

混凝土梳子壩攔阻功效之研究

黃育珍⁽¹⁾ 李錦浚⁽²⁾ 李元智⁽³⁾

摘要

本研究之室內渠槽試驗材料係取自南投縣信義鄉神木村之土石材料，並以等重量替代法對現場之粒徑分佈情況加以修正。而壩體模型為林務局於南投縣信義鄉松山溪所設置之梳子壩為比例以混凝土製成，並進行相關攔阻功效及衝擊力試驗。在試驗過程中，以防治工法之觀點探討河道坡度 ($\tan \theta$)、壩體角度 (β) 與相對開口寬度 (L/D_{\max} 或 L/D_m ，即梳子壩開口寬度 L 與土石最大粒徑 D_{\max} 或平均粒徑 D_m 之比值) 為因子，對壩體之貯砂率、粒徑分離能力與衝擊應力進行探討。

研究結果顯示：當壩體角度較大時，會造成壩前土砂堆積較高、堆積角度較大，而其貯砂率及分離能力均因此而較為提高；在壩體角度較小時，土石流對壩體衝擊力有明顯之減少。研究顯示減小壩體角度對保護壩體上可發揮其功效。此外，由試驗結果可以發現，在粒徑較大時，此一因壩體角度變化造成防治功效差異將更加明顯。

(**關鍵詞**：攔阻功效、衝擊力試驗、粒徑分離能力)

A Study of Trapping Efficiency of Concrete-made Slit Sabo Dam

Yu-Chen Huang⁽¹⁾, Ching-Chun Lee⁽²⁾, Yuan-Chi Lee⁽³⁾

Ph.D Graduate Students⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation
National Chung-Hsing University, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The data of this study was collected at Shin-Mu village, Nantou County in central Taiwan. In this experiment, data are used to simulate the Shen-Mu Village in situ grading curve by equal weight composing modification.

(1) 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

(2) (3) 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

The experimental concrete-made slit sabo dam model is designed in the propoation of a real slit sabo dam that built up at the Song San creek in Shin-Mu village. In this study, we use three factors that including canal slope($\tan\theta$), dam impact angle (β) and relative slit width L/D_{\max} to discuss the relationship for separation effect, traping rate and impact. The results show that if the sabo dam have a higher impact angle (β), the debris will pile up a higher angle and height. while the trapping rate and separation effect is also have a higher performance. It's also show that if the sabo dam have a lower impact angle (β), it's effective to protect the sabo dam to resist the compact from debris flow. In addition, if the debris have a large grain size, the difference in separation effect and traping rate is more obviously.

(**Keyword:** separation effect, trapping rate impact angle, relative silt width).

前言

近年來，台灣地區灣地區土石流災害頻傳，引起國人嚴重關切與認知，並對土石流相關之課題進行研究。其中包括流動性質、發生機制、堆積型態、衝擊力力學特性及防治工法、危險區域或預警系統之劃定、災區之現場調查報告等等技術均有長遠之進步。

然而，近年來國內土石流防災結構物之設計上，工程師經驗累積並參照現場地理特性作為設計之依據，而在壩體形式之選擇上仍以構築傳統封閉式壩體為主。此種封閉式壩體雖然在淤滿後仍可有效地控制泥砂運移及穩定河床、防止兩岸持續性的崩塌等等優點，但由於土石流係屬於高濃度集體流動現象，移動速度極快，動量極大，若未能有效阻止其流動將對下游產生極大災害；而若無選擇地過度攔阻砂石，除造成壩體下游溪床之淘刷現象外，若上游之貯砂空間不足，將導致河道淤塞形成另一種洪水災害。故近年來，在本省多處土石流危險區已有改採開放式攔砂壩。此種壩體在土石流來臨時，不僅可蓄積洪水及土石流所挾帶之大量砂石，另

一方面又可達到河道自然輸砂平衡的原則。

本研究原始構想係來自奧地利目前已興建之攔砂壩壩體 (Fiebiger 1997)。研究之目的在探討土石流在不同坡度下對於具有不同衝擊角度之混凝土梳子壩其壩體角度對於土砂攔阻功效及衝擊力之影響性，以求得在一特定規模之土石流下一兼具壩體保護及攔阻功效之最佳衝擊角度。此一研究成果在實際設計上之應用，除可以保護壩體為出發外，更可獲致在不同角度下其相對應之壩前土砂堆積角度，進一步作為在不同貯砂條件下設置梳子壩之設計參考。本研究為求符合實際之狀況，在水槽模型之設計上，主要係以位於南投縣信義鄉松山溪梳子壩作為壩體尺寸模擬之對象。未來，將進一步研究壩體具有不同角度之複合型壩體，以更符合現場之需求。

文獻回顧

完善之土石流防治措施，應將硬體與軟體措施並行採用，以達最佳效果。而在土石流防治措施之規劃與設計上，首先應先瞭解土石流發展之各階段（發生、流動、淤積、

停止)的特性，並妥善運用各種抑制、攔阻、疏導、淤積、緩衝等防治方法，以達到各種工法共同負擔土石流土砂之目的，以減輕對下游地區之損害。依水土保持手冊(2006)土石流防治規劃設計原則(1.4.8)中，當土石流轉化為挾砂水流時之排出土砂量，視為容許排出土砂量；前述主要概念是以土石流為標的之工程治理措施，在規模上和設計標準上通常都較一般山地洪流為高，故只要能夠透過相關工程措施將土石流轉化為一般山地洪流(或挾砂水流)，其安全自然無虞。

池谷浩(1980)認為梳子壩 (slit dam) 於平時可使土砂適時流出，並能在洪水期間發揮抑制土砂災害之功效，此一概念與水土保持手冊(2006)所闡述之土石流工程治理措施相當吻合。圖 1 為梳子壩形狀示意圖。池谷浩由室內渠槽試驗(渠槽寬 0.6m，長 10.9m，坡降 1/30) 證實梳子壩之調節土砂功能，並提出以下論點：①梳子壩之設計，需合乎 $L/D_{max} \leq 1.5$ 之條件，才具有阻擋砂石之功能。②梳子壩之狹縫密度 (Slit Density) $\Sigma L/B$ ，若介於 0.2 與 0.6 之間 ($0.2 \leq \Sigma L/B \leq 0.6$)，則其調節土砂效果，可達傳統壩之 1.2 倍。③在狹縫間距 L 與狹縫密度 $\Sigma L/B$ 相同情況下，系列梳子壩 (2~3 座) 之效果不如單一梳子壩理想 (B：梳子壩壩體全寬，L：梳子壩壩體狹縫寬度， D_{max} ：土石流之最大粒徑)。

林裕益(1988)探討梳子壩對土石流之調節功效，獲致以下結論，①梳子壩狹縫間距之大小，會影響土石流尖峰濃度。②梳子壩可消滅土石流尖峰流量，具調節土石流流量之功效。③梳子壩狹縫間距 L 之設計，若符

合 $L/D_{max} \leq 1.7$ 的條件，則壩體便具有顯著之攔砂功效。④當 $L/D_{max} \leq 2.0$ 時，梳子壩即可將土石流集體流動型態轉變成一般土砂流動狀態；且隨值減小，其分離土石流粗礫石之功效愈顯著。

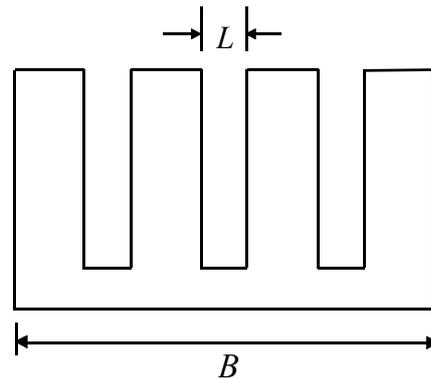


圖 1. 梳子壩形狀示意圖

在土石流發生之濃度特性方面，土石流與一般挾砂水流最顯著之差異乃固體泥砂含量不同，而隨流體中含砂礫體積濃度之多寡與組成材料及粒徑分佈不同，使得流體呈現同力學行為及流變特性。高橋保(1977)依據堆積層之剪力理論與 Terzaghi 所提出之土壤抗剪強度公式，在忽略凝聚力之條件下導出土石流砂礫體積濃度 C_d 之估算式：

$$C_d = \frac{\rho_w \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

式中： ρ_w ：水

之密度， ρ_s ：砂礫密度， ϕ ：內摩擦角， θ ：渠道坡角。

連惠邦(1998)研究以輸砂力學理論配合床面泥砂顆粒啓動概念，建立土石流泥砂體積濃度之估算模式，以預測土石流之臨前泥砂體積濃度(過壩前之泥砂體積濃度)。經理論推導結果顯示，土石流泥砂體積濃度可

表為：

$$C_d = \frac{1}{2} \left[(C_m + A_1 + A_2) - \sqrt{(C_m + A_1 + A_2)^2 - 4A_1C_m} \right]$$

$$A_1 = \frac{\rho \tan \theta}{(\rho_s - \rho)(\tan \alpha - \tan \theta)}, \quad A_2 = \frac{0.05}{(\tan \alpha - \tan \theta)}$$

而上式中： C_m ：床面靜止土體之最大體積濃度， $\tan \theta$ ：渠槽坡度， α ：動摩擦角， ρ ：水體密度， ρ_s ：固體泥砂顆粒密度。

武居有恆(1979)引述Richardson導出適用於土石流衝擊力公式為： $F = 0.5CD_i\rho u^2(\pi a^2)$ ，式中 F ：衝擊力， CD_i ：衝擊抵抗係數， ρ ：密度， u ：流速， a ：礫石之半徑；水山高久(1979)引述雪崩之正面瞬間衝擊力為該式計算值之2倍。若以完全彈性球體之假設推導得土石流中巨礫對混凝土攔砂壩之衝擊力如下式： $F = 241u^{1.2} \cdot R^2$ 。其中 F ：巨礫衝擊力(ton)， u ：流速(m/sec)， R ：巨礫之半徑(m)，且經燒岳土石流之實測檢算後，將上式修正成下式：

$$F = 48.2u^{1.2} \cdot R^2$$

劉格非(1994)以數值方法推導出土石流撞擊力方程式為：

$$F = \rho g \cos \theta h|_{-L_0} + \rho g \sin \theta L_0 - \frac{\tau_0 L_0}{(h-B)} \operatorname{sgn}(u) +$$

$$\frac{\rho}{2} (u^2|_{-L_0} - u^2|_0) + \rho C_s u|_{-L_0}$$

其中， C_s 為震波在

撞擊攔阻壩時之波速。式中右側第一項為土石流之靜壓，第二項為重力項，第三項為床底總剪力，第四項為動壓差，最後一項為震波產生之力量。

水土保持手冊(2006)懸臂式梳子壩設計例(3.4)採用經驗公式。其中，土石流流體撞擊力 $P_f = \alpha \cdot \frac{\gamma_{sat}}{g} \cdot h_d \cdot v_{df}^2 (t/m)$ ；式中 $\alpha \approx 1.0$ ， γ_{sat} ：飽和單位重， h_d ：設計流深， v_{df} ：設計流速；而巨礫撞擊力： $P_d = 50(\text{巨礫礫徑})^2 \cdot (\text{土石流流速})^{1.2}$ ，(游繁結，1993，水土保持學報，25卷第一期 p.24)。

土石流由於前端集聚有大量的粗大礫石且上層石塊多於下層，因此土石流前端衝擊力較層大於下層；但由於石塊時刻帶有隨機性質，因此很難得到衝擊力與運動要素關係。要測得大石塊之瞬間衝擊力，常以理論分析輔以破壞實例驗證來解決。

研究區域

1. 地形與水系

神木村位於南投縣信義鄉和社、東埔之間。出水溪由東南向北蜿蜒並於神木國小左下方匯流入霍薩溪。全區集水面積約為861公頃，主流河道長3.5公里，河谷標高1300公尺以上，地勢陡峭，出水溪集水區地形圖如圖2。民國85年8月之土石流，發生區坡度為29度，為賀伯颱風所造成之各個土石流災區中，土石流發生次數最多(約二十餘次)且其動態被實地錄影之唯一災區。

2. 地質調查

陳有蘭溪以西地區地層分佈屬於中新世至上新世之沈積岩層，神木村該區地質則屬十六份頁岩及大窩砂岩。而神木村附近之地質材料，大致為和社層之灰色砂岩、暗色頁岩、暗灰色砂頁岩互層，呈現破碎狀；崩積

岩以砂、泥、塊岩為主，膠結鬆散。整體說來，該地屬於地質較年輕之地層，主要為砂、頁岩互層；但因構造發達、岩層破碎，且坡

度較陡，表層岩屑土砂堆積不易穩定，故容易發生崩塌，使之成為土石流形成材料，區域地質圖詳圖 3。

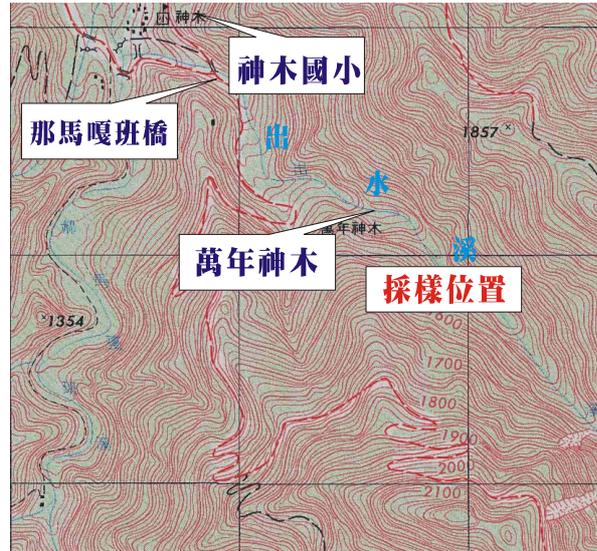


圖 2. 出水溪集水區地形圖
Figure 2. The terrain in Chu-Shui Creek basin.



圖 3. 神木地區區域地質圖
Figure 3. Regional geology map in Shin-Mu village area.

研究方法

1. 現場採樣及室內物理試驗

為了解研究區溪谷堆積之崩積土樣特性，本研究於現地擇一適宜之地點進行明坑篩分析試驗，以瞭解現場土樣之粒徑分佈及密度，並於現場採集適合之土樣，以便於室內進行相關土石流特性之研究。

本研究原計畫於出水溪下游地區取得不擾動土壤，作為試驗之用，但有鑑於神木村當地已有數次之土石流災害發生，為防止土石流再度發生危害下游地區，在採樣之前林務局已於出水溪河道進行相關疏濬及整治工程，故下游土體多已因工程進行而產生擾動。最後，經人員至上游地區實地勘察且研究是否為擾動區後，確定採樣地點為靠近萬年神木附近之一防砂壩（出水溪上游段防砂壩工程 1 號壩，林務局嘉義林管處建造）下游面約 300 公尺遠處之土石流堆積河床取樣。

2. 現場採樣程序

整地：剷除表面之雜草，約略整平，再以噴漆、水準尺在整平之地面，畫出一公尺見方之明坑採樣位置。整地完成後以人工進行挖掘。

現場篩分析及取樣：將挖掘出之土樣用長 60cm、寬 40cm 之大型方孔篩進行篩分析。粒徑大於 38.1mm (1.5") 之粗礫料，採乾篩法。先將顆粒表面之土壤刮除，按次序分別秤出停留於篩徑 38.1mm(1.5")、50.8mm(2")、76.2mm(3")、152.4mm(6")、228.6mm(9")、304.8mm(12")篩網上之濕重 W_{wi} ，再依現地含水量修正至乾重

$W_{di} \left(W_{di} = \frac{\omega_i}{1 + \omega_i} \right)$ ，式中 ω_i 乃各粒徑之現地含水量。

明坑體積之量測：挖掘完成後，於長寬高各量取五處求取平均值，即可獲得平均體積。

室內篩分析：粒徑小於 38.1mm(1.5") 之土石混合物，因室外處理較為不易，故攜回試驗室，在室內採濕篩法處理。依各級篩號篩洗完畢後，烘乾後加以稱重。

篩分析曲線：計算各篩號之個別留篩百分率及累積過篩百分率後，繪製現地粒徑分佈曲線，作為相關分析之參考數據，及室內試驗中，粒料準備之依據。

3. 模擬級配曲線

觀察神木村河道實際情況，現地超過 25cm 以上之大粒徑土石比比皆是，甚至有高達 100cm 以上之巨礫。但在實際情況下，室內試驗時由於受限於試驗室渠槽之尺寸，並無法以和現地之級配情形完全相同之粒徑分佈進行試驗。因此，在試驗過程中就必須研究以縮小現地級配來製作試體來進行試驗，不但需符合試驗室之限制條件，更必須與現地有類似之力學特性。

模擬現地粒徑分佈之方法一般有三種：①剝除法 (Scalping Method) ②平行級配法 ③等重量替代法。本研究係採用等重量替代法，將某一粒徑以上之現地粒徑分佈曲線作一任意改變，但對此粒徑以下之粒徑分佈曲線仍保持與現地相同。然此法最大優點在於縮小級配後，其粗、細顆粒含量之比例保持與現地相同，因此其細粒料之含量與現地完

全相同，所以無平行級配法細粒料增加之困擾，且礫石比重隨粒徑大小改變之情形較輕微，幾乎與現地比重大致相同，故可控制其乾密度及孔隙率與現地一致。根據曲先慎（1986）針對縮小級配中等重量替代法與平行級配法進行力學性質試驗結果，提出土壤強度參數之求得以等重量替代法為宜之結論，故本研究以等重量替代法模擬現地粒徑分佈曲線，並以#4 作為分界，控制最大粒徑分別為 63.5mm(2.5")、50.8mm(2.0")、38.1mm(1.5") 三條粒徑分佈曲線，如圖 4 所示。並以此三種粒徑分佈之試料進行相關試驗。

4. 水槽模型試驗

供水部：由沈水馬達、流量閥門、儲水槽、消能式供水箱、塑膠管所構成，可控制水流量及穩定輸送。

水槽：以不鏽鋼板為底部，兩側為透明玻璃板，長 600cm，寬 60cm，高 30cm。可自由調整水槽之傾角，動力由馬達供給，角度因室內空間限制，變化僅為 0 度~21 度。

收集槽：以長 150cm，寬 150cm，深 50cm 之不鏽鋼製成，其收集面裝有濾網，將土石、木材與水分離，再將水收集至底部之儲水箱，由沈水馬達汲取至儲水槽（如圖 5）。

試驗模型：本研究之攔砂壩模型，相關壩型及間距尺寸為參考松山溪梳子壩所設計。壩體高度為 30cm、寬度 5.5cm，為配合渠槽寬度 60cm，開口寬度約為 5.4cm，分別具有兩組壩體角度（如圖 6）。本試驗過程中，每一組壩體具備設計兩壩體角度，製作兩組壩體共有 4 壩體角度以提供試驗所需變化。壩體角度 β （ β 係指壩體傾斜面和水槽平面之交角）分別為 90 度、80 度、70 度及 60 度，

在每一固定之壩體角度下，進行相關包括河道坡度、相對開口寬度等不同因子之試驗，以探討在開放式混凝土梳子壩中，壩體角度對相關攔阻功效之影響。

衝擊力量測設備：本試驗於下游壩體模型正面固定之高度位置，裝設壓力計。將各壓力計連接至訊號放大器，調整所需放大倍率，並經由 IntruNet 軟體設定相關參數及擷取頻率，以每秒 100 次（100Hz）來記錄試驗中所量測之資料值；試驗結束後再將存取之資料以電腦統計軟體分析。而所有電源皆透過穩壓器（不斷電系統 UPS）接出，以消除電壓不穩定之訊號干擾。

5. 實驗控制條件

本研究所進行之水槽模型試驗其控制條件如下：① 模擬級配試體三種： $D_{max} = 63.5\text{mm}$ （2.5"）、0.8mm（2.0"）、38.1mm（1.5"）。② 水槽傾角三種：分別為 15°、17°、19°。③ 供水流量： $Q = 4 \text{ l/sec}$ 。④ 壩體角度：分別為 90°，80°，70°，60°。

6. 實驗步驟

(1) 水槽模型試驗步驟：

- ① 於水槽中、下游確實固定壩體模型，並在固定位置設置壓力計，連接資料截取系統。同時將攝影機架設妥當進行錄影。
- ② 將水槽升起至試驗角度（由角度規檢視），同時拆除固定土樣之壓克力板並控制水流量閥門至所須流量位置。
- ③ 啟動資料截取系統，然後啟動抽水馬達供水，使土石流發生到結束為止（約 30 秒）。
- ④ 記錄流動狀態、堆積高度，並取通過壩體及為壩體攔阻之堆積材料作粒徑分析。

⑤分析記錄資料。

(2) 流速與流況之觀測

在流速與流況之觀測上，須分析並計算土石到達壩前之波速，同時記錄土石流於壩前堆積高及堆積長度，並記錄土石流流動及堆積狀況，而在壩體濃度量測中，利用碼表記錄土砂開始至結束沖蝕之時間，根據實際之水流量及土砂之體積，可計算求得土石流平均之壩前濃度作為評估攔阻功效之參考。

(3) 通過及攔阻物分析

當土石流停止並堆積完成時，取通過壩體之土石堆積物與被壩所攔阻之土石堆積物，經由濕篩法分出各篩號礫石，再以烘箱烘乾後稱重進行粒徑分析。將結果繪製成粒徑分佈曲線圖，再利用下式式以求其平均粒徑 D_m ，

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \times \Delta P_i}{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}$$

式中， D_i 為各篩號之孔徑，而 ΔP_i 則為各篩號停留百分比。

結果與討論

本章探討在不同壩體角度及相關因子下，開放式混凝土梳子壩對土石流之攔阻功效。研究之進行乃於室內水槽上游端供給已知流量之表面逕流，沖刷、推移固定高度堆積土塊的土砂、礫石來形成土石流波段。土石流發生並流動 3 公尺距離後，以設置於渠道下游之混凝土梳子壩對土砂進行攔阻，通過壩體之土石以收集槽收集之。試驗完成

後，將開放式壩體所攔阻與通過壩體之土石進行濕篩後烘乾、稱重。透過粒徑分析之結果，計算貯砂率及壩前、過壩土石之粒徑分佈，以探討不同壩體角度下，壩體之攔阻功效。

1. 土石流流況

於試驗過程及試驗後從錄影帶中觀察，土塊試體皆先由下游面崩壞，形成土石流之第一波，隨後流下之土石量越多，而形成集體流動之趨勢。此種發生型態，乃屬於何敏龍分類之複合型的第三類。

一般而言，此一估算式適用於初始破壞，對壩前臨前濃度較不適用。而連惠邦（1998）所建立之半經驗式則較符合實際情況。本研究利用估算水流時間方式，估計壩前臨前濃度，結果如圖 7 所示。由實驗結果得知，連惠邦半經驗式，和試驗結果接近，試驗值約為經驗式之 90%。

2. 壩前堆積情況

高橋保(1977)指出土石流運動必有碰撞發生，來維持本身集體運動，在有足夠空間供礫石顆粒充分運動之情況下，隨著碰撞次數增加，能量也增加，土石流整體運動速度也隨著加快。一旦流動中之土石撞擊攔砂壩體，其能量迅速降低，加上已無空間讓土石流顆粒保持順暢流動，且土石流堆積高度有所限制，故造成土石流急遽停止。

從實際觀察可得，在第一波土石達到壩體時，攔阻效應並不立即發生，此時被攔阻之土石形成不穩定之土石堆積，在後續到達土石之擠壓甚至翻越之下，堆積於壩前之不穩定土石會再度流下。經觀察，在土石發生

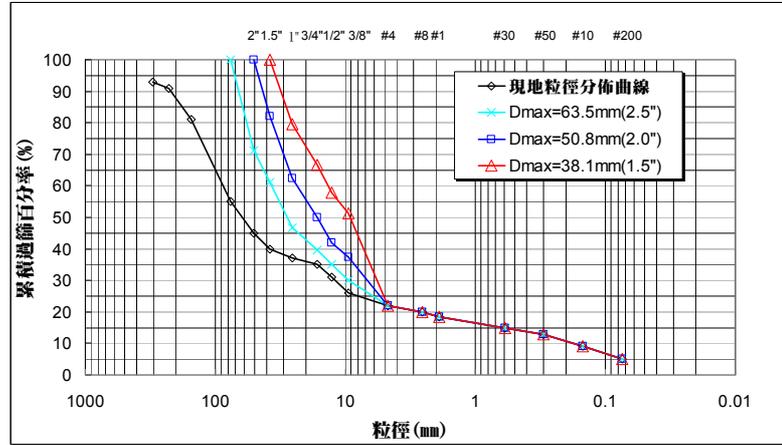


圖 4. 篩分析及模擬級配曲線

Figure 4. In situ Grain size distribution and grading curve by equal weight composing modification.

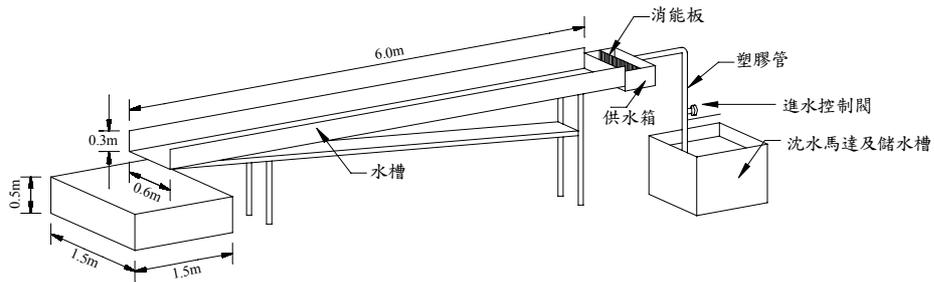


圖 5. 水槽模型示意圖

Figure 5. Sketch map for experiment canal.

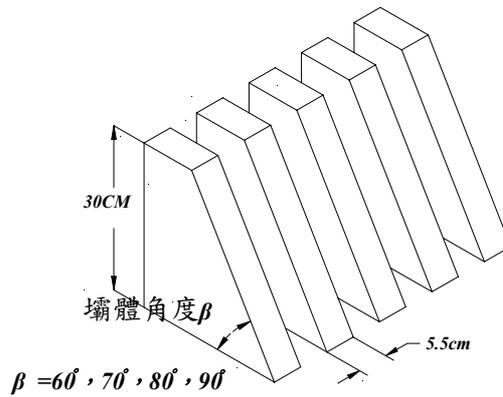


圖 6. 壩體模型示意圖

Figure 6. Sketch map for experiment concrete-made sabo dam.

3. 貯砂率分析

開放式攔砂壩對土石流攔固排液之防治目的，即希望將高流速、衝擊力大的粗大顆粒攔阻於壩前，形成堆積，一方面藉由土石自重穩定壩體外，並可緩和溪谷坡度，提高安全性；另一方面，因壩體攔阻空間有限，危害性較低之土砂流則可透過壩體開口往下游輸送。因此，對於土石流之防治而言，貯砂率為評估壩體攔阻效益之重要指標。

當土石停止流動後，將堆積於複合壩前與通過壩體之土石堆積物，從水槽上方取出烘乾秤重，以求堆積與通過土石量及計算貯砂率 $R_s(\%)$ ， $R_s(\%)$ 計算方式如下：

$$R_s(\%) = \frac{T}{T+P} \times 100\% \quad T: \text{壩前堆積土石}, P: \text{過壩土石}$$

根據計算所得之貯砂率結果，分別於三種不同之河道坡度下對壩體角度 β (度) 及相對開口寬度 L/D_{\max} 進行分析，可得其迴歸式分別如表 1。

若將河道坡度 $\tan \theta$ ，壩體角度 β 與相對開口寬度 L/D_{\max} 三個參數作迴歸分析，可得關係式如下：

$$R_s(\%) = 143.15 + 9.33\beta - 26.25 \tan \theta - 32.78e^{1/D_{\max}}$$

$$, r^2 = 0.895$$

由迴歸式中可以發現，在河道坡度較大時， R_s 和 β 有相當程度之相關性。在壩體研究範圍 90 度~60 度之中，當壩體 β 角度越大，其 R_s 也將隨之提升，此種影響並以坡度 19 度時最為明顯。此一隨坡度變化之趨勢，和過去所得之結論類似。若以坡度 17 度為例，當壩體角度為 60 度時， $L/D_{\max} = 1.15$

($L/D_m = 3.39$) 可達到 50% 之貯砂率。此外，由試驗所得曲線可發現，無論坡度及壩體角度，當 $L/D_{\max} > 1.5$ 以上時，壩體幾無攔阻之功效，未來於設計壩體時，開口寬度為必須考量之重點之一。

4. 顆粒分離效果

土石流粗顆粒之功效，乃將各試驗條件下所流出的砂石，進行粒徑分析，計算繪出其篩分析曲線，取其平均粒徑 (D_m)，並利用分離能力之指標 D_{mp}/D_{m0} ，探討壩體之特性。一般而言， D_{mp}/D_{m0} 若小於 1 即有細粒化之效果，可視為壩體具有土砂分離能力。而由曲線上來看，在試驗所設定之條件下， D_{mp}/D_{m0} 均小於 1，顯示試驗之壩體均具有土砂分離之能力。將所有試驗結果及相關因子進行迴歸，可得表 2 各迴歸式：

若將三項因子作迴歸分析則可得：

$$\frac{D_{mp}}{D_{m0}} = -0.22 - 0.23\beta + 0.86 \tan \theta + 0.31e^{1/D_{\max}}$$

$$, r^2 = 0.892$$

由上式綜合分析可得， D_{mp}/D_{m0} 和壩體角度呈現負相關，當壩體角度增加時，過壩之土砂平均粒徑有隨之縮小之趨勢，此一現象表示，當壩體角度加大，過壩之土石細粒化程度更加明顯。而在相對開口寬度之分析上可發現，當相對開口寬度越小（即顆粒越大）壩體分離能力將急速下降，可見其和過去成正比之關係略有所不同。若以設計之角度來探討，在一河道坡度 17 度而壩體角度為 60 度時， $L/D_{\max} < 1.31$ ，壩體對土砂即產生細粒化之效果。

5. 粗顆粒分離效率

為瞭解不同角度下，壩體在粗顆粒之防治效果，本研究以粗顆粒分離效率 D_e 作為評估壩體在粗顆粒防治功效上之指標

$$D_e = \frac{D_{f0} - D_f}{D_{f0}}$$

D_{f0} = 原始試體中值粒徑 (D_{50}) 以上之平均粒徑， D_f = 過壩試體中值粒徑 (D_{50}) 以上之平均粒徑。

粗顆粒分離效率 D_e 在 L/D_{max} 最小時，不同壩體角度之影響性最明顯。且在壩體角度 90 度時分離效率最為顯著。下表為在各坡度下，試驗所得 D_e 和 L/D_{max} 及壩體角度之迴歸式如表 3。

由以上迴歸式中，可以得到以壩體角度 60 度情況下，若以考慮貯砂率及粒徑分離能力為主而得之 L/D_{max} 值 1.15 作為設計標準，則 D_e 仍具有約 30% 之粗顆粒分離效率，因此，以防治功效而言，在壩體之設計考量上可以以前兩者為主。然而，所有仍須參考當地實際之需求，以最符合之方式作設計為佳。

此外，在 $D_e = 0$ L/D_{max} 時 = 1.47，此一數值和貯砂率為 0 時所得之 L/D_{max} 極為接近，此一結果證明 $L/D_{max} = 1.5$ 為設計時之極限，當大於此值時，壩體已無防治功效，未

來在壩體設計時應予以考量。

6. 壩體衝擊力分析

由於土石對壩體衝擊力充滿隨機性，因此每一壓力計所擷取得之數據較無法獲得一精確值，本研究以大面積之壓力計 (8.55 cm^2) 所得之數據視為壩體平均之壓力，而以小面積 (0.2 cm^2) 壓力計之值為瞬間尖峰壓力。

在土石流撞擊壩體之過程，多有數個波段存在，而特別突出的尖峰值則可能為大顆粒礫石碰撞壩體所致。土石流對壩體的衝擊力，一般認為由下列幾項組成：土石流流體產生的動壓、堆積物對壩體的主動土壓力、土石流中巨礫的瞬間衝擊力、後續流下土石對既有堆積物產生的震波效應以及河床床底的摩擦阻力等。由結果可以得到一初步結論，當壩體角度較大時，瞬間之最大壓力可達 2.2 kg/cm^2 以上，而當壩體角度減小時，由於礫石正向直接撞擊的機會降低，因此，瞬間最大壓力之有下降之趨勢。

此外，在利用直徑 2cm 之玻璃珠進行衝擊力試驗當中，實測衝擊力約 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ ，此一衝擊力值約為理論式之 1/5。圖 11 為在河道坡度 17 度下，壩體所受衝擊應力和壩體角度關係圖，由圖中可發現：在壩體角度越小時，平均力和尖峰應力差異性越小，此一結果顯示在壩體角度較小時，可減低巨礫正面撞擊之機率，減少壩體之損害。

表 1. 貯砂率迴歸分析結果
Table 1. The regress equation for trapping rate.

坡度 15 度	$R_s(\%) = 142.29 + 8.04\beta - 28.55e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.978$
坡度 17 度	$R_s(\%) = 168.79 + 8.44\beta - 40.36e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.979$
坡度 19 度	$R_s(\%) = 142.47 + 11.51\beta - 29.42e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.906$

表 2. 分離能力 D_{mp} / D_{m0} 迴歸分析結果

Table 2. The regress equation for separation effect.

坡度 15 度	$D_{mp} / D_{m0} = -0.14 - 0.20\beta + 0.34e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.927$
坡度 17 度	$D_{mp} / D_{m0} = 0.15 - 0.25\beta + 0.30e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.836$
坡度 19 度	$D_{mp} / D_{m0} = 0.11 - 0.24\beta + 0.30e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.931$

表 3. 粗顆粒分離效率 D_e 迴歸分析結果

Table 3. The regress equation for large grain size separation effect.

坡度 15 度	$D_e = 1.15 + 0.02\beta - 0.26e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.957$
坡度 17 度	$D_e = 1.02 + 0.06\beta - 0.25e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.947$
坡度 19 度	$D_e = 1.16 + 0.03\beta - 0.273e^{1/D_{max}}$, $r^2 = 0.950$

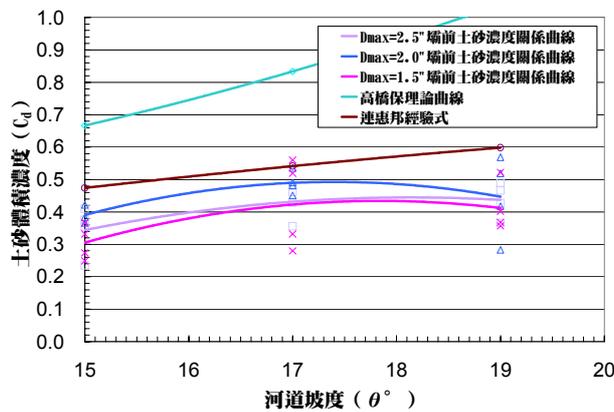


圖 7. 河道坡度 θ° 與土砂體積濃度 C_d

Figure 7. The relation curve between canal slope (θ°) and debris consistency (C_d).

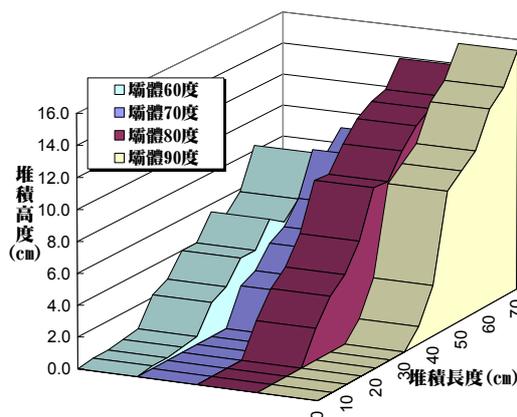


圖 8. 河道坡度 15 度壩前堆積情況

Figure 8. The debris pile up terrain for canal slope 15° .

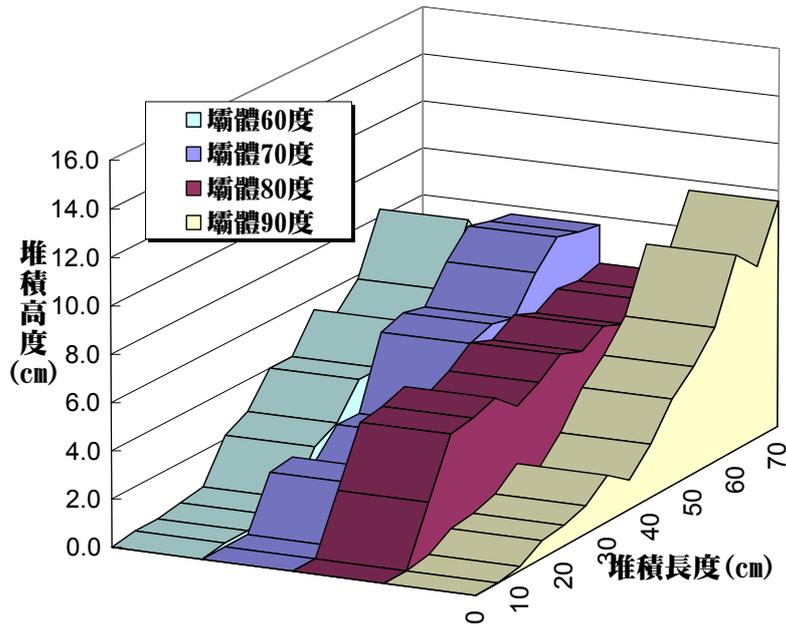


圖 9. 河道坡度 17 度壩前堆積情況

Figure 9. The debris pile up terrain for canal slope 17°.

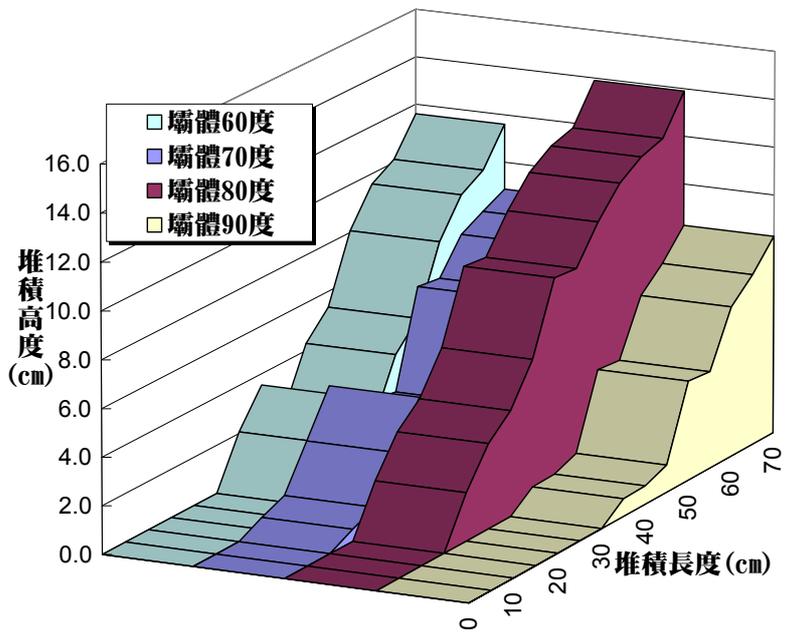


圖 10. 河道坡度 19 度壩前堆積情況

Figure 10. The debris pile up terrain for canal slope 19°.

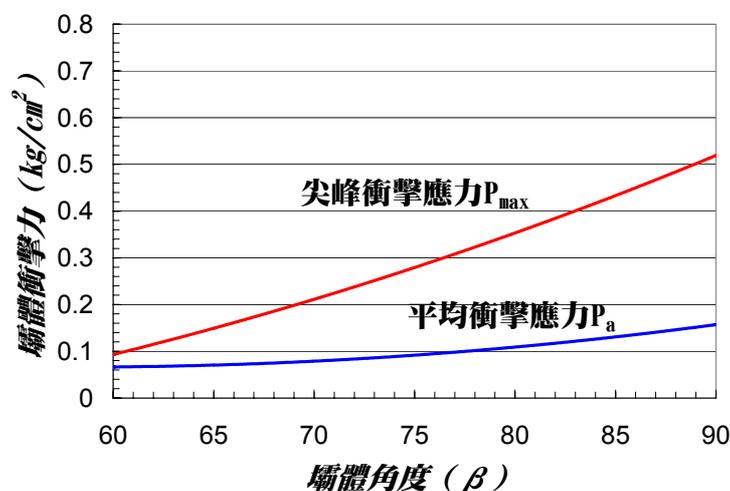


圖 11. 壩體衝擊應力和壩體角度關係圖

Figure 11. The relation curve between impact and impact angle (β).

結論與建議

1. 結論

- (1) 將試驗所得之貯砂率 R_s ，分別對相關因子（河道坡度 $\tan \theta$ ，壩體角度 β 與相對開口寬度 L/D_{\max} 或 L/D_m ）作迴歸分析，可得試驗範圍壩體角度 90 度~60 度中，當壩體角度 β 越大，其貯砂率 R_s 亦將隨之提升，此種影響並以坡度 19 度時最為明顯。若以坡度 17 度為例，當壩體設計角度為 60 度時， $L/D_{\max} = 1.15$ 或 $L/D_m = 3.39$ 可達到 50%之貯砂率。
- (2) 在過壩土砂平均粒徑與原始土砂平均粒徑比值 D_{mp}/D_{m0} 之分析中，將試驗所得之 D_{mp}/D_{m0} 結果對壩體角度及相對開口寬度作迴歸分析得 D_{mp}/D_{m0} 和壩體角度呈現負相關，當壩體角度增加時，過壩之土砂平均粒徑有隨之縮小之趨勢，此一現象表示，當壩體角度加大，過壩之土石細粒化程度更加明顯。若以設計之角度來探討，在一河道坡度 17 度而壩體角度為 60 度時， $L/D_{\max} < 1.31$ ，壩體對土砂即產生細粒化之效果。
- (3) 不同壩體角度，對於壩前土砂貯砂率影響較為有限，而對壩前堆積土石堆積情況影響較為顯著。由實際觀察結果顯示：當壩體角度較大時，壩前堆積之高度較高，堆積之長度較低，故整體堆積物之堆積角度亦較大，在壩體角度 90 度時堆積角約 13 度；而在壩體角度 60 度時，堆積角約僅 5.3 度。
- (4) 在壩體衝擊力試驗結果，可得清水對壩體產生之動壓約為 0.008~0.024kg/cm²，而玻璃珠對壩體約為 0.2~0.5 kg/cm²，因此在衝擊力分析中，土石流對壩體衝擊力是以石塊之撞擊力為主。而在土石流衝擊力試驗上：當壩體角度越小，土石流對壩體

衝擊力有明顯減小；在壩體角度越小時，平均力和尖峰應力差異性越小，此一結果顯示在壩體角度較小時，可減低巨礫正面撞擊之機率，減少壩體之損害。

壩體角度設計，以承受較大之衝擊力；若河道係屬於河幅較為窄且較陡之型態。建議改採壩體角度較大之設計，以避免因壩前土砂淤積導致通水斷面迅速降低，衍生通水斷面不足之災害。

- (5) 綜合本研究之試驗結果，並參考連惠邦（1998）之開口寬度設計曲線，可整理出如圖 12 符合本研究試驗條件之壩體設計曲線圖。設計可由河道坡度先決一定壩前濃度 C_d ，藉由壩前濃度 C_d 利用設計曲線圖可根據不同壩體角度之防治功效，決定其濃度折減率 D_e ，最後，利用設計圖決定其最佳之相對開口寬度。
- (6) 依據本研究所獲得之壩體角度與壩前土石堆積關係，若河道係屬於河幅較為寬闊且河道坡度較緩之型態，可採坡度較緩之

2. 建議

- (1) 在單一壩體角度完成相關研究後，未來可進一步研究具有不同傾斜角度之複合式壩體，配合實際河道之情況，進行相關之研究。以提供實務界參考。
- (2) 本研究所獲得之相關結果，如壩體角度與壩前土石堆積之關係，未來在參考現場情況作修正後，可配合並建立一符合現場需求之設計經驗式，以提供各界作為設計壩體時之參考。

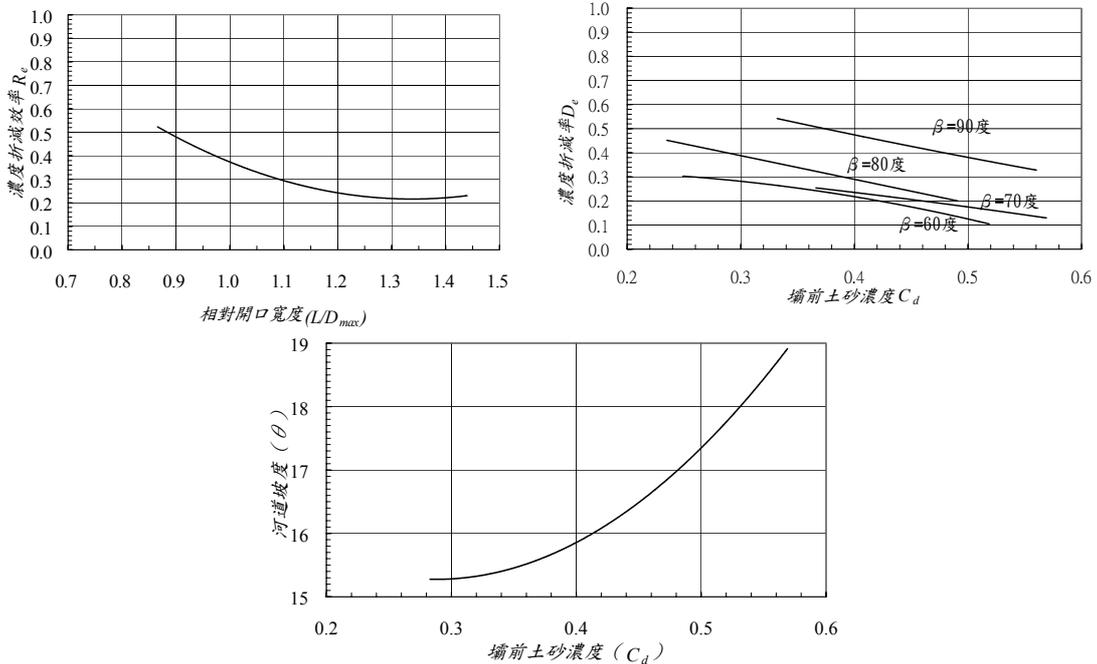


圖 12. 壩體設計曲線圖

Figure 12. The design curve for sabo dam.

參考文獻

1. 林裕益(1988),「梳子壩調節土石流功效之試驗」,國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
2. 李德基(1991),「泥石流防治指南」,中國科學院水利部—成都山地災害與環境研究所, P.155~156。
3. 謝正倫(1991),「土石流預警系統之研究(一)」,國立成功大學水工試驗所報告第130號。
4. 劉格非、郭哲昆、吳哲修(1993),「緩坡上土石流運動之研究」,中華水土保持學報—土石流專輯,第24卷第1期, P.1~11。
5. 連惠邦(1994),「礫石型土石流流體性質與運動特性之相關研究」,國立中興大學水土保持研究所博士論文, P.25。
6. 劉格非(1994),「攔阻土石流結構物上受力之研究」,行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, NSC 82-0414-P002-022B。
7. 陳有蘭溪治山防災整體治理規劃報告(1997),行政院農業委員會,台灣省水土保持局。
8. 何敏龍(1997),「土石流發生機制與流動制止結構物之研究」,國立臺灣大學土木工程研究所博士論文。
9. 連惠邦、陳禮仁、李韋德(1997),「切口式防砂壩防治土石流之設計模式」,第一屆土石流研討會論文集, P.71~82。
10. 林智勇(1998),「複合斷面開放式壩攔阻功效之研究」,國立中興大學土木工程研究所碩士論文。
11. 連惠邦(1998),「梳子壩防治土石流合理開口寬度之研究之研究(三)」,87年度防災專案計畫成果研討會論文集。
12. 高橋保(1977),「土石流發生流動關研究」京都大學防災研究所年報,第20號 B-2, P.405~435。
13. 渡邊正幸、水山高久、上原信司(1980),「土石流對策砂防設施關檢討」,新砂防第115號, P.40~45。
14. 蘆田和男、高橋保(1980),「土石流調節制御關研究—立體格子型砂防堰堤水理機能」,京都大學防災研究所年報第23號 B-2, P.433~441。
15. 高橋保(1981),「洞谷土石流」,新砂防第118號, P.42~46。
16. 行政院農業委員會水土保持局(2005),「水土保持手冊」,工程方法篇,工1-22。
17. Campbell, R.H.(1975), "Soil Slide, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California", U.S. Geological Survey Professional paper 851, p.51.
18. Takahashi, T.(1991)"Debris flows", Balkema Publishers, Brookfield, U.S.A, p.41~47.
19. Gernot Fiebiger. (1997) "Structures of Debris Flow Countermeasures". Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Edited by Cheng-lung Chen, ASCE(1997), p.596

95年11月27日 收稿

95年12月27日 修改

96年1月9日 接受