

# Ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục cốt FRP đến ứng xử uốn của dầm bê tông đặt cốt lai FRP/thép

Effect of axial stiffness ratio of frp bar on the behavior of hybrid frp/steel reinforced concrete beams

> NGUYỄN ĐỨC SỸ<sup>1</sup>, BÙI VĂN TUYẾN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa Sư phạm Công nghiệp, Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng

<sup>2</sup>Khoa Xây dựng, Trường Công nghệ Văn Lang, Trường ĐH Văn Lang; Email: tuyen.bv@vlu.edu.vn

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt thanh polyme cốt sợi (FRP) đến mômen gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực trên tiết diện thẳng góc của dầm bê tông đặt cốt lai FRP/thép. Để mô phỏng ứng xử của dầm, tác giả đã xây dựng mô hình dầm đặt cốt lai kết hợp từ các thanh cốt sợi thủy tinh và thanh cốt thép trên phần mềm Lira-Saprr. Kết quả mô phỏng ứng xử của dầm được kiểm chứng bằng kết quả nghiên cứu thực nghiệm. Dựa trên mô hình dầm trên phần mềm Lira-Saprr, tác giả đã phân tích ứng xử của ba nhóm dầm khác nhau về hàm lượng cốt thép, hàm lượng cốt FRP và mô đun đàn hồi của cốt FRP. Từ đó đánh giá ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP đến mômen gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực của dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi cố định hàm lượng cốt thép, tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.06 đến 1.67 làm tăng mô men gây chảy cốt thép của dầm 51% và tăng khả năng chịu lực của dầm đến 87%, đồng thời khả năng chịu lực và mô men gây chảy cốt thép của các dầm sử dụng các loại cốt FRP với mô đun đàn hồi khác nhau nhưng có cùng tỉ lệ độ cứng dọc trục là như nhau. Ngược lại, khi cố định hàm lượng cốt FRP, việc tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.11 đến 1.67 sẽ làm giảm mô men gây chảy cốt thép 73.3% và giảm khả năng chịu lực của dầm 35.4%.

**Từ khóa:** Dầm; bê tông cốt thép; FRP; cốt lai; Lira-Saprr; độ cứng dọc trục.

## ABSTRACT

This paper presents the research results on the influence of the axial stiffness ratio of fiber-reinforced polymer (FRP) bars on the steel yielding moment and the load-bearing capacity of the cross-section of FRP/steel hybrid reinforced concrete beams. To simulate the behavior of the beam, the author constructed a hybrid reinforcement beam model combining glass fiber bars and steel bars using the Lira-Saprr software. The simulation results of beam was verified with experimental research results. Based on the beam model in Lira-Saprr, the author analyzed the behavior of three different beam groups concerning steel reinforcement ratio, FRP reinforcement ratio and the elastic modulus of FRP, thereby assessing the impact of the FRP axial stiffness ratio on the steel yielding moment and the load-bearing capacity of the beam. The research results show that, with a fixed steel reinforcement ratio, increasing the FRP axial stiffness ratio from 1.06 to 1.67 increases the steel yielding moment of the beam by 51% and the load-bearing capacity by up to 87%. Simultaneously, the load-bearing capacity and steel yielding moment of beams using different types of FRP with various elastic moduli but the same axial stiffness ratio are equal. Conversely, with a fixed FRP reinforcement ratio, increasing the FRP axial stiffness ratio from 1.11 to 1.67 decreases the steel yielding moment by 73.3% and the load-bearing capacity of the beam by 35.4%.

**Keywords:** Beam; reinforced concrete; FRP, hybrid reinforcement; Lira-Saprr; Axial stiffness.

## 1. TỔNG QUAN

Độ bền và tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) bị chi phối bởi nhiều yếu tố, trong đó điển hình là sự ăn mòn của cốt thép. Ăn mòn cốt thép làm giảm độ bền cơ học của kết cấu BTCT và trạng thái liên kết giữa thép và bê tông. Để khắc phục tình trạng ăn mòn

cốt thép của kết cấu BTCT, được khai thác trong môi trường ăn mòn, có thể sử dụng cốt thép mạ kẽm hoặc bổ sung phụ gia ức chế ăn mòn cho bê tông [1, 2]. Bên cạnh đó, thanh polymer cốt sợi (FRP – Fiber reinforced polymer) được coi là sự thay thế lý tưởng cho cốt thép truyền thống cho kết cấu bê tông đặt cốt khai thác trong một

số môi trường đặc biệt [3]. So với cốt thép truyền thống, cốt FRP có những ưu điểm vượt trội như: cường độ chịu kéo cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn, không dẫn điện, không bị nhiễm từ v.v... [4, 5]. Tuy nhiên, cốt FRP cũng có những nhược điểm nhất định như: trạng thái ứng suất-biến dạng của thanh FRP là tuyến tính mà không có chảy dẻo, các cấu kiện bê tông đặt cốt FRP thường phá hoại giòn, khả năng chịu nén rất kém, mô đun đàn hồi thấp. Do cốt thanh FRP có mô đun đàn hồi nhỏ, vì vậy cấu kiện chịu uốn đặt cốt FRP có độ cứng uốn bé, theo đó độ võng và bề rộng vết nứt của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng có giá trị lớn [6, 7]. Vì vậy, để đáp ứng yêu cầu sử dụng theo trạng thái giới hạn 2, cấu kiện chịu uốn bê tông đặt cốt FRP thường được đặt nhiều (dư) cốt FRP trong vùng kéo nhằm tăng độ cứng uốn, điều này gây lãng phí và tăng giá thành xây dựng. Để khắc phục nhược điểm này của cốt FRP, nhiều tác giả đã nghiên cứu sử dụng cốt FRP kết hợp với cốt thép truyền thống (cốt lai hoặc cốt hỗn hợp) cho cấu kiện chịu uốn nhằm cải thiện tính dẻo, tăng độ cứng, khả năng chịu lực v.v... [6, 8-11]. Trong trường hợp này, để tránh tình trạng ăn mòn, cốt thép có thể đặt sâu hơn trong bê tông (ở lớp thứ 2 trở đi) [11-13].

Trong những năm gần đây, ứng xử ngắn hạn và dài hạn của cấu kiện chịu uốn bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép được nghiên cứu rộng rãi trong và ngoài nước. Các nghiên cứu này tập trung vào nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số khác nhau như: tính chất cơ học của vật liệu, tỉ lệ diện tích cốt FRP/cốt thép ( $A_f/A_s$ ), hàm lượng cốt dọc v.v... đến ứng xử của dầm, độ võng, mô men gây nứt, khả năng chịu lực, khớp dẻo, độ dẻo, độ dai v.v... [6, 8-15]. Song song với các nghiên cứu ứng xử, các phương pháp tính toán thiết kế cấu kiện chịu uốn cũng được xây dựng với độ tin cậy cao.

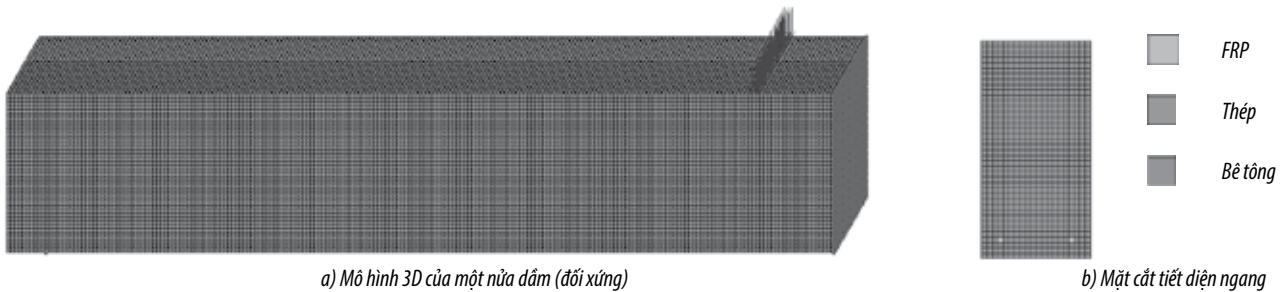
Tuy cấu kiện chịu uốn bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép đã được nhiều tác giả quan tâm nghiên cứu, nhưng vẫn còn nhiều khía cạnh cần được làm sáng tỏ. Một trong những khoảng trống đó là đánh giá ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP đến ứng

xử của cấu kiện chịu uốn đặt cốt hỗn hợp FRP/thép. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP đến ứng xử của dầm bê tông đặt cốt FRP/thép nhằm làm sáng tỏ hơn về bản chất của cốt hỗn hợp và dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp. Để đạt được mục đích nghiên cứu, tác giả xây dựng mô hình mô phỏng dầm trên phần mềm Lira-SapR và kiểm chứng với kết quả thực nghiệm, trên cơ sở đó tiến hành khảo sát ứng xử của 3 nhóm dầm (mỗi nhóm có 4 dầm) bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép với các tham số thay đổi: diện tích cốt thép; diện tích cốt FRP và mô đun đàn hồi của cốt FRP. Từ kết quả khảo sát nhận được, tác giả tiến hành đánh giá ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục đến mô men gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực của dầm.

## 2. MÔ HÌNH DẦM BÊ TÔNG ĐẶT CỐT HỖN HỢP FRP/THÉP TRÊN PHẦN MỀM LIRA-SAPR

### 2.1. Mô phỏng dầm bằng phần mềm Lira-SapR

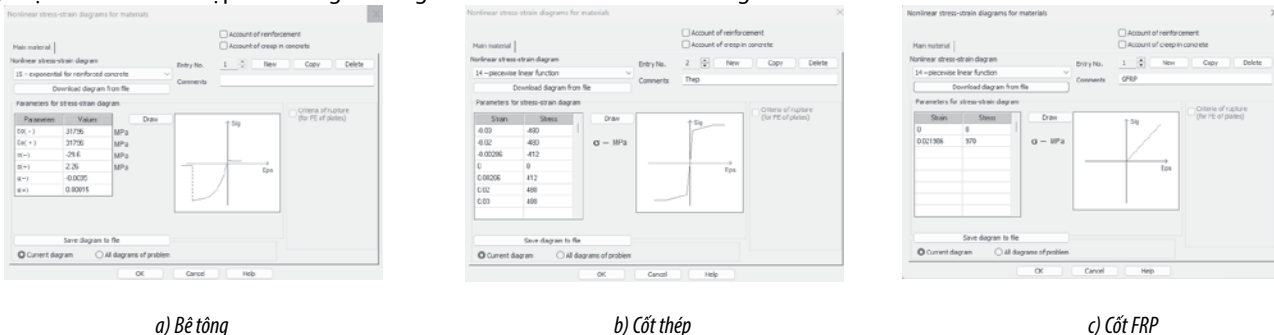
Tác giả sử dụng phần mềm Lira-SapR để mô phỏng ứng xử phi tuyến của dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép. Lira-SapR là gói phần mềm đa chức năng để thiết kế và tính toán các kết cấu xây dựng và cơ khí với các mục đích khác nhau trên nền phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Vật liệu bê tông được mô phỏng bằng PTHH FE236, đây là PTHH đẳng tham số không gian tám nút phi tuyến về mặt vật lý và thường được dùng để tính toán cường độ của các vật thể liên tục và kết cấu có xét đến tính phi tuyến vật lý của vật liệu. Tương tự, các thanh cốt cũng được mô phỏng bằng PTHH FE236. Ở đây, các thanh cốt cũng có thể được mô phỏng dạng thanh bằng PTHH FE410, đây là PTHH thanh không gian có xét đến phi tuyến vật lý và hình học [16]. Để giảm khối lượng tính toán, có thể mô phỏng một nửa dầm cho trường hợp đối xứng và gán các điều kiện liên kết tương ứng. Hình 1 thể hiện mô hình 3D của một nửa dầm và tiết diện ngang.



Hình 1. Mô hình dầm trên phần mềm Lira-SapR

Biểu đồ ứng suất-biến dạng của vật liệu được khai báo theo các quy luật được tích hợp sẵn trong chương trình. Theo đó, biểu đồ quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông được khai báo theo quy luật hàm mũ tích hợp sẵn trong chương trình như trên Hình

2a. Để đơn giản, biểu đồ ứng suất-biến dạng của cốt thép được khai báo dạng ba đoạn như trên Hình 2b, còn biểu đồ quan hệ ứng suất-biến dạng của cốt FRP khi kéo khai báo dạng đoạn thẳng như trên Hình 2c.



Hình 2. Biểu đồ quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu

**2.2. Kiểm chứng kết quả mô phỏng ứng xử dầm trong chương trình Lira-Saprr**

Để kiểm chứng mô hình trên chương trình Lira-Saprr, tác giả sử dụng kết quả nghiên cứu thực nghiệm dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp GFRP/thép B5(2G14-2S12) của tác giả Duy và Hiệp trong [11]. Dầm thí nghiệm có chiều dài  $l = 2.7m$ , nhịp thí nghiệm  $l_0 = 2.4 m$ , và được

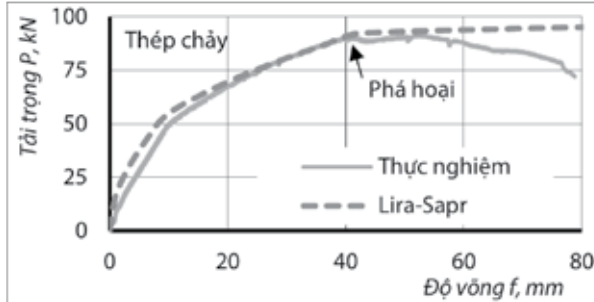
Bảng 1. Các thông số của dầm thí nghiệm B5(2G14-2S12)

B5(2G14-2S12)	Tiết diện				Cốt dọc GFRP			Cốt thép dọc			Bê tông		
	$b, mm$	$h, mm$	$C_f, mm$	$C_s, mm$	Thanh	$R_f, MPa$	$E_f, GPa$	Thanh	$\sigma_{sy}, MPa$	$\sigma_{su}, MPa$	$R_b, MPa$	$R_{bt}, MPa$	$E_b, GPa$
	148	250	16	48	2Ø14	970	44.3	2Ø12	412	577	35.4	2.5	34.17

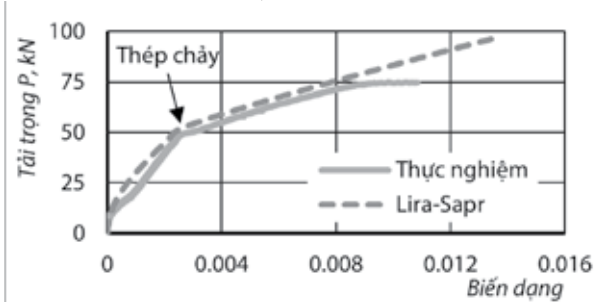
Ghi chú:  $R_f$  và  $E_f$  tương ứng là cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của cốt GFRP;  $\sigma_{sy}$  và  $\sigma_{su}$  tương ứng là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép dọc;  $R_b, R_{bt}$  và  $E_b$  tương ứng là cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông.

Mô hình dầm trong chương trình Lira-Saprr được kiểm chứng bằng cách so sánh biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng và biểu đồ

gia tải theo sơ đồ uốn 4 điểm với khoảng cách giữa 2 điểm đặt lực (vùng uốn thuần túy) là 400 mm. Cấu tạo cốt thép dọc chịu lực của dầm gồm có hai thanh cốt GFRP đặt ở lớp thứ nhất và hai thanh cốt thép ở lớp thứ hai. Chi tiết về các thông số của dầm thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 1.



a) Biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng giữa dầm



b) Biểu đồ quan hệ tải trọng - biến dạng cốt GFRP

**Hình 3.** So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng

Phân tích đồ thị so sánh trên Hình 3 cho thấy, về tổng thể, biến dạng và độ võng được dự đoán bởi phần mềm mô phỏng Lira-Saprr tương đối trùng khớp với kết quả thực nghiệm, tỉ lệ tải trọng gây chảy cốt thép giữa mô phỏng và thực nghiệm là 1.04, còn tỉ lệ này đối với tải trọng phá hoại là 1.02. Hơn nữa, kết quả nghiên cứu cho thấy biến dạng kéo trong cốt GFRP phát triển ổn định khi tải trọng tăng dần. Điều này cho thấy ứng suất liên kết giữa các thanh cốt FRP và bê tông xung quanh vẫn đảm bảo cho đến khi mẫu dầm bị phá hoại.

cao hiệu quả của tiết diện 360 mm, cốt FRP và cốt thép đặt trên cùng 01 lớp, chiều dài  $l = 4200 mm$ , nhịp  $l_0 = 4000mm$ . Dầm chịu tác dụng của 02 tải trọng tập trung (P) với vùng uốn thuần túy ở giữa nhịp là 400 mm. Bê tông và cốt thép dọc có các tính chất cơ học tương tự như dầm B5 trong Bảng 1. Chi tiết các thông số về các dầm khảo sát được thể hiện trong Bảng 2. Các dầm ở nhóm D1 (Dầm D1-1 ... D1-4) được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP khi diện tích cốt FRP thay đổi và diện tích cốt thép cố định đến ứng xử của dầm đặt cốt hỗn hợp. Ngược lại với nhóm dầm D1, các dầm ở nhóm dầm D2 (Dầm D2-1...D2-4) được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP khi diện tích cốt FRP cố định và diện tích cốt thép thay đổi. Nhóm dầm D3 có diện tích cốt thép cố định, mô đun đàn hồi và diện tích cốt FRP thay đổi sao cho tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP trong các dầm trùng với các dầm tương ứng của nhóm dầm D1, nhóm D3 để so sánh với nhóm dầm D1 và đánh giá ảnh hưởng của mô đun đàn hồi và diện tích cốt dọc FRP đến ứng xử của dầm.

**3. ẢNH HƯỞNG CỦA TỈ LỆ ĐỘ CỨNG DỌC TRỤC CỐT FRP ĐẾN ỨNG XỬ CỦA DẦM**

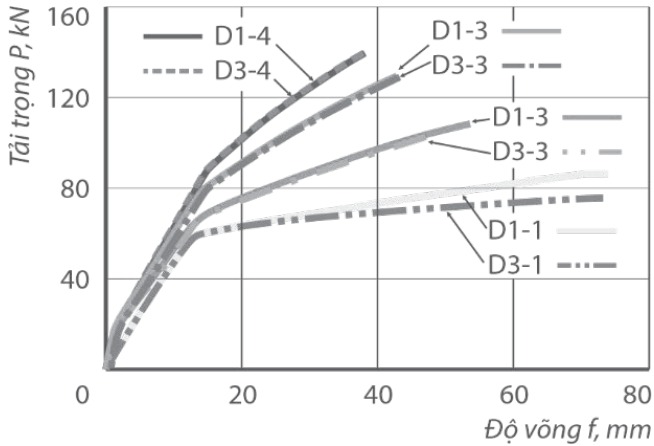
Để đánh giá ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP,  $1+E_fA_f/E_sA_s$  đến ứng xử của dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép, tác giả đã tiến hành mô phỏng ứng xử của 03 nhóm dầm khác nhau về diện tích cốt FRP, diện tích cốt thép và mô đun đàn hồi của cốt FRP, mỗi nhóm dầm có 04 dầm. Dầm khảo sát có kích thước tiết diện ngang  $200 \times 400 mm$ , chiều

Bảng 2. Chi tiết các dầm và kết quả để khảo sát tham số

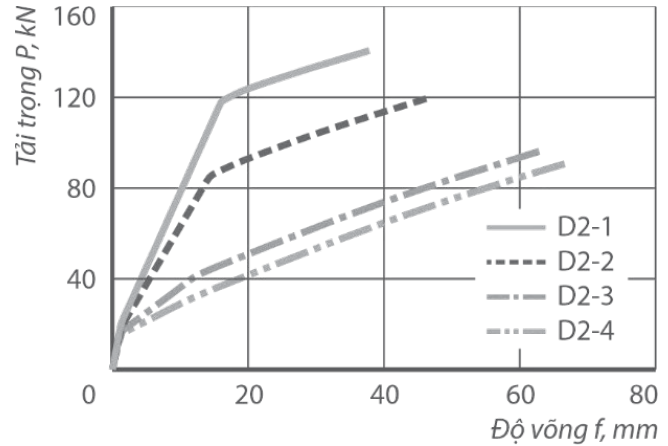
Nhóm	Dầm	$A_s, mm^2$	$A_f, mm^2$	$E_f, GPa$	$1+E_fA_f/E_sA_s$	$M_y, kNm$	$M_u, kNm$	$M_y/M_u$
D1	D1-1	730	200	44.3	1.06	106	155.4	0.68
	D1-2	730	700	44.3	1.21	119	195	0.61
	D1-3	730	1500	44.3	1.46	141	221.6	0.64
	D1-4	730	2200	44.3	1.67	160	254.2	0.63
D2	D2-1	1500	730	44.3	1.11	212	252.3	0.84
	D2-2	1000	730	44.3	1.16	154	215.7	0.71
	D2-3	370	730	44.3	1.44	74.4	172.5	0.43
	D2-4	240	730	44.3	1.67	56.6	162.9	0.35
D3	D3-1	730	49.2	180	1.06	105.6	136.1	0.78
	D3-2	730	172.3	180	1.21	119.3	189.1	0.63
	D3-3	730	369.2	180	1.46	141.1	232	0.61
	D3-4	730	541.4	180	1.67	159	254.5	0.62

Mô men gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực từ kết quả mô phỏng bằng chương trình Lira-Sapra của các dầm khảo sát được thể hiện trong Bảng 2. Hình 4 và Hình 5 thể hiện biểu đồ quan hệ tải trọng và độ võng của các nhóm dầm khảo sát. Đối với nhóm dầm D1 và D3 có hàm lượng cốt thép cố định và hàm lượng cốt FRP thay đổi, độ cứng của dầm chủ yếu được quyết định bởi cốt thép, vì vậy độ cứng của các dầm trong 02 nhóm này ở giai đoạn trước khi cốt

thép chảy là tương đồng nhau. Ngược lại, đối với nhóm dầm D2 có hàm lượng cốt FRP cố định và hàm lượng cốt thép thay đổi, việc tăng tỉ lệ độ cứng của cốt FRP sẽ làm giảm độ cứng của tổng thể của dầm. Ngoài ra, kết quả so sánh các dầm có cùng tỉ lệ độ cứng dọc trục trên Hình 4 cho thấy, khi cố định cốt thép dọc, độ cứng của dầm chỉ phụ thuộc vào tỉ lệ độ cứng của cốt FRP mà không phụ thuộc vào loại FRP sử dụng.



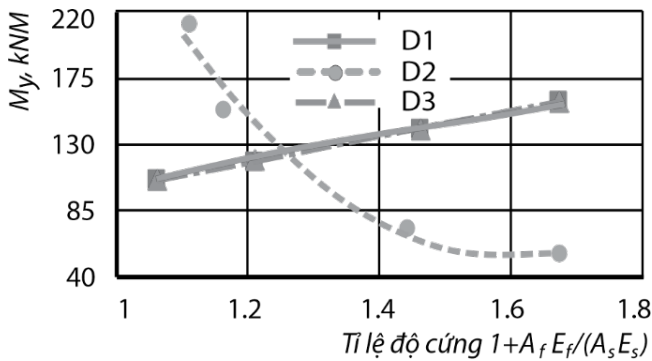
Hình 4. So sánh biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng của nhóm dầm D1 và D3



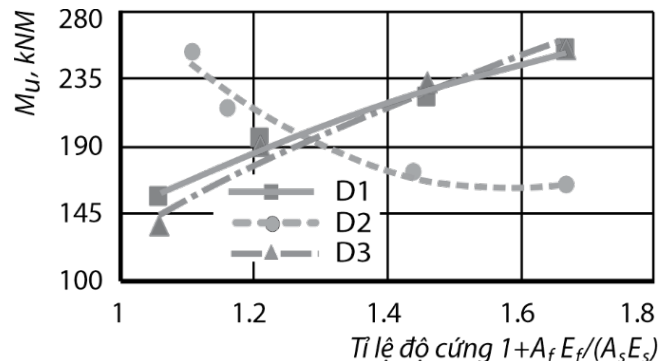
Hình 5. Biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng của nhóm dầm D2

Phân tích biểu đồ quan hệ khả năng chịu lực của các dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép với tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP trên Hình 6b có thể thấy, trong trường hợp cố định cốt thép dọc, việc tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP sẽ làm tăng khả năng chịu lực của dầm, đồng thời tỉ lệ này gần như là tuyến tính (nhóm dầm D1, D3). Cụ thể, khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.06 đến 1.67, khả năng chịu lực của dầm tăng đến 87%. Ngoài ra, quan hệ giữa tỉ lệ độ cứng dọc trục và khả năng chịu lực của dầm không phụ thuộc vào mô đun đàn hồi của vật liệu FRP. Khi cố định

cốt thép dọc và tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP, khả năng chịu lực của dầm bê tông đặt các loại cốt FRP có mô đun đàn hồi khác nhau nhưng có cùng tỉ lệ độ cứng dọc trục thì khả năng chịu lực sẽ tương đương nhau, điều này có thể thấy khi so sánh biểu đồ của nhóm dầm D1 và D3. Còn đối với nhóm dầm D2, khi cố định hàm lượng cốt FRP, việc tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP (tương ứng là giảm hàm lượng cốt thép) sẽ dẫn đến giảm khả năng chịu lực của dầm. Cụ thể, với nhóm dầm D2, khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.11 đến 1.67, khả năng chịu lực của dầm giảm 35.4%.



a) Mô men gây chảy cốt thép



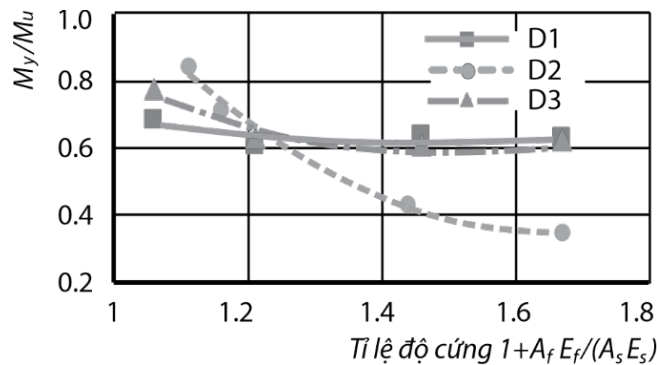
b) Khả năng chịu lực

Hình 6. Biểu đồ quan hệ giữa tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP với mô men gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực của dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép

Ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP đến mô men gây chảy cốt thép trong dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép được thể hiện trên Hình 6a. Phân tích các biểu đồ quan hệ này có thể thấy, ảnh hưởng của tỉ lệ độ cứng dọc trục đến mô men gây chảy cốt thép hoàn toàn tương tự như đối với khả năng chịu lực của dầm như đã phân tích ở trên. Với nhóm dầm có hàm lượng cốt thép cố định (nhóm D1 và D3), khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.06 đến 1.67, mô men gây chảy cốt thép

tăng đến 51%. Ngược lại, với nhóm dầm có hàm lượng cốt FRP cố định (nhóm D2), khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.11 đến 1.67, mô men gây chảy cốt thép giảm đến 73.3%.

Hình 7 thể hiện biểu đồ quan hệ giữa tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP đến tỉ lệ mô men gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực của dầm ( $M_y/M_u$ ). Qua hình vẽ này có thể thấy, việc tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP sẽ làm giảm tỉ lệ  $M_y/M_u$ , đặc biệt với nhóm dầm cố định cốt thép (D2), tỉ lệ giảm này là đáng kể.



Hình 7. Quan hệ giữa tỉ lệ  $M_y/M_u$  và tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP

#### 4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu của bài báo có thể rút ra một số kết luận chính sau:

- Phần mềm Lira-Sap với bộ PTHH đa dạng cho phép mô phỏng tương đối chính xác ứng xử ngắn hạn của dầm bê tông đặt lai FRP/thép;

- Tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP có ảnh hưởng lớn đến ứng xử của dầm bê tông đặt cốt hỗn hợp FRP/thép;

- Trong dầm đặt cốt hỗn hợp FRP/thép với hàm lượng cốt thép cố định, ứng xử của các dầm có cùng tỉ lệ độ cứng dọc trục giống nhau là tương đồng nhau và không phụ thuộc vào loại và tính chất cơ học của cốt FRP. Trong trường hợp này, khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP sẽ làm tăng mô men gây chảy cốt thép và mô men gây phá hoại dầm. Cụ thể, khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.06 đến 1.67, mô men gây chảy cốt thép và khả năng chịu lực của dầm tăng tương ứng là 51% và 87%;

- Trong dầm đặt cốt hỗn hợp FRP/thép với hàm lượng cốt FRP cố định, việc tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP sẽ ảnh hưởng xấu đến ứng xử của dầm. Cụ thể, khi tăng tỉ lệ độ cứng dọc trục của cốt FRP từ 1.11 đến 1.67, mô men gây chảy cốt thép giảm đến 73.3%.

Cũng lưu ý thêm rằng, kết quả nghiên cứu của bài báo này chỉ được tiến hành trên các dầm có dạng phá hoại phổ biến của loại dầm đặt cốt hỗn hợp FRP/thép là chảy cốt thép và phá hoại bê tông vùng nén. Hơn nữa, các kết luận trên được rút ra từ kết quả nghiên cứu trên số mẫu còn hạn chế. Có thể, với các dạng phá hoại khác, các kết luận này không phù hợp và đây cũng là hướng nghiên cứu của các tác giả trong thời gian tới.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Soriano, C. and A. Alfantazi, *Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics*. Construction and Building Materials, 2016. **102**: p. 904-912.
- Thuy, D.N., et al., *Corrosion protection of carbon steel by solvent free epoxy coating containing hydrotalcites intercalated with different organic corrosion inhibitors*. Progress in Organic Coatings, 2016. **101**: p. 331-341.
- Alsayed, S., Y. Al-Salloum, and T. Almusallam, *Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures*. Composites Part B: Engineering, 2000. **31**(6-7): p. 555-567.
- Alsayed, S.H. and A.M. Alhozaimy, *Ductility of concrete beams reinforced with FRP bars and steel fibers*. Journal of composite materials, 1999. **33**(19): p. 1792-1806.
- Benmokrane, B. and R. Masmoudi, *Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars*. Structural Journal, 1996. **93**(1): p. 46-55.
- Abdullah, W., Z.Z. Zhuang, and R.X. Jie, *Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid FRP bars and HRB bars*. IOSR Journal of Engineering, 2019. **09**(6): p. 9.
- Nanni, A., *Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement*. Journal of Structural Engineering, 1993. **119**(11): p. 3344-3359.

- Qu, W., X. Zhang, and H. Huang, *Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars*. Journal of Composites for Construction, 2009. **13**(5): p. 350-359.

- Ahmed, E.A., F. Settecasei, and B. Benmokrane, *Construction and testing of GFRP steel hybrid-reinforced concrete bridge-deck slabs of Sainte-Catherine overpass bridges*. Journal of Bridge Engineering, 2014. **19**(6): p. 04014011.

- Duy Nguyen, P., et al., *Long-term Deflections of Hybrid GFRP/Steel Reinforced Concrete Beams under Sustained Loads*. Civil Engineering Journal, 2020. **6**: p. 1-11.

- Duy, N.P. and D.V. Hiep, *Analytical Identification of Failure Modes and Design-Oriented Formulations in Hybrid FRP/Steel Reinforced Concrete Beams*. International Journal of Civil Engineering, 2022. **21**(5): p. 727-750.

- Aiello, M.A. and L. Ombres, *Structural Performances of Concrete Beams with Hybrid (Fiber-Reinforced Polymer-Steel) Reinforcements*. Journal of Composites for Construction, 2002. **6**(2): p. 133-140.

- Leung, H. and R. Balendran, *Flexural behaviour of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars*. Structural Survey, 2003. **21**(4): p. 146-157.

- Bui, L.V., B. Stitmannathum, and T. Ueda, *Mechanical performances of concrete beams with hybrid usage of steel and FRP tension reinforcement*. Computers and Concrete, An International Journal, 2017. **20**(4): p. 391-407.

- Qin, R., A. Zhou, and D. Lau, *Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams*. Composites Part B: Engineering, 2017. **108**: p. 200-209.

- НИИАСС, *Лира версия 9 - Руководство пользователя. Книга 1 Основные теоретические и расчетные положения. Некоторые рекомендации*. 2002.