

## 陡坡卵礫石小型河川底床推移載之現場量測 與經驗公式之比較—以筏子溪為案例

劉建榮 許少華\* 蘇宏仁

**摘要** 目前台灣河川推估推移載輸砂率多以經驗公式或者總輸砂量的固定比例作為推移載傳輸量，缺乏現地實驗數據驗證，可能錯估大水期間的推移載傳輸量。本研究利用自行研發的推移載採樣器於台中市筏子溪進行現地量測。根據試驗結果可知，表面流速高於 3.8 m/s 以上時，幾乎所有的河床質皆已啟動。何智武—A1 與 A2 公式以及 MPM 公式較適用於筏子溪進行推移載輸砂率推估。Parker 經驗公式所推估之輸砂量與實際值有所差異應為所給定之護甲層資訊需根據不同颱風事件進行修正。由敏感度分析可知，何智武—A1 與 A2 公式的估算對 S 與  $D_{50}$  之變化較為敏感，此有助於釐清推估颱風期間推移載傳輸量時所應強調的重點參數。  
**關鍵詞：** 推移載、現地量測、輸砂公式。

### Field Measurements of Gravel Transportation and Comparison with Bedload Formulas in a Small River with a Steep Slope – Fa-Zih River used as an example

Chien-Jung Liu Shao-hua Hsu\* Hung-Ren Su

**ABSTRACT** Currently, the bedload transport rate is usually estimated by empirical formulas or by assuming a ratio between the bedload and suspended load. Without proper confirmation by field data, the predicted value might be far from the real value. This study employed a newly invented instrument to measure the bedload transport rate in Fa-Zih River, Taichung, during Typhoon Sinlaku in 2008 and Typhoon Morakot in 2009. The data from the three field experiments showed, almost the entire bed material would move when the surface velocity reached 3.8 m/s. The He-Zhi-Wu—A1 & A2 and MPM empirical formulas were more suitable to evaluate the bedload transport rate than other empirical formulas. For the He-Zhi-Wu—A1 & A2 empirical formulas, the predicted bedload transport rate is very sensitive to the bed slope parameters and mean grain size  $D_{50}$ . It was useful to understand what parameters should be emphasized to evaluate the predicted bedload transport rate on Fa-Zih River during typhoons.

**Key Words:** bed load, sediment transport.

## 一、前言

河道泥砂於不同的水流流量條件下水流所能挾帶之泥砂粒徑範圍不同 (即挾砂能力不同), 不同流量下懸浮載與底床推移載之泥砂粒徑範圍也不同。如何準確掌握不同流量下的懸浮載與底床推移載泥砂傳輸特性與傳輸量, 對於河道變遷以及泥砂進出攔河堰所造成的沖淤變化為相當重要的研究課題。目前國內的研究與量測多以懸浮載為主, 推移載傳輸量多以經驗公式進行迴歸式推估。國外研究部分, 由於河川特性 (地床坡度、颱風期間的流量、河床質粒徑大小..等等) 與台灣相差甚大, 故大部分之採樣器皆不適用於台灣地區進行底床推移載之量測。

由於即使在相對穩定的流場條件下, 推移載的傳輸量也並非穩定的, 而是由接近底床局部流場所造成間歇性發生的, 故採樣時間的長短並無絕對的標準。目前大多使用經驗公式來推估颱風期間的底床推移載輸砂量, 或以總輸砂量的一定比例推估推移載輸砂量。但以經驗公式或總輸砂量固定比例推估之推移載輸砂量缺乏現地數據來驗證, 所推估之輸砂量與實際輸砂量的差距往往無法得知。故本研究利用自行研發之底床推移載採樣器於台中市筏子溪進行現地採樣, 並與國內外經驗公式所推估之底床推移載輸砂量進行分析比較。

## 二、文獻回顧

### 1. 相關研究與採樣儀器

#### (1) 移動式底床推移載採樣器

Delft (1996) 利用可攜式 Helley-Smith sampler (H-S sampler) 砂礫石採樣器 (如圖 1 所示) 研究礫石河床的底床推移載的運輸行為。採樣粒徑範圍為 76.2 mm~0.25 mm。觀測紐西蘭的 Waal River, 平均流量為 1350 CMS, 尖峰流量可達 8000 CMS, 底床載粒徑範圍 0.1 mm~10 mm (Kleinhans and Brinke, 2001)。Bunte et al. (2004) 以可攜式採樣器 (如圖 2 所示) 研究礫石河床的粗顆粒底床推移載的運輸行為, 其儀器約可容納體積 0.025 m<sup>3</sup> 或 25 kg 的礫石及卵石。將其量測資料與 H-S sampler 採樣資料比較發現, 低流量時的採樣資料差異較大, 流量介於漫灘前後底床推移載流動率較接近 (如圖 3 所示)。圖 4 與圖 5 分

別為 Helley-Smith 與 Canada 礫石型底床推移載採樣器, 取樣總重分別可達 75.8 kg 以及 75 kg。圖 6 則為 Chinese US-TR 2 型底床推移載採樣器, 取樣總重可達 81.7 kg。圖 7 為手提式 USFS 底床推移載採樣器, 量測泥砂粒徑範圍為 4 mm~90 mm。圖 8 與圖 9 為其他兩種底床推移載量測儀器。由圖 1、圖 2 與圖 4~圖 8 可發現, 量測不同粒徑底床推移載 (砂或礫石) 之儀器除大小有所差異, 其原理與形狀皆大同小異, 有一般的前方開口式 (圖 1、圖 2 與圖 4~圖 7) 與籃式 (basket-type) (圖 8)。量測方式可分為人工手持 (如圖 2 所示) 小型儀器以及需以吊車 (如圖 6 所示) 或鋼索固定方式懸吊 (如圖 9 所示) 的大型儀器。許少華等人 (2009) 研發底床推移載採樣器 (如圖 10 所示), 於 2008 年辛樂克颱風已測試成功。該採樣器可承受最大表面流速剛體部分約為 4.5 m/s, 連接線部分約為 1.8 m/s, 已成功收集的推移載粒徑範圍為 0.4 cm~28.2 cm, 單次可收集推移載總重限制為 200 kg。

#### (2) 固定式底床推移載採樣器

固定式採樣方式的優點乃其設置地點可事先加以整備, 可使量測河床有較佳的起始狀態, 可事先埋設於量測位置容量可較大, 可量測較久的時間。因容量較大, 故底床推移載進入的先後可事後加以分別篩分析, 若搭配與流量歷線則可進一步分析洪水事件過程中較細部的底床載移動過程 (如圖 11 所示)。固定式的缺點為位置設置後無法輕易移動, 量測之河川必須有乾涸的時期或是上游有攔水導水的控制工法使河床乾涸方能進行儀器設置, 若設置於河床變動較劇烈的河川容易因掏刷而毀損或破壞。

#### (3) 目前國內外底床推移載採樣方式與儀器對筏子溪之適用性

台灣地區豐枯水季流量變化極大, 平時部分河床雖有乾涸的時期, 但颱風期間的大流量常造成河床劇烈變化。評估後發現固定式底床推移載採樣方式不適用於台灣地區之河川, 若設置固定式採樣儀器, 容易因底床掏刷而損毀。傳統之移動式採樣器雖具有較佳的機動性, 可隨河床當時現況進行量測位置選定, 但缺點為大水時將儀器以人工 (水深較淺) 或吊放的方式 (水深較深) 的方式放入水中進行量測時, 儀器可能會因為流速較

大而有無法確實固定貼近底床進行採樣的問題。此外，量測地點的選定因其儀器的重量、垂吊時所需的起重設備是否可以抵達量測位置的交通限制，以及固定鋼索是否有適當位置可供固定...等條件而受到限制。表 1 為目前各採樣方式與採樣儀器不適用於筏子溪的問題整理。許少華 (2009) 所研發之底床推移載採樣器可於每次颱風來臨前，根據現地的情況進行選點設置，設置方式較固定式簡單，僅需將其固定於河床上，與移動式採樣器一樣具有較佳的機動性。此外因儀器可確實貼近河床進行推移載之採樣，也具有固定式採樣器的優點。故本研究以該採樣器進行颱風期間的底床推移載採樣試驗。

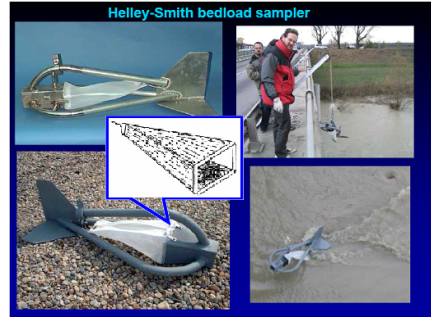


圖 1 Helley-Smith 底床推移載採樣器 (Course on fluvial dynamics of Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, Italy)

Fig.1 Helley-Smith bedload sampler

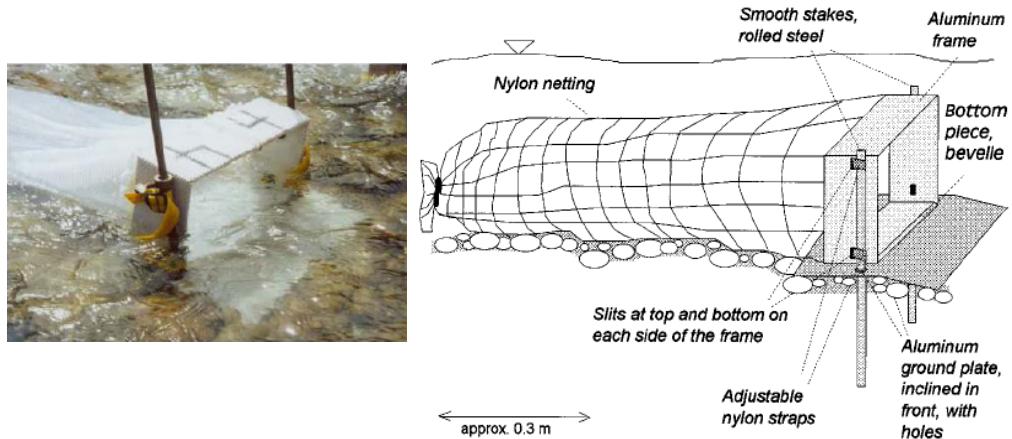


圖 2 手提式 USFS Bedload trap 示意圖 (泥砂粒徑範圍 4~90 mm) (Bunte et al., 2004; Course on fluvial dynamics of Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, Italy)

Fig.2 Hand-taken USFS bedload trap (grain size range: 4-90 mm)

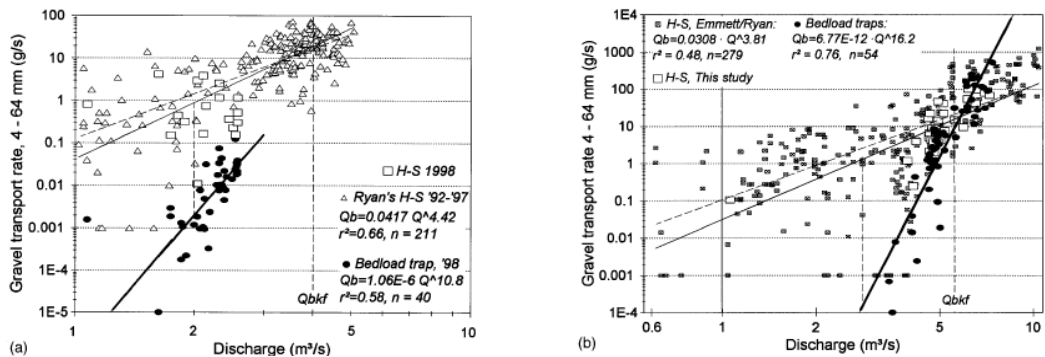


圖 3 H-S sampler 與 Bedload trap 之採樣數據比較 (Bunte et al., 2004)

Fig.3 Comparison of the measured data between H-S sampler 與 Bedload trap



圖 4 Helley-Smith 礫石型底床推移載採樣器  
**Fig.4 Helley-Smith sampler for gravel bed load**



圖 5 Canada 礫石型底床推移載採樣器  
**Fig.5 Canada sampler for gravel bed load**

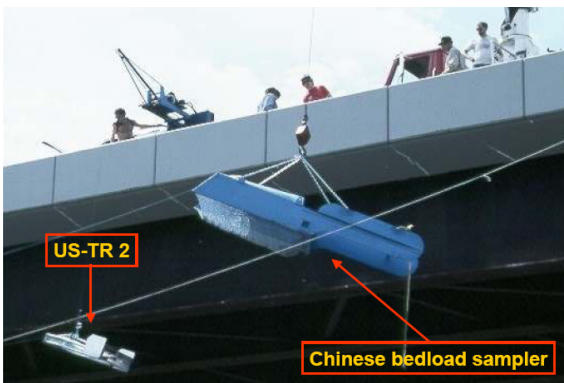


圖 6 Chinese 底床推移載採樣器 (Course on fluvial dynamics of Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, Italy)  
**Fig.6 Chinese bedload sampler**

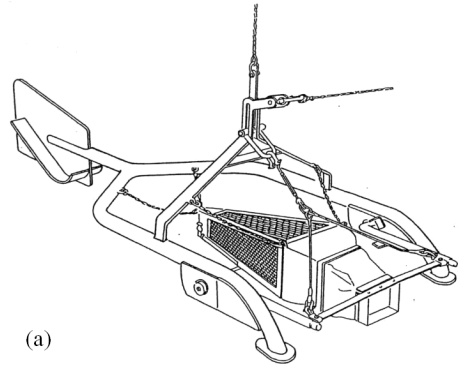


圖 7 Koblenz 底床推移載採樣器 (Course on fluvial dynamics of Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, Italy)  
**Fig.7 Koblenz bedload sampler**

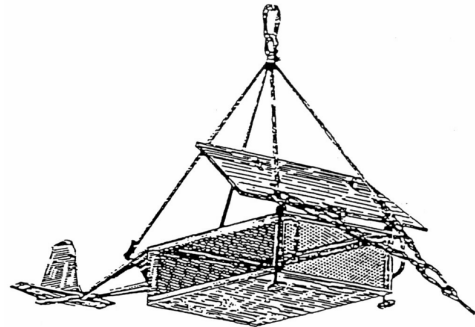


圖 8 MÜHLHOFER 底床推移載採樣器 (Geschiebemessungen, Leichtweiß institute, 1992)  
**Fig.8 MÜHLHOFER bedload sampler**

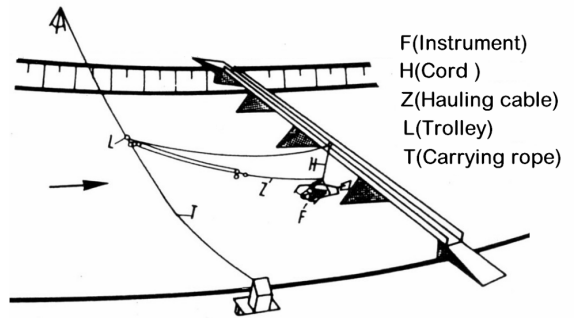


圖 9 底床推移載採樣器懸吊量測示意圖 (Geschiebemessungen, Leichtweiß institute, 1992)  
**Fig.9 Measured method of the bedload sampler**

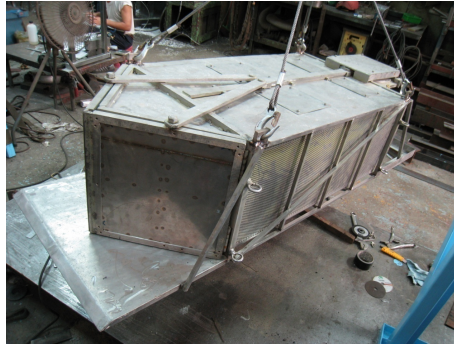


圖 10 許少華 (2009) 所研發之底床推移載採樣器

Fig.10 A newly invented instrument by Hsu (2009) for bed load sampling

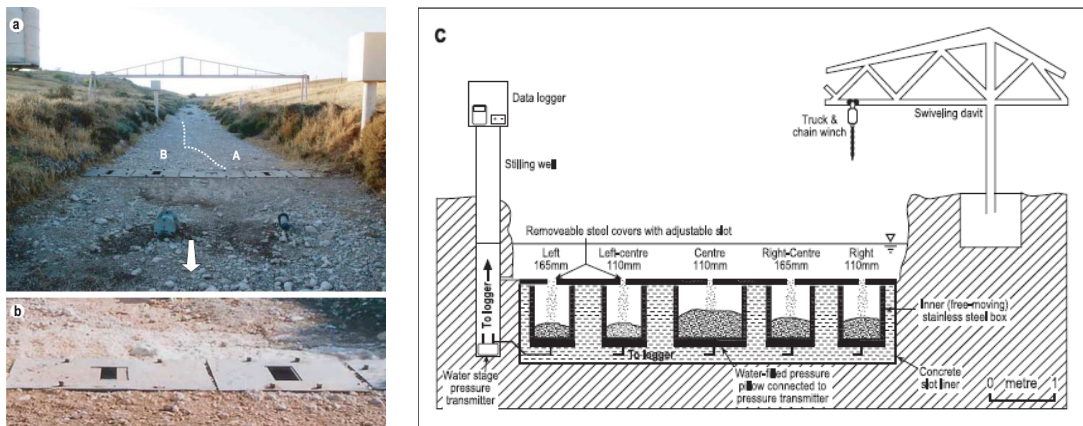


圖 11 固定式底床推移載量測儀器示意圖 (Bergman, 2007)

Fig.11 Schematic diagram of mixed bedload sampler

表 1 目前各採樣方式與採樣儀器不適用於筏子溪的問題整理

Table 1 Coordination of the unsuitable reasons for the previous samplers and sampling methods using on Fa-Zih River

採樣方式	採樣儀器	適用範圍	不適用的原因
移動式	Helley-Smith	粒徑範圍 76.2 mm~0.25 mm 平均流量 1350 CMS 尖峰流量 8000 CMS	收容體積不夠，重量太輕，無法於颱風期間使用
	Helley-Smith 礫石型	總重可達 75.8 kg	大水時不易固定於底床
	劉德春	流量為 10,000 cms~36,000 cms 水深 9 m~21 m，流速為 1.7 m/s~3.8 m/s	大水時不易固定於底床
	Canada 礫石型	總重可達 75kg	大水時不易固定於底床
	Chinese	-	大水時不易固定於底床
	手提式 USFS	泥砂粒徑範圍 4 mm~90 mm	收容體積不夠，重量太輕，無法於颱風期間使用
	Koblenz	-	重量太輕，無法於颱風期間使用
固定式	MÜHLHOFER	-	重量太輕，無法於颱風期間使用
	Bergman	-	容易因底床掏刷而損毀
	蘇重光	$S_b=0-0.0093$ 粗卵石顆粒( $d_s=1.96\text{ cm}-7.27\text{ cm}$ , $S_f=0.78-0.84$ ) 大理石顆粒( $d_s=2.6\text{ cm}-6.14\text{ cm}$ , $S_f=1.0$ ) 單位寬流量 $q=0.0392\text{ m}^2/\text{s}-0.45\text{ m}^2/\text{s}$	僅於室內渠槽試驗進行測試，若於筏子溪卵礫石河川進行試驗有損壞的可能
	許少華	剛體部分：表面流速 $<4.5\text{ m/s}$ 連接線部分：表面流速 $<1.8\text{ m/s}$ 粒徑範圍：0.4 cm~28.2 cm 可收集總重 $<200\text{ kg}$	為筏子溪設計，故暫無不問題

## 2. 推移載輸砂公式

國內外有許多學者利用水槽實驗及現地實驗數據，迴歸經驗公式推估該流況下的推移載輸砂量，茲將各推移載輸砂公式之適用範圍與是否適用於筏子溪詳列於表2，並將幾個較具代表性的輸砂公式概述如下。

### (1) Schoklitsch (1934) 輸砂公式

Schoklitsch (1934) 利用水槽實驗及現地實驗之數據推導單寬流量輸砂公式：

$$g_s = \frac{7000}{\sqrt{D_{50}}} \cdot S^{3/2} \cdot (q - q_c) \quad (3)$$

$$q_c = 0.00001944 \cdot D_{50} / S^{4/3} \quad (4)$$

式中： $g_s$  為推移載重量輸砂率[ $kg/s/m$ ]； $q_c$  為單位河寬之河床質臨界起動流量[ $cms/m$ ]； $q$  為河川單寬流量[ $cms/m$ ]； $S$  為河床坡度； $D_{50}$  為通過百分比為 50% 之河床質粒徑[ $mm$ ]。由於 Schoklitsch 公式所推估值為重量單位，為了與其他公式比較，需除以卵礫石密度 2650  $kg/m^3$ ，才能得到推移載體積輸砂率  $q_s$  [ $m^2/s$ ]。

### (2) MPM (Meyer-Peter & Muller, 1948) 輸砂公式

Meyer-Peter & Muller (1948) 經驗公式係乃根據試驗管道之資料分析而得，適用範圍如表 2 所示。MPM (1948) 假設、底床及邊壁之平均流速一致。輸砂公式如下：

$$\frac{g_s}{\sqrt{g \left( \frac{\gamma_s - 1}{\gamma} \right) D_m^3}} = 8 \left[ \left( \frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} \tau_* - \tau_{*c} \right]^{3/2} \quad (5)$$

式中： $g_s$  為單寬泥砂重量輸砂率[ $kg/s/m$ ]，可利用  $g_s / \rho_s = q_s$  換為單寬泥砂體積輸砂率[ $m^2/s$ ]； $K_s = \frac{1}{n_b}$  為底床阻力係數；

$K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$  為沙粒阻力係數； $K_s / K_r$  為沙波阻力修正因數，床面平整時為 1，有沙波時可減小為 0.5； $D_m$  為泥砂顆粒平均粒徑[ $m$ ]； $P_i$  為各組代表粒徑  $D_i$  所佔的比例； $\tau_* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma) D_m}$  為無因次

剪應力； $\tau_{*c}$  為無因次臨界剪應力。

### (3) 何智武-A1 與 A2 模式

何智武 (1983) 於利用齷齪坑溪、信義溪及水裏溪等三處觀測試驗區，以河道斷面測量、河床質採樣、防砂壩淤積量觀測及水文資料，分析各次暴雨或中長期累積降雨之輸砂量變化，提出無因次輸砂公式如下。本研究將 (4) 式與 (5) 式組合稱為 A1 模式，(4) 式與 (6) 式組合稱為 A2 模式。

$$q_s = 0.0616 \cdot D^{1.41} \cdot S^{0.983 D^{0.26}} (q - q_c) \quad (6)$$

$$q_c = -3.04 \times 10^{-3} \cdot D \cdot \log S - 4.078 \times 10^{-3} \cdot D^{0.76} \quad (7)$$

$$q_c = 1.403 \times 10^{-5} \cdot D^{2.02} \cdot S^{-1.3 D^{-0.27}} \quad (8)$$

式中： $q$  為單寬流量[ $cms/m$ ]； $q_c$  為單寬臨界起動流量[ $cms/m$ ]； $q_s$  為單寬推移載體積輸砂量[ $cms/m$ ]； $D$  為河床質粒徑[ $mm$ ]； $S$  為河床坡度。

### (4) Gary Parker (1990) 輸砂公式

Parker (1990) 以 Oak Creek 實測之礫石底床推移載粒徑分佈資料推導推移載輸砂公式，該公式主要應用於卵礫石河床為主。該公式需假設一護甲層進行計算：

$$W = \sum W_i \cdot F_i = 0.00218 \sum G[\phi] \cdot F_i \quad (9)$$

$$G(\phi) = \begin{cases} 5474 \left( 1 - \frac{0.853}{\phi} \right)^{4.5} & \phi > 1.59 \\ \exp \left[ 4.2(\phi - 1) - 9.25(\phi - 1)^2 \right] & 1 \leq \phi \leq 1.59 \\ \phi^{14.2} & \phi < 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\phi = \omega \cdot \phi_{sg0} \cdot g_0(\delta_i), \quad \delta_i = D_{i(GP)} / D_{sg}, \quad (11)$$

$$g_0(\delta_i) = (\delta_i)^{-0.0951}$$

$$\omega = 1 + \frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\phi 0}} (\omega_0 - 1) \quad (12)$$

$$\sigma_\phi^2 = \sum \left[ \frac{\ln(D_i / D_{sg})}{\ln(2)} \right]^2 F_i, \quad D_i = \sqrt{D_{b,j} \cdot D_{b,j+1}} \quad (13)$$

式中： $W^*$ 為單寬體積總輸砂率 [ $m^2/s$ ]； $G(\phi)$ 為部分底床推移載方程式； $F_i = (F_{f,i} - F_{f,i+1})/100$ 為河床表面礫石  $i$  尺寸之級配； $\phi_{sg0} = \frac{\tau_{sg}^*}{\tau_{rs0}}$ 為 Shields 無因次剪力， $\tau_{sg}^* = \frac{\tau}{\rho \cdot R \cdot g \cdot D_{sg}} = \frac{u_*^2}{R \cdot g \cdot D_{sg}}$ ， $u_*$ 為底床剪力流速 [ $m/s$ ]， $D_{sg}$ 為表面河床之幾何平均粒徑 [ $m$ ]， $\tau_{rs0}^* = 0.0386$ ； $\omega_0$ 和 $\sigma_{\phi_0}$ 是依據 $\phi_{sg0}$ 數據求得的； $g_0(\delta_i)$ 表示為底床表面之隱藏函數值。

本研究直接以 Gary Parker 所提供之 excel 試算檔，將現地之水深、坡度與河床質與概估之護甲層的粒徑分佈代入，即可得該流況下之推移載單寬體積輸砂率，同時可推估其輸砂粒徑分佈。

#### (5) 吳益裕 (1999) 輸砂公式

吳益裕 (1999) 根據室內渠槽試驗結果，配合國內外相關渠槽資料，選取水流條件相近資料共 126 組進行底床推移載輸砂公式迴歸分析得一單寬輸砂公式如下：

$$q_s = 1.048(q - q_c) \cdot S_f^{1.52} \cdot \sigma^{0.842} \quad (14)$$

$$\frac{q_c}{\sqrt{g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) D_m^3}} = 0.061 \cdot S_f^{-1.343} \quad (15)$$

式中： $q_s$ 為單寬推移載輸砂量 [ $m^2/s$ ]； $S_f$ 為底床坡面最終坡度； $\sigma$ 為泥砂粒徑分佈幾何標準偏差 [ $\sigma = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$ ]； $D_m$ 為泥砂顆粒平均粒徑 [ $m$ ]。

#### (6) Bathurst (2007) 輸砂公式

Bathurst (2007) 採用多組現地文獻實驗數據及自行收集的資料，假設河川推移載輸砂量會受河床護甲層效應影響，其迴歸式如下：

$$g_s = a \cdot \rho(q - q_c) \quad (16)$$

$$a = 29.2 \cdot S^{1.5} (D_{20} / D_{50s})^{-3.3} \quad (17)$$

$$q_c = 0.0513 \cdot g^{0.5} \cdot D_{50}^{1.5} \cdot S^{-1.2} \quad (18)$$

式中： $g_s$ 為輸砂量 [ $kg/s/m$ ]，可利用  $g_s / \rho_s = q_s$  換為單寬泥砂體積輸砂率 [ $m^2/s$ ]； $a$ 為無因次係數； $q$ 為單寬流量 [ $m^2/s$ ]； $q_c$ 為單寬底床泥砂啟動之臨界流量 [ $m^2/s$ ]； $D_{50}$ 為底床表面通過百分比為 50%之泥砂粒徑 [ $m$ ]； $D_{50s}$ 為底床表面下方通過百分比為 50%之泥砂粒徑 [ $m$ ]； $S$ 為河床坡度； $g$ 為重力加速度 9.81 [ $m/s$ ]。適用範圍如表 2 所示。

## 三、現地試驗

### 1. 儀器設置位置

本研究於 2008 年的「辛樂克颱風」以及 2009 年的「莫拉克颱風」於台中市筏子溪進行底床推移載的現地採樣試驗。筏子溪發源於台中縣大雅鄉橫山圳排水，屬平地河川。流域範圍北以大甲溪為界，西臨大肚山臺地，東接麻園頭溪，由北向南流，流經台中縣市都會區經集泉橋於烏日鄉先注入大裏溪再匯入烏溪，全長約 21.3 km，流域面積 132.6 km<sup>2</sup> (如圖 12 所示)，全流域平均坡度約為 1/177。考慮颱風期間赴現場試驗人員的安全性以及同時量測河川表面流速的方便性，故選擇於橋樑附近設置採樣儀器。由於筏子溪橋上游有內新庄排水匯入使流量大增，且橋上游面有一約 2 m 寬之人行道，可使赴現地架設儀器與進行量測工作之人員較為安全且不影響交通 (如圖 12 所示)，故選定於知高橋與筏子溪橋進行量測。本研究儀器之取樣範圍僅限於由儀器上游往下游運動且剛好可進入儀器之推移載。取樣方式為於橋樑上開啟採樣器前方之開口，於收集一段時間後再將之關閉。採樣時間為颱風期間的漲水段，此時推移載已開始移動且儀器尚未遭大量推移載掩埋，若於退水段進行採樣，則可能有流量快速下降以及儀器已遭掩埋的問題。

### 2. 底床流速的推估

河流底床流速所產生的剪應力是使泥砂啟動的主要關鍵，以經驗公式推估底床推移載輸砂量時底床流速是一個重要因數。但於颱風期間以儀器直接進行底床流速的量測有安全上的考量與困難，故本研究提出利用表面流速與各水深位置流速剖面的相關性進行迴歸，以於颱風期間側得之表面流速代入迴歸式進行底床流速的推估。故於台中縣石岡壩南幹渠以雷達波表面流速儀 (SVR) 與聲波都普勒剖面流速儀 (ADP) 進

行表面流速與各水深位置水平流速的量測 (如圖 13 所示), 並以多次不同流況 (不同水深、不同表面流速) 的量測資料進行無因次化與迴歸其相關性 (如圖 14 所示):

$$\text{無因次水深} = \frac{\text{實際水深}}{\text{該次量測之總水深}} \quad (19)$$

$$\text{無因次流速} = \frac{\text{各水深流速}}{\text{該次量測之表面流速}} \quad (20)$$

由圖 14 不同流況下表面流速與各水深位置水準方向流速的迴歸關係可知, 無因次後的底床流速約為表面流速的 70%。由於目前暫無較準確及較安全的颱風期間底床流速量測方式, 故暫以此迴歸關係概估颱風期間之底床流速。

表 2 各經驗公式的適用範圍及是否是用於筏子溪分析表

Table 2 Analysis of the suitable conditions of each empirical formulas

作者(西元)	適用範圍	所需參數		是否適用筏子溪	不適用原因
		水理	河床質		
Schoklitsch (1934)	粒徑: 0.25 mm~32 mm (medium sand ~ coarse gravel)	$h, V, S$	$D_{50}$	否	河床粒徑太大
Meyer-Peter & Muller (1948)	粒徑: 0.4 mm~30 mm 坡度: 0.4~2.3%	$n_b, S, h$	$D_{90}, D_m, \gamma_s$	否	河床粒徑太大
沙莫夫	粒徑 $D=0.2 \text{ mm} \sim 0.73 \text{ mm}$ , 13 mm~65 mm 水深 $h=0.8 \text{ m} \sim 2.95 \text{ m}$ 平均流速 $U=0.18 \text{ m/s} \sim 2.16 \text{ m/s}$	$h, V$	$D$	否	河床粒徑太大
列維	$D=0.25 \text{ mm} \sim 23 \text{ mm}$ , $\frac{h}{D} = 5 \sim 500$ , $\frac{U}{U_c} = 1 \sim 3.5$	$h, V$	$D$	否	河床粒徑太大
崗恰洛夫	$D=0.08 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ , $\frac{h}{D} = 10 \sim 1550$ , $\frac{U}{U_c} = 0.72 \sim 13.1$	$h, V$	$D$	否	河床粒徑太大
何智武-A1 與 A2 模式	無	$h, V, S$	$D_{50}$	是	-
陳耀彬(1990)	渠床縱坡 $S_0 = 0.015 \sim 0.106$ 粒徑 $D=3 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$ 流量 $0.0084 \text{ m}^2/\text{s} \sim 0.081 \text{ m}^2/\text{s}$	$h, Q, S$	$D$	否	河床粒徑太大
※Gary Parker(1990)	無	$u_* , S$	$D_i, \gamma_s$	是	-
蘇志強 (1995)	實驗所使用是小粒徑, 並且此經驗公式是將許多小粒徑實驗數據推算出來的	$V, S$	$D_m$	否	河床粒徑太大
※吳益裕 (1999)	非均勻平衡試驗方面: (1) $1.77 \text{ mm} < D_i < 50.8 \text{ mm}$ (2) $1.5 < \sigma < 3.0$ (3) $0.045 \text{ m}^2/\text{s} < q < 0.135 \text{ m}^2/\text{s}$ (4) $2\% < S_i < 8\%$ 非均勻非平衡試驗方面: (1) $2.36 \text{ mm} < D_i < 38.1 \text{ mm}$ ; (2) $\sigma = 2.0$ ; (3) $q = 0.045 \text{ m}^2/\text{s}$ (4) 淤積試驗 $S_i = 2\% \sim 4\%$ 、 沖刷試驗 $S_i = 4\% \sim 2\%$ 。	$h, V, S_f$	$D_m, \sigma, \rho_s$	否	河床粒徑太大
※Bathurst (2007)	坡度 $S=0.00048 \sim 0.048$ $D_{50} = 12 \text{ mm} \sim 146 \text{ mm}$ $D_{50} / D_{50s}$ 比值範圍為 1.52~11	$h, V, S$	$D_{50}, D_{50s}$	是	-

※表示需要河床質粒徑級配資料。



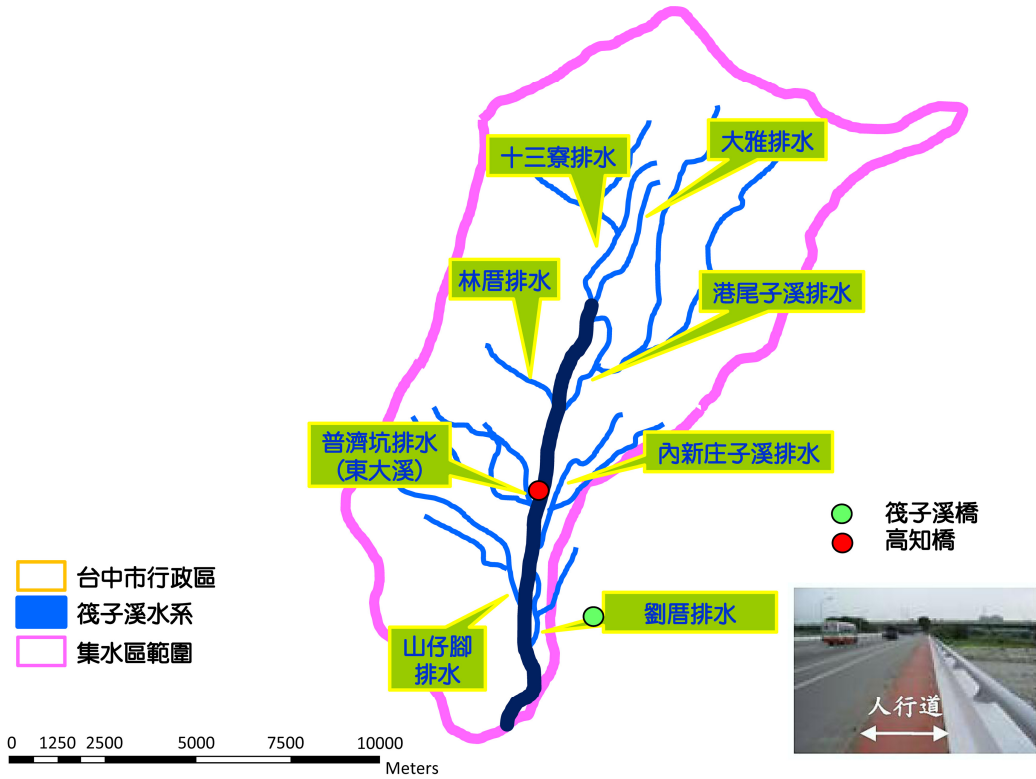


圖 12 筏子溪流域各主支流水系與知高橋位置示意圖

Fig.12 Position of the main stream and tributaries of Fa-Zih River and Zhi-Guo Bridge

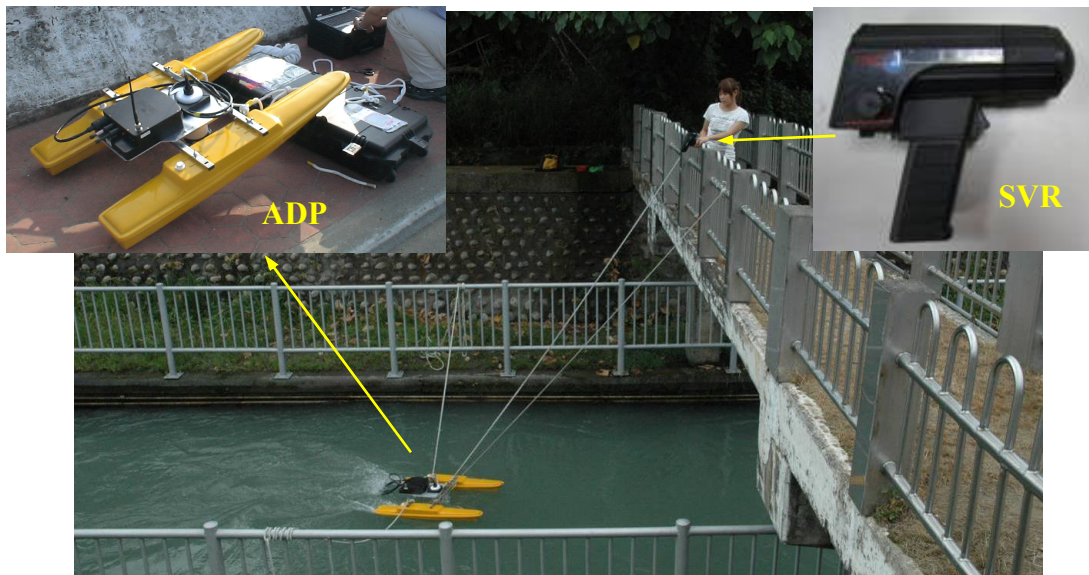


圖 13 ADP 與 SVR 儀器同時量測流速之示意圖

Fig.13 Schematic diagram of measurement by ADP 與 SVR

### 3. 現地採樣結果

本研究共進行了八次現地底床推移載採樣試驗，各次試驗情況與結果如表 3 所示。卡孜基颱風因電源線接頭強度不夠被沖斷故無法採樣，第三~五次試驗豪雨所造成之流量雖足以帶動部分底床推移載但無法大範圍帶動，造成採樣儀器周圍因局部流場變化產生局部掏刷，使採樣器有些微懸空現象而無法確實採集底床推移載，於後續試驗將採樣器設置位置加以挖深使採樣器略低於河床高程。但莫拉克颱風時因開啟時間較晚，採樣器前方被部分推移載所掩埋，造成前方開口無法確實開啟進行採樣。但仍有三次成功案例（一次颱風、兩次豪雨）可供進行探討。

第二次地實驗（辛樂克颱風）所收集之底床推移載總輸砂量約為 11.57 kg，除以卵礫石密度、閘門開口寬度與收集時間後可得底床推移載單位時間單寬體積輸砂率約為  $3.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。第六次地實驗所收集之底床推移載總輸砂量約為 32.56 kg，單位時間單寬輸砂率約為  $4.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。第八次現地實驗所收集之底床推移載泥總輸砂量約為 10.61 kg，單位時間單寬輸砂率約為  $1.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 3 本研究所做的現地實驗總整理

Table 3 Total experimental conditions of this study

試驗	實驗地點 (量測原因)	表面流速 (m/s)	水深 (m)	採樣時間 (hr)	是否成功量測推移載	總輸砂量	
						kg	m <sup>2</sup> /s
	知高橋 (卡孜基颱風)	4.7	2.5	-	否	-	-
第二次實驗 (2008/09/14)	知高橋 (辛樂克颱風)	1.6	0.6	0.5	是	11.57	$3.73 \times 10^{-6}$
第三次實驗 (2009/06/04)	筏子溪橋 (一般豪雨)	2.4	0.6	-	否	-	-
第四次實驗 (2009/06/12)	筏子溪橋 (一般豪雨)	1.8	0.5	-	否	-	-
第五次實驗 (2009/07/14)	筏子溪橋 (一般豪雨)	2.0	0.6	-	否	-	-
第六次實驗 (2009/08/05)	筏子溪橋 (一般豪雨)	3.8	1.5	2	是	32.56	$4.27 \times 10^{-6}$
第七次實驗 (2009/08/08)	筏子溪橋 (莫拉克颱風)	3.8	1.8	-	否	-	-
第八次實驗 (2010/04/10)	筏子溪橋 (一般豪雨)	1.6	0.9	2	是	10.61	$1.39 \times 10^{-6}$

## 四、結果分析與討論

### 1. 本研究所選定之輸砂公式

本研究利用七種不同半經驗公式，分別為 Schoklitsch、MPM、Gary Parker、吳益裕、Bathurst 與何智武-A1 與 A2 輸砂公式，分別推估不同流況下之推移載輸砂率，並於與本研究所做的現地實驗量測數據相互比較。

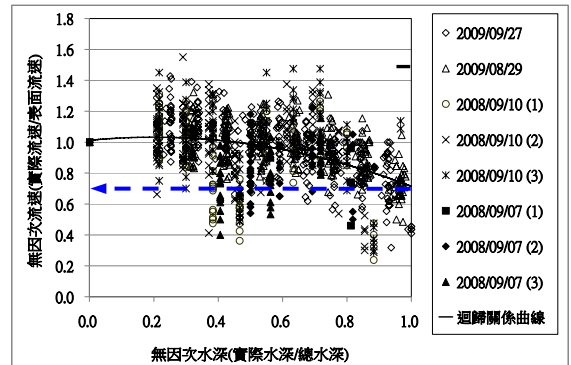


圖 14 無因次流速與無因次水深迴歸關係圖

Fig.14 Relationship between dimensionless velocity and dimensionless depth

(1) 第二次現地實驗 (辛樂克颱風)

於辛樂克颱風採樣期間水深約為 0.6 m，河床質粒徑  $D_{16} = 0.04$  m， $D_{50} = 0.069$  m， $D_{84} = 0.127$  m， $D_m = 0.07$  m，底床表面下的  $D_{50}$  泥砂粒徑  $D_{50s}$  (護甲層以下的泥砂粒徑分佈  $D_{50}$ ) 約為 0.051 m。底床流速以表面流速 (1.6 m/s) 的 70% 即 1.12 m/s 概估之，單寬流量約為 0.816 m<sup>2</sup>/s。代入不同半經驗公式可得第二次現地實驗之經驗公式推估推移載輸砂率 (如表 4 所示)。可發現 MPM、何智武-A1 與 A2 公式及 Parker 公式推估之推移載輸砂率與實際輸砂率接近。但 Schoklitsch、吳益裕及 Bathurst 之輸砂公式因河川單寬流量小於各公式臨界單寬流量而無法啟動底床推移載。由圖 15 推移載粒徑級配分佈圖可發現，Parker 之經驗公式推估結果與實際值之推移載主要移動粒徑範圍皆集中於 4.76~63.5 mm 之間，其分佈百分比之間的差異應為實際值並無收集到粒徑大於 63.5

mm 之大顆粒卵礫石，若實際情況有收集到粒徑大於 63.5mm 之卵礫石，其粒徑分佈百分比應該會更為接近。

(2) 第六次現地實驗

第六次現地實驗水深約為 1.5 m，河床質粒徑  $D_{16} = 0.036$  m， $D_{50} = 0.061$  m， $D_{84} = 0.129$  m， $D_m = 0.08$  m，假設底床表面下的  $D_{50}$  泥砂粒徑  $D_{50s}$  (護甲層以下的泥砂粒徑分佈  $D_{50}$ ) 約為 0.051 m。底床流速以表面流速 (3.8 m/s) 的 70% 即 2.66 m/s 概估之，單寬流量約為 4.85 m<sup>2</sup>/s。將之代入不同輸砂公式可得如表 4 之輸砂量推估值。可發現以 MPM 公式、何智武-A1 與 A2 公式所推估輸砂量與實際輸砂量仍相差不大，但 Parker 經驗公式推估之推移載總輸砂率與實際輸砂率有極大的差異 (推估值約為實際值的 700 倍)。但經驗公式推估之主要移動推移載粒徑區間 (25.4 mm~70 mm) 與實際資料相符。

表 4 各家輸砂公式於現地實驗所推估輸砂率與實際輸砂率一覽表

**Table 4 Comparison between field-measured bedload transport rate and evaluated results form empirical formulas**

實驗名稱	坡度設定	經驗公式	單寬輸砂量(m <sup>2</sup> /s)	經驗公式推估值/現地實驗值
第二次實驗	實際量測		$3.73 \times 10^{-6}$	-
	中尺度坡度 (S=0.0076) (1/132)	Schoklitsch	0	-
		MPM	$1.65 \times 10^{-5}$	4
		何智武-A1 公式	$6.18 \times 10^{-6}$	1.8
		何智武-A2 公式	$4.08 \times 10^{-6}$	1.1
		Gary Parker	$6.48 \times 10^{-6}$	1.7
		吳益裕	0	-
Bathurst	0	-		
第六次實驗	實際量測		$4.27 \times 10^{-6}$	-
	中尺度坡度 (S=0.0072) (1/139)	Schoklitsch	$8.55 \times 10^{-4}$	200
		MPM(1948)	$7.73 \times 10^{-5}$	18
		何智武-A1 公式	$7.61 \times 10^{-5}$	17.8
		何智武-A2 公式	$7.36 \times 10^{-5}$	17.2
		Gary Parker	$3.04 \times 10^{-3}$	712
		吳益裕	$6.49 \times 10^{-4}$	152
Bathurst	$2.7 \times 10^{-2}$	6323		
第八次實驗	實際量測		$1.39 \times 10^{-6}$	-
	中尺度坡度 (S=0.0072) (1/139)	Schoklitsch	$3.74 \times 10^{-6}$	2.7
		MPM(1948)	$3.49 \times 10^{-5}$	25
		何智武-A1 公式	$5.08 \times 10^{-6}$	3.65
		何智武-A2 公式	$2.88 \times 10^{-6}$	2.07
		Gary Parker	$9.88 \times 10^{-5}$	71.1
		吳益裕	0	-
Bathurst	0	-		

※表中之中尺度坡度乃是以筏子溪第 17 與第 18 號斷面之河床高程進行計算

(3) 第八次現地實驗

第八次現地試驗水深約為 0.9 m，河床質粒徑  $D_{16}=0.044$  m， $D_{50}=0.086$  m， $D_{84}=0.173$  m， $D_m=0.096$  m，並假設底床表面下的  $D_{50}$  泥砂粒徑  $D_{50s}$  (護甲層以下的泥砂粒徑分佈  $D_{50}$ ) 約為 0.051 m。底床流速以表面流速 (1.6 m/s) 的 70% 即 1.12 m/s 概估之，單寬流量約為 1.22 m<sup>2</sup>/s。表 4 中的中尺度坡度乃是以筏子溪第 12 與第 17 號斷面河床高程計算約為 0.0072 (1/139)。將資料代入各輸砂公式可得如表 4 之輸砂量推估值。可發現 Schoklitsch 及何智武-A1 與 A2 公式三者輸砂公式所推估的單寬輸砂量與實際輸砂量較為相近。Parker 公式所推估之輸砂量約為實際值的 70 倍。於此案例中 Parker 經驗公式推估之主要移動推移載粒徑區間與實際資料有些微出入 (如圖 17 所示)。

探究造成 Parker 經驗公式於三次試驗所推估之總輸砂量及推移載粒徑分佈與實測結果有所差異的原因可能有三：(1) 台灣地區颱風期間流量變化幅度極大且變化時間極短，不同的颱風事件流量變化幅度與延時也不同，每場颱風事件後底床質的粒徑分佈也會有些微的改變，故不同颱風事件河床質的護甲層效應應有所不同，若以一固定不變之護甲層資訊代入 Parker 公式進行不同颱風事件之推移載輸砂量與粒徑分佈推估會與實際情況有所差異；(2) 台灣河川於颱風期間水位變化較國外河川劇烈，但 Parker 公式僅能給定一代表水深進行推估，有可能造成推估上的誤差；(3) 大尺寸顆粒的推移載於實際情況下是隨機且無固定方向移動，有可能有移動但並無進入載採樣器中。由於颱風期間現地之不確定性極大，故暫無法確定是何原因造成。

表 5 MPM 公式及何智武-A1 與 A2 公式之敏感度分析一覽表

Table 5 Sensitive analysis of MPM, He-Zhi-Wu-A1 & A2 empirical formulas

	平均粒徑 $D_{50}$	河床坡度 $S$	平均流速 $V$	水深 $h$
參數變動幅度	增加 2.0 倍	增加 2.0 倍	增加 2.0 倍	增加 2.0 倍
MPM 輸砂公式	減少 1.5 倍	增加 3.1 倍	無影響	增加 3.1 倍
何智武-A1 公式	減少 5.8 倍	增加 7 倍	增加 2.1 倍	增加 2.1 倍
何智武-A2 公式	減少 5.9 倍	增加 7.3 倍	增加 2.2 倍	增加 2 倍

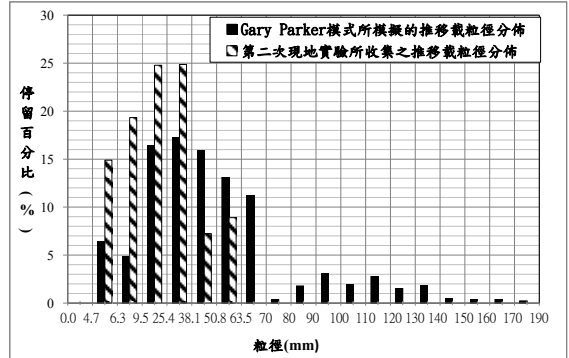


圖 15 Parker 公式推估之第二次現地實驗推移載粒徑柱狀圖 (S=0.0076)

Fig.15 Grain size distribution of the bedload of second experiment by Parker's formula

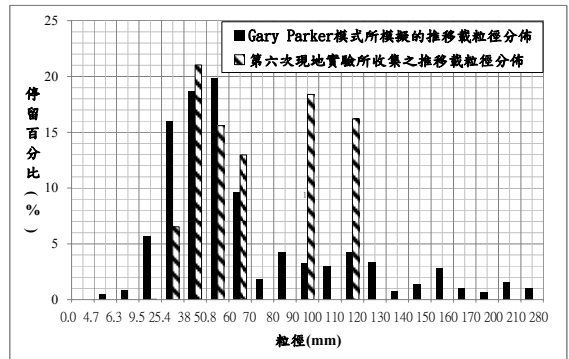


圖 16 Parker 公式推估之第六次現地實驗推移載粒徑柱狀圖

Fig.16 Grain size distribution of the bedload of sixth experiment by Parker's formula

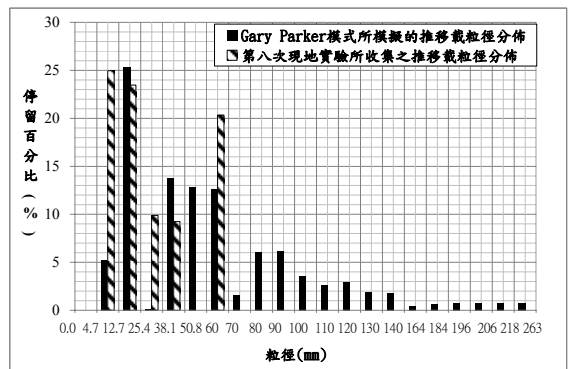


圖 17 Parker 公式推估之第八次現地實驗推移載粒徑柱狀圖

Fig.17 Grain size distribution of the bedload of eighth experiment by Parker's formula

## 2. 探討 MPM 公式及何智武—A1 與 A2 公式之敏感度分析

由上述結果可知，目前以 MPM 公式及何智武—A1 與 A2 公式較為適合用來推估筏子溪非均勻卵礫石河川之推移載輸砂率。本研究利用第六次現地實驗數據進行敏感度分析，探討哪些現地實驗參數的變化，對於 MPM 公式及何智武—A1 與 A2 公式影響最大。表 6 為 MPM 公式與何智武—A1 與 A2 公式之敏感度分析一覽表，可發現各參數對於 MPM 公式的影響差異不大。何智武—A1 與 A2 輸砂公式對於河床坡度  $S$  及河床粒徑  $D_{50}$  的變化較為敏感，對於流量  $q$  僅是線性變化，此有助於釐清筏子溪卵礫石河川於颱風期間進行推移載傳輸量的推估時所應強調的重點參數。

## 五、結 論

1. 本研究成功量測三次現地底床推移載輸砂量。第一次為表面流速約為  $1.6 \text{ m/s}$ ，水深約為  $0.6 \text{ m}$ ，可起動的推移載最大粒徑約為河床質的  $D_{40}$  ( $63 \text{ mm}$ )。第二次為表面流速約為  $3.8 \text{ m/s}$ ，水深約為  $1.5 \text{ m}$ ，可起動的推移載最大粒徑約為河床質的  $D_{84}$  ( $120 \text{ mm}$ )，可知於該流況下幾乎大部分的河床質皆已啟動。第三次為表面流速約為  $1.6 \text{ m/s}$ ，水深約為  $0.9 \text{ m}$ ，可起動的推移載最大粒徑約為河床質的  $D_{43}$  ( $68 \text{ mm}$ )。
2. 本研究透過表面流速儀 (SVR) 與杜蘭勒流速儀 (ADP) 建立表面流速與底床流速迴歸關係式，發現底床流速約為表面流速的  $70\%$ 。由於目前暫無較準確及較安全的颱風期間底床流速量測方式，故暫以此迴歸關係估颱風期間底床流速。
3. 由現地實驗數據資料與各經驗公式推估結果比較可知，MPM 公式與何智武—A1 與 A2 公式三種經驗公式較適合推估筏子溪現地河川底床推移載輸砂量。其中何智武—A1 與 A2 公式所需的參數比 MPM 公式少，只需河床中值粒徑  $D_{50}$ 、河床坡度  $S$  及單寬流量  $q$  即可推估筏子溪河川推移載輸砂量。
4. 不同颱風事件流量變化幅度與延時也不同，且每場颱風事件後底床質的粒徑分佈也會有些微的改變，故單以一固定不變之護甲層資訊代入 Parker 經驗公式進行不同颱風事件之推移載輸砂量與粒徑分佈推估會與實際情況有所差異。
5. 透過敏感度分析可發現，何智武—A1 與 A2 公式

對於河床坡度  $S$  與河床中值粒徑  $D_{50}$  變化較為敏感，對於流量  $q$  僅是線性變化，此有助於釐清推估筏子溪卵礫石河川於颱風期間，進行推移載傳輸量的推估時所應強調的重點參數。

## 謝 誌

本研究承蒙臺北經濟部水利署 97 年「台灣地區小型河川底床推移載泥砂傳輸量測儀器計畫—以筏子溪為例(1/2)」及 98 年「台灣地區小型河川底床推移載泥砂傳輸量測儀器計畫—以筏子溪為例(2/2)」研究計畫之經費補助，使本研究能順利完成，特此致上誠摯的感謝。

## 參考文獻

1. 余國安、王兆印、陽吉山、張康 (2009)，「來沙條件對山區河流推移質輸沙的影響」，大陸清華大學學報 (自然科學版). (Yu, G. A., Wang, Z. Y., Chang, J. S. and Chang, K. (2009) "The influence to the bedload transportation of mountain river caused by inflow sediment condition," *academic Journal of Tsinghua university, CHINA.* (in Chinese))
2. 何智武 (1983)，「湍流渠槽沈滓運移特性之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文. (He, Z. W. (1983) *Sediment deposition and transportation in turbulent-flow channel*, Doctoral Dissertation of Institute of Civil Engineering, National Taiwan University. (in Chinese))
3. 吳益裕 (1999)，「陡坡管道混合沉滓運移機制之研究」，國立中興大學土木工程學研究所博士論文. (Wu, I. Y. (1999), *Transport Mechanism of Nonuniform Sediment in Steep Channels*, Doctoral Dissertation of Institute of Civil Engineering, National Chung Hsing University. (in Chinese))
4. 陳耀彬 (1990)，「陡坡渠槽輸砂特性之試驗研究」，國立中興大學水土保持學研究所碩士論文. (Wu, I. Y. (1999), *A study on the sediment transport characteristics in steep slope flume experiment*, Master thesis of Institute of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University. (in Chinese))
5. 劉建榮、許少華、蘇宏仁 (2010)，「陡坡卵礫石

- 小型河川底床推移載量測之研究－以筏子溪為例」, 台灣水利, 58(2):1-10. (Hsu, S. M., Liu, C. J. and Su, H. R. (2010) “Developing a Device for Measuring Bedload Transport Rate in a Small Steep-slope Gravel-bed River – Tested in Fazih River as an Example,” *Journal of Taiwan Water Conservancy*, 58(2):1-10. (in Chinese))
6. 經濟部水利署 (2007), 「台灣地區小型河川底床推移載泥砂傳輸量測儀器計畫－以筏子溪為例」, 成果報告書. (Water Resources Agency of Ministry of Economic Affairs (2007), *Measured instrument for bedload transportation on the small-river bed in Taiwan area -Tested in Fazih River as an Example*, Final report. (in Chinese))
  7. 蘇志強 (1995), 「混合礫石渠槽輸砂率研究」, 國立中興大學土木工程學研究所碩士論文. (Sue, J. C. (1995), *Transport Rate for Gravels with Different Ranges of Grain Sizes*, Master Thesis of Institute of Civil Engineering, National Chung Hsing University. (in Chinese))
  8. Bergman, N., Laronne1, J. B. and Reid, I. (2007) “Benefits of design modifications to the Birkbeck bedload sampler illustrated by flash-floods in an ephemeral gravel-bed channel,” *Published online 1 November 2006 in Wiley InterScience DOI: 10.1002/esp.1453*. (www.interscience.wiley.com)
  9. Bunte, K., Abt, S. R., Potyondy, J. P. and Ryan, S. E. (2004) “Measurement of Coarse Gravel and Cobble Transport Using Portable Bedload Traps,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9):879-893.
  10. Bathurst, J. C. (2007) “Effect of Coarse Surface Layer on Bedload Transport,” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, pp.1192-1205.
  11. Delft Hydraulics (1996) “Test and calibration measurements with an adapted Helley-Smith for bedload transport measurements in sand-bed rivers,” *Rep. Q2141, Delft Hydraulics*, Delft, the Netherlands (in Dutch).
  12. Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, course on fluvial dynamics, Italy.
  13. Kleinhans, M. G. and Ten Brinke, W. B. M. (2001) “Accuracy of Cross-Channel Sampled Sediment Transport in Large Sand-Gravel-Bed Rivers,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(4):258-269.
  14. Lenzi, M. A., Mao, L. and Comiti, F. (2006) “When does Bedload Transport Begin in Steep Boulder-Bed streams? ,” *Hydrology Process*, 20:3517-3533.
  15. Leichtweiß institute (1992) *Geschiebemesungen*.
  16. Parker, G. (1990) “Surface-based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers,” *Hydraulic Research*, 28(4):417-436.
- 
- 2010年11月15日 收稿  
2011年02月09日 修正  
2011年02月13日 接受
- (本文開放討論至2011年12月31日)