

ĐÁNH GIÁ SỰ PHÁ HỦY CẤU KIỆN BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG NỔ TIẾP XÚC BẰNG MÔ PHỎNG SỐ VÀ THỰC NGHIỆM TẠI HIỆN TRƯỜNG

Phan Thành Trung^{a,*}, Nguyễn Quốc Bảo^b, Vũ Đức Hiếu^a

^a*Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự, số 236 đường Hoàng Quốc Việt, quận Bắc từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Công trình, Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, số 54 đường Triều Khúc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 09/10/2020, Sửa xong 02/11/2020, Chấp nhận đăng 03/11/2020

Tóm tắt

Đánh giá tác động và phá hủy của lượng nổ tiếp xúc với các cấu kiện là bài toán rất phức tạp và có sai số lớn. Ở Việt nam, tính toán này hiện nay chủ yếu sử dụng một số công thức thực nghiệm tham khảo đã có. Kết quả thực nghiệm chỉ phù hợp trong phạm vi thực nghiệm đề ra và còn có nhiều sai lệch đáng kể so với thực tế tại hiện trường. Bài báo tập trung vào nghiên cứu và đánh giá sự phá hủy của tải trọng nổ tiếp xúc đối với bê tông cốt thép theo phương pháp thực nghiệm tại hiện trường và mô phỏng số. Để phục vụ mô phỏng số, tác giả đã lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp với bài toán nổ và tiến hành thực nghiệm để xác định các tham số trên. Kết quả so sánh nhằm đánh giá mức độ tin cậy của mô phỏng, lựa chọn mô hình tính và mô hình vật liệu trong mô phỏng kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ bằng phần mềm ABAQUS.

Từ khóa: nổ tiếp xúc; phá hủy bê tông cốt thép; phân tích động tường minh theo thời gian; mô hình Holmquist - Johnson - Cook; mô hình Johnson - Cook.

ASSES THE FRACTURE RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE COMPONENTS UNDER CONTACT BLAST LOADING USING THE SIMULATION AND ON SITE TESTING METHOD

Abstract

Evaluation of and fracture failure of contact blast loading on structural components is normally a complicated issue with errors. In Vietnam, the problem has been solved by applied some empirical models in the literature. However, the experimental results are only suitable for each case study and still have significant deviations in comparison with reality. The paper aim to assess the fracture failure mode of reinforced concrete components under contact blast loading using both on site experiment and numerical simulation. Based on the results, the selection of computational models, constitutive laws of the material in the simulation of the structure under the impact of blast loading in the ABAQUS program has been evaluated.

Keywords: contact blast loading; demolition of reinforced concrete; explicit time integration; Holmquist - Johnson - Cook model; Johnson - Cook model.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(5V\)-15](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(5V)-15) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Khi tính toán cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc, phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration) [1] sẽ mô tả cơ hệ một cách sát thực nhất. Phương pháp này mô phỏng đầy đủ quá trình vật lý nổ, lan truyền sóng nổ trong môi trường và

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: thanhtrungphank4@gmail.com (Trung, P. T.)

tương tác của sóng nổ với kết cấu. Quá trình tính toán bắt đầu từ tâm vụ nổ, năng lượng lan truyền qua các phần tử môi trường theo bước thời gian và tác dụng vào công trình. Giải quyết bài toán tương tác này thực chất là giải quyết hệ bài toán vi phân đạo hàm riêng cực kỳ phức tạp, trong đó các phương trình phải mô tả được các quan hệ vật lý, các định luật bảo toàn, thỏa mãn các điều kiện biên ban đầu theo cả trường không gian và thời gian.

Những phương trình trên phải được giải quyết đồng thời trong mọi thời điểm, phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration) được phát triển để giải quyết đồng thời các bài toán vật lý nổ, lan truyền và tương tác của sóng nổ với công trình. Trong các chương trình tính toán ABAQUS tùy theo mô đun và yêu cầu của bài toán có thể được giải bằng các phương pháp như sai phân hữu hạn, thể tích hữu hạn, phần tử hữu hạn, ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) hay SPH (The smoothed particle hydrodynamics) [1].

Bài toán mô phỏng nổ thực chất là tính toán các tham số của sản phẩm nổ và mô tả quá trình giãn nở của sản phẩm nổ. Quá trình truyền sóng là mô phỏng quá trình lan truyền của các tham số áp suất, nội năng, khối lượng, nhiệt độ, ứng suất và mật độ theo thời gian. Quá trình lan truyền và tương tác là giải quyết các bài toán trên cơ sở định luật bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng tại tất cả các nút hoặc các phần tử theo điều kiện biên và điều kiện ban đầu [2, 3]. Các phương trình sử dụng để mô tả trạng thái của vật liệu, các quan hệ giữa ứng suất, biến dạng và chuyển vị.

Khác với giải thuật khi giải các bài toán động lực học kết cấu ở vùng đàn dẻo (không có quá trình phá hủy vật liệu) là giải các phương trình cân bằng động lực học sử dụng phép tính gần đúng Newmark [4]. Khi giải các bài toán động lực học diễn ra trong thời gian ngắn và có xét đến sự phá hủy vật liệu như trong bài toán nổ, người ta sử dụng sơ đồ tích phân trung tâm theo thời gian khác nhau (thường được gọi là phương pháp Leapfrog) [1].

Để tính toán kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ bằng các phần mềm ABAQUS trước tiên cần phải mô hình hóa bài toán. Công việc này thực chất là phân chia các vùng tính toán, khai báo mô hình vật liệu cho từng vùng, lựa chọn phương pháp giải phù hợp cho mỗi vùng và giải pháp tương tác giữa các vùng. Trong mô hình số bằng phần mềm đó, mô hình tính và mô hình các vật liệu, các thông số cơ bản có thể được lấy trực tiếp và các thông số còn lại thường được coi là giống với các thông số mô hình cụ thể, điều này làm giảm độ chính xác của các kết quả mô phỏng số. Vì vậy, tác giả đã tiến hành một số thí nghiệm để đưa ra các tham số của mô hình vật liệu thực sự cần thiết.

Trên thế giới các nghiên cứu về tác dụng của nổ tiếp xúc lên kết cấu bê tông cốt thép đã được thực hiện trong các thập kỷ qua. Một vài nghiên cứu xác định tải trọng và phá hoại do nổ tiếp xúc để đưa ra tải trọng tương đương cho sự phá hoại đó, làm căn cứ bước đầu nghiên cứu lý thuyết về phá hoại do nổ tiếp xúc [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 tiếp xúc, tuy nhiên các phương pháp này chỉ dựa trên một số giả định đơn giản làm ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả. 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, 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 bê tông cốt thép, Marchand và cs. [11] đã phát triển thuật toán về nứt dưới tác dụng của tải trọng nổ đối với tấm sàn và tường bê tông cốt thép. Các nghiên cứu trên cho thấy, ứng xử cơ học của bê tông chịu tác động của tải trọng nổ tiếp xúc rất phức tạp. Khả năng chịu tác động tải trọng nổ tiếp xúc của cấu kiện bê tông cốt thép 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.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về vấn đề nổ tiếp xúc cũng thực hiện trong những năm gần đây [12]. Việc nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số quá trình tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc đối với cấu kiện bê tông cốt thép với bê tông B25 chưa được công bố. Mục tiêu của nghiên cứu này là thử nghiệm hiện trường và mô phỏng lại quá trình phá hoại cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ tiếp xúc. Các cấu kiện bê tông cốt thép có cùng kích thước đã được chế tạo và thử nghiệm nổ để so sánh với kết quả mô phỏng số. Tải trọng nổ tiếp xúc của thuốc nổ TNT. Từ các tham số mô hình vật liệu có được sau khi thí nghiệm, tác giả tiến hành bằng mô phỏng số bài toán phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc, so sánh và đánh giá với kết quả thực nghiệm tại hiện trường.

2. Mô phỏng số phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc

2.1. Cơ sở lý thuyết của các vùng trong bài toán mô phỏng

a. Vùng thuốc nổ

Thuốc nổ được sử dụng trong nghiên cứu này là loại thuốc nổ TNT và các loại tương đương. Khi bị kích nổ thuốc nổ chuyển hóa rất nhanh từ thể rắn sang khí, tương tác và truyền sang các vùng xung quanh một năng lượng nhất định [2, 3]. Do sự giãn nở rất lớn trong quá trình nổ, nên vùng thuốc nổ và các phần tử của sản phẩm thuốc nổ được mô hình hóa và giải theo phương pháp lưới Euler hoặc nhờ kỹ thuật hạt không lưới SPH nhằm tránh sự méo mó quá lớn của lưới dẫn đến lỗi trong quá trình giải [13, 14]. Mặt khác trong quá trình nổ các phần tử của sản phẩm nổ có thể sẽ được mở rộng ra các lớp vật liệu xung quanh và ngược lại, lớp vật liệu xung quanh có thể sẽ bị đẩy, thâm nhập vào vùng của sản phẩm nổ. Do đó thuốc nổ và vùng vật liệu xung quanh cần phải được thiết lập để mô hình hóa và giải theo cùng một phương pháp dạng lưới Euler hoặc kỹ thuật hạt không lưới SPH, trong môi trường thiết lập đa vật liệu. Để mô hình hóa hiện tượng nổ và quá trình lan truyền áp lực sóng nổ, sử dụng phương trình trạng thái do Lee – Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất. Theo đó phương trình trạng thái của thuốc nổ TNT và chất nổ tương đương có dạng như sau [15]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v} \right) e^{-r_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v} \right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (1)$$

trong đó: p là áp suất thủy tĩnh; $v = 1/\rho$ là thể tích riêng; ρ là khối lượng riêng thuốc nổ TNT; A, B, r_1, r_2, ω là các hằng số đoạn nhiệt được xác định từ thí nghiệm.

b. Vùng kết cấu công trình

Đối với kết cấu công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, sự biến dạng của của các phần tử kết cấu, vị trí của mỗi chất điểm trong môi trường kết cấu được mô phỏng mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange [16] để giải, chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các nút cũng như ứng suất và biến dạng của các phần tử trong vùng này nhận được nhờ giải các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng. Phương trình này cùng với mô hình vật liệu cụ thể và một tập hợp các điều kiện ban đầu, điều kiện biên sẽ cho ta lời giải hoàn chỉnh [17].

2.2. Mô hình vật liệu được sử dụng trong bài toán mô phỏng

a. Bê tông

Sử dụng mô hình vật liệu Holmquist – Johnson – Cook (HJC), các tham số của mô hình HJC được xác định bằng phương pháp do Holmquist và cộng sự đề xuất [18]. Loại bê tông được sử dụng trong nghiên cứu này là bê tông B25 hiện chưa có các tham số cho mô hình HJC, do vậy tác giả đã thực hiện

các thí nghiệm nén đơn trục, thí nghiệm lặp cũng như các thí nghiệm ép chẻ và nén ba trục bằng máy nén ba trục tại Phòng thí nghiệm của Bộ môn Cơ sở kỹ thuật công trình, Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự để đưa ra các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25. Cấp phối bê tông như trong Bảng 1. Ở độ tuổi 21 ngày, 14 mẫu thử hình trụ với chiều dài và đường kính được liệt kê trong Bảng 2, được đưa ra khỏi phòng bảo dưỡng và được mài cẩn thận ở cả hai đầu để tạo ra các khu vực phẳng và nhẵn cho các tấm chất tải, sau đó chúng được đưa trở lại phòng bảo dưỡng cho đến tuổi thí nghiệm.

Bảng 1. Cấp phối bê tông B25 sử dụng xi măng PC30

	Nước (lít)	Xi măng (kg)	Cát (m ³)	Đá 1 × 2 (m ³)
B25	187	439	0,444	0,865

Bảng 2. Các thông số của mẫu bê tông B25

Tên mẫu	Khối lượng (g)	Chiều dài (mm)	Đường kính (mm)	Tỉ trọng (g/cm ³)
1	631,5	110,10	54,92	2,421
2	630,5	110,60	54,82	2,415
3	622,0	109,80	54,72	2,409
4	637,5	111,30	54,82	2,427
5	614,5	109,12	54,76	2,391
6	617,5	109,52	54,90	2,382
7	621,0	109,66	54,80	2,401
8	632,5	110,54	54,84	2,422
9	645,5	111,80	54,52	2,473
10	602,5	107,20	54,72	2,390
11	625,5	109,24	54,80	2,428
12	624,0	111,32	54,84	2,373
13	609,5	108,04	54,86	2,387
14	618,5	110,54	54,82	2,371

Theo kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2, giá trị trọng lượng riêng ρ_0 bằng giá trị trung bình của 14 mẫu thí nghiệm, là 2,406 g/cm³.

Thí nghiệm xác định cường độ nén đơn trục f_c , mô đun đàn hồi E , hệ số Poisson ν và mô đun cắt G

Giá trị của thông số cường độ nén đơn trục f_c được xác định thông qua thí nghiệm nén một trục mẫu bê tông B25. Ba thí nghiệm nén đơn trục đã được thực hiện và thu được ba bộ dữ liệu. Dựa trên dữ liệu đó, giá trị của tham số cường độ nén đơn trục f_c của mẫu bê tông B25 thu được từ điểm cực đại của đường cong ứng suất - biến dạng (Bảng 3).

Theo kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3, giá trị trung bình của ba mẫu được coi là giá trị của tham số cường độ nén đơn trục f_c , mô đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν của mẫu bê tông B25 lần là $f_c = 41,305$ MPa, $E = 28320$ MPa và $\nu = 0,254$. Mô đun cắt $G = E/2(1 + \nu) = 11291,866$ MPa.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm nén dọc trục

Tên mẫu	Cường độ nén (MPa)	Biến dạng dọc trục (10^{-2})	Biến dạng ngang (10^{-2})	Mô đun đàn hồi (MPa)	Hệ số Poisson
3	41,203	0,273	-0,069	27086	0,252
8	39,680	0,221	-0,059	29603	0,266
9	43,031	0,261	-0,064	28271	0,244

Thí nghiệm xác định độ bền kéo đơn trục T

Để xác định độ bền kéo đơn trục T , dùng máy nén để ép chế 3 mẫu bê tông hình trụ có đường kính 54 mm, chiều cao 110 mm. Tải trọng dọc trục được gia tải với tốc độ 0,1 mm/phút. Thí nghiệm kết thúc khi một vết nứt xuất hiện trên bề mặt mẫu thử. Kết quả thu được là lực nén phá hủy P , từ đó tính được độ bền kéo đơn trục $T = 2P/\pi dh$, trong đó d là đường kính mẫu, h là chiều cao mẫu. Tiến hành thí nghiệm ép chế 3 mẫu bê tông và kết quả được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Giá trị cường độ kéo dọc trục

Tên mẫu	Tải phá hủy (kN)	Chiều dài (mm)	Đường kính (mm)	Cường độ kéo dọc trục (MPa)
7	31,3	109,66	54,80	3,32
11	29,7	109,24	54,80	3,16
12	31,2	111,32	54,84	3,25

Theo kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 4, giá trị cường độ kéo dọc trục T bằng giá trị trung bình của 3 mẫu thí nghiệm, là 3,24 MPa.

Thí nghiệm xác định hằng số hư hỏng $e_{f\min}$ của vật liệu

Hằng số hư hỏng $e_{f\min}$ là điểm tới hạn của trạng thái biến dạng dẻo được xác định bằng thí nghiệm lặp. Trong quá trình chất tải, đầu tiên các mẫu bê tông được gia tải đến 90% cường độ nén đơn trục của chúng và sau đó được dỡ tải xuống 0 ở cùng tốc độ. Sau đó, việc gia tải được lặp lại và cường độ của nó được giảm đi 10% ở mỗi chu kỳ

Bảng 5. Giá trị của tham số $e_{f\min}$

Tên mẫu	$e_{f\min}$	Giá trị trung bình
4	0,0018	0,0016
5	0,0015	
6	0,0017	

cho đến khi không còn biến dạng dư [18]. Biểu đồ nứt gãy cho thấy rằng khi biến dạng dọc trục đạt đến giao điểm của mặt phân cách và trục, mẫu mất hoàn toàn sức bền của nó và giá trị biến dạng bằng giá trị của $e_{f\min}$. Các giá trị tham số thu được theo phương pháp trên được tóm tắt trong Bảng 5.

Theo kết quả thể hiện trong Bảng 5, tham số phá hủy $e_{f\min}$ bằng giá trị trung bình của 3 mẫu, là 0,0016. Do thiếu thiết bị thí nghiệm, nên lấy $D_1 = 0,04$ và $D_2 = 1,0$ theo đề xuất của đề xuất bởi Holmquist và cs. (1993) [18].

Tham số đặc trưng cho độ bền của vật liệu A, B, N và S_{\max}

Các tham đặc trưng cho độ bền của vật liệu của mô hình HJC gồm A, B, N và S_{\max} , trong đó B, N có thể được xác định bằng thí nghiệm nén ba trục, thông số $S_{\max} = 7$ lấy theo đề xuất bởi Holmquist

và cs. (1993). Tham số A là cường độ dính kết chuẩn hóa của bê tông tại $\epsilon^* = 1,0$. Do thiếu dữ liệu thí nghiệm Holmquist và cộng sự giả định cường độ kết dính chuẩn hóa tại $0,75f_c$ đối với các điều kiện bán tĩnh ($\epsilon^* = 0,001$) và có được $A = 0,79$ bằng cách chuẩn hóa tốc độ biến dạng thành $\epsilon^* = 1,0$ từ công thức:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \epsilon^*) \quad (2)$$

Nếu không tính đến ảnh hưởng của các hiệu ứng tốc độ biến dạng và phá hủy, thì cân bằng của mặt dẻo (2) có thể được đơn giản hóa như sau:

$$\sigma^* = 0,79 + BP^{*N} \quad (3)$$

trong đó $\sigma^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/f_c$; $P^* = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3f_c$, với σ_1 là ứng suất dọc trục; σ_2, σ_3 là áp lực hông.

Để đạt được các giá trị của B và N . Một thử nghiệm nén ba trục được thực hiện bằng cách sử dụng áp lực giới hạn ở tốc độ 2 MPa/s. Sau thời gian ổn định, gia tải dọc trục được áp dụng với tốc độ 0,1 mm/phút cho đến khi mẫu phá hoại với các cấp áp lực hông bằng 5, 10, 15, 20 và 25 MPa.

Áp suất thủy tĩnh $P = (\sigma + 2\sigma_3)/3$ và chênh lệch ứng suất chính $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ được chuẩn hóa bằng các giá trị $P^* = P/f_c$ và $\sigma^* = \Delta\sigma/f_c$ (Bảng 6).

Bảng 6. Giá trị σ^* và P^*

Tên mẫu	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ^* (MPa)	P^* (MPa)
1	75,67	5	1,71	0,69
2	101,31	10	2,21	0,98
10	119,66	15	2,53	1,21
13	137,29	20	2,84	1,43
14	158,99	25	3,24	1,69

Sử dụng dữ liệu trong Bảng 6, hiệu chỉnh số liệu theo phương trình $\sigma^* = 0,79 + BP^{*N}$ và đường cong khớp với dữ liệu trong Bảng 6 ta thu được giá trị $B = 1,405$ và $N = 1,085$.

Tham số trạng thái $P_{crush}, \mu_{crush}, P_{lock}, \mu_{lock}, C, K_1, K_2$ và K_3

Các tham số P_{crush}, μ_{crush} được xác định bằng công thức sau [18]: $P_{crush} = f_c/3$ và $\mu_{crush} = P_{crush}/K$ với $K = E/3(1 - 2\nu)$. Như vậy P_{crush}, μ_{crush} có giá trị lần lượt là 13,768 MPa và 0,0007. Các tham số đặc trưng cho tốc độ biến dạng C , áp lực giới hạn nén P_{lock} , biến dạng thể tích ở áp lực nén μ_{lock} , và các hằng số vật liệu K_1, K_2 và K_3 được xác định bằng các thí nghiệm va đập và các thử

Bảng 7. Các tham số mô hình HJC cho bê tông B25

ρ_0 (kg/m ³)	G (Pa)	A	B	C	N	$e_{f \min}$
2406	$11,292 \times 10^9$	0,79	1,405	0,007	1,085	0,0016
T (Pa)	f_c (Pa)	S_{\max}	P_{crush} (Pa)	μ_{crush}	P_{lock} (Pa)	μ_{lock}
$3,24 \times 10^6$	$41,305 \times 10^6$	7	$13,768 \times 10^6$	0,0007	1×10^9	0,08
D_1	D_2	K_1 (Pa)	K_2 (Pa)	K_3 (Pa)		
0,04	1,0	85×10^9	-171×10^9	208×10^9		

nghiệm thanh áp lực Split-Hopkinson [18]. Do điều kiện thí nghiệm hạn chế nên các giá trị của các tham số này được lấy theo đề xuất bởi Holmquist và cs. (1993) [18]. Như vậy, các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 được xác định và liệt kê trong Bảng 7.

b. Cốt thép

Sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, các tham số của phương trình trạng thái, mô hình bền, mô hình phá hủy của cốt thép được lấy theo tài liệu [19, 20] cụ thể như sau như Bảng 8.

Bảng 8. Các tham số mô hình vật liệu thép

E (MPa)	ν	A (MPa)	B (MPa)	n	T_{melt} (K)	T_H (K)	m
200000	0,3	263	130	0,0915	1800	293,2	1
ρ (kg/m ³)	C	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
7850	0,017	1	0,05	3,44	2,12	0,002	0,61

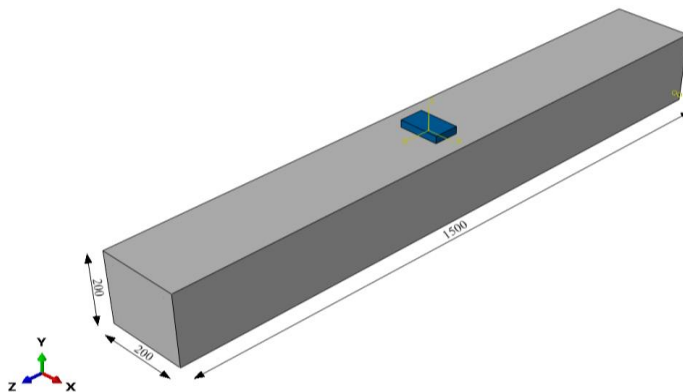
c. Thuốc nổ

Để mô hình hóa hiện tượng nổ và quá trình lan truyền áp lực sóng nổ, sử dụng phương trình trạng thái do Lee – Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất [15] với các tham số: $\nu = 1/\rho$ là thể tích riêng; ρ là khối lượng riêng thuốc nổ TNT; A, B, r_1, r_2, ω là các hằng số đoạn nhiệt được xác định từ thí nghiệm, v_n là tốc độ nổ; E_0 là năng lượng trên đơn vị thể tích; P_{CJ} là áp suất nổ. Giá trị cụ thể các tham số được liệt kê trong Bảng 9.

Bảng 9. Tham số mô hình vật liệu TNT

ρ (kg/m ³)	v_n (m/s)	P_{CJ} (kPa)	A (kPa)	B (kPa)
1650	6930	$2,1 \times 10^7$	$3,7377 \times 10^8$	$3,73471 \times 10^6$
r_1	r_2	ω	ν	E_0 (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6×10^6

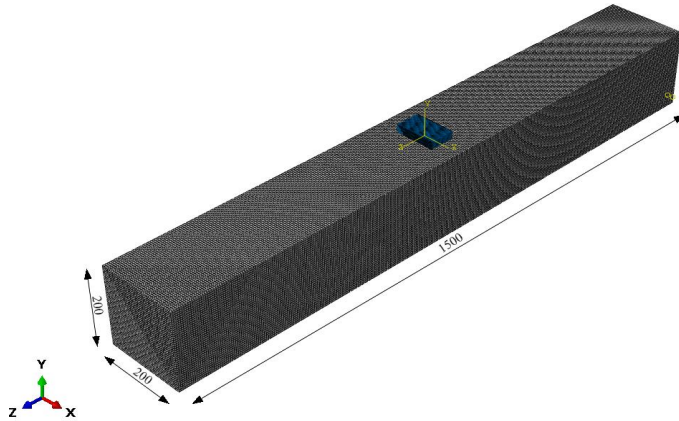
2.3. Mô hình hình học bài toán



Hình 1. Mô hình hình học bài toán

Nghiên cứu sự phá huỷ và tương tác của cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc. Cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5 m, tiết diện $0,2 \times 0,2$ m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6a200$ với chiều dày bảo vệ 0,01 m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc có khối lượng 200g đặt chính giữa cấu kiện BTCT (Hình 1).

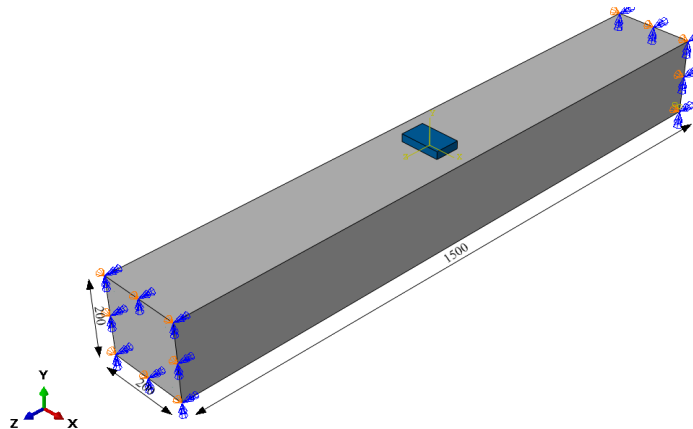
Cấu kiện BTCT được mô tả như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5 mm. Lưới chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5 mm (Hình 2).



Hình 2. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT của mô hình mô phỏng

Kết cấu bê tông được mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange. Điều kiện phá huỷ được xác định theo tiêu chuẩn vật liệu người dùng tự định nghĩa, sử dụng các tham số vật liệu như thí nghiệm đã nêu. Thuốc nổ được tính theo phương pháp SPH [13, 14].

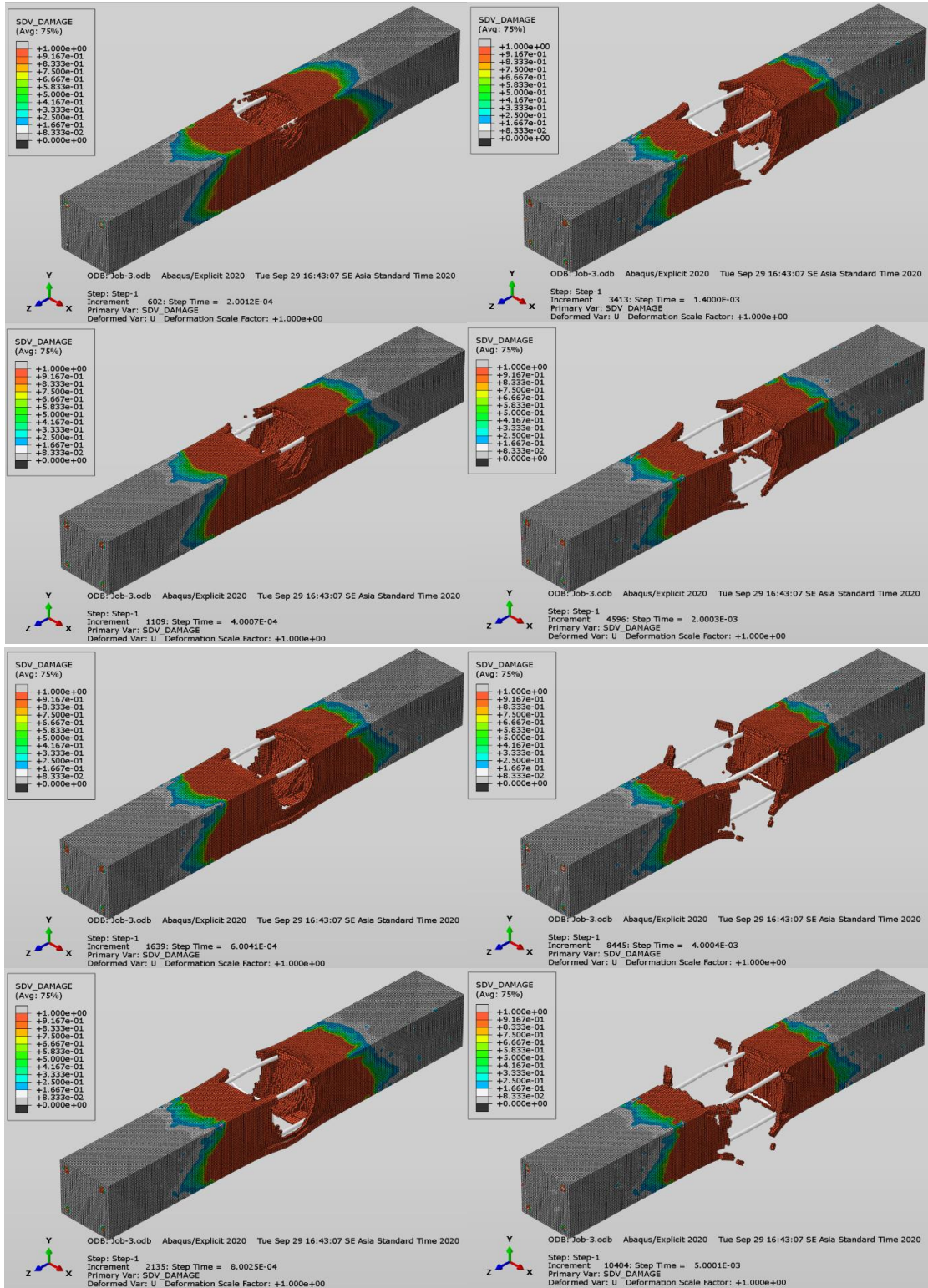
Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (Hình 3).



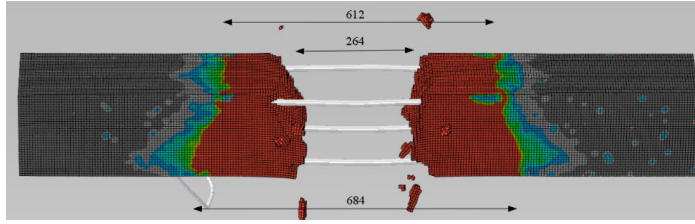
Hình 3. Điều kiện biên của kết cấu

2.4. Kết quả mô phỏng số

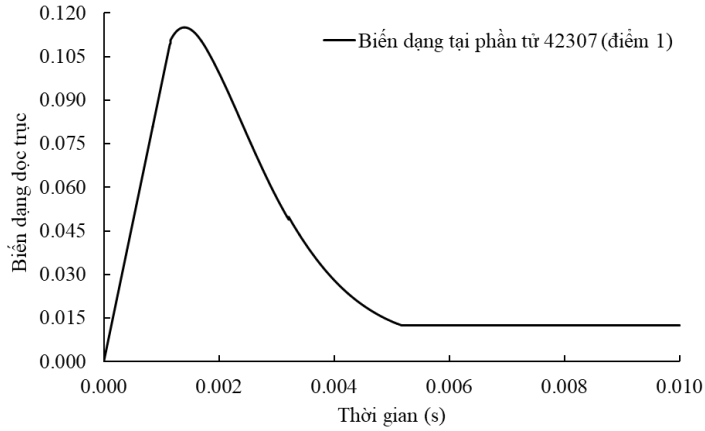
Kết quả mô phỏng số được thể hiện như trong Hình 4–7 và Bảng 10.



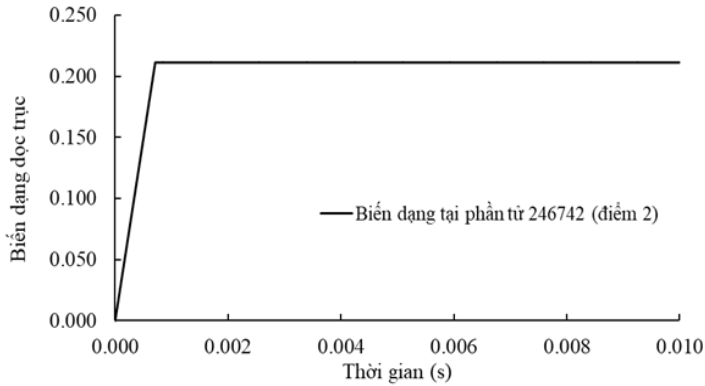
Hình 4. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT theo thời gian trên mô hình mô phỏng



Hình 5. Kích thước vùng phá hủy cầu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng số



Hình 6. Biến dạng dọc trục tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện)



Hình 7. Biến dạng dọc trục tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cầu kiện)

Bảng 10. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình mô phỏng số

	Chiều dài vùng phá hủy giữa cầu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cầu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cầu kiện (mm)
Mô phỏng số	264	612	684

Mô phỏng số cho thấy quá trình phá hoại của cầu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ tiếp xúc theo các thời điểm 0,0002, 0,0004, 0,0006, 0,0008, 0,0014, 0,002, 0,004 và 0,005 s (Hình 4), quá

trình phá hoại của nổ tiếp xúc là rất nhanh, đến thời điểm 0,5 trở đi vùng phá hoại của cầu kiện đạt đến trạng thái lớn nhất, kết quả vùng bê tông của cầu kiện BTCT bị phá hoại hoàn toàn ở chính giữa có chiều dài khoảng 264 mm, vùng phá hoại lan rộng ra phía các cạnh cầu kiện có chiều dài khoảng 612-684 mm (Bảng 10). Cốt thép chịu lực không bị phá hủy, thép đai tại vị trí gần lượng nổ bị thổi bay. Biến dạng tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện BTCT) đạt giá trị lớn nhất là 0,115 (Hình 6) và biến dạng tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cầu kiện BTCT) đạt 0,211 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại khỏi cầu kiện (Hình 7).

3. Thử nghiệm nổ phá hoại cầu kiện bê tông cốt thép

Tác giả tiến hành thử nghiệm nổ tại hiện trường để phá hoại cầu kiện BTCT có chiều dài 1,5 m, tiết diện 0,2×0,2 m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai a200 với chiều dày bảo vệ 0,01 m. Cầu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc với khối lượng 200 g đặt chính giữa cầu kiện (Hình 8). Xác định được thực trạng bị phá hoại của kết cấu. Từ đó sánh kết quả giữa thí nghiệm và mô phỏng.

3.1. Thử nghiệm nổ phá hoại cầu kiện bê tông cốt thép

a. Chuẩn bị mô hình thử nghiệm

Mô hình thử nghiệm chế tạo tại xưởng bê tông đúc sẵn Chèm, kích thước và chất lượng đảm bảo đúng theo yêu cầu bài toán, sau đó được vận chuyển đến thao trường của Học viện KTQS tại Hòa Lạc. Tại thao trường tiến hành làm công tác chuẩn bị (Hình 8).



Hình 8. Ảnh mô hình thử nghiệm

b. Thiết bị thí nghiệm

Máy đo biến dạng, đầu đo biến dạng, máy điểm hỏa, dây điện, kíp điện, loa, còi, dây căng cảnh báo an toàn.

Máy đo động NI SCXI-1000DC

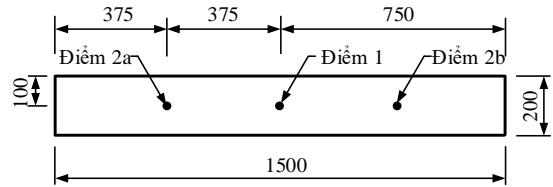
Máy đo động đa kênh NI SCXI-1000DC (Hình 9) là thiết bị đo động đa kênh hiện đại do hãng National Instrument của Mỹ chế tạo. Đây là một hệ thống đo thông minh có cấu hình mềm dẻo bằng cách tích hợp các loại card đo khác nhau tùy theo mục đích thí nghiệm của người sử dụng.

Cảm biến đo biến dạng

Trong thí nghiệm, cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11 được sử dụng để đo biến dạng của cầu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ tiếp xúc tại các điểm dưới đáy cầu kiện (Hình 10).



Hình 9. Máy đo động NI SCXI-1000DC



Hình 10. Vị trí gắn cảm biến đo biến dạng trên mô hình thử nghiệm

Máy điểm hỏa FD200

Máy điểm hỏa FD200 (Hình 11) là loại máy dùng để điểm hỏa gây nổ cho tối đa 200 kíp nổ điện. Thông số cơ bản: điện áp đầu ra 3000 V, thời gian nạp điện nhỏ hơn 30 giây, điện áp nguồn 6 VDC.



Hình 11. Máy điểm hỏa FD200

Thuốc nổ và kíp nổ

Thuốc nổ được sử dụng là loại thuốc nổ TNT được đúc thành bánh có khối lượng 200 g, kích thước 100 × 50 × 25 mm (Hình 12). Kíp nổ điện được sử dụng là loại kíp nổ điện số 8 (Hình 13).



Hình 12. Thuốc nổ TNT



Hình 13. Kíp nổ điện số 8

c. Trình tự thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm nổ lần lượt với thuốc nổ TNT khối lượng 200 g đặt tiếp xúc trên cầu kiện BTCT với trình tự cụ thể như sau:

- Đặt cầu kiện BTCT vào vị trí để thí nghiệm liên kết chặt;
 - Gắn các đầu đo biến dạng tại các điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện BTCT); điểm 2 (mặt dưới chính giữa cầu kiện BTCT);
 - Cấu tạo lượng nổ và bố trí lượng nổ vào mô hình kết cấu BTCT. Khi bố trí lượng nổ, tất cả người không có trách nhiệm phải ra khỏi vị trí nổ và rút về vị trí an toàn theo qui định được phổ biến tại thao trường;
 - Kiểm tra công tác an toàn trước khi nổ, cho phép kiểm tra mạch nổ;
 - Tiến hành nổ, kiểm tra và xử lý mìn cam sau đó đo kết quả cho lần thí nghiệm.
- Các lần nổ thí nghiệm tiếp theo quy trình được thực hiện theo đúng tuần tự như trên.

3.2. Kết quả thử nghiệm

Kết quả cấu kiện BTCT bị phá hoại sau khi nổ cấu kiện BTCT số 2, 3 và 5 như trong Hình 14(a), (b), (c) và Bảng 11.



(a) Cấu kiện BTCT số 2



(b) Cấu kiện BTCT số 3



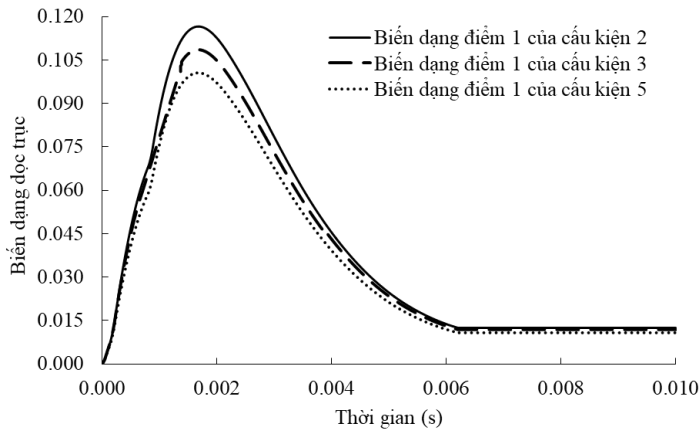
(c) Cấu kiện BTCT số 5

Hình 14. Hình ảnh cấu kiện BTCT bị phá hủy sau khi nổ cấu kiện số 2, 3 và 5

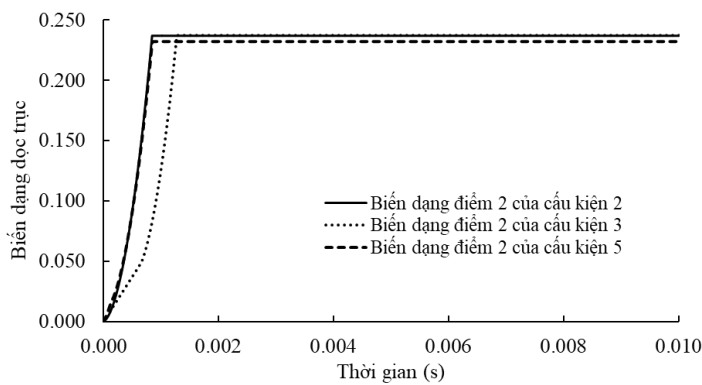
Bảng 11. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm

Cấu kiện	Chiều dài vùng phá hủy giữa cấu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cấu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cấu kiện (mm)
Cấu kiện 2	280	655	695
Cấu kiện 3	310	635	710
Cấu kiện 5	265	660	725
Trung bình	285	650	710

Biến dạng đo được thông qua các cảm biến gắn trên cầu kiện BTCT tại điểm 1 và 2 (Hình 15 và 16).



Hình 15. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thực

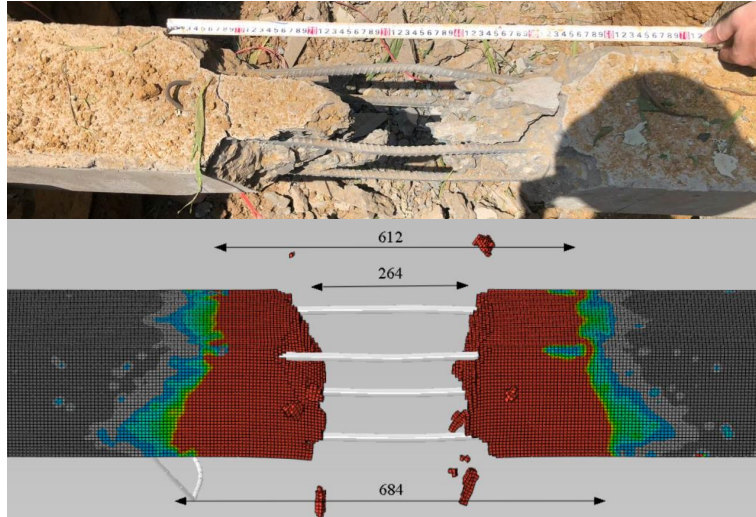


Hình 16. Kết quả đo biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thực

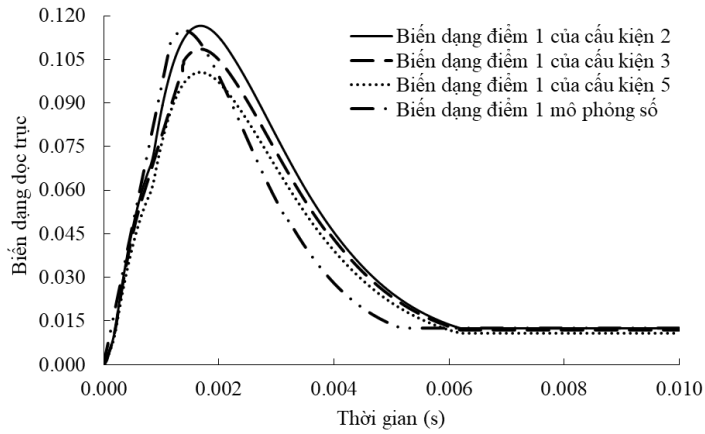
Thử nghiệm nổ trên hiện trường cho kết quả vùng bê tông của cầu kiện BTCT bị phá hoại hoàn toàn ở chính giữa có chiều dài khoảng 285 mm, vùng phá hoại lan rộng ra phía các cạnh cầu kiện BTCT có chiều dài khoảng 650-710 mm (Bảng 11). Cốt thép chịu lực không bị phá hủy, thép đai tại vị trí gần lượng nổ bị thổi bay. Biến dạng tại điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện BTCT) đạt giá trị lớn nhất là 0,109 (Hình 15) và biến dạng tại điểm 2 (mặt dưới chính giữa cầu kiện BTCT) đạt 0,236 sau đó những phần tử bê tông tại điểm đó bị phá hoại khỏi cầu kiện (Hình 16).

4. So sánh, đánh giá kết quả

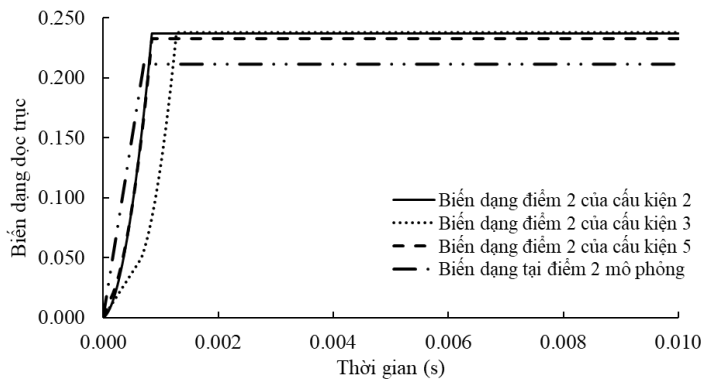
Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số được thể hiện như trong Hình 17–19 và Bảng 12. Kết quả kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số (Hình 17) có sự sai khác chiều dài vùng phá hủy giữa cầu kiện 7,4%; Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cầu kiện 5,8%; Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cầu kiện 3,7% (Bảng 12). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 và 2 (trung bình của điểm đo 2a và 2b) (Hình 18, 19) có sự sai khác lần lượt là 5,5% và 10,6%. Sai khác này hoàn toàn chấp nhận được đối với bài toán mô phỏng tác dụng của tải trọng nổ.



Hình 17. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 18. Biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 19. Biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 12. So sánh kết quả trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều dài vùng phá hủy giữa cầu kiện (mm)	264	285	7,4%
Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cầu kiện (mm)	612	650	5,8%
Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cầu kiện (mm)	684	710	3,7%
Biến dạng dọc trục điểm 1	0,115	0,109	5,5%
Biến dạng dọc trục điểm 2	0,211	0,236	10,6%

5. Kết luận

Bài cáo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số sự phá hoại của cầu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ tiếp xúc. Kết quả nghiên cứu cho thấy:

- Thời gian tác dụng phá hủy cầu kiện bê tông cốt thép của nổ tiếp xúc là rất ngắn, cầu kiện bị phá hoại hoàn toàn ở vùng tiếp xúc với lượng nổ và vùng phá hoại đó lan rộng ra ở mặt trên và mặt dưới cầu kiện. Cốt thép bị ảnh hưởng không đáng kể.

- Sai khác kết quả mô phỏng số và thực nghiệm cụ thể lần lượt: Chiều dài vùng phá hủy giữa cầu kiện 7,4%; Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cầu kiện 5,8%; Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cầu kiện 3,7%; Biến dạng dọc trục điểm 1 và 2 lần lượt là 5,5% và 10,6%. Kết quả nhận được từ mô phỏng số phù hợp với kết quả thí nghiệm hiện trường, thông qua mô phỏng số cho ta thấy rõ cơ chế phá hoại kết cấu bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc theo từng thời điểm.

Từ đó có cơ sở để khẳng định tính hợp lý khi sử dụng mô hình vật liệu HJC cho bê tông và mô hình vật liệu Johnson-Cook cho cốt thép trong phân tích kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ tiếp xúc bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả đó hữu ích cho mô phỏng các bài toán kháng xuyên, kháng nổ và kháng sập lũy tiến chịu tác dụng nổ.

Tài liệu tham khảo

- [1] (2020). *ABAQUS Theory Manual, revision 2020*. Pawtucket, Rhode Island, Mỹ.
- [2] Lee, E., Finger, M., Collins, W. (1973). JWL equation of state coefficients for high explosives. Technical report, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley.
- [3] Henrych, J., Major, R. (1979). *The dynamics of explosion and its use*, volume 569, chapter 5. Elsevier Amsterdam.
- [4] Biggs, J. M. (1964). *Introduction to structural dynamics*. New York: McGrawHill.
- [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. (1977). 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] Hòa, P. D., Thắng, N. C., Linh, N. Đ., Dung, B. T. T., Lộc, B. T., Đạt, Đ. V. et al. (2019). [Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao \(UHPC\)](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 13(3V):12–21.
- [13] Monaghan, J. J. (1988). An introduction to SPH. *Comput. Phys. Comm.*, 48:89–96.
- [14] Hayhurst, C. J., Clegg, R. A. (1997). [Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates](#). *International Journal of Impact Engineering*, 20(1-5):337–348.
- [15] Lee, E., Finger, M., Collins, W. (1973). JWL equation of state coefficients for high explosives. Technical report, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
- [16] Johnson, G. R. (1994). Linking of Lagrangian particle methods to standard finite element methods for high velocity impact computations. *Nuclear Engineering and Design*, 150(2-3):265–274.
- [17] Abascal, R., Dominguez, J. (1984). Dynamic behavior of strip footings on non-homogeneous viscoelastic soils. *Dynamic Soil-structure Interaction: Proceedings of the International Symposium on Dynamic Soil-Structure Interaction, Minneapolis*, 25–35.
- [18] Holmquist, T. J., Johnson, G. R. (2011). A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures. *The 14th international symposium on ballis-tic*, Quebec, Canada, (5):26–29.
- [19] Johnson, G. R., Cook, W. H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Netherlands, 21(1):541–547.
- [20] Johnson, G. R., Cook, W. H. (1985). [Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures](#). *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1):31–48.