

# 遮蔽效應對混合粒徑輸砂量之影響探討

## Analysis of Armoring Effect to Mixed Grain Sediment Discharge

國立台灣大學生物環境系統工程學系  
教授兼水工試驗所特約研究員

黃宏斌\*

Hung-Pin Huang

國立台灣大學生物環境系統工程學系  
碩士

吳榮瑜

Zong-Yu Wu

### 摘 要

本研究採用 Einstein 所提出之序率型輸砂模式進行分析發現，混合粒徑因為遮蔽效應之影響，其輸砂強度可區分為三個階段。亦即當  $\psi > 18.07$  時，無論均勻或混合粒徑都呈現一致之輸砂率；當  $18.07 \geq \psi > 2.78$ ，河床質開始形成護甲，產生遮蔽效應，試驗點會因為遮蔽效應和起動機率之影響程度產生分散現象；當  $2.78 \geq \psi$  時，水流強度足以破壞護甲層之遮蔽效應，輸砂量一致且大增。

依據本研究之 30 組試驗結果結合所蒐集前人試驗 798 組數據，得到一考量遮蔽效應和起動機率之混合粒徑輸砂量模式。

**關鍵詞：**混合粒徑，渠槽試驗，輸砂量，遮蔽效應，序率。

### ABSTRACT

In order to explore the armoring effect to mixed-grain sediment discharge, this study, associated with Einstein's stochastic model, got the result as following: when  $\psi > 18.07$ , the same tendency of sediment transport rate occurs for both of uniform and mixed-grain sediment; while  $18.07 \geq \psi > 2.78$ , the armoring effect begins to affect the sediment discharge and test points are scattered resulting from the degree of armoring effect and starting probability of sediment. As  $2.78 \geq \psi$ , water shear is too large to destroy the armoring effect of surface layer resulting in same tendency and large sediment transportation for both uniform and mixed-grain sediment.

In accordance with the 30 sets of experimental data and 798 data from literature, this study got a mixed-grain sediment transport model with the armoring effect and starting probability of sediment.

\*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，benhuang@ntu.edu.tw

**Keywords:** Mixed grain, Flume experiment, Sediment discharge, Armoring effect, Stochastic.

## 一、前言

台灣山高坡陡、河短流急、颱風豪雨頻繁等水文和地文特性，再加上 921 地震之鬆動土體，造成集水區上游常發生嚴重之沖蝕或崩塌，大量泥砂下移常造成災害。為減少泥砂所產生之災害，集水區內水工構造物常被規劃設計以保護當地及下游居民，而這些工程在設計之前都需要先瞭解上游坡面崩塌和河道輸砂量兩大泥砂來源。一般坡面泥砂估算已有許多專家學者和模式提出；而河道輸砂量之估算則逐漸有針對國內之特殊地理特性提出者，其中，推移質輸砂量影響河床型態較為顯著，有關推移質輸砂量之研究較多。

早期國內外學者專家大都採用均勻粒徑從事試驗，所推導出模式理論上無法考量混合粒徑之遮蔽效應對輸砂量之影響。例如，當小流量發生，河床之上細粒徑泥砂被沖走後留下粗顆粒泥砂形成護甲，而護甲層下之較細泥砂受到遮蔽效應不會被水流帶走，完整地留在原河床，形成泥砂輸送量不會隨著流量增大而增大之現象。當大流量足以破壞護甲層時，不僅護甲層面之大顆粒會被水流帶走，被護甲層遮蔽保護之下層細顆粒泥砂也會被挾帶離開，形成比該流量能產生之輸砂量還大之輸砂量發生。因此，混合粒徑輸砂模式如果考慮遮蔽效應時，則其流量和輸砂量間之關係不會像均勻粒徑一般平滑之趨勢。

由於天然河道之河床質粒徑組成不一，如果要推導一適用不同粒徑組成之混合粒徑輸砂量模式是極不可能的，因此，本研究嘗試以水力分析和探討已經發表之混合粒徑輸砂量試驗資料，釐清遮蔽效應會影響混合粒徑輸砂量之區段，並且從事渠槽試驗驗證此一區段之存在。

## 二、前人研究

過去對於河道或渠槽推移質沉澱運移估算

之研究大多以探討均勻粒徑為主，近年來，為了能讓模式更適用於天然河川，越來越多學者針對混合粒徑沉澱之運移進行分析討論，茲列舉和本研究較相關或常用之均勻粒徑輸砂量模式與混合粒徑輸砂量模式說明如下：

### (一) 代表粒徑輸砂量模式

河道或渠槽之推移質沉澱運移估算模式甚多，但多數模式之試驗或適用條件多屬細顆粒沉澱或適用於緩流情況者，目前雖然尚無法準確推估台灣上游河道之輸砂量，但其理論依據、模式型態及其在沉澱運移等方面，仍具有相當價值。現就針對其推導之理論、背景及試驗範圍依下列四類分別討論：

1. 剪力型：Du Boys (1879)、Meyer-Peter & Müller (1948)、Smart (1984)、Parker-Klingman & Mclean (1984)、Van Rijn (1984)、Lu & Wu (1999)...等。
2. 有效流量型：Schoklitsch (1962)、Bathurst (1987)、何黃模式(1992)...等。
3. 序率型：Einstein (1950)、Lu and Su (2005) ...等。
4. 水流功率型：Bagnold (1980)、Yang, C. T. (1984) ...等。

早期對於泥砂運移分析大部分受到 Du Boys 之影響，他提出渠床剪應力是沉澱起動和運移之主要作用力，並依理論推導出以渠床剪應力型式之輸砂模式。Meyer-Peter & Müller 同樣提出渠床剪應力是沉澱起動運移之主要作用力，從事渠槽試驗探討水流剪應力對泥砂運移之影響。他們推導之模式在歐洲曾被廣泛應用。Smart 認為 Meyer-Peter & Müller (1948)之輸砂模式在坡度超過 0.03 時會產生明顯低估，於是從事坡度高達 20%之渠槽試驗，並配合 Meyer-Peter & Müller (1948)部分試驗資料，重新迴歸得出考慮阻力及粒徑分佈影響之輸砂模式。

表 1 均勻粒徑輸砂量模式之試驗範圍表

參數 \ 學者	MPM (1948)	Schoklitsch (1962)	Smart (1984)	何黃模式 (1992)
粒徑(mm)	0.4~30.0	0.3~7.0	2.0~10.5	2.0~25.0
坡度	0.0004~0.02	0.002~0.031	0.03~0.20	0.01~0.10
水深(m)	0.01~1.20	0.025~0.150	0.01~0.09	0.014~0.224
單寬流量(cms/m)	0.004~2.3	0.00054~0.0337	0.025~0.150	0.009~0.184
單寬輸砂量(cms/m)	$8.9 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-4}$	$9.1 \times 10^{-6} \sim 7.1 \times 10^{-4}$

Schoklitsch 發現天然河川常常僅水深較深之主槽才有泥砂運移，認為以剪應力做為泥砂顆粒起動之標準並不合適，因為天然河川之床底平均剪應力分佈並不均勻，建議應採用單寬流量為參數來描述泥砂運動。因此，Schoklitsch 採用 Gilbert (1914) 水槽試驗資料及收集其他學者之渠槽試驗數據資料，提出考慮有效單寬流量之輸砂模式。陡坡礫石河川之水面經常晃動較為激烈，水深量測頗為困難，而野外實測資料通常僅有流量、輸砂量及水面寬度等數據。Bathurst 比較諸家臨界起動及推移質模式後，提出以考慮單寬流量，不用剪應力之 Schoklitsch 模式最適合用於推估山區河流輸砂量。因此，他建議使用 Schoklitsch 之輸砂模式並根據所收集到較新之渠槽試驗資料重新迴歸修正得到新臨界起動流量模式。

黃宏斌以何智武於 1983 年所完成之試驗資料為基礎，配合本身所做渠槽試驗數據，重新分析探討輸砂模式，並求得簡化之起動流量與沉滓運移模式。經過驗證比較後，發現所得到之輸砂模式在推估台灣山區河川輸砂量時較 Schoklitsch 輸砂模式吻合。另外，由於該輸砂模式為一簡化形式，使用上比較方便、簡單，因而曾被水土保持技術規範列為台灣野溪輸砂量推估模式。

上述均勻粒徑輸砂量模式中，有些模式是由理論推導得到；有些則為利用渠槽試驗資料分析得到，茲將其模式之試驗範圍列如表 1。

## (二) 混合粒徑輸砂量模式

由於混合粒徑之標準偏差所產生之遮蔽效應會影響流量與輸砂量間之關係，因此，以定率方式推導輸砂量模式將會顯得更為複雜，與 Du

Boys 不同，Einstein 提出泥砂起動和運移係屬於機率分布理論，推導出以力學觀點結合泥砂跳動與機率概念之輸砂模式。雖然 Einstein & Chien (1953) 發展出混合粒徑之推移質模式，分別計算各級粒徑並考慮泥砂顆粒受遮蔽效應影響之輸砂率，但其計算頗為繁複。Parker-Klingman & Mclean 於 1984 年以礫石河川覆蓋底層各級粒徑具同等之移動性為理論背景，收集 Milhous (1973) 於 Oak Creek 之實測資料，考慮水流強度大至破壞河床表面覆蓋層(pavement)，覆蓋底層推移載始運移，迴歸推導得到一輸砂模式。1984 年 Van Rijn 以數值方法求解運動方程式，分別將輸砂率、水流強度及沉滓粒徑化為無因次參數，並依據水理及泥砂關係推求三者間之相互關係而得。

非定律理論中，除了機率觀點外，還有提出水流功率的。Bagnold 認為推移質在運動時主要是以躍移之形式運動，並收集世界各地天然河川與試驗渠槽資料加以點繪推移質輸砂率與平均流速及泥砂粒徑之關係圖，分析得到推移載單寬輸砂率與河川功率之關係式。Yang 將單位水重之位能損率視為平均流速與能量坡降乘積，稱為單位水流功率，並透過泥砂推移主要是發生在紊流之條件下，進一步推導出單位水流功率之基本型式，再以試驗資料迴歸出無因次參數，進而推導出泥砂濃度與單位水流功率之輸砂模式。

近年來，國內專家學者投入混合混合粒徑之輸砂量研究者，如陳耀彬(1990)、李振耀(1993)、蘇志強(1995)、吳益裕(1999)、Lu and Wu (1999)、李偉哲(2002)、謝孟荃(2005)及 Lu and Su (2005) 等人。

1990 年，陳耀彬進行湍流混合粒徑渠槽試

表 2 混合粒徑輸砂量模式之試驗範圍表

學者	陳耀彬 (1990)	李振耀 (1993)	蘇志強 (1995)	吳益裕 (1999)	李偉哲 (2002)	謝孟荃 (2005)
粒徑(mm)	3~25	3~25	2.4~38.1	1.2~50.2	1.2~43.0	1.2~41.6
坡度	0.015~0.106	0.03~0.09	0.02~0.08	0.02~0.08	0.01~0.05	0.02~0.06
水深(m)	0.015~0.086	0.047~0.085	0.027~0.088	0.050~0.107	0.019~0.110	0.036~0.107
單寬流量 (cms/m)	0.01~0.08	0.06~0.11	0.04~0.14	0.04~0.14	0.01~0.09	0.02~0.10
單寬輸砂量 (cms/m)	$6.4 \times 10^{-7} \sim 3.7 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-4} \sim 6.2 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-7} \sim 5.4 \times 10^{-4}$	$3.2 \times 10^{-5} \sim 4.8 \times 10^{-4}$

驗，採用中值粒徑  $D_{50}$  為 15mm 從事渠槽試驗，利用所得試驗數據推導混合粒徑輸砂模式。李振耀於 1993 年亦採用同樣  $D_{50}$  進行渠槽試驗，並提出粒徑標準偏差( $\sigma$ )產生之遮蔽效應會影響輸砂量之條件下，配合陳耀彬之試驗數據，重新迴歸建立輸砂模式。1995 年蘇志強從事坡度大於 2% 之渠槽試驗，探討相同  $D_m$  條件下，2 種不同中值粒徑及 3 種粒徑標準偏差對輸砂量之影響，相較於李振耀模式為一較簡化計算之模式。1999 年吳益裕延伸蘇志強之渠槽試驗，採用相同  $D_m$ ，從事較大  $\sigma$  值，且擴及至 4 種不同  $\sigma$  值之試驗，並配合蘇志強試驗數據，建立混合粒徑輸砂模式。Lu and Wu 於 1999 年收集 Emmet (1979) 與 Hollingshead (1972) 之野外天然河川資料以及 Kuhnle (1994)、Wilcock (1987)、Wu (1998) 之水槽等混合泥砂試驗資料，針對單峰及雙峰粒徑分佈，應用 Diplas (1987) 之遮蔽函數推導可估算個別粒徑推移率之輸砂模式。這些文獻充分說明粒徑標準偏差所產生之遮蔽效應，在某區段之流量下會產生護甲層，而嚴重影響原先之流量與輸砂量關係。

Little and Mayer (1976) 指出當  $\sigma < 1.5$  時，河床粒徑大小相似，為均勻粒徑分佈，在不同水流強度下，不易形成護甲層，遮蔽效應可忽略；相反地，當  $\sigma > 1.5$  時，河床粒徑分佈粗細差異大，較容易形成護甲層，輸砂量明顯因遮蔽效應影響，相同之水流強度下，混合與均勻粒徑之輸砂量與水流強度呈現不同之關係。李偉哲於 2002 年證明此一觀點，他分別從事均勻與混合粒徑渠槽試驗，發現兩者之差異在於護甲層是否形成。

由於護甲層之遮蔽效應，使得細顆粒在粗顆粒保護下留在原處不動；一旦護甲層遭受足以起動之大流量時，細顆粒將會隨粗顆粒被帶走同時而大量流失。2005 年謝孟荃採用  $\sigma = 1.5$  當作均勻與混合粒徑之判斷標準，除從事較大  $\sigma$  值(= 2.54)之渠槽試驗外，並配合目前國內外渠槽資料中  $\sigma > 1.5$  之混合粒徑試驗資料分析討論，以推得一考慮單寬流量、坡度及粒徑標準偏差之臨界流量與沉滓運移模式。同年，Lu and Su 並非採用定率觀念，延用 Einstein 之無因次參數，針對陡坡礫石混合粒徑分佈對輸砂率影響進行試驗探討，並收集前人試驗資料進行分析，他們建議採  $D_m$  為混合粒徑之代表粒徑，並分析得一簡化之模式。茲將所蒐集到之各家模式試驗範圍列如表 2。

有鑒於定率模式無法模擬所有粒徑及其標準偏差組合之天然河床。因此，本研究嘗試以 Einstein 之無因次參數，配合蒐集到之混合粒徑試驗資料，釐清遮蔽效應會影響輸砂量之區段，並且從事渠槽試驗驗證此一區段之存在。

### 三、理論分析

以序率方式研究泥沙之起動理論中較著名者首推 1950 年 Einstein。他從渠槽試驗注意到床面泥砂顆粒之移動具有隨機特性，因此，他將起動機率(Pickup probability)定義為：泥砂顆粒所承受之瞬間上升力大於泥砂顆粒有效重量之機率，並由此出發推導出泥沙顆粒起動機率如下：

$$P = 1 - \int_{-B_*\psi^{-1/\eta_0}}^{B_*\psi^{-1/\eta_0}} \exp(-t^2) dt = \frac{A_*\phi_E}{1 + A_*\phi_E} \dots (1)$$

式中：P 為泥砂起動機率(%)

$$\phi_E = \frac{q_s}{\sqrt{g(\rho_s / \rho - 1)D_{35}^3}} \dots\dots\dots (1a)$$

為 Einstein 無因次輸砂強度參數

$$\psi = \frac{(\gamma_s - \gamma)D_{35}}{\tau} = \frac{1}{\tau_*} \dots\dots\dots (1b)$$

為 Einstein 無因次水流強度參數

$$\eta_0 = f(\text{Re}^*) \dots\dots\dots (1c)$$

為泥砂跳動變異係數

A\* or B\* = f(flow, D)為綜合參數；q<sub>s</sub> 為輸砂量；ρ<sub>s</sub> 為河床質密度；ρ 為流體密度；g 為重力加速度；D 為河床質粒徑；γ<sub>s</sub> 為河床質重量密度；γ 為流體重量密度；τ 為河床質平均剪應力(= γRS)；S 為能量坡降；Re 為雷諾數。

起動條件除了一定之水流運動強度帶動，還包括了起動機率，Einstein 以染色砂礫做試驗，觀察發現床面泥砂與推移質間存在不斷之交換現象，泥砂顆粒之移動是間歇性，且移動一段距離之後靜止等待下次移動之機會，同時泥砂移動路徑亦隨時間進行不斷改變，得到以力學觀點結合泥砂跳動與機率概念之輸砂模式。1953 年他又與 Chien 發展混合粒徑之推移質模式，分別計算各級粒徑並考慮泥砂顆粒受遮蔽效應影響之輸砂率。

根據 Shields 之理論，無因次水流強度之倒數 1/ψ 等同於無因次剪應力參數 τ\*，後來 Brown (1950)認為無因次輸砂強度 φ 是與 1/ψ 相關，故由 Einstein-Brown Formula：

$$\phi = f(1/\psi) \dots\dots\dots (2)$$

開始推導，並採用 Rouse (1950)所修正之 φ：

$$\phi = \frac{g_s}{\gamma_s F_1 \sqrt{g \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) d_s^3}} \dots\dots\dots (3)$$

其中，F<sub>1</sub> 乃出現於 Rubey (1933)所提出沉降速度模式中：

$$\omega = F_1 \sqrt{\left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d_s} \dots\dots\dots (4)$$

而在 Einstein-Brown Formula 中，

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd_s^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd_s^3 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \dots (5)$$

根據所收集到 Gilbert (1914)與 Meyer-Peter and Müller 之模式及試驗數據迴歸得出 φ 與 τ\* 之關係式：

$$\phi = 40 \left( \frac{1}{\psi} \right)^3 \dots\dots\dots (6)$$

其中，Shields 曲線僅考慮水流強度、輸砂強度和沉降速度等三個參數，並未考量遮蔽效應之影響。2005 年，Lu and Su 採用 Einstein 之無因次參數，針對陡坡礫石混合粒徑分佈對輸砂率影響進行試驗；並收集前人試驗資料進行分析，當採用 D<sub>m</sub> 為代表粒徑時，可分析得到下列關係式：

$$\begin{aligned} \phi &= 9.72 \left( \frac{1}{\psi} - 0.0336 \right)^{1.98} & \psi > 3 \\ \phi &= 7.69 \left( \frac{1}{\psi} \right)^{1.9} & \psi \leq 3 \end{aligned} \dots\dots (7)$$

由於 Einstein 模式可以同時考量力學、機率 and 遮蔽效應等參數，這是目前定率方法所難以達成的，而且，Lu and Su 也印證此一觀點之正確性。因此，本研究以無因次輸砂強度參數 φ 及無因次水流參數 ψ 為影響參數，並推求出兩參數間之關係。

#### 四、渠槽試驗

由於粒徑標準偏差大小產生之遮蔽效應嚴重影響混合粒徑流量與輸砂量間之關係，由文獻知 σ < 1.5 可視為均勻粒徑。為探討遮蔽效應對混合粒徑輸砂量之影響，本研究採用所蒐集到之試驗粒徑最大、最小值作為本研究之最大粒徑和最小粒徑，亦即粒徑範圍涵蓋所蒐集到之混合粒徑試驗範圍，σ = 3.5，比任一蒐集到之試驗標準偏差都大，藉以從事渠槽試驗(如圖 2 和表 3 所示)。試驗渠槽位於台大安康水工模型試驗場，為一循環式鋼架試驗渠槽，主要配備如圖 1。渠槽包含試驗段、頭水箱、尾水箱和沉砂池等四部分，試

表 3 蒐集國內現有混合粒徑輸砂試驗資料

	粒徑範圍 (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	$\sigma = \sqrt{\frac{D_{84.1}}{D_{15.9}}}$	坡度(%)	流量範圍 (cms/m)
陳耀彬(1990)	3~25	15	1.5	1.5~10.6	0.01~0.08
李振耀(1993)	3~35	15	1.9	3~9	0.06~0.11
	3~35	16.5	1.1	3.4~7.2	0.08~0.09
蘇志強(1995)	2.4~38.1	7.5	2.0	2~8	0.04~0.14
	2.4~38.1	7.5	2.0		
吳益裕(1999)	1.18~50.5	7.5	3.0	2~8	0.04~0.14
李偉哲(2002)	1.2~19.1	4.02	1.94	1~5	0.01~0.09
	1.2~19.1	3.83	2.00		
	2.4~43.0	8.45	2.32		
謝孟荃(2005)	1.2~41.6	13.74	2.54	2~6	0.02~0.10
本研究(2007)	1.2~41.6	13.74	3.50	2~7	0.02~0.09

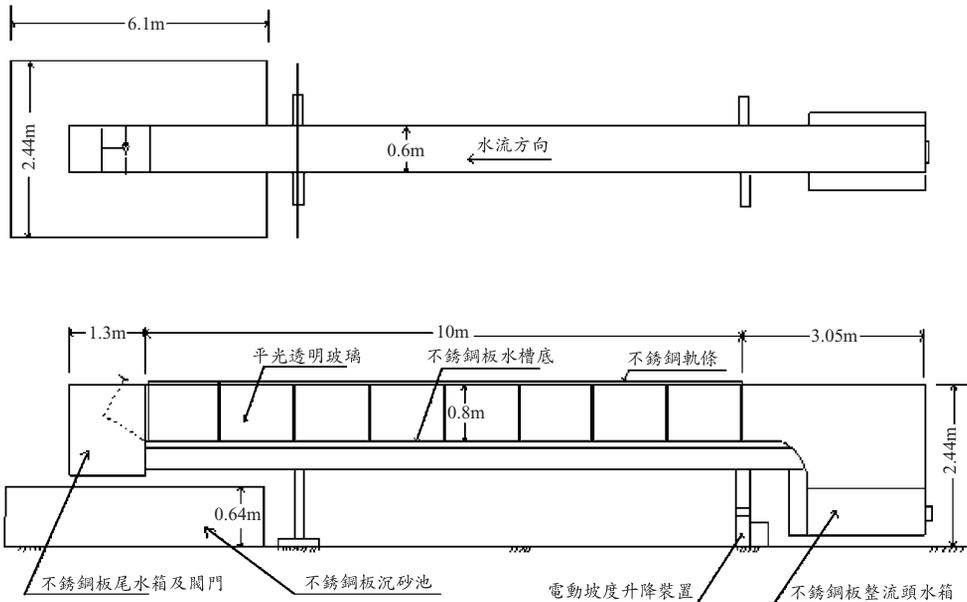


圖 1 試驗渠槽平面圖

驗段長 10 公尺，寬 60 公分，高 80 公分。試驗流量由步進馬達控制，最大單寬流量為 0.24 cms/m。坡度範圍由步進馬達控制，坡度最大可達 20% (精度 1 公釐)。

由於大台北地區之砂石場並未販售本研究所需要之天然礫石，因此，試驗材料為市售之七釐石、二分石及六分石依不同比例配成混合粒徑之沉滓。由於碎石在小流量之起動試驗是會造成

相當誤差，在大流量或高輸砂率時，誤差較小，因此，本研究選擇大流量之輸砂試驗結果，以降低誤差之影響。本研究在定量均勻流下，配合 0.02、0.03、0.05、0.06 及 0.07 等五種渠床坡度，且選取 6 種大於臨界流量之水流進行渠槽試驗。其中，加砂粒徑分布與原床砂完全相同，加砂方式以人工加砂而非加砂器加砂，並且以不擾動水流為原則。

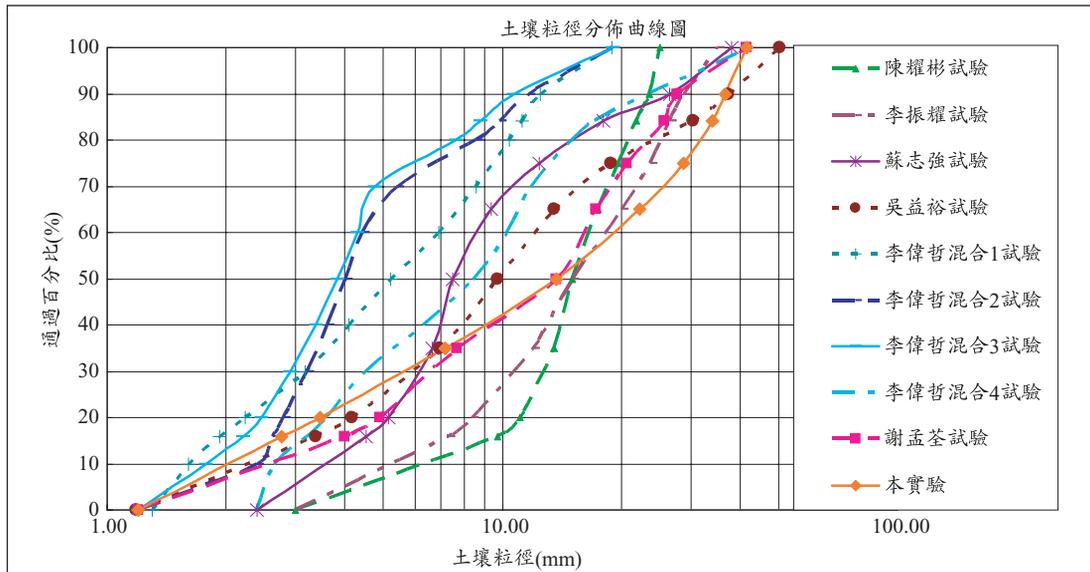


圖 2 蒐集國內現有混合粒徑之分佈曲線

## 五、結果與討論

依據試驗設計完成混合粒徑輸砂試驗 30 組，再配合收集之輸砂試驗 798 組資料，共計 828 組。就試驗過程中之觀察與試驗結果作分析探討：

### (一) 遮蔽效應對輸砂量之影響

遮蔽效應對輸砂量之影響可分為三個階段：第一階段為低流量時，遮蔽效應尚未發生，細顆粒均可以自由隨水流帶走，不受任何粗顆粒阻礙；第二階段為中流量時，遮蔽效應開始影響輸砂機制，細顆粒受到遮蔽效應影響，無法移動容易產生低輸砂量；第三階段為高流量時，護甲層之粗顆粒被水流破壞帶走，護甲層下方之細顆粒在沒有任何遮蔽物下一併被水流帶走，產生高輸砂量。為證明此一現象，本研究將從事混合粒徑渠槽試驗之蘇志強、吳益裕、李偉哲、謝孟荃、何智武及本研究之試驗資料點繪於圖 3。其中，圖 3(a)為  $S = 0.02$  之流量輸砂量數據，由圖中知在低流量( $q < 0.04$  cms/m)下，大部份數據點之流量與輸砂量關係是一致的。在  $0.04\sim 0.06$  cms/m 間，有部份混合粒徑數據點小

於均勻粒徑之輸砂量。大於  $0.06$  cms/m 後，輸砂量會隨著不同粒徑和不同標準偏差而有變化，但是都大於何智武之均勻粒徑輸砂量。圖 3(b)為  $S = 0.05$  之數據，其趨勢和  $S = 0.02$  者相似，只是區段大小和位置不同而已。在流量  $< 0.015$  cms/m 時，大部份數據點之流量與輸砂量關係是呈現一致的。在  $0.015\sim 0.04$  cms/m 間，也有部份混合粒徑數據點小於均勻粒徑之輸砂量之現象。大於  $0.04$  cms/m 後，輸砂量會隨著不同粒徑和不同標準偏差而有變化，但是都大於何智武之均勻粒徑輸砂量。圖 3 證明在粗顆粒大標準偏差 ( $1.2\text{ mm} \leq D \leq 50.5\text{ mm}$ ,  $1.1 \leq \sigma \leq 3.5$ ) 之試驗條件下，於低流量遮蔽效應尚未發生階段，混合粒徑輸砂量與均勻粒徑模式估算值相差不多。但是，當護甲層發生遮蔽效應時，部分混合粒徑輸砂量會小於均勻粒徑之輸砂量，特別是大標準偏差之粒徑組合會產生較小之輸砂量，對本研究所蒐集到之數據點而言，這一區段並不長；當護甲層之遮蔽效應遭到高流量破壞時，實測輸砂量會大於均勻模式之估算值。尤其是，大標準偏差之粒徑組合會產生較大之輸砂量。這三個區段之分界點(流量值)因坡度大小而異。

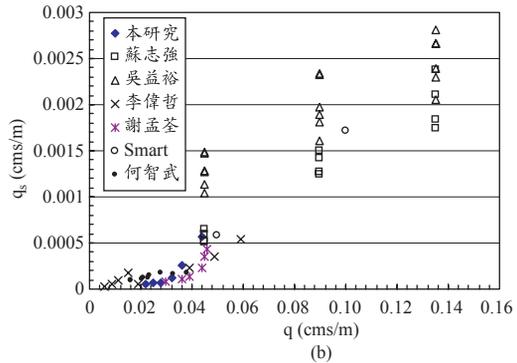
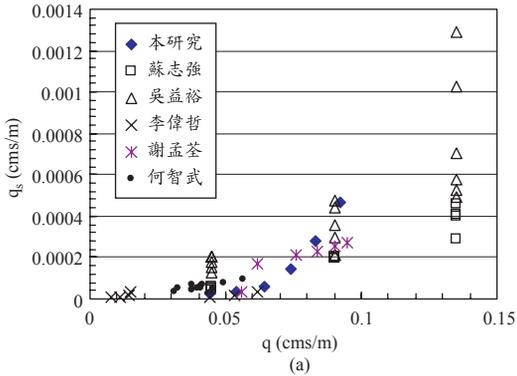


圖 3 (a)各家試驗流量與輸砂量關係(S=0.02)；(b)各家試驗流量與輸砂量關係(S=0.05)

## (二) 混合粒徑輸砂模式

在估算輸砂量之模式中，一般多以定率之方式來考慮泥沙顆粒之起動及運動行為，故以河床質剪應力或流量之大小去量化水流對河床沖刷力及挾砂力，但 Gessler (1965)於試驗中觀察到，即使當底床剪應力已經到達甚至超過臨界剪應力時，仍會有一部分之泥沙顆粒不發生移動。因此實際上泥沙顆粒之起動是一種包含隨機之現象，起動條件除了一定之水流運動強度帶動，還包括了起動機率，與其所在之位置、顆粒大小及進床之流況皆有密切之關係。不僅起動流量難以確定外，自圖 4 數據點之散佈情形亦可知，關係流量和輸砂量間之關係還須包括坡度和粒徑。這也是圖 3 必須以大小坡度分別繪製之原因。

由於無因次水流強度含有坡度因子；無因次輸砂強度含有粒徑因子，加上 Einstein 模式本身具有機率因子，粒徑標準偏差所產生之遮蔽效應亦可涵容於起動機率中，因此，本研究嘗試以序率

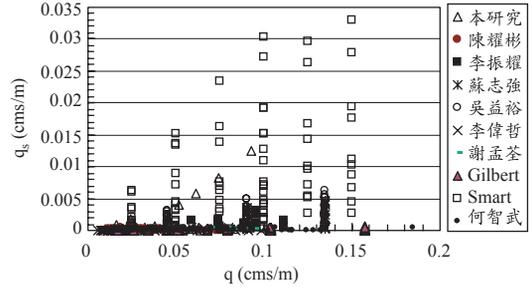


圖 4 各家試驗流量與輸砂量關係

方式探討混合粒徑輸砂量。其中，因為本研究所蒐集到之試驗粒徑標準偏差較一般者大，依據李偉哲提到大標準偏差之輸砂量探討以  $D_{50}$  作為代表粒徑會較為合適之結論，故以  $D_{50}$  代替 Brown 所選用之  $D_{35}$  代入式(2)；以  $D_{50}$  代替 Lu & Su 所選用之  $D_m$  代入式(7)，以及 Gilbert, Meyer-Peter and Müller, Smart, 何智武、李振耀、蘇志強、吳益裕、李偉哲與謝孟荃之試驗資料 798 組，加上本研究所從事之 30 組，共 828 組繪於圖 5。

由於自圖 5 中可以得到任一  $\Phi$  對應之  $\Psi$  值，而  $\Psi$  值或  $\Psi$  之倒數  $\tau_*$  都可以對照 Shields Diagram，得到  $Re_*$  值。因此，當  $\Psi = 18.07$  時，自圖 5 可得到  $\tau_* = 0.055$ ，對照 Shields Diagram，得到泥沙顆粒之邊界雷諾數  $Re_* = 250$ ；當  $\Psi = 2.78$  時， $\tau_* = 0.36$ ， $Re_* = 0.33$ ，均位於 Shields Diagram 曲線上之轉折點上。故可將輸砂過程區分為三個階段：當  $\Psi > 18.07$ ，表示刚开始水流之對河床質淘刷力小且遮蔽效應尚未產生影響時，無論均勻或混合粒徑都呈現一致之輸砂強度；隨著水流強度增大， $18.07 \geq \Psi > 2.78$ ，河床質開始分選，粗顆粒造成護甲層，遮蔽效應開始產生影響。受到遮蔽效應影響較大之輸砂量會大為降低，也因為影響程度不一，大小顆粒以及標準偏差大小都會影響遮蔽效應之出現機率，因此，此一區段之數據點會較為分散；至水流強度大到足以帶走粗顆粒時， $2.78 \geq \Psi$ ，受粗顆粒遮蔽之細顆粒也會一併被帶走，形成輸砂量大增之現象。各階段之間都具有轉折，表示於不同階段，輸砂強度受遮蔽效應、起動機率之影響，與水流強度間呈現不同之關係。將 828 組試驗資料

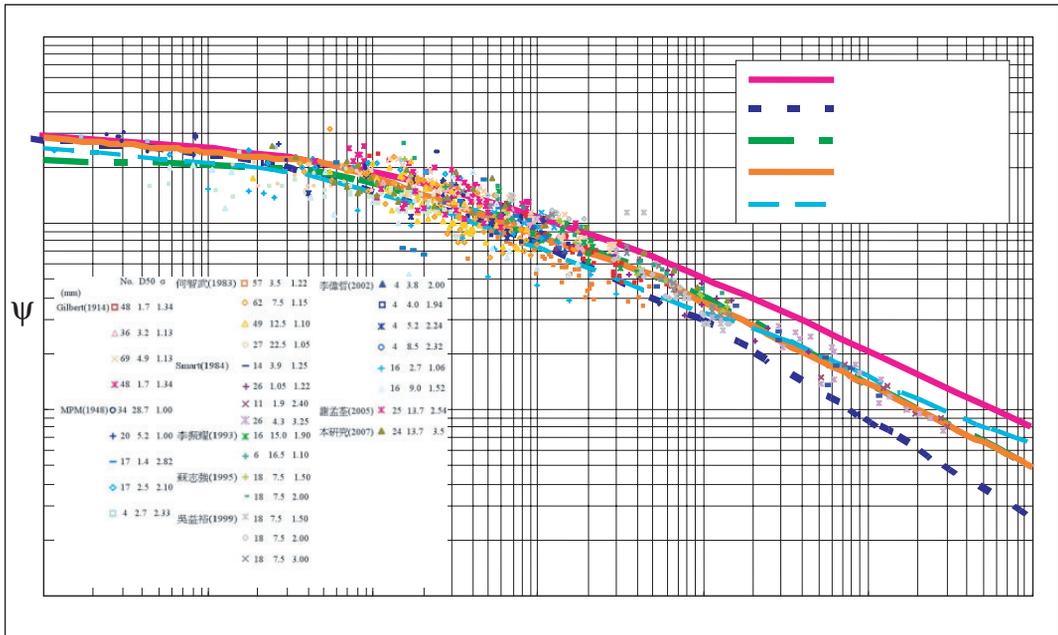


圖 5 各家輸砂模式之無因次輸砂強度與水流強度參數關係圖

依據上述三區段分別回歸可得：

$$\begin{aligned} \phi &= 17.68 \left( \frac{1}{\Psi} \right)^{1.96}, & \Psi \leq 2.78 & \quad (R^2 = 0.87) \\ \phi &= 1.44 \left( \frac{1}{\Psi} - 0.05534 \right)^{0.93}, & 2.78 < \Psi \leq 18.07 & \quad (R^2 = 0.85) \dots\dots\dots (8) \\ \phi &= 3.13 \left( \frac{1}{\Psi} - 0.03125 \right)^{1.51}, & 18.07 < \Psi & \quad (R^2 = 0.73) \end{aligned}$$

從式(8)之相關係數知，這三群曲線蠻足以代表這些數據點之分布，接著，將式(8)點繪於圖 5 中，發現中段之數據點較為發散外，大水流強度和小水流強度之數據點都蠻一致的。

## 六、結論與建議

本研究主要針對遮蔽效應對混合粒徑輸砂量影響進行探討，並加入所蒐集到之試驗資料進行序率型無因次分析，歸納出遮蔽效應對輸砂量之影響。本研究所獲得之主要成果如下：

1. 本研究採用 Einstein 以序率之方式探討泥砂顆粒之運動，發現混合粒徑輸砂過程可區分為

三個階段：當  $\Psi > 18.07$ ，無論均勻或混合粒徑都呈現低度之輸砂率；隨著水流強度增大， $18.07 \geq \Psi > 2.78$ ，河床質開始分選，粗顆粒造成護甲層，對細顆粒產生遮蔽效應，試驗點會較分散；當  $2.78 \geq \Psi$ ，水流強度大到能夠帶動粗顆粒粒徑，輸砂量大增。亦即當  $\Psi > 18.07$  或  $2.78 \geq \Psi$  時，均勻和混合粒徑之輸砂量間之差異並不大。當  $18.07 \geq \Psi > 2.78$  時，混合粒徑之遮蔽效應才會反映在輸砂量方面。

2. 本研究之 30 組試驗數據，加上前人試驗資料 798 組，共 828 組，進行回歸分析，可得下列輸砂量模式：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \phi = 17.68 \left( \frac{1}{\psi} \right)^{1.96} & , \psi \leq 2.78 \\ \phi = 1.44 \left( \frac{1}{\psi} - 0.05534 \right)^{0.93} & , 2.78 < \psi \leq 18.07 \\ \phi = 3.13 \left( \frac{1}{\psi} - 0.03125 \right)^{1.51} & , 18.07 < \psi \end{array} \right.$$

## 七、參考文獻

1. 何智武，「湍流渠槽沉滓運移特性之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文，1983。
2. 何智武、黃宏斌，「台灣上游湍流河道之輸砂模式研究」，中華水土保持學報，14(2): 95~106，1983。
3. 李振耀，「混合礫石在超臨界流之運移研究」，國立中興大學土木工程學研究所碩士論文，1993。
4. 李偉哲，「湍流渠槽之輸砂量模式研究」，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文，2002。
5. 吳益裕，「陡坡渠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，1999。
6. 陳耀彬，「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，1990。
7. 黃宏斌，「陡坡水槽之輸砂量模式研究」，台灣水利，41(4): 44~51，1992。
8. 謝孟荃，「混合粒徑輸砂量估算之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文，2005。
9. 蘇志強，「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，1995。
10. Einstein, H. A., "The Bed-load Function for Sediment Transport in Open Channel Flows." Tech. Bull. 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.
11. Gilbert, G. K., "The transportation of debris by running water: U.S. Geological Survey Professional Paper," pp.86, 263, 1914.
12. Graf, W. H., "Hydraulics of Sediment Transport." McGraw-Hill, New York., pp.135-136, 1971.
13. Meyer-Peter, E. and R. Müller, "Formulae for Bedload Transport." Trans. Intern. Assoc. Hydraulic Res., 2nd. Meeting, Stockholm, pp. 39~65, 1948.
14. Simons D. B., and F. Sentürk, "Sediment Transport Technology." Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1977.
15. Smart, G. M., "Sediment Transport Formula for Steep Channels." J. Hydraulic. Eng., ASCE, 110(3): 267~276, 1984.
16. Van Rijn, L. C., "Sediment transport, part I: bed load transport." J. Hydraulic Eng., pp. 1431~1456, 1984.
17. Van Rijn, L. C., "Sediment transport, part II: suspended load transport." J. Hydraulic Engrg., ASCE, 110(11), pp. 1613~1638, 1984.
18. Yang, C. T., "Unit Stream Power Equation for Gravel." J. Hydraulic. Eng., ASCE, 110(12): 1783~1798, 1984.

收稿日期：民國 96 年 9 月 17 日

修正日期：民國 97 年 4 月 21 日

接受日期：民國 97 年 4 月 24 日