



# RESEARCH ON NUMERICAL MODELS TO SIMULATE THE BLAST LOADS ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING ABAQUS SOFTWARE

Le Ba Danh

Hanoi University of Civil Engineering, No 55 Giai Phong Street, Hanoi, Vietnam

## ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 05/03/2024

Revised: 31/03/2024

Accepted: 09/04/2024

Published online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.11>

\* *Corresponding author*

Email: danhlb@huce.edu.vn

**Abstract.** To minimize damage caused by explosive loads on reinforced concrete structures, research on the impact of this load on reinforced concrete structures is extremely necessary. From there, there are appropriate structural and material solutions. This paper presents the results of research on numerical models simulating blast loads on reinforced concrete structures using Abaqus software. Three numerical models to simulate explosive loads used in Abaqus software are studied, including: Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), equivalent explosive mass and combined Lagrangian - Eulerian method. Numerical simulation research results were performed on reinforced concrete slabs with dimensions of 1000x1000x60mm. The explosive load studied was TNT explosive placed 5cm from the open surface of the reinforced concrete slab. Concrete is modeled as a brittle material and follows the Johnson-Holmquist-II (JH-2) model. The Elasto-plastic model is used to simulate the reinforcement. The damage and destruction on the top and bottom surfaces and the mechanical behavior of the slab under the blast load are analyzed and compared between experiments and simulations to evaluate the effectiveness of usage models.

**Keywords:** Reinforced concrete, Abaqus software, blast load, numerical model, finite element method.

@2024 University of Transport and Communications



# NGHIÊN CỨU CÁC MÔ HÌNH SỐ MÔ PHÒNG TẢI TRỌNG NỔ LÊN KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG PHẦN MỀM ABAQUS

Lê Bá Danh

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

## THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/03/2024

Ngày nhận bài sửa: 31/03/2024

Ngày chấp nhận đăng: 09/04/2024

Ngày xuất bản Online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.11>

\* Tác giả liên hệ

Email: danhb@huce.edu.vn

**Tóm tắt.** Để hạn chế tối đa thiệt hại do tải trọng nổ lên các công trình bê tông cốt thép, việc nghiên cứu về tác động của tải trọng này lên kết cấu bê tông cốt thép là hết sức cần thiết, để từ đó có các giải pháp về mặt kết cấu, giải pháp về vật liệu phù hợp. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu các mô hình số mô phỏng tải trọng nổ lên kết cấu bê tông cốt thép sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn Abaqus. Ba mô hình số mô phỏng tải trọng nổ được sử dụng trong phần mềm Abaqus được nghiên cứu gồm: Phương pháp không lưới (SPH), phương pháp sử dụng khối nổ tương đương và phương pháp kết hợp Lagrangian – Eulerianian. Kết quả nghiên cứu mô phỏng số và thực nghiệm được thực hiện trên tấm bê tông cốt thép có kích thước 1000x1000x60mm. Tải trọng nổ nghiên cứu là thuốc nổ TNT được đặt cách mặt thoáng của tấm bê tông cốt thép 5cm. Bê tông được mô phỏng tuân theo mô hình Johnson–Holmquist-II (JH-2). Mô hình đàn dẻo được sử dụng để mô phỏng cốt thép. Sự hư hại và phá hủy ở mặt trên, mặt dưới và ứng xử cơ học của các mẫu thí nghiệm dưới tác động của tải trọng nổ được phân tích và so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng để đánh giá hiệu quả của các mô hình sử dụng.

**Từ khóa:** Bê tông cốt thép, phần mềm Abaqus, tải trọng nổ, mô hình số, phương pháp phần tử hữu hạn.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, tình hình thế giới có nhiều biến động, trong đó chiến tranh, các hoạt động khủng bố đang diễn ra càng ngày càng phức tạp ở các nước trên thế giới. Việc sử dụng

nhiều loại tải trọng nổ khác nhau đã gây ra rất nhiều thiệt hại về con người cũng như cơ sở vật chất. Có thể thấy rằng, trong chiến tranh hoặc các hoạt động khủng bố, các công trình giao thông huyết mạch như các cây cầu, hoặc các công trình dân sự và quân sự sẽ trở thành mục tiêu đánh phá của đối phương. Trong cuộc chiến tranh giữa Nga và Ukraine, ngày 8/10/2022 Ukraine đã tấn công cầu Crimea (cây cầu huyết mạch của Nga nối với bán đảo Crimea) bằng một xe tải chở 21 tấn thuốc nổ tương đương 42 tên lửa Kinzhal. Vụ đánh bom xe khiến cầu Crimea hư hại nặng và 3 người thiệt mạng. Kể từ vụ đánh bom này, cầu Crimea ngày càng nhiều lần trở thành mục tiêu tập kích của quân đội Ukraine, trong đó có các cuộc tấn công bằng máy bay không người lái (UAV) và xuồng tự sát chứa thuốc nổ [1]. Ở Việt Nam, một vụ nổ ở nhà máy Nhà máy Z121 thuộc Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng (Bộ Quốc phòng) đóng trên địa bàn xã Khải Xuân và Võ Lao, huyện Thanh Ba, Phú Thọ đã xảy ra vào ngày 12/10/2013 đã làm thiệt hại nặng nề về người và các công trình xây dựng.

Để hạn chế tối đa các thiệt hại do tải trọng nổ gây ra lên các công trình dân sự và quân sự, việc nghiên cứu về tác động của tải trọng này lên các công trình là hết sức cần thiết, để từ đó có các giải pháp về kết cấu, giải pháp về vật liệu phù hợp cho các công trình này từ lúc thiết kế hoặc để gia cường các công trình ở thời điểm hiện tại. Tải trọng nổ có thể được kích hoạt khi tiếp xúc với công trình hoặc ở một khoảng cách nhất định. Nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nổ lên công trình có thể được thực hiện theo hai cách: bằng phương pháp thử nghiệm phá hủy và thử nghiệm không phá hủy. Phương pháp thử nghiệm phá hủy là thực hiện các thí nghiệm nổ trực tiếp để đánh giá ảnh hưởng của tải trọng nổ lên công trình. Phương pháp này rất phức tạp, có nhiều hạn chế: (i) cần sự cho phép của cơ quan chức năng khi thực hiện thí nghiệm; (ii) cần hệ thống máy móc và thiết bị đo có độ chính xác cao; (iii) mất nhiều thời gian và chi phí cho công tác thí nghiệm và xử lý kết quả, đặc biệt là khi thực hiện thí nghiệm trên các công trình có quy mô lớn. Để hạn chế các nhược điểm của phương pháp phá hủy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nổ lên công trình bằng phương pháp không phá hủy ngày càng được sử dụng phổ biến. Cách tiếp cận của phương pháp này có thể dựa trên kết quả phân tích hoặc mô phỏng số. Việc thực nghiệm nếu cần chỉ thực hiện trên các mẫu nhỏ, tiến hành đơn giản, chi phí thấp.

Đặc tính của tải trọng nổ là cường độ cao và thời gian diễn ra nhanh. Sau khi khối nổ được kích nổ sẽ giải phóng một nguồn năng lượng lớn dưới dạng các sóng nổ. Áp lực của các sóng nổ này sẽ tác động trực tiếp lên công trình gây ra sự phá hoại của vật liệu và kết cấu, từ đó có thể dẫn đến sự sụp đổ hoàn toàn công trình [2]. Việc sử dụng phương pháp số để mô phỏng lại quá trình lan truyền của sóng nổ và ảnh hưởng của nó lên kết cấu công trình sẽ giúp các kỹ sư hiểu rõ hơn về bản chất vật lý của vấn đề, từ đó đưa ra các thiết kế phù hợp. Một trong những phương pháp số được sử dụng phổ biến hiện nay để mô phỏng tải trọng nổ là phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method – FEM). Các mô hình tải trọng nổ bằng FEM đã được đưa vào các phần mềm thương mại như LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS, ANSYS,... Trong đó, tải trọng nổ thường quy về thuốc nổ tiêu chuẩn TNT.

Ở Việt Nam, việc nghiên cứu ứng xử của bê tông cốt thép dưới tác động của tải trọng nổ được thực hiện trong vài năm trở lại đây [[3], [4]]. Do những hạn chế về thiết bị máy móc, nên công tác thực nghiệm tải trọng nổ ở nước ta còn gặp một số khó khăn. Do đó, việc hiểu và nắm sâu về lý thuyết mô phỏng nổ sẽ góp phần giải quyết được các bài toán thực tế một cách dễ dàng hơn, đỡ tốn kém chi phí.

Nội dung của nghiên cứu này sẽ giới thiệu về lý thuyết của các phương pháp số trong FEM để mô phỏng về sự lan truyền của sóng nổ. Nghiên cứu được thực hiện trên phần mềm thương mại Abaqus CAE. Các thí nghiệm mô phỏng số cho các trường hợp này sẽ được thực hiện và

so sánh với kết quả thí nghiệm thực tế để khẳng định tính đúng đắn của mô hình sử dụng. Bài báo kết thúc bằng phần kết luận và kiến nghị.

## 2. LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP

Để mô tả được chính xác hơn các hiện tượng vật lý xảy ra trong quá trình nghiên cứu về tải trọng nổ, phương pháp số là một lựa chọn tối ưu. Thông qua phương pháp số, cơ chế lan truyền sóng nổ, tác động của sóng nổ lên vật liệu, kết cấu, ứng xử của kết cấu sẽ được mô tả và thể hiện rõ ràng. Phương pháp số sử dụng phổ biến hiện nay trên thế giới để nghiên cứu về tải trọng nổ là FEM. Nghiên cứu này sẽ giới thiệu về FEM được sử dụng trong phần mềm Abaqus để mô phỏng về tải trọng nổ.

### 2.1. Thuật toán sử dụng

Trong FEM, để phân tích bài toán động, hai thuật toán được sử dụng phổ biến là thuật toán Implicit và Explicit [5]. Tùy thuộc vào bài toán thực tế mà lựa chọn thuật toán phù hợp để có thể mô phỏng lại được chính xác nhất sự làm việc của vật liệu. Thông thường, với các bài toán động (tải trọng lớn, thời gian diễn ra nhanh), việc nghiên cứu ứng xử của vật liệu trong miền đàn hồi (tuyến tính) thì thuật toán Implicit phù hợp để sử dụng. Ngược lại, nếu việc tính toán ứng xử cơ học của vật liệu ngoài miền đàn hồi, phi tuyến thì thuật toán Explicit lại được ưu tiên sử dụng [6]. Với mục đích nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nổ tới sự hư hại của vật liệu, kết cấu, thuật toán Explicit trong FEM sẽ được lựa chọn sử dụng (Abaqus/Explicit).

Trong phần mềm Abaqus/Explicit, phương trình chuyển động của phần tử tại các bước thời gian được tính như sau [7]:

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (1)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1/2)} \quad (2)$$

Trong đó,  $u$  là vận tốc của phần tử,  $\dot{u}$  là gia tốc của phần tử, chỉ số  $i$  là số bước thời gian. Trạng thái động tính toán tại bước thời gian thứ  $i$  sẽ được xác định thông qua các giá trị đã biết của  $\dot{u}^{(i-1/2)}$  và  $\ddot{u}^{(i)}$  từ bước thời gian trước đó.

### 2.2. Mô hình tải trọng nổ

Để mô phỏng tải trọng nổ và sự lan truyền của sóng nổ, ba mô hình đã được sử dụng trong phần mềm Abaqus, gồm: Phương pháp không lưới, phương pháp sử dụng khối nổ tương đương và phương pháp kết hợp Lagrangian – Eulerianian.

Các nghiên cứu [4], [8], [9], [10] đã sử dụng phương pháp không lưới SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) để mô phỏng sự lan truyền của sóng nổ lên các tấm bê tông cốt thép.

Trong phương pháp SPH, khối nổ được chia thành các hạt rời rạc. Các hạt này được đại diện bởi vị trí, khối lượng, vận tốc, lực, 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. Khi nổ, các hạt rời rạc sẽ có các vận tốc ban đầu rất lớn, khi các hạt này va chạm với vật liệu bê tông cốt thép sẽ gây ra tác động cơ học dẫn đến phá hoại. Trường hợp này thường dùng mô phỏng cho các trường hợp nổ tiếp xúc. Tức là khối nổ nằm trực tiếp trên vật thể.

Với các trường hợp khối nổ ở khoảng cách nhất định so với vật thể, sóng nổ sẽ lan truyền thông qua môi trường xung quanh khối nổ (khí, chất lỏng,...). Để mô phỏng chính xác áp lực của sóng nổ này khi tới bề mặt của vật thể, một số mô hình số trong phần tử hữu hạn có thể

được sử dụng để mô phỏng lại môi trường xung quanh khối nổ. Phương pháp khá phổ biến mô phỏng khối nổ trong trường hợp này là mô hình tải trọng nổ tương đương CONWEP [11], [12], [13]. Phương pháp này sử dụng công thức thực nghiệm trong đó tác động nổ chỉ phụ thuộc vào khối lượng thuốc nổ và khoảng cách đến bề mặt tiếp xúc của kết cấu, hay còn gọi là phương pháp khối nổ tương đương. Phương pháp này không cần mô hình hóa lượng nổ và môi trường xung quanh, nên thời gian tính toán sẽ nhanh hơn.

Tuy nhiên, trong một số trường hợp phức tạp, cần biểu thị sự lan truyền của sóng nổ thông qua môi trường xung quanh một cách chính xác, phương pháp kết hợp Lagrangian - Eulerian (Coupled Eulerian-Lagrangian) được sử dụng, trong đó kết hợp đồng thời của cả thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian [14], [15]. Phương pháp này có ưu điểm là khắc phục được những hạn chế của từng thuật toán, cho phép các nhà nghiên cứu giải quyết các bài toán biến dạng lớn, phù hợp với bài toán tải trọng nổ phá. Với phương pháp này, các thành phần như lượng nổ, môi trường không khí và kết cấu đều được mô hình hóa đầy đủ và khắc phục những thiếu sót của phương pháp Lagrangian thuần túy.

Các vật liệu không khí và thuốc nổ TNT, cũng như tất cả các chất lỏng và khí nói chung, được mô hình hóa bằng cách sử dụng các phương trình trạng thái (EOS), tức là không khí sử dụng khí lý tưởng (equations of state - EOS). Thuốc nổ TNT đã được định nghĩa bởi phương trình trạng thái Jones-Wilkins-Lee (JWL), mô hình hóa áp suất được tạo ra khi giải phóng năng lượng hóa học trong vụ nổ [7].

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left( -R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left( -R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \omega \rho E_m \quad (3)$$

Trong đó:

$P$ : Áp lực tạo ra bởi khối thuốc nổ.

$A, B, R_1, R_2, \omega$ : các hằng số liên quan tới vật liệu nổ.

$\rho_0$ : Mật độ của thuốc nổ ở trạng thái tinh thể trước khi nổ.

$\rho$ : Mật độ hiện tại của thuốc nổ.

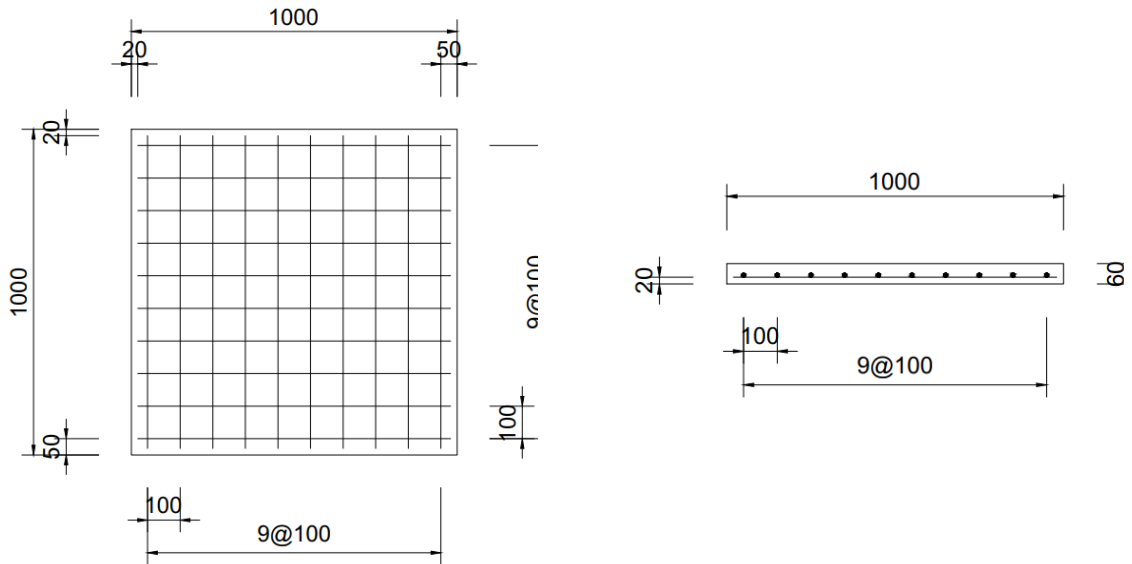
$E_m$ : Năng lượng ban đầu bên trong của thuốc nổ.

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Nghiên cứu sẽ tiến hành mô phỏng ảnh hưởng của tải trọng nổ (TNT) lên tấm bê tông cốt thép theo hai mô hình: CONWEP và mô hình kết hợp Lagrangian – Eulerian. Kết quả về sự phá hoại của tấm bê tông cốt thép dưới tác dụng của tải trọng nổ được nghiên cứu và so sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng số.

#### 3.1. Vật liệu và mẫu bê tông cốt thép sử dụng

Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng được thực hiện trên tấm bê tông cốt thép có kích thước 1000x1000x60mm (Hình 1). Kích thước của tấm bê tông cốt thép được lựa chọn dựa trên các trên nguyên tắc: (i) thuận tiện cho công tác thực nghiệm hiện trường, (ii) phản ánh được gần nhất ứng xử thực tế của kết cấu.



Hình 1. Kích thước mẫu bê tông cốt thép sử dụng.

Bê tông sử dụng trong nghiên cứu có cấp phối được thể hiện trong Bảng 1. Tính chất cơ lý của bê tông được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 1. Cấp phối bê tông sử dụng.

Mác bê tông	Cát vàng kg	Xi măng PCB40 kg	Đá 1x2 kg	Nước kg
M300	626	395	1210	183

Bảng 2. Tính chất cơ lý của bê tông sử dụng trong nghiên cứu.

Mác bê tông	Cường độ chịu nén MPa	Cường độ chịu kéo MPa	Modul đàn hồi GPa
M300	30	3	30

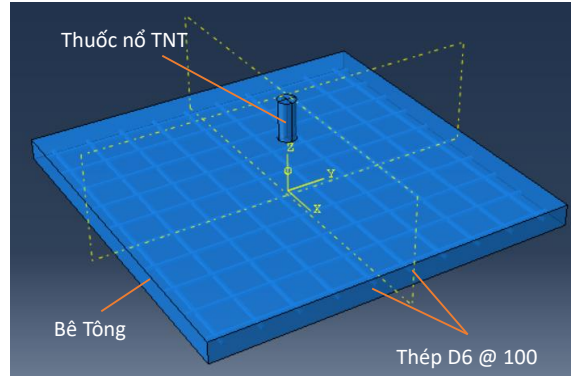
Cốt thép sử dụng loại thép tròn trơn CB300-T đường kính  $\varnothing 6$  với các đặc trưng cơ lý tuân theo tiêu chuẩn TCVN 1651:2008.

### 3.2. Thuốc nổ sử dụng

Thuốc nổ sử dụng là TNT có dạng hình trụ với các thông số như sau: khối lượng 0,5kg, đường kính 50mm, chiều cao 180mm. Khối nổ được treo cách mặt trên của mẫu bê tông cốt thép một khoảng cách 50mm (Hình 2).



(a) Tải trọng nổ TNT



(b) Mô hình thí nghiệm trong Abaqus

Hình 2. Tải trọng nổ thực nghiệm và mô hình số trong Abaqus.

### 3.3. Kết quả mô phỏng nổ

Mô hình SPH thường thích hợp để mô phỏng các trường hợp nổ trong đó thuốc nổ tiếp xúc với kết cấu. Trong nghiên cứu này, khối nổ được đặt cách tấm bê tông một khoảng cách 50mm, nên hai mô hình CONWEP và kết hợp Lagrangian – Eulerian được lựa chọn để sử dụng. Quá trình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Abaqus với thuật toán Explicit.

Bê tông là loại vật liệu có tính “giòn” – cường độ chịu nén cao tuy nhiên khả năng chịu kéo lại thấp hơn nhiều lần và có xu hướng tích lũy phá hoại dưới tác động của nhiều loại tải trọng đặc biệt là tải trọng do lan truyền sóng. Mô hình mô phỏng sự phá hoại Johnson-Holmquist [16] là một trong những mô hình rất phù hợp để mô phỏng sự phá hoại của bê tông dưới tác dụng của sóng nổ. Trong nghiên cứu này, vật liệu bê tông được mô phỏng theo mô hình Johnson-Holmquist-II (JH-2) [16]. Theo mô hình này, sự làm việc của bê tông phụ thuộc vào 3 yếu tố là: cường độ, sự phá hoại và áp lực. Trong khi đó, mô hình đàn dẻo được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của cốt thép. Chi tiết các thông số của bê tông và cốt thép sử dụng được tham khảo từ nghiên cứu [17].

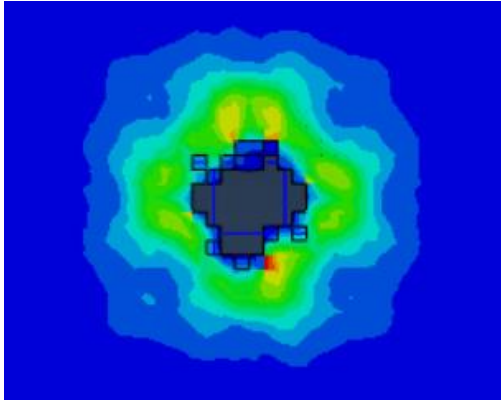
Để mô phỏng tải trọng nổ bằng mô hình CONWEP trong phần mềm Abaqus, việc khai báo khối lượng và khoảng cách nổ sẽ là bắt buộc. Thông qua các thông số này, phần mềm sẽ tự động tính toán áp lực của sóng nổ lên bề mặt của tấm bê tông cốt thép.

Các thông số của phương trình trạng thái Jones-Wilkins-Lee (JWL) của thuốc nổ TNT theo phương pháp kết hợp Lagrangian – Eulerian được thể hiện trong Bảng 3.

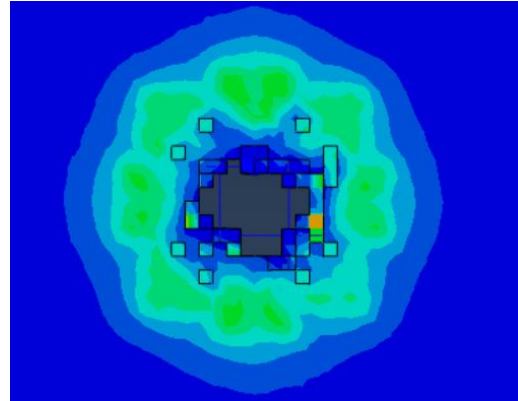
Bảng 3. Thông số TNT sử dụng với mô hình Lagrangian – Eulerian [18].

Vật liệu	Loại	Tính chất	Giá trị	Đơn vị
TNT	Tỷ trọng	Trọng lượng riêng	1630	Kg/m <sup>3</sup>
	JWL	$A$	373770000000	N/m <sup>2</sup>
		$B$	3747100000	N/m <sup>2</sup>
		$\omega$	0,35	-
		$R_1$	4,15	-
		$R_2$	0,9	-
	$E_m$	0	N/m <sup>2</sup>	

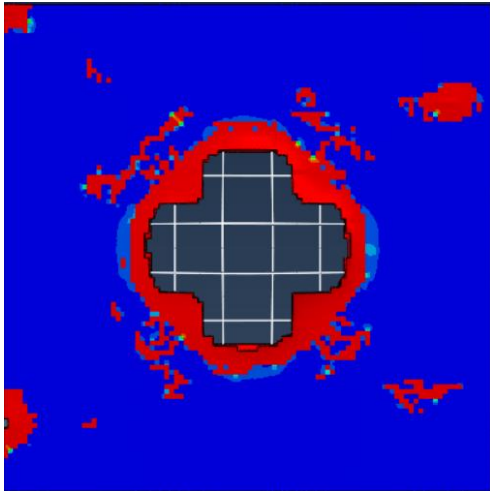
Kết quả so sánh sự phá hoại mặt trên và mặt dưới của tấm bê tông cốt thép theo mô hình số và thực nghiệm được thể hiện trong Hình 3. Với tải trọng nổ TNT có khối lượng 0,5kg, đặt cách bề mặt tấm bê tông cốt thép 50mm, sẽ gây ra phá hoại dưới dạng lỗ thủng ở trên bề mặt của tấm. Kết quả thực nghiệm cho thấy kích thước lỗ thủng ở mặt trên của tấm khoảng 9cm (Hình 3(e)), kích thước lỗ thủng mặt dưới là 10cm (Hình 3(f)).



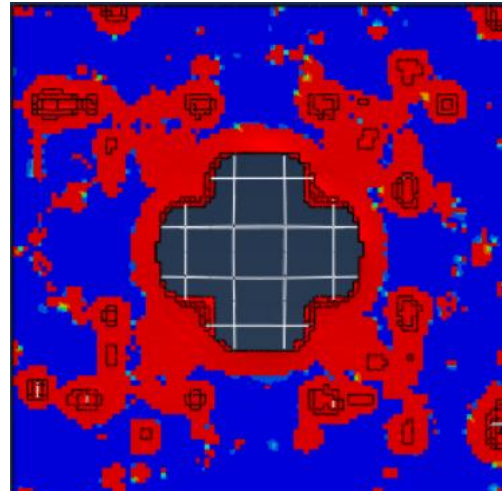
(a) Phá hoại mặt trên theo mô hình CONWEP



(b) Phá hoại mặt dưới theo mô hình CONWEP



(c) Phá hoại mặt trên theo mô hình Lagrangian - Eulerianian



(d) Phá hoại mặt dưới theo mô hình Lagrangian - Eulerianian



(e) Phá hoại mặt trên theo thực nghiệm



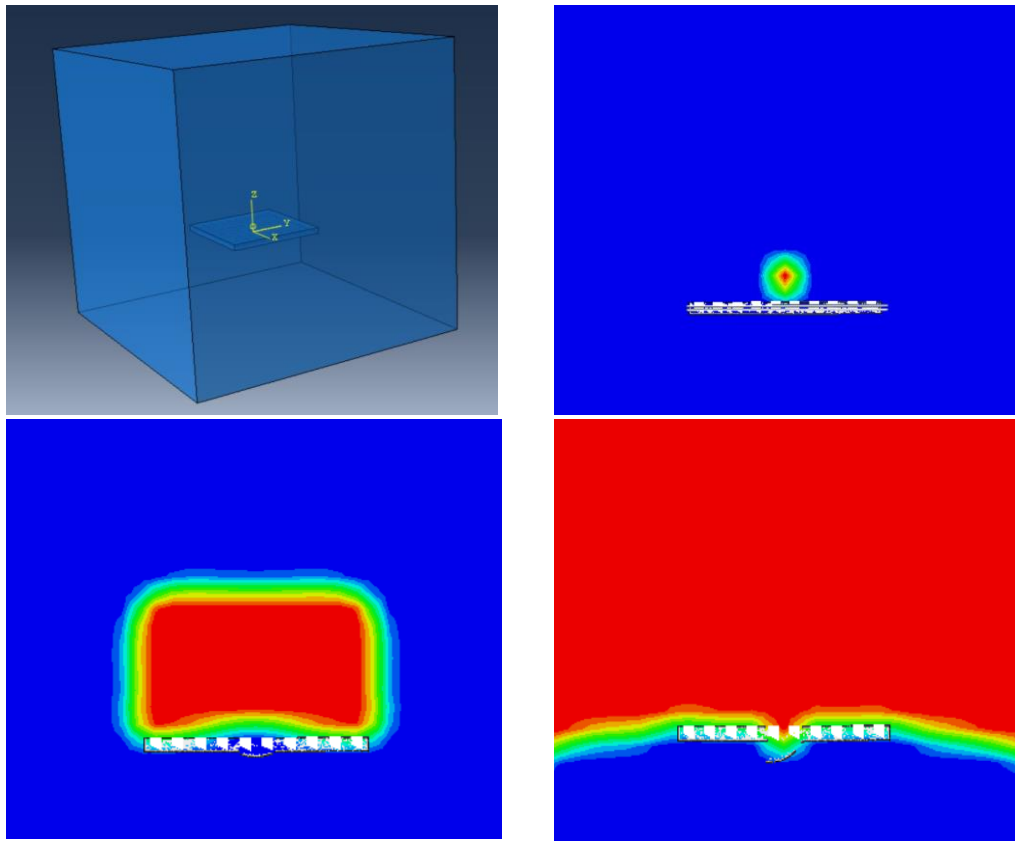
(f) Phá hoại mặt dưới theo thực nghiệm

Hình 3. Kết quả mô hình số và thực nghiệm.



Với mô hình nổ CONWEP, kết quả mô phỏng cho thấy tấm bê tông cốt thép cũng bị phá hoại và hình thành lỗ thủng như kết quả thực nghiệm. Kích thước lỗ thủng ở mặt trên của tấm bê tông cốt thép theo mô hình CONWEP là 10,5cm (Hình 3(a)) và của mặt dưới là 11 cm (Hình 3(b)). Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng thu được bằng mô hình nổ CONWEP là khá sát với kết quả thực nghiệm.

Mô hình nổ theo phương pháp Lagrangian – Eulerianian, kết quả mô phỏng cũng cho thấy tấm bê tông cốt thép bị phá hoại có dạng lỗ thủng giống thực nghiệm. Tuy nhiên, kích thước lỗ thủng ở mặt trên và mặt dưới của tấm bê tông cốt thép là khá lớn so với kết quả thực nghiệm. Cụ thể, kết quả mô phỏng cho kích thước lỗ thủng ở mặt trên và mặt dưới lần lượt là 40cm và 41cm ((Hình 3(c,d)). Kết quả này lớn hơn khá nhiều so với kết quả thực nghiệm.



Hình 4. Quá trình lan truyền của sóng nổ theo mô hình Lagrangian – Eulerianian.

Có thể thấy rằng, hai mô hình tải trọng nổ theo CONWEP và kết hợp Lagrangian – Eulerianian đều cho ra kết quả phá hoại ở hai mặt tấm bê tông cốt thép. Kết quả này giống với kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng kích thước phá hoại ở mặt trên và mặt dưới của tấm bê tông cốt thép theo mô hình CONWEP là sát hơn so với kết quả thực nghiệm so với phương pháp Lagrangian – Eulerianian. Vì phương pháp Lagrangian – Eulerianian phải đưa vào nhiều thông số hơn khi khai báo tải trọng nổ và môi trường xung quanh, nên ảnh hưởng của đầu vào tới kết quả cũng sẽ nhiều hơn so với phương pháp CONWEP. Tuy nhiên, phương pháp này lại cho phép quan sát được quá trình lan truyền vật lý của sóng nổ ảnh hưởng tới tấm bê tông cốt thép từ đó sẽ hiểu được rõ hơn bản chất của quá trình lan truyền sóng nổ và ảnh hưởng của nó lên kết cấu. Điều này là khá quan trọng, giúp cho việc tính toán, thiết kế được chính xác hơn.

Hình 4 mô tả quá trình lan truyền của sóng nổ từ khi khối nổ được kích hoạt, tới khi sóng nổ tác dụng lên tấm bê tông cốt thép. Sóng nổ sẽ gồm hai thành phần gây ra áp suất nén và kéo trong quá trình lan truyền. Khi sóng này tác động vào tấm bê tông cốt thép sẽ gây ra áp lực bề mặt và gây ra sự phá hoại của tấm.

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã giới thiệu về các mô hình số mô phỏng tải trọng nổ lên tấm bê tông cốt thép sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn Abaqus. Ba mô hình số mô phỏng tải trọng nổ được sử dụng trong phần mềm Abaqus được nghiên cứu gồm: Phương pháp không lưới (SPH), phương pháp sử dụng khối nổ tương đương và phương pháp kết hợp Lagrangian – Eulerianian. Nghiên cứu đã phân tích ưu, nhược điểm và phạm vi áp dụng cho từng phương pháp. Kết quả nghiên cứu bằng thực nghiệm và mô phỏng số ảnh hưởng của tải trọng nổ TNT lên tấm bê tông cốt thép có kích thước 1000x1000x60mm đã được thực hiện trong nghiên cứu. Sự phá hoại ở mặt trên và mặt dưới của tấm bê tông cốt thép đã được xem xét và so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng số. Kết quả thu được bằng phương pháp mô phỏng số với hai trường hợp mô hình tải trọng nổ theo CONWEP và kết hợp Lagrangian – Eulerianian khá tương đồng với kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, với phương pháp kết hợp Lagrangian – Eulerianian mức độ phá hoại đang lớn hơn so với thực nghiệm, vì phương pháp này chịu ảnh hưởng của rất nhiều thông số đầu vào liên quan tới thuốc nổ và không khí xung quanh. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ phân tích kỹ về các thông số đầu vào theo phương pháp này để có kết quả mô phỏng tốt hơn, sát hơn với thực tế. Kết quả nghiên cứu cũng là cơ sở để có các nghiên cứu chuyên sâu về ảnh hưởng của tải trọng nổ lên các kết cấu công trình lớn hơn phục vụ cho an ninh quốc phòng cũng như các trường hợp công trình đặc biệt.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Báo dân trí, chuyên mục Thế giới/Quân sự. <https://dantri.com.vn/the-gioi/ukraine-thua-nhan-danh-bom-cau-crimea-bang-21-tan-thuoc-no-20230820065547866.htm>, truy cập ngày 06 tháng 3 năm 2024.
- [2]. G. F. Kinney, K. J. Graham, Explosive shocks in air, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3]. V.-C. Mai, X.-B. Luu, C.-B. Dao, D.-V. Le, Investigate the structural response of ultra-high performance concrete column under the high explosion, Def. Sci. J, 71 (2021) 256–264. <https://doi.org/10.14429/dsj.71.16427>
- [4]. D. H. Pham, B. D. Le, C. T. Nguyen, H. T. Tran, Modeling the fracture behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete slabs under contact Blast Loading, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, (2020) 052079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052079>
- [5]. T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, Nonlinear finite elements for continua and structures, John Wiley & sons, 2014.
- [6]. C. Kevin et al., Numerical simulations for classification of blast loaded laminated glass: possibilities, limitations and recommendations, ERNCIP thematic group resistance of structures to explosion effects, ERNCIP Thematic Group, Luxembourg, 2014, pp. 1–39.
- [7]. A. U. Manual, Dassault Systems Simulia Corporation, Providence USA, 2010.
- [8]. T. Jankowiak, T. Łodygowski, Smoothed particle hydrodynamics versus finite element method for blast impact, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 61 (2013) 111–121.
- [9]. J. Li, C. Wu, H. Hao, Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion, Eng Struct, 102 (2015) 395–408.

- [10]. L. Librescu, S.-Y. Oh, J. Hohe, Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to underwater and in-air explosions, *Int J Solids Struct*, 43 (2006) 3794–3816.
- [11]. V. Karlos, G. Solomos, M. Larcher, Analysis of the blast wave decay coefficient using the Kingery–Bulmash data, *International journal of protective structures*, 7 (2016) 409–429.
- [12]. V. Kumar, K. V Kartik, M. A. Iqbal, Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading, *Eng Struct*, 206 (2020) 110125.
- [13]. K. P. Dharmasena, H. N. G. Wadley, Z. Xue, J. W. Hutchinson, Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *Int J Impact Eng*, 35 (2008) 1063–1074.
- [14]. G. Leonardi, R. Palamara, F. Suraci, 3D Finite element model of a blast load in a tunnel, *Archives of Civil Engineering*, 67 (2021) 91–105.
- [15]. M. D. Botez, L. A. Bredean, Numerical Study of a RC Slab Subjected to Blast: A Coupled Eulerian-Lagrangian Approach, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2019) 052036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/5/052036>
- [16]. T. J. Holmquist, G. R. Johnson, A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures, 2011.
- [17]. D. H. Pham, B. D. Le, A comparison between experimental and numerical studies for reinforced concrete slabs under blast loading, *Geomate Journal*, 22 (2022) 1–8. <https://doi.org/10.21660/2022.93.j2378>
- [18]. Wojciech Mamrak, Blast wave propagation in the air and action on rigid obstacles, 2013.