

# MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ CỦA TẤM BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO (HSC) ĐẶT TRÊN NỀN ĐẤT CHỊU TẢI TRỌNG NỔ ỨNG DỤNG MÔ HÌNH VẬT LIỆU CONCRETE DAMAGED PLASTICITY

NUMERICAL SIMULATION TO EVALUATE THE BEHAVIOR OF HIGH-STRENGTH CONCRETE (HSC) SLABS UNDER BLAST LOADING

➤ TS. Vũ Văn Hoàng, Viện KTCTĐB, Học viện KTQS Email: hoangmta@gmail.com

➤ KS. Đỗ Hữu Hiệp, Học viện KTQS

➤ TS. Cao Chu Quang, Viện KTCTĐB, Học viện KTQS

➤ TS. Nguyễn Tiến Nam, Viện KTCTĐB, Học viện KTQS

**Tóm tắt:** Nghiên cứu mô phỏng số nhằm đánh giá ứng xử của tấm bê tông cường độ cao (HSC) chịu tải trọng nổ ứng dụng trong các cấu kiện công trình. Một mô hình số ba chiều được xây dựng bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, bao gồm nguồn nổ, kết cấu đặt trên nền đất để mô phỏng toàn diện ứng xử của tấm HSC dưới tác động của sóng xung kích. Trong nghiên cứu, các thông số như độ võng lớn nhất, biến dạng và trạng thái thiệt hại của tấm HSC được phân tích chi tiết. Mô hình vật liệu Concrete Damaged Plasticity (CDP model) được sử dụng để dự đoán chính xác ứng xử phi tuyến của bê tông dưới tải trọng động. Phân tích cho thấy tấm bê tông cường độ cao có khả năng chống chịu tốt hơn đáng kể so với bê tông thường dưới tải trọng nổ, với chuyển vị sau vụ nổ thấp hơn 50% và mức độ thiệt hại nghiêm trọng nhỏ hơn 60%. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và ứng dụng bê tông cường độ cao trong các công trình yêu cầu khả năng kháng nổ cao.

**Từ khóa:** Tải trọng nổ; bê tông cường độ cao; conwep; TNT; thiệt hại

## 1. Đặt vấn đề

Bê tông cường độ cao (High Strength Concrete - HSC) là một loại vật liệu xây dựng tiên tiến, được phát triển nhằm cải thiện các đặc tính cơ học và độ bền so với bê tông truyền thống. Với cường độ nén và khả năng chống thấm vượt trội, HSC đã được ứng dụng rộng rãi trong các công trình yêu cầu khả năng chịu lực và độ bền cao. Tuy nhiên, dưới tác động của tải trọng nổ, ứng xử của kết cấu bê tông, bao gồm cả HSC, trở nên phức tạp và đòi hỏi sự nghiên cứu chi tiết để đảm bảo an toàn và hiệu quả cho các công trình.

Tải trọng nổ tạo ra áp lực lớn trong thời gian ngắn, gây ra các phản ứng động lực học phức tạp trong kết cấu bê tông. Việc hiểu rõ ứng xử của tấm bê tông HSC dưới tác động của tải trọng nổ là cần thiết để thiết kế và xây dựng các công trình chịu được các tình huống khắc nghiệt, như trong các khu vực có nguy cơ cháy nổ hoặc các công trình

**Abstract:** This study presents a numerical simulation to evaluate the behavior of high-strength concrete (HSC) slabs under blast loading. A three-dimensional finite element model was developed, incorporating the blast source, structural elements, and boundary conditions, to comprehensively simulate the response of HSC slabs to shock wave impacts. Key parameters such as maximum deflection, deformation, and damage states of the slabs were analyzed in detail. The Concrete Damaged Plasticity (CDP) material model was employed to accurately predict the nonlinear behavior of concrete under dynamic loading conditions. The results demonstrated that HSC slabs exhibit significantly better blast resistance compared to normal concrete, with a 50% reduction in post-blast displacement and 60% less severe damage. These findings provide a scientific foundation for the design and implementation of high-strength concrete in structures requiring enhanced blast resistance.

**Keywords:** Blast load; high strength concrete; conwep; TNT; damage.

quân sự. Phương pháp mô phỏng số, đặc biệt là sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, đã trở thành phương pháp hữu hiệu trong việc nghiên cứu và dự báo ứng xử của kết cấu bê tông dưới các loại tải trọng khác nhau, bao gồm cả tải trọng nổ.

Dù có rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để đánh giá ứng xử của tấm bê tông cường độ cao chịu tải trọng nổ, tuy nhiên nghiên cứu ứng xử của tấm bê tông HSC dưới tác động của tải trọng nổ là một trong những nội dung vẫn còn nhiều thách thức. Đặc biệt, việc xác định các tham số vật liệu chính xác cho HSC trong các mô hình mô phỏng số là một vấn đề phức tạp, do sự khác biệt về thành phần và tính chất của HSC so với bê tông thường. Hơn nữa, các nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của HSC dưới tải trọng nổ còn hạn chế, dẫn đến khó khăn trong việc xác thực các mô hình mô phỏng. Do đó, việc tiếp tục nghiên cứu và phát triển các mô hình mô phỏng số chính xác để dự báo ứng xử của

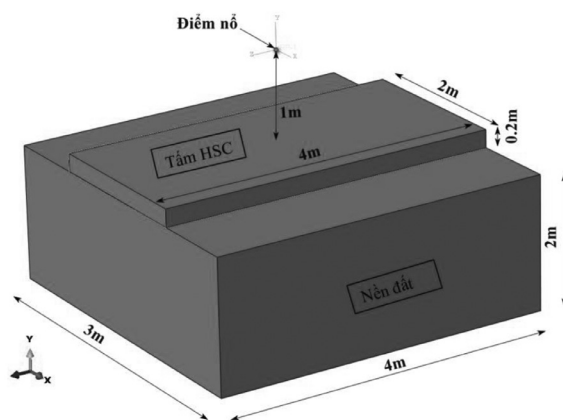
tấm bê tông HSC dưới tác động của tải trọng nổ là cần thiết. Điều này không chỉ giúp cải thiện thiết kế và xây dựng các công trình sử dụng HSC, mà còn đóng góp vào việc đảm bảo an toàn cho các công trình quân sự khi chịu tác dụng của tải trọng nổ. Ngoài ra, việc kết hợp các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số sẽ cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về ứng xử của HSC dưới tải trọng nổ, từ đó đề xuất các giải pháp thiết kế hiệu quả và kinh tế cho các công trình quân sự.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

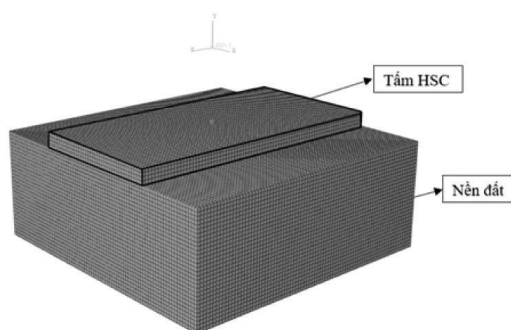
Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng số để đánh giá ứng xử của tấm bê tông cường độ cao (HSC) đặt trên nền đất chịu tác động của tải trọng nổ. Phương pháp nghiên cứu bao gồm các bước chính sau: Xây dựng mô hình số, lựa chọn mô hình vật liệu và thiết lập tham số tải trọng nổ.

### 2.1. Xây dựng mô hình số

Một mô hình số ba chiều được xây dựng bằng phần mềm phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA), ABAQUS Explicit. Mô hình này bao gồm các thành phần chính: nguồn nổ, tấm bê tông HSC và nền đất. Tải trọng nổ được mô phỏng bằng cách sử dụng chương trình CONWEP (Conventional Weapons Effects Program), cho



Hình 1. Mô hình hình học của tấm bê tông HSC dưới tải trọng nổ



Hình 2. Mô hình chia lưới phần tử 3D của tấm bê tông HSC đặt trên nền đất chịu tải trọng nổ

phép mô phỏng áp lực sóng nổ do lượng nổ TNT gây ra lên tấm bê tông 4x2x0,2m đặt trên nền đất, chịu tác dụng của sóng nổ do lượng nổ 1 kg đặt phía trên, chính giữa tấm cách tâm 1m gây ra.

### 2.2. Lựa chọn mô hình vật liệu và thiết lập tham số tải trọng nổ

#### a. Mô hình vật liệu cho bê tông

Mô hình dẻo bê tông bị phá hủy (CDP) là một trong những mô hình phù hợp nhất để nắm bắt hành vi phi tuyến tính của vật liệu bê tông [1]. Hai cơ chế phá hủy cơ bản của bê tông bao gồm nứt kéo và nghiền nén đã được mô tả thành công thông qua mô hình CDP. Hơn nữa, độ cứng giảm của vật liệu do hư hỏng đối với cường độ kéo và nén là độc lập. Do những ưu điểm của nó, mô hình CDP đã được chọn để mô phỏng hành vi của vật liệu HSC trong nghiên cứu hiện tại. Lý thuyết và công thức của mô hình CDP có thể được tham khảo trong tài liệu [2, 3]. Trong Abaqus, mô hình CDP được triển khai bằng các tham số bao gồm tỷ lệ cường độ nén hai trục so với cường độ nén một trục, hình dạng của bề mặt phá hủy, góc giãn nở, độ lệch tâm, tham số độ nhớt và quy luật cấu thành của vật liệu [4].

- Giá trị thực nghiệm cho tỷ lệ cường độ nén hai trục so với cường độ nén một trục,  $\sigma_{ho} / \sigma_{co}$ , được xác định trong phạm vi từ 1,1 đến 1,16 với bê tông thông thường. Tuy nhiên, dựa trên các nghiên cứu thực nghiệm, Curbach và cộng sự đã tiết lộ rằng đối với bê tông cường độ cao, độ tăng cường độ dưới tải trọng hai trục ít rõ rệt hơn [5]. Tỷ lệ được đề xuất trong nghiên cứu này là 1,07, được chọn cho mô hình mô phỏng trong nghiên cứu hiện tại.

- Hình dạng của bề mặt phá hủy được đặc trưng bởi tham số  $k_c$ , biểu thị tỷ lệ giữa khoảng cách từ trục thủy tinh đến kinh tuyến kéo-nén. Theo khuyến nghị của Kmieciak và cộng sự, giá trị  $k_c$  là 2/3 để đạt được hình dạng của bề mặt giới hạn chảy gần với tiêu chí cường độ [6]

- Góc giãn nở  $\phi$  được xác định trong mặt phẳng p-q ở áp suất giới hạn cao được chọn là 36° trong nghiên cứu hiện tại [7].

- Tham số độ lệch tâm  $e$  được xác định trong phạm vi (0;1), chi phối độ lệch của thể dẻo hyperbolic so với đường tiệm cận. Tham số có thể được lấy theo tỷ lệ giữa cường độ kéo và cường độ giới hạn chảy ban đầu khi nén. Trong nghiên cứu này, tham số độ lệch tâm được chọn là 0,1 [7].

- Tham số độ nhớt trong mô hình điều chỉnh dẻo nhớt, cho phép ứng suất vượt ra ngoài bề mặt giới hạn chảy. Để giữ cho kết quả mô phỏng chính xác và độc lập với tham số này, tham số độ nhớt phải càng nhỏ càng tốt. Dựa trên mô phỏng số của cấu trúc HSC, tham số độ nhớt được lấy là 0,005

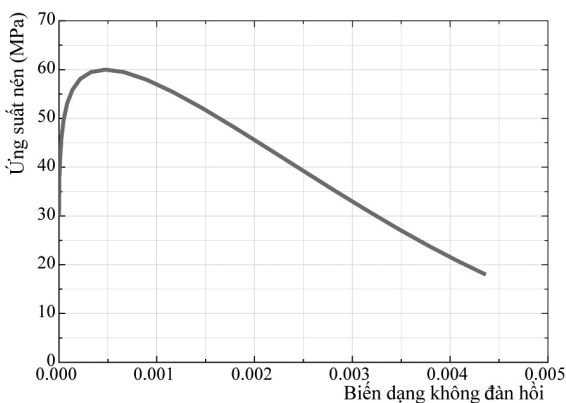
trong nghiên cứu này [8].

- Mối quan hệ ứng suất-biến dạng đối với cường độ nén và cường độ kéo đóng vai trò quan trọng nhất trong hành vi của vật liệu HSC, phải được xác định bằng thực nghiệm.

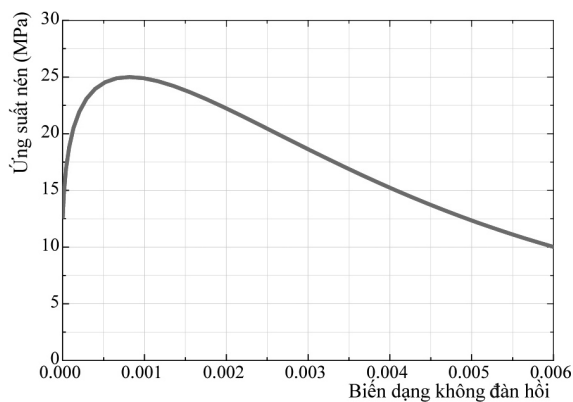
Các thông số của vật liệu bê tông HSC và bê tông thường dùng trong mô phỏng được thể hiện trên Bảng 1. Hình 1 cho thấy mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu HSC. Bê tông HSC có cường độ nén là 60MPa (B45), trong khi bê tông thường có cường độ nén là 25MPa (B20).

**Bảng 1.** Các thông số vật liệu của bê tông HSC / bê tông thường sử dụng trong mô phỏng số

Trọng lượng riêng (ton/m <sup>3</sup> )	Cường độ nén (MPa)	Mô đun đàn hồi (MPa)	Hệ số Poisson	Mô hình
2,4 / 2,2	60 / 25	24874 / 15427	0,18 / 0,18	CDP
$\phi$	$\epsilon$	$\sigma_{bo} / \sigma_{co}$	Kc	$\mu$
36° / 36°	0,1 / 0,1	1.07 / 1.16	0,667 / 0,667	0,005 / 0,005



a. Bê tông cường độ cao HSC



b. Bê tông thường

**Hình 3.** Đường cong ứng suất nén, biến dạng không đàn hồi của bê tông HSC (a) và bê tông thường (b)

#### b) Mô hình hóa đất nền

Mô hình Mohr-Coulomb thường được sử dụng trong mô phỏng địa kỹ thuật, bao gồm cả các kết

cấu chịu tải trọng nổ (Li, 2007; Yu và cộng sự, 2019). Mô hình này có ưu điểm là cho phép nghiên cứu tác động của tải trọng nổ lên ứng xử của đất một cách đơn giản. Các tham số của mô hình Mohr-Coulomb cho đất nền được thể hiện trên Bảng 2.

**Bảng 2.** Các thông số của đất nền dùng trong mô phỏng theo mô hình Mohr-Coulomb

Trọng lượng riêng (ton/m <sup>3</sup> )	Mô đun đàn hồi (MPa)	Góc ma sát	Góc dãn nở
1,8	10	30°	30°

#### c) Mô hình tải trọng nổ

Mô hình Conwep được thiết lập để mô phỏng khối lượng thuốc nổ 01 kg TNT, ở các khoảng cách khác nhau từ tâm vụ nổ đến bề mặt tấm là  $R_0 = 1m$ .

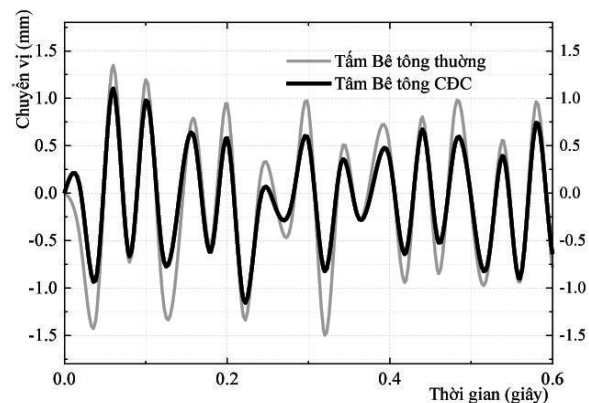
### 3. Kết quả và thảo luận

Tổng năng lượng giải phóng bởi một vụ nổ dưới dạng sóng nổ và khoảng cách đến vụ nổ là các thông số quan trọng trong nghiên cứu kết cấu chịu tải trọng nổ. Phương pháp Hopkinson-Cranz [9] là hình thức phổ biến nhất để đánh giá mức độ của vụ nổ, với khái niệm khoảng cách tỷ lệ Z như được trình bày trong phương trình:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

Trong đó W là trọng lượng thuốc nổ, được định nghĩa là khối lượng tương đương TNT (kg) và R (m) là khoảng cách từ tải trọng nổ đến bề mặt của kết cấu. Smith và cộng sự [10] đã nghiên cứu khoảng cách tỷ lệ Z để xác định các điều kiện tải trọng nổ cho từng trường hợp. Theo đó, vụ nổ xa tương ứng với  $3,97 < Z$ . Vụ nổ gần có khoảng cách tỷ lệ  $1,19 < Z \leq 3,97$  và vụ nổ rất gần là khi  $Z \leq 1,19$ .

Với khối lượng thuốc nổ tương đương 1kg TNT và khoảng cách 1m tính từ tâm vụ nổ đến kết cấu, thay số vào phương trình (1) ta được  $Z = 1$ . Như vậy, vụ nổ nghiên cứu trong mô phỏng là dạng vụ



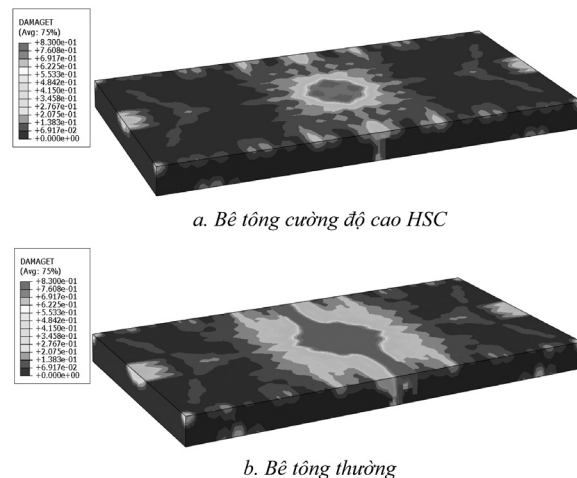
**Hình 4.** Chuyển vị của tấm bê tông thường và bê tông cường độ cao dưới tải trọng nổ

nổ rất gần.

Hình 4 minh họa đồ thị chuyển vị của tấm bê tông thường (đường màu cam) và bê tông cường độ cao (màu đen) dưới tải trọng nổ. Có thể thấy tấm bê tông thường cho thấy biên độ dao động lớn hơn đáng kể so với tấm bê tông cường độ cao. Ở giai đoạn ban đầu (khoảng từ 0 đến 0.2 giây), biên độ dao động có giá trị gần ±1.5 mm, đây là mức dao động lớn nhất được ghi nhận trong cả quá trình. Sự giảm biên độ dao động sau thời gian này diễn ra chậm, cho thấy khả năng hấp thụ năng lượng kém hiệu quả hơn so với bê tông cường độ cao. Tấm bê tông cường độ cao (đường đồ thị màu đen) cho thấy biên độ dao động thấp hơn so với bê tông thường ở mọi thời điểm. Ở giai đoạn ban đầu (từ 0 đến 0.2 giây), biên độ dao động lớn nhất của tấm bê tông cường độ cao chỉ đạt khoảng ±1.0 mm, nhỏ hơn khoảng 50% so với tấm bê tông thường. Biên độ dao động của tấm bê tông cường độ cao giảm nhanh hơn theo thời gian, cho thấy khả năng kháng dao động tốt hơn, đồng thời thể hiện đặc tính giảm chấn hiệu quả hơn.

Về hiệu suất giảm chấn, tấm bê tông thường có độ giảm biên độ dao động diễn ra chậm hơn, điều này chỉ ra rằng tấm bê tông thường có khả năng hấp thụ và tiêu tán năng lượng kém hơn. Sau khoảng 0.6 giây, chuyển vị của tấm bê tông thường vẫn dao động rõ ràng, chứng tỏ mức độ suy giảm dao động không hiệu quả. Ngược lại, tấm bê tông cường độ cao thể hiện sự giảm nhanh biên độ dao động. Tấm bê tông cường độ cao hấp thụ năng lượng tốt hơn và nhanh chóng ổn định trạng thái chuyển vị. Như vậy, bê tông cường độ cao rõ ràng có ưu thế vượt trội so với bê tông thường trong việc kháng lại tác động của tải trọng nổ.

Trên hình 5 minh họa mức độ thiệt hại dưới tải trọng nổ của tấm HSC và tấm bê tông thường. Biến



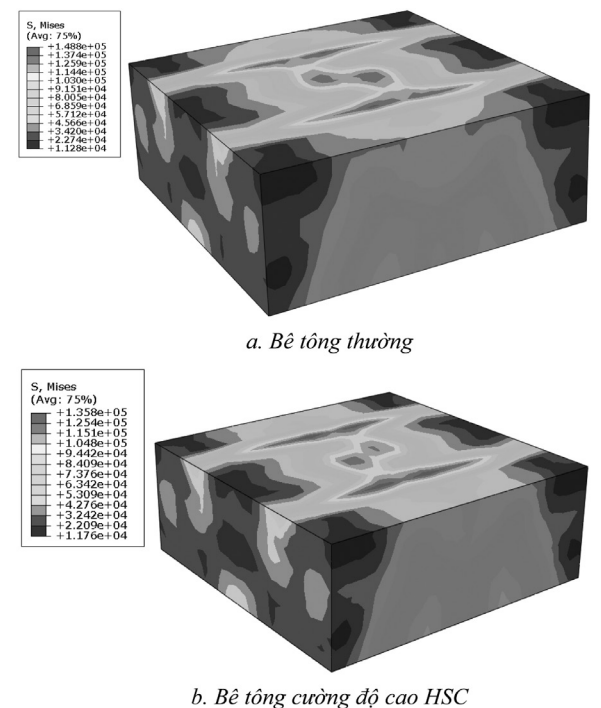
Hình 5. Minh họa thiệt hại của tấm HSC và bê tông thường dưới tải trọng nổ

thiệt hại Damaget có giá trị từ 0 đến 1. Nếu tiến đến mức độ 1, kết cấu có thể bị phá hủy (collapse). Mức độ thiệt hại quy định bởi màu sắc, màu càng thiên về đỏ thì thiệt hại càng lớn. Ví dụ màu đỏ tương ứng có biến DAMAGET là 0.83 là thiệt hại lớn nhất. Có 3 mức thiệt hại: thiệt hại nhẹ tương ứng với biến DAMAGET ≤ 0.2. Thiệt hại vừa tương ứng với biến 0.2 < DAMAGET ≤ 0.6. Thiệt hại nghiêm trọng: tương ứng với biến DAMAGET > 0.6.

Bảng 3. Tình trạng hư hỏng của tấm bê tông HSC và bê tông thường

Trường hợp	Thiệt hại nhẹ	Thiệt hại vừa	Thiệt hại nghiêm trọng	Sup đổ
Tấm bê tông HSC	20,2%	0,9%	1,61%	-
Tấm bê tông thường	28,12%	1,04%	2,58%	-

Dựa trên kết quả phân tích, được tổng hợp trên Bảng 4, có thể nhận thấy rằng mức độ thiệt hại của tấm bê tông HSC dưới tải trọng nổ thấp hơn đáng kể so với tấm bê tông thường. Cụ thể, diện tích thiệt hại nghiêm trọng của tấm HSC chiếm 1,61% theo thể tích của tấm, trong khi ở tấm bê tông thường, tỷ lệ này tăng lên 60%, đạt 2,58%. Điều này cho thấy tấm bê tông thường chịu thiệt hại nghiêm trọng hơn dưới tải nổ, với mức độ phá hủy lan rộng ở vùng trung tâm. Bên cạnh đó, mức độ thiệt hại vừa với tấm bê tông HSC là 0,9%, thấp hơn so với 1,04% ở tấm bê tông thường, tiếp tục khẳng định rằng tấm bê tông thường phải chịu phá hủy mạnh hơn từ vụ nổ. Đối với thiệt hại nhẹ, tấm trong bê tông HSC có 20,2% diện tích chịu thiệt hại nhẹ, thấp hơn hơn



Hình 6. Minh họa ứng suất nền đất dưới các tấm bê tông sau tác động nổ

so với mức 28,12% ở tấm bê tông thường. Điều này cho thấy bê tông HSC duy trì được tính toàn vẹn và khả năng chống chịu tốt hơn dưới tải trọng nổ, khi phần lớn diện tích của nó chỉ chịu thiệt hại nhẹ. Từ những so sánh trên, có thể thấy rằng vật liệu bê tông HSC có khả năng kháng nổ tốt hơn rất nhiều so với bê tông thường. Kết cấu làm từ bê tông thường chịu thiệt hại nghiêm trọng hơn cả về thể tích lẫn mức độ, cho thấy tính năng chống chịu của nó kém hơn khi đối mặt với cùng một điều kiện tải trọng nổ.

Như minh họa trên hình 6a, phân bố ứng suất trên nền đất dưới tấm bê tông thường cho thấy các vùng ứng suất lớn tập trung chủ yếu tại khu vực trung tâm, với giá trị ứng suất cực đại  $1.488e+05$  Pa (màu đỏ). Ứng suất có xu hướng giảm dần ra phía mép tấm, với các vùng có ứng suất nhỏ hơn được biểu thị bằng các màu xanh lá và xanh dương, cho thấy sự chuyển dịch ứng suất từ trung tâm ra biên. Sự phân bố ứng suất không đối xứng hoàn toàn, điều này có thể cho thấy nền đất dưới tấm bê tông thường chịu tác động lớn hơn và phân tán ứng suất kém hiệu quả. Với tấm bê tông cường độ cao, như trên hình 6b, phân bố ứng suất cũng tập trung mạnh tại khu vực trung tâm, nhưng giá trị cực đại chỉ đạt  $1.358e+05$  Pa, thấp hơn so với tấm bê tông thường. Phân bố ứng suất trên nền đất có sự đối xứng tốt hơn, các vùng chuyển tiếp từ giá trị ứng suất lớn (đỏ và vàng) đến các giá trị nhỏ (xanh lá và xanh dương) được phân bố đều hơn. Điều này cho thấy nền đất dưới tấm bê tông cường độ cao chịu tải trọng một cách hiệu quả hơn, với mức độ lan truyền ứng suất rộng hơn và ít tập trung ứng suất cục bộ. Kết quả phân tích đồ thị ứng suất cho thấy rằng việc sử dụng bê tông cường độ cao mang lại lợi ích đáng kể trong việc giảm ứng suất tác động lên nền đất khi chịu tải trọng nổ. Bê tông cường độ cao không chỉ giảm giá trị ứng suất cực đại mà còn cải thiện sự phân bố ứng suất, giúp nền đất chịu tải ổn định hơn.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích và so sánh hiệu suất của tấm bê tông thường và bê tông cường độ cao (HSC) dưới tác động của tải trọng nổ, thông qua các phân tích tham số như chuyển vị, mức độ thiệt hại và phân bố ứng suất. Dựa trên các kết quả đã trình bày, một số kết luận chính được rút ra như sau:

1. Tấm bê tông cường độ cao có biên độ dao động nhỏ hơn đáng kể so với bê tông thường, với biên độ dao động cực đại giảm khoảng 50% trong giai đoạn ban đầu. Hiệu suất giảm chấn của bê tông cường độ cao vượt trội hơn, khi biên độ dao động giảm nhanh hơn và trạng thái ổn định đạt được sớm hơn so với bê tông thường. Điều này chứng

minh khả năng hấp thụ và tiêu tán năng lượng tốt hơn của vật liệu HSC khi đối mặt với tải trọng nổ.

2. Tấm bê tông cường độ cao có mức độ thiệt hại nghiêm trọng thấp 60%, chỉ chiếm 1,61% thể tích, so với 2,58% của bê tông thường. Điều này cho thấy HSC giúp giảm thiểu mức độ phá hủy và duy trì tính toàn vẹn cấu trúc tốt hơn. Mức độ thiệt hại vừa và nhẹ của tấm HSC cũng thấp hơn bê tông thường, khẳng định khả năng kháng nổ vượt trội.

3. Phân bố ứng suất trên nền đất dưới tấm bê tông cường độ cao có tính đối xứng và đồng đều hơn, với giá trị ứng suất cực đại giảm khoảng 10%. Tấm HSC lan truyền ứng suất hiệu quả hơn, giảm sự tập trung ứng suất cục bộ, giúp nền đất chịu tải ổn định hơn. □

#### Tài liệu tham khảo

1. Szczecina, M. and A. Winnicki. Relaxation time in CDP model used for analyses of RC structures. in *Procedia engineering*, 2017.
2. Lee, J. and G.L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 1998. 124(8): p. 892-900.
3. Lubliner, J., et al., A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids*, 1989. 25(3): p. 299-326.
4. Systèmes, D. *Abaqus/CAE User's Guide*. 2016.
5. Dresden, G. Ultra high performance concrete under biaxial compression. in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel, Germany. 2008.
6. Kmieciak, P. and M. Kamiński, Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of civil mechanical engineering*, 2011. 11(3): p. 623-636.
7. Bahij, S., et al., Numerical investigation of the shear behavior of reinforced ultra-high-performance concrete beams. *Structural Concrete*, 2018. 19(1): p. 305-317.
8. Dias da Silva, V., A simple model for viscous regularization of elasto-plastic constitutive laws with softening. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2004. 20(7): p. 547-568.
9. Sadovskiy, M. Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments. in *In: Physics of explosion*, USSR Academy of Sciencs. 2004.
10. Smith, S.J., D.M. McCann, and M.E. Kamara, Blast resistant design guide for reinforced concrete structures. 2009.