

出版編號：SWCB-106-044

**透水式固床工之工法研發與水理特性研究
(二、三)**

**Innovation of permeable groundsills and
assessment of its hydraulic characteristics
(II、III)**

執行單位：國立屏東科技大學

執行期間：106 年 02 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳嘉俊 教授

研究人員：陳宥達、張之馨、謝采樺、張為勝

協助人員：邱心柔、唐翊婷、李伯賢、沈珮君、許湘晴、

黃芊華

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 106 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)

摘要

固床工為國內慣用的野溪整治工法，雖其功能已被確定，但水域的區間化及固床工趾部的局部淘刷問題至今仍未能舒緩。本計畫之目的，乃是藉由室內水工試驗，探討透水式固床工對於水域區間化及固床工趾部局部淘刷的改善可行性，並藉由室內試驗研發可行的透水式固床工，以做為未來實務設計之參考。

本計畫為連續計畫，接續第一年度的研究成果，持續測試不同通透率的透水式固床工。第一年度水工試驗，包含傳統式固床工，及通透率 7%、68% 兩種透水式固床工，共計 81 組試驗，今年度則增加兩組通透率的固床工模型；其中一款透水式固床工的通透率為 32%、另一款的通透率為 50%，共計 54 組試驗。兩年度的試驗參數均包含流量、渠床坡降、床質粒徑。試驗期間除量測固床工趾部的最大淘刷深度、最大淘刷深度發生位置，以及試驗前後渠床動床地形 3D 變化外，更進一步利用因次分析，獲得透水式固床工趾部最大淘刷的深長比公式。

關鍵詞：透水式固床工、局部淘刷控制、野溪整治

Innovation of permeable groundsills and assessment of its hydraulic characteristics (II, III)

Abstract

Groundsill is one of the common practices implemented for stream training. Functions of groundsills have been verified, however, dissecting stream channel and local scour at the groundsill toe are still required attention. Therefore the objectives of this study are to assess the feasibility of permeable groundsills in scour reduction and to provide suggestions for field implementation.

This study extends the research finding from the first year during which traditional groundsill as well as groundsills with two distinct permeability; namely 7% and 68%; were tested. Total of 81 experiments were conducted. Two additional groundsills with permeability of 32% and 50% were tested this year, and total of 54 runs were carried out under combinations of flow rates, channel gradients, and bed material sizes. Maximum scour depth at the toe of groundsill, location of the maximum scour depth, as well as 3-D scanning of channel bed elevations were measured. In addition, dimensional analysis was performed to obtain an empirical equation of scour depth-length ratio for permeable groundsills.

Keywords: Permeable Groundsills, Local Scour Control, Stream Training

目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 緒論.....	1-1
第二章 前人研究	2-1
第一節 固床工間距相關研究	2-1
第二節 橫向構造物之淘刷相關研究	2-6
第三節 橫向構造物改良之相關研究	2-14
第三章 試驗材料與方法	3-1
第一節 試驗材料	3-1
第二節 試驗方法	3-8
第三節 水工試驗之適用	3-11
第四節 透水式固床工模型之設計計畫	3-12
第四章 結果與討論	4-1
第一節 固床工趾部渠床局部淘刷試驗資料整合與分析	4-1
第二節 水流流況、土砂移動情形與水理特性比較	4-5

一、傳統式固床工.....	4-5
二、透水式 A 型固床工	4-10
三、透水式 B 型固床工	4-15
四、透水式 C 型固床工	4-21
五、透水式 D 型固床工	4-25
第三節 固床工趾部局部淘刷之複迴歸分析	4-28
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1

表次

表 3-1 水工試驗參數	3-錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-1 傳統式、透水式 A 型及透水式 B 型固床工實驗資料摘錄...4-	
34	
表 4-2 固床工趾部局部淘刷無因次 II 項分析摘錄.....	4-36

圖次

圖 1-1 固床工造成溪床水域的區間化.....	1-2
圖 1-2 固床工趾部的局部淘刷現象.....	1-3
圖 1-3 固床工趾部的局部淘刷現象.....	1-4
圖 1-4 鋼軌格柵透水式潛壩	1-5
圖 2-1 不同帶工間距下帶工間之渠床淘刷情形 (WU, 2002).....	2-4
圖 2-2 不同底床坡度對固床工下游淘刷深度之影響 (WU, 2002)...	2-4
圖 2-3 GAUDIO, ETAL. (2000) 提出之淘刷坑觀念示意圖	2-8
圖 3-1 試驗渠槽與固床工模型配置示意圖	3-2
圖 3-2 透水式 A 型固床工模型.....	3-4
圖 3-3 透水式 B 型固床工模型.....	3-5
圖 3-4 透水式 C 型固床工模型.....	3-6
圖 3-5 透水式 D 型固床工模型.....	3-6
圖 3-6 試驗床砂之粒徑分佈	3-7
圖 3-7 固床工趾部局部淘刷之量測參數.....	3-9
圖 3-8 固床工間渠床與水面高程量測斷面位置示意圖.....	3-10
圖 3-9 局部淘刷及渠床 3D 掃描量測設備配置	3-11

圖 4-1 資料整合所產出之等高線及 3D 立體圖	4-2
圖 4-2 淘刷段與堆積段的分割	4-3
圖 4-3 傳統式固床工於其後方未淤滿時的水流動向示意圖	4-6
圖 4-4 傳統式固床工趾部渠床局部淘刷初期作用示意圖	4-8
圖 4-5 傳統式固床工趾部局部淘刷後期之發展示意圖	4-8
圖 4-6 傳統式固床工渠床淘刷之全景攝影 ($S=0.06$ 、 $D_{50}=0.85\text{MM}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{CMS}$)	4-9
圖 4-7 透水式 A 型固床工通透結構體之孔隙分布	4-10
圖 4-8 透水式 A 型固床工的初期通水情形	4-11
圖 4-9 溢淹過透水式 A 型固床工的投潭水流	4-11
圖 4-10 透水式 A 型固床工渠床淘刷之全景攝影 ($S=0.06$ 、 $D_{50}=0.85\text{MM}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{CMS}$) (孔隙通暢時)	4-12
圖 4-11 透水式 A 型固床工渠床淘刷之全景攝影 ($S=0.06$ 、 $D_{50}=0.85\text{MM}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{CMS}$) (孔隙堵塞後)	4-14
圖 4-12 傳統式與透水式 A 型固床工之投潭水流比較	4-14
圖 4-13 水流穿越透水式 B 型固床工通透格柵的情形	4-16
圖 4-14 透水式 B 型固床工於試驗初期時的水流與淘刷機制示意圖	4-17
圖 4-15 透水式 B 型固床工間淘刷坑交錯發展的情形 ($S=0.08$ 、 $D_{50}=1.45\text{MM}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{CMS}$)	4-18

圖 4-16 透水式 B 型固床工間渠床淘刷之發展.....	4-19
圖 4-17 水流溢淹漫過透水式 C 型固床工造成投潭的情形.....	4-22
圖 4-18 透水式 C 型固床工保護下渠床的淘刷結果.....	4-24
圖 4-19 水流穿過透水式 D 型固床工時的情形	4-26
圖 4-20 透水式 D 型固床工溢流投潭及淘刷結果	4-27
圖 4-21 透水式 D 型固床工保護下渠床的淘刷結果.....	4-28
圖 4-22 水深量測位置及淘刷規模示意圖	4-29

第一章 緒論

水土保持的業務除水土資源保育之外，治山防災業務亦為重點工作；其中對於野溪的整治，亦為重點項目之一。過去針對野溪整治的訴求，多以保全對象的安全為優先考量，近年來由於自然生態及環境保育觀念受到重視，因此，如何精進野溪整治所加設之橫向構造物 (transverse structures) 的設計，以符合安全、保全以及自然生態環境永續的要求，已成為現階段治山防災的重點。

溪流整治工作中常用的橫向構造物，其主要功能在於減緩溪床坡降、穩定流心、防止溪床縱向淘刷、橫向侵蝕、溪岸崩塌，並依設計上的功能需求，使得橫向構造物甚至具備調節河道泥砂的功能。基於其減緩溪床坡降的功能，橫向構造物亦可自英文原文的 grade-control structure 直譯為坡降控制構造物，國內則依據橫向構造物的有效高度進行分類，而衍生出防砂壩、潛壩、固床工等名辭；部份地區甚至將緊貼於溪床表面的橫向構造物稱之為帶工。

國內過去對於「固床工」或「帶工」的定義區分，建構在橫向構造物頂部凸出溪床表面的高度及溢流口設置之有無。若橫向構造物之頂部高程與設計溪床線平齊且不設置溢流口者，稱之為帶工或潛檻。若橫向構造物頂部突出於溪床者，稱之為固床工 (李木青，1992)。

無論使用名稱於國內工程界或行政認定上的多樣性，橫向構造物

已證明可於治山防災工作中發揮防災、減災的功能，但卻也因為橫向構造物的構築，將自然溪流調整成階梯狀。如此的整治模式，使得原本通暢的溪流流路受到橫向構造物的影響而截成區間（圖 1-1）。當河道被分隔成區間後，水生生物的棲息環境因此而發生改變，其中最大的改變當屬溪流流況、橫向構造物下游溪流深潭、淺灘與湍瀨的失衡，以致水棲生物族群改變，最後導致溪流食物鏈的瓦解 (Biedenharn and Hubbard, 2001)。



圖 1-1 固床工造成溪床水域的區間化

近自然生態工法 (near-nature ecologic engineering) 自 2003 年開始在國內推動以來，就野溪整治工作而言，其預期目標在於打破傳統治理工法與其設計邏輯，朝向「表面粗糙化」、「壩高低矮化」、「岸坡

平緩化」、「材質自然化」及「施工經濟化」等方向努力。開口式防砂壩、魚梯、踏步式固床工、開口式固床工及透水式鋼結構等，均為野溪整治朝向「五化」發展的產物。

橫向構造物的有效高度影響溪水越過構造物頂部的投潭效應 (plunge-flow effect)，而造成橫向構造物趾部局部淘刷 (local scour) 的原因，在於構造物頂緣與其下游溪床間高程落差所形成的投潭水流，固床工趾部的局部淘刷，甚至可能衝擊固床工的基礎安全 (圖 1-2)。國內過去曾以改變固床工的設計形式；例如開口式(或稱踏步式)固床工、淺碟式固床工，以降低固床工的投潭衝擊 (施東榮，2003)。



圖 1-2 固床工趾部的局部淘刷現象

國內過去亦曾經有嘗試試用透水式固床工的案例，如圖 1-3 及 1-4 所示，其中多於固床工的溢流口位置加設鋼軌或 H 型鋼，以形成

格栅。格栅透水式固床工的設計理念，不外乎在於 (1).增加土砂通過的機會、(2).減少土砂於固床工後方的堆積、(3).降低投潭水流的高程落差、(4).提供水棲生物棲息或躲藏的空間等。雖然於現場調查中，曾經發現溪蟹利用格栅與柵間回填塊石的間隙活動及躲藏的現象，但現場勘查發現，由於大部分的格栅多已出現土砂淤積現象，使得溪蟹活動的空間仍多侷限於格栅透水式固床工的下游牆面縫隙。除此之外，格栅透水式固床工趾部的局部淘刷現象並沒有因為格栅的構築而有所改善。因此，本計畫的目的，在於了解透水式固床工於不同通透率情況下對於溪床水流水理現象的改變，進而研發較為適宜的橫向構造物，以達到野溪整治之安全、保全、永續的最終目標。



圖 1 - 3 固床工趾部的局部淘刷現象



圖 1-4 鋼軌格柵透水式潛壩

本計畫為三年期計畫，105 及 106 年度的工作項目及計畫目標如下：

105 年度：

(一) 工作項目：

1. 透水式固床工設計、透水率訂定及與模型製作：先行設計數種透水式固床工，設計的重點必須考量未來現場施工的可行性、結構的安全性、結構的透水性等，並對透水式固床工的透水率進行標準訂定，以量化透水率。接著，依據所設計的透水式固床工，製作 1:50 縮尺的固床工模型，以供水工試驗測試使用。
2. 試驗渠槽整備：本研究將於國立屏東科技大學水土保持系

的陡坡水工實驗室中進行，水工模型試驗的參數擬包含：

- (1) 3 種渠槽坡降，(2) 3 種試驗流量，(3) 3 種床砂粒徑，
- (4) 3 種透水率的透水式固床工，其中包含傳統式固床工做為對照組，水工模型試驗的最大總組數預計達 81 組。

- 3. 資料分析：針對水工模型試驗所量測的參數進行資料分析，其中包含因次分析、固床工下游渠床淘刷分析等。

4. 文獻搜尋

5. 報告撰寫

(二) 年度計畫目標：

- 1. 瞭解透水式固床工的水理特性。
- 2. 提出透水式固床工用於野溪治理的優缺點評估。
- 3. 利用水工試驗，測試不同透水率的固床工。

106 年度：

(一) 工作項目：

- 1. 透水式固床工設計、透水率訂定及與模型製作：延續 105 年度的水工試驗，增加兩種通透率的透水式固床工模型設計，設計的重點，乃參照 105 年度計畫執行的成果、水工試驗的觀察紀錄，優先考量結構的透水性。
- 2. 試驗渠槽整備：本研究將於國立屏東科技大學水土保持系

的陡坡水工實驗室中進行 1:50 縮尺的水工模型試驗。試驗參數擬包含：(1) 3 種渠槽坡降，(2) 3 種試驗流量，(3) 3 種床砂平均粒徑，(4) 2 種通透率的透水式固床工，水工模型試驗的最大總組數預計達 54 組。

3. 資料分析：針對水工模型試驗所量測的參數，併同 105 年度的試驗量測參數進行資料分析，其中包含固床工下游渠床淘刷分析、105 年度試驗量測參數的無因次複迴歸分析、影響因子與淘刷規模分析等。

4. 文獻搜尋

5. 報告撰寫

(二) 年度計畫目標：

1. 瞭解本年度新設計的透水式固床工的水理特性。
2. 利用水工試驗，測試不同透水率的固床工，並提出設計建議，以提供做為野溪治理的設計參考。

第二章 前人研究

國內外過去進行透水式固床工相關試驗研究的案例甚少，大多集中於固床工間距、固床工趾部的局部淘刷、固床工的設計改良上。

第一節 固床工間距相關研究

張則安 (1994) 以溪床床面阻力分佈並假設阻力係數具有可加性的概念，利用 3 組均勻砂及 2 組非均勻砂進行清水流之室內動床淘刷試驗，以探討固床工形狀阻力 (form resistance) 與其設置密度之關係，進而推導出固床工間距的推估公式如下：

$$\frac{L}{L_0} = 10^{9.8} \left(\frac{h}{R} \right)^{-3.46} \left(\frac{\nu}{UR} \right)^{-5.1} \left(\frac{gR}{U^2} \right)^{-3} \left(\frac{\tau_g}{\rho U^2} \right)^{-3.9} \quad [1]$$

式中， L = 固床工間距 (m)、 L_0 = 固床工設置段之總長 (m)、 h = 固床工高 (m)、 R = 水力半徑 (m)、 ν = 流體運動粘滯係數 (m^2/s)、 U = 流速 (m/s)、 g = 重力加速度 (m/s^2)、 τ_g = 固床工形狀阻力 (N/m^2)、 ρ = 流體密度 (kg/m^3)、 $\left(\frac{\nu}{UR} \right)$ = 雷諾數 (Reynolds Number) 倒數、 $\left(\frac{gR}{U^2} \right)$ = 福祿數 (Froude Number) 平方倒數。

游繁結 (1996) 自 1993 年至 1995 年辦理行政院農業委員會委託「固床工間距之調查與研究」計畫，藉由水工模型試驗及現場調查，

推導出固床工的間距公式。現場調查包含台東及台中市大坑附近設有固床工的野溪共計 28 條，現場調查項目包含固床工間距、有效壩高及壩厚、固床工下游沖刷長度及深度、底床寬及水深、溪床坡度、床質粒徑等。水工模型試驗則採加砂試驗，試驗參數包含流量、間距、固床工高度、床質粒徑、坡度等 5 項，共計進行 320 組試驗，並對室內水工試驗資料所推導出的固床工間距公式進行檢核，得到以下的固床工間距設計公式：

$$L = 4.67 \frac{d_{65}^{0.14}}{H^{0.73} S^{0.45}} \quad [2]$$

式中， L = 固床工間距 (m)、 d_{65} = 累積通過 65% 之床質代表粒徑 (m)、 H = 設計水深 (m)、 S = 原溪床坡度 (%)。

劉世昌 (1997) 以台東 8 條已整治野溪所採用帶工下游淘刷坑的幾何形狀進行分析，訂定出適用於台東海岸山脈泥岩地不同床質粒徑的帶工間距設計公式：

$$L = \frac{100 \times H}{1.2 + 1.5 \times S} \quad ; \quad \text{床質粒徑偏大者} \quad [3]$$

$$L = \frac{100 \times H}{4.5 + 1.1 \times S} \quad ; \quad \text{床質粒徑偏小者} \quad [4]$$

式中， L = 帶工間距 (m)、 H = 帶工設計高度 (m)、 S = 設計坡度 (%)。

吳嘉俊 (2001) 自 1998 年至 2000 年辦理行政院農業委員會委託「固床工間連續帶工間距之研究」計畫，以 1:50 縮尺之水工模型試驗，探討不同流量、溪床床質代表粒徑、溪床坡降、帶工間距等參數與帶工下游溪床淘刷幾何形狀的關係。試驗中除量測帶工下游溪床淘刷之幾何斷面外，更利用微型皮托管量測不同流量、帶工間距及溪床坡度之帶工間的流速分布。

藉由 576 組水工模型試驗，將帶工下游溪床淘刷之幾何形狀歸納分類成淘刷 S 型、淘刷 M 型、淘刷 L 型等三種，如圖 2-1 所示。研究發現，帶工間的總淘刷量隨著帶工間距的增長而增加，且緊臨帶工的局部淘刷深度亦隨之增加。若單就溪床坡降而言，坡降愈陡，緊臨帶工的淘刷深度愈深，如圖 2-2 所示。

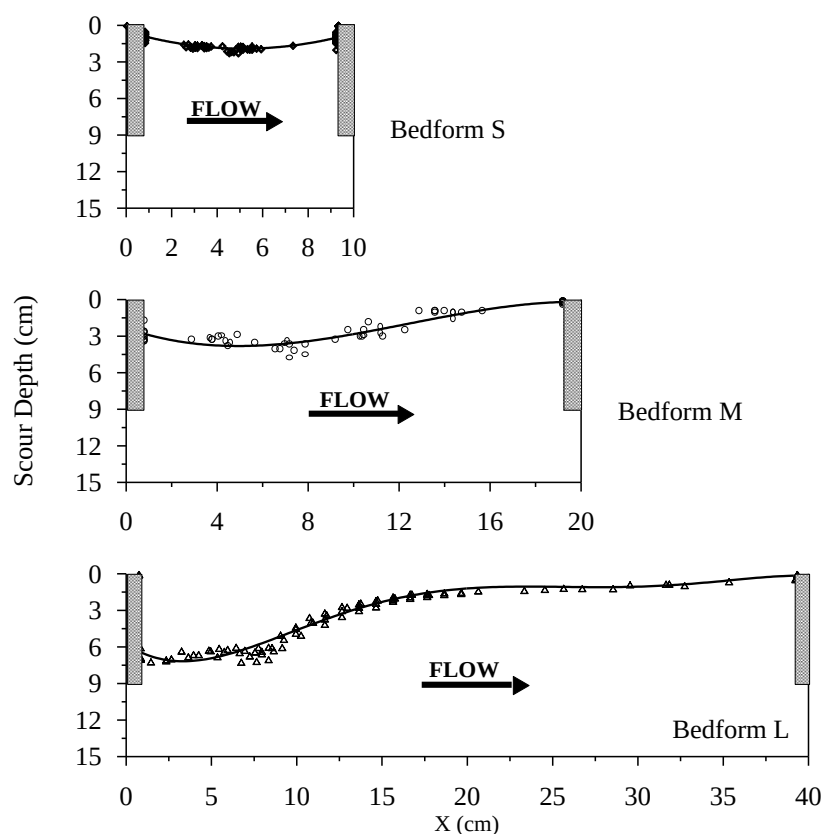


圖 2-1 不同帶工間距下帶工間之渠床淘刷情形 (Wu, 2002)

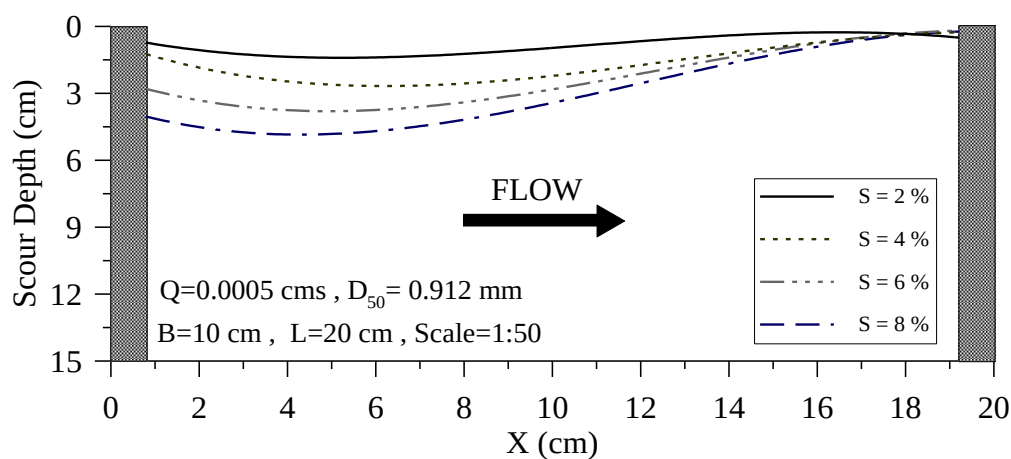


圖 2-2 不同底床坡度對固床工下游淘刷深度之影響 (Wu, 2002)

淘刷 S 型、M 型及 L 型等三種床型的發生，反映出帶工間距對於整治後溪流水理的影響。當帶工間距較密時，越頂而過的溪水會因

為下游帶工之存在所產生的迴水效應 (backwater effect) 而潛入流速較低的迴水層，使得潛入的水流流速下降，形成潛流水躍 (submerged-hydraulic jump)，進而影響其上游溪床淘刷坑的發展。當帶工間距增加後，下游帶工所產生之迴水效應會因此而下降，使得越過帶工的溪水能量消減受限，進而提供淘刷坑發展的機會。

雖然如此，當水流流量增加時，倘若相鄰兩帶工的間距仍足以提供足夠的迴水效應，且迴水長度涵蓋相鄰兩帶工的間距時，迴水效應仍得以發揮，此時就水理特性而言，溢流水不再具備投潭水流的特性，此時的水理特性與 Vischer & Hager (1998) 所著 Dam Hydraulics 中所提的似投潭水 (pseudo-plunge flow) 相符。

就淘刷 L 型而言，當實物帶工之間距為 20m 時，下游帶工所產生的迴水效應無法涵蓋上游相鄰帶工的基礎，此時，越過上游帶工頂的溪水無法因迴水效應而受惠，而直接對下游溪床投潭並進行淘刷。

經由室內水工模型試驗之結果，並以帶工構造物之基礎安全為優先考量，吳嘉俊 (2000) 提出最適帶工間距的設計公式如下：

$$L_I = 48.872 \frac{H}{\tan^2 \varphi} \left(\frac{Q}{\sqrt{Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3}} \right)^{-0.399} \quad [5]$$

式中， L_I = 帶工間距 (m)、 H = 帶工高度 (或帶工埋入深度；m)、 φ = 溪床床砂之水中安息角($^\circ$)、 Q = 設計洪峰流量 (cms)、 S_g = 溪床床

砂比重量 (specific gravity)、 B = 溪流整治段之幅寬 (m)、 h = 設計流量下整治段之正規水深 (normal depth; m)、 g = 重力加速度 (m/s^2)、 S = 溪床水力坡降、 D_{50} = 溪床床砂之中值粒徑 (m)。公式中

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\sqrt{Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3}} &= \frac{\rho Q^2}{\rho Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3} = \frac{\rho Q(VA)}{\rho(S_g - 1)gSD_{50}^3 Bh} \\ &= \frac{\rho QV}{\rho(S_g - 1)gSD_{50}^3} = \frac{\dot{m}V}{m_s gS} = \frac{m\dot{V}}{m_s gS} = \frac{ma}{m_s gS} \end{aligned} \quad [6]$$

所代表的物理意義為，水流作用力與溪床床砂之自重沿溪床床面方向分力之比值。

第二節 橫向構造物之淘刷相關研究

連惠邦 (2001) 以室內渠槽試驗，探討防砂壩之防砂功能及其下游河床演變與固床工整流的功能。研究成果指出防砂壩「上淤下沖」及固床工「先緩後沖」的泥砂輸移特性，並提出「產砂區位轉移效應」的觀念。該觀念認為，防砂壩與下游固床工不僅能夠將河流土砂生產區位轉移至下游，而且可以將河流上游土砂災害之高潛勢區移至下游低潛勢區河段。

經由不同固床工間距、渠槽坡降、流量、固床工下游沖刷率及水流功率的分析，推導出固床工的沖刷減少率公式：

$$\frac{S_{r0} - S_r}{\sqrt{gL}} = 8 \times 10^{-5} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.83} \left(\frac{L_0 - L}{L_0} \right)^{2.81} S^{1.23} \quad [7]$$

式中， S_{r0} = 未設置固床工時之河床平均沖刷率、 S_r = 設置固床工後之平均沖刷率、 L_0 = 河段長度、 L = 固床工間距、 W = 水流功率、 W_c = 泥砂顆粒臨界起動功率、 S = 河床平均坡降。

Gaudio, et al. (2000) 利用水工模型試驗探討固床工下游淘刷的情形。根據圖 2-3 的觀念，Gaudio, et al. 認為固床工下游淘刷坑的最大淘刷深度 (y_s) 與下列參數有關：

$$y_s = f(g, \nu, \rho, \rho_s, q, q_s, h_u, D_{50}, a_1) \quad [8]$$

式中， q = 單寬流量、 q_s = 單寬土砂流量、 h_u = 正規水深、 D_{50} = 床質中值粒徑、 a_1 = 型態落差 (morphological jump) = $(S_o - S_{eq})L$ ； S_o = 原設計坡降、 S_{eq} = 平衡輸砂坡降、 ρ = 流體密度、 ρ_s = 土砂密度。

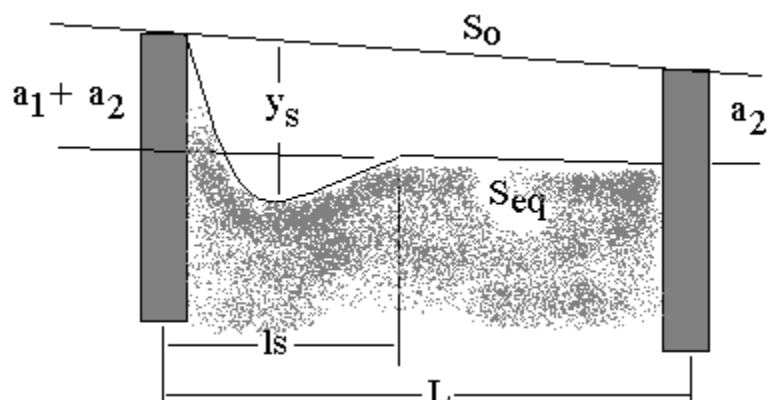


圖 2 - 3 Gaudio, et al. (2000) 提出之淘刷坑觀念示意圖

Gaudio, et al. 水工模型試驗的設計，乃是令相鄰兩固床工的間距具有足夠的長度使得下游相鄰固床工不會影響到上游淘刷坑的發展。經由水工模型試驗，Gaudio, et al 提出固床工下游淘刷坑深度 (y_s) 及淘刷坑長度 (l_s) 與臨界比能 (critical specific energy) 的比例公式如下：

$$\begin{aligned}\frac{y_s}{H_s} &= 0.189 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 0.266 \\ \frac{l_s}{H_s} &= 1.87 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 4.02\end{aligned}\quad [9]$$

式中， H_s = 臨界比能、 Δ = 泥砂之水中比重量 = ($S_g - 1$)。使用上述公式之前，必須先利用輸砂公式及 Shields 泥砂起動運動關係圖 (Shields' diagram)，找出該整治河道段的平衡輸砂坡降 S_{eq} 。

陳聖文 (2000) 以變換不同渠槽傾角、搭配定量流的方式，針對帶工投潭水流的冲刷進行研究，並提出最大冲刷深度、跌水數、坡度、

帶工長度與水流沖擊位置的經驗公式。研究結果發現，帶工佈置能使泥砂沖刷體積量減小，並使沖刷坑位置較遠離構造物，與無帶工佈置之對照組相比較發現，沖刷坑的平均最大刷深量減小 58%。當渠床配有帶工時，將有減力與消能的效果，並與無帶工佈置之對照組相互比較分析，顯示水流作用力衰弱約 32~35%，能量消滅約 58%。但是當渠床坡度變陡時，投潭水流的沖刷潛能及沖擊力會變大，導致泥砂較易被水流沖刷而帶動，因而使得沖刷現象加劇。

吳尚訓 (2000) 藉由清水流之渠槽試驗，探討固床工設置前後的泥砂運移情形，並透過不同保護範圍下泥砂體積變化的分析，瞭解固床工設置對河床穩定的效果。研究結果指出，隨著固床工間距的減小，可有效抑制部分床砂的運移，進而減緩河床的沖刷。除此之外，並採用水流功率與臨界啟動功率的觀念，推求平均沖刷率與其他相關因子之關係式如下：

$$\frac{S_{ra}}{\sqrt{gh}} = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.86} \left(\frac{L}{L_o} \right)^{0.37} S^{1.28} \quad [10]$$

式中， S_{ra} = 河床平均沖刷率、 W = 水流功率、 W_c = 泥砂顆粒之臨界起動功率、 L = 固床工間距、 L_o = 固床工保護段長度、 S = 渠槽坡度。

Lenzi, et al. (2002) 延續 Gaudio, et al. (2000) 的研究並將研究成果試用於坡度陡峻的山區野溪，更利用水工模型試驗進行驗證。研究

結果發現，淘刷坑的深度及長度與所採用的床砂 D_{95} 粒徑所計算之密度福祿數 (densimetric Froude Number) 相關性最高，並且 D_{95} 的大小約略等於最終淘刷坑坑內床砂粒料之中徑，最終推導出固床工下游淘刷坑深度 (y_s) 及淘刷坑長度 (l_s) 與臨界比能的比例公式如下：

$$\frac{y_s}{H_s} = 0.4359 + 1.4525 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{0.8626} + 0.0599 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.4908} \quad [11]$$

$$\frac{l_s}{H_s} = 4.479 + 0.023 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{-1.808} + 2.524 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.129} \quad [12]$$

結合設計洪峰流量並以整治段溪幅之單寬流量 (unit-width flow rate) 表示，同時考慮溪床淘刷坑幾何形狀特性與不同型態之水躍機制，Wu, et al. (2002) 將前述吳嘉俊研究資料進行重新整理，獲得帶工下游淘刷坑幾何形狀公式如下：

$$Y = \left(\frac{d_{sc}}{L_{sc}} \right) = f(\Pi) = 2.7046 \left(\frac{1}{(S_g - 1) D_{50} S L_I} \sqrt[3]{\frac{q^4}{g^2}} \right)^{-0.3384} \quad [13]$$

式中， d_{sc} = 帶工下游溪床最大淘刷深度 (m)、 L_{sc} = 帶工趾部至最大淘刷深度的水平距離 (m)、 q = 整治段的單寬流量 (cms/m)、 S_g = 床砂比重量、 g = 重力加速度 (m/s^2)、 S = 水力坡降、 D_{50} = 床砂中值粒徑 (m)。

除此之外，Wu, et al. (2002) 獲得連續帶工群帶工間距之設計公式如下：

$$L_I = \frac{0.156 \cdot q^{1.333}}{(S_g - 1) D_{50} S} (\tan \phi)^{0.3384} \quad [14]$$

王志豪 (2008) 透過現地固床工調查與固床工下游淘刷坑的實測資料，研究花蓮縣土石流災害防砂設施之功效，並將實測淘刷坑 2 區、22 組數據進行無因次化後，找出固床工下游淘刷坑所產生之最大淘刷深度與最大淘刷長度與臨界比能的比例迴歸方程式，式中的參數乃沿用 Gaudio, et al. (2000) 的淘刷坑定義：

$$\text{最大淘刷深度：} \frac{y_s}{H_s} = 0.318 + 2.314 \left(\frac{a_1}{H_s} \right) - 0.15 \left(\frac{a_1}{\Delta \cdot D_{50}} \right) \quad [15]$$

$$\text{最大淘刷長度：} \frac{l_s}{H_s} = 1.268 - 5.99 \left(\frac{a_1}{H_s} \right) + 0.33 \left(\frac{a_1}{\Delta \cdot D_{50}} \right) \quad [16]$$

Marion, et al. (2004) 探討固床工間距及渠床床砂粒徑對於固床工下游局部淘刷深度的影響，進而推導出最大淘刷深度 (y_s) 與臨界比能 (H_s) 比例的關係式：

$$\frac{y_s}{H_s} = 2.7 \left(\frac{a_l}{H_s} \right)^{0.43} SI^{-0.19} \left(1 - e^{-0.14 \frac{L}{H_s}} \right) \quad [17]$$

其中，

$$SI = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad [18]$$

Espa and Sibilla (2006) 利用水工模型試驗探討尾水 (tail water) 深度對潛堰 (submerged weir) 下游渠床平衡淘刷 (equilibrium scour) 的影響。研究結果發現，水流越過潛堰之後，其入潛射流 (submerged jet) 對於渠床淘刷的影響確實隨著尾水的深度而改變，且為水流密度福祿數的函數。試驗的結果並與 Schoklitsch 所提出的最大淘刷深度公式及 Shalash 的最大淘刷深度公式相比較 (Breusers and Raudkivi, 1991)。研究結果發現，Schoklitsch 公式所估算的最大淘刷深度與水工試驗結果差異較大，應該是與兩者的試驗設計差異有關。雖然 Shalash 所推估的最大淘刷深度優於 Schoklitsch，但部分的推估結果仍無法解釋床面射流 (bed-surface jet) 應該會產生的渠床淘刷現象。

Pagliara and Palermo (2006) 利用水工試驗探討漿砌塊石緩降洩槽式固床工下游的局部淘刷現象，而試驗的緩降洩槽式固床工包含緊密漿砌塊石、部分漿砌通透式。除此之外，並嘗試在漿砌塊石緩降洩槽式固床工的下游增設拋石保護工。研究結果發現，於漿砌塊石緩降洩槽式固床工下游適當地點增設拋石的作法，對於固床工下游渠床的淘刷具有抑制的功效，主要是因為增設的拋石保護工提供了類似尾檻

的功能，於漿砌塊石緩降洩槽式固床工的下游營造出一個迴水水墊的環境；但 Pagliara and Palermo 不建議在漿砌塊石緩降洩槽式固床工下游立即增設拋石，倘若立即於其下游增設，則隨著渠床坡度的增加，反而會產生另一次的溢流水躍。

Tregnaghi, et al. (2006) 探討上游加砂對於固床工下游局部淘刷的影響，並鎖定陡坡降條件進行試驗。試驗的渠槽坡降包含 4.2、5.0、6.2 及 7.4%，入流流量採用 18、22 及 26 L/s，上游加砂量則採用 10.7、21.3 及 26.0 g/s，以及不額外加砂的控制組。研究結果發現，上游若採用額外加砂，如同所預期的結果，固床工下游的淘刷規模會隨著上游加砂量的增加而減小，但局部淘刷的發展速率並不會因為上游額外加砂有所影響，因此，Tregnaghi, et al. 指出若要探討固床工下游的渠床局部淘刷現象，採用清水流試驗的方式是可以被信賴的。

Wu, et al. (2014)、吳嘉俊等 (2016) 利用水工縮尺試驗，探討固床工下游設置拋石對於固床工趾部渠床局部淘刷的控制效益。研究結果指出，固床工趾部拋石確實可以降低渠床局部淘刷的規模，但卻無法完全消除局部淘刷的發生。當拋石保護工以巨粒拋石構成時，由於巨粒拋石所營造較高的高程落差及較大的間隙，使得流經的水流容易從間隙流過，造成渠床淘刷，且淘刷坑發生的位置較容易在拋石末端發生。拋石保護工的長度也會影響其對於固床工趾部渠床局部淘刷的

控制效益，當拋石長度過短時，溢流水的投射路徑若是落於拋石保護工的末端，則控制局部淘刷的效益不佳；反觀較長的拋石保護工，除了能消弭溢流水的能量之外，亦能營造並維持拋石粒徑所產出的水流境況 (flow regime)，有利於局部淘刷現象的控制。

第三節 橫向構造物改良之相關研究

有鑑於野溪經過整治之後的溪流型態過於單調，Wu, et al. (2004) 執行行政院農業委員會委辦計畫，利用水工模型試驗探討於傳統式固床工上開設單一開口，並調整相鄰兩固床工開口開設位置的偏距 (offset)，以營造出侷限環境 (confined environment) 下蜿蜒槽線 (sinuous thalweg) 的可行性。研究中以蜿蜒指數 (sinuosity index; S_n) 做為蜿蜒槽線的評估指標，並提出以下的公式：

$$S_n = 1.3099 \frac{D_{50}^{0.0085} Q^{0.0077}}{B^{0.0077} S^{0.0218} h^{0.0192}} \left(\frac{\Delta e}{Li} \right)^{0.0894} \quad [19]$$

式中， S_n = 蜿蜒槽線的蜿蜒指數、 D_{50} = 床砂中值 (m)、 Q = 整治段的設計流量 (cms)、 B = 整治段幅寬 (m)、 S = 水力坡降、 h = 設計正規水深 (m)、 Δe = 相鄰兩固床工之開口偏距 (m)、 Li = 相鄰兩固床工之間距 (m)。該公式可適用於渠床平均坡度 2~6%、設計流量 8.84

~ 42.43 cms、床砂中值粒徑 25.25 ~ 68.50 mm 的整治溪段中。

林原巧 (2005) 透過室內水工模型試驗，探討不同開口數量之固床工對直線段河道整治後溪床床型 (bedform) 變化的影響，並以 Shannon 歧異度指數 (Shanon Diversity Index, SDI) 量化溪床床型的高程變化，同時，利用達西阻力係數 (Darcy friction coefficient) 量化床型形狀糙度 (form roughness) 的變化。研究結果指出，開口式固床工較傳統固床工能提供較多樣的床型變化，使得由傳統式固床工的 0.261 溪床床型歧異度，最高可提升至單開口固床工的 2.093。除此之外，研究結果亦發現，開口式固床工的匯流聚能的能力，隨著固床工阻水比 (flow obstruction ratio) 的降低；亦即，開口數量的減少，而逐漸提昇，因此，單開口固床工趾部的渠床最大淘刷深度約為傳統式固床工的一倍，對於固床工基礎具有潛在威脅。當渠床坡降較緩時，建議可選擇配置較低阻水比的開口式固床工；亦即，減少開口數量，以增加水流束縮，提昇床型變化；但是當渠床坡降較陡時，應選擇高阻水比的多開口式固床工，以達到分散水流、抑制淘刷深度，並兼具維持生態廊道貫通與多樣床型變化的目的 (Wu and Lin, 2006)。

陳沛霖 (2006) 利用水工縮尺模型試驗，探討開口式圓弧型固床工應用於野溪整治的可行性，試驗分析項目包含：水流特性、水流流速、床型的沖淤變化、床型歧異度、達西阻力係數等。研究的結果指

出，溪床的床型型態隨著流量、床砂粒徑、渠床坡降、開口數量而有所不同。當開口數量少時，其所產生的床型歧異度較開口數量多時為大，可營造多變的床型型態，但必須注意因為水流匯集所產生的淘刷對結構物的負面影響。流量增加時，則可以使投潭淘刷高阻力係數區的範圍增加，低阻力係數區的範圍減少，而開口式圓弧型固床工較開口式直線型固床工更能增加床型歧異度，預期對於水棲生態環境較有貢獻。

何國勇 (2007) 針對開口式近直線弧型固床工之開口數量、水流流速、渠床床型沖淤變化、床型歧異度指標、達西阻力係數的影響進行探討。近直線弧形固床工的設計，乃介於林原巧 (2005) 的直線型傳統固床工 (構造物的軸向曲率半徑 = ∞) 與陳沛霖 (2006) 的圓弧型固床工 (構造物的軸向曲率半徑 = $\frac{1}{2}$ 溪幅幅寬) 之間；亦即，構造物的軸向曲率半徑 = 0.6 倍的溪幅幅寬。

研究結果發現，固床工開口數量的增加，可以分散水流對固床工趾部溪床的衝擊，使得淘刷坑的範圍縮小、深度變淺，且由於水流的分散作用，使得開口下游淘刷坑內的水流形成漩渦，以致流速減緩；但是當入流水自固床工頂溢流時，固床工開口數量的增加，對於固床工下游渠床的淘刷變化影響較不明顯。除此之外，開口式近直線弧形固床工所產生溪床床型歧異度普遍大於開口式圓弧形固床工、開口式

直線型固床工，甚至大於傳統式固床工。

該研究建議，當溪流坡降大、屬於高變動溪床時，可以採用近直線型的開口式固床工，以降低水流對溪床的直接衝擊，並兼具多樣的床型變化與維持生態廊道的貫通，做為多元化濱水生態的棲息空間。當溪流坡降緩、屬於低變動溪床時，可選擇開口數量較少的固床工設計，以增加水流束縮、提升溪床床型變化及水流雕塑床型的能力；但是，開口少的固床工容易造成水流集中淘刷，應注意構造物基礎的安全。

第三章 試驗材料與方法

第一節 試驗材料

本研究乃是利用國立屏東科技大學水土保持系陡坡水工實驗室的試驗渠槽進行 1:50 比例之縮尺模型 (scaled-model) 實驗，試驗渠槽全長 4.0 m、寬 0.91 m、深 0.3 m，渠槽最大可調坡度為 11%。試驗渠槽內配有一組不銹鋼材質護岸，護岸岸坡斜率 (V:H) 為 1:0.3，以形成一梯形通水斷面。

傳統式固床工模型是以防水膠合板切割而成，其厚度為 1.5 cm、寬度為 30 cm、高度為 15 cm。為使潛伏於系列固床工群間的水體得以貫通，本研究於固床工模型面板 1/3 高度處均勻鑽設孔口直徑 3.2 mm、孔距 2 cm 之排水孔一排。固床工模型的安裝，乃是以矽膠緊密將固床工黏貼於兩側不銹鋼護岸及試驗渠槽底部，以形成系列固床工群，相鄰兩固床工的間距則是依據 Wu, et al. (2002) 之研究結果；過短的間距讓溪流嚴重的區間化、過長的間距則固床工趾部的淘刷危及固床工結構基礎；因此，本研究選定 Wu, et al. 所建議的固床工間距 20 cm；若依 1:50 比例縮尺計算，則相當於現場 10 m 的固床工間距。固床工埋設深度之所以與試驗渠槽底部緊貼，是為了因應式內水工試驗無法將式驗渠槽內的床砂壓密夯實到現場溪床的低透水狀況。

固床工模型經過上述安裝程序之後，即可進行填砂工作。填砂之

前，先於固床工模型頂緣與試驗渠床擬鋪設床砂砂面高程間保留 1 cm 的高程落差，其目的在模擬現場固床工頂緣與其下游溪床之間的 0.5 m 落差。試驗渠槽與相關附屬設施，以及系列固床工群模型之配置，如圖 3-1 所示；圖中的有效格代表試驗階段量測水深、渠床床面高程以及試驗結束後之最終渠床床面高程的區間。

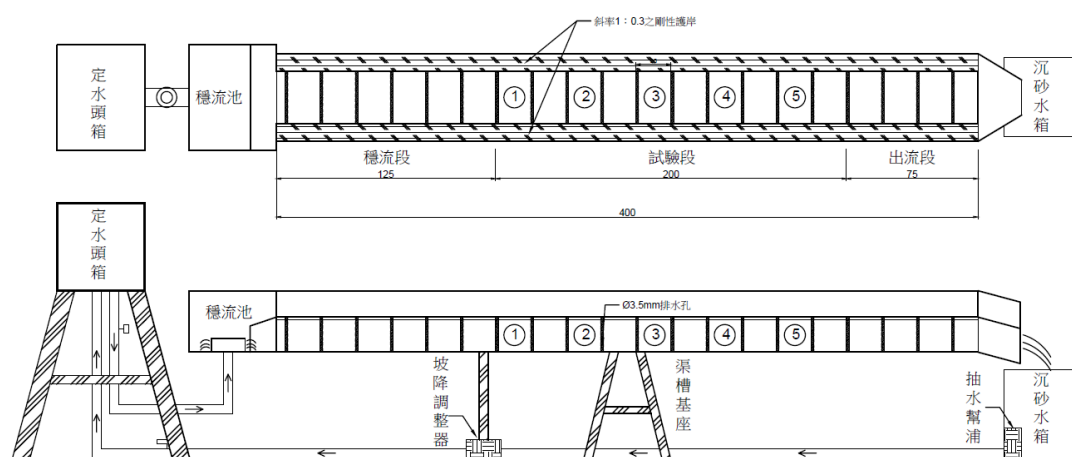


圖 3-1 試驗渠槽與固床工模型配置示意圖

本研究之所以採用系列固床工群的配置，乃是利用系列固床工群及間隔量測的方式，取代重複試驗的次數。通常進行動床 (mobile bed) 水工模型試驗的試驗設計可採上游加砂 (upstream sediment feed) 及所謂「清水流」 (clear-flow without sediment feed) 設計；其中，上游加砂設計是於試驗進行過程當中不斷地在試驗渠槽上游以加砂器對試驗渠槽進行加砂，而清水流設計乃是採用上游不加砂的方式進行，以

獲知動床經由水力淘刷 (hydraulic scour) 之後的最惡劣狀態。為了瞭解固床工趾部的最大淘刷狀況；包含最大淘刷深度、最大淘刷深度發生位置與固床工面板間的距離、固床工趾部淘刷的平均長度，故本研究採用所謂的「清水流」試驗。與其說是「清水流」試驗，不如稱之為「似清水流」(pseudo clear-flow without sediment feed)，其原因是因為水工試驗間的參數量測區間之間都保留一個區間不予量測，該區間於試驗期間所產生的床砂，做為下一個固床工區間的床砂補充來源，直到整個渠槽內各個固床工區間的淘刷達到穩定之後，才開始進行試驗參數的量測。

透水式固床工模型的製作，乃是將原傳統式固床工模型的頂部切除原出露床砂砂面 1 cm 的突出部分，再分別安裝不同的通透結構。本年度乃接續去年度的試驗，增加兩款通透結構。今年度所採用通透結構的通透率介於去年度透水式 A 型 7% 及透水式 B 型 68% 之間；其中，透水式 C 型的通透率為 32%，另一款透水式 D 型的通透率為 50%。

透水式 A 型固床工 (圖 3-2) 的製作，乃是先切除傳統式固床工模型出露床砂砂面 1 cm 落差的突出部分，再在切除後的固床工模型頂緣上裝設金屬框架。金屬框架是由 4 支一般市售的串燒鐵條穿過寬約 1 cm 的透空塑膠板的四角，金屬框架乃是模擬目前國內曾經使用

過的 50 kg H 型鋼軌架構，經 1:50 比例換算後，構成金屬框架的串燒鐵條直徑恰與 50 kg 級的 H 型鋼軌相當。至於寬約 1 cm 的透空塑膠板，除用於支撐串燒鐵條以構成金屬框架外，同時模擬現場所採用的鋼筋混凝土固定座。

透水式 B 型固床工 (圖 3-3) 則是嘗試利用雙排方形孔洞排列，以形成陣列式微箱涵，模型孔洞尺寸為 5 mm × 5 mm，相當於現地實務孔洞尺寸 25 cm × 25 cm。

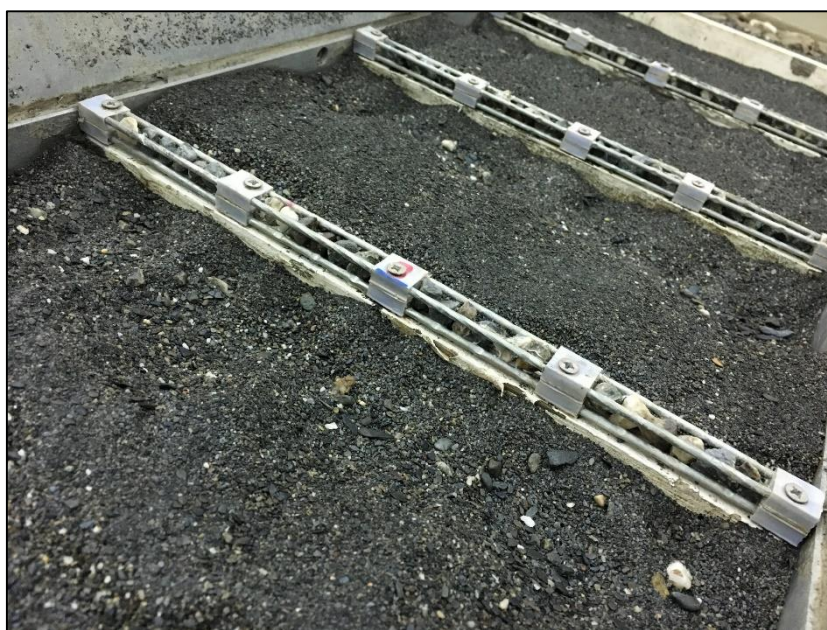


圖 3-2 透水式 A 型固床工模型



圖 3-3 透水式 B 型固床工模型

透水式 C 型固床工 (圖 3-4) 的通透結構乃衍生自透水式 A 型固床工，其通透結構則是於金屬框架內先內襯鋼網，再於鋼網內填充塊石，以模擬箱籠結構，設置金屬框架之目的在於保護模型箱籠不受上游來砂的撞擊。當填充完畢之後，即可進行金屬框架的封頂與裝設。

透水式 D 型固床工 (圖 3-5) 的通透結構乃是結合透水式 A 型與 B 型設計，先構築金屬框架，再於框架內擺設以 3 隻為一個單元、內徑 3.5 mm 的吸管透水結構，以模擬直徑 17.5 cm 的管涵，最後再於管涵之間填入塊石，以形成整體通透率為 50% 的通透結構。

上述所有透水式固床工通透結構的通透率測定，均藉由正射攝影，再將照片影像藉由 Image J 影像軟體，以設定影像像素色彩門檻值的方式進行辨識。



圖 3-4 透水式 C 型固床工模型



圖 3-5 透水式 D 型固床工模型

本研究採用三種混和粒徑床砂，其平均代表粒徑 (D_{50}) 分別為 0.85 mm、1.05 mm、1.45 mm，並以細床砂、中床砂、粗床砂表示之。

各床砂的粒徑分佈曲線如圖 3-6 所示。

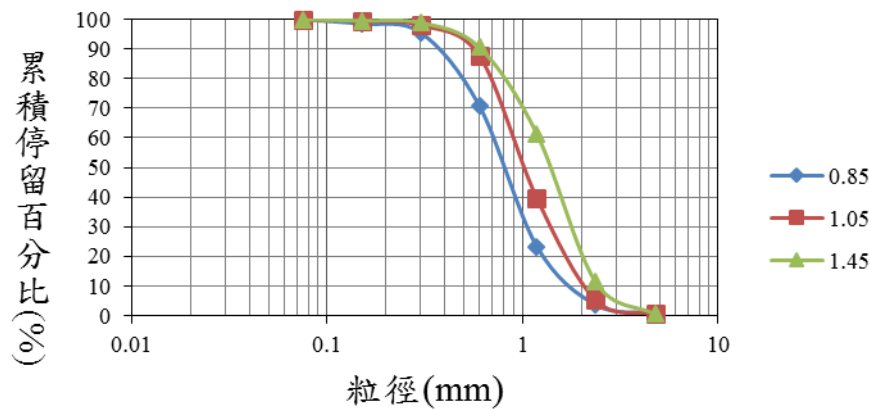


圖 3 - 6 試驗床砂之粒徑分佈

水工試驗之流量選取，乃是依據 (1).實驗室幫浦所能提供的流量範圍、(2).動床床砂於試驗坡降下得以啟動的臨界流量，以及 (3).於最大流量及最陡渠槽坡降條件下，試驗渠槽動床不至於被淘刷至渠槽底部等原則進行篩選。本研究採用福祿定律 (Froude Law) (毛壽彭，1987) 做為換算模型 (model) 與原型 (prototype) 間比例關係的選取依據，各項水工試驗參數及對應實物後之參數如表 3-1。

表 3 - 1 水工試驗參數

試驗參數		縮尺模型	對應現地實物
流量 (m ³ /s)		4.5×10^{-4}	7.95
		6.7×10^{-4}	11.84
		8.7×10^{-4}	15.38
坡降 (-)		0.04、0.06、0.08	
固床工間距 (m)		0.20	10.0
渠床床砂 中值粒徑 D ₅₀ (mm)	細床砂	0.85	42.5
	中床砂	1.05	52.5
	粗床砂	1.45	72.5
固床工通透率		105 年度： 0.0% (傳統式固床工) 68.0% (透水式 A 型固床工) 7.0% (透水式 B 型固床工) 106 年度： 32.0 % (透水式 C 型固床工) 50.0 % (透水式 D 型固床工)	

備註：縮尺比例 = 1:50

第二節 試驗方法

試驗過程中並未對渠床進行額外加砂 (sediment feed)，各個固床工間距內的土砂填補及供應則是來自於上游相鄰固床工所產生的淘刷土砂，以營造出最大淘刷的情況 (Tregnaghi, et al. 2006)。

為避免渠床表面及淘刷坑內的床砂於試驗過程中發生材料的水

力洗選 (hydraulic sorting)，故每次試驗完成後，須先將床砂進行人工翻攪、不足砂量的補充、渠床床砂的重新夯實、整平及鋪設，並於試驗開始之前，以解析度 $75\ \mu\text{m}$ 的雷射測距計進行渠床之地形掃描，以便進行淘刷量體之後置計算。

試驗量測之淘刷參數分別為最大淘刷深度 (y_s)、固床工趾部至最大淘刷深度間的水平距離 (λ_m)、淘刷坑長度 (λ_s)，如圖 3-7 所示；其中， y_s 為原始渠床砂面至淘刷最深點間的垂直高程差、 λ_s 為固床工趾部至淘刷坑結束的水平距離。除此之外，於試驗進行期間，利用 PA1F-150S 電子式位移尺，搭配 LP-300FJ 橫向位移計與據擷取盒 (Data Acquisition System; DAS)，量測各個固床工區間內的水面與動床砂面高程數個斷面，如圖 3-8 所示，藉以計算各量測斷面的水深。

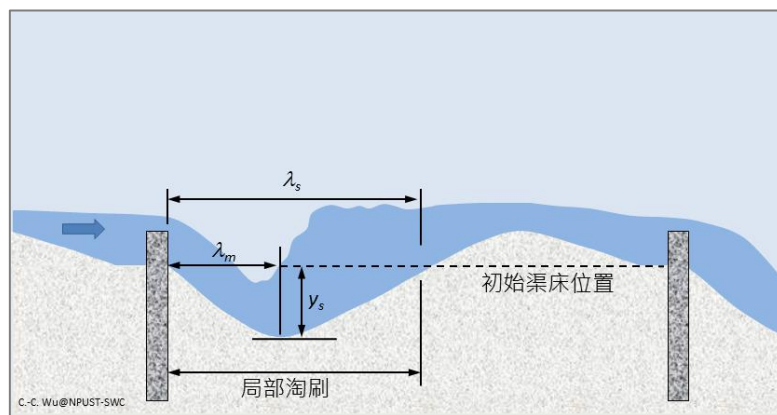


圖 3 - 7 固床工趾部局部淘刷之量測參數

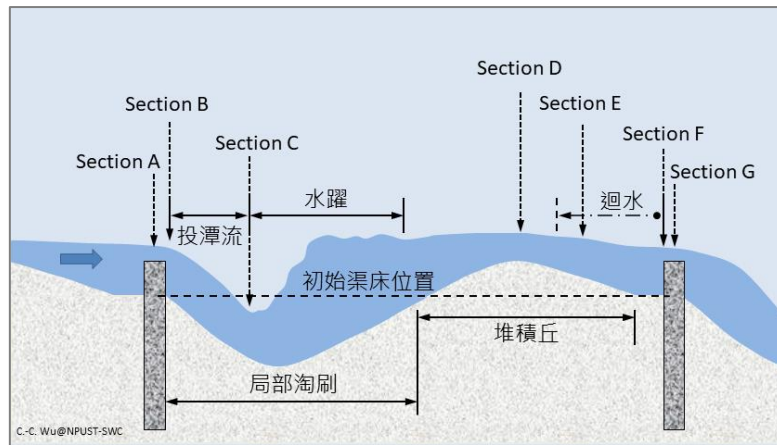


圖 3 - 8 固床工間渠床與水面高程量測斷面位置示意圖

為數化固床工趾部淘刷之情形，本研究利用 CD33-250N 雷射高程掃描器搭配 LP-300FJ 橫向位移計，架設於專用試驗臺車上，以掃描渠床橫斷面的高程，掃描訊號經由數據擷取盒自動儲存於電腦中。試驗台車可沿渠槽上下游自由移動，藉由槽壁上皮捲尺之刻度讀數，以記錄量測橫斷面所在的沿程位置。試驗臺車及量測設備的配置，如圖 3-9 所示。

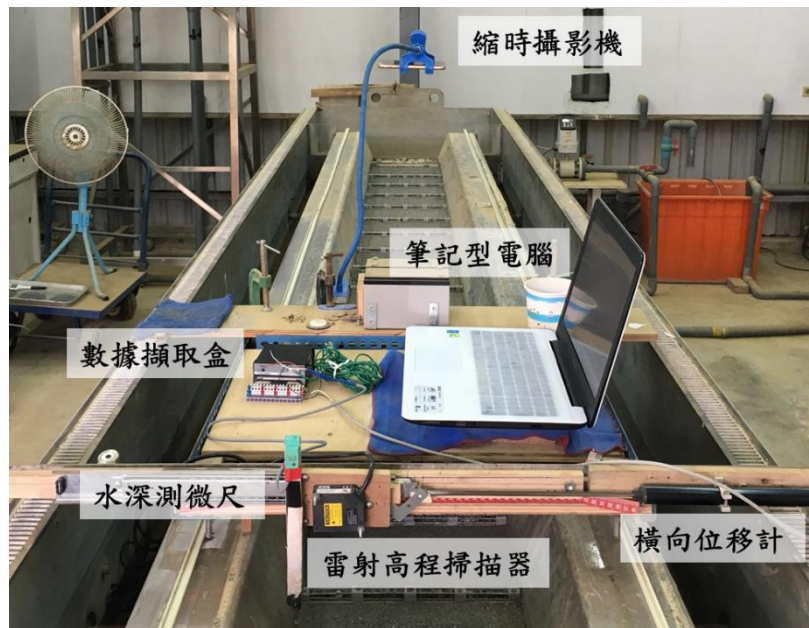


圖 3 - 9 局部淘刷及渠床 3D 掃描量測設備配置

每次試驗即將完成之前，必須先以擋板擋住出流水，同時關閉供水閥門，並將試驗渠槽緩慢調至水平，以免最終淘刷坑型因為瞬間關閉供水而遭受破壞。之後靜待試驗渠槽內的餘水緩慢滲出後，再以雷射測距計進行最終砂面高程的量測，量測斷面的數量則依據渠床床面及淘刷坑的狀況斟酌增加。通常一次水工試驗需時 2 小時、等待試驗渠槽內的餘水滲出需時 5 小時，最終斷面高程量測則約需時 2 小時。

第三節 水工試驗之適用

整體而言，本研究的水工試驗設計乃依據前述的福祿定律做為模型與原型間比例關係的選取依據，試驗流量採用定量流，在定量流的

條件下，水工試驗的目標，或可稱為試驗假設，是尋求固床工於完成設置之後；無論是傳統式固床工或任一型式的透水式固床工；與水、砂之間互動所形成的動態平衡 (dynamic equilibrium)。除此之外，本研究不考慮超濃度流 (hyper-concentrated flow) 的狀況，其理由是當含砂水流 (sediment-laden flow) 的土砂含量濃度過高時，流體性質將因此而改變，由原先的牛頓流體 (Newtonian Fluid) 轉變成為非牛頓流體 (Non-Newtonian Fluid)。當含砂水流的泥砂濃度持續增加時，含砂水流的流體特性將轉變為賓漢流體 (Bingham Fluid)，亦即成為土石流 (Debris Flow)，這均不適用於本研究考慮的範疇。

第四節 透水式固床工模型之設計計畫

本研究的透水式固床工研究乃企圖改變傳統式固床工不透水的結構設計，改以可透水式的通透結構設計。因此，105 年度的水工試驗模型包含傳統式固床工以及兩款透水式結構。

105 年度的兩款透水式結構其通透度分別為 7% 的透水式 A 型及 68% 的透水式 B 型；其中，透水式 A 型乃是參考目前台東及屏東地區現場實作的 H 型鋼框內填塊石的實物進行縮尺、透水式 B 型則是依據透水式 A 型通透結構較易被上游土砂堵塞所進行的改良，以二

排陣列式方型箱涵進行設計，其目的在於增加通透結構的通透率，且方型箱涵的內部尺寸均大於試驗用砂的最大粒徑。

106 (本)年度的透水式固床工模型設計乃依據 105 年度水工試驗的觀察，一方面考量未來現場的實作可行性與便利性、再方面擷取 105 年度透水結構體的優缺點、三方面補充 105 年度傳統式固床工的 0% 通透率、透水式 A 型的 7% 低通透率，以及透水式 B 型的高通透率之間的通透率空間等進行設計。

本年度所設計的透水式固床工共計兩款，其中一款為透水式 C 型乃是考量未來現場實作的方便性，以 H 型鋼軌框內填置石籠結構，以增加石籠的強度，減少因為石籠的軟性材料特性受上游來砂被壞的機會，其通透度為 32%。H 型鋼軌框架則沿用透水式 A 型的結構體，至於石籠則仿造菱形網內填塊石的方式按比例縮小製作。

另一款為透水式 D 型，乃是結合透水式 A 型及透水式 B 型的優點，取透水式 B 型高通透率的陣列式方型箱涵優點，但改以單排五孔管涵陣列為之，管涵陣列之間則以塊石填充，其目的在於改變陣列管涵迎水面的整齊劃一，以創造較為不規則的迎水面，同時改變水流的流動特性與流速，並利用塊石之間較大的通透孔隙，增加上游來砂通過的機會，藉以降低固床工的水頭高度，減少溢流水的投潭力道。

透水式 D 型固床工的結構一樣沿用透水式 A 型的 H 型鋼軌框架

結構，管涵陣列單一管涵的內徑大於試驗用砂的最大粒徑，管涵的上下游端均與 H 型鋼軌框架切齊，至於管涵陣列之間填充的塊石則儘量內包於 H 型鋼軌框架中。如此的通透結構設計改變了透水式 B 型及透水式 C 型通透結構迎水面的整齊劃一，其原理如同於沉砂池排放口外加設圓弧型攔汙柵一樣，降低土砂及雜物堵塞排放口的機會。

第四章 結果與討論

第一節 固床工趾部渠床局部淘刷試驗資料整合與分析

為了解不同型式透水式固床工配置對於固床工趾部渠床局部淘刷所造成之最大淘刷深度、淘刷範圍的影響，因此，必須先將試驗後量測各固床工區間數個橫斷面的高程數據，依其沿程位置順序利用 Surfer®軟體以克利金法(Kriging method)內插計算各個固床工區間內所量測斷面的渠床高程。

在使用雷射高程掃描器 CD33-250N 測量高程時，有時會因為雷射光反射訊號出現異常，或是橫向位移計 LP-300FJ 自動記錄雷射高程掃描器所在之橫幅位置時電壓供應不穩定等因素，造成擷取資料的雜訊，因此，所有的原始高程數據必須先經過自行撰寫的 Sill-0810-Ch02-v2 程式進行過濾，以去除儀器異常所造成的誤差。

接著將處理過後所有橫斷面的高程資料按照沿程位置順序進行縫合，再將縫合結果匯入 Surfer®軟體中以便自動內插，將橫斷面之間的高程進行運算，此內插運算結果除可用於等高線圖、剖面線圖、3D 立體圖的繪製外淘刷與淤積體積計算，也可以方便後續淘刷規模之計算。由於所使用的 CD33-250N 雷射高程掃描器具備 75 μm 的解析度，故經過內插後的高程資料，其精度可到達 0.5 mm，圖 4-1 即為經過上述資料整合步驟後所產出的等高線圖與 3D 立體圖。

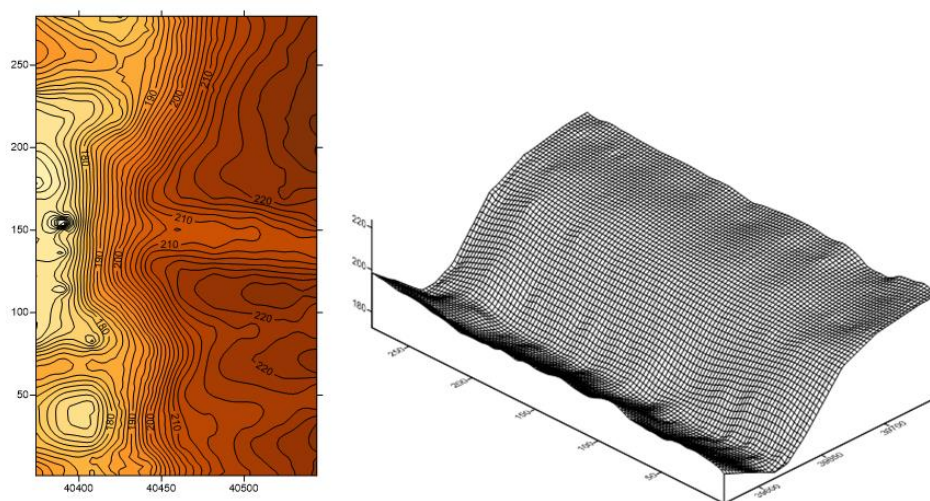


圖 4-1 資料整合所產出之等高線及 3D 立體圖

淘刷規模之計算，是以淘刷範圍的長度 λ_s 、最大淘刷深度 y_s 以及最大淘刷深度發生之位置 λ_m 為主要運算參數。進行淘刷規模計算時，必須先將固床工區間內的淘刷段與堆積段予以分割。本研究是以試驗前之鋪砂面平均高程做為分割基準，圖 4-2 為參照比對固床工區間內計算後的平面高程資料與該區間正射照片的情形，圖中左側以色列標註的網格代表其高程比基準高程為低的區域。

當各量測區間的主要淘刷參數計算完畢後，再次配合試驗照片，檢視是否出現計算結果異常，並將異常數據剔除，最後將保留之數據取其平均值，即為該場試驗可以用於因次分析的參數。

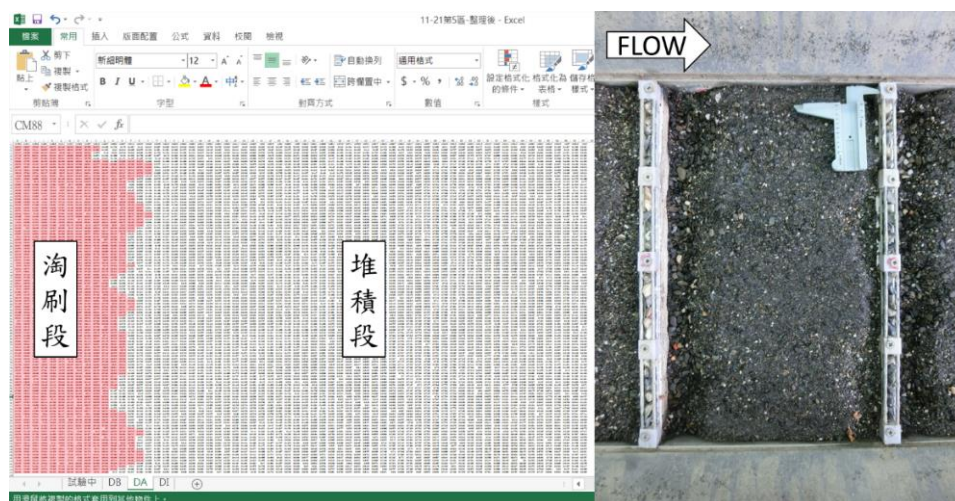


圖 4-2 淘刷段與堆積段的分割

本研究利用因次分析(Dimensional Analysis)企圖找出影響固床工趾部局部淘刷規模應變數 (dependent variables) 與影響淘刷規模之因子自變數 (independent variables) 間的關係，因此利用白金漢 Π 定理 (Buckingham Π Theorem) 對所有參數進行無因次化，無因次 Π 項的組成，除必須滿足白金漢 Π 定理因次同質化 (dimension homogeneity) 外，並在無因次化過程中不可喪失其所代表的物理意義。經過白金漢 Π 定理處理後，本研究所採用之無因次自變數 Π 項如下：

1. 阻塞率 (blocking rate; BR) = [1.0 - 試驗後通透結構的最終通透率]；阻塞率代表試驗結束後通透結構的最終堵塞情形，並將傳統式固床工的堵塞率定義為 1.0；若以透水式 A 型為例，其最終阻塞率介於 0.93 ~ 1.0 之間、透水式 B 型之阻塞率則介於 0.32 ~ 1.0 之間，各透水式固床工的阻塞率隨試驗條件之

不同而變化。

2. 顆粒移動性 (particle mobility, P_m) = $\frac{\rho mg}{\rho_s m_s g}$; 其中, ρmg 為通

過固床工頂緣的流體重量、 $\rho_s m_s g$ 為渠床上靜待淘刷的非粘滯

土砂 (non-cohesive sediment) 重量。若將流體與土砂之間的

密度比 (ρ/ρ_s) 視為定值 κ , 並考慮單位溪幅幅寬與固床工沿

水流方向的單位頂寬, 則顆粒移動性 P_m 可表示為 $P_m = \frac{y_h}{D_{50}}$,

其中, y_h 為固床工頂端之單位溪幅幅寬、固床工沿水流方向

單位頂寬的平均水深、 D_{50} 則為渠床土砂顆粒的平均粒徑, 而

顆粒移動性則代表土砂受到投潭水流作用時的靜態作用力比

(static force ratio), 可詮釋為水流的驅動力與泥砂抵制啟動之

自重力的靜態比值, 其比值之大小反映水流啟動土砂的難易

程度。

3. 福祿數 Froude Number (Fr) = $\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot y_h}}$, 用以表示重力與慣性

力間相關特性的無因次參數。

4. 水力坡降 (hydraulic gradient; S) 。

本研究用於描述淘刷坑形狀特徵的應變數 Π 項如下：

1. 淘刷坑朝上游方向的坑面斜率 (USS) = $\frac{y_s}{\lambda_m}$; 其中, y_s 為固床

工趾部渠床的平均最大淘刷深度、 λ_m 為最大淘刷深度發生位

置與固床工面版間的水平距離。

2. 淘刷坑朝下游方向的坑面斜率 (DSS) = $\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m}$ ；其中， λ_s 為

固床工趾部渠床的平均淘刷長度。

3. 固床工趾部渠床的平均淘刷深長比 (DLR) = $\frac{y_s}{\lambda_s}$ 。

據此，用於檢討不同型式透水式固床工與傳統式固床工趾部渠床局部淘刷的無因次公式可以表示如下：

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_m}, \frac{y_s}{\lambda_s}, \frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} \right) = f(B_r, P_m, F_r, S) \quad [20]$$

第二節 水流流況、土砂移動情形與水理特性比較

一、傳統式固床工

傳統式固床工由於採用結構體頂緣高度齊平且實心不透水設計，導致水流通過時，會先被阻擋在固床工上游，並因為水流碰撞固床工時產生的反作用力形成迴水效應 (backwater effect)，使得流速降低，待水流蓄滿固床工後方的空間之後，才能夠自固床工頂緣溢流，此時，水流會因為固床工與渠床之間的高度落差，而以投潭的方式進入下游區段，此投潭水流進入下游的角度、力道及淘刷位置將因入流流量及

渠床坡的條件而有所不同，如圖 4-3 所示。

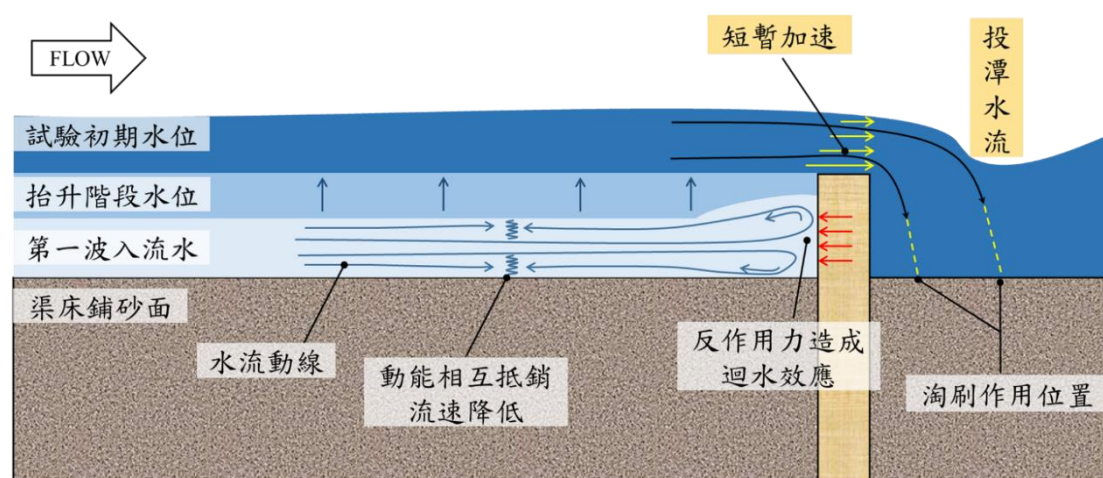


圖 4-3 傳統式固床工於其後方未淤滿時的水流動向示意圖

進入到固床工下游的投潭水流於沖擊渠床的瞬間，部分水流會向下入滲，快速提高床砂的含水量，另一部分則對表層床砂產生捲揚與分離作用，迅速在投潭水流落點處產生一個淘刷坑，之後繼續往下游漫流。遭到水流沖擊而分離的土砂則暫時停留在淘刷坑內上、下游的兩側，此時，坑內水位抬升，使得因投潭水流而分離的床砂更容易往下游移動，如圖 4-4 所示。

此時，溢流過固床工的水流除了以投潭的方式直接對固床工趾部的渠床進行淘刷外，更於投潭過程中形成兩股運行方向相反的渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，另一股渦流則朝上游方向流動 (Bennett et al, 2000)。朝向上游方向旋轉的渦流，其主要的的作用在於侵蝕渠床床砂及淘刷坑朝上游方向的坑壁，同時也提供類似水墊

(cushion) 的功能，以消弭投潭水流的衝擊。在重力及渦流的雙重作用下，使得淘刷坑的上游坑壁床砂得以維持動態平衡。至於朝下游方向運行的渦流，其能量則消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂往淘刷坑外運移，同時保持淘刷坑下游坑壁的動態平衡。

本研究利用螢光染劑將上述的兩股異向渦流進行可視化 (visualization) 處理並於試驗中發現，朝下游方向旋轉的渦流通常能夠從流況極為紊亂的淘刷坑中脫逃而出，而成為渠床表面流 (surface flow) 的一部分，並攜帶著被投潭水所淘刷的床砂向下游移動，至於淘刷坑中的床砂是否可以順利被運往下游，則取決於下游相鄰固床工所產生的迴水效應。下游相鄰固床工所產生的迴水，使得淘刷坑外至下游相鄰固床工之間的水流流速降低，改變了水流的輸砂容量 (sediment transport capacity)，進而使得床砂於該區段間堆積，創造了多樣的堆積丘 (deposition dune)。

最後，離開淘刷坑的土砂將逐漸填補淘刷坑與下游相鄰固床工之間的囚砂空間，迴水效應的影響也因此而逐漸縮減，直到囚砂空間被完全填滿為止，此時，土砂產量與淘刷坑的幾何型態變化漸趨穩定，不再改變，如圖 4-5 所示。

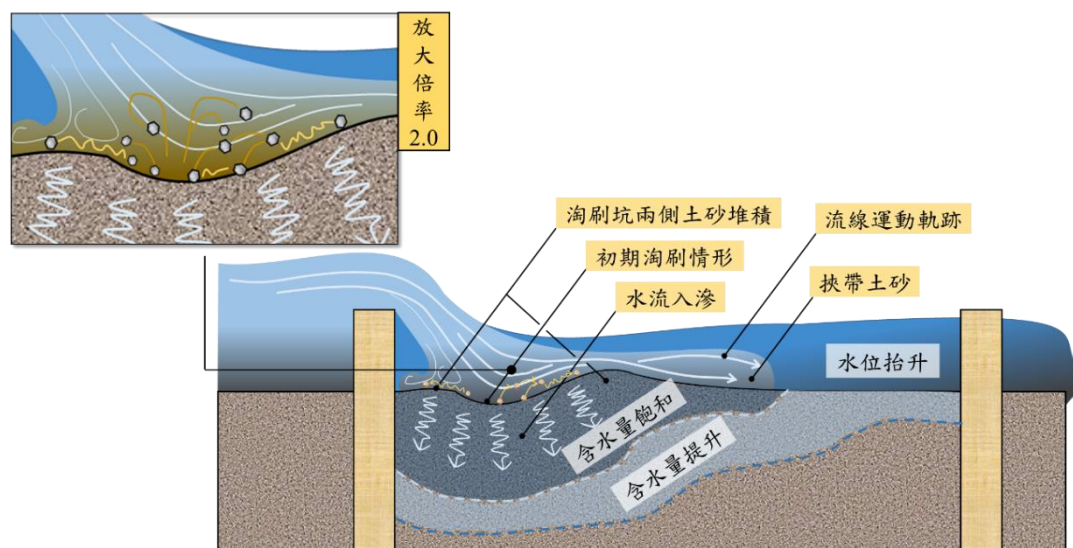


圖 4-4 傳統式固床工趾部渠床局部淘刷初期作用示意圖

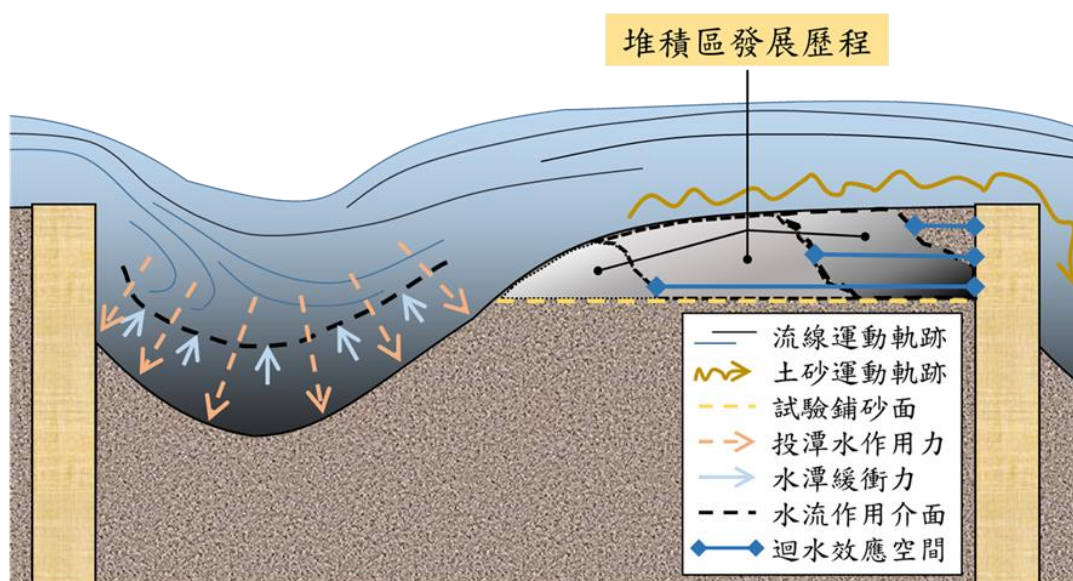


圖 4-5 傳統式固床工趾部局部淘刷後期之發展示意圖

堆積丘的長度和高度，取決於淘刷坑的產砂量。D'Agostino (1994) 將堆積丘定性地概分為長堆積丘與短堆積丘兩類。長堆積丘通常發生於高泥砂產量之淘刷坑下游，短堆積丘則會在低泥砂產量的淘刷坑下游形成。本研究發現，當投潭水流與渠床坡降營造出高泥砂產量的淘

刷坑時，淘刷坑外堆積丘的長度往往會朝下游方向延伸至相鄰的固床工，導致長堆積丘的頂部高程通常與下游相鄰固床工的頂部齊平，因此，長堆積丘之發展消除了下游固床工的迴水效應。反觀短堆積丘，其堆積的規模受限於淘刷坑的產砂量，使得短堆積丘的堆積長度無法到達下游相鄰的固床工，而在堆積丘與下游相鄰固床工之間形成一個水深較深、流速明顯較慢的緩流區域，該緩流區域的形成，侷限了下游相鄰固床工迴水效應的傳播。

迴水效應的喪失或侷限，使得原本可以因為迴水效應向源回溯至固床工趾部以做為消弭投潭能量的功能也因此喪失，導致固床工趾部局部淘刷擴大，最終造成渠床床型單調劃一，圖 4-6 為傳統式系列固床工群設置下，整治段的渠床床型。

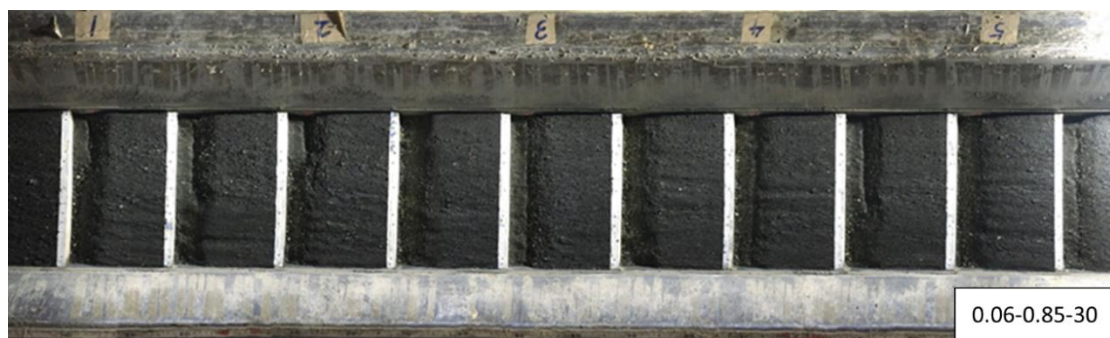


圖 4 - 6 傳統式固床工渠床淘刷之全景攝影 ($S=0.06$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、

$$Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms})$$

二、透水式 A 型固床工

透水式 A 型固床工乃是仿造國內目前找到的現場實作案例以模擬現場鋼軌矩形格框，並在格框內填充塊石的方式，架構成為一透水的結構體。經實驗室測定，透水式 A 型固床工的平均平面通透率為 7%；亦即，透水式 A 型固床工的通透結構具備每單位面積有 7%的面積可以讓水流通過。

透水式 A 型固床工通透結構格框內的透過孔隙分布並不均勻，得以提供水流通過的孔隙大部分集中在通透結構體與固床工底版間的接觸面以及靠近通透結構體的頂端，其餘的通透孔隙則隨機分配於石塊之間，如圖 4-7 所示。

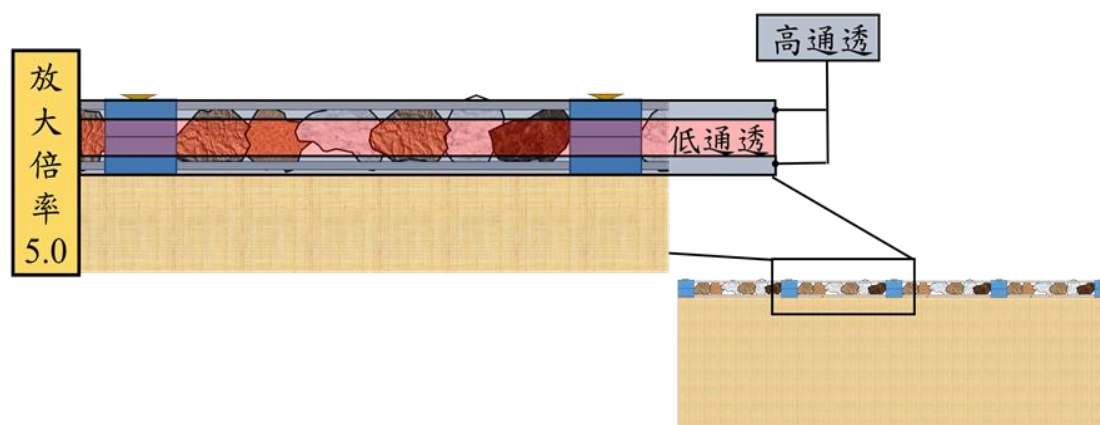


圖 4-7 透水式 A 型固床工通透結構體之孔隙分布

當水流通過透水式 A 型固床工時，首先會有部分水流以層流水的型態從通透結構體底部的填充塊石孔隙間通過，雖然量體不多，尚未能夠帶動土砂，但卻足以使渠床表層床砂的含水量快速飽和。隨後，

暫時被攔阻在固床工後方的水流水位則快速抬升，並從不規則排列的填充塊石間隙中鑽出，順著塊石的間隙流下，並與流過通透結構體底部的水流匯集，如圖 4-8 所示。當上游水流溢淹漫過固床工時，溢淹水流才會以投潭的方式進入固床工趾部，如圖 4-9 所示。

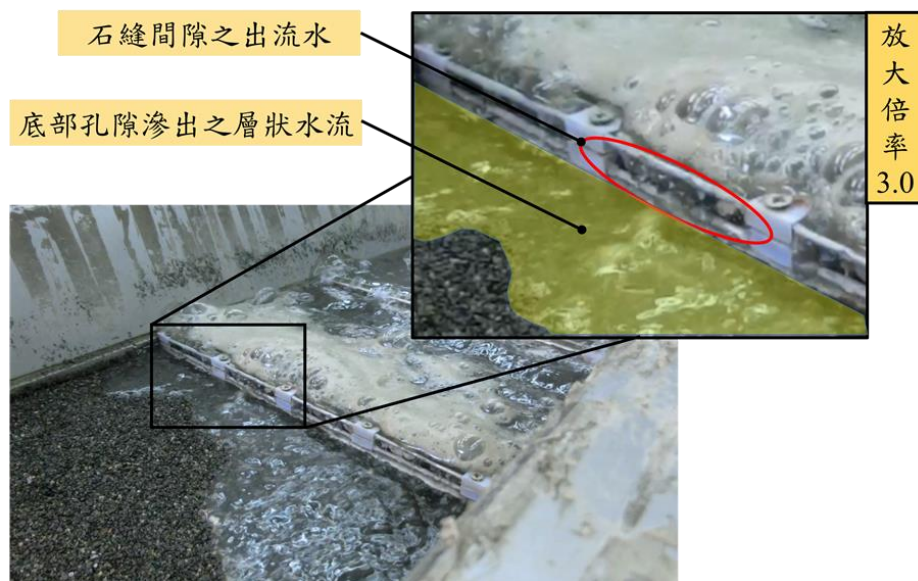


圖 4-8 透水式 A 型固床工的初期通水情形



圖 4-9 溢淹過透水式 A 型固床工的投潭水流

雖然透水式 A 型固床工的通透率不高，但當上游水流初次通過透水式 A 型固床工時，水流均可以順利通過格框內填充塊石的孔隙，使得固床工後方水位的壅高現象不如傳統式固床工來得明顯及快速。通過的水流，由於受到格框內填充塊石的影響，水流被迫分散、流速明顯變慢，導致淘刷規模略為縮減。又因為透水式 A 型固床工通透結構體頂端高度受到結構體內填充塊石的影響而崎嶇不一，也造就了溢淹而過的投潭水在此斷面各個位置上的流量分布不均，直接影響了下游淘刷坑的形狀。若是通透結構體頂端某處的塊石縫隙較大或是較為通暢，則該位置將有較大的流量通過，其下游渠床對應位置也就容易出現規模較大的淘刷坑，且土砂輸送的效率較高，進而影響淘刷坑下游渠床的淤積情形。反之，較少流量通過的位置，將會產生較小規模的淘刷、較低的土砂產量以及規模較小的土砂淤積。如此交互影響下，常可在試驗結束後出現一些不規則的鋸齒狀渠床型態，如圖 4-10。

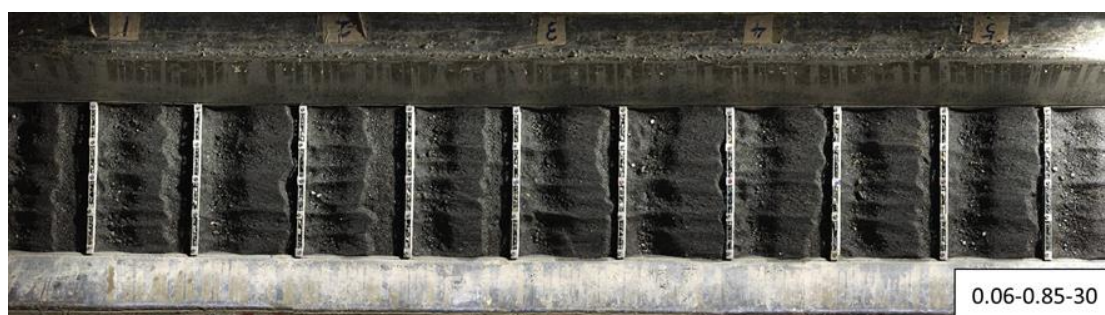


圖 4 - 10 透水式 A 型固床工渠床淘刷之全景攝影 (S=0.06、

$D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$) (孔隙通暢時)

投潭水流在淘刷坑內的運動行為與傳統式固床工無異，但土砂移動的過程則因為通透結構的通透特性而有所不同。初期，透水式 A 型固床工位於通透結構體底端的縫隙足以讓一些較細小的土砂顆粒通過，這些細顆粒土砂通常會停留在固床工趾部，此現象僅隨機發生在試驗初期，當底部的縫隙受到粗顆粒土砂堵塞時則隨即停止。接著，土砂改從填充塊石間的縫隙通過，並逐漸填滿大部分的塊石間縫隙，也使得通透結構體的頂端變得平整。

隨著固床工後方水位的逐漸壅高、上游來砂於固床工後方逐漸淤積，上游來水開始以溢流的方式漫淹過固床工，而逐漸產生投潭作用。投潭作用的效果，隨著流量或渠床坡降的增加，而逐漸恢復。最後，只要上游來砂足以將通透結構體的內填塊石孔隙阻塞，將會使投潭水的現象趨近於傳統式固床工，而通透結構體頂端的崎嶇不平對於水流所造成的影響也會因此而減少，最終呈現類似於傳統式固床工較為平整的淘刷坑，如圖 4-11 所示。

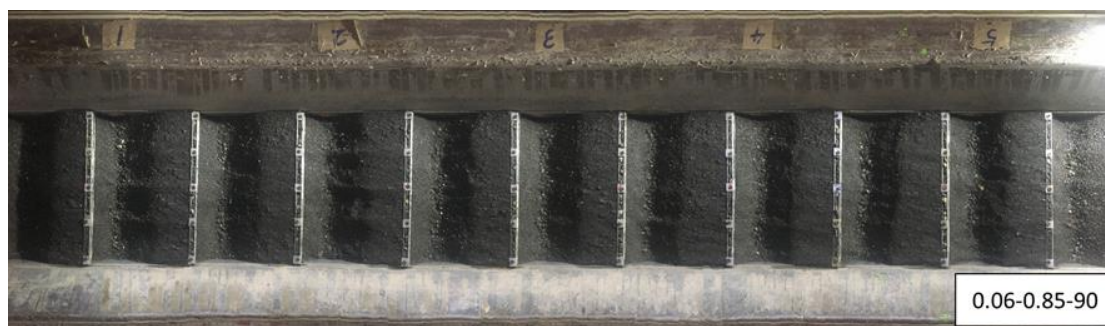


圖 4 - 11 透水式 A 型固床工渠床淘刷之全景攝影 (S=0.06、
 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$) (孔隙堵塞後)

由於透水式 A 型與傳統式在固床工頂堰體的特性差異，使得部分通過透水式 A 型固床工的水流得以順著填充塊石的表面進入下游區段，影響了投潭水入流的角度，如圖 4-12 所示。既使如此，試驗中觀察發現，投潭所造成的局部淘刷不及傳統式固床工嚴重。

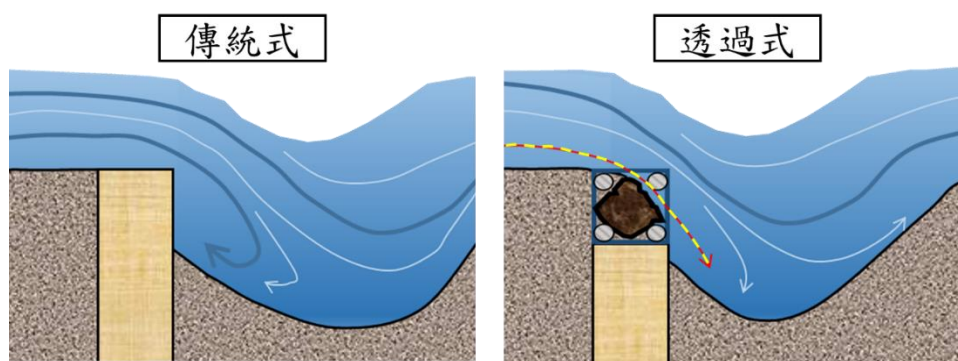


圖 4 - 12 傳統式與透水式 A 型固床工之投潭水流比較

透水式 A 型固床工由於其通透功能，使得投潭水流不會像傳統式固床工來得均勻分佈，投潭水流的分佈範圍則由下游相鄰固床工後方的土砂堆積程度與範圍決定，又由於溢流過透水式 A 型固床工的

投潭水流分佈不均，導致溢流投潭的下游處容易出現較深的淘刷坑；倘若未發生溢流投潭，因為固床工後方水位壅高程度較低，水流多由鋼條格框間通過，使得投潭衝擊的效果明顯下降。在部分通透、部分溢流投潭的交互作用之下，透水式 A 型固床工得以創造出較傳統式固床工來得多樣的渠床床型，且下游緊鄰的固床工後方較不易產生均佈的土砂堆積區。因此，雖然透水式 A 型固床工的通透率偏低，但對於固床工趾部的局部淘刷而言，可以獲得削減。

三、透水式 B 型固床工

為模擬較高的通透性，本計畫以塑膠瓦楞板製作平均通透率為 68% 的透水式 B 型固床工通透結構體，塑膠瓦楞板提供 5 mm × 5 mm 的平行通透格柵。由於通透格柵的平行均一，使得上游水流通過固床工時的水理特性受到影響。

當上游水流來到透水式 B 型固床工時，水流可以輕易地通過高通透率的通透格柵，使得水流無法於固床工後方停滯，以至於試驗初期不易見到投潭水流衝擊渠床的現象，如圖 4-13 所示。因此，在試驗初期，穿越通透格柵的水流隨即對固床工趾部的渠床做工，並將土砂帶往下游。受水流攜帶的土砂，大多可以順利通過下游緊鄰之固床

工的通透格柵，僅有少部分的土砂在下游固床工處堆積，因此不容易於下游固床工產生迴水效應而減緩流速。固床工後方的水位雖然因為固床工的攔阻而有些許抬升，但抬升的幅度遠不及傳統式與透水式 A 型固床工來得明顯。



圖 4-13 水流穿越透水式 B 型固床工通透格柵的情形

由於透水式 B 型固床工的通透格柵內部極為平滑，通過的水流其流速不會受到通透格柵糙度的影響而改變，而以近似射流的方式衝出格柵，隨後接觸到的是相對粗糙的渠床，渠床表面較大的摩擦阻力消耗掉水流的部分能量，並於固床工下游產生水躍現象，最後在固床工的趾部產生淘刷，如圖 4-14 所示。

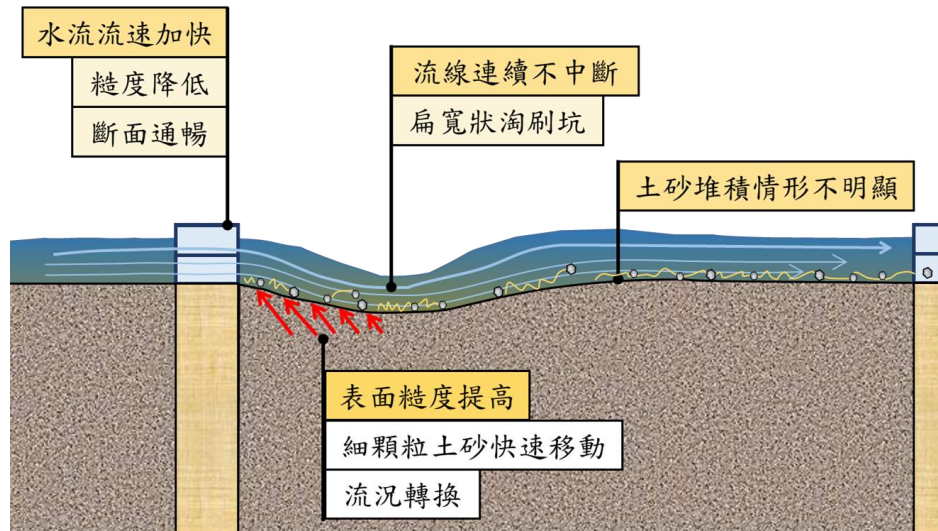


圖 4 - 14 透水式 B 型固床工於試驗初期時的水流與淘刷機制示意圖

由於透水式 B 型固床工所營造出的流況特性，導致試驗初期渠床較不會因為投潭水流的沖擊而產生淘刷，反而淘刷的主因來自於通過通透格柵的層狀射流水對渠床進行剪切作用所產生的掃流效應，導致渠床表層床砂的輸送情形較為劇烈。當土砂顆粒被帶往下游後，會受到下游緊鄰固床工的篩選，較粗的土砂隨機在固床工的迎水面任意位置淤積，造成固床工通透率隨淤積的情形而逐漸降低。同時，在固床工通透結構體頂端橫斷面上的流量也因格柵的堵塞而變得不均勻，水位隨著土砂的淤積開始逐漸抬升，也逐漸拉大水流與固床工下游渠床間的高低落差，最後，當格柵被完全堵塞時，淘刷的形式回復到與傳統式固床工相似的投潭淘刷。

土砂對於通透格柵的隨機堵塞行為直接影響淘刷坑的形狀，在透水式 B 型固床工的試驗當中發現，某些區段在渠道的中心線上可以

見到較明顯的淘刷坑，其餘區段的淘刷坑則緊貼在左右兩岸附近，如圖 4-15 所示，這兩種完全不同的渠床型態通常會在試驗區段中交錯發生。

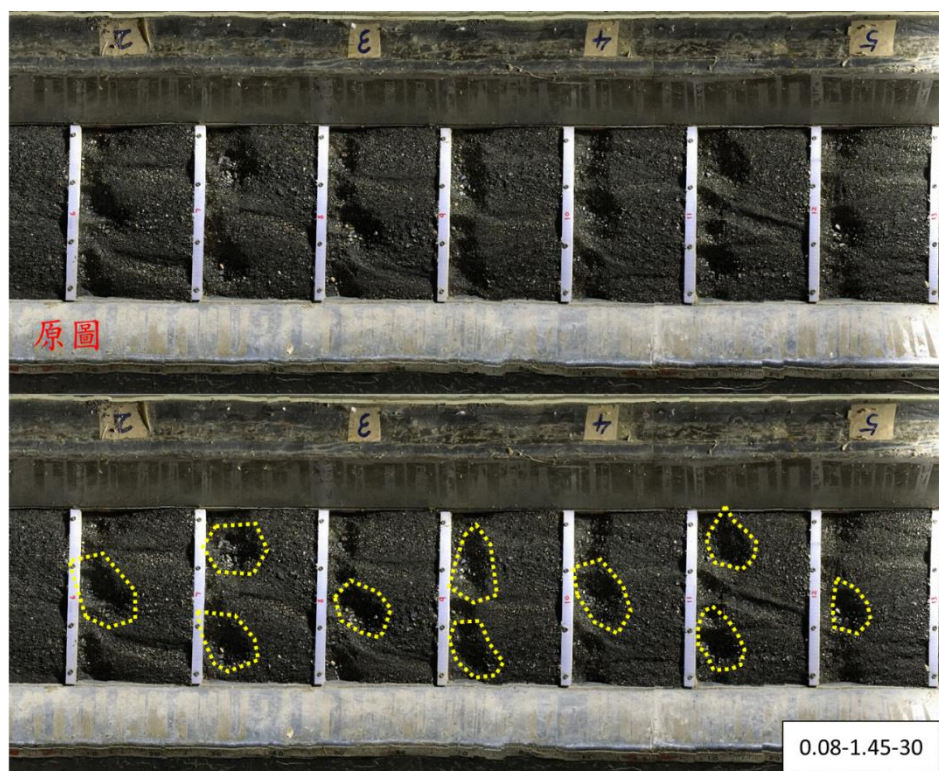


圖 4 - 15 透水式 B 型固床工間淘刷坑交錯發展的情形 ($S=0.08$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$)

又由於透水式 B 型固床工所產生的水流流況不似透水式 A 型複雜，以至於渠床表面床砂的淘刷作用由渠床床砂的運移性 (mobility) 決定。當渠床表面床砂經由通透射流的攜帶而到達下游緊鄰的固床工時，高通透且平直的通透孔道讓土砂較容易順利通過，以至於試驗初期可以明顯觀察到固床工間渠床高程的均勻下切，最大切深深度大約

與通透結構體的底部同高，形成相對均一的渠床床型。

渠床床砂於透水式 B 型固床工上游堆積的情況，隨著時間的進程而逐漸累積，但並未發現土砂於固床工上游以全幅寬的方式進行堆積的現象，反而是出現局部堆積的現象。局部的土砂堆積，加上高透水特性，使得水流得以自行尋找流路，導致水流集中匯流通過格柵。因此，匯集的水流逐漸在透水式 B 型固床工間形成一明顯的水流通路，並持續攜帶土砂往下游運移，導致如圖 4-16 所見的兩股 V 型洩槽。



圖 4 - 16 透水式 B 型固床工間渠床淘刷之發展

當 V 型洩槽持續向上游溯源發展時，倘若固床工趾部未發生明顯淘刷坑時，即可與通過上游緊鄰之固床工格柵的水流相連貫，加速

固床工間的渠床淘刷發展，直到淘刷深度到達通透結構體底部為止。

此時，穿越透水格柵的水流開始改變其對渠床床砂的做工型態，轉變成為傳統的投潭水流淘刷。

雖然透水式 B 型固床工的通透結構體具備 68%的通透率，但不表示於固床工後方不會產生土砂堆積。隨著通過格柵的射流水對床砂進行選擇性淘刷與輸送，粗粒徑床砂逐漸向下游推移，最後在固床工後方產生堆積；既使本研究所採用最粗的床砂粒徑僅為通透格柵開口的 0.26 倍。

當土砂逐漸於透水式 B 型固床工後方產生堆積之後，發生水流溢流的範圍隨即由固床工後方土砂堆積的範圍決定，但固床工後方土砂堆積的程度較不如透水式 A 型。因此，投潭沖刷在透水式 B 型固床工的保護下較透水式 A 型更不明顯，加上固床工後方土砂堆積的程度又不及 A 型固床工，因此，溢流投潭水流在通過格柵之射流水層的保護下，投潭沖擊效果降低、射流流速因為投潭水流的入侵而減緩，取而代之的是紊亂的流況。當紊亂水流流過固床工間的渠床時，渠床床砂的運移性及水流的 Shields 捲揚函數 (entrainment function) 決定了渠床的床型變化，其結果是如前述圖 4-15 所示更為歧異多樣的渠床環境。

四、透水式 C 型固床工

透水式 C 型固床工乃依據國內目前現場的實作案例進行改良，以相同於透水式 A 型固床工的鋼條格框製作方式，先架構一矩形格框，再在格框內部內襯鋼網，最後填充塊石，以模擬鋼軌格框內嵌箱籠的通透結構體。經實驗室測定，透水式 C 型固床工通透結構體的平均平面通透率為 32%；亦即，透水式 C 型固床工露出渠床的通透結構體每單位面積有 32% 的面積可以讓水流通過。

當上游水流初次通過透水式 C 型固床工時，水流均可以順利通過格框內內嵌箱籠填充塊石的孔隙，使得固床工後方水位的壅高現象不如傳統式固床工來得明顯及快速。由於通過透水式 C 型固床工通透結構體的水流受到箱籠籠網以及內填較為密實的塊石所影響，水流速度明顯變慢，導致通透的水流無法立即對固床工趾部的渠床進行淘刷，以致試驗初期固床工趾部以及固床工間的渠床淘刷並不明顯。

雖然格框內嵌箱籠的設計具備延長水流穿越的流動路徑長度與通過時間，同時藉由箱籠網目與內填塊石的糙度減緩水流速度，對於減緩固床工趾部渠床的局部淘刷有正面的幫助，但是，由於水流流速減緩甚為明顯，反倒是固床工後方的水位容易快速壅高，水流開始以溢流的方式漫淹過固床工，而逐漸產生投潭作用，如圖 4-17 所示。



圖 4-17 水流溢淹漫過透水式 C 型固床工造成投潭的情形

溢流的水流於投潭過程中一樣會形成兩股運行方向相反的渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，另一股渦流則朝上游方向流動，此現象大多與傳統式固床工及通透率 7% 之鋼軌格框內填塊石的透水式 A 型固床工類似。朝向上游方向旋轉的渦流，除了維持淘刷坑朝上游方向坑壁的動態平衡外，同時也提供了類似水墊的功能，以消弭投潭水流的沖擊。朝下游方向運行渦流的能量則消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂往坑外運移，同時保持淘刷坑朝下游方向坑壁的動態平衡。

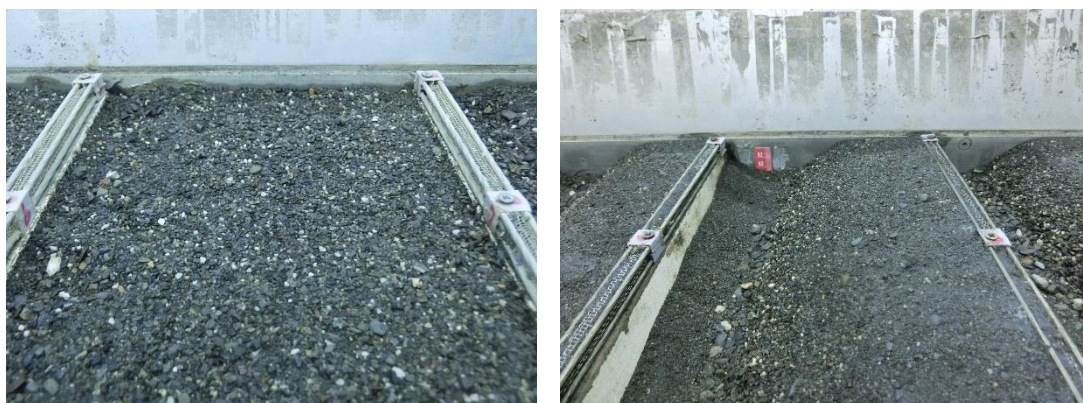
在透水式 C 型固床工所產生的投潭作用沖擊下，固床工趾部淘刷逐漸形成、土砂逐漸向下游運移而於固床工方開始淤積，此現象與透水式 A 型較為接近。投潭淘刷的功率隨著流量或渠床坡降的增加而逐漸增加，然而，透水式固床工的通透結構體依其透水特性影響了

溢流而過朝向固床工趾部投潭水流的流況與沖擊潛勢。

透水式 C 型格框內嵌箱籠的通透結構設計，使得結構體表面較為粗糙，且又具備透水的功能。本研究於試驗中利用注射針筒將螢光染料注入水流並觀察染色水流通過通透結構體的行經路徑發現，當水流即將穿過箱籠前，染色水流大致上呈現出明顯的流線 (streamline)。當染色水流通過箱籠時，原先明顯的流線開始因為箱籠內填充塊石的影響而逐漸變形、螢光染料開始出現擴散。當逐漸擴散的螢光染料通過箱籠時，擴散的情況更為嚴重，表示此時穿過箱籠的水流其水流能量已降至接近停滯的狀態，之後隨即遭遇上方溢流水的侵襲，最後融為溢流水的一部份，因此，接下來投潭水是否能夠對固床工趾部渠床造成淘刷、淘刷的規模為何，就不再是由通透結構體決定，而是由投潭水離開固床工頂緣時具備多少剩餘能量決定之。

造成固床工趾部局部淘刷規模的因子除了由投潭水流的剩餘能量決定之外，仍包含影響渠床土砂移動性的外在與內在因子；其中內在因子當屬土砂的粒徑大小，而外在因子，當屬渠床坡降及相鄰兩固床工間的相互影響。就內在因子而言，較細粒徑的土砂在投潭的沖擊作用下具備較高的機會被淘刷；反之，則較不易形成明顯的淘刷坑，圖 4-18(A)即為本研究所採用最緩的渠槽坡降、最粗的床質粒徑，搭配最小流量所產生的小規模淘刷、圖 4-18(B)為最陡的渠槽坡降、最

細的床質粒徑，搭配最大流量所產生的固床工趾部淘刷情形、圖 4-18(C)則為透水式 C 型固床工於最陡渠槽坡降、最細床質粒徑，搭配最大流量所產生的淘刷結果全景攝影。



(A). $S=0.04$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$ (B). $S=0.08$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



(C). $S=0.08$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$ 全景照

圖 4 - 18 透水式 C 型固床工保護下渠床的淘刷結果

由圖 4-18 中可清楚說明對透水式 C 型固床工的結論：(1).格框內嵌箱籠的通透結構設計，對於固床工趾部的局部淘刷規模影響決定於箱籠網目的粗細，網目過細容易造成土砂阻塞，以至於土砂容易於固床工後方淤積、(2).固床工後方的土砂淤積現象，使得透水式 C 型會快速失去原有的透水功能，並直逼透水式 A 型固床工，甚至比透水式

A 型的原始 7% 通透率還低，導致溢流投潭沖擊下的淘刷規模有時會比透水式 A 型來得更大，甚至逼近於傳統式固床工。

五、透水式 D 型固床工

透水式 D 型固床工的設計概念，乃是擷取透水式 A 型及透水式 B 型的優點，以及從透水式 C 型所學到的經驗，加以綜合，具備了透水式 B 型固床工之平行通透格柵陣列的優點、透水式 A 型固床工鋼條格框內填塊石的不均勻間隙優點、避開透水式 C 型固床工鋼條格柵內嵌箱籠細網目的缺點，取而代之的是，管涵陣列搭配塊石於其間的穿插設計，供給透水式 D 型通透結構體 50% 的通透率，其通透率介於透水式 B 型與透水式 C 型之間。

當水流初次通過透水式 D 型固床工時，如設計所預期，水流可以順利由管涵陣列及間填塊石之間隙間順利通過。雖然透水式 D 型採用管涵陣列取代透水式 B 型的雙排通透格柵陣列，且單一管涵的內徑較透水式 B 型單一通透格柵的內徑來得小些，但事實上一樣具有高通透率的功能，因此有利於水流通過，圖 4-19(A) 即為水流初次通過透水式 D 型固床工時，水流自由尋找通水間隙的出流情形。由圖中可以看到通過管涵陣列的水流明顯形成管狀流束，此現象與透水式 B

型不相同。透水式 B 型的上下雙排平行通透格柵陣列容易營造出射流水層，反觀透水式 D 型的單排管涵陣列結構，由於管涵與管涵之間無法完全密接，使得管涵陣列比方型通透格柵陣列多了 42.5% 的孔隙面積。由於這多餘的孔隙存在，讓水流穿過透水式 D 型固床工之後較不容易形成類似透水式 B 型的均勻快速射流層，取而代之的是較為紊亂且分離的管狀流束，這些管狀流束的存在較不會像透水式 B 型固床工一樣具備較高的掃流能力，因此，當水流初次通過透水式 D 型固床工時，對於固床工下游渠床的淘刷作用不似透水式 B 型來得劇烈，如圖 4-19(B) 所示，同時，流束的流況結構不像透水式 B 型通透格柵來得紮實，因此有提供消除溢流水能量的水墊功能。



(A). 初次穿越



(B). 逐漸溢流

圖 4 - 19 水流穿過透水式 D 型固床工時的情形



(A). 溢流投潭淘刷

(B). 投潭淘刷結果

圖 4-20 透水式 D 型固床工溢流投潭及淘刷結果

圖 4-21 為透水式 D 型固床工於本研究最陡坡度、最大流量下，面對最細床砂粒徑時所產生的最終淘刷情形，該情境是所有透水式 D 型固床工所面對最為嚴峻的挑戰，其中又以管涵陣列受土砂阻塞的挑戰最高。由圖 4-21(B)可以看出，固床工後方土砂淤積的情形不如透水式 C 型來得劇烈，部分塊石間隙之間提供土砂流出的管道，再加上整體通透結構的通透率比透水式 C 型高出 18%，更有助於水流與土砂的穿越。

透水式 D 型固床工對於其下游渠床的淘刷控制，就淘刷坑的幾何外觀來說，最大淘刷深度有明顯改善、最大淘刷深度發生的位置較遠離固床工結構，對於固床工基礎的保全似乎優於前列 A 型、B 型及 C 型透水式固床工。藉由透水式 D 型固床工的水工試驗觀察經驗，如何讓管涵陣列受土砂阻塞的機會降低，又可兼具施工便利快速及水泥減量的優點，更能有效控制固床工趾部及下游渠床的淘刷規模，應當

可以列為明年度試驗研究的主軸。

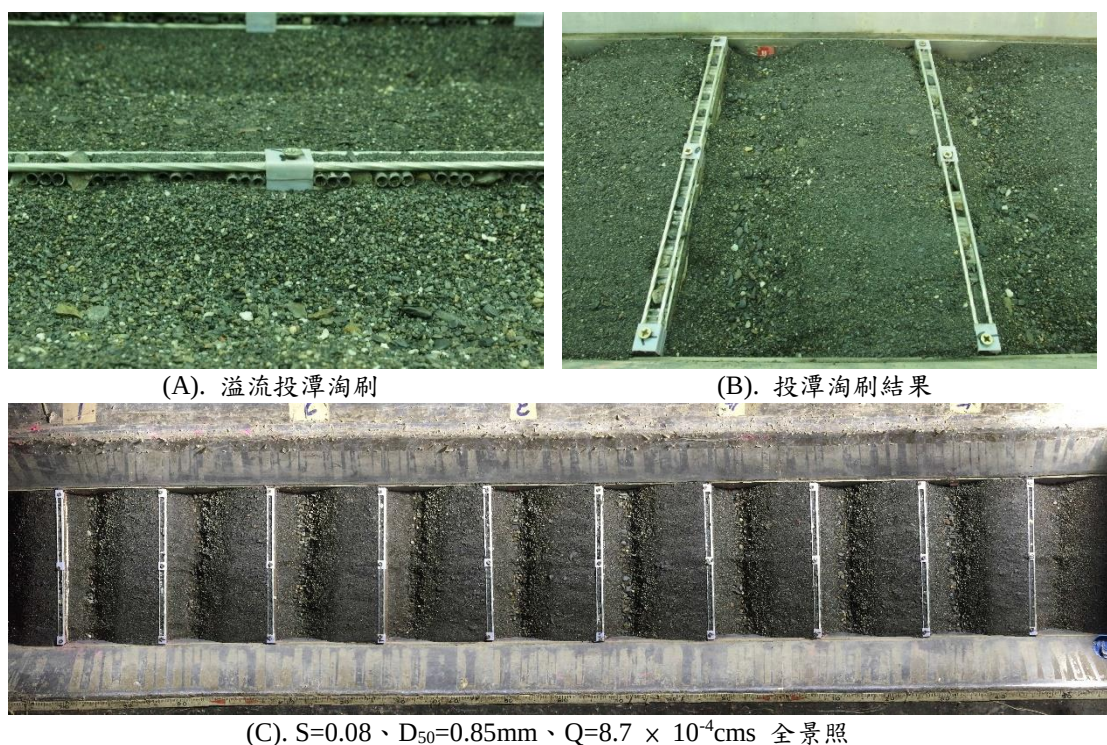


圖 4 - 21 透水式 D 型固床工保護下渠床的淘刷結果

第三節 固床工趾部局部淘刷之複迴歸分析

本研究將所有影響及與固床工趾部淘刷坑幾何形狀特性有關的物理參數進行無因次化，組合成具有物理意義的無因次 Π 項；物理參數包含，平均最大淘刷深度 y_s 、平均淘刷範圍 λ_s 、最大淘刷深度所在位置與固床工之間的距離 λ_m 、固床工頂緣流速 u 、重力加速度 g 、坡降 S 、固床工頂端水深 y_h 、最終堵塞率 B_R 以及床砂中值粒徑 D_{50} ，無因次 Π 項參數包含：淘刷坑朝上游方向坑壁斜率 USS 、淘刷坑朝

下游方向坑壁斜率 DSS 、淘刷坑之深長比 DLR 、福祿數 Fr 、渠床坡降 S 、最終堵塞率 B_R ，以及顆粒移動性 P_m 。

固床工頂端水深 y_h 的量測工作較具挑戰，原因是穿過各型式通透孔隙的水流，有各種不同的情境，會影響固床工頂端水深的量測。為解決此情形，本研究以人工檢選的方式，根據透水式固床工的最終堵塞情形，判斷試驗期間所量測的固床工頂端水深是否可採用，倘若不行，則改以固床工後方的水深做為代表，以減少水流未經固床工頂端越過所產生的誤差，如圖 4-22 所示，圖中箭頭代表各種情境下水深量測的位置。

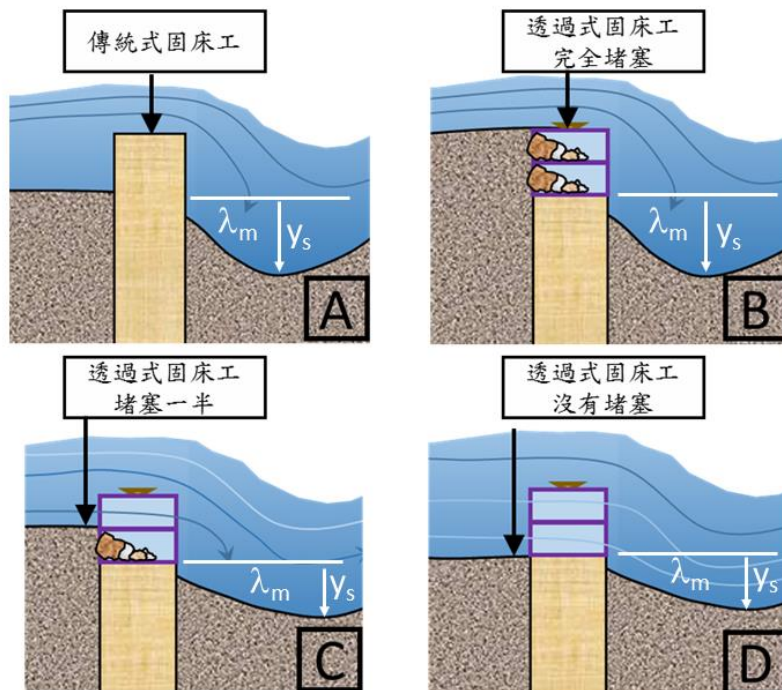


圖 4 - 22 水深量測位置及淘刷規模示意圖

圖 4-22 亦顯示出透水式固床工通透結構因為上游土砂堵塞通透孔隙對於固床工趾部局部淘刷的影響；圖中的 y_s 代表固床工趾部最大淘刷的深度、 λ_m 代表固床工趾部出現最大淘刷位置與固床工面版的距離。由於傳統式固床工不具備通透特性，使得溢流過固床工頂的水流以投潭的方式對固床工趾部進行淘刷，當淘刷坑一旦形成並達到動態穩定之後，因下游緊鄰固床工的有限儲砂空間多已被土砂填滿，導致其所產生的迴水效應降到最低，無利於投潭水的消能，因此，溢流通過傳統式固床工水流總能量其中的部分能量被淘刷坑內的水墊所消除，剩餘的能量則用於維持淘刷坑上游坑壁及下游坑壁的動態平衡，最大淘刷深度為所有試驗固床工的最深，且最為靠近固床工面版，如圖 4-22 A 所示。

當透水式固床工取代傳統式固床工之後，初期因為透水式固床工通透結構的透水特性，使得上游來水得以部分或全數通過通透結構，通過的水流對於固床工下游渠床的淘刷影響由通透結構體的結構特性決定之。當採用二列箱涵列陣式的 B 型固床工時，如前所述，水流以射流的方式快速通過，但由於射流水的流線因為箱涵的誘導使得平行於渠床，因此，初期的局部淘刷深度較淺且遠離固床工面版，如圖 4-22 D 所示，相同的現象亦出現於單排-五支管涵陣列間填塊石的透水式 D 型。

當透水式固床工的通透孔隙逐漸被上游來砂所堵塞但未完全堵塞時，如圖 4-22 C 所示，水流再次通過通透結構體的機會就由通透結構的形式以及土砂堵塞的情況而決定，同時也決定了後續投潭水流能量的消耗程度以及固床工趾部局部淘刷規模。雖然通透結構體的通透孔隙因為上游來砂而遭堵塞，但仍具備部分通透水流的能力，使得溢流通過固床工的水流部分能量因此被削減，流況變得較為紊亂，而固床工趾部的局部淘刷深度開始逐漸加深且逐漸向固床工面版靠近，如圖 4-22 C 所示。由於淘刷規模不如傳統式固床工劇烈，因此，淘刷行為所產生的土砂量體較傳統式固床工少，對於下游緊鄰固床工所產生的迴水效應削減較不如傳統式固床工劇烈，得以回溯的迴水提供投潭水流另一層的消能功用。

當透水式固床工通透結構的通透孔隙受上游來砂完全堵塞之後，大部分的水流改以投潭的方式對固床工趾部的渠床進行淘刷，但本研究發現，由於透水式 A、D 型通透結構的表面及通透孔隙並非均一，以至於固床工趾部的局部淘刷規模並不會像傳統式及透水式 B、C 型那麼規則均佈，而最大淘刷深度及其發生位置也不像傳統式固床工那麼深且靠近固床工面版，如圖 4-22 B 所示。

透水式固床的對於水流水理的影響並非上游來水水流的能量轉換，由位能轉變為動能，主要是因為當水流通過通透結構的通透孔隙

時，通透孔隙拉長了水流的流通路徑、通透孔隙與孔隙間的糙度；例如內填塊石之間的顆粒糙度，增加了摩擦水頭的損失，而下游緊鄰固床工所產生的迴水效應再一次減緩投潭水流的能量，所有的元件的影響均貢獻於透水式固床工投潭水流能量的削減。

無論固床工的型式為何，固床工趾部的局部淘刷範圍；自淘刷坑的上游坑壁、淘刷坑內、淘刷坑的下游坑壁；均屬於強烈變動的淘刷範圍，淘刷範圍內所產生的土砂均藉由水流的輸送送往下游，部分的土砂得以順利直奔下游出口，部分土砂則淤積於固床工間。

複迴歸分析必須注意 ANOVA 所呈現的顯著 P 值需小於 0.05，代表應變數與自變數之間顯著性的存在。當 ANOVA 係數表中部份變數出現顯著性問題時，應予以刪除，重新進行複迴歸，直到係數表中各項係數的 P 值皆小於 0.05 為止。接著觀察判定係數 R^2 (coefficient of determination)， R^2 代表迴歸方程式的配適度 (goodness of fit)，當 $R^2 = 0$ 時，代表應變數與自變數之間不存在線性關係，當 $R^2 \neq 0$ 時，則代表應變數可被自變數解釋的比率。

當進行複迴歸分析之前必須對影響淘刷規模的應變參數；其中包含：淘刷坑深長比 (DLR)、淘刷坑內下游坑壁斜率 (DSS)、淘刷坑內上游坑壁斜率 (USS)，進行篩選，而篩選的目的在於將自變參數中對於淘刷規模影響不顯著的參數排除，同時篩除有問題的實驗數據，出

現問題的原因以實驗數據記錄時的人為誤差居多。本研究透過原始實驗資料的篩選及簡單的統計分析，將上述應變參數中出現超過一個平均值加減 3 個標準差的值刪除。由於實驗資料龐大，人工篩選不易，故自行撰寫 QBASIC 程式進行資料的自動篩選、各次實驗各量測斷面資料的縫合、最後再進行自然對數的轉換等前置步驟之後，才進行最後的複迴歸分析。完成複迴歸分析之後，再實施指數函數的轉換，即獲得最終的複迴歸公式。

由於試驗資料龐大，無法將所有試驗每一個量測區間的資料全數登載報告中，故僅將經過資料前置篩選及後置平均處理後的結果摘錄如表 4-1。表 4-1 為傳統式、透水式 A 型及透水式 B 型固床工的實驗資料摘錄。表 4-2 則為固床工趾部局部淘刷的無因次 Π 項分析資料，其中表中所列的試驗編號較表 4-1 少了 2 組，減少的 2 組資料即為前置篩選過程中發現原始資料異常的試驗。

表 4-1 傳統式、透水式 A 型及透水式 B 型固床工實驗資料摘錄

試驗參數	流量	渠床坡降	中值粒徑	透過率	平均最大 淘刷深度	最大淘刷深度 與固床工間距	平均淘刷範圍
試驗編號	Q cms	S -	D ₅₀ mm	P _R -	y _s mm	λ _m mm	λ _s mm
1	0.00046	0.04	0.85	0.00	21.04	33.15	78.50
2	0.00064	0.04	0.85	0.00	18.50	37.62	84.00
3	0.00084	0.04	0.85	0.00	21.66	44.01	103.30
4	0.00045	0.04	1.05	0.00	14.32	27.25	65.89
5	0.00063	0.04	1.05	0.00	17.68	34.28	81.53
6	0.00084	0.04	1.05	0.00	17.54	47.08	94.71
7	0.00045	0.04	1.45	0.00	9.66	23.37	54.67
8	0.00063	0.04	1.45	0.00	13.49	48.24	83.47
9	0.00082	0.04	1.45	0.00	16.14	40.08	86.01
10	0.00045	0.06	0.85	0.00	19.92	29.56	59.68
11	0.00064	0.06	0.85	0.00	29.73	37.47	88.23
12	0.00084	0.06	0.85	0.00	31.39	43.91	103.25
13	0.00044	0.06	1.05	0.00	19.98	22.48	61.23
14	0.00063	0.06	1.05	0.00	26.53	33.91	81.79
15	0.00084	0.06	1.05	0.00	29.10	42.82	98.44
16	0.00040	0.06	1.45	0.00	15.96	18.06	47.61
17	0.00060	0.06	1.45	0.00	20.10	32.21	69.93
18	0.00081	0.06	1.45	0.00	25.71	44.69	98.28
19	0.00046	0.08	0.85	0.00	30.37	12.26	65.82
20	0.00058	0.08	0.85	0.00	28.15	29.74	78.05
21	0.00083	0.08	0.85	0.00	36.83	40.51	101.99
22	0.00042	0.08	1.05	0.00	30.56	5.75	59.25
23	0.00062	0.08	1.05	0.00	29.51	31.85	82.23
24	0.00071	0.08	1.05	0.00	34.84	41.52	97.54
25	0.00045	0.08	1.45	0.00	24.80	6.05	53.84
26	0.00063	0.08	1.45	0.00	24.17	30.73	71.34
27	0.00081	0.08	1.45	0.00	29.81	39.78	85.55
28	0.00042	0.04	0.85	0.07	9.24	17.52	43.88
29	0.00060	0.04	0.85	0.07	12.57	31.40	70.98
30	0.00083	0.04	0.85	0.07	16.00	42.62	85.02
31	0.00044	0.04	1.05	0.07	9.58	13.17	61.47
32	0.00060	0.04	1.05	0.07	9.18	22.23	54.61
33	0.00085	0.04	1.05	0.07	16.24	42.21	81.30
34	0.00039	0.04	1.45	0.07	6.60	9.38	57.63
35	0.00061	0.04	1.45	0.07	8.08	21.92	53.30
36	0.00081	0.04	1.45	0.07	10.04	34.43	69.49
37	0.00040	0.06	0.85	0.07	19.23	11.07	50.68
38	0.00061	0.06	0.85	0.07	22.62	33.57	75.07
39	0.00082	0.06	0.85	0.07	31.53	44.76	102.16
40	0.00040	0.06	1.05	0.07	13.87	6.87	37.87
41	0.00061	0.06	1.05	0.07	22.32	29.72	70.22
42	0.00083	0.06	1.05	0.07	27.18	42.04	92.07
43	0.00041	0.06	1.45	0.07	12.47	7.05	32.01
44	0.00060	0.06	1.45	0.07	15.35	21.21	56.18

表 4-1 傳統式、透水式 A 型及透水式 B 型固床工實驗資料摘錄
(續)

試驗參數	流量	渠床坡降	中值粒徑	透過率	平均最大 淘刷深度	最大淘刷深度 與固床工間距	平均淘刷範圍
試驗編號	Q cms	S -	D ₅₀ mm	P _R -	y _s mm	λ _m mm	λ _s mm
45	0.00082	0.06	1.45	0.07	22.44	42.24	87.48
46	0.00040	0.08	0.85	0.07	25.74	2.04	46.57
47	0.00061	0.08	0.85	0.07	31.20	26.82	78.62
48	0.00081	0.08	0.85	0.07	36.77	39.56	99.82
49	0.00041	0.08	1.05	0.07	22.46	2.08	47.17
50	0.00060	0.08	1.05	0.07	26.64	27.25	70.10
51	0.00082	0.08	1.05	0.07	30.68	35.27	99.15
52	0.00040	0.08	1.45	0.07	16.60	5.72	42.46
53	0.00060	0.08	1.45	0.07	22.57	26.94	61.87
54	0.00080	0.08	1.45	0.07	26.67	36.82	78.26
55	0.00043	0.04	0.85	0.68	11.19	16.34	96.15
56	0.00062	0.04	0.85	0.68	12.83	26.09	83.91
57	0.00084	0.04	0.85	0.68	16.45	39.34	95.99
58	0.00039	0.04	1.05	0.68	4.08	6.60	83.79
59	0.00061	0.04	1.05	0.68	10.78	20.69	80.31
60	0.00086	0.04	1.05	0.68	14.29	37.01	86.56
61	0.00041	0.04	1.45	0.68	4.00	6.49	71.43
62	0.00063	0.04	1.45	0.68	5.45	16.97	74.79
63	0.00081	0.04	1.45	0.68	7.87	26.37	57.94
64	0.00042	0.06	0.85	0.68	20.37	6.43	69.01
65	0.00061	0.06	0.85	0.68	23.76	25.02	83.43
66	0.00080	0.06	0.85	0.68	31.54	46.33	106.55
67	0.00040	0.06	1.05	0.68	8.34	10.83	62.38
68	0.00062	0.06	1.05	0.68	24.52	26.01	82.91
69	0.00084	0.06	1.05	0.68	28.67	45.06	100.87
70	0.00040	0.06	1.45	0.68	10.17	5.57	47.15
71	0.00062	0.06	1.45	0.68	16.73	26.79	61.82
72	0.00080	0.06	1.45	0.68	21.50	41.41	84.97
73	0.00047	0.08	0.85	0.68	29.76	8.92	74.32
74	0.00062	0.08	0.85	0.68	36.40	17.96	89.69
75	0.00081	0.08	0.85	0.68	34.19	45.08	98.52
76	0.00041	0.08	1.05	0.68	13.12	8.29	67.84
77	0.00060	0.08	1.05	0.68	29.60	24.59	77.09
78	0.00081	0.08	1.05	0.68	33.24	40.14	92.00
79	0.00041	0.08	1.45	0.68	21.13	9.61	62.35
80	0.00060	0.08	1.45	0.68	24.15	28.74	68.58
81	0.00081	0.08	1.45	0.68	27.17	38.58	82.38

表 4-2 固床工趾部局部淘刷無因次 II 項分析摘錄

試驗參數	固床工頂端 福祿數	渠床坡降	顆粒 移動性	最終 堵塞率	淘刷坑內 上游坑面斜率	淘刷坑內 下游坑面斜率	淘刷坑 深寬比
試驗編號	F _r	S	P _m	B _R	USS	DSS	DLR
	-	-	-	-	-	-	-
1	1.36	0.04	6.18	1.00	0.49	0.46	0.27
2	1.56	0.04	7.04	1.00	0.42	0.40	0.22
3	1.54	0.04	8.47	1.00	0.44	0.37	0.21
4	1.21	0.04	5.24	1.00	0.43	0.37	0.22
5	1.41	0.04	5.86	1.00	0.42	0.37	0.22
6	1.19	0.04	7.83	1.00	0.37	0.37	0.19
7	1.23	0.04	3.66	1.00	0.31	0.31	0.18
8	1.18	0.04	4.74	1.00	0.26	0.38	0.16
9	1.43	0.04	4.97	1.00	0.45	0.35	0.19
10	1.49	0.06	5.79	1.00	0.20	0.66	0.33
11	1.52	0.06	6.87	1.00	0.38	0.59	0.34
12	1.76	0.06	8.17	1.00	0.51	0.53	0.30
13	1.54	0.06	4.40	1.00	0.39	0.52	0.33
14	1.50	0.06	5.70	1.00	0.45	0.55	0.32
15	1.42	0.06	7.03	1.00	0.41	0.52	0.30
16	1.29	0.06	3.31	1.00	0.36	0.54	0.34
17	1.48	0.06	3.94	1.00	0.41	0.53	0.29
18	1.56	0.06	4.66	1.00	0.42	0.48	0.26
19	1.51	0.08	5.53	1.00	0.01	0.57	0.46
20	1.40	0.08	6.86	1.00	0.28	0.58	0.36
21	1.46	0.08	8.38	1.00	0.42	0.60	0.36
22	1.35	0.08	4.54	1.00	0.08	0.57	0.52
23	1.22	0.08	6.29	1.00	0.37	0.59	0.36
24	1.52	0.08	6.69	1.00	0.37	0.62	0.36
25	1.62	0.08	3.10	1.00	0.15	0.52	0.46
26	1.61	0.08	3.88	1.00	0.30	0.60	0.34
27	1.57	0.08	4.74	1.00	0.36	0.65	0.35
28	0.19	0.04	21.20	0.94	0.24	0.35	0.21
29	0.15	0.04	30.90	0.93	0.23	0.32	0.18
30	1.41	0.04	8.56	0.99	0.38	0.38	0.19
31	0.16	0.04	19.56	0.93	0.27	0.20	0.16
32	0.14	0.04	20.12	0.93	0.19	0.28	0.17
33	1.71	0.04	6.26	0.99	0.40	0.42	0.20
34	0.16	0.04	13.01	0.93	0.28	0.14	0.11
35	0.19	0.04	15.62	0.93	0.20	0.26	0.15
36	0.23	0.04	16.81	0.93	0.20	0.29	0.14
37	0.23	0.06	18.87	0.94	0.17	0.49	0.38
38	1.57	0.06	6.67	1.00	0.36	0.55	0.30
39	1.40	0.06	8.64	1.00	0.44	0.55	0.31
40	0.16	0.06	18.66	0.93	0.11	0.45	0.37
41	1.42	0.06	5.71	0.98	0.42	0.55	0.32
42	1.36	0.06	7.15	0.99	0.43	0.54	0.30
43	0.15	0.06	14.16	0.93	0.35	0.50	0.39
44	0.20	0.06	15.11	0.94	0.29	0.44	0.27
45	1.47	0.06	4.86	1.00	0.41	0.50	0.26
46	1.89	0.08	4.51	0.99	0.09	0.58	0.55
47	1.48	0.08	6.79	1.00	0.30	0.60	0.40

表 4-2 固床工趾部局部淘刷無因次 II 項分析摘錄(續)

試驗參數	固床工頂端 福祿數	渠床坡降	顆粒 移動性	最終 堵塞率	淘刷坑內 上游坑面斜率	淘刷坑內 下游坑面斜率	淘刷坑 深寬比
試驗編號	F _r	S	P _m	B _R	USS	DSS	DLR
	-	-	-	-	-	-	-
48	1.40	0.08	8.48	0.99	0.38	0.61	0.37
49	0.88	0.08	10.31	0.97	0.09	0.50	0.48
50	1.46	0.08	5.57	0.99	0.34	0.62	0.38
51	1.37	0.08	7.07	0.98	0.44	0.48	0.31
52	0.16	0.08	13.68	0.93	0.13	0.45	0.39
53	1.80	0.08	3.51	1.00	0.31	0.65	0.36
54	1.61	0.08	4.76	0.99	0.37	0.64	0.34
55	0.40	0.04	13.40	0.32	0.27	0.14	0.12
56	0.65	0.04	12.20	0.37	0.30	0.22	0.15
57	0.54	0.04	17.07	0.50	0.34	0.29	0.17
58	0.57	0.04	7.73	0.32	0.15	0.05	0.05
59	0.55	0.04	8.76	0.36	0.24	0.18	0.13
60	1.04	0.04	10.37	0.57	0.33	0.29	0.17
61	0.75	0.04	4.91	0.32	0.13	0.06	0.06
62	0.73	0.04	6.51	0.33	0.11	0.09	0.07
63	0.87	0.04	7.19	0.63	0.26	0.25	0.14
64	1.21	0.06	6.04	0.46	0.24	0.33	0.30
65	0.41	0.06	17.06	0.61	0.28	0.41	0.28
66	0.60	0.06	16.67	0.93	0.42	0.52	0.30
67	0.87	0.06	7.84	0.64	0.34	0.43	0.30
68	1.53	0.06	6.47	1.00	0.45	0.51	0.28
69	1.27	0.06	3.31	0.54	0.15	0.24	0.22
70	0.84	0.06	6.44	0.83	0.34	0.48	0.27
71	1.76	0.06	4.29	0.99	0.41	0.49	0.25
72	2.34	0.08	4.31	0.58	0.77	0.46	0.40
73	0.28	0.08	21.14	0.88	0.24	0.51	0.41
74	0.89	0.08	11.67	0.97	0.36	0.64	0.35
75	0.41	0.08	14.33	0.84	0.28	0.56	0.38
76	1.08	0.08	8.73	0.97	0.41	0.64	0.36
77	1.74	0.08	3.22	0.76	0.40	0.40	0.34
78	2.00	0.08	3.29	0.99	0.36	0.61	0.35
79	1.02	0.08	6.23	0.95	0.39	0.62	0.33

本年度針對表 4-2 所列的無因次 II 項已完成傳統式、透水式 A 型、透水式 B 型的複迴歸分析，所得到的結果如下：

淘刷坑深長比 (DLR) 複迴歸分析的顯著值 1.42×10^{-27} ，調整後的

$R^2=0.819$ ，屬於高度相關，無因次公式為：

$$DLR = \frac{y_s}{\lambda_s} = 4.954 \cdot F_r^{0.108} S^{1.123} P_m^{0.179} B_R^{0.561} \quad [21]$$

淘刷坑內下游坑壁斜率 (DSS) 複迴歸分析的顯著值 5.36×10^{-30} ，調整後的 $R^2=0.845$ ，屬於高度相關，無因次公式為：

$$DSS = \frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 2.334 \cdot F_r^{0.278} S^{0.779} P_m^{0.329} B_R^{0.911} \quad [22]$$

淘刷坑內上游坑壁斜率 (USS) 經過三次複迴歸的篩選，篩選後剩下的兩項變數分別為福祿數 F_r 及顆粒移動性 P_m ，係數表中的顯著 P 值皆小於 0.05，顯示這兩項變數對於淘刷坑內上游坑壁斜率(USS)具有統計上的顯著相關性，但調整後的 R^2 為 0.108，代表若將試驗所得的參數帶入該迴歸方程式並與實測值相比較時，此迴歸方程式僅有 10.8% 的比例能夠與實測值吻合，本研究所得到的迴歸方程式如下：

$$USS = 0.120 \cdot F_r^{0.461} P_m^{0.454} \quad [23]$$

無因次迴歸公式的獲得為本研究於本年度內重要的研究成果，由於連續兩年度以來所累積的資料量相當龐大，資料的先期篩選、後置處理、3D 地型的產出、地形高程的剖析、水理現象相關的參數運算，到最後的複迴歸分析，雖然僅完成傳統式、透水式 A 型、透水式 B 型資料的迴歸分析，對於透水式 C 型與 D 型資料的則須待明年度計畫

執行中進行細部分析，細部分析的結果剛好可以用來測試今年度所產出的複迴歸方程式[21]、[22]、[23]，以做為方程式的驗證使用。

若就複迴歸方程式的價值而言，式[22]及式[23]可以分別用於描述或推測固床工趾部局部淘刷坑的下游坑壁斜率 (DSS) 及上游坑壁斜率 (USS)，對於實務應用上的價值較低，但對於學術研究上卻具備另一層的意義。因為固床工趾部渠床的局部淘刷規模無法用單一無因次 Π 項可以完全詮釋，理由是不同的水理境況有可能產生相同的淘刷坑深長比，但卻擁有不一樣的淘刷坑下游坑壁及上游坑壁斜率。

式[22]代表渠床床砂在投潭消能過後離開淘刷坑的水流的動態平衡輸砂極限(dynamic equilibrium sediment transport limit)，也反應出透水式固床工對於投潭水流能量削減的能效高低；亦即，投潭能量消耗得越多，淘刷坑下游坑壁斜率將會越趨近於淘刷坑上游坑壁斜率，反之，淘刷坑下游坑壁斜率將會越趨平緩。

式[23]則代表溢流通過固床工後的投潭水流於淘刷坑內轉換成為兩股異向旋轉渦流之一往上游方向旋轉的渦流強度；亦即，透水式固床工消弭投潭水流能量的效能越高，則淘刷坑中異向旋轉之渦流的漩渦強度就越低，能夠維持淘刷坑上游坑壁動態平衡的能力就越低，能夠支持上游坑壁不至於坍塌的能力也就越低，此時，淘刷坑上游坑壁斜率就將越趨平緩；反之，則淘刷坑上游坑壁斜率就越趨近於渠床

床砂於水流當中的安息角。據此，本研究將於明(107)年度的計畫執行期間進行下游坑壁斜率 (DSS) 及上游坑壁斜率 (USS) 細部分析，企圖用該二無因次 Π 項做為透水式固床工消弭投潭水流能量的指標。

式(21)代表淘刷坑深長比，為最具有實用價值的複迴歸方程式，式子等號左邊的淘刷坑深長比代表於不同水理條件及不同透水式固床工型式下固床工趾部的無因次局部淘刷型態，用於描述平均最大淘刷深度與平均淘刷坑長的比值，等號右邊則為所有影響固床工趾部局部淘刷規模的物理參數；其中含括了水流流量、渠床坡降、渠床床砂粒徑，以及透水式固床工的最終堵塞率。

就實務應用而言，透水式固床工的設計者可以依據擬整治的溪流段坡降、上游流量、渠床幅寬、治理段的溪床床質平均粒徑、透水式固床工的最終堵塞率等設計值，代入式(21)等號的右邊，而獲得預期會在固床工趾部局部淘刷的淘刷坑深長比 y_s/λ_s 。根據本研究連續兩年度的水工試驗觀察發現，最常發生的平均淘刷坑長度約為固床工間距的 $1/3$ ，因此，當設計者經由上述的計算獲得固床工趾部局部淘刷的預期淘刷坑深長比 y_s/λ_s 之後，設計者可將擬配置固床工群的固床工間距 L 的 $1/3$ 長度取代 y_s/λ_s 中的 λ_s ，即可獲得固床工趾部局部淘刷的預期淘刷坑深度，最後扣除出露溪床的固床工高度(建議採用 0.5m)，即可得知固床工埋入溪床的深度 y_b 。

式(21)中較難選取的無因次參數當屬最終堵塞率 B_R ，由於透水式固床工通透結構體受到上游來砂堵塞的情況隨著淘刷坑的土砂產出量、渠床坡降，以及通透結構體的通透特性影響，屬於比較不容易量化且不確定性較高的一項參數。但本研究連續兩年的水工試驗觀察發現，不同型式透水式固床工的最終堵塞率似乎存在某種規律，這個規律性的分析仍待本計畫第三年時進行細部分析之後方能確定。

第五章 結論與建議

整體看來，透水式固床工改變了溢流水深及固床工趾部渠床淘刷的機制，使得淘刷規模得以減緩，水流境況得以多變，但當上游來水流量逐漸增加時，不同透水式固床工之間通透率的差異對於固床工趾部渠床的局部淘刷影響差異則逐漸縮減。就固床工趾部的局部淘刷深度而言，主要的控制因子仍以渠槽坡降的影響最為顯著。

本研究發現，造成透水式固床工與傳統式固床工趾部淘刷規模差異的主因來自於透水式固床工通透結構體的孔隙作用，使得減少了投潭現象發生的強度與機會。

陣列式方形箱涵提供水流快速通過的管道，並以平行於渠床床面的射流方式快速流向固床工下游，造成渠床的層狀淘刷。在上游來水流量以及渠床坡降的適度搭配下，通過方形箱涵陣列的水流反而提供隨之而來溢流投潭水的能量削減保護。由於陣列式方形箱涵提供較高的通透率，使得最終的堵塞率介於 0.32~0.99 之間。但，高通透率的透水式固床工較適用於小流量環境，在渠床坡度較陡的野溪環境下較容易因為穿透射流作用，造成固床工趾部局部淘刷，且淘刷深度的發生位置較貼近於固床工，對固床工基礎造成隱憂，因此不建議用於渠床床質粒徑偏細的溪床。

H 型鋼軌框架內填塊石的透水結構體由於內填塊石間不規則的

通透孔隙，為通過的水流提供摩擦作用，同時也增加入水流通過的流動長度，最終營造出較為穩亂的水流境況。但是卻也因為水流流速的快速降低，容易導致上游來砂於固床工後方產生淤積，使得 H 型鋼軌框架內填塊石的透水式固床工的最終堵塞率介於 0.93~0.99 之間。

H 型鋼軌框架內包石籠的作法並不合適，主要的理由是構成石籠的菱形網材容易受到土砂的撞擊而變形，既使其外有 H 型鋼軌框架的保護。雖然施工上最為便利，但是當 H 型鋼軌框架內包的石籠因為外力作用而變形之後，上游來砂快速於固床工後方淤滿，使得通透結構體的通透率快速下降。

至於 H 型鋼軌框架內包陣列管涵、管涵之間以塊石回填，其通透率為 32%，似乎為目前結合陣列方型箱涵與 H 型鋼軌框架內充填快時兩大設計優點的透水式固床工，其對於固床工趾部局部淘刷的影響細部分析仍有待的三年度時進行方知其成效。

床砂堵塞透水式固床工通透結構體的通透孔隙或孔道，除了影響通透結構的水流通透性之外，也影響通水斷面的均勻性。本研究發現，透水式固床工可創造出較為歧異多變的渠床床型或稱為深潭與淺灘，多變的床型型態遠優於傳統式固床工均一的淘刷，有助於生態友善棲地的營造。除此之外，低通透率的透水式固床工較適用於流量小且渠床坡度緩的環境，可有效降低固床工趾部局部淘刷深度，亦可將最大

淘刷深度發生位置推離固床工基礎，且亦具備降低溢流水深（或稱為水頭落差）的功能。

本年度亦完成傳統式、透水式 A 型、透水式 B 型的複迴歸分析，獲得具有實務應用價值的無因次淘刷坑深長比 (DLR) 複迴歸公式，複迴歸分析的顯著值達 1.42×10^{-27} ，調整後的 $R^2 = 0.819$ ，屬於高度相關，無因次公式為：

$$DLR = \frac{y_s}{\lambda_s} = 4.954 \cdot F_r^{0.108} S^{1.123} P_m^{0.179} B_R^{0.561}$$

設計者可經由上式的計算獲得固床工趾部局部淘刷的預期淘刷坑深長比 y_s/λ_s 之後，將擬配置固床工群的固床工間距 L 的 $1/3$ 長度取代 y_s/λ_s 中的 λ_s 而獲得固床工趾部局部淘刷的預期淘刷坑深度，最後扣除出露溪床的固床工高度，即可得知固床工埋入溪床的深度 y_b 。

從連續兩年的研究成果看來，透水式固床工之實務應用上應該可減少混凝土用量、提供構造物更多的孔隙空間來孕育生態，甚至可以有效分散投潭水流，達到減緩淘刷規模的功用。近年來提倡以安全為基礎、生態為導向的施工準則，隨著環保意識的抬頭，使得工程單位需要在保證安全的前提下，盡力滿足維持生態資源所需要的各項細節，透水式固床工剛好具備「表面粗糙化」與「材質自然化」的特質。

本研究經由兩年度的水工試驗過程已對於透水式固床工對其趾部渠床淘刷規模的縮減效益及水理特性已獲得通盤的了解。藉由去年

度水工試驗的觀察、加上今年度透水式固床工通透結構體的改良，以及透水式固床工趾部無因次淘刷坑深長比複迴歸方程式的獲得，接下來的研究重點將鎖定如何與實務施工的方便性與可行性進行結合，以達成本研究第三年以及全程期的研究預期目標。

整體而言，透水式固床工改變了上游來水溢流過固床工結構體的水流特性、固床工趾部的局部淘刷規模與型態、固床工後方的土砂淤積，讓上游的來砂得以選擇性通過，也藉由通透結構體內部的通透孔隙或通道提供了水棲或濱溪活動生物的縱向活動廊道，解除了傳統式固床工的缺點。至於透水式固床工對於以洪枯期間水量落差極大的荒溪是否會增加上游來水的入滲伏流，反而影響水棲生物的生存空間，則有待未來進一步研究。

參考文獻

1. 毛壽彭，水工模型試驗，中國土木水利工程學會，臺灣，14-7~14-57 頁，1987。
2. 王志豪，碩士論文，花蓮縣土石流災害防砂設施之功效調查及淘刷分析，國立屏東科技大學水土保持學系，2008。
3. 何國勇，碩士論文，近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究，國立屏東科技大學水土保持學系，2007。
4. 吳尚訓，碩士論文，固床工間距對河床穩定性影響之研究，逢甲大學土木及水利工程研究所，2000。
5. 吳嘉俊，"固床工間連續帶工間距之研究(三)"，89 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 66 號，69-97 頁，2001。
6. 吳嘉俊、黃炳錡、吳雅筠，"拋石保護控制固床工趾部局部淘刷之研究"，中華水土保持學報 47(3)，147-155 頁，2016。
7. 李木青，防砂壩，台灣省水利局防洪工程設計講習班講義，1992。
8. 林原巧，碩士論文，開口式固床工應用於野溪整治之研究，國立屏東科技大學水土保持學系，2005。
9. 施東榮，"野溪固床工生態工法之探討"，泥岩自然生態工法研討

- 會，55-86 頁，2003。
10. 張則安，碩士論文，固床工間距之研究，國立中興大學水土保持學系，1994。
 11. 連惠邦，"防砂壩下游河床演變及其整流工程配置模式之研究(一)"，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，541-549 頁，2001。
 12. 陳沛霖，碩士論文，圓弧型開口式固床工應用於野溪整治之研究，國立屏東科技大學水土保持學系，2006。
 13. 陳聖文，碩士論文，防砂壩下游帶工佈置之試驗研究，國立中興大學土木工程研究所，2000。
 14. 游繁結，"固床工間距之調查研究(三)"，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，541-549 頁，1996。
 15. 劉世昌，碩士論文，台東地區野溪帶工之研究，國立中興大學水土保持學系，1997。
 16. S.J. Bennett, C.V. Alonso, S.N. Prasad and M.J.M. Römken, "Experiments on headcut growth migration in concentrated flows typical of upland areas," Water Resour. Res., Vol. 36, No.7, pp. 1911-1922, 2000.
 17. D.S. Biedenharn and L.C. Hubbard, Design considerations for siting

- grade control structures. US Army Corps of Engineers. ERDC/CHL CHTEN-VII-3, 2001.
18. H.N.C. Breusers and A.J. Raudkivi, Scouring. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991.
 19. V. D'Agostino, "Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mo-bile," *Energ. Elettr*, Vol. 71, No. 2, pp. 37-51, 1994.
 20. P. Espa and S. Sibilla. "Experimental study of the scour regimes downstream of an apron for intermediate tail water depths," In: *River Flow 2006*, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis. pp. 1715-1724, 2006.
 21. R. Gaudio, A. Marion and V. Bovolin. "Morphological effects of bed sills in degrading rivers," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 89-96, 2000.
 22. M.A. Lenzi, A. Marion, F. Comiti and R. Gaudio. "Local scouring in low and high gradient streams at bed sills," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 731-739, 2002.
 23. A. Marion, M.A. Lenze and F. Comiti, "Effect of sill spacing and sediment size grading on scouring at grade-control structures," *Earth Surface Processes and Landforms* Vol. 29, pp. 983-993, 2004.
 24. S. Pagliara and M. Palermo, "Scour protection downstream of block ramps," In: *River Flow 2006*, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis, pp. 1725-

- 1730, 2006.
25. D.L. Vischer and W.H. Hager, (ed.) Dam Hydraulics. Chapter 5: John Wiley & Sons, 1998.
 26. M. Tregnaghi, A. Marion and F. Comiti, "Sediment supply effect on local scouring at bed sills in high gradient streams," In: River Flow 2006, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis, pp. 1759-1764, 2006
 27. C.C. Wu, C.H. Hou, C.N. Chen, and C.Y. Shih, "Determination of groundsills interval for stream training," In: River Flow 2002, edited by D. Bousmar and Y. Zech. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Louvain-La-Neuve, Belgium, Sept. 4-6. A.A. Balkema Publishers, pp. 1109-1116, 2002.
 28. C.C. Wu, J.J. Lin, Y.C. Lin and C.M. Yeh. "The applicability of open-slot groundsills in trained river to encourage the formation of meandering," In: Proceedings of the Conference on Self-sustaining Solutions for Streams, Wetlands, and Watersheds, St. Paul, Minnesota, USA, Sept. 12-15, ASAE, pp. 183-190, 2004.
 29. C.C. Wu and Y.C. Lin, "Diversity of streambed features caused by open-slot groundsills," In: River Flow 2006, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis, pp. 1665-1671, 2006.
 30. C.C. Wu, P.C. Huang, P.C., W.L. Liao, Y.C. Chung and T.S. Hsu, "Effect of riprap protection in controlling local scour at the toe of a

groundsill, " In: River Flow 2014, edited by Schleiss, De Cesare, Franca and Pfister. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lausanne, Switzerland, Sept. 3-5, CRC Press, pp. 2111-2118, 2014.

附錄

附錄一 期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

SWCB(103.07 月版)

行政院農業委員會水土保持局 「106 年度創新研究計畫」案期中審查(D 場)會議紀錄

壹、時間：106 年 8 月 1 日(星期二)下午 1 時 30 分

貳、地點：本局第三會議室

參、主持人：林簡任正工程司仕修代

記錄：高百毅

肆、出(列)席單位人員：詳簽到簿。

伍、受委託單位簡報：略。

陸、審查意見：如后附件。

柒、結論：

一、請計畫執行畫單位參照與會人員相關意見辦理。

二、本場次審查「地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例」、「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)」、「重力、地震力與降雨引致的邊坡破壞行為模擬研究(II)」及「應用非破壞檢測技術評估以野溪淤積土製作之混凝土強度」等 4 案計畫，各計畫執行單位所提期中報告書，均通過審查，同意撥付第二期款。

捌、臨時動議：無

玖、散會：下午 16 時 10 分

二、 透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三) (屏東科技大學)

1. 有關試驗之設計與試驗，建議列出與實務之可能差異，亦即說明試驗之「假設」。
2. 是否(或如何)產生最佳之固床工工法？複回歸分析？
3. 簡報中水理特性的分析，建議可納入報告內。
4. 固床工是野溪整治重要的構造，持續研發工作有其必要性，後續可能考慮防止縱向淘刷，則易發生橫向沖蝕或向源侵蝕。
5. 固床工底部的淘刷往往是溪床高程控制不佳所致，透水式固床工可能減緩淘刷的發生。
6. 本案有前期計畫，應有大致成果的摘要說明，並說明全程的目標。
7. 表 5 請修正為表 5-1。
8. P.2-2，公式[2]請修正編排。
9. P.4-1 圖 4-1 至圖 4-3 缺內文說明。
10. P.4-2，右下 $Q=Q_3$ ？
11. 透過性 A 之沖刷深度與距上游固床工之距離，似乎較傳統型較深且近，是否如預期成果。
12. 有無提供相關比較數據，以呈現各案例較傳統型之優缺。
13. 設計以 10 m 為間距，惟實際案例多為 20 m，有無相關建議？

「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)」

期中審查意見答覆說明及修正辦理情形

時間:民國 106 年 8 月 1 日(星期二)下午 1 時 30 分

地點:行政院農業委員會水土保持局第三會議室

審查意見	答覆說明及修正辦理情形
1.有關試驗之設計與試驗，建議列出與實務之可能差異，亦即說明試驗之「假設」。	1.感謝指導，已依建議納入第三章第三節中，詳參 P. 3-11 ~ 3-12。
2.是否(或如何)產生最佳之固床工工法？複迴歸分析？	2.感謝指導，已依建議納入第四章第一及第三節中。
3.簡報中水理特性的分析，建議納入報告內。	3.感謝指導，已依建議納入第四章第二節中。
4.固床工是野溪整治重要的構造，持續研發工作有其必要性，後續可能考慮防止縱向淘刷，則易發生橫向沖蝕或向源侵蝕。	4.感謝指導。固床工確實具備控制縱向淘刷及向源侵蝕的功能，至於橫向沖蝕的控制屬另一值得深入研究之課題，建議委託機關納入未來委辦考量。
5.固床工底部的淘刷往往是溪床高程控制不佳所致，透水式固床工可能減緩淘刷的發生。	5.感謝指導，今年度為本計畫執行的第二年，預計明年度總整三年研究成果後，當可較明確回覆。
6.本案有前期計畫，應有大致成果的摘要說明，並說明全程的目標。	6.感謝指導，已將去年度水理特性研究成果與今年度合併於第四章中。
7.表 5 請修正為表 5-1。	7.感謝指導，因應期末報告內容需要，已於期中報告中刪除表 5。
8.P.2-2，公式[2]請修正編排。	8.感謝指導，已重新檢視該公式之編排並修正。
9.P.4-1 圖 4-1 至圖 4-3 缺內文說	9.感謝指導，期末報告中已刪除。

審查意見	答覆說明及修正辦理情形
明。	
10.P.4-2，右下 $Q=Q_3$ ？	10.感謝指導，期末報告中已刪除。
11.透過性 A 之沖刷深度與距上游固床工之距離，似乎較傳統型較深且近，是否如預期成果。	11.感謝指導。固床工趾部的局部淘刷現象並非單一因子可以造成，其為水、砂、坡降等因子與固床工通透構造物之間交互影響的結果，今年度為本計畫執行的第二年，預計明年度總整三年研究成果後，當可較明確回覆。
12.有無提供相關比較數據，以呈現各案例較傳統型之優缺。	12.感謝指導。由於試驗數據量測項目眾多、分析資料量龐大且繁雜，而固床工趾部的局部淘刷現象並非單一因子可以造成，其為水、砂、坡降等因子與固床工通透構造物之間交互影響的結果，故目前僅將各型式透水式固床工的水理特性與其所造成的局部淘刷陳述於第四章中。
13.設計以 10m 為間距，惟實際案例多為 20m，有無相關建議？	13. 水工試驗考量福祿定律法則的理由，在於方便於室內的控制環境下，將所要探索之物理現象與其影響因子進行相似律的縮尺，就如同飛行器於風洞中的試驗、船舶於造波渠槽中的試驗、海岸侵蝕防治於造波渠槽中的試驗相同。藉由資料的量測及後置的因次分析結果，可以獲得無因次的公式，此時，當初試驗期間的比

審查意見	答覆說明及修正辦理情形
	例尺已不再受限，可以依據使用者的需求調整，而獲得想要的結果。但是，無因次公式並非無上限的適用，以目前本研究的水工試驗以及未來總整分析所獲得的透水式固床工設計建議公式，應可以適用於現場 20 m 間距的條件。工程師對於任何公式的應用都仍需要謹慎，有關如何應用本研究的成果於現場，將於第三年的計畫執行期間詳細說明。

附錄二 期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

「106 年度創新研究計畫」案

期末審查會議(D場)簽到單

壹、開會時間：106 年 12 月 4 日（星期一）下午 2 時 0 分

貳、開會地點：第五會議室

參、主 持 人：柯總工程司燦堂 柯燦堂 記錄：高百毅

肆、出（列）席單位及人員：

出席委員			簽 名 處	
單位(機關)	職稱	姓名	職 稱	姓 名
交通大學	教授	王維志	教授	王維志
中興大學	教授	蘇苗彬	教授	請 假
嘉義大學	教授	周良勳	教授	周良勳
水土保持局	組長	范世億	組長	柯在修
水土保持局	副組長	王志雄	副組長	請 假

列席單位及人員	簽 名 處			
	職 稱	姓 名	職 稱	姓 名
逢甲大學	助理教授	謝孟勳	助理教授	謝孟勳
				陳國昌
屏東科技大學	教授	吳嘉俊	教授	吳嘉俊
中央大學	副教授	洪汶宜	副教授	洪汶宜
建國科技大學	副教授	林喻峰	副教授	林喻峰
技術研究發展小組		陳均維		
		陳均維		

透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)

列席單位及人員	簽 名 處			
	職 稱	姓 名	職 稱	姓 名
	工程師	鄭永彰		
	助工	李忠和		
		高育龍		
	工程員	李陳純		
	工程員	高源昇		

伍、散會： 下午 午 時 30 分

SWCA(103.07 月版)

行政院農業委員會水土保持局
「106 年度創新研究計畫」案期末審查(D 場)會議紀錄

壹、時間：106 年 12 月 4 日(星期一)下午 2 時

貳、地點：本局第五會議室

參、主持人：柯總工程司燦堂

記錄：高百毅

肆、出(列)席單位人員：詳簽到簿。

伍、受委託單位簡報：略。

陸、審查意見：如后附件。

柒、結論：

一、 請計畫執行單位參照與會人員相關意見辦理。

二、 本場次審查「地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例」、「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)」、「重力、地震力與降雨引致的邊坡破壞行為模擬研究(II)」及「應用非破壞檢測技術評估以野溪淤積土製作之混凝土強度」等 4 案計畫，各計畫執行單位所提期末報告書，均通過審查，請於 106 年 12 月 22 日前繳交成果報告、會計結束報告辦理結案，如有餘款請一併繳回。

捌、臨時動議：無

玖、散會：下午 16 時 30 分

「106 年度創新研究計畫」案期末審查(D 場)

審查意見

一、地震引致崩塌之坡地易損性曲線建立—以 921 地震為例
(逢甲大學 謝孟勳老師)

1. 簡報所提實際案例應用部分，其操作方式、流程、步驟、使用條件或注意事項等，建議補充於報告詳述。
2. P.117~P.118 表 6.4，驗證結果之說明，建議加強。
3. P.117，有關第六章第三節之驗證，可否說明未通過驗證(約 12%)之可能原因為何？
4. 921 地震後之崩塌地分佈已有相關之圖層資料，為何還需再做判釋。
5. 921 地震後 2 年發生桃芝颱風侵襲，造成崩塌地面積擴大，建議參考納入分析。
6. 是否有用 921 地震實際已崩塌的地區所對應的指標參數值以類神經網路訓練出可收斂的參數，再測試其他已知崩塌地的崩塌機率是否合理。
7. 請增列摘要。
8. 目錄第二章第三節重複，圖 5-7 重複。
9. P.26 圖 2-6 和表 2-7 排序宜一致，表 2-7 文字宜修正。
10. P.46 表 3-2，增列單位。
11. P.54、P.55，排序宜修正。
12. P.93，”波向”修正為”坡向”。
13. 缺工作時程表。
14. 檢核工作項目和內容是否符契約規定。

SWCA(103.07 月版)

二、 透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)
(屏東科技大學 吳嘉俊老師)

1. 複迴歸分析(公式 21)之實務運用方式，建議可於本文內闡述。
2. 第一章可說明本研究為三年期，各年之範圍、本年度工作項目、計畫目標。
3. PPT 檔有些資料，可補充在報告內。
4. 將固床工增加其透水性後，有利也有弊，例如其構造物的強度將降低，另因透水性增加後原野溪的基流量可提供生物的棲息，將變成伏流水影響到生物的棲息。
5. 請補充內頁。
6. 宜列試驗設計計畫。
7. 結論宜有量化資料。
8. P.4-29，ABCD，圖 4-22 宜註記深度的差異性，並考量強沖刷區減緩對下游弱沖刷的影響。

三、重力、地震力與降雨引致的邊坡破壞行為模擬研究(II)
(中央大學 洪汶宜老師)

1. 期中報告審查意見之回覆內容，應可考慮納入報告內，因為其它讀者可能有類似之疑問。
2. 試驗之排樁與實務之施作會有明顯差距時，例如施作品質，會很明顯影響結果嗎？
3. 建議於第一章內說明本研究為多年期，各年度之範圍、本年度工作事項、計畫目標。
4. 降雨會造成地下水位上升、孔隙水壓增加，在地震力作用下則壓密，產生超額孔隙水壓力，降低坡面的安定性，本計畫未來可否嘗試模擬分析。
5. 請修正內頁日期。
6. 圖目錄缺少圖 3-9、圖 4-2、圖 4-10、圖 4-25 及圖 4-28。
7. 宜有試驗設計計畫，並註記 I 的範圍結果。
8. P.4-38，內文和圖名宜整合。

四、應用非破壞檢測技術評估以野溪淤積土製作之混凝土強度
(建國科技大學 林喻峰老師)

1. P.3-37 第 3.3.2 節，所選用之案例，是否為以「野溪淤積土製作之混凝土構造物」？建議澄清。
2. P.1-7(本計畫預計完成之成果)之一為「建立評估野溪淤積土製作之混凝土強度的非破壞檢測試驗流程」，建議於第三章列出此小節。
3. P.3-44，”已完成大部份”之工作項目，請調整用詞。
4. 微鑽孔試驗法似對構造物有破壞行為，似不應歸在非破壞檢測，可視為微破壞試驗。
5. 微鑽孔試驗法之準確性如何？有其適用情況？
6. P.3-17 表 3-8，7-A、28-A 推算強度一樣，宜檢核。
7. 表 3-10 和表 3-11 差異性很大，宜檢核是否試驗條件的問題。
8. P.3-18 超音波宜和抗壓強度率定；微鑽孔試驗宜和抗壓強度率定。
9. P.3-23，圖 3-15 表面磨平是否確實，角度是否修正。
10. 變異係數 CV 值，抗壓強度的差異性宜彙整。
11. P.3-16，H1 水灰比 1.77 和 H2 水灰比 1.75 比較，H1 平均強度比 H2 平均強度高，宜說明。
12. 反彈錘宜註記打擊角度。

「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(二、三)」

期末審查意見答覆說明及修正辦理情形

時間:民國 106 年 12 月 4 日(星期一)下午 2 時 00 分

地點:行政院農業委員會水土保持局第五會議室

審查意見	答覆說明及修正辦理情形
1. 複迴歸分析(公式 21)之實務運用方式，建議可於本文內闡述。	1.遵照辦理，已依建議納入第四章中，詳參 P. 4-39 ~ 4-41。
2. 第一章可說明本研究為三年期，各年之範圍、本年度工作項目、計畫目標。	2.遵照辦理，已依建議納入第一章，詳參 P. 1-5 ~ 1-8。
3. PPT 檔有些資料，可補充在報告內。	3.感謝指導，已依建議補充於第三及第四章中。
4. 將固床工增加其透水性後，有利也有弊，例如其構造物的強度將降低，另因透水性增加後原野溪的基流量可提供生物的棲息，將變成伏流水影響到生物的棲息。	4.感謝指導，已依建議進行透水式固床工的利弊扼要陳述於「結論與建議」中，完整的透水式固床工利弊檢討將於第三年度中進行討論。
5. 請補充內頁。	5.遵照辦理，已依建議補附內頁。
6. 宜列試驗設計計畫。	6.感謝指導，已依建議於第三章中增加第四節「透水式固床工模型之設計計畫」，詳參 P. 3-12 ~ 3-14。
7. 結論宜有量化資料。	7.遵照辦理，已依建議補充。
8. P.4-29，ABCD，圖 4-22 宜註記深度的差異性，並考量強沖刷區減緩對下游弱沖刷的影響。	8.感謝指導，本研究旨在了解固床工趾部的強淘刷區，已補充說明，詳參 P. 4-29 ~ 4-32。