

Nghiên cứu tốc độ phát triển vết nứt trong bê tông siêu tính năng sử dụng phương pháp tương quan ảnh kỹ thuật số

Trần Trung Hiếu^{1*}, Vũ Đức Đạt², Ngô Trí Thường³

¹ Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Kiến Trúc

² Công ty cổ phần MC-Bifi Bauchemie

³ Khoa Công trình, Trường Đại Học Thủy lợi

TỪ KHOÁ

UHPFRC
Cốt sợi thép
Tốc độ vết nứt
DIC

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu phương pháp xác định tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu bê tông siêu tính năng gia cố và không gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của các tốc độ tải trọng khác nhau. Thí nghiệm uốn ba điểm với mẫu tạo sẵn vết nứt được thực hiện dưới tải trọng tĩnh bằng hệ thống máy đa năng (UTM) và dưới tải trọng động tốc độ cao bằng máy khung năng lượng (I-SEFIM). Tốc độ phát triển vết nứt được ghi lại bằng hệ thống camera tốc độ cao và xử lý bằng phương pháp tương quan ảnh số (DIC). Kết quả cho thấy tốc độ phát triển vết nứt phụ thuộc lớn vào tốc độ gia tải và sự có mặt của cốt sợi làm giảm đáng kể tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu bê tông dưới cả tải trọng tĩnh và tải trọng động.

KEYWORDS

UHPFRC
Steel fiber
Crack velocity
DIC

ABSTRACT

This paper presents the research results on a method for determining the crack propagation rate in ultra-high-performance concrete (UHPC) specimens, both reinforced and non-reinforced with steel fibers, under different loading rates. Three-point bending tests were conducted on pre-cracked specimens under static loading using a universal testing machine (UTM) and under high-speed dynamic loading using an energy frame system (I-SEFIM). The crack propagation rate was recorded using a high-speed camera system and analyzed through the digital image correlation (DIC) method. The results indicate that the crack propagation rate is significantly influenced by the loading rate, and the presence of fibers in the concrete notably reduces the crack propagation rate in the specimens under both static and dynamic loading conditions.

1. Giới thiệu

Bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép (Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete-UHPFRCs) là một loại vật liệu bê tông có cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo, khả năng hấp thụ năng lượng cao, và khả năng gia tăng cường độ khi tốc độ gia tải tăng [1–5], Hình 1. Những tính năng đặc biệt này giúp vật liệu UHPFRCs phù hợp để sử dụng cho các công trình hạ tầng kỹ thuật, công trình quân sự chịu tác động của tải trọng cực đoan như va đập, nổ [4,6,7].

Ví dụ: Tường bê tông chống đạn trong các công trình quân sự. Tuy nhiên, việc hình thành và phát triển vết nứt trong vật liệu UHPFRCs dưới tác động của tải trọng tốc độ cao, là một quá trình phức tạp và quan trọng dẫn tới sự phá hủy kết cấu vẫn còn hạn chế thông tin, do hạn chế về thiết bị tạo động cũng như việc ghi lại giữ liệu.

Có nhiều phương pháp đã được áp dụng để khảo sát sự hình thành và phát triển vết nứt của bê tông [8–14], sử dụng các kỹ thuật khác nhau như sóng âm (acoustic emission) [8], máy quay tốc độ cao (high-speed camera) [9,10], phương pháp tương quan ảnh kỹ thuật số (digital image correlation - DIC) [10] và cảm biến đo biến dạng hoặc đo vết nứt (strain gauge or crack gauge) [15,16]. Tuy nhiên, nghiên cứu

về tốc độ phát triển vết nứt trong bê tông gia cố cốt sợi (Fiber reinforced concrete- FRC), đặc biệt là UHPFRCs vẫn còn hạn chế. Zhang và cộng sự. [17] nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ gia tải đến tốc độ phát triển vết nứt trong bê tông gia cố cốt sợi thép (fiber reinforced concrete - SFRC), sử dụng cảm biến biến dạng dính trên bề mặt (bonded strain gauges), cho thấy tốc độ vết nứt cơ bản giữ ổn định khoảng 10^{-4} m/s dưới tác dụng của tốc độ tải trọng khoảng $3,33 \times 10^{-3}$ mm/s, trong khi các vết nứt chính phát triển với tốc độ giảm khi tốc độ gia tải tăng lên, khoảng từ 0,10 đến $2,66 \times 10^{-3}$ mm/s. Gần đây, Pyo và cộng sự. [18] nghiên cứu tốc độ phát triển vết nứt trong bê tông UHPFRCs chỉ ra rằng tốc độ phát triển vết nứt đến 1454 m/s trong mẫu có vết nứt tạo sẵn ở tốc độ gia tải cao. Trong các phương pháp sử dụng khảo sát, đánh giá tốc độ phát triển vết nứt, phương pháp tương quan ảnh kỹ thuật số (DIC) đã và đang cho thấy sự hiệu quả và độ chính xác tốt, đặc biệt là dưới tải trọng tốc độ cao.

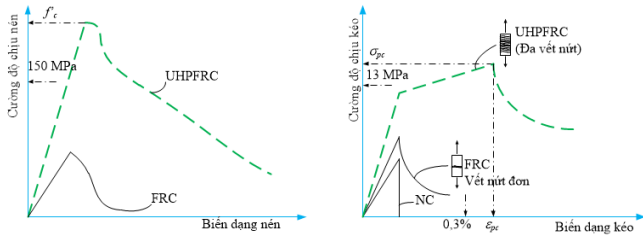
Mục đích của nghiên cứu này là nghiên cứu phương pháp xác định tốc độ phát triển vết nứt trong UHPFRCs dưới tác dụng của các tốc độ tải trọng khác nhau. Một chương trình thí nghiệm uốn ba điểm với mẫu bê tông có vết nứt tạo sẵn được thực hiện trên máy nén đa năng (Universal Test Machine - UTM) cho thí nghiệm tải trọng tĩnh và

*Liên hệ tác giả: hieutt@hau.edu.vn

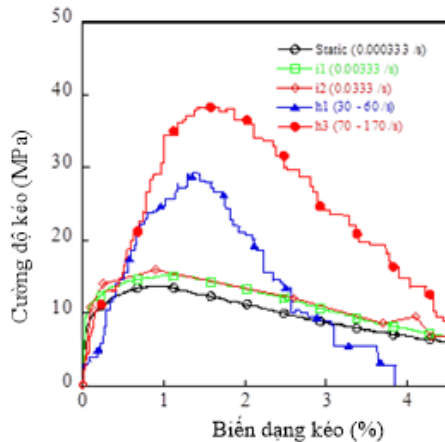
Nhận ngày 30/03/2025, sửa xong ngày 22/04/2025, chấp nhận đăng ngày 24/04/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.889>

trên hệ thống máy thí nghiệm động (Improved Strain Energy Frame Impac Machine - I-SEFIM). Quá trình phát triển vết nứt trong mẫu bê tông được ghi lại bởi hệ thống máy ghi hình tốc độ cao và xử lý bằng phần mềm tương quan ảnh kỹ thuật số (DIC).



(a) Ứng xử kéo - nén của UHPFRC so với FRC và NC



(b) Ứng xử kéo của UHPFRC dưới các tốc độ tải khác nhau

Hình 1. Tính chất kéo, nén của vật liệu UHPFRC [5].

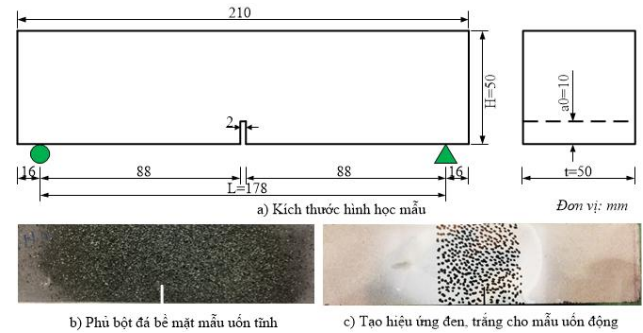
2. Chương trình thí nghiệm

2.1. Vật liệu và mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm uốn UHPFRC có gia cố và không gia cố 2 % khối lượng cốt sợi thép tròn trơn, đường kính 0,2 mm và chiều dài 19 mm, kích thước như Hình 2, được chế tạo và thí nghiệm. Thành phần cấp phối của bê tông UHPC như Bảng 1, kích thước thành phần hạt của từng thành phần và quá trình trộn, chuẩn bị mẫu có thể tham khảo trong các tài liệu [19]. Máy trộn công suất 20 l có thể điều chỉnh tốc độ quay được dùng để trộn hỗn hợp UHPC. Đầu tiên, muối silic (silica fume) và cát quartz (silica sand) được trộn khô với nhau trong khoảng 5 phút. Sau đó, xi măng loại I (cement - type I) và bột khoáng (silica powder) được cho vào trộn tiếp trong khoảng 5 phút (với tốc độ quay của máy trộn khác nhau). Khi hỗn hợp khô đã đồng đều, nước và phụ gia siêu dẻo (superplasticizer) được cho vào từ từ và trộn tiếp cho đến khi hỗn hợp đạt được độ dẻo cần thiết.

Kích thước mẫu hình khối là $50 \times 50 \times 210 \text{ mm}^3$. Trước khi thí nghiệm, mẫu được cắt sẵn một khe sâu 10 mm rộng trung bình 2 mm phía mặt dưới của mẫu tạo điều kiện cho vết nứt hình thành tập trung, đúng vị trí cần khảo sát của mẫu. Bột đá hoặc bề mặt đốm trắng đen lần lượt được tạo lên bề mặt của mẫu nén tĩnh (Hình 2b) và mẫu nén

động (Hình 2c) nhằm tăng tính hiệu quả của hệ thống ghi hình ảnh và xử lý thông tin vết nứt trên mẫu. Mẫu thí nghiệm, điều kiện biên, điều kiện gia tải được sử dụng đồng bộ cho cả thí nghiệm tĩnh và động để loại bỏ các ảnh hưởng khác đến kết quả thí nghiệm.



Hình 2. Mẫu thí nghiệm tạo vết nứt trước.

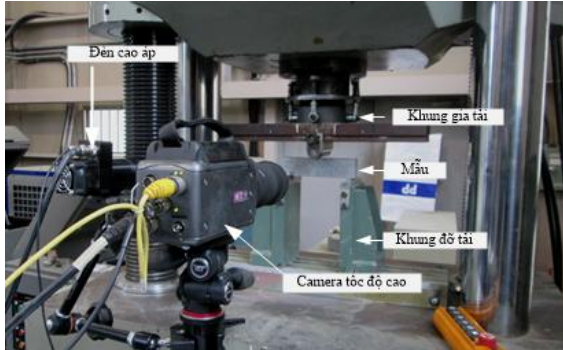
2.2. Thí nghiệm

Thí nghiệm uốn ba điểm tải trọng tĩnh được vận hành bằng máy nén đa năng UTM với chế độ kiểm soát chuyển vị (Hình 3). Tải trọng tác dụng được đo bằng cảm biến lực cài đặt trong UTM, trong khi dịch chuyển thẳng đứng (δ) của mẫu được đo bằng hai biến áp vi sai tuyến tính (linear variable differential transformer - LDVT) được gắn vào đáy mẫu bằng khung nhôm. Tốc độ ghi dữ liệu của máy là 1 Hz. Hệ thống máy quay tốc độ cao, được thiết lập với tần số 2.5000 ảnh/s và độ phân giải 128×88 pixel dùng để ghi lại quá trình chuyển vị của mẫu thí nghiệm. Trong quá trình thí nghiệm một bộ đèn cao áp được sử dụng để chiếu lên bề mặt mẫu, tăng khả năng và chất lượng ghi hình ảnh của hệ thống máy quay.

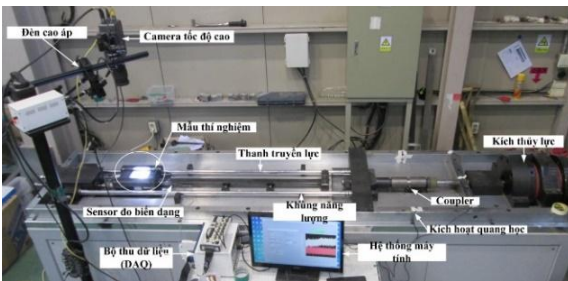
Hệ thống thí nghiệm động bằng khung năng lượng (I-SEFIM) được đề xuất bởi Tran và cộng sự [24], nâng cấp bởi Park và cộng sự [4] tại Đại học Sejong (Hàn Quốc), đã và đang được dùng hữu hiệu để thí nghiệm kéo mẫu UHPFRC dưới tác dụng của tải trọng động. Trong nghiên cứu này, một bộ thí nghiệm uốn ba điểm được cải tiến để cài vào máy I-SEFIM phục vụ thí nghiệm uốn ở tốc độ gia tải siêu cao, như thể hiện trong Hình 4. Hai tổ hợp coupler và hệ thống khung năng lượng được sử dụng để tạo ra các tốc độ gia tải khác nhau: Coupler 800 và 400 kN sử dụng với khung năng lượng bằng thép cường độ cao được sử dụng tạo ra tốc độ gia tải lý thuyết lần lượt là 13.83 và 6.94 m/s [20]. Tải trọng tác dụng được đo bằng 2 cảm biến biến dạng động gắn vào 2 bên thanh truyền lực của hệ thống, trong khi quá trình biến dạng và tốc độ phát triển vết nứt được đo bằng hệ thống máy quay tốc độ cao. Hệ thống máy quay tốc độ cao được thiết lập với tần số 100.000 ảnh/s và độ phân giải 160×80 pixel dùng để ghi lại quá trình chuyển vị của mẫu thí nghiệm. Trong quá trình thí nghiệm bộ đèn cao áp dùng để chiếu lên bề mặt mẫu, tăng khả năng và chất lượng ghi hình ảnh của hệ thống máy quay. Chi tiết về nguyên lý, cấu tạo thí nghiệm có thể tham khảo tại [21].

Bảng 1. Thành phần cấp phối UHPC theo tỷ lệ khối lượng.

Thành phần	Xi măng (loại I)	Muội silic	Cát quartz	Bột khoáng	Phụ gia siêu dẻo	Nước
Tỷ lệ khối lượng	1,00	0,25	1,10	0,30	0,067	0,2
Khối lượng (kg/m ³)	823	206	905	247	55	165



Hình 3. Thí nghiệm uốn ba điểm, tải trọng tĩnh.

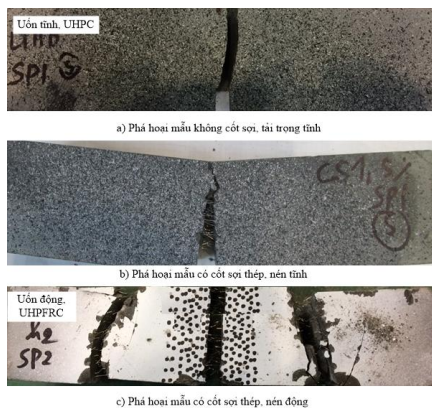


Hình 4. Thí nghiệm uốn ba điểm, tải trọng động (I-SEFIM).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Trạng thái phá hủy

Sự phát triển vết nứt chủ đạo trong mẫu UHPFRCS dưới tác dụng của tải trọng được thể hiện trong Hình 5. Nhìn chung, các mẫu thí nghiệm bị phá hủy bởi một vết nứt chính, hình thành từ mép của vết cắt tạo sẵn, phát triển đến mép đối diện của mẫu, mặc dù hình dáng, đường đi của vết nứt là khác nhau tùy theo hàm lượng cốt sợi và tốc độ gia tải.



Hình 5. Sự phá hoại mẫu dưới tác dụng của tải trọng khác nhau.

Mẫu UHPC phá hủy với chỉ một vết nứt chính, trong khi mẫu UHPFRCS hình thành các vết nứt nhỏ dọc theo đường đi của vết nứt lớn. Hơn nữa, các vết nứt chính thẳng hơn khi tốc độ gia tải tăng lên. Cần lưu ý rằng, trên mẫu thí nghiệm động (Hình 5.c), vết nứt giữa là vết nứt phá hoại khi mẫu bị tác dụng lực, còn 2 vết nứt xiên 2 bên là mẫu bị phá hoại do phản hồi của khung máy sau khi mẫu đã bị phá hoại hoàn toàn theo vết nứt giữa.

3.2. Công nghệ tương quan hình ảnh số (DIC)

Tương quan hình ảnh kỹ thuật số (DIC) là một kỹ thuật đo lường quang học không tiếp xúc, được sử dụng để đo chuyển vị trên bề mặt của một vật thể cần đo. Chuyển vị này sau đó được sử dụng để tính toán biến dạng bề mặt của vật thể. DIC hoạt động bằng cách so sánh một chuỗi hình ảnh được chụp theo trình tự trong một khoảng thời gian nhất định bằng một máy quay kỹ thuật số có độ phân giải cụ thể. Biến dạng của bề mặt được xác định bằng sự dịch chuyển tọa độ của các vị trí ở các thời điểm khác nhau của quá trình thí nghiệm. Để quá trình đạt hiệu quả tối đa, khu vực cần đo nên được sơn phủ bằng một mẫu chấm ngẫu nhiên trước khi bắt đầu quá trình [22].

DIC ba chiều (3D DIC) yêu cầu hai bộ hình ảnh của vật thể được chụp từ các góc máy khác nhau tại cùng một thời điểm. Hệ thống phải được hiệu chuẩn để xác định không gian 3D trong đó sự kiện hoặc quá trình cần nghiên cứu sẽ diễn ra. Kết quả của quá trình hiệu chuẩn này sau đó được sử dụng để liên kết các hình ảnh từ hai camera, giúp xác định độ võng và biến dạng của vật liệu được nghiên cứu [22]. Một ưu điểm của DIC là nó có thể được sử dụng để theo dõi các khu vực bề mặt lớn và phát hiện các hiện tượng bất thường xảy ra trên bề mặt, chẳng hạn như sự hình thành các vết nứt lớn từ các khu vực khiếm khuyết trong bê tông – điều có thể khó hoặc không thể xác định và đo lường bằng các kỹ thuật truyền thống.

Nguyên lý cơ bản của DIC dựa trên thực tế rằng phân bố các giá trị thang độ xám trong ảnh của trạng thái chưa biến dạng có thể được liên kết với trạng thái đã biến dạng. Để thực hiện điều này, phân bố mức xám ban đầu trong ảnh tham chiếu cho bất kỳ vùng điểm ảnh nào được biểu diễn bằng một hàm $g(x,y)$. Hàm này trở thành $g(x_t,y_t)$ trong bức ảnh đã biến dạng. Mối quan hệ giữa các giá trị thang độ xám cho vùng điểm ảnh này trong trạng thái ban đầu và trạng thái đã biến dạng được biểu diễn bằng công thức sau [22]:

$$g(x; y) = g(x_t + y_t) \quad (1)$$

Các pixel trong ảnh tham chiếu sau đó được biến đổi thành ảnh đích như sau:

$$x_t = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (2)$$

$$y_t = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \quad (3)$$

Các giá trị a_1, a_5 mô tả sự tịnh tiến của tâm điểm ảnh; các giá trị còn lại (a_2-a_4, a_6-a_8) mô tả sự quay và biến dạng của nó.

3.3. Tốc độ phát triển vết nứt

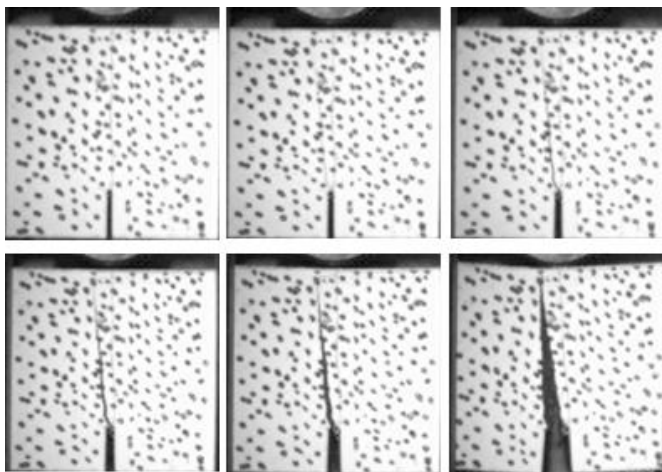
Dữ liệu từ hệ thống camera tốc độ cao ghi lại quá trình biến dạng, phá huỷ của mẫu thí nghiệm được đưa vào phần mềm DIC để xử lý hình ảnh, tính toán xác định tốc độ phát triển vết nứt. Các hình ảnh điển hình phá hoại mẫu theo thời gian được thể hiện trên Hình 6-7. Trong đó, Hình 6 là hình thành phát triển vết nứt của mẫu không có gia cố cốt sợi. Một vết nứt đơn lẻ hình thành từ cuối khe tạo sẵn của mẫu xuất hiện và phát triển hướng về khu vực chịu nén khi uốn của mẫu. Vết nứt có xu hướng không hoàn toàn thẳng, vuông góc với trục trung hoà của mẫu do không bị hạn chế bởi các cốt sợi và mẫu hỗn hợp UHPC là tương đối dòn. Trong khi đó, vết nứt chính kèm theo các vết nứt nhỏ hình thành dọc từ cuối của vết cắt tạo sẵn đến phía đối diện của mặt cắt mẫu, vết nứt không hoàn toàn thẳng do sự giới hạn phát triển vết nứt của các sợi cốt sợi bắc ngang qua vết nứt, như thể hiện trên Hình 6.

Các cặp điểm đo chuyển vị ảo được tạo trên bề mặt của mẫu, dọc theo 2 bên trục vết nứt hình thành được dùng để đo chuyển vị thông qua các hình ảnh liên tiếp nhau ghi bởi hệ thống máy quay tốc độ cao, như Hình 7. Tốc độ phát triển vết nứt được xác định theo công thức (1)

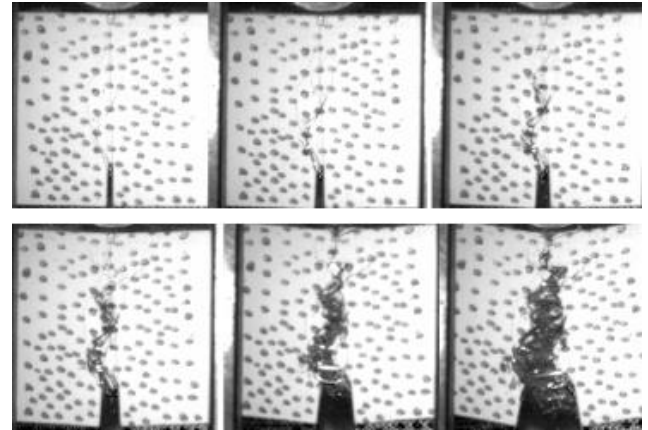
$$\text{Tốc độ vết nứt} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_{GL_i} - y_{GL_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}}}{n-1} \quad (1)$$

Trong đó, y_{GL_i} là tọa độ y của điểm đầu và điểm cuối của điểm đo biến dạng thứ i (GL_i); t_i là thời điểm đo biến dạng của điểm GL_i ; n số cảm biến ảo dùng để đo. GL_1 và GL_n được bố trí ở vị trí cuối của khe nứt tạo trước và trên trục trung hoà ban đầu của mẫu thí nghiệm. Lưu ý rằng, tọa độ x của từng cảm biến ảo được điều chỉnh theo sự phát triển của vết nứt cho từng mẫu thí nghiệm, nhưng khoảng cách giữa 2 điểm đo của từng cảm biến ảo cố định 10 mm.

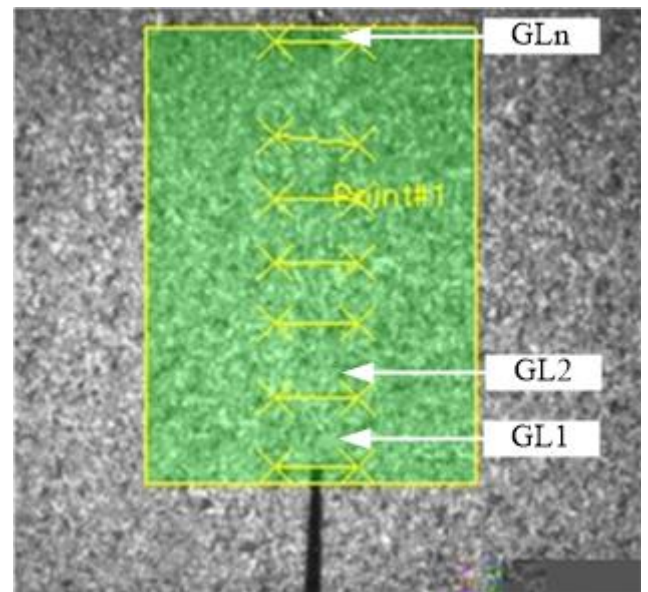
Tốc độ phát triển vết nứt (v) trong mẫu UHPC và UHPFRCs phân tích bằng DIC được thống kê trong Bảng 2, sử dụng công thức (1).



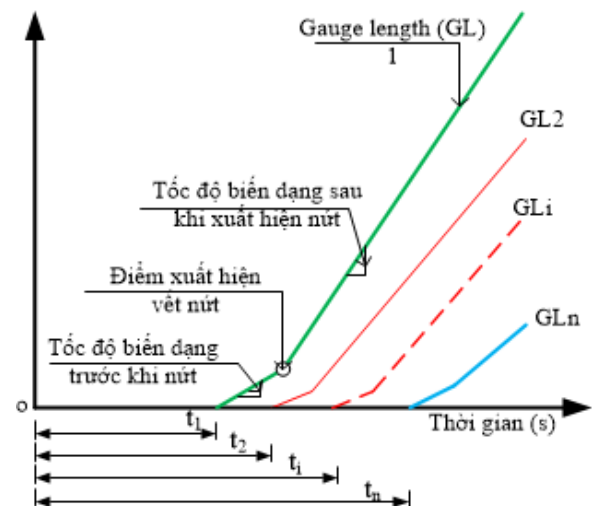
Hình 6. Hình thành vết nứt theo thời gian với mẫu UHPC.



Hình 6. Hình thành vết nứt theo thời gian với mẫu UHPFRCs.



a) Các đoạn đo chuyển vị trên bề mặt mẫu



b) Minh họa cách tính toán tốc độ vết nứt

Hình 8. Tính toán tốc độ vết nứt dùng DIC.

Bảng 2. Tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu UHPFRCs.

Loại thí nghiệm	Số hiệu mẫu	Tốc độ gia tải	Tốc độ vết nứt, v, DIC)
		m/s	m/s
SS00-S	SP1	1,67x10 ⁻⁵	4,14
	SP2		3,85
	SP3		4,73
	SP4		9,85
	Average		5.64
SS00-h	SP1	13,83 ^{**}	638,1
	SP2		736,0
	SP3		857,5
	SP4		723,7
	Average		738.82
LS20-S	SP1	1,67x10 ⁻⁵	0,0015
	SP2		0,0029
	SP3		0,0023
	SP4		0,0011
	Average		0.0019
LS20-h	SP1	13,83 ^{**}	484,5
	SP2		516,2
	SP3		603,9
	SP4		603,9
	Average		552.12

Ký hiệu của từng loạt thí nghiệm được đặt theo hàm lượng cốt sợi (00, 20 tương ứng với hàm lượng cốt sợi là 0,0 và 2,0 vol.%); tốc độ gia tải (“S” tương ứng với tải trọng tĩnh, “h” tương ứng với tốc độ gia tải cao). Có thể thấy ở Bảng 2, tốc độ phát triển vết nứt trung bình của các mẫu UHPC là 5,64 m/s dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tăng lên 738,82 m/s ở tốc độ gia tải cao. Trong khi đó, giá trị này của mẫu UHPFRCs lần lượt là 0,0019 và 552,12 m/s. Điều đó cho thấy, khi tốc độ gia tải tăng thì tốc độ phát triển vết nứt tăng. Đồng thời, việc gia cố cốt sợi có tác dụng đáng kể vào việc hạn chế tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu UHPFRCs. Tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu UHPC 5,64 m/s giảm xuống còn 0,0019 m/s trong mẫu UHPFRCs dưới tải trọng tĩnh. Con số tương ứng ở tốc độ gia tải cao là 738,82 m/s xuống 552,12 m/s. Xu hướng này phù hợp với những nghiên cứu đã được công bố trước đây [18,19].

4. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy, có thể sử dụng phương pháp DIC với hệ thống máy quay tốc độ cao để xác định tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu bê tông UHPFRCs. Một số kết luận có thể được rút ra từ kết quả thí nghiệm như sau:

- Tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu UHPFRCs tăng khi tốc độ gia tải tăng. Tốc độ phát triển vết nứt trung bình của các mẫu UHPC

và UHPFRC là 5,64; 0,0019 m/s dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tăng lên 738,82 và 552,12 m/s ở tốc độ gia tải cao.

- Cốt sợi có tác dụng đáng kể trong việc hạn chế tốc độ phát triển vết nứt trong mẫu UHPFRCs. Những tính chất này hứa hẹn việc áp dụng vật liệu UHPFRCs vào công trình thực tế, chịu tải trọng động như động đất, va chạm, phá nổ.

Cần có thêm các nghiên cứu để áp dụng công nghệ DIC vào các công trình thực tế để theo dõi sự hình thành và phát triển vết nứt, để có những cảnh báo kịp thời, hạn chế các tác hại mà sự phá hỏng kết cấu gây ra.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Wille K, Naman AE, Parra-Montesinos GJ. Ultra - High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22ksi): A Simpler Way. ACI Mater J 2011;108:46–53.
- [2]. Lee Y, Kang ST, Kim JK. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. Constr Build Mater 2010;24:2030–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.009>.
- [3]. Tran NT, Tran TK, Jeon JK, Park JK, Kim DJ. Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. Cem Concr Res 2016;79:169–84. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.011>.
- [4]. Park SH, Kim DJ, Kim SW. Investigating the impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine. Constr Build Mater 2016;125:145–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.027>.
- [5]. Thường NT, Hải HV. 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 Kỹ Thuật và Công Nghệ 2021;63:40–5. [https://doi.org/https://doi.org/10.31276/VJST.63\(3\).40-45](https://doi.org/https://doi.org/10.31276/VJST.63(3).40-45).
- [6]. Tran NT, Tran TK, Kim DJ. High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension. Cem Concr Res 2015;69:72–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.12.008>.
- [7]. Pyo S, El-Tawil S, Naaman AE. Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates. Cem Concr Res 2016;88:144–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.003>.
- [8]. Goszarczyńska B. Analysis of the process of crack initiation and evolution in concrete with acoustic emission testing. Arch Civ Mech Eng 2014;14:134–43. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.06.002>.
- [9]. Mindess S, Bentur A. A preliminary study of the fracture of concrete beams under impact loading, using high speed photography. Cem Concr Res 1985;15:474–84. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90121-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90121-8).
- [10]. P. Forquin. An optical correlation technique for characterizing the crack velocity in concrete. Eur Phys J Spec Top 2012;206:89–95.
- [11]. John, R. and Shah S. Fracture of Concrete Subjected to Impact Loading. Cem Concr Aggregates 1986;8:24–32.
- [12]. Rong Z, Sun W, Zhang Y. International Journal of Impact Engineering Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites. Int J Impact Eng 2010;37:515–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.11.005>.
- [13]. Eibl MGK -H. HJ. Measurement of crack velocity in concrete. Exp Tech 1989;13:25–7.
- [14]. Pyo S, El-Tawil S. Crack velocity-dependent dynamic tensile behavior of concrete. Int J Impact Eng 2013;55:63–70.