

共軍導彈對我作戰區級地下指揮所威脅之評估

作者/王成堃中校

提要

國軍在地下指揮所之設計與施工，已有相當多經驗，早期武器精準度差，不易命中地下指揮所結構體，但共軍目前將飛彈基地移至距離中華民國空對空飛彈打擊範圍之外最近的地區，以提高射擊準確度，壓縮中華民國預警與防衛的時間，兩岸對峙的時間愈長，其飛彈的數量累積愈多，對中華民國的威脅也就愈強。

目前美軍 TM5-855-1 技術手冊，雖有建議可選用之地下指揮所出入口型式，但設計方法並不明確。因此，有必要對出入口抗炸評估技術進行研究，使地下指揮所能在戰時維持其功能。本文採用國科會研究計畫發展之 PSDV3 軟體可評估現有地下指揮所出入口之抗炸能力，並提出改善方案，以提供防護各型武器之地下指揮所出入口型式；並可作為國軍設計與評估地下指揮所之抗爆能力之參據，以達戰力保存之目標。

關鍵詞：地下指揮所、出入口抗炸、PSDV3 軟體。

前言

武器的使用除了戰果勝負上的考量外尚需顧及客觀現實國際環境等。以核子彈頭的使用為例，二次大戰以來除了美國為結束戰爭而用了兩顆轟炸日本外，就從未再被用過。世界各國也瞭解對他國冒然使用核子彈頭的後果是不堪設想的，故對發生機率甚小的極端毀滅行為本文不擬探討。本文僅考慮傳統彈頭的彈道飛彈對中華民國的威脅，準此原則彈道飛彈的準確度就成了評估破壞力的關鍵因素，此外目前國內採用之防護設計規範，主要參考美國陸軍技術手冊 TM5-855-1，本文將以美國陸軍 1998 年版 TM 5-855-1 技術手冊為主，透過 PSDV3 設計軟體，設計評估可防敵武器直接命中及非直接命中攻擊之指揮所為目的地。

武器的效用通常分戰略性與戰術性兩類。戰略性武器具極端毀滅功能（WMD, Weapons of Mass Destruction）通常備而不用，也可以達到不戰而居屈人之兵的嚇阻作用。其數量通常有限，彈道飛彈裝上核子彈頭即屬此類。戰術性武器是一種有限殺傷力，但大量用於戰場上的實質武器，如一般槍炮等。如果彈道

飛彈裝上傳統彈頭則既不具極端毀滅功能，戰時也不能大量用於戰場上，殺傷力亦甚有限。伊拉克在波斯灣對美國及伊朗兩次戰爭中，動用的飛毛腿所造成的傷亡人數甚少。戰術性武器在平時僅能用來對敵方人民作心理上的威脅，中國大陸對中華民國就是如此。¹

共軍導彈威脅分析

共軍彈道飛彈區分有長距離的洲際彈道飛彈可攻擊美、俄，及中距離的可攻擊日本、菲律賓、關島等地，而短距離的可對中華民國的安全形成巨大威脅。至於三軍戰場上配備使用的極短程飛彈（100 公里以下），則因中華民國已具備反制能力，其威脅性不大。換言之，中國大陸飛彈其射程 1000 公里以上者目標是指向別國，100 公里以下者中華民國已具備一定程度的反制能力。考量中華民國海峽寬約 150 公里的距離，可見射程在 300 至 1000 公里的短程彈道飛彈對中華民國的安全才具有威脅。中國大陸目前亦在發展海對地巨浪一型與二型飛彈。巨浪一型射程 1700 公里，目標是美、日，但也可能從太平洋上對付中華民國東部的軍事基地²。

共軍的短程彈道飛彈 M-9 與 M-11，從自行研發到成軍約費時八年（1984-1992），目前已部署 300 顆。依其發展過程我們不難推測，到 2005 年 M-9 及 M-11 的飛彈數量已倍數成長，如再配以太空導航裝置如全球定位系統(Global Positioning System, GPS) 接收器等，其準確度將由現在的 300 公尺提昇至 150 公尺以內。

圖 1 共軍 M-9 短程彈道飛彈



資料來源：中華網，〈共軍二砲部隊〉，<http://military.china.com/>，西元 1999 年 11 月 16 日。

¹：謝清志先生，《我們如何面對中國的導彈威脅》，（出版社，西元 2004 年 X 月），頁 118。

²：謝清志先生，《我們如何面對中國的導彈威脅》，（出版社，西元 2004 年 X 月），頁 119-120。

飛彈的威力通常以三個因素來估算，即射程、準確度（Circular Error Probable, CEP）及彈頭爆炸威力。中國大陸飛彈能威脅中華民國的有兩種即 M-9、M-11，其中 M-9 射程 600 公里，準確度圓半徑 300 公尺，可載 500 公斤的高爆炸藥；M-11 射程 280 公里，準確度 600 公尺，載重量是 800 公斤。兩種飛彈均可裝載傳統炸藥或核子彈頭，而且使用可移動發射台，增加我方警戒的困難度。更因係單節固態火箭，發射準備時間短。據資料顯示，兩種飛彈除飛行過程中以慣性導航，當快到達目標物時，則以終端尋標器瞄準，以翼翅或微調引擎操控來增加其準確度。所謂 CEP 是指飛彈命中率百分之五十之圓形區域的半徑，係用來比較各種武器命中率的相對優劣度。真正可能擊中目標應以命中率百分之 99.8 之範圍來衡量，即三倍標準誤差值（ 3σ ），其值約為五倍的 CEP。由此推知，M-9 的幾近百分之百投中半徑是 1.5 公里。以桃園機場為例，其面積約為 4×2 平方公里，我們不難想像，如果中國大陸以 M-9 向桃園機場瞄準發射，則其命中率幾近百分之百。大型建築物如總統府面積約為 200×100 平方公尺，其命中率約為 350 分之一。目標越小其命中率越低，坦克、飛彈發射台等其命中率幾乎微乎其微。保守估計，中國大陸的 M-9 與 M-11 飛彈現有數量約 300 顆，在心理上已對中華國民眾造成嚴重的威脅³。

在面對敵人之攻擊時，我軍必須有完善之結構物，來保護人員、資源與裝備等戰力，才能以最大戰力來打擊敵軍。要想保有最大戰力，結構物便需根據敵軍可能使用之武器來設計，並時時檢討與改善。目前國內採用之防護設計規範，主要參考美國陸軍技術手冊 TM5-855-1。本文將以美國陸軍 1998 年版 TM 5-855-1 技術手冊為主，透過 PSDV3 設計軟體，設計評估可防敵武器直接命中及非直接命中攻擊之指揮所為目地。

傳統武器效應與防護策略

一、傳統武器效應⁴

傳統武器之型態約可分為槍彈、砲彈、炸彈、火箭與飛彈等五種形式，飛彈雖已成為我軍之主要威脅，但由於美軍規範主要以炸彈為主，本文將只探討炸彈之效應。高爆型(HE)炸彈之形式約可分為通用彈(GP)、薄殼彈(LC)、破片彈(FRAG)、穿甲彈(AP)、半穿甲彈(SAP)、油爆彈(FAE)等幾種，目前之設計主要針對 GP 與 SAP 兩種，其特性示於表 1。其中之 SAP 彈，貫穿效應大於 GP 彈，而 GP 彈則爆炸威力較大。

³：謝清志先生，《我們如何面對中國的導彈威脅》，（出版社，西元 2004 年 X 月），頁 118。

⁴：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

表 1 各型炸彈之特性

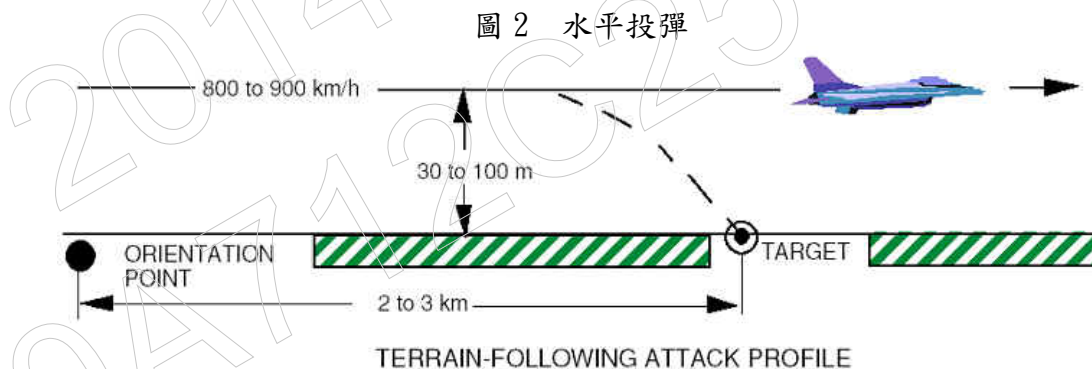
型式		彈頭重量 (kg)	直徑 (mm.)	彈鼻長度 (mm)	彈長度 (mm)	炸藥 種類	炸藥重量 (kg)	設計破片 重量(kg)	破片速度 (m/sec)
GP	250	106.6	229	515	1100	Tritonal	45.4	0.01574	2112.9
	500	223.6	274	830	1540	Tritonal	87.1	0.02722	2060.2
	750	334.3	409	622	1260	Tritonal	175.1	0.03520	2325.6
	1000	417.4	356	1081	1840	Tritonal	201.9	0.04296	2123.0
	2000	852.8	457	1390	2470	Tritonal	428.7	0.06687	2179.0
	3000	1281.8	612	931	2250	Tritonal	860.9	0.05273	2512.0
SAP	500	231.3	305	341	1250	Tritonal	69.4	0.18685	1335.1
	1000	453.6	381	426	1450	Tritonal	140.6	0.21228	1505.8
	2000	925.3	483	540	1680	Tritonal	249.8	0.26900	1572.7

資料來源：：TM5-855-1(1998)

炸彈在攻擊時，可依目的調整其引信為空炸、碰炸與延遲炸，因此會有貫穿、爆炸、破片、彈坑、飛出物與振動等不同效應，其行為相當複雜，目前之設計主要仍以經驗公式及圖表為主。市面上有很多套裝軟體，如 LS-DYNA、AUTODYN 等，皆可用來模擬貫穿或爆炸之行為，但不在本文討論之範圍。

炸彈之投擲方式，一般有下列二種⁵：

(一)水平投彈：飛行速度為 800 至 900 km/h，投彈高度低空為 30 至 100m，中高空為 3000 至 4000m 以上，最高投彈高度為 8000 至 10000m。

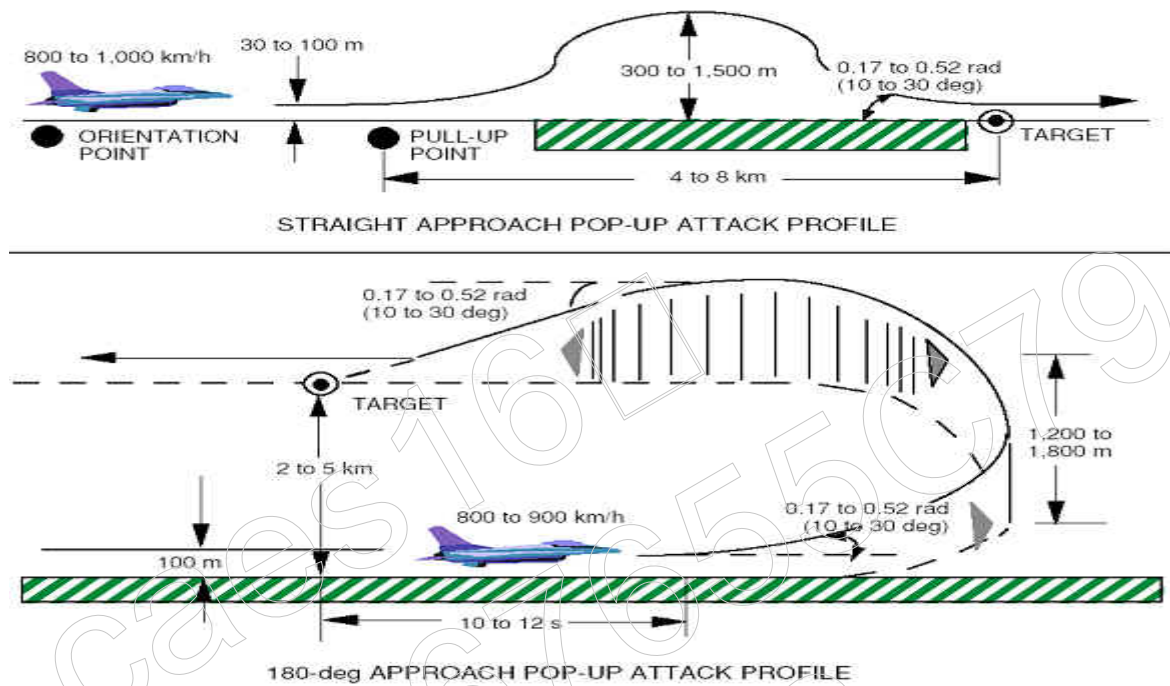


資料來源：TM5-855-1(1998)

(二)俯衝投彈：飛行速度為 800 至 1000 km/h，投彈高度為 300 至 1800m，俯衝角為 10 至 30 度。

⁵：TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects", (U. S. Department of the Army 1998) ,1998.P. 3-4

圖 3 俯衝投彈



資料來源: TM5-855-1(1998)

炸彈落地時之速度 V_f 與角度 θ 為

$$V_f = \sqrt{V^2 + (2gH)} \quad \text{-----} (2.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{V \sin \alpha + 2gH}}{V \cos \alpha} \quad \text{-----} (2.2)$$

其中， V 為飛機速度， g 為重力加速度， H 為投彈高度， α 為俯衝角。

炸彈傳統上因為無導引系統，其準確度低，但目前已有雷射導引或 GPS 導引炸彈，其準確度佳，尤其是雷射導引方式，可準確命中掩體出入口，雷達站，橋樑等目標，這是我軍需面對之問題。而火箭因為無導引設施，敵人主要用在近距離攻擊，其威力通常比飛彈小。飛彈可分為小型飛彈，彈道飛彈，巡弋飛彈等型式，其威力很大，我軍有必要對其防護方式作更深入之研究。

二、防護等級與策略⁶

對傳統武器之防護等級，可依據敵人之攻擊模式來訂定，本文僅對正規戰部分進行探討。以波灣戰爭、南斯拉夫戰爭或阿富汗戰爭為例，第一波攻擊將以削弱我全國性攻擊與防禦能力為主，其目標主要在全國指揮中心、雷達站、

⁶：同註 4。

通訊電力設施、飛彈基地、機場、與港口等重要目標，使我軍無還擊能力，以掌握海空優勢，其防護等級為最高；第二波則以削弱我地區性攻擊與防禦能力為主，其目標主要在地區指揮中心、防空砲陣地、橋樑與油彈庫，並持續對第一波殘餘目標攻擊，以準備第三波的地面攻擊，其防護等級次之。

防護策略可依目的與主被動方式，分為掩蔽、疏散、搶修、備份、攔截、阻絕、示假、與隱真等八種形式，如表 2 所示，策略之選用需根據目標特性來選定。例如，全國指揮中心由於為敵人注意之目標，其位置很早便已被鎖定，可採掩蔽、示假與備份等策略；雷達站為達最佳效果，通常設在明顯之位置如山頂，可採非直接命中掩蔽、示假、與備份等策略；通訊電力設施可採掩蔽、搶修、與備份等策略；飛彈基地由於國軍飛彈種類很多，需根據飛彈特性來訂定其合適策略；機場跑道則為很明顯之目標，且需經常使用，可採備份、疏散、與搶修等策略；橋樑為不易防護之目標，但也不易命中，可採搶修與備份等策略；油彈庫則可採疏散、非直接命中掩蔽與示假等策略。

表 2 防護策略

目的		主動方式	被動方式
讓敵人打	正面	掩蔽	疏散
	反面	搶修	備份
讓敵人打不到	正面	攔截	阻絕
	反面	示假	隱真

資料來源:作者整理

三、小結

在面對敵人之攻擊時，我軍必須有完善之結構物，來保護人員、資源與裝備等戰力，才能以最大戰力來打擊敵軍。要想保有最大戰力，結構物便需根據敵軍可能使用之武器來設計，並時時檢討與改善。武器之威力，約可分為四種主要形式：應力衝擊、燃燒、核生化、與電磁脈衝。本文將針對應力衝擊，探討結構物在炸彈攻擊下之各種效應及其防護原則。

目前國內採用之防護設計規範，主要參考美國陸軍技術手冊 TM5-855-1。此規範之最早版本為 1949 年，經過 1965 年與 1986 年之改版，目前最新版為 1998 年版，但在 2002 年，將其編號改為 UFC 3-340-01，內容只有小部份修正。本文將以美國陸軍 1998 年版 TM 5-855-1 技術手冊為主，透過 PSDV3 設計軟體，設計可防敵武器直接命中及非直接命中攻擊之指揮所為目地。

地下指揮所結構體抗炸設計概念⁷

一、地下指揮所結構體可能遭受之威脅

假設該指揮所為作戰區級指揮所，因此屬於敵導彈或飛彈攻擊之重要軍事目標之一，在武器威脅上可能為 M-9、M-11 彈道飛彈或 GP 及 SAP 彈。

然而考量基地面積為 120×100m，又 M9 準確率為 300m CEP、M11 準確率為 600m CEP 的情形下，由上節次所述因此可以得知 M9、M11 命中率太低不予考慮於本次設計，僅考慮 US Bomb SAP2000 直接命中及 GP2000 非直接命中的影響。

二、設計概念

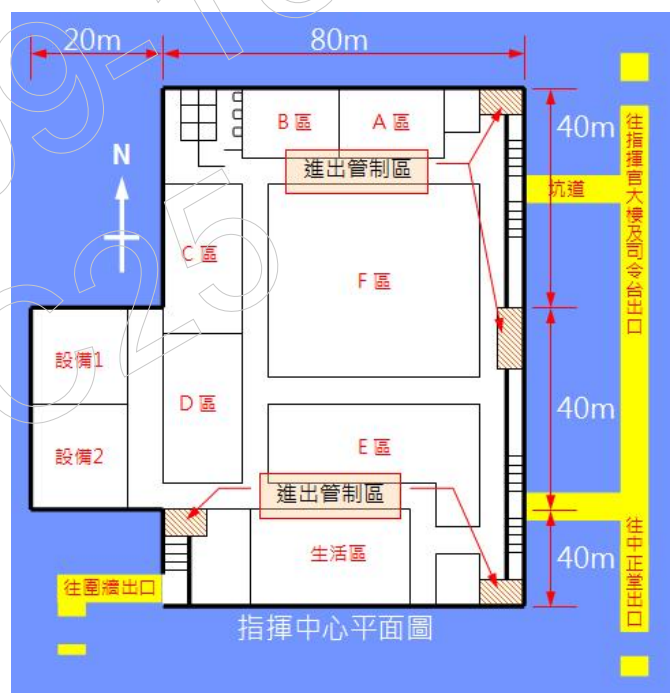
由於指揮部位於樹林茂密之偏僻山區(假設條件)，且周圍均為平房式兵舍(假設條件)，為充分利用地形地物優勢及掩蔽隱蔽考量，本案將以指揮所地下化為主導。

指揮所選定於營區內某處，緊鄰營區圍牆(見圖 4)，使用腹地為 100×120m，指揮所接 3 個通道、4 個出口(見圖 5)。

圖 4 指揮所位置圖



圖 5 指揮所平面圖



資料來源:作者整理

(一)地下指揮所偽裝

地下指揮所的第 1 出口，直通至軍團指揮部大樓地下室，除遮蔽及偽裝功能外，亦能提供高階指揮者直達指揮所之效果。

地下指揮所的第 2 出口，直通至集合場司令台地下室，以司令台作為遮蔽及偽裝。

⁷：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，西元 2010 年 9 月)，頁 76。

地下指揮所的第 3 出口，直通至中正堂地下室，以中正堂作為遮蔽及偽裝。
地下指揮所的第 4 出口，坐落於營區圍牆邊，以現地植栽物種增加培植，作為遮蔽及偽裝。

地下指揮所的頂層同樣以現地植栽物種增加培植作為遮蔽及偽裝。

(二)坑道防護

因指揮部大樓為顯著重點目標物，敵可能以 SAP 彈進行攻擊；而司令台與中正堂屬一般建築物，敵可能以 GP 彈進行攻擊。由於前述結構物樓板防貫穿效能小，故考量武器貫穿結構物於地下室進行地表爆炸，爆壓以 Side-On 的形式進入第 1、2 及 3 出口坑道，本案於坑道內設置防爆門以利防護。第 4 出口坑道則考量 GP 彈於洞口產生地表爆炸，爆壓以 End-On 的形式進入，坑道內同樣設置防爆門進行防護。

在各坑道頂面則設置一層混凝土層，用以防止 SAP 彈或 GP 彈在攻擊主要目標時，因為沒有直接命中(比如打到指揮所側邊)而對坑道造成的直接傷害。

針對 SAP 彈對直接命中、貫入土壤側邊爆炸，以及 GP 彈鄰近通風口爆炸所產生的影響進行評估及分析。

表 3 設計及評估項目表

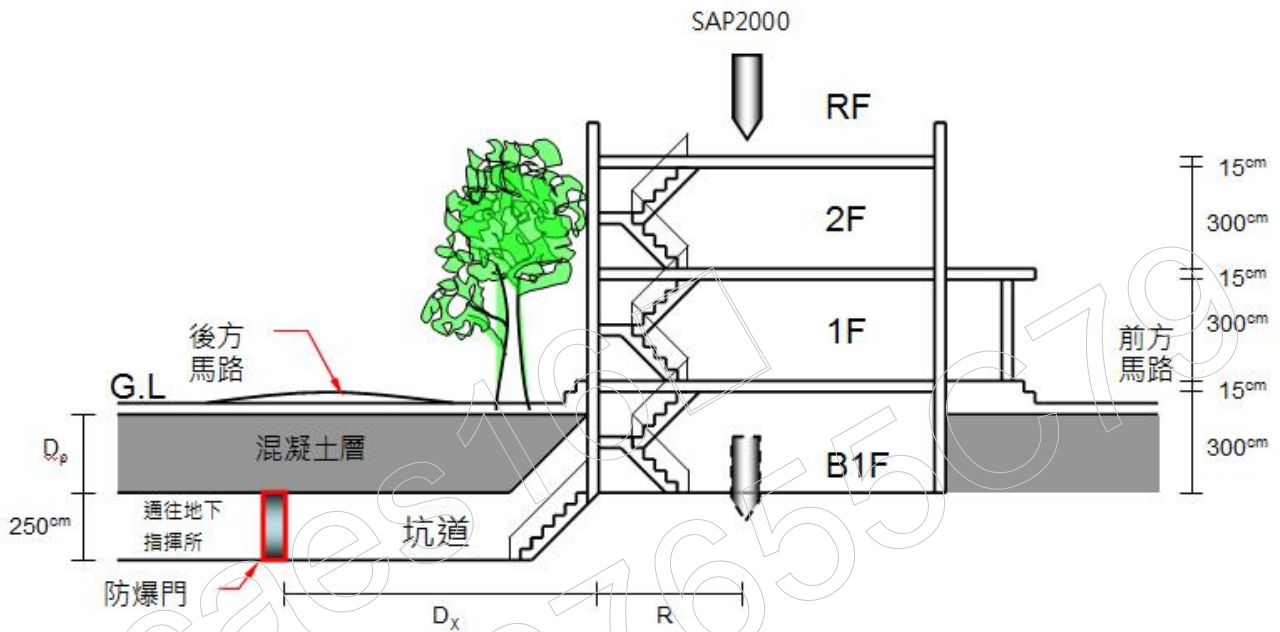
項目 位置	威脅來源	偽裝掩蔽 設計	結構防護			通風管 影響 評估
			防貫穿層 評估	防爆門 設計	側牆防爆 炸評估	
第 1 出口(指揮部)	SAP2000	○		○		
第 2 出口(司令台)	GP2000	○		○		
第 3 出口(中正堂)		○		○		
第 4 出口(圍牆處)		○		○		
地下指揮所	SAP2000	○	○		○	○

資料來源:作者整理

(三)設計及評估

1. 指揮部出口：地下指揮所第一出口連結於指揮部大樓地下室，以指揮部大樓作為遮蔽與偽裝，見圖 6。

圖 6 指揮部大樓

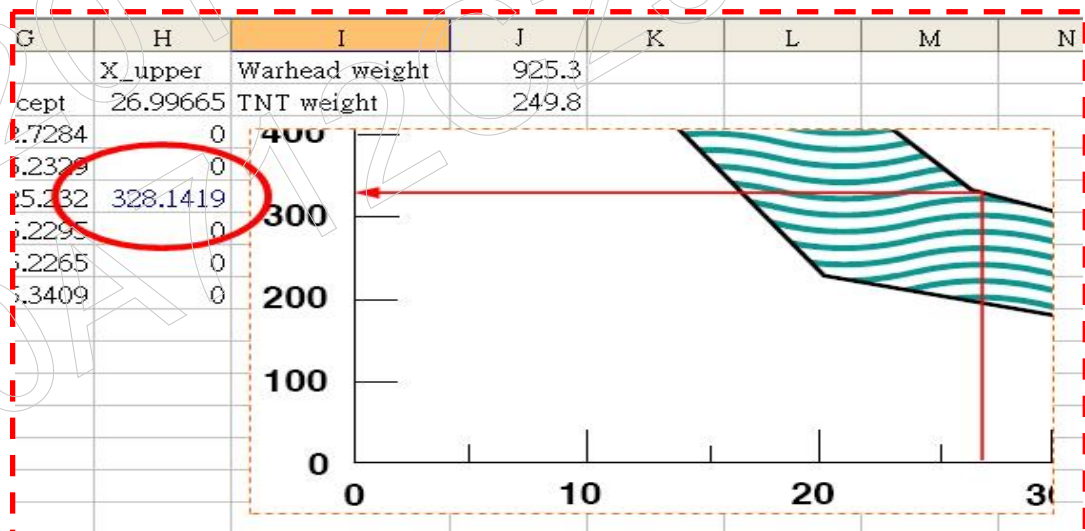


資料來源:作者整理

(1) 指揮部大樓樓板防貫穿評估

經查 TM5-855-1 (1998) table 2-1 可以得知 Warhead weight=925.3kg，TNT weight=249.8kg，代入 ImpactVelocityLimit.xls 軟體可得最大衝擊速度 (Striking Velocity) 為 328.1419m/s，見圖 7。

圖 7 SAP2000 彈速度評估



資料來源:作者整理

使用「PSDV3」軟體中「結構設計」功能進行評估，SAP2000 彈最後停留於地下室地板(見圖 8)，因此確定炸彈於地下室進行地表面爆炸，而指揮部大樓各層樓板均無法發揮防貫穿能力。

圖 8 PSD2007 評估指揮部大樓防 SAP2000 彈貫穿

or ☒ Select a weapon: US Bomb SAP2000

Striking Velocity (m/s): 328.1419 impact angle(degree): 90

Layer 1:	Concrete	Thickness (mm) = 150	Penetration Index S = 0.816211772
Layer 2:	Air	Thickness (mm) = 3000	Penetration Index S = 0
Layer 3:	Concrete	Thickness (mm) = 150	Penetration Index S = 0.816211772
Layer 4:	Air	Thickness (mm) = 3000	Penetration Index S = 0
Layer 5:	Concrete	Thickness (mm) = 150	Penetration Index S = 0.816211772
Layer 6:	Air	Thickness (mm) = 3000	Penetration Index S = 0

Run

Layer 1 : Residual Velocity (m/sec) = 311.33
 Layer 2 : Residual Velocity (m/sec) = 311.33
 Layer 3 : Residual Velocity (m/sec) = 294.68
 Layer 4 : Residual Velocity (m/sec) = 294.68
 Layer 5 : Residual Velocity (m/sec) = 278.18
 Layer 6 : Residual Velocity (m/sec) = 278.18
 total penetration depth (mm) = 9450

資料來源:作者整理

(2)防爆門設置距離評估

[假設 1：坑道斷面為 200 × 250cm(寬×高)。]

[假設 2：炸點(SAP2000 彈)距離坑道入口 2m。]

[假設 3：防爆門為 60cm 厚、鋼筋混凝土造、單開門方式]

[假設 4：防爆門簡化為單位寬度簡支樑形式進行評估，標準為端點最大旋轉角<2 度。]

[假設 5：a. 樑斷面為雙鋼筋斷面，b. 拉力區混凝土未開裂，c. 拉壓鋼筋比均為 0.002，d. 保護層厚度為 0.05m，e. 不忽略鋼筋對斷面的影響。]

首先計算使防爆門產生 2 度旋轉角時，所需之 Pstatic，先求得中性軸位置(從壓力側最外緣算起)如下：

$$x = \frac{\frac{1}{2}bh^2 + (n-1)A_s d + (n-1)A'_s d'}{bh + (n-1)A_s + (n-1)A'_s} = 0.3 \text{ m}$$

其次以轉換斷面法計算慣性矩，如下：

$$I_t = \frac{bh^3}{12} + bh\left(x - \frac{h}{2}\right)^2 + (n-1)A_s(d-x)^2 + (n-1)A'_s(x-d')^2 = 0.018528 \text{ m}^4$$

其中 $n = \text{彈性模數比} = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{24870} = 8.04$

$A_s = \text{壓力區鋼筋面積} = 0.002hb/2 = 0.0006 \text{ m}^2$

$A'_s = \text{拉力區鋼筋面積} = 0.002hb/2 = 0.0006 \text{ m}^2$

$d' = \text{壓力側最外緣至壓力筋中央位置} = 0.05\text{m}$

$d = \text{有效深度} = h - 0.05 = 0.55$

$b = \text{單位寬度} = 1\text{m}$

$h = \text{厚度} = 0.6\text{m}$

再以旋轉角進行反推獲得 P_{static} (最大容許值)，如下：

$$\theta = \frac{\Delta}{L/2} = \frac{5wL^4/2}{384EI L} = \frac{5wL^3}{192EI} \Rightarrow w = P_{\text{static}} = \frac{192EI}{5L^3} \theta = 39.5457 \text{ MPa}$$

其中 $w = \text{均佈載重 } P_{\text{static}}$

$L = \text{樑長} = 2.5\text{m}$

$E = \text{混凝土彈性模數，假設 } f'_c \text{ 為 } 28\text{MPa} \text{ 時，} E = 24870\text{MPa}$

$I = \text{斷面慣性矩} = 0.018528 \text{ m}^4$

$\theta = \text{旋轉角} = 2 \text{ 度}$

由於爆炸爆壓與距離成反比，因此代入不同的距離至 PSDV3 軟體中可以找出小於 P_{static} 的最適當距離(從炸藥到防爆門)。

使用 PSDV3 軟體計算坑道入口處的反射爆壓(當 $R=2$)，得 $P_r=92.29 \text{ MPa}$ ，見圖 9：

圖 9 計算第 1 坑道入口處反射爆壓

The screenshot shows the PSDV3 software interface with the following settings and results:

- Weapon: US Bomb SAP2000
- with case effect: ☐
- Distance to reference point (m): 2
- Surface burst: ☒ : Altitude (m): 0
- Temperature (°C): 15
- Reflected Pressure (MPa): 92.29
- Reflected Impulse (MPa-ms): 26.887

資料來源:作者整理

將 $P_r=92.29$ MPa 及 $I_r=26.887$ 代入 PSD V3 軟體中「結構分析」選項，求出 $DLF=0.1919$ ，見圖 10：

圖 10 計算第 1 坑道出口 DLF

Peak Overpressure (MPa)=	92.29	Impulse (MPa-ms)=	26.887	Type:	Triangular load ▼
Mass(kg/mm ²)=	0.00144	Load-mass Factor=	0.78	Period (sec)=	0.009499503387
Material :	Elastic ▼	Resistance (MPa)=	0.23212927	Compute Properties	
Compute Structure properties					
width (mm)=	1000	Length (mm)=	2500	Thickness (mm)=	600
Element:	simple support beam (length)		Material: Elastic ▼		
☒ RC: Concrete:	Mass Density (kg/m ³) =	2400	Compressive Strength (MPa) =	28	Strength Factor =
	1.4				
reinforcement:	tension reinforcement ratio =	0.002	effective depth (mm) =	550	Young Modulus (MPa) =
	200000				
Yielding Stress (MPa) =	250	Stress Factor =	1.21		
Stiffness (MPa/m) = 491.3772298437909					
Elastic Limit (mm) = 0.47240543926758316					
Static displacement (mm) = 187.82					
Max. displacement (mm) = 36.04					
Dynamic Load Factor, DLF = 0.19190396450751512					

資料來源:作者整理

因此 $=92.29 \times 0.1919 = 17.7108$ MPa < 39.5457 MPa(防爆門可承受最大爆壓)，計算結果即使將防爆門設於坑道入口處，也可承受 SAP2000 彈爆炸所產生的變形。

考量施工、維護及安全管制問題，防爆門的設置退縮到距離坑道口 5m 處，即 $D_x=5m$ 。

(3)坑道混凝土層厚度(D_p)計算

由於 TM5-855-1(1998)並沒有單層混凝土層的設計，因此採用 TM5-855-1⁸(見表 3)，可得防剝落厚度 $T_s=3.64m=D_p$ 。(所有坑道混凝土層厚度均相同)

表 3 TM5-855-1(1986) ACE 公式計算成果

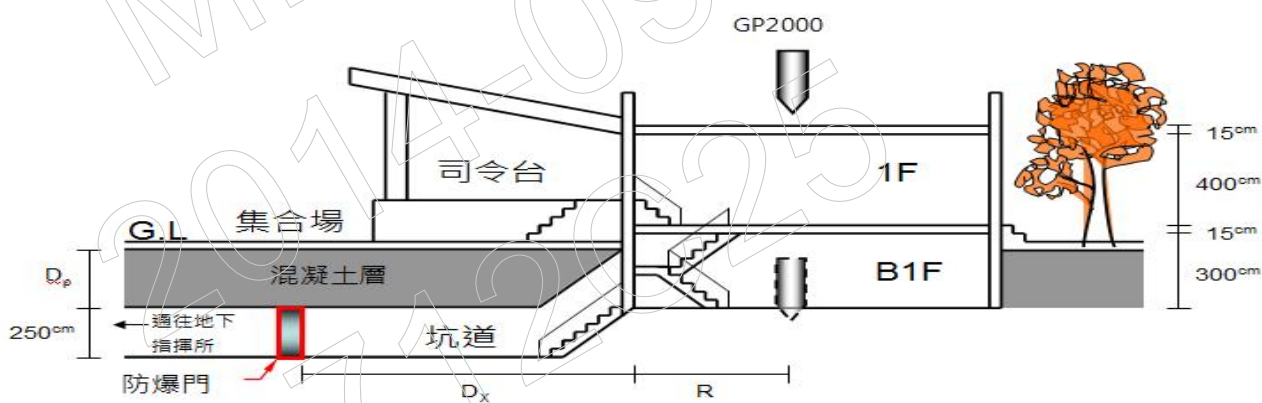
⁸: TM5-855-1, " Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects", (U. S. Department of the Army 1998)。

項目		公制	單位		英制	單位	公式及備註
彈重	W	925.30	kg	→	2039.93	lb	$X = 222 \frac{W}{A} \left(\frac{V_s}{1000} \right)^{1.5} \frac{d^{0.215}}{\sqrt{f'_c}} + \frac{d}{2}$
彈直徑	d	0.46	m	→	17.99	inch	
彈截面積	A	0.16	m ²	→	254.25	inch ²	
撞擊速度	V _s	328.14	m/s	→	1076.63	fps	
混凝土抗壓強度	f _c	28.00	MPa	→	4061.06	psi	公式誤差約為 15%，需修正
貫入深度	X	1.70	m	←	67.12	inch	$T_p = 1.24X + 1.32d$
修正後貫入深度	X	1.96	m	←	77.19	inch	$T_s = 1.36X + 2.12d$
防貫穿厚度	T _p	2.92	m	←	115.02	inch	
防剝落厚度	T _s	3.64	m	←	143.12	inch	

資料來源: TM5-855-1(1986)

2. 司令台出入口：地下指揮所第 2 出口連結於司令台地下室，以司令台作為遮蔽與偽裝，見圖 11。

圖 11 司令台入口處

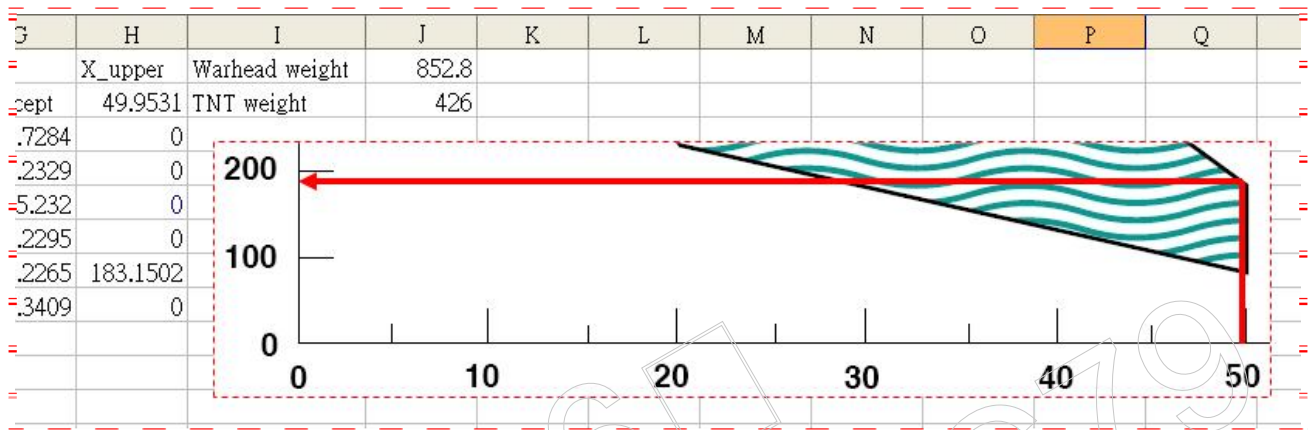


資料來源: 作者整理

(1) 司令台樓板防貫穿評估

經查 TM5-855-1 (1998) table 2-1 可以得知 Warhead weight=852.8kg，TNT weight=428.7kg，代入 ImpactVelocityLimit.xls 軟體可得最大衝擊速度(Striking Velocity)為 183.1502m/s(因為 TNT weight 最大僅能輸入至 426kg，故以該值進行運算)，見圖 12。

圖 12 GP2000 彈速度評估



資料來源:作者整理

使用「PSDV3」軟體中「結構設計」功能進行評估，GP2000 彈最後停留於地下室地板(見圖 12)，因此確定炸彈於地下室進行地表面爆炸，而司令台各層樓板均無法發揮防貫穿能力(假設地下室地板層為 2m 厚混凝土層)。

圖 13 PSD2007 評估司令台防 GP2000 彈貫穿

or ☒ Select a weapon: US Bomb GP2000

Striking Velocity (m/s): 183.1502 impact angle(degree): 90

Layer 1:	Concrete	Thickness (mm) = 150	Penetration Index S = 0.816211772
Layer 2:	Air	Thickness (mm) = 4000	Penetration Index S = 0
Layer 3:	Concrete	Thickness (mm) = 150	Penetration Index S = 0.816211772
Layer 4:	Air	Thickness (mm) = 3000	Penetration Index S = 0
Layer 5:	Concrete	Thickness (mm) = 2000	Penetration Index S = 0.816211772

Layer 1 : Residual Velocity (m/sec) = 170.36
 Layer 2 : Residual Velocity (m/sec) = 170.36
 Layer 3 : Residual Velocity (m/sec) = 157.74
 Layer 4 : Residual Velocity (m/sec) = 157.74
 Layer 5 : Residual Velocity (m/sec) = 0
 Layer 6 : Residual Velocity (m/sec) = 0
 total penetration depth (mm) = 8025
 Bomb stop at layer = 5

資料來源:作者整理

(2)防爆門設置距離評估

[假設 1：坑道斷面為 200 × 250cm(寬×高)。]

[假設 2：炸點(GP2000 彈)距離坑道入口 2m。]

[假設 3：防爆門為 60cm 厚、鋼筋混凝土造、單開門方式]

[假設 4：防爆門簡化為單位寬度簡支樑形式進行評估，標準為端點最大旋

轉角<2 度。]

[假設 5：a.樑斷面為雙鋼筋斷面，b.拉力區混凝土未開裂，c.拉壓鋼筋比均為 0.002，d.保護層厚度為 0.05m，e.不忽略鋼筋對斷面的影響。]

計算程序及 $P_{\text{static}} (=39.5457 \text{ MPa})$ 同上節。使用 PSD 軟體計算坑道入口處的反射爆壓(當 $R=2$)，得 $P_r=126.478 \text{ MPa}$ ，見圖 14：

圖 14 計算第 2 坑道入口處反射爆壓

or ☒ Weapon: US Bomb GP2000 ☐ with case effect

Distance to reference point (m)= 2

☒ Surface burst : Altitude (m)= 0 Temperature (°C)= 15

Reflected Pressure (MPa)=126.478

Reflected Impulse (MPa-ms)=41.877

資料來源:作者整理

將 $P_r=126.478 \text{ MPa}$ 及 $I_r=41.877$ 代入 PSD 軟體中「結構分析」選項，求出 $DLF=0.2178$ ，見圖 15：

圖 15 計算第 2 坑道出口 DLF

Peak Overpressure (MPa)= 126.478 Impulse (MPa-ms)= 41.877 Type: Triangular load

Mass(kg/mm²)= 0.00144 Load-mass Factor= 0.78 Period (sec)= 0.009499503387

Material: Elastic Resistance (MPa)= 0.23212927

Compute Structure properties

width (mm)= 1000 Length (mm)= 2500 Thickness (mm)= 600

Element: simple support beam (length) Material: Elastic

☒ RC: Concrete: Mass Density (kg/m³)= 2400 Compressive Strength (MPa)= 28 Strength Factor = 1.4

reinforcement: tension reinforcement ratio = 0.002 effective depth (mm)= 550 Young Modulus (MPa)= 200000

Yielding Stress (MPa)= 250 Stress Factor = 1.21

Stiffness (MPa/m) = 491.3772298437909

Elastic Limit (mm) = 0.47240543926758316

Static displacement (mm) = 257.39

Max. displacement (mm) = 56.07

Dynamic Load Factor, DLF = 0.21783188981891077

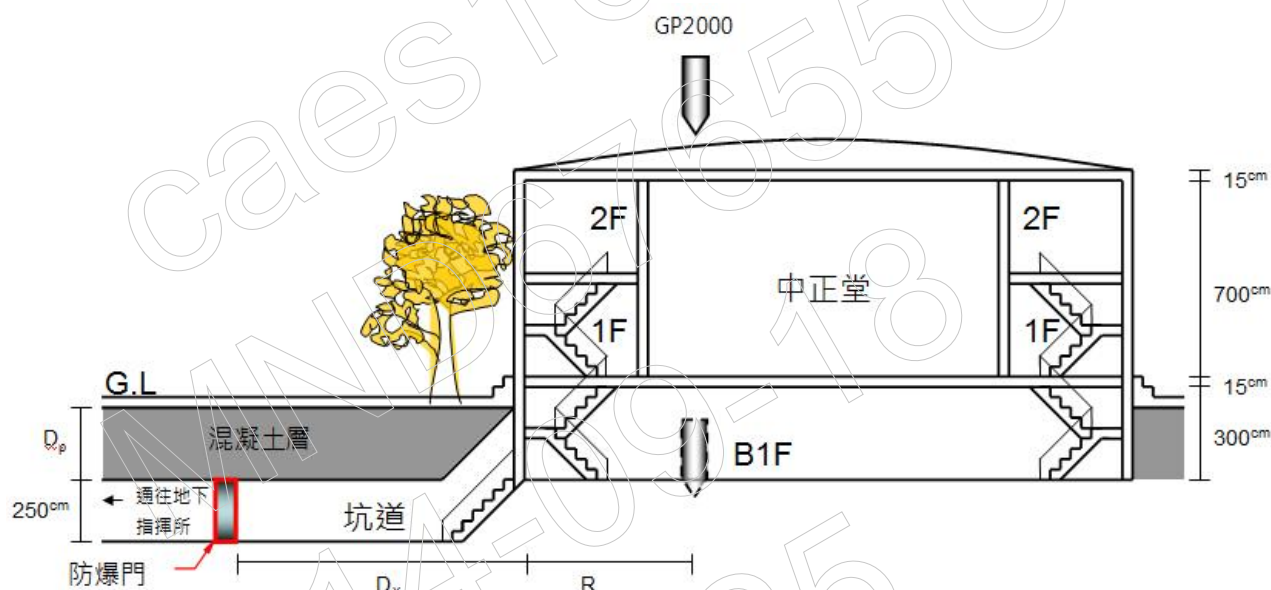
資料來源:作者整理

因此 $P_{static} = P_r \times DLF = 126.478 \times 0.2178 = 27.5509 \text{ MPa} < 39.5457 \text{ MPa}$ (防爆門可承受最大爆壓)，計算結果即使將防爆門設於坑道入口處，也可承受 GP2000 彈爆炸所產生的變形。

考量施工、維護及安全管理問題，防爆門的設置退縮到距離坑道口 5m 處，即 $D_x = 5\text{m}$ 。

3. 司令台出入口：地下指揮所第 3 出口連結於中正堂地下室，以中正堂作為遮蔽與偽裝，見圖 16。

圖 16 第 3 出口設置於中正堂地下室



資料來源: 作者整理

(1) 中正堂樓板防貫穿評估

同上節使用「PSDV3」軟體中「結構設計」功能進行評估，各層樓板均無法發揮防貫穿能力。

(2) 防爆門設置距離評估

同上節分析結果，即使將防爆門設於坑道入口處，也可承受 GP2000 彈爆炸所產生的變形。考量施工、維護及安全管理問題，防爆門的設置退縮到距離坑道口 5m 處，即 $D_x = 5\text{m}$ 。

4. 圍牆處出口：地下指揮所第 4 出口，坐落於營區圍牆邊，以現地植栽物種增加培植，作為遮蔽及偽裝，見圖 17。

(1) 防爆門設置距離評估

5. 地下指揮所：地下指揮所頂層以現地植栽物種增加培植作為遮蔽及偽裝，見圖 18。

Figure 1: Cross-section diagram of the underground command center structure. The diagram illustrates the vertical layers of the structure, including the ground level (G.L.), the topsoil layer (壤土層), the anti-penetration layer (防貫穿層-混凝土), the sand layer (砂層), the main structural top layer (主結構頂層-混凝土), and the underground command center (地下指揮所). The structure is surrounded by a trench (坑道) with exits (出口) indicated. A SAP2000 analysis point is shown at the top center.

第 17 頁，共 24 頁

(1)地下指揮所樓板防貫穿評估

SAP2000 彈速度評估同上節。使用「PSDV3」軟體中「結構設計」功能進行評估，SAP2000 彈最後停留於防貫穿層(見圖 19)，並可獲得貫穿深度等各參數。

圖 19 PSD2007 評估地下指揮所防 SAP2000 彈貫穿

or ☒ Select a weapon: US Bomb SAP2000

Striking Velocity (m/s): 328.1419 impact angle(degree): 90

Layer 1: Concrete Thickness (mm) = 2000 Penetration Index S = 0.816211772

Layer 2: Soil Thickness (mm) = 1000 Penetration Index S = 10

Layer 3: Concrete Thickness (mm) = 1000 Penetration Index S = 0.816211772

Layer 4: Air Thickness (mm) = 2000 Penetration Index S = 0

Layer 1 : Residual Velocity (m/sec) = 0

Layer 2 : Residual Velocity (m/sec) = 0

Layer 3 : Residual Velocity (m/sec) = 0

Layer 4 : Residual Velocity (m/sec) = 0

Layer 5 : Residual Velocity (m/sec) = 0

Layer 6 : Residual Velocity (m/sec) = 0

total penetration depth (mm) = 1579

Bomb stop at layer = 1

modified Depth of Burst (mm) = 782

Coupling Factor = 0.948

貫穿深度

炸彈停留位置

爆炸深度

互制係數

資料來源:作者整理

(2)主結構層頂面爆壓評估

使用「PSDV3」軟體中「武器威力評估/爆炸」功能進行評估，計算得反射爆壓 $P_r=194.376\text{MPa}$ 、反射衝量 $I_r=597.564\text{MPa}\cdot\text{ms}$ (見圖 20)，可用於計算主結構層所需的強度，或是委由建築師或結構技師進行設計。

圖 20 地下指揮所主結構層頂面爆壓評估

or ☒ Weapon: US Bomb SAP2000 ☐ with case effect

Distance to reference point (m)= 1.194

☐ Free-air burst : Altitude (m)= 0 Temperature (°C)= 15

☒ Buried Explosion: Soil type: DSOIL2: Concrete Sand (SP) 21.4% saturation Coupling Factor= 0.948

TM 5-855-1, 1998

Peak Radial Stress (MPa)=129.584

Impulse (MPa-ms)=585.686

Peak Reflected Radial Stress (MPa)=194.376

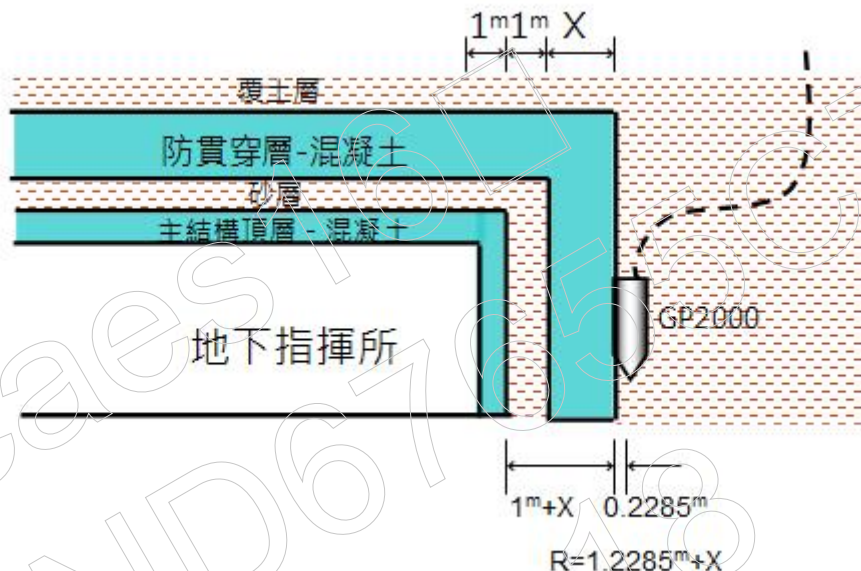
Reflected Impulse (MPa-ms)=597.564

資料來源:作者整理

(3) SAP2000 彈貫入土壤中爆炸對結構體側牆影響

本節考量當 SAP2000 彈未直接命中地下指揮所時，評估貫入土壤緊貼抗爆牆爆炸，對主結構體側牆造成傷害(見圖 21)。

圖 21 SAP2000 彈貫入土壤後位於指揮所側牆



資料來源:作者整理

使用「PSDV3」軟體中「武器威力評估/彈坑與飛出物」功能進行評估，假設 $DOB = -0.2285\text{m}$ ，可求得純混凝土受炸後成坑最大深度為 0.679m ，見圖 22。

圖 22 抗爆牆成坑深度計算

or ☒ Weapon: US Bomb SAP2000

Depth of Burst, DOB (m) = -0.2285

☒ massive Concrete or Rock

Massive Concrete or Rock

True depth (m) from 0.095(reinforced) to 0.679(unreinforced)

資料來源:作者整理

因此假設抗爆牆的厚度為 2 倍的成坑深度，即 $X = 2 \times 0.679 = 1.358\text{m}$ ，直接取 1.4m 。

使用「PSDV3」軟體中「武器威力評估/爆炸」功能進行評估，假設緩衝砂層材質為 Concrete Sand(21% Saturation)， $R = 1 + 1.4 = 2.4\text{m}$ ，SAP2000 彈半徑為 0.2285m ，則可計算出側牆的反射爆壓($P_r = 13.455\text{MPa}$)及反射衝量($I_r =$

73.801MPa-ms)，見圖 23(在互制係數的選項中，因 DOB 無法輸入負號，因此假設炸點中心貼平於抗爆牆的外側)。前述所求之結果，可用於計算主結構層所需的強度，或是委由建築師或結構技師進行設計。

圖 23 主結構體側牆反射爆壓計算

or ☒ Weapon: US Bomb SAP2000 ☐ with case effect

Distance to reference point (m)= 2.4

☒ Free-air burst : Altitude (m)= 0 Temperature (°C)= 15

☒ Buried Explosion: Soil type: DSOIL2: Concrete Sand (SP) 21.4% saturation Coupling Factor= 0.500636

Compute Coupling Factor for buried explosion

Depth of Bomb center (m)= 0.2285 Bomb Angle (degree) from vertical= 0

Bomb Length (m) in Air: 0 Soil: 0.457 Concrete: 0 Soil: 0

Coupling Factor= 0.5006363 new DOB (m)= 0.2285

TM 5-855-1, 1998

Peak Radial Stress (MPa)=8.97

Impulse (MPa-ms)=70.758

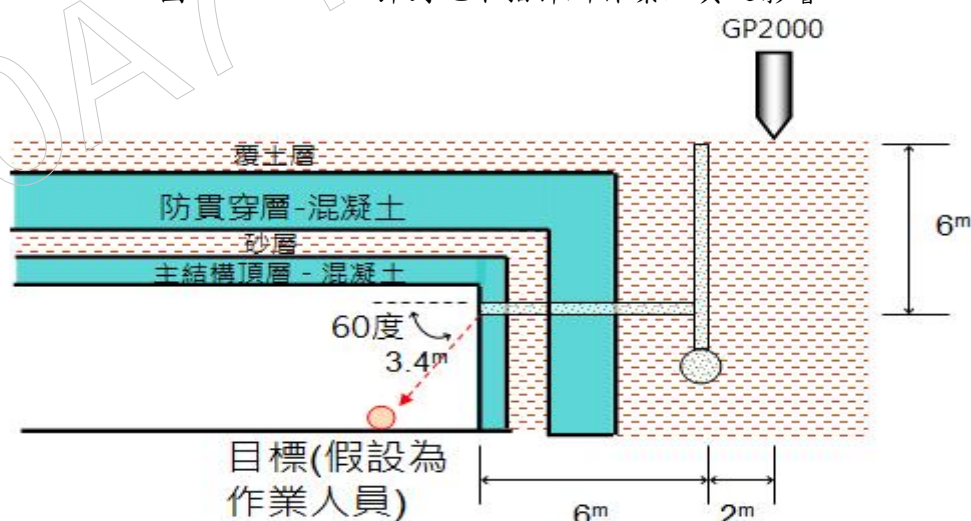
Peak Reflected Radial Stress (MPa)=13.455

Reflected Impulse (MPa-ms)=73.801

資料來源:作者整理

6. GP2000 彈對通風口之影響：通風口依現地條件配置如圖 24，假設通風口的斷面積為 1m^2 。

圖 24 GP2000 彈對地下指揮所作業人員之影響



資料來源:作者整理

使用「PSDV3」軟體中「武器威力評估/爆炸」功能進行評估，計算得 0.096MPa(見圖 25)，大於人體所能承受爆壓 0.034MPa，後續需要求建築師設計減壓閥，使爆壓合於標準。

圖 25 地下指揮所通風口爆壓計算

or ☒ Weapon: US Bomb GP2000 ☐ with case effect

Distance to reference point (m)= 2

☒ Chamber: pipeline length (m) = 12 Pipeline Area(m²)=1 Distance from opening to target(m)=3.4

angle between center of opening to target(degree)=60

Side-on Pressure (MPa)=11.028
Peak Overpressure (MPa)=0.096
duration of overpressure (ms)=3.286

資料來源:作者整理

(四)小結

這是一個虛構的設計案，許多計算都用了大量的假設，計算出來的結果是否符合需求、安全、經濟的要求，仍有許多探討的空間。以下就本案所設計、評估成果作一綜整的統計：

表 4 設計及評估成果綜整統計表

設計地點	評估、設計項目	內容
第 1 出口 (指揮部大樓)	防爆門	尺寸：200×250×60cm(寬×高×厚) 材質：鋼筋混凝土 位置：距離坑道出口 5m 處 最大容許爆壓：39.5457 MPa (2 度旋轉角變形) 成果：可承受爆壓
第 2 出口 (司令台)		
第 3 出口 (中正堂)		
第 4 出口 (圍牆邊)	防爆門	尺寸：200×250×60cm(寬×高×厚) 材質：鋼筋混凝土 位置：距離坑道出口 10m 處 最大容許爆壓：39.5457 MPa (2 度旋轉角變形) 成果：可承受爆壓
坑道	防貫穿、爆炸層	尺寸：364cm(防剝落厚度) 材質：混凝土 位置：坑道上方 成果：可防止貫穿及爆炸。
地下指揮所	直接命中主結構體	尺寸：(防貫穿層)混凝土(200cm)、(緩衝層)砂(100cm) 位置：指揮所上方 爆壓：Pr=194.376MPa、Ir=597.564MPa-ms 成果：可防止貫穿及爆炸。
	貫入土壤中爆炸對結構體側牆影響	尺寸：(抗爆炸層)混凝土(140cm)、(緩衝層)砂(100cm) 位置：指揮所側邊 爆壓：Pr=13.455MPa、Ir=73.801MPa-ms 成果：可抵抗爆炸對側牆的影響。
	非直接命中對通風口影響	爆壓：Pso=0.096MPa 成果：大於人體所能承受爆壓 0.034MPa，後續需要求建築師設計減壓閥，使爆壓合於標準。

資料來源:作者整理

1. SAP2000 彈或 GP2000 彈貫入至各建物地下室，因為炸點並非位於空曠地區，使用內部爆炸進行反射爆壓的分析應該比使用地表爆炸合理。然而進行分析後，內部爆炸產生的反射壓比地表爆炸小，因此前述設計還是以地表爆炸計算結果為主(保守設計)。

2. 採用 TM5-855-1(1986)ACE 公式所求得之坑道混凝土防貫穿層比較保守，例如使用「PSDV3」軟體中「結構設計」功能進行評估，其防貫穿層即比 ACE 公式所得結果要小，且 ACE 尚有誤差問題，為保守起見將誤差納入考量，將使混凝土層變得很厚。如果不做防剝落的設計(欲減小厚度)，則需將 deck 板或鋼板作為防剝落補強，以達相同防護效果。

3. 本案中還有很多沒有納入設計，例如將警衛排納入指揮所空間規劃中，可能就有儲放彈藥槍枝等問題，必須進行內部爆炸的分析。實際應用時可以依需求納入考量。

結語

國軍在地下指揮所之設計與施工，已有相當多經驗，早期武器精準度差，不易命中地下指揮所結構體，但共軍目前將飛彈基地移至距離中華民國空對空飛彈打擊範圍之外最近的地區，以提高射擊準確度，壓縮中華民國預警與防衛的時間，兩岸對峙的時間愈長，其飛彈的數量累積愈多，對中華民國的威脅也就愈強。

在面對敵人之攻擊時，我軍必須有完善之結構物，來保護人員、資源與裝備等戰力，才能以最大戰力來打擊敵軍。要想保有最大戰力，結構物便需根據敵軍可能使用之武器來設計，並時時檢討與改善。目前國內採用之防護設計規範，主要參考美國陸軍技術手冊 TM5-855-1，另外搭配國科會委辦研發之 PSDV3 軟體可評估現有地下指揮所出入口之抗炸能力，並提出改善方案，提供防護各型武器之地下指揮所出入口型式，地下指揮所出入口設計規範，可協助國軍設計與評估地下指揮所之抗爆能力，以達戰力保存之目標。同時，亦可轉為恐怖份子爆炸攻擊之爆壓威力評估，及工廠意外爆炸安全評估。

作者簡介

王成堃，指職軍官 89-10 期、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. 謝清志先生，《我們如何面對中國大陸的導彈威脅》，（出版社，西元2004年X月）。
2. 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，西元2010年9月）。
3. TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects", (U. S. Department of the Army, 1965) .
4. TM5-855-1, "Technical Manual-Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects" , (U. S. Department of the Army, 1998.)
5. LS-DYNA Version 971 Theory' s Manual Rev5, (Livermore Software Technology Corporation, 2010.)
6. 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.)
7. 中華網，〈共軍二砲部隊〉，[http : //military.china.com/](http://military.china.com/)

