

Nghiên cứu sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tải trọng nổ gần và đề xuất một số giải pháp kháng sập

Phan Thành Trung¹

¹ Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt

TỪ KHOÁ

Sụp đổ lũy tiến
Kháng sập lũy tiến
Nổ gần
Phá hủy bê tông cốt thép
Mô hình holmquist-johnson-cook
Mô hình johnson-cook

TÓM TẮT

Việc tính toán công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ là yêu cầu bắt buộc với các công trình an ninh quốc phòng và công trình đặc biệt. Tuy nhiên, kết quả tính toán bài toán nổ còn rất phức tạp, có sai số lớn. Ở Việt Nam, phương pháp phổ biến hiện nay là phương pháp tải trọng tĩnh tương đương. Phương pháp đó cho kết quả phù hợp với một số trường hợp nhất định và không phản ánh được phản ứng động và quá trình quá hủy cấu kiện do tải trọng nổ gây ra. Bài báo tập trung vào sử dụng mô phỏng số để phân tích sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối khi chịu tác dụng nổ gần. Kết quả mô phỏng được so sánh với dữ liệu thực nghiệm và đạt được sự phù hợp. Từ đó, bài báo đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình đặc biệt chịu tải trọng nổ gần.

KEYWORDS

Progressive collapse
Progressive collapse resistance
Blast loading; demolition of reinforced concrete
Holmquist-john-son-cook model
Johnson-cook model

ABSTRACT

Structures used in civil - industrial and defence fields are mostly applied by steel or reinforced concrete. Under the effect of various loading, especially dynamic loading from the explosion, the deformation of elemental sections of elastoplastic frames can reach the plasticity state, and flexible joints in the structure will be appeared. The progressive appearance of these flexible joints let the structural system's stiffness reduce and limited deformation may be appeared. The progressive collapse of the structure will occur whenever the local bearing of the structure is failed. However, studying the effects of explosive loading on structures is a very complicated problem with large errors. In Vietnam, the issues currently have been solved by using some experimental loading formulas and still lacking the progressive collapse process method. The paper is focused on using numerical simulation to analyze the progressive collapse of a monolithic reinforced concrete frame under the influence of contact blast loading. The simulation results are compared with the experimental data. The matching between them is still reached. Hence, the proposes of progressive resistance solutions for special structures also offered.

1. Giới thiệu

Từ sự sụp đổ lũy tiến (SĐLT) của tòa nhà liên bang Alfred P. Murrah và đặc biệt sự sụp đổ lũy tiến của Trung tâm Thương mại Thế giới (Mỹ) do vụ nổ và va chạm - vấn đề nghiên cứu sụp đổ lũy tiến đối với các công trình cùng các phương pháp tính toán kết cấu phục vụ cho thiết kế kháng sập lũy tiến đã trở nên cấp bách và bắt đầu được quan tâm, ngày càng phát triển rất mạnh mẽ trên thế giới. 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 gần 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 gần 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 gần [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 gần, 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 [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 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 rất phức tạp. Khả năng chịu tác động tải trọng nổ gần 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 chi 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 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 gần, 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

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) toàn khối chịu tác dụng nổ gần 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

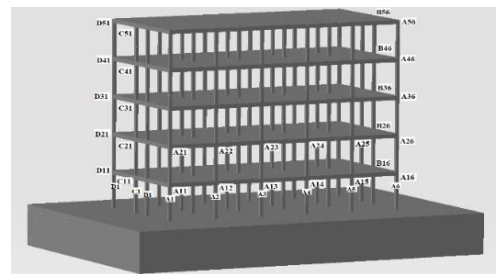
Các công trình đặc biệt phục vụ lưỡng dụng vừa cho mục đích dân sự vừa cho mục đích an ninh Quốc phòng khi có các sự cố như khủng bố, chiến tranh. Trong nghiên cứu này tác giả nghiên cứu công trình gồm có 5 tầng nổi và một tầng hầm, các tầng của tòa nhà phục vụ cho các mục đích dân sự trong điều kiện 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 4 Ø 22, thép đai Ø 6 a 200; Dầm có tiết diện 0,35 x 0,35 m, cốt thép chịu lực 4 Ø 20, thép đai Ø 6 a 200; Sàn các tầng nổi có chiều dày 0,1 m bố trí 2 lớp thép Ø 8 a 200; Tầng hầm cấu tạo bằng vách BTCT có chiều dày 0,3 m bố trí 2 lớp thép Ø 16 a 200. 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 2737-1995. 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

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	$11,292 \cdot 10^9$	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}
$3,24 \cdot 10^6$	$41,305 \cdot 10^6$	7	$13,768 \cdot 10^6$	0,0007	$1 \cdot 10^9$	0,08
D_1	D_2	K_1 (Pa)	K_2 (Pa)	K_3 (Pa)		
0,04	1,0	$85 \cdot 10^9$	$-171 \cdot 10^9$	$208 \cdot 10^9$		

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

khí, tương tác và truyền sang các vùng xung quanh một năng lượng nhất định [10,11]. 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 [12]. Thông qua thực hành mô phỏng số bằng việc sử dụng các mô hình cho thuốc nổ như mô hình SPH hay CONWEP để khảo sát bài toán thì việc sử dụng mô hình CONWEP cho kết quả khả quan nhất.

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 [13]. 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 chèn 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 (tương đương thép CII) được lấy theo tài liệu [14,15] 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 gần

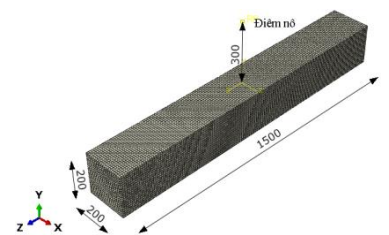
Tác giả tiến hành thử nghiệm nổ tại hiện trường để phá hoại cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5 m, tiết diện 0,2 x 0,2 m được gia cường bằng 4 thanh thép Φ 14, cốt đai Φ 6 a 200 (dùng thép CII) với chiều dày bảo vệ 0,01 m. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600 g đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 0,3 m, 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 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

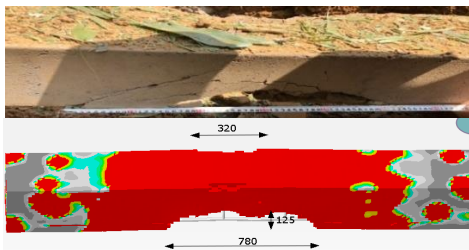
Tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Cấu kiện BTCT được mô tả như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5 mm. Lưới chịu 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. Thuộc nổ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [12]. Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (Hình 3).



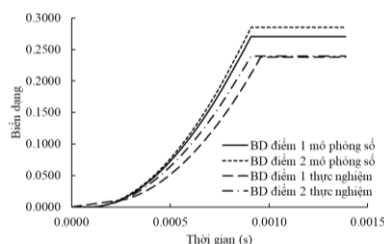
Hình 3. Mô hình hình học mô phỏng số.

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 4.



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 4.

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

	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều sâu phễu chấn sụp (mm)	125	130	3,85 %
Chiều dài phễu chấn sụp (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 13) có sự sai khác chiều sâu phễu chấn sụp 3,85 %; Chiều dài phễu chấn sụp 4,0 %; Chiều dài vùng phá hủy mặt bên 20,0 % (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) 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 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 gần bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả đó hữu ích cho mô phỏng các bài toán kháng xuyên, kháng nổ và kháng sập lỵ tiến chịu tác dụng nổ.

4. Mô phỏng số sự SĐLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng nổ gần

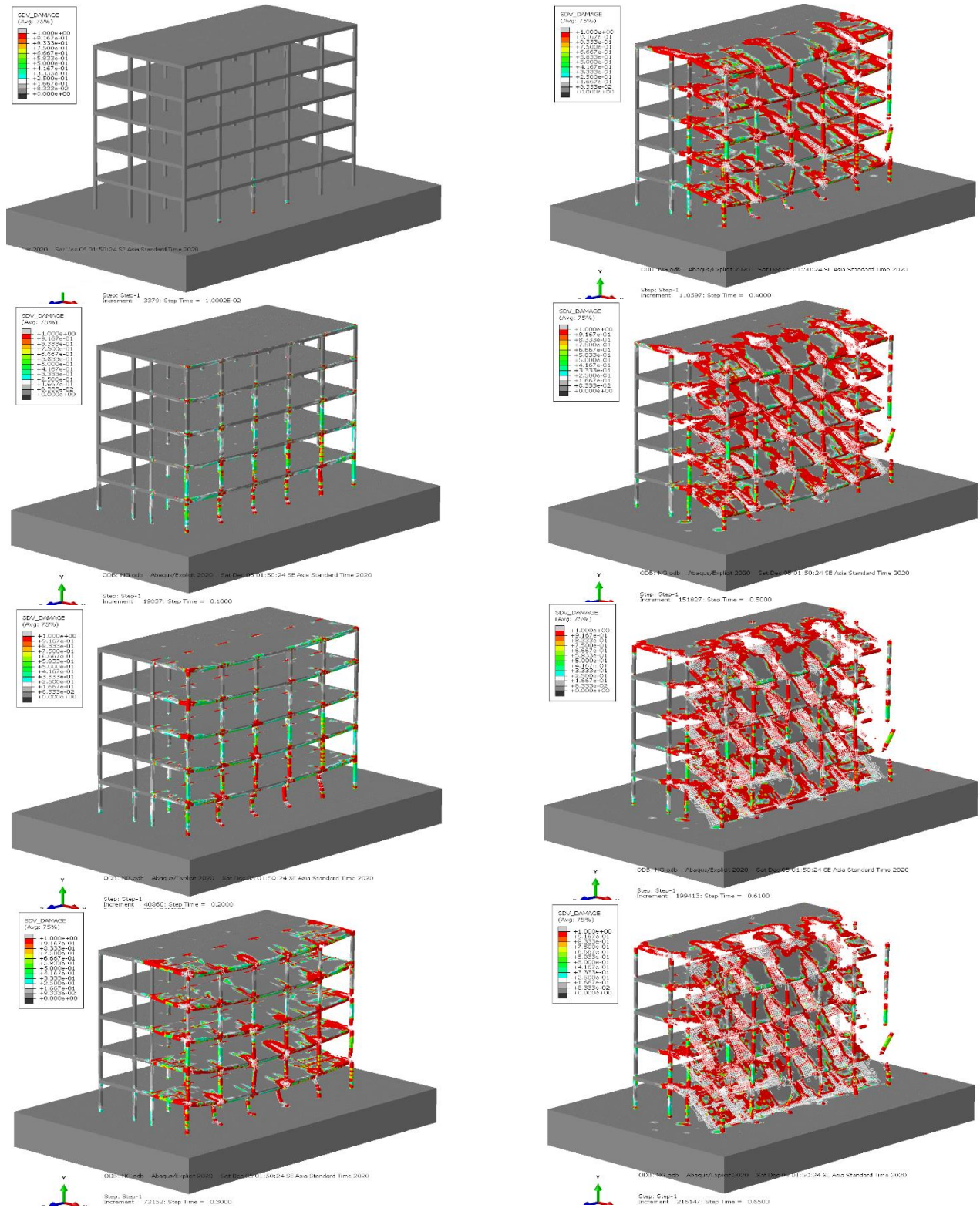
Trong mục này, tác giả tiến hành khảo sát khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần với kịch bản: Tòa nhà bị tiếp cận gần bằng xe bom chứa khối lượng 200 kg thuốc nổ TNT đặt trên sàn xe cách mặt đất 0,5 m, xe bom cách mặt trước tòa nhà 10 m, chính diện cột A3 của tòa nhà (Hình 1).

4.1. Kết quả mô phỏng số

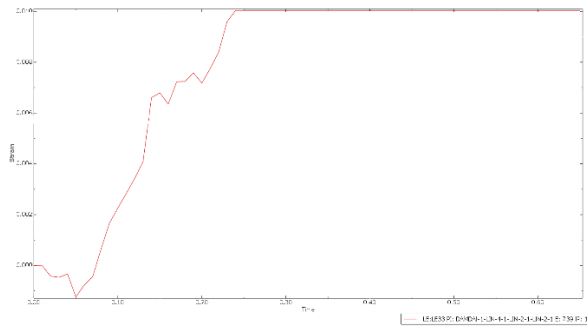
Kết quả mô phỏng số sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong Hình 6 và Hình 7.

4.2. Nhận xét kết quả

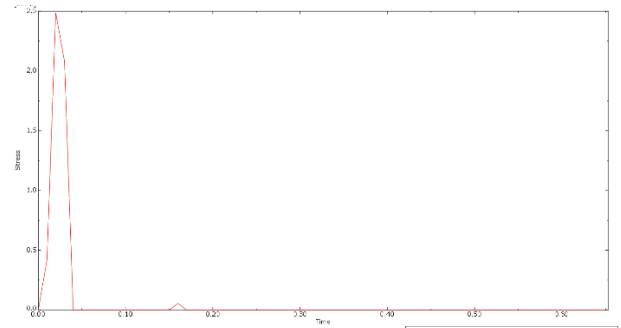
Sau khi bị lượng nổ 200 kg TNT nổ cách công trình 10 m, tải trọng sóng xung kích được duy trì khoảng thời gian 0,03 s, cột A3 bắt đầu hình thành vùng phá hủy phía dưới chân cột, tiếp đến vùng phá hủy lan tới các đầu cột và chân cột A1, A2, A3, A4, A5. Tại thời điểm 0,1s các cột A2, A3, A4,



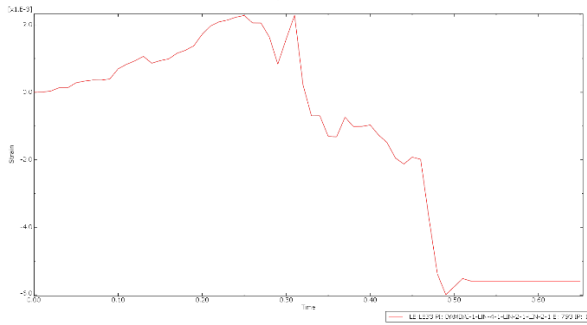
Hình 6. Quá trình SDLT của khung BTCT chịu tác dụng của nỗ gần tại các thời điểm 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.



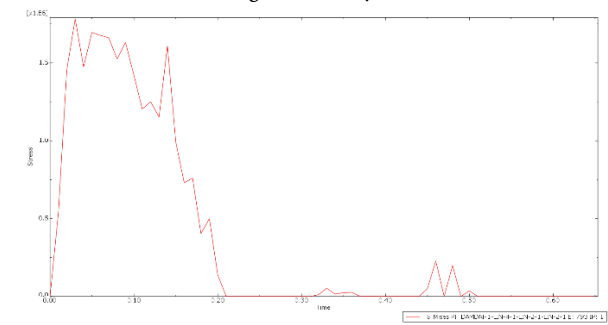
(a) Biến dạng LE33 tại PT 739



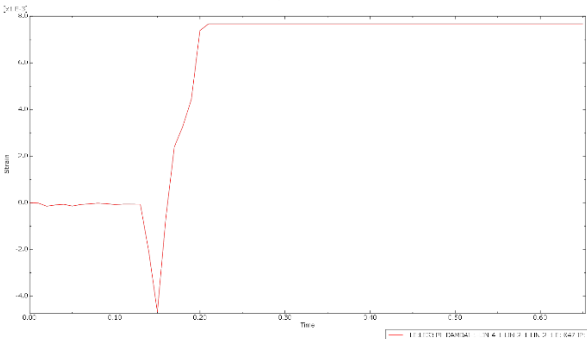
(d) Ứng suất mises tại PT 739



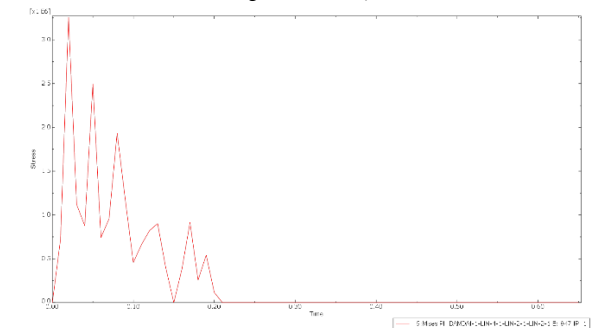
(b) Biến dạng LE33 tại PT 793



(e) Ứng suất mises tại PT 793



(c) Biến dạng LE33 tại PT 847



(f) Ứng suất mises tại PT 847

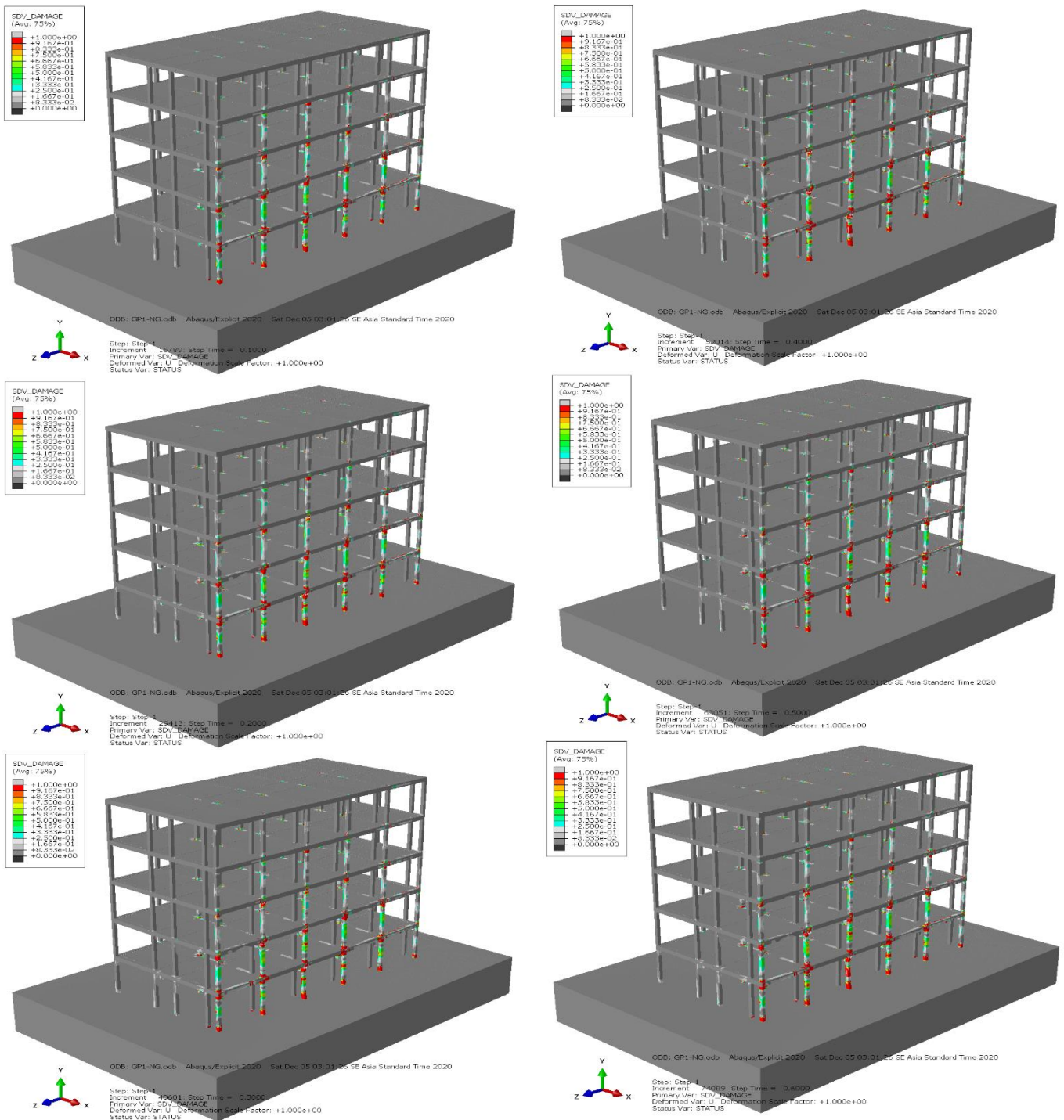
Hình 7. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

A5 gần như bị phá hủy và mất khả năng chịu lực hoàn toàn. Trong những thời điểm tiếp theo 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 A11, A12, A13, A14, A15, A16 (tầng 1); A21, A22, A23, A24, A25, A26 (tầng 2); A31, A32, A33, A34, A35, A36 (tầng 3); A41, A42, A43, A44, A45, A46 (tầng 4) và A51, A52, A53, A54, A55, A56 (tầng 5), tiếp đó sự phá hủy lan nhanh lên các dầm và sàn trục A-B và B-C lần lượt từ tầng 1 đến tầng 5. Quá trình phá hủy lũy tiến diễn ra rất nhanh sau 0,65 s một nửa của tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ (Hình 6).

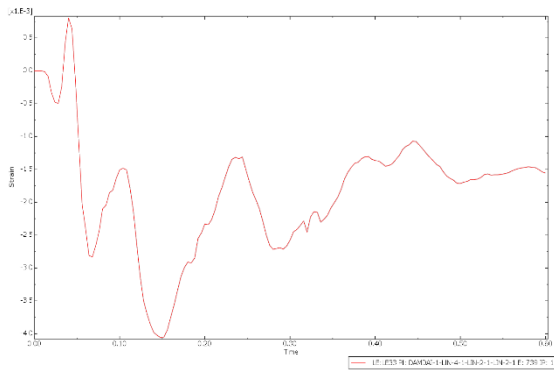
Trên Hình 7, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và

giữa dầm (PT 793) nối nút A22 và A23. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các phần tử đó tăng đến thời điểm 0,2 s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

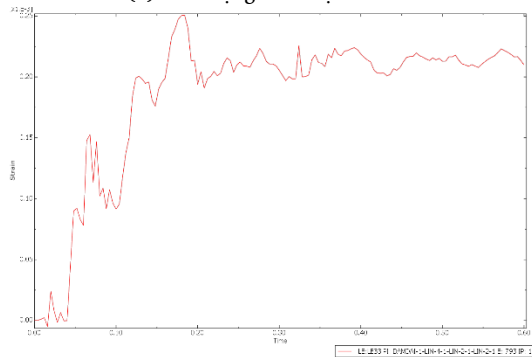
Như vậy, có thể thấy dưới tác dụng của vụ nổ gần, đồng thời các cột A2, A3, A4 bị phá hủy do sóng xung kích, sóng xung kích cũng gây ra những vùng phá hoại nhỏ trên các dầm, ngay sau đó tải trọng được phân bố lại cho các cấu kiện còn lại, nội lực trong các cấu kiện đó tăng lên đột ngột vượt quá khả năng 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 SĐLT rất nhanh chóng cho công trình.



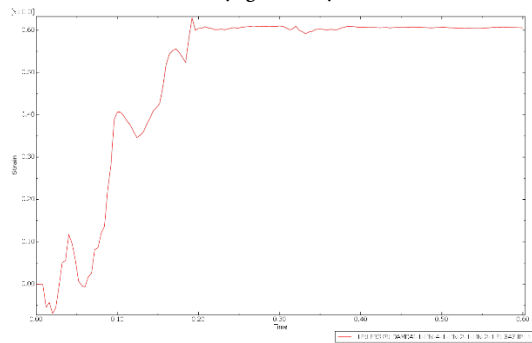
Hình 8. Quá trình phá hủy của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6s.



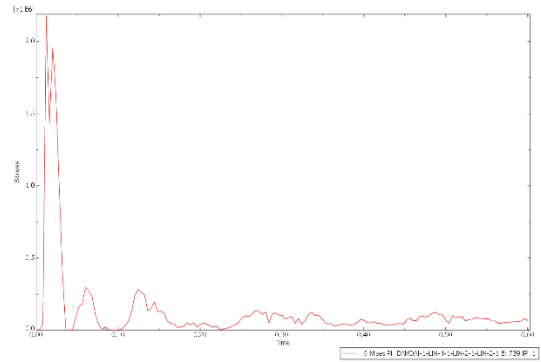
(a) Biến dạng LE33 tại PT 739



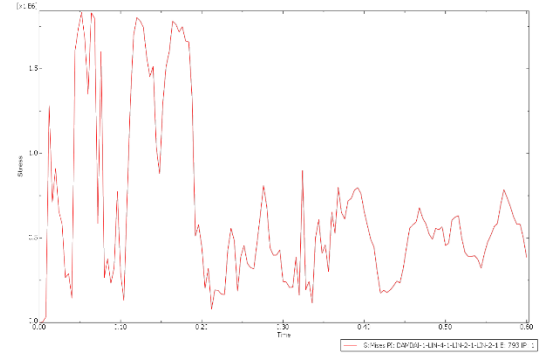
(b) Biến dạng LE33 tại PT 793



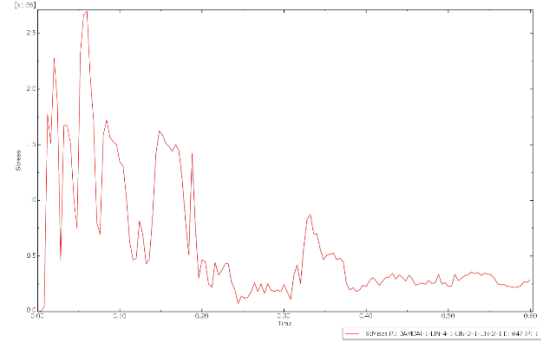
(c) Biến dạng LE33 tại PT 847



(d) Ứng suất mises tại PT 739



(e) Ứng suất mises tại PT 793



(f) Ứng suất mises tại PT 847

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

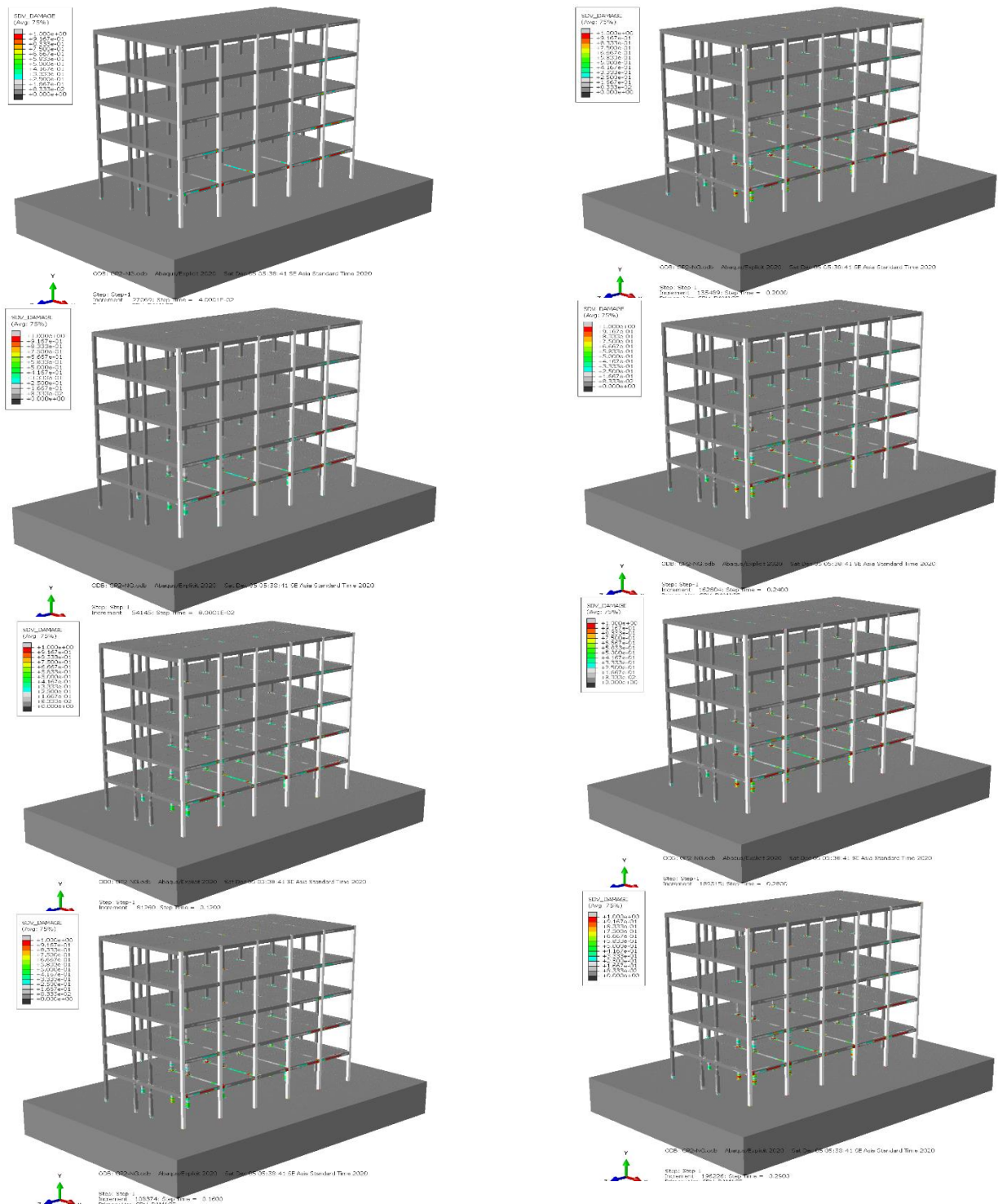
5. Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

Sau khi tiến hành khảo sát sự sụp đổ lũy tiến khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp gần, cho thấy sự phá hoại lũy tiến trong trường hợp này xảy ra với mức độ lớn hơn và thời gian phá hoại diễn ra nhanh hơn do gần như các cột ở vùng gần tâm nổ (A2, A3, A4) đều bị phá hoại với các mức độ khác nhau. Tác giả đề xuất một số giải pháp kháng sập như sau: Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm cột phụ; giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy; giải pháp thứ ba - bố trí tường chắn sóng nổ.

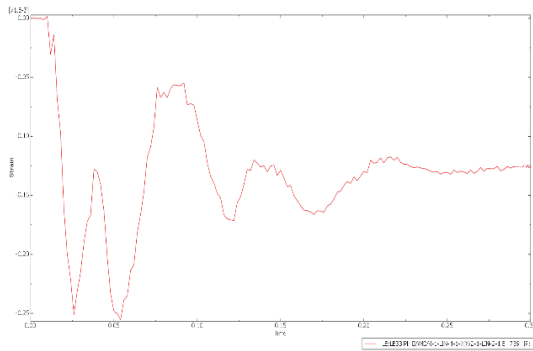
5.1. Giải pháp thêm cột phụ để kháng sập lũy tiến của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

Kết quả mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ kháng sập lũy tiến của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong Hình 8 và 9.

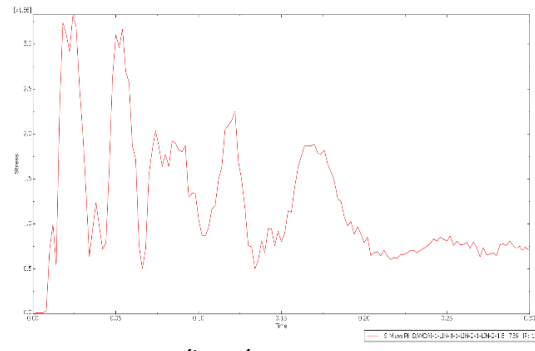
Với giải pháp thêm cột phụ ngay sau vị trí hàng cột bị phá hủy do lượng nổ gần (hàng cột trực A), ngay sau khi sóng xung kích của vụ nổ gây phá hoại cục bộ hàng cột và một số dầm trên trực A, tải trọng được phân bố lại và có thể thấy toàn bộ tải trọng của hàng cột trực A (cột A1, A2, A3, A4,



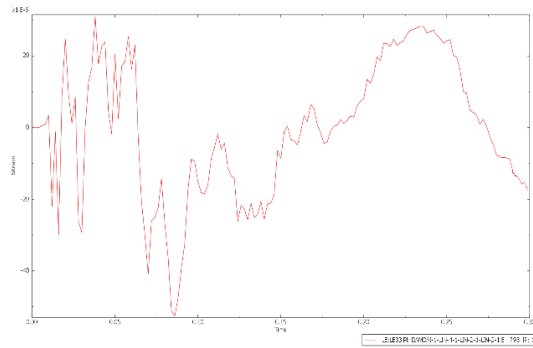
Hình 10. Quá trình phá hủy của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nỗ gần cố bực thép cột tại các thời điểm 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2; 0,24; 0,28; 0,29s.



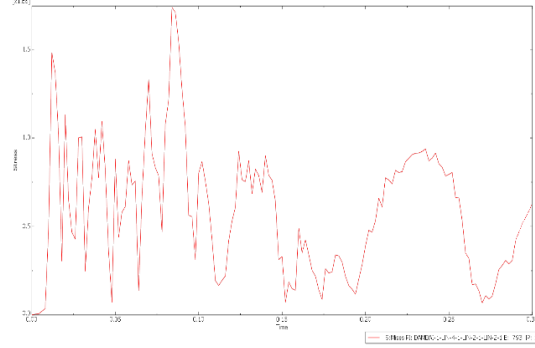
(a) Biến dạng LE33 tại PT 739



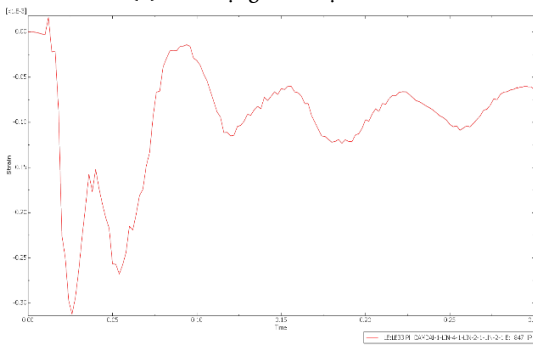
(d) Ứng suất mises tại PT 739



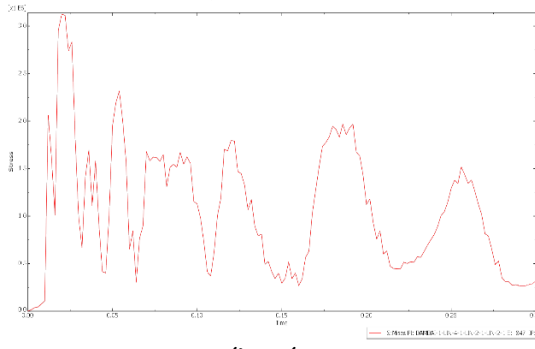
(b) Biến dạng LE33 tại PT 793



(e) Ứng suất mises tại PT 793



(c) Biến dạng LE33 tại PT 847



(f) Ứng suất mises tại PT 847

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

A5, A6) lúc này đã tác dụng lên cột phụ CP, do vậy trong quá trình phân tích kết cấu chỉ bị phá hủy một phần nhỏ trên cột và dầm của trục A, không còn xảy ra sự phá hoại lũy tiến như trong trường hợp không có cột phụ (Hình 8).

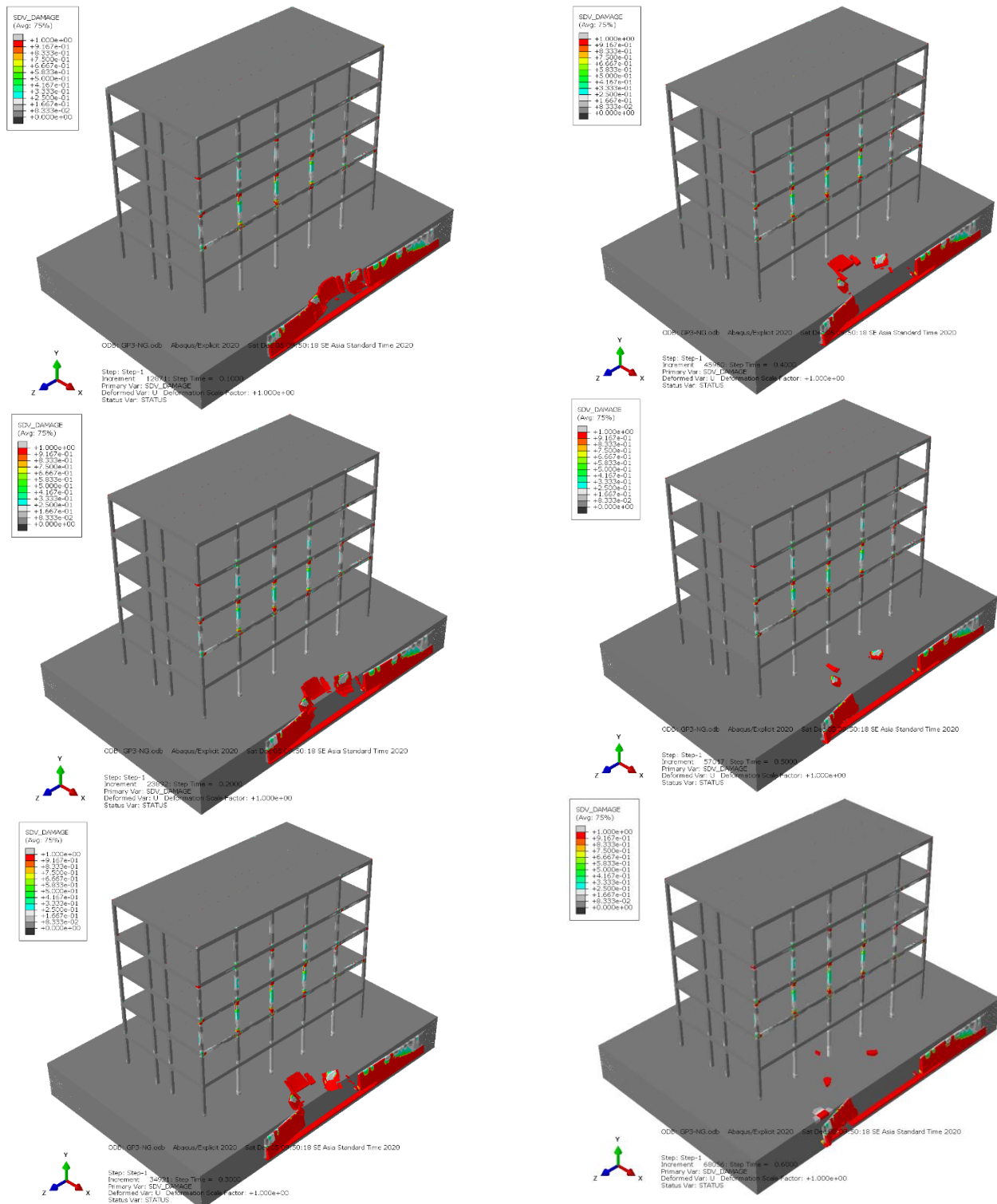
Trên Hình 9, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và giữa dầm (PT 793) nối nút A22 và A23. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,2 s sau đó dần dần ổn định.

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

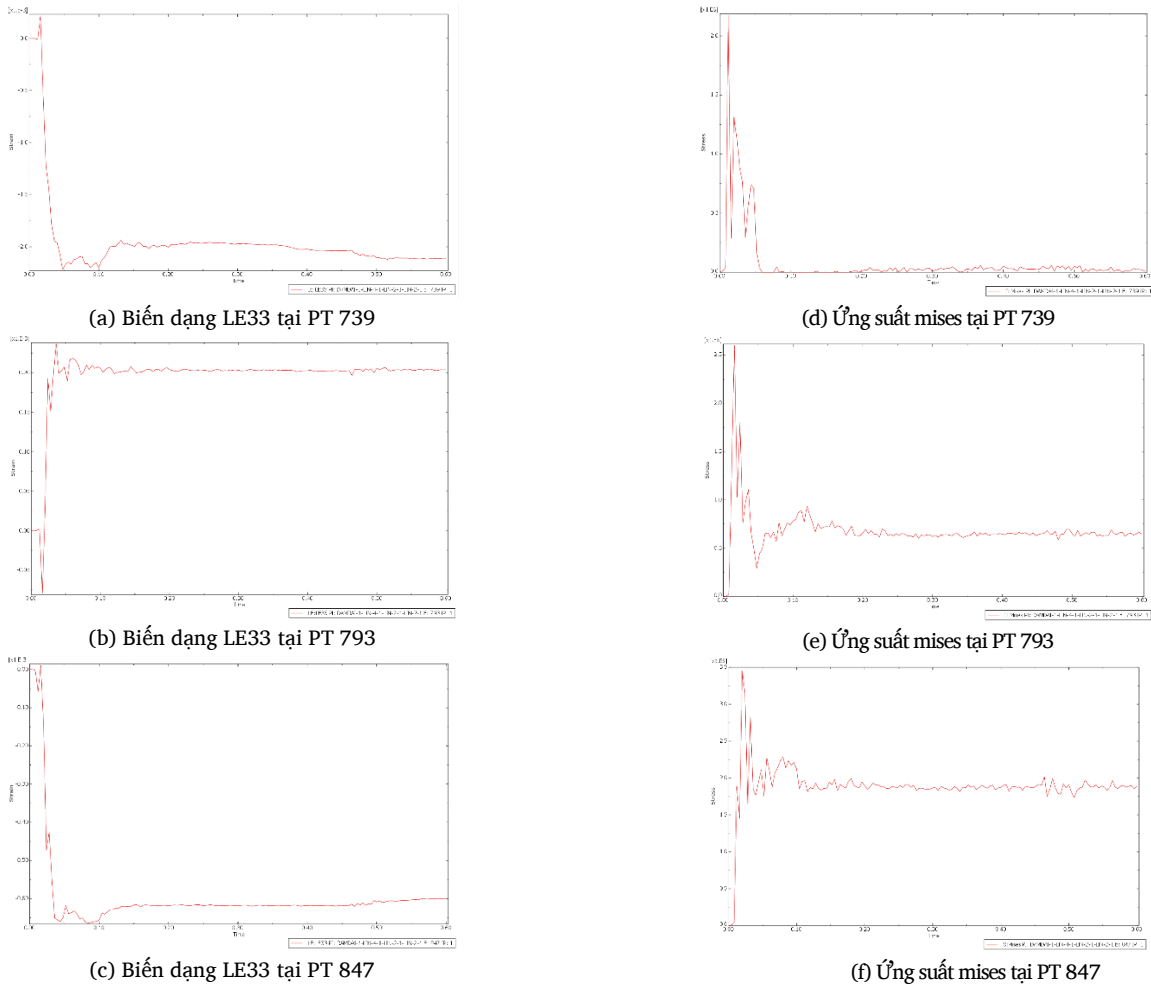
5.2. Giải pháp bọc thép cột để KSLT của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

Kết quả mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong Hình 10 và 11.

Với giải pháp bọc thép hàng cột trục A (cột A1, A2, A3, A4, A5 và A6) - hàng cột này bị tác dụng trực tiếp của sóng xung kích khi nổ gần, ngay sau khi nổ lớp bọc thép bị chảy dẻo một phần ngay tại một số vị trí, bê tông trong hàng cột trục A bị tác động tuy nhiên không đến trạng thái bị phá hủy do một phần lớn năng lượng nổ được lớp bọc



Hình 12. Quá trình phá hủy của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có tường chắn sóng tại các thời điểm 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 s.



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

thép hấp thụ, vùng phá hủy vẫn xuất hiện trên một số dầm trục A tuy nhiên quá trình phá hoại lũy tiến đã không xảy ra do các cột trục A vẫn còn khả năng chịu lực, 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 dọc trục và ứng suất mises tại phần tử đó tăng đến thời điểm 0,1 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 gần.

5.3. Giải pháp tường chắn sóng để KSLT của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

Kết quả mô phỏng số giải pháp tường chắn sóng để kháng sập lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong Hình 12 và 13.

Với giải pháp sử dụng tường chắn sóng nổ bằng bê tông đặt giữa công trình và vị trí nổ khoảng cách tương ứng là 7 m và 3 m khi nổ gần, ngay sau khi nổ sóng xung kích tác dụng và phá hủy tường chắn sóng. Trên toàn nhà xuất hiện một số vùng tiến tới trạng thái có thể bị phá hủy tại các nút A21, A22, A23, A24, A25 (tầng 2); A31, A32, A33, A34 (tầng 3); A41, A42, A43 (tầng 4), bê tông tại các nút này bị tác động tuy nhiên không đến trạng thái bị phá hủy do một phần lớn năng lượng nổ bị suy giảm rất nhanh theo khoảng cách, quá trình phá hoại lũy tiến đã không xảy ra do các cột trục A vẫn còn khả năng chịu lực, 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 0,06s sau đó dần dần ổn định.

Như vậy, với giải pháp sử dụng tường chắn sóng nổ bằng bê tông cho thấy có thể chống lại sự sụp đổ lũy tiến cho công trình khi chịu tải trọng nổ gần.

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 toàn khối chịu tác dụng nổ gần 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 gần, sau khi bị lượng nổ gần phá hủy các cột ở vùng gần tâm nổ (A2, A3, A4) 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 0,65 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); giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy (sử dụng thép tấm dày 10 mm bọc tại vị trí cột bị phá hủy) và giải pháp thứ ba - bố trí tường chắn sóng 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 gần 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, bọc thép cột và tường chắn sóng 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 sụp đổ lũy tiến đối với các công trình phục vụ cho an ninh Quốc phòng.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Li and H. Hao, "A Two-Step Numerical Method for Efficient Analysis of Structural Response to Blast Load," *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 2, no. 1, pp. 103-126, Mar. 2011, doi: 10.1260/2041-4196.2.1.103.
- [2] J. Dragos and C. Wu, "Interaction between direct shear and flexural responses for blast loaded one-way reinforced concrete slabs using a finite element model," *Eng. Struct.*, vol. 72, pp. 193-202, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.043.
- [3] C. A. Kot, R. A. Valentin, D. A. McLennan, and P. Turula, "Effects of air blast on power plant structures and components," Argonne National Lab., IL (USA). NUREG/CR-0442, ANL-CT-78-41, 6611172, Oct. 1978. doi: 10.2172/6611172.
- [4] C. A. Kot, "Spalling of concrete walls under blast load," presented at the 4 International conference on structural mechanics in reactor technology, Commission of the European Communities (CEC), 1977.
- [5] M. K. McVay, "Spall Damage of Concrete Structures," Vicksburg, MS: U.S. Army Waterways Experiment Station, Technical Report SL-88-22, Jun. 1988.
- [6] W. Wang, D. Zhang, F. Lu, S. Wang, and F. Tang, "Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 27, pp. 41-51, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.07.010.
- [7] K. A. Marchand *et al.*, *Concrete hard target spall and breach model*. Eglin Air Force Base, Fla.: Air Force Research Laboratory, Munitions Directorate, Lethality & Vulnerability Branch, 1998.
- [8] B. D. Le *et al.*, "Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu tác động tải trọng nổ của vật liệu bê tông chất lượng siêu cao," *Tap Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng NUCE*, vol. 13, no. 3V, pp. 12-21, 2019.
- [9] "ABAQUS Theory Manual, revision 2020," Pawtucket, Rhode Island, USA, 2020.
- [10] W. McGuire, "Prevention of Progressive Collapse," presented at the Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1974.
- [11] B. A. Izzuddin, "Simplified assessment of structural robustness for sudden component failures," COST Action TU0601, 1st Workshop on Robustness of Structures, ETH Zurich, Switzerland, 2008.
- [12] "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions." UFC (Unified Facilities Criteria), UFC 3-340-02. U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency, 2008.
- [13] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, and W. H. Cook, "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, Sep. 1993, pp. 591-600.
- [14] G. R. Johnson and W. Cook, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," presented at the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1993.
- [15] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31-48, Jan. 1985, doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.