

漂流木起動之試驗研究

陳樹群 王啟榮 趙益群*

摘要 本研究藉由渠槽試驗模擬單根漂流木在定床渠道之初始起動情形，並探討不同漂流木長度、直徑、與水流夾角及底床粒徑對漂流木初始起動水流條件之影響。試驗發現，當漂流木與水流方向平行時，隨著水深逐漸增加，漂流木所受之浮力隨之增加，摩擦阻力則逐漸減小，直至漂流木開始發生運動，此時漂流木會以半浮動半滑動的方式向下游移動；而漂流木與水流方向傾斜及垂直時，則皆為滾動之方式向下游移動。綜合試驗與模式預測之結果得知，漂流木能否穩定停留在渠道中，主要跟漂流木與水流之夾角、漂流木密度、直徑、渠道坡度及底床粗糙度等因子有關。本研究由試驗結果推導出漂流木初始起動無因次迴歸曲線。因此，在進行漂流木穩定性判定時，可參考本研究提出之漂流木初始啟動關係式，作為簡單之判定依據。

關鍵詞：漂流木、漂流木啟動、渠槽試驗。

Flume Experiment for Wood Entrainment

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

ABSTRACT This research used a flume experiment to simulate the entrainment of single wood and explore the influences on the flow condition of large woody debris (LWD) entrainment under different lengths and diameters of LWD, grain sizes, and the flow angle between the LWD and the central flow. The results showed the LWD started to move downstream by semi-floating and semi-sliding when the LWD was parallel with the flow. The motion occurred because of the increased water depth, increased buoyancy, and decreased friction force. However, the LWD was rolling downstream while the LWD was oblique or transverse to the flow. The results showed the main factors causing LWD to remain stable in the channel were the flow angle between the LWD, the density and the diameter of the LWD, the channel slope, and the bed roughness. The regression analysis showed the significant fit dimensionless model of the LWD entrainment in the experiment study. Therefore, the results provided simple principles to predict the stability of the LWD.

Key Words: large woody debris (LWD), wood entrainment, flume experiments.

一、前言

一般河床上除了常見的塊石外，亦常發現枯樹幹橫躺於河道上；當這些枯木之直徑及長度分別大於 0.1m 及 1.0m 時，稱之為漂流木 (large woody

debris, LWD; Keller and Swanson, 1979; Andrus *et al.*, 1988; Gippel, 1995; Schuett-Hames *et al.*, 1999)。近年來，臺灣所發生之天然災害，已從原本之單一災害，如崩塌、土石流及洪水等，轉化為覆合性之天然災害，而在這些天然災害中，亦從原本單純之

土砂災害加入了漂流木的因子。如 2004 年艾莉 (Aere) 及海馬 (Haima) 颱風過後，石門水庫庫區出現大量漂流木堆積，造成水庫管理問題；2009 年莫拉克颱風過後，臺灣西南部及東半部沿海之漂流木堆積，造成漁業等經濟影響。除此之外，在一般河道中，漂流木之移動亦會造成橋樑受到破壞。因此，集水區之漂流木運移無疑為當前所關注之話題。

漂流木在河道中之運移及儲存明顯受到河岸特性之影響 (Latterell and Naiman, 2007)。Seo *et al.* (2010) 指出，小型集水區 (<20km²) 中漂流木主要來源為森林的動態因子 (forest dynamics; 自然死亡、病蟲害、暴風雪、森林大火、物種競爭等) 及邊坡變動 (hillslope processes; 崩塌及雪崩等)，而此漂流木可能數十年來均會停留在溪谷之間或者因隨著土石流運移而下。在中型集水區 (20-100km²) 中，河岸兩側邊坡受到水流侵蝕，使得河岸兩側溪濱植物倒塌進入河道；而這些漂流木會隨著洪水運移至下游地區。大型集水區 (>100km²) 中漂流木主要因為河道兩岸局部地區發生崩塌而產生；而漂流木多聚積於洪氾平原上。

研究指出，漂流木在河道中移動之過程受到漂流木本身及水文地貌特性影響；如漂流木長度與河道寬度之關係，浮力水深與溪流水深等 (Braudrick and Grant, 2000; Martin and Benda, 2001; Haga *et al.*, 2002)。除此之外，河川流量及溪流坡度亦是漂流木運移能力之重要因素 (Martin and Benda, 2001; Seo and Nakamura, 2009)。上述影響因子中，漂流木長度在運移的過程中，扮演著最重要的角色。一般來說，當漂流木長度較渠道寬度短時，較容易運移，且較短之漂流木運移之距離亦相對較遠 (Braudrick and Grant, 2000; Nakamura and Swanson, 1993)；漂流木移動之頻率，與溪流之大小成正比之關係 (Lienkaemper and Swanson, 1987)。且經調查發現，會移動的漂流木大多數長度小於滿槽河寬 (Nakamura and Swanson, 1994)。

漂流木之間的相互作用在漂流木的運移及沉積過程中扮演了重要的角色 (Braudrick *et al.*, 1997)，通常一根固定不動的漂流木會因為受到移動中的漂流木撞擊而開始運動，或是固定不動的漂流木將水流導向另一根固定不動的漂流木後，使其開始運動。河岸的形狀和鄰近河岸的植生也會影響到漂流木初始起動的臨界值，漂流木被抬離底床而不受水流作用或受到阻礙而停止運動。因此本研究僅探討單根漂流木的運

動，不考慮河岸及植生的影響。

在天然河川中，漂流木主要受到水流的作用而開始發生運移，如欲藉由現地調查探討漂流木初始運動機制，將會有安全上的考量及數據量測困難的限制。Braudrick and Grant (2000) 針對漂流木在任意水流夾角，假設漂流木初始運動方式皆為滑動，以合力平衡的觀點，建立漂流木初始起動之臨界狀態。然而，實際上漂流木之初始運動方式並非皆為滑動，因此 Bocchiola *et al.* (2006) 針對漂流木與水流平行及垂直，假設漂流木與水流平行之運動方式為滑動，與水流垂直之運動方式則為滾動，分別以合力平衡及合力矩平衡的觀點，建立漂流木初始起動之臨界狀態。雖然 Bocchiola *et al.* (2006) 分別以合力平衡及合力矩平衡的觀點，建立漂流木初始起動之臨界狀態，但是卻無法適用在任意漂流木與水流夾角。

本研究首先利用渠槽試驗模擬單根漂流木在定床渠道中之運動情形，改變漂流木之長度、直徑、與水流夾角及底床粒徑，探討漂流木在渠道中之初始起動臨界條件。接著，以水流作用在單一漂流木的力學平衡為基礎 (Braudrick and Grant, 2000; Bocchiola *et al.*, 2006)，針對其缺失加以改善，建立漂流木在不同水流夾角之初始起動預測模式，並將渠槽試驗之結果對預測模式進行驗證。由於預測模式中之因子 (如漂流木性質、渠道坡度及底床粒徑等) 皆可經由現地調查得到相關資料，利用本研究所提出之漂流木初始起動預測模式，可作為判斷漂流木是否能穩定停留在河道之參考依據。

二、漂流木運動機制

天然河川中，漂流木的運動方式是很複雜的，若僅考慮底床泥砂固定不動的情況，漂流木的形狀 (如彎曲度，有無樹枝及樹根等)、漂流木與水流方向的夾角及浮力等外力作用在漂流木不同部位之作用力等，都會影響漂流木的運動方式 (Braudrick and Grant, 2000)。

Braudrick and Grant (2000) 建立一個簡單的漂流木運動機制模式，假設漂流木為均勻圓柱體，並放置在光滑、平坦之定型渠道且為均勻流場中 (uniform flow field)，而初始運動方式皆為滑動。當朝下游方向的重力分量 (F_g)、拖曳力 (F_d) 與朝上游方向的摩擦力 (F_f) 達到平衡時，即為漂流木運動的臨界狀態。在此臨界狀態下，漂流木往往尚未浸沒在水

中, 故其上舉力 (lift force) 可被忽略 (圖 1 (a)~(b))。

漂流木在水流方向的重力分量為:

$$F_g = (W - B)\sin\alpha = \left(g\rho_l L_l \frac{\pi D_l^2}{4} - g\rho_w L_l A_s \right) \sin\alpha \quad (1)$$

其中, W 為漂流木之重量, B 為漂流木所受之浮力, L_l 、 D_l 分別為漂流木長度與直徑, ρ_w 、 ρ_l 則分別為水與漂流木的密度, α 為坡度, g 為重力加速度, A_s 為漂流木與其長度垂直之截面浸沒在水中的面積。

水流對漂流木產生朝向下游方向的拖曳力為:

$$F_d = \frac{U^2}{2} \rho_w C_D (L_l d_w \sin\theta + A_s \cos\theta) \quad (2)$$

其中, U 為流速, d_w 為水深, C_D 為拖曳力係數, θ 為漂流木與水流方向的夾角 (圖 1 (c))。

漂流木與底床產生的摩擦力為:

$$F_f = -\mu_b F_n = -\left(g\rho_l L_l \frac{\pi D_l^2}{4} - g\rho_w L_l A_s \right) \mu_b \cos\alpha \quad (3)$$

其中, F_n 為漂流木在斜坡面上之正向力, μ_b 為漂流木與底床之摩擦係數。

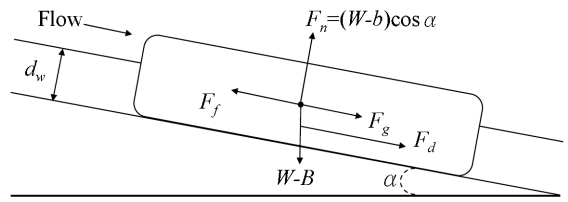
當漂流木達運動之臨界狀態時, 即 $F_g + F_d + F_f = 0$:

$$\begin{aligned} & \left(g\rho_l L_l \frac{\pi D_l^2}{4} - g\rho_w L_l A_s \right) (\mu_b \cos\alpha - \sin\alpha) \\ & = \frac{U^2}{2} \rho_w C_D (L_l d_w \sin\theta + A_s \cos\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

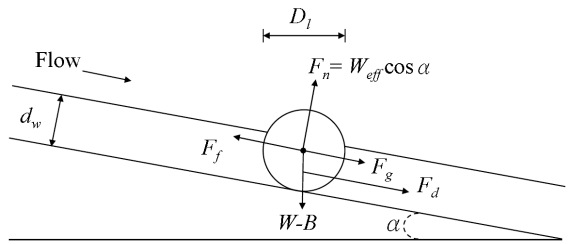
又 A_s 為水深與漂流木直徑的函數, 當漂流木為圓柱體時, A_s 可表示為:

$$A_s = \left\{ 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2d_w}{D_l}\right) - \sin\left[2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2d_w}{D_l}\right)\right] \right\} \frac{D_l^2}{8} \quad (5)$$

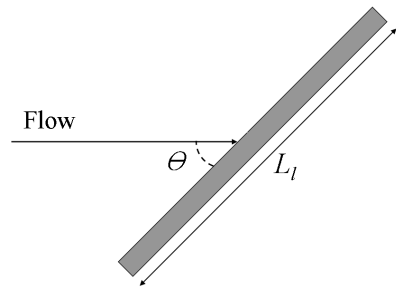
然而, 在天然河川中漂流木的初始運動方式並非都是滑動的方式。Bocchiola *et al.* (2006) 提出當漂流木與水流方向平行時, 其初始運動方式以滑動為



(a) 平行水流方向之受力情形
(a) Pieces lying parallel to flow



(b) 垂直水流方向之受力情形
(b) Cross-section view of piece oriented normal to flow



(c) 傾斜水流方向
(c) Plan view of piece lying oblique to flow

圖 1 漂流木與各作用力示意圖 (重繪自 Braudrick and Grant, 2000)

Fig.1 Schematic and body-force diagrams of components of the force balance acting on a log

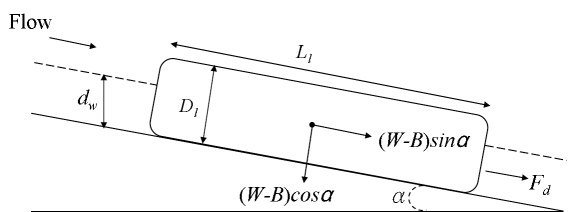


圖 2 漂流木滑動之運動機制 (Bocchiola *et al.*, 2006)
Fig.2 Sketch of incipient motion of a sliding log

主。滑動之運動機制與 Braudrick and Grant (2000) 相同，係以合力平衡的觀點，但漂流木的形狀改以長方體進行模擬 (圖 2)，可將 (4) 式簡化為：

$$(g\rho_l L_l D_l - g\rho_w d_w L_l)(\cos\alpha \tan\phi - \sin\alpha) = \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 d_w \quad (6)$$

其中 ϕ 為漂流木滑動與底床之摩擦角。

當漂流木與水流方向垂直 ($\theta = 90^\circ$) 時，則係以滾動方式為主。針對滾動之運動機制係以合力矩平衡的觀點 (圖 3)，其平衡方程式為 (7) 式。

$$\begin{aligned} (g\rho_l D_l^2 - g\rho_w d_w D_l) \cos\alpha \left(\frac{D_l}{2} \sin\delta\right) = \\ (g\rho_l D_l^2 - g\rho_w d_w D_l) \sin\alpha \left(\frac{D_l}{2} \cos\delta\right) \\ + \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 d_w \left(\frac{D_l}{2} \cos\delta\right) \end{aligned} \quad (7)$$

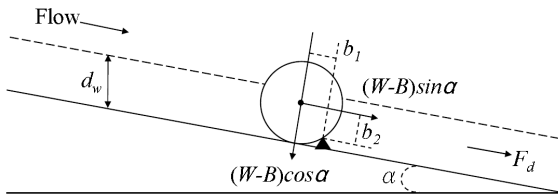


圖 3 漂流木滾動之運動機制 (Bocchiola et al., 2006)

Fig.3 Sketch of incipient motion of a rolling log

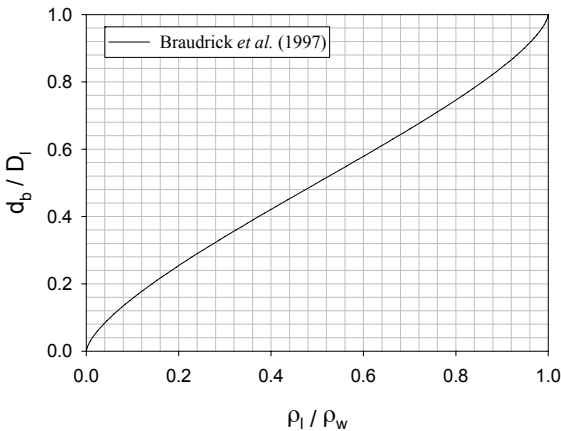


圖 4 漂流木之臨界浮力水深 (Braudrick et al., 1997)

Fig.4 Dimensionless plot of critical floating depth/log diameter (d_c/D_l) versus wood density/water density (ρ_l/ρ_w)

$b_1 = (D_l \sin\delta)/2$ ， $b_2 = (D_l \cos\delta)/2$ ， b_1 、 b_2 均為力臂， δ 為漂流木滾動與底床之摩擦角。

漂流木初始運動所需水深之上限係當水深達漂流木之浮力水深 (buoyant depth, d_b) 時，漂流木浮起離開底床。浮力水深的定義為在靜止且水平渠道上，使漂流木浮起所需之水深。當漂流木之重力等於浮力時，即為漂流木浮動之臨界狀態。Braudrick et al. (1997) 求解出臨界浮力水深，並且依照漂流木的密度不同分為以下三部分：

當漂流木之密度小於 500 kg/m^3 時，

$$\cos^{-1}\left(\frac{r-d_b}{r}\right) - \frac{r-d_b}{r^2} \sqrt{2d_c r - d_b^2} = \frac{\pi\rho_l}{\rho_w} \quad (8)$$

當漂流木之密度等於 500 kg/m^3 時，

$$d_b = r \quad (9)$$

當漂流木之密度大於 500 kg/m^3 時，

$$\begin{aligned} \sin^{-1}\left(\frac{d_b-r}{r}\right) + \frac{d_b-r}{r^2} \sqrt{2d_b r - d_b^2} \\ = \pi\left(\frac{\rho_l}{\rho_w} - \frac{1}{2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中， r 為漂流木之半徑， d_b 為漂流木之臨界浮力水深。

求解出各不同密度之漂流木其所對應之臨界浮力水深，將漂流木密度與水密度之比值 (ρ_l/ρ_w) 對臨界浮力水深與漂流木直徑之比值 (d_b/D_l) 作無因次圖 (圖 4)。圖中曲線為漂流木浮與不浮之分界，曲線上方表示漂流木會浮起，曲線下方則表示不會浮起。

Bocchiola et al. (2006) 利用渠槽試驗探討漂流木在河道中初始滑動 (平行水流) 與滾動 (垂直水流) 的起動條件，並將 (6) 式及 (7) 式整理成一個無因次方程式；如 (11) 式。

漂流木初始起動無因次方程式：

$$Y_w^* = \frac{\rho_w d_w}{\rho_l D_l} = \frac{1}{1 + C_D X_{S,R}^*} \quad (11)$$

其中，

$$X_S^* = \frac{1}{2} \frac{U^2}{g L_l} \frac{1}{(\cos\alpha \tan\phi - \sin\alpha)} ;$$

$$X_R^* = \frac{1}{2} \frac{U^2}{g D_l} \frac{1}{(\cos\alpha \tan\delta - \sin\alpha)} ;$$

X^* 下標 S 和 R 分別表示漂流木滑動及滾動的運動方式, 根據漂流木起動是滑動或是滾動, 代入相應之 X^* 值。(11) 式中, X^* 可表示為托曳力及摩擦力之關係式; 其中亦隱含了福祿數因子在內。 Y^* 可表示為相對浮力 (relative buoyancy) 或是水深與漂流木半徑之比值。 X^* 及 Y^* 可將漂流木之運動水深視為托曳力及摩擦力之函數。

但是, 從試驗發現, 實際上漂流木周圍之水深與平均水深不同, 因此利用反推法 (back-calculate), 將漂流木直徑及密度、水密度與 $X_{S,R}^*$ 等已知條件代入 (11) 式, 求得漂流木初始起動之代表水深 (representative water depth, d_r), 如 (12) 式。

漂流木初始起動水深修正:

$$Y_r^* = \frac{\rho_w d_r}{\rho_l D_l} = \frac{1}{1 + C_D X_{S,R}^*} \quad (12)$$

Bocchiola *et al.* (2006) 提出利用 $X_{S,R}^*$ 及 Y^* 兩個無因次因子, 可以用來判斷漂流木是否發生運動。漂流木初始起動曲線係根據: (1) 力學平衡的觀點, 由 (12) 式建立之, 其中 C_D 值為 1.41; (2) 將試驗結果之 X^* 及 Y^* 因子, 經迴歸分析後可得 $Y^* = 1.26 / (1 + 2.49X^*)$ 。漂流木初始起動曲線可作為漂流木穩定指標, 位於曲線下方為漂流木穩定不動, 上方則漂流木開始起動。

三、試驗設計

1. 試驗材料

在河道中的漂流木在運移的過程中, 經過分解與破碎化之後, 大多僅剩樹幹的部分; 因此本研究採用光滑圓柱體作為試驗之漂流木模型, 模型密度 (ρ_l) 介於 600~800kg/m³。模型直徑 (D_l) 為 0.03、0.04 及 0.05m; 長度 (L_l) 為 0.15、0.20、0.25 及 0.30m。模型細長比 (slenderness; L_l / D_l) 介於 3~10。

本研究為探討漂流木模型在具有粗糙度底床時之啟動力學機制, 故本研究先將石材均勻攪拌於水泥中平鋪於木板上, 再將表層水泥洗去露出石材, 而石材露出的深度約為石材粒徑 (d_s) 的一半; 如此一來, 可確保試驗之底床顆粒固定且均勻分佈。最後再將附著石材之木板鋪設在渠道上, 而木板與渠道邊壁及木板與木板間的空隙則利用黏土填平, 以防止滲水。另外, 為瞭解不同底床粗糙度對漂流木初始起動之影響, 分

別利用粒徑 d_s 為 5mm 及 8mm 的石材製作兩種不同粗糙度之試驗底床。

2. 摩擦角試驗

在無水流作用的條件下, 為探討不同漂流木模型之擺設方式及底床粒徑對漂流木摩擦角之影響。本試驗利用可抬升坡度之平台進行摩擦角量測。漂流木摩擦角之試驗條件為 2 種不同粗糙度之底床 ($d_s=5\text{mm}$ 和 $d_s=8\text{mm}$)、3 種擺設型態及 12 根漂流木模型, 共 72 組試驗, 每組並進行 3 次重複試驗。其中, 漂流木擺設型態分別為平行 (parallel, $\theta = 0^\circ$)、垂直 (transverse, $\theta = 90^\circ$) 及傾斜 (oblique, $\theta = 45^\circ$) 三種。

3. 浮力試驗

為瞭解漂流木之浮力水深對於初始啟動之影響, 本研究利用一矩形透明玻璃水箱進行浮力試驗。玻璃水箱長 0.74m, 寬 0.24m, 高 0.18m; 並於玻璃側壁貼上標尺, 作為水深量測依據。漂流木之浮力水深試驗係將漂流木放置在靜止的水中, 量測使漂流木受浮力作用浮起之水深, 試驗之漂流木 12 根, 每根漂流木進行 3 次重複試驗, 共 36 次試驗。試驗過程中, 水深每次增加 0.1cm, 直至漂流木浮起, 並分別記錄漂流木尚未浮起之水深上限 (non-buoyant depth, d_{nb}) 與浮起所需之水深下限, 即浮力水深 (d_b)。

4. 初始啟動試驗

漂流木初始啟動試驗於可調整坡度之矩形玻璃渠槽中進行, 渠槽全長 11 m、寬 0.6 m、高 0.6 m。漂流木初始起動之試驗條件為 2 種不同底床粗糙度 ($d_s=5\text{mm}$ 和 $d_s=8\text{mm}$)、3 種擺設型態, 12 根漂流木, 每組試驗進行 2 次重複試驗。其中, 初始起動試驗之漂流木擺設型態分別為與水流方向平行、垂直及傾斜三種。而擺設型態為傾斜又分為頂部偏向左岸 (oblique I) 與頂部偏向右岸 (oblique II) 兩種; 但此兩種不同傾斜方向之初始起動流量大致相同, 故僅將兩種不同之傾斜擺設各做 1 次試驗, 再將兩種傾斜擺設之試驗結果取平均得漂流木擺設為傾斜之初始起動水力條件。

進行漂流木初始起動試驗時, 為了與 Bocchiola *et al.* (2006) 之試驗成果比較, 將渠槽坡度固定為 0.006 (m/m)。而為使試驗段內之水流流況均勻且穩定, 遂以距出水口 4m 處為試驗起始段。同時, 為減

小渠道邊壁效應對試驗之影響，將漂流木放置在試驗段之渠道中心線位置。試驗初始將漂流木放置於試驗段，逐漸增加流量（流量增加率：0.0002 cms/min），直至漂流木開始起動，再量測漂流木初始起動之各種水力條件。其中，漂流木初始起動之水力條件量測主要分為兩部分：(1) 漂流木達初始起動之流量後，將漂流木移除，量測在該流量下未受到干擾之之平均水深 (d_w) 與平均流速 (U)；(2) 漂流木達初始起動之流量後，固定漂流木，量測漂流木周圍水深。而漂流木周圍水深則分為漂流木上游段水深 (d_{up})、漂流木下游段水深 (d_{down}) 以及漂流木周圍之水深 (\bar{d})；周圍水深係將距離漂流木四周各 10 公分範圍之水深取平均而得。

本試驗以顆粒追蹤 (particle tracking) 的方式量測表面流速，並利用 (13) 式將表面流速轉換成平均流速 (Hinze, 1975)：

$$\frac{U_h - U_y}{U_*} = -5.75 \cdot \log\left(\frac{y}{h}\right) \quad (13)$$

其中， U_h 為表面流速， U_y 為在 y 水深位置之流速， U_* 為剪力流速 (shear velocity)。假設當 $y/h = 0.42$ 時， U_y 等於平均流速 (U)，則 (13) 式可簡化為 (14) 式：

$$U = U_h - 2.17 \cdot U_* \quad (14)$$

其中， $U_* = \sqrt{g \cdot R \cdot S}$ 。

漂流木初始起動之水流條件，其福祿數 (Froude number, $F_r = U / \sqrt{g d_w}$) 範圍介於 0.25~0.72，屬於亞臨界流況 (subcritical flow)；而雷諾數 (Reynolds number, $R_e = U d_w / \nu$) 範圍則介於 $1.2 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^4$ 。本試驗之漂流木初始起動水流福祿數與雷諾數範圍與 Bocchiola *et al.* (2006) 試驗相近。

四、試驗結果

1. 摩擦角試驗

試驗發現，當漂流木之擺設型態為平行水流時，其初始運動方式為滑動；而擺設型態為傾斜及垂直水流時，初始運動方式則為滾動。由此可知，不同擺設型態之漂流木運動方式主要為滑動及滾動為主；因此，在建立漂流木之初始運動機制時，應需依據其運動方式搭配相對應之力學分析方法，而並非如 Braudrick and Grant (2000) 均係採用相同之力學分析方法。

從試驗結果得知，相同擺設型態之漂流木其摩擦角與漂流木之直徑及長度無關，僅與底床粒徑有關 (圖 6)。當擺設型態與水流平行時，底床粒徑對摩擦角之影響主要係在底床與漂流木之接觸面積，底床粒徑較小者，與漂流木間之接觸面積較多，摩擦角較大。當擺設型態為傾斜或垂直水流時，底床粒徑對摩擦角之影響主要係由於底床顆粒凸起阻礙漂流木滾動，底床粒徑較大者，漂流木需增加抬升之坡度以克服底床顆粒阻礙，進而開始滾動，故摩擦角較大。

另外，在相同之底床粒徑條件下，擺設型態為平行水流之摩擦角最大，其次為傾斜水流之摩擦角，以垂直水流之摩擦角為最小。主要原因係滑動之摩擦角大於滾動之摩擦角，故擺設型態平行水流時之摩擦角最大；而傾斜及垂直水流之擺設型態初始運動方式皆為滾動，但傾斜水流之擺設型態可以被分解成平行與垂直水流方向兩個分量，存在有滑動之分量，使得傾斜水流之摩擦角略大於垂直水流之摩擦角。然而，儘管傾斜水流之擺設型態可以被分解成平行與垂直水流方向兩個分量，但由於滾動之摩擦角遠小於滑動之摩擦角，當坡度達滾動之摩擦角時，漂流木即開始滾動，故傾斜水流擺設型態之初始運動方式為滾動。

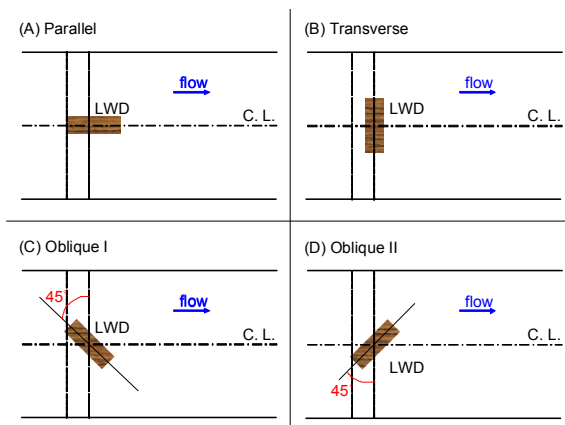


圖 5 漂流木模型初始起動試驗擺設型態

Fig.5 Patterns log displacements in the incipient motion experiments

2. 浮力水深

從試驗結果可知，漂流木密度差異不大時，漂流木之浮力水深與漂流木長度無顯著關係，但與漂流木直徑呈正相關之關係。漂流木本身之重力等於浮力時，即為漂流木浮動之臨界狀態。從力平衡觀點 (4) 式兩側皆有漂流木長度因子，可以相互消除，因此漂流木之浮力水深與漂流木長度無關。另外，根據試驗之漂流木模型，在相同直徑下，長度增加 5 cm，漂流木之體積約增加 25%；然而在相同長度下，直徑僅增加 1 cm，漂流木之體積即增加約 65%。因此，在漂流木密度差異不大時，改變漂流木直徑對其體積變化之

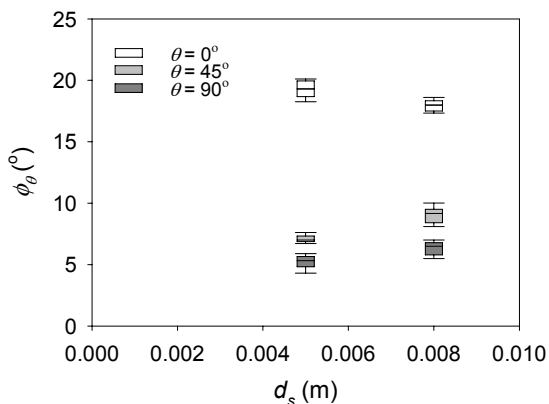


圖 6 漂流木模型與底床之摩擦角

Fig.6 Friction angles between logs and channel bed

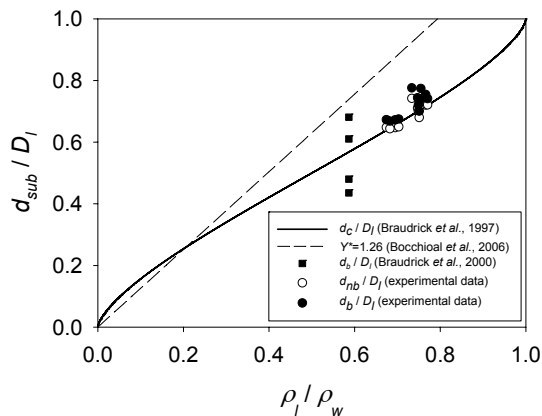


圖 7 漂流木模型之浮力水深

Fig.7 Buoyant depth of log

影響較大，故漂流木之直徑對浮力水深 (d_b) 有顯著的關係。

影響浮力水深之原因，除了漂流木直徑之外，尚與漂流木之密度大小有關。試驗時漂流木尚未浮起之水深上限值 (d_{nb}) 與 Braudrick *et al.* (1997) 利用數值方法求解之漂流木臨界浮力水深 (d_c) 相近；而試驗之漂流木浮起之水深下限值 (d_b) 則略大於臨界浮力水深 (d_c)，因此本試驗之試驗結果可用來與 Braudrick *et al.* (1997) 之理論值相互驗證 (圖 7； d_{sub} 代表各種水深，如 d_{nb} 、 d_b)。Braudrick and Grant (2000) 對漂流木進行浮力水深試驗，但試驗之結果卻分佈在 Braudrick *et al.* (1997) 之理論值兩側。其原因為該試驗之漂流木模型僅標示其密度範圍介於 436~735kg/m³，並無每根漂流木相對應之密度值，所以本研究係將該試驗漂流木模型之平均密度做為代表進行計算，因而與 Braudrick *et al.* (1997) 之理論值有所差異。Bocchialo *et al.* (2006) 利用渠槽試驗所得之漂流木浮動門檻值 ($Y^*=1.26$) 與本試驗值及 Braudrick *et al.* (1997) 所求解之漂流木臨界浮力水深差異甚大，並且當密度比值大於 0.8 後，水深與漂流木直徑之比值將會大於 1，如此表示漂流木之浮力水深將大於漂流木之直徑，此結果與現實狀況不符。造成如此差異之原因可能係因為該試驗之漂流木密度僅兩種變化，試驗所得之迴歸值並無法適用在所有密度比值之漂流木，而僅適用在某一範圍之密度比值。再者， $Y^*=1.26$ 乃係假設在流速極小之情形而得，並非是在靜止之水中試驗求得知浮力水深，如此亦可能造成此差異性。

3. 漂流木之初始啟動

試驗過程中發現，若擺設型態為平行水流，且接近漂流木之初始起動流量時，漂流木會有些微晃動之現象；但是，擺設型態為傾斜及垂直水方向時，在達到漂流木初始起動流量前則無類似之預兆。漂流木達到初始起動條件後，若漂流木之擺設型態為平行水流時，其初始起動方式主要為滑動；另外，在漂流木滑動的過程中，有時候會受到底床顆粒干擾而改變漂流木與水流方向之夾角 θ ，再加上水流的作用，使得漂流木的運動方式由滑動變成軸轉動或滾動。若擺設型態為傾斜及垂直水方向時，其初始起動方式則主要為滾動；而且，這 2 種擺設型態之漂流木一旦開始起動後，即保持相同的運動方式，但在運動的過程中有時候會受到底床顆粒阻礙而停止運動。

五、漂流木初始啟動之影響因子

1. 漂流木與水流方向之夾角 (θ 角)

漂流木與水流方向之夾角會影響漂流木初始啟動之水流條件 (Braudrick and Grant, 2000)。在所有漂流木直徑與長度組合之試驗條件中，漂流木初始啟動所需之水深與流速以平行水流方向最大，其次為傾斜水流方向，垂直水流方向最小。此表示相較於漂流木與水流方向傾斜及垂直，當漂流木與水流方向平行時較為穩定；此試驗結果亦與 Braudrick and Grant (2000) 論點相符。

當渠道受到漂流木之阻礙時，會造成通水斷面積的減少，使得水深及流速等水流條件產生局部的變化。因此，漂流木對通水斷面積之影響程度對漂流木初始啟動所需之水深有顯著之影響。當漂流木與水流方向平行時，其遮蔽率 (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) 範圍約介於 0.04~0.08 (圖 8)，遮蔽率變化範圍不大，對漂流木初始啟動所需之水深影響不顯著。漂流木與水流方向傾斜及垂直時，其遮蔽率範圍約介於 0.2~0.5，漂流木初始啟動所需之水深與遮蔽率則呈現負相關之關係 (圖 8)。由此可知，隨著漂流木與水流方向夾角 θ 角增加，漂流木對水流之遮蔽率亦隨之增加，造成漂流木受水流作用之面積增加，因而減少漂流木之穩定性。

2. 漂流木長度、直徑及密度

在許多關於漂流木在河道中運移之研究皆指出，漂流木之運移距離與漂流木長度及直徑因子之有關 (Bilby and Ward, 1989; Abbe *et al.*, 1993; Braudrick *et al.*, 1997; Braudrick and Grant, 2000)。由試驗結果得知，若漂流木長度變為原本之 2 倍 (從 0.15m 變成 0.3m)，漂流木與水流方向平行時，漂流木初始啟動所需之水深約增加 4%；而漂流木與水流方向傾斜與垂直時，其初始啟動所需之水深則分別減少 7% 及 14% (圖 9)。若漂流木直徑增加約為原本之 1.7 倍 (從 0.03m 變成 0.05m)，漂流木與水流方向平行時，漂流木初始啟動所需之水深約增加 63%；而漂流木與水流方向傾斜與垂直時，其初始啟動所需之水深則約增加 40%。由上述可知，漂流木直徑之改變對其初始啟動所需之水深影響較大，表示漂流木直徑大小對漂流木之穩定性有顯著的影響 (圖 10)。另外，漂流木直徑對初始啟動所需之水深之變化

斜率以漂流木與水流方向平行時最大，而漂流木與水流方向傾斜與垂直之斜率則大致相同，表示當漂流木與水流方向平行時，改變漂流木直徑對其初始啟動所需之水深影響較大 (圖 10)。

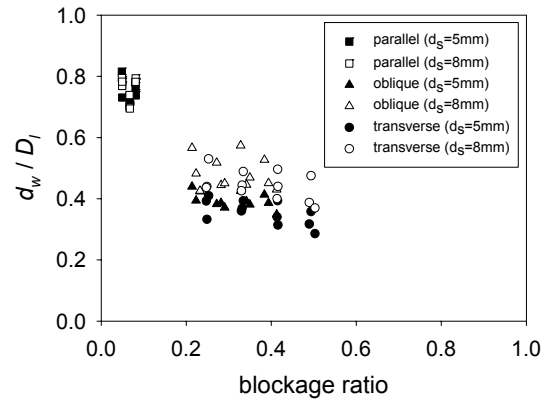


圖 8 遮蔽率與漂流木初始啟動水深之關係

Fig.8 blockage ratio against initial depth of log

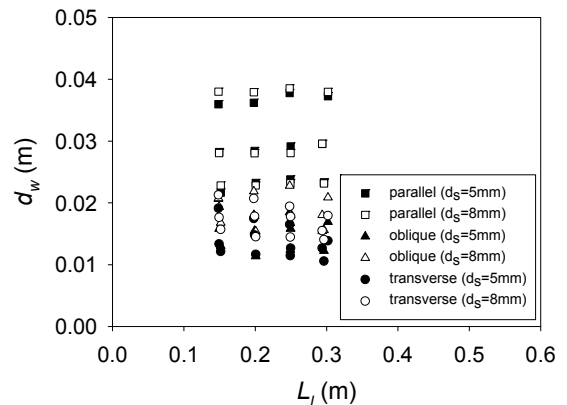


圖 9 漂流木長度與初始啟動水深關係

Fig.9 Log length against initial motion depth

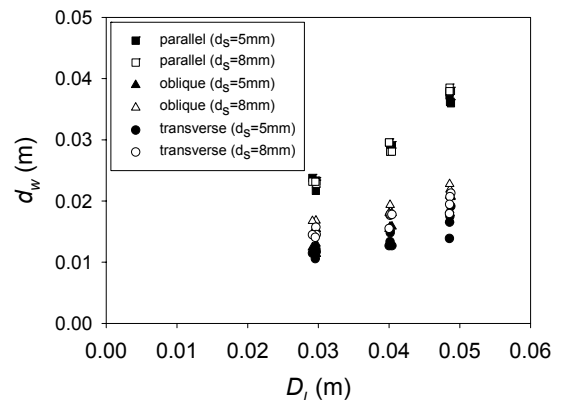


圖 10 漂流木直徑與初始啟動水深關係

Fig.10 Log diameter against initial motion depth

漂流木初始起動之上限係當水深達到漂流木之浮力水深, 漂流木浮起離開底床; 因此, 流木之密度大小會影響漂流木初始起動所需之水深。但由於本試驗之漂流木密度範圍變異性不大, 並不易判別漂流木密度與漂流木初始起動水深之間的相關性。從試驗結果可約略看出, 漂流木初始起動所需之水深與漂流木直徑之比值發現與漂流木密度呈現正相關之關係 (圖 11)。其中, 以漂流木平行水流方向最為明顯; 傾斜及垂直水流方向之試驗結果經迴歸分析後可發現, 水深與漂流木直徑比與漂流木密度呈現微弱的正相關之關係。從不同擺設型態之迴歸曲線斜率變化可知, 密度之變化對初始起動水深與漂流木直徑之比值的變化量以擺設型態為平行水流最大, 傾斜及垂直水流次之 (圖 11); 此結果與 Braudrick and Grant (2000) 利用理論模式計算之結果相符合。

3. 底床粗糙度

當漂流木與水流方向平行時, 底床粗糙度對漂流木初始起動所需之水深影響不大; 但是, 當漂流木與水流方向傾斜及垂直時, 底床粒徑較大者 ($d_s=8\text{mm}$) 所需要之啟動水深較粒徑小者 ($d_s=5\text{mm}$) 為深 (圖 10)。

當漂流木與水流方向平行時, 其初始起動所需之水深略大於漂流木臨界浮力水深 (圖 12); 此表示漂流木已經浮起, 不與底床接觸。然而, 漂流木與水流方向平行時, 水流受到漂流木阻擋, 造成漂流木周圍水深產生劇烈變化。因此, 利用不受漂流木干擾之試驗段平均水深作為漂流木初始起動之水深, 會產生與實際現象不符的問題。為此, 若以漂流木周圍平均水深 (\bar{d}) 作為描述漂流木初始起動之水深, 則可發現漂流木之周圍水深介於漂流木尚未浮起水深上限 (d_{nb}) 與浮起水深下限 (d_b) 之間 (圖 13; d_{sub} 代表各種水深, 如 d_{nb} 、 d_b 等)。由此可知, 漂流木與水流方向平行時, 隨著水深逐漸增加 (漂流木所受之浮力增加), 漂流木之摩擦阻力則逐漸減小, 直至漂流木達到初始起動所需之水流條件, 漂流木會以半浮動半滑動的方式向下游移動, 使得底床粒徑對漂流木初始起動所需之水深的影響差異性不顯著; 但是, 因為水深變化量不明顯, 所以很難從高速攝影機所記錄的影像中判斷。而當漂流木與水流方向傾斜及垂直時, 其初始起動所需之水深則皆小於漂流木臨界浮力水深, 表示漂流木之初始

起動過程均與底床有接觸, 使得底床粒徑對漂流木初始起動所需之水深影響較為顯著; 漂流木必須克服底床顆粒阻礙才能開始起動, 故 $d_s=8\text{mm}$ 之初始起動所需水深較 $d_s=5\text{mm}$ 大, 此結果亦與摩擦角試驗結果相同。

4. 漂流木福祿數

Wallerstein *et al.* (2002) 提出漂流木福祿數 ($F_{R1} = U / \sqrt{gD_1}$) 會影響水流對漂流木產生之拖曳力。而 Bocchiola *et al.* (2006) 所建立之 X^*_S 及 X^*_R 兩個無因次因子中亦存在漂流木福祿數之因子, 但是針對

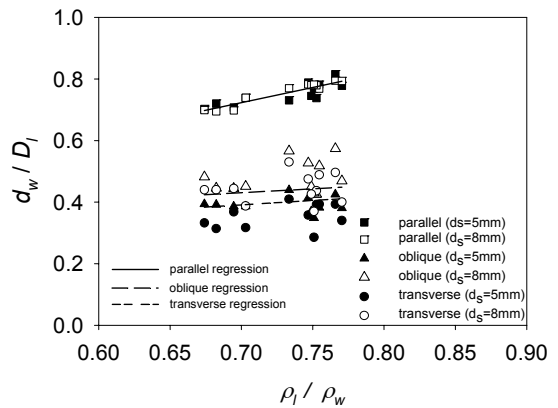


圖 11 密度與漂流木初始啟動水深之關係

Fig.11 Density against initial motion depth

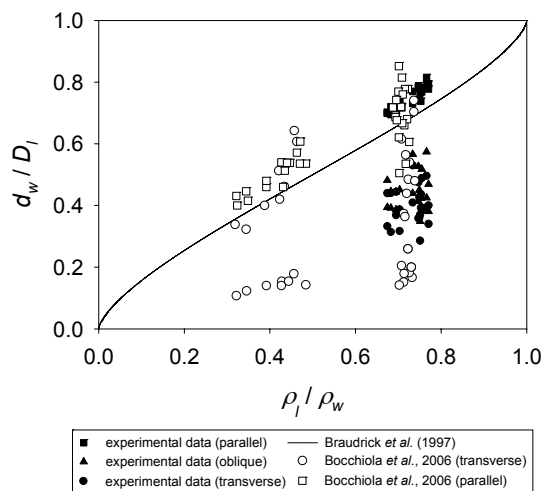


圖 12 漂流木初始啟動水深與浮力水深之關係

Fig.12 LWD initial motion depth against buoyant depth

漂流木與水流方向平行及垂直，其漂流木福祿數則係分別表示為 $U/\sqrt{gL_l}$ 及 $U/\sqrt{gD_l}$ 兩種形式 ((11) 式)。由此可知，漂流木福祿數和漂流木與水流方向之夾角有關，因此本研究針對漂流木在任意水流方向夾角，其漂流木福祿數以 (15) 式表示之。

漂流木福祿數：

$$Fr_l = U \sqrt{\frac{L_l \sin \theta + D_l \cos \theta}{gD_l L_l}} \quad (15)$$

當漂流木與水流方向傾斜及垂直時，由於大底床粒徑時之漂流木初始起動所需水深較小底床粒徑深，流速較慢，造成底床粗糙度對漂流木初始起動有所影響；且初始起動所需水深與直徑之比值和漂流木福祿數呈現負相關之關係 (圖 14)。而當漂流木與水流方向平行時，初始起動所需水深與直徑之比值和漂流木福祿數並無顯著之關係，係由於漂流木與水流方向平行，其漂流木福祿數僅與平均流速及漂流木長度有關，但漂流木長度因子對其初始起動所需水深之影響不顯著，故漂流木福祿數因子與漂流木初始起動所需之水深並無顯著關係。

5. 漂流木上下游水深變化情形

在各種試驗條件下，水流受到漂流木的阻礙，使得漂流木上游段之水深高於初始起動之平均水深 (d_w)，而漂流木下游段之水深則會低於其初始起動之平均水深。進一步探討漂流木上下游水深變化情形，由漂流木上下游水深之變化比 (depth variation ratio) $= (d_{up} - d_{down}) \times 100\% / d_{down}$ 與漂流木遮蔽率之間的關係可知，水深之變化比與遮蔽率呈現正相關之關係，即係漂流木阻水面積愈大，將導致漂流木上下游水深變化之差愈大 (圖 15)。當漂流木與水流方向垂直時，遮蔽率為最大，其水深變化比約為 48%；漂流木與水流方向傾斜之遮蔽率次之，水深變化比約為 40%；而漂流木與水流方向平行之遮蔽率最小，水深變化比約為 10%。

六、 X^* 及 Y^*

Bocchiola *et al.* (2006) 利用 X^* 及 Y^* 兩個無因次因子建立漂流木之初始起動曲線，此曲線可用來判斷漂流木是否發生運動。但是藉由試驗發現，實際之漂流木周圍水深與平均水深不同，因而利用反推法 (back-calculate)，將漂流木直徑及密度、水密度與

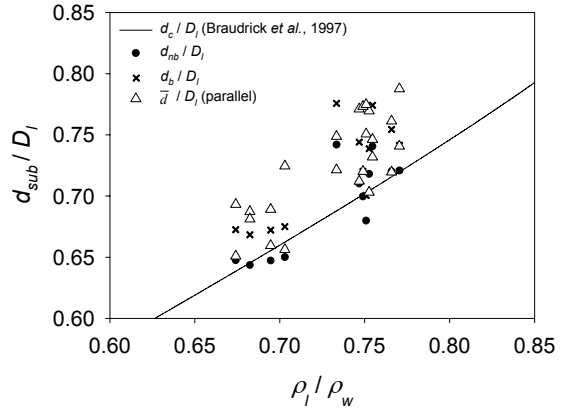


圖 13 漂流木周圍水深與浮力水深之關係
Fig.13 Buoyant depth against depth of surrounded LWD

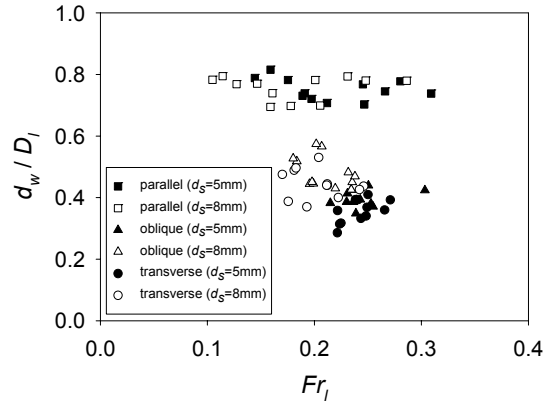


圖 14 漂流木福祿數與漂流木初始啟動水深關係
Fig.14 LWD Froude number against initial motion depth

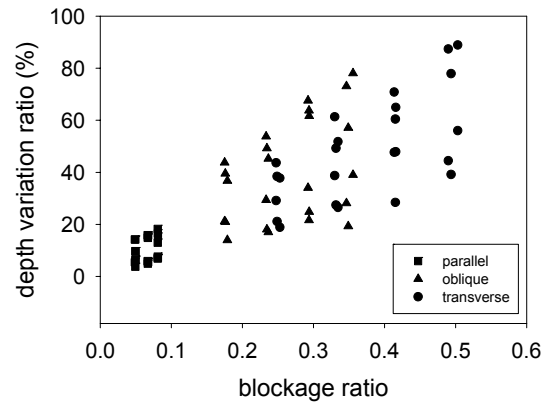


圖 15 遮蔽率與水深變化率之關係
Fig.15 blockage ratio against depth variation rate

$X^*_{S,R}$ 等已知條件代入 (12) 式, 求得漂流木初始起動之代表水深。因此, 本研究亦將初始起動試驗之平均水深利用 Bocchiola *et al.* (2006) 所提出之水深修正式 ((12) 式), 求得本試驗之漂流木初始起動代表水深, 其中漂流木拖曳力係數皆以 1.41 代入。將試驗之平均水深經過 (12) 式修正後, 由於本研究之漂流木拖曳力係數皆以 1.41 代入, 因而使其結果均落在 $Y^*=1/(1+1.41X^*)$ 之曲線上 (圖 16)。利用 (12) 式將漂流木初始起動之平均水深修正後, 發現 Y^* 值皆會小於 1, 表示漂流木在該初始起動之代表水深, 漂流木本身之重力皆大於浮力, 漂流木尚未浮起。然而, 由試驗結果得知, 漂流木在與水流方向平行時, 漂流木會以半浮半滑動之運動方式向下游移動; 因此, 若將漂流木之初始起動水深以 d_r 代表, 會與實際現象不符。

分別利用無漂流木時之水深 (d_w) 及周圍水深 (\bar{d}) 代表漂流木初始起動所需之水深, 並代入求得 Y^* 因子。當漂流木與水流方向平行, 所求得之結果皆會落在 $Y^*=1/(1+1.41X^*)$ 之曲線上方, 其原因係平均水深及周圍水深皆大於漂流木臨界浮力水深, 漂流木受浮力作用影響, 造成漂流木以半浮半滑動的方式運移, Y^* 值會大於 1; 另外, 亦可發現, 隨著 X^* 值增加, 相對應之 Y^* 值並無明顯的變化, 表示漂流木與水流方向平行時, X^* 與 Y^* 並無顯著關係, Y^* 值大約介於 1~1.1 之間。當漂流木與水流方向傾斜及垂直, 所求得之結果皆會落在 $Y^*=1/(1+1.41X^*)$ 之曲線下方, 其原因係漂流木與水流方向傾斜及垂直時, 受到遮蔽率之影響, 造成漂流木上游水深壅高, 而壅高之水深會大於平均水深及周圍水深。而漂流木滾動主要係受到漂流木上游水深之影響, 因而造成結果皆落在曲線下方。 X^* 為漂流木福祿數、坡度及底床粗糙度之函數; 根據試驗結果顯示, 漂流木與水流方向平行之初始起動所需水深與漂流木福祿數及底床粗糙度無顯著關係, 故 X^* 與 Y^* 並無顯著關係。但是, 漂流木與水流方向傾斜及垂直時, 漂流木初始起動所需之水深與漂流木福祿數及底床粗糙度卻有顯著關係。此時漂流木福祿數與 X^* 呈正比, 與初始起動所需之水深則呈負相關; 而底床粗糙度與 X^* 呈反比, 與初始起動所需之水深則呈正相關; 因此造成 X^* 與 Y^* 呈現負相關之關係。最後, 利用 d_w 或 \bar{d} 代表漂流木初始起動所需之水深, 其 Y^* 因子差異不大, 而平均水深之量測較為方便, 因此建議可用平均水深來代表漂流木初始起動所需之水深 (圖 16)。

將試驗結果之 X^* 及 Y^* 本研究根據 Bocchiola *et al.* (2006) 所得結果, 將初始起動試驗結果利用 $Y^*=a/(1+bX^*)$ 迴歸模式進行分析。漂流木初始起動水深採用平均水深, 並利用 t 檢定 (t -test) 判別變數對模式之顯著性, 以 0.05 作為顯著水準, 採雙尾檢定。檢定結果顯示此模式之變數有相當顯著之影響。另外, 試驗上之誤差於迴歸分析模式中, 將影響模式之準確性, 而影響迴歸模式準確性之試驗值則稱之為影響點 (influence point); 在此利用 D_i (Cook's Distance) 作為影響點診斷之依據, 判別標準為檢定 $F_{(p,n-p,50\%)} = F_a$, 若 $D_i > F_a$, 此試驗值即為影響點; 此迴歸模式之 $F_{(2,70,50\%)} = F_a = 0.7$, 經過影響點診斷後, 顯示 D_i 皆小於 F_a , 無影響點之存在。

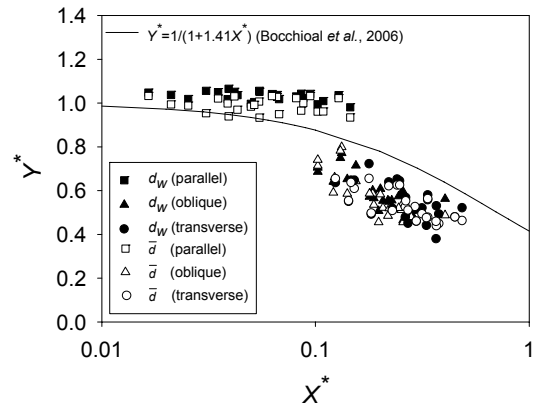


圖 16 漂流木穩定性因子 (X^* 及 Y^*)
Fig.16 LWD stability factors (X^* against Y^*)

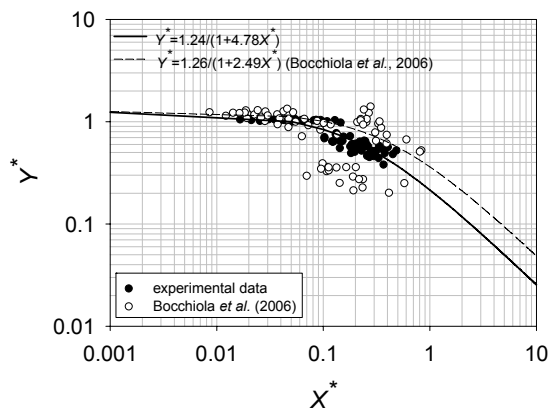


圖 17 漂流木初始啟動曲線迴歸模式
Fig.17 Predictive model of LWD initial motion curve

本研究將漂流木初始起動水深以平均水深表示，利用 X^* 及 Y^* 因子建立之漂流木初始起動曲線迴歸模式， $Y^*=1.24/(1+4.78X^*)$ 。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，此 F 統計量可視為模式所解釋的變異數與模式誤差變異數之比值；由 F 檢定，以 0.05 作為顯著水準，採單尾檢定，變數為 2，自由度為 70，查 F 分佈表得 $F_{0.05}=4$ ，經檢定後顯示迴歸模式與試驗值有顯著關係。

將本研究經迴歸分析所得之漂流木初始起動曲線迴歸模式為：

$$Y^*=1.24/(1+4.78X^*) \quad (16)$$

與 $Y^*=1.26/(1+2.49X^*)$ (Bocchiola *et al.*, 2006) 相互比較，發現兩條曲線在 X^* 小於 0.1 之差異性不大，係由於兩條曲線係數 a 之數值相近 (1.24 與 1.26)，且兩條曲線對漂流木與水流方向平行之試驗結果皆有很好的配適 (fitting) 能力，符合實際之試驗現象 (圖 17)。與 Bocchiola *et al.* (2006) 所提出之迴歸曲線相比較，本研究之漂流木與水流方向傾斜及垂直之試驗結果皆在 Bocchiola *et al.* (2006) 所提出之迴歸曲線下方。主要係由於本研究之試驗結果 X^* 皆小於 1，而 Bocchiola *et al.* (2006) 之迴歸資料具有 X^* 大於 1 之數據，因而造成兩條迴歸曲線係數 b 之數值的差異 (4.78 與 2.49)，進而影響兩條曲線在 X^* 大於 0.1 之斜率。雖然本研究之漂流木初始起動迴歸曲線缺乏 X^* 大於 1 之數據，如要對於 X^* 大於 1 之數值進行漂流木穩定性之判斷能力會稍嫌不足，但針對 X^* 小於 1 之數值進行漂流木穩定性之判斷仍有良好之判斷能力。

七、結 論

漂流木在渠道中之運動機制，從本試驗研究中可知與漂流木及水流方向之夾角、漂流木密度、直徑及底床粗糙度等因子有關。漂流木與水流方向之夾角愈大，漂流木愈容易以滾動方式運動；而當漂流木與水流方向平行時，漂流木必須浮起才會以滑動之方式運動。由此可知，漂流木大多係以與水流方向平行的形式穩定停留渠道中。而漂流木密度與直徑為控制漂流木穩定性之主要因子；漂流木之密度與直徑愈大，即漂流木本身之重量愈重，漂流木愈穩定。另外，在本試驗研究結果中漂流木長度不是影響穩定之主要因子；但是，在漂流木現地調查之研究中皆指出

(Lienkaemper and Swanson, 1987; Abbe *et al.*, 1993; Montgomery *et al.*, 2003)，漂流木之長度因子會影響漂流木之穩定性。主要差異在於天然河川中，漂流木之穩定性會受到河道寬度之影響；一般來說，當漂流木之長度大於河寬的一半時，漂流木會受到兩岸渠道影響，而趨向於穩定地停留在河道上。但是本試驗之渠道寬度遠大於漂流木長度，因此漂流木不會受到渠道寬度影響，造成漂流木部分不受水流作用的情形發生，或是阻止漂流木繼續往下游移動。上述原因，使得在本研究中漂流木長度因子對漂流木穩定性之影響不顯著。

漂流木與水流方向平行時，其初始起動之平均水深皆略大於漂流木臨界浮力水深，比較 Bocchiola *et al.* (2006) 亦得到相同的結果。然而，漂流木與水流方向平行時，水流受到漂流木阻擋，造成漂流木周圍水深產生劇烈變化；因此，利用不受漂流木干擾之試驗段平均水深作為漂流木初始起動之水深，會產生與實際現象不符的問題。當漂流木與水流方向平行時，隨著水深逐漸增加 (漂流木所受之浮力增加)，漂流木之摩擦阻力則逐漸減小，直至漂流木達到初始起動所需之水流條件，漂流木會以半浮動半滑動的方式向下游移動，使得底床粒徑對其初始起動條件之影響不明顯。而當漂流木與水流方向傾斜及垂直時，其初始起動所需之水深則皆小於漂流木臨界浮力水深，表示漂流木底床有接觸，漂流木必須克服底床顆粒阻礙才能開始起動，故 $d_s=8\text{mm}$ 之初始起動所需水深較 $d_s=5\text{mm}$ 大，此結果亦與摩擦角試驗結果相同。

利用無漂流木時之水深 (d_w) 或周圍水深 (\bar{d}) 代表漂流木初始起動所需之水深，其 Y^* 因子差異不大，但是平均水深之量測較為方便，因此建議可用平均水深來代表漂流木初始起動所需之水深。本研究發展之漂流木初始起動迴歸曲線 (16) 式在漂流木與水流方向平行之試驗結果皆有較佳之表現能力。雖然此迴歸模式對於 X^* 大於 1 之數值進行漂流木穩定性之判斷能力會稍嫌不足，但針對 X^* 小於 1 之數值進行漂流木穩定性之判斷仍有良好之判斷能力。因此，未來在進行漂流木之穩定性判定時，可參考本研究提出之漂流木初始啟動關係式，作為簡單之判定依據。

參考文獻

1. 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.
2. Andrus, C. W., Long, B. A. and Frochlich, H. A. (1988) "Woody Debris and its Contribution to Pool Formation in a Coastal Stream 50 Years after Logging," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45:2080-2086.
 3. Bilby, R. E. and Ward, J. W. (1989) "Changes in characteristics and function of large woody debris with increasing size of streams in western Washington," *Transactions of the American Fisheries Society*, 118:368-378.
 4. Bocchiola, D., Rulli, M., C. and Rosso, R. (2006) "Flume experiments on wood entrainment in rivers," *Advance in Water Resources*, 29:1182-1195.
 5. Braudrick, C. A. and Grant, G. E. (2000) "When do logs move in rivers?," *Water Resources Research*, 36:571-583.
 6. Braudrick, C. A., Grant, G. E., Ishikawa, Y. and Ikeda, H. (1997) "Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment," *Earth Surface Processes and Landforms*, 22:669-683.
 7. Gippel, C. J. (1995) "Environment Hydraulics of Large Woody Debris in Stream and River," *Journal of Environmental Engineering*, 388-395.
 8. Haga, H., Kumagai, T., Otsuki, K. and Ogawa, S. (2002) "Transport and Retention of Coarse Woody Debris in Mountain Streams: an in Situ Field Experiment of Log Transport and a Field Survey of Coarse Woody Debris Distribution," *Water Resources Research*, 38(8):1029-1044.
 9. Hinze, J. O. (1975) *Turbulence*, Second Edition, Mc Graw Hill.
 10. 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.
 11. Latterell J. J. and Naiman, R. J. (2007) "Sources and Dynamics of Large Logs in a Temperate Floodplain river," *Ecological Applications*, 17:1127-1141.
 12. 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.
 13. Martin, D. J. and Benda, L. E. (2001) "Patterns of Instream Wood Recruitment and Transport at the Watershed Scale," *Transactions of the American Fisheries Society*, 130: 940-958.
 14. Montgomery, D. R., Collins, B. D., Buffington, J. M. and Abbe, T. B. (2003) "Geomorphic effects of wood in river," *American Fisheries Society Symposium*, pp.1-27.
 15. 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 Landforms*, 18:43-61.
 16. Nakamura, F. and Swanson, F. J. (1994) "Distribution of Coarse Woody Debris in a Mountain Stream, Western Cascades Range, Oregon," *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 2395-2403.
 17. Schuett-Hames, D., Pleus, A. E., Ward, J., Fox, M. and Light, J. (1999) *TFW Monitoring Program Method Manual of Large Woody Debris Survey*, Washington State Department of Natural Resources under the Timber, Fish and Wildlife Agreement.
 18. Seo, J. I. and Nakamura, F. (2009) "Scale-dependent Controls Upon the Fluvial Export of Large Wood from River Catchments," *Earth Surface Processes and Landforms*, 34:786-800.
 19. Seo, J. I., Nakamura, F. and Chun, K. W. (2010) "Dynamics of Large Wood at the Watershed Scale: a Perspective on Current Research Limits and Future Directions," *Landscape and Ecological Engineering*, 6(2):271-287.
 20. Wallerstein, N. P., Alonso, C. V., Bennett, S. J., and Thorne, C. R. (2002) "Surface wave forces acting on submerged logs," *ASCE J Hydraul Eng*, 128(3):349-353.

21. Wooster, J. and Hilton, S. (2004) "Large woody debris volumes and accumulation rates in cleaned streams in redwood forests in Southern Humboldt county, California," *USDA Forest Service Research Note*, PSW-RN-426.
-

2010 年 10 月 30 日 收稿

2011 年 02 月 15 日 修正

2011 年 02 月 24 日 接受

(本文開放討論至 2011 年 12 月 31 日)