

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

=====o O o=====

PHAN THÀNH TRUNG

**NGHIÊN CỨU SỰ ĐỔ LŨY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG
CỐT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TÁC DỤNG NỔ VÀ ĐỀ XUẤT
MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SẬP**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

=====o O o=====

Phan Thành Trung

**NGHIÊN CỨU SỰP ĐỒ LỮY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG
CỘT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TÁC DỤNG NỔ VÀ ĐỀ XUẤT
MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SẬP**

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình đặc biệt

Mã số: 9 58 02 06

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1.GS. TSKH Nguyễn Văn Hợi

2.GS.TS Nguyễn Quốc Bảo

Hà Nội - 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận án

Phan Thành Trung

LỜI CẢM ƠN

Tác giả luận án xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đối với thầy giáo đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ và đề xuất nhiều ý tưởng khoa học có giá trị giúp cho tác giả hoàn thành luận án nghiên cứu này. Tác giả luôn trân trọng sự động viên, khuyến khích và những kiến thức khoa học cũng như chuyên môn mà các Giáo sư đã chia sẻ cho tác giả trong nhiều năm qua giúp cho tác giả nâng cao năng lực khoa học và củng cố lòng yêu nghề.

Tác giả trân trọng cảm ơn tập thể bộ môn Xây dựng Công trình Quốc phòng, Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, phòng Sau đại học - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện và giúp đỡ tác giả trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Cuối cùng tác giả muốn bày tỏ lòng biết ơn đối với những người thân trong gia đình đã thông cảm, động viên và chia sẻ khó khăn với tác giả trong suốt thời gian làm luận án.

Tác giả

Phan Thành Trung

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	ii
LỜI CẢM ƠN	iii
MỤC LỤC	iv
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	viii
DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	xi
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	5
1.1 Tổng quan về sự sụp đổ lũy tiến của công trình	5
1.1.1 Sụp đổ lũy tiến của công trình nhà cửa	5
1.1.2 Sụp đổ lũy tiến của công trình cầu và các công trình khác	10
1.2 Các giải pháp thiết kế kháng sụp lũy tiến	11
1.2.1 Kiểm chế sự kiện (event control)	11
1.2.2 Thiết kế gián tiếp (indirect design)	12
1.2.3 Thiết kế trực tiếp (direct design)	12
1.2.3.1 Phương pháp kháng cục bộ đặc biệt (The Specific Local Resistance Method)	12
1.2.3.2 Phương pháp đường dẫn tải thay thế (Alternate Load Path Method)	13
1.3 Tiêu chuẩn và quy phạm	13
1.3.1 Sự hình thành các tiêu chuẩn và quy phạm liên quan đến thiết kế kháng sụp lũy tiến .	13
1.3.2 Các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế hiện nay của Mỹ	15
1.3.2.1 Bộ tiêu chuẩn xây dựng quốc tế IBC	15
1.3.2.2 Bộ Tiêu chuẩn an toàn ISC	16
1.3.2.3 Hướng dẫn thiết kế của Bộ quốc phòng DoD	16
1.3.2.4 Hướng dẫn thiết kế GSA	17
1.3.2.5 Các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế liên quan đến tác dụng nổ	19
1.4 Các phương pháp phân tích kháng sụp lũy tiến của kết cấu	19
1.4.1 Sử dụng phương pháp PTHH và các phần mềm tính toán thương mại	20
1.4.2 Sử dụng phương pháp phần tử rời rạc mở rộng EDEM	26
1.4.3 Sử dụng phương pháp thay đổi điểm tích phân thích ứng ASI	27
1.5 Kết luận chương 1	28
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÂY DỰNG MÔ HÌNH VẬT LIỆU, MÔ HÌNH TÍNH TRONG MÔ PHỎNG SỐ PHÂN TÍCH SỰ PHÁ HOẠI LŨY TIẾN CỦA KẾT CẤU CHỊU TÁC DỤNG NỔ	30
2.1 Mở đầu	30
2.2 Mô phỏng ứng xử cơ học của bê tông	31
2.2.1 Mô phỏng ứng xử của bê tông trong giới hạn đàn hồi	31
2.2.2 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo lý thuyết cơ học rạn nứt bê tông	32
2.2.3 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật đàn hồi-dẻo	33
2.2.4 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật đàn hồi-dòn	34
2.2.5 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật kết hợp	34

2.3 Mô phỏng ứng xử cơ học của cốt thép	35
2.3.1 Mô hình phá hủy vật liệu thép trên cơ sở cơ học môi trường liên tục	37
2.3.2 Mô hình phá hủy trên cơ sở quan sát hiện tượng	38
2.4 Cơ sở lý thuyết tính toán trong bài toán nghiên cứu.....	39
2.4.1 Vùng thuốc nổ	39
2.4.2 Vùng gần tâm nổ	39
2.4.3 Vùng không khí.....	41
2.4.4 Vùng kết cấu công trình	41
2.4.4.1 Phương pháp lưới Lagrange.....	42
2.4.4.2 Phương pháp hạt không lưới SPH	46
2.3.4.3 Phương pháp lưới Euler	50
2.5 Phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration)	51
2.6 Xây dựng mô hình vật liệu, mô hình tính trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để phân tích sự SDLT của kết cấu	56
2.6.1 Giới thiệu về ABAQUS	56
2.6.2 Xây dựng mô hình vật liệu bài toán nghiên cứu	57
2.6.2.1 Mô hình vật liệu bê tông.....	57
2.6.2.1.1 Phương trình trạng thái.....	58
2.6.2.1.2 Mô hình bền.....	59
2.6.2.1.3 Mô hình phá hủy.....	60
2.6.2.1.4 Tham số mô hình vật liệu bê tông.....	60
2.6.2.2 Mô hình vật liệu thép.....	60
2.6.2.2.1 Phương trình trạng thái.....	60
2.6.2.2.2 Mô hình bền.....	61
2.6.2.2.3 Mô hình phá hủy.....	61
2.6.2.2.4 Tham số mô hình vật liệu thép.....	61
2.6.2.3 Mô hình vật liệu nổ TNT	62
2.6.2.4 Mô hình không khí.....	62
2.7 Kết luận của chương 2.....	62
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ MÔ HÌNH VẬT LIỆU VÀ HIỆU CHỈNH MÔ HÌNH TÍNH TRONG PHÂN TÍCH SỰ SỤP ĐỔ LỬU TIẾN CỦA CÔNG TRÌNH CHỊU TẢI TRONG NỔ	63
3.1 Mở đầu.....	63
3.2 Xác định tham số mô hình vật liệu trong bài toán nghiên cứu	63
3.2.1 Tham số mô hình vật liệu bê tông.....	63
3.2.2 Tham số mô hình vật liệu thép.....	73
3.2.3 Tham số mô hình vật liệu thuốc nổ TNT	73
3.2.4 Tham số mô hình không khí	73
3.3 Thử nghiệm nổ tại hiện trường và mô phỏng số để xác nhận mô hình vật liệu, hiệu chỉnh mô hình tính của bài toán nghiên cứu	74
3.3.1 Thử nghiệm nổ hiện trường	74

3.3.1.1 Chuẩn bị mô hình thử nghiệm	74
3.3.1.2 Thiết bị thí nghiệm	75
3.3.1.3 Thuốc nổ và kíp nổ điện.....	77
3.2.1.4 Trình tự thí nghiệm.....	78
3.2.1.5 Kết quả thí nghiệm	79
3.3.2 Mô phỏng số cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc và nổ gần	82
3.3.2.1 Mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ tiếp xúc.....	83
3.3.2.1.1 Mô hình hình học cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc.....	83
3.3.2.1.2 Mô hình vật liệu.....	84
3.3.2.1.3 Kết quả mô phỏng số nổ tiếp xúc	84
3.3.2.1.4 So sánh kết quả nổ tiếp xúc.....	87
3.3.2.2 Mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần.....	89
3.3.2.2.1 Mô hình hình học cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần	89
3.3.2.2.2 Mô hình vật liệu.....	90
3.3.2.2.3 Kết quả mô phỏng số nổ gần	91
3.3.2.2.4 So sánh kết quả nổ gần.....	93
3.4 Kết luận của chương 3.....	94
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU SỰ ĐỔ LŨY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG CỐT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TÁC DỤNG NỔ VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SẬP.....	96
4.1 Mở đầu.....	96
4.2 Đặt bài toán.....	97
4.2.1 Mô hình hình học của bài toán nghiên cứu	97
4.2.2 Mô hình vật liệu sử dụng trong bài toán nghiên cứu.....	98
4.2.3 Các giải pháp gia cố kháng sập sử dụng trong bài toán nghiên cứu.....	99
4.2.4 Các bài toán nghiên cứu	99
4.3 Nghiên cứu sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc.....	100
4.3.1 Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A1 (Kịch bản 1)	100
4.3.1.1 Mô hình bài toán.....	100
4.3.1.2 Kết quả mô phỏng số.....	100
4.3.1.3 Nhận xét kết quả.....	103
4.3.2 Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 (Kịch bản 2)	104
4.3.2.1 Mô hình bài toán.....	104
4.3.2.2 Kết quả mô phỏng số.....	104
4.3.2.3 Nhận xét kết quả.....	107
4.4 Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến trong trường hợp khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3.....	108

4.4.1 Giải pháp thêm cột phụ để KSLT của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3	108
4.4.1.1 Mô hình bài toán.....	108
4.4.1.2 Kết quả mô phỏng số.....	108
4.4.1.3 Nhận xét kết quả.....	111
4.4.2 Giải pháp bọc thép cột để KSLT của khung BTCT chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3	112
4.4.2.1 Mô hình bài toán.....	112
4.4.2.2 Kết quả mô phỏng số.....	112
4.4.2.3 Nhận xét kết quả.....	114
4.5 Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần	115
4.5.1 Mô hình bài toán.....	115
4.5.2 Kết quả mô phỏng số.....	115
4.5.3 Nhận xét kết quả	118
4.6 Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến trong trường hợp khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần.....	119
4.6.1 Giải pháp thêm cột phụ để KSLT của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần	119
4.6.1.1 Mô hình bài toán.....	119
4.6.1.2 Kết quả mô phỏng số.....	120
4.6.1.3 Nhận xét kết quả.....	122
4.6.2 Giải pháp bọc thép cột để KSLT của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần	123
4.6.2.1 Mô hình bài toán.....	123
4.6.2.2 Kết quả mô phỏng số.....	123
4.6.2.3 Nhận xét kết quả.....	125
4.6.3 Giải pháp tường chắn sóng để KSLT của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần.....	126
4.6.3.1 Mô hình bài toán.....	126
4.6.3.2 Kết quả mô phỏng số.....	126
4.6.3.3 Nhận xét kết quả.....	129
4.7 Kết luận của chương 4.....	130
KẾT LUẬN CHUNG.....	132
I. Các kết quả mới và chính của luận án	132
II. Phương hướng nghiên cứu tiếp theo	132
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ	
TÀI LIỆU THAM KHẢO	
PHỤ LỤC	

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

R_P	Bán kính vùng phá hoại
K_P	Hệ số vùng phá hoại phụ thuộc tính chất môi trường
K_T	Hệ số qui đổi thuốc nổ sang thuốc nổ tiêu chuẩn TNT
Q_{TNT}	Nhiệt lượng nổ của thuốc nổ TNT
Q_X	Nhiệt lượng nổ của thuốc nổ
m_l	Hệ số lèn
T_e	Entropy
v_{in}	Thể tích riêng
A_{tn}, B_{tn}	Các hằng số đoạn nhiệt của thuốc nổ
r_1, r_2, ω	Các hằng số đoạn nhiệt của thuốc nổ
E_{tn}	Năng lượng trên đơn vị thể tích của thuốc nổ
D_n	Biến phá hủy
S	Diện tích
m_p	Khối lượng phần tử quy nút
E	Mô đun đàn hồi
G	Mô đun cắt
ν	Hệ số Poisson
f_c	Cường độ nén đơn trục
T	Độ bền kéo đơn trục
A	Cường độ kết dính chuẩn hóa
B	Hệ số làm cứng áp lực chuẩn hóa
N	Số mũ tăng cứng áp lực
S_{max}	Cường độ lớn nhất chuẩn hóa
C	Hệ số tốc độ biến dạng
μ_{crush}	Biến dạng thể tích ở giới hạn đàn hồi
P_{crush}	Giới hạn áp lực nén đàn hồi
μ_{lock}	Biến dạng thể tích ở giới hạn nén

P_{crush}	Giới hạn áp lực nén
P_o	Áp lực khi biến dạng thể tích đạt đến μ_o trước khi dỡ tải
μ_o	Biến dạng thể tích đạt được ở áp lực P_o trước khi dỡ tải
$\bar{\mu}$	Biến dạng thể tích đã sửa đổi
$K; K_2; K_3$	Hằng số vật liệu
σ^*	Ứng suất tương đương đã chuẩn hóa
P^*	Áp lực tương đương đã chuẩn hóa
T^*	Độ bền kéo chuẩn hóa
e_{fmin}	Hằng số hư hỏng của vật liệu
$D_1; D_2$	Hằng số phá hủy
m	Khối lượng
t	Thời gian
v	Vận tốc
x	Chuyển vị
D	Tham số phá hủy
e	Nội năng
p	Áp lực thủy tĩnh
s_{xx}, s_{yy}, s_{zz}	Các thành phần ứng suất lệch
s_{xy}, s_{yz}, s_{zx}	Các thành phần ứng suất lệch
q	Áp suất giả nhớt
ρ	Khối lượng riêng
ρ_o	Khối lượng riêng ban đầu
c	Vận tốc sóng âm trong môi trường
σ	Ứng suất
ε	Biến dạng
ε_p	Biến dạng dẻo
$\dot{\varepsilon}_p$	Tốc độ biến dạng dẻo
T_H	Nhiệt độ tương đương

E_e	Mô đun đàn hồi khi vật liệu thép không chứa khuyết tật
E_{eff}	Mô đun đàn hồi khi vật liệu thép chứa khuyết tật
T_{room}	Nhiệt độ phòng
T_{melt}	Nhiệt độ nóng chảy
A_t, B_t, C_t	Các hằng số vật liệu thép
n_t, m_t	Các hằng số vật liệu thép
ε_f	Giới hạn biến dạng phá hủy của thép
E_{kk}	Nội năng của đơn vị thể tích của không khí
C_0, C_1, C_2, C_3	Các hằng số của không khí
C_4, C_5, C_6	Các hằng số của không khí
m_o	Khối lượng tương đối của không khí
γ	Hệ số nhiệt dung riêng không khí
ε_{ij}	Tenxơ biến dạng
σ_{ij}	Tenxơ ứng suất
k	Độ cứng của vật liệu
k_m	Kích thước nhỏ nhất của phân tử
l	Hệ số ổn định
\ddot{x}_i	Gia tốc nút i
F_i	Lực nút tác dụng lên các điểm nút i
BTCT	Bê tông cốt thép
BT	Bê tông
SĐLT	Sụp đổ lũy tiến
PHLT	Phá hoại lũy tiến
PTHH	Phân tử hữu hạn
PT	Phân tử
CK	Cấu kiện
HJC	Holmquist-Johnson-Cook
JC	Johnson-Cook

DANH MỤC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Sập đổ do thiết kế tại kho lưu trữ thực phẩm Save-on-Foods, Canada, 1988	5
Hình 1.2. Sập đổ sân vận động Husky, Mỹ do thi công năm 1987.....	6
Hình 1.3. Sập đổ tòa nhà Ronan Point ở Luân Đôn do nổ khí ga năm 1968.....	7
Hình 1.4. Sập đổ tòa nhà văn phòng Alfred P. Murrah do thuốc nổ năm 1997	7
Hình 1.5. Sập đổ tòa tháp WTC, New York do không tặc tấn công năm 2001	8
Hình 1.6. Sập đổ tòa nhà do bão Katrina, New Orleans năm 2005	9
Hình 1.7. Sập đổ của WTC, New York do đánh bom năm 1993	9
Hình 1.8. Sập đổ của mái sân vận động Saint Petersburg, Nga năm 2020.....	10
Hình 1.9. Các kịch bản phân tích SĐLT đối với khung cứng (Smith và cộng sự, 2001).....	18
Hình 2.1. Minh họa xác định lực nút trong không gian 3 chiều	43
Hình 2.2. Chu trình tính toán trong vùng Lagrange	45
Hình 2.3. Sơ đồ thuật toán giải bài toán bằng phương pháp SPH	49
Hình 2.4. Quan hệ của hạt trung tâm với hạt lân cận và khoảng làm mịn	50
Hình 2.5. Sơ đồ tích phân theo thời gian khi sử dụng lưới Euler	51
Hình 2.6. Sơ đồ giải pháp tính toán bằng ABAQUS	54
Hình 2.7. Biểu diễn hình học các công thức của sai phân hữu hạn	55
Hình 2.8. Rời rạc hóa trong ABAQUS	56
Hình 2.9. Phương trình trạng thái.....	58
Hình 2.10. Phương trình mặt dẻo.....	59
Hình 2.11. Trạng thái phá hủy của mô hình HJC.....	60
Hình 3.1. Máy nén ba trục.....	65
Hình 3.2. Bộ mẫu thí nghiệm.....	66
Hình 3.3. Đường cong ứng suất-biến dạng nén đơn trục	67
Hình 3.4. Hình ảnh mẫu sau khi nén ép chế	68
Hình 3.5. Phương pháp chuyển đổi tham số e_{fmin}	69
Hình 3.6. Đường cong ứng suất-biến dạng của thí nghiệm lặp đơn trục.....	69
Hình 3.7. Biểu đồ ứng suất - biến dạng ở các cấp áp lực giới hõng khác nhau.....	71
Hình 3.8. Đường cong phù hợp của các giá trị B và N.....	72
Hình 3.9. Cấu kiện cột bê tông cốt thép và gối đỡ thí nghiệm	74
Hình 3.10. Mô hình thử nghiệm nổ tiếp xúc	75
Hình 3.11. Mô hình thử nghiệm nổ gần	75
Hình 3.12. Máy đo động NI SCXI-1000DC.....	76
Hình 3.13. Cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11	76
Hình 3.14. Vị trí gắn cảm biến đo biến dạng trên mô hình thử nghiệm.....	76
Hình 3.15. Máy điểm hỏa FD200.....	77
Hình 3.16. Thuốc nổ TNT	78

Hình 3.17. Kíp nổ điện số 8	78
Hình 3.18. Cấu kiện BTCT số 2 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc	79
Hình 3.19. Cấu kiện BTCT số 3 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc	79
Hình 3.20. Cấu kiện BTCT số 5 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc	79
Hình 3.21. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thực nổ tiếp xúc	80
Hình 3.22. Kết quả đo biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thực nổ tiếp xúc	80
Hình 3.23. Phá hủy phía mặt trên của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần.....	81
Hình 3.24. Chiều dài vùng chấn sục của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần.....	81
Hình 3.25. Chiều cao vùng chấn sục của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần	81
Hình 3.26. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1 và 2 trong trường hợp nổ gần	82
Hình 3.27. Mô hình hình học cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc.....	83
Hình 3.28. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc	83
Hình 3.29. Điều kiện biên của kết cấu	84
Hình 3.30. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT do nổ tiếp xúc trên mô hình mô phỏng	85
Hình 3.31. Kích thước vùng phá hủy CK BTCT nổ tiếp xúc trên mô hình mô phỏng	86
Hình 3.33. Biến dạng dọc trục tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện)	86
Hình 3.34. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số.....	87
Hình 3.35. Biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số	88
Hình 3.36. Biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số	88
Hình 3.37. Mô hình hình học cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần	89
Hình 3.38. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần.....	90
Hình 3.39. Điều kiện biên của kết cấu BTCT bị phá hủy do nổ gần.....	90
Hình 3.40. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT do nổ gần trên mô hình mô phỏng	91
Hình 3.41. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT nổ gần trên mô hình mô phỏng	92
Hình 3.42. Biến dạng dọc trục tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện) và phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện)	92
Hình 3.43. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số.....	93
Hình 3.44. Biến dạng tại điểm 1, 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số.....	93
Hình 4.1. Mô hình bài toán nghiên cứu	98
Hình 4.2. Mô hình bài toán nổ tiếp xúc đặt tại cột A1.....	100
Hình 4.3. Quá trình SĐLT của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1, tương ứng thời điểm 0,005; 0,1; 0,2; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5s.....	101
Hình 4.4. Quá trình SĐLT của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1, tương ứng thời điểm 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9s.....	102
Hình 4.5. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	103
Hình 4.6. Mô hình bài toán nổ tiếp xúc đặt tại cột A3	104

Hình 4.7. Quá trình SĐLT 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; 0,45s.....	105
Hình 4.8. 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; 0,85s.....	106
Hình 4.9. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	107
Hình 4.10. Mô hình bài toán thêm cột phụ KSLT nổ tiếp xúc đặt tại cột A3.....	108
Hình 4.11. Quá trình làm việc của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,005; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,35; 0,4s.....	109
Hình 4.12. Quá trình làm việc của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,425; 0,45; 0,475; 0,5; 0,525; 0,55; 0,575; 0,6s.....	110
Hình 4.13. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	111
Hình 4.14. Mô hình bài toán bọc thép cột để KSLT do nổ tiếp xúc đặt tại cột A3.....	112
Hình 4.15. Quá trình làm việc của khung BTCT của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi bọc thép cột tiếp xúc nổ tại các thời điểm 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24s.....	113
Hình 4.16. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	114
Hình 4.17. Mô hình bài toán SĐLT khung BTCT chịu tác dụng nổ gần.....	115
Hình 4.18. Quá trình SĐLT của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần tại các thời điểm 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3s.....	116
Hình 4.19. Quá trình SĐLT của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần tại các thời điểm 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,58; 0,61; 0,65s.....	117
Hình 4.20. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	118
Hình 4.21. Mô hình bài toán giải pháp thêm cột phụ để KSLT chịu tác dụng nổ gần.....	119
Hình 4.22. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng nổ gần có gia cường cột phụ tại các thời điểm 0,012; 0,016; 0,02; 0,028; 0,04; 0,1s.....	120
Hình 4.23. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng nổ gần có gia cường cột phụ tại các thời điểm 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6s.....	121
Hình 4.24. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	122
Hình 4.25. Mô hình bài toán giải pháp bọc thép cột để KSLT chịu tác dụng nổ gần.....	123
Hình 4.26. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có bọc thép cột tại các thời điểm 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2; 0,24; 0,28; 0,29s.....	124
Hình 4.27. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	125
Hình 4.28. Mô hình bài toán giải pháp tường chắn sóng để KSLT chịu tác dụng nổ gần..	126
Hình 4.29. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có tường chắn sóng tại các thời điểm 0,004; 0,008; 0,016; 0,028; 0,04; 0,1s.....	127
Hình 4.30. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có tường chắn sóng tại các thời điểm 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6s.....	128
Hình 4.31. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.....	129

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Các biến trong mô hình phá hủy vật liệu	35
Bảng 2.2. Các công thức phương pháp sai phân hữu hạn.....	55
Bảng 3.1. Phân loại tham số vật liệu mô hình HJC.....	64
Bảng 3.2. Cấp phối mẫu bê tông thí nghiệm sử dụng xi măng PC30	65
Bảng 3.3. Các thông số của mẫu bê tông thí nghiệm.....	66
Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm nén đơn trục	67
Bảng 3.5. Giá trị độ bền kéo đơn trục	68
Bảng 3.6. Giá trị của tham số e_{\min}	70
Bảng 3.7. Giá trị σ^* và P^*	71
Bảng 3.8. Các tham số mô hình vật liệu bê tông thí nghiệm.....	72
Bảng 3.9. Các tham số mô hình vật liệu thép.....	73
Bảng 3.10. Tham số mô hình vật liệu TNT	73
Bảng 3.11. Tham số mô hình vật liệu không khí.....	73
Bảng 3.12. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT khi nổ tiếp xúc	79
Bảng 3.13. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT khi nổ gần	82
Bảng 3.14. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng.....	87
Bảng 3.15. So sánh kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số	88
Bảng 3.16. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng.....	92
Bảng 3.17. So sánh kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số	94

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu

Các kết cấu công trình trong ngành xây dựng dân dụng - công nghiệp cũng như trong ngành xây dựng công trình Quốc phòng đa số là kết cấu khung được làm bằng các vật liệu thép, bê tông cốt thép. Các vật liệu trên có tính dẻo rõ rệt. Dưới tác dụng của các loại tải trọng, đặc biệt tải trọng động do nổ của bom đạn, biến dạng trong các tiết diện phân tử (PT) của khung với vật liệu đàn - dẻo có thể đạt đến trạng thái chảy dẻo, tạo ra các khớp dẻo trong kết cấu. Sự xuất hiện liên tiếp các khớp dẻo này làm cho độ cứng của hệ kết cấu dần bị giảm xuống so với kết cấu ban đầu và có sự phân phối lại nội lực trong hệ kết cấu. Khi số khớp dẻo trong khung đạt đến một số lượng nào đó thì kết cấu sẽ biến hình (kết cấu biến thành cơ cấu) và kết cấu hết khả năng chịu lực, dẫn đến sập đổ. Trạng thái kết cấu tương ứng với trạng thái trước thời điểm xuất hiện khớp dẻo cuối cùng làm cho kết cấu sập đổ được gọi là trạng thái giới hạn. Phương pháp tính toán - thiết kế đối với các kết cấu khung đàn - dẻo có kể đến sự xuất hiện các khớp dẻo (hoặc có kể đến tính dẻo của vật liệu) quy ước gọi là các phương pháp tính toán - thiết kế truyền thống. Lưu ý rằng, với phương pháp này, các khớp dẻo sau khi xuất hiện được coi là không bị phá hoại dù cho biến dạng (chuyển vị) dẻo của các tiết diện ở đó vẫn tiếp tục phát triển. Trong thực tế, khi chuyển vị dẻo tại các tiết diện này đạt đến một giá trị giới hạn nào đó (gọi là giá trị cực hạn) thì các khớp dẻo sẽ bị phá hoại (gọi là phá hoại dẻo). Các phương pháp tính toán - thiết kế đối với các kết cấu khung đàn - dẻo khi kể đến sự phá hoại các khớp dẻo (hay phá hoại dẻo) được coi là các phương pháp tính toán - thiết kế hiện đại.

Khi khớp dẻo bị phá hoại thì tiết diện thanh tại đó bị đứt và tách ra khỏi nút khung và nếu PT thanh có cả 2 đầu bị đứt thì PT đó tách ra khỏi kết cấu và rơi xuống, lúc đó PT được coi là bị phá hoại. Sự phá hoại dẻo xảy ra từ PT này đến PT khác trong kết cấu lan truyền như một phản ứng dây chuyền. Hiện tượng trên được gọi là phá hoại lũy tiến (PHLT) hay sụp đổ lũy tiến (SĐLT). Như đã trình bày ở trên, khi các khớp dẻo đã xuất hiện thì độ cứng của kết cấu sẽ giảm xuống, nếu kể thêm sự PHLT của các khớp và của các PT thì độ cứng của kết cấu càng suy giảm nhanh hơn, dẫn đến thời gian kết cấu bị phá hoại sẽ

diễn ra nhanh hơn so với thời gian tính toán - thiết kế theo các quan điểm truyền thống (không kể đến sự phá hoại dẻo của các khớp dẻo).

Ngày nay, thuật ngữ “phá hoại lũy tiến” hay “sụp đổ lũy tiến” được dùng với ý nghĩa tổng quát hơn - đó là sự phá hoại dây chuyền trong kết cấu khi có một PT nào đó trong hệ bị phá hoại đột ngột, không lường trước. Sự phá hoại đột ngột của PT này - được gọi là sự phá hoại ban đầu - gây ra do các tác động bất thường khác nhau, như va chạm của các máy bay không tặc vào các tòa nhà cao tầng, do sự va chạm của các phương tiện xe cộ lên các công trình trên mặt đất, do nổ của bom đạn hay các hỗn hợp khí, do động đất, bão, lũ lụt, lốc xoáy, hỏa hoạn, do lỗi xây dựng (không đảm bảo độ bền do khâu thiết kế hoặc thi công),... Đa số các phương pháp nghiên cứu, tính toán - thiết kế đối với phá hoại lũy tiến của các kết cấu thường xuất phát từ sự phá hoại đột ngột ban đầu của một PT trong hệ không cần quan tâm đến nguyên nhân gây ra phá hoại đó thuộc loại tác động nào.

Cho đến nay, các công trình nghiên cứu về phương pháp phân tích động lực học các kết cấu khung dàn dẻo chịu tác dụng nổ chủ yếu theo quan điểm truyền thống, còn ít các công trình theo quan điểm tiên tiến và hiện đại, trong đó có kể đến sự phá hoại lũy tiến của kết cấu. Đặc biệt ở Việt Nam, bài toán này rất ít được đề cập đến. Do đó, hướng đề tài của luận án được chọn là ***“Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ và đề xuất một số giải pháp kháng sụp”***.

Mục đích nghiên cứu của luận án

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết để phân tích lựa chọn: Mô hình vật liệu, mô hình tính của hệ (từ thuốc nổ, vật liệu bê tông, cốt thép...) trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để phân tích sự phá hoại lũy tiến của kết cấu bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ.

- Nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm để đưa ra các tham số mô hình vật liệu và thực nghiệm ngoài hiện trường để xác nhận mô hình vật liệu và hiệu chỉnh mô hình tính phục vụ cho việc mô phỏng số phân tích sự sụp đổ lũy tiến của của kết cấu bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ.

- Từ mô hình vật liệu và mô hình tính trên, tiến hành nghiên cứu sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ và 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 sập lũy tiến cho công trình.

Phạm vi nghiên cứu của luận án

- Chọn loại công trình đặc biệt liên quan đến lĩnh vực an ninh - Quốc phòng như sở chỉ huy, công trình phòng thủ dân sự dưới dạng kết cấu khung sàn làm bằng vật liệu bê tông cốt thép (BTCT) toàn khối.

- Kết cấu khung, sàn bê tông cốt thép toàn khối làm việc theo mô hình bài toán không gian. Phần tử nghiên cứu là phần tử khối đối với vật liệu bê tông (BT) và phần tử thanh đối với cốt thép .

- Tải trọng tác dụng lên kết cấu bao gồm: Tải trọng thiết kế (trọng lượng bản thân kết cấu, các hoạt tải sử dụng theo tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành và tải trọng nổ) và tải trọng bất thường (tải trọng nổ) gây ra sự phá hoại đột ngột của kết cấu dẫn đến sự sụp đổ lũy tiến của hệ. Chưa xét tải trọng nhiệt do cháy, tải trọng va chạm do giải phóng làm rơi các cấu kiện trong quá trình sụp đổ lũy tiến.

Phương pháp nghiên cứu

Lý thuyết kết hợp với mô phỏng số trên máy tính có tiến hành thí nghiệm trong phòng thí nghiệm và thử nghiệm hiện trường. Cụ thể, tiến hành thí nghiệm xác định các tham số của mô hình vật liệu, xác nhận mô hình đó thông qua mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS với các thực nghiệm được thực hiện tại hiện trường. Từ cơ sở đó sử dụng phần mềm ABAQUS phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ và 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 các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình.

Nội dung và cấu trúc của luận án

Luận án gồm phần mở đầu, 4 chương và phần kết luận, danh mục các tài liệu tham khảo và phụ lục.

Phần mở đầu: Nêu tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu, mục đích, phạm vi, phương pháp nghiên cứu, nội dung và cấu trúc của luận án.

Chương 1: Tổng quan

Tổng quan các tài liệu nghiên cứu về sụp đổ lũy tiến của các công trình xây dựng, các phương pháp thiết kế kháng sập lũy tiến, các tiêu chuẩn và quy phạm về thiết kế kháng sập lũy tiến, các phương pháp phân tích sụp đổ lũy tiến và các phần

mềm tính toán thương mại liên quan đến sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu, từ đó lựa chọn đề tài, mục đích, nội dung, phạm vi và phương pháp nghiên cứu của luận án.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết xây dựng mô hình vật liệu, mô hình tính trong mô phỏng số phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu chịu tác dụng nổ

Trình bày cơ sở lý thuyết để xây dựng mô hình vật liệu, mô hình tính trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ.

Chương 3: Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tham số mô hình vật liệu và hiệu chỉnh mô hình tính trong phân tích sự sụp đổ lũy tiến của công trình chịu tải trọng nổ

Tiến hành thực nghiệm trong phòng thí nghiệm để đưa ra các tham số mô hình vật liệu và thực nghiệm ngoài hiện trường để xác nhận mô hình vật liệu và hiệu chỉnh mô hình tính, đưa ra các tham số của mô hình vật liệu phục vụ cho việc mô phỏng số phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ.

Chương 4: Nghiên cứu sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ và đề xuất một số giải pháp kháng sập

Sử dụng mô hình vật liệu và mô hình tính phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ bằng phần mềm ABAQUS trong các trường hợp sau:

- Trường hợp 1: Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc với kết cấu và 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 các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình;

- Trường hợp 2: Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần với kết cấu và 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 các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình.

Phần kết luận chung: Đưa ra các kết quả mới và chính của luận án, phương hướng nghiên cứu tiếp theo.

Phần phụ lục: Giới thiệu các văn bản mã nguồn của các bài toán đã lập trong luận án.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1 Tổng quan về sự sụp đổ lũy tiến của công trình

Sự sụp đổ lũy tiến nhiều nhất đã xảy ra đối với công trình nhà cửa và công trình cầu. Dưới đây là các sự kiện điển hình.

1.1.1 Sụp đổ lũy tiến của công trình nhà cửa

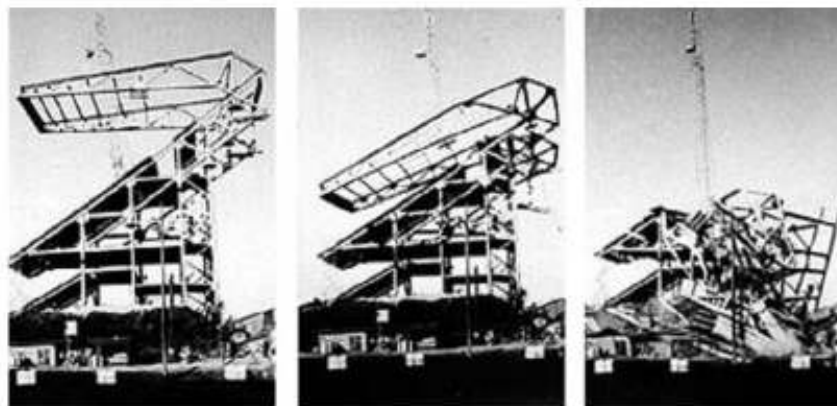
Các sự kiện sụp đổ trong quá khứ đã góp phần đáng kể vào sự phát triển thiết kế kiến trúc hiện đại, đặc biệt là về độ an toàn và tính vững chắc. Dưới đây là một số sự kiện mang tính bước ngoặt về sự SĐLT của kết cấu.

- Sự sụp đổ tẩm mái của bãi đậu xe kho lưu trữ thực phẩm Save-on-Foods ở Canada, vào ngày 23 tháng 4 năm 1988. Tại đây một phần mái bị rơi xuống gian hàng cùng với 20 chiếc xe ô tô (hình 1.1). Thiết kế không đảm bảo kỹ thuật là nguyên nhân chính dẫn đến sự cố trên của kết cấu. Sự cố sụp đổ này chủ yếu là do các sai sót trong thiết kế mà trong đó, trọng lượng bản thân của hệ dầm và cột chống mái nhà đã không được tính đến, dẫn đến sự cố mất ổn định dầm giằng [13,14].



Hình 1.1. Sụp đổ do thiết kế tại kho lưu trữ thực phẩm Save-on-Foods, Canada, 1988

- Sự cố sụp đổ mái Sân vận động Đại học Husky, Washington vào ngày 25 tháng 2 năm 1987 (hình 1.2). Nguyên nhân là do trong quá trình thi công, sáu trong số chín cột chống tạm bị dỡ bỏ sớm hơn quy định khiến 250 tấn khung thép bị nghiêng và cuối cùng là sụp đổ.



Hình 1.2. Sập đổ sân vận động Husky, Mỹ do thi công năm 1987

Các nguyên nhân khác, chẳng hạn như do vật liệu hoặc quá trình vận hành, cũng góp phần gây ra các sự cố công trình. Trong thiết kế có thể dùng các vật liệu mới, hiện đại, nhưng các lỗi do quá trình sản xuất, chế tạo vẫn tồn tại trong cả kết cấu thép hoặc bê tông cốt thép. Các lỗi do vật liệu này thường không được phát hiện và xem xét trong quá trình thiết kế hoặc giai đoạn thi công. Hầu hết các vấn đề về vật liệu là do con người gây ra, do sự thiếu hiểu biết về vật liệu hoặc sử dụng vật liệu không tương thích. Ngoài ra có thể do lỗi vận hành, các sự cố công trình có thể xảy ra do chủ đầu tư hay người sử dụng lạm dụng, không bảo trì đầy đủ.

- Sự sập đổ một phần tòa nhà Ronan Point (22 tầng) xảy ra ngày 16/05/1968 do nổ khí ga xảy ra ở tầng 18. Vụ nổ đã thổi bay tường chịu lực bê tông đúc sẵn trên tầng 18, làm các tường đỡ ở dưới sập đổ, dẫn đến các sàn ở trên sập đổ theo. Sự sập đổ phát triển lũy tiến đến tầng ngầm do các sàn trên khi sập đổ va chạm vào các sàn phía dưới (hình 1.3) và được mô tả như là sập đổ của “trò chơi xếp hình” [15]. Báo cáo điều tra chính thức đã nhanh chóng xác định rằng, vật liệu bằng đồng không đạt tiêu chuẩn để sử dụng kết nối các ống khí đốt cho bếp là nguyên nhân của vụ rò rỉ khí ga [16]. Sự sập đổ dây chuyền của các tấm sàn nhà trong sự cố này được cho là thiếu sự liên tục trong việc gia cố tại các liên kết sàn - tường và tường - tường.



Hình 1.3. Sập đổ tòa nhà Ronan Point ở Luân Đôn do nổ khí ga năm 1968

- Sự sập đổ từng phần tòa nhà văn phòng Alfred P. Murrah ở thành phố Oklahoma xảy ra vào ngày 19/4/1995 do tải trọng nổ (hình 1.4). Chi tiết của hệ thống kết cấu có thể được tìm thấy trong tài liệu [17]. Một chiếc xe tải chở khoảng 1,8 tấn TNT đã gây nổ ở khoảng cách 4,9m từ mặt phía bắc của tòa nhà. Vụ nổ đã làm hỏng ba cột ngoài và dẫn đến sự sập đổ khu vực rộng lớn ở phía bắc của tòa nhà. Sự sập đổ của tòa nhà Alfred P. Murrah là một ví dụ điển hình về sự SĐLT. Ban đầu chỉ vài cột ở khu vực nhỏ bị hư hỏng rồi lan dần, gây ra diện tích sụp đổ lớn. Các nghiên cứu sự sập đổ sau này bao gồm việc sửa đổi thiết kế kết cấu có sử dụng khung đặc biệt và các quy định chi tiết đã được phát triển có thể làm giảm diện tích sụp đổ từ 50 đến 80% [17,18,19].



Hình 1.4. Sập đổ tòa nhà văn phòng Alfred P. Murrah do thuốc nổ năm 1995

- Vụ sập đổ của tòa Tháp Trung tâm Thương mại Thế giới (WTC) vào ngày 11/9/2001 (hình 1.5) là một trong những thảm họa công trình thảm khốc nhất đã từng xảy ra trong nền văn minh hiện đại. Trong số khoảng 17.400

người dân sinh sống trong những tòa tháp, 2749 người đã thiệt mạng [20]. Vụ sập đổ xảy ra do máy bay số hiệu 767- 200ER bị không tặc cướp. WTC1 (Tòa tháp phía bắc) bị ảnh hưởng bởi va chạm đầu tiên với tốc độ khoảng 210m/s từ tầng 94 đến tầng 98 từ trung tâm của mặt phía bắc. Va chạm thứ hai xảy ra ngay sau va chạm đầu tiên với tốc độ khoảng 254m/s từ tầng 78 và tầng 84 của WTC2 (Tòa tháp phía nam) từ mặt phía đông của tháp. Mặc dù khung ngoại vi bị thiệt hại lớn - phần lớn các cột ngoại vi đã bị mất nhưng tháp không đổ ngay. WTC1 tồn tại trong 1 giờ 43 phút và WTC2 tồn tại 56 phút sau khi va chạm. Hỏa hoạn do rò rỉ nhiên liệu phản lực làm suy yếu kết cấu theo thời gian. Độ võng của kết cấu sàn do hỏa hoạn đã kéo các cột ngoại vi vào bên trong, sau đó bị uốn dọc và dẫn đến sập đổ toàn phần [19,20]. Nhóm nghiên cứu hợp tác giữa các cơ quan chính phủ và các chuyên gia kỹ thuật trong ngành công nghiệp đã được thành lập để tiến hành điều tra chi tiết [19,20]. Nghiên cứu kết luận rằng, cả hai tòa tháp WTC không thể chống chịu lại tác động không phải vì công tác phòng cháy chữa cháy không hiệu quả mà có quá nhiều trận hỏa hoạn trên sàn. Độ vững chắc vốn có là nhờ vào hệ thống kết cấu, đặc biệt là vì kèo trên mái nhà rất tốt, bền và dẻo nên giúp duy trì tòa tháp cho đến khi sụp đổ toàn phần. Tháp bị sập đổ dần dần, theo cách lũy tiến là do kết hợp cả hai yếu tố cực đoan từ tác động va chạm của máy bay và lửa. Không thể ngăn chặn sự sụp đổ của sự cố này bằng cách áp đặt những thay đổi đơn giản để thiết kế kết cấu, ngoại trừ phòng cháy chữa cháy có thể kéo dài thời gian trước khi sụp đổ toàn phần.



Hình 1.5. Sập đổ tòa tháp WTC, New York do không tặc tấn công năm 2001

Thiên tai, bao gồm động đất, bão, lũ lụt, lốc xoáy, hỏa hoạn, thường mạnh hơn rất nhiều so với những hoạt động gây ra bởi con người. Hình 1.6

cho thấy một trong những tòa nhà bị hư hỏng nặng do cơn bão Katrina ở New Orleans vào năm 2005. Theo Tapia (2001) và Hartwig (2004), những thảm họa nhân tạo gây ra bởi cuộc bạo loạn Los Angeles bạo loạn năm 1992, vụ đánh bom vào WTC năm 1993 (Hình 1.7), vụ đánh bom Oklahoma năm 1995 và vụ tấn công WTC năm 2001 dẫn đến các thiệt hại lần lượt tương đương với 775 triệu USD, 510 triệu USD, 125 triệu USD và 40 tỉ USD. Theo Văn phòng Ngân sách Quốc hội (CBO, 2002) và Holtz-Eakin (2005), các thảm họa thiên nhiên gây ra bởi bão Hurricane Andrew năm 1992, trận động đất Northridge năm 1994, trận động đất Kobe năm 1995, và cơn bão Katrina năm 2005 gây ra thiệt hại lần lượt tương ứng với 34 tỷ USD, 43 tỷ USD, 110 tỷ USD và 140 tỷ USD. Để giảm thiểu thiệt hại do động đất, FEMA ký hợp đồng dự án ATC-58 cho Hội đồng Công nghệ Ứng dụng (ATC) để phát triển các hướng dẫn thiết kế dựa trên kết quả địa chấn tiếp theo cho các tòa nhà. Triết lý thiết kế và phân tích này cũng có thể được áp dụng cho các sự cố công trình có khả năng xảy ra [21].



Hình 1.6. Sụp đổ tòa nhà do bão Katrina, New Orleans năm 2005



Hình 1.7. Sập đổ của WTC, New York do đánh bom năm 1993



Hình 1.8. Sập đổ mái sân vận động Saint Petersburg do lỗi thi công, Nga năm 2020

1.1.2 Sập đổ lũy tiến của công trình cầu và các công trình khác

Những thí dụ liên quan đến SĐLT của các công trình cầu được kể đến đầu tiên là một phần của cầu dầm liên tục Viadotto Cannavino (ở Ý) với 4 nhịp dầm liên tục, bị sập đổ trong quá trình xây dựng năm 1972. Sự cố sập cầu xảy ra do hư hỏng của đà giáo và sập đổ tiếp theo do không đảm bảo độ cứng trong giai đoạn xây dựng.

Sự sập đổ Cầu Haeng-Ju Grand (cầu dầm bê tông dự ứng lực liên tục tại Seoul, Hàn Quốc) xảy ra năm 1992 do hư hỏng trụ tạm tại vị trí nhịp chính. Nguyên nhân và vị trí hư hỏng ban đầu không được xác định chính xác, do đó sự sập đổ tiếp tục phát triển đến 10 nhịp liền kề và kết quả là 800m của cầu đã bị sập đổ hoàn toàn. Ví dụ trên liên quan đến công trình cầu đã bị sập dần dần do một hư hỏng ban đầu, trong khi đó, cầu Tasman gần Hobart, Úc năm 1975, do tác dụng của lực va xô tải trọng 7200 tấn, hai trụ của cây cầu đã bị phá hỏng và kết cấu của 3 nhịp cầu đã sập đổ nhưng 19 nhịp khác vẫn nguyên vẹn. Như vậy cầu Tasman đã xuất hiện hư hỏng ban đầu nhưng không gây ra SĐLT cho công trình.

Một thí dụ lịch sử khác là cầu Chaumont Viaduct (Pháp), một cầu đường sắt dài 600m và được hoàn thành vào năm 1856 với 50 nhịp xây khung vòm. Cứ 5 trụ thì có 1 trụ chính với tiết diện ngang theo cả hai phương gấp hai lần trụ thường. Việc bố trí như vậy đã làm việc xây dựng diễn ra thuận tiện, bởi vì mỗi đoạn gồm 5 trụ có thể được xây dựng một cách độc lập với các đoạn khác. Mặc dù mục tiêu thiết kế ban đầu không phải nhằm tăng độ cứng, nhưng kết cấu của cầu đã đứng vững qua chiến tranh thế giới lần thứ 2, khi

mà bốn trụ đã bị phá hủy nhưng không dẫn đến SĐLT. Một thí dụ khác nữa là cầu Liên hoàn, cây cầu liên bang bắc qua eo biển Northumberland giữa đảo Prince Edward và lục địa Canada. Đây là cầu bê tông dầm hộp dự ứng lực liên tục gồm 43 nhịp chính. Mỗi nhịp dài 250m và nhịp dẫn ngắn hơn ở hai đầu. Tổng chiều dài là 12910m. Kết cấu cầu này được tăng cường và kháng sập bằng đường truyền tải trọng, một sự phá hoại cục bộ ban đầu có thể được xem xét như là sự phá hoại một trụ cầu. Việc phá hoại này, lần lượt, sẽ yêu cầu thiết kế một kết cấu bê tông dự ứng lực với hai nhịp dài 500m. Việc thiết kế lựa chọn phương pháp là cô lập các phân bị sập đổ và do đó hạn chế được mức độ sập đổ bởi sự phân đoạn của kết cấu. Như vậy yêu cầu chống sụp SĐLT là một phần của các tiêu chuẩn thiết kế cầu này.

1.2 Các giải pháp thiết kế kháng sập lũy tiến

Các giải pháp thiết kế để ngăn ngừa hoặc giảm thiểu sự rủi ro SĐLT đối với công trình (gọi chung là kháng sập lũy tiến) có thể phân thành 3 nhóm chính: 1) kiểm chế sự kiện, 2) thiết kế gián tiếp và 3) thiết kế trực tiếp [22]. Trong giải pháp kiểm chế sự kiện sự nỗ lực hướng tới kiểm chế và ngăn ngừa xảy ra các tác động (tải trọng) bất thường. Giải pháp thiết kế gián tiếp nghiên cứu sức kháng SĐLT dựa trên các yêu cầu tối thiểu về độ bền, sự liên tục và độ dẻo. Cuối cùng, giải pháp thiết kế trực tiếp hướng tới khả năng của kết cấu ngăn ngừa các hư hỏng cục bộ, dẫn đến SĐLT. Dưới đây là nội dung chính của các giải pháp nói trên

1.2.1 Kiểm chế sự kiện (Event control)

Trong giải pháp này sự nỗ lực hướng tới kiểm chế và ngăn ngừa xảy ra các tác động bất thường (loại trừ sự kiện, giảm ảnh hưởng của sự kiện, bảo vệ chống lại sự kiện). Phương pháp này có thể coi là quan trọng và phù hợp khi cần tăng khả năng kháng sập lũy tiến cho các công trình có sẵn, với các công trình này khi thiết kế đã không tính đến yêu cầu kháng sập lũy tiến. Ví dụ như sử dụng barie xung quanh cột để ngăn ngừa sự va chạm của xe cộ, mở lỗ thông khí nổ để giảm áp lực xuất hiện trong tường rào bao quanh, chọn vị trí xây nhà cách xa vùng đông dân. Cần lưu ý là kiểm chế sự kiện không làm tăng sức kháng của kết cấu bởi vì quá trình thiết kế không trực tiếp hướng tới các yêu

cầu về độ bền, sự liên tục và độ dẻo của nó. Do đó, giải pháp này được coi là nằm ngoài công việc của kỹ sư kết cấu [22]. Ngược lại, hai giải pháp còn lại nằm trong tầm kiểm soát của các kỹ sư kết cấu và có thể sử dụng một cách dễ dàng khi thiết kế để đạt được mục đích mong muốn. Hai giải pháp này đang có mặt trong hầu hết các tiêu chuẩn và quy phạm thiết kế hiện hành.

1.2.2 Thiết kế gián tiếp (Indirect design)

Thiết kế này đặt ra các yêu cầu tối thiểu về độ bền, sự liên tục và độ dẻo của kết cấu để đảm bảo đủ sức kháng đối với SĐLT. Chẳng hạn, tăng cường các mối nối bằng các chi tiết đặc biệt, tăng thêm bậc siêu tĩnh, tăng thêm độ dẻo cho kết cấu - là các giải pháp được tính đến trong giải pháp gián tiếp. Thuật ngữ “tính nguyên vẹn của kết cấu tổng thể” được một số nhà nghiên cứu sử dụng để mô tả giải pháp này [23,24]. Bởi vì giải pháp này được hy vọng cải thiện phản ứng của toàn bộ kết cấu và rất thích hợp với thiết kế, nên đã được đưa vào trong hầu hết các tiêu chuẩn và quy phạm thiết kế nhà cửa. Ngoài tính phổ cập, một số nhà nghiên cứu phê phán giải pháp này bởi vì không tính đến tình huống đặc biệt khi có một phần tử nào đó bị hư hỏng đột ngột thì kết cấu sẽ ứng xử thế nào. Do đó, trong khi tính nguyên vẹn của kết cấu tổng thể được quan tâm đến, thì sức kháng đối với SĐLT lại không được đề cập tới một cách rõ ràng.

1.2.3 Thiết kế trực tiếp (Direct design)

Giải pháp này đề cập tới một cách rõ ràng đối với khả năng kết cấu chống lại SĐLT. Có 2 phương pháp cơ bản của giải pháp thiết kế này: phương pháp kháng cục bộ riêng biệt và phương pháp đường dẫn tải thay thế.

1.2.3.1 Phương pháp kháng cục bộ đặc biệt (The specific local resistance method)

Phương pháp này tạo ra điều kiện để giảm rủi ro phá hoại cục bộ. Nó đòi hỏi phần tử quan trọng (key element) của kết cấu có khả năng chống đỡ được tải trọng bất thường. Do đó, phần tử cốt lõi của kết cấu cần được thiết kế đủ độ bền và độ dẻo. Hạn chế của phương pháp này là tải trọng bất thường cực trị cần được giả thiết là đã cho trước và dữ liệu này có thể là khó xác định liên quan đến tính bất định của sự cố. Cách đơn giản nhất để thực hiện phương

pháp kháng cực bộ đặc biệt là tăng hệ số tải trọng thiết kế sao cho đảm bảo được độ bền và độ dẻo bổ sung của phần tử thiết kế. Leyendecker và Ellingwood [22] đã tổng hợp các kết quả nghiên cứu của phương pháp này - phương pháp đã được thừa nhận trong nhiều tiêu chuẩn thiết kế chủ yếu trong thời gian qua. Tuy nhiên, tiêu chuẩn thiết kế hiện hành ở Hoa Kỳ lại ưa chuộng phương pháp đường dẫn tải thay thế hơn.

1.2.3.2 Phương pháp đường dẫn tải thay thế (Alternate load path method)

Ngược lại với phương pháp trên, phương pháp này khảo sát trạng thái của kết cấu sau khi có một số phần tử nào đó bị phá hoại đột ngột, không tính đến nguyên nhân của sự cố này. Sự quan tâm hàng đầu là diễn biến đối với toàn bộ kết cấu sau sự cố nói trên chứ không phải là đối với phần tử bị phá hoại. Nói chung, phương pháp đường dẫn tải thay thế khác với các phương pháp trước, lời cuốn không những do khảo sát diễn biến hư hỏng của toàn bộ kết cấu, mà còn không phải nhận dạng tải trọng bất thường. Tư tưởng cơ bản của phương pháp này là, khi một hoặc nhiều phần tử chịu tải ban đầu bị phá hoại, thì kết cấu còn lại phải có khả năng trụ vững đối với tải trọng đang tồn tại trên kết cấu đã đặt vào và tải trọng do sự cố nói trên gây ra. Phương pháp này sẽ dẫn tới thiết kế, trong đó kết cấu có khả năng loại trừ được hư hỏng cục bộ, từ đó làm giảm và ngăn ngừa khả năng SDLT. Với phương pháp đường dẫn tải thay thế, một hoặc nhiều PT kết cấu được giả thiết bị phá hoại và khi tính toán các PT này sẽ bị loại khỏi mô hình kết cấu. Tiếp đó, kết cấu còn lại được tính toán để xác định còn PT nào khác bị phá hoại nữa không. Quy trình tính toán được tiếp tục cho đến khi không còn phần tử nào nữa bị hư hỏng hoặc kết cấu vẫn còn khả năng chịu được tải trọng dù đã mất một số PT kết cấu. Từ kết quả của việc sử dụng phương pháp đường dẫn tải thay thế để tính toán SDLT sẽ nhận được thông tin về sự phân bố lại tải trọng tĩnh trên kết cấu bị phá hoại đang khảo sát.

1.3 Tiêu chuẩn và quy phạm

1.3.1 Sự hình thành các tiêu chuẩn và quy phạm liên quan đến thiết kế kháng sập lũy tiến

Sau sự sụp đổ của tòa tháp Ronan Point vào năm 1968, những thay đổi đáng kể đã được thực hiện cả trong tính toán và yêu cầu thiết kế của các tòa nhà

ở Anh. Một thời gian ngắn sau khi sự kiện này, người Anh đã trở thành các nhà nghiên cứu tích cực nhất, và họ là những người đầu tiên đưa các yêu cầu sụp đổ lũy tiến vào tiêu chuẩn xây dựng của họ vào năm 1970 [25]. Bộ tiêu chuẩn Canada, tương tự như ở Anh, đã đưa vào các yêu cầu thiết kế sụp đổ lũy tiến năm 1970 [26]. Không có tiêu chuẩn xây dựng nào của Mỹ như vậy, tuy nhiên, đã có những yêu cầu tương tự. Đến năm 1981 thì các quy định đầu tiên của Mỹ đối với sụp đổ lũy tiến mới xuất hiện trong bộ tiêu chuẩn BOCA [27].

Trên thế giới, bộ tiêu chuẩn Anh, tiêu chuẩn châu Âu, và bộ tiêu chuẩn xây dựng quốc gia Canada (NBC) hiện nay bao gồm các hướng dẫn liên quan đến sụp đổ lũy tiến. Các bộ tiêu chuẩn Anh và châu Âu yêu cầu tính bền vững của kết cấu, trong đó sự phá hoại đột ngột của một phần tử riêng lẻ (hoặc một phần của một kết cấu) không được dẫn đến sự sụp đổ kết cấu, bất kể nguyên nhân gây ra phá hoại là gì [28]. Phương pháp đường dẫn tải thay thế được khuyến nghị sử dụng trong các tiêu chuẩn này. Phần 4.1.1.3 (1) của tiêu chuẩn xây dựng quốc gia Canada [29] đã đề cập đến các điều kiện về "tính toàn vẹn của kết cấu" nào đó mà các công trình phải đáp ứng, NBC định nghĩa thuật ngữ này trong chú thích C của phần này như là khả năng làm giảm sự phá hoại cục bộ mà không kéo theo sụp đổ rộng lớn. Tuy nhiên, không có khuyến nghị được đưa ra để đáp ứng yêu cầu này.

Mặc dù các tiêu chuẩn xây dựng mô tả ở trên bao gồm các quy định liên quan đến sự sụp đổ lũy tiến của các tòa nhà, các yêu cầu là khá chung và đôi khi không rõ ràng, không cung cấp được các hướng dẫn cụ thể để giải quyết các vấn đề. Do những hạn chế này, một số cơ quan chính phủ Mỹ, bao gồm cả Bộ Quốc phòng-DoD (Department of Defence), Cơ quan các dịch vụ công-GSA (General Services Administration) và Ủy ban An ninh liên ngành-ISC (Interagency Security Committee) đã phát triển chi tiết hơn các thông số kỹ thuật cho các thiết kế cơ sở để chống lại sự sụp đổ lũy tiến [30]. Ngoài ra, bộ tiêu chuẩn xây dựng hiện nay của Mỹ được phát triển bởi các Hội đồng tiêu chuẩn quốc tế IBC [31] bao gồm các ngôn ngữ liên quan đến sự sụp đổ lũy tiến.

Dưới đây tóm tắt các nội dung liên quan đến SDLT đã được đưa vào các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế trên thế giới.

1.3.2 Các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế hiện nay của Mỹ

1.3.2.1 Bộ tiêu chuẩn xây dựng quốc tế IBC

Có ba bộ luật xây dựng chính được sử dụng rộng rãi ở các vùng khác nhau của Mỹ: bộ tiêu chuẩn Xây dựng quốc gia được công bố bởi bộ xây dựng & bộ tiêu chuẩn quản trị quốc tế (BOCA), tiêu chuẩn xây dựng thống nhất công bố tại Hội nghị quốc tế của bộ xây dựng (ICBO), và tiêu chuẩn xây dựng được công bố tại tòa nhà phía Nam luật Quốc hội quốc tế (SBCCI). Gần đây, ba bộ tiêu chuẩn Mỹ đã sáp nhập vào một thành bộ tiêu chuẩn mới được gọi là bộ tiêu chuẩn xây dựng quốc tế - IBC (International Building Code) được công bố bởi Hội đồng quy chuẩn Quốc tế (ICC) năm 2000. Mục đích là để thay thế ba bộ tiêu chuẩn hiện hành bằng bộ tiêu chuẩn mẫu có thể áp dụng trên toàn nước Mỹ. Trong Bộ tiêu chuẩn xây dựng quốc tế (IBC, 2000) [31] và của ASCE (American Society of Civil Engineers) tại phần “sụp đổ lũy tiến” có phần “Tính nguyên vẹn của kết cấu tổng thể, nội dung như sau [32]:

“Nhà cửa và các kết cấu khác nhau được thiết kế sao cho để nếu xảy ra phá hoại cục bộ, thì toàn bộ hệ thống kết cấu còn lại vẫn bền vững và không bị phá hoại đến mức không cân xứng so với những thiệt hại cục bộ ban đầu. Điều này sẽ đạt được thông qua sự bố trí các phần tử kết cấu, sao cho tạo ra được sự ổn định cho toàn bộ hệ thống bằng cách truyền tải từ khu vực bị phá hoại cục bộ ban đầu đến các vùng lân cận để cho kết cấu vẫn có khả năng chịu tải mà không bị sụp đổ. Nó sẽ được thực hiện bằng cách tạo ra độ bền đầy đủ, sự liên tục, hoặc khả năng tiêu tán năng lượng - công suất (độ dẻo), hoặc tổ hợp các yếu tố trên, trong các bộ phận của kết cấu.”

Trong chú thích của ASCE mục 1.4, các sự cố gây ra hư hỏng cục bộ có thể dẫn đến sự sụp đổ lũy tiến xác định như sau: nổ gas, nôi hơi, va chạm của xe cộ, va chạm của các cầu kiện bị phá hoại rơi xuống, sụt lở của các hố đào bên cạnh, tổ hợp các lỗi xây dựng và gió bão. Những sự kiện này là bất thường và sẽ được xem xét trong thiết kế. ASCE 7 cũng chỉ ra rằng thiết kế bảo vệ đặc biệt có thể là một giải pháp thay thế, nhưng nó không thực tế để thiết kế các kết cấu cho các sự kiện ngẫu nhiên. Mặc dù đã có một loạt hướng

dẫn để đạt được tính toàn vẹn của kết cấu tổng thể, nhưng nói chung, sự đầy đủ độ dẻo và sự liên tục là các yêu cầu bắt buộc cho sự toàn vẹn kết cấu.

1.3.2.2 Bộ Tiêu chuẩn an toàn ISC

Năm 2001, Ủy ban An ninh liên ngành ISC ban hành tài liệu " Tiêu chuẩn an toàn cho tòa nhà văn phòng liên bang mới và các dự án hiện đại hóa chính " [33]. Tiêu chuẩn này áp dụng cho việc xây dựng các tòa nhà mới cho các nhân viên liên bang Mỹ sử dụng .Vi quan tâm ban đầu của tài liệu là thiết kế kháng nổ, các biện pháp để ngăn chặn sự sụp đổ lũy tiến như mô tả của ISC, được đưa ra gián tiếp và khá chung chung. Mặc dù không nói rõ nhưng các hướng dẫn này gợi ý sử dụng các phương pháp đường dẫn tải thay thế. Nội dung này được thể hiện trong phần "4.B.1. Sụp đổ lũy tiến":

“Thiết kế sao cho tránh được tổn thất do sự sụp đổ lũy tiến. Ở mức tối thiểu, tất cả các bộ phận mới cần được thiết kế đảm bảo sao cho nếu tổn thất của một cột trong tầng một tại chu vi tòa nhà sẽ không xảy ra sự sụp đổ lũy tiến. Mục đích của thiết kế là để đảm bảo các đường dẫn tải dự phòng đầy đủ trong kết cấu khi sự phá hoại xảy ra do bất cứ nguyên nhân nào. Người thiết kế có thể áp dụng phương pháp tính toán tĩnh hoặc động để đáp ứng yêu cầu này. Sức chịu tải giới hạn có thể được giả định trong tính toán.”

Mặc dù thông số kỹ thuật cho phép sử dụng phương pháp tĩnh hoặc động, nhưng không đưa ra chỉ dẫn nào về cách thực hiện các tính toán này. Ngoài ra, tương tự như tiêu chuẩn IBC, tiêu chuẩn ISC cũng tham khảo của tiêu chuẩn của ASCE 7 - tiêu chuẩn năm 1995 - để chi tiết hóa về thiết kế sức kháng đối với sụp đổ lũy tiến.

1.3.2.3 Hướng dẫn thiết kế của Bộ quốc phòng DoD

Bộ Tiêu chuẩn xây dựng lực lượng bảo vệ - hướng dẫn thiết kế sụp đổ lũy tiến của Bộ quốc phòng [34] đưa ra các hướng dẫn thiết kế để ngăn ngừa sụp đổ lũy tiến các công trình của bộ quốc phòng. Hướng dẫn này đưa ra một phương pháp tường minh cho việc tính toán và thiết kế kết cấu để chống lại sự sụp đổ lũy tiến bằng cách sử dụng phương pháp đường dẫn tải thay thế.

Tiêu chuẩn thiết kế của DoD giải quyết vấn đề sụp đổ lũy tiến bằng cách sử dụng phương pháp độc lập với hiểm họa [35]. Với phương pháp này, loại hiểm họa

đặc biệt (tải trọng bất thường) này không cần phải xác định. Phương pháp này đòi hỏi phải thực hiện một loạt các tính toán đối với kết cấu chịu tác dụng của việc loại bỏ PT chịu tải ban đầu tại các vị trí khác nhau. Việc lựa chọn các phần tử được loại bỏ do các sự kiện ban đầu được giới hạn ở bên ngoài hoặc bên trong kết cấu. Đối với các phân tích đã tiến hành, các yếu tố tải trọng và các yếu tố suy giảm độ bền, ngoại trừ phần tử chịu cắt, không được xem xét.

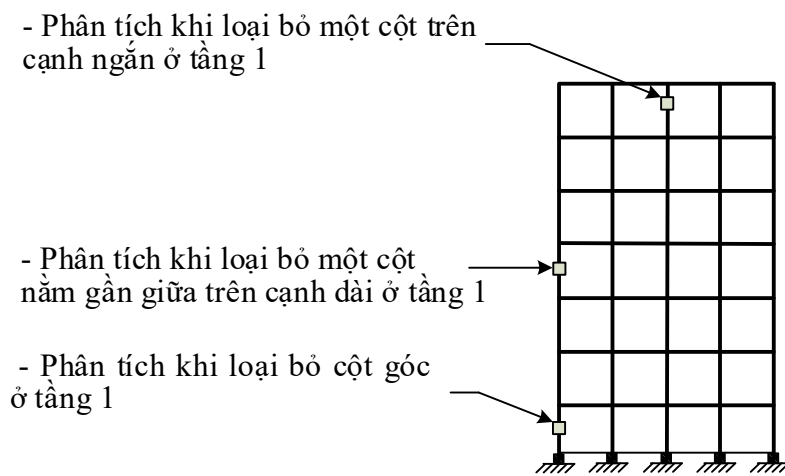
Các hướng dẫn cho phép sử dụng các phương pháp phân tích khác nhau. Mô hình hai chiều và ba chiều đều được thừa nhận, và phản ứng của kết cấu có thể thu được từ mô hình đàn hồi tuyến tính hoặc chính xác hơn là mô hình đàn hồi phi tuyến. Không phụ thuộc vào phương pháp phân tích được sử dụng, nếu khả năng một cấu kiện vượt quá giới hạn thì cấu kiện này được coi là không có khả năng mang tải và sẽ loại bỏ khỏi mô hình kết cấu, sau đó tiếp tục phân tích các kết cấu còn lại. Khi một cấu kiện bị phá hoại được loại ra, bất cứ tải trọng thường xuyên hay tạm thời liên quan đến cấu kiện đó phải được phân bố cho các cấu kiện còn lại. Điều này được thực hiện bằng cách phân phối tải cho các cấu kiện còn lại trong cùng tầng có cấu kiện bị phá hoại hoặc bằng cách đặt thêm tải vào tầng thấp hơn. Nếu phân tích chỉ ra rằng sự sụp đổ lũy tiến xảy ra, thì thiết kế cần phải được hiệu chỉnh lại, và các bước phân tích cần được lặp lại từ đầu. Khi tải được truyền xuống cho các cấu kiện thấp hơn thì tải trọng ở cấu kiện này phải được tăng lên do lực va chạm. Phương pháp gần đúng để tính đến lực va chạm là phương pháp động lượng với giả thiết tải này tồn tại khoảng 0,1 giây. Các phương pháp tính toán khác với việc sử dụng phương pháp phân tích động lực học cũng cần được sử dụng [36].

1.3.2.4 Hướng dẫn thiết kế GSA

Do hướng dẫn trong nhiều bộ tiêu chuẩn có các tiêu chuẩn sụp đổ lũy tiến là rất chung chung và đôi khi không rõ ràng nên GSA đã phát triển và chi tiết hóa một bộ các nguyên tắc trong tài liệu "Phân tích sụp đổ lũy tiến và hướng dẫn thiết kế cho tòa nhà văn phòng liên bang mới và các dự án hiện đại hóa " [37] để xác định khả năng sụp đổ lũy tiến của kết cấu. Mục đích của hướng dẫn này là để "giúp làm giảm khả năng sụp đổ lũy tiến trong các tòa nhà văn phòng liên bang mới, và để hỗ trợ trong việc đánh giá khả năng

sụp đổ lũy tiến trong các tòa nhà văn phòng liên bang đang tồn tại”.

Tương tự như các tài liệu của DoD, tài liệu hướng dẫn GSA sử dụng phương pháp độc lập với hiểm họa trong việc xác định khả năng sụp đổ lũy tiến bằng cách phân tích phản ứng của kết cấu khi mất phần tử cốt yếu của nó. GSA đưa ra các kịch bản phân tích kết cấu với cấu kiện bị phá hoại ở các vị trí khác nhau. Mỗi kịch bản được xem xét như một trường hợp độc lập. Ví dụ, đối với khung cứng có khả năng phá hoại các cấu kiện ở bên ngoài (hình 1.9), việc loại bỏ một cột bên ngoài gần với trung tâm và loại bỏ cột ở góc tạo thành hai kịch bản độc lập.



Hình 1.9. Các kịch bản phân tích SĐLT đối với khung cứng [35].

Để tính toán GSA cho phép sử dụng một số phương pháp bao gồm đàn hồi tuyến tính, phân tích tĩnh kết hợp với các chỉ tiêu phá hoại, phân tích phi tuyến phần tử hữu hạn, phân tích sai phân hữu hạn, vv. Ngoài ra, việc sử dụng các mô hình ba chiều được khuyến nghị để có các kết quả chính xác hơn.

Tải trọng có chiều tác dụng từ trên xuống được quy định trong hướng dẫn GSA để đánh giá khả năng sụp đổ lũy tiến, bao gồm các tải trọng thường xuyên và tạm thời cùng với hệ số gia tăng tải trọng do hiệu ứng động lực học. Khi phân tích tĩnh tuyến tính, tải trọng là tải trọng tĩnh tương đương bằng 2 lần tải trọng tĩnh gốc, tải trọng này là trọng lượng bản thân của kết cấu và các thiết bị vật dụng khác trên đó và $= (\text{tải trọng thường xuyên} + 25\% \text{ tải trọng tạm thời})$. Đối với các tính toán chính xác hơn với việc sử dụng phương pháp phân tích động lực học trực tiếp thì tải trọng động được khuyến nghị lấy bằng tải trọng tĩnh thiết kế ban đầu.

Theo các hướng dẫn của GSA, nếu đường dẫn tải thay thế có khả năng chịu lực sau khi phần tử cốt yếu đã bị loại bỏ thì kết cấu được xem là ít có khả năng sụp đổ lũy tiến không phụ thuộc vào loại tải bất thường gây ra phá hoại ban đầu.

1.3.2.5 Các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế liên quan đến tác dụng nổ

Thiết kế các kết cấu chống lại tải trọng nổ là một ví dụ về thiết kế bảo vệ. Đối với các kết cấu này, trọng tâm chính là điều chỉnh lực kháng của cấu kiện để nó không bị phá hoại. Do đó, nó có thể được coi là một phần của phương pháp kháng sập cục bộ đặc biệt đã đề cập trong một số tiêu chuẩn quy phạm thiết kế. Về mặt lịch sử, thiết kế kháng nổ là một lĩnh vực hoạt động nghiên cứu và thực hành trong cộng đồng quốc phòng. Các tài liệu thiết kế kỹ thuật đã có đề cập đến thiết kế kháng nổ như: TM 5-1300, "kết cấu chống lại tác dụng của vụ nổ ngẫu nhiên" [38] và hướng dẫn "Thiết kế kết cấu để chống lại tác dụng của vũ khí hạt nhân" [39]. Ngoài ra, một số phương pháp luận thiết kế và công nghệ nổ được phát triển cho quân sự gần đây đã được xem xét lại và sửa đổi để phù hợp với nhu cầu của công trình dân sự [40]. Trong mọi trường hợp, cần nghiên cứu nhiều hơn nữa để đảm bảo các hướng dẫn thiết kế phù hợp cho các công trình dân sự gắn với việc ngăn ngừa sụp đổ lũy tiến của các tòa nhà [41]. Các tiêu chuẩn quy phạm tương tự cũng đã được đưa vào các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế bắt buộc ở châu Âu và Nga.

1.4 Các phương pháp phân tích kháng sập lũy tiến của kết cấu

Các phương pháp phân tích SDLT của kết cấu được nghiên cứu để làm công cụ tính toán phục vụ cho các giải pháp thiết kế kháng sập lũy tiến của kết cấu đã trình bày ở các phần trên. Điểm chú ý là các phương pháp này đều tập trung cho giải pháp “đường dẫn tải thay thế”- là phương pháp chủ yếu được sử dụng nhiều nhất trong các giải pháp thiết kế kháng sập lũy tiến.

Các phương pháp tính toán được sử dụng cho thiết kế kháng sập lũy tiến toán chủ yếu là các phương pháp số sau đây:

- Phương pháp PTHH và PTHH mở rộng cùng với các phần mềm tính toán thương mại (SAP 2000, ADAPTIC, LS-DYNA, ABAQUS, LY-RA);
- Phương pháp phần tử rời rạc mở rộng - EDEM;

- Phương pháp thay đổi điểm tích phân thích ứng - ASI.

Trong các phương pháp số nói trên có đề cập đến các mô hình tính toán khác nhau của vật liệu và kết cấu (đàn hồi tuyến tính, đàn hồi phi tuyến, đàn-dẻo) và các tính chất tác dụng của tải trọng (tĩnh, động).

Dưới đây dẫn ra tổng quan theo các phương pháp.

1.4.1 Sử dụng phương pháp PTHH và các phần mềm tính toán thương mại

Marjanishvili và Agnew [42] đã tiến hành phân tích tĩnh tuyến tính, tĩnh phi tuyến, động tuyến tính và động phi tuyến đối với các tác dụng do loại bỏ cột đột ngột và so sánh các kết quả tính toán. Tác giả xem xét ưu điểm và khuyết điểm tương ứng của từng phương pháp và gợi ý rằng mỗi phân tích cần được kiểm tra và lựa chọn cho mục tiêu đánh giá phá hoại lũy tiến, từ phân tích tĩnh tuyến tính đến phân tích động phi tuyến. Trong một nghiên cứu tiếp theo [43], các tác giả trên so sánh hiệu quả của 4 phương pháp được đề xuất bởi GSA để phân tích sự sụp đổ lũy tiến của một tòa nhà có dầm bê tông 9 tầng. Khi nghiên cứu đã sử dụng các thủ tục phân tích theo độ phức tạp tăng dần: phân tích tĩnh tuyến tính, tĩnh phi tuyến, động tuyến tính và động phi tuyến cho trường hợp loại bỏ cột đột ngột. Phân tích số được thực hiện bằng cách sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn SAP2000 (CSI, 2009). Trong nghiên cứu, hư hỏng kết cấu được xem xét bằng cách sử dụng phương pháp khớp dẻo đơn giản và bỏ qua tính phi tuyến hình học. Giả định này hạn chế sự phát triển của ảnh hưởng dây chuyền khi hệ có biến dạng lớn. Đồng thời, ảnh hưởng của tấm sàn và các liên kết dầm - cột cũng được bỏ qua trong nghiên cứu. Kết quả cho thấy rằng phân tích động mang lại kết quả chính xác hơn và hoàn toàn có thể thực hiện khi có sự hỗ trợ của máy tính cùng với các phần mềm tính toán thương mại.

Kaewkulchai và Williamson [44] đã phân tích động phi tuyến sự sụp đổ lũy tiến có tính đến ảnh hưởng của liên kết dầm - cột. Họ giả định mô hình biến dạng dẻo tập trung đa tuyến tính với sự tương tác uốn-nén. Chỉ số phá hoại được sử dụng để dự đoán trạng thái phá hoại tại thời điểm bắt đầu xảy ra sự cố. Suy giảm độ cứng và độ bền được xem xét trong mối quan hệ phụ thuộc vào chỉ số phá hoại. Ảnh hưởng của tấm sàn và các liên kết dầm - cột

được bỏ qua trong nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu ứng dụng trên một khung phẳng cho thấy phương pháp phân tích động phi tuyến ưu việt hơn so với phương pháp phân tích tĩnh phi tuyến do một số dạng sự cố và nhu cầu biến dạng không được dự đoán một cách chính xác khi sử dụng phương pháp tĩnh phi tuyến. Trong một nghiên cứu tiếp theo, các tác giả đã mở rộng khả năng phân tích để xem xét tác động của lực va chạm do các PT bị phá hoại gây ra [45]. Giả định cơ bản về tác động của lực va chạm là lực do dầm bị phá hoại ở tầng trên rơi xuống tầng dưới được giả định như các tải trọng tập trung, còn dầm bị va chạm ban đầu ở trạng thái tĩnh, sau khi va chạm cả hai dầm chuyển động cùng nhau và bỏ qua biến dạng cục bộ. Phần tử dầm 3 nút được sử dụng, trong đó nút thứ 3 nằm ở giữa nhịp tại điểm tác động. Các phương pháp nghiên cứu chỉ hạn chế cho các kết cấu khung phẳng và không áp dụng được cho các kết cấu có liên kết tấm sàn, kết cấu khung ba chiều vì tính phức tạp của chúng.

Izzuddin [46] đề xuất một kết cấu đơn giản để đánh giá sự sụp đổ lũy tiến trong trường hợp mất cột đột ngột trong kết cấu khung thép. Phương pháp dựa trên nguyên tắc làm việc ảo tạo điều kiện cho ý tưởng được thực hiện trong tính toán thiết kế hàng ngày. Đánh giá động đơn giản dựa trên khái niệm năng lượng tương đương được đề xuất như là một thay thế cho phân tích động phi tuyến phức tạp. Các mô hình cơ học dựa trên Eurocode 3 [47] được sử dụng để đại diện cho tính bền từng phần nửa cứng của các liên kết thép dầm - cột. Mặt khác, mô hình tấm sàn đơn giản được thực hiện bằng cách sử dụng khái niệm độ rộng tương đương của Eurocode 3. Nghiên cứu bằng số cho thấy liên kết tấm cạnh dễ bị ảnh hưởng hơn mặc dù mỏng manh hơn so với tấm đầu cuối và liên kết chịu cắt góc bản giằng [48]. Nghiên cứu gần đây của [49] đã mở rộng đến kết cấu đa cấp và đánh giá động đơn giản để giải quyết trường hợp tác động của sàn. Kích bản va chạm dẻo và cứng được nghiên cứu trong phương pháp số, khi tính toán sử dụng phần mềm phân tích phi tuyến ADAPTIC.

Powell [50] đã sử dụng phương pháp đường truyền tải trọng thay thế để tính toán sự sụp đổ lũy tiến bằng cách phân tích động phi tuyến đơn giản đối

với khung một tầng. Trong nghiên cứu, thiệt hại vật chất được xem xét với việc sử dụng phương pháp khớp dẻo đơn giản và bỏ qua phi tuyến hình học. Ảnh hưởng của tấm sàn và các liên kết dầm - cột cũng được bỏ qua trong nghiên cứu. Tác giả nhận xét về sự khác biệt và hiệu quả kết hợp với phương pháp phân tích tĩnh và động tuyến tính, tĩnh và động phi tuyến. Nghiên cứu cho thấy mô hình phi tuyến là khả thi để đánh giá sự sụp đổ và mô hình thường được kết hợp với phân tích động đất nên được mở rộng để xem xét tác động dây chuyền. Một phân tích động đơn giản tương tự như Izzuddin [46] được đề xuất để giải thích hiệu ứng động kết hợp với loại bỏ đột ngột thành phần chịu lực. Tác giả, mặc dù thừa nhận tầm quan trọng của phân tích phi tuyến trong dự đoán sụp đổ, nhưng vẫn ủng hộ việc phân tích tuyến tính. Tác giả kết luận rằng phân tích phi tuyến cung cấp cái nhìn sâu sắc hơn vào tính năng kết cấu và chỉ nên được sử dụng cho các kết cấu đặc biệt và quan trọng, trong đó phân tích tĩnh tuyến tính phù hợp với các kết cấu thông thường.

Khandelwal và El-Tawil [51] đã nghiên cứu phản ứng của khung chịu uốn khi cột bên trong bị loại bỏ đột ngột. Trong nghiên cứu này, các mô hình cơ học được sử dụng để thể hiện độ bền từng phần nửa cứng của các liên kết thép dầm - cột. Mặt khác, ảnh hưởng của tấm sàn được bỏ qua trong nghiên cứu, nhưng có kể đến hiệu ứng P-Delta. Nghiên cứu của Sadek và các cộng sự [52] cho thấy tấm sàn có thể ngăn chặn cột khỏi bị kéo vào phía trong. Vì vậy, nếu tấm sàn bị bỏ qua, có thể dẫn đến đánh giá độ vững chắc không thực tế. Tuy nhiên, Khandelwal và El-Tawil [51] nhận ra rằng sự chính xác của các kết quả được trình bày phụ thuộc nhiều vào các giả định mô hình khác nhau, trong đó bao gồm việc lý tưởng hóa khung.

Fu [53] đã nghiên cứu các tính năng kết cấu của một tòa nhà khung thép hỗn hợp 20 tầng theo 3 hướng trong trường hợp loại bỏ cột đột ngột với việc sử dụng phần mềm phân tử hữu hạn ABAQUS (ABAQUS, 2005) và phương pháp đường dẫn tải thay thế theo đề xuất của GSA (2003). Tòa nhà có một lưới cột điển hình 7,5m và chiều cao tầng điển hình 3m. Tất cả các dầm và các cột được mô phỏng bằng cách sử dụng các phần tử dầm trong thư viện ABAQUS (ABAQUS, 2005), trong khi các bức tường được mô hình hóa như các phần tử

tấm. Ngoài ra, trong quá trình loại bỏ cột, lực dọc trục trong cột, dầm và các thanh chống biến động khá lớn.

Kwasniewski [54] trình bày kết quả nghiên cứu về sụp đổ lũy tiến của một tòa nhà nhiều tầng với việc sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn LS-DYNA [55]. Tòa nhà làm bằng khung thép hỗn hợp 8 tầng hiện tại được xây dựng để thử nghiệm lửa ở Vương quốc Anh (British, 1998). Tương tự như các công trình nghiên cứu khác, đường truyền tải thay thế theo đề xuất trong GSA (2003) được sử dụng trong nghiên cứu. Tất cả các dầm và cột, gồm cả các liên kết giữa các tấm, được mô hình hoá bằng cách sử dụng các phần tử dầm. Mô hình chi tiết đó cho phép kể đến các ảnh hưởng cục bộ như liên kết không đàn hồi tại các nút hoặc uốn dọc cục bộ trong PT chịu nén. Trong mô hình này, sự phá hoại của PT được thể hiện bằng việc loại bỏ một số phần tử khỏi hệ. Tấm hỗn hợp dày 130mm được mô hình hóa bằng cách sử dụng các phần tử vỏ 4 nút. Hai loại phần tử vỏ (có độ dày khác nhau) được sử dụng để mô hình hóa tính trục hướng của tấm thép hỗn hợp. Dải đầu tiên có độ dày 130mm và dải thứ hai có độ dày 70mm. Mỗi dải được mô phỏng như một tấm hỗn hợp đa tầng với việc sử dụng mô hình đàn hồi dẻo đẳng hướng với độ bền kéo và độ bền nén khác nhau (MAT124) [55]. Mô hình phức tạp được sử dụng trong nghiên cứu dẫn đến một mô hình lớn với 1,08 triệu phần tử hữu hạn của dầm và vỏ. Ba trường hợp loại bỏ cột đột ngột được xem xét trong phân tích là loại bỏ một cột góc, loại bỏ cột bên hoặc loại bỏ cột giữa. Nghiên cứu cho thấy rằng trường hợp quan trọng nhất là loại bỏ cột góc. Tuy nhiên, các tác giả kết luận rằng nghiên cứu cho thấy khả năng xảy ra sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu thấp hơn. Tác giả nhận ra rằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn chi tiết đã đề xuất vẫn khó được áp dụng trong thực tế do nhu cầu tính toán rất lớn. Ví dụ, một trường hợp loại bỏ cột sẽ cần thời gian tính toán 19 ngày và sử dụng song song 60 bộ vi xử lý (Kwasniewski, 2009).

Yu và các cộng sự [56] nghiên cứu sự sụp đổ lũy tiến của hệ thống tấm hỗn hợp bằng phần mềm phần tử hữu hạn LS-DYNA (Hallquist, 2006). Trọng tâm của nghiên cứu là tìm hiểu ảnh hưởng của liên kết và tấm bê tông với dầm thép. Hệ thống sàn tổng hợp được nghiên cứu là một mẫu khung thép hỗn hợp

một tầng được thử nghiệm bởi Tan và Astaneh-Asl [57] tại Đại học California, Berkeley. Các tấm sàn được làm bằng bê tông trên sàn kim loại được hỗ trợ bởi các dầm dọc và ngang. Liên kết chống lực cắt được sử dụng để liên kết dầm - cột và dầm - dầm. Trong mô hình số, dầm và cột được mô hình hóa như là các PT thanh, trong khi các sàn kim loại được xem như PT vỏ. Tấm bê tông được mô hình hóa như là PT 8 nút với áp lực không đổi. Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng chống xoay của liên kết và có một vai trò quan trọng trong việc ngăn chặn sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu. Do đó, liên kết cứng được khuyến khích cho thiết kế kết cấu. Để áp dụng vào các tòa nhà hiện có, Yu và các cộng sự [56] cũng nghiên cứu khả năng áp dụng các loại cáp dự ứng lực để nâng cao hiệu quả liên kết các dầm. Nghiên cứu cho thấy các loại cáp dự ứng lực có thể nâng cao khả năng ngăn chặn sự sụp đổ lũy tiến và hiệu quả của nó tăng lên cùng với sự gia tăng số lượng cấu kiện liên kết với dầm.

Sadek và các cộng sự [52] nghiên cứu độ vững chắc của hệ thống sàn hỗn hợp với liên kết chống lực cắt đơn giản trong trường hợp loại bỏ cột bên trong với việc sử dụng phần mềm phân tử hữu hạn LS-DYNA [55]. Hệ thống sàn được sử dụng trong nghiên cứu này là một đơn nguyên 2x2 của một tòa nhà khung thép nguyên mẫu được thiết kế bởi NIST để nghiên cứu độ vững chắc. Hệ thống lưới cột điển hình 9,14m. Các dầm, cột được mô hình hóa bằng phần tử thanh và sàn kim loại được mô hình hoá bằng cách sử dụng PT vỏ. Mối quan hệ ứng suất biến dạng song tuyến tính được sử dụng để mô hình hóa các thuộc tính của vật liệu. Đối với bê tông sử dụng mô hình dẻo không liên kết theo nhiều đường xuyên tâm, bao gồm lực kéo và lực nén đơn trục, hai trục và ba trục. Khi xây dựng mô hình cũng sử dụng chỉ số hư hỏng tích lũy như một tham số của cả biến dạng dẻo hiệu quả và biến dạng thể tích. Gia cố tấm được mô hình hóa bằng cách sử dụng PT, trong đó mối quan hệ ứng suất biến dạng là song tuyến tính như các thành phần thép khác. Đinh tán được mô phỏng như các PT thanh liên kết với các tấm sàn bê tông. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng các tấm sàn đóng một vai trò quan trọng trong việc ngăn cản sụp đổ. Nghiên cứu cũng cho thấy rằng sàn nhà dễ bị sụp đổ khi sử dụng tiêu chí GSA [58] để liên kết. Từ kết quả nghiên cứu đã đề xuất việc sử

dụng các liên kết chống cắt cứng, sàn kim loại dày hơn, mật độ cao hơn sàn cốt thép và việc sử dụng các liên kết mômen kháng uốn thay vì liên kết chống cắt ở mọi sàn.

Alashker [59], mở rộng nghiên cứu của Sadek và các cộng sự [52], đã điều tra các thông số chính ảnh hưởng đến độ vững chắc của sàn hỗn hợp trong trường hợp loại bỏ cột nội bộ. Mô hình tính giống như mô hình được sử dụng bởi Sadek và các cộng sự [52], ngoại trừ một số thay đổi nhỏ; nó bao gồm tổng cộng 295.000 PT vỏ và PT dầm. Nghiên cứu cho thấy sàn thép góp phần đáng kể vào việc ngăn chặn sự sụp đổ của hệ thống sàn hỗn hợp.

Đối với PT tấm BTCT thì cốt thép trong tấm được giả định là làm việc như một lớp sợi. Các tính chất cơ học của vật liệu thép được mô hình hoá bằng cách sử dụng một mô hình vật liệu đàn dẻo từ thư viện ABAQUS (ABAQUS, 2005) [60]. Đối với các thành phần bê tông, các thuộc tính vật liệu được mô phỏng dựa trên mô hình độ dẻo bê tông từ thư viện ABAQUS (ABAQUS, 2005). Tất cả các dầm được mô phỏng gần đường trung tâm của các phần tử dầm chính và các tấm hỗn hợp được mô phỏng tại đường trung tâm của tấm. Phương trình liên kết ràng buộc được sử dụng để nối các phần tử dầm và vỏ với nhau. Dầm thép để liên kết các cột không được đưa vào mô hình tính. Do đó, ảnh hưởng quan trọng của các liên kết không được xem xét trong nghiên cứu.

Tác giả Ngô Đức Tuấn - Đại học Melbourne và Phạm Xuân Đạt - Đại học Xây dựng Hà Nội cũng có những nghiên cứu về SĐLT thiên về nghiên cứu thực nghiệm vật liệu bê tông cốt thép, chủ yếu tập trung vào phương pháp “đường dẫn tải thay thế”, bài toán đặt ra là khảo sát trạng thái phá hoại lũy tiến của kết cấu do một số phần tử nào đó bị hư hỏng ngẫu nhiên gây ra, [61, 62,63,64]. Vì vậy, sự phá hoại đối với PT đầu tiên không phải do tác dụng của tải trọng nào đó cho trước.

O.B. AJIMA3OB, Cao Duy Khôi [102,103], trong công trình của mình đã nghiên cứu sự phá hoại lũy tiến của các khung nhà cao tầng BTCT liên khối. Mục đích của nghiên cứu là dẫn bài toán động về bài toán tĩnh tương đương, trong đó việc nghiên cứu các tính chất của hệ số động được thực hiện với sự hỗ trợ của các phần mềm tính toán thông dụng LY-RA của (Nga) và

SAP-2000 (của Mỹ). Các tác giả đã đưa ra các khuyến nghị về cách tính hệ số động theo số lượng tầng của tòa nhà, theo đó có thể tiến hành phân tích động lực học sự phá hoại lũy tiến của các khung nhà cao tầng BTCT liên khối thông qua bài toán tĩnh học của công trình với theo các phương pháp thông dụng ở Nga. Sử dụng cách tính trên các tác giả đã nghiên cứu và đưa các khuyến nghị về các giải pháp kháng sập lũy tiến cho nhà cao tầng BTCT.

Vũ Văn Hoàng là nghiên cứu sinh đầu tiên ở Việt Nam nghiên cứu và công bố các công trình ở trong nước về đề tài theo hướng PHLT của công trình, [12]. Ở đây tác giả chỉ dừng lại trong phạm vi cứu phương pháp tính toán kết cấu có kể đến sự phá hoại lũy tiến mà chưa đi đến nghiên cứu các giải pháp kháng sập lũy tiến của kết cấu. Đối tượng nghiên cứu là khung phẳng, vật liệu được giả thiết là đàn dẻo lý tưởng, phương pháp tính toán là phương pháp động lực học, trong tính toán có kể đến tính phi tuyến vật lý và phi tuyến hình học của kết cấu (hiệu ứng P - Δ và chuyển vị thẳng của các nút khung) và ảnh hưởng của lực va chạm lên các PT dầm của kết cấu khung do các PT bị phá hoại của kết cấu gây ra và đã thiết lập các phần mềm tính toán tương ứng.

1.4.2 Sử dụng phương pháp phần tử rời rạc mở rộng EDEM

Phương pháp phần tử rời rạc mở rộng - EDEM (Extended Distinct - Element Method) do Meguro và Santo đề xuất năm 1996 [65] để mô hình hóa sụp đổ của kết cấu khung BTCT do động đất và các tải trọng động khác.

Phương pháp phần tử rời rạc mở rộng (EDEM) là biến điệu của phương pháp phần tử rời rạc (DEM) được đề nghị bởi Cundall và Strack [66]. Phương pháp này được sử dụng lần đầu để mô hình hóa sự sụp đổ của kết cấu được tổ hợp bởi các vật liệu hạt như đất và đá. Mô hình của phần tử gồm có phần tử cứng liên kết với 2 lò xo, một theo phương ngang và một theo phương đứng. Các lò xo của phần tử được sử dụng để biểu diễn tính chất của vật liệu được mô hình hóa. Hakuno và Meguro [67] mở rộng phương pháp phần tử rời rạc để tính toán sự phá hỏng của kết cấu bê tông thành phương pháp phần tử rời rạc mở rộng. Với phương pháp này đặt thêm các lò xo phụ, gọi là các lò xo “rỗng” (“pore”) vào giữa các phần tử cứng theo cả 2 phương để mô hình hóa sự phá hoại của xi măng trong bê tông. Để mô hình hóa một cấu kiện

(member) bê tông cần phải có một số lượng lớn các phần tử (element) cứng, các lò xo rỗng và các lò xo phần tử. Hakuno và Meguro, 1993 đã sử dụng EDEM để mô phỏng sự sụp đổ của khung bê tông do tải trọng động đất gây ra. Để giảm thời gian tính toán họ sử dụng khung với một số ít phần tử. Dù vậy, họ cũng đã thành công trong việc mô phỏng quá trình sụp đổ và kết luận rằng cần hoàn thiện một số nhược điểm trước khi có thể ứng dụng trực tiếp phương pháp này để tính toán kết cấu khung.

1.4.3 Sử dụng phương pháp thay đổi điểm tích phân thích ứng ASI

Phương pháp thay đổi điểm tích phân thích ứng ASI (Adaptive Shift Intergation Technique) là phương pháp cải tiến của phương pháp thay đổi điểm tích phân được Toi đề xuất lần đầu tiên [68] và được Isobe và Toi phát triển năm 2000 [69] để giải bài toán khung không liên tục do phá hỏng đầu cuối của các phần tử dưới tác dụng của tải trọng động.

Phương pháp thay đổi điểm tích phân ban đầu được sử dụng để tính toán sụp đổ dẻo của kết cấu khung. Phương pháp này thay đổi các điểm tích phân số của phần tử tới các vị trí của khớp dẻo với việc sử dụng các quan hệ xác định giữa các điểm tích phân ban đầu và các điểm tích phân mới. Quan hệ này được thiết lập dựa trên sự cân bằng của năng lượng biến dạng có thể cải thiện độ chính xác và tính hiệu quả để tính toán sụp đổ dẻo của kết cấu khung bằng phương pháp PTHH, bởi vì các điểm tích phân có thể chọn chính xác tại các vị trí khớp dẻo xuất hiện (tại các nút cấu kiện và tại các điểm tác dụng của lực tập trung). Do đó, vị trí các khớp dẻo cần phải biết trước và các điểm tích phân cần phải chọn phù hợp. Theo cách này, đối với các trường hợp chất tải phức tạp có thể sẽ bị giảm độ chính xác khi tính toán trên máy, đặc biệt khi sử dụng phương pháp PTHH với bước lưới lớn.

Khắc phục nhược điểm của phương pháp thay đổi điểm tích phân, Isobe và Toi, 1993 đã sử dụng các điểm tích phân truyền thống để tính toán tuyến tính kết hợp với sự thay đổi tự động các điểm tích phân khi các khớp dẻo đầy đủ xuất hiện. Họ gọi phương pháp này là phương pháp thay đổi điểm tích phân “thích ứng” (ASI) và đã ứng dụng nó một cách thành công cho cả phần tử dầm Bernoulli-Euler và phần tử dầm Timoshenko.

Tuy nhiên, để phân tích các bài toán đối với khung không liên tục do các đầu cuối của cấu kiện bị phá hoại, phương pháp này chỉ có thể ứng dụng cho phần tử dầm Timoshenko [69]. Để chính xác khi mô hình hóa cấu kiện ít nhất phải có 2 phần tử sử dụng phương pháp ASI. Trong phương pháp này sau khi xảy ra phá hoại tại đầu cuối của PT thì độ cứng của nó sẽ bằng không và không còn vai trò đối với phản ứng chung của kết cấu. Do đó, PT về mặt tính toán bị loại bỏ khỏi mô hình tính dù cho dầm vẫn tồn tại. Do đó, phương pháp này bỏ qua sự đóng góp của khối lượng và độ cứng của dầm vào khối lượng và độ cứng chung của kết cấu khi đầu cuối của nó bị phá hoại tách khỏi kết cấu chính và làm việc như dầm công xôn.

1.5 Kết luận chương 1

Từ tổng quan ở trên có thể rút ra các nhận xét sau đây:

1. Tính thời sự của vấn đề kháng sập lũy tiến của công trình: Trong thời gian gần đây, đặc biệt sau khi các tòa tháp Trung tâm thương mại thế giới tại New York bị sập đổ do không tặc - được cho là SĐLT - vấn đề nghiên cứu các giải pháp thiết kế kháng sập lũy tiến đối với các công trình cùng các phương pháp tính toán kết cấu phục vụ cho thiết kế nói trên đã trở nên cấp bách và ngày càng được quan tâm, ngày càng phát triển rất mạnh mẽ trên thế giới. Cũng từ thời gian này, ở nước ngoài, các nội dung liên quan đến tính toán - thiết kế kháng sập lũy tiến bắt đầu được đưa vào các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế công trình. Tuy nhiên, lời giải đối với các bài toán đặt ra ở đây rất khó và phức tạp nên các kết quả nghiên cứu ngay cả ở các nước có nền khoa học tiên tiến trên thế giới cũng chỉ mới đạt được ở mức độ bước đầu. Tính cấp bách của vấn đề nghiên cứu nói trên cũng không là ngoại lệ đối với Việt Nam. Ở nước ta, cho đến nay mới chỉ có một số rất ít công trình nghiên cứu đề cập đến hướng nghiên cứu này và chủ yếu được thực hiện và công bố ở nước ngoài. Trong các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế các công trình ở Việt Nam còn thiếu vắng các nội dung liên quan đến tính toán - thiết kế kháng sập lũy tiến.

2. Trong các công trình nghiên cứu đã công bố, chủ yếu tập trung vào phương pháp “đường dẫn tải thay thế”, theo đó bài toán đặt ra là khảo sát trạng

thái phá hoại lũy tiến của kết cấu do một số phần tử nào đó bị hư hỏng ngẫu nhiên và đột ngột gây ra. Nhưng không kể đến các nguyên nhân và các tải trọng bất thường gây ra sự hư hỏng đó. Với cách đặt bài toán như vậy thì sự phá hoại đối với các PT đầu tiên không phải do tác dụng của các tải trọng xác định nào đó cho trước.

3. Về đối tượng nghiên cứu: Trong công trình nghiên cứu đã công bố, chủ yếu đề cập đến các nhà cao tầng và các công trình giao thông (cầu treo, cầu dầm BTCT liên tục); còn ít công trình đề cập đến các loại công trình đặc biệt liên quan đến lĩnh vực an ninh - Quốc phòng như các sở chỉ huy, công trình phòng thủ dân sự,...

4. Về tải trọng tính toán: Để phục vụ cho giải pháp thiết kế “đường dẫn tải thay thế”, khi đặt và giải bài toán, đa số các tác giả chỉ mới quan tâm đến các loại tải trọng tĩnh cố định là trọng lượng bản thân của kết cấu và thiết bị, ít quan tâm đến chính loại tải trọng gây ra sự phá hoại đột ngột ban đầu của PT, chẳng hạn như tải trọng nổ - nghĩa là chưa tính đến tác dụng đồng thời các tải trọng tĩnh và động khi kết cấu bị SĐLT.

5. Về mô hình vật liệu và kết cấu: Đối với vật liệu và kết cấu khi nghiên cứu các bài toán SĐLT của công trình, chủ yếu quan tâm đến vật liệu đàn dẻo: trong đó phần lớn sử dụng mô hình ĐDLT, biến dạng nhỏ, ít sử dụng mô hình biến dạng lớn dạng phức tạp hơn và sát thực tế hơn.

6. Về phương pháp tính toán và phần mềm tính toán: Do lời giải các bài toán đặt ra rất phức tạp nên các tác giả chủ yếu trực tiếp sử dụng các phần mềm thương mại rất mạnh, được xây dựng trên cơ sở phương pháp PTHH như: SAP 2000, ADAPTIC, LS-DYNA, ABAQUS,...

Từ các kết luận trên, hướng đề tài luận án được chọn là: “**Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ và đề xuất một số giải pháp kháng sập**” với mục đích, nội dung, phạm vi và phương pháp nghiên cứu như đã trình bày trong phần mở đầu của luận án.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÂY DỰNG MÔ HÌNH VẬT LIỆU, MÔ HÌNH TÍNH TRONG MÔ PHỎNG SỐ PHÂN TÍCH SỰ ĐỔ LŨY TIỀN CỬA KẾT CẤU CHỊU TÁC DỤNG NỔ

2.1 Mở đầu

Tính toán kết cấu bê tông cốt thép nói chung thường được thực hiện trên cơ sở các giả thiết về ứng xử đồng nhất, đẳng hướng và trong giai đoạn đàn hồi của vật liệu. Cơ học môi trường liên tục là lý thuyết cơ sở để xây dựng các phương pháp phân tích ứng xử của các kết cấu bê tông cốt thép. Cùng với các giả thiết về đơn giản hóa các kết cấu thực tế bằng các sơ đồ tính toán phù hợp, hầu hết các bài toán phân tích sự làm việc của kết cấu bê tông cốt thép như dầm, bản sàn, cột...đều có thể được giải quyết một cách tương đối dễ dàng bằng các công thức có trong các quy trình thiết kế, kiểm định. Trong tính toán các công trình xây dựng bằng bê tông cốt thép, phương pháp có thể gọi là truyền thống như trên thể hiện nhiều ưu điểm như tính toán đơn giản, dễ hiểu, các kỹ sư có thể kiểm soát quy trình tính toán và kết quả thu được. Việc tiếp cận phương pháp tính cũng tương đối đơn giản, hệ số an toàn thiết kế cao và thực tế chứng minh là các kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép hoàn toàn đáp ứng được các yêu cầu chịu lực trong điều kiện bình thường.

Tuy nhiên, có nhiều vấn đề đặt ra khi xét đến đặc điểm ứng xử của bê tông cốt thép vốn không luôn luôn đàn hồi trong quá trình chịu tải. Sau giai đoạn đàn hồi, sự xuất hiện các vùng phá hủy dòn, vùng dẻo cục bộ và các đường nứt làm mất tính liên tục của môi trường tính toán và đặc biệt không xét đến phần ứng xử sau đỉnh phá hoại đã làm cho phương pháp tính truyền thống không thể có kết quả tính toán chính xác cũng như gây lãng phí vật liệu khi thiết kế các kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép. Do đó cần thiết phải đưa vào phương pháp phân tích vật liệu và kết cấu bê tông cốt thép có xét đến các ứng xử phi tuyến, các vùng phá hủy, các đường nứt, các vùng dẻo...Việc nghiên cứu các mô hình vật liệu cụ thể nhằm phản ánh sát thực ứng xử làm việc của bê tông, cốt thép đã được thực hiện trong nhiều thập kỷ qua trên thế giới.

Trong chương này sẽ trình bày cơ sở lý thuyết để xây dựng mô hình vật liệu (bê tông, cốt thép, thuốc nổ TNT và không khí), mô hình tính trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để phân tích sự sụp đổ lũy tiến của kết cấu khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ.

2.2 Mô phỏng ứng xử cơ học của bê tông

Để mô phỏng ứng xử cơ học của bê tông khi chịu tải, cho tới nay có rất nhiều quy luật ứng xử được đề nghị. Đầu tiên là các quy luật đàn hồi đơn giản, sau đó để mô phỏng cục bộ và phi tuyến về sự làm việc của các kết cấu bê tông thì quy luật dẻo, quy luật dòn và lan truyền vết nứt đã lần lượt được đề nghị. Hiện nay quy luật hỗn hợp đã và đang được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu và hoàn thiện mặc dù đang gặp rất nhiều khó khăn. Mỗi mô hình vật liệu cho bê tông có những ưu nhược điểm cũng như phạm vi áp dụng hợp lý cho từng trường hợp cụ thể khi chịu tải của bê tông.

2.2.1 Mô phỏng ứng xử của bê tông trong giới hạn đàn hồi

Các mô hình đàn hồi tuyến tính dựa trên lý thuyết đàn hồi với 2 tham số cơ bản là mô đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν hoàn toàn có thể mô phỏng ứng xử của bê tông trong giai đoạn này. Theo đó ứng xử của bê tông được xem là hoàn toàn đàn hồi, không xét đến tính phi tuyến ở cả trước và sau đỉnh đường cong phá hoại. Định luật Hook là cơ sở của mô hình ứng xử này. Một số tác giả khác có xét đến phần phi tuyến trước phá hoại (pre-peak) của bê tông như Ahmed và Shah [70] hoặc sử dụng quan hệ gia tăng ứng suất và gia tăng biến dạng như Gerstle [71].

Tính toán đơn giản là ưu điểm của mô hình này và khi đưa vào tính toán thông thường không xét đến tính phi tuyến trước phá hủy, tuy nhiên kết quả tính toán rõ ràng là không đáp ứng được yêu cầu thiết kế đối với các kết cấu trong thực tế khi làm việc dưới tác dụng của tải trọng lớn như tải trọng nổ, đặc biệt là đối với các ứng xử cục bộ.

Trong tính toán số theo quy luật đàn hồi, các tham số đầu vào có thể làm cho kết quả tính toán vẫn luôn hội tụ khi tải trọng lớn, điều này hoàn toàn không phù hợp với ứng xử thực của vật liệu. Ở cấp độ vĩ mô và khi tải trọng nhỏ, quy luật ứng xử này khá phù hợp trong mô phỏng ứng xử với các phần tử

thanh không gian để tính ra các giá trị nội lực ở các mặt cắt đặc trưng dưới tác dụng của tải trọng, và với kết cấu dạng thanh như dầm hay cột nói chung thì quy luật này cơ bản đáp ứng được các yêu cầu tính toán thiết kế theo các tiêu chuẩn thiết kế.

2.2.2 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo lý thuyết cơ học rạn nứt bê tông

Tiếp cận theo cơ học rạn nứt đàn hồi tuyến tính (LEM-Linear Elastic Fracture Mechanics) phù hợp với giả thiết bê tông hoàn toàn giòn, khi đó các đặc trưng nứt và điều kiện lan truyền nứt hoàn toàn được mô phỏng theo lý thuyết cơ bản của môn cơ học rạn nứt có xét đến các đặc điểm về hình học được suy ra từ thực nghiệm. Kaplan [72] và Glucklich [73] đưa ra các công thức giải tích của cơ học rạn nứt vào bê tông thông qua hệ số cường độ ứng suất hoặc năng lượng nứt, bê tông được giả thiết là đồng nhất, đẳng hướng ở những vùng nằm ngoài đường nứt.

Các tiếp cận phi tuyến về lan truyền nứt (NFM-Nonlinear Fracture mechanics) có xét đến phát triển của một vùng có ứng xử phi tuyến cục bộ đầu đường nứt (có thể là vùng dẻo [74] hoặc vùng phá hủy giòn [75]) cho phép mô tả chính xác hơn về điều kiện lan truyền vết nứt và sự tập trung biến dạng trong vùng phá hủy, và do đó cho kết quả mô phỏng chính xác hơn và tránh được sự không hội tụ của kết quả tính toán cũng như phụ thuộc của kết quả tính toán vào cách chia lưới phần tử. Các tiếp cận phi tuyến cho phép mô tả chính xác hơn cơ chế lan truyền các đường nứt và hiện tượng tập trung biến dạng trong các vùng bị phá hủy. Do đó các kết quả tính toán với các mô hình phi tuyến chính xác hơn so với tính toán theo các mô hình tuyến tính.

Hai mô hình phi tuyến điển hình nhất là mô hình đường nứt ảo FCM (Fictionous Crack Model - Hillerborg) và mô hình dải nứt CBM (Crack Band Model - Bazant) với giả thiết trường chuyển vị là không liên tục hoặc liên tục yếu. Theo các tiếp cận này thì các bài toán về lan truyền nứt trong bê tông được giải quyết tương đối hoàn chỉnh, đặc biệt là với các kết cấu bê tông có kích thước đủ lớn.

Tuy vậy nhược điểm khi lập trình đó là phải sử dụng các phần tử phức tạp và sự phụ thuộc các đường nứt vào sự phân bố hình học của các phần tử

hữu hạn đã góp phần hạn chế sự phát triển của quy luật ứng xử này. Khó khăn đó đã ngăn cản đáng kể việc áp dụng rộng rãi các mô hình trong tính toán các kết cấu công trình bằng bê tông cốt thép.

Vì thế, với việc một số tác giả phát triển các mô hình xấp xỉ như mô hình nứt hai tham số TPM (Two-Parameter Model-Hillerborg), mô hình hiệu ứng kích thước SEM (Size Effect Model-Bazant) hay mô hình đường nứt có hiệu ECM (Effective Crack Model-Karihaloo) hoặc sử dụng các kỹ thuật điều chỉnh như với mô hình MRCM (Modified Rotating Crack Model-Jirasek) hay sử dụng các phần tử nứt (Embedded Crack Elements-Jirasek và T.Zimmerman) với mục đích khắc phục các khó khăn khi lập trình số hoặc làm cho kết quả không phụ thuộc vào lưới phần tử hữu hạn đã mang lại sự đơn giản và hiệu quả khi áp dụng quy luật ứng xử này vào tính toán các kết cấu bê tông. Hiện nay nhiều tác giả tiếp tục phát triển nhóm mô hình này bằng cách đưa vào các công thức không cục bộ để tính đến sự tập trung biến dạng nhưng cũng đang dừng lại ở các bài toán đơn giản, việc ứng dụng vào các phần mềm thương mại đang tiếp tục được phát triển.

2.2.3 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật đàn hồi-dẻo

Các mô hình đàn hồi-dẻo của bê tông được phát triển từ các mô hình dẻo cơ bản của vật liệu như Mohr-Columb, Drucker-Prager có sử dụng thêm các hiệu chỉnh đối với trường hợp bê tông chịu kéo. Ví dụ, ứng xử của bê tông khi kéo có thể mô tả theo tiêu chuẩn phá hoại Rankine và ứng xử khi nén có thể theo quy luật Mohr-Columb hay Drucker-Prager cơ bản hoặc cải tiến. Lập trình bằng phần tử hữu hạn theo quy luật này khá dễ dàng vì trường tính toán luôn là môi trường liên tục.

Feentra và de Borst [76] đã đề nghị một mô hình đàn dẻo hỗn hợp bằng cách sử dụng quy luật ứng xử dẻo Drucker-Prager cho phần bê tông chịu nén và tiêu chuẩn phá hoại Rankine cho phần bê tông chịu kéo.

Nhiều mô hình của các tác giả khác nhau đã được đề nghị trong nhóm mô hình này như Raynourd (1974), Franzetkakit (1987), Chen và Han (1988), Lubnier và olivier (1989), Feentra và de Borst (1995), Nedjar (2002), Ulm và Coussy (2003)...Nhóm tiêu chuẩn này đặc biệt quan tâm đến ứng xử chịu nén

của bê tông và thiết lập đường ứng xử dẻo theo các đề nghị khác nhau. Tuy nhiên vì bỏ qua tính phá hủy của bê tông nên nhóm mô hình này không tính đến sự giảm mạnh của độ cứng bê tông trong các vùng phá hủy, đặc biệt đối với bê tông cường độ cao, nhóm mô hình này trở nên yếu vì không xét đến tính dòn của vật liệu.

2.2.4 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật đàn hồi-dòn

Nhóm mô hình dựa trên lý thuyết cơ bản của các môi trường liên tục. Cơ học phá hủy là cơ sở thiết lập quy luật phát triển các biến trạng thái khi vật liệu từ trạng thái nguyên vẹn sang phá hủy hoàn toàn. Qua các thí nghiệm thực tế với việc có xét đến trạng thái phá hủy của vật liệu, cho thấy mô đun đàn hồi E của vật liệu bị suy giảm trong quá trình phá hủy. Mô hình đàn hồi-dòn đầu tiên được phát triển bởi Kachanov [77] với mô hình đẳng hướng cổ điển sử dụng biến phá hủy với biến dạng là các thông số kiểm soát, sau đó rất nhiều tác giả đề nghị các mô hình mới như Mazars [78], Simo và Ju [79] với tiếp cận cục bộ tức là không xét đến sự tập trung biến dạng trong vùng phá hủy của bê tông. Tiếp đó, nhiều mô hình không cục bộ đàn hồi-dòn lần lượt được đề nghị như Pijaudier-Cabot và Bazant [80], Jirasek [81]. Các tác giả sử dụng biến kiểm soát phá hủy là biến dạng tương đương cho kết quả tính toán hội tụ và gần sát với thực nghiệm.

Trong các mô hình trên thì mô hình Mazars được sử dụng rộng rãi hơn cả trong các phần mềm tính toán. Tuy nhiên mô hình không xét đến tính cứng cố khi nén cũng như các biến dạng dư của bê tông nên không sử dụng được trong trường hợp tải trọng chu kỳ.

2.2.5 Mô phỏng ứng xử của bê tông theo quy luật kết hợp

Quy luật ứng xử kết hợp đã và đang được nhiều tác giả phát triển trong những năm gần đây với mục đích xét hết tất cả các thuộc tính của bê tông gồm tính bất đối xứng khi kéo và khi nén, tính dòn, tính phi đàn hồi, tính cứng cố khi nén và tính bất đẳng hướng. Theo đó tính dòn và tính dẻo được cùng xem xét để có mô hình sát nhất với kết quả quan sát thực nghiệm. Hai phần kết hợp gồm: kết hợp trạng thái đàn hồi-dòn và kết hợp đàn hồi-dẻo.

Nhiều mô hình ứng xử kết hợp đã được đề nghị như: Lemaitre (1992, 2000), Salari (2004), Faria (1998), Simo và Ju (1987), Yazdani và Schreyer (1990), Luccioni (1996), Jefferson (2003), Holmquist-Johnson-Cook (HJC) (1993), Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) (1997)... Theo đó sự kết hợp đúng bản chất được dùng thay thế cho các biến đổi gần đúng của mô hình phá hủy ban đầu để tính đến biến dạng dư khi chịu tải trọng chu kì. Khi đó lí thuyết phá hủy dùng để mô hình hóa phá hủy vật liệu, còn lí thuyết dẻo dùng để xét đến các biến dạng dư và dẫn nở thể tích.

Trong các mô hình ứng xử kết hợp trên, mô hình HJC có thể mô tả ứng xử động của bê tông chịu biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và áp suất cao. Mô hình này đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới trong việc phân tích các phản ứng động của bê tông dưới tác dụng nổ. Chi tiết về mô hình HJC được tác giả trình bày cụ thể ở mục 2.5 của chương này. Đây cũng là mô hình được tác giả chọn để mô tả cho vật liệu bê tông trong luận án này.

2.3 Mô phỏng ứng xử cơ học của cốt thép

Quan sát hiện tượng vật lý và định lượng các thông số tác động vào quá trình giúp các nhà nghiên cứu mô hình hóa các quá trình phá hủy vật liệu thép bằng việc thiết lập các phương trình đại số mô tả ứng xử của vật liệu với các biến trình bày trên bảng 2.1.

Bảng 2.1. Các biến trong mô hình phá hủy vật liệu [82]

Đặc tính cơ học	Kiểu	Biến trạng thái		Biến liên kết
Đàn nhiệt	Ten xơ	ε_{ij}	-	σ_{ij}
Entropy	Vô hướng	T_v	-	s
Biến dạng dẻo	Ten xơ	-	\mathcal{E}^p_{ij}	$-\sigma_{ij}$
Biến cứng đẳng hướng	Vô hướng	-	r	R
Biến cứng động	Ten xơ	-	α_{ij}	X_{ij}
Phá hủy	Vô hướng	-	D	$-Y$
	Ten xơ	-	D_{ij}	$-Y_{ij}$

Biến phá hủy vô hướng: Xét một phân tử thể tích vật liệu với kích thước đủ nhỏ có chứa khuyết tật và tính chất cơ học trong thể tích này liên tục. Gọi S_0 là tổng diện tích của các bề mặt của phân tử này, S là diện tích bề mặt chứa khuyết tật của phân tử chiếm chỗ, \vec{n} là véc tơ pháp tuyến của bề mặt S . Biến phá hủy D_n [83] được định nghĩa:

$$D_n = \frac{S_0 - S}{S_0}, \quad (2.1)$$

với $D_n = 0$, vật liệu không tồn tại khuyết tật; $D_n = D_c$ - vật liệu chứa khuyết tật, với kim loại $0,2 < D_n < 0,8$.

Giá trị của D_n phụ thuộc vào hướng \vec{n} , nếu khuyết tật cấu trúc phân bố đều theo tất cả các hướng thì D_n không phụ thuộc vào \vec{n} , khi đó D_n chính là một đại lượng vô hướng được gọi là D [84].

Trong nhiều trường hợp, biến phá hủy vô hướng được tính dựa trên mô đun đàn hồi của vật liệu thép theo công thức sau:

$$D = \frac{E_e - E_{eff}}{E_e}, \quad (2.2)$$

trong đó E_e , E_{eff} - mô đun đàn hồi khi vật liệu thép không chứa khuyết tật và khi vật liệu thép chứa khuyết tật.

Trong vật liệu thực, khuyết tật cấu trúc phân bố khác nhau theo các hướng. Vì vậy, giả thiết vật liệu đẳng hướng chỉ mang tính tương đối. Bên cạnh đó, trong quá trình biến dạng, mỗi vùng vật liệu lại có mức độ biến dạng khác nhau. Sự hình thành và phát triển vết nứt, lỗ trống cũng khác nhau theo sự tác động của ứng suất hữu hiệu trong từng vùng vật liệu.

Ứng suất tương đương liên hệ với biến phá hủy vô hướng theo công thức:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma}{1 - D}. \quad (2.3)$$

Khi trong vật liệu tồn tại khuyết tật, tính chất vật liệu thay đổi, biến phá hủy vô hướng được xác định bởi sự thay đổi ấy. Mật độ vật liệu thay đổi có thể xem như một biến để xác định mức độ khuyết tật tồn tại trong vật liệu, điện trở thay đổi cũng là một thông số xác định mức độ khuyết tật vi mô, giới hạn mỏi thay đổi xác định được thời gian chịu tải còn lại của vật liệu. Ứng xử cơ học của vật liệu thông qua giá trị ứng suất có thể dự báo được phá hủy vật liệu.

Mô hình phá hủy được sử dụng như một công cụ hữu hiệu trong các phần mềm mô phỏng số. Chúng được sử dụng để nghiên cứu dự báo phá hủy vật liệu nhằm mục đích tối ưu quá trình sản xuất thực tế. Mô hình phá hủy chia làm hai loại chính: mô hình liên kết và mô hình không liên kết. Mô hình

không liên kết, ở đó biến phá hủy không tác động đến tính chất vật liệu, nó chỉ được tính toán trong quá trình hậu xử lý khi phân tích kết quả bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Ngược lại, mô hình phá hủy liên kết ở đó biến phá hủy gắn liền với độ bền của vật liệu trong quá trình biến dạng và khả năng chống lại sự biến dạng vật liệu.

Trong mô hình phá hủy, biến phá hủy D thay vì giá trị bằng 1, có thể quy ước khi D đạt tới giá trị tới hạn D_c vật liệu bị phá hủy. Ngưỡng phá hủy phụ thuộc vào bản chất vật liệu cũng như hàm tải trọng (ứng suất, biến dạng, nhiệt độ, ma sát...) tác dụng lên vật liệu, phá hủy xảy ra khi:

$$D \geq D_c. \quad (2.4)$$

Chỉ tiêu phá hủy là một hàm phụ thuộc vào nhiều biến số được biểu diễn dưới dạng tổng quát (2.5):

$$D = \int_0^{\varepsilon_c} f(X_i) d\varepsilon_p = 1, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.5)$$

trong đó ε_c là giá trị của biến dạng dẻo tương đương tại thời điểm phá hủy, ε_p biến dạng dẻo, các biến X_i có thể là ứng suất, biến dạng, tốc độ biến dạng. Chỉ tiêu phá hủy là hàm số của các biến số tác động vào quá trình (2.6) sao cho:

$$D = \int_0^{\varepsilon_c} f(\sigma, \varepsilon, T, \dot{\varepsilon}) d\varepsilon_p \leq 1. \quad (2.6)$$

Mô hình tổng quát này đã được nhiều nhà nghiên cứu cụ thể hoá thành các phương trình toán học riêng. Mỗi mô hình có những ưu, nhược điểm và phù hợp cho một dạng bài toán. Vì vậy, khi nghiên cứu ứng xử của vật liệu thép cần xác định rõ đặc điểm, các điều kiện biên của bài toán để lựa chọn mô hình phù hợp. Các mô hình này được chia làm hai nhóm dựa trên cơ sở cơ học phá hủy vật liệu (trên cơ sở học môi trường liên tục và quan sát hiện tượng).

2.3.1 Mô hình phá hủy vật liệu thép trên cơ sở cơ học môi trường liên tục

Người đi tiên phong trong nghiên cứu xây dựng mô hình phá hủy vật liệu là McClintock [85], ông quan sát và phân tích sự lớn lên của các lỗ trống hình trụ sinh ra do ứng suất kéo. Tác giả kết luận rằng các lỗ trống này phát triển nhanh và là nguyên nhân gây nên phá hủy vật liệu. Sự phát triển của khuyết tật vật liệu phụ thuộc vào ứng suất dư mà không phụ thuộc nhiều vào

ứng suất thủy tĩnh. Tiếp theo, Rice và Tracey [86] tiếp tục phát triển mô hình của McClintock, các tác giả kết luận rằng những lỗ trống hình trụ và hình cầu đều phát triển hướng tâm, chúng thay đổi cả về kích thước và hình dạng khi vật liệu chịu tải. Sự thay đổi ấy phụ thuộc rất lớn vào chỉ số trạng thái ứng suất. Sau đó, Hancock và MacKenzie tiến hành các thí nghiệm và công bố sự phát triển của lỗ trống không chỉ theo một hướng mà nhiều hướng khác nhau, tốc độ phát triển phụ thuộc chủ yếu vào chỉ số trạng thái ứng suất.

Người đưa mô hình của Hancock và MacKenzie vào ứng dụng rộng rãi trong các phần mềm mô phỏng số hiện nay là Johnson-Cook (JC) [87], tác giả đã tính tới ảnh hưởng của các yếu tố quan trọng trong công nghệ tạo hình ở nhiệt độ cao với tốc độ biến dạng và mức độ biến dạng lớn. JC cho rằng phá hủy xảy ra khi độ xốp trong vật liệu thép đạt đến giá trị tới hạn và không những phụ thuộc vào chỉ số trạng thái ứng suất, mà còn phụ thuộc vào tốc độ biến dạng và nhiệt độ tạo hình. Kết luận này đã bao quát được những yếu tố cần thiết ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình tạo hình và đưa mô hình này vào ứng dụng để dự báo hư hại và phá hủy cho nhiều bài toán trong lĩnh vực tạo hình và gia công vật liệu.

2.3.2 Mô hình phá hủy trên cơ sở quan sát hiện tượng

Phá hủy vật liệu là kết quả của quá trình hình thành phát triển và hợp nhất của các lỗ trống, vết nứt bên trong vật liệu. Kích thước của các khuyết tật thay đổi từ vi mô đến kích thước vĩ mô. Khuyết tật vĩ mô có thể quan sát được bằng thực nghiệm, tính chất vật liệu chứa khuyết tật dạng này xác định thông qua độ bền vật liệu. Các mô hình phá hủy được xây dựng trên cơ sở quan sát hiện tượng như Lemaitre [88], tác giả sử dụng ứng suất hữu hiệu như một thông số quan trọng nhất quyết định đến sự hình thành khuyết tật vĩ mô trong vật liệu. Cùng xây dựng mô hình để mô tả phá hủy vĩ mô là Chaboche [89], Liang Xue và các cộng sự [90]. Trong những năm gần đây, mô hình mô tả ứng xử phá hủy dẻo của vật liệu kim loại được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, xây dựng. Các mô hình không chỉ mô tả sự hình thành, phát triển hợp nhất của các lỗ trống mà còn mô tả tác động của biến dạng, ứng suất, chỉ số trạng thái ứng suất, thông số Loge đến phá hủy vật liệu. Điển hình là mô hình Wierzbicki T [91] và Xue [92].

Trên cơ sở nguồn tài liệu tiếp cận, mô hình Johnson-Cook phù hợp với bài toán mô tả ứng xử động của cốt thép chịu biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và áp suất cao. Mô hình này đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới trong việc phân tích các phản ứng động của cốt thép dưới tác dụng nổ. Chi tiết về mô hình Johnson-Cook được tác giả trình bày cụ thể ở mục 2.5 của chương 2. Đây cũng là mô hình được tác giả chọn để mô tả cho vật liệu cốt thép trong luận án này.

2.4 Cơ sở lý thuyết tính toán trong bài toán nghiên cứu

Trong phạm vi luận án này tác giả nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của tải trọng nổ cụ thể các trường hợp nghiên cứu như sau:

- Sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của vụ nổ tiếp xúc và đề xuất một số giải pháp kháng sập;
- Sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của vụ nổ gần và đề xuất một số giải pháp kháng sập;

Từ phạm vi nghiên cứu trên, cơ sở lý thuyết của các vùng trong bài toán được xem xét cụ thể như sau:

2.4.1 Vùng thuốc nổ

Thuốc nổ được sử dụng trong nghiên cứu này là loại thuốc nổ TNT và các loại tương đương. Khi bị kích nổ thuốc nổ chuyển hóa rất nhanh từ thể rắn sang khí, tương tác và truyền sang các vùng xung quanh một năng lượng nhất định [93,94]. Do sự giãn nở rất lớn trong quá trình nổ, nên vùng thuốc nổ và các phần tử của sản phẩm thuốc nổ được mô hình hóa và giải theo phương pháp lưới Euler hoặc nhờ kỹ thuật hạt không lưới SPH nhằm tránh sự méo mó quá lớn của lưới dẫn đến lỗi trong quá trình giải [95,96]. Mặt khác trong quá trình nổ các phần tử của sản phẩm nổ có thể sẽ được mở rộng ra các lớp môi trường xung quanh và ngược lại, lớp môi trường xung quanh có thể sẽ bị đẩy, thâm nhập vào vùng của sản phẩm nổ. Do đó thuốc nổ và vùng môi trường 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.

2.4.2 Vùng gần tâm nổ

Trong quá trình nổ vùng vật liệu quanh tâm nổ sẽ bị phá hủy và biến dạng lớn, độ lớn vùng phá hoại được xác định nhờ các công thức thực nghiệm hoặc trong mô phỏng ta thực hiện bằng phương pháp thử dần. Bán kính vùng

này được xác định dựa vào khối lượng khối nổ, tính chất của môi trường và vị trí nổ theo công thức sau [10]:

$$R_p = m_l K_p \sqrt[3]{K_T C}, \quad (2.7)$$

trong đó: R_p là bán kính vùng phá hoại; K_p là các hệ số vùng phá hoại phụ thuộc tính chất môi trường; m_l là hệ số lèn; K_p , m_l tra bảng [10]; K_T hệ số qui đổi thuốc nổ sang thuốc nổ tiêu chuẩn TNT theo công thức sau:

$$K_T = \frac{Q_X}{Q_{TNT}}, \quad (2.8)$$

với Q_{TNT} là nhiệt lượng nổ của thuốc nổ TNT; Q_X là nhiệt lượng nổ của thuốc nổ sử dụng.

Vùng vật liệu quanh tâm nổ có sự méo mó và biến dạng rất lớn, nếu sử dụng phần tử Lagrange thông thường để mô hình hóa, lưới sẽ biến dạng quá mức cho phép, phần tử bị lộn ngược lại, thể tích phần tử trở thành âm, dẫn đến quá trình tính toán không thể thực hiện được. Hiện nay để giải quyết những khó khăn đã nêu, có thể sử dụng phương pháp Lagrangian-Eulerian tùy biến ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) hoặc phương pháp hạt không lưới SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) [11,95,97]. Cả hai phương pháp này cho phép ta mô phỏng đáp ứng của vùng vật liệu có biến dạng rất lớn.

Phương pháp hạt không lưới SPH là một kỹ thuật hạt không lưới, do đó nó loại bỏ nhiều vấn đề rắc rối do lưới gây ra và cho kết quả mô phỏng gần thực tế hơn, đồng thời đơn giản trong việc xây dựng các bài toán 3 chiều và có khả năng mô phỏng sự phân tán, thâm nhập của vật chất mà không cần phải sử dụng các kỹ thuật đặc biệt. Phương pháp này tính toán các quá trình nổ, va chạm tốc độ cao, cũng như các tải trọng động khác, đặc biệt khi có sự thay đổi đáng kể về hình dáng hình học của các đối tượng được mô phỏng (ví dụ sự dẫn nổ, mở rộng vật chất). Trong phương pháp hạt không lưới SPH vật liệu được biểu diễn bằng các hạt có khối lượng cố định và chuyển động theo biến dạng của vật liệu. Không giống như phương pháp dựa trên lưới là giả định liên kết giữa các nút lưới để xây dựng lên mô hình vật thể không gian, phương pháp hạt không lưới SPH sử dụng một tập xỉ hạt nhân (hạt trung tâm) dựa trên nội suy phân bố ngẫu nhiên của điểm. Các hạt mang vật chất như khối lượng m , vector vận tốc \vec{v} vector vị trí \vec{x} ... và hình thành khung tính toán cho các phương trình bảo toàn (khối lượng, động lượng, năng lượng...) cùng với phương trình trạng thái.

2.4.3 Vùng không khí

Trong mô phỏng số không khí được xem là khí lý tưởng, như vậy phương trình trạng thái khí lý tưởng được sử dụng để mô tả ứng xử của không khí dưới tác dụng của vụ nổ. Đối với khí lý tưởng khi mô phỏng không cần đến mô hình bền cũng như mô hình phá hủy, nội năng của nó được xem là một hàm tỷ lệ thuận với nhiệt độ. Với trạng thái ban đầu cân bằng và phương trình trạng thái khí lý tưởng được sử dụng cho vùng không khí [98].

Vùng không khí có khả năng bị biến dạng rất lớn nên trong mô phỏng sử dụng phương pháp Euler để tính toán (lưới vẫn giữ nguyên trong suốt quá trình mô phỏng). Với phương pháp Euler vật liệu chảy qua lưới nên không xảy ra hiện tượng lưới bị méo mó và biến dạng khi vật liệu biến dạng lớn. Lời giải bằng cách sử dụng phương pháp Euler thường tính toán tốn nhiều bộ nhớ hơn so với sử dụng phương pháp Lagrange. Với phương pháp Lagrange trong quá trình tác động các nút của lưới sẽ biến dạng theo sự biến dạng của vật liệu còn với phương pháp Euler các nút của lưới được cố định trong không gian (chúng không di chuyển), thay vào đó vật liệu được theo dõi khi nó di chuyển qua lưới [97].

Do có vật liệu chuyển động qua lưới, các biến đặc trưng cho trạng thái của môi trường sẽ dịch chuyển. Hiện nay khi sử dụng phương pháp Euler có các thuật toán cho phép mỗi ô lưới chứa một hoặc nhiều vật liệu, lưu ý rằng khoảng trống (không gian tự do) cũng được coi là một vật liệu. Các lưới loại này lần lượt được gọi là lưới Euler một thành phần và lưới Euler nhiều thành phần [97].

2.4.4 Vùng kết cấu công trình

Đối với kết cấu công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, sự biến dạng của các phần tử kết cấu, vị trí của mỗi chất điểm trong môi trường kết cấu liên tục có thể được mô tả căn cứ theo tọa độ ban đầu sử dụng phương pháp Lagrange [99], vị trí nghiên cứu khi chất điểm trong môi trường kết cấu không liên tục thì sử dụng phương pháp Euler [100,101], những vị trí chất điểm nằm giao thoa hai vùng môi trường kết cấu trên sử dụng kỹ thuật ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) để giải, chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các nút cũng như ứng suất và biến dạng của các phần tử trong vùng này nhận được nhờ giải các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng. Các phương trình này cùng với mô hình vật liệu cụ thể và một tập hợp các điều kiện ban đầu, điều kiện biên sẽ cho ta lời giải hoàn chỉnh [102].

2.4.4.1 Phương pháp lưới Lagrange

Trong vùng Lagrange, lưới di chuyển và biến dạng cùng với sự biến dạng của vật liệu mà nó mô hình hóa, vì vậy định luật bảo toàn khối lượng luôn được đảm bảo. Khối lượng riêng của vật liệu trong vùng Lagrange ở bất kỳ thời điểm nào có thể được xác định từ thể tích hiện tại của vùng và khối lượng ban đầu của nó theo phương trình bảo toàn khối lượng [97,99].

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}. \quad (2.9)$$

Các phương trình vi phân từng phần thể hiện sự bảo toàn động lượng trong vùng Lagrange được biểu diễn thông qua mối quan hệ giữa gia tốc và các thành phần tenxơ ứng suất σ_{ij} như sau [97,103]:

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \ddot{y} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \ddot{z} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Các thành phần nội lực trong vùng Lagrange được xác định thông các phương trình vi phân từng phần (2.10) bằng cách nhân với vi phân thể tích dV . Theo định lý Green, chúng ta có thể lấy được tích phân bề mặt xung quanh hình bát giác bao quanh nút liên quan (hình 2.1). Đối với phần tử khối 8 nút, khối lượng phần tử quy về nút được tính từ khối lượng của 8 đa diện quanh nút đó [97].

$$m_p = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 m_n. \quad (2.11)$$

Phương trình xác định chuyển động theo phương x là [104]

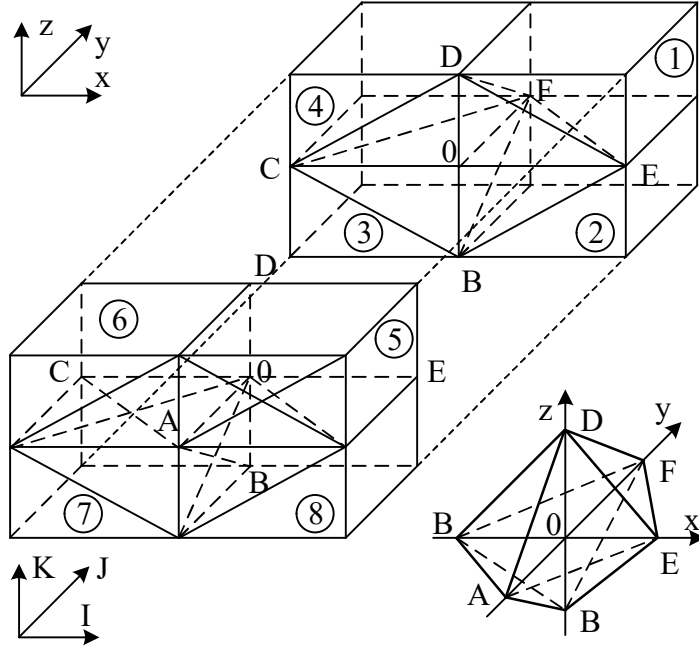
$$m_p \ddot{x} = \frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial F_{zx}}{\partial z}, \quad (2.12)$$

trong đó $\frac{\partial F_{xx}}{\partial x}$ xác định thông qua giá trị ứng suất $(\sigma_{xx})_n$ của 8 PT xung quanh nút đó [97].

$$\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^8 [(\sigma_{xx})_n \times A_n], \quad (2.13)$$

với A_n là diện tích chiếu của mặt bát diện trong phần tử n lên mặt phẳng $x =$

0, tương tự có thể tìm được $\frac{\partial F_{xy}}{\partial y}$ và $\frac{\partial F_{zx}}{\partial z}$.



Hình 2.1. Minh họa xác định lực nút trong không gian 3 chiều [97]

Từ hình 2.1 ta nhận được lực theo phương x do phần tử 1 đóng góp vào nút 0 là [33]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4}(\sigma_{xx})_1 [(y_F - y_E)(z_D - z_E) - (z_F - z_E)(y_D - y_E)] + \\ & \frac{1}{4}(\sigma_{xy})_1 [(z_F - z_E)(x_D - x_E) - (x_F - x_E)(z_D - z_E)] + \\ & \frac{1}{4}(\sigma_{zx})_1 [(x_F - x_E)(y_D - y_E) - (y_F - y_E)(x_D - x_E)]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Tổng lực theo phương x tại nút 0 sẽ xác định bằng cách lấy tổng các lực do 8 phần tử xung quanh nút đó đóng góp.

Tương tự như trên phương trình thể hiện chuyển động theo hướng y, z là [97]:

$$\begin{aligned} m_p \ddot{y} &= \frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial F_{yz}}{\partial z}, \\ m_p \ddot{z} &= \frac{\partial F_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial F_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Lực theo phương y, z do phần tử 1 đóng góp vào nút 0 là [97]:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{4}(\sigma_{xy})_1 [(y_F - y_E)(z_D - z_E) - (z_F - z_E)(y_D - y_E)] + \\
& \frac{1}{4}(\sigma_{yx})_1 [(z_F - z_E)(x_D - x_E) - (x_F - x_E)(z_D - z_E)] + \\
& \frac{1}{4}(\sigma_{yz})_1 [(x_F - x_E)(y_D - y_E) - (y_F - y_E)(x_D - x_E)], \\
& \frac{1}{4}(\sigma_{zx})_1 [(y_F - y_E)(z_D - z_E) - (z_F - z_E)(y_D - y_E)] + \\
& \frac{1}{4}(\sigma_{zy})_1 [(z_F - z_E)(x_D - x_E) - (x_F - x_E)(z_D - z_E)] + \\
& \frac{1}{4}(\sigma_{zz})_1 [(x_F - x_E)(y_D - y_E) - (y_F - y_E)(x_D - x_E)].
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Các thành phần của tenxơ ứng suất $[\sigma_{ij}]$ được xác định như sau [97]:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= -(p + q) + s_{xx}, \\
\sigma_{yy} &= -(p + q) + s_{yy}, \\
\sigma_{zz} &= -(p + q) + s_{zz}, \\
\sigma_{xy} &= s_{xy}, \sigma_{yz} = s_{yz}, \sigma_{zx} = s_{zx},
\end{aligned} \tag{2.17}$$

trong đó: p là áp suất thủy tĩnh; q là áp suất giả nhớt; s_{xx} , s_{yy} , s_{zz} , s_{xy} , s_{yz} , s_{zx} là các thành phần ứng suất lệch. Dấu âm thể hiện rằng ứng suất là dương khi kéo và âm khi nén (ngược lại với áp suất).

Các thành phần của tenxơ biến dạng $[\varepsilon_{ij}]$ được xác định từ mối quan hệ giữa tốc độ biến dạng và vận tốc $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ theo các biểu thức sau [97]:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_{xx} &= \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}, \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial \dot{z}}{\partial z}, \\
\dot{\varepsilon}_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{x}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right), \dot{\varepsilon}_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{y}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial y} \right), \dot{\varepsilon}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{z}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial z} \right).
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Các thành phần tốc độ biến dạng trên có liên quan đến tốc độ thay đổi thể tích thể hiện ở biểu thức sau [33]:

$$\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\varepsilon}_{xx} + \dot{\varepsilon}_{yy} + \dot{\varepsilon}_{zz}. \tag{2.19}$$

Đối với ứng xử đàn hồi của vật liệu, từ phương trình (2.19) và định luật Hooke ta xác định được quan hệ giữa tốc độ ứng suất lệch và tốc độ biến dạng như sau [97]:

$$\dot{s}_{xx} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \dot{V} \right), \dot{s}_{yy} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \dot{V} \right), \dot{s}_{zz} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{zz} - \frac{1}{3} \dot{V} \right), \quad (2.20)$$

$$\dot{s}_{xy} = 2G \dot{\epsilon}_{xy}, \dot{s}_{yz} = 2G \dot{\epsilon}_{yz}, \dot{s}_{zx} = 2G \dot{\epsilon}_{zx}.$$

Áp lực thủy tĩnh p là hàm của khối lượng riêng ρ và nội năng e , mối quan hệ này gọi là phương trình trạng thái (EOS) [33].

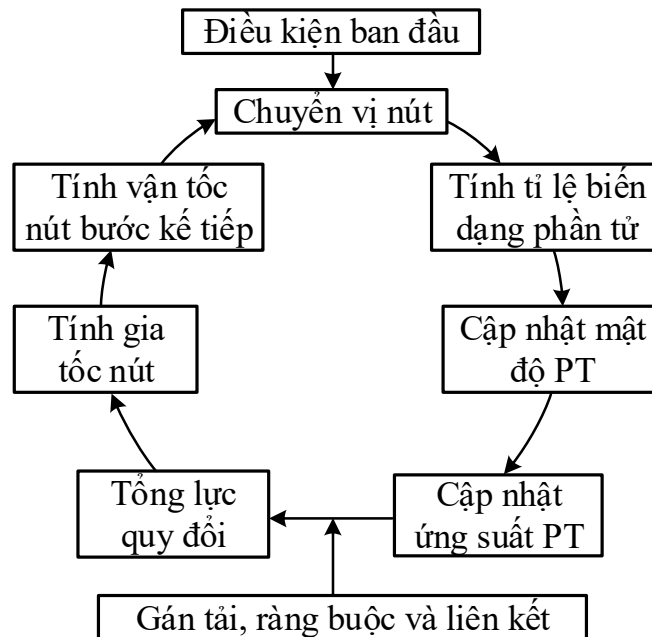
$$p = f(\rho, e). \quad (2.21)$$

Đối với mỗi loại vật liệu khác nhau sẽ có phương trình trạng thái khác nhau. Khi mô phỏng phải giải quyết đồng thời phương trình trạng thái và phương trình bảo toàn năng lượng [97,103].

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \left(\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} \right). \quad (2.22)$$

Trong mỗi bước thời gian của tiến trình giải, các phương trình này được giải một cách tường minh cho từng phần tử trong mô hình dựa trên các giá trị đầu vào ở cuối bước thời gian trước đó. Trên thực tế trong tiến trình giải chỉ thực hiện bảo toàn khối lượng và động lượng. Tuy nhiên bảo toàn năng lượng cần được theo dõi liên tục để có phản hồi về chất lượng của lời giải, trái ngược với sai số hội tụ trong phương pháp giải ẩn của các phương pháp động lực học không tường minh (Implicit).

Giải thuật giải trong vùng Lagrange được thể hiện như trên hình 2.2 [97]:



Hình 2.2. Chu trình tính toán trong vùng Lagrange [97]

2.4.4.2 Phương pháp hạt không lưới SPH

Trong phương pháp SPH vùng nghiên cứu được rời rạc hóa bằng một tập hợp hữu hạn các hạt, các hạt này có thể hiểu như là các thể tích phân tử của môi trường liên tục. Mỗi hạt có kích thước đủ lớn để có thể sở hữu các đặc tính chuẩn mực của môi trường như: khối lượng riêng, khối lượng, vận tốc, năng lượng, áp suất. Mỗi hạt cũng cần có kích thước đủ nhỏ để có thể coi các tham số của hạt là như nhau. Giá trị của thể tích này được tính bằng tỷ số giữa khối lượng của hạt với khối lượng riêng của nó $V=m/\rho$ (m là khối lượng; ρ là khối lượng riêng). Về toán, giá trị của hàm $a(x)$ phải tìm tại một điểm bất kỳ được biểu diễn dưới dạng tích phân của hàm này với hàm trọng số Dirac. Về vật lý $a(x)$ có thể là tham số chuyển động hay trạng thái cần tìm [11,105,116]:

$$a(x) = \int_R a(x') \delta(x' - x) dx', \quad (2.23)$$

trong đó: $\delta(x' - x)$ là hàm xung delta Dirac; $a(x)$ là hàm cần tìm; dx' phần thể tích nhỏ trong không gian đang được xem xét.

Bản chất của phương pháp SPH chính là việc xấp xỉ công thức (2.23) thành các chuỗi biến đổi liên tục. Đầu tiên để nhận được công thức gần đúng của hàm tích phân trong miền R , thay thế hàm Dirac bởi hàm giải tích cổ điển tron tru nào đấy $W[(x' - x), h]$ và gọi là hàm trọng số hạt trung tâm (hạt nhân), việc thay thế hàm giải tích này được gọi là làm mịn, h là bán kính làm mịn. Kết quả ta nhận được [11,105,116]:

$$\bar{a}(x) = \int_R a(x') W[(x' - x), h] dx'. \quad (2.24)$$

Rõ ràng rằng $W[(x' - x), h]$ cần phải thỏa mãn điều kiện [116,117]:

$$\begin{cases} \int_R W(x, h) dx' = 1, \\ W(x, h) \xrightarrow{h \rightarrow 0} \delta(x). \end{cases} \quad (2.25)$$

Trong công trình của Monaghan [116,117] khẳng định rằng nếu những điều kiện này được thỏa mãn (thông thường lựa chọn hàm $W(x, h) = e^{-(x/h)^2}$),

thì việc thay thế gần đúng trên sẽ đảm bảo mức gần đúng tới bậc 2 - $O(h^2)$.

Bây giờ chúng ta hãy xem xét các phương pháp số để tính các tích phân này. Ta giả định mô hình (môi trường nghiên cứu) của chúng ta được chia nhỏ thành các phần tử (các hạt). Mỗi phần tử (hạt) như vậy có giá trị tham số xấp xỉ $a(x)$ của mình bằng a_i . Chúng ta giả định rằng đã biết khối lượng riêng ρ_i , vị trí x_i và cả khối lượng m_i của nó. Vấn đề phân bố của các hạt này như thế nào để xấp xỉ các tham số $a(x)$ theo cách tốt nhất là vấn đề rất phức tạp, tuy nhiên trong hầu hết các trường hợp, thời điểm ban đầu đơn giản và dễ dàng nhất được sử dụng là phân bố dạng lưới hình khối đều đặn.

Bằng cách thay thế tích phân trong công thức (2.24) bằng tổng các thành phần ta nhận được:

$$\bar{a}(x) = \sum_i \frac{m_i a_i}{\rho_i} W[(x_i - x), h]. \quad (2.26)$$

Phép tổng (2.26) không tính với mọi hạt, mà chỉ tính cho một số hữu hạn các hạt xung quanh hạt i - miền này gọi là miền kề quanh i . Kích thước miền kề được xác định theo bán kính Kernal h . Sau khi tính được xấp xỉ $\bar{a}(x)$, thường đòi hỏi tính các đạo hàm $\frac{\partial \bar{a}(x)}{\partial x_\alpha}$, với SPH, các đạo hàm được xấp xỉ theo tổng (2.27).

Sử dụng sự xấp xỉ theo công thức (2.26) sẽ đơn giản hóa việc tính toán, gradient của hàm bên trái $\frac{\partial \bar{a}(x)}{\partial x_\alpha}$ sẽ thực sự tương ứng với một hàm liên tục (hạt mịn) [83,104,105]:

$$\frac{\partial \bar{a}(x)}{\partial x_\alpha} = \sum_i \frac{m_i a_i}{\rho_i} \frac{\partial W[(x_i - x), h]}{\partial x_\alpha}. \quad (2.27)$$

Việc tính toán các gradient sẽ dẫn đến tính vi phân của các hàm giải tích, cần lưu ý rằng biểu thức này không phải là dạng duy nhất của xấp xỉ đạo hàm $\frac{\partial \bar{a}(x)}{\partial x_\alpha}$.

Xấp xỉ các phương trình cơ bản trong cơ học môi trường liên tục với sự trợ giúp của phương pháp hạt không lưới SPH với độ chính xác bậc 2 - $O(h^2)$

sẽ có dạng như sau [95,116,117]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\rho_i}{dt} &= \sum_k m_k (u_k^\alpha - u_i^\alpha) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\alpha}; \quad \frac{du_i^\alpha}{dt} = \sum_k m_k \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_k^{\alpha\beta}}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\beta}, \\
\frac{de_i}{dt} &= \sum_k m_k (u_i^\alpha - u_k^\alpha) \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_k^{\alpha\beta}}{\rho_k^2} \right) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\beta}, \\
\frac{ds_i^{\alpha\beta}}{dt} &= 2\mu \left(\varepsilon_i^{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta^{\alpha\beta} \varepsilon_i^{\alpha\beta} \right) + s_i^{\alpha\gamma} R_i^{\beta\gamma} + s_i^{\gamma\beta} R_i^{\alpha\gamma}, \\
\varepsilon_i^{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} \sum_k \frac{m_k}{\rho_k} \left[(u_k^\alpha - u_i^\alpha) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\beta} + (u_k^\beta - u_i^\beta) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\alpha} \right], \\
R_i^{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} \sum_k \frac{m_k}{\rho_k} \left[(u_k^\alpha - u_i^\alpha) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\beta} - (u_k^\beta - u_i^\beta) \frac{\partial W_{ik}}{\partial x_i^\alpha} \right].
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Tích phân các phương trình cho hạt thứ i được thực hiện theo sơ đồ sau:

$$\begin{aligned}
x_i^{n+1} &= x_i^n + \Delta t \left(u_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \frac{du_i^n}{dt} \right); \quad \rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t \frac{d\rho_i^n}{dt}, \\
u_i^{n+1} &= u_i^n + \Delta t \frac{du_i^n}{dt}; \quad s_i^{n+1} = s_i^n + \Delta t \frac{ds_i^n}{dt},
\end{aligned} \tag{2.29}$$

trong đó, các giá trị của các thành phần của tensor ứng suất σ_i^{n+1} được tính toán với sự trợ giúp của phương trình trạng thái theo các giá trị khối lượng riêng đã tính được ρ_i^{n+1} và tenxơ ứng suất lệch s_i^{n+1} .

Lực thể tích các hạt được xác định như sau [95,97]:

$$\begin{aligned}
F_i^{pressure} &= - \sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W(r_{ij}, h), \\
F_i^{viscosity} &= \mu \sum_j m_j \frac{v_i - v_j}{2\rho_j} \nabla^2 W(r_{ij}, h),
\end{aligned} \tag{2.30}$$

trong đó: $r_{ij} = x_i - x_j$; còn μ hệ số độ nhớt; áp suất p_i được tính toán thông qua phương trình cơ bản:

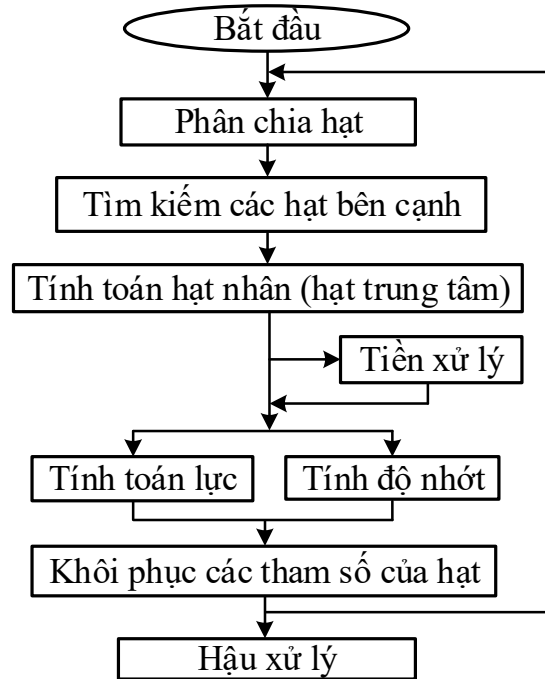
$$p_i = k(\rho_i - \rho_0), \tag{2.31}$$

ở đây k, ρ_0 lần lượt là độ cứng và khối lượng riêng ban đầu của vật liệu

Cuối cùng gia tốc của hạt SPH thứ i nào đó được xác định theo biểu thức [95,97]:

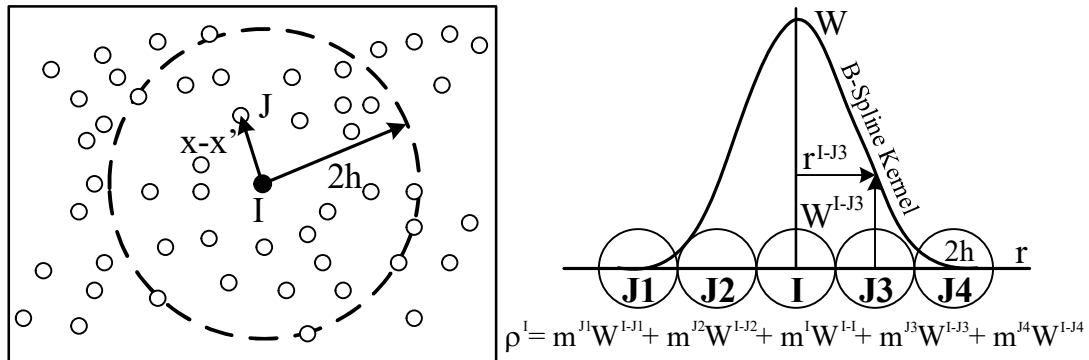
$$a_i = \frac{1}{\rho_i} (F_i^{pressure} + F_i^{viscosity} + F_i^{external}), \quad (2.32)$$

trong đó $F_i^{external}$ là ngoại lực (như trọng lượng bản thân hay lực tiếp xúc) tác dụng lên hạt SPH.



Hình 2.3. Sơ đồ thuật toán giải bài toán bằng phương pháp SPH [95,97]

Thuật toán tổng quát để giải quyết một bài toán hạt rời rạc được thể hiện trong hình 2.3 mỗi giai đoạn của tính toán có thể được triển khai theo nhiều cách khác nhau, trong giai đoạn khởi tạo cần thiết phải cho kích thước hình học của miền con của vùng được mô hình hóa, cho tính chất vật lý và điều kiện tính toán ban đầu, ở giai đoạn tạo hạt cần cho các tọa độ của từng hạt được khởi tạo. Cần lưu ý rằng khi mô hình hóa sự tương tác của dòng chất lưu (lỏng và khí) với các vật thể rắn có hình dạng phức tạp, cũng như với các vật thể biến dạng dẻo số lượng các hạt sinh ra phải tăng lên sao cho nó có thể che phủ bề mặt của vật thể tiếp xúc với lưu chất. Để quan sát các điều kiện biên trên biên "lỏng-rắn" lớp ngoài của các hạt được bố trí sao cho các tâm của chúng trùng với bề mặt của vật thể rắn. Sau khi thu được sự phân bố các hạt ban đầu, thực hiện quá trình tính toán lặp các giá trị mới của tọa độ, vận tốc, mật độ cho mỗi hạt.



Hình 2.4. Quan hệ của hạt trung tâm với hạt lân cận và khoảng làm mịn [11,95,97]

Các hạt là các điểm nội suy mà từ đó các giá trị của hàm và các dẫn xuất của chúng có thể được ước tính tại các điểm rời rạc trong phần tử liên tục. Các giá trị hàm và các dẫn xuất của chúng được tìm bằng xấp xỉ Kernel thay vì từ dạng có kết cấu lưới. Ví dụ khối lượng riêng được tính nội suy theo hàm trọng số W và độ dài làm mịn h như sau [11,95,97]:

$$\rho^I = \sum_{J=1}^N m^J W^{IJ} \left[(x^I - x^J), h \right], \quad (2.33)$$

Trong phương pháp SPH, mỗi hạt 'I' tương tác với tất cả các hạt khác 'J' nằm trong một khoảng cách nhất định nào đó tính từ nó (hình 2.4). Các tương tác được xử lý bằng các hàm làm mịn (hàm Kernel). Sử dụng nguyên lý này, giá trị của hàm liên tục, hoặc đạo hàm của nó có thể được ước tính tại bất kỳ hạt 'I' nào dựa trên cơ sở đã biết các giá trị ở xung quanh các hạt 'J' bằng cách sử dụng các ước lượng hạt trung tâm (ước lượng Kernel [95]) (hình 2.4) và hàm dạng trong phương pháp SPH được tạo thành từ thể tích hạt và hàm trọng số như sau [11,95,97]:

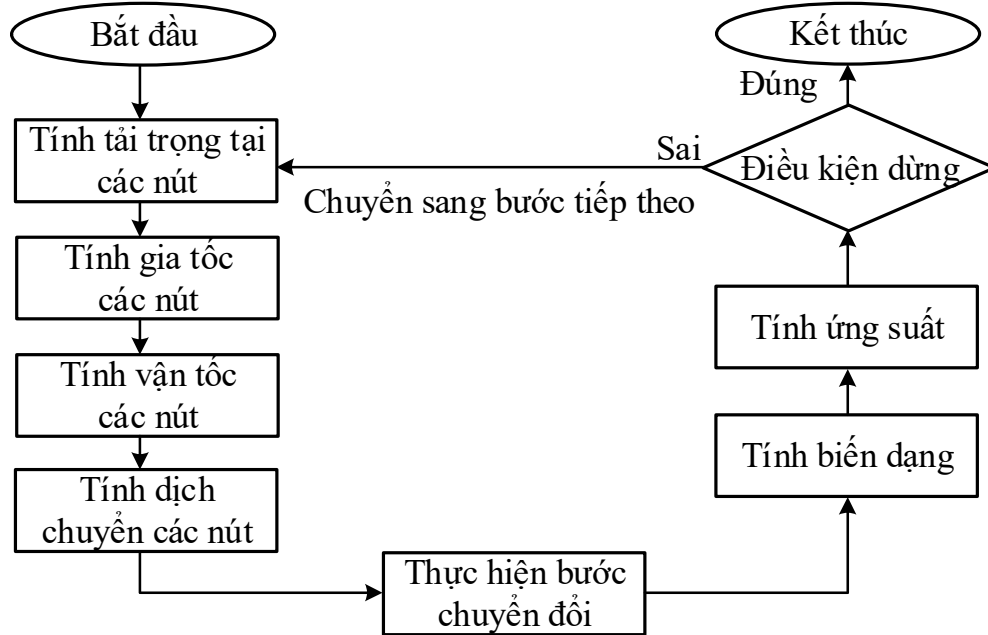
$$N(x) = \Delta V_I W \left[(x - x_I), h_0 \right], \quad (2.34)$$

ở đây ΔV_I là thể tích liên kết với hạt lân cận và $W \left[(x - x_I), h_0 \right]$ là một hàm trọng số.

2.3.4.3 Phương pháp lưới Euler

Khi giải bằng phương pháp Euler, các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng được giải trên một khối có cấu trúc lưới nền bằng cách sử dụng sơ đồ đa vật liệu của Godunov có độ chính xác bậc 2 kết hợp

với phương pháp ngược dòng bậc 2 của Van Leer [97,103].



Hình 2.5. Sơ đồ tích phân theo thời gian khi sử dụng lưới Euler [97]

2.5 Phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration)

Khi tính toán công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration) [97,103] 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 công trình. Quá trình tính toán bắt đầu từ tâm vụ nổ, năng lượng lan truyền qua các phân tử môi trường theo bước thời gian và tác dụng vào công trình. Hệ công trình và môi trường (không khí, đất...) cùng làm việc đồng thời. Giải quyết bài toán tương tác này thực chất là giải quyết hệ bài toán vi phân đạo hàm riêng cực kỳ phức tạp [97,103], 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 và điều kiện ban đầu theo cả trường không gian và thời gian.

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 [103]. 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 [97,103,106]. Các phương trình sử dụng để mô tả trạng thái của vật liệu, các quan hệ giữa ứng suất, biến dạng và chuyển vị.

Phương trình của định luật bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2.35)$$

Phương trình của định luật bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.36)$$

Phương trình của định luật bảo toàn năng lượng:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + v_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (2.37)$$

Các phương trình bổ trợ cho mô hình hóa:

$$\text{- Phương trình ten xơ ứng suất: } \sigma_{ij} = -(p + q) + s_{ij}, \quad (2.38)$$

$$\text{- Phương trình trạng thái: } p = f(\rho, e), \quad (2.39)$$

$$\text{- Phương trình quan hệ cơ bản: } \sigma_{ij} = g(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, e), \quad (2.40)$$

$$\text{- Phương trình mô phỏng nổ: } \sigma_{ij} = g(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, e, D), \quad (2.41)$$

trong đó các đại lượng được mô tả trong các phương trình (2.35)-(2.41): t - thời gian (s); v - vận tốc (m/s); x - chuyển vị (m); D - tham số phá hủy; e - Nội năng (J); p - Áp suất thủy tĩnh (Pa); s - ứng suất lệch (Pa); T - nhiệt độ (K); q - áp suất giả nhớt (Pa); ρ - khối lượng riêng (kg/m³); σ - ứng suất (Pa); ε - biến dạng; i, j, k - chỉ số dưới; θ - trạng thái ban đầu; Chỉ số trên “ \cdot ” - đạo hàm.

Những phương trình trên phải được giải quyết đồng thời trong mọi thời điểm, phương pháp tích phân 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 phần mềm 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) [95,97].

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 tích phân Newmark [1,107,108]. 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) [97] cụ thể như sau:

Sau khi lực đã được tính toán tại các nút của lưới (do áp lực bên trong, tiếp xúc hoặc điều kiện biên), các lực nút được chia cho khối lượng nút để tạo ra gia tốc nút theo công thức (2.42) [97]:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i, \quad (2.42)$$

trong đó: \ddot{x}_i là các thành phần gia tốc nút ($i=1..3$); F_i là các lực nút tác dụng lên các điểm nút tương ứng; b_i là các thành phần gia tốc của vật thể; m là khối lượng được gán cho nút.

Với các gia tốc tại thời điểm n đã xác định, vận tốc tại thời điểm $n+1/2$ sẽ được xác định theo công thức (2.43) [97]:

$$\dot{x}_i^{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_i^{n-\frac{1}{2}} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n. \quad (2.43)$$

Vị trí của các nút tại thời điểm $n+1$ sẽ được cập nhật bằng cách tích phân vận tốc theo công thức (2.44) [97]:

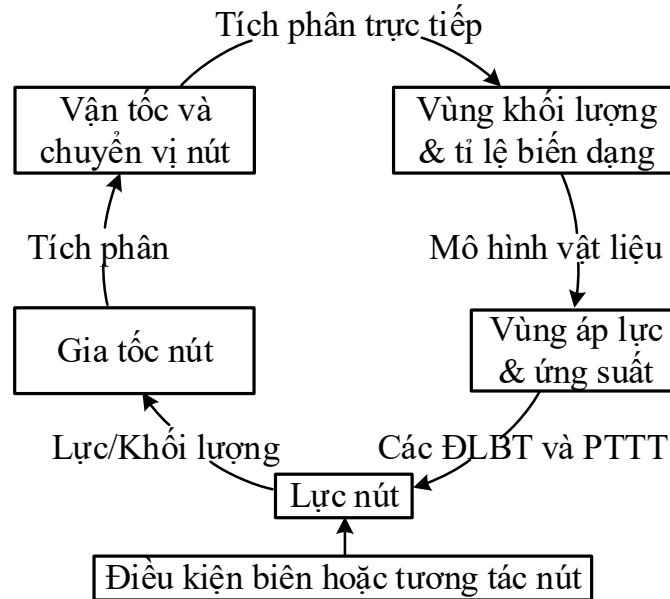
$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}}. \quad (2.44)$$

Ưu điểm của việc sử dụng phương pháp này là các phương trình trở nên độc lập riêng rẽ và có thể được giải một cách trực tiếp tường minh. Không có yêu cầu thuật toán lặp trong quá trình tích phân theo thời gian. Không cần thiết phải kiểm tra tính hội tụ bởi vì các phương trình đã được tách rời độc lập riêng rẽ. Không cần phải tính ma trận độ cứng nghịch đảo. Tất cả các phi tuyến (bao gồm cả thành phần tiếp xúc) đều được đưa vào trong vector nội lực.

Để đảm bảo sự ổn định và chính xác của lời giải, độ lớn của bước thời gian được sử dụng trong tích phân theo thời gian bị giới hạn bởi điều kiện CFL (Courant-Friedrichs-Lewy [97,109]). Điều kiện CFL yêu cầu bước thời gian lựa chọn phải đủ nhỏ để thông tin có đủ thời gian để truyền qua không gian được rời rạc hóa. Trong bài toán thực tế, điều kiện CFL được mô tả rằng bước thời gian tính toán phải nhỏ hơn khoảng thời gian cho một sóng âm vượt qua phần tử nhỏ nhất của mô hình cụ thể là:

$$\Delta t \leq \frac{l.k_m}{c}, \quad (2.45)$$

trong đó: k_m là kích thước nhỏ nhất của phần tử; l là hệ số ổn định (l có giá trị từ 0,6-0,9 [97]); c vận tốc sóng âm trong môi trường.



Hình 2.6. Sơ đồ giải pháp tính toán bằng ABAQUS [97]

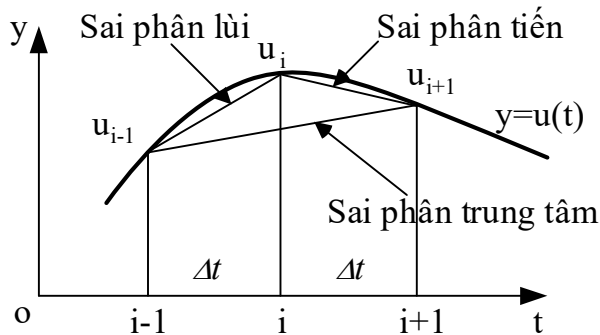
Để tính toán các đại lượng, giải pháp tính toán ABAQUS áp dụng kỹ thuật rời rạc hóa các phương trình vi phân cơ bản trong cơ học vật rắn biến dạng thành một tập hợp các phương trình đại số, kỹ thuật rời rạc hóa tuân theo phương pháp rời rạc hóa của Wilkins [97] với một số thay đổi cụ thể. Đây là phương pháp dựa trên phương pháp sai phân trung tâm tường minh (explicit central difference method) [97] với sai số bậc 2. Các công thức của sai phân hữu hạn được trình bày trong (bảng 2.2) và biểu diễn hình học được thể hiện ở (hình 2.7). Trong

phương pháp tường minh (explicit method) các đại lượng tại bước thời gian $t+l$ được tính trực tiếp dựa trên các đại lượng đã biết ở bước thời gian trước đó t .

Các công thức rời rạc hóa để xử lý phương trình vi phân trình bày trong (bảng 2.2) [103], thay vì không khả thi khi tính trực tiếp hệ phương trình vi phân phức tạp, các phương pháp sai phân hữu hạn cho phép lập trình và tính toán các hệ phương trình vi phân thường (ODE) và phương trình vi phân đạo hàm riêng (PDE).

Bảng 2.2. Các công thức phương pháp sai phân hữu hạn

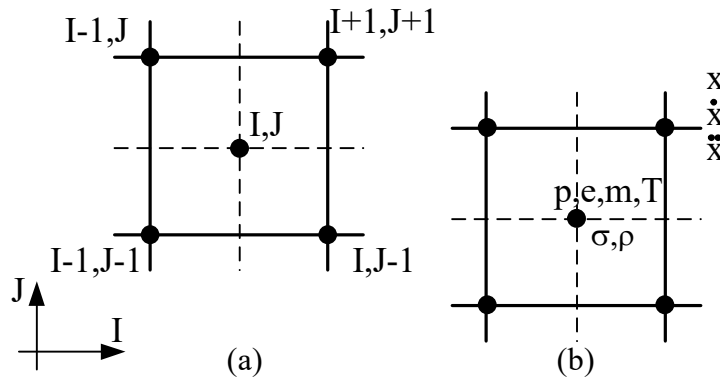
Đạo hàm	Công thức	Tên	Độ chính xác
$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{t=t_i}$	$\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta t}$	Sai phân tiến	Bậc nhất
$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{t=t_i}$	$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t}$	Sai phân lùi	Bậc nhất
$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{t=t_i}$	$\frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t}$	Sai phân trung tâm	Bậc hai
$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right)_{t=t_i}$	$\frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta t^2}$	Sai phân trung tâm	Bậc hai



Hình 2.7. Biểu diễn hình học các công thức của sai phân hữu hạn

Rời rạc hóa không gian trong ABAQUS là rời rạc hóa lưới, (hình 2.8) miêu tả lưới phần tử và phép gán các biến cho phần tử chữ nhật. Lưới đại diện cho đối tượng hình học cần quan tâm, các tham số vật liệu, điều kiện biên và điều kiện ban đầu được gán cho lưới.

Sự biến dạng của môi trường, vị trí của mỗi chất điểm trong môi trường liên tục có thể được mô tả căn cứ theo tọa độ ban đầu sử dụng phương pháp Lagrange [99], vị trí nghiên cứu khi chất điểm không trong môi trường liên tục thì sử dụng phương pháp Euler [101,108], những vị trí chất điểm nằm giao thoa hai vùng trên sử dụng phương pháp ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Cả ba phương pháp trên được kết hợp để giải các bài toán va chạm, nổ... Nguyên lý giải các phương trình vi phân được thể hiện trong tính toán Lagrange [97]. Hình 2.8 (a) mô tả cho phương pháp lưới Lagrange, Hình 2.8 (b) mô tả phương pháp lưới Euler [97].



Hình 2.8. Rời rạc hóa trong ABAQUS [97]

(a) - Lưới phần tử nút I, J ; (b) - Các tham số trong phần tử

Để tính toán SDLT công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ bằng ABAQUS trước tiên cần phải lựa chọn mô hình vật liệu, mô hình hóa bài toán. Công việc này thực chất là lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp, 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.

2.6 Xây dựng mô hình vật liệu, mô hình tính trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để phân tích sự SDLT của kết cấu

2.6.1 Giới thiệu về ABAQUS

ABAQUS được viết và phát triển từ năm 1978 bởi Hibbitt, Karlsson và Sorensen, trụ sở đặt tại thành phố Pawtucket bang Rhode Island, Mỹ. Bộ phần mềm này bao gồm hai khối phân tích chủ yếu:

- ABAQUS/Standard khối phân tích sử dụng bài toán động tốc độ thấp và tĩnh, cần có các giải pháp chính xác cao

- ABAQUS/Explicit khối phân tích để giải các bài toán phi tuyến với những mô hình bài toán chịu tải trọng phức tạp

Ngoài ra còn có các khối phân tích phụ ABAQUS/Aqua, ABAQUS/Design, ABAQUS/Viewer, ABAQUS/CAE là khối giao tiếp với người dùng, làm công tác tiền xử lý như thiết lập mô hình, gán các đặc tính và điều kiện biên hay xử lý kết quả sau khi phân tích [85].

Tất cả những thông tin được xử lý qua phần mềm ABAQUS được thực hiện thông qua 3 giai đoạn đó là xử lý số liệu, phân tích và xử lý kết quả.

Và ngoài ra việc sử dụng phần mềm ABAQUS không chỉ được ứng dụng nhiều trong việc phân tích kết cấu mà nó còn được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như truyền dẫn nhiệt, điện tử cơ học hay phân tích âm thanh.

Để phân tích mô hình tính của bài toán nghiên cứu của luận án này tác giả sử dụng khối phân tích ABAQUS/Explicit.

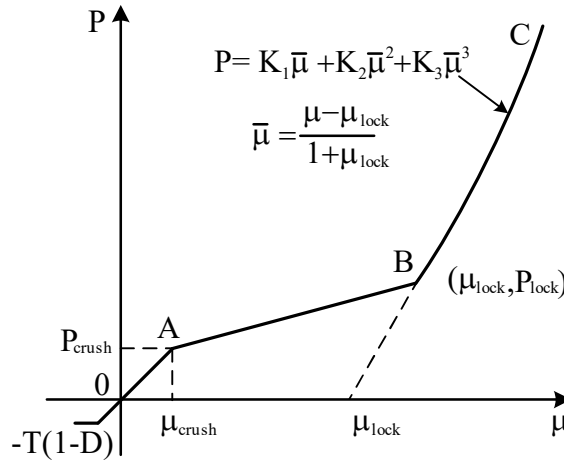
Tuy nhiên, trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS, mô hình tính và mô hình các vật liệu, các thông số cơ bản có thể được lấy trực tiếp và các thông số còn lại thường được coi là giống với các thông số mô hình cụ thể, điều này làm giảm độ chính xác của các kết quả mô phỏng số. Vì vậy, cần phải tiến hành thực nghiệm để đánh giá và hiệu chỉnh mô hình tính, đưa ra các tham số của mô hình vật liệu cho từng bài toán cụ thể.

2.6.2 Xây dựng mô hình vật liệu bài toán nghiên cứu

2.6.2.1 Mô hình vật liệu bê tông

Mô hình Holmquist-Johnson-Cook (HJC) [109] có thể mô tả ứng xử nén động của bê tông chịu biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và áp suất cao. Hình thức của mô hình HJC đơn giản và ý nghĩa vật lý của các tham số là rõ ràng. Do đó, nó đã được sử dụng rộng rãi trong việc phân tích các phản ứng động của bê tông dưới tác dụng nổ. Mô hình HJC đã được nhúng vào phần mềm ABAQUS và được áp dụng rộng rãi cho các mô phỏng số phản ứng động của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nổ.

2.6.2.1.1 Phương trình trạng thái



Hình 2.9. Phương trình trạng thái

Phản ứng nén được biểu thị bởi phương trình trạng thái và được tách thành ba giai đoạn, như thể hiện trong hình 2.9.

Giai đoạn đầu tiên kết cấu bê tông nguyên vẹn được thể hiện bằng đoạn thẳng OA trên hình 2.9. Trong giai đoạn này kết cấu bê tông làm việc trong trạng thái đàn hồi tuyến tính từ điểm cắt áp suất âm $-T(1-D)$ đến giới hạn đàn hồi P_{crush} và được tính bằng:

$$P = K\mu; P < P_{crush}, \quad (2.46)$$

trong đó biến dạng thể tích tiêu chuẩn $\mu = \rho/\rho_o - 1$, với ρ và ρ_o tương ứng khối lượng riêng hiện tại và khối lượng riêng ban đầu. $K = P_{crush}/\mu_{crush}$ là mô đun đàn hồi với μ_{crush} là biến dạng thể tích ở giới hạn đàn hồi P_{crush} .

Giai đoạn thứ 2 (AB) được gọi là giai đoạn chuyển tiếp, trong giai đoạn này các khoảng trống không khí dần dần bị nén ra khỏi bê tông và biến dạng thể tích dẻo tạo ra phá hủy khi nén cho đến khi đạt đến điểm (μ_{lock}, P_{lock}) , được thể hiện như sau:

$$\text{Quá trình gia tải: } P = P_{crush} + K_{lock}(\mu - \mu_{crush}), \quad (2.47)$$

trong đó $K_{lock} = (P_{lock} - P_{crush})/(\mu_{lock} - \mu_{crush})$ là độ dốc của biểu đồ với μ_{lock} là biến dạng thể tích ở áp lực nén P_{lock} .

$$\text{Quá trình dỡ tải: } P = P_o - [(1-F)K + FK_1](\mu_o - \mu), \quad (2.48)$$

trong đó $F = (\mu_o - \mu_{crush})/(\mu_{lock} - \mu_{crush})$ là hệ số nội suy; P_o là áp lực khi biến dạng thể tích đạt đến μ_o trước khi dỡ tải.

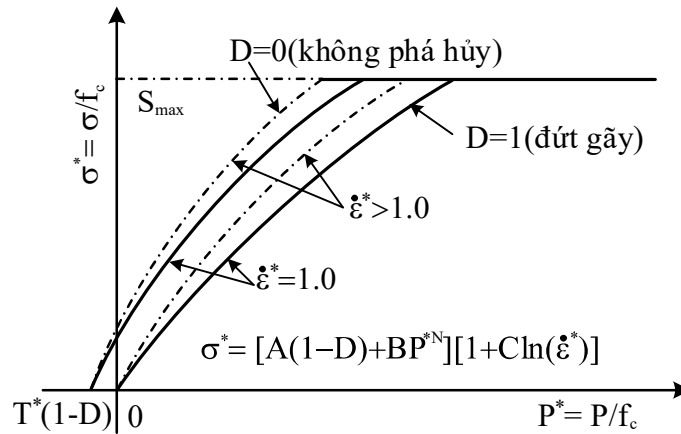
Giai đoạn thứ 3 (BC) là giai đoạn mà tất cả các lỗ rỗng không khí được loại bỏ khỏi bê tông, được giả định là hoàn toàn đàn hồi phi tuyến tính và mối quan hệ được biểu thị như sau:

$$\text{Quá trình gia tải: } P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3, \quad (2.49)$$

trong đó $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{lock}) / (1 + \mu_{lock})$ là biến dạng thể tích đã sửa đổi, và $\mu_{lock} = \rho_{grain} / \rho_o - 1$ là biến dạng thể tích khóa với ρ_{grain} là khối lượng riêng của bê tông không có lỗ rỗng không khí. K_1, K_2, K_3 là các hằng số của vật liệu.

$$\text{Quá trình dỡ tải: } P = K_1 \bar{\mu}. \quad (2.50)$$

2.6.2.1.2 Mô hình bền



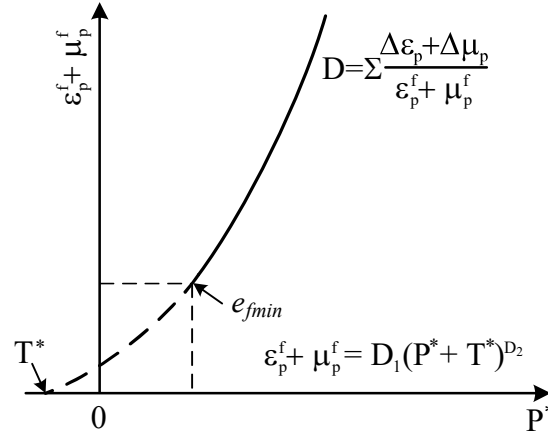
Hình 2.10. Phương trình mặt dẻo

Ảnh hưởng của tải trọng đến tốc độ biến dạng và phá hủy được thể hiện trong hình 2.10, với:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*), \quad (2.51)$$

trong đó $\sigma^* = \sigma / f_c$ và $P^* = P / f_c$ tương ứng là ứng suất và áp lực tương đương đã chuẩn hóa; f_c là cường độ nén đơn trục; σ và P là ứng suất và áp lực tương ứng thực tế; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_o$ là tỷ lệ biến dạng (trong đó $\dot{\epsilon}^*$ và $\dot{\epsilon}_o^* = 1.0s^{-1}$ tương ứng là tốc độ biến dạng thực tế và tham chiếu). $T^* = T / f_c$ là độ bền kéo chuẩn hóa, trong đó T là độ bền kéo đơn trục. S_{max} là cường độ lớn nhất chuẩn hóa mà vật liệu bê tông có thể chịu được. A, B, N tương ứng là các hằng số vật liệu đại diện cho cường độ kết dính chuẩn hóa, hệ số làm cứng áp lực chuẩn hóa và số mũ tăng cứng áp lực. C là hệ số tốc độ biến dạng và D ($0 \leq D \leq 1$) phá hủy tích lũy.

2.6.2.1.3 Mô hình phá hủy



Hình 2.11. Trạng thái phá hủy của mô hình HJC

Phá hủy của mô hình HJC được thể hiện ở hình 2.11, được tích lũy từ cả biến dạng dẻo tương đương và biến dạng dẻo thể tích, được tính bằng công thức:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f}, \quad (2.52)$$

trong đó, $\Delta \varepsilon_p$ và $\Delta \mu_p$ tương ứng là số gia biến dạng dẻo tương đương và biến dạng dẻo thể tích. $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ là tổng hợp biến dạng dẻo dưới áp lực không đổi, được xác định bằng:

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq e_{fmin}, \quad (2.53)$$

trong đó e_{fmin} là hằng số hư hỏng của bê tông, là điểm tới hạn của trạng thái biến dạng dẻo do thí nghiệm lặp. D_1 và D_2 là các hằng số phá hủy.

2.6.2.1.4 Tham số mô hình vật liệu bê tông

Các thông số của phương trình trạng thái, mô hình bền và mô hình phá hủy của bê tông được xác định bằng thí nghiệm được trình bày ở chương 3.

2.6.2.2 Mô hình vật liệu thép

2.6.2.2.1 Phương trình trạng thái

Đối với cốt thép ta sử dụng phương trình trạng thái tuyến tính, đây là dạng phương trình đơn giản nhất. Phương trình này có thể được xác định bằng cách giả thiết áp lực độc lập với nội năng, sự thay đổi mật độ của vật liệu là nhỏ và tuân theo quá trình thuận nghịch.

Phương trình trạng thái dạng tuyến tính (Linear) của cốt thép được mô tả bằng định luật Hooke theo phương trình [110,111]:

$$p = E\mu, \quad (2.54)$$

trong đó: $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$; E là mô đun đàn hồi của cốt thép.

2.6.2.2.2 Mô hình bền

Cốt thép sử dụng trong kết cấu được mô tả bởi mô hình bền Johnson-Cook [110,111]. Với mô hình này, ứng suất chảy của vật liệu thay đổi phụ thuộc vào biến dạng, tốc độ biến dạng và nhiệt độ có dạng sau [109]:

$$Y = (A_t + B_t \varepsilon_p^{n_t}) (1 + C_t \ln \varepsilon_p^*) (1 - T_H^{m_t}), \quad (2.55)$$

trong đó: ε_p là biến dạng dẻo; ε_p^* là tốc độ biến dạng dẻo; T_H là nhiệt độ tương đương, $T_H = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$; T_{room} là nhiệt độ phòng; T_{melt} là nhiệt độ nóng chảy; A_t , B_t , C_t , n_t và m_t là các hằng số vật liệu.

2.6.2.2.3 Mô hình phá hủy

Cốt thép là vật liệu đàn dẻo sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook [110,112] đề xướng. Mô hình phá hủy Johnson-Cook sử dụng để mô hình hóa sự phá hủy dẻo của vật liệu khi chịu áp lực lớn, tốc độ biến dạng lớn và nhiệt độ cao. Mô hình này được xây dựng tương tự như mô hình chảy dẻo Johnson-Cook, sự phá hủy biến dạng động học của vật liệu là hàm của áp lực, tốc độ biến dạng và nhiệt độ như sau [97]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \text{ với } \varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 + D_5 T^*), \quad (2.56)$$

trong đó: $\Delta \varepsilon$ là lượng gia tăng biến dạng dẻo tương ứng với lượng gia tăng tải trọng; ε_f là biến dạng tương đương tại thời điểm bị phá hủy; σ^* là giá trị trung bình ứng suất; $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\varepsilon}_0$ là tốc độ biến dạng và tốc độ biến dạng tham chiếu; T^* là tỉ số nhiệt độ; D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 là các hằng số vật liệu.

Theo mô hình phá hủy này vật liệu được giả định là nguyên vẹn cho đến khi tổng biến dạng đạt đến giá trị phá hủy ε_f ($D=1.0$).

2.6.2.2.4 Tham số mô hình vật liệu thép

Các tham số của phương trình trạng thái, mô hình bền, mô hình phá hủy và tham số mô hình vật liệu của thép được lấy theo [110,112].

2.6.2.3 Mô hình vật liệu nổ TNT

Để mô hình hóa hiện tượng nổ và quá trình lan truyền áp lực sóng nổ, sử dụng phương trình trạng thái do Lee – Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất. Theo đó phương trình trạng thái của thuốc nổ TNT và chất nổ tương đương có dạng như sau [93]:

$$p = A_m \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v_m}\right) E_m^{-r_1 v_m} + B_m \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v_m}\right) E_m^{-r_2 v_m} + \frac{\omega E_m}{v_m}, \quad (2.57)$$

trong đó: p là áp suất thủy tĩnh; $v_m = 1/\rho$ là thể tích riêng; ρ là khối lượng riêng thuốc nổ TNT; $A_m, B_m, r_1, r_2, \omega$ là các hằng số đoạn nhiệt được xác định từ thí nghiệm; E_m - năng lượng trên đơn vị thể tích.

2.6.2.4 Mô hình không khí

Để mô hình hóa không khí dùng phương trình trạng thái không khí thể hiện theo công thức:

$$p = C_0 + C_1 + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_{kk}. \quad (2.58)$$

Phương trình trạng thái khí lý tưởng được rút gọn như công thức (2.59) với $C_1 + C_2 + C_3 + C_6 = 0$ và $C_0 = C_1 = \gamma - 1$:

$$p = (\gamma - 1) \rho / \rho_0 E_{kk}, \quad (2.59)$$

trong đó: E_{kk} là nội năng của đơn vị thể tích; μ là hệ số nhớt động; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ là các hằng số; γ là hệ số nhiệt dung riêng không khí; ρ_0 là khối lượng riêng ban đầu không khí; ρ là khối lượng riêng của không khí [86].

2.7 Kết luận của chương 2

Trong chương 2, tác giả đã trình bày cơ sở lý thuyết để mô phỏng tính toán SĐLT cho công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, xây dựng mô hình vật liệu, mô hình tính trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Cụ thể tác giả đã trình bày phương pháp phân tích động tường minh theo thời gian (explicit time integration), lựa chọn mô hình cho các vật liệu (mô hình HJC cho bê tông, mô hình Johnson-Cook cho cốt thép, mô hình hóa hiện tượng nổ sử dụng phương pháp SPH với phương trình trạng thái do Lee - Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất, phương trình trạng thái khí lý tưởng cho không khí), giải pháp tương tác giữa các vùng và điều kiện biên của bài toán nghiên cứu.

Trong chương sau, tác giả tiến hành thực nghiệm để hiệu chỉnh mô hình tính, thí nghiệm đưa ra các tham số của mô hình vật liệu phục vụ cho phân tích bài toán nghiên cứu trong luận án.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ MÔ HÌNH VẬT LIỆU VÀ HIỆU CHỈNH MÔ HÌNH TÍNH TRONG PHÂN TÍCH SỰ SỤP ĐỔ LŨY TIẾN CỦA CÔNG TRÌNH CHỊU TẢI TRỌNG NỔ

3.1 Mở đầu

Trong mô hình số bằng phần mềm ABAQUS, trong 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, tiến hành thực nghiệm để đánh giá và hiệu chỉnh mô hình tính, đưa ra các tham số của mô hình vật liệu phục vụ cho phân tích bài toán nghiên cứu trong luận án này thực sự cần thiết.

Cụ thể trong chương này tác giả trình bày các kết quả thí nghiệm để xác định các tham số của vật liệu bê tông thí nghiệm - loại bê tông này hiện chưa có các tham số theo mô hình Holmquist-Johnson-Cook, lựa chọn các tham số của vật liệu thép theo mô hình Johnson-Cook, mô hình vật liệu nổ TNT, mô hình không khí cũng như tiến hành nổ thử nghiệm ngoài hiện trường để xác định sự phá hoại cấu kiện BTCT bằng nổ tiếp xúc và nổ gần, sau đó sử dụng các tham số mô hình vật liệu trên tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS so sánh kết quả giữa mô phỏng với thử nghiệm. 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 bằng phần mềm ABAQUS.

3.2 Xác định tham số mô hình vật liệu trong bài toán nghiên cứu

3.2.1 Tham số mô hình vật liệu bê tông

Mô hình vật liệu bê tông được áp dụng là mô hình Holmquist - Johnson - Cook. Tổng số 19 tham số được sử dụng trong mô hình HJC được chia thành năm loại: tham số cơ bản, tham số đặc trưng cho độ bền, tham số trạng thái, tham số đặc trưng cho tốc độ biến dạng, tham số phá hủy [109].

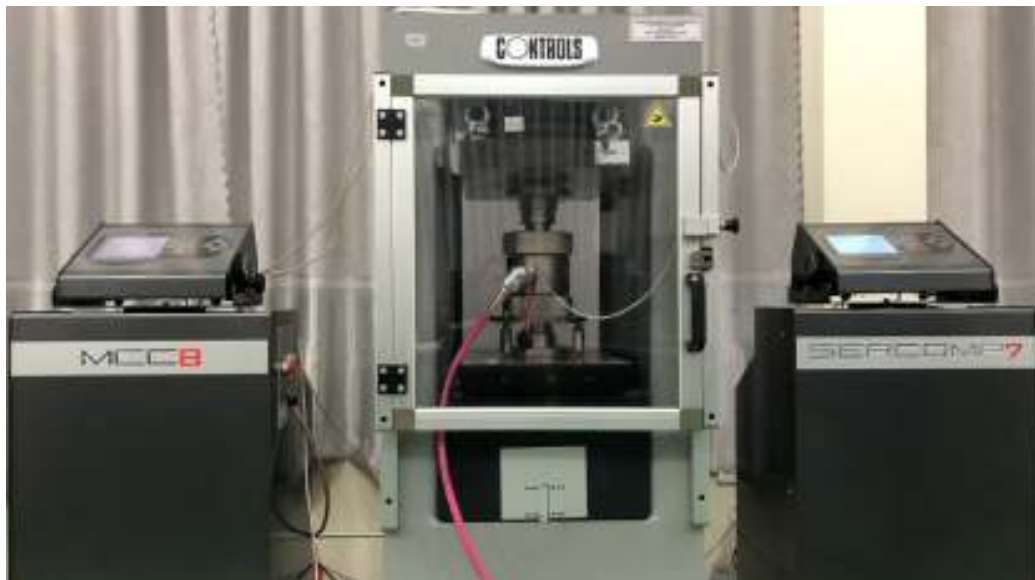
Mô hình Holmquist - Johnson - Cook chứa 19 tham số được thể hiện trong bảng 3.1.

Bảng 3.1. Phân loại tham số vật liệu mô hình HJC

Stt	Loại	Tên tham số	Ký hiệu
01	Tham số cơ bản	Trọng lượng riêng	ρ_o
02		Mô đun cắt	G
03		Cường độ nén đơn trục	f_c
04		Độ bền kéo đơn trục	T
05	Tham số đặc trưng cho độ bền	Cường độ kết dính chuẩn hóa	A
06		Hệ số làm cứng áp lực chuẩn hóa	B
07		Số mũ tăng cứng áp lực	N
08		Cường độ lớn nhất chuẩn hóa	S_{max}
09	Tham số đặc trưng cho tốc độ biến dạng	Hệ số tốc độ biến dạng	C
10	Tham số trạng thái	Áp lực giới hạn đàn hồi	P_{crush}
11		Biến dạng thể tích ở giới hạn đàn hồi	μ_{crush}
12		Áp lực giới hạn nén	P_{lock}
13		Biến dạng thể tích ở giới hạn nén	μ_{lock}
14		Hằng số vật liệu	K_1
15		Hằng số vật liệu	K_2
16		Hằng số vật liệu	K_3
17	Tham số phá hủy	Hằng số hư hỏng của vật liệu	e_{fmin}
18		Hằng số phá hủy	D_1
19		Hằng số phá hủy	D_2

Xác định các tham số

Dựa vào các thí nghiệm, các tham số của mô hình HJC được xác định bằng phương pháp do Holmquist và cộng sự đề xuất. Các thí nghiệm nén đơn trục và thí nghiệm lặp cũng như các thí nghiệm ép chẻ và nén ba trục được thực hiện bằng máy nén ba trục (hình 3.1) 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.



Hình 3.1. Máy nén ba trục

Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Loại bê tông được sử dụng trong nghiên cứu này là bê tông có cấp phối bê tông như trong bảng 3.2. Ở độ tuổi 21 ngày, các mẫu thử được đưa ra khỏi phòng bảo dưỡng và được mài cẩn thận ở cả hai đầu để tạo ra các khu vực phẳng và nhẵn cho các tấm chất tải, sau đó chúng được đưa trở lại phòng bảo dưỡng cho đến tuổi thí nghiệm (hình 3.2).

Bảng 3.2. Cấp phối mẫu bê tông thí nghiệm sử dụng xi măng PC30

	Nước (lít)	Xi măng PC30 (kg)	Cát (m ³)	Đá 1x2 (m ³)
Mẫu BT	178,4	450	0,45	0,887



Hình 3.2. Bộ mẫu thí nghiệm

Bảng 3.3. Các thông số của mẫu bê tông thí nghiệm

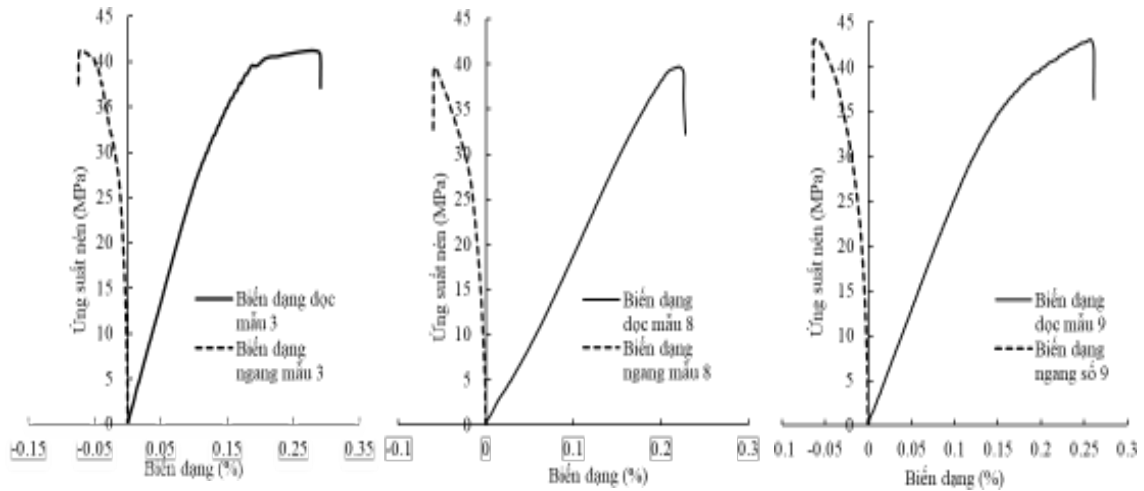
Tên mẫu	Khối lượng (g)	Chiều dài (mm)	Đường kính (mm)	Tỉ trọng (g/cm^3)
1	631,5	110,10	54,92	2,421
2	630,5	110,60	54,82	2,415
3	622,0	109,80	54,72	2,409
4	637,5	111,30	54,82	2,427
5	614,5	109,12	54,76	2,391
6	617,5	109,52	54,90	2,382
7	621,0	109,66	54,80	2,401
8	632,5	110,54	54,84	2,422
9	645,5	111,80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

Theo kết quả thí nghiệm được thể hiện trong bảng 3.3, giá trị trọng lượng riêng ρ_0 bằng giá trị trung bình của 14 mẫu thí nghiệm, là $2,406 \text{ g}/\text{cm}^3$.

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

Giá trị của thông số cường độ nén đơn trục f_c , mô đun đàn hồi E và hệ

số Poisson ν được xác định thông qua thí nghiệm nén một trục mẫu bê tông thí nghiệm. Ba thí nghiệm nén đơn trục gia tải với tốc độ 0,1mm/phút đã được thực hiện cho đến khi mẫu bị phá hủy và thu được ba bộ dữ liệu. Dựa trên dữ liệu đó, vẽ được các đường cong ứng suất - biến dạng của các mẫu nén đơn trục được thể hiện hình 3.3.



Hình 3.3. Đường cong ứng suất-biến dạng nén đơn trục

Như thể hiện trong bảng 3.4, giá trị của tham số cường độ nén đơn trục f_c của mẫu bê tông thí nghiệm thu được từ điểm cực đại của đường cong ứng suất - biến dạng.

Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm nén đơn trục

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

Theo kết quả thí nghiệm được trình bày trong bảng 3.4, giá trị trung bình của ba mẫu được coi là giá trị của tham số cường độ nén đơn trục f_c , mô đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν của mẫu bê tông thí nghiệm lần là $f_c = 41,305$ MPa, $E = 28320$ MPa và $\nu = 0,254$. Mô đun cắt $G = E/2(1 + \nu) = 11291,866$ MPa.

Xác định độ bền kéo đơn trục T

Để xác định độ bền kéo đơn trục T , dùng máy nén để nén ép chế 3 mẫu

bê tông hình trụ có đường kính 54mm, chiều cao 110mm (hình 3.4). Tải trọng dọc trục được gia tải với tốc độ 0,1mm/phút. Thí nghiệm kết thúc khi một vết nứt xuất hiện trên bề mặt mẫu thử.



Hình 3.4. Hình ảnh mẫu sau khi nén ép chế

Kết quả thu được là lực nén phá hủy P , từ đó tính được độ bền kéo đơn trục $T = 2P/\pi dh$, trong đó d là đường kính mẫu, h là chiều cao mẫu. Tiến hành nén ép chế 3 mẫu bê tông và kết quả được thể hiện trong bảng 3.5.

Bảng 3.5. Giá trị độ bền kéo đơn trục

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

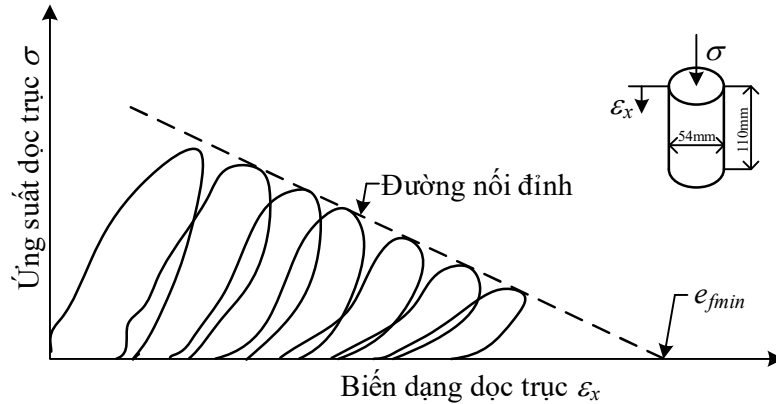
Theo kết quả thí nghiệm được thể hiện trong bảng 3.5, giá trị độ bền kéo đơn trục T bằng giá trị trung bình của 3 mẫu thí nghiệm là 3,24MPa.

Tham số phá hủy e_{fmin} , D_1 , D_2

Hằng số hư hỏng e_{fmin} là điểm tới hạn của trạng thái biến dạng dẻo được xác định bằng thí nghiệm lặp.

Hằng số hư hỏng e_{fmin} giảm thiểu biến dạng dẻo tại thời điểm đạt được

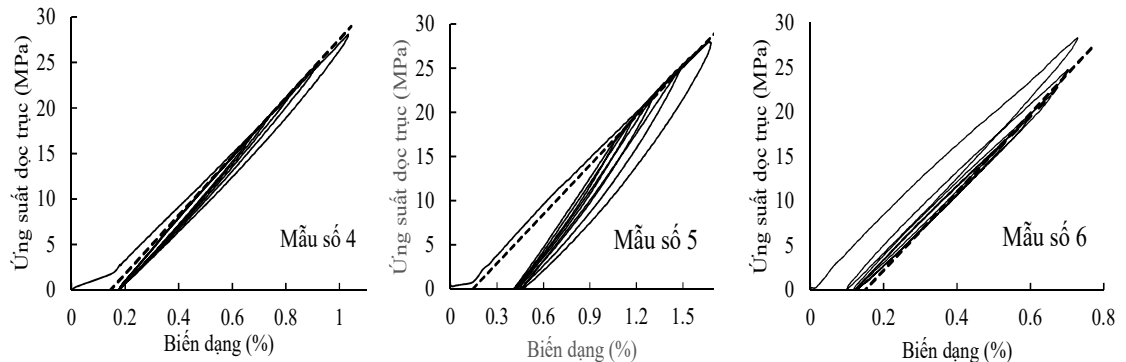
độ đứt gãy ở độ bền tối thiểu của vật liệu. Phương pháp thu nhận được đưa ra trong tài liệu [109] hình 3.5. Việc xác định giá trị của tham số e_{fmin} yêu cầu một thí nghiệm tải chu kỳ nén đơn trục, và biểu đồ phá hủy được xác định dựa trên đường cong do kết quả thí nghiệm. Biểu đồ đứt gãy cho thấy rằng khi biến dạng dọc trục đạt đến giao điểm của mặt phân cách và trục, mẫu mất hoàn toàn sức bền của nó và giá trị biến dạng bằng giá trị của e_{fmin} .



Hình 3.5. Phương pháp chuyển đổi tham số e_{fmin}

Trong quá trình chất tải, đầu tiên các mẫu bê tông được gia tải đến 90% cường độ nén đơn trục của chúng và sau đó được dỡ tải xuống 0 ở cùng tốc độ. Sau đó, việc gia tải được lặp lại và cường độ của nó được giảm đi 10% ở mỗi chu kỳ cho đến khi không còn biến dạng dư.

Biểu đồ phá hủy được xác định trên đường cong ứng suất - biến dạng, kẻ giao điểm của đường nối các đỉnh ứng suất dọc trục (đường nét đứt) với trục biến dạng ta xác định được giá trị của e_{fmin} (hình 3.6).



Hình 3.6. Đường cong ứng suất-biến dạng của thí nghiệm lặp đơn trục

Các giá trị tham số thu được theo phương pháp trên được thể hiện trong bảng 3.6.

Bảng 3.6. Giá trị của tham số e_{fmin}

Tên mẫu	e_{fmin}	Giá trị trung bình
4	0,0018	0,0016
5	0,0015	
6	0,0017	

Theo kết quả thể hiện trong bảng 3.6, tham số phá hủy e_{fmin} bằng giá trị trung bình của 3 mẫu là 0,0016. Do thiếu thiết bị thí nghiệm, nên lấy $D_1 = 0,04$ và $D_2 = 1,0$ theo đề xuất của Holmquist và cộng sự [109].

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

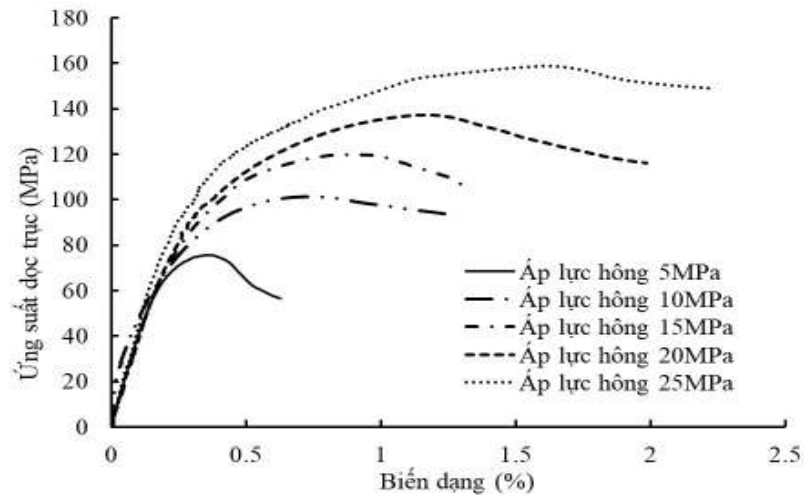
Các tham số đặc trưng cho độ bền của vật liệu của mô hình HJC gồm A , B , N , và S_{max} , trong đó B , N có thể được xác định bằng thí nghiệm nén ba trục, thông số $S_{max} = 7$ lấy theo đề xuất bởi Holmquist và cộng sự [109]. Tham số A là cường độ dính kết chuẩn hóa của bê tông tại $\varepsilon^* = 1,0$. Do thiếu dữ liệu thí nghiệm Holmquist và cộng sự giả định cường độ kết dính chuẩn hóa tại $0,75f_c$ đối với các điều kiện bán tĩnh ($\varepsilon^* = 0,001$) và có được $A = 0,79$ bằng cách chuẩn hóa tốc độ biến dạng thành $\varepsilon^* = 1,0$ từ công thức $\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \varepsilon^*)$. Nếu không tính đến ảnh hưởng của các hiệu ứng tốc độ biến dạng và phá hủy, thì cân bằng của mặt dẻo có thể được đơn giản hóa như sau:

$$\sigma^* = 0,79 + BP^{*N}, \quad (3.1)$$

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

Hệ số làm cứng áp lực chuẩn hóa B và Chỉ số mũ làm cứng áp lực N được xác định bằng thí nghiệm nén 3 trục. Trong các thí nghiệm này, áp lực hông được đặt $\sigma_2 = \sigma_3$. Đầu tiên, ba trục gia tải đến các giá trị của áp lực tới hạn, và sau đó áp lực tới hạn được giữ không đổi $\sigma_2 = \sigma_3$. Trong giai đoạn tiếp theo, một tải trọng được đặt dọc theo hướng trục cho đến khi mẫu bị phá hoại và ghi lại giá trị lớn nhất của ứng suất dọc trục σ_1 . Việc tính toán hệ số làm cứng áp lực chuẩn hóa B và Chỉ số mũ làm cứng áp lực N bằng áp lực thủy tĩnh yêu cầu và chênh

lệch ứng suất chính $\Delta\sigma$ tương ứng. Áp lực thủy tĩnh P và chênh lệch ứng suất chính $\Delta\sigma$ được tính toán lần lượt là $P = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ và $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$. Một loạt các giá trị (P^*, σ^*) được xác định bằng cách chuẩn hóa các giá trị của $(P, \Delta\sigma)$ theo phương trình $P^* = P/f_c$ và $\sigma^* = \Delta\sigma/f_c$. Các giá trị thu được, được điều chỉnh bởi phương trình $\sigma^* = 0,79 + BP^{*N}$. Để xác định được các giá trị của B và N . Thí nghiệm nén ba trục được thực hiện bằng cách sử dụng áp lực giới hạn ở tốc độ 2MPa/phút. Sau thời gian ổn định, gia tải dọc trục được áp dụng với tốc độ 0,1 mm/phút cho đến khi mẫu phá hoại với các cấp áp lực hông bằng 5, 10, 15, 20 và 25 MPa. Biểu đồ đường cong ứng suất-biến dạng dọc trục của các mẫu thí nghiệm đạt được dưới các áp lực hông khác nhau được thể hiện trong hình 3.7.



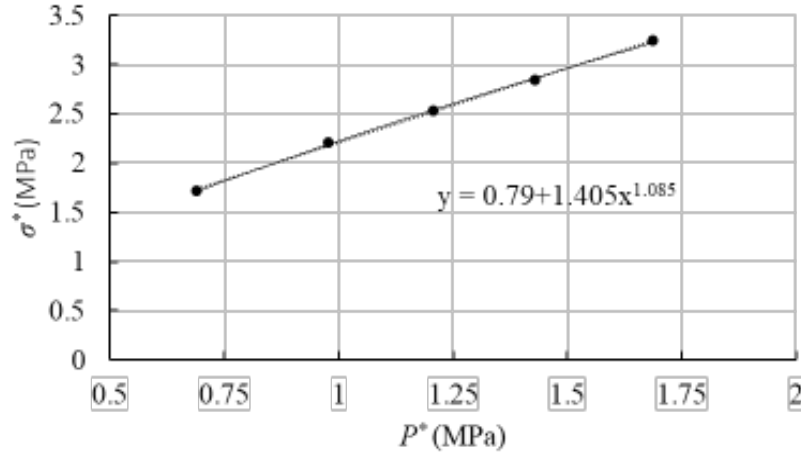
Hình 3.7. Biểu đồ ứng suất - biến dạng ở các cấp áp lực giới hông khác nhau

Áp lực thủy tĩnh $P = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ và chênh lệch ứng suất chính $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ được chuẩn hóa bằng các giá trị $P^* = P/f_c$ và $\sigma^* = \Delta\sigma/f_c$ (bảng 3.7).

Bảng 3.7. Giá trị σ^* và P^*

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

Sử dụng dữ liệu trong bảng 3.7, hiệu chỉnh số liệu theo phương trình $\sigma^* = 0,79 + BP^{*N}$ và đường cong khớp với dữ liệu trong bảng 3.7 được vẽ như trong hình 3.8. Từ đó xác định được giá trị $B = 1,405$ và $N = 1,085$.



Hình 3.8. Đường cong phù hợp của các giá trị B và N

Tham số trạng thái P_{crush} , μ_{crush} , C , P_{lock} , μ_{lock} , K_1 , K_2 , và K_3

Các tham số P_{crush} , μ_{crush} được xác định bằng công thức sau [97]: $P_{crush} = f_c/3$ và $\mu_{crush} = P_{crush}/K$ với $K = E/3(1-2\nu)$. Như vậy P_{crush} , μ_{crush} có giá trị lần lượt là 13,768 MPa và 0,0007.

Các tham số đặc trưng cho tốc độ biến dạng C , áp lực giới hạn nén P_{lock} , biến dạng thể tích ở áp lực nén μ_{lock} , và các hằng số vật liệu K_1 , K_2 , và K_3 được xác định bằng các thí nghiệm va đập và các thử nghiệm thanh áp lực Split-Hopkinson. Do điều kiện thí nghiệm hạn chế nên các giá trị của các tham số này được lấy theo đề xuất bởi Holmquist và cộng sự [109].

Như vậy, các tham số của mô hình HJC cho mẫu bê tông thí nghiệm được xác định và liệt kê trong bảng 3.8.

Bảng 3.8. Các tham số mô hình vật liệu bê tông thí nghiệm

ρ (kg/m ³)	G (Pa)	A	B	C	N	e_{fmin}
2406	11,292 x10 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 x10 ⁶	41,305 x10 ⁶	7	13,768 x10 ⁶	0,0007	1 x10 ⁹	0,08
D_1	D_2	K_1 (Pa)	K_2 (Pa)	K_3 (Pa)		
0,04	1,0	85x10 ⁹	-171 x10 ⁹	208 x10 ⁹		

3.2.2 Tham số mô hình vật liệu 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 [110,112] cụ thể như sau như bảng 3.9.

Bảng 3.9. Các tham số mô hình vật liệu thép

E (MPa)	ν	A_t (MPa)	B_t (MPa)	n_t	T_{melt} (K)	T_H (K)	m_t
200000	0,3	263	130	0,0915	1800	293,2	1
ρ_o (kg/m ³)	C_t	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

3.2.3 Tham số mô hình vật liệu thuốc nổ TNT

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 với các tham số: $v_m = 1/\rho_o$ là thể tích riêng; ρ_o là khối lượng riêng thuốc nổ TNT; $A_m, B_m, r_1, r_2, \omega$ là các hằng số đoạn nhiệt được xác định từ thí nghiệm, v_n - tốc độ nổ; E_m - năng lượng trên đơn vị thể tích; P_{CJ} - áp lực nổ. Giá trị cụ thể các tham số được liệt kê trong bảng 3.10 [93].

Bảng 3.10. Tham số mô hình vật liệu TNT

ρ_o (kg/m ³)	v_n (m/s)	P_{CJ} (kPa)	A_m (kPa)	B_m (kPa)
1650	6930	$2,1 \times 10^7$	$3,7377 \times 10^8$	$3,73471 \times 10^6$
r_1	r_2	ω	v_m	E_m (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6×10^6

3.2.4 Tham số mô hình không khí

Để mô hình hóa không khí dùng phương trình trạng thái khí lý tưởng với các tham số như bảng 3.11, trong đó: E_{kk} là nội năng của đơn vị thể tích; C_4, C_5 là các hằng số; m_o là khối lượng tương đối; ρ_o là khối lượng riêng của không khí [98].

Bảng 3.11. Tham số mô hình vật liệu không khí

ρ (kg/m ³)	E_o (J/m ³)	m_o (kg/m ³)	C_4	C_5
1,23	$2,58 \times 10^5$	1,0	0,4	0,4

3.3 Thử nghiệm nổ tại hiện trường và mô phỏng số để xác nhận mô hình vật liệu, hiệu chỉnh mô hình tính của bài toán nghiên cứu

Tác giả tiến hành thử nghiệm nổ tại hiện trường để phá hoại cấu kiện (CK) bê tông cốt thép (BTCT) thí nghiệm tiết diện $0,2 \times 0,2\text{m}$, dài $1,5\text{m}$ được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6 \times 200$ với chiều dày bảo vệ $0,01\text{m}$ bằng phương pháp nổ tiếp xúc và nổ gần. Qua thử nghiệm xác định được thực trạng bị phá hoại và biến dạng tại các điểm đo của kết cấu. Sau đó tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS so sánh kết quả giữa mô phỏng với thử nghiệm. Từ đó có cơ sở để tiến hành mô phỏng số mô hình tính bài toán nghiên cứu của luận án.

3.3.1 Thử nghiệm nổ hiện trường

3.3.1.1 Chuẩn bị mô hình thử nghiệm

Mô hình thử nghiệm chế tạo tại xưởng bê tông đúc sẵn Chèm, kích thước và chất lượng đảm bảo đúng theo yêu cầu bài toán, sau đó được vận chuyển đến thao trường của Học viện KTQS tại Hòa Lạc. Tại thao trường tiến hành làm công tác chuẩn bị như hình 3.9, mô hình thử nghiệm nổ tiếp xúc với lượng nổ có khối lượng 200gam thuốc nổ TNT (hình 3.10) và mô hình thử nghiệm nổ gần trong không khí với khối lượng 1600gam thuốc nổ TNT treo chính giữa cách cấu kiện BTCT 300mm (hình 3.11).



Hình 3.9. Cấu kiện cột bê tông cốt thép và gô đỡ thí nghiệm



Hình 3.10. Mô hình thử nghiệm nổ tiếp xúc



Hình 3.11. Mô hình thử nghiệm nổ gần

3.3.1.2 Thiết bị thí nghiệm

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

a. Máy đo động NI SCXI-1000DC

Máy đo động đa kênh NI SCXI-1000DC (hình 3.12) là thiết bị đo động đa kênh hiện đại do hãng National Instrument của Mỹ chế tạo. Đây là một hệ thống đo thông minh có cấu hình mềm dẻo bằng cách tích hợp các loại card đo khác nhau tùy theo mục đích thí nghiệm của người sử dụng. Máy có nguồn điện một chiều ac-quy đi kèm, có thể đo liên tục ngoài hiện trường 10 giờ không cần nạp điện. Tốc độ đo lấy mẫu của máy có thể đạt tới 96000 mẫu/s với mức nhiễu cực thấp. Trên máy bố trí 4 khe cắm dùng để cắm các loại card

đo khác nhau. Hãng NI cung cấp một dải rất rộng các loại cạc đo họ SCXI phù hợp với dòng máy SCXI-1000DC, các loại cạc này có thể đo được rất nhiều các phép đo khác nhau như đo gia tốc, đo biến dạng, chuyển vị, đo điện áp. Máy đo NI SCXI-1000DC được điều khiển hoàn toàn bằng máy tính thông qua kết nối USB. Phần mềm điều khiển LABVIEW là một phần mềm đo – phân tích nổi tiếng trên thế giới, phần mềm này cho phép thiết kế các chương trình đo và phân tích số liệu trực tiếp trong khi đo hay xử lý nguội sau khi đo với số lượng kênh lên tới hàng ngàn kênh một lần đo.



Hình 3.12. Máy đo động NI SCXI-1000DC

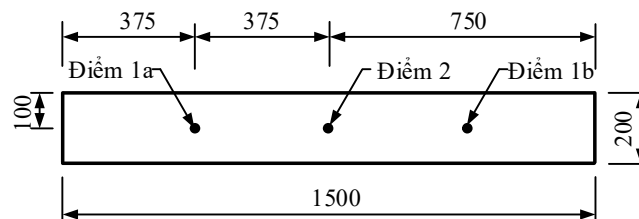
b. Cảm biến đo biến dạng

Cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11 (hình 3.13) là cảm biến đo biến dạng một phương, dạng lá và thích hợp cho các cấu kiện bê tông sử dụng cấp phối đá dăm hạt lớn. Giới hạn đo: $\epsilon = \pm 1.8\% = \pm 0,018 = 18.000 \mu\text{m/m}$. Kích thước nền: 8x74mm.



Hình 3.13. Cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11

Trong thí nghiệm, cảm biến đo biến dạng KC-60-120-A1-11 được sử dụng để đo biến dạng của cấu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ tại các điểm 1a, 1b và 2 ở mặt đối diện với tải trọng nổ (hình 3.14). Liên kết cảm biến vào cấu kiện dùng keo dán chuyên dụng gắn chặt vào bề mặt của cấu kiện BTCT.



Hình 3.14. Vị trí gắn cảm biến đo biến dạng trên mô hình thử nghiệm

c. Máy điễm hỏa FD200

Máy điễm hỏa FD200 (hình 3.15) là loại máy dùng để điễm hỏa gây nổ cho tối đa 200 kíp nổ điện. Thông số cơ bản: điện áp đầu ra 3000V, thời gian nạp điện nhỏ hơn 30 giây, điện áp nguồn 6VDC.



Hình 3.15. Máy điễm hỏa FD200

3.3.1.3 Thuốc nổ và kíp nổ điện

Thuốc nổ được sử dụng là loại thuốc nổ TNT được đúc thành bánh có khối lượng 200g, kích thước 100x50x25mm (hình 3.16). TNT kết tinh màu vàng nhạt, khi bị ánh sáng phân tích có màu nâu thẫm, tỉ trọng 1,6 g/cm³. Nhiệt độ nóng chảy của TNT nguyên chất là 81°C, TNT kỹ thuật là 79°C đến 80°C, ở nhiệt độ nóng chảy TNT không bị phân tích, vì thế TNT có thể nhồi vào bom đạn bằng phương pháp đúc. TNT ít hút ẩm và khi hút ẩm tính chất nổ cháy không thay đổi.

TNT ít tan trong cồn, tan nhiều trong a xít nitric, axit sunphuaric, axeton, toluen và benzen. TNT độc, ở nhiệt độ cao có tính chảy dầu. Khi TNT tác dụng với kiềm tạo thành chất nhạy nổ hơn. TNT không tác dụng với kim loại. Trong môi trường axit TNT tác dụng với kim loại làm mất tính nổ cháy. TNT có tính ổn định tốt, ở điều kiện bình thường TNT bảo quản được rất lâu.

Nhiệt độ bùng cháy là 290° đến 300°C, khi nhiệt độ tăng đột ngột lên 290°C TNT cháy có thể chuyển thành nổ. Đốt ngoài trời TNT chỉ cháy không nổ, khi cháy trong buồng kín có thể chuyển thành nổ. Độ nhạy về cơ và xung nổ của TNT kém hơn so với chất nổ phá khác. Độ nhạy về xung nổ ở trạng thái nén cao hơn ở trạng thái đúc. Dùng kíp nổ số 8 để gây nổ TNT nén, để gây nổ TNT đúc phải dùng trạm truyền nổ trung gian.

Từ các tính chất trên nhận thấy, TNT là chất nổ phá có nhiều ưu điểm như tính ổn định tốt, độ nhạy cơ nhiệt tương đối thấp, độ nhạy xung trung bình, uy lực khá mạnh vì thế TNT được sử dụng rộng rãi trong quân sự và công nghiệp. Trong quân sự TNT và hỗn hợp của nó được nhồi vào bom, mìn, đạn, ngư lôi, thủy lôi,... hoặc

làm các lượng nổ khác. TNT thường được ép thành các bánh 75 g, 200 g, 400 g, có vỏ bọc phòng ẩm, có lỗ tra kíp sẵn rất thuận lợi cho công tác nổ phá vật cản của bộ đội. Trong công nghiệp TNT thường được sử dụng là một thành phần tham gia trong chất nổ công nghiệp dạng hỗn hợp cơ học, như họ thuốc nổ amonit. Tuy nhiên vì TNT có tính độc hại khi tiếp xúc và ảnh hưởng đến môi trường sau khi nổ, nên xu hướng trong công nghiệp đang hạn chế dần việc sử dụng thuốc nổ có chứa TNT và tìm các loại thuốc nổ thay thế ít độc hại hơn đối với môi trường.



Hình 3.16. Thuốc nổ TNT

Kíp nổ điện được sử dụng là loại kíp nổ điện số 8 (hình 3.17).



Hình 3.17. Kíp nổ điện số 8

3.2.1.4 Trình tự thí nghiệm

a. Tiến hành thí nghiệm nổ tiếp xúc lần lượt với thuốc nổ TNT khối lượng 200g đặt tiếp xúc trên cấu kiện BTCT với trình tự cụ thể như sau: Đặt kết cấu BTCT vào vị trí để thí nghiệm liên kết chặt; Gắn các đầu đo biến dạng tại các điểm 1a và 1b (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện); điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện); Cấu tạo lượng nổ; Bố trí lượng nổ vào mô hình kết cấu BTCT (hình 3.10). Khi bố trí lượng nổ, tất cả mọi người không có trách nhiệm phải rút về vị trí an toàn theo qui định được phổ biến tại thao trường; Kiểm tra công tác an toàn trước khi nổ; Cho phép kiểm tra mạch nổ; Tiến hành nổ; Kiểm tra và xử lý mìn câm nếu có; Đo kết quả cho lần thí nghiệm.

b. Tiến hành thí nghiệm nổ gần với thuốc nổ TNT khối lượng 1600g treo cách mặt trên cấu kiện bê tông cốt thép khoảng cách 300mm với trình tự cụ thể như sau: Đặt kết cấu BTCT vào vị trí để thí nghiệm liên kết chặt; Gắn các đầu đo biến dạng tại các điểm 1a và 1b (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện); điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện); Cấu tạo lượng nổ; Bố trí

lượng nổ vào mô hình kết cấu BTCT (hình 3.11). Khi bố trí lượng nổ, tất cả mọi người không có trách nhiệm phải rút về vị trí an toàn theo qui định được phổ biến tại thao trường; Kiểm tra công tác an toàn trước khi nổ; Cho phép kiểm tra mạch nổ; Tiến hành nổ; Kiểm tra và xử lý mìn câm nếu có; Đo kết quả cho lần thí nghiệm. Các lần nổ thí nghiệm tiếp theo quy trình được thực hiện theo đúng tuần tự như trên.

3.2.1.5 Kết quả thí nghiệm

a. Kết quả thử nghiệm nổ tiếp xúc

Kết quả cấu kiện BTCT bị phá hoại khi nổ tiếp xúc được thể hiện như trong hình 3.18; 3.19; 3.20 và bảng 3.12.



Hình 3.18. Cấu kiện BTCT số 2 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc



Hình 3.19. Cấu kiện BTCT số 3 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc

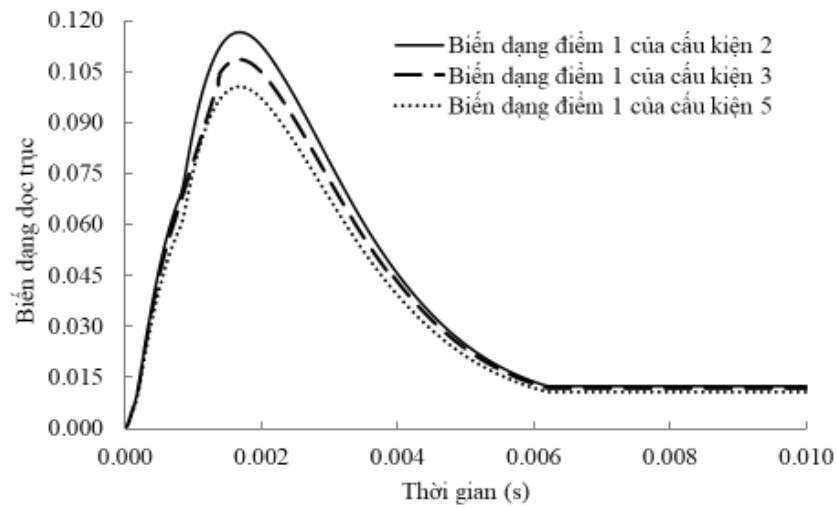


Hình 3.20. Cấu kiện BTCT số 5 bị phá hủy sau khi nổ tiếp xúc

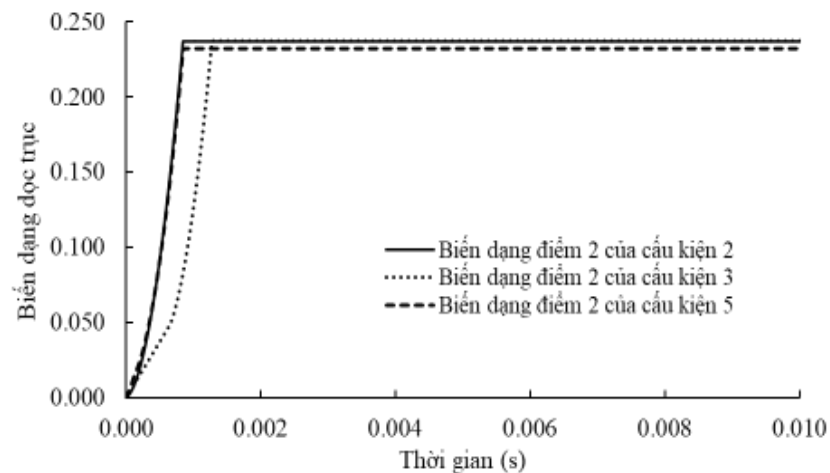
Bảng 3.12. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT khi nổ tiếp xúc

Stt	Lần thử nghiệm	Chiều dài vùng phá hủy giữa cầu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt trên cầu kiện (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới cầu kiện (mm)
1	Cầu kiện số 2	280	655	695
2	Cầu kiện số 3	310	635	710
3	Cầu kiện số 5	265	660	725
	Trung bình	285	650	710

Biến dạng đo được thông qua các cảm biến gắn trên cầu kiện tại điểm 1 (trung bình của điểm 1a và 1b) và điểm 2 (hình 3.21 và 3.22).



Hình 3.21. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thực nổ tiếp xúc



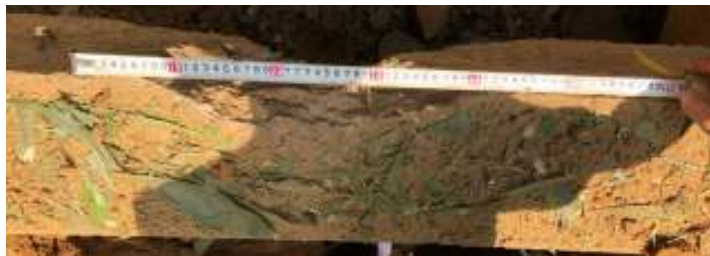
Hình 3.22. Kết quả đo biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thực nổ tiếp xúc

Thử nghiệm nổ tại hiện trường cho kết quả vùng bê tông của cầu kiện

BTCT bị phá hoại hoàn toàn ở chính giữa có chiều dài khoảng 285mm, vùng phá hoại lan rộng ra phía các cạnh cấu kiện BTCT có chiều dài khoảng 650-710mm (bảng 3.12). Cốt thép chịu lực không bị phá hủy, thép đai tại vị trí gần lượng nổ bị thổi bay. Biến dạng tại điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị lớn nhất là 0,109 (hình 3.21) và biến dạng tại điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,236 sau đó những phần tử bê tông tại điểm đó bị phá hoại khỏi cấu kiện (hình 3.22).

b. Kết quả thử nghiệm nổ gần

Kết quả cấu kiện BTCT bị phá hoại khi nổ gần như trong hình 3.23; 3.24; 3.25 và bảng 3.13.



Hình 3.23. Phá hủy phía mặt trên của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần



Hình 3.24. Chiều dài vùng chấn sục của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần

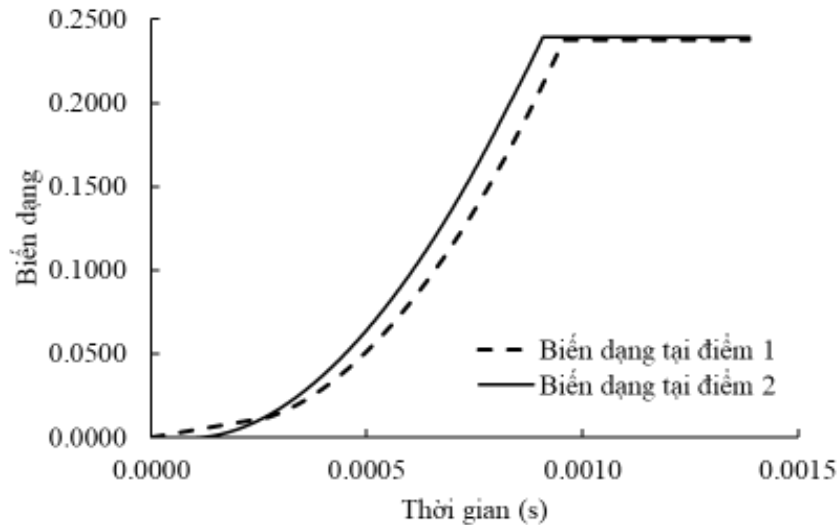


Hình 3.25. Chiều cao vùng chấn sục của cấu kiện BTCT sau khi nổ gần

Bảng 3.13. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT khi nổ gần

Chiều sâu phễu chấn sục (mm)	Chiều dài phễu chấn sục (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)
130	750	400

Biến dạng đo được thông qua các cảm biến gắn trên cấu kiện tại điểm 1 (trung bình của điểm 1a và 1b) và điểm 2 (hình 3.26).



Hình 3.26. Kết quả đo biến dạng tại điểm 1 và 2 trong trường hợp nổ gần

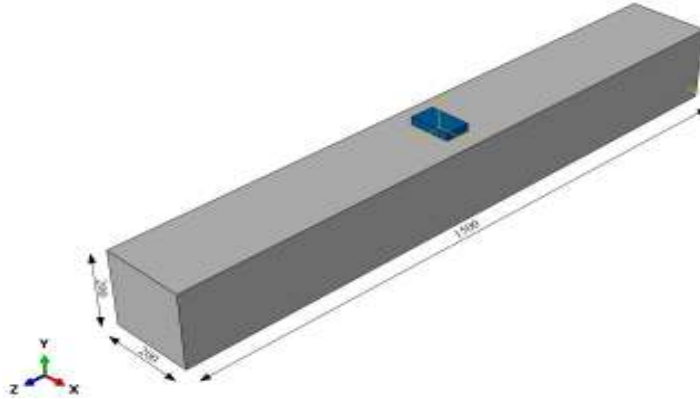
Thử nghiệm nổ gần trên hiện trường cho kết quả vùng bê tông của cấu kiện BTCT bị sóng nổ tạo phễu chấn sục phía mặt đối diện với lượng nổ, chiều dài phễu chấn sục là 750mm, chiều sâu phễu chấn sục là 130mm (bảng 3.13). Còn cốt thép trong cấu kiện BTCT gần như không bị ảnh hưởng. Biến dạng tại điểm 1 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị là 0,2376 và biến dạng tại điểm 2 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,2394 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại khỏi cấu kiện (hình 3.26).

3.3.2 Mô phỏng số cấu kiện BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc và nổ gần

Từ các cơ sở lý thuyết và mô hình vật liệu trình bày ở trên tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thí nghiệm hiện trường, nhận xét và rút ra kết luận, làm cơ sở để tiến hành mô phỏng mô hình kết cấu của bài toán nghiên cứu của luận án.

3.3.2.1 Mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ tiếp xúc

3.3.2.1.1 Mô hình hình học cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc



Hình 3.27. Mô hình hình học cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc

Nghiên cứu sự phá hủy và tương tác của cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ tiếp xúc. Cấu kiện BTCT có chiều dài 1,5m, 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 3.27).

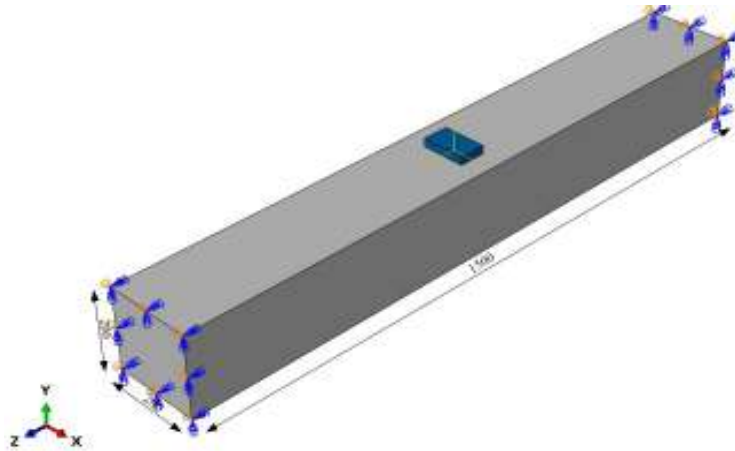
Cấu kiện bê tông được mô tả bằng phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho cốt thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và cốt thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5mm. Lưới thép chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5mm (hình 3.28).



Hình 3.28. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT nổ tiếp xúc

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 mô phỏng theo phương pháp SPH.

Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_{r_2} = u_{r_3} = 0$) (hình 3.29).



Hình 3.29. Điều kiện biên của kết cấu

3.3.2.1.2 Mô hình vật liệu

Bê tông

Sử dụng mô hình HJC cho bê tông thí nghiệm với các tham số được xác định và liệt kê trong bảng 3.8.

Cốt thép

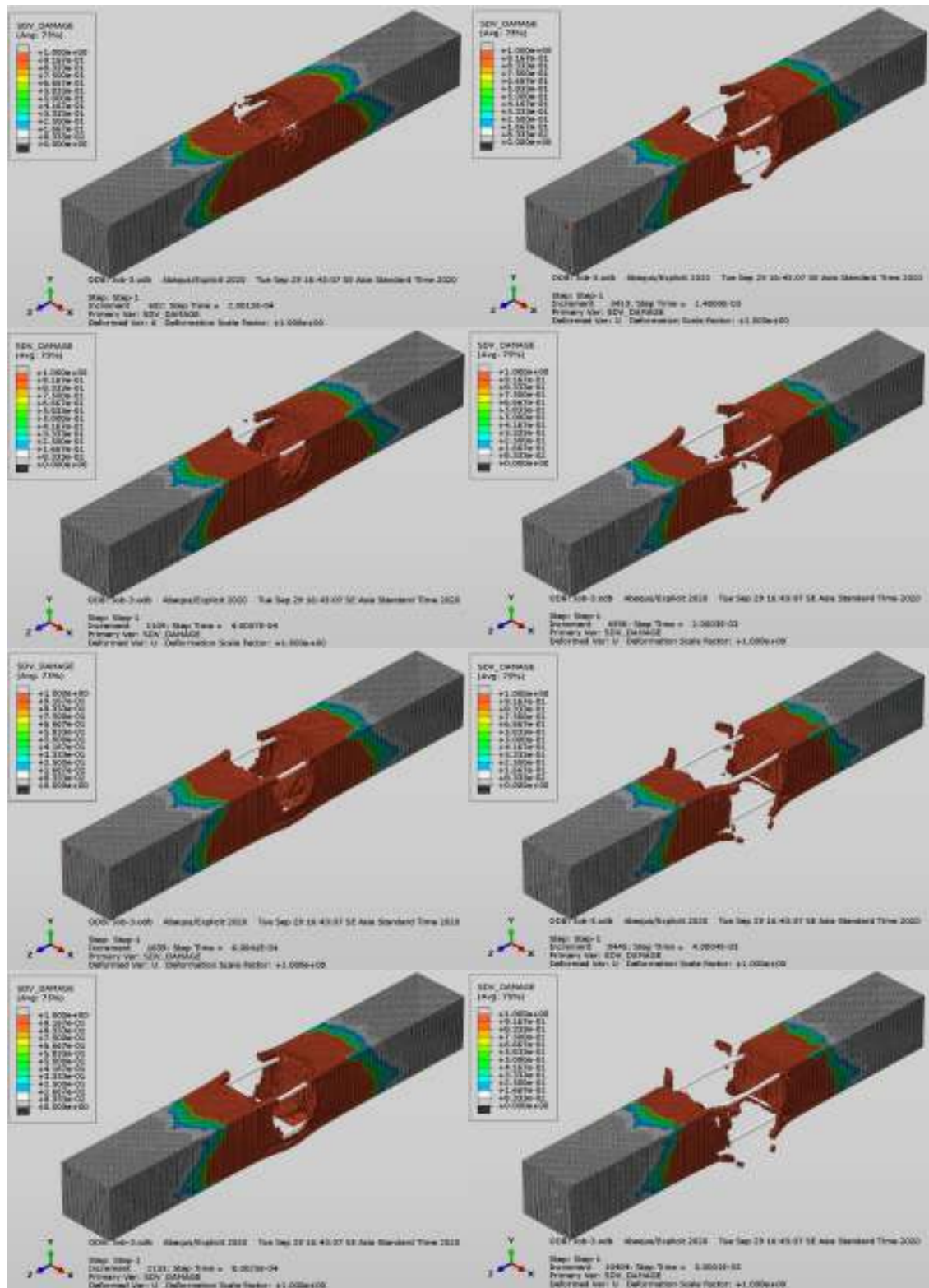
Sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, các tham số như bảng 3.9.

Thuốc nổ

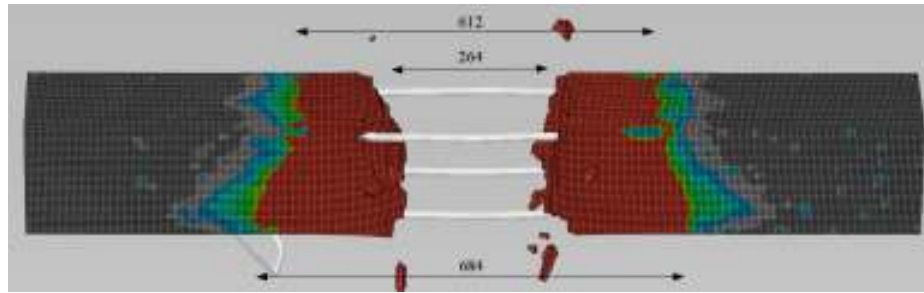
Để mô hình hóa hiện tượng nổ sử dụng phương pháp SPH với phương trình trạng thái do Lee – Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất, các tham số được liệt kê trong bảng 3.10.

3.3.2.1.3 Kết quả mô phỏng số nổ tiếp xúc

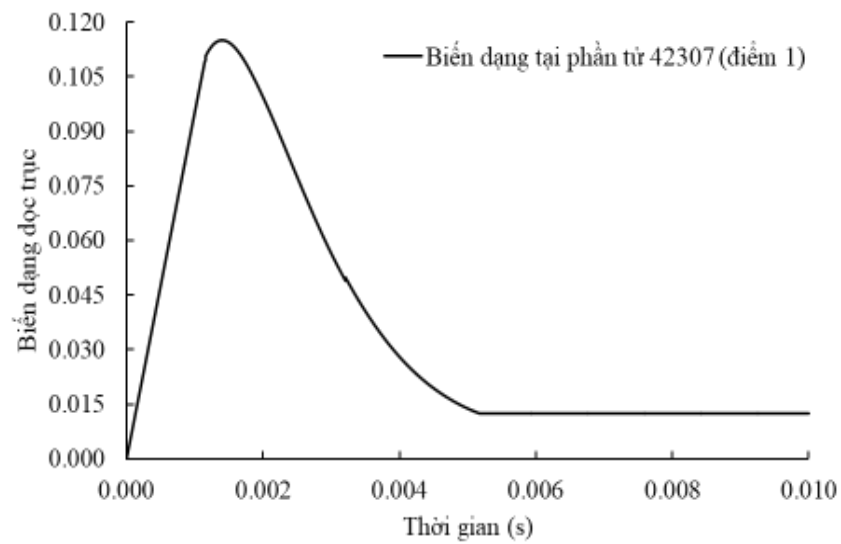
Kết quả mô phỏng số cấu kiện BTCT chịu tác dụng của nổ tiếp xúc được thể hiện như trong hình 3.30; 3.31; 3.32; 3.33 và bảng 3.14.



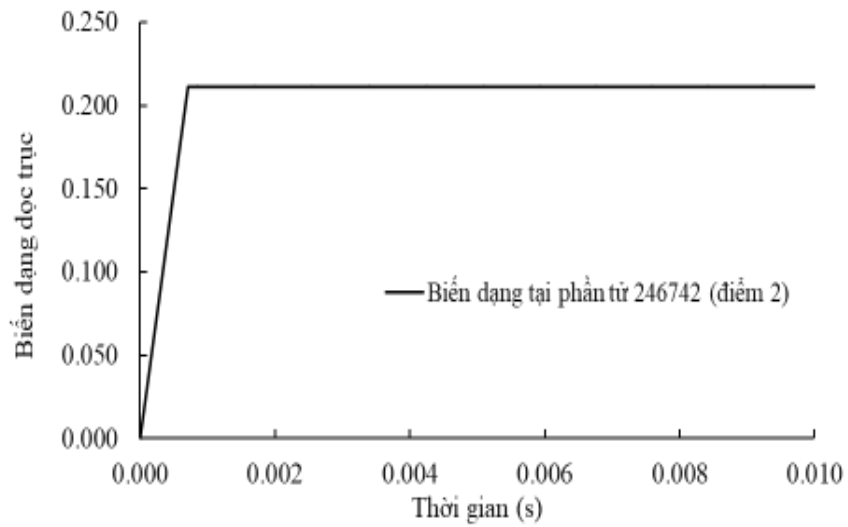
Hình 3.30. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT do nổ tiếp xúc trên mô hình mô phỏng



Hình 3.31. Kích thước vùng phá hủy CK BTCT nổ tiếp xúc trên mô hình mô phỏng



Hình 3.32. Biến dạng dọc trục tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện)



Hình 3.33. Biến dạng dọc trục tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cầu kiện)

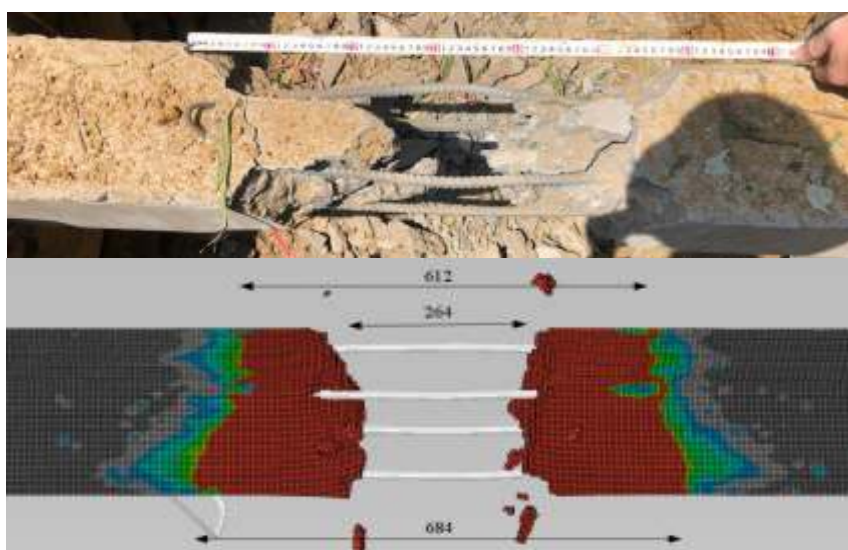
Bảng 3.14. Kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng

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

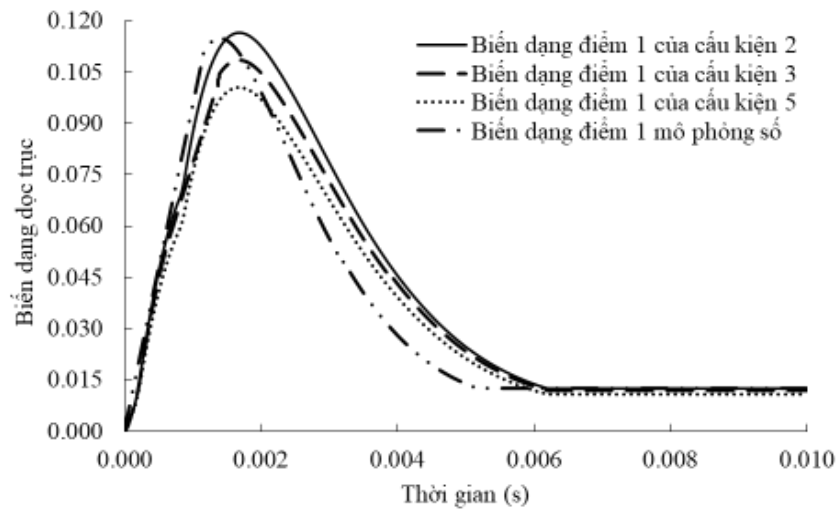
Từ kết quả mô phỏng số cho thấy quá trình phá hoại của cấu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ tiếp xúc theo các thời điểm 0,0002; 0,0004; 0,0006; 0,0008; 0,0014; 0,002; 0,004 và 0,005s (hình 3.30), quá trình phá hoại của nổ tiếp xúc là rất nhanh, đến thời điểm 0,005s trở đi vùng phá hoại của 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 3.14). Cốt thép chịu lực còn nguyên vẹn, thép đai tại vị trí gần lượng nổ bị thổi bay. Biến dạng tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị lớn nhất là 0,115 (hình 3.32) và biến dạng tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,211 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại và rơi khỏi cấu kiện (hình 3.33).

3.3.2.1.4 So sánh kết quả nổ tiếp xúc

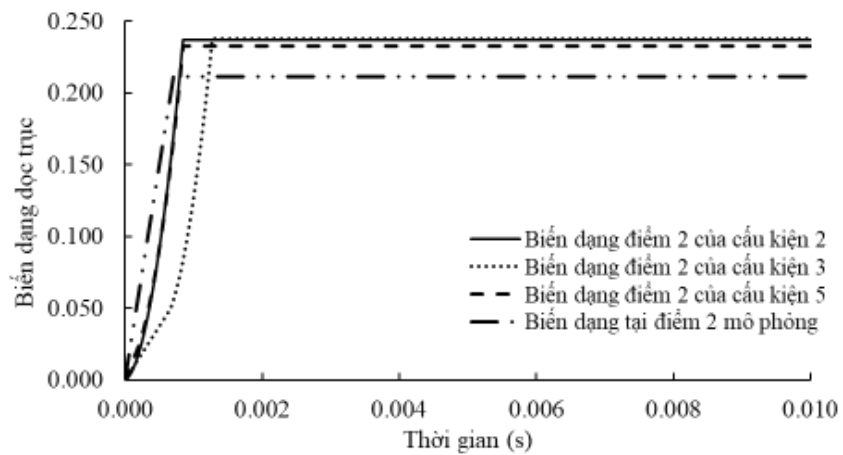
So sánh kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hoại do tiếp xúc được thể hiện như trong hình 3.34; 3.35; 3.36 và bảng 3.15.



Hình 3.34. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 3.35. Biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 3.36. Biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 3.15. So sánh kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số

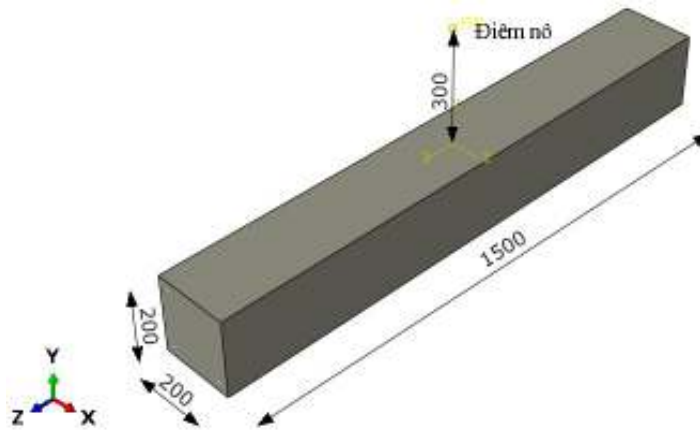
	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều dài vùng phá hủy giữa CK (mm)	264	285	7,4%
Chiều dài vùng phá hủy mặt trên CK (mm)	612	650	5,8%
Chiều dài vùng phá hủy mặt dưới CK (mm)	684	710	3,7%
Biến dạng dọc trục điểm 1	0,115	0,109	5,5%
Biến dạng dọc trục điểm 2	0,211	0,236	10,6%

Kết quả kích thước vùng phá hủy cấu kiện BTCT trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số (hình 3.34) 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 3.15). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 (trung bình của điểm đo 1a và 1b) và 2 (hình 3.35; 3.36) 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.

3.3.2.2 Mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần

3.3.2.2.1 Mô hình hình học cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần

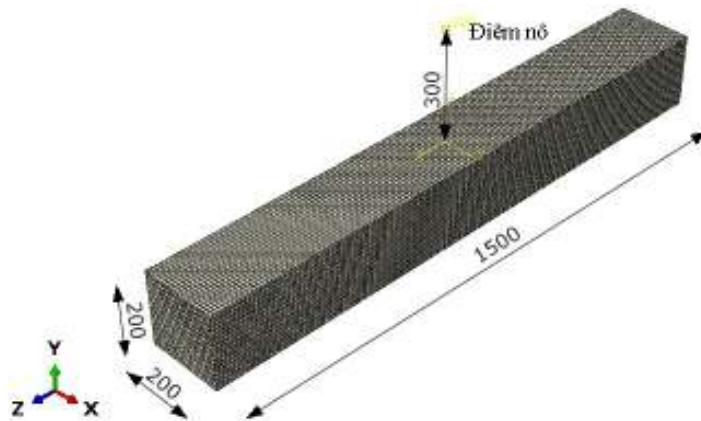


Hình 3.37. Mô hình hình học cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần

Nghiên cứu sự phá hủy và tương tác của cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ gần. Cấu kiện BTCT có chiều dài 1500mm, tiết diện 200x200mm được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6a200$ với chiều dày bảo vệ 10mm. Cấu kiện BTCT chịu tác dụng của tải trọng nổ gần có khối lượng 1600g TNT đặt chính giữa, cách mặt trên cấu kiện BTCT 300mm (hình 3.37).

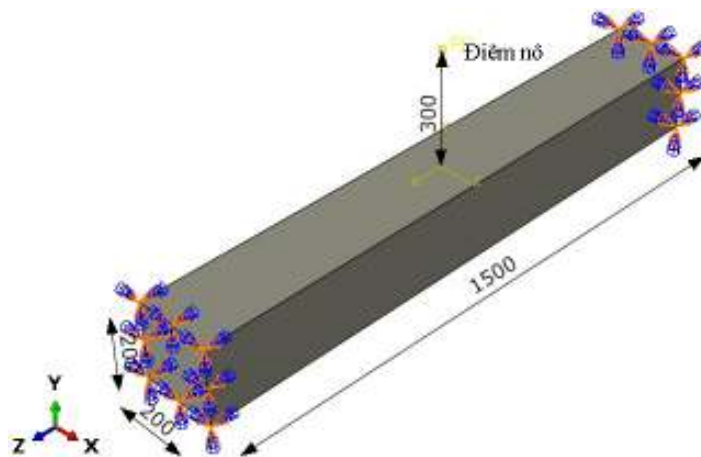
Cấu kiện bê tông được mô tả bằng phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho cốt thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và thanh thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia mịn với kích thước 5mm. Lưới thép chịu lực và thép đai cũng được chia mịn với kích thước 5mm (hình 3.38).

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 mô hình CONWEP.



Hình 3.38. Chia lưới phần tử cấu kiện BTCT bị phá hủy do nổ gần

Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (hình 3.39).



Hình 3.39. Điều kiện biên của kết cấu BTCT bị phá hủy do nổ gần

3.3.2.2.2 Mô hình vật liệu

Bê tông:

Sử dụng mô hình HJC cho bê tông thí nghiệm với các tham số được xác định và liệt kê trong bảng 3.8.

Cốt thép:

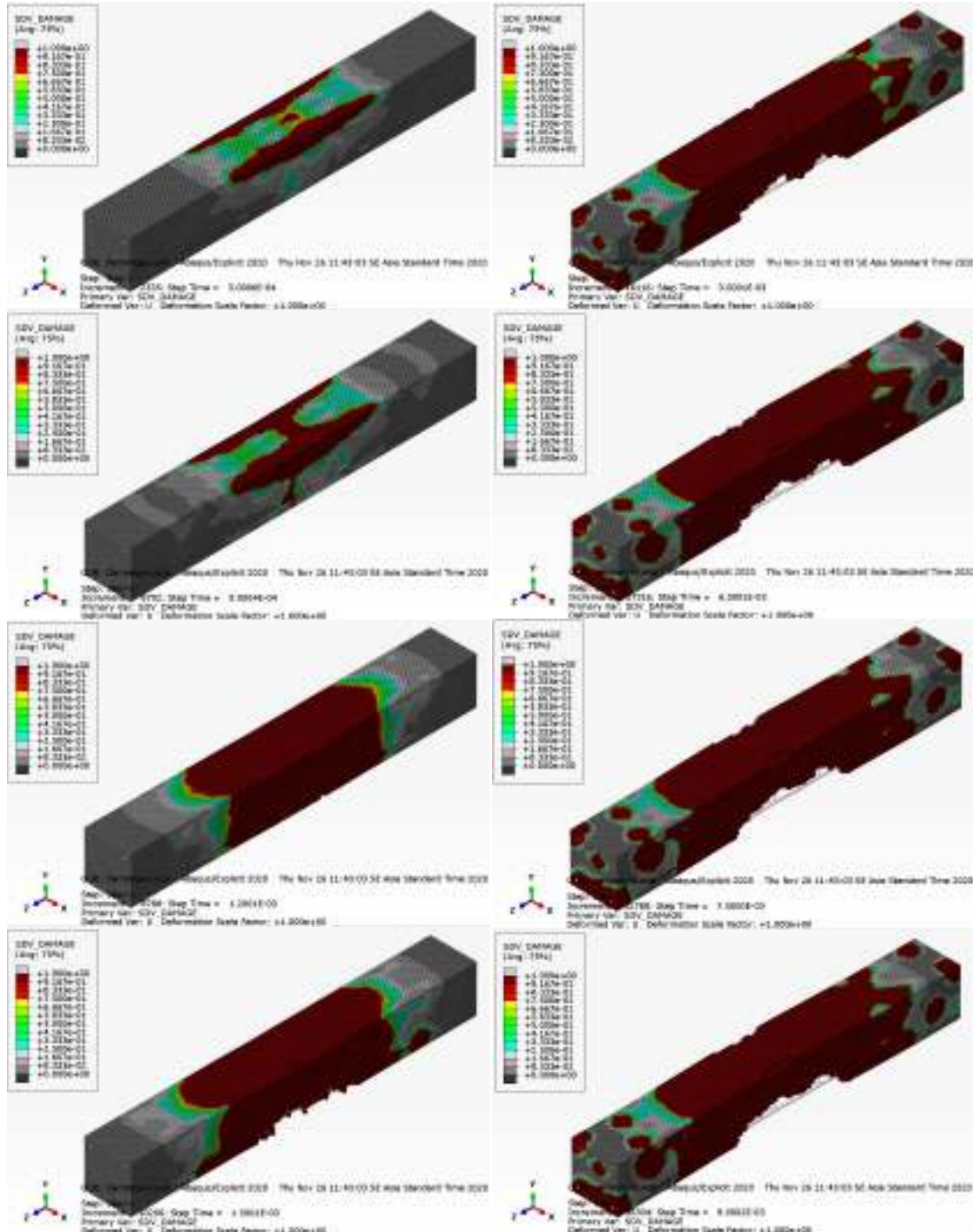
Sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, các tham số như bảng 3.9.

Thuốc nổ:

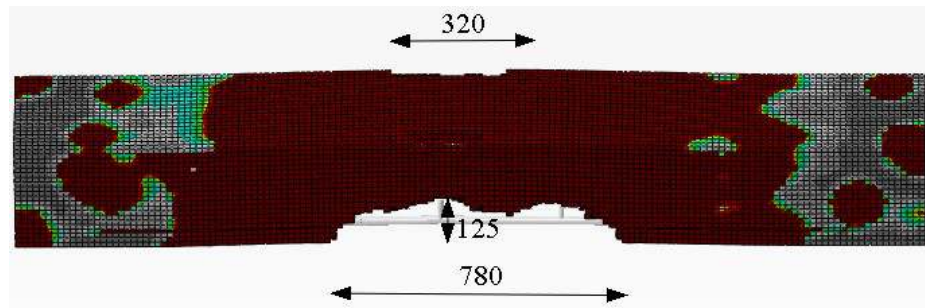
Thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP, áp lực sóng xung kích trong không khí được tính theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2 [113].

3.3.2.2.3 Kết quả mô phỏng số nổ gần

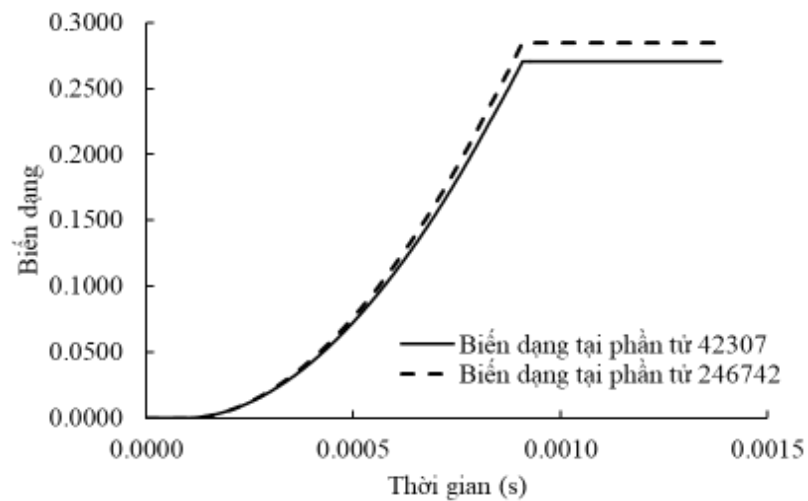
Kết quả mô phỏng số cấu kiện BTCT chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 3.40; 3.41; 3.42 và bảng 3.16.



Hình 3.40. Quá trình phá hủy cấu kiện BTCT do nổ gần trên mô hình mô phỏng



Hình 3.41. Kích thước vùng phá hủy cầu kiện BTCT nổ gần trên mô hình mô phỏng



Hình 3.42. Biến dạng dọc trục tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở 1/4 chiều dài cầu kiện) và phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cầu kiện)

Bảng 3.16. Kích thước vùng phá hủy cầu kiện BTCT trên mô hình mô phỏng

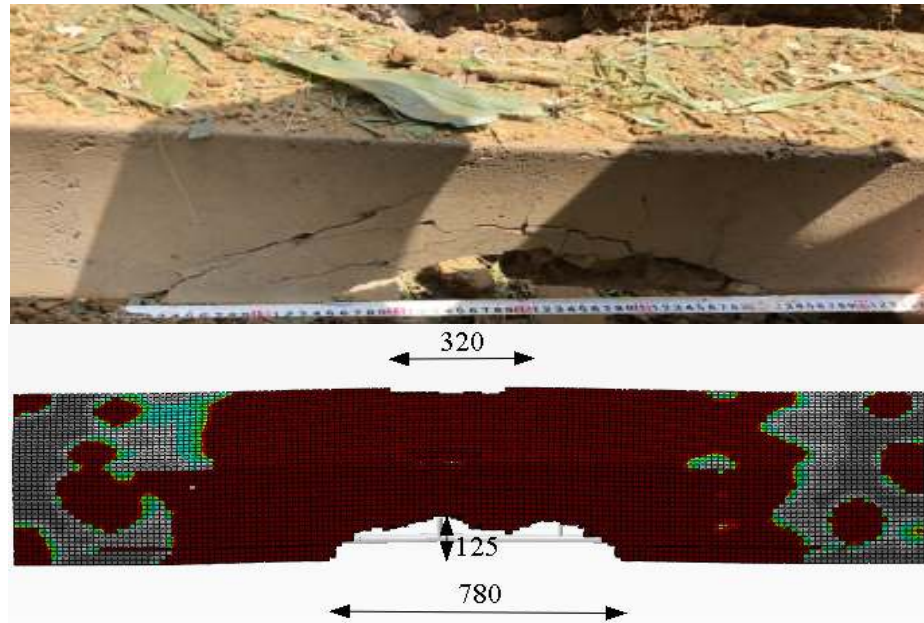
Chiều sâu phễu chấn sục (mm)	Chiều dài phễu chấn sục (mm)	Chiều dài vùng phá hủy mặt bên (mm)
125	780	320

Mô phỏng số cho thấy quá trình phá hoại của cầu kiện bê tông cốt thép khi chịu tác dụng nổ gần theo các thời điểm 0,0003; 0,0009; 0,0012; 0,0015; 0,003; 0,006; 0,0075 và 0,009s (hình 3.40), quá trình phá hoại của nổ gần là rất nhanh, đến thời điểm 0,009s trở đi vùng phá hoại của cầu kiện đạt đến trạng thái lớn nhất, kết quả vùng bê tông của cầu kiện BTCT bị sóng nổ tạo phễu chấn sục phía mặt đối diện với lượng nổ, chiều dài phễu chấn sục là 780mm, chiều sâu phễu chấn sục là 125mm (bảng 3.16). Còn cốt thép trong cầu kiện BTCT gần như không bị ảnh hưởng. Biến dạng tại phần tử 42307 (chính giữa, mặt dưới, ở

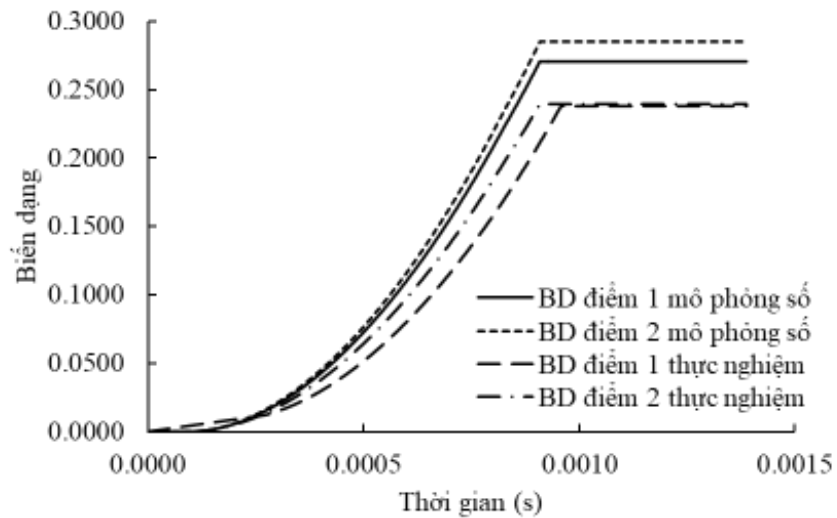
1/4 chiều dài cấu kiện BTCT) đạt giá trị là 0,2705 và biến dạng tại phần tử 246742 (mặt dưới chính giữa cấu kiện BTCT) đạt 0,2849 sau đó những phần tử bê tông tại vị trí đó bị phá hoại khỏi cấu kiện (hình 3.42).

3.3.2.2.4 So sánh kết quả nổ gần

So sánh kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số cấu kiện BTCT bị phá hoại do tiếp xúc được thể hiện như trong hình 3.43; 3.44 và bảng 3.17.



Hình 3.43. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 3.44. Biến dạng tại điểm 1, 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 3.17. So sánh kết quả thí nghiệm thực 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 3.43) 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 3.17). Còn biến dạng dọc trục điểm 1 (trung bình của điểm đo 1a và 1b) và 2 (hình 3.44) 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.

3.4 Kết luận của chương 3

Trong chương 3, tác giả đã trình bày nghiên cứu thực nghiệm xác định các tham số mô hình vật liệu và hiệu chỉnh mô hình tính, cụ thể như sau:

Trình bày các kết quả thí nghiệm để xác định các tham số của vật liệu bê tông thí nghiệm theo mô hình Holmquist-Johnson-Cook, lựa chọn các tham số của vật liệu thép theo mô hình Johnson-Cook, mô hình vật liệu nổ TNT, mô hình không khí.

Tiến hành nổ thử nghiệm ngoài hiện trường để phá hoại cấu kiện BTCT bằng nổ tiếp xúc và nổ gần, sau đó sử dụng các tham số mô hình vật liệu trên tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS so sánh kết quả giữa mô phỏng với thử nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy:

- Thời gian tác dụng phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép của tải trọng nổ là rất ngắn. Trong trường hợp nổ tiếp xúc cấu kiện bị phá hoại hoàn toàn ở vùng tiếp xúc với lượng nổ và vùng phá hoại đó lan rộng ra ở mặt trên và mặt dưới cấu kiện, còn trong trường hợp nổ gần cấu kiện bị phá hủy tạo phễu chấn sục ở mặt dưới của cấu kiện bê tông cốt thép do pha dẫn của sóng nổ. Cốt thép bị ảnh hưởng không đáng kể;

- Kích thước các vùng phá hủy và biến dạng của mẫu thử trên mô hình thử nghiệm hiện trường và mô hình thử nghiệm số là tương đồng và phù hợp với quy luật của cơ học kết cấu, thông qua mô phỏng số cho ta thấy rõ cơ chế phá hoại kết cấu bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng nổ theo từng thời điểm.

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, mô hình không khí trong phân tích kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ bằng phần mềm ABAQUS. Kết quả đó làm cơ sở cho việc mô phỏng các bài toán phân tích sự sụp đổ lũy tiến của của kết cấu khung không gian bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ.

Chương 4 của luận án sẽ sử dụng các mô hình vật liệu với các tham số đã được trình bày ở trên tiến hành mô phỏng phân tích sự phá hoại lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc và nổ gần, 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 sập lũy tiến cho công trình trong các trường hợp này.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU SỤP ĐỔ LŨY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG CỐT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TÁC DỤNG NỔ VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SẬP

4.1 Mở đầu

Một vụ nổ tiếp xúc hay nổ gần trên mặt đất ngay cạnh một tòa nhà có thể gây ra thiệt hại nghiêm trọng cho kết cấu của tòa nhà, làm sập tường, thổi bay hệ thống cửa và làm tê liệt các hệ thống của tòa nhà. Thiệt hại về tính mạng và thương tích cho người trong tòa nhà đó có thể rất lớn do nhiều nguyên nhân, bao gồm tác động trực tiếp từ vụ nổ, sụp đổ kết cấu, va chạm mảnh vỡ, lửa và khói. Các tác động gián tiếp có thể làm kìm hãm hoặc ngăn chặn việc sơ tán kịp thời, do đó góp phần gây thêm thương vong.

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 bất thường, nhằm đảm bảo cho các công trình có thể chịu được khi có các vụ nổ như trên xảy ra.

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 thiết kế mà còn ít đề cập đến nổ bất thường và chủ yếu được đề cập cho các công trình Quân sự. Còn các công trình dân dụng chưa được quan tâm đúng mức.

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu liên quan đến các phân tích kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ, 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 chương này, tác giả sẽ sử dụng các mô hình vật liệu với các tham số đã được trình bày ở chương 3 tiến hành mô phỏng phân tích sự phá hoại lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc và nổ gần, 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 sập lũy tiến (KSLT) cho công trình trong các trường hợp này.

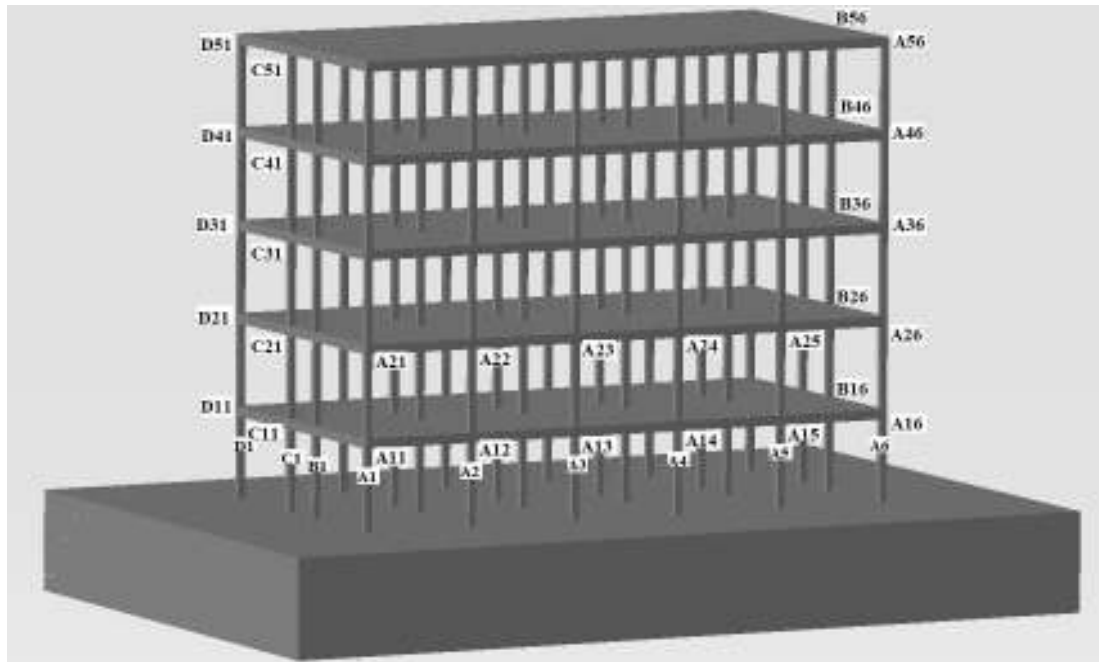
4.2 Đặt bài toán

Các công trình đặc biệt phục vụ lưỡng dụng vừa sử dụng mục đích dân sự vừa cho mục đích an ninh quốc phòng khi có các sự cố như khủng bố, chiến tranh. Trong luận án này tác giả nghiên cứu công trình nhà có 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 lưỡng dụng - có thể đưa vào phục vụ cho mục đích trú ẩn khi có khủng bố hay chiến sự.

4.2.1 Mô hình hình học của bài toán nghiên cứu

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; 4m và 5 gian với bước khung là 4m; chiều cao tầng 3,3m. Phần hầm có kích thước 20,25x30,25m với chiều cao 3,6m. Kết cấu của tòa nhà bằng khung bê tông cốt thép: Cột có tiết diện 0,25x0,25m, cốt thép chịu lực 4Ø22, thép đai Ø6a200; Dầm có tiết diện 0,25x0,35m, cốt thép chịu lực 4Ø20, thép đai Ø6a200; Sàn các tầng nổi có chiều dày 0,1m bố trí 2 lớp thép Ø8a200; Tầng hầm cấu tạo bằng vách bê tông cốt thép có chiều dày 0,3m bố trí 2 lớp thép Ø16a200. Chiều dày lớp bảo vệ 0,015m. Cốt thép tương đương thép CII, bê tông thí nghiệm. 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 0,15m (hình 4.1) (Chi tiết xem phụ lục).

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, bỏ qua tải trọng nhiệt.



Hình 4.1. Mô hình bài toán nghiên cứu

Cấu kiện bê tông được mô tả bằng phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho cốt thép. Liên kết giữa các phần tử của khối bê tông và cốt thép được xác định theo liên kết cứng. Lưới bê tông được chia với kích thước 5mm ở những cấu kiện chịu tác dụng trực tiếp với tải trọng nổ, những cấu kiện còn lại là 50mm. Lưới thép chịu lực, thép đai, thép gia cường được chia với kích thước 5mm ở những cấu kiện chịu tác dụng trực tiếp với tải trọng nổ, những cấu kiện còn lại là 100mm. Số lượng phần tử trong mỗi bài toán lên tới khoảng 22.000.000 phần tử, máy tính cấu hình cao chạy trong khoảng 10 ngày mới ra kết quả.

Kết cấu bê tông được mô hình hóa bằng phương pháp lưới Lagrange. Điều kiện phá hủy được xác định theo mô hình vật liệu người dùng tự định nghĩa, sử dụng các tham số vật liệu được trình bày trong chương 3. Thuộc nổ được tính theo phương pháp SPH trong bài toán nổ tiếp xúc và tính theo mô hình CONWEP trong bài toán nổ gần.

Điều kiện biên: Đáy tầng hầm được gán liên kết ngàm cứng, vách tường tầng hầm được gán liên kết lò xo 1 chiều (hình 4.1).

4.2.2 Mô hình vật liệu sử dụng trong bài toán nghiên cứu

Bê tông: Sử dụng mô hình HJC cho bê tông thí nghiệm với các tham số được xác định và liệt kê trong bảng 3.8.

Cốt thép: Sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, các tham số như bảng 3.9.

Thuốc nổ: Trong bài toán nổ tiếp xúc: Để mô hình hóa hiện tượng nổ sử dụng phương pháp SPH với phương trình trạng thái do Lee – Tarver và Jones - Wilkins - Lee đề xuất, các tham số được liệt kê trong bảng 3.10.

Trong bài toán nổ gần: 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 [113].

4.2.3 Các giải pháp gia cố kháng sập sử dụng trong bài toán nghiên cứu

Các giải pháp được áp dụng cho công trình đã lựa chọn, nhằm mục đích tăng sức kháng cho công trình, kết quả tính toán được so sánh với kết cấu bài toán nguyên bản.

Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm cột phụ: Trong các bài toán khảo sát dưới đây, tác giả đã bố trí cột phụ có kích thước hình học tương đương với cột phá hủy, đặt cách cột bị phá hủy 1m (qua khảo sát bài toán với khoảng cách này tránh được va chạm của cột chính khi bị phá hủy). Đây là một giải pháp trong phương pháp đường dẫn tải thay thế.

Giải pháp thứ 2 - bọc thép cột bị phá hủy: Với thêm dẻo lớn, vật liệu thép được coi là vật liệu chịu tải trọng của nổ khá tốt, cụ thể ở thí nghiệm trong chương 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 tại những vị trí cột bị phá hủy (bọc thép các cột bị tiếp xúc với lượng nổ trong bài toán nổ tiếp xúc và bọc hàng cột tiếp xúc với sóng nổ trong bài toán nổ gần). Liên kết giữa tấm thép bọc cột và cột được gán là liên kết tiếp xúc. Đây là một giải pháp trong phương pháp kháng cục bộ riêng biệt.

Giải pháp thứ 3 - bố trí tường chắn sóng nổ: Với mục đích ngăn chặn, làm giảm tác dụng của sóng nổ lên kết cấu, kết cấu tường chắn sóng nổ được xem là một trong những biện pháp hữu hiệu. Trong nghiên cứu này tác giả chọn kết cấu tường chắn sóng nổ bằng bê tông thí nghiệm chiều dài 20m, cao 2m mặt cắt ngang hình thang vuông 0,2x0,5m - có tác dụng làm đổi hướng tiếp xúc của mặt sóng nổ. Đây cũng là một giải pháp trong phương pháp kháng cục bộ riêng biệt.

4.2.4 Các bài toán nghiên cứu

Mô hình bài toán, mô hình vật liệu trên được sử dụng để mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS trong các trường hợp cụ thể sau:

Trường hợp 1: Sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc với kết cấu (mục 4.3.1 và 4.3.2) và 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 các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình (mục 4.4.1 và 4.4.2);

- Trường hợp 2: Sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần với kết cấu (mục 4.5) và 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 các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình (mục 4.6.1; 4.6.2 và 4.6.3).

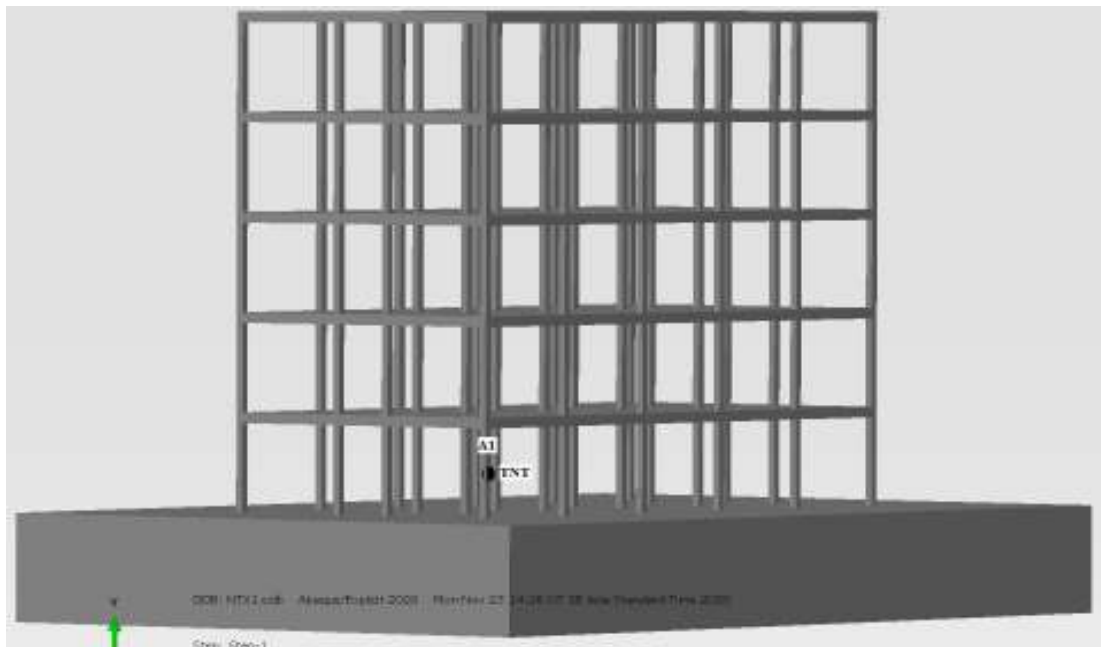
4.3 Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc

Trong mục này, tác giả tiến hành khảo sát khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc với 2 kịch bản:

- Kịch bản 1: Tòa nhà bị tiếp cận tầng 1 và ộp lượng nổ tiếp xúc 400g TNT tại chính giữa cột A1 (cột góc của tòa nhà);
- Kịch bản 2: Tòa nhà bị tiếp cận tầng 1 và ộp lượng nổ tiếp xúc 400g TNT tại chính giữa cột A3 (cột giữa của tòa nhà).

4.3.1 Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A1 (Kịch bản 1)

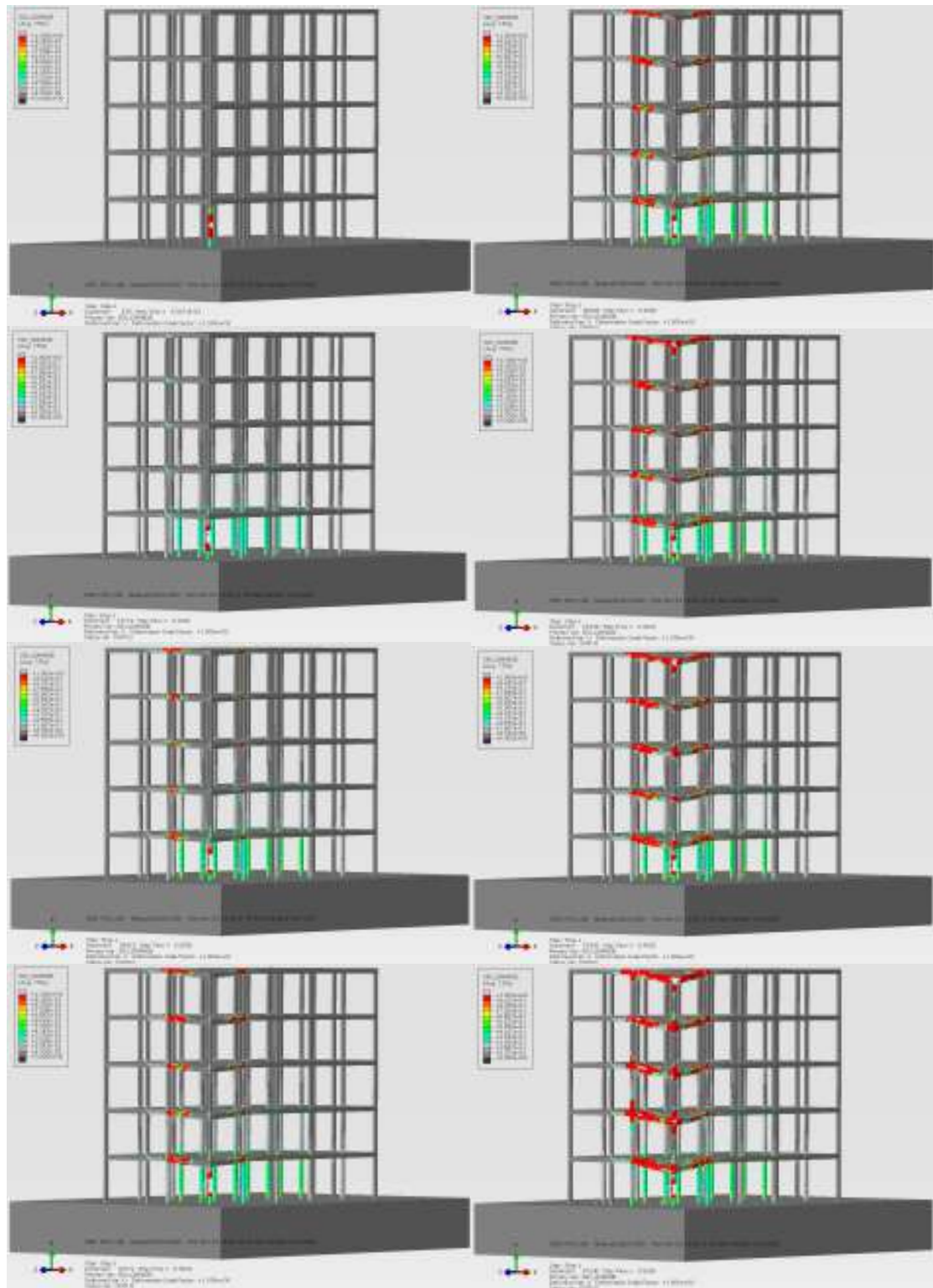
4.3.1.1 Mô hình bài toán



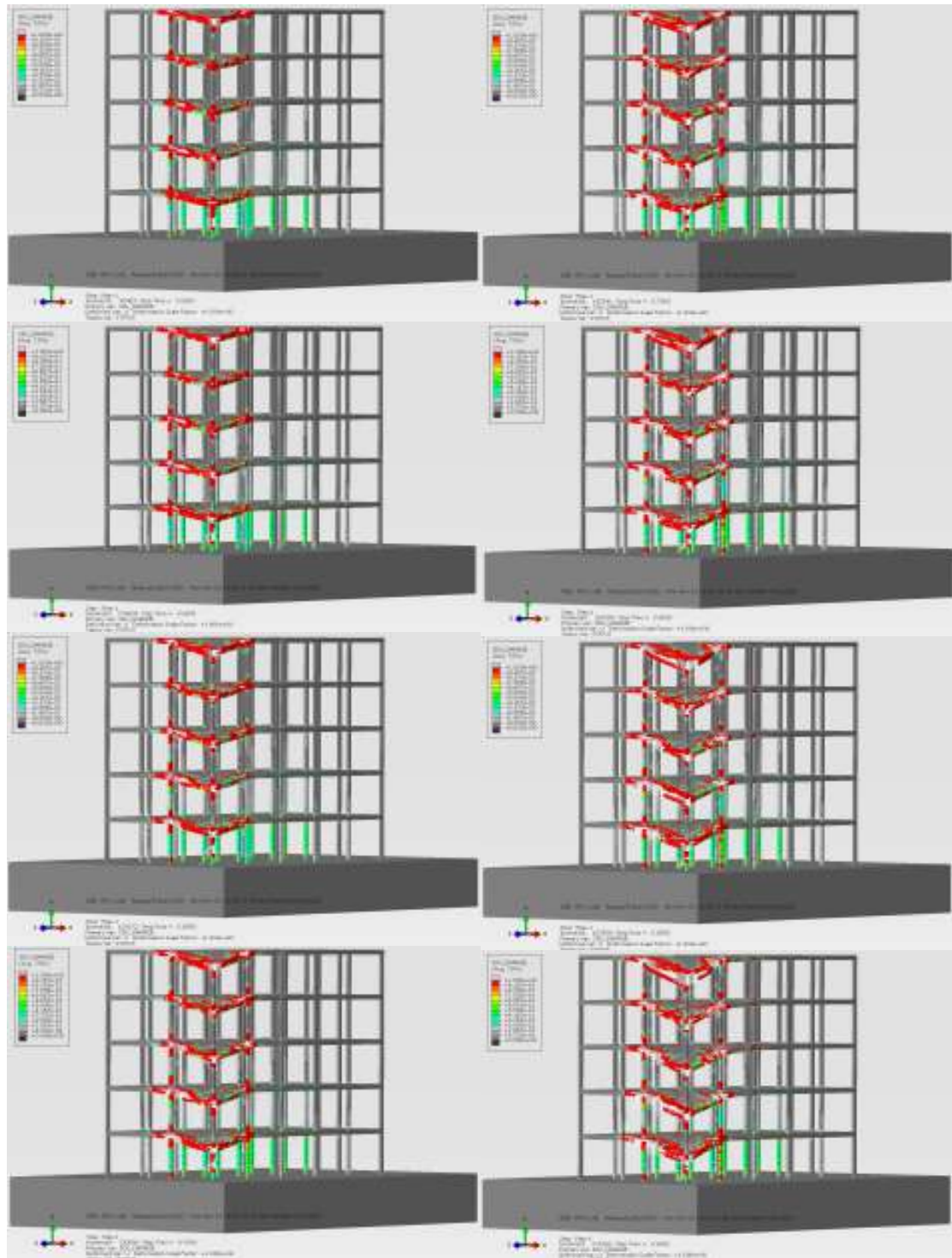
Hình 4.2. Mô hình bài toán nổ tiếp xúc đặt tại cột A1.

4.3.1.2 Kết quả mô phỏng số

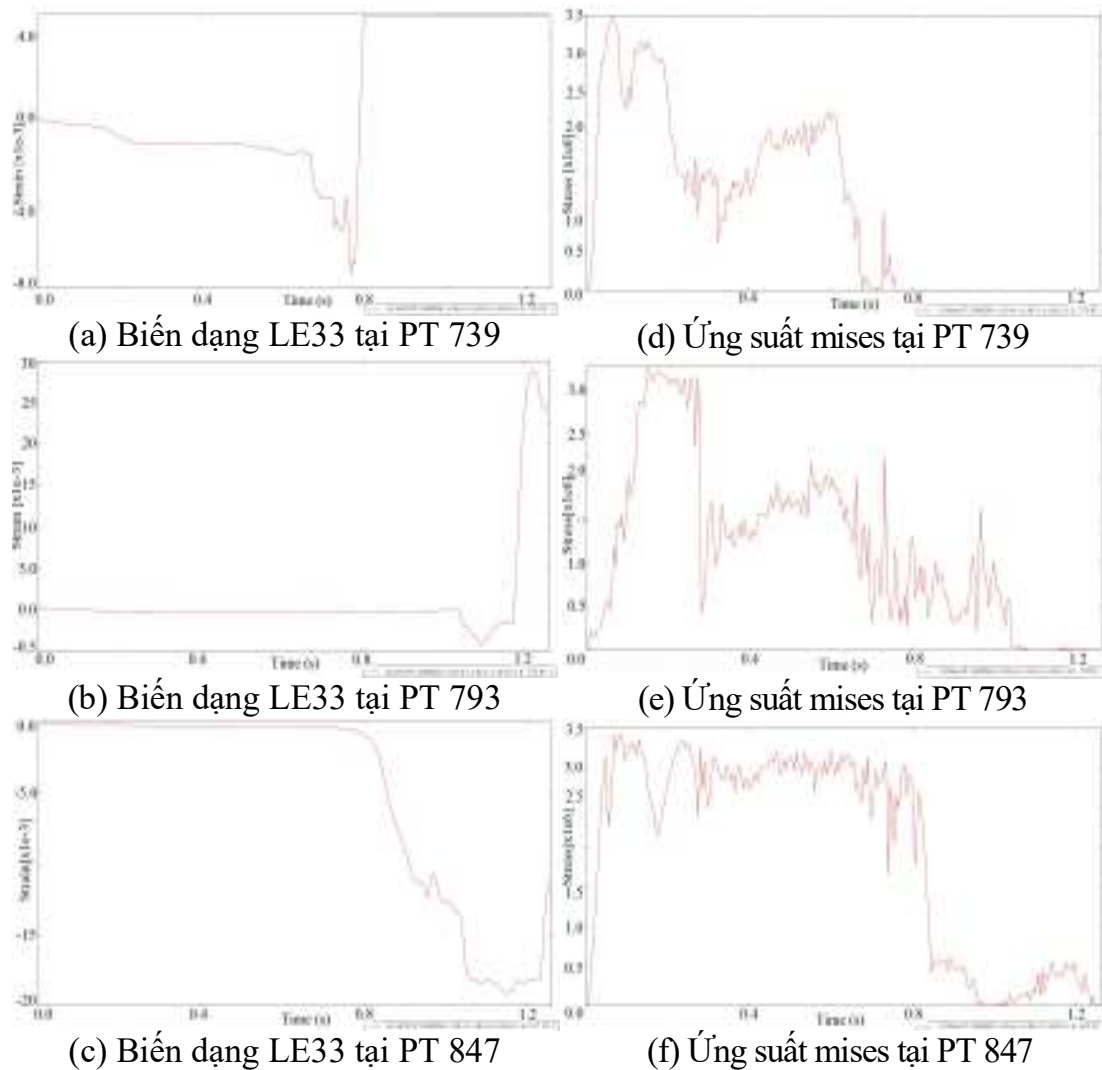
Kết quả mô phỏng số sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1 được thể hiện như trong hình 4.3; 4.4 và 4.5.



Hình 4.3. Quá trình SDLT của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1, trong ứng thời điểm 0,005; 0,1; 0,2; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5s.



Hình 4.4. Quá trình SDLT của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1, tương ứng thời điểm 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9s.



Hình 4.5. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.3.1.3 Nhận xét kết quả

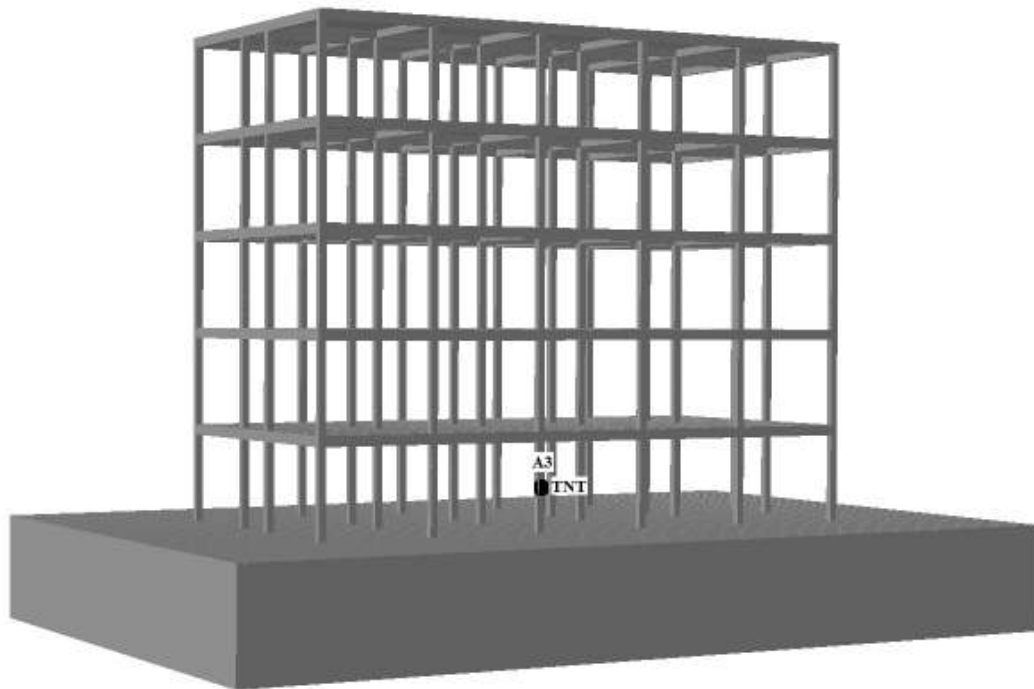
Căn cứ kết quả khảo sát về mức độ phá hủy, biểu đồ biến dạng LE và biểu đồ ứng suất mises, nhận thấy sau khi bị lượng nổ tiếp xúc phá hủy cột A1, tải trọng nổ duy trì sau khoảng thời gian 0,007s kết thúc, dưới tác dụng của trọng lượng bản thân của kết cấu khung bê tông cốt thép, tải trọng của tường bao và hoạt tải, sự phá hủy hình thành tại các tiết diện dầm ở các nút lần lượt B11, A12 (tầng 1); B21, A22 (tầng 2); B31, A32 (tầng 3); B41, A42 (tầng 4) và B51, A52 (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, A2, B1 bị phá hủy, quá trình phá hoại lây tiến diễn ra rất nhanh sau 0,9s một góc của tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ (hình 4.4).

Trên hình 4.5, 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 739 tăng đến thời điểm 0,9s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy, còn các phần tử 793 và 847 các giá trị đó dần dần ổn định sau thời điểm đó.

Như vậy, khi cột A1 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 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.

4.3.2 Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 (Kịch bản 2)

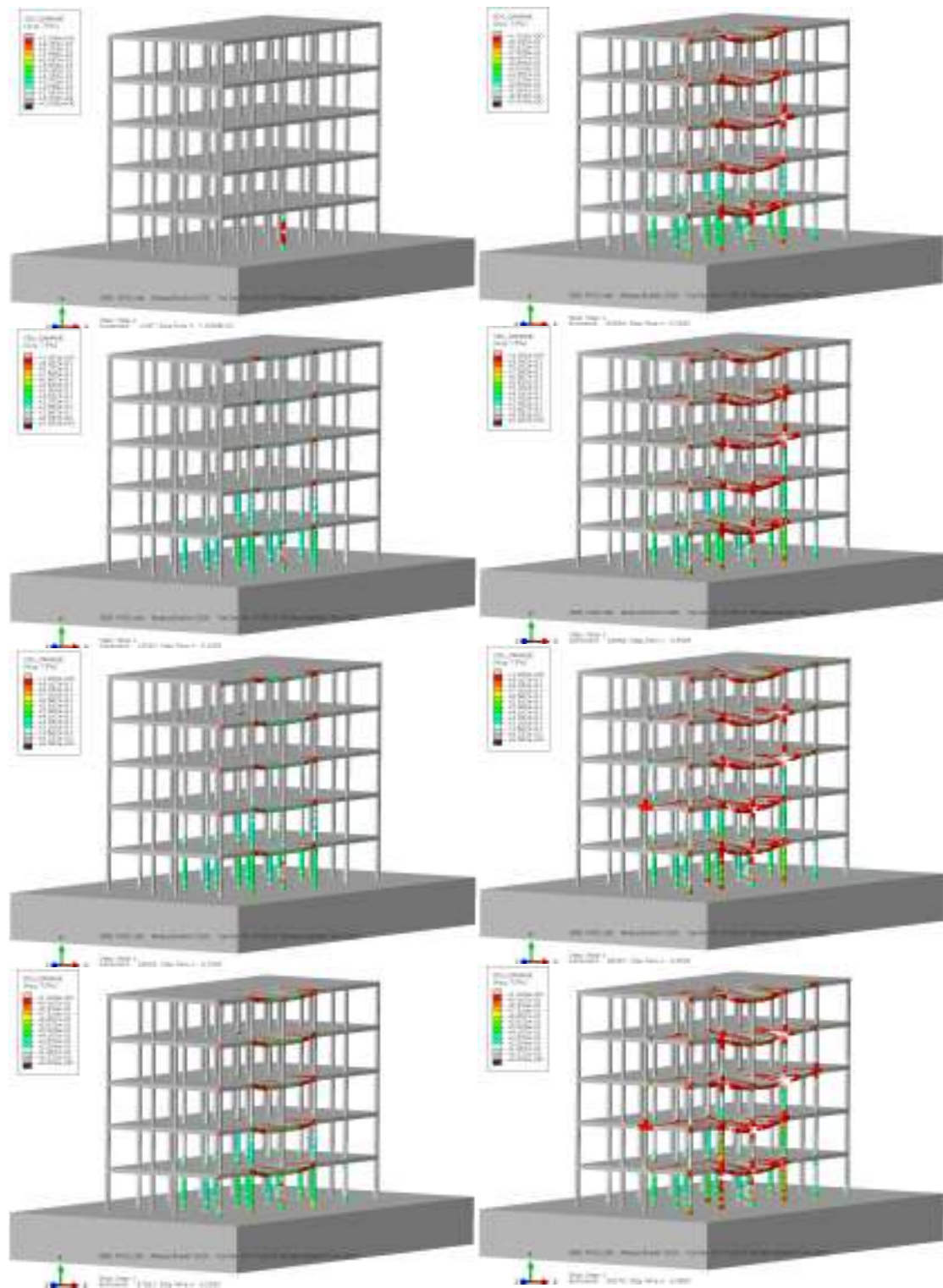
4.3.2.1 Mô hình bài toán



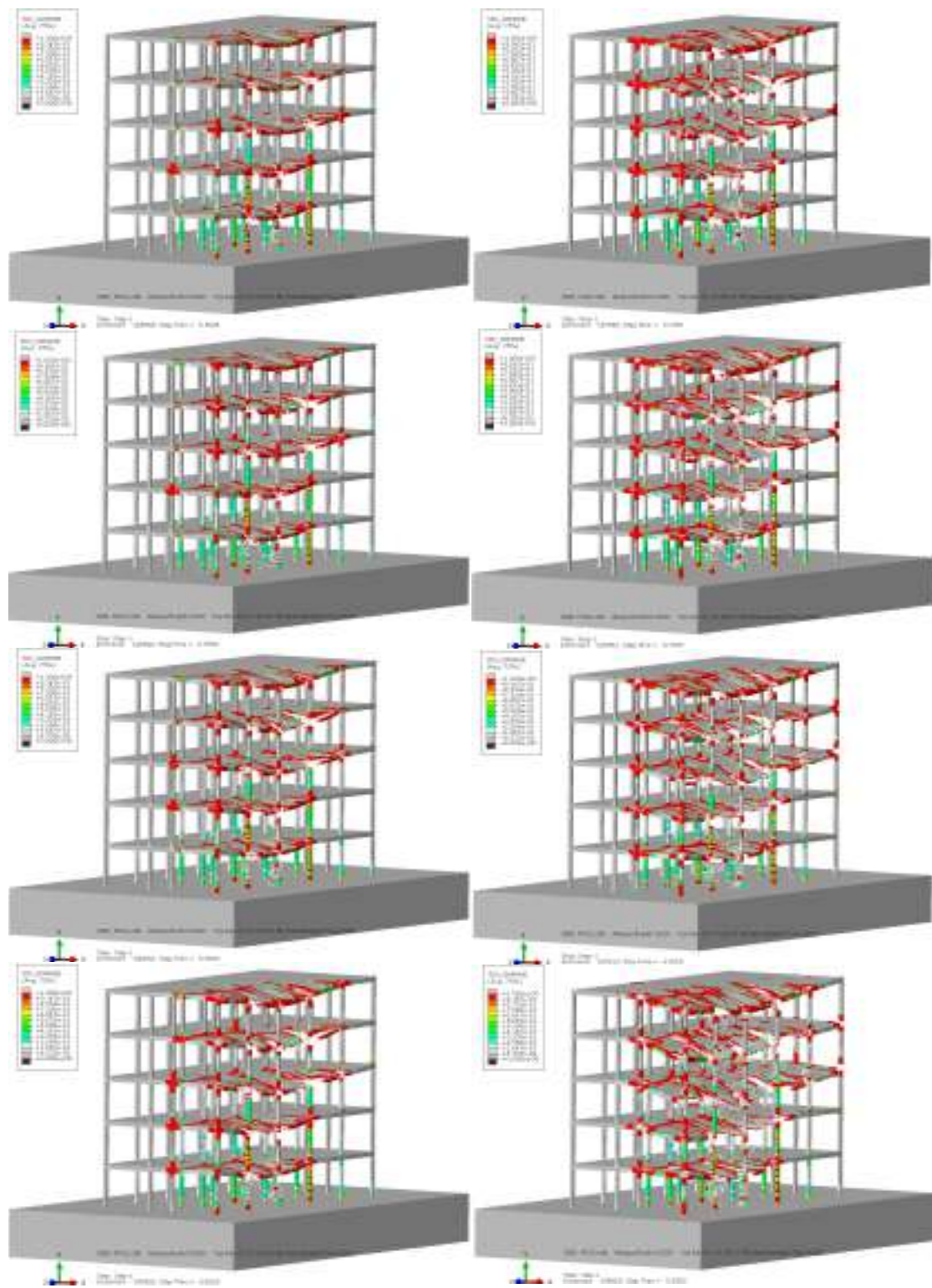
Hình 4.6. Mô hình bài toán nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

4.3.2.2 Kết quả mô phỏng số

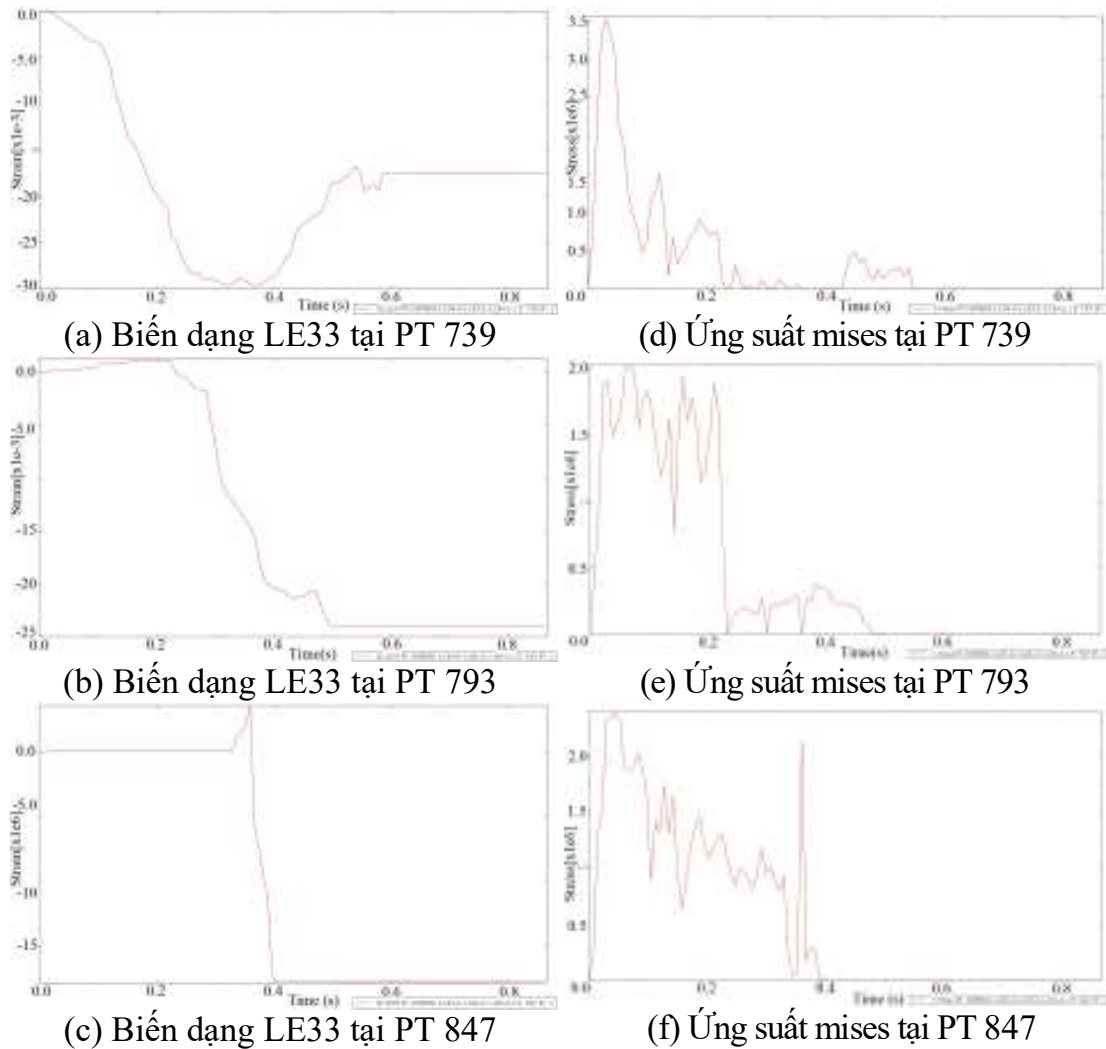
Kết quả mô phỏng số sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong hình 4.7; 4.8 và 4.9.



Hình 4.7. 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; 0,45s.



Hình 4.8. Quá trình SDLT 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; 0,85s.



Hình 4.9. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.3.2.3 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 sau khi bị lượng nổ tiếp xúc phá hủy cột A3, tải trọng nổ duy trì sau khoảng thời gian 0,007s 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 0,85s một nửa tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ (hình 4.8).

Trên hình 4.9, 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; 0,57s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

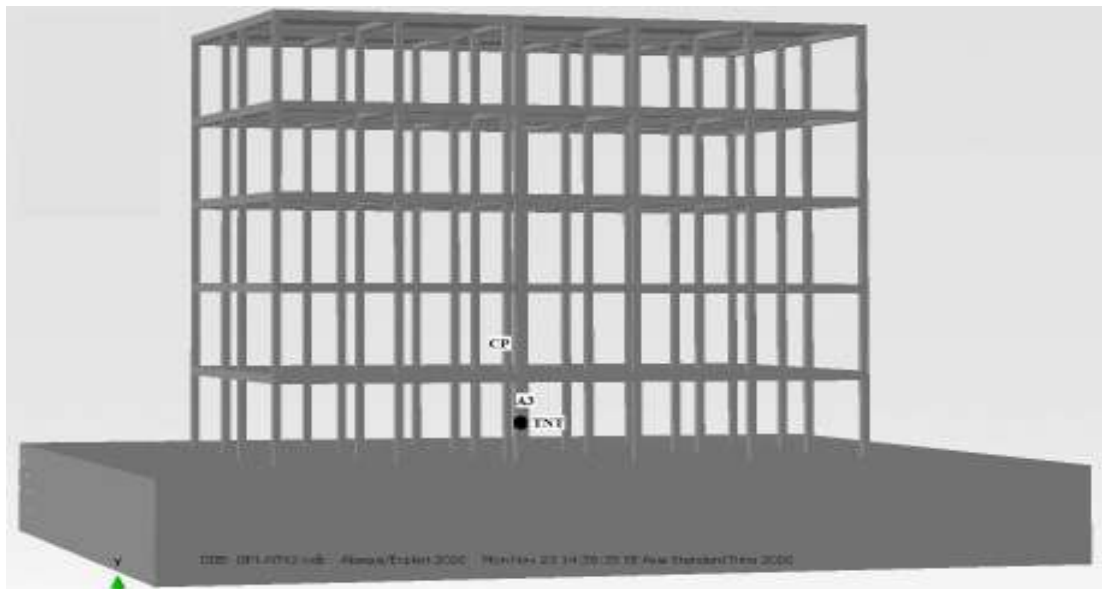
Như vậy, khi cột A3 bị phá hủy do lượng nổ tiếp xúc, tải trọng được phân bố lại cho các cấu kiện còn lại, nội lực trong các cấu kiện đó tăng lên đột ngột vượt quá khả năng chịu tải của các cấu kiện đó (vốn không được tính trong thiết kế), dẫn đến các cấu kiện đó bị phá hủy, gây ra sự sụp đổ lũy tiến cho công trình.

4.4 Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến trong trường hợp khung bê tông cốt thép 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 toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc cho 2 trường hợp lượng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1 và A3, cho thấy trong trường hợp đặt lượng nổ tiếp xúc tại cột A3 sự PHLT xảy ra với mức độ lớn hơn và thời gian phá hoại diễn ra nhanh hơn, do 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 và giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy.

4.4.1 Giải pháp thêm cột phụ để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

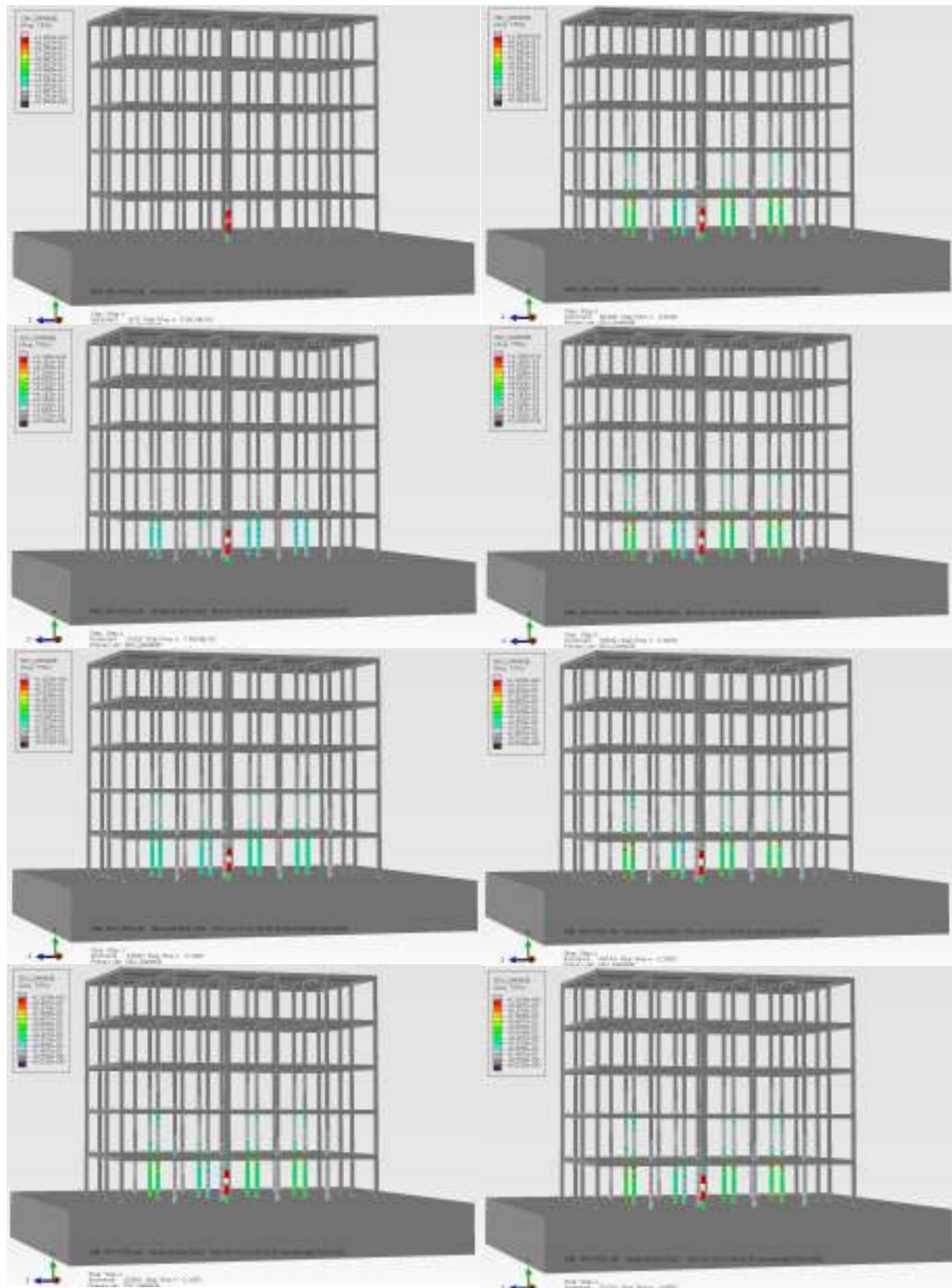
4.4.1.1 Mô hình bài toán



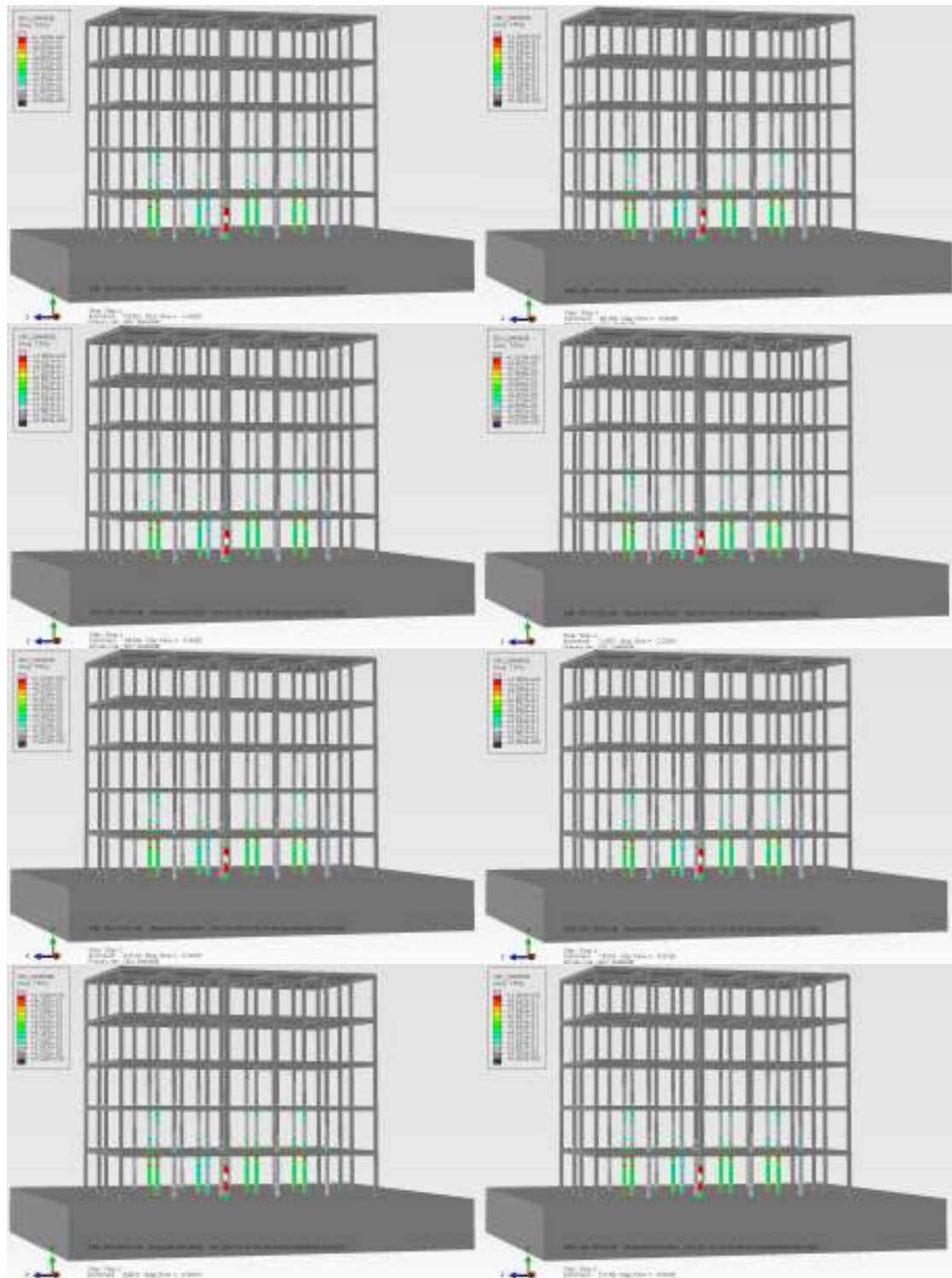
Hình 4.10. Mô hình bài toán thêm cột phụ KSLT nổ tiếp xúc đặt tại cột A3.

4.4.1.2 Kết quả mô phỏng số

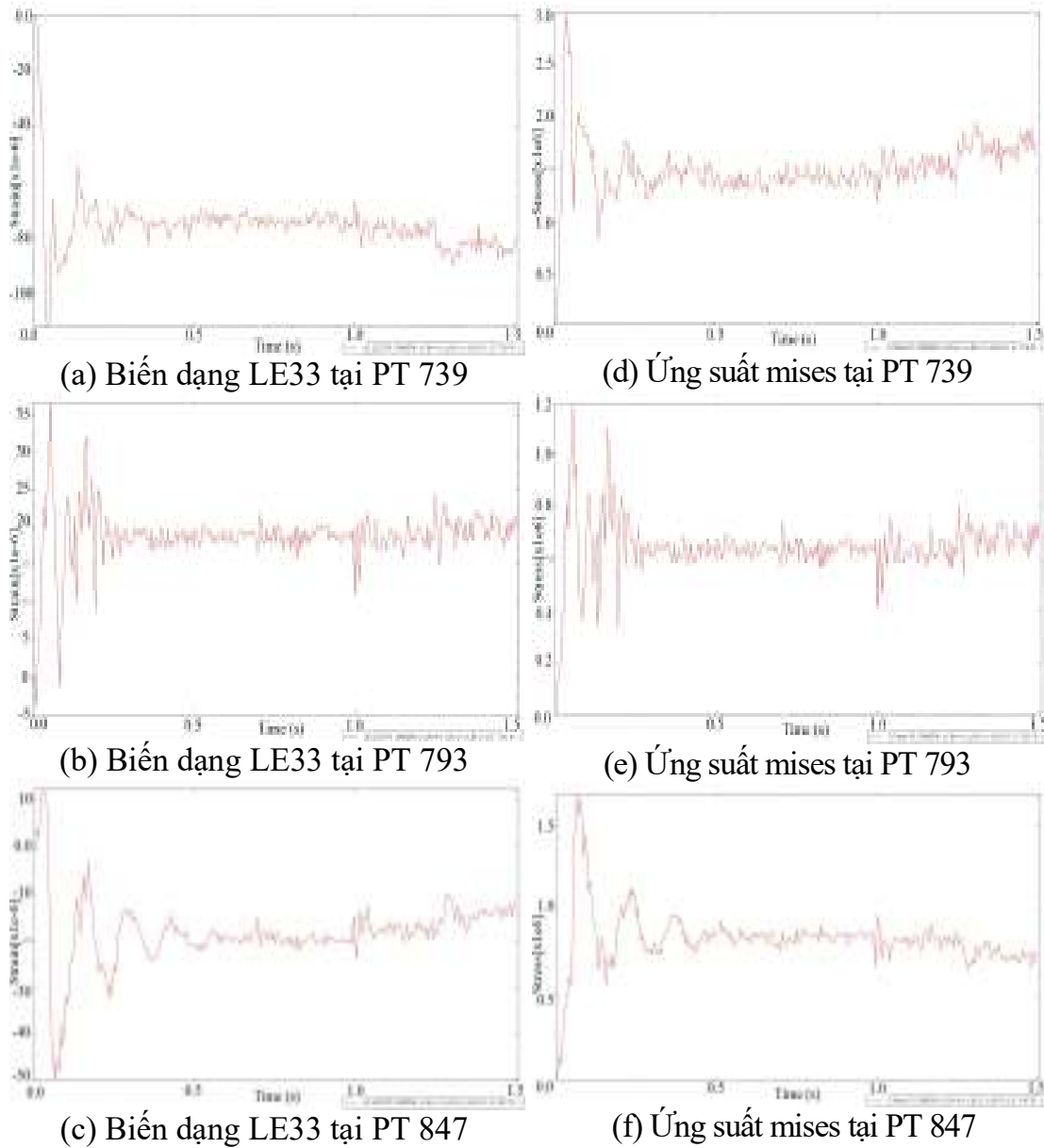
Kết quả mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong hình 4.11; 4.12 và 4.13.



Hình 4.11. Quá trình làm việc của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,005; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,35; 0,4s.



Hình 4.12. Quá trình làm việc của khung BTCT chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi có thêm cột phụ, thời điểm 0,425; 0,45; 0,475; 0,5; 0,525; 0,55; 0,575; 0,6s.



Hình 4.13. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.4.1.3 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 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 CP, do vậy trong quá trình phân tích kết cấu không

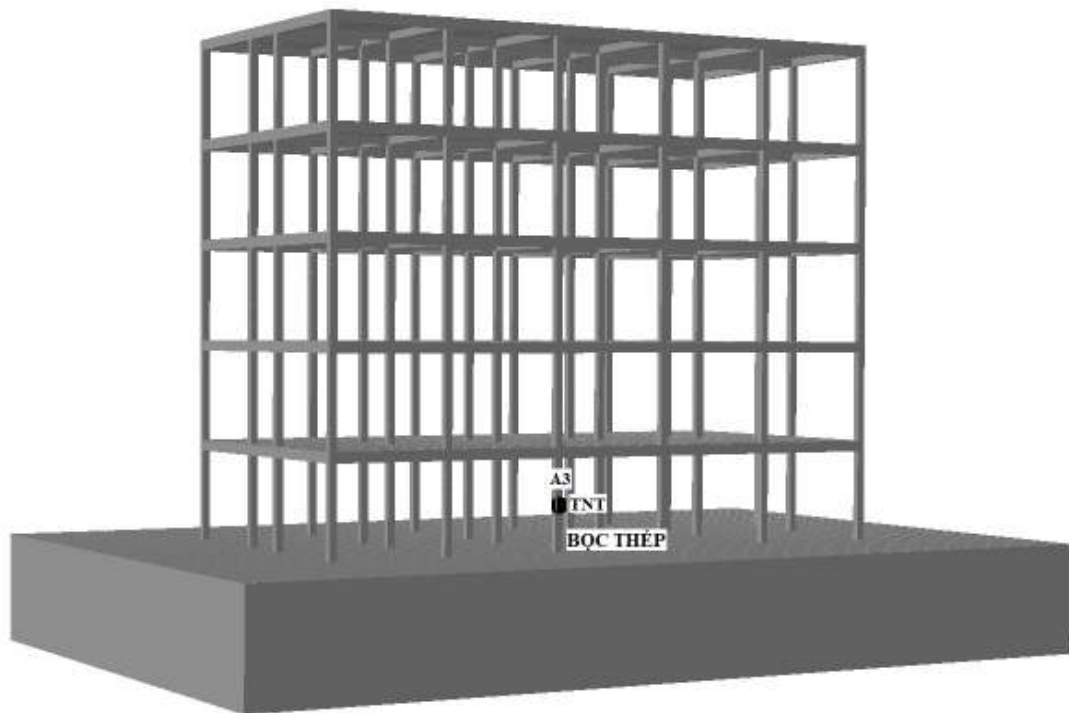
còn bị phá hủy như trong trường hợp không có cột phụ (hình 4.12).

Trên hình 4.13, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phân 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 phân tử đó tăng đến thời điểm 0,2s sau đó dần dần 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.

4.4.2 Giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

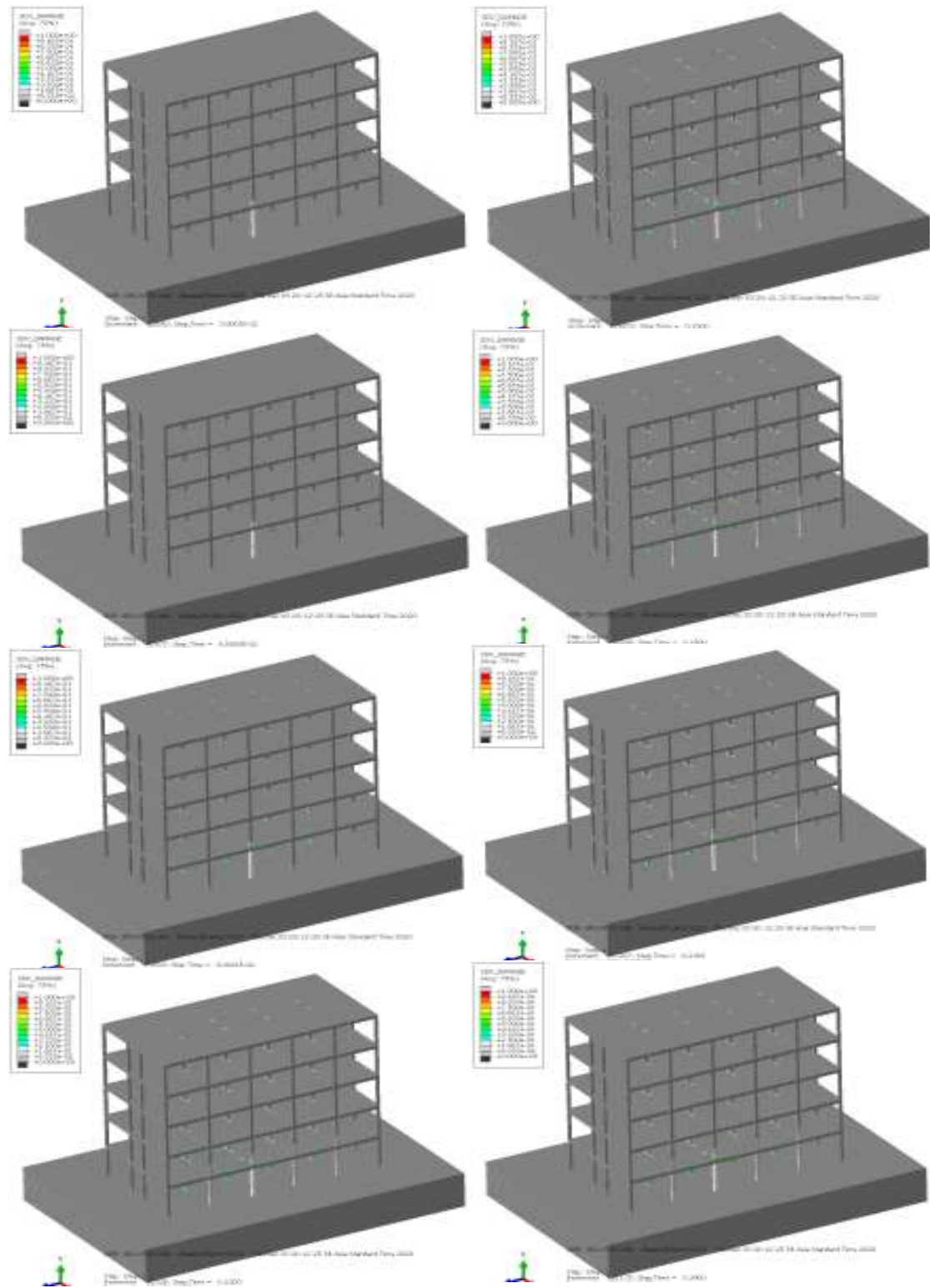
4.4.2.1 Mô hình bài toán



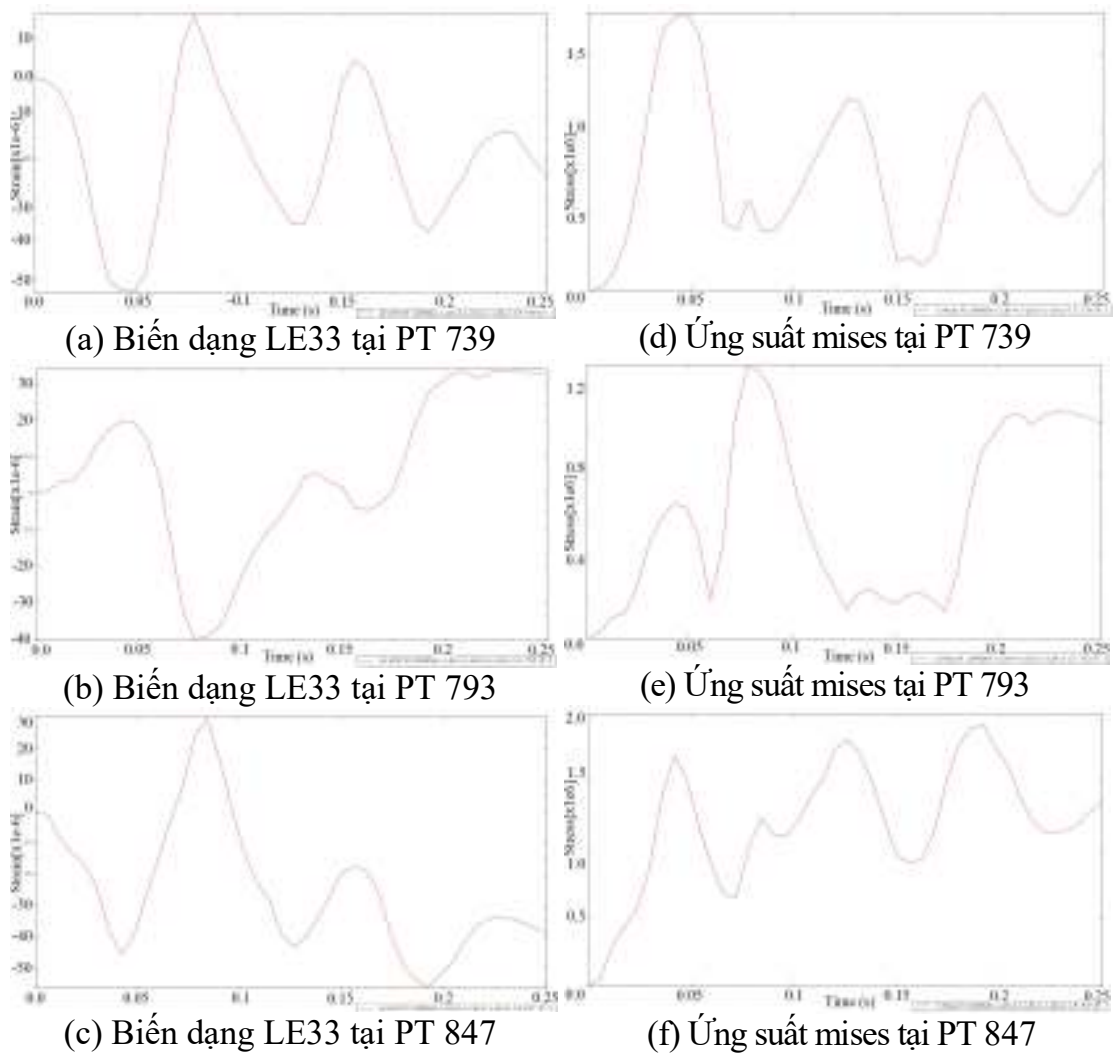
Hình 4.14. Mô hình bài toán bọc thép cột để KSLT do nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

4.4.2.2 Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 được thể hiện như trong hình 4.15 (Quá trình phá hủy của khung BTCT của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi bọc thép cột tiếp xúc nổ) và 4.16 (Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847).



Hình 4.15. Quá trình làm việc của khung BTCT của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 khi bộc thép cột tiếp xúc nổ tại các thời điểm 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24s.

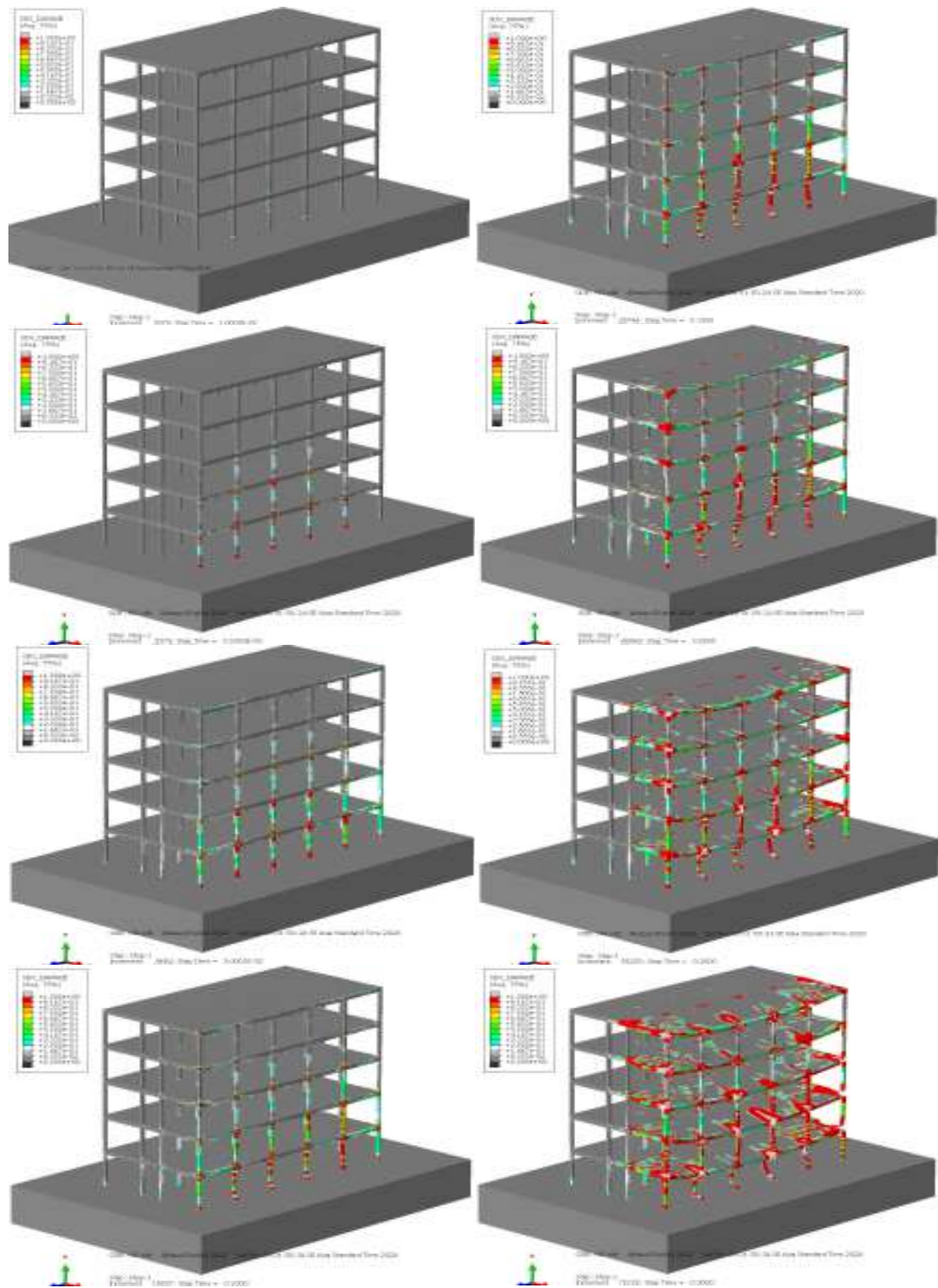


Hình 4.16. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

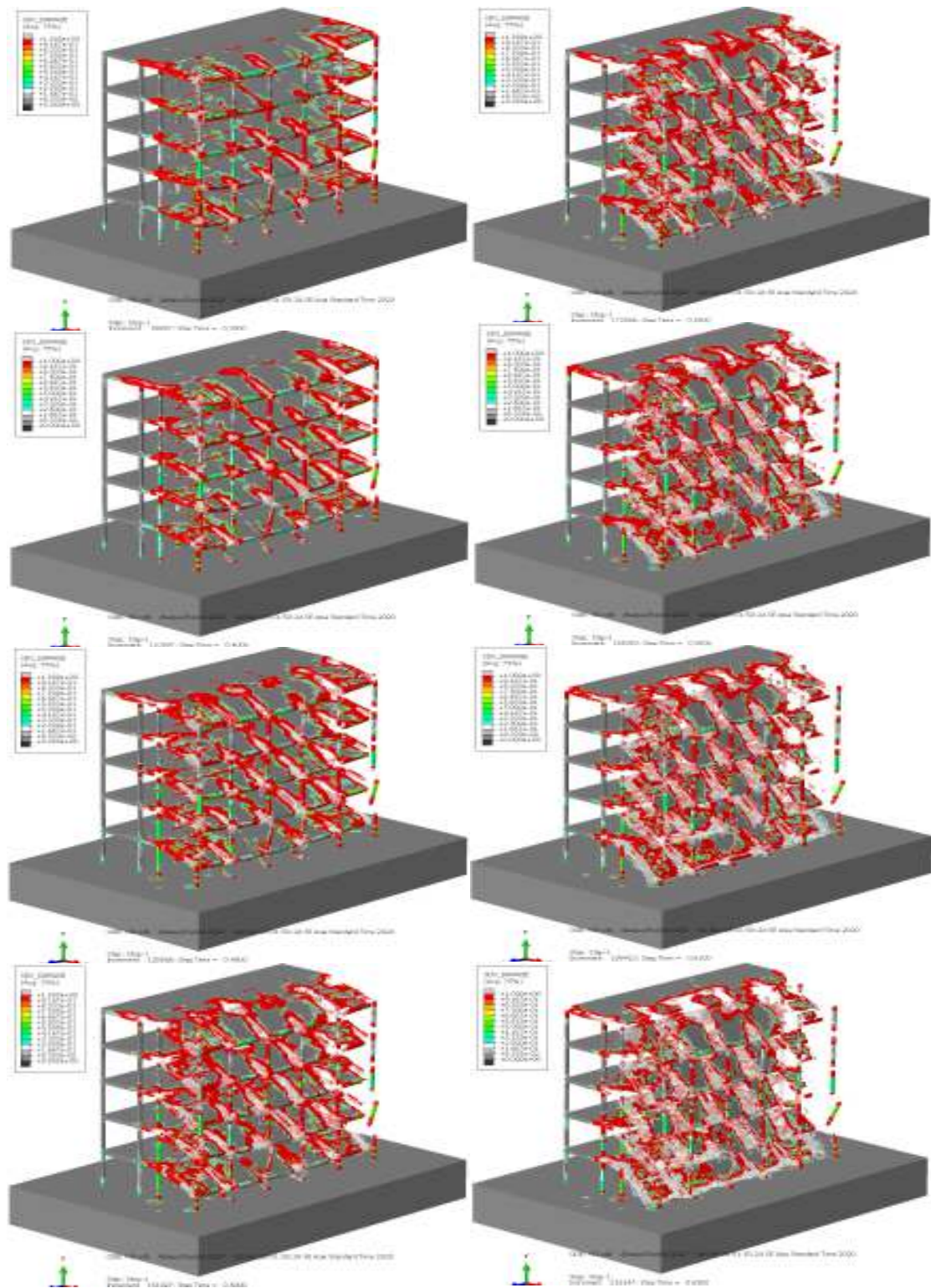
4.4.2.3 Nhận xét kết quả

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 cột ngay chính trên cột A3 bị đặt lượng nổ tiếp xúc, ngay sau khi nổ lớp bọc thép bị chảy dẻo một phần ngay tại vị trí đặt lượng nổ, bê tông trong cột A3 bị tác động tuy nhiên chưa 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 4.15).

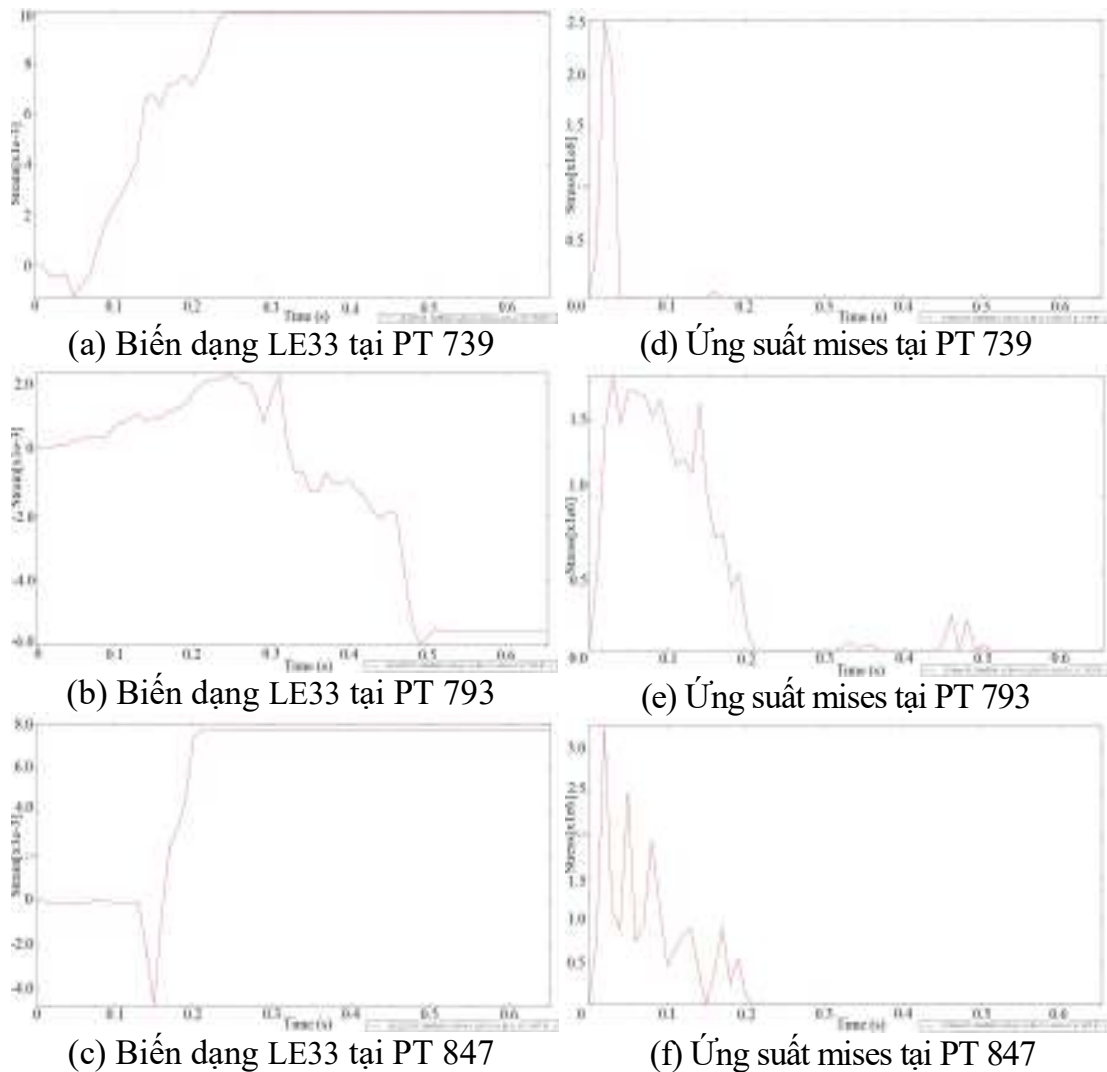
Trên hình 4.16, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phân tử 739; 793 và 847 tương ứng tại các vị trí đầu dầm (PT 739; 847) và giữa dầm (PT 793)



Hình 4.18. Quá trình SDLT của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần tại các thời điểm 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3s.



Hình 4.19. Quá trình SDLT của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần tại các thời điểm 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,58; 0,61; 0,65s.



Hình 4.20. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.5.3 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 sau khi bị lượng nổ 200kg TNT nổ cách công trình 10m, tải trọng sóng xung kích được duy trì khoảng thời gian 0,03s, 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, 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 hoại lũy tiến diễn ra rất nhanh sau 0,65s một nửa của tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ (hình 4.19).

Trên hình 4.20, 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 0,2s không còn ghi nhận giá trị ngay lúc đó phần tử bị phá hủy.

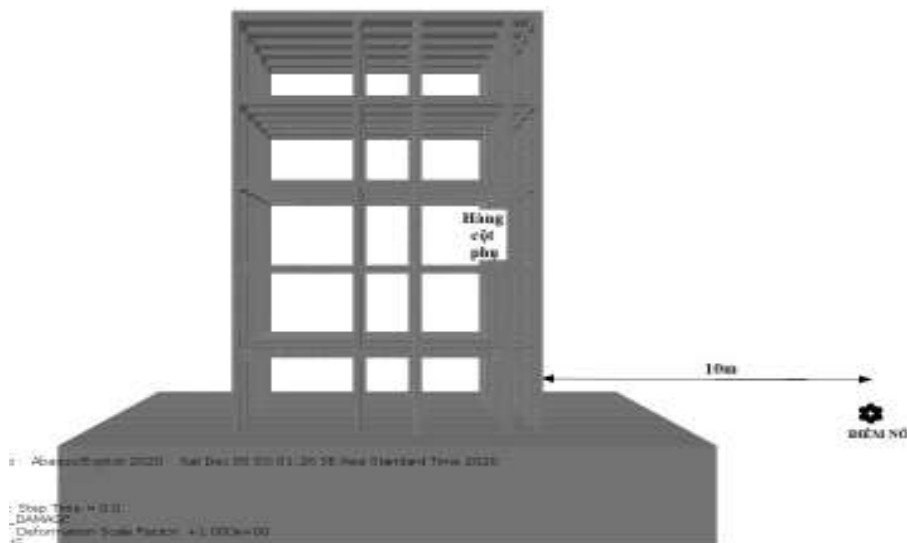
Như vậy, có thể thấy dưới tác dụng của vụ nổ gần, đồng thời các cột A2, A3, A4 bị phá hủy do sóng xung kích, sóng xung kích cũng gây ra những vùng phá hoại nhỏ trên các dầm, ngay sau đó tải trọng được phân bố lại cho các cấu kiện còn lại, nội lực trong các cấu kiện đó tăng lên đột ngột vượt quá khả năng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

4.6 Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến trong trường hợp khung bê tông cốt thép 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.

4.6.1 Giải pháp thêm cột phụ để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

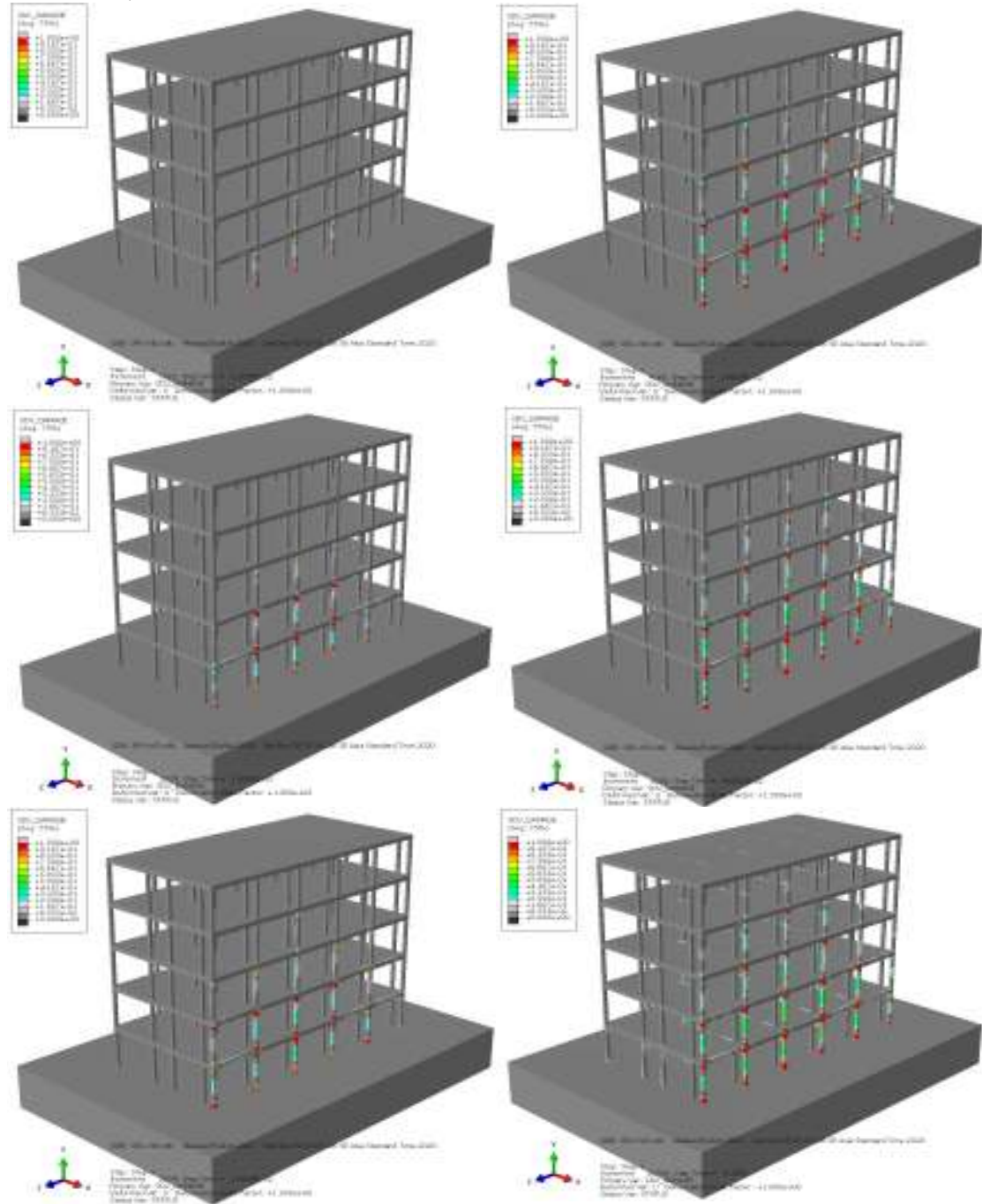
4.6.1.1 Mô hình bài toán



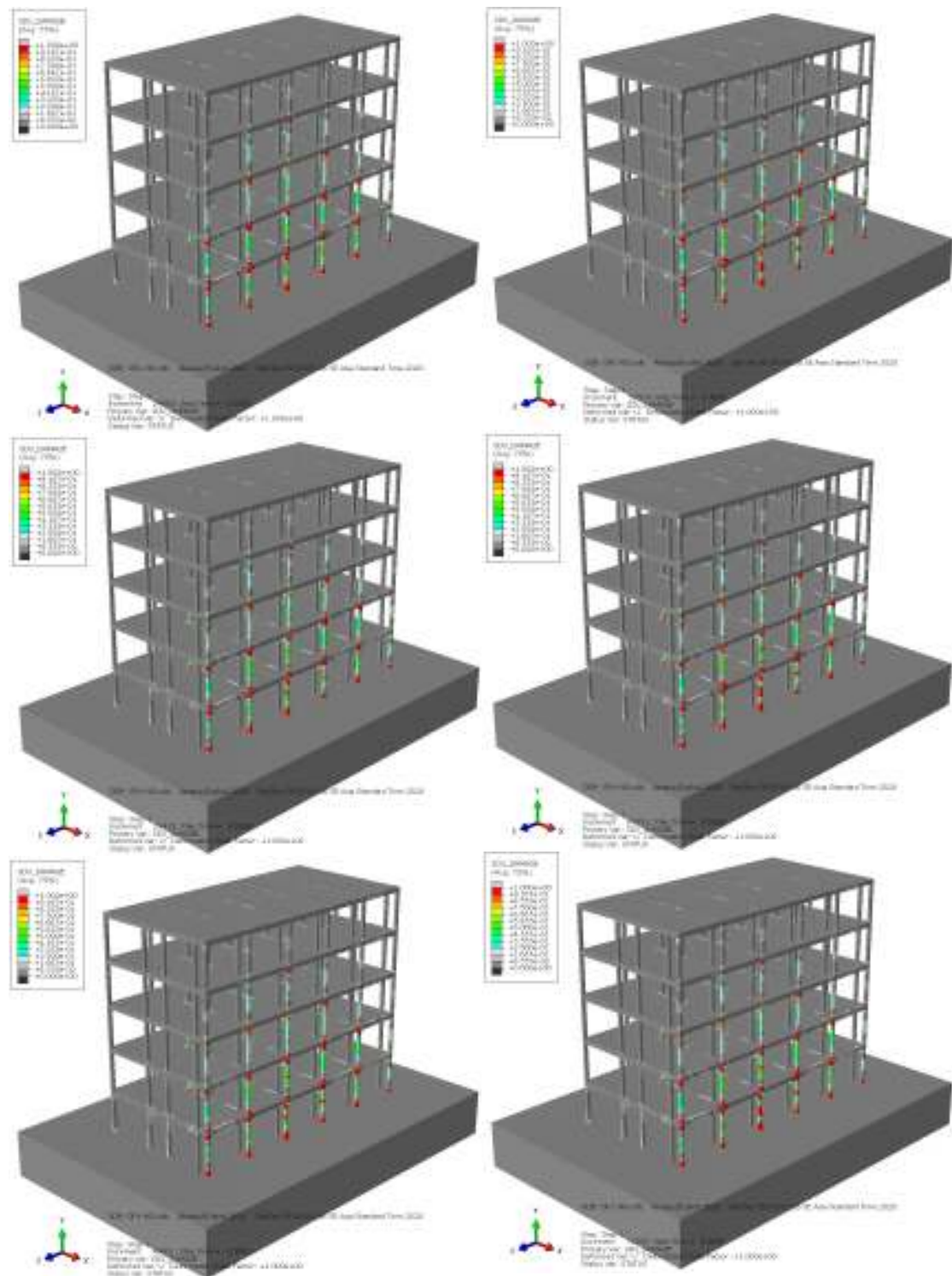
Hình 4.21. Mô hình bài toán giải pháp thêm cột phụ để KSLT chịu tác dụng nổ gần

4.6.1.2 Kết quả mô phỏng số

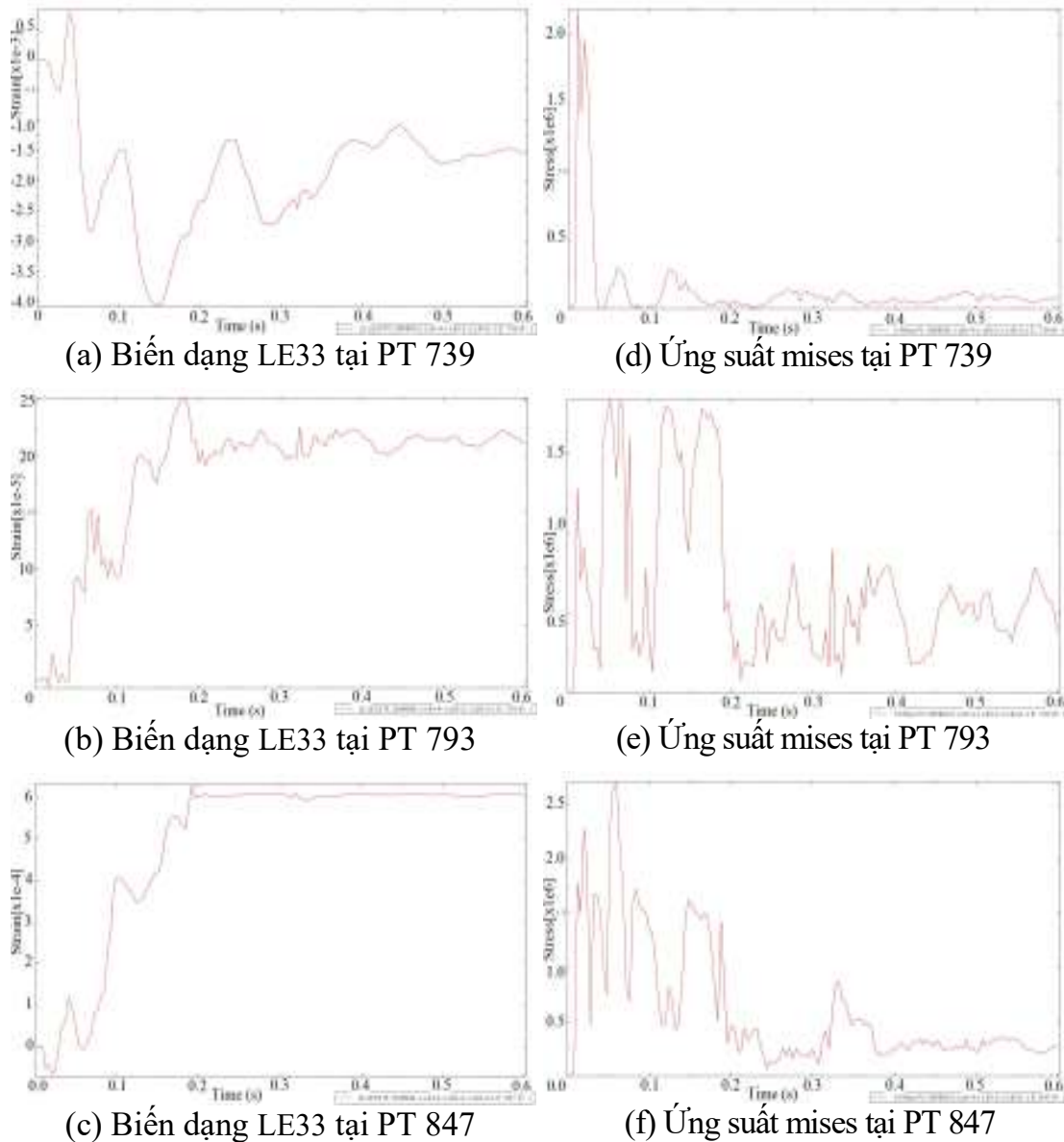
Kết quả mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 4.22; 4.23 và 4.24.



Hình 4.22. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng nổ gần có gia cường cột phụ tại các thời điểm 0,012; 0,016; 0,02; 0,028; 0,04; 0,1s



Hình 4.23. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng nổ gần có gia cường cột phụ tại các thời điểm 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6s.



Hình 4.24. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847

4.6.1.3 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 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, A5, A6) lúc này đã tác dụng lên cột phụ CP, do vậy

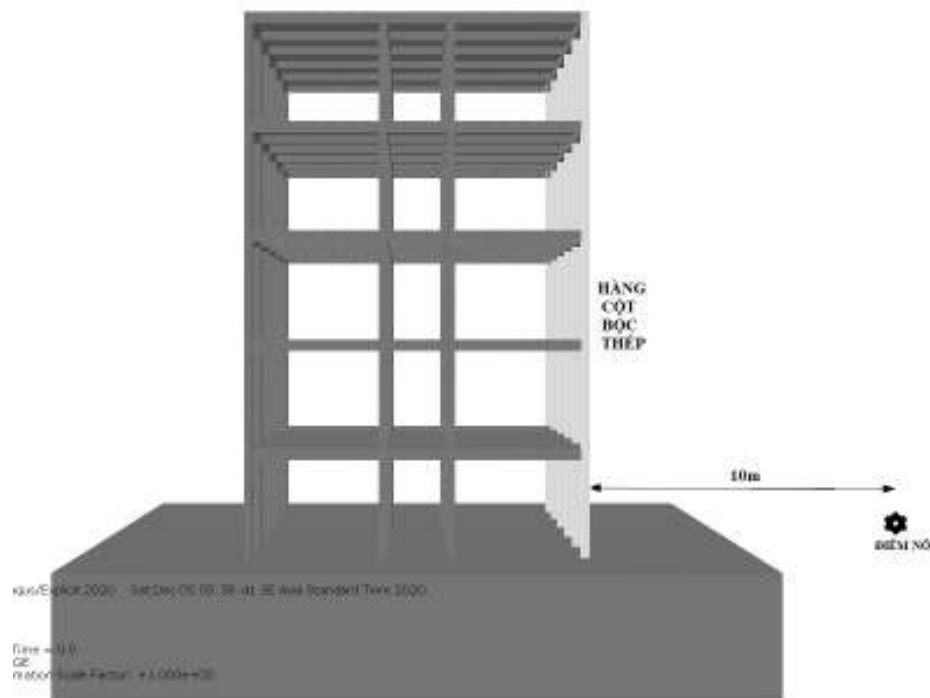
trong quá trình phân tích kết cấu chỉ bị phá hủy một phần nhỏ trên cột và dầm của trục A, không còn xảy ra sự phá hoại lũy tiến như trong trường hợp không có cột phụ (hình 4.22; 4.23).

Trên hình 4.24, hiển thị biến dạng LE33 và ứng suất mises tại phân 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 phân tử đó tăng đến thời điểm 0,2s 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.

4.6.2 Giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

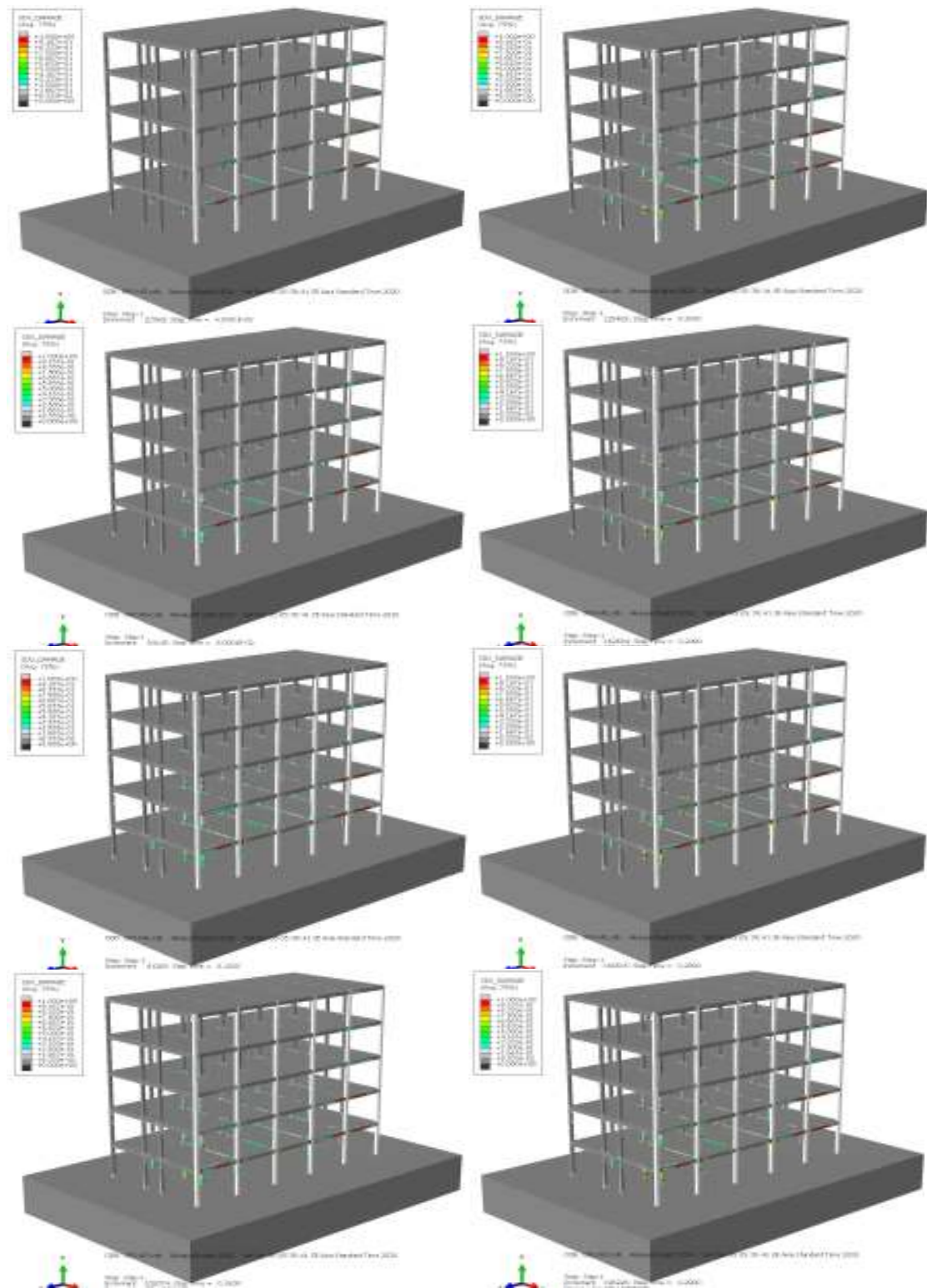
4.6.2.1 Mô hình bài toán



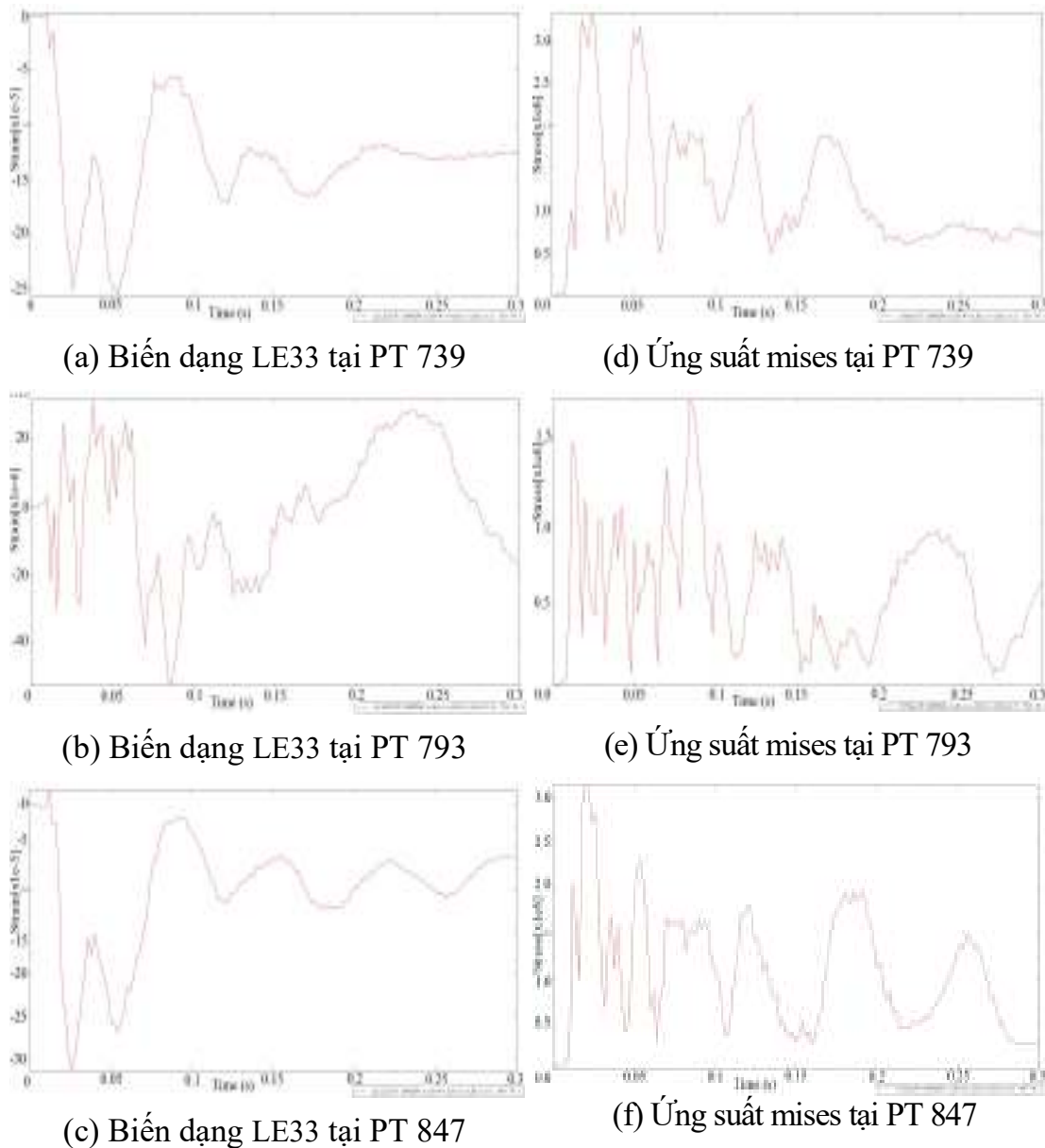
Hình 4.25. Mô hình bài toán giải pháp bọc thép cột để KSLT chịu tác dụng nổ gần

4.6.2.2 Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 4.26 và 4.27.



Hình 4.26. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có bọc thép cột tại các thời điểm 0,04; 0,08; 0,12; 0,16; 0,2; 0,24; 0,28; 0,29s.



Hình 4.27. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.6.2.3 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 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 thép hấp thụ, vùng phá hủy

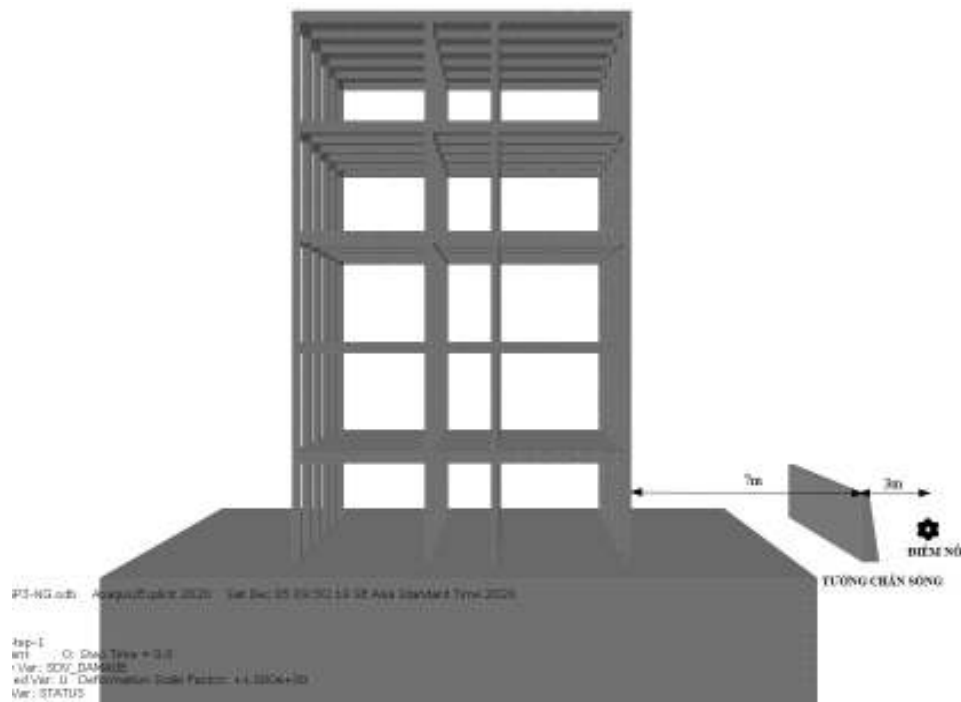
vẫn xuất hiện trên một số dầm trục A tuy nhiên quá trình phá hoại lũy tiến đã không xảy ra do các cột trục A vẫn còn khả năng chịu lực, do vậy trong quá trình phân tích kết cấu không còn bị phá hủy như trong trường hợp không có cột phụ (hình 4.26).

Trên hình 4.27, 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 0,1s 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.

4.6.3 Giải pháp tường chắn sóng để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

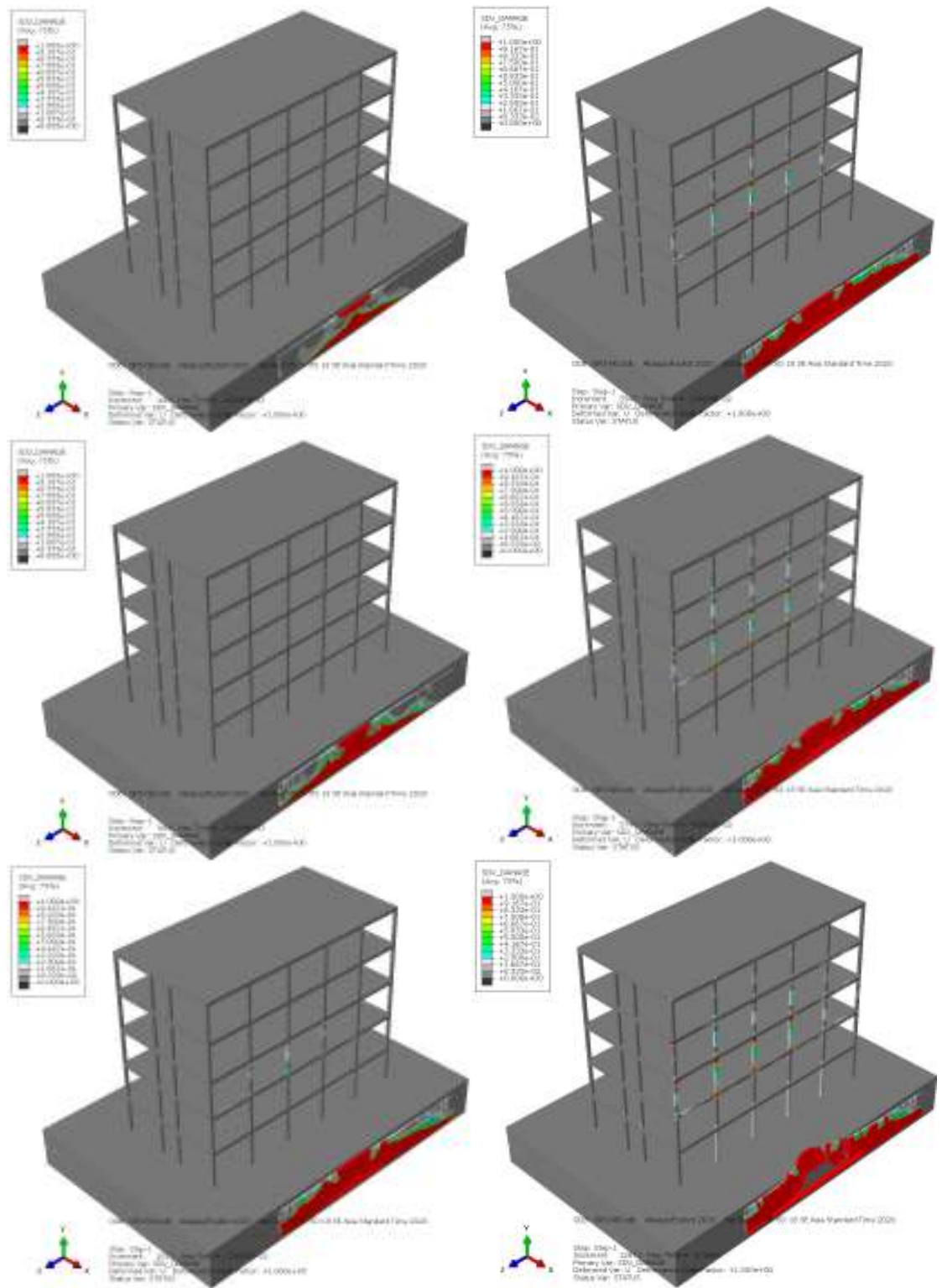
4.6.3.1 Mô hình bài toán



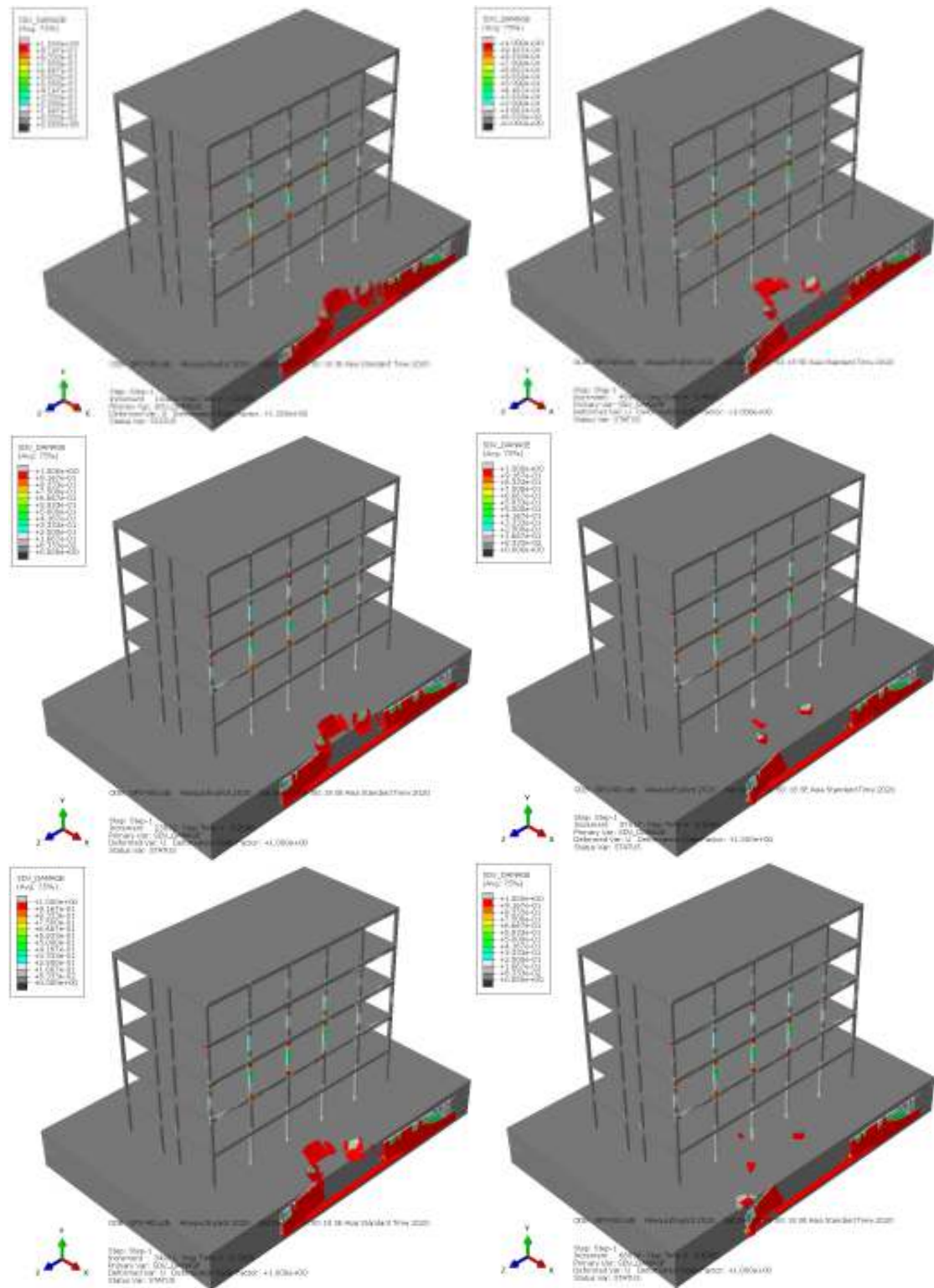
Hình 4.28. Mô hình bài toán giải pháp tường chắn sóng để KSLT chịu tác dụng nổ gần

4.6.3.2 Kết quả mô phỏng số

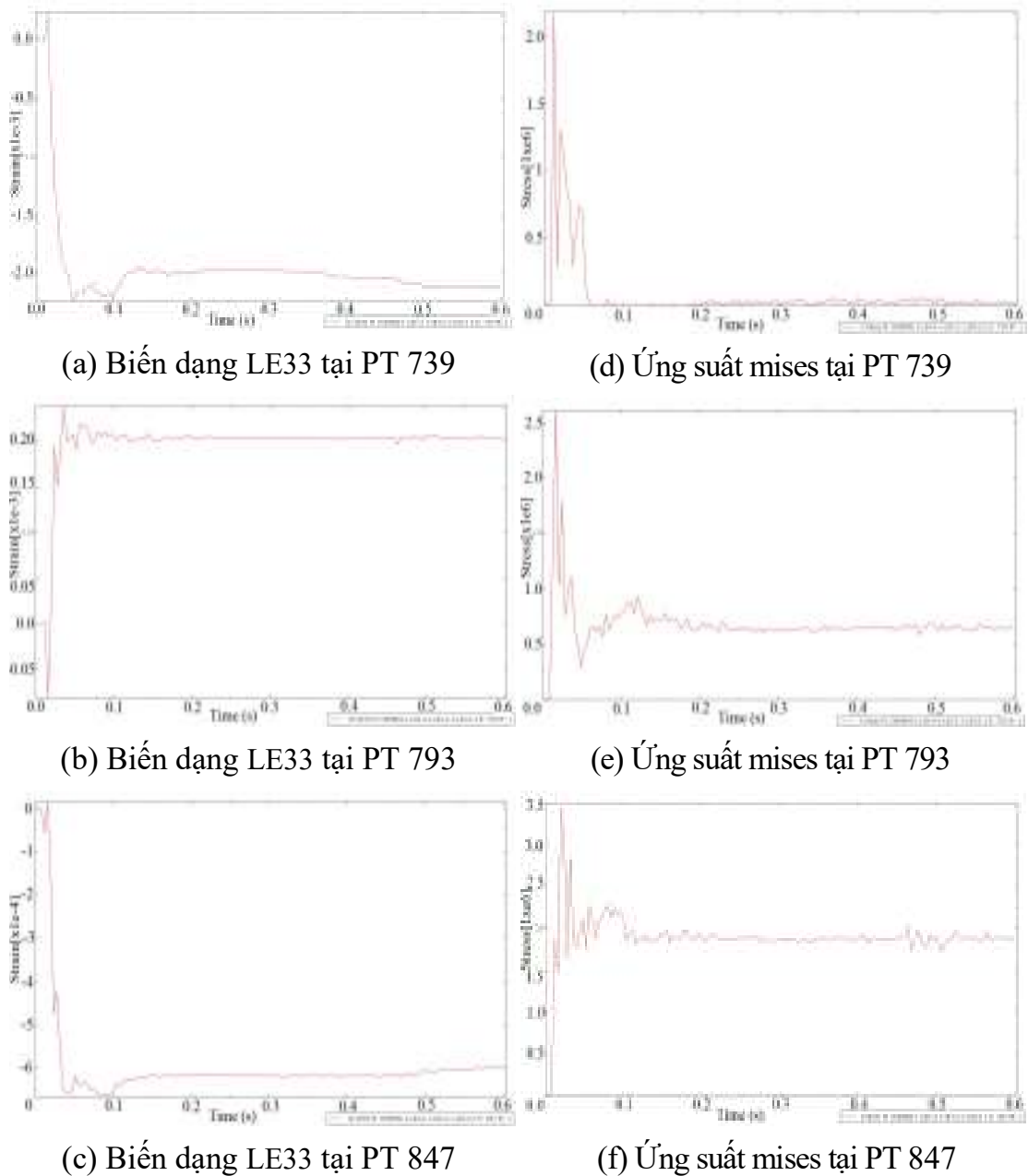
Kết quả mô phỏng số giải pháp tường chắn sóng để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần được thể hiện như trong hình 4.29; 4.30 và 4.31.



Hình 4.29. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có tường chắn sóng tại các thời điểm 0,004; 0,008; 0,016; 0,028; 0,04; 0,1s.



Hình 4.30. Quá trình làm việc của khung không gian BTCT chịu tác dụng của nổ gần có tường chắn sóng tại các thời điểm 0,16; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6s.



Hình 4.31. Biến dạng LE33 và ứng suất mises tại các PT 739; 793 và 847.

4.6.3.3 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 sử dụng tường chắn sóng nổ bằng bê tông đặt giữa công trình và vị trí nổ khoảng cách tương ứng là 7m và 3m (hình 4.28) khi nổ gần, ngay sau khi nổ sóng xung kích tác dụng và phá hủy tường

chấn 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 4.29, 4.30).

Trên hình 4.31, 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.

4.7 Kết luận của chương 4

Trong chương 4, tác giả đã tiến hành phân tích bằng số sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ, cụ thể trong các trường hợp như sau:

- Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của vụ nổ tiếp xúc với 2 kịch bản nổ có thể xảy ra:

+ Kịch bản 1 - tòa nhà bị tiếp cận tầng 1 và ôp lượng nổ tiếp xúc 400g TNT tại chính giữa cột A1 (cột góc của tòa nhà), sau khi bị lượng nổ tiếp xúc phá hủy cột A1, 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 0,9s một góc của tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ.

+ Kịch bản 2 - tòa nhà bị tiếp cận tầng 1 và ôp lượng nổ tiếp xúc 400g TNT tại chính giữa cột A3 (cột giữa của tòa nhà), 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 0,85s một nửa tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ.

- 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 xúc cho 2 trường hợp lượng nổ tiếp xúc đặt tại cột A1 và A3, trong trường hợp đặt lượng nổ tiếp xúc tại cột A3 sự phá hoại lũy tiến xảy ra với mức độ lớn hơn và thời gian phá hoại diễn ra nhanh hơn, do 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 và giải pháp thứ hai - bọc thép cột bị phá hủy. Kết quả cho thấy các giải pháp kháng sập đều có hiệu quả tốt, làm giảm mức độ phá hủy của kết cấu một cách đáng kể và chống lại quá trình sụp đổ lũy tiến của tòa nhà.

- Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của vụ nổ gần. Sau khi lượng nổ 200kg TNT nổ cách công trình 10m, các cột ở vùng gần tâm nổ gần như bị phá hủy và mất khả năng chịu lực hoàn toàn, sau đó quá trình phá hoại lũy tiến diễn ra rất nhanh sau 0,65s một nửa của tòa nhà hoàn toàn bị sụp đổ.

- 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, 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. Kết quả cho thấy các giải pháp kháng sập đều có hiệu quả tốt, làm giảm mức độ phá hủy của kết cấu một cách đáng kể và chống lại quá trình sụp đổ lũy tiến của tòa nhà.

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 diễn ra nhanh và mức độ phá hủy là rất lớn, do vậy cần thiết phải có các giải pháp để kháng sập sữ tiến tránh các thiệt hại cho công trình. Từ đó tác giả cũng đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng nổ, kết quả phân tích cho thấy các giải pháp kháng sập đó có hiệu quả tốt, làm giảm đáng kể mức độ phá hủy của kết cấu và chống lại quá trình sụp đổ lũy tiến.

KẾT LUẬN CHUNG

I. Các kết quả mới và chính của luận án

1. Phân tích lựa chọn các mô hình ứng xử cơ học của vật liệu và các mô hình tính kết cấu ứng dụng trong mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để nghiên cứu sự phá hoại lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của tải trọng nổ.

2. Thí nghiệm trên các mẫu bê tông và trên cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ tiếp xúc và nổ gần. Đã nhận được:

+ Các tham số để bổ sung và hiệu chỉnh mô hình HJC của vật liệu bê tông đã thí nghiệm;

+ Sử dụng các tham số của mô hình HJC đã được bổ sung và hiệu chỉnh, tiến hành phân tích sự phá hoại của cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng của nổ bằng phần mềm ABAQUS;

+ Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm nổ phù hợp với mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS.

3. Phân tích sự sụp đổ lũy tiến của khung không gian bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc và nổ gần bằng phần mềm ABAQUS với việc sử dụng các mô hình vật liệu và kết cấu đã được lựa chọn, bổ sung và hiệu chỉnh. Đề xuất một số giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình trên chịu tác dụng nổ.

Các kết quả nghiên cứu của luận án có thể tham khảo và ứng dụng vào tính toán thiết kế các công trình, đặc biệt là các công trình trong lĩnh vực an ninh quốc phòng chịu tác dụng nổ.

II. Phương hướng nghiên cứu tiếp theo

Do khuôn khổ thời gian có hạn, nên trong luận án chỉ mới giải quyết được bài toán khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ. Phương hướng nghiên cứu tiếp theo sau luận án này có thể:

1. Nghiên cứu bài toán khung không gian có vách, tường có kể đến va chạm của các phần tử bị tách ra khỏi kết cấu, đổ vỡ của vách tường.

2. Nghiên cứu phương pháp sử dụng mô phỏng bằng phần mềm ABAQUS để giải quyết các bài toán như kết cấu công trình chịu tải trọng nổ bằng các mô hình vật liệu mới...

3. Luận án mới chỉ nghiên cứu tác dụng của nổ của khối chất nổ, cần tiếp tục nghiên cứu đối với bom đạn xuyên trong môi trường kết cấu (có kể đến va chạm, xuyên) rồi mới nổ.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Phan Thành Trung, Nguyễn Quốc Bảo, Vũ Đức Hiếu, Vũ Anh Tuấn (2020), *Thí nghiệm xác định các tham số của mô hình vật liệu Holmquist-Johnson-Cook cho bê tông B25 và ứng dụng kết quả trong mô phỏng kết cấu sàn chịu tác dụng của nổ gần*, Tạp chí Nghiên cứu & phát triển Vật liệu xây dựng số 3/2020, tr 61-67, Viện Vật liệu xây Dựng - Bộ Xây Dựng.
2. Phan Thành Trung, Nguyễn Quốc Bảo, Vũ Đức Hiếu (2020), *Đánh giá sự phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng tải trọng nổ tiếp xúc bằng mô phỏng số và thực nghiệm tại hiện trường*, Tạp chí khoa học công nghệ Xây dựng số 14(5V) tháng 11/2020, tr 180-196, Trường Đại học Xây Dựng.
3. Phan Thành Trung, Nguyễn Quốc Bảo, Nguyễn Hữu Hà (2021), *Đánh giá sự phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép dưới tác dụng tải trọng nổ gần bằng mô phỏng số và thực nghiệm tại hiện trường*, Tạp chí khoa học công nghệ Xây dựng số 1/2021, tr 39-47, Viện Khoa học công nghệ xây Dựng.
4. Phan Thành Trung, Nguyễn Quốc Bảo, Vũ Văn Hoàng (2021), *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*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng số 3/2021, tr 30-40, Viện Vật liệu và xây Dựng - Bộ Xây Dựng.
5. Phan Thành Trung (2021), *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*, Tạp chí Vật liệu và Xây dựng số 4/2021, tr 48-60, Viện Vật liệu và xây Dựng - Bộ Xây Dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Nguyễn Quốc Bảo, Trần Nhật Dũng (2001), *Lý thuyết phân tử hữu hạn*, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [2] Đào Huy Bích (2004), *Lý thuyết dẻo và các ứng dụng*, NXB Xây dựng.
- [3] Võ Như Cầu (2003), *Tính toán kết cấu theo phương pháp tối ưu*, NXB Xây dựng.
- [4] Nguyễn Văn Hợi, Phạm Đình Ba (1994), *Giáo trình động lực học công trình*, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [5] Nguyễn Hồng Sơn, Võ Thanh Lương (2016), *Thiết kế kết cấu nhà chịu tác động của nổ sự cố*, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [6] Nguyễn Phú Thái, Nguyễn Văn Vượng (2006), *Tính toán công trình chịu tải trọng xung và va chạm*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [7] Lều Thọ Trình (2006), *Cơ học kết cấu (Tập II)*, NXB KH&KT, Hà Nội.
- [8] Nguyễn Văn Tú (2010), *Tính toán khung phẳng đàn - dẻo chịu tác dụng của tải trọng động ngắn hạn*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự
- [9] Nguyễn Mạnh Yên (2000), *Phương pháp số trong cơ học kết cấu*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [10] Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Địch (2008), *Giáo trình công sự tập I*, Học viện Kỹ thuật quân sự
- [11] Ngô Ngọc Thủy (2012), *Nghiên cứu nổ và lan truyền sản phẩm nổ trong môi trường khí bằng phương pháp hạt không lưới*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [12] Vũ Văn Hoàng (2016), *Tính toán động lực học khung phẳng đàn - dẻo lý tưởng có kể đến sự phá hoại lũy tiến của các phần tử kết cấu*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Tiếng Anh

- [13] Jones, C.P., and Nathan, N.D. 1990. Supermarket roof collapse in Burnaby, British Columbia, Canada. American Society of Civil Engineers, Journal of Performance of Constructed Facilities 4(3): 142–160.
- [14] Essa, H. S. and Kennedy, D. J. L. (1994) “Design of Cantilever Steel Beams: Refined Approach” Journal of Structural Engineering, 120(9), p. 2623-2636.
- [15] Breen, J.E., editor, 1975, “Research Workshop on Progressive Collapse of Building Structures,” Summary Report, HUD-PDR-182, Department of Housing and Urban Development, Washington, DC.

- [16] Griffiths, H., Pugsley, A. and Saunders, O., 1968, "Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Canning Town," Her Majesty's Stationary Office, London, England.
- [17] *Lessons from the Oklahoma City Bombing: Defensive Design Techniques*, by E.E. Hinman and David J. Hammond, American Society of Civil Engineers, New York, ASCE Press, 1997.
- [18] Corley R. H. V. (1998). "What is the upper limit to oil extraction ratio?," in Proceedings of International Conference on Oil and Kernel Production in Oil Palm—A Global Perspective, eds Rajanaidu N., Henson I. E., Jalani B. S. (Kuala Lumpur: Palm Oil Research Institute of Malaysia;), 256–269.
- [19] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2009. Local Officials Guide for Coastal Construction, FEMA P-762. Washington, DC, February 2009.
- [20] Errata for NIST, 2005. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of World Trade Center Building.
- [21] Whittaker, R.J., Araujo, M.B., Paul, J., Ladle, R.J., Watson, J.E.M. & Willis, K.J. (2005) Conservation biogeography: assessment and prospect. Diversity and Distributions, 11, 3–23.
- [22] Leyendecker, E.V. and Ellingwood, B.R., 1977, "Design Methods for Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings," NBS Building Science Series 98, National Bureau of Standards, Washington, DC.
- [23] McGuire, W., 1974, "Prevention of Progressive Collapse," Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [24] Fintel, M. and Schultz, D.M., 1976, "Philosophy for Structural Integrity of Large Panel Buildings," Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.21, No.3, pp.46-69.
- [25] Ferahian, R.H., 1972, "Buildings: Design for Prevention of Progressive Collapse." Civil Engineering, ASCE, February 1972, pp.66-69.
- [26] Springfield, J., 1998, "Resistance to Progressive Collapse Requirements in Ontario, Canada," Proceedings of the Structural Engineers World Congress, San Francisco, USA.
- [27] Longinow, A. and Ellingwood, B.R., 1998, "The Impact of the Ronan Point Collapse – 25 Years After," Proceedings of the Structural Engineers World Congress, San Francisco, USA.
- [28] Menzies, J.B., and Nethercot, D.A., 1998, "Progressive Collapse – Preventive Measures in the United Kingdom," Proceedings of the Structural Engineers World Congress, San Francisco, USA.

- [29] NBC, National Building Code of Canada, National Research Council of Canada, Ontario, Canada, 1995.
- [30] Dusenberry, D.O., 2002, "Review of Existing Guidelines and Provisions Related to Progressive Collapse," The National Workshop on The Prevention of Progressive Collapse, Multihazard Mitigation Council, NIST, July 2002, Chicago, Illinois.
- [31] IBC, International Building Code, International Code Council, USA, 2000.
- [32] ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-95, American Society of Civil Engineers, New York, 1996.
- [33] ISC, ISC Security Criteria for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, Interagency Security Committee, Washington, DC, September, 2001.
- [34] DoD, Dod Interim Antiterrorism/Force Protection Construction Standards-Progressive Collapse Design Guidance, Department of Defense, Washington, DC, March 2013.
- [35] Smith, J.L., Swatzell, S.R. and Hall, B., 2001, "Prevention of Progressive Collapse-DOD Guidance & Application," SAME National Symposium on Comprehensive Force Protection, SAME Readiness Committee, Charleston, South Carolina, USA.
- [36] Dusenberry, D.O., 2002, "Review of Existing Guidelines and Provisions Related to Progressive Collapse," The National Workshop on The Prevention of Progressive Collapse, Multihazard Mitigation Council, NIST, July 2002, Chicago, Illinois.
- [37] GSA, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, General Services Administration, Washington, DC, November 2000.
- [38] DoD, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300, Department of Defense, Washington, DC, 1990.
- [39] ASCE, Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects, ASCE Manual 42, Committee on Dynamic Effects, American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1985.
- [40] NRC, 1995, Protecting Buildings from Bomb Damage: Transfer of Blast-Effects Mitigation Technologies from Military to Civilian Applications, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.
- [41] NRC, 1999, Blast Mitigation for Structures: 1999 Status Report on the DTRA/TSWG Program, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.

- [42] S. Marjanishvili, E. Agnew, 2004. Progressive analysis procedure for progressive collapse. *J. Perf. Constr. Fac.*, 18 (2), pp. 79-85.
- [43] S. Marjanishvili, E. Agnew, 2006. Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *J. Perf. Constr. Fac.*, 20 (4), pp. 365-374.
- [44] Kaewkulchai, G. and Williamson, E.B. (2003) “Dynamic Behaviour of Planar Frames During Progressive Collapse”, Proc. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seat t le, 16-18 July 2003.
- [45] Kaewkulchai, G. and Williamson, E.B., 2006, “Modelling the Impact of Failed Members for Progressive Collapse Analysis of Frame Structures”, *Journal of P erformance of Constructed Facilit ies*, 20(4), pp. 375-383.
- [46] 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.
- [47] British Standards Institution (BSI). (2005a). BS 0: 2005 A standard for standards– Part 1: Development of standards– Specification. Chiswick: BSI.
- [48] Vlassis, A., Izzudin, B., Elghazouli, A., and Nethercot, D. (2008). “Design oriented approach for progressive collapse assessment of steel framed buildings.” *Struct. Eng. Int.*,16(2), 129–136.
- [49] Vlassis, A. (2009). “Progressive collapse assessment of tall buildings.” Ph.D. thesis, London Imperial College, London.
- [50] Powell G. 2009. Progressive collapse: case study using nonlinear analysis. In *Proceedings of the 2009 Structures Congress and the 2009 Forensic Engineering Symposium*, New York, NY, 20–24 April.
- [51] Khandelwal K. and El-Tawil S. (2005). Multiscale computational simulation of progressive collapse of steel frames. *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, May 2005.
- [52] Sadek, F., J.A. Main, H.S. Lew, S.D. Robert, V.P. Chiarito, and S. El-Tawil. 2010. “An Experimental and Computational Study of Steel Moment Connections under a Column Removal Scenario.” NIST Technical Note 1669, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. doi:10.6028/NIST.TN.1720.
- [53] Fu, F. 2009 Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1269-1278.

- [54] Kwasniewski, L. 2009, "On practical problems with verification and validation of computational models", Archives of Civil Engineering, vol. LV, no. no. 3, pp. 323-346.
- [55] Hallquist, J.O. 2006, "LS-DYNA theory manual", Livermore Software Technology Corporation, vol. 3.
- [56] Yu, M., Zha, X., & Ye, J. (2010). The influence of joints and composite floor slabs on effective tying of steel structures in preventing progressive collapse. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(3), 442-451.
- [57] S. Tan and A. Astaneh-Asl, "Testing a Retrofit Concept to Prevent Progressive Collapse", Report Number UCB/CEE-Steel-2003/02, Dept. of Civil and Environmental Engineering., University of California, Berkeley.
- [58] GSA (2003). *GSA guidelines for progressive collapse analysis*. U.S. General Services Administration, USA.
- [59] Alashker, Y., Li, H., and El-Tawil, S. (2011). "Approximations in Progressive Collapse Modeling." *Journal of Structural Engineering*, 137(9), pp. 914–924.
- [60] ABAQUS Theory Manual, revision 2005, Pawtucket, Rhode Island, Mÿ, 2005.
- [61] Pham Xuan Dat, Tan Kang Hai (2011), Membrane actions of RC slabs in mitigating progressive collapse of building structures, *Engineering Structures* xxx (2011) xxx–xxx.
- [62] Pham Xuan Dat, Tan Kang Hai (2013), Experimental study of beam - slabsubstructures subjected to apenultimate-internal column loss, *Engineering Structures* xxx (2013) xxx–xxx.
- [63] Pham Xuan Dat, Tan Kang Hai, Yu Jun (2015), A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures, *Engineering Structures* 101 (2015) 45–57.
- [64] T. Ngo, P. Mendis (2007), *Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview*, The University of Melbourne, Australia.
- [65] Meguro, K. and Sato, T., 1996, "Simulation of Collapse of Structures Due to The 1995 Great Hanshin Earthquake," Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- [66] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., 1979, "Discrete Numerical Model for Granular Assemblies," *Geotechnique*, Mar 1979, London, Vol.29, No.1, pp.47-65.

- [67] Hakuno, M. and Meguro, K., 1993, "Simulation of Concrete-Frame Collapse Due to Dynamic Loading," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.119, No.9, pp.1709-1723.
- [68] Toi, Y., 1991, "Shifted Integration Technique in One-dimensional Plastic Collapse Analysis using Linear and Cubic Finite Elements," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.31, pp.1537-1552.
- [69] Toi, Y. and Isobe, D., 2000, "Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.36, pp.2323-2339.
- [70] Ahmad, S. H. and Shah, S. P., 'Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcements', *ACI J. Proc.* 79 (Nov.–Dec. 1982), 484–490.
- [71] Gerstle, K. H. (1981), Simple formulation of biaxial concrete behavior, *J. Am. Concr. Inst.*, vol. 78, no. 1, pp. 62-68.
- [72] Kaplan, M. F., *Crack propagation and the fracture of concrete*. Journal of the American Concrete Institute. Proceedings, Vol. 58, No. 5, November, 1961, pp. 591–610.
- [73] Glucklich, J.—*Fracture of plain concrete*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 89, No. EM6, December, 1963, pp. 127–138.
- [74] Dugdale, D.S., 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Solids* 8, 100–104.
- [75] Gustafsson P.-J., Hillerborg A.—*Improvements in concrete design achieved through the application of fracture mechanics*. Application of fracture mechanics to cementitious materials, NATO Advanced Research Workshop, September 4–7, 1984, Northwestern University.
- [76] Feenstra, P.H. and de Borst, R. (1995). A plasticity model for mode-I cracking in concrete. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 38, 2509–2529.
- [77] Kachanov, L. (1958) Time of the Rupture Process under Creep Conditions. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Teckhnicheskikh Nauk*, 8, 26-31.
- [78] Mazars, J. (1984) Application of Continuous Damage Mechanic to Non-Linear Behavior of Concrete Structures. PhD Thesis, Paris 6 University, Paris. (in French).
- [79] Simo, J. C.; Ju J. W. (1987). Strain and stress based continuum damage models. I: Formulation. *Int. J. Solids Structures* 23, No. 7, 821–840.

- [80] Bazant Z. P., and Pijaudier-Cabot, G., 1989, "Measurement of Characteristic Length of Nonlocal Continuum," *J. Engrg. Mech.*, ASCE, V. 115, No. 4, Apr., pp. 755-767.
- [81] Jirasek, M., Zimmermann, T.: Embedded crack model: Part I: Basic formulation, Part II: Combination with smeared cracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 50, 1269–1305 (2001).
- [82] Kiranli E, Master thesis of science, Izmir Institute of Technology, 2009.
- [83] *Applied Mechanics -Trans of the ASME* (1998), pp 59–64.
- [84] Atkins A. G (1985), *Elastic and Plastic Fracture*, Wiley, New York.
- [85] McClintock F. A (1968), *A Criterion for Ductile Fracture by the Void Growth*. *Trans. ASME, J. Appl. Mech.* 17 pp 363-368.
- [86] Rice J. R, Tracey D. M. (1969), *On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress fields*. *J. Mech Phys Solids* 17 (1969), pp 201 -211.
- [87] Jutras M. (2008), *Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook model Model*, Faculte des sciences et de genie university Laval Quebec.
- [88] Lemaitre and J. Dufailly. Damage measurements. *Engineering Fracture Mechanics*, 28(5-6):643–661, 1987.
- [89] Chaboche J.L, *Continuum damage mechanics: Part I -general concepts*. *Journal of Applied Mechanics -Trans. of the ASME*, 55:59–64, 1988.
- [90] Liang Xue (2011), *Ductile Fracture Modeling -Theory, Experimental Investigation and Numerical Verification*, Doctor thesis.
- [91] Wierzbicki T, Xue L. (2005), *On the effect of the third invariant of the stress deviator on ductile fracture*, Technical Report 136, Impact and Crashworthiness Lab, MIT.
- [92] Xue. L, Damage accumulation and fracture initiation of uncracked ductile solids subjected to triaxial loading. *International Journal of Solids and Structures*, 44:5163-5181, 2007.
- [93] E. Lee, M. Finger, W. Collins, *JWL equations of state coefficient for high explosives*, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley 1973.
- [94] Henrych J. *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Chapter 5. Elsevier: New York, 1979.
- [95] Monagan J. J. *An introduction to SPH*, *Comput. Phys. Comm.* 1988. Vol. 48. P. 89-96.
- [96] Hayhurst CJ, Clegg RA (1997). Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates. *Int J Impact Eng* 1997, 337-48.
- [97] *ABAQUS Theory Manual*, revision 2020, Pawtucket, Rhode Island, Mÿ, 2020.

- [98] Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*. University of Texas Press, Austin, Texas.
- [99] Johnson GR (1994). Linking of Lagrangian particle methods to standard finite element methods for high velocity impact computations. Post-SMIRT Impact IV Seminar, Berlin. Nuclear Engineering and Design 150p.
- [100] Cole RH. (1948) *Underwater Explosions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- [101] GFC Rogers, YR Mayhew. Thermodynamic and Transport Properties of Fluids, SI Units.
- [102] Abascal R., Dominguez J. (1984), *Dynamic behavior of strip footings on non-homogeneous Viscoplastic Soil*, Pavement International Symposium on dynamic Soil Structure interaction, Minneapolis, Minnesota.
- [103] FIŠEROVÁ Darina. Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading, PhD Thesis, Cranfield University, January 2006.
- [104] Anastasios G (2005), *Design-Oriented Progressive Collapse Assessment of Steel Framed Buildings*, JCSS and IABSE Workshop on Robustness of Structures.
- [105] N. Nagy, M. Mohamed and J.C. Boot (2010), Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures, Geomechanics and Engineering, Vol. 2, No. 1 (2010) 1-18.
- [106] Jichong An (2010). *Soil Behavior Under Blast Loading*. Civil Engineering Teses, Dissertations, and Student Research. 14. DigitalCommons @University of Nebraska.
- [107] Biggs JM (1964), *Introduction to structural dynamics*. New York: McGrawHill.
- [108] Zienkiewicz. O. C. *The Finite Element Method*/ O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor.- Butterworth-Heinemann, 2000.- 1186p.
- [109] 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 ballistics, Quebec, Canada, 26-29 September, pp. 591-600. Arlington, VA: American Defense Preparedness Association
- [110] 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.

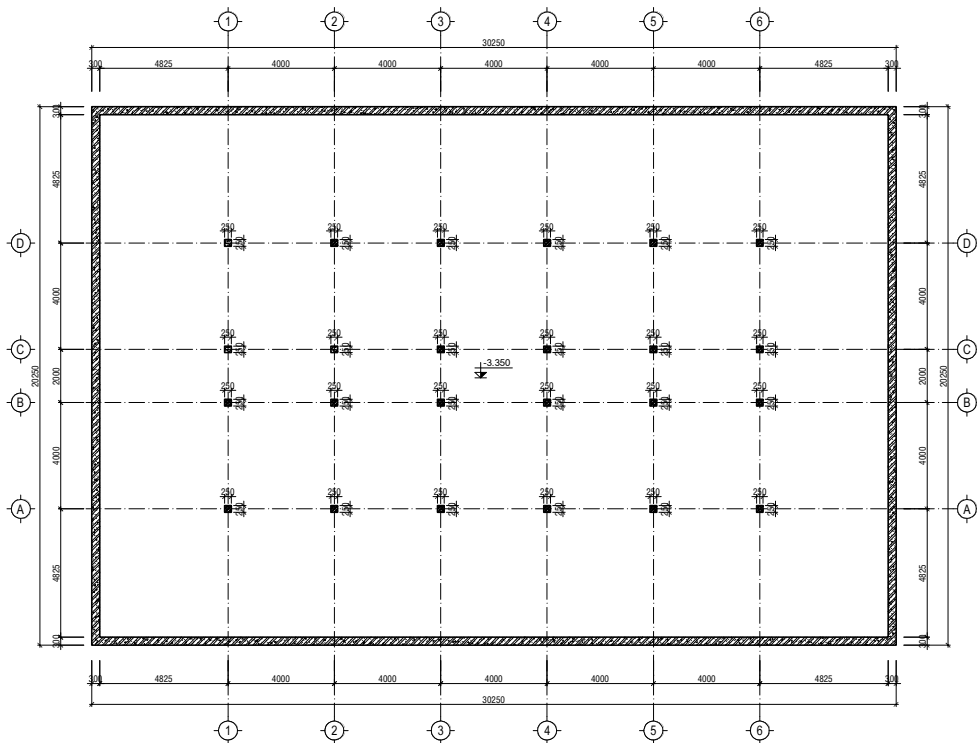
- [111]Mueller CM (1986). *Shear friction tests support program*; laboratory friction test results for WES flume sand against steel and grout: Report 3. USAE WES, Technical Report, SL-86-20.
- [112]Johnson G. R., Cook W. H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure, *EngngFractMech*, Vol. 21(1) 1985 pp. 31-48.
- [113]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.

Tiếng Nga

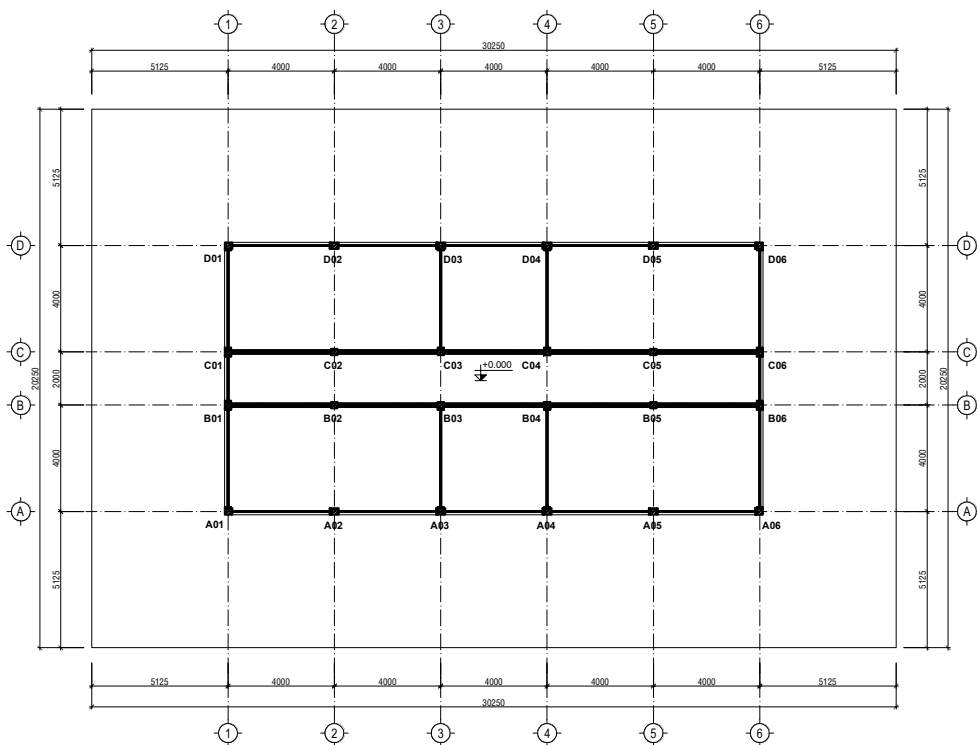
- [114]АЛМАЗОВ В.О. Сопротивление прогрессирующему разрушению: расчетные и конструктивные мероприятия. Доклад ЦНИИСК, 2009г.
- [115]КАО ЗУЙ КХОЙ. «Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов». Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, МГСУ, 2010, 193 с.
- [116]Ю.В. Блажевич, В.Д. Иванов, И.Б. Петров, И.В (1999). *Петвиашвили. Моделирование высокоскоростного соударения методом гладких частиц // Математическое моделирование, 1999, т.11, №1, с.88-100*
- [117]А.п. Потапов, с.и. Ройз, и.б. Петров (2009). *Моделирование волновых процессов методом сглаженных частиц (sph)*. Математическое моделирование 2009 год, том 21, номер 7, стр. 20-28.

PHẦN PHỤ LỤC
BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH VÀ MÃ NGUỒN CÁC BÀI TOÁN ĐÃ LẬP

BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH



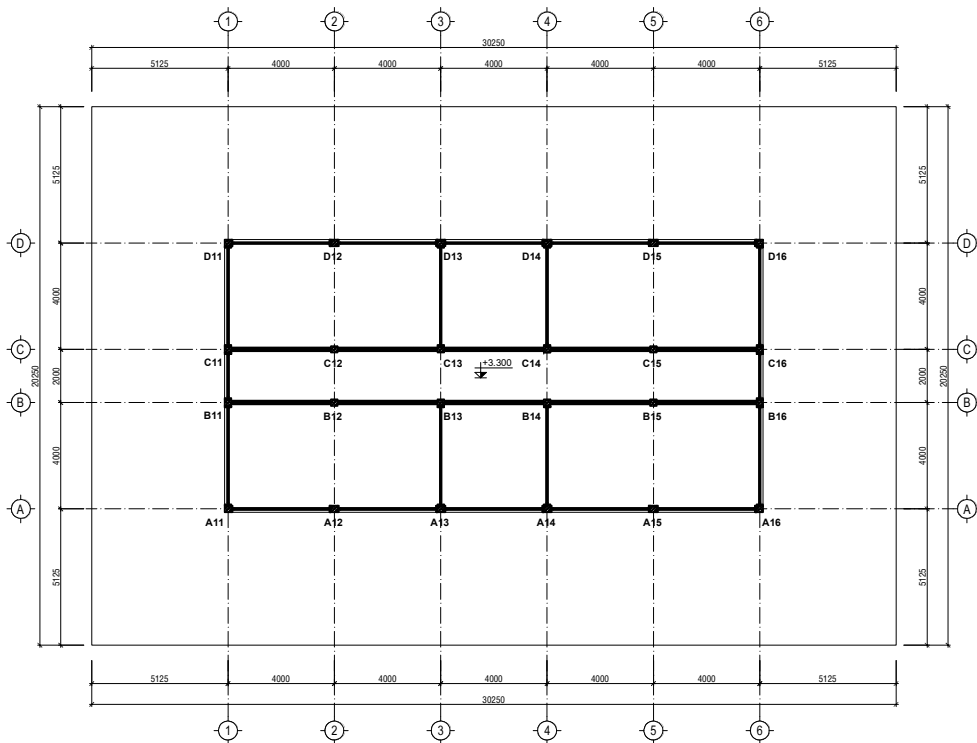
MẶT BẰNG TẦNG HẦM



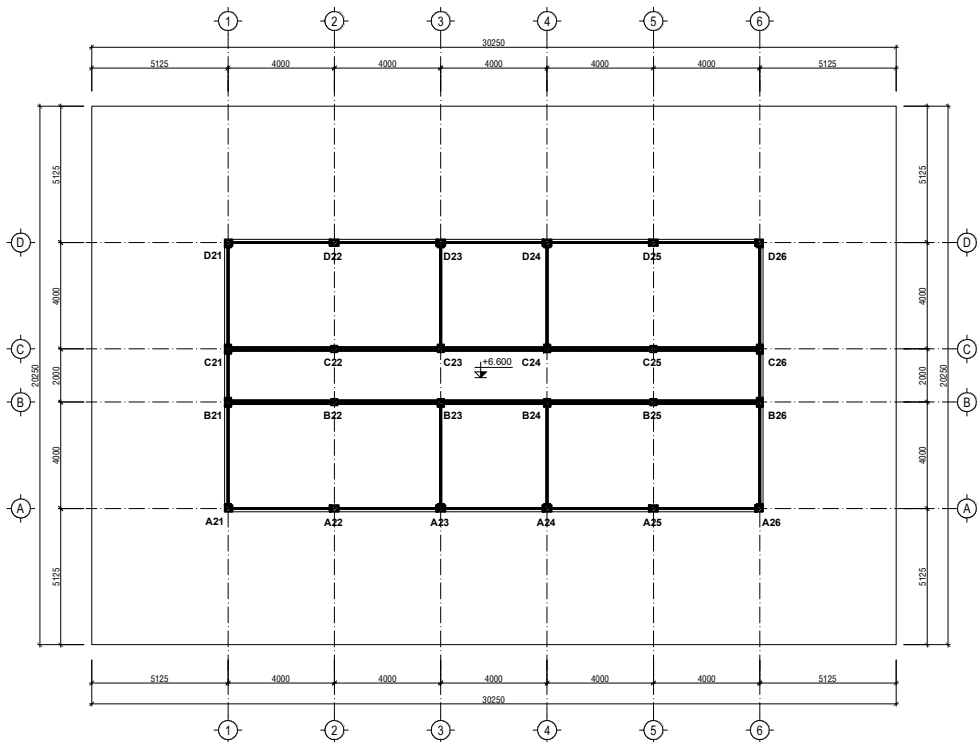
MẶT BẰNG TẦNG 1

GHI CHÚ:
CÁC KÝ HIỆU: A01,...,D06 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG HẦM

BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH



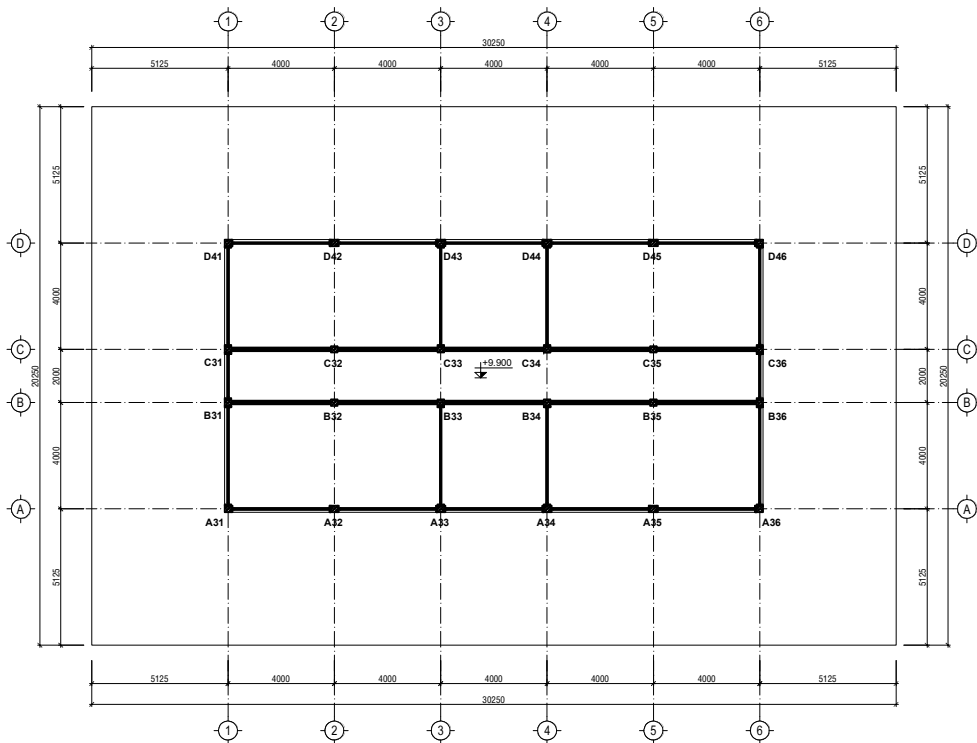
MẶT BẰNG TẦNG 2



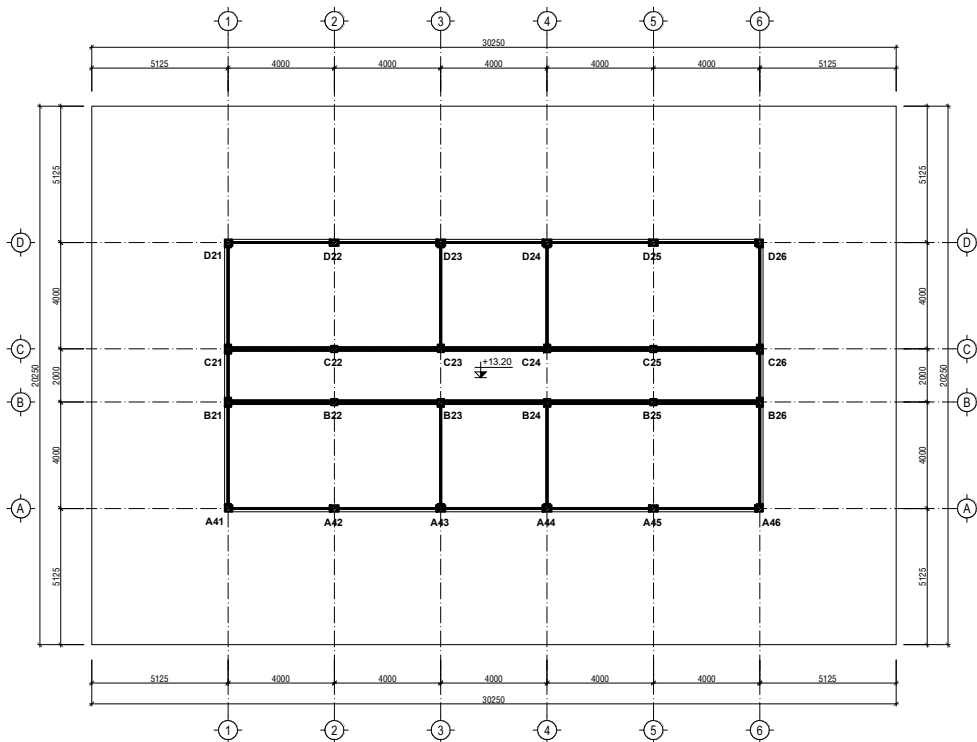
MẶT BẰNG TẦNG 3

GHI CHÚ:
CÁC KÝ HIỆU: A11.....D16 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 1;
A21.....D26 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 2.

BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH



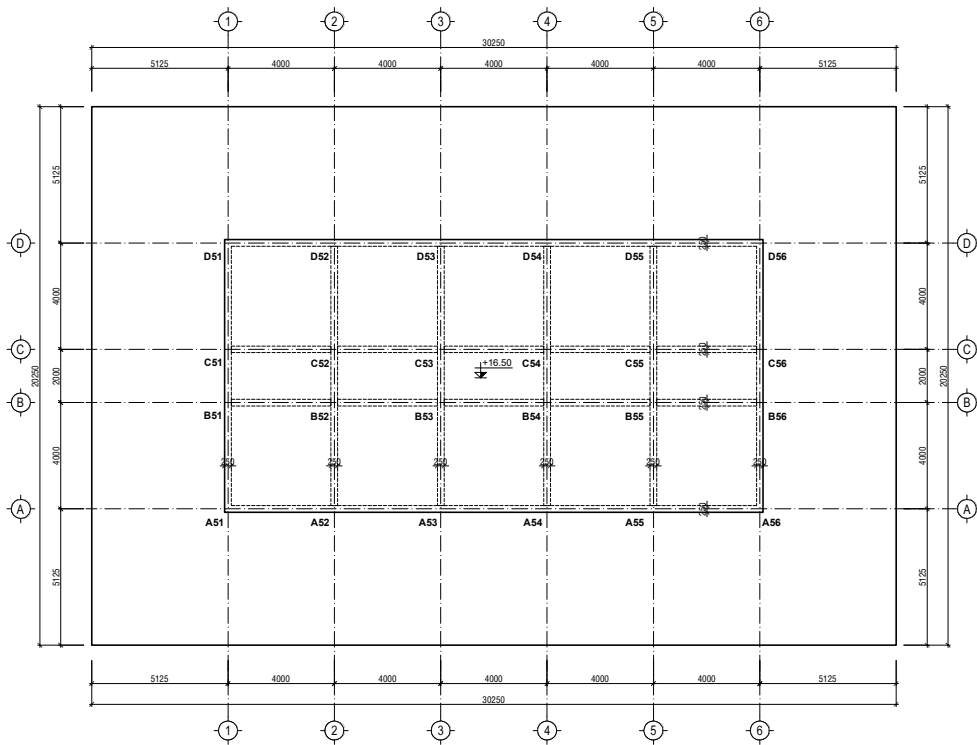
MẶT BẰNG TẦNG 4



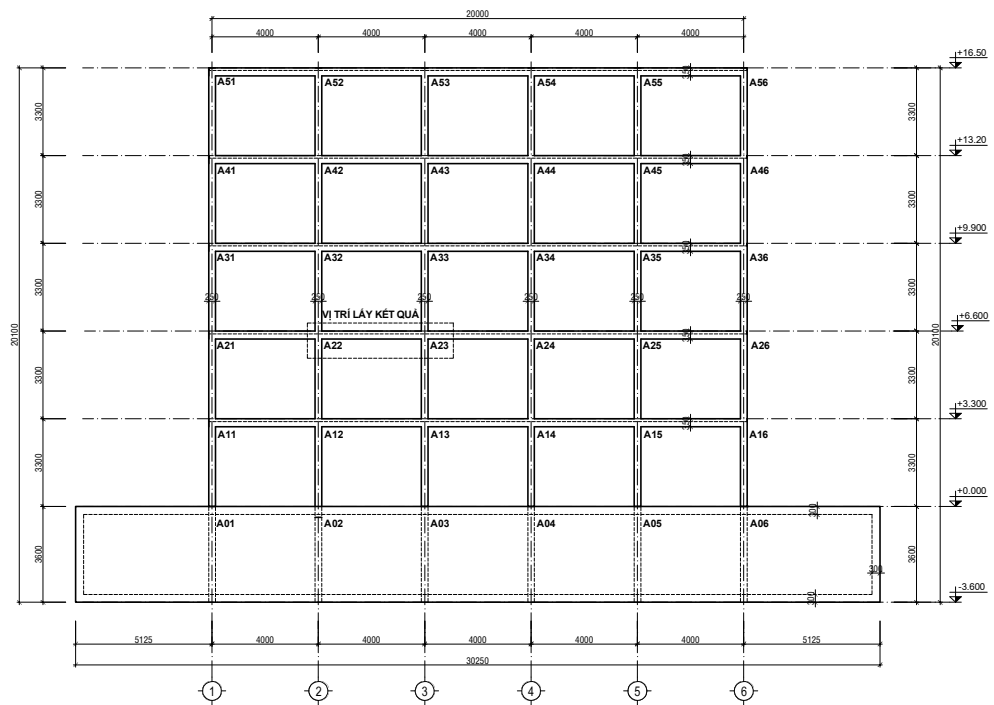
MẶT BẰNG TẦNG 5

GHI CHÚ:
CÁC KÝ HIỆU: A31.....D36 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 3;
A41.....D46 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 4.

BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH



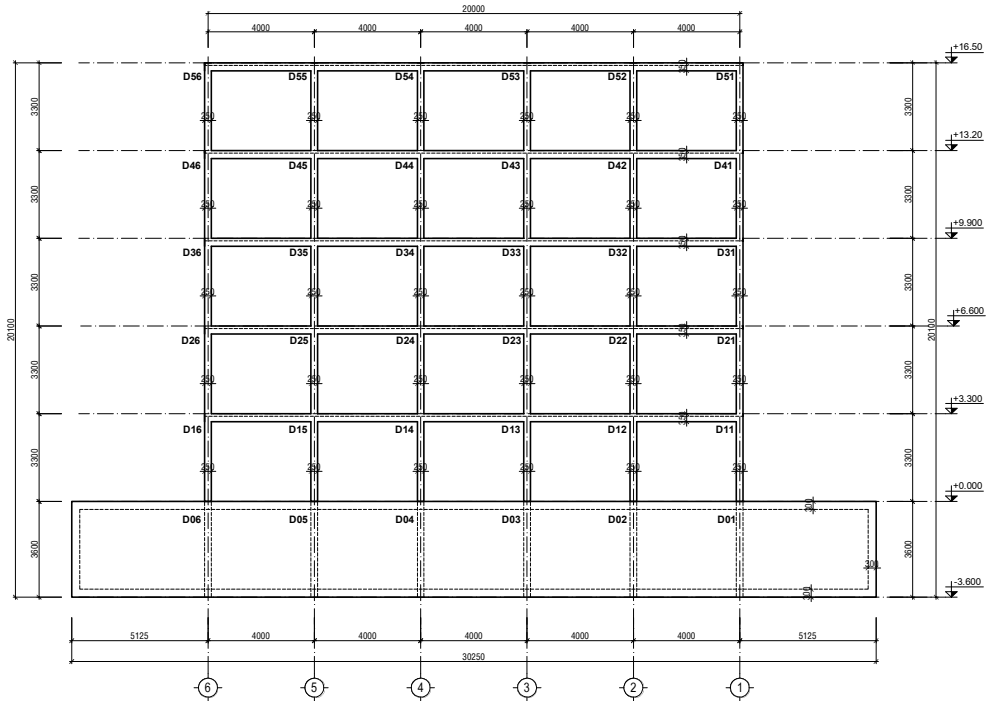
MẶT BẰNG MÁI



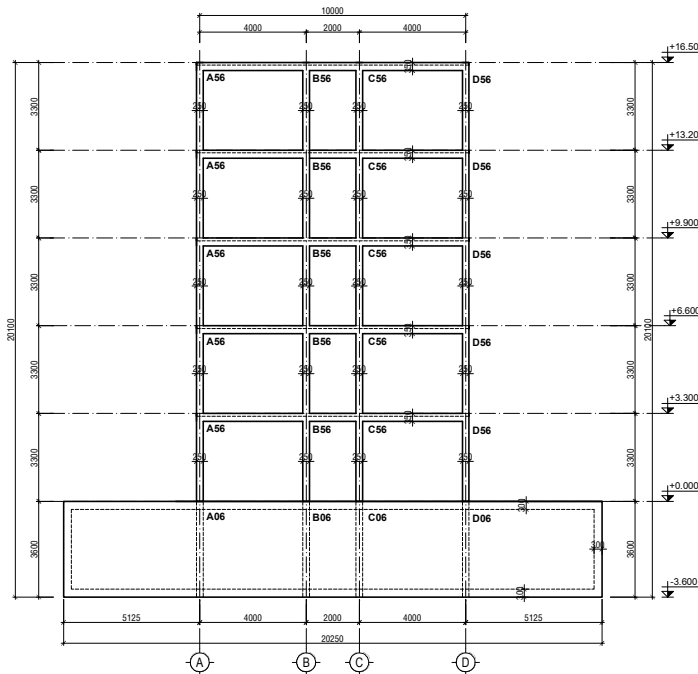
MẶT ĐƯNG TRỤC 1-6

GHI CHÚ:
CÁC KÝ HIỆU: A51.....D56 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 5

BẢN VẼ MÔ HÌNH TÍNH

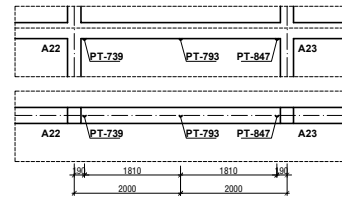


MẶT ĐƯNG TRỤC 6-1



MẶT ĐƯNG TRỤC A-D

VỊ TRÍ LẤY KẾT QUẢ



GHI CHÚ:
 CÁC KÝ HIỆU: A51, ..., D56 LÀ NÚT GIAO DẪM - CỘT TRÊN SÀN TẦNG 5;
 TẢI TRONG LẤY THEO TCVN 2737-1995;
 + SÀN 200KG/M² VỚI HỆ SỐ VƯỢT TẢI LÀ 1,2;
 + HÀNH LANG 300KG/M² VỚI HỆ SỐ VƯỢT TẢI LÀ 1,2;
 + VÁCH KÍNH 70KG/M² VỚI HỆ SỐ VƯỢT TẢI LÀ 1,3;
 + MẶT 75KG/M² VỚI HỆ SỐ VƯỢT TẢI LÀ 1,3;
 + TƯỜNG GẠCH 1,5T/M³ VỚI HỆ SỐ VƯỢT TẢI LÀ 1,1.
 TẢI TRONG LÊN NÓC HẠM 1500KG/M² LẤY THEO GIÁO TRÌNH CÔNG SỰ;
 CỘT TIẾT DIỆN 0,23X0,25M, CỘT THÉP CHỊU LỰC 40X2, THÉP DÀI Ø6a200;
 DẪM TIẾT DIỆN 0,23X0,35M, CỘT THÉP CHỊU LỰC 40X2, THÉP DÀI Ø6a200;
 SÀN TẦNG 1,2,3,4,5 DÀY 0,1M BƠ TRÍ 2 LỚP THÉP Ø8a200;
 SÀN VÀ VÁCH TẦNG HẠM DÀY 0,3M BƠ TRÍ 2 LỚP THÉP Ø16a200;
 CHIỀU DÀY LỚP BẢO VỆ 0,015M;
 CỘT THÉP TƯƠNG ĐƯƠNG THÉP CI, BẾ TỔNG B25.

1. Mô phỏng số cấu kiện bê tông cốt thép bị phá hủy do nổ tiếp xúc

*Heading

** Job name: RC_TNT200g_TX Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2020

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

** PARTS

*Part, name=Bars

*Node

1,	-0.75,	0.,	0.
2,	-0.730000019,	0.,	0.
3,	-0.709999979,	0.,	0.
4,	-0.689999998,	0.,	0.
5,	-0.670000017,	0.,	0.
6,	-0.649999976,	0.,	0.
7,	-0.629999995,	0.,	0.
8,	-0.610000014,	0.,	0.
9,	-0.589999974,	0.,	0.
10,	-0.569999993,	0.,	0.

*Element, type=B31

*Nset, nset=Set-4, generate

1, 76, 1

*Elset, elset=Set-4, generate

1, 75, 1

*Nset, nset=Set-5, generate

1, 76, 1

*Elset, elset=Set-5, generate

1, 75, 1

*Nset, nset=Set-6, generate

1, 76, 1

*Elset, elset=Set-6, generate

1, 75, 1

** Section: theptron14 Profile: phi14

*Beam Section, elset=Set-6, material=Steel, temperature=GRADIENTS,
section=CIRC

0.007

0.,0.,-1.

*End Part

** Constraint: Constraint-1

*Embedded Element, host elset=Column-1.Set-1, exterior tolerance=0.002

Embedded

*End Assembly

** ELEMENT CONTROLS

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC

1., 1., 1.1, 0.

** MATERIALS

*parameter

rho0 = 2406

G = 11.292e9

A = 0.79

N = 1.085

B = 1.405

M = 1.085

C = 0.007

edot0 = 1.0

T = 3.24e6

sigIMax = 9.5e9

sigFMax = 1.1e9

HEL = 80e6

PHEL = 45e6

beta = 1.0

D1 = 0.04

D2 = 1.0

efMax = 1.0

efMin = 0.0016

K1 = 85e9

K2 = -171e9

K3 = 208e9

FS = 0.2

IDamage = 0

*Material, name=Steel

*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK

0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.

*Damage Evolution, type=ENERGY

400.,

*Density

7850.,

*Elastic

2e+11, 0.3

*Plastic, hardening=JOHNSON COOK

2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.

*Material, name=TNT

*Density

1650.,

*Eos, type=JWL

```

6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.
*Detonation Point
0.,0.,0.,0.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density
<rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=IntProp-1
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet38, XSYMM
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit
, 0.02
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
** LOADS
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, , IntProp-1
** OUTPUT REQUESTS

```

*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, number interval=100
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
DMICRT, EVF, LE, PE, PEEQ, S, SDV, STATUS, UVARM
*Contact Output
CSTRESS,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

2. Mô phỏng số cấu kiện bê tông cốt thép bị phá hủy do nổ gần

*Heading
** Job name: RC_TNT200g_NG Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2020
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
** PARTS
*Part, name=Bars
*Node
1, -0.75, 0., 0.
2, -0.74000001, 0., 0.
3, -0.730000019, 0., 0.
4, -0.720000029, 0., 0.
5, -0.709999979, 0., 0.
6, -0.699999988, 0., 0.
7, -0.689999998, 0., 0.
8, -0.680000007, 0., 0.
9, -0.670000017, 0., 0.
10, -0.660000026, 0., 0.
*Element, type=B31
1, 1, 2
2, 2, 3
3, 3, 4
4, 4, 5
5, 5, 6
6, 6, 7
7, 7, 8
8, 8, 9
9, 9, 10
10, 10, 11
*Nset, nset=Set-4, generate
1, 151, 1

```

*Elset, elset=Set-4, generate
  1, 150, 1
*Nset, nset=Set-5, generate
  1, 151, 1
*Elset, elset=Set-5, generate
  1, 150, 1
*Nset, nset=Set-6, generate
  1, 151, 1
*Elset, elset=Set-6, generate
  1, 150, 1
** Section: theptron14 Profile: phi14
*Beam Section, elset=Set-6, material=Steel, temperature=GRADIENTS,
section=CIRC
0.007
0.,0.,-1.
*End Part
*Part, name=Part-2
*End Part
*Part, name=Strips
*Node
  1, -0.075000003, 0.075000003, 0.
  2, 0.075000003, 0.075000003, 0.
  3, 0.075000003, -0.075000003, 0.
  4, -0.075000003, -0.075000003, 0.
  5, 0.0649999976, 0.075000003, 0.
  6, 0.0549999997, 0.075000003, 0.
  7, 0.0450000018, 0.075000003, 0.
  8, 0.0350000001, 0.075000003, 0.
  9, 0.0250000004, 0.075000003, 0.
  10, 0.0149999997, 0.075000003, 0.
*Element, type=B31
  1, 2, 5
  2, 5, 6
  3, 6, 7
  4, 7, 8
  5, 8, 9
  6, 9, 10
  7, 10, 11
  8, 11, 12
  9, 12, 13
  10, 13, 14
*Nset, nset=Set-1, generate
  1, 60, 1

```



```
*Elset, elset=Set-1, generate
  1, 60, 1
*Nset, nset=Set-2, generate
  1, 60, 1
*Elset, elset=Set-2, generate
  1, 60, 1
*Nset, nset=Set-6, generate
  1, 60, 1
*Elset, elset=Set-6, generate
  1, 60, 1
** Section: Theptron6 Profile: phi8
*Beam Section, elset=Set-1, material=Steel, temperature=GRADIENTS,
section=CIRC
0.004.0.,0.,-1.
*End Part
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf128, internal
__PickedSurf128_S2, S2
__PickedSurf128_S6, S6
__PickedSurf128_S5, S5
** Constraint: Constraint-1
*Embedded Element
*End Assembly
** ELEMENT CONTROLS
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406
G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
```

```

efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
*Material, name=TNT
*Density 16500.,
*Eos, type=JWL
6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.
*Detonation Point 0.,0.,0.,0.001
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=GenContact
*Incident Wave Interaction Property, name=Blast-Property, type=AIR BLAST
*CONWEP Charge Property
0.3, 1. 1., 1., 1.
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

```

```

*Boundary
_PickedSet134, XSYMM
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-2
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, , GenContact
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit, 0.03
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Incident Wave Interaction, CONWEP, property=Blast-Property
_PickedSurf128, _PickedSet129, , 0., 1.
** OUTPUT REQUESTS
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, number interval=100
*Node Output A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
IWCONWEP, LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SDV, STATUS,
SVAVG
*Contact Output
CSTRESS,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

```

3. Mô phỏng số sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A1

```

*Heading
** Job name: NTX-A1 Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE 2020
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
** PARTS
*Part, name=Cot
*Node
1, 0., -0.375, 16.5
2, 0., -0.125, 16.5

```

3, 0., -0.125, 0.
4, 0., -0.375, 0.
5, 0.25, -0.125, 16.5
6, 0.25, -0.125, 0.
7, 0.25, -0.375, 0.
8, 0.25, -0.375, 16.5
9, 0., -0.375, 20.1000004
10, 0., -0.125, 20.1000004

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12947, internal

__PickedSurf12947_S6, S6

__PickedSurf12947_S4, S4

** Constraint: Constraint-1

*Embedded Element

Embedded

*End Assembly

** ELEMENT CONTROLS

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC

1., 1., 1.1, 0.

** MATERIALS

*parameter

rho0 = 2406

G = 11.292e9

A = 0.79

N = 1.085

B = 1.405

M = 1.085

C = 0.007

edot0 = 1.0

T = 3.24e6

sigIMax = 9.5e9

sigFMax = 1.1e9

HEL = 80e6

PHEL = 45e6

beta = 1.0

D1 = 0.04

D2 = 1.0

efMax = 1.0

efMin = 0.0016

K1 = 85e9

K2 = -171e9

K3 = 208e9

FS = 0.2

```

IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=TNT
*Density 1650.,
*Eos, type=JWL
6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.
*Detonation Point 0.,0.,0.,0.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=Contact
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit , 1.5
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2

```

```
** LOADS
** Name: BS Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12941, P, 15000.
** Name: Dambomai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12940, P, 2500.
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12947, P, 5000.
** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12945, P, 300.
** Name: Taihanhlangmai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12946, P, 150.
** Name: Taisan1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12943, P, 1000.
** Name: Taisanmai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12944, P, 500.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, , Contact
** OUTPUT REQUESTS
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, number interval=300
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
DMICRT, EVF, LE, PE, PEEQ, S, SDV, STATUS, UVARM
*Contact Output
CSTRESS,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

4. Mô phỏng số sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

*Heading

** Job name: NTX-A3 Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2020

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

** PARTS

*Part, name=Cot

*Node

1,	0.,	-0.375,	16.5
2,	0.,	-0.125,	16.5
3,	0.,	-0.125,	0.
4,	0.,	-0.375,	0.
5,	0.25,	-0.125,	16.5
6,	0.25,	-0.125,	0.
7,	0.25,	-0.375,	0.
8,	0.25,	-0.375,	16.5
9,	0.,	-0.375,	20.1000004
10,	0.,	-0.125,	20.1000004

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12949, internal

__PickedSurf12949_S4, S4

__PickedSurf12949_S6, S6

*Elset, elset=__PickedSurf12950_S6, internal, instance=San-1, generate
1, 4669, 1

*Elset, elset=__PickedSurf12950_S3, internal, instance=San-1, generate
12790, 20909, 1

*Elset, elset=__PickedSurf12950_S4, internal, instance=San-1, generate
4670, 12789, 1

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12950, internal

__PickedSurf12950_S6, S6

__PickedSurf12950_S3, S3

__PickedSurf12950_S4, S4

** Constraint: Constraint-1

*Embedded Element

Embedded

*End Assembly

** ELEMENT CONTROLS

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC

1., 1., 1. 1, 0.

** MATERIALS

*parameter

rho0 = 2406

G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=TNT
*Density 1650.,
*Eos, type=JWL
6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.
*Detonation Point 0.,0.,0.,0.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, , <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8

1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=Contact
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit, 1.5
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: BS Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12947, P, 40000.
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12949, P, 5000.
** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12945, P, 300.
** Name: Taisan1234 Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12943, P, 1000.
** Name: Taisanmai Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12950, P, 100.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Contact, op=NEW

*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
 *Contact Property Assignment , , Contact
 ** OUTPUT REQUESTS
 *Restart, write, number interval=1, time marks=NO
 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
 *Output, field, number interval=200
 *Node Output A, RF, U, V
 *Element Output, directions=YES
 DMICRT, EVF, LE, PE, PEEQ, S, SDV, STATUS, UVARM
 *Contact Output CSTRESS,
 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
 *Output, history, variable=PRESELECT
 *End Step

5. Mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ để KSLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

*Heading
 ** Job name: GP1-NTX-A3 Model name: Model-1
 ** Generated by: Abaqus/CAE 2020
 *Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
 ** PARTS

*Part, name=Cot

*Node

1,	0.,	-0.375,	16.5
2,	0.,	-0.125,	16.5
3,	0.,	-0.125,	0.
4,	0.,	-0.375,	0.
5,	0.25,	-0.125,	16.5
6,	0.25,	-0.125,	0.
7,	0.25,	-0.375,	0.
8,	0.25,	-0.375,	16.5
9,	0.,	-0.375,	20.1000004
10,	0.,	-0.125,	20.1000004

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12949, internal
 __PickedSurf12949_S4, S4
 __PickedSurf12949_S6, S6

** Constraint: Constraint-1

*Embedded Element

Embedded

*End Assembly

** ELEMENT CONTROLS

*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
 CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC

1., 1., 1. 1, 0.

** MATERIALS

*parameter

rho0 = 2406

G = 11.292e9

A = 0.79

N = 1.085

B = 1.405

M = 1.085

C = 0.007

edot0 = 1.0

T = 3.24e6

sigIMax = 9.5e9

sigFMax = 1.1e9

HEL = 80e6

PHEL = 45e6

beta = 1.0

D1 = 0.04

D2 = 1.0

efMax = 1.0

efMin = 0.0016

K1 = 85e9

K2 = -171e9

K3 = 208e9

FS = 0.2

IDamage = 0

*Material, name=Steel

*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK

0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.

*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,

*Density 7850.,

*Elastic 2e+11, 0.3

*Plastic, hardening=JOHNSON COOK

2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.

*Material, name=TNT

*Density 1650.,

*Eos, type=JWL

6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.

*Detonation Point 0.,0.,0.,0.

*Material, name=abq_jh2_concrete

*density <rho0>

*user material, constants=32

<rho0>, <G>, <A>, <N>, , <M>, <C>, <edot0>

<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>

```

<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=Contact
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet13163, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit, 1.5
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: Dambomai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12948, P, 2500.
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12949, P, 5000.
** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12945, P, 300.
** Name: Taihanhlangmai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12946, P, 150.

```

** Name: Taisan1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12943, P, 1000.
 ** Name: Taisanmai Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12944, P, 500.
 ** INTERACTIONS
 ** Interaction: Int-1
 *Contact, op=NEW
 *Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
 *Contact Property Assignment , , Contact
 ** OUTPUT REQUESTS
 *Restart, write, number interval=1, time marks=NO
 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
 *Output, field, number interval=300
 *Node Output A, RF, U, V
 *Element Output, directions=YES
 DMICRT, EVF, LE, PE, PEEQ, S, SDV, STATUS, UVARM
 *Contact Output CSTRESS,
 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
 *Output, history, variable=PRESELECT
 *End Step

6. Mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để KSLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

*Heading
 ** Job name: GP2-NTX-A3 Model name: Model-1
 ** Generated by: Abaqus/CAE 2020
 *Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
 ** PARTS
 *Part, name=Cot
 *Node

1,	0.,	-0.125,	13.5500002
2,	0.,	-0.375,	13.5500002
3,	0.,	-0.375,	16.5
4,	0.,	-0.125,	16.5
5,	0.25,	-0.375,	13.5500002
6,	0.25,	-0.375,	16.5
7,	0.25,	-0.125,	16.5
8,	0.25,	-0.125,	13.5500002
9,	0.,	-0.125,	0.
10,	0.,	-0.375,	0.

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12949, internal
 __PickedSurf12949_S4, S4

```
__PickedSurf12949_S6, S6
*Elset, elset=__PickedSurf12964_S6, internal, instance=San-1, generate
  1, 4669, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12964_S3, internal, instance=San-1, generate
  12790, 20909, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12964_S4, internal, instance=San-1, generate
  4670, 12789, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=__PickedSurf12964, internal
__PickedSurf12964_S6, S6
__PickedSurf12964_S3, S3
__PickedSurf12964_S4, S4
** Constraint: Constraint-1
*Embedded Element
Embedded
*End Assembly
** ELEMENT CONTROLS
*Section Controls, name=EC-1, ELEMENT CONVERSION=YES, CONVERSION
CRITERION=TIME, KERNEL=CUBIC
1., 1., 1. 1, 0.
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406
G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
```

```

IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=TNT
*Density
1650.,
*Eos, type=JWL
6930., 3.73e+11, 3.74e+09, 0.35, 4.15, 0.9, 6.06e+06, 0.
*Detonation Point
0.,0.,0.,0.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density
<rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=IntProp-1
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre

```

```

*Boundary
_PickedSet12965, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit , 0.6
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12949, P, 5000.
** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12945, P, 300.
** Name: Taisan1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12943, P, 1000.
** Name: Taisanmai Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12964, P, 100.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions
MatTNT , Thep
Mattrongthep , Matcot
*Contact Property Assignment
, , IntProp-1
** OUTPUT REQUESTS
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, number interval=100
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
DMICRT, EVF, LE, PE, PEEQ, S, SDV, STATUS, UVARM
*Contact Output
CSTRESS,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step

```


7. Mô phỏng số sụp đở lữ tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

*Heading

** Job name: NG Model name: Model-1

** Generated by: Abaqus/CAE 2020

*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO

** PARTS

*Part, name=Cot

*Node

1,	0.,	-0.375,	16.5
2,	0.,	-0.125,	16.5
3,	0.,	-0.125,	0.
4,	0.,	-0.375,	0.
5,	0.25,	-0.125,	16.5
6,	0.25,	-0.125,	0.
7,	0.25,	-0.375,	0.
8,	0.25,	-0.375,	16.5
9,	0.,	-0.375,	20.1000004
10,	0.,	-0.125,	20.1000004

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Vachngan-1, generate

1, 948, 1

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-6-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1-1

1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Vachdai-1, generate
1, 1452, 1

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-3-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-5-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Vachngan-1-lin-1-2, generate
1, 948, 1

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-2
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Vachdai-1-lin-1-2, generate
1, 1452, 1

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Sanham-1-lin-1-2, generate
1, 9801, 1

*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684

*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684

*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-4-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684

*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684

*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1-1

1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-6-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-3-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-5-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-2
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-5-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-3-1-lin-2-1-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Nset, nset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-6-1-lin-2-1-lin-2-1
1, 2, 5, 8, 13, 14, 345, 346, 679, 680, 683, 684
*Elset, elset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1
1, 2, 3, 496, 498, 991, 992, 993, 1486, 1487, 1488, 1594, 1596, 1702,
1703, 1704
*Elset, elset=_PickedSet12926, internal, instance=Cot-1-lin-2-1

1, 2, 3, 496, 498, 991, 992, 993, 1486, 1487, 1488, 1594, 1596, 1702, 1703, 1704

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-5-2, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-3-4, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-6-5, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-2-5, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-6-1, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-4-3, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-1-5, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-5-1, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-3-3, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-6-4, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-2-4, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-5-5, generate
568, 925, 3

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-4-2, generate
568, 925, 3

```

*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-1-3,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-2-2,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-5-3,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-3-5,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-3-1,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-6-2,
generate
568, 925, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12934_S6, internal, instance=Damngan-1-lin-4-4,
generate
568, 925, 3
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12934, internal
__PickedSurf12934_S4, S4
__PickedSurf12934_S6, S6
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S3, internal, instance=San-1-lin-2-1, generate
12790, 20909, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S3, internal, instance=San-1-lin-3-1, generate
12790, 20909, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S3, internal, instance=San-1-lin-4-1, generate
12790, 20909, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S3, internal, instance=San-1-lin-5-1, generate
12790, 20909, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S4, internal, instance=San-1-lin-2-1, generate
4670, 12789, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12936_S4, internal, instance=San-1-lin-3-1, generate
4670, 12789, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12936, internal
__PickedSurf12936_S3, S3
__PickedSurf12936_S4, S4
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12942, internal
__PickedSurf12942_S4, S4
__PickedSurf12942_S3, S3
** Constraint: Constraint-1

```

```

*Embedded Element
Embedded
*End Assembly
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406
G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>

```

```

*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE , "Damage variable"
5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD , "Yield strength"
7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS , "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Surface Interaction, name=Contact
*Incident Wave Interaction Property, name=Blast-Property, type=SURFACE
BLAST
*CONWEP Charge Property 200., 1. 1., 1., 1.
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit, 1.5
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: BS Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12934, P, 40000.
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12940, P, 5000.
** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12938, P, 300.
** Name: Taisan1234 Type: Pressure
*Dload
_PickedSurf12936, P, 1000.
** Name: Taisanmai Type: Pressure
*Dload

```

_PickedSurf12942, P, 100.
 ** INTERACTIONS
 ** Interaction: Int-1
 *Incident Wave Interaction, CONWEP, property=Blast-Property
 _PickedSurf12884, _PickedSet12933, , 0., 1.
 ** Interaction: Int-2
 *Contact, op=NEW
 *Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
 *Contact Property Assignment
 ** OUTPUT REQUESTS
 *Restart, write, number interval=1, time marks=NO
 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
 *Output, field, number interval=150
 *Node Output A, RF, U, V
 *Element Output, directions=YES
 LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SDV, STATUS, SVAVG
 *Contact Output CSTRESS,
 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
 *Output, history, variable=PRESELECT
 *End Step

8. Mô phỏng số giải pháp thêm cột phụ để KSLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

*Heading
 ** Job name: GP1-NG Model name: Model-1
 ** Generated by: Abaqus/CAE 2020
 *Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
 ** PARTS
 *Part, name=Cot
 *Node

1,	0.,	-0.375,	16.5
2,	0.,	-0.125,	16.5
3,	0.,	-0.125,	0.
4,	0.,	-0.375,	0.
5,	0.25,	-0.125,	16.5
6,	0.25,	-0.125,	0.
7,	0.25,	-0.375,	0.
8,	0.25,	-0.375,	16.5
9,	0.,	-0.375,	20.1000004
10,	0.,	-0.125,	20.1000004

*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1
 1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809
 *Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1
 1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809


```
*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809
*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809
*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-4-1-lin-2-1-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809
*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Cot-1-lin-2-1-1-lin-2-1
1591, 1592, 1593, 1699, 1700, 1701, 1807, 1808, 1809
*Elset, elset=_PickedSet12925, internal, instance=Vachngan-1, generate
12790, 20909, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf14215, internal
__PickedSurf14215_S4, S4
__PickedSurf14215_S3, S3
** Constraint: Constraint-1
*Embedded Element
Embedded
*End Assembly
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406
G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
IDamage = 0
*Material, name=Steel
```

```

*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, <B>, <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ, "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT, "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE, "Damage variable"
5, DELTAP, "Pressure increment due to bulking"
6, YIELD, "Yield strength"
7, EVOL, "Volumetric Strain, Mu"
8, MPSTATUS, "Material point status"
** INTERACTION PROPERTIES
*Incident Wave Interaction Property, name=Blast-Property, type=SURFACE
BLAST
*CONWEP Charge Property 200., 1. 1., 1., 1.
** BOUNDARY CONDITIONS
** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12925, ENCASTRE
** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
*Boundary
_PickedSet12926, ENCASTRE
** STEP: Step-1
*Step, name=Step-1, nlgeom=YES
*Dynamic, Explicit, 0.6
*Bulk Viscosity 0.06, 1.2
** LOADS
** Name: Gravity Type: Gravity
*Dload
, GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
** Name: Taidambo1234 Type: Pressure

```

*Dsload
 _PickedSurf12940, P, 5000.
 ** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12938, P, 300.
 ** Name: Taisan1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12936, P, 1000.
 ** Name: Taisanmai Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf14215, P, 100.
 ** Interaction: Int-1
 *Incident Wave Interaction, CONWEP, property=Blast-Property
 _PickedSurf12884, _PickedSet12933, , 0., 1.
 ** OUTPUT REQUESTS
 *Restart, write, number interval=1, time marks=NO
 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
 *Output, field, number interval=150
 *Node Output
 A, RF, U, V
 *Element Output, directions=YES
 LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SDV, STATUS, SVAVG
 *Contact Output
 CSTRESS,
 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
 *Output, history, variable=PRESELECT
 *End Step

9. Mô phỏng số giải pháp bọc thép cột để KSLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

*Heading
 ** Job name: GP2-NG Model name: Model-1
 ** Generated by: Abaqus/CAE 2020
 *Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
 ** PARTS
 *Part, name=Bocthepcot
 *Node

1,	-0.125,	0.135000005,	0.
2,	-0.125,	0.135000005,	16.5
3,	0.125,	0.135000005,	16.5
4,	0.125,	0.135000005,	0.
5,	-0.125,	0.125,	16.5
6,	0.125,	0.125,	16.5
7,	0.125,	0.125,	0.

```

      8,   -0.125,   0.125,   0.
      9,   -0.125, -0.135000005,   0.
     10,   -0.125, -0.135000005,  16.5
*Elset, elset=__PickedSurf12955_S4, internal, instance=Damngan-1-lin-1-5,
generate
  3, 567, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12955_S4, internal, instance=Damngan-1-lin-6-4,
generate
  3, 567, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12955_S4, internal, instance=Damdai-1-lin-4-1-lin-2-1-
lin-2-1
*Elset, elset=__PickedSurf12955_S4, internal, instance=Damngan-1-lin-1-3,
generate
  3, 567, 3
*Elset, elset=__PickedSurf12955_S4, internal, instance=Damngan-1-lin-6-2,
generate
  3, 567, 3
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12955, internal
  __PickedSurf12955_S6, S6
  __PickedSurf12955_S4, S4
*Elset, elset=__PickedSurf12968_S1, internal, instance=Damdai-1-lin-2-1-1-lin-2-
1, generate
  283, 396, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12968_S1, internal, instance=Damdai-1-lin-2-1-lin-2-1-
lin-2-1, generate
  283, 396, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12968_S1, internal, instance=Damdai-1-lin-3-1-lin-2-1-
lin-2-1, generate
  283, 396, 1
*Elset, elset=__PickedSurf12968_S1, internal, instance=Damdai-1-lin-5-1-lin-2-1-
lin-2-1, generate
  283, 396, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12968, internal
  __PickedSurf12968_S1, S1
  __PickedSurf12968_S2, S2
  __PickedSurf12968_S5, S5
** Constraint: Constraint-1
*Embedded Element
Embedded
*End Assembly
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406

```

G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
IDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32
<rho0>, <G>, <A>, <N>, , <M>, <C>, <edot0>
<T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
<D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
<K1>, <K2>, <K3>
*DEPVAR, DELETE=8
1, PEEQ, "Equivalent plastic strain"
2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
3, DUCTCRT, "Ductile damage initiation criterion"
4, DAMAGE, "Damage variable"
5, DELTAP, "Pressure increment due to bulking"

6, YIELD , "Yield strength"
 7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
 8, MPSTATUS , "Material point status"
 ** INTERACTION PROPERTIES
 *Surface Interaction, name=Contact
 *Incident Wave Interaction Property, name=Blast-Property, type=SURFACE
 BLAST
 *CONWEP Charge Property 200., 1. 1., 1., 1.
 ** BOUNDARY CONDITIONS
 ** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12925, ENCASTRE
 ** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12926, ENCASTRE
 ** STEP: Step-1
 *Step, name=Step-1, nlgeom=YES
 *Dynamic, Explicit, 0.3
 *Bulk Viscosity 0.06, 1.2
 ** BOUNDARY CONDITIONS
 ** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12969, ENCASTRE
 ** LOADS
 ** Name: Gravity Type: Gravity
 *Dload
 , GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
 ** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12955, P, 5000.
 ** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12938, P, 300.
 ** Name: Taisan1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12936, P, 1000.
 ** Name: Taisanmai Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12942, P, 100.
 ** INTERACTIONS
 ** Interaction: Int-1
 *Incident Wave Interaction, CONWEP, property=Blast-Property
 _PickedSurf12968, _PickedSet12933, , 0., 1.

** Interaction: Int-2
 *Contact, op=NEW
 *Contact Inclusions
 BocthepA1 , A1
 BocthepA2 , A2
 BocthepA3 , A3
 BocthepA4 , A4
 BocthepA5 , A5
 BocthepA6 , A6
 *Contact Property Assignment
 , , Contact
 ** OUTPUT REQUESTS
 *Restart, write, number interval=1, time marks=NO
 ** FIELD OUTPUT: F-Output-1
 *Output, field, number interval=150
 *Node Output
 A, RF, U, V
 *Element Output, directions=YES
 LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SDV, STATUS, SVAVG
 *Contact Output
 CSTRESS,
 ** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
 *Output, history, variable=PRESELECT
 *End Step

10. Mô phỏng số giải pháp tường chắn sóng để KSLT của khung BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

*Heading
 ** Job name: GP3-NG Model name: Model-1
 ** Generated by: Abaqus/CAE 2020
 *Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
 ** PARTS

*Part, name=Cot

*Node

1,	0.,	-0.125,	10.1999998
2,	0.,	-0.375,	10.1999998
3,	0.,	-0.375,	16.5
4,	0.,	-0.125,	16.5
5,	0.25,	-0.375,	10.1999998
6,	0.25,	-0.375,	16.5
7,	0.25,	-0.125,	16.5
8,	0.25,	-0.125,	10.1999998
9,	0.,	-0.125,	0.
10,	0.,	-0.375,	0.

```

*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf12947, internal
__PickedSurf12947_S1, S1
__PickedSurf12947_S6, S6
** Constraint: Constraint-1
*Embedded Element
Embedded
*End Assembly
** MATERIALS
*parameter
rho0 = 2406
G = 11.292e9
A = 0.79
N = 1.085
B = 1.405
M = 1.085
C = 0.007
edot0 = 1.0
T = 3.24e6
sigIMax = 9.5e9
sigFMax = 1.1e9
HEL = 80e6
PHEL = 45e6
beta = 1.0
D1 = 0.04
D2 = 1.0
efMax = 1.0
efMin = 0.0016
K1 = 85e9
K2 = -171e9
K3 = 208e9
FS = 0.2
lDamage = 0
*Material, name=Steel
*Damage Initiation, criterion=JOHNSON COOK
0.05, 3.44, 2.12, 0.002, 0.61, 1800., 293., 1.
*Damage Evolution, type=ENERGY 400.,
*Density 7850.,
*Elastic 2e+11, 0.3
*Plastic, hardening=JOHNSON COOK
2.6351e+08, 1.3005e+08, 0.0915, 1., 1800., 293.
*Material, name=abq_jh2_concrete
*density <rho0>
*user material, constants=32

```


<rho0>, <G>, <A>, <N>, , <M>, <C>, <edot0>
 <T>, <sigIMax>, <sigFMax>, <HEL>, <PHEL>, <beta>
 <D1>, <D2>, <efMax>, <efMin>, <FS>, <IDamage>
 <K1>, <K2>, <K3>
 *DEPVAR, DELETE=8
 1, PEEQ , "Equivalent plastic strain"
 2, PEEQ_RATE, "Equivalent plastic strain rate"
 3, DUCTCRT , "Ductile damage initiation criterion"
 4, DAMAGE , "Damage variable"
 5, DELTAP , "Pressure increment due to bulking"
 6, YIELD , "Yield strength"
 7, EVOL , "Volumetric Strain, Mu"
 8, MPSTATUS , "Material point status"
 ** INTERACTION PROPERTIES
 *Surface Interaction, name=Contact
 *Incident Wave Interaction Property, name=Blast-Property, type=SURFACE
 BLAST
 *CONWEP Charge Property 200., 1.1., 1., 1.
 ** BOUNDARY CONDITIONS
 ** Name: BC-1 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12925, ENCASTRE
 ** Name: BC-2 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12926, ENCASTRE
 ** Name: BC-3 Type: Symmetry/Antisymmetry/Encastre
 *Boundary
 _PickedSet12949, ENCASTRE
 ** STEP: Step-1
 *Step, name=Step-1, nlgeom=YES
 *Dynamic, Explicit, 0.6
 *Bulk Viscosity 0.06, 1.2
 ** LOADS
 ** Name: Gravity Type: Gravity
 *Dload
 , GRAV, 9.81, 0., -1., 0.
 ** Name: Taidambo1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12940, P, 5000.
 ** Name: Taihanhlang1234 Type: Pressure
 *Dsload
 _PickedSurf12938, P, 300.
 ** Name: Taisan1234 Type: Pressure

*Dsload
_PickedSurf12936, P, 1000.
** Name: Taisanmai Type: Pressure
*Dsload
_PickedSurf12942, P, 100.
** INTERACTIONS
** Interaction: Int-1
*Incident Wave Interaction, CONWEP, property=Blast-Property
_PickedSurf12947, _PickedSet12933, , 0., 1.
** Interaction: Int-2
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
, , Contact
** OUTPUT REQUESTS
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
*Output, field, number interval=150
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SDV, STATUS, SVAVG
*Contact Output
CSTRESS,
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step