

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐƯỜNG HẦM KHI CHUYỂN HƯỚNG ĐẾN ÁP LỰC SÓNG XUNG KÍCH BẰNG PHẦN MỀM

ANSYS AUTODYN STUDY ON THE EFFECT OF DIRECTIONAL CHANGES ON SHOCK WAVE PRESSURE IN TUNNELS USING ANSYS AUTODYN SOFTWARE

PGS.TS. Vũ Ngọc Quang, TS. Ngô Ngọc Thủy*, TS. Vũ Ngọc Anh - Học viện Kỹ thuật quân sự.

*Email: ngothuy.ngo@lqdtu.edu.vn

TS. Lê Bảo Quốc - Đại học Đồng Tháp

Tóm tắt: Khi thiết kế và tính toán các công trình ngầm, việc giải quyết bài toán kết cấu chịu áp lực sóng xung kích do lượng nổ phát sinh là một yêu cầu kỹ thuật hết sức phức tạp. Bài báo tập trung nghiên cứu mô phỏng quá trình lan truyền sóng nổ trong không khí và khảo sát ảnh hưởng của các đoạn hầm khi chuyển hướng (với góc chuyển hướng từ 100° đến 140°) trong đường thông ngầm đến giá trị áp lực sóng xung kích bằng phần mềm Ansys Autodyn 3D. Kết quả mô phỏng được đối chiếu với công thức thực nghiệm Xadovski để làm cơ sở cho các khuyến nghị thiết kế tối ưu.

Từ khóa: công trình ngầm, lượng nổ, sóng xung kích, đường hầm khi chuyển hướng, Ansys Autodyn.

Abstract: When designing and calculating underground structures, solving the structural problem subjected to shock wave pressure from explosive charges is a highly complex technical requirement. This article focuses on simulating the propagation of explosion waves in the air and investigating the effect of directional changes in tunnels (with deflection angles from 100° to 140°) on shock wave pressure values using Ansys Autodyn 3D software. The simulation results are compared with the empirical Xadovski formula to provide a basis for optimal design recommendations.

Keywords: underground structure, explosive charge, shock wave, directional change, Ansys Autodyn.

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh phát triển và khai thác không gian ngầm hiện nay (như hầm giao thông đô thị, đường hầm khai thác mỏ, kho tàng công nghiệp), các nguy cơ sự cố cháy nổ do rò rỉ khí gas, tai nạn lưu trữ hóa chất, hoặc bụi than đang trở thành một thách thức cực kỳ nghiêm trọng. Khác với không gian mở ngoài trời, khi một lượng nổ phát sinh bên trong hoặc ngay tại vị trí cửa hầm, sóng xung kích sinh ra sẽ bị giới hạn không gian lan truyền bởi các vách hầm cứng. Điều này dẫn đến hiện tượng sóng phản xạ chồng chất lên nhau, khiến năng lượng nổ ít bị suy giảm, duy trì siêu áp ở mức nguy hiểm và có khả năng lan truyền đi rất xa vào sâu bên trong công trình [1].

Trên thế giới, bài toán kiểm soát lan truyền sóng nổ trong hầm ngầm đã và đang thu hút sự quan tâm lớn của cộng đồng khoa học. Nhiều công trình nghiên cứu nổi bật gần đây của Li và cộng sự (2021) [5] và Zhang và cộng sự (2023) [7] đã chứng minh thông qua cả thực nghiệm và mô phỏng số rằng việc chủ động thay đổi cấu trúc hình học của đường hầm—như tạo nhánh rẽ, mở rộng tiết diện đột ngột, hay thiết kế các đoạn hầm khi chuyển hướng—đóng vai trò như các "bẫy giảm áp" rất hiệu quả. Đặc biệt, Wang et al. (2022) [6] và Zhao et al. (2023) [8] đã sử dụng các phần mềm thủy

động lực học (như AUTODYN, LS-DYNA) để xác nhận rằng các góc chuyển hướng tạo ra hiện tượng nhiễu xạ và phản xạ ngược chiều, góp phần tiêu tán nhanh chóng động năng của sóng nổ.

Tại Việt Nam, với tốc độ đô thị hóa nhanh và sự ra đời của các hệ thống Metro, hầm chui giao thông, vấn đề an toàn cháy nổ ngầm bắt đầu được đặt lên hàng đầu. Một số tác giả trong nước như Nguyễn và Phạm (2022) [1] hay Trần et al. (2024) [2] đã có những công bố bước đầu trong việc đánh giá sự suy giảm sóng nổ bằng công cụ mô phỏng. Tuy nhiên, các nghiên cứu tập trung khảo sát định lượng, tối ưu hóa cụ thể thông số góc mở của đoạn hầm khi chuyển hướng phục vụ trực tiếp cho công tác thiết kế vẫn còn khá khiêm tốn.

Nhằm góp phần làm rõ vấn đề này, bài báo ứng dụng phần mềm Ansys Autodyn 3D để đi sâu phân tích và xác định giá trị áp lực sóng nổ lan truyền trong hệ thống đường thông có bố trí đoạn hầm khi chuyển hướng với các góc dao động từ 100° đến 140° . Kết quả mô phỏng sẽ được đối chiếu với công thức giải tích kinh điển của Xadovski, từ đó cung cấp cơ sở khoa học đáng tin cậy để đề xuất thông số thiết kế góc chuyển hướng tối ưu nhất.

2. CƠ SỞ TÍNH TOÁN VÀ MÔ HÌNH BÀI TOÁN

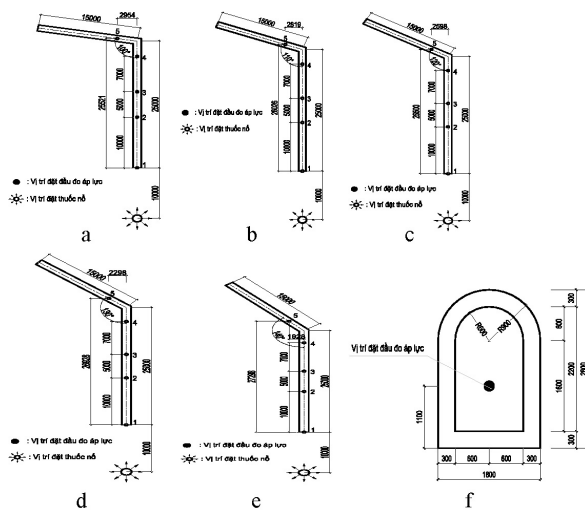
2.1. Các giả thiết tính toán và đặt bài toán

Phân tích và xác định giá trị áp lực sóng nổ lan truyền trong hệ thống đường hầm có bố trí đoạn hầm khi chuyển hướng với các góc dao động từ 100° đến 140°, mặt bằng và tiết diện ngang bài toán khảo sát thể hiện trong hình 1.

Để giải quyết bài toán đặt ra ta sẽ thừa nhận các giả thiết sau đây: Chỉ nghiên cứu lan truyền sóng xung kích và các yếu tố ảnh hưởng tới lan truyền sóng xung kích trong đường hầm; khi xác định tải trọng sóng nổ lên công trình, công trình được coi là vật thể tuyệt đối cứng và không bị dịch chuyển.

Các giả thiết trên dẫn tới các điều kiện tính toán sau đây:

- Sóng xung kích do nổ của bom lan truyền trong không khí được tính theo các công thức nổ trên mặt đất (phân biệt với trường hợp nổ trên cao)
- Sóng nổ lan truyền trong không khí là sóng cầu.
- Không tính đến sự tương tác sóng - công trình do biến dạng và dịch chuyển của kết cấu.



Hình 1. Mô hình bài toán khảo sát lan truyền lan của sóng xung kích trong đường hầm

a) Góc chuyển 100°; b) Góc chuyển 110°; c) Góc chuyển 120°; d) Góc chuyển 130°; e) Góc chuyển 140°; f) Mặt cắt ngang của đường hầm

2.2. Mô hình bài toán

Tiến hành khảo sát bài toán có lượng nổ đặt trên mặt đất, cách công trình R=15m. Lượng nổ: CTNT = 214 kg.

- *Vật liệu:* Vật liệu không khí, thuốc nổ TNT được lựa chọn trong thư viện của phần mềm. Việc lựa chọn vật liệu cũng đồng thời với việc chọn kiểu phương trình trạng thái sử dụng cho loại vật liệu đó. Đối với môi trường không khí: sử dụng phương trình trạng thái của khí lý tưởng [3].

$$P = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot e \tag{5}$$

Trong đó: P là áp suất khí (Pa); ρ là mật độ khí (kg/m³); γ là hằng số khí lý tưởng; e là nội năng riêng của khí (J/kg⁰K).

Bảng 1. Các hệ số của phương trình trạng thái khí lý tưởng

ρ (g/cm ³)	γ	Nhiệt độ (°K)	e (J/kg ⁰ K)
0,001225	1,4	288,200012	717,599976

Đối với sản phẩm nổ: Sử dụng phương trình trạng thái của sản phẩm nổ Jones-Wilkins-Lee (viết tắt là JWL) để tính các giá trị áp lực của sản phẩm nổ, đây là phương trình bán thực nghiệm [3],[4],[5]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{6}$$

Trong đó: các hằng số A, B, R₁, R₂, ω đối với chất nổ TNT được trình bày trong (Bảng 2); p là áp lực tạo ra bởi khối thuốc nổ (kPa); V= 1/ρ₀ là thể tích riêng; ρ₀ là mật độ của khối thuốc nổ TNT (ρ₀ = 1630 kg/m³); E năng lượng trên đơn vị thể tích (E = 6,0e6 KJ/m³); Áp suất nổ P_{CJ} = 2,1e7 (kPa); Tốc độ nổ: v_{CJ} = 6930 (m/s).

Bảng 2. Các hệ số của phương trình trạng thái JWL

Chất nổ	Hệ số của phương trình trạng thái JWL				
	A (kPa)	B (kPa)	R1	R2	w
TNT	3,7377e8	3,7471e6	4,15	0,9	0,35

Công trình ngầm có mặt cắt tiết diện như hình 4, mô hình hóa bài toán như hình 5,6; sử dụng vật liệu bê tông cốt thép có cường độ 35MPa, coi công trình ngầm là cứng và bất động.

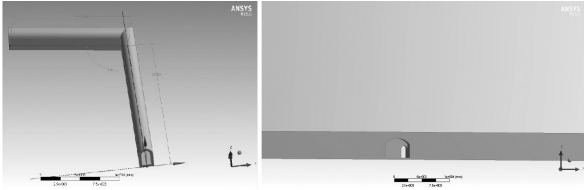
- *Mô hình hình học:* Tiến hành giải bài toán theo mô hình 3D. Mô hình được đặt toàn bộ trong môi trường không khí bán vô hạn. Khi đó ta sẽ tính được các giá trị áp lực sóng xung kích ở khoảng cách R so với tâm khối thuốc nổ TNT.

- *Dạng lưới phần tử:* Do biến dạng của các phần tử trong bài toán là tương đối lớn nên ta chọn lưới Lagrange – Euler (ALE) cho bài toán. Mục đích của lưới ALE là phát huy tối đa ưu điểm của cả hai loại lưới Lagrange và lưới Euler.

- *Đặt điều kiện đầu, điều kiện biên:* Điều kiện đầu của bài toán chính là sự không bị ảnh hưởng của các yếu tố khác tới quá trình kích nổ cũng như nổ hoàn toàn, xem thuốc nổ được kích nổ từ tâm và tốc độ nổ ổn định. Điều kiện biên (Flow Out: không có sự phản xạ lại của sóng xung kích).

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Nghiên cứu tiến hành mô phỏng 5 trường hợp đường hầm khi chuyển hướng thay đổi lần lượt theo các góc: 100°, 110°, 120°, 130°, và 140°. Có 5 điểm đo (Gauge) được đặt dọc theo trục đường hầm để ghi nhận áp lực, trong đó điểm đo 1 đặt tại cửa, các điểm 2, 3, 4 nằm trước đoạn chuyển hướng và điểm đo 5 nằm ở đoạn đường thông sau vị trí chuyển hướng.

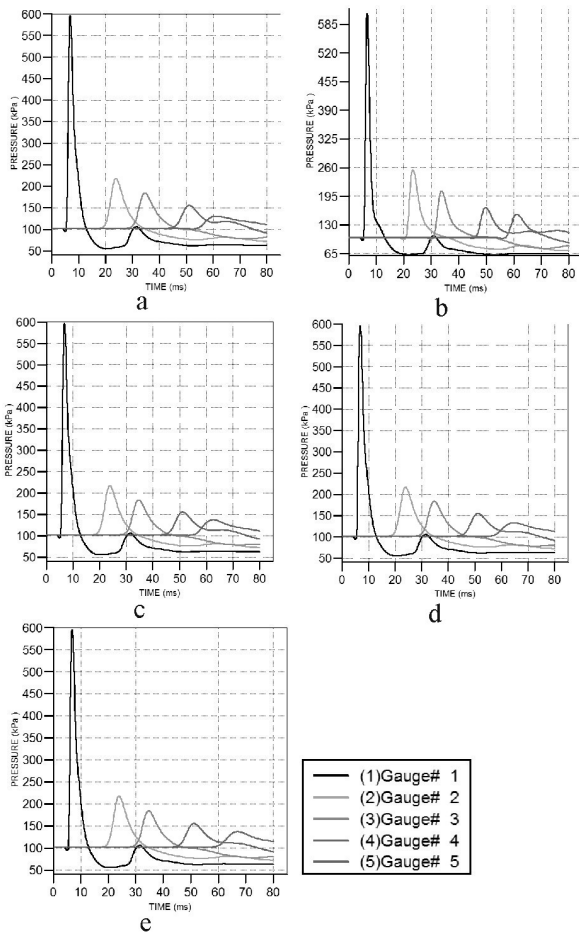


Hình 2. Mô hình hóa bài toán trong Ansys Autodyn3D

Dữ liệu trích xuất từ phần mềm ANSYS AUTODYN 3D về giá trị siêu áp lớn nhất tại 5 điểm đo đối với từng trường hợp góc được tổng hợp tại Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp giá trị áp lực lớn nhất tại các điểm đo theo phần mềm AUTODYN

Điểm đo	1	2	3	4	5 (Sau chuyển hướng)
Góc 100°	596,09	217,29	184,08	155,39	129,96
Góc 110°	596,09	217,29	184,08	155,39	130,67
Góc 120°	596,09	217,29	184,08	155,39	133,21
Góc 130°	596,09	217,29	184,08	155,39	137,14
Góc 140°	596,09	217,29	184,08	155,39	138,43



Hình 3. Biểu đồ giá trị áp lực tại điểm đo 1, 2, 3, 4, 5
a) Góc chuyển 100°; b) Góc chuyển 110°; c) Góc chuyển 120°; d) Góc chuyển 130°; e) Góc chuyển 140°;

Để kiểm chứng độ tin cậy, các kết quả thu được từ mô phỏng số được so sánh với tính toán giải tích sử dụng công thức thực nghiệm của Xadovski. Kết quả so sánh độ lệch được trình bày trong Bảng 4 dưới đây.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả so sánh áp lực giữa phần mềm Ansys Autodyn 3D và công thức thực nghiệm Xadovski

Điểm đo	So sánh giá trị áp lực P (kPa)		Chênh lệch (%)	Ghi chú	
	R (m)	Xadovski			Ansys
Điểm 1	10	618,17	596,09	-3,57	Cửa
Điểm 2	20	208,94	217,29	4,00	
Điểm 3	25	170,48	184,08	7,98	
Điểm 4	32	145,31	155,39	6,94	
Điểm 5					
Góc 100°		143,51	129,96	-9,44	
Góc 110°		143,75	130,67	-9,10	
Góc 120°		143,99	133,21	-7,49	
Góc 130°		144,24	137,14	-4,92	
Góc 140°		144,64	138,43	-4,29	

Nhận xét:

- Căn cứ vào bảng so sánh giá trị áp lực, có thể thấy kết quả mô phỏng của phần mềm Ansys Autodyn 3D hoàn toàn phù hợp về mặt quy luật lan truyền sóng xung kích trong đường thông.

- Sự sai khác giữa mô phỏng và công thức giải tích luôn nằm trong khoảng dưới 10%, đây là biên độ sai số hoàn toàn có thể chấp nhận được đối với các bài toán lượng nổ có tính phi tuyến cao.

- Khi đường hầm chuyển hướng thay đổi từ 100° đến 140°, giá trị áp lực tại điểm đo 5 (phía sau đoạn chuyển hướng) có sự biến thiên rõ rệt. Cụ thể, giá trị áp lực nhỏ nhất (129,96 kPa) đạt được khi góc chuyển hướng là 100° và lớn nhất (138,43 kPa) khi góc hầm mở rộng tới 140°.

4. KẾT LUẬN

Việc sử dụng phần mềm Ansys Autodyn 3D để mô phỏng áp lực nổ trong công trình ngầm mang lại độ tin cậy và linh hoạt vượt trội so với các công thức thực nghiệm truyền thống. Dựa trên cơ chế lan truyền sóng xung kích qua các nút giao, nhóm nghiên cứu khuyến nghị: Đối với công trình ngầm có yêu cầu chống chịu đặc biệt, các đoạn chuyển hướng hầm nên được thiết kế với góc uốn từ 100° đến 120°. Giải pháp này không chỉ tối ưu không gian vận hành cho người và thiết bị, mà còn làm suy giảm đáng kể cường độ của sóng xung kích.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn, V. H., & Phạm, T. T. (2022). Nghiên cứu mô phỏng sự lan truyền sóng nổ trong hầm giao thông đô thị bằng

- phần mềm LS-DYNA. Tạp chí Giao thông vận tải, (6), 88-95.
- [2] Trần, M. T., và nhóm tác giả. (2024). Đánh giá hiệu quả giảm áp của các giải pháp hình học trong hệ thống đường hầm công nghiệp. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 18(2), 45-56.
- [3] ANSYS. (2009). AUTODYN help: ANSYS WORKBENCH 14.5. ANSYS, Inc.
- [4] Dobratz, B. M., & Crawford, P. C. (1985). LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants (Report No. UCRL-52997). Lawrence Livermore National Laboratory.
- [5] Li, X., et al. (2021). Propagation laws of shock waves in underground tunnels with branches and bends. Tunnelling and Underground Space Technology, 112, Article 103909. doi.org
- [6] Wang, J., et al. (2022). Numerical simulation of blast wave propagation in complex underground spaces using AUTODYN. Process Safety and Environmental Protection, 160, 230-245. doi.org
- [7] Zhang, Y., et al. (2023). Attenuation effect of tunnel bends on blast waves: Experimental and numerical investigations. International Journal of Impact Engineering, 172, Article 104432. doi.org
- [8] Zhao, Z., et al. (2023). Influence of turning angle on the propagation of explosion shock waves in mine tunnels. Shock and Vibration, 2023, Article ID 8472910. doi.org

TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ GIẢM CHẤN THỦY LỰC CHO NHÀ CAO TẦNG...

Tiếp theo trang 39

và các thiết bị đỡ đặc bên trong công trình.

2. *Tính phân bố tối ưu:* Hệ số cản C tối ưu thường tập trung lớn ở các tầng dưới và giảm dần lên trên. Điều này phù hợp với đặc điểm biến dạng và phân bố lực cắt của nhà cao tầng khi chịu tải trọng ngang.

3. *Kiểm soát mục tiêu:* Việc ứng dụng thuật toán tối ưu hóa giúp kỹ sư chủ động đưa kết cấu về trạng thái làm việc mong muốn (ví dụ: khống chế chuyển vị trong miền đàn hồi) thay vì chỉ chọn thông số theo kinh nghiệm.

Nghiên cứu đã khẳng định việc sử dụng giảm chấn thủy lực là một giải pháp hữu hiệu và cấp thiết cho nhà cao tầng tại Việt Nam, đặc biệt là các công trình đã hiện hữu nhưng chưa được thiết kế kháng chấn đầy đủ. Quy trình tối ưu hóa trên Matlab cung cấp một công cụ mạnh mẽ để xác định thông số thiết bị một cách khoa học.

Cần mở rộng nghiên cứu với các hàm mục tiêu khác như tối ưu hóa lực cắt chân cột hoặc chi phí lắp đặt.

Áp dụng thực tế cho các công trình thép và bê tông cốt thép có nguy cơ chịu ảnh hưởng động đất cao tại các đô thị lớn. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- TCVN 9386 – 2012 Thiết kế công trình chịu của động đất.
- GS. TSKH Nguyễn Đông Anh (2015), Nghiên cứu thiết kế chế

- 3.TS. Phạm Đình Ba, TS Nguyễn Tài Trung (2005), Động lực học công trình, Nhà xuất bản xây dựng.
- 4.Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Tương Lai, Vũ Ngọc Quang, Lê Anh Tuấn, Nguyễn Văn Tú (2009), Giáo trình tính toán kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- 5.Phan Văn Cúc, Nguyễn Lê Ninh (1994), Tính toán và cấu tạo kháng chấn công trình nhiều tầng.
- 6.PGS.TS Nguyễn Lê Ninh (2007), Động đất và thiết kế công trình chịu động đất, Nhà xuất bản xây dựng.
- 7.Jenn – Shin Hwang, “Seismic Design of Structures with Viscous Dampers”, International training programe for Seismic Design of Building Structures
- 8.Masahiko Higashino and Shin Okamoto, “Response Control and Seismic Isolation of Buildings”, 2006 Taylor & Francis
- 9.A.Gh. Pricopie, D. Cretu (2013), “Rehabilitation of existing structures by optimal placement of viscous dampers”, Life – Cycle Sustainability of Civil Infrastructure Systems – Strauss, ISBN 978-0-415-62126-7.