

# 2010年臺灣國際科學展覽會

## 優勝作品專輯

編號：150008

### 作品名稱

透水式攔砂壩的設計準則

**Design criteria for the permeable sabo dam**

### 得獎獎項

地球科學科大會獎一等獎

香港正選代表:香港第43屆聯校科學展覽會

學校名稱：臺北縣立永和國民中學

作者姓名：薛皓薰

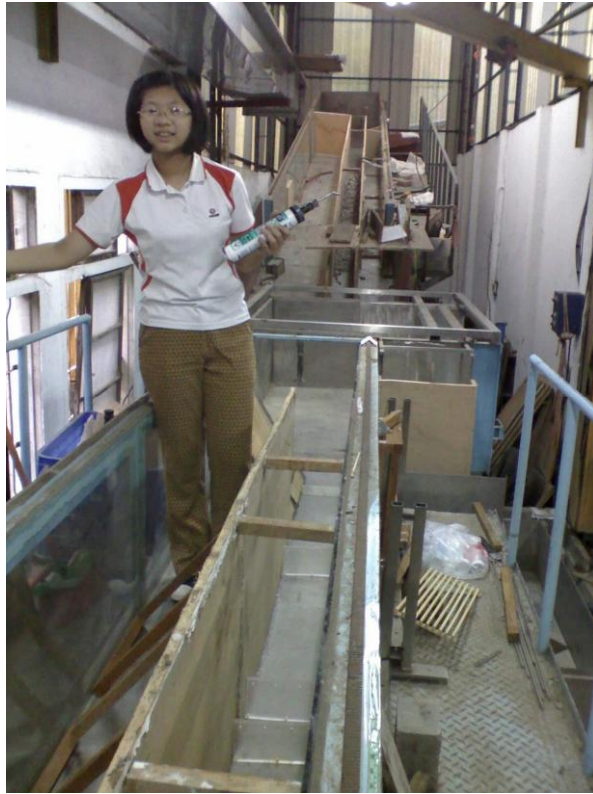
指導老師：劉格非、劉秋燕

關鍵詞：透水柵工法、篩分比、攔阻率

**Infiltration Screen ; Sediment Screening Ratio ;**

**Trapping Ratio**

## 作者簡介



我是薛皓薰，爸爸是導遊，而母親是自然科教師，我覺得「好鳥枝頭亦朋友，落花水面 皆文章」最喜歡和父母探訪世界各地風俗民情。舞蹈家瑪莎葛萊姆說：「我們在發現自己能 做什麼之前，根本不明瞭我們自己」但是老師說我的潛能無限；同學說我的想像力豐富；媽媽說我最大的缺點是太容易相信朋友，而且尚未學會「拒絕」的藝術，而我只知道我喜歡看 書和品嚐巧克力美食，它們具有令人廢寢忘食的的魔力，我的興趣是彈琵琶、大阮和一些少數民族的奇妙樂器，曾獲得過全國音樂比賽優等，同學都稱我為「科學人」因為我熱愛設計 實驗，曾獲得四次代表台北縣參加全國科展比賽的機會，希望往後能在研究的路上找到知己， 並不斷精進自己的能力。

## 摘要

由於台灣山區溪流短小陡急，土石流災害嚴重，透過式防砂壩攔阻工法為現今之趨勢，而平面透水柵具有一般透過式壩的優點，不但能將土石流轉化為水砂流，還可以減低土石流衝擊力造成的損壞及改善上游儲砂空間不足的問題。本研究採用改良式平面柵，在下游處增設分流河道，可改善分離出之細顆粒土砂水與大礫石再度結合之危險。此工法於2003年引進台灣後，尚未廣泛應用，主要原因為缺乏設計之經驗式，因此本研究針對透水柵的柵棒長度（ $L/D_{max}$ ）、棒淨間距（ $b/D_{max}$ ）、柵面架設方式、柵面篩分角度（ $\theta$ ）等多項重要因子進行室內渠槽試驗，最後提出土砂篩分比與攔阻率的趨勢方程式，設計時以總攔阻率（ $R$ ）高為原則，輔以篩分比（ $S$ ）與貯砂率（ $R1$ ）高，即可有良好之成效，期望能作為國內外現場工程施做時之參考，結果如下所示。

$$R=0.03554\left(\frac{b}{D_{max}}\right)+0.020524\left(\frac{L}{D_{max}}\right)-0.00268\theta+0.405093 \quad R^2=0.912154$$

$$R1=-0.2705\left(\frac{b}{D_{max}}\right)+0.008136\left(\frac{L}{D_{max}}\right)-0.00389\theta+0.556913 \quad R^2=0.797114$$

$$S=0.437719\left(\frac{b}{D_{max}}\right)+0.015581\left(\frac{L}{D_{max}}\right)+0.001675\theta-0.22502 \quad R^2=0.909837$$

## Abstract

Mountainous topography has made streams in Taiwan short and steep, this induces rapidflows. This Natural condition turns debris flow into one of the major natural disasters. To prevent debris flow from entering populated areas, permeable sabo dams have been frequently used recently as one of the countermeasures in debris flow disaster mitigation. The bottom infiltration screen is one of the strategies to control debris flow's liquidity. The main function of the bottom infiltration screens is to isolate debris flow's large boulders and transform it to sandy flow. They have the common advantages of the slit dam. They can avoid the damage made by direct impaction of the debris flow and improve the problem of insufficient sand-trapping capacity. We design a side under-pass below the main channel so that water and fine particles can be separated and flow through the under-pass to downstream. Then, the coarse boulders can be stopped and deposited along the main channel to the predesigned deposit area. This research uses experimental method to analyze important factors such as the length of the bar, bar spacing, the angle of infiltration screen. As one of the important results, we obtain the dimensionless empirical formulae for screen length ( $L/D_{max}$ ), bar spacing ( $L/D_{max}$ ), screen angles ( $\theta$ ), Sediment screening ratio ( $S$ ), Sediment storage rate ( $R1$ ) and Trapping ratio ( $R$ ).

As follows :

$$R = 0.03554 \left( \frac{b}{D_{max}} \right) + 0.020524 \left( \frac{L}{D_{max}} \right) - 0.00268 \theta + 0.405093 \quad R^2 = 0.912154$$

$$R1 = -0.2705 \left( \frac{b}{D_{max}} \right) + 0.008136 \left( \frac{L}{D_{max}} \right) - 0.00389 \theta + 0.556913 \quad R^2 = 0.797114$$

$$S = 0.437719 \left( \frac{b}{D_{max}} \right) + 0.015581 \left( \frac{L}{D_{max}} \right) + 0.001675 \theta - 0.22502 \quad R^2 = 0.909837$$

# 壹、前言

## 一、研究動機

世界銀行2005年「Natural Disaster Hotspots — A Global Risk Analysis」提及台灣曝露於天然災害下之人口與面積比例均為世界之冠，加以近年全球氣候變遷之影響，極端氣候發生頻率日益增加，土石流災害事件近年來有逐漸增多的趨勢，台灣地區由於地形陡峭、地質脆弱以及颱風豪雨等眾多天然不良因素，而且台灣有三分之二的地區是山區，人口密度又大，山區過度開發的結果，也使得山坡變得很不穩定，在民國八十八年 921 地震後，土石流的災害規模已明顯不同於以往，每逢颱風或豪雨，就令人心驚膽顫，最近一次促使這股流動殺手大規模發威的是 2009 年八月七、八日侵臺的莫拉克颱風，其豐沛的雨量造成臺灣東部、台東縣及南部各縣市地區的土石流竄、堤防潰決、橋梁沖毀、路基流失及居民房舍遭土石掩埋的慘重災情，土石流是世界十大風險災害之一，有研究的必要性。而且 2005 年聯合國防災世界會議(World Conference on Natural Disaster Reduction)發表了「兵庫宣言」(Hyogo Declaration)及「2005-2015 兵庫行動綱領」明白地宣示永續發展和減災策略整體規劃的密切關係，政府在制定災害防救法時，將土石流單獨明定為災害項目。由於政府的各項計畫都關係到公共財政支出問題，尤其是對於金額龐大的工程措施，因此土石流防治工程的經濟效益與預期攔阻功效，更有研究的必要性與迫切性。

對土石流而言，開放式防砂壩不僅可以停滯土石流先端部部分土砂礫石之行進，減弱其破壞力，又可利用常流量將堆積於壩上游之泥沙顆粒以個別搬運的方式予以清除，形成有利的貯砂空間，同時兼有維持溪流魚類和土砂資源平衡之能力，實為一個符合環境保護之防治工法，是目前土石流防治的主流(邱鼎晏，2008；謝宗憲，2004；段錦浩等，2003；黃育珍，1999)又台灣2003年引進「土石流透水柵工法」在土石流防治工法中，透水柵已由日本於現場設置，並於土石流侵襲時做過實況觀測，證實除具有篩分、貯存土砂、停止等透過性防砂壩優點外，另因其平鋪河床，可避免土石流巨大衝擊力的正面撞擊，又具有脫水、減勢和調節土石流攜出土砂規模的能力(邱鼎晏，2008；陳政德，2007；謝宗憲，2004；段錦浩等，2003；陳虹合，2002；陳忠義，1998)但因特殊外型，設置場所需具備階

段式河川地形，綜觀台灣1503條土石流潛勢溪流，多數早期施做的壩體因淤積而失去防治的功效，因此若能藉瘀滿砂石的防砂壩所形成的階梯式坡度，將平面式「透水柵」壩體與之結合，應可活化此壩體的攔阻功能，並提升土石流防治的效益，此工法台灣應用者尚未普遍，目前溪頭森林區「大學坑」有一座以此工法設計的防治壩體，本研究參考日本長野縣燒岳山的透水柵，發現此種透水柵工法似乎仍有改良的空間，有鑑於以往透水柵設計方式，對於停積於柵上之土石，若受後方推擠越過柵面，而與已分離之水混合有可能再度形成土石流之危險，為避免此種情況發生，本研究擬設置改良之透水柵，分為主流河道及分流河道，使越過篩分裝置後之土砂經主流河道至預計沉積處，過篩之土砂與水則由分流河道流到下游，不致產生分離後之土水再度混合之虞，對於透水柵之前人研究，至今仍無全盤周詳之結果發表，值得深入探究，因此藉由室內渠槽試驗，探討此改良式透水柵的可能性，擬透過渠槽試驗，希望能提出設計準則，以透水柵設計之攔阻率與篩分比趨勢線方程式架構完整的柵體幾何參量設計模式，作為平面式透水性防砂壩施作之參考。

## 二、研究目的

透水柵，為利用脫水的作用，使土石流失去流動之主要動力，進而達到使土石流停止流動之目的，由兩座相距很近的防砂壩上面再架設有間距的數十根H型鋼所組成，具有一般透過性壩體之特性。本研究透過實地勘查以瞭解透水柵應用的情形，並藉由室內渠槽的試驗，重現土石流通過透水柵裝置時所產生的減速、堆積等特性，以及觀察細砂石由柵棒之間隙落入柵棒下層形成土砂流，使主河道的土石流規模減小或停止的情形。而透水柵可攔阻多少砂石主要取決於透水柵柵棒淨間距、柵面角度及柵棒長度等重要因子，因此以無因式柵棒間距 ( $b/D_{max}$ ) 柵棒長度 ( $L/D_{max}$ ) 柵面角度 ( $\theta$ ) 等影響因子進行迴歸分析，建立透水柵貯砂率、篩分比、總攔阻率的趨勢方程式，以提出透水柵攔砂壩的設計準則，做為工程施做時之參考。

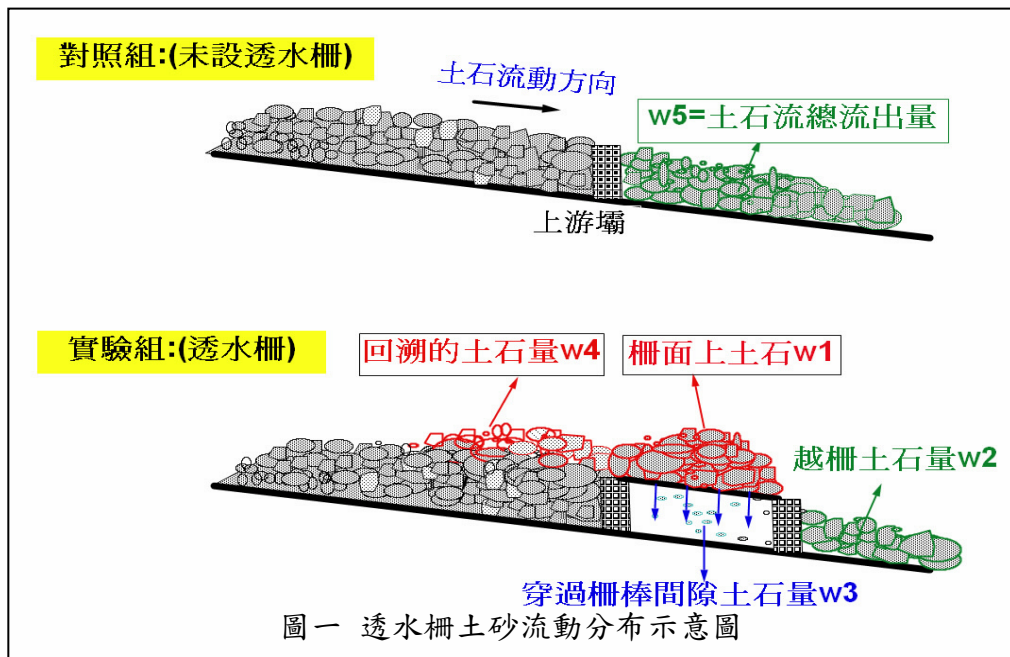
貯砂率 = 柵體攔阻的土石量 / 土石流總土石量 × 100%

總攔阻率 = 柵體攔阻的總土石量 (含分河道細顆粒砂石) / 土石流總土石量 × 100%

篩分比 = (穿過柵棒間隙落入柵面下之土石量) / (通過上游壩總土石量)

具體研究目的如下：

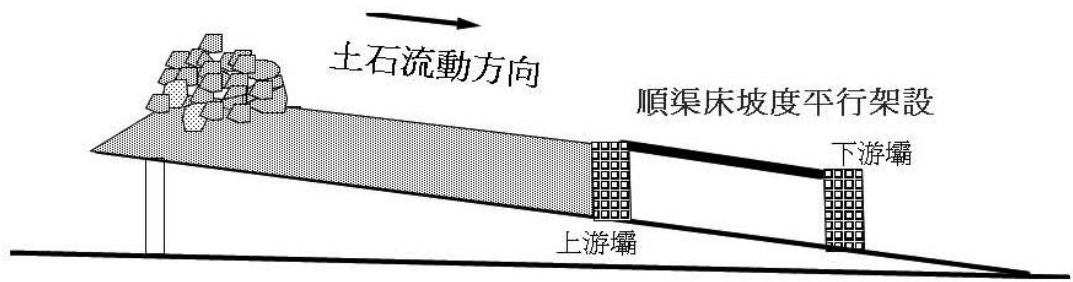
- 一、探討透水柵長度對礫石型土石流篩分效益及攔阻效益的影響。
- 二、探討透水柵棒間距對礫石型土石流篩分效益及攔阻效益的影響。
- 三、探討地形坡度對透水柵工法篩分效益及堆積特性的影響。
- 四、分析透水柵架設角度對攔阻效益、篩分效益及堆積特性的影響。
- 五、探討大坡度順向傾降式架設法的土石自清能力。
- 六、利用透水柵土石攔阻效益與篩分效益，建立透水柵工程設計準則。



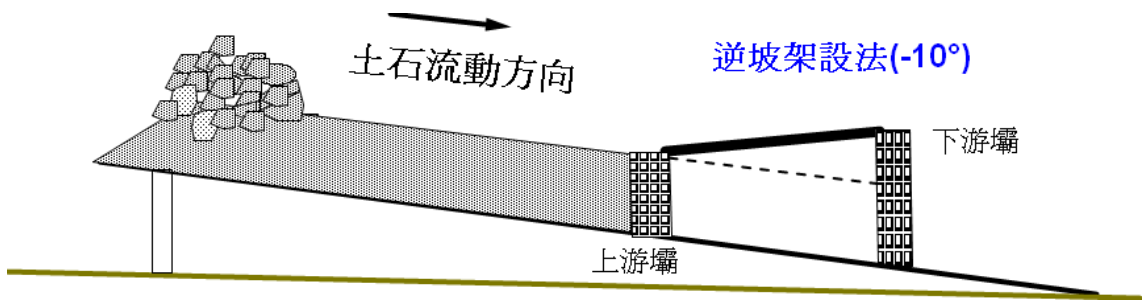
$$\text{總攔阻率 } R = \frac{\text{透水柵總攔阻量}}{\text{土石總流出量}} = \frac{\text{無設置透水柵土石流出量} - \text{越柵土石量}}{\text{無設置透水柵土石流出量}} = \frac{W5 - W2}{W5} \times 100\%$$

$$\text{貯砂率 } R1 = \frac{\text{透水柵上停積量(含回溯土石量)}}{\text{土石總流出量}} = \frac{W5 - W2 - W3}{W5} \times 100\%$$

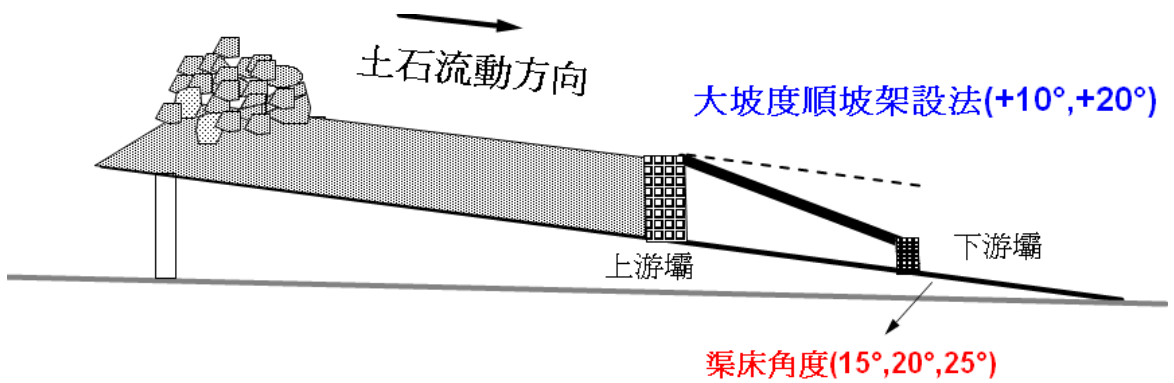
$$\text{篩分比 } S = \frac{W3}{W1 + W2 + W3}$$



(柵面角度=渠床坡度)



(柵面角度=渠床坡度-10°)



**柵面角度 $\theta$ =渠床角度+架設角度**

(柵面角度=渠床坡度+10° 或 +20°)

圖二 透水柵架設法側面示意圖

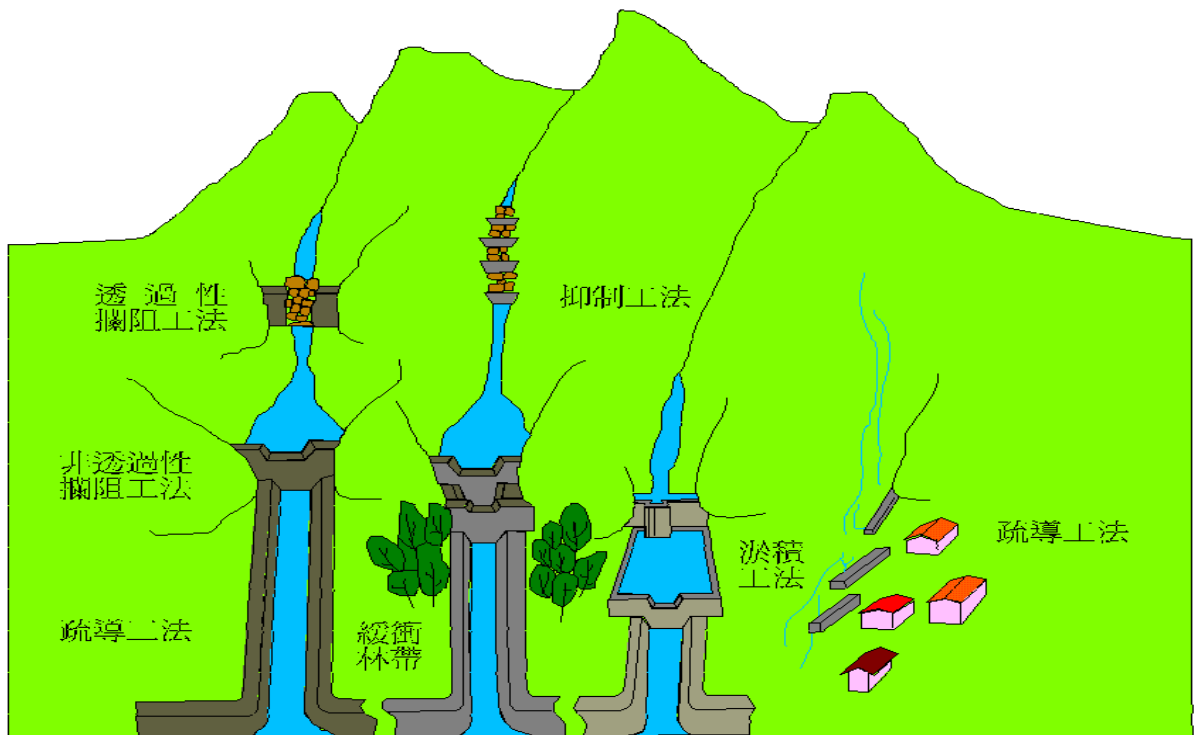


## 貳、文獻回顧

### 一、土石流防治工法

(一) 土石流防治工法防治對策：

1. 針對土石流在上中下游不同特性的防治，分別有抑制、攔阻、淤積、疏導及緩衝等工程方法，如下圖所示。



圖三 土石流防治工法配置示意圖 (水土保持手冊, 1992)

表一 土石流防治工法防治對策

土石流防治工法 防治對策	應用地點	目的及原理	工法
抑制工法	上游處	上游坡度較陡，侵蝕能力較強對溪床堆積及側岸產生劇烈的沖蝕，以獲得土石原料，因此上游是土石流的發源地，故以抑制方法阻止土石流獲得料源補充。	防砂壩、固床工、潛壩、連續壩、打樁編柵、山腹工
攔阻工法	中上游	中上游坡度較上游緩一點，沖刷力降低，但巨礫與流木衝力仍強，因此此處以攔阻工法將材料攔阻下來。	非透過性潛壩、透過性壩
淤積工法	中下游	採用局部加大溪床的寬度，或局部降低溪床的坡度，使土石材料淤積	沉砂池、圍堤
疏導工法	中下游或扇狀地	將土石流導入渠道或導流堤，使流動體沿著規劃的路徑流動制安全區域。	渠道、導流堤
緩衝林帶	出口之扇狀地	以帶狀的樹木抵擋土石流直接侵襲	樹林帶

(資料來源：摘自台灣的土石流，盧光輝、魏稽生著)

2.土石流輸送段的防治：土石流因為大量水流的作用而快速流動，一旦脫水後就會慢慢停下來，因此在溪床上可設置梳子壩或鋼管樁壩等透水性之攔砂壩，或以水平之格柵工鋪陳於溪床上，一來可以讓土石流減速，再來當土石流流經水平柵時，水分可以向下滲透，而使水土分離，達到脫水之效果，促使土石流停止。

## (二)土石流防治工法之效能評估

1.渡邊正幸等（1980）首先提出抑制土石流之防治設施，必須具備下列功能：

- (1)減少土石流之洪峰流量
- (2)延遲土石流之到達時間
- (3)減少土石流之總流出量
- (4)將粗大礫石由土石流中分離

2.游繁結（1993）提出設計土石流防治工程時，應考慮下述之原則：

- (1)防止土石流發生
- (2)消滅土石流之流動能量
- (3)土石流轉變成土砂流
- (4)土石流之脫水
- (5)土石流之停止
- (6)土石流之土砂收容
- (7)土石流之分散

## 二、透過性防砂壩的特點

1.段錦浩等（2003）指出，透過性防砂壩普遍具有的特點包括：

- (1)具有遲滯洪水或蓄積土石流所挾帶大量砂石之能力，有效降低土石流之土砂總流出量。
- (2)水流可以自由穿過壩體開口處，故可利用常水流量將被壩體停積之泥砂顆粒，以個別方式輸往下游，保持壩體之上游部份儲砂空間。
- (3)因土砂和水體可以自由穿越壩體，對溪流魚類之生態和土砂輸移之平衡影響較小。

2.江永哲等(1993)指出，開放式防砂壩主要功效為積蓄洪水或土石流挾帶之大量砂石亦可利用枯水時期之常水流量，將泥砂顆粒由淤積區以個別搬運方式輸往下游。

### 三、透水柵工法的相關研究與實例

表二 台灣的透水柵與日本 長野縣燒岳山的透水柵比較表

國家	照片	說明
日本 長野縣 燒岳山	 <p>照片來源：            中興大學水土保持學系提供            (由下游面向上游面仰視)</p>	<p>1. 日本有多座的透水柵，規格不盡相同，是一種水平式的透水工法，土石流過透水柵，當先端停止時會往上游回溯。</p> <p>2. 橫向有溢流現象，所以側面做格柵壩防止溢流。</p> <p>缺點：土石流規模過大時，柵棒長度不足時會有越流至主河道的情形，事後柵面清淤工程也有待改進。</p>
台灣 溪頭 大學坑	 <p>照片來源：            攝於溪頭台灣大學實驗林            2008/08/31(由上游面向下游面俯視)</p>	<p>1. 透水柵的裝置長度20m、寬3m，下面分為四個流槽，柵面鋪設鋼軌來分離土石。</p> <p>2. 停淤場目的在留置土石流帶來的大量土石，土石將定期清除，大約長450m、寬120m，由圍堤、砌石防砂壩、透水柵溝及溢流口組成。</p> <p>3. 淨水池的設置在削減水流能量及沉澱土砂，寬30m、長20m、高6.5m，水流在此沉砂及分流入三條寬5m、深3m之坑溝，再安全導入下游。</p> <p>4. 是一種水平式的透水工法加上朝上游面的格柵型梳子壩，防止土石流越流或溢流，下游面設置沉砂池，可沉澱土砂。左右為砌石護岸，防止左右溢流。</p> <p>缺點：土石流攔阻後的柵面清淤工程。</p>

平面柵工法為預防土石流的其中一種工法，主要是利用土石分流的方法來預防土石流的產生，目前還未被廣泛應用，因為缺乏柵棒設計的準則。

表三前人研究結果一覽表

作者	研究結果
矢澤昭夫、 水山高久、 森田昭宏 (1986)	<p>對透水柵所做之室內試驗所得結果如下：</p> <p>(1) 透水柵柵面間距之改變對土石流先端部流下距並無太大影響。</p> <p>(2) 逆坡透水柵之堆積長度小於順坡透水柵。</p> <p>(3) 順坡透水柵以80%粒徑程度為柵面軌距時，大部份之土砂不會流出，當以90%粒徑程度做軌距時，則土砂大半會流出；透水柵水平設置時，以90% 粒徑為間距，則土石流完全被補捉；逆坡度設置時，以最大粒徑值做為軌距，流下之土砂量約為全體之8%。</p> <p>(4) 透水柵上之堆砂形態，在柵上之堆積角度約為土石流材料之安息角；而透水柵上游側之角度則約與一般壩體角度相同。</p>
清野雅雅、 宮越英紀、 上原信司、 水山高久 (1986)	<p>於日本燒岳現場施作透水柵，分析結果得知透水柵距下列功能：</p> <p>(1) 可分離土石流先端之巨礫與泥水。</p> <p>(2) 土石流先端停止後，堆積往上游回溯，橫向有溢流現象。</p> <p>(3) 不用考慮土石流衝擊力。</p>

<p>黃怡仁(1990)</p>	<p>(1)透水柵有調節土石流流出濃度之功效，並可降低土石流尖峰出流濃度，其柵面軌距與柵角皆為影響因素。</p> <p>(2)透水柵有調節土石流輸送量之功效，並可降低、延滯尖峰出流量，其柵面軌距與柵角皆為影響因素。</p> <p>(3)透水柵有減少土石流總輸送量之功效，柵面軌條間距與柵角皆會影響貯砂率。</p> <p>(4)透水柵有分離土石流粗大礫石之功效，可轉化土石流之集體運動型態為一般土砂流出型態。</p> <p>(5)就以上數點整體而言，緩坡透水柵防治土石流之功效較順坡透水柵為佳</p>
<p>陳虹合(2002)</p>	<p>一般透過性壩體所遭遇最大問題就是容易受土石流巨大衝擊力而損壞及壩體上游貯砂空間不足，因而設置平面篩分裝置，此平面篩分裝置由兩座相距很近的防砂壩上面再架設平行於流心線而有間隙的數十根 H 型鋼所組成，具有一般透過性壩體之特性，可調節土砂流出量，且沿著土石流流向設置，以避免土石流直接衝擊，並將貯砂場所移至下游，可有較大之貯砂空間。</p>

林忠義(1998)	<p>透水柵和土石流間的土砂互動行為具有以下三個特點：</p> <p>(1)土石流通過透水柵時，上、下分離土砂之數量多寡，受上游入流土砂規模、柵體上游邊界條件、柵體幾何尺寸及溪床質特徵等因素影響而產生變異。</p> <p>(2)透水柵可有效將土石流之水體與土砂分離，使先端部粗大礫石迅速脫水停積，並形成一臨時性堆積阻攔後續流動的土砂。</p> <p>(3)透水柵是平行設置於溪床上，故觀察試驗中堆積於透水柵上土砂之厚度普遍不大，且土砂結構極為鬆散，此有利於河川自身於常流量時對柵上土砂之清除。</p> <p>(4)引用固、液兩相質量守恆定律建立了出流土砂流出率之一般表達式，以及柵體對土石流土砂分流比與相對開口寬度、狹縫密度及土砂滯留時間所構成之半經驗方程式。由其試驗指出，透水柵之土砂分流比為<math>VS1/VS2</math> (<math>VS1</math>:土石流越過透水柵總土砂量,<math>VS2</math>:土石流穿過透水柵總土砂量)。則土砂分流比隨相對開口寬度增大而遞減，兩者成反比例相關。狹縫密度愈高，柵體通透性佳，攔阻功效減弱，土砂分流比隨之減小。柵體長度加長或土石流所處坡度較小時，透水柵作用於土石流之時間會加長，使大量土砂穿過柵體流出，降低土砂分流比。土石流之土砂粒徑越不均勻，受透水柵幾何尺寸之影響程度降低，使土砂分流比提高。</p>
林彥志(2005)	柵棒長度與篩分比為微幅正相關，且有效柵棒長度之增加能使過篩空間增加，延長過篩時間。
張敬昌(2002)	若土石流 99%粒徑小於柵距時，共構體對土石流泥砂體積濃度降低能力能達 25%以上。

謝宗憲(2003)	<p>土石流發生時，水與坡度為其行進動力的重要因子。試驗中的四種平面柵依照相對於渠床坡度改變量所設計，分別有與原渠床坡度平行、減緩上游50%坡度、減緩上游100%坡度呈水平及加陡50%上游坡度四種過篩角度，藉調整平面柵篩分裝置之設置坡度，了解在不同的設置坡度下，對土石流流動的停止及沉積有何影響。</p> <p>(1)篩分坡度影響土石顆粒篩分結果顯著，尤以略斜於河床坡度為佳，設計時考慮以順緩坡之形式之篩分裝置可避免土石淤積鋼棒上並能達較佳篩分效果。</p> <p>(2)回歸之經驗式相關係數 <math>R^2</math> 略偏低，原因可能來自實驗誤差，建議增加實驗之次數以提高數據精確度，藉以改進經驗式之相關係數值。</p>
陳虹合(2002)	<p>土石流受平面篩分作用，會產生流動、停積、再流動、再停積之重覆現象，最後平面柵失去功效，土石流越流而過。平面篩分裝置之設置坡度介於與水平夾角 22~24 度之間，可達較加之分離效果且較為經濟。</p>
洪國凱(2005)	<p>土石流分離後之土砂堆積造成透水柵淤塞、篩分功能喪失之缺點，加以改良設計大角度傾斜角透水柵，設計 31°至39°傾角式透水柵共五組，得到無因次柵棒長度(L/d60)及透水柵面角度(<math>\theta</math>)與土砂篩分比(S)及分流比(W)之無因次回歸式：</p> $S = -0.2959 + 0.016 \theta + 0.0675(L/d60) \quad R^2 = 0.7525$ $W = -72.9217 + 3.675 \theta + 0.586(L/d60) \quad R^2 = 0.537$
陳政德(2007)	<p>設計 0.8cm、1.0cm、1.2cm、1.4cm 不同淨間距透水柵四組、透水柵柵面角度33°、35°、37°三組、柵棒長度30cm、40cm、50cm三組。經試驗後得到柵棒淨間距為1.2cm、透水柵面角度37°及柵棒長度50cm篩分功效最佳。</p>



邱鼎晏(2008)	<p>以梳子壩開口寬度、透水柵柵面向上游仰角及柵面長度為重要因子進行試驗，設計開口數皆為 2 開口寬度 1cm、2cm、3cm 的梳子壩三組、透水柵柵面向上游仰角 33°、35°、37° 三組、柵面長度 30cm、40cm、50cm 三組。觀察對土石流運動、堆積型態之影響，得到梳子壩狹縫密度(<math>\Sigma b/20</math>)、無因次柵面長度(<math>L/d50</math>)及透水柵柵面仰角(<math>\theta</math>)與土砂篩分比(<math>S</math>)之無因次回歸公式：</p> $S = 0.0152 \times (L/d50) + 1.6094 \times (\Sigma b/20) + 0.9807 \theta - 1.1792R^2 = 0.6704$
土石流防災資訊網	<p>南投縣信義鄉豐丘村，桃芝颱風豪雨再度發生土石流，受到貯砂池攔蓄，部分土砂自右岸及下游透水柵流出，除台 21 線遭部分流出土石砂埋沒，未有重大災害產生。</p>

綜合上述研究，透水柵工法對土石流防治確實具有功效，但是對於施工設計並未有周詳之經驗式，因此具有研究的價值。

### 參、研究方法或過程

本研究方式採渠槽試驗，利用渠槽鋪砂並供水引發土石流，觀察土石流流經透水柵篩分裝置時土石被篩分及停止堆積之情形，並分析土砂經柵棒篩分掉落柵棒下方的篩分比、土砂攔阻量、土砂流出率及各篩分因子之間的關係，根據前人研究(張敬昌,2003;黃怡仁,1990;林彥志,2005;邱鼎晏,2008)提出：在同流量及採用相同的平行架設方式時，柵棒間隙的寬度和柵棒長度會影響砂石落入柵面下層的土石量，又前人研究(洪國凱2005;邱鼎晏,2008)提出柵面角度會影響柵面土石量，綜合上述因子勢必影響粒徑篩分效果與攔阻率。本研究為了瞭解其影響程度，因此設計四種不同的柵棒間距以及四種不同柵棒長度及不同柵面傾斜角度，以瞭解透水柵篩分比、貯砂率及總攔阻率的差異，最後由無因式柵棒的開口間距( $b/D_{max}$ )和柵棒長度( $L/D_{max}$ )及柵面傾斜角度( $\theta$ )來分析篩分效果與攔阻效益，最後擬出透水柵設計之準則與建議，以下是渠槽試驗部分的設計。

## 一、試驗條件與設備器具

### (一) 試驗內容

包含土石流未受透水柵攔阻試驗(對照組)和土石流受透水柵攔阻試驗(實驗組)

#### 1. 土石流未受透水柵攔阻試驗(對照組)

旨在取得土石流未受透水柵攔阻的流動過程中，其流出的總土石量，以作為對照之用。

#### 2. 土石流受透水柵攔阻試驗(實驗組)

透水柵於不同的柵棒間距、柵棒長度、柵面角度等不同因子下，量測流出的總土石量、堆積總土石量，並以前項作為對照組建立貯砂率，以及分析各篩分因子對篩分比之影響。

### (二) 渠槽試驗的設計

從事土石流模型試驗，為了避免所模擬的土石流現象失真，因此渠槽的寬度與高度必須特別設計，從所蒐集的資料中得知模擬實驗的渠槽要符合「邊界條件相似」於是請教中興大學水土保持學系教授得知：設備的邊界條件與原型土石流之間要滿足下面兩個式子(式子中(m)、(p)代表模型和原形土石流； $d_{max}$ 代表最大粒徑；B代表寬度；H代表土石流深度)。

$$\frac{d_{max}(m)}{B(m)} \leq \frac{d_{max}(p)}{B(p)} \quad \frac{d_{max}(m)}{H(m)} \leq \frac{d_{max}(p)}{H(p)}$$

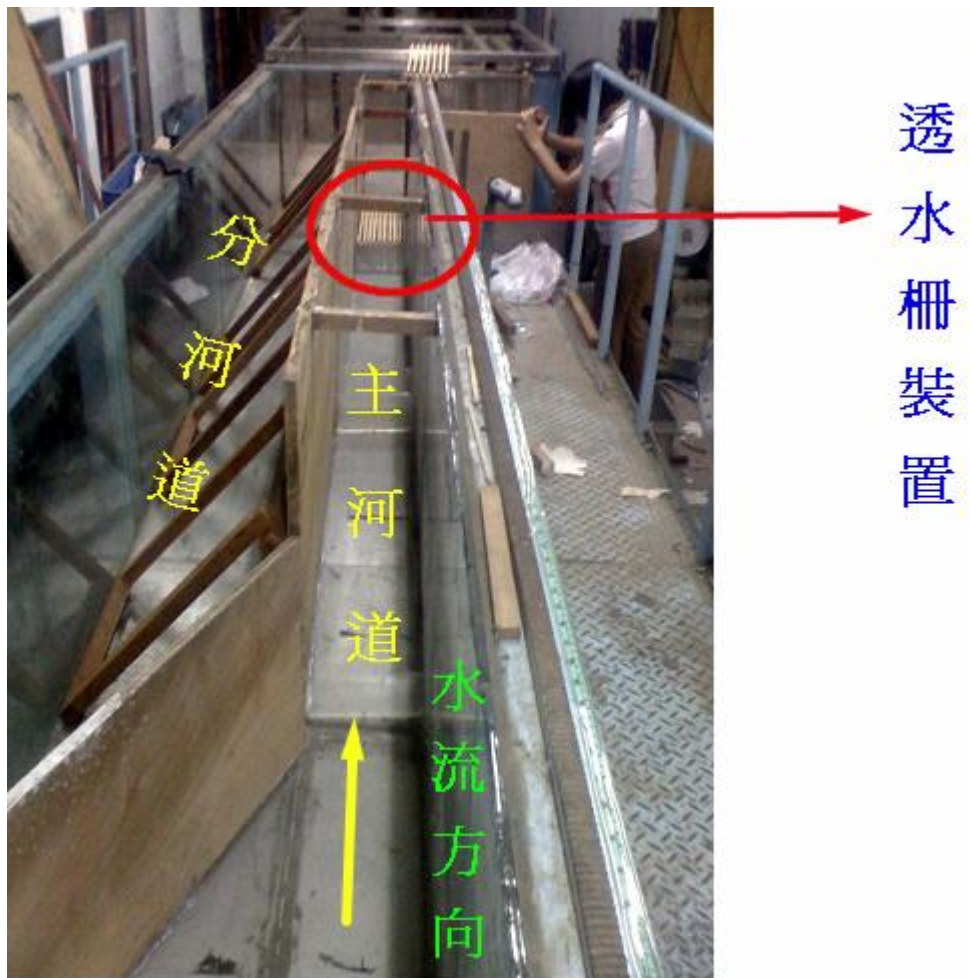
從資料中顯示：弗萊施曼在1986年發現眾多現場土石流資料的調查結果中， $d_{max}(p)/B(p) \leq 0.2$ ，而且 $0.2 \leq d_{max}(p)/H(p) \leq 0.5$ ，因此代入上式中，就可得到：

$$B(m) \geq 5d_{max}(m) \text{ 和 } H(m) \geq 5d_{max}(m)$$

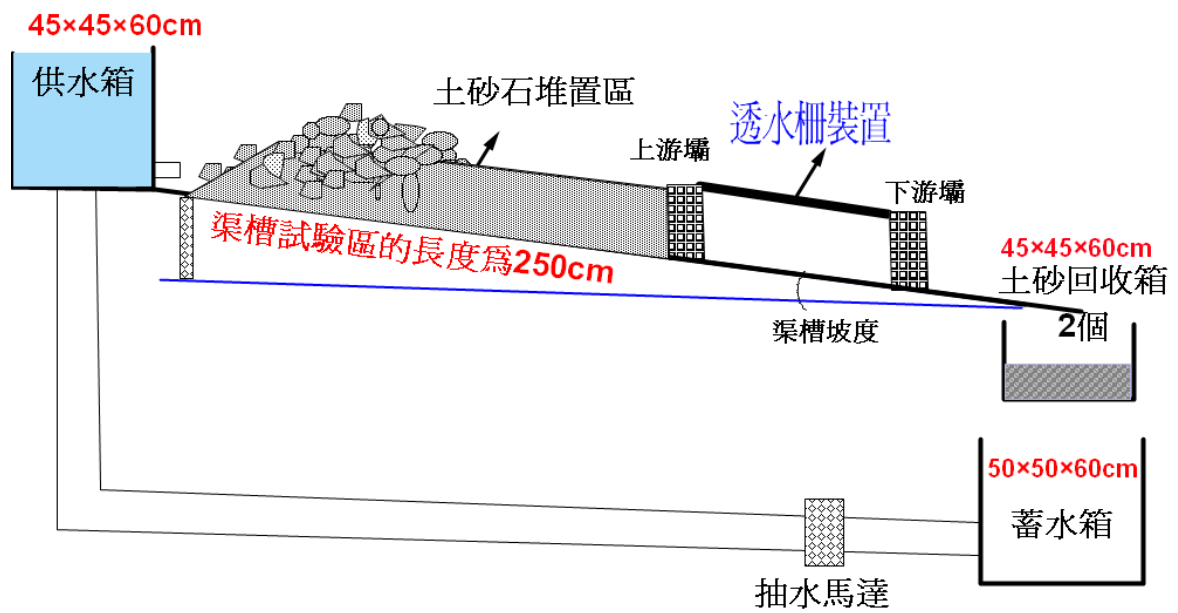
本研究欲模擬的大石粒徑最大為19.1mm，帶入上式中得知土石流模型的寬度宜大於10cm，土石流深度宜大於10cm。又請教台灣大學水土保持學系教授：根據「連續體理論」中值粒徑 $D_{50}$ 要小於流深的十倍，因此本試驗依此設計渠槽裝置如下：

### 1. 渠槽尺寸與布置

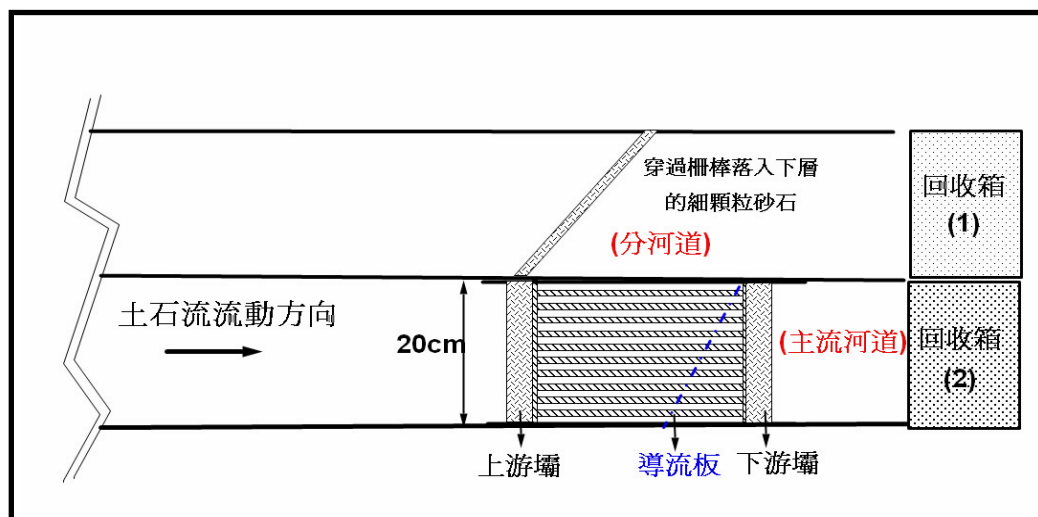
渠道（長×寬×高=250×40×40 cm）以木板隔成主河道和分河道，各寬20cm，有設置下游壩和上游壩各15公分高，製成主河道和分河道，下游分別收集主河道未經篩分的粗砂石與分流道之穿過柵棒間隙的細顆粒砂石，此設計可改良越過篩分裝置後之土砂石與過篩之土砂水產生分離後之土水再度混合之危險（圖四）



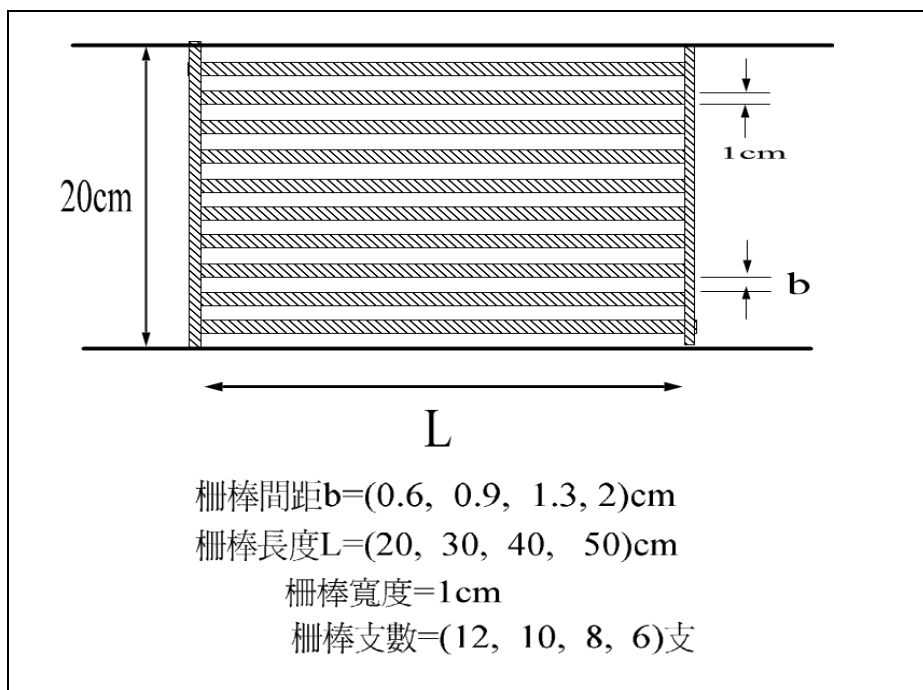
圖四 實驗裝置示意圖



圖五 渠槽側視示意圖



圖六 透水柵裝置正視圖



圖七 柵棒裝置示意圖

## 2. 土砂石材料的選定與模擬級配曲線

根據台灣省水土保持局出版的「水土保持手冊」(1992)。依組成材料之粒徑分佈，礫石型土石流(又稱水石流)是指土石流中礫石含量大而泥砂含量少，其泥砂含量占10%以下。又參考世界近年土石流粒徑資料(表四)，發現 $D_{84.1}/D_{15.9}$ 從6.2~1514皆有，南投縣土石流災情近年來遽增，南投縣溪頭地區之主要土石流溪谷，共有17條，溪頭肇災之原因有地形陡峻、斷層多、高強度降雨、房舍多集中於谷口處、原有整治計畫和排水規劃不夠整體等，因此，溪頭地區之緊急處理和中長期整體治理計畫亦是不可或缺之工作項目(黃宏斌，2002)。因此本研究依土石流的定義，並以南投縣溪頭三號坑現地明坑粒徑分佈(中華顧問工程司，2002)。採用「等重量替代法」以表五所示的不同粒徑比例的土砂石，來模擬礫石型土石流。

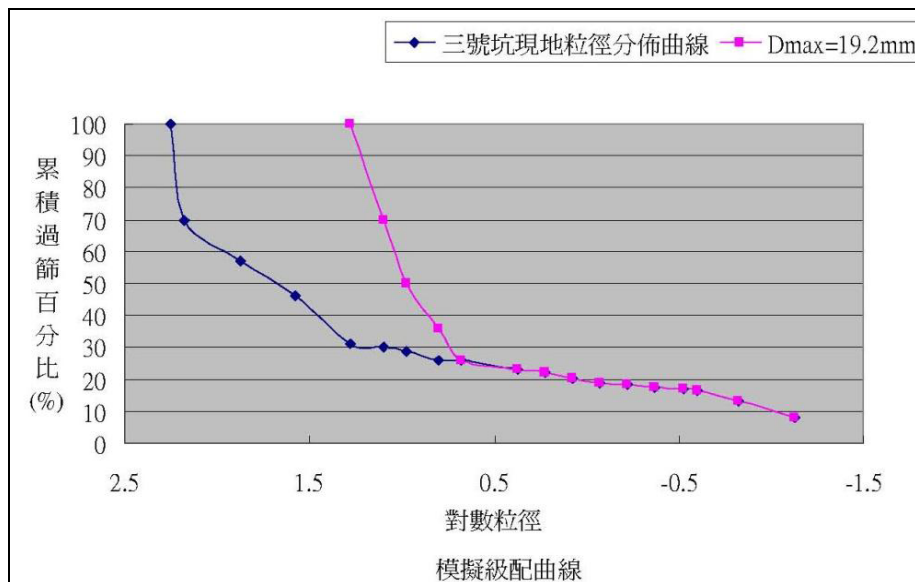
表四、土石流粒徑分佈彙整表

礫石流地區	D <sub>15.9</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>84.1</sub> (mm)	D <sub>max</sub> (mm)	D <sub>84.1</sub> / D <sub>15.9</sub>
台灣南投縣溪頭三號坑	0.25	37.5	150	178	600
台灣南投縣九份二山	15.3	66.9	149.6	174	9.8
台灣南投縣三部	2.4	31.7	72	148	30.1
台灣南投縣豐丘	11.4	72.7	118.7	173.5	10.5
台灣南投縣神木	0.25	26	125	300	1200
台灣花蓮縣大興	1.1	18.7	64.1	185.3	60.4
台灣花蓮縣見晴	1.2	14	144.4	159.6	122.4
美國奧勒岡州Rock Creek	0.004	5	3	11	750
美國奧勒岡州 Highway38	0.007	2.8	10.6	13	1514.3
義大利 Calabria	0.45	5.8	2.8	40	6.2

(整理自黃宏斌&楊凱鈞, 2005; 胡聖賢, 2003; 中華顧問工程司, 2002; 朱嘉政, 2001)

表五 本試驗的粒徑比例表

篩網規格	粒徑 (mm)	重量百分比%	累計重量百分比%
#4	4.8 以下	26%	26%
1/4"	6.3	10%	36%
3/8"	9.5	14%	50%
1/2"	12.7	20%	70%
3/4"	19.1	30%	100%



### 3.供水裝置

依日本高速道路調查會之土石流發生型態，模擬土石流發生原因為溪床上之堆積土砂因流水增加而流動者，因此採用方式為利用地表逕流來促發土石流，所以使用長寬高為45x45x60cm之定水頭水箱（高度為60cm）五管水流穩定供水（3公升/秒）流出透水柵裝置的水透過抽水機回收導入供水箱回收再利用。

### 4.上下游壩體模型

以壓克力製作多個長方形壩體，依實驗需要組成所需的規格與柵面坡度。

### 5.透水柵模型

1cm 方形木棒製作，長度分別為 22cm、32cm、42cm、52cm，透水柵形式有 6 支柵棒、8 支柵棒、10 支柵棒柵棒、12 支柵棒柵棒，間距分別為 2cm、1.3cm、0.9cm、0.6cm，各完成寬度為 20cm 透水柵模型有十六片以瞭解柵棒間隙與長度不同時篩分功效與攔阻效益的差異。

表五 透水柵模型規格表

透水柵形式	6 支柵棒	8 支柵棒	10 支柵棒	12 支柵棒
間距 (cm)	2cm	1.3cm	0.9cm	0.6cm
狹縫密度 ( $\Sigma b/B$ )	0.7	0.6	0.5	0.4
柵面寬度	20cm			
柵棒長度	長度分別為 22cm、32cm、42cm、52cm 淨長度為 20cm、30cm、40cm、50cm			

### 6.土石回收裝置

下游處設置回收箱2個，分別收集主河道越過柵面之土石以及穿過柵面間隙流到分流道的細顆粒土砂，回收箱內襯「細內裡布與細紗網」過濾濕砂土並秤重量。

#### (四) 渠槽坡度的設定

由蒐集的資料得知一場土石流的過程包含發生區、流動區及堆積區：土石流發生區的坡度大約在15~30度之間，流動區的坡度大約在6~15度之間，而堆積區在3~6度之間，因此我們決定渠槽的坡度以15°、20°、25°來進行。

#### (五) 攝影裝置

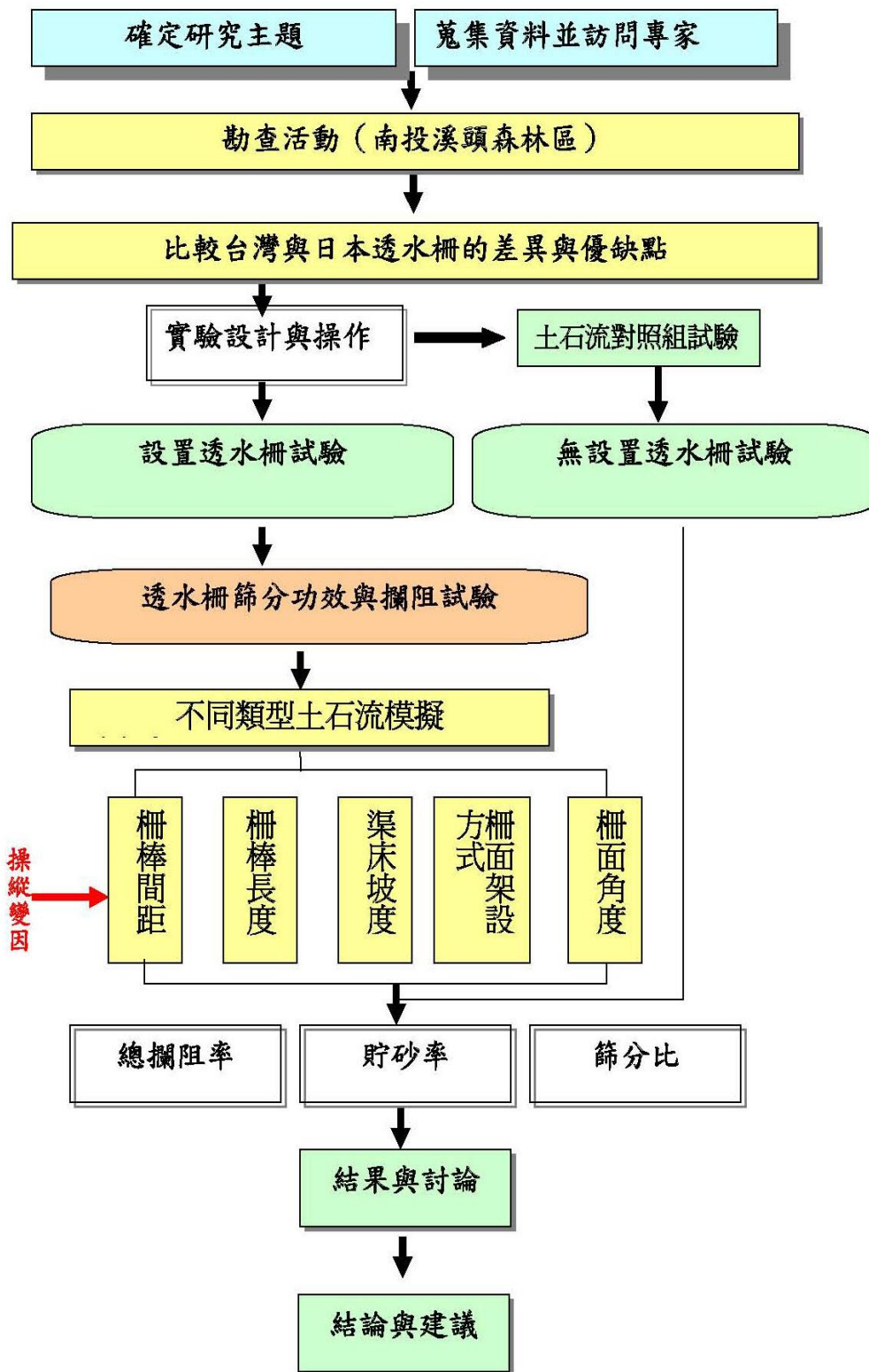
Canon數位攝錄影機，錄取實驗過程，放置於渠槽旁拍攝，藉由影像播放軟體，採用定格播放的方式，記錄土石流通過透水柵篩分、流動、停積之情形。

## 二、土石流形成方式

目前渠床試驗引發土石流的方式有兩種方法，一是將組合成的土體與水充分混合形成濃稠的土石流動體，在傾斜的渠槽內像下流動，但此方法經過數次的試驗發現並不適用於黏度低的礫石型土石流，對於粘度偏低的礫石型土石流，會產生粗顆粒與流體之分離現象，故本研究採用方式為於試驗渠槽中堆積一厚度均勻之飽和堆積土層，並於其上加鋪一層結構鬆散之土石，自上游供給已知流量的表面逕流，藉由表面逕流所具備強勁的沖刷能力及滲流作用，沖刷推移土層中的泥砂礫石以模擬土石流的形成。



### 三、研究架構圖



#### 四、實驗步驟

1. 調配土石比例。
2. 架設上下游壩體，高度15公分高。
3. 調整實驗的渠槽坡度 $15^\circ$ 。
4. 將20公分長的透水柵面固定在上下游壩體上面，在柵面下斜放一片壓克力板，使掉落柵下的細顆粒能導引至分河道，不至於堆放在柵面下而影響砂石的掉落。
5. 在上游壩面向上堆置180公分長的飽和的土砂並壓實，使高度低於壩面一公分，模擬天然河床或封閉式壩體瘀滿後的情形，並用灑水器充分澆水使土石達飽和狀態。
6. 在距離上游壩180公分處定量堆置鬆散的調配後的試驗土石。
7. 渠槽下方設回收箱2個，內襯兩層內裡布與細紗網，分別收集主河道和分河道的濕砂石。
8. 打開供水箱開關，固定水量(3公升/秒)並穩定供水直到土石流發生，不再沖刷土石時，即關閉開關。
9. 觀察土石在柵面上停積、流動的情形，並紀錄分河道回收箱內、透水柵面上及掉落主河道的溼土石的重量，算出貯砂率、總攔阻率及篩分比。實驗以三次為原則，若有試驗結果有異狀則捨去，需多做3次再求平均，以減少實驗誤差值。
10. 更換不同柵棒間距的柵面，重複步驟2~9。
11. 更換不同柵棒長度，重複步驟1~10。
12. 改變柵面角度，重複步驟2~11。

表 七 試驗條件表

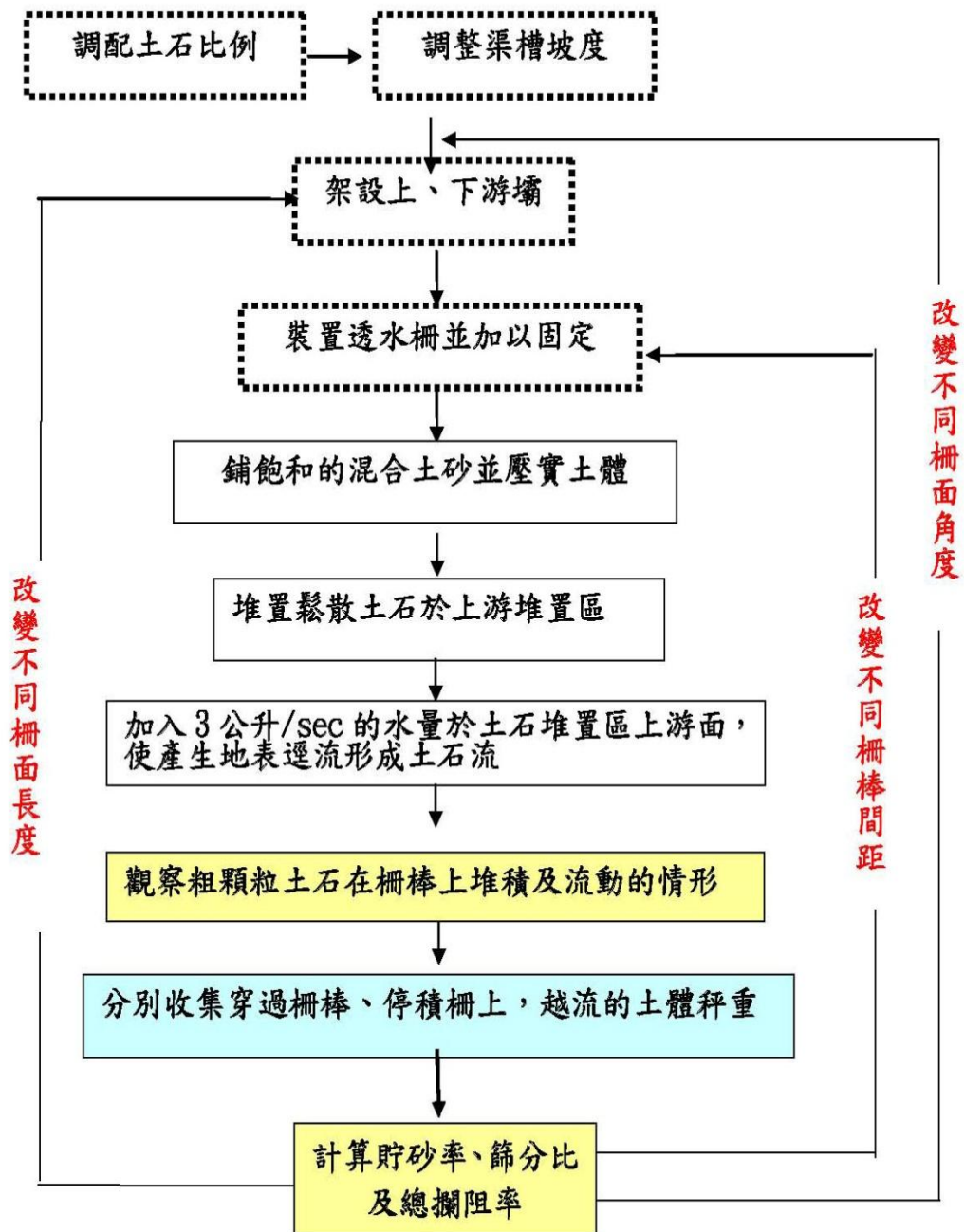
項目	說明	
河床坡度	三種渠床坡度	15°、20°、25°
供水量	固定水量	3 公升/秒
柵棒間距	四種間距	0.6cm、0.9cm、1.3cm、2cm (12 支柵棒、10 支柵棒、8 支柵棒、6 支柵棒)
柵棒架設方式	三種方式	逆坡架設、平行渠床架設、順坡架設
平面柵角度 (柵面與水平面 夾角)	九種角度	5°、10°、15°、20°、25°、 30°、35°、40°、45°
淨柵棒長度	四種長度	20cm、30cm、40cm、50cm

<p><b>穿過柵棒落入分河道的細沙泥重量</b></p> <p><b>篩分比 =</b> <math>\frac{\text{穿過柵棒落入分河道的細沙泥重量}}{\text{越過上游壩進入柵棒篩分區的總土石量 (包含柵上、越柵及穿過柵棒的土石)}}</math></p>
<p><b>受柵體攔阻的主河道土石量 (不含分河道)</b></p> <p><b>貯砂率 =</b> <math>\frac{\text{受柵體攔阻的主河道土石量 (不含分河道)}}{\text{未置柵體前土石流向下流動的總土石量}}</math></p>
<p><b>受柵體攔阻的土石量 (含分河道)</b></p> <p><b>總攔阻率 =</b> <math>\frac{\text{受柵體攔阻的土石量 (含分河道)}}{\text{未置柵體前土石流向下流動的總土石量}}</math></p>

表八 符號說明表

符號	說明	備註
W1	柵面上的土石量	主流河道
W2	越柵的土石量	
W3	穿越柵棒間隙的土石量	分流河道(過篩的細顆粒 砂石)
WA	土石流未受透水柵攔阻的流出量(對照組)	
Wa	土石流受透水柵攔阻捕捉的總土石量含分 河道	=WA-W2
R1	貯砂率	=(WA-W2-W3)/WA
R	總攔阻率	=Wa/WA=(WA-W2)/WA
S	篩分比	=W3/(W1+W2+W3)
b	柵棒間距	
L	柵棒長度	
$\theta$	柵面角度=取槽角度+柵面架設傾斜的角度	逆坡架設為負號，順坡架 設為正號
Dmax	最大粒徑	
b/Dmax	柵棒間距與最大粒徑的相對開口寬度	
L/Dmax	柵棒長度與最大粒徑比值	

## 五、試驗流程圖



圖十 試驗流程圖

 <p>柵面上堆積土石秤重</p>	 <p>試驗的土石</p>	 <p>將土石以篩網篩分</p>
 <p>渠槽下半部份往下游面俯視照片</p>	 <p>以黏著劑將木板黏在渠槽上，以防止滲水，待乾後即可試驗</p>	 <p><math>\theta = 30^\circ</math>  <math>b = 1.91\text{cm}</math>  <math>L = 50\text{cm}</math>      碎石在流: 1.5 粒, 5.7 粒      9.3.1.1</p> <p><math>b/D_{\max}=1</math>，<math>L/D_{\max}=25</math>，試驗過程</p>
 <p><math>b/D_{\max}=0.65</math>，<math>L/D_{\max}=25</math>，試驗過程</p>	 <p><math>b/D_{\max}=0.65</math>，<math>L/D_{\max}=25</math>，<math>\theta = 20^\circ</math>側面堆積圖</p>	 <p><math>\theta = 15^\circ</math>  <math>b = 1.7\text{cm}</math>  <math>L = 50\text{cm}</math>      碎石: 1.5 粒, 5.7 粒      9.3.1.1</p> <p><math>b/D_{\max}=0.65</math>，<math>L/D_{\max}=25</math>，<math>\theta = 15^\circ</math>側面堆積圖</p>
 <p>柵面角度測量器</p>	 <p><math>b/D_{\max}=0.65</math>，<math>L/D_{\max}=20</math>，<math>\theta = 35^\circ</math>側面架設圖</p>	 <p><math>b/D_{\max}=0.65</math>，<math>L/D_{\max}=20</math>，<math>\theta = 15^\circ</math>側面堆積圖</p>

照片一 實驗過程照片

## 肆、結果與討論

本研究藉由一連串的渠槽試驗，重現土石流基本運動特性，並針對透水柵的篩分裝置設置不同的柵棒開口間距、柵棒長度及柵面角度等影響因子進行分析，期能找出透水柵之較佳的設計條件。

透水柵工法是2003年引進台灣的新興工法，本研究參考日本 燒岳山 的透水柵工法，發現停積於柵上之土石，若受後方推擠越過柵面，會與已分離之水混合，有再度形成土石流之危險，為避免此種情況發生，本研究設置異於日本的改良型的透水柵，分為主流河道及分流河道，使越過篩分裝置後之土砂經主流河道至預計沉積處，過篩之土砂與水則由分流河道導引至安全的區域，以改善分離後之土砂水再度混合之情形。

本研究訪問土石流設計專家與教授得知：在現地施作防治工法時，常發生施作空間或經費不足的情況，在環境因素與經濟狀況不佳時則無法設置適當的長度。因此本研究提出「藉由柵面傾斜架設的角度與間距寬度的變化來控制貯砂量，進而提出攔阻率與篩分率的趨勢方程式」做為工程設計時之參考依據。

另外土石清除問題一直是防砂壩待克服的重點之一，尤其在防砂壩前的土石停淤場空間不足時，清除工作顯得格外重要，因此進一步探討柵面上土石減量的可能性。

研究結果分為攔阻效益及篩分效益分析，並與前人研究結果進行探究，擬出透水柵設計之建議。

## 一、攔阻效益分析

透水式攔砂壩主要的目的是要將高流速、衝撞力大的粗大顆粒攔阻，形成堆積，若壩前攔阻空間有限，則對於危害較低的細顆粒土砂流可透過柵棒的間隙往下游輸送，或將細顆粒土砂流由分河道導引到安全的區域，而柵面上的貯砂率與總攔阻率為評估壩體攔阻效益的重要指標。從貯砂率可知此工法柵面上的土石攔阻率，而總攔阻率可知此工法所能捕捉攔截的土石百分比。

$$\begin{aligned} \text{貯砂率 } R_1 &= (\text{停積的土石量}) / \text{總土石流量} \\ &= (\text{總土石流量} - \text{越過柵面土石量} - \text{穿過柵棒間隙土石量}) / \text{總土石流量} \\ \text{總攔阻率 } R &= (\text{停積的土石量及落入分流道之土石量}) / \text{總土石流量} \\ &= (\text{總土石流量} - \text{越過柵面土石量}) / \text{總土石流量} \end{aligned}$$

以無因式柵棒開口間距 ( $b/D_{\max}$ ) 柵棒長度 ( $L/D_{\max}$ ) 及柵面與水平面之夾角 ( $\theta$ ) 等影響因子進行分析，經過多次試驗結果，其迴歸方程式如下：

$$\text{貯砂率 } R_1 = -0.2705 (b/D_{\max}) + 0.008136 (L/D_{\max}) - 0.00389 \theta + 0.556913$$

$$R^2 = 0.797114$$

$$\begin{aligned} \text{總攔阻率 } R &= 0.03554 (b/D_{\max}) + 0.020524 (L/D_{\max}) - 0.00268 \theta + 0.405093 \\ R^2 &= 0.912154 \end{aligned}$$

從趨勢方程式得知：貯砂率隨柵棒長度增加而增加，隨柵棒間距及柵面角度增加而減小；總攔阻率隨柵棒長度、柵棒間距的增加而有增加趨勢，而隨柵面角度增加而有減小趨勢。

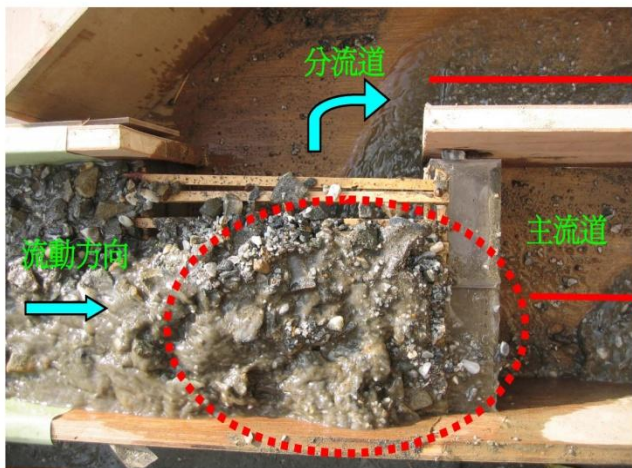
### (一) 貯砂率分析

張敬昌 (2003) 試驗分析指出：沖刷機制或土石流防治效能表現中，平面



透水柵的柵距大小，為主要影響因子。因此試驗之初，先進行「有間隙」與「無間隙」對土石流基本運動特性的觀察，再進一步進行四種不同間距之試驗。

以間距 $b=0$ 做為對照組，發現土石流通過無間隙之木板時，土石流快速流過，但是土石流通過有間隙之透水柵面時，土石流有飛越柵棒上游約 5 公分的現象，而後才發生脫水與篩分的作用，當粗顆粒砂石停積於柵面，而後續土石會推擠而帶動方才堆積的土石向前移動，渠槽坡度愈大，沿拋物線飛越的現象更明顯，停積、推擠，再越流的情形重複發生。



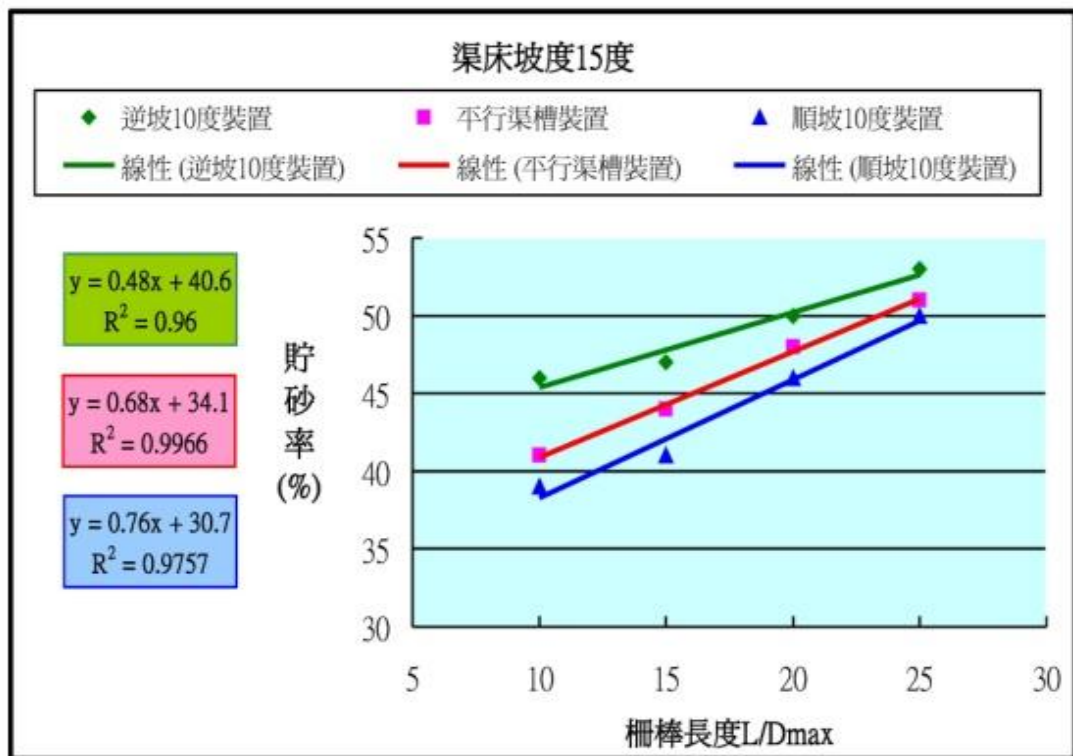
▲ 穿過柵棒間隙的細顆粒土砂流由分河道導引到安全的區域，可防止與越流之土石再度結合。

▲ 柵棒阻塞或長度不足的情況下，越過柵面流入主河道衝向下游的土石會增多。

照片二 土石落入主河道實驗照片

### 1. 圖十一「不同柵棒長度—貯砂率的迴歸線型圖」：

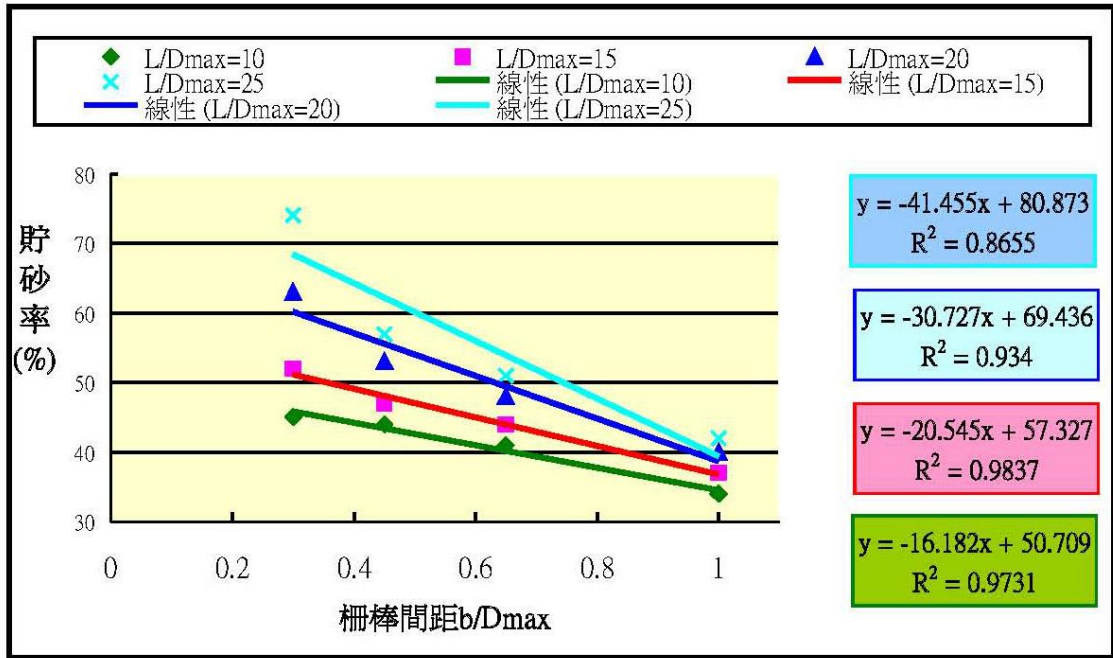
- (1) 柵棒長度與貯砂率成正比，柵棒加長有助於貯砂率的提升，從圖中可推知  $L/D_{max}$  每增加5，則貯砂率可提升2%~4%。
- (2) 當 $b/D_{max}=0.65$  時，逆坡架設法可增加貯砂率。
- (3) 當柵棒間距固定時 ( $b/D_{max}=0.65$ )，以無因式 $L/D_{max}$  為自變數，依據實驗數據列出透水柵的貯砂率的迴歸方程式如下圖內所示 ( $L/D_{max}$  為柵棒相對長度)。若 $L/D_{max} > 20$ 、 $b/D_{max}=0.65$ ，則不論是逆坡10 度或順坡10 度，其貯砂率皆可達45%以上。



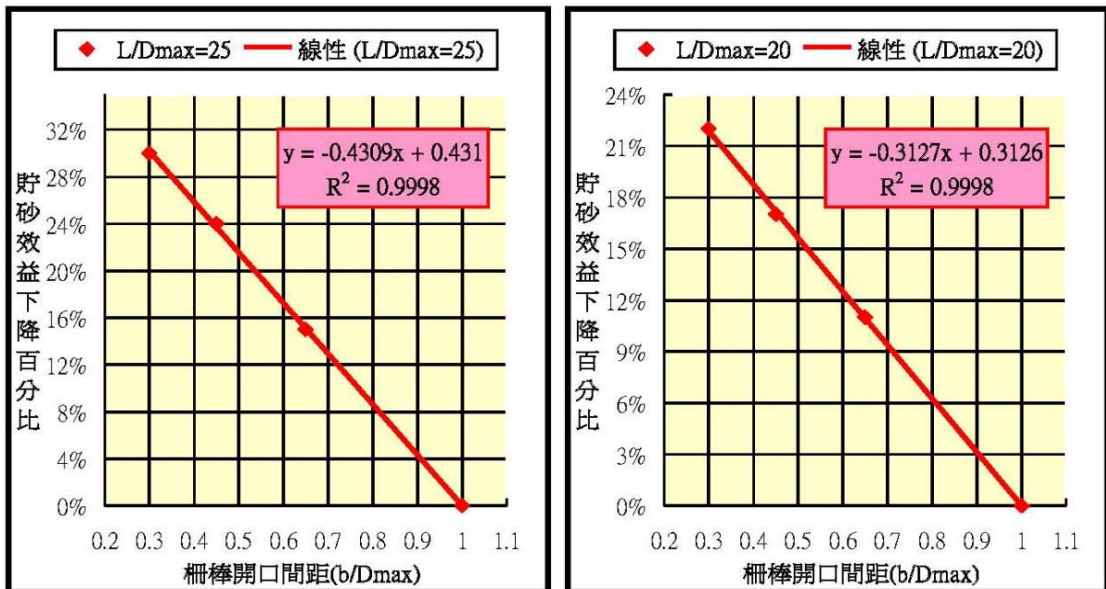
圖十一 柵棒長度—貯砂率迴歸線型圖 ( $b/D_{max}=0.65$ )

2.圖十二「不同柵棒間距—貯砂率的迴歸線型圖」:

- (1)發現柵棒間距寬度與貯砂率呈反比，即柵棒間距愈大，貯砂率愈低，土石落入柵棒下層的多寡取決於柵棒之間間隙寬度，當間距愈大則砂石由間隙落下就愈多，促使貯砂量減少。
- (2)就攔阻土石的效益來看：當  $L/D_{max} > 20$  時，其間距條件  $b < D_{max}$  為開口間距，則從統計圖中得知貯砂率可達到四成以上。
- (3)當長度固定時，以無因式  $b/D_{max}$  為自變數，依據實驗數據列出透水柵的貯砂率的迴歸方程式如下圖所示。當  $L/D_{max} > 20$ ，且間距  $b/D_{max} = 0.5$ ，則貯砂率可達 50% 以上。
- (4)以柵棒長度  $L/D_{max} = 25$  或 20 分析： $L/D_{max} = 25$  時，其  $b/D_{max}$  每降低 0.1，貯砂效益約提昇 4%； $L/D_{max} = 20$  時，其  $b/D_{max}$  每降低 0.1，貯砂效益約提昇 3%。



圖十二 不同柵棒間距－貯砂率的迴歸線型圖（地形 $\theta = 15^\circ$ 平行渠床架設法）



貯砂效益下降趨勢線

討論：

所謂「貯砂量」是指防治工法在壩前所能攔阻的土石量，也就是被攔阻在柵上以及威脅性。陳理人等（1993）建議開放式防砂壩體每次洪水挾帶砂石量 $1/3 \sim 1/2$ 以上滯留在壩內。前人研究提出開放性梳子壩設計的經驗式為 $b/D_{max} < 1.5$ ，若與本試驗結果對照，本研究柵棒間距 $b/D_{max}=1$ 時，造成土石和水分掉落

柵棒下而流入分河道的土石量高於總土石的 1/2 以上，僅將土石流分流成二股土石流，這並非我們的主要用意，因此建議透水柵在篩分長度 足夠的情形下，間距  $b/D_{max} < 1$  才可能兼顧貯砂率與篩分效益。

### 3.圖十三、十四「柵面角度－貯砂率比較圖」

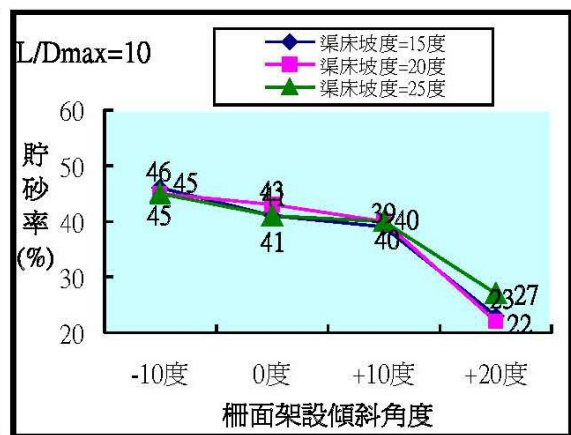
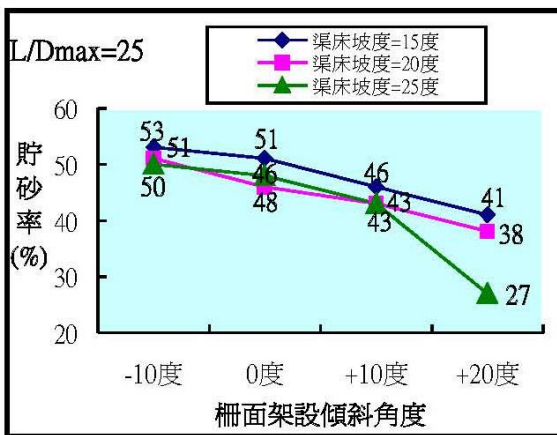
(1) 在間距與長度固定的條件下，從圖中可知貯砂率隨柵面角度增大而有減少的趨勢。

(2) 逆坡架設法會提升貯砂率，即逆坡  $10^\circ >$  平行渠床  $>$  順坡  $10^\circ >$  順坡  $20^\circ$ 。

(如圖十三)

(3) 若柵棒長度不足(例如  $L/D_{max}=10$ ) 一旦柵面順坡加大傾斜至  $20^\circ$  度時，貯砂率會低於30%，出現驟降的趨勢(如圖十四)

(4)  $L/D_{max}=25$ ，柵面角度  $45^\circ$  時(即渠床坡度  $25^\circ +$  順坡加大  $20^\circ$  架設)貯砂率低於 30%，也出現驟降的趨勢。顯示柵面角度過大會影響貯砂率。



圖十三 柵面角度－貯砂率折線圖

圖十四 柵面角度－貯砂率折線圖

( $b/D_{max} = 0.65$ )

討論：

土石流的前進動力來自本身的重力與慣性力，而重力部分與柵面角度有關，土石堆積在柵面上時，篩分作用會降低甚至停止，採用逆坡架設法或柵棒間距愈小時，則柵面上的土石量會增加，必須適時清除柵面上土石，若能減少柵棒堆積堵塞的情形，將有助透水柵篩分作用。順坡向下游面陡降的角度愈大時，土石下滑速度快，當柵面角度大於土石安息角度時，柵上不易有堆積物，所以篩分脫水功能好，但是柵棒長度若太短，土石快速流過會有過篩不完全的情況，越過柵面流向下游主河道的土石明顯增多，試驗結果顯示貯砂率有下降趨勢。

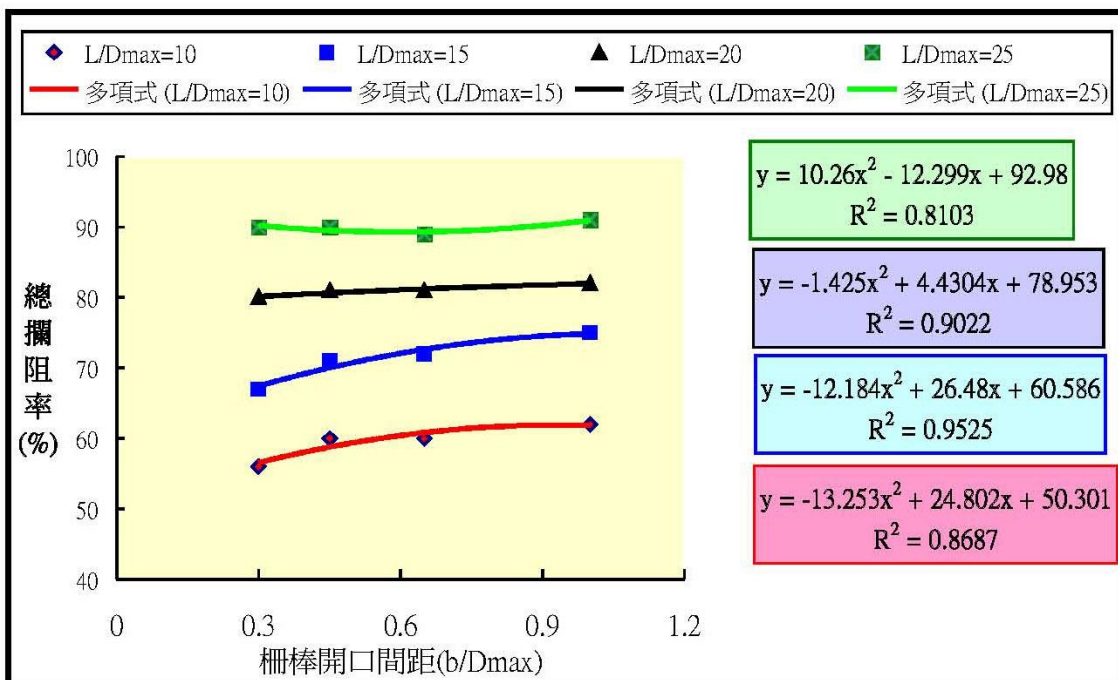
## (二) 總攔阻率分析

### 1. 圖十五「柵棒間距—長度—總攔阻率迴歸線型圖」分析

(1) 從下圖中發現柵棒間距對總攔阻率影響不大，而柵棒長度對總攔阻率影響頗大，柵棒長度加長有助於總攔阻率的提升。

(2) 就攔阻土石的效益來看： $L/D_{max} \geq 10$ ，其總攔阻率皆達到 50% 以上。

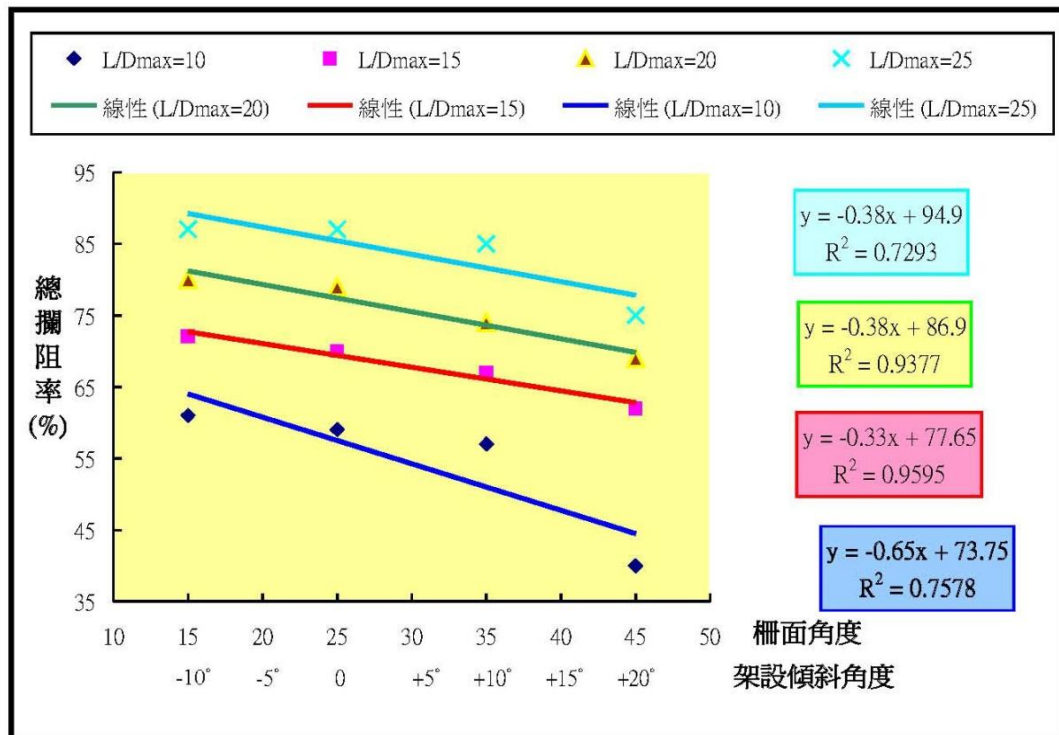
(3) 以無因式  $b/D_{max}$  為自變數，總攔阻率的迴歸方程式如下圖內所示：



圖十五 柵棒間距—長度—總攔阻率迴歸線型圖 (渠床坡度  $\theta = 15^\circ$ )

## 2.圖十六「柵面角度—總攔阻率迴歸線型圖」分析

- (1) 總攔阻率會隨著柵面角度呈輕微的負相關趨勢變化。但  $L/D_{max}=10$  在傾斜角度愈大時，呈現明顯的大幅度下降，足見柵棒長度不足時，在柵面順坡陡降的情形下對總攔阻率影響甚大，推論其與長度太短時，其越柵土石量驟增有很大的關係。
- (2) 從下圖得知除了  $L/D_{max}=10$  以外，其餘  $L/D_{max}>15$  且柵面與地平線夾角  $<45^\circ$ ，總攔阻率皆可達 60% 以上。



圖十六 柵面角度—總攔阻率迴歸線型圖 ( $b/D_{max}=0.65$ ，渠床坡度 25 度)

### 討論：

從  $L/D_{max}=10$  時，其總攔阻率的曲線在順坡加大 20 度架設法時(柵面與地平線夾角  $=45^\circ$ ) 出現驟降的情形，探其原因應為：柵面坡度大於土石停息角時，土石不易停積在柵面上，而因重力作用滑落主河道，而且柵棒長度不足，造成越過柵面的土石量比較多，響影其攔阻效果而呈現急遽下降的情形。因此建議柵棒長度宜  $L/D_{max}>15$  比較不會產生攔阻率驟降的情形。

## 二、篩分效益分析

透水柵裝置防治土石流的主要的原理是土石流通過柵面時水分及細顆粒砂石會由柵棒間隙析出，脫水作用使土石流頓時失去流動的動力，因而使土石堆積在透水柵裝置上，細顆粒土砂石將會穿過柵棒間隙而使土石流呈現上、下層之兩股運動型態，上、下層土砂量的多寡代表柵體對土石流的分流程度，但是如果柵棒太短，則來不及充分過篩即越過壩體的土石量則會大增，而且礫石流因脫水而停止的功能也因長度不足而減低，對下游具有威脅性；若柵棒間距太寬則落入下層之土石的粒徑太大，無法將土石流做較佳的粒徑分離，究竟柵棒間距與長度設計準則為何？篩分比成為防治工法設計時的重要參考值。

$$\text{篩分比 } S = \frac{W3}{W1 + W2 + W3}$$

(W3為落入柵棒下層細顆粒土石量，W1為柵面上堆積土石量，W2為越柵土石量)

經過多次試驗結果，以無因式柵棒開口間距 ( $b/D_{\max}$ ) 柵棒長度 ( $L/D_{\max}$ ) 及柵面角度 ( $\theta$ ) 等影響因子進行分析，篩分比趨勢線可做為施工時參考的依據，透水柵的篩分比迴歸方程式如下：

篩分比

$$S = 0.437719 (b/D_{\max}) + 0.015581 (L/D_{\max}) + 0.001675 \theta - 0.22502 \quad R^2 = 0.909837$$

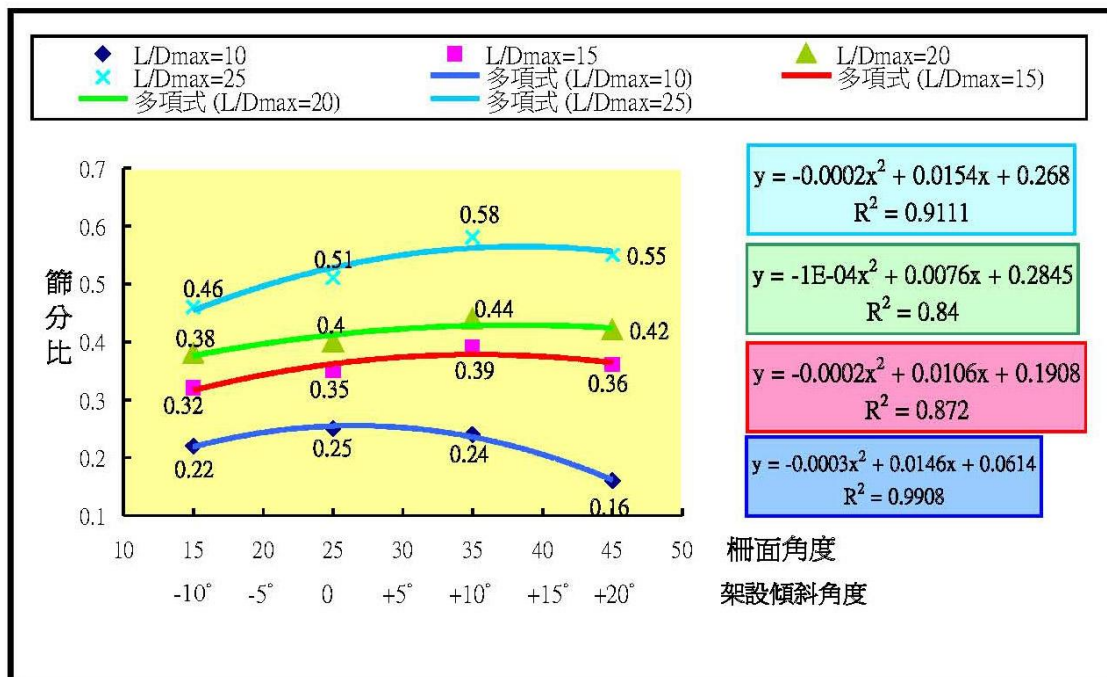
### 1. 圖十七「柵棒長度-柵面架設角度-篩分比值」的比較圖

(1) 篩分比隨著柵面向下游面傾斜角度增加而漸升，但若柵面傾斜度過大時，上升趨勢會轉為向下降。

(2) 柵棒太短如圖中的  $L/D_{\max} = 10$ ，其下降的趨勢最為明顯。

## 討論：

張繼儒（2003）土石流平面柵分流效率之試驗研究中提到：當柵棒長度30~50cm、裝置坡度介於 30 度~40 度之間時，所得之土砂分流比介於 1~2 之間（土砂分流比為上層粗顆粒土石重÷下層細顆粒土石重）。其結果換算為本研究的篩分比，即 S 介於 0.33~0.5之間，此結果與本研究結果大致相符合。然本研究發現如果柵面角度太陡，可能會使篩分比趨勢變緩，甚至會有下降趨勢。



圖十七 柵棒長度-柵面角度-篩分比值迴歸線型圖（地形坡度 25 度）

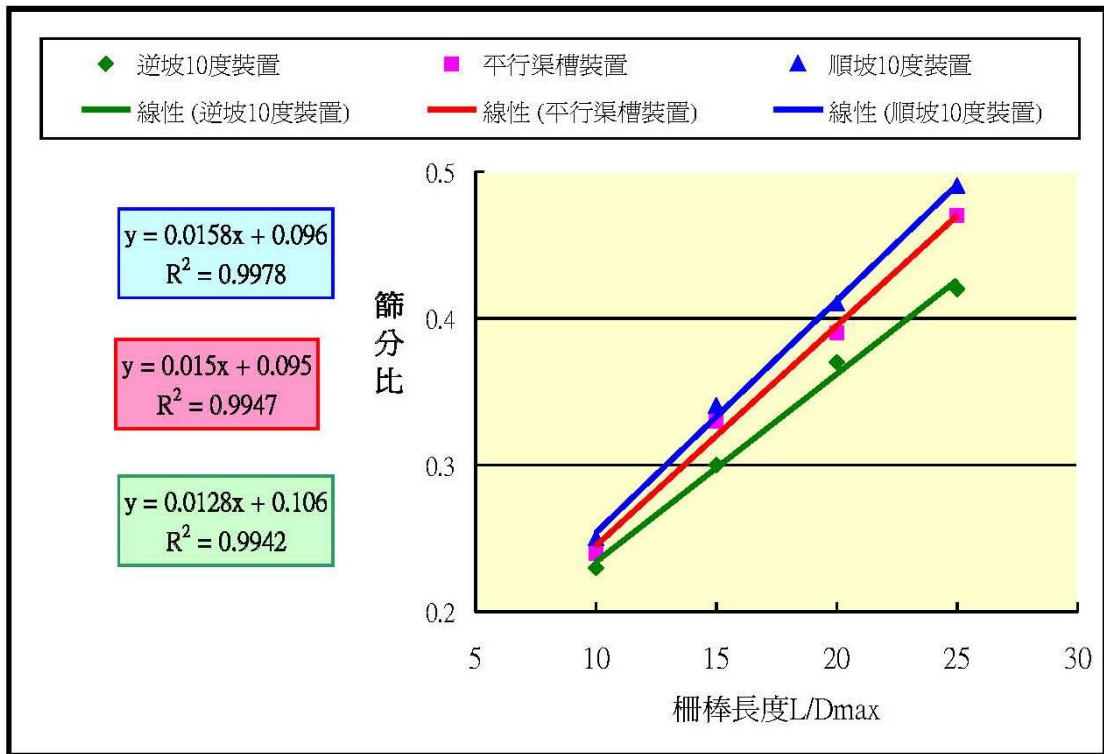
## 2. 圖十八「柵棒長度—篩分比迴歸線型圖」：

- (1) 柵棒長度愈長，篩分比也有增大的趨勢，透水柵長度會影響土石流通過時停留在柵面的時間長短，柵面愈長則篩分的空間增加。柵棒太短時，篩分比值比較小，代表落入分河道的細顆粒砂土比較少，而大部分土石大多掉落主河道，故篩分效果不佳，主要是篩分不完全所造成。
- (2) 渠槽逆坡10 度的裝置，其篩分效果比其他裝置略小。
- (3) 以無因式L/Dmax為自變數，依據實驗數據列出透水柵的篩分比迴歸方程式如下表所示。



不同架設方式的篩分比迴歸方程式彙整表 ( $b/D_{max}=0.65$ )

架設角 樓型坡度	逆坡 ( $-10^\circ$ )	平行渠床	順坡 ( $+10^\circ$ )
$15^\circ$	$S = 0.0128$ $(L/D_{max}) + 0.106$ $R^2 = 0.9942$	$S = 0.015 (L/D_{max})$ $+ 0.095 R^2 = 0.9947$	$S = 0.0158 (L/D_{max})$ $+ 0.096 R^2 = 0.9978$
$20^\circ$	$S = 0.0138 (L/D_{max})$ $+ 0.091 R^2 = 0.9888$	$S = 0.0136 (L/D_{max})$ $+ 0.122 R^2 = 0.988$	$S = 0.0172 (L/D_{max})$ $+ 0.109 R^2 = 0.9888$
$25^\circ$	$S = 0.0156 (L/D_{max})$ $+ 0.072 R^2 = 0.9909$	$S = 0.0148 (L/D_{max})$ $+ 0.111 R^2 = 0.9849$	$S = 0.0166 (L/D_{max})$ $+ 0.107 R^2 = 0.9496$



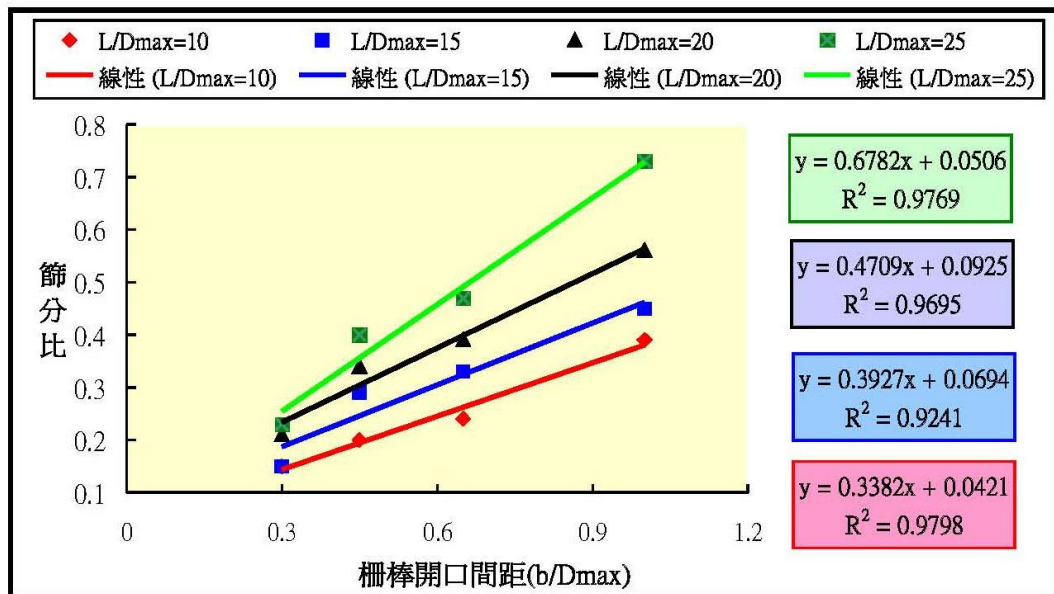
圖十八 柵棒長度－篩分比迴歸線型圖 (地形坡度 $15^\circ$ 、 $b/D_{max}=0.65$ )

討論：

在實驗過程中，逆坡形式最接近水平式，其土石在柵面停積、推擠的情況是最頻繁也最明顯，可能此原因使其篩分比最小，即順坡  $10^\circ$  的篩分比  $>$  平行渠槽  $>$  逆坡  $10^\circ$ 。

### 3.圖十九「柵棒間距—長度—篩分比迴歸線型圖」；

- (1) 透水柵的柵棒間距與篩分比具有正相關性，柵棒間距愈大則篩分有上升的趨勢。
- (2) 柵棒長度愈長其停積、推擠、越流再篩分的次數愈多，而且間距愈小則越流規模愈大，其越流次數也最明顯。
- (3) 當長度固定時，以無因式  $b/D_{max}$  為自變數，依據實驗數據列出透水柵的篩分比迴歸方程式如下圖內所示。



圖十九 柵棒間距-長度-篩分比迴歸線型圖（渠槽坡度 15° 順著渠床角度平行架設）

### 4.圖二十「篩分效益趨勢線」分析

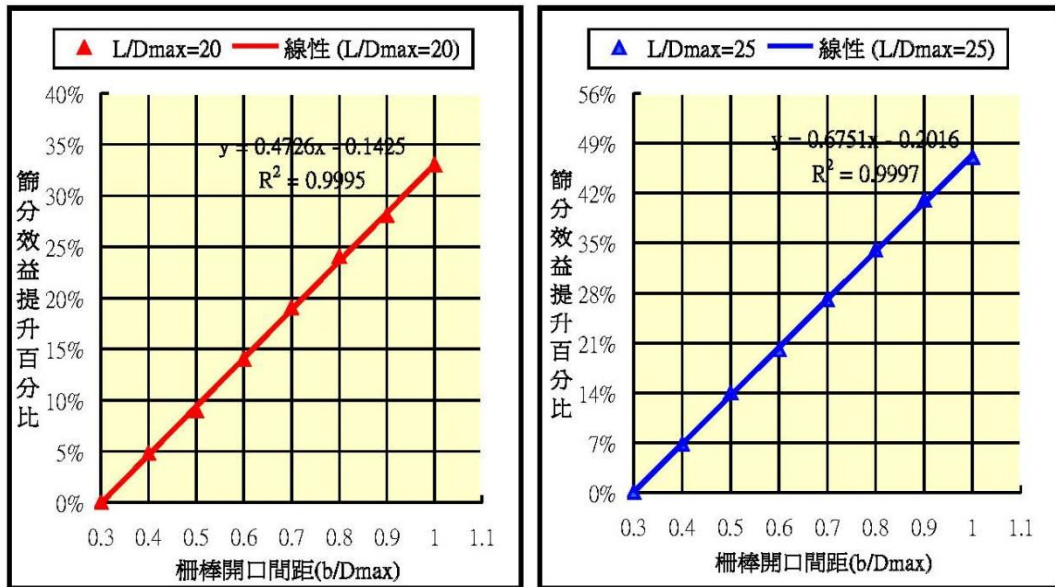
以柵棒長度  $L/D_{max}=25$  或 20 分析：

- ①  $L/D_{max}=25$  時，以  $b/D_{max}=0.5$  做為柵棒間距的寬度來設計，則篩分比約為 0.39（即代表落入下層的砂石量約占 39%）篩分比趨勢線如下：

$S = 0.6782 (b/D_{max}) + 0.0506$   $R^2 = 0.9769$  其  $b/D_{max}$  每提升 0.1，篩分效益約提昇 7%。

②  $L/D_{max}=20$  時，以  $b/D_{max}=0.5$  做為柵棒間距的寬度來設計，則篩分比約為 0.33，篩分比趨勢線如下：

$S = 0.4709 (b/D_{max}) + 0.0925$      $R^2 = 0.9695$     其  $b/D_{max}$  每提升 0.1，篩分效益約可提昇 5%。



圖二十 篩分效益提升趨勢線

**總討論：**

綜合上述結果得知柵棒開口間距、柵棒長度及柵面架設的角度會影響土石流的運動特性，而且柵棒有隨機阻塞的情形，一旦阻塞即柵面堆積情形迅速加劇時，則柵棒篩分作用會逐漸減低，後續前進的土石流會朝下游呈波段性前進，使攔阻效益減低。

實驗中發現柵棒間距、長度與柵角皆會影響貯砂率，透水柵有分離土石流粗大礫石之功效，可轉化土石流之集體運動型態為一般土砂流出型態。黃怡仁 (1990) 指出：「緩坡透水柵防治土石流之功效較順坡透水柵為佳」，此結果乃是針對貯砂率而言，與本研究結果中「緩坡透水柵貯砂率高於順坡透水柵」之結果相符，但綜觀前人研究指出「順坡架設法」會提升篩分比值 (謝宗憲，2004；邱

鼎晏，2008；陳政德，2007），與本研究結果大致相符，但是本研究發現：柵面角度固然能增加篩分比，但是卻會使攔阻效益下降，當順坡架設使柵面傾斜坡度達40度以上時，篩分比會由上升轉為下降的趨勢，因此設計透水柵裝置時宜考慮柵面設置的角度問題。

### 總結：

土石流經過透水柵裝置時因過篩後的土石流頓失水分而失去流體特性時，較粗顆粒土石與細顆粒土砂水分離而停積於柵面上或越過柵體，細顆粒土砂水可從分流道導引至下游安全區域，可有效降低土石流災害，在實驗中發現主河道上若有大量土石掉落，應引至預先設計好的堆積區，否則大量的土石，在水流量充沛但是柵棒已被阻塞而失去篩分脫水功能的時候，大量的土石易衝向下游而造成下游的土石災害。

綜合上述篩分比、貯砂率與總攔阻率之試驗結果，透水柵是採柔性分流土石與水的防治構造物。當柵棒愈長對攔阻效益與篩分功效皆有提昇作用，呈現正趨勢增長，而柵棒間隙的寬度對篩分效果具有關鍵性影響，柵面順坡架設的角度增大有助於篩分功效的提升，但是若達到45度則篩分與攔阻率皆會有下降的趨勢。

以無因式柵棒間距 ( $b/D_{max}$ )、柵棒長度 ( $L/D_{max}$ )、柵面角度 ( $\theta$ ) 等影響因子進行迴歸分析，得到以下方程式：

篩分比 $S=0.437719(b/D_{max})+0.015581(L/D_{max})+0.001675\theta-0.22502$	$R^2=0.909837$
貯砂率 $R1=-0.2705(b/D_{max})+0.008136(L/D_{max})-0.00389\theta+0.556913$	$R^2=0.797114$
總攔阻率 $R=0.03554(b/D_{max})+0.020524(L/D_{max})-0.00268\theta+0.405093$	$R^2=0.912154$

### 案例分析：

依據試驗結果推論：當 $L/D_{\max} > 20$ 、 $0.5 < b/D_{\max} < 1$ ，則柵面角度 $\theta$ 設置在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 時，其預期效益為貯砂率在40%以上，總攔阻率約八成左右，而且篩分比皆可達0.3以上。若 $L/D_{\max} > 25$ ，則其貯砂率可再上升至50%以上，總攔阻率更高達九成左右，而且篩分比皆可達0.4以上，可有效減少主河道的土石流量。

### 台灣南投三號坑為例（民國90年桃芝颱風）：

根據資料顯示，上游面一系列梳子壩的攔截，估計三號坑可通過的最大粒徑約60公分，流動區坡度15~20度。因此若柵棒長度15m ( $L/D_{\max} = 25$ )，若貯砂率要達50%以上，則柵棒間距必須 $b/D_{\max} < 0.8$ （約 $b = 35\text{cm}$ ），此時篩分比=0.4左右，代表可以透水柵可攔阻五成土石量，而且柵棒的篩分率達四成以上，而總攔阻率在九成以上。若柵棒間距 $b/D_{\max}$ 再增加0.1（即約6cm）可使篩分率再提升7%，但貯砂率會降4%。

## 伍、結論

土石流攔阻工法的相關研究國內外不斷的進行中，透過式防砂壩是目前的趨勢，無論所採用的是何種形式的壩體，主要的目的均在於減災。本研究採用平面式透水柵進行室內模擬、試驗，「透水柵工法」是針對土石流流體的特性，將土石流流動中很重要的水因子，以柵棒間隙來進行柔性篩分，使土石流因水分被析出而減低流動的動力，進而產生停積與攔阻的功效，本研究勘查位於台灣的溪頭大學坑透水柵工程，及參考日本長野燒岳山透水柵工法，提出改良式分流道設計，落入柵棒下層分流道之土砂水可導引至下游安全區段，而土石流前端之粗顆粒土石儘可能將之攔阻在透水柵裝置上，再利用常流量將堆積於壩上之泥沙顆粒以個別搬運的方式予以清除，一方面可有效的調節河川下游輸砂之能力，維持土砂資源平衡與兼顧溪流魚類，另一方面其平面式鋪於河床的架設法，異於一般透過性防砂壩體採正面直立型架設，可免於正面強烈撞擊，是個具有生態、防災與經濟效益概念的土石流防治構造物。本研究藉由一系列試驗來瞭解透水柵工法的適用性，以柵棒間距、柵面長度及柵面角度為重要因子進行分析，最後提出透水柵篩分比與攔阻率的趨勢方程式，期望能在有限的經濟條件下，擬出最佳的壩體設計條件，以做為施工設計時之參考。

### 一、從攔阻效益分析

貯砂率與柵棒長度 ( $L/D_{max}$ ) 成正相關，隨柵棒間距 ( $b/D_{max}$ )、柵面角度 ( $\theta$ ) 增加而降低，呈現負相關；總攔阻率則隨柵面角度 ( $\theta$ ) 增加而減少，也呈現負相關趨勢。以無因式柵棒間距 ( $b/D_{max}$ )、柵棒長度 ( $L/D_{max}$ )、柵面角度 ( $\theta$ ) 等影響因子進行迴歸分析，趨勢線方程式如下：

$$\begin{aligned} \text{貯砂率 } R_1 &= -0.2705 (b/D_{\max}) + 0.008136 (L/D_{\max}) - 0.00389 \theta + 0.556913 \\ R &= 0.797114 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{總攔阻率 } R &= 0.03554 (b/D_{\max}) + 0.020524 (L/D_{\max}) - 0.00268 \theta + 0.405093 \\ R &= 0.912154 \end{aligned}$$

設計時以總攔阻率（R）高為原則，輔以篩分比（S）與貯砂率（R1）高，即可有良好之成效。

試驗結果發現：當  $L/D_{\max} \geq 20$  時，每柵棒間距每減少 0.1 倍最大粒徑寬度（ $b/D_{\max}$  減少 0.1），貯砂率約可提升3%以上。

## 二、從篩分比分析：

篩分比隨柵棒間距（ $b/D_{\max}$ ）、柵棒長度（ $L/D_{\max}$ ）、柵面角度（ $\theta$ ）等的增加而增大。

篩分比  $S = 0.437719 (b/D_{\max}) + 0.015581 (L/D_{\max}) + 0.001675 \theta - 0.22502$   
 $R^2 = 0.909837$  但當柵面角度大於  $40^\circ$ ，篩分效益出現增幅減緩甚至有下降的趨勢，而且柵棒愈短愈明顯，此結果能補足前人試驗之不足，設計時宜注意之，本研究結果可架構更完整的柵體幾何參量設計模式。

試驗結果發現：當  $L/D_{\max} \geq 20$  時，每柵棒間距每增加 0.1 倍最大粒徑寬度（ $b/D_{\max}$  增加 0.1），篩分效益可提升 5% 左右。

## 三、從柵面上土石清除能力分析：

就柵面上堆積長度而言：順坡透水柵裝置比平行渠床裝置及逆坡裝置長，但透水柵的順坡柵面角度大於土石安息角時，柵面上不易有堆積物。就堆積高度而言：逆坡透水柵裝置大於平行渠床裝置與順坡裝置。而順坡式架設的透水柵自清能力優於其他架設法，當柵面角度愈大則土石下滑的力量也會增大，土

石自動滾落主河道的情形增加，從土體堆積的剖面圖可發現粒徑以上層的顆粒較小，所以藉由常態水流清除柵面上土石比較容易，如能善用並導引土石停積於預定的土石堆積區，可減少清除土石流堆積量的人力與物力，但順坡架設角度愈大對攔阻率具有負相關趨勢，因此在設計柵體時仍建議總攔阻率宜高於六成以上為佳。

#### 四、改良型透水柵工法的可行性

$L/D_{\max}=20$ 、 $b/D_{\max}=0.5$  在柵面角度  $25^\circ$  的條件下，貯砂率約 50%；若以最大粒徑作為柵棒間距的寬度來設計則貯砂率降為 35%。而當  $L/D_{\max} > 20$ 、 $0.5 < b/D_{\max} < 1$ ，則柵面角度  $\theta$  設置在  $5^\circ \sim 25^\circ$  時，其預期效益為貯砂率在 40% 以上，總攔阻率約八成左右，而且篩分比皆可達 0.3 以上。若  $L/D_{\max} > 25$ ，則其貯砂率可再上升至 50% 以上，總攔阻率更高達九成左右，而且篩分比皆可達 0.4 以上，可有效減少主河道的土石流量。

透水柵與已淤積之壩體共構並採用分河道設計，依據試驗結果其活化土石防治功效是可行的計畫，本研究提出改良式的透水柵工法計畫，希望能獲得相關單位與現場工程之重視、參考及採用，並促進國內外遭受土石流危害的地區，能藉此得到對應之道。



## 陸、展望與建議

- 一、透水柵的篩分功效取決於土砂石的粒徑的大小、柵面篩分的角度、柵棒間距與長短，柵棒間距些微改變即影響試驗結果，日後試驗可增加更多組柵棒間距與柵棒長度，以求得更精確的數據。
- 二、本試驗重點放在透水柵工程的部分，對於分河道的土砂流對下游是否產生何種變化並未探討，且實驗中發現柵棒下方當細砂石掉落時產生的侵蝕坑洞也未深入探討，建議日後可朝此部份進一步探究。
- 三、建議施做透水柵工法時能與封閉性壩體、梳子壩或人字壩等透過性工法共構，可增加土石流防治的功效。
- 四、此工法適用於土石流的流動區，透水柵體開口間距之設計必須瞭解現地土砂的特徵粒徑及現地地質，建議在其上游發生區與流動區務必先進行其他透過式防砂壩體控制土石流 到達設置地點時之最大粒徑。
- 五、本試驗的土石材料是參考台灣南投三號坑的明坑採等重量替代法級配土石材料，分析其土石粒徑組成比例，再依據當地坡度進行柵面角度、柵棒長度及柵棒間距的試驗，以作為當地設計工程時之參考，只要控制到達現地之最大粒徑，使現地土石資料與本試驗相 符皆適用本試驗之結果。
- 六、土石流在柵面上會產生拋物線飛越柵棒上游端的現象，接著停積、擠壓、越流，再堆積的重複現象，而且柵棒越長或地形坡度小時愈明顯。實驗中發現，部分水流會越過下游壩，而溢流至主河道的現象，此情形大多發生在柵棒長度不足或坡度太大時，且隨柵面角度的增大，而有加重的情況。此時若能在柵面下設計導流裝置，並將細顆粒土砂水導入分流道，則應能降低主河道堆積區的流量，減低堆積區發生另一波土石流災害之危險性。
- 七、透水柵工法具有減勢、攔截土石流動的功能，而最異於其他透過性壩體的優點是比較不會正面受到土石的撞擊，然而堆積在柵棒上之土石重量施加於壩體結構之作用力，設計工程時一定要加以估算。

## 柒、參考文獻

### 一、謝誌

感謝國立台灣大學土木工程研究所劉格非教授的指導，劉教授非常的忙碌，卻願意挪出時間，不厭其煩的解釋土石流原理與理論，並利用假日親自說明細節與現今世界防災趨勢，使我獲益良多，而國立中興大學水土保持研究所段錦浩教授及其研究生，提供專業知識並允許於水工試驗室進行實驗，還有水土保持局第三工程所技正及台灣大學實驗林服務處的親切服務，以及爸、媽、弟弟的全程陪伴，級任李怜慧老師，三年來不斷的給我鼓勵與多方的協助，得之於人者多，使我在研究的路上充滿向前進的動力，我心存感激。

### 二、參考資料

- 1.中華顧問工程司（2002）。溪頭遊樂區九二一地震後續復健工程委託規劃設計監造技術服務 工作第一標規劃報告書修正版。
- 2.朱嘉政(2001)。滲流對管湧式土石流發生影響之研究。台灣大學農業工程研究所碩士論文。
- 3.林銘郎與謝正倫（1997）。台灣土石流災害特性與研究回顧。  
[www.earth.ce.ntu.edu.tw](http://www.earth.ce.ntu.edu.tw)
- 4.林忠義（1999）。透水柵調節土石流之機制研究。逢甲大學土木及水利工程學系碩士論文。
- 5.林彥志（2004）。平面柵柵棒長度對土石流篩分功效之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 6.邱鼎晏（2008）。透水柵與梳子壩之共構試驗研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 7.洪國凱（2005）。大角度斜降式透水柵對土石流篩分功效之試驗研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 8.胡聖賢（2003）。溪頭三號坑溪土石流堆積特性之調查與分析。台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。

- 9.段錦浩、謝宗憲、張繼儒(2003)。土石流透水柵篩分因子之研究，水土保持學報 35(3)：p.321，332。
- 10.陳政德(2007)。不同間距透水柵對土石流篩分功效之試驗研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 11.張敬昌(2003)。平面透水柵對渠床沖刷及土石流防治之研究。國立中興大學水土保持學系博士論文。
- 12.張繼儒(2003)。土石流平面柵分流效率之試驗研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 13.黃怡仁(1991)。透水柵防治土石流功效之試驗，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 14.黃宏斌&楊凱鈞(2005)。土石流紊流流況與顆粒篩選機制之關係，農業工程研討會論文集。p.201。
- 15.黃宏斌(2002)。坡地災害之發生機制：以溪頭集水區為例—總計畫暨子計畫：坡地土石流發生機制研究。行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告。(計畫編號：NSC 90-2625-Z-002-017)。
- 16.詹錢登(2000)。土石流發生與降雨特性之關係。民 97 年 8 月 30 日，取自：  
<http://email.ncku.edu.tw/~em50190/ncku/196/b/b1.htm>
- 17.游繁結(1993)。土石流之防治工法。水土保持學報，25(1)，p21~28。
- 18.謝宗憲(2003)。平面柵對土石流篩分功效之試驗研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 19.薛皓薰等(2007)。探討土石流防治工法的攔阻效益與過壩行為之研究。中華民國第四十七屆中小學科展。
- 20.薛皓薰等(2006)。探討斜坡滲流破壞引發土石流與土石流預警器製作。中華民國第四十六屆中小學科展。
- 21.薛皓薰等(2005)探討降雨強度引發土石流與土石流預警器製作。台北縣93學年度中小學科展。
- 22.土石流防災資訊網。<http://246.swcb.gov.tw/default-1.asp>

試驗紀錄表 (一) 渠槽坡度15度 (架設方式:平行渠槽)

對照組:未置透水柵前土石總土石量三次平均值為26.2公斤

柵棒長度: 20cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	5.8	10.3	3.2	19.3	12.7	15.9	48%	61%	0.17	
第二次	6	11.9	2.9	20.8	11.4	14.3	44%	55%	0.14	
第三次	5.1	12.2	3.1	20.4	10.9	14	42%	53%	0.15	
平均		11.1	3.1	20.2	11.7	14.7	45%	56%	0.15	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	5.1	11.1	4.5	20.7	10.6	15.1	40%	58%	0.22	
第二次	5.6	10.4	4	20	11.8	15.8	45%	60%	0.20	
第三次	6.3	10.1	3.8	20.2	12.3	16.1	47%	61%	0.19	
平均		10.8	4.3	20.3	11.6	15.7	44%	60%	0.20	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	5.6	10.5	4.6	20.7	11.1	15.7	42%	60%	0.22	
第二次	4.8	10.8	5	20.6	10.4	15.4	40%	59%	0.24	
第三次	4.7	10.3	5.4	20.4	10.5	15.9	40%	61%	0.26	
平均		10.7	4.8	20.7	10.7	15.7	41%	60%	0.24	
柵棒間距: 2cm										
第一次	2.3	9.5	7.2	19	9.5	16.7	36%	64%	0.38	
第二次	1.3	10.1	7.5	18.9	8.6	16.1	33%	61%	0.40	
第三次	1.7	10.5	6.7	18.9	9	15.7	34%	60%	0.35	
平均		9.8	7.4	18.9	9.0	16.2	34%	62%	0.39	
柵棒長度: 30cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	7.5	9.5	3.2	20.2	13.5	16.7	52%	64%	0.16	
第二次	8	9.1	2.9	20	14.2	17.1	54%	65%	0.15	
第三次	8.4	9.9	3.2	21.5	13.1	16.3	50%	62%	0.15	
平均		9.3	3.1	20.6	13.6	16.7	52%	64%	0.15	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	8	8.1	5.6	21.7	12.5	18.1	48%	69%	0.26	
第二次	7.2	7.3	6.1	20.6	12.8	18.9	49%	72%	0.30	
第三次	7.8	7.5	6.8	22.1	11.9	18.7	45%	71%	0.31	
平均		7.7	5.9	21.5	12.4	18.6	47%	71%	0.29	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	7.7	8	7	22.7	11.2	18.2	43%	69%	0.31	
第二次	7	7	7.4	21.4	11.8	19.2	45%	73%	0.35	
第三次	7.1	7.3	7.6	22	11.3	18.9	43%	72%	0.35	
平均		7.5	7.2	22.1	11.4	18.8	44%	72%	0.33	
柵棒間距: 2cm										
第一次	4.7	6	10.1	20.8	10.1	20.2	39%	77%	0.49	
第二次	4	6.5	9.4	19.9	10.3	19.7	39%	75%	0.47	
第三次	4.5	7.1	10.2	21.8	8.9	19.1	34%	73%	0.47	
平均		6.3	9.8	20.8	9.8	19.7	37%	75%	0.48	
柵棒長度: 40cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	10.1	5.1	4.5	19.7	16.6	21.1	63%	81%	0.23	
第二次	11	5.6	3.9	20.5	16.7	20.6	64%	79%	0.19	
第三次	10.6	5.4	4.6	20.6	16.2	20.8	62%	79%	0.22	
平均		5.4	4.2	20.3	16.5	20.8	63%	80%	0.21	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	8.1	5	6.9	20	14.3	21.2	55%	81%	0.35	
第二次	9.3	4.9	7.5	21.7	13.8	21.3	53%	81%	0.35	
第三次	8.7	5.3	7.1	21.1	13.8	20.9	53%	80%	0.34	
平均		5.0	7.2	20.9	14.0	21.1	53%	81%	0.34	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	8.8	4.3	8.5	21.6	13.4	21.9	51%	84%	0.39	
第二次	9.4	5.1	9.4	23.9	11.7	21.1	45%	81%	0.39	
第三次	7.8	5.3	8.3	21.4	12.6	20.9	48%	80%	0.39	
平均		4.7	9.0	22.8	12.6	21.3	48%	81%	0.39	
柵棒間距: 2cm										
第一次	3.2	4.8	11.5	19.5	9.9	21.4	38%	82%	0.59	
第二次	3.7	4.5	10.5	18.7	11.2	21.7	43%	83%	0.56	
第三次	4.1	5.1	10.4	19.6	10.7	21.1	41%	81%	0.53	
平均		4.7	11.0	19.3	10.6	21.4	40%	82%	0.56	
柵棒長度: 50cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	10.1	2.5	4.6	17.2	19.1	23.7	73%	90%	0.27	
第二次	13.6	2.1	4.3	20	19.8	24.1	76%	92%	0.22	
第三次	11.2	3.2	4.1	18.5	18.9	23	72%	88%	0.22	
平均		2.3	4.5	18.6	19.3	23.6	74%	90%	0.23	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	9.6	2.6	9.2	21.4	14.4	23.6	55%	90%	0.43	
第二次	10.6	3.1	8.8	22.5	14.3	23.1	55%	88%	0.39	
第三次	11.1	2.4	7.9	21.4	15.9	23.8	61%	91%	0.37	
平均		2.9	9.0	21.8	14.9	23.5	57%	90%	0.40	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	8.1	3	9.5	20.6	13.7	23.2	52%	89%	0.46	
第二次	8.5	3.2	9.6	21.3	13.4	23	51%	88%	0.45	
第三次	7.8	3.1	10.3	21.2	12.8	23.1	49%	88%	0.49	
平均		3.1	9.6	21.0	13.3	23.1	51%	88%	0.47	
柵棒間距: 2cm										
第一次	3.1	2.1	13.9	19.1	10.2	24.1	39%	92%	0.73	
第二次	2.5	2.5	12.6	17.6	11.1	23.7	42%	90%	0.72	
第三次	1.8	2.2	12.1	16.1	11.9	24	45%	92%	0.75	
平均		2.3	13.3	17.6	11.1	23.9	42%	91%	0.73	

W1=柵面上濕土石量 單位:kg W2=越柵落入主河道土石量  
W3=穿過柵棒間隙落入分河道的細砂石量  
V2=柵上攔阻總土石量=未置柵體土石流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置柵體土石流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水柵土石總流出量  
R2貯砂率=V3/未置透水柵土石總流出量  
篩分比=穿過柵棒間隙之細砂石量佔流過上游壩總土砂石量之比值=W3/V1

試驗紀錄表(二) 渠槽坡度15度(架設方式:逆坡10度)

對照組:未置透水柵前土石流總土石量三次平均值為26.2公斤

柵棒長度: 20cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	5.9	11.8	1.6	19.3	12.8	14.4	49%	55%	0.08	
第二次	6.7	12.6	2.5	21.8	11.1	13.6	42%	52%	0.11	
第三次	6.1	10.2	2.1	18.4	13.9	16	53%	61%	0.11	
平均		12.2	2.1	19.8	12.6	14.7	48%	56%	0.10	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	6.3	10.9	3.8	21	11.5	15.3	44%	58%	0.18	
第二次	5.7	9.5	4.1	19.3	12.6	16.7	48%	64%	0.21	
第三次	6.1	9.5	3.9	19.5	12.8	16.7	49%	64%	0.20	
平均		10.2	4.0	19.9	12.3	16.2	47%	62%	0.20	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	5.4	10	4.5	19.9	11.7	16.2	45%	62%	0.23	
第二次	4.7	9.5	4.1	18.3	12.6	16.7	48%	64%	0.22	
第三次	5.6	9.4	4.6	19.6	12.2	16.8	47%	64%	0.23	
平均		9.8	4.3	19.1	12.2	16.6	46%	63%	0.23	
柵棒間距: 2cm										
第一次	2.1	11.6	5.4	19.1	9.2	14.6	35%	56%	0.28	
第二次	1.5	11.8	5.9	19.2	8.5	14.4	32%	55%	0.31	
第三次	1.9	10.9	6.5	19.3	8.8	15.3	34%	58%	0.34	
平均		11.7	5.7	19.2	8.8	14.8	34%	56%	0.30	
柵棒長度: 30cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	8.5	9	3	20.5	14.2	17.2	54%	66%	0.15	
第二次	8.1	9.4	2.5	20	14.3	16.8	55%	64%	0.13	
第三次	7.5	8.5	2.7	18.7	15	17.7	57%	68%	0.14	
平均		9.2	2.8	19.7	14.5	17.2	55%	66%	0.14	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	7.7	8.1	5.6	21.4	12.5	18.1	48%	69%	0.26	
第二次	7.8	8.2	6.6	22.6	11.4	18	44%	69%	0.29	
第三次	8.5	7.1	5.9	21.5	13.2	19.1	50%	73%	0.27	
平均		8.2	6.1	21.8	12.4	18.4	47%	70%	0.28	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	7.8	7.2	6.6	21.6	12.4	19	47%	73%	0.31	
第二次	7.4	7.1	6.1	20.6	13	19.1	50%	73%	0.30	
第三次	7.7	7.6	6.9	22.2	11.7	18.6	45%	71%	0.31	
平均		7.2	6.4	21.1	12.4	18.9	47%	72%	0.30	
柵棒間距: 2cm										
第一次	4.9	7.5	7.4	19.8	11.3	18.7	43%	71%	0.37	
第二次	4.2	6.7	8.6	19.5	10.9	19.5	42%	74%	0.44	
第三次	5.1	8.1	8.5	21.7	9.6	18.1	37%	69%	0.39	
平均		7.1	8.0	20.3	10.6	18.8	40%	72%	0.40	
柵棒長度: 40cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	9.9	5.4	5.1	20.4	15.7	20.8	60%	79%	0.25	
第二次	11.7	4.9	4	20.6	17.3	21.3	66%	81%	0.19	
第三次	10.3	5	3.8	19.1	17.4	21.2	66%	81%	0.20	
平均		5.2	4.6	20.0	16.8	21.1	64%	81%	0.21	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	11.1	5.3	7.4	23.8	13.5	20.9	52%	80%	0.31	
第二次	9.2	4.7	6.3	20.2	15.2	21.5	58%	82%	0.31	
第三次	9.4	5.6	6.9	21.9	13.7	20.6	52%	79%	0.32	
平均		5.0	6.9	22.0	14.1	21.0	54%	80%	0.31	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	9.3	4.8	7.8	21.9	13.6	21.4	52%	82%	0.36	
第二次	9.5	5.1	8.5	23.1	12.6	21.1	48%	81%	0.37	
第三次	8.7	5	8.3	22	12.9	21.2	49%	81%	0.38	
平均		5.0	8.2	22.5	13.0	21.2	50%	81%	0.37	
柵棒間距: 2cm										
第一次	4.5	6	9.3	19.8	10.9	20.2	42%	77%	0.47	
第二次	4.1	5.1	9.9	19.1	11.2	21.1	43%	81%	0.52	
第三次	5.1	4.7	8.6	18.4	12.9	21.5	49%	82%	0.47	
平均		5.6	9.6	19.1	11.7	20.9	45%	80%	0.49	
柵棒長度: 50cm										
柵棒間距: 0.6cm	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R2(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	13.8	2.6	4.3	20.7	19.3	23.6	74%	90%	0.21	
第二次	14.2	1.8	4.8	20.8	19.6	24.4	75%	93%	0.23	
第三次	12.5	2.1	3.9	18.5	20.2	24.1	77%	92%	0.21	
平均		2.2	4.6	20.0	19.7	24.0	75%	92%	0.22	
柵棒間距: 0.9cm										
第一次	11.5	2.9	8.7	23.1	14.6	23.3	56%	89%	0.38	
第二次	10.5	3.1	7.1	20.7	16	23.1	61%	88%	0.34	
第三次	12.4	2.1	8.7	23.2	15.4	24.1	59%	92%	0.38	
平均		3.0	7.9	22.3	15.3	23.5	59%	90%	0.36	
柵棒間距: 1.3cm										
第一次	10	2.9	9.5	22.4	13.8	23.3	53%	89%	0.42	
第二次	10.4	2.8	9.8	23	13.6	23.4	52%	89%	0.43	
第三次	9.5	2.7	8.9	21.1	14.6	23.5	56%	90%	0.42	
平均		2.9	9.7	22.7	14.0	23.4	53%	89%	0.42	
柵棒間距: 2cm										
第一次	5.5	1.3	11.5	18.3	13.4	24.9	51%	95%	0.63	
第二次	5.8	1.5	11.6	18.9	13.1	24.7	50%	94%	0.61	
第三次	5.3	1.6	12.6	19.5	12	24.6	46%	94%	0.65	
平均		1.4	11.6	18.9	12.8	24.7	49%	94%	0.63	

W1=柵面上濕土石量 單位:kg W2=越柵落入主河道土石量  
W3=穿過柵棒間隙落入分河道的細砂石量  
V2=柵上攔阻總土石量=未置柵體土石流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置柵體土石流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水柵土石總流出量  
R2貯砂率=V3/未置透水柵土石總流出量  
篩分比=穿過柵棒間隙之細砂石量佔通過上游壩總土砂石量之比值=W3/V1

試驗紀錄表 (三) 渠槽坡度15度 (架設方式:順坡10度)

對照組:未置透水槽前土石總量三次平均值為26.2公斤

欄桿長度: 20cm										
欄桿間距: 0.6cm	w1(欄面土石)	w2(越欄土石)	w3(穿過欄桿間隙土石)	V1(越過上游欄土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(欄上貯砂率)	R(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	5	11.8	3.3	20.1	11.1	14.4	42%	55%	0.16	
第二次	4.6	12.9	3.2	20.7	10.1	13.3	39%	51%	0.15	
第三次	5.1	12.3	4.1	21.5	9.8	13.9	37%	53%	0.19	
平均		12.4	3.3	20.8	10.3	13.9	39%	53%	0.17	
欄桿間距: 0.9cm										
第一次	4.7	10.7	4.4	19.8	11.1	15.5	42%	59%	0.22	
第二次	5.1	9.6	4.7	19.4	11.9	16.6	45%	63%	0.24	
第三次	5.5	10.4	4.2	20.1	11.6	15.8	44%	60%	0.21	
平均		10.2	4.6	19.8	11.5	16.0	44%	61%	0.22	
欄桿間距: 1.3cm										
第一次	5.5	10.8	5.5	21.8	9.9	15.4	38%	59%	0.25	
第二次	4.5	10.7	4.8	20	10.7	15.5	41%	59%	0.24	
第三次	4.6	10.5	5.3	20.4	10.4	15.7	40%	60%	0.26	
平均		10.8	5.2	20.9	10.3	15.5	39%	59%	0.25	
欄桿間距: 2cm										
第一次	2.1	10.1	8	20.2	8.1	16.1	31%	61%	0.40	
第二次	2.2	10.5	8.9	21.6	6.8	15.7	26%	60%	0.41	
第三次	1.6	10.7	7.8	20.1	7.7	15.5	29%	59%	0.39	
平均		10.3	8.5	20.6	7.5	15.8	29%	60%	0.40	
欄桿長度: 30cm										
欄桿間距: 0.6cm	w1(欄面土石)	w2(越欄土石)	w3(穿過欄桿間隙土石)	V1(越過上游欄土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(欄上貯砂率)	R(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	7.6	9.7	3.5	20.8	13	16.5	50%	63%	0.17	
第二次	7.8	9.7	3.1	20.6	13.4	16.5	51%	63%	0.15	
第三次	8.2	9.5	3.7	21.4	13	16.7	50%	64%	0.17	
平均		9.7	3.3	20.9	13.1	16.6	50%	63%	0.16	
欄桿間距: 0.9cm										
第一次	7.8	8.5	6.5	22.8	11.2	17.7	43%	68%	0.29	
第二次	7.5	8.6	7.2	23.3	10.4	17.6	40%	67%	0.31	
第三次	7.1	9.2	6.9	23.2	10.1	17	39%	65%	0.30	
平均		8.6	6.9	23.1	10.6	17.4	40%	67%	0.30	
欄桿間距: 1.3cm										
第一次	7.1	7.8	7.6	22.5	10.8	18.4	41%	70%	0.34	
第二次	8	7.8	8	23.8	10.4	18.4	40%	70%	0.34	
第三次	7.8	7	8.1	22.9	11.1	19.2	42%	73%	0.35	
平均		7.8	7.8	23.2	10.8	18.7	41%	71%	0.34	
欄桿間距: 2cm										
第一次	2.5	8.4	9.4	20.3	8.4	17.8	32%	68%	0.46	
第二次	3	8.8	10.1	21.9	7.3	17.4	28%	66%	0.46	
第三次	2.2	7.9	10.3	20.4	8	18.3	31%	70%	0.50	
平均		8.6	9.8	20.9	7.9	17.8	30%	68%	0.48	
欄桿長度: 40cm										
欄桿間距: 0.6cm	w1(欄面土石)	w2(越欄土石)	w3(穿過欄桿間隙土石)	V1(越過上游欄土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(欄上貯砂率)	R(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	9.7	4.8	4.8	19.3	16.6	21.4	63%	82%	0.25	
第二次	10.4	5.4	4.1	19.9	16.7	20.8	64%	79%	0.21	
第三次	10.3	5.4	5	20.7	15.8	20.8	60%	79%	0.24	
平均		5.1	4.5	20.0	16.4	21.0	62%	80%	0.23	
欄桿間距: 0.9cm										
第一次	8	4.6	7.3	19.9	14.3	21.6	55%	82%	0.37	
第二次	9.2	4.6	7.8	21.6	13.8	21.6	53%	82%	0.36	
第三次	8.5	5.1	8.3	21.9	12.8	21.1	49%	81%	0.38	
平均		4.6	7.6	21.1	13.6	21.4	52%	82%	0.37	
欄桿間距: 1.3cm										
第一次	7.9	4.1	10	22	12.1	22.1	46%	84%	0.45	
第二次	7.2	4.5	9.6	21.3	12.1	21.7	46%	83%	0.45	
第三次	7.6	5.1	9.4	22.1	11.7	21.1	45%	81%	0.43	
平均		4.3	9.8	21.7	12.0	21.6	46%	83%	0.44	
欄桿間距: 2cm										
第一次	2.3	4.5	11.4	18.2	10.3	21.7	39%	83%	0.63	
第二次	3.3	4.5	10.6	18.4	11.1	21.7	42%	83%	0.58	
第三次	3.9	5	10.8	19.7	10.4	21.2	40%	81%	0.55	
平均		4.5	11.0	18.8	10.6	21.5	40%	82%	0.58	
欄桿長度: 50cm										
欄桿間距: 0.6cm	w1(欄面土石)	w2(越欄土石)	w3(穿過欄桿間隙土石)	V1(越過上游欄土石量)	V2(攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(欄上貯砂率)	R(總貯砂率)	S(篩分比)	
第一次	9.6	2.4	4.7	16.7	19.1	23.8	73%	91%	0.28	
第二次	12.1	2	5	19.1	19.2	24.2	73%	92%	0.26	
第三次	11.6	2.8	4.3	18.7	19.1	23.4	73%	89%	0.23	
平均		2.2	4.9	18.2	19.1	23.8	73%	91%	0.26	
欄桿間距: 0.9cm										
第一次	9.7	2.6	9.7	22	13.9	23.6	53%	90%	0.44	
第二次	10.4	3	8.9	22.3	14.3	23.2	55%	89%	0.40	
第三次	10.6	2.5	8.6	21.7	15.1	23.7	58%	90%	0.40	
平均		2.8	9.3	22.0	14.4	23.5	55%	90%	0.41	
欄桿間距: 1.3cm										
第一次	8.2	2.5	10.5	21.2	13.2	23.7	50%	90%	0.50	
第二次	8	2.3	11.1	21.4	12.8	23.9	49%	91%	0.52	
第三次	7.6	2.4	10.5	20.5	13.3	23.8	51%	91%	0.51	
平均		2.4	10.8	21.3	13.1	23.8	50%	91%	0.51	
欄桿間距: 2cm										
第一次	3	2.3	13.6	18.9	10.3	23.9	39%	91%	0.72	
第二次	2.1	3	13.1	18.2	10.1	23.2	39%	89%	0.72	
第三次	1.5	3.2	12.5	17.2	10.5	23	40%	88%	0.73	
平均		2.7	13.4	18.1	10.3	23.4	39%	89%	0.72	

W1=欄面上滯留土石量 單位:kg W2=越欄落入主河道土石量  
W3=穿過欄桿間隙落入分河道的細砂石量  
V2=攔阻總土石量=未置欄體土石流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置欄體土石流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水欄土石總流出量  
R2貯砂率=V3/未置透水欄土石總流出量  
篩分比=穿過欄桿間隙之細砂石量佔流過上游欄體土石量之比值=W3/V1

試驗紀錄表 (四) 柵棒間距: 1.3cm (渠槽坡度15度)

柵棒長度: 20cm									
柵面角度: 5度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)
第一次	5.4	10	4.5	19.9	11.7	16.2	45%	62%	0.23
第二次	4.7	9.5	4.1	18.3	12.6	16.7	48%	64%	0.22
第三次	5.6	9.4	4.6	19.6	12.2	16.8	47%	64%	0.23
平均		9.6	4.4	19.1	12.2	16.6	46%	63%	0.23
柵面角度: 15度									
第一次	5.6	10.5	4.6	20.7	11.1	15.7	42%	60%	0.22
第二次	4.8	10.8	5	20.6	10.4	15.4	40%	59%	0.24
第三次	4.7	10.3	5.4	20.4	10.5	15.9	40%	61%	0.26
平均		10.5	5.0	20.7	10.7	15.7	41%	60%	0.24
柵面角度: 25度									
第一次	5.5	10.8	5.5	21.8	9.9	15.4	38%	59%	0.25
第二次	4.5	10.7	4.8	20	10.7	15.5	41%	59%	0.24
第三次	4.6	10.5	5.3	20.4	10.4	15.7	40%	60%	0.26
平均		10.7	5.2	20.9	10.3	15.5	39%	59%	0.25
柵面角度: 35度									
第一次	2.5	14.6	4.5	21.6	7.1	11.6	27%	44%	0.21
第二次	1.5	17.1	5.1	23.7	4	9.1	15%	35%	0.22
第三次	2.1	14.9	4.5	21.5	6.8	11.3	26%	43%	0.21
平均		15.5	4.7	22.7	6.0	10.7	23%	41%	0.21
柵棒長度: 30cm									
柵面角度: 5度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)
第一次	7.8	8	6.6	22.4	11.6	18.2	44%	69%	0.29
第二次	7.4	7.8	6.1	21.3	12.3	18.4	47%	70%	0.29
第三次	7.7	7.8	6.9	22.4	11.5	18.4	44%	70%	0.31
平均		7.87	6.5	21.9	11.8	18.3	45%	70%	0.30
柵面角度: 15度									
第一次	7.7	8	7	22.7	11.2	18.2	43%	69%	0.31
第二次	7	7	7.4	21.4	11.8	19.2	45%	73%	0.35
第三次	7.1	7.3	7.6	22	11.3	18.9	43%	72%	0.35
平均		7.43	7.3	22.1	11.4	18.8	44%	72%	0.33
柵面角度: 25度									
第一次	7.1	7.8	7.6	22.5	10.8	18.4	41%	70%	0.34
第二次	8	7.8	8	23.8	10.4	18.4	40%	70%	0.34
第三次	7.8	7	8.1	22.9	11.1	19.2	42%	73%	0.35
平均		7.53	7.9	23.2	10.8	18.7	41%	71%	0.34
柵棒長度: 40cm									
柵面角度: 5度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)
第一次	9.3	4.8	7.8	21.9	13.6	21.4	52%	82%	0.36
第二次	9.5	5.1	8.5	23.1	12.6	21.1	48%	81%	0.37
第三次	8.7	5	8.3	22	12.9	21.2	49%	81%	0.38
平均		4.97	8.2	22.5	13.0	21.2	50%	81%	0.37
柵面角度: 15度									
第一次	8.8	4.3	8.5	21.6	13.4	21.9	51%	84%	0.39
第二次	9.4	5.1	9.4	23.9	11.7	21.1	45%	81%	0.39
第三次	7.8	5.3	8.3	21.4	12.6	20.9	48%	80%	0.39
平均		4.90	8.7	22.8	12.6	21.3	48%	81%	0.39
柵面角度: 25度									
第一次	8.5	4.1	9.1	21.7	13	22.1	50%	84%	0.42
第二次	9.1	4.5	9.3	22.9	12.4	21.7	47%	83%	0.41
第三次	7.6	5.1	8.5	21.2	12.6	21.1	48%	81%	0.40
平均		4.57	9.0	22.3	12.7	21.6	48%	83%	0.41
柵棒長度: 50cm									
柵面角度: 5度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)
第一次	10	2.9	9.5	22.4	13.8	23.3	53%	89%	0.42
第二次	10.4	2.8	9.8	23	13.6	23.4	52%	89%	0.43
第三次	9.5	2.7	8.9	21.1	14.6	23.5	56%	90%	0.42
平均		2.8	9.4	22.7	14.0	23.4	53%	89%	0.42
柵面角度: 15度									
第一次	8.1	3	9.5	20.6	13.7	23.2	52%	89%	0.46
第二次	8.5	3.2	9.6	21.3	13.4	23	51%	88%	0.45
第三次	7.8	3.1	10.3	21.2	12.8	23.1	49%	88%	0.49
平均		3.1	9.8	21.0	13.3	23.1	51%	88%	0.47
柵面角度: 25度									
第一次	8.2	3.4	11	22.6	11.8	22.8	45%	87%	0.49
第二次	8	3.7	11.1	22.8	11.4	22.5	44%	86%	0.49
第三次	7.6	3.1	10.5	21.2	12.6	23.1	48%	88%	0.50
平均		3.4	10.9	22.7	11.9	22.8	46%	87%	0.49

柵面角度為透水柵架設後的實際篩分角度  
W1=柵面上滯留土石量 單位:kg W2=越柵落入主河道土石量  
W3=穿過柵棒間隙落入分河道的細砂土石量  
V2=柵上攔阻總土石量=未置柵體土石流流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置柵體土石流流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水柵土石總流出量  
R2總攔阻率=V3/未置透水柵土石總流出量  
篩分比=穿過柵棒間隙之細砂土石量佔流過上游壩總土石量之比值=W3/V1

上下游壩高度:							
渠槽	架設方式(θ)	柵面角度(θs)	sin θ	上游壩高度	下游壩高度(L=20cm)	下游壩高度(L=30cm)	下游壩(L=40cm) 下游壩(L=50cm)
渠槽25度	逆坡10度	15	0.1736	15cm	18.47cm	20.21cm	21.95cm 23.68cm
渠槽25度	順坡0度	25	0	15cm	15cm	15cm	15cm
渠槽25度	順坡10度	35	0.1736	20cm	16.53m	14.79cm	11.05cm 11.32cm
渠槽25度	順坡20度	45	0.342	20cm	13.16cm	9.74cm	6.32cm 2.9cm

試驗紀錄表(五) 柵棒間距:1.3cm(渠槽坡度20度)

柵棒長度:20cm										
柵面角度:10度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	4.5	10.5	4.4	19.4	12.7	17.1	46%	62%	0.23	
第二次	5.6	10	4.8	20.4	12.8	17.6	46%	64%	0.24	
第三次	6	11	4.5	21.5	12.1	16.6	44%	60%	0.21	
平均		10.50		20.4	12.5	17.1	45%	62%	0.22	
柵面角度:20度										
第一次	5.3	10.8	5.5	21.6	11.3	16.8	41%	61%	0.25	
第二次	5.1	10.3	5.2	20.6	12.1	17.3	44%	63%	0.25	
第三次	4.9	10.8	5	20.7	11.8	16.8	43%	61%	0.24	
平均		10.63		21.0	11.7	17.0	43%	61%	0.25	
柵面角度:30度										
第一次	4.2	11.4	5.7	21.3	10.5	16.2	38%	59%	0.27	
第二次	3.4	10.8	6	20.2	10.8	16.8	39%	61%	0.30	
第三次	4.2	10.6	5.5	20.3	11.5	17	42%	62%	0.27	
平均		10.93		20.6	10.9	16.7	40%	60%	0.28	
柵面角度:40度										
第一次	1.2	15.1	4.5	20.8	8	12.5	29%	45%	0.22	
第二次	1.6	17.4	4.2	23.2	6	10.2	22%	37%	0.18	
第三次	2.1	17.9	5.1	25.1	4.6	9.7	17%	35%	0.20	
平均		16.80		23.0	6.2	10.8	22%	39%	0.20	
柵棒長度:30cm										
柵面角度:10度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	7.4	8.6	6.6	22.6	12.4	19	45%	69%	0.29	
第二次	7.7	8.7	7.1	23.5	11.8	18.9	43%	68%	0.30	
第三次	6.5	7.7	6.9	21.1	13	19.9	47%	72%	0.33	
平均		8.33		22.4	12.4	19.3	45%	70%	0.31	
柵面角度:20度										
第一次	7.4	8	7.6	23	12	19.6	43%	71%	0.33	
第二次	7.1	7.7	8.4	23.2	11.5	19.9	42%	72%	0.36	
第三次	8.1	8.1	7.4	23.6	12.1	19.5	44%	71%	0.31	
平均		7.93		23.3	11.9	19.7	43%	71%	0.34	
柵面角度:30度										
第一次	6.6	8.2	8.8	23.6	10.6	19.4	38%	70%	0.37	
第二次	6.9	9	8.2	24.1	10.4	18.6	38%	67%	0.34	
第三次	7	8.4	8.6	24	10.6	19.2	38%	70%	0.36	
平均		8.53		23.9	10.5	19.1	38%	69%	0.36	
柵棒長度:40cm										
柵面角度:10度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	8	5.2	8.6	21.8	13.8	22.4	50%	81%	0.39	
第二次	8.4	5.9	7.9	22.2	13.8	21.7	50%	79%	0.36	
第三次	9.1	6	8.3	23.4	13.3	21.6	48%	78%	0.35	
平均		5.70		22.5	13.6	21.9	49%	79%	0.37	
柵面角度:20度										
第一次	9	5.3	9.5	23.8	12.8	22.3	46%	81%	0.40	
第二次	8.9	5.6	9	23.5	13	22	47%	80%	0.38	
第三次	8.5	5.4	9.1	23	13.1	22.2	47%	80%	0.40	
平均		5.43		23.4	13.0	22.2	47%	80%	0.39	
柵面角度:30度										
第一次	5.6	5.7	9.9	21.2	12	21.9	43%	79%	0.47	
第二次	5	5.2	9.6	19.8	12.8	22.4	46%	81%	0.48	
第三次	4.8	6	9.3	20.1	12.3	21.6	45%	78%	0.46	
平均		5.63		20.4	12.4	22.0	45%	80%	0.47	
柵棒長度:50cm										
柵面角度:10度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	8.9	3.9	9.5	22.3	14.2	23.7	51%	86%	0.43	
第二次	9.2	3.1	10	22.3	14.5	24.5	53%	89%	0.45	
第三次	9.1	4.1	9.6	22.8	13.9	23.5	50%	85%	0.42	
平均		3.70		22.5	14.2	23.9	51%	87%	0.43	
柵面角度:20度										
第一次	8.8	4.1	11.1	24	12.4	23.5	45%	85%	0.46	
第二次	9.8	3.9	11.5	25.2	12.2	23.7	44%	86%	0.46	
第三次	8	4	10.5	22.5	13.1	23.6	47%	86%	0.47	
平均		4.00		23.9	12.6	23.6	46%	86%	0.46	
柵面角度:30度										
第一次	5.5	4	11.6	21.1	12	23.6	43%	86%	0.55	
第二次	6.1	4.3	11.4	21.8	11.9	23.3	43%	84%	0.52	
第三次	6.3	3.9	11.6	21.8	12.1	23.7	44%	86%	0.53	
平均		4.07		21.6	12.0	23.5	43%	85%	0.53	

柵面角度為透水柵架設後的實際篩分角度  
W1=柵面上濕土石量 單位:kg W2=越柵落入主河道土石量  
W3=穿過柵棒間隙落入分河道的細砂石量  
V2=柵上攔阻總土石量=未置柵體土石流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置柵體土石流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水柵土石總流出量  
R2總攔阻率=V3/未置透水柵土石總流出量  
篩分比=穿過柵棒間隙之細砂石量佔流過上游壩總土石量之比值=W3/V1

上下游壩高度:										
渠槽	架設方式(θ)	柵面角度(θs)	sin θ	上游壩高度	下游壩高度(L=20cm)	下游壩高度(L=30cm)	下游壩(L=40cm)	下游壩(L=50cm)		
渠槽25度	逆坡10度	15	0.1736	15cm	18.47cm	20.21cm	21.95cm	23.68cm		
渠槽25度	順坡0度	25	0	15cm	15cm	15cm	15cm	15cm		
渠槽25度	順坡10度	35	0.1736	20cm	16.53cm	14.79cm	11.05cm	11.32cm		
渠槽25度	順坡20度	45	0.342	20cm	13.16cm	9.74cm	6.32cm	2.9cm		



試驗紀錄表(六) 柵棒間距:1.3cm(渠槽坡度25度)

柵棒長度:20cm										
柵面角度:15度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	5.2	11	4.2	20.4	13.9	18.1	48%	62%	0.21	
第二次	5.7	11.3	4.5	21.5	13.3	17.8	46%	61%	0.21	
第三次	4.8	11	5.1	20.9	13	18.1	45%	62%	0.24	
平均		11.10	4.6	20.9	13.4	18.0	46%	62%	0.22	
柵面角度:25度										
第一次	5.1	11.6	5.3	22	12.2	17.5	42%	60%	0.24	
第二次	4.5	11.9	5.5	21.9	11.7	17.2	40%	59%	0.25	
第三次	4.1	12	5.2	21.3	11.9	17.1	41%	59%	0.24	
平均		11.83	5.3	21.7	11.9	17.3	41%	59%	0.25	
柵面角度:35度										
第一次	4.3	12.5	4.7	21.5	11.9	16.6	41%	57%	0.22	
第二次	3.5	12.1	5	20.6	12	17	41%	58%	0.24	
第三次	2.1	12	4.9	19	12.2	17.1	42%	59%	0.26	
平均		12.20	4.9	20.4	12.0	16.9	41%	58%	0.24	
柵面角度:45度										
第一次	1.3	16.4	3.2	20.9	9.5	12.7	33%	44%	0.15	
第二次	1.6	16.9	3.8	22.3	8.4	12.2	29%	42%	0.17	
第三次	0.8	19.1	4	23.9	6	10	21%	34%	0.17	
平均		17.47	3.7	22.4	8.0	11.6	27%	40%	0.16	
柵棒長度:30cm										
柵面角度:15度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	6.9	7.9	6.6	21.4	14.6	21.2	50%	73%	0.31	
第二次	7.2	8.4	7.6	23.2	13.1	20.7	45%	71%	0.33	
第三次	6.5	8	6.8	21.3	14.3	21.1	49%	72%	0.32	
平均		8.10	7.0	22.0	14.0	21.0	48%	72%	0.32	
柵面角度:25度										
第一次	6	8.8	7.9	22.7	12.4	20.3	43%	70%	0.35	
第二次	6.2	8.6	8	22.8	12.5	20.5	43%	70%	0.35	
第三次	7	8.9	8.1	24	12.1	20.2	42%	69%	0.34	
平均		8.77	8.0	23.2	12.3	20.3	42%	70%	0.35	
柵面角度:35度										
第一次	3.5	9.3	8.2	21	11.6	19.8	40%	68%	0.39	
第二次	2.9	9.3	8.3	20.5	11.5	19.8	40%	68%	0.40	
第三次	3.4	10.1	8.6	22.1	10.4	19	36%	65%	0.39	
平均		9.57	8.4	21.2	11.2	19.5	38%	67%	0.39	
柵面角度:45度										
第一次	2	10.8	7.9	20.7	10.4	18.3	36%	63%	0.38	
第二次	2.1	11	7.3	20.4	10.8	18.1	37%	62%	0.36	
第三次	3	11.5	7.6	22.1	10	17.6	34%	60%	0.34	
平均		11.10	7.6	21.1	10.4	18.0	36%	62%	0.36	
柵棒長度:40cm										
柵面角度:15度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	8.6	6	8.4	23	14.7	23.1	51%	79%	0.37	
第二次	8.9	5.8	9	23.7	14.3	23.3	49%	80%	0.38	
第三次	8.1	5.8	8.6	22.5	14.7	23.3	51%	80%	0.38	
平均		5.87	8.7	23.1	14.6	23.2	50%	80%	0.38	
柵面角度:25度										
第一次	9	6.4	9.8	25.2	12.9	22.7	44%	78%	0.39	
第二次	8.8	5.2	9.4	24.1	13.8	23.2	47%	80%	0.39	
第三次	8.5	5.7	10.1	24.3	13.3	23.4	46%	80%	0.42	
平均		6.00	9.8	24.5	13.3	23.1	46%	79%	0.40	
柵面角度:35度										
第一次	4.5	7.4	10	21.9	11.7	21.7	40%	75%	0.46	
第二次	5.5	7.7	9.6	22.8	11.8	21.4	41%	74%	0.42	
第三次	3.9	7.5	9.5	20.9	12.1	21.6	42%	74%	0.45	
平均		7.53	9.7	21.9	11.9	21.6	41%	74%	0.44	
柵面角度:45度										
第一次	3.5	8.9	8.7	21.1	11.5	20.2	40%	69%	0.41	
第二次	3.6	9.1	8.9	21.6	11.1	20	38%	69%	0.41	
第三次	2.8	9.4	9.1	21.3	10.6	19.7	36%	68%	0.43	
平均		9.13	8.9	21.3	11.1	20.0	38%	69%	0.42	
柵棒長度:50cm										
柵面角度:15度	w1(柵面土石)	w2(越柵土石)	w3(穿過柵棒間隙土石)	V1(越過上游壩土石量)	V2(柵上攔阻的總土石量)	V3(攔阻的總土石量含分河道砂石)	R1(柵上貯砂率)	R(總攔阻率)	S(篩分比)	
第一次	8.8	3.8	11	23.6	14.3	25.3	49%	87%	0.47	
第二次	9.1	3.5	10.6	23.2	15	25.6	52%	88%	0.46	
第三次	8.1	4.1	10.5	22.7	14.5	25	50%	86%	0.46	
平均		3.80	10.7	23.2	14.6	25.3	50%	87%	0.46	
柵面角度:25度										
第一次	6.8	3.6	11.5	21.9	14	25.5	48%	88%	0.53	
第二次	7.1	4	11.3	22.4	13.8	25.1	47%	86%	0.50	
第三次	7.6	3.8	11.3	22.7	14	25.3	48%	87%	0.50	
平均		3.80	11.4	22.3	13.9	25.3	48%	87%	0.51	
柵面角度:35度										
第一次	4.5	4.2	12	20.7	12.9	24.9	44%	86%	0.58	
第二次	4.1	4	12.1	20.2	13	25.1	45%	86%	0.60	
第三次	5.5	4.8	12.6	22.9	11.7	24.3	40%	84%	0.55	
平均		4.33	12.2	21.3	12.5	24.8	43%	85%	0.58	
柵面角度:45度										
第一次	2.8	7.9	12.9	23.6	8.3	21.2	29%	73%	0.55	
第二次	2.7	8.1	13.3	24.1	7.7	21	26%	72%	0.55	
第三次	3.1	8.1	13.5	24.7	7.5	21	26%	72%	0.55	
平均		8.03	13.2	24.1	7.8	21.1	27%	72%	0.55	

柵面角度為透水柵架設後的實際柵分角度  
W1=柵面上滯土石量 單位:kg W2=越柵落入主河道土石量  
W3=穿過柵棒間隙落入分河道的細砂石量  
V2=柵上攔阻總土石量-未置柵體土石流出量-W2-W3  
V3=攔阻的總土石量含分河道細顆粒砂石=未置柵體土石流出量-W2  
R1貯砂率=V2/未置透水柵土石總流出量  
R總攔阻率=V3/未置透水柵土石總流出量  
S篩分比=穿過柵棒間隙之細砂石量佔流過上游壩總土石量之比值=W3/V1

渠槽	架設方式(θ)柵面角度(θs)	sin θ	上游壩高度	下游壩高度(L=20cm)	下游壩高度(L=30cm)	下游壩(L=40cm)	下游壩(L=50cm)
渠槽25度	逆坡10度	15	0.1736	15cm	18.47cm	20.21cm	21.95cm 23.68cm
渠槽25度	順坡0度	25	0	15cm	15cm	15cm	15cm
渠槽25度	順坡10度	35	0.1736	20cm	16.53m	14.79cm	11.05cm 11.33cm
渠槽25度	順坡20度	45	0.342	20cm	13.16cm	9.74cm	6.32cm 2.9cm