

TNT爆炸之震波特性研究

作者/鄭冠豪少校

提 要

- 一、本文係探討 TNT 爆破震波特性，研究首先自行設計、組裝可供快速擷取震波資料之多頻道擷取系統，再將資料進行頻譜分析以及質點能量衰減推估。
- 二、研究結果顯示：爆破震波比地震震波的能量衰減快，地震震波的主頻率約在 1Hz，但爆破震波在垂直向的主頻率約為 85Hz，而水平向的頻率分佈從 0-400Hz，主頻率範圍 1-10Hz，與地震頻率分佈相似。
- 三、爆破垂直震波在近爆破區域屬於低至高頻波，在遠爆破區域則以低頻波為主。至於爆破震波能量衰減預測公式，本文建議以通用的質點速度峰值 (PPV) 公式為佳。

關鍵詞：爆破震波、主頻率、質點速度峰值

前 言

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓板塊虎口交叉擠壓處，衍生地質破碎、地形陡峭、斷層綿密、地震頻發等特徵，而且近年來也誘發多次地質災害，例如：921 集集大地震，八八水災等，因而地質災害之研究亦備受重視，尤其在 921 集集大地震後，地震相關議題的研究如雨後春筍般被提出，而且獲得很多不錯的成果。然而在爆破震波方面之研究相對較不受重視，難怪乎在八八水災有人質疑越域引水隧道爆破工程是造成土石鬆動而形成小林村災難的誘因時，為政者無以為辯。

地震與爆破均屬能量釋放引致地表震動的行為，兩者同樣以波的形式通過介質向外傳遞，其能量除隨距離而衰減外，也會受地形、地質等因素影響，同時也對構造物均具有破壞力¹。然而自然地震與人工爆破的震波特性仍有一些差異；自然地震震波的頻率一般低於 5Hz，持續時間通長在 1 秒至數分鐘間，最大地表加速度較少大於 1g；相反地，人工爆破震波的頻率較高，通常在 0—200 Hz 範圍內，單爆的持續時間約在 0.5 秒內完成，引起最大地表加速度亦隨藥量增加而增大，最大甚至會超過 25g²。Ma et al.³對爆破引起的地面結構損傷評估的研

註¹ 張義平、吳桂義(2007)，爆破地震波特性研究，礦業研究與開發，第 27 卷，第 6 期，第 68-72 頁。

註² 薛超(2008)，爆破地震波特性與天然地震波的比較，科學之友，第 255-256 頁。

究中指出，在分析地震工程的結構響應時，大多數情況下，垂直向震動常因主頻率(dominant frequency)總是非常小，而且與地震在水平方向上所激發第一個振動模態的結構頻率通常很接近而被忽略，但由地下爆炸產生的垂直向震動則不能被忽視，因為其具有較大的垂直振幅和更寬的主頻率帶，高頻地面震動可激起地表面結構的更高振動模態，尤其接近爆炸區震動的垂直分量就有可能會大於水平分量。張鳳鵬⁴等人的研究也認為，爆破震波的震源能量小、作用範圍小、持續時間短，而在安全標準僅考慮震速而忽視震波頻率的影響是不夠全面的，因為震動對結構的破壞還與頻率有關，尤其震動的頻率與結構的固有頻率相近時，容易發生共振而危害結構物安全。

綜合前述，儘管人工爆破震波的震幅與頻率偏高，但因能量衰減快，造成的損失不若自然地震之嚴重，然而也因其主頻率寬、振幅大、衰減快等特性，所激發對結構物之影響也與地震有所差異，因此本文本著不因噎廢食之精神，自行設計、組裝多頻道震波量測系統，用以擷取爆破震波外，並對其振幅大小、持續時間、主頻率寬等特性，以及其能量衰減與藥量、距離等關係亦併加探討，俾供工程界應用之參考。

爆炸震波之相關研究

一、震波分類

無論自然地震、人工爆破或衝擊荷重均會在地層內部與表面或介質表面產生應力波動。在地層內部傳播者稱實體波，包括縱波(P波)與橫波(S波)，而在地層表面傳播者稱表面波，主要有雷利(Rayleigh)波(R波)和拉夫(Love)波(L波)。由圖一示意圖(C)可知：P波的能量傳輸方向與質點運動方向一致，質點運動使介質產生壓縮(Compression)和伸張(Extension)的現象，故又被稱為壓力波。S波係指質點振動方向與能量傳輸方向相互垂直，而使介質產生剪斷(Shear)的現象，因此被稱為剪力波。R波通常是因P波和S波於邊界作用而產生，其質點係在能量傳輸方向(X-direction)和自由面法向(X-direction)線所構成之垂直平面(ZX-plane)上進行橢圓運動，而在與該平面垂直的水平方向(Y-direction)無其震波波動，而且其震動隨深度(Z-depth)呈指數衰減。張義平、吳桂義¹指出，只有在半無限空間上至少覆蓋一低速地表層時，L波才會出現。L波傳播時，

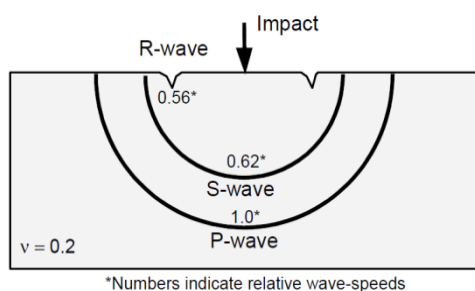
註³ Guowei Ma, Hong Hao, Yingxin Zhou (2000), Assessment of structure damage to blasting induced ground motions, *Engineering Structures*, 22, 1378 – 1389.

註⁴ 張鳳鵬、烏萬昌、孫豁然、金校園，人工爆破地震波特性的實驗研究，*金屬礦山*，總第342期，第19-22頁。

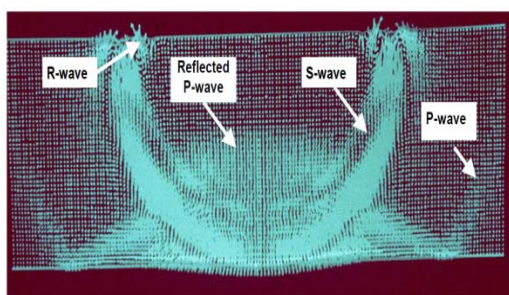
質點於垂直波前進方向(X-direction)的水平面(ZY-plane)上作剪斷運動，而無垂直(Z-direction)分量運動。

在半無限彈性介質中 P 波、S 波和 R 波的波傳速度與波松比(Poisson's ratio, ν) 有關，例如圖一 (a)中 $\nu=0.2$ 時， $V_s \approx 0.62V_p$ 而 $V_R \approx 0.56V_p$ ⁵；換言之， $V_p > V_s > V_R$ 。但當 $\nu \rightarrow 0.5$ 時，則 $V_R \rightarrow V_s$ 。但當 $\nu=0.25$ 時， $V_p = \sqrt{3}V_s$ ，且與頻率無關，即 R 波不存在頻散現象。此外就震波總輸入能量而言，R 波約占 67%，剪切波占 26%，壓縮波占 7%；換言之，震波總能量的 2/3 是以 R 波的形式向外傳播。由於 P 波能使岩石產生壓縮和伸張變形，為爆破時造成岩石破裂的主要原因，而 R 波因頻率低、衰減慢、攜帶較多的能量，是造成地震破壞的主要原因。此外實體波在爆破近區起主要作用，而表面波則在爆破遠區起主要作用。

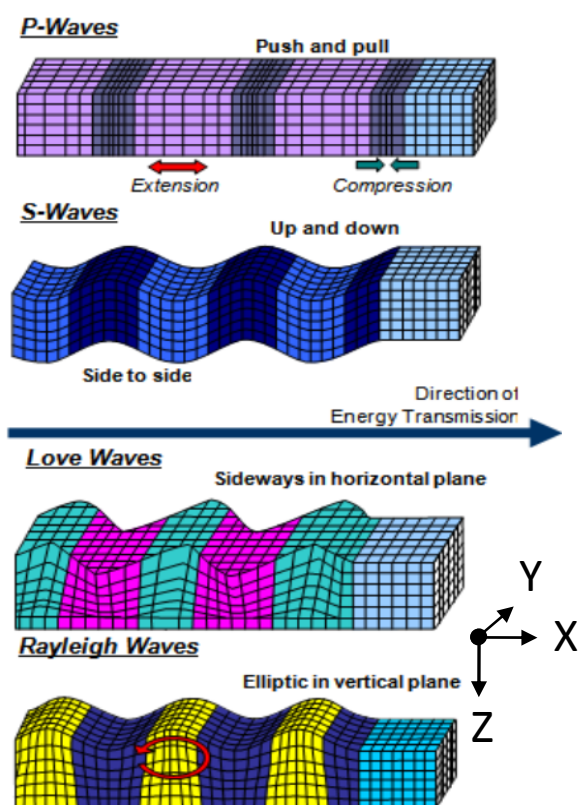
(a) 震波類別



(b) 震波類別模擬成果



(c) 震波類別解說



圖一 震波分類示意圖

資料來源：(a、b 取自文獻[5]，c 取自文獻[6]⁶)

註⁵ Carino, N. J.(2001), The impact-echo method: An overview, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23,2001,Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001. 18 p.

註⁶ The constructor civil engineering home, How the ground shakes during earthquake, <http://theconstructor.org/earthquake/how-the-ground-shakes-during-earthquake/2648/>.

二、爆破震波能量衰減

李洪濤⁷等人在爆破震波的能量衰減規律研究中，認為爆破地震對建築物的影響中主要考慮的是震動的動能。對於空間中質量為 ΔM 的質點而言，在某一時刻(t)，爆破震動的能量 $E(t)$ 可以表示為：

$$E(t) = \frac{1}{2} [\Delta M V^2(t)] \quad \text{【式(1)】}$$

上式中： $E(t)$ 為 t 時間爆破震動的能量， $V(t)$ 為 t 時刻爆破震動速度。

有鑒於此，目前對爆破震波能量衰減之探討有以 $V(t)$ 為主的質點峰值速度以及用 $E(t)$ 為要的峰值暫態能量等兩種方法，分述如下：

(一) 質點峰值速度衰減

爆破地震波的能量衰減除與使用炸藥量和爆破距離相關外，也受場址的地質結構：地形與地質材料性質等因素之影響。因此對質點峰值速度(Peak particle velocity, PPV)衰減之預測的研究，概以經驗法則為之，例如 Langefors 和 Kihlstrom⁸建議以(2)式方程預測 PPV：

$$PPV = \kappa \left[\frac{Q}{R^2} \right]^\alpha \quad \text{【式(2)】}$$

上式中：PPV 是質點峰值速度 (cm/s)， R 為爆破和測量點之間的距離， Q 炸藥量(kg)；若為齊發爆破時為總裝藥量，延遲爆破時為最大一段裝藥量。 κ 為與爆破場地有關的係數， α 為與地質條件有關的爆破震波衰減係數。Siskind et al.⁹提出以規格距離 (scaled distance, SD) 的概念來修改(2)式使成為(3)式，而此式一直是目前官方機構和炸藥製造商最廣泛使用的方程式。

$$PPV = \kappa \left[\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right]^\alpha = \kappa \cdot SD^\alpha \quad \text{【式(3)】}$$

在(3)式中：SD 係爆破和測量點之間的距離(R)與炸藥量平方根($Q^{\frac{1}{3}}$)之比值 ($m/kg^{\frac{1}{3}}$)，PPV、 κ 與 α 如(2)式之定義。

Hakan 和 Adnan¹⁰於不連續頻率(Discontinuity frequency)對梯段爆破產生震動的影響研究中，將不連續頻率引入(3)式中，並提出(4)式以預測具不連續弱面之質點峰值速度。

註⁷ 李洪濤、盧文波、舒大強、楊興國、易長平(2010)，爆破地震波的能量衰減規律研究，岩石力學與工程學報，第29卷增1，第3364-3369頁。

註⁸ Langefors U, Kihlstrom B.(1963), The modern techniques of rock blasting. New York: Wiley.

註⁹ Siskind DE, Stagg MS, Kopp JW, Dowding CH.(1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. RI 8507. Bureau of Mines, 1980.

註¹⁰ Hakan Ak_, Adnan Konuk (2008), The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 686–694.

$$PPV = \kappa \cdot SD^{\alpha} \cdot \lambda^{\beta} \quad \text{【式 (4)】}$$

上式中： λ 代表不連續頻率， β 則為不連續頻率常數，PPV、SD、 κ 與 α 如(2)、(3)式所示。

(二) 峰值暫態能量衰減

李洪濤⁷等人將(1)式用 ΔM 加以正規化而獲得爆破震動能量 EP 值，並將其定義為 2 倍單位質點動能，如(5)式所示：

$$EP(t) = \frac{2E(t)}{\Delta M} = V^2(t) \quad \text{【式 (5)】}$$

再將(5)式積分，即可獲得總能量 ET 如(6)式：

$$ET = \int V^2(t) dt \quad \text{【式 (6)】}$$

並依據能量衰減與藥量、距離相關之經驗公式，提出峰值暫態能量 EM 與總能量 ETM 方程式，如(7)、(8)所示。

$$EM = \kappa' \left[\frac{Q}{R^3} \right]^{\alpha'} \quad \text{【式 (7)】}$$

$$ETM = \kappa_E [R]^{\alpha_E} \quad \text{【式 (8)】}$$

上式中：EM 為峰值暫態能量(cm^2/s^2)， κ' 與 α' 與爆破方法、地質、地形條件有關的待定係數， κ_E 代表初始能量 E_0 ， α_E 則為爆破地震能量隨距離的衰減係數⁷。

研究方法

一、TNT 爆破

本研究爆藥使用 TNT，屬三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)，顏色為乳黃色之結晶體，故又稱黃色炸藥，其爆炸速度 6300m/sec，係一種威力強大之高級爆藥，並必須使用雷管、電雷管或爆炸導火索始能起爆。本次實驗使用 0.25 磅包裝之爆藥，藥包為直徑 1.5 吋之圓柱型，草綠色塑膠外殼。試驗用來引爆 TNT 的電雷管為瞬發電雷管(Instantaneous electric detonator)，從通電到起爆時間約為 4-7ms。

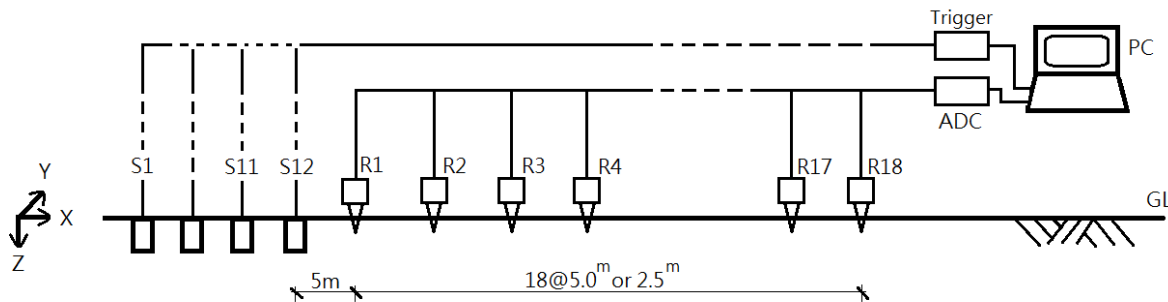
二、多頻道量測系統

研究所用量測儀器為自行研發表面波試驗儀器，主要以三軸向加速度計作為受波器，其量測範圍為 $\pm 1.5g$ ，反應頻率 Z 軸為 350Hz，X、Y 軸為 400Hz，靈敏度則各為 800mv/g。擷取卡是使用 16bit、64 通道，總擷取頻率為 1MHz。

此外，自行以 VB.net 開發擷取及簡易訊號處理軟體以供使用，擷取資料檔案格式可供 geopsy¹¹ 開放軟體直接讀取。

三、試驗方法

本次試驗主要在探討 TNT 爆破震波特性的，其實驗場地規劃如圖二所示。本次試驗以 0.25 磅 TNT 爆炸時產生之震動為震源，每波次依序點火引爆 12 個靶位之 TNT 爆藥，並以三軸向加速度計共計 18 個當為接收器(Receiver)，其間距排列分別為 5m 以及 2.5m 兩種。另外為測得震源到接收器之震波走時，在 TNT 爆藥的外殼安裝觸發(Trigger)裝置，以觸發訊號擷取卡及軟體，記錄各靶位爆藥起爆時所產生加速度大小與歷時以利後續分析。最後再將數據讀入 geopsy 程式中分析其頻譜特性。此外為利討論本文以 Si@xRi 為試驗編碼，其中 Si 代表第 i 個震源，x 為接收器間距，Ri 代表第 i 個接收器。



圖二 實驗規劃
資料來源：作者繪製

結果與討論

為探討地震與爆破震波特性的差異性，本研究採用 1999.10.22 嘉義地震於燕巢測站(KAU013)¹²所記錄之震波資料，以作為與爆炸震波比較探討之參考數據。

一、地震與爆破震波波形比較

圖三(a)為 KAU013 的震波歷時曲線，擷取頻率為 250Hz，擷取時間長度 75s。圖三(b)為 S12@5P1 接收器所記錄到爆炸震波的歷時曲線，其擷取頻率為 15kHz，並經移動平均法轉成 1kHz，記錄長度為 1s。比較兩圖可知地震震波歷時長(約 1min)、P 波與 R 波的歷時差較大而且明顯。然而，爆破震波歷時非常

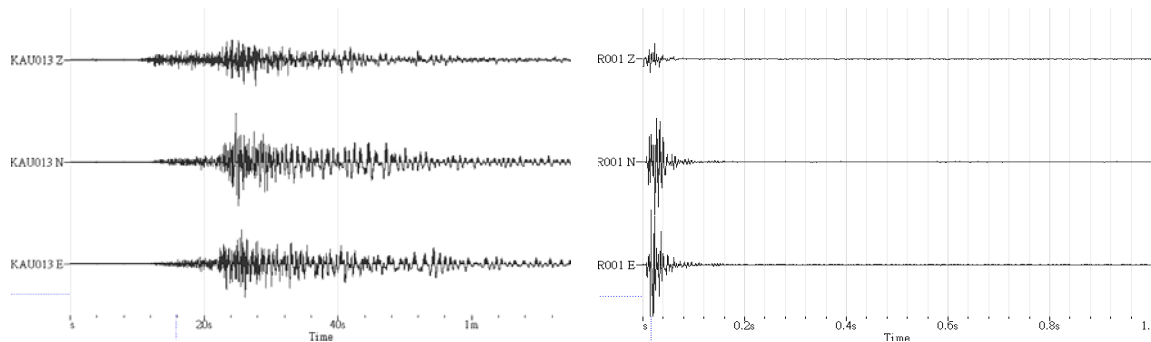
註¹¹ Geopsy project(2012),<http://www.geopsy.org>

註¹² 中央氣象局(2012),1022 嘉義地震原始資料(ASCII), <http://www.cwb.gov.tw/x7/earthquake/>

短(0.2s)，P 波與 R 波的歷時差也較小而且不容易識知。

(a)KAU013 地震震波

(b)S12@5R1 爆破震波



圖三 地震與爆破震波波形

資料來源：取自文獻[12]

二、地震與爆破垂直向震波頻譜的差異性

由圖四(a)KAU013 測得垂直向地震震波的頻譜分析，可知其頻率分佈小於 10Hz，其主頻率出現在 1.5Hz。然而從圖四(b)、(e)可發現無論接收器(Receiver)間距 2.5m 或 5.0m，其爆破震波譜幅(Spectrum amplitude)均遠大於地震震波。尤其從圖四(c)與(f)平均頻譜圖得知爆破震波頻率分佈範圍在 0-250Hz 間，其主頻率約在 85Hz。此外由圖四(d)與(g)比較獲知近爆破區($\leq 25m$)以低至高頻均有可能出現，而遠爆破區($>25m$)則以低頻為主。

三、地震與爆破水平向震波頻譜的差異性

為探討地震震波與爆破震波於水平方向的行為差異，仍以 X(E)、Y(N)方向的震波記錄求得水平向，並據此繪製頻譜圖，結果如圖五所示。由圖五(a)顯示地震水平向頻率亦集中於 10Hz 以下，主頻率則發生在 0.5Hz 附近，而且其譜幅比垂直向者為大，顯示水平向的作用能量較垂直向為大。

至於爆破震波可由圖五(b)、(c)及(e)、(f)得知其譜幅也比垂直向大，並遠大於地震者，顯示爆破激發之水平震波能量大於垂直向。另外，水平向頻率範圍在 0-400Hz 間，主頻率發生在低頻區的 1-10Hz 間，其與地震類似，而且與一般建物的反應頻率接近，因此水平向爆破震波的影響就顯得重要而不可忽略。

四、爆破震波衰減特性

由運動學可知加速度與速度具有一次微分關係，因此在探討爆破震波對建物影響時，有些研究者以最大地表加速度(Peak ground acceleration, PGA)，有

些人則以速度峰值(Peak velocity, PV)當為評估準則。然而此兩種方法並未考慮頻率(或時間)之影響,所以近年有以單位質量總能量(Total energy per mass, ETM)來評估。

從圖 6 本場址爆破爆震波 PGA 衰減,包括 PPGA(質點最大地表加速度)、VPGA(垂直向最大地表加速度)以及 HPGA(水平向最大地表加速度)等三項,其中 PPGA 是取垂直(VPGA)或水平向(HPGA)之大值當為質點最大地表加速度值。由圖可獲得 PPGA 與規格距離(Scaled distance, SD)之關係,如下:

$$PPGA = 21197 \cdot SD^{-1.70}; R^2 = 0.820 \quad \text{【式 (9)】}$$

由(9)式知,若 PPGA=1gal, TNT 炸藥量為 1/4lb,則其影響距離 R=118m。

圖 7 則為本場址爆破震波的速度峰值,包括質點速度峰值(PPV)、垂直速度峰值(PVV)以及水平速度峰值(PHV),而 PPV 亦係取自 PVV 或 PHV 之大值者當為該測點的 PPV 值,(10)式則為本場址的 PPV 衰減公式。

$$PPV = 11.95 \cdot SD^{-0.95}; R^2 = 0.881 \quad \text{【式 (10)】}$$

對於能量衰減,本文參照李[7]等研究成果,並依 Siskind et al.[9]導入規格距離(SD)將(7)式修改為(11)式所示,並討論如下:

$$EM = \kappa \cdot SD^{\alpha} \quad \text{【式 (11)】}$$

經由圖 8 可獲得單位質點能量峰值(Peak particle energy per mass,PEM)為:

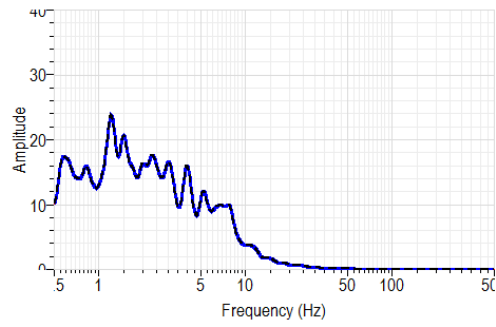
$$PEM = 142.9 \cdot SD^{-1.90}, R^2 = 0.881 \quad \text{【式 (12)】}$$

比較(10)式與(12)式,可知 PEM 的 $\alpha=-1.90$,而 PPV 的 $\alpha=-0.95$,顯示 PEM 的 α 值為 PPV 之 α 值的 2 倍;PEM 的 $\kappa=142.9$,而 PPV 的 $\kappa=11.95$,也顯示出 PEM 的 κ 值為 PPV 的 κ^2 關係。

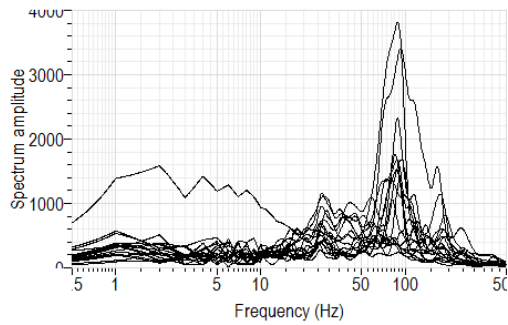
經由三種衰減現象討論,PGA 與構造物之關係較無規範或標準可供研判,至於 PV 與 EM 均可視為震波動能衰減,而且有規範標準供參考,例如 USBM、OSMRE 和 DIN4150 等¹³,故建議可以用 PPV 為評估準則之依據。

註¹³ 湯銘文、沈清全(2006),爆破振動對礦場邊坡及殘壁穩定性的影響研究,經濟部礦物局 94 年度研究發展專題,報告編號 94078。

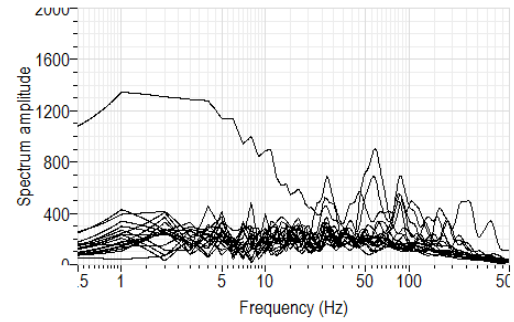
(a)KAU013 頻譜



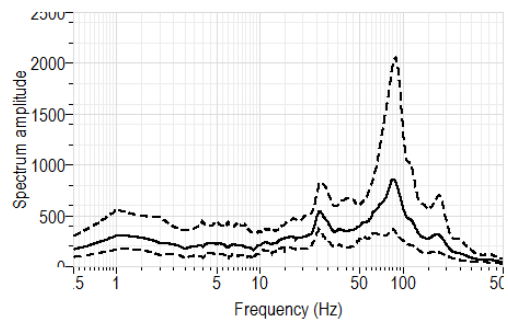
(b)S12@2.5R1~18 頻譜



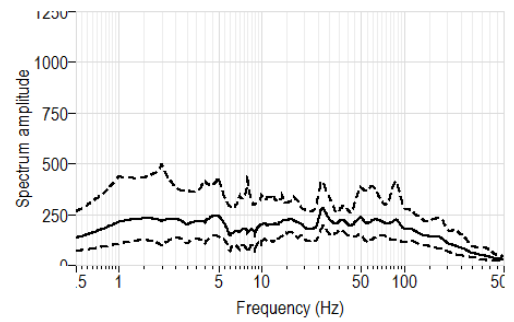
(e)S12@5R1~18 頻譜



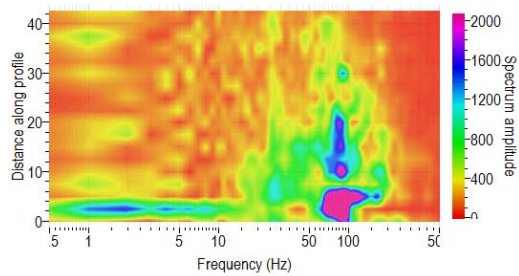
(c)S12@2.5R1~18 平均頻譜



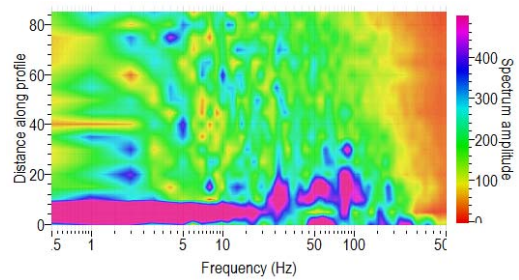
(f)S12@5R1~18 平均頻譜



(d)S12@2.5R1~18 距離頻譜



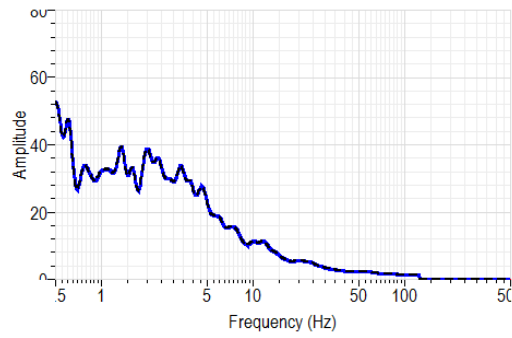
(g)S12@5R1~18 距離頻譜



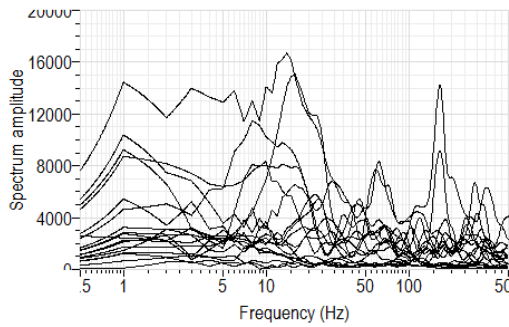
圖四 地震與爆破垂直向震波頻譜

資料來源：作者繪製

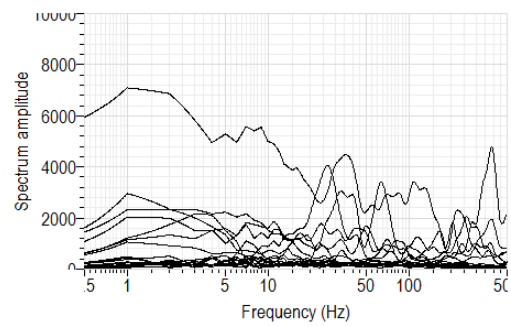
(a)KUA013 頻譜



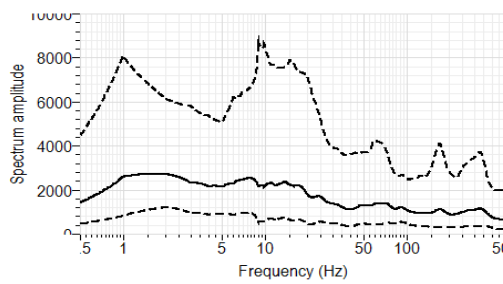
(b)S12@2.5R1~18 頻譜



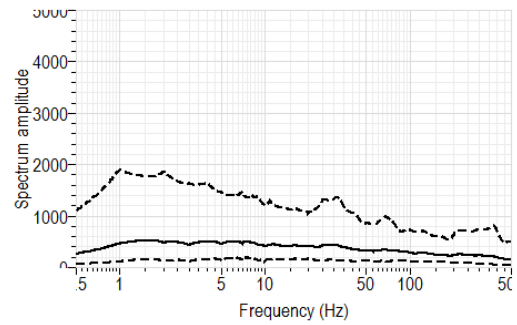
(e)S12@5R1~18 頻譜



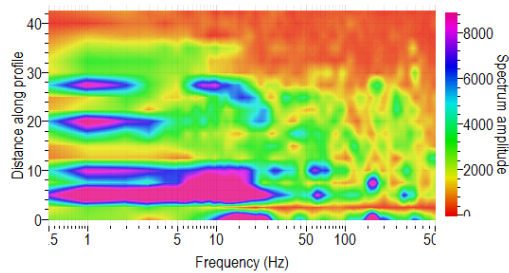
(c)S12@2.5R1~18 平均頻譜



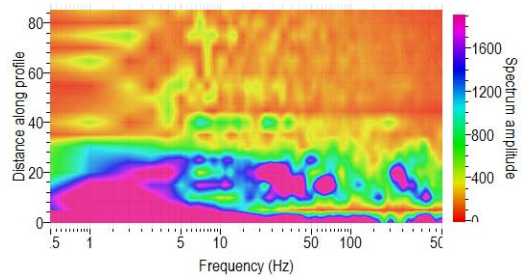
(f)S12@5R1~18 平均頻譜



(d)S12@2.5R1~18 距離頻譜

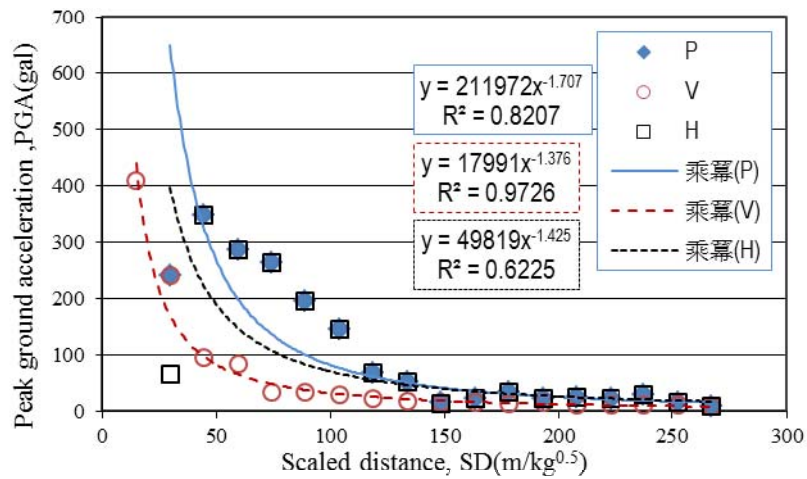


(g)S12@5R1~18 距離頻譜



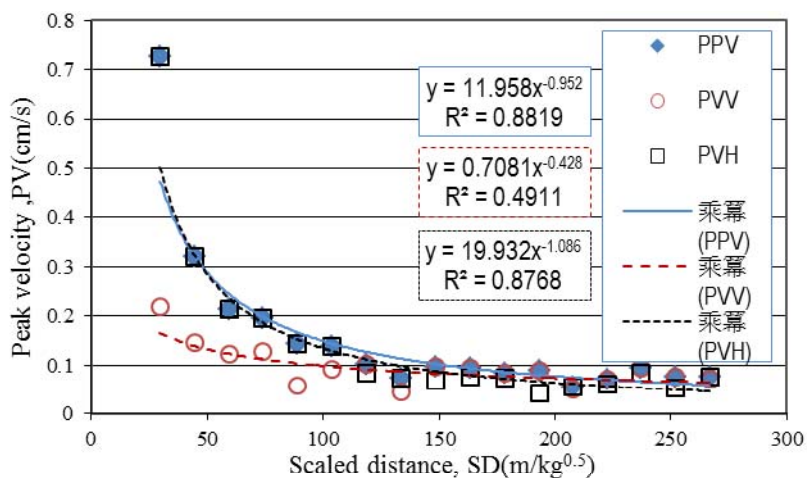
圖五 地震與爆破水平向震波頻譜

資料來源：作者繪製



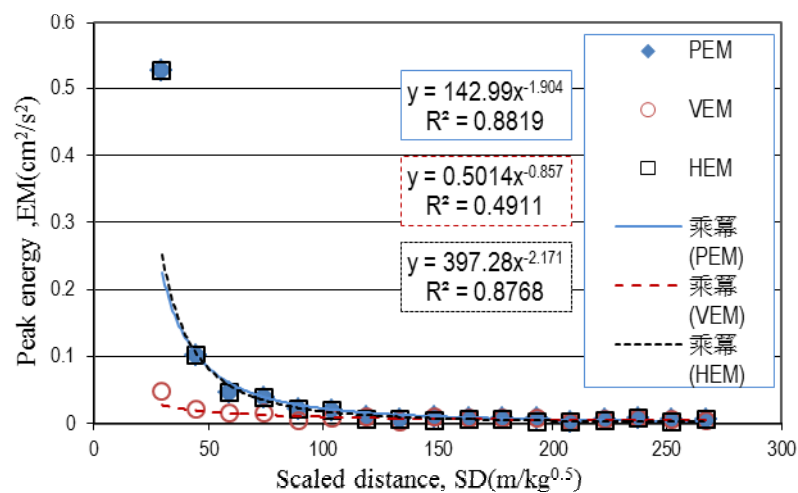
圖六 S12@5R1~13 的 PGA 衰減曲線

資料來源：作者繪製



圖七 S12@5R~13 的 PV 衰減曲線

資料來源：作者繪製



圖八 S12@5R1~13 的 EM 衰減曲線

資料來源：作者繪製

結 論

經由本文的研究可獲得結論如下：

一、無論地震或爆破震波，其水平方向的譜幅均比垂直向的譜幅大，尤其爆破震波的水平向除譜幅很大外，其頻率分佈從低頻至高頻均存在，而且主頻範圍在 1~10Hz 內，與地震引致建築物的共振頻率相似。

二、爆破震波於垂直方向的頻譜，對本場址而言，其主頻率約發生在 85Hz，而且在爆破近區域($\leq 25\text{m}$)從低頻到高频均有可能出現；相反地，在爆破遠區域(225m)則以低頻為主。

三、爆破震波衰減，無論用最大地表加速度(PGA)、速度峰值(PV)或瞬間能量峰值(EM)，其均與規格距離(SD)成指數遞減函數關係。此外，本文建議以質點速度峰值(PPV)當為評估準則，其除因具有普及性外，也具有可供參考之爆破地震安全評定標準。

四、本研究係針對一個場址、一種爆藥進行研究，目的在探討爆破震波與地震震波之間的差異性，並對爆破震波的衰減行為併加討論，但由於爆破震波受地質、地形等影響，故宜對不同場址、爆藥、以及地質構造等再加以研究，俾利獲得更清晰的爆破震波特性。

作者簡介

鄭冠豪少校、理工學院專 22 期、工校正規班 141 期、高雄應用科大土木防災所；曾任排長、連長、訓練官、教官，現任職於陸軍工兵學校戰工組教官。

參考文獻

1. 張義平、吳桂義(2007)，爆破地震波特性研究，礦業研究與開發，第27卷，第6期，第68-72頁。
2. 薛超(2008)，爆破地震波特性與天然地震波的比较，科學之友，第255-256頁。
3. Guowei Ma, Hong Hao, Yingxin Zhou (2000), Assessment of structure damage to blasting induced ground motions, Engineering Structures, 22, 1378–1389.
4. 張鳳鵬、烏萬昌、孫豁然、金校圓，人工爆破地震波特性的實驗研究，金屬礦山，總第342 期，第19-22頁。
5. Carino, N. J.(2001), The impact-echo method: An overview, Proceedings of the

- 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23,2001,Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001. 18 p.
6. The constructor civil engineering home, How the ground shakes during earthquake,
<http://theconstructor.org/earthquake/how-the-ground-shakes-during-earthquake/2648/> .
 7. 李洪濤、盧文波、舒大強、楊興國、易長平(2010) , 爆破地震波的能量衰減規律研究, 岩石力學與工程學報, 第29卷增1, 第3364-3369頁。
 8. Langefors U, Kihlstrom B.(1963), The modern techniques of rock blasting. New York: Wiley.
 9. Siskind DE, Stagg MS, Kopp JW, Dowding CH.(1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. RI 8507. Bureau of Mines, 1980.
 10. Hakan Ak_, Adnan Konuk (2008) , The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 686–694.
 11. Geopsy project(2012),<http://www.geopsy.org>
 12. 中央氣象局(2012),1022嘉義地震原始資料(ASCII),
<http://www.cwb.gov.tw/x7/earthquake/>
 13. 湯銘文、沈清全(2006), 爆破振動對礦場邊坡及殘壁穩定性的影響研究, 經濟部礦物局94年度研究發展專題, 報告編號94078。