

Nghiên cứu ứng dụng bê tông siêu tính năng UHPC cho trụ cầu chống lại tải trọng nổ

■ TS. LÊ BÁ DANH

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: danhlb@huce.edu.vn

TÓM TẮT: Bê tông UHPC là loại vật liệu bê tông thế hệ mới có cường độ chịu kéo, nén lớn, có tính dẻo dai, khả năng chống ăn mòn và mài mòn tốt. Việc ứng dụng bê tông UHPC cho các công trình để chịu tải trọng cường độ cao như tải trọng nổ là một hướng đi mới và cấp thiết. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn về ứng dụng bê tông UHPC cho kết cấu trụ cầu chống lại tải trọng nổ. Tải trọng nổ sử dụng trong nghiên cứu là thuốc nổ TNT, được mô phỏng sử dụng phương pháp SPH. Mô hình JH-2 sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học của bê tông UHPC khi chịu tải trọng nổ. Nghiên cứu được thực hiện với tải trọng nổ tiếp xúc được đặt tại mặt bên của trụ cầu. Hai loại trụ bằng vật liệu bê tông thường và bê tông UHPC đã được sử dụng trong nghiên cứu. Kết quả về sự phá hoại trụ dưới tác dụng của các loại tải trọng nổ khác nhau được so sánh giữa bê tông thường và bê tông UHPC, từ đó rút ra được kết luận về hiệu quả của việc ứng dụng bê tông UHPC cho trụ cầu chịu tải trọng nổ. Nghiên cứu sẽ góp phần quan trọng trong việc đưa nội dung tính toán tải trọng nổ vào trong thiết kế các công trình cầu tại các vị trí quan trọng, có ý nghĩa chiến lược về mặt quân sự.

TỪ KHÓA: UHPC, trụ cầu, phần mềm Abaqus, tải trọng nổ, mô hình số, phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT: UHPC concrete is a new generation concrete material with high tensile and compressive strength, flexibility and good corrosion and abrasion resistance. The application of UHPC concrete for structures to withstand high intensity loads such as explosive loads is a new and urgent direction. This article presents the results of numerical simulation research using the finite element method on the application of UHPC concrete for bridge pier structures to resist explosive loads. The explosive load used in the study is TNT explosive, simulated using the SPH method. Model JH-2 is used to simulate the mechanical behavior of UHPC

concrete when subjected to explosive loading. The study was carried out with a contact blast load applied at the side of the bridge pier. Two types of piers made of normal concrete and UHPC concrete were used in the study. The results of pier damage under the effect of different mass of explosive loads are compared between normal concrete and UHPC concrete, from which conclusions are drawn about the effectiveness of applying UHPC concrete to bridge piers withstand explosive loads. The research will make an important contribution to incorporating explosive load calculations into the design of bridge structures at important locations with strategic military significance.

KEYWORDS: UHPC, bridge pier, Abaqus software, blast load, numerical model, finite element method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tình hình thế giới những năm gần đây có nhiều biến động, chiến tranh, hoạt động khủng bố nổ ra ở nhiều nơi với tính chất phức tạp ngày càng tăng. Trong các cuộc giao tranh giữa các nước, cơ sở hạ tầng, năng lượng là một trong những mục tiêu bị đánh phá nhiều nhất nhằm gây thiệt hại cho đối phương. Các công trình giao thông huyết mạch như các cây cầu nối giữa các vị trí quan trọng sẽ trở thành mục tiêu đầu tiên trong các cuộc đánh phá này. Với chiến tranh hiện đại ngày nay, nguy cơ hệ thống trụ cầu bị tấn công bởi các thiết bị nổ được trang bị tối tân là rất cao, vì trụ là bộ phận quan trọng để nâng đỡ kết cấu nhịp cầu, nếu hỏng trụ thì toàn bộ kết cấu nhịp cầu sẽ bị sập.

Để hạn chế tối đa các thiệt hại của hệ thống trụ đối với những cây cầu nằm tại các vị trí quan trọng, chiến lược về mặt quân sự khi bị tấn công bởi các tải trọng nổ thì cần xem xét và đưa vào ở bước thiết kế yếu tố tải trọng đặc biệt này. Trong đó, ngoài giải pháp về mặt kết cấu thì giải pháp về mặt vật liệu cho trụ cầu cũng là một hướng đi tiềm năng và mang lại hiệu quả chống nổ cao. Ngày nay, với sự phát triển của khoa học công nghệ, đặc biệt là các công nghệ về vật liệu, việc sử dụng các vật liệu mới có cường độ cao, khả năng chống va đập tốt sẽ phù hợp cho kết cấu trụ cầu chống lại tải trọng nổ.

Bê tông siêu tính năng UHPC (Ultra-high performance concrete - UHPC) là một sản phẩm bê tông thế hệ mới có tính chất cơ học vượt trội với cường độ chịu nén lớn hơn 120 MPa [1], cường độ chịu kéo khi uốn lên đến 50 Mpa, mô-đun đàn hồi từ 42 - 55 GPa [2], cường độ chịu kéo dọc trục từ 6 - 12 MPa [3]. Ngoài ra, UHPC có độ đặc chắc, tính dẻo dai cao, khả năng chống ăn mòn, mài mòn tốt giúp tăng độ bền và tuổi thọ công trình. Thành phần UHPC có chứa các sợi thép, do đó hạn chế được sự mở rộng và phát triển của vết nứt khi có sự hư hại. Nhờ những tính chất cơ học vượt trội như trên so với bê tông thông thường, việc nghiên cứu ứng dụng bê tông UHPC cho các trụ cầu để chống lại sự phá hoại của tải trọng nổ là một hướng đi mới tiềm năng.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nổ lên kết cấu trụ cầu bằng UHPC, có thể thực hiện theo phương pháp thử nghiệm phá hủy trên kết cấu hoặc mô phỏng trên mô hình số. Do những nhược điểm của phương pháp thử nghiệm phá hủy như: (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 nên việc sử dụng phương pháp mô phỏng trên mô hình số ngày càng được sử dụng phổ biến.

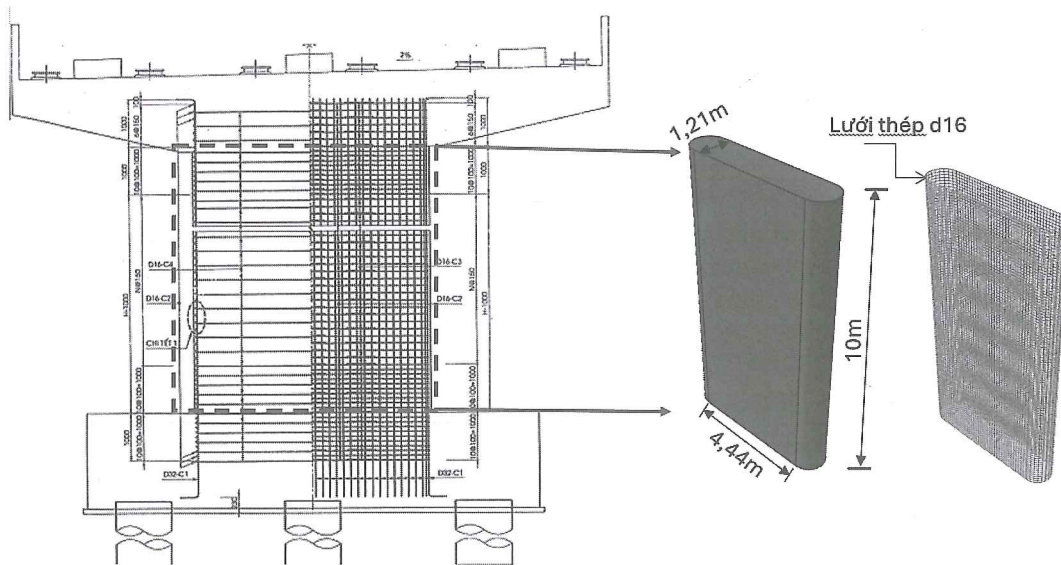
Nội dung của nghiên cứu này sẽ giới thiệu kết quả mô phỏng số ứng xử của trụ cầu sử dụng vật liệu UHPC chịu tác động của tải trọng nổ tiếp xúc. Thuốc nổ sử dụng là TNT. Nghiên cứu được thực hiện trên phần mềm Abaqus. Kết quả mô phỏng sẽ được so sánh giữa trụ UHPC và trụ bằng bê tông thông thường để đánh giá hiệu quả chịu tải trọng nổ của vật liệu UHPC làm trụ cầu.

2. MÔ HÌNH HÓA KẾT CẤU VÀ VẬT LIỆU

2.1. Mô hình hóa hình học trụ cầu

Trụ cầu nghiên cứu được tham khảo từ một trụ cầu bê tông cốt thép thực tế. Hai loại vật liệu gồm bê tông thông thường (NC) và UHPC sẽ được sử dụng nghiên cứu nhằm đánh giá hiệu quả của bê tông UHPC khi chịu tác động của tải trọng nổ. Trong nghiên cứu bước đầu, để giảm thời gian tính toán và mức độ phức tạp của việc mô phỏng kết cấu, phần thân trụ sẽ được tách riêng để nghiên cứu. Thân trụ được mô phỏng có chiều cao 10 m, rộng 4,44 m, dày 1,21 m, với lưới thép sử dụng có đường kính 16 mm (Hình 2.1).

Phần tử khối C3D8R được sử dụng để mô phỏng bê tông trụ cầu, trong khi phần tử dạng dầm được sử dụng để mô phỏng cốt thép trong Abaqus. Nghiên cứu sử dụng 102.819 phần tử C3D8R.



Hình 2.1: Mô hình hóa trụ cầu và lưới cốt thép trong Abaqus

2.2. Mô hình hóa tải trọng nổ

Nghiên cứu được thực hiện thông qua phần mềm Abaqus/Explicit [4]. Tải trọng nổ được sử dụng là thuốc nổ TNT, được mô phỏng theo mô hình SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [5, 6, 7, 8]. Khối nổ được mô hình hóa sử dụng 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 [9]. Phương trình trạng thái JWL có thể được viết dưới dạng như sau:

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

Trong đó:

P - Áp lực tạo ra bởi khối thuốc nổ;

A, B, R_1 , R_2 , ω - Các hằng số liên quan tới vật liệu nổ;

ρ_0 - Mật độ của thuốc nổ ở trạng thái tinh thể trước khi nổ;

ρ - Mật độ hiện tại của thuốc nổ;

E_m - Năng lượng ban đầu bên trong của thuốc nổ.

Các thông số cho thuốc nổ TNT sử dụng trong nghiên cứu này được thể hiện trong *Bảng 2.1*.

Bảng 2.1. Các thông số trong phương trình trạng thái của thuốc nổ TNT [12]

Vận tốc sóng nổ	A	B	R_1	R_2	ω	ρ_0
m/s	GPa	GPa				kg/m ³
6930	374	3,747	4,15	0,9	0,35	1.630

2.3. Mô hình hóa vật liệu bê tông và cốt thép

Nghiên cứu sẽ thực hiện mô phỏng trên trụ làm bằng bê tông UHPC và NC để đối chứng. Hai loại bê tông này được mô phỏng theo mô hình Holmquist-II (JH-2) [11]. Mô hình này có thể mô tả ứng xử nén động của bê tông chịu biến dạng lớn, tốc độ biến dạng cao và áp suất cao. Theo đó, mô hình làm việc của bê tông phụ thuộc vào ba yếu tố là cường độ, sự phá hoại và áp lực. Các thông số của mô hình JH-2 cho bê tông UHPC và NC được thể hiện trong *Bảng 2.2*. Mô hình đàn hồi dẻo được sử dụng để mô phỏng cốt thép. Các thông số của cốt thép sử dụng được thể hiện trong *Bảng 2.3*.

Bảng 2.2. Các thông số mô hình JH-2 của UHPC và NC

Thông số	UHPC [14]	NC [15]
Trọng lượng riêng		
ρ (kg/m ³)	2.550	2.440
Thông số cường độ		
G (N/m ²)	33,2×10 ⁹	14,86×10 ⁹
A	0,79	0,79
B	0,79	1,60
N	0	0
m	0,61	0,61
P_{HEL} (N/m ²)	19×10 ⁶	48×10 ⁶
$\dot{\epsilon}_0$	1,0	1,0
f'_c (N/m ²)	158×10 ⁶	48×10 ⁶
Hằng số phá hoại		
D_1	0,05	0,04
D_2	1	1
$\bar{\epsilon}_{fmin}^{pl}$	0,001	0,001
$\bar{\epsilon}_{fmax}^{pl}$	1	1
Hằng số áp lực		
K_1 (N/m ²)	8,5×10 ⁶	85×10 ⁹
K_2 (N/m ²)	-17,1×10 ⁶	-171×10 ⁹
K_3 (N/m ²)	20,8×10 ⁶	208×10 ⁹
T(N/m ²)	0,0084×10 ⁹	0,00354×10 ⁹

Bảng 2.3. Các thông số của cốt thép

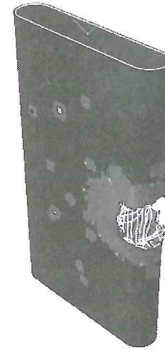
Loại thép	Đường kính thép	Mô-đun đàn hồi	Cường độ chịu kéo
	mm	MPa	MPa
CB400-V	d16	200.000	400

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

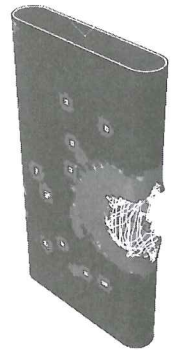
Khối nổ TNT có dạng hình lập phương, được đặt tiếp xúc tại tâm mặt bên của trụ. Vị trí này được lựa chọn để mô tả lại được chính xác hơn vị trí va chạm nổ trong thực tế. Ba khối lượng nổ của TNT đã được sử dụng để mô phỏng lần

lượt là 200 kg, 500 kg và 1.630 kg. Kết quả mô phỏng tải trọng nổ lên trụ bê tông NC và UHPC được thể hiện trong *Hình 3.1*.

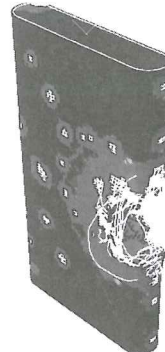
Có thể thấy rằng, cùng một đương lượng nổ, bê tông UHPC có khả năng chịu được tải trọng nổ tốt hơn rất nhiều so với bê tông cốt thép thường. Ví dụ, khối nổ 200 kg TNT, trụ bê tông NC bị phá hoại với kích thước lên tới gần 1 m, trong khi đó trụ UHPC bị phá hoại ít ở phần bề mặt, lộ phần cốt thép. Với khối lượng nổ lên tới 1.630 kg TNT, trụ NC bị phá hủy gần như một nửa, trong khi trụ UHPC mới chỉ mở rộng sự phá hủy bề mặt, độ sâu của phá hủy không lớn.



a) - NC- TNT 200 kg



b) - NC- TNT 500 kg



c) - NC- TNT 1.630 kg



d) - UHPC- TNT 200 kg



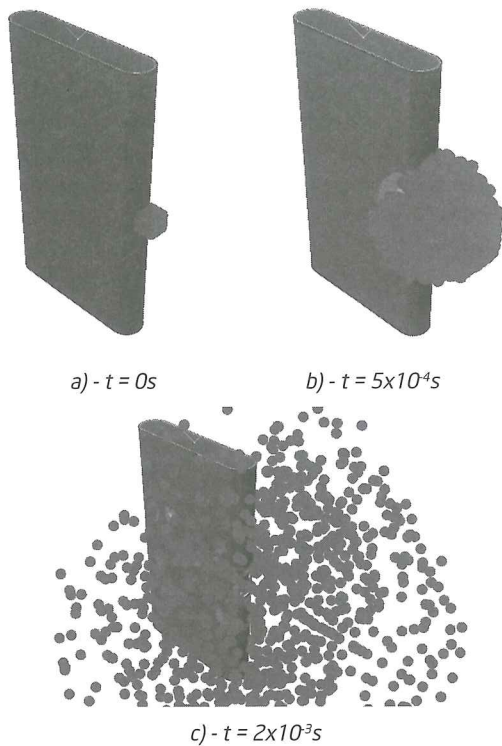
e) - UHPC- TNT 500 kg



f) - UHPC- TNT 1.630 kg

Hình 3.1: Kết quả mô phỏng nổ trên bê tông NC và UHPC

Quá trình lan truyền của sóng nổ theo phương pháp SPH được thể hiện trong *Hình 3.2*. Sau khi được kích nổ, các hạt của khối nổ TNT được bắn ra xung quanh tâm nổ với vận tốc lớn. Các hạt này tương tác với trụ và tạo ra các hư hỏng.



Hình 3.2: Quá trình lan truyền của sóng nổ

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã giới thiệu về kết quả mô phỏng số ảnh hưởng của tải trọng nổ tới trụ cầu bê tông UHPC dựa trên phần mềm phần tử hữu hạn Abaqus. Thuốc nổ sử dụng là TNT. Bê tông được mô phỏng sử dụng mô hình JH-2. Các khối lượng nổ khác nhau đặt trực tiếp tại mặt bên thân trụ đã được sử dụng. Thí nghiệm mô phỏng được thực hiện trên hai loại trụ bê tông cốt thép thường và bê tông UHPC. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cùng một đương lượng nổ, bê tông UHPC có khả năng chịu tải trọng nổ tốt hơn rất nhiều so với bê tông cốt thép thường cùng kích thước. Điều này cho thấy việc ứng dụng bê tông UHPC cho kết cấu trụ cầu sẽ có tác dụng rất tốt trong việc chống lại các loại tải trọng nổ. Nghiên cứu này góp phần mở ra một hướng mới trong việc ứng dụng bê tông UHPC chống lại tải trọng nổ cho công trình cầu, là cơ sở quan trọng để đưa vào trong tính toán thiết kế các công trình cầu tại các vị trí chiến lược, đặc biệt là các công trình cầu có ý nghĩa về mặt an ninh, quốc phòng, từ đó làm giảm thiểu được các thiệt hại nếu xảy ra chiến tranh hay khủng bố tập trung vào loại công trình này.

Tài liệu tham khảo

[1]. M. A. Bajaber and I. Y. Hakeem (2021), *UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review*, Journal of Materials Research and Technology, vol.10, pp.1058-1074.

[2]. B. A. Graybeal (2006), *Material property characterization of ultra-high performance concrete*, United States. Federal Highway Administration, Office of Infrastructure.

[3]. F. Standard (2016), *NF P18-470-concrete-ultra-high performance fibre-reinforced concrete-specifications, performance, production and conformity*, La Plaine Saint-Denis: Association Française de Normalisation, p.94.

[4]. T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran and K. Elkhodary (2014), *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John Wiley & sons.

[5]. T. Jankowiak and T. Łodygowski (2013), *Smoothed particle hydrodynamics versus finite element method for blast impact*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol.61, no.1, pp.111-121.

[6]. J. Li, C. Wu and H. Hao (2015), *Investigation of ultra-high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion*, Eng Struct, vol.102, pp.395-408.

[7]. L. Librescu, S.-Y. Oh and J. Hohe (2006), *Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to underwater and in-air explosions*, Int J Solids Struct, vol.43, no.13, pp.3794-3816.

[8]. D. H. Pham, B. D. Le, C. T. Nguyen and H. T. Tran (2020), *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, p.052079.

[9]. A. U. Manual (2010), *Dassault Systems Simulia Corporation*, Providence USA.

[10]. X. Zhao, G. Wang, W. Lu, P. Yan, M. Chen and C. Zhou (2018), *Damage features of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions*, Ocean engineering, vol.147, pp.531-545.

[11]. T.J. Holmquist, G. R. Johnson and W. H. Cook (1993), *A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures The 14th International Symposium on Ballistics*, in Proceedings of the BALLISTICS-INTERNATIONAL SYMPOSIUM, vol 2; Warhead Mechanisms, Terminal Ballistics, 14th International Symposium, vol.2; Warhead Mechanisms, Terminal Ballistics, ADPA Arlington, TX, USA, pp.591-600.

[12]. V.-C. Mai, X.-B. Luu, C.-B. Dao and D.-V. Le (2021), *Investigate the structural response of ultra-high performance concrete column under the high explosion*, Def Sci J, vol.71, no.2, pp.256-264.

[13]. T.J. Holmquist, G. R. Johnson and W. H. Cook (1993), *A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures The 14th International Symposium on Ballistics*, in Proceedings of the BALLISTICS-INTERNATIONAL SYMPOSIUM, vol.2; Warhead Mechanisms, Terminal Ballistics, 14th International Symposium, vol 2; Warhead Mechanisms, Terminal Ballistics, ADPA Arlington, TX, USA, pp.591-600.

Ngày nhận bài: 15/3/2024
Ngày nhận bài sửa: 04/4/2024
Ngày chấp nhận đăng: 18/4/2024