021), “Nghiên cứu mô phỏng xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và GFRP theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018”, *Tạp chí Kết cấu và Công nghệ Xây dựng*, (33): 73-82.
- [2]. ACI 440.1R-15 (2015), *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- [3]. American Concrete Institute (ACI) (2017). *Guide for the design and construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI 440.2R-17, Farmington Hills, MI.
- [4]. CSA S806-12 (2012) *Design and Construction of Buildings Components with Fiber-Reinforced Polymers*, Canadian Standards Association (CSA), Toronto.
- [5]. Đỗ Đức Thắng (12-2012), “Triển vọng ứng dụng cốt sợi thủy tinh gia cường polymer thay thế cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép ở Việt Nam”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 14.
- [6]. Nguyễn Hồng Sơn, “Thiết kế dầm bê tông sử dụng chất dẻo cốt sợi FRP dạng thanh”, *Tạp chí xây dựng*, số T6-2013, Hà Nội.
- [7]. TCVN 11109:2015 (2015), *Cốt composite polyme*, Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [8]. TCVN 11110:2015 (2015), *Cốt composite polyme dùng trong kết cấu bê tông và địa kỹ thuật*, Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [9]. Nguyễn Quang Sĩ, “Nghiên cứu mô phỏng xác định ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt composite polyme”, *Tạp chí Người Xây dựng*, số tháng 3&4-2022.
- [10]. Ilker Fatih Kara, Ashraf F. Ashour, Mehmet Alpaslan Köroğlu, “Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams”, *Compos. Str.*, (Accepted Manuscript), 2015.
- [11]. Qin Renyuan, Ao Zhou, Denvid Lau, “Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams”, *Composites Part B*, (2017), (Accepted Manuscript).
- [12]. I. Chitsazan, M. Kobraei, M. Z. Jumaat, and P. Shafiqh, “An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI,” *J. Civ. Eng. Constr. Technol.*, vol. 1(2), pp. 27–42, 2010.
- [13]. CAST3M, <http://www-cast3m.cea.fr/>.
- [14]. Mazars J, “A description of micro and macroscale damage of concrete structure”. *Eng Fract Mech* 25:729–737, 1986.