

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

近床區域三維多顆粒泥砂連續躍移模式之研究

Investigations of the three-dimensional multi-particles

continuous saltation process near the channel bed

計畫編號：NSC 89-2211-E-002-144-

執行期限：89年8月1日至90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：林穎典 國立台灣大學水工試驗所

一. 摘要

在一般水流條件下推移載中泥砂顆粒以躍移方式運動佔大部份 (Einstein(1942)、Sekine and Kikkawa (1984, 1988, 1992)及 Wiberg and Smith(1988, 1989)等), 故本研究主要在探討泥砂顆粒躍移的運動機制。

前人所做的實驗中, 主要針對二維泥砂顆粒與底床間的碰撞行為及泥砂顆粒間的運動型態作探討 (Garcia and Nino(1994, 1998)、陳彥旭(1998)、游景雲(1999)), 獲得不錯的成果; 但由於僅觀測二維之泥砂運動型態, 並不能完全契合實際情況。本研究期望以實驗方式模擬三維泥砂顆粒與底床間的碰撞行為及泥砂顆粒間的運動型態, 並藉助三維動態影像數位化系統來觀測明渠流中近床顆粒間的碰撞行為並進行力學分析, 進而修正前人所建立的躍移模式以建立多顆粒連續躍移運動的三維數值模式, 並藉此模式探討顆粒群躍移的運動特性, 以提供泥砂運動研究之參考。

關鍵詞：推移載、躍移、碰撞機制、三維動態影像數位化系統。

Abstract

According to previous investigators (Einstein (1942), Sekine and Kikkawa (1984, 1988, 1992) and Wiberg and Smith (1988, 1989)), most of the bed load particles are transport in a saltating mode and hence is investigated in this study.

A series of studies regarding the 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. However, the collision models they proposed were two dimensional models and can not really reflect the three dimensional behaviors. A three dimensional flow visualization technique will be developed in this study to measure the three dimensional collision process. Basing on these measurements a three dimensional collision model will be proposed. Combing with the saltating model of our previous studies, a three dimensional saltating model for multiple sediment particles will be established. This model will be very helpful in estimating the quantity of the bed load transport

rate.

Keywords : Bed load, Saltation, Collision mechanism, 3-D flow visualization technique

二.緣由與目的

泥砂運動一般可分為推移載(bed load)及懸移載(suspended load)，推移載顆粒在水中的運動隨著水流強弱不同而有滑動(sliding)、滾動(rolling)、躍移(saltation)及懸移(suspension)等不同型式，Einstein(1942,1949)認為躍移質為推移質之主體，所以泥砂躍移的研究將成為研究推移載問題之中心課題；回顧前人的研究(Garcia and Nino(1992,1994)、Lee et al.(2000))，大致已呈現出一完整的理論基礎，但模擬情形僅限於二維的泥砂運動，且對於多顆粒泥砂躍移的機制瞭解不多，因此三維多顆粒泥砂躍移的理論機制急待建立，以符合實際的輸砂行為。本研究藉助一套新穎的三維動態影像數位化系統(3-D flow visualization technique)來研究明渠中近床三維多顆粒的躍移運動特性，以前人的二維單顆粒單步躍移模式加上隨機底床碰撞機制及二維顆粒碰撞力學機制為基礎，建立多顆粒連續躍移運動的三維數值模式，並藉此模式探討顆粒躍移的運動特性，以提供泥砂運動研究之參考，希望能對泥砂運動的進一步研究有所幫助。

三.結果與討論

a.實驗結果分析

躍長(saltation length, SL)為每一躍移之長度、躍高(saltation height, SH)為每一躍移

之 y 方向的相對最大高度、躍寬(saltation width, SW)為每一躍移於 z 方向的最大位移量、平均躍移速度(average saltation velocity, SV)為每一躍移之平均速度及躍移軌跡最高點之位移佔躍移長度之比例($L1/L$)；以上各項物理量的變異係數皆很大，這代表了整個顆粒躍移運動的隨機性。

將各物理量無因次化後，發現躍移長度大約介於12.28~30.75倍粒徑之間，躍移高度介於2.06~2.92倍粒徑之間，躍寬大約介於1.11~1.68倍粒徑之間，躍移平均速度大約介於8.16~9.95倍剪力速度。這些無因次量皆隨顆粒參數 D_* 及水流強度 T_* 的增加而增大。將躍移長度、高度、寬度及平均速度分別除以其平均值推估其分佈情形，並經過卡方檢定測試，檢定結果發現只有躍移平均速度之分佈為一常態分佈(Normal Distribution)，而其餘三者則以考慮平均值、標準偏差及偏態係數的Pearson Type III Distribution表示。

以底床碰撞及其前後點計算在 $x-y$ 及 $x-z$ 平面之起跳角與降落角，在縱向($x-y$ 平面)的平均起跳角約介於18~32度，平均降落角約為7~15度，橫向($x-z$ 平面)的平均起跳角約介於5~12度，平均降落角約為3~5度；以上的物理量皆隨水流強度的增加而減小，在同一顆粒參數 D_* 下，其增加的趨勢更為明顯。

在躍移顆粒底床碰撞方面， $x-y$ 平面上，反射角範圍約為入射角的兩倍，而且反射角的大小並不會因為入射角大小的不同，而有特別明顯的改變； $x-z$ 平面上，反射角範圍也約為入射角的兩倍，在不同入射角的範圍下，反射角約為常態分佈，但其上下限會隨入射角的增加而增大。

摩擦係數 f 為一定值，其平均值大約為0.96，表示碰撞之後相對於碰撞面的切線速度約有百分之九十六呈現守恆。碰撞係數 e 分佈的範圍介於0.3~0.7之間，隨水流強度的增加而減少。表示碰撞後，相對於碰撞面的法線

速度變化，大約只有 30%~70%轉換成向上速度，當水流越強，會抑制顆粒起跳的速度，使 e 值越小，由實驗結果可得出的一條迴歸直線： $e = 0.59 - 0.045T_*$ 。而底床碰撞能量損失係數 k_b ，不會隨水流強度而有所變化，其平均值約等於 0.75。

b. 模擬結果分析

進行 100 組（10 種粒徑×10 種水流條件）模擬，粒徑的分佈為 0.00625mm ~ 0.2mm，水流強度 T_* 為 1.58~100，利用模式執行 110 次連續跳躍，取後 100 次的平均結果，探討不同水流強度及不同粒徑條件下顆粒的躍移特性，模擬結果發現 SL/D 、 SH/D 、 SW/D 、 SV_x/D 值會隨著 T_* 及 D_* 的增加而增大。

將數值模擬所得出的躍高、躍長、躍寬、平均躍移速度分別除以其平均值，得出如同實驗的分佈情形，但仍有一些差異的存在。由 110 組數值模擬的平均結果，可迴歸出無因次躍移物理量如下：

$$\frac{SL}{D} = 2.2583D_*^{0.1543}T_*^{0.9132} \quad (R=0.8217)$$

$$\frac{SH}{D} = 0.3010D_*^{0.4522}T_*^{0.3345} \quad (R=0.7718)$$

$$\frac{SW}{D} = 0.3521D_*^{0.0683}T_*^{0.8606} \quad (R=0.8472)$$

$$\frac{SV_x}{U_*} = 3.099D_*^{0.1537}T_*^{0.1381} \quad (R=0.9662)$$

$$\frac{SV_z}{U_*} = 0.4522D_*^{0.0906}T_*^{0.080} \quad (R=0.7741)$$

推移載輸砂量 (q_b) 等於顆粒濃度 (C_b)、躍移高度 (SH) 與縱向躍移速度 (SV_x) 的乘積，即 $q_b = C_b \times SH \times SV_x$ 。就其中一組資料（共 315 筆數據，9 種粒徑 (0.19mm~0.93mm)）分析推移質濃度 C_b 與 D_* 、 T_* 的關係如下所述：

$$C_b(ppm) = 6.1875D_*^{-0.2835}T_*^{1.5483} \quad (R=0.8400)$$

可得輸砂率公式如下：

$$q_b(m^3/m \cdot s) = 5.77k d_{50} \times u_* \times D_*^{0.3230} \times T_*^{2.0209} \times 10^6$$

將計算結果與陳彥旭(1998)、游景雲(1999)、Meyer-Peter & Muller(1948)與 Van Rijn(1984)所提出之輸砂公式作比較，計算結果略微偏小，但較陳彥旭、游景雲、Meyer-Peter & Muller(1948)與 Van Rijn(1984)為佳。誤差的原因研判係因為模式未考慮顆粒相互碰撞、床形變化、級配、形狀因子等原因。此外由於模式中迴歸出了橫向速度與 D_* 及 T_* 的關係，因此亦可推得橫向推移質輸砂量 (q_{bn})，等於顆粒濃度 (C_b)、躍移高度 (SH) 與縱向躍移速度 (SV_x) 的乘積，即 $q_{bn} = C_b \times SH \times SV_x$ ，利用資料分析可得輸砂率公式：

$$q_{bn}(m^3/m \cdot s) = 0.42k d_{50} \times u_* \times D_*^{0.2593} \times T_*^{1.9627} \times 10^6$$

利用實驗資料計算，可發現橫向輸砂量約為縱向輸砂量的 10%，這需要收集更多的現場資料，以供後續之研究與發展。

四. 計畫成果自評

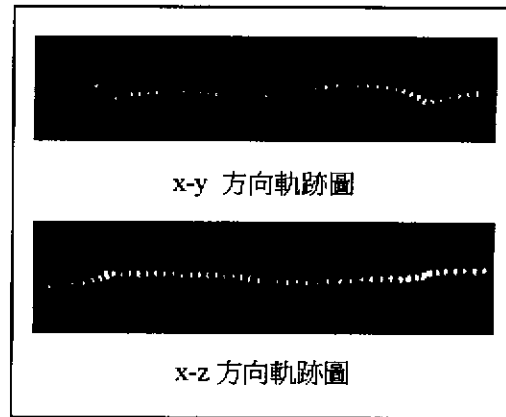
本研究發展出一套三維動態數位化系統，可在快速經濟且方便的條件下，分析三維泥砂顆粒躍移運動。

躍移顆粒與底床碰撞實驗中，本研究量得大量實驗資料，分析得到碰撞係數、摩擦係數及等床碰撞能量損失係數，有助於三維泥砂顆粒連續躍移模式之建立；藉由本研究三維底床之幾何關係及底床碰撞點具有隨機性之概念所推導之三維底床碰撞模式，配合實驗量測參數，發展出三維泥砂顆粒連續躍移模式，並經由率定及驗證，確定模式之適用性。

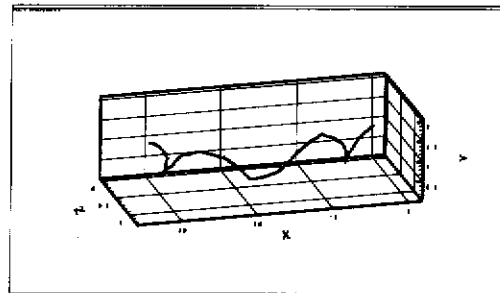
本研究已初步建立三維單一顆粒連續躍移模式，未來可結合統計及數值方法，推求多顆粒交互作用下之泥砂輸砂率。

五. 參考文獻

1. 許盈松(1996),「近床區域泥砂運動之研究」,國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
2. 游景雲(1999),「多顆粒泥砂連續躍移模式之研究」,國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
3. 胡春宏、惠遇甲(1995)「明渠挾砂水流運動的力學和統計規律」,科學出版社。
4. 錢寧、萬兆惠(1983),「泥砂動力學」,科學出版社。
5. Coleman N.L.(1967), "A Theoretical and Experimental Study of Drag Lift Forces Acting on a Hypothetical Stream Bed." Proceedings, 12th Congress International Association for Hydraulic Research, Vol.3, 1967, pp.184-192.
6. Francis J.R.D, "Experiments on Motion of Solitary Grains Along the Bed of Water Streams", Proc. Royal Soc., London, England, Vol.284, A, 1977, pp.1321.
7. Lee H.Y and Hsu I.S., "Investigation of Saltating Particle Motions," Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, Vol.120, No.7, 1994, pp.831-845.」

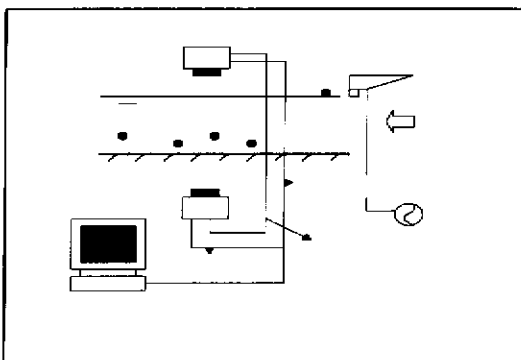


圖二 實驗影像



圖三 數位化軌跡

六、附圖



圖一 實驗配置圖