

ẢNH HƯỞNG CỦA NANO CARBON VÀ TRO BAY ĐẾN CO NGÓT VÀ KHẢ NĂNG KHÁNG NỨT CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO

Văn Viết Thiên Ân^{a,*}, Lê Đăng Hải^a

^a*Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 16/05/2019, Sửa xong 28/05/2019, Chấp nhận đăng 30/05/2019

Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và nano carbon đến các tính chất cơ lý cũng như co ngót và khả năng kháng nứt theo phương pháp vòng hạn chế (Ring-Test) của bê tông chất lượng siêu cao (UHPC). Kết quả nghiên cứu cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay thay thế xi măng thì tính công tác và co ngót của UHPC sẽ được cải thiện. Tuy nhiên, cường độ nén ở tuổi 28 ngày và khả năng kháng nứt của UHPC đạt được cao nhất ở 20% tro bay thay thế xi măng theo thể tích. Khi sử dụng nano carbon thì cường độ nén ở 28 ngày tuổi và khả năng kháng nứt của UHPC tăng lên.

Từ khoá: bê tông chất lượng siêu cao; tro bay; nano carbon; co ngót; kháng nứt.

EFFECT OF NANO CARBON AND FLY ASH ON SHRINKAGE AND CRACK RESISTANCE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Abstract

The present study aims to evaluate the effects of fly ash and nano carbon on properties of ultra-high performance concrete (UHPC) such as workability, compressive strength, shrinkage, and crack resistance. Ring-Test method was used to measure the crack resistance of concrete samples. The results showed that increasing fly ash content in UHPC will result in higher flowability of concrete mixture and lowers shrinkage of UHPC. However, the maximum compressive strength at the age of 28d and crack resistance of UHPC can be possibly obtained by using 20% to replace cement by volume. The addition of nano carbon enhances the 28d compressive strength and crack resistance of UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; fly ash; nano carbon; shrinkage; crack resistance.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(2V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(2V)-04) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Đặt vấn đề

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) là một phân loại bê tông mới sử dụng chất kết dính xi măng, nó đã và đang được nghiên cứu và ứng dụng ở nhiều nước trên thế giới trong hơn hai thập niên qua [1, 2]. Bê tông chất lượng siêu cao có độ chảy cao, cường độ nén ở tuổi 28 ngày thường đạt trên 120 MPa trong điều kiện dưỡng hộ thường, cường độ uốn lớn (khi sử dụng cốt sợi thép), độ rỗng rất thấp và độ bền lâu rất cao [3–5]. Để đạt được các tính năng đặc biệt này, bê tông chất lượng siêu cao sử dụng tỷ lệ nước và chất kết dính (N/CKD) rất thấp, lượng dùng xi măng khoảng 900-1000 kg/m³ và hàm lượng muội silic (silica fume) tương ứng khoảng 150-250 kg/m³. Với lượng dùng xi măng và

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: anvt@nuce.edu.vn (Ân, V. V. T.)

muối silic lớn, lượng dùng nước rất thấp, bê tông chất lượng siêu cao có độ co ngót cao, gây nguy cơ nứt cao hơn nhiều so với bê tông thông thường cũng như bê tông chất lượng cao, ảnh hưởng lớn đến khả năng ứng dụng của loại bê tông này. Các hướng nghiên cứu chính hiện nay không những nhằm nâng cao các tính chất về cường độ, độ bền dẻo dai, cấu trúc và độ bền lâu của bê tông mà còn cần cải thiện tính công tác, giảm tính co ngót cũng như tăng cường khả năng kháng nứt cho hỗn hợp bê tông này.

Phụ gia khoáng hoạt tính, đặc biệt là silica fume cần được sử dụng trong chế tạo UHPC. Phụ gia khoáng hoạt tính đóng vai trò là các chất điền đầy làm tăng khả năng liên kết giữa các hạt, tăng khả năng phân tán các hạt xi măng cũng như góp phần phản ứng với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nhằm cải thiện tính công tác cũng như cường độ, vi cấu trúc của UHPC. Vì vậy, silica fume ảnh hưởng rất nhiều đến các tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông đã rắn chắc [6–8]. Tro bay, là chất thải rắn của các nhà máy nhiệt điện đang được thải ra với khối lượng rất lớn có giá thành thấp và gây ô nhiễm môi trường ở nước ta và trên thế giới có thể được sử dụng để sản xuất UHPC. Khi tro bay thay thế từng phần xi măng thì có thể cải thiện tính công tác của hỗn hợp UHPC nhưng chỉ làm tăng cường độ ở một hàm lượng thay thế hợp lý hoặc thậm chí làm giảm cường độ của UHPC [9–12]. Trong bê tông, khi tăng hàm lượng sử dụng silica fume sẽ làm tăng co ngót trong khi đó sử dụng tro bay thay thế xi măng sẽ cải thiện tính co ngót của bê tông, đặc biệt là bê tông chất lượng siêu cao [13]. Bên cạnh đó, vật liệu nano như nano silica, nano carbon cũng đã được nghiên cứu và ứng dụng trong UHPC [14, 15]. Kết quả nghiên cứu [15] cho thấy việc sử dụng nano carbon không ảnh hưởng nhiều đến tính công tác nhưng lại có khả năng cải thiện cường độ nén và co ngót của UHPC.

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và nano carbon đến các tính chất cơ lý cũng như co ngót và khả năng kháng nứt theo phương pháp vòng hạn chế (Ring-Test) của UHPC. Các kết quả nghiên cứu sẽ được so sánh với mẫu đối chứng không sử dụng tro bay hoặc mẫu không sử dụng nano carbon.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

Xi măng PC40 Bút Sơn, tro tuyển Phả Lại (FA), silica fume (SF) dưới dạng hạt không kết nén là các vật liệu chất kết dính được sử dụng trong nghiên cứu. Cát quắc là cốt liệu duy nhất cho bê tông

Bảng 1. Thành phần hóa của vật liệu chất kết dính, [%]

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	MKN
Xi măng	22,56	3,47	5,29	64,21	0,14	0,61	2,26	0,81
Tro bay	58,70	7,31	22,89	0,98	0,33	3,60	0,85	3,13
Silica fume	92,30	-	-	-	-	-	-	-

Bảng 2. Tính chất cơ lý cơ bản của vật liệu

	Xi măng	Tro bay	Silica fume	Cát quắc
Khối lượng riêng [g/cm^3]	3,1	2,24	2,20	2,64
Kích thước hạt trung bình [μm]	21,1	7,87	0,151	473,40
Cường độ xi măng ở các tuổi [MPa]	3 ngày:	28,7	28 ngày:	47,9

chất lượng siêu cao. Các đặc tính hóa lý của vật liệu sử dụng được trình bày ở Bảng 1–2. Phụ gia siêu dẻo có gốc polycarboxylate với hàm lượng chất rắn 40% được sử dụng để chế tạo bê tông và nano carbon (NC) được đưa vào dưới dạng phụ gia. Nano carbon là vật liệu nano dạng ống được nhập khẩu từ công ty Advanced Research & Technologies từ Belarus dưới dạng dung dịch có chứa nano carbon và chất ổn định với một số đặc tính của nano carbon được nêu trong Bảng 3.

Bảng 3. Tính chất nano carbon do nhà sản xuất cung cấp

Thông số	Giá trị
Đường kính ngoài	< 8 nm
Đường kính bên trong	2 ± 5 nm
Chiều dài	10 ± 30 μ m
Độ tinh khiết	> 95%
Lượng tro	< 1,5%
Tỉ diện tích bề mặt riêng	> 500 m ² /g

2.2. Cấp phối bê tông

Thiết kế thành phần bê tông được tính toán dựa vào nguyên tắc thể tích tuyệt đối. Bê tông chất lượng siêu cao được xem gồm hai thành phần chính là các hạt cốt liệu và hồ chất kết dính. Thể tích của hồ chất kết dính trong UHPC được chọn lớn hơn 15% thể tích rỗng của cát quá không đầm chặt; Thể tích rỗng của cát thạch anh dùng trong nghiên cứu là 42%, vì vậy thể tích hồ chất kết dính sẽ chiếm 57% thể tích của UHPC và thể tích cốt liệu mịn chiếm 43%. Tỷ lệ $N/CKD_v = 0,50$ là tỷ lệ nước trên chất kết dính tính theo thể tích. Thể tích hồ, thể tích chất kết dính và nước được giữ cố định cho tất cả các cấp phối. Thể tích của xi măng được thay thế từng phần bởi thể tích của tro bay (FA) và silicafume (SF). Lượng dùng phụ gia siêu dẻo (SD_k) là 1% hàm lượng chất khô tính theo khối lượng hỗn hợp chất kết dính. Các cấp phối thí nghiệm được đưa ra ở Bảng 4 và Bảng 5.

Bảng 4. Cấp phối hỗn hợp bê tông UHPC có hàm lượng tro bay khác nhau

STT	% Phụ gia khoáng thay thế xi măng theo thể tích		Xi măng	Cát	SF	FA	N*	SD_k	N/CKD_v
	SF (%)	FA (%)							
CP0	15	0	1001	1135	125,4	-	190	11,3	0,50
CP1	15	10	884	1135	125,4	85,1	190	10,9	0,50
CP2	15	20	766	1135	125,4	170,2	190	10,6	0,50
CP3	15	30	648	1135	125,4	255,4	190	10,3	0,50

(*) Tổng lượng nước nhào trộn.

2.3. Chế tạo bê tông và phương pháp nghiên cứu

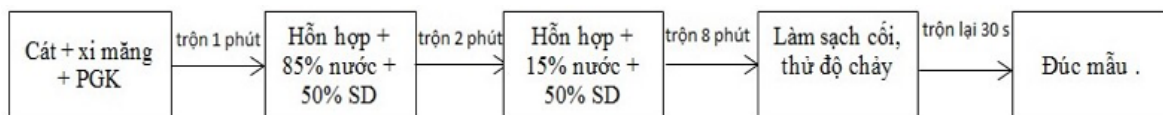
Hỗn hợp bê tông được trộn theo qui trình trên Hình 1. Đối với cấp phối sử dụng phụ gia nano carbon, dung dịch phụ gia có chứa nano carbon được định lượng theo hàm lượng chất khô của nano carbon tương ứng với cấp phối trên Bảng 5 được trộn vào 15% nước và 50% siêu dẻo còn lại trước khi

Ân, V. V. T., Hải, L. Đ. / Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng
 Bảng 5. Cấp phối UHPC có hàm lượng nano carbon khác nhau

STT	XM	Cát	SF	FA kg/m ³	N*	SD _k	NC
CP1	884	1135	125,4	85,12	190	10,9	0
CP1-1	884	1135	125,4	85,12	190	10,9	0,050
CP1-2	884	1135	125,4	85,12	190	10,9	0,175
CP1-3	884	1135	125,4	85,12	190	10,9	0,300

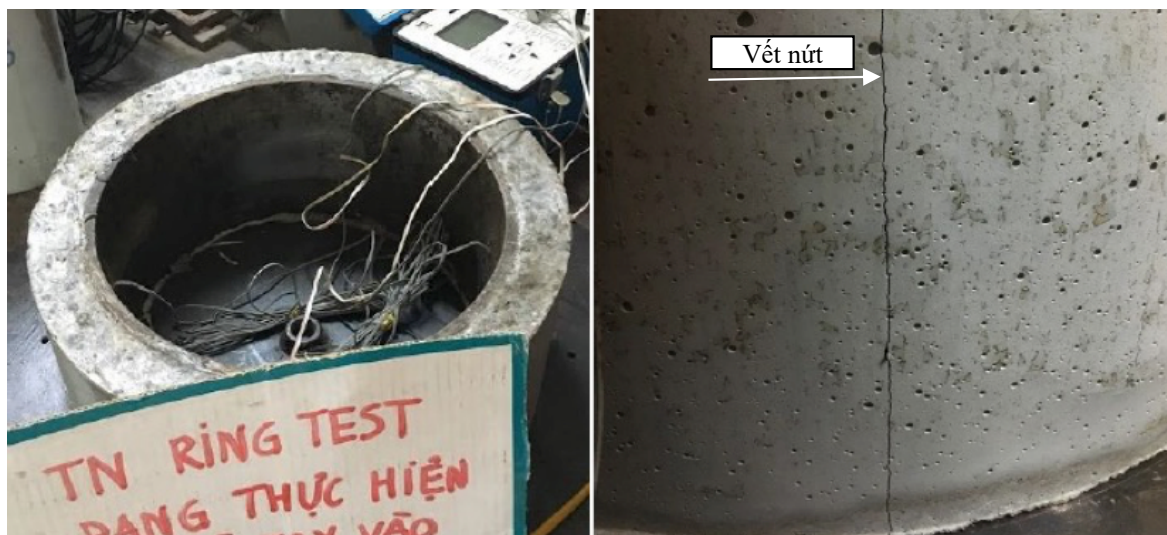
(*) Tổng lượng nước nhào trộn.

cho vào hỗn hợp để trộn (Hình 1). Độ chảy loang được xác định theo BS 4451-1:1998 nhưng không dùng dụng cụ mini côn. Mẫu có kích thước 50 × 50 × 50 mm³ được sử dụng để xác định cường độ nén theo ASTM C109, được tạo hình thành 2 lớp, mỗi lớp rung 30 giây. Mẫu thí nghiệm được bảo dưỡng trong khuôn ở điều kiện phòng thí nghiệm và được tháo khuôn sau 24h. Mẫu sau khi tháo khuôn được đưa vào bảo dưỡng trong nước đến tuổi thí nghiệm.



Hình 1. Quy trình chế tạo bê tông chất lượng siêu cao

Co ngót của mẫu UHPC được xác định trên mẫu kích thước 25 × 25 × 285 mm, trên cơ sở tiêu chuẩn ASTM C157. Hỗn hợp bê tông được rót đầy khuôn, không rung tạo hình, được bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm và tháo khuôn sau 24h. Mẫu sau khi tháo khuôn được bọc kín bề mặt ngay để thực hiện đo co ngót nội sinh và để tự do trong môi trường phòng thí nghiệm để đo co ngót tổng, mỗi cấp phối cho một phép đo được thực hiện trên 3 mẫu và bắt đầu quá trình đo co ngót sau 24h thủy hóa.



Hình 2. Mẫu thí nghiệm Ring-Test

Khả năng kháng nứt của UHPC được xác định thông qua thời điểm mẫu thí nghiệm bị nứt kể từ khi tháo khuôn bằng phương pháp thí nghiệm vòng hạn chế (Restrained ring test) theo ASTM C1581-2004. Mẫu bê tông sẽ được tháo khuôn sau 24h bảo dưỡng ở điều kiện phòng thí nghiệm. Sau đó tiến hành xác định biến dạng của vòng thép dưới tác động co ngót của bê tông. Khi mẫu bị nứt thì ứng suất trong vòng thép sẽ thay đổi đột biến do đó sẽ xác định được thời điểm nứt mẫu do ứng suất của co ngót bê tông gây nên (Hình 2).

3. Kết quả thực nghiệm và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của tro bay và nano carbon đến tính công tác

Kết quả độ chảy loãng của UHPC sử dụng côn đo mini được thể hiện trên Bảng 6. So sánh kết quả của cấp phối CP0 đến CP3 cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay thay thế từng phần xi măng thì độ chảy loãng của hỗn hợp UHPC tăng lên. Trong khoảng sử dụng vật liệu nano carbon của nghiên cứu này thì tăng hàm lượng nano carbon sẽ cải thiện độ chảy loãng của hỗn hợp bê tông (cấp phối CP1, CP1-1, CP1-2 và CP1-3). Điều này cho thấy các hiệu ứng vật lý của tro bay và nano carbon như hiệu ứng điền đầy, phân tán và ổ bi đã cải thiện mức độ lèn chặt giữa các hạt chất rắn, giải phóng lượng nước tự do trong hỗn hợp, từ đó cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông.

Bảng 6. Độ chảy loãng của các hỗn hợp UHPC, mm

CP0	CP1	CP2	CP3	CP1-1	CP1-2	CP1-3
260	270	300	310	285	295	305

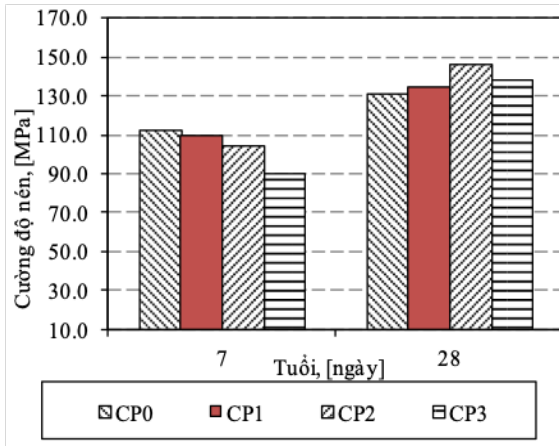
3.2. Ảnh hưởng của tro bay và nano carbon đến cường độ nén

Kết quả cường độ nén trên Hình 3 cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay thay thế một phần xi măng thì cường độ nén của UHPC ở tuổi sớm (7 ngày) giảm dần. Trong khi đó, cường độ nén ở tuổi 28 ngày của mẫu UHPC có chứa 20% tro bay thay thế xi măng theo thể tích đạt cường độ cao nhất. Các mẫu có chứa tro bay kết hợp với silica fume đều có cường độ nén cao hơn so với mẫu đối chứng chỉ chứa silica fume. Có thể sử dụng đến 30% tro bay để thay thế xi măng theo thể tích mà cường độ nén của vẫn đạt trên 130 MPa ở tuổi 28 ngày (Hình 3).

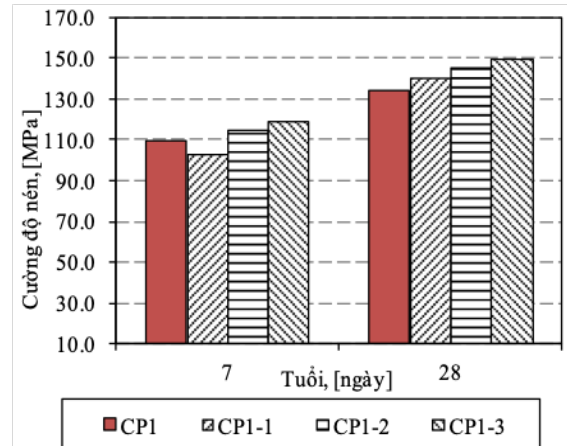
Kết quả trên Hình 4 cho thấy khi thay đổi hàm lượng nano carbon thì cường độ nén ở tuổi 7 ngày của các mẫu có chứa nano carbon tăng lên. Mẫu có chứa hàm lượng nano carbon rất thấp (CP1-1) cho cường độ nén ở tuổi 7 ngày thấp hơn đôi chút so với mẫu không chứa phụ gia nano carbon. Kết quả này có thể do sai số của thí nghiệm. Tuy nhiên, đến tuổi 28 ngày thì các mẫu có chứa nano carbon đều cho cường độ nén cao hơn mẫu không chứa nano carbon. Khi tăng hàm lượng sử dụng nano carbon sẽ làm tăng cường độ nén của UHPC (Hình 4).

3.3. Ảnh hưởng của tro bay đến co ngót

Co ngót nội sinh và co tổng của các mẫu cấp phối UHPC đã được đo đến 70 ngày sau khi tháo khuôn. Kết quả co ngót của UHPC được đưa ra trên Hình 5 và Hình 6. Kết quả nghiên cứu cho thấy co ngót của mẫu UHPC phát triển rất nhanh ở tuổi sớm ngày sau đó chậm lại. Khi tăng hàm lượng tro bay thay thế xi măng trong UHPC thì co ngót nội sinh và co tổng của mẫu giảm. So sánh đường thể hiện phát triển co ngót nội sinh và co ngót tổng của các mẫu cấp phối UHPC cho thấy tro bay thay thế

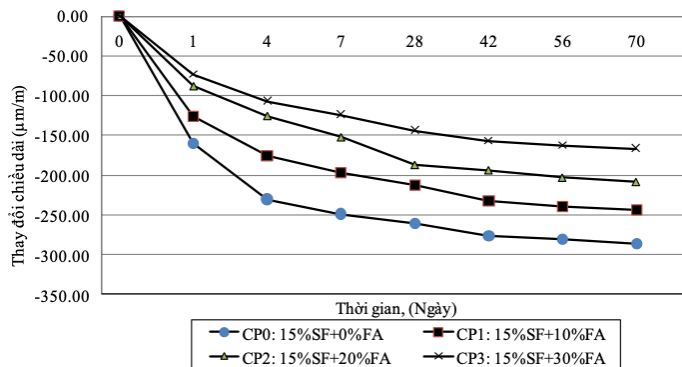


Hình 3. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến cường độ nén



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng nano carbon đến cường độ nén

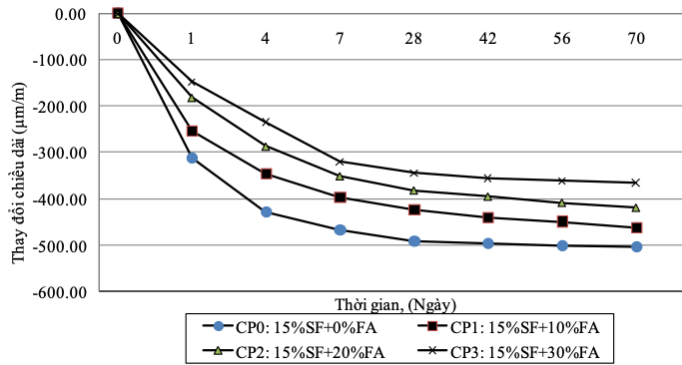
xi măng chủ yếu ảnh hưởng đến co ngót của UHPC ở tuổi sớm ngày, trước tuổi 29 ngày. Trong khoảng thời gian 28 ngày đến 70 ngày thí nghiệm đo co ngót, các đường phát triển co ngót của mẫu có hàm lượng tro bay khác nhau gần như song song với nhau (Hình 5 và Hình 6). Khi so sánh kết quả co khô, là hiệu giữa co tổng và co nội sinh cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay lên thì co khô của UHPC tăng lên.



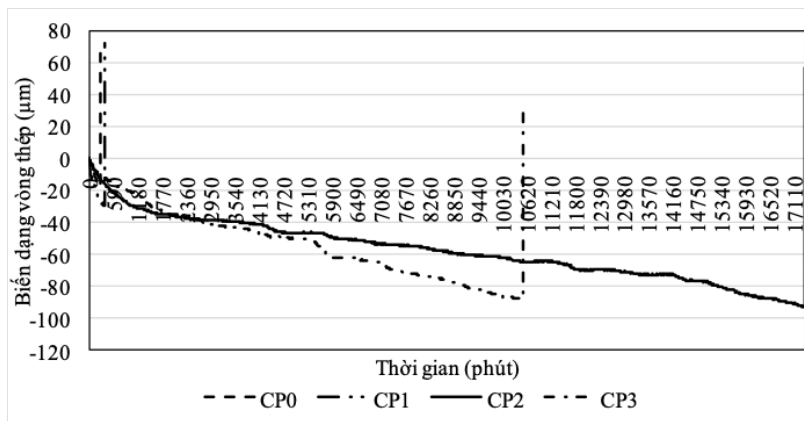
Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến co nội sinh

3.4. Ảnh hưởng của tro bay và nano carbon đến khả năng kháng nứt

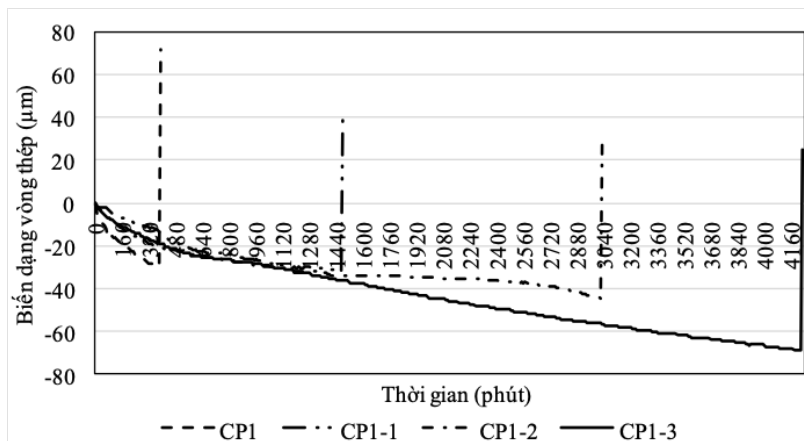
Khả năng kháng nứt của UHPC được đánh giá thông qua thí nghiệm vòng đo co hạn chế. Khi biến dạng co ngót của bê tông bị ngăn cản bởi vòng thép bên trong sẽ tạo ứng suất nén trong vòng thép và ứng suất kéo trong vòng bê tông. Ứng suất chịu nén của vòng thép tạo ra bởi co ngót của bê tông sẽ được ghi lại bởi tenzomet điện trở (strain gauge). Khi biến dạng co ngót của bê tông đạt đến một giá trị nhất định sẽ dẫn đến ứng suất kéo trong vòng bê tông vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông, lúc này sẽ gây ra nứt trên kết cấu bê tông. Khi đó áp lực lên vòng thép sẽ được giải phóng dẫn đến biến dạng của vòng thép đo qua các tenzomet điện trở cũng giảm xuống đột ngột. Kết quả đo Ring-Test của các cấp phối UHPC có chứa hàm lượng tro bay và hàm lượng nano carbon khác nhau được đưa ra tương ứng trên Hình 7 và 8.



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến co tổng



Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến khả năng kháng nứt của UHPC

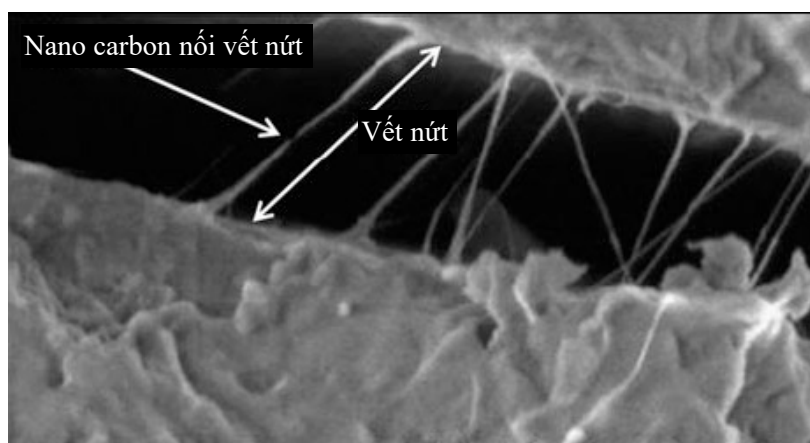


Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng nano carbon đến khả năng kháng nứt của UHPC

Kết quả trên Hình 7 cho các mẫu UHPC có chứa 0, 10, 20 và 30% tro bay tương ứng với CP0, CP1, CP2 và CP3 có thời gian xảy ra nứt kể từ thời điểm bắt đầu đo là 290, 390, 17400 và 10540 phút. Điều này cho thấy các mẫu UHPC có chứa tro bay đều kéo dài thời gian bắt đầu nứt của mẫu thí

nghiệm so với mẫu đối chứng CP0. Với các mẫu có chứa hàm lượng tro bay khác nhau thì thời điểm gây nứt mẫu là khác nhau. Mẫu có chứa 20% tro bay thay thế xi măng theo thể tích cho thời gian xảy ra nứt là lớn nhất (17400 phút), thậm chí dài hơn cả thời điểm gây nứt của mẫu có chứa 30% tro bay (10540 phút). Trong khi, kết quả co tổng và co nội sinh trên Hình 5 và 6 đều cho thấy co ngót của mẫu có chứa 20% tro bay lớn hơn co ngót của mẫu có chứa 30% tro bay. Điều này cho thấy tuy thay thế với hàm lượng lớn tro bay thì có thể cải thiện co ngót của bê tông nhưng khả năng kháng nứt của bê tông lại không tăng. Có thể do việc thay thế vượt quá hàm lượng phụ gia khoáng hợp lý sẽ dẫn đến cường độ chịu kéo của bê tông suy giảm nhiều gây nứt sớm cho mẫu bê tông cho dù ứng suất kéo trong mẫu được tạo nên bởi co ngót là không cao.

Để đánh giá khả năng cải thiện của nano carbon đến khả năng kháng nứt của UHPC, cấp phối có chứa 15% silica fume và 10% tro bay thay thế xi măng theo thể tích được sử dụng để bổ sung hàm lượng nano carbon khác nhau. Kết quả trên Hình 8 cho thấy khi tăng hàm lượng sử dụng nano carbon thì khả năng kháng nứt của UHPC được cải thiện rõ rệt. Mẫu UHPC không chứa nano carbon có thời gian xảy ra nứt kể từ thời điểm đo là 390 phút. Trong khi tăng hàm lượng nano carbon trong UHPC ở cấp phối CP1-1, CP1-2 và CP1-3 với lượng dùng nano carbon tương ứng là $0,05 \text{ kg/m}^3$, $0,175 \text{ kg/m}^3$ và $0,3 \text{ kg/m}^3$ thì thời gian xảy ra nứt kể từ thời điểm đo tương ứng là 1480 phút, 3040 phút và 4230 phút. Rõ ràng, các ống nano carbon có kích thước siêu nhỏ đã làm cầu nối giữa các lỗ rỗng và vết nứt tế vi của đá xi măng từ đó cải thiện khả năng kháng nứt của bê tông (Hình 9) [16].



Hình 9. Ảnh chụp cấu trúc vết nứt của hệ xi măng - nano carbon [16]

4. Kết luận

Dựa vào các kết quả thực nghiệm thu được trong nghiên cứu, các kết luận sau đây được rút ra:

- Việc sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng trong chế tạo UHPC đã cải thiện tính công tác và co ngót của bê tông. Với hàm lượng thay thế 20% tro bay theo thể tích cho xi măng thì cường độ nén ở tuổi 28 ngày của mẫu bê tông đạt cao nhất. Nano carbon cũng cải thiện cường độ nén của UHPC ở tuổi 28 ngày.

- Phương pháp thí nghiệm Ring-Test có thể sử dụng để đánh giá khả năng ảnh hưởng của phụ gia khoáng cũng như nano carbon đến khả năng kháng nứt của bê tông. Khi tăng hàm lượng tro bay thay thế xi măng thì co ngót của bê tông giảm xuống, tuy nhiên khả năng kháng nứt do co ngót của mẫu bê tông chỉ đạt cao nhất khi sử dụng hàm lượng phụ gia khoáng hợp lý. Trong nghiên cứu này, bê tông sử

dùng 20% tro bay cho khả năng kháng nứt tốt hơn bê tông sử dụng 10 và 30% tro bay. Sử dụng nano carbon đã cải thiện rõ rệt khả năng kháng nứt của UHPC.

Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn sự hỗ trợ thực nghiệm của Đỗ Văn Dương và Nguyễn Thế Đức trong quá trình thực nghiệm tại Phòng thí nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- [1] Resplendino, J. (2012). State of the art of design and construction of UHPFRC structures in France. In *Proceedings of Hipermat 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press, Kassel, Germany, 27–41.
- [2] Schmidt, M. (2012). Sustainable building with ultra-high-performance concrete (UHPC)—Coordinated research program in Germany. In *Proceedings of Hipermat 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press, Kassel, Germany, 17–25.
- [3] Schmidt, M., Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. In *The 7th International symposium on the utilization of high-strength- and high-performance-concrete*, ACI Washington, 228:51–78.
- [4] Schmidt, M. (2007). Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton. In *The 16th International Conference on Building Materials*, Weimar, Germany, 2:1405–1416.
- [5] ASTM C1856/C1856M-17 (2017). *Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] Chung, D. D. L. (2002). [Improving cement-based materials by using silica fume](#). *Journal of Materials Science*, 37(4):673–682.
- [7] Gatty, L., Bonnamy, S., Feylessoufi, A., Clinard, C., Richard, P., Van Damme, H. (2001). [A transmission electron microscopy study of interfaces and matrix homogeneity in ultra-high-performance cement-based materials](#). *Journal of Materials Science*, 36(16):4013–4026.
- [8] Chan, Y.-W., Chu, S.-H. (2004). [Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 34(7):1167–1172.
- [9] Gerlicher, T., Leonhardt, S., Heinz, D., Urbonas, L. (2009). Einfluss des Steinkohlenflugascheeinsatzes auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfestem Beton. In *The 17th International Conference on Building Materials (ibausil)*, Weimar, Germany, 1:1091–1098.
- [10] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A. Ş. (2009). [Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes](#). *Construction and Building Materials*, 23(3):1223–1231.
- [11] Ferdosian, I., Camões, A., Ribeiro, M. (2017). [High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete \(UHPC\)](#). *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1):e157–e161.
- [12] 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.
- [13] Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H. (2017). [Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review](#). *Construction and Building Materials*, 149:62–75.
- [14] Ghafari, E., Arezoumandi, M., Costa, H., Julio, E. (2015). [Influence of nano-silica addition on durability of UHPC](#). *Construction and Building Materials*, 94:181–188.
- [15] Lim, J. L. G., Raman, S. N., Safiuddin, M., Zain, M. F. M., Hamid, R. (2019). [Autogenous shrinkage, microstructure, and strength of ultra-high performance concrete incorporating carbon nanofibers](#). *Materials*, 12(2):1–15.
- [16] Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J., Tighe, S. L. (2014). [State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete](#). *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10):940–949.