

大理岩接觸爆炸試驗與準則驗證

作者／陳祺杰上尉

提 要

- 一、爆破教範為國軍爆破作業之重要參考準則，應用範圍廣泛，尤其近年來天災所引起的落石坍方事件，多委請工兵部隊進行處置，因此準則中有關岩石爆破的適用性及準確性，直接影響救援任務的遂行。
- 二、岩石爆破主要目的為分解岩石，續以施工機具進行清運，當塊石過大時則可採用二次爆破方式進行分解，其中以接觸爆炸方法的準備與處理速度最快，能符合救援的時效性。
- 三、在爆破教範中接觸爆炸的部份，僅提出岩石塊體直徑與炸藥量的關係，並未詳細說明適用的岩石強度範圍與破壞程度；而美軍 TM5-855-1 技術手冊雖提出炸藥量與破壞程度的關係，可以補足爆破教範的不足，然而其適用性有待求證。
- 四、在眾多岩石種類中，大理岩在強度與取得數量上能滿足本研究之目的，因此試驗時以大理岩作為試驗材料。而為了控制炸藥量，本研究採用 C-4 炸藥作為試驗用炸藥。試驗時將不同重量的球形 C-4 炸藥，放置於試體頂面引爆，藉此觀察試體破壞情形。
- 五、試驗結果發現，當炸藥量超過 50g 時，試體除了產生正面成坑外，會有沿著紋路或平行紋路形成貫穿破裂，或者是背面有大片剝落現象。各炸藥量預估值均大於試驗值，將預估值乘上折減係數後，可提高預估準確性。

關鍵字：二次爆破、接觸爆炸、大理岩

前 言

歷年來，台灣飽受天災的侵襲，救災往往受限於道路的搶修速度，尤其是山區落石坍方所造成的交通中斷，如橫貫公路或蘇花公路等，一般的公務機關無法以施工機械或人力排除，必須依賴國軍工兵部隊使用爆破來破壞岩石，俾利遂行搶通作業。爆破作業後，對於過大致機具無法進行清運之塊石，常施以二次爆破(Secondary Blasting)^[1]方式予以破壞。除救災外，此種技術亦常見於隧

註¹：Bhandari, S., Engineering Rock Blasting Operations, Published by A. A. Balkema, Rotterdam, USA, 1997, pp.

道、礦坑工程或礦場採石作業。二次爆破可再細分數個方式，其中接觸爆炸方式(即直接置炸藥於岩塊表面引爆)，所需準備工作最少、速度最快，運用得當效果立現。

現階段，接觸爆炸的相關資料，僅在 1998 年的美軍技術手冊 TM5-855-1^[2](以下簡稱 TM 手冊)及國軍爆破教範^[3](以下簡稱爆破教範)中略有提及，其餘文獻付之闕如。TM 手冊提出 TNT 炸藥作用下，中等強度岩石正面成坑的預估值，但未詳述背後疤落或破壞的誤差範圍。而爆破教範則列出炸藥量與塊石尺寸的關係，卻未說明破壞程度及適用的塊石種類。由於以上準則僅能概估破壞情形，有鑑於此，本研究將透過爆破試驗，驗證準則的準確性與適用性。試驗所採用之岩類，在研究目的、石材採購的合法性、成本、試驗尺寸、數量及均質性的全盤考量下，選用花蓮大理岩作為接觸爆炸試驗試體，本研究之成果可供國軍準則修編與救災應用之參考。

岩石爆破

一、岩石爆破定義

爆破是指利用爆藥爆炸所產生劇烈之爆發或高壓膨脹結果，破碎、壓實、疏鬆和切割物體的作業，最終目的在確保軍事任務順利達成，因此爆破是一種手段。而岩石爆破係指利用爆破方法，自岩床取得工程上所需之石料，或排除某地區之岩石（落石）。

二、岩石概說

台灣岩石種類繁多，依其形成與礦物組成的方式不同，可以分類火成岩(如花崗岩)、沉積岩(如砂岩)及變質岩(如大理岩)等三種。本研究所需試驗岩石其限制條件上，需要較高的平均強度及均質性，且試體須保持完整。目前台灣蘊藏量最多的岩石為砂岩及大理岩，就兩者的強度比較而言，大理岩的強度高於砂岩，且變異性較小；就取得的完整性與均質性而言，砂岩由於較易受風化作用且質地較脆，因此大理岩優於砂岩。綜合以上考量，本研究將採用大理岩作為試驗用岩石，如圖1。一般而言，必須先對岩體鑽心取樣(如圖2)，再進行基本力學試驗才能獲得岩石的強度，由於台灣大理岩的相關研究相當豐富，因此本研究將透過文獻回顧方式來了解大理岩的基本性質。



圖 1 大理岩

資料來源：本研究整理

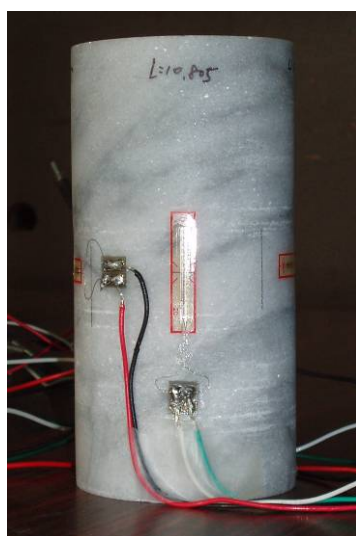


圖 2 抗壓試驗試體

資料來源：本研究整理

三、二次爆破

岩石爆破後所產生的過大塊石，可使用二次爆破技術處理至預期尺寸。1997年Bhandari提出了3種主要的方法，即接觸爆炸(Plaster Shooting)、塊石鑽炸(Block Holing)及趾部爆炸(Toe Blasting)，如圖3。

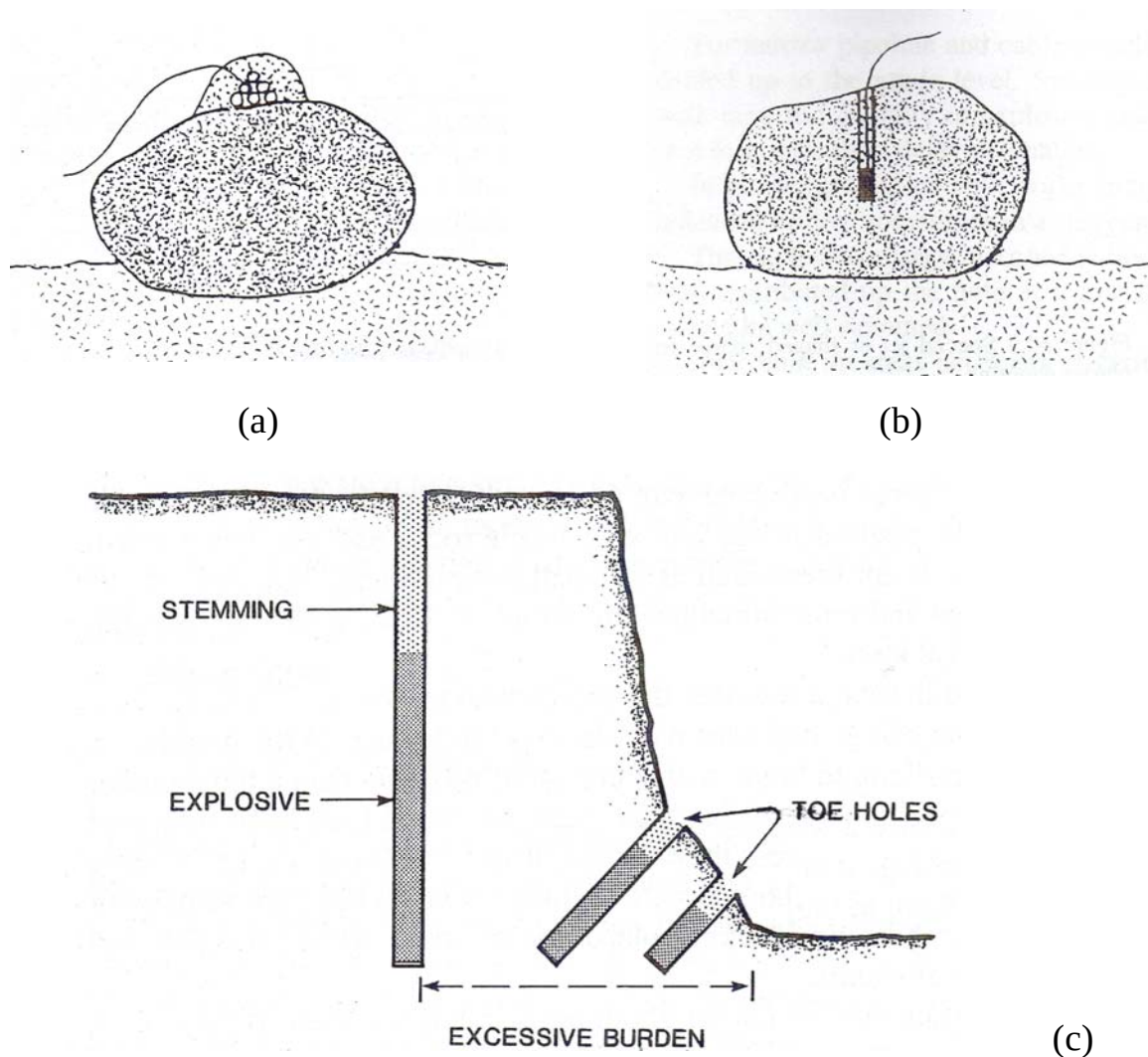


圖 3 二次爆破(a)接觸爆炸、(b)塊石鑽炸及(c)址部爆炸

資料來源： Bhandari, S., Engineering Rock Blasting Operations, Published by A.A.Balkema, Rotterdam, USA, 1997, pp. 274-276.

接觸爆炸又稱為Mud Capping，爆破教範稱為土頂法，大陸稱為泥帽工法、糊炮爆破。作業時，直接將炸藥置於塊石的表面或凹陷處，或於炸藥上覆以泥、濕黏土、砂及其他物質，即可進行引爆。接觸爆炸可使用的炸藥種類很多，而且不侷限形狀，也可使用錐形裝藥(Shaped Charge)來破壞塊石(如圖4)。在同一種炸藥及藥量下，圓形塊石由於厚度較大，比厚度薄、面積大之盤狀塊石爆破效果差；對於預先承受應力(如岩層中的圍壓)或外界力量(如爆炸)的塊石，比自然裸露的塊石更容易破碎。在炸藥的選擇上，高爆速炸藥引發的應力波與形成的破裂效果，優於低爆速炸藥。在岩塊尺寸與炸藥量的關係方面，爆破教範針對不同的塊體直徑，建議TNT、第奈米特(Dynamite)的炸藥量範圍在1至12磅之間，如表1。

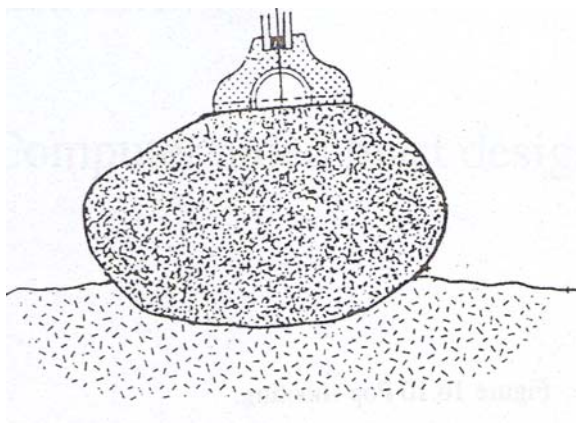


圖 4 使用錐形裝藥進行塊石爆破

資料來源： Bhandari, S., Engineering Rock Blasting Operations, Published by A.A.Balkema, Rotterdam, USA, 1997, pp. 274.

表 1 爆破規範中岩石二次爆破作業建議炸藥量

爆 藥		TNT					第 奈 米 特 (Dynamite)				
塊石直徑 (英呎)		3/2	2	3	4	5	3/2	2	3	4	5
炸藥量 (磅)	土頂法	1	3/2	2	7/2	6	2	3	4	7	12
	閉塞法	1/8	1/8	1/4	3/8	1/2	1/4	1/4	1/2	3/4	1

資料來源：鄭冠豪，高得乾，王幸南，《爆破教範》(桃園：國防部陸軍司令部，2005 年 8 月)，頁 4-192。

塊石鑽炸在爆破教範中稱為閉塞法，顧名思義就是對塊石進行鑽孔埋藥，再以泥或濕土填塞後引爆。相較於接觸爆炸，具有炸藥量少及噪音較小等優點，然準備工作費時為其主要缺點。在進行塊石鑽炸時，Bhandari建議鑽洞深度為塊石厚度的0.25~0.5倍；當塊石尺寸較大時，則視現況增加鑽孔數量及孔深(0.5~0.9倍厚度)，炸藥量可參考爆破教範建議取1/8至1磅之間(如表1)。址部爆炸主要配合控制爆炸，在坡址處進行爆破以便切除多餘岩塊。

除了前列所提方法外，尚有爆破教範所提之蛇孔法，主要用於爆破部分岩體埋藏於地面下之塊石。作業時，於塊石下方鑽孔埋藥，再用濕土或泥土填塞後引爆，如圖5。



圖 5 蛇孔法

資料來源：鄭冠豪，高得乾，王幸南，《爆破教範》(桃園：國防部陸軍司令部，2005 年 3 月)，頁 4-191。

接觸爆炸作業易肇生危安事件，因此做好安全防護相當重要，2005年李得春及李金龍^[4]提出下列實爆作業注意事項：(1)藥包應盡量放於塊石的中央或凹陷處；(2)覆土層應高於藥包的高度，最好用緻密的黏土作為覆蓋物；(3)安全距離應達200m以上，做好警戒工作，防止飛石傷害；(4)爆破效果不佳或塊石太大時，應盡量採用錐形裝藥方式。

四、接觸爆炸破壞程度評估法

TM 手冊中的圖 8-44，描述了中等強度岩石 (Medium-Strength Rock, 25~49MPa)之縮尺爆炸深度與縮尺坑洞深度(或直徑)的關係(如圖6)。其中，炸藥種類為TNT，縮尺爆炸深度由爆炸中心到岩石表面距離除以1/3次方的藥重($m/kg^{1/3}$)計算獲得。欲使用美軍規範進行評估，必須先了解炸點與岩石表面的關係。當炸點位於岩石表面上方(接近地面)時，此時的爆炸行為稱為低空爆炸(Low Airburst)，爆炸中心到岩石表面距離以爆炸高度(HOB, Height of Burst)表示(如圖7)；在岩石表面以下則以爆炸深度(DOB, Depth of Burst)表示。假設炸藥的形狀為球形，當HOB等於炸藥半徑時炸藥底面與岩石表面接觸，本研究將該型態視同接觸爆炸(如圖8)，依此法預測岩石正面成坑的直徑與深度。本規範也可用於評估純混凝土與鋼筋混凝土的破壞程度，適用於抗壓強度範圍在14至35MPa的一般混凝土。

註⁴：李得春，李金龍，〈井下深孔爆破產生大塊原因及處理〉《有色金屬期刊》（中國），第 57 卷第 5 期，出版社，2005 年 9 月，頁 12-13。

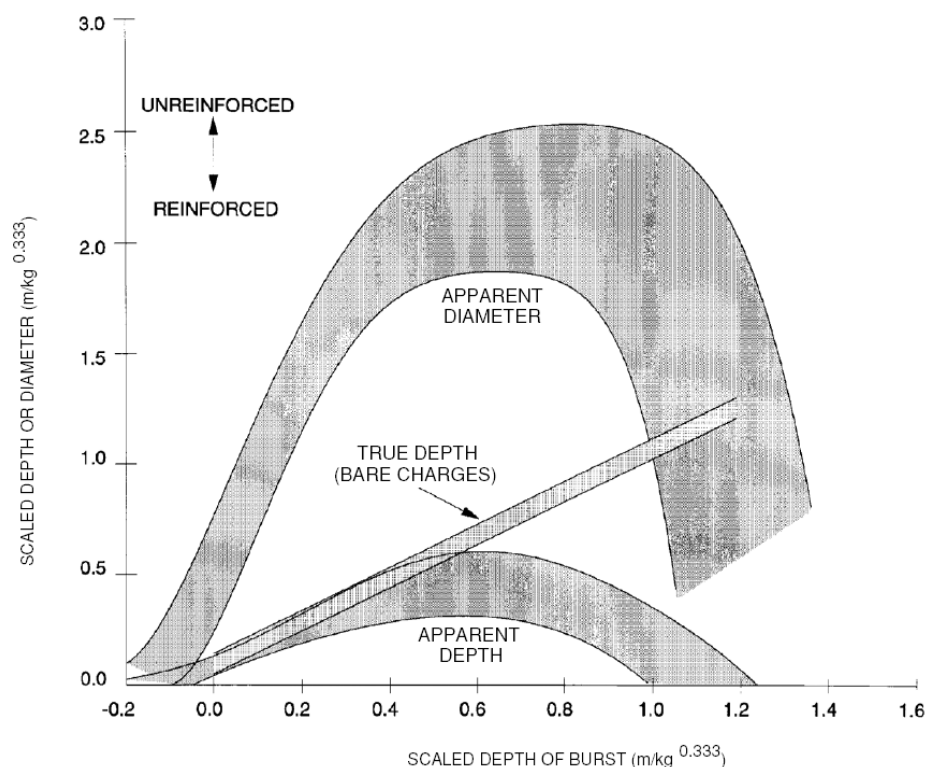


圖 6 評估爆炸對混凝土或岩石所產生之坑洞尺寸圖

資料來源：Department of the Army, Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998, pp. 8-52.

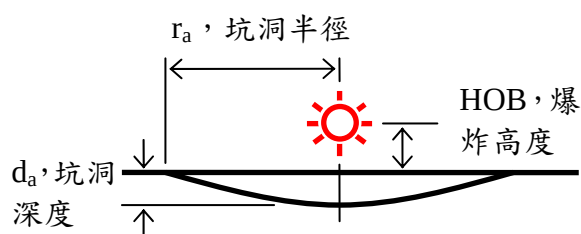


圖 7 低空爆炸

資料來源：Department of the Army, Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998, pp. 8-49.

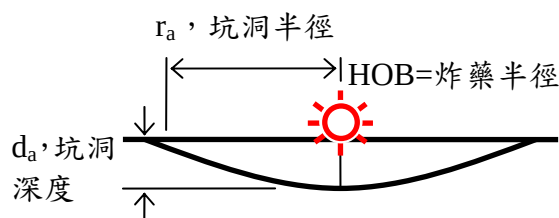


圖 8 接觸爆炸

資料來源：本研究整理

五、現有大理岩基礎試驗與爆炸試驗成果

基礎試驗主要目的除了掌握岩石的基本力學性質外，並據以判定強度分類，俾利與規範預估值進行比較。現階段，已有多位學者對花蓮大理岩進行過探討。1992年鄭寶山^[5]以傳統的三軸壓力試驗探討圍壓下的力學行為，並求得在

註⁵：鄭寶山，《花蓮大理岩在圍壓下力學行為之研究》（台北：台灣大學土木工程學研究所碩士論文，1992年6月），頁40-41。

不同圍壓下的降伏強度、單壓強度、殘餘強度、破壞強度、變形模數、柏松比及軸向應變等大理岩參數。1994年施國欽、李彪^[6]等人對花蓮天祥、和平、崇德及宜蘭觀音等地區的大理岩進行過單壓試驗。1996年劉全偉^[7]將大理岩紋理視為葉理面，求得與水平面不同夾角(Ψ)下的彈性模數、柏松比及張力強度等，發現張力強度有隨著夾角改變的趨勢。2000年蕭永成^[8]探討溫度對強度的影響，經實驗得知在同樣圍壓下溫度升高將造成強度減弱，攝氏300度以內對尖峰後應力-應變曲線影響不大。諸位學者試驗成果整理於表2，並附錄TM手冊中第四章提供之大理岩單壓強度範圍一同納入比較。由文獻值依強度分類，花蓮大理岩介於中強岩及強岩(Strong Rock, 49~98MPa)之間，且單壓及張力強度有明顯差異，最大變異係數高達32%，主要的原因在於變質過程中，原有岩類成分含量、環境溫度、壓力的不同，導致變質後強度有所差異。在爆炸試驗方面，僅有2006年蘇義松^[9]以鑽孔埋藥方式，探討了花蓮大理岩應用圓錐形聚能射流與傳統控制爆破方法的差異，尚未有接觸爆炸相關研究。

表 2 台灣花蓮大理岩前人基礎試驗成果

項 目	單壓強度(MPa)			張力強度(MPa)		柏松比
作 者	鄺寶山	施國欽	TM手冊	劉全偉	蕭永成	鄺寶山
實 驗 組 數	7	16	-	9	18	5
最 大 值	70.05	89.37	75.84	10.24	11.01	0.32
最 小 值	55.31	31.59	56.54	7.13	4.85	0.29
平 均 值	63.98	66.15	-	9.06	6.85	0.31
變異係數(%)	7.95	20.23	-	10.82	32.04	9.22

資料來源：本研究整理

六、大理岩正面成坑概估成果

由於大理岩強度介於中強岩及強岩之間，涵蓋了準則適用範圍，因此以TM手冊推估破壞範圍，雖結果較趨於保守，仍可作為試驗值的比較參考。透過規

註⁶：施國欽，李彪，〈台灣地區沉積岩單壓強度初步研究〉《1994年岩盤工程研討會論文集》，1994年，頁219-228。

註⁷：劉全偉，《溫度與壓力對花蓮大理岩力學行為之影響研究》（台北：台灣工業技術學院營建工程技術研究所碩士論文，1996年6月），頁40。

註⁸：蕭永成，《異向性大理岩之力學性質研究》（台北：台北科技大學材料及資源工程系研究所碩士論文，2000年6月），頁41、61。

註⁹：蘇義松，《聚能射流應用於岩石控制爆破之研究》（台南：國立成功大學博士論文，2006年6月），頁3。

範推算出不同的C-4炸藥量下，正面成坑直徑與深度如表3。

表 3 預估不同 C-4 炸藥量下大理岩正面成坑直徑與深度

炸 藥 量 (g)	50	60	65	70	75	100	150
DOB(以炸藥半徑計算) (cm)	1.95	2.08	2.13	2.19	2.24	2.46	2.82
坑 洞 直 徑 (cm)	25.6	27.2	28	28.6	29.3	32.3	36.9
坑 洞 深 度 (cm)	4.5	4.7	4.9	5	5.1	5.6	6.4

資料來源：本研究整理

接觸爆炸試驗規劃

試驗目的在求不同 C-4 炸藥量下大理岩正面成坑情形，以驗證準則正確性。試驗時，同時量測試體距炸源 100cm 處的爆壓值，以了解爆炸時試體周圍的實際爆壓，供人員機具位置安全性之參考。爆炸用試體共有 14 個，其中 9 個將以 3 個確定炸藥量、每組 3 個試體進行接觸爆炸，其他為測試及預備用試體，配置如圖 9。

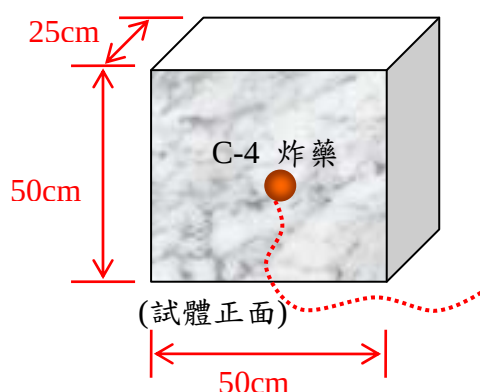


圖 9 C-4 炸藥位置圖

資料來源：本研究整理

一、爆炸試驗用試體

爆炸試驗使用14塊、50×50×25cm之大理岩試體，編號以M50C4NO1方式表示，其中M為大理岩(Marble)，50C4指試驗藥量50g的C-4炸藥，NO1為第1個試體；另外，編號為test開頭則代表測試用試體。

二、炸藥及引爆裝置

本研究所使用之炸藥為C-4炸藥，為一種白色柔軟、敏感性低、威力大之高速爆藥(爆炸速度8530m/s)，易塑成各種形狀。試驗用炸藥，從國軍M5A1藥包(如

圖10)拆解後，依規劃重量及直徑大小揉成球形炸藥。引爆裝置採用美造J2測試電雷管(如圖11)，使用時需避免靜電以防引爆。在未試驗時，須特別注意電雷管不可與爆藥同置一處，以免發生意外。



(a)



(b)

圖 10 C-4 炸藥(a)原 M5A1 藥包(b)拆解揉成 100g 球型炸藥

資料來源：本研究整理



圖 11 美造 J2 測試電雷管

資料來源：本研究整理

三、爆炸試驗量測儀器

採用美國PCB公司(PCB Piezotronics, Inc.)出品的137A21及137A23自由場爆壓計(如圖12)、鋼捲尺及游標卡尺進行試驗量測。自由場爆壓計長40.6cm、外型為一筆狀金屬棒，感測器約位於金屬棒1/3處。量測時將尖端正對爆源，感測器從側向量測到入射壓Pso(Side-on Overpressure)。



圖 12 爆壓計(137A20 系列)

資料來源：本研究整理

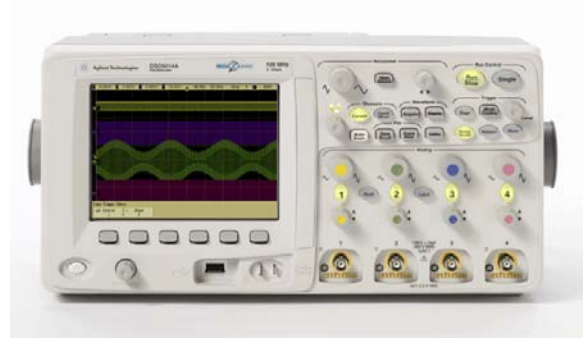


圖 13 示波器(安捷倫 5000 系列)

資料來源：本研究整理

爆壓計使用美國安捷倫科技股份有限公司(Agilent Technologies, Inc.)出品2通道5012A及4通道5014A示波器進行訊號擷取，取樣率(Sampling Rate)最高可達2GHz，本研究設定10MHz進行擷取；示波器可進行數位儲存(如圖13)。

四、爆炸試驗用試體架

為了便於觀察試體背面破裂情形，本研究使用鐵製試體架將試體托高來進行試驗(如圖14)。鐵架透過不銹鋼釘牢固於地面，大理岩放置後，經調整壓條固定好，即完成了垂直方向(Z向)束制。

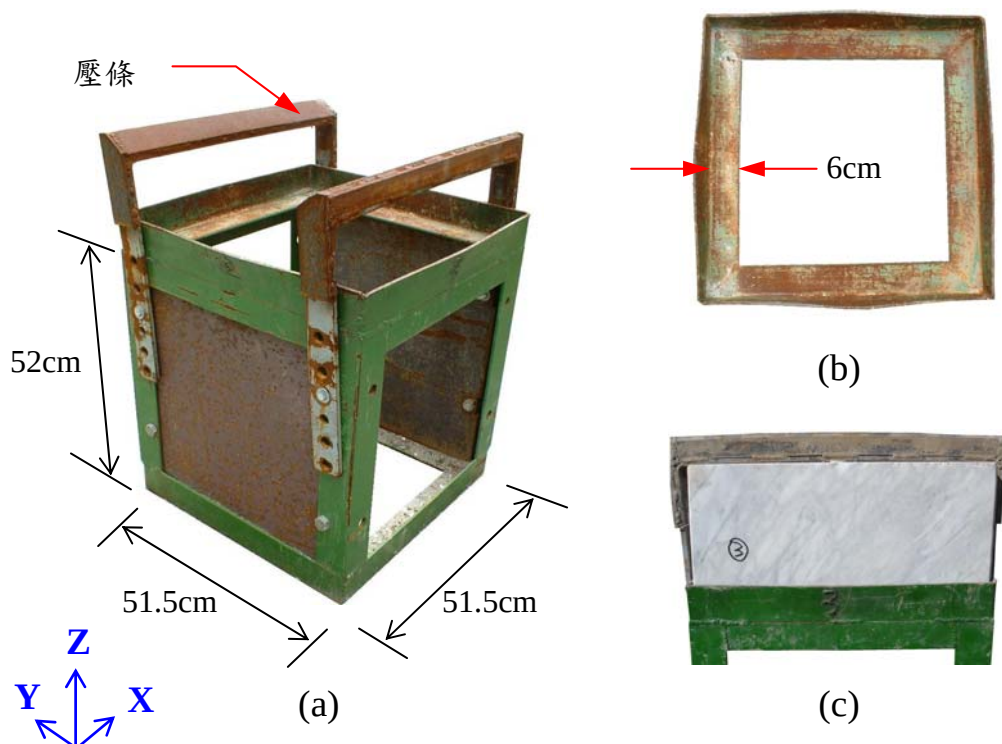


圖 14 試體架(a)規格尺寸(b)試體與架子的接觸面(c)大理岩放置情形

資料來源：本研究整理

五、試體破壞程度紀錄方式

爆炸試驗所形成之坑洞，以平行試體縱、橫軸方式，使用鋼捲尺及游標卡尺量測縱、橫向長度及深度(如圖15)，同時進行描圖紙進行描繪(如圖16)及照片拍攝，破壞範圍透過數位化處理，可換算成等值的坑洞直徑，提供比較參考。另外，因為大理岩試體不易搬運，對坑洞灌注矽膠進行翻模作業(如圖17)，方便後續檢核。



圖 15 使用游標卡尺量測坑洞尺寸
資料來源：本研究整理



圖 16 使用描圖紙描繪坑洞形狀
資料來源：本研究整理



圖 17 使用矽膠對正面成坑進行翻模
資料來源：本研究整理

六、實爆試驗場地與設備配置

本研究選定國軍旗山彈藥庫內廢彈燒爆燬場(如圖18)，進行接觸爆炸試驗。該場地地處偏僻、腹地廣大，相關火具控制、爆炸防護等設備均相當完善，且由未爆彈處理小組人員負責點火相關事宜，能符合各項試驗需求。自由場爆壓

計架設時與炸藥等高，並指向炸藥中心，感測器至炸藥中心距離1m，設備配置如圖19。

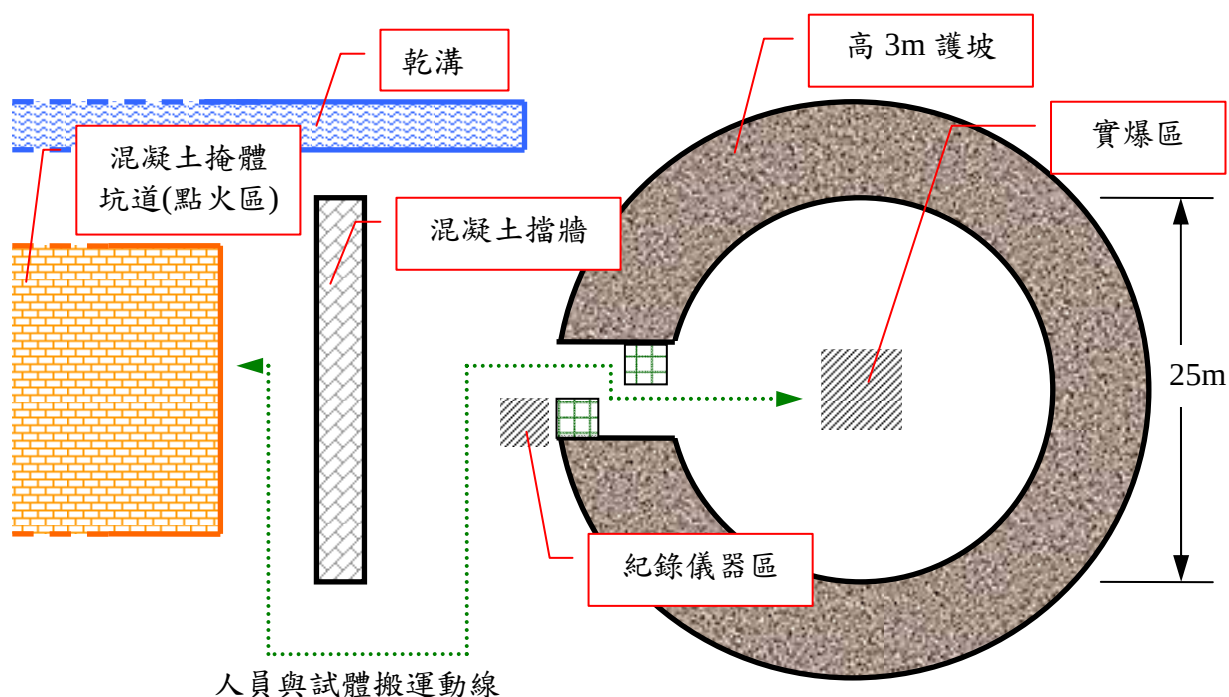


圖 18 實爆試驗場地(燒爆燬場)配置平面示意圖

資料來源：本研究整理

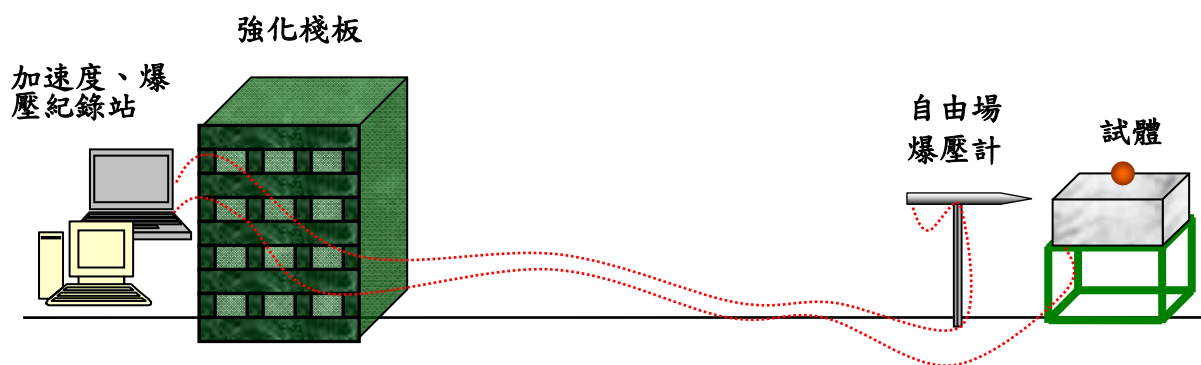


圖 19 接觸爆炸量測設備配置立面示意圖

資料來源：本研究整理

試驗結果

一、試體破壞情形

爆炸試驗一開始以150g炸藥量進行測試，發現試體循著紋路方向產生貫穿破裂(如圖20)，遂將炸藥量縮減為100g，結果相同(如圖21)。當炸藥量調降至50g，試體在維持完整形狀下，僅發生正面成坑(如圖22)現象。因此，以50g炸藥量作

為基準而逐次提升(65g及75g)，發現75g炸藥量下試體背面有整片剝落情形(如圖23)，遂訂定50g、60g及70g作為試驗炸藥量，每種炸藥量進行3組試驗。

試驗後發現，除了50g炸藥量可在試體保持完整的情況下形成正面成坑外，藥量提升則容易發生試體背後大片剝落或劈裂等現象，從大部分破裂的試體可觀察到，破裂的方向大致與試體的紋路成平行，如同陳其瑞^[10]所指出紋路屬於弱面，因此可能在爆炸力的作用下導致受拉開裂。另外，正面成坑的直徑並沒有隨著炸藥量提升而有明顯增加的趨勢，可能的原因在於試驗的炸藥量增加幅度不大，或是能量被貫穿裂縫吸收，需要後續進一步的研究探討。各炸藥量的試驗結果均詳列於表4。



圖 20 150gC-4 炸藥接觸爆炸下大理岩試體破裂情形

資料來源：本研究整理

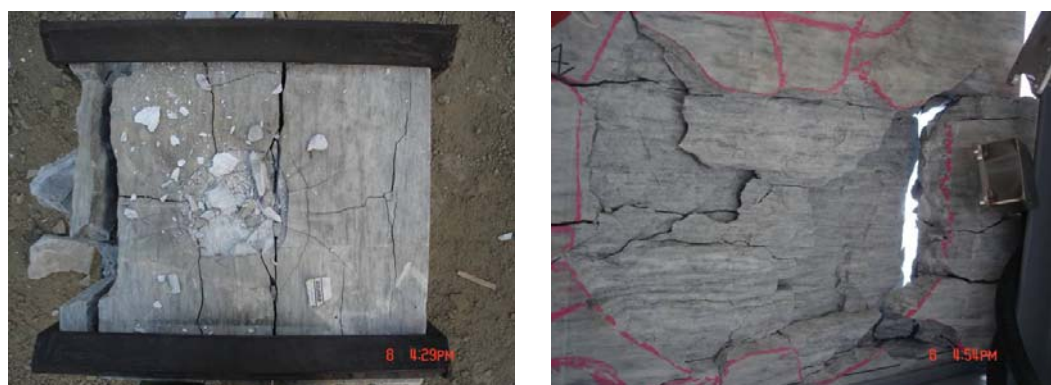


圖 21 100gC-4 炸藥接觸爆炸下大理岩試體破裂情形

資料來源：本研究整理

註¹⁰：陳其瑞，《台灣的大理石》（台灣：經濟部中央地質調查所，1996 年），頁 31。



圖 22 50gC-4 炸藥接觸爆炸下大理岩試體破裂情形

資料來源：本研究整理



圖 23 75gC-4 炸藥接觸爆炸下大理岩試體背面大片剝落情形

資料來源：本研究整理

表 4 大理岩接觸爆炸試驗成果紀錄表

編號	炸藥量 (g)	橫向成 坑直徑 (cm)	縱向成 坑直徑 (cm)	平均成 坑直徑 (cm)	等值成 坑直徑 (cm)	坑洞 深度 (cm)	開裂 情形
test1	150	17	13	15	16.16	1.67	破裂
test2	100	16	15.5	15.75	15.76	1.36	破裂
test3	50	16	17.5	16.75	16.38	0.69	細紋
M65C4NO1	65	14	15.5	14.75	14.74	1.13	完整
M75C5NO1	75	22	17	19.5	18.29	1.69	破裂
M50C4NO1	50	17	20	18.5	17.74	1.215	細紋
M50C4NO2	50	16.5	16.5	16.5	17.51	1.42	裂紋
M50C4NO3	50	11.7	18.5	15.1	14.97	1.17	完整
M60C4NO1	60	6	5	5.5	4.71	0.28	完整
M60C4NO2	60	22.5	20.5	21.5	21.91	2.48	破裂
M60C4NO3	60	19.5	21.5	20.5	18.42	1.91	破裂
M70C4NO1	70	16	19.5	17.75	17.55	1.375	裂紋
M70C4NO2	70	16	15.5	15.75	16.52	1.36	破裂
M70C4NO3	70	21.5	19.5	20.5	19.29	1.89	破裂

資料來源：本研究整理

50g、60g及70g炸藥量分別形成的平均成坑直徑為16.7、15.8及18cm。其中，以50g炸藥量的變異性較低，為7.2%。而50g、60g及70g炸藥量分別形成的深度為1.1、1.6及1.5cm。其中，以70g炸藥量的變異性較低，為16%。試驗結果以60g炸藥量的變異係數最高，達59.9%，原因在於M60C4NO1試體的強度可能較高以致爆炸後坑洞尺寸太小，是故變異係數提高。變異性分析如表5。

表 5 不同炸藥量下表面成坑平均直徑與深度變異性分析

量 測 項 目	平均成坑直徑			成坑深度		
炸 藥 量 (g)	50	60	70	50	60	70
組 數	4	3	3	4	3	3
最 大 值 (cm)	18.5	21.5	20.5	1.42	2.48	1.89
最 小 值 (cm)	15.1	5.5	15.75	0.69	0.28	1.36
平 均 值 (cm)	16.7	15.8	18.0	1.1	1.6	1.5
標 準 差 (cm)	1.2	7.3	1.9	0.3	0.9	0.2
變 異 係 數 (%)	7.2	46.2	10.8	23.8	59.9	16.0

資料來源：本研究整理

以鋼捲尺量測所得之平均直徑與等值直徑比較，發現差異在-5.17%以內，如表6，因此可以得知以平行縱、橫軸量測坑洞直徑方式，即可得到具代表性的數據，後續將採用等值坑洞直徑進行比較與驗證。

表 6 大理岩接觸爆炸下正面成坑平均直徑與等值直徑比較表

炸 藥 量 (g)	50	60	70
平均坑洞直徑 (cm)	16.7	15.8	18.0
等值坑洞直徑 (cm)	16.65	15	17.8
差 異 (%)	-0.37	-5.17	-1.18

資料來源：本研究整理

本研究結果與TM手冊比較下(如表7)，發現正面成坑直徑與深度預估值均大於試驗值，差異分別在50%、200%以上(如圖24)，預估值較為保守(如圖25、26)。可能的原因在於TM手冊的岩類為中強岩，低於大理岩強度，因此預估值大於試驗值是合理的。另外，將預估值除上試驗值，可得到不同炸藥量下成坑直徑與深度的折減係數(如表8)，本研究取其中最大值(即0.65與0.34)，作為統一的折減係數，以避免發生預估值小於試驗值情形。預估值透過折減，成坑直徑與深度的差異可降至12%及39%以下，獲得較準確之結果。

表 7 大理岩接觸爆炸下正面成坑預估值與試驗結果誤差比較表

量 測 項 目	成坑直徑			成坑深度		
炸 藥 量 (g)	50	60	70	50	60	70
預 估 值 (cm)	25.6	27.2	28.6	4.5	4.7	5
試 驗 值 (cm)	16.7	15.8	18.0	1.1	1.6	1.5
差 異 (%)	53	72	59	300	202	224

資料來源：本研究整理

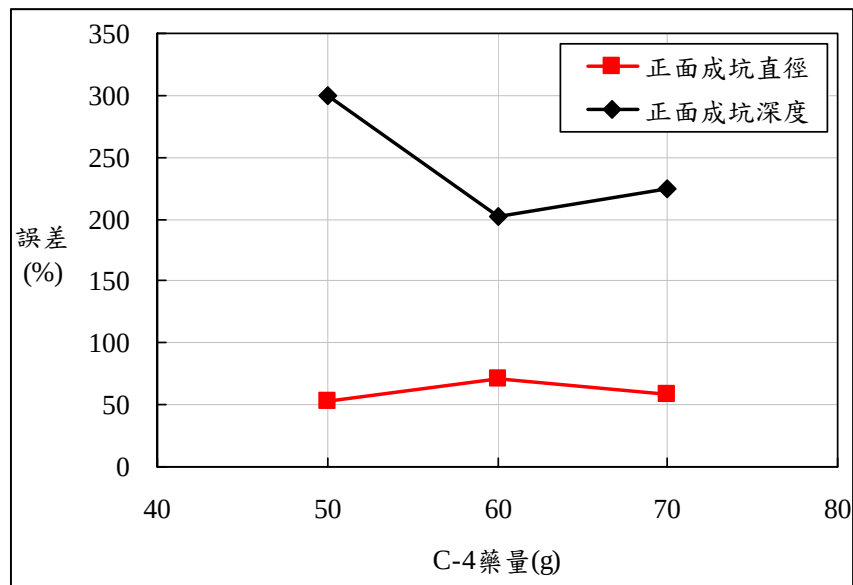


圖 24 大理岩接觸爆炸下正面坑洞預估值與試驗結果誤差比較圖

資料來源：本研究整理

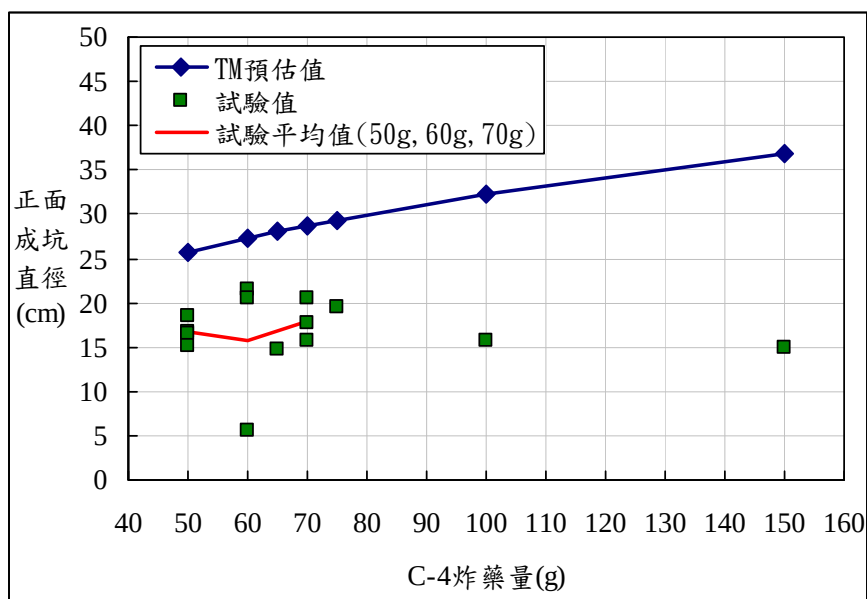


圖 25 大理岩在不同炸藥量下正面成坑直徑預估值與試驗值比較情形

資料來源：本研究整理

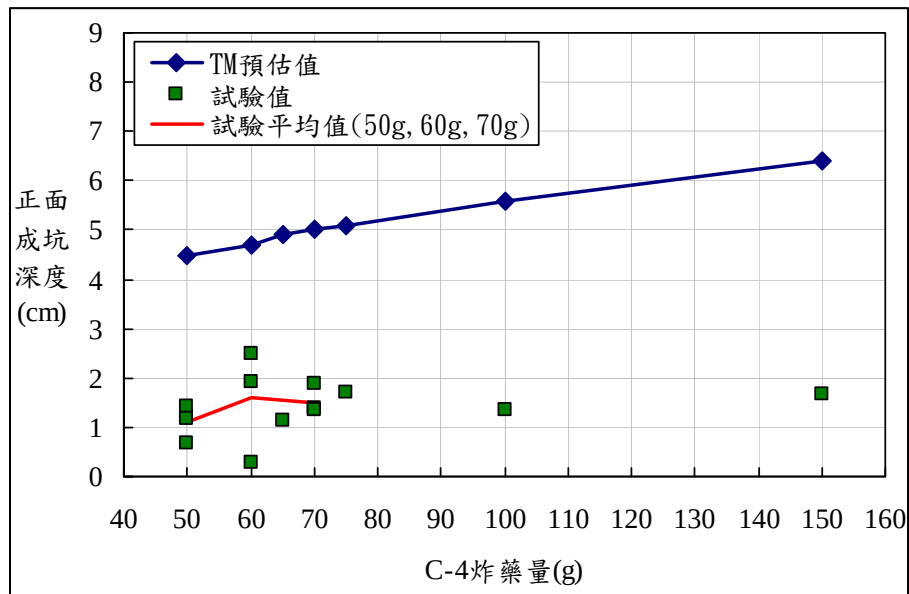


圖 26 大理岩在不同炸藥量下正面成坑深度預估值與試驗值比較情形
資料來源：本研究整理

表 8 大理岩接觸爆炸下正面成坑折減後預估值與試驗結果誤差比較表

量 測 項 目	成坑直徑			成坑深度		
炸 藥 量 (g)	50	60	70	50	60	70
折 減 係 數	0.65	0.58	0.63	0.24	0.34	0.30
折減後預估值 (cm)	16.7	17.7	18.7	1.5	1.6	1.7
試 驗 值 (cm)	16.7	15.8	18.0	1.1	1.6	1.5
差 異 (%)	0	12	4	39	0	13

資料來源：本研究整理

試驗的過程中，爆炸所產生的火球及破片容易傷及作業人員(如圖27)，因此需設定安全距離及落實防護工作，以維人員及設備安全。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 27 大理岩接觸爆炸試驗開始至結束情形

資料來源：本研究整理

二、爆壓值量測

爆炸試驗使用PCB 137A21及137A23自由場爆壓計，在距離爆源100cm處進行量測，各搭配一台安捷倫示波器(Agilent 5012A、5014A)進行資料擷取，試驗炸藥量調整時，示波器的觸發條件及電壓範圍也要隨之調整。本研究炸藥量較低，因此所產生的爆壓可能接近背景值或是異常值，故部分幾組爆壓值未能擷取到，試驗結果如表9。試驗結果發現，爆壓值有隨著炸藥量的增加而有提高的趨勢，而60g炸藥量的爆壓值變異性最大，為19.5%，試驗變異情形如表10。

表 9 不同炸藥量下接觸爆炸試驗爆壓值(距離爆源 100cm)

試體編號	炸藥量(g)	137A21(KPa)	137A23(KPa)
test1	150	297.03	272.51
test2	100	233.02	216.41
test3	50	(未量測到)	124.64
M65C4NO1	65	200.20	(未量測到)
M75C5NO1	75	229.60	195.04
M50C4NO1	50	150.28	109.27
M50C4NO2	50	(未量測到)	(未量測到)
M50C4NO3	50	(未量測到)	(未量測到)
M60C4NO1	60	(未量測到)	144.70
M60C4NO2	60	228.81	(未量測到)
M60C4NO3	60	169.03	(未量測到)
M70C4NO1	70	(未量測到)	158.31
M70C4NO2	70	(未量測到)	163.41
M70C4NO3	70	(未量測到)	157.61

資料來源：本研究整理。

表 10 不同炸藥量下爆壓值變異情形比較表

炸藥量 (g)	50	60	70
爆壓值 (Kpa)	150.28	228.81	158.31
	124.64	169.03	163.41
	109.27	144.70	157.61
平均值 (Kpa)	128.1	180.9	159.8
標準差 (Kpa)	16.9	35.3	2.6
變異係數 (%)	13.2	19.5	1.6

資料來源：本研究整理。

另發現本研究試驗之爆壓值，介於TM手冊中自由空氣爆炸(Free-air Burst)及地表面爆炸(Surface Blast)預估值之間，主要的原因在於炸藥引爆時，爆震波自試體正面中央至邊界階段屬於地表面爆炸，超過邊界時則進入自由空氣爆炸，故爆壓值衰減介於兩者之間，如圖28。在預估爆壓時，使用TM手冊可以得到一個理想範圍。

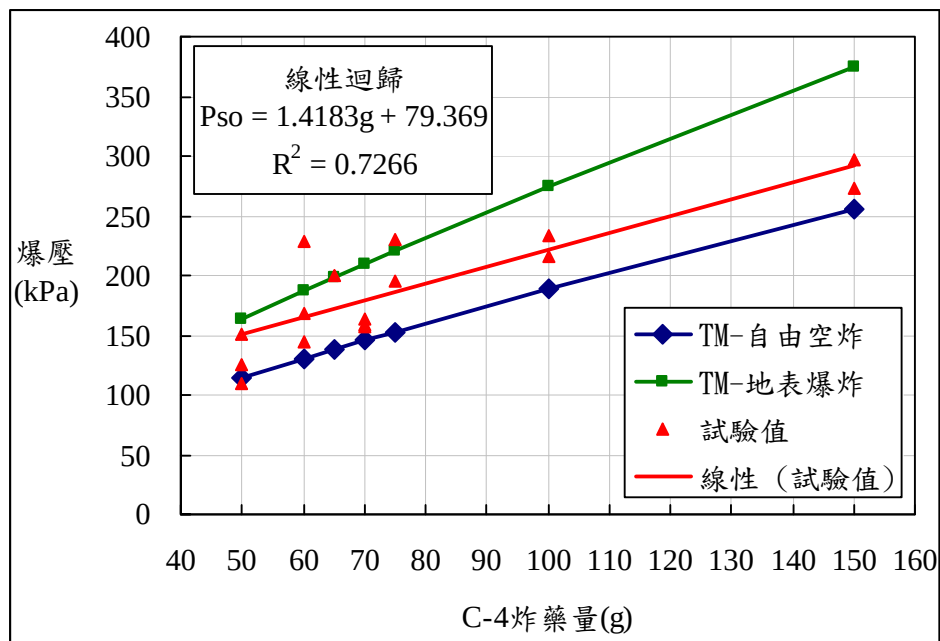


圖 28 爆炸試驗爆壓值與 TM 手冊評估值比較情形

資料來源：本研究整理

結語

當接觸爆炸試驗炸藥量超過50g時，試體除了形成正面成坑外，會有沿著紋路或平行紋路形成貫穿破裂，或者是背面大片剝落的現象，可能原因在於試體的紋路為弱面，在爆炸力的作用下導致受拉開裂。另外在試驗後，所形成的正

面成坑較淺，建議未來的研究中可進一步探討，以瞭解大理岩在爆炸下的破壞機制。當使用TM手冊來評估50×50×25cm之大理岩試體的正面成坑直徑與深度，與試驗值的差異在50%及200%以上；若透過折減計算，直徑與深度的差異可降至12%及39%以下。試驗中所量測之爆壓值，介於TM手冊自由空氣爆炸與地表面爆炸的爆壓值之間，未來在進行相關試驗時，可據此預估作業人員、儀器所在位置爆壓，以判斷作業的安全性。本次試驗由於時間、天候、場地、設備及人員等因素對試驗影響甚劇，因此每種炸藥量僅規劃3組試體進行試驗，建議未來的試驗中增加試體組數，以獲得更具有代表性的試驗成果；亦可針對不同強度種類岩石進行試驗，以求得對應的折減係數。

作者簡介

陳祺杰上尉，指職軍官班 90-1 期、國立台灣科技大學營建工程系、國防大學裡工學院軍事工程碩士；曾任後勤官、工程官、教官，現任職於陸軍工兵學校軍事工程組教官。