

探討各類型爆壓下防爆門之設計

作者/王成堃中校

提要

- 一、國軍重要掩體防護設施大部份均有設置防爆門，且一般設置於掩體出入口位置，戰時面對敵人攻擊時必須發揮其使用性，否則由於防爆門之損壞而造成人員及武器無法出入掩體，將影響作戰任務之遂行。
- 二、面對敵人武器攻擊時，防爆門必須能承受炸彈爆炸所產生之爆壓力，以能再度發揮其使用性，目前國軍對於防爆門之設計均參照美軍規範TM 5-1300 及TM5-855-1 為主。
- 三、本文將以深入淺出方式說明各種爆壓型式及其對防爆門之影響，其次介紹防爆門種類及各部位功能，最後針對防爆門設計考量及流程做一介紹，以做為國軍防爆門設計之參考。

關鍵詞：爆壓型式、防爆門、防爆門設計。

前言

防護系統能在戰時保護人員之安全及發揮武器裝備之功能，國軍重要掩體防護設施大部分有設置防爆門，防爆門一般均設置在掩體出入口，面對敵人武器攻擊時，防爆門必須能承受炸彈爆炸所產生之爆壓力，以能再度發揮其使用性，目前國軍對防爆門之設計均參照美軍規範TM5-1300 及TM5-855-1 為主^[1]，惟其內容是以爆壓防護為主，然防爆門設計涉及範圍甚廣，包括敵人之威脅分析、武器效應、爆炸型態、爆壓計算、防爆門選用及各部位設計等，本文係針對防爆門板在爆壓下之設計流程做一介紹，以做為國軍防爆門設計之參考^[2]。

註¹：陸軍司令部，「軍事工程教範」，陸軍司令部，桃園，2004 年，頁 28-30。

註²：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998.P.2-3

各類型爆壓及對防爆門之影響

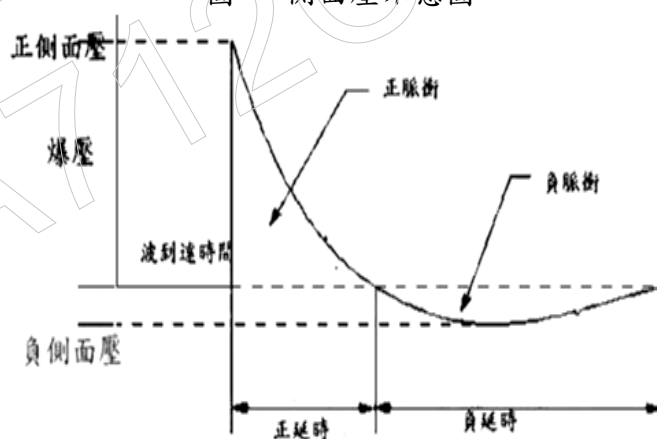
一、武器效應^[3]

敵人之威脅評估為防爆門必備之需求，本研究以傳統武器為主，傳統武器之型態約可分為槍彈、砲彈、炸彈、火箭與飛彈等五種型式，若不考慮直接命中，炸彈產生之爆壓對防爆門有較大之影響，高爆型炸彈之型式約可分成通用彈、破片彈、穿甲彈、半穿甲彈及油爆彈等幾種，其中通用彈(GP 彈)爆炸威力較大，所以採用通用彈來設計。

二、爆壓現象

爆藥爆炸為一急速之化學燃燒作用，產生之爆壓效應包含超壓及動態壓。超壓為一高壓波前，由炸點中心經由介質向周圍擴散，最大壓力發生在波前，此值稱為尖峰入射壓力。因以爆波前進方向之平行面上測得，故稱為側面壓(圖一)。圖中負壓之產生為離爆炸中心一定距離時，會發生超壓後方壓力小於大氣壓力情形(圖二)，此為負相或吸著現象。在負相產生之處，空氣粒子往低壓處(爆炸中心)方向移動，與往外推進之正相(壓力大於大氣壓力)部份，形成兩種相反之壓力波進行方向，一般防護設計均不考慮負壓之影響，但若為柔性結構(如鋼結構)，因有回彈效應，故可能需考慮負壓之作用；動態壓為因空氣分子移動速度較爆波慢，而伴隨在波前緣後方產生強風，亦會對結構物發生作用。當波前撞擊至防爆門後，整個防爆門均會籠罩在爆波中，而作用在防爆門正面上之爆壓與分佈，則依爆藥材料與重量，炸點與結構物間之距離與角度，波前與地面或防爆門之交互作用而產生不同之效應。^[4]

圖一 側面壓示意圖

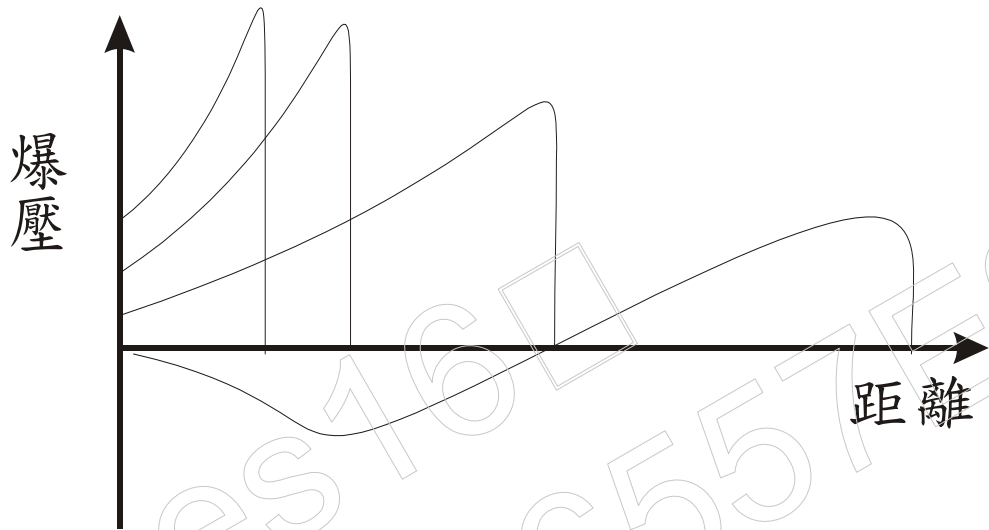


資料來源：TM5-855-1(1998)

註³：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 3-4

註⁴：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 5

圖二 負壓發生示意圖



資料來源：TM5-855-1(1998)

三、各類型爆炸對防爆門之影響^[5]

依炸點與結構物間之幾何關係，大致可分為無圍束爆炸及圍束爆炸。

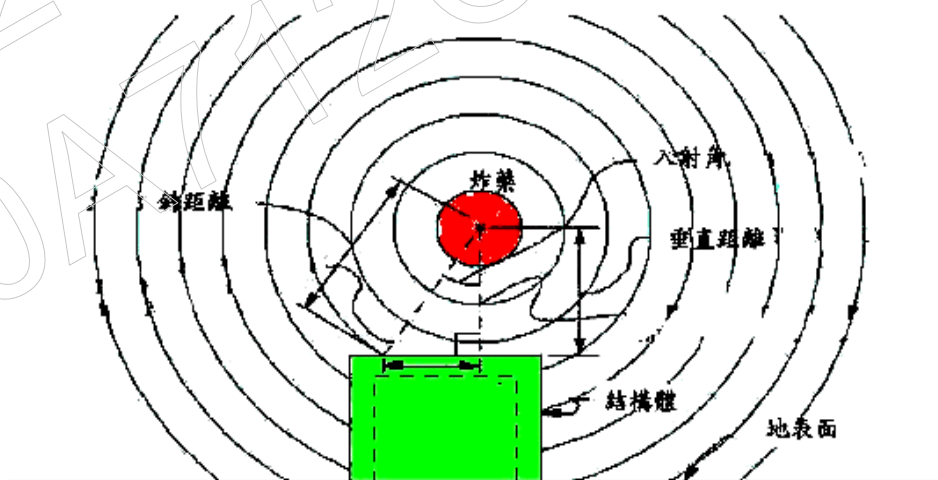
(一)無圍束爆炸

爆壓在完全無限制之情形下對防爆門有直接破壞作用，可分為自由空炸、空炸與地面爆炸等。

1. 自由空炸

當爆壓位置在自由空氣中時，其衝擊波不受地面反射波之干擾，炸源呈輻射狀球形擴散至接觸結構物表面（圖三）。

圖三 自由空炸示意圖



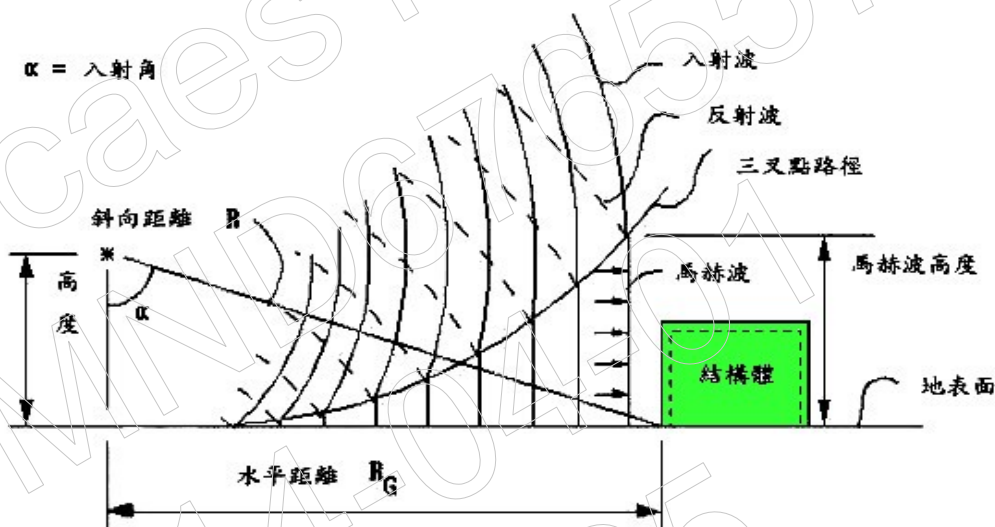
資料來源：TM5-855-1(1998)

註⁵：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 6-7

2. 空炸

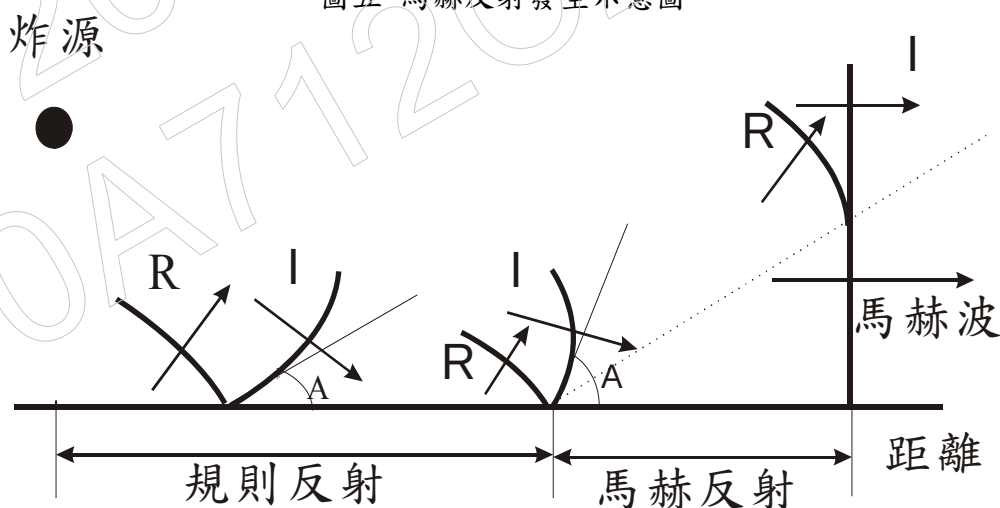
當爆炸位置靠近地表面時，將會產生反射壓力波（圖四），反射壓力波依入射角度可分為正反射及斜反射，正反射為爆波垂直撞至一剛性面，波後之氣流受阻反射，將產生大於側面壓之正反射壓力波，斜反射為爆波斜角撞至一剛性面，波後之氣流受阻反射，亦產生大於側面壓之斜反射壓力波，但會小於正反射壓力波，斜反射依臨界入射角可區分為規則反射及馬赫反射兩階段（圖五），馬赫波為衝擊波與來自地面之反射波互相干擾而形成，此波在三叉點下方為一平面波，其爆壓均勻分佈，其爆壓極值比自由空炸為大^[6]。

圖四 空炸示意圖



資料來源：TM5-855-1(1998)

圖五 馬赫反射發生示意圖



資料來源：TM5-855-1(1998)

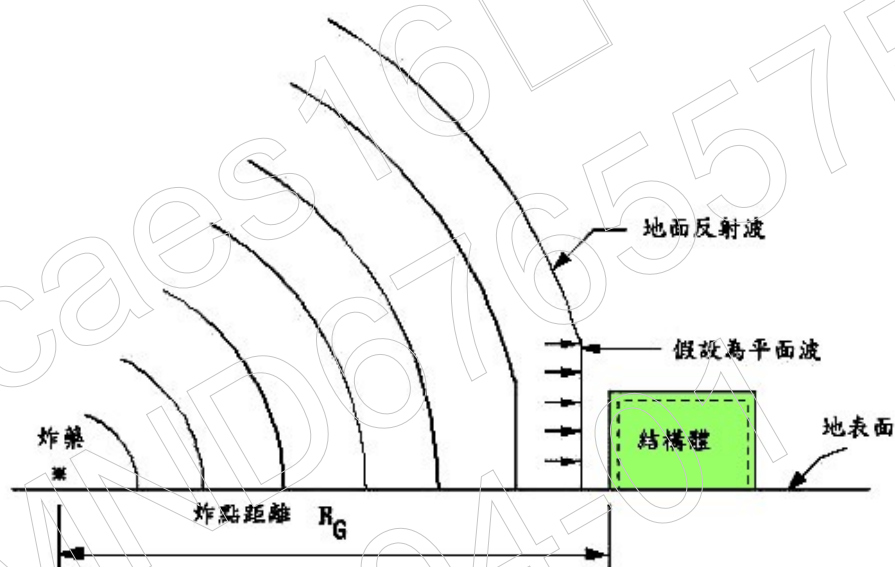
附註說明：I 為入射波，R 為反射波，A 為入射角

註⁶：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 6-9

3. 地面爆炸

當炸彈在地表面爆炸時，其衝擊波與地表反射波結合向外傳遞（圖六），假設炸藥為半球形，衝擊波以半球形向外傳遞，在靠近地面處假設為平面波，爆壓均勻分佈，此種爆壓比起自由空炸或空炸為大。

圖六 地面爆炸示意圖

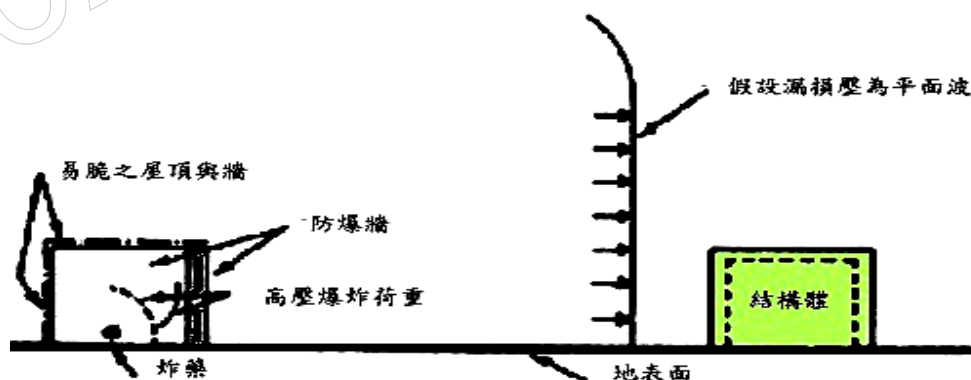


資料來源: TM5-855-1(1998)

(二) 部份圍束爆炸

爆壓在完全限制或部份限制之情形下，讓爆壓受圍束而直接減少對掩體之破壞，如防爆牆之設立，可將部份爆壓抵制，而剩餘爆壓溢出至防爆牆內側（如圖七），防爆牆之設計方式不在本文中探討。另外，彈藥庫內部意外爆炸亦為圍束爆炸之一種，其爆壓之計算不在此說明。

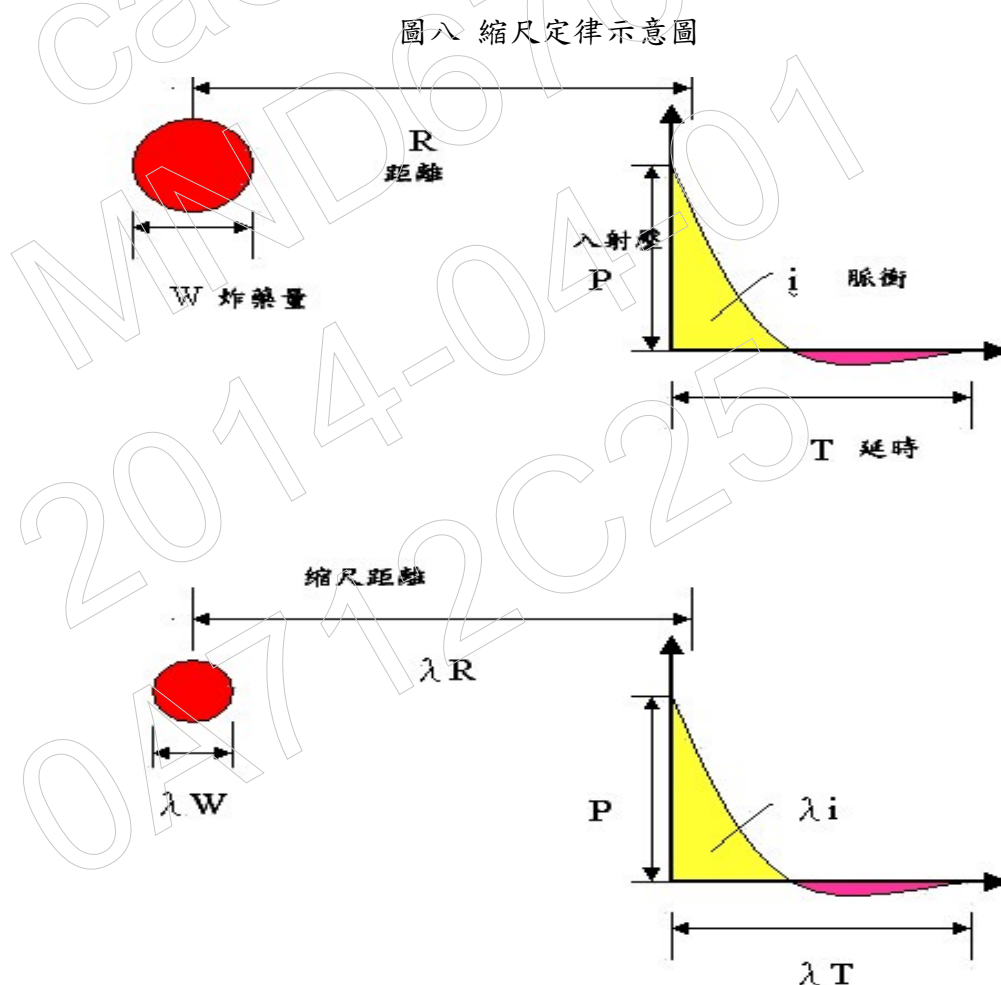
圖七 圍束爆炸示意圖



資料來源: TM5-855-1(1998)

四、爆壓計算^[7]

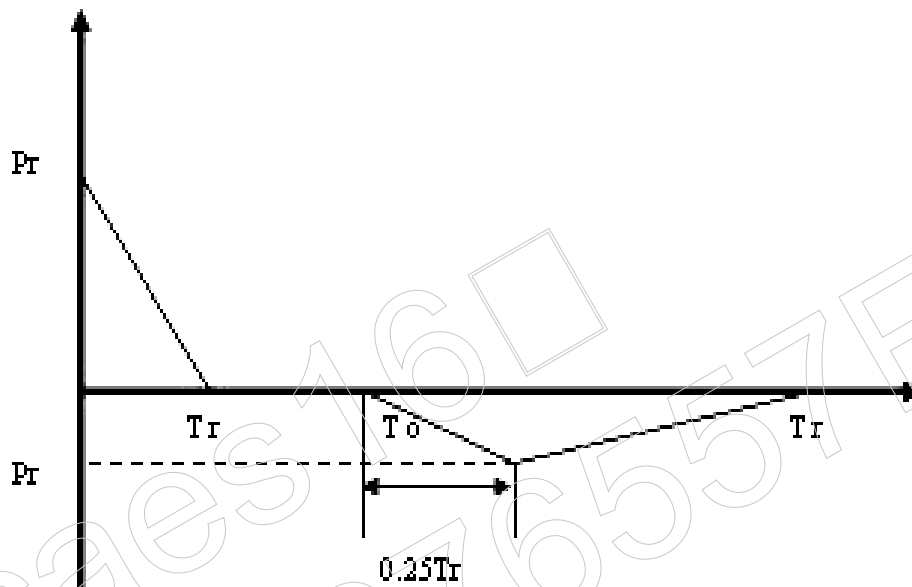
當爆震波撞擊至防爆門後，整個防爆門均會籠罩在爆波中，而作用在防爆門之爆壓與分佈，則依爆藥材料與重量，炸點與結構物間之距離與角度，會產生不同之效應，為使爆壓參數具有通用性，以海平面大氣壓為標準大氣壓，並以TNT為標準炸藥，將爆波性質縮尺化，利用Hopkinson-Cranz所提出立方根縮尺定律，縮尺定律（圖八）為一觀測者位於炸央 λR 之距離， λW 之炸藥量，延時為 λT ，衝量為 λi ，在縮尺定律中，壓力、溫度、密度和速度在相等時間是不變的，故 $R/W^{0.333}$ 為距離縮尺量， $T/W^{0.333}$ 為時間縮尺量， $i/W^{0.333}$ 為衝量縮尺量，因反射壓為結構物表面之爆壓，故均以反射壓來計算結構體所需承受爆壓，而實際爆壓並非線性，為求計算方便，以等值衝量之線性爆壓來計算（圖九）。



資料來源：TM5-855-1(1998)

註⁷：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 20-26

圖九 爆壓計算示意圖



資料來源：TM5-855-1(1998)

附註說明： P_r 為反射壓， T_r 為反射壓作用時間， T_o 為實際時間延時

防爆門之簡介

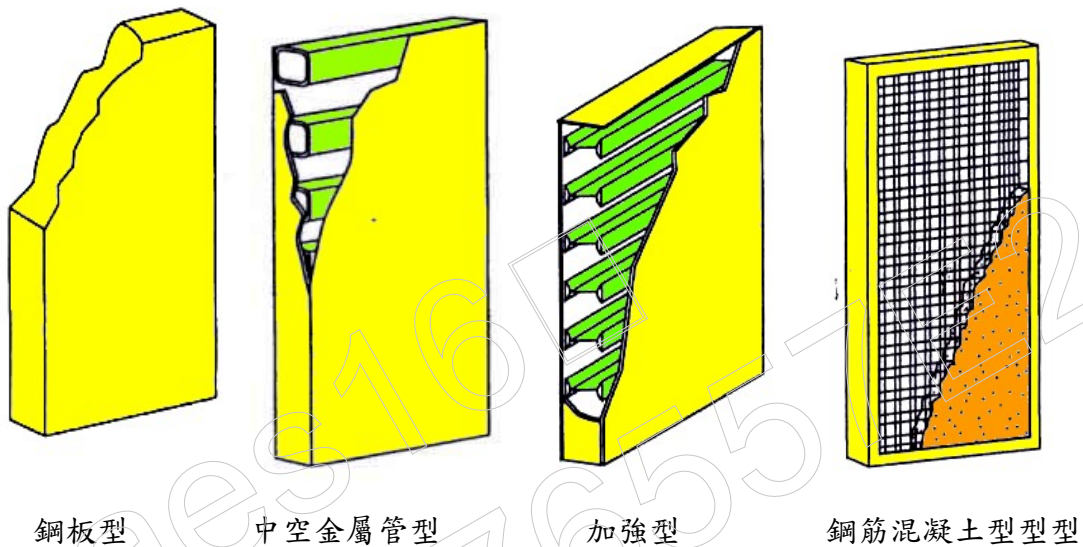
一、防爆門之種類^[8]

(一)依材料種類區分

目前防爆門大致可分為鋼材、鋼筋混凝土及鋼板與混凝土結合之防爆門等，鋼材包含鋼板型、中空金屬管型及加強型等（如圖十）鋼板型防爆門因現有規格而造成厚度上之限制，將無法承受過大爆壓而變形，另厚度較大之鋼板會較笨重且昂貴，所以中空金屬管型及加強型門可取代厚度較大之鋼板，其共同特點為較輕及便宜，加強型門則較中空金屬管門承受較大爆壓；鋼筋混凝土型門較鋼板門為笨重，但其成本較低，無論鋼製防爆門與鋼筋混凝土防爆門，兩種門對於震波及輻射均有良好之防護作用，但鋼製防爆門無法對熱阻有良好防護，而鋼筋混凝土防爆門屬剛性結構，當承受爆壓時極易龜裂破壞，故鋼板與混凝土結合之防爆門為依據上述兩種門之特點而產生，此種門須在工廠將鋼框製造完成後運至現場安裝，最後灌注混凝土。

註⁸：國科會，「地下指揮所出入口抗炸技術」，行政院國家科學委員會，台北，2010 年 9 月，頁 76。

圖十 各種防爆門類型



資料來源：國科會，「地下指揮所出入口抗炸技術」，行政院國家科學委員會，台北，2010 年。

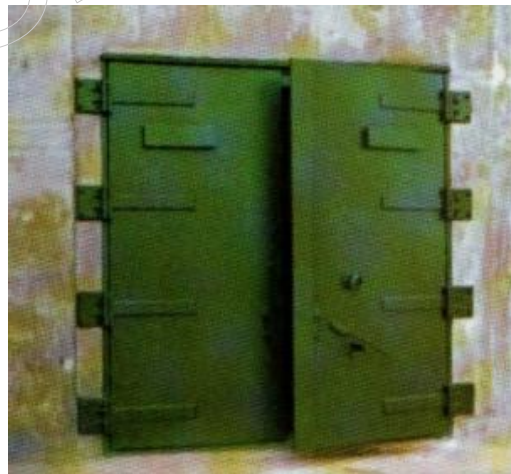
(二)依開啟方式區分

開口型式大致可分為單開門、雙開門及斜拉門(圖十一)等，單開門及雙開門為最常使用之型式，一般用於掩體內部及外部人員出入口或彈藥儲存等，尺寸規格較斜拉門為小，可用人力或機械推開；斜拉門一般可用於飛機掩體或大型武器屯儲等，必須用機械拉開，斜拉門因束制條件比單開門或雙開門為低，承受爆壓能力亦較小，所以除非有大型特殊需求，應儘量避免使用斜拉門。

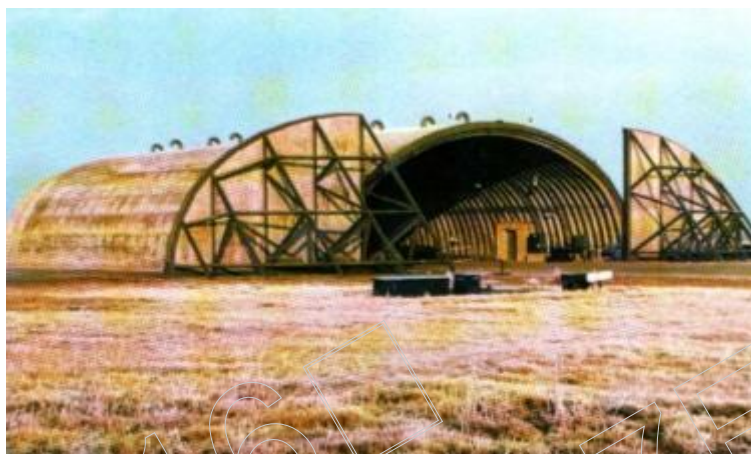
圖十一 防爆門開啟類型



單開門型



雙開門型



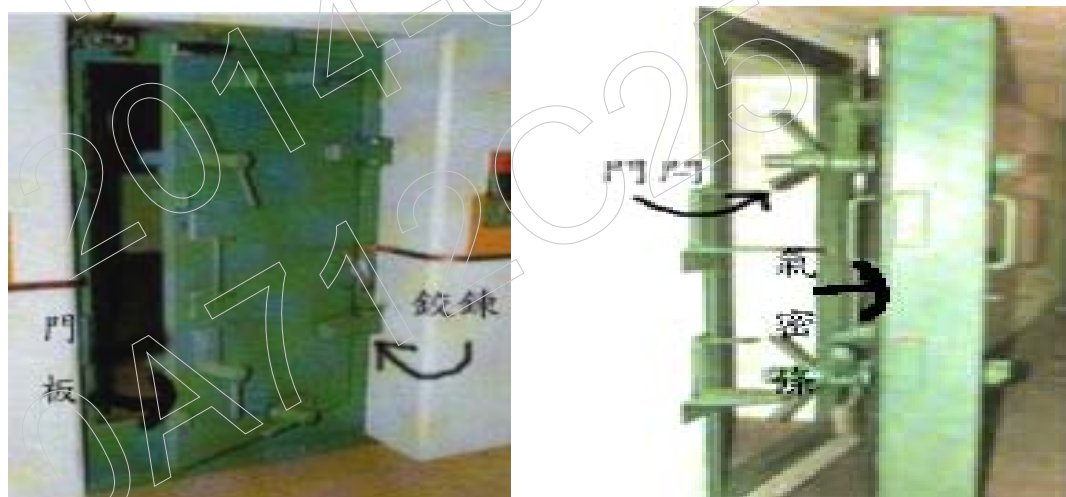
斜拉門型

資料來源：國科會，「地下指揮所出入口抗炸技術」，行政院國家科學委員會，台北，2010 年。

二、防爆門各部位介紹

防爆門由門板、鉸鏈、門閂及氣密條等組合（圖十二），其中門板功能為承受爆壓；鉸鏈為門板之轉動軸承，功能為將門板轉動；門閂為門板之鎖扣，功能為使門板與門框不分離；氣密條為安裝在門與門框間之橡膠體，功能為保持門與門框密封，以防止爆炸後產生之熱氣體侵入掩體內部。

圖十二 防爆門各部位位置圖



資料來源：國科會，「地下指揮所出入口抗炸技術」，行政院國家科學委員會，台北，2010 年。

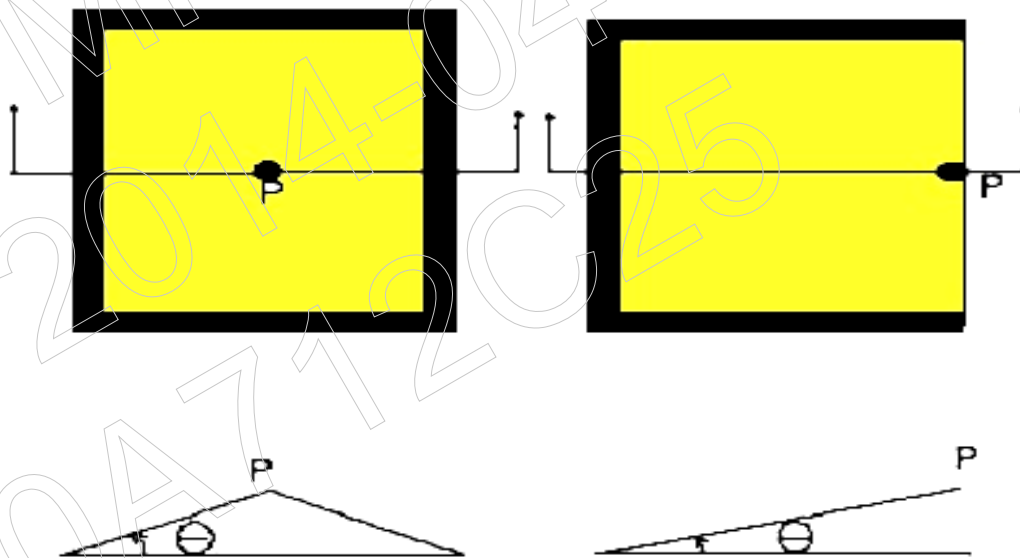
防爆門之設計考量

由美軍規範得知，一般防爆門設計需考慮撓度限制、回彈效應、破片防護及漏損防護等^[9]。

一、撓度限制

防爆門以板行為來分析，受爆壓後會產生變形，故規範將撓度列為防爆門防護等級之判定，板變形可以支承旋轉角（圖十三）來定義；其防護等級分為四個階段（圖十四），第一階段，門在彈性範圍，無永久變形，門可使用。第二階段，其支承旋轉角在 2 度以內，門不在彈性範圍，小永久變形，門仍可使用。第三階段，其支承旋轉角在 2 度至 4 度之間，門產生永久變形，門可能不能使用。第四階段，其支承旋轉角在 4 度至 12 度之間，門產生大永久變形，門不能使用；由上可知，支承旋轉角愈大則門板撓度亦愈大。規範建議板之支承旋轉角最好小於 2 度，因它可確實避免爆壓及火球進入結構體，使人員及裝備得到良好防護，另為避免門體日後維修之困難，所以最好能在彈性階段內變形，但成本較高^[10]。

圖十三 門板支承旋轉角示意圖



四邊均束制情形，其支承旋轉角由板中點計算(如單開門形式)

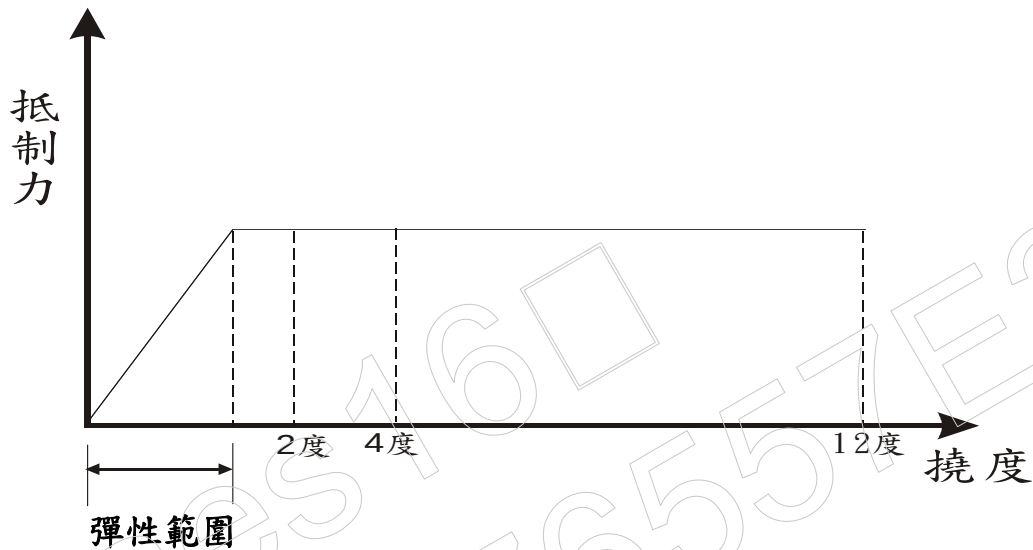
三邊束制，一邊為自由端情形，其支承旋轉角由自由端中點計算(如雙開門型式)

資料來源：TM5-855-1(1998)

註⁹：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 30-37

註¹⁰：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 31

圖十四 防爆門防護等級示意圖

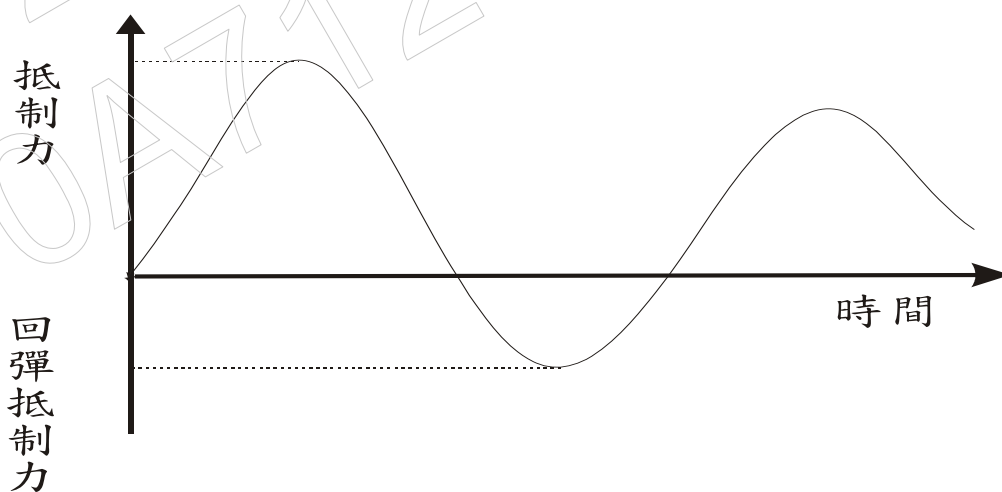


資料來源: TM5-855-1(1998)

二、回彈效應

門在受爆壓作用下（圖十五），門板將會產生正向及負向抵制力，其中負向抵制力又可稱回彈抵制力，目前設計方法將防爆門以板之型式來分析；門在回彈過程中，柔性結構（如鋼結構）因所受彈力較大，故較易反應，但為剛性結構（如 RC 結構），由於勁度大，變形小，回彈時不大會變化，則可不計此效應，所以鋼製防爆門因有回彈效應，須藉由鉸鍊及門門來承受回彈時之荷重，所以鉸鍊及門門之配置非常重要^[11]。

圖十五 回彈效應示意圖



資料來源: TM5-855-1(1998)

註¹¹: TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 32

三、破片防護

破片可分為主要破片及次要破片，主要破片由炸彈本身所產生，特徵為體積小且非常高速；次要破片由爆壓產生情況下，導致附近碎塊伴隨移動，此種碎片體積較大且速度較慢。若破片以高速方式撞擊防爆門時，極可能貫穿防爆門，故厚度及材料之選擇應須考量防貫穿，其設計方式不在此說明。

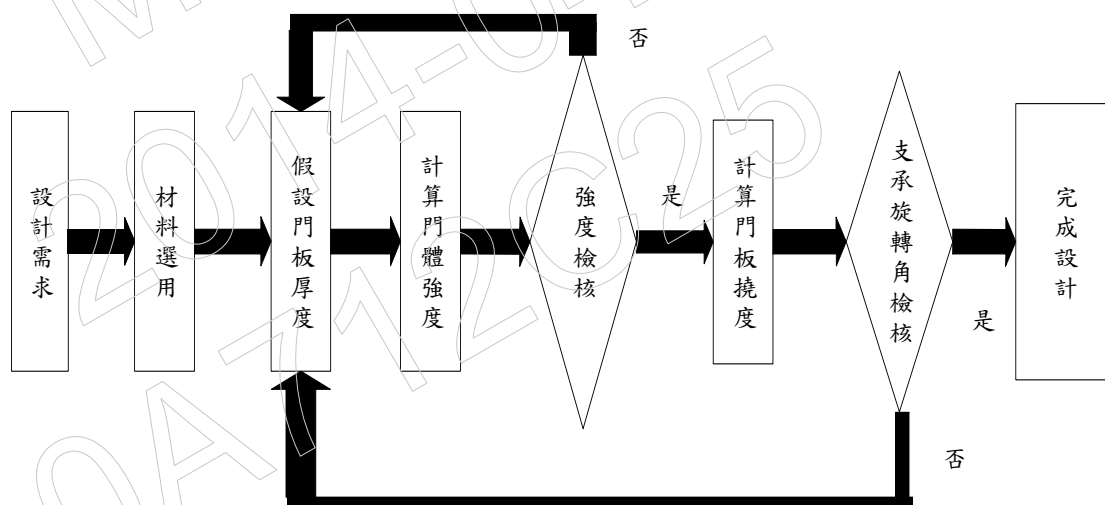
四、漏損防護

為防止爆壓及火球效應進入結構體造成內部人員及裝備之傷害，故須在門與牆之交接處使用氣密條密封，其材質通常為橡膠類，具有抗張性、耐寒及電絕緣性等特性。

防爆門之設計流程

防爆門包含門板、鉸鍊、門閂及氣密條等組合，本文設計流程係針對門板來設計，在設計考量方面，僅考量門板撓度限制及回彈效應，其設計流程如圖十六。

圖十六 防爆門之設計流程



資料來源:作者整理

一、設計需求

本文以爆壓防護為主，在武器效應方面以通用彈來設計，爆壓現象以地面爆炸來計算，防護等級為支承旋轉角 2 度以內。

二、材料選用

防爆門之材質有鋼材、鋼筋混凝土及鋼板與混凝土結合之防爆門等，當選用防爆門材質後，須得到材料參數(彈性模數、單位重、降伏強度、極限強度等)，

其材料參數計算流程如下。

(一)計算動態設計應力 (f_{ds})

$$f_{ds} = f_{dy} \quad (\text{假設支承旋轉角 } \theta \leq 4)$$

$$f_{ds} = f_{dy} + \frac{(f_{du} - f_{dy})}{4} \quad (\text{假設支承旋轉角 } \theta > 4)$$

動態降伏應力 $f_{dy} = c \times a \times f_y$ ，動態極限應力 $f_{du} = c \times f_u$ ， f_y 為降伏應力， f_u 為極限應力，動態增加因子 (c) 由應變率增加所致，可區分降伏應力及極限應力 (表一) [12]，而平均強度增加因數 (a) 為 1.1。

表一 鋼材降伏應力及極限應力動態增加因子

鋼材 種類	降伏應力動態增加因子 (C)				極限應力動態增加因子 (C)
	彎曲情形		拉力或壓力情形		
	低壓	高壓	低壓	高壓	
A36	1.29	1.36	1.19	1.24	1.10
A588	1.19	1.24	1.12	1.15	1.05
A514	1.09	1.12	1.05	1.07	1.00

資料來源：TM5-855-1(1998)

(二)計算動態設計剪應力 (f_{dv})

$$f_{dv} = 0.55 f_{ds}$$

三、假設門板厚度

先假設門板厚度，經過計算後若無法達到標準，則再增加門板厚度。

四、計算門體強度與檢核

(一)計算板之單位寬度彎距容量

$$\text{彈性斷面模數 } s = \frac{bd^2}{6}$$

$$\text{塑性斷面模數 } z = \frac{bd^2}{4}$$

其中 b 為板單位寬度，d 為門板厚度

註¹²：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 38

$$\text{塑性彎矩 } M_p = \frac{f_{ds}(z+s)}{2}$$

其中 z 為塑性斷面模數， s 為彈性斷面模數

(二) 計算單位寬度動態極限剪力容量 (V_p)

$$V_p = f_{dv} \times A_w \quad (\text{其中 } A_w \text{ 為單位面積})$$

(三) 估計支承剪力並檢核版剪力容量

先假設動態荷重因子 DLF (表二) ^[13]

$$\text{剪力 } V = \frac{DLF \times P \times H}{2}, \quad \text{其中 } P \text{ 為均佈爆壓, } H \text{ 為門板寬度}$$

(為避免雙向板計算複雜性故簡化以單向板設計)

$$\text{若 } \frac{V}{V_p} \leq 0.67, \quad M_p \text{ 需折減, 依 } M = M_p \left(1 - \left(\frac{V}{V_p}\right)^4\right)$$

表二 板初始動態荷重因子

變形程度	最大支承旋轉角 (θ)	動態荷重因子 (DLF)
小變形	2	1.0
中變形	4	0.8
大變形	12	0.6

資料來源: TM5-855-1(1998)

(四) 計算極限單位抵抗力 r_u 及門體四周剪力 ^[14]

此部份須考慮四邊是否有束制(板降伏線位置如圖十七)，規範將版區分為二邊束制二邊自由端、三邊束制一邊自由端及四邊束制(表三)，單開門以四邊束制設計，雙開門以三邊束制一邊自由端設計。茲以單開門設計為例說明如下。由 L/H 查出 x/L 或 y/H (圖十八) 進而得 x 及 y 值。門體強度承受之最大均佈靜態壓力 r_u 為

$$r_u = 5 \left(\frac{M_{hn} + M_{hp}}{x^2} \right) \quad (x \leq L/2), \quad r_u = 5 \left(\frac{M_{vn} + M_{vp}}{y^2} \right) \quad (y \leq H/2)$$

M_{hp} 為水平方向極限單位寬度正彎矩容量

註¹³: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 39

註¹⁴: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 40-41

M_{hn} 為水平方向極限單位寬度負彎矩容量

M_{vp} 為垂直方向極限單位寬度正彎矩容量

M_{vn} 為垂直方向極限單位寬度正彎矩容量

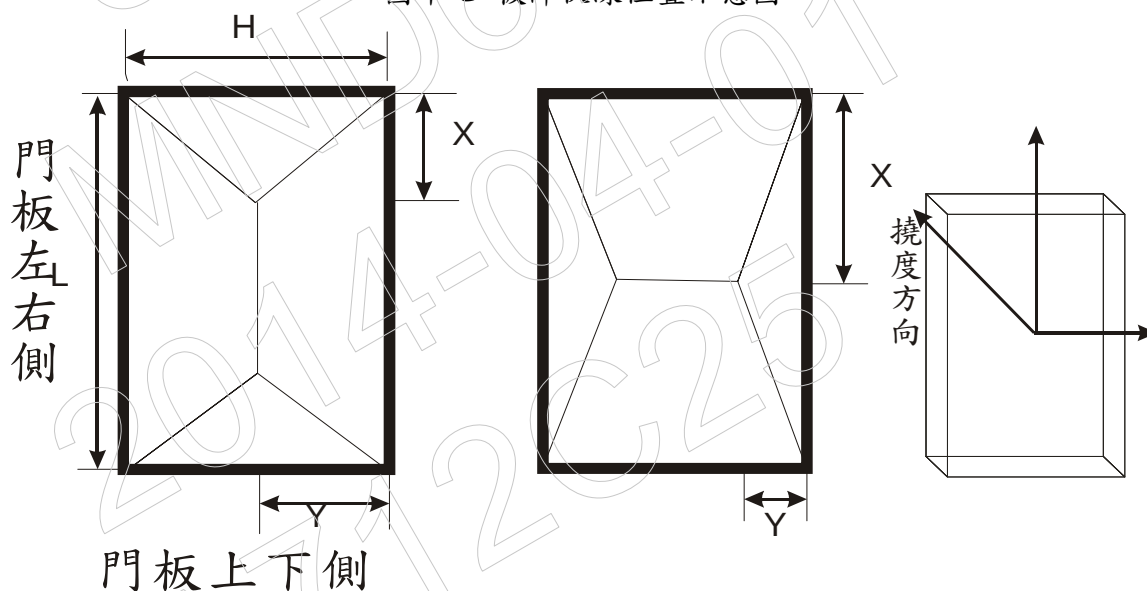
門體上下側單位寬度可承受剪力 (表四) ^[15]

$$V_{sv} = \frac{3r_u H(1-\frac{x}{L})}{2(3-\frac{x}{L})} \quad (\text{當 } x \leq L/2), \quad V_{sv} = \frac{3r_u y}{5} \quad (\text{當 } y \leq H/2)$$

門體左右側單位寬度可承受剪力 (表4)

$$V_{sh} = \frac{3r_u x}{5} \quad (\text{當 } x \leq L/2), \quad V_{sh} = \frac{3r_u L(1-\frac{y}{H})}{2(3-\frac{y}{H})} \quad (\text{當 } y \leq H/2)$$

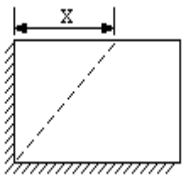
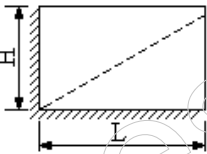
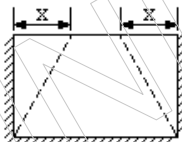
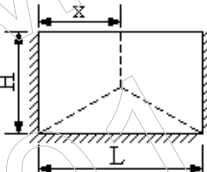
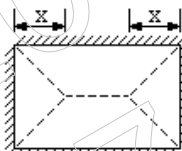
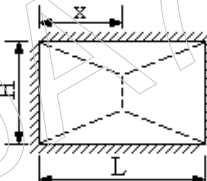
圖十七 板降伏線位置示意圖



資料來源: TM5-855-1(1998)

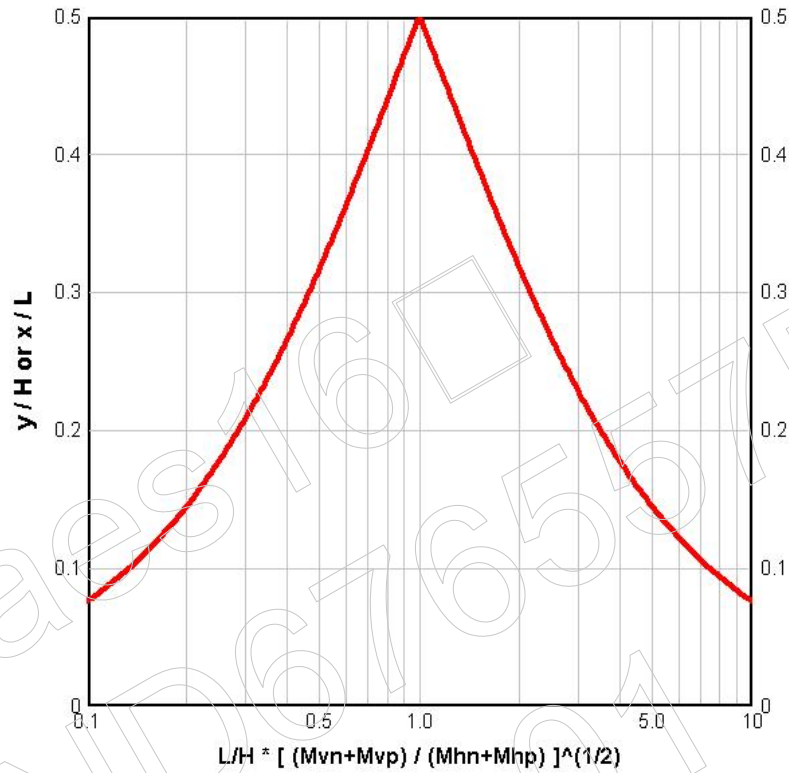
註¹⁵: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 42

表三 雙向板之極限單位抵抗力

邊界條件	降伏線位置	限制條件	極限單位抵抗力
兩邊束制		$x \leq L$	$\frac{5(M_{HN} + M_{HP})}{x^2} \text{ OR } \frac{6LM_{VN} + (5M_{VP} - M_{VN})x}{H^2(3L - 2x)}$
兩邊自由端		$y \leq H$	$\frac{5(M_{VN} + M_{VP})}{y^2} \text{ OR } \frac{6HM_{HN} + (5M_{HP} - M_{HN})y}{L^2(3H - 2y)}$
三邊束制		$x \leq L/2$	$\frac{5(M_{HN} + M_{HP})}{x^2} \text{ OR } \frac{2M_{VN}(3L - x) + 10xM_{VP}}{H^2(3L - 4x)}$
一邊自由端		$y \leq H$	$\frac{5(M_{VN} + M_{VP})}{y^2} \text{ OR } \frac{4(M_{HN} + M_{HP})(6H - y)}{L^2(3H - 2y)}$
四邊束制		$x \leq L/2$	$\frac{5(M_{HN} + M_{HP})}{x^2} \text{ OR } \frac{8(M_{VN} + M_{VP})(3L - x)}{H^2(3L - 4x)}$
		$y \leq H/2$	$\frac{5(M_{VN} + M_{VP})}{y^2} \text{ OR } \frac{8(M_{HN} + M_{HP})(3H - y)}{L^2(3H - 4y)}$

資料來源：TM5-855-1(1998)

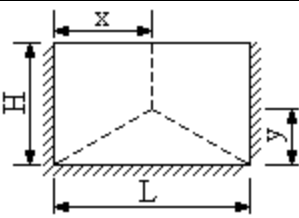
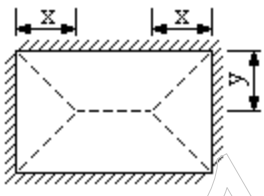
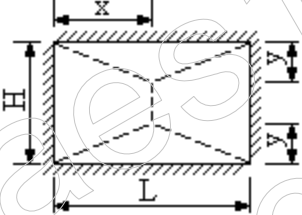
圖十八 雙向板在四周束制時對稱降伏線位置圖



資料來源：TM5-855-1(1998)

表四 雙向板之極限支承剪力

邊界條件	降伏線位置	限制條件	水平剪力 (Vsh)	垂直剪力 (Vsv)
兩邊束制		$x \leq L$	$\frac{3r_u x}{5}$	$\frac{3r_u H \left(2 - \frac{x}{L}\right)}{\left(6 - \frac{x}{L}\right)}$
兩自由端		$y \leq H$	$\frac{3r_u L \left(2 - \frac{y}{H}\right)}{\left(6 - \frac{y}{H}\right)}$	$\frac{3r_u y}{5}$
三邊束制		$x \leq \frac{L}{2}$	$\frac{3r_u x}{5}$	$\frac{3r_u H \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{\left(3 - \frac{x}{L}\right)}$

一 自由端		$y \leq H$	$\frac{3r_u L \left(2 - \frac{y}{H}\right)}{2 \left(6 - \frac{y}{H}\right)}$	$\frac{3r_u y}{5}$
四 束 制		$x \leq \frac{L}{2}$	$\frac{3r_u x}{5}$	$\frac{3r_u H \left(1 - \frac{x}{L}\right)}{2 \left(3 - \frac{x}{L}\right)}$
		$y \leq \frac{H}{2}$	$\frac{3r_u L \left(1 - \frac{y}{H}\right)}{2 \left(3 - \frac{y}{H}\right)}$	$\frac{3r_u y}{5}$

資料來源: TM5-855-1(1998)

五、計算門體撓度

此部份考慮不同束制條件之影響，例如四周固定端及四周簡支端在固定爆炸下會產生不同撓度，其計算過程如下。

1. 計算等值彈性勁度 K_E

$$K_E = \frac{r}{u} = \frac{D}{\gamma H^4}, \quad D = \frac{EI}{(1 - \nu^2)}$$

其中 u 為撓度， E 為材料楊氏係數， I 為單位寬度慣性矩， r 為單位抵制力， ν 為柏松比， γ 為撓度係數，依不同邊界條件而改變，四周為固定端時查圖十九，四周為簡支端時查圖二十^[16]。

2. 計算等值彈性撓度 X_E

$$X_E = \frac{r_u}{K_E}$$

3. 計算桿件有效單位面積質量 m_e

$$m_e = K_{LM} \times m$$

其中 K_{LM} 為荷重質量因子(表五)^[17]

m 為單位面積質量

註¹⁶: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 44

註¹⁷: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 45

4. 計算自然振動週期 T_n

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K_E}}$$

5. 決定門板最大撓度 X_m

由 $\frac{r_u}{P}$, $\frac{T}{T_n}$ 求得 $\frac{X_m}{X_E}$ 比值 (圖二十一)^[18], 適用於爆壓歷時為三角形狀,

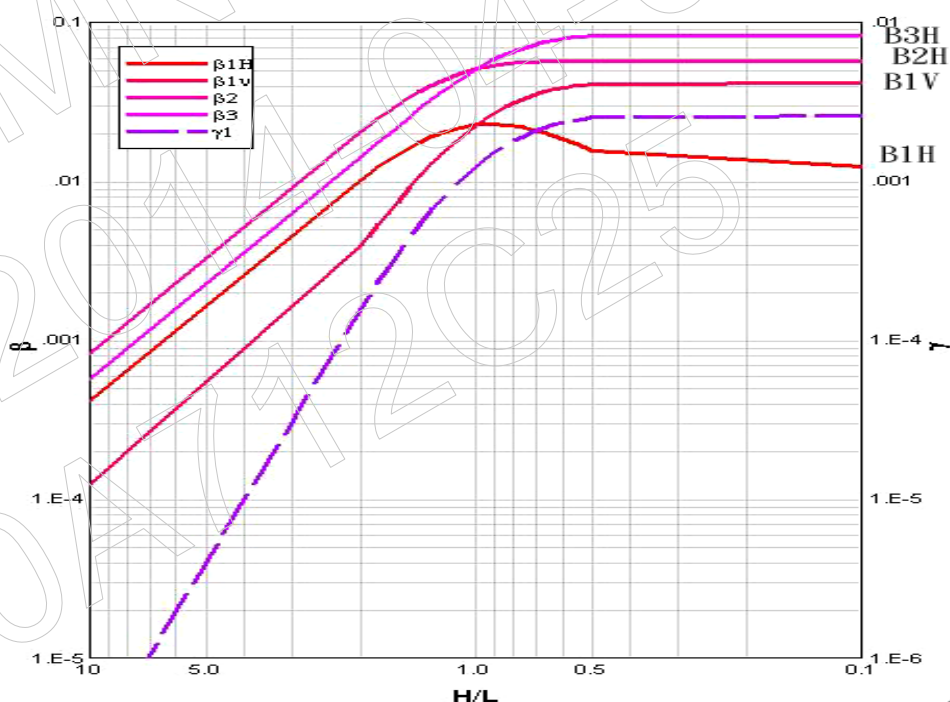
並以單自由度且彈塑性行為分析, 進而求出 X_m 。

但若 $\frac{X_m}{X_E} < 1$ 時, 查圖二十二^[19]得動態荷重因子 (DLF)

(六) 支承旋轉角檢核

$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_m}{H}\right)$, 若所求出之 θ 小於最先所預設之值時則為合格, 否則須重新考慮門板之厚度。

圖十九 雙向板在均佈荷重之彎距及撓度係數(固定端)

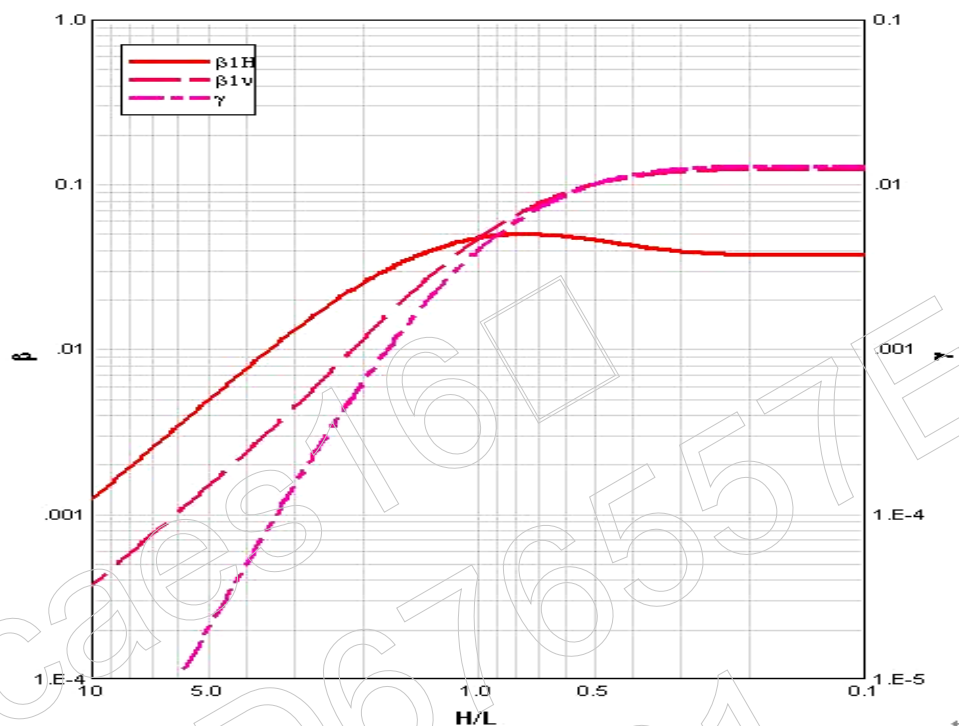


資料來源: TM5-855-1(1998)

註¹⁸: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 46

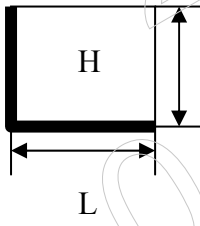
註¹⁹: TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 47-48

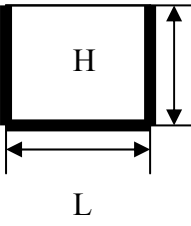
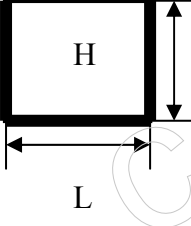
圖二十 雙向板在均佈荷重之彎距及撓度係數(簡支端)



資料來源: TM5-855-1(1998)

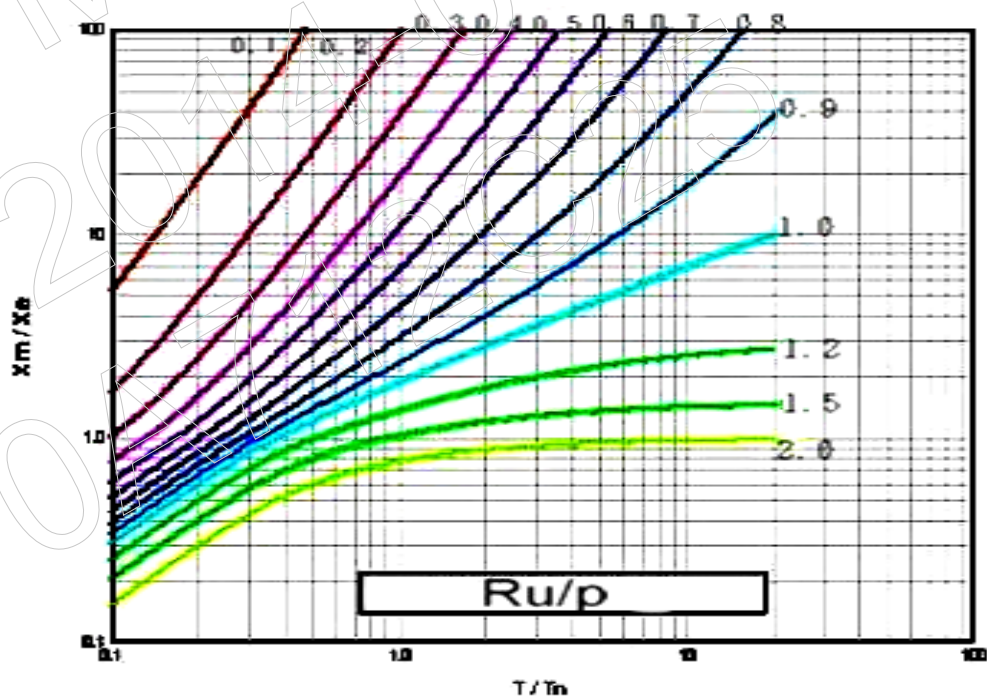
表五 雙向板在彈性與彈塑性範圍之荷重-質量因子

支承條件	L/H	彈性及彈塑性範圍				
		所有支承固定	一個簡支承 其餘固定	二個簡支承 其餘固定	三個簡支承 其餘固定	所有支承 固定
兩邊固定 兩邊自由	ALL	0.65	0.66	—	—	0.66
						
三邊自由 一邊自由	L/H < 0.5	0.77	0.77	0.79	—	0.79

	$.5 \leq L/H$ ≤ 2 $L/H \geq 2$	0.65- 0.16(L/2H-1) 0.65	0.66- 0.144(L/2H-1) 0.66	0.65- 0.186(L/2H-1) 0.65	— —	0.66- 0.175(L/H-1) 0.66
四邊固定	L/H=1	0.61	0.61	0.62	0.63	0.63
	$1 \leq L/H \leq 2$ $L/H \geq 2$	0.61+ 0.16(L/H-1) 0.77	0.61+ 0.16(L/H-1) 0.77	0.61+ 0.16(L/H-1) 0.78	0.61+ 0.16(L/H-1) 0.79	0.61+ 0.16(L/H-1) 0.79

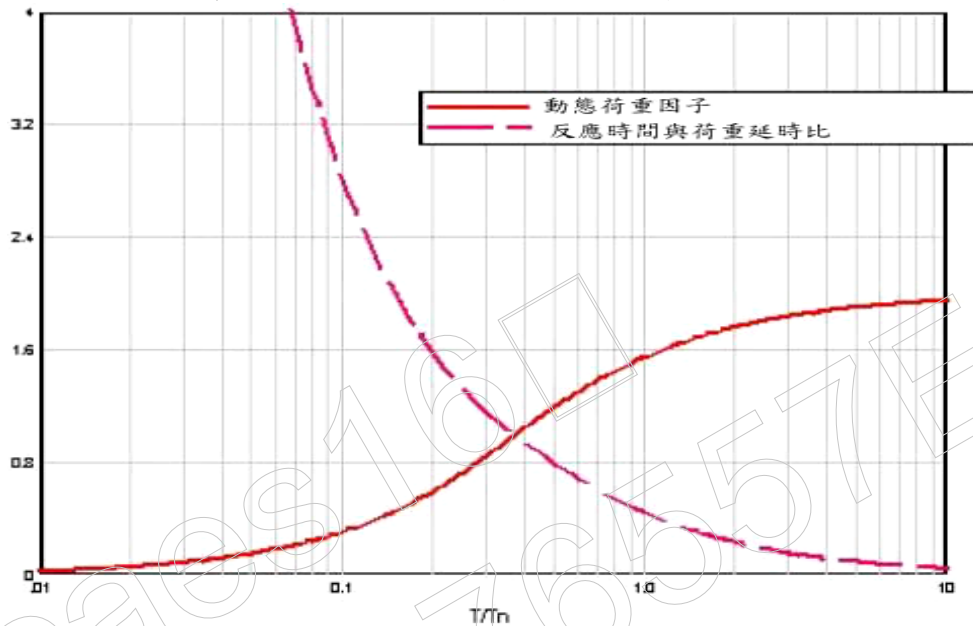
資料來源：TM5-855-1(1998)

圖二十一 單自由度彈塑性系統之最大撓度（爆壓歷時為三角形）



資料來源：TM5-855-1(1998)

圖二十二 單自由度彈性系統之最大反應（爆壓歷時為三角形）



資料來源: TM5-855-1(1998)

防爆門之設計範例

一、已知資料

長 84in，寬 48in，厚 2in 之單開鋼門，門四周貼附氣密條，鋼板降伏強度為 50ksi，柏松比為 0.3，彈性模數為 29600ksi，單位重為 490pcf，假想以 1000 磅（內含 50%TNT）GP 彈在距離 20ft 進行地面爆炸。

二、防護需求

需求防護能力分別為入射壓力大於 10bar (147psi)，反射壓力大於 80bar (1176psi)，支承旋轉角在 2 度以內。

三、設計經過

（一）爆壓計算

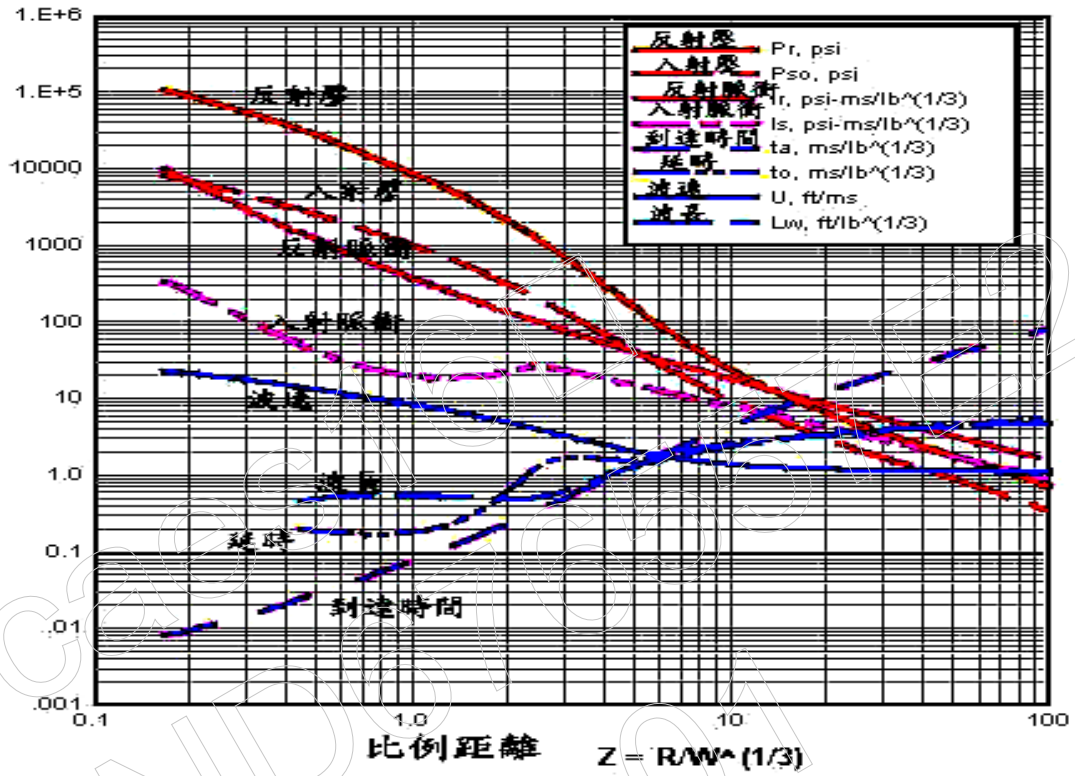
1. 查圖二十三並依比例距離（其中 R 為炸源距離，W 為炸藥重量（需增加 20%安全係數））^[20]，可求得入射壓為 223.1psi，反射壓為 1384.4psi，故均符合需求防護能力。

2. 查圖二十四可求出負向作用下各參數，而由圖二十三及二十四可求出正向及負向作用下之反射壓力 (Pr) 及反射衝量 (ir)，故反射壓作用時間 (tr)，依公式 $tr=2ir/Pr$ ，爆壓歷時如圖二十五^[21]；若不計負壓影響，爆壓時間為 1.31ms，最大反射壓為 1384.3psi。

註²⁰：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 49-51

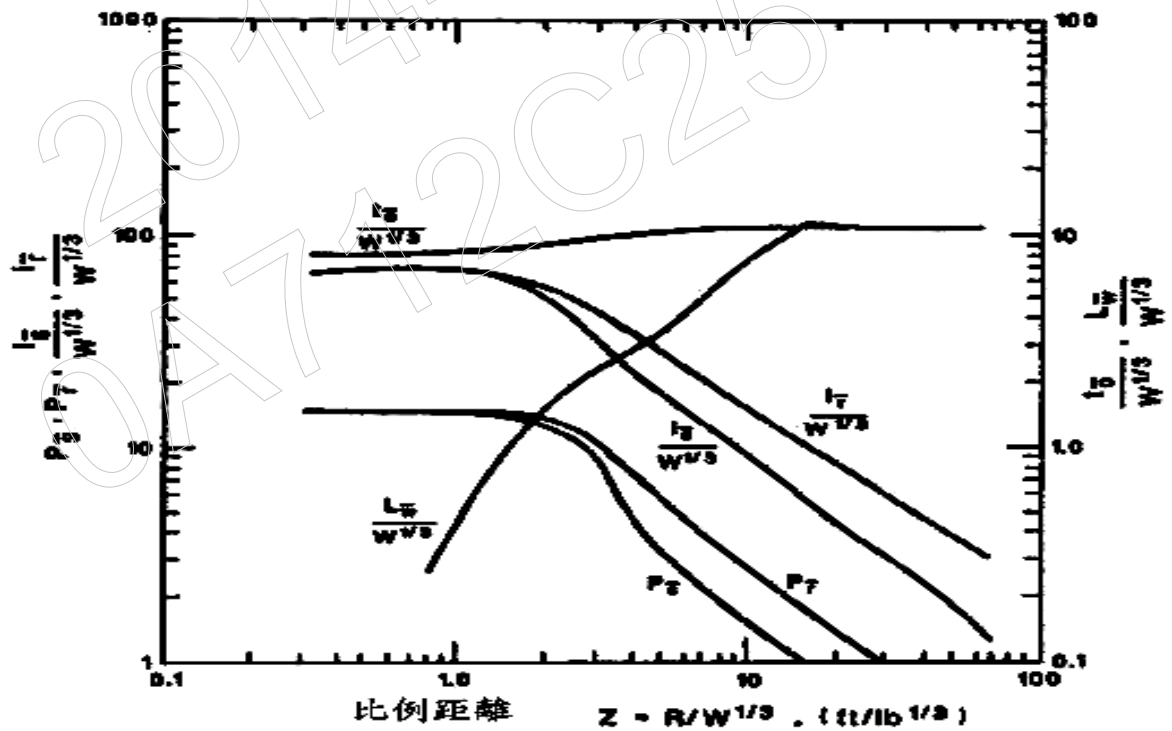
註²¹：TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998. P. 52

圖二十三 地面爆炸下之正向震波參數



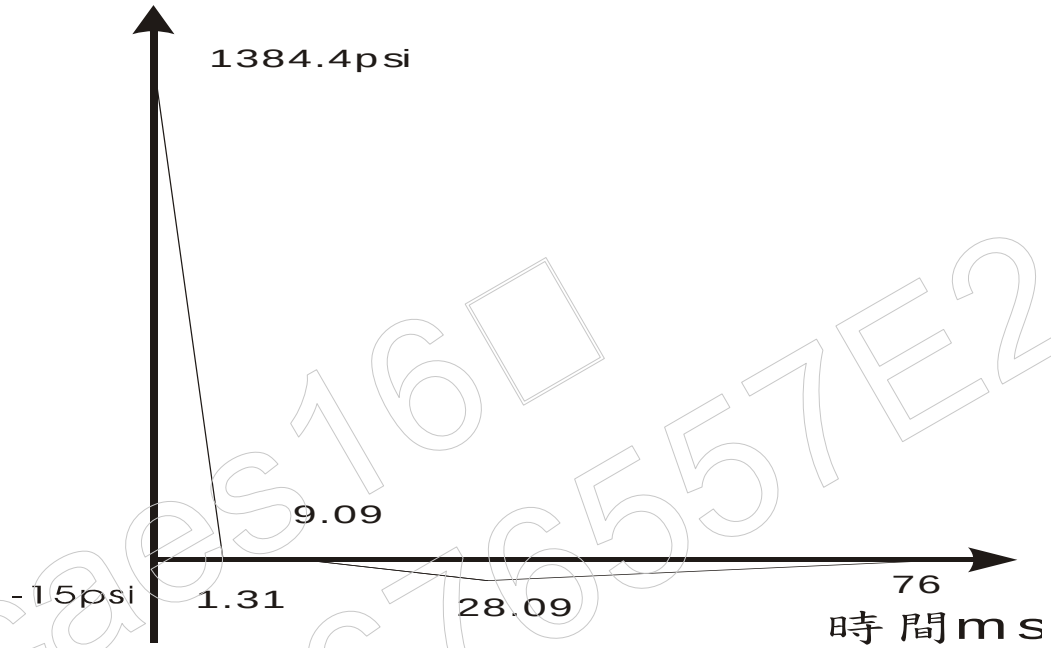
資料來源: TM5-855-1(1998)

圖二十四 地面爆炸下之正向震波參數



資料來源: TM5-855-1(1998)

圖二十五 爆壓歷時圖



資料來源: TM5-855-1(1998)

(二) 防爆門板厚度設計

門四周因有氣密條與門框相貼，所以假設門體四邊為固定端，厚度為 2in。

1. 動態增加因子 $c=1.24$ (表一)

$$\text{動態降伏強度 } f_{dy} = 1.24 \times 1.1 \times 50000 = 68200 \text{ psi}$$

$$\text{動態剪力強度 } f_{dv} = 0.55 \times 68200 = 37510 \text{ psi}$$

$$\text{單位寬度彈性斷面模數 } S = \frac{1 \times 2^2}{6} = 0.67 \text{ in}^3/\text{in}$$

$$\text{單位寬度塑性斷面模數 } Z = \frac{1 \times 2^2}{4} = 1 \text{ in}^3/\text{in}$$

$$\text{單位寬度極限彎矩強度 } M_p = \frac{f_{dy}(S + Z)}{2} = \frac{68200 \times (0.67 + 1)}{2} = 56947 \text{ lb-in/in}$$

$$\text{單位寬度極限剪力強度 } V_p = 37510 \times 2 = 275020 \text{ lbs/in}$$

$$\text{單位寬度剪力強度 } V = \frac{1 \times 1384.4 \times 48}{2} = 33225.6 \text{ lbs/in}$$

$$\frac{V}{V_p} = 0.44 < 0.67$$

2. 因 $\frac{V}{V_p}$, 故不需折減 M_p

由圖十八及表三可知

$$\frac{L}{H} = 1.75 \quad \frac{x}{L} = 0.35 \quad x = 0.35 \times 84 = 29.4 \text{ in}$$

若門板為固定端時，極限單位抵抗均佈壓力 $r_u = \frac{10 \times 56947}{29.4^2} = 658.83 \text{ psi}$
 門體上下側承受單位寬度剪力

$$V_{sv} = \frac{3 \times 1384.4 \times 48 \times (1 - 0.35)}{2 \times (3 - 0.35)} = 24449 \text{ lbs/in} < V_p \quad (\text{檢核合格})$$

門體兩側承受單位寬度剪力

$$V_{sh} = \frac{3 \times 1384.4 \times 29.4}{5} = 24420.8 \text{ lbs/in} < V_p \quad (\text{檢核合格})$$

$$I = 0.667 \text{ in}^4/\text{in}$$

$$3. \text{ 查圖 19 } \frac{H}{L} = 0.57, r = 0.0024$$

$$K_E = \frac{EIb(1 - \nu^2)}{rH^4} = 1410.2 \text{ psi/in}$$

$$X_E = \frac{658.83}{1410.2} = 0.467 \text{ in}$$

$$K_{LM} = 0.73 \quad \text{當} \quad \frac{L}{H} = 1.75 \quad (\text{表五})$$

$$M = 1468 \text{ psi-ms}^2/\text{in}$$

$$M_e = 0.73 \times 1468 = 1071.64 \text{ psi-ms}^2/\text{in}$$

$$\text{振動週期} \quad T_n = 2\pi \sqrt{\frac{1071.64}{1410.2}} = 5.47 \text{ ms}$$

$$\text{查圖 21} \quad \frac{R_u}{P} = \frac{658.83}{1384.4} = 0.476$$

$$\frac{t_r}{T_n} = 0.239 \quad \text{得} \quad \frac{X_m}{X_E} = 1.63$$

(因值大於 1，門已進入塑性範圍)

$$\text{最大位移} = 0.76 \text{ in}$$

$$\text{最大轉角} = 1.81^\circ < 2^\circ$$

四、分析結果

此門在受爆壓後，不會造成結構體內部人員及裝備之傷害，門可能會產生小永久變形，所以 2in 門板厚度可符合設計需求。

結論

以整體防護系統而言，掩體進出口為防護之弱點，防爆門設置在進出口，其重要性可想而知，防爆門屬被動式之防禦系統，要如何減少對防爆門之損壞乃為規劃設計之重點，如在防爆門前方設立防爆牆或者將防爆門隱藏至掩體內部，避免門體與爆震波直接接觸為最有效方式，本文僅針對防爆門直接在爆壓作用下進行探討。在武器效應方面，通用彈爆炸威力最大，建議以通用彈來設計；在爆炸型式方面，地面爆炸產生效應最大，建議以地面爆炸來計算爆壓；在防爆門材料方面，可依各單位需求來設計，若不考慮熱阻效應，一般以鋼製防爆門為主，在鋼製防爆門選用中，若考量鋼板厚度大而產生高經濟成本時，則可選用中空金屬管型或加強型防爆門，若考慮熱阻效應或破片效應，則建議選用鋼板與混凝土結合之防爆門；在門開啟方式方面，除非有特殊需求，盡量不使用斜拉門，應以單開門或雙開門為主，另可將門體設計斜面或弧面，以避免爆波與門體成直角，可降低爆壓對門體之作用；無論何種防爆門型式，應避免受攻擊後而無法使用，所以設計應在彈性範圍且支承旋轉角在 2 度以內，但若爆壓超過預期設計而造成永久變形無法使用時，應可由兩側或內側拆除門體，以確保人員或武器裝備能順利進出。

本文僅針對在爆壓下門板之設計提出探討，而武器效應尚有破片撞擊效應、電磁脈衝效應、熱輻射效應及有害氣體效應等；結構設計除門板外，尚有鉸鍊、門門及氣密條之設計；另惡劣之環境條件下會降低裝備性能與可靠度，台灣主要氣候環境為高溫、濕度、颱風、雨、鹽霧、砂石及太陽輻射等，將會造成表面金屬磨損與腐蝕、活動部份機械卡死及密封失效等，目前設計規範或相關書籍並未做明確說明，部份仍在研究中，期望學術單位能完成相關研究，而使防爆門設計更趨於完善。

作者基本資料

王成堃中校，指職軍官 89 年班、工兵正規班 153 期、國立中興大學水土保持研究所碩士。曾任排長、保養官、副連長、教官，現任於陸軍工兵學校戰工組教官。

參考資料

1. TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1998.
2. TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects," U. S. Department of the Army, 1965.
3. LS-DYNA Version 971 Theory' s Manual Rev5, Livermore Software Technology Corporation, 2010.
4. Bouamail, A. and Nguyen-Dang, T. V., "High Explosive Simulation using Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation, " Defense R&D Canada , DRDC Valcartier TM 2008-254, October, 2008.
5. 國科會, 「地下指揮所出入口抗炸技術」, 行政院國家科學委員會, 台北, 2010 年9 月。
6. 陸軍司令部, 「軍事工程教範」, 陸軍司令部, 桃園, 2004 年。