

NGHIÊN CỨU SỰ SỤP ĐỔ LŨY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG CỐT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TẢI TRỌNG NỔ TIẾP XÚC VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SẬP

Phan Thành Trung¹, Nguyễn Quốc Bảo², Vũ Văn Hoàng¹

¹ Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt

² Đại học Công nghệ GTVT

Nhận ngày 13/11/2020, thẩm định ngày 28/11/2020, chỉnh sửa ngày 12/03/2021, chấp nhận đăng 19/03/2021

Tóm tắt

Các công trình đặc biệt sử dụng trong lĩnh vực an ninh Quốc phòng, việc tính toán các loại công trình chịu tác dụng nổ là một yêu cầu bắt buộc, tuy nhiên việc tính toán các công trình chịu tác dụng nổ rất phức tạp và có sai số lớn. Ở Việt Nam, tính toán hiện nay chủ yếu sử dụng một số công thức qui tính tải trọng nổ đã có. Kết quả này chỉ phù hợp trong một số phạm vi nhất định và không phản ánh được quá trình phá hủy cấu kiện do tác dụng nổ gây ra. Bài báo này tập trung nghiên cứu mô hình mô phỏng số để phân tích sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc, trong đó các kỹ thuật mô phỏng kết cấu phân tử dầm và sàn của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối, cũng như mô hình vật liệu được mô tả chi tiết. Kết quả số được so sánh với dữ liệu thực nghiệm và đạt được sự phù hợp. Từ đó đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình đặc biệt chịu tải trọng nổ tiếp xúc bằng mô phỏng số trên phần mềm ABAQUS.

Từ khóa: sụp đổ lũy tiến, kháng sập lũy tiến, nổ tiếp xúc, phá hủy bê tông cốt thép, mô hình Holmquist- Johnson - Cook; mô hình Johnson - Cook.

Abstract

Special buildings used in the field of security and defense, the calculation of the types of buildings subjected to explosions is a mandatory requirement, but the calculation of buildings subjected to explosions is very complicated and large error. In Vietnam, current calculations mainly use some existing static load static formula. This result is only suitable for a certain extent and does not reflect the process of structural destruction caused by the explosion effect. This paper focuses on the numerical simulation model to analyze the progressive collapse of reinforced concrete frames subjected to contact explosion, in which the structural simulation techniques of beam and floor elements of the frame. monolithic reinforced concrete spaces, as well as material models are described in detail. The numerical results were compared with the experimental data and a match was obtained. Since then, proposing some progressive anti-collapse solutions for special constructions subjected to exposed explosive loads by numerical simulation on ABAQUS software.

Keywords: progressive collapse, progressive collapse resistance, contact blast loading; demolition of reinforced concrete; Holmquist - Johnson - Cook model; Johnson - Cook model.

1. Giới thiệu

Trên thế giới việc sử dụng năng lượng nổ để gây ra các vụ khủng bố trở thành một vấn đề nhức nhối cho các nhà chức trách trong việc bảo đảm sự an toàn cho con người và các công trình trước hoạt động này. Một số quốc gia đã đưa vào tiêu chuẩn thiết kế xây dựng các quy định về thiết kế công trình chịu tác dụng của các vụ nổ, nhằm đảm bảo cho các công trình có thể chịu được khi có các vụ nổ như trên xảy ra. 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 [1,2]. Kot và cs. [3,4] 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 giá 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 [5] 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. [6] 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. [7] 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 mối đe dọa từ các vụ nổ tác động lên công trình và cuộc sống con người không còn là vấn đề xa lạ. Ví dụ như nổ chất nổ, nổ khí ga...Hiện nay tiêu chuẩn tải trọng và tác động hiện hành của Việt Nam có yêu cầu, nhưng tài liệu về

chỉ dẫn thiết kế kết cấu công trình dân dụng lại không có. Các vấn đề tính toán các công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ chủ yếu được đề cập cho các công trình Quân sự. Còn các công trình dân dụng chưa được quan tâm đúng mức. Các nghiên cứu về vấn đề nổ tiếp xúc cũng thực hiện trong những năm gần đây [8].

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu liên quan đến các phân tích kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc, song các công trình trên chủ yếu mới nghiên cứu trong giai đoạn đàn - dẻo, còn có kể đến sụp đổ lũy tiến còn ít được đề cập đến. Điều này có thể do phân tích kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ có kể đến sụp đổ lũy tiến phức tạp hơn. Hơn nữa, việc kiểm tra các kết quả tính toán có kể đến sụp đổ lũy tiến phức tạp hơn.

Trong bài báo này, tác giả sẽ tiến hành mô phỏng phân tích sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép (BTCT) liên khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc bằng phần mềm ABAQUS. Các kỹ thuật mô phỏng kết cấu phần tử dầm và sàn của khung không gian bê tông cốt thép, cũng như mô hình vật liệu được mô tả chi tiết. Kết quả số được so sánh với dữ liệu thực nghiệm và đạt được sự phù hợp. Từ đó đưa ra các nhận xét định lượng về ảnh hưởng của các nhân tố trên đến phá hoại lũy tiến của kết cấu, đồng thời đề xuất một số giải pháp kháng sụp đổ lũy tiến cho công trình 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 kháng sụp đổ lũy tiến đối với các công trình phục vụ cho an ninh Quốc phòng.

2. Đặt bài toán nghiên cứu

Các công trình đặc biệt phục vụ lưỡng dụng vừa cho mục đích dân sự vừa cho mục đích an ninh Quốc phòng khi có các sự cố như khủng bố, chiến tranh. Trong nghiên cứu này tác giả nghiên cứu công trình gồm có 5 tầng nổi và một tầng hầm, các tầng của tòa nhà phục vụ cho các mục đích dân sự trong điều kiện bình thường (không có khủng bố và chiến tranh), còn tầng hầm có thể đưa vào phục vụ cho mục đích trú ẩn khi có khủng bố hay chiến sự.

Mô hình bài toán nghiên cứu là công trình gồm có 5 tầng nổi và một tầng hầm. Các tầng nổi của tòa nhà gồm 3 nhịp có chiều dài lần lượt là 4, 2, 4 m và 5 gian với bước gian là 4 m; chiều cao tầng 3,3 m. Phần hầm có kích thước 20,25 x 30,25 m với chiều cao 3,6 m. Kết cấu của tòa nhà bằng khung BTCT: Cột có tiết diện 0,25 x 0,25 m, cốt thép chịu lực 4Ø22, thép đai Ø6a200; Dầm có tiết diện 0,35 x 0,35 m, cốt thép chịu lực 4Ø20, thép đai Ø6a200; Sàn các tầng nổi có chiều dày 0,1 m bố trí 2 lớp thép Ø8a200; Tầng hầm cấu tạo bằng vách BTCT có chiều dày 0,3 m bố trí 2 lớp thép Ø16a200. Chiều dày lớp bảo vệ 0,015 m. Kết cấu bao che xung quanh tòa nhà là vách kính cường lực, kết cấu ngăn cách các phòng là tường xây gạch rỗng dày 0,15 m (Hình 1).

Các loại tải trọng tác dụng lên kết cấu: Trọng lượng bản thân của kết cấu khung bê tông cốt thép, tải trọng của tường bao và hoạt tải cho công trình văn phòng lấy theo tiêu chuẩn TCVN 2737-2020. Giả thiết bỏ qua sự va chạm của các phần tử bị tách ra khỏi kết cấu và của đồng đồ vỡ tường bao khi bị phá hủy.

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 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.

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 [10,11]. 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 [12,13]. 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 [14] 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	ν	E_0 (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6×10^6

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		

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

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 [15]. 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 lập cũng như các thí nghiệm ép chế 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. Từ các thí nghiệm thực hiện được các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 được xác định và liệt kê trong Bảng 2.

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 được lấy theo tài liệu [16,17] cụ thể như sau như Bảng 3.

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



Hình 2. Ảnh mô hình thử nghiệm.

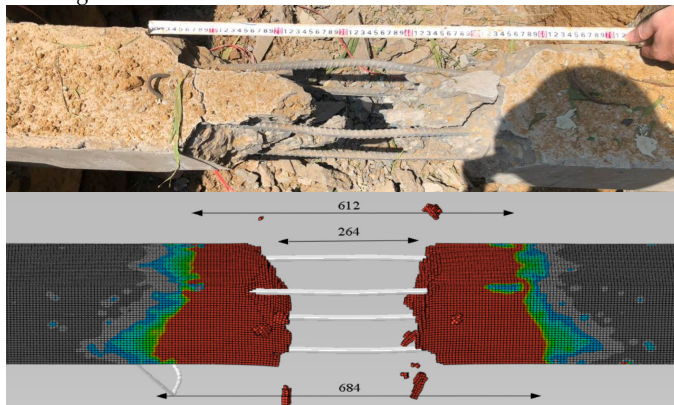
3.2. Mô phỏng số sự phá hủy cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc
 Tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Cấu kiện BTCT được mô tả như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5 mm. Lưới chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5 mm. 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. Thuốc nổ được tính theo phương pháp SPH [12,13]. Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_r_2 = u_r_3 = 0$) (Hình 3)



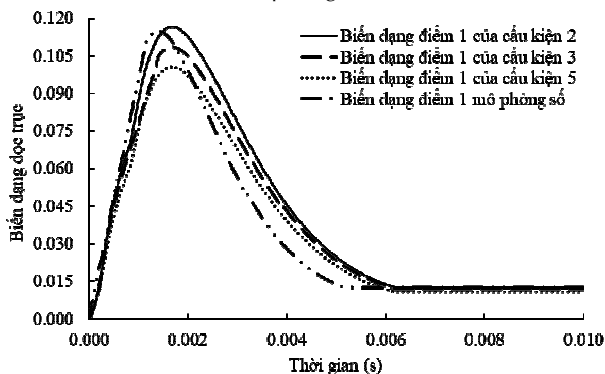
Hình 3. Mô hình hình học mô phỏng số.

3.3. Phân tích và so sánh kết quả

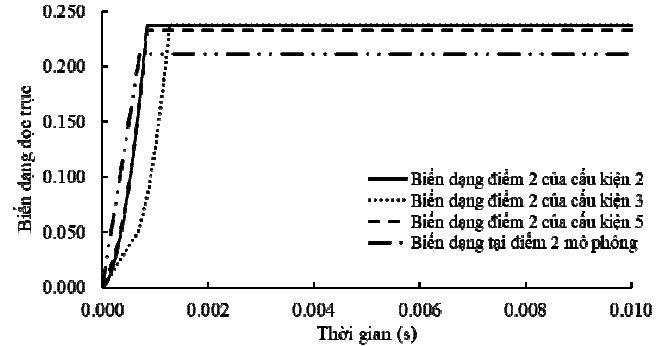
Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số như trong Hình 4, 5, 6 và Bảng 4.



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 cấu kiện (mm)	264	285	7,4 %
Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cấu kiện (mm)	612	650	5,8 %
Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cấu 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 cấu kiện 7,4 %; Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cấu kiện 5,8 %; Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cấu kiện 3,7 % (Bảng 4). 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 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.

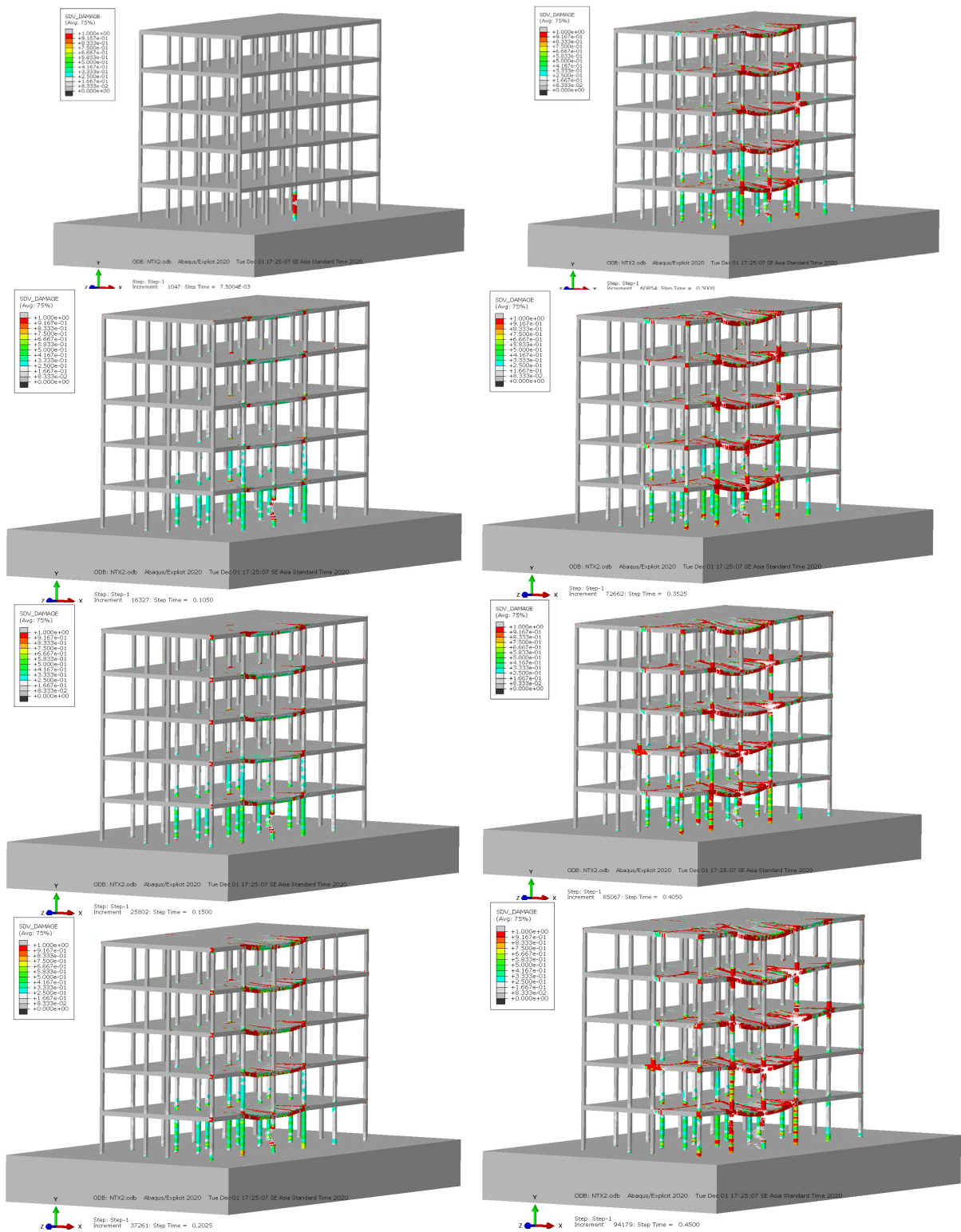
Từ đó có cơ sở để khẳng định tính hợp lý khi sử dụng mô hình vật liệu HJC cho bê tông và mô hình vật liệu Johnson-Cook cho cốt thép trong phân tích kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ tiếp xúc bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả đó hữu ích cho mô phỏng các bài toán kháng xuyên, kháng nổ và kháng sập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

4. Mô phỏng số sự sụp đổ lũy tiến của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc

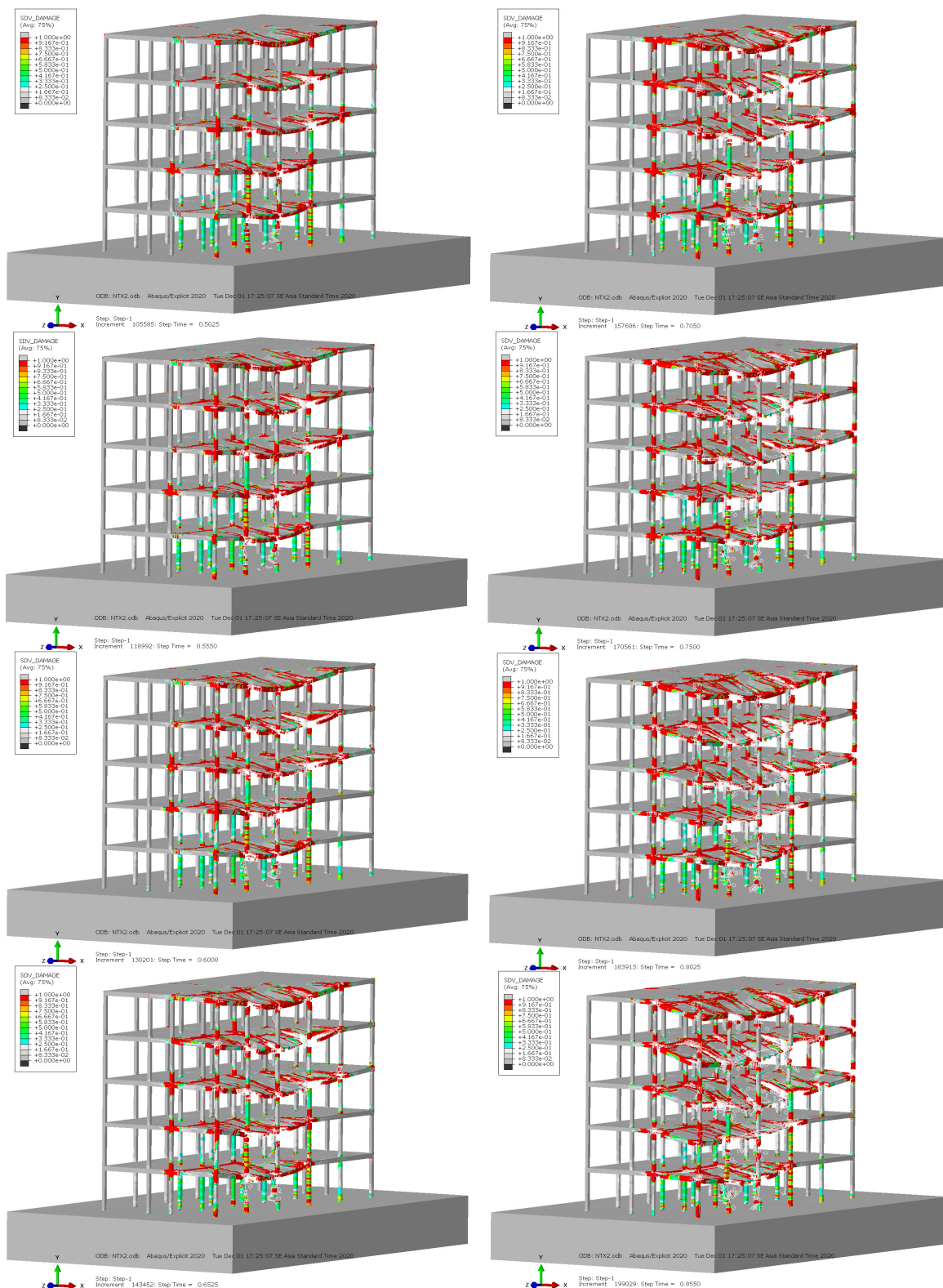
Trong mục này, tác giả tiến hành khảo sát khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc với kích bán: Tòa nhà bị tiếp cận tầng 1 và ộp lượng nổ tiếp xúc 400 g TNT tại chính giữa cột A3 (cột giữa của tòa nhà) (Hình 1).

4.1. Kết quả mô phỏng số

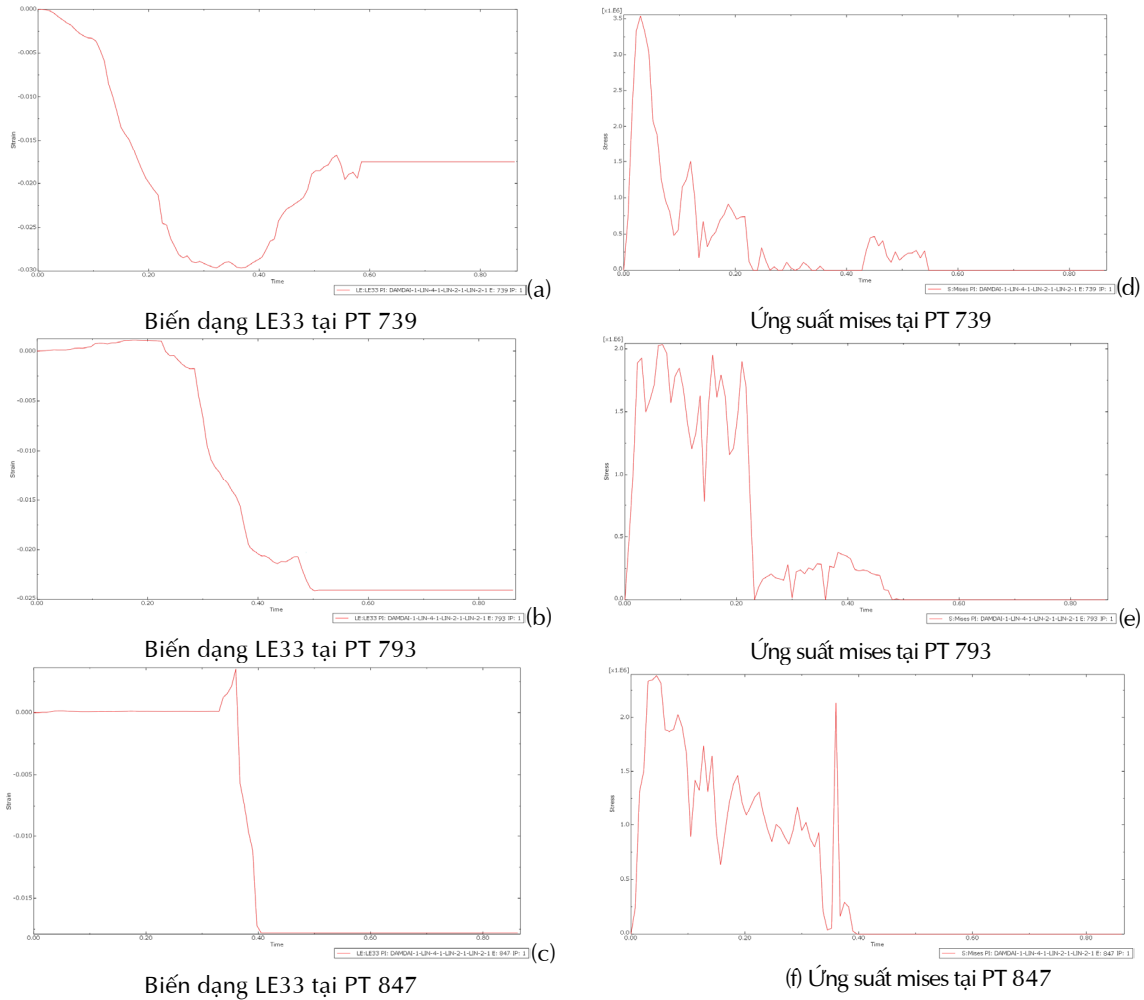
Kết quả mô phỏng số sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép có tầng hầm chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong Hình 7; 8 (Quá trình SDLT của khung BTCT chịu tác dụng của nổ tiếp xúc) và Hình 9 (Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847).



Hình 7. Quá trình SDLT của khung BTCT chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 tại các thời điểm 0,007; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45 s.



Hình 8. Quá trình SĐLT của khung BTCT chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 tại các thời điểm 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85 s.



Hình 9. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.2. Nhận xét kết quả

Sau khi bị lượng nổ tiếp xúc phá hủy cột A3, tải trọng nổ duy trì sau khoảng thời gian 0,007 s kết thúc, dưới tác dụng của trọng lượng bản thân của kết cấu khung bê tông cốt thép, tải trọng của tường bao và hoạt tải, sự phá hủy hình thành tại các tiết diện dầm ở các nút lần lượt A12, A14 (tầng 1); A22, A24 (tầng 2); A32, A34 (tầng 3); A42, A44 (tầng 4) và A52, A54 (tầng 5), tiếp đó sự phá hủy lan mạnh các dầm và sàn lần lượt từ tầng 1 đến tầng 5, sau khi các nút trên cột A1, A3, B1, B2, B3, B4, B5 bị phá hủy, quá trình phá hủy lan ra các dầm giữa các cột A1-A5 và B1-B5. Quá trình phá hoại lũy tiến diễn ra rất nhanh sau 0,85 s một nửa tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ (Hình 8).

Trên Hình 9, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và giữa dầm (PT 793) nối nút A22 và A23. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,4; 0,5; 0,57 s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

Như vậy, khi cột A3 bị phá hủy do lượng nổ tiếp xúc, tải trọng được phân bố lại cho các cấu kiện còn lại, nội lực trong các cấu kiện

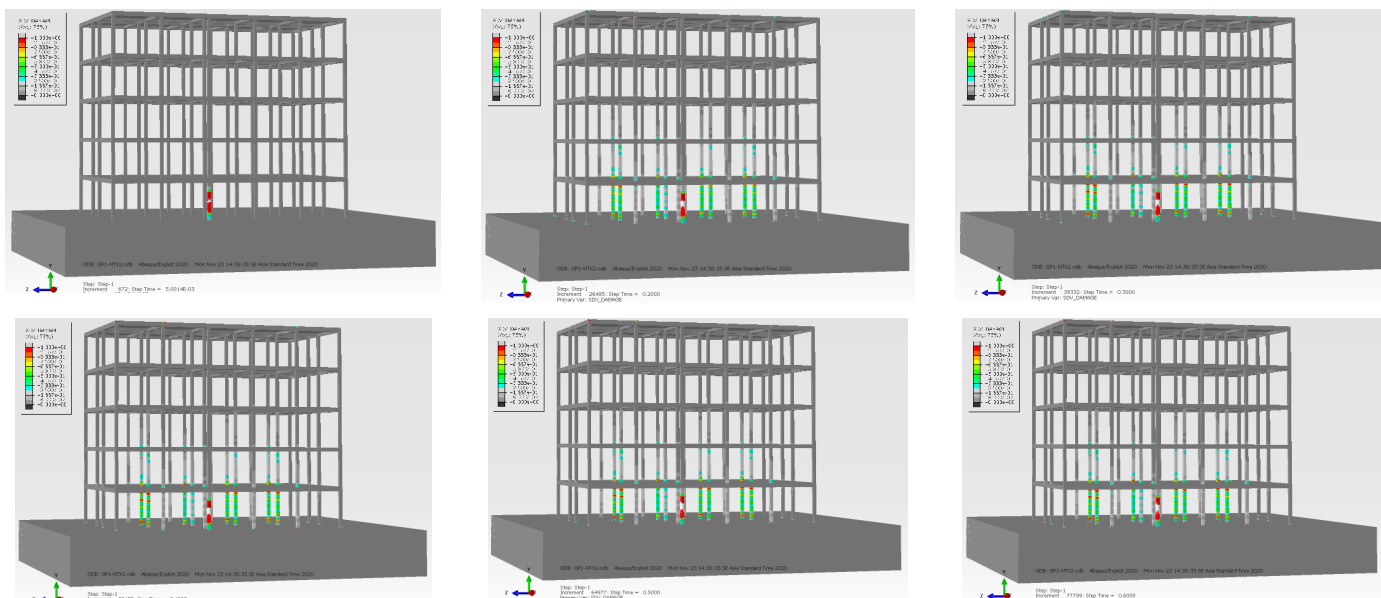
đó tăng lên đột ngột vượt quá khả năng chịu tải của các cấu kiện đó (vốn không được tính trong thiết kế), dẫn đến các cấu kiện đó bị phá hủy, gây ra sự sụp đổ lũy tiến cho công trình.

5. Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

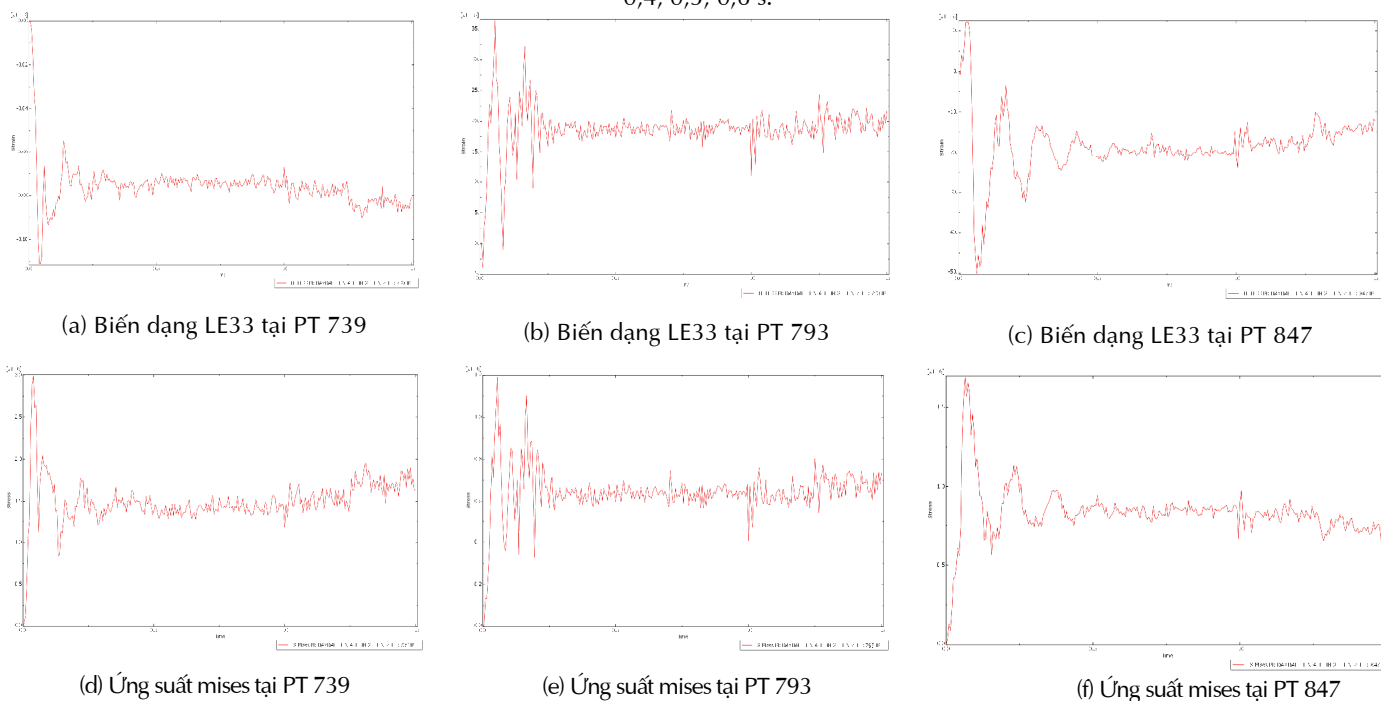
Sau khi tiến hành khảo sát sự sụp đổ lũy tiến khung không gian BTCT có tầng ngầm chịu tác dụng của nổ tiếp xúc tại cột A3, tác giả đề xuất một số giải pháp kháng sập cho trường hợp này, gồm: Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm cột phụ đặt cách cột bị phá hủy 1 m (qua khảo sát bài toán với khoảng cách này tránh được va chạm của cột chính khi bị phá hủy) và giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy (sử dụng thép tấm dày 10 mm bọc tại vị trí cột bị tiếp xúc với lượng nổ).

5.1. Giải pháp thêm cột phụ để kháng sập lũy tiến khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

Kết quả mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ kháng sập lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép có tầng hầm chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong Hình 10 và 11.



Hình 10. Quá trình phá hủy của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,005; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 s.



Hình 11. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

Với giải pháp thêm cột phụ ngay sau vị trí cột chính A3 bị phá hủy do lượng nổ tiếp xúc, ngay sau khi cột A3 bị phá hủy do nổ, tải trọng được phân bố lại và có thể thấy toàn bộ tải trọng của cột A3 lúc này đã tác dụng lên cột phụ, do vậy trong quá trình phân tích kết cấu không còn bị phá hủy như trong trường hợp không có cột phụ (Hình 10).

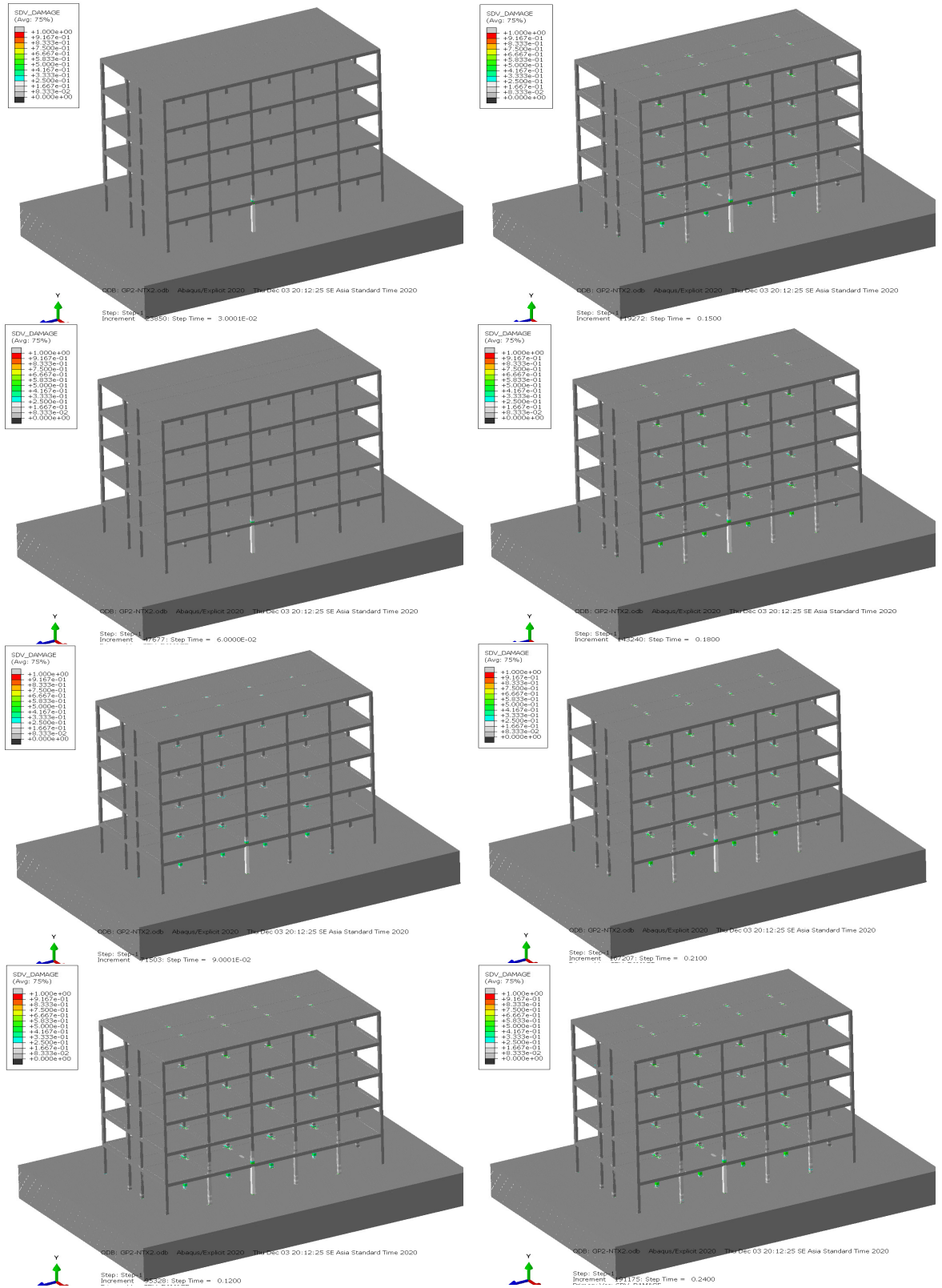
Trên Hình 11, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và giữa dầm (PT 793) nối nút A22 và A23. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,2 s sau đó dần

dẫn ổn định.

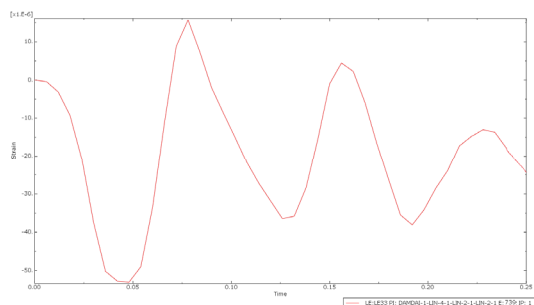
Như vậy, với giải pháp bố trí thêm cột phụ cho thấy có thể chống lại sự sụp đổ lũy tiến cho công trình khi chịu tải trọng nổ tiếp xúc tại cột A3.

5.2. Giải pháp bọc thép cột để kháng sụp lũy tiến khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

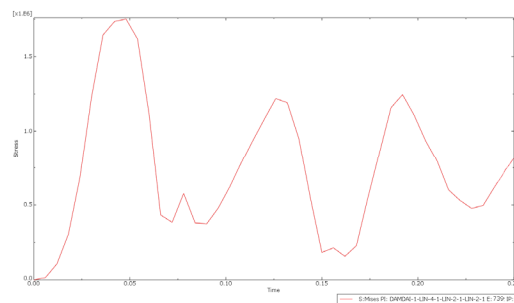
Kết quả mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để kháng sụp lũy tiến khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong Hình 12 và 13.



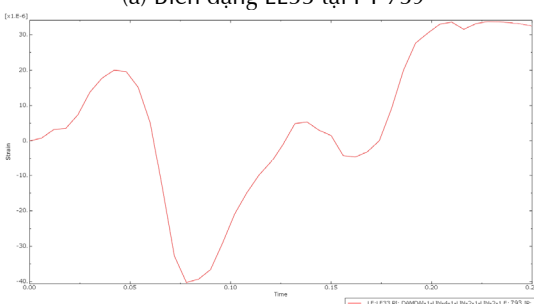
Hình 12. Quá trình phá hủy của khung BTCT khi có bực thép tại cột tiếp xúc với lượng nổ (cột A3) tại các thời điểm 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24 s.



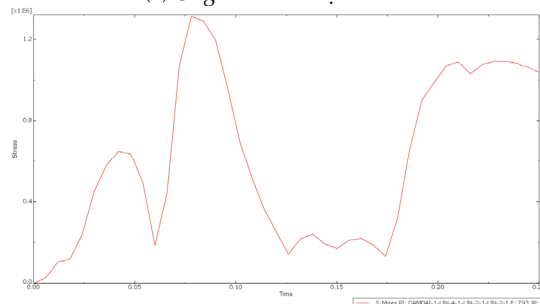
(a) Biến dạng LE33 tại PT 739



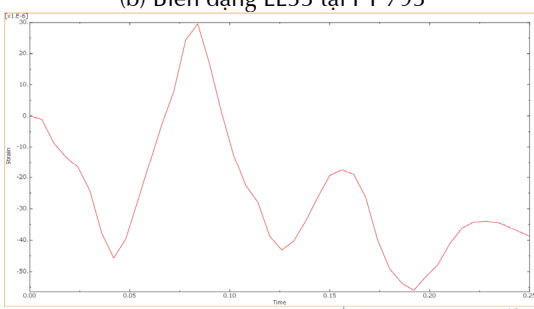
(d) Ứng suất mises tại PT 739



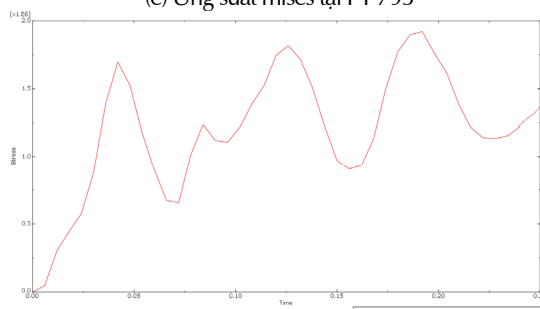
(b) Biến dạng LE33 tại PT 793



(e) Ứng suất mises tại PT 793



(c) Biến dạng LE33 tại PT 847



(f) Ứng suất mises tại PT 847

Hình 13. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

Với giải pháp bọc thép cột ngay chính trên cột A3 bị đặt lượng nổ tiếp xúc, ngay sau khi nổ lớp bọc thép bị cháy dẻo một phần ngay tại vị trí đặt lượng nổ, bê tông trong cột A3 bị tác động tuy nhiên không đến trạng thái bị phá hủy do một 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 có cột phụ (Hình 12).

Trên Hình 13, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và giữa dầm (PT 793) nối nút A22 và A23. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,08 s sau đó dần dần ổn định.

Như vậy, với giải pháp bọc thép cột cho thấy có thể chống lại sự sụp đổ lũy tiến cho công trình khi chịu tải trọng nổ tiếp xúc tại cột A3.

6. Kết quả nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, tác giả đã tiến hành mô phỏng phân tích sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian liên khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc bằng phần mềm ABAQUS, cụ thể phân tích quá trình sụp đổ lũy tiến của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của lượng nổ tiếp xúc tại chính giữa cột A3, sau khi bị lượng nổ tiếp xúc phá hủy cột A3, dưới tác dụng của trọng lượng bản thân của kết cấu khung bê tông cốt thép, tải trọng của tường bao và hoạt tải, quá trình phá hoại lũy tiến diễn ra rất nhanh sau 0,85 s một

nửa tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ. Từ đó tác giả đề xuất một số giải pháp kháng sập cho trường hợp này gồm: Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm cột phụ đặt cách cột bị phá hủy 1 m (qua khảo sát bài toán với khoảng cách này tránh được va chạm của cột chính khi bị phá hủy) và giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy (sử dụng thép tấm dày 10 mm bọc tại vị trí cột bị tiếp xúc với lượng nổ).

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, quá trình sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc diễn ra nhanh và mức độ phá hủy là rất lớn, do vậy cần thiết phải có các giải pháp để kháng sập lũy tiến tránh các thiệt hại cho công trình.

Cũng từ kết quả đó tác giả nhận thấy các đề xuất giải pháp thêm cột phụ và bọc thép cột tiếp xúc với lượng nổ để kháng sập lũy tiến có hiệu quả tốt, làm giảm đáng kể mức độ phá hủy của kết cấu và chống lại quá trình sụp đổ lũy tiến.

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

Tài liệu tham khảo

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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).
- [4] Kot, C. A. (1978). Spalling of concrete walls under blast load. *Structural Mechanics in Reactor Technology*, 31(9):2060–2069.
- [5] cVay, M. K. (1988). Spall damage of concrete structures. Technical report, ARMY Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures LAB.
- [6] 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.
- [7] Marchand, K. A., Plenge, B. T. (1998). *Concrete hard target spall and breach model*. Air Force Research Laboratory, Munitions Directorate, Lethality.
- [8] Danh, L.B., Hòa, P.D., Thăng, 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.
- [9] ABAQUS Theory Manual, revision 2020, Pawtucket, Rhode Island, Mỹ, 2020.
- [10] McGuire, W., 1974, "Prevention of Progressive Collapse," Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [11] 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.
- [12] Monagan J. J. An introduction to SPH, *Comput. Phys. Comm.* 1988. Vol. 48. P. 89-96.
- [13] Hayhurst C.J., Clegg R.A. (1997), Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates. *Int J Impact Eng* 1997, 337-48.
- [14] E. Lee, M. Finger, W. Collins, JWLE equations of state coefficient for high explosives, *Lawrence Livermore Laboratory*, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley 1973.
- [15] Holmquist T.J., Johnson G.R. and Cook W.H. (1993), A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: *The 14th international symposium on ballistic*, Quebec, Canada, 26–29 September, pp. 591-600. Arlington, VA: American Defense Preparedness Association.
- [16] Johnson G. R., Cook W. H., 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, 1983.
- [17] Johnson G. R., Cook W. H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure, *EngngFractMech*, Vol. 21(1) 1985 pp. 31-48.