



火炸藥安全量距之研析

林鵬舉

提要

- 一、彈藥與火炸藥爆炸之後產生強大的破壞能力，在人類歷史上的各個戰役中已驗證無疑，因此，其儲存的安全問題，世界各國均廣為重視。
- 二、火炸藥安全量距（Explosives Safety Quantity-Distance, ESQD）是用以衡量彈藥與火炸藥儲存安全的最重要準據，現今所使用的火炸藥安全量距數據，均經嚴謹的科學實證測試與演算，對相關從業人員而言，可依循其規範實施正確的管理作為。
- 三、本文引介美國、聯合國、北大西洋公約組織等最新出版之火炸藥安全量距資料，並以圖示方式介紹美軍之應用作法；相較國軍單位多沿襲美軍舊版技令，實務工作上將可能出現安全罅隙，本文期能提供國內火炸藥相關工作者一個全新的國際視野，俾建立未來國軍專業典範。

關鍵詞：爆炸、火炸藥、量距

壹、前言

過去十數年間，國軍彈藥安全問題已廣為各界所重視，尤其幾次爆炸意外事件，影響社會觀感甚鉅，要求彈庫（Ammunition Magazine）與軍工廠（Explosives Facility）搬遷的聲浪甚囂塵上^{1, 2}。

近年由於中研院「國家生技園區開發計畫案」中之開發標的緊鄰軍備局第二〇二廠，開發範圍內必須徵收土地做為第二〇二廠火工區搬遷重建之用³，復以《土地徵收條例》於民國101年9月1日起採行以「市價」徵收之修正措施⁴，中研院原編列之土地取得預算不足，未能完成相關徵收作業而轉與軍備局研商：是否可減少火工區之安全量距以減少土地徵收範圍？

由上，導出一個嚴肅的問題，火炸藥的安全量距應如何計算才合理？

過去因為國軍彈藥意外事件曾造成重大

損傷，社會大眾普遍對於軍方彈藥及火炸藥設施存有疑慮與恐懼，致使產生莫名的謬誤偏見；相對而言，國軍彈庫或生產火炸藥的軍工廠，在既定的社會氛圍下係處於弱勢的地位，縱已改善相關安全防護作為，亦難以取信民眾甚至讓民眾接受其存在的事實。因此，本文探討美國、聯合國及北大西洋公約組織等之相關規範及作法，針對火炸藥安全量距作一嚴謹剖析，期能提供國軍彈藥與火炸藥從業人員之依循準據，建立國軍專業典範。

貳、火炸藥安全量距

一、歷史背景⁵

量距（Quantity-Distance, Q-D）一詞，源自西元1909年，當時稱為「居住建物距離表（The Inhabited Building Distance Tables）」，或稱「距離表（The American Table of Distances）」。⁵時任美國火炸藥局總

- 1 王長鼎，南港彈藥庫周邊明年底解禁，聯合報，臺北，民國96年4月21日。
- 2 丁守中，臺北抱著半顆原子彈丁守中促遷南港彈藥庫，立法委員丁守中全球資訊網，<http://www.tingso.org/>，民國102年3月8日引用。
- 3 臺北市政府，民國97年12月3日府都規字第09707491200號公告《變更臺北市南港區中南段2小段302-1地號等機關用地（供國防部軍備局生產製造中心第202廠使用）及保護區為機關用地（供國家生技研究園區使用）及機關用地（供中央研究院及國防部使用）主要計畫案》；行政院經建會，民國101年4月16日委員會決議通過《「國家生技研究園區」開發計畫修訂草案》。
- 4 民國101年1月4日《土地徵收條例》修正通過，行政院核定民國101年9月1日起正式施行。
- 5 Ona R. Lyman., The History of the Quantity Distance Tables for Explosive Safety, Memorandum Report ARBRL-MR-02925, Ballistic Research Laboratory, US Army Armament Research and Development Command, June 1979.

督察的鄧恩上校 (Col. B. W. Dunn)，代表美國鐵路協會對美國境內的火藥製造商提出要求：應注意座落於鐵路沿線的火炸藥庫房可能造成的潛在危害狀態，並且必須作出根本上的改變。

鄧恩上校促使美國烈性炸藥製造商協會成立了一個委員會，這個委員會蒐集自1864年至1914年間共122起爆炸意外事故，調查研究這些爆炸事故的炸藥量以及其造成損害所擴及之距離範圍。研究結果繪製成「距離表 (The American Table of Distances)」於1915年出版，此表給定了計算最大至一百萬磅 (45萬3,950公斤) 火炸藥量時，至居住建物之最小可允許距離；此項研究結果，美國紐澤西州率先於1925年將之制定為州法律，然而，1926年位於紐澤西州丹麥湖的海軍彈藥基地 (Naval Ammunition Depot, Lake Denmark, New Jersey) 發生嚴重的爆炸意外事故 (圖一)⁶，基地內彈藥庫房全毀，並波及鄰近的皮卡汀尼兵工廠 (Picatinny Arsenal) 以及周圍社區，造成21死、53重傷，財產損失估計達8,400萬美元 (以1926年美元幣值計算)；其後，美國於

1928年將「距離表」訂定為聯邦政府法律，同年於美國國防部下設置「火炸藥安全委員會 (Department of Defense Explosives Safety Board, DDESB)」，職掌火炸藥安全問題，並防止國防部設置的火工品設施在爆炸與環境效應的危害下危及生命與財產安全。

1930年時，有研究者發現此研究結果的數據中⁷，基於某些天然或人工設置的障礙物，對同樣重量的火炸藥量發生爆炸後，其可被允許之最小距離較無障礙物之距離要縮減許多，該「距離表」將爆炸源至鐵路的最小可允許距離定為居住建物距離的60%，而此60%的選擇是相當武斷的推論。雖然如此，「距離表」仍沿用了許多年；遲至1945年時，



圖一 西元1926年美國紐澤西州丹麥湖海軍彈藥基地爆炸事故現場照片

6 Department of Defense Explosives Safety Board, DDESB. <http://www.ddesb.pentagon.mil/index.asp>

7 Assheton, Ralph., History of Explosions on Which the American Table of Distances was Based, Published under the direction of the Institute of Makers of Explosives, Charles Story Press Co., Wilmington, Delaware, 1930.

美軍羅賓遜上校 (Col. Clark S. Robinson) 提出了一份報告⁸，對居住建物距離的準確性提出質疑，他認為，美軍當時已研製出Torpex炸藥⁹，具有比TNT更強大的爆炸效應，「距離表」所規範的距離可能過短。

二戰結束後的20年內，美國政府進行了廣泛的爆炸行為的研究工作，擋牆 (Barricades) 能否減少爆壓 (Blast Pressures) 的有效性之議題，也在這個時期內積極地研究論證。其後，多位研究者以壓力與衝擊負荷模式對選定目標 (民宅、公共建築、彈藥庫房、航空器以及車輛) 建立動態交互模型^{10,11,12}，並考量每一目標結構元件之彈性與塑性變形，提出了壓力脈衝爆炸破壞模式 (Pressure-Impulse Blast Damage Mode)，並規範可接受的損傷程度。此一大量

的實證研究時期，亦證明了擋牆設置在爆炸源可減少對居住建物的安全距離是顯而易見的¹³。

其後，美國在上述的基礎上不斷的精進研究與實證測試，並據以編修美國國防部標準 (DoD Standards) 與美軍準則迄今。

二、量距之定義

量距 (Quantity-Distance, Q-D)，美軍準則定義為：「爆炸損傷的嚴重程度是取決於潛在爆炸位址 (Potential Explosion Site, PES) 和暴露位址 (Exposed Site, ES) 之間的距離，此距離與炸藥的類型、潛在爆炸位址中火炸藥的數量、潛在爆炸位址可抑制爆炸超壓 (Blast Overpressure) 的能力、彈藥碎片與殘骸以及暴露位址周圍的裸露部位可承受爆炸效應的能力等項有關」¹⁴，如圖二所

8 Col., Clark S. Robinson., Army-Navy Explosive Safety Board, Technical Paper Number 1, "The Present Status of the American Table of Distance," 1 July 1945.

9 Torpex炸藥，鋁粉混合炸藥，由40.5%TNT、40.5%RDX以及18%鋁粉混合而成，二次大戰期間主用於魚雷裝藥，今已被H6與PBX等組合炸藥所取代。

10 Col. H. S. Morton., Scaling the Effects of Air Blast on Typical Targets, Technical Memorandum, Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, January 1966.

11 Johnson, O. T., "A Blast-Damage Relationship," BRL Report 1389, Ballistic Research Laboratory, September 1967, AD 389909.

12 R. N. Shumaker, and B. E. Cummings., "A Modified Pressure-Impulse Blast Damage Model," Ballistic Research Laboratory BRL MR 2724, January 1977, AD A036196.

13 K. Kaplan, and V. W. Davis., "Effectiveness of Barricades: Review of Basic information," Defense Atomic Support Agency, June 1968, AD 837984.

14 Department of the Army Pamphlet 385-64, Ammunition and Explosives Safety Standards, Headquarters Department of the Army Washington, DC., 24 May 2011.

示¹⁵。

量距可由以下之數學模式描述：

$$D(m) = K_m \times Q^{1/3} \quad (1)$$

(1) 式中之D表示量距，單位為公尺；Q表示淨火炸藥量 (Net Explosive Weight, NEW ; or Net Explosive quantity, NEQ)，單位為公斤；Km稱為K因子 (K factor)，係與可被承擔或可被允許之風險有關，單位為 $m/kg^{1/3}$ 。

依據美國國防部標準，量距之定義為：「正常情形下，爆炸造成的損害或傷亡取決於潛在爆炸位址 (Potential Explosion Site, PES) 和暴露位址 (Exposed Site, ES) 之間的分隔距離，此距離與潛在爆炸位址可抑制爆炸超壓 (Blast Overpressure) 的能力、飛散的一級碎片與二級碎片 (Primary and

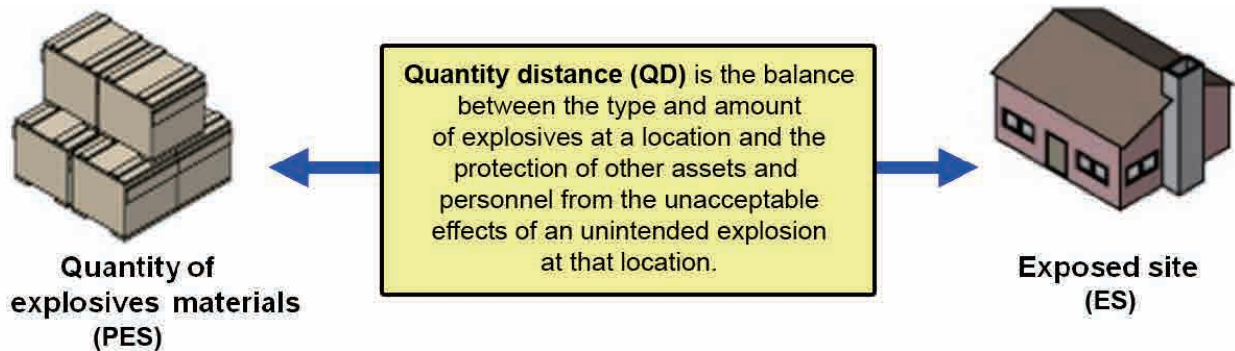
Secondary Fragments) 以及暴露位址可承受爆炸效應的能力等項有關」¹⁶。

北大西洋公約組織 (North Atlantic Treaty Organization, NATO) 對於量距之解釋，認為：「在不同的國家，是基於爆炸意外中所有可用的數據進行一系列廣泛的試驗與分析，然而，由於爆炸的變異性會使量距產生不確定性，因此，以距離函數為主體所導出之量距，在確定的情形下，可用以確認最小或最大之距離」¹⁷。

前述所稱之潛在爆炸位址、暴露位址、炸藥的類型、火炸藥的數量、爆炸超壓、一級與二級碎片等名詞之解釋，茲分述如下：

(一) 潛在爆炸位址 (Potential Explosion Site, PES)¹⁸

潛在爆炸位址是指儲存彈藥/火炸藥



圖二 量距示意圖

15 US Army, Tactical Explosives Safety: Quick Reference Guide, US Army Technical Center for Explosives Safety, Revision 6, 15 December 2011.

16 DoD 6055.09-STD, Ammunition and Explosives Safety Standards, February 29, 2008.

17 NATO, Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives, AASTP-1, Change 3, May 2010.

18 UFC 4-420-01, Ammunition and Explosives Storage Magazines, 10 July 2009.

(Ammunition and Explosives)的場所，一般而言，即指儲存庫房。美軍將儲存庫房分為三類：地面庫(Aboveground Magazine, AGM)、半地下化彈庫(Earth-Covered Magazine, ECM)、地下化儲存設施(Underground Storage Facility)；此三種型態所適用之量距均不同，美軍目前主要的儲存型態為半地下化彈庫(ECM)型式，因此，本文以下所介紹內容，均以半地下化彈庫為主。

值得注意的是，國軍有某些單位將ECM直譯為「土蓋庫」，並非妥適；依美軍規範¹⁹，在一般情形下，ECM其結構外層至少需覆土2英尺(0.61公尺)厚度，並依不同之防護等級

使用經批准之結構材質(包含：門、牆體等)以強化設施防護功能，因其外觀有覆土層，狀似處於半地下化型態(圖三)²⁰，譯為「半地下化彈庫」較為合宜。

(二) 暴露位址(Exposed Site, ES)^{21,22}

指從潛在爆炸位址發生爆炸後受到其爆炸效應所影響之場所，稱之。暴露位址的型態，於本文第三節中詳細敘述。

(三) 炸藥的類型(危害分類)

火炸藥依組成成分不同，會產生不同型態之爆炸效應，而不同組成之火炸藥的敏感性不一，儲存時必須加以分類，避免在混合儲存時產生非必要的危害。



圖三 美軍半地下化彈庫圖

19 DDESB, Technical Paper No. 15, Revision 3, Approved Protective Construction, May 2010.

20 Department of the Army Pamphlet 385-65, Explosive and Chemical Site Plan Development and Submission, 20 July 2009.

21 同註14，p.79

22 同註18，p.19

危害分類的原則，依聯合國組織危害分類系統(The United Nations Organization Hazardous Classification System)，係將各種危害物質區分為9種類別，其中，火炸藥列為第1類(Hazard Class 1)，美軍則依此危害分類系統，將所使用的火炸藥再細分為組(Hazard Division，例如：HD1.1，意為第1類1組)，共區分為6組(HD1.1～HD1.6)；如表一所示^{23,24}。此外，聯合國與美軍皆依不同彈藥組成分之屬性，賦予A、B、C、D、E、F、G、

H、J、K、L、N、S等共13個代碼，編製成混儲表(Storage Compatibility Mixing Chart)^{25,26}，詳如表二所示，提供從事相關作業時辨識使用。

表二中標示為「X」符號者，表示該等類別之彈藥/火炸藥可以混儲；標示為「Z」符號者，表示為基於風險因素，該等類別之彈藥/火炸藥僅能在限制數量、判斷暫不影響安全並獲得授權之情形下，始可實施混儲。

須特別注意的是，本文所列之混儲表係

表一 聯合國與美軍使用之危害分類

聯合國危害物質分類		美軍第1類危害區分	
危害分類	物質名稱	危害區分	危害類型
Class 1	火炸藥	1.1	集體性爆炸
Class 2	易燃性氣體、非易燃性壓縮氣體、毒性氣體	1.2	非集體性爆炸，伴隨破片產生
Class 3	易燃性液體	1.2.1	產生之危害較HD 1.2類更為嚴重者
Class 4	易燃性固體、自燃性物質、禁水性物質	1.2.2	產生之危害較HD 1.2類為輕者
Class 5	氧化物、有機過氧化物	1.2.3	經特定測試準據驗證後認為應分類於HD 1.2類者
Class 6	毒性物質、感染性物質	1.3	集體性燃燒，可能產生輕微爆炸或碎片
Class 7	放射性物質	1.4	非集體性燃燒，並無爆炸或碎片為此類危害之特徵
Class 8	腐蝕性物質	1.5	屬不敏感性之火炸藥物質，但具集體性爆炸之危害特徵
Class 9	其他危險性物質	1.6	屬極不敏感之火炸藥物質，不具集體性爆炸之危害特徵
資料來源：本研究彙整			

23 United Nations, New York, Recommendations of the UN Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods, 1989.

24 TB 700-2, Department of Defense Ammunition and Explosives Hazard Classification Procedures, Headquarters Departments of the Army, the Navy, and the Air Force Washington, DC., 30 July 2012.

25 United Nations Office for Disarmament Affairs, International Ammunition Technical Guideline: UN explosive hazard classification system and codes, 1st Edition, 1 October 2011.

26 同註14，p.53

表二 混儲表

區分	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	N	S
A	X	Z											
B	Z	X	Z	Z	Z	Z	Z	Z				X	X
C		Z	X	X	X	Z	Z	Z				X	X
D		Z	X	X	X	Z	Z	Z				X	X
E		Z	X	X	X	Z	Z	Z				X	X
F		Z	Z	Z	Z	X	Z	Z				Z	X
G		Z	Z	Z	Z	Z	X	Z				Z	X
H								X					X
J									X				X
K										Z			
L													
N		X	X	X	X	Z	Z					X	X
S		X	X	X	X	X	X	X	X			X	X

經聯合國與美軍重新修訂，已與舊有版本迥異，其中混儲代碼「L」類別之彈藥/火炸藥，僅能單獨儲存同一品項，不可與其他類別混儲，即使同屬「L」類別，非同品項亦不可混儲；例如，照明劑（Flares）為HD1.2L類，附發射藥之煙霧黃磷彈（Ammunition, Smoke, White Phosphorus[with propelling charge]）亦為HD 1.2L類，但此二者絕不可互為混儲。

（四）火炸藥數量

量距的距離與火炸藥數量有直接地關係，係以「淨火炸藥量（Net Explosive Weight,

NEW）」為計算基準²⁷，淨火炸藥量是指火炸藥化合物或混合物的實際重量（不計算裝填之彈頭或藥筒之重量），包括以TNT當量計算之能量物質²⁸。

（五）爆炸超壓（Blast Overpressure）

彈藥/火炸藥爆炸後瞬間產生之壓力，為其爆炸行為的主要表徵之一，此爆壓稱為超壓（Overpressure），超壓的大小會對人體與建物結構產生不同程度的傷害與損壞。根據Glibert的研究指出²⁹，人體耳膜所能承受的壓力範圍約為350～1000 毫巴（millibars，等於

27 Joint Publication 1-02, Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms, As Amended Through 12 July 2007.

28 TNT當量（trinitrotoluene equivalent）為計算爆炸威力的一種標準，指某種物質爆炸後所釋放的能量相當於多少噸TNT炸藥爆炸所釋放的能量。

29 G. F. Kinny., & K. J. Graham., Explosives shocks in air, 2nd edition, Springer-Verlag, New York, 1985.

5.08~14.51psi)³⁰，超出此範圍時，即可能造成耳膜貫穿、外傷、肢解等傷害，隨著器官密度的不同，而有不同的傷害，如氣胸(Lung damage)等；會造成致命性危害的壓力範圍則在7000~15000millibars(101.58~217.68 psi)之間。

Glibert以一公斤TNT球形裸藥的爆炸側向壓力，作為估算超壓的方式，如下：

$$P = \frac{P^0}{P_a} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{\lambda}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{1.35} \right)^2}} \quad (2)$$

(2)式中之P表示超壓， P^0/P_a 定義為超壓

比，表示爆炸超壓對周圍大氣壓力的比值； P^0 為最大超壓(Peak Overpressure)，單位為psi； P_a 表周圍大氣壓力，單位為psi； λ 表示比例化距離因子，與實際之爆炸量與當時所處環境的大氣壓力條件相關，單位為 $m/kg^{1/3}$ 。此處之 λ 即為(1)式中之 K_m (K factor)。

美國國防部出版的部頒標準³¹，採用Glibert的研究結論，計算出爆炸超壓對人體損傷的情形，分如表三與表四所示。

表三中之 K_m 是比例化距離因子，表示火炸藥量與距離之比例關係，在同樣的火炸藥量情形下，為便於理解，假設表三中之火炸藥量均為1公斤，由(1)式計算可得，發生爆炸

時，在距離爆炸源7.87公尺範圍內之壓力為3.0psi、耳膜破裂機率为1%；同理，距離爆炸源3.16公尺範圍內之壓力為15.0psi、耳膜破裂機率为50%，則距離爆炸源1.55公尺範圍內之壓力為74.4psi、耳膜破裂機率为99%。

火炸藥爆炸後產生壓力與脈衝

表三 爆炸效應對人體的影響 — 耳膜破裂

事故效應	事故壓力 (psi)	K_m ($m/kg^{1/3}$)	損傷機率 (%)
耳膜破裂	3.0	7.87	1
	3.6	7.08	2
	4.9	5.78	5
	6.6	4.84	10
	9.0	4.10	20
	15.0	3.16	50
	74.4	1.55	99

表四 爆炸效應對人體的影響 — 肺部損傷致死

事故效應	火炸藥量 (kg)	爆炸範圍 (m)	K_m ($m/kg^{1/3}$)	事故壓力 (psi)	脈衝時隔 (ms)	正向脈衝 (psi-ms)
肺部損傷致死	3628.7	10.92	0.71	386.9	8.8	412.5
	12247	30.42	1.32	107.1	51.1	665.6
	56699	57.85	1.51	79.3	82.6	985.3

30 millibars與psi皆為壓力單位，1psi = 0.07031kg/cm²，亦即1psi為每平方公分需承受約0.07公斤之力，5.08~14.51 psi表示人體耳膜每平方公分能承受之力為0.35 kg/cm²~1.02 kg/cm²。

31 同註16，pp.27-28。

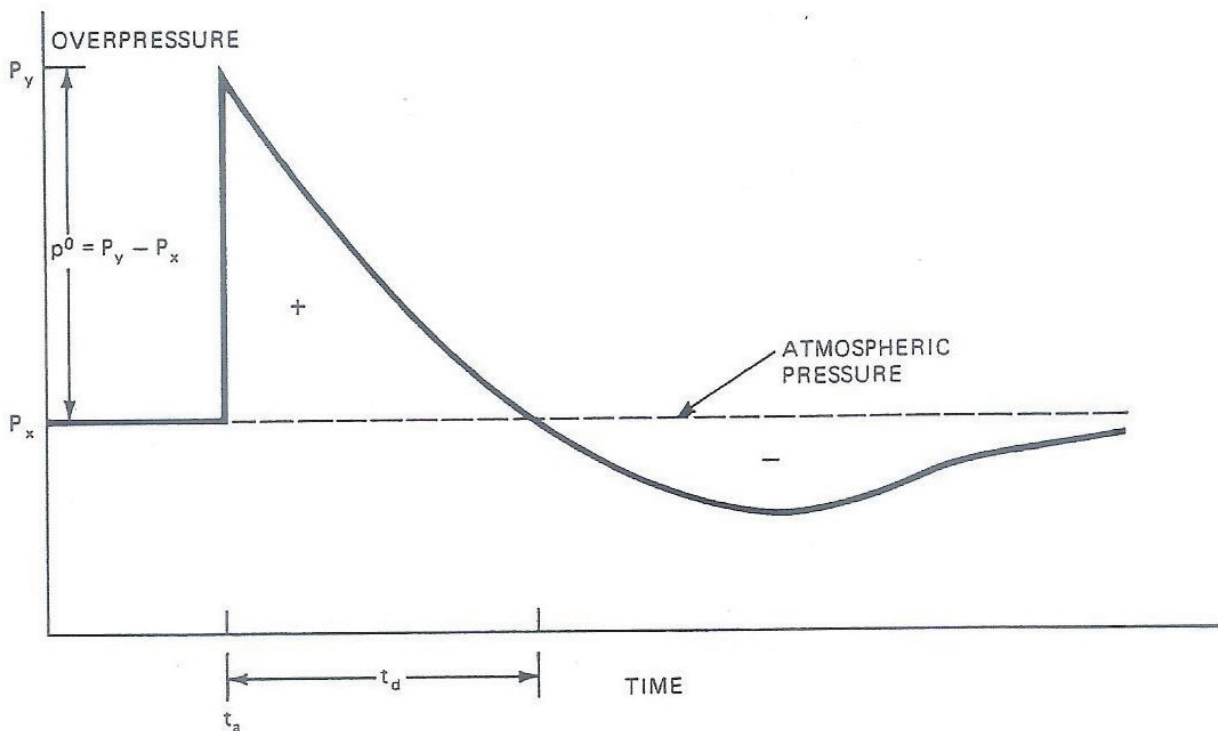
(Impulse)³²，兩者結合是導致引發肺部損傷致死的原因，表四的數據是基於肺部損傷致死的機率為99.9%情形下之假設。

要了解表四所顯示的意義，必須搭配壓力與時間的關係圖（圖四）³³。圖四中「+」的部分表示正向脈衝（Positive Impulse），「-」的部分則表示負向脈衝（Negative Impulse），正向脈衝的值是「+」部分內的區域將其積分之結果； t_d 定義為脈衝時隔（Pulse Duration），單位為微秒（microseconds, ms），由以下數學式表示：

$$\frac{t_d}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{\lambda}{0.54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{\lambda}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{\lambda}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{6.9} \right)^2}} \quad (3)$$

與當時環境之大氣壓力（ P_a ），應用公式（2）可求得 λ 值（即Km值），由公式（3）求得脈衝時隔，再應用公式（1）可得此火炸藥量之爆炸範圍距離。

則表四所顯示的意義是：當1萬2,247公斤（2萬7,000磅）的火炸藥爆炸時，若人處於30.42公尺的爆炸範圍內，將承受51.1微秒時隔內共計107.1psi的超壓壓力與665.6psi-ms



圖四 火炸藥爆炸波之典型壓力時間曲線圖 (pressure-time curve)

32 脈衝 (Impulse)，力與時間的動量變化，定義為 $\text{Impulse} = F\Delta t$ ，表示某時間間隔內，力的變化情形

33 同註29，pp.91-97.

的正向脈衝，完全無存活的机会。

此外，美國國防部出版的部頒標準，也訂定出超壓對於建築物結構的影響。美國國防部認為，傳統建築物結構(Conventional Structures)之設計，可承受每小時145公里的風載(Wind Loads)、屋頂可承載每平方公尺0~22.7公斤的積雪荷載量(Roof-Snow Loads)³⁴，換算成壓力單位後，可求出火炸藥爆炸後產生的超壓對於建築物結構的影響，摘整如表五所示³⁵。

由表五資料顯示，美國國防部認為，一旦火炸藥發生爆炸後，傳統建築物結構也許無法提供完整的保護，而傳統建物結構最薄弱的地方是窗戶，受爆炸壓力震碎之窗戶碎片

可能使人受傷甚至失血致死。

(六) 一級碎片與二級碎片(Primary and Secondary Fragments)^{36, 37}

火炸藥爆炸後之行為表徵，除了爆壓之外，另一個重要的危害即為爆炸後所產生之碎片，區分為一級碎片與二級碎片。

一級碎片(Primary Fragments)主要來自裝置火炸藥之容器爆炸後所產生之粉碎體(Shattering)，包括：彈殼、錐孔裝藥之斗型器、藥筒，或其他用以裝填火炸藥之容器等，這些碎片通常非常小，且初速達每秒數千公尺，就算在距離爆炸源很遠的地方也會因被這些碎片擊中而致命。

二級碎片(Secondary Fragments)主要是

表五 爆炸超壓造成建物結構損壞的機率

Km(m/kg ^{1/3})	事故壓力 (psi)	破損機率(%)		
		窗戶1	窗戶2	窗戶3
15.87	1.2	85	100	100
19.84	0.9	60	100	100
23.80	0.7	41	100	100
22.77	0.6	26	100	100
1. 表內之窗戶材質均經浮式(Float)方法製造、退火程序處理，稱Float annealed玻璃，此種方式製造之玻璃質地緊密、耐用。 2. 窗戶1規格，長61 cm 寬30.5 cm 厚0.223 cm 3. 窗戶2規格，長61 cm 寬61 cm 厚0.223 cm 4. 窗戶3規格，長106.7 cm 寬91.4 cm 厚0.395 cm				

34 每小時145公里的風載 = 0.14 psi 每平方公尺0~22.7公斤的積雪荷載量 = 0.34 psi.

35 同註16，p25.

36 同註16，p28.

37 DDESB, Technical Paper No. 16, Revision 4, Methodologies for Calculating Primary Fragment Characteristics, 2 August 2012.

來自接近爆炸源的結構（可能是建築物）或其他項目（可能是樹木，被炸成片段飛散），這些碎片有些可能較一級碎片來的大，且其初速也僅為每秒數十至數百公尺，飛散距離也遠較一級碎片為小。

美國火炸藥安全委員會（DDESB）曾針對一級碎片的危害做了相當大量的科學實證與理論研究³⁸，將彈藥與火炸藥爆炸後產生破片的特性區分為三種類型：強固型（Robust）、極度強固型（Extremely Heavy Cased）以及非強固型（Non-Robust），產生

此三種類型碎片之彈藥與火炸藥，摘列如表六所示；另就此三種類型碎片，依其裝藥之淨火炸藥量可產生爆炸後飛散之碎片最大水平距離（Maximum Fragment Distance-Horizontal, MFD-H）與碎片危害距離（Hazardous Fragment Distance, HFD），單位均為公尺（m），摘列如表七所示。

三、危害區分HD1.1類之危害效應

危害區分HD1.1～HD1.6類，其爆炸後所產生之危害效應各有不同，限於篇幅，本文僅就危害效應最烈的HD1.1類作介紹。

表六 三種類型破片之彈藥與火炸藥區分範例

強固型 (Robust)	極度強固型 (Extremely Heavy Cased)	非強固型 (Non-Robust)
M456式105公厘高爆榴彈	Mk14式16吋火箭	AN-M30A1式100 磅炸彈
M1式105公厘榴彈	Mk II型37公厘穿甲彈	M57式250磅炸彈
M933/M934式120公厘彈	Mk14式8吋加農彈	M66A2式2000磅炸彈
M107式155公厘彈		M56式81公厘迫砲彈
M114式240公厘彈		M15 式反坦克地雷
Mk35式5吋38倍彈		M28 式高爆槍榴彈

表七 淨火炸藥量與爆炸碎片飛散距離之關係

淨火炸藥量 (kg)	碎片最大水平距離 (m)			碎片危害距離 (m)		
	強固型	極度強固型	非強固型	強固型	極度強固型	非強固型
1	698	953	308	87	105	96
10	1012	1359	529	148	159	158
50	1241	1620	733	202	201	208
100	1342	1729	831	229	220	232
500	1586	1989	1080	306	272	305
1000	1700	2113	1193	347	299	349
3000	1896	2341	1372	425	351	447
5000	1998	2468	1454	469	380	510

38 同註37。

HD1.1類之彈藥/火炸藥在發生爆炸後，所產生的爆炸效應，除前述的爆炸超壓與一、二級碎片外，尚包括熱危害（Thermal Hazards）、地面衝擊波與彈坑（Groundshock and Cratering）³⁹。

一般而言，熱危害要比爆炸超壓與一、二級碎片所造成的危害來的小，相對來說，比起爆炸超壓與一、二級碎片對人體在瞬間造成的傷害，熱危害效應的時間比較長；雖然如此，若人體暴露於溫度超過70°C以上、無任何防護措施，則2秒內皮膚層即完全被破壞，因此，一旦發生HD1.1類爆炸後，人員不要試圖搶救。

熱危害對於建物的破壞效應，主要為爆炸燃燒使建物的部分或全部被燒毀，所要關注的是，火炸藥燃燒可能會過渡到更嚴重的爆轟反應（Detonation Reaction）。

HD1.1類爆炸後，除爆壓向外擴散傳遞之外，增殖向下的地面衝擊波亦為其顯著的爆炸特徵，且會在地面形成彈坑；地下化儲存設施（Underground Facilities）若發生HD1.1類爆炸時，地面衝擊波效應會將其覆蓋的地層

炸裂而彈射出爆炸碎片。

四、量距之分類

美軍將量距分為兩大類：內部距離（Internal Distances）與外部距離（External Distances），茲分述如後：

（一）內部距離

內部距離係用以規範軍方管轄儲存庫區內，火炸藥與火炸藥之間、火炸藥與其他設施間之最小需求距離，區分如下：

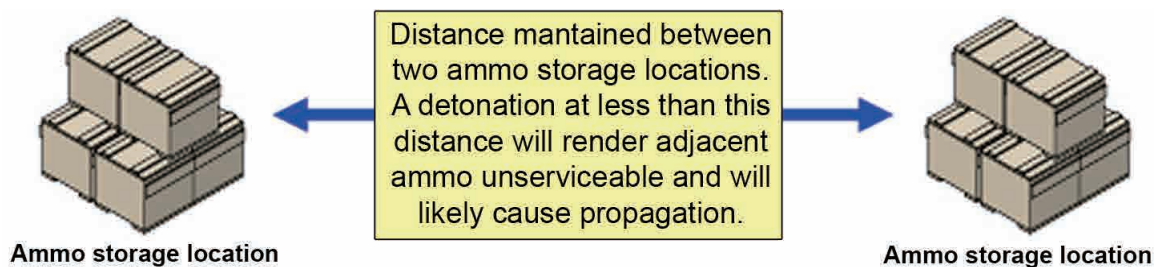
1. 庫間距離（Intermagazine Distance, IMD）

此距離係規範儲存區域內之兩個彈藥/火炸藥儲存位置間之距離，如圖五所示；庫間距離適用於彈藥基地以及作戰時開設之彈藥補給點（Ammunition Supply Point, ASP）。

2. 廠間距離（Intraline Distance, ILD）

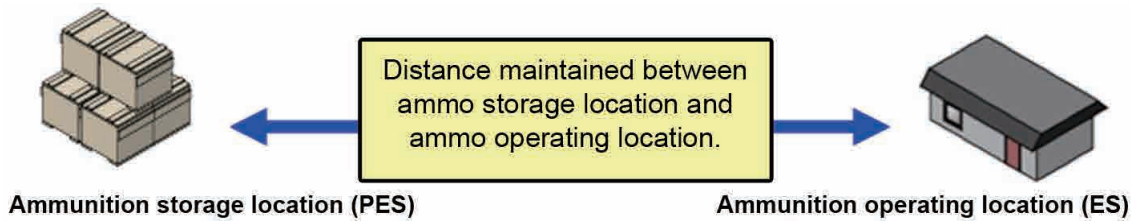
此距離係規範儲存區域內，某個彈藥儲存位置與其他彈藥作業區域之間的距離，如圖六所示；廠間距離適用於彈藥基地、作戰時開設之彈藥補給點（區隔彈藥堆儲與其他人員或補給設施）、生產火炸藥之軍工廠。

當庫間距離與廠間距離不足，或遭遇某些限制因素時，可使用擋牆（Barricades）作



圖五 庫間距離示意圖

39 同註16，pp.28-29.



圖六 廠間距離示意圖

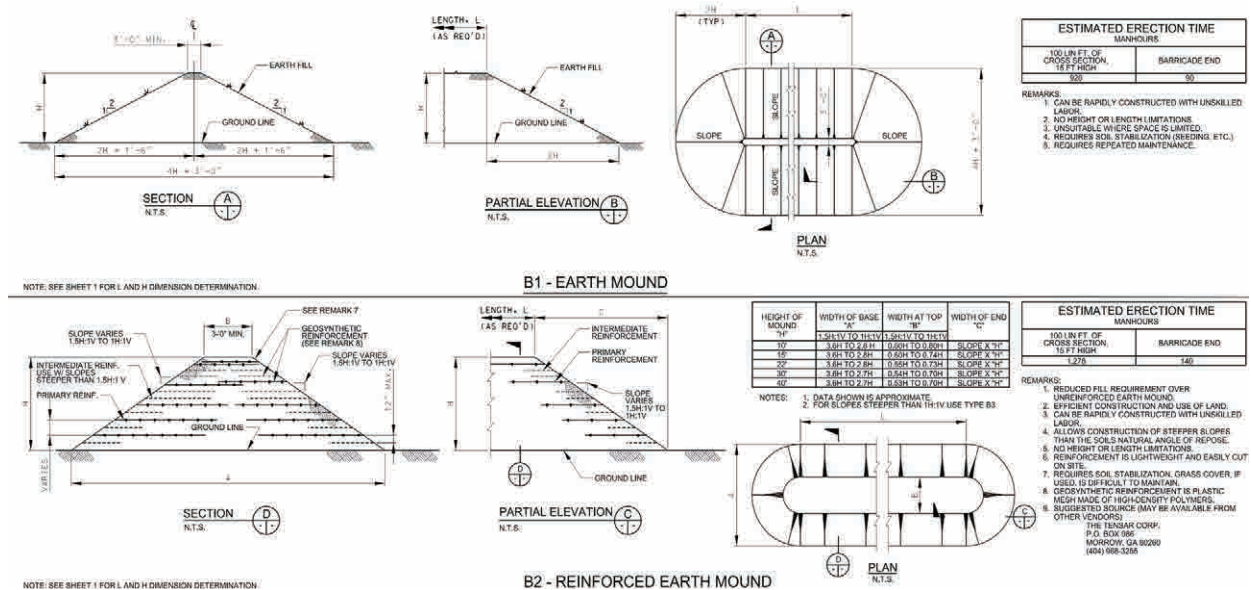
為防護設施。擋牆的功能，可防止爆炸時之低角度、高速度的碎片，以及減少非常接近擋牆附近的衝擊超壓，但對高角度之碎片或經爆炸後被拋射的彈藥，則並不具防護能力；若提供防護能力的擋牆在爆炸時被摧毀，則二級碎片可能從被摧毀的擋牆產生出來，這是在建造擋牆時必須考量承受的風險。

擋牆的制式規格，依儲存庫房類型、囤

儲火炸藥量多寡而有許多不同的型式，美國陸軍工兵團制訂了建造各型式擋牆的圖說⁴⁰，其中規定了建造擋牆應與庫房對應的高度、寬度、角度以及應使用之建築材料等，例舉如圖七所示；

(二)外部距離

外部距離係用以規範從爆炸源發生爆炸後，受到其爆炸效應影響之範圍所需之距



圖七 基本土丘型(B1)與強化土丘型(B2)擋牆之建造圖說

40 U.S. Army Engineering and Support Center, Definitive Drawings: Barricades, Revisions and Updates 6 May 2011.

離，亦即本文第二節中所述「由潛在爆炸位址至暴露位址之間的分隔距離」，區分如下：

1. 居住建物距離 (Inhabited Building Distance, IBD)

此距離之訂定，可提供人員與物資對爆炸超壓與一、二級碎片有較佳的防護作為；如圖八之示意。

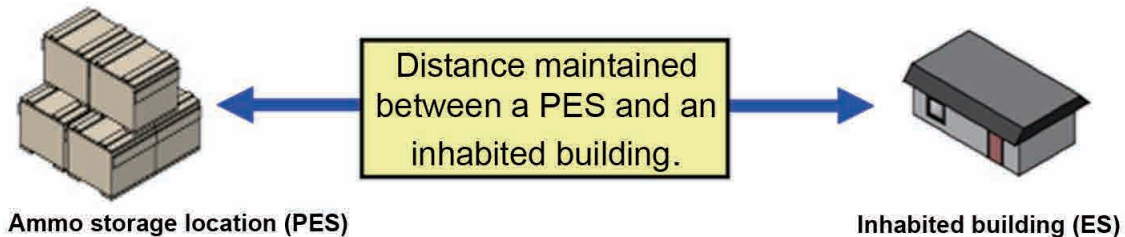
2. 公共交通道路距離 (Public Traffic Route Distance, PTRD)

公共交通道路，依美國國防部頒標

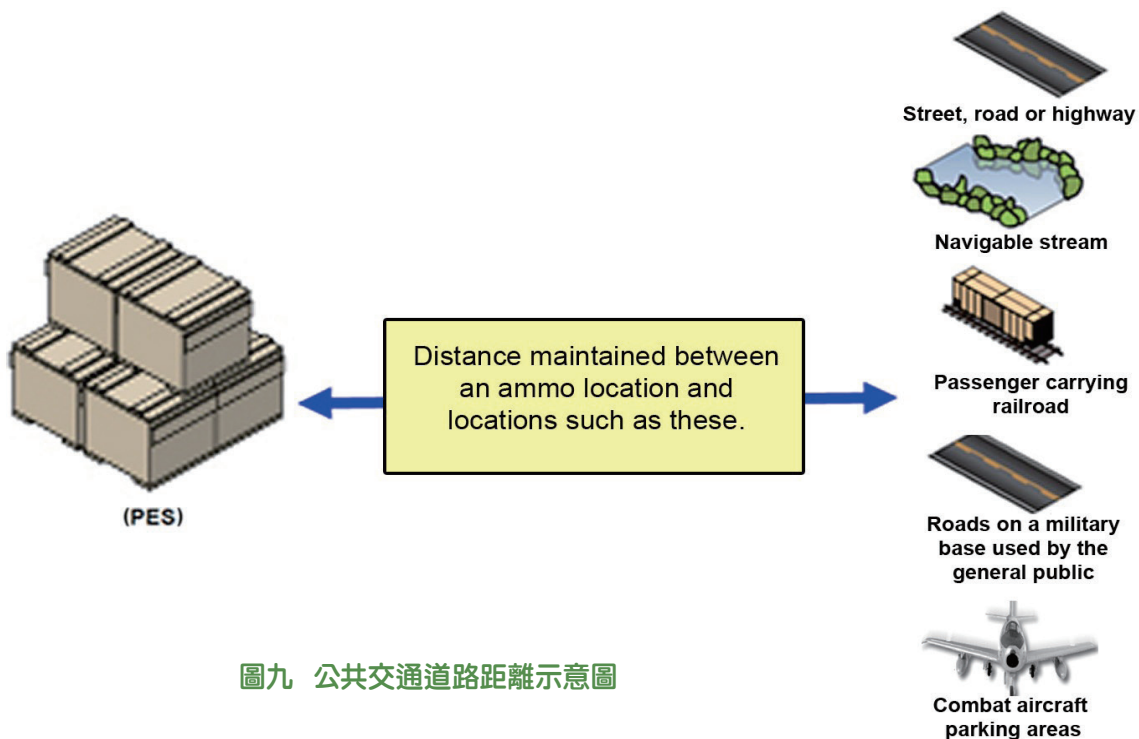
準，係指公共道路 (Public Highway)、通航水道 (Navigable Waterway)、客運鐵路 (Passenger Railway) 或其他供大眾使用之交通道路，包括公眾使用之通道而為軍事目的預定使用之道路、作戰航空器停放區域等。

公共交通道路距離，即是規範由潛在爆炸位址至上述道路間之最小分隔距離，如圖九所示。

公共交通道路距離，亦適用於大多數客運載具的停車區與開放式遊憩區，但不包括



圖八 居住建物距離示意圖



圖九 公共交通道路距離示意圖

這些區域的看臺或其他地方會出現的大量人員。

一般情形下，美軍將公共通道道路距離之計算，訂為居住建物距離的60%（亦即，PTRD = 60% IBD），究其原因，美軍係認為公共通道道路是一個動態的現象，依機率發生與風險後果考量，公共通道道路並不若居住建物一般，有經常性的人員停駐，因此，一旦發生爆炸影響至某條公共通道道路時，該道路內的流量可能不高，而遭遇被爆炸碎片或爆炸時隔內之爆壓所襲擊的車輛之機率並不高，以及若道路上的車輛果真被碎片或爆壓波及，其所造成的風險後果，也遠較居住建物的群聚危害為低。

PTRD = 60% IBD只是一個通則，實際的應用仍必須考量儲存庫房的火炸藥量與周邊環境的關係。

五、量距之應用

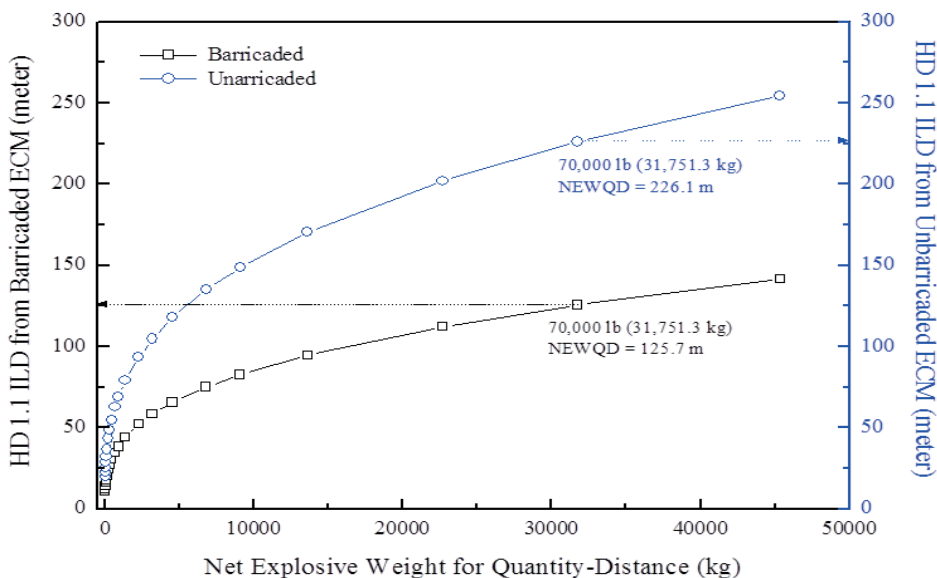
美國國防部與美軍重新修訂的準則中（參見註14及註16），已詳列HD1.1~1.6類量距的使用規範，且其準則文件均為公開資訊，國軍相關需求單位可至美國火炸藥安全委員會（DDESB, <http://www.ddesb.pentagon.mil/>）網站下載其最新版本，俾供修編國軍準則之使用依據。

本文僅就HD1.1類量距、儲存庫房型式為半地下化庫房（ECM）的部分，引介美軍準則中火炸藥安全量距的使用方式，如下：

若國軍某單位彈藥庫區某座半地下化庫房預定經常性屯儲7萬磅（3萬1751.3公斤）淨火炸藥量之彈藥，則其內部距離與外部距離之運用，如圖十～圖十二所示。

由圖十可知，某座半地下化庫房屯儲7萬磅（3萬1751.3公斤）淨火炸藥量的彈藥，與

庫區其他設施之廠間距離（ILD）在有擋牆防護的情形下，至少需間隔125.7公尺之距離；而在無擋牆防護的情形下，必須間隔至少226.1公尺。但是，這兩者（有擋牆及無擋牆）的距離是指從半地下化彈庫的前門處計算起；美軍的實證研究認為，半地下化彈庫的結構，受爆炸效應的影響，彈庫前門處是最脆



圖十 半地下化彈庫之廠間距離（ILD）（有擋牆/無擋牆）

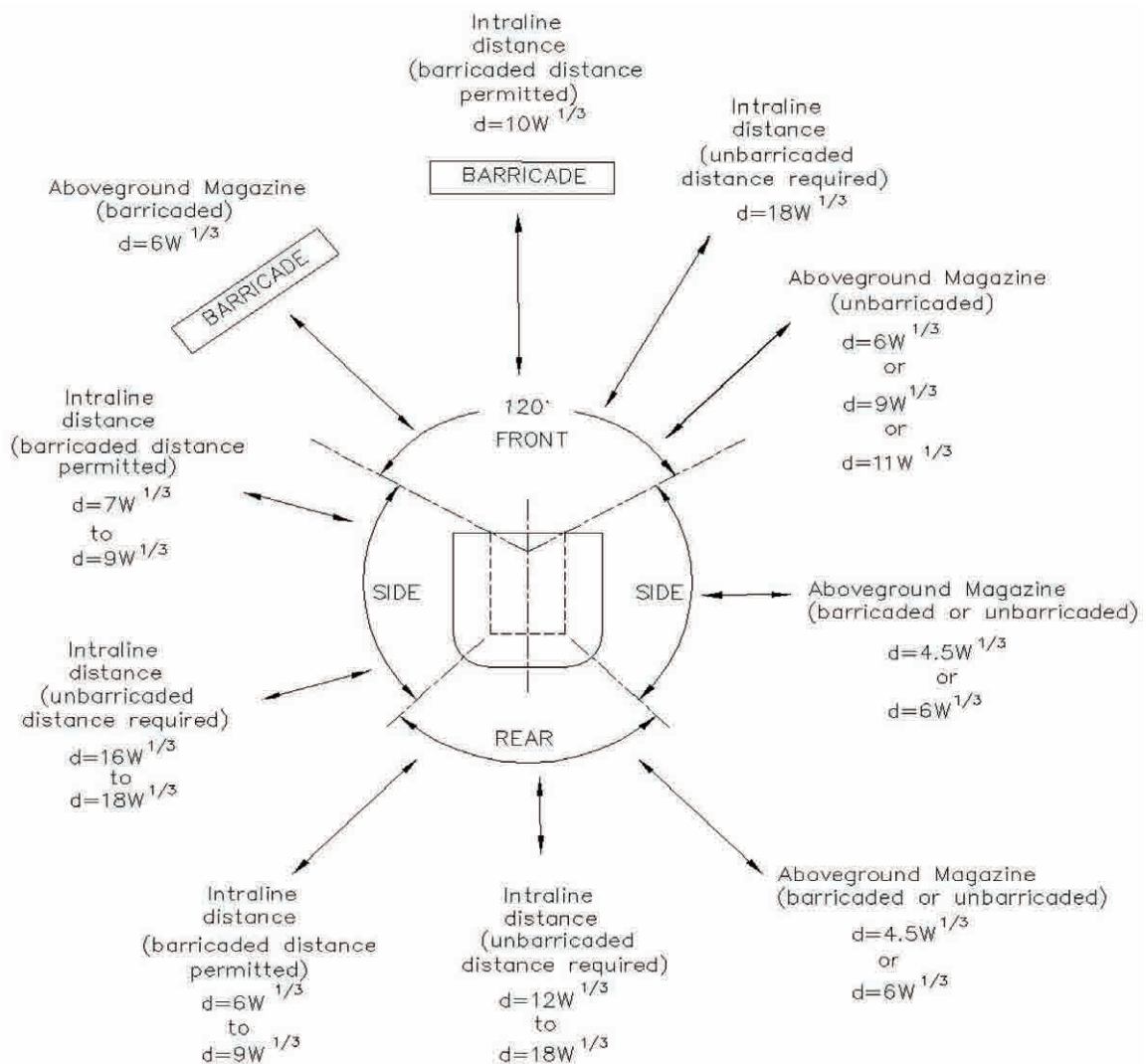
弱的部位，其次是彈庫的側邊，結構強度較強的是彈庫的後部，因此，在內部距離的計算上，必須區分彈庫的前、側、後等部位與其他庫區設施之間的距離，如圖十一所示。

圖十一顯示彈庫前、側、後等三個部位在有(無)擋牆情形下，與庫區其他設施距離之計算準據。

圖十一，以彈庫前部位(Front)為例，從

中心線張開扇型 120° 角範圍內，直線面對庫區其他設施且有擋牆防護情形下，廠間距離的計算公式為 $d=10W^{1/3}$ (d 為量距，單位為英尺； W 為淨火炸藥量，單位為磅；參數10，為比例化距離因子，即本文前述之 K_m 值，單位為 $\text{ft}/\text{lb}^{1/3}$)，則代入7萬磅(3萬1751.3公斤)，經單位轉換後，可得距離為125.7公尺，與圖十相符。

另，由圖十一，彈庫前部位(Front)左上



圖十一 半地下化彈庫之內部距離 (Internal Distances) 準據圖

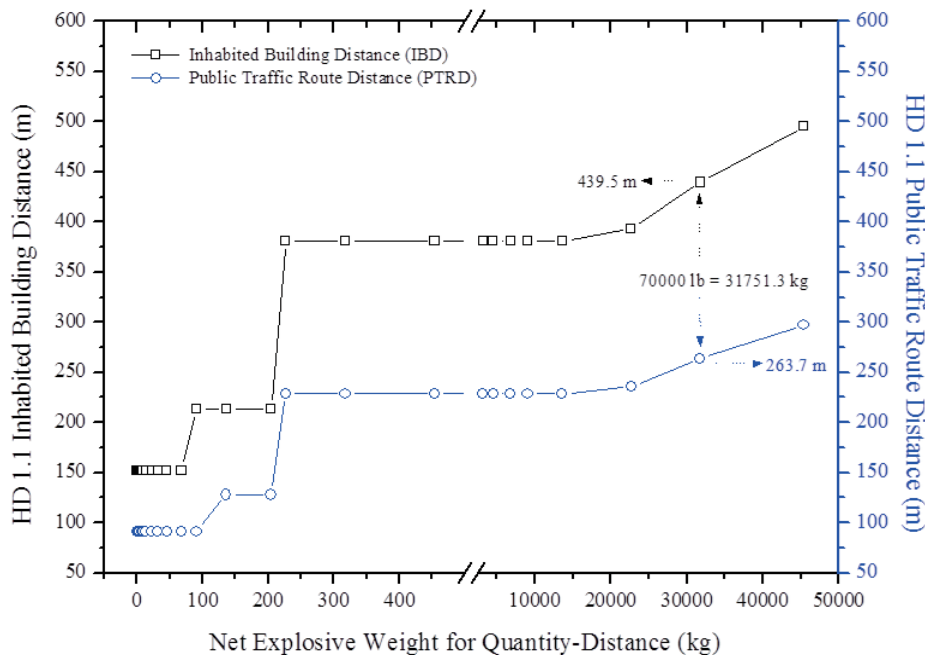
緣，例舉其在有擋牆防護情形下與庫區內某地面庫 (Aboveground Magazine) 距離之計算，則須採用 $d=6W^{1/3}$ 之計算公式。同理，由圖十一，彈庫後部位 (Rear)，在無擋牆防護需求情形下，與庫區其他設施之距離，採用 $d=12W^{1/3}$ 至 $d=18W^{1/3}$ 之計算公式 (Km 值的選擇從 12 至 18，視其風險評估接受程度而定)。

外部距離之計算，如圖十二所示。圖十二表示，若某半地下化彈庫屯儲 HD1.1 類彈藥之淨火炸藥量為 7 萬磅 (3 萬 1751.3 公斤)，則該彈庫與外部居住建物距離 (IBD) 以及公共交通道路距離 (PTRD)，分別為 439.5 公尺與 263.7 公尺。

圖十～圖十二為 HD1.1 類火炸藥量距之基本應用，但如果無法依此原則應用時，例如，在內部距離的考量上，庫區內的既有設施與

庫房屯儲的淨火炸藥量，經計算後距離明顯不足時，即必須考量是否應減量屯儲，疏遷過大的淨火炸藥量；或者，以建造擋牆方式區隔，減緩庫區內部距離不足的問題。

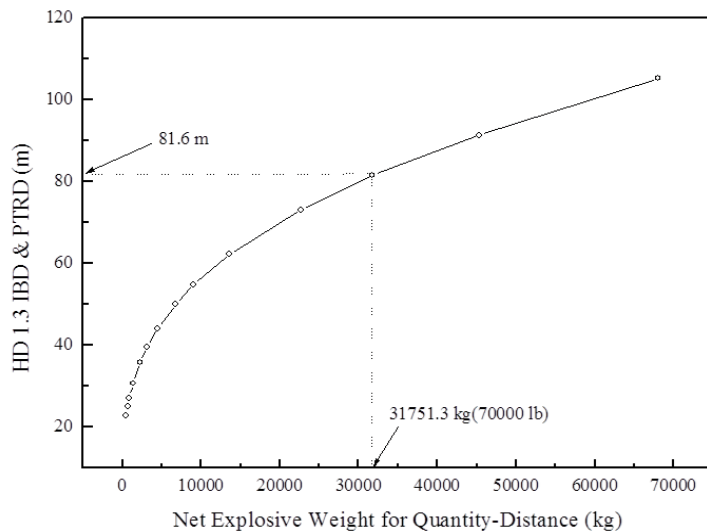
在外部距離的考量上，以屯儲 7 萬磅 (3 萬 1751.3 公斤) 淨火炸藥量為例，若居住建物量距 (IBD) 439.5 公尺範圍內即有部分民宅存在的情形，減量屯儲是必須優先考量的措施。然而，以圖十二顯示的情形，即使減量至 1 萬 5 千公斤以下之屯儲量，其在 227 公斤以上至 1 萬 5 千公斤間之屯量的距離要求，是維持在一個定值 (381 公尺)，則應如何做量距的研判？美軍提出了量距的設置原則：除非，無法判斷爆炸碎片的型態 (參見表六)，而該庫房的結構在發生爆炸後能有效阻止一級碎片的飛散，始可在豁免風險的條件下，降階適用



圖十二 半地下化彈庫應用HD1.1類外部距離圖

HD1.3類之量距 (圖十三)，否則，均仍應依HD1.1類火炸藥量距為計算基準。

由圖十三，在火炸藥危害區分為HD1.3類時，彈庫與外部居住建物距離 (IBD) 以及公共交通道路距離 (PTRD) 均為同一



圖十三 半地下化彈庫應用HD1.3類外部距離圖

距離，這是因為HD1.3類爆炸時的危害效應並不產生嚴重的超壓與強烈的脈衝；若原屬HD1.1類的庫房因外部建物距離（IBD）內已有民宅存在的事實，除非在確認該庫房的建築結構可承受HD1.1類爆炸之爆壓與碎片且有良好的防護設施（像是美軍定義的HPM⁴¹，或防護強度極佳的擋牆）情形下，可將外部距離由439.5公尺限縮至81.6公尺，否則，未經任何嚴謹的設施驗證與風險評估，後果將非常的嚴重。

參、結論

長期以來，國內社會環境對軍方多有輕鄙與不友善之態度，如何重建國人信心、獲

取民眾信任，必須在國軍專業領域上積極地自我提升、贏得國人的尊敬。

近年來，國軍在彈藥/火炸藥安全的工作上已做出相當大的努力，包括新竹滿湖彈庫購地案，南港、土城彈庫疏遷釋地案等，皆展現國軍回應民意與強調專業的立場。較令人憂心的是，國軍因實施募兵制在即，相關彈藥/火炸藥作業人力因精粹案而離退，造成經驗傳承上的斷層，且目前多數彈藥/火炸藥準則

長期沿用美軍舊版並未重新修編，實務作業上亦將陷入窒礙困境。國軍相關單位或可從尋求委外譯印美軍新版技令著手，並據以制定教育課程科目，延攬專業師資開辦短期班隊，實施大量的彈藥/火炸藥作業人員基礎訓練，以型塑國軍未來彈藥/火炸藥安全的專業典範。

作者簡介

林鵬舉上校，中正理工學院76年班，國防大學理工學院國防科學研究所應用化學組博士95年班，現任國防大學管理學院運籌管理學系專任助理教授。

41 High Performance Magazines(HPM), 譯為「高效能庫房」，指經特殊結構設計後建造之庫房，幾乎能完全防止爆炸時之爆壓、碎片以及火焰的傳播，請參見美國海軍設施工程指揮部之圖說，Naval Facilities Engineering Command, Standard High Performance Magazines: Preliminary Design, 3 July 2001.