



# 大理岩接觸爆炸試驗 與準則驗證

## 作者簡介



陳祺杰上尉，指職軍官班90-1期、國立臺灣科技大學營建工程系、國防大學理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。

## 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，當石塊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分，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。

關鍵詞：二次爆破、接觸爆炸、大理岩

## 前言

歷年來，臺灣飽受天災的侵襲，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石塊，常施以二次爆破（Secondary Blasting）<sup>1</sup>方式予以破壞。除救災外，此種技術亦常見於隧道、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<sup>2</sup>（以下

簡稱TM手冊）及國軍爆破教範<sup>3</sup>（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石塊尺寸的關係，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，其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

1 Bhandari, S., Engineering Rock Blasting Operations, Published by A. A. Balkema, Rotterdam, USA, 1997, pp. 274~276

2 Department of the Army, Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM5-855-1, USA, 08, 1998, pp. 4-21、8-52.

3 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4-190~4-192。



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

臺灣岩石種類繁多，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。目前臺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（如圖一）。一般而言，必須先對岩體鑽心取樣（如圖二），再進行基本力學試驗才能獲得岩石的強度，由於臺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瞭解大理岩的基本性質。



圖一 大理岩

資料來源：本研究整理

## 三、二次爆破

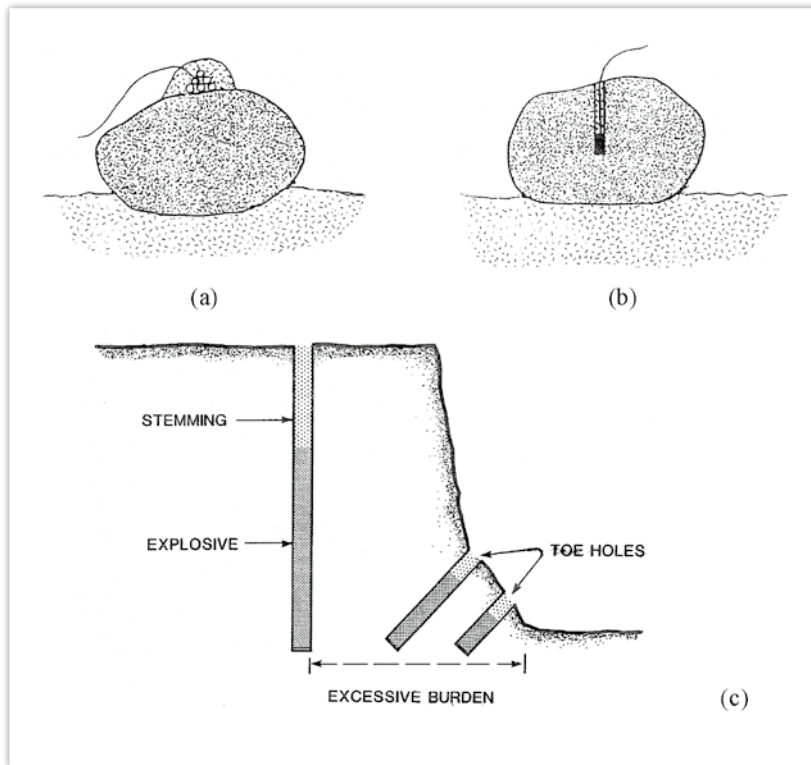
岩石爆破後所產生的過大石塊，可使用二次爆破技術處理至預期尺寸。1997年Bhandari提出3種主要的方法，即接觸爆炸（Plaster Shooting）、石塊鑽炸（Block Holing）及趾部爆炸（Toe Blasting）（如圖三）。

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



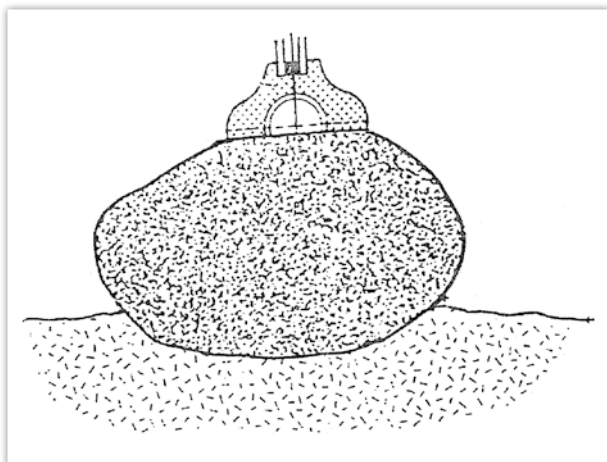
圖二 抗壓試驗試體

資料來源：本研究整理



圖三 二次爆破 (a) 接觸爆炸 (b) 石塊鑽炸及 (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.



圖四 使用錐形裝藥進行石塊爆破

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

Charge) 來破壞石塊 (如圖四)。在同一種炸藥及藥量下，圓形石塊由於厚度較大，比厚度薄、面積大之盤狀石塊爆破效果差；對於預先承受應力 (如岩層中的圍壓) 或外界力量 (如爆炸) 的石塊，比自然裸露的石塊更容易破碎。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1~12磅之間 (如表一)。

石塊鑽炸在爆破教範中稱為閉塞法，就是對石塊進行鑽孔埋藥，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。在進行石塊鑽炸時，Bhandari建議鑽洞深度為塊石厚度的0.25~0.5倍；當石塊尺寸較大時，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1/8~1磅之間 (如表一)。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，於石塊下方鑽孔埋藥，再用濕土或泥土填塞後引爆 (如圖五)。

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<sup>4</sup>提出下列實爆作業注意事項：(-)



表一 爆破規範中岩石二次爆破作業建議炸藥量

| 炸藥       |     | TNT |     |     |     |     | 第奈米特 (Dynamite) |     |     |     |    |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|----|
| 塊石直徑 (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。

藥包應儘量放於石塊的中央或凹陷處；(二)覆土層應高於藥包的高度，最好用緻密的黏土作為覆蓋物；(三)安全距離應達200m以上，做好警戒工作，防止飛石傷害；(四)爆破效果不佳或石塊太大時，應儘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（如圖六）。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（ $m/kg^{1/3}$ ）



圖五 蛇孔法

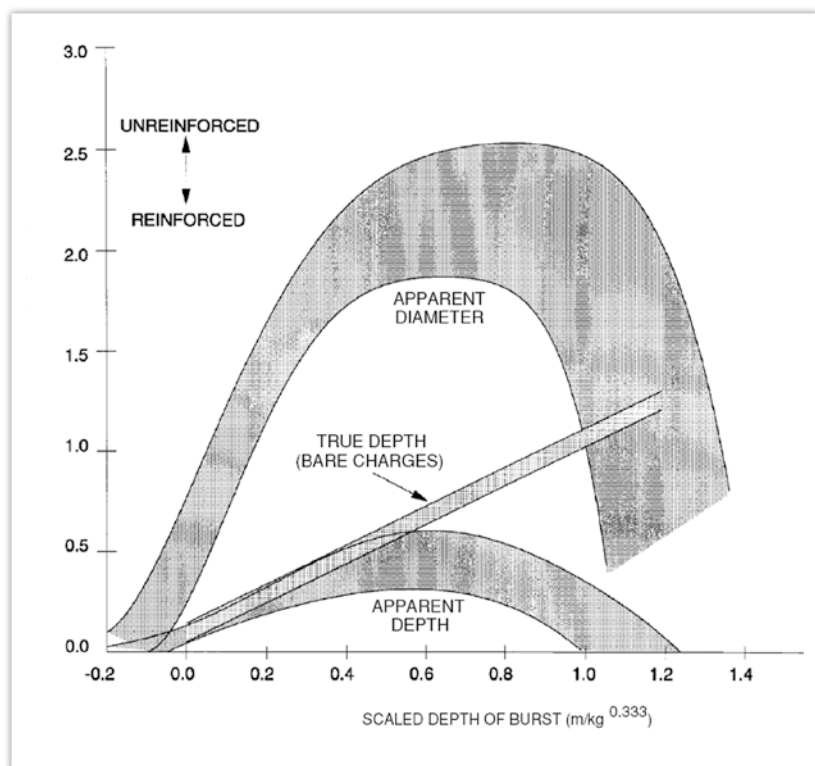
資料來源：鄭冠豪、高得乾、王幸南，《爆破教範》（桃園：國防部陸軍司令部，2005年3月），頁4-191。

計算獲得。欲使用美軍規範進行評估，必須先瞭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（如圖七）；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（如圖八），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。

#### 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<sup>5</sup>以傳統的三軸壓力試驗探討圍壓下的力學行為，並求得在不同圍壓下的降伏強度、單壓強度、殘餘強度、破壞強

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。



圖六 評估爆炸對混凝土或岩石所產生之坑洞尺寸圖

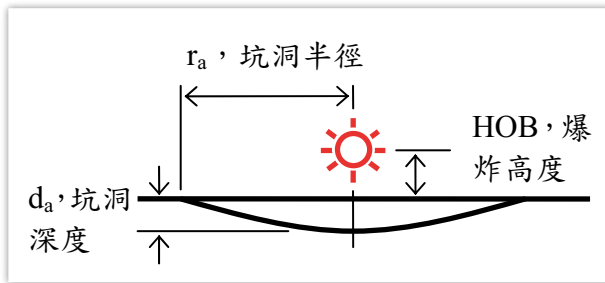
資料來源：Department of the Army, Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, Technical Manual TM5-855-1, USA, 1998, pp. 8-52.

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<sup>6</sup>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<sup>7</sup>將大理岩紋理視為葉理面，求得與水平面不同夾角（ $\Psi$ ）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<sup>8</sup>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（如表二），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

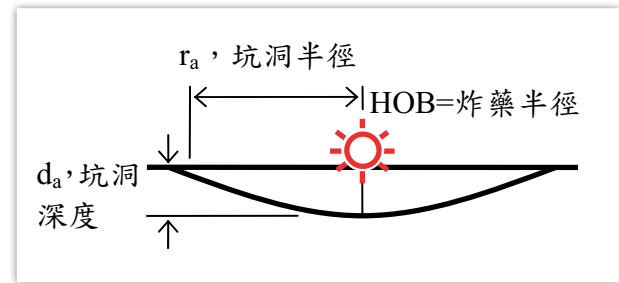
分含量、環境溫度、壓力的不同，導致變質後強度有所差異。在爆炸試驗方面，僅有2006年蘇義松<sup>9</sup>以鑽孔埋藥方式，探討了花蓮大理岩應用圓錐形聚能射流與傳統

- 5 鄭寶山，《花蓮大理岩在圍壓下力學行為之研究》（臺北：臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，1992年6月），頁40~41。
- 6 施國欽、李彪，〈臺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。
- 7 劉全偉，《溫度與壓力對花蓮大理岩力學行為之影響研究》（臺北：臺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。
- 8 蕭永成，《異向性大理岩之力學性質研究》（臺北：臺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。
- 9 蘇義松，《聚能射流應用於岩石控制爆破之研究》（臺南：國立成功大學博士論文，2006年6月），頁3。



圖七 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.



圖八 接觸爆炸

資料來源：本研究整理

控制爆破方法的差異，尚未有接觸爆炸相關研究。

## 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。透過規範推算出不同的C-4炸藥量下，正面成坑直徑與

深度如表三。

## 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，以瞭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

表二 臺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      | 鄭寶山        | 施國欽   | TM手冊  | 劉全偉        | 蕭永成   | 鄭寶山  |
| 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

表三 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

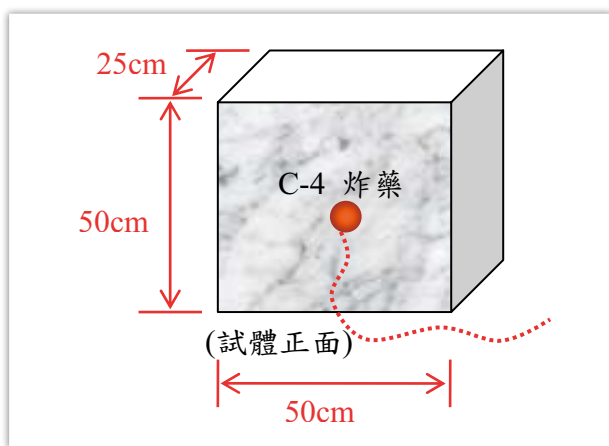
為測試及預備用試體，配置如圖九。

### 一、爆炸試驗用試體

爆炸試驗使用14塊、 $50 \times 50 \times 25\text{cm}$ 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



圖九 C-4炸藥位置圖

資料來源：本研究整理

速爆藥（爆炸速度 $8530\text{m/s}$ ），易塑成各種形狀。試驗用炸藥，從國軍M5A1藥包（如圖十）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（如圖十一），使用時須避免靜電以防引爆。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。

### 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（如圖十二）、鋼捲尺及游標卡尺進行試驗量測。自由場爆壓計長 $40.6\text{cm}$ 、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）。

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 $2\text{GHz}$ ，本研究設定 $10\text{MHz}$ 進行擷取；示波器可進行數位儲存（如圖十三）。

### 四、爆炸試驗用試體架



圖十 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



圖十一 美造J2測試電雷管

資料來源：本研究整理



圖十二 爆壓計（137A20系列）

資料來源：本研究整理



圖十三 示波器（安捷倫5000系列）

資料來源：本研究整理

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（如圖十四）。鐵架透過不鏽鋼釘牢固於地面，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。

### 五、試體破壞程度記錄方式

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（如圖十五），同時進行描圖紙進行描繪（如圖十六）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（如圖十七），方便後續檢核。

### 六、實爆試驗場地與設備配置

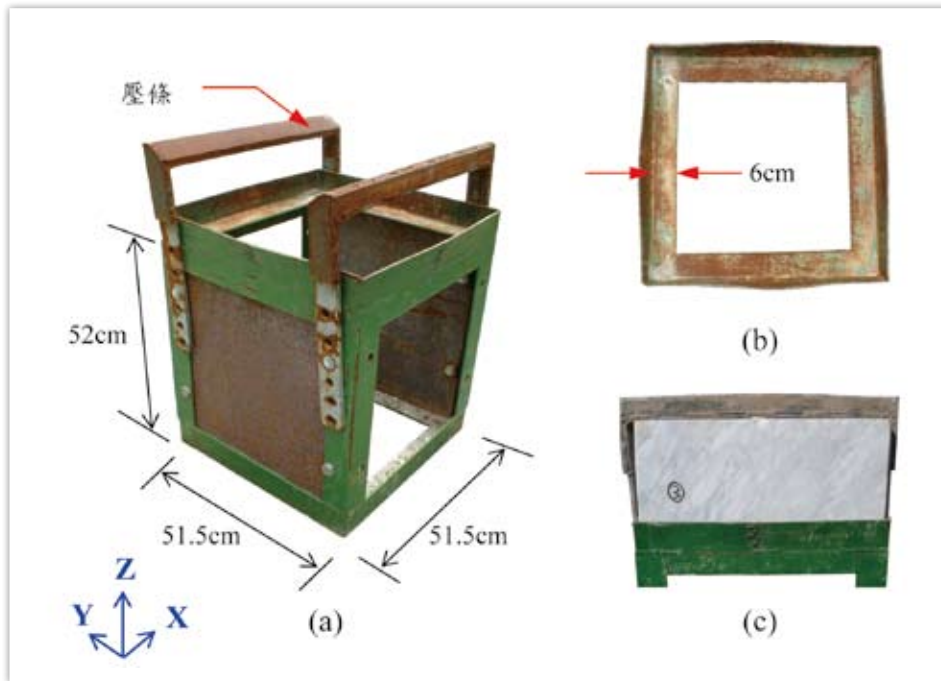
本研究選定國軍旗山彈藥庫內廢彈燒爆燬場（如圖十八），進行接觸爆炸試驗。該場地地處偏僻、腹地廣大，相關火具控制、爆炸防護等設備均相當完善，且由未爆彈處理小組人員負責點火相關事宜，能符合各項試驗需求。自由場爆壓計架設時與炸藥等高，並指向炸藥中心，感測器至炸藥中心距離1m，設備配置如圖十九。

## 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（如圖廿），遂將炸藥量縮減為100g，結果相同（如圖廿一）。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（如圖廿二）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（如圖廿三），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，



圖十四 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

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<sup>10</sup>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四。

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



圖十五 使用游標卡尺量測坑洞尺寸

資料來源：本研究整理



圖十六 使用描圖紙描繪坑洞形狀

資料來源：本研究整理

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



圖十七 使用砂膠對正面成坑進行翻模

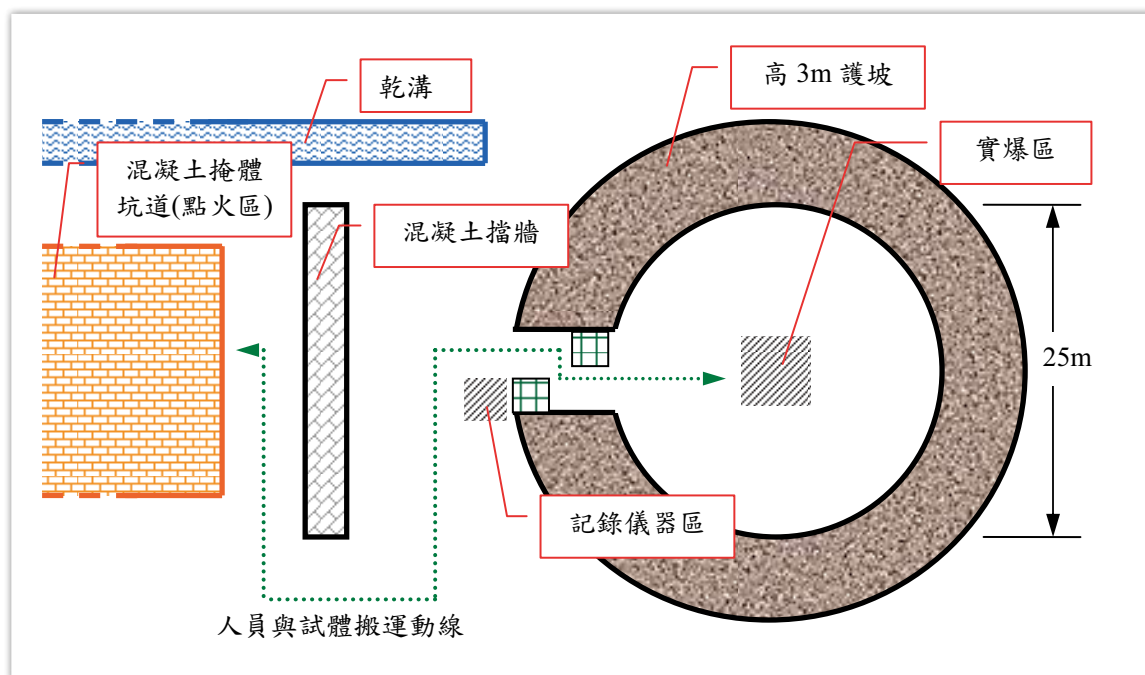
資料來源：本研究整理

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（如表五）。

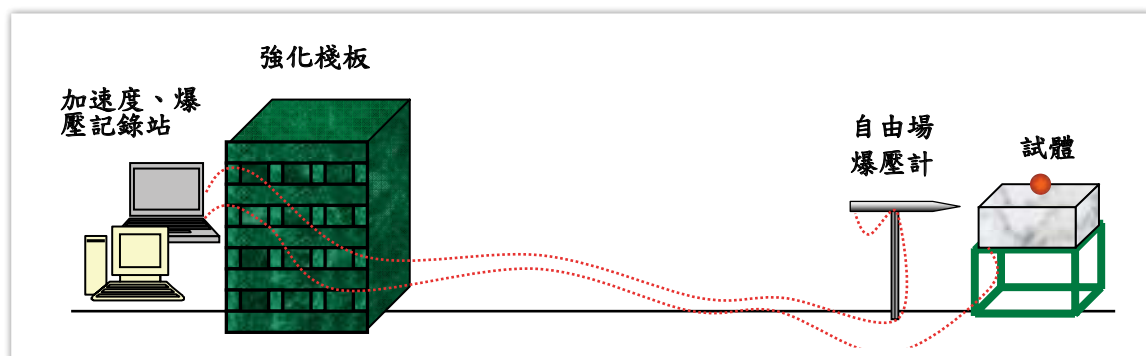
以鋼捲尺量測所得之平均直徑與等值直徑比較，發現差異在-5.17%以內（如表六），因此可以得知以平行縱、橫軸量測坑洞直徑方式，即可得到具代表性的數據，後續將採用等值坑洞直徑進行比較與驗證。

本研究結果與TM手冊比較下（如表七），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（如圖廿四），預估值較為保守（如圖廿五、廿六）。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（如表八），本研究取其中最大值（即0.65與0.34），作



圖十八 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



圖十九 接觸爆炸量測設備配置立面示意圖

資料來源：本研究整理



圖廿 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



圖廿一 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



圖廿二 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



圖廿三 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

表四 大理岩接觸爆炸試驗成果記錄表

| 編號       | 炸藥量<br>(g) | 橫向成坑直徑<br>(cm) | 縱向成坑直徑<br>(cm) | 平均成坑直徑<br>(cm) | 等值成坑直徑<br>(cm) | 坑洞深度<br>(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

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。

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（如圖廿七），因此須設定安全距離及落實防護工作，以維人員及設備安全。

## 二、爆壓值量測

爆炸試驗使用PCB 137A21及137A23

表五 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  | 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

表六 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

表七 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

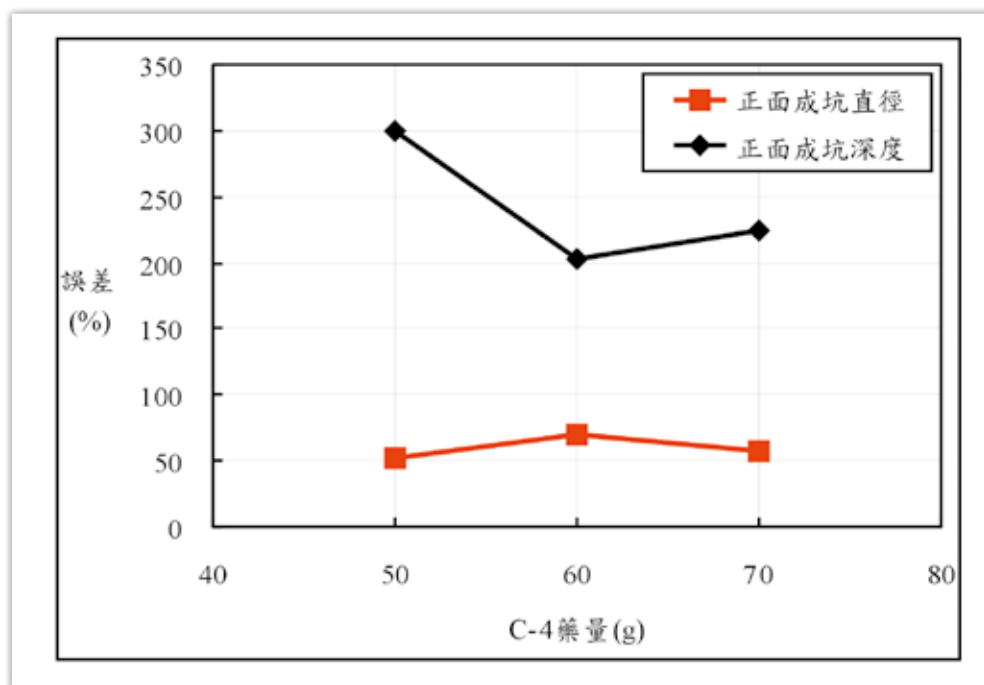
| 量 | 測 | 項     | 目      | 成    | 坑    | 直    | 徑   | 成   | 坑   | 深 | 度 |
|---|---|-------|--------|------|------|------|-----|-----|-----|---|---|
| 炸 | 藥 | 量     | ( g )  | 50   | 60   | 70   | 50  | 60  | 70  |   |   |
| 預 | 估 | 值     | ( cm ) | 25.6 | 27.2 | 28.6 | 4.5 | 4.7 | 5   |   |   |
| 試 | 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

自由場爆壓計，在距離爆源100cm處進行量測，各搭配一臺安捷倫示波器（Agilen 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（如表九）。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，

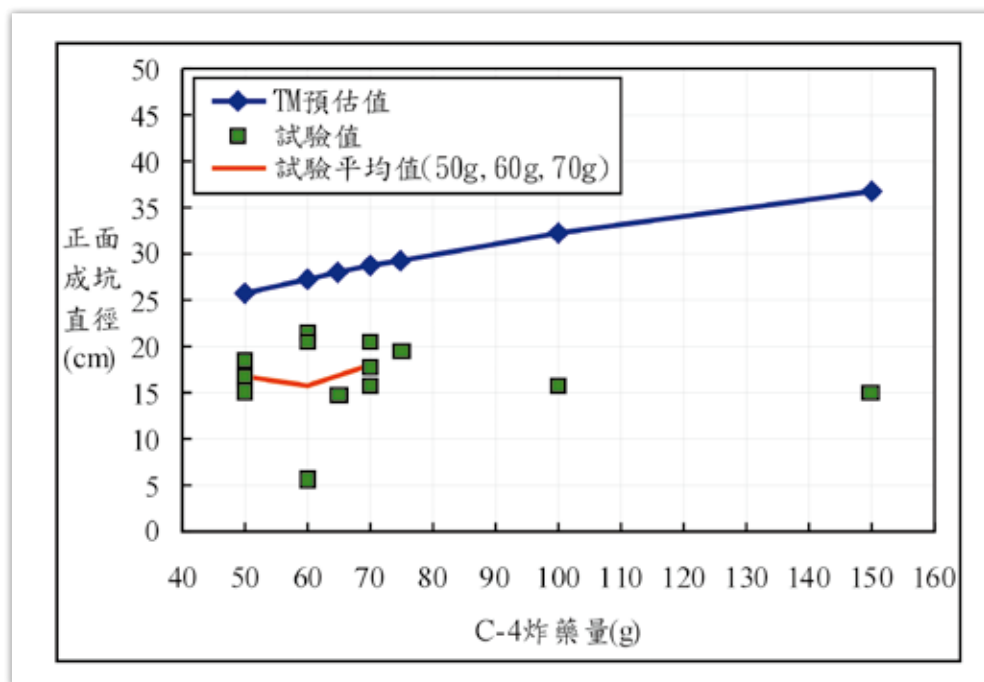
而60g炸藥量的爆壓值變異性最大，為19.5%，試驗變異情形（如表十）。

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（如圖廿



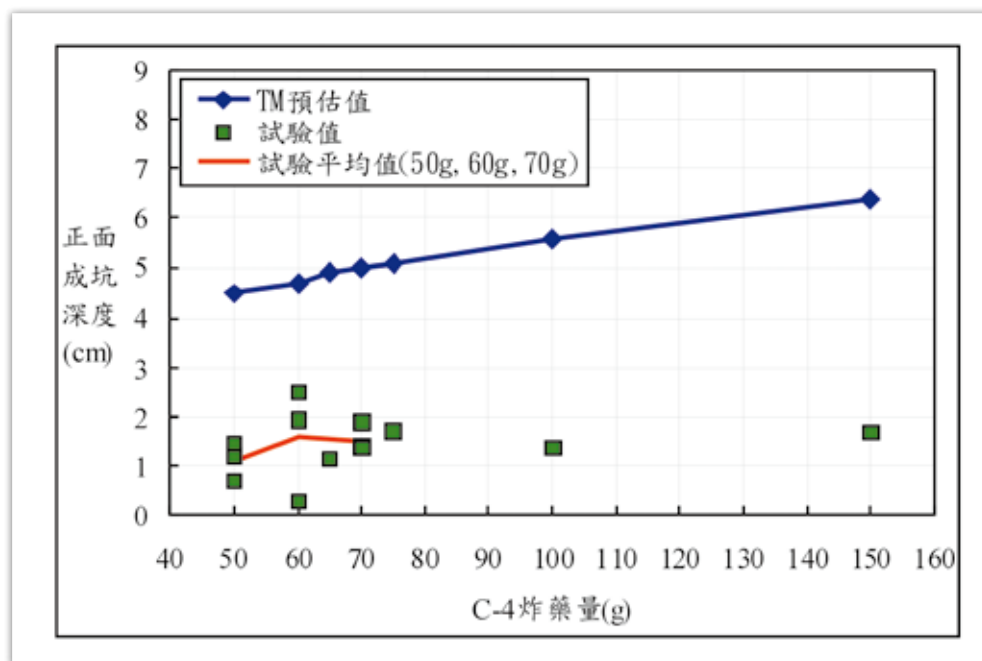
圖廿四 大理岩接觸爆炸下正面坑洞預估值與試驗結果誤差比較圖

資料來源：本研究整理



圖廿五 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



圖廿六 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

表八 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   |

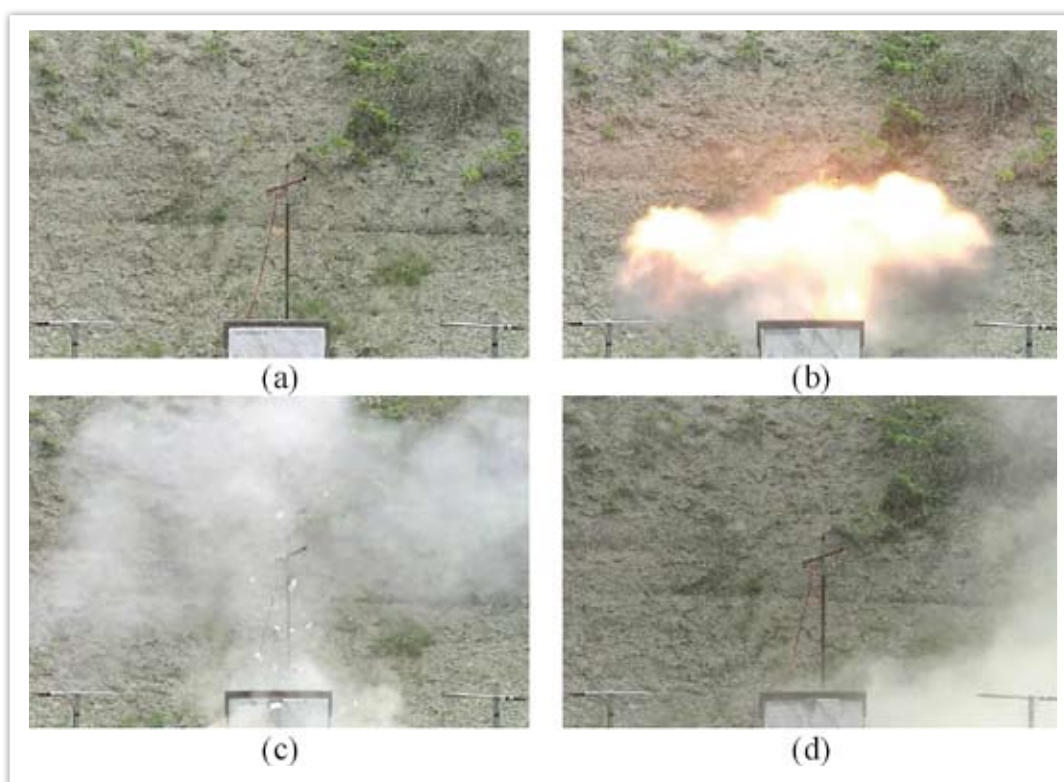
資料來源：本研究整理

八)。在預估爆壓時，使用TM手冊可以得到一個理想範圍。

## 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%



圖廿七 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

表九 不同炸藥量下接觸爆炸試驗爆壓值（距離爆源100cm）

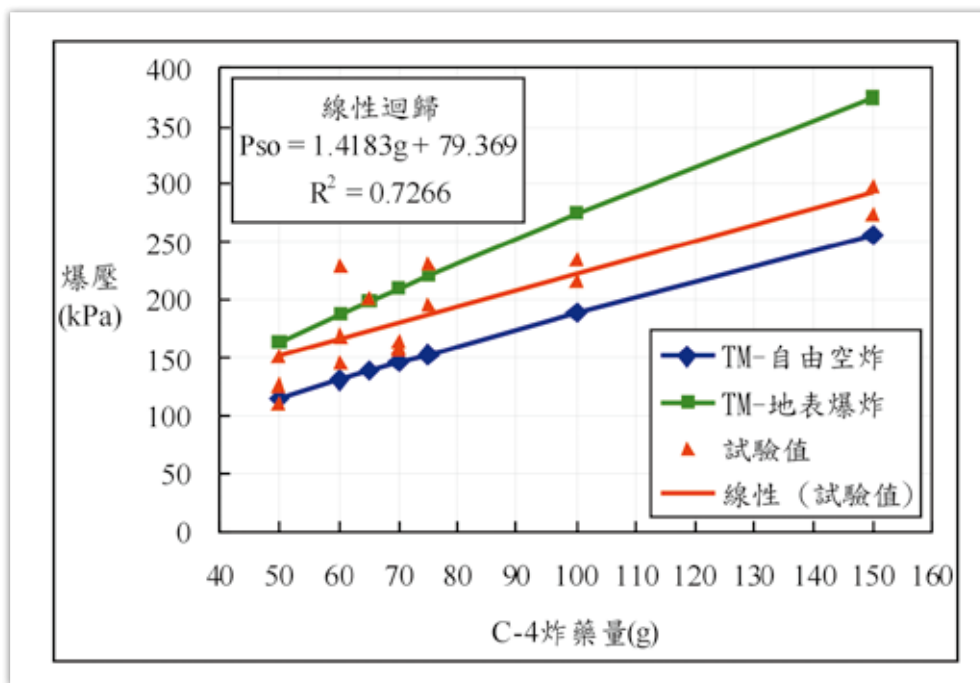
| 試體編號     | 炸藥量 (g) | 137A21 (KPa) | 137A23 (KPa) |
|----------|---------|--------------|--------------|
| test1    | 150     | 297.03       | 272.51       |
| test2    | 100     | 233.02       | 216.41       |
| test3    | 50      | (未量測到)       | 124.64       |
| M65C4NO1 | 65      | 200.20       | (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

表十 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



圖廿八 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

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。

收件：99年9月30日

修正：99年10月4日

接受：99年10月6日