

NGHIÊN CỨU SỰ PHÁ HOẠI CỤC BỘ CỦA TẤM BÊ TÔNG CỐT SỢI CHỊU TẢI TRỌNG NỔ SỬ DỤNG MÔ PHÒNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

Nguyễn Xuân Bằng^a, Trịnh Thị Hiền^b, Nguyễn Thị Phương Lan^c, Phạm Thái Hoàn^{c,*}

^aViện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự,
236 đường Hoàng Quốc Việt, phường Cổ Nhuế 1, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức
565 đường Quang Trung, TP Thanh Hoá, tỉnh Thanh Hoá, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 14/3/2023, Sửa xong 26/5/2023, Chấp nhận đăng 26/5/2023

Tóm tắt

Bài báo sử dụng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn để khảo sát sự phá hoại cục bộ của tấm bê tông cốt sợi (fiber reinforced concrete – FRC) dưới tác động của tải trọng nổ. Mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn của thí nghiệm tấm FRC chịu tác động của khối thuốc nổ được phát triển trên phần mềm LS-DYNA. Kết quả phân tích từ mô hình phù hợp với kết quả thu được từ thí nghiệm chứng tỏ mô hình phần tử hữu hạn có thể mô phỏng tương đối chính xác sự phá hoại của tấm FRC chịu tải trọng nổ. Mô hình phần tử hữu hạn được dùng để khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến sự phá hoại cục bộ của tấm FRC bao gồm vật liệu, kết cấu và tải trọng. Các kết quả phân tích cho thấy rằng mỗi tham số đều có ảnh hưởng nhất định đến sự phá hoại của tấm FRC.

Từ khóa: tấm bê tông cốt sợi; phá hoại cục bộ; tải trọng nổ; LS-DYNA; phần tử hữu hạn.

INVESTIGATION OF LOCAL DAMAGE OF FRC PANEL UNDER BLAST LOADING USING FINITE ELEMENT SIMULATION

Abstract

This paper presents a development of finite element (FE) simulation of FRC panel under blast loading using LS-DYNA software. The simulation model was developed to investigate the local damage of FRC panel under blast load. The analysis results from the simulation are consistent with the results obtained from the experiment, indicating that the FE model can accurately simulate the damage of the FRC plate subjected to blast load. The FE model was then used to investigate the factors affecting the performance of FRC panels including materials, structures and loads. The analysis results showed that each parameter has a certain influence on the failure of the FRC panel.

Keywords: fiber reinforced concrete panel; local damage; blast loading; LS-DYNA.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17\(4V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17(4V)-09) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Những thảm họa về các vụ cháy nổ gần đây cho thấy sự cần thiết phải thiết kế và đánh giá an toàn kết cấu để chống lại tải nổ. Thông thường, kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) được sử dụng để chịu tải trọng nổ do các ưu điểm của chúng như cường độ nén cao, vật liệu phổ biến và chi phí hợp lý. Tuy nhiên, với độ bền kéo thấp và đặc tính giòn, kết cấu BTCT thường bị hư hỏng nghiêm trọng khi chịu tải trọng nổ. Để cải thiện khả năng chống nổ của các kết cấu bê tông cốt thép thông thường, bê tông cốt sợi (FRC) đã được nghiên cứu sử dụng trong vài thập kỷ qua. So với các kết cấu BTCT thông

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hoanpt@huice.edu.vn (Hoàn, P. T.)

thường, kết cấu FRC có ưu thế hơn trong việc cải thiện độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng, là các đặc trưng cơ học của vật liệu khi chịu tác động của tải trọng nổ [1, 2]. Nhờ đặc tính đó, khả năng chống nổ của kết cấu FRC tốt hơn rất nhiều so với kết cấu BTCT.

Rất nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm cung cấp các công thức thực nghiệm trong đánh giá thiết kế và an toàn của kết cấu dưới tác động của tải trọng nổ. Trong khi một số phương trình thực nghiệm dùng để đánh giá tấm BTCT chịu tải trọng nổ được đề xuất bởi [3, 4], một vài phương trình thực nghiệm cho kết cấu FRC đã được đề xuất. Thái và cs. [5] đã đề xuất một phương trình dự đoán khả năng chịu lực còn lại của cột FRC sau khi chịu tải trọng nổ bằng phương pháp phần tử hữu hạn và phân tích hồi quy. Đối với tấm FRC, mặc dù Nam và cs. [6] đã đề xuất công thức thực nghiệm để dự báo mức độ hư hỏng của tấm xi măng cốt sợi khi chịu tải trọng nổ tiếp xúc, biểu thức này lại không thể sử dụng để đánh giá mức độ hư hỏng của tấm FRC khi tải trọng nổ không tiếp xúc với kết cấu. Foglar và cs. [2, 7–10] đã thực hiện một loạt các thí nghiệm trên tấm BTCT và tấm FRC với nhiều loại bê tông, loại sợi và hàm lượng sợi khác nhau để nghiên cứu khả năng chống phá hoại của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng nổ. Ngoài ra, một số thí nghiệm nổ trên các tấm FRC cũng đã được thực hiện bởi những người khác, như thể hiện trong các nghiên cứu của Pantelides và cs. [11] hay của Mao và cs. [12]. Nhìn chung, các thử nghiệm này đã cung cấp dữ liệu rất quan trọng và thực tế cho các kỹ sư và nhà nghiên cứu. Tuy nhiên, ngoài việc kinh phí lớn, các yếu tố về an toàn hay an ninh quốc phòng liên quan đến sử dụng chất nổ đã hạn chế rất nhiều khả năng tiến hành các thí nghiệm nổ. Do đó, ngoài một số kết quả hạn chế, rất nhiều yếu tố từ vật liệu, kết cấu đến tải trọng ảnh hưởng đến sự làm việc của kết cấu FRC dưới tác động của tải trọng nổ chưa được xem xét và nghiên cứu một cách cụ thể. Gần đây, với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ máy tính và phần mềm, một số nhà nghiên cứu đã mô phỏng thành công các thí nghiệm tấm BTCT và FRC dưới tác dụng của tải trọng nổ sử dụng các phần mềm mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH) [13–15]. Cách tiếp cận này rẻ hơn nhiều so với phương pháp thử nghiệm và có thể mang lại kết quả đáng tin cậy.

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng mô hình PTHH bằng phần mềm LS-DYNA để mô phỏng sự làm việc của tấm FRC dưới tác động của tải trọng nổ, từ đó sử dụng mô hình mô phỏng để khảo sát các yếu tố về vật liệu, kết cấu và tải trọng ảnh hưởng đến sự phá hoại cục bộ của tấm FRC. Mô hình PTHH được kiểm chứng bằng các kết quả thí nghiệm đã được công bố, trong khi đó kết quả khảo sát là sự phá hoại cục bộ của tấm FRC dưới tác động của tải trọng nổ. Kết quả nghiên cứu cùng những gợi ý đưa ra sẽ hữu ích cho quá trình thiết kế tấm FRC chịu tải trọng nổ.

2. Xây dựng mô hình PTHH mô phỏng tấm FRC dưới tác dụng của tải trọng nổ

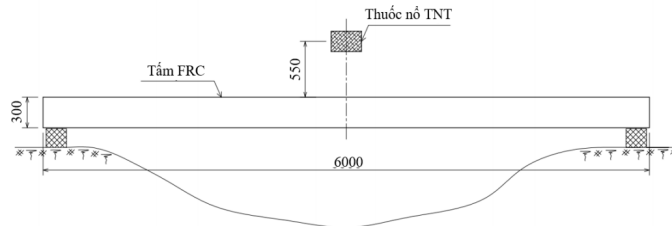
Để có kết quả kiểm chứng, mô hình PTHH trong nghiên cứu này được xây dựng dựa trên thí nghiệm tấm FRC với tỷ lệ thật chịu tác động của tải trọng nổ đã được thực hiện bởi Foglar và cs. [8]. Thiết lập thí nghiệm và kết quả thu được cùng với mô hình PTHH được trình bày chi tiết dưới đây.

2.1. Thí nghiệm tấm FRC chịu tải trọng nổ

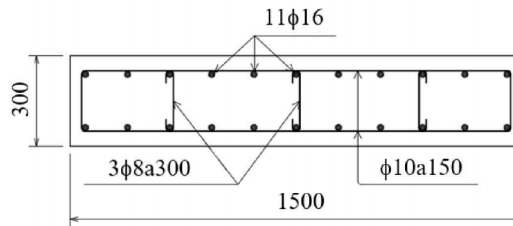
a. Mô tả thí nghiệm

Trong nghiên cứu của mình, Foglar và cs. [8] đã tiến hành rất nhiều thí nghiệm trên các loại tấm khác nhau với các thông số khác nhau, trong đó có thí nghiệm trên mẫu số 15 là mẫu tấm FRC phù hợp với nghiên cứu này. Do đó, thí nghiệm trên mẫu số 15 như thể hiện trên Hình 1(a) được lựa chọn để xây dựng mô hình PTHH. Tấm FRC được chế tạo sẵn được đặt lên gối tựa là hai thanh gỗ cố định trên nền đất. Khối thuốc nổ TNT 25 kg được đỡ bởi các thanh thép tại vị trí chính giữa tấm với khoảng cách từ tâm khối thuốc đến bề mặt trên của tấm FRC là 0,55 m. Nhằm tránh hiệu ứng dội ngược lại của sóng nổ khi va chạm vào bề mặt đất phía dưới, phần đất này được đào bỏ để tạo thành hố sâu phía dưới tấm.

Tấm FRC với kích thước dài, rộng và dày tương ứng là 6 m, 1,5 m và 0,3 m được chế tạo từ bê tông cốt sợi có cường độ chịu nén và chịu kéo lần lượt là 76,1 MPa và 10,7 MPa. Cốt sợi thép dùng cho bê tông là loại sợi xoắn (Hooked fiber) có chiều dài 30 mm được dùng với hàm lượng 1% tương đương 80 kg/m³ bê tông. Cốt thép dùng cho tấm FRC bao gồm 11 thanh cốt dọc đường kính 16 mm, cốt đai vòng kín $\phi 10a150$ cùng 3 nhánh đai phụ $\phi 8a300$. Toàn bộ cốt thép sử dụng loại thép có cường độ chảy dẻo 500 MPa, mô đun đàn hồi 210 000 MPa, được đặt trong tấm FRC với lớp bê tông bảo vệ 50 mm như được thể hiện trên Hình 1(b).



(a) Sơ đồ thí nghiệm tấm FRC chịu nổ



(b) Chi tiết cấu tạo tấm FRC

Hình 1. Mô tả thí nghiệm tấm FRC chịu nổ được thực hiện bởi Foglar và cs. [8]

b. Kết quả thí nghiệm

Kết quả chính của thí nghiệm nổ tấm FRC là dạng phá hoại cùng với diện tích vùng bị phá hoại/ảnh hưởng trên tấm dưới tác động của khối thuốc nổ. Các kết quả này được chụp/đo sau khi thí nghiệm kết thúc. Ngoài ra trong thí nghiệm cũng sử dụng 1 máy ảnh với tốc độ xử lý rất cao nhằm ghi lại ứng xử của tấm trong quá trình thí nghiệm. Hình 2 thể hiện hình ảnh sự phá hoại ở mặt trên (mặt gần khối thuốc nổ) và mặt dưới của tấm FRC sau khi chịu tác động của khối thuốc nổ, hình ảnh cho thấy thuốc



(a) Mặt trên



(b) Mặt dưới

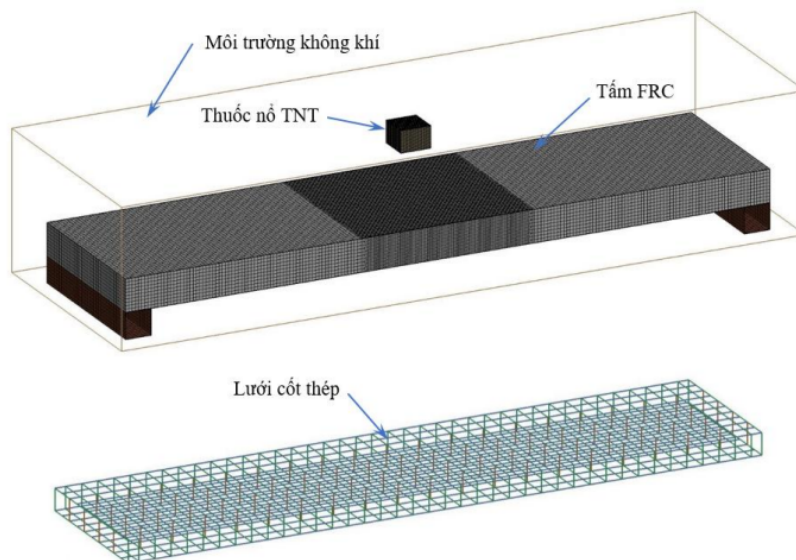
Hình 2. Sự phá hoại của tấm FRC sau thí nghiệm nổ [8]

nổ đã làm xuyên thủng một lỗ lớn tại tâm và tấm FRC gần như đã bị phá hủy. Kết quả đo đạc cho thấy mặt trước của lỗ bị phá hủy có diện tích khoảng $0,16 \text{ m}^2$ trong khi thể tích vùng bê tông bị phá hủy khoảng $0,16 \text{ m}^3$, cùng với biến dạng đáng kể của các thanh cốt thép là biến dạng dư cuối cùng lớn nhất $0,5 \text{ m}$ tại tâm tấm FRC.

2.2. Xây dựng mô hình PTHH

a. Mô hình các cấu kiện

Mô hình PTHH mô phỏng thí nghiệm tấm FRC chịu tải trọng nổ được xây dựng sử dụng phần mềm LS-DYNA [16] như được thể hiện trong Hình 3.

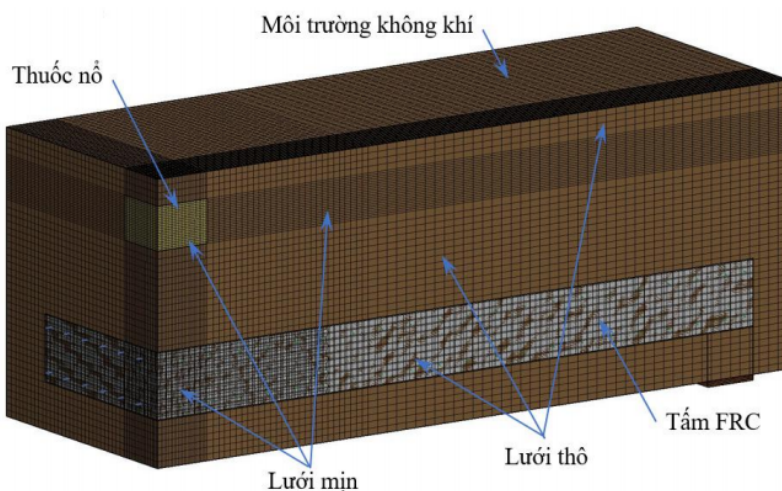


Hình 3. Mô hình PTHH tấm FRC chịu tải trọng nổ

Tấm FRC được mô phỏng sử dụng phần tử khối 8 nút. Khu vực giữa tấm nơi bị ảnh hưởng của tải trọng nổ được chia lưới phần tử mịn với kích thước 15 mm nhằm thu được ứng xử động một cách đáng tin cậy, trong khi đó hai vùng biên của tấm được chia lưới thô hơn với kích thước 30 mm nhằm giảm thời gian phân tích cho mô hình. Kích thước chia lưới được lựa chọn dựa trên rất nhiều phân tích thử nghiệm trước đó nhằm đạt được sự hội tụ và phản ánh chính xác nhất kết quả thí nghiệm. Các thanh cốt thép dọc và thép đai được mô phỏng sử dụng phần tử dầm Belytschko-Schwer có sẵn trong LS-DYNA [16]. Để mô hình hóa liên kết giữa bê tông và cốt thép, LS-DYNA cung cấp một kỹ thuật rất mạnh mẽ và thuận tiện, đó là thuật toán Lagrange-in-solid, trong đó bê tông được gán như là phần chủ (master) còn cốt thép được gán như là phần phụ thuộc (slave) gắn chặt với phần chính. Liên kết này được chứng minh phản ánh phù hợp với sự làm việc giữa bê tông và cốt thép trong rất nhiều mô phỏng tương tự [5, 17]. Hai con lăn gối tựa được mô phỏng gần đúng như dầm thép ống rỗng, sử dụng các phần tử vỏ. Cần lưu ý rằng trong thí nghiệm, thực tế hai gối tựa là hai thanh gỗ, tuy nhiên do sử dụng mô hình vật liệu cho gỗ có thể mất nhiều thời gian phân tích trong khi việc mô phỏng vật liệu con lăn không có ảnh hưởng đáng kể đến phản ứng của tấm FRC dưới tải trọng nổ, như đã nêu trong tài liệu tham khảo [8], mô hình thay thế của các con lăn sử dụng dầm thép ống rỗng đơn giản hơn mà không làm thay đổi ứng xử của tấm FRC. Sự tương tác giữa các con lăn và tấm FRC được mô hình hóa bằng cách sử dụng thuật toán liên kết tiếp xúc mặt – mặt (Surface_to_Surface) trong LS-DYNA [16].

Trong thí nghiệm tải trọng nổ, vùng môi trường không khí xung quanh vị trí đặt chất nổ và mẫu thử có vai trò truyền sóng nổ trước và sau khi sóng này va chạm và gây tác động lên mẫu thử, do đó

việc mô phỏng môi trường không khí xung quanh này rất quan trọng. Hình 4 thể hiện mối tương quan giữa vùng không khí xung quanh khu vực và các phần khác của mô hình. Với những kết quả thành công trong mô phỏng kết cấu bê tông chịu tải trọng nổ trong thời gian qua [5, 17], nghiên cứu này tiếp tục sử dụng mô phỏng tải trọng nổ bằng phương pháp Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian (MM-ALE). Phần tử đa vật liệu 1 điểm Arbitrary Lagrange Eulerian (ALE) được sử dụng để lập mô hình miền không khí và khối thuốc nổ TNT. Cần nhấn mạnh rằng khối thuốc nổ phải được mô hình hóa bằng lưới rất mịn, ngoài ra khu vực gần vị trí khối chất nổ theo phương đứng là phương mà sóng nổ sẽ truyền tới tấm FRC cũng được mô hình hóa bằng lưới mịn hơn, trong khi đó ở những vùng mà ảnh hưởng của áp lực nổ là không đáng kể, sử dụng chia lưới thô hơn nhằm giảm thiểu thời gian phân tích của mô hình. Các kịch bản chia lưới với kích thước khác nhau ở các vùng khác nhau đã được tiến hành trong các phân tích thử nghiệm, kết hợp với các kết quả mô phỏng thành công trong các nghiên cứu trước đây [5, 17, 18], kích thước lưới phần tử ở các vùng được chia như sau: khối thuốc nổ và khu vực liên quan trực tiếp đến chất nổ được chia lưới rất mịn với kích thước 10 mm; các miền xung quanh khu vực có khả năng xảy ra phá hoại cục bộ của tấm được chia lưới 30 mm; và những vùng còn lại không có khả năng xảy ra phá hoại được chia lưới với kích thước mắt lưới 50 mm. Để mô hình hóa sự tương tác giữa miền MM-ALE và tấm FRC, mô hình tương tác kết cấu - chất lỏng (fluid-structure interaction model) được sử dụng. Theo cách này, áp suất nổ do vật liệu nổ tạo ra được truyền qua khí quyển đã được mô hình hóa bởi miền MM-ALE và truyền đến kết cấu.



Hình 4. Chia lưới phần tử các vùng khác nhau trong mô hình PTHH

b. Mô hình vật liệu

Việc lựa chọn sử dụng mô hình vật liệu phù hợp là tối quan trọng và quyết định tính chính xác cũng như độ tin cậy cho mô hình PTHH. Dựa trên kinh nghiệm và bí quyết của các tác giả, trong mô hình PTHH này, các mô hình vật liệu khác nhau có sẵn trong LS-DYNA [19] được lựa chọn sử dụng bao gồm mô hình vật liệu đàn hồi dẻo (Elastic Plastic material), mô hình cháy nổ cao (High Explosive Burn), mô hình Null và mô hình bê tông Winfrith (Winfrith Concrete model). Dưới đây sẽ trình bày tóm tắt về sự làm việc của các mô hình vật liệu này.

- Mô hình vật liệu đàn hồi dẻo (Elastic Plastic model - MAT#003)

Mô hình vật liệu đàn hồi dẻo là mô hình đơn giản, phù hợp sử dụng cho các vật liệu có tính dẻo như cốt thép. Mô hình này cung cấp các ứng xử tăng cứng tùy chọn của vật liệu, có thể kết hợp giữa tăng cứng đẳng hướng (Isotropic hardening) và tăng cứng động học (Kinematic hardening) bằng cách

thay đổi một tham số, được gọi là β trong khoảng từ 0 đến 1. Đối với $\beta = 0$ vật liệu sẽ ứng xử theo tăng cứng động học, trong khi đó với $\beta = 1$ vật liệu sẽ ứng xử theo tăng cứng đẳng hướng [19]. Đối với vật liệu tăng cứng đẳng hướng, tâm của bề mặt chảy dẻo được cố định trong khi bán kính của nó là một hàm của biến dạng dẻo. Ngược lại, với vật liệu tăng cứng động học, bán kính của bề mặt chảy dẻo là cố định trong khi tâm của nó tịnh tiến theo phương của biến dạng dẻo. Đối với cốt thép dẻo, tùy chọn tăng cứng động học thường được sử dụng, nghĩa là $\beta = 0$, khi đó điều kiện chảy dẻo của vật liệu như sau:

$$\phi = \frac{1}{2}\xi_{ij}\xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad (1)$$

trong đó, $\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}$ với s_{ij} là tenxơ ứng suất và α_{ij} là tenxơ ứng suất dịch chuyển.

Để xem xét đến ảnh hưởng của tốc độ biến dạng, mô hình vật liệu đàn hồi dẻo sử dụng phương trình phổ biến Cowper-Symonds để tính toán hệ số gia tăng động là hàm của tốc độ biến dạng và các hằng số Cowper-Symonds (C và p), là các hằng số phụ thuộc vào vật liệu.

Trong mô hình này, các thông số vật liệu cốt thép theo mô hình đàn hồi dẻo như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của mô hình vật liệu cốt thép

Trọng lượng riêng (kg/m ³)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poát xông	Cường độ chảy dẻo (MPa)	Mô đun tiếp tuyến (MPa)	β	C	p	Biến dạng phá hủy
7850	210	0,3	500	0	0	40,4	5,0	0,5

- Mô hình vật liệu cháy nổ cao (High Explosive Burn - MAT#008)

Mô hình vật liệu này thường được sử dụng cho các loại thuốc nổ TNT. Mô hình vật chất này được sử dụng cùng với hàm Jones-Wilkins-Lee (JWL) - Equation of State (EoS) [19]. Áp suất hiệu quả p trong chất nổ được xác định bằng cách nhân phần cháy F với phần áp suất p_{eos} được tính bởi hàm EoS như sau:

$$p = F \times p_{eos} \quad (2)$$

trong đó $F = \max(F_1, F_2)$, với:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t - t_l)D}{3\left(\frac{v_e}{A_{e\max}}\right)} & \text{khi } t > t_l \\ 0 & \text{khi } t \leq t_l \end{cases} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{1 - V}{1 - V_{CJ}} \quad (4)$$

trong đó t là thời điểm hiện tại; t_l là thời gian cháy của một phần tử; D là vận tốc nổ; v_e là thể tích phần tử; $A_{e\max}$ là diện tích mặt lớn nhất của phần tử; V là thể tích tương đối; và V_{CJ} là thể tích tương đối Chapman-Jouguet.

Phương trình hàm trạng thái JWL-EoS là mối quan hệ áp suất - thể tích trong quá trình mở rộng đẳng hướng và được biểu diễn như sau:

$$p_{eos} = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_0}\right)e^{-R_1 V_0} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_0}\right)e^{-R_2 V_0} + \frac{\omega E_0}{V_0} \quad (5)$$

trong đó V_0 là thể tích tương đối; E_0 là nội năng riêng; và A, B, R_1, R_2 và ω là các hằng số thu được bằng các dữ liệu thử nghiệm.

Trong mô hình này, các thông số khai báo cho vật liệu cháy nổ cao và hàm trạng thái JWL-EoS như trong Bảng 2 [20].

Bảng 2. Thông số của mô hình vật liệu cháy nổ cao

Trọng lượng riêng (kg/m ³)	Vận tốc nổ D (m/s)	P_{CJ} (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	E_0 (J/m ³)	V_o
1600	7680	21,15	759,9	12,56	5,1	1,5	0,29	7×10^9	1,0

- Mô hình vật liệu rỗng (Null model - MAT#009)

Miền không khí xung quanh khu vực nổ được mô hình hóa như một loại khí lý tưởng bằng cách sử dụng kết hợp mô hình vật liệu rỗng và hàm trạng thái EOS dạng đa thức tuyến tính, khi đó áp suất trong miền không khí được xác định như sau [20]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (6)$$

Trong đó $C_0 \sim C_6$ là hằng số, E_0 là nội năng trên một đơn vị thể tích ban đầu và $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ với ρ và ρ_0 lần lượt là trọng lượng riêng của không khí ban đầu và hiện tại. Với khí lý tưởng, các hệ số $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ và $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, khi đó biểu thức (6) trở thành:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \quad (7)$$

với γ là tỷ số nhiệt. Trong mô hình này, tỷ số nhiệt được lấy $\gamma = 1,4$, trọng lượng riêng vật liệu là 1,29 kg/m³, trong khi các tham số khác được để giá trị 0. Ngoài ra áp suất tham chiếu 1,0 bar ($\sim 0,1$ MPa) lên bề mặt tự do của khối không khí được khai báo thông qua tùy chọn *CONTROL_ALE nhằm xác định các điều kiện biên của dòng chảy áp lực không khí.

- Mô hình vật liệu bê tông (Winfrith Concrete model - MAT#084)

Trong số nhiều mô hình vật liệu được phát triển cho FRC, Winfrith là mô hình vật liệu phù hợp và hiệu quả nhất để mô hình hóa sự phá hủy cục bộ của kết cấu FRC dưới tác động của tải trọng động nhờ rất nhiều ưu điểm trong đó nổi bật khả năng mô hình vết nứt của cấu kiện FRC, điều này thực sự hữu ích trong việc đánh giá vùng hư hỏng của kết cấu. Ngoài ra, mô hình vật liệu Winfrith kết hợp tính năng EROSION trong phần mềm LS-DYNA cho phép loại bỏ các phần tử bê tông khi đạt đến giới hạn phá hoại, cho phép thể hiện vùng bê tông bị phá hoại như trong kết cấu thật. Hơn nữa, mô hình vật liệu này kể đến được ứng xử mềm hóa biến dạng khi vật liệu chịu kéo (strain softening behavior in tension) và có khả năng hiệu chỉnh ứng xử kéo và cường độ của FRC bằng cách sử dụng mô hình của Naaman đã đề xuất [21]. Chi tiết về mô hình vật liệu này được thể hiện rõ trong rất nhiều tài liệu tham khảo [5, 20], Bảng 3 liệt kê các thông số cần khai báo cho vật liệu FRC trong mô hình này.

Bảng 3. Thông số của mô hình vật liệu FRC

Trọng lượng riêng (kg/m ³)	Mô đun tiếp tuyến TM (GPa)	Hệ số Poát xông	Cường độ chịu nén (MPa)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Năng lượng phá hủy FE (N/m ²)	Kích thước cốt liệu (m)
2350	31,62	0,20	76,1	10,7	115	0,008

3. Kiểm chứng mô hình PTHH mô phỏng tấm FRC dưới tác dụng của tải trọng nổ

Để kiểm chứng sự chính xác của mô hình PTHH, cần thực hiện hai kiểm chứng riêng biệt, bao gồm (1) kiểm chứng mô hình PTHH về sự mô phỏng tải trọng nổ và (2) kiểm chứng về sự mô phỏng

ứng xử của tấm FRC chịu tải trọng nổ. Việc kiểm chứng về sự mô phỏng tải trọng nổ đã được các tác giả thực hiện trong các công trình nghiên cứu trước đây nên được trình bày ngắn gọn trong bài báo này. Trong khi đó, việc kiểm chứng ứng xử của tấm FRC dưới tác dụng của tải trọng nổ thông qua kết quả thí sẽ được trình bày chi tiết hơn dưới đây.

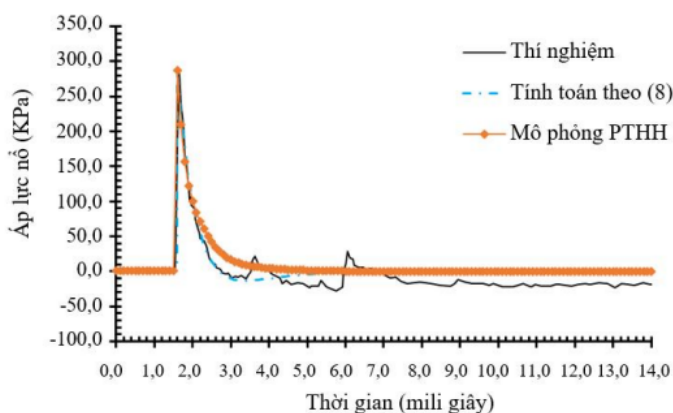
3.1. Kiểm chứng mô phỏng tải trọng nổ

Để kiểm chứng mô hình vụ nổ, thử nghiệm nổ được thực hiện bởi Remennikov và cs. [22] và phương trình thực nghiệm đề xuất bởi Baker [23] được sử dụng. Trong thử nghiệm nổ, Remennikov và cs. [22] đã tiến hành bắn thử nghiệm lượng nổ tương đương 1,0 kg thuốc nổ TNT. Lượng TNT được đặt ở giữa không trung và lịch sử thời gian - áp suất (Pressure-time history) được đo bằng các thiết bị đo áp suất. Lịch sử thời gian - áp suất cũng có thể được ước tính bằng phương trình thực nghiệm đề xuất bởi Baker như sau [23]:

$$P_{ex}(t) = P_{S0} \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) e^{\frac{-\alpha t}{t_0}} \quad (8)$$

trong đó t_0 và t tương ứng là thời gian áp suất dương và thời gian hiện tại; P_{S0} là đỉnh quá áp (tính bằng bar); và α là tham số suy hao.

Thử nghiệm vụ nổ được mô hình hóa trong phần mềm LS-DYNA bằng cách sử dụng mô phỏng MM-ALE. Khối thuốc nổ được mô hình bằng cách sử dụng mô hình vật liệu cháy nổ cao kết hợp với EOS JWL, trong khi miền không khí được lập mô hình bằng mô hình vật liệu rỗng kết hợp với EOS đa thức tuyến tính với các thông số đã được trình bày ở trên. Kết quả mô hình hóa vụ nổ chính là đường quan hệ lịch sử thời gian – áp lực nổ. Hình 5 so sánh lịch sử thời gian – áp lực nổ thu được từ thử nghiệm thực tế của Remennikov và cs., phương trình Baker và mô hình PTHH được xây dựng. Kết quả từ Hình 5 chỉ ra rằng mô hình PTHH có thể mô phỏng gần như chính xác áp lực nổ tạo ra bởi thuốc nổ TNT theo thời gian. Do đó, mô hình PTHH được phát triển trong nghiên cứu này sử dụng mô phỏng MM-ALE có thể tin cậy được sử dụng trong mô phỏng số của các kết cấu chịu tải trọng nổ.

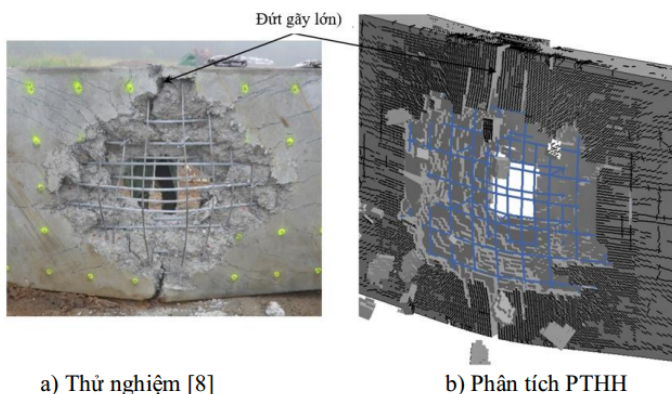


Hình 5. Kiểm chứng quan hệ lịch sử thời gian – áp suất từ mô hình PTHH

3.2. Kiểm chứng mô phỏng tấm FRC chịu tải trọng nổ

Để đánh giá độ chính xác của mô hình PTHH đã được xây dựng, các thông số bao gồm dạng phá hoại, biến dạng lớn nhất cuối cùng và thể tích phần bê tông bị phá vỡ của tấm FRC sau va chạm thu được từ phân tích PTHH sẽ được so sánh với kết quả thử nghiệm tương ứng. Cần lưu ý rằng, thể tích phần bê tông bị phá hoại được tính toán dựa trên kích thước vùng bê tông bị phá hoại thu được nhờ áp dụng tính năng EROSION trong LS-DYNA. Hình 6 thể hiện sự so sánh về dạng và mức độ phá hoại,

trong khi Bảng ?? so sánh biến dạng lớn nhất cuối cùng và thể tích phần bê tông bị phá vỡ của tấm FRC sau khi chịu nổ giữa thử nghiệm và mô hình PTHH. Kết quả so sánh ở Hình 6 cho thấy mô hình phân tích PTHH mô phỏng chính xác dạng và mức độ phá hoại của tấm FRC khi chịu nổ. Vùng phá hoại hình nón ở giữa tấm FRC có dạng và mức độ tương đồng với kết quả thu được từ thử nghiệm, bên cạnh đó các thanh cốt thép bị biến dạng đáng kể nhưng không bị kéo đứt. Các vết nứt lớn gây đứt gãy xảy ra ở hai bên mép chứng tỏ tấm FRC đã bị phá hoại hoàn toàn. So sánh biến dạng lớn nhất cuối cùng và thể tích phần bê tông bị phá vỡ của tấm FRC sau va chạm thể hiện trong Bảng ?? cũng cho thấy kết quả phân tích phù hợp tốt với kết quả thử nghiệm với sai số tương ứng lần lượt là 5,60% và 6,25%. Kết quả này cho thấy rằng mô hình PTHH có thể mô phỏng chính xác sự phá hoại của tấm FRC dưới tác động của tải trọng nổ, do đó mô hình PTHH được xây dựng có thể được sử dụng để phân tích bài toán tấm FRC chịu tải trọng nổ cho kết quả đáng tin cậy.

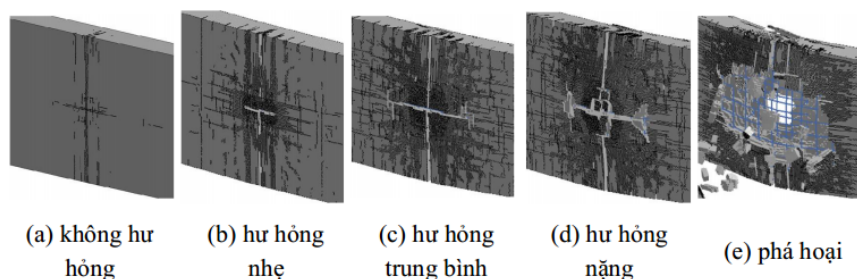


Hình 6. So sánh dạng và mức độ phá hoại mặt trên của tấm FRC chịu tải trọng nổ

4. Khảo sát sự phá hoại của tấm FRC chịu tải trọng nổ

4.1. Dạng phá hoại của tấm FRC chịu tải trọng nổ

Sự phá hoại của kết cấu tấm nói chung dưới các tác động của tải trọng xung như va đập hay nổ thường được phân thành nhiều loại dựa trên mức độ phá hoại khác nhau của tấm. Dựa theo tiêu chuẩn thiết kế liên quan như tiêu chuẩn thiết kế an toàn cho nhà máy điện hạt nhân của Mỹ (ACI 349-01) và kết quả của các nghiên cứu trước đây [24, 25], có thể phân loại sự phá hoại của tấm FRC dưới tác động của tải trọng nổ thành 5 dạng cơ bản như sau: (1) không hư hỏng, một số vết nứt nhỏ xuất hiện trên bề mặt tấm nhưng không gây hư hỏng cục bộ hoặc nứt; (2) hư hỏng nhẹ, xuất hiện các vết nứt nhỏ và hư hỏng nhẹ nhưng cốt thép không bị ảnh hưởng, vẫn được bao phủ bởi lớp bê tông bảo vệ; (3) hư hỏng trung bình, xảy ra nứt, gãy, lớp bê tông phủ trên bề mặt tấm bị bong tróc nhưng cốt thép không bị phá hủy; (4) hư hỏng nặng, tấm bị hư hỏng rất nặng, một phần tiết diện bê tông bị bong tróc, cốt



Hình 7. Các dạng (mức độ) phá hoại điển hình của tấm FRC chịu tải trọng nổ - mặt gần khối thuốc nổ

thép bị biến dạng nhưng chưa bị phá hoại; và (5) phá hoại, tấm gần như hoặc bị phá hoại hoàn toàn. Các dạng phá hoại này được minh họa trong Hình 7 và được sử dụng như là các tiêu chí đánh giá mức độ phá hoại của tấm dưới tác động của tải trọng nổ.

4.2. Các yếu tố khảo sát ảnh hưởng đến sự phá hoại của tấm FRC

Với mô hình PTHH đã được xây dựng, một số thông số quan trọng sẽ được khảo sát để xem xét sự ảnh hưởng của chúng đến sự phá hoại của tấm FRC chịu tải trọng nổ bao gồm khối lượng chất nổ, cường độ chịu kéo (liên quan trực tiếp đến hàm lượng cốt sợi), cường độ chịu nén, và độ dày của bê tông cốt sợi. Trọng lượng của chất nổ và khoảng cách từ điểm đặt chất nổ được coi là một trong những yếu tố gây ảnh hưởng lớn nhất đến sự phá hoại của tấm. Trong khảo sát này nhằm tiết kiệm thời gian mô hình hóa, khoảng cách từ khối chất nổ đến tấm FRC được giữ không đổi trong khi trọng lượng thuốc nổ được thay đổi từ 10 kg đến 25 kg. Rất nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông cốt sợi đóng vai trò quan trọng đối với sự phá hoại của tấm dưới tác động nổ [2, 7–10]. Cường độ chịu kéo của bê tông cốt sợi phụ thuộc vào cường độ chịu kéo của bê tông sử dụng, loại và hàm lượng cốt sợi trong khi đó mô đun đàn hồi phụ thuộc vào cường độ chịu nén của bê tông sử dụng, loại và hàm lượng cốt sợi. Các mối quan hệ này có thể tham khảo các đề xuất được phổ biến sử dụng trong các tài liệu tham khảo [21, 26]. Trong khảo sát này, ảnh hưởng của cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi được xem xét thông qua hàm lượng của cốt sợi thép dạng móc (Hooked fiber) và cường độ chịu nén của bê tông nền tương ứng. Do cường độ chịu nén được coi là không có nhiều ảnh hưởng đến sự phá hoại của tấm, khảo sát chỉ tiến hành trên hai giá trị cường độ chịu nén phổ biến của bê tông nền khi chế tạo bê tông cốt sợi là 60 MPa và 80 MPa. Kết hợp với các hàm lượng cốt sợi khác nhau thường được sử dụng từ 0,75% đến 2,0%, các thông số về vật liệu được khảo sát bao gồm cả cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi như được thể hiện trong Bảng 4. Ngoài ra, ảnh hưởng của độ dày tấm cũng được khảo sát với các chiều dày khác nhau thay đổi từ 240 mm đến 420 mm.

Bảng 4. Các thông số và giá trị dùng trong khảo sát

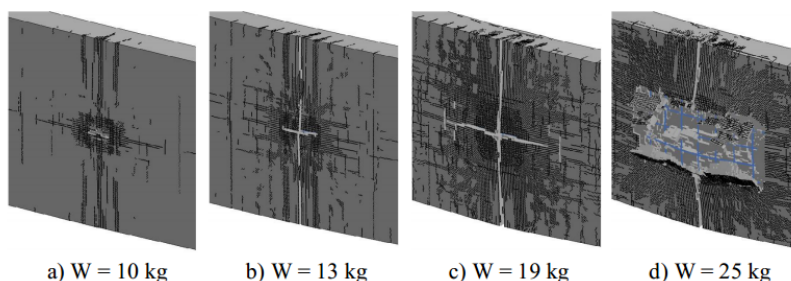
Thông số	Đơn vị	Giá trị
Chiều dày tấm (t)	mm	240; 300; 360; 420
Trọng lượng thuốc nổ (W)	kg	10; 13; 16; 19; 22; 25
Cường độ chịu kéo (f_t)*	MPa	5,75; 7,18; 9,29; 10,42
Cường độ chịu nén (f_c')	MPa	60; 80
Mô đun đàn hồi (E)*	GPa	26,6; 27,4; 28,1; 28,5; 30,0; 30,8; 31,6; 32,0
Hàm lượng cốt sợi	%	0,75; 1,00; 1,50; 2,00

* Xác định thông qua cường độ chịu nén và hàm lượng cốt sợi

4.3. Ảnh hưởng của khối lượng chất nổ

Hình 8 thể hiện mức độ phá hoại của tấm FRC dưới tác động của các mức tải trọng nổ khác nhau thu được từ phân tích PTHH, kết quả cho thấy khối lượng chất nổ có ảnh hưởng lớn đến sự phá hoại của tấm. Với khối thuốc nổ 10 kg, xuất hiện các vết bong tróc nhỏ ở giữa và một số vết nứt theo chiều ngang giữa tấm FRC, tấm bị hư hỏng nhẹ trong trường hợp này. Khi khối thuốc nổ là 13 kg, sự phá hoại do nứt bắt đầu hình thành trên tấm. Tại trung tâm tấm FRC cũng xuất hiện vết nứt dọc và nhiều vết nứt nhỏ ngang dọc khác, đồng thời, biến dạng tổng thể và cục bộ của tấm đều tăng lên. Khi khối thuốc nổ tăng lên 19 kg, cả vết nứt ngang và dọc đều lớn hơn và làm lộ ra phần cốt thép, đồng thời xuất hiện dạng nứt đáng kể ở khu vực giữa của tấm. Biến dạng tổng thể tăng nhanh và sự phá hoại cục bộ bắt đầu hình thành. Khi lượng thuốc nổ tăng lên 25 kg thì xảy ra sự hư hỏng cục bộ nặng, bê

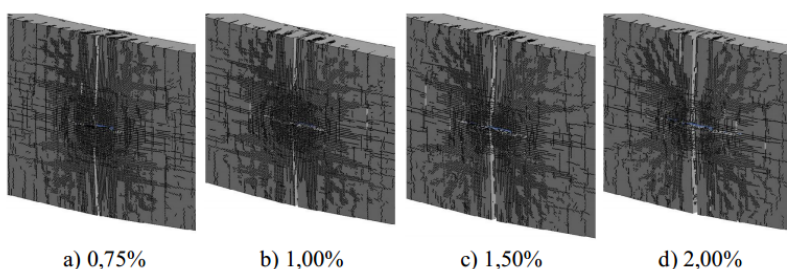
tông tấm bị phá vỡ một lỗ lớn để lộ cốt thép, các vết nứt lớn cũng xuất hiện trên khắp mặt tấm và các vết nứt nhỏ cũng lan rộng hơn, tấm coi như bị phá hoại hoàn toàn. Nhìn chung, việc tăng tải trọng nỗ làm cho hư hỏng cục bộ, biến dạng tổng thể, biến dạng cốt thép tăng lên rõ rệt, đồng thời các đứt gãy và nứt nẻ cũng tăng lên cho đến khi tấm bị phá hoại hoàn toàn.



Hình 8. Phá hoại mặt trên của tấm FRC dưới tác động của các khối lượng nỗ khác nhau

4.4. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi

Hàm lượng cốt sợi thường được cho là có tác dụng đáng kể trong việc giảm thiểu sự phá hoại của tấm FRC dưới tải trọng nỗ. Tuy nhiên, kết quả phân tích trong nghiên cứu này cho thấy việc tăng hàm lượng sợi không làm tăng đáng kể khả năng chống nỗ như được thể hiện trong Hình 9.



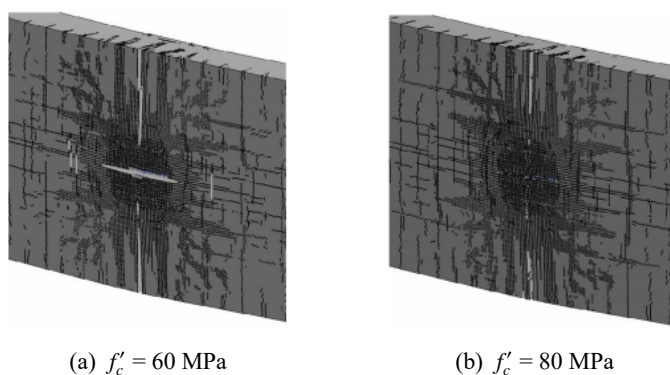
Hình 9. Sự phá hoại mặt trên của tấm với các hàm lượng cốt sợi khác nhau

Sự khác biệt quan sát được từ kết quả phân tích dường như chỉ là sự phân bố các vết nứt trên mặt tấm FRC. Khi hàm lượng sợi thấp ở mức 0,75%, vết nứt chính xuất hiện tập trung ở điểm giữa của tấm, trong khi với hàm lượng sợi cao hơn ở mức 2,00%, các vết nứt được phân bố ở hai bên của tấm đồng thời số lượng vết nứt nhỏ giảm đi. Kết quả phân tích cho thấy thành phần sợi có ảnh hưởng nhẹ đến việc giảm biến dạng của tấm tường, tuy nhiên không đáng kể với các biến dạng tương ứng là 0,329 m, 0,327 m, 0,320 m và 0,315 m khi hàm lượng cốt sợi lần lượt là 0,75%, 1,00%, 1,50% và 2,00%. Cũng cần nhấn mạnh rằng ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi được khảo sát trong nghiên cứu này là đối với tấm chịu tác động của khối thuốc nỗ 10 kg, với khối lượng thuốc nỗ lớn hơn, có thể ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi sẽ rõ ràng hơn. Một nghiên cứu thực nghiệm thực hiện bởi Hajek và cs. [9] chỉ ra rằng cốt sợi thép hiệu suất thấp (low-performance steel fiber) không ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống nỗ của các tấm bê tông cốt sợi, trong khi đó dữ liệu thử nghiệm được thực hiện bởi Yao và cs. [27] cho thấy tấm FRC sợi thép cho khả năng chống tải trọng nỗ tốt nhất so với các loại tấm sử dụng sợi hỗn hợp (là sự kết hợp giữa sợi thép, polypropylene và polyvinyl alcohol). Trong các thử nghiệm của Foglar và cs. [2] mà trong đó mẫu thí nghiệm số 15 được sử dụng để xây dựng mô hình PTHH trong nghiên cứu này, khi thay đổi hàm lượng cốt sợi khác nhau từ 0,5% đến 1,0%, tất cả các tấm FRC đều bị phá hoại, do đó không thể đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến khả năng chống nỗ của tấm FRC từ kết quả các thí nghiệm này. Về mặt lý thuyết, sợi gia cường làm tăng

độ bền kéo của vật liệu, do đó cũng làm tăng khả năng chống uốn và chống cắt của tấm dẫn đến làm giảm biến dạng (độ võng) và sự phá hoại của tấm khi chịu tải trọng. Đối với các tấm FRC chịu tải tốc độ cao như tải va đập và nổ, việc giảm độ võng (nghĩa là tăng độ cứng của tấm) có thể dẫn đến hư hỏng cục bộ nghiêm trọng hơn cho tấm, chỉ khi độ dày của tấm đủ lớn để việc tăng độ cứng không làm giảm đáng kể biến dạng của tấm thì độ bền kéo của vật liệu mới phát huy hiệu quả làm giảm hư hỏng cho tấm FRC.

4.5. Ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông nền

Cũng giống như hàm lượng cốt sợi trong trường hợp khảo sát, cường độ chịu nén của bê tông mặc dù có ảnh hưởng phần nào đến sự phá hoại của tấm FRC nhưng không đáng kể như được thể hiện trên Hình 10. Kết quả phân tích cho thấy tấm FRC sử dụng bê tông có cường độ chịu nén là 60 MPa có mức độ phá hoại lớn hơn so với trường hợp tấm có cường độ chịu nén 80 MPa. Trong khi tấm có cường độ chịu nén 60 MPa có nhiều vết nứt hơn xung quanh khu vực trung tâm, thì tấm FRC với cường độ chịu nén 80 MPa chỉ hình thành với hai vết nứt chính, đó là vết nứt ngang và vết nứt dọc. Ở tấm FRC thứ nhất, phần cốt thép lộ ra nhiều hơn so với tấm FRC thứ hai, cho thấy tấm FRC thứ nhất bị biến dạng nhiều hơn. Có thể kết luận rằng, mặc dù sự thay đổi cường độ chịu nén của bê tông không làm thay đổi các dạng phá hoại (tức là trong cả hai trường hợp đều xuất hiện dạng phá hoại nhẹ) nhưng lại có sự thay đổi về mức độ phá hoại của tấm.

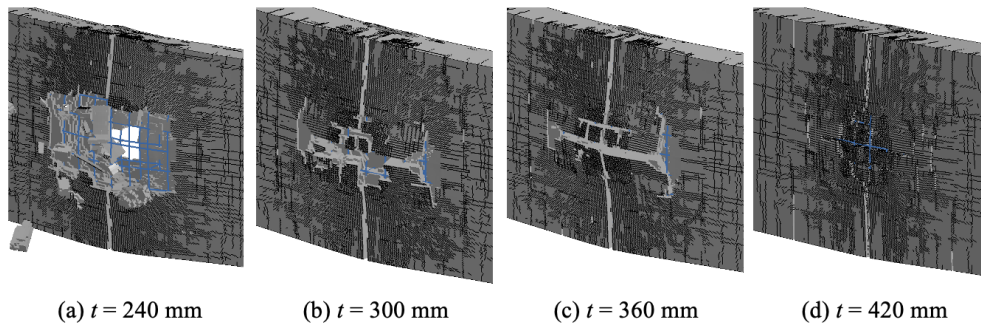


Hình 10. Phá hoại mặt trên của tấm FRC với cường độ chịu nén bê tông khác nhau

4.6. Ảnh hưởng của chiều dày tấm FRC

Độ dày của tấm FRC là yếu tố quyết định đến mức độ phá hoại của tấm dưới tác động của tải trọng nổ như thể hiện trong Hình 11. Đúng như dự kiến, khi độ dày tăng lên, sự phá hoại cục bộ của tấm FRC giảm đáng kể. Với độ dày 240 mm, tấm FRC bị phá hoại dẫn đến hư hỏng hoàn toàn với một lỗ thủng lớn ở giữa và một vết nứt lớn xuất hiện trên mặt cắt ngang của tấm. Các thanh cốt thép bị biến dạng đáng kể bên cạnh các vết nứt nhỏ xảy ra xung quanh lỗ thủng. Trong trường hợp chiều dày bằng 300 mm, vết nứt lớn xảy ra xuyên qua mặt cắt của tấm FRC nhưng tấm không bị phá vỡ hoàn toàn. Các vết nứt xung quanh khu vực giữa dường như rộng hơn và song song với vết nứt lớn ở giữa bức tường. Các thanh cốt thép vẫn bị biến dạng đáng kể và tấm FRC bị hư hỏng nghiêm trọng. Khi chiều dày tăng lên 360 mm, vết nứt lớn vẫn xuất hiện ở giữa tấm mặc dù số lượng các vết nứt nhỏ ít hơn. Các vết nứt quanh khu vực giữa tấm tiếp tục mở rộng song song với vết đứt gãy lớn. Độ biến dạng của cốt thép giảm đáng kể nhưng tấm vẫn bị hư hỏng khá nặng. Trường hợp chiều dày bằng 420 mm, lớp bê tông phủ mặt sau của tường bị nứt nhưng không có sự hư hỏng đáng kể. Vết nứt ở mặt cắt giữa tấm không lớn lắm, xung quanh khu vực giữa có một số vết nứt nhỏ. Theo quan sát, việc tăng độ dày

có thể làm giảm mức độ phá hoại của tấm, nhưng các vết nứt và vỡ đường như phân tán trên một diện tích rộng hơn.



Hình 11. Sự phá hoại mặt trên của các tấm FRC với chiều dày khác nhau

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, mô hình PTHH mô phỏng thí nghiệm tấm FRC chịu tải trọng nổ đã được xây dựng và kiểm chứng. Mô hình PTHH sau đó được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của các tham số đến sự phá hoại cục bộ của tấm FRC dưới tác động của tải trọng nổ. Các kết quả phân tích cho thấy rằng mỗi tham số đều có ảnh hưởng nhất định đến sự phá hoại của tấm FRC. Với các trường hợp khảo sát, trong khi ảnh hưởng của khối lượng chất nổ và chiều dày bản thân tấm có ảnh hưởng rõ rệt nhất đến mức độ phá hoại của tấm FRC, hàm lượng cốt sợi và cường độ chịu nén của vật liệu cho thấy mức độ ảnh hưởng ít hơn. Hàm lượng cốt sợi ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng chịu kéo của vật liệu bê tông cốt sợi trong khi cường độ chịu kéo của vật liệu được coi là có ảnh hưởng lớn đến sự phá hoại cục bộ cũng như biến dạng của tấm FRC khi chịu tải tốc độ cao như tải va đập và nổ. Tuy nhiên kết quả khảo sát trong nghiên cứu này chưa cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của cường độ chịu kéo đến sự phá hoại cục bộ của tấm FRC. Nguyên nhân như đã được phân tích ở trên, có thể do vùng khảo sát về chiều dày tấm FRC chưa đủ nhiều để ảnh hưởng của cường độ chịu kéo được thể hiện rõ hơn. Vấn đề này có thể sẽ được khảo sát trong các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện thông qua đề tài cấp Trường Đại học Xây dựng Hà Nội năm 2023, mã số: 34-2023/KHXD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bengar, H. A., Kiadehi, M. A., Shayanfar, J., Nazari, M. (2020). [Effective flexural rigidities for RC beams and columns with steel fiber](#). *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 34(3):453–465.
- [2] Foglar, M., Hajek, R., Kovar, M., Štoller, J. (2015). [Blast performance of RC panels with waste steel fibers](#). *Construction and Building Materials*, 94:536–546.
- [3] Li, J., Hao, H. (2014). [Numerical study of concrete spall damage to blast loads](#). *International Journal of Impact Engineering*, 68:41–55.
- [4] Morishita, M., Tanaka, H., Ando, T., Hagiya, H. (2004). [Effects of concrete strength and reinforcing clear distance on the damage of reinforced concrete slabs subjected to contact detonations](#). *Concrete Research and Technology*, 15(2):89–98.
- [5] Thai, D.-K., Nguyen, D.-L., Pham, T.-H., Doan, Q. H. (2021). [Prediction of residual strength of FRC columns under blast loading using the FEM method and regression approach](#). *Construction and Building Materials*, 276:122253.
- [6] Nam, J., Kim, H., Kim, G. (2017). [Experimental investigation on the blast resistance of fiber-reinforced cementitious composite panels subjected to contact explosions](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1):29–43.

- [7] Foglar, M., Kovar, M. (2013). [Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks](#). *International Journal of Impact Engineering*, 59:18–28.
- [8] Foglar, M., Hajek, R., Fladr, J., Pachman, J., Stoller, J. (2017). [Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPFRC and UHPFRC bridge decks](#). *Construction and Building Materials*, 145:588–601.
- [9] Hajek, R., Foglar, M., Kohoutkova, A. (2017). [Recent development in blast performance of fiber-reinforced concrete](#). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 246:012014.
- [10] Hajek, R., Fladr, J., Pachman, J., Stoller, J., Foglar, M. (2019). [An experimental evaluation of the blast resistance of heterogeneous concrete-based composite bridge decks](#). *Engineering Structures*, 179:204–210.
- [11] Pantelides, C. P., Garfield, T. T., Richins, W. D., Larson, T. K., Blakeley, J. E. (2014). [Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests](#). *Engineering Structures*, 76:24–33.
- [12] Mao, L., Barnett, S. J., Tyas, A., Warren, J., Schleyer, G. K., Zaini, S. S. (2015). [Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading](#). *Construction and Building Materials*, 93:822–830.
- [13] Mao, L., Barnett, S., Begg, D., Schleyer, G., Wight, G. (2014). [Numerical simulation of ultra high performance fibre reinforced concrete panel subjected to blast loading](#). *International Journal of Impact Engineering*, 64:91–100.
- [14] Lin, X. (2018). [Numerical simulation of blast responses of ultra-high performance fibre reinforced concrete panels with strain-rate effect](#). *Construction and Building Materials*, 176:371–382.
- [15] Hou, X., Liu, K., Cao, S., Rong, Q. (2019). [Factors governing dynamic response of steel-foam ceramic protected RC slabs under blast loads](#). *Steel Compos Struct*, 33(3):333–346.
- [16] L.S.T. Corporation (2007). *LS-DYNA Keyword User's Manual*.
- [17] Thai, D.-K., Pham, T.-H., Nguyen, D.-L. (2019). [Damage assessment of reinforced concrete columns retrofitted by steel jacket under blast loading](#). *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(1).
- [18] Thai, D.-K., Kim, S.-E. (2018). [Numerical investigation of the damage of RC members subjected to blast loading](#). *Engineering Failure Analysis*, 92:350–367.
- [19] L.S.T. Corporation (2006). *LS-DYNA Theory Manual*.
- [20] Thai, D.-K., Pham, T.-H., Nguyen, D.-L. (2019). [Damage assessment of reinforced concrete columns retrofitted by steel jacket under blast loading](#). *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(1).
- [21] Chanvillard, G., Rigaud, S. (2003). Complete characterization of tensile properties of Ductal UHPFRC according to the French recommendations. *Proceedings of the 4th International RILEM workshop High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*, 21–34.
- [22] Remennikov, A., Ngo, T., Mohotti, D., Uy, B., Netherton, M. (2017). [Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges](#). *International Journal of Impact Engineering*, 101:78–89.
- [23] Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*. University of Texas Press, Austin, TX.
- [24] Thai, D.-K., Kim, S.-E., Bui, T. Q. (2018). [Modified empirical formulas for predicting the thickness of RC panels under impact loading](#). *Construction and Building Materials*, 169:261–275.
- [25] Nhân, L. Đ., Kiên, T. Đ., Hoàn, D. Q., Nguyễn, N. Đ., Hoàn, P. T. (2022). [Dự đoán mức độ phá hoại cục bộ của tấm bê tông cốt sợi chịu tải trọng va đập sử dụng thuật toán máy học](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(2V):30–43.
- [26] Lee, S.-C., Oh, J.-H., Cho, J.-Y. (2015). [Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers](#). *Materials*, 8(4):1442–1458.
- [27] Yao, W., Sun, W., Shi, Z., Chen, B., Chen, L., Feng, J. (2019). [Blast-resistant performance of hybrid fiber-reinforced concrete \(HFRC\) panels subjected to contact detonation](#). *Applied Sciences*, 10(1):241.