

Ảnh hưởng của nano silic đến cường độ liên kết bề mặt cốt sợi thép trong bê tông cường độ siêu cao

Đặng Văn Phi^{1*}, Tăng Văn Lâm¹, Lê Huy Việt¹, Đàm Anh Tuấn¹, Hồng Tiến Thắng², Vũ Ngọc Trụ³

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Số 18 Phố Viên, Phường Đức Thắng, Quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội

²Trường Đại học Thủy Lợi, Số 175 Tây Sơn, Quận Đống Đa, Hà Nội

³Trường Đại học Xây dựng, Số 55 Giải Phóng, Hai Bà Trưng, Hà Nội

TỪ KHOÁ

Nano silic

Bê tông cường độ siêu cao

Cường độ liên kết bề mặt

TÓM TẮT

Bài báo trình bày sự ảnh hưởng của hàm lượng nano silic (NS) đến cường độ liên kết bề mặt của cốt sợi thép trong bê tông cường độ siêu cao (UHPC). Khi thay thế khối lượng xi măng bằng khối lượng NS tương ứng từ 0,50 đến 2,00% trong thành phần cấp phối của UHPC, cường độ liên kết bề mặt của cốt sợi thép trong UHPC được cải thiện đáng kể và đạt được giá trị lớn nhất khi sử dụng hàm lượng 1,00% NS. Cường độ liên kết cực đại (τ_{peak}) và tương đương (τ_{eq}) của cốt sợi thép trong UHPC khi sử dụng hàm lượng 1,00% NS lần lượt là 13,63 MPa và 140,10 MPa. Khi được bổ sung thêm hàm lượng NS, cường độ liên kết của UHPC tăng lên là do NS đã làm tăng sự đặc chắc tại vùng chuyển tiếp xung quanh bề mặt cốt sợi thép và UHPC. Ngoài ra, khi sử dụng hàm lượng NS tăng từ 0,50 đến 1,00%, cường độ nén của UHPC có xu hướng tăng và đạt giá trị lớn nhất ($201,51 \pm 3,40$ MPa) với hàm lượng 1,00% NS được sử dụng. Tuy nhiên, khi hàm lượng NS tăng từ 1,00 đến 2,00% cường độ nén của UHPC có xu hướng giảm. Hơn nữa, tính công tác của UHPC giảm khi bổ sung thêm NS trong thành phần cấp phối của UHPC. Độ chảy của các hỗn hợp chứa các hàm lượng NS đều thấp hơn 235 mm, trong khi độ chảy của mẫu đối chứng là 245 mm.

KEYWORDS

Nanosilica

Ultra high performance concrete

Interfacial bond strength

ABSTRACT

This study investigated the influence of nano silica (NS) content on the interfacial bond strength of steel fiber embedded in ultra high performance concrete (UHPC). When replacing the cement content by volume with the corresponding NS content from 0.50 to 2.00% in the mix composition of UHPC, the interfacial bond strengths of steel fiber embedded in UHPC significantly increased and achieved the highest value as using 1.00% NS content. The maximum (τ_{peak}) and equivalent (τ_{eq}) bond strengths were 13.63 MPa and 140.10 MPa, respectively. The bond strengths of UHPC were enhanced owing to the addition of NS to UHPC increasing the density at the interfacial transition zone around the surface of steel fiber and UHPC. In addition, as NS content was increased from 0.50 to 1.00%, the compressive strength of UHPC enhanced and reached the highest value (201.51 ± 3.40 MPa) at 1.00% NS content. However, the compressive strength of UHPC decreased as the NS content was between 1.00 and 2.00%. Furthermore, adding NS to the mix composition reduced the workability of UHPC. The flowability of the UHPC containing NS contents was all lower than 235 mm, while the flowability of the control specimen was 245 mm.

1. Đặt vấn đề

Bê tông cường độ siêu cao (UHPC) đang được nghiên cứu và áp dụng rộng rãi tại Việt Nam và thế giới. UHPC được chế tạo với tỷ lệ nước trên chất kết dính thấp, tỉ lệ này trong khoảng 0,14 – 0,20 [1]. Ngoài ra, khi bổ sung thêm một số loại cốt sợi vào trong thành phần cấp phối của UHPC sẽ làm giảm co ngót và hạn chế vết nứt xuất hiện trong bê tông [2–4].

Trên thế giới, việc sử dụng vật liệu có kích thước nano mét (nm) để cải thiện tính chất của bê tông cũng đã thu hút được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Tác giả Camilletti và nnk [5] chỉ ra rằng các hạt nano- CaCO_3 (NC) có khả năng cải thiện cường độ của UHPC ở tuổi sớm. Các tác giả đã báo cáo rằng, việc bổ sung hàm lượng NC (2,5 – 5,0 %) sẽ làm tăng cường độ chịu nén của UHPC từ 32 đến 75 % ở tuổi sớm (tuổi 24h sau khi đúc mẫu) so với mẫu đối chứng không sử dụng NC. Tác giả Ghafari và nnk [6] chỉ ra rằng việc sử dụng nano- SiO_2 (NS)

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

Nhận ngày 8/5/2024, sửa xong ngày 22/5/2024, chấp nhận đăng ngày 7/6/2024

Link DOI: 10.54772/jomc.03.2024.701

sẽ làm giảm tính công tác của UHPC, tuy nhiên NS lại làm tăng cường độ nén của UHPC ở tuổi sớm. Tác giả Wille và Loh [7] báo cáo rằng, khi bổ sung 0,022 % sợi nano-carbon vào trong thành phần cấp phối đã làm tăng 40 % giá trị lực kéo nhỏ của sợi thép trong UHPC. Ngoài ra, tác giả Park và nnk [8] đã báo cáo rằng, việc bổ sung thêm chất giảm co ngót (shrinkage reducing agent - SRA) vào trong thành phần của UHPC đã làm giảm độ bền liên kết giữa sợi thép và bê tông.

Ở Việt Nam, đã có một số tác giả nghiên cứu sử dụng các loại hạt cốt liệu mịn có kích thước micro mét (μm) để cải thiện các tính chất cơ học của UHPC. Tác giả Nguyễn Quang Phú [9] đã báo cáo rằng khi thay thế hàm lượng silica fume (SF) từ 10 đến 30 % bằng hàm lượng xi măng (XM) tương ứng trong thành phần cấp phối của UHPC thì cường độ nén của UHPC tăng từ 24 – 32 %. Tuy nhiên, cường độ nén của UHPC giảm khi hàm lượng SF vượt quá 20 %, do hiệu ứng điền đầy và phản ứng pozzolanic của SF chưa triệt để. Bên cạnh đó, tác giả Văn Viết Thiên Ân và Bùi Danh Đại [10] đã chỉ ra rằng, khi kích thước hạt SF càng nhỏ thì cường độ nén của UHPC càng lớn. Tuy nhiên kích thước hạt của SF sử dụng trong nghiên cứu này chỉ dừng ở cấp độ từ 5-61 μm , ảnh hưởng của kích thước hạt ở cấp độ nano mét vẫn chưa được xem xét. Hơn nữa, tác giả Văn Viết Thiên Ân và Lê Đăng Hải [11] đã báo cáo rằng khi bổ sung hàm lượng nano carbon (0 – 0,3 kg/m³) vào trong thành phần cấp phối đã làm tăng cường độ nén và khả năng chống nứt của UHPC ở tuổi 28 ngày.

Tác giả Nguyễn Công Thắng và nnk [12] đã báo cáo rằng việc sử dụng các loại phụ gia khoáng (PGK) hạt mịn SF (20 %), tro bay (20 %), và xi lò cao (40 %) trong thành phần cấp phối của UHPC có thể tạo ra cường độ nén lớn hơn 120 MPa. Tác giả báo cáo rằng UHPC sử dụng PGK có độ đặc chắc và khả năng chống ăn mòn cốt thép cao hơn so với mẫu đối chứng không sử dụng PGK.

Tác giả Ngô Văn Thức [13] đã nghiên cứu tính toán thành phần cấp phối của bê tông cường độ cao (High performance concrete-HPC), với cường độ nhỏ hơn 100 MPa, có sử dụng hàm lượng NS từ 0 – 3 %. Tác giả chỉ ra rằng, HPC sử dụng hàm lượng 1,5 % NS đã thu được cường độ nén lớn nhất, ngoài ra khi hàm lượng NS lớn hơn 1,5 % cường độ nén của HPC giảm vì NS bị vón tụ và tạo ra các vùng yếu trong HPC. Tác giả Trần Bá Việt và nnk [14] đã nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng NS (1 – 5 %) đến tính chất cơ học của UHPC. Tác giả đã báo cáo rằng, khi sử dụng hàm lượng 3 % NS đã tạo ra cường độ nén lớn nhất trong UHPC. Tuy nhiên, độ bền liên kết của cốt sợi trong UHPC chưa được đề cập đến trong những nghiên cứu này.

Mặc dù, đã có một số nghiên cứu sử dụng NS và một số loại PGK ở cấp độ micro mét để cải thiện tính chất cơ lý của bê tông. Tuy nhiên, những nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu có kích thước nano mét đến đến cường độ liên kết bề mặt cốt sợi thép trong UHPC vẫn còn hạn chế. Vì vậy, trong nghiên cứu này ảnh hưởng của hạt NS đến những tính chất của UHPC như: tính công tác, cường độ nén và cường độ liên kết bề mặt của cốt sợi thép trong UHPC sẽ được đánh giá thông qua thực nghiệm.

2. Vật liệu sử dụng và quá trình thí nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

Bảng 1 cung cấp tỉ lệ thành phần cấp phối vật liệu của các hỗn hợp mẫu sử dụng trong nghiên cứu này, các tỉ lệ này là tỉ số khối lượng của vật liệu tương ứng trên khối lượng của xi măng. Trong nghiên cứu này, Xi măng pooc lăng (Portland Cement - PC) đã được sử dụng. Ngoài ra, hàm lượng nano silica (NS) từ 0 – 2,00 % được sử dụng tương ứng với các hỗn hợp; trong đó, M00 (mẫu đối chứng), hỗn hợp M05, M10, M15, và M20 sử dụng hàm lượng NS lần lượt là 0,50 %, 1,00 %, 1,50 %, và 2,00 % (Bảng 1). Trong đó, NS có thành phần chính là silic dioxit (SiO₂) chiếm tỉ lệ 99,9 %. Kích thước hạt trung bình của: NS là 50 nm, cát từ 210 đến 250 μm , SF từ 0,1 đến 1,0 μm , và bột silicat (silica powder - SP) là 10 μm . Phụ gia siêu dẻo với nồng độ phần trăm ether polycarboxylate là 30 %, được sử dụng để tăng độ chảy của hỗn hợp bê tông. Tỉ lệ nước/xi măng (N/XM) được sử dụng trong nghiên cứu này là 0,2. Cốt sợi thép có đường kính 0,3 mm và chiều dài 30 mm (Bảng 2).

Bảng 1. Tỉ lệ thành phần cấp phối của các hỗn hợp theo khối lượng.

Hỗn hợp	XM	NS	Cát	SF	SP	Phụ gia siêu dẻo	N/XM
M00	1,000	-	1,1	0,25	0,3	0,075	0,2
M05	0,995	0,005	1,1	0,25	0,3	0,075	0,2
M10	0,990	0,010	1,1	0,25	0,3	0,075	0,2
M15	0,985	0,015	1,1	0,25	0,3	0,075	0,2
M20	0,980	0,020	1,1	0,25	0,3	0,075	0,2

Bảng 2. Thông số cơ bản của cốt sợi thép tròn trơn.

Đường kính (mm)	Chiều dài (mm)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Cường độ kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)
0,3	30	7,9	2447	200

Hình 1 cung cấp một số hình ảnh trong quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm. Quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm bao gồm các bước chính như sau [15]: Bước 1 – Sử dụng thiết bị (ultrasonicators) để phân tán NS trong nước và một nửa phụ gia siêu dẻo theo yêu cầu cấp phối. Đầu tiên, đổ nước và phụ gia siêu dẻo vào cốc đựng và khuấy đều bằng tay trong khoảng thời gian 2 phút, sau đó đổ từ từ dung dịch này vào trong cốc đựng NS và đặt dưới đầu dò của thiết bị ultrasonicators trong khoảng thời gian 2 giờ để phân tán đều NS vào dung dịch (Hình 1a). Bước 2 – XM, cát, SF, và SP được trộn khô trước trong khoảng thời gian 5 phút (Hình 1b). Bước 3 – đổ từ từ dung dịch chứa NS, nước và phụ gia siêu dẻo ở Bước 1 vào hỗn hợp đã trộn ở Bước 2, trong khoảng thời

gian 2 phút. Bước 4 – Đổ từ từ lượng phụ gia siêu dẻo còn lại theo yêu cầu vào trong hỗn hợp và tiếp tục trộn đều trong khoảng thời gian 5 phút. Bước – 5 hỗn hợp bê tông sau đó được đổ từ từ vào khuôn (Hình 1c) và được bảo dưỡng trong điều kiện nhiệt độ phòng ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) trong thời gian 48 giờ trước khi tháo mẫu, những mẫu này sau đó được

ngâm bảo dưỡng trong bể chứa nước nóng ở nhiệt độ ($90 \pm 2^\circ\text{C}$) trong thời gian 3 ngày. Sau đó, mẫu được vớt ra và bảo dưỡng ở điều kiện nhiệt độ phòng, tổng thời gian bảo dưỡng là 28 ngày trước khi tiến hành làm thí nghiệm.



(a) Phân tán NS vào dung dịch



(b) Trộn khô các vật liệu



(c) Khuôn và mẫu thí nghiệm

Hình 1. Một số hình ảnh trong quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm.

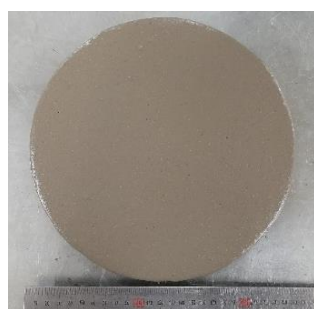
2.2. Phương pháp thí nghiệm

a. Kiểm tra tính công tác của bê tông

Hình 2 trình bày thí nghiệm kiểm tra tính công tác của các hỗn hợp mẫu. Thiết bị thí nghiệm có dạng hình nón cụt có chiều cao là 60 mm, đường kính đáy lớn là 100 mm, và đường kính đáy nhỏ là 70 mm. Các bước kiểm tra tính công tác của bê tông tuân theo tiêu chuẩn ASTM C1437 [16].



(a) Dụng cụ kiểm tra độ chảy



(b) Đo độ chảy của hỗn hợp

Hình 2. Thí nghiệm kiểm tra tính công tác của hỗn hợp bê tông.

b. Kiểm tra cường độ nén của bê tông

Hình 3 trình bày một số hình ảnh trong quá trình thí nghiệm kiểm tra cường độ nén của các hỗn hợp. Mẫu nén sử dụng trong nghiên cứu này là mẫu lập phương với kích thước 50x50x50 mm. Thí nghiệm nén được kiểm tra theo tiêu chuẩn ASTM C109/C109M, tốc độ gia tải được áp dụng trong quá trình nén mẫu là 1,0 mm/phút, đảm bảo tốc độ lực nén đạt 1000 N/s [17].

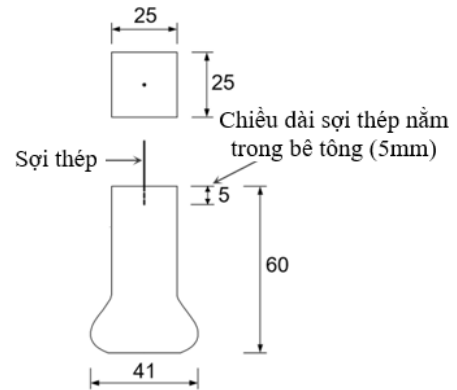


Hình 3. Thí nghiệm kiểm tra cường độ nén.

c. Kiểm tra cường độ liên kết bề mặt giữa sợi thép và bê tông



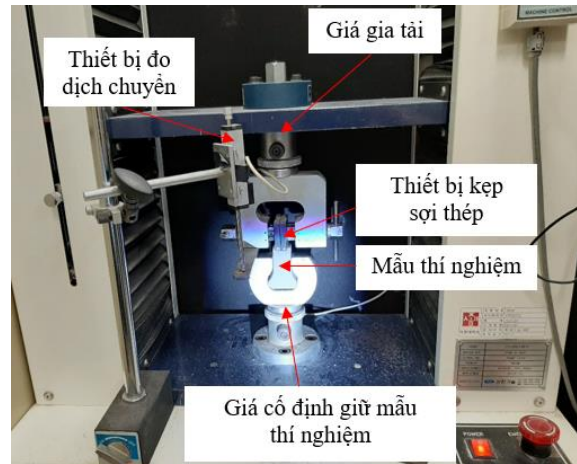
(a) Khuôn chế tạo mẫu thí nghiệm



(b) Kích thước mẫu thí nghiệm [18]



(c) Mẫu thí nghiệm



(d) Thiết lập các thiết bị thí nghiệm

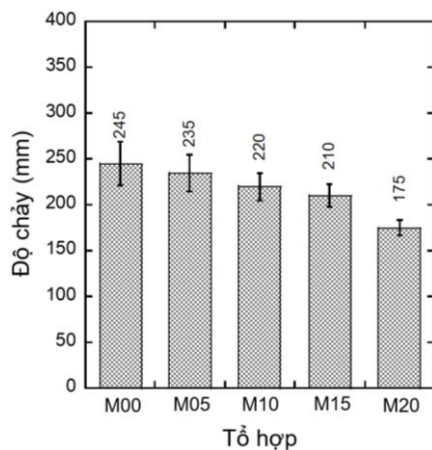
Hình 4. Thí nghiệm kéo nhỏ sợi thép trong UHPC.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng NS đến độ chảy của bê tông

Hình 5 biểu diễn kết quả đo độ chảy lan của các hỗn hợp UHPC. Kết quả cho thấy rằng, độ chảy của các hỗn hợp chứa NS đều thấp hơn (235mm) so với mẫu đối chứng (245mm). Bên cạnh đó, khi hàm lượng NS tăng 0,50 – 2,00 % thì độ chảy của các hỗn hợp giảm. Độ chảy của các mẫu trong các hỗn hợp M05, M10, M15, và M20 lần lượt là 235 ± 20 , 220 ± 15 , 210 ± 12 và 175 ± 8 mm.

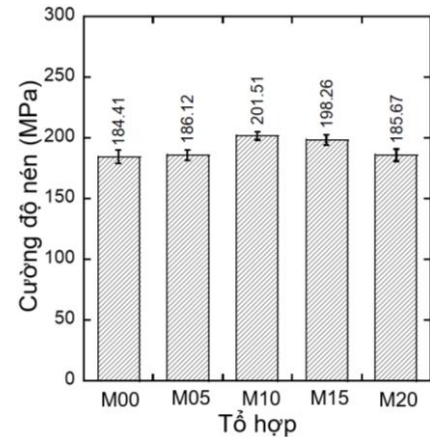
Các hỗn hợp có sự giảm độ chảy khi hàm lượng NS tăng bởi vì NS đã làm tăng diện tích bề mặt trong thành phần cấp phối của các hỗn hợp, do đó cần phải cung cấp lượng nước lớn hơn để lấp đầy vào các khoảng trống và làm ướt bề mặt các hạt cốt liệu [19,20]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này lượng nước và phụ gia siêu dẻo trong thành phần cấp phối được giữ nguyên giá trị giữa các hỗn hợp. Do đó, độ chảy của các hỗn hợp giảm khi hàm lượng NS tăng. Khi hàm lượng NS được bổ sung vào trong UHPC tăng thì tính công tác của UHPC giảm, xu hướng này tương tự như kết quả đã được báo cáo trong các tài liệu [6,14].



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng NS đến tính công tác của bê tông.

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng NS đến cường độ nén của bê tông

Hình 6 trình bày kết quả nén của các hỗn hợp mẫu sử dụng trong nghiên cứu. Có thể thấy rằng, khi thay thế hàm lượng NS bằng lượng XM tương ứng, có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ nén của các hỗn hợp. Những hỗn hợp được bổ sung thêm NS có cường độ nén cao hơn so với mẫu đối chứng. Cường độ nén của các hỗn hợp M00, M05, M10, M15 và M20 lần lượt là $184,41 \pm 5,22$; $186,12 \pm 4,24$; $201,51 \pm 3,40$; $198,26 \pm 4,06$ và $185,67 \pm 4,92$ MPa. Khi bổ sung thêm NS vào trong UHPC đã làm tăng cường độ nén của bê tông, nguyên nhân là NS có thể cải thiện độ đặc chắc và thúc đẩy quá trình thủy hóa trong bê tông, điều này sẽ được thảo luận cụ thể trong Mục 3.3.

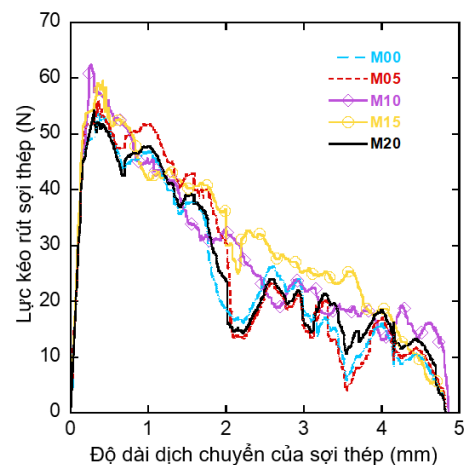


Hình 6. Cường độ nén của các bê tông.

Hơn nữa, trong số hàm lượng NS đã được sử dụng, hàm lượng 1,00 % NS đã tạo ra cường độ nén lớn nhất trong UHPC ($201,51 \pm 3,40$ MPa). Điều này có thể là do hàm lượng 1,00 % NS là hàm lượng tối ưu, khi thay thế XM trong thành phần cấp phối [20,21]. Tuy nhiên, khi hàm lượng NS tăng lên 2,00 %, cường độ nén của hỗn hợp có xu hướng giảm, điều này là do khi hàm lượng NS lớn dẫn đến các hạt NS dễ dàng vón tụ lại với nhau và tạo ra các vùng rỗng xốp trong bê tông [22].

3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng NS đến cường độ liên kết bề mặt giữa sợi thép và bê tông

Hình 7 trình bày đường ứng xử lực kéo trung bình và độ dịch chuyển của cốt sợi thép trong quá trình kéo nhỏ. Mỗi đường cong trong biểu đồ được lấy trong mỗi hỗn hợp là giá trị trung bình của ba mẫu thí nghiệm. Các hỗn hợp mẫu UHPC chứa NS có lực kéo lớn hơn so với mẫu đối chứng. Giá trị lực kéo lớn nhất tương ứng với các mẫu M05, M10, M15 và M20 lần lượt là 56,00; 62,44; 59,54 và 54,33 MPa, trong khi giá trị này của mẫu đối chứng M00 là 53,70 MPa (Bảng 3).



Hình 7. Biểu đồ biểu thị lực kéo và độ dịch chuyển của sợi thép.

Cường độ liên kết bề mặt của sợi thép được tính toán theo công thức (1) và (2). Trong đó, τ_{eq} là cường độ liên kết tương đương được tính toán từ công thức hiện trong quá trình kéo sợi và τ_{peak} được xác định dựa trên tải kéo tối đa [8].

$$\tau_{eq} = \frac{2P_E}{\pi d_f L_{em}}; \quad (1)$$

$$\tau_{peak} = \frac{P_{peak}}{\pi d_f L_{em}}; \quad (2)$$

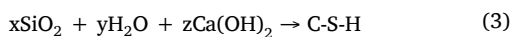
P_E là năng lượng kéo nhỏ sợi, P_{peak} là lực kéo nhỏ sợi lớn nhất, d_f là đường kính cốt sợi thép, và L_{em} là chiều dài cốt sợi thép nằm trong bê tông.

Bảng 3 tổng hợp các thông số cơ học của cốt sợi thép thu được từ thí nghiệm (Mục 2.2c). Các hỗn hợp mẫu có chứa hàm lượng NS trong hỗn hợp đều tạo ra ứng xử kéo nhỏ sợi lớn hơn so với mẫu đối chứng. Giá trị lực kéo nhỏ sợi lớn nhất tương ứng với các mẫu M05, M10, M15 và M20 lần lượt là 56,00; 62,44; 59,54, và 54,33N, trong khi giá trị này của mẫu đối chứng M00 là 53,70 N. Khi bổ sung hàm lượng NS vào trong UHPC, cường độ liên kết của các hỗn hợp đã được cải thiện, sự cải thiện này là do NS đã cải thiện sự đặc chắc tại vùng chuyển tiếp xung quanh bề mặt cốt sợi thép và UHPC.

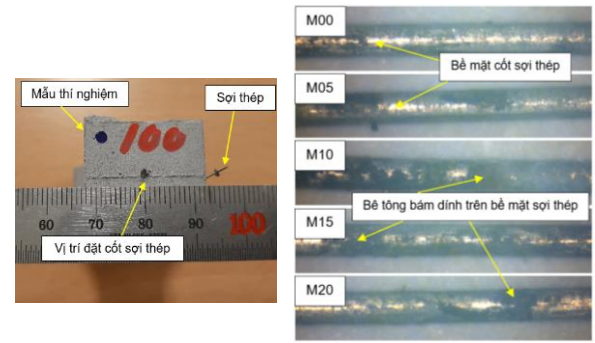
Bảng 3. Ứng xử cơ học của cốt sợi thép khi chịu kéo nhỏ.

Hỗn hợp	P_{Peak} (N)	P_E (Nmm)	τ_{peak} (MPa)	τ_{eq} (MPa)
M00	53,70	759,70	11,82	121,56
M05	56,00	792,24	12,33	127,84
M10	62,44	883,31	13,63	140,10
M15	59,54	842,25	13,11	136,75
M20	54,33	768,63	11,96	126,16

Hình 8 trình bày hình ảnh cốt sợi thép sau khi kết thúc thí nghiệm kéo nhỏ. Từ hình ảnh có thể thấy rằng, lượng bê tông bám vào bề mặt sợi thép trong các hỗn hợp có chứa NS lớn hơn so với mẫu đối chứng (Hình 8). Tác giả Wu và nnk [20] đã báo cáo rằng, khi bổ sung NS vào trong thành phần cấp phối của UHPC đã thúc đẩy quá trình thủy hóa tạo ra các gel C-S-H được thể hiện trong công thức (3):



Ngoài ra, giữa các hàm lượng NS đã được sử dụng (0,50 – 2,00%) trong nghiên cứu này, hàm lượng 1,00% NS tạo ra giá trị τ_{peak} (13,63 MPa) và τ_{eq} (140,10 MPa) lớn nhất trong UHPC (Bảng 3). Kết quả này có xu hướng tương tự như đối với kết quả nén đã trình bày trong Mục 3.2.



(a) Mẫu thí nghiệm sau khi bị kéo nhỏ

(b) Bề mặt sợi thép sau khi bị kéo nhỏ

Hình 8. Hình ảnh mẫu thí nghiệm và sợi thép sau thí nghiệm.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của hàm lượng nano-silica (NS) từ 0,50 đến 2,00 %, đến một số tính chất cơ học, đặc biệt khả năng kéo nhỏ sợi thép trong UHPC đã được nghiên cứu dựa trên kết quả thực nghiệm. Một số kết luận được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

- Tính công tác của UHPC giảm khi bổ sung thêm NS trong thành phần cấp phối. Độ chảy của các hỗn hợp chứa các hàm lượng NS đều thấp hơn 235 mm, trong khi độ chảy của mẫu đối chứng là 245 mm. Ngoài ra, khi hàm lượng NS tăng từ 0,50 đến 2,00 % thì độ chảy của UHPC giảm từ 235 ± 20 xuống 175 ± 8 mm.
- Khi sử dụng hàm lượng NS tăng từ 0,50 đến 1,00 %, cường độ nén của UHPC có xu hướng tăng và đạt giá trị lớn nhất ($201,51 \pm 3,40$ MPa) với hàm lượng 1,0 % NS được sử dụng. Tuy nhiên, khi hàm lượng NS tăng từ 1,00 đến 2,00 % cường độ nén của UHPC có xu hướng giảm.
- Những hỗn hợp mẫu có chứa hàm lượng NS trong hỗn hợp đều tạo ra ứng xử kéo nhỏ sợi lớn hơn so với mẫu đối chứng. Khi bổ sung hàm lượng NS vào trong UHPC, cường độ liên kết của các hỗn hợp đã được cải thiện, sự cải thiện này là do NS đã cải thiện sự đặc chắc tại vùng chuyển tiếp xung quanh bề mặt cốt sợi thép và UHPC. Trong số các hàm lượng NS đã được sử dụng (0,50 – 2,00 %), UHPC với hàm lượng NS 1,00 % đã tạo ra cường độ liên kết lớn nhất với các giá trị τ_{peak} và τ_{eq} lần lượt là 13,63 MPa và 140,10 MPa.

5. Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Mô-Địa Chất thông qua đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Cơ sở mã số: T24-34. Nhóm nghiên cứu xin trân trọng cảm ơn.

Tài liệu tham khảo

- [1]. C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 741–751.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
- [2]. N.Q. Phú, Nghiên cứu xác định hàm lượng cốt sợi hợp lý để chế tạo bê tông có khả năng chịu nén và chịu uốn tốt, bền trong môi trường biển, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi & Môi trường*, (2018) 23–29.
- [3]. Lê Quỳnh Nga, Nghiên cứu các tính chất cơ học của bê tông cốt sợi polypropylen forta, *Tạp chí Giao thông vận tải*, (2018) 83–86.
- [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]. J. Camilletti, A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete, *Mater. Struct. Constr.* 46 (2013) 881–898.
<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9940-0>.
- [6]. E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, L. Durães, The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete, *Mater. Des.* 59 (2014) 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>.
- [7]. K. Wille, K.J. Loh, Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes, *Transp. Res. Rec.* 2142 (2010) 119–126.
<https://doi.org/10.3141/2142-18>.
- [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]. N.Q. Phú, Sử dụng cốt sợi thép và phụ gia khoáng siêu mịn để chế tạo bê tông chất lượng siêu cao, *Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường*, (2020) 29–35.
- [10]. V.V.T. Ân, B.D. Đại, Nghiên cứu ảnh hưởng của silica fume kết nén có độ mịn khác nhau và tro trấu đến tính chất của bê tông chất lượng cao, *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, (2019) 13–20.
- [11]. V.V.T. Ân, L.Đ. Hải, Ảnh hưởng của nano carbon và tro bay đến cơ ngót và khả năng kháng nứt của bê tông chất lượng siêu cao, *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng* (2019) 32–40.
- [12]. N.C. Thắng, N.V. Tuấn, P.H. Hanh, Ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông chất lượng siêu cao, *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, (2018) 86–91.
- [13]. N.V. Thức, Nghiên cứu tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao sử dụng nano Silica ứng dụng trong công trình cầu, (n.d.) *Luận án tiến sĩ* (2021), 183.
- [14]. T.B. Việt, N.D. Hiếu, L.T. Hùng, L.H. Sơn, Đ.H. Duy, Ảnh hưởng của Nano Silica đến tính chất của bê tông siêu tính năng UHPC, *Tạp chí Xây dựng*, (2022) 98–102.
- [15]. 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>.
- [16]. ASTM International, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, *ASTM C1437* (1993) 15–16.
- [17]. ASTM International, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, *ASTM C109/C109M 04* (1993) 1–7.
- [18]. 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>.
- [19]. H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*, 2nd ed., Thomas Telford, London, 1997.
- [20]. Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat, S. Wan, Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC), *Cem. Concr. Compos.* 70 (2016) 24–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.003>.
- [21]. Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat, Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO₃ particles, *Cem. Concr. Compos.* 86 (2018) 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.014>.
- [22]. Z. Wu, K.H. Khayat, C. Shi, B.F. Tutikian, Q. Chen, Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃, *Cem. Concr. Compos.* 119 (2021) 103992.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103992>.