
Ứng xử của kết cấu ngầm bê tông cốt thép (btct) nguyên khối chịu tác dụng của tải trọng nổ trong môi trường đất sét lẫn đá hộc

Behavior of reinforced concrete (RC) underground structures monolith subject to explosive loads in the clay and rock environment

Trần Văn Hùng, Hà Đức Bình

Trường Đại học Ngô Quyền – Trường Sĩ quan Công Binh, Bình Dương

Tác giả liên hệ: Trần Văn Hùng. E-mail: hocvienk26a@gmail.com

Tóm tắt: Quá trình hình thành sóng nén tác dụng lên kết cấu khi nổ trong môi trường đất đá không đồng nhất tương đối phức tạp. Tuy nhiên dưới sự hỗ trợ của máy tính và các phần mềm tính toán chuyên dụng, quá trình đó sẽ được mô phỏng và tính toán dễ dàng hơn. Bài báo đánh giá ứng xử của kết cấu BTCT nguyên khối chịu tải trọng nổ trong môi trường đất sét đồng nhất và môi trường đất sét không đồng nhất có lẫn đá hộc. Nội dung này hiện chưa có bài nghiên cứu và mô hình hoá nào. Nghiên cứu này sử dụng mô hình vật liệu của G.R Johnson và T. J. Holmquist [1] để mô hình hoá vật liệu giòn như bê tông và đá, mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb được sử dụng để mô hình hoá môi trường đất. Phương trình trạng thái “Jones-Wilkins-Lee” (JWL equation of state) được sử dụng để tính toán áp lực nổ do bom đạn gây ra. Các mô phỏng được thực hiện trên phần mềm ABAQUS 2022 và sử dụng phương pháp kết hợp Coupled Eulerian - Lagrangian (CEL) để thu được kết quả. Nội dung nghiên cứu cho thấy rõ khả năng giảm áp lực của sóng nén lên kết cấu ngầm BTCT khi chèn lẫn đá hộc xung quanh kết cấu trong quá trình san lấp bên ngoài.

Từ khóa: *Abaqus; Coupled Euler Lagrangian; nổ trong đất; tải trọng nổ; ứng xử kết cấu chịu nổ trong đất.*

Abstract: The process of forming compression waves acting on structures when exploding in heterogeneous soil and rock environments is relatively complex. However, with the support of computers and specialized calculation software, that process will be simulated and calculated more easily. This article evaluates the behavior of monolithic reinforced concrete structures subjected to explosive loads in homogeneous clay environments and heterogeneous clay environments mixed with rubble. There are currently no research or modeling articles on this content. This study uses the material model of G.R Johnson and T. J. Holmquist [1] to model brittle materials such as concrete and rock, the Mohr-Coulomb ideal elastic model is used to model the soil environment. . The “Jones-Wilkins-Lee” equation of state (JWL equation of state) is used to calculate the explosion pressure caused by bombs. The simulations were performed on ABAQUS 2022 software and used the Coupled Eulerian - Lagrangian (CEL) method to obtain the results. The research content clearly shows the ability to reduce the pressure of compression waves on reinforced concrete underground structures when mixed with crushed rock around the structure during the external leveling process.

Keywords: *Abaqus; Behavior of blast-resistant structures in soil; Coupled Euler Lagrangian; explosion in soil; explosive load*

1. Đặt vấn đề

Tính toán kết cấu bê tông cốt thép chịu tác dụng của bom đạn nổ trong đất là một trong những nội dung quan trọng trong tính toán sức sống của công trình quân sự. Khi bom đạn nổ trong đất thường chia thành ba vùng tác động đó là vùng nén ép, vùng phá hoại và vùng chấn động. Đối với kết cấu BTCT đặt trong vùng chấn động, tác dụng của nổ của bom đạn lên công trình chủ yếu là sóng nén. Các kết quả nghiên cứu giải tích trước đây [2], để đơn giản các tác giả thường xem đất đá là môi trường đồng nhất liên tục. Hiện nay, với sự hỗ trợ của

máy tính, xu hướng nghiên cứu ứng xử của kết cấu BTCT nguyên khối chịu tác dụng của tải trọng nổ trong môi trường đất lẫn đá đã và đang được nghiên cứu ứng dụng. Bài báo trình bày một phương pháp nghiên cứu ứng xử của kết cấu bê tông cốt thép nguyên khối chịu tác dụng của tải trọng nổ trong môi trường đất lẫn đá bằng phương pháp phân tử hữu hạn và sử dụng phần mềm ABAQUS phiên bản năm 2022.

2. Cơ sở lý thuyết của quá trình lan truyền sóng ứng suất

Đối với công trình đặt ngoài vùng phá hoại do tác dụng nổ của bom đạn, tác dụng nổ của bom

đạn chuyển thành dạng sóng nén lan truyền trong đất. Các tham số chính để xác định sóng nén bao gồm ứng suất tại một điểm bất kì (σ_{\max}) và quy luật phân bố theo thời gian $\sigma(t)$ [3].

Giá trị ứng suất nén pháp tuyến trong sóng tới tại một tọa độ trong không gian phụ thuộc vào khoảng cách đến tâm nổ, hàm áp lực nổ trong buồng mìn và đặc trưng của đất đá có thể xác định được theo quy luật [4], [5].

$$\sigma_i = \frac{p(t)}{(r/r_0)^\beta} \quad (1)$$

r: đường kính lỗ khoan,

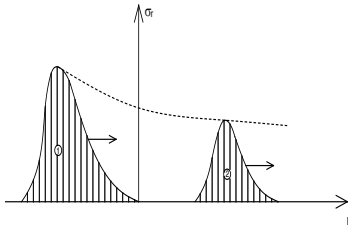
r_0 : đường kính khối thuốc nổ,

$p(t)$: áp lực nổ lên thành lỗ mìn,

$$p(t) = p_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

t: thời điểm khảo sát sau khi kích nổ;

α : hệ số đặc trưng cho sự suy giảm của hàm áp lực nổ trong buồng mìn, phụ thuộc vào đặc tính chất nhồi lên, lượng nổ, đất đá.



Hình 1. Sự lan truyền sóng ứng suất nổ trong không gian [4]

p_0 : áp lực tối đa ban đầu của sản phẩm nổ,

$$p_0 = \frac{\rho_T D^2}{2(k+1)}$$

với: ρ_T là mật độ thuốc nổ; D là tốc độ nổ, k là chỉ số đa biến, đối với sản phẩm nổ theo Landau $k=3$;

Sóng nén truyền trong đất khi gặp chướng ngại sẽ phản xạ lại.

Áp lực phản xạ của sóng nén (sóng dọc) tính theo công thức: $\sigma = K_{px} \sigma_i$ (3)

σ : là áp lực sóng lên bề mặt chướng ngại;

σ_i là áp lực sóng tới;

K_{px} là hệ số phản xạ.

Áp lực sóng nén trong đất

Ứng suất lớn nhất σ_{\max} ở độ sâu h do tải trọng sóng xung kích trên mặt đất [4], [6]:

$$\sigma_{\max} = \Delta P_{\max} \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{h}{a_p \theta} \right)^i \frac{2(\gamma^2 - 1) \cdot n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot (n-i+1)}{[(\gamma+1)^{i+1} - (\gamma-1)^{i+1}] i!} \right] \quad (4)$$

σ_{\max} - áp lực lớn nhất tại độ sâu h kể từ mặt đất;

ΔP_{\max} - áp lực cực đại của sóng xung kích trên mặt đất;

h - độ sâu đến điểm cần nghiên cứu;

θ - thời gian tác dụng của sóng xung kích;

n - chỉ số nhị thức biểu thị quy luật biến đổi của siêu áp trên mặt sóng;

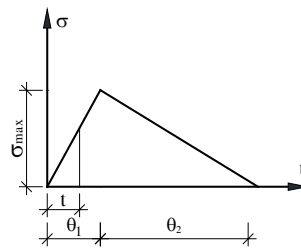
$$\gamma = \frac{a_0}{a_1} \approx \frac{a_p}{a_1}; \quad i - \text{số hạng của chuỗi};$$

Khi $n = 1$ thì áp lực lớn nhất tại độ sâu h là:

$$\sigma_{(h)\max} = \Delta P_{\max} \left(1 - \frac{h}{2a_1 \tau_+} \left(1 - \frac{a_1}{a_0} \right)^2 \right)$$

$$\theta_1 = \frac{h}{a_1} - \frac{h}{a_0}; \quad \tau_+ = \theta$$

Thời gian tăng và giảm tải:



Hình 2. Quy luật biến thiên của sóng nén theo thời gian [4]

Gọi thời gian từ lúc sóng xung kích tác dụng lên mặt đất tới lúc sóng đàn hồi truyền đến độ sâu h là t_0 :

$$t_0 = \frac{h}{a_0} \quad (5)$$

Thời gian từ lúc bắt đầu sóng xung kích tác dụng trên mặt đất tới lúc sóng nén đạt trị số σ_{\max} là:

$$t = \frac{h}{a_1} \quad (6)$$

Thời gian tăng áp lực:

$$\theta_1 = \frac{h}{a_1} - \frac{h}{a_0} = \frac{z(a_0 - a_1)}{a_0 a_1} \quad (s) \quad (7)$$

Thời gian giảm áp lực:

$$\theta_2 = (1,5 \div 2)\theta \quad (s) \quad (8)$$

3. Mô phỏng số sự ảnh hưởng của bom đạn tác dụng lên kết cấu BTCT trong môi trường đất sét lẫn đá học

Phần mềm ABAQUS được tích hợp để mô phỏng các vụ nổ trong các môi trường khác nhau. Thuật toán Lagrangian được áp dụng khi phân tích các loại chất rắn, trong khi đó thuật toán hỗn hợp Coupled Eulerian-Lagrangian phù hợp khi phân tích các bài toán về dòng chảy của chất lỏng và chất khí. Nó cũng thích

hợp để phân tích sự lan truyền sóng nổ trong môi trường đất đá khác nhau.

a) Mô hình hoá vật liệu.

- **Đất:** Một trường đất xung quanh kết cấu được mô hình hoá theo mô hình Morh-Coulomb. Các tham số của môi trường được lấy theo nghiên cứu của của Johannes Pistor và cộng sự công bố năm 2012 [7].

Bảng 1. Tham số của đá, và BT theo mô hình phá huỷ HJC [7]

Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
E	40000000	N/m ²
ν	0.3	-
ρ	1900	kg/m ³
φ	32	°
c	200	N/m ²

- **Đá, bê tông:** Đá và bê tông là các loại vật liệu giòn được khai báo theo mô hình vật liệu của Holmquist, Johnson and Cook (HJC) (1993) đã được phát triển cho tính toán phá huỷ các vật liệu giòn như đá, bê tông... chịu áp lực cao, biến dạng lớn [1], [8]. Mô hình HJC bao gồm phương trình cường độ ứng với tốc độ biến dạng, phương trình trạng thái nén tĩnh phi tuyến và phương trình phát triển phá huỷ với biến dạng dẻo [1], [6], [8].

Phương trình quan hệ giữa cường độ và tốc độ biến dạng [1]:

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^{**}) \quad (9)$$

Trong đó:

σ^* : ứng suất tương đương được chuẩn hoá

σ : ứng suất tương đương thực,

f_c cường độ chịu nén

P^* : Áp lực được chuẩn hoá

P : Áp lực tĩnh

ϵ^{**} : Tốc độ biến dạng không thứ nguyên

ϵ^* : Tốc độ biến dạng thực:

ϵ_0^* : Tốc độ biến dạng tham chiếu

$$\epsilon_0^* = 1.0 s^{-1}$$

T^* : Cường độ chịu kéo được chuẩn hoá.

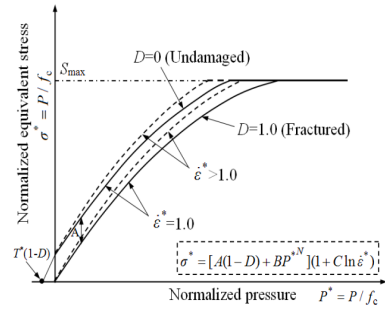
T : Cường độ chịu kéo.

S_{max} : Cường độ lớn nhất được chuẩn hoá mà bê tông có thể chịu đựng được.

A, B và N lần lượt là các hằng số vật liệu đại diện cho cường độ đỉnh chuẩn hóa, hệ số cứng áp suất chuẩn hóa và số mũ cứng áp suất.

C : hệ số tốc độ biến dạng.

D : phá huỷ tích lũy ($0 \leq D \leq 1$).



Hình 3. Quan hệ giữa cường độ và tốc độ biến dạng theo mô hình HJC [1]

Phương trình phá huỷ:

Hình 3 cho thấy sự phá huỷ của mô hình HJC được tích lũy từ biến dạng dẻo tương đương và biến dạng dẻo thể tích, và được xác định theo công thức sau [1]:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (10)$$

Trong đó:

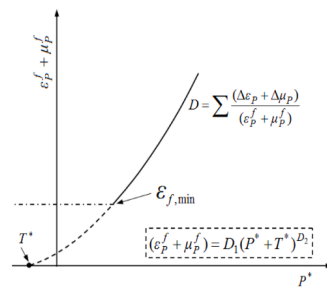
$\Delta \epsilon_p$ và $\Delta \mu_p$ là số gia biến dạng dẻo có hiệu và biến dạng dẻo thể tích.

$\epsilon_p^f + \mu_p^f$: Tổng biến dạng dẻo dưới tác dụng của 1 tải trọng không đổi cho đến khi nứt, được tính bằng công thức:

$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 \cdot (P^* + T^*)^{D_2} \geq e_{f,min}$$

P^*, T^* : Hằng số vật liệu được dùng để triệt tiêu nứt nẻ do các sóng kéo gây ra.

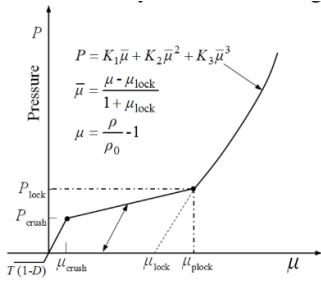
D_1 và D_2 là các hằng số phá huỷ



Hình 4. Quan giữa áp lực chuẩn hóa với tổng biến dạng dẻo và biến dạng tích lũy theo mô hình vật liệu HJC [1]

Phương trình trạng thái nén tĩnh:

Phản ứng nén tĩnh được điều chỉnh bằng phương trình trạng thái và chia thành 3 giai đoạn như hình 3.



Hình 5. Trạng thái nén tĩnh của vật liệu theo mô hình HJC [1]

Giai đoạn 1 là đàn hồi tuyến tính từ ngưỡng áp lực âm tới giới hạn đàn hồi

$$P = K\mu; P < P_{crush}$$

μ : biến dạng thể tích tiêu chuẩn;

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1; \rho_0 \text{ và } \rho \text{ mật độ ban đầu và mật}$$

độ hiện tại;

K : Mô đun đàn hồi khối của vật liệu

$$K = \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}}$$

μ_{crush} : biến dạng thể tích tại giới hạn đàn hồi P_{crush}

Giai đoạn 2: còn gọi là giai đoạn chảy dẻo trong giai đoạn này các lỗ rỗng không khí dần bị nén ra khỏi bê tông và các phá huỷ được tạo ra do biến dạng dẻo thể tích cho đến khi khi đạt đến điểm (μ_{lock}, P_{lock}) :

$$P = P_{crush} + K_{lock}(\mu - \mu_{crush})$$

$$K_{lock} = (P_{lock} - P_{crush})(\mu_{plock} - \mu_{crush})$$

là hệ số góc;

μ_{plock} biến dạng thể tích tại áp lực nén P_{lock}

Giai đoạn 3: giai đoạn nén chặt. Khi tất cả lỗ rỗng không khí đã toát hết ra khỏi bê tông. Lúc này bê tông được coi như là hoàn toàn đàn hồi phi tuyến. mối quan hệ giữa áp lực và biến dạng được biểu thị qua công thức:

$$P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (11)$$

$\bar{\mu} = \frac{(\mu - \mu_{lock})}{(1 + \mu_{lock})}$: biến dạng thể tích hiệu chỉnh,

μ_{lock} : biến dạng thể tích ở trạng thái nén chặt

$$\mu_{lock} = \frac{\rho_{grain}}{\rho_0} - 1$$

ρ_{grain} : mật độ vật liệu ở trạng thái nén chặt không còn lỗ rỗng.

K_1, K_2, K_3 : các hằng số vật liệu.

Các tham số của vật liệu bê tông được lấy theo nghiên cứu của G.R Johnson và T. J. Holmquist 1994 [1]. Các tham số của đá được Wang cùng cộng sự công bố năm 2019 [6].

Bảng 2. Tham số của đá, và BT theo mô hình phá huỷ HJC [1], [6]

Thông số vật liệu	Giá trị	
	Bê tông	Đá vôi
P_o (kg.m ⁻³)	2440	2300
G (GPa)	22	10,093
N	0.61	0.89
A	0.79	0.55
B	1.6	1.23
C	0.007	0.0097
S_{max}	7	20
ϵ_0^*	1.0	1.0
T (MPa)	5.6	4
D_1	0.04	0.04
D_2	1	1
P_{crush} (MPa)	80	20
P_{lock} (GPa)	1.2	2
e_{fmin}	0.01	0.01
$K1$ (GPa)	85	39
K_2 (GPa)	-171	-223
K_3 (GPa)	208	550
μ_{crush}	0.00124	0.00125
μ_{lock}	0.011	0.174

- **Thuốc nổ:** Trong tính toán mô phỏng số để xác định được áp lực do sản phẩm nổ tác dụng lên đất đá, các nhà nghiên cứu sử dụng phương trình trạng thái để biểu thị mối quan hệ giữa năng lượng, áp lực và mật độ của sản phẩm nổ. Có nhiều tác giả xây dựng các dạng phương trình trạng thái khác nhau như Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) E_{OS}, Mie-Gruneisen E_{OS} [9], [10], [11]. Phương trình trạng thái Jones-Wilkins-Lee (JWL equation of state) được sử dụng phổ biến và rộng rãi vì tính đơn giản của nó và đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng trong các công trình nghiên cứu của mình [6], [12], [13], [14], [15]. Áp lực tác dụng lên môi trường do sản phẩm nổ gây ra được tính toán theo phương trình trạng thái “Jones-Wilkins-Lee” (JWL equation of state) được biểu thị theo phương trình sau [16]:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 \nu} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 \nu} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

V là thể tích tương đối của sản phẩm nổ; A, B, R_1, R_2 , và ω là các tham số đặc tính của thuốc nổ, các tham số này thu được khi thí nghiệm dẫn nổ sản phẩm nổ trong các điều

kiện kiểm soát được [17], [18]. Giá trị của các tham số này được trình bày trong bảng 3.

Bảng 3. Các tham số của thuốc nổ theo phương trình trạng thái JWL [17]

A (Mbar)	B (Mbar)	R_1
3,73	0,0374	4,15
R_2	E (kJ/m ³)	ω
0,9	$6,06 \cdot 10^6$	0,35
V_d (m/s)	P (kg/m ³)	p_{cs} (Mbar)
6930	1650	0.281

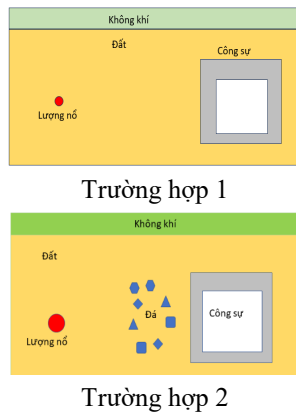
- *Thiết lập mô hình:*

Bài toán kết cấu BTCT chịu tác dụng nổ của bom đạn trong hai trường hợp:

Trường hợp 1: môi trường đất sét đồng nhất.

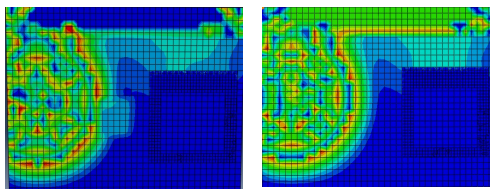
Trường hợp 2: môi trường đất sét lẫn đá học.

Các thông số vật liệu thừa nhận từ các nghiên cứu trước đó, như đã trình bày ở phần trên.



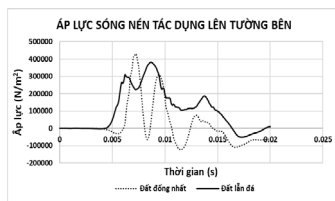
Hình 5. Mô hình bài toán trong môi trường đồng nhất và không đồng nhất.

Sau khi tính toán bằng phần mềm Abaqus cho hai trường hợp kết cấu kết cấu đặt trong hai môi trường khác nhau cho kết quả như hình 6, 7 và hình 8.

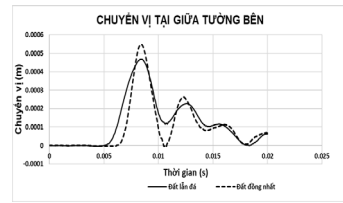


a) Môi trường đất lẫn đá; b) Môi trường đồng nhất

Hình 6. Sự lan truyền dao động của các phần tử môi trường



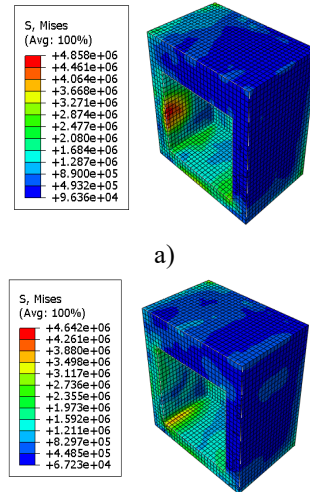
a) Áp lực sóng nén;



b) Chuyển vị tại điểm giữa tường bên

Hình 7. Áp lực sóng nén, chuyển vị tại điểm giữa tường bên của kết cấu

Ta thấy khi nổ trong môi trường đất lẫn đá tốc độ lan truyền của sóng nén tác dụng lên kết cấu ngầm nhanh hơn khi nổ trong môi trường đất đồng nhất. Tuy nhiên áp lực sóng nén khi môi trường có lẫn đá nhỏ hơn trong môi trường đất đồng nhất (382000 N/m^2 và 432000 N/m^2).

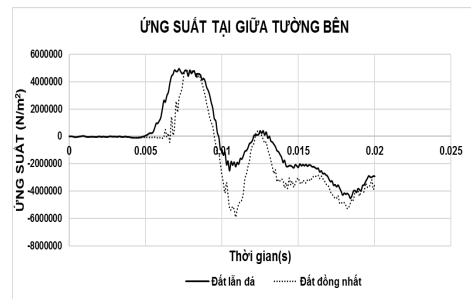


a)

b)

Hình 8. Biểu đồ ứng suất trong kết cấu tại thời điểm $t=0.011s$

Ứng suất nén điểm giữa của tường tại thời điểm $t = 0.011s$ khi nổ trong môi trường đất lẫn đá học ($2,2 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$) tuy xuất hiện sớm hơn nhưng nhỏ hơn rõ rệt so với khi nổ trong môi trường đồng nhất ($6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$).



Hình 9. Ứng suất tại mặt trong tường bên của kết cấu

3. Kết luận

Trong nghiên cứu này đã trình bày cơ sở lý thuyết lan truyền của sóng nén do nổ trong môi trường đất đá tác dụng lên kết cấu ngầm. Bài báo đã thiết lập và phân tích bài toán nổ trong môi trường đất sét đồng nhất và không đồng nhất có lẫn đá học. Kết quả thu được cho thấy khi môi trường đất sét có lẫn đá học tác dụng của sóng nén lên kết cấu ngầm sẽ xuất hiện sớm hơn nhưng cường độ sóng sẽ giảm đi. Ứng xử của kết cấu khi đặt trong môi trường đất lẫn đá học cũng giảm đi rõ rệt so với môi trường đất đồng nhất. Như vậy, môi trường đất sét lẫn đá học có thể tăng khả năng chịu đựng của kết cấu với cùng tải trọng nổ như khi nổ trong đất sét đồng nhất.

Trên cơ sở này, chúng ta có thể tìm ra một hướng nghiên cứu mới trong giải pháp bảo đảm nâng cao sức chịu đựng của kết cấu ngầm trong đất trong tương lai và tận dụng được các vật liệu sẵn có tại địa phương để chèn lấp bên ngoài cùng với đất bao quanh kết cấu ngầm.

Tài liệu tham khảo

- [1] T. J. Holmquist, G. R. Johnson and W. H. Cook, "A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rate and high pressure," The 14th International Symposium on Ballistic, pp. 591-600, 1993.
- [2] N. X. BÀNG, "Nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến kết cấu ngầm chịu tác dụng của tải trọng nổ," Tạp chí Xây dựng, pp. 110-112, 2023.
- [3] V. D. L. Đ. V. D. Nguyen Tri Ta, *Giao trình Công su Tập 1*, Hà Nội: HV KTQS, 2008.
- [4] Đ. T. THẮNG, *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*, Hà Nội: Khoa học tự nhiên và công nghệ, 2015.
- [5] Đ. T. THẮNG, *Nổ mìn trong xây dựng công trình*, Hà Nội: Học viện kỹ thuật quân sự, 2020.
- [6] Y. H. a. F. X. Zhiliang Wang, "Three-Dimensional Numerical Analysis of Blast-Induced Damage Characteristics of the Intact and Jointed Rockmass," *Computers, Materials & Continua*, vol. 60, pp. 1189 - 1206, 2019.
- [7] Johannes Pistol, Franz-Josef Falkner, Dietmar Adam, Christoph Adam, "COMPARISON OF CONSTITUTIVE SOIL MODELS FOR THE SIMULATION OF DYNAMIC ROLLER COMPACTION," in *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*, Vienna, Austria, 2012.
- [8] H. W. Q. F. X.-Z. K. Gen-Mao Ren, "Parameters of Holmquist–Johnson–Cook model for high strength concrete-like materials under projectile impact," *International Journal of Protective Structure*, 2017.
- [9] C. Mader, *Numerical Modeling of Detonation*, California: U. of California, 1979.
- [10] J.R. Asay and M. Shahinpoor., *High-Pressure Shock Compression of Solids*, 1993.
- [11] W. W. W.C. Davis in J.A. Zukas, "Explosive Effects and Applications-," in *Shock wave in solids*, New York, Springer-Verlag, 1998, pp. 75-102. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108744>
- [12] M. D. Banadaki and B. Mohanty, "Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock," *International Journal of Impact Engineering*, Vols. 40-41, pp. 16-25, 2012.
- [13] X. G. Y. Z. Jianzhong Lai, "Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 84, pp. 1-12, 2015.
- [14] H. W. J. W. N. T. Zhiliang Wang, "Finite element analyses of constitutive models performance in the," *Computers and Geotechnics*, vol. 135, 2021.
- [15] Y. L. H. H. K. C. Zhongqi Wang, "A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast," *Computers and Structures*, vol. 83, p. 339–356, 2005.
- [16] H. H. K. M. Y. K. S. Itoh, "Determination of JWL parameters from underwater explosion test," in *12th International Detonation Symposium*, San Diego, 2002.
- [17] . Alia and M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 1032-1042, 2006
- [18] Bibiana Luccioni, Daniel Ambrosini, Gerald Nurick, Izak Snyman, "Craters produced by underground explosions," *Computers and Structures*, vol. 87, pp. 1366-1373, 2009.

Ngày nhận bài: 2/10/2023

Ngày hoàn thành sửa bài: 1/3/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/3/2024