

擋牆對彈庫內爆後安全距離及爆壓之影響

郝文風¹ 洪正偉^{1*} 鄭丁興²

¹國防大學理工學院國防科學研究所

²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘 要

彈庫為重要之軍事設施，為避免彈庫意外爆炸造成人員之傷亡，擋牆之增設有其必要性，本研究除介紹規範及經驗公式評估彈庫內部爆炸後對擋牆承受爆壓及安全距離外，另利用 LS-DYNA 流固耦合方法模擬彈庫內部爆炸之行為，炸藥及空氣由 Eulerian 網格組成，主結構體由 Lagrangian 網格組成，模擬結果顯示設立擋牆在有效範圍內可降 28.8%，與規範值(可降 50% 以上)差異很大，所以依現行規範無法與模擬值做一比較，須進一步做實驗驗證來探討。

關鍵詞：彈庫，擋牆，爆炸，LS-DYNA，流固耦合

Effect of Blast wall on Safety Distance and Blast Overpressure for Ammunition Storage Magazine Subjected to Internal Explosion

Wen-Feng Yu¹, Cheng-Wei Hung^{1*}, and Ding-Shing Cheng²

¹*School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

²*Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National, Defense University*

ABSTRACT

Ammunition storage magazines are important military facilities. To prevent casualties for people subjected to accidental explosion, it's essential to build blast walls. In this study, not only U.S. Army Technical Manual, TM5-1300, was used to evaluate blast pressure resistance and safe distance of blast wall after internal explosion inside magazine, but also Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) algorithm of the LS-DYNA software was used to simulate behavior of internal explosion. Eulerian mesh for explosive and air and Lagrange mesh for solid were coupled together with overlap. The numerical result showed that blast wall could reduce blast pressure 28.8% within effective range. However, the discrepancy was much compared to Manuals, so it's not accurate to compare to current Manuals (reduce blast pressure more than 50%). Hence, experiment verification will be necessary for further study.

Keywords: Ammunition Storage magazine, Blast wall, LS-DYNA, ALE

一、前言

彈庫為國防上重要之軍事設施，隨著武器威力增加，及避免彈庫意外爆炸造成人員傷亡，故彈庫防護日趨重要。除須平日做好彈藥保存工作外，另可於彈庫出口前設立擋牆，以降低炸藥意外爆炸後產生之爆壓及碎片直接對人員、裝備造成傷害。本研究為評估彈庫擋牆之防護能力，將以美軍規範 DOD 6055.9-STD [1]及 TM5-1300[2]為評估依據，計算擋牆可承受之爆炸威力及人員受最低傷害之距離，以做為分析設計之參考。然而為確定規範值之準確性，需做試驗來驗證，但進行彈庫爆炸試驗成本極高，若能藉由電腦模擬方式預測彈庫爆炸行為，則可節省大量成本。

目前結構物承受爆炸力之傳統研究，可針對爆炸威力，分為三大類型，一為結構物無局部破壞，將爆壓歷時載重作用於結構體，進行整體的結構動力非線性有限元分析；二為結構物產生局部破壞，則利用經驗公式評估破壞範圍；三為只進行爆炸流場分析。但對於爆炸產生高度不均勻爆壓分佈或結構物產生大變形時，傳統方法之適用性便受到限制。由於近年來，流固耦合數值模式發展迅速，1994年 T. C. Chapman 等人[3]為求得 TNT 炸藥於自由場爆炸所產生之爆震波，採用 AUTODYN2D 有限元素分析軟體，建立僅 10 度仰角的 Eulerian 圓弧模型，進行 TNT 炸藥於自由場爆炸之參數研究，結果顯示遠距離之爆壓值與美軍依 TM5-855-1 所開發之 CONWEP 程式相近，並以此模型另做真實爆炸對擋牆後方之爆壓量測，電腦模擬值在 3ms 以內爆壓歷時曲線與試驗相近，2005 年 Chengqing Wu 及 Hong Hao[4]利用 AUTODYN 進行地表爆炸與自由空氣爆炸之數值模擬，並將結果與經驗公式與美軍 1986 年 TM5-855-1 規範比較，結果其近炸源之預測值與經驗公式和規範計算所得關係曲線仍有相當大誤差，但遠距離所比較之關係曲線相近，2005 年李文志[5]利用 LS-DYNA 有限元素分析軟體 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)流固耦合方法分別建立自由場空氣爆炸(Free Air Burst)與地表爆炸(Surface Burst)數值模型，採用 Solid 元素及球狀 Eulerian 網格建構炸藥與空氣模型，發現以空氣狀態方程式參數 E_0 對爆壓分佈之影響最大，藉由增加臨近炸藥處空氣溫度以提高初始

內能，在比例距離(Scaled Distance)Z 值($m/kg^{1/3}$)一定之範圍內可得到與 TM5-1300 相近之結果。2006 年洪正偉[6]將矩形形狀炸藥與空氣以共點方式構成 Eulerian 網格，顯示李文志[5]圓型模型之結果相近，且亦提升炸藥周圍空氣溫度為 3000K，可有效提升爆壓及衝量，使得更趨近於 TM5-1300 之爆壓及衝量歷時。Zhou 與 Hao[7]於 2008 年針對擋牆利用電腦模擬數值軟體 AUTODYN 來分析擋牆後方爆壓情形，假設擋牆與建物均為剛體，擋牆厚度為 25cm，並以地表爆炸方式來分析，另運用流體與固體互制來模擬爆炸情形，得到擋牆後方建物承受爆壓之調整因數經驗公式，2008 年陳弘驥[8]利用 LS-DYNA 有限元素軟體模擬室內爆炸之現象，採用 ALE 算法求解。並與文獻實驗值比較，在考慮火球效應對內部爆炸之影響下，可大幅提升較常溫下對於室內爆炸爆壓及衝量偏低狀況，但與實驗值仍有較大誤差，需進一步探討參數值之設定。

綜上所述，利用流固耦合數值模式可模擬自由場爆炸之情形，然對於彈庫內部爆炸後對擋牆承受爆壓及安全距離之評估，仍有待進一步探討。因此，本文除介紹規範及經驗公式計算外，另將利用 LS-DYNA 軟體[9]探討流體與固體耦合之數值模式來比較模擬值與規範值之差異，以做為彈庫與擋牆設計之參考。

二、研究內容及方法

2.1 彈庫安全距離及擋牆損壞評估介紹

2.1.1 彈庫安全距離

1. 以建物安全為考量

美軍規範 DOD 6055.9-STD[1]DA Pam 385-64[10]主要將彈庫區分為平面庫(Above-Ground Magazines, AGS)及洞庫(Earth-Covered Magazines, ECM)二種，並將有擋牆及無擋牆分別列入計算，其彈庫間安全量距(為兩彈庫牆壁間距離)換算公式為

$$D = K * W^{1/3} \quad (1)$$

其中，D：指安全量距(ft)，K：指危險因數值(Hazard Factor)，其值如表 1。W：指火炸藥量淨重(lb)(Net Explosive Weight in Pound)。

另規範亦訂定平面庫、洞庫分別與住宅量距計算公式(D, ft)：

- (1)平面庫與住宅量距計算公式：
 A.100,000 磅以下： $D=40*W^{1/3}$ 。
 B.100,000-250,000 磅： $D=2.42*W^{0.5777}$ 。
 (C)250,000 磅以上： $D=50*W^{1/3}$ 。
 (2)洞庫與住宅量距計算公式(適用洞庫前方與側邊)：
 A.100,000 磅以下： $D=35*W^{1/3}$ 。
 B.100,000-250,000 磅： $D=0.3955*W^{0.7227}$ 。
 C.250,000 磅以上： $D=50*W^{1/3}$ 。
 (3)洞庫與住宅量距計算公式(適用洞庫後方)：
 A.100,000 磅以下： $D=25*W^{1/3}$ 。
 B.100,000-250,0 磅： $D=0.004125*W^{1.0898}$ 。
 C.250,000 磅以上： $D=50*W^{1/3}$ 。

表 1. K 值換算表[1] (單位：公尺)

		平面庫		洞庫				
		有擋牆	無擋牆	前		側	後	
				有擋牆	無擋牆			
平面庫	有擋牆	6	6	6	6	6	6	
	無擋牆	6	11	6	11	6	6	
7-bar 洞庫	前	有擋牆	4.5	6	4.5	6	2.75	2
		無擋牆	6	6	6	6	2.75	2
	側	4.5	4.5	2.75	2.75	1.25	1.25	
	後	4.5	4.5	2	2	1.25	1.25	
3-bar 洞庫	前	有擋牆	6	6	6	6	4.5	4.5
		無擋牆	6	9	6	9	4.5	4.5
	側	6	6	2.75	2.75	1.25	1.25	
	後	6	6	2.0	2.0	1.25	1.25	

2. 以人員安全為考量

TM5-1300 對於人員所承受之最大有效爆壓有明確之說明如表 2，可用此標準來判定炸

藥爆炸後之人員安全距離。

表 2. 人體部位承受最大有效爆壓[2]

人體傷害部位		最大有效爆壓(psi)
耳膜受傷	最低傷害	5
	50%傷害	15
肺損傷	最低傷害	30-40
	50%傷害	80 以上
致命死亡	最低傷害	100-120
	50%傷害	130-180
	接近 100%傷害	200-250

彈庫爆炸所產生之爆壓，受擋牆與彈庫結構之影響，分別說明如下：

(1)無設立擋牆之情形

A. 不考慮彈庫結構

彈庫爆炸時，若假設彈庫結構不影響爆波之傳遞，則可採用 TM5-1300[2] 及 TM5-855-1[11]之地表爆炸，以炸藥重量 W(kg)與炸藥至地面一點間距離 R (m)，查圖 1 可得入射爆壓極值(P_{so} , MPa)、剛面反射爆壓(the peak reflected pressure impulse on a rigid wall)極值(P_r , MPa)與反射衝量(I_r , MPa-ms)。

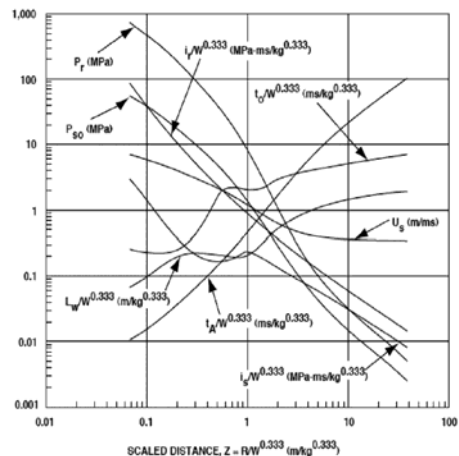


圖 1. 地表爆炸之爆壓參數[11]。

B. 考慮彈庫結構

(A) 彈庫全毀之情形

DDESB(Department of Defense Explosives Safety Board) 所發展 BEC(Blast Effects Computer) 軟體中 [12]，區分平面庫(AGS)及洞庫(ECM) 爆炸後對於人員所能承受之爆壓，並提供 Mercex[13,14]及 Eisenberg[15] 指標做為耳膜損傷機率之判定，亦可用來估算安全距離(自炸藥中心起算)，惟未能將擋牆之有無納入考量。

(B) 彈庫完整之情形

若考慮爆炸後彈庫保持完整之情形下，就須考量彈庫開口情形(如防爆門、窗等弱面)。當爆炸發生於某一有開口內部空間，衝擊壓力會藉由開口向外宣洩，這種壓力稱之為洩漏壓。在美軍規範 TM5-1300[2]中對洩漏壓之計算如下(開口於前方如圖 2)。

- 計算參數 $Z=R/W^{1/3}$ 、 $A/V^{2/3}$
 其中 R =炸藥距離(ft)， W =炸藥重量(lb)， A =開口面積 ft^2 ， V =內部空間體積 ft^3 。
- 將 Z 與 $A/V^{2/3}$ 之值查規範圖 3(開口於前方)，得洩漏壓極值 P_{so} 。
- 查圖 1 之 P_{so} 曲線可得對應到的比例距離 (Scaled Distance)，再由比例距離值可求得衡量值。

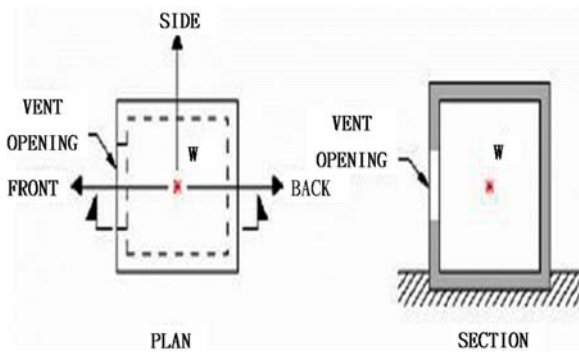


圖 2. 開口型式[2]。

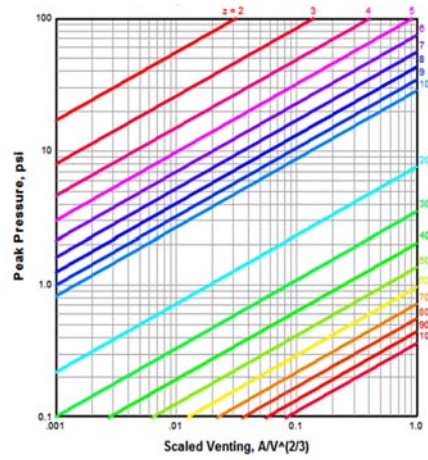


圖 3. 爆壓極值(開口於前方)[2]。

(2) 有設立擋牆之情形

A. TM5-853-3(1994)[16]

TM5-853-3 中對爆炸在擋牆前方之情形(如圖 4)，將炸藥重量、牆與建物高度、擋牆在炸藥與建物之間距離完成計算，再查圖(如圖 5)可得調整因數(Adjustment Factor)，將此因數乘上 TM5-1300 或 TM5-855-1 計算得到之地表爆炸(無擋牆)爆壓，即可得擋牆後方剛面反射爆壓。但運用此圖時，炸藥與擋牆距離 ($L-2$) 須小於或等於 $3ft/lb^{1/3}$ ，擋牆與建築物比例距離 ($L-3$) 須介於 $1ft/lb^{1/3}$ 與 $20ft/lb^{1/3}$ 之間。

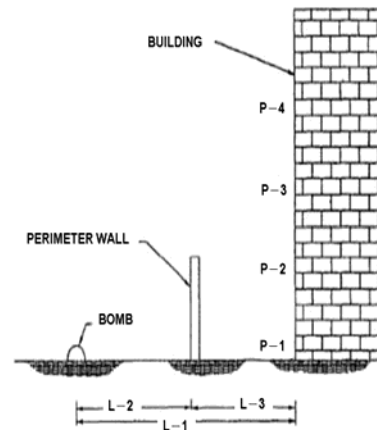


圖 4. 炸彈、擋牆與建物配置圖[16]。

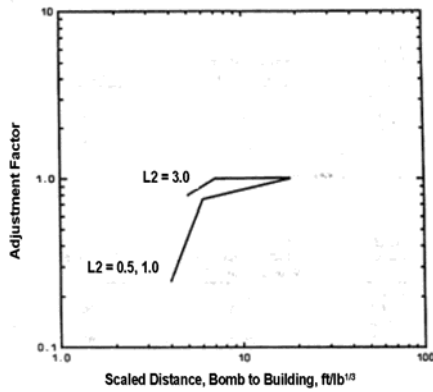


圖 5. 剛面反射爆壓之調整因數[16]
 (牆高 0.8 ft/lb^{1/3}，建物高 0 ft/lb^{1/3})。

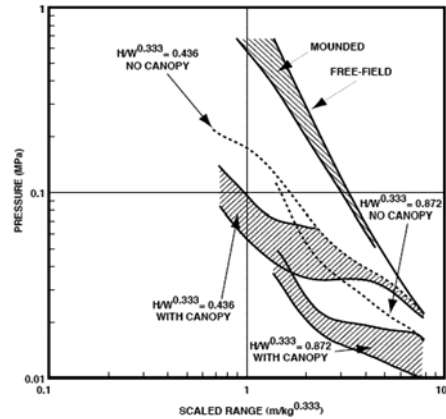


圖 8. 擋牆後方之入射爆壓(目標在牆高度)[11]。

B. TM5-855-1(1998)

規範對不同型式擋牆(如圖 6)計算爆炸時擋牆後方之入射爆壓，區分目標之高度在地面及牆高位置(如圖 7 與圖 8)。

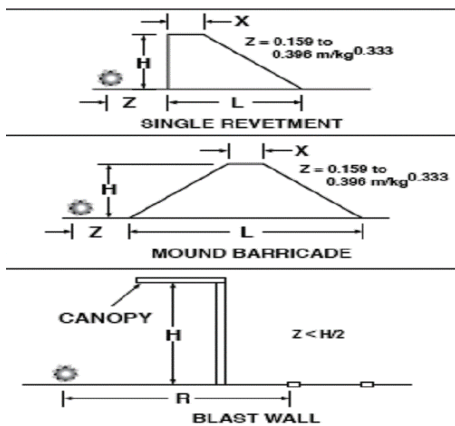


圖 6. 不同擋牆型式配置圖[11]。

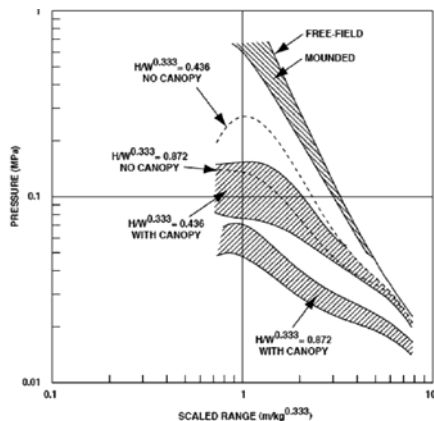


圖 7. 擋牆後方之入射爆壓(目標在地面)[11]。

C. Zhou & Hao(2008)[7]

使用 AUTODYN 軟體進行模擬得出調整因數 A_{pmax} 及 A_{lmax} ，再乘上無擋牆情形之剛面反射爆壓及反射衝量，即可得擋牆後方之剛面反射爆壓及反射衝量值。

$$A_{pmax} = -0.1359 + (0.3272 + 0.1995 \log(\frac{H_1}{D})) \log Z - 0.5626 \log(\frac{H_1}{D}) + 0.4666 \frac{L_1}{D} \quad (2)$$

$$A_{lmax} = 0.0274 + (0.4146 + 0.2393 \log(\frac{H_1}{D})) \log Z - 0.5044 \log(\frac{H_1}{D}) + 0.2538 \frac{L_1}{D} \quad (3)$$

其中 H_1 為擋牆高度(m)， D 為炸藥與擋牆後方人員之距離(m)， L_1 為炸藥與擋牆之距離(m)， $Z=D/W^{1/3}$ ， W 為炸藥重量(kg)。

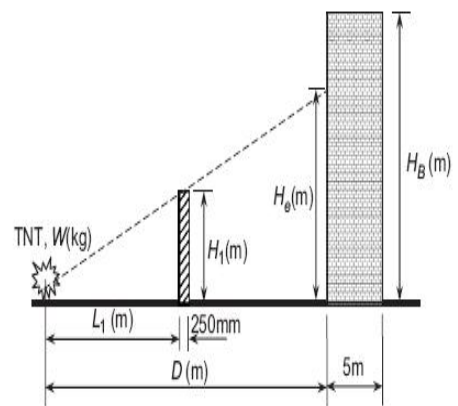


圖 9. 電腦模擬之擋牆配置圖[7]。

2.1.2 擋牆損壞之評估

1. 考量彈庫結構

可運用上述所示，區分彈庫全毀(BEC 軟體)及彈庫完整(TM5-1300)來計算反射壓力與反射衝量。

2. 不考量彈庫結構

除可採用 TM5-855-1 或 TM5-1300 之地表爆炸來計算外，另在 TM5-1300 中炸藥對擋牆之衝擊壓力的計算如下：

- (1) 決定炸藥及結構物型態之關係參數 N 值(如圖 10)。
- (2) 計算參數： h/H 、 I/L 、 L/Ra 、 L/H (h =炸藥高度、 H =結構物牆高度、 L =結構物寬度、 I =炸藥至側牆或背牆距離、 Ra =炸藥至參考點距離)。
- (3) 查圖 11(僅以一圖代表)得平均反射壓力極值。
- (4) 查圖 12(僅以一圖代表)得平均單位反射衝量值。

將上述計算所得之平均反射壓力與平均反射衝量，使用鄭丁興等[17]依照 TM5-855-1 研發之 PSD(Protective Structure Design) 程式，藉由輸入炸藥爆炸衝擊到擋牆之平均反射壓、平均反射衝量及擋牆尺寸等材料參數，可計算極限抵制力及最大位移，做為評估擋牆損害之依據。

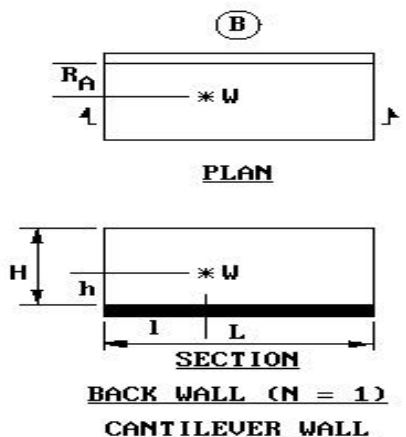


圖 10. 炸藥及結構物之關係參數 N 值[2]。

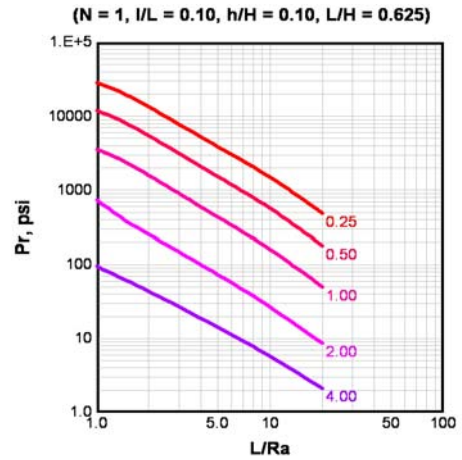


圖 11. 平均反射壓力極值[2]。

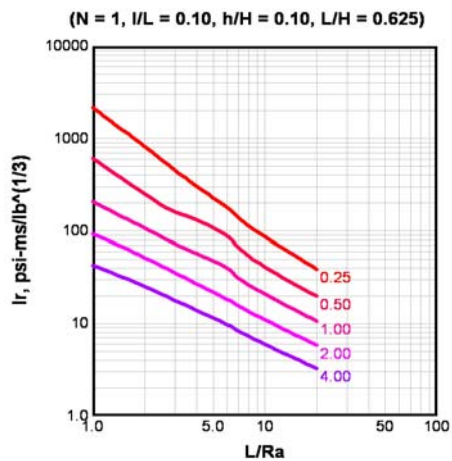


圖 12. 平均單位反射衝量值[2]。

2.2 流固耦合理論

在從事多維度的流體動力以及非線性的固體力學數值模擬時，最重要的關鍵在於選定何種數值模式，使在連續體變形時，對所劃分的有限元網格一旦發生巨大的扭曲變形，仍能精確的提供正確的材料介面(Material Interfaces)及移動的邊界(Mobile Boundaries)，以對連續體的動態行為進行描述。

常見的數值模式有三種描述法：Lagrangian 描述法、Eulerian 描述法與 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 描述法，皆是基於質量守恆、動量守恆及能量守恆的基礎所發展；並依問題性質之不同，其適用範圍亦有

所區分[18,19,20]。

對於 Lagrangian 描述法而言，在物體移動期間，元素網格上的節點，會隨著與其連結的材料質點一起移動，具有追蹤一個質點隨時間歷程變化的能力。惟缺點在於不易利用其網格重劃(Remesh)的方式，處理元素網格所產生的巨大變形，此法多用於固體力學。

Eulerian 描述法中的元素網格被固定於空間中，僅材料質點在預劃的網格中移動。因此，當物體移動時元素網格並不會變形。缺點為需要預劃較大的流體網格，以確切掌握流體的流動，此法多用於流體力學。

在流固耦合 ALE 描述法中，固體元素網格上的節點和材料質點將和 Lagrangian 描述法一樣，會隨著連續體的變形而移動；流體網格則如同 Eulerian 描述法一樣，會將元素網格上的節點固定於空間中，僅材料質點於空間中流動，材料質點隨著連續體變形而移動。由於 ALE 網格的移動，兼顧了描述流體的特性，並完成流體與固體耦合的動態分析 [18,19,21]。為了得到較佳的精度，流體網格(Eulerian 網格)與固體網格(Lagrangian 網格)必須重疊，但網格大小不須一致，且固體與流體網格的元素長度比值須大於或等於 2[22,23]。

2.3 彈庫與擋牆模型建立

2.3.1 模型建立流程

ANSYS/LS-DYNA 數值模擬模型建立流程主要步驟如圖 13，包括元素選用、定義元素特性及材料性質、建立實體模型、網格化、設定邊界束制條件及外力荷載等。

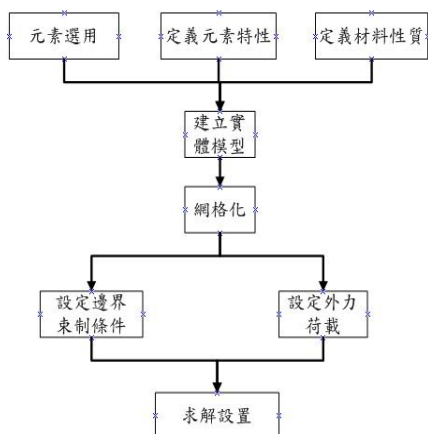


圖 13. 數值模擬模型建構流程圖。

2.3.2 真實模型假設

假設彈庫內部空間寬 10m，高 5m，深 20m，牆厚 80cm，地板厚 30cm，彈庫正面有一 3m*3m 之開口(忽略防爆門)，前方 5m 處有一擋牆(高 4m 寬 4m 厚 80cm)，為鋼筋混凝土結構，混凝土為 280kg/cm²，配筋型式 D32@20cm 雙向，降伏強度為 4200 kg/cm²，彈庫內存放 546kg TNT 炸藥(如圖 14)。

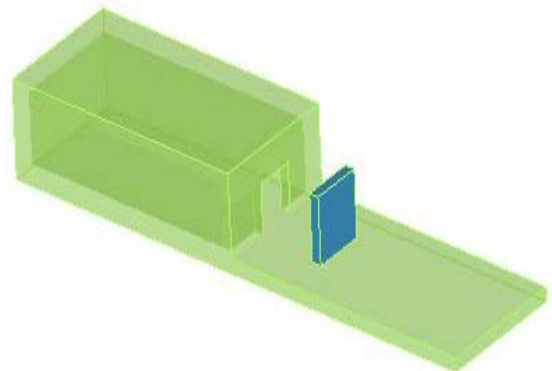


圖 14. 彈庫(含擋牆)模型示意圖。

2.3.3 數值模型之建立

1. 幾何結構

區分彈庫(含地板)、擋牆、炸藥及空氣，彈庫及擋牆結構如上述，惟忽略鋼筋配置，假設炸藥為矩型，長、寬、高均為 70 cm，位於彈庫中央地面，空氣亦為矩型，長 60m，寬 20m，高 15m，包覆彈庫及擋牆(如圖 15)。

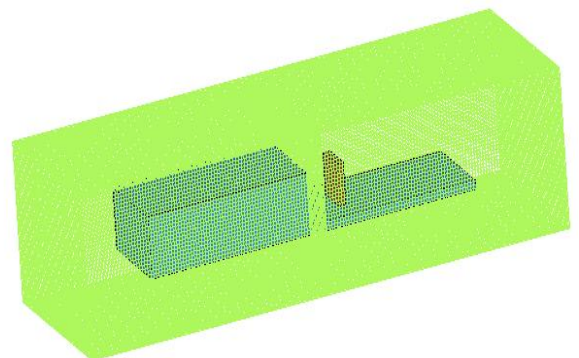


圖 15. 空氣與彈庫(擋牆)網格圖。

2. 元素屬性

本研究所有幾何結構均為實體元素(Solid Element)，另為運用 LS-DYNA 之 FSI(Fluid-Structure Interaction)功能，以量測擋

牆承受之爆壓值，故於擋牆中央上、中、下部貼附 SHELL 元素，其中空氣及炸藥建構為共用節點的 Euler 網格，所採用之元素算法設定為 *SECTION_SOLID_ALE 中 11 號算法，即中心單點積分多物質耦合元素(One Point ALE Multi-material Element) 算法，混凝土為 Lagrange 網格，採用之元素算法設定為 *SECTION_SOLID 中 1 號算法，即常應力實體單元(Constant Stress Solid Element) 算法，並且透過 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 的設定，將 Eulerian 網格定義為 Master ID，Lagrange 網格定義為 Slave ID 產生 ALE 流固耦合數值模式。其各元素說明如下。

(1) 實體 Solid 164 元素[9]

Solid 164 為三度空間實體結構模式，為具有 8 個節點的六面體元素，每個點除 X、Y 及 Z 方向有平移自由度外，另加上速度及加速度自由度，故每點共有 9 個自由度，且選用全積分實體元素，沒有沙漏效應。

(2) 板殼 Shell 163 元素[9]

Shell 163 含有彎曲及薄膜能力，具有 4 個節點，而每個節點在 X、Y 及 Z 方向之平移及旋轉計 6 個自由度，另加上速度及加速度共計具有 12 個自由度。

(3) 材料參數

材料組成律即應力張量與應變張量的關係，係將應力區分為應力偏差部分 (Deviatoric Stress Part) 與壓力部分 (Mean normal Stress Part)，其降伏函數為壓力與軸差應力與壓力之關係，並以狀態方程式 (Equation of State) 來描述材料組成律中，壓力 (P)、體積 (或密度 ρ)、與溫度 (或比內能) 三者之關係。在等溫彈性力學 (Isothermal elasticity) 中，狀態方程式可簡化為壓力等於體積模數 (Bulk Modulus) 乘以體積應變。以下就本研究所使用的材料之材料組成率分述如下：

A. 空氣

採用編號 9 的空材料 (MAT_NULL)，並搭配 Linear Polynomial Equation-of-State 狀態方程式以描述空氣 (如式 3)。Linear Polynomial Equation-of-State 狀態方程式是由單位體積的初始內能 E_0 、動態黏滯係數 μ 以及使用者需自行定義的參數 C_i , $i=0\sim 6$ 組

成。假設氣體為理想氣體，可將 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_6 設置為零，並令 $C_4=C_5$ 等於 $\gamma - 1$ ，如此狀態方程式可化簡為式 4：

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0 \quad (3)$$

$$P=(\gamma-1)\frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}}E_0 \quad (4)$$

$$E_0=\rho_{initial}C_vT$$

其中 $\frac{\rho_{current}}{\rho_{initial}}$ 為相對密度， γ 為空氣比熱， $\mu=\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}$ ，為材料縮減率， E_0 為單位體積的初始內能， $\rho_{initial}$ 為空氣密度的初始值， $\rho_{current}$ 為目前的空氣密度值， C_v 為空氣的定容比熱， T 為空氣初始溫度，另考量火球效應，提高炸藥周圍之內能，材料參數暨狀態方程式如表 3。

表 3. 空氣材料參數暨狀態方程式

材料		材料暨狀態方程式輸入值 (單位 = g, cm, μ second, Mbar)							
空氣	*MAT_NULL								
	RO	PC	MU	TEROD	CEROD	YM	PR		
	0.00129	0	0	0	0	0	0		
	*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL								
	Co	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Eo	V0
0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.1 E-05	1	

其中

- RO：材料的質量密度 (Mass Density)。
- Eo：單位比容初始內能 (Initial internal energy per unit reference specific volume)。
- V0：初始相對體積 (Initial relative volume)

B. 炸藥

採用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 炸藥材料，模擬高爆型的炸藥時，其參數中的體積模數 K 與剪力模數 G ，是用來描述爆炸前，炸藥的材料性質。在選用此材料時，仍需要一 JWL 狀態方程式來描述其材料行為如下。

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V_0}\right)e^{-R_1V_0}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V_0}\right)e^{-R_2V_0}+\frac{\omega E_0}{V_0} \quad (5)$$

其中，A、B、R1、R2、 ω 等參數皆為方程式係數，P 為壓力、V0 為初始相對體積、E0 則為單位比容初始內能，材料參數暨狀態方程式如表 4。

表 4. 炸藥材料參數暨狀態方程式

TNT 炸藥	*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (單位= g, cm, μ second, Mbar)						
	RO	D	PCJ	BETA	K	G	SIGY
	1.63	0.693	0.21	0	0	0	0
*EOS_JWL							
A	B	R ₁	R ₂	ω	E ₀	V ₀	
3.712	0.0323	4.15	0.95	0.3	0.07	1	

其中

RO：材料的質量密度 (Mass Density)。

D：炸藥的爆速 (Detonation Velocity)。

PCJ：Chapman-Jouget 壓力 (Chapman-Jouget Pressure)。

C. 彈庫與擋牆

本模型以三個剪力破壞面作為其材料的破壞準則，並同時考慮損傷、狀態方程式及應變率的影響，另具有材料參數內部自動產生的能力，以解決材料參數獲得不易的問題，而此模型僅需要混凝土之抗壓強度(28MPa)，其材料參數如表 5。

表 5. 彈庫與擋牆材料參數

*Mat_Concrete_Damage_Rel3 (單位: cm-g-Mbar- μ S)						
RO	PR	A0	RSIZE	UCF		
2.4	0.22	-28E-05	3.937 E-02	145 E-05		

其中

RO：材料的質量密度。

PR：柏松比。

FT：混凝土抗拉強度(Uniaxial tensile strength)。

A0、A1、A2：最大剪力破壞表面參數 (Maximum shear failure surface parameter)

A0：設定為-fc。

RSIZE：長度單位轉換係數(Unit conversion factor for length)，由英吋(inch)轉換公分(cm)。

UCF：應力單位轉換係數(Unit conversion factor for stress)，由 Psi 轉成 Mbar。

LCRATE：動態放大係數與應變率影響之參數。

D. 擋牆面鋼板

利用鋼板(0.1cm 厚)貼附擋牆中央之上、中、下局部位置，而採用適合描述等向及動態應變硬化材料塑性行為之 Plastic Kinematic(MAT 3)材料模型。對於材料進入塑性後之應變硬化行為，可由參數 β 來選擇。若 $\beta=0$ 即為動態塑性硬化材料 (Kinematic Hardening)；若 $\beta=1$ 則為等向應變硬化材料(Isotropic Hardening)，本文採用 $\beta=1$ ，即等向塑性硬化材料，其材料參數如表 6。

表 6. 擋牆面鋼板材料參數

鋼板	*MAT_Plastic_Kinematic (單位: cm-g-Mbar- μ S)					
	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
	7.9	2.04	0.3	0.0027	0.0047	1.0
	SRC	SRP	FS	VP		
0	0	0.5	0			

其中

RO：材料的質量密度

E：楊氏模數

PR：柏松比

SIGY：降伏應力

ETAN：切線模數

BETA：應變硬化參數

FS：材料破壞應變

4. 網格劃分

Solid 元素以六面體網格，Shell 元素以四邊形網格，炸藥與空氣每分格為 35cm，擋牆與彈庫每分格為 80cm，其各部位網格數如表 7，Solid 元素網格計 445831 個，Shell 元素網格計 3 個。

表 7. 各部位元素網格數

部位	元素種類	元素網格數	
炸藥	Solid 元素	8	445831
空氣	Solid 元素	441488	
彈庫 (含地板)	Solid 元素	4310	
擋牆	Solid 元素	25	
擋牆面	Shell 元素	3	3
合計		445834	

三、分析結果與討論

3.1 規範值與經驗公式

3.1.1 安全距離

依據文獻內容可提出三種方法來分析，依序為美軍規範 DA Pam 385-64、BEC 軟體及 Zhou & Hao 電腦模擬經驗公式。

1. 美軍規範 DA Pam 385-64

依照規範經驗公式評估可得到洞庫與平面庫及住宅相互間之安全距離(如表 8)。

表 8. 各式彈庫(含住宅)間之安全距離

彈庫型式		洞庫、平面庫	
		無擋牆	有擋牆
平面庫	有擋牆	19.27m	19.27m
	無擋牆	35.3m	19.27m
7-bar 洞庫	前(有擋牆)	19.27m	14.45m
	前(無擋牆)	19.27m	19.27m
	側	8.83m	8.83m
	後	6.42m	6.42m
住宅		111.77m	

2. BEC 軟體

以洞庫(ECM-Front)型式，輸入炸藥重量及離炸點距離後可得人員受傷害之程度，若以表 1 人體耳膜承受 5psi 為限，其安全距離為 47.6m，但只限於無擋牆情形。

3. Zhou & Hao 電腦模擬經驗公式

利用經驗公式得出調整因數 A_{pmax} ，再乘上無擋牆情形之剛面反射爆壓，即可得擋牆

後方之剛面反射爆壓。惟本經驗公式是以自由場地表爆炸分析且適用於剛面反射爆壓，故用於彈庫內爆炸需轉換炸源與擋牆之距離，以自由場地表爆炸時，炸源至擋牆距離為 15m，經 BEC 軟體分析得剛面反射爆壓為 1.372MPa，以此爆壓反推彈庫內炸源與擋牆距離為 17m，經用試誤法可得 $D=40m$ ，則驗證計算步驟如下。

$$(1) Z=D/W^{1/3}=40/546^{1/3}=4.89m/kg^{1/3}$$

(2) 計算未設擋牆時，在距離 40m 時之入射爆壓為 7.056psi，剛面反射爆壓為 16.9psi。

(3) 計算調整因數 A_{pmax}

$$A_{pmax} = -0.1359 + (0.3272 + 0.1995 \log(\frac{4}{40})) \log 4.89 - 0.5626 \log(\frac{4}{40}) + 0.4666 \frac{17}{40} = 0.713$$

(4) 將未設擋牆時剛面反射爆壓 P 乘上 A_{pmax}
 $A_{pmax}=0.713$

$$P_{max}=0.713*16.9=12psi$$

(5) 再依圖 1 將剛面反射爆壓轉換為入射爆壓 (5.18psi)，則設擋牆之安全距離由 47.6m 降為 40m。

3.2 電腦模擬分析

3.2.1 彈庫無擋牆情形(如圖 16)

電腦分析之爆炸過程如圖 17，其距離彈庫正面 6m 至 13m 之爆壓如圖 18，其 6m 及 13m 爆壓尖峰值分別為 0.848MPa 及 0.352MPa。

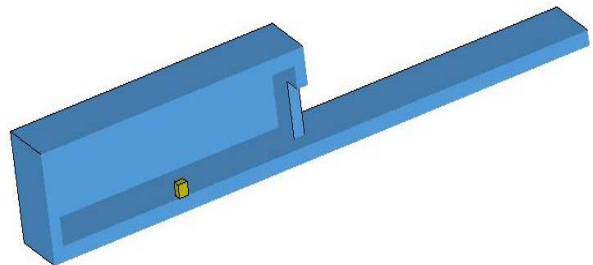


圖 16. 炸藥集中一堆剖面圖。

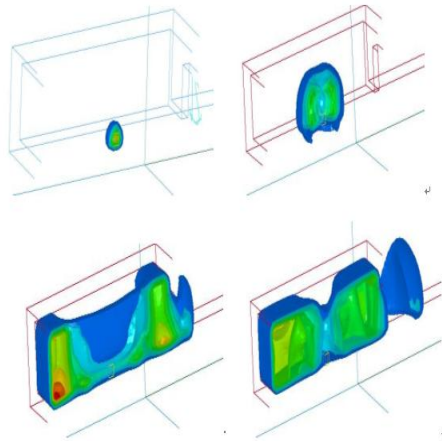


圖 17. 炸藥集中一堆爆炸過程。

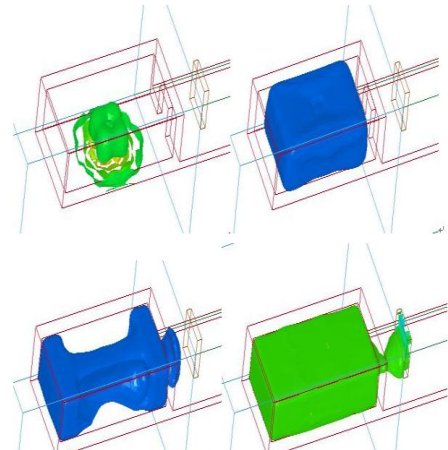


圖 19. 彈庫(含擋牆)爆炸過程。

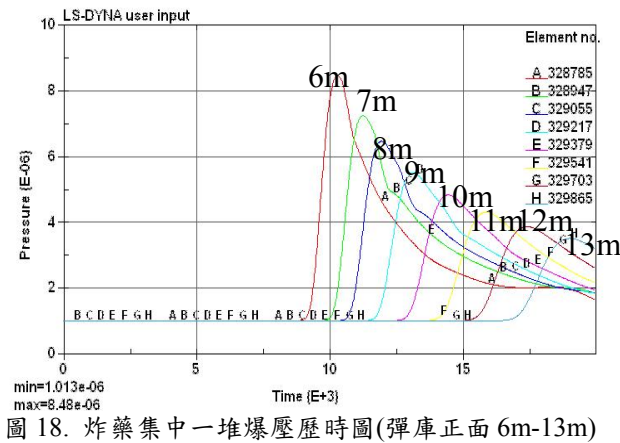


圖 18. 炸藥集中一堆爆壓歷時圖(彈庫正面 6m-13m)

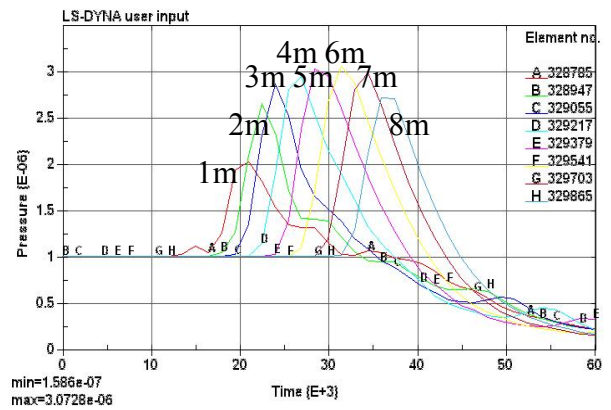


圖 20. 彈庫擋牆後 1m 至 8m 爆壓歷時圖。

3.2.2 彈庫有擋牆情形

電腦分析之爆炸過程如圖 19，其距離擋牆背後 1m(彈庫正面 6m)至 8m(彈庫正面 13m)之爆壓如圖 20，其爆壓尖峰值由擋強牆背面 1m(0.2069MPa) 上升至擋牆背面 6m(0.3072MPa)，再下降至擋牆背面 8m(0.272MPa)，擋牆上、中、下部分承受爆壓如圖 21-23，其爆壓尖峰值分別為 4.009、4.121 及 6.41MPa。

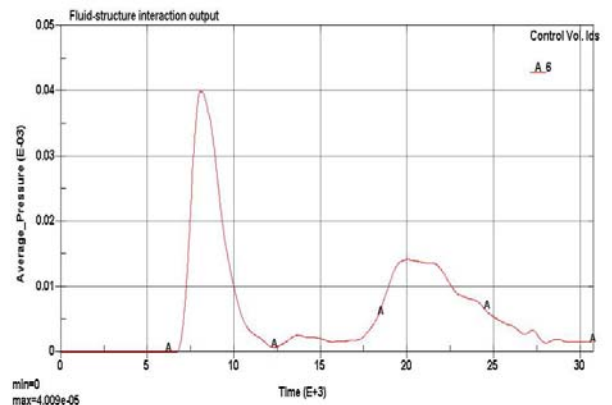


圖 21. 擋牆上部承受爆壓歷時圖。

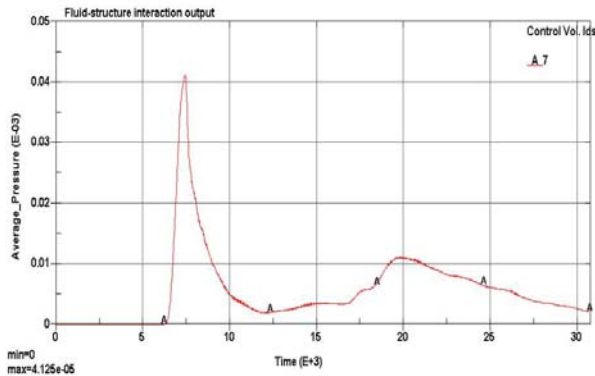


圖 22. 擋牆中部承受爆壓歷時圖。

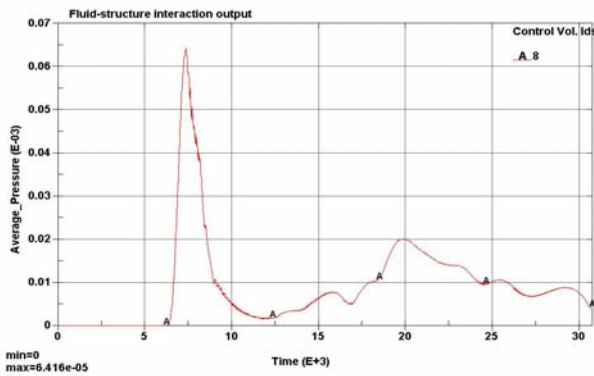


圖 23. 擋牆下部承受爆壓歷時圖。

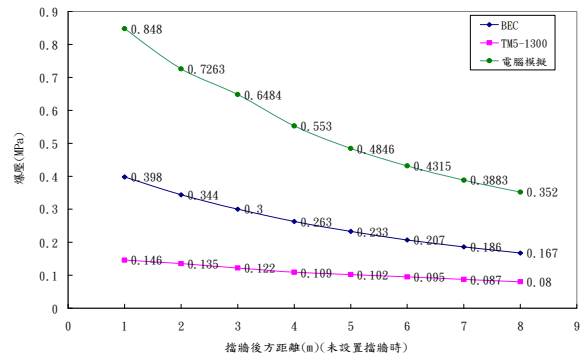


圖 24. 電腦模擬與BEC、TM在不同距離之爆壓 (未設擋牆時)。

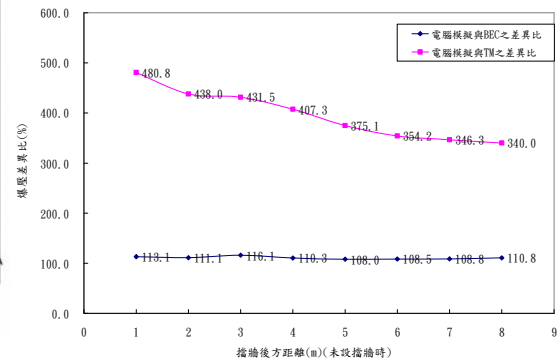


圖 25. 電腦模擬與BEC、TM值之爆壓差異比 (未設擋牆時)。

3.3 綜合分析

3.3.1 無擋牆情形

以 546kgTNT 集中堆置並依 BEC 軟體中 ECM 及 TM5-1300 之 Figure 2-187 分別計算無擋牆時距離彈庫正面 6-13m 之爆壓，再與電腦模擬值比較如圖 24 及 25 所示，此三條曲線之爆壓均依距離愈遠而下降，模擬值高於 BEC 及 TM5-1300，且差異很大，係因 BEC 軟體可計算平面庫及洞庫等型式彈庫，但未能將彈庫真實尺寸及開口列入考慮；而 TM5-1300 有將彈庫內部體積及開口面積列入考慮，但未能說明彈庫尺寸及開口位置；故無論 BEC、TM5-1300 及模擬值三種方法僅能做粗略比較，於後續研究中增做實驗驗證以確認電腦模擬可信度。

3.3.2 有擋牆情形

以 546kgTNT 集中堆置並依 BEC 與 Zhou&Hao 結合計算有擋牆時距離彈庫正面 6-13m(擋牆後方 1-8m)之爆壓，再與電腦模擬值比較差異如圖 26，因 Zhou&Hao[7]中炸源距擋牆與炸源距量測點之比例須在 0.2-0.8 之間。而本例適用範圍在擋牆後方 4.15-66.4m，所以取 5-8m 來比較，電腦模擬曲線較 Zhou&Hao 之曲線為高，且電腦模擬之爆壓自 0.2069MPa 上升至 0.3072MPa 為第一階段，再由 0.3072MPa 下降至 0.272MPa 為第二階段，係因第一階段因擋牆之設立，造成擋牆背面一段距離內有效阻擋爆壓傳播，故爆壓會先上升，而第二階段內，由第一階段爆壓上升最高值再正常下降，在擋牆承受爆壓之比較方面(如表 9)，依 BEC 軟體計算，擋牆承受尖峰爆壓為 2.036MPa，與電腦模擬仍有較大差異，其原因如同 3.3.1 所述。

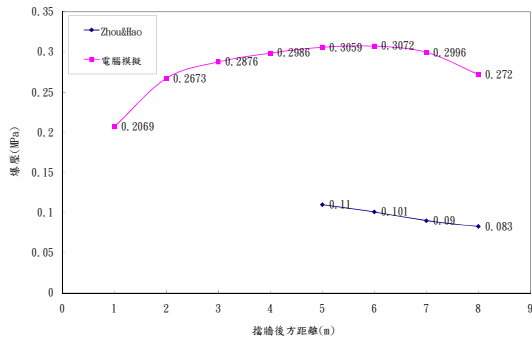


圖 26. 電腦模擬與 Zhou&Hao 不同距離爆壓值 (設擋牆時)。

表 9. 彈庫擋牆規範值與模擬值比較表

比較方式	規範值	電腦模擬值 (MPa)		差異值 (MPa)
		上	中	
擋牆承受尖峰爆壓	2.036MPa	4.009	1.973	
		4.121	2.085	
		6.41	4.374	

3.3.3 無擋牆與有擋牆之比較

1. 安全距離

依前述規範及經驗公式可歸納彈庫間及人員之安全距離如表 10，其洞庫間與平面庫間安全距離之降低率分別為 25%及 45.7%，人員安全距離降低率為 16%。

表 10. 彈庫間與人員在有無擋牆之安全距離

類型		無擋牆	有擋牆	縮減率
彈庫間	洞庫	19.27m	14.45m	25%
	平面庫	35.5m	19.27m	45.7%
人員		47.6m	40m	16%

註：彈庫間類型依 DOD 6055.9-STD 計算。
 人員類型依 Zhou & Hao 建議公式計算

2. 牆後爆壓

依規範(經驗公式)及電腦模擬分別對彈庫無擋牆及有擋牆進行比較如表 11 及圖 27-28，在表 11 中擋牆後方 5-8m 之範圍內，增設擋牆最大可降低 52.7%之爆壓；而電腦模擬方面，以擋牆後方距離 (L) 與擋牆高度 (H) 之比例來分析，在擋牆後方 6-8m (L/H 在 1.5-2 之間) 範圍內，增設擋牆

最大可降低 28.8%之爆壓。在牆後 1m-8m 之爆壓衰減比例若以爆壓尖峰起算 (L/H=1.5) 時，其值分別約為 2%及 9%，而在無擋牆時，與有擋牆後相對位置比較下，爆壓衰減比例最大為 14.7%，最小為 9%，其中在有無擋牆之比較下，L/H=1.75-2 之間時有相近之爆壓衰減比例。

表 11. 規範(經驗公式)對有無擋牆之比較

類型	5m	6m	7m	8m
無擋牆 (MPa)	0.233	0.207	0.186	0.167
有擋牆 (MPa)	0.11	0.101	0.09	0.08
降低率	52.7%	51.2%	51.6%	51.7%

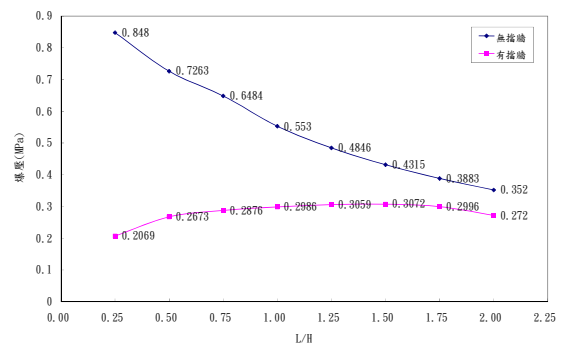


圖 27. 電腦模擬對有無擋牆在不同距離之爆壓值。

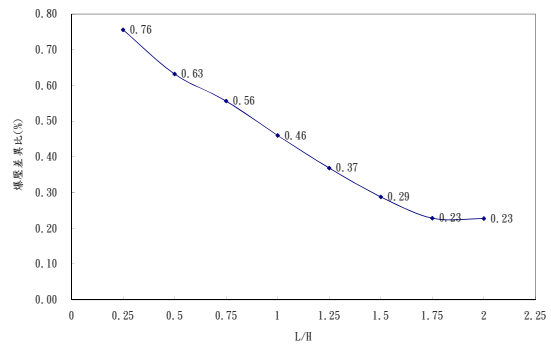


圖 28. 電腦模擬對有無擋牆在不同距離之差異比。

四、結論

利用規範(經驗公式)及流固耦合方法模擬彈庫內部爆炸對擋牆承受爆壓及安全距離之評估，以 546kgTNT 炸藥在彈庫內爆之情形，在安全距離方面，設立擋牆後，經規範(經

驗公式)計算後，洞庫間及平面庫安全距離可縮短 25%及 45.7%，人員安全距離可縮短 16%；在牆後爆壓方面，設立擋牆後，經規範（經驗公式）計算後，在擋牆後方 5-8m 範圍內可降低 52.7%之爆壓，在電腦模擬下，在擋牆高度 1.5-2 倍距離範圍內可降低 28.8%之爆壓，由上可知，擋牆之設立在有效範圍內可降低爆壓及縮減安全距離。另電腦模擬彈庫內爆所得之爆壓與規範值差異很大，故無論 BEC、TM5-1300 及模擬值三種方法僅能做粗略比較，於後續研究中增做實驗驗證以確認電腦模擬可信度。

誌謝

感謝國家高速電腦中心提供軟體運用，以利本研究順利完成。

參考文獻

- [1] Department of Defense, DoD Ammunition and Explosives Safety Standards, Technical Manual DoD 6055.9-STD,USA, 2004.
- [2] Departments of the Army, Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions, Technical Manual TM5-1300, USA, 1990.
- [3] Chapman, T. C., Rose, T. A. and Smith, P. D., “Blast Wave Simulation Using AUTODYN2D: A Parametric Study,” International Journal of Impact Engineering, Vol.16, pp.777-787, 1995.
- [4] Wu, C. Q. and Hao, H., “Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions,” International Journal of Impact Engineering, Vol. 31,pp. 699-717, 2005.
- [5] 李文志，流固耦合在鋼板承受爆壓數值模式之應用，碩士論文，國防大學中正理工學院，桃園，2005。
- [6] 洪正偉，鋼筋混凝土板承受矩形炸藥爆炸之數值模參數研究，碩士論文，國防大學中正理工學院，桃園，2006。
- [7] Zhou, X.Q. , and Hao H., “Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 363-375, 2008.
- [8] 陳弘驥，流固耦合在彈藥庫爆炸數值模式之應用，碩士論文，國防大學中正理工學院，桃園，2008。
- [9] LS-DYNA Version 971 User’s Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [10] Departments of the Army, “Ammunition and Explosives Safety Standards”, Technical Manual Pamphlet 385-64, USA , 1999.
- [11] Department of The Army, Design And Analysis of Hardened Structures to Convention Weapon Effects, Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998.
- [12] Department of Defense Explosives Safety Board, Blast Effects Computer, USA, 2000.
- [13] Mercex, W. P. M., Method to Determine Injury to People and Damage to structures due to the Exposure to Dangerous Goods, 1990.
- [14] Mexcex,W. P. M., The Effects of Explosions on Humans, Europex Newsletter, Edition 13, September, 1990.
- [15] Eisenberg N. A., Lynch, C. J., and Breeding, R.J., “Vulnerability Model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spill,” AD-A015-245, 1975.
- [16] Departments of the Army, Security Engineering Final Design,” Technical Manual TM5-853-3, USA, 1994.
- [17] 鄭丁興、成曉琳，Protective Structure Design software，國防大學中正理工學院，桃園，2006。
- [18] Wang, J. and Gadala, M. S., “Formulation and Survey of ALE Method in Nonlinear Solid Mechanics,” Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 24, pp. 253-269, 1997.
- [19] Stoker, H. C., Developments of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in Non-linear Solid Mechanics, ISBN 90-36512646, 1999.
- [20] Donea, J. and Huerta, A., “Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods,” Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 1, 2004.
- [21] Haufe, A., Weimar, K. and Göhner, U., “Advanced Airbag Simulation Using Fluid-Structure-Interaction and the Eulerian Method in LS-DYNA,” DYNAMore GmbH, Industriestr. 2 ,70565 Stuttgart,

- Deutschland, 2004.
- [22] Gebbeken, N. and Ruppert, M., “On the Safety and Reliability of High Dynamic Hydrocode Simulations,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999.
- [23] Michael, J. M. and Brendan, J. O., “Simulation of Energy Absorbing Materials in Blast Loaded Structures,” 8th International LS-DYNA Users Conference : Penetration/Explosive, Michigan, 2004.
- [24] 莊俊，半穿甲彈彈頭早爆反應分析之研究，博士論文，國防大學中正理工學院，桃園，2001。

郝文風等
擋牆對彈庫內爆後安全距離及爆壓之影響