

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※

※                            **躍移過程中顆粒間碰撞行為之研究**                            ※

※※※

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-041-

執行期間：91年8月1日 至 92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 92 年 9 月 15 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 躍移過程中顆粒間碰撞行為之研究

### Investigations of the interparticle collision mechanism during the saltation process

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-041-

執行期限：91年8月1日至92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：王筱雯 國立台灣大學水工試驗所

#### 一. 摘要

本研究利用一套三維即時影像數位化系統，對明渠中近床顆粒之躍移行為進行觀測，研究其泥砂顆粒在空間中與底床之碰撞行為力學機制，並以實驗觀測資料為基礎，建立一三維近床多顆粒泥砂連續躍移之數值模式，藉此模式探討泥砂碰撞的特性。此數值模式經過率定和驗證，得到相當滿意的結果，並進而結合數值模式之模擬結果與實測資料，迴歸出輸砂率公式，提供相關研究之參考。

關鍵詞：推移載、躍移、碰撞機制、三維動態影像數位化系統。

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the interacting mechanism between the saltating particles near the channel bed. A three-dimension real-time flow visualization technique was developed to measure the interparticle collision behaviors during the saltating process. Basing on the experimental data, a three-dimensional saltating model was also developed.

This model was calibrated and verified with the experimental data collected with satisfactory results. The model is able to simulate the continuous saltating trajectories of several particles. Regression equations for the saltating height and velocity were obtained.

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；目前前人的研究(Garcia and Nino(1992,1994)、Lee et al.(2000))已發展到單顆粒的躍移模式，至於多顆粒的泥砂躍移模式(Gotoh, Tsujimoto and NakaGawa, 1994)亦缺少以實驗數值為依據之理論基礎，所以本研究

從實驗著手，作為三維多顆粒泥砂運動模式之理論基礎。本研究將以實驗為基礎，探討明渠中近床泥砂之運動特性，進而建立一包含顆粒與底床碰撞與空間顆粒相互碰撞之三維多顆粒連續躍移數值模式，提供相關研究之參考。

### 三.三維多顆粒連續躍移模式

顆粒運動過程中所受的主要作用力：包括重力、浮力、虛質量效應力、升力及曳力，在三維明渠水流作用下，根據牛頓第二運動定律，可以得到顆粒躍移運動方程式如下：

$$m\ddot{x} = F_L \cdot \left( \frac{\dot{y}}{u_r} \cdot \frac{u - \dot{x}}{\sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{z}^2}} \right) + F_D \cdot \left( \frac{u - \dot{x}}{u_r} \right) + F_G \sin\theta$$

$$m\ddot{y} = F_L \cdot \left( \frac{\sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{z}^2}}{u_r} \right) - F_D \cdot \frac{\dot{y}}{u_r} - F_G \cos\theta$$

$$m\ddot{z} = F_L \cdot \left( \frac{\dot{y}}{u_r} \cdot \frac{\dot{z}}{\sqrt{(u - \dot{x})^2 + \dot{z}^2}} \right) + F_D \cdot \left( \frac{\dot{z}}{u_r} \right)$$

其中， $m$  為顆粒總質量（顆粒實際質量及虛質量之和）， $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ 、 $\dot{z}$  分別為顆粒縱向、橫向及垂向的速度， $\ddot{x}$ 、 $\ddot{y}$ 、 $\ddot{z}$  分別為顆粒縱向、橫向及垂向的加速度， $\theta$  為渠床坡度。

將上述之運動方程式降階為一階常微分方程式，接著採用 Runge-Kutta with Gills method 數值方法求解降階後的一階常微分方程式。經由數值方法計算，可求得顆粒躍移的軌跡和躍移過程的速度、加速度以及各主要作用力大小的變化等運動和動力特性。

模式之模擬主要分為運動方程式之求解、底床碰撞之運算與顆粒間碰撞之運算三部分。運算流程為在時間前進方向求解躍移動力方程式，並檢驗是否達到底床碰撞與顆粒碰撞的條件，顆粒間碰撞與底床碰撞在同一時間內

僅能擇一發生。碰撞機制選擇之優先順序為底床碰撞，然後才是顆粒碰撞。碰撞發生為瞬間之情形，因此模式在處理碰撞過程時時間不會前進，處理完再解動力方程式。

## 四.結果與討論

### a.模擬結果

以三維多顆粒連續躍移模式來模擬顆粒躍移行為，在四種水流條件下分別模擬六種顆粒之躍移行為。於模式運算的初始時間，在  $X=0$  之邊界平面上均勻加入多顆粒泥砂進行追蹤。顆粒軌跡示意如圖 1 所示。

圖 2 與 3 為利用三維多顆粒連續躍移模式所計算出之最大躍移高度與躍移速度，將模擬出之 24 組資料迴歸所得無因次躍高與無因次躍移速度公式如下所示：

$$\frac{SH}{D} = 1.091 \cdot D_*^{0.330} T_*^{0.501}$$

$$\frac{SV}{U_*} = 3.053 \cdot D_*^{0.171} T_*^{0.201}$$

由模擬結果可以看出， $SH/D$  與  $SV/U_*$  值皆會隨著水流參數  $T_*$  及顆粒參數  $D_*$  的增加而增大，而在相同  $T_*$  下， $D_*$  愈大，其值也愈大。且躍移厚度為三維單顆粒躍移平均躍高的 1.2~1.8 倍，且為二維多顆粒躍移平均躍高的 0.7~0.8 倍。多顆粒同時疊加造成躍高的提升；又躍移層的厚度比二維多顆粒躍移模式所推求之厚度低，乃是由於多加入一個維度的考量，碰撞情形發生與否的條件判斷更為嚴謹，少了在二維模式中誤判碰撞使顆粒疊加的影響。

圖 4 為模擬顆粒的縱向、橫向與垂

向速度的沿程變化。由圖中可看出縱向速度有漸小的趨勢；垂向速度值在正負之間不斷循環，表示顆粒在碰撞底床間的上升與下降情形；橫向速度量值較縱向速度與垂向速度為小，但仍具有一定的影響力。

### b. 輸砂率之推估

由於推移載量( $q_b$ )等於顆粒濃度( $C_b$ )躍移高度(SH)與躍移速度(SV)的乘積，即  $q_b = C_b \times SH \times SV$ ，若有足夠的現場或水槽試驗的輸砂量資料，配合前述所得的模擬結果回歸式，即可獲得顆粒濃度的回歸式，之後將可得到一以簡單參數表示的推移載輸砂量表示式。依據陳彥旭碩士論文中蒐集的四群資料，如下所示：

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

配合前述式子可得輸砂率如下：

$$q_b (\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}) = 20.6 \times d_{50} \times u_* \times D_*^{0.218} \times T_*^{2.250} \times 10^6$$

圖 5 為無因次輸砂強度  $\Phi = \frac{q_b}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50}^3}}$

輸砂公式之比較圖。比較結果發現利用本研究躍移模式所得之計算值與實際值之比值更趨近於 1，有較好的計算結果。

### 五. 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。

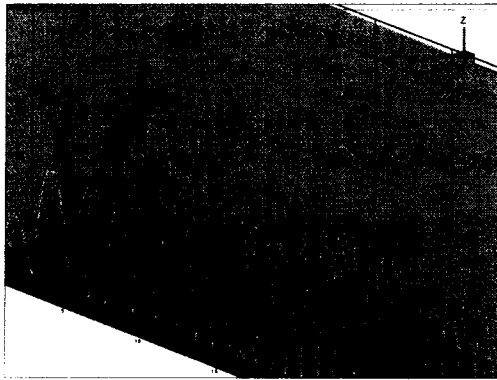
在三維多躍移顆粒相互碰撞實驗中，本研究量得大量實驗資料，分析後之實驗數據有助於三維泥砂多顆粒連續躍移模式之建立。

本研究已初步建立三維空間泥砂顆粒碰撞行為之特性，未來可加入如床型變化、間留效應等因子加以考量，可以有更明確之定性研究。

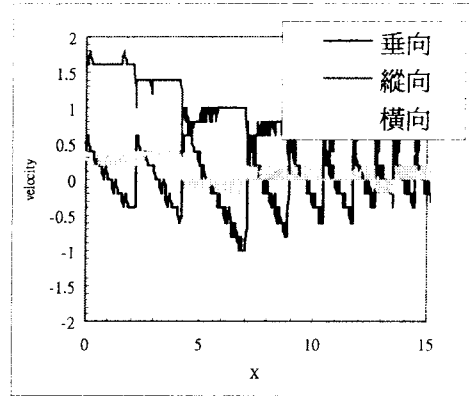
### 六. 參考文獻

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. 林穎典(2000)，「三維泥砂顆粒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。
4. 李博甯(2001)，「多顆粒泥砂連續躍移之碰撞機制」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
5. 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。
6. 錢寧、萬兆惠(1983)，「泥砂動力學」，科學出版社。
7. Coleman N.L.(1967), "A Theoretical and Experimental Study of Drag Lift Forces Acting on a Hypothetical Stream Bed." Proceedings, 12<sup>th</sup> Congress International Association for Hydraulic Research, Vol.3, 1967, pp.184-192.
8. 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.
9. 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.」

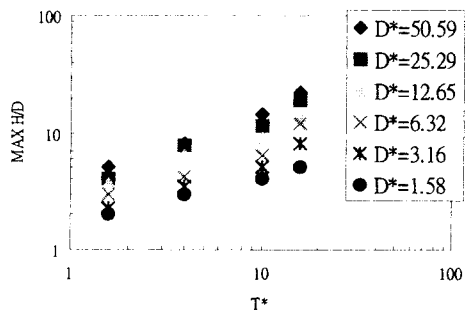
## 六、附圖



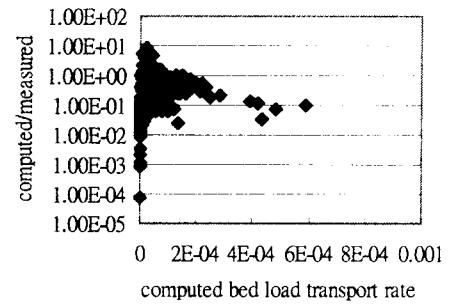
圖一 顆粒軌跡示意圖



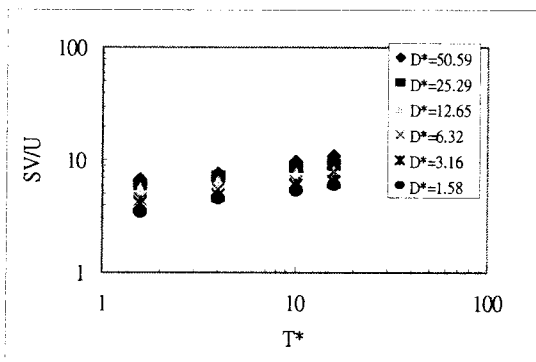
圖四 顆粒速度的沿程變化



圖二 模擬最大躍移高度



圖五 無因次輸砂強度



圖三 模擬躍移速度