

以地聲檢知器探測土石流發生之研究(第四年)

Detection of ground vibration generated by debris flow using geophones (IV)

主管單位：農業委員會水土保持局

黃清哲

Huang, Ching-Jer

國立成功大學水利及海洋工程學系

摘要

本計畫之研究主要是以地聲檢知器探測土石流發生時所產生的地表振動（或稱為地聲），並探討其特性。96 年度工作內容主要包括下列六項：一、國內十三個土石流觀測站附近土石地聲傳播特性之綜合分析；二、土石流地聲與空氣次聲特性比較；三、簡易土石流地聲警報器之製作與測試；四、地聲檢知器埋設及遷移地點諮詢服務；五、現場土石流地聲特性之分析及研究；六、訂定土石流發生地聲警戒基準值。綜合分析十三處土石流示範觀測站之土石地聲資料顯示土石地聲之頻率主要介於 10-200Hz，傳播速度在 100 到 500 m/s 之間。比較土石運動所形成的地聲與空氣中的聲音發現，聲音與地聲之頻率範圍一樣，且聲壓隨著距離的衰減與地聲相較非常小；顯示利用聲波監測土石流之發生有其潛力。簡易土石流地聲警報器已於 95 年度（第三年）製作完成，並完成初步的測試。本年度計畫中，持續於颱風侵台期間，將該警報器放置於豐山及神木村愛玉子溪等觀測站量測地聲。經由分析土石流觀測站蒐集到的地聲資料，發現於 2007 年 10 月 6 日 18 時 23-25 分在嘉義豐山觀測站有土石流發生，但規模不大，速度振幅小於 2 cm/s。

關鍵詞：地聲檢知器、土石流、地聲、空氣次聲、土石流地聲警報器

Abstract

The purpose of the project is to investigate the main characteristics of the ground vibrations resulting from debris flows using geophones. The in-situ tests show that frequency of ground vibrations at the sites of the debris flow observation station ranges between 10 and 200 Hz and propagation speed of ground vibrations lies between 100 and 500 m/s. Experiments performed for comparing the ground vibrations and airborne sounds due to rock motions reveal that ground vibrations decay much faster than airborne sounds not just in their strengths but also in the higher frequency band. Analysis of ground vibration signals collected from the automated debris flow monitoring indicates that a debris flow occurred at Hua-Shan on October 6 (16:23-16:25), 2007.

Key Words: geophone, debris flow, ground vibration, airborne sound, alarm device.

一、前言

臺灣地區每年洪汛期間，因土石流災害所造成的國土資源、百姓生命及財產損害不計其數。為了能對土石流的發生作一適當的警戒，並在土石流造成災害前，先行對當地民眾提出警告，以供居民作為防災、保障生命財產的方法。國內現行的土石流預警系統主要是採用累積雨量及降雨強度作為預警指標的事前預警方法，其警報準確度較低，應變時間較長。為了提高土石流警戒系統的準確度，近年來有愈來愈多的研究是針對準確度較高，應變時間較短的事發偵測方法，例如：鋼索感應器、光束阻斷器、及地聲感應器等。從以往現場觀察資料知道當土石流發生時，會產生巨大的低鳴聲(空氣次聲)及地表振動(土石流地聲)等物理現象。土石流地聲檢知器就是基於土石流流動時會有巨礫撞擊底床造成地表振動的特性而發展出來的。

本年度計畫將就全臺所建置十三處土石流觀測示範站址的土石流地聲特性，作一綜合評判分析；並探討土石流所產生地聲和空氣次聲之特性。本計畫並將 95 年度所發展出來的「簡易土石流地聲警報器」，於颱風期間放置於土石流之潛勢溪流，藉由監測地聲訊號之特性，判別土石流是否發生。藉由本計畫案之執行，將可提昇土石流防災應變能力及災情警戒通報效率。

二、相關理論

2.1 地聲簡介

通過地殼傳播的振動波稱為地聲 (underground sound, geosound) 或稱為地表振動 (ground vibration)，有地震地聲，山崩、滑坡的地聲，山洪、土石流的地聲等。當土石流流動時會使巨礫摩擦、撞擊和侵蝕河床而造成地表振動。此種振動波所造成空氣中的聲音，只是其能量的少部份，而沿著岩層中傳播的地聲則佔其大部份能量。由前人的研究中，我們得知土石流地聲主要介於 10 到 300 Hz 之間。當石頭或於渠道流動之礫石撞擊孔隙介質時，從震源處釋放巨大能量，在孔隙介質中產生強烈的振動，並以波的形式從震源向四周傳播。而大部分的能量根據波的性質和特點不同分別以實體波及表面波 (surface wave) 的形式在礫石層中傳播。表面波又稱雷利波 (Rayleigh wave)，其傳播方向以撞擊點為中心沿礫石層表面向四周進行。理論上，土石流地聲之傳播可視為彈性波在孔隙及顆粒介質中之傳遞。因此，在研究土石流地聲之特性時，必須仔細地探討傳遞介質之特性。到目前為止主要有以下三種理論，提出求得彈性波在孔隙介質中傳播速度的方法，分別為：(i) Gassmann 理論、(ii) Biot 理論、及(iii) 球體顆粒排列模式 (Duffy and Mindlin, 1957)。由實驗方法可測得土石碰撞底床產生之地聲，經分析後可得到土石地聲之頻率、傳遞速度及隨距離衰減之特性。

2.2 地聲之量測

本研究使用美國 Geo Space 公司所生產之 GS-3C Land Case 型地聲檢知器，量測土石運動所產生的地聲。此型地聲檢知器，如圖 1 所示，可量測三軸方向 (XYZ) 之地聲訊號；外部附有一易於判斷儀器水準之氣泡。本文中 X 軸為沿河道方向，Y 軸為

與河道垂直之方向，而Z軸為與河床垂直向上之方向。地聲檢知器屬於電磁感應式地震儀的一種，主要是利用法拉第感應定律之原理，其內部構造如圖2所示，將一物體懸掛在彈簧上，並使用金屬線纏繞此物體，使形成線圈，再利用固定於地表的磁鐵圍繞在線圈四周。當地表發生震動時，磁鐵便在物體之周圍上下運動，因此穿過線圈面的磁通量會改變，並會有電流感應於線圈上，產生電壓，經轉換後即可獲得地表振動之速度振幅。



圖 1、GS-3C Land Case 型地聲檢知器

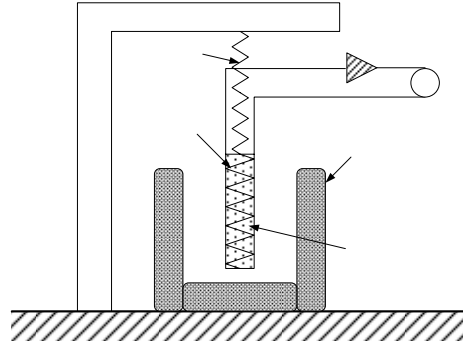


圖 2、地聲檢知器之內部構造

2.3 聲音量測系統

聲音的量測系統包含麥克風(B&K, Type 4190)、前置放大器(B&K, Type 2669)及濾波放大器(B&K, Type 2690)，如圖3所示。麥克風(圖4)為外部供電的電容式麥克風。麥克風主要由振動膜、基板、絕緣體和外罩所組成，如圖5所示。麥克風在使用時需外接電源以固定供給 200V 的電壓給麥克風和前置放大器使用，所能量測的頻率範圍由 3.15Hz ~ 20kHz，再加上它的內部噪音很低，可以用來量測大頻率範圍的聲音。電容式麥克風主要是靠著振動膜受壓後和基板間的距離改變而產生電壓的變化。

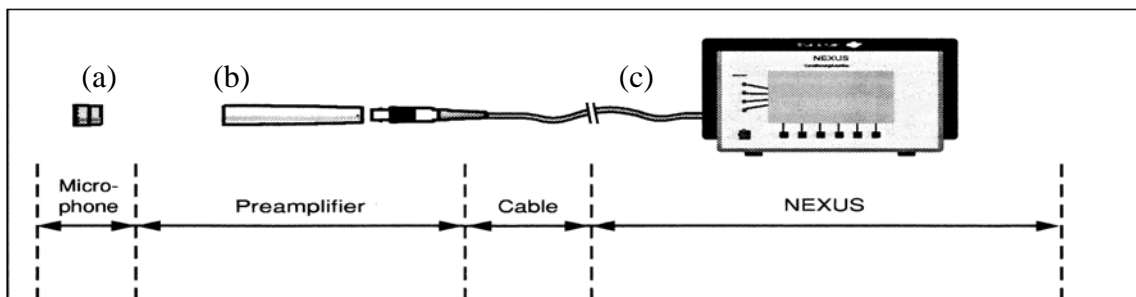


圖 3、次聲量測系統示意圖：(a)麥克風、(b)前置放大器、(c)濾波放大器



圖 4、4190 型麥克風之外觀

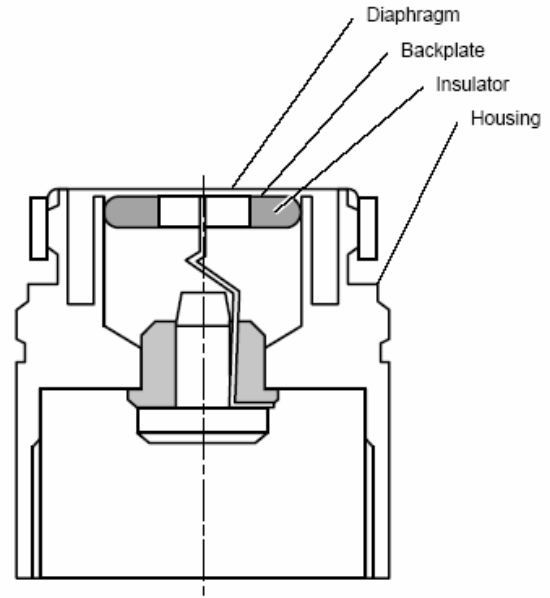


圖 5、麥克風 4190 型的內部構造圖

2.4 Gabor Transform

傳統上常利用快速傅立葉轉換將時域訊號轉換為頻域訊號，但對於分析土石流地聲訊號此類非連續且具有阻尼特性的瞬時訊號，若使用傅立葉轉換，其頻域訊號會產生失真的情形。土石流地聲訊號為非連續且具有阻尼的瞬時訊號，因此在本計畫中我們選用 Gabor transform 進行實驗分析。Gabor 轉換是一種對時域訊號作時間頻率分析的方法，若 $y(t)$ 為時域訊號，則可表示為：

$$y(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} g(t - n\Delta t) \exp(2\pi i m \Delta f t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} g_{m,n}(t) \quad (1)$$

式中 $C_{m,n}$ 為 Gabor 係數，Gabor 轉換之目的即在求解 Gabor 係數， Δt 及 Δf 分別表示時域和頻域上的分隔大小，而 $g(t - n\Delta t)$ 為單邊指數型視窗函數，可表示如下：

$$g(t) = \sqrt{2\lambda/\Delta f} \exp(-\lambda t) u(t) \quad (2)$$

其中 λ 為阻尼係數，而 $u(t)$ 為單位階梯函數。在求出 $g_{m,n}(t)$ 的正交函數後，帶入(1)式即可解得 $C_{m,n}$ 。由於 $g_{m,n}(t)$ 為一無因次之函數，因此 $C_{m,n}$ 的因次與 $y(t)$ 相同。

為了比較 FFT 及 Gabor 轉換在訊號處理上的差異，本研究分別以此兩種方法分析下述人為之訊號

$$h(t) = \sum_{i=1}^8 a_i e^{-\lambda_i(t-t_i)} \cos[2\pi f_i(t-t_i)] u(t-t_i) \quad (3)$$

式中 a 表示訊號之振幅， λ 為阻尼係數，其因次為 T^{-1} ， T 為時間， u 為單位階梯函數， f 為頻率。(3) 式中包含了八組訊號，其出現時間分別為 $t_i (i=1, \dots, 8) = 2, 4, 4, 7, 7, 9, 10, 13$ sec，頻率為 10、3、8、10、25、8、15、3 Hz，振幅為 0.5、0.3、0.2、0.7、1、0.6、1、0.2，阻尼係數為 0.5、0.7、0.6、0.4、0.8、0.5、0.7、0.6。圖 6(a) 為時域上的訊號，圖 6(b) 為圖 6(a) 之時域訊號經 FFT 分析所得之頻譜訊號，而圖 6(c) 為利用 Gabor 轉換所得之結果，雖然訊號的阻尼係數都不盡相同，但圖 6(c) 中係假設阻尼係數為 0.5 來進行訊號分析。比較圖 6(b) 及圖 6(c) 可發現 Gabor 轉換能適切地呈現訊號在時域和頻域上的特性，經由 Gabor 轉換後的圖 6(c)，可清楚的分析出八組訊號的頻率及出現時間，而 FFT 分析僅能分析出訊號的頻率成分，無法得知各頻率出現的時間點，容易誤判為只有五組訊號。

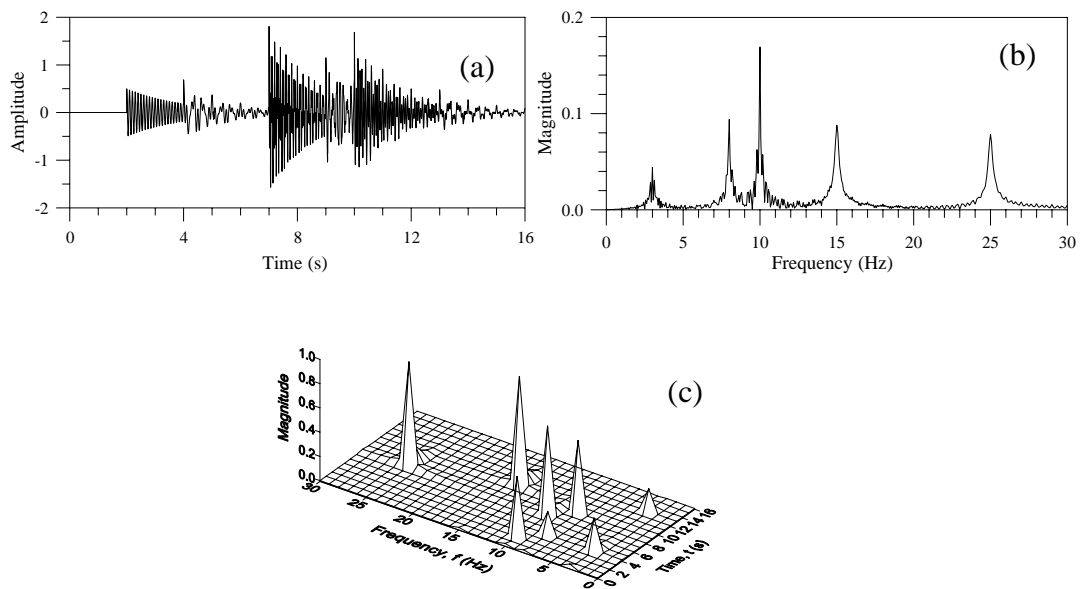


圖 6、複合型阻尼性訊號；(a) 時域訊號、(b) 經 FFT 分析之結果、及 (c) 經 Gabor 轉換分析之結果

三、結果分析與討論

3.1 觀測站之土石地聲特性綜合分析

到目前為止，行政院農業委員會水土保持局已於全台設置了十三個土石流示範觀測站。各觀測站之觀測儀器主要有鋼索檢知器、地聲檢知器、雨量計、及數位攝影機等。本研究已於過去三年（93~95 年）的計畫中分析出十三處土石流觀測示範站現地的地聲傳播速度及衰減係數。試驗方法係利用不同重量之石頭從不同高度撞擊示範觀測站附近之河床產生地聲訊號，並藉由三支離撞擊點不同距離的地聲檢知器接收地聲訊號。所接收到的時域訊號利用快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform, FFT）轉換為頻域訊號，並利用 Gabor Transform 將時域訊號轉換為時間—頻域訊號。由這些轉換過的訊號可看出地聲之頻率及不同頻率之地聲其出現的時間。此外，藉由分析地聲抵達不同地聲檢知器時的時間及振幅，可推算出地聲的傳遞速率及衰減特性。土石流示範觀測站現地實驗結果顯示地聲頻率主要在 10 到 250 Hz 之間，而地聲傳遞速率主要在

100 到 500 m/s 之間，衰減係數主要在 0.1 到 0.3 m^{-1} 之間，其中地聲傳遞速率及衰減係數受地質特性影響較大，故每一站差異性較大。因此，93~95 年的計畫成果報告中，針對每一個土石流示範觀測站皆有現地實驗結果（黃，2004、2005、2006）。在假設土壤砂粒為石英材質的條件下，利用球體顆粒排列模式所得地聲傳遞速度為 241 m/s。實驗結果顯示，當土壤中粗顆粒礫石含量較少時，地聲傳遞速度的理論值與實驗結果較為接近。

3.2 土石流地聲與空氣次聲特性比較

圖 7 所示為本研究量測石頭撞擊河床所產生地表振動及空氣聲音之儀器配置示意圖。實驗係於雲林華山土石流觀測站附近之溪床進行。圖 8 至圖 10 所示分別為第一支到第三支地聲檢知器（Y 軸）所量測到 30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床所產生的地表振動訊號，其中(a)圖為時域訊號而(b)圖為頻域訊號。麥克風所量測到的相對結果示於圖 11 至圖 13。

由實驗結果可知，石頭撞擊河床所產生的地聲頻率範圍，與聲音的頻率範圍一致。地聲訊號的振幅與聲音訊號的振幅相較明顯衰減很大；此外，高頻的地聲衰減比低頻的地聲快，因此，離撞擊點較遠的地聲檢知器無法偵測出高於 100Hz 的地聲訊號，但是三支麥克風所量測到的聲音訊號卻能完整的顯現出頻率範圍。重量為 50 公斤的石頭產生之地聲及聲音訊號的尖峰頻率值都比重量為 30 公斤的石頭低，因此當所選撞擊石頭的重量越重，所產生訊號的主要尖峰頻率值會往低頻的方向移動。在石頭撞擊河床的過程中，雖然隨著撞擊石頭的重量和體積的增加，產生的訊號頻率值會往低頻方向移動，但是所得結果並沒有次聲(頻率低於 20Hz)訊號的產生。

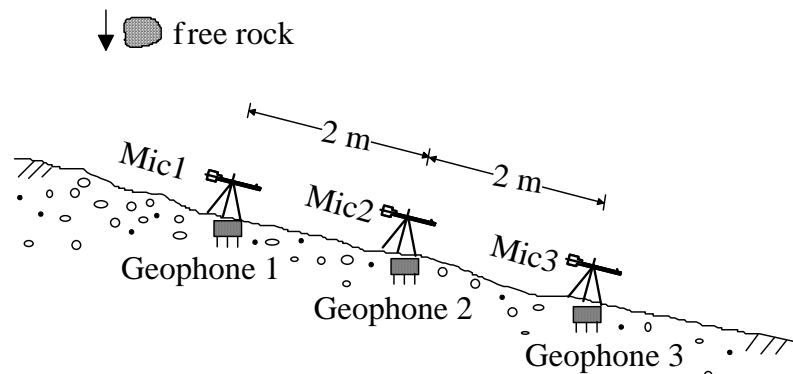


圖 7、石頭撞擊河床所產生地表振動及空氣聲音量測示意圖

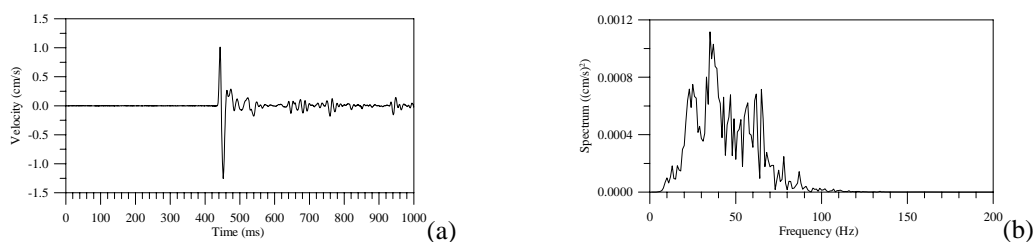


圖 8、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第一支地聲檢知器所量測到的地表振動訊號；(a)時域訊號、(b)頻域訊號

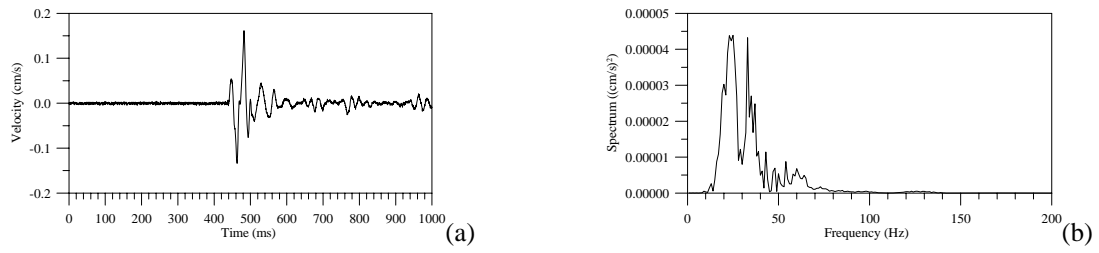


圖 9、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第二支地聲檢知器所量測到的地表振動訊號；(a)時域訊號、(b)頻域訊號

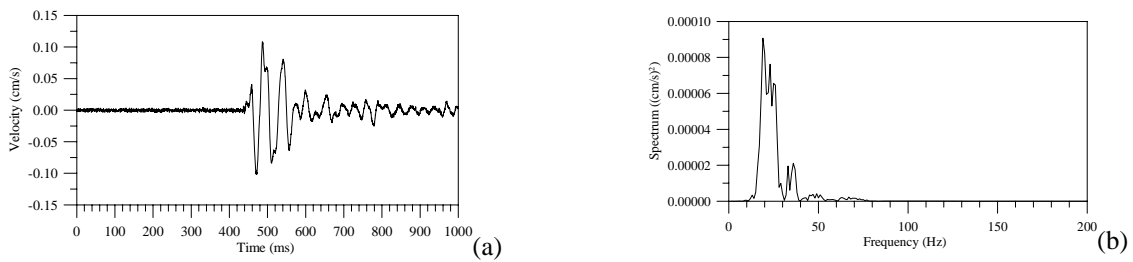


圖 10、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第三支地聲檢知器所量測到的地表振動訊號；(a)時域訊號、(b)頻域訊號

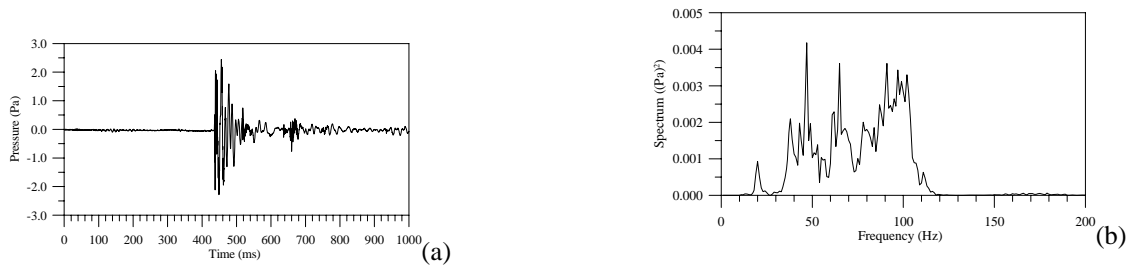


圖 11、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第一支麥克風所量測到的聲音訊號；(a)時域訊號、(b)頻域訊號

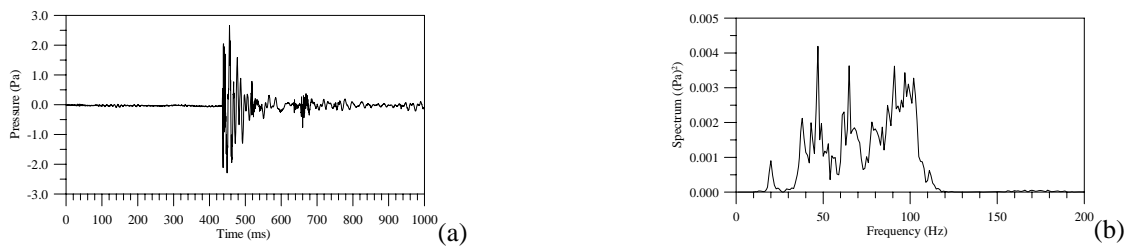


圖 12、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第二支麥克風所量測到的聲音訊號；(a)時域訊號、(b)頻域訊號

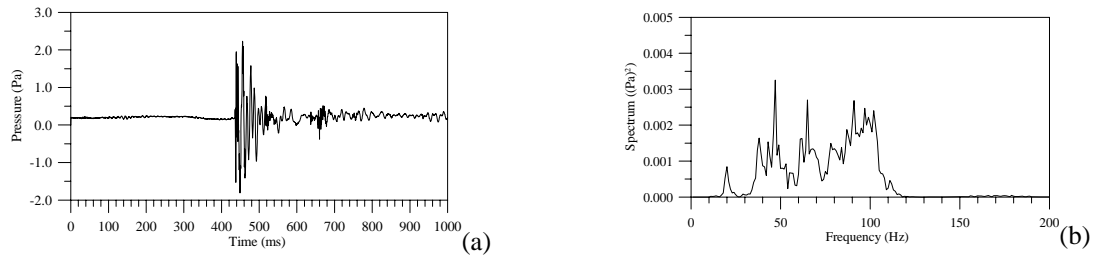


圖 13、30kg 重的石頭從 1.2m 高掉落撞擊河床第三支麥克風所量測到的聲音訊號；(a) 時域訊號、(b) 頻域訊號

3.3 簡易土石流發生警報器之製作與裝設之研究

為瞭解土石流發生時，地聲警戒值是否能正確判斷土石流之發生，本計畫係以所訂定土石流發生地聲警戒基準值，進行現地實際驗證及探討。經由今年各颱風期間可能帶來豪雨，並引發土石流，我們選定嘉義豐山土石流觀測站和神木村愛玉子溪土石流觀測站為實地驗證。該驗證期間雖無發生土石流以供實證，但從儀器固定時間傳回訊息，及野外獨立運作至颱風過境等成果，相信該警報器確實有其預警功能。

3.4 地聲檢知器埋設及遷移地點諮詢服務

對於地聲檢知器埋設及遷移地點，建議地聲檢知器以埋設在下列四個地點較為理想：混凝土壩體上、溪床底部、乾砌石護岸上、及混凝土壩體上游靠近河岸兩側不易沖刷處。埋設在不同的位置各有不同的優缺點，可以視環境現況作適當選擇。依據民國 93 年 7 月 2 日敏督利颱風入侵台灣所引起的土石流經驗，將地聲檢知器埋設在混凝土壩體上較為安全，但所接收到的地聲訊號較弱；相反的，若將地聲檢知器埋設在溪床河床底部或乾砌石護岸上，所接收到的地聲訊號較明顯，但也較容易被沖毀。

3.5 現場土石流地聲資料之分析及研究

經分析本年度(2007年)10月6日18時23~25分豐山土石流觀測站所收錄的地聲資料，發現埋設於上游之地聲檢知器收錄到明顯的土石流地聲訊號。土石流的頻率範圍在 8~60 Hz 之間，持續時間約為 18 秒。圖 14 為下午 18 時 24 分之地聲訊號分析結果，由圖中可看出土石流之最大速度振幅約為 1.5 cm/s，持續的時間約為 30 秒。18 時 25 分之地聲訊號並不明顯，但從頻域圖可知頻率主要集中在 8 到 50 Hz 之間，因此初步判斷此時所量到的訊號屬於土石流尾流段。由收錄到的地聲訊號可知這場土石流持續的時間長達兩分鐘，其速度振幅最大約為 1.5 cm/s，並沒有比 93 年 7 月 2 日神木村愛玉子溪下游之土石流地聲訊號大，但其持續的時間超過 10 秒且地聲頻率範圍介於 8~60 Hz 之間，因此可以確定當日已發生小規模的土石流。

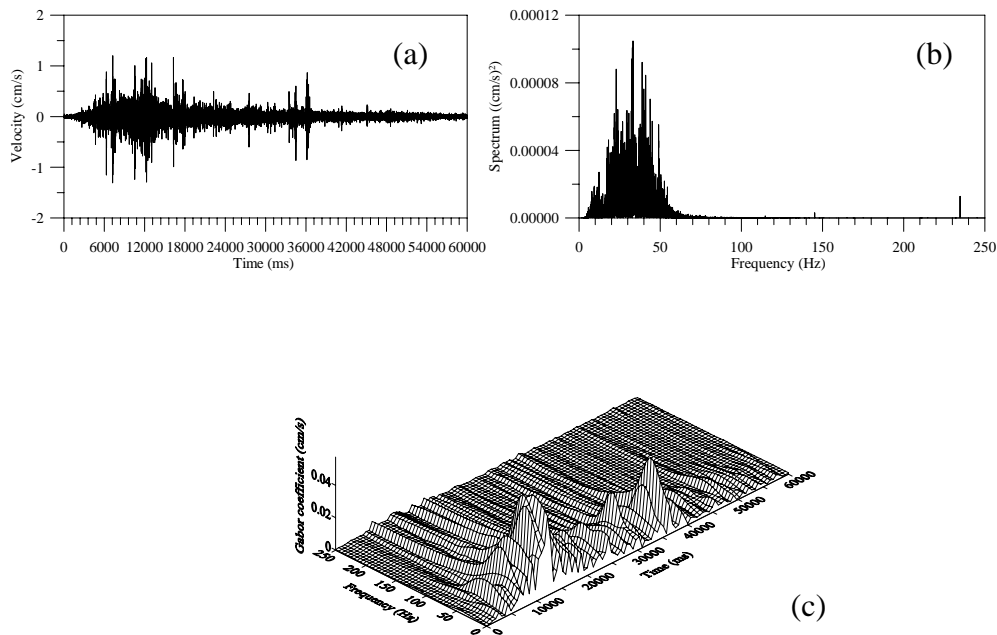


圖 14、豐山站 96 年 10 月 06 日下午 18 時 24 分上游地聲檢知器 (Z 軸) 地聲資料分析結果：(a)時域訊號、(b)經 FFT 分析之頻譜、及(c)經 Gabor 轉換分析之訊號

3.6 土石流地聲警戒基準值之訂定及校驗

由於每個地區所發生之土石流地聲特性不大相同，本研究建議台灣地區土石流發生警戒基準值，以地聲能量大小、持續時間、及土石流特徵頻率三個參數來訂定。根據 93 年 7 月 2 日神木村土石流、94 年 7 月 19 日九份二山土石流、及本年度豐山土石流地聲資料，得出下列土石流發生的門檻值：地聲最大速度振幅超過 3 cm/s，持續時間超過 13 秒，且地聲頻率介於 10~100Hz。

四、結論

本計畫實施四年 (2004-2007) 所完成的相關工作整理如下：

1. 完成水土保持局所設立十三處「土石流示範觀測站」現地地聲傳播特性之試驗研究，針對土石運動所造成地聲之頻率、傳遞速度及衰減係數作了詳細的試驗，每一站之試驗結果皆編成專冊，以供參考。
2. 鑑於土石流地聲理論上可視為彈性波中之表面波，或稱為 Rayleigh waves，因此本計畫也試著從現有的彈性波在孔隙介質中傳播的理論，分別為(i) Gassmann 理論、(ii)Biot 理論、及(iii)球狀顆粒排列模式，估算出地聲的速度，並與實驗結果比較。
3. 由於土石流顆粒組合之不同，會影響到其地聲之特性，因此，本計畫也於實驗室中探討不同型態 (礫石型、一般型、泥流型) 之土石流，其地聲之特性。
4. 分析土石流觀測站所蒐集到的土石流地聲資料顯示，在 2004 年到 2007 年間共監測到三場較具規模之土石流，分別為：(i) 2004 年 7 月 2 日 16 時 41 分至 42 分發生於神木村愛玉子溪之土石流，(ii) 2005 年 7 月 19 日 23 時 52 分至 24 時 0 分發生於九份二山之土石流，(iii) 2007 年 10 月 6 日 18 時 23 分至 25 分發生於嘉義豐山之土石流。上述第一場土石流也有 CCD 攝影機拍錄到的影響，可與地聲資料相互比較。
5. 地聲檢知器埋設及遷移地點諮詢服務。由歷年來的監測資料及地聲檢知器之損害情

形，建議地聲檢知器埋設地點。

6. 訂定土石流發生地聲警戒基準值。根據國內三場土石流地聲訊號之資料，本計畫初步訂定土石流發生的門檻值為：地聲訊號最大速度振幅已超過 3 cm/s，持續 13 秒以上，且地聲頻率介於 10~100Hz。
7. 土石流地聲與空氣次聲特性比較。由於研究顯示土石地聲衰減相當快，當地聲檢知器偵測到土石流地聲時，土石流之波湧已快接近地聲檢知器，無法達到早期預警之功能。因此，本計畫也利用麥克風量測土石運動所造成空氣中的聲音；結果顯簡易土石流地聲警報器之製作與測試。
8. 基於我們對土石流地聲偵測之經驗與對土石流地聲特性之瞭解，本計畫也發展製作出「簡易土石流地聲警報器」。經多次測試，性能良好。

參考文獻

1. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告，行政院農委會水保局計劃，計劃編號：SWCB-93-130。
2. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄一：郡坑土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
3. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄二：神木村土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
4. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄三：九份二山土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
5. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄四：華山土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
6. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄五：射馬干土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
7. 黃清哲 (2004) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第一年) — 成果報告 (附錄六：土石流觀測站土石流地聲訊號分析結果)，行政院農委會水保局計劃。
8. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告，行政院農委會水保局計劃，計劃編號：SWCB-94-094。
9. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告 (附錄一：神木村愛玉子溪土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
10. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告 (附錄二：大興土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
11. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告 (附錄三：鳳義坑土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
12. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告 (附錄四：大粗坑土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
13. 黃清哲 (2005) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第二年) — 成果報告 (附錄五：白布帆土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
14. 黃清哲 (2006) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第三年) — 成果報告，行政院農委會水保局計劃，計劃編號：SWCB-95-094。

15. 黃清哲 (2006) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第三年) — 成果報告 (附錄一：松鶴土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
16. 黃清哲 (2006) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第三年) — 成果報告 (附錄二：上安土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
17. 黃清哲 (2006) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第三年) — 成果報告 (附錄三：豐山土石流觀測站現地實驗結果)，行政院農委會水保局計劃。
18. 黃清哲 (2007) 以地聲檢知器探測土石流發生之研究 (第四年) — 成果報告，行政院農委會水保局計劃，計劃編號：SWCB-96-080。
19. Duffy, J. and R. D. Mindlin (1957), Stress-strain relations and vibrations of a granular medium, *J. Appl. Mech.*, Vol. 24, pp. 585-593.