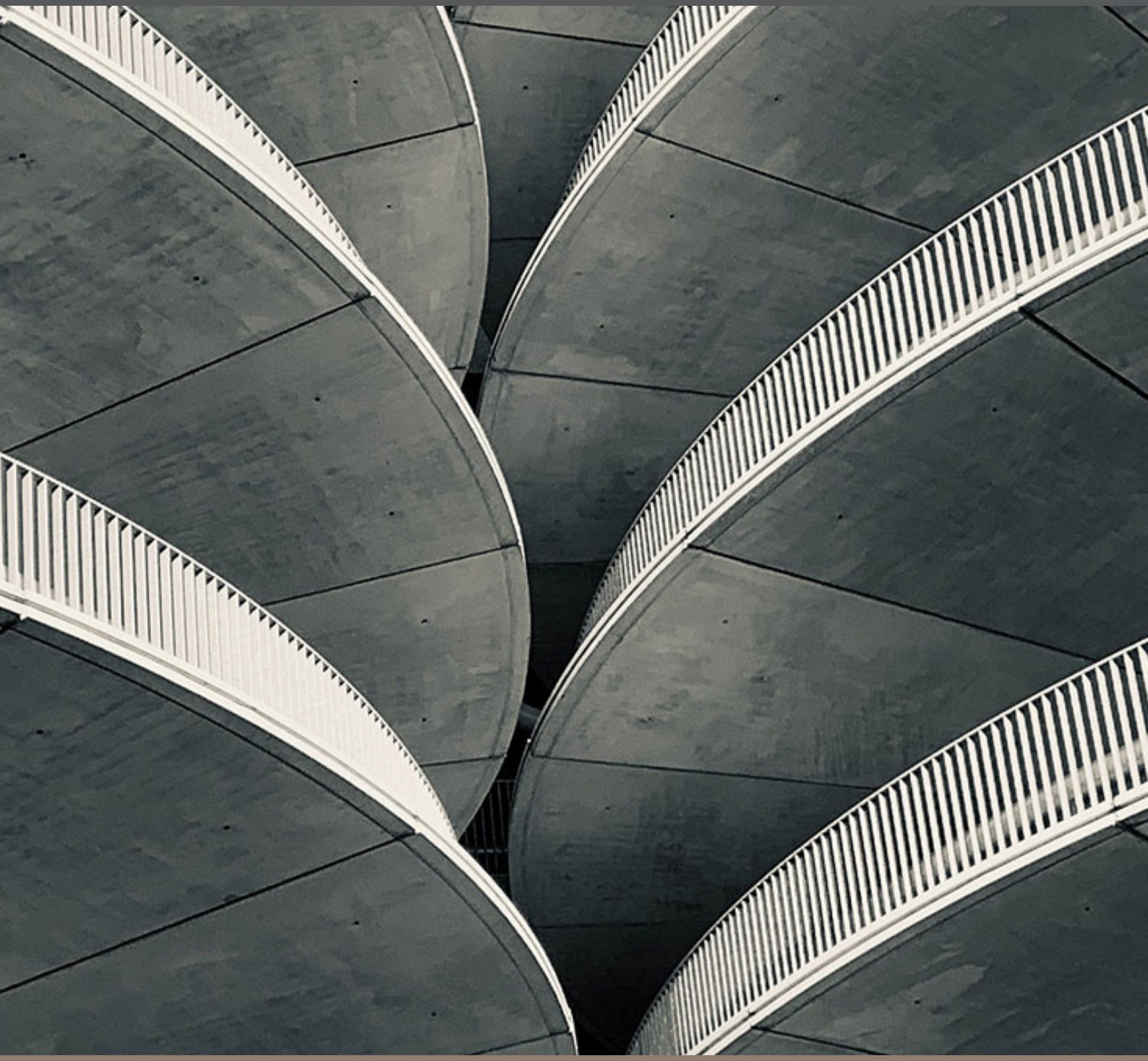
TẠP CHÍ VẬT LIỆU & XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA VIỆN VẬT LIỆU XÂY DỰNG - BỘ XÂY DỰNG

TẬP 15 SỐ 6 | (12-2025)



ISSN 1859-381X

VIỆN VẬT LIỆU XÂY DỰNG

VIETNAM INSTITUTE FOR BUILDING MATERIALS

Trụ sở chính: Số 235 đường Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân Trung, quận Thanh Xuân, TP. Hà Nội
Điện thoại: 024.3858.1111 * Fax: 024.3858.1112 * Email: vienvlxd@vibm.vn * Website: www.vibm.vn
Phân viện Vật liệu xây dựng miền Nam: Lô I- 3b-5, đường N6, Khu Công nghệ cao, phường Tân Phú, Tp. Thủ Đức, Tp. Hồ Chí Minh
Điện thoại: 028.37402343 * Fax: 028.37402343
Cơ sở 2 Hà Nam: Khu Tiểu thủ công nghiệp, xã Trung Lương, huyện Bình Lục, tỉnh Hà Nam

Trụ sở chính của VIBM tại Hà Nội

Viện Vật liệu xây dựng (VIBM) trực thuộc Bộ Xây dựng, được thành lập ngày 4/11/1969, là viện nghiên cứu khoa học và công nghệ Quốc gia về vật liệu xây dựng và các lĩnh vực khác bao gồm: cơ khí xây dựng, hạ tầng kỹ thuật và môi trường xây dựng; phục vụ công tác quản lý Nhà nước và phát triển ngành công nghiệp vật liệu xây dựng trên phạm vi toàn quốc.

Nguyên Viện trưởng Lê Trung Thành báo cáo nguyên Tổng Bí thư Nguyễn Phú Trọng, nguyên Phó Thủ tướng Trịnh Đình Dũng và nguyên Bộ trưởng Bộ Xây dựng Phạm Hồng Hà về một số hoạt động nghiên cứu khoa học trọng điểm của Viện Vật liệu xây dựng

Chức năng nhiệm vụ:

- Xây dựng chiến lược, quy hoạch, kế hoạch, chính sách phát triển, quy chuẩn, tiêu chuẩn;
- Nghiên cứu khoa học – công nghệ;
- Phân tích, thí nghiệm, kiểm định, chứng nhận hợp chuẩn – hợp quy;
- Khảo sát, thăm dò tài nguyên khoáng sản;
- Tư vấn đầu tư sản xuất, thẩm định, thiết kế và chuyển giao công nghệ;
- Sản xuất, xuất – nhập khẩu; đầu tư sản xuất, kinh doanh;
- Tổ chức thi công xây dựng;
- Đào tạo, bồi dưỡng kỹ thuật viên, công nhân vận hành; phổ biến tiêu chuẩn, quy chuẩn và văn bản pháp quy;
- Nghiên cứu thị trường, xúc tiến thương mại.

Hội thảo quốc tế về "Vật liệu xây dựng thế kỷ 21" (ICBM 2024) do Viện Vật liệu xây dựng tổ chức từ 31/10/2024 - 03/11/2024 tại Hà Nội nhân kỷ niệm 55 năm thành lập

Đơn vị thành viên:

- Phân viện Vật liệu xây dựng miền Nam
- Trung tâm Đào tạo, Truyền thông và Hợp tác quốc tế
- Trung tâm Nghiên cứu chiến lược phát triển VLXD
- Trung tâm Tư vấn và Dịch vụ kỹ thuật xây dựng
- Văn phòng chứng nhận chất lượng sản phẩm VLXD
- Trung tâm Xi măng và Bê tông
- Trung tâm Vật liệu chịu lửa và Chống cháy
- Trung tâm Gốm sứ – Thủy tinh
- Trung tâm Thiết bị, môi trường và An toàn lao động
- Trung tâm Vật liệu hữu cơ và Hóa phẩm xây dựng
- Trung tâm Kiểm định VLXD
- Trung tâm Vật liệu xây dựng công trình giao thông
- Công ty Cổ phần Vật liệu xây dựng tính năng cao (HIMAT)

Nguyên Phó Thủ tướng Trịnh Đình Dũng và Đoàn công tác của Chính phủ đến thăm và làm việc tại Viện VLXD về Chiến lược phát triển VLXD thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050

7 Ảnh hưởng của cát nghiền đến một số tính chất của bê tông
Phan Văn Quỳnh, Nguyễn Văn Đoàn, Dương Thanh Qui

13 Nghiên cứu tận dụng xỉ đáy lò của nhà máy đốt rác sinh hoạt làm cốt liệu nhỏ trong bê tông
Nguyễn Văn Tuyến, Nguyễn Đình Giang Nam, Hoàng Vĩ Minh, Lê Văn Toàn, Trần Quốc Vinh

20 Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi thép đến khả năng chịu kéo của bê tông cường độ siêu cao
Đặng Văn Phi

27 Nghiên cứu ứng xử chịu chọc thủng của sàn phẳng bê tông cốt thép có lỗ mở
Nguyễn Quang Sĩ, Nguyễn Hoàng Quân, Nguyễn Xuân Huy, Lê Đăng Dũng

36 Tình hình sử dụng và các giải pháp tiết kiệm năng lượng trong sản xuất clanhke xi măng tại Việt Nam
Nguyễn Văn Hoan, Phan Văn Quỳnh

41 Phân tích phản ứng động đất của cầu cọc sàn đúc sẵn
Nguyễn Quốc Tới, Nguyễn Trường Chinh

47 Vi nhựa trong nước uống: Hiện trạng và giải pháp
Phạm Văn Tới, Phạm Văn Định, Đỗ Văn Mạnh, Lê Xuân Thanh Thảo, Nguyễn Thị Thu Trang, Lê Thị Thanh An, Vũ Thị Thanh Huyền

55 Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng xỉ nhiệt điện và đá bazan chế tạo xi măng theo tiêu chuẩn Châu Âu
Nguyễn Văn Hoan, Lê Văn Tiến

63 Nghiên cứu chế tạo vữa xây dựng hấp thụ khí CO_2 từ nguồn hỗn hợp tro bay nhiệt điện, cốt sợi xơ dừa và dung dịch siêu dẻo hoạt hóa
Tăng Văn Lâm, Phạm Quang Đạo, Trần Thị Kim Phụng, Đỗ Đình Hưng

70 Gạch bông trong bối cảnh phát triển vật liệu xây dựng không nung ở Việt Nam
Trần Thị Thanh Tuyền

78 Ảnh hưởng của điều kiện dưỡng hộ CO_2 đến cường độ, mức độ cacbonat hóa và biến đổi vi cấu trúc của gạch xây không nung
Lê Văn Quang, Nguyễn Huy Dũng, Huỳnh Trọng Phước

86 Nghiên cứu ứng xử kéo nhổ của đa sợi thép trong bê tông
Đặng Văn Phi, Tăng Văn Lâm, Lê Huy Việt

92 Tối ưu hình dạng kết cấu của nhóm cọc móng cầu nước sâu
Nguyễn Quốc Tới, Nguyễn Trường Chinh

97 Ứng xử chịu kéo khi uốn của dầm bê tông cốt sợi thép phân tán: Thí nghiệm và mô hình số
Lê Gia Khuyến, Vũ Việt Hưng, Nguyễn Hoàng Quân, Trần Bảo Việt

105 Nghiên cứu về đóng góp của các dự án xây dựng khi áp dụng BIM tới tăng trưởng kinh tế tại Hà Nội
Lê Minh Thoa, Lâm Hải Hòa, Nguyễn Thanh Huyền, Nguyễn Thanh Tuyền

111 Phân tích so sánh ảnh hưởng của phương pháp thi công và thời gian chờ cố kết đến ứng xử của tường vây trong công trình ngầm
Lê Đình Mạnh

121 Giải pháp công nghệ trong kiểm tra, quản lý chất lượng mối hàn nhiệt nhôm, giáp mối nóng chảy và một số hạng mục kết cấu khác tại các dự án đường sắt đô thị ở Việt Nam
Nguyễn Anh Tú, Cao Anh Tuấn, Lâm Hữu Quang

Tổng biên tập
TS. Lưu Thị Hồng
Phó Tổng biên tập
TS. Vũ Văn Dũng

Hội đồng khoa học
PGS.TS. Lê Trung Thành (Chủ tịch)
GS.TS. Nguyễn Việt Anh
PGS.TS. Huỳnh Đăng Chính
PGS.TS. Tạ Ngọc Dũng
GS.TS. Thái Hoàng
TS. Ứng Quốc Hùng
GS.TS. Phạm Huy Khang
GS.TS. Trần Đại Lâm
GS.TS. Nguyễn Tố Lăng
PGS.TS. Lương Đức Long
PGS.TS. Bùi Công Quang
GS.Nguyễn Văn Tuấn
GS.TS. Ngô Tuấn
TS. Trần Bá Việt
PGS.TS. Vũ Quốc Vương
PGS.TS. Dirk Schwede
GS.TS. Е.В.Королев
GS.TS. Ippei Maruyam
GS.TS. Johann Plank
GS.TS. Marios Soutsos
GS. Michael A. Waibel

Tòa soạn và trị sự
235 Nguyễn Trãi, Khương Đình, Hà Nội
Tel: 024 3 8582217
Fax: 024 3 8581112
E-mail: contact@jomc.vn
Website: https://jomc.vn
Giấy phép xuất bản:
Số 564/GP-BTTT ngày 03/12/2020

VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Nghiên cứu ứng xử kéo rút của đa sợi thép trong bê tông

Đặng Văn Phi [1,2*], Tăng Văn Lâm [1,2], Lê Huy Việt [1,2]

[1] Trường Đại học Mỏ - Địa chất

[2] Nhóm nghiên cứu mạnh : Địa kỹ thuật, vật liệu và phát triển bền vững (GECS), Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TỪ KHOÁ

Ứng xử kéo rút
Đa sợi thép
Bê tông

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ứng xử kéo rút của đa sợi thép trong bê tông thông qua thí nghiệm kéo rút với số lượng sợi lần lượt là 1, 4 và 16. Các mẫu thí nghiệm được chế tạo nhằm làm rõ ảnh hưởng của số lượng sợi đến khả năng bám dính, cơ chế truyền ứng suất và sự hình thành vết nứt trong vùng tiếp xúc giữa sợi và bê tông. Kết quả cho thấy khi số lượng sợi tăng, cường độ bám dính trung bình trên mỗi sợi có xu hướng giảm, chủ yếu do sự phân tán ứng suất tiếp xúc và sự chồng lấn của các vết nứt lân cận. Đặc biệt, mẫu chứa một sợi đơn lẻ cho thấy khả năng kháng kéo rút tối ưu trên mỗi đơn vị sợi, ngược lại các mẫu có nhiều sợi ghi nhận mức suy giảm đáng kể. Tuy nhiên, sự gia tăng số lượng sợi cũng dẫn đến khả năng tiêu tán năng lượng cao hơn nhờ sự tương tác phức tạp giữa các vết nứt. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở thực nghiệm hữu ích cho việc mô tả cơ chế bám dính của các sợi thép trong bê tông và hỗ trợ thiết kế tối ưu vật liệu bê tông cốt sợi trong các kết cấu thực tế.

KEYWORDS

Pullout behavior
Multiple steel fibers
Concrete

ABSTRACT

This study evaluates the pullout behavior of multiple steel fibers in concrete through pullout tests with fiber quantities of 1, 4, and 16. The specimens were prepared to clarify the influence of fiber number on bond strength, stress transfer mechanisms, and crack development at the fiber-concrete interface. The results indicate that as the number of fibers increases, the average bond strength per fiber tends to decrease, primarily due to the redistribution of interfacial stresses and the overlapping of neighboring cracks. In particular, the single-fiber specimen exhibited the highest pullout resistance per unit fiber, whereas specimens with multiple fibers exhibited a significant reduction. Nevertheless, increasing the number of fibers enhanced the overall energy dissipation capacity, attributed to more complex crack interactions. The findings provide valuable experimental evidence for characterizing the bond mechanism of steel fibers in concrete and support the optimal design of fiber-reinforced concrete for practical structural applications.

1. Giới thiệu

Bê tông từ lâu đã được xem là vật liệu xây dựng chủ đạo nhờ khả năng chịu nén tốt, tính bền lâu và chi phí hợp lý; tuy nhiên, đặc tính chịu kéo và khả năng kháng nứt của bê tông còn hạn chế, đặc biệt khi xuất hiện các vi nứt trong cấu trúc của bê tông [1–3]. Sự gia cường bằng sợi thép trong bê tông đã chứng minh hiệu quả rõ rệt trong việc cải thiện độ dẻo, nâng cao cường độ chịu kéo sau nứt, gia tăng khả năng hấp thụ năng lượng và kiểm soát sự lan truyền vết nứt của vật liệu này nhờ vào cơ chế "bắc cầu" của sợi qua các vết nứt [4, 5]. Hiệu quả này phụ thuộc mạnh mẽ vào liên kết giữa sợi và bê tông, trong đó ứng xử kéo rút đóng vai trò quyết định đối với sự tham gia của sợi vào khả năng chịu tải trọng của cấu kiện bê tông [6]. Trong nhiều thập kỷ qua, các nghiên cứu đã tập trung khảo sát cơ chế kéo rút của sợi thép đơn, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của nhiều yếu tố như hình dạng đầu sợi (thẳng, có móc, xoắn, v.v.), chiều dài neo, đường kính sợi, điều kiện bề mặt, v.v., cũng như cường độ và cấu trúc lỗ rỗng của bê tông [7–9]. Các kết quả này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc dự đoán khả năng chịu lực và độ bền sau nứt của bê tông, đặc biệt trong các loại bê tông có hiệu suất cao như UHPC (Ultra-High Performance Concrete) [6, 10]. Tuy nhiên, trong thực tế thi công, sợi thép hiếm khi tồn tại riêng lẻ mà thường được phân bố với mật độ cao trong hỗn hợp bê tông; khi đó, hiện tượng tương tác giữa các sợi trở thành yếu tố quan trọng, có thể làm giảm hoặc thay đổi đáng kể lực bám dính, đường cong tải trọng-biến dạng, cũng như cơ chế phá hủy so với trường hợp sợi đơn. Một số nghiên cứu gần đây đã mở rộng phạm vi khảo sát sang các thí nghiệm kéo rút đa sợi thép, nhằm làm rõ tác động của số lượng sợi, khoảng cách giữa các sợi, hình dạng đầu sợi, góc đặt sợi, v.v. Kết quả cho thấy, sự xuất hiện của nhiều sợi có thể dẫn đến hiện tượng giảm cường độ liên kết do vùng bê tông xung quanh sợi bị suy yếu hoặc do các mặt nứt giao thoa, đồng thời khả năng trượt của sợi cũng có thể bị giới hạn bởi sự chèn ép lẫn nhau [11–14]. Bên cạnh đó, các thông số của bê tông như cường độ nén, mô đun đàn hồi, kích thước cốt liệu mịn, hàm lượng phụ gia khoáng hoặc tỷ lệ nước-chất kết dính có thể

*Liên hệ tác giả: dangvanphi@humg.edu.vn
Nhận ngày 30/08/2025, sửa xong ngày 20/10/2025, chấp nhận đăng ngày 21/10/2025
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1097

ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử kéo rút của sợi trong điều kiện đa sợi, nhưng vẫn chưa được phân tích toàn diện, đặc biệt trong bối cảnh sử dụng vật liệu địa phương hoặc khi xét đến tuổi bê tông trong giai đoạn đầu [9, 11–14].

Từ những phân tích ở trên có thể thấy rằng, các công trình trước đây đã tập trung làm rõ cơ chế bám dính của sợi thép đơn trong bê tông, đồng thời phân tích ảnh hưởng của hình dạng sợi, chiều dài neo và cường độ bê tông đến ứng xử kéo rút sợi thép. Tuy nhiên, trong điều kiện thực tế, các sợi thép thường phân bố với mật độ cao, dẫn đến hiện tượng tương tác giữa các sợi, làm thay đổi lực bám dính, năng lượng hấp thụ và cơ chế phá hủy của vật liệu. Mặc dù hiệu ứng nhóm sợi đã được ghi nhận, song nguồn gốc của hiện tượng này đối với đặc tính liên kết bề mặt vẫn chưa được hiểu rõ. Do đó, việc xác định các thông số chi phối khả năng kéo rút đa sợi và cơ chế hình thành hiệu ứng nhóm sợi là cần thiết nhằm tối ưu hóa hiệu suất của bê tông, đặc biệt là bê tông siêu tính năng (UHPC). Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ứng xử kéo rút của đa sợi thép nhúng trong bê tông, dựa trên thực nghiệm nhằm xem xét đồng thời các tham số bao gồm: (i) Tác động của mật độ sợi thép đến giá trị cực đại của tải trọng kéo rút, (ii) Ảnh hưởng của mật độ sợi thép tới năng lượng hấp thu và phân tán, (iii) Ảnh hưởng của mật độ sợi thép tới khả năng bám dính. Mục tiêu của nghiên cứu là làm sáng tỏ cơ chế tương tác giữa các sợi và bề mặt sợi-bê tông, từ đó cung cấp dữ liệu thực nghiệm tin cậy phục vụ việc phát triển các mô hình phân tích và mô phỏng số nhằm dự đoán lực kéo rút và đường cong lực-dịch chuyển trong điều kiện đa sợi, đồng thời hỗ trợ thiết kế, tối ưu hóa cấu kiện bê tông cốt sợi.

2. Vật liệu và Thí nghiệm

Bảng 1 trình bày thành phần cấp phối, tính công tác và cường độ nén của tổ hợp bê tông được sử dụng trong nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, xi măng Portland được sử dụng làm chất kết dính chính, thành phần hóa học của xi măng được thể hiện trong Bảng 2, khối lượng riêng của xi măng là 3,15 g/cm^3, được lấy theo tài liệu [16]. Cát silica có đường kính hạt trung bình là 0,3 mm, đường kính trung bình của bột silica khoảng 10 µm. Silica fume chứa khoảng 98 % SiO_2 và có khối lượng riêng 2,60 g/cm^3. Phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate ether dạng dung dịch, với thành phần chất rắn hoạt tính chiếm 30% khối lượng, được dùng để tăng độ chảy và giảm lượng nước trộn trong bê tông. Sợi thép có đường kính 0,3 mm, chiều dài 30 mm, khối lượng riêng 7,9 g/cm^3. Cường độ kéo đứt của sợi thép là 2447 MPa, trong khi mô đun đàn hồi là 200 GPa [15].

Quá trình chế tạo mẫu được thực hiện theo tài liệu [17]: Xi măng (XM), silica fume (SF), bột silica (SP) và cát (C) được trộn khô trong khoảng thời gian 10 phút; Sau giai đoạn trộn khô, nước (N) được chia thành 5 phần bằng nhau và được bổ sung lần lượt, mỗi lần cách nhau 2 phút; Tiếp theo, phụ gia siêu dẻo (PGSD) được chia thành 5 phần và thêm vào hỗn hợp, mỗi lần cách nhau 2 phút. Sau khi tháo khuôn, toàn bộ mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt độ cao 90 ± 2 °C trong 3 ngày, sau đó để ở nhiệt độ phòng 25 ± 2 °C, và được thí nghiệm sau 28 ngày.

Hình 1 trình bày mẫu thí nghiệm kéo rút sợi, mẫu gồm hai phần riêng biệt. Ở phần thứ nhất, các sợi thép được bố trí với chiều dài neo trong bê tông là 5 mm nhằm khảo sát ứng xử kéo rút của sợi. Ở phần thứ hai, chiều dài neo của sợi trong bê tông là 23 mm. Trước khi đổ khuôn, các sợi được cố định vào tấm nhựa PVC dày 2 mm để đảm bảo sự phân tách rõ ràng giữa hai vùng của mẫu thí nghiệm [18].

Số lượng sợi được chọn là 1, 4 và 16 nhằm mô phỏng các mức độ tương tác sợi khác nhau trong vật liệu (Hình 2). Mẫu có 1 sợi đại diện cho trường hợp không có tương tác giữa các sợi, trong khi các mẫu có 4 và 16 sợi phản ánh các mức mật độ sợi tăng dần, qua đó cho phép đánh giá ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm sợi đến lực bám dính và cơ chế phá hủy của vật liệu.

Thí nghiệm kéo rút sợi đa sợi được tiến hành trên máy kéo có sức chịu tải 5 kN (Hình 3). Lực kéo rút được đo bằng cảm biến tải trọng, trong khi độ trượt được ghi nhận bằng cảm biến. Mẫu được cố định bằng kẹp chuyên dụng trong suốt quá trình thí nghiệm (Hình 3). Tốc độ gia tải trong các thí nghiệm kéo rút đa sợi là 0,0167 mm/s, với tần suất ghi dữ liệu tương ứng 5 Hz [15].

Cường độ liên kết tại bề mặt giữa sợi thép và bê tông được đánh giá thông qua các phương trình (1) và (2) [18]:

$$\tau_{peak} = \frac{P_{peak}}{N_f \pi d_f L_{em}}, \quad (1)$$

$$\tau_{eq} = \frac{2PE}{N_f \pi d_f L_{em}^2}, \quad (2)$$

Trong đó, τ_{peak} thể hiện độ bền liên kết được xác định từ tải trọng kéo lớn nhất (P_{peak}), τ_{eq} biểu thị độ bền liên kết tương đương, được tính từ công thực hiện trong quá trình kéo sợi, d_f là đường kính sợi, L_{em} là chiều dài của sợi thép trong bê tông (5mm), và N_f là số lượng sợi trong mẫu thí nghiệm.

3. Kết quả và thảo luận

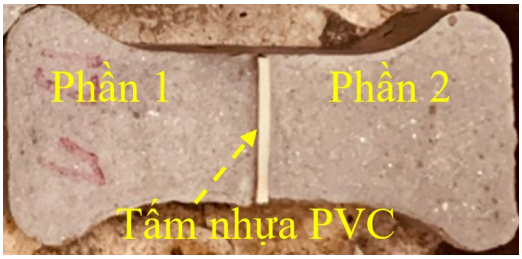
Kết quả thí nghiệm kéo rút sợi thu được đối với ba tổ hợp mẫu TH1S, TH4S và TH16S được trình bày chi tiết trong Bảng 3, đồng thời đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa lực kéo và độ dịch chuyển của sợi được trình bày ở Hình 4. Các số liệu thực nghiệm cho thấy cường độ liên kết tại bề mặt tiếp xúc giữa sợi thép và bê tông có sự thay đổi rõ rệt khi thay đổi số lượng sợi thép được bố trí trong các tổ hợp.

Bảng 1. Cấp phối vật liệu cho 1m^3, đặc tính công tác và cường độ nén của bê tông.

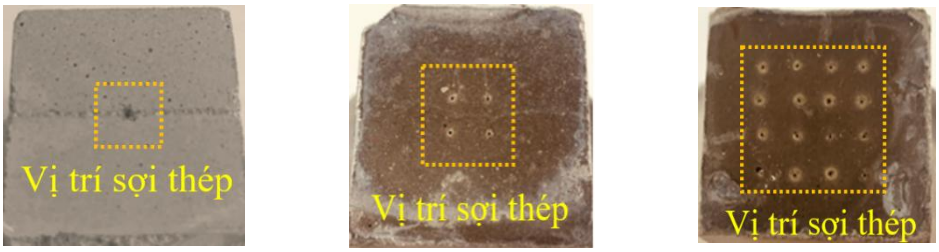
XM (kg)	C (kg)	SF (kg)	SP (kg)	PGSD (kg)	N (kg)	Độ chảy (mm)	Cường độ nén (MPa)
926	1019	232	278	65	194	220	188,27

Bảng 2. Thành phần hóa học của xi măng [16].

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Hao hụt (%)
21,00	4,90	3,30	62,10	2,90	2,40	0,10	1,30	2,00

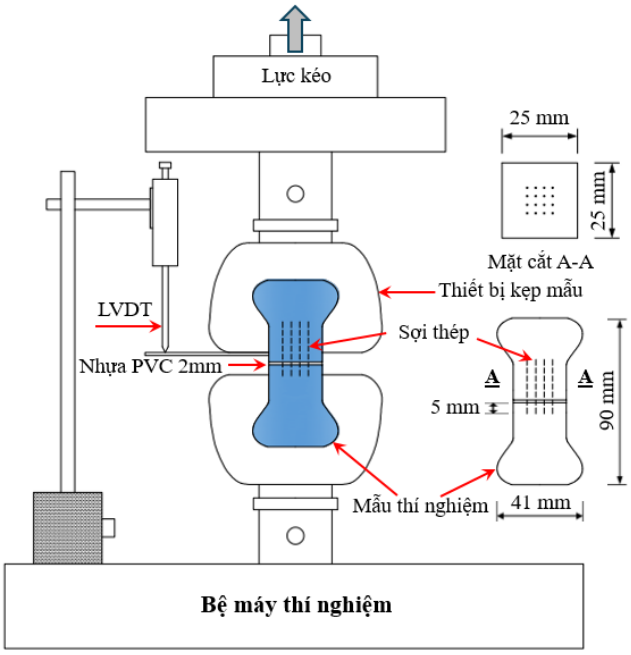


Hình 1. Mẫu thí nghiệm kéo rút sợi.



a) TH1S b) TH4S c) TH16S

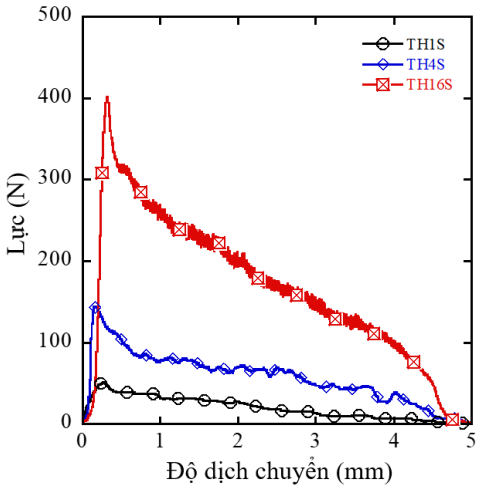
Hình 2. Bề mặt mẫu sau thí nghiệm kéo rút sợi.



Hình 3. Thí nghiệm kéo sợi.

Bảng 3. Các thông số cơ học của các sợi thép dưới tác dụng của lực kéo rút sợi.

Tổ hợp	P_{peak} (N)	τ_{peak} (MPa)	*PE* (N.mm)	τ_{eq} (MPa)
TH1S	51,02	10,83	100,15	8,51
TH4S	144,48	7,67	286,49	6,08
TH16S	402,12	5,33	812,87	4,31



Hình 4. Lực-độ dịch chuyển của sợi thép trong bê tông.

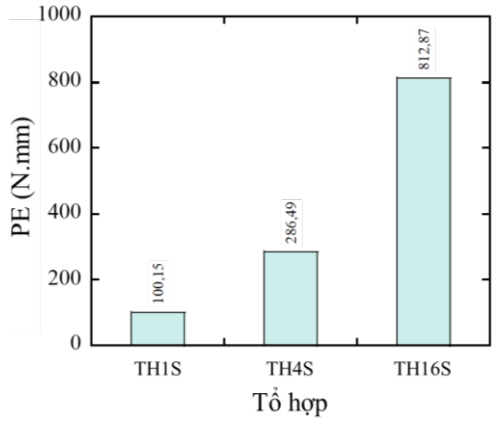
3.1. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến tải trọng kéo rút cực đại

Tải trọng cực đại P_{peak} trong thí nghiệm kéo rút tăng rõ rệt khi số lượng sợi thép trong mẫu được nâng từ 1 lên 16 sợi (Hình 4). Cụ thể, P_{peak} đạt 51,02 N đối với mẫu TH1S, 144,48 N đối với mẫu TH4S và 402,12 N đối với mẫu TH16S (Bảng 3). Sự gia tăng này phản ánh vai trò quan trọng của hàm lượng sợi trong việc cải thiện khả năng chịu lực tổng thể của hệ thống liên kết sợi-bê tông. Khi mật độ sợi tăng, ứng suất truyền qua bề mặt tiếp xúc được phân bố đồng đều hơn trong khối bê tông, đồng thời hiệu ứng cầu nối của sợi giúp kìm hãm sự phát triển của vi khe nứt và duy trì khả năng chịu kéo của vật liệu [14, 19].

Xét ở mức độ vi mô, sự gia tăng tải trọng kéo rút có thể được lý giải thông qua các cơ chế tương tác phức hợp giữa sợi thép và bê tông xung quanh sợi. Trước hết, lực dính bám hóa học hình thành trong giai đoạn đầu khi hồ xi măng bao quanh bề mặt sợi, tạo nên liên kết tĩnh giữa hai pha vật liệu. Tiếp đó, khi tải trọng tăng, liên kết hóa học này bị phá vỡ, nhưng ma sát bề mặt sợi và các hạt xi măng-cốt liệu tiếp tục đóng vai trò chủ đạo trong việc chống trượt [20].

3.2. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến năng lượng tiêu tán

Diện tích nằm dưới đường cong lực-độ dịch chuyển trong thí nghiệm kéo rút sợi (Hình 4) biểu thị công thực hiện trong toàn bộ quá trình kéo rút sợi, ký hiệu là PE, phản ánh trực tiếp khả năng tiêu tán năng lượng và mức độ dẻo của liên kết giữa sợi-bê tông. Kết quả ở Hình 5 cho thấy giá trị PE tăng đáng kể khi số lượng sợi thép trong mẫu tăng từ 1 lên 16 sợi lần lượt là 100,15 Nmm (TH1S), 286,49 Nmm (TH4S) và 812,87 Nmm (TH16S). Sự gia tăng này chứng tỏ rằng mật độ sợi cao đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao khả năng hấp thụ năng lượng và cải thiện ứng xử dẻo của vật liệu bê tông. Ở cấp độ vi mô, mức tăng PE có thể lý giải thông qua sự phối hợp của ba cơ chế chính: (i) Ma sát bề mặt giữa sợi thép và nền xi măng giúp duy trì lực cản trong suốt quá trình trượt; (ii) Khóa cơ học do hình dạng gân hoặc nhám của sợi kết hợp với hồ xi măng-cốt liệu, làm tăng cường độ chống trượt; (iii) Tương tác nhóm sợi khi mật độ sợi cao, trong đó các sợi lân cận hỗ trợ lẫn nhau, hạn chế sự lan rộng của khe nứt, đồng thời phân tán ứng suất hiệu quả hơn trong bê tông [21]. Sự phối hợp của các cơ chế này khiến năng lượng cần thiết để phá hủy liên kết sợi-bê tông gia tăng, đồng thời làm chậm quá trình mở rộng vết nứt.



Hình 5. Năng lượng tiêu tán của các tổ hợp.

Kết quả này phù hợp với nhận định của tác giả Wang và cộng sự [22], tác giả báo cáo rằng bê tông cường độ cao cốt sợi thép với hàm lượng sợi lớn thể hiện khả năng kháng nứt và tiêu tán năng lượng vượt trội so với mẫu có hàm lượng thấp. Đáng chú ý, vùng sau vị trí lực kéo lớn nhất trên đường cong lực-độ dịch chuyển của mẫu TH16S kéo dài và lớn hơn so với TH1S, minh chứng rằng quá trình trượt của sợi trong bê tông diễn ra chậm dần, thay vì đột ngột, qua đó giúp vật liệu vẫn duy trì được khả năng chịu lực ngay cả khi các vết nứt chính đã hình thành.

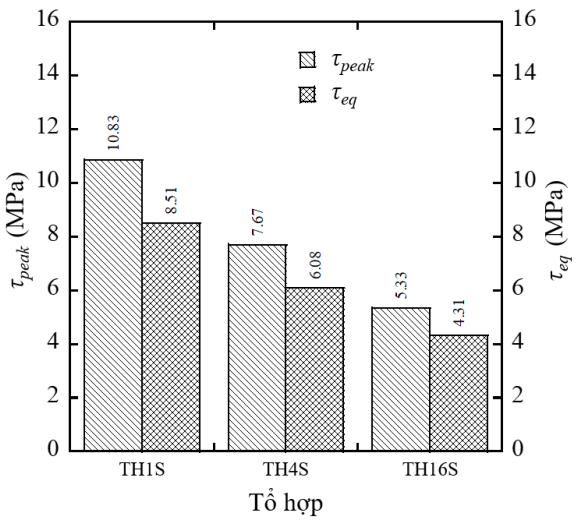
Tuy nhiên, cần lưu ý rằng việc gia tăng năng lượng tiêu tán không đồng nghĩa với việc gia tăng vô hạn hàm lượng sợi. Sau một ngưỡng tối ưu, mật độ sợi quá cao có thể dẫn tới sự phân bố không đồng đều, hình thành lỗ rỗng hoặc tập trung ứng suất cục bộ, làm giảm hiệu quả liên kết sợi-bê tông [23]. Do đó, lựa chọn tỷ lệ sợi hợp lý là điều kiện then chốt để tối ưu hóa khả năng tiêu tán năng lượng và độ bền của bê tông cốt sợi.

3.3. Ảnh hưởng của số lượng sợi thép đến cường độ bám dính

Kết quả thí nghiệm cho thấy, trái ngược với xu hướng gia tăng của tải trọng cực đại P_{peak} và năng lượng tiêu tán PE, các giá trị ứng suất bám dính cực đại τ_{peak} và bám dính tương đương τ_{eq} lại có xu hướng giảm khi số lượng sợi trong mẫu tăng (Hình 6). Cụ thể τ_{peak} giảm từ 10,83 MPa (TH1S) xuống 7,67 MPa (TH4S) và 5,33 MPa (TH16S); trong khi τ_{eq} cũng giảm từ 8,51 MPa (TH1S) xuống 4,31 MPa (TH16S). Kết quả này cho thấy khi mật độ sợi thép tăng, ứng suất bám dính trung bình của mỗi sợi đơn giảm, mặc dù khả năng chịu tải trọng tổng thể tăng.

Hiện tượng trên có thể được giải thích thông qua hai cơ chế chính ở cấp vi mô. Thứ nhất là hiệu ứng che chắn: khi các sợi nằm gần nhau trong cùng thể tích bê tông, chúng cản trở sự xâm nhập và bao bọc đầy đủ của hồ xi măng xung quanh từng sợi. Điều này dẫn đến sự

suy giảm chất lượng vùng chuyển tiếp giữa sợi và bê tông, làm giảm độ bền liên kết hóa học và ma sát tại bề mặt tiếp xúc[14]. Thứ hai là tương tác giữa các sợi trong quá trình kéo rút. Khi mật độ sợi cao, diện tích bề mặt hiệu quả để truyền ứng suất từ bê tông sang từng sợi giảm xuống, khiến cơ chế bám dính cơ học trở nên kém hiệu quả hơn [13]. Tuy vậy, các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng mặc dù mặc dù lực bám dính của từng sợi có xu hướng giảm khi hàm lượng sợi tăng, hiện tượng "bó sợi" có thể giúp kết cấu duy trì, thậm chí cải thiện khả năng chịu tải trọng tổng thể. Nhờ đó, bê tông cốt sợi vẫn đạt được giá trị tải trọng và năng lượng tiêu tán cao, ngay cả khi ứng suất bám dính trung bình trên mỗi sợi bị giảm [24].



Hình 6. Cường độ bám dính của các tổ hợp.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đánh giá và phân tích tác động của số lượng sợi thép đến đặc trưng kéo rút của sợi trong bê tông. Các kết luận được rút ra như sau:

- Kết quả thí nghiệm kéo rút cho thấy tải trọng cực đại P_{peak} và năng lượng tiêu tán PE tăng đáng kể khi số lượng sợi thép trong mẫu tăng từ 1 lên 16 sợi. Sự gia tăng này phản ánh vai trò của hàm lượng sợi trong việc nâng cao khả năng chịu tải và cải thiện tính dẻo của liên kết sợi-bê tông thông qua cơ chế ma sát, khóa cơ học và hiệu ứng bắc cầu vết nứt.
- Ứng suất bám dính cực đại τ_{peak} và bám dính tương đương τ_{eq} giảm khi mật độ sợi tăng, do hiệu ứng che chắn và suy giảm chất lượng vùng chuyển tiếp ITZ, đồng thời diện tích bề mặt truyền ứng suất cho từng sợi bị hạn chế. Tuy vậy, "hiệu ứng bó sợi" giúp duy trì tải trọng tổng thể và năng lượng tiêu tán trong bê tông cốt sợi.

Các nghiên cứu tiếp theo nên xem xét toàn diện hơn ảnh hưởng của số lượng sợi, cũng như các yếu tố hình học như hình dạng, đường kính và độ nhám bề mặt, v.v., nhằm tối ưu hóa lực bám dính và cơ chế kéo rút của sợi thép trong điều kiện thực tế.

Tài liệu tham khảo

[1]. N.T.T. Hà, N.H. Chi, Sử dụng bê tông cốt sợi thép trong xây dựng mặt đường có nhiều xe tải trọng nặng trên địa bàn tỉnh Hà Nam, Tạp chí Giao thông vận tải, (2023) 68–70.

[2]. T.B. Việt, T.T. Kiên, L.T. Hùng, Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tính chất của bê tông siêu tính năng-UHPC, (2022) 58–62.

[3]. N.Q. Tuấn, P.D. Hòa, N.B. Hà, L.B. Danh, K.Đ. Tùng, Nghiên cứu đánh giá sức kháng uốn của bê tông chất lượng siêu cao: thực nghiệm và mô hình số, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng - ĐHXDHN 16 (2022) 1–13. https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2v)-01.

[4]. N.T. Thường, H.V. Hải, Nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động, Khoa học & công nghệ Việt Nam, (2021) 40–45.

[5]. N.T. Tran, T.K. Tran, D.J. Kim, High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension, Cem. Concr. Res. 69 (2015) 72–87. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.12.008.

[6]. D.J. Kim, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Correlation between single fiber pullout behavior and tensile response of FRC composites with high strength steel fiber, Fifth Int. Symp. High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos. (2007) 67–76.

[7]. D.J. Kim, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers, ACI Mater. J. 105 (2008) 576–584. https://doi.org/10.14359/20199.

[8]. J.K. Park, S.H. Park, D.J. Kim, Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, Cem. Concr. Compos. 94 (2018) 226–237. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.014.

[9]. J.K. Park, T.T. Ngo, D.J. Kim, Interfacial bond characteristics of steel fibers embedded in cementitious composites at high rates, Cem. Concr. Res. 123 (2019) 105802. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105802.

[10]. K. Wille, D.J. Kim, A.E. Naaman, Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents, Mater. Struct. 44 (2011) 583–598. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9650-4.

[11]. X. Ding, M. Zhao, H. Li, Y. Zhang, Y. Liu, S. Zhao, Bond Behaviors of Steel Fiber in Mortar Affected by Inclination Angle and Fiber Spacing, Materials (Basel). 15 (2022) 1–16. https://doi.org/10.3390/ma15176024.

[12]. H. Feng, M.N. Sheikh, M.N.S. Hadi, L. Feng, D. Gao, J. Zhao, Pullout Behaviour of Different Types of Steel Fibres Embedded in Magnesium Phosphate Cementitious Matrix, Int. J. Concr. Struct. Mater. 13 (2019) 1–17. https://doi.org/10.1186/s40069-019-0344-1.

[13]. J.J. Kim, D.Y. Yoo, Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete, Cem. Concr. Compos. 103 (2019) 213–223. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006.

[14]. D.Y. Yoo, J.J. Kim, J.J. Park, Effect of fiber spacing on dynamic pullout behavior of multiple straight steel fibers in ultra-high-performance concrete, Constr. Build. Mater. 210 (2019) 461–472. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.171.

[15]. V.P. Dang, D.J. Kim, Rate-sensitive pullout resistance of smooth-steel fibers embedded in ultra-high performance concrete containing nanoparticles, Cem. Concr. Compos. (2023). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105109.

[16]. D.J. Kim, G.J. Park, H.V. Le, D. Moon, Fresh and hardened properties of steel fiber-reinforced grouts containing ground granulated blast-furnace slag, Constr. Build. Mater. 122 (2016) 332–342. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.005.

[17]. V.P. Dang, H.V. Le, D.J. Kim, Loading rate effects on the properties of fiber-matrix zone surrounding steel fibers and cement based matrix, Constr. Build. Mater. 283 (2021) 122694. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122694.

[18]. H.S. Jo, J.K. Park, N.T. Tran, D.J. Kim, Loading rate effects on multifiber pullout resistance of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, (2024). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03719 Available.

[19]. C.K.Y. Leung, V.C. Li, Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites, J. Mech. Phys. Solids 40 (1992) 1333–1362. https://doi.org/10.1016/0022-5096(92)90018-W.

[20]. P. Guerrero, A.E. Naaman, P. Energy, Effect of mortar fineness and adhesive agents on pullout response of steel fibers, ACI Struct. J. 97 (2000) 12–20.

[21]. N. Wiemer, A. Wetzel, M. Schleiting, P. Krooß, M. Vollmer, T. Niendorf, S. Böhm, B. Middendorf, Effect of fibre material and fibre roughness on the pullout behaviour of metallic micro fibres embedded in UHPC, Materials (Basel). 13 (2020) 1–21. https://doi.org/10.3390/ma13143128.

[22]. C. Wang, G. Xue, X. Zhao, Influence of fiber shape and volume content on the performance of reactive powder concrete (Rpc), Buildings 11 (2021) 1–19. https://doi.org/10.3390/buildings11070286.

[23]. Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, Constr. Build. Mater. 103 (2016) 8–14. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028.

[24]. H. Zhang, F. Hu, Y. Duan, J. Yang, Z. Duan, L. Cao, Interaction Mechanism of Cementitious Composites Containing Different Twisted PVA Fiber Bundles, Buildings 13 (2023). https://doi.org/10.3390/buildings13092194.