

單根漂流木啟動之動床渠槽試驗

梁閔智 陳樹群*

摘要 本研究運用渠槽試驗模擬單根漂流木在動床渠道之啟動情形，以不同長度、直徑之漂流木並配合與水流方向三種夾角變化，探討漂流木與底床的互動關係、運動方式、表面流場與流速變化，以及比較定床與動床之漂流木啟動穩定因子。研究內容主要分為三部分：第一部分是運用雷射掃描數化地形資料，以判釋結果說明漂流木啟動前渠床微對地形的影響，以及漂流木之運動方式；第二部分是，利用 PTV 追蹤表面顆粒繪製出表面流場與流速；第三部分是運用漂流木臨界啟動之水力條件來計算漂流木穩定因子。試驗結果顯示，漂流木周圍之流場與流速會因不同擺放方向而改變，漂流木在動床中會受地形影響而改變導致漂流木之運動方式、初始啟動門檻值。漂流木置於平行水流方向時，其運動方式可分為軸轉動和滑動兩種模式。而漂流木與水流傾斜與垂直時，亦有兩種運動模式，分別為軸轉動與滑動同時發生與只發生滾動。漂流木在定床渠道中，與水流方向平行漂流木的啟動主要是藉浮力啟動，動床結果顯示受浮力與拖曳力同時影響，漂流木傾斜與垂直水流方向，會比定床條件更難啟動，因此需要較大的水流條件。

關鍵詞：漂流木、漂流木啟動、動床、渠槽試驗

The Mobile Bed Flume Experiment of Single Woody Debris Initial Entrainment

Min-Chih Liang Su-Chin Chen*

ABSTRACT This study conducted flume experiments that simulated the initial entrainment of single woody debris in a moving channel bed. Woody debris of different lengths, diameters and orientations to flow direction were used to explore their interactions with the moving channel bed. In addition, their mode of transport and variation of the flow field were investigated. Results of test were compared to the initial entrainment of woody debris on a fixed channel bed. For the sake of comparison, this study was divided into three parts. In the first part, laser scanning was used to compare channel topography before and after woody debris movement. The second part used particle tracking velocimetry (PTV) to establish the fields of surface flow and velocity. The final part assessed the stability of the woody debris stability factor. The results of these experiments indicate that woody debris orientation influences the flow field, flow velocity and the final bed topography. Topography changes influenced the mode of wood transport and their entrainment threshold. Woody debris oriented parallel to flow had two modes of transport; rotation and sliding to downstream. Under oblique and transverse placements, woody debris movement can also be divided into two; rotation and sliding two modes and rotation is majority. A notable difference between the fixed and the moving bed channel was that entrainment of woody debris was primarily initialized by buoyancy in the fixed bed, whereas both buoyancy and drag-force initiated movement in the moving bed channels. Finally, our results demonstrated that woody debris in a moving bed channel needed larger discharge to initiate movement than that in fixed bed channels.

Key words: woody debris, wood entrainment, mobile bed, flume experiment.

一、前言

樹木因外力或死亡後進入河道，長度大於 1m 和直徑 10cm 以上者，被稱為漂流木 (wood debris)(Wohl and Scott, 2017)。漂流木會以不同的方式與河道及河漫灘之地貌、水文和生態產生交互作用，並改變河川地形地貌 (Montgomery et al., 2003)、產生水流阻力、降低流速及泥砂輸送力 (Wohl 2013)、增加河道中有機質含量 (Diez et al., 2001)。在強降雨的作用下可能導

致邊坡不穩定引發土石流及崩塌事件，漂流木往往伴隨其事件進入河道，與土石流結合形成複合式災害。再者，河道中之漂流木運移與堆積會破壞人工結構物 (如橋梁及堤防等)、阻塞河道、進而增加洪水災害，而造成人類的生命及財產損失 (Richmond et al., 1995)。

鑒於上述原因，近年來漂流木運移與堆積成為重要研究之

議題，主要研究方向可分為現地調查 (Galia et al., 2017, Sullivan et al., 2017, Jamieson et al., 2018)、數值模擬 (Ruiz-Villanueva et al., 2014, Ruiz-Villanueva et al., 2016)、室內渠道實驗 (Braudrick and Grant, 2000, Bocchiola et al., 2006a, Bocchiola et al., 2006b, Dey et al., 2008, 陳樹群 et al., 2011, Bertoldi et al., 2014, Rusyda et al., 2014)，其中以現地調查居多。目前現地調查著重於災害事件前後，主要分析漂流木運移距離、堆積方式及地形與地貌變化。而對於漂流木初始啟動因子、與底床相互作用、周圍流況變化及運動方式之研究甚少。天然河道中漂流木運動，主要是發生在較大流量條件下啟動運移，因此想藉由現地調查探討漂流木之初始啟動以及各因子的影響有其難度 (Braudrick et al., 2000)，大部分學者乃利用室內啟動研究實驗進行。

漂流木室內試驗中最早由 Braudrick et al., (2000) 利用渠槽進行物理模型試驗，探討漂流木運動與輸送之水力門檻值，並且提出簡單的漂流木運動機制模式，其中提到漂流木方向與根系存在會對穩定性有顯著影響。陳樹群 et al., (2011) 利用渠槽試驗模擬單根漂流木之初始啟動，提出能預測任意擺放方向之漂流木啟動模式，並且指出漂流木之穩定性與水流之夾角、漂流木密度、直徑、渠道坡度及底床粗糙度等因子有關。然而，上述試驗條件中，皆簡化了地形因子，將地形條件設定為定床，忽略了地形變化與漂流木互動之影響。

本研究將利用渠槽試驗模擬不同長度、直徑及與水流方向夾角之單根漂流木在動床河道中的運動情形。利用顆粒追蹤速度法 (Particle Tracking Velocimetry, PTV) 以測量表面流場及流速，以及利用雷射掃描之方式建立數值地形模型 (DEM)，並觀察漂流木與底床互動對漂流木運動之影響。由於本研究之試驗條件與陳樹群 et al., (2011) 之試驗條件相近，故亦針對其漂流木穩定因子之結果做比較，並建立無因次方程式分析漂流木穩定指標在動床與定床之差異。

二、漂流木運動機制

Braudrick et al., (2000) 利用均勻木製圓柱當作漂流木模型，放置於均勻流場且光滑平面之定床渠道中，探討漂流木啟動之水力門檻值，並提出簡單的漂流木運動力平衡模式。當朝上游方向的摩擦力 (friction force) 與沿水流方向的重力 (gravitational force) 分量及拖曳力 (drag force) 達到平衡時，即為漂流木運動之臨界啟動狀態。一般而言漂流木啟動前水流往往未能淹沒漂流木，因此上舉力 (lift force) 可被忽略。Braudrick 等人之模式只考慮了漂流木運動方式為滑動之情況，然而在天然河川中漂流木運動方式並非只有滑動狀態。Bocchiola et al., (2006a) 提出了兩種漂流木運動之力平衡方程式，分別考慮了滑動 (與水流方向平行) 與滾動 (與水流方向垂直)，並將式子整理後提出一個以力平衡觀點的漂流木初始啟動之無因次方程式 ((1)式)。

$$X^* = \frac{1}{2} Fr_1^2 \frac{1}{(\cos \alpha \tan \phi - \sin \alpha)} \quad (1)$$

$$Y^* = \frac{\rho_w d_w}{\rho D} = \frac{1}{1 + C_D X^*} \quad (2)$$

其中， $Fr_1 = U/\sqrt{gd}$ 為漂流木福祿數， d 為漂流木與水流方向垂直之特徵長度 (投影長度)，因此當漂流木與水流方向平行 ($\theta=0^\circ$) 時， d 為漂流木直徑 (D)；漂流木與水流方向垂直時 ($\theta=90^\circ$) 則 d 為漂流木長度 (L)；漂流木與水流方向呈任一夾角 θ 時， $d = (L \sin \theta + D \cos \theta)$ 為兩者之組合 (陳樹群 et al., 2011)。而 ρ 、 L 、 D 分別為漂流木密度、長度與直徑， g 為重力加速度， U 為水流流速， C_D 為平均形狀阻力係數 ($C_D=1.41$ ，(Braudrick et al., 2000))， ρ_w 為水的密度， d_w 為漂流木啟動時的水深， α 為河床坡度， ϕ 為滑動或滾動的漂流木底床之摩擦角。在 (1) 式中 X^* 代表漂流木受到拖曳力、坡度與摩擦力之影響，(2) 式中 Y^* 代表漂流木所受浮力影響或水深與漂流木直徑之比值，可稱作為相對浮力數 (relative buoyancy number)。Nicholas et al., (2002) 提出漂流木福祿數 (Woody Froude Number, F_{rl}) 因子之概念，漂流木福祿數表示漂流木受水流作用之強度。本研究將與定床試驗結果以及漂流木初始啟動之無因次方程式作比較，探討漂流木在動床中 X^* 值與 Y^* 值之間的差別，以及如何影響漂流木之起動方式。

三、試驗材料與方法

1. 試驗材料

本研究於動床之室內渠槽進行漂流木試驗，試驗渠槽全長 14.3 m、寬 0.6 m、深 0.6 m、坡度為 0.6%，主要由頭水箱、渠道、靜水池、蓄水池構成如圖 1 所示。渠道出水口放置了蜂巢型吸管及三層均勻礫石之整流器來穩定流況，透過馬達將水流由蓄水池抽至頭水箱再進入渠道，形成完整循環系統。使用顆粒追蹤速度法測量表面流速，以改善手動開啟閘門控制流量之誤差。由於試驗水深較淺，因此假設表面流速與平均流速相等，結合渠寬及水深來計算流量。水深的量測是利用測針，並裝置於可前後左右移動的架子上。將試驗區設計在距出水口 5.7 m 處，並且在進入試驗區前端設計了一個底 0.4 m、高 0.1 m、寬 0.6 m 的壓克力三角柱以減緩水流對底床造成淘刷，在後端放置了一塊長方形 (長 0.6 m、寬 0.01 m、高 0.1 m) 之壓克力板保持底床砂的厚度。在試驗段中鋪設了長 4.05 m、寬 0.6 m、高 0.1 m 之均勻石英砂 (粒徑 $d_{50}=1.236$ mm)。

本研究採用之漂流木是假設無根系之圓木 (密度約介於 $650\sim 790$ kg/m^3)，圓木直徑 (D) 分別為 0.03、0.04 及 0.05 m，長度 (L) 為 0.15、0.20 及 0.25 m，總共有 5 支漂流木模型。木頭細長比 (slenderness； L/D) 介於 4.19~6.86 (圖 2、表 1)。漂流木以與水流方向呈 0° 、 45° 和 90° (圖 3)，為了防止漂流木長期浸泡於水中會導致密度改變，因此將漂流木塗上防水護木漆，以保持密度不變。

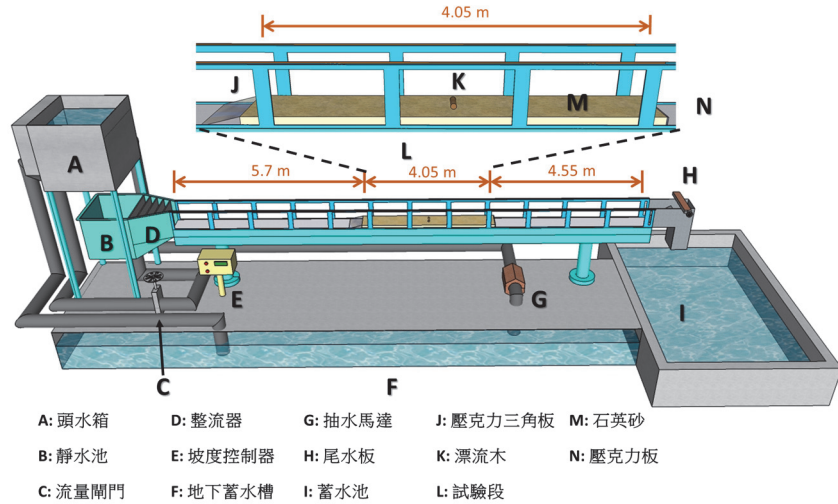


圖 1 試驗渠槽模型

Fig.1 Experiment flume

表 1 漂流木模型之尺寸

Table 1 Sample sizes of woody debris.

WD編號	D (m)	L (m)	Volume (m ³)	Weight (kg)	ρ (kg/m ³)	L/D (.)
D5L20	0.047	0.197	0.00034	0.271	792.89	4.19
D4L25	0.040	0.249	0.00031	0.215	687.11	6.22
D4L20	0.040	0.199	0.00025	0.173	691.80	4.97
D4L15	0.038	0.151	0.00017	0.126	735.76	5.39
D3L20	0.029	0.210	0.00013	0.106	764.18	6.86

註：D5L20 代表漂流木直徑 0.05 m，長度 0.20 m，依此類推



圖 2 漂流木樣本

Fig.2 Samples of woody debris.

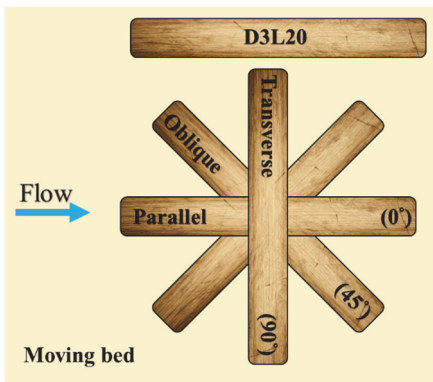


圖 3 漂流木模型啟動試驗擺放型態

Fig.3 Patter of orientations of log deployments in the incipient motion experiments.

2. 試驗方法

本研究為瞭解漂流木在動床渠道上的運動機制以及與底床互動之影響，分別使用了 5 支不同直徑、長度的木頭進行漂流木啟動試驗，每一種尺寸之漂流木分別以與水流方向平行 (0°)、傾斜 (45°) 及垂直 (90°) 三種方向進行試驗，並將圓木擺放在渠道中間以減少漂流木受到渠道的邊界效應影響。流量由 $Q=0.00056 \text{ m}^3/\text{s}$ 開始，為了防止瞬間改變流量導致漂流木受到影響，因此每 2 分鐘增加一次流量；當調整至指定流量後 (指定流量對應為閘門圈數分別是 5、5.25、5.5、5.75、6 圈)，即進行歷時 30 分鐘的觀測。試驗 30 分鐘後停止供應水流，並將漂流木移除進行地形掃描之工作。如果流量未達能使漂流木啟動將重新放回原位，再依照以上的實驗步驟再次進行，直到木頭啟動。試驗次數共進行有 15 組，由於漂流木試驗條件不同啟動的流量也不同，因此每組試驗最多經歷 3 種不同階段之流量 (0.00098、0.00176、0.00256、0.00370、0.00510 m^3/s)，水流以清水流為主，流量的測量是利用表面流速搭配平均水深求得。漂流木啟動之水流條件，其雷諾數 (Reynolds number) 介於 $1.64 \times 10^3 \sim 7.02 \times 10^3$ ，其水流福祿數 (Froude number) 0.44-0.66，為亞臨界流。本研究使用之雷諾數與福祿數與陳樹群 et al., (2011) 相近。

表面流速量測是採用顆粒追蹤速度法的方式測量。本試驗使用的顆粒是黑色輕質黏土長度約 3 mm 至 4 mm、直徑約 2 mm 至 3 mm 的長條狀粒子，由於輕質黏土密度小重量輕可浮在水面上，其顏色與底砂顏色有較大之對比，容易利用影像處理做區分，非常適合做為顆粒追蹤的材料。將拍攝後的影像經

由 MATLAB 軟體做影像處理, PTV 的原理為追蹤每張影像中顆粒的特徵點, 經由連續影像所捕捉到的點進行分析, 以獲得影像中顆粒的移動位置與速度, 最後透過座標轉換投影出顆粒的真實位置和表面流速, 由於試驗的水深較淺, 因此將表面流速當作平均流速。

本研究參考 Ni et al., (2006) 的雷射掃描量測法, 利用攝影機拍攝雷射線, 並記錄投射在渠道上的雷射線, 以收集不同時間下之雷射線位置。此種的方式不僅便利且精準, 每次掃描時, 只需花費 5 至 6 分鐘。使用之雷射線具有 90° 的散射角度 (Fan Angle), 可以有效的包覆整個試驗渠槽, 雷射線的寬度約為 1 mm。雷射安裝在一個有效行程 1 m 之皮帶滑台上, 在滑台前端接上一個調速馬達及速度控制器, 利用控制器將雷射移動速度調整於大約為 0.192~0.208 cm/s 之速度。藉由座標轉換建立地形模型 (網格大小為 0.05cm*0.05cm)。再來利用 MATLAB 做影像分析, 捕捉所有影像中的雷射線, 將這些雷射線做內差法來取得完整的地形資料, 最後利用座標轉換將地形資料轉為真實的數值地形模型。

四、試驗結果與討論

1. 漂流木與底床之互動

漂流木與底床之互動, 是採用漂流木啟動前後之地形資料進行定性分析, 利用地形型態變化說明漂流木與底床之互動方式。當漂流木擺放方向為 $\theta=0^\circ$ 時, 水流通過漂流木會受圓木橫斷面的阻礙產生向下射流, 其淘刷位置會集中於漂流木前端, 而前端被淘刷起的泥砂會在漂流木兩側形成長條狀堆積, 有助於提升漂流木之穩固性 (圖 4(b))。隨著試驗時間增加長條狀堆積會慢慢延伸, 當延伸至超過漂流木長度後, 會於漂流木後方堆積, 逐漸形成 V 型堆積形態, 進而增加漂流木後方之穩固性, 減少漂流木滑動之發生。由於後方堆積物的阻礙, 使漂流木的運動方式會傾向先發生軸轉動再滾動 (圖 4(c))。其中, 直徑最小的漂流木對底床的變化較小, 與底床互動關係不顯著, 其啟動方式仍以滑動為主 (圖 7(a))。

當漂流木擺放方向為 $\theta=45^\circ$ 時, 水流受到漂流木阻擋向兩端分流, 導致漂流木兩端之渠床產生淘刷及堆積。漂流木後端方向比前端更接近水流之流向, 因此漂流木前端阻力較大, 渠

床地形會先由此發生變化 (圖 5(b))。而後端會慢慢呈現三角形堆積型態, 泥砂堆積體比前端堆積者較容易被往下游推移, 因此形成前端地形的堆積長度較後端堆積短和厚。觀察漂流木的運動方式可發現, 當漂流木前端受到較強的水流會產生不平衡之狀況, 前端易發生淘刷, 淘刷達到一定程度, 會發生軸轉動。當漂流木與水流方向夾角漸漸變大, 隨著漂流木的迎水面積增加阻力也跟著增加, 而漂流木為了回到較小的受力狀況, 後端便會成為支點發生軸轉動, 使漂流木與水流方向夾角角度變小 (接近 45°)。先前底床與漂流木互動產生之堆積體, 對木頭有稍微支撐之效果。軸轉動的過程中會改變原有的床支撐, 使漂流木在軸轉動時伴隨著滑動。持續發生淘刷與堆積作用後, 在漂流木後方會形成穩固的堆積狀態, 使漂流木的運移會趨向穩定 (圖 5(c))。其中漂流木直徑較小只會以滾動的方式向下游移動 (圖 7(b))。

當漂流木擺放方向與水流方向呈 $\theta=90^\circ$ 的結果顯示, 漂流木會阻擋水流, 使水流均勻的向兩端分流, 受到兩端漂流木影響水流會向下射流, 導致漂流木兩端渠床產生淘刷與堆積情形, 兩側之淘刷影響範圍會由木頭兩端往中心位置移動 (圖 6(b))。漂流木啟動階段, 淘刷起的泥砂會在漂流木後方呈三角形堆積體, 此堆積體隨時間增長而越大。由於漂流木與泥砂相互作用, 使漂流木運動方式以軸轉動和滑動同時發生。在後方的堆積物會使漂流木趨於穩定 (圖 6(c))。但若漂流木直徑太小則產生的底床沖刷亦屬輕微, 這時漂流木的運動是以滾動的方式進行 (圖 7(c))。

在陳樹群等人 (2011) 利用渠槽試驗, 模擬漂流木在定床渠道中之初始起動, 試驗結果顯示, 當漂流木擺放與水流方向平行時, 漂流木會受到浮力之影響, 以半浮動半滑動之運動方式向下游移動, 而漂流木與水流方向傾斜及垂直時, 則以滾動之方式向下游移動。該結果與本研究發現不盡相同, 本研究較大尺寸之漂流木呈現出不同的運動方式, 而尺寸較小之漂流木運動方式 (圖 7) 則與定床相似, 較大尺寸之漂流木會與底床泥砂發生明顯的交互作用, 進而改變漂流木的運動方式。由以上之結果可發現漂流木不同擺放方向, 會改變漂流木之運動型態及啟動門檻值, 而這些影響都是來至於底床的淘刷與堆積。底床的變化除了受漂流木本身之影響外, 亦受水流的影響, 水流流速與流場會使底床的泥砂淘刷與運移, 下一節將針對水流的流速與流場進行分析。

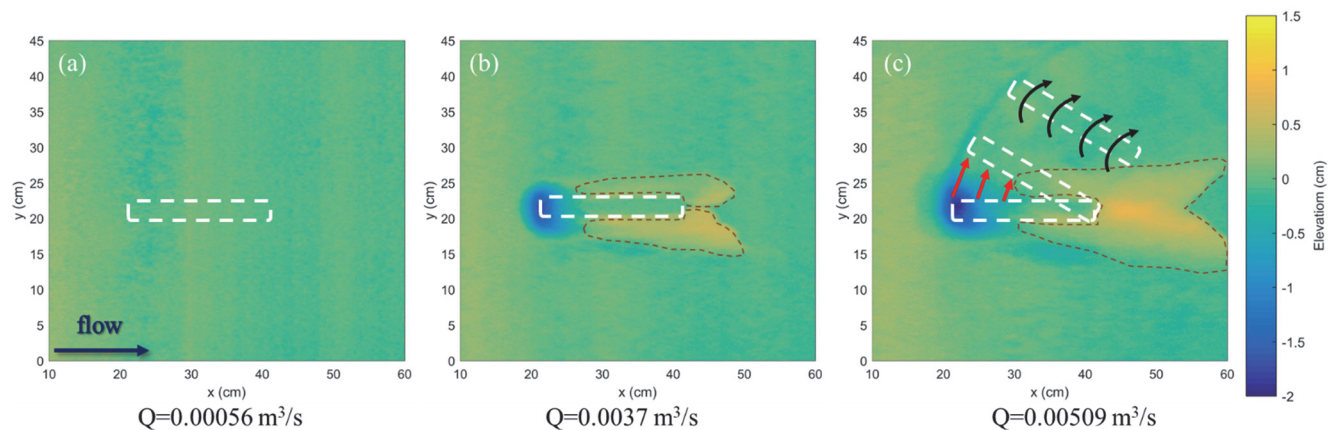


圖 4 漂流木擺放方向 $\theta=0^\circ$ 對底床之影響及運動方式

Fig.4 The influence of the woody debris of placement direction $\theta=0^\circ$ on flume bed and movement modes.

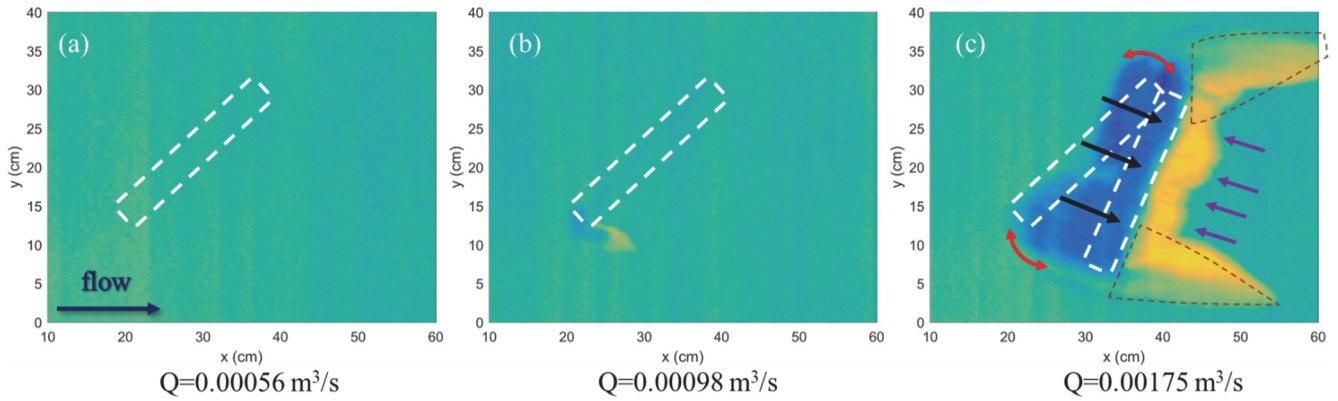


圖 5 漂流木擺放方向 $\theta=45^\circ$ 對底床之影響及運動方式

Fig.5 The influence of the woody debris of placement direction $\theta=45^\circ$ on flume bed and movement modes.

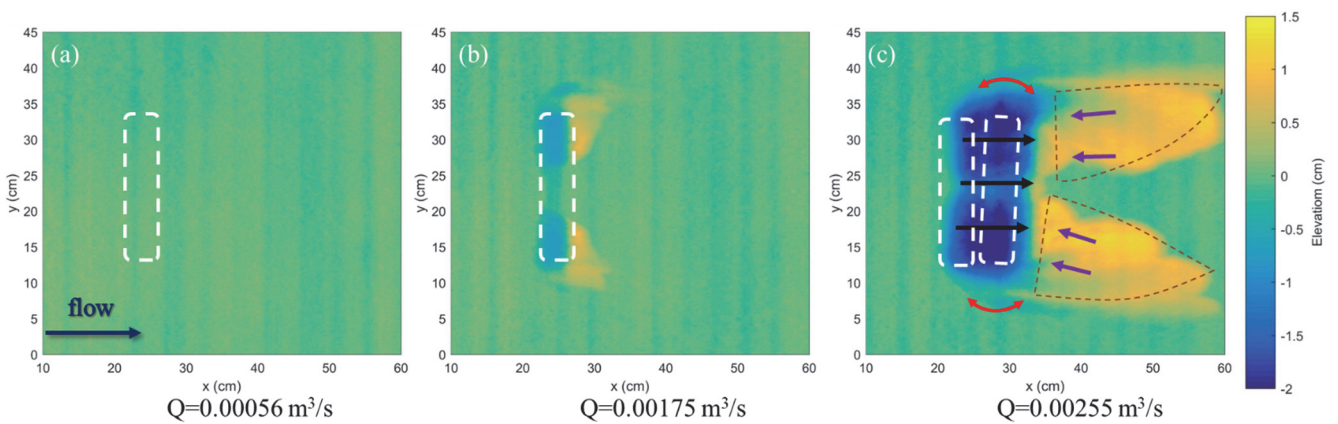


圖 6 漂流木擺放方向 $\theta=90^\circ$ 對底床之影響及運動方式

Fig.6 The influence of the woody debris of placement direction $\theta=90^\circ$ on flume bed and movement modes.

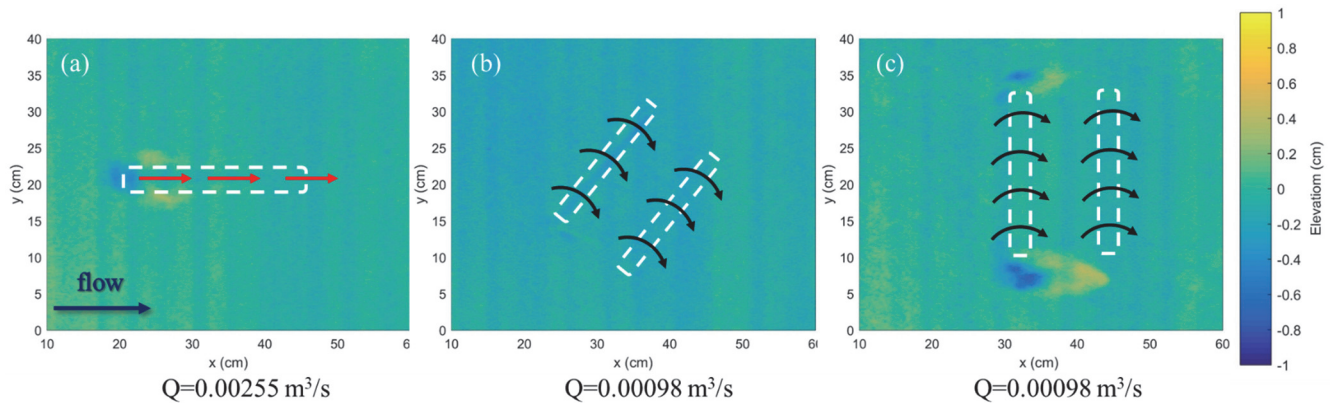


圖 7 漂流木 (小直徑) 不同擺放方向對底床之影響及運動方式

Fig.7 The influence of the woody debris (smaller size) with different directions on flume bed and movement modes.

2. 漂流木對表面流場及流速之影響

表面流場與流速試驗結果顯示，漂流木不同擺放方向會對整個流場有很明顯的影響，但漂流木的尺寸對於表面流場的影響較不顯著。當漂流木擺放方向為 0° 時 (圖 8(a))，漂流木前端水流流速會迅速下降並向兩邊分流，出現湧水現象，此時前端的水流會對漂流木前端產生向下射流，導致漂流木前端發生淘刷現象。因漂流木兩側之水流流向與漂流木方向呈現平行，故表面流場沒有太大的變化同時對底床的影響力較小；因此前端淘刷起的泥砂會堆積在漂流木周圍，並向下游緩慢移動形成

對漂流木的兩側穩定作用，在漂流木後端的水流也呈現減速之情況，當漂流木周圍的泥砂進入漂流木後端的區域後，會大量堆積於漂流木後端，因而有助於漂流木的穩定，使漂流木較不易以滑動方式啟動，同時也會改變漂流木的啟動條件。

當在漂流木擺放方向為 45° 時 (圖 8(b))，漂流木前端會出現湧水之現象，流場與 0° 方向相比有明顯的不同。由於漂流木在右岸偏上游端，左岸偏下游端，因此漂流木右岸會比左岸受到更大的水流作用力，漂流木右端的底床淘刷會比左岸更加明顯，而右端後面的水流會明顯的減速，使泥砂會堆積於漂流木

右端後面,較不易往下游移動。但在左端的水流受到的阻力小,泥砂容易被水流往下游夾帶,因此形成右端堆積範圍較短左端為大之情形。由於漂流木右端的水流作用力較大,故右端先發生運動,左端成為軸轉動之支點,此時漂流木與水流夾角開始改變,但由於右端後方的泥砂堆積使漂流木運動有限。在右端運動的同時左端受水流作用力也隨之增加,由於左端的泥砂堆積量小,因此啟動使漂流木右端將形成支點再次發生軸轉動,使漂流木角度減少,此種運移方式會繼續交替發生。在漂流木後方會形成一片流速極小的緩流區,這邊的流場造成兩個大小不一的漩渦,可以明顯的看出右端的水流受到的影響較大因

此漩渦也較大。

在漂流木擺放方向為 90° 時 (圖 8(c)),水流會從漂流木中間均勻分流至兩端,在前方出現大量湧水之情形。漂流木兩端受到的水流作用力是相近的,因此兩端會同時出現淘刷之情況,堆積方式亦相似。淘刷的位置會隨著流量增加由兩端向試驗圓木中心移動,漂流木後方會形成緩流區,並形成兩個三角形的堆積體。緩流區中的泥砂夾帶能力較差,可以觀測到漂流木後方所形成兩個大小相近的漩渦。泥砂的堆積會穩固漂流木,並增加漂流木的啟動之門檻條件,由於兩端的受力是相近的,因此漂流木運動會以不規則的軸轉動輪流交替發生。

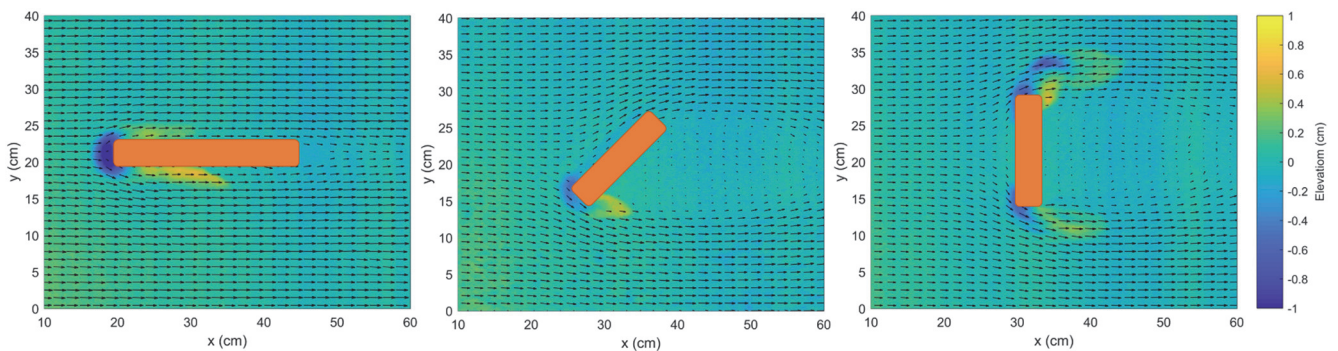


圖 8 漂流木不同擺放方向之流場變化

Fig.8 Flow field changes in different directions of woody debris

3. 動床與定床的 X^* 及 Y^* 值之比較

本研究將試驗結果代入 Bocchiola et al., (2006a) 以力平衡的觀點建立之 (1) 及 (2) 式,並與陳樹群 et al., (2011) 定床試驗之結果相比較,結果如圖 9 所示。試驗結果顯示漂流木擺放方向為 0° 時, X^* 值與 Y^* 值呈現較無相關,因此漂流木啟動所需要之水深與底床粗糙度及漂流木福祿數之間的關係小。當 Y^* 值落在虛直線上方代表漂流木主要是受到浮力影響而啟動,而 Y^* 小於 1 代表漂流木啟動會受部分拖曳力 (X^* 值) 之影響,因此漂流木運動並非如定床實驗是完全受浮力作用,也包含了部份拖曳力。在漂流木擺放方向為 45° 和 90° 時,部分的結果 Y^* 會落在實曲線上方代表漂流木受浮力作用大於 Y^* 落於實曲線下方者。比較漂流木最大與最小直徑之結果顯示,在所有角度中小直徑之漂流木 (D3L20) 的 Y^* 值比大直徑之漂流木 (D5L20) 大,因此小直徑漂流木受浮力之影響較顯著。而 X^* 值之比較部分,漂流木擺放方向為 45° 和 90° 的變化較不明顯,而 0° 方向小直徑受到的拖曳力影響明顯較小。

漂流木運動方式之結果,漂流木擺放為 0° 方向時,漂流木運動主要是以浮動或軸轉動的方式啟動,有此可知漂流木受到不止浮力之作用力,因此 Y^* 值低於 1。漂流木擺放方向為 45° 和 90° 時,漂流木會受到下游端的土砂影響致所需要之啟動流量提高;由地形掃描結果 (圖 5 和圖 6) 中,可發現漂流木擺放方向為 45° 與 90° 下游端有土砂堆積並對其產生阻力,因此增加漂流木受水流之拖曳力與浮力影響,導致部分結果 Y^* 值落在實曲線上方。除此之外, 0° 方向之結果中直徑最大之漂流木 (D5L20),其 Y^* 值有明顯的下降,漂流木直徑增加啟動流量下降,代表漂流木受動床影響,因漂流木前端的土砂受到大

量淘刷導致木頭前端往下傾斜 (圖 10),受到較大的浮力影響導致漂流木啟動,故漂流木在動床中會降低漂流木啟動之門檻值。

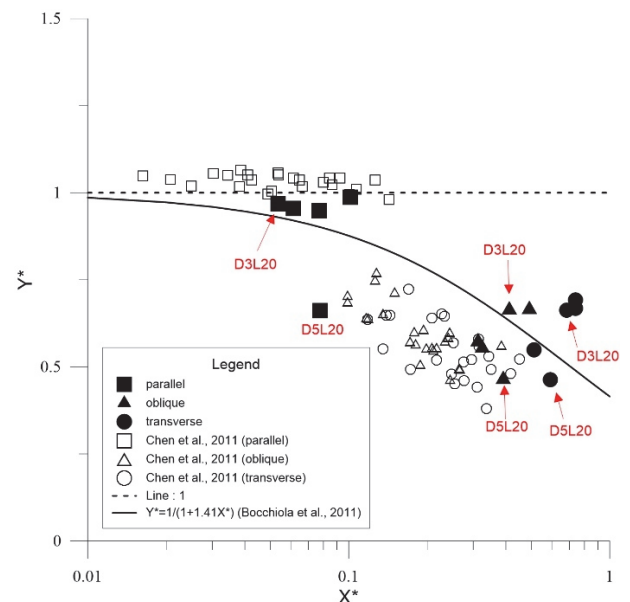


圖 9 以力平衡觀點之漂流木穩定曲線圖

Fig.9 Woody debris stability curve from the view point of force balance

本研究之試驗結果與陳樹群 et al., (2011) 研究所得做比較如圖 9 所示,由圖中亦可以發現漂流木擺放方向為 0° 時,兩種試驗條件之 Y^* 值與 X^* 值沒有顯著關係,而定床條件之 Y^* 值會落在 1 以上,故漂流木啟動以浮力為主導,運動方式為半浮半滑動,而漂流木在動床渠道中因底床變化使木頭受到拖曳

力影響，漂流木運動為滑動或軸轉動，其結果與本研究發現稍有不同。在漂流木擺放方向為 45° 與 90° 時，定床條件中 Y^* 值與 X^* 值呈現負相關，而動床條件中呈現沒有顯著關係，代表漂流木初始啟動水深與漂流木福祿數無關，而動床條件之 X^* 都明顯大於定床條件之結果，代表漂流木在動床中會受底床影響導致啟動條件提高，拖曳力作用也隨之增加。因此說明了漂流木在動床渠道中，會因為底床的變化使漂流木的啟動條件以及運動方式改變。

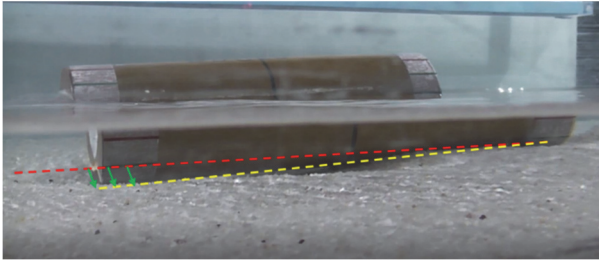


圖 10 漂流木 (D5L20) 前端往下傾斜

Fig.10 The front end of woody debris is tilted down.

五、結 論

本研究藉由渠槽模擬試驗，探討單根漂流木在動床渠道中，對泥砂堆積運移以及流場及流速之影響，並比較動床與定床條件之漂流木穩定因子 (X^* 值與 Y^* 值) 之影響。本研究以改變漂流木之長度、直徑及與水流方向夾角，利用雷射掃描數化地形資料，觀察漂流木啟動前後渠槽微地形之變化，以及啟動後與底床互動之情形。在渠道中的漂流木不同擺放方向以及尺寸大小，會使底床淘刷與堆積的型態與規模有所不同。漂流木的運動方式會受到地形變化之影響，而呈現不同的運動方式。表面流場及流速試驗結果顯示，漂流木不同擺放方向確實能影響渠道中水流之流況；而漂流木的尺寸大小對於流場的影響較不明顯，流場與流速的改變會對底床的泥砂造成影響，進而改變漂流木之運動方式。利用 X^* 與 Y^* 的兩無因次因子，進行動床與定床之比較，比較結果顯示，漂流木擺放方向為 0° 時，定床結果顯示漂流木主要受浮力影響而啟動，動床結果顯示漂流木除了受浮力影響外還有少許受拖曳力影響，進而降低漂流木啟動條件。此外，直徑較大之漂流木 (D5L20) 主要受地形影響，以拖曳力為主要啟動力。漂流木擺放方向與水流方向呈現 45° 與 90° 時，顯示漂流木主要受拖曳力影響而啟動，而動床條件的 X^* 值會比定床條件大，原因是底床淘刷在漂流木後方堆積增加了漂流木的穩定性，使漂流木啟動條件提高，且部分漂流木受到的浮力也隨之增加。本研究使用定床條件所提出之力平衡方程式進行計算與分析，可以發現忽略底床地形變化對漂流木所帶來的影響，將會與實際狀況有落差。此外，在計算過程中以平均水深代替啟動水深將忽略漂流木對周圍水深變化所帶來之影響。

六、參考文獻

- [1] 陳樹群、王啟榮、趙益群 (2011). 「漂流木啟動之試驗研究」，中華水土保持學報，42(2)，79-92。(Chen, S.C., Wang, C.R., and Chao, Y.C. (2011). "Flume Experiment for Wood Entrainment." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(2), 79-92. (in Chinese))
- [2] Bertoldi, W., Welber, M., Mao, L., Zanella, S., and Comiti F. (2014). "A flume experiment on wood storage and remobilization in braided river systems." *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 804-813.
- [3] Bocchiola, D., Rulli, M.C., and Rosso, R. (2006a). "Flume experiments on wood entrainment in rivers." *Advances in Water Resources*, 29, 1182-1195.
- [4] Bocchiola, D., Rulli, M.C., and Rosso, R. (2006b). "Transport of large woody debris in the presence of obstacles." *Geomorphology*, 76, 166-178.
- [5] Braudrick, C.A., and Grant, G.E., (2000). "When do logs move in rivers?" *Water Resources Research*, 36, 571-583.
- [6] Dey, S., and Singh, N.P. (2008). "Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow." *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 134, 588-600.
- [7] Diez, J.R., Elosegi, A., and Pozo, J. (2001). "Woody debris in north Iberian streams: Influence of geomorphology, vegetation, and management." *Environmental Management*, 28, 687-698.
- [8] Galia, T., Silhan, K., Ruiz-Villanueva, V., Tichavsky, R., and Stoffel, M. (2017). "Temporal dynamics of instream wood in headwater streams draining mixed Carpathian forests." *Geomorphology*, 292, 35-46.
- [9] Jamieson, T.J.R., Watmough, S.A., and Eimers, M.C. (2018). "Increase in woody debris nutrient pools in stream channels following selection harvesting in a northern hardwood forest." *Forest Ecology and Management*, 409, 8-18.
- [10] Montgomery, D.R., Collins, B.D., and Buffington, J.M. (2003). "Geomorphic Effects of Wood in Rivers." *American Fisheries Society Symposium*, 1-27.
- [11] Ni, W-J., and Capart, H. (2006). "Groundwater drainage and recharge by networks of irregular channels." *Journal of Geophysical Research*, 111, F02014, doi: 10.1029/2005JF000410.
- [12] Nicholas, P. W., Carlos, V. A., Sean, J. B., and Colin, R. T. (2002). "Surface Wave Forces Acting on Submerged Logs." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(123), 349-353.
- [13] Richmond, A.D., and Fausch, K.D. (1995). "Characteristics and Function of Large Woody Debris in Sub-Alpine Rocky-Mountain Streams in Northern Colorado." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 1789-1802.
- [14] Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Martí-Cardona, B., Diez-Herrero, A., and Bodoque, J.M. (2014). "Two-dimensional numerical modeling of wood transport." *Journal of Hydroinformatics*, 16, 1077-1096.
- [15] Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Zawiejska, J., Hajdukiewicz, M., and Stoffel, M. (2016). "Factors controlling large-wood transport in a mountain river." *Geomorphology*, 272, 21-31.

- [16] Rusyda, M. I., Hashimoto, H., and Ikematsu, S. (2014). Log jam formation by an obstruction in a river. 717-724 p.
- [17] Sullivan, T.P., and Sullivan, D.S. (2017). "Green-tree retention and recovery of an old-forest specialist, the southern red-backed vole (*Myodes gapperi*), 20 years after harvest." *Wildlife Research*, 44, 669-680.
- [18] Wohl, E. (2013). "Floodplains and wood." *Earth-Science Reviews*, 123, 194-212.
- [19] Wohl, E., and Scott, D.N. (2017). "Wood and sediment storage and dynamics in river corridors." *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 5-23.

2018年10月16日 收稿

2018年10月30日 修正

2018年11月16日 接受

(本文開放討論至 2019 年 03 月 31 日)