

Đánh giá khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông tính năng cao dưới tải trọng nén và uốn

Assessing energy absorption capacity of high-performance fiber-reinforced concrete in compression and bending

> NGUYỄN DUY LIÊM^{1*}, TRẦN MINH TIẾN², TRẦN NGỌC THANH³, ĐỖ XUÂN SƠN¹

¹GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

²CV Ban Quản trị Thiết bị, Trường Đại học Ngoại thương - cơ sở TP.HCM

³GV Viện Xây dựng, Trường Đại học GTVT TP.HCM

Email: liemnd@hcmute.edu.vn; tranminhtien.cs2@ftu.edu.vn; ngocthanh.tran@ut.edu.vn; sondx@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày khả năng hấp thụ năng lượng của bê tông tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete - HPFRC) thông qua kết quả thí nghiệm nén và uốn. Bốn loại HPFRC thí nghiệm được gia cường cốt sợi thép khác nhau về loại sợi và hàm lượng thể tích: không sợi, sợi nhỏ 1,5%, sợi to 1,5%, sợi hỗn hợp gồm 1,0% sợi to + 0,5% sợi nhỏ. Sợi thép to có hình dạng hai đầu móc chiều dài 35 mm và đường kính 0,5 mm. Sợi thép nhỏ có hình dạng thẳng chiều dài 13 mm và đường kính 0,2 mm. Kết quả thí nghiệm cho thấy năng lượng hấp thụ của HPFRC có sợi gia cường được cải thiện đáng kể so với HPFRC không sợi, cả trong thí nghiệm nén lẫn uốn. Ngoài ra, HPFRC chứa hỗn hợp sợi có năng lượng hấp thụ cao nhất dù tổng hàm lượng cốt sợi gia cường vẫn ở mức 1,5%.

Từ khóa: HPFRC; năng lượng hấp thụ; cường độ nén; cường độ uốn.

ABSTRACT

This paper reports the energy absorption capacity of HPFRCs under compression and bending through an experimental investigation. There were four types of HPFRCs with different steel fiber types and volume contents as follows: no fiber, macro fiber 1.5%, micro fiber 1.5%, and hybrid fiber including 1.0% macro fiber blended with 0.5% micro fiber. The macro fiber used in this research is hooked-end type with its a length of 35 mm and a diameter of 0.5 mm. The micro fiber used is smooth type with its a length of 13 mm and a diameter of 0.2 mm. According to the test results, the energy absorption capacity of HPFRCs containing steel fiber were enhanced clearly, in comparison to HPFRC with no fiber under both compression and bending. Besides, the HPFRC with hybrid fiber demonstrated the highest energy absorption capacity, in despite of the same fiber content of 1.5%.

Keywords: HPFRC; energy absorption capacity; compressive strength; bending strength

1. GIỚI THIỆU

Bê tông tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete - HPFRC) được xem là vật liệu xây dựng rất có triển vọng vì sở hữu tính chất cơ học ưu việt bao gồm cường độ chịu nén cao, khả năng kháng nứt tốt do có cấu trúc rất đặc, lỗ rỗng nhỏ và ít giúp giảm thấm. Đặc biệt khi được trộn cốt sợi với thành phần hợp lý, bê tông tính năng cao có cường độ chịu kéo cao, độ dẻo dai lớn, khả năng hấp thụ năng lượng rất lớn [1-4]. Với những tính chất ưu việt nêu trên, HPFRC được mong đợi sẽ cải thiện đáng kể khả năng chịu tải cũng như độ bền của công trình.

Trong chế tạo HPFRC, cốt sợi gia cường đóng vai trò lớn trong việc hình thành tính tăng cứng cơ học (strain-hardening) [5-7]. Đây là tính chất ưu việt của HPFRC cải thiện phần nào tính giòn cổ hữu của bê tông thường cũng như làm tăng khả năng hấp thụ năng lượng cơ học dưới tác dụng của tải trọng. Các yếu tố ảnh hưởng từ cốt sợi bao gồm hình học sợi, tỷ lệ hình dáng, hàm lượng sợi,

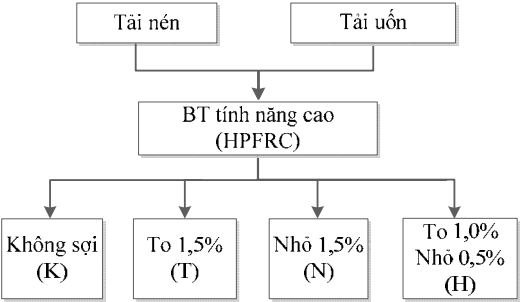
cường độ kéo đứt và sự phân bố cốt sợi. Một số nghiên cứu gần đây cho thấy sự kết hợp nhiều loại sợi có kích thước khác sẽ tạo hiệu ứng tương hỗ làm tăng tính năng cơ học của HPFRC dưới nhiều loại tải khác nhau như tải kéo trực tiếp [8-10], tải uốn [11], tải cắt [12]. Theo các công bố này, hỗn hợp sợi to-nhỏ kết hợp có thể tạo ra sức kháng cơ học của HPFRC tốt hơn so với sử dụng cốt sợi đơn với cùng hàm lượng. Do vậy, nghiên cứu này dùng sợi hỗn hợp để chế tạo vật liệu HPFRC thí nghiệm dưới tải nén và uốn, sau đó khảo sát, đánh giá khả năng hấp thụ năng lượng của HPFRC. Thông tin từ kết quả nghiên cứu giúp các kỹ sư xây dựng áp dụng HPFRC hợp lý và an toàn cho công trình.

2. THÍ NGHIỆM

2.1 Sơ đồ thí nghiệm

Hình 1 mô tả sơ đồ thí nghiệm nghiên cứu trong bài báo này. Theo sơ đồ này, có bốn loại HPFRC thí nghiệm được gia cường cốt

sợi thép khác nhau về loại sợi và hàm lượng thể tích: không sợi, sợi nhỏ 1,5%, sợi to 1,5%, sợi hỗn hợp gồm 1.0% sợi to + 0.5% sợi nhỏ. Tải thí nghiệm bao gồm tải nén và uốn. Mẫu nén dùng mẫu lăng trụ kích thước 114x200 mm, mẫu uốn có kích thước rộngxcaoxchiều dài nhíp 40x40x120 mm (chiều dài mẫu uốn là 160 mm).



Hình 1 - Sơ đồ thí nghiệm
2.2 Vật liệu và chế tạo mẫu

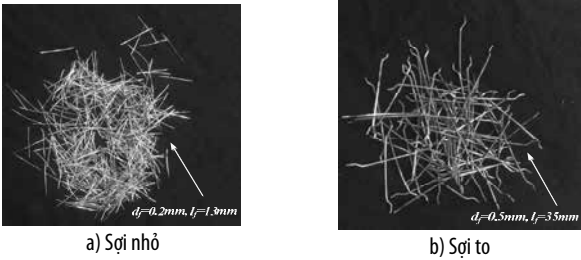
Bảng 1 cung cấp tỉ lệ trọng lượng thành phần các vật liệu tạo thành HPFRC. Bảng 2 cung cấp tính chất cơ lý của sợi thép dùng trong HPFRC, hàm lượng theo thể tích của hỗn hợp 2 loại sợi gồm: sợi to 1.0 %, sợi nhỏ 0.5 %. Hình 2 thể hiện hình chụp 2 loại sợi thép được sử dụng để chế tạo các HPFRC thí nghiệm.

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

Xi măng (kg/m³)	Silica fume (kg/m³)	Cát (kg/m³)	Tro bay (kg/m³)	Phụ gia hóa dẻo (kg/m³)	Nước (kg/m³)
0,80	0,07	1,00	0,20	0,40	0,26

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

Loại sợi	Đường kính/ Chiều dài (mm)	Trọng lượng riêng (g/cm³)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Cường độ kéo (MPa)
Sợi thép to, hai đầu móc	0,5/35	7,9	200	> 1200
Sợi thép nhỏ, thẳng trơn	0,2/13	7,9	200	> 2500

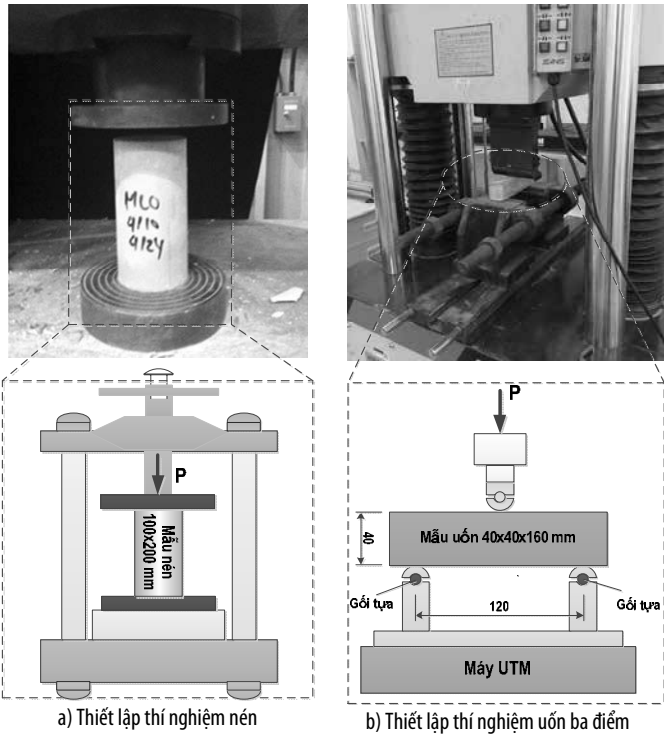


Hình 2 - Ảnh chụp các loại sợi được sử dụng trong HPFRC
3.2 Lắp đặt và thí nghiệm

Hình 3 thể hiện thiết lập thí nghiệm nén và uốn mẫu. Tất cả các mẫu uốn được thí nghiệm dưới sơ đồ ba điểm uốn. Máy UTM có khả năng tải lớn nhất 1000 kN ghi lại giá trị tải và chuyển vị trong quá trình áp tải. Trong thí nghiệm nén, ứng suất (σ) và biến dạng nén (ε) được tính toán lần lượt theo biểu thức (1) và (2), đỉnh đường cong ứng suất - biến dạng là điểm A (ε_{cu}, f_c) như mô tả trong Hình 4a. Trong biểu thức (1) và (2), A là diện tích mẫu nén, ΔH là độ biến dạng máy thu thập trong quá trình áp tải, H là chiều cao mẫu nén, P là tải tập trung tác dụng lên mẫu nén được máy thu thập.

$$\sigma = P / A \tag{1}$$

$$\varepsilon = \Delta H / H \tag{2}$$



Hình 3 - Thiết lập thí nghiệm nén và uốn mẫu
Trong thí nghiệm uốn, ứng suất kéo uốn (f) và độ võng tương đối (δ / L) được tính toán lần lượt theo biểu thức (3) và (4), đỉnh đường cong ứng suất kéo uốn - độ võng tương đối là điểm MOR ($\delta / L_{MOR}, f_{MOR}$) như mô tả trong Hình 4b. Trong biểu thức (3) và (4), L là chiều dài nhíp, ΔH là độ biến dạng máy thu thập trong quá trình áp tải - được xem là độ võng giữa nhíp, b và h lần lượt là bề rộng và chiều cao mẫu uốn, P là tải tập trung tác dụng lên giữa nhíp được máy thu thập.

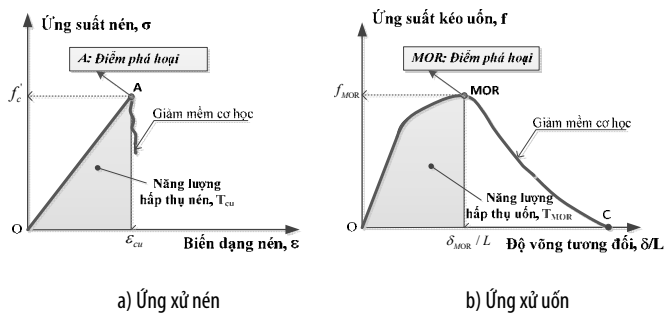
$$f = 1.5 P L / (b h^2) \tag{3}$$

$$\delta / L = \Delta H / L \tag{4}$$

Khả năng hấp thụ năng lượng nén (T_{cu}) được định nghĩa là diện tích dưới đường cong ứng xử nén (Hình 4a) và tính theo biểu thức (5). Khả năng hấp thụ năng lượng uốn (T_{MOR}) được định nghĩa là diện tích dưới đường cong ứng xử uốn (Hình 4b) và tính theo biểu thức (6).

$$T_{cu} = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon_{cu}} \sigma(\varepsilon) d(\varepsilon) \tag{5}$$

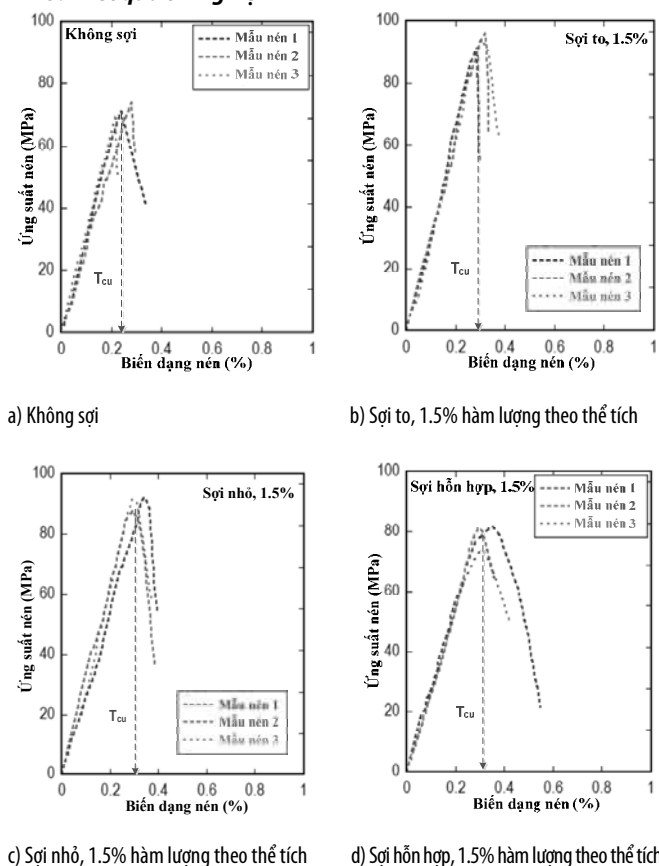
$$T_{MOR} = \int_{\delta/L=0}^{\delta/L_{MOR}} f(\delta/L) d(\delta/L) \tag{6}$$



Hình 4 - Ứng xử điển hình của HPFRC dưới tải trọng nén và uốn cùng năng lượng hấp thụ

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

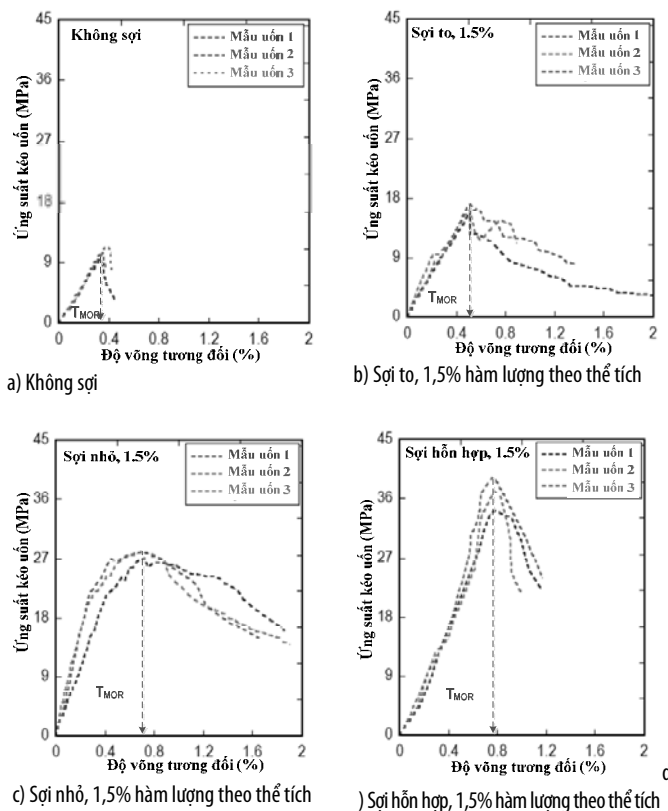
3.1 Kết quả thí nghiệm



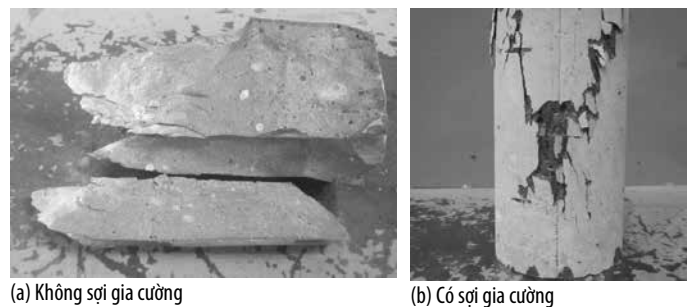
Hình 5. Ứng xử nén của các loại HPFRC

Hình 5 thể hiện ứng xử nén (thực hiện trong nghiên cứu này) và Hình 6 thể hiện ứng xử uốn của các loại HPFRC (theo nghiên cứu trước đây [7] của tác giả đầu). Bảng 3 trình bày các thông số tại đỉnh đường cong của ứng xử nén và uốn. Các kết quả trong bảng này được lấy trung bình từ ba mẫu thử nghiệm cho mỗi loại HPFRC. Theo như Bảng 3, cường độ nén cao hơn cường độ kéo uốn, cho cả 4 loại HPFRC thí nghiệm như sau: Không sợi (8,01 lần), Sợi to (5,70 lần), Sợi nhỏ (3,26 lần), Sợi hỗn hợp (2,64 lần). Về ảnh hưởng của cốt sợi gia cường, so với không sợi, sợi hỗn hợp tạo hiệu quả nhất trong việc cải thiện cường độ của HPFRC: tăng 1,17 lần dưới tải nén và tăng 3,54 lần dưới tải uốn. Các loại sợi to và sợi nhỏ sử dụng đơn loại cũng cải thiện cường độ của HPFRC, đặc biệt là dưới tải uốn. Ngoài ra, theo quan sát, sợi nhỏ hiệu quả hơn sợi to trong uốn nhưng ít hiệu quả hơn sợi to trong nén trong việc cải

thiện cường độ HPFRC. Hình 7 và Hình 8 lần lượt thể hiện mẫu phá hoại dưới tải nén và tải uốn. Dưới tải trọng nén, HPFRC không sợi bị vỡ vụn ra thành nhiều mảnh trong khi HPFRC được gia cường cốt sợi không bị vỡ vụn. Dưới tải trọng uốn, HPFRC không sợi bị gãy gọn thành hai phần trong khi HPFRC được gia cường cốt sợi hai phần vẫn liên kết nhau.



Hình 6. Ứng xử uốn của các loại HPFRC



Hình 7. Hình ảnh điển hình mẫu nén bị phá hoại

Bảng 3. Thông số nén và uốn của HPFRC

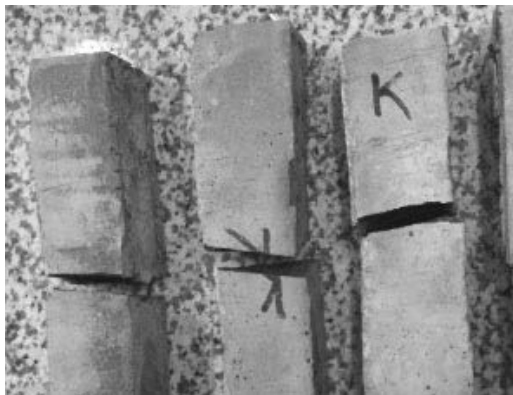
Dưới tải trọng nén				
Loại sợi	Không sợi	Sợi to 1.5%	Sợi nhỏ 1.5%	Sợi hỗn hợp 1.5%
Cường độ nén, f'_c (MPa)	83,38	93,55	90,47	97,23
Khả năng biến dạng nén, ε_{cu} (%)	0,29	0,30	0,31	0,31
Dưới tải trọng uốn [7]				
Loại sợi	Không sợi	Sợi to 1.5%	Sợi nhỏ 1.5%	Sợi hỗn hợp 1.5%
Cường độ uốn, f_{MOR} (MPa)	10,41	16,41	27,76	36,83
Khả năng chịu võng tương đối, δ / L (%)	0,36	0,51	0,72	0,78

Bảng 4. Thông số năng lượng hấp thụ của HPFRC

Loại sợi	Không sợi	Sợi to 1.5%	Sợi nhỏ 1.5%	Sợi hỗn hợp 1.5%
Năng lượng hấp thụ nén, T_{cu} (MPa.%)	12,09	14,50	13,57	15,07
Tỉ lệ tăng so với không sợi	1,00	1,20	1,12	1,25
Năng lượng hấp thụ uốn, T_{MOR} (MPa.%)	2,06	4,81	12,15	13,31
Tỉ lệ tăng so với không sợi	1,00	2,34	5,90	6,46

Bảng 5. Hệ số hiệp đồng của các tham số năng lượng của HPFRCs dưới tải trọng nén và uốn

Tên mẫu	Năng lượng hấp thụ (MPa.%)	
Loại tải trọng	Tải trọng nén	Tải trọng uốn
Sợi to, (a)	14,50	4,81
Sợi nhỏ, (b)	13,57	12,15
Sợi hỗn hợp, (a+b)	15,07	13,31
Giá trị S_y	+0,039	+0,095



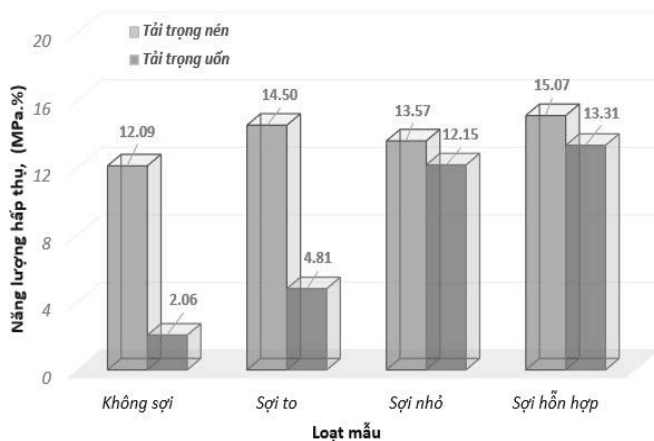
(a) Không sợi



(b) Có sợi gia cường

Hình 8. Hình ảnh điển hình mẫu uốn bị phá hoại

3.2 Năng lượng hấp thụ của HPFRC dưới tải trọng nén và uốn



Hình 9. So sánh thông số năng lượng của HPFRC

Bảng 4 cung cấp thông số khả năng hấp thụ năng lượng của HPFRC dưới tải nén và uốn. Các kết quả trong bảng này được lấy trung bình từ ba mẫu thử nghiệm cho mỗi loạt mẫu. Hình 9 thể hiện sự so sánh các thông số năng lượng của HPFRC dưới tải trọng nén và uốn. Theo như quan sát tại Hình 5, năng lượng hấp thụ của HPFRC dưới tải nén luôn cao hơn dưới tải uốn, cho cả 4 loại HPFRC thí nghiệm. Sự chênh lệch khả năng hấp thụ năng lượng giữa nén và uốn lớn theo thứ tự: Không sợi (5,87 lần) > Sợi to (3,01 lần) > Sợi hỗn hợp (1,13 lần) > Sợi nhỏ (1,12 lần). Về ảnh hưởng của cốt sợi gia cường, so với không sợi, sợi hỗn hợp tạo hiệu quả nhất trong việc cải thiện năng lượng hấp thụ của HPFRC: tăng 1,25 lần dưới tải nén và tăng 6,46 lần dưới tải uốn. Các loại sợi to và sợi nhỏ sử dụng đơn loại cũng cải thiện năng lượng hấp thụ của HPFRC, đặc biệt là dưới tải uốn. Điều này có nghĩa là cốt sợi thép gia cường trộn trong HPFRC nhạy cảm đối với tải uốn hơn là tải nén. Ngoài ra, theo quan sát, sợi nhỏ hiệu quả hơn sợi to trong uốn nhưng ít hiệu quả hơn sợi to trong nén.

3.3 Hiệu quả hiệp đồng trong thông số năng lượng hấp thụ của HPFRC

Hiệu ứng hiệp đồng của hệ thống sợi hỗn hợp đã xảy ra trong HPFRC dưới tải trọng uốn tĩnh. Theo kết quả nghiên cứu của Ngo và cộng sự [12], độ bền uốn do sợi hỗn hợp tạo ra cao hơn độ bền uốn được tạo ra bởi sợi đơn với cùng hàm lượng theo thể tích giống hệt nhau. Trong nghiên cứu này, để đánh giá một cách định lượng hiệu quả hiệp đồng của sợi hỗn hợp đối với thông số năng lượng của HPFRC, hệ số hiệp đồng ký hiệu là S_y được sử dụng và được tính theo Biểu thức (7) [12].

Trong biểu thức (7), $R_{hybrid,a+b}^{(V_f)}$ là thông số năng lượng của mẫu sử dụng sợi thép hỗn hợp, $R_{mono,a}^{(V_f)}$ và $R_{mono,b}^{(V_f)}$ lần lượt là thông số năng lượng của mẫu sử dụng sợi to và sợi nhỏ. Lưu ý rằng, $R_{hybrid,a+b}^{(V_f)}$, $R_{mono,a}^{(V_f)}$ và $R_{mono,b}^{(V_f)}$ phải có hàm lượng sợi giống nhau (hàm lượng 1,5% theo thể tích). Giá trị dương của S_y có nghĩa là sợi hỗn hợp thể hiện tốt hơn so với sợi đơn

$$S_y = \frac{R_{hybrid,a+b}^{(V_f)} - \max(R_{mono,a}^{(V_f)}, R_{mono,b}^{(V_f)})}{\max(R_{mono,a}^{(V_f)}, R_{mono,b}^{(V_f)})} \quad (7)$$

Bảng 5 cung cấp hệ số hiệp đồng của các thông số năng lượng bao gồm năng lượng hấp thụ dưới tải nén và năng lượng hấp thụ dưới tải uốn của HPFRC. Theo như kết quả phân tích tại Bảng 5, giá trị của S_y theo năng lượng hấp thụ dưới tải nén và tải uốn của HPFRC lần lượt là +0,039 và +0,095. Cả 2 hệ số hiệp đồng đều dương tức sợi hỗn hợp tạo hiệu quả hơn hệ sợi đơn. Cụ thể, giá trị S_y đối với thông số năng lượng hấp thụ dưới tải uốn cao hơn rất nhiều so với giá trị S_y dưới tải nén, khoảng $0,095/0,039 = 2,44$ lần, tức là, hiệu quả hiệp đồng hỗn hợp sợi thép dưới tải uốn của HPFRCs, cao hơn rất nhiều so với dưới tải nén.

4. KẾT LUẬN

Một số kết luận có thể rút ra từ kết quả nghiên cứu trong bài báo này như sau:

- So với HPFRC không sợi, có sự gia tăng rõ ràng về cường độ nén và cường độ kéo uốn bằng cách trộn gia cường sợi thép với hàm lượng 1,5% theo thể tích cho HPFRC. Sợi hỗn hợp tạo hiệu quả nhất trong việc cải thiện cường độ của HPFRC: tăng 1,17 lần dưới tải nén và tăng 3,54 lần dưới tải uốn.
- Bốn loại HPFRC thí nghiệm đều có cường độ nén cao hơn cường độ kéo uốn, cụ thể như sau: Không sợi (8,01 lần), Sợi to (5,70 lần), Sợi nhỏ (3,26 lần), Sợi hỗn hợp (2,64 lần).
- So với HPFRC không sợi, có sự gia tăng rõ ràng về năng lượng hấp thụ dưới tải nén và năng lượng hấp thụ dưới tải uốn cho HPFRC có trộn gia cường sợi thép với hàm lượng 1,5% theo thể tích cho HPFRC.
- Năng lượng hấp thụ của HPFRC dưới tải nén luôn cao hơn dưới tải uốn, cho cả 4 loại HPFRC thí nghiệm. Sự chênh lệch khả năng hấp thụ năng lượng giữa nén và uốn lớn theo thứ tự: Không sợi (5,87 lần) > Sợi to (3,01 lần) > Sợi hỗn hợp (1,13 lần) > Sợi nhỏ (1,12 lần).
- Trong so sánh khả năng hấp thụ năng lượng của HPFRCs, hiệu quả hiệp đồng của hỗn hợp sợi thép dưới tải uốn cao hơn rất nhiều so với dưới tải nén thông qua kết quả phân tích hệ số hiệp đồng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM chủ trì trong đề tài mã số B2021-SPK-08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Graybeal B and Davis M, "Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance-Fiber-Reinforced Concrete," *ACI Mater. J.*, 2008, 105(6): pp. 603–9.
2. Farhat FA, Nicolaidis D, Kanellopoulos A, Karihaloo BL, "High Performance fiber-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) - performance and application to retrofitting," *Eng. Fract. Mech.*, 2007, 74(1–2): pp. 151–67.
3. Wille K, Kim DJ, Naaman AE, "Strain hardening UHP-FRC with low fiber contents," *Mater. Struct.* 2011, 44: pp. 583–98.
4. Naaman AE, Reinhardt HW, "Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response," *Materials and Structures*, 2006, 39: pp. 547–555.
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: Engineering*; Vol 69, pp. 159–168, 2015.
6. Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agobdjan, W. & Raghavan, B., "Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes," *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220, 2016.
7. Nguyen D.L., Thai, D.K., Lam M.N.-T., "Synergy in Flexure of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Hybrid Steel Fibers," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 34, Issue 6, 2022. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004232.
8. 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.
9. Tran, N. T., & Kim, D. J. (2017). "Synergistic response of blending fibers in ultra-high-performance concrete under high rate tensile loads," *Cement and Concrete Composites*, 78, 132–145, 2017. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.01.008
10. Nguyen, D. L., Thai, D. K., Nguyen, H. T. T., Nguyen, T. Q., & Le-Trung, K. (2021a). "Responses of composite beams with high-performance fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, 270, 121814. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121814
11. Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2011). "Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers," *Construction and Building Materials*, 25:4144–55, 2011.
12. Ngo, T. T., & Kim, D. J., "Synergy in shear response of ultra-high-performance hybrid-fiber-reinforced concrete at high strain rates," *Composite Structures*, 195, 276–287, 2018. doi:10.1016/j.compstruct.2018.04.075