

擋牆設置與炸藥分堆對彈藥庫內部爆炸之爆壓影響

洪正偉

提要

- 一、彈藥庫為重要之軍事設施，為避免彈藥庫意外爆炸造成人員傷亡，擋牆與炸藥分堆設置會影響彈藥庫內部爆炸後之爆壓極值變化。
- 二、本研究除說明彈藥庫內部爆炸後，擋牆設置與炸藥分堆之相關規範及經驗公式，另利用LS-DYNA數值軟體模擬彈藥庫內部爆炸之爆壓極值探討，亦區分擋牆與炸藥分堆設置等二個研究子題。
- 三、擋牆設置部分結果顯示，設立擋牆可有效降低爆壓極值，以擋牆後方距離(L)與擋牆高度(H)之比例L/H在0.25至2範圍內，設置擋牆最大可降低76%之爆壓極值，驗證擋牆設立之可行性與必要性。
- 四、炸藥分堆部分結果顯示，分堆炸藥堆置之爆壓極值降低效果，較集中炸藥堆置為佳，且炸藥分堆時應以彈藥庫長向堆置為第一考量，再決定炸藥之間距，此因炸藥間距愈大則產生爆壓重疊效應愈小緣故，倘若彈藥庫空間有限，仍須以炸藥分堆短向堆置時，可在炸藥間設置隔板，亦可有效降低爆壓極值。

關鍵詞：彈藥庫、防爆擋牆、炸藥分堆、內部爆炸、爆壓

壹、前言

國內彈藥庫分布地區廣，在配合國軍建軍備戰要求下，目前多以最大庫儲容量屯儲彈藥，但此作法具有高危險性，倘若因庫儲設施不完善或管理不當，將容易引起彈藥庫意外爆炸，造成附近人員傷亡與建築物損壞，形成重大危安事件。依照彈藥庫爆炸產生之反應影響，可區分為爆壓(Blast)、破片(Fragments)、熱危害(Thermal Hazards)、地表震動與坑洞(Ground Shock and Cratering)等四種型式，其中以爆壓危害對結構與人員安全之影響範圍較大，應妥慎評估與研究，鑑此，本文之研究範圍僅針對彈藥庫之爆壓值進行探討，忽略其他效應。但因爆壓量測不易且具危險性，而目前針對國內彈藥庫之爆壓評估，主要仍參考美軍規範為主，所訂定之爆壓極值較為保守。另外，考量我國地小人稠，因國家日益發展與城鄉不斷開發建設，造成許多民生設施與建築物，已逐漸接近彈藥庫。故在有限的彈藥庫腹地範圍內，除須於平日做好彈藥保存工作外，另可於彈藥庫出口前設立擋牆，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。

因此建立爆壓預測模式，評估彈藥庫內部爆炸所產生爆壓極值影響範圍與減壓方式，已是當前重要之研究議題。

目前傳統結構物承受爆炸之研究，可區分為考量結構體分析與忽略結構體分析等兩大類型，在考量結構體分析部分又區分為兩種型式，一為結構物無破壞，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。另外在忽略結構體分析部分則將結構體視為剛體，僅針對爆炸流場進行分析。但傳統結構物承受爆炸分析研究僅能單純以均布壓力分析結構體變形，但對於爆炸產生高度不均勻爆壓分布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，電腦硬體與數值軟體發展迅速，利用電腦進行數值模擬爆炸分析已是發展趨勢，其中CFD(Computational Fluid Dynamics)和結構反應(Structural Response)之組合發展為流固耦合模式，不僅可預測爆壓等相關參數，亦可分析結構物之反應¹，但是CFD需要精密且複雜的計算，另外工程師必須具備較高的數值計算經驗與知識。1995年Chapman等²、

- 1 Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., and Ramsay, J., "Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview," *Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue: Loading on Structures*, pp. 76-91, 2007.
- 2 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, No. 516, pp. 777-787, 1995.

2005年Wu等³共同提到，接近炸源之爆壓預測值，分別與美軍TM5-855-1⁴比較仍有相當大差異，但遠距離相對誤差則較相近。2008年Klomfass⁵利用APOLLO求解器，模擬1kg球形TNT炸藥在距地面高20cm處爆炸，因地面的反射與折射，故爆炸後之爆震波波形，在近距離時呈現跳動劇烈行為，會影響爆壓極值，但遠距離之爆震波波形則較平緩而不影響爆壓極值。2005年李文志⁶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與地表爆炸數值模型，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 對爆壓分布之影

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TM5-1300⁷相近之結果。2006年洪正偉⁸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Hao⁹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，

- 3 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, No. 6, pp. 699-717, 2005.
- 4 Department of the Army, Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects, TM5-855-1, U. S. A., pp. 1-50, 1998.
- 5 Klomfass, A., "Numerical Investigation of Fluid Dynamic Instabilities and Pressure Fluctuations in the Near Field of a Detonation," Proceeding of the 20th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock Conference, Norway, pp. 1-13, 2008.
- 6 李文志, "流固耦合在銅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, 第32-84頁, 2005。
- 7 Department of the Army, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM5-1300, U. S. A., pp. 1-1867, 1990.
- 8 洪正偉, "鋼筋混凝土板承受矩形炸藥爆炸之數值模擬參數研究", 碩士論文, 國防大學中正理工學院, 桃園, 第58-82頁, 2006。
- 9 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.

2008年陳弘驥¹⁰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。本研究為評估彈藥庫擋牆之防護能力，將以美軍規範DOD 6055.9-STD¹¹及TM5-1300為評估依據，計算擋牆設置與炸藥分堆對彈藥庫內部爆炸之爆壓影響，以做為分析設計之參考。另外，近年來因電腦模擬軟體技術進步，已可利用電腦數值模擬彈藥庫內部爆炸情形。經配合實驗數據比較後修正數值模擬參數值，提供合理之數值模型。如此，可取代與預測部分爆炸實驗結果，減少爆炸實驗經費支出與降低實驗危安風險。

貳、研究內容

由於國內爆炸實驗仍受管制，主要因所需經費大、炸藥取得不易、實驗場地受限、爆壓量測變異大等問題。故本研究採取數值模擬方式實施研究。本文首先介紹美軍規範及相關研究之經驗公式，說明彈藥庫外設置擋牆之爆壓極值評估，與彈藥庫內炸藥分堆對

彈藥庫內部爆炸之爆壓經驗公式，可提供彈藥庫外設置擋牆之爆壓極值評估，與彈藥庫內炸藥分堆之設置原則之參考依據。一般而言，彈藥庫爆炸後掩體會產生「全毀」、「部分損壞」及「無損壞」等三種情況。本文之研究假設一，係以假定彈藥庫內部爆炸後，掩體無損壞下之情況下實施研究，其爆壓宣洩處為彈藥庫大門，此時所量測與計算之爆壓值應為最大值，若以此爆壓值作為後續彈藥庫設計之參據，可獲得較保守(亦即安全)之結果。

依據美軍規範DOD 6055.9-STD，彈藥庫防爆門設計區分為7bar與3bar等兩種，一般而言均無法承受彈藥庫內部爆炸之巨大壓力，故通常彈藥庫防爆門係用來抵擋彈藥庫外部爆炸之壓力，且防爆門亦須內縮，係計算爆壓衰減至7bar與3bar以下，方可設置防爆門。本文之研究假設二，係以假定彈藥庫防爆門已完全無法承受彈藥庫內部之爆壓值，故已忽略防爆門設置。

另本研究亦將彈藥庫所有存放之物質，均全部換算成TNT當量之火炸藥計算，以利爆壓值計算與比較。此外，本文主要利用LS-DYNA¹²軟體，實施爆炸模擬研究，為目前世界各國廣泛採用具有公信力之數值軟體，所

10 陳弘驥，“流固耦合在彈藥庫爆炸數值模式之應用”，碩士論文，國防大學理工學院，桃園，第63-67頁，2008。

11 Department of Defense, “DoD Ammunition and Explosives Safety Standards,” DoD 6055.9-STD, U. S. A., pp. 96-238, 2009.

12 LS-DYNA Version 971 Users’ Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.

建立之數值模型，分別模擬彈藥庫外設置擋牆與彈藥庫內炸藥分堆，對彈藥庫內部爆炸所產生之爆壓影響，研究成果希冀可做為未來彈藥庫設計之參考依據，本研究內容茲分別說明如下：

一、彈藥庫外設置擋牆之爆壓極值評估

(一)TM5-853-3¹³

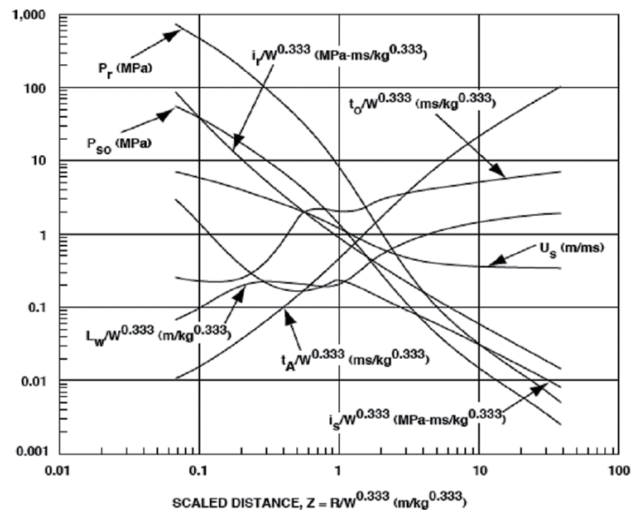
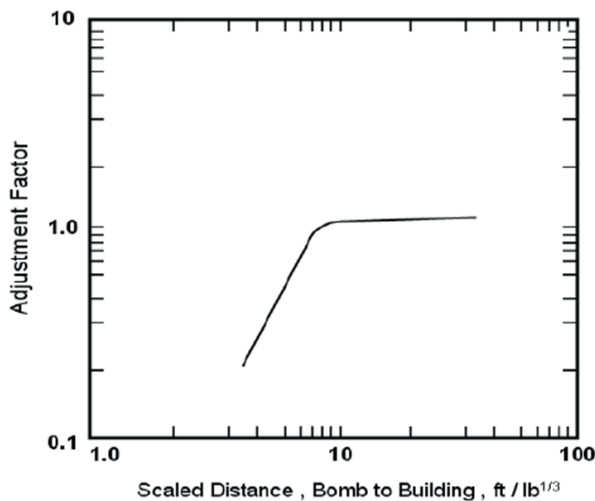
為有效預測防爆擋牆後方建築物所承受之爆壓，美軍經一系列實驗，在其美軍規範TM5-853-3中，提供相關簡易擋牆後方建築物所承受之爆壓估算公式，藉由炸藥量、擋牆位置及高度、牆後建築物高度，估算牆後之爆壓調整係數(Adjustment Factor, AF)，如圖一左所示。再將該值乘上TM5-1300所求得

之無擋牆地表面爆壓極值(P_{no_wall})，如圖一右所示，即可得出擋牆後方建築物所承受爆壓極值(P_{wall})，其計算如式(1)所示，但運用此圖時，炸藥與擋牆間之縮尺距離必須小於或等於3呎/磅^{1/3}，擋牆與牆後建築物間之縮尺距離則須介於1至20呎/磅^{1/3}之間。

$$P_{wall} = P_{no_wall} * AF \quad (1)$$

(二)Zhou¹⁵等經驗公式

2007年Zhou等利用數值模擬方式，進行防爆擋牆對爆炸效應之數值預測，結果顯示防爆擋牆對降低爆炸效應具有顯著影響，並提供相關經驗公式，以牆後爆壓之調整因數 A_{pmax} 及 A_{imax} ，再乘上TM5-1300所求得無擋牆情形之反射爆壓及反射衝量，即可得擋牆後



圖一 牆後爆壓調整係數與地表面爆壓極值¹⁴

13 Departments of the Army, Security Engineering Final Design, Technical Manual TM5-853-3, U. S. A., pp. 1-132, 1994.

14 同註13。

15 同註9。

方之反射爆壓及反射衝量值。

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

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

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

二、彈藥庫內炸藥分堆之設置原則

依據美軍規範DoD 6055.9-STD,當有二堆以上炸藥儲存時,須考慮分堆之炸藥有一定之間隔,以免造成爆壓重疊效應。區分炸藥為橫向堆置(Lateral Position)及軸向堆置(Axial Position)兩種情形。

(一)炸藥橫向堆置

第一個堆置炸藥爆炸至橫向炸藥時間 t (毫秒),限制值為 $t < 5.21 \times Q^{1/3}$, Q 為炸藥重(公斤)。

(二)炸藥軸向堆置

第一個堆置炸藥爆炸至軸向炸藥時間 t (毫秒),限制值為 $t < 7.29 \times Q^{1/3}$, Q 為炸藥重(公斤)。

三、數值模型介紹

本研究分別建立彈藥庫含擋牆,與彈藥庫炸藥分堆等二種數值模型。數值模型區分為空氣、炸藥與混凝土等三個部分建立模型。本文採用全模型進行分析,可較為精確模擬物理現象。數值模型以LS-DYNA有限元素軟體之ALE算法為主,將空氣與炸藥設為

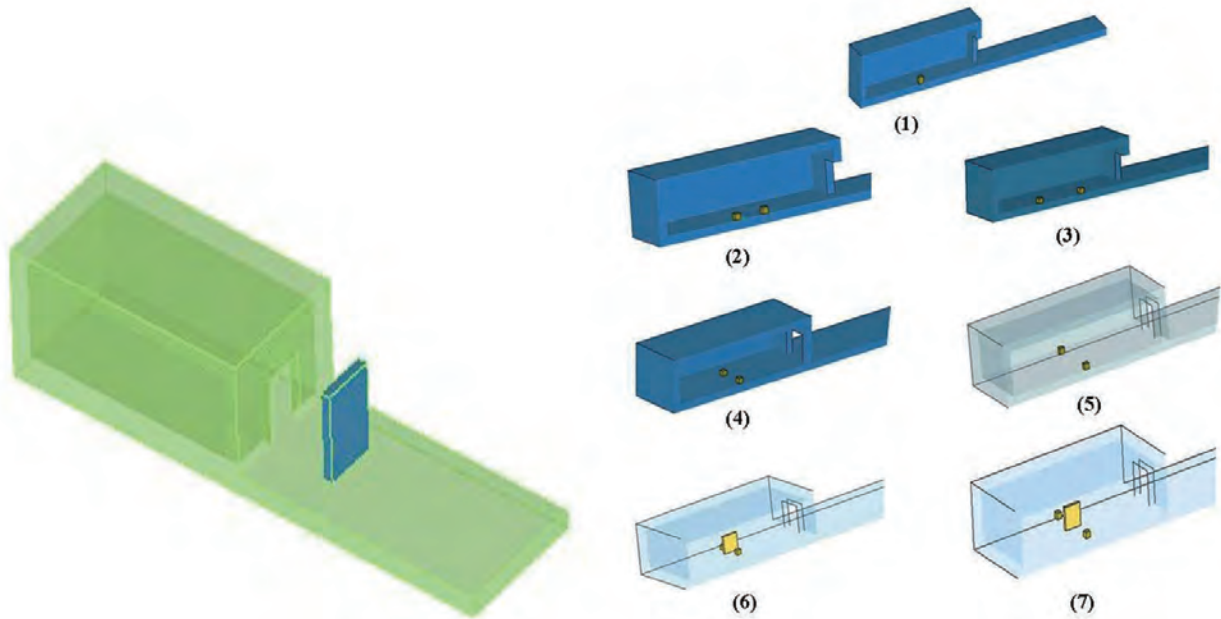
Eulerian網格,彈藥庫、地面、擋牆與隔板則為Lagrangian網格,共構一個流固耦合之數值模型。數值模擬使用8個節點之實體元素,元素計算方式採用多物質耦合元素中心單點積分(1 Point ALE Multi Material Element)算法,與元素計算方式採用常應力實體單元(Constant Stress Solid Element)算法,流體網格與固體網格重疊,透過CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID的設定,以產生ALE流固耦合之數值模式,並將起爆點設定為炸藥中心點。以下分別針對幾何結構、網格描述、元素屬性、材料組成律、網格劃分實施說明:

(一)幾何結構

1.彈藥庫含擋牆模型

彈藥庫含擋牆之模型尺寸,其彈藥庫內部空間寬10公尺,高5公尺,深20公尺,牆厚80公分,地板厚30公分,彈藥庫正面有一3公尺*3公尺之開口(忽略防爆門),前方5公尺處有一擋牆(高4公尺寬4公尺厚80公分),為鋼筋混凝土結構,混凝土為280公斤/公分²,配筋型式D32@20公分雙向,降伏強度為4200公斤/公分²,彈藥庫內存放546公斤TNT炸藥,如圖二左所示。

2.彈藥庫炸藥分堆模型



圖二 彈藥庫含擋牆模型與炸藥分堆模型(作者繪製)

數值模型尺寸與彈藥庫(含擋牆)模型相同，惟僅差異在於有無擋牆與隔板等設施，依據彈藥庫內炸藥位置，將數值模型區分為(1)炸藥集中一堆、(2)炸藥長向分成二堆相距3公尺、(3)炸藥長向分成二堆相距6公尺、(4)炸藥短向分成二堆相距3公尺、(5)炸藥短向分成二堆相距6公尺、(6)炸藥短向分成二堆相距3公尺且有隔板、(7)炸藥短向分成二堆相距6公尺且有隔板等7種，分別探討彈藥庫正面5公尺與10公尺處之爆壓極值。此外說明，以上炸藥分堆型式，均採用美軍規範DoD 6055.9-STD橫向堆置(Lateral Position)原則設置，如圖二右所示。

(二)網格描述

對於流體動力分析與非線性固體力學數值模擬，關鍵在於選定何種數值模式¹⁶。LS-DYNA提供Lagrangian描述法、Eulerian描述法與ALE(ArbitraryLagrangian-Eulerian)描述法等三種數值模式描述法，說明如下：

1.Lagrangian描述法

Lagrangian描述法主要應用於固體結構的應力應變分析，所有計算網格均隨附著材料節點而移動，網格節點即為材料節點，亦即結構物變形與計算網格變形是一致的，物質不會在網格與網格間流動。主要優點為可精確描述結構物邊界的運動，追蹤自由表面及不同材料之介面，但缺點為若發生大變形問題時，將

16 Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J. P., and Rodriguez-Ferran, A., "Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods," Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol.1, pp. 1-38, 2004.

會出現嚴重的網格畸變，使得數值運算困難而中止。

2. Eulerian描述法

Eulerian描述法主要應用於流場分析，以空間座標為基礎，計算網格是固定不動，結構之材料可自由移動，所以網格與網格之間的物質是可以流動的，材料在一個固定計算域中，採用Navier-Stokes方程式求解。可以想像成有兩層網格重疊，一層固定不動的空間網格，另一層為附著在材料節點，隨材料在固定網格中流動。主要優點為很容易處理大變形問題，缺點為在結構邊界的捕捉較為困難，且需耗費較大計算時間。

3. ALE描述法

ALE描述法最初出現在流體動力學的有限差分法，其兼具Lagrangian及Eulerian兩種描述法的特點，亦即在處理結構邊界運動上採Lagrangian描述法，因此可有效追蹤結構邊界的運動行為，另外亦吸收Eulerian描述法的特點，計算網格與所分析結構材料網格是各自獨立的，但與Eulerian描述法不同處在於，ALE描述法空間網格可以依據所定義的參數，在求解中可任意移動調整網格。因

此ALE描述法首先會執行一個或數個Lagrangian網格計算，此時的網格單元會隨著材料的流動而產生變形，隨後才執行ALE時步計算¹⁷，可區分光滑步階(Smooth Step)與對流步階(Advection Step)二階段，光滑步階為保持變形後之物體邊界條件，對內部進行重分網格，網格擴展關係保持不變，對流步階為將變形網格中的單元變量(密度、能量及應力張量等)和節點速度輸入到重新劃分的網格中，區分：(1)決定需移動之節點、(2)先移動邊界節點、(3)再移動內部節點、(4)計算元素中央變數之傳送、(5)計算動量傳送及更新速度等流程¹⁸。

(三)元素屬性

本研究所有幾何結構均為實體元素(Solid element)，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(1 Point ALE Multi Material Element) 算法。另外，彈藥庫、地面、擋牆與隔板則為Lagrangian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，透過*CONSTRAINED_

17 李裕春、時黨勇，ANSYS 10.0/LS-DYNA基礎理論與工程實踐，中國水利水電出版社，北京，第190頁，2005。

18 Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 Theory's Manual, Livermore Software Technology Corporation, U. S. A., pp. 1-680, 2006.

LAGRANGE_IN_SOLID的設定，將Euler網格定義為主要網格(Master Mesh)，Lagrange網格定義為從屬網格(Slave Mesh)，進而產生ALE流固耦合數值模式。實體Solid 164元素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等自由度，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。

(四)材料組成律

材料組成律即應力張量與應變張量的關係，係將應力區分為偏差應力部分(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之關係，並以狀態方程式(Equation of State)來描述材料組成律中，壓力、體積(或密度)、與溫度(或比內能)三者之關係，其性質相當於彈性力學中的體積模數(Bulk Modulus)。材料在爆炸反應時，由於體積變化大，需搭配使用狀態方程式來描述材料的體積、應力與應變關係。有關LS-DYNA一般常用的材料參數，可參考關鍵字用戶手冊(Keyword User's Manual)¹⁹來設定。而本研究中所用的材料模型，共有空氣(MAT9)、炸藥(MAT8)、混凝土(MAT3)等三種

材料，說明如下：

1.空氣(MAT9)

空氣材料是使用編號9號MAT_NULL的材料模式，所需輸入參數為材料的質量密度(Mass Density)、壓力截斷值(Pressure Cutoff)、動態黏滯係數(Dynamic Viscosity Coefficient)、相對體積(Relative Volume)、楊氏係數(Young's Modulus)、柏松比(Poisson's Ratio)，並搭配Linear Polynomial Equation-of-State狀態方程式以描述空氣。

2.炸藥(MAT8)

炸藥材料係採用編號8號之MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN的材料模式，可用來模擬高爆型的炸藥。本研究所使用的為TNT炸藥，參考LLNL²⁰爆炸手冊，所需輸入參數為材料的質量密度(Mass Density)、炸藥的爆速(Detonation Velocity)、Chapman-Jouget壓力、衰變常數(Beta Burn Flag)、體積模數(Bulk Modulus)、剪力模數(Shear Modulus)、降伏應力(Yield Stress)，並搭配EOS_JWL狀態方程式。

3.混凝土(MAT3)

19 Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971/Rev 5 (Beta) User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, U. S. A., pp. 1-2546, 2010.

20 Dobratz, B. M. and Crawford, P. C., LLNL Explosives Handbook - Properties of Chemical Explosives and Explosives Simulants, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-52997 Change 2, University of California, pp. 22-23, 1985.

混凝土材料使用編號為3號MAT_PLASTIC_KINEMATIC材料，可用來模擬彈藥庫、地面、擋牆與隔板，在運算上為了簡化及保守考量下，擬採用理想化應力-應變曲線，對於材料進入塑性後之應變硬化行為，可由參數BETA來控制。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)。若不考慮塑性變形，則所需輸入參數僅為材料的質量密度(Mass Density)、楊氏係數(Young's Modulus)、柏松比(Poisson's Ratio)。

(五)網格劃分部分

1. 彈藥庫含擋牆模型

炸藥與空氣每分格為35cm，彈藥庫、地面、擋牆每分格為80cm，元素網格計445831個。

2. 彈藥庫炸藥分堆模型

炸藥與空氣每分格為35cm，彈庫每分格為80cm，彈藥庫、地面、隔板，元素網格計445806個。

如下：

(一)無擋牆部分

在擋牆後方L/H在0.25至2範圍，爆壓極值為0.848MPa至0.352MPa之間，隨L/H值增加，爆壓極值呈現遞減現象，如圖三左所示。

(二)有擋牆部分

在擋牆後方L/H在0.25至2範圍，爆壓極值為0.207MPa至0.272MPa之間，隨L/H值增加，爆壓先呈現增加後遞減現象。顯現爆壓值並不與擋牆後方距離(L)與擋牆高度(H)之比例有線性關係，需再做進一步研究，如圖三左所示。

(三)有、無擋牆爆壓差異比部分

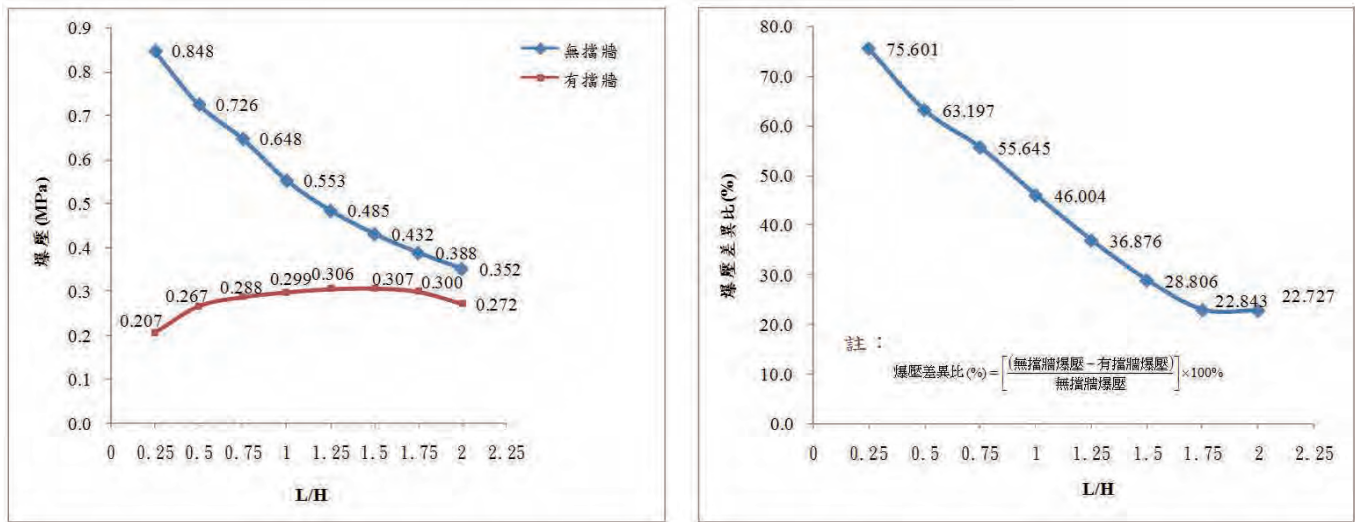
在無擋牆與有擋牆後方相對位置比較下，擋牆後方距離(L)與擋牆高度(H)之比值(即L/H值)在0.25至1.75範圍內，隨L/H值增加，有、無擋牆爆壓差異比呈現降低現象，其中以L/H值=0.25時，有、無擋牆爆壓差異比最為顯著，另L/H值在1.75至2範圍間，有、無擋牆爆壓差異比則呈現不顯著現象，如圖三右所示。

綜上所述，研究結果顯示，防爆擋牆係能有效降低爆炸效應之障礙物，在適當範圍內，可保護牆後人員、設施及結構物免受爆炸損害，使其提高存活能力。易言之，在爆震波(Blast Wave)傳播的路徑上施作防爆擋牆，將由於防爆擋牆的作用，設立擋牆可有效降低爆壓極值，以擋牆後方距離(L)與擋牆高度(H)之比例L/H在0.25至2範圍內，增設擋牆最

參、分析結果及討論

一、彈藥庫設置擋牆之爆壓極值評估

依照電腦數值模擬結果，分別對彈藥庫無擋牆及有擋牆進行分析比較，以擋牆後方距離(L)與擋牆高度(H)之比例來探討，說明



圖三 電腦模擬對有無擋牆爆壓比較(作者繪製)

大可降低75.601%之爆壓極值，驗證擋牆設立之必要性。

二、彈藥庫內炸藥分堆

(一)無隔板部分

依DoD 6055.9-STD炸藥軸向分堆原則，以546公斤炸藥分成兩堆(每堆炸藥273公斤)，第一堆炸藥爆炸至第二堆炸藥之時間應小於10.3毫秒，計算應至少相距12.5公尺，方能無爆壓重疊效應產生，但本研究數值模型之分堆炸藥範圍距離則分別為3公尺與6公尺，均會產生爆壓重疊效應現象，故本計算之數值模型係以考量在產生爆壓重疊效應下之分堆設置原則之評估，經電腦數值模擬分析結果，集中及分堆炸藥(無增加隔板)之爆壓極值，如表一所示。

1. 集中炸藥與分堆炸藥爆壓極值比較

若以集中炸藥為比較基準，在彈藥庫正面5公尺處，除短向炸藥分成二堆(相

距為3公尺)，爆壓極值因重疊效應致使爆壓極值有增加(38.900%)外，其餘爆壓極值均有下降現象，其爆壓極值增減率依序為，長向炸藥分成二堆(相距為3公尺)爆壓極值減少0.600%、長向炸藥分成二堆(相距為6公尺)爆壓極值減少32.500%、短向炸藥分成二堆(相距為6公尺)爆壓極值減少22.700%，而以長向炸藥(相距為6公尺)爆壓極值折減率最高32.500%。

另外在彈藥庫正面10公尺處，除短向炸藥分成二堆(相距為3公尺與6公尺)，爆壓極值因重疊效應致使爆壓極值有增加18.300%與1.130%外，其餘爆壓極值均有下降現象，其爆壓極值增減率依序為，長向炸藥分成二堆(相距為3公尺)爆壓極值減少4.960%、長向炸藥分成二堆(相距為6公尺)爆壓極值減少

表一 各種炸藥堆置方式之爆壓極值(無增加隔板)

分堆位置	彈藥庫正面5公尺處		彈藥庫正面10公尺處	
	爆壓 (MPa)	增減率	爆壓 (MPa)	增減率
集中堆置	0.971	0	0.443	0
長向分成二堆(相距為3公尺)	0.965	-0.600%	0.421	-4.960%
長向分成二堆(相距為6公尺)	0.655	-32.500%	0.410	-7.450%
短向分成二堆(相距為3公尺)	1.349	+38.900%	0.524	+18.300%
短向分成二堆(相距為6公尺)	0.750	-22.700%	0.448	+1.130%
資料來源：本研究整理				

7.450%，亦以長向炸藥(相距為6公尺)爆壓極值折減率最高7.450%。

2. 炸藥間距之爆壓極值影響比較

彈藥庫炸藥間距之爆壓極值影響比較下，在彈藥庫正面5公尺處，無論短向或長向堆置，在炸藥相距為3公尺及6公尺比較下，相距為6公尺之爆壓極值均較相距為3公尺小。另外在彈藥庫正面10公尺處，同樣地亦得到相同的結果，可驗證分堆炸藥間距愈大則產生爆壓重疊效應愈小，爆壓極值折減率可提升。

3. 短向或長向堆置炸藥之爆壓極值比較

炸藥長向及短向堆置之比較下，在彈藥庫正面5公尺處，無論炸藥間距在相距為3公尺或6公尺，長向堆置產生爆壓極值均較短向堆置爆壓極值小，爆壓極值折減率可提升。

整體而言，分堆炸藥設置之爆壓極值折減效果，比集中炸藥堆置為佳，倘若需施以炸藥分堆設置，宜以長向堆置為第一考量，

再決定炸藥之間距，當彈藥庫空間有限仍須短向堆置時，則更應考量DoD 6055.9-STD炸藥分堆設置原則，避免產生爆壓極值重疊效應之情形。

(二)有隔板部分

基於短向堆置爆壓較易產生極值重疊效應，當僅考量炸藥短向堆置且於炸藥之間設有隔板時，實施分析爆壓極值增減率分析。在炸藥間距3公尺時，其在彈藥庫正面前5公尺及10公尺處之爆壓極值可分別降低9.560%及8.970%，而在炸藥間距6公尺時，其爆壓極值亦可分別降低0.530%及0.670%，顯示隔板設置對與彈藥庫外爆壓極值有折減效果，如表二所示。

綜上所述，炸藥分堆設置之爆壓極值降低效果，較集中炸藥堆置為佳，且炸藥分堆時應以彈藥庫長向堆置為第一考量，再決定炸藥之間距，此為炸藥間距愈大則產生爆壓重疊效應愈小緣故，倘若囿於彈藥庫空間有限，仍須以炸藥分堆短向堆置時，則可運用

表二 短向堆置增加隔板之爆壓極值比較

短向堆置		無隔板	有隔板	增減率
相距為3公尺	彈藥庫正面5公尺(MPa)	1.349	1.220	9.560%
	彈藥庫正面10公尺(MPa)	0.524	0.477	8.970%
相距為6公尺	彈藥庫正面5公尺(MPa)	0.750	0.746	0.530%
	彈藥庫正面10公尺(MPa)	0.448	0.445	0.670%
資料來源：本研究整理				

隔板設置於炸藥間，亦可有降低爆壓極值之效果。

肆、結論

彈藥庫儲管理，一直以來都是國軍重視的問題，惟一旦發生爆炸意外，為不至引起危險波及於其他之彈藥庫、人員、交通設施及建築物等，並期損壞降至最小的程度，遂律定安全量距，確保彈藥庫人安與物安。當彈藥庫發生意外爆炸事件將造成嚴重災害，諸如2011年伊朗首都德黑蘭西方的革命衛隊軍事基地發生大規模爆炸，造成包括指揮官在內的17人喪生，據調查顯示即為彈藥庫意外爆炸。2012年土耳其西部艾菲昂市的一處彈藥庫發生爆炸，造成25名士兵喪命等。倘若發生在人口稠密的國家，更是一件不容小覷的事件。例如，2006年我國北部某彈藥庫發生威力強大的爆炸事件，由於未設置防爆擋牆以及安全量距不足，造成士官兵的死傷。因此，各國軍方無不檢討「彈藥庫地下化」、「彈藥庫搬遷」等問題，誠如同樣在亞洲國

家且地小人稠的新加坡，更在2006年於市中心底下，興建地下彈藥庫就是一個典型的例子。本文介紹美軍規範及相關學者研究經驗公式，針對彈藥庫外設置擋牆與彈藥庫內炸藥分堆之爆壓極值評估做概略性探討。此外，利用LS-DYNA數值軟體分別模擬彈藥庫外設置擋牆與彈藥庫內炸藥分堆，對彈藥庫內部爆炸所產生之爆壓影響，研究成果俾供未來彈藥庫設計與防爆擋牆構建之參考。

作者簡介

洪正偉中校，陸軍官校正86年班、陸軍工兵正規班139期、國防大學中正理工學院軍事工程研究所碩士95年班、國防大學理工學院國防科學研究所博士101年班，現任職於陸軍第十軍團工兵組中校參謀官，並同為國防大學陸軍指揮參謀學院在職班102年班學員。