

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**

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình đặc biệt

Mã số: 9 58 02 06

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2021

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. GS.TSKH Nguyễn Văn Hợi
2. GS.TS Nguyễn Quốc Bảo

Phản biện 1: GS.TS Nguyễn Văn Lệ

Phản biện 2: GS.TS Nguyễn Mạnh Yên

Phản biện 3: PGS.TS Nguyễn Xuân Huy

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo Quyết định số 4557/QĐ-HV ngày 01 tháng 11 năm 2021 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi: giờ ngày tháng năm 2021

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

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.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Trong quá trình sử dụng, các công trình dân dụng cũng như các công trình lưỡng dụng (kết hợp kinh tế và an ninh Quốc phòng), ngoài tải trọng thiết kế còn phải chịu các tác dụng bất thường (do nổ, va chạm của các phương tiện và thiết bị giao thông trên bộ và trên không,...), dẫn đến kết cấu bị phá hoại và sụp đổ lũy tiến (SDLT). Cho đến nay việc nghiên cứu các phương pháp tính toán, các quy phạm thiết kế các công trình chịu các tác dụng bất thường nói trên ở nước ta chưa được quan tâm đúng mức. Vì vậy, đề tài *“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”* có tính thời sự, cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục đích và nhiệm vụ 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.

- 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.

3. Đối tượng, 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. Bỏ qua tải trọng nhiệt do cháy, tải trọng va chạm do giải phóng làm rơi các cấu kiện trong quá trình sụp đổ lũy tiến.

4. Phương pháp nghiên cứu của luận án

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.

5. Nội dung và bố cục của luận án

Nội dung luận án gồm: phần mở đầu, 04 chương và kết luận.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

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

Các sự kiện điển hình về sự sụp đổ lũy tiến nhiều nhất đã xảy ra đối với công trình nhà cửa và công trình cầu.

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.

1.3 Các tiêu chuẩn và quy phạm

Trình bày các tiêu chuẩn và quy phạm về thiết kế kháng sập đổ lũy tiến cho công trình chịu các loại tải trọng bất thường của các nước trên thế giới.

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

Các phương pháp phân tích SĐLT 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.

1.5 Kết luận chương 1

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

1. Trong quá trình sử dụng, các công trình dân dụng cũng như các công trình lưỡng dụng (kết hợp kinh tế và an ninh QP), ngoài tải trọng thiết kế còn phải chịu các tác dụng bất thường (do nổ, va chạm của các phương tiện và thiết bị giao thông trên bộ và trên không,...), dẫn đến kết cấu bị phá hoại và sập đổ lũy tiến. Cho đến nay việc nghiên cứu các phương pháp tính toán, các quy phạm thiết kế các công trình chịu các tác dụng bất thường nói trên ở nước ta chưa được quan tâm đúng mức.

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.

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; 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 phần tử.

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,...

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

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

2.2.1 Vùng thuốc nổ

Thuốc nổ được sử dụng trong nghiên cứu này là loại thuốc nổ TNT và các loại tương đương. 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. 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.

2.2.2 Vùng gần tâm nổ

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). Cả hai phương pháp này cho phép ta mô phỏng đáp ứng của vùng vật liệu có biến dạng rất lớn.

2.2.3 Vùng không khí

Vùng không khí có khả năng bị biến dạng rất lớn nên trong mô phỏng sử dụng phương pháp Euler để tính toán. 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.

2.2.4 Vùng kết cấu công trình

Đối với kết cấu công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, sự biến dạng của 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, vị trí nghiên cứu khi chất điểm trong môi trường kết cấu không liên tục thì sử dụng phương pháp Euler, 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.

2.3 Phương pháp phân tích động trường minh theo thời gian

Khi tính toán công trình chịu tác dụng của tải trọng nổ, phương pháp phân tích động trường minh theo thời gian 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. 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, 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.

Phương trình của định luật bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2.1)$$

Phương trình của định luật bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.2)$$

Phương trình của định luật bảo toàn năng lượng:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + v_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (2.3)$$

Các phương trình bổ trợ cho mô hình hóa:

$$\text{- Phương trình ten xơ ứng suất: } \sigma_{ij} = -(p + q) + s_{ij}, \quad (2.4)$$

$$\text{- Phương trình trạng thái: } p = f(\rho, e), \quad (2.5)$$

- Phương trình quan hệ cơ bản: $\sigma_{ij} = g(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, e)$, (2.6)

- Phương trình mô phỏng nổ: $\sigma_{ij} = g(\varepsilon_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, e, D)$, (2.7)

trong đó các đại lượng được mô tả trong các phương trình (2.1)-(2.7): 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 nhót (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.

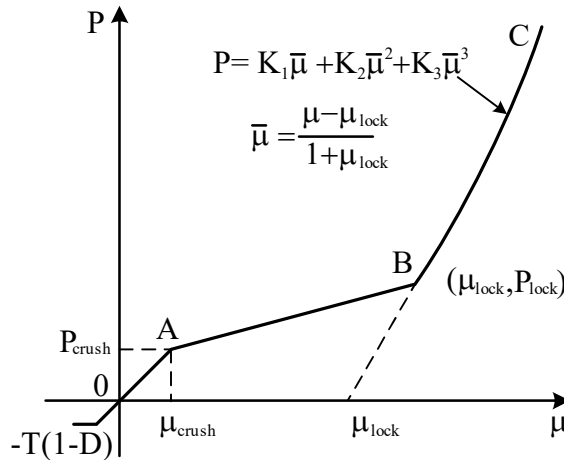
Những phương trình trên phải được giải quyết đồng thời trong mọi thời điểm, phương pháp tích phân động tường minh theo thời gian được phát triển để giải quyết đồng thời các bài toán vật lý nổ, lan truyền và tương tác của sóng nổ với công trình. Trong phần mềm tính toán ABAQUS tùy theo mô đun và yêu cầu 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 hay SPH.

2.4 Xây dựng mô hình vật liệu bài toán nghiên cứu

2.4.1 Mô hình vật liệu bê tông

Mô hình Holmquist-Johnson-Cook (HJC) có thể mô tả ứng xử nén động của bê tông chịu biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và áp suất cao. Do đó, nó đã được sử dụng rộng rãi trong việc phân tích các phản ứng động của bê tông dưới tác dụng nổ.

2.4.1.1 Phương trình trạng thái



Hình 2.1. Phương trình trạng thái

Giai đoạn đầu tiên kết cấu bê tông nguyên vẹn được thể hiện bằng đoạn thẳng OA trên hình 2.1. 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:

$$P = K\mu; P < P_{crush}, \quad (2.8)$$

trong đó biến dạng thể tích tiêu chuẩn $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, với ρ và ρ_0 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:

$$\text{Quá trình gia tải: } P = P_{crush} + K_{lock}(\mu - \mu_{crush}), \quad (2.9)$$

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} .

$$\text{Quá trình dỡ tải: } P = P_o - [(1-F)K + FK_1](\mu_o - \mu), \quad (2.10)$$

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.

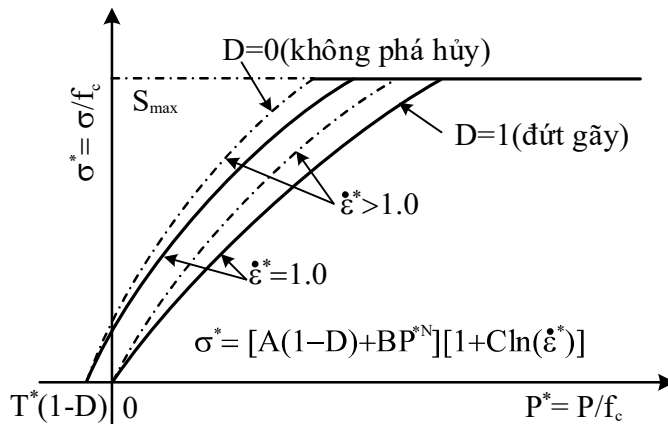
Giai đoạn thứ 3 (BC) là giai đoạn mà tất cả các lỗ rỗng không khí được loại bỏ khỏi bê tông, được giả định là hoàn toàn đàn hồi phi tuyến tính và mối quan hệ được biểu thị như sau:

$$\text{Quá trình gia tải: } P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3, \quad (2.11)$$

trong đó $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{lock})/(1 + \mu_{lock})$ là biến dạng thể tích đã sửa đổi, và $\mu_{lock} = \rho_{grain}/\rho_0 - 1$ 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.

$$\text{Quá trình dỡ tải: } P = K_1\bar{\mu}. \quad (2.12)$$

2.4.1.2 Mô hình bền



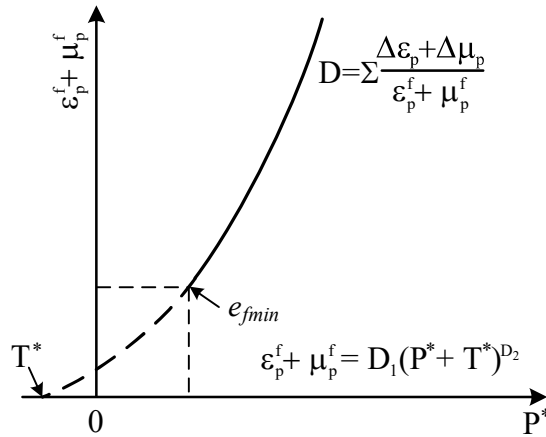
Hình 2.2. Phương trình mặt dẻo

Ảnh hưởng của tải trọng đến tốc độ biến dạng và phá hủy được thể hiện:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*), \quad (2.13)$$

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; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_o$ là tỷ lệ biến dạng (trong đó $\dot{\varepsilon}^*$ và $\dot{\varepsilon}_o = 1.0s^{-1}$ 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.

2.4.1.3 Mô hình phá hủy



Hình 2.3. Trạng thái phá hủy của mô hình HJC

Phá hủy của mô hình HJC được thể hiện ở hình 2.3, được tích lũy từ cả biến dạng dẻo tương đương và biến dạng dẻo thể tích, được tính bằng công thức:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f}, \quad (2.14)$$

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:

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq e_{fmin}, \quad (2.15)$$

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.

2.4.1.4 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.

2.4.2 Mô hình vật liệu thép

2.4.2.1 Phương trình trạng thái

Phương trình trạng thái dạng tuyến tính của cốt thép được mô tả bằng định luật Hooke theo phương trình: $p = E\mu$, (2.16)

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

2.4.2.2 Mô hình bền

Cốt thép sử dụng trong kết cấu được mô tả bởi mô hình bền Johnson-Cook. 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:

$$Y = \left(A_t + B_t \varepsilon_p^{n_t} \right) \left(1 + C_t \ln \varepsilon_p^* \right) \left(1 - T_H^{m_t} \right), \quad (2.17)$$

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.

2.4.2.3 Mô hình phá hủy

Cốt thép là vật liệu đàn dẻo sử dụng mô hình phá hủy do Johnson-Cook đề xuất, sự phá hủy biến dạng động học của vật liệu là hàm của áp lực, tốc độ biến dạng và nhiệt độ như sau:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \text{ với } \varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*} \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 + D_5 T^* \right), \quad (2.18)$$

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 ($D=1.0$).

2.4.2.4 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.

2.4.3 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:

$$p = A_m \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v_m}\right) E_m^{-r_1 v_m} + B_m \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v_m}\right) E_m^{-r_2 v_m} + \frac{\omega E_m}{v_m}, \quad (2.19)$$

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.

2.4.4 Mô hình không khí

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

$$p = C_0 + C_1 + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_{kk}. \quad (2.20)$$

Phương trình trạng thái khí lý tưởng được rút gọn như công thức (2.22) với $C_1 + C_2 + C_3 + C_6 = 0$ và $C_0 = C_1 = \gamma - 1$:

$$p = (\gamma - 1) \rho / \rho_0 E_{kk}, \quad (2.21)$$

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.

2.5 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, 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.

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

3.1.1 Tham số mô hình vật liệu bê tông

Mô hình vật liệu bê tông được áp dụng là mô hình Holmquist - Johnson - Cook. Dựa vào các thí nghiệm, 19 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 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.

Từ các thí nghiệm thực hiện được các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 được xác định và liệt kê trong bảng 3.1:

Bảng 3.1. 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		

3.1.2 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 (trương đương thép CII) được lấy theo bảng 3.2.

Bảng 3.2. 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

3.1.3 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 3.3.

Bảng 3.3. 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	2,1x10 ⁷	3,7377x10 ⁸	3,73471x10 ⁶
r_1	r_2	ω	v_m	E_m (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6x10 ⁶

3.1.4 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 3.4, 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.

Bảng 3.4. 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

3.2 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 bê tông cốt thép thí nghiệm tiết diện 0,2x0,2m, dài 1,5m được gia cường bằng 4 thanh thép $\Phi 14$, cốt đai $\Phi 6$ a200 với chiều dày bảo vệ 0,01m bằng phương pháp nổ tiếp xúc và nổ gần. Qua đó xác định được thực trạng bị phá hoại và biến dạng tại các điểm đo của cấu kiện. Sau đó tiến hành mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS so sánh kết quả giữa mô phỏng với 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 3.1, mô hình thử nghiệm nổ tiếp xúc với lượng nổ có khối lượng 200gam thuốc nổ TNT (hình 3.2) 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 3.3).



Hình 3.1. Cấu kiện cột bê tông cốt thép và gói đỡ thí nghiệm



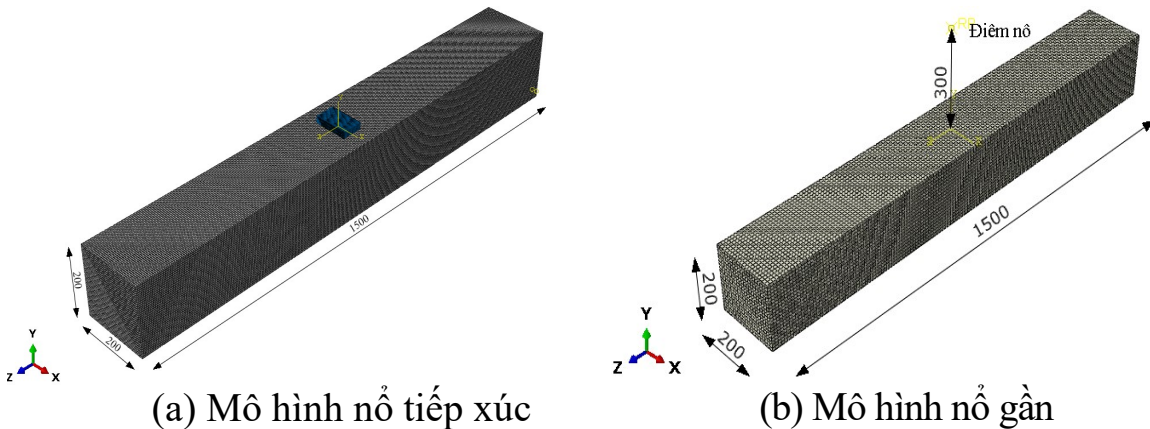
Hình 3.2. Mô hình thử nghiệm nổ tiếp xúc



Hình 3.3. Mô hình thử nghiệm nổ gần

3.3 Mô phỏng số sự phá hủy cấu kiện bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ tiếp xúc và nổ gần

Tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS. Bê tông được mô tả như phần tử khối trong khi phần tử thanh áp dụng cho thanh thép. 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. Trong bài toán nổ tiếp xúc, thuốc nổ được mô phỏng bằng phương pháp SPH; Trong bài toán nổ gần, thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP (UFC 3-340-2). Điều kiện biên: Cấu kiện BTCT được liên kết trên 2 gối ($u_1 = u_2 = u_3 = 0$) (hình 3.4).



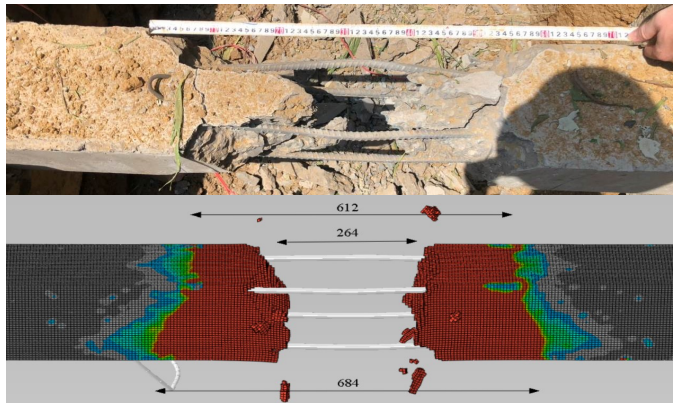
(a) Mô hình nổ tiếp xúc

(b) Mô hình nổ gần

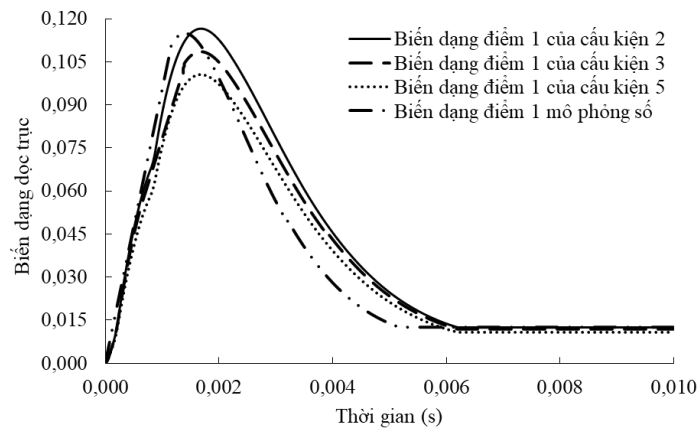
Hình 3.4. Mô hình hình học mô phỏng số tiếp xúc và nổ gần

3.4 Phân tích và so sánh kết quả trong trường hợp nổ tiếp xúc

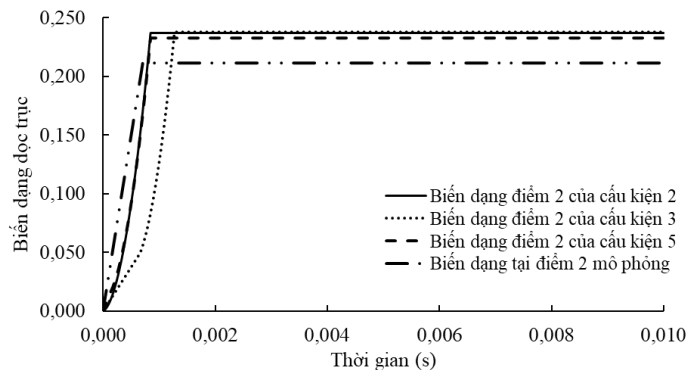
Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số như trong hình 3.5, 3.6, 3.7 và bảng 3.5.



Hình 3.5. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 3.6. Biến dạng tại điểm 1 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



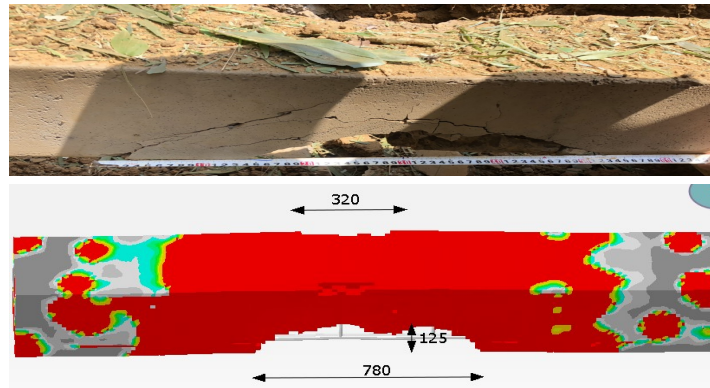
Hình 3.7. Biến dạng tại điểm 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 3.5. So sánh kết quả trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

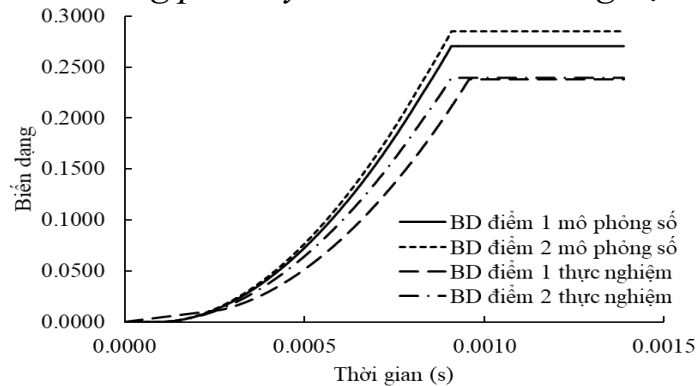
	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Vùng phá hủy giữa cấu kiện (mm)	264	285	7,4%
Vùng phá hủy mặt trên cấu kiện (mm)	612	650	5,8%
Vùng phá hủy mặt dưới cấu kiện (mm)	684	710	3,7%
Biến dạng dọc trục điểm 1	0,115	0,109	5,5%
Biến dạng dọc trục điểm 2	0,211	0,236	10,6%

3.5 Phân tích và so sánh kết quả trong trường hợp nổ gần

Kết quả thí nghiệm thực và mô phỏng số như trong hình 3.8, 3.9 và bảng 3.6.



Hình 3.8. Kích thước vùng phá hủy trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số



Hình 3.9. Biến dạng tại điểm 1, 2 trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

Bảng 3.6. So sánh kết quả trên mô hình thử nghiệm và mô phỏng số

	Mô phỏng số	Thử nghiệm	Sai khác
Chiều sâu phễu chấn sục (mm)	125	130	3,85%
Chiều dài phễu chấn sục (mm)	780	750	4,0%
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%

3.6 Kết luận của chương 3

Trong chương 3, tác giả đã trình bày nghiên cứu thí nghiệm trong phòng thí nghiệm xác định các tham số mô hình vật liệu và nổ thử nghiệm ngoài hiện trường kết hợp với mô phỏng số bằng phần mềm ABAQUS để hiệu chỉnh các tham số mô hình vật liệu, mô hình tính.

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.

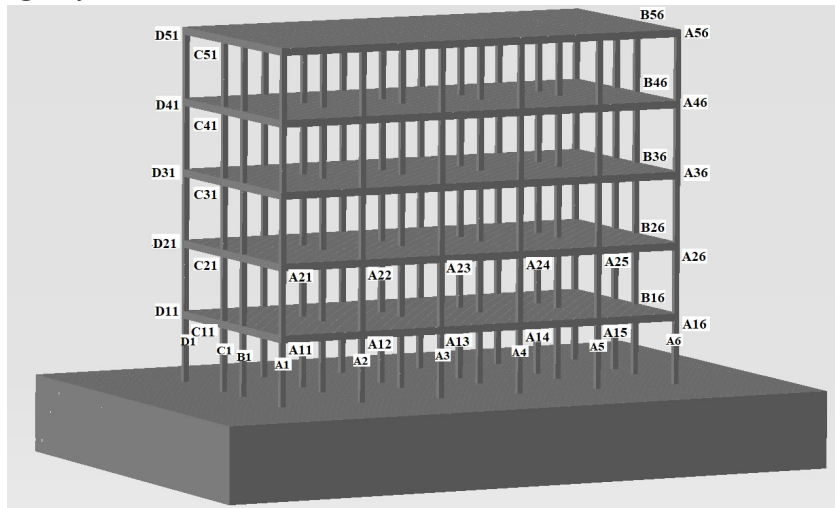
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU SỤP ĐỔ LŨY TIẾN CỦA KHUNG BÊ TÔNG CỐT THÉP TOÀN KHỐI CHỊU TÁC DỤNG NỔ VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁNG SỤP

4.1 Đặt bài toán

4.1.1 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. 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).

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.



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. 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.

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).

4.1.2 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 3.1.

Cốt thép: Sử dụng mô hình phá hủy Johnson-Cook, các tham số như bảng 3.2.

Thuốc nổ: Trong bài toán nổ tiếp xúc: Sử dụng phương pháp, các tham số được liệt kê trong bảng 3.3. Trong bài toán nổ gần: Thuốc nổ được tính theo mô hình CONWEP (theo tiêu chuẩn UFC 3-340-2).

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

Giải pháp thứ nhất - bố trí thêm cột phụ: Bố trí cột phụ có kích thước hình học tương đương với cột phá hủy, đặt cách cột bị phá hủy 1m.

Giải pháp thứ 2 - bọc thép cột bị phá hủy: Sử dụng thép tấm dày 10mm bọc tại những vị trí cột bị phá hủy.

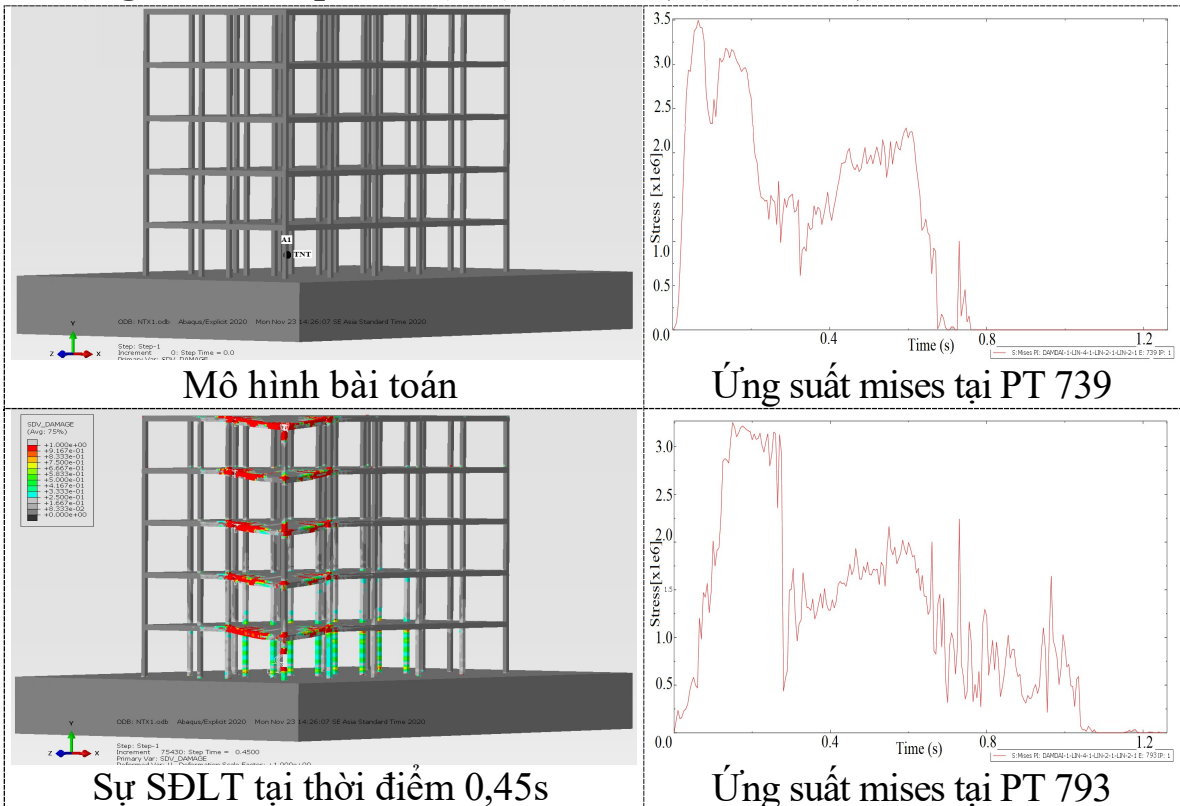
Giải pháp thứ 3 - bố trí tường chắn sóng nổ: Chọn kết cấu tường chắn sóng nổ bằng bê tông thí nghiệm chiều dài 20m, cao 2m mặt cắt ngang hình thang vuông 0,2x0,5m - có tác dụng làm đổi hướng tiếp xúc của mặt sóng nổ.

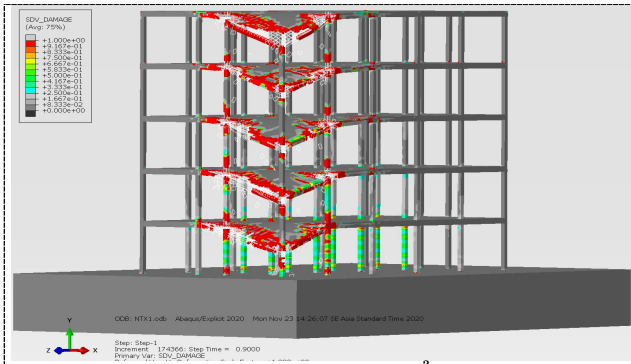
4.1.4 Các bài toán nghiên cứu

- Sự SĐLT của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc với kết cấu và đề xuất các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình;

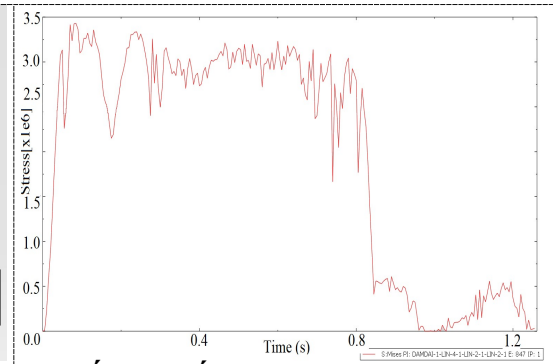
- Sự SĐLT của khung không gian BTCT toàn khối chịu tác dụng của nổ gần với kết cấu và đề xuất các giải pháp kháng sập lũy tiến cho công trình.

4.2 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)



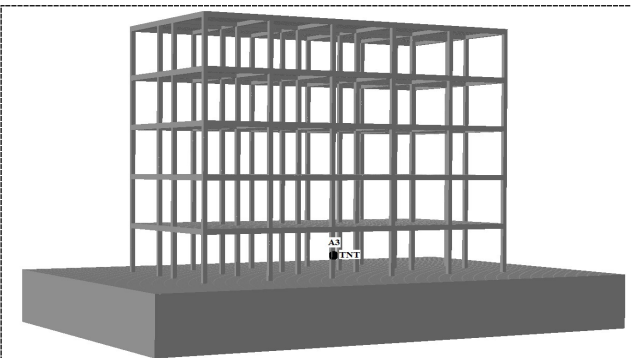


Sự SĐLT tại thời điểm 0,9s

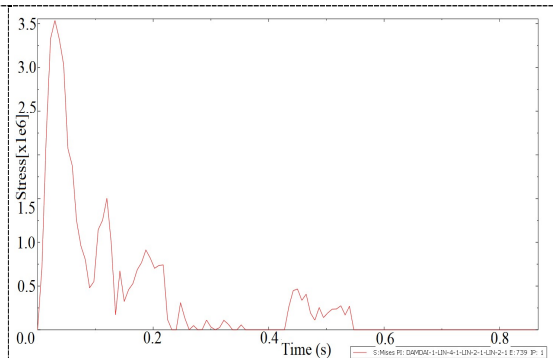


Ứng suất mises tại PT 847

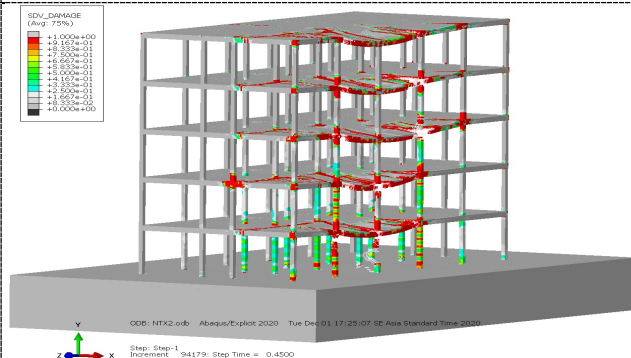
4.3. Sự sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ tiếp xúc đặt tại cột A3 (Kịch bản 2)



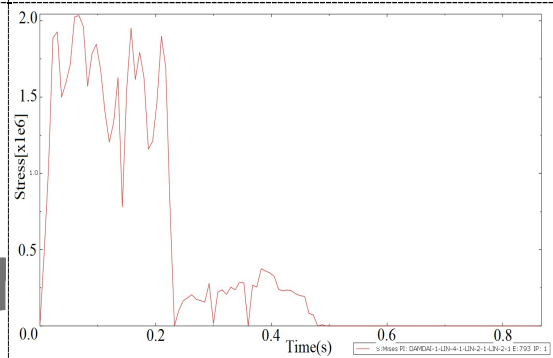
Mô hình bài toán



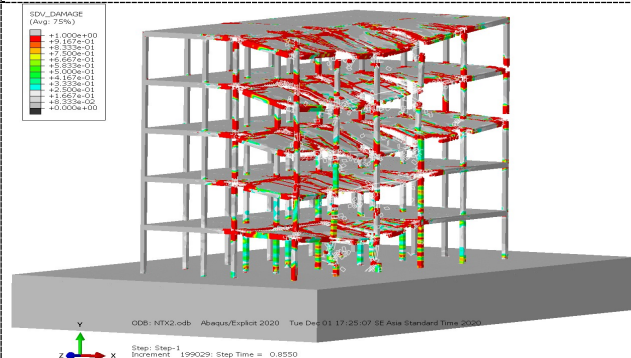
Ứng suất mises tại PT 739



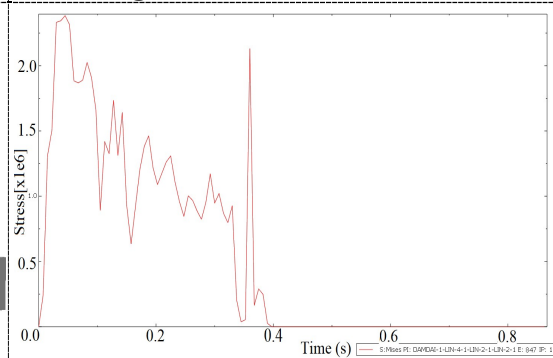
Sự SĐLT tại thời điểm 0,45s



Ứng suất mises tại PT 793

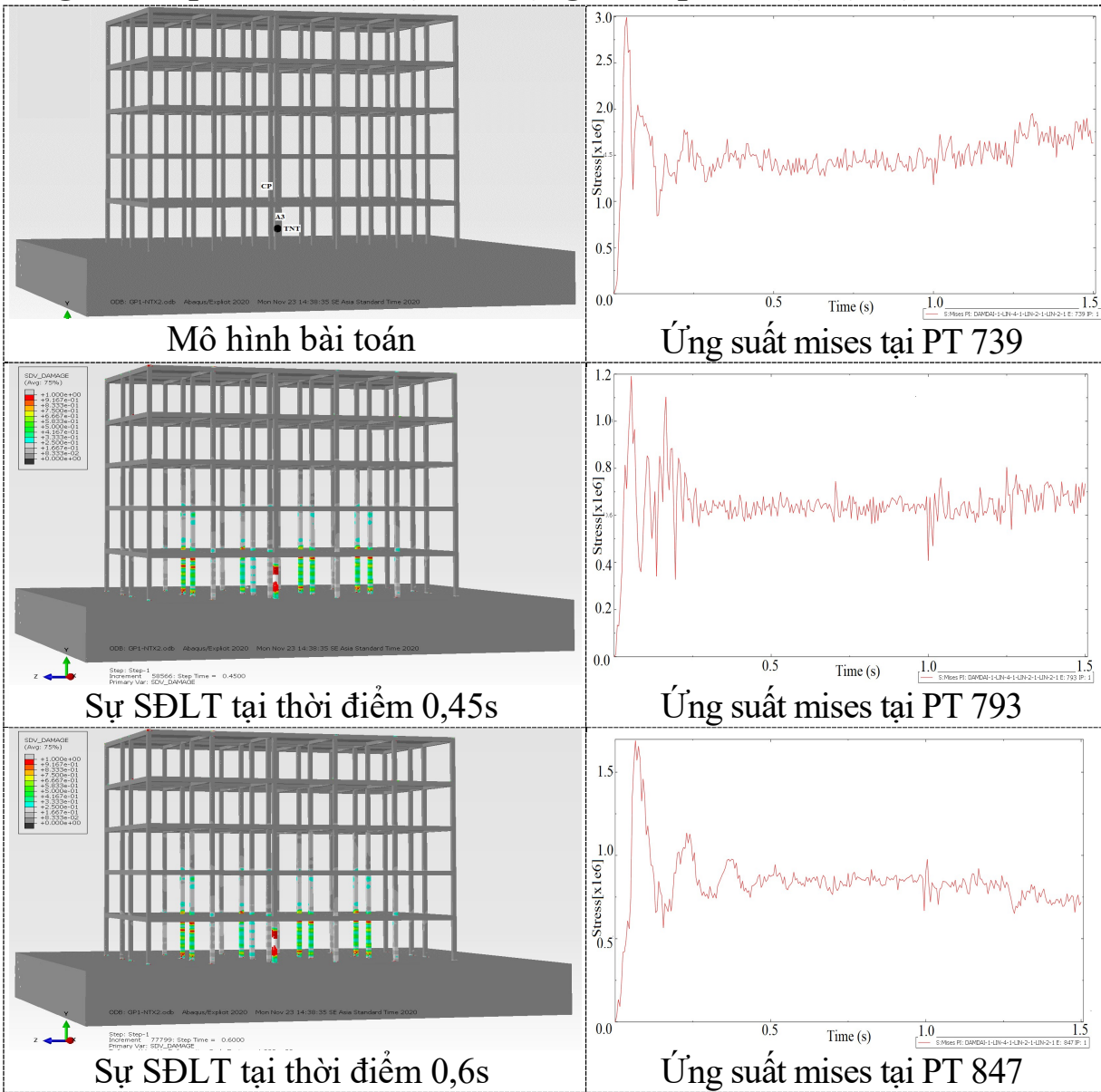


Sự SĐLT tại thời điểm 0,85s

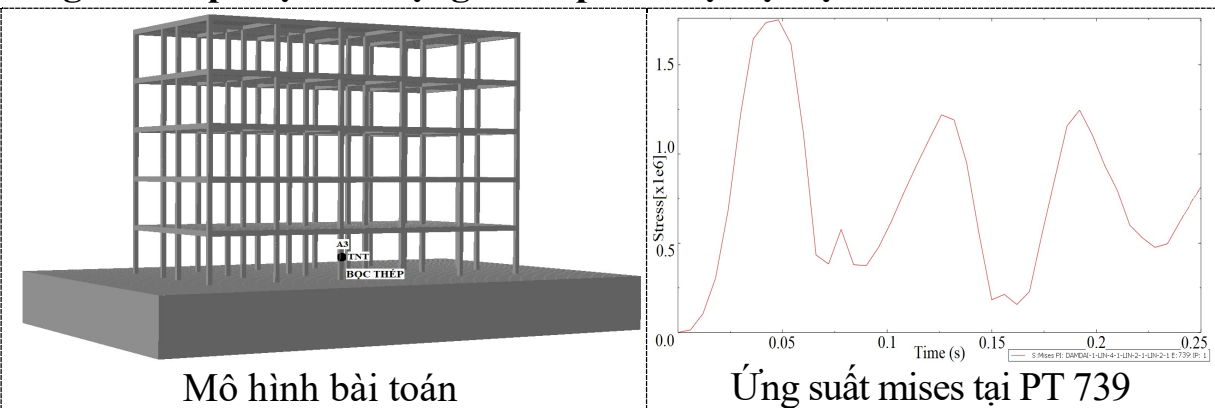


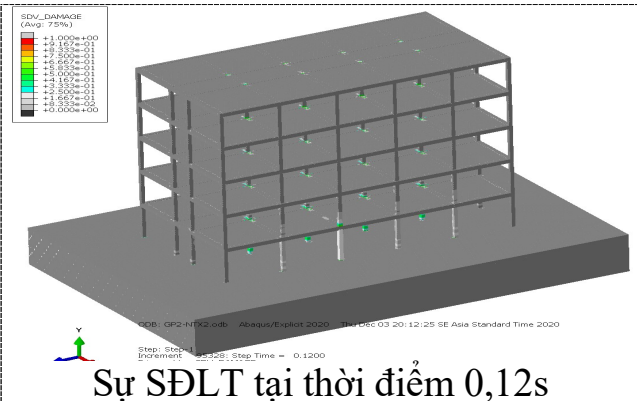
Ứng suất mises tại PT 847

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

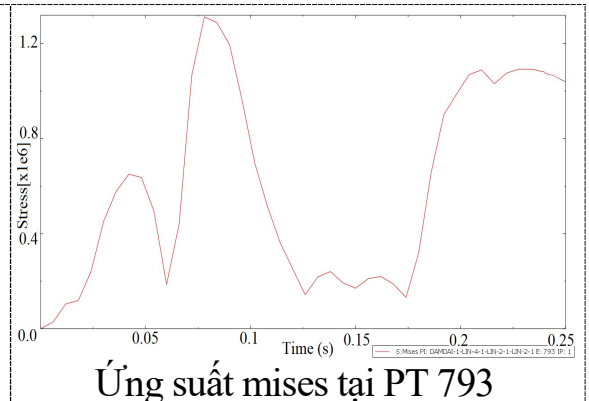


4.5. Giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép chịu tác dụng nổ tiếp xúc đặt tại cột A3

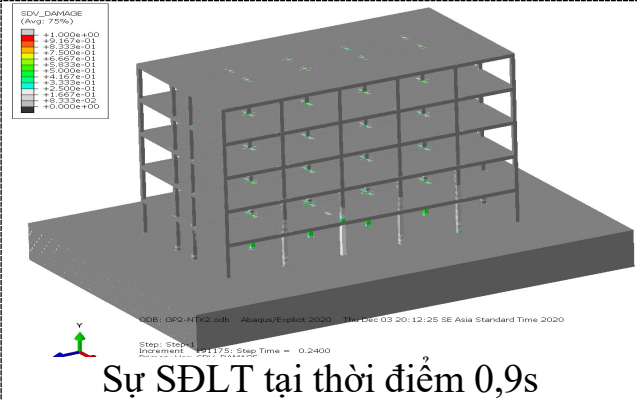




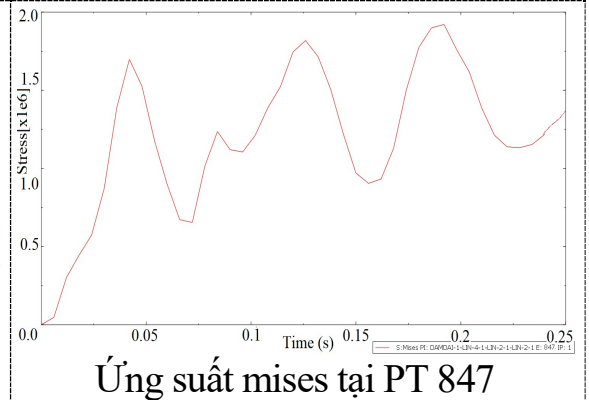
Sự SĐLT tại thời điểm 0,12s



Ứng suất mises tại PT 793

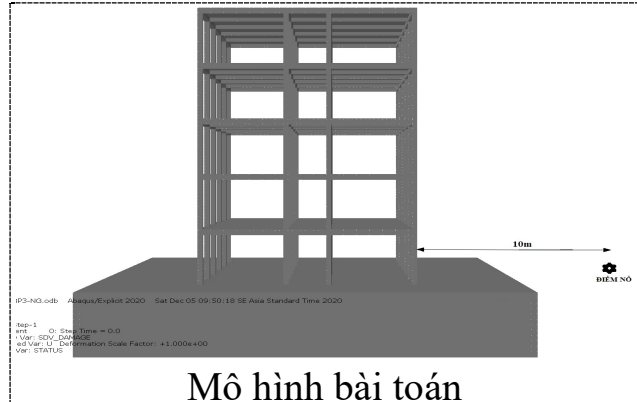


Sự SĐLT tại thời điểm 0,9s

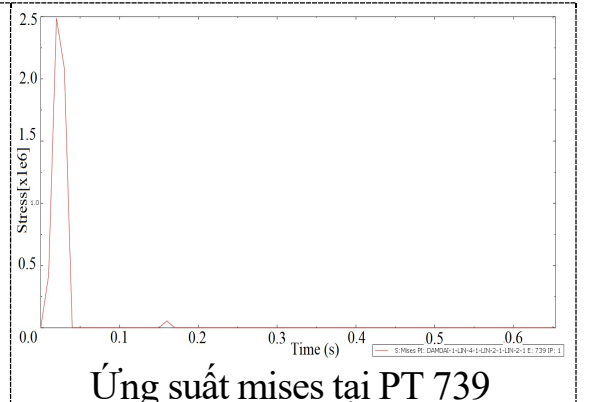


Ứng suất mises tại PT 847

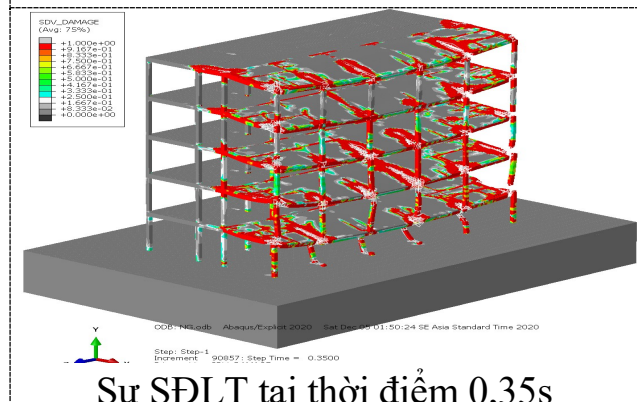
4.6. Nghiên cứu sụp đổ lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần



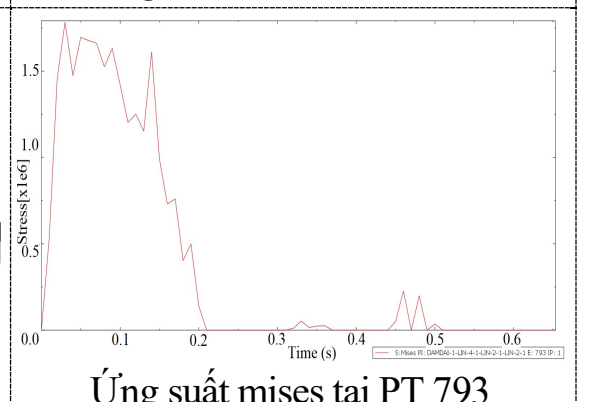
Mô hình bài toán



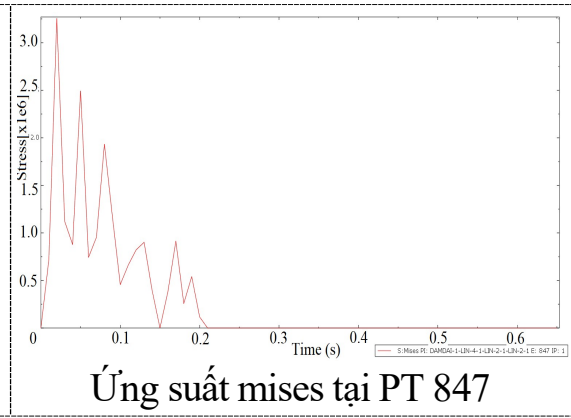
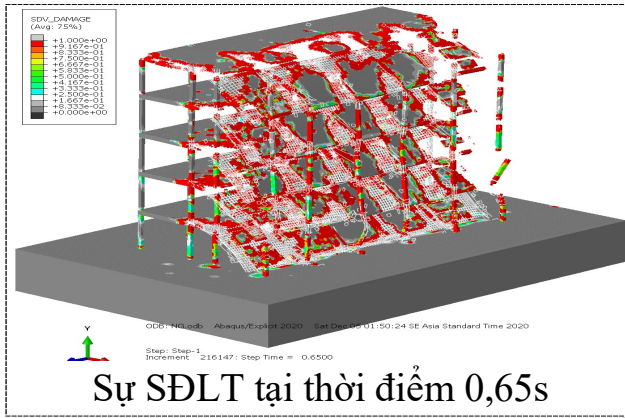
Ứng suất mises tại PT 739



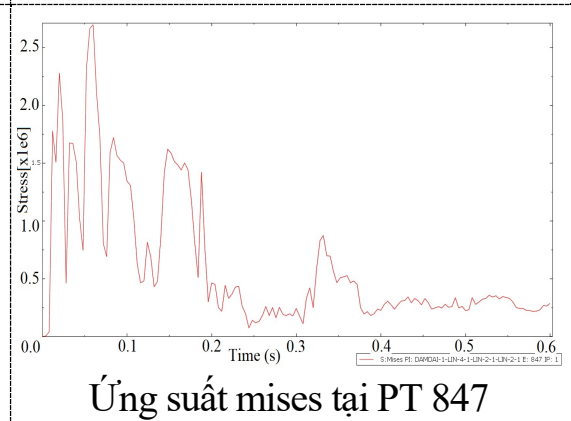
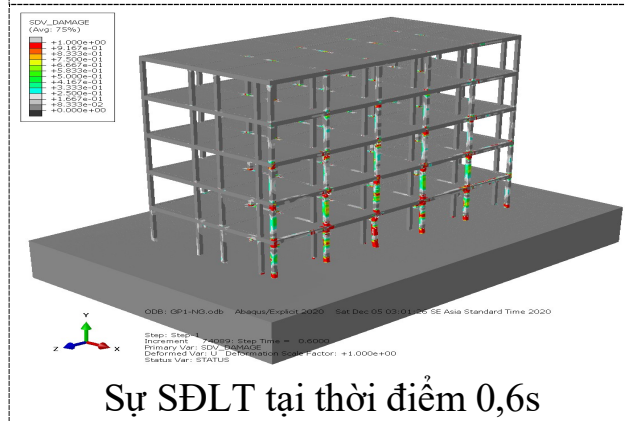
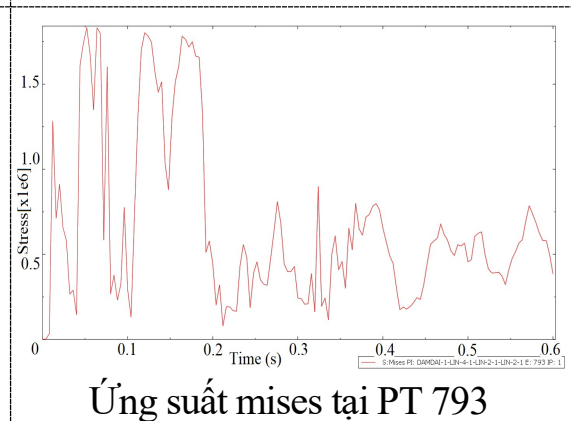
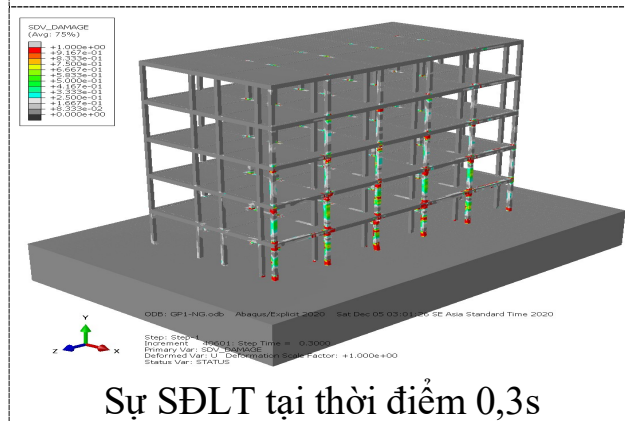
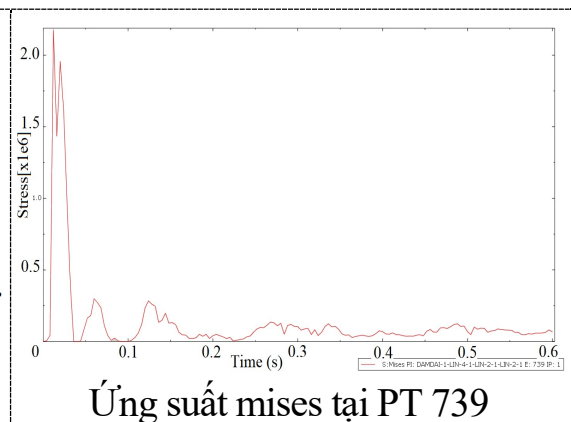
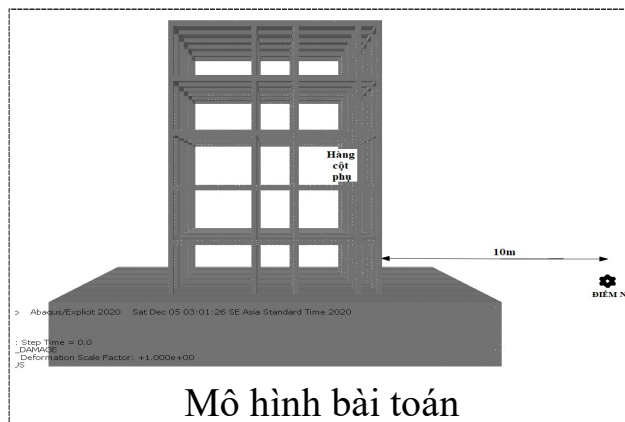
Sự SĐLT tại thời điểm 0,35s



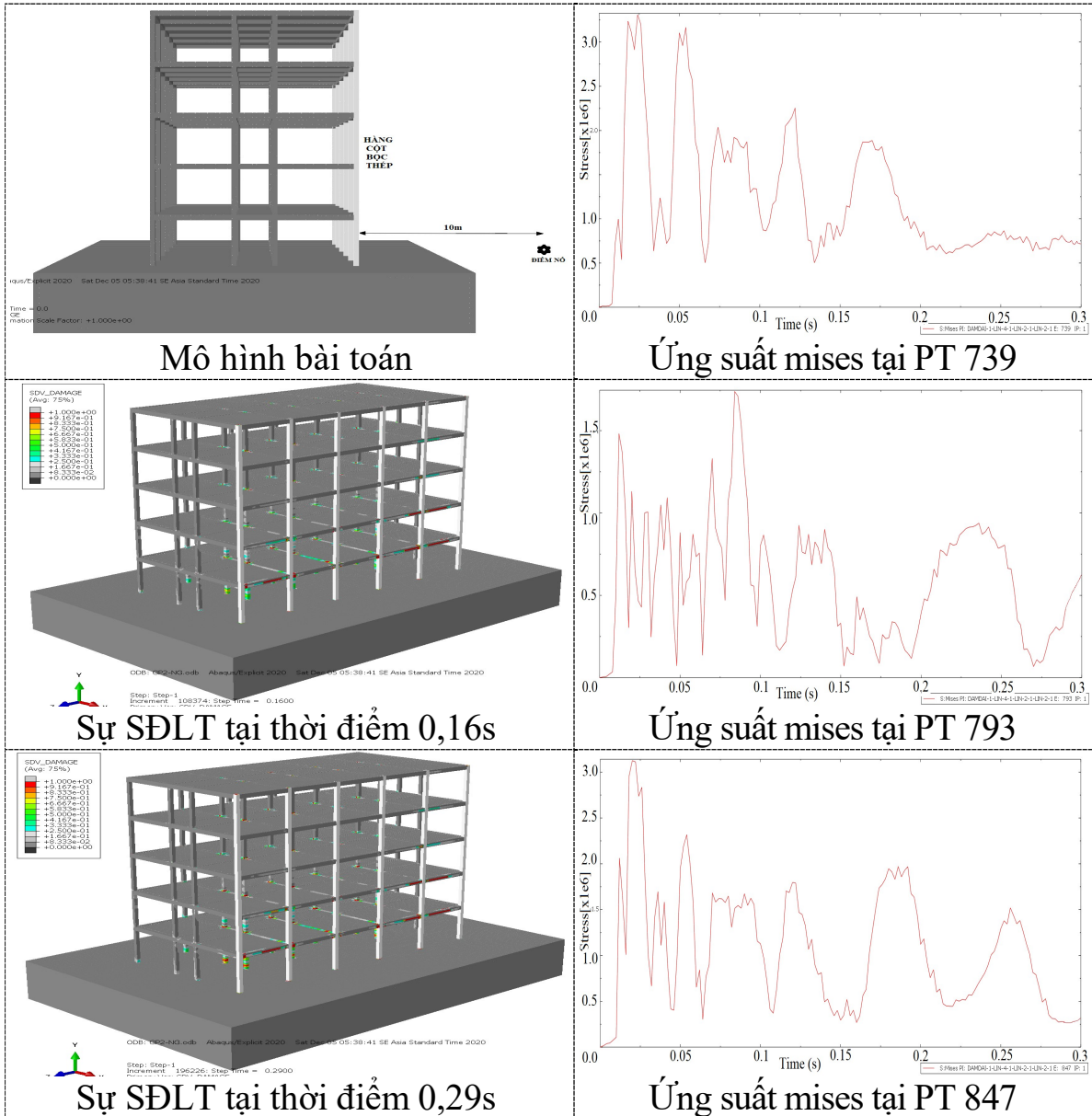
Ứng suất mises tại PT 793



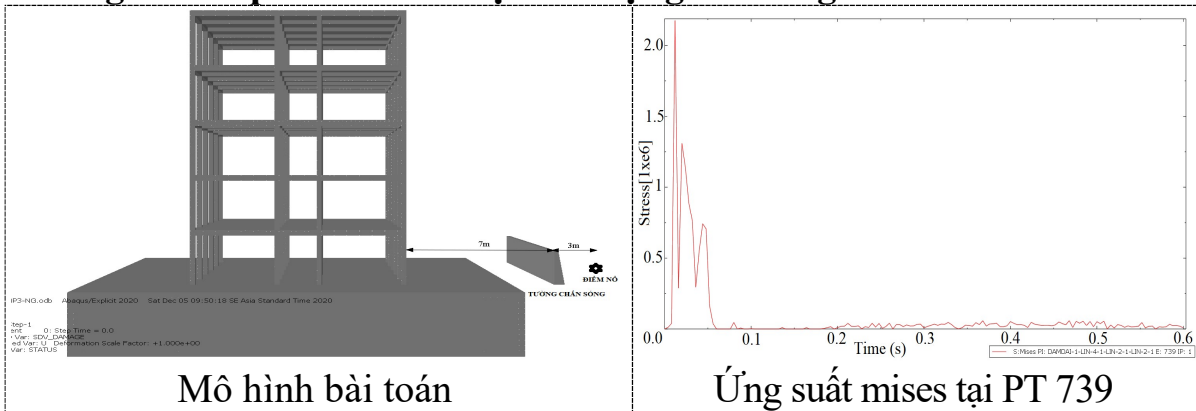
4.7. Giải pháp thêm cột phụ để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần

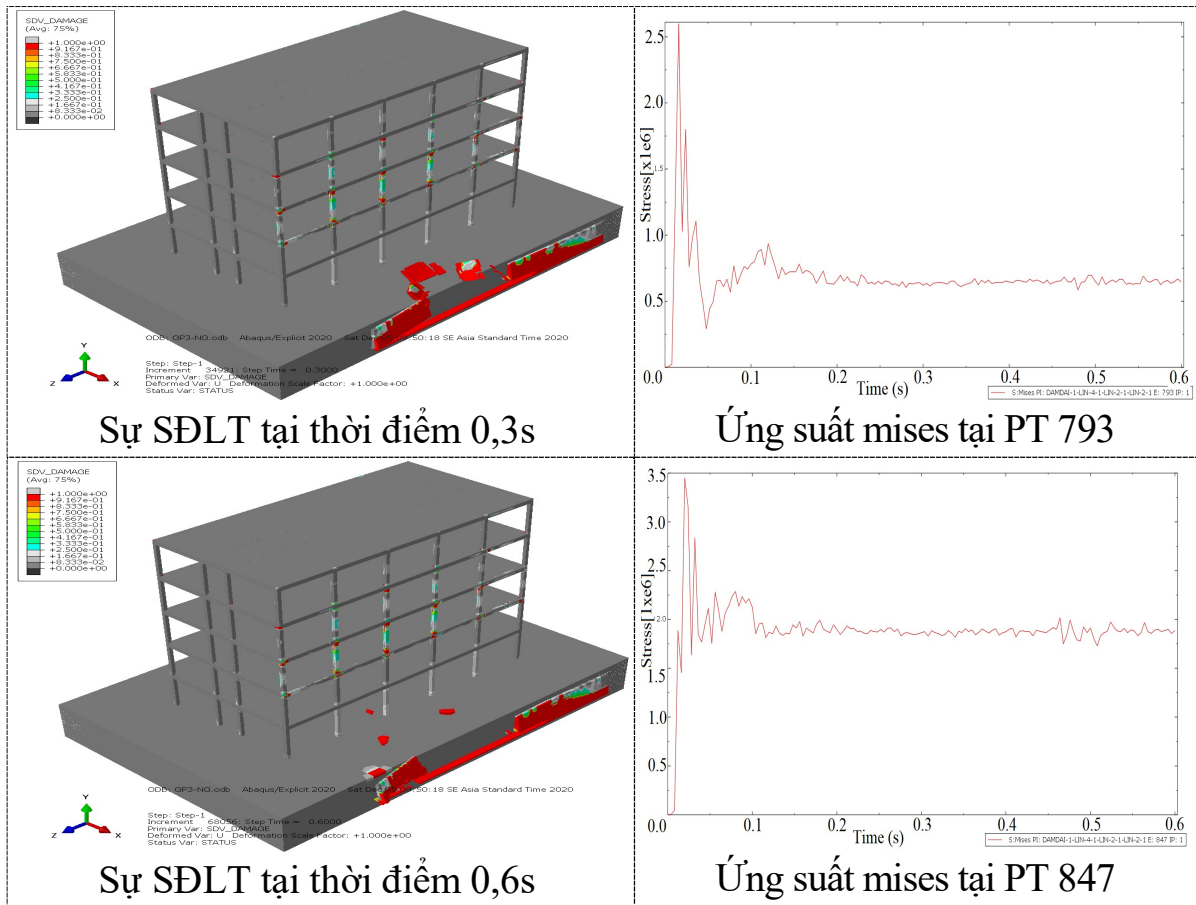


4.8. Giải pháp bọc thép cột để kháng sập lũy tiến của khung bê tông cốt thép toàn khối chịu tác dụng của nổ gần



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





4.10. Kết luận của chương 4

Trong chương 4, tác giả đã 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.

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 lũy 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, bao gồm: 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 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

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.