

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

沙丘床形之三維多顆粒泥砂躍移研究(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-002-025-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學水工試驗所

計畫主持人：李鴻源

計畫參與人員：林永峻、翁明儀

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 7 月 28 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

沙丘床形之三維多顆粒泥砂躍移研究(II)

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2211-E-002-025

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：李鴻源教授

執行單位：國立台灣大學水工試驗所

中華民國 94 年 07 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

沙丘床形之三維多顆粒泥砂躍移研究 (II)

Investigations of three dimensional multi-particles
saltating process on a dune bed (II)

計畫編號：NSC 93-2211-E-002-025

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

主持人：李鴻源教授 國立台灣大學水工試驗所

計畫參與人員：林永峻 國立台灣大學水工試驗所

翁明儀 國立台灣大學水工試驗所

一、摘要

以往研究的成果，主要是針對二維泥砂顆粒與平底床顆粒的碰撞行為以及泥砂顆粒的運動型態作探討 (Garcia and Nino(1994,1998)、陳彥旭(1998)、游景雲(1999))，已獲得不錯之成果。在有關三維泥砂運行與躍移之研究，本研究群 (林穎典(2000)、李博甯(2001)、王筱雯(2002))，均假設底床為規則顆粒組成之平坦床形，建立一包含底床碰撞與空間碰撞之三維多顆粒連續躍移數值模式，藉此模式探討顆粒躍移之運動特性。然而一般明渠中，底床床型會依流速的不同而呈現包括平整(flat bed)、沙紋(ripple)、沙丘(dune)、沙浪(antidune)及急灘與深潭(chutes and pools)等不同型式，不同型式的床型會對近床區域的流況造成影響，進而影響到推移載顆粒的運動情形。本研究針對沙丘(dune) 底床型態之三維泥砂顆粒躍移行為及其間的碰撞機制進行探討，藉助三維動態影像數位元化系統來建立一套在沙丘底床型態下之二維單顆粒躍移模式，並和過去所發展相互比較，希望能對泥砂顆粒躍移運動有更進一步的瞭解。

關鍵詞：推移載、躍移、碰撞機制、二維動

態影像數位化系統、沙丘

Abstract

A series of studies regarding the two dimensional collision mechanism with the channel bed and among the saltating particles were conducted by Garcia and Nino (1994, 1998) and our group (Chen 1998, You 1999). The simulation results are satisfactory. For past years, our group (Lin 2000, Lee 2001, Wang 2002) had extended the experiments to three dimensional conditions. The bed forms of our previous experiments were flat bed and formed by uniformly distributed sediment particles. However, the bed forms in natural rivers vary with different flow conditions. Different types of bed forms, were observed, namely, flat bed, ripple, dune, antidune, and chutes and pools. Particles saltation characteristics will definitely be different under different bed formation. The purpose of this study is to investigate the three dimensional saltation characteristics on a dune bed, with special attention on the collision behaviors between the saltating particles and the channel bed and interparticle collision behaviors. A three dimensional flow visualization technique will be modified and upgraded in this study to measure the three dimensional saltation trajectories on a dune bed. Basing on these data, a two dimensional saltation model for single sediment particle will then be developed. This model will be very helpful in the study of bed load transport.

Keywords : Bed load, Saltation, 2-D flow visualization technique, Dune

二、緣由與目的

天然河川是由水流和河床相互作用所構成的複雜運動系統，當水流的作用力超過河床的抵抗能力後，泥砂便開始起動，伴隨而來的是河床的變化，進而影響水流的特性。由於對近床區域的泥砂躍移機制並不十分瞭解，所以一般沿用的推移載公式，都是由實驗或現場量測所得的輸砂量，配合因次分析或簡單的物理概念所推求的經驗或半經驗公式，其適用性往往只局限於某一個狹隘的範圍內，而且應用不同公式所求得的结果差異頗大。要突破此一瓶頸，應該要針推移載的運動機制進行更深入的探討，而不再以迴歸經驗公式為目標。顆粒躍移運動除了各種定率性的作用力之外，尚包含了隨機性的影響因子；所以若要瞭解此一運動規律，不僅要研究其力學機制，還要考慮其隨機特性，才能反應出問題的全貌。近年來有不少學者著眼於泥砂顆粒的躍移分析及泥砂顆粒間彼此的作用，已有不錯的成果。

三、實驗底床佈置及分析方法

a、底床形狀及試驗條件

實驗佈置圖如圖 1.1 所示

在沙丘階段，Yalin. M. S. and E.Karahan, 研究沙丘產生-成長-衰微-消失的全部過程，所達到的陡度不斷加大，並以 0.06 為其極限，故底床的坡度選擇 0.06 來作為觀察。而單一躍移顆粒及多顆粒實驗所用的顆粒及水流條件如表 3.1 所示。

由表 1.1 可知，實驗條件的福祿數範圍小於 1，再加上 Kennedy 的產生沙丘的水深與福祿數的關係決定水流條件（弧線 BCD 以下為沙丘發生條件），如圖 1.2~1.3。

顆粒：黃色圓形 BB 彈，半徑 0.003m，密度 1061 kg/m^3 ，為非彈性體。

b、擷取影像及顆粒軌跡方法

為了能精確並且有效的獲取三維躍移顆粒之實驗數據，本研究藉助三維動態影像數位化系統技術，即使用兩台電荷耦合相機（Charge Couple Device Camera, CCD camera）分別紀錄 X-Y 及 X-Z 平面的亮點影像，由其中一台 CCD 照相機發出同步訊號給另一台 CCD 相機，以達同步攝影之目的，其原理簡述如下，一般彩色影像由 R(RED)、G(Green)、B(Blue) 三原色所組成，稱為三個 channel，每種顏色有 256 色階，而本量測

系統利用 Matrox Image Grabber(影像捕捉卡)，攝得之影像。

影像擷取範圍為 5 個沙丘底床 (82.5cm)，以每秒 30 張的速度拍攝。將攝得之連續 30 張影像，利用 Matlab 寫一個數位影像處理的程式。先將全部影像作平均後，再將每一張影像個別減去平均的影像後設立一個門檻值，由於實驗中的顆粒亮度(黃色)比背景(黑色)亮，可通過門檻值，即抓到每張影像中移動的顆粒的位置，再將每個時間下的移動點疊加在同一張圖上，即形成躍移軌跡。

四、實驗結果與討論

定性觀察實驗結果：

如圖 2，為沙丘面上的流線分佈，水流在經過這樣的河底時，並不與沙丘表面相平行，近底的水流自 A 點循上波以達波峰 C，在那裡發生分離，至 E 點再和河床相遇（這一點稱為重匯點），至波峰至重匯點的長度為 L，它反映了波峰下游分離區的長度。

水流分離的結果，使近底床流速的沿程分佈不可能保持均勻，在沙丘的迎水面處於加速區，背水面處於減速區，垂線流速分佈在波峰 C 處最為均勻。在重匯點 E 處，水流的壓力最大；沙丘迎水面和背水面的壓力不等，造成沿著水流方向的一個合力，這個合力的反作用力就是沙丘的形狀阻力（又稱沙波阻力），從 E 點循著沙丘的迎水面到達 C 點，一方面是水流的時均剪切力不斷加大，在重匯點為零，至波峰到達最大，另一方面，由於水流分離面上下兩層水流流速的急劇改變，使得這裡水流很不穩定，產生了局部紊動，紊動強度至 E 點最大，至此以下，紊動迅速向主流區擴散，進底處的紊動強度反而越來越小。

在這樣的水流條件下，泥沙顆粒在沙丘迎水面上的泥沙顆粒受水流時均剪切力及底床紊動的雙重作用而外移，沿著坡面滾動或跳動前進，到了波峰後，落入背水的面的渦流中，就地堆積下來，或是被水流帶到下一個沙丘，

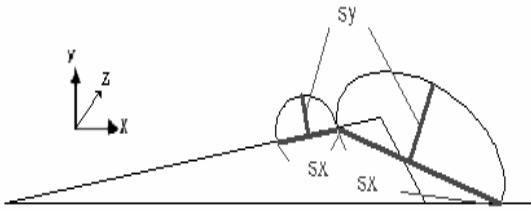
其中有一部份細顆粒泥沙在下一個沙丘和緩的坡面上沉降下來，然後循著迎水坡再度向前移動。只有在接近底床處運動的顆粒泥沙到達波峰後，水流向上流動分速不足以使之舉離渦流區，結果或為水流所擷取，或者沿坡面 CD 滑落下來，都沉積在波谷中。如圖 3 所示，即為顆粒堆積於波谷之現象。

由於造成沙丘底床的水流條件為福祿數小於 1，造成水流速度比較慢的情形，故容易造成少顆躍移，也因為在影像處理上，三顆是比較容易定位的，有鑑於此，本研究選擇了三顆來與單顆粒比較其物理特性。在實驗觀察中，三顆粒也有單顆粒的所有特性，所不同的是，當三顆一起躍

移時，必有一顆以上堆積在坡谷。在本實驗的水流條件下，大部份的情形是兩顆停留，一顆繼續向前躍移至下一個波谷停留。

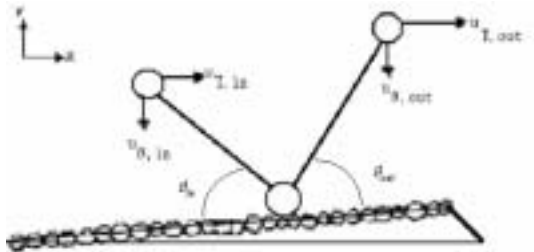
各物理量定義：

利用比例尺的觀念換算鏡頭擷取的影像與實際的單位，將每個點的三維座標(x, y, z)定出，進而去計算所有的物理量，進而準確判斷出顆粒跳躍的時間及位置；躍長(s_x)為每一躍移方向的相對最大高度、躍高(s_y)為每一躍移的相對最大高度、躍寬(s_w)為每一躍移於 z 方向的最大位移量。躍移速度(sv)為每一躍移的平均速度。迎水面與背水面躍長、躍高定義如圖。



為了要探討顆粒的躍移行為，必須要在顆粒與底床碰撞部分加以處理，以瞭解顆粒碰撞後，各項物理量之變化。在二維底床碰撞機制部分，Nino and Garcia(1994)認為碰撞點位置具有隨機性，因此引入條件機率的概念，描述入射角 θ_{in} 及反射角 θ_b 之關係，再利用期望值的概念，可求出 θ_r ，即可與實驗比較。

θ_b 為碰撞點切線方向與水平面的夾角； θ_r 為以碰撞平面為基準之反射角， θ_{in} 為以水平面為基準的入射角。引入兩個待定參數 e 跟 f ，其中 e 為碰撞係數(coefficient of restitution)，表示碰撞前後法線方向速度的變化； f 為摩擦係數(coefficient of friction)，表示碰撞前後切線方向的速度變化。因此：



$$u_{T,out} = fu_{T,in}, u_{N,out} = -eu_{N,in} \quad (1)$$

$$\tan \theta_r = \frac{e}{f} \tan(\theta_{in} + \theta_b) \quad (2)$$

在已知 θ_{in} 的情況下，可推求 θ_b ，因此可寫成條件機率的形式： $p(\theta_b | \theta_{in})$ ，而機率密度函數 r 及 l ，皆假設為均勻分佈，表示碰撞點投影在水平面上的機率都一樣，亦即碰撞點落在床面上的機率相同。根據上述的幾何關係，即可將機率密度函數 r 及 l 轉換成條件機率 $p(\theta_b | \theta_{in})$ ，再利用期望值的概念，推導出散佈函數(splash function) (圖 10)，因此 θ_r 可表為：

$$\theta_r = \langle \theta_{out} \rangle - E[\theta_b | \langle \theta_{in} \rangle] \quad (3)$$

其中 $\langle \rangle$ 代表平均值， E 代表期望值。

定量分析實驗結果：

在實驗中讀取了大量入射角和反射角及入射速度和反射速度資料，最後探討碰撞係數 e 及摩擦係數 f 與入射角及水流強度的關係。由於本研究有讀取實驗之 e f 值，因 f 值接近為一常數，故以 f 值來推算碰撞機制下的 e 值與實測 e 值的誤差百分比，如圖 11。所得的結果為誤差分佈在 3.72 % ~ 26.89 % 依隨機的狀況來說，其量測值貼近理論值。

本文採用相對量作為統計量，各物理量

$\frac{s_x}{sx}, \frac{s_y}{sy}, \frac{s_w}{sw}, \frac{u_{in}}{u_{in}}, \frac{u_{out}}{u_{out}}, \frac{\theta_{in}}{\theta_{in}}, \frac{\theta_{out}}{\theta_{out}}, \frac{sv}{sv}$ 之機率密

度分佈皆為高斯分佈。

$$f(x) = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{x}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{w^2}} \quad (4)$$

y_0 ：基線的偏移量

A ：分佈曲線下的面積總合

w ：2 倍的標準偏差

本實驗並找出沙丘型底床摩擦係數 f 碰撞係數 e 與水流強度 T_* 的關係： f 接近一定值，不過其平均值比平底床略小，約為 0.73， $e = 0.46 \sim 0.57$ 之間，隨水流強度的增加而減少，可得出的一條迴歸直線

$$e = 0.51 - 0.003T_* \quad (5)$$

e 值隨水流的強度增加而減少的很緩慢，推測為實驗所使用的沙丘型底床所致，由於顆粒在沙丘的迎水面，受到邊界層與勢流區的交互影響大於水流強度影響。

以 e 、 f 值來看，其值保持了不受水流條件影響，也不受顆粒多的影響，單顆與三顆的值是差不多的。

沙丘型底床的入射角與反射角皆較平底床為大且更隨機，此間接說明了沙丘型底床的 e 、 f 值較不受水流影響的原因。

五、二維沙丘型底床單一顆粒躍移模式

5.1 流場的建立

將實際之底床依照 1:1 的比例建制計算網格，並以 Standard $k-\varepsilon_1$ Model (1972) 來求解。Standard $k-\varepsilon_1$ model 為一個建立輸砂公式對於紊流動能 (k) 和它的消散比率 (ε_1) 之半經驗模式。

Launder and Spalding (1974) 提出紊流場中大渦流之尺度 (l_b) 與紊流動能 (k) 與動能消散率 (ε_1) 有關，其關係如式 (6)：

$$l_b = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon_1} \quad (6)$$

而紊流黏滯係數 (ν_T) 為紊流動能 (k) 與動能消散率 (ε_1) 之函數，紊流動能 (k) 愈大或動能消散率 (ε_1) 愈小，則紊流黏滯係數愈大，其關係如式 (7)：

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon_1} \quad (7)$$

其中， c_μ 為模式參數。因此 $k-\varepsilon_1$ 紊流模式是一種加入求解亂流動能 (k) 及動能消散率 (ε_1) 之半經驗模式，在二維流場中包含六個控制方程式，包括連續方程式、動量方程式、紊流動能方程式、動能消散率方程式，以求解六個未知數 (u_i 、 P 、 ε_1 、 ν_T)。

5.2 顆粒運動方程式

顆粒力平衡

利用 Lagrangian method 法，以顆粒上之力平衡來預測顆粒的軌跡，其運動方程式為：

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \vec{F}_G + \vec{F}_v + \vec{F}_L \quad (8)$$

a. $\vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ 為單一顆粒質量之曳力

$$\vec{F}_D = \frac{18\mu}{\rho_p D^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (9)$$

u 為水流速度， u_p 為顆粒速度， μ 為水流動力黏滯係數， ρ 是流體密度， ρ_p 為顆粒密度， D 為顆粒的直徑， Re 為相關雷諾數，定義如下：

$$\text{Re} \equiv \frac{\rho D |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (10)$$

$$C_D = \begin{cases} 0.424 & \text{Re} > 1000 \\ \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{2/3}\right) & \text{Re} \leq 1000 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p) = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_p D} (\vec{u}_p - \vec{u})(\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (12)$$

b. 有效重力

$$\vec{F}_G = \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (13)$$

c. 虛質量效應力

\vec{F}_v 為虛質量效應力，此力為運動顆粒與相鄰流體間相對加速度產生的水壓力所造成：

$$\vec{F}_v = -\frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (14)$$

d. Saffman's 升力

歸納 Saffman (1965) 之結果，Li and Ahmadi (1992) 假設

$$\bar{F}_L = \frac{2Kv^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (\bar{u} - \bar{u}_p) \quad (15)$$

其中 $K=2.594$ 而 d_{ij} 為張量。

5.3軌跡方程式積分，求解運動方程式

軌跡方程式，將式(8)對時間逐步積分可解出沿著躍移軌跡的顆粒速度。另一方面，利用軌跡本身也可以寫出另一個方程式：

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{u}_p(x,t) \quad \frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{u}_p(y,t) \quad (16)$$

與式(8)相同，式(16)用來解所有方向的座標來預測顆粒之軌跡。假設此項包含在很短時間內顆粒的內力仍然維持常數，作用在顆粒上的力則呈現線性關係，如此一來，軌跡方程式則可以寫成較簡單之型式：

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = \frac{1}{T_p} (\bar{u} - \bar{u}_p) \quad (17)$$

T_p 為顆粒的鬆弛時間。使用trapezoidal scheme來對5-14式做積分

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{T} (u^* - u_p^{n+1}) + \dots \quad (18)$$

n 表示疊代次數

$$u^* = \frac{1}{2} (u^n + u^{n+1}) \quad (19)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t u_p^n \cdot \nabla u^n \quad (20)$$

式(16)和式(17)同時被用來計算顆粒在任何時間的速度跟位置。圖5.2為顆粒躍移軌跡示意圖，其中標示了顆粒上所受各力的方向。

5.4邊界條件(底床碰撞機制)

將實驗時求得之碰撞係數 e 及摩擦係數 f 代入模式中作為顆粒碰撞底床的邊界條件。

5.5初始條件

將顆粒放在 $x = 0.85m$ 、 $y = 0.005m$ 的位置， x 、 y 方向起始速度皆給 $0 m/s$ ，讓顆粒隨水流前進，與底床產生連續碰撞後而開始躍移行為，在連續三個沙丘底床上碰撞後，取中間底床的躍移行為觀察分析。

六、沙床型躍移模式之模擬結果討論

應用本模式進行 21 組模擬(3 種粒徑×7 種水流條件)，設計與實驗相同之水流強度 T_* ，來模擬不同粒徑(0.5mm、1mm、6mm)之跳躍行為。利用 21 組實驗結果，可以迴歸出無因次躍移物理量如下：

$$\frac{sx}{D} = 2.45D_*^{-1.4775} T_*^{0.0762} \quad (R^2=0.68) \quad (21)$$

$$\frac{sy}{D} = 2.6D_*^{0.0573} T_*^{-0.0889} \quad (R^2=0.81) \quad (22)$$

$$\frac{sv}{u_*} = 0.12D_*^{0.0257} T_*^{-0.3241} \quad (R^2=0.83) \quad (23)$$

推移載輸砂量(q_b)等於顆粒濃度(C_b)、躍移高度(sy)與躍移速度(sv)的乘積，即 $q_b = C_b \times sy \times sv$ 。依據陳彥旭(1998)所蒐集之資料(0.19mm~0.93mm)，可得 C_b 與 D_* 、 T_* 之關係：

$$C_b (ppm) = 6.1875D_*^{-0.2835} T_*^{1.5483} \quad (R=0.84) \quad (24)$$

將式(22)-式(24)代入 $q_b = C_b \times sy \times sv$ 得：

$$q_b (m^3 / m \cdot s) = 1.9305 \times d_{50} \times u_* \times D_*^{-0.2005} \times T_*^{1.1353} \quad (25)$$

將計算結果與陳彥旭(1998)、游景雲(1999)、林穎典(2000)、Meyer-Peter & Muller(1948)與 Van Rijn(1984)所提出之輸砂公式作比較，如圖 6.1(a)~(f)所示。圖 12 之橫軸為量測之無因次輸砂強度

$$\Phi = \frac{q_b}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50}^3}}$$

結果之比值；由圖可看出，加上沙丘底床後計算結果與陳彥旭(1998)、游景雲(1999)、林穎典(2000)、van Rijn(1984)比較，已經修正高估值；與 Meyer-Peter & Muller(1948)比較，低估之範圍較小。造成低估的原因可能為模式考慮之底床坡度為沙丘所能達到的最大坡度及未考慮顆粒相互碰撞、級配、形狀因數等原因。

七、誌謝

本研究承蒙 國科會提供研究經費及台大水工試驗所提供試驗場地，謹致謝忱。

八、參考文獻

1. B. E. Launder and D. B. Spalding. " Lectures in Mathematical Models of Turbulence," Academic Press, London, England, 1972.
2. Einstein, H. A. and E.A. El-Sammi. "Hydrodynamic forces on a rough wall," Rev. Modern Phys., Vol.21, No.3 , pp.520-524, 1949.
3. Karahan, M. E. and A. W. Peterson, "Visualization of Separation Over Sand Waves" , J. Hyd. Div. Proc., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol.106, No. HY8, Aug. 1980, pp.1345~1352
4. Lee, H.Y., and Hsu, I.S., "Investigation of Saltating Particle Motions," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.7, pp.831-845. 1994.
5. Lee, H.Y., Chen, Y. H. You, T.Y., and Lin, Y.T., "Investigations of Continuous Bed Load Saltating Process", ASCE Journal of Hydraulic Engineering. (in press)
6. Lee, S.Y , "Investigations of the Particle Saltating Process Near the channel Bed" , MS Thesis, Dept. of Civil Engineering, National Taiwan University, June 1993 (in Chinese) .
7. Nino, Y., Garcia, M. and Ayala, L., "Gravel Saltation 1. Experiments," Water Resources Research, Vol.30, No.6, pp.1907-1914, 1994.
8. Yalin. M. S. and E. Karahan, "Steepness of Sedimentary Dunes", J. Hyd. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs.

表 1.1 躍移顆粒性質與水流條件

	粒徑 (m)	顆粒 個數	密度 (kg/m^3)	沙丘 坡度	u_* (m/s)	u_{*c} (m/s)	u (m/s)	h (m)	Fr	ξ	θ	θ_c	T_*
S-1	0.006	1	1061	0.06	0.0247	0.012	0.367	0.050	0.523	1.90	0.170	0.040	3.253
C-1	0.006	3	1061	0.06	0.0247	0.012	0.367	0.050	0.523	1.90	0.170	0.040	3.253
S-2	0.006	1	1061	0.06	0.0130	0.012	0.282	0.090	0.301	3.43	0.047	0.040	0.169
C-2	0.006	3	1061	0.06	0.0130	0.012	0.282	0.090	0.301	3.43	0.047	0.040	0.169
S-3	0.006	1	1061	0.06	0.0142	0.012	0.309	0.090	0.329	3.43	0.056	0.040	0.397
C-3	0.006	3	1061	0.06	0.0142	0.012	0.309	0.090	0.329	3.43	0.056	0.040	0.397
S-4	0.006	1	1061	0.06	0.0139	0.012	0.325	0.100	0.328	3.81	0.054	0.040	0.339
S-5	0.006	1	1061	0.06	0.0179	0.012	0.329	0.070	0.398	2.67	0.089	0.040	1.230
S-6	0.006	1	1061	0.06	0.0197	0.012	0.363	0.070	0.438	2.67	0.108	0.040	1.711
S-7	0.006	1	1061	0.06	0.0400	0.012	0.517	0.040	0.826	1.52	0.446	0.040	10.146

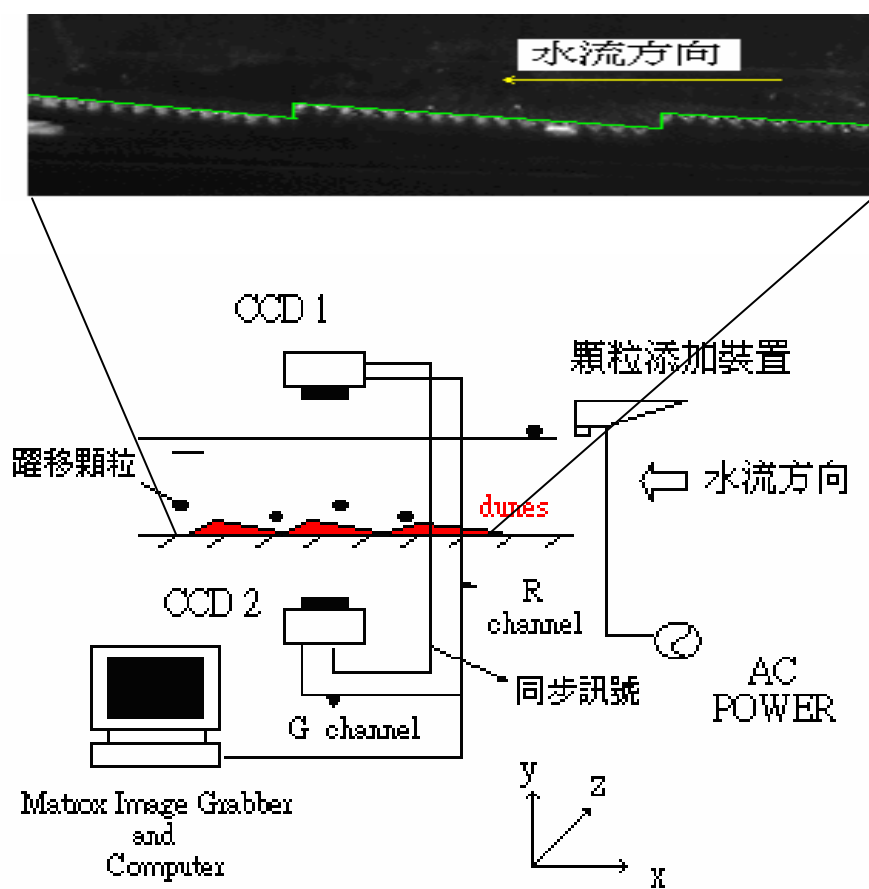


圖 1.1 實驗佈置圖

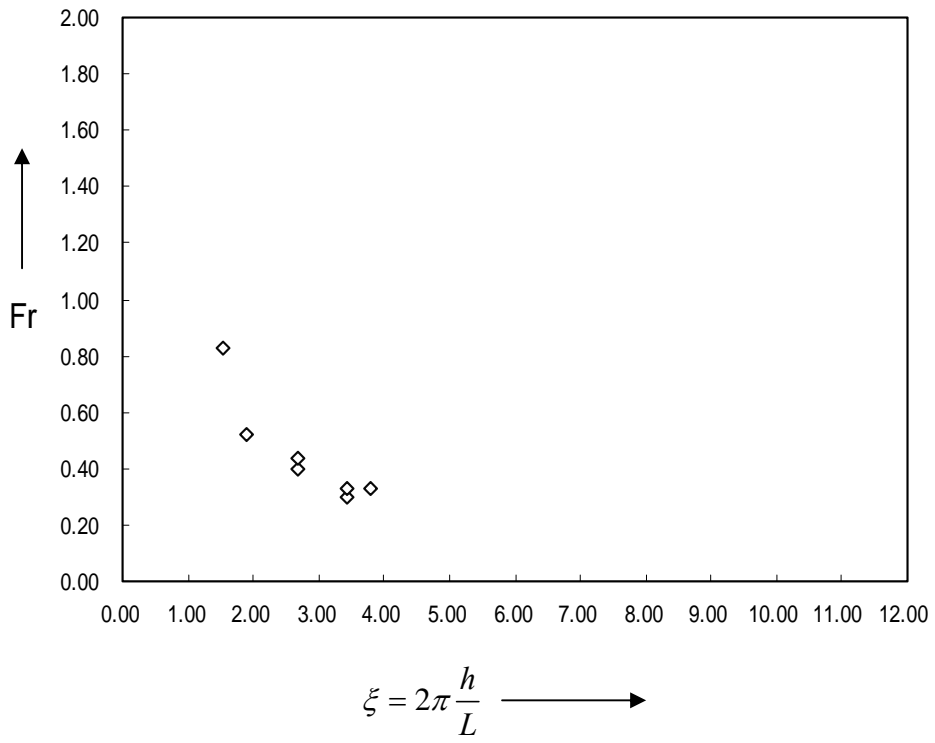


圖 1.2 實驗水流條件

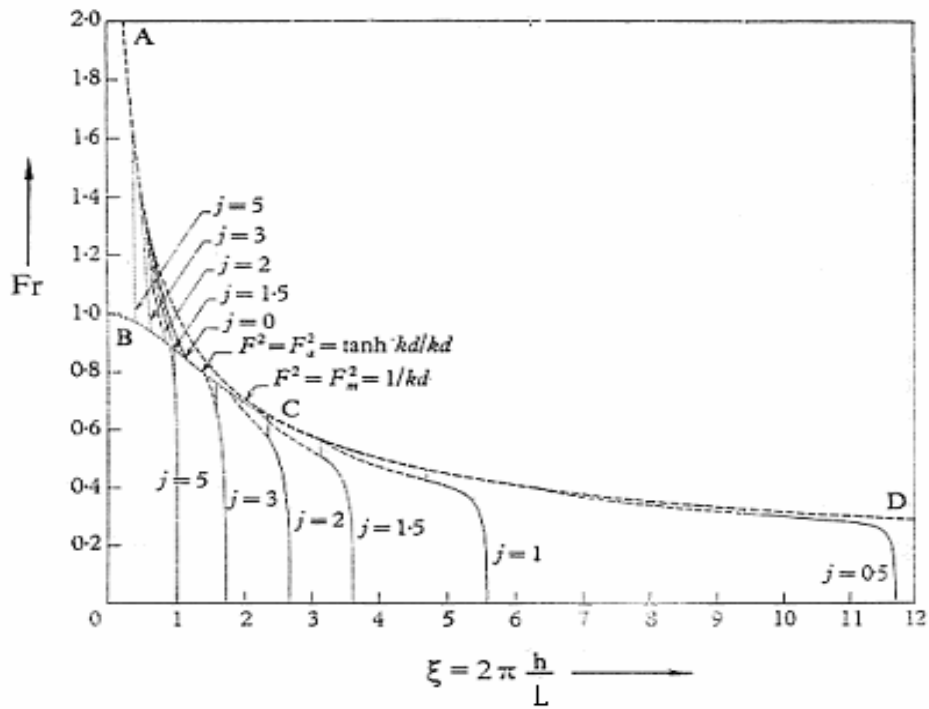


圖 1.3 沙丘水流條件

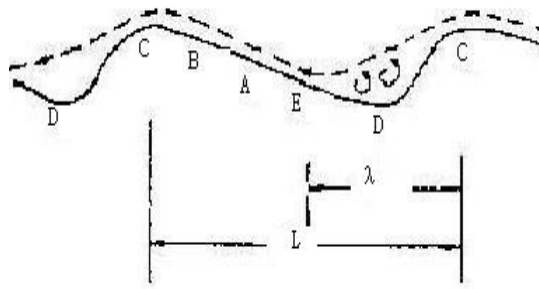


圖 2 沙丘上的流線分佈

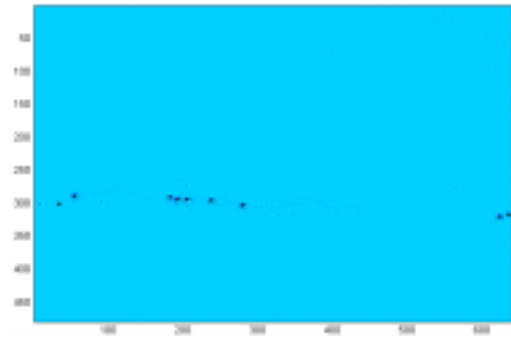


圖 5 用 Matlab 分析原始圖像所得移動點(x-y)

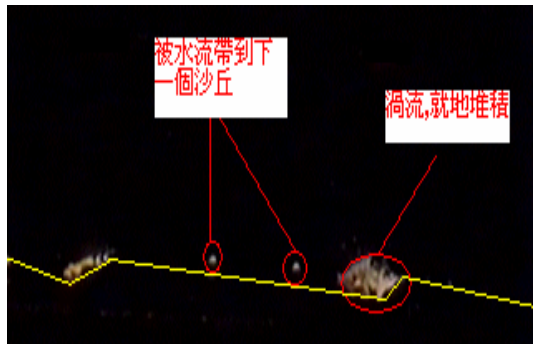


圖 3 顆粒移動圖

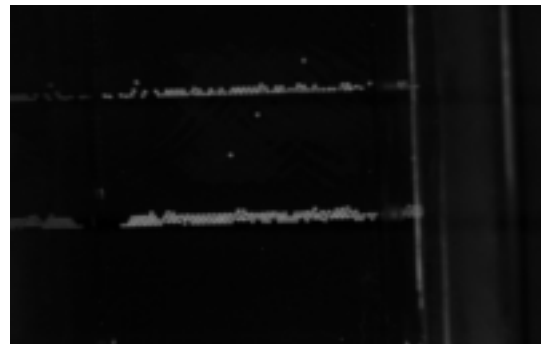


圖 6 CCD 相機所擷取原始圖像(x-z)



圖 4 CCD 相機所擷取原始圖像(x-y)

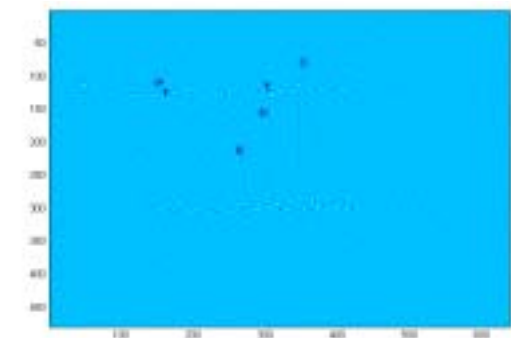


圖 7 用 Matlab 分析原始圖像所得移動點(x-z)

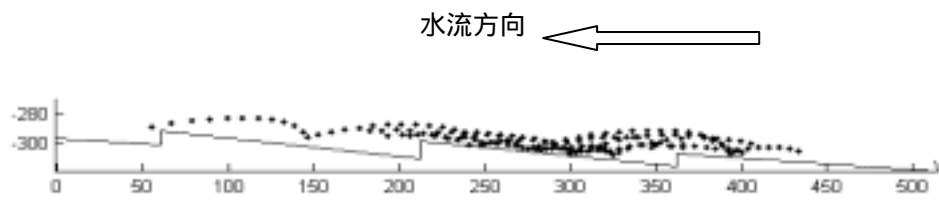


圖 8 用 Matlab 分析實驗影像軌跡圖(x-y)

水流方向

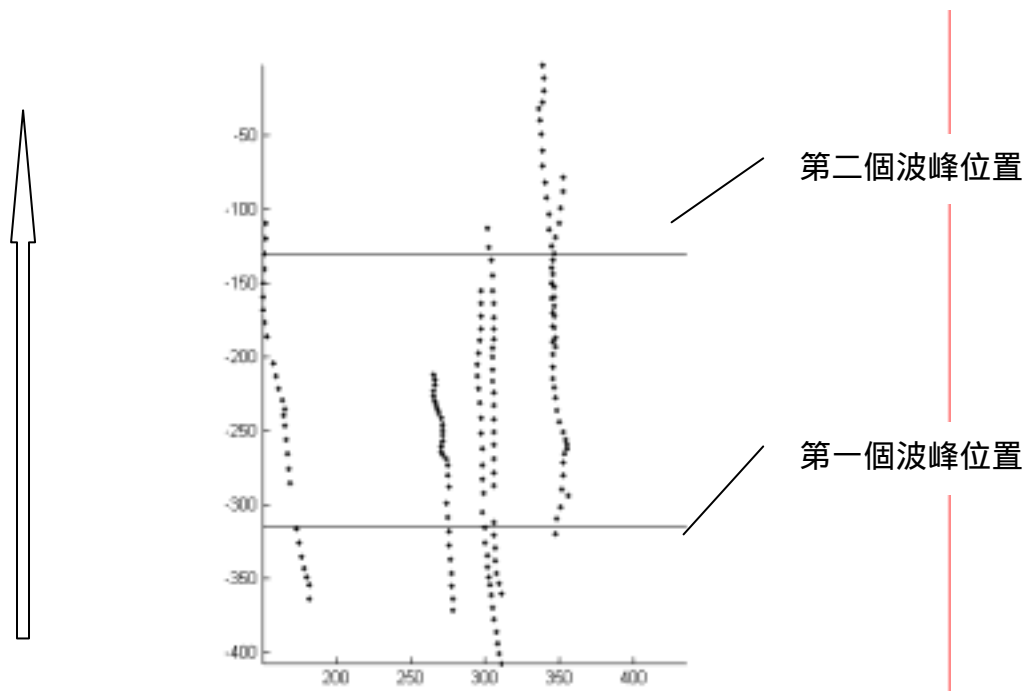


圖 9 用 Matlab 分析實驗影像軌跡圖(x-z)

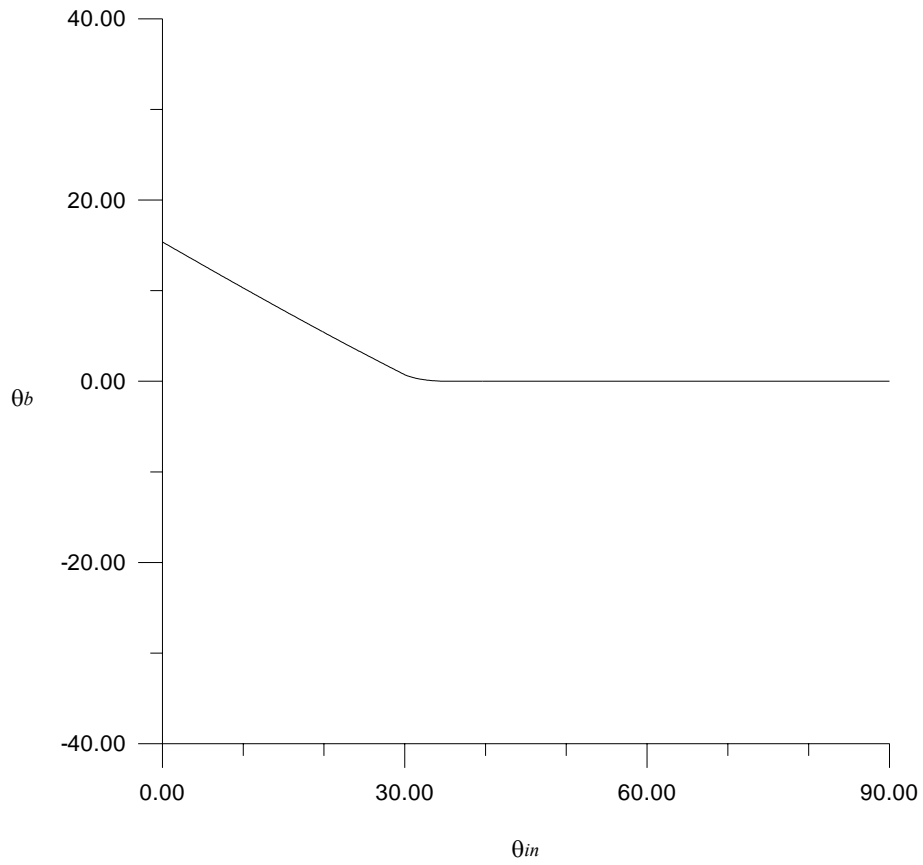


圖 10 散佈函數 (splash function)

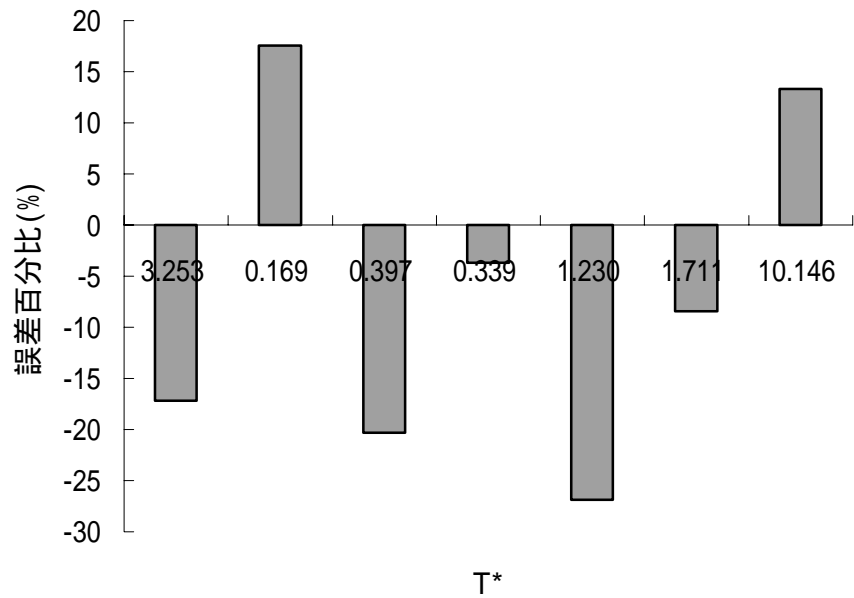
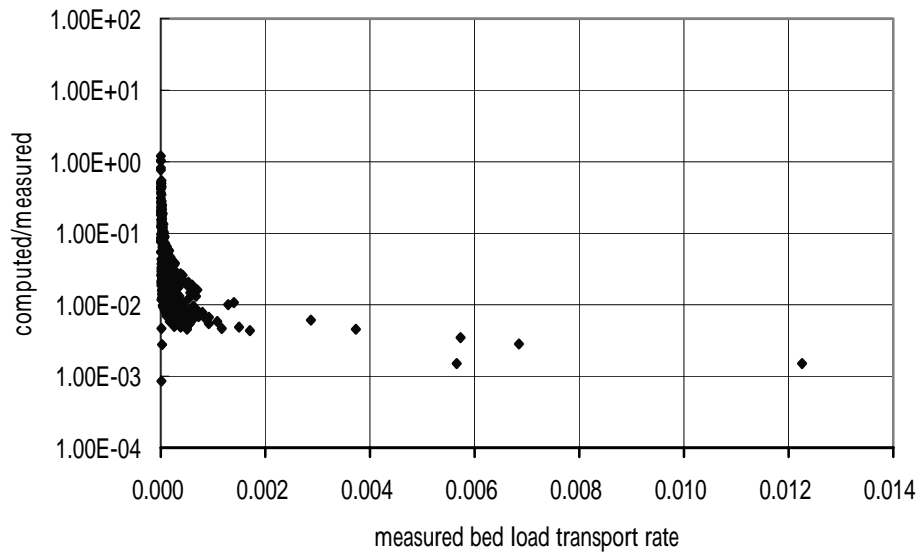
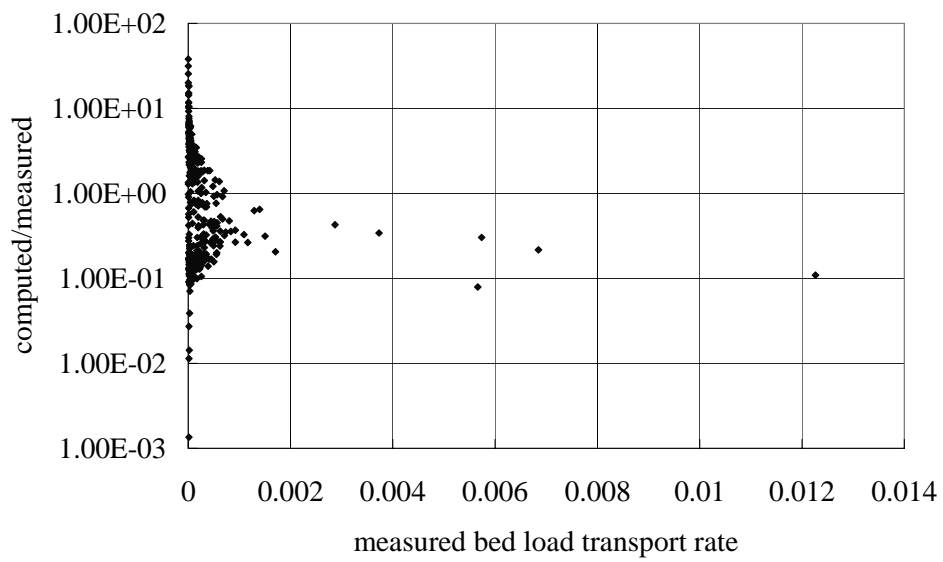


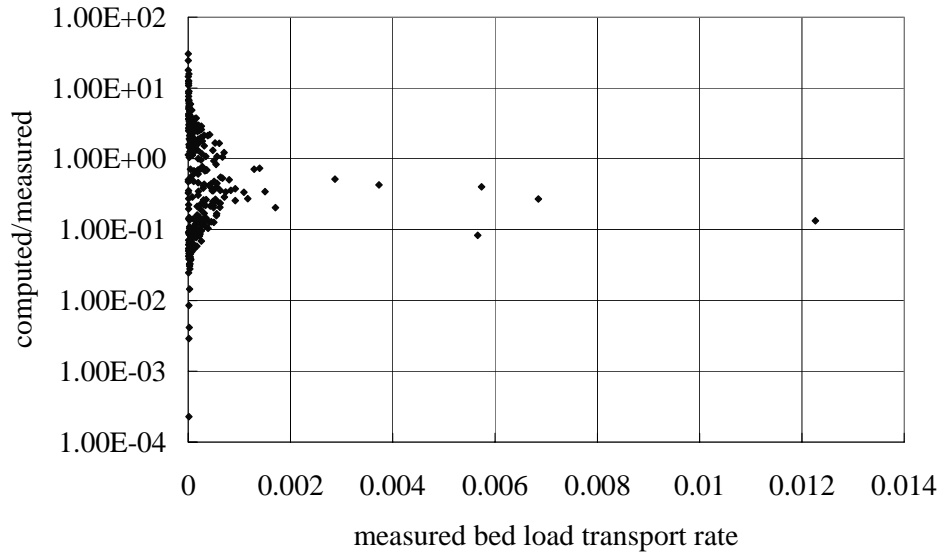
圖 11 單顆粒 e 值誤差百分比



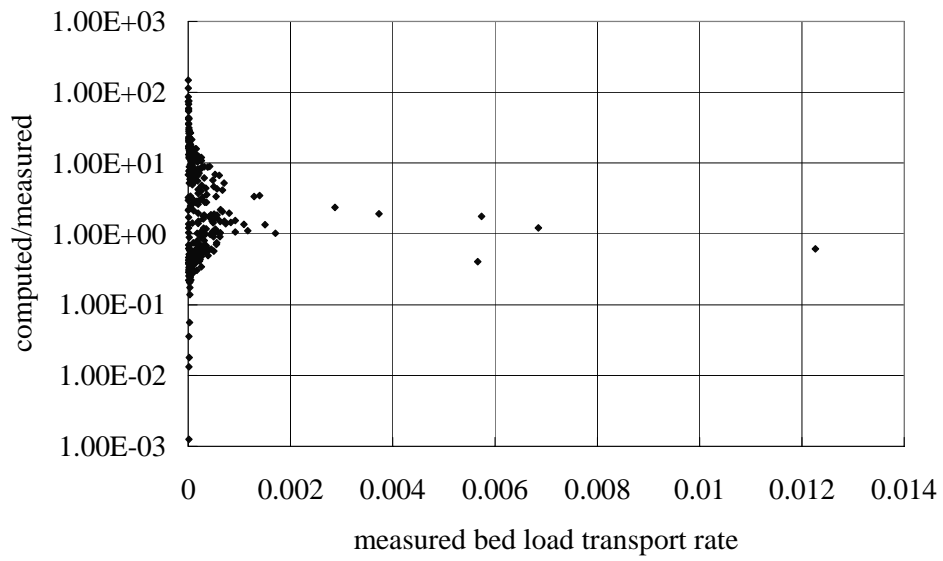
(a) Weng (2D single-particle saltating model of dune)



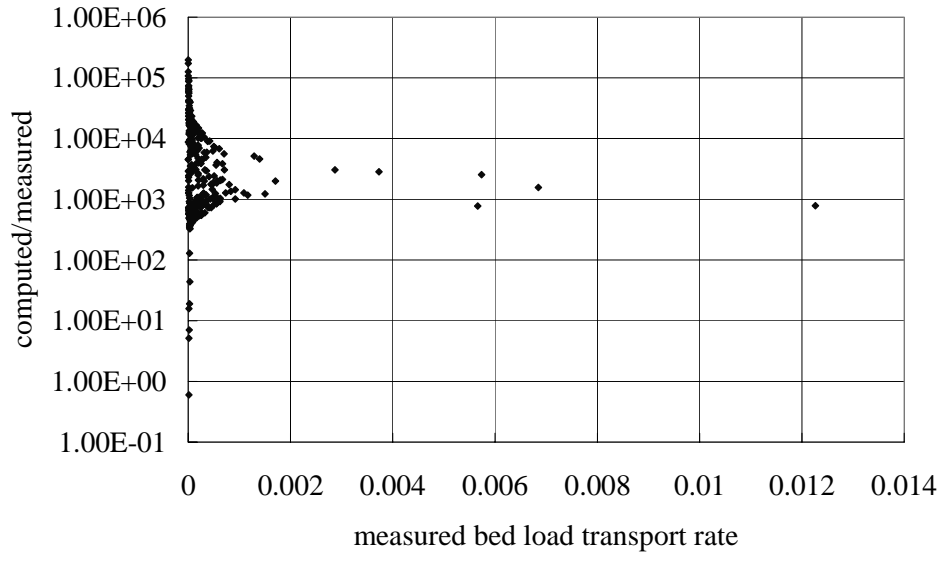
(b) Lin (3D single-particle saltating model)



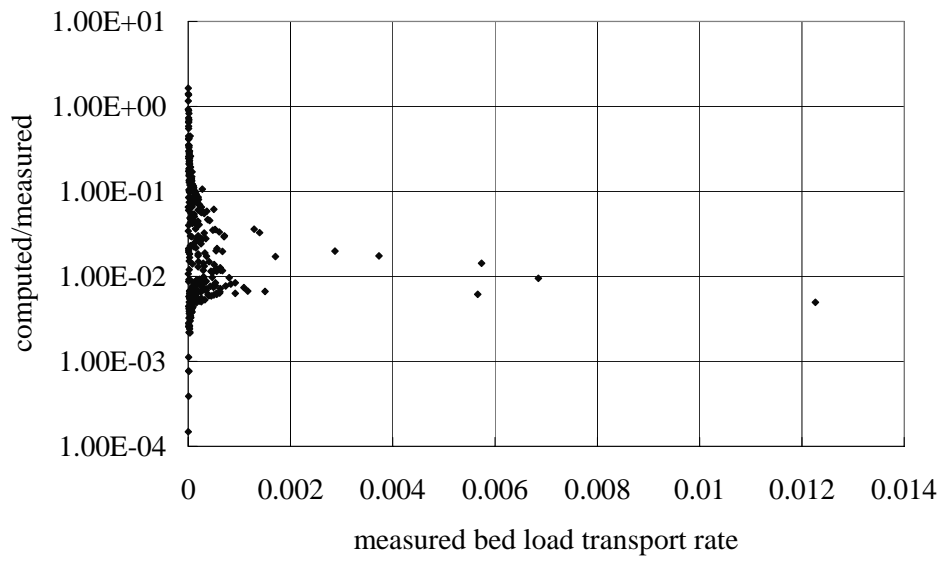
(c) Chen (2D single-particle saltating model)



(d) You (2D multi-particle saltating model)



(e) Rijn



(f) MPM

圖 12 無因次輸砂強度比較圖