

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KHẢ NĂNG CHỊU TÁC ĐỘNG TẢI TRỌNG NỔ CỦA VẬT LIỆU BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO (UHPC)

Lê Bá Danh^{a,*}, Phạm Duy Hòa^a, Nguyễn Công Thắng^b, Ngô Đức Linh^c,
Bùi Thị Thùy Dung^c, Bùi Thị Lộc^d, Đỗ Văn Đạt^a

^aKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cViện Thiết kế Bộ Quốc phòng, 21 đường Lê Văn Lương, Hà Nội, Việt Nam

^dNhà máy Z113, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Bộ Quốc phòng,
Thị trấn Tân Bình, huyện Yên Sơn, Tuyên Quang, Việt Nam

Nhận ngày 12/06/2019, Sửa xong 05/07/2019, Chấp nhận đăng 22/07/2019

Tóm tắt

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của bê tông chất lượng siêu cao (Ultra-High Performance Concrete - UHPC). Bê tông UHPC sử dụng trong nghiên cứu được chế tạo sử dụng các vật liệu sẵn có ở Việt Nam. Các tấm bê tông UHPC và bê tông thường có cùng kích thước (chiều dài 1000 mm, chiều rộng 800 mm và chiều dày 120 mm) đã được chế tạo và thí nghiệm nổ để so sánh. Tải trọng nổ sử dụng là thuốc nổ nhũ tương. Sự hư hại và phá hủy ở mặt trên, mặt dưới của các mẫu thí nghiệm và thành phần hạt của các mảnh vỡ bắn ra dưới tác động của tải trọng nổ được phân tích và so sánh giữa bê tông UHPC và bê tông thường.

Từ khóa: bê tông chất lượng siêu cao; bê tông thường; tải trọng nổ; thực nghiệm.

EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE SLABS UNDER CONTACT EXPLOSIONS

Abstract

This paper presents an experimental study of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) slabs under contact explosions. The UHPC material is fabricated in lab using the material available in Vietnam. The UHPC slabs and Normal Concrete slabs with the same dimensions (1000 mm in length, 800 mm in width and 120 mm in thickness) are fabricated and tested. The Emulsion Explosive has been used. The concrete crater and spall damage under contact explosions are considered and compared between UHPC slabs and Normal Concrete slabs.

Keywords: ultra-high performance concrete, normal concrete, blast loads, experiment.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(3V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-02) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

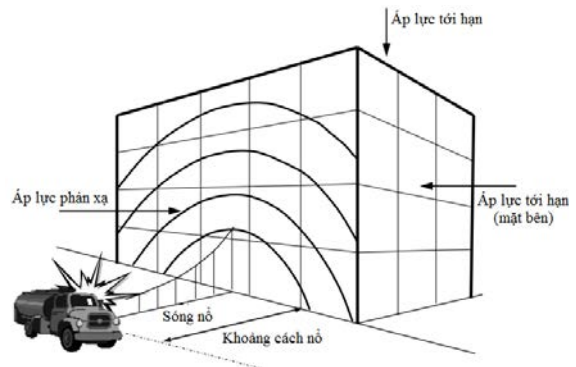
1. Giới thiệu

Bê tông cốt thép (BTCT) là một trong những vật liệu xây dựng được sử dụng phổ biến nhất hiện nay. Nó tạo nên các kết cấu chịu lực chính của các công trình xây dựng. BTCT đã được ứng dụng rất

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: danhlb@nuce.edu.vn (Danh, L. B.)

rộng rãi trong các công trình dân dụng và công nghiệp. Tuy nhiên, đối với các công trình quốc phòng, đặc biệt là các công sự, ngoài yêu cầu bê tông có cường độ cao thì khả năng hấp thụ cũng như làm triệt tiêu năng lượng do áp lực nổ gây ra cũng được quan tâm rất lớn. Một vụ nổ dù vô tình hay cố ý ở gần các công trình, mặc dù xác suất xảy ra thấp nhưng sẽ để lại hậu quả rất thảm khốc. Tải trọng nổ với cường độ cao và thời gian diễn ra nhanh sẽ giải phóng một nguồn năng lượng lớn dưới dạng các sóng nổ. Áp lực của các sóng nổ này sẽ tác động trực tiếp lên công trình gây ra sự phá hoại của vật liệu và kết cấu, từ đó có thể dẫn đến sự sụp đổ hoàn toàn công trình. Tải trọng nổ lên công trình được minh họa trong Hình 1 [1]. Khi một vụ nổ ở gần hoặc tiếp xúc với kết cấu bê tông, trên bề mặt đối diện với vụ nổ, bê tông chịu nén và có thể phá hoại theo nhiều dạng khác nhau tùy vào đương lượng nổ, hoặc sinh ra hố lõm [2], hoặc dẫn đến mất hoàn toàn khả năng chịu lực của kết cấu dẫn đến công trình bị sụp đổ [3, 4]. Các mảnh vụn bê tông sinh ra sau khi nổ sẽ có tốc độ cao có thể gây ra thương vong và thiệt hại về người và tài sản. Để hạn chế tối đa sự phá hoại của tải trọng nổ, việc nghiên cứu ứng xử cơ học của bê tông dưới tác động của tải trọng này, từ đó thiết kế thành phần cấp phối hoặc tạo ra các loại bê tông mới có khả năng chịu áp lực nổ tốt là hết sức cần thiết.

Các nghiên cứu về ứng xử cơ học của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nổ đã được thực hiện trong vài thập kỷ qua. Một vài nghiên cứu định dạng cấu trúc tải trọng và thiệt hại do nổ để đưa ra tải trọng tương đương cùng gây ra phá hoại đó, làm căn cứ bước đầu nghiên cứu lý thuyết về phá hoại do nổ [5, 6]. Kot và cs. [7, 8] đã đề xuất các phương pháp lý thuyết về sự phá hoại của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nổ, tuy nhiên các phương pháp này chỉ dựa trên một số giả định đơn giản làm ảnh hưởng đến tính chính xác của phép tính. Vào cuối những năm 1980, một loạt các thử nghiệm nổ bê tông đã được McVay [9] tóm tắt, các thông số ảnh hưởng đến sự phá hoại của bê tông như: khoảng cách,



Hình 1. Tải trọng nổ lên tòa nhà [1]

trọng lượng chất nổ, độ dày tường, cường độ bê tông, phụ gia bê tông và hàm lượng cốt thép đã được nghiên cứu. Wang và cs. [10] đã tiến hành các thử nghiệm nổ tiếp xúc trên các tấm BTCT vuông với khối lượng thuốc nổ khác nhau, kết quả được quan sát, nghiên cứu qua đó sử dụng để xác minh mô hình số của chúng. Dựa trên lượng lớn các cơ sở dữ liệu từ các thử nghiệm nổ trên tấm sàn và tường BTCT, Marchand và cs. [11] đã phát triển thuật toán về nứt dưới tác dụng của tải trọng nổ đối với tấm sàn và tường BTCT. Các nghiên cứu trên cho thấy, ứng xử cơ học của bê tông chịu tác động của tải trọng nổ rất phức tạp. Khả năng chịu tác động tải trọng nổ của BTCT không được cao, sự phá hoại xuất hiện kèm theo sự phát triển nhanh của các vết nứt làm cho công trình rất dễ bị phá hoại.

Bê tông chất lượng siêu cao, hay còn gọi là bê tông siêu tính năng (Ultra High Performance Concrete - UHPC) là bước ngoặt trong công nghệ bê tông xi măng hiện nay. Đây là bê tông có cường độ chịu nén cao (≥ 120 MPa) và độ dẻo dai lớn, cường độ kéo khi uốn có thể lên tới 40 MPa; khả năng chịu tác động va chạm và chịu tải trọng lặp cao; độ bền và độ ổn định lâu dài. Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trên thế giới đã chứng minh rằng bê tông UHPC có khả năng chống nổ rất tốt [12–15].

Ở Việt Nam, nghiên cứu về vật liệu UHPC được thực hiện trong khoảng 10 năm gần đây [16, 17]. Các nghiên cứu áp dụng bê tông UHPC đã được thực hiện cho một số công trình xây dựng như cầu biển, cầu dân sinh, các tấm ốp. Việc nghiên cứu ứng dụng UHPC cho các công trình đặc biệt chịu tác

động của tải trọng nổ chưa được công bố. Mục tiêu của đề tài này là nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tải trọng nổ của vật liệu UHPC được sản xuất bởi các vật liệu sẵn có ở Việt Nam, từ đó phân tích những ưu điểm của UHPC so với bê tông thường (Normal Concrete - NC) làm cơ sở cho việc nghiên cứu ứng dụng bê tông này cho các công trình đặc biệt ở Việt Nam. Các tấm bê tông UHPC và bê tông thường có cùng kích thước đã được chế tạo và thí nghiệm nổ để so sánh. Tải trọng nổ sử dụng là thuốc nổ nhũ tương có đương lượng nổ tương đương thuốc nổ TNT. Bài báo bắt đầu bằng mô tả quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm. Công tác thí nghiệm nổ các tấm bê tông thường và bê tông UHPC được giới thiệu trong Mục 3. Mục 4 phân tích và so sánh kết quả thí nghiệm nổ giữa các tấm bê tông thường và bê tông UHPC. Mục kết luận và kiến nghị sẽ kết thúc bài báo.

2. Công tác chế tạo mẫu UHPC thí nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

Vật liệu được dùng trong nghiên cứu gồm: bê tông thường M30 sử dụng cốt liệu mịn (cát vàng) có mô đun độ lớn $M_{dl} = 2,5$; cốt liệu thô là đá dăm với cỡ hạt 5–20 mm. Với bê tông chất lượng siêu cao M120, cốt liệu là cát quắc có đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 300 μm , độ rỗng khi chưa lên chặt 44,9%; xi măng Poocăng PC40, có đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 11,4 μm ; Silica fume (SF) dạng hạt rời của hãng Elkem, có đường kính hạt trung bình khoảng 0,15 μm , hàm lượng SiO_2 là 92,3%, chỉ số hoạt tính với xi măng là 113,5%; tro bay (FA) sử dụng trong nghiên cứu có đường kính cỡ hạt trung bình khoảng 5,83 μm , hàm lượng các oxit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) là 84,4%; sợi thép sử dụng trong đề tài của hãng Dramix với chiều dài 13 mm, đường kính 0,2 mm và cường độ kéo đứt là 2750 MPa; phụ gia siêu dẻo (PGSD) sử dụng của hãng BASF có gốc polycarboxylate, với hàm lượng chất khô 30%.

2.2. Cấp phối bê tông sử dụng

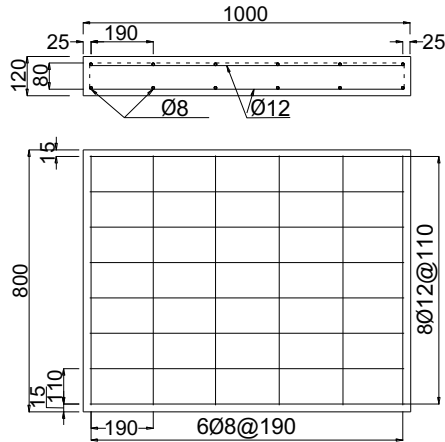
Trong nghiên cứu, tác giả sử dụng hai loại bê tông là bê tông thường (NC) mác M30 và bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) mác M120 sử dụng sợi thép với hàm lượng 2% (theo thể tích) (UHPC-F2). Thành phần cấp phối của bê tông sử dụng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu

Kí hiệu	Cát (Kg)	Đá (Kg)	XM (Kg)	FA (Kg)	SF (Kg)	PGSD (Kg)	Nước (Kg)	Sợi (Kg)
NC	626	1210	395				183	
UHPC-F2	1108		831	166	111	36,9	164	157

2.3. Công tác chế tạo mẫu

Các mẫu bê tông thí nghiệm chế tạo ở dạng tấm với kích thước: chiều dài 1000 mm, chiều rộng 800 mm và chiều dày 120 mm. Các mẫu thí nghiệm được gia cố bằng thép thanh chịu lực, với cốt thép dọc gồm 8 thanh $\Phi 12 \times 110$ và cốt thép ngang gồm 6 thanh $\Phi 8 \times 190$. Cốt thép bố trí trong tấm và công tác lắp đặt ván khuôn được thể hiện ở Hình 2. Quá trình trộn và đổ bê tông UHPC vào ván khuôn được thể hiện ở Hình 3.



(a) Bố trí cốt thép



(b) Lắp đặt ván khuôn chế tạo mẫu thử nghiệm

Hình 2. Công tác ván khuôn



(a) Công tác trộn



(b) Đổ bê tông UHPC

Hình 3. Công tác bê tông mẫu thí nghiệm

2.4. Công tác thí nghiệm xác định cường độ bê tông

Cường độ chịu nén của bê tông M30 được xác định theo TCVN 3118-1993 [18] trên các mẫu có kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm. Cường độ chịu nén của bê tông UHPC M120 được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C39M [19] trên các mẫu trụ có kích thước 100×200 mm.

Cường độ uốn của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1609M [20], trong đó, bê tông M30 xác định trên các mẫu lăng trụ có kích thước $150 \times 150 \times 600$ mm. Với mẫu bê tông UHPC M120 xác định trên các mẫu lăng trụ có kích thước $100 \times 100 \times 400$ mm.

Mô đun đàn hồi của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C469M [21], trong đó với bê tông M30 xác định trên các mẫu trụ có kích thước 150×300 mm. Với mẫu bê tông UHPC M120 xác định trên các mẫu trụ có kích thước 100×200 mm.

Tính chất cơ lý của bê tông sử dụng trong nghiên cứu thu được sau quá trình thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất cơ lý của bê tông sử dụng trong nghiên cứu

Kí hiệu	Cường độ chịu nén (MPa)	Cường độ chịu uốn (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)
NC	30	3	30
UHPC-F2	120	15	48

3. Công tác thí nghiệm nổ

3.1. Công tác chuẩn bị thuốc nổ

Thuốc nổ sử dụng cho các thí nghiệm là thuốc nổ nhũ tương có đương lượng nổ tương đương thuốc nổ TNT. Căn cứ vào các nghiên cứu cũng như khuyến cáo từ đơn vị cung cấp thuốc nổ, đề tài đã sử dụng hai khối nổ hình trụ có khối lượng 0,5 kg và 1,22 kg (Hình 4). Các thông số cơ bản của hai khối nổ được thể hiện trong Bảng 3.



(a) Khối nổ 0,5 kg



(b) Khối nổ 1,22 kg

Hình 4. Hình ảnh khối nổ sử dụng

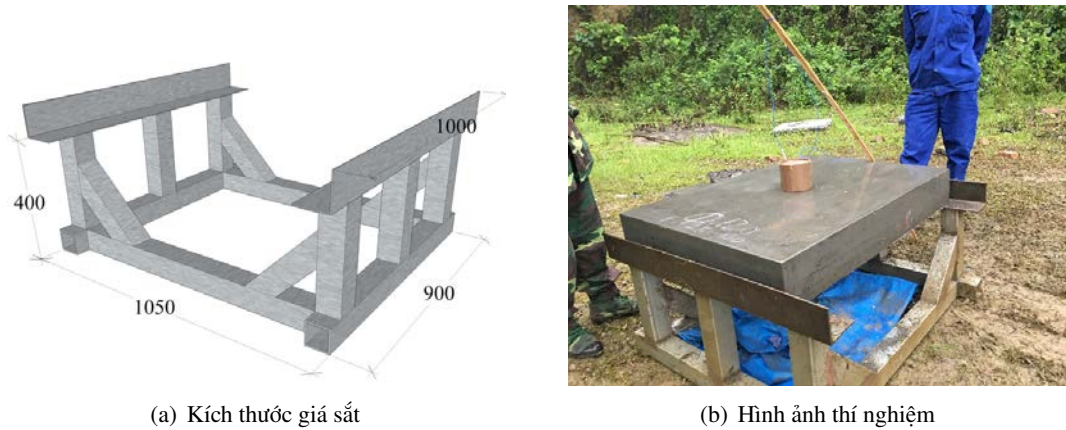
Bảng 3. Các thông số cơ bản của các khối nổ sử dụng

	Năng lượng (kJ/kg)	Vận tốc (m/s)	Trọng lượng riêng (g/cm ³)	Đường kính (mm)	Chiều cao (mm)	Khối lượng (kg)
Khối nổ 1	4500	4095	1,15	80	86,5	0,5
Khối nổ 2	4500	4095	1,15	120	94	1,22

3.2. Công tác thí nghiệm nổ

Để thực hiện thí nghiệm nổ, các tấm bê tông thí nghiệm sẽ được kê lên một giá sắt đặt trực tiếp trên mặt đất (Hình 5(a)). Ở dưới giá sắt sẽ được đặt một tấm bạt để thu hồi các mảnh vụn bê tông bắn ra sau khi nổ (Hình 5(b)). Độ bằng phẳng của tấm được kiểm tra kỹ trước khi đặt các khối thuốc nổ lên. Thuốc nổ sẽ được đặt trực tiếp tại tâm mặt trên của tấm. Kíp được gá cố định, vuông góc với khối thuốc nổ, đầu dây điện vào điểm hỏa. Dây điện nối kíp nổ được treo bằng một cọc tre đặt dựa vào tấm bê tông sao cho dây và kíp thẳng và vuông góc với khối thuốc nổ (Hình 5(b)).

Thí nghiệm nổ được thực hiện trên 4 tấm bê tông gồm 02 tấm UHPC và 02 tấm bê tông thường NC với 2 khối nổ có khối lượng 0,5 kg và 1,22 kg (Bảng 4).



Hình 5. Công tác thí nghiệm nổ

Bảng 4. Nội dung chi tiết các thí nghiệm nổ

TT	Tấm thí nghiệm	Khối lượng thuốc nổ (kg)	Kí hiệu thí nghiệm
1	UHPC	0,5	UHPC-M0,5
2	NC	0,5	NC-M0,5
3	UHPC	1,22	UHPC-M1,22
4	NC	1,22	NC-M1,22

4. Phân tích kết quả thí nghiệm

Kết quả phá hoại của hai tấm UHPC (thí nghiệm UHPC-M0,5) và NC (thí nghiệm NC-M0,5) ứng với khối nổ 0,5 kg được thể hiện trong Hình 6 và 7. Đối với tấm bằng bê tông UHPC, khối nổ chỉ gây ra một hố lõm có kích thước ngang 10 cm, sâu 1,5 cm ở mặt trên (Hình 6(a)); còn mặt dưới bê tông bị bong một lớp có kích thước ngang 33 cm (Hình 7(a)). Ngoài ra không xuất hiện một vết nứt nào ở cả hai mặt. Trong khi đó, đối với tấm bê tông thường NC, lỗ thủng đã xuất hiện ngay tại vị trí đặt tải trọng nổ, xuyên từ mặt trên xuống mặt dưới, với kích thước 26 cm ở mặt trên và 35 cm ở mặt dưới. Ngoài ra, trên hai bề mặt của tấm NC cũng xuất hiện rất nhiều vết nứt do tải trọng nổ gây ra (Hình 6(b), Hình 7(b)).

Với khối nổ 2 khối lượng 1,22 kg (thí nghiệm UHPC-M1,22 và NC-M1,22), tấm bê tông UHPC bắt đầu xuất hiện lỗ thủng tại vị trí đặt tải trọng nổ. Kích thước của lỗ thủng này theo phương ngang ở mặt trên là 16 cm và mặt dưới là 30 cm (Hình 8(a), Hình 9(a)). Ngoài ra, xuất hiện thêm một số vết nứt ở hai mặt của tấm UHPC. Trong khi đó, tấm NC bị phá hủy hầu như hoàn toàn, lỗ thủng ở giữa tấm có kích thước 30 cm ở mặt trên và 58 cm ở mặt dưới, kèm theo rất nhiều vết nứt lớn, cốt thép bị biến dạng (Hình 8(b), Hình 9(b)).

Tổng hợp kích thước phá hoại ở mặt trên và mặt dưới của các thí nghiệm nổ được thể hiện trong Hình 10. Dựa vào kết quả thí nghiệm thấy rằng, với cùng một kích thước, bê tông UHPC có khả năng chịu được tải trọng nổ tốt hơn nhiều so với bê tông cốt thép thường. Với cùng khối lượng nổ, kích thước phá hoại của UHPC giảm gần như một nửa so với NC. Đặc biệt, các vết nứt xuất hiện trên bề mặt UHPC ít, và có độ mở rộng rất bé so với các vết nứt trên bề mặt của tấm NC (Hình 11). Điều này có thể giải thích nhờ vào vai trò của sợi thép trong UHPC. Các sợi thép chính là cầu nối làm hạn



(a) UHPC-M0,5



(b) NC-M0,5

Hình 6. Kích thước phá hoại ở mặt trên 2 tấm bê tông sau thí nghiệm



(a) UHPC-M0,5



(b) NC-M0,5

Hình 7. Kích thước phá hoại ở mặt dưới 2 tấm bê tông sau thí nghiệm



(a) UHPC-M1,22



(b) NC-M1,22

Hình 8. Kích thước phá hoại ở mặt trên 2 tấm bê tông sau thí nghiệm

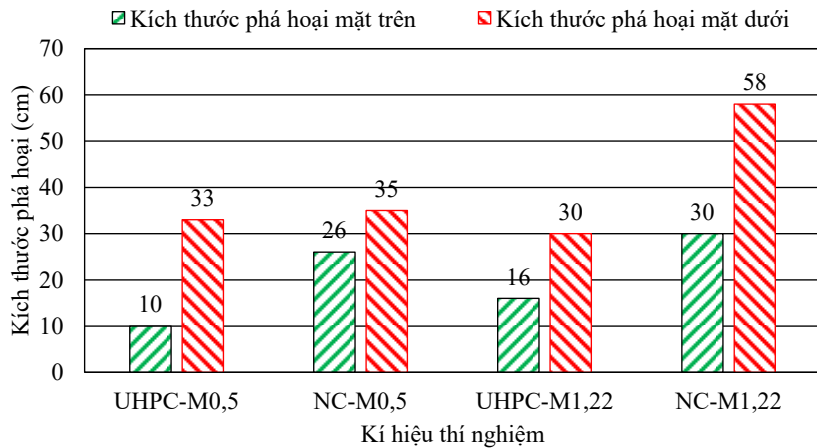


(a) UHPC-M1,22



(b) NC-M1,22

Hình 9. Kích thước phá hoại ở mặt dưới 2 tấm bê tông sau thí nghiệm



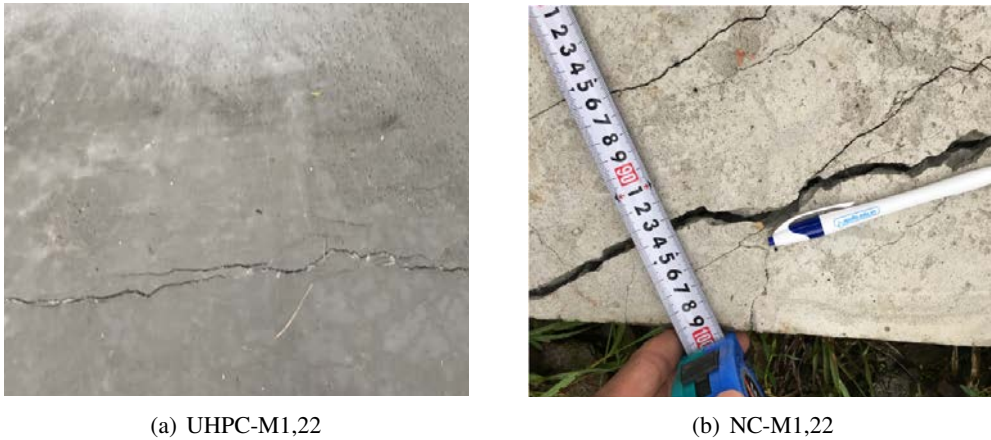
Hình 10. So sánh kích thước phá hoại mặt trên và mặt dưới của các thí nghiệm nổ chế sự xuất hiện và phát triển của vết nứt. Mặt khác, nó cũng làm cho vết nứt phát triển chậm hơn, tăng khả năng làm việc của vật liệu UHPC. Trong khi với bê tông cốt thép thường NC không thể có được những tính chất này.

Các mảnh vỡ sau khi nổ được thu gom bằng một tấm bạt đặt dưới các mẫu thí nghiệm (Hình 5(b)). Sau đó, tiến hành sàng để phân loại kích thước cỡ hạt của các mảnh vỡ. Khối lượng mảnh vỡ thu được sau khi nổ ứng với các cỡ hạt khác nhau được thể hiện trong Hình 12. Qua biểu đồ có thể thấy rằng, cùng một đương lượng nổ, bê tông UHPC chịu tải trọng nổ tốt hơn rất nhiều so với bê tông thường, thể hiện ở khối lượng vụn nổ thu được rất ít. Mặt khác, với bê tông thường, khối lượng mảnh vỡ bị bắn ra có khối lượng lớn và tập trung ở thành phần hạt từ 2,5 mm đến 20 mm. Cỡ hạt này bắn ra sẽ có tính sát thương rất lớn.

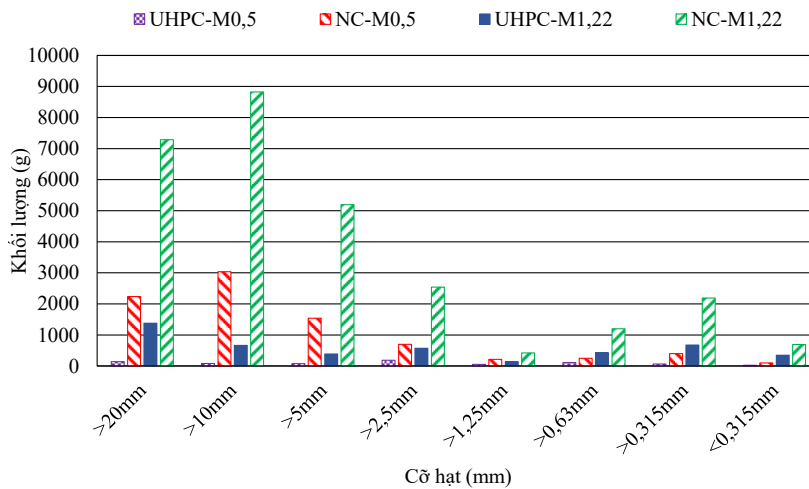
5. Kết luận, kiến nghị

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao và mẫu bê tông thường. Kết quả thí nghiệm đã cho thấy:

- Bê tông chất lượng siêu cao có khả năng chịu tác động của tải trọng nổ tốt hơn rất nhiều so với bê tông cốt thép thường. Việc sử dụng cốt sợi thép trong bê tông UHPC làm cho các vết nứt xuất hiện trên vật liệu này do tải trọng nổ xuất hiện ít, phát triển chậm.



Hình 11. Vết nứt ở bề mặt của bê tông UHPC và bê tông thường NC



Hình 12. Khối lượng mảnh vỡ thu được sau khi nổ ứng với các cỡ hạt khác nhau

- Với cùng đương lượng nổ, khối lượng và kích thước các mảnh vỡ của mẫu UHPC nhỏ hơn rất nhiều so với các cỡ hạt bắn ra sau khi nổ từ mẫu bê tông cốt thép thường. Với mẫu bê tông thường, khối lượng mảnh vỡ bị bắn ra có khối lượng lớn nhất tập trung ở thành phần hạt từ 2,5 mm đến 20 mm. Trong khi đó, với bê tông UHPC cấp hạt này thu được sau khi nổ rất ít.

Từ những lý do nêu trên, nghiên cứu cũng đề xuất áp dụng bê tông chất lượng siêu cao cho các công trình đặc biệt, chịu tác động của tải trọng nổ, đặc biệt là các công trình trong quốc phòng.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của trường Đại học Xây dựng và Viện Thiết kế Bộ Quốc phòng cho đề tài khoa học và công nghệ cấp trường trọng điểm mã số 234-2018/KH XD-TĐ, được thực hiện theo hợp đồng hợp tác nghiên cứu khoa học và công nghệ giữa trường Đại học Xây dựng và Viện Thiết kế Bộ Quốc phòng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. (2007). Blast loading and blast effects on structures—an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7(S1):76–91.
- [2] Li, J., Hao, H. (2014). Numerical study of concrete spall damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 68:41–55.
- [3] Bažant, Z. P., Verdure, M. (2007). Mechanics of progressive collapse: Learning from World Trade Center and building demolitions. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(3):308–319.
- [4] Szuladziński, G., Szamboti, A., Johns, R. (2013). Some Misunderstandings Related to WTC Collapse Analysis. *International Journal of Protective Structures*, 4(2):117–126.
- [5] Li, J., Hao, H. (2011). A two-step numerical method for efficient analysis of structural response to blast load. *International Journal of Protective Structures*, 2(1):103–126.
- [6] Dragos, J., Wu, C. (2014). Interaction between direct shear and flexural responses for blast loaded one-way reinforced concrete slabs using a finite element model. *Engineering Structures*, 72:193–202.
- [7] Kot, C. A., Valentin, R. A., McLennan, D. A., Turula, P. (1978). Effects of air blast on power plant structures and components. Technical report, Argonne National Lab., IL (USA).
- [8] Kot, C. A. (1978). Spalling of concrete walls under blast load. *Structural Mechanics in Reactor Technology*, 31(9):2060–2069.
- [9] McVay, M. K. (1988). Spall damage of concrete structures. Technical report, ARMY Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures LAB.
- [10] Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.-c., Tang, F. (2013). Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion. *Engineering Failure Analysis*, 27:41–51.
- [11] Marchand, K. A., Plenge, B. T. (1998). Concrete hard target spall and breach model. Air Force Research Laboratory, Munitions Directorate, Lethality.
- [12] Bibora, P., Drdlová, M., Prachař, V., Sviták, O. (2017). UHPC for blast and ballistic protection, explosion testing and composition optimization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing.
- [13] Li, J., Wu, C., Hao, H., Su, Y. (2015). Investigation of ultra-high performance concrete under static and blast loads. *International Journal of Protective Structures*, 6(2):217–234.
- [14] Li, J., Wu, C., Hao, H. (2015). Residual loading capacity of ultra-high performance concrete columns after blast loads. *International Journal of Protective Structures*, 6(4):649–669.
- [15] Wu, C., Oehlers, D. J., Rebentrost, M., Leach, J., Whittaker, A. S. (2009). Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, 31(9):2060–2069.
- [16] Thắng, N. C. (2013). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng silica fume và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng*, 7(1):83–92.
- [17] Thắng, N. C., Tuấn, N. V., Hanh, P. H., Lâm, N. T. (2013). Nghiên cứu chế tạo bê tông chất lượng siêu cao sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng silica fume và tro bay sẵn có ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng*, (2):21–29.
- [18] TCVN 3118-1993. Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén. Bộ Khoa học Công nghệ, Việt Nam.
- [19] ASTM C39M (2012). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Annual book of ASTM standards, 4.
- [20] ASTM C1609 (2012). Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). Annual book of ASTM standards, 4.
- [21] ASTM C469M (2012). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. Annualbook of ASTM standards, 4.