

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ CÁC LOẠI THANH FRP VÀ TÍNH ỨNG DỤNG CỦA MỘT SỐ CÔNG THỨC ĐÁNH GIÁ CƯỜNG ĐỘ LIÊN KẾT GIỮA THANH FRP – BÊ TÔNG

A REVIEW OF RECENT TYPES OF FRP BARS AND THE APPLICABILITY OF EXISTING FORMULAS IN ASSESSING THEIR BOND STRENGTH IN CONCRETE

Nguyễn Minh Hải^{1*}, Đỗ Việt Hải¹, Phan Hoàng Nam¹, Phạm Văn Ngọc¹,
Huỳnh Phương Nam², Phạm Tiến Cường¹

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

²Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nmhai@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 01/5/2023; Sửa bài / Revised: 02/6/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 17/7/2023)

Tóm tắt - Nghiên cứu trình bày tổng quan về các loại thanh cốt sợi tổng hợp (Fiber Reinforced Polymer, gọi tắt là thanh FRP), có cập nhật các công nghệ mới gần đây về vật liệu đầu vào và phương pháp gia công bề mặt. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng khảo sát tính ứng dụng của bảy công thức trong các quy chuẩn thiết kế và các nghiên cứu trước đây thông qua phân tích tính tương quan giữa giá trị tính toán với bộ dữ liệu gồm gần 800 mẫu thí nghiệm được thu thập. Kết quả chỉ ra rằng phần lớn các công thức không thể đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông trên phạm vi rộng của các thông số đầu vào, có cập nhật các dạng thanh FRP được phát triển trong thời gian gần đây. Do đó, cần xác định phạm vi sử dụng hợp lý của từng công thức khi tính toán cường độ liên kết giữa thanh FRP – bê tông trong thiết kế các kết cấu bê tông cốt FRP.

Từ khóa - Thanh cốt sợi tổng hợp (thanh FRP); cường độ liên kết; gia công bề mặt; công thức thực nghiệm; bộ dữ liệu thí nghiệm

1. Đặt vấn đề

Kết cấu bê tông cốt thép đã và đang là loại kết cấu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng. Bên cạnh các ưu điểm như chi phí thấp, dễ thi công, thì nhược điểm lớn nhất của loại kết cấu này là vấn đề ăn mòn cốt thép [1]. Việc này kéo theo sự suy giảm công năng và ảnh hưởng lớn đến độ an toàn của toàn công trình [2]. Điều đáng nói hơn là việc phòng ngừa hoặc xử lý sau khi phát hiện ăn mòn cốt thép bên trong bê tông là khó khăn và tốn kém. Các phương pháp như mạ kẽm, sơn epoxy lên cốt thép, sử dụng bê tông cốt sợi nhằm hạn chế vết nứt v.v., đã được ứng dụng tại một số công trình gần đây, nhưng chỉ hạn chế và giải quyết vấn đề ăn mòn cốt thép trong thời gian nhất định mà không loại bỏ hoàn toàn được vấn đề [3, 4].

Với bối cảnh đó, vật liệu tổng hợp FRP (Fiber Reinforced Polyme, gọi tắt FRP) là một giải pháp vật liệu đầy tiềm năng. FRP được tạo ra bằng cách nhúng các loại sợi tổng hợp vào trong nhựa cao phân tử. Ma trận nhựa liên kết các sợi lại với nhau để tạo thành một tổ hợp đồng nhất. Những đặc tính nổi bật của vật liệu này là khả năng chống ăn mòn, cường độ kéo cao, khả năng chịu tải cao, nhẹ, và dễ dàng gia công [5]. Do đó, việc sử dụng vật liệu FRP ở dạng thanh thay thế hoàn toàn hoặc một phần cốt thép bên trong cấu kiện bê tông cốt thép là hướng tiếp cận đầy tiềm năng, đặc biệt là đối với các công trình làm việc trong môi

Abstract - This study synthesizes various Fiber Reinforced Polymer bars (FRP bars) currently available, with particular emphasis on the differences in the type of fiber and the surface treatment methods of the FRP bars. In addition, the study also investigates the applicability of these formulas based on an analysis of the correlation between the calculated and experimental values from a dataset of nearly 800 specimens. The results indicate that most formulas cannot evaluate the bond strength between FRP bars and concrete over a wide range of design parameters. Therefore, the reasonable range of each formula needs to be identified when calculating the bond strength between FRP bars and concrete in the design of FRP reinforced concrete structures.

Key words - Fiber Reinforced Polymer bars (FRP bars); bond strength; surface treatment; empirical formula; experimental dataset

trường khắc nghiệt, có tốc độ ăn mòn cốt thép cao. Một số nghiên cứu trong nước [6-7] và ngoài nước [8-10] đã thực hiện các thí nghiệm nhằm làm rõ ứng xử cơ học của các cấu kiện bê tông sử dụng cốt FRP như trụ, sàn, dầm và cho thấy triển vọng lớn về hướng ứng dụng này.

Để tiến tới phát triển kết cấu bê tông cốt FRP một cách rộng rãi hơn, việc tối ưu hóa kỹ thuật chế tạo vật liệu để nâng cao khả năng chịu lực, giảm thiểu giá thành vật liệu bên cạnh việc hoàn thiện phương pháp tính toán cho loại kết cấu này là yêu cầu bắt buộc. Các giải pháp về thay đổi loại sợi tổng hợp như sử dụng sợi Aramid (A) hoặc sợi Basalt (B) bên cạnh các loại sợi thông dụng như Carbon hoặc sợi thủy tinh giúp đa dạng hơn các sản phẩm thanh FRP. Bên cạnh đó, các kỹ thuật gia công bề mặt khác nhau nhằm nâng cao cường độ liên kết giữa bê tông và thanh FRP cũng là chìa khóa quan trọng nhằm nâng cao tính năng của kết cấu bê tông cốt FRP. Các kỹ thuật này đang phát triển rất mạnh mẽ giúp đẩy nhanh quá trình đa dạng hóa sản phẩm trong thời gian gần đây. Trong bối cảnh các nghiên cứu hiện nay phần lớn tập trung phân tích các ứng dụng riêng lẻ của một vài loại thanh FRP nhất định, không phải người kỹ sư nào cũng có điều kiện cập nhật, tổng hợp tài liệu, phân biệt đặc tính và so sánh ưu nhược điểm của nhiều các loại thanh FRP khác nhau để đưa ra phương án lựa chọn vật liệu và thiết kế tối ưu. Do đó, nghiên cứu tổng

¹ The University of Danang – University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Nguyễn Minh Hải, Đỗ Việt Hải, Phan Hoàng Nam, Phạm Văn Ngọc, Phạm Tiến Cường)

² The University of Danang, Danang, Vietnam (Huỳnh Phương Nam)

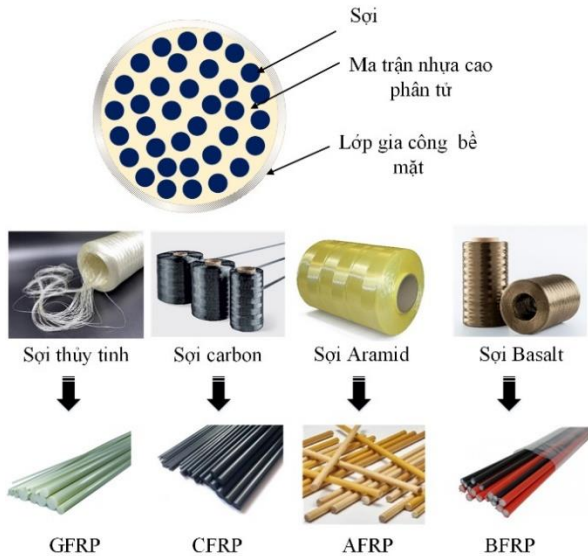
quan về thanh FRP có cập nhật các kỹ thuật chế tạo mới là hết sức cần thiết giúp các kỹ sư có thể nguồn tài liệu dễ dàng cập nhật và nắm bắt được một cách có hệ thống các dạng thanh FRP mới hiện nay, qua đó tăng phương án lựa chọn trong quá trình thiết kế.

Bên cạnh đó, các công thức đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông là rất quan trọng trong tính toán thiết kế kết cấu bê tông cốt FRP. Một số công thức đã được quy định trong nhiều quy chuẩn thiết kế trên thế giới cũng như các nghiên cứu trước đây [11 -15]. Tuy nhiên, có khả năng các công thức này có tính ứng dụng không cao đối với các loại thanh FRP mới, có phạm vi thông số đầu vào rộng hơn so với cơ sở dữ liệu khi xây dựng các công thức trên [16-17]. Do đó, việc đánh giá tính ứng dụng của các công thức hiện có dựa trên một bộ dữ liệu thí nghiệm đủ lớn là công việc hết sức cần thiết.

Với bối cảnh như trên, nghiên cứu này thực hiện nhằm mục đích: (i) Tổng hợp các loại thanh FRP trên cơ sở cập nhật những tiến bộ gần đây, đặc biệt chú trọng sự khác nhau về đặc tính vật liệu đầu và phương pháp gia công bề mặt thanh FRP; (ii) Thu thập và tổng hợp bộ dữ liệu thí nghiệm đủ lớn về cường độ liên kết giữa thanh FRP – bê tông dựa trên các nghiên cứu gần đây; (iii) Khảo sát sơ bộ tính ứng dụng của các công thức đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP – bê tông hiện nay dựa trên phân tích tính tương quan giữa giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm của bộ dữ liệu.

2. Tổng quan về các loại thanh FRP với chủng loại sợi và bề mặt khác nhau

2.1. Cấu tạo và đặc tính cơ bản



Hình 1. Cấu tạo cơ bản của các loại thanh FRP [18]

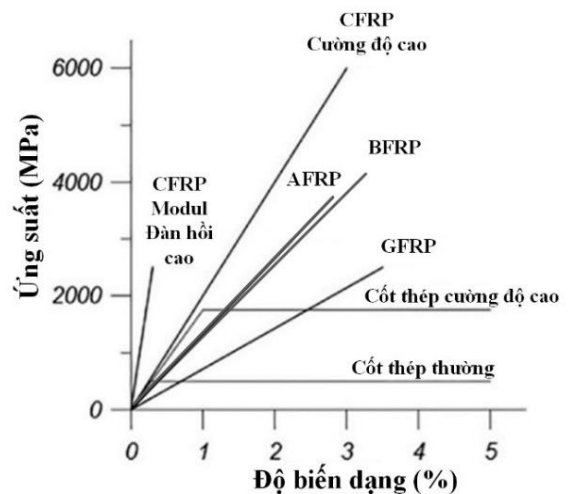
FRP là vật liệu composite với thành phần chính là sợi tổng hợp và ma trận nhựa cao phân tử. Cấu tạo của thanh FRP điển hình được mô tả như Hình 1 [18], gồm 3 phần chính là các sợi tổng hợp, ma trận nhựa và phần bề mặt được gia công theo mục đích sử dụng. Việc lựa chọn chủng loại sợi tổng hợp và nhựa cao phân tử phù hợp quyết định các tính chất cơ bản của FRP như cường độ chịu kéo, modul đàn hồi, độ giãn dài và khả năng chống ăn mòn. Sợi thủy tinh và sợi carbon được sử dụng rộng rãi từ những

năm của thập niên 70-80 thế kỷ trước. Tuy nhiên, gần đây sợi basalt (được làm từ đá bazan) hoặc sợi aramid đang được ứng dụng dựa vào các ưu điểm của nó. Trong khi đó, các loại nhựa cao phân tử được sử dụng rộng rãi bao gồm polyester, vinyl ester hoặc epoxy.

Bảng 1. Đặc tính cơ bản của vật liệu dùng trong chế tạo thanh FRP [19 -20]

Tên vật liệu	Cường độ kéo (MPa)	Modul đàn hồi (GPa)	Độ giãn dài (%)
Sợi thủy tinh	1900-4100	70-90	2,5-5,5
Sợi Carbon	2000-6000	70-400	0,2-5,0
Sợi Aramid	2700-4100	70-130	2,5-5,0
Sợi Basalt	3000-4800	90-100	3,0-4,0
Epoxy	55-130	2.7-4.1	8,0
Polyester	73-81	2.1-3.5	2,5
Vinylester	73-81	3.0-3.4	8,0
Cốt thép	300 - 500	200-210	10-25

Tính chất cơ bản của mỗi loại sợi và hỗn hợp nhựa cao phân tử là khác nhau. Bảng 1 thể hiện các đặc tính cơ bản của 4 loại sợi, 3 loại hỗn hợp nhựa khi so sánh với cốt thép thông thường [19 -20]. Có thể nhận xét cường độ kéo của cả 4 loại sợi đều lớn hơn nhiều so với cốt thép thông thường, trong khi các giá trị về modul đàn hồi và độ giãn dài của các loại sợi này là nhỏ hơn so với cốt thép. Biên độ của các giá trị này tương đối lớn tùy thuộc vào phương pháp sản xuất các loại sợi tổng hợp. Bên cạnh đó, cả ba loại ma trận nhựa đều có thông số về cường độ kéo, modul đàn hồi nhỏ hơn của sợi tổng hợp và cốt thép. Như vậy, ma trận nhựa có nhiệm vụ chính là liên kết bó sợi, mà không đóng góp nhiều vào khả năng chịu kéo của thanh FRP. Trong số 3 loại ma trận nhựa, Epoxy có thông số về cường độ kéo, modul đàn hồi cũng như độ giãn dài cao hơn so với Polyester và Vinylester. Do vậy, Epoxy được sử dụng trong sản xuất thanh FRP rộng rãi hơn so với 2 loại ma trận nhựa còn lại.



Hình 2. Quan hệ ứng suất – biến dạng của thanh FRP so với cốt thép [21]

Dựa vào các vật liệu đầu vào nêu trên, có 4 loại thanh FRP được đặt tên theo tên của loại sợi dùng trong chế tạo bao gồm: GFRP (dùng sợi thủy tinh - Glass), CFRP (dùng sợi Carbon), AFRP (dùng sợi Aramid) và BFRP (dùng sợi Basalt). Các loại thanh này với bề mặt chưa được gia công

(bề mặt trơn) cũng được thể hiện trong Hình 1. Ngoài ra, Hình 2 thể hiện quan hệ ứng suất – độ biến dạng đặc trưng của các loại thanh FRP khi so sánh với thép thông thường và thép cường độ cao [21]. Có thể thấy, đặc trưng cơ bản của các loại thanh FRP là có cường độ cao hơn và modul đàn hồi và độ giãn dài kém hơn so với cốt thép do đặc điểm tương ứng của vật liệu đầu vào theo Bảng 1. Modul đàn hồi của CFRP cao hơn so với các loại thanh còn lại, và có thể đạt tương đương hoặc cao hơn so với cốt thép. Tuy nhiên, modul đàn hồi càng cao, tính giòn của vật liệu tăng và độ giãn dài của thanh CFRP cũng bị giảm đáng kể so với các loại thanh khác. Các mô hình ứng suất biến dạng ở Hình 2 là rất quan trọng trong tính toán thiết kế các kết cấu bê tông cốt FRP. Tuy nhiên, các mô hình này có phạm vi biến động nhất định tùy thuộc vào đặc tính của vật liệu đầu vào và phương pháp sản xuất. Do đó, việc xác định các thông số cần thiết dựa trên chỉ số của nhà sản xuất hoặc thí nghiệm thực tế là hết sức cần thiết khi tính toán thiết kế kết cấu bê tông cốt FRP.

2.2. Các phương pháp gia công bề mặt thanh FRP

Kết cấu bê tông cốt FRP chỉ phát huy tối đa hiệu quả khi thanh FRP và bê tông làm việc đồng thời. Do đó, việc nâng cao cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông xung quanh bằng các phương pháp gia công bề mặt thanh được coi là chìa khóa quan trọng trong việc nâng cao tính ứng dụng của loại kết cấu này. Hình 3 thể hiện một số ví dụ về bề mặt của thanh FRP được nghiên cứu và sản xuất trong những năm gần đây [22-27]. Có thể thấy, phương pháp gia công bề mặt thanh FRP là rất đa dạng, nhưng nhìn chung đều hướng tới 2 hiệu ứng chủ yếu là: (i) Tăng diện tích bề mặt tiếp xúc giữa thanh FRP và bê tông, qua đó làm tăng cường độ bám dính giữa 2 vật liệu; (ii) tạo các gân chống cắt nhằm tăng cường độ cắt trượt đối với ứng suất truyền giữa thanh FRP và bê tông. Ứng với phương pháp gia công khác nhau, cấu tạo bề mặt của thanh FRP là khác nhau, dẫn đến sự khác nhau trong cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông. Tuy nhiên, dựa vào các phương pháp gia công bề mặt ở Hình 3, có thể phân làm 5 nhóm bề mặt chính với cơ chế truyền lực được thể hiện như Hình 4 và các đặc điểm như sau:

Nhóm bề mặt trơn (Hình 3(a) và Hình 4(a)): Đây là loại bề mặt nguyên bản của thanh FRP chưa được xử lý. Bề mặt này có nền là nhựa cao phân tử, và cường độ liên kết chủ yếu dựa trên cường độ bám dính giữa lớp nền nhựa và bê tông sau khi đông kết. Do đó, cường độ liên kết với bê tông của loại thanh FRP này là tương đối thấp so với các loại thanh FRP được gia công bề mặt.

Nhóm bề mặt bọc cát (Hình 3 (b) – (c) và Hình 4(b)): Bề mặt nhóm này được gia công bằng cách phun cát mịn (Hình 3(b)) hoặc cát thô (Hình 3(c)) trên bề mặt của thanh FRP. Bằng cách tạo bề mặt nhám, phương pháp này giúp tăng cường độ liên kết thông qua việc tăng diện tích tiếp xúc bề mặt giữa thanh – bê tông, qua đó tăng cường độ bám dính giữa hai vật liệu. Ngoài ra, độ gồ ghề bề mặt cũng góp phần tăng cường độ chống cắt trượt giữa hai vật liệu, nhưng hiệu ứng này là không lớn vì lớp cát có kích thước hạt tương đối nhỏ nên không tạo nên gân chống cắt đáng kể. Nhóm bề mặt này được sử dụng rất phổ biến do gia công đơn giản và không ảnh hưởng đến cấu trúc phân lõi, cường độ kéo, modul đàn hồi của bản thân thanh FRP. Tuy nhiên, cường độ liên kết thanh FRP – bê tông theo phương pháp

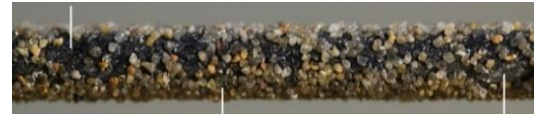
này sẽ có phạm vi biến động rộng, phụ thuộc vào kích thước hạt cát, độ bám dính cũng như mức độ phân bố đồng đều của hạt trên bề mặt thanh.



(a) GFRP bề mặt trơn [22]



(b) GFRP bọc cát mịn [23]



(c) CFRP bọc cát thô [24]



(d) BFRP bọc xoắn ốc 1 chiều [25]



(e) BFRP bọc xoắn ốc 2 chiều [25]



(f) GFRP đan sợi xoắn ốc [26]



(g) BFRP rãnh xoắn ốc tròn [25]



(h) BFRP rãnh xoắn ốc vuông [25]



(i) GFRP rãnh ren bu lông [27]

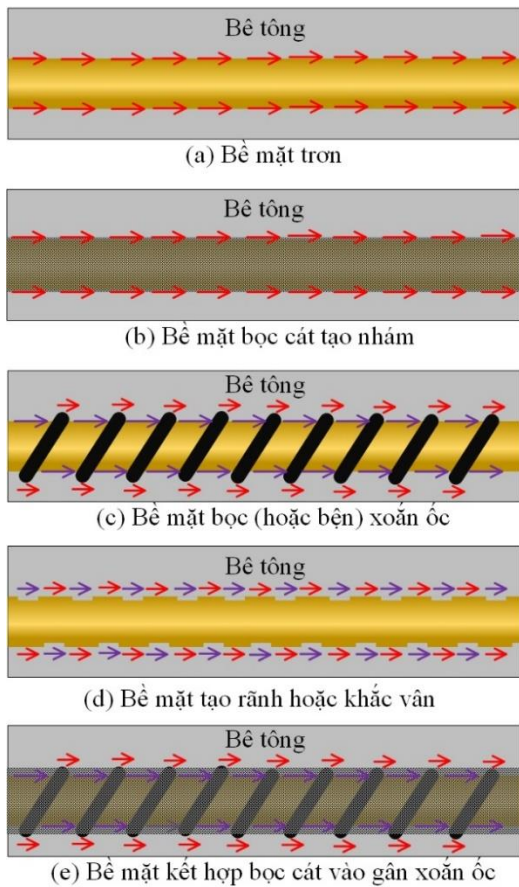


(j) Thanh GFRP khắc vân [25]



(l) GFRP kết hợp bọc cát và bọc xoắn ốc [25]

Hình 3. Một số loại thanh FRP với bề mặt khác nhau



Hình 4. Một số nhóm bề mặt chủ yếu của thanh FRP

Nhóm bề mặt bọc hoặc bện sợi tạo gân xoắn ốc (Hình 3(d) - (f) và Hình 4(c)): Đặc điểm chung của nhóm bề mặt này là có dạng gân hình xoắn ốc được tạo ra bằng cách dùng vật liệu bọc lên trên thanh FRP trơn hoặc bện sợi tổng hợp theo dạng xoắn ốc trước khi thực hiện những thứ cấp vào ma trận nhựa. Gân xoắn ốc có thể được quấn theo 1 hoặc 2 chiều. Cường độ liên kết giữa thanh – bê tông được cải thiện chủ yếu dựa vào hiệu ứng chống cắt của gân được tạo ra trên bề mặt thanh. Do đó, chiều cao và khoảng cách gân ảnh hưởng đáng kể đến cường độ liên kết giữa thanh và bê tông. Ngoài ra, đối với trường hợp tạo gân xoắn bằng phương pháp bọc, độ bám dính giữa vật liệu bọc và thân thanh FRP trơn là chìa khóa để đảm bảo hiệu ứng chống cắt trượt của phương pháp gia công này.

Nhóm bề mặt có rãnh hoặc vân nhám trên thân thanh (Hình 3(g) – (j) và Hình 4(d)): Bề mặt này được tạo ra từ các phương pháp đẽo, gọt, đánh nhám cơ học nhằm tạo các rãnh hoặc vân trên thân thanh FRP trơn. Có nhiều hình dạng rãnh khác nhau như rãnh xoắn ốc tròn, rãnh xoắn ốc vuông, rãnh ren bu lông, rãnh song song hoặc các loại vân với độ sâu khác nhau. Đây là phương pháp có công nghệ gia công đơn giản, và không cần vật liệu bọc ngoài như các phương pháp trên. Độ sâu của các rãnh hoặc vân tạo ra càng lớn càng giúp cải thiện cường độ chống cắt trượt. Trong khi đó, khoảng cách rãnh càng nhỏ hoặc mật độ vân càng lớn sẽ làm tăng diện tích bề mặt tiếp xúc với bê tông, nên giúp tăng cường độ bám dính giữa thanh và bê tông. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của phương pháp gia công này là việc tạo rãnh hoặc vân làm giảm tiết diện hữu dụng chịu

lực của bản thân thanh FRP. Do đó, khi sử dụng loại bề mặt này, khả năng chịu lực của FRP cần được tính toán thiết kế dựa trên tiết diện hữu dụng sau khi đã cắt rãnh.

Nhóm bề mặt gia công kết hợp (Hình 3(l) và Hình 4(e)): Ngoài 4 nhóm bề mặt chính trên, các phương pháp kết hợp nhiều loại bề mặt cũng được áp dụng thử nghiệm trong thời gian gần đây. Trong đó, phổ biến nhất là phương pháp kết hợp giữa bọc cát và bọc gân xoắn ốc. Sự kết hợp này nhằm trung hòa ưu và nhược điểm của từng loại bề mặt, qua đó giúp cường độ liên kết giữa thanh và bê tông lớn và ổn định hơn. Tuy nhiên, việc kết hợp nhiều phương pháp sẽ làm tăng chi phí gia công, và đây là vấn đề lớn khi áp dụng các phương pháp này một cách rộng rãi hơn trong thực tế.

Tóm lại, hiện nay các loại bề mặt thanh FRP là rất đa dạng và cơ chế truyền lực của mỗi loại là khác nhau. Vì vậy, các kỹ sư cần hiểu rõ ưu và nhược điểm của mỗi loại bề mặt, đặc biệt liên quan đến cường độ liên kết giữa thanh – bê tông nhằm tối ưu hóa các thiết kế kết cấu bê tông cốt FRP.

3. Xây dựng bộ dữ liệu thí nghiệm và tổng hợp công thức đánh giá cường độ liên kết thanh FRP – bê tông

3.1. Thu thập và tổng hợp bộ dữ liệu thí nghiệm

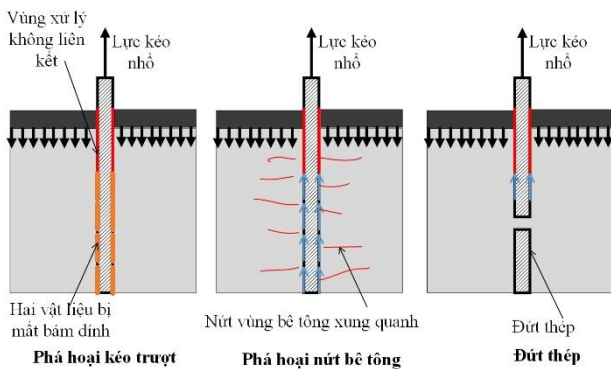
Như đã trình bày ở phần 2, với sự phát triển của công nghệ vật liệu tổng hợp, chủng loại sợi và bề mặt của thanh FRP là rất đa dạng và được nghiên cứu cải tiến không ngừng. Đối với mỗi loại thanh FRP, cơ chế truyền ứng suất bề mặt là khác nhau dẫn đến sự sai lệch trong cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông. Do đó, các nghiên cứu nhằm đánh giá cường độ liên kết của thanh FRP – bê tông được tiến hành rộng rãi. Song song với đó, bê tông cường độ cao với cường độ lên tới 100MPa được sử dụng ngày càng rộng rãi. Do đó, các dữ liệu thí nghiệm điều tra cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông cường độ cao cũng được chú trọng trong những năm gần đây.

Với bối cảnh trên, nghiên cứu này đã tiến hành thu thập toàn diện các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến cường độ liên kết giữa các loại thanh FRP và bê tông trong những năm gần đây. Quá trình thu thập được thực hiện trên nhiều hệ thống cơ sở dữ liệu của các nhà xuất bản uy tín như Elsevier, Springer, Wiley, Taylor&Francis và MDPI. Với kết quả đó, 27 nghiên cứu được công bố trên các tạp chí uy tín đã được chọn lọc để bắt đầu quá trình tổng hợp và phân tích số liệu [30-57].

Một số phương pháp thí nghiệm đã được áp dụng để điều tra cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông [11, 25, 37, 56]. Trong số đó, thí nghiệm kéo nhỏ một phương được sử dụng để đánh giá cường độ liên kết của thanh FRP và bê tông phổ biến nhất [11] như được thể hiện trong Hình 5. Trong thí nghiệm này, lực kéo tác dụng trực tiếp lên các thanh FRP bố trí bên trong khối bê tông, và khối bê tông được cố định vào khung cứng để tạo phản lực. Để tránh phá hủy hình nón phần bê tông mặt trên (Cone failure), bề mặt của một phần thanh FRP được xử lý để loại bỏ cường độ liên kết. Cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông được tính bằng lực kéo lớn nhất chia cho diện tích bề mặt tiếp xúc của thanh FRP với bê tông xung quanh.

Trong quá trình thử kéo thanh FRP trong bê tông, có thể xảy ra ba dạng phá hoại như thể hiện trong Hình 5 bao

gồm: (i) phá hoại kéo trượt, (ii) phá hoại nứt bê tông, và (iii) đứt thanh FRP. Phá hoại kéo trượt xảy ra khi ứng suất trên bề mặt thanh FRP đạt đến một giá trị nhất định, dẫn đến sự mất bám dính giữa hai vật liệu. Đây là dạng phá hoại liên kết phổ biến nhất của thanh FRP trong bê tông. Phá hoại nứt bê tông xung quanh thanh FRP thường xuất hiện khi thanh FRP có gân cao bố trí trong bê tông có cường độ thấp hoặc kích thước khối bê tông bao bọc nhỏ. Các vết nứt dẫn đến việc giảm hiệu ứng bao bọc (confined effect) của vùng bê tông xung quanh thanh FRP, qua đó giảm ứng suất liên kết giữa thanh và bê tông. Đây có thể được coi là dạng phá hoại mong muốn vì tải trọng kéo sẽ giảm từ từ, và phát huy tối đa sự làm việc đồng thời giữa thanh FRP và bê tông. Cuối cùng, phá hoại đứt thanh FRP thường xảy ra ở trường hợp đối với thanh FRP có đường kính nhỏ, và vùng bê tông bao bọc xung quanh có kích thước lớn hoặc cường độ bê tông cao. Dạng phá hoại này là không mong muốn trong thiết kế vì nó gây ra phá hủy giòn, làm giảm đột ngột tính an toàn của công trình.



Hình 5. Các dạng phá hoại trong thí nghiệm kéo thanh FRP bên trong bê tông

Dựa vào các phân tích trên, để giảm ảnh hưởng của phương pháp thử nghiệm và dạng phá hoại đặc biệt, dữ liệu chỉ được thu thập đối với kết quả thí nghiệm kéo nhỏ 1 phương, và có dạng phá hoại phổ biến là: (i) Phá hoại kéo trượt, và (ii) phá hoại nứt bê tông. Theo đó, một bộ dữ liệu bao gồm kết quả của 793 mẫu thí nghiệm [30-57] đã được xây dựng. Bảng 2 thể hiện cấu trúc của bộ dữ liệu được thu thập dựa trên phạm vi các thông số thí nghiệm cơ bản bao gồm: đường kính thanh, cường độ bê tông, loại sợi tổng hợp của thanh FRP, nhóm bề mặt và dạng phá hủy của mẫu thử trong các thí nghiệm kéo. Có thể nhận thấy, số lượng mẫu không đồng đều đối với các thông số về loại sợi, loại bề mặt và dạng phá hoại nhưng lại tương đối đồng đều đối với các thông số về đường kính thanh FRP và cường độ bê tông. Từ Bảng 2, có thể thấy, phạm vi ứng dụng thông thường của cấu kiện bê tông cốt FRP, chẳng hạn như đường kính thanh FRP, là từ 8-20 mm. Bê tông thông thường cường độ chịu nén 20-60MPa, thanh GFRP, hoặc CFRP được tập trung nghiên cứu phổ biến. Điều này là dễ hiểu vì thanh GFRP và CFRP được lịch sử sử dụng trước các dạng thanh AFRP hoặc BFRP. Bên cạnh đó, số lượng mẫu theo phương pháp gia công bề mặt bọc cát, tạo gân xoắn ốc, hoặc phương pháp kết hợp bởi hai phương pháp này được nhiều hơn đáng kể so với loại bề mặt trơn hoặc bề mặt tạo rãnh và vân trên thân thanh FRP. Điều này là do việc tạo rãnh hoặc khắc vân trên thân thanh FRP ảnh hưởng đến tiết

diện hữu dụng của thanh khi tham gia chịu lực trong kết cấu. Ngoài ra, dạng phá hoại kéo trượt là phổ biến hơn so với dạng phá hoại nứt bê tông. Điều này đồng nghĩa với các phương pháp gia công bề mặt của thanh FRP vẫn cần tiếp tục được phát triển nhằm phát huy tối đa quá trình làm việc đồng thời giữa thanh và bê tông.

Bảng 2. Cấu trúc bộ dữ liệu được thu thập [30-57]

Loại thông số	Chủng loại/phạm vi	Số lượng mẫu
Loại sợi	GFRP	573
	CFRP	153
	AFRP	25
	BFRP	30
	HFRP (kết hợp C & G)	12
Đường kính thanh	4,0-8,0 mm	146
	8,1-10,0 mm	157
	10,1-13,0 mm	253
	13,1-16,0mm	138
	16,1-20,0mm	79
	20,1-26mm	20
Cường độ bê tông	10,0-20,0 MPa	27
	20,1-30,0 MPa	131
	30,1-40,0 MPa	189
	40,1-50,0 MPa	241
	50,1-60,0 MPa	138
	60,1-100,0 MPa	67
Loại bề mặt	Trơn	11
	Bọc cát	322
	Gân xoắn ốc	234
	Rãnh/Vân	32
	Bọc cát + Gân xoắn ốc	194
Dạng phá hoại	Phá hoại kéo trượt	628
	Phá hoại nứt bê tông	165

3.2. Một số công thức đánh giá cường độ liên kết thanh FRP – bê tông

Để đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông, một số công thức thực nghiệm đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây hoặc đã được quy định trong các bộ tiêu chuẩn thiết kế. Bảng 3 thể hiện 7 công thức được sử dụng rộng rãi nhất do được quy định trong các bộ tiêu chuẩn thiết kế uy tín [11-15] hoặc trong các nghiên cứu được trích dẫn nhiều [30-31]. Các công thức trong Bảng 3 đánh giá cường độ liên kết dựa trên các thông số thí nghiệm. Các công thức quy định trong quy chuẩn FIB [15], hoặc công thức đề xuất bởi Roman và cộng sự [30], và Lee và cộng sự [31] có cấu trúc đơn giản, đánh giá cường độ liên kết của thanh FRP trong bê tông chủ yếu dựa vào cường độ chịu nén của bê tông và đường kính của thanh FRP. Trong khi đó, các công thức quy định trong tiêu chuẩn thiết kế của ACI [11], CSA [12, 13], JSCE [14] có dạng phức tạp hơn, Công thức CSA-S806 [12] có xét đến ảnh hưởng của các thông số khác như kích thước khối bê tông bao bọc, chiều dài phân chôn thanh FRP trong bê tông, vị trí tương đối của thanh FRP bố trí bên trong khối bê tông, loại sợi tổng hợp, hoặc phương pháp xử lý bề mặt thông qua các hệ số ảnh hưởng trong. Công thức của JSCE [14] xét đến hệ số thể hiện hiệu ứng bao bọc của khối bê tông xung quanh.

Bảng 3. Một số công thức đánh giá cường độ liên kết thanh FRP và bê tông

Tài liệu	Công thức	Phạm vi áp dụng			
		Loại thanh	Loại bề mặt	d_b (mm)	f_c (Mpa)
Roman và cộng sự [30]	$\tau_b = 14,7 \frac{\sqrt{f_c}}{d_b}$	GFRP, CFRP, AFRP	Bọc cát, gân xoắn ốc	6-19	38,6-60,4
Lee và cộng sự [31]	$\tau_b = 3,3 f_c^{0,3}$	GFRP	Bọc cát, gân xoắn ốc	12,7	25,5-92,4
ACI 440.1R-06 [11] (CT theo hiệp hội bê tông Hoa Kỳ)	$\frac{\tau_b}{0,083\sqrt{f_c}} = 4,0 + 0,3 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_d}$	GFRP	Gân xoắn ốc	$\frac{C}{d_b} \leq 3,5$	Bê tông thường
CSA- S806 [12] (CT theo hiệp hội quy chuẩn Canada)	$\tau_b = \frac{C\sqrt{f_c}}{1,15(K_1K_2K_3K_4K_5)\pi d_b}$	GFRP, CFRP, AFRP	Bọc cát, gân xoắn ốc	$\frac{C}{d_b} \leq 2,5$	Bê tông nhẹ, Bê tông thường
CSA S6-06 [13] (CT theo hiệp hội quy chuẩn Canada)	$\tau_b = \frac{0,4C\sqrt{f_c}}{0,45\pi d_b K_1 K_4}$				
JSCE [14] (CT theo hiệp hội xây dựng Nhật Bản)	$\tau_b = \frac{f_{bod}}{\alpha_1} = \frac{0,28 f_c^{2/3}}{1,3 \alpha_1}$ α_1 phụ thuộc vào giá trị $k_c = \frac{c}{d_b} + \frac{15A_t}{s d_b}$ $\alpha_1 = 1,0$ khi $k_c \leq 1,0$ $\alpha_1 = 0,9$ khi $1,0 < k_c \leq 1,5$ $\alpha_1 = 0,8$ khi $1,5 < k_c \leq 2,0$ $\alpha_1 = 0,7$ khi $2,0 < k_c \leq 2,5$ $\alpha_1 = 0,6$ khi $2,5 \leq k_c$	GFRP	Bọc xoắn ốc	$\frac{C}{d_b} \leq 3,5$	Bê tông thường
FIB [15] (CT theo liên hiệp bê tông thế giới)	$\tau_b = \gamma\sqrt{f_c}$	GFRP, CFRP, AFRP	Không quy định	Không quy định	Bê tông thường

Giải thích ký hiệu:

τ_b : Cường độ liên kết (MPa); f_c : Cường độ nén bê tông (MPa); C: Bề dày lớp bê tông bảo vệ của mẫu (mm); d_b : Đường kính thanh FRP (mm); l_d : Chiều dài chôn thanh (mm); K_1 : Hệ số hiệu ứng bao bọc (1,3 khi có cốt thép đai khoảng cách dưới 300mm, 1,0 cho các trường hợp còn lại); K_2 : Hệ số loại bê tông (1,3 đối với bê tông siêu nhẹ, 1,2 đối với bê tông nhẹ, 1,0 đối với bê tông thường); K_3 : Hệ số kích thước thanh (0,8 khi $A_b \leq 300\text{mm}^2$, 1,0 khi $A_b > 300\text{mm}^2$ với A_b : Tiết diện thanh (mm^2)); K_4 : Hệ số loại sợi tổng hợp (1,0 đối với CFRP và GFRP, 1,25 đối với AFRP); K_5 : Hệ số bề mặt (1,0 cho bề mặt bọc cát hoặc bện xoắn ốc, 1,05 cho bề mặt bọc gân xoắn ốc, 1,8 cho bề mặt có rãnh); E_{FRP} : Modul đàn hồi của thanh FRP (MPa); A_t : Tiết diện thanh (mm^2); s, n: Khoảng cách (mm) và số lượng cốt thép đai E_t , E_s : Modul đàn hồi của thanh đai và cốt thép (MPa); α_1 : Hệ số hiệu ứng bao bọc; γ : Hệ số dạng phá hoại (2,5 cho dạng phá hoại nứt bê tông và 1,25 cho dạng phá hoại kéo trượt)

Phạm vi ứng dụng của mỗi công thức liên quan đến 4 loại thông số trong Bảng 3 được xác định dựa trên các tham số trong tập dữ liệu cơ sở được sử dụng để xây dựng công thức tương ứng. Các công thức được phát triển bởi Roman và cộng sự, Lee và cộng sự, hoặc được quy định trong bộ tiêu chuẩn ACI-440, CSA – S806, CSA S6-06 có quy định về phạm vi áp dụng như trong Bảng 3. Công thức JSCE được xây dựng dựa trên tham khảo và chỉnh sửa công thức của ACI theo tiêu chuẩn Nhật Bản nên có cùng phạm vi sử dụng với công thức ACI-440. Mặt khác, không có quy định cụ thể về phạm vi áp dụng đối với loại bề mặt và đường kính thanh FRP trong công thức của FIB. Tuy nhiên, để xem xét tính ứng dụng của các công thức đối với các loại thanh FRP được phát triển trong thời gian gần đây và với phạm vi thông số đầu vào rộng hơn như mục đích ban đầu của nghiên cứu, việc so sánh giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm đã được áp dụng cho cả phạm vi rộng trong bộ dữ liệu thí nghiệm được thu thập.

4. Đánh giá tính tương quan của các công thức với kết quả bộ dữ liệu thí nghiệm thu thập

Trong phạm vi một nghiên cứu tổng quan, nghiên cứu này thực hiện phân tích tính tương quan giữa giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm thông qua việc xét tỷ số giữa hai giá trị trên. Việc phân tích dữ liệu sơ bộ này nhằm 2

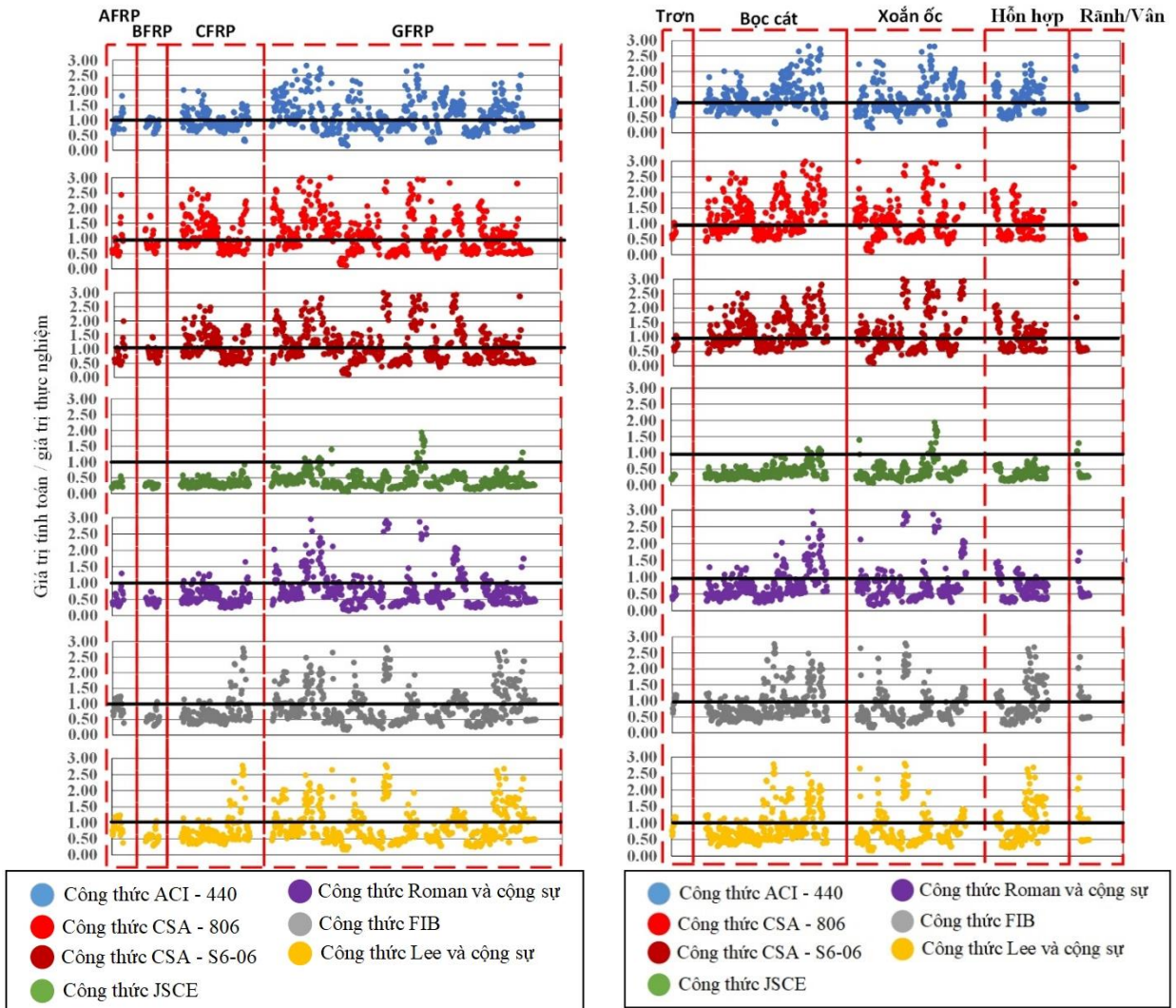
mục tiêu chính: (i) Xem xét một cách khái quát tính ứng dụng của các công thức trong Bảng 3 khi áp dụng tính cường độ liên kết giữa bê tông và các thanh FRP trên phạm vi rộng của các thông số kỹ thuật; (ii) nắm bắt khuynh hướng tổng thể của dữ liệu nhằm phát triển các hướng nghiên cứu tiếp theo.

Hình 6, Hình 7, Hình 8 thể hiện kết quả so sánh giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm thông qua việc đánh giá tỷ số của giá trị tính toán chia cho giá trị thực nghiệm. Nghĩa là, giá trị trục tung bằng 1 khi giá trị tính toán và thực nghiệm bằng nhau, lớn hơn 1 khi giá trị tính toán lớn hơn giá trị thực nghiệm. Tính tương quan càng cao khi giá trị trung tâm tập trung trên đường thẳng $y=1$, và công thức được coi là an toàn khi các điểm dữ liệu nằm dưới đường thẳng $y=1$. Cách đánh giá tính tương quan này đã được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu trước đây, đặc biệt phù hợp khi khảo sát tính an toàn đối với một công thức thiết kế [58, 59]. Hình 6 đến Hình 8 được phân tích theo 5 nhóm thông số bao gồm: Hình 6(a) theo chủng loại sợi, Hình 6(b) theo nhóm bề mặt, Hình 7(a) theo dạng phá hoại, Hình 7(b) theo cường độ nén của bê tông, và Hình 8 theo đường kính thanh FRP. Màu sắc trong các hình phân biệt kết quả khi giá trị tính toán dựa trên các công thức khác nhau. Ngoài ra, Bảng 4 thể hiện các giá trị thống kê cơ bản gồm giá trị trung bình và độ lệch chuẩn cho toàn bộ dữ liệu.

Đầu tiên, kết quả từ Hình 6 – 8 cho thấy khuynh hướng tỷ số giữa giá trị tính toán / thực nghiệm là khác nhau giữa các công thức đánh giá. Xét trên phần lớn dữ liệu, tỷ số khi sử dụng công thức JSCE (màu xanh lá cây) là bé hơn 1,0, và giá trị trung bình của tỷ số này là 0,38, độ lệch chuẩn là 0,23 đều nhỏ hơn so với khi sử dụng các công thức khác. Nghĩa là, công thức JSCE đánh giá khá thấp cường độ liên kết thanh FRP – bê tông, và có dữ liệu ít phân tán hơn so với các công thức khác. Điều này giúp bảo đảm tính an toàn của công thức khi xem xét các thông số thiết kế trên 1 phạm vi rộng. Tuy nhiên, cần xem xét các hệ số tối ưu để tăng giá trị tính toán nhằm cân bằng giữa tính kinh tế và tính an toàn trong thiết kế. Đối với các công thức còn lại, giá trị trung bình nằm trong khoảng 0,79 – 1,23, và độ lệch chuẩn của dữ liệu là tương đối cao nằm trong khoảng 0,59 – 0,83. Tỷ lệ đánh giá theo công thức của ACI 440.1R-06, CSA S806 và CSA S6-06 có khuynh hướng đánh giá cường độ liên kết cao hơn, trong khi các công thức theo FIB, Roman và cộng sự hoặc Lee và cộng sự có khuynh hướng đánh giá cường độ thấp hơn

so với giá trị thực nghiệm. Điều này cho thấy không thể dùng các công thức này khi đánh giá cường độ liên kết giữa thanh FRP – bê tông trong phạm vi sử dụng rộng, đặc biệt là với các loại thanh và bề mặt được phát triển trong thời gian gần đây.

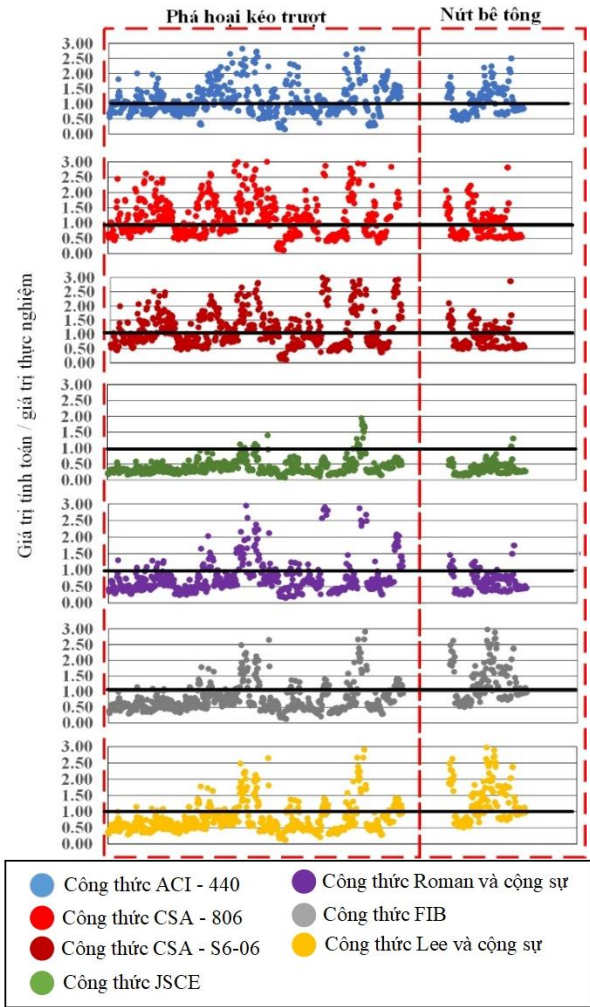
Xét theo nhóm thông số về loại sợi, Hình 6(a) cho thấy khoảng biến động của dữ liệu nhóm GFRP là cao hơn so với dữ liệu cho các thanh AFRP, BFRP hoặc CFRP. Có 2 nguyên nhân có thể được xét đến là (i) số lượng dữ liệu của GFRP là lớn dẫn đến mức độ sai số cao, (ii) modul đàn hồi của thanh GFRP là bé hơn các thanh khác (tham khảo Hình 2), ảnh hưởng đến cơ chế truyền ứng suất bề mặt khi đờng kính thanh khác nhau. Hai nguyên nhân này cần được khảo sát dựa trên việc lọc dữ liệu hoặc mô phỏng số trong các nghiên cứu tiếp theo. Ngoài ra, nhóm dữ liệu của nhóm AFRP, BFRP ít phân tán hơn nhóm CFRP. Điều này cho thấy các công thức sử dụng cho đánh giá cường độ liên kết của CFRP hoặc GFRP cũng có tính ứng dụng cao để đánh giá cho thanh AFRP và BFRP.



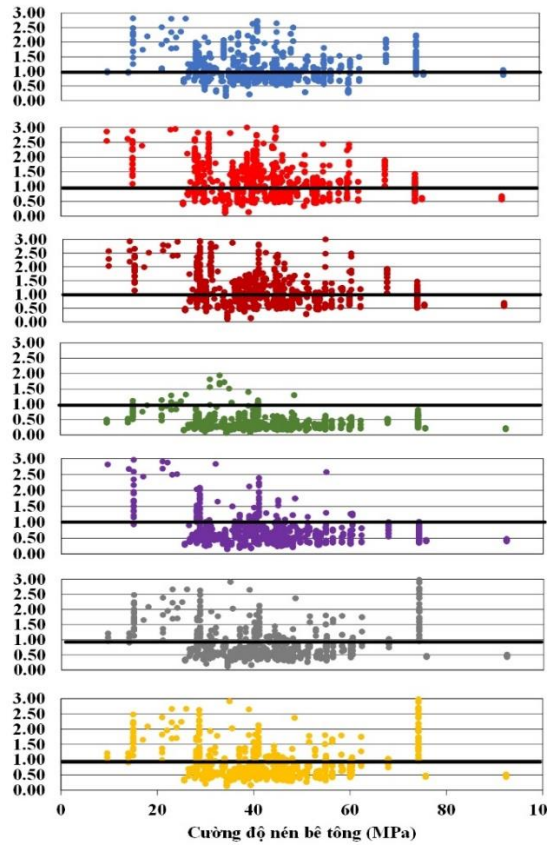
(a) Phân theo chủng loại sợi

(b) Phân theo nhóm bề mặt

Hình 6. Khảo sát tỷ lệ giá trị tính toán đối với giá trị thực nghiệm của bộ dữ liệu thu thập theo chủng loại sợi và dạng bề mặt thanh FRP



(a) Phân theo dạng phá hoại



(b) Phân theo nhóm cường độ bê tông

Hình 7. Khảo sát tỷ lệ giá trị tính toán đối với giá trị thực nghiệm của bộ dữ liệu thu thập theo dạng phá hoại và cường độ bê tông

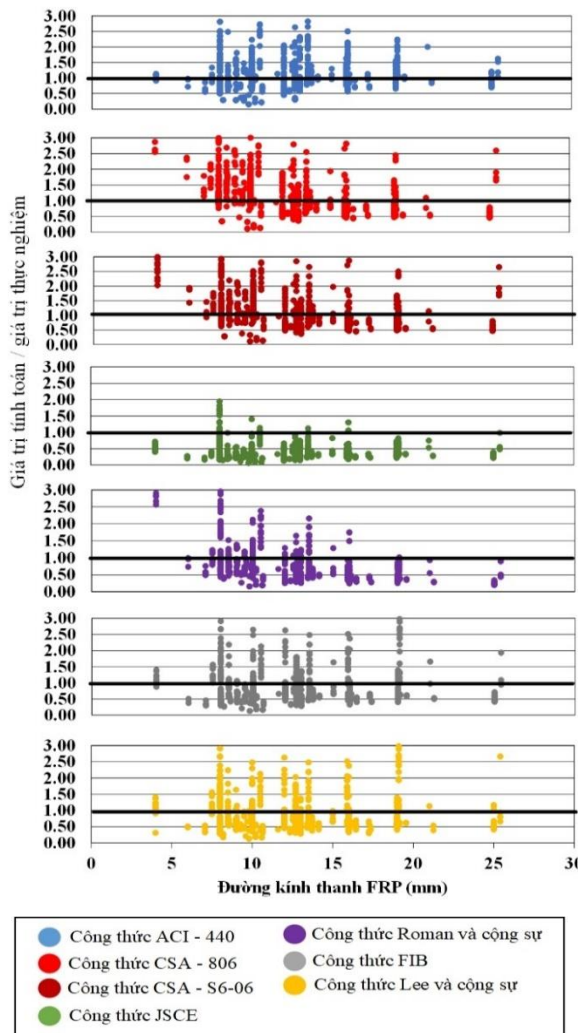
Bảng 4. Giá trị thống kê tỷ số giữa giá trị tính toán và giá trị thực nghiệm

Công thức	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Roman và cộng sự [30]	0,79	0,65
Lee và cộng sự [31]	0,94	0,66
ACI 440.1R-06 [11]	1,11	0,59
CSA- S806 [12]	1,23	0,83
CSA S6-06 [13]	1,16	0,73
JSCE [14]	0,38	0,23
FIB [15]	0,90	0,69

Xét theo nhóm thông số về loại bề mặt ở Hình 6(b), tuy dữ liệu khá nhất quán đối với thanh FRP có bề mặt trơn, nhưng sự phân tán của dữ liệu không có xu hướng rõ ràng đối với các nhóm bề mặt như bọc cát, gân xoắn ốc, hoặc rãnh. Như đã trình bày ở Mục 2.2, cường độ liên kết giữa thanh FRP và bê tông dựa trên 2 cơ chế chủ yếu là: (i) Cường độ bám dính dựa trên tiếp xúc bề mặt giữa 2 vật liệu; (ii) Cường độ chống cắt trượt dựa trên độ cao của gân chống trượt. Tuy các nhóm dữ liệu đã được phân loại theo loại bề mặt, nhưng độ nhám của vật liệu

bọc, mật độ và độ cao của gân cũng khác nhau trong cùng 1 phương pháp gia công. Do đó, cường độ liên kết khi không xét đến các yếu tố này có sai số nhất định so với kết quả thí nghiệm. Trong các nghiên cứu tiếp theo, các giá trị trên cần được xét đến khi xây dựng phương pháp đánh giá nhằm tăng tính tương quan giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán.

Ngoài ra, không có sự khác biệt thật sự rõ rệt khi xét đến các thông số khác như dạng phá hoại, cường độ bê tông và đường kính cốt thép trong các Hình 7(a), Hình 7(b) và Hình 8. Tuy nhiên, có thể thấy một số xu hướng như sau. Công thức theo FIB, Lee và cộng sự, ACI 440.1R-06 là không thích hợp khi ứng dụng cho phạm vi bê tông cường độ cao (trên 70MPa). Bên cạnh đó, dữ liệu của tất cả công thức đối với bê tông có cường độ dưới 30MPa có độ phân tán cao. Nghĩa là, các công thức hiện tại không thích hợp khi sử dụng đánh giá cường độ giữa thanh FRP và các loại bê tông nhẹ, hoặc có cường độ thấp. Ngoài ra, sự phân tán dữ liệu của công thức JSCE hoặc Roman và cộng sự cao khi đường kính thanh FRP ở dưới 10mm. Nguyên nhân có thể là do các thanh FRP có đường kính nhỏ khó gia công bề mặt hơn so với đường kính lớn, do đó có sai số nhất định trong cường độ liên kết với bê tông.



Hình 8. Khảo sát tỷ lệ giá trị tính toán đối với giá trị thực nghiệm của bộ dữ liệu thu thập theo nhóm đường kính thanh

Tóm lại, để thực hiện các phân tích sâu hơn dựa trên bộ dữ liệu lớn được thu thập, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung giải quyết các vấn đề sau: (i) Điều tra chi tiết các thông số khác như: Độ cao, mật độ gân chống trượt, loại và độ nhám của cát bọc, các thông số liên quan đến nhiệt độ, modul đàn hồi của thanh FRP và các dữ liệu cần thiết khác; (ii) Thực hiện các mô phỏng nhằm khảo sát nguyên nhân của sự chênh lệch trong cường độ liên kết ứng với các bề mặt khác nhau; (iii) Áp dụng lý thuyết độ tin cậy hoặc kỹ thuật học máy để xây dựng các mô hình đánh giá có tính ứng dụng trong phạm vi rộng. Các hướng nghiên cứu này sẽ đóng góp đáng kể giúp các kỹ sư có công cụ hiệu quả trong thiết kế kết cấu bê tông cốt FRP trong tương lai.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã tổng hợp các loại thanh FRP được sản xuất từ sợi thủy tinh, sợi Carbon, sợi Aramid và sợi Basalt. Các thanh được làm từ các loại sợi này có tính chất cơ học khác nhau, nhưng nhìn chung đều có cường độ kéo lớn hơn, modul đàn hồi và độ giãn dài nhỏ hơn khi so sánh với cốt thép thông thường. Ngoài ra, một bộ dữ liệu gồm 793 kết quả thí nghiệm kéo nhô thanh FRP trong bê tông đã được xây dựng từ 27 nghiên cứu gần đây. Phần lớn nghiên cứu tập trung điều tra cường độ bám dính của các thanh GFRP,

CFRP có bề mặt bọc cát và bọc hoặc bên xoắn ốc vì các loại thanh này được sử dụng phổ biến nhất.

Nghiên cứu cũng đã tổng hợp và phân tích cấu trúc của bảy công thức trong các quy chuẩn và nghiên cứu trước đây dùng trong đánh giá cường độ giữa thanh FRP và bê tông. Dựa trên phân tích tỷ số giữa giá trị tính toán theo bảy công thức và giá trị thực nghiệm của bộ dữ liệu thí nghiệm ở cả trong và ngoài phạm vi áp dụng của các công thức, có thể nhận xét tính tương quan giữa các công thức này so với bộ dữ liệu thí nghiệm là khác nhau. Tỷ số trung bình của giá trị tính toán theo công thức của ACI 440.1R-06, CSA S806 và CSA S6-06 so với giá trị thí nghiệm là lớn hơn 1.0, trong khi tỷ số này đối với các công thức còn lại là nhỏ hơn 1.0. Trong các công thức được khảo sát, công thức JSCE có tỷ số trung bình thấp nhất, cho thấy tính an toàn cao khi áp dụng công thức này trong tính cường độ liên kết thanh FRP – bê tông trong phạm vi áp dụng rộng. Ngoài ra, độ lệch chuẩn của tỷ số giá trị tính toán chia giá trị thực nghiệm của tất cả các công thức so với tỷ số trung bình là tương đối cao. Do đó, cần làm rõ phạm vi sử dụng cụ thể cho từng công thức sau khi cập nhật các loại thanh FRP được phát triển trong thời gian gần đây. Bên cạnh đó, các phương pháp đánh giá toàn diện dựa trên kỹ thuật học máy hoặc lý thuyết độ tin cậy cần được phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng thuộc đề tài có mã số B2022-DN02-10.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Shamsad, "Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and Service Life Prediction - a Review", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 4-5, pp. 459–471, 2003.
- [2] S.-J. Han, T. Ishida, and S. Tsuchiya, "Numerical evaluation on the effect of rebar corrosion on long-term structural behavior of underground RC Culverts", *Structures*, vol. 48, pp. 1920–31, 2023.
- [3] R. E. Melchers and I. A. Chaves, "Durable steel-reinforced concrete structures for marine environments", *Sustainability*, vol. 13, no. 24, pp. 13695, 2021.
- [4] A. Dasar, D. Patah, H. Hamada, D. Yamamoto, and Y. Sagawa, "Life Performance of 40-Year-Old RC Beams with Different Concrete Covers and Bar Diameters in Natural Corrosion Environments", *Structures*, vol. 46, pp. 2031–2046, 2022.
- [5] M. Farooq, *Development of FRP based composite fibre for fibre reinforced cementitious composites*, University of British Columbia Open Collections, 1970.
- [6] P. M. Tuan, "Moment capacity of reinforced concrete beam using hybrid (steel and GFRP) bars conforming to TCVN 5574:2018", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 13, no. 4V, pp. 73–81, 2019.
- [7] N. T. Ninh, T. H. Linh, D. V. Hai, K. V. Tai, and N. T. Hieu, "Experimental study on flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid GFRP and steel bars corroded by chloride ion", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 15, no. 3V, pp. 16–26, 2021.
- [8] Y. H. M. Amran, R. Alyousef, R. S. M. Rashid, H. Alabduljabbar, and C.-C. Hung, "Properties and Applications of FRP in Strengthening RC Structures: A Review", *Structures*, vol. 16, pp. 208–238, 2018.
- [9] M. El-Mogy, A. El-Ragaby, and E. El-Salakawy, "Behavior of Continuous Concrete Beams Reinforced with FRP Bars". *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, 2011, pp. 283–286.
- [10] M. Ju, H. Oh, and J. Sim, "Indirect Fatigue Evaluation of CFRP-Reinforced Bridge Deck Slabs under Variable Amplitude Cyclic Loading", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 1783–1792, 2016.
- [11] American Concrete Institute, *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*; ACI440.1R-06, USA, 2006.
- [12] Canadian Standards Association. Design and Construction of Building

- Components with Fibre-Reinforced Polymers; CSA-S806-12, Canada, 2012.
- [13] Canadian Standards Association. *Canadian Highway Bridge Design Code*. CSA-S6-06, Canada, 2010.
- [14] Machida, Atsuhiko, *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, 1997.
- [15] The International Federation for Structural Concrete (FIB): *Model Code 2010 - First complete draft*, Volume 1, Bulletin No. 55, 2010.
- [16] N. Saleh, A. Ashour, and T. Sheehan, "Bond between glass fibre reinforced polymer bars and high - strength concrete", *Structures*, vol. 22, pp. 139–53, 2019.
- [17] B. Basaran, I. Kalkan, E. Bergil, and E. Erdal, "Estimation of the FRP-Concrete Bond Strength with Code Formulations and Machine Learning Algorithms", *Composite Structures*, vol. 268, pp. 113972, 2021.
- [18] U. Marek, "Compressive Strength of Modified FRP Hybrid Bars." *Materials*, vol. 13, no. 8, pp. 1898, 2020.
- [19] M. Lach *et al.*, "Effect of Fiber Reinforcement on the Compression and Flexural Strength of Fiber-Reinforced Geopolymers", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 21, pp. 10443–43, 2021.
- [20] B. Brahim *et al.*, "Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-fib bars for concrete structures", *Composites Part B: Engineering*, vol. 114, pp. 163–174, 2017.
- [21] P. G. Kossakowski and W. Wciślik, "Fiber-Reinforced Polymer Composites in the Construction of Bridges: Opportunities, Problems and Challenges", *Fibers*, vol. 10, no. 4, pp. 37, 2022.
- [22] "12mm Fiberglass Rod", *Indiamart*. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/12mm-fiberglass-thread-rod-21753250497.html>. [Accessed March 5, 2023].
- [23] K. Hamidreza *et al.*, "Bond Durability between Anchored GFRP Bar and Seawater Concrete under Offshore Environmental Conditions", *Materials and Structures*, vol. 56, no. 3, 2023.
- [24] T. Eleni *et al.*, "Bond Durability of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Tendons Embedded in High-Strength Concrete", *Journal of Composites for Construction*, vol. 22, no. 5, 2018.
- [25] L. Xia *et al.*, "Bond behavior of basalt fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under mono-tensile and cyclic loads", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, 2020.
- [26] M. Ekenel, F. D. C. y Basalo, and A. Nanni, "Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Members", *Building Safety Journal*, 2021. [Online]. Available: <https://www.iccsafe.org/building-safety-journal/bsj-technical/fiber-reinforced-polymer-reinforcement-for-concrete-members/> [Accessed March 5, 2023].
- [27] P. Anant and M. S. Alam, "A Review on the Application of Sprayed-FRP Composites for Strengthening of Concrete and Masonry Structures in the Construction Sector", *Composite Structures*, vol. 187, pp. 518–534, 2018.
- [28] Y. Liu *et al.*, "Experimental Study on Mechanical Properties of Novel FRP Bars with Hoop Winding Layer", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 10, pp. 1-18, 2021.
- [29] M. Ivey, J. P. Carey, and C. Ayranci, "Manufacturing and Characterization of Braided Fiber Reinforced Polymer Rebar", *Polymer Composites*, vol. 39, no. 2, pp. 337–350, 2016.
- [30] O. Roman and R. Yuan, "Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete", *Journal of Composites for Construction*, vol. 9, no. 3, pp. 203–213, 2005.
- [31] J.-Y. Lee *et al.*, "Interfacial Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in High-Strength Concrete", *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 258–270, 2008.
- [32] M. Baena *et al.*, "Experimental Study of Bond Behaviour Between Concrete and FRP Bars Using a Pull-out Test", *Composites Part B-engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 784–97, 2009.
- [33] B. Bogachan and I. Kalkan, "Development Length and Bond Strength Equations for FRP Bars Embedded in Concrete", *Composite Structures*, vol. 251, pp. 112662, 2020.
- [34] K. Avishay, "Bond Mechanism of FRP Rebars to Concrete", *Materials and Structures*, vol. 32, no. 10, pp. 761–68, 1999.
- [35] R. Arnaud *et al.*, "Experimental Investigations on the Bond Behavior Between Concrete and FRP Reinforcing Bars", *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 136–48, 2018.
- [36] I. Sirajul *et al.*, "Bond Characteristics of Straight- and Headed-End, Ribbed-Surface, GFRP Bars Embedded in High-Strength Concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 283–298, 2015.
- [37] A. Zenon and K. Pilakoutas, "Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions", *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, no. 2, pp. 173–181, 2004.
- [38] L. J. Malvar *et al.*, "Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars and Concrete. I: Experimental Study", *Journal of Composites for Construction*, vol. 7, no. 2, pp. 154–163, 2003.
- [39] B. Abdeldjelil and H. Wang, "Bond Durability of FRP Bars Embedded in Fiber-Reinforced Concrete", *Journal of Composites for Construction*, vol. 16, no. 4, pp. 371–380, 2012.
- [40] Z. Dong *et al.*, "Bond durability of bfrp bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction", *Materials and Design*, vol. 92, pp. 552–62, 2016.
- [41] W. Wei *et al.*, "Bond Performance Between Fibre-reinforced Polymer Bars and Concrete Under Pull-out Tests", *Construction and Building Materials*, vol. 227, pp. 116803, 2019.
- [42] W. C. Tang, T. Y. Lo, and R. V. Balendran, "Bond performance of polystyrene aggregate concrete (PAC) reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars", *Building and Environment*, vol. 43, no. 1, pp. 98–107, 2008.
- [43] A. Abdolkarim and P. J. Hogg, "Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete", *Composites Part B-engineering*, vol. 36, no. 5, pp. 394–404, 2005.
- [44] B. Tighiouart, B. Benmokrane, and D. Gao, "Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars", *Construction and Building Materials*, vol. 12, no. 8, pp. 453–62, 1998.
- [45] M. Bazli, H. Ashrafi, and A. V. Oskoue, "Experiments and Probabilistic Models of Bond Strength Between GFRP Bar and Different Types of Concrete Under Aggressive Environments", *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 429–443, 2017.
- [46] D. Yining *et al.*, "Fibres for Enhancing of the Bond Capacity Between GFRP Rebar and Concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 303–12, 2014.
- [47] J. F. Davalos, Y. Chen, and I. Ray, "Effect of FRP Bar Degradation on Interface Bond With High Strength Concrete", *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 8, pp. 722–730, 2008.
- [48] J.-P. Won *et al.*, "Effect of Fibers on the Bonds Between FRP Reinforcing Bars and High-strength Concrete", *Composites Part B-engineering*, vol. 39, no. 5, pp. 747–55, 2008.
- [49] J. Zhou, X. Chen, and S. Chen, "Effect of Different Environments on Bond Strength of Glass Fiber-reinforced Polymer and Steel Reinforcing Bars", *KSCSE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 994–1002, 2012.
- [50] M. Robert and B. Benmokrane, "Effect of Aging on Bond of GFRP Bars Embedded in Concrete", *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 6, pp. 461–467, 2010.
- [51] H. Qingduo *et al.*, "Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 865–71, 2009.
- [52] G. Ahmed *et al.*, "Bond strength of FRP bars in recycled-aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 267, pp. 120919, 2021.
- [53] M. A. Aiello, M. Leone and M. Pecce, "Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 205–213, 2007.
- [54] K. Hossain *et al.*, "Bond Strength of Standard and High-Modulus GFRP Bars in High-Strength Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 449–56, 2014.
- [55] B. Kim *et al.*, "Effects of Structural Fibers on Bonding Mechanism Changes in Interface Between GFRP Bar and Concrete", *Composites Part B-engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 768–79, 2013.
- [56] I. Vilanova *et al.*, "Experimental study of bond-slip of GFRP bars in concrete under sustained loads", *Composites Part B-engineering*, vol. 74, pp. 42–52, 2015.
- [57] F. Yan *et al.*, "Experimental study on bond durability of glass fiber reinforced polymer bars in concrete exposed to harsh environmental agents: freeze-thaw cycles and alkaline-saline solution", *Composites Part B-engineering*, vol. 116, pp. 406–21, 2017.
- [58] N. M. Hai, N. Akinori, and F. Shuichi, "Study on applicability of shear resistance evaluation formulas of perfobond strip based on push-out test data of previous studies", *JSCE Journal of Structural Engineering*, vol. 65A, pp. 712-724, 2019.
- [59] N. M. Hai, P. H. Nam, D. V. Hai, and H. P. Nam, "An experiment-based nonlinear model of shear force-slip relationship for perfobond strips in an unreinforced narrow joint with high-strength steel fiber mortar", *Case Studies in Construction Materials*, 2023, pp. e02092.