

Đánh giá hiệu quả giảm áp lực nổ lên công trình ngầm đặt nông sử dụng tấm chắn bằng vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng

Evaluating the effectiveness of reducing explosion pressure for underground structures by using shields made of porous materials

> TS LÊ ANH TUẤN, TS NGUYỄN CÔNG NGHỊ*

Học viện Kỹ thuật quân sự, *Email nghinguyen@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng được dùng nhiều trong việc hấp thụ tác động của các loại tải trọng xung kích nhờ quá trình biến dạng của cấu trúc bên trong vật liệu. Vấn đề đặt ra là cần đánh giá hiệu quả của loại vật liệu này trong ứng dụng giảm áp lực từ vụ nổ tác dụng lên công trình. Nội dung của bài báo trình bày cấu tạo, nguyên lý hấp thụ năng lượng xung kích của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp); tiến hành thí nghiệm xác định các đặc trưng cơ lý và ứng xử cơ học của vật liệu xốp. Từ đó, nghiên cứu sử dụng mô phỏng số để đánh giá hiệu quả hấp thụ năng lượng của tấm chắn bằng vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng nhằm giảm tác dụng của áp lực nổ và ứng dụng cho công trình ngầm đặt nông trong đất. Kết quả nghiên cứu của bài báo cho phép gợi mở thêm các nội dung nghiên cứu chuyên sâu về cấu trúc vật liệu, cơ chế hấp thụ tác động và giải pháp ứng dụng khi sử dụng vật liệu dạng này.

Từ khóa: Vật liệu xốp; áp lực nổ; hấp thụ; rung động; ứng suất.

ABSTRACT

Materials with a porous structure are widely used to absorb the impact of dynamic loads through the deformation process of the internal structure of the material. The problem is to evaluate the effectiveness of this type of material in reducing pressure from explosion events on structures. The paper presents the structure and the principle of blast energy absorption of materials with a porous structure (foam materials) and experiments to determine the mechanical characteristics and behavior of foam materials. Numerical simulations are then used to assess the energy absorption efficiency of shields made of materials with a porous structure to mitigate the effects of explosion pressure and apply them to underground structures placed in soil. The results suggest further research on the material structure, impact absorption mechanism and application solutions when using this material.

Keywords: Foam materials; explosion pressure; absorption; vibration; stress.

1. MỞ ĐẦU

Khi một vụ nổ xảy ra ở gần công trình, xuất hiện áp lực rất lớn tác dụng lên công trình và làm cho kết cấu bị rung động mạnh, ảnh hưởng lớn đến độ bền, sự ổn định của công trình và hoạt động của con người trong đó [1-5]. Do vậy, cần nghiên cứu các giải pháp làm giảm áp lực do nổ tác dụng lên công trình, từ đó làm giảm tác động tiêu cực của áp lực nổ đối với kết cấu. Có nhiều các giải pháp khác nhau để giảm tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình, một trong những giải pháp đó là việc sử dụng các vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp) để giảm tác dụng trực tiếp của áp lực nổ. Từ những ứng dụng thực tế của vật liệu xốp được sử dụng trong một loạt các sản phẩm khác nhau từ hấp thụ năng lượng tác động, bao bọc để bảo vệ các thiết bị quan trọng tránh va đập, đệm chống va đập, sử dụng trong chế tạo sản phẩm gia dụng phục vụ đời sống,... cho thấy khả năng hấp thụ tác động của vật liệu dạng này khi chịu tác dụng của xung và đập cũng như áp lực nổ [6-9]. Do đó, việc nghiên cứu sử dụng vật liệu

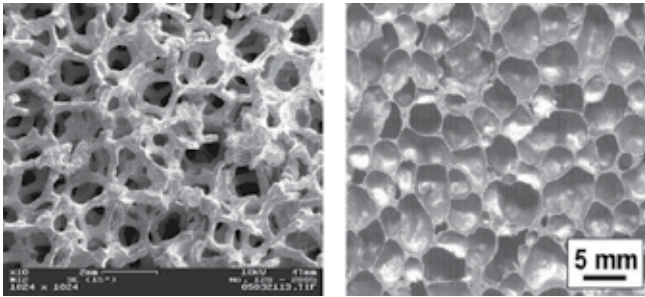
xốp để giảm rung động và ứng suất cho công trình khi chịu tác dụng nổ có tính khoa học và thực tiễn.

2. VẬT LIỆU XỐP

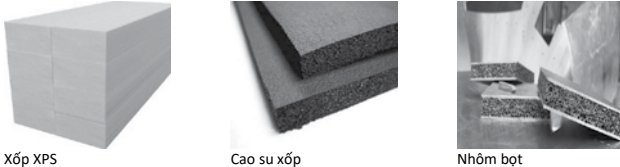
Vật liệu xốp được tạo ra với hai yếu tố quan trọng là vật liệu nền và hình thái của pha khí. Có hai hình thái pha khí trong vật liệu xốp là lỗ rỗng mở và lỗ rỗng đóng kín (Hình 1). Các lỗ rỗng mở có cấu trúc dạng xương cho phép không khí có thể luân chuyển giữa các lỗ rỗng, còn đối với cấu trúc lỗ rỗng đóng kín ngoài cấu trúc xương như lỗ rỗng mở còn được ngăn cách bởi các vách ngăn bằng pha rắn, ngăn không cho không khí thoát ra ngoài các lỗ rỗng. Ngoài ra kích thước lỗ rỗng đóng vai trò quan trọng trong ứng xử và kiểm soát tốc độ khí thoát ra khi vật liệu bị nén.

Sự đa dạng của vật liệu xốp cũng như sự phát triển kỹ thuật sản xuất cao đã cho phép các nhà sản xuất vật liệu đưa ra các dạng vật liệu có tính hấp thụ năng lượng lớn, chống các va đập bất lợi cũng

nghư giảm rung động như ứng dụng làm lớp bọc giảm chấn. Sự đa dạng của vật liệu cũng tạo ra rất nhiều các mô hình tính toán cho vật liệu, nhằm đánh giá đúng ứng xử của vật liệu trong các điều kiện sử dụng khác nhau.



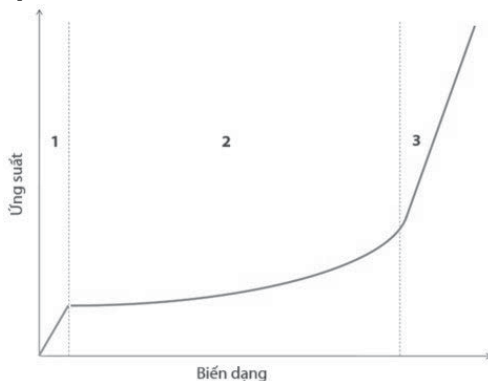
Hình 1. Cấu trúc lỗ rỗng mở (trái) và lỗ rỗng kín (phải)



Hình 2. Một số dạng vật liệu xốp trong thực tế

3. KHẢ NĂNG HẤP THỤ NĂNG LƯỢNG CỦA VẬT LIỆU XỐP KHI CHỊU NÉN

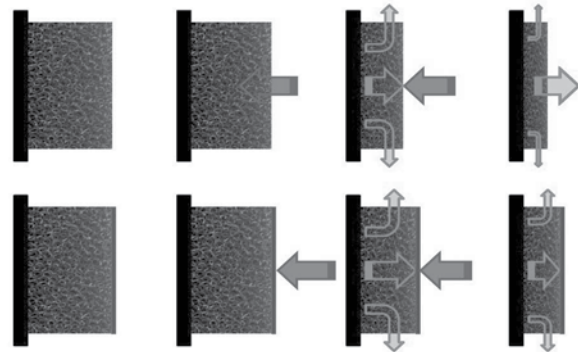
Vật liệu cấu trúc dạng xốp là vật liệu có mật độ thấp biểu diễn quan hệ phi tuyến tính và thường được dùng trong các ứng dụng hấp thụ năng lượng [10]. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng được chia thành ba giai đoạn. Ban đầu là quan hệ tuyến tính thể hiện ứng xử quá trình trước khi bị ép sát của cấu trúc lỗ rỗng (1), sau đó là quá trình ép sát của màng hoặc xương trong cấu trúc lỗ rỗng (2) và cuối cùng là quá trình ép chặt của pha rắn vật liệu (3) như trên Hình 3 [11].



Hình 3. Đường cong đặc trưng quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp [11]

Khi chịu áp lực nén ép thì cấu trúc lỗ rỗng mở sẽ phức tạp hơn trong ứng xử với tác dụng của áp lực. Đối với cấu trúc lỗ rỗng mở không có lớp màng chắn phía trước không khí áp suất cao sẽ đi vào trong lỗ rỗng trước khi quá trình nén xảy ra, sau đó khi cấu trúc vật liệu bị nén không khí có thể thoát ra ngoài. Trong trường hợp có lớp màng chắn phía trước cho phép không khí bên trong vật liệu bị nén ép tạo thành phản áp với áp lực, quá trình tiếp theo là sự nén ép vật liệu làm cho không khí bên trong lỗ rỗng vượt quá áp lực và bắt đầu thoát ra ngoài. Còn đối với vật liệu cấu trúc lỗ rỗng đóng kín quá trình nén ép là quá trình biến dạng pha rắn vật liệu và nén ép không khí bên trong lỗ rỗng. Sự thay đổi áp lực không khí bên trong lỗ rỗng và sự nén ép cấu trúc vật liệu do nén ép của áp lực sẽ làm tiêu tán áp lực khi đi qua lớp vật liệu dạng này [11].

Với đặc tính của hai loại cấu trúc như trên thì cấu trúc lỗ rỗng đóng kín được dùng nhiều hơn trong các ứng dụng hấp thụ áp lực, do sự nén ép của không khí bên trong các lỗ rỗng [6, 7, 9-11]. Mô tả sự khác biệt luồng khí vào và ra lỗ rỗng mở trong quá trình vật liệu bị nén như trên Hình 4.



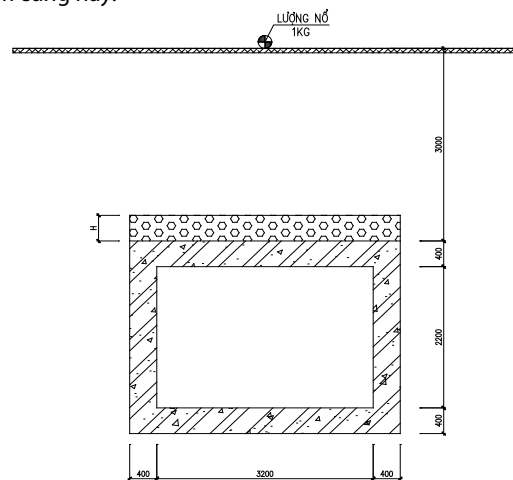
Hình 4. Sự khác biệt luồng khí vào và ra lỗ rỗng mở trong quá trình vật liệu bị nén [11]

4. THỬ NGHIỆM SỐ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA VẬT LIỆU XỐP

4.1. Đặt bài toán

Để đánh giá hiệu quả khi sử dụng vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng giảm tác dụng của áp lực nổ lên công trình ngầm đặt nông trong đất. Tiến hành thử nghiệm số thông qua mô phỏng tính toán công trình có tiết diện ngang hình chữ nhật với kích thước thông thủy 3200x2200mm; chiều dày nóc, thành và đáy 400mm; công trình được đặt trong đất và cách mặt đất 3m; lượng nổ 1kg TNT đặt trên mặt đất. Tính toán công trình chịu tác dụng trực tiếp của vụ nổ và công trình có sử dụng lớp đệm nhôm xốp (aluminum foam) bên trên tấm nóc kết cấu có chiều dày thay đổi. Điểm khảo các thông số về rung động và ứng suất tại mép dưới chính giữa tấm nóc của kết cấu, mô hình kết cấu như trên Hình 5.

Như đã nói ở mục trên (Hình 4), việc có thêm tấm cứng phía trước vật liệu xốp có khả năng làm tăng hiệu quả cho giải pháp giảm áp lực. Tuy nhiên do lớp vật liệu đặt trong môi trường đất và chịu áp lực nén nên trong nghiên cứu khi khảo sát bài toán sẽ chưa đề cập đến tấm cứng này.

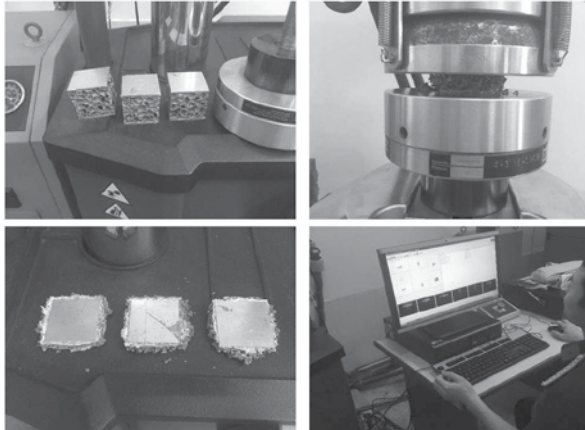


Hình 5. Mô hình bài toán nghiên cứu khảo sát

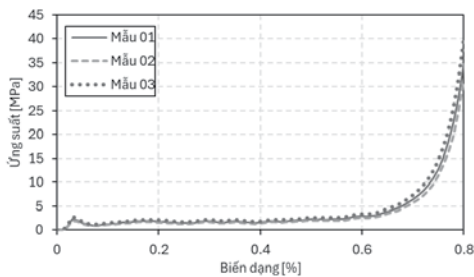
4.2. Thí nghiệm vật liệu xốp

Sử dụng vật liệu nhôm xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín để làm lớp hấp thụ tác dụng của áp lực nổ lên kết cấu công trình, đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu được xác định thông qua thí nghiệm nén đơn trục. Thí nghiệm tiến hành trên hệ thống máy kéo nén đa năng của hãng MTS sử dụng đầu gia lực 647 Hydraulic Wedge Grips

có khả năng gia tải lên đến 50kN với tốc độ nén được điều khiển. Máy ép được kết nối đồng bộ với hệ thống máy tính tích hợp phần mềm điều khiển và xử lý dữ liệu chuyên dụng của hãng. Các mẫu nén nhôm xốp trong thí nghiệm sử dụng loại mẫu kích thước 50x50x50mm, tốc độ nén 10mm/phút. Kết quả nén được thể hiện ngay trên giao diện của phần mềm giúp việc đánh giá kết quả thí nghiệm và điều chỉnh thí nghiệm kịp thời. Quá trình thí nghiệm nén mẫu trong phòng thí nghiệm và kết quả đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng được thể hiện trong Hình 6 và Hình 7.

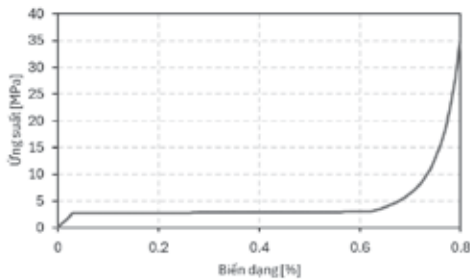


Hình 6. Thí nghiệm nén mẫu nhôm xốp



Hình 7. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng nén đơn trục mẫu nhôm xốp

Tiến hành lấy giá trị trung bình của 03 lần thí nghiệm và trung bình hóa đường cong ứng suất - biến dạng thu được kết quả như Hình 8.



Hình 8. Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng mẫu nhôm xốp sau chuẩn hóa

4.3. Xây dựng bài toán mô phỏng số

ANSYS Autodyn mô phỏng phân ứng của vật liệu khi chịu tác dụng va chạm mạnh, áp suất cao hoặc các vụ nổ trong thời gian ngắn. Nó là thích hợp nhất cho mô phỏng biến dạng vật liệu lớn hoặc bị phá hủy. Do đó, trong bài toán mô phỏng khả năng giảm tác dụng nổ của vật liệu xốp sử dụng phần mềm ANSYS Autodyn để mô phỏng và tính toán.

Đối với thuốc nổ lấy vật liệu TNT, vật liệu công sự lấy bê tông (CONC-35MPa) và môi trường đất (SAND), là các mô hình vật liệu có sẵn trong thư viện phần mềm.

Ứng xử động của vật liệu nhôm xốp được mô phỏng bằng cách sử dụng phương trình trạng thái khí nén ép P- α và giới hạn chảy von

Mises. Trong đó cường độ nén ban đầu 2,23MPa và cường độ khi nén chặt 35,03MPa được lấy theo kết quả thí nghiệm nén mẫu nhôm xốp; số mũ nén (compaction exponent) lấy bằng 1,4 tham khảo theo tài liệu [12] và các tham số vật liệu cơ bản được lấy theo Bảng 1.

Mô đun đàn hồi của xốp được xác định theo đồ thị Hình 8, trong vùng 1 ở giai đoạn vật liệu làm việc đàn hồi theo định luật Hooke. Mô đun khối (lấy trong giai đoạn đàn hồi) và vận tốc truyền âm được xác định thông qua các biểu thức:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu_f)} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

trong đó ρ là trọng lượng riêng của xốp, E là mô đun đàn hồi, K là mô đun khối, c là vận tốc truyền âm trong xốp và ν_f là hệ số Poisson của xốp.

Hệ số Poission của vật liệu xốp không phải hằng số, nó phụ thuộc vào mật độ vật liệu xốp và tốc độ biến dạng [13]. Thông thường mô hình vật liệu xốp được thực hiện bởi tính toán bởi các phần mềm mô phỏng thường giả định hệ số Poisson thấp [11]. Điều này cho phép xác định biến dạng thể tích của vật liệu dễ dàng hơn, các phần tử vật liệu xốp trong mô phỏng sẽ có xu hướng tăng cứng để chống lại lỗi thể tích âm thường gặp trong mô phỏng vật liệu xốp chịu tốc độ biến dạng cao. Một số công trình nghiên cứu đã công bố, lựa chọn hệ số Poisson của xốp bằng 0 [14-18]. Do vậy, trong nội dung nghiên cứu của bài báo lựa chọn hệ số Poisson của vật liệu nhôm xốp (xốp cứng không phục hồi) bằng 0.

Bảng 1. Tham số vật liệu nhôm xốp

$\rho(\text{kg/m}^3)$	ν_f	E(Pa)	K(Pa)	c(m/s)
350	0,0	90,63E6	30,21E3	293

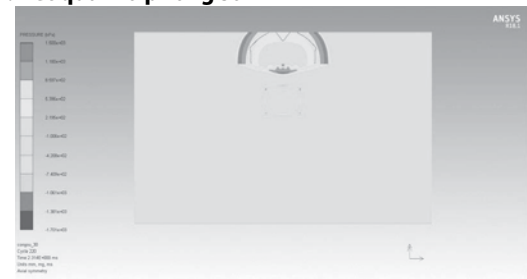
Tiến hành khảo sát các bài toán bao gồm không có lớp xốp và các lớp xốp dày lần lượt 100mm, 200mm và 300mm đặt phía trên tấm nóc kết cấu, lớp xốp được dán chặt lên bề mặt kết cấu.

Mô hình bài toán khảo sát số trong ANSYS Autodyn được thể hiện như trên Hình 9, trong đó vật liệu nhôm xốp được định nghĩa theo tên gọi NEW_Foam.

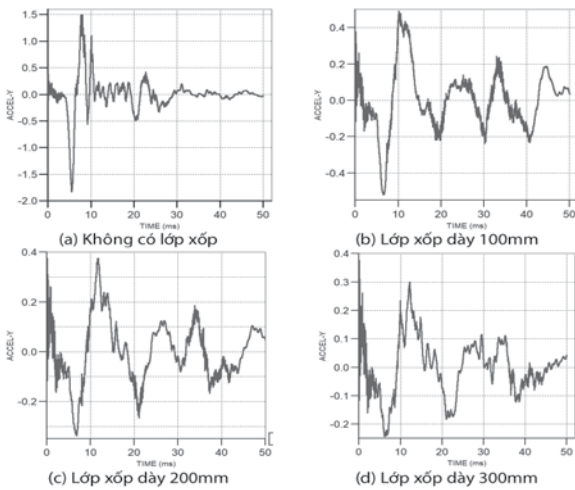


Hình 9. Mô hình mô phỏng số bài toán khảo sát

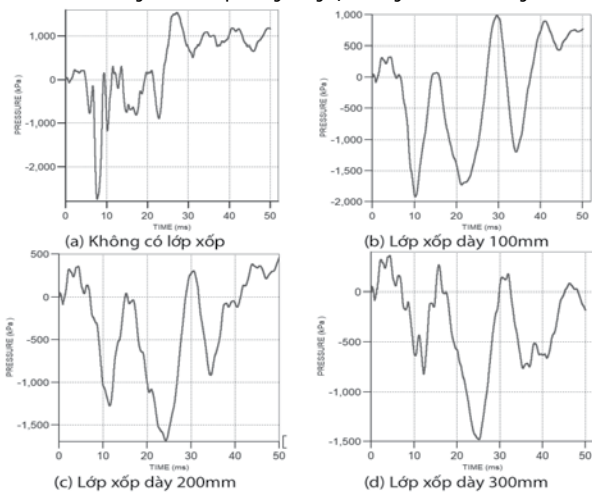
4.4. Kết quả mô phỏng số



Hình 10. Quá trình mô phỏng nổ cho bài toán khảo sát tại thời điểm 2,314ms



Hình 11. Biểu đồ gia tốc theo phương đứng tại điểm giữa tầm nóc công trình



Hình 12. Biểu đồ ứng suất tại điểm giữa tầm nóc công trình

Bảng 2. Tổng hợp kết quả khảo sát

TT	Tham số	Nội dung	Giá trị	Chênh lệch (%)
1	Gia tốc (g)	Không có lớp xốp	1,8309	-
		Lớp xốp dày 100mm	0,5195	71,62
		Lớp xốp dày 200mm	0,3753	79,50
		Lớp xốp dày 300mm	0,3753	79,50
2	Ứng suất (kPa)	Không có lớp xốp	2751	-
		Lớp xốp dày 100mm	1918	30,28
		Lớp xốp dày 200mm	1683	38,82
		Lớp xốp dày 300mm	1479	46,23

Từ kết quả khảo sát cho thấy vật liệu xốp có tác dụng tốt trong việc hấp thụ áp lực tác động từ vụ nổ làm giảm mạnh cả rung động và nội lực trong kết cấu.

Gia tốc điểm khảo sát tương ứng với lớp xốp dày 200mm và 300mm tuy có giá trị đỉnh gần nhau ở thời điểm ban đầu nhưng giá trị đỉnh các giai đoạn sau lại có độ giảm mạnh của lớp xốp 300mm như trên Hình 11c và 11d. Điều này dẫn đến ứng suất giảm tương ứng đáng kể khi lớp xốp được tăng chiều dày.

Thông qua biểu đồ kết quả khảo sát cho thấy khi cấu tạo vật liệu xốp làm lớp hấp thụ áp lực từ vụ nổ sẽ làm giảm mạnh giá trị đỉnh áp lực và kéo dài thời gian tác dụng.

5. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu và khảo sát của bài báo cho phép rút ra một số nhận định như sau:

Vật liệu xốp có khả năng tốt trong việc hấp thụ áp lực tác động của tải trọng xung kích nói chung, cũng như áp lực nổ nói riêng và điều này cho thấy vật liệu xốp có thể ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau.

Từ cơ chế ứng xử của vật liệu xốp khi chịu nén cho thấy quá trình biến dạng vật liệu là một quá trình hấp thụ năng lượng của áp lực nén bên ngoài khi vật liệu làm việc trong giai đoạn thứ hai. Điều này cho thấy vật liệu có ứng suất trong giai đoạn này càng cao thì khả năng hấp thụ năng lượng càng lớn.

Từ kết quả mô phỏng số cho các trường hợp có sử dụng và không sử dụng lớp đệm vật liệu xốp, cho thấy hiệu quả của lớp đệm trong việc giảm tác dụng rung động gần 80% và ứng suất trên kết cấu lên đến gần 50%.

Kết quả khảo sát cũng cho thấy chiều dày lớp xốp ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả hấp thụ tác động (ứng suất giảm được từ 30,28% lên đến 46,23%; gia tốc giảm được từ 71,62% lên đến 79,50%). Yếu tố này mở ra những nội dung nghiên cứu tiếp theo để lựa chọn được chiều dày phù hợp.

Kết quả nghiên cứu cũng gợi mở thêm các nghiên cứu sâu hơn về cấu trúc vi mô của vật liệu, cấu tạo chi tiết cấu trúc bảo vệ sử dụng vật liệu xốp nhằm hấp thụ áp lực tải trọng xung kích bảo vệ kết cấu công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N.Q. Trung, L.H. Đức, V.T. Tùng (1998). *Giáo trình Công tác nổ - Tập I*. Học viện Kỹ thuật quân sự.

[2] N.T. Tá, V.Đ. Lợi, Đ.V. Đích (2008). *Giáo trình công sự - tập I*. Học viện Kỹ thuật quân sự.

[3] H.S. Giao, Đ.T. Thăng, L.V. Quyển, H.T. Chung (2010). *Nổ hóa học, lý thuyết và thực tiễn*. NXB Khoa học và kỹ thuật.

[4] Đ.T. Thăng, B.X. Nam, T.Q. Hiếu (2015). *Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình*. NXB Khoa học Tự nhiên và công nghệ.

[5] C. Naito, K. Wheaton (2006). *Blast assessment of load-bearing reinforced concrete shear walls*. Practice periodical on Structural design and Construction. 11, 112-121.

[6] M.F. Ashby, B. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson (2000). *Metal foams: a design guide*. Elsevier.

[7] T. Mukai, H. Kanahashi, K. Higashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. Nieh (1999). *Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading*. Scripta materialia. 40.

[8] B. Skews, M. Atkins, M. Seitz (1992). *Gas dynamic and physical behaviour of compressible porous foams struck by a weak shock wave*. shock waves. Springer, pp. 511-516.

[9] A. Hanssen, L. Enstock, M. Langseth (2002). *Close-range blast loading of aluminium foam panels*. International journal of impact engineering. 27, 593-618.

[10] J.G. Nerenberg (1998). *Blast Wave Loading of Polymeric Foams*. McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

[11] Christopher George Thom (2009). *Soft Materials under Air Blast Loading and Their Effect on Primary Blast Injury*. Waterloo, Ontario, Canada.

[12] M. M. Mahmoud, H. M. Farag and S. Y. Mahfouz. *Behavior of Reinforced Concrete Slab with Aluminum Foam Panels Subjected to Blast Loadings*. 16th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT - 16 - May 26 - 28, 2015.

[13] J. Kováčik, L. Marsavina, E. Linul (2018). *Poisson's ratio of closed-cell aluminium foams*. Materials. 11, 1904.

[14] B. Croop, H. Lobo, N. DatapointLabs (2009). *Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA*. 7th European LS-Dyna Conference, pp. 1-6.

[15] Q.H. Shah, A. Topa (2014). *Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA*. Modelling and Simulation in Engineering. 2014.

[16] Y. Masso-Moreu, N. Mills (2003). *Impact compression of polystyrene foam pyramids*. International journal of impact engineering. 28, 653-676.

[17] C.-J. Zhang, F. Yi, X.-b. Zhang (2010). *Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20, 1380-1386.

[18] S. Vavilala, P. Shribhate, J. Mandal, M.D. Goel (2020). *Blast mitigation of RC column using polymeric foam*. Materials Today: Proceedings. 26, 1347-1351.