

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^{1*}

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TỪ KHOÁ

Sợi thép
Bê tông cường độ siêu cao
Ứng xử kéo

TÓM TẮT

Bê tông cường độ siêu cao (UHPC) là vật liệu có tính năng cơ học vượt trội, đặc biệt là cường độ nén và độ bền lâu, tuy nhiên khả năng chống nứt sau khi vượt qua giới hạn đàn hồi vẫn còn hạn chế. Việc bổ sung sợi thép là một giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao khả năng chịu kéo và cải thiện tính dẻo sau nứt của UHPC. Nghiên cứu này trình bày ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi thép đến đặc tính chịu kéo của UHPC thông qua thí nghiệm với ba loại sợi thép khác nhau (tròn trơn, xoắn và có móc hai đầu), ứng với ba mức hàm lượng theo thể tích (0,5%, 1,0% và 1,5%). Kết quả cho thấy, cường độ chịu kéo tại thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên của UHPC không thay đổi đáng kể giữa các tổ hợp. Tuy nhiên, cường độ kéo sau nứt, biến dạng dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng đều tăng đáng kể khi hàm lượng sợi thép tăng. Đặc biệt, sợi thép xoắn và sợi thép có móc hai đầu thể hiện hiệu quả vượt trội so với sợi thép tròn trơn nhờ khả năng tạo liên kết cơ học tốt hơn với vữa bê tông. Các kết quả cho thấy hình dạng và tỷ lệ sợi đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao hiệu suất cơ học tổng thể của UHPC dưới tác động kéo.

KEYWORDS

Steel fiber
Ultra high performance concrete
Tensile behavior

ABSTRACT

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a construction material characterized by exceptional mechanical properties, particularly high compressive strength and long-term durability. However, its crack resistance beyond the elastic limit remains limited. The incorporation of steel fibers has emerged as an effective approach to enhance the tensile performance and post-cracking ductility of UHPC. This study investigates the influence of fiber types and volume contents on the tensile behaviors of UHPC through experiments using three types of steel fibers (smooth, twisted, and hooked fibers) at volume fractions of 0.5%, 1.0%, and 1.5%. Results indicate that the initial tensile strength at first cracking is not significantly affected by fiber type or content. However, as the fiber content increases, there is a significant enhancement in post-cracking strength, tensile strain capacity, and energy absorption. Notably, twisted and hooked-end fibers outperform smooth fibers due to their superior mechanical interlocking with the cementitious matrix. These findings highlight the critical role of fiber geometry and dosage in optimizing the tensile performance and overall mechanical behavior of UHPC under tensile loading.

1. Đặt vấn đề

Bê tông cường độ siêu cao (UHPC) là một trong những loại vật liệu tiên tiến được phát triển nhằm đáp ứng các yêu cầu khắt khe trong xây dựng hiện đại, đặc biệt ở những công trình đòi hỏi độ bền cơ học và tuổi thọ cao. Với cường độ nén vượt trội (thường trên 150 MPa), có độ đặc chắc cao và khả năng chống thấm tốt, UHPC đang dần thay thế các loại bê tông truyền thống trong các kết cấu cầu nhịp lớn, công trình quốc phòng và các kiến trúc hạ tầng phức tạp, v.v. Tuy nhiên, cũng giống như các loại bê tông hiệu suất cao khác, UHPC có xu hướng giòn và khả năng chịu kéo hạn chế, dễ hình thành các vết nứt khi chịu tác động uốn, kéo hoặc tải trọng lặp, từ đó ảnh hưởng đến hiệu năng làm việc lâu dài của công trình [1, 2].

Để khắc phục những hạn chế về độ dẻo và khả năng chịu kéo,

việc đưa cốt sợi thép phân tán vào trong hỗn hợp UHPC là một trong những giải pháp hữu hiệu nhằm cải thiện độ bền, nâng cao khả năng kiểm soát vết nứt và tăng cường cơ chế chịu tải trọng sau nứt của UHPC [3]. Tuy nhiên, hiệu quả gia cường phụ thuộc đáng kể vào loại sợi (loại, hình dạng, cấu trúc bề mặt, v.v.) và hàm lượng sợi trong hỗn hợp UHPC. Một số nghiên cứu cho thấy rằng sợi có hình dạng móc câu hoặc xoắn có khả năng neo giữ tốt hơn so với sợi tròn trơn, từ đó làm tăng khả năng truyền ứng suất kéo trong bê tông [3, 4]. Mặt khác, nếu hàm lượng sợi quá thấp thì không đủ để hình thành mạng lưới kiểm soát nứt hiệu quả, trong khi hàm lượng sợi vượt quá mức tối ưu có thể làm giảm tính công tác, tạo lỗ rỗng và giảm tính đồng nhất của hỗn hợp [5].

Tác giả Ngô Trí Thường và Hoàng Văn Hải [6] đã nghiên cứu ảnh hưởng của cốt sợi thép tròn trơn ($d = 0,2 \text{ mm}$, $l = 19 \text{ mm}$) với hàm lượng 0,5 % và 1,5 % theo thể tích, đến tính năng cơ học của

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

Nhận ngày 18/07/2025, sửa xong ngày 21/09/2025, chấp nhận đăng ngày 22/09/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1058>

UHPC. Kết quả cho thấy sự gia tăng hàm lượng sợi giúp cải thiện đáng kể cường độ uốn, đồng thời khả năng kháng uốn của vật liệu cũng được nâng cao khi tốc độ gia tải tăng. Tác giả Trần Bá Việt và nnk [7] báo cáo rằng bản bê tông cốt sợi thép thể hiện khả năng chịu lực vượt trội, đạt khoảng ba lần so với bản bê tông cốt thép thường. Mặc dù độ võng quan sát được vượt quá giới hạn của tiêu chuẩn bê tông thông dụng, sự hình thành và phát triển vết nứt của bê tông cốt sợi vẫn đảm bảo phù hợp với các quy định trong tiêu chuẩn Việt Nam. Theo tác giả Trần Trung Hiếu và nnk [8], kết quả thử nghiệm cho thấy việc sử dụng UHPC tại vùng nút khung giúp tăng khả năng chịu lực lên 15,8 %-19,7 %, đồng thời chuyển vị tăng khoảng 25 % và biến dạng cắt tại nút được cải thiện rõ rệt trước khi xảy ra phá hoại.

Mặc dù đã có một số nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của sợi thép đến tính chất cơ học của UHPC, tuy nhiên phần lớn các nghiên cứu trước đây vẫn tập trung vào cường độ nén và khả năng chịu uốn [4, 9], trong khi đặc tính chịu kéo trực tiếp, kéo dọc trực là yếu tố quan trọng phản ánh tính năng kiểm soát nứt và khả năng làm việc của vật liệu trong điều kiện chịu lực kéo vẫn chưa được phân tích một cách toàn diện. Ngoài ra, sự khác biệt về phương pháp thử nghiệm, thành phần cấp phối và đặc tính sợi giữa các nghiên cứu cũng khiến cho việc tổng hợp và đối sánh kết quả trở nên khó khăn, đặc biệt khi đánh giá tác động đồng thời của cả yếu tố loại sợi và hàm lượng sợi.

Vì vậy, nghiên cứu này nhằm đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi thép đến cường độ chịu kéo trực tiếp của vật liệu UHPC. Ba dạng hình học sợi thép điển hình được lựa chọn gồm:

sợi thép tròn trơn, sợi thép có móc và sợi thép xoắn, được trộn với các hàm lượng khác nhau trong thành phần cấp phối của UHPC. Điểm mới của nghiên cứu nằm ở cách tiếp cận toàn diện khi kết hợp nhiều yếu tố hình học - hàm lượng sợi, qua đó cung cấp các bằng chứng thực nghiệm rõ ràng về cơ chế gia cường của từng loại sợi đối với UHPC. Trong đó, ba mục tiêu chính được xác định: (1) phân tích tác động của hình dạng và tỷ lệ sợi đến cường độ chịu kéo; (2) xem xét ảnh hưởng của sợi thép đến khả năng biến dạng của UHPC sau khi nứt; và (3) xác định vai trò của sợi trong việc nâng cao khả năng hấp thụ năng lượng của UHPC. Kết quả nghiên cứu dự kiến sẽ cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế UHPC có khả năng kháng nứt cao và hiệu năng cơ học tối ưu, phù hợp với yêu cầu phát triển bền vững trong xây dựng hiện đại.

2. Vật liệu sử dụng và quá trình thí nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

Hình 1 trình bày hình ảnh một số loại vật liệu đặc trưng được sử dụng trong thành phần cấp phối của UHPC, bao gồm xi măng (XM), cát, silica fume, silica powder, phụ gia siêu dẻo và nước. Trong đó, khối lượng XM được chọn làm cơ sở (1,00) để quy đổi tỷ lệ các vật liệu còn lại như cát (1,10), silica fume (0,25), silica powder (0,30). Phụ gia siêu dẻo được sử dụng với tỷ lệ 0,08 nhằm tăng cường tính linh động mà không cần gia tăng hàm lượng nước. Tỷ lệ nước trên xi măng (N/XM) được kiểm soát ở mức 0,20 nhằm đảm bảo tính đồng nhất và hiệu quả thi công của hỗn hợp.



a) Xi măng



b) Cát



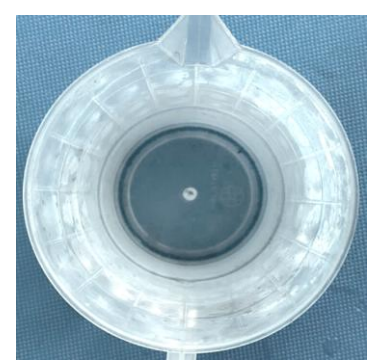
c) Silica fume



d) Silica powder



e) Phụ gia siêu dẻo

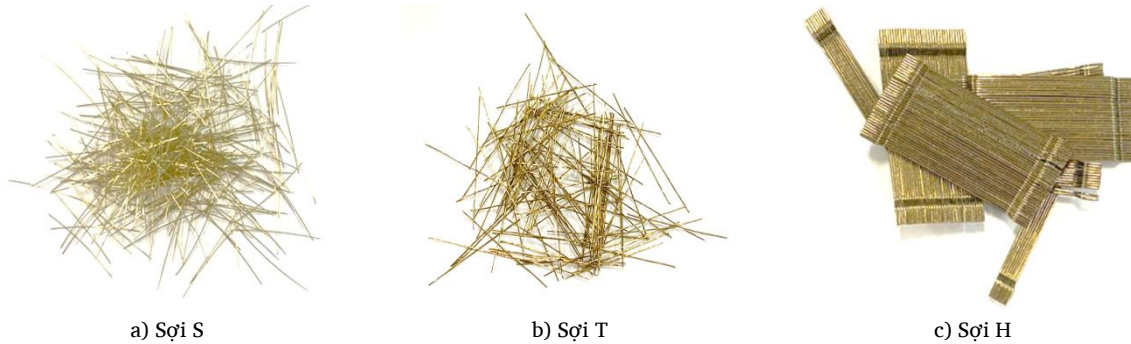


f) Nước

Hình 1. Hình ảnh một số vật liệu trong thành phần cấp phối của UHPC.

Bảng 1. Tỷ lệ thành phần cấp phối của các tổ hợp.

XM	Cát	Silica fume	Silica powder	Phụ gia siêu dẻo	N/XM	Độ chảy (cm)	Cường độ nén (MPa)
1,00	1,10	0,25	0,30	0,08	0,20	$25 \pm 0,5$	$183,7 \pm 2,8$



Hình 2. Hình dạng sợi thép sử dụng trong nghiên cứu.

Bảng 2. Các đặc tính cơ học của các loại sợi gia cường [10].

Loại sợi thép	Đường kính (mm)	Chiều dài (mm)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Cường độ kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)
Sợi S	0.3	30	7.90	2580	200
Sợi T	0.3 [*]	30	7.90	2428	200
Sợi H	0.375	30	7.90	2311	200

Hình 2 trình bày hình dạng một số loại sợi sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: sợi thép tròn trơn (S), sợi thép xoắn (T), và sợi thép có móc ở hai đầu (H). Bên cạnh đó, các đặc trưng cơ lý của ba loại sợi thép S, T và H, bao gồm đường kính, chiều dài, cường độ kéo đứt và mô đun đàn hồi, v.v., được tổng hợp trong Bảng 2. Mỗi loại sợi có đặc trưng hình học và cơ học riêng, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng phân tán, tương tác với nền bê tông và hiệu quả gia cường trong UHPC. Hơn nữa, hàm lượng sợi được sử dụng trong nghiên cứu này là 0,5 %, 1,0 % và 1,5 % theo thể tích, áp dụng cho từng loại sợi S, T và H, tương ứng tạo thành các tổ hợp mẫu S05, S10, S15; T05, T10, T15; và H05, H10, H15.

2.2. Quá trình thí nghiệm

Quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm được thực hiện theo các bước trong tài liệu [11]: Silica fume và cát được trộn khô trong 5 phút; sau đó, silica powder và xi măng được bổ sung và tiếp tục trộn khô thêm 5 phút. Tiếp theo, nước được thêm vào và hỗn hợp được trộn trong 5 phút, đồng thời phụ gia siêu dẻo được bổ sung dần và tiếp tục khuấy trộn. Khi hỗn hợp đạt độ lưu động và độ nhớt thích hợp để đảm bảo sự phân bố đồng đều của sợi, các sợi thép được đưa vào hỗn hợp một cách cẩn thận bằng tay và trộn thêm trong 2 phút. Sau đó, các hỗn hợp này được đổ vào khuôn (Hình 3a) và được bảo dưỡng ở nhiệt độ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ trong 48 giờ trước khi tháo khuôn. Tiếp theo, các mẫu được ngâm trong bể nước nóng ở nhiệt độ $90 \pm 2^\circ\text{C}$ trong vòng ba ngày rồi lấy ra để ở nhiệt độ $20 \pm 2^\circ\text{C}$, sau 28 ngày các mẫu được đem đi thí nghiệm kéo, với hình ảnh mẫu thí nghiệm được minh họa trong Hình 3b. Để tránh

sự phá hủy xảy ra ngoài chiều dài đo biến dạng (gauge length) của mẫu trong quá trình thí nghiệm kéo, hai lớp lưới thép đã được gia cường tại hai đầu của mẫu thí nghiệm (Hình 3a) [12].



a) Khuôn và lưới thép

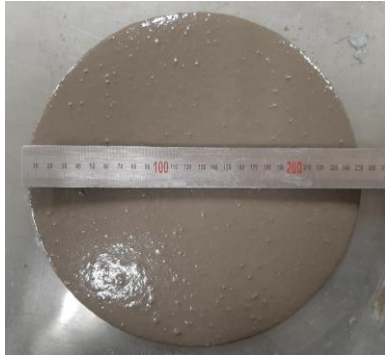


b) Mẫu thí nghiệm

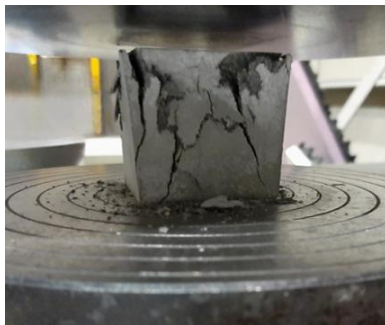
Hình 3. Hình ảnh khuôn và mẫu thí nghiệm kéo.

Tính công tác của hỗn hợp UHPC được đánh giá theo tiêu chuẩn ASTM C230/C230M-21. Hình 4 trình bày thí nghiệm kiểm tra tính công tác của hỗn hợp UHPC. Kết quả cho thấy độ chảy của hỗn hợp đạt giá trị $25 \pm 0,5$ cm (Bảng 1). Ngoài ra, thí nghiệm nén được thực hiện trên mẫu lập phương có kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm theo quy định của ASTM C109/C109M (Hình 5), giá trị cường độ nén của mẫu nền UHPC đạt $183,7 \pm 2,8$ MPa (Bảng 1). Bên cạnh đó, thí nghiệm kéo được tiến hành đối với các mẫu tuân thủ theo tiêu chuẩn ASTM C1856/C1856M

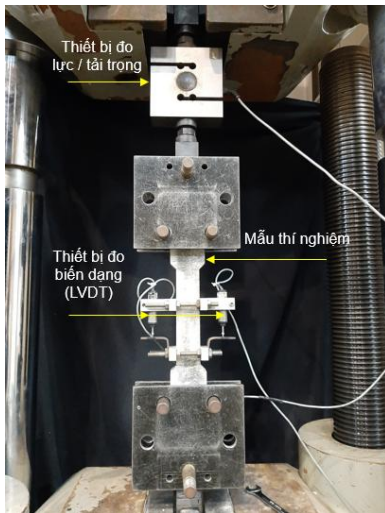
(Hình 6). Tải trọng trong quá trình thí nghiệm nén và kéo mẫu được duy trì với tốc độ 1 mm/phút [13].



Hình 4. Kiểm tra tính công tác của UHPC.



Hình 5. Thí nghiệm nén mẫu.

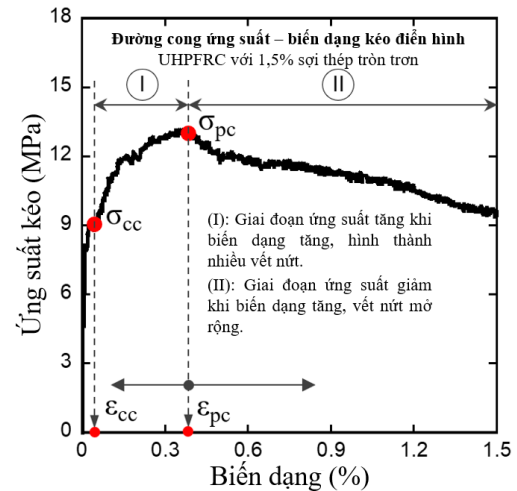


Hình 6. Thí nghiệm kéo tĩnh [13].

3. Kết quả và thảo luận

Các kết quả thu được từ quá trình kéo mẫu thí nghiệm được tính toán, bao gồm [12, 13]: cường độ (σ_{cc}) là giá trị ứng suất kéo tại thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên; cường độ (σ_{pc}) là ứng suất kéo cực đại trên đường cong ứng suất-biến dạng; ϵ_{pc} biểu thị biến dạng tương ứng với cường độ σ_{pc} (Hình 7). Năng lượng mà vật liệu có thể hấp thụ trước

khi đạt đến trạng thái chịu ứng suất kéo lớn nhất (T_p) được xác định là diện tích dưới đường cong ứng suất-biến dạng kéo cho đến điểm ứng suất cao nhất.



Hình 7. Đường cong ứng suất - biến dạng kéo đặc trưng của UHPC sử dụng sợi thép tròn trơn [13].

Bảng 3 trình bày các thông số cơ bản đặc trưng cho ứng xử kéo của các tổ hợp được khảo sát trong nghiên cứu, trong khi đường cong ứng suất-biến dạng tương ứng của các tổ hợp này được thể hiện trong Hình 8. Kết quả cho thấy hình dạng và hàm lượng sợi thép có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu kéo của UHPC. Việc gia tăng hàm lượng sợi thép từ 0,5 % lên 1,5 % góp phần nâng cao các đặc tính cơ học của UHPC, đặc biệt là cường độ chịu kéo σ_{pc} , biến dạng ϵ_{pc} và khả năng hấp thụ năng lượng T_p .

3.1. Ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi thép đến cường độ chịu kéo của UHPC

Hình 9 trình bày kết quả thực nghiệm về cường độ chịu kéo của các tổ hợp UHPC khi sử dụng ba loại sợi thép khác nhau (S, T và H), với các hàm lượng sợi được thay đổi theo thể tích lần lượt là 0,5 %, 1,0 % và 1,5 %. Kết quả cho thấy sự khác biệt về giá trị cường độ chịu kéo σ_{cc} giữa các tổ hợp là không đáng kể, với các giá trị dao động trong khoảng từ $7,64 \pm 0,86$ MPa đến $7,95 \pm 0,92$ MPa. Giá trị cường độ chịu kéo σ_{cc} có xu hướng tăng khi tăng hàm lượng sợi thép tăng, tuy nhiên mức tăng này không rõ ràng và chưa phản ánh được ảnh hưởng rõ nét của hàm lượng sợi đến khả năng chịu kéo của các tổ hợp UHPC. Điều này cho thấy rằng hàm lượng và hình dạng của sợi thép không tác động đáng kể đến khả năng kháng nứt ban đầu của vật liệu UHPC. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Yoo và cộng sự (2013), trong đó chỉ ra rằng ứng suất gây ra vết nứt đầu tiên chủ yếu phụ thuộc vào đặc tính của thành phần cấp phối của các tổ hợp, hơn là sự phân bố hay đặc điểm hình học của sợi thép [9].

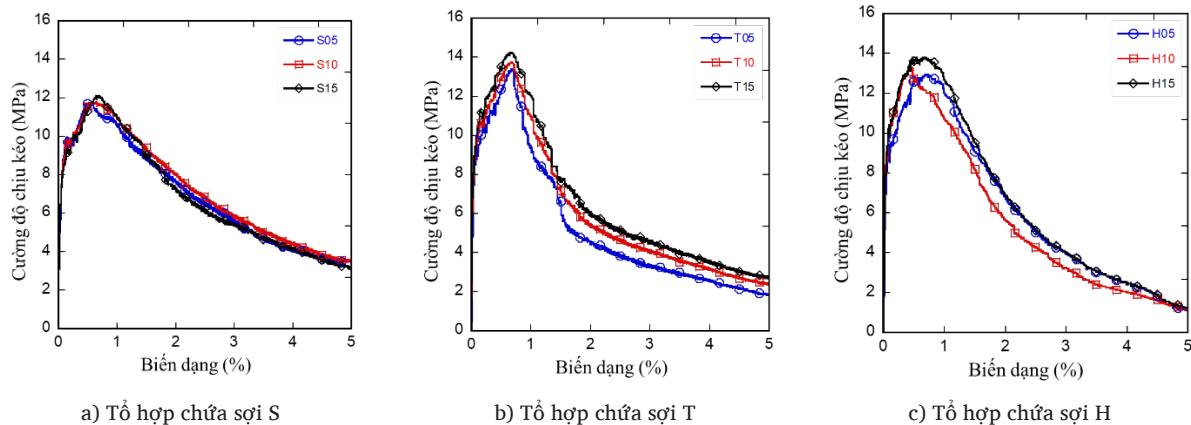
Tuy nhiên, giá trị cường độ sau nứt (σ_{pc}) cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các mức hàm lượng sợi. Cụ thể, đối với cả ba loại sợi thép,

σ_{pc} có xu hướng tăng đáng kể khi hàm lượng sợi tăng từ 0,5 % lên 1,5 % theo thể tích, điều này cho thấy vai trò quan trọng của sợi trong việc cải thiện khả năng chịu kéo sau nứt của UHPC. Trong đó, tổ hợp sử dụng sợi xoắn (T) cho giá trị σ_{pc} cao nhất, đạt tối đa $14,22 \pm 1,42$ MPa với hàm lượng 1,5 %. Tiếp theo là tổ hợp sử dụng sợi có móc (H), với giá trị σ_{pc} đạt $13,80 \pm 1,44$ MPa ở hàm lượng 1,5 %. Tổ hợp sử dụng sợi tròn trơn (S) cho kết quả thấp nhất, dao động từ $11,73 \pm 1,33$ MPa

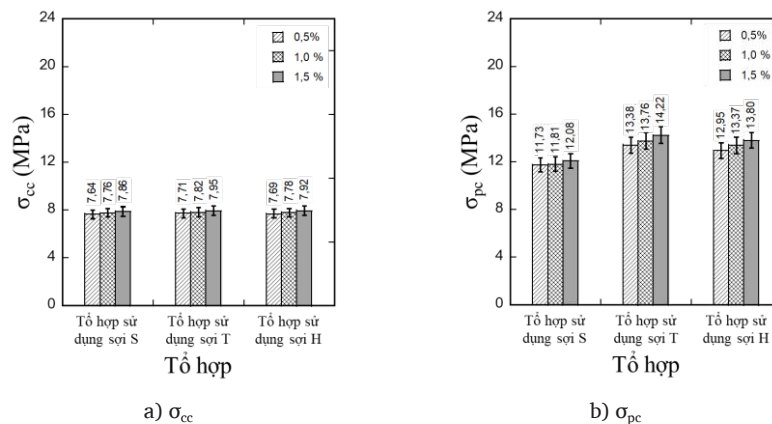
đến $12,08 \pm 1,27$ MPa (Bảng 3). Điều này chứng tỏ rằng hình dạng sợi có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng chịu kéo cực đại của UHPC, đặc biệt là những loại sợi có khả năng liên kết cơ học tốt như sợi xoắn và sợi có móc ở hai đầu. Các kết quả này phù hợp với nhận định của Wu và cộng sự (2016), rằng sợi có cấu trúc hình học cải tiến giúp tăng cường độ liên kết tại vùng tiếp xúc giữa sợi và bê tông, từ đó nâng cao khả năng truyền lực và cải thiện cường độ chịu kéo của bê tông [4].

Bảng 3. Một số đặc trưng cơ học của các tổ hợp mẫu được đánh giá thông qua thí nghiệm kéo.

Tổ hợp	σ_{cc} (MPa)	σ_{pc} (MPa)	ϵ_{pc} (%)	T_p (kJ/m ³)
UHPC	$7,58 \pm 0,72$	-	-	-
S05	$7,64 \pm 0,86$	$11,73 \pm 1,33$	$0,53 \pm 0,17$	$51,97 \pm 2,84$
S10	$7,76 \pm 0,83$	$11,81 \pm 1,19$	$0,60 \pm 0,14$	$60,41 \pm 3,68$
S15	$7,86 \pm 0,82$	$12,08 \pm 1,27$	$0,69 \pm 0,19$	$68,86 \pm 3,05$
T05	$7,71 \pm 0,84$	$13,38 \pm 1,36$	$0,68 \pm 0,18$	$78,76 \pm 3,10$
T10	$7,82 \pm 0,85$	$13,76 \pm 1,48$	$0,69 \pm 0,15$	$80,06 \pm 3,92$
T15	$7,95 \pm 0,92$	$14,22 \pm 1,42$	$0,70 \pm 0,20$	$84,80 \pm 3,25$
H05	$7,69 \pm 0,88$	$12,95 \pm 1,23$	$0,72 \pm 0,17$	$78,41 \pm 2,94$
H10	$7,78 \pm 0,81$	$13,37 \pm 1,32$	$0,60 \pm 0,14$	$78,58 \pm 3,82$
H15	$7,92 \pm 0,88$	$13,80 \pm 1,44$	$0,69 \pm 0,20$	$83,18 \pm 3,16$

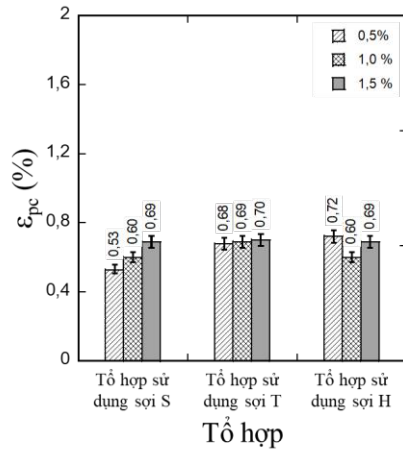


Hình 8. Đường cong ứng suất-biến dạng của các tổ hợp.



Hình 9. Cường độ chịu kéo của các tổ hợp tương ứng với từng loại sợi và hàm lượng sợi trong khoảng từ 0,5 % đến 1,5 %.

3.2. Tác động của sợi thép đến đặc tính biến dạng khi chịu kéo của UHPC



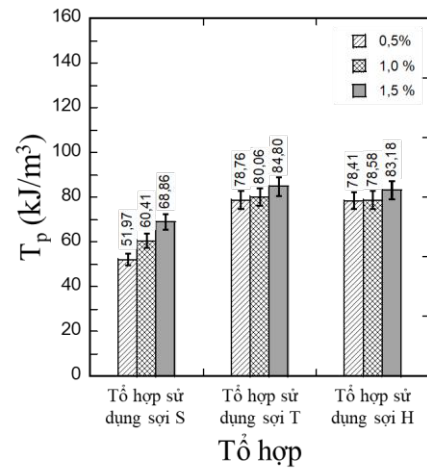
Hình 10. Biến dạng kéo của các tổ hợp theo loại và hàm lượng sợi.

Giá trị biến dạng kéo ϵ_{pc} của các tổ hợp với ba loại sợi thép (S, T, và H) tại các hàm lượng 0,5 %, 1,0 % và 1,5 % được thể hiện trong Hình 10. Biến dạng ϵ_{pc} phản ánh khả năng biến dạng dẻo của bê tông sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên, từ đó cho thấy hiệu quả của sợi trong việc phân tán và kiểm soát vết nứt khi chịu kéo. Giá trị ϵ_{pc} có xu hướng tăng lên khi tăng hàm lượng sợi từ 0,5 % lên 1,5 % đối với sợi S và T. Cụ thể, ϵ_{pc} tăng từ 0,53 % (S05) lên 0,69 % (S15); từ 0,68 % (T05) lên 0,70 % (T15). Tuy nhiên, giá trị ϵ_{pc} của tổ hợp sử dụng sợi H có xu hướng không rõ ràng, ϵ_{pc} giảm từ 0,72 % (H05) xuống 0,60 % (H10), sau đó lại tăng lên tới 0,69 % (H15). Trong ba loại sợi được khảo sát, các tổ hợp sử dụng sợi T và H có giá trị ϵ_{pc} cao hơn so với tổ hợp sử dụng sợi S. Điều này là do sợi có móc hai đầu tạo ra liên kết cơ học mạnh hơn với nền bê tông thông qua hiệu ứng "neo móc", từ đó giúp bê tông duy trì được khả năng chịu kéo trong vùng biến dạng dẻo. Tương tự, sợi xoắn T cũng thể hiện hiệu quả cao do khả năng chống trượt tốt nhờ hình dạng bề mặt xoắn. Ngược lại, sợi tròn trơn S cho giá trị ϵ_{pc} thấp nhất, phản ánh khả năng tương tác yếu hơn giữa sợi bề mặt sợi và bê tông [14].

3.3. Vai trò của sợi thép trong việc cải thiện năng lượng hấp thụ của UHPC

Hình 11 trình bày giá trị năng lượng hấp thụ T_p của các tổ hợp khi sử dụng các loại sợi khác nhau tương ứng với các hàm lượng lần lượt là 0,5 %, 1,0 % và 1,5 %. Với các loại sợi được sử dụng trong nghiên cứu này, giá trị T_p cho thấy xu hướng tăng rõ rệt khi tỷ lệ hàm lượng sợi tăng từ 0,5 % lên 1,5 %. Cụ thể, các giá trị T_p của tổ hợp sử dụng sợi tròn trơn tăng từ $51,97 \pm 2,84 \text{ kJ/m}^3$ (S05) lên $68,86 \pm 3,05 \text{ kJ/m}^3$ (S15); tổ hợp sử dụng sợi xoắn tăng từ $78,76 \pm 3,10 \text{ kJ/m}^3$ (T05) lên $84,80 \pm 3,25 \text{ kJ/m}^3$ (T15); và tổ hợp sử dụng sợi có móc tăng từ $78,41 \pm 2,94 \text{ kJ/m}^3$ (H05) lên $83,18 \pm 3,16 \text{ kJ/m}^3$ (H15). Tại cùng một mức hàm lượng, sợi có móc hai đầu H và sợi xoắn T cho kết quả T_p cao hơn đáng kể so với

sợi tròn trơn S. Ví dụ, với hàm lượng 1,0 %, T_p của tổ hợp H10 và T10 đạt lần lượt là $78,58 \pm 3,82 \text{ kJ/m}^3$ và $80,06 \pm 3,92 \text{ kJ/m}^3$, trong khi giá trị T_p của tổ hợp S10 là $60,41 \pm 3,68 \text{ kJ/m}^3$. Kết quả này cho thấy hình dạng sợi đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng tiêu tán năng lượng của UHPC. Sợi móc hai đầu và sợi xoắn tạo ra cơ chế liên kết cơ học hiệu quả hơn, từ đó cản trở sự phát triển và lan truyền vết nứt tốt hơn so với sợi tròn trơn [14].



Hình 11. Năng lượng hấp thụ của các tổ hợp dưới tác dụng của tải trọng kéo.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá thực nghiệm về ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi thép đến khả năng chịu kéo của bê tông cường độ siêu cao UHPC, tập trung vào ba khía cạnh chính: cường độ chịu kéo, khả năng biến dạng dẻo sau nứt và khả năng hấp thụ năng lượng.

- Kết quả cho thấy, mặc dù loại và hàm lượng sợi không ảnh hưởng rõ rệt đến cường độ chịu kéo ban đầu σ_{cc} , nhưng lại có tác động đáng kể đến cường độ chịu kéo sau nứt σ_{pc} , đặc tính biến dạng ϵ_{pc} và năng lượng tiêu tán T_p của UHPC. Khi tăng hàm lượng sợi thép từ 0,5 % đến 1,5 % theo thể tích, các giá trị σ_{pc} và T_p đều tăng lên rõ rệt, cho thấy vai trò thiết yếu của sợi trong việc cải thiện khả năng chịu kéo sau nứt và tăng cường độ dẻo của vật liệu.

- Đặc biệt, sợi thép có hình dạng cải tiến như sợi xoắn và sợi có móc hai đầu thể hiện hiệu quả vượt trội so với sợi tròn trơn thông thường. Các tổ hợp chứa sợi T và H không chỉ đạt giá trị σ_{pc} và ϵ_{pc} cao hơn, mà còn cho khả năng tiêu tán năng lượng lớn hơn đáng kể, nhờ cơ chế liên kết cơ học hiệu quả tại vùng tiếp xúc giữa sợi và nền bê tông. Điều này phù hợp với các cơ chế truyền lực đã được chỉ ra trong các nghiên cứu trước đây.

- Từ các kết quả thu được, có thể khẳng định rằng hình dạng và hàm lượng sợi thép là những yếu tố then chốt trong việc tối ưu hóa đặc tính chịu kéo và năng lượng tiêu tán của UHPC. Các kết quả này góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế vật liệu UHPC ứng

dụng trong các kết cấu chịu tải trọng động và yêu cầu khả năng kháng nứt cao.

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]. E. Trends, F.O.R. Application, O.F.U. Performance, M. Bridge, Phân tích và đánh giá xu hướng ứng dụng vật liệu bê tông chất lượng siêu cao trong xây dựng cầu quy mô nhỏ và trung bình ở việt nam, 13 (2019) 1–11.
- [3]. 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>.
- [4]. 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>.
- [5]. K. Wille, A.E. Naaman, G.J. Parra-Montesinos, Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way, *ACI Mater. J.* 108 (2011) 46–54. <https://doi.org/10.14359/51664215>.
- [6]. 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.
- [7]. N.T.H. Trần Bá Việt, Lê Minh Long, Phân tích ứng xử của bản bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao, *Tạp Chí KHCN Xây Dựng*, Số 1 (2015) 10–17.
- [8]. T.T. Hiếu, L.A. Tuấn, V.Q. Anh, Đ.V. Hiệp, Nghiên cứu thực nghiệm nút khung biên sử dụng bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao, (2019).
- [9]. D.Y. Yoo, J.H. Lee, Y.S. Yoon, Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites, *Compos. Struct.* 106 (2013) 742–753. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.033>.
- [10]. N.T. Tran, D.J. Kim, Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads, *Cem. Concr. Compos.* 78 (2017) 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.008>.
- [11]. 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>.
- [12]. T.K. Tran, D.J. Kim, Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates, *Cem. Concr. Res.* 50 (2013) 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.018>.
- [13]. V.P. Dang, D.J. Kim, Effects of nanoparticles on the tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates, *J. Build. Eng.* 63 (2023) 105513. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105513>.
- [14]. 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>.