

單根漂流木之初始起動理論模式

陳樹群 王啟榮 趙益群*

摘要 漂流木部分浸末於水流時，會因與水流不同夾角等因素，產生滑動或滾動之現象。本文結合滑動與滾動之力學平衡機制，建立單根漂流木初始理論起動無因次水深模式。模擬結果顯示，漂流木初始起動水深與水流之夾角及渠道坡度呈現負相關之關係；而且漂流木直徑與密度對漂流木初始起動所需之水深有顯著的影響。本文亦與陳樹群等 (2011) 之渠道試驗結果相驗證，結果顯示本文所發展出之模式在預測理論起動水深時有良好之表現能力。

關鍵詞：漂流木、理論模式、漂流木起動水深。

Incipient Motion Theoretical Model of Single Large Woody Debris

Su-Chin Chen Ci-Rong Wang Yi-Chin Chao*

ABSTRACT The entrainment depth theoretical model for single large woody debris (LWD) has been developed and discussed in terms of the influences of LWD characteristics, channel properties, and different piece angles relative to flow direction. This study integrated a sliding and rolling equilibrium mechanism to establish a theoretical model of wood entrainment depth. The simulated results showed LWD entrainment depth is negatively correlated with different flow angles and channel slope. In addition, the LWD diameter and density significantly influences LWD entrainment depth. The simulated results compared with Chen et al. (2011) showed the theoretical model could effectively [predict??] the incipient depth of LWD entrainment.

Key Words : Large woody debris (LWD), theoretical model, LWD entrainment depth.

一、前言

漂流木 (large woody debris, LWD) 對高山溪流之河床與流況具有顯著的影響。漂流木可改變河川之地形地貌 (Keller and Swanson, 1979; Nakamura and Swanson, 1993)、增加溪流有機物質 (Bilby and Ward, 1991) (Aumen et al., 1990) 及影響水生生物棲地之環境 (Carlson et al., 1990) 等。漂流木在高山溪流內雖擁有上述多項功能；但是相反地，漂流木之運移及聚積現象卻可改變水流狀態，增加局部洪水災害，破壞人為建物 (如橋樑及堤防等)，甚至造成人類生命及財產上

之危害 (Moulin and Piégay, 2004)。關於漂流木之運移及聚積等相關研究，多數為現場調查結果 (Abbe and Montgomery, 1996; Baillie et al., 2008; Lienkaemper and Swanson, 1987; Gurnell et al., 2000)，僅少部份研究為室內渠槽試驗或數值解析 (Braudrick et al., 1997; Braudrick and Grant, 2000; Braudrick and Grant, 2001; Bocchiola et al., 2006a; Bocchiola et al., 2006b)。

Braudrick and Grant (2000) 建立漂流木之起動，係以動量平衡之概念，在光滑渠道且為均勻流場中進行研究。為了簡化漂流木之起動方式，假設漂流木為單根圓柱體，僅以滑動 (sliding) 之方式開始起動。然

而,漂流木之起動過程中除了滑動之外, Bocchiola et al. (2006a) 根據渠槽試驗發現,漂流木與不同之水流夾角,漂流木起動之方式皆會有所不同。當漂流木之擺設方式與水流方向平行時,漂流木之起動會先以滑動之方式起動,隨後受到水流影響產生轉動,最後會改以滾動 (rolling) 之方式向下游移動。而漂流木擺設方式與水流方向呈現垂直時,漂流木會先以滾動之方式起動,隨後受到底床及水流影響,改變與水流方向之夾角繼續往下游移動。陳樹群等 (2011) 在漂流木起動之渠槽試驗中,亦觀察到相同之漂流木起動方式。除了 Braudrick and Grant (2000) 所假設漂流木以滑動之方式起動外, Bocchiola et al. (2006) 假設漂流木形狀為長方體,利用力平衡及力距平衡 (moment equilibrium) 兩種方式,假設漂流木係以滑動及滾動之起動方式,並根據漂流木之性質、渠道特性及水流條件 (水深及流速) 等因子,推導漂流木起動之臨界方程式。實際上漂流木散佈於河道上,係以隨機之方式停留於河道上,所以漂流木與水流方向之夾角並非固定以平行或是垂直的方式出現。但是, Bocchiola et al. (2006a) 所推導之漂流木臨界起動方程式中,僅考慮漂流木與水流方向平行及垂直兩種形式。

綜合上述, Braudrick and Grant (2000) 假設漂流木在任意與水流方向之夾角,其初始運動方式皆為滑動,建立單根漂流木受水流作用之力學平衡機制。然而,在天然河川中,漂流木之初始運動方式並非皆為滑動;漂流木與水流方向平行,其初始運動方式主要為滑動,而漂流木與水流方向垂直,其初始運動方式主要為滾動。為此, Bocchiola et al. (2006a) 分別針對漂流木與水流方向平行及垂直,提出兩種單根漂流木受水流作用之力學平衡機制。但是 Bocchiola et al. (2006a) 所提出之兩種單根漂流木受水流作用之力學平衡機制卻無法適用在任意漂流木與水流方向之夾角。因此,本研究分為兩大部份,第一部份為在不同擺設狀況下,漂流木與底床之摩擦角之關係;第二部份為漂流木在不同水流方向之任意夾角下起動理論式之推導;最後並與陳樹群等 (2011) 之試驗結果相互比較以驗證此模式之可用性。

二、理論架構

本研究在推導漂流木之初始起動方式時,不考慮漂流木漂浮之狀態。研究係以單根漂流木與水流呈不同方向夾角 (θ), 並且部份浸沒於穩定且均勻之水流

中。並假設漂流木平行於水流方向時,以滑動之方式起動;漂流木垂直於水流方向時,以滾動之方式起動之假設條件下,進行下列之漂流木啟動理論水深模式推導。

1. 漂流木滑動之起動方式

假設漂流木處於滑動之臨界起動條件下,當驅動力 ($F_g + F_d$) 與摩擦力 (F_f) 相等時,漂流木則處於臨界的起動狀態 (圖 1)。

驅動力主要由水流方向之重力分量 (gravitation force, F_g) 及拖曳力 (drag force, F_d) 所構成;其中,向下游之重力可表示為:

$$F_g = (\rho_l g D_l^2 L_l - \rho_w g D_l L_l D_w) \sin \alpha \quad (1)$$

水流作用在漂流木上所產生向下游之拖曳力,係由漂流木在水流中形成之拖曳力係數 (C_D)、漂流木在水流方向之投影面積及水流平均速度 (U) 所組成;其關係式可表示為:

$$F_d = 0.5 \rho_w C_D U^2 (L_l d_w \sin \theta + D_l d_w \cos \theta) \quad (2)$$

當漂流木為滑動起動時,力平衡方程式表示為:

$$F_f = F_g + F_d \quad (3)$$

水流作用在漂流木上之摩擦力 (friction force, F_f) 為正向力 (F_n) 與底床之摩擦係數 (μ_b) 組合而成。因漂流木為部分浸沒,故可忽略上舉力 (lift force), 同時亦處於初始運動之平衡條件,故忽略慣性力 (inertial force) (Braudrick and Grant, 2000; Bocchiola et al., 2006a)。此摩擦力可表示為:

$$F_f = (\rho_l g D_l^2 L_l - \rho_w g D_l L_l d_w) \cos \alpha \tan \phi \quad (4)$$

其中, ϕ 為漂流木在無水流作用下與底床之摩擦角;經由力平衡之推導得知,摩擦係數可表示為 $\tan \phi$ 。

ρ_l 及 ρ_w 分別為漂流木及水之密度、 D_l 及 L_l 分別為漂流木之直徑及長度、 d_w 則為水深、 g 為重力加速度。

當漂流木為滑動起動之臨界條件時,(3) 式經整理後可改寫成 (5) 式。

$$\begin{aligned} & (\rho_l g L_l D_l^2 - \rho_w g d_w D_l L_l) (\cos \alpha \tan \phi_0 - \sin \alpha) \\ & = \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 (D_l d_w) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ϕ_0 為漂流木與水流方向夾角為 0° 時之摩擦角。

2. 漂流木滾動之起動方式

當漂流木受到底床泥砂影響垂直於河道，漂流木受到水流影響，會以滾動的方式再次起動並運移至下游。而以滾動方式起動之漂流木運動型態，主要為漂流木受到水流驅動後所產生之力矩，大於漂流木正向力所產生之力矩，而發生運動之情形。

滾動起動之臨界狀態以合力矩平衡為基礎，其平衡方程式為 (圖 2)：

$$F_n b_1 = F_g b_2 + F_d b_2 \quad (6)$$

式中， b_1 為正向力之力臂、 b_2 為重力及拖曳力之力臂。將 (1) 式、(2) 式及 (4) 式代入 (6) 式整理後，可改寫成 (7) 式。

$$\begin{aligned} & (\rho_l g L_l D_l^2 - \rho_w g d_w D_l L_l) (\cos \alpha \tan \phi_{90} - \sin \alpha) \\ &= \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 (L_l d_w) \end{aligned} \quad (7)$$

式中， ϕ_{90} 為漂流木與水流方向夾角為 90° 時之摩擦角。

3. 漂流木起動水深臨界方程式

在推導完漂流木之滑動及滾動起動方程式後，比較 (5) 式與 (7) 式即可發現，兩式中僅摩擦角不同。因此，漂流木與水流方向夾角 (θ) 之初始運動不論係以滑動還是滾動，其平衡方程式皆可表示為：

$$\begin{aligned} & (\rho_l g L_l D_l^2 - \rho_w g d_w D_l L_l) (\cos \alpha \tan \phi_\theta - \sin \alpha) \\ &= \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 (L_l d_w \sin \theta + D_l d_w \cos \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， ϕ_θ 為漂流木與水流方向夾任意角 (θ) 時與底床之摩擦角。

根據先前假設漂流木放置在均勻流場中且為寬廣渠道時 ($R = d_w$)，可將 (8) 式中之流速利用曼寧公式 (Manning's formula) (9) 式轉換成底床粗糙度、水深和坡度之函數。

$$U = \frac{1}{n} d_w^{2/3} S^{1/2} \quad (9)$$

其中， n 為曼寧粗糙係數， R 為水力半徑， S 為坡度 (即 $\tan \alpha$)。其中，曼寧粗糙係數 n 值可利用 Strickler's formula，由底床平均粒徑 d_s (m) 求得：

$$n = \frac{d_s^{1/6}}{21.1} \quad (10)$$

將 (9) 式及 (10) 式代入 (8) 式，經過整理可得 (8) 式。

$$\begin{aligned} \frac{\rho_l}{\rho_w} &= \frac{C_D S \left(\frac{L_l}{D_l} \sin \theta + \cos \theta \right)}{0.044 \frac{L_l}{D_l} (\cos \alpha \tan \phi_\theta - \sin \alpha)} \cdot \left(\frac{d_w}{D_l} \right)^2 \\ \left(\frac{d_w}{d_s} \right)^{1/3} &+ \frac{d_w}{D_l} \end{aligned} \quad (11)$$

式中， d_w / D_l 代表漂流木之相對浸沒度 (relative submergence)； d_w / d_s 代表底床泥砂之相對浸沒度，亦可視為相對粗糙度之倒數； L_l / D_l 為漂流木之細長比值； ρ_l / ρ_w 為密度比值，均為無因次因子。如此一來，僅需將 ρ_w 、 ρ_l 、 C_D 、 D_l 、 L_l 、 θ 、 ϕ_θ 、 α 及 d_s 等已知條件代入 (11) 式，即可得到漂流木初始起動所需水深 (d_w) 之理論值。

三、摩擦角與水流方向夾角

為了使 (11) 式便於應用，本研究利用陳樹群等 (2011) 量測漂流木平行、傾斜及垂直水流起動時之底床臨界摩擦角 (ϕ) 與底床粒徑試驗結果進行迴歸分析，建立漂流木在不同水流夾角狀況下與摩擦角之關係式。

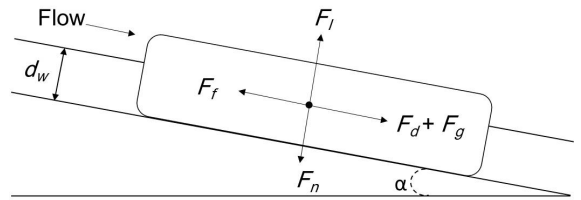


圖 1 漂流木初始滑動示意圖

Fig.1 Sketch of incipient forces for a sliding log

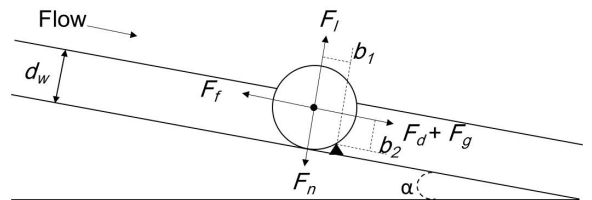


圖 2 漂流木初始滾動示意圖

Fig.2 Sketch of incipient forces for a rolling log

首先, 將摩擦角試驗結果利用 (1) 簡單線性模式 (simple linear model); (2) 雙係數之遞減指數模式 (single exponential decay with 2 parameter); (3) 三係數之遞減指數模式 (single exponential decay model with 3 parameter) 等迴歸模式, 建立漂流木在不同水流方向夾角下與摩擦角之關係式。根據各迴歸模式之 PRESS (Prediction Sum of Squares) 值判斷後可知, 兩種底床粒徑之摩擦角迴歸模式, 以三係數之遞減指數模式為較佳之迴歸模式。

接著, 將摩擦角試驗之結果利用所選定之較佳迴歸模式進行迴歸分析, 估計變數之相關數值詳見表 1。利用 *t* 檢定 (*t*-test) 判別變數對模式之顯著性, 以雙尾檢定方式進行檢定 ($t_{0.05}=2.04$)。檢定結果顯示, 模式中變數皆有顯著之影響。為避免試驗誤差影響模式之準確性, 本研究利用 D_i (Cook's Distance) 作為影響點 (influence point) 診斷之依據。判別標準為檢定 $F(p, n-p, 50\%) = F_\alpha$, 若 $D_i > F_\alpha$, 此試驗值即為影響點; 此迴歸模式之 $F(3, 33, 50\%) = F_\alpha = 0.81$, 經過影響點診斷後, 顯示 D_i 皆小於 F_α , 無影響點之存在。

藉由迴歸分析所建立之漂流木與水流夾角及摩擦角間的迴歸模式, 如 (12) 式及 (13) 式。利用 *F*-test 作為判定迴歸模式之預測值與試驗值間顯著性之依據。採單尾檢定方式且顯著水準為 0.05 進行檢定。檢定結果顯示, 迴歸模式與試驗值有高度之顯著關係。圖 3 表示在不同底床粒徑下, 漂流木與水流方向夾角與所對應之摩擦角關係圖。

當 $d_s=5\text{mm}$ 時:

$$\phi_\theta = 14.38e^{-0.042\theta} + 4.92 \quad (R^2=0.99) \quad (12)$$

當 $d_s=8\text{mm}$ 時:

$$\phi_\theta = 12.84e^{-0.026\theta} + 4.14 \quad (R^2=0.99) \quad (13)$$

當漂流木從平行水流方向轉變傾斜水流方向時, 漂流木之運動方式由滑動變為滾動, 運動方式不同, 其力學平衡機制亦不相同; 而傾斜水流方向轉變垂直水流方向時, 漂流木之運動方式則皆為滾動 (陳樹群等; 2011)。另外, 由試驗結果可知, 滑動之摩擦角遠大於滾動之摩擦角 (相差超過 10°), 而當漂流木傾斜及垂直水流方向時之摩擦角相差不超過 5°, 故差異不大 (陳樹群等; 2011)。因此, 當漂流木由滑動變為滾動, 其摩擦角應呈現指數遞減, 而非線性遞減, 故本研究提出之迴歸模式與試驗之物理現象相符; 此迴歸模式方可應用於 (11) 式。

四、數值分析結果

1. 拖曳力係數與渠道坡度

漂流木之拖曳力係數會受到漂流木與水流方向之夾角、細長比、遮蔽率、漂流木之浸沒程度以及水流福祿數、雷諾數等因子的影響 (Gippel et al., 1996; Wallerstein et al., 2002)。Gippel et al. (1996) 透過渠槽試驗得到各種不同漂流木與水流方向之夾角, 其所對應之拖曳力係數 (C_D) 如下, 與水流方向平行時 C_D 值為 0.9; 傾斜 (45°) 於水流時之 C_D 值為 0.8, 而垂直水流時之 C_D 值為 0.9。漂流木之遮蔽率對拖曳力係數之影響, 可藉由遮蔽率與拖曳力係數之間的修正式, 將

表 1 估計變數之相關數值

Table 1 Statistics related values for estimated variables

$d_s=5\text{mm}$			
Variable	Estimate	Std. Error	t value
a	14.383	0.267	53.852
b	0.042	0.003	14.930
c	4.915	0.223	22.085
$d_s=8\text{mm}$			
Variable	Estimate	Std. Error	t value
a	12.835	0.407	31.557
b	0.026	0.002	12.147
c	5.137	0.387	13.267

註: 變數 a、b 及 c 代表 $\phi_\theta = ae^{-b\theta} + c$ 式中之斜率、指數及截距之係數。

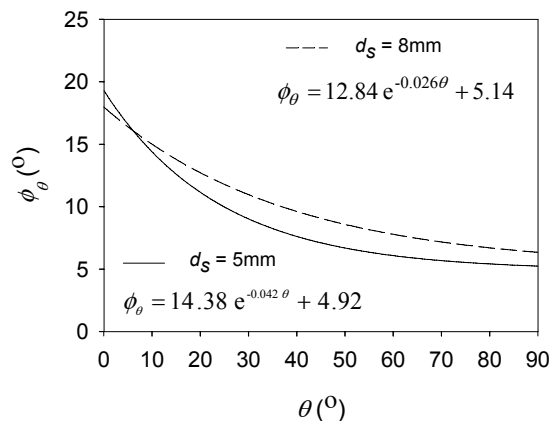


圖 3 漂流木與水流方向夾角 (θ) 之摩擦角 (ϕ_θ) 之關係

Fig.3 The relationship between angel of flow direction (θ) and friction angel (ϕ_θ) for large woody debris

試驗或野外量測得到之拖曳力係數 C_D^{app} (apparent drag coefficient), 考慮遮蔽率之影響進行修正 (Shields et al., 1995)。另外, 當漂流木之浸沒程度低時, 漂流木之拖曳力係數會受到自由液面之波動阻力 (wave drag) 影響, 而此波動阻力與漂流木之浸沒程度及水流福祿數有關 (Wallerstein et al., 2002)。綜合上述可知, 漂流木之拖曳力係數受到許多因子之影響; 且相關研究所提出之結果相差甚多。因此, 本研究藉由 C_D 值之敏感度分析, 探討 C_D 值對漂流木初始動之影響。

當漂流木與水流方向平行時, C_D 值對漂流木初始動之影響並不顯著; 而在漂流木與水流方向傾斜及垂直時, C_D 值對漂流木初始動之影響性則較為明顯 (圖 4)。另外, 許多漂流木拖曳力係數相關研究所提出之 C_D 值範圍大約介於 0.8~1.5, 由數值分析之結果發現, 改變 C_D 值 (由 0.8 變為 1.5), 對漂流木與水流方向平行之初始起動水深影響約為 4%, 對漂流木與水流方向傾斜及垂直之初始起動水深影響則分別約為 16% 及 17%。雖然 Gippel et al. (1996) 透過渠槽試驗得到各種不同漂流木與水流方向之夾角, 其所對應之拖曳力係數, 但各種不同與水流方向夾角所相應之拖曳力係數值, 其數值差異不超過 2 倍。根據數值分析之結果顯示, C_D 值之變異對漂流木初始起動之影響差異性乃係在可接受範圍內, 並不會對漂流木之初始起動產生嚴重之影響。因此, 本研究針對各不同漂流木與水流方向之夾角之拖曳力係數, 均係採用 Bocchiola et al. (2006) 所提出, $C_D=1.41$, 而不考慮眾多因子對 C_D 值之影響。

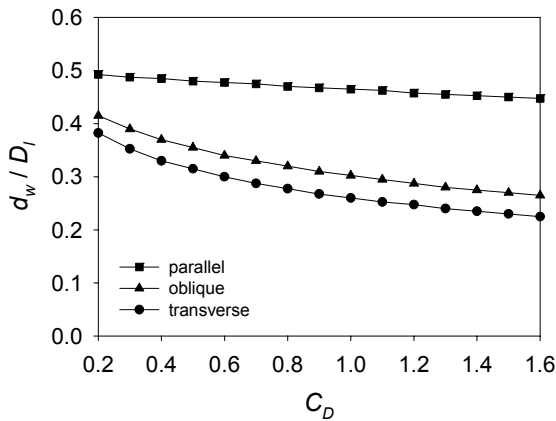


圖 4 C_D 值與漂流木初始起動水深之關係

Fig.4 The theoretical plot of d_w/D_l at entrainment as a function of drag coefficient ($L_l = 0.25$ m, $D_l = 0.04$ m, $\rho_l = 500$ kg/m³, $\rho_w = 1000$ kg/m³, $S = 0.01$, $d_s = 5$ mm)

探討渠道坡度變化對漂流木初始起動之影響, 隨著渠道坡度增加, 漂流木沿坡面方向之重力增加 ((1) 式之 $\sin\alpha$ 增加), 而漂流木垂直坡面方向之正向力減小 ($\cos\alpha$ 減小), 底床給予漂流木之摩擦阻力減小, 造成漂流木之初始起動與渠道坡度呈現負相關係 (圖 5)。另外, 水流流速亦會隨渠道坡度增加而增加, 因而增加水流對漂流木所產生之拖曳力, 亦會使漂流木初始起動所需之水深減少。但是, 因為漂流木與水流方向傾斜及垂直之受力面積較與水流方向平行大, 使得坡度增加對漂流木初始起動所需之水深變化幅度較為劇烈; 若渠道坡度由 0.002 變為 0.06, 漂流木與水流方向平行之初始起動水深變化率約為 32%, 與水流方向傾斜之初始起動水深變化率約為 69%, 與水流方向垂直之初始起動水深變化率約為 76%。

2. 漂流木與水流方向之夾角

數值結果發現, 漂流木之初始起動水深隨著漂流木與水流方向夾角增加, 呈現指數遞減的形式 (圖 6); 隨著漂流木與水流方向夾角之增加 (從 0° 增加至 90°), 漂流木初始起動之運動方式由滑動變為滾動, 且漂流木之摩擦角與水流方向夾角呈現負相關之關係 (圖 3), 使得漂流木所受之摩擦阻力隨水流方向夾角增加而減小, 漂流木較容易起動; 亦即是當漂流木與水流方向平行時, 漂流木會較為穩定, 此結果與 Braudrick and Grant (2000) 所提出之結果相同。另外, 漂流木與水流方向水平時, 底床粗糙度對漂流木初始起動之影響不

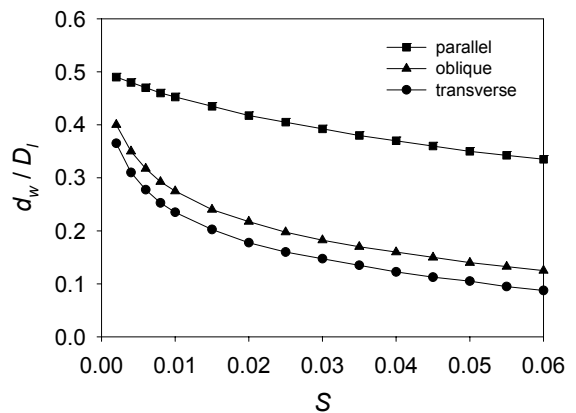


圖 5 渠道坡度與漂流木初始起動水深之關係

Fig.5 The theoretical plot of d_w/D_l at entrainment as a function of drag coefficient ($L_l = 0.25$ m, $D_l = 0.04$ m, $\rho_l = 500$ kg/m³, $\rho_w = 1000$ kg/m³)

顯著；隨水流方向夾角增加，底床粗糙度對漂流木初始起動之影響才較為明顯（圖 6），此結果亦與陳樹群等（2011）之試驗結果相同。探討不同水流方向夾角造成漂流木對水流之遮蔽率（blockage ratio，遮蔽率為漂流木受水流作用與水流方向垂直之投影面積與通水斷面積之比值）與漂流木初始起動之關係（圖 7）；隨著水流方向夾角增加，漂流木與水流方向之夾角越來越大，使得漂流木對水流之遮蔽率隨之增加，此結果使得漂流木受水流作用之面積增加，造成漂流木之穩定性減低；此結果與陳樹群等（2011）之試驗結果有相同之趨勢。

3. 漂流木之基本特性

漂流木在河道中運移之相關研究皆指出，漂流木之基本特性，如長度、直徑及密度會影響漂流木在河道中之穩定性（Abbe et al., 1993; Braudrick et al., 1997; Braudrick et al., 2000）。本研究首先固定漂流木直徑為 0.04 m，藉由改變漂流木長度，使漂流木細長比變化範圍介於 1~30 之間，以探討在不同漂流木與水流方向之夾角，細長比對漂流木初始起動之影響。當漂流木與水流方向平行時，細長比對漂流木初始起動水深之影響較明顯，隨著漂流木與水流方向夾角從水平轉變為垂直時，細長比之影響逐漸減小；當漂流木與水流方向垂直時，(11) 式中之細長比因子可被化簡，使得漂流木初始起動水深不受到細長比之影響（圖 8）。另外，由於漂流木之直徑固定為 0.04m，因此細長比之

影響亦可當作漂流木長度因子之影響。漂流木與水流方向平行，其初始運動方式為滑動，而漂流木之長度因子大小主要係影響漂流木之摩擦阻力，漂流木長度較長，與底床之接觸面積較大，產生之摩擦阻力亦較大，因而細長比對漂流木初始起動水深之影響較為明顯；但是當細長比大於 10 後，細長比對漂流木初始起動之影響則趨於緩和（曲線變化斜率漸緩）。

針對漂流木直徑因子之影響，給定漂流木長度為 0.25 m，改變漂流木之直徑，探討在不同漂流木與水流方向之夾角，直徑對漂流木初始起動之影響。根據數值分析之結果顯示，漂流木直徑對初始起動所需之水深有極為顯著之影響（圖 9）。在不同的漂流木與水流方向夾角條件下，漂流木直徑變成原來的兩倍，漂流木初始起動水深之變化率皆達到 80%；另外，不同漂流木與水流方向之夾角，改變直徑對漂流木初始起動水深之影響程度會有差異，與水流方向平行，漂流木初始起動水深變化之斜率較大。

最後改變漂流木密度，其密度變化範圍為 100~950 kg/m³，探討在不同漂流木與水流方向之夾角，密度對漂流木初始起動之影響。增加漂流木直徑，漂流木初始起動所需之水深亦隨之增加（圖 10）；其中，若漂流木密度由 300 kg/m³ 變為 700 kg/m³，漂流木與水流方向平行之初始起動水深變化率約為 53%，與水流方向傾斜及垂直之初始起動水深變化率則約為 40%。隨著漂流木密度增加，各不同漂流木與水流方向夾角，其初始起動所需水深之間的差異會愈明顯（圖 10）。

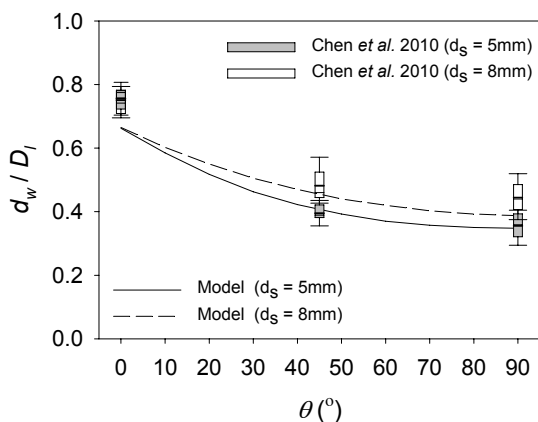


圖 6 水流夾角 (θ) 與漂流木初始起動之關係

Fig.6 The theoretical plot of d_w / D_l at entrainment as a function of piece angle ($L_l = 0.25$ m, $D_l = 0.04$ m, $\rho_l = 500$ kg/m³, $\rho_l = 1000$ kg/m³, $S = 0.01$)

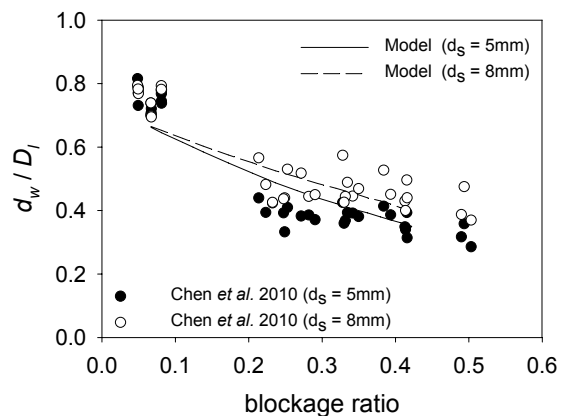


圖 7 遮蔽率與漂流木初始起動之關係

Fig.7 The theoretical plot of d_w / D_l at entrainment as a function of blockage ratio ($L_l = 0.25$ m, $D_l = 0.04$ m, $\rho_l = 500$ kg/m³, $\rho_l = 1000$ kg/m³, $S = 0.01$)

綜合漂流木直徑及密度因子，當漂流木與水流方向平行，其初始運動方式為滑動，漂流木初始起動所需之水深主要係受到漂流木之直徑與密度之影響；而漂流木與水流方向傾斜及垂直，其初始運動方式為滾動，漂流木初始起動所需之水深主要係受到漂流木直徑之影響，密度對初始起動之影響較小。

五、起動水深比較分析

本文利用陳樹群等 (2011) 試驗所觀測之試驗起動水深 (\bar{d})，再以漂流木初始起動試驗條件代入公式

(11)，獲得初始起動水深之理論值 (d_w)。圖 11 中除了表示試驗所觀測到之水深及理論水深外，本研究將誤差 $\pm 10\%$ 及 $\pm 20\%$ 之範圍亦標註於圖上。

當漂流木與水流方向平行時，理論水深結果有明顯的低估情形 (圖 11)。試驗中當漂流木與水流方向平行時，漂流木會以半浮半滑動的方式開始運動，其初始起動所需之水深介於漂流木尚未浮起之水深上限與漂流木浮起之水深下限之間 (陳樹群等, 2011)；而起動理論水深模式係假設漂流木與水流方向平行時，以滑動方式開始運動，且漂流木尚未浮起，所以理論水

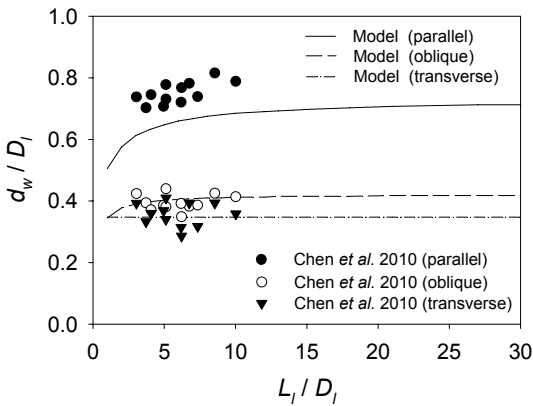


圖 8 漂流木細長比與初始起動之關係
Fig.8 The theoretical plot of d_w / D_1 at entrainment as a function of slenderness (L_1/D_1) ($D_1 = 0.04 \text{ m}$, $\rho_l = 500 \text{ kg/m}^3$, $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.01$, $d_s = 5 \text{ mm}$)

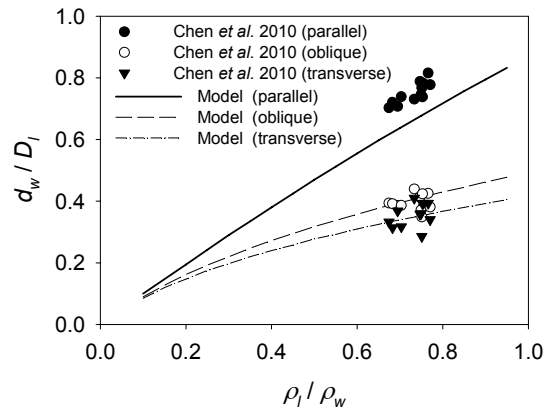


圖 10 漂流木密度與初始起動水深之關係
Fig.10 The theoretical plot of d_w / D_1 at entrainment as a function of piece density (ρ_l / ρ_w) ($L_1 = 0.25 \text{ m}$, $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.01$, $d_s = 5 \text{ mm}$)

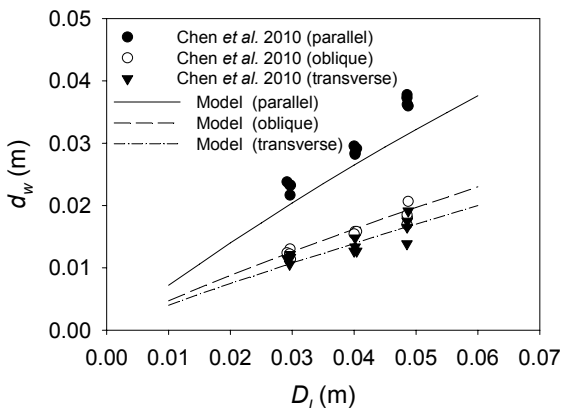


圖 9 漂流木直徑與初始起動水深之關係
Fig.9 The theoretical plot of water depth (d_w) at entrainment as a function of piece diameter ($L_1 = 0.25 \text{ m}$, $\rho_l = 500 \text{ kg/m}^3$, $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.01$, $d_s = 5 \text{ mm}$)

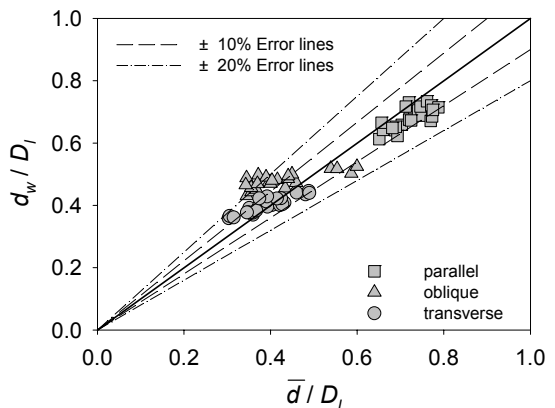


圖 11 試驗觀測水深值與理論水深值之比較
Fig.11 Comparison of the observed depths and theoretical depths

深小於試驗之觀測水深。而起動理論水深相對於試驗起動觀測水深之低估誤差值介於 10%之間。當漂流木與水流方向傾斜時，起動理論水深值大多呈現高估之情形，其高估之誤差值大多介於 10~20%之內；僅 20%之理論值低於試驗觀測值，但誤差範圍在 10%內。當漂流木與水流方向垂直時，理論水深與試驗觀測值之誤差則平均分散於±10%之間。根據陳樹群等 (2011) 之試驗成果可知，當漂流木傾斜及垂直水流方向時，漂流木係以滾動之方式開始運動，此時漂流木尚未浮起，與起動理論水深模式假設相同；因此，此模式針對漂流木以滑動及滾動為主之運動方式有較佳之適用性。實際上，漂流木起動與否，與當時之水流條件、底床組成材料及漂流木本身之基本特性有顯著之關係。

六、結 論

本研究利用水流作用在單根漂流木的力學平衡為基礎 (Braudrick and Grank, 2000; Bocchiola et al., 2006)，結合漂流木滑動與滾動兩種不同之力學平衡機制，推求漂流木之初始起動水深，此公式亦可適用在任意漂流木與水流方向之夾角。由已知之漂流木基本性質 (密度、直徑、長度、漂流木拖曳力係數及摩擦角)、渠道性質 (水密度、坡度及底床粒徑)，利用漂流木初始起動公式，即可得到漂流木初始起動所需之水深理論值。

本研究利用迴歸分析，建立漂流木與水流方向夾角及摩擦角之間的迴歸模式；分析模式之各種統計量，結果皆顯示該模式與試驗結果之間皆呈現顯著關係，且亦與試驗之物理現象相符。儘管漂流木之拖曳力係數受到許多因子的影響，但由敏感度分析之結果顯示， C_D 值之變異對漂流木初始起動之影響差異性乃係在可接受範圍內，並不會對漂流木之初始起動造成深遠之影響。因此，本研究採用 Bocchiola et al. (2006) 所提出之 $C_D = 1.41$ 進行模擬。而漂流木初始起動所需之水深與漂流木對水流之夾角及渠道坡度呈現負相關之關係；而與漂流木直徑及密度因子之間則呈現正相關之關係，且漂流木直徑與密度對漂流木初始起動所需之水深有顯著的影響。

在初始起動模式預測值與試驗值比較之結果方面。漂流木與水流方向平行時，理論值較試驗觀測值少約 10%之水深。表示漂流木在平行水流時，要有足夠的水深使漂流木浮起運移，而非單純的滑動；因此造成起

動理論水深有低估現象。而漂流木在傾斜及垂直水流方向時，起動理論水深誤差範圍均介於 ±20 %，乃因當漂流木與水流方向傾斜或垂直時之水流情況較為複雜且漂流木滾動時受底床組成材料有顯著之影響，再者推導理論式時為求簡化，忽略些許條件造成上述之誤差結果。儘管本研究所提出之初始起動理論模式之預測能力與陳樹群等 (2011) 之試驗結果尚有些許誤差存在，但以 (11) 式作為漂流木初始起動水深預測之參考依據，仍有良好之表現能力。

參考文獻

1. 陳樹群、王啟榮、趙益群 (2011)，「漂流木起動之試驗研究」，中華水土保持學報，42(2)，1-11。
(Chen S.C., Wang, C.R., and Chao, Y.C. (2011). "The flume experimental of wood entrainment." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(2), 1-11. (in Chinese))
2. Abbe, T.B., and Montgomery, D.R. (1996). "Large wood debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers." *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, 201-221.
3. Abbe, T.B., Montgomery, D.R., Featherston, K., and McClure, E. (1993). "A process-based classification of woody debris in a fluvial network; preliminary analysis of the Queets River, Washington." *EOS Transaction of the American Geophysical Union*, 74, 296.
4. Aumen, N.G., Hawkins, C.P., and Gregory, S.V. (1990). "Influence of woody debris on nutrient retention in Catastrophically disturbed stream." *Hydrobiologia*, 190, 183-191.
5. Baillie, B.R., Garrett, L.G., and Evanson, A.W. (2008). "Spatial distribution and influence of large woody debris in an old growth forest river system, New Zealand." *Forest Ecology and Management*, 256, 20-27.
6. Bilby, R.E., and Ward, J.W. (1991). "Changes in characteristics and function of large woody debris in streams draining old-growth, clear-cut, and Second-growth forests in Southwestern Washington." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48, 2499-2508.
7. Bocchiola, D., Rulli, M. C., and Rosso, R. (2006a). "Flume experiments on wood entrainment in rivers." *Advance in Water Resources*, 29, 1182-1195.

8. Bocchiola, D., Rulli, M.C., Rosso, R. (2006b). "Transport of large woody debris in presence of obstacles." *Geomorphology*, 76, 166-178.
9. Braudrick, C.A., and Grant, G.E. (2000). "When do logs move in rivers?" *Water Resources Research*, 36, 571-583.
10. Braudrick, C.A., and Grant, G.E. (2001). "Transport and Deposition of Large Woody Debris in Streams: a Flume Experiment." *Geomorphology*, 41, 263-283.
11. Braudrick, C.A., Grant, G.E. Ishikawa, Y., and Ikeda, H. (1997). "Dynamics of Wood Transport in Stream a Flume Experiment." *Earth Surface Processes and Landform*, 22, 669-683.
12. Carlson, J.Y., Andrus, C.W., and Froehlich, H.A. (1990). "Woody Debris, Channel Features, and Macroinvertebrates of Streams with Logged and Undisturbed Riparian Timber in Northeastern Oregon, U.S.A." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47, 1103-1111.
13. Gippel, C.J., O'Neill, I.C. Finlayson, B.L., and Schnaz, I. (1996). "Hydraulic guidelines for the re-introduction and management of large woody debris in lowland river." *Regulated Rivers, Research and Management*, 12, 223-236.
14. Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollman, J., Ward, J.V., and Tockner, K. (2000a). "Wood Storage Within the Active Zone of a Large European Gravel-bed River." *Geomorphology*, 34, 55-72.
15. Keller, E.A., and Swanson, F.J. (1979). "Effect of Large Organic Material on Channel Form and Fluvial Processes." *Earth Surface Processes*, 4, 361-380.
16. Lienkaemper, G.W., and Swanson, F.J. (1987). "Dynamics of Large Woody Debris in Streams in Old-growth Douglas-fir Forests." *Canadian Journal of Forest Research*, 17(2), 150-156.
17. Moulin, B., and Piégay, H. (2004). "Characteristics and Temporal Variability of Large Woody Debris Trapped in a Reservoir on the River Rhone (Rhone): Implications for River Basin Management." *River Research Applications*, 20, 79-97.
18. Nakamura, F., and Swanson, F. J. (1993). "Effects of Coarse Woody Debris on Morphology and Sediment Storage of a Mountain Stream System in Western Oregon." *Earth Surface Processes and Landform*, 18, 43-61.
19. Shields Jr, F.D., and Gippel, C.J. (1995). "Prediction of effects of woody debris removal on flow resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(4), 341-354.
20. Wallerstein, N.P., Alonso, C.V., Bennett, S.J., and Thorne, C.R. (2002). "Surface wave forces acting on submerged logs." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 128(3), 349-353.

2011年02月17日 收稿

2011年04月26日 修正

2011年10月05日 接受

(本文開放討論至 2012 年 9 月 30 日)