

非浸沒植生群密度對周圍底床沖淤影響之試驗研究

詹勳全¹ 黃胤慈² 彭志雄³

摘要

天然河道常存在河濱植生，植生若生長茂密將阻礙水流致使通水面積減小，進而造成底床型態產生變化，底床之沖刷與淤積改變會影響河道的穩定性，因此河濱植生之密度對河床沖淤之影響為水力學中重要之議題。本研究以室內渠槽試驗探討高莖植物在高灘地存在對附近河床沖淤的影響，比較不同密度模型植生之底床沖淤影響差異。考量河濱植物通常生長於河岸，試驗過程將植生佈置於試驗渠槽之單側邊壁，試驗入口流速趨近試驗泥砂之啟動流速，以雷射測距儀量測平衡型態之底床沖淤變化。試驗植生密度設計為 0.03、0.04、0.05、0.07、0.09、0.12、0.15、0.22 及 0.3，另進行剛性不透水試驗組做為參考比較對象。分析結果顯示密度 0.03 到 0.12 時，無因次化的沖刷坑特徵長度 D 變化範圍介於 1.30-1.50 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 A 變化範圍介於 0.94-1.27 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 B 變化範圍介於 1.11-1.48 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 C 變化範圍介於 1.05-1.42 間，無因次化的堆積丘的寬度 E 變化範圍介於 1.18-1.67 間，無因次化的堆積丘特徵長度 F 變化範圍介於 0.49-1.81 間，特徵長度 A、B、C、D 及 E 具有高度線性相關；密度 0.15 到 0.3 沖刷和堆積型態類似於不透水模型墩柱，沖刷坑由墩柱正前方向渠道中心側沖刷，受邊壁影響呈現半馬蹄形沖刷坑，堆積都是從沖刷坑要結束處開始形成。

(**關鍵詞**：實驗、水流、植生、沖刷)

Experimental Study on Flows Induced Scour around Emergent Vegetation Zone with Different Densities

Chan, Hsun-Chuan⁽¹⁾ Huang, Yin-Tzu⁽²⁾ Jhih -Syong Peng⁽³⁾

Associate Professor¹, Master Student², Ph.D³, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan and Deputy Director, Central Region Water Resources Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.

¹副教授，國立中興大學水土保持學系（通訊作者 Email: hcchan@nchu.edu.tw）

²碩士生，中興大學水土保持研究所

³博士生，國立中興大學水土保持學系；副局長，經濟部水利署中區水資源局

ABSTRACT

In the natural rivers, woody vegetation commonly grows along the riverbank. When flows run through the vegetation zones, the stream processes are markedly affected. This study experimentally investigated the flows induced scour around the vegetation zone with different densities. Since vegetation grows along the nature bank, the model vegetation was arranged along one side of the experimental flume. The experiments were expected to simulate the near bank scour in the jointed effects of vegetation and flow. Model vegetation was simulated by the steel columns in the emergent flow conditions. The experimental flow was steady and flow velocity and was adopted to close to the initiation of sediment motion. The bed morphology of equilibrium scour condition was measured by a Laser Distance Meter in the cases of vegetation density equal to 0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.09, 0.12, 0.15, 0.22, and 0.3. The results showed, while the vegetation density ranging from 0.03 to 0.12, the dimensionless characteristic length D ranges between 1.30~1.50; the dimensionless characteristic length A ranges between 0.94~1.27; the dimensionless characteristic length B ranges between 1.11~1.48; the dimensionless characteristic length C ranges between 1.05~1.42; the dimensionless characteristic length E ranges between 1.18~1.67 and; the dimensionless characteristic length F ranges between 0.49~1.81. It was also showed the dimensionless characteristic lengths A, B C, D, and E are high-positive correlation to the vegetation density respectively. Moreover, the flows induced scour around the vegetation zone extended to the main channel while the vegetation density ranging from 0.15 to 0.3.

(**Keywords:** Experiments; Flows; Vegetation; Scour)

前言

高灘地乃河道低水河槽岸頂至堤前坡間之河床，天然河道之高灘地常有植生生長，常水量時無水流通過，但當洪水來臨時，河道水流會漫過主河道，溢流至高灘地，因此植生生長茂密將阻礙洪水流致使通水面積減小，進而造成底床型態產生變化，底床之沖刷與淤積改

變會影響河道的穩定性。台灣因地狹人稠，河道治理以疏通水流為主要考量，現行河川高灘地種植規範之內容主要針對種植作物進行規範，因此較為嚴謹，若以生態景觀綠美化為考量的時候，其規範之植生密度相對較低，很難做到景觀和遮蔽效果，較難達到近自然之河濱植生型態。河濱植生可有效增加動物的棲息地，作為動物由陸域移動至水域之移動通道，更是許多魚類的避難場，有鑑於人民生活水準提高，

減災同時還要重視環境生態以及生活環境品質，本研究以水槽試驗之方式嘗試了解河濱之高莖植物對與底床沖淤的影響，寄望研究成果可以做為未來規劃設計河濱公園綠帶、人造護岸加入植生綠美化時，河濱植生群落營造對河道水力特性影響之參考。

河濱植生可概分為浸沒與非浸沒兩種型態，水流經過低莖植物之浸沒植生時，因為植生莖葉之柔性，而產生倒伏現象，植生莖葉於水流中貼近河床；而當水流經過高莖之非浸沒植生時，植生無倒伏現象產生，其莖部附近之水流型態有如通過剛性圓柱群一般。洪水水流漫到高灘地時，天然高灘地漫生低莖與高莖植物，低莖植物於浸沒過程易被水流沖倒或沖走，應較無阻礙水流之疑慮，然高莖植物可承受部分的水流阻力，挺立於水流中，故有阻礙水流之疑義。雖然植生對生態、水質改善和環境綠美化都有很大的成效，但植生存在降低通水斷面、阻擋水流流速，易造成水流局部紊動引起底床沖刷等現象，然對河道岸壁而言，岸壁附近的水流剪力卻因而降低，有減緩岸壁沖刷之功效，有此河岸植生之存在對底床沖刷與河壁穩定之影響並非絕對，所以有必要在之間取得其平衡。

本研究以試驗方式觀測水流通過植生群，底床沖淤型態受到植生群影響的改變，探討底床沖淤變化與植生密度之間的關係，透過雷射測距儀量測實驗平衡後沖淤地形，分析沖刷坑

和堆積丘特徵尺寸隨著植生密度變化之情形。

前人研究

河川植生導入除可改善水質、增加環境綠美化外，更有環境維護功效，如：調節氣溫、淨化空氣、防噪音及防風等；此外，植物之透水性可使河川內物種保有棲息地，對河川生態環境之營造有其正面效益。然而，植生存在會減少通水斷面，並衍生之洪水氾濫與河道沖刷，欲評估其淨影響因素頗為複雜，但以河川生態棲地營造為目標，植生導入確實有其必要性 (Brookes and Shields, 1996)，以往對於河岸植生之研究頗多，散佈於景觀、生態、水文與水理等相關領域，本研究以試驗方式探討底床沖淤型態受到植生群之影響，以下乃針對植生水理試驗相關之前人研究加以分析與討論。

1. 植生模型之試驗材質

以往用於水理試驗之植生模型材質種類繁多，研究者多考慮試驗條件及模擬之現場狀況決定所採用的模型材質類型，其中可蓋分為剛性、柔性、以及真實植生進行水理試驗。Wu 等人(1999)提出非柔性植物較柔性植物產生較大水流阻力，且柔韌性植物阻力係數隨植物硬度降低而減小。楊等人(2005)之研究則以塑膠管、鴨毛和假草模擬喬木、灌木等大型多年

生木本植物與低矮草本植物，同時生長情況下高灘地水流紊動之特性，並使用聲波都普勒流速儀(Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)量測三維瞬時流速，透過分析流速分布及紊動強度等資料，比較有無植生存在之水理特性差異。Nepf (1999)於室內試驗以剛性圓柱模型來模擬植生，用三維 ADV 和二維 ADV 量測分析剛性植物在渠道中的阻力及紊流擴散特性，試驗求得阻力係數與植物密度的試驗變化曲線，探討植物區紊動能的特性，其分析結果得知渠道植生區中紊流強度受植生形狀影響，由於渦流強度的減小造成紊動擴散減少，但紊流強度卻可能增加。

由前述研究結果分析可發現，以剛性材料模擬植生時，前人研究使用木棒或鋼棒直立在水中，忽略莖葉之影響；柔性材料多以塑膠片來模擬植生，水流通過形成擺盪，造成的水流型態與剛性植生有很大的差異；以真實植生進行渠道試驗時，由於試驗比例尺縮尺問題難以達成，所以較少出現於前人之研究中。

2. 植生對水流之影響

植物遭遇水流的時候，因高莖或低莖植生的特性會形成不同的水流條件，包括浸沒與非浸沒兩種水流條件。Järvelä(2002)以渠槽試驗探討各式植生對水流阻力之影響，在浸沒與非浸沒兩條件下，以數種不同的排列組合方式

和植生密度等多項控制變因，進行交叉試驗，實驗結果顯示植生阻力之摩擦係數受水深、流速、雷諾數以及植生密度影響甚大，最後透過試驗結果推得不同植生密度之摩擦係數大小，發現莖葉的存在與否對摩擦係數有重大的影響。柯(2014)以鋼棒模擬植生，在非浸沒的情況下進行植生模型平床與底床沖淤平衡後流場量測，觀察底床沖淤前後水流通過植生之差異，由紊流動能分佈圖得知在植生區附近底床有較高能量，沖刷前紊流動能較高之位置即為最大沖刷深度出現之位置，沖淤平衡後因植生區底床出現沖刷坑使水流通量增加，使前述現象較不明顯，植生區後方邊壁附近之紊流能量較平衡前低，且能量隨向下游方向遞減。

以往對於植生對水流之影響研究主要包含植生阻力與流況特性兩研究方向，用以預測渠道水流特性中所受植生之影響，但針對植生對泥砂運移特性影響的探討則相形較少；考量水流通過天然河道之河濱植生，多呈現非浸沒之流況，為彌補前人研究之不足，如果針對非浸沒植生探導植生密度的不同對泥砂運移之影響增加對其瞭解，應較有實務應用價值。

3. 植生附近底床泥砂沖淤情況

自然河川之發展過程，因河川結構物、底床型態與植物等存在，影響水流進而促使底床泥砂沖淤產生變化，改變河床型態。Tsuji moto

(2000)在研究洪水通過植生時，發現水流驅動力可能造成河川結構物與河道植生的破壞，河道底床型態的改變也會影響植物生長，因此植生與河道底床變化關係環環相扣，所以了解植生與河道底床變化關係外，更需瞭解植物存在所造成底床沖淤型態之變化。Elliott(2000)透過渠道試驗將植株模擬為傾斜植莖、鋼性圓柱以及具纏繞性之枝條三種型態，探討不同植生型態造成底床泥砂影響之差異，試驗結果顯示河川植生之導入有助於抑止底床泥砂運移，其中以具纏繞性之枝條效果最為明顯。Follett 及 Nepf (2012)以剛性圓柱模擬蘆葦群於非浸沒流況下，水流通過植生群周圍底床泥沙的沖刷情況，植生密度較低時植生區內部泥砂被沖刷，大部分沉積在植生區下游，距離約為植生區寬度一倍處，當植生密度較高時泥砂從植生區內沖刷被帶往下游得更遠處，Follett 及 Nepf 之試驗雖初步瞭解植生區附近底床沖淤之變化，然其模擬之植生區佈置位置為渠道之正中央，較不符合天然渠道植生生長之區位。

綜觀前述研究，其中水流受植生影響著墨甚多，但對於植生影響底床沖淤特性研究相對較少，本研究便以此方向訂定研究架構。考慮天然河道植生多生長於岸壁附近，在洪水漫淹

過程中灘地上之大型喬木或高莖植物，其靠近底床附近之莖部接近剛性且鮮少生長莖葉，由前人研究結果可得知，此條件應屬於非浸沒植生條件下，適合以剛性結構物來簡化試驗模型，藉以探討其底床周圍之沖淤型態。

材料與方法

在自然的渠道下水流運動與泥砂運移之間關係相當複雜，洪水來臨時現地觀測有一定的困難度及安全性的問題，另外自然條件下除水砂之間的關係外，各種作用力的影響以及自然環境中包含生物等不確定因素，使得自然環境中的水與土砂關係無法精準的推估，所以本研究以渠道試驗方式簡化條件來進行問題探討，藉以獲得單純水流和植生群之間關係及其對於底床泥砂運動的影響，研究結果可供參考預測自然環境中植生群附近底床泥砂變化之趨勢。

1. 試驗設備

試驗渠道為寬 1m、深 0.6m、長 20m 之定水頭循環式水流玻璃試驗水槽，底床坡降固定為 1/1,000，如圖 1 所示，試驗水槽包括：導流段、實驗段、尾水段及蓄水箱等四大部分。

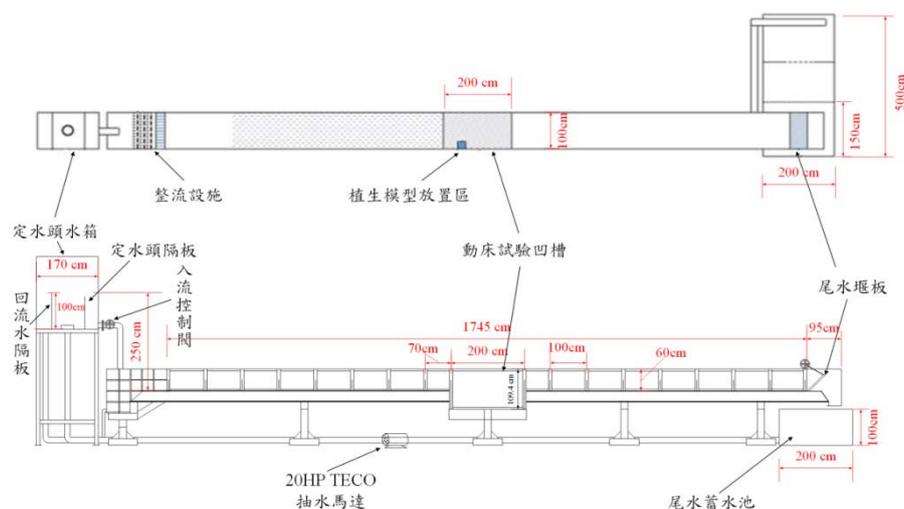


圖1 試驗渠道示意圖

Fig 1. Sketch plot of experimental flume.

(1) 導流段

清水由渠道馬達將水注入定水頭水箱後，透過定水頭隔板，使進入渠槽內水頭維持等高，並以控制閥調整進入渠道之水流流量。水流通過渠道入口段整流設施以消除水流中大尺度的擾動，並減少水面波動，導流段末端設置蜂巢式整流器，水流通過整流段可縮短其完全發展之距離。

(2) 試驗段

此段因渠道底床原為光滑鋼板，為預防水流進入鋪砂床後，因糙度變化使流速變動而引起沖刷，進而影響試驗結果，試驗過程將泥砂膠合於原光滑床面，使其糙度與砂床相仿，以消彌糙度變化之影響。試驗模型

安置於試驗段變床凹槽處，由於渠道全段兩側邊壁皆為透明玻璃，可方便觀察或紀錄試驗之過程。

(3) 尾水段

試驗渠道末端設置可調式尾水堰板，經由尾水堰板的調整，配合入口控制閥流量大小調整，可控制試驗渠道內水位之高低以及試驗流速之大小，水流通過堰板後以自由跌水方式注入尾水蓄水槽內。

(4) 蓄水槽

水流由渠槽流出後進入蓄水槽內，蓄水槽內設有網狀鋼板以及三角堰以及攔汙網，攔汙網用以預防試驗用砂隨水流循環，造成抽水馬達毀損，網狀鋼板可使跌入蓄水

槽內水流擾動降低，方可準確讀取三角堰堰上水頭高，以三角堰流量率定曲線配合堰上水頭高，可推算渠槽內水流流量。

2. 試驗儀器

(1) 雷射測距儀

本試驗進行底床高程量測使用 Leica 公司所生產的型號為 DISTO™ X310 雷射測距儀，精度為 $\pm 1.0\text{mm}$ ，測量範圍為 0.05m 至 120m，附有 1/4" 螺絲孔，可固定於三腳架上或台車上，並以非接觸方式量測底床，可降低量測時之人為因素干擾，因此選此儀器進行地形量測以確保數據之正確性。

(2) 針尺

在有水流的時候雷射測距儀無法穿過水面，進行正確的距離量測，本研究用針尺來量測水位以及沖刷過程之最大沖刷深度和最大堆積高度之量測，確認地形是否發展至穩定，針尺之精度為 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

(3) 試驗台車

在試驗水槽側壁上方以鋼製齒條做為台車軌道，試驗台車配置三軸移動系統，台車上可安置手持式雷射測距儀以及針尺等觀測儀器，以台車配合觀測儀器可量測不同位置渠道底床地形高低起伏之型態。

3. 試驗布置與條件

(1) 植生模型材料與設計

植生模型之固定以 50cm×50cm、厚 0.7cm 方形鋼板為試驗模型底座，並且選用直徑為 0.635cm 之鋼棒，其底部具有螺紋可鎖於模型底座上(如圖 2)，依試驗需求改變植生密度及配置形狀等，植生模型最大密度可達 0.32，鋼板底座四周為可調整高度之基腳，配合試驗砂鋪設厚度，可調整植生模型浸於水中之高度以及埋設於試驗砂之深度。植生模型鋼棒上每 5mm 標示出刻度，刻度用於觀測試驗過程中單株植生模型周圍沖刷深度，減少以儀器置入植生群中測量而對底床沖淤產生影響，完成佈置之植生模型如圖 3 所示。

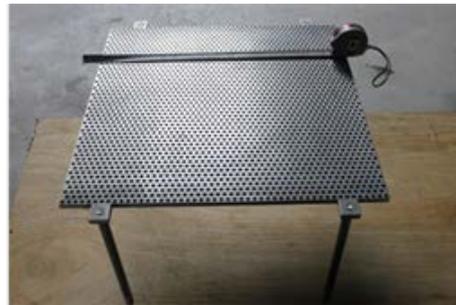


圖2 植生模型固定鋼板底座

Fig 2. Steel base for installing the model vegetation.



圖3 完成佈置之植生模型

Fig 3. Model vegetation installed in the flume.

(2) 試驗砂

由於市售之石英砂粒徑的均勻度不盡理想，無法達到均勻粒徑泥砂之標準，經預備試驗和室內篩分析後，先將市售石英砂其粒徑 1.18mm 以上者以及粒徑 0.6mm 以下者，透過搖篩機分離並捨棄，經篩選後之試驗用砂粒徑分布曲線如圖 4 所示，其 d_{50} 粒徑(重量累積通過為 50%之粒徑)為 0.83mm，粒徑標準偏差 $\sigma_g=1.3$ ($\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ， d_{16} 為重量累積通過為 16%之粒徑， d_{84} 為重量累積通過為 84%之粒徑)。

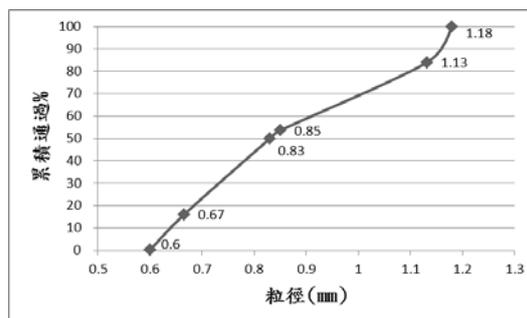


圖 4 試驗砂粒徑分布曲線

Fig 4. Grain size distribution curve of experimental sediment.

(3) 模型密度

由於植生密度越高時，河道之阻力越大，植生引致之沖刷影響範圍可能越大，若試驗渠道之寬度較小的時候沖刷可能延伸到渠道邊壁，渠道邊壁限制沖刷範圍之發展，造成試驗無法正確反應不同植生密度間的實際沖刷影響範圍，需要透過降低試驗流量以減小沖刷發展範圍，然降低流量可能使得試驗條件無法符合泥砂啟動條件的需求，亦不利於比較不同植生密度之沖刷發展歷程，本研究選取以植生佈置面積為控制因子，經預備實驗確定佈置面積達最大植生密度時沖刷影響範圍無延伸至渠道邊壁之情況，植生平面佈置面積採用 10cm×10cm。

植生密度計算方式採模型植生棒於區域內所佔的體積百分比計算(Follett 及 Nepf, 2012)，由於本研究採用剛性非浸沒

植生且模型為均值圓柱體，故植生所占體積百分比即為面積百分比，植生密度 ϕ 為單位面積內植生所占面積，其計算方式為：

$$\phi = \frac{na}{\Sigma A} = \frac{n\pi d^2}{4}$$
，其中 ΣA 為植生區總面積， n 為 1m^2 內植生棒支數， d 為模型植生棒直徑， π 為圓周率。

在天然河道中植生並非整齊生長排列，受限於試驗中植生平面佈置面積尺寸，試驗過程以亂數隨機排列植生並不易達成，本試驗故以交錯排列方式進行植生佈置，為了探討隨著植生密度增加對底床沖淤相關特徵長度的影響，將試驗植生密度設定介於 0.03 至 0.4 的交錯排列型態，植生密度規劃配置分別為 0.03、0.04、0.05、0.07、0.09、0.12、0.15、0.22 與 0.3，共九組。

(4) 坐標定位

本文試驗中定義順水流方向為縱向 X，以上游迎水面第一排模型植生棒中心點為

起點，愈下游 X 座標值愈大，向上游則以負值來表示；水平橫方向為 Y，以試驗渠道側邊壁定義為零，愈遠離邊壁其值愈大；垂向為 Z，以試驗前底床鋪砂高度為零。在試驗台車三軸移動系統設有刻度，量測時依讀數紀錄其位置。

(5) 試驗條件

泥砂啟動之臨界條件需配合水深與流速等條件，實驗設計時參考 Melville (1997) 臨界啟動流速值如表 1 所示，試驗進行時上游入口水深為 16.8cm，底床 d_{50} 粒徑為 0.83mm，泥砂之比重假定為 2.65，經計算後試驗泥砂之臨界起動流速值列於表 1。由試驗流量推估之入口平均流速為 29.7cm/s，其流速小於 Melville (1997) 所推估之試驗用砂臨界啟動流速，故本研究之試驗可視為清水沖刷

表1 泥砂臨界啟動公式及推估值

Table 1. Summary of estimations for the initiation of sediment motion and the results of estimated velocity.

來源	計算公式			附註	
Melville (1997)	$V_c = 5.75u_{*c} \log(5.53 \frac{y}{d_{50}})$			d_{50} : 底床平均粒徑(m)	
	$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (0.1mm < d_{50} < 1mm)$			y : 水深(m)	
	$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.00655d_{50}^{-1} \quad (1mm < d_{50} < 100mm)$			S : 底床值比重	
				V_c : 臨界啟動流速 (m/s)	
y	d_{50}	y/d_{50}	S	V_c (cm/s)	
168 mm	0.83 mm	202.4	-	36.9	

透過入流控制閥及尾水堰板控制試驗段水深及流速，經由上述條件可計算出渠槽試驗段福祿數為 0.232，屬亞臨界流流況 (subcritical flow)，試驗相關條件整理如表 2 所示。本研究使用鋼棒模型模擬植生，植生模型凸出砂面 25 cm，而水深為 16.8 cm，試驗條件近似於水流通過剛性植生之型態。

表2 試驗條件

Table 2. Summary of the experimental conditions

說明		試驗條件
流量 (cms)	Q	0.05
入口流速 (cm/s)	V_{in}	29.7
水深(cm)	y	16.8
福祿數	Fr	0.232 (subcritical flow)
試驗砂		$d_{50}=0.83mm, \sigma=1.3$
植生模型		由直徑為 0.635cm 之鋼棒模擬之剛性非浸沒植生
植生密度 (%)	ϕ	0.03、0.04、0.05、0.07、0.09、0.12、0.15、0.22、

結果分析與討論

本研究以試驗方式探討植生群非浸沒在交錯排列條件下，不同植生密度對底床沖淤變化的影響，在相同水流與泥砂條件下，變換試驗植生密度觀察其底床沖淤影響範圍及程度差異，以植生密度 0.03、0.04、0.05、0.07、0.09、0.12、0.15、0.22 以及 0.30 進行試驗分析，前述結果並與不透水結構物試驗結果進行比較。

不同植生密度底床沖淤觀測結果如圖 5 所示，在植生密度最小情況 $\phi=0.03$ 其迎水面僅寬 8 公分，水流通過植生區因植生密度較小水流受阻礙較少，沖刷現象只有出現在模型植生周圍，因植生存在造成偏折之側向流強度也較小，植生區沖刷起之泥砂往下游運移之距離有限，遂緊鄰植生區落淤堆積成三角型堆積丘。當植生密度增大為 $\phi=0.04$ 時，最大沖刷深度為 2.38 公分、下游堆積丘高度為 1.7 公分，最大沖刷深度出現於植生區內 6 至 7 公分處，水流因為植生的阻礙變大，通水斷面積變小水流帶走更多泥砂，沖刷坑向周圍擴張，往渠槽中心側發展，水流通過植生區後把泥砂帶到區域後方約 5 公分處產生堆積，堆積丘形成初期主體呈現近似矩型，但由於側向流強度開始增加，在靠近渠槽中心側的堆積丘往下游延伸，逐漸轉變形成 L 型堆積丘。植生密度 $\phi=0.05$ 時最大沖刷深度 2.31 公分、堆積丘高度 1.8 公分，最大沖刷

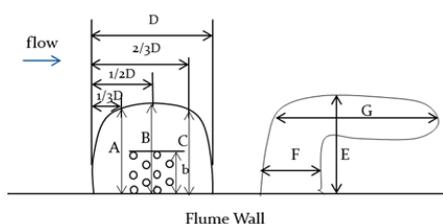
深度仍出現於模型植生區中心，泥砂受沖刷揚起後，植生區後方因通水斷面突闊，使水流變緩，被水流挾帶之泥砂逐漸沉降形成砂丘，然此時堆積丘高度已逐漸顯著，水流穿過植生區後因堆積丘抬升現象明顯，在其後方形成回流現象，因水流越過沙丘流速為減速、沙丘後流速為加速，明顯造成堆積丘坡度迎水面坡緩、背水流面陡之現象。植生密度 $\phi=0.07$ 時最大沖刷深度 2.58 公分、堆積丘高度 2.08 公分，最大沖刷深度出現於植生區內 3 至 4 公分處，因植生密度繼續增大後，最大沖刷發生位置出現往上游移動之現象，沖刷區範圍也明顯擴增，堆積丘影響長度也明顯增加。植生密度 $\phi=0.09$ 時最大沖刷深度 2.5 公分、堆積丘高度 1.55 公分，沖刷區域向上游延伸模型植生區 1/2 邊長長度，最大沖刷深度出現位置已往上游移動至植生區內 2 至 3 公分處，並開始略向渠槽中心側移動，堆積丘則首次出現於植生區內，於植生區最後一排處泥砂開始落淤。植生密度 $\phi=0.12$ 時最大沖刷深度 3.32 公分、堆積丘高度 1.91 公分，最大沖刷深度出現於植生區迎水面第一排處，沖刷坑往上游移到植生區內 7 至 8 公分處開始出現泥砂堆積，堆積丘長度也開始變短。植生密度 $\phi=0.15$ 時大沖刷深度 5.62 公分、堆積丘高度 2.72 公分，此時因為側向流偏折太大，沖刷坑會隨著側向流擴展到渠道中心並開始向下游延伸，影響到主河道底床型態，第一個堆積區始於植

生區下游 5 公分處，堆積區域呈現矩型，第二個堆積區始於植生區下游 84 公分處，堆積區域呈現三角型(圖中無呈現)。植生密度 $\phi=0.22$ 時最大冲刷深度 10.74 公分、堆積丘高度 5.2 公分，最大冲刷深度於模型植生區迎水流第一排前 2 公分處，冲刷坑除持續向渠道中心發展外，並開始向植生區的岸壁延伸，原本出現於植生區正後分之堆積丘已不復見，僅存冲刷坑下游之堆積丘，位於植生區後 70 公分處呈三角型。植生密度 $\phi=0.30$ 時最大冲刷深度 11.78cm、堆積丘高度 6 公分，最大冲刷深度於植生區迎水面第一排前 2.5 公分處，冲刷坑主要以刷深及往渠道中心延伸為其發展趨勢，堆積丘出現於植生區後 52 公分處呈三角型。 $\phi=1.00$ 不透水模型結構物時，最大冲刷深度 18.22 公分、堆積丘高度 4.82 公分，此時因結構物不透水，冲刷主要由結構物前的向下射流所導致，最大冲刷深度為於結構物上游邊緣近邊壁處，冲刷坑發展成深且廣之型態，堆積丘位於結構物後 40 公分處產生呈三角型。

歸納前述之試驗結果可知，植生密度 $\phi=0.03-0.30$ 冲刷坑發展，先由穿過植生區之穿越流主導，冲刷坑由單株植生周圍局部冲刷開始發展，隨著植生密度增加，冲刷坑往植生區上游移動，並向渠道中心側擴張，密度小於 0.12 時，冲刷坑僅出現在植生區

周圍，而密度大於 0.12 後，因植生區存在造成水流偏折之側向流強度逐漸增強，冲刷坑因而往渠道中心發展，其形狀呈現半馬蹄形，並影響到主河道底床型態。

植生區附近之冲刷坑與堆積丘型態，明顯以植生密度 0.12 為分界，在植生密度介於 0.15 到 0.3 時，冲刷坑發展主要受偏折之側向流影響，與植生密度小於 0.12 時，由穿過植生區之穿越流主導迥異。礙於試驗組數有限，針對植生區附近冲刷坑與堆積丘之特徵長度與植生密度關係分析，本研究以植生密度 0.12 以下為主進行分析，比較植生密度為 0.03 到 0.12 所造成的冲刷特徵長度之差異，針對底床冲刷相關特徵長度定義示意圖如圖 6 所示，其中 D 為冲刷坑(以原始底床高程為基準)在縱方向(順水流)的寬度；A 為冲刷坑寬度 1/3D 時的橫向長度；B 為在冲刷坑寬度 1/2D 時的橫向長度；C 為在冲刷坑寬度 2/3D 的橫向長度；E 為植生區後方堆積丘橫向的寬度；F 為植生區後方堆積丘近渠道邊壁縱向的寬度，G 為植生區後方堆積丘近渠道中心縱向的寬度。



lengths圖6 植生群沖刷及堆積尺度示意圖
(在密度0.03到0.12)

Fig 6. Definition sketch for the characteristic
of scour and deposition around vegetation zone
($\phi=0.03\sim 0.12$)

沖刷特徵長度試驗結果以植生區長度 b 無因次化後彙整如表 3 所示，其中特徵長度 A、B、C 及 E 隨植生密度變大其尺寸有成正比變化的趨勢；而特徵長度 D 與 F 則與植生密度成反比變化的趨勢；特徵長度 G 先隨植生密度增加而遞增，至植生密度 0.07 時則轉變為遞減。將特徵長度 A、B 和 C 與植生密度關係以線性方式迴歸，其結果分別如圖 7(a)、(b)、(c)，判定係數 (coefficient of determination) R^2 為分別為 0.7752、0.8952、0.8521，特徵長度 A、B 和 C 與植生密度具有高度相關性；特徵長度 D 隨著密度增加而遞減，線性迴歸結果如圖 7(d) 所示，其線性迴歸方程式之斜率小於特徵長度 A、B 和 C 線性迴歸方程式之斜率，表示沖刷坑縱向寬度減小的幅度小於橫向寬度減小的幅度，可見水流對植生區其泥砂運移以刷深為主，加上沖刷坑位置隨植生密度增加往上游移動，減緩沖刷坑往下游發展之趨勢，造成沖刷坑

長度縱向發展被壓縮；特徵長度 E 隨著密度增加，沖刷坑被帶起之泥砂顆粒於植生區後方堆積，因此堆積區會隨著植生密度增加而寬度也會越大，特徵長度 E 與植生密度關係如圖 7(e) 所示，其 R^2 達 0.9254；特徵長度 F 因為植生密度越高、沖刷深度越深，植生區可能因沖刷坑造成局部通水斷面積增大，通過植生區之水流變弱，降低將泥砂往下游運送能力，然特徵長度 F 出現隨植生密度增加而遞減之關係，如圖 7(f) 所示，然其 R^2 僅為 0.4083；沖刷坑被帶起之泥砂顆粒往下游運送之過程，遭遇因植生區存在而產生之偏折側向流，進而往更下游處運送後，由於側向流水流強度大於穿越流，使堆積丘形狀逐漸發展為 L 型，然可能因為植生區後方側向流與穿越流相互影像作用複雜，導致植生區後方後方非恆定 (unsteady) 效應強烈，特徵長度 G 與植生密度之關係無法以線性迴歸方式代表，兩者線性迴歸結果如圖 7(g) 所示，其 R^2 僅為 0.2094。統計學上當 $R^2 > 0.49$ 時，代表此迴歸有著高度線性相關；當 $0.09 < R^2 \leq 0.49$ 時，表示此迴歸有著中度線性相關；當 $R^2 \leq 0.09$ 時，表示此迴歸有著低度線性相關，綜合以上各特徵長度與植生密度迴歸結果，特徵長度 A、B、C、D 及 E 具有高度線性相關，特徵長度 F 及 G 具有中度線性相關。

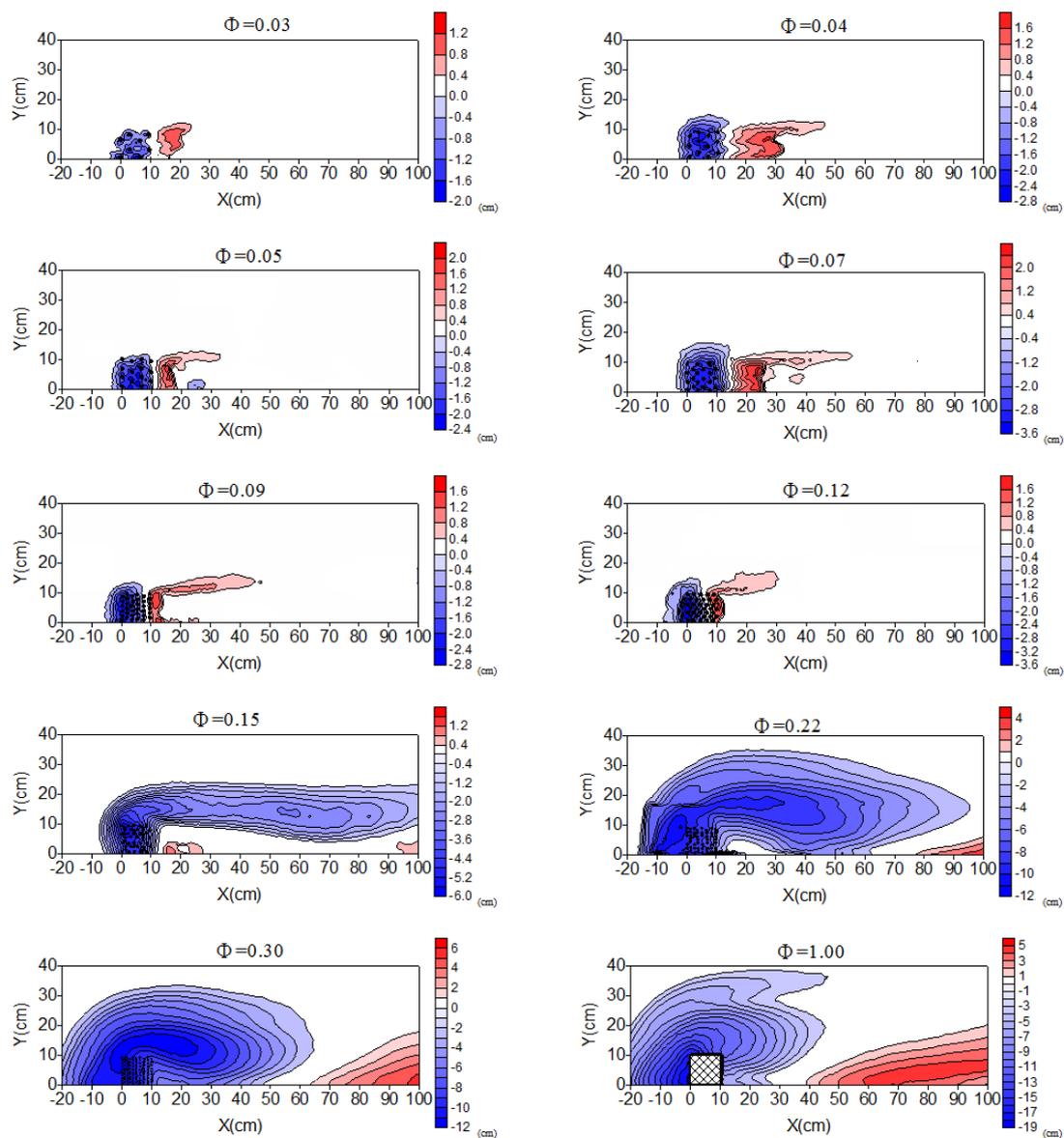


圖5 不同密度沖淤平衡比較

Fig 5. Scour patterns around the vegetation zone.

表 3 密度 0.03 到 0.12 特徵長度試驗結果

Table 3. Experimental results of the characteristic lengths for vegetation zone with densities

$\phi=0.03\sim 0.12$.

密度	A	B	C	D	E	F	G
0.03	0.94b	1.11b	1.05b	1.50b	1.18b	1.04b	1.36b
0.04	1.09b	1.17b	1.11b	1.46b	1.26b	1.81b	2.11b
0.05	1.02b	1.13b	1.09b	1.43b	1.24b	0.63b	2.15b
0.07	1.21b	1.35b	1.30b	1.39b	1.33b	1.14b	4.04b
0.09	1.16b	1.32b	1.22b	1.35b	1.60b	0.53b	3.58b
0.12	1.27b	1.48b	1.42b	1.30b	1.67b	0.49b	2.31b

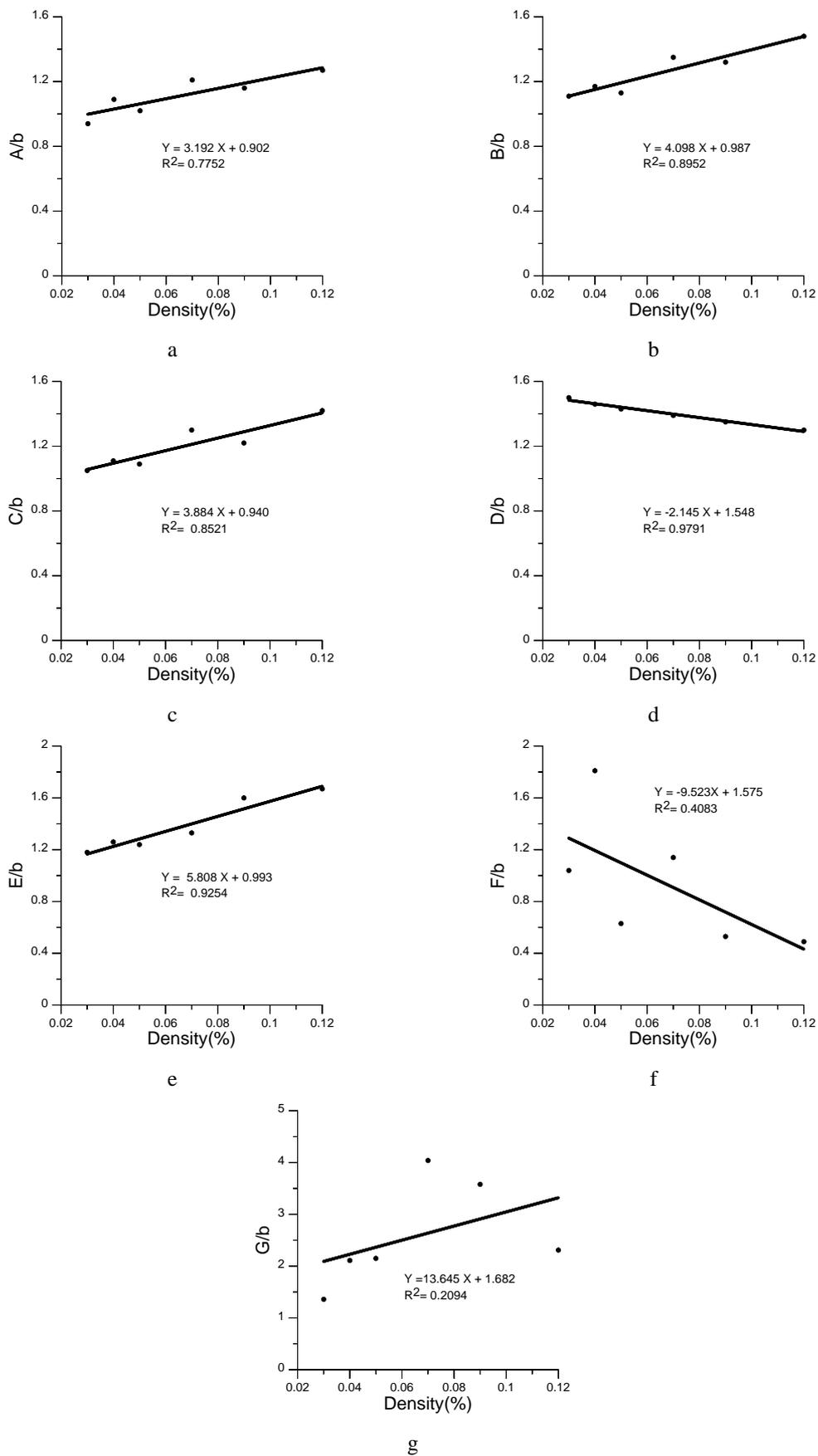


圖7 特徵長度與植生密度關係

Fig 7. Variation s of the characteristic lengths with the vegetation densities.

結論與建議

本研究利用室內渠槽試驗在相同的水流與底床條件下，改變試驗模型植生密度，探討植生密度對底床沖淤影響範圍及程度之差異，試驗模型植生密度選定為 0.03、0.04、0.05、0.07、0.09、0.12、0.15、0.22 及 0.3。研究結果分析得知，在植生密度 0.03 到 0.12 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 D 變化範圍介於 1.30-1.50 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 A 變化範圍介於 0.94-1.27 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 B 變化範圍介於 1.11-1.48 間，無因次化的沖刷坑特徵長度 C 變化範圍介於 1.05-1.42 間，無因次化的堆積丘的寬度 E 變化範圍介於 1.18-1.67 間，無因次化的堆積丘特徵長度 F 變化範圍介於 0.49-1.81 間，無因次化的堆積丘特徵長度 G 變化範圍介於 1.36-4.04 間。特徵長度與植生密度之線性迴歸分析顯示，特徵長度 A、B、C、D 及 E 具有高度線性相關，特徵長度 F 具有中度線性相關，特徵長度 G 由於植生區後方側向流與穿越流相互影像作用複雜，特徵長度 G 先隨植生密度增加而遞增，至植生密度 0.07 時則轉變為遞減。植生密度 0.15 到 0.3 間，沖刷和堆積型態類似於不透水結構物，沖刷坑由植生區正前方向渠道中心側發展，受邊壁影響而呈現半馬蹄形沖刷坑，並影響到主河道底床型態。

本研究透過試驗模擬剛性非浸沒植生群不同密度之底床沖淤型態，探討不同密度植生

群沖刷發生的位置，結果來規劃河濱植生種類的選擇，在可能有較大底床沖刷深度的區位建議可種植根系較深的植生來增加保土能力，另外植生密度在 0.12 以下時，植生區導致之沖刷坑僅出現在植生區周圍，而密度大於 0.12 後，植生區導致之沖刷坑往渠道中心發展，可能影響到主河道底床型態的平衡，由於自然河道上游會有來砂，所以底床沖刷為濁水沖刷，而本研究之試驗在清水沖刷條件下進行試驗，若為了使渠槽試驗更貼近實際狀況，建議未來可以濁水沖刷條件進行渠槽試驗。

參考文獻

1. 楊克君，劉興年，槽叔尤，張之湘(2005)，「植被作用下的複式河槽漫灘水流紊動特性」，水利學報，36(10)：1263-1268。
2. 柯柏睿(2014)，「剛性非浸沒植生群周圍流場及底床沖淤之試驗研究」，國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文。
3. Brookes, A., & Shields, F. D. (Eds.), (1996), "River channel restoration: guiding principles for sustainable projects," Chichester: Wiley: 433.
4. Elliott, A.H., (2000), "Settling of Fine Sediment In A Channel with Emergent Vegetation," J. Hydraulic Eng : 570-577.
5. Follett E. M. and Nepf H. M., (2012), "Sediment patterns near a model

- patch of reedy emergent vegetation,” Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology Geomorphology, 179 : 141-151.
6. Järvelä J. (2002), “Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants,” *Journal of Hydrology*, Volume 269, Issues 1-2(1) : 44-54.
7. Melville, B. W., (1997), “Pier and abutment scour: an integrated approach.” *Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE*, 123(2) : 125-136.
8. Melville, B. W., and Chiew, Y. M., (1999), “Time scale for local scour at bridge piers,” *Journal of the Hydraulics Engineering*, Volume 125 : 59-65.
9. Nepf, H. M., (1999), “Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation,” *Water resources research*, 35(2) : 479-489.
10. Tsujimoto, T., (2000), “Fluvial processes in streams with vegetation,” *J. Hydraulic Res.*, 37(6): 789-803.
11. Wu, F. C., Shen, H. W., & Chou, Y. J., (1999), “Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9) : 934-942.
-
- 105 年 01 月 19 日收稿
105 年 01 月 24 日修改
105 年 02 月 16 日接受