

MÔ PHỎNG GIẢI PHÁP BẢO VỆ KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NỔ TIẾP XÚC

SIMULATION OF SOLUTIONS TO PROTECT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER

PHAN THÀNH TRUNG^{a,*}

^aViện Kỹ thuật công trình đặc biệt

*Tác giả đại diện: Email: thanhtrungphanh4@gmail.com

Ngày nhận 28/9/2023, Ngày sửa 23/10/2023, Chấp nhận 30/10/2023

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2023.vi.vol3-3>

Tóm tắt: 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. Từ đó đưa ra giải pháp bảo vệ kết cấu bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc. 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, mô hình Holmquist – Johnson – Cook.

Abstract: 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. From there, we propose a solution to protect reinforced concrete components under explosive load contact. 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, Holmquist - Johnson - Cook model.

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 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

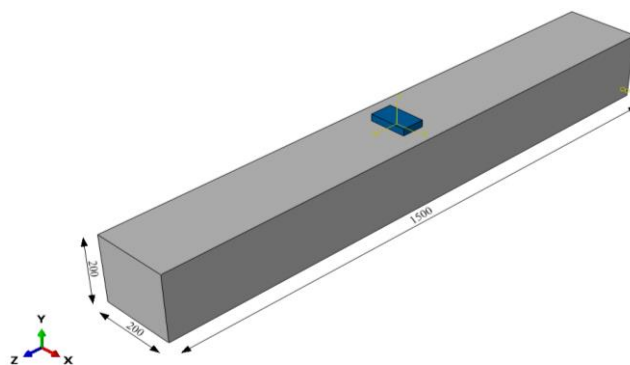
trọng nổ tiếp xúc của cấu kiện bê tông cốt thép không được cao, sự phá hoại xuất hiện kèm theo sự phát triển nhanh của các vết nứt làm cho công trình rất dễ bị phá hoại.

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, từ đó đưa ra giải pháp bảo vệ kết cấu bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc.

2. Đặt bài toán nghiên cứu

Mô phỏng giải pháp bảo vệ cấu kiện bê tông cốt thép bằng phương pháp bọc thép tấm dày 10mm xung quanh cấu kiện dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc. Cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6a200$ với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc có khối lượng 200g đặt chính giữa cấu kiện BTCT (hình 1).

2.1 Mô hình bài toán



Hình 1. Mô hình bài toán nghiên cứu

2.2 Mô hình vật liệu

Để tính toán kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ bằng các phần mềm ABAQUS [1] trước tiên cần

phải mô hình hóa bài toán. Các tham số của các mô hình vật liệu dưới đây được sử dụng cho tất cả các bài toán khảo sát của bài báo này.

2.2.1 Thuốc nổ

Thuốc nổ được sử dụng trong nghiên cứu này là loại thuốc nổ TNT. 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 [13,14]. 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 hạt không lưới SPH nhằm tránh sự méo mó quá lớn của lưới dẫn đến lỗi trong quá trình giải [15,16]. Mặt khác trong quá trình nổ các phần tử của sản phẩm nổ có thể sẽ được mở rộng ra các lớp bê tông xung quanh và ngược lại, lớp bê tông xung quanh có thể sẽ bị đẩy, thâm nhập vào vùng

của sản phẩm nổ. Do đó thuốc nổ và vùng bê tông 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 [17] với các tham số: $v = 1/\rho$ 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, v_n - tốc độ nổ; E_0 - năng lượng trên đơn vị thể tích; P_{CJ} - áp suất nổ. Giá trị cụ thể các tham số được liệt kê trong bảng 1.

Bảng 1. 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	v	E_0 (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6×10^6

2.2.2 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 chèn và nén ba trục bằng máy nén ba trục tại phòng thí nghiệm của Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt để đưa ra các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 (bảng 2).

Bảng 2. 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		

2.2.3 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 (tương đương thép CII) được lấy theo tài liệu [19,20] cụ thể như sau (bảng 3):

Bảng 3. 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

3. Xác nhận mô hình

3.1 Thử nghiệm nổ phá hủy cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc

Tác giả tiến hành thử nghiệm nổ tại hiện trường để phá hoại cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt

đai $\Phi 6a200$ (dùng thép CII) với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc với khối lượng 200g đặt chính giữa cấu kiện

(hình 2). Xác định được thực trạng bị phá hoại của kết cấu. Từ đó so sánh kết quả giữa thí nghiệm và mô phỏng.

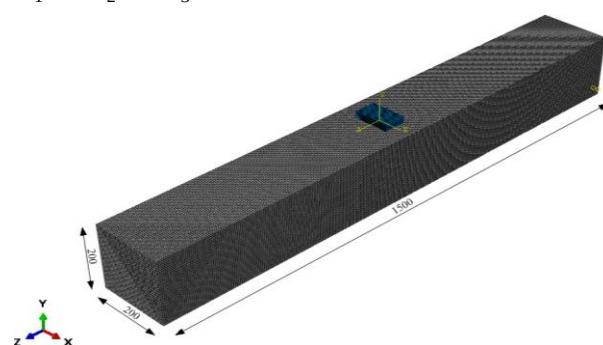


Hình 2. Ảnh mô hình thử nghiệm

3.2 Mô phỏng số sự phá hủy cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc

Tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. 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 5mm. Lưới chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5mm. Kết cấu bê tông được mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange. Điều kiện phá hủy 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. Thuộc nổ được tính theo phương pháp SPH [15,16]. Điều kiện biên: Cấu

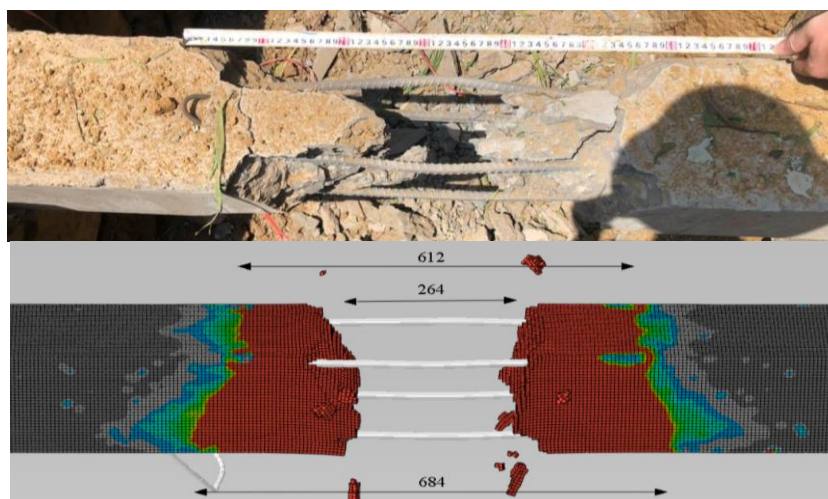
kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (hình 3).



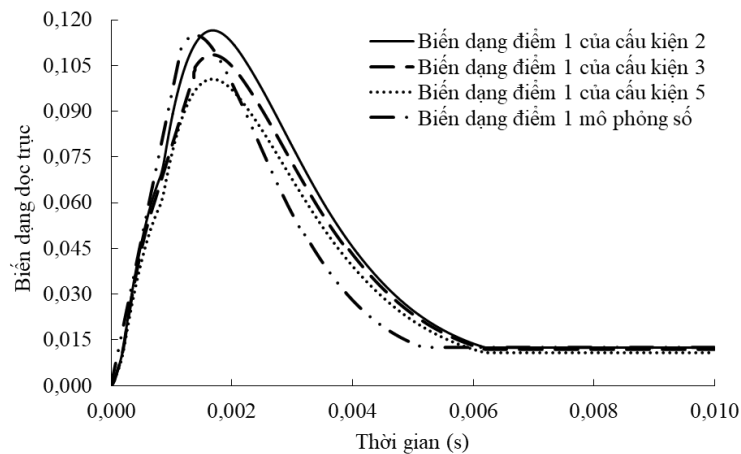
Hình 3. Mô hình hình học mô phỏng số

3.3 Phân tích và so sánh kết quả

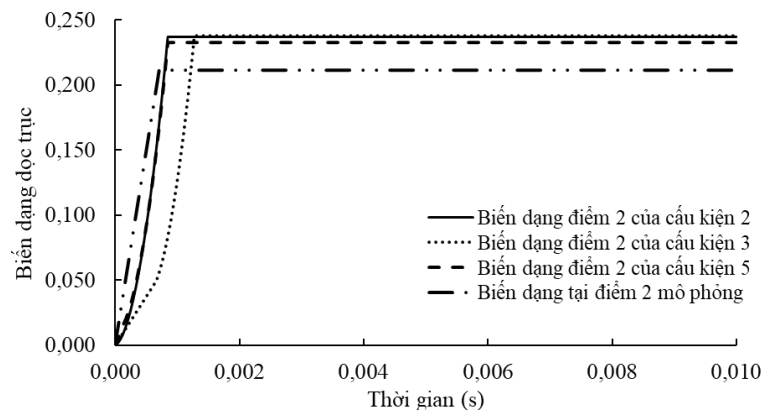
Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số như trong hình 4, 5, 6 và bảng 4.



Hình 4. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 5. Biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 6. Biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 4. 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%

Kết quả kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số (hình 4) 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 4). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện BTCT) và 2 (mặt dưới chính giữa cầu kiện BTCT) (hình 5 và 6) 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.

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.

4. Mô phỏng số giải pháp bảo vệ cầu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc

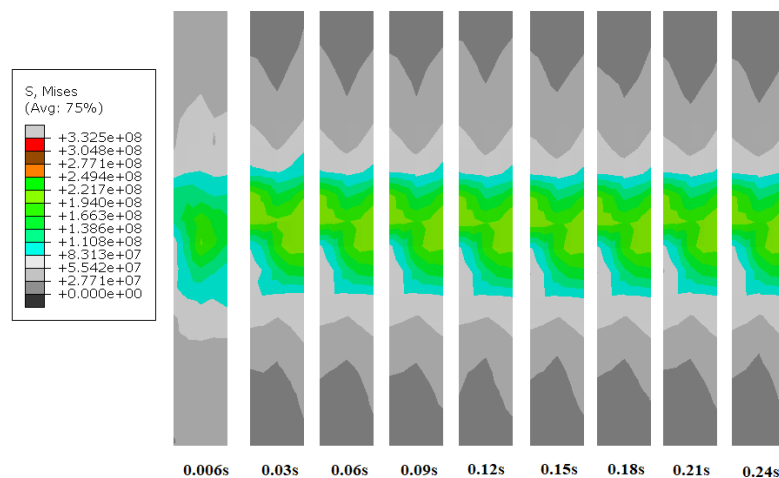
Trong mục này, tác giả tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS giải pháp bảo vệ cầu kiện bê tông cốt thép bằng phương pháp bọc thép tấm dày 10mm xung quanh cầu kiện dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc. Cầu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6a200$ với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cầu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc có khối lượng 200g đặt chính giữa cầu kiện BTCT.

Với thêm dẽo lớn, vật liệu thép được coi là vật liệu chịu tải trọng của nổ khá tốt, cụ thể ở thí nghiệm trong mục 3, mặc dù bê tông bị phá hủy gần như hoàn toàn nhưng cốt thép chỉ bị biến dạng chút ít, với kết quả đó tác giả sử dụng thép tấm dày 10mm bọc xung quanh cầu kiện bê tông cốt thép. Liên kết giữa tấm thép bọc và cầu kiện bê tông cốt thép được gán là liên kết tiếp xúc. Đây là một giải pháp trong phương pháp kháng cự bộ riêng biệt.

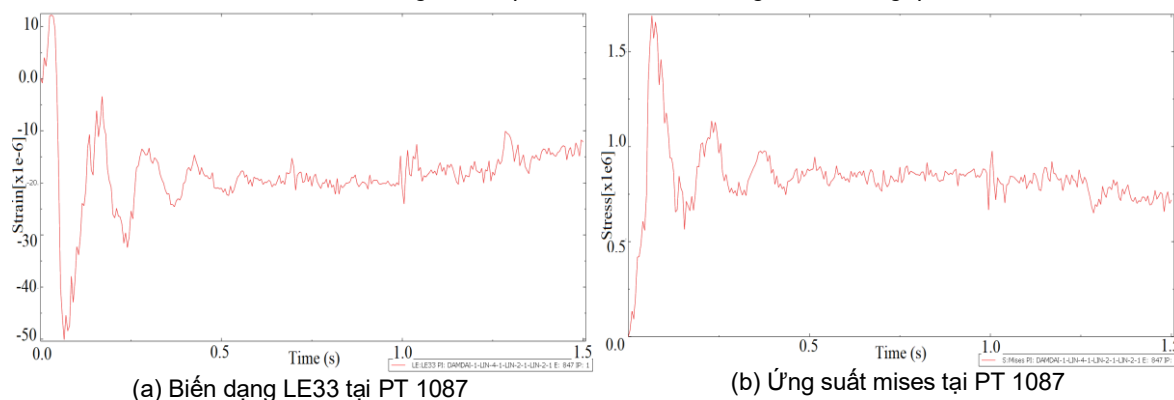
4.1 Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số cho thấy, gần như năng lượng nổ được thép tấm hấp thụ và giảm đáng kể

lên cột bê tông cốt thép được bọc phía trong dẫn đến không có sự phá hoại lên kết cấu bê tông cốt thép (hình 7; 8).



Hình 7. Hình ảnh biến dạng của thép tấm tại vị trí đặt lượng nổ bọc xung quanh cấu kiện



Hình 8. Biến dạng và ứng suất mises tại phần tử 1087 của cấu kiện BTCT (ngay sau vị trí đặt lượng nổ)

4.2 Nhận xét kết quả

Căn cứ kết quả khảo sát về mức độ phá hủy, biểu đồ biến dạng LE và biểu đồ ứng suất mises, nhận thấy với giải pháp bọc thép xung quanh cấu kiện BTCT dưới tác dụng của lượng nổ tiếp xúc, ngay sau khi nổ lớp bọc thép bị chảy dẻo một phần ngay tại vị trí đặt lượng nổ, cấu kiện bê tông bị tác động tuy nhiên chưa đến trạng thái bị phá hủy do phần lớn năng lượng nổ được lớp bọc thép hấp thụ, do vậy trong quá trình phân tích kết cấu không còn bị phá hủy như trong trường hợp không bọc thép (hình 7).

Trên hình 8, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 1087 của cấu kiện BTCT (ngay sau vị trí đặt lượng nổ). Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,08s sau đó dần dần ổn định.

Như vậy, với giải pháp bọc thép xung quanh cấu kiện BTCT cho thấy có thể bảo vệ cho cấu kiện BTCT khi chịu tải trọng nổ tiếp xúc.

5. Kết quả nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, tác giả đã tiến hành mô phỏng

phân tích sự phá hoại của cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc bằng phần mềm ABAQUS, cụ thể mô phỏng số cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, tiết diện 0,2x0,2m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6a200$ với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc có khối lượng 200g đặt chính giữa cấu kiện BTCT. Sau khi gây nổ quá trình phá hoại của nổ tiếp xúc là rất nhanh, đến thời điểm 0,005s trở đi vùng phá hoại của cấu kiện đạt đến trạng thái lớn nhất, kết quả vùng bê tông của cấu kiện BTCT bị phá hoại hoàn toàn ở chính giữa có chiều dài khoảng 264mm, vùng phá hoại lan rộng ra phía các cạnh cấu kiện có chiều dài khoảng 612-684mm (bảng 4). Cốt thép chịu lực còn nguyên vẹn, thép đai tại vị trí gần lượng nổ bị thổi bay. Từ đó tác giả đề xuất giải pháp bọc thép xung quanh cấu kiện BTCT cho thấy có thể bảo vệ cho cấu kiện BTCT khi chịu tải trọng nổ tiếp xúc.

6. Kết luận

Các kết quả thu được khẳng định tính hợp lý khi sử dụng mô hình vật liệu Holmquist-Johnson-Cook cho bê tông, mô hình vật liệu Johnson-Cook cho cốt thép, mô hình vật liệu nổ TNT trong phân tích kết cấu bê tông cốt

thép chịu tác dụng nổ bằng phần mềm ABAQUS.

Từ kết quả phân tích trên có thể nhận thấy rằng, dưới tác dụng của sản phẩm nổ khi nổ tiếp xúc các kết cấu BTCT ngay lập tức bị phá hoại cục bộ, phần bê tông gần như bị phá hủy hoàn toàn ở khu vực gần lượng nổ. Do đó làm suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu và thậm chí làm phá hoại hoàn toàn kết cấu. Do vậy cần thiết phải có giải pháp bảo vệ cấu kiện tại những vị trí này tránh các thiệt hại cho kết cấu công trình.

Cũng từ kết quả đó tác giả nhận thấy đề xuất giải pháp bảo vệ cấu kiện bê tông cốt thép bằng phương pháp bọc thép tấm dày 10mm xung quanh cấu kiện dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc có hiệu quả tốt, làm giảm đáng kể mức độ phá hoại của cấu kiện.

Các kết quả thu được có thể cung cấp thêm một số thông tin hữu ích cho các thiết kế có kể đến chấn sập đối với các công trình phục vụ cho an ninh Quốc phòng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ABAQUS Theory Manual, revision 2020, Pawtucket, Rhode Island, Mỹ, 2020.
- [2] E. Lee, M. Finger, W. Collins (1973), *JWL equations of state coefficient for high explosives*, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley.
- [3] Henrych J (1979). *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Chapter 5. Elsevier: New York.
- [4] Biggs JM (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. (1978). *Spalling of concrete walls under blast load*. Structural Mechanics in Reactor Technology, 31(9):2060–2069.
- [9] cVay, 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] Danh, L.B., Hòa, P.D., Thắng, N.C., Linh, N.Đ., Dương, B.T.T., Lộc, B.T., Đạt, Đ.V. (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 NUCE 2019.13 (3V): 12–21.
- [13] McGuire, W., (1974), *“Prevention of Progressive Collapse,”* Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [14] Izzuddin, B.A. (2008). *“Simplified assessment of structural robustness for sudden component failures”*, COST Action TU0601, 1st Workshop on Robustness of Structures, ETH Zurich, Switzerland.
- [15] Monagan J. J (1988). *An introduction to SPH*, Comput. Phys. Comm. Vol. 48. P. 89-96.
- [16] Hayhurst CJ, Clegg RA (1997), *Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates*. Int J Impact Eng, 337-48.
- [17] E. Lee, M. Finger, W. Collins (1973), *JWL equations of state coefficient for high explosives*, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley.
- [18] Holmquist TJ, Johnson GR and Cook WH (1993), *A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures*. In: The 14th international symposium on ballis-tic, Quebec, Canada, 26–29 September, pp. 591-600. Arlington, VA: American Defense Preparedness Association.
- [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 Inter-national Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands.
- [20] Johnson G. R., Cook W. H. (1985), *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure*, EngngFractMech, Vol. 21(1), pp. 31-48.