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

Ảnh hưởng của sợi ngắn dẫn điện đến độ chảy, đặc trưng cơ học và độ dẫn điện của bê tông cường độ siêu cao

Nguyễn Linh[1, 2], Ngô Trung Hiếu[1], Lê Huy Việt [1,3*]

[1] Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất

[2] Phòng Quản lý chất lượng công trình xây dựng, Sở Xây dựng tỉnh Quảng Ninh, Việt Nam

[3] Nhóm nghiên cứu mạnh Địa kỹ thuật, vật liệu và phát triển bền vững, Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TỪ KHOÁ

Bê tông cường độ siêu cao
Đặc trưng cơ học
Độ dẫn điện
Sợi cacbon
Sợi thép

TÓM TẮT

Bê tông cường độ siêu cao (UHPC) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các kết cấu đòi hỏi độ bền và khả năng chịu tải cao nhờ cường độ cơ học vượt trội, độ bền lâu dài và cấu trúc vi mô đặc chắc. Việc bổ sung sợi dẫn điện ngắn vào UHPC có tiềm năng cải thiện đồng thời tính dẫn điện và khả năng tự cảm biến (self-sensing) của vật liệu, phục vụ giám sát sức khỏe kết cấu (SHM). Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của sợi thép và sợi cacbon (hàm lượng 0,5% thể tích) đến độ chảy xòe, cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và độ dẫn điện của UHPC. Kết quả cho thấy thêm sợi thép và sợi cacbon làm giảm độ chảy xòe của hỗn hợp UHPC do gia tăng ma sát nội bộ và tương tác sợi–vữa. Về đặc trưng cơ học, sợi thép cải thiện đáng kể cường độ chịu uốn nhờ hiệu ứng bắc cầu vết nứt nhưng ít ảnh hưởng đến cường độ chịu nén; ngược lại, sợi cacbon làm giảm cả cường độ chịu nén lẫn cường độ chịu uốn của UHPC. Cả hai loại sợi đều cải thiện đáng kể độ dẫn điện của UHPC, trong đó sợi cacbon cho hiệu quả vượt trội hơn nhờ đường kính nhỏ và tỷ lệ mảnh lớn, thuận lợi cho sự hình thành mạng lưới dẫn điện thông qua các cơ chế kết nối trực tiếp, dẫn điện xuyên hầm và dẫn điện ion. Những kết quả này cho thấy rõ mối quan hệ giữa hiệu quả gia cường cơ học và hiệu quả tạo mạng lưới dẫn điện của hai loại sợi, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng của UHPC gia cường sợi cacbon và sợi thép trong các hệ thống tự cảm biến và giám sát sức khỏe kết cấu công trình.

KEYWORDS

Carbon fiber
Electrical conductivity
Mechanical properties
Steel fiber
UHPC

ABSTRACT

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is increasingly employed in demanding structural applications owing to its exceptional strength, durability, and dense microstructure. Incorporating short conductive fibers into UHPC can simultaneously enhance its electrical conductivity and self-sensing capability, offering potential for structural health monitoring (SHM). This study investigates the effects of steel fibers and carbon fibers (0.5 vol.%) on the flowability, compressive strength, flexural strength, and electrical conductivity of UHPC. The results show that the addition of steel fibers and carbon fibers reduces the flowability of fresh UHPC owing to increased internal friction and fiber–matrix interaction. Regarding mechanical properties, steel fibers substantially enhance flexural strength through crack-bridging but have little effect on compressive strength; in contrast, carbon fibers reduce both the compressive and flexural strength of UHPC. Both fiber types significantly improve the electrical conductivity of UHPC, with carbon fibers being more effective owing to their smaller diameter and higher aspect ratio, which produce a continuous conductive network through direct connection, tunneling, and ionic conduction mechanisms. These findings confirm the potential of carbon- and steel-fiber-reinforced UHPC for self-sensing and structural health monitoring applications.

1. Giới thiệu

Bê tông cường độ siêu cao (Ultra-High-Performance Concrete – UHPC) là một trong những bước tiến quan trọng nhất trong lĩnh vực vật liệu xây dựng xi măng trong các thập kỷ gần đây. Với cường độ chịu nén có thể vượt quá 150 MPa, độ bền cao, cấu trúc vi mô đặc chắc và khả năng chống thấm ion clorua vượt trội so với bê tông thông thường, UHPC ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các công trình đòi hỏi độ bền lâu dài và khả năng chịu tải trọng lớn như cầu vượt nhịp lớn, kết cấu hạ tầng ven biển, công trình hạ tầng đường sắt tốc độ cao và các kết cấu chịu tải trọng va đập, nổ [1]. Tính chất cơ học và độ bền vượt trội của UHPC đạt được nhờ tỷ lệ nước/chất kết dính cực thấp, sử dụng lượng lớn phụ gia khoáng hoạt tính, cốt liệu mịn cấp phối tối ưu và đặc biệt là việc bổ sung sợi gia cường nhằm cải thiện độ dẻo dai và khả năng chịu kéo, uốn của vật liệu bê tông xi măng.

*Liên hệ tác giả: lehuyviet@humg.edu.vn
Nhận ngày 10/05/2026, sửa xong ngày 24/07/2026, chấp nhận đăng ngày 27/07/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1430

Bên cạnh việc cải thiện tính chất cơ học, xu hướng nghiên cứu gần đây tập trung vào phát triển các loại bê tông đa chức năng, trong đó nổi bật là khả năng tự cảm biến (self-sensing) thông qua hiệu ứng áp trở (piezoresistive effect) [2–5]. Khi được tích hợp các chất dẫn điện cao dạng phân tán, vật liệu xi măng có thể biến đổi điện trở suất tương ứng với biến dạng, ứng suất hoặc sự xuất hiện của vết nứt bên trong, từ đó cho phép giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring – SHM) một cách liên tục [6]. You và cộng sự (2017) đã chỉ ra rằng UHPC gia cường sợi thép có khả năng tự cảm biến rõ rệt sau khi bổ sung thêm ống nano cacbon (carbon nanotube, CNT) [7]. Tương tự, Lee và cộng sự (2018) khi nghiên cứu hiệu ứng kết hợp giữa sợi thép và CNTs đã ghi nhận sự cải thiện đáng kể về cường độ chịu kéo và độ dẻo sau đỉnh của UHPC so với việc chỉ sử dụng CNTs đơn lẻ [8]. Le và cộng sự (2020) cũng cho thấy việc điều chỉnh kích thước và hàm lượng cốt liệu xỉ thép có ảnh hưởng rõ rệt đến đáp ứng áp trở của UHPC gia cường sợi dẫn điện [9].

Trong số các giải pháp tạo tính dẫn điện cho vật liệu xi măng, việc bổ sung sợi ngắn dẫn điện như sợi thép và sợi carbon được xem là phương pháp khả thi về mặt kinh tế – kỹ thuật và nhiều tiềm năng, do có thể kết hợp đồng thời hai chức năng: gia cường cơ học và tạo mạng lưới dẫn điện thông qua cơ chế kết nối trực tiếp (connected conduction) và dẫn điện xuyên hầm (tunneling conduction) giữa các sợi phân tán trong bê tông [10]. Sợi thép, với đường kính lớn, mô đun đàn hồi cao đã được sử dụng phổ biến để cải thiện cường độ chịu kéo, uốn và khả năng kháng nứt của UHPC thông qua cơ chế cầu nối vết nứt (crack-bridging). Trong khi đó, sợi cacbon với đường kính nhỏ, tỷ lệ mảnh (aspect ratio) lớn có tiềm năng hình thành mạng lưới dẫn điện hiệu quả hơn ở hàm lượng thấp, tuy nhiên khả năng phân tán đồng đều trong UHPC lại là một thách thức kỹ thuật đáng kể.

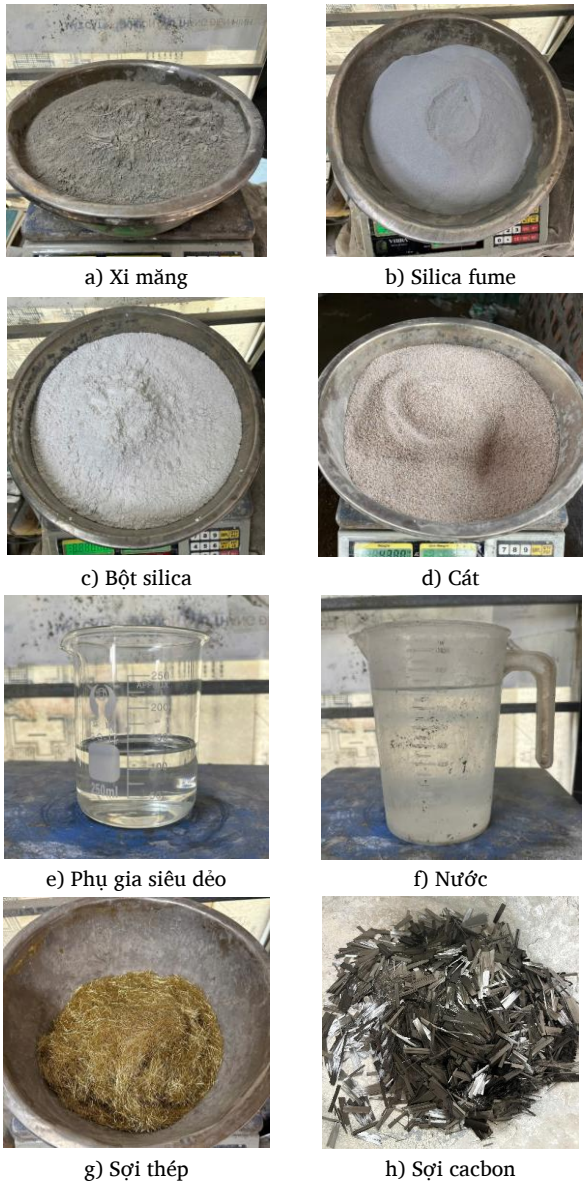
Mặc dù đã có nghiên cứu riêng lẻ về ảnh hưởng của sợi thép hoặc sợi cacbon đến tính chất của UHPC, các nghiên cứu so sánh trực tiếp và có hệ thống về tác động đồng thời của hai loại sợi này đến ba nhóm tính chất là độ chảy, đặc trưng cơ học và độ dẫn điện trên UHPC vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, cơ chế tương tác giữa sợi dẫn điện với UHPC có độ nhớt cao và cấu trúc lỗ rỗng cực nhỏ, cũng như mối quan hệ giữa tính công tác, hiệu quả gia cường cơ học và ngưỡng dẫn điện, vẫn cần được làm rõ nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn và tối ưu hóa loại sợi, hàm lượng sợi phù hợp với từng mục tiêu ứng dụng cụ thể.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm khảo sát một cách hệ thống ảnh hưởng của sợi thép và sợi cacbon đến độ chảy xòe, cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và độ dẫn điện của UHPC. Thông qua việc phân tích so sánh đặc điểm cơ – điện của các cấp phối chứa từng loại sợi, nghiên cứu hướng đến việc làm sáng tỏ cơ chế ảnh hưởng của hình dạng, kích thước và bản chất vật liệu sợi đến sự hình thành mạng lưới dẫn điện cũng như hiệu quả gia cường cơ học trong UHPC, phục vụ định hướng ứng dụng trong các hệ thống tự cảm biến và giám sát sức khỏe kết cấu công trình.

2. Chương trình thí nghiệm

2.1. Vật liệu

Cấp phối UHPC được kế thừa từ các nghiên cứu [4,11,12] và tổng hợp trong Bảng 1. Phụ gia siêu dẻo được sử dụng để khống chế tỷ lệ nước trên xi măng (N/X) ở 0,2. Silica fume với hàm lượng SiO_2 lớn hơn 90 % được sử dụng để tăng cường độ cho UHPC. Bột silica và cát thạch anh được dùng làm cốt liệu cho UHPC. Sợi thép (đường kính 0,2 mm, chiều dài 13 mm) với hàm lượng 2 % thể tích và sợi cacbon với hàm lượng 0,5 % thể tích được dùng để tăng độ dẫn điện cho UHPC. Hàm lượng sợi thép và sợi các bon trong bê tông thông minh được tham khảo từ các nghiên cứu [4,13–15].



a) Xi măng b) Silica fume c) Bột silica d) Cát e) Phụ gia siêu dẻo f) Nước g) Sợi thép h) Sợi cacbon

Hình 1. Hình ảnh các vật liệu sử dụng.

Bảng 1. Các cấp phối UHPC với sợi thép và sợi cacbon.

Cấp phối	Xi măng	Silica fume	Bột silica	Cát	Phụ gia siêu dẻo	Nước	Sợi thép (vol.%)	Sợi cacbon (vol.%)
U0	1,0	0,25	0,3	1,25	0,067	0,2	-	-
UST	1,0	0,25	0,3	1,25	0,067	0,2	2,0	-
UCB	1,0	0,25	0,3	1,25	0,067	0,2	-	0,5

Ghi chú: vol.%: phần trăm thể tích.

2.2. Chuẩn bị mẫu

Các vật liệu gồm xi măng, bột silica, cát thạch anh, silica fume được trộn khô trong 5 phút. Nước và phụ gia siêu dẻo được cho dần vào hỗn hợp và trộn đều trong 5 phút đến khi hỗn hợp chảy dẻo. Hỗn hợp bê tông tươi được thực hiện kiểm tra độ chảy xòe. Với các cấp phối chứa sợi thép và sợi cacbon (UST và USC), sợi thép hoặc sợi cacbon được phân tán đều vào hỗn hợp bê tông và tiếp tục trộn đều trong 2 phút. Hỗn hợp bê tông tươi được đúc vào các mẫu nén kích thước 50x50x50 mm^3 và mẫu uốn 40x40x160 mm^3. Với mẫu đo điện trở, lưới thép không rỉ kích thước 45x45x70 mm^3 được chôn vào trong mẫu nén với khoảng cách 20 mm. Tất cả các mẫu được đầm kỹ để không khí thoát ra ngoài bề mặt mẫu. Các mẫu được bảo dưỡng ở điều kiện phòng và tháo khuôn sau 48 giờ. Sau đó, các mẫu được bảo dưỡng trong nước với nhiệt độ được duy trì ở 60 ± 5 °C trong 3 ngày trước khi mẫu được thí nghiệm.

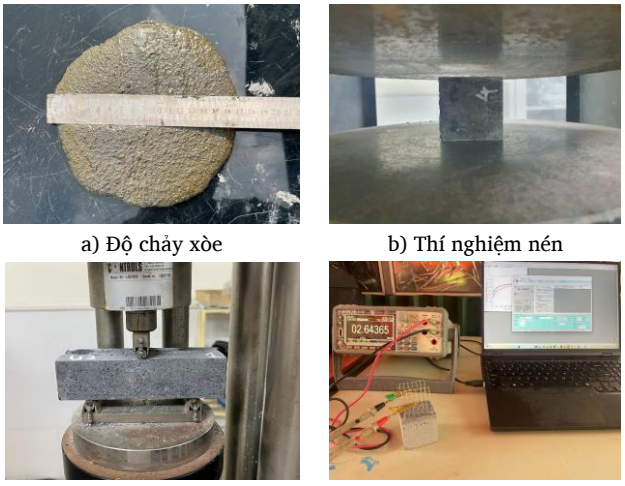
2.3. Thiết lập thí nghiệm

Hình ảnh các thí nghiệm được biểu diễn trên Hình 2. Thí nghiệm độ chảy xòe được thực hiện dựa trên TCVN 3121:2022 [16]. Vữa UHPC tươi được đổ đầy vào ống hình trụ có đường kính 50 mm, chiều cao 100 mm. Ống hình trụ được rút thẳng để bê tông tươi chảy xòe ra mặt kính, đường kính theo hai chiều được đo và lấy trung bình để xác định độ chảy xòe của bê tông tươi.

Cường độ chịu nén và uốn của bê tông được xác định bằng máy nén uốn đa năng Advantest 9 (Control, Italia). Tốc độ gia tải cho xác định cường độ nén được khống chế ở 5 N/s trong khi xác định cường độ uốn là 50 N/s theo TCVN 3121:2022 [16].

Để đánh giá độ dẫn điện của các cấp phối bê tông UHPC, điện trở suất giữa hai điện cực. Dòng điện một chiều được cấp vào hai đầu điện cực, đồng thời giá trị điện áp được đo. Giá trị điện trở của mẫu giữa hai điện cực được xác định và hiển thị trên thiết bị đo và kết nối dữ liệu máy tính theo thời gian. Giá trị điện trở suất (ρ) xác định theo công thức (1) từ giá trị điện trở đo được (R) và khoảng cách giữa 2 điện cực đo (L). Điện trở giữa hai điện cực đo được xác định theo phương pháp đo hai điện cực với dòng điện một chiều.

$$\rho = R\frac{A}{L} \qquad (1)$$



a) Độ chảy xòe b) Thí nghiệm nén

c) Thí nghiệm uốn d) Thí nghiệm đo điện trở

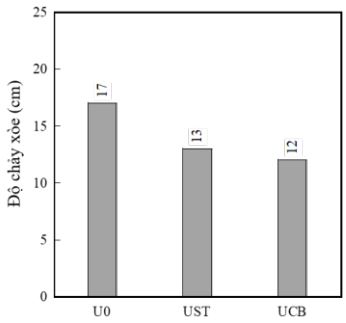
Hình 2. Các thí nghiệm.

3. Kết quả và thảo luận

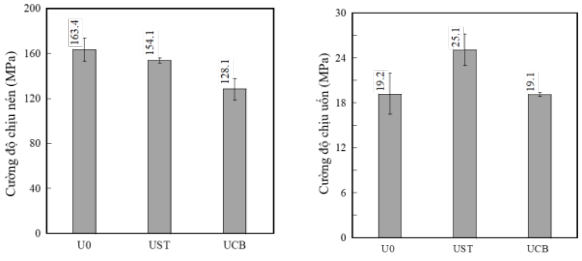
Hình 3 biểu diễn độ chảy xòe của UHPC không và có sử dụng sợi thép hoặc sợi các bon. Độ chảy xòe của UHPC với cả sợi thép và sợi các bon đều có thể đảm bảo khi điều chỉnh lượng phụ gia siêu dẻo. Giá trị độ chảy xòe của mẫu UHPC không có sợi là 17 cm trong khi của sợi thép là 13 cm và sợi cacbon là 12 cm (Hình 3). Zhao và cộng sự [17] chỉ ra rằng, độ chảy xòe của hỗn hợp vữa xi măng phụ thuộc chính vào lượng nước tự do trong bê tông (free water). Nước được thêm vào bê tông, một phần tham gia vào quá trình thủy hóa của xi măng, một phần dính bám vào bề mặt của cốt liệu trong bê tông và phần còn lại là nước tự do trong bê tông. Lượng nước tự do này là nguyên nhân chính dẫn đến độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông tươi. Ngô Xuân Hùng và cộng sự báo cáo việc thêm sợi phi kim dẫn đến giảm độ chảy xòe của bê tông hạt mịn cường độ cao khi sử dụng cùng hàm lượng phụ gia siêu dẻo [18]. Việc thêm sợi thép và sợi các bon dẫn đến giảm lượng nước tự do đồng thời ma sát giữa sợi và cốt liệu dẫn đến làm giảm độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông tươi. Mặc dù hàm lượng sợi thép sử dụng nhiều hơn nhưng sợi các bon đường kính nhỏ dẫn đến số lượng sợi lớn, đồng thời khả năng bám dính nước bề mặt cao hơn. Do đó, độ chảy xòe của hỗn hợp UHPC với sợi các bon thấp hơn so với sợi thép.

Ảnh hưởng của sợi thép và sợi cacbon đến cường độ chịu nén và cường độ chịu uốn được so sánh trên Hình 4. Hình 5 biểu diễn hình ảnh của mẫu UHPC sau khi bị phá hủy. Sợi thép ít ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của UHPC nhưng tăng khả năng chịu uốn của UHPC. Cường

độ chịu nén của sợi thép giảm nhẹ từ 163,4 tới 154,1 MPa (giảm 5,6 %) trong khi cường độ chịu uốn tăng rõ ràng từ 19,2 tới 25,1 MPa (tăng 30,7 %). Do tác dụng của sợi thép bắc cầu qua các vết nứt, các mẫu có sợi thép chỉ hình thành các vết nứt bề mặt, không có hiện tượng phá hủy đột ngột trong quá trình thí nghiệm sau khi mẫu đạt cường độ chịu nén lớn nhất. Kim và cộng sự [19] cũng báo cáo tăng khả năng chịu uốn của vữa cường độ cao khi thêm sợi thép. Dưới tác dụng của tải trọng uốn, các vi khe nứt được hình thành và phát triển. Hiệu ứng của sợi thép bắc cầu qua các vi khe nứt giúp tăng khả năng chịu kéo/uốn của UHPC. Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khi hàm lượng sợi thép dưới 3 %, cường độ chịu nén của UHPC gần như không đổi và có thể giảm [12]. Do đó, ảnh hưởng đến cường độ chịu nén là không đáng kể, cho thấy hiệu ứng bắc cầu vết nứt của sợi thép chi phối chủ yếu ứng xử chịu kéo/uốn hơn là ứng xử chịu nén của vật liệu xi măng.



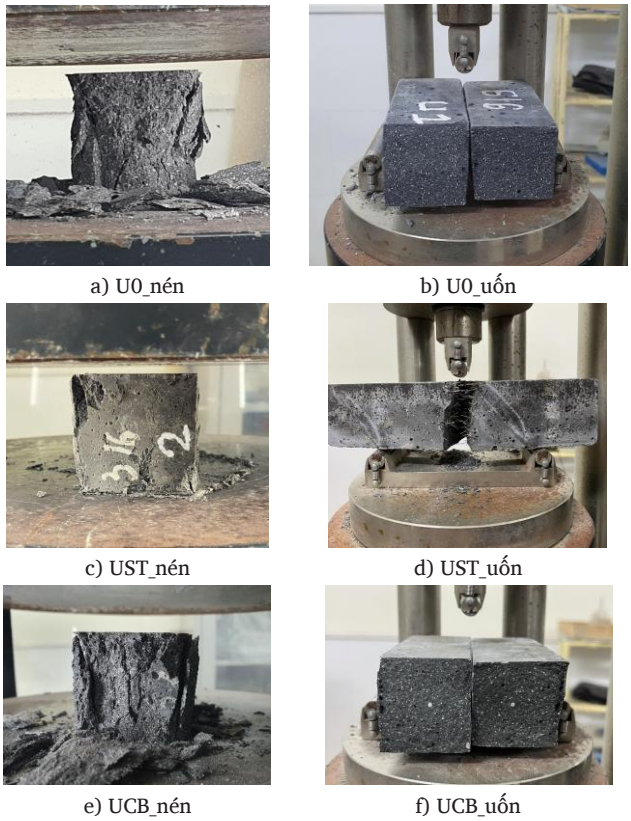
Hình 3. Độ chảy xòe của hỗn hợp UHPC với sợi thép và sợi cacbon.



a) Cường độ chịu nén b) Cường độ chịu uốn

Hình 4. So sánh ảnh hưởng của sợi thép và sợi cacbon đến tính chất cơ học.

Sợi cacbon làm giảm cả cường độ nén và cường độ chịu uốn của UHPC. Ngô Xuân Hùng và cộng sự [18] cũng đưa ra kết quả ảnh hưởng của sợi phi kim dẫn đến làm giảm cường độ của vữa bê tông cường độ cao. Sợi cacbon có khả năng chịu nén thấp nên chính bản thân của sợi cacbon cũng tạo thành vùng giảm yếu. Khi phân tán trong UHPC, các sợi phi kim quá mảnh không tạo thành được hiệu ứng bắc cầu qua khe nứt. Vì vậy, ảnh hưởng của sợi cacbon làm giảm đặc trưng cơ học của UHPC. Sự kết tụ sợi (fiber ball) của sợi cacbon làm tăng độ rỗng và giảm liên kết giữa sợi với nền xi măng, tạo ra các vùng giảm yếu, từ đó làm giảm cường độ nén của UHPC. Cường độ chịu uốn của UHPC với sợi cacbon giảm nhẹ do không tạo được hiệu ứng bắc cầu và duy trì cường độ ở vết nứt. Như hình ảnh phá hủy mẫu chịu uốn ở Hình 5f, các sợi các bon với đường kính nhỏ kích cỡ micro mét gần như không nhìn thấy bắc cầu qua các vết nứt trong khi các sợi thép tạo hiệu ứng bắc cầu giúp tăng khả năng chịu uốn của UHPC.



a) U0_nén b) U0_uốn

c) UST_nén d) UST_uốn

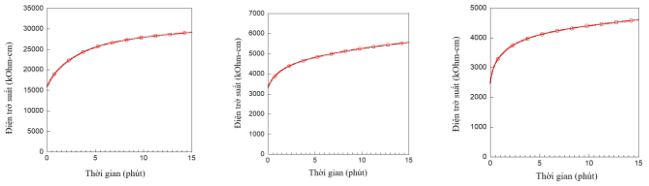
e) UCB_nén f) UCB_uốn

Hình 5. Hình ảnh mẫu bị phá hủy sau thí nghiệm nén và uốn.

Hình 6 biểu diễn sự thay đổi điện trở suất của UHPC ở giai đoạn đầu do quá trình phân cực dưới tác dụng của dòng điện một chiều. Lê và cộng sự [20] cũng chỉ ra hiện tượng phân cực của bê tông cường độ cao hạt mịn với sợi thép. Dưới tác dụng của dòng điện một chiều, các ion âm trong dung dịch nước lỗ rỗng trong bê tông sẽ di chuyển về cực dương trong khi ion dương di chuyển về phía cực âm. Điện trở suất tăng nhanh ở 5 phút đầu, sau đó dần ổn định. Điện trở suất của bê tông có thể ổn định sau 15 phút. Nguyen và cộng sự [21] cũng báo cáo thời gian phân cực của bê tông cường độ cao hạt mịn là từ 15 phút đến 30 phút. Giá trị điện trở suất sau khi ổn định được sử dụng làm điện trở suất của bê tông thông minh.

Độ dẫn điện của UHPC với sợi dẫn điện khác nhau được đánh giá thông qua điện trở suất của các mẫu. Mẫu có điện trở suất càng nhỏ, độ dẫn điện càng cao. Việc thêm sợi thép và sợi cacbon giúp tăng rõ rệt độ dẫn điện của UHPC như trên Hình 5. Điện trở suất của UHPC không chứa sợi (U0), chứa sợi thép (UST) và sợi các bon (UCB) lần lượt là 29181 kΩ.cm, 6167 kΩ.cm và 4609 kΩ.cm. Độ dẫn điện của UHPC với sợi cacbon tốt hơn so với sợi thép. Với kích thước nhỏ, phân tán đều trong UHPC, cơ chế dẫn điện của UHPC với sợi cacbon có thể theo ba dạng: một là các sợi cacbon kết nối trực tiếp với nhau tạo thành đường

dẫn điện (connecting conduction); hai là dạng đường hầm dẫn điện (tunnelling conduction) hình thành khi khoảng cách các sợi cacbon đủ gần nhau (nano mét), dòng điện có thể được truyền qua; ba là truyền điện qua thông qua các ion trong dung dịch nước lỗ rỗng (ionic conduction). Trong UHPC với sợi cacbon, ba dạng dẫn điện có thể xảy ra song song hoặc kết hợp với nhau tạo thành đường dẫn điện. Trong UHPC với sợi thép, đường dẫn điện chủ yếu xảy ra với dạng kết nối trực tiếp và thông qua ion trong dung dịch nước lỗ rỗng. Như kết quả trên Hình 6, điện trở suất của UHPC với sợi cacbon nhỏ hơn so với sợi thép ở cùng hàm lượng. Với đường kính nhỏ hơn nhiều của sợi cacbon, số lượng sợi cũng như số lượng sợi kết nối và khoảng cách các sợi khi được phân tán đều trong UHPC dẫn đến độ dẫn điện của UHPC với sợi cacbon tốt hơn so với sợi thép có cùng hàm lượng.



a) U0 b) UST c) USC

Hình 6. So sánh điện trở suất của UHPC với sợi thép và sợi cacbon.

Kết quả này phù hợp với lý thuyết ngưỡng giới hạn (percolation threshold) trong các composite xi măng dẫn điện. Theo Han và cộng sự [6] sợi dẫn điện có tỷ lệ mảnh (aspect ratio) càng lớn thì ngưỡng giới hạn càng thấp, do sợi mảnh và dài dễ dàng tiếp xúc hoặc tiến đến khoảng cách đủ gần để dẫn điện xuyên hầm (tunneling conduction) hơn so với sợi có đường kính lớn như sợi thép. Với đường kính nhỏ hơn nhiều lần so với sợi thép, sợi cacbon có tỷ lệ mảnh vượt trội, do đó dễ dàng vượt ngưỡng giới hạn và hình thành mạng lưới dẫn điện liên tục hơn. Sợi thép có đường kính lớn nên số lượng sợi trên một đơn vị thể tích thấp, khó hình thành mạng lưới tiếp xúc liên tục. Điều này giải thích vì sao, mặc dù có hàm lượng thể tích nhỏ hơn trong nghiên cứu này, UHPC với sợi cacbon vẫn thể hiện độ dẫn điện vượt trội so với UHPC với sợi thép. Những phát hiện này củng cố nhận định rằng sợi cacbon là lựa chọn hiệu quả hơn về mặt điện học, trong khi sợi thép phù hợp hơn cho mục tiêu gia cường cơ học.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã khảo sát một cách hệ thống ảnh hưởng của sợi thép và sợi cacbon (hàm lượng 0,5 % thể tích) đến độ chảy xòe, cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và độ dẫn điện của UHPC. Một số kết luận được rút ra như sau:

Về độ chảy xòe, việc thêm sợi thép và sợi cacbon làm giảm tính công tác của hỗn hợp UHPC do giảm lượng nước tự do trong hỗn hợp cũng như tăng ma sát giữa sợi và cốt liệu cũng như giữa các sợi với nhau.

Về đặc trưng cơ học, sợi thép cải thiện đáng kể cường độ chịu uốn của UHPC nhờ hiệu ứng bắc cầu vết nứt, trong khi ít ảnh hưởng đến cường độ chịu nén. Ngược lại, sợi cacbon không cải thiện cường độ chịu uốn và có xu hướng làm giảm cả cường độ chịu nén. Nguyên nhân có thể do khả năng chịu nén bản thân sợi cacbon thấp và độ rỗng gia tăng khi độ chảy xòe của hỗn hợp bị suy giảm. Điều này cho thấy sợi thép phù hợp hơn cho mục tiêu gia cường cơ học, trong khi việc sử dụng sợi cacbon cho mục đích này cần được cân nhắc hoặc kết hợp với các giải pháp cải thiện độ phân tán và liên kết bề mặt sợi.

Về độ dẫn điện, cả sợi thép và sợi cacbon đều cải thiện đáng kể khả năng dẫn điện của UHPC so với mẫu đối chứng, trong đó sợi cacbon cho hiệu quả vượt trội hơn nhờ đường kính nhỏ, tỷ lệ mảnh lớn và cơ chế dẫn điện kết hợp giữa kết nối trực tiếp, dẫn điện xuyên hầm và dẫn điện ion, trong khi sợi thép chủ yếu dẫn điện qua kết nối trực tiếp và dẫn điện ion. Đây là cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn loại sợi phù hợp khi hướng đến các ứng dụng đòi hỏi độ dẫn điện cao.

Kết quả nghiên cứu cho thấy rõ mối quan hệ giữa hiệu quả gia cường cơ học và hiệu quả tạo mạng lưới dẫn điện của hai loại sợi: sợi thép cải thiện tính chất cơ học nhưng độ dẫn điện cải thiện thấp hơn sợi cacbon, trong khi sợi cacbon cải thiện độ dẫn điện cao hơn nhưng có thể làm suy giảm tính công tác và một số đặc trưng cơ học nếu không kiểm soát tốt hàm lượng và độ phân tán. Do đó, UHPC gia cường đồng thời hoặc kết hợp hợp lý cả hai loại sợi có tiềm năng ứng dụng cao trong các hệ thống tự cảm biến (self-sensing) và giám sát sức khỏe kết cấu (SHM) cần đảm bảo độ bền cơ học và khả năng cảm biến điện trở ổn định.

Trên cơ sở đó, các nghiên cứu tiếp theo sẽ được tập trung xác định ngưỡng giới hạn cụ thể của sợi cacbon và sợi thép trong UHPC, khảo sát ảnh hưởng của việc kết hợp (hybrid) hai loại sợi ở các tỷ lệ khác nhau đến sự cân bằng giữa tính công tác, cường độ cơ học và độ dẫn điện, cũng như đánh giá khả năng tự cảm biến (self-sensing) của UHPC dưới tác dụng của tải trọng lặp và tải trọng dài hạn, nhằm cung cấp cơ sở khoa học đầy đủ hơn cho việc ứng dụng vật liệu này trong giám sát sức khỏe kết cấu công trình.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong khuôn khổ Chương trình nghiên cứu cơ bản trong Khoa học tự nhiên và Kỹ thuật, Mã số đề tài 107.99-2025.50. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn Phòng thí nghiệm Bộ môn Xây dựng công trình Ngầm và Mỏ, Phòng thí nghiệm Bộ môn Kỹ thuật Xây dựng, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã tạo điều kiện về trang thiết bị để thực hiện các thí nghiệm trong bài báo này.

Tài liệu tham khảo

[1]. B.A. Graybeal, H.G. Russel, H. Garcia, J. Yuan, T. Brief, Z.B. Haber, J.F. Munoz, Z.B. Haber, I.D. la. Varga, B. Nakashoji, R. El-Helou, N.A. No, F.P. No, T. Brief, F. Baby, H.G. Russel, Z.B. Haber, J.F. Munoz, I. De la Varga, L. Chen, Ultra-High Performance Concrete: A State of the Art Report for the Bridge Community. Publication No. FHWA-HRT-13-060, Tech Br. 1 (2013) 176.

[2]. D.D.L. Chung, Self-monitoring structural materials, Mater. Sci. Eng. R Reports 22 (1998) 57–78. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(97)00021-1.

[3]. B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 794–800. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.012.

[4]. L.H. Viet, L. Dao Phuc, N.T. Thuong, N.T. Thanh, D.L. Nguyen, D.J. Kim, Improvement of the stress sensing ability of ultra-high-performance concrete using short steel fibers and steel slag aggregates under high compression, Sensors Actuators A. Phys. 362 (2023) 114616. https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114616.

[5]. H.V. Le, D.J. Kim, Detecting crack and damage location in self-sensing fiber reinforced cementitious composites, Constr. Build. Mater. 240 (2020) 117973. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117973.

[6]. B. Han, X. Yu, J. Ou, Self-sensing concrete in smart structures, Butterworth Heinemann, Elsevier, Kidlington, 2014. https://doi.org/10.1016/C2013-0-14456-X.

[7]. I. You, D.Y. Yoo, S. Kim, M.J. Kim, G. Zi, Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes, Sensors (Switzerland) 17 (2017). https://doi.org/10.3390/s17112481.

[8]. S.Y. Lee, H.V. Le, D.J. Kim, Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress, Constr. Build. Mater. 220 (2019) 149–160. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.197.

[9]. H.V. Le, D.H. Lee, D.J. Kim, Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes, Sensors Actuators, A Phys. 305 (2020) 111925. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111925.

[10]. H.V. Le, M.K. Kim, D.J. Kim, J. Park, Electrical properties of smart ultra-high performance concrete under various temperatures, humidities, and age of concrete, Cem. Concr. Compos. 118 (2021) 103979. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103979.

[11]. L.H. Viet, N.V. Khuây, L.N. Nam, P.V. Khải, T.Đ. Tú, T.V. Lâm, P. Xuân, Nghiên cứu chế tạo bê tông hạt mịn cường độ chịu nén trên 100 MPa sử dụng hạt xỉ thép thay thế cát, Tạp Chí Vật Liệu và Xây Dựng 6 (2023) 45–50.

[12]. H.V. Le, A.D. Do, V.M. Nguyen, T.K. Nguyen, D.L. Nguyen, Compressive and electrical resistivity properties of UHPC containing different steel fibers (Đặc trưng nén và điện trở suất của bê tông cường độ siêu cao sử dụng các loại sợi thép khác nhau), Xay Dung (2023) 110–114.

[13]. H.V. Le, M.K. Kim, S.U. Kim, S.-Y. Chung, D.J. Kim, Enhancing self-stress sensing ability of smart ultra-high performance concretes under compression by using nano functional fillers, J. Build. Eng. 44 (2021) 102717. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102717.

[14]. X. Fu, W. Lu, D.D.L. Chung, Improving the strain-sensing ability of carbon fiber-reinforced cement by ozone treatment of the fibers, Cem. Concr. Res. 28 (1998) 183–187. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00265-2.

[15]. S. Wen, D.D.L. Chung, Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement, Carbon N. Y. 45 (2007) 710–716. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.11.029.

[16]. B.X. Dựng, Tiêu chuẩn Quốc gia Vữa xây dựng - Phương pháp thử TCVN 3121_2022, (2022).

[17]. M. Zhao, X. Zhang, Y. Zhang, Effect of free water on the flowability of cement paste with chemical or mineral admixtures, Constr. Build. Mater. 111 (2016) 571–579. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.057.

[18]. N.X. Hùng, N. Trung, N. Tôn, M. Đỗ, V. Sơn, V. An, Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của sợi phi kim đến một số đặc trưng cơ lý của vữa cường độ cao định hướng ứng dụng cho công trình biển, Tạp Chí Vật Liệu và Xây Dựng (2025) 38–43.

[19]. 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.

[20]. Lê Huy Việt; Nguyễn Sỹ Đức; Mai Văn Chương; Nguyễn Ngọc Hưng; Đặng Quang Duy; Hoàng Anh Phi; Lê Bình Hiếu; Đỗ Ngọc Huy, Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tính công tác, cường độ và điện trở suất của bê tông cường độ cao, Tạp Chí Vật Liệu và Xây Dựng 14 (2024) 5–13. https://doi.org/http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.027.

[21]. J. Song, D.L. Nguyen, Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of cementitious composites, J. Compos. Mater. 49 (2015) 3621–3634. https://doi.org/10.1177/0021998314568169.