

# Năng lượng phá hủy và đặc trưng mô hình phát triển nứt của bê tông tính năng cao dưới tải trọng kéo trực tiếp

Fracture energy and parameter of crack propagation model of high-performance fiber-reinforced concrete under direct tension

NGUYỄN DUY LIÊM<sup>1</sup>, NGUYỄN HUỖNH TẤN TÀI<sup>1</sup>, NGUYỄN VĂN THUẬN<sup>2</sup>, TRẦN NGỌC THANH<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP.HCM

<sup>2</sup>GV Khoa Kỹ thuật giao thông, Trường Đại học Nha Trang

<sup>3</sup>GV Viện Xây dựng, Trường Đại học GTVT TP.HCM

Email: liemnd@hcmute.edu.vn, tainht@hcmute.edu.vn, \*ngocthanh.tran@ut.edu.vn

## TÓM TẮT

Năng lượng phá hủy cùng thông số đặc trưng mô hình phát triển nứt của bê tông tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete - HPFRC) được xác định trong bài báo này thông qua kết quả thí nghiệm kéo trực tiếp. Ba loại cốt sợi thép khác nhau về loại sợi nhưng cùng hàm lượng 1.5% thể tích được dùng gia cường HPFRC như sau: sợi ngắn phẳng (N), sợi dài có móc hai đầu (D), sợi hỗn hợp gồm 1.0% sợi dài có móc hai đầu + 0.5% sợi ngắn phẳng (H). Sợi thép dài có móc hai đầu và sợi thép ngắn phẳng có tỉ lệ hình dạng chiều dài/đường kính lần lượt là 35/0.5 mm và 13/0.2 mm. Kết quả nghiên cứu cho thấy năng lượng phá hủy dưới tải kéo trực tiếp của HPFRC chứa hỗn hợp sợi cao nhất, cả giai đoạn trước đỉnh và sau đỉnh đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng, dù tổng hàm lượng cốt sợi gia cường vẫn ở mức 1.5%. Chiều dài vùng nứt liên kết, một thông số quan trọng trong mô hình phát triển nứt cũng được đánh giá, thảo luận.

**Từ khóa:** HPFRC; năng lượng phá hủy; chiều dài nứt liên kết; phát triển nứt.

## ABSTRACT

Fracture energy and parameter of crack propagation model of HPFRCs under direct tension were determined in this paper based on test results. Three fiber types embedded in HPFRCs with their same volume content of 1.5 vol.% as follows: short smooth fiber, long hooked fiber, and hybrid fiber (including 1.0% long hooked fiber blended with 0.5% short smooth fiber). The long hooked and short smooth fiber have their aspect ratios 35/0.5 mm và 13/0.2 mm, respectively. The test results showed that, the energy fracture of HPFRC containing hybrid fiber revealed the highest fracture energy, in both zones within and beyond of the peak of stress-displacement response curves, although the fiber amounts added in HPFRCs were identical. The length of cohesive crack of HPFRCs, an important parameter of crack propagation model under direct tension, was also assessed and discussed.

**Keywords:** HPFRC; fracture energy; cohesive crack length; crack propagation.

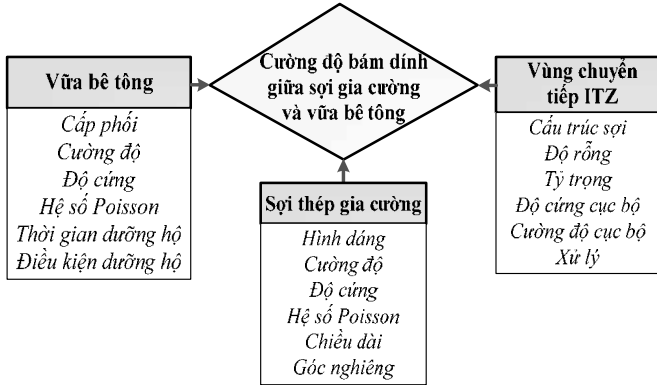
## 1. GIỚI THIỆU

Nhu cầu phát triển vật liệu xây dựng bền vững dưới tác động thiên tai và môi trường xâm thực ngày một cao. Trận động đất lịch sử ở Thổ Nhĩ Kỳ và Syria vào tháng 2/2023 đã gây ra thiệt hại lớn về cơ sở vật chất và con người [1]. Các công trình hầu như bị sập đổ do sự tàn phá của trận động đất [2]. Bê tông truyền thống là vật liệu xây dựng phổ biến, tuy nhiên vật liệu này được đánh giá là có độ giòn lớn và bền kém dưới tải thiên tai và xâm thực do năng lượng hấp thụ kém, vết nứt phát triển nhanh. Bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (high-performance fiber-reinforced concrete - HPFRC) được phát triển gần đây được xem là vật liệu xây dựng rất có triển vọng bởi độ dẻo lớn, bền cơ học và kháng nứt tốt [3-5]. Vì vậy việc áp dụng HPFRC vào công trình dân dụng hay hạ tầng giao

thông được mong đợi đem lại sự bền vững lâu dài, giảm chi phí duy tu bảo dưỡng, mặc dù kinh phí đầu tư ban đầu có cao hơn bê tông truyền thống.

Tính chất cơ học của HPFRC cơ bản phụ thuộc vào cường độ bám dính giữa cốt sợi gia cường và vữa bê tông. Ba yếu tố chính tác động cường độ bám dính là đặc tính vật liệu vữa bê tông, đặc tính sợi thép gia cường và đặc tính vùng chuyển tiếp ITZ (Interfacial Transition Zone), được mô tả trong Hình 1 [6]. Theo như Hình 1, các đặc tính của cốt sợi bao gồm hình dáng, cường độ, độ cứng, hệ số poisson, chiều dài, góc nghiêng. Hiện nay, thông tin về ảnh hưởng loại sợi gia cường (hình dáng sợi) đến năng lượng phá hủy và đặc trưng mô hình phát triển nứt của HPFRC vẫn còn hạn chế. Do đó, việc nghiên cứu năng lượng phá hủy và đặc trưng mô

hình phát triển nứt của HPFRC (sử dụng vật liệu và chế tạo tại Việt Nam) là cần thiết. Kết quả nghiên cứu trong bài báo này cung cấp thông tin hữu ích giúp hiểu rõ hơn về đặc tính phá hủy HPFRC, từ đó ứng dụng vật liệu này một cách hợp lý, đảm bảo an toàn cho các công trình xây dựng.

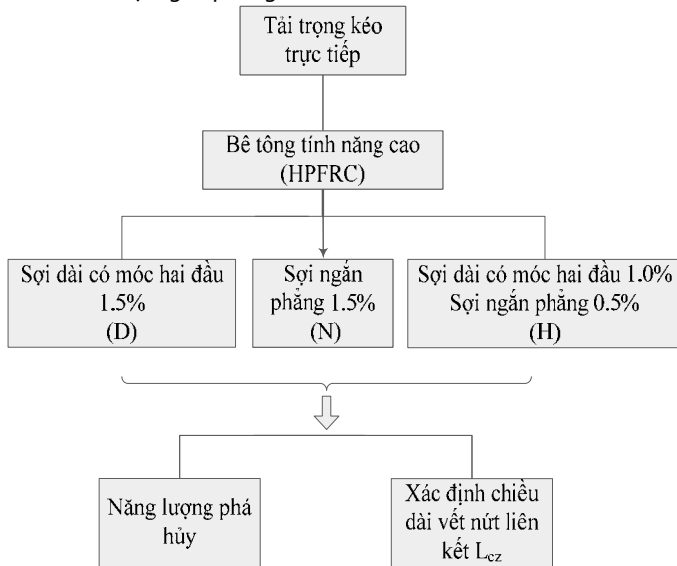


Hình 1 - Các thông số ảnh hưởng đến cường độ bám dính của sợi thép và vữa bê tông

**2. THÍ NGHIỆM**

**2.1 Sơ đồ thí nghiệm**

Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện ở Hình 2. Ba loại HPFRC thí nghiệm được gia cường cốt sợi thép khác nhau về loại sợi nhưng cùng hàm lượng thể tích 1.5% như sau: sợi ngắn phẳng (N), sợi dài có móc hai đầu (D), sợi hỗn hợp (H) gồm 1.0% sợi dài có móc hai đầu + 0.5% sợi ngắn phẳng.



Hình 2 - Sơ đồ thí nghiệm

**2.1 Vật liệu và chế tạo mẫu**

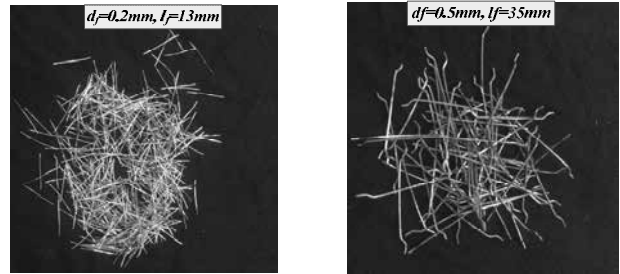
Bảng 1 cung cấp thông tin về tỉ lệ trọng lượng các thành phần của HPFRC, bao gồm: xi măng, silica fume, cát, tro bay, phụ gia hóa dẻo và nước. Bảng 2 tóm tắt tính chất cơ lý của 2 loại sợi thép dùng trong HPFRC, bao gồm tỷ lệ đường kính/chiều dài sợi thép, trọng lượng riêng, mô đun đàn hồi, cường độ kéo. Hình 3 mô tả ảnh chụp của 2 loại sợi thép được dùng trong thí nghiệm này.

Bảng 1. Thành phần vữa bê tông HPFRC theo tỉ lệ khối lượng

Xi măng	Silica fume	Cát	Tro bay	Phụ gia hóa dẻo	Nước
0.8	0.07	1	0.2	0.04	0.26

Bảng 2. Tính chất cơ lý của các loại sợi thép

Loại sợi	Đường kính/ Chiều dài (mm)	Trọng lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	Mô đun đàn hồi (GPa)	Cường độ kéo (MPa)
Sợi thép dài có móc hai đầu (D)	0.5/35	7.9	200	> 1200
Sợi thép ngắn phẳng (N)	0.2/13	7.9	200	> 2500



a) Sợi ngắn phẳng b) Sợi dài có móc hai đầu

Hình 3 - Ảnh chụp hai loại sợi được sử dụng trong HPFRC

**2.3 Thiết lập thí nghiệm**

Hình 4a mô tả kích thước của mẫu kéo trong khi Hình 4b thể hiện thiết lập thí nghiệm kéo trực tiếp thực hiện trong bài báo này. Tất cả các mẫu kéo được thực hiện bởi máy thí nghiệm đa năng. Tốc độ dịch chuyển của tải trọng không đổi 1.0 mm/phút được áp dụng cho tất cả các mẫu kéo. Tải trọng tác dụng (P) và chuyển vị dọc trục (δ) được ghi lại với tần số 1 Hz. Trong suốt quá trình thí nghiệm, mẫu được căn chỉnh cẩn thận để giảm thiểu ảnh hưởng của độ lệch tâm. Tất cả các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ phòng 28+5 °C. Biến dạng được đo bằng cảm biến biến dạng dòng điện (LVDTs).

Giá trị ứng suất kéo (σ) được tính thông qua biểu thức:  $\sigma = P / F$ , trong đó P là tải trọng áp dụng, F là diện tích mặt cắt ngang của mẫu kéo. Khả năng hấp thụ năng lượng kéo ( $G_{II}$ ) được định nghĩa là diện tích dưới đường cong ứng xử kéo (Hình 5) và được tính bằng công thức (1), tổng năng lượng hấp thụ  $G_{II}$  được tính bằng công thức (2) [7]

$$G_{cz} = \tau_{pc} \int_0^{\delta} \sigma(\delta) d\delta \tag{1}$$

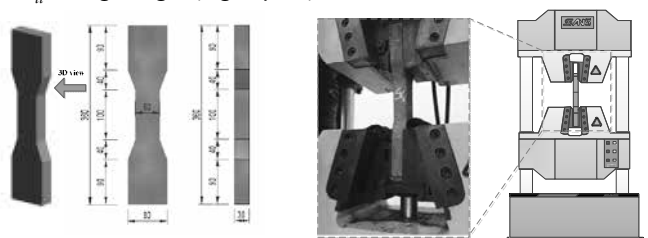
$$G_{II} = \tau_{pc} + G_{cz} \tag{2}$$

Trong đó:

$\tau_{pc}$ : Năng lượng tăng cứng

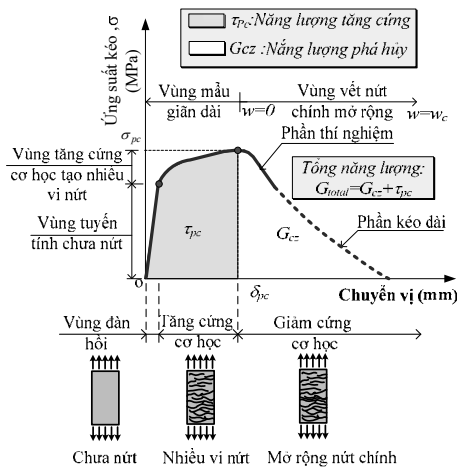
$G_{cz}$ : Năng lượng phá hủy

$G_{II}$ : Tổng năng lượng hấp thụ



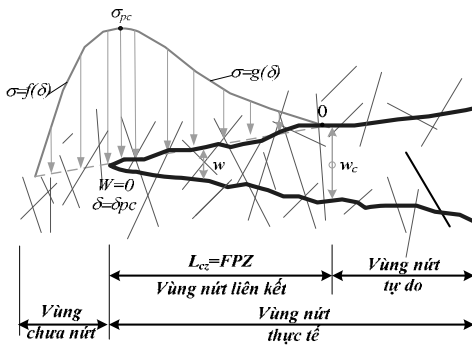
a) Kích thước mẫu kéo b) Thiết lập thí nghiệm kéo trực tiếp

Hình 4 - Lắp đặt và thiết lập thí nghiệm kéo trực tiếp



Hình 5 - Minh họa thông số năng lượng của HPFRC dưới tải trọng kéo trực tiếp

Hình 5 mô tả toàn bộ quá trình tiếp nhận tải đến khi phá hoại hoàn toàn gồm ba vùng chính: vùng đàn hồi chưa xuất hiện nứt, vùng tăng cứng cơ học xuất hiện nhiều vết nứt, vùng giảm cứng cơ học mở rộng vết nứt chính [7]. Trong vùng giảm cứng cơ học, đoạn nứt kéo dài trên cơ sở tiếp tuyến với đường cong ứng xử tại điểm ngưng tải. Đây cũng là vùng xác định năng lượng phá hủy cùng thông số đặc trưng mô hình phát triển nứt của HPFRC.



Hình 6 - Mô hình phát triển vết nứt

Mô hình phát triển vết nứt được mô tả tại Hình 6 [8]. Theo mô hình này, chiều dài vùng nứt liên kết ( $L_{cz}$ ) được xác định bằng khoảng cách từ điểm có độ mở rộng khe nứt  $w = 0$  (tương ứng với ứng suất tối đa  $\sigma_{pc}$ ), đến điểm có độ mở rộng khe nứt  $w = w_c$  (tương ứng với ứng suất giảm còn 0). Chiều dài nứt liên kết càng lớn thể hiện sức kháng mở rộng nứt càng cao. Chiều dài vùng nứt liên kết được xác định thông qua phương trình (3) [9]:

$$L_{cz} = E \frac{G_{cz}}{(\sigma_{pc})^2} = E \frac{\tau_{pc}}{(\sigma_{pc})^2} \quad (3)$$

Trong biểu thức (3),  $L_{cz}$  là chiều dài vùng nứt liên kết,  $E$  là modun đàn hồi của vật liệu,  $G_{cz}$ ,  $\tau_{pc}$  và  $\sigma_{pc}$  lần lượt là năng lượng phá hủy, năng lượng tăng cứng và ứng suất tối đa dưới tải trọng kéo trực tiếp.

#### 4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

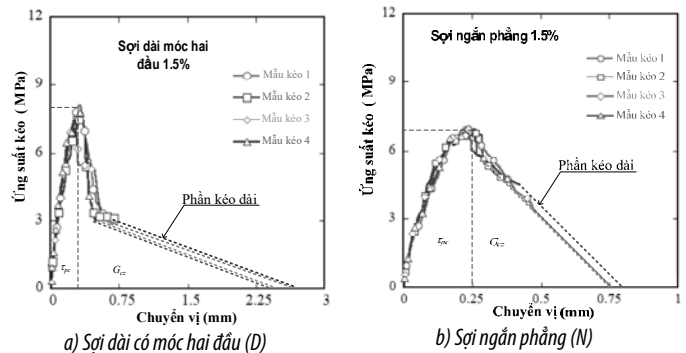
##### 4.1 Kết quả thí nghiệm

Hình 7 a,b và c lần lượt thể hiện mối liên hệ giữa ứng suất kéo trực tiếp và chuyển vị tương ứng của HPFRC khi dùng sợi dài có móc hai đầu (Hình 7a), sợi ngắn phẳng (Hình 7b), sợi hỗn hợp (Hình 7c) [10]. Bảng 3 cung cấp thông số kéo của các HPFRC được

gia cường các loại sợi khác nhau có cùng hàm lượng [10]. Các thông số nghiên cứu bao gồm: ứng suất kéo  $\sigma_{pc}$  và chuyển vị  $\delta_{pc}$  tương ứng với ứng suất  $\sigma_{pc}$  tại đỉnh đường cong, phần kéo dài vùng mở rộng vết nứt dựa trên cơ sở tiếp tuyến với đường cong ứng xử tại điểm ngưng tải.

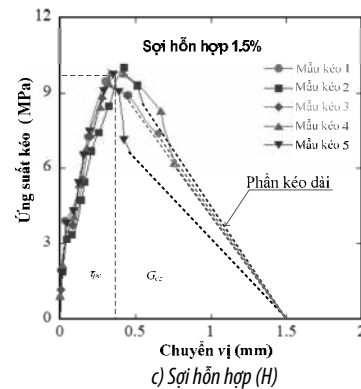
Bảng 3. Các thông số kéo của các loại HPFRC

Loại sợi	Chuyển vị $\delta_{pc}$	Ứng suất $\sigma_{pc}$
	mm	MPa
Mẫu 1	0.32	8.13
Mẫu 2	0.35	7.79
Mẫu 3	0.27	7.40
Mẫu 4	0.32	7.82
Sợi dài có móc hai đầu (D)	0.31	7.79
Mẫu 1	0.23	7.03
Mẫu 2	0.27	6.76
Mẫu 3	0.24	6.67
Mẫu 4	0.25	7.41
Sợi ngắn phẳng (N)	0.25	6.97
Mẫu 1	0.3	9.48
Mẫu 2	0.42	10.01
Mẫu 3	0.32	9.93
Mẫu 4	0.4	9.87
Mẫu 5	0.35	9.74
Sợi hỗn hợp (H)	0.36	9.81



a) Sợi dài có móc hai đầu (D)

b) Sợi ngắn phẳng (N)



c) Sợi hỗn hợp (H)

Hình 7 - Ứng xử uốn của các loại HPFRC

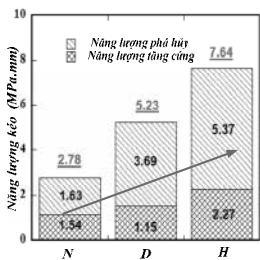
##### 4.2 Thông số năng lượng và chiều dài vùng nứt liên kết của HPFRC dưới tải trọng kéo trực tiếp

Bảng 4 cung cấp thông số năng lượng của HPFRC, bao gồm mô đun đàn hồi khi kéo ( $E$ ), năng lượng tăng cứng ( $\tau_{pc}$ ), năng lượng phá hủy ( $G_{cz}$ ), năng lượng tăng cứng và ứng suất tối đa dưới tải trọng kéo trực tiếp.

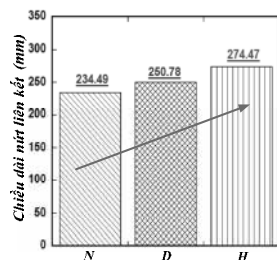
vết nứt liên kết ( $Lcz$ ). Thông số  $E$  được suy ra từ hệ số góc của đường cong ứng xử giai đoạn tuyến tính ở Hình 7 (khi tải còn nhỏ). Kết quả trong Bảng 4 được lấy trung bình từ ít nhất bốn mẫu thử nghiệm cho mỗi loạt mẫu. Hình 8 thể hiện sự so sánh giữa các thông số năng lượng của HPFRC dưới tải trọng kéo trực tiếp. Theo quan sát tại Hình 8, thứ tự  $G_{cz}$  như sau: Sợi ngắn phẳng (1.63 MPa.mm) < Sợi dài có móc hai đầu (3.69 MPa.mm) < Sợi hỗn hợp (5.37 MPa.mm). Kết quả của toàn bộ năng lượng hấp thụ,  $G_{tt}$ , cũng có thứ tự tương tự: Sợi ngắn phẳng (2.78 MPa.mm) < Sợi dài có móc hai đầu (5.23 MPa.mm) < Sợi hỗn hợp (7.64 MPa.mm). Theo thông tin trong Hình 8, năng lượng trong vùng phá hủy lớn hơn nhiều so với năng lượng trong giai đoạn tăng cứng cơ học, có thể lên đến 2.37 lần (trường hợp cốt sợi hỗn hợp). Thứ tự thông số chiều dài nứt liên kết: Sợi ngắn phẳng (239.49 mm) < Sợi dài có móc hai đầu (250.78 mm) < Sợi hỗn hợp (274.47 mm). Nhìn chung, các mẫu kéo HPFRC sử dụng sợi hỗn hợp gia cường thể hiện cao nhất về năng lượng và chiều dài vùng liên kết nứt.

Bảng 4. Thông số năng lượng và chiều dài vùng nứt liên kết

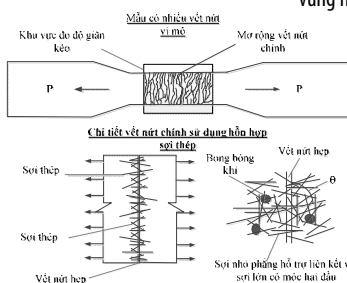
Loại sợi	E MPa	$\tau_{pc}$ MPa.mm	$G_{cz}$ MPa.mm	$G_{tt}$ MPa.mm	$Lcz$ mm
Mẫu 1	5145.74	1.63	4.82	6.45	374.73
Mẫu 2	4273.61	1.68	4.61	6.29	324.97
Mẫu 3	4108.7	1.19	4.42	5.61	331.31
Mẫu 4	4527.59	1.68	0.9	2.58	66.87
Sợi dài có móc hai đầu (D)	4513.91	1.54	3.69	5.23	274.47
Mẫu 1	6145.94	1.04	1.73	2.76	214.98
Mẫu 2	7080.58	1.33	1.41	2.74	218.84
Mẫu 3	7175.64	1.11	1.61	2.72	259.85
Mẫu 4	6755.67	1.15	1.75	2.9	244.3
Sợi ngắn phẳng (N)	6789.46	1.15	1.63	2.78	234.49
Mẫu 1	4124.15	1.82	6.14	7.96	281.63
Mẫu 2	4286.1	2.63	5.25	7.88	224.99
Mẫu 3	4540.61	1.91	5.73	7.64	263.69
Mẫu 4	4389.76	2.72	5.35	8.07	241.14
Mẫu 5	5264.72	2.27	4.37	6.64	242.45
Sợi hỗn hợp (H)	4521.07	2.27	5.37	7.64	250.78



Hình 8 - So sánh thông số năng lượng



Hình 9 - So sánh thông số chiều dài vùng nứt liên kết



Hình 10 - Cơ chế liên kết nứt bằng sợi hỗn hợp (H).

Các đặc tính vật liệu cũng như liên kết giữa sợi thép và vữa bê tông có thể sử dụng để giải thích các kết quả thí nghiệm. Sự pha trộn giữa sợi to có móc hai đầu và sợi nhỏ phẳng có thể tác động lớn đến việc tăng cường sức kháng nứt như mô tả trong Hình 10. Khi vết nứt xuất hiện, cả sợi nhỏ phẳng và sợi to có móc hai đầu có tác dụng chằng vết nứt, ngăn cản mở rộng và phát triển vết nứt. Park và các cộng sự [11] cho rằng những cốt sợi thép to đóng vai trò chính nâng cao khả năng biến dạng của bê tông cốt sợi trong khi sợi thép nhỏ có thể giúp cải thiện cường độ kéo. Như vậy sự tương hỗ giữa sợi to và sợi nhỏ mang lại hiệu quả kinh tế vì không làm tăng hàm lượng cốt sợi thép gia cường mà vẫn đạt được sức kháng cơ học, sức kháng nứt tốt.

### 5. KẾT LUẬN

Bài báo này cung cấp thông tin hữu ích về ứng xử kéo, năng lượng phá hủy và chiều dài vết nứt liên kết. Dựa trên kết quả thí nghiệm và phân tích, có thể kết luận như sau:

- Năng lượng phá hủy lớn hơn năng lượng tăng cứng cơ học được quan sát thấy ở HPFRC với hàm lượng sợi 1.5% theo thể tích với ba loại sợi nghiên cứu.

- Thứ tự lớn dần cường độ kéo, năng lượng phá hủy, chiều dài vùng nứt liên kết như sau: Sợi ngắn phẳng < Sợi dài có hai đầu móc < Sợi hỗn hợp.

- Sự pha trộn giữa sợi thép to có móc hai đầu và sợi nhỏ phẳng có thể cải thiện sức kháng cơ học và kháng nứt của HPFRC.

### Lời cảm ơn

Nhóm tác giả cảm ơn Trường Đại học Sư phạm kỹ Thuật TP.HCM tài trợ nghiên cứu này.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. <https://vnexpress.net/dong-dat-moi-o-tho-nhi-ky-la-du-chan-lon-khac-thuong-4573441.html>.
2. <https://vietnamnet.vn/suc-manh-2-tran-dong-dat-o-tho-nhi-ky-syria-tuong-duong-500-qua-bom-hat-nhan-2109320.html>.
3. Nguyen D.L., Thai D.K., Ngo T.T., Tran T.K., Nguyen T.T., Weibull modulus from size effect of high-performance fiber-reinforced concrete under compression and flexure. Construction and building materials 226 (2019) 743-758.
4. Nguyen D.L., Kim D.J., Thai D.K., Enhancing Damage-Sensing Capacity of Strain-Hardening Macro-Steel Fiber-Reinforced Concrete by Adding Low Amount of Discrete Carbons. Materials 2019, 12, 938; doi:10.3390/ma12060938.
5. Nguyen D.L., Song J., Manathamsombat C., Kim D.J., Comparative electromechanical damage-sensing behavior of six strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites under direct tension. Composites: Part B; 69, pp. 159-168, 2015.
6. Thai D.K., Nguyen D.L., Kim S.E. Numerical investigation on local damage of proposed RC panels under impact loading. Nuclear Engineering and Design, 341 (2019) 377-389
7. Nguyen D.L., Lam M.N.-T., Kim D.J. and Song J. Direct tensile self-sensing and fracture energy of steel-fiber-reinforced concretes Composites Part B: Engineering 183 (2020) 107714, pp. 1-19
8. De Maio U, Fantuzzi N, Greco F, Leonetti L, Pranno A. Failure Analysis of Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Structures Enhanced with Nanomaterials by Using a Diffuse Cohesive Interface Approach. Nanomaterials. 2020; 10(9):1792.
9. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.E., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cem Concr Res. 6 (6) (1976) 773-782.
10. Nguyen, D.L., Thai, D.K., Nguyen, H.T.T., Nguyen, T.Q., & Le-Trung, K. (2021). Responses of composite beams with high-performance fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, 270, 121814, pp. 1-13
11. Park SH . Kim DJ. Ryu GS. Koh KT. "Tensile behavior of Ultra-high Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete." Construction and Building Materials. 2012. 34(2): pp. 172-184.