

**NGHIÊN CỨU CHẤN SỤP CỦA TẤM BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI
TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NỔ GẦN VÀ ĐỀ XUẤT
MỘT SỐ GIẢI PHÁP CHỐNG SỤP**
**RESEARCHING SCABBING EFFECT OF REINFORCED CONCRETE
SLAB UNDER THE IMPACT OF CLOSE EXPLOSIVE LOADING AND
SUGGESTING SOME SOLUTIONS TO ANTI-SCABBING**

TS. PHAN THÀNH TRUNG, TS. VŨ VĂN HOÀNG

Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt

Email: thanhtrungphank4@gmail.com

Tóm tắt: Trong lĩnh vực công trình Quốc phòng, kết cấu hầu hết được làm từ thép hoặc bê tông cốt thép. Dưới tác dụng của các loại tải trọng, đặc biệt tải trọng động do tác dụng nổ của bom đạn, kết cấu bị phá hoại cục bộ. Sự phá hoại cục bộ này làm cho độ cứng của hệ kết cấu bị suy giảm cục bộ và có thể xuất hiện hiện tượng biến hình. Kết cấu mất khả năng chịu lực cục bộ và dẫn tới sự phá hoại của toàn hệ kết cấu. Tuy nhiên, nghiên cứu tác dụng tải trọng nổ với các cấu kiện là bài toán rất phức tạp và còn có sai số lớn. Ở Việt Nam, nhóm bài toán này hiện chủ yếu sử dụng một số công thức tính tải thực nghiệm, rất ít nghiên cứu đến quá trình phá hoại cục bộ do tải trọng nổ gây ra. Bài báo tập trung vào sử dụng mô phỏng số để phân tích sự chấn sụp của tấm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ gần. Từ đó, bài báo đề xuất một số giải pháp chống sụp cho tấm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ gần.

Từ khóa: chấn sụp, chống sụp, nổ gần, phá hủy bê tông cốt thép, mô hình Holmquist-Johnson-Cook; mô hình Johnson-Cook.

Abstract: In defence construction field, Almost defence structures are made of steel or reinforced concrete. Under the effect of loading, especially dynamic loads created by bombs or warhead, the structure is damaged locally. This local response of the structure leads to the local decreasing of structural system stiffness and deformation occurrence. The structure reduces its bearing capacity locally and the collapse of the entire structural system can be appeared. However, studying the effects of explosive loads on structure components is a very complicated problem with large errors. In Vietnam, the problems currently mainly have been solved by applying some empirical loading calculation formulas and there is only few research on the process.. The article is

focused on using numerical simulation to analyze the collapse of reinforced concrete slabs under the impact of close explosive. Hence, the article will suggest some solutions to prevent progressive collapse of reinforced concrete slabs under the impact of close explosive.

Keywords: scab, anti-scab, blast loading; demolition of reinforced concrete; Holmquist-Johnson-Cook model; Johnson-Cook model.

1. Giới thiệu

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 [1,2]. Các phương trình sử dụng để mô tả trạng thái của vật liệu, các quan hệ giữa ứng suất, biến dạng và chuyển vị.

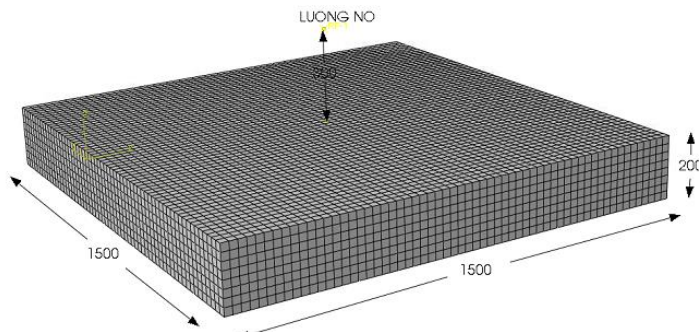
Khác với giải thuật khi giải các bài toán động lực học kết cấu ở vùng đàn dẻo (không có quá trình phá hủy vật liệu) là giải các phương trình cân bằng động lực học sử dụng phép tính gần đúng Newmark [3]. Khi giải các bài toán động lực học diễn ra trong thời gian ngắn và có xét đến sự phá hủy vật liệu 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) [4].

Trên thế giới các nghiên cứu về tác dụng của nổ 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

[5,6]. Kot và cs. [7,8] đã đề xuất các phương pháp lý thuyết về sự phá hoại của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nổ, tuy nhiên các phương pháp này chỉ dựa trên một số giả định đơn giản làm ảnh hưởng đến tính chính xác của 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 rất phức tạp. Khả năng chịu tác động tải trọng nổ 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 cũng thực hiện trong những năm gần đây [12]. Việc

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 [9] 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

nghiên cứu thực nghiệm và nghiên cứu quá trình tác dụng của tải trọng nổ đối với cấu kiện bê tông cốt thép với bê tông còn ít được công bố.

Trong bài báo này, tác giả sẽ tiến hành mô phỏng số chấn sụp (là vùng phá hủy phía sau của tấm bê tông khi bị tác dụng của sóng nổ phía trước) của tấm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ gần bằng phần mềm ABAQUS. Các kỹ thuật mô phỏng kết cấu phần tử bê tông cốt thép, cũng như mô hình vật liệu được mô tả chi tiết. Từ đó đưa ra các nhận xét định lượng về ảnh hưởng của các nhân tố trên đến phá hoại cục bộ của kết cấu bê tông cốt thép, đồng thời đề xuất một số giải pháp chống sụp cho kết cấu bê tông cốt thép trong trường hợp này. Các kết quả thu được có thể cung cấp thêm một số thông tin hữu ích cho các thiết kế có kể đến chống sụp đối với các công trình phục vụ cho an ninh Quốc phòng.

2. Đặt bài toán nghiên cứu

Mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS tấm bê tông cốt thép (BTCT) hình vuông với kích thước 1,5m, chiều dày 0,2m, cốt thép chịu lực bố trí 2 lớp $\varnothing 12 \times 145$ chiều dày bảo vệ cốt thép 0,01m. Tấm BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m.

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. 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.

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

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]. Thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [15].

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 [16]. 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 Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt để đưa ra các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 (bảng 1).

Bảng 1. 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 [17,18] cụ thể như bảng 2:

Bảng 2. 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 gần

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 $\Phi 6$ a200 (dùng thép CII) với chiều dày bảo vệ 0,01m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải

trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m, tác giả sử dụng khối thuốc nổ TNT dạng bánh và cấu tạo lượng nổ dạng hình khối lập phương, trong công tác nổ xem đây là khối lượng nổ tập trung và có thể sử dụng tính gần đúng cho các công thức của lượng nổ hình cầu (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.

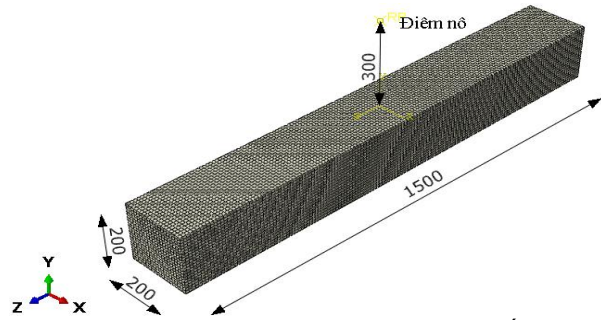


Hình 2. Ảnh mô hình thử nghiệm

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

Tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Cấu kiện BTCT được mô tả

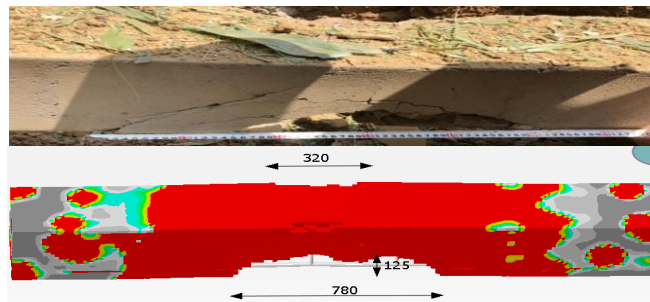
như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5mm. Lưới chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5mm. Kết cấu bê tông được mô hình hóa 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 nỏ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [15]. Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (hình 3).



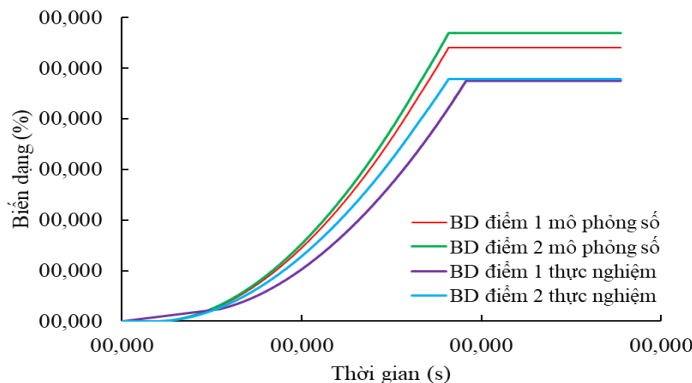
Hình 3. Mô hình hình học mô phỏng số

3.3 Phân tích và so sánh kết quả

Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số như trong hình 4, 5 và bảng 3.



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



Hình 5. Biến dạng tại điểm 1, 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 3. So sánh kết quả trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều sâu phễu chấn sục (mm)	125	130	3,85%
Chiều dài phễu chấn sục (mm)	780	750	4,0%
Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)	320	400	20,0%
Biến dạng dọc trục điểm 1	0,2705%	0,2376%	19,0%
Biến dạng dọc trục điểm 2	0,2849%	0,2394%	13,8%

Kết quả kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số (hình 4) có sự sai khác chiều sâu phễu chấn sục 3,85%; Chiều dài phễu chấn sục 4,0%; Chiều dài vùng phá hủy mặt bên 20,0% (bảng 3). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) và 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT)

(hình 5) có sự sai khác lần lượt là 19,0% và 13,8%. Sai khác này hoàn toàn chấp nhận được đối với bài toán mô phỏng tác dụng của tải trọng nỏ. 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 nỏ gần bằng phần

mềm ABAQUS.

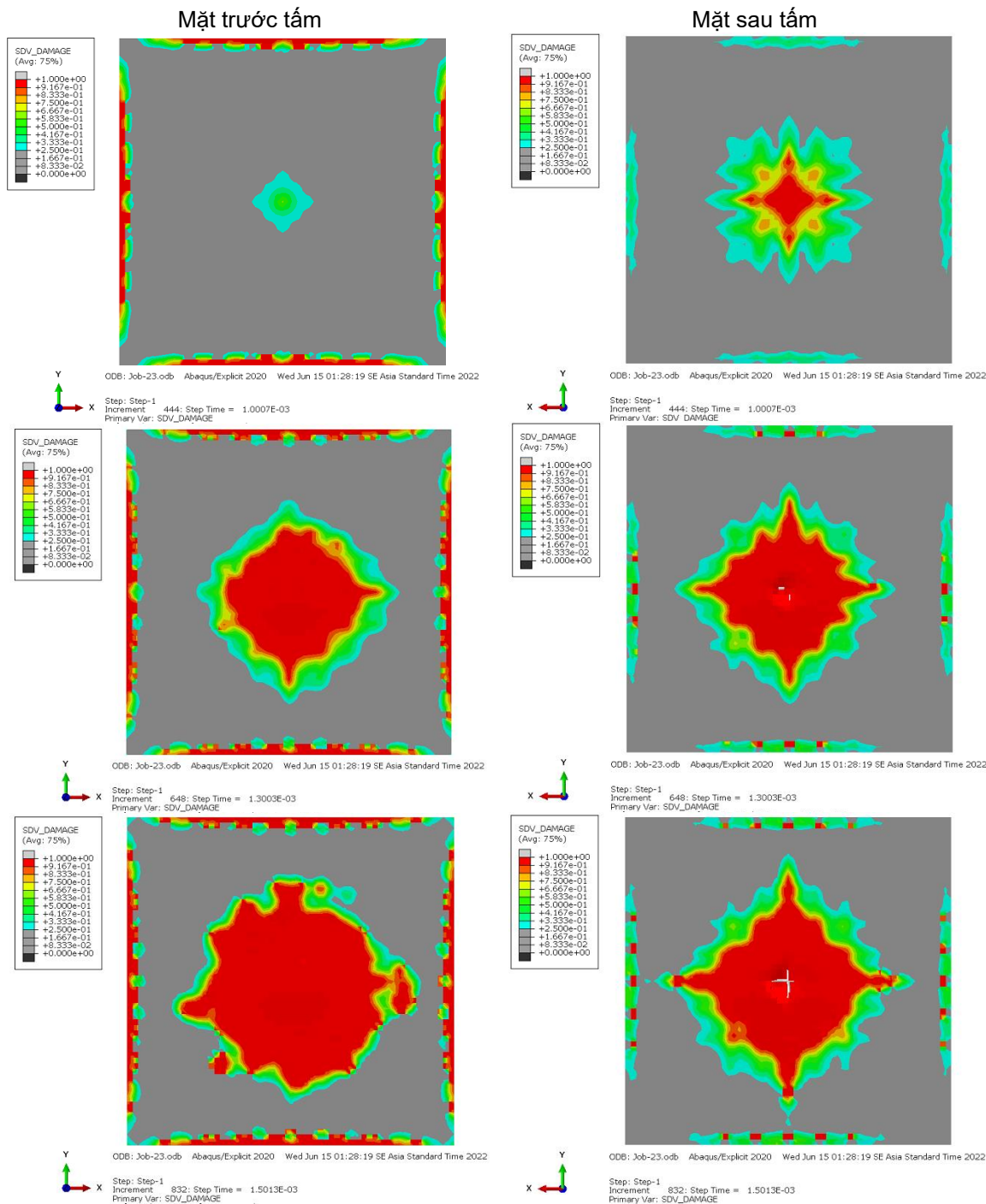
4. Mô phỏng số sự chấn sụp của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần

Trong mục này, tác giả tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS tấm bê tông cốt thép (BTCT) hình vuông với kích thước 1,5m, chiều dày 0,2m, cốt thép chịu lực bố trí 2 lớp $\varnothing 12a145$ chiều

dày bảo vệ cốt thép 0,01m. Tấm BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m.

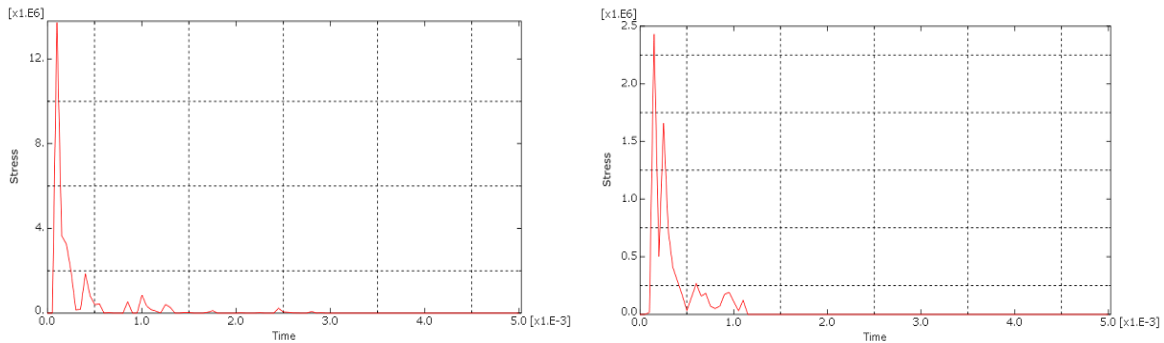
4.1 Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số sự chấn sụp của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần được thể hiện như trong hình 6.



Ứng suất mises tại phần tử chính giữa, mặt trên

Ứng suất mises tại phần tử chính giữa, mặt dưới



Hình 6. Quá trình hình thành sự chấn sập của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần tại các thời điểm 0,001; 0,0013; 0,0015s và ứng suất mises của các phần tử chính giữa trước và sau tấm

4.2 Nhận xét kết quả

Sau khi lượng nổ 1600g TNT nổ cách tấm BTCT 0,3m, dưới tác dụng của tải trọng sóng xung kích mặt trên của tấm hình thành các vùng biến dạng (màu đỏ - hình 6) tuy nhiên gần như không bị phá hoại cục bộ mặt trên tấm BTCT, còn mặt dưới của tấm hình thành vùng chấn sập có đường kính khoảng 0,2m và chiều sâu 0,06m từ thời điểm 0,0013s và phát triển đến thời điểm 0,0015s thì các vùng biến dạng và phá hoại dừng phát triển (hình 6).

Trên hình 6, hiển thị ứng suất mises tại phần tử chính giữa mặt trên và mặt dưới của tấm BTCT, ứng suất mises tại các phần tử đó tăng đến thời điểm 0,2s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

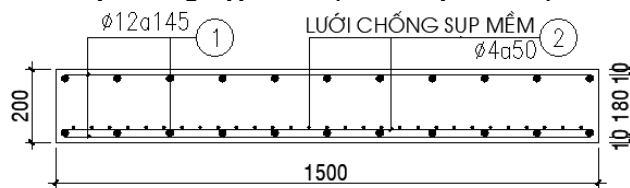
Như vậy, có thể thấy dưới tác dụng của vụ nổ gần, pha nén và sau đó là pha giãn của sóng xung

kích tấm BTCT hình thành vùng chấn sập hình tròn có đường kính khoảng 0,2m và chiều sâu 0,06m ở mặt sau của tấm.

5. Đề xuất một số giải pháp chống sập của tấm BTCT dưới tác dụng của nổ gần

Sau khi tiến hành khảo sát sự chấn sập của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần, cho thấy do quá trình tác dụng của tải trọng nổ diễn ra rất nhanh nên ngoài bị phá hoại cục bộ trên bề mặt tiếp xúc với sóng nổ, ở phía mặt đối diện của tấm BTCT hình thành phễu chấn sập khá lớn, làm cho kết cấu bị phá hủy do đó làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Từ đó nhằm nâng cao khả năng chống sập của tấm BTCT, tác giả đề xuất một số giải pháp kháng sập như sau: Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm lưới thép chống sập mềm (lưới thép $\varnothing 4a50$); giải pháp thứ hai - bố trí thêm thép chống sập cứng (thép $\varnothing 16a145$ hình chữ Z).

5.1 Giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sập mềm (lưới thép $\varnothing 4a50$)



Hình 7. Bố trí lưới thép chống sập mềm cho tấm BTCT

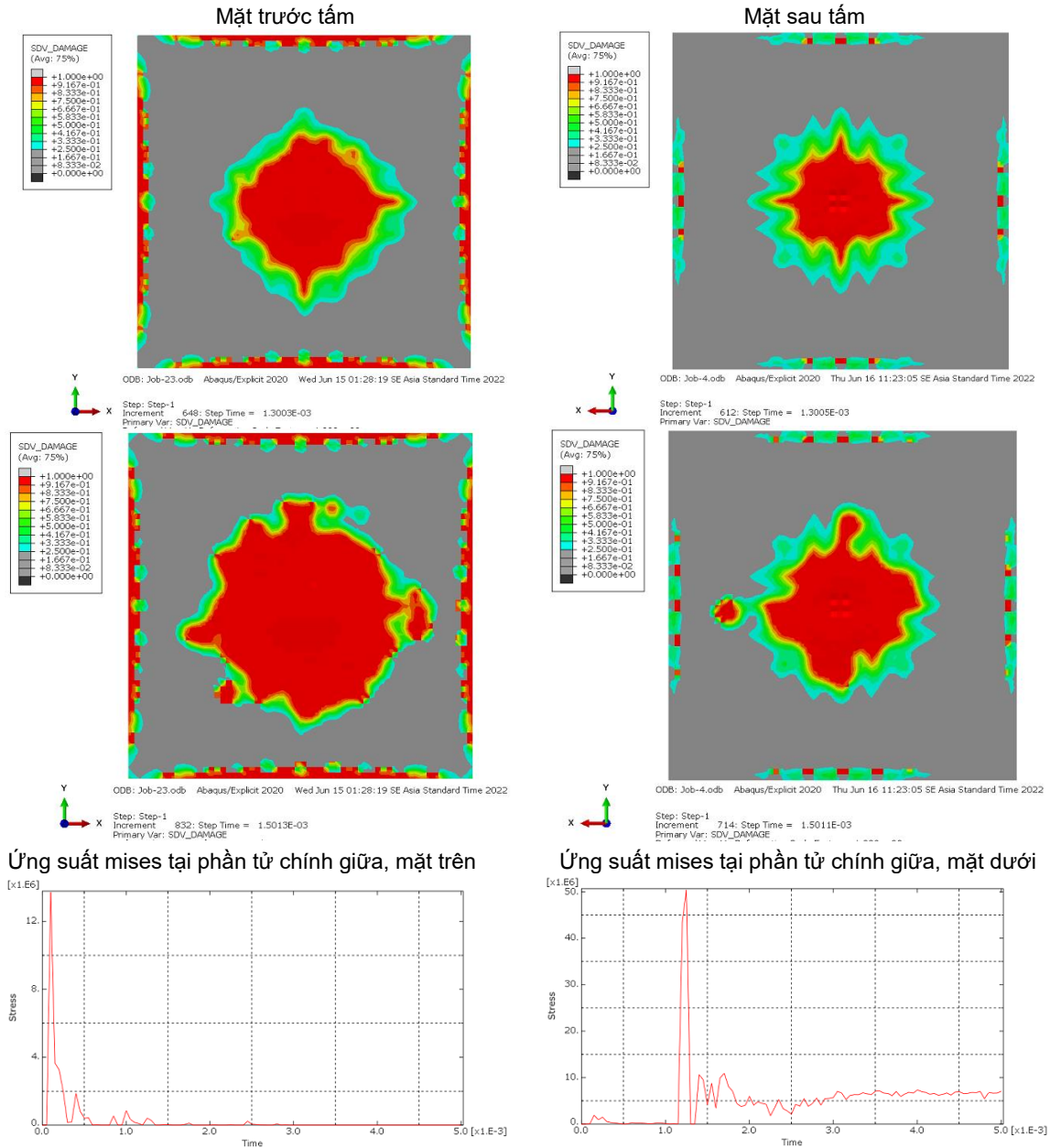
Kết quả mô phỏng số giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sập mềm (lưới thép $\varnothing 4a100$) nâng cao khả năng chống sập của tấm BTCT dưới tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 8.

Với giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sập mềm (lưới thép $\varnothing 4a100$), ngay sau khi lượng nổ 1600g TNT nổ cách tấm BTCT 0,3m, dưới tác dụng của tải trọng sóng xung kích mặt trên của tấm hình thành các vùng biến dạng (màu đỏ - hình 8) gần như không bị phá hoại cục bộ mặt trên tấm BTCT, còn mặt dưới của tấm hình thành vùng chấn sập có đường kính khoảng 0,08m và chiều sâu 0,03m từ

thời điểm 0,0013s và phát triển đến thời điểm 0,0015s thì các vùng biến dạng và phá hoại dừng phát triển (hình 8).

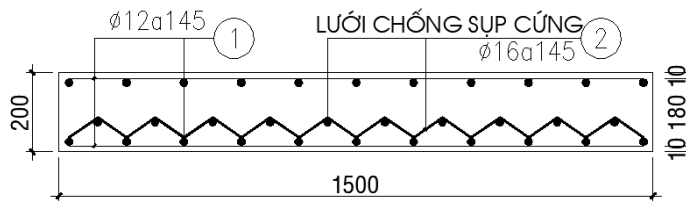
Trên hình 8, hiển thị ứng suất mises tại phần tử chính giữa mặt trên và mặt dưới của tấm BTCT, ứng suất mises tại các phần tử đó tăng đến thời điểm 0,2s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

Như vậy, với bố trí thêm lưới thép chống sập mềm (lưới thép $\varnothing 4a100$) cho thấy có thể làm giảm đáng kể sự chấn sập của tấm BTCT dưới tác dụng của tải trọng nổ gần.



Hình 8. Quá trình hình thành sự chấn sập của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần tại các thời điểm 0,0013; 0,0015s và ứng suất mises của các phần tử chính giữa trước và sau tấm.

5.2 Giải pháp bố trí thêm thép chống sập cứng (thép $\Phi 16a145$ hình chữ Z)



Hình 9. Bố trí lưới thép chống sập cứng cho tấm BTCT

Kết quả mô phỏng số giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sập cứng (thép $\Phi 16a145$ hình chữ Z) nâng cao khả năng chống sập của tấm BTCT dưới tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 10.

Với giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sập cứng (thép $\Phi 16a145$ hình chữ Z), ngay sau khi

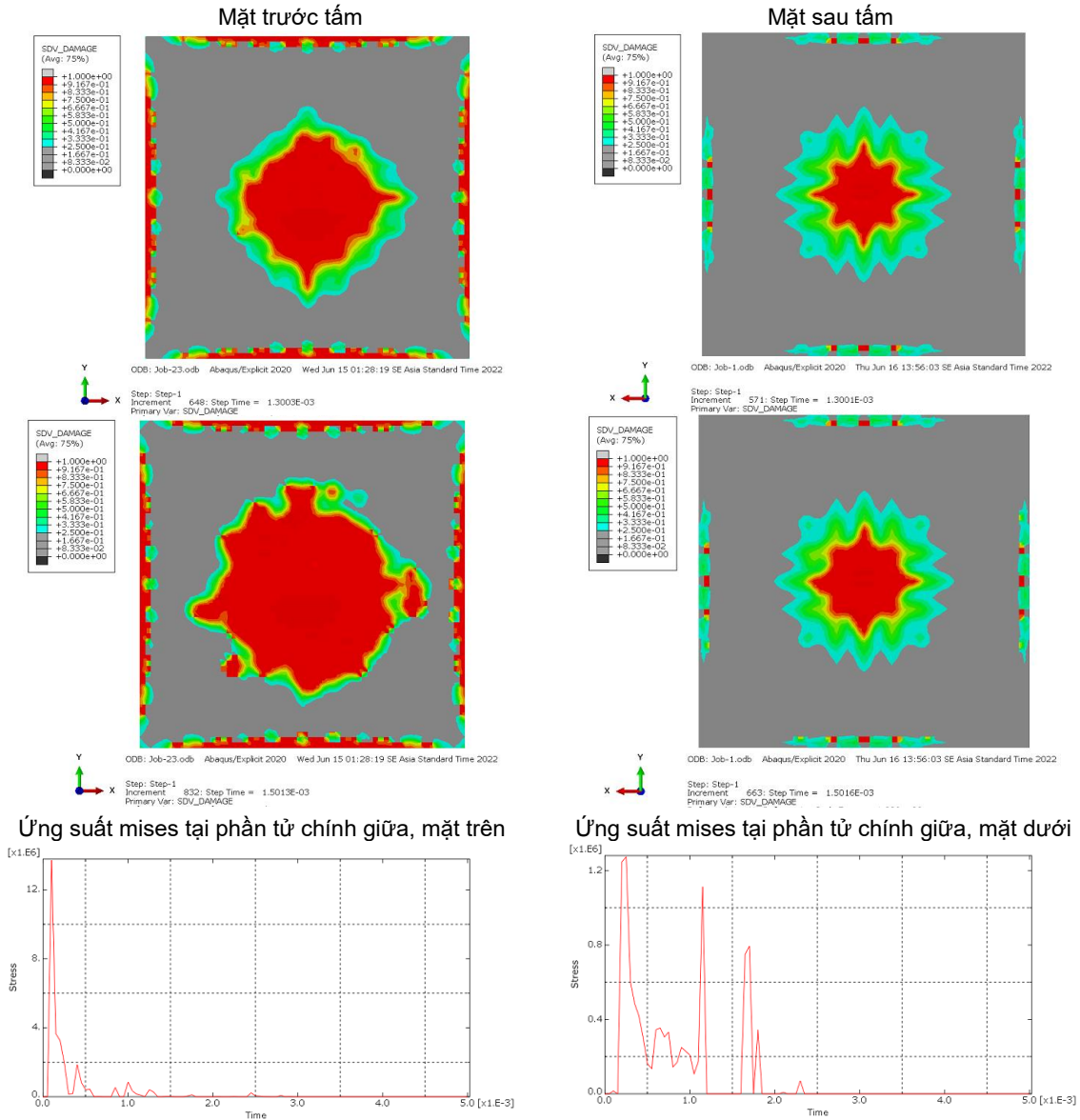
lượng nổ 1600g TNT nổ cách tấm BTCT 0,3m, dưới tác dụng của tải trọng sóng xung kích mặt trên của tấm hình thành các vùng biến dạng (màu đỏ - hình 8) gần như không bị phá hoại cục bộ mặt trên tấm BTCT, còn mặt dưới của tấm hình thành vùng chấn sập có đường kính khoảng 0,05m và chiều sâu

0,02m từ thời điểm 0,0013s và phát triển đến thời điểm 0,0015s thì các cùng biến dạng và phá hoại dừng phát triển (hình 10).

Trên hình 10, hiển thị ứng suất mises tại phần tử chính giữa mặt trên và mặt dưới của tấm BTCT, ứng suất mises tại các phần tử đó tăng đến thời

điểm 0,2s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

Như vậy, với bố trí thêm lưới thép chống sụp cứng (thép $\Phi 16a145$ hình chữ Z) cho thấy có thể làm giảm đáng kể sự chấn sụp của tấm BTCT dưới tác dụng của tải trọng nổ gần.



Hình 10. Quá trình hình thành sự chấn sụp của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần tại các thời điểm 0,0013; 0,0015s và ứng suất mises của các phần tử chính giữa trước và sau tấm

6. Kết quả nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, tác giả đã tiến hành mô phỏng phân tích sự chấn sụp của tấm BTCT chịu tác dụng nổ gần bằng phần mềm ABAQUS, cụ thể mô phỏng số tấm bê tông cốt thép hình vuông với kích thước 1,5m, chiều dày 0,2m, cốt thép chịu lực bố trí 2 lớp $\Phi 12a145$ chiều dày bảo vệ cốt thép 0,01m. Tấm BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3m, dưới tác dụng của pha

nén và pha giãn của sóng xung kích mặt sau của tấm hình thành vùng chấn sụp hình tròn có đường kính khoảng 0,2m và chiều sâu 0,06m. Từ đó tác giả đề xuất một số giải pháp kháng sập cho trường hợp này gồm: Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm lưới thép chống sụp mềm (lưới thép $\Phi 4a50$) mặt sau của tấm hình thành vùng chấn sụp hình tròn có đường kính khoảng 0,08m và chiều sâu 0,03m; giải pháp thứ hai - bố trí thêm thép chống sụp cứng (thép $\Phi 16a145$ hình chữ Z) mặt sau của tấm hình

thành vùng chấn sục hình tròn có đường kính khoảng 0,05m và chiều sâu 0,02m.

7. 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 sóng xung kích các kết cấu BTCT hình thành vùng chấn sục phía mặt sau của kết cấu, sự phá hoại cục bộ này 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 các giải pháp để chống sục tránh các thiệt hại cho kết cấu công trình.

Cũng từ kết quả đó tác giả nhận thấy các đề xuất giải pháp bố trí thêm lưới thép chống sục mềm (lưới thép $\varnothing 4a50$) hoặc bố trí thêm thép chống sục cứng (thép $\varnothing 16a145$ hình chữ Z) để chống sục cho tấm BTCT có hiệu quả tốt, làm giảm đáng kể mức độ chấn sục 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 sục đối với các công trình phục vụ cho an ninh Quốc phòng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. E. Lee, M. Finger, W. Collins (1973), JWL equations of state coefficient for high explosives, *Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley.*
2. Henrych J (1979). The Dynamics of Explosion and Its Use, *Chapter 5. Elsevier: New York.*
3. Biggs JM (1964), Introduction to structural dynamics. *New York: McGrawHill.*
4. ABAQUS Theory Manual, *revision 2020, Pawtucket, Rhode Island, Mỹ, 2020.*
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. Unified Facilities Criteria (UFC) (2008), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, *U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, UFC 3-340-02.*
16. 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.*
17. Johnson G. R., Cook W. H., A (1983), 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.*
18. 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.*

Ngày nhận bài: 29/6/2022.

Ngày nhận bài sửa: 04/7/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 06/7/2022.