

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG HÌNH DẠNG MẶT CẮT NGANG ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG CỦA ĐƯỜNG HẦM METRO DƯỚI TÁC DỤNG CỦA VỤ NỔ TRÊN MẶT ĐẤT

INVESTIGATION THE INFLUENCE OF CROSS-SECTION SHAPE ON THE STRESS-DEFORMATION STATE OF METRO TUNNEL UNDER THE IMPACT OF SURFACE EXPLOSION

PHAN THÀNH TRUNG^{a,*}

^aViện Kỹ thuật công trình đặc biệt

*Tác giả đại diện: *Email*: thanhtrungphank4@gmail.com

Ngày nhận 19/8/2025, *Ngày sửa* 25/9/2025, *Chấp nhận* 29/9/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol3-4>

Tóm tắt: Bài báo này tập trung vào nghiên cứu và đánh giá sự ảnh hưởng hình dạng mặt cắt ngang đến trạng thái ứng suất - biến dạng của đường hầm metro dưới tác dụng của vụ nổ trên mặt đất. Đường hầm tàu điện ngầm có tiết diện mặt cắt ngang lần lượt hình hộp chữ nhật, hình tròn và vòm tường thẳng chôn trong môi trường đất đá ở độ sâu 7 m được sử dụng để khảo sát trạng thái ứng suất - biến dạng dưới tác dụng của vụ nổ 1000 kg thuốc nổ TNT trên mặt đất. Phần mềm mô phỏng ABAQUS được sử dụng để mô hình hóa và phân tích kết quả của bài toán này. Kết quả chỉ ra rằng các đường hầm có mặt cắt ngang hình tròn có khả năng chịu tải trọng nổ trên mặt đất tốt nhất, tiếp đến là mặt cắt vòm tường thẳng và hình hộp chữ nhật.

Từ khóa: Mô phỏng số, nổ trên mặt đất, phá hủy bê tông cốt thép.

Abstract: This paper focuses on the study and evaluation of the influence of cross-sectional shape on the stress-deformation state of metro tunnels under the impact of ground explosions. Metro tunnels with rectangular, circular and straight-wall arch cross-sections buried in soil and rock at a depth of 7 m were used to investigate the stress-deformation state of metro tunnels under the impact of 1000 kg TNT explosions on the ground. ABAQUS simulation software was used to model and analyze the results of this problem. The results showed that tunnels with circular cross-sections had the best ability to withstand ground explosion loads, followed by straight-wall arch and rectangular cross-sections.

Keywords: Numerical simulation, Surface explosion, demolition of reinforced concrete.

1. Giới thiệu

Trên thế giới việc sử dụng năng lượng nổ để gây ra các vụ khủng bố trở thành một vấn đề nhức

nhối cho các nhà chức trách trong việc bảo đảm sự an toàn cho con người và các công trình trước hoạt động này. Xe bom là sự lựa chọn hàng đầu mà những kẻ khủng bố sử dụng để thực hiện kế hoạch của chúng nhờ vào sức công phá hủy diệt của nó. Tàu điện ngầm là một trong những nơi công cộng có thể bị ảnh hưởng bởi những sự kiện như vậy. Để có thể bảo vệ các kết cấu của đường hầm metro trong trường hợp này là sự dự đoán vị trí và tính toán tải trọng vụ nổ tác dụng lên kết cấu đường hầm thông qua các nghiên cứu phân tích, thực nghiệm hoặc các công cụ mô phỏng số. Vì vậy cần xác định ứng xử động của đường hầm metro chịu tác dụng do nổ nhằm đảm bảo an toàn cho các công trình này.

Ảnh hưởng của tải trọng nổ đến đường hầm metro đã được nhiều tác giả nghiên cứu bằng các thí nghiệm thực địa. Ví dụ, Công binh Lục quân Hoa Kỳ đã thực hiện một số vụ nổ thử nghiệm trong những năm 1948 - 1952 gần khu vực có đường hầm bằng đá sa thạch (Hendron, 1977) [1]. Trong thử nghiệm này, ảnh hưởng của vụ nổ được chia thành 4 nhóm: gây nứt, phá hoại cục bộ, phá hoại lớn và phá hoại hoàn toàn. Kendorski và cộng sự (1973) [2] đã trình bày sự hình thành các vết nứt trên lớp lót bê tông phun của đường hầm xảy ra khi ảnh hưởng của sóng nổ. Cheesman và cộng sự (2006) [3] đã thực hiện phân tích Euler - Lagrange để nghiên cứu sự lan truyền sóng nổ của chất nổ chôn trong cát bão hòa nước. Kích thước, độ sâu chôn của khối chất nổ, khoảng cách và kích thước của chướng ngại rất đa dạng. Độ chính xác của số liệu mô phỏng này được so với các quan sát thực nghiệm. Nakano và cộng sự (1993) [4] cũng đã trình bày sự hình thành các vết nứt bê tông phun gây ra bởi một vụ nổ đường hầm. Hầu hết các công thức thử nghiệm có sẵn trong tài liệu thường chỉ phản

ánh đối với một số loại đất đá cụ thể, đồng nhất và tương ứng với những trường hợp tải trọng nổ cụ thể nào đó.

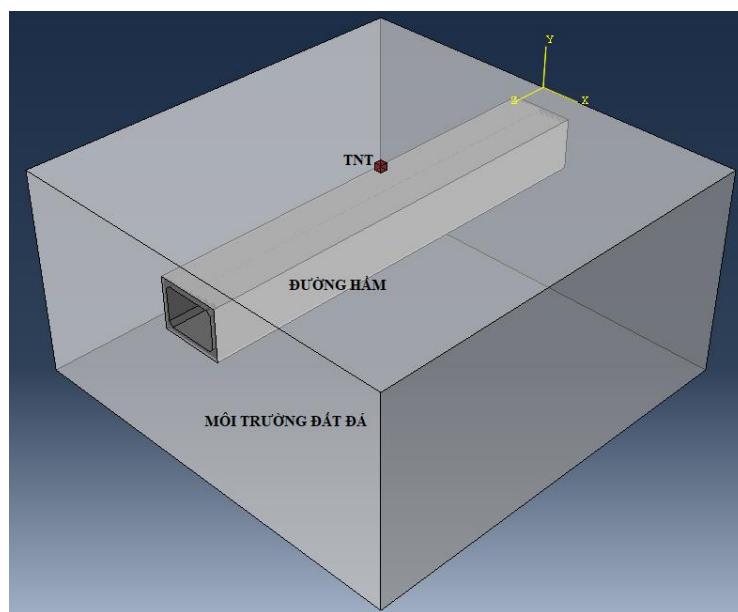
Ngày nay, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ máy tính và sự phát triển phương pháp số, cho phép tính toán chi tiết và xác thực hơn về quá trình ảnh hưởng của tải trọng nổ đến kết cấu của đường hầm metro. Các phương pháp số khác nhau đã được đề xuất để đánh giá khối lượng đá hoặc thiệt hại của đường hầm do tải trọng nổ gây ra. Ví dụ Wang và Lu (2003) [5], Vương và cộng sự (2004) [6] đã xây dựng mô hình mô phỏng số của đất ba pha có khả năng sử dụng để mô phỏng vụ nổ và lan truyền sóng nổ trong đất. Sử dụng mô hình này, Lu và cộng sự (2005) [7], Wang và cộng sự (2005) [8] đã thực hiện mô phỏng số của một công trình ngầm dưới tác dụng vụ nổ dưới lòng đất. Luo và cộng sự (2007) [9] đã phân tích các phản ứng

động của đường hầm tàu điện ngầm Nam Kinh trong đất cát đối với vụ nổ trên mặt đất của 100kg và 300kg thuốc nổ TNT bằng phần mềm LS-DYNA.

Bài toán trong nghiên cứu này đánh giá sự ảnh hưởng hình dạng mặt cắt ngang đến trạng thái ứng suất - biến dạng của đường hầm metro dưới tác dụng của vụ nổ 1000 kg thuốc nổ TNT trên mặt đất đối với hầm được chôn ở độ sâu 7 m trong vùng đất cát xung quanh. Đường hầm tàu điện ngầm có mặt cắt ngang hình hộp chữ nhật, hình tròn và vòm tường thẳng được sử dụng để khảo sát trạng thái ứng suất - biến dạng của đường hầm metro dưới tác dụng của vụ nổ trên mặt đất. Phần mềm mô phỏng ABAQUS được sử dụng để mô hình hóa và phân tích kết quả của bài toán này.

2. Đặt bài toán nghiên cứu

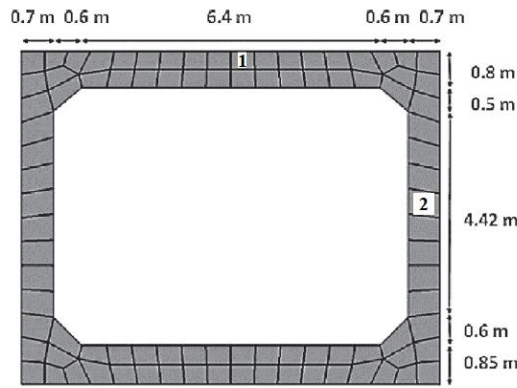
2.1 Mô hình bài toán



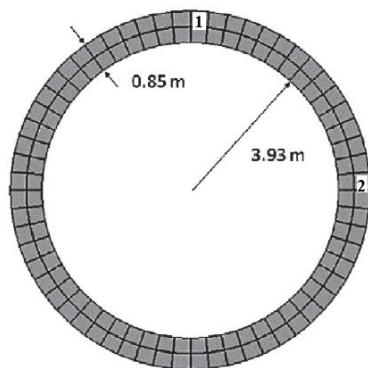
Hình 1. Mô hình bài toán mô phỏng

Đường hầm được sử dụng trong bài toán này có hình dạng mặt cắt ngang lần lượt là hình chữ nhật (Hình 2), hình tròn (Hình 3), vòm tường thẳng (Hình 4). Vùng bị ảnh hưởng của vụ nổ (1000 kg TNT) trong đất và đường hầm, đã được nhóm tác giả khảo sát bằng cách thay đổi chiều dài đường hầm từ 10 m đến 30 m trong mô phỏng số. Nhận thấy rằng trên 25 m, việc thay đổi chiều dài đường hầm chỉ gây ra những thay đổi không đáng kể về tải trọng nổ

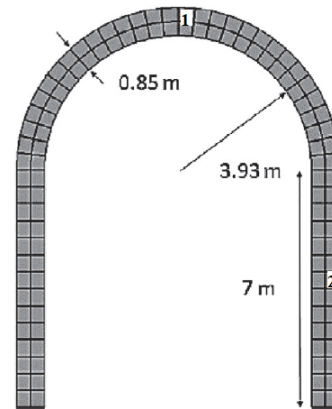
trên đường hầm. Vì vậy, chỉ có kết quả với chiều dài đường hầm là 25 m được chọn để khảo sát trong bài báo này (Hình 1). Hơn nữa, sự dịch chuyển chuyển tiếp của các nút vuông góc với các mặt phẳng đối xứng (mặt phẳng YZ và YX) bị hạn chế. Các ranh giới không phản xạ được áp dụng cho hai bề mặt bên trên và bề mặt dưới cùng để giảm thiểu sự phản xạ sóng ứng suất tại các ranh giới tính toán này và điều kiện biên tự do được sử dụng cho bề mặt trên.



Hình 2. Mặt cắt ngang hình chữ nhật



Hình 3. Mặt cắt ngang hình tròn



Hình 4. Mặt cắt ngang vòm tường thẳng

2.2 Mô hình vật liệu

Để tính toán kết cấu chịu tác dụng của tải trọng nổ bằng các phần mềm ABAQUS [10] trước tiên cần phải mô hình hóa bài toán. Các tham số của các mô hình vật liệu dưới đây được sử dụng cho bài toán khảo sát của bài báo này. Các mô hình vật liệu này được xác nhận độ tin cậy trong các nghiên cứu [11,12].

a. *Thuốc nổ*: Thuốc nổ được sử dụng trong nghiên cứu này là loại thuốc nổ TNT. Khi bị kích nổ thuốc nổ chuyển hóa rất nhanh từ thể rắn sang khí, tương tác và truyền sang các vùng xung quanh một năng lượng nhất định [13,14]. 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 hạt không lưới SPH nhằm tránh sự méo mó quá lớn của lưới dẫn đến lỗi trong quá trình

giải [15,16]. Mặt khác trong quá trình nổ các phần tử của sản phẩm nổ có thể sẽ được mở rộng ra các lớp bê tông xung quanh và ngược lại, lớp bê tông xung quanh có thể sẽ bị đẩy, thâm nhập vào vùng của sản phẩm nổ. Do đó thuốc nổ và vùng bê tông 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. 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 [17] với các tham số: $v = 1 / \rho$ là thể tích riêng; ρ là khối lượng riêng thuốc nổ TNT; A, B, r_1, r_2, ω là các hằng số đoạn nhiệt được xác định từ thí nghiệm, v_n là tốc độ nổ; E_0 là năng lượng trên đơn vị thể tích; P_{CJ} là áp suất nổ. Giá trị cụ thể các tham số được liệt kê trong bảng 1.

Bảng 1. Tham số mô hình vật liệu TNT

ρ (kg/m ³)	v_n (m/s)	P_{CJ} (kPa)	A (kPa)	B (kPa)
1650	6930	$2,1 \times 10^7$	$3,7377 \times 10^8$	$3,73471 \times 10^6$
r_1	r_2	ω	v	E_0 (kJ/m ³)
4,15	0,9	0,35	1/1650	6×10^6

b. *Bê tông*: Sử dụng mô hình vật liệu Holmquist-Johnson-Cook (HJC), các tham số của mô hình

HJC được xác định bằng phương pháp do Holmquist và cộng sự đề xuất [18]. Loại bê tông

được sử dụng trong nghiên cứu này là bê tông B25 hiện chưa có các tham số cho mô hình HJC, do vậy tác giả đã thực hiện các thí nghiệm nén đơn trục, thí nghiệm lặp cũng như các thí nghiệm ép chèn và nén

ba trục bằng máy nén ba trục tại phòng thí nghiệm của Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt để đưa ra các tham số của mô hình HJC cho bê tông B25 (Bảng 2).

Bảng 2. Các tham số mô hình HJC cho bê tông B25

ρ_0 (kg/m ³)	G (Pa)	A	B	C	N	$e_{f \min}$
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		

c. **Cốt 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 (tương đương thép CII) được lấy theo tài liệu [19,20] cụ thể như Bảng 3:

Bảng 3. Các tham số mô hình vật liệu thép

E (MPa)	ν	A (MPa)	B (MPa)	n	T_{melt} (K)	T_H (K)	m
200000	0,3	263	130	0,0915	1800	293,2	1
ρ (kg/m ³)	C	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

d. **Đất:** Đất được mô hình hóa theo loại vật liệu của Yang và cộng sự công bố năm 2010 [21]. Các tham số vật liệu của đất đã được xác định từ các thành phần mô hình nén đất. Trong đó: q là khối lượng

riêng, G là mô đun cắt, K_u là mô đun khối tại đường dờ tải: a_0 , a_1 và a_2 là hằng số hàm giới hạn chảy và P_{cut} là ngưỡng áp suất cho đứt gãy kéo (Bảng 4; 5).

Bảng 4. Kết quả nén 3 trục của đất

Biến dạng	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,33
Áp suất (MPa)	0,02	0,05	0,07	0,12	0,2	0,34	0,5

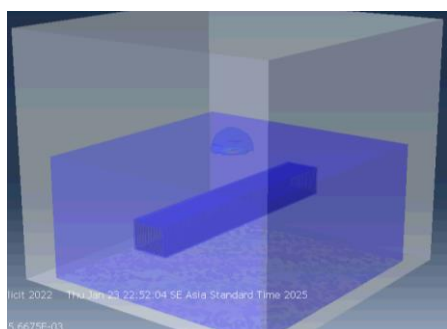
Bảng 5. Các tham số mô hình đất

ρ (kg/m ³)	G (MPa)	K_u (MPa)	a_0	a_1	a_2	P_{cut} (MPa)
1255	1,724	5,516	0	0	0,8702	0

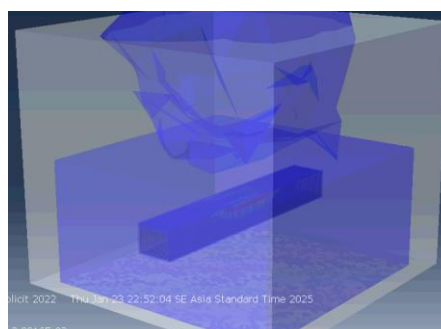
2.3 Kết quả mô phỏng số

Kết quả mô phỏng số cho thấy, ngay sau khi khối thuốc nổ bị kích nổ, sóng nổ được hình thành và lan truyền gây phá hoại cục bộ bề mặt đất, tạo phiểu nổ ngay trên bề mặt đất đá và truyền sóng nén vào trong khối đất đá. Tiếp đó sóng nén được lan truyền trong môi trường đất đá đến tác dụng lên

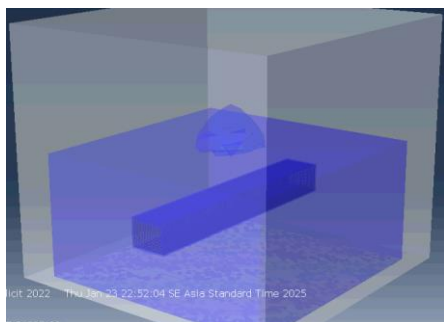
đường hầm. Nhóm tác giả khảo sát các trường hợp hầm có hình dạng mặt cắt lần lượt là hình chữ nhật (Hình 2), hình tròn (Hình 3), vòng tường thẳng (Hình 4) chôn ở độ sâu 7 m. Hình 5 thể hiện quá trình hình thành, lan truyền và phá hoại của sóng nổ trong trường hợp mặt cắt ngang của hầm là hình chữ nhật.



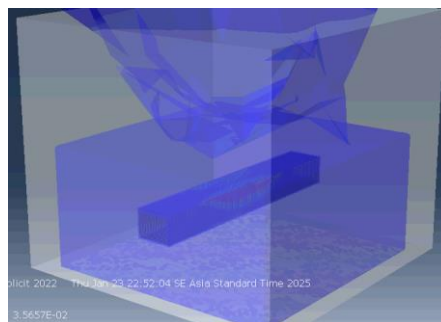
(a) Thời điểm $t = 0,005s$



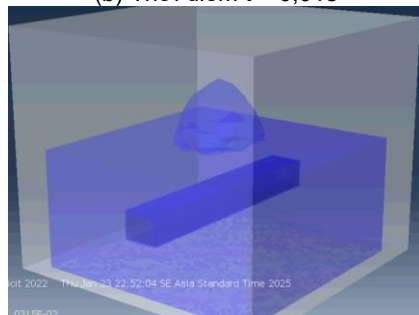
(f) Thời điểm $t = 0,05s$



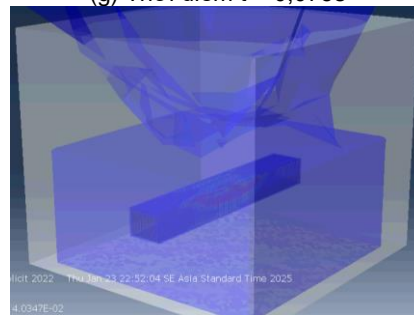
(b) Thời điểm $t = 0,01s$



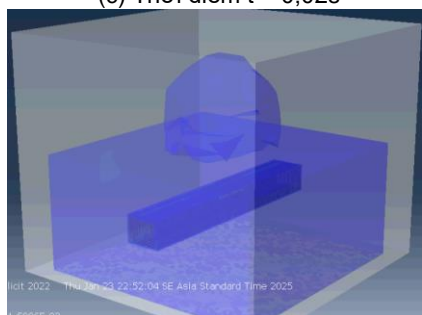
(g) Thời điểm $t = 0,075s$



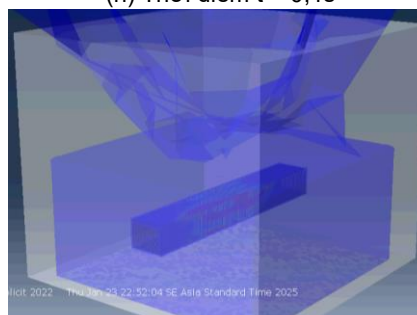
(c) Thời điểm $t = 0,02s$



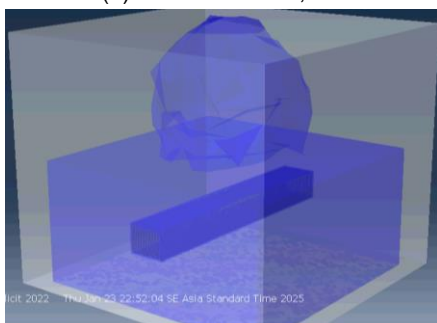
(h) Thời điểm $t = 0,1s$



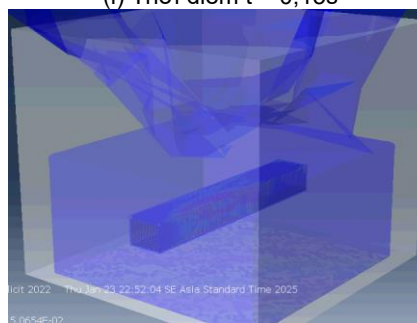
(d) Thời điểm $t = 0,03s$



(i) Thời điểm $t = 0,15s$

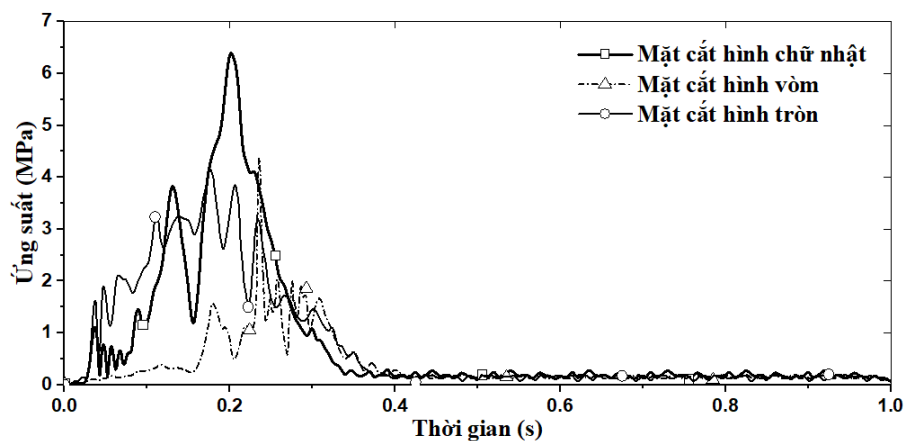


(e) Thời điểm $t = 0,04s$

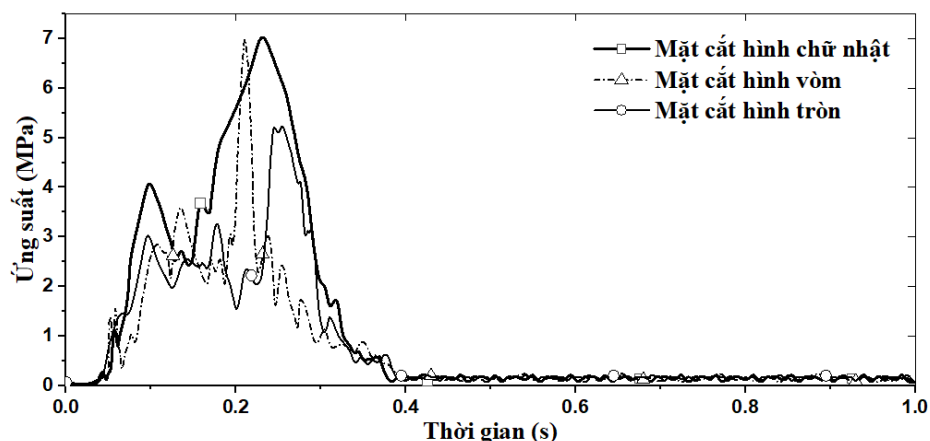


(l) Thời điểm $t = 0,2s$

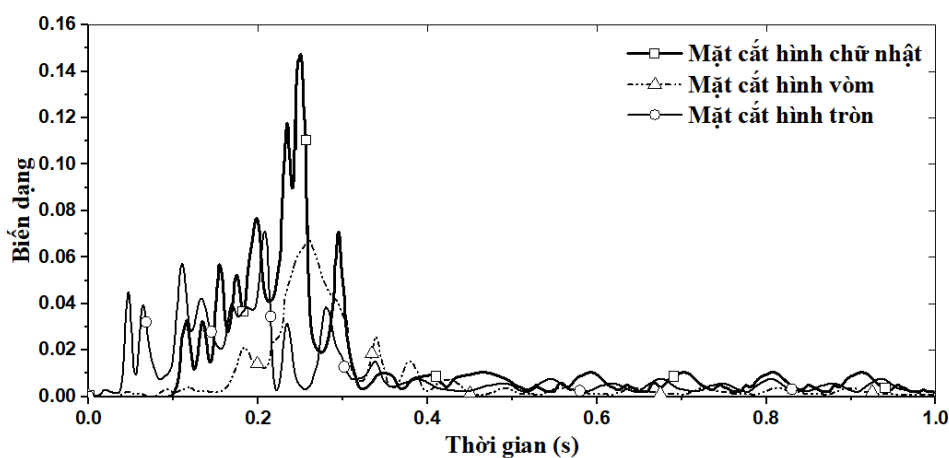
Hình 5. Hình ảnh hình thành và lan truyền sóng nổ trường hợp mặt cắt ngang của hầm là hình chữ nhật



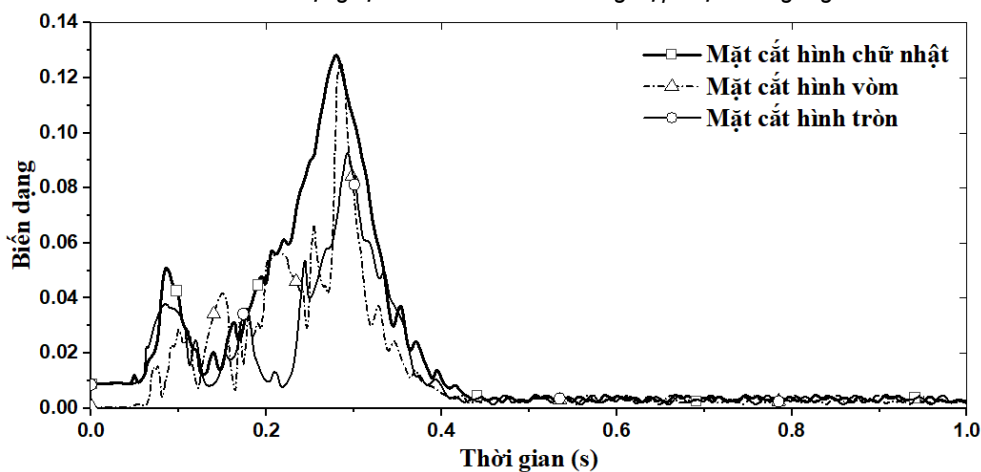
Hình 6. Ứng suất tại điểm 1 của các trường hợp mặt cắt ngang



Hình 7. Ứng suất tại điểm 2 của các trường hợp mặt cắt ngang



Hình 8. Biến dạng tại điểm 1 của các trường hợp mặt cắt ngang



Hình 9. Biến dạng tại điểm 2 của các trường hợp mặt cắt ngang

3. Nhận xét kết quả

Kết quả mô phỏng số cho thấy dưới tác dụng của tải trọng nổ ngay lập tức sóng nổ được hình thành và lan truyền gây phá hoại cục bộ bề mặt đất, tạo phiểu nổ ngay trên bề mặt đất đá và truyền sóng nén vào trong khối đất đá. Tiếp đó sóng nén được lan truyền trong môi trường đất đá đến tác dụng lên đường hầm.

Đường hầm có mặt cắt ngang là hình tròn có khả năng chịu lực tốt nhất dưới tác động của vụ nổ. Các mô phỏng cho thấy ứng suất phân bố đồng đều trên toàn bộ mặt cắt tròn, với giá trị lớn nhất là 4.8 MPa và biến dạng tối đa ở mức 0.04. Đây là hình dạng lý tưởng để giảm thiểu các vấn đề về tập trung ứng suất, giúp công trình ổn định hơn và chịu lực tốt hơn.

Đường hầm có mặt cắt ngang là hình vòm tường thẳng cũng thể hiện khả năng chịu tải tốt, nhưng ứng suất ở các điểm yếu của vòm có thể lên đến 5.5 MPa, và biến dạng có thể đạt 0.06. Mặc dù mặt cắt này cung cấp không gian rộng hơn, nhưng sự gia tăng ứng suất và biến dạng ở các vị trí yếu là điều cần lưu ý khi thiết kế.

Đường hầm có mặt cắt ngang là hình chữ nhật có ứng suất tối đa đạt 7.1 MPa, với biến dạng tại các khu vực tiếp giáp với các góc có thể lên tới 0.14. Điều này cho thấy hình dạng này dễ bị tập trung ứng suất ở các góc hoặc các khu vực tiếp xúc, dẫn đến nguy cơ nứt hoặc hư hỏng kết cấu cao hơn.

Kết quả mô phỏng từ phần mềm ABAQUS cũng khẳng định rằng, mặt cắt hình tròn là lựa chọn tối ưu cho các tuyến metro ngầm. Không chỉ giúp phân phối ứng suất đồng đều mà còn đảm bảo công trình ổn định dưới tác động của vụ nổ. Mặt cắt hình vòm tường thẳng và chữ nhật mặc dù có thể thích hợp trong một số tình huống thi công và yêu cầu không gian rộng, nhưng về khả năng chịu lực và giảm thiểu biến dạng dưới tải trọng nổ, chúng không tối ưu bằng mặt cắt hình tròn.

4. Kết luận

Các kết quả thu được khẳng định tính hợp lý khi sử dụng mô hình vật liệu trong phân tích kết cấu bê tông cốt thép chịu tác động nổ bằng phần mềm ABAQUS.

Kết quả mô phỏng cho thấy các mặt cắt hình tròn và vòm tường thẳng có khả năng chịu lực tốt hơn so với mặt cắt hình chữ nhật. Mặt cắt tròn, nhờ tính đối xứng và khả năng phân phối ứng suất đồng đều, đã thể hiện được sự vượt trội trong việc giảm thiểu biến dạng và hư hại khi gặp tác động nổ. Mặt cắt hình vòm cũng tương tự, với khả năng chịu tải tốt nhờ sự phân bố lực nén đều trên các bề mặt vòm. Trong khi đó, mặt cắt hình chữ nhật mặc dù có ưu điểm về không gian sử dụng nhưng lại gặp phải vấn đề tập trung ứng suất ở các góc, khiến các điểm này dễ bị nứt hoặc phá hoại khi chịu tác động của vụ nổ.

Cũng từ các kết quả mô phỏng số đã chứng minh rằng việc lựa chọn hình dạng mặt cắt phù hợp có thể giảm thiểu đáng kể mức độ biến dạng và ứng

suất gây hại cho kết cấu công trình dưới tác động của vụ nổ trên mặt đất.

Các kết quả thu được có thể cung cấp thêm một số thông tin hữu ích cho các thiết kế đường hầm có kể đến an toàn của các vụ nổ trên mặt đất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hendron, A.J., (1977). *Engineering of rock blasting on civil projects*. In: Hall, W.J. (Ed.), *Structural and Geotechnical mechanics, A Volume Honoring NM Newmark*. Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Kendorski, F.S., Jude, C.V., Duncan, W.M., (1973). *Effect of blasting on shotcrete drift linings*. *Min. Eng.* 25 (12), 38–41.
- [3] Cheesman, B.A., Wolf, S., Yen, C.F., Skaggs, R., (2006). *Blast simulation of explosive buried in saturated sand*. *Fragblast* 10 (1), 1–8.
- [4] Nakano, K., Okada, S., Furukawa, K., Nakagawa, K., (1993). *Vibration and cracking of tunnel lining due to adjacent blasting*. In: Rombun-Hokokushu, D.G. (Ed.), *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, pp. 53–62 (in Japanese).
- [5] Wang, Z., Lu, Y., (2003). *Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading*. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 23, 705–714.
- [6] Wang, Z., Hao, H., Lu, Y., (2004). *A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading*. *Numer. Anal. Meth. Geomech.* 28 (1), 33–56.
- [7] Lu, Y., Wang, Z., Chong, K., (2005). *A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations*. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 25, 275–288.
- [8] Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., Chong, K., (2005). *A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to surface blast*. *Comput. Struct.* 83, 339–356.
- [9] Luo, K.S., Wang, Y., Zhang, Y.T., Huang, L.K., (2007). *Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion*. *J. PLA Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.)*. 8 (6), 674–679.
- [10] ABAQUS Theory Manual, revision (2020), Pawtucket, Rhode Island, Mỹ.
- [11] 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, tr 180-196, Trường Đại học Xây dựng.
- [12] 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, tr 39-47, Viện Khoa học công nghệ xây dựng.
- [13] McGuire, W., (1974), *“Prevention of Progressive Collapse”*, Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [14] Izzuddin, B.A. (2008). *“Simplified assessment of structural robustness for sudden component failures”*, COST Action TU0601, 1st Workshop on Robustness of Structures, ETH Zurich, Switzerland.
- [15] Monagan J. J. An introduction to SPH, Comput. Phys. Comm (1988). Vol. 48. P. 89-96.
- [16] Hayhurst CJ, Clegg RA (1997), *Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates*. Int J Impact Eng 1997, 337-48.
- [17] E. Lee, M. Finger, W. Collins (1973), *JWL equations of state coefficient for high explosives*, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCID-16189, Berkeley.
- [18] Holmquist TJ, Johnson GR and Cook WH (1993), *A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures*. In: The 14th international symposium on ballis-tic, Quebec, Canada, 26–29 September, pp. 591-600. Arlington, VA: American Defense Preparedness Association.
- [19] Johnson G. R., Cook W. H.(1983), *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*, Proceedings of the 7th Inter-national Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands.
- [20] Johnson G. R., Cook W. H.(1985), *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressure*, EngngFractMech, Vol. 21(1), pp. 31-48.
- [21] Yang, Y., Xie, X., Wang, R., (2010). *Numerical simulation of operating metro tunnel induced by ground explosion*. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2 (4), 373–384.