

擋牆對爆壓衰減效應之研究

成曉琳^{1*} 王公彥²

¹國防大學理工學院環境資訊及工程學系

²國防部聯合後勤司令部戰訓計畫處

摘 要

本文採數值模擬方式，針對擋牆承受爆震波作用下，其對爆壓衰減與牆後安全量距進行探討。研究結果顯示：本研究所提出之數值分析模式能有效預測爆炸所產生的爆壓值；擋牆在有限的範圍內對於爆壓的衰減有明顯的效果，然由於擋牆幾何尺寸與爆震波傳遞路徑，牆後防護區域外之爆壓可能高於自由場爆壓，造成擋牆防護的反效果；同時讓牆前爆壓反射疊加之效應受到抑制，以及牆後爆壓得以有效衰減，凸字型擋牆(B 型式)之構型所產生的效果最佳；室內爆炸受到空間的約束，造成庫房開口處之爆壓遽昇。

關鍵詞：擋牆，爆壓，安全量距

A Study of the Effect of a Blast Wall on Pressure Attenuation

Hsiao-Lin Cheng^{1*} and Kung-Yen Wang²

¹*Department of Environmental Information and Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

²*Division of Operations-Training and planning, Combined Logistics Command, Ministry of National Defense*

ABSTRACT

This study investigates the effects of a blast wall subjected to the blast wave on the attenuation of the pressure and the safe quantity-distance behind the wall by means of numerical simulation. The results show that the proposal numerical simulation model fairly predicts the pressure of the explosion, and that a blast wall effectively reduces the pressure within a limited distance. However, due to the configuration of the wall and the propagation path of the blast wave, the pressure beyond the limited safe quantity-distance may exceed the pressure of the free-field. This causes the loss of the protective performance of the wall. The wall with a B type provides the best performance in terms of the pressure attenuation. The results also show that the pressure produced by the interior explosion dramatically increases in the opening due to the space confinement.

Keywords: blast wall, pressure, safe quantity-distance

Manuscript received January 25, 2010; revised September 1, 2010; * Corresponding author

一、前言

2004年新竹縣雲光爆竹工廠第11號工作室(專門配製火藥的作業室)發生爆炸事故,造成3人死亡、11人輕重傷及周圍半徑70公尺內房屋結構毀損,整個廠區在發生爆炸後,幾乎每一個工作室都仍在著火,所幸第一爆炸現場旁的擋牆發揮防爆功能,減少了部分傷亡。2006年位於台北縣山區的一座彈藥庫發生爆炸事故,威力強大的爆震波與被炸飛的防爆門,直擊150公尺外的官兵營舍並起火燃燒,造成士官兵嚴重死傷,事後現勘發現引起爆炸的彈藥庫與兵舍之間並未設置防爆擋牆。

彈藥安全手冊[1]中明確律定:為保護彈藥工作人員、器材、設備,避免遭受某項特殊工作中可能發生之火災或爆炸危害,必須使用適當程度的防護,即利用堅固之天然擋牆或建造合適的人工擋牆,以削減爆炸威力。擋牆必須建構於易發生意外災害場所與被保護建築物之間,以隔離保護之,其設置位置與幾何形狀,均為建構擋牆之重要因素。

以實驗法來進行擋牆對爆壓衰減效應的探討具有實際且正確的意義,然由於爆炸實驗牽涉範圍較廣,例如炸藥的來源及許可、實驗場地的適當性、龐大的實驗經費及人力、高度的危險性等,以致實際爆炸實驗無法普遍的進行。考量經費、環境限制及安全等因素與電腦的快速發展下,數值模擬已不能僅僅看作理論研究和實驗研究的輔助手段了,它已成為近代科學技術迅速發展中不可忽視的重要技術方法,而且以計算機進行數值模擬,其難度、意義都不比傳統的實驗低,且數值模擬的效率、經濟性都要比實驗高得多,因此,數值模擬已成為一種有效且經濟的替代分析方法,惟仍需與實驗結果比較,以驗證數值模擬之適當性。

二、研究方法與內容

本文採數值模擬方式,進行擋牆承受炸藥地表面爆炸下對爆壓衰減效應的探討。首先藉由實驗文獻的比較,以驗證數值分析模式的可靠性,接著探討擋牆參數對於爆壓分布與爆壓衰減之影響,並依據人體所能承受之最大有效爆壓來推測牆後之安全量距,以做為評估擋牆之防護能力及未來彈藥庫擋牆安全設計之參考依據。

2.1 數值分析法

本文採用 LS-DYNA[2]有限元素分析軟體進行數值模擬,LS-DYNA 具有處理三度空間結構之非線性及大變形行為的強大能力,尤其適合求解三維非線性結構之高速碰撞及爆炸等非線性動力衝擊問題,同時該軟體以顯性時間積分求解為主,使其運算處理快速,為目前針對爆炸模擬分析的最佳工具之一,主要數值模擬特性簡述如下。

2.1.1 質點運動描述法

對於質點運動之數學描述法,主要有 Lagrange 描述法(材料描述法)、Euler 描述法(空間描述法)、ALE 描述法(Arbitrary Lagrangian- Eulerian)等3種描述法。ALE 描述法兼具 Lagrange 描述法和 Euler 描述法之優點,首先在結構邊界運動的處理上,引進 Lagrange 描述法的特點,因此能夠有效的追蹤物質結構邊界的運動,其次在內部網格的劃分上,採用了 Euler 描述法的長處,使內部元素網格獨立於被分析的物質,網格可以根據定義之參數在求解過程中適當調整位置,使得網格不致出現嚴重的變形,網格與網格間之物質也是可以流動的,在分析大變形問題時是非常有利的[3]。

2.1.2 流固耦合

流固耦合(Fluid-Structure Interaction)為流體與固體兩介質間之相互作用,即固體結構在流場動態荷載作用下產生變形或運動等反應,而固體所產生的反應亦會交互改變流場荷載的分布及大小。在 LS-DYNA 中有關流固耦合計算方法,區分為共點算法、接觸算法及流固耦合算法等3種算法,其中本研究採用流固耦合算法,主要特點係進行幾何模型構建及有限元素網格劃分時,固體與流體的幾何模型及網格,可以重疊在一起,透過關鍵字 *CONSTRAINED_ LAGRANGE_IN_SOLID 的約束方法,將流體與固體耦合在一起,來實現流體與固體間之耦合效應。

2.1.3 材料模型

本研究所使用的材料模型,主要包含炸藥(*MAT_008)、空氣(*MAT_009)及混凝土(*MAT_072R3)等3種,而對於爆炸所產生之高速、高溫、高壓的狀況,則須使用狀態方程來描述材料體積變化行為,以真實模擬材料之動態反應。

2.2 爆炸安全量距

當爆炸意外發生時，首要關心的不是設備器材的毀壞或金錢財物的損失，而是周邊作業人員的安全，人員無論受到的是輕傷或是重傷，對於單位運作及戰力都有著相當程度的影響。美軍技術手冊 TM5-1300[4]對於人體器官所能承受之最大有效爆壓有明確規定，如表 1 所示，此標準可做為判定炸藥爆炸所需安全量距(Quantity- Distance)之依據。

表 1. 人體器官承受最大有效爆壓[4]

人體器官危害情形		最大有效爆壓 (MPa)
耳膜破裂	最低傷害	0.034
	50% 傷害	0.103
肺臟損傷	最低傷害	0.207 ~ 0.276
	50% 傷害	≥ 0.512
致命死亡	最低傷害	0.689 ~ 0.827
	50% 傷害	0.896 ~ 1.241
	接近100% 傷害	1.379 ~ 1.724

2.2.1 未設置擋牆之安全量距

對於地表爆炸所造成的爆震波效應，可利用美軍技術手冊 TM5-1300 提供的圖表查得，如圖 1 所示，再藉由人體器官所能承受的最大有效爆壓(表 1)，求得不同危害情形下所需之安全量距，其中圖 1 之縱座標為爆震波參數值，如爆壓、衝量、歷時等，橫座標表示縮尺距離 Z (ft/lb^{1/3})，其為炸藥淨重量 W (lb)與炸藥至地面標的間距離 R (ft)的函數，關係式為 $Z = R/W^{1/3}$ 。

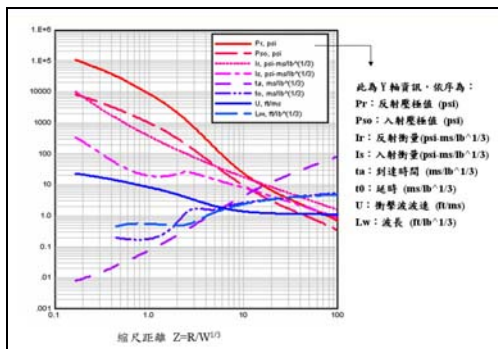


圖 1. 地表面爆炸之相關爆炸參數[4]。

2.2.2 設置有擋牆之安全量距

2008 年 Zhou 與 Hao[5]利用數值模擬方式，進行擋牆對爆炸效應之數值預測，分析結果顯示擋牆對於降低爆炸效應具有正面的影響。以爆壓強度為例，擋牆牆後爆壓值 ($P_{with_barrier}$) 為 TM5-1300 所求得無擋牆地表面爆壓值 ($P_{no_barrier}$) 乘上修正係數 ($A_{P_{max}}$)，其中 $A_{P_{max}}$ 如式(1)所示，式中 H_1 為擋牆高度 (m); D 為炸藥至牆後結構物之距離(m); L_1 為炸藥至擋牆之距離 (m); Z 為縮尺距離 (m/kg^{1/3})。

$$A_{P_{max}} = -0.1359 + (0.3272 + 0.1995 \log(H_1/D)) \log Z - 0.5626 \log(H_1/D) + 0.4666 L_1/D \quad (1)$$

另美軍技術手冊 TM5-855-1[6]中提供了牆後爆壓預測之經驗公式，適用縮尺距離在 0.159m/kg^{1/3} 至 0.396m/kg^{1/3} 之間、縮尺牆高在 0.067m/kg^{1/3} 至 0.872m/kg^{1/3} 之間的爆炸狀況，在擋牆附近的爆壓強度會急劇下降，然而，隨著炸藥與擋牆間之距離的增加，所得到的爆壓值將逐漸趨近於無擋牆之自由場爆炸狀況。

三、數值模型驗證

為驗證本文數值模型在爆炸分析上的可靠性，本節將針對 2 組文獻[7,8]之實驗結果，分別進行牆上爆壓與牆後爆壓之數值模擬驗證，以做為後續研究之基礎。

(1)Tancreto 實驗[7]: 2007 年 Tancreto 等人使用 2268000g(5000lb)TNT 炸藥正對前方距離 7315cm(240ft)處之擋牆進行爆炸實驗，混凝土抗壓強度為 34.5MPa(5000psi)，爆炸場地周圍溫度為攝氏 15°C，實驗配置設有 7 處量測點，其中 1 處記錄牆上爆壓(反射壓)，6 處記錄地表面之自由場爆壓(其中距離炸藥 14173.2cm 處同時設有 2 個量測點)，如圖 2(a)所示。文獻中除爆炸實驗所獲得之實測數值外，同時也使用第 5 版 BEC 軟體(未公開，目前美軍僅公開第 4 版的 BEC 軟體)預測牆上爆壓，如表 2 所示。

本數值模型由 4 種元素所建構而成，分別為炸藥、空氣、地表面、擋牆等，現以 2268000g 之 TNT 炸藥進行地表面爆炸數值模擬(炸藥邊長為 111.64cm)，空氣元素網格邊長為 27.91cm，固體元素網格邊長為 55.82cm，時間步長縮尺係數為 0.5，元素網格高寬比均為 1，擋牆尺寸為寬度 600cm、高度 760cm、

厚度 20cm，與炸藥間的距離為 7315cm，模型尺寸為 9377.76cm* 1339.68cm*1339.68cm，如圖 2(b)所示。數值模擬結果顯示：牆上爆壓(反射壓)之模擬值為 0.0427MPa，文獻之實驗結

果為 0.0441MPa，其爆壓值誤差百分比僅為 3%。顯示本數值模型可有效模擬爆炸所產生的爆壓極值，如表 2 所示。

表 2. 爆壓驗證結果比較

文獻實驗	炸藥量 (g)	炸藥與擋牆距離(cm)	爆壓值(MPa)/誤差率		
			實驗值	BECv5	模擬值
Tancreto 實驗 (牆上之反射爆壓)	2268000	7315	0.0441	0.0294 (-33%)	0.0427 (-3%)
Ishikawa 實驗 (牆後之入射爆壓)	擋牆尺寸	炸藥量	炸藥與擋牆距離	實驗值	模擬值
	A	20000	150	0.100	0.200 (100%)
	A	46000	200	0.140	0.230 (64%)
	B	46000	200	0.310	0.289 (-6%)
	C	20000	150	0.190	0.200 (5%)

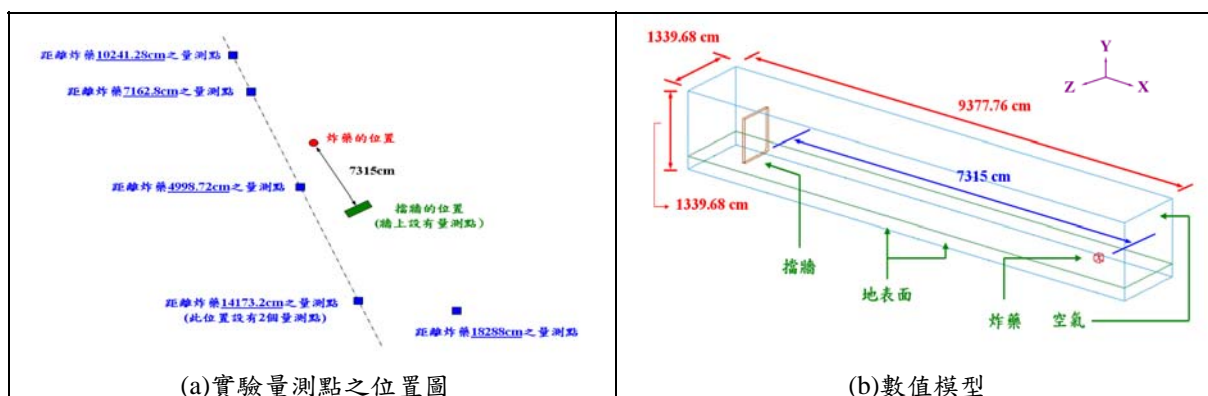


圖 2. Tancreto 實驗配置與數值模型。

(2)Ishikawa 實驗[8]: 2007 年 Ishikawa 與 Beppu 針對擋牆受炸藥爆炸下之防護效果進行探討，分別使用 20000g 及 46000g 的 TNT 炸藥，對於 3 種不同尺寸擋牆進行爆炸實驗，並量測牆後 50cm 處地表面上的爆壓(入射壓)與探討爆壓對牆後兔子存活的影响，牆體左、右兩側各有一個底邊 100cm、高度 150cm、厚度 10cm 之混凝土固定斜撐，其中 B 尺寸擋牆配置圖如圖 3(a)所示。

本數值模型由 5 種元素建構而成，分別為炸藥(流體)、空氣(流體)、地表面(固體)、擋牆(固體)及三角形斜撐(固體)，以 46000g 的 TNT 炸藥正對前方距離 200cm 處之擋牆(B 尺寸)進行爆炸數值模擬為說明，其炸藥邊長為 30.45cm，空氣網格邊長為 7.6125cm，時間步長縮尺係數為 0.5，全模型尺寸為 609cm* 548.1cm*517.65cm，如圖 3(b)所示。

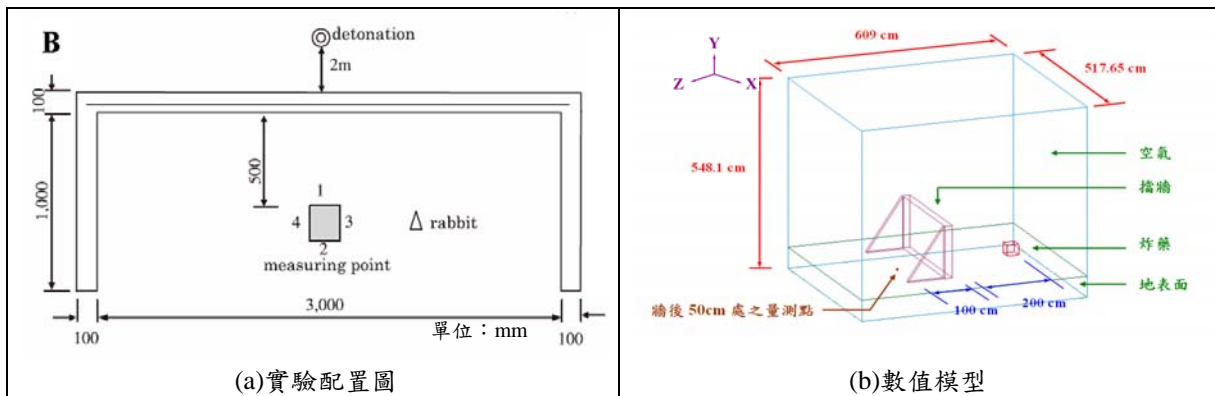


圖 3. Ishikawa 實驗配置與數值模型。

數值模擬結果顯示(如表 2):除 A 尺寸擋牆之牆後爆壓(入射壓)相對實驗值誤差較大外, B 與 C 尺寸擋牆之牆後爆壓(入射壓)均與實驗值相當接近, 其相對誤差百分比分別為 6% 與 5%。進一步分析結果, 以 A、B 尺寸擋牆、炸藥量為 46000g 且炸藥與擋牆距離為 200cm 為例, A、B 尺寸擋牆厚度分別為 20、10cm, 其擋牆厚度(僅相差 10cm)為唯一變數, 其餘實驗配置條件均相同, 實驗結果顯示其牆厚對爆壓的影響從 0.140MPa 變成 0.310MPa, 其爆壓變化率((爆壓_B-爆壓_A)/爆壓_B=55%)遠高於數值模擬結果的 20%。厚度僅 10cm 的差異應不致造成過高的爆壓變化, 因此合理推測 A 尺寸擋牆之牆後爆壓有被低估之嫌, 間接導致模擬結果的誤差較大。

整體而言, 從上述 2 組文獻分別進行牆上爆壓與牆後爆壓之數值模擬驗證, 顯示本數值模型可有效模擬爆炸所產生的爆壓極值。

四、分析與討論

本節將分別針對有無設置擋牆、炸藥與擋牆距離變化、擋牆高度變化、擋牆型式、室內爆炸與地表面爆炸等參數對爆壓衰減與牆後安全量距進行探討, 其中炸藥與擋牆之幾何位置如圖 4 所示, 圖中 W 為 TNT 炸藥淨重量, D 為炸藥與量測點間之距離, R 為炸藥與擋牆間之距離, r 為擋牆與量測點間之距離, H 為擋牆的高度, h 為量測點距地表面高度, w 為擋牆寬度, t 為擋牆厚度, 擋牆幾何形狀為寬度(w)*高度(h)*厚度(t)。令 Z_D 為炸藥至量測點之縮尺距離($D/W^{1/3}$), Z_R 為炸藥至擋牆之縮尺距離($R/W^{1/3}$), Z_r 為擋牆至量測點之

縮尺距離($r/W^{1/3}$), Z_H 為擋牆縮尺高度($H/W^{1/3}$)。

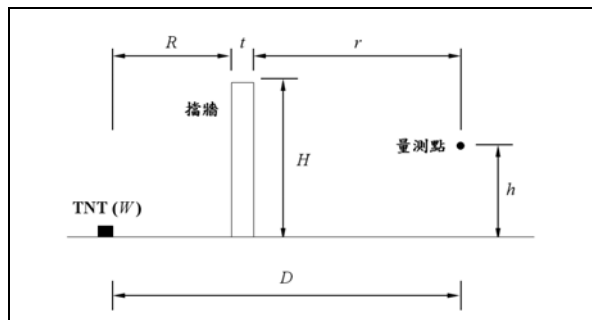


圖 4. 炸藥、擋牆、量測點間之位置關係圖。

4.1 有無設置擋牆之爆壓分析

本小節考量擋牆設置與否對爆壓衰減與安全量距之影響, 其中炸藥為 46000g 之 TNT, 擋牆為抗壓強度 34.5MPa 之混凝土結構, 尺寸為 300cm(寬)*300cm(高)*90cm(厚), 擋牆至炸藥之距離為 300cm ($Z_R=8.38\text{cm/g}^{1/3}$)。

圖 5 為數值模擬之爆壓分布曲線, 圖中可以發現由於擋牆的存在, 使其地表面爆壓分布之趨勢產生變化, 在沒有設置擋牆的情形下(自由場), 其爆壓分布隨著與炸藥間距離的增加, 呈現快速衰減的趨勢, 而當有設置擋牆時, 擋牆會使得牆前與牆後之爆壓產生不同的變化, 擋牆前方短距離範圍內, 由於擋牆的反射而使得爆壓提升, 而擋牆後方則因爆震波的傳遞受阻, 使得牆後爆壓產生大幅衰減現象。

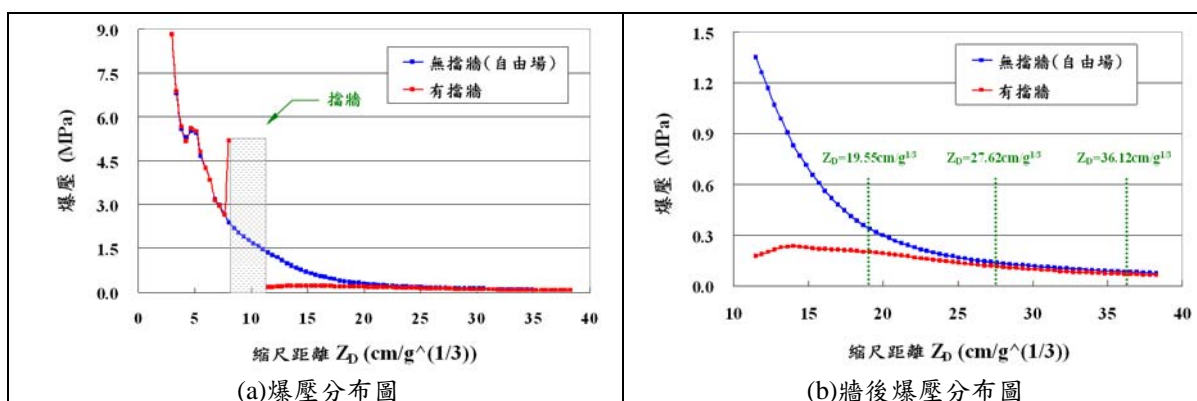


圖 5. 有無設置擋牆情形下之爆壓分布圖。

因為擋牆的存在使得擋牆背側處(縮尺距離 $Z_D=11.47\text{cm/g}^{1/3}$)之爆壓產生大幅衰減的狀況,為了更清楚牆後爆壓衰減情形,針對牆後部分的爆壓分布(即縮尺距離 $Z_D=10\text{cm/g}^{1/3}$ 至 $40\text{cm/g}^{1/3}$)進行探討,如圖 5(b)所示,從圖中 $Z_D=11.47\text{cm/g}^{1/3}$ 處可以明顯看到爆壓從沒有設置擋牆的自由場爆壓 1.349MPa,衰減至設有擋牆的 0.176MPa,擋牆衰減了 86.93%的爆壓,因此,擋牆的存在對於降低爆壓有明顯的效果。另外分別觀察縮尺距離 $Z_D=19.55\text{cm/g}^{1/3}$ 、 $Z_D=27.62\text{cm/g}^{1/3}$ 及 $Z_D=36.12\text{cm/g}^{1/3}$ 等 3 處之爆壓值(即牆後縮尺距離為 1 倍、2 倍、3 倍縮尺牆高處),發現爆壓從自由場的 0.317MPa、0.137MPa、0.083MPa,分別降至設有擋牆的 0.196MPa、0.115MPa 及 0.070MPa,擋牆削減了 38.21%、16.19%及 16.09%的爆壓,由上述結果可以發現,擋牆具有降低爆壓的功能,惟隨著距離的增加,擋牆對於爆壓的降低效果漸小,爆壓將逐漸趨近於自由場的狀況,擋牆的有效防護區域約為牆後 1 至 2 倍縮尺牆高的距離範圍內。

另依據美軍技術手冊 TM5-1300 中對於人體器官所能承受的最大有效爆壓之標準,當炸藥發生爆炸時,在不造成耳膜受傷害的情況下,其爆壓必須低於 0.034MPa,不造成肺臟受傷害之爆壓須低於 0.207MPa,倘若要避免爆炸危及人員性命,則爆壓必須低於 0.689MPa。在圖 5(b)中可以觀察到,在沒有擋牆的情況下,人員若位於距炸藥縮尺距離 $Z_D=14.87\text{cm/g}^{1/3}$ 的範圍內,生命將會受到爆壓

的威脅(爆壓為 0.713MPa 以上),但由於擋牆的設置,使得相同位置處之爆壓降至 0.226MPa,雖然已經不會對人的生命造成威脅,但此時的爆壓卻仍舊會使肺臟受到傷害(高於肺臟所能承受的 0.207MPa),所以只有當 $Z_D=18.27\text{cm/g}^{1/3}$ 時,才能確保肺臟無虞(爆壓已降至 0.206MPa)。為能更確實掌握牆後爆壓分布狀況,本數值模型已涵蓋牆後 3 倍縮尺牆高的水平縮尺距離($Z_D=36.12\text{cm/g}^{1/3}$),惟於此距離內之爆壓,仍無法低於耳膜所能承受爆壓的最低程度(0.034MPa),而且由圖中可以清楚看到,其爆壓分布已趨近於自由場的狀況,表示擋牆對爆壓的衰減已失去功能。

4.2 炸藥與擋牆距離變化之爆壓分析

本小節考量 2 種炸藥與擋牆距離變化對爆壓衰減與安全量距之影響,其中炸藥為 2268000g 之 TNT,擋牆為抗壓強度 34.5MPa 之混凝土結構,尺寸為 300cm(寬)*300cm(高)*120cm(厚),炸藥與擋牆距離分別為 1100cm ($Z_R=8.38\text{cm/g}^{1/3}$)與 2200cm ($Z_R=16.76\text{cm/g}^{1/3}$),擋牆高度為 300cm ($Z_H=2.28\text{cm/g}^{1/3}$)。

圖 6(a)與 (b)分別為炸藥與擋牆距離 $Z_R=8.38\text{cm/g}^{1/3}$ 與 $Z_R=16.76\text{cm/g}^{1/3}$ 下,擋牆背側爆壓之分布圖,其中 $Z_r=0\text{cm/g}^{1/3}$ 處為擋牆背側面,並分別針對牆後水平縮尺距離(Z_r)為 1 倍、2 倍、3 倍縮尺牆高範圍內(即 $Z_r=2.28\text{cm/g}^{1/3}$ 、 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 、 $Z_r=6.84\text{cm/g}^{1/3}$)之爆壓進行探討。

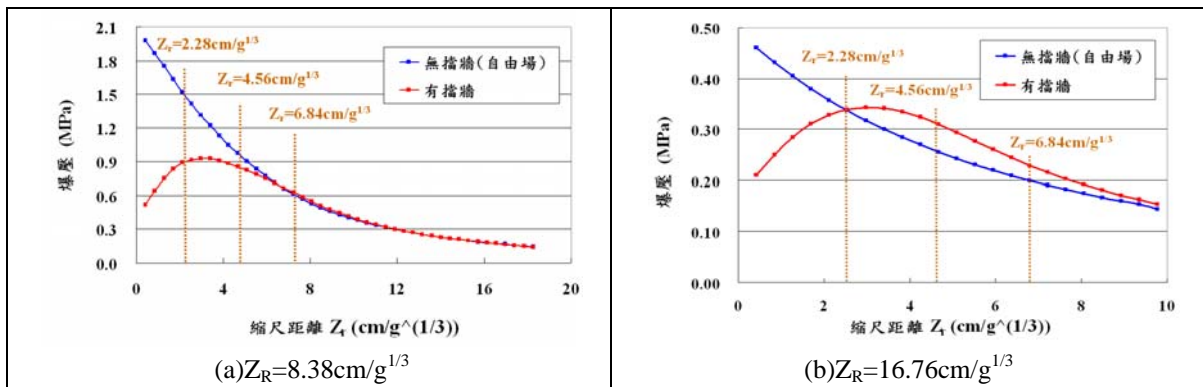


圖 6. 炸藥與擋牆距離變化下之牆後爆壓分布圖。

4.2.1 $Z_R=8.38\text{cm/g}^{1/3}$ 時之牆後爆壓

圖 6(a)中發現牆後 $Z_r=2.28\text{cm/g}^{1/3}$ 處(牆後水平縮尺距離等於 1 倍縮尺牆高)之地表面爆壓,從自由場的 1.521MPa 降至有擋牆作用後的 0.887MPa,衰減了 41%的爆壓;而在 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 處(牆後水平縮尺距離等於 2 倍縮尺牆高)之地表面爆壓,則由 0.972 MPa 降至 0.856MPa,衰減 11%的爆壓,隨著牆後縮尺距離(Z_r)的增加,所衰減之爆壓百分比降低,亦逐漸趨近於自由場爆壓;到了 $Z_r=6.84\text{cm/g}^{1/3}$ 處(牆後水平縮尺距離等於 3 倍縮尺牆高),牆後地表面爆壓(0.669 MPa)已與自由場爆壓(0.662 MPa)幾近相同。圖中顯示擋牆的保護範圍約為牆後 1 至 2 倍縮尺牆高的水平距離內,而若以人體承受爆炸能力來判斷,在該範圍內原本會造成人員喪命(爆壓為 0.972 MPa 至 1.521MPa),經過擋牆的阻擋,已降至不足以致命的程度(0.856MPa 至 0.887MPa),擋牆的存在使得牆後人員生命得以受到保護。

在不造成耳膜受傷害的情況下,其爆壓必須低於 0.034MPa,不造成肺臟受傷害之爆壓須低於 0.207MPa,若要避免爆炸危及人員性命,則爆壓必須低於 0.689MPa。圖 6(a)中可以觀察到人員若位於擋牆正後方($Z_r=0 \text{ cm/g}^{1/3}$ 處),在沒有擋牆的自由場爆炸狀況下,原本將會承受到 1.977 MPa 的爆壓威脅而

致命,但由於擋牆的設置使得爆壓降至 0.518MPa,雖然已經不會對人員生命造成威脅,但此時的爆壓卻仍舊會使得肺臟受到傷害(高於肺臟所能承受的 0.207MPa),因此,必須減少炸藥量或增加炸藥與擋牆之距離,以降低爆炸危害。

4.2.2 $Z_R=16.76\text{cm/g}^{1/3}$ 時之牆後爆壓

當炸藥與擋牆距離為 $Z_R=16.76\text{cm/g}^{1/3}$ 時,其數值模擬結果如圖 6(b)所示,圖中可以發現擋牆作用的有效影響範圍僅在牆後 1 倍縮尺牆高的水平距離內($Z_r=2.28\text{cm/g}^{1/3}$),而在大於該距離後的區域,其牆後爆壓已高過自由場爆壓,換言之,在 $Z_r > 2.28\text{cm/g}^{1/3}$ 的區域,擋牆不僅無法有效提供防護功能,反而可能造成爆壓提高的反效果。

針對 $Z_r > 2.28\text{cm/g}^{1/3}$ 的區域,其爆壓不降反增的形成原因進行探討。首先選定牆後縮尺距離為 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 處進行分析(該位置上牆後爆壓與自由場爆壓的差距最大),當爆震波傳遞至擋牆,除了被擋牆反射之外,其餘爆震波將沿著擋牆牆體邊緣繞射至牆後,為了解牆後爆壓高過自由場爆壓的形成原因,故選取擋牆側邊底部端點與 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 處之空氣元素,根據爆震波傳遞歷程及爆壓分布狀況進行分析,其中空氣元素位置(A、B、C、D、E、F、G、H)如圖 7 所示。

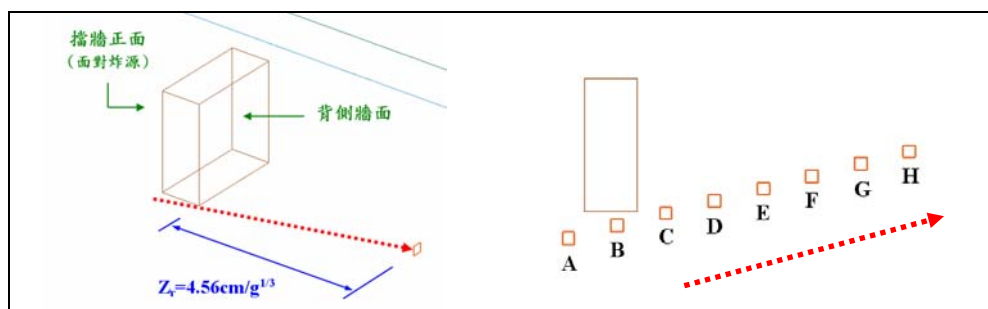


圖 7. 擋牆底部端點與 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 間之元素位置示意圖。

當爆震波傳遞至位置 E 處時開始有第二個波峰(如圖 8(a)所示)出現,此波峰主要是爆震波經由不同路徑繞射所傳遞而來的,而當爆震波傳遞至位置 F 處時,不同路徑繞射的爆震波相互接觸產生疊加效果,造成爆壓逐漸提升(如圖 8(b)所示),最後形成在牆後縮尺距離 $Z_r=4.56\text{cm/g}^{1/3}$ 處之爆壓值高於自由場爆壓(如圖 8(c)所示),在此之後的區域無論有無設置擋牆,爆壓均將隨著縮尺距離的增加而降低,最後將趨近於自由場的爆壓。

前述內容乃經由爆震波傳遞路線之上之爆壓分布狀況,來解釋造成牆後爆壓高於自由場爆壓的結果。現以美軍規範 TM5-855-1[6]所提供之牆後爆壓(如圖 9(a)),以佐證模擬結果合理性(該圖形適用縮尺牆高在 $0.067\text{m/kg}^{1/3}$ 至 $0.872\text{m/kg}^{1/3}$ 之間),為使數值模擬所呈現的結果是基於相同驗證條件下進行探討,已統一定實際擋牆高度為 3m,並將模擬單位由 $\text{cm/g}^{1/3}$ 換算為 $\text{m/kg}^{1/3}$ 。

圖 9(a)中可以看到無頂篷(No Canopy)擋牆,其縮尺牆高為 $Z_H=0.436\text{m/kg}^{1/3}$ 時之牆後爆壓值高於 $Z_H=0.872\text{m/kg}^{1/3}$ 之牆後爆壓值,換言之,縮尺牆高較小者之擋牆,其所獲得的

牆後爆壓值較大,其中垂直虛線為擋牆背側牆面位置。現在將擋牆高度均固定為 3m,以不同炸藥量(46kg、326kg、2268kg)來調整縮尺牆高的變化,即分別為 $Z_H=0.838\text{m/kg}^{1/3}$ (炸藥量為 46kg)、 $Z_H=0.436\text{m/kg}^{1/3}$ (炸藥量為 326kg)與 $Z_H=0.228\text{m/kg}^{1/3}$ (炸藥量為 2268kg),以證明牆後爆壓會高於自由場爆壓的數值模擬結果。

$Z_H=0.228\text{m/kg}^{1/3}$ 、 $0.436\text{m/kg}^{1/3}$ 與 $0.838\text{m/kg}^{1/3}$ 等 3 種不同縮尺牆高之數值模擬結果如圖 9(b)所示。當縮尺牆高為 $0.436\text{m/kg}^{1/3}$ 與 $0.838\text{m/kg}^{1/3}$ 時,其牆後爆壓分布與 TM5-855-1 有著相同的趨勢,且均低於自由場狀態下的爆壓分布;當縮尺牆高為 $0.228\text{m/kg}^{1/3}$ 時,牆後爆壓值為 3 種不同縮尺牆高的最大,且在縮尺距離 $Z_D > 0.856\text{m/kg}^{1/3}$ 之後的區域,可以明顯發現其爆壓分布已高於自由場的爆壓。所以藉由「爆震波傳遞之爆壓分布狀況」與「不同縮尺牆高之爆壓分布」兩部分的驗證,可發現擋牆僅能在有限的範圍內提供爆壓衰減的貢獻,在擋牆作用影響範圍之外,牆後爆壓將逐漸趨近自由場的爆壓,或也有可能造成爆壓值不降反增的結果。

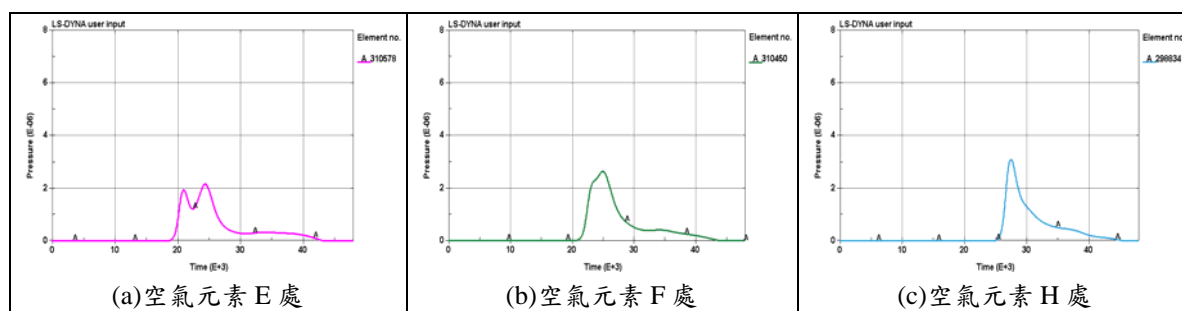


圖 8. 爆壓歷時曲線圖(爆壓單位: 100GPa)。

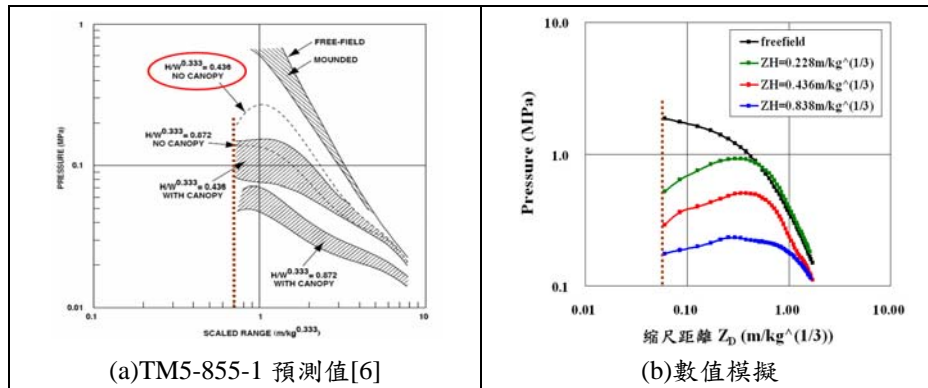


圖 9. 縮尺牆高不同情形下之牆後爆壓分布圖。

4.3 擋牆高度變化之爆壓分析

本小節考量擋牆高度變化對爆壓衰減之影響，其中炸藥為 2268000g 之 TNT，擋牆為抗壓強度 34.5MPa 之混凝土結構，尺寸為 300cm(寬)*120cm(厚)，擋牆高度則分別為 300cm ($Z_H=2.28\text{cm/g}^{1/3}$) 與 600cm ($Z_H=4.56\text{cm/g}^{1/3}$)，炸藥與擋牆距離為 2200cm($Z_R=16.76\text{cm/g}^{1/3}$)。

牆後爆壓之數值模擬結果如圖 10 所示，可以發現雖然擋牆高度不同，但是對於牆後縮尺距離 $Z_r < 1.70\text{cm/g}^{1/3}$ 範圍內，擋牆仍具有降低爆壓的效果；而對於牆後縮尺距離 $Z_r > 1.70\text{cm/g}^{1/3}$ ，縮尺高度較小 ($Z_H=2.28\text{cm/g}^{1/3}$) 的擋牆，其牆後爆壓相對較高，甚至高於自由場的爆壓。

進一步探討牆後爆壓高於自由場爆壓的現象，其主要的原由仍與爆震波的傳遞路徑有關。爆震波傳遞過程受到擋牆的阻擋，部分爆震波在擋牆前方被反射，其餘爆震波則由於繞射作用，分別自擋牆的兩側及頂部沿著牆體繞至牆後，並於牆後產生相互疊加的效應，在特定的擋牆幾何形狀下(擋牆寬度與高度)，其牆後爆壓疊加結果將可能造成高於自由場的爆壓的現象，如圖 6(b)與圖 10 所示。

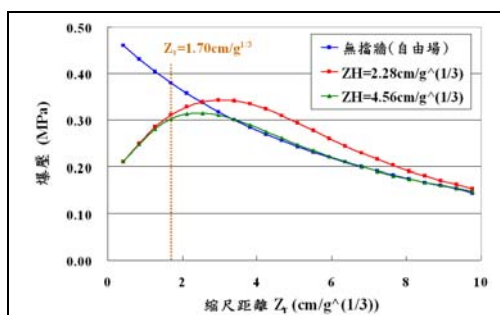


圖 10. 擋牆高度變化之牆後爆壓分布圖。

4.4 擋牆型式之爆壓分析

本小節考量 3 種不同型式的擋牆進行數值模擬，並分別針對擋牆前方與後方 111.64cm 處之量測點(F 點與 B 點)進行爆壓分析與探討。3 種型式的擋牆分別為面對炸藥方向呈凹字型的 A 型式擋牆、凸字型的 B 型式擋牆與一字型的 C 型式擋牆(如表 3 所示)，其中炸藥為 2268000g 之 TNT，擋牆為抗壓強度 34.5MPa 之混凝土結構，炸藥與擋牆距離為 1100cm。

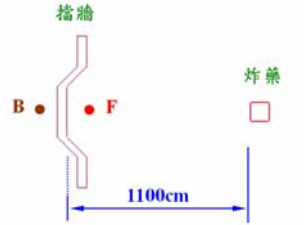
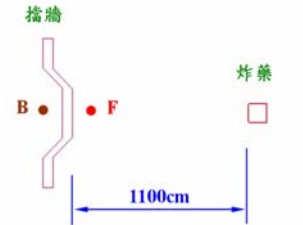
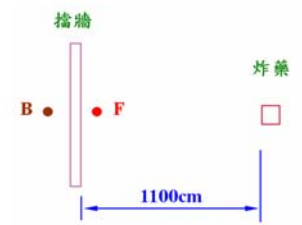
數值模擬結果如圖 11 所示，其中圖 11(a)為 3 種型式擋牆前方量測點(F 點)之爆壓歷程圖，圖中顯示一字型的 C 型式擋牆前量測點之爆壓為 3.465MPa，而 A 型式擋牆則由於其構型係面對炸藥呈凹字型，當爆震波傳遞至擋牆時，將於牆體內縮之凹槽區域形成爆壓反射疊加效應，造成相對較大的爆壓(6.547MPa)，另面對炸藥呈凸字型的 B 型式擋牆，因牆體之幾何構型造成爆震波被導引至擋牆兩側疏散，使得量測點的爆壓相對較小(2.903MPa)。

圖 11(b)為擋牆後方量測點(B 點)之爆壓歷程圖，結果顯示呈凹字型的 A 型式擋牆，由於牆前所形成威力較大的爆震波之繞射作用，致使牆後爆壓亦相對較高(0.366MPa)；B 型式擋牆正好與其相反，在牆前爆炸威力較小的爆震波繞射作用，以及牆體構型所形成之爆壓疏散結果，其牆後爆壓則相對較小(0.156MPa)；另一字型的 C 型式擋牆，因其不具有爆壓疊加(A 型式擋牆)或爆壓疏散(B 型式擋牆)的特性，其牆後爆壓介於 A、B 型式擋牆之間(0.276MPa)。

綜上所述，若要同時讓牆前爆壓反射

疊加之效應受到抑制,以及牆後爆壓得以有效衰減,B 型式擋牆之構型所產生的效果最佳(爆壓疏散),其中 A、B、C 等 3 種不同型式擋牆之防護效益如表 3 所示。

表 3. 不同型式擋牆之防護效益綜整表

擋牆型式		A(凹字型)	B(凸字型)	C(一字型)
				
牆前爆壓 (F 點)	爆壓值 (MPa)	6.547	2.903	3.465
	降低爆壓反射疊加效益	差	佳	中
牆後爆壓 (B 點)	爆壓值 (MPa)	0.366	0.156	0.276
	衰減爆壓效益	差	佳	中

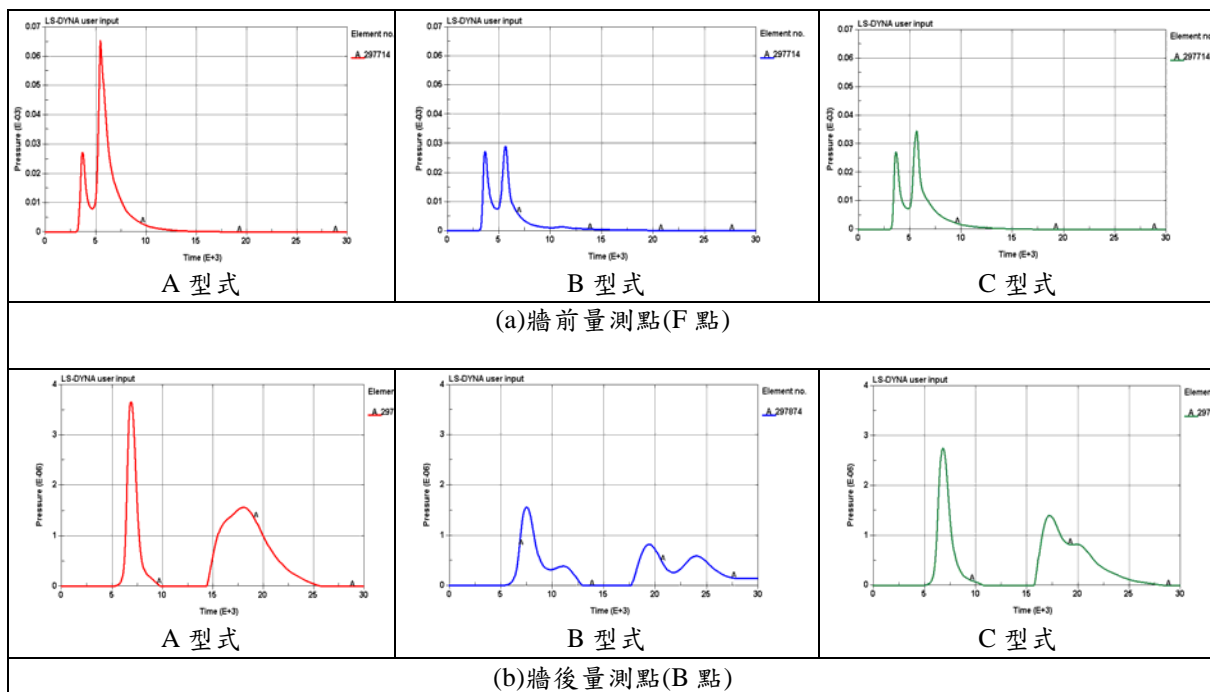


圖 11. 不同型式擋牆之爆壓歷時圖(爆壓單位: 100GPa)。

4.5 室內爆炸與地表面爆炸之爆壓分析

本小節考量室內爆炸對爆壓所造成的圍束效應,並與地表面爆炸之爆壓分布進行探討,其中炸藥為 2268000g 之 TNT,庫房與擋牆均為抗壓強度 34.5MPa 之混凝土結

構,庫房內部尺寸為 2088.36cm(長)*1380cm(寬)*771.64cm(高),庫房開口為 270cm(寬)*270cm(高),前方 1100cm 處設有一座 300cm(寬)*300cm(高)*120cm(厚)的擋牆,炸藥置於庫房正中央地面上,炸藥與擋牆距離為 2200cm,如圖 12 所示。

室內爆炸與地表面爆炸之爆壓分布如圖 13 所示，由於室內爆炸受到室內空間的約束，爆震波產生多重反射與疊加的效果，造成在庫房開口處($Z_D=7.644\text{cm/g}^{1/3}$)的爆壓值高達 6.009MPa，相較於地表面爆炸(非室內爆炸)之爆壓(2.734MPa)，增加了 120% 的爆壓；當爆震波通過庫房開口到達室外後，將因爆炸能量得以宣洩，其爆壓分布即隨著距離的增加，呈現逐漸衰減的趨勢，同時，由於擋牆的作用，牆後爆壓得以快速衰減。室內爆炸造成庫房開口處向外宣洩的爆壓較大(相對於地表面爆炸)，繞射至牆後也形

成較大的牆後爆壓分布(圖 13(b))。

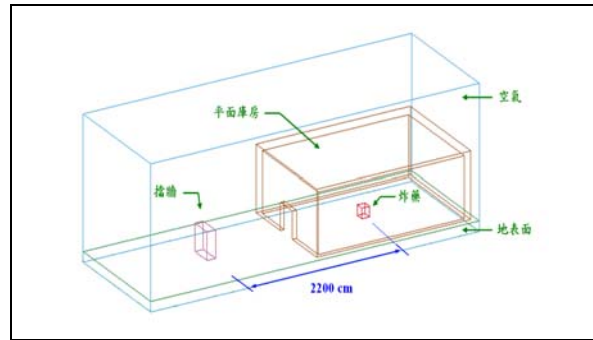


圖 12. 室內爆炸之數值模擬圖。

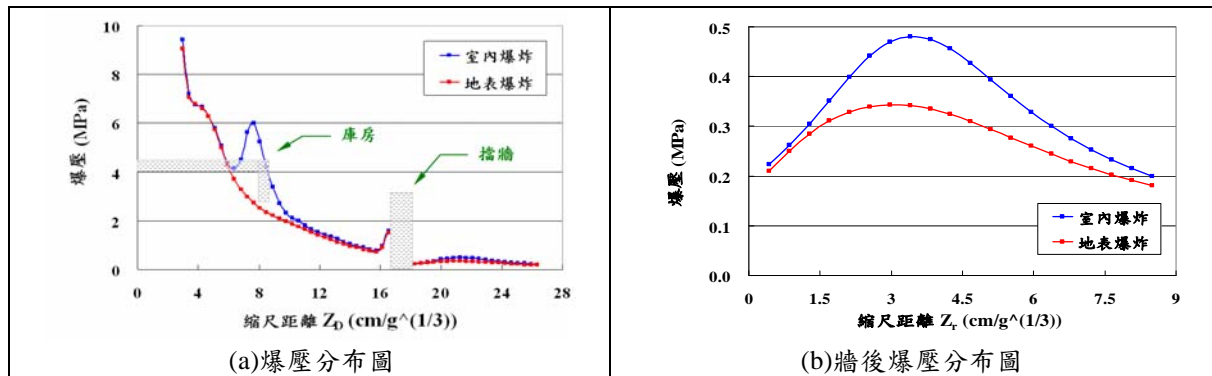


圖 13. 室內爆炸與地表面爆炸之爆壓分布圖。

五、結論

本文採數值模擬方式，分別針對有無設置擋牆、炸藥與擋牆距離變化、擋牆高度變化、擋牆型式、室內爆炸與地表面爆炸等參數對爆壓衰減與牆後安全量距進行探討，研究結果綜整如下：

- (1) 經由實驗驗證，顯示本研究所提出之數值分析模式能有效預測爆炸所產生的爆壓值。
- (2) 擋牆在有限的範圍內對於爆壓的衰減有明顯的效果，一般而言，其有效防護區域約為牆後 1 倍縮尺牆高的距離範圍內；然由於擋牆幾何尺寸與爆震波傳遞路徑，牆後防護區域外之爆壓可能高於自由場爆壓，造成擋牆防護的反效果。
- (3) 同時讓牆前爆壓反射疊加之效應受到抑制，以及牆後爆壓得以有效衰減，凸字型擋牆(B 型式)之構型所產生的效果最佳。
- (4) 室內爆炸受到空間的約束，爆震波產生多重反射與疊加效果，造成庫房開口處之爆壓遽昇(相較於地表面爆炸之爆壓增加了

120%)，該範圍內極具危險性。

參考文獻

- [1] 黃昱冀、蕭旭仁、李旺樹，彈藥安全手冊，國防部聯合後勤司令部，台北，第 7-15 頁，2007。
- [2] LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [3] 白金澤，LS-DYNA3D 理論基礎與實例分析，科學出版社，北京，2005。
- [4] Departments of the Army, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," Technical Manual TM5-1300, USA, 1990.
- [5] 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.
- [6] Department of The Army, "Design and Analysis of Hardened Structures to

- Convention Weapon Effects,” Technical Manual TM5-855-1, USA, 2002.
- [7] Tancreto, J.E., Conway, R., and Malvar, L.J., “Response of Tilt-Up Reinforced Concrete and Unreinforced Masonry to Blast Loads,” International Symposium on International of the Effects of Munitions with Structures, 2007.
- [8] Ishikawa, N. and Beppu, M., “Lessons from past explosive tests on protective structures in Japan,” International Journal of Impact Engineering, Vol.34, pp.1535-1545, 2007.