

以壓力式水位計推估含砂水流濃度

陳樹群⁽¹⁾ 趙益群⁽²⁾ 馬佩君⁽³⁾

摘 要

多數土石流監測系統甚少包括含砂濃度之即時監測；再者，含砂濃度監測技術目前僅利用時域反射技術可達到即時監測外，其餘即時濃度監測技術發展尚未普及。因此，本研究擬嘗試利用壓力式水位計進行含砂水流之即時體積濃度推估。實驗結果發現，液體中固體顆粒組成性質為重要影響因子，當液體含有大量黏土質時，比重變化不大。當液體中黏土含量減少時，顆粒之沉降速度會對液體之比重量有明顯之影響，進而影響液體中體積濃度之推估。本研究針對高嶺土液體所得之體積濃度推估值與理論值誤差範圍介於 0.6%~1.5% 之間；而土樣在高濃度時，所推估之體積濃度誤差介於 1%~3.7% 之間。此結果說明利用壓力式水位計推估液體含砂濃度為可行之辦法。

(**關鍵詞**：泥砂濃度、含砂水流、壓力式水位計)

Using Submersible Pressure Transducers to predict the Concentration of Hyperconcentrated Flow

Su-Chin Chen⁽¹⁾ Yi-Chiung Chao⁽²⁾ Pei-Chun Ma⁽³⁾

Distinguished Professor⁽¹⁾, Ph. D. Candidate⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan. Research Assistant⁽³⁾, Hydrotech Research Institute, National Taiwan University

ABSTRACT

Most of debris flow monitoring systems lack for real-time monitoring in sediment concentration, because there have a technical developing gap in sediment concentration monitoring instrument. In this study, we attempted to use the submersible pressure transducers to predict the hyperconcentrated flow concentration by volume. The result shows that the component characteristics of particle are an important factor. When the flow contains amount of clay, the specific weight alters slightly. However, the particle fall velocity has a significant effect on

(1) 中興大學水土保持學系特聘教授

(2) 中興大學水土保持學系博士候選人 (通訊作者 e-mail: d9542007@mail.nchu.edu.tw)

(3) 臺灣大學水工試驗所研究助理

the variation of specific weight as the clay contains decreasing. It affects the prediction of sediment concentration underestimate obviously. In the kaolin case, the error range of estimated values is from 0.6% to 1.5%. In the high concentration sediment case, the error range of estimated values is from 1% to 3.7%. These results prove that using the submersible pressure transducers to predict the sediment concentration is a practicable approach.

(Keywords : Sediment concentration, Hyperconcentrated flow, submersible pressure transducers)

前言

土石流災害會造成人員傷亡、財產損失與重大公共工程損壞；因此，行政院農業委員會水土保持局自 2002 年起截至目前為止，已於 21 條土石流潛勢溪流設立土石流觀測站（行政院農委會水土保持局，2013；尹等，2006），藉以監測及蒐集該潛勢溪流於土石流災害發生時之即時資料，供專家學者進行資料判斷以及提供當地民眾進行防災避難之依據。目前各觀測站現有之觀測儀器包括雨量計、CCD 攝影機（含投射燈）、鋼索檢知器、地聲檢知器及超音波水位計等，已掌握土石流之發生及動態。瞭解土石流運動過程中各項行為機制，作為未來設計各項土石流防治措施及學術研究之參考（尹等，2006）。

目前觀測儀器之相關研究，多著重於影像判釋、土石流地聲分析及降雨臨界值之研究及分析。張等（2005）、莊（2005）及柯（2007）等人，利用即時影像監測利用序列影像，進行土石流事件判釋及進行土石流流速判釋等。劉和李（1999）、黃等（2005）、黃等（2007）及方等（2008）利用土石流發生時之地聲時域訊號，以傅立葉轉換、Gabor 及小波轉換方式得知地聲之頻域特性，以便在災害來臨時，可判斷土石流發生時間及規模等之依據，

大幅提升防災應變能力。詹和李（2004）及 Lehmann et al.（2007）以降雨強度及有效累積雨量建立土石流及坡地崩塌發生之降雨警戒模式，作為評估土石流及崩塌等災害之可能性。另外，有少部分利用水位計進行相關研究，其中楊（1998）研製半自動超音波泥位計觀測土石流的龍頭高度變化、水位變化和渠道沖淤變化。豐（2002）以壓力式水位計量測原理，提出大氣壓力之變化、水體密度、含砂量與含鹽度等為影響測量精度之主要因素。

即時資料對土砂相關研究為一重要驗證，潛勢溪流的含砂水流濃度之即時監測資料，為預測土石流發生及規模之重要關鍵之一。目前即時監測溪流含砂濃度之技術，如張（2005）利用時域反射技術（time domain reflectometry; TDR）基於水中泥砂濃度變化所產生之電學性質差異，建立泥砂濃度變化之關係。此方法可應用於河川與水庫之高濃度泥砂運移，但低濃度時之量測準確度則有待提昇。再者，目前國內即時監測溪流含砂濃度技術尚未成熟；因此，本研究將利用壓力式水位計進行室內試驗，藉由水位計所偵測之資料推估靜態液體之含砂濃度。本研究主要分為兩部分進行，第一部分探討由不同組成物質是否會對液體之比重在量測上造成差異。第二部分為使用清水、高嶺土及土樣

等不同液體，在水流靜止之態狀下，推估液體之含砂濃度。

研究材料與方法

本研究利用壓力式水位計進行含砂水流濃度室內實驗。首先針對不同含砂水流進行校正，最後利用壓力式水位計推估即時含砂水流濃度。含砂水流濃度係指水流單位體積中黏土、坩土、砂、石等固態物質所佔有之體積，其顆粒組成從黏土至巨礫或岩塊等粒徑大小皆具備，故大多數研究在理論計算上為求方便，通常假設為平均濃度。在討論含砂水流固體顆粒含量中有兩種表示方法，第一種為固體體積比濃度（ C_d ），即水流中固體顆粒所佔體積比；第二種為混合液體密度（ ρ_m ， kg/m^3 ），即單位體積中固相和液相總質量，兩者關係如下所示：

$$\rho_m = \rho_w + C_d(\rho_s - \rho_w) \quad (1)$$

式中， ρ_w 及 ρ_s 為清水及泥砂之密度(kg/m^3)。壓力式水位計乃偵測感測器上方壓力，故以清水比重量（ γ_w ）為固定係數，將壓力換算成液面高度。因此，可利用壓力式水位計所量測到之水位高度，利用靜水壓原理，間接推估含砂水流濃度。靜水壓力公式如下所示：

$$P = \gamma_m h = \rho_m g h \quad (2)$$

式中， P 為靜水壓力(kN/m^2)、 γ_m 為混合液體比重量(kN/m^3)、 g 為重力加速度(m/s^2)及 h 為水位高度(m)。

1. 實驗材料

本研究所使用之壓力式水位計為 Pressure Systems 公司所出產之 KPSI™ Transducers Series 720 水位計。其偵測原理乃利用儀器下方感測頭之壓力式感應器，偵測某量測點之靜壓力，在經由電壓值方式輸出至資料處理控制器。此壓力式水位計量測之壓力範圍介於 0 至 300 psi，量測溫度範圍則介於 -10°C 至 $+60^\circ\text{C}$ 之間，靜態精度為 $\pm 0.25\%$ F.S.R。實驗材料為高嶺土（ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ）、小於 2.0 mm 之土樣及礫石等三種。其中高嶺土屬於黏土，硬度 2~2.5，比重介於 2.60~2.63；< 2mm 之土樣， d_{50} 為 0.1mm，比重為 2.65 以及 d_{50} 為 2 cm 比重為 2.65 之礫石。

2. 實驗方法

(1) CASE 1

為探討相同體積濃度與相同液面高度時，不同固體顆粒所組成之物質在液體中發生沉降時，壓力值及比重量是否發生變化。故在試驗中固定液面高度 30 cm，分別以高嶺土、土樣及礫石依不同比例組成 18.2%之混合液體，並量測每分鐘瞬時靜態壓力值，待靜置 3 小時後量測壓力並拍攝影像。實驗啓始條件如表 1 所示。儀器配置圖如圖 1(a)所示。

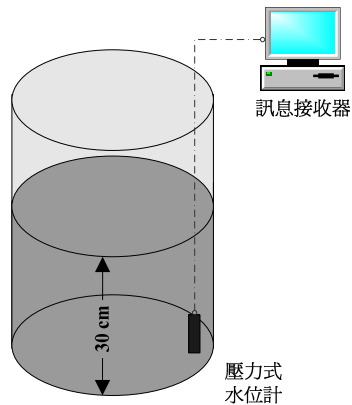
(2) CASE 2

為量測靜態液體壓力進而推估混合液體之體積濃度。本研究使用長 80 cm、寬 70 cm 及高 110 cm 之木板水槽，並於水槽內側塗抹防水漆，以防止水流滲入木材內影響實驗準度，並於水槽側邊設置一透明壓克力板並貼上標尺，方便觀測液面高度變化，並將壓力式水位計設置於水槽底部。儀器配置圖如圖

1(b)所示。其中，實驗用液體為清水（ $\gamma_w = 9.777\text{kN/m}^3$, 25°C ）、高嶺土體積濃度 9.2%、13.7%、18.2%及 22.6%共 4 組及土樣體積濃度 9.2%、22.6%、35.6%及 44%共四組。

為使含砂液體充分混合土砂，本實驗利用人工方式將土砂與水充分攪拌混合。但是，攪拌的過程中仍會發生沉澱現象。因此，本研究假設各組實驗開始時，土砂為均勻分散在液體中。

(a) CASE 1



(b) CASE 2

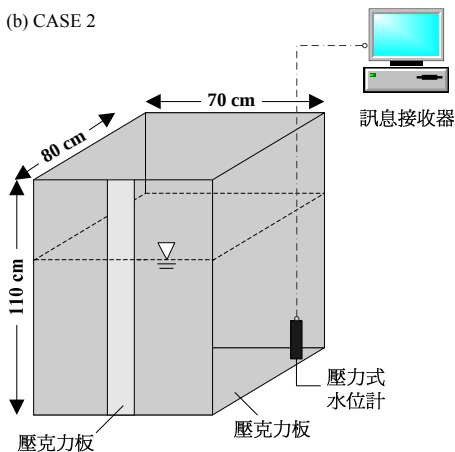


圖 1 試驗配置圖。(a) CASE 1；(b) CASE 2

Figure 1 Schematic View of Experiment; (a) case 1 and (b) case 2

結果與討論

1. 壓力式水位計之校正

量測資料之可用性與量測儀器之穩定性及精確性相關，要確保資料之可用性，需先熟悉量測儀器之準確度與穩定度，並找出影響因子及限制條件。壓力式水位計偵測原理乃係利用壓力感測器來偵測靜水壓力，再經由液體密度轉換成水深，因此偵測到之壓力水頭與液體密度等因素相關。

藉由清水比重（ 9.777kN/m^3 , 25°C ）換算成觀測之壓力值（observation pressure, P ）。而壓力式水位計所量測到之試驗值（submersible pressure, P' ），在與觀測值進行分析時發現，大部分之試驗值有高估之現象，尤其當靜水壓力增大時，高估之現象愈為明顯（圖 2(a)）。本研究利用統計學中殘差之概念，將觀測值與實驗值相減後繪製相關殘差圖（圖 2(b)），並觀察其相差值是否有規律性之變化。從圖 2(b)發現，觀測值與實驗值之差值與實驗值呈現負相關之趨勢；即水深越深時，實驗值將越大於觀測值，其相差範圍介於 0.004 至 0.035 psi 之間。吾人利用線性迴歸方式且顯著水準 α 為 0.05 針對實驗值之校正，並將結果繪製於圖 2(a)中。結果可發現，實驗值於高水位時會產生高估之情形，在經過校正後已獲得明顯之改善。

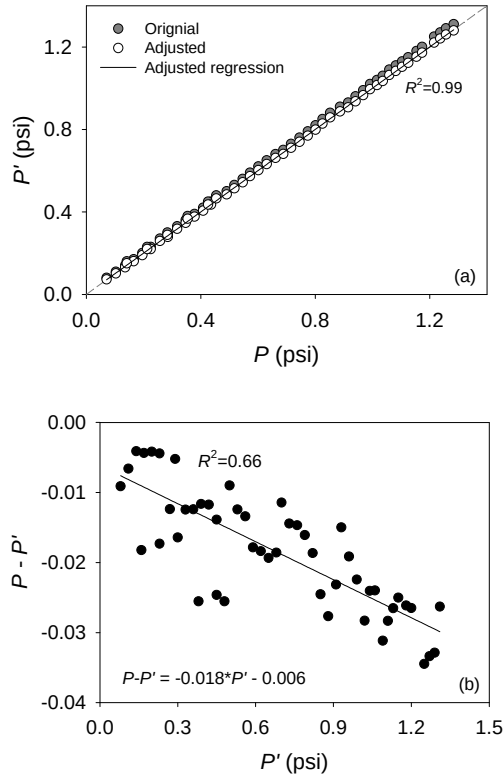


圖 2 壓力式水位計校正前後之壓力關係(a)
及殘差圖(b)

Figure 2 The Relationship of Observation
Pressure (P) and Submersible Pressure (P') (a),
and Residual Plots (b)

2. 液體組成物質對實驗準確性之影響

壓力式水位計乃是利用感測器上方所量測到之壓力值轉換成液面高度。然而，所量測到之壓力水頭與液體之密度有關；假設液體中之固體顆粒不發生沉降且均勻分布混合於液體中，此時壓力式水位計所量測到之壓力為混合流體之壓力。但是，高含砂水流主要由大量隻黏土、坩土和砂組成，而礫石與卵石僅佔少部分（Thomas & Kevin, 1985；周，1991）。當這些組成物質在液體中發生沉

降時，壓力值是否發生變化，將於此小節進行探討。

本研究液體內組成物質之不同分為兩個部分。第一部份全部皆為由高嶺土及土樣（實驗編號 I 及 II）所組成，體積濃度為 18% 之高含砂液體；第二部份為佔整體組成物質 90% 之細顆粒（高嶺土及土樣）及 10% 之粗顆粒（礫石）所組成體積濃度為 18% 之高含砂液體，實驗編號分別為 III 及 IV。實驗結果如表 1 所示。

由於高嶺土與土樣之粒徑大小不同，且其凝聚力亦不同，造成顆粒沉降速度不同。在實驗編號 I 及 II 中可明顯分辨出兩者於試驗開始一分鐘後壓力有很大之差異。由於土樣顆粒沉降速度較快速，所以初始壓力與 1 分鐘後之壓力產生較大之差異，約下降 23%；且隨著時間增加，顆粒沉降速度逐漸減緩，使得所量測到之壓力亦以小幅度逐漸變小，帶實驗經過 3 小時候，其壓力直與初始值相比約下降 28%。而實驗編號 I 之高嶺土，待實驗經過 3 小時候，所量測到之壓力值與初始值約下降 1%。

實驗編號 III 及 IV 中，均有 10% 之粗顆粒存在，由於粗顆粒於試驗開始即沉於底部，造成部分壓力分散，使得實驗開始 1 分鐘後所量測到之壓力值與初始壓力值，有明顯降低之趨勢。然而，由於土樣沉降速度較高嶺土快速，所以在實驗開始 1 分鐘後，實驗編號 VI 之壓力變化約下降 12%，而實驗編號 III 之壓力變化約下降了 6%。因此，在實驗開始 1 分鐘後可發現，實驗編號 VI 之壓力值變化為實驗編號 III 之 2 倍。實驗開始 3 小時後，實驗編號 III 之壓力值與實驗開始 1 分鐘

後之壓力值相同，沒有任何變化產生。而實驗編號 VI 之壓力值與初始壓力值降低了 21 %。

從實驗結果可發現，流體中之細顆粒成分，對於流體之流變特性有很大之影響。而在流變特性之影響因子上除了含砂濃度外，尚有細顆粒之黏土礦物成分、流體之 pH 值、溫度及交換離子類型等（王，2007；費和舒，2004）。另外，高嶺土之黏滯度遠大於本研究所使用之土樣（Nitakawi et al., 1981），進而造成高嶺土之沉降速度緩慢許多。此結果說明，細顆粒之組成物質特性，會明顯造成實驗數據上之變化。綜合上述實驗結果，顆粒之組成物質特性會影響壓力式水位計所量測之壓力值，進而影響含砂濃度推估值。因此本研究利用含砂水流中細顆粒沉降特性概分為兩種情形。第一種為水流中細顆粒沉降速度較為緩慢，在經過固定時間後，所量得之壓力值與初始值相差幅度不大，此時所得之比重量能表示為混合液體之比重。第二種情形則為沉降速度較快，在經過固定時間後，所量得之壓力值與初始值相差幅度甚大，此時所測得之比重則不能表示為混合液體之比重。

3. 含砂濃度之推估

本小節探討利用所量測到之壓力式水位計壓力值與水位高度推估水體中含砂濃度，並使用不同土樣推估含砂濃度探討其準確度及可行性。試驗中以清水、高嶺土及土樣（< 2mm）3 種，於相同體積濃度及不同液面高度下分析其壓力與高度的關係，並以比重與液面高度關係圖觀察比重變化趨勢。在清水實驗部分，雖然水位計已事先校正，量測清

水所得之比重值仍存在儀器誤差，如圖 3(b) 所示。以水深 40cm 為界分高、低水位兩種，低水位時所量測到之試驗值相對於高水位振盪幅度較大，並將其量測平均比重與清水比重相比較，誤差百分比為 8%；高水位時誤差百分比為 3%。

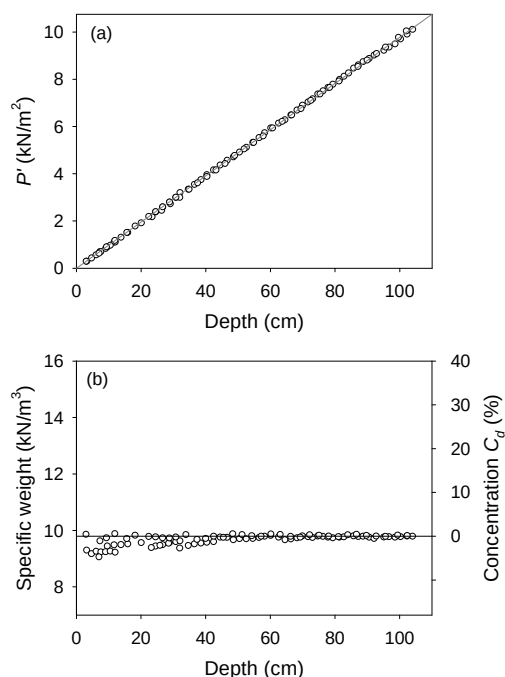


圖 3 清水之壓力、比重及濃度與液面高度關係圖

Figure 3 The relationship between submersible pressure (kN/m^2), specific weight (kN/m^3), concentration (%), and water depth (m) in water

高嶺土為黏土範圍，故當與水混合時固體顆粒會均勻分散於水中且吸水性佳，當體積濃度大於 22.6%時，將非常黏稠且達到飽和，因此本研究採用 9.2%、13.7%、18.2%及 22.6%等 4 種體積濃度；其壓力、比重、體

積濃度與液面高度之關係圖，如圖 4 所示。圖中實線代表各水深下之理論壓力值及理論濃度值。從壓力與水深之關係圖中可發現，當濃度為 9.2% 時，實驗值略小於理論值；而當濃度等於或大於 13.7% 時，實驗值略大於理論值（圖 4(a)）。然而，從比重量、濃度與水深之關係圖中（圖 4(b)），可明顯發現體積濃度為 9.2% 時，利用壓力式水位計所推估之濃度值有低估之現象產生，將推估值與理論值相比較後發現，相差約 0.6%；當體積濃度逐漸增大時，利用壓力式水位所推求之推估值開始有高估現象產生，其最大之平均體積濃度誤差為 1.5%。故可知當液體體積濃度增大時，利用壓力式水位計推求之推估值誤差量也隨之增加。以水深 40cm 為界，低水位時與清水實驗情形相同，推估值振盪幅度較高水位大，亦產生實驗誤差。

土樣在此實驗所使用之體積濃度分別為 9.2%、22.6%、35.6% 及 44% 四組，如圖 5 所示。圖中實線代表各水深下之理論壓力值及理論濃度值。圖 5(a) 為壓力與液面高度之關係，濃度為 9.2% 及 22.6% 時，可明顯發現液面高度越高時，壓力式水位計所測得之值有明顯低估之情形產生；當濃度提高至 35.6% 及 44% 時，實驗值愈接近理論值。當體積濃度增加至 35.6% 及 44% 時，因體積濃度較高使得泥砂沉降速度趨於緩慢，故濃度愈高時利用壓力式水位計所推估之液體濃度愈接近理論值，其平均體積濃度誤差分別為 1% 及 3.7%，此誤差量均遠小於低濃度時之誤差量。

根據上述結果顯示，高嶺土屬黏土範圍，顆粒極為細小不易沉澱，因此體積濃度推估

值與初始值較為相近。然而，土樣在低濃度時由於受到固體顆粒沉降影響，使得濃度推估值與初始值有較大之差距，因此有明顯的低估情形產生。但是，土樣在高濃度時，利用壓力式水位計所推估之濃度值與初始值誤差量明顯減少。因此，利用壓力式水位計在實驗試內進行靜態液體中含砂濃度之推估在理論上實為可行之方案。但是，現實生活中之高含砂水流為動態液體，並包含各種顆粒粒徑之土石材料。另外，壓力式水位計在高含砂水流流動之過程中易受破壞。因此，在未來之應用上需配合當地溪床條件，並將水位計設置在適當之位置避免受到破壞。

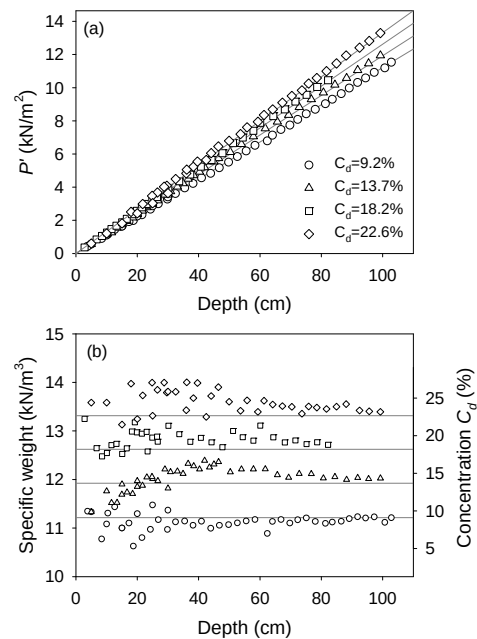


圖 4 高嶺土之壓力、比重量及濃度與液面高度關係圖

Figure 4 The relationship between submersible pressure (kN/m^2), specific weight (kN/m^3), concentration (%), and water depth (m) in Kaolin

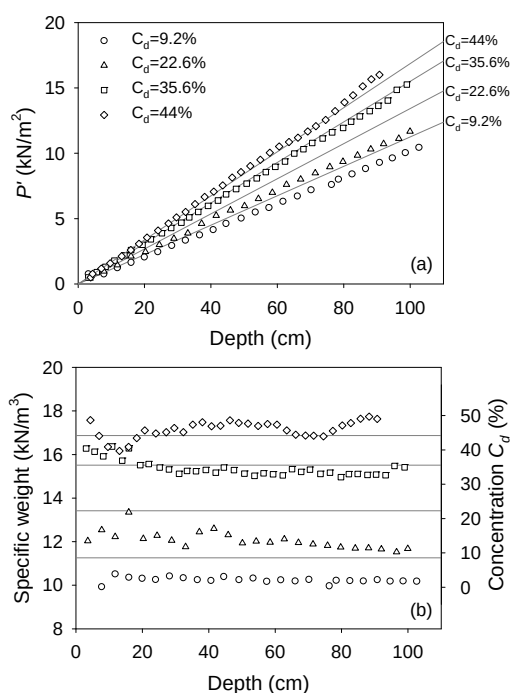


圖 5 土樣之壓力、比重量及濃度與液面高度關係圖

Figure 5 the relationship between submersible pressure (kN/m²), specific weight (kN/m³), concentration (%), and water depth (m) in sediment

結論

本研究使用高嶺土及土樣 (< 2mm) 製造不同濃度之液體，利用壓力式水位計推估含靜止狀態下之含砂液體之體積濃度。實驗結果發現，液體中之固體顆粒組成性質為重要之影響因子。屬黏土範圍之高嶺土由於固體顆粒均一且細小，沉降速度較為緩慢，對於比重量變化不大；因此，濃度推估無明顯影響。但是，土樣在低濃度時，由於固體顆粒沉降速度較快，使得比重量有明顯之變化。

若能使固體顆粒完全地分散且均勻分佈於液體中，則將會有更佳之推估成果。另外，壓力式水位計針對高嶺土液體所得之體積濃度推估值與理論值誤差範圍介於 0.6%~1.5% 之間；而土樣在高濃度時，所推估之體積濃度誤差介於 1%~3.7% 之間。此結果說明利用壓力式水位計推估液體含砂濃度為可行之辦法。最後，建議可利用動態液體進行實驗，以避免固體顆粒沉降之影響，亦更符合現場之情形。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會提供研究經費 (NSC93-2625-Z-005-002)，以利本研究順利進行。

參考文獻

1. 行政院農委會水土保持局(2013)，土石流防災資訊網，<http://246.swcb.gov.tw/index.aspx>.
2. 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，第三十七期，第二卷，第 91-109 頁。
3. 周必凡(1991)，「泥石流防制指南」，科學出版社。
4. 費祥俊、舒安平(2004)，「泥石流運動機理與災害防治」，清華大學出版社
5. 王志賢(2007)，「泥砂顆粒組成對黏性土石流體流變參數影響之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論

- 文。
6. 劉格非、李欣輯(1999)「地聲探測器之初步研究」。第二屆土石流研討會論文集，第 84-93 頁。
7. 黃清哲、葉智惠、尹孝元、王晉倫(2005)，「地聲探測器應用於土石流監測之研究」，中華水土保持學報，第三十六期，第一卷，第 39-53 頁。
8. 柯秀宜(2007)，「影像處理技術於土石流流速判釋之可行性研究-以神木觀測示範站為例」，國立中興大學資訊科學研究所碩士論文。
9. 莊淑欣(2005)，「應用影像特徵於土石流事件判釋之研究-以神木觀測站為例」，國立中興大學資訊科學研究所碩士論文。
10. 張守陽、黃榮堂、李璟芳(2005)，「機械視覺應用於土石流監測之研究」，中華水土保持學報，第三十六期，第一卷，第 1-18 頁。
11. 方耀民、李秉乾、周天穎、張桂芳、連惠邦、林裕益、連榮吉、尹孝元(2008)，「小波轉換應用於土石流地聲分析-以愛玉子溪事件為例」，中華水土保持學報，第三十九期，第一卷，第 27-44 頁。
12. 黃清哲、孫坤池、陳潮億、尹孝元(2007)，「不同型態土石流地聲特性之實驗研究」，中華水土保持學報，第三十八期，第四卷，第 417-430 頁。
13. 詹錢登、李明熹(2004)，「土石流發生降雨警戒模式」，中華水土保持學報，第三十五期，第三卷，第 275-285 頁。
14. 楊仁文(1998)，「超聲波泥位計的研製和應用效果」，山地研究，第十六期，第一卷，第 77-79 頁。
15. 豐建勛(2002)，「壓力式水位計應用及精度分析」，海洋測繪，第二十二期，第二卷，第 52-54 頁。
16. 張育嘉(2005)，「高含砂濃度觀測技術之研發：時域反射法」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
17. Thomas C.P. and M. S. Kevin (1985), "Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hypreconcentrated streamflow," *Water Resources Research*, 21: 1511-1524.
18. Nitakawi Y., K. Wada and K. Egashira (1981), "Particle-particle and particle-water interactions in aqueous clay suspension. Part II. Viscosity data and interpretation," *Clay Science*, 5: 319-331.
19. Lehmann P., C. Hinz, H.J. Tromp-Van Meerveld and McDonnell J.J. (2007), "Rainfall threshold for hillslope outflow: an emergent property of flow pathway connectivity," *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11: 1047-1063.
-
- 102 年 03 月 08 日收稿
102 年 03 月 25 日修改
102 年 03 月 27 日接受

表 1 不同組成物質之液體對壓力之影響實驗條件及結果

Table 1 Summary of experimental condition and results in different material fluid

編號	組成物質 $C_d = 18.2\%$	初始值 P'_m (kN/m^2)	開始實驗後 1 分鐘 (P'_{1m})		開始實驗後 3 小時 (P'_{3m})	
			照片	壓力值 (kN/m^2)	照片	壓力值 (kN/m^2)
I	高嶺土	3.79 $\gamma_m = 12.62$		3.88 $\gamma_m = 12.95$		3.75 $\gamma_m = 12.50$
II	土樣	3.81 $\gamma_m = 12.71$		2.94 $\gamma_m = 9.79$		2.73 $\gamma_m = 9.11$
III	高嶺土 (90%) 礫石 (10%)	3.79 $\gamma_m = 12.62$		3.55 $\gamma_m = 11.82$		3.55 $\gamma_m = 11.82$
IV	土樣 (90%) 礫石 (10%)	3.81 $\gamma_m = 12.71$		3.34 $\gamma_m = 11.41$		3.00 $\gamma_m = 10.01$

註： C_d 為體積濃度； γ_m 單位為 kN/m^3