

NGHIÊN CỨU DÙNG MUỘI THAN ĐEN VÀ XỈ LÒ CAO NGHIÊN MỊN TRONG VIỆC CẢI THIỆN KHẢ NĂNG TỰ CẢM BIẾN CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO

Nguyễn Duy Liêm^a, Vũ Thị Bích Ngà^{b,*}, Đỗ Xuân Sơn^a, Trần Minh Phụng^c

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. Hồ Chí Minh,

01 Võ Văn Ngân, quận Thủ Đức, Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng,

215 Điện Biên Phủ, quận Bình Thạnh, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cKhoa Kiến trúc - Xây dựng và Mỹ thuật, Trường Đại học Thủ Dầu Một,

06 Trần Văn Ôn, Phú Hoà, Thủ Dầu Một, Bình Dương, Việt Nam

Nhận ngày 07/08/2019, Sửa xong 04/09/2019, Chấp nhận đăng 06/09/2019

Tóm tắt

Thông qua thực nghiệm, bài báo cung cấp thông tin hữu ích khi dùng muội than đen và xỉ lò cao nghiên cứu cải thiện khả năng tự cảm ứng của bê tông tính năng cao (high performance fiber-reinforced concretes, HPFRC) trong giai đoạn đàn hồi lẫn trong quá trình tăng cứng cơ học (strain hardening). Ba loại vữa bê tông tính năng cao sử dụng gồm: cấp phối đối chứng (M1), cấp phối dùng muội than đen thay thế 1% khối lượng xi măng (M2), cấp phối dùng xỉ lò cao nghiên cứu thay thế 25% khối lượng xi măng (M3). Ba cấp phối này được gia cường cốt sợi thép loại 2 đầu móc, hàm lượng như nhau 1,5% theo thể tích. So sánh với cấp phối M1 dưới sơ đồ kéo trực tiếp, kết quả thí nghiệm cho thấy cấp phối M2 và M3 được cải thiện đáng kể khả năng tự cảm biến cũng như cường độ kéo.

Từ khoá: bê tông tính năng cao; hệ số cảm biến; tự cảm biến; vật liệu thông minh; muội than đen; xỉ lò cao nghiên cứu.

USING CARBON BLACK AND GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG FOR IMPROVEMENT OF SELF-SENSING CAPACITY OF HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETES

Abstract

This paper provides useful information about using carbon black (CB) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) for improvement of self-sensing capacity of high performance fiber-reinforced concrete (HPFRC) in both elastic and strain hardening stages. Some HPFRC types were experimented as follows: controlled matrix containing no fibers (M1), amount 1 wt.% of cement was partly replaced by carbon black (M2), or amount 25 wt.% of cement was partly replaced by ground granulated blast furnace slag (M3). All investigated HPFRC types contained the same amount of hooked steel fibers with 1.5% volume fraction. The self-sensing capacities of M2 and M3 under direct tension were observed to be significantly higher than that of the controlled matrix, M1.

Keywords: high-performance fiber-reinforced concretes; gauge factor; self-sensing; smart materials; carbon black; ground granulated blast furnace slag.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(4V\)-14](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(4V)-14) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: ngavtb@hiu.vn (Ngà, V. T. B.)

1. Giới thiệu

Những năm gần đây, bê tông tính năng cao cốt sợi (high performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) được các nhà nghiên cứu tìm hiểu, phát triển sâu rộng. Vật liệu này có tính năng vượt trội so với bê tông truyền thống như cường độ nén cao (nén trên 90 MPa), cường độ kéo đạt trên 10 MPa nhờ cốt sợi liên kết các vết nứt, khả năng chịu biến dạng và độ bền rất cao [1–3]. Tại Việt Nam, tuy chưa phổ biến như bê tông truyền thống, song bê tông tính năng cao (hay siêu cao) cũng được quan tâm nghiên cứu, ứng dụng ngày một nhiều [4–6]. Hình 1 mô tả cầu extradosed của tuyến metro số 1 (Bến Thành – Suối Tiên) sử dụng bê tông tính năng cao cốt sợi tại kết cấu trụ tháp dây văng.



Hình 1. Trụ tháp sử dụng bê tông tính năng cao trộn sợi thép

Ngoài khả năng chịu tải lớn, HPFRC còn có tính chất đặc biệt là khả năng tự cảm biến [2, 3] để phục vụ quan trắc chất lượng công trình đang khai thác. Công tác quan trắc này rất quan trọng giúp đánh giá khả năng chịu tải hiện tại của kết cấu sau khoảng thời gian khai thác, từ đó có biện pháp duy tu, nâng cấp hay hạn chế tải trọng đảm bảo an toàn khai thác [7]. Phương cách quan trắc chất lượng công trình truyền thống là dùng hệ thống cảm biến (sensor) chôn hay gắn vào kết cấu; phương pháp này có những nhược điểm là giá thành cao, tuổi thọ không lâu, việc chôn các sensor vào kết cấu cũng làm giảm khả năng chịu tải của công trình [8]. Vật liệu xây dựng tự cảm biến giúp khắc phục được những nhược điểm kể trên. Khả năng tự cảm biến của vật liệu HPFRC phụ thuộc nhiều vào loại cốt sợi [2], hàm lượng cốt sợi [3] hay loại bê tông nền [9]. Cơ chế của tính tự cảm biến hư hỏng được diễn giải như sau: ứng suất, biến dạng, hình thành vết nứt của HPFRC có mối liên hệ với điện trở suất (electrical resistivity). Do vậy có thể xác định điện trở suất để xác định các thông số cơ học.

Mặc dù HPFRC có khả năng tự cảm biến, tuy nhiên việc nâng cao tính năng này là rất cần thiết. Bài báo này trình bày nghiên cứu việc sử dụng muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn để nâng cao khả năng tự cảm biến cũng như tính chất cơ học của HPFRC. Kết quả nghiên cứu đóng góp cho việc ứng dụng tính chất tự cảm biến của HPFRC trong việc phát triển xây dựng cơ sở hạ tầng hướng đến sự bền vững, đô thị thông minh.

2. Thí nghiệm

2.1. Vật liệu và phương pháp chế tạo mẫu nghiên cứu

Bảng 1 cung cấp thành phần cấp phối 3 loại vữa bê tông tính năng cao sử dụng gồm: cấp phối đối chứng (M1), cấp phối dùng muội than đen thay thế 1% khối lượng xi măng (M2), cấp phối dùng xỉ lò cao nghiền mịn thay thế 25% khối lượng xi măng (M3). Cường độ nén của 3 loại vữa bê tông (không có cốt sợi) lần lượt là 89 MPa (M1), 92 MPa (M2) và 109 MPa (M3). Hình 2 thể hiện ảnh chụp vật

Bảng 1. Thành phần vữa bê tông theo khối lượng và cường độ nén

Cấp phối	Xi măng	Silica fume	Cát trắng	Tro bay	Phụ gia hóa dẻo	CB	GGBS	Nước	f'_c (MPa)	ρ_m (k Ω - cm)
M1	0,800	0,07	1,00	0,20	0,04	-	-	0,26	89	168,11
M2	0,792	0,07	1,00	0,20	0,04	0,008	-	0,26	92	150,30
M3	0,640	0,07	1,00	0,20	0,04	-	0,16	0,26	109	155,94



(a) Muội than đen (CB)



(b) Xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS)

Hình 2. Vật liệu muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn

liệu muội than đen và xỉ lò cao nghiền mịn sử dụng trong nghiên cứu. Bảng 2 cung cấp thông tin về tính chất vật lý của một số vật liệu thành phần.

Trong các loại HPFRC, sử dụng sợi thép hai đầu móc (hooked) đường kính tương đương 0,375 mm, hàm lượng 1,5% theo thể tích. Bảng 3 cung cấp một số thông tin về tính chất cơ lý sợi thép. Sợi thép có khối lượng riêng 7,9 g/cm³ và mô đun đàn hồi 200 GPa. Cát sử dụng trong nghiên cứu là cát mịn, đường kính hạt từ 0,15 đến 0,7 mm.

Bảng 2. Tính chất vật lý của một số vật liệu thành phần

Tính chất	Xi măng	Silica fume	Tro bay	CB	GGBS
Khối lượng riêng (g/cm ³)	3,15	2,24	2,31	2,04	2,90
Độ mịn (cm ² /g)	4450	163000	3637	5410	4287

Bảng 3. Tính chất cơ lý của sợi thép

Hình dáng	Đường kính (mm)	Chiều dài (mm)	Tỉ lệ hình dạng (L/D)	Cường độ kéo đứt (MPa)	Điện trở suất ρ_f (k Ω - cm)
	0,375	30	80	2311	$1,94 \times 10^{-8}$

Hỗn hợp vật liệu được trộn bằng máy trộn cưỡng bức có dung tích thùng trộn 20 lít. Xi măng, cát, silica fume, tro bay và muội than đen (hoặc xỉ lò cao nghiền mịn) được trộn khô trong khoảng 10 phút, sau đó nước được thêm vào và trộn tiếp khoảng 5 phút. Phụ gia siêu dẻo được bổ sung từ từ

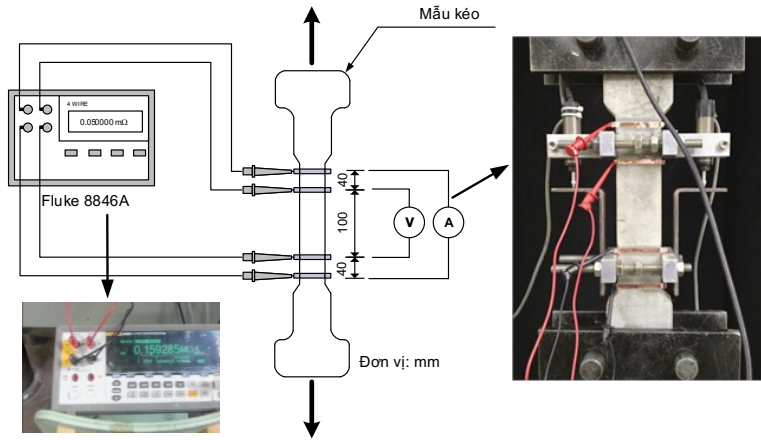
thêm vào từng đợt để có thể điều chỉnh đạt độ dẻo phù hợp. Sau đó sợi thép được cho vào trộn đều. Mẫu vữa được dưỡng hộ 14 ngày trong nước 25°C, sau đó mẫu được vớt ra làm khô khoảng 12 giờ trong lò sấy ở nhiệt độ 70°C. Tất cả mẫu được thí nghiệm ở tuổi 18 ngày.

2.2. Thiết lập thí nghiệm

Hình 3 thể hiện kích thước mẫu kéo và sơ đồ thí nghiệm kéo-cảm biến. Mẫu có hình dạng quả tạ với tiết diện đoạn làm việc $50 \times 25 \text{ mm}^2$, dài 100 mm [2, 3]. Thí nghiệm được tiến hành trong phòng có nhiệt độ $25 \pm 3^\circ\text{C}$ và độ ẩm $50 \pm 6\%$. Điện trở (R) đo được sau đó được quy ra điện trở suất (ρ) bằng công thức (1):

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

trong đó A và L lần lượt là diện tích mặt cắt và chiều dài hoạt động của mẫu, R là điện trở và ρ là điện trở suất.



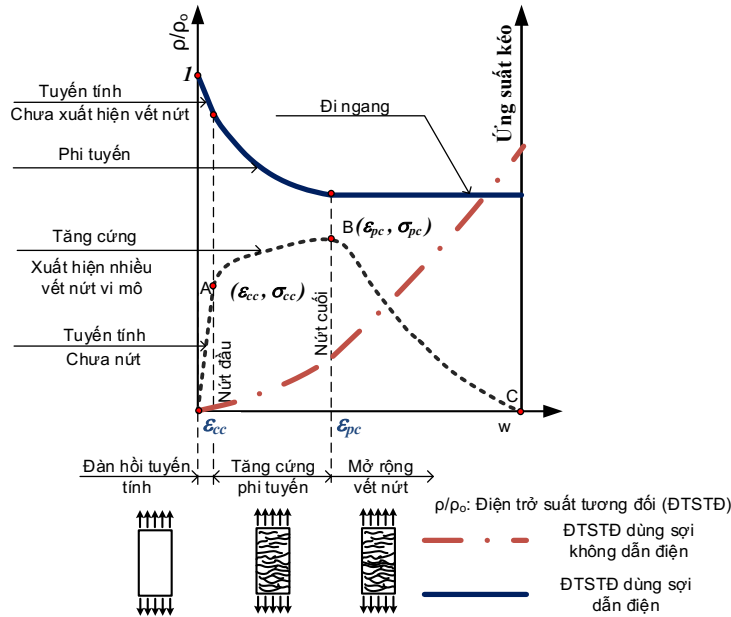
Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm kéo-cảm biến

Hình 4 thể hiện ứng xử kéo-cảm biến của HPFRC. Trong đó đường nét liền thể hiện mối quan hệ ứng suất – biến dạng trong khi đường nét đứt thể hiện mối quan hệ điện trở suất tương đối – biến dạng. Giá trị ρ/ρ_0 , điện trở suất tương đối (ĐTSTĐ), lớn ở giai đoạn đầu sau đó giảm dần; qua khỏi vết nứt sau cùng, ĐTSTĐ đi ngang (không thay đổi). Hệ số cảm biến (gauge factor, GF) được dùng để đánh giá khả năng cảm biến của vật liệu. Hệ số cảm biến trung bình trong phạm vi vết nứt đầu (GF_{cc}) và trong phạm vi vết nứt cuối (GF_{pc}) thể hiện qua phương trình (2) và (3).

$$GF_{cc} = \left| \frac{\Delta R/R_0}{\Delta \varepsilon} \right| = \left| \frac{(R_0 - R_{cc})/R_0}{(\varepsilon_{cc} - 0)} \right| = \left| \frac{(R_0 - R_{cc})}{R_0 \cdot \varepsilon_{cc}} \right| = \left| \frac{(\rho_0 - \rho_{cc})}{\rho_0 \cdot \varepsilon_{cc}} \right| \quad (2)$$

$$GF_{pc} = \left| \frac{\Delta R/R_0}{\Delta \varepsilon} \right| = \left| \frac{(R_0 - R_{pc})/R_0}{(\varepsilon_{pc} - 0)} \right| = \left| \frac{(R_0 - R_{pc})}{R_0 \cdot \varepsilon_{pc}} \right| = \left| \frac{(\rho_0 - \rho_{pc})}{\rho_0 \cdot \varepsilon_{pc}} \right| \quad (3)$$

trong đó R_0 (hay ρ_0), R_{cc} (hay ρ_{cc}) và R_{pc} (hay ρ_{pc}) lần lượt là điện trở (hay điện trở suất) tại lúc bắt đầu gia tải, tại vết nứt đầu và tại vết nứt sau cùng.



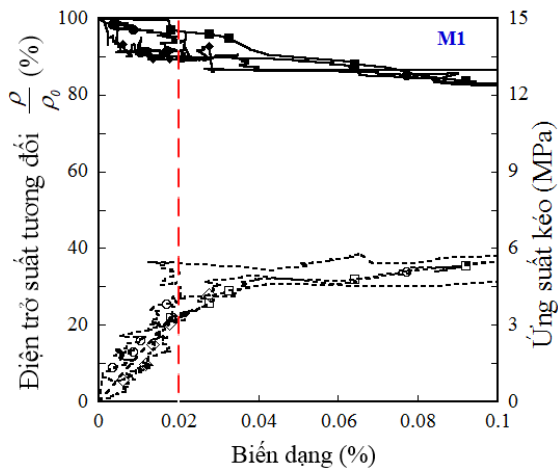
Hình 4. Biểu đồ ứng xử kéo-cảm biến của HPFRC

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

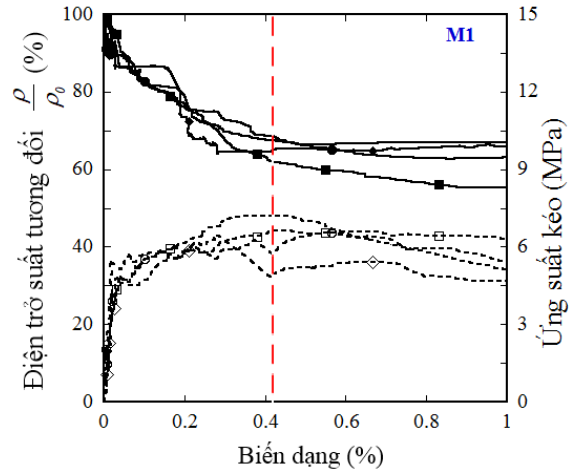
Hình 5 cung cấp biểu đồ ứng xử kéo-cảm biến của ba loại HPFRC sử dụng cấp phối M1, M2 và M3. Trong các biểu đồ này, đường nét đứt thể hiện mối quan hệ ứng suất – biến dạng trong khi đường nét liền thể hiện mối quan hệ độ giảm ĐTSTD – biến dạng. Theo Hình 5 thì cả ba cấp phối đều tạo được hiệu ứng tăng cứng cơ học (strain hardening behaviors) đi liền với sự giảm của điện trở suất. Trong đó, loại M2 có ĐTSTD giảm rõ rệt và ứng suất kéo tăng đáng kể. Bảng 4 cung cấp thông số ứng xử kéo-cảm biến của ba loại HPFRCs tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt và thời điểm kết thúc

Bảng 4. Thông số trong ứng xử kéo-cảm biến của các loại HPFRC

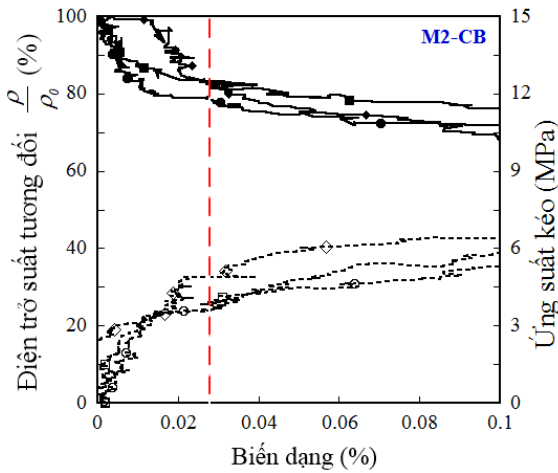
Tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt	Tính chất cơ học		Khả năng cảm biến biến dạng (strain sensing)		
	ε_{cc} (%)	σ_{cc} (MPa)	ρ_0 (kΩ-cm)	ρ_{cc}/ρ_0 (%)	GF _{cc}
M1-Đối chứng	0,020	3,94	269,87	93,73	309,47
M2-CB	0,027	3,97	257,01	82,41	651,48
M3-GGBS	0,017	4,52	335,08	93,79	365,29
Tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt	Tính chất cơ học		Khả năng cảm biến hư hỏng (damage sensing)		
	ε_{pc} (%)	σ_{pc} (MPa)	ρ_0 (kΩ-cm)	ρ_{pc}/ρ_0 (%)	GF _{pc}
M1- Đối chứng	0,420	6,72	269,87	64,84	88,50
M2-CB	0,291	7,18	257,01	56,76	148,59
M3-GGBS	0,220	6,92	335,08	77,71	101,32



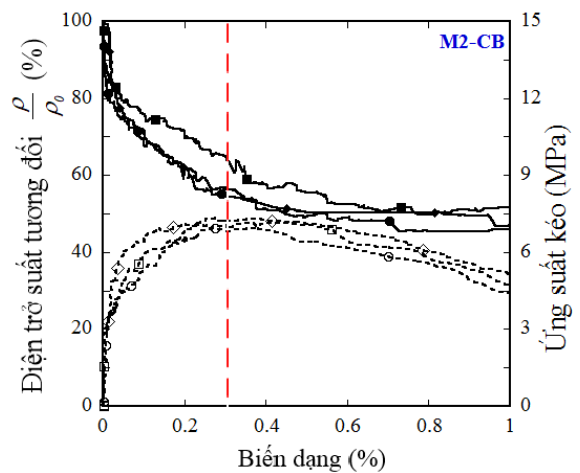
(a) M1, biến dạng tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt



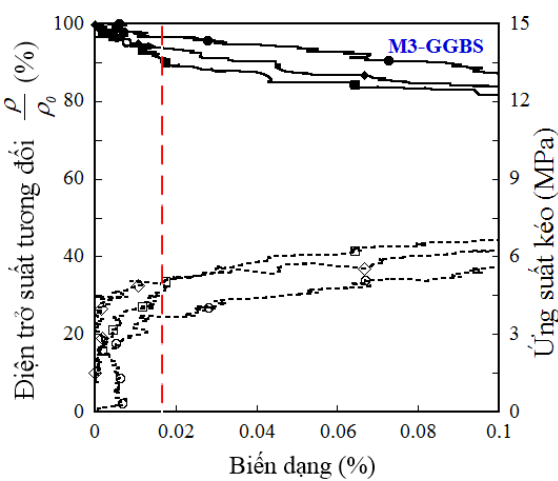
(b) M1, biến dạng tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt



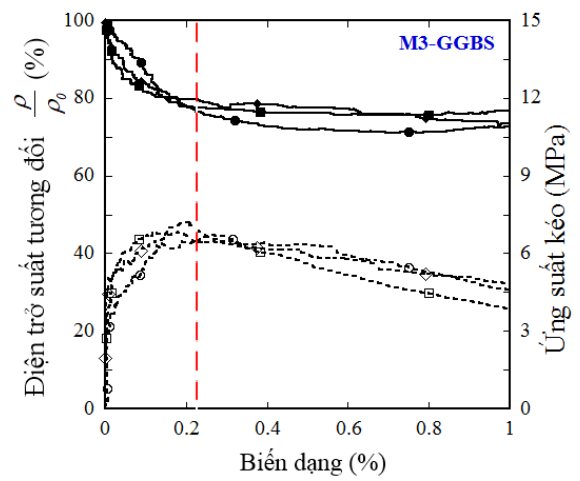
(c) M2, biến dạng tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt



(d) M2, biến dạng tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt

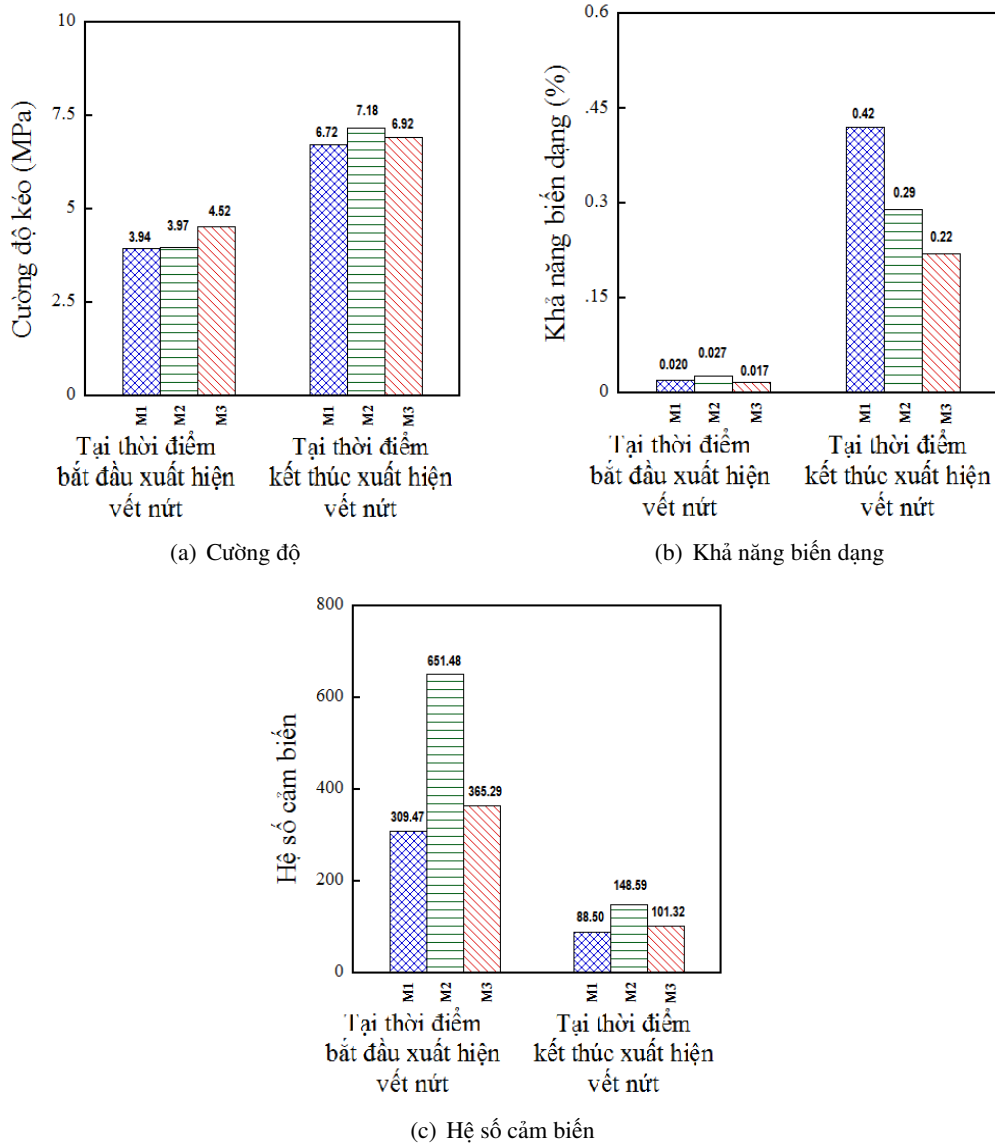


(e) M3, biến dạng tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt



(f) M3, biến dạng tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt

Hình 5. Ứng xử kéo-cảm biến của các loại HPFRC



Hình 6. So sánh một số thông số ứng xử kéo-cảm biến của các loại HPFRC

xuất hiện vết nứt. So sánh hệ số cảm biến của các HPFRC được thể hiện trong Hình 6(c). So với M1, cấp phối M2 chứa muội than đen làm tăng hệ số cảm biến khá ấn tượng: GF_{cc} tăng 2,1 lần, GF_{pc} tăng 1,67 lần. Cấp phối M3 chứa xỉ lò cao nghiền mịn giúp cải thiện hệ số cảm biến, tuy không nhiều so với M2: GF_{cc} tăng 1,18 lần, GF_{pc} tăng 1,14 lần. Thông số cường độ chịu kéo cũng có xu hướng được cải thiện tuy nhiên khả năng chịu biến dạng có xu hướng giảm, cụ thể như sau:

- Đánh giá về cường độ chịu kéo trực tiếp (Hình 6(a)), so với M1, cấp phối M2 có σ_{cc} tăng 1,01 lần, σ_{pc} tăng 1,07 lần. Cấp phối M3 có σ_{cc} tăng 1,15 lần, σ_{pc} tăng 1,03 lần.

- Đánh giá về khả năng chịu biến dạng (Hình 6(b)), so với M1, cấp phối M2 có ε_{cc} tăng 1,35 lần, ε_{pc} giảm 0,69 lần. Cấp phối M3 có ε_{cc} giảm 0,85 lần, ε_{pc} giảm 0,52 lần.

Muội than đen có độ mịn lớn hơn xi măng nên khi thay thế một phần xi măng, vật liệu này có khả

năng giảm độ rỗng trong vữa giúp bê tông đặc chắc hơn dẫn đến cường độ kéo cao hơn. Mặt khác, muội than đen có độ dẫn điện tốt hơn xi măng, điều này giúp ĐTSTD thay đổi lớn dưới tải trọng kéo dẫn đến hệ số cảm biến tăng mạnh, tuy phần tăng này có đóng góp từ biến dạng giảm. Xi măng sử dụng xỉ lò cao nghiền mịn có nhiều tính chất đặc biệt như bền trong môi trường nước biển, ít toả nhiệt, phù hợp với bê tông khối lớn, chống thấm tốt, v.v... Do vậy xỉ lò cao nghiền mịn được khuyến khích sử dụng, dù hệ số cảm biến của HPFRC khi có thêm vật liệu này chỉ tăng ở mức 15%, cường độ kéo tăng ở mức 15% cho σ_{cc} và 3% cho σ_{pc} .

4. Kết luận

- Cả ba loại HPFRC nghiên cứu gồm M1-đối chứng, M2-chứa muội than đen, M3-chứa xỉ lò cao nghiền mịn đều thể hiện khả năng tự cảm biến cả trong giai đoạn đàn hồi lẫn giai đoạn tăng cứng cơ học. Muội than đen tạo hiệu ứng nâng cao tính tự cảm biến (2,1 lần GF_{cc} , 1,67 lần GF_{pc}) cũng như làm tăng cường độ kéo (tăng 1,01 lần đối với σ_{cc} , tăng 1,07 lần đối với σ_{pc}). Tuy nhiên, muội than đen làm giảm biến dạng tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt.

- Xỉ lò cao nghiền mịn nâng cao tính tự cảm biến mức độ nhẹ (1,18 lần GF_{cc} , 1,14 lần GF_{pc}) cũng như làm tăng cường độ kéo (tăng 1,15 lần đối với σ_{cc} , tăng 1,03 lần đối với σ_{pc}). Xỉ lò cao nghiền mịn làm giảm biến dạng tại thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt cũng như tại thời điểm kết thúc xuất hiện vết nứt.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Đại học Quốc tế Hồng Bàng cho đề tài mã số GV1905.

Tài liệu tham khảo

- [1] Naaman, A. E., Reinhardt, H.-W. (2006). [Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response](#). *Materials and Structures*, 39(5):547–555.
- [2] Nguyen, D. L., Song, J., Manathamsombat, C., Kim, D. J. (2015). [Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension](#). *Composites Part B: Engineering*, 69:159–168.
- [3] Song, J., Nguyen, D. L., Manathamsombat, C., Kim, D. J. (2015). [Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites](#). *Journal of Composite Materials*, 49(29):3621–3634.
- [4] Hà, N. B., Hòa, P. D., Tuấn, N. Q., Danh, L. B., Tuyển, N. N., Bảo, N. Q. (2019). [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](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(3V):1–11.
- [5] Danh, L. B., Hòa, P. D., Thắng, N. C., Linh, N. Đ., Dung, B. T. T., Lộc, B. T., Đạt, Đ. V. (2019). [Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(3V):12–21.
- [6] An, V. V. T. (2018). [Study on using maximum amount of fly ash in producing ultra-high performance concrete](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 12(3):51–61.
- [7] Li, H., Ou, J. (2016). [The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges](#). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1):43–67.
- [8] <https://clevelandelectriclabs.in/index.php/bridge-health-monitoring/>.
- [9] Kim, M. K., Kim, D. J., An, Y.-K. (2018). [Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension](#). *Composites Part B: Engineering*, 134:254–264.