

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

Lê Huy Việt^{1,2*}, Nguyễn Sỹ Đức¹, Mai Văn Chương¹, Nguyễn Ngọc Hưng¹, Đặng Quang Duy¹, Hoàng Anh Phi¹, Lê Bình Hiếu¹, Đỗ Ngọc Huy¹

¹ Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

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

TỪ KHOÁ

Bê tông cường độ cao
Bê tông thông minh
Cốt sợi thép
Cường độ chịu nén
Điện trở suất

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tính công tác, cường độ và điện trở suất của bê tông cường độ cao. Sợi thép tròn trơn kích thước đường kính 0.2 mm, chiều dài 13 mm, mạ đồng với cường độ chịu kéo 2100 MPa, mô đun đàn hồi 200 GPa được sử dụng gia cường cho bê tông cường độ cao. Hàm lượng sợi thép sử dụng trong các cấp phối F0, F2, F4 và F5 lần lượt là 0, 2 %, 4 % và 5 %. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 2 %, tính công tác của hỗn hợp bê tông và cường độ chịu nén của bê tông không thay đổi đáng kể. Khi hàm lượng sợi thép tăng từ 2 % đến 4 % và 5 %, tính công tác của hỗn hợp bê tông giảm trong khi cường độ chịu nén của bê tông tăng. Độ chảy xê của F0, F2, F4 và F5 lần lượt là 245 mm, 240 mm, 220 mm và 200 mm trong khi cường độ chịu nén tương ứng là 98,5 Mpa; 102,3 Mpa; 110,14 MPa và 117,97 MPa. Khối lượng thể tích tăng từ 2237,3 kg/m³ lên 2584 kg/m³ khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 5 %. Điện trở suất của bê tông giảm rõ ràng khi hàm lượng sợi thép tăng từ 2 % lên 4 % nhưng giảm nhẹ khi hàm lượng sợi tăng lên 5 %. Hình ảnh vi cấu trúc của bê tông xung quanh sợi thép và phân bố của sợi thép được chụp và phân tích, từ đó mô hình mạng lưới dẫn điện trong bê tông cốt sợi thép được phân tích và giải thích. Hàm lượng sợi thép 4 % có thể coi là hàm lượng giới hạn về sợi thép trong bê tông cường độ cao khi đánh giá khả năng cảm biến dưới tác dụng của tải trọng ngoài.

KEYWORDS

Compressive strength
Electrical resistivity
High-performance concrete
Smart concrete
Steel fiber

ABSTRACT

This study investigated the effects of steel fiber content on the workability, strength, and resistivity of high-strength concrete. Smooth straight steel fibers with a diameter of 0.2 mm, length of 13 mm, brass coating, tensile strength of 2100 MPa, and elastic modulus of 200 Gpa reinforce high-strength concrete. The steel fiber content used in the F0, F2, F4, and F5 matrices is 0, 2%, 4%, and 5%, respectively. Test results showed that, as the steel fiber content increased from 0 to 2%, the workability of the concrete mixture and the compressive strength little changed. As the steel fiber content increased from 2% to 4% and 5%, the workability of the concrete mixture decreased while the compressive strength of the concrete increased. The flow values of F0, F2, F4, and F5 are 245 mm, 240 mm, 220 mm, and 200 mm, respectively while the compressive strength is 98.5 MPa, 102.3 MPa, 110.14 MPa, and 117.97 MPa, correspondingly. The volumetric weight increased from 2237.3 kg/m³ to 2584 kg/m³ as the steel fiber content increased from 0 to 5%. The electrical resistivity of concrete significantly decreased as the steel fiber content increased from 2% to 4% but decreased slightly as the fiber content increased to 5%. The microstructure images of concrete surrounding steel fibers and the distribution of steel fibers were captured and analyzed. Then the conductive network model in steel fiber-reinforced high-performance concrete was analyzed and explained. Steel fiber content of 4% can be considered as the percolation threshold in high-strength concrete for evaluating the sensing ability under the effect of external load.

1. Giới thiệu

Bê tông là vật liệu sử dụng phổ biến thứ hai trên thế giới do tính dễ tạo hình, cường độ, độ bền, tận dụng được nguyên liệu địa phương

và khả năng chống chịu cao với điều kiện môi trường và tải trọng. Tuy nhiên, sự phá hoại đột ngột của các công trình nhà cao tầng, cầu quy mô lớn bằng bê tông cốt thép mà không có cảnh báo gây ra các thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản. Một số thảm họa về phá hủy công

*Liên hệ tác giả: lehuyviet@humg.edu.vn

Nhận ngày 01/08/2024, sửa xong ngày 30/09/2024, chấp nhận đăng ngày 03/10/2024

Link DOI: 10.54772/jomc.06.2024.723

trình có thể kể đến như Nhà máy dệt Dhaka Savar Rana, Bangladesh năm 2013 gây ra 1134 người chết, trung tâm thương mại Sampoong ở Hàn Quốc năm 1995 với 502 người chết, cầu Morandi ở Ý năm 2018 với 43 người chết. Các báo cáo đã chỉ ra rằng một trong các nguyên nhân chính dẫn đến các thảm họa phá hủy công trình là do thiếu hệ thống quan trắc, đánh giá, cảnh báo sớm về các hư hại và tình trạng kết cấu công trình. Do đó, hệ thống đánh giá trạng thái kết cấu công trình (structural health monitoring, SHM) gần đây được quan tâm nghiên cứu và phát triển trên thế giới. Trong hệ thống SHM, các cảm biến (sensor) ứng suất, biến dạng hoặc vết nứt được tích hợp kết hợp hệ thống thu phát tín hiệu và trung tâm xử lý để theo dõi cảnh báo trạng thái kết cấu theo thời gian thực. Tuy nhiên, các cảm biến có các nhược điểm như giá thành cao, tuổi thọ thấp so với tuổi thọ kết cấu công trình, khả năng cảm biến cục bộ và có thể làm giảm cường độ của cấu kiện trong trường hợp chôn cảm biến vào bên trong kết cấu.

Gần đây, bê tông thông minh với khả năng tự cảm biến ứng suất, biến dạng, vết nứt được nghiên cứu và phát triển trên thế giới vượt qua các nhược điểm của các cảm biến để tích hợp vào trong hệ thống SHM [1–5]. Các chất tăng cường dạng phân tán có độ dẫn điện cao được thêm vào bê tông để tạo thành mạng lưới dẫn điện trong bê tông, đồng thời giúp cải thiện đặc trưng cơ học của bê tông. Một số chất tăng cường phổ biến cho bê tông thông minh kể đến như sợi thép, xi thép, sợi các bon, ống nano các bon, các bon đen, nicken, ... [4,6–12]. Để đánh giá khả năng cảm biến của bê tông thông minh, điện trở suất của bê tông cần được xác định và đánh giá. Dưới tác dụng của tải trọng ngoài hoặc hình thành vết nứt trong bê tông, căn cứ vào sự thay đổi trong điện trở suất của bê tông do mạng lưới dẫn điện thay đổi, ứng suất, biến dạng hoặc vết nứt trong bê tông thông minh có thể được phát hiện và đánh giá theo thời gian thực.

Bên cạnh đó, cùng với sự phát triển về quy mô, số lượng các công trình nhà cao tầng, siêu cao tầng, cầu nhịp lớn, ... nhu cầu sử dụng và phát triển vật liệu bê tông cường độ cao, tính năng cao ngày càng tăng. Do đó, các đặc trưng cảm biến của bê tông cường độ cao cần được nghiên cứu và đánh giá. Tuy nhiên, các nghiên cứu về bê tông thông minh cường độ cao ở Việt Nam chưa nhiều. Liem [8] nghiên cứu khả năng cảm biến của bê tông thông minh sử dụng chất tăng cường là các bon đen.

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của sử dụng hàm lượng sợi thép cao đến cường độ, tính công tác và đặc trưng cảm biến (điện trở suất) của bê tông cường độ cao được phân tích. Sợi thép với hàm lượng 0, 2 %, 4 % và 5 % thể tích hỗn hợp được đánh giá. Đặc điểm vi cấu trúc, mô hình phân bố sợi thép trong bê tông cường độ cao được đưa ra để giải thích đặc trưng về điện trở suất của bê tông cường độ cao với sợi thép.

2. Đặc trưng điện trở suất của bê tông

Phản hồi điện trở suất của bê tông dưới tác dụng của tải trọng được sử dụng để đánh giá khả năng cảm biến của bê tông thông minh. Điện trở suất được xác định từ giá trị điện trở đo được trong bê tông

theo công thức (1).

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

Trong đó, A là diện tích tiết diện ngang và L là khoảng cách giữa 2 điện cực đo.

Để đo điện trở trong bê tông, hai phương pháp phổ biến hiện nay là dùng phương pháp đo dòng điện một chiều (DC) và đo dòng điện xoay chiều (AC) thông qua các điện cực đo được dán hoặc chôn vào trong bê tông. Phương pháp sử dụng dòng một chiều có ưu điểm là thiết bị đơn giản, dễ mua, dễ chế tạo tuy nhiên điện trở của bê tông bị ảnh hưởng của quá trình phân cực khi sử dụng dòng một chiều. Các ion trong bê tông sẽ xu hướng chuyển dịch về các điện cực trái dấu với nó dẫn đến điện trở của mẫu tăng. Giai đoạn đầu điện trở tăng nhanh và sau đó điện trở ổn định sau khoảng 15 đến 20 phút. Phương pháp dùng dòng điện xoay chiều sẽ giúp xác định điện trở suất của bê tông mà không bị ảnh hưởng của quá trình phân cực. Tuy nhiên, chi phí của thiết bị đo điện trở xoay chiều thường cao hơn nhiều lần so với thiết bị đo điện trở một chiều.

Phương pháp đo hai điện cực và bốn điện cực thường được sử dụng. Ở phương pháp đo 4 điện cực, dòng điện được áp vào ở hai điện cực phía ngoài trong khi hai điện cực ở trong dùng để đo điện thế. Giá trị điện trở xác định thông qua điện thế và dòng điện. Ở phương pháp đo hai điện cực, dòng điện và điện thế cùng được áp vào và đo ở hai điện cực. Han và cộng sự [12] chỉ ra rằng phương pháp đo 2 điện cực sẽ bị ảnh hưởng bởi điện trở tiếp xúc giữa điện cực đo và mẫu bê tông, do đó giá trị điện trở đo được thường cao hơn so với phương pháp sử dụng 4 điện cực đo. Tuy nhiên, thiết lập thí nghiệm và thiết bị đo cho phương pháp đo 2 điện cực đơn giản hơn và chi phí rẻ hơn so với 4 điện cực. Đồng thời, phản hồi của điện trở dưới tác dụng của tải trọng của phương pháp đo 2 điện cực đáp ứng được cho đánh giá cảm biến ứng suất, biến dạng, vết nứt của bê tông tự cảm biến [12].

Bên cạnh đó, khi áp dụng bê tông tự cảm biến vào công trình thực tế, việc phát triển hệ thống thu phát điện trở không dây sử dụng dòng điện một chiều và hai điện cực đo sẽ dễ dàng hơn nhiều so với sử dụng dòng điện xoay chiều và bốn điện cực đo. Trong nghiên cứu này, phương pháp sử dụng dòng điện một chiều với hai điện cực đo được thực hiện.

3. Vật liệu và thí nghiệm

3.1. Vật liệu và quá trình chuẩn bị mẫu

Đồng thời, hạt silica fume có kích thước nhỏ hơn nhiều so với kích thước hạt xi măng và cốt liệu khác sẽ có tác dụng chèn đầy các lỗ rỗng trong cấu trúc của bê tông.

Bảng 1 tổng hợp cấp phối thành phần của bê tông cường độ cao. Cấp phối được thiết kế sử dụng dựa trên các cấp phối chế tạo bê tông cường độ siêu cao trên thế giới và Việt Nam [4,6,13–15], sử dụng các vật liệu, nguồn nguyên liệu sẵn có trên thị trường. Hình 1 biểu diễn hình ảnh các vật liệu trong các cấp phối bê tông. Xi măng Bút sơn PCB40 và phụ gia khoáng muối silic (silica fume, SF90) được sử dụng làm chất

kết dính trong bê tông. Xi măng và silica fume được sàng để loại bỏ các hạt bị vón cục do quá trình lưu trữ. Nước sử dụng tuân theo tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 [16] với tỷ lệ N/X = 0.2. Phụ gia siêu dẻo SR5000F của hãng Silkroad, phụ gia giảm nước tầm cao thành phần dựa trên gốc Polycarboxylate, được sử dụng để giảm nước và tăng tính công tác cho hỗn hợp bê tông. Cốt liệu mịn cát vàng sông Lô có kích thước hạt lọt

sàng dưới 1.25 mm được sử dụng. Sợi thép tròn trơn kích thước đường kính 0.2 mm, chiều dài 13 mm, mạ đồng với cường độ chịu kéo 2100 MPa, mô đun đàn hồi 200 GPa được sử dụng gia cường cho bê tông cường độ cao. Bốn cấp phối F0, F2, F4 và F5 tương ứng với hàm lượng sợi thép theo thể tích lần lượt là 0, 2, 4 và 5%.

Bảng 1. Tổng hợp cấp phối bê tông cường độ cao theo tỷ lệ về khối lượng.

Mẫu	Xi măng	Silica fume	Cát vàng	Nước	Phụ gia siêu dẻo	Sợi thép (% thể tích)
F0	1	0,25	1,25	0,2	0,035	0
F2	1	0,25	1,25	0,2	0,035	2
F4	1	0,25	1,25	0,2	0,035	4
F5	1	0,25	1,25	0,2	0,035	5



a) Silica fume



b) Cát vàng



c) Xi măng



d) Sợi thép



e) Nước

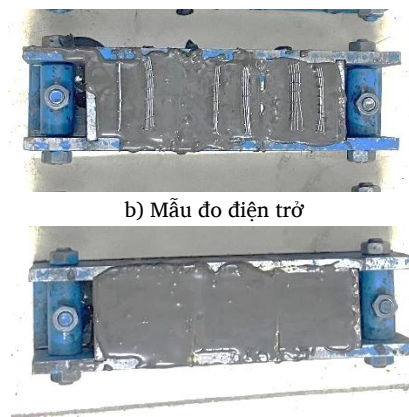


f) Phụ gia siêu dẻo

Hình 1. Hình ảnh vật liệu sử dụng.



a) Máy trộn



b) Mẫu đo điện trở

c) Mẫu xác định cường độ chịu nén

Hình 2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm đo điện trở và mẫu xác định cường độ chịu nén.

Các cấp phối được trộn theo một quy trình thống nhất để đảm bảo không bị sai lệch do quá trình trộn mẫu. Máy trộn vữa (Hình 2a) với các tốc độ trộn chậm và nhanh được sử dụng. Các bước thực hiện như sau: (1) các cốt liệu gồm xi măng, muối silic, cát được trộn khô đảm bảo đồng đều các vật liệu trong 5 phút, (2) nước được cho từ từ vào cối trộn trong 3 phút, (3) phụ gia siêu dẻo được thêm vào cối trộn và bật chế độ trộn nhanh trong vòng 2 phút đến khi mẫu đảm bảo được độ chảy của hỗn hợp bê tông tươi. Sợi thép được phân tán đều vào hỗn hợp bằng tay và trộn thêm 1 phút. Hỗn hợp bê tông tươi được tiến hành kiểm tra độ chảy xòe trước khi đổ vào khuôn mẫu lập phương kích thước 50x50x50 mm³ (kích thước mẫu theo tiêu chuẩn ASTM C109 đánh giá cường độ chịu nén cho bê tông hạt mịn). Các mẫu tiến hành đầm nhẹ để bọt khí có thể thoát ra ngoài, đảm bảo độ đặc chắc trong cấu trúc bê tông. Với mẫu đo điện trở, các lưới sợi thép kích thước rộng 50 mm, cao 80 mm với khoảng cách 20 mm để làm điện cực đo cho mẫu bê tông. Hình ảnh mẫu xác định điện trở và mẫu xác định cường độ chịu nén biểu diễn trên Hình 2b và 2c lần lượt. Các mẫu

được dán kín bằng tấm nilon mỏng để tránh bay hơi nước trong quá trình bảo dưỡng. Mẫu được tháo khuôn sau 2 ngày và cho vào bể bảo dưỡng ở nhiệt độ 90 °C trong 3 ngày.

3.2. Quá trình thí nghiệm

Tính công tác của bê tông cường độ cao được đánh giá thông qua xác định độ chảy xòe của bê tông tươi. Độ chảy xòe được xác định sử dụng thí nghiệm côn mini (đường kính cạnh bé 70 mm và cạnh lớn của côn 80 mm, chiều cao 40 mm) như Hình 4a theo các bước như sau: Hỗn hợp bê tông tươi được đổ đầy côn mini; Côn được rút chậm theo phương thẳng đứng bằng hai tay; dùng thước đo đường kính theo hai chiều độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông sau khi rút côn 1 phút; Giá trị độ chảy xòe lấy bằng trung bình của kích thước hai chiều đo. Khối lượng thể tích của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 3115: 1993 bằng cách cân và đo khối lượng và thể tích của mẫu bê tông sau bảo dưỡng.



a) Xác định độ chảy xòe



b) Xác định cường độ chịu nén



c) Xác định điện trở của mẫu sử dụng dòng điện một chiều với 2 điện cực đo

Hình 3. Thiết lập thí nghiệm xác định đặc trưng cơ học và điện trở của mẫu.

Cường độ chịu nén của mẫu bê tông cường độ cao được xác định sử dụng hệ thống máy nén uốn tự động ADVANTEST 9 (Controls – Italia, khả năng gia tải tối đa 300 tấn) với tốc độ gia tải là 0,5 MPa/s. Điện trở của bê tông được xác định thông qua phương pháp đo điện trở 1 chiều (DC) với 2 điện cực đo sử dụng máy đo điện trở đa năng INSTEK GDM 9060. Điện trở suất được xác định từ giá trị đo điện trở theo công thức (1). Ít nhất ba mẫu được chuẩn bị và thực hiện thí nghiệm để xác định cường độ chịu nén, khối lượng thể tích và điện trở của mỗi cấp phối bê tông.

Mẫu thí nghiệm chụp ảnh vi cấu trúc của bê tông cường độ cao gia cường cốt sợi thép được cắt trực tiếp từ mẫu bê tông kích thước 50x50x50 mm³. Hình ảnh vi cấu trúc được chụp bằng kính hiển vi điện tử (SEM) A QUANTA ở Trung tâm công nghệ cao, Trường Đại học Mở - Đà chất.

4. Kết quả và thảo luận

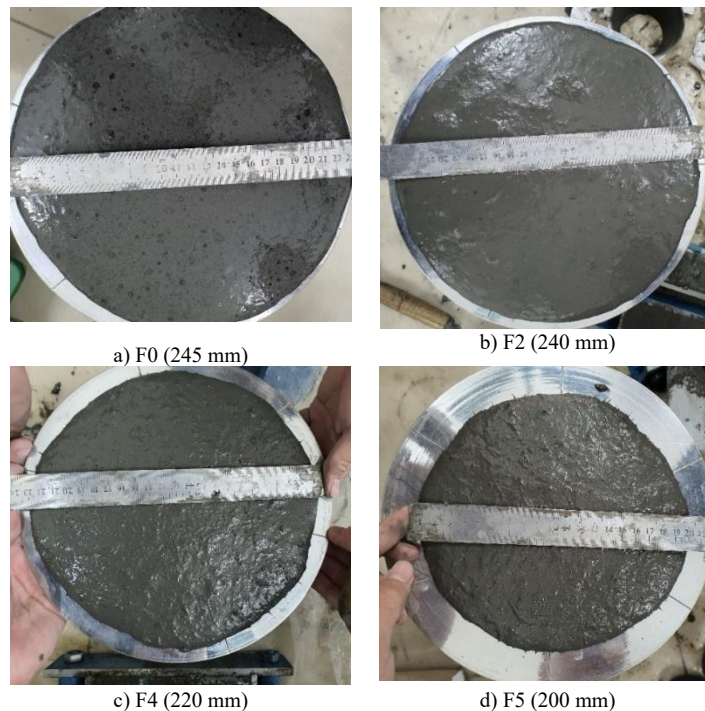
4.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép trên tính công tác, khối lượng thể

tích và cường độ chịu nén của bê tông cường độ cao

Bảng 2 tổng hợp kết quả thí nghiệm xác định độ chảy xòe, khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của các mẫu bê tông cường độ cao. Hình ảnh độ chảy xòe của các cấp phối biểu diễn trên Hình 4. Khi hàm lượng cốt sợi thép là 2%, độ chảy xòe giảm nhẹ từ 245 mm (F0) xuống 240 mm (F2). Độ chảy xòe của F4 và F5 với 4 và 5% cốt sợi thép giảm rõ ràng hơn xuống 220 mm và 200 mm lần lượt. [17] chỉ ra rằng, độ chảy xòe của hỗn hợp bê tông tươi phụ thuộc chính vào lượng nước tự do trong bê tông. Khi hàm lượng sợi thép tăng, lượng nước bám trên bề mặt sợi thép tăng dẫn đến lượng nước tự do trong bê tông giảm. Đồng thời, khi số lượng sợi thép tăng lên nhất định (cấp phối F4, F5), ma sát và các kết nối giữa các sợi thép cũng có thể làm cho độ chảy xòe của bê tông giảm. Nhìn chung, bê tông cường độ cao với hàm lượng sợi cao (4% và 5%) mặc dù độ chảy xòe giảm so với hàm lượng sợi thấp nhưng vẫn có tính công tác tốt khi độ chảy xòe lớn hơn 200 mm.

Bảng 2. Độ chảy xòe, khối lượng thể tích, cường độ chịu nén của bê tông cường độ cao.

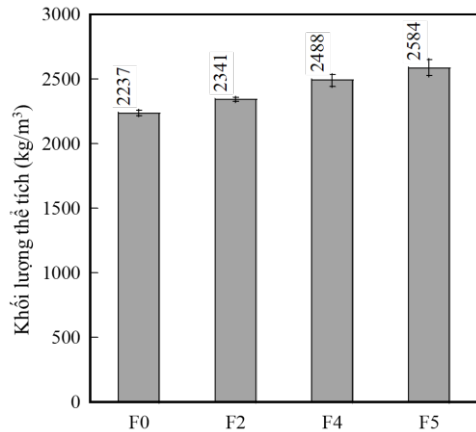
Tên Mẫu		Cường độ chịu nén (MPa)	Khối lượng thể tích (kg/m ³)	Độ chảy xòe (mm)
F0	SP1	100,6	2269	245
	SP2	96,3	2215	
	SP3	98,5	2228	
	Trung bình	98,5	2237,3	
	Độ lệch	6,8	23,0	
F2	SP1	101,2	2325	240
	SP2	106,2	2308	
	SP3	99,5	2390	
	Trung bình	102,3	2341	
	Độ lệch	2,8	18,2	
F4	SP1	108,67	2552	220
	SP2	113,95	2432	
	SP3	107,81	2480	
	Trung bình	110,14	2488	
	Độ lệch	3,81	49,3	
F5	SP1	128,22	2632	200
	SP2	108,47	2624	
	SP3	117,22	2496	
	Trung bình	117,97	2584	
	Độ lệch	8,08	62,3	



Hình 4. Độ chảy xòe của các cấp phối bê tông cường độ cao.

Hình 5 biểu diễn sự thay đổi của khối lượng thể tích của mẫu bê tông cường độ cao khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 5 %. Các cấp phối có thành phần xi măng, cát, silica fume, nước, phụ gia siêu dẻo như nhau chỉ khác hàm lượng sợi thép tăng thêm vào hỗn hợp các cấp

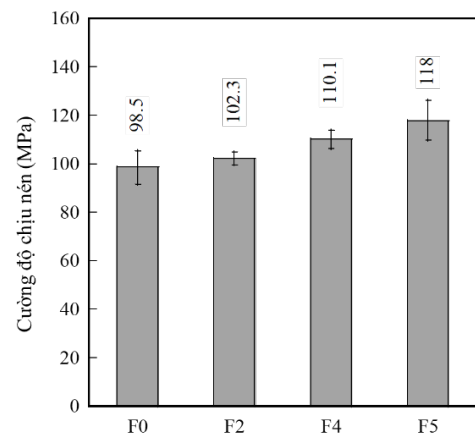
phối. Sợi thép có khối lượng thể tích (7850 kg/m³) lớn hơn nhiều so với bê tông. Do đó, khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 5 %, khối lượng thể tích tăng từ 2237 đến 2584 kg/m³.



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến khối lượng thể tích.

Hình 6 biểu diễn thay đổi cường độ chịu nén của bê tông khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 5 %. Hình 7 thể hiện hình ảnh phá hủy của mẫu bê tông cường độ cao có sợi thép (F5) và không có sợi thép (F0). Dưới tác dụng của tải trọng nén, với mẫu bê tông không sợi thép ngay sau khi ứng suất nén mẫu đạt giá trị lớn nhất, các vết nứt trong mẫu bê tông liên kết và mở rộng, dẫn đến mẫu bê tông bị phá hủy và không chịu thêm được tải trọng. Trong khi đó, lực dính giữa sợi thép phân tán và bê tông nền sẽ bắc cầu qua các vết nứt và giúp bê tông có thể tiếp tục chịu tải kể cả sau khi ứng suất nén trong bê tông đạt giá trị lớn nhất. Bên cạnh đó, các sợi thép cũng giúp giảm chiều rộng vết nứt và hình thành đa vi nứt trong bê tông, tăng độ dẻo của bê tông [18]. Khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 2%, cường độ chịu nén tăng

không đáng kể từ 98.5 đến 102.3 MPa. Nhiều nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khi hàm lượng sợi thép tăng dưới 2%, khả năng chịu kéo và uốn của bê tông cường độ cao tăng nhưng khả năng chịu nén không thay đổi đáng kể [19,20]. Khi hàm lượng sợi thép lớn (F4 và F5), cường độ chịu nén của bê tông cường độ cao tăng lên 110.1 và 118 MPa. Dưới tác dụng tải trọng nén, các vết nứt hình thành và phá hủy từ các vùng có cường độ yếu hoặc lỗ rỗng trong bê tông. Khi hàm lượng sợi thép đủ nhiều, lực dính giữa sợi thép và bê tông nền bắc qua các vết nứt đủ lớn giúp sự hình thành và mở rộng vết nứt giảm, dẫn đến khả năng chịu nén của mẫu bê tông tăng. Như hình ảnh trong Hình 8, sự phân tán của các sợi thép trong bê tông cường độ cao khá đồng đều trong toàn bộ mẫu.



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến cường độ chịu nén.



a) F0



b) F5

Hình 7. Hình ảnh phá hủy của mẫu bê tông có sợi thép và không sợi thép.



a) F2

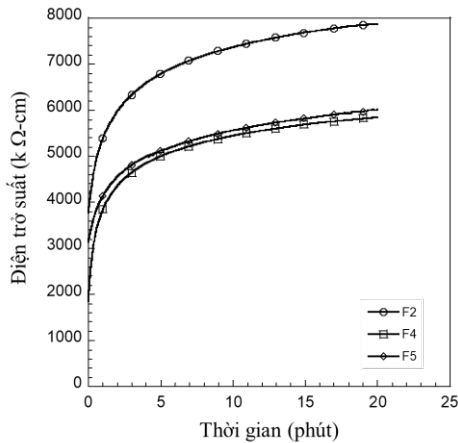


b) F4

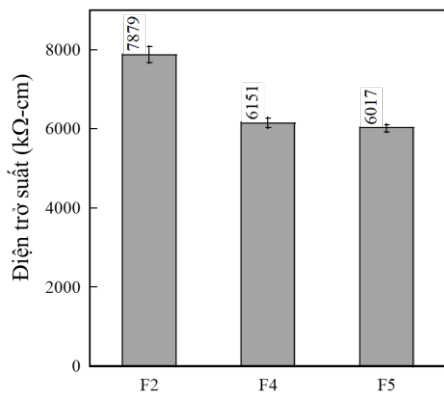


c) F5

Hình 8. Hình ảnh phân tán của cốt sợi thép trong bê tông cường độ cao.



Hình 9. Sự thay đổi điện trở của bê tông cường độ cao do ảnh hưởng quá trình phân cực.



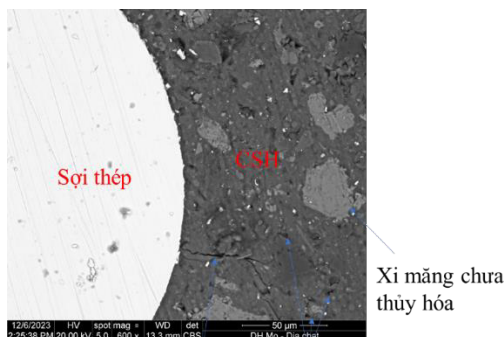
Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến điện trở suất.

Hình 9 biểu diễn ảnh hưởng quá trình phân cực đến điện trở suất của tất cả các cấp phối bê tông cường độ cao sử dụng xi thép. Điện trở suất của các mẫu bê tông tăng nhanh ở thời điểm đầu và dần ổn định sau 15 đến 20 phút. Giá trị điện trở suất của bê tông được xác định ở thời điểm sau khi tiến hành đo 20 phút để loại bỏ ảnh hưởng của hiện tượng phân cực. Hình 10 biểu diễn ảnh hưởng của

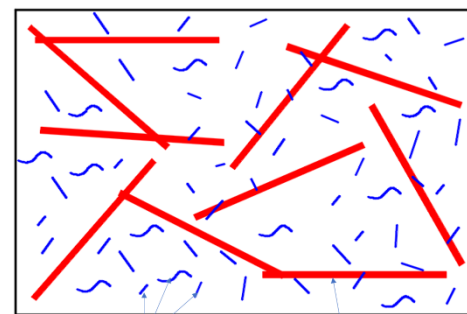
hàm lượng sợi thép đến điện trở suất của bê tông. Khi hàm lượng sợi thép tăng từ 2 đến 4 % điện trở suất của bê tông giảm đáng kể từ 7879 đến 6151 kΩ-cm. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi thép tăng từ 4 đến 5 %, điện trở suất của bê tông giảm nhẹ xuống 6017 kΩ-cm.

Hình 11a thể hiện hình ảnh vi cấu trúc của bê tông nền xung quanh sợi thép. Vi cấu trúc của mẫu bê tông có độ đặc chắc cao, chỉ có các lỗ rỗng hoặc vết nứt không liên tục. Một trong các nguyên nhân chính là do sự ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia khoáng silica fume kết hợp với quá trình bảo dưỡng nhiệt ẩm cao (90 °C) giúp tăng cường phản ứng giai đoạn 2 (phản ứng pozolanic), tạo ra nhiều CSH hơn và giảm CH trong cấu trúc bê tông. Bên cạnh đó, Silica fume với kích thước nhỏ hơn khoảng 100 lần so với xi măng, ngoài tác dụng tham gia phản ứng thủy hóa, có tác dụng làm chất chèn, tăng độ đặc chắc cho cấu trúc của bê tông. Cấu trúc đặc chắc của bê tông giúp các bê tông cốt sợi có cường độ trên 100 MPa (Bảng 2).

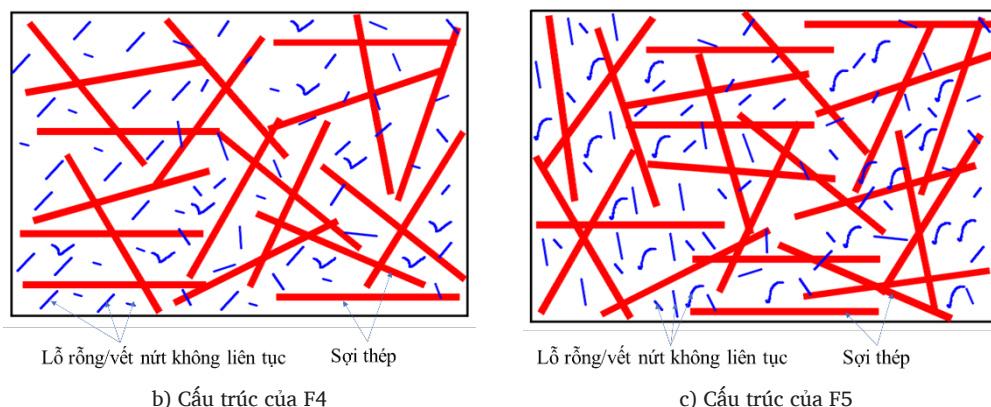
Dựa vào vi cấu trúc của bê tông, hàm lượng sợi thép, hình ảnh phân tán vi cấu trúc của sợi thép và lỗ rỗng, vết nứt trong bê tông được biểu diễn trên Hình 11b, c và d. Han và cộng sự [12] chỉ ra rằng, mạng lưới dẫn điện chính trong bê tông tự cảm biến gồm các đường dẫn điện ion (Ri, do sự dịch chuyển của các ion trong dung dịch của hệ thống lỗ rỗng hoặc vi khe nứt) và đường dẫn điện liên kết giữa các chất tăng cường độ dẫn điện (Rct). Độ dẫn điện của bê tông tự cảm biến phụ thuộc lớn vào hàm lượng chất tăng cường độ dẫn điện [3,6,21]. Do đó, khi hàm lượng sợi thép tăng từ 2 % lên 4 %, mạng lưới dẫn điện trong bê tông được cải thiện do tăng sự kết nối giữa các sợi thép lên giúp tăng đường dẫn điện liên kết. Tuy nhiên, như có thể thấy trên Hình 11b và 11c, F4 đã cung cấp mạng lưới kết nối ổn định giữa các sợi thép, sợi thép và các đường dẫn điện ion trong hệ thống nước lỗ rỗng hoặc vết nứt không liên tục. Do đó, mặc dù hàm lượng sợi thép tiếp tục tăng ở F5 (5 %), điện trở suất của bê tông không thay đổi đáng kể do mạng lưới dẫn điện trong F4 đã ổn định. Do đó, hàm lượng 4 % có thể coi là điểm giới hạn về hàm lượng chất tăng cường sợi thép (percolation threshold). Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, khi hàm lượng chất tăng cường vượt quá hàm lượng giới hạn, phản hồi điện trở dưới tác dụng của tải trọng ngoài (nghĩa là khả năng cảm biến) của bê tông sẽ giảm [4,6,12,21].



Vết nứt không liên tục Lỗ rỗng không liên tục
a) Vi cấu trúc của bê tông



Lỗ rỗng/vết nứt không liên tục Sợi thép
b) Cấu trúc của F2



Hình 11. Hình ảnh vi cấu trúc của bê tông và mô phỏng cấu trúc của bê tông gia cường các hàm lượng sợi thép khác nhau

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá được ảnh hưởng của sử dụng hàm lượng sợi thép lớn (trên 2 % thể tích) đến tính công tác, khối lượng thể tích, cường độ chịu nén và điện trở suất của bê tông cường độ cao. Bốn cấp phối bê tông cường độ cao (F0, F2, F4 và F5) tương ứng với sử dụng 0 %, 2 %, 4 % và 5 % sợi thép theo thể tích được nghiên cứu. Một số kết luận rút ra như sau:

- Khi hàm lượng sợi thép dưới 2 % thể tích, tính công tác của hỗn hợp bê tông cường độ cao ít bị ảnh hưởng. Độ chảy xê của F0 và F2 lần lượt là 245 mm và 240 mm. Hàm lượng sợi thép cao (4 % và 5 %) làm giảm tính công tác của bê tông cường độ cao so với hàm lượng 2 % nhưng vẫn đảm bảo tính công tác tốt (độ chảy xê của F4 và F5 là 220 mm và 200 mm).

- Khối lượng thể tích của bê tông cường độ cao với hàm lượng sợi 0 %, 2 %, 4 % và 5 % tăng dần với giá trị lần lượt là 2237,3 kg/m³; 2341 kg/m³; 2488 kg/m³ và 2584 kg/m³.

- Cường độ chịu nén của bê tông cường độ cao với hàm lượng cốt sợi thép 2 % không thay đổi đáng kể so với không sử dụng sợi thép. Sử dụng hàm lượng sợi thép cao (4 % và 5 %) giúp tăng khả năng chịu nén của bê tông cường độ cao. Cường độ chịu nén của F0, F2, F4 và F5 lần lượt là 98,5 Mpa; 102,3 Mpa; 110,14 MPa và 117,97 MPa.

- Điện trở suất của bê tông cường độ cao gia cường cốt sợi giảm rõ ràng khi hàm lượng sợi thép tăng từ 2 % đến 4 % nhưng thay đổi nhỏ khi hàm lượng sợi tăng từ 4 % lên 5 %. Hàm lượng sợi thép 4 % có thể coi là hàm lượng giới hạn về sợi thép trong bê tông cường độ cao khi đánh giá khả năng cảm biến dưới tác dụng của tải trọng ngoài.

- Hình ảnh vi cấu trúc của bê tông xung quanh cốt sợi thép được chụp và phân tích. Dựa trên đặc điểm vi cấu trúc, hàm lượng sợi thép, đặc trưng truyền điện, điện trở suất của bê tông cường độ cao với các hàm lượng sợi thép khác nhau được phân tích và giải thích.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài Nghiên cứu Khoa học Sinh viên Tiềm năng do Trường Đại học Mỏ - Địa chất tài trợ năm 2022.

Nhóm tác giả xin được gửi lời cảm ơn tới Phòng thí nghiệm Bộ môn Xây dựng Công trình Ngầm và Mỏ, Khoa Xây dựng, Đại học Mỏ - Địa chất đã hỗ trợ thiết bị thực hiện thí nghiệm của bài báo.

Đóng góp của các tác giả

Lê Huy Việt: lập chương trình thí nghiệm, viết và chỉnh sửa bản thảo; Nguyễn Sỹ Đức, Mai Văn Chương, Nguyễn Ngọc Hưng: thực hiện thí nghiệm, phân tích số liệu, tham gia viết bản thảo bài báo; Đặng Quang Duy, Hoàng Anh Phi, Lê Bình Hiếu, Đỗ Ngọc Huy: thực hiện thí nghiệm, tham gia viết bản thảo.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Z.Q. Shi, D.D.L. Chung, Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 435–439. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X).
- [2]. S. Wen, D.D.L. Chung, Piezoresistivity in continuous carbon fiber cement-matrix composite, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 445–449. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00211-7).
- [3]. B. Han, S. Ding, X. Yu, Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review, *Measurement*. 59 (2015) 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>.
- [4]. 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>.
- [5]. T.U. Kim, M.K. Kim, J.W. Park, D.J. Kim, Effects of temperature and humidity on self-stress sensing capacity of smart concrete blocks, *J. Build. Eng.* 69 (2023) 106227. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106227>.
- [6]. 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.job.2021.102717>.
- [7]. D.Y. Yoo, S. Kim, S.H. Lee, Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension, *Sensors Actuators, A Phys.* 276 (2018) 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.009>.
- [8]. D.L. Nguyen, V.T.B. Nga, D.X. Son, M.P. Tran, Nghiên cứu dùng muối than

- đen và xỉ lò cao nghiền mịn trong việc cải thiện khả năng tự cảm biến của bê tông tính năng cao, Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng NUCE. 13 (2019) 151–158.
- [9]. D.L. Nguyen, J. Song, C. Manathsombat, D.J. Kim, Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension, *Compos. Part B Eng.* 69 (2014) 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.037>.
- [10]. B. Han, Z. Yang, X. Shi, X. Yu, Transport properties of carbon-nanotube/cement composites, *J. Mater. Eng. Perform.* 22 (2013) 184–189. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0228-x>.
- [11]. B. Han, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors, *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 1 (2011) 17–24. <https://doi.org/10.1007/s13349-010-0001-5>.
- [12]. 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>.
- [13]. H.V. Le, D.J. Kim, Effects of matrix strength, fiber type, and fiber content on the electrical resistivity of steel-fiber-reinforced cement composites during fiber pullout, *J. Korean Soc. Civ. Eng.* 39 (2019) 675–689.
- [14]. M.K. Kim, D.J. Kim, Y.K. An, Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension, *Compos. Part B Eng.* 134 (2018) 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.061>.
- [15]. L.H. Việt, 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.
- [16]. Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7570:2006 về cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật, (2012).
- [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]. H.V. Le, D. Moon, D.J. Kim, Effects of ageing and storage conditions on the interfacial bond strength of steel fibers in mortars, *Constr. Build. Mater.* 170 (2018) 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.064>.
- [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]. A. Le Hoang, E. Fehling, Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>.
- [21]. 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>.