

Nghiên cứu thực nghiệm xác định áp lực sóng xung kích trên bề mặt đất do 2 lượng nổ liên tiếp trong không khí

Experimental study to determine shock wave pressure on surface due to 2 consecutive explosions in air

> PGS.TS NGUYỄN TRÍ TÁ

Học viện Kỹ thuật quân sự

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm nổ liên tiếp 2 lượng nổ có xét đến nổ vi sai. Từ các kết quả đo được, rút ra ảnh hưởng của sóng xung kích ban đầu (sóng sơ cấp) đến sóng xung kích thứ hai (sóng thứ cấp) khi tác dụng liên tiếp với khoảng thời gian khác nhau. Từ đó có những nhận xét về việc tính toán áp lực sóng xung kích thứ cấp (sóng thứ hai) sau sóng thứ nhất, làm cơ sở để tính toán công trình chịu tác dụng của nhiều sóng xung kích tác dụng liên tiếp.

Từ khóa: Sóng xung kích; nổ liên tiếp.

ABSTRACT

This article presents the results of experiments on consecutive explosions of 02 explosive amounts considering differential explosion. From the measured results, draw the influence of the initial shock wave (primary wave) on the second shock wave (secondary wave) when applied consecutively with different time intervals. From there, there are comments on calculating secondary shock wave pressure (second wave) after the first wave, as a basis for calculating structures affected by multiple shock waves acting consecutively.

Keywords: Shock wave; consecutive explosions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Có nhiều nguồn năng lượng có khả năng tạo ra sóng xung kích. Song, cho tới nay các nguồn năng lượng nổ vẫn là chủ yếu. Bởi lẽ, các loại chất nổ không những có khả năng sinh công lớn, mà điều quan trọng hơn là còn có vận tốc giải phóng lượng rất cao.

Đòi hỏi với việc hoàn thiện chất nổ hoá học và phát triển chất nổ hạt nhân, người ta đã đạt được nhiều tiến bộ trong phương thức sử dụng chất nổ, nhằm giải quyết các nhiệm vụ khác nhau.

Trong thực tế, ngoài nổ đơn của từng vụ nổ thì phương thức nổ loạt bao gồm các vụ nổ hoặc đồng thời, hoặc liên tiếp đã tạo ra

những trường sóng xung kích rất phức tạp, có hiệu suất phá hoại cao. Do đó, đã gây nên sự chú ý của nhiều nhà khoa học.

Việc tính toán xác định áp lực của nhiều sóng xung kích do nổ liên tiếp bằng lý thuyết là rất khó khăn, đặc biệt sau vụ nổ thứ nhất môi trường không khí đã bị thay đổi nhiều. Vì vậy, để xác định được áp lực sóng xung kích thứ cấp cần có thí nghiệm thực tế để nghiên cứu ảnh hưởng của vụ nổ sơ cấp đến lượng nổ thứ cấp theo từng khoảng thời gian nhất định. Nội dung bài báo này sẽ góp phần làm sáng tỏ sự ảnh hưởng của lượng nổ thứ nhất đến lượng nổ thứ hai.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN ÁP LỰC CỦA SÓNG XUNG KÍCH DO NỔ LIÊN TIẾP

Trên cơ sở của ba định luật bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng, kết hợp với phương trình trạng thái của không khí, đã thiết lập được hệ phương trình cơ bản biểu thị sự liên hệ giữa các tham số mật độ ρ_Φ , vận tốc truyền sóng D_Φ và vận tốc dòng vật

chất U_Φ qua áp suất P_Φ của môi trường trên mặt sóng:

$$\frac{\rho_\Phi}{\rho_0} = \frac{(k+1)P_\Phi + (k-1)P_0}{(k+1)P_0 + (k-1)P_\Phi}$$
$$D_\Phi - U_0 = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{P_\Phi - P_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_\Phi}}} \quad (1)$$

$$U_\Phi - U_0 = \sqrt{(P_\Phi - P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_\Phi} \right)}$$

Trong đó:

P_0, ρ_0, U_0 - Áp suất, mật độ và vận tốc dòng vật chất môi trường không khí ban đầu.

k - Hệ số đoạn nhiệt của không khí.

Hệ phương trình (1) là một hệ được chứng minh chặt chẽ về mặt toán học và rõ ràng về ý nghĩa vật lý. Giúp chúng ta hiểu được các quá trình đoạn nhiệt Hugoniot trong môi trường tồn tại sóng gián đoạn.

Tuy nhiên, do còn thiếu những điều kiện biên cần thiết, nên hệ (1) vẫn là hệ chưa khép kín. Chưa thể sử dụng nó một cách trực tiếp để giải các bài toán cụ thể trong kỹ thuật nổ được.

Để khép kín hệ phương trình này, trong trường hợp nguồn nổ chỉ phát sinh một lần, Xa-Đôp-Xki đã tiến hành thí nghiệm nhiều vụ nổ đơn và đã tìm ra mối liên hệ giữa siêu áp mặt sóng với trọng lượng chất nổ và khoảng cách từ điểm nghiên cứu đến tâm nổ:

$$\Delta P_{\Phi} = P_{\Phi} - P_0 = 0.84 \frac{\sqrt[3]{K_1 K_2 C}}{R} + 2.7 \left(\frac{\sqrt[3]{K_1 K_2 C}}{R} \right)^2 + 7 \left(\frac{\sqrt[3]{K_1 K_2 C}}{R} \right)^3 \quad (2)$$

Trong đó: P_{Φ} - Áp suất mặt sóng;

P_0 - Áp suất không khí trong trạng thái yên tĩnh;

C, R - Trọng lượng chất nổ, và khoảng cách từ tâm nổ đến điểm nghiên cứu;

K_1 - Đương lượng TNT của chất nổ;

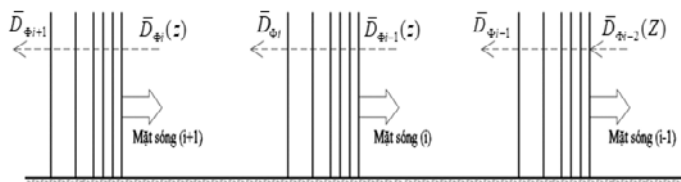
K_2 - Hệ số phản ánh tính chất bán vô hạn của môi trường.

Siêu áp mặt được xác định trong môi trường không khí ban đầu ($P_0; \rho_0$). Trạng thái môi trường trước, mỗi vụ nổ có thể khác ($P_0; \rho_0$).

Vì vậy, sự khép kín hệ (1) bằng hệ thức Xa-Đôp-Xki có thể bị phá vỡ, do đó vấn đề nghiên cứu tìm quy luật siêu áp mặt sóng xung kích lại bắt buộc phải đặt ra.

Xét trường hợp có n vụ nổ liên tiếp được điều khiển thời gian nổ theo chế độ khác nhau. Dưới áp lực của n vụ nổ như vậy, khối không khí tại điểm nghiên cứu tất yếu phải trải qua n quá trình "Nén Hugoniot - dẫn Poisson" mà trong đó trạng thái môi trường tại mỗi nấc thời gian z phải trở thành trạng thái ban đầu của môi trường trước mỗi vụ nổ.

Kết quả của những quá trình "nén - dẫn" đoạn nhiệt như vậy đã tạo ra trong môi trường một trường sóng xung kích n sóng liên tiếp như trên hình 1 biểu thị.



Hình 1. Trường sóng xung kích n sóng chu kỳ Z

Khác với trường sóng đơn, đó là một trường sóng xung kích "có tính chu kỳ". Khi xem xét sự thay đổi siêu áp giữa các mặt sóng do nổ liên tiếp, cần phải biết được mối liên hệ giữa các tham số trạng thái và tham số chuyển động, trên từng mặt sóng tuân theo quy luật nào. Đây là vấn đề rất phức tạp, đầu tiên coi mối liên hệ giữa các tham số trên mặt sóng vẫn tuân theo hệ phương trình (1), bởi vì khi thiết lập hệ phương trình này, không bị ràng buộc bởi điều kiện: sóng xung kích có hay không có chu kỳ. Tuy nhiên, để giải đáp vấn đề trên một cách rõ ràng, có thể bắt đầu bằng việc khảo sát sơ đồ vận động sóng trên hình (1).

Giả thử tại thời điểm $t_i = (i - 1)Z$, mặt sóng i xuất hiện và truyền lan đến điểm M trên mặt đất.

Nếu ta gắn gốc tọa độ vào mặt sóng i và gọi Δt là thời gian cần thiết để môi trường chuyển từ trạng thái $(P_{\Phi,i-1}(z); \rho_{\Phi,i-1}(z))$ sang trạng thái $(P_{\Phi,i}; \rho_{\Phi,i})$ thì vận tốc và khối lượng dòng vật chất từ môi trường (i - 1) chuyển động vào và ra khỏi mặt sóng i sẽ là:

$$\begin{aligned} \bar{D}_{\Phi,i-1}(z) &= [D_{\Phi,i} - U_{\Phi,i-1}(z)] \\ \bar{D}_{\Phi,i} &= [D_{\Phi,i} - U_{\Phi,i}] \\ M(i-1)_z &= [D_{\Phi,i} - U_{\Phi,i-1}(z)] \rho_{\Phi,i-1}(z) F \Delta t \\ M_i &= [D_{\Phi,i} - U_{\Phi,i}] \rho_{\Phi,i} F \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $M(i-1)_z, \bar{D}_{\Phi,i-1}(z)$ - Khối lượng và vận tốc dòng vật chất đi vào mặt sóng i.

$M_i, \bar{D}_{\Phi,i}$ - khối lượng và vận tốc dòng vật chất ra khỏi mặt sóng i.

$\rho_{\Phi,i-1}(z); U_{\Phi,i-1}(z)$ - Mật độ và vận tốc dòng vật chất sau mặt sóng (i - 1) tại thời điểm (i - 1)z.

$\rho_{\Phi,i}; U_{\Phi,i}; D_{\Phi,i}$ - Mật độ, vận tốc dòng vật chất và vận tốc mặt sóng i.

F - Tiết diện ngang, cắt qua điểm M.

Dựa vào ba định luật bảo toàn trong cơ học và phương trình trạng thái của không khí, cũng tương tự như trường sóng đơn đã trình bày trong [1], đồng thời có chú ý đến (3) thu được hệ phương trình cơ bản của sóng xung kích (4).

$$\begin{aligned} \frac{P_{\Phi,i}}{\rho_{\Phi,i-1}(z)} &= \frac{(k+1)P_{\Phi,i} + (k-1)P_{\Phi,i-1}(z)}{(k+1)P_{\Phi,i-1}(z) + (k-1)P_{\Phi,i}} \\ D_{\Phi,i} - U_{\Phi,i-1}(z) &= \frac{1}{\rho_{\Phi,i-1}(z)} \sqrt{\frac{P_{\Phi,i} - P_{\Phi,i-1}(z)}{1 - \frac{1}{\rho_{\Phi,i-1}(z)} - \frac{1}{\rho_{\Phi,i}}}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$U_{\Phi} - U_0 = \sqrt{(P_{\Phi,i} - P_{\Phi,i-1}) \left(\frac{1}{\rho_{\Phi,i-1}(z)} - \frac{1}{\rho_{\Phi,i}} \right)}$$

Như vậy, rõ ràng việc khảo sát trường sóng xung kích liên tiếp có tính chu kỳ chỉ còn tập trung vào việc tìm quy luật xác định siêu áp trên từng mặt sóng. Để thực hiện được việc khảo sát trường sóng xung kích do nổ liên tiếp, trước tiên cần phải thực hiện các thí nghiệm thực tế sau đó có thể kết hợp với kết quả mô phỏng số để thiết lập được quy luật siêu áp trên từng mặt sóng.

3. THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH ÁP LỰC SÓNG XUNG KÍCH DO 2 LƯỢNG NỔ LIÊN TIẾP

3.1. Mục đích thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm đo áp lực sóng xung kích tại một điểm M trên bề mặt đất do 2 lượng nổ liên tiếp gây ra, lượng nổ 1 đặt cách lượng nổ 2 là 2,0 m theo sơ đồ thí nghiệm hình 2. Sử dụng thuốc nổ TNT và các trang thiết bị thí nghiệm sau:

- Đầu đo áp lực sóng xung kích

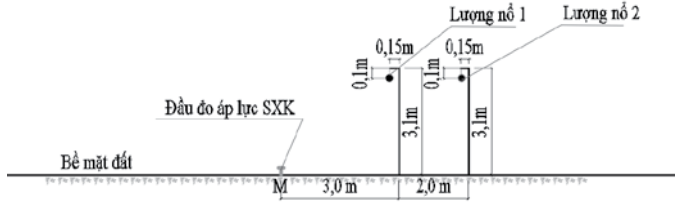


Hình 2. Đầu đo áp lực sóng xung kích mã hiệu PCB Piezotronics 137B21B - Máy đo động đa năng NI SCXI-1000DC



Hình 3. Máy đo động NI SCXI-1000DC

3.2. Mô hình thí nghiệm

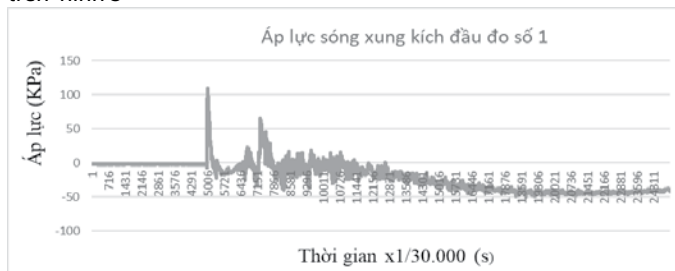


Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm nổ liên tiếp

3.3. Kết quả thí nghiệm

a. Lần nổ 1

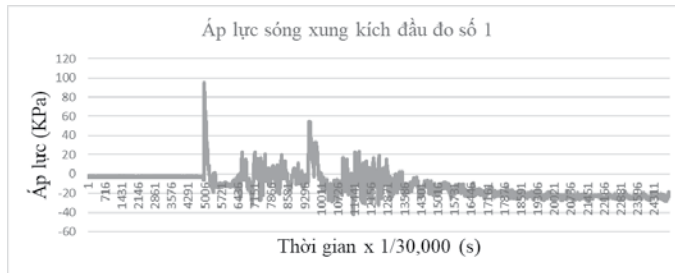
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg sử dụng kíp số 0, lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg sử dụng kíp số 1 (25ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 3



Hình 3. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

b. Lần nổ 2

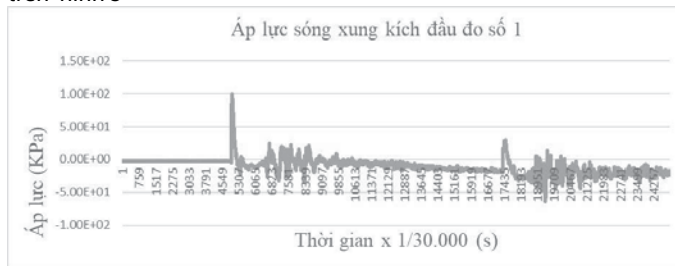
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 0, lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 2 (50ms), Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 4



Hình 4. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

c. Lần nổ 3

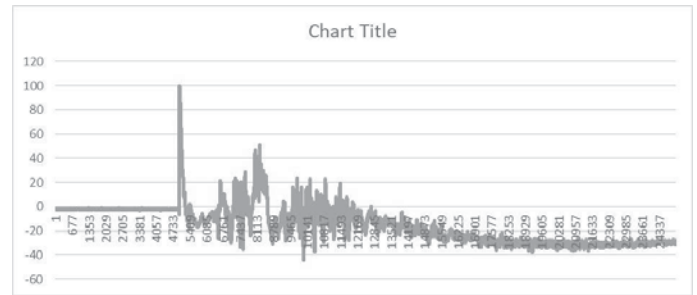
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 0, lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 4 (100ms), Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 5



Hình 5. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

d. Lần nổ 4

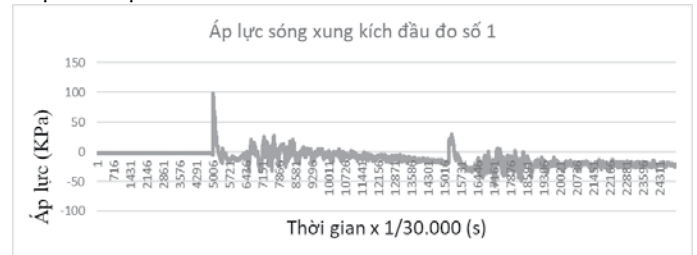
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 1 (25ms), lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 2 (50ms), Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 6.



Hình 6. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

e. Lần nổ 5

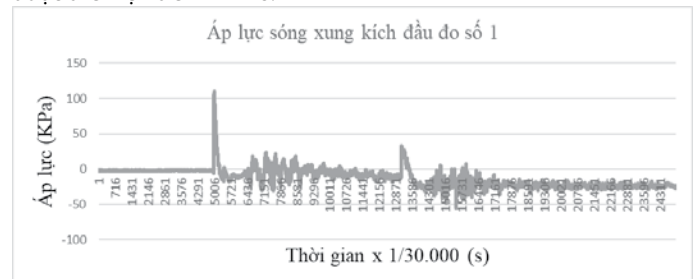
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 1 (25ms), lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 4 (100ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 7.



Hình 7. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

f. Lần nổ 6

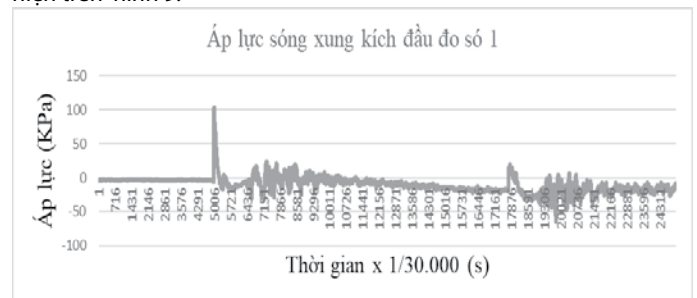
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 2 (50ms), lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 4 (100ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 8.



Hình 8. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

g. Lần nổ 7

Lượng, lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 0, lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 4 (100ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 9.

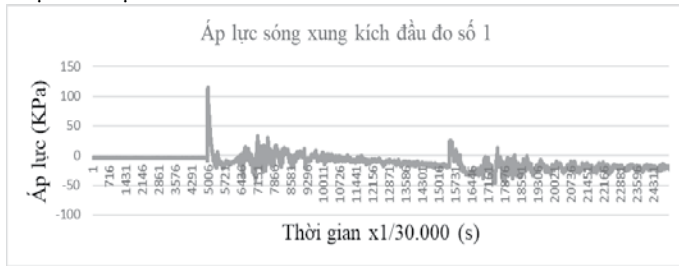


Hình 9. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

h. Lần nổ 8

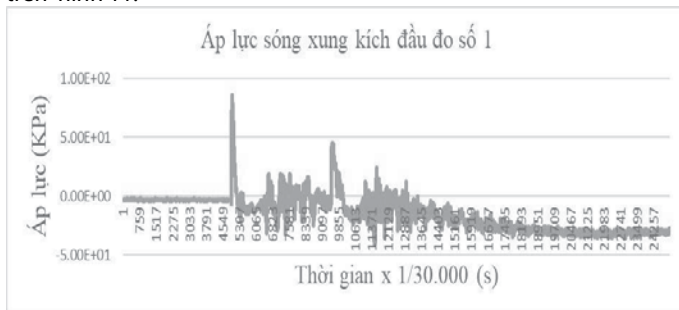
Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 1 (25ms), lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 4 (100ms). Sơ đồ

nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 10.



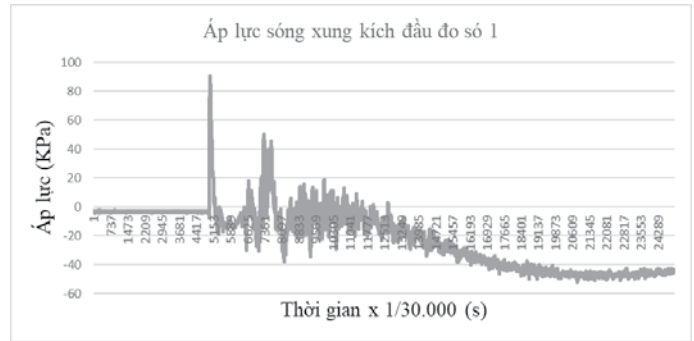
Hình 10. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất
i. Lấn nổ 9

Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 0, lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 2 (50ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 11.



Hình 11. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất
j. Lấn nổ 10

Lượng nổ 1 có khối lượng 1,0 kg, sử dụng kíp số 1(25ms), lượng nổ 2 có khối lượng 1,6 kg, sử dụng kíp số 2 (50ms). Sơ đồ nổ như hình 2. Kết quả áp lực sóng xung kích đo được tại điểm M được thể hiện trên hình 12.



Hình 12. Áp lực sóng xung kích tại điểm M trên mặt đất

4. KẾT QUẢ THEO LÝ THUYẾT CHO LƯỢNG NỔ 2

Sử dụng công thức (2) tính được áp lực sóng tới

$$\Delta P_{\phi} = 0,84 \frac{\sqrt[3]{C}}{R} + 2,7 \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R} \right)^2 + 7 \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R} \right)^3 \quad (5)$$

$$\Delta P_{\phi} = 0,84 \frac{\sqrt[3]{1,6}}{5,83} + 2,7 \left(\frac{\sqrt[3]{1,6}}{5,83} \right)^2 + 7 \left(\frac{\sqrt[3]{1,6}}{5,83} \right)^3 = 0,345 \text{ kG} / \text{cm}^2$$

Vì $R_1 = 3,0 \text{ m} = H$, điểm đo cách tâm nổ 3,0 m, vì vậy, áp lực sóng bề mặt sẽ được tính theo công thức:

$$\Delta P_{bm} = \Delta P_{\phi} \left(1 + 7 \frac{\Delta P_{\phi} + 1}{\Delta P_{\phi} + 7,2} \cdot \frac{R + H}{2R} \right) \quad (6)$$

$$\Delta P_{bm} = 0,345 \left(1 + 7 \frac{0,345 + 1}{0,345 + 7,2} \cdot \frac{5,83 + 3,0}{2 \cdot 5,83} \right) = 0,671 \text{ kG} / \text{cm}^2 \quad (7)$$

Bảng 1. Tổng hợp kết quả nổ 2 lượng nổ liên tiếp trong không khí

Lần nổ	Khối lượng thuốc nổ		Khoảng cách			Kết quả áp lực		Thời gian giữ chậm giữa 2 lượng nổ
	C ₁ (kg)	C ₂ (kg)	H (m)	R ₁ (m)	R ₂ (m)	ΔP ₁ (Kpa)	ΔP ₂ (Kpa)	
1	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	109,406	65,768	25 ms
2	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	94,65	55,227	50 ms
3	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	99,287	29,507	100 ms
4	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	99,709	51,221	25 ms
5	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	98,223	29,297	75 ms
6	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	109,617	33,091	50 ms
7	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	103,503	23,605	100 ms
8	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	115,520	32,67	75 ms
9	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	85,374	45,318	50 ms
10	1,0	1,6	3,0	3,0	5,0	90,855	50,167	25 ms

5. XỬ LÝ SỐ LIỆU ÁP LỰC SÓNG XUNG KÍCH DO NỔ 2 LƯỢNG NỔ LIÊN TIẾP

Do sử dụng kíp giữ chậm từ 25ms đến 100ms và do khoảng

cách giữa 2 lượng nổ là 2,0 m nên kết quả đo được thời gian giữa 2 giá trị áp lực lớn nhất của các đầu đo được thể hiện trong bảng .2

Bảng .2. Thời gian giữa 2 giá trị lớn nhất của đầu đo

Lần nổ	Thời gian đầu đo ghi được giá trị áp lực lớn nhất (max)			Thời gian tác dụng của lượng nổ thứ nhất theo lý thuyết (s)	Áp lực lượng nổ 2		
	Lượng nổ 1 (S)	Lượng nổ 2 (S)	Khoảng thời gian (S)		Theo thí nghiệm (Kpa)	Theo lý thuyết (Kpa)	Sai số giữa 2 kết quả (%)
1	0,1667	0,2427	0,076	0,0108	65,768	67,1	2,02
2	0,1667	0,3180	0,1513	0,0108	55,227	67,1	21,5
3	0,1667	0,5837	0,417	0,0108	29,507	67,1	127,4
4	0,1667	0,2745	0,1078	0,0108	51,221	67,1	31,0
5	0,1667	0,5104	0,3437	0,0108	29,297	67,1	129,0
6	0,1667	0,4377	0,271	0,0108	33,091	67,1	102,8
7	0,1667	0,5944	0,4277	0,0108	23,605	67,1	184,3
8	0,1667	0,5197	0,353	0,0108	32,67	67,1	105,4
9	0,1667	0,3203	0,1536	0,0108	45,318	67,1	48,1
10	0,1667	0,2439	0,0772	0,0108	50,167	67,1	33,8

Nhận xét:

Từ bảng 2 cho thấy thời gian lượng nổ thứ hai tác dụng khi chu kỳ của lượng nổ thứ nhất đã hết. Về lý thuyết thì lượng nổ thứ hai sẽ độc lập với lượng nổ thứ nhất. Tuy nhiên, kết quả từ bảng 1 cho thấy, mặc dù lượng nổ thứ nhất đã hết nhưng môi trường không khí vẫn bị ảnh hưởng do lượng nổ thứ nhất tác dụng. Theo bảng 1 khi lượng nổ thứ hai càng xa thời gian với lượng nổ thứ nhất (lần nổ 3,5,6,7,8) thì áp lực sóng xung kích do lượng nổ gây ra sẽ giảm. Điều này được giải thích nguyên nhân như sau:

Từ hình 3, hình 4, hình 12 cho thấy áp lực không khí sau lượng nổ thứ nhất gần về áp lực không khí ban đầu. Do vậy, lượng nổ sơ cấp không gây ảnh hưởng đến lượng nổ thứ cấp. Kết quả đo được sai khác với kết quả tính toán lý thuyết không cao từ 2,02% đến 33,8%.

Từ hình 5 đến hình 10 cho thấy áp lực không khí sau lượng nổ thứ nhất bị dẫn nổ tiếp, áp lực không khí nhỏ hơn đáng kể áp lực không khí ban đầu. Do vậy, lượng nổ sơ cấp có gây ảnh hưởng đến lượng nổ thứ cấp, làm giảm tác dụng của lượng nổ thứ cấp. Kết quả đo được sai khác với kết quả tính toán lý thuyết khá cao từ 102,8% đến 129%.

Nếu 2 lượng nổ có thời gian nổ rất gần nhau thì áp lực không khí sau lượng nổ thứ nhất vẫn còn trong pha nén cao hơn áp lực không khí ban đầu. Do vậy, lượng nổ sơ cấp làm tăng áp lực cho lượng nổ thứ cấp. Nhận định này cần có thí nghiệm thực tế để làm sáng tỏ.

6. KẾT LUẬN

- Khi nổ liên tiếp, giá trị áp lực sóng thứ cấp bị giảm khi thời gian nổ giữa 2 lượng nổ dài nằm trong khoảng từ 0,16s đến 0,5s và giá trị áp lực sóng thứ cấp gần với tính toán lý thuyết khi thời gian giữa hai lượng nổ ngắn nằm trong khoảng 0,075s đến 0,15s.

- Cần tiếp tục nghiên cứu cả thực nghiệm và cả mô phỏng số để có được kết quả tính toán áp lực sóng xung kích do nổ

nhiều lượng nổ liên tiếp hợp lý nhất đồng thời bổ sung thêm các hệ số thực nghiệm khi tính toán sóng xung kích trên bề mặt môi trường do nhiều vụ nổ liên tiếp gây ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Đích (2008), *Giáo trình công sự tập I*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
 [2] Vũ Đình Lợi (2005), *Giáo trình Công sự (dùng cho học viên cao học chuyên ngành xây dựng CTQP)*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
 [3] Henrych J. *The Dynamics of Explosion and Its Use*, Chapter 5. Elsevier: New York, 1979.
 [4] Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*. University of Texas Press, Austin, Texas.
 [5] Кутузов Б.Н. *Разрушение горных пород взрывом - Взрывные технологии в промышленности*. МГГУ, Москва, 1994, 450 с.
 [6] Кутузов Б.Н. *Взрывное и Механическое разрушение горных пород*. Недра, Москва, 1973, 310с.
 [7] Т.М. Саламахин. *Пособие для решения по теории механического действия взрыва*. ВИА - 1967.
 [8] Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*, Изд.ГИТЛ, 1954.
 [9] Крюков Г.М. *Методы научных исследований*. МГГУ. Москва 2002.