

土石流光纖感測系統之整合與應用

黃清哲^{[1]*} 朱崇銳^[1] 田宗謨^[2] 尹孝元^[3]

摘 要 本研究藉由組合光纖光柵加速度計、解調儀、及其他相關元件，發展一套可偵測土石流之光纖感測系統。現地測試結果顯示，與目前常用含地聲檢知器的土石流感測系統相較，本系統所測得地表振動訊號之訊雜比比前者高 10 dB。在測試系統量測效能後，將此系統分別架設於南投縣信義鄉神木村之愛玉子溪及出水溪上。系統中採串連方式配置四個光纖加速度計，並於 2012 年監測到多場土石流。觀測結果顯示，光纖感測系統所測得土石流所造成地表振動之加速度，與過去地聲檢知器所測得土石流地表振動速度，兩者頻率一樣，均為 10 - 150 Hz。由於光纖光柵加速度計相較於地聲檢知器更為靈敏，因此，除了可應用於偵測土石流外，也可應用於監測會產生地表振動的其他坡地災害，如：落石及山崩等。

關鍵詞：光纖感測系統、光纖光柵、土石流、地聲。

Integration and Application of a Fiber-Optic Sensing System for Monitoring Debris Flows

Ching-Jer Huang^{[1]*} Chung-Ray Chu^[1] Tsung-Mo Tien^[2] Hsiao-Yuen Yin^[3]

ABSTRACT This study presents an innovative fiber-optic sensing system for monitoring debris flows. The system mainly comprises an interrogator and four fiber Bragg grating accelerometers. The field tests show that signal-to-noise-ratio (SNR) of the fiber-optic sensor is 10 dB higher than that of a geophone. Following confirmation of the reliability of the proposed sensing system, the systems are deployed along the Ai-Yu-Zi and Chu-Shui Creeks in Nantou County, Taiwan, for monitoring debris flows. The four accelerometers are installed in series. The systems have detected several debris flows in 2012. The monitored data reveal that the frequency range of the acceleration of ground vibration is 10-150 Hz, which is the same as that of the velocity of ground vibration detected by a sensing system that includes geophones. Because the fiber-optic sensing system is more sensitive than the geophone system, the proposed fiber-optic sensing system is highly promising for use in monitoring natural disasters that generate ground vibrations.

Key Words : Fiber-optic sensing system, fiber Bragg grating, debris flow, ground vibration.

一、前 言

臺灣位於菲律賓海板塊與歐亞板塊交界處，地震

頻繁，屬於不穩定地質。加上全球氣候變遷影響下，極端氣候出現頻率增高，使得每年洪汛期間坡地災害頻傳。土石流為近年來影響台灣甚鉅的坡地災害之

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

[2] 國防部軍備局中山科學研究院

Chung-Shan Institute of Science and Technology, Armaments Bureau, M.N.D., Taoyuan, Taiwan.

[3] 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Nantou, Taiwan.

* Corresponding Author. E-mail : cjhuang@mail.ncku.edu.tw

一，2001年桃芝與納莉颱風及2009年莫拉克颱風均造成土石流災情。近30年來國內外許多學者致力於發展各式土石流監測系統 (Itakura et al., 2005)，透過各種量測方法了解土石流誘發條件與流動特性，期望應用於土石流預警，保障人民安全與降低經濟損失。土石流警報系統大致上可分為兩類：事前預警系統 (advance warning system) 與事件警報系統 (event warning system) (Arattano and Marchi, 2008)。事前預警系統以監測水文資訊作為預警條件，例如雨量計、土壤含水量計 (soil moisture sensor) 等儀器，當條件達設定門檻時發出警報。此預警系統的優勢為應變時間較長，但準確率低。而事件警報系統為量測土石流運動時的流動變化與產生之訊號，例如超音波水位計、鋼索檢知器、地聲檢知器 (geophone) 等儀器。此警報系統量測之準確率高，但預警時間極短，較常作為流況觀測工具。台灣各地目前所設立的土石流觀測站中，同時採用上述兩類型警報系統，以加強土石流警報之效能 (尹孝元 et al., 2006)。

土石流為礫石、泥砂、與水的混合物，而由重力驅動的快速流動體 (Iverson et al., 1997; Johnson and Rodine, 1984)；其具有三項主要特徵：一、前端波湧夾帶大量巨石、泥沙、及水；二、後端為泥流且流量漸減；三、常伴隨著明顯低鳴聲與地表振動 (Takahashi, 1991)。地表振動俗稱為地聲，為礫石在河床上滾動與撞擊所造成，此種振動波會透過河床傳遞，而部份能量也會透射入空氣中，以聲波的形式於空氣中傳遞，因此藉由量測地表振動與空中聲音便可偵測土石流之發生。土石流地聲具有三點特性：(1) 振動頻率響應範圍為 10–150 Hz；(2) 土石流前端波湧主頻 10–30 Hz，後端尾流主頻為 60–80 Hz，成因為較大礫石會集中於前端波湧；(3) 地聲振幅與土石流流量成正比，因此測得訊號具有一定延時 (Huang et al., 2007)。此三項特性為判斷土石流發生之依據。目前國際上有關土石流地聲的研究，大多數於土石流現地安裝地聲檢知器，量測土石流發生時所產生的地聲，並探討地聲訊號的特性 (Arattano, 2000; Arattano et al., 2012; Berti et al., 2000; Burtin et al., 2009; Burtin et al., 2010; Huang et al., 2007; Itakura et al., 1997; Okuda et al., 1980; 黃清哲 et al., 2007)。然而，地聲於地表中傳遞時，振波能量會隨距離衰減，而且衰減程度與頻率相關 (Toksöz and Johnston, 1981)。Suriñach et al. (2005) 以地震儀量測多起地震也獲得此明確結果，當地震 (local earthquake)、區域地震 (regional earthquake)、及遠震

(teleseism) 離量測儀器分別為 52.8 km、228.2 km、及 6931.6 km 時，所測得地表振動頻率範圍分別為 1–50 Hz、1–12 Hz、及 0.1–1 Hz。由現場量測資料得知土石流地聲的頻率介於 10–150 Hz 之間 (Huang et al., 2007)，而且振動規模遠小於地震，因此土石流地聲在地表中衰減較快，必須在局部區域內量測，才能偵測到明顯的地聲訊號。若能將感測器佈放於接近土石流的源區，則能提早偵測到土石流發生。然而，必須使用更長的纜線，才能將感測器佈放於更接近土石流源區的位置，傳統的地聲檢知器是由銅軸電纜傳輸類比訊號，纜線愈長則訊號衰減愈大，雜訊愈多，傳輸距離因此受到限制。

國際上針對土石流所造成的空中聲音之研究成果較少。Huang et al. (2008) 探討石塊於河床上運動產生的地表振動及空中聲音訊號的差異，發現地聲及空中聲音訊號的頻率範圍皆介於 10–150 Hz 之間，但空中聲音訊號衰減比地聲慢，因此建議也可藉由監測空中聲音訊號偵測土石流。Kogelnig et al. (2011) 利用麥克風監測到土石流會產生 4–15 Hz 低頻空氣次聲 (infrasound)，因此建議可同時量測地表振動及空氣次聲來偵測土石流。

光纖感測器主要是利用光訊號感測物理環境之變動，近來已發展出多種感測儀器，例如：位移計、溫度計、加速度計等 (Kirkendall and Dandridge, 2004)。其具有衰減率低、敏感度高、及不受電磁效應干擾之特性，因此適用於長距離、微弱訊號的偵測。光纖光柵 (Fiber Grating) 最早由 Hill et al. (1978) 發現摻鉻光纖中的光感性，利用氫離子雷射與纖核中的光感性造成光纖纖核發生折射率週期性的變化，形成世上第一個寫製完成的光纖光柵。Meltz et al. (1989) 將感光性的光纖曝照於高能量紫外雷射使折射率變大，稱之光纖布拉格光柵 (fiber bragg grating, FBG)。Hill et al. (1993) 利用相位光罩製作光柵的方法，使得光纖光柵的製作技術趨於成熟。經過 20 餘年的發展，至今已成功的應用於實際物理量的監測。由於 FBG 對於溫度及壓力的靈敏度相較於其他種類之光纖感測器具有較佳的結果，因此 FBG 最早應用於溫度及壓力之物理量監測 (Morey et al., 1989)。後續 FBG 也廣泛應用於基礎結構物監測 (Proshaka et al., 1992)、合成材料結構監測 (Bullock et al., 1992) 及壓力計和加速度計之開發應用 (Berkoff and Kersey, 1996)。目前 FBG 應用於土石流監測之文獻極少，Pei et al. (2011) 曾以光纖傾斜儀 (inclinometer) 附掛於金屬桿件上，藉由量測桿件變形以

偵測土石流之發生。以此方法偵測土石流，僅可測得土石流之第一次波湧，無法進行多次量測，而且必須準確安裝於土石流發生地點，才可測得土石流。

綜合上述土石流地表振動量測之研究歷程可知，土石流地表振動監測系統目前受限於監測範圍。本研究發展一套可偵測土石流之光纖感測系統，系統主要含有光纖加速度計、解調儀、及其他相關元件。在測試系統量測效能後，將此系統分別架設於南投縣信義鄉神木村之愛玉子溪及出水溪上，並於 2012 年監測到多場土石流 (黃清哲, 2012)。由於光訊號在光纖中傳遞時衰減很小，此系統可延伸到大範圍；而且光纖系統靈敏度高、及訊號不易受到電磁雜訊干擾之優勢，更可擴大感測範圍，因此適合做為區域性坡地災害監測之用。本文後續章節將介紹光纖感測原理、光纖系統與不同感測器效能測試、系統架設方式，最後是土石流案例分析。

二、光纖光柵感測原理

光纖布拉格光柵 (fiber bragg gratings, FBG) 是在光纖上做出週期性狹縫的干涉條紋 (Hill et al., 1978)。圖 1 為光纖光柵原理示意圖，其中光柵干涉條紋之週期間距為 Λ 。當寬頻光束通過光柵時，會造成符合布拉格共振波長的光波被反射，而其他波長的光波則繼續向前傳遞 (Kersey, 1997)。布拉格反射波長 λ_B 可表示為

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中 n 為光纖纖心的有效折射率， Λ 為光柵之週期間距。當光纖受到應變導致光柵週期間距改變時，反射光之波長亦隨之改變，而形成波長飄移。若受應變後光柵週期間距改變量為 $\Delta\Lambda$ ，由 (1) 式可推導出波長飄移量與週期間距改變量之關係式為

$$\Delta\lambda_B = 2n\Delta\Lambda \quad (2)$$

光柵週期的改變主要受溫度與應變的影響 (Kersey et al., 1997)，其間的關係可表示如下：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\alpha + \frac{(dn/dT)}{N} \right] \Delta T \quad (3)$$

式中 ε 為光纖應變量， ΔT 為環境溫度變化量， P_{ij} 為 Pockels 係數， ν 為光纖材料的蒲松比 (Poisson's

ratio)， α 為光纖材料的熱容係數 (thermal expansion)。由於土石流流動延時大約是數十秒至數分鐘，而溫度改變的時間尺度為數小時，因此溫度改變所造成之波長飄移量在短時間振動量測中並不明顯，(3) 式中最後一項可被忽略。(3) 式中 $1 - (n^2/2)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 為一常數，可以光彈係數 P_e 取代。因此，(3) 式可改寫如下

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = P_e \varepsilon \quad (4)$$

由 (4) 式可得到波長飄移量與應變量間之關係。

近年來，光纖光柵已廣泛應用在各種不同物理量的量測，也有不少市售產品。本研究應用光纖光柵感測器量測土石流所產生的地表振動，感測元件屬於加速度計。本文以彈簧質量系統簡要說明加速度計之運作原理，參閱圖 2。當土石流中的礫石撞擊河床時，可視為對此系統質量 (河床土體) 施加一外力。假設系統質量為 M ，其加速度為 a ，而形變量為 ΔL ，則 (4) 式中的應變量 ε 為 $\Delta L/L$ ，因此

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

根據虎克定律 (Hooke's law)，外力與形變的關係可寫為

$$\Delta L = \frac{Ma}{k} \quad (6)$$

其中 k 為彈性常數 (spring constant)。由此可知此簡易動態系統之共振頻率為 $\sqrt{k/M}$ 。作用於光纖之外力 $k\Delta L$ ，會產生內應力 σ ，其值為 $k\Delta L/S$ ，其中 S 代表光纖截面積。因此，(6) 式中的彈性常數可改寫為

$$k = \frac{ES}{L} \quad (7)$$

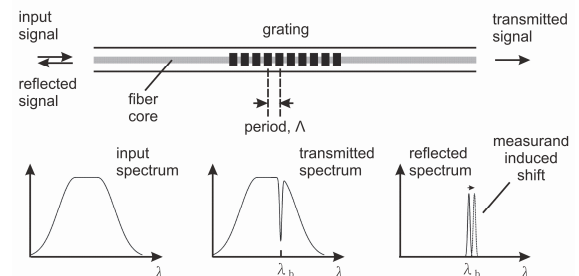


圖 1 光纖光柵反射原理示意圖 (Kersey et al., 1997)

Fig.1 Principles of fiber Bragg grating sensors

其中 E 為光纖的彈性模數 (elastic modulus)。由 (5)-(7) 式可得出光波長飄移量與加速度之關係式如下 (Baldwin et al., 2005)：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{P_e M}{ES}\right)a \quad (8)$$

上式中 $P_e M/ES$ 為一特性常數，代表加速度與波長飄移量呈一線性比例關係。隨著操作波長 λ_B 不同，不同加速度計中波長飄移量與對應的加速度也會不同。

多工技術 (multiplexing) 是光纖感測一項重要特性，其是指同一條光纖中可傳遞多種波長的光訊號，再依不同條件 (如波長、頻率等) 分割成多個通道，即可在同一條光纖內傳輸更多資料。本研究採用分波多工 (wavelength division multiplexing, WDM) 技術處理，利用寬頻光源與多工器 (multiplexer) 將多個不同波長的光束同時放在一條光纖內傳遞，經過光柵後數

道不同波長之反射光回傳，再以解多工器 (demultiplexer) 將光纖中不同波長的訊號還原，如圖 3 所示。目前國際上常使用的頻帶有 C-Band 和 L-Band。其中 C-Band 的波長範圍在 1520 – 1570 nm，而 L-Band 的波長範圍在 1570 – 1610 nm。

三、系統量測效能測試

本研究發展一套可偵測土石流之光纖感測系統，主要設備為：一台光纖解調儀 (interrogator)、四支 FBG 光纖光柵加速度計、及其他相關元件。光纖解調儀內部包含寬頻雷射光源、耦合器、檢光器、類比數位轉換系統、資料記錄系統及 Windows 作業系統，其功能用來發射寬頻光源與訊號解調並記錄量測數據。FBG 光纖光柵加速度計為感測加速度之儀器，埋設於河岸旁，測量土石流撞擊河床之地表振動。光纖解調儀是使用 FiberSensing 公司所製造的 FS 5500 Benchtop Braggscope。該解調儀的光源頻段為 C band (1520 – 1570 nm)，解析度為 0.1 pm。FBG 光纖光柵加速度計則是使用 FiberSensing 公司所製造的 FS6500 Accelerometer。其偵測敏感度為 10 pm/g，共振頻率為 430 Hz，操作頻率範圍為 10 – 300 Hz，所能量測的加速度範圍為 ± 40 g，最小量測加速度為 20 mg，系統操作溫濕度範圍分別為 $-20 - 80^\circ\text{C}$ 及 $< 90\% @ 40^\circ\text{C}$ 。

為了測試光纖系統的量測效能，本研究將 FBG 光纖光柵加速度計、地聲檢知器、及麥克風同時量測相同振動源，以此方法比對光纖系統之量測效能。本次實驗在神木村出水溪河岸一處高約 5 m 的斜坡進行，實驗配置如圖 4 所示，斜坡下方之河床土體中埋設光纖加速度計與地聲檢知器，埋設點旁邊則架設麥克風，並將三種儀器分別接上電腦與解調儀。斜坡上方為礫石堆，實驗開始測量後將礫石朝斜坡推下，三種儀器同時測量礫石滾動時撞擊斜坡所產生之地表振動與空氣聲音。實驗所用之地聲檢知器為目前國內廣泛用於測量土石流地表振動的儀器，為 GeoSpace 公司所生產的 GS-20DX 三軸地聲檢知器；麥克風則為 B&K 4190。其中 GS-20DX 操作頻率為 8 – 1500 Hz，共振頻率為 8 Hz，量測敏感度為 27.7 V/(m/s)。而 B&K 4190 麥克風操作頻率為 3 – 20k Hz，量測敏感度為 50 mV/Pa。由 Huang et al. (2007) 的結論可知土石流所產生的地表振動頻率範圍為 10 – 150 Hz，因此三種儀器的取樣率均設定於 500 Hz，且三種儀器的操作頻率均涵蓋這個範圍。

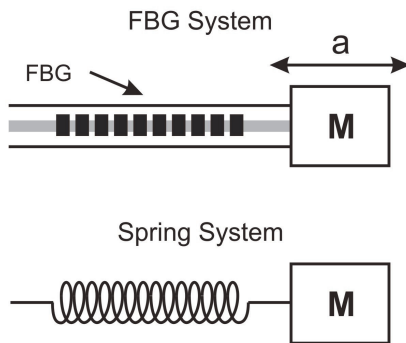


圖 2 光纖光柵加速度計簡易示意圖

Fig.2 Diagram of a simple FBG accelerometer

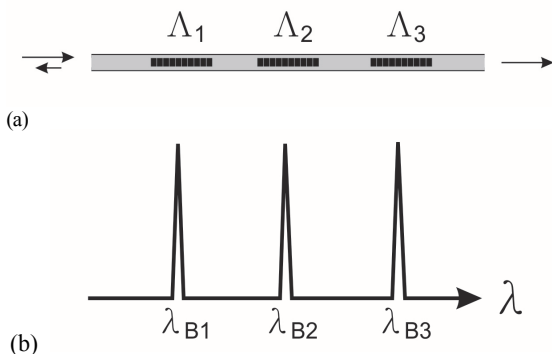


圖 3 光纖多工技術原理示意圖；(a) 不同光柵週期之感測器串連、(b) 反射波譜

Fig.3 Principle of multiplexing of serial FBG sensors; (a) a sequence of separated FBG sensors with different grating periods, and (b) reflected spectrum

首先比對光纖加速度計與地聲檢知器所測得的礫石滾動訊號。由於光纖加速度計感測方向與地聲檢知器 Z 軸 (與地表垂直方向) 一致, 因此本文僅比對地聲檢知器 Z 軸訊號。圖 5 中, (a1) 及 (b1) 分別為地聲檢知器 Z 軸及光纖加速度計所測得的訊號, 而 (a2) 及 (b2) 分別為各自的功率譜密度 (power spectral density, PSD)。由量測結果可知, 雖然兩種儀器所測得的地表振動量分別為速度與加速度, 但所測得的振動頻率範圍卻有相同趨勢。這是因為對相同振動源, 加速度由速度對時間微分求得, 因此振動頻率應該一致。圖 5 的結果表示光纖加速度計也可應用於土石流地表振動量測。

訊雜比 (signal-to-noise-ratio, SNR) 為目標訊號強度與環境雜訊強度之比值, 訊雜比高表示目標訊號較清晰, 代表儀器量測效能較佳。訊雜比以 dB 值計算, 為一無因次量, 因此常用於評估不同儀器之量測效能, 計算公式如下:

$$SNR = 10 \log\left(\frac{S_E}{N_{\text{mean}}}\right) \quad (9)$$

式中 S_E 及 N_{mean} 分別代表目標訊號能量與平均環境雜訊能量。由於三種儀器量測物理量均不相同, 因此皆取實驗開始前 20 秒訊號, 計算每秒平均能量後取

平均, 作為環境雜訊位準。目標訊號則取實驗開始後之訊號每秒平均能量。計算方式如下:

$$S_E = \frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt \quad (10)$$

$$N_{\text{mean}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{T} \int_0^T N_j^2(t) dt \right] \quad (11)$$

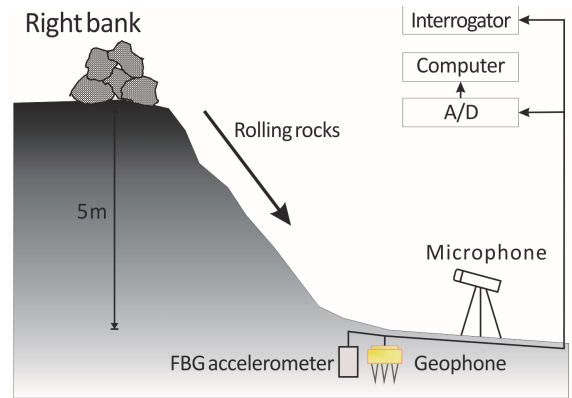


圖 4 光纖加速度計、地聲檢知器、及麥克風效能測試實驗示意圖

Fig.4 Field test for comparing the performance of the proposed fiber-optic sensing system with those of conventional sensing systems involving a geophone and a microphone

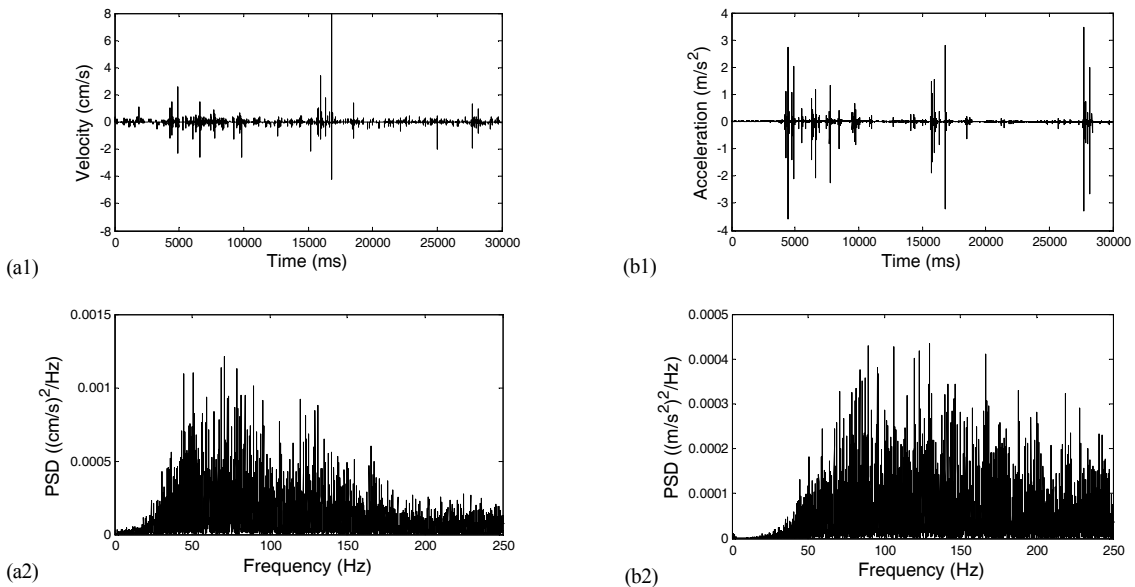


圖 5 地聲檢知器 Z 軸與光纖加速度計量測與分析結果; (a1) 地聲檢知器測得時域訊號、(a2) 地聲檢知器頻域訊號、(b1) 光纖加速度計測得時域訊號、(b2) 光纖加速度計頻域訊號

Fig.5 Ground vibrations measured by Z-axis of geophone and FBG sensor; (a1) time-series data measured by geophone, (a2) geophone signals in frequency domain, (b1) time-series data measured by FBG sensor, and (b2) FBG sensor signals in frequency domain

式中 S 及 N_j 分別為目標訊號與環境雜訊之時序列資料 (time-series data), T 為累積能量計算周期 ($T=1s$), M 為平均環境雜訊的計算時間 ($M=20$)。三種儀器的訊雜比結果如圖 6 所示, 其中圖 6 (a) 為時域訊雜比分析, 圖 6 (b) 為頻域訊雜比分析。圖中實線、點線、及虛線分別為光纖加速度計、地聲檢知器 Z 軸、及麥克風所測得礫石滾動訊號的訊雜比。圖 6 (a) 上方為光纖加速度計所測得的地表振動訊號。由圖 6 (a) 可知當有礫石撞擊斜坡時, 訊雜比均會明顯提高。其中以光纖加速度計訊雜比最高, 比地聲檢知器 Z 軸高約 10 dB, 代表其訊號與雜訊能量比值較地聲檢知器高約 10 倍, 測得訊號也更清晰。而麥克風的訊雜比則是三種

儀器中最差的, 原因為麥克風容易受環境空氣擾動影響而使雜訊提高, 因此訊號最不清晰。圖 6 (b) 採用 1/3 八音階頻寬 (1/3-octave bands) 表示法, 計算各頻寬內之訊雜比。由結果可知光纖加速度計與地聲檢知器在各頻段皆優於麥克風; 在小於 30 Hz 之頻率範圍內, 光纖加速度計與地聲檢知器效能相當; 大於 30 Hz 時, 光纖加速度計量測之訊雜比優於地聲檢知器。由於土石流地聲頻率範圍主要為 10 – 150 Hz, 因此針對土石流地聲量測而言, 光纖加速度計量測效能較地聲檢知器及麥克風佳。

四、現地系統架設

在測試光纖感測系統的量測效能之後, 本研究分別於南投縣信義鄉神木村之愛玉子溪與出水溪河岸架設一套土石流光纖感測系統, 系統配置如圖 7 所示。每套系統包含一台光纖解調儀、光纖終端箱、光纖接續盒、四支 FBG 光纖光柵加速度計、網路與電腦。如圖 7 所示, 四支光纖加速度計埋設於河岸旁土體內, 以量測土石流地表振動。加速度計埋設位置之間的距離如表 1 所述。光纖纜線採高架佈設, 先將光纖主纜線套入光纖保護套中, 再依地形採電線桿架空, 延伸至感測器端附近再附掛接續盒, 並外接光纖至光纖加速度計。由於光纖加速度計必須埋設於土體中, 將其鎖緊於光纖接續盒中再埋入土體, 不但可量測到振動訊號且不易毀損。

利用光纖多工特性, 系統中光纖加速度計採用串連方式裝設, 如圖 8 所示。光束在光纖內傳輸損耗約 0.383 dB/km (Miya et al., 1979), 但一組分接頭所產生損耗可達 0.5 dB, 而整段光通路共有 10 幾組分接頭, 代表系統串連愈尾端, 光訊號衰減愈高。考量到最上

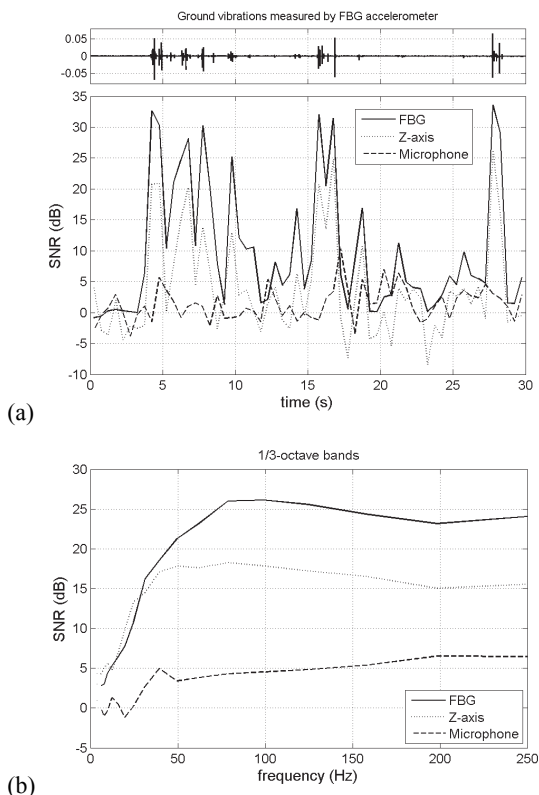


圖 6 光纖加速度計、地聲檢知器 Z 軸、及麥克風訊號之訊雜比分析：(a) 時序列分析，圖 6 (a) 上方為光纖加速度計測得訊號；(b) 頻譜分析，採用 1/3 八音階頻寬表示法

Fig.6 Signal-to-noise ratio (SNR) of signals detected by FBG accelerometer, Z-axis of geophone, and microphone; (a) time domain, the upper subplot shows the ground vibration signals measured by FBG accelerometer, and (b) frequency domain based on the 1/3-octave band width



圖 7 神木村土石流光纖感測系統配置圖

Fig.7 Fiber optic sensing system deployed in Shen-Mu Village for monitoring debris flows

游感測器距離土石流源頭最近, 因此以上上游感測器 (Sensor 1) 作為串連起始端, 往下游串接, 以確保系統量測品質。系統架設完畢後以光時域反射儀 (optical time domain reflectometer, OTDR) 測試光路是否通路。系統運作時, 雷射光束由解調儀發出後依序傳至上上游、上游、中游、及下游加速度計, 而各感測器中光柵反射波長分別為 1541 nm、1548 nm、1554 nm 及 1561 nm, 反射訊號互不干擾。反射訊號取樣率為 500 Hz, 經解調後將波長飄移量轉換成加速度值儲存, 在計算加速度的每秒均方根後, 以每秒一筆透過網路回傳至監控中心並發佈於網站。本研究以石頭敲擊感測器附近土體, 測試系統運作情形, 測試訊號如圖 9 所示。圖 9(a) 為加速度計測量到的地表振動時域訊號, 圖 9(b) 為圖 9(a) 訊號經 FFT 分析之頻譜, 而圖 9(c) 為圖 9(a) 訊號經 Gabor 轉換所得之時-頻譜。由圖 9(a) 可看出敲擊測試持續 20 秒, 由圖 9(c) 可看出不同時間出現的振動訊號其頻譜特性相當接近。由圖 9 的結果可判斷光纖感測系統運作正常而且相當靈敏。如何利用 Gabor 轉換將土石流地表震動之時域訊號轉換為時-頻譜, 請參閱 Huang et al. (2004)。

五、土石流案例分析

神木村愛玉子溪土石流光纖感測系統在 2012 年成功測得 3 場土石流事件, 分別為 5 月 4 日、5 月 20 日、及 6 月 10 日豪雨所造成的土石流事件, 3 次事件所測得的地表振動加速度於土石流發生時皆發佈於網站上 (黃清哲, 2012)。本文以 6/10 土石流事件作為分析案例。根據水土保持局神木觀測站資料顯示, 愛玉子溪上的鋼索檢知器於 6/10 10:34:30 斷裂, 經比對現場影像資料, 確定愛玉子溪發生土石流。圖 10 為土石流光纖觀測系統網站所發佈的加速度歷線圖, 此為下游加速度計量測結果。由圖 10 可知光纖加速度計從 10:34 開始測得明顯地表振動訊號, 與鋼索斷裂的時間吻合, 代表此為土石流地表振動加速度訊號, 而此訊號所有愛玉子溪光纖感測系統中的加速度計皆有測得。

表 1 感測器與儀器小屋佈設間距

Table 1 Distances between the sensors and the data receiving center

溪流名稱	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	儀器小屋
愛玉子溪	105 m	180 m	196 m	144 m
出水溪	227 m	173 m	145 m	50 m

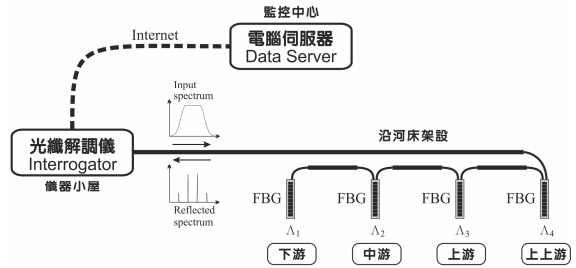


圖 8 土石流光纖感測系統架構圖

Fig.8 Fiber optic sensing system for monitoring debris flows

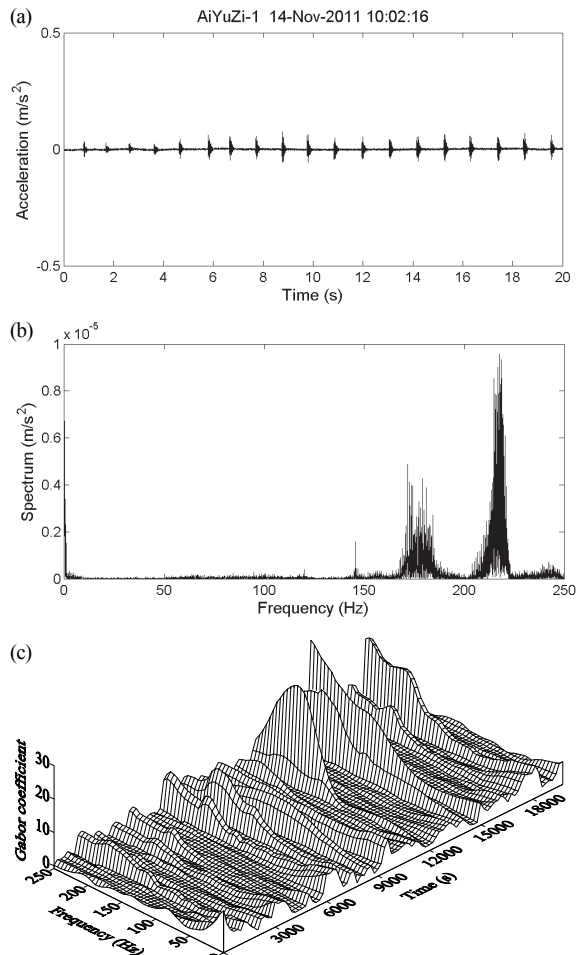


圖 9 愛玉子溪土石流光纖感測系統上上游加速度計 (圖 7 AYZ-1) 測試訊號; (a) 時域訊號、(b) 經 FFT 分析之頻譜、(c) 經 Gabor 轉換之時-頻譜

Fig.9 Testing signals detected by Sensor 1 of the fiber-optic sensing system deployed along the Ai-Yu-Zi Creek (AYZ-1 sensor, Fig. 7); (a) time domain, (b) frequency domain, and (c) time-frequency domain obtained by Gabor transform

此次連續降下 3 天豪雨 (6/10 – 6/12)，檢視系統所量測到的地表振動訊號後發現，從 6/10 早上 9:00 到 6/11 中午 12:00 這 27 小時內，共有三起規模較大的土石流訊號。圖 11 (a)、(c)、(e) 分別為愛玉子溪上、中、下游加速度計在這段時間內所量測到的地表振動訊號，圖 11 (b)、(d)、(f) 為上述訊號分別經過短時傅立葉轉換後所得之時-頻譜。短時傅立葉轉換常用於分析頻率隨時間變異之非穩態訊號 (non-stationary signal)，其概念為時域訊號乘上一隨時間平移之特定窗函數 (window)，得到特定時間點之短時訊號後進行傅立葉轉換，如下式所示：

$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

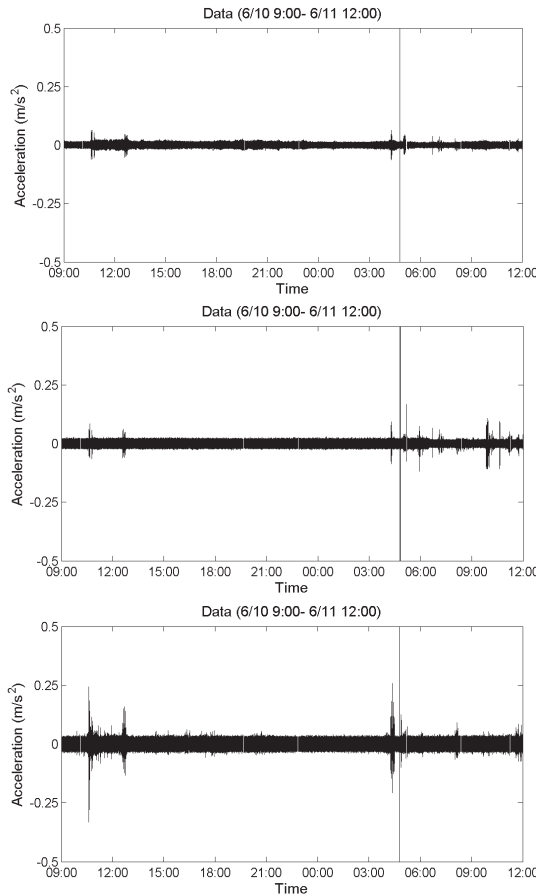


圖 11 2012 年 6/10 早上 9:00 到 6/11 中午 12:00 愛玉子溪光纖加速度計測得土石流地表振動訊號；(a)、(c)、(e) 分別為上、中、下游加速度計所測得之時域訊號，(b)、(d)、(f) 分別為上述訊號之時-頻譜，強度單位為 dB re 1 m/s²

Fig.11 Ground vibration signals of debris flows detected by the fiber-optic sensing system deployed along the Ai-Yu-Zi Creek; (a), (c), (e) are time domain signals detected by AYZ-2, AYZ-3, and AYZ-4 respectively; (b), (d), (f) are spectrograms of the signals in (a), (c), and (e) respectively. The unit of spectrogram intensity is dB re 1 m/s²

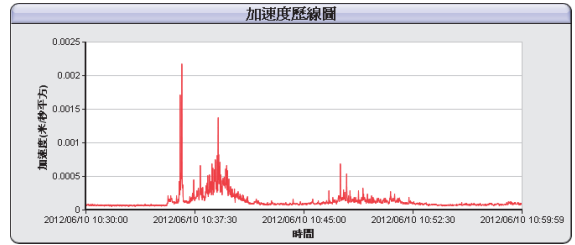
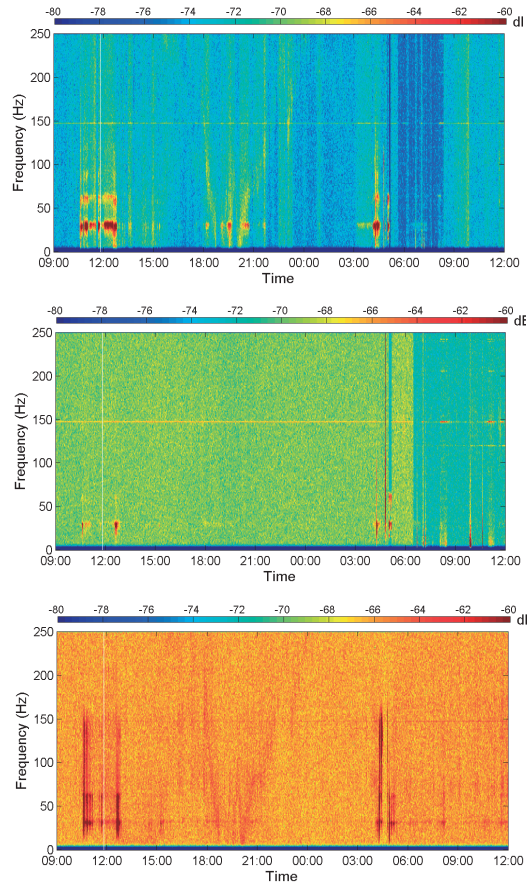


圖 10 愛玉子溪下游加速度計之加速度歷線圖 (截取自水保局土石流防災資訊網 <http://dfm.swcb.gov.tw/debrisFinal/ViewStation.asp?StationID=3>)

Fig.10 Ground vibration signals monitored by Sensor 4 of the fiber-optic sensing system deployed along the Ai-Yu-Zi Creek (AYZ-4 sensor, Fig. 7)



其中 $X(\tau, \omega)$ 為轉換後之時-頻譜訊號。本研究將時-頻譜強度以 $\text{dB re } 1 \text{ m/s}^2$ 表示, 如下所示:

$$\text{Level} = 10 \times \log |X(\tau, \omega)|^2 \quad (13)$$

上上游加速度計在豪雨期間並無訊號回傳, 原因為光纖在系統尾端的光源太弱, 導致訊號不明。綜合比較圖 11 的結果可知, 三組加速度計所測得的土石流訊號以下游加速度計最清楚, 如圖 11 (e)、(f)。其中三起大型土石流波湧所產生的地表振動加速度頻率為 10 – 150 Hz, 後端跟隨數起較小型的土石流波湧, 能量較小, 集中在 10 – 60 Hz, 頻率特性與文獻中以地聲檢知器測得的結果吻合 (Huang et al., 2007)。由此可知, 無論以速度計或加速度計量測, 所測得的訊號頻率響應一致, 代表光纖加速度計適用於土石流地表振動量測。然而, 圖 11 (a) – (d) 中、上游加速度計雖然也於相同時間測得三起土石流, 但訊號較不清楚, 其原因研判與加速度計埋設方式有關。地表震動量測儀器安裝時若與地表結合愈緊密, 愈能完整測得震動訊號 (Arattano et al., 2012)。本系統為了確保儀器安全, 加速度計均固定於一長圓筒形光纖接續盒中, 接續盒高度約 50 cm。下游加速度計埋設位置土體較易挖掘, 因此接續盒採直立式穩固埋入土體內; 中、上游加速度計由於埋設位置位於箱籠護岸上方, 土體不易挖掘與埋設, 因此採橫式淺埋, 再覆蓋泥土與礫石。相較之下, 下游加速度計埋設較穩固, 因此測得震動訊號不只較強, 且更清晰。此外, 由圖 11 也可看出土石流流動特性實為一陣陣波湧, 表示以地表振動量測法可彌補鋼索檢知器僅能偵測第一起波湧之不足。因此, 本研究所發展的光纖感測系統可提供更完整的土石流流況。黃清哲等人 (2007) 在分析 2004 年七二水災神木村土石流地聲時發現, 地聲檢知器容易受 60 Hz 交流電雜訊影響。本研究所應用的光纖系統抗雜訊性能比地聲檢知器更好, 也不會因外在環境中不正常放電而將電子雜訊導入系統中, 因此訊號更為清晰。圖 11 中亦可觀察出 6/11 4:46 時三組加速度計均測得強訊號, 然而當時為凌晨, 觀測站 CCD 並無法提供清楚資料其是否為土石流, 因此該訊號來源仍有待後續分析。

出水溪上的光纖感測系統於 2012 年 6 月 11 日到 6 月 12 日期間, 也偵測到多場土石流, 相關資料請參閱 (黃清哲, 2012)。由上述結果可看出本研究所發展的光纖感測系統在監測頻率介於 10 – 300 Hz 的地表振動相當靈敏, 因此本系統也可應用於會產生地表振動的其他坡地災害, 如: 落石及山崩等。此外, 由於

光訊號在光纖中傳遞時衰減很小, 此系統可延伸到範圍, 做為區域性坡地災害監測之用。然而, 相對其他系統, 如設有地聲檢知器之系統, 光纖感測系統費用較高。主要原因為解調儀內含有不少精密光學元件, 使其造價昂貴; 且土石流潛勢地區常在荒山野外, 架設光纖所費不貲。因此, 費用昂貴為此系統主要的缺點, 系統建置預算與效能比較可參閱表 2。

六、結 論

光纖感測技術近年來已開始被應用到大樓結構、隧道管片結構、石油探井溫度等方面的監測, 但尚未應用於土石流的監測。本研究將光纖感測技術應用於土石流地表振動量測, 並於南投縣信義鄉神木村架設一套區域性土石流光纖觀測系統。此系統設有 8 個 FBG 光纖光柵加速度計 (愛玉子溪及出水溪各 4 個)、2 台光纖解調儀及 1 組電腦伺服器。以人為落石實驗進行系統性能測試, 發現光纖系統與地聲檢知器系統測得頻率響應一致, 而且比地聲檢知器系統得到的訊雜比高約 10 dB, 比麥克風系統更高出 30 dB, 證實其量測效能更優異。

神木村光纖觀測系統利用光纖多工特性, 採用串連設置, 於 2012 年 5/4、5/20、6/10 測得多起土石流事件。此為國際上首次以光纖感測器測得實際土石流地表振動訊號。由量測結果可知, 光纖系統測得土石流地表振動加速度, 與地聲檢知器測得地表振動速度頻率響應一致, 均為 10 – 150 Hz, 而且其抗雜訊性能更優異, 不受外界多種電磁雜訊干擾, 資料品質更佳。此外, 光纖系統可測量完整土石流流動歷程, 對於其他土石流相關研究領域, 可以提供更完整的資料以供參考。

表 2 系統預算與量測效能比較表

Table 2 Comparison of system cost and measurement effect

	光纖系統	地聲檢知器	麥克風
系統建構預算*	120 – 150 萬 含一組解調儀、三組光纖感測器、熔接、光纖、立桿、五金等費用	40 – 60 萬 含一組電腦、三組地聲檢知器、一組資料收集系統、電纜、立桿、五金等費用	70 – 90 萬 含一組電腦、三組麥克風、一組訊號放大器、一組資料收集系統、電纜、立桿、五金等費用
SNR 量測效能	光纖系統 > 地聲系統 > 麥克風系統		

*僅估算硬體架設費用, 不含人力與差勤支出。估算費用僅供參考。

誌 謝

本研究為行政院農委會水土保持局 97 - 101 年度計畫 (SWCB-97-088、SWCB-98-094、SWCB-99-200、SWCB-101-016、及 SWCB-101-063) 部分研究成果。對水保局之經費補助及富發電信工程有限公司協助佈纜施工，在此致謝。

參考文獻

- [1] Arattano, M. (2000). "On debris flow front evolution along a torrent." *Phys. Chem. Earth Pt. B*, 25(9), 733-740.
- [2] Arattano, M., and Marchi, L. (2008). "Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning." *Sensors*, 8(4), 2436-2452.
- [3] Arattano, M., Marchi, L., and Cavalli, M. (2012). "Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12(3), 679-686.
- [4] Baldwin, C., Niemczuk, J., Kiddy, J., and Salter, T. (2005). "Review of fiber optic accelerometers." *Proc. IMAC XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics*(on CD-ROM), 1-7.
- [5] Berkoff, T.A., and Kersey, A.D. (1996). "Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer." *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8(12), 1677-1679.
- [6] Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., and Tecca, P.R. (2000). "Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps)." *Phys. Chem. Earth Pt. B*, 25(9), 707-715.
- [7] Bullock, D.E., Dunphy, J.R., and Hufstetler, G.H. (1992). "Embedded Bragg grating fiber optic sensor for composite flexbeams." *Proc., SPIE, Fiber Optic Smart Structures and Skins*, 1798, 253-261.
- [8] Burtin, A., Bollinger, L., Cattin, R., Vergne, J., and Nabelek, J.L. (2009). "Spatiotemporal sequence of Himalayan debris flow from analysis of high-frequency seismic noise." *J. Geophys. Res.*, 114, F04009, doi:10.1029/2008JF001198.
- [9] Burtin, A., Vergne, J., Rivera, L., and Dubernet, P. (2010). "Location of river-induced seismic signal from noise correlation functions." *Geophys. J. Int.*, 182(3), 1161-1173.
- [10] Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C., and Kawasaki, B.S. (1978). "Photosensitivity in optical fiber waveguides-application to reflection filter fabrication." *Appl. Phys. Lett.*, 32(10), 647-649.
- [11] Hill, K.O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D.C., and Albert, J. (1993). "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical-fiber by UV exposure through a phase mask." *Appl. Phys. Lett.*, 62(10), 1035-1037.
- [12] Huang, C.J., Shieh, C.L., and Yin, H.Y. (2004). "Laboratory study of the underground sound generated by debris flows." *J. Geophys. Res.*, 109, F01008, doi:10.1029/2013JF000048.
- [13] Huang, C.J., Yeh, C.H., Chen, C.Y., and Chang, S.T. (2008). "Ground vibrations and airborne sounds generated by motion of rock in a river bed." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(6), 1139-1147.
- [14] Huang, C.J., Yin, H.Y., Chen, C.Y., Yeh, C.H., and Wang, C.L. (2007). "Ground vibrations produced by rock motions and debris flows." *J. Geophys. Res.*, 112, F02014, doi:10.1029/2005JF000437.
- [15] Itakura, Y., Inaba, H., and Sawada, T. (2005). "A debris-flow monitoring devices and methods bibliography." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5(6), 971-977.
- [16] Itakura, Y., Koga, Y., Takahama, J.I., and Nowa, Y. (1997). "Acoustic detection sensor for debris flow." *Proc. 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Am. Soc. of Civ. Eng., 747-756.
- [17] Iverson, R.M., Reid, M.E., and LaHusen, R.G. (1997). "Debris-flow mobilization from landslides." *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.*, 25, 85-138.
- [18] Johnson, A.M., and Rodine, J.R. (1984). "Debris flows." *Slope Instability*, D. Brunnsden, and D. B. Prior, eds., John Wiley & Sons. Ltd., 257-361.
- [19] Kersey, A.D. (1997). "Multiplexing techniques for fiber-optic sensors." *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*, J. Dakin, and B. Culshaw, eds., 369-407.
- [20] Kersey, A.D., Davis, M.A., Patrick, H.J., LeBlanc, M., Koo, K.P., Askins, C.G., Putnam, M.A., and Friebele, E.J. (1997). "Fiber grating sensors." *J. Lightwave Technol.*, 15(8), 1442-1463.
- [21] Kirkendall, C.K., and Dandridge, A. (2004). "Overview of high performance fibre-optic sensing." *J. Phys. D Appl. Phys.*, 37(18), R197-R216.

- [22] Kogelnig, A., Hübl, J., Suriñach, E., Vilajosana, I., and McArdell, B. (2011). "Infrasound produced by debris flow: propagation and frequency content evolution." *Nat. Hazards*, doi:10.1007/s11069-011-9741-8.
- [23] Meltz, G., Morey, W.W., and Glenn, W.H. (1989). "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method." *Opt. Lett.*, 14(15), 823-825.
- [24] Miya, T., Terunuma, Y., Hosaka, T., and Miyashita, T. (1979). "Ultimate low-loss single-mode fiber at 1.55 μm ." *Electron. Lett.*, 15(4), 106-108.
- [25] Morey, W.W., Meltz, G., and Glenn, W.H. (1989). "Fiber Bragg grating sensors." *Proc., SPIE, Fiber Optic & Laser Sensors VII*, 1169, 98-107.
- [26] Okuda, S., Okunishi, K., and Suwa, H. (1980). "Observation of debris flow at Kamikamihori Valley of Mt. Yakedake." *Proc., 3rd meeting of IGU commission on field experiment in geomorphology*, 127-130.
- [27] Pei, H., Cui, P., Yin, J., Zhu, H., Chen, X., Pei, L., and Xu, D. (2011). "Monitoring and warning of landslides and debris flows using an optical fiber sensor technology." *J. Mt. Sci.*, 8(5), 728-738.
- [28] Proshaka, J.D., Snitzer, E., Chen, B., Maher, M. H., Nawy, E. G., and Morey, W.W. (1992). "Fiber optic Bragg grating strain sensor in large scale concrete structures." *Proc., SPIE, Fiber Optic Smart Structures and Skins*, 1798, 286-298.
- [29] Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G., and Vilaplana, J.M. (2005). "Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5(6), 791-798.
- [30] Takahashi, T. (1991). *Debris Flow*, Balkema, Rotterdam.
- [31] Toksöz, M.N., and Johnston, D.H. (1981). *Seismic Wave Attenuation*, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, Okla, USA.
- [32] 尹孝元、黃清哲、連惠邦、李秉乾、周天穎、王晉倫 (2006), 「自動化土石流觀測系統之發展及應用」, *中華水土保持學報*, 37(2), 91-109。(Yin, H.Y., Huang, C.J., Lien, H.P., Lee, B.J., Chou, T.Y., and Wang, C.L. (2006). Development and application of automated debris-flow monitor system in Taiwan, *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 37(2), 91-109. (in Chinese))
- [33] 黃清哲 (2012), 「區域性低頻地聲量測系統應用於坡地災害監測之研究」, *成果報告*, 行政院農業委員會水土保持局, SWCB-101-063, 南投, 台灣, 248 頁。(Huang, C.J. (2012). Development of a low-frequency ground vibration measuring system for monitoring regional hillside hazards, *Final Report*, Soil and Water Conservation Bureau, SWCB-101-063, Nantou, Taiwan, 248 pages. (in Chinese))
- [34] 黃清哲、張順添、尹孝元、葉智惠、王晉倫 (2007), 「2004 年七二水災神木村土石流地聲特性之研究」, *中華水土保持學報*, 38(3), 299-310。(Huang, C.J., Chang, S.T., Yin, H.Y., Yeh, C.H., and Wang, C.L. (2007). Ground vibrations generated by debris flows in Shenmu village during the flood on July 2, 2004, *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 38(3), 299-310. (in Chinese))
- [35] 土石流防災資訊網, <<http://dfm.swcb.gov.tw/debrisFinal/ViewStation.asp?StationID=3>>。

2013 年 01 月 18 日 收稿

2013 年 03 月 04 日 修正

2013 年 04 月 17 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 3 月 31 日)