

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

多顆粒連續躍移之碰撞機制

On Collision Mechanism of multiple continuous saltating particles

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-083-

執行期限：90年8月1日至91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：李博甯 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

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)。本研究發展一套三維即時顯影技術，研究顆粒在明渠中碰撞行為之力學機制，量測躍移顆粒間碰撞行為之實驗資料，以供未來建立三維近床多顆粒泥砂躍移模式，進而推估推移載，躍移顆粒在近床區域的過程當中，一方面受到水流效應的作用，另一方面也受到底床顆粒與鄰近顆粒的影響，在如此複雜的影響因子之下，躍移顆粒不但須遵守力學上的運動機制，同時也兼具隨機特性；本研究以實驗觀測多顆粒泥砂躍移運動之特性為基礎，同時從力學與統計學的觀點，來探討泥砂碰撞的特性，進而建立躍移顆粒間碰撞之力學機制，做為未來研究三維多顆粒泥砂運動模式之理論基礎。

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 3-dimension real-time flow visualization technique was developed to measure the interparticle collision behaviors during the saltating process. This experimental data collected is useful in develop a 3-D saltating model to estimate the bed load transport rate. In consideration of saltating particles are under the effects both from flow condition and the other particles motion in bottom and saltating, interparticle collision behaviors not only follow the Newton's laws in kinematics but also controlled in random process. In the study, interparticle collision characteristics are described with kinematics and stochastic theories to build the interacting mechanism.

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，探討明渠中近床泥砂之運動特性，作為三維多顆粒泥砂運動模式之理論基礎。

三.結果與討論

a. 實驗誤差

動量守恆之修正，計算出碰撞前後各速度分量之修正量，分別將碰撞前與碰撞後之誤差修正量求平方和並開根號，再與其合速度比較，即為該組碰撞資料之誤差值 E ，可表示如下：

$$E = \frac{\sqrt{(e_x^2 + e_y^2 + e_z^2)}}{V} \quad (1)$$

上式中， $V = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}$ ，如此可得不同水流條件下各組實驗之誤差分佈（如圖1）。

1. 由誤差平均值討論：各組之誤差平均值顯示出在顆粒質量較輕的組別如組一、組二、組三、以及組六，其誤差平均值均較小，並且有隨著水流條件遞減的趨勢，而在較重顆粒質量的組別如組四、組五、組七，其誤差平均值均有明顯的提升。

2. 由偏態係數討論：由各組之偏態係數可看出，輕顆粒之組別具有較明顯之左偏分佈型態，而重顆粒之實驗結果其左偏型態較不明顯，甚至第七組之分佈為左右對稱之型態，由此可知，誤差係數之分佈型態明顯受顆粒密度的影響。
3. 由峰態係數討論：各組峰態係數之值可看出，輕顆粒誤差係數之峰態均大於3，屬於高狹峰，重顆粒峰態係數值小於或等於3，屬於常態峰或是低闊峰，在誤差係數均大於零的狀態之下，顯示出重顆粒之實驗結果誤差值較為分散，且實驗精度較低。

比較組五與組六不同顆粒在相同水流條件下之實驗結果，第六組具有較佳之實驗精度，且誤差分佈亦較第五組集中，綜上所述，實驗之精確度明顯的受到重力的影響，密度較大的顆粒之實驗結果，會因為重力在垂向所顯示出之影響加上實驗難以掌控在碰撞瞬間，導致顆粒躍移軌跡扭曲而增加實驗之誤差。

b. 恢復係數之實驗結果

利用動力學(Engineering Mechanics Dynamics)所定義之恢復係數，計算出七組實驗結果之恢復係數，並藉由變異係數分析法(ANOVA)，在七種不同水流條件下，對各組恢復係數進行分析，藉由群組樣本平均值的權重變異係數與所有樣本的變異係數比較，判斷各群組之平均值是否相等，可得在97.5%之信賴區間下，恢復係數之平均值不會隨水流條件改變，即各組恢復係數之機率分佈，屬於同一分佈型態，因此，將七組實驗之恢復係數一起分析，如圖2，圖中可看出總樣本之分佈具明顯之偏態。

因為恢復係數分佈圖呈一偏態分佈，其值集中於0-1之間，峰值在0.8左右，平均值為

0.807，依機率分佈理論，推估並建議其分佈為 Exponential 分佈，其表示式如下：

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0, \lambda = \frac{1}{\bar{x}} \quad (2)$$

本實驗中， $\bar{x}=0.8553$ ， $\lambda=1.169$ ，將實驗值分佈與理論推估值 Exponential 分佈以卡方分配作適合性檢定，計算結果在 90% 之信賴區間下，接受理論值與實驗值為同一分佈之假設。

由圖 2 可看出，各組實驗結果所得到之恢復係數，有部分大於 1 之現象，根據恢復係數之定義，恢復係數為恢復衝量與形變衝量之比值，而恢復衝量會吸收入射前碰撞顆粒相對於系統之質心速度，以能量的觀點來看，恢復係數之實驗結果應分佈在 0 到 1 之間，除非躍移顆粒在出射後有接受到外界環境所提供的能量，否則恢復係數值不會有大於一之情形發生，推究其原因，可能為紊流效應的干擾或是泥砂顆粒在碰撞過程中，將其轉動所具有的能量轉換成動能，導致出射後，顆粒之能量不增反減，根據前人之研究(Lee and Hsu(1994))得知，顆粒在躍移過程中的旋轉速度 w_s 介於 40rev/sec 至 100rev/sec 之間，以旋轉速度 40rev/sec 為例，顆粒因為旋轉所造成之能量為 $230 \text{ g.cm}^2 / \text{sec}$ ，而顆粒在不計旋轉量的假設之下，其本身之動能為 $550 \text{ g.cm}^2 / \text{sec}$ ，在角動量完全轉換的情況下，即可能造成恢復係數大於 1 之情形。

c. 合理碰撞面實驗結果

依據空間機率的觀念而言，碰撞點於球面上的分佈應為隨機分佈，因為球面上相對於泥砂入射速度之垂直投影面大小不同，所以球面上各點之碰撞機率會隨著入射垂向面積之大小的不同而改變；將碰撞點於合理碰撞面上投影之座標 X 軸與 Y 軸獨立分析，推導其理論分佈，並將實驗值與理論值作比較；依據機率理論，可推得 X 軸座標與 Y 軸座標之理論機

率如下：

$$P = \frac{-2 \int_{\beta_1}^{\beta_2} r \sin \theta d(r \cos \theta)}{\pi^2} \quad (3)$$

其中 β 為碰撞投影點與 X 軸或 Y 軸之夾角，將理論碰撞機率乘上實際總碰撞次數，即為各個入射角度下之理論碰撞次數，將理論值與實際值一同分析，並分別作卡方測試，測試結果顯示，在 95% 之信賴區間下，接受理論值與實驗值為同一機率分佈之假設。

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。

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。

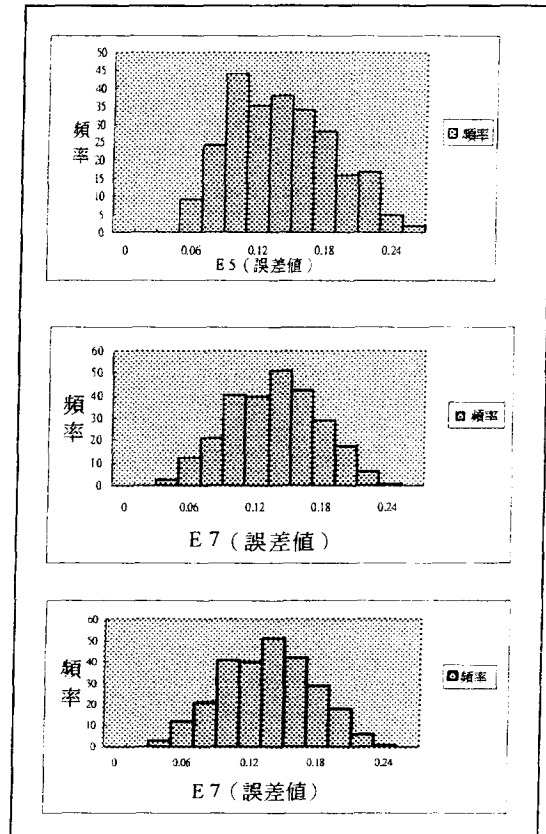
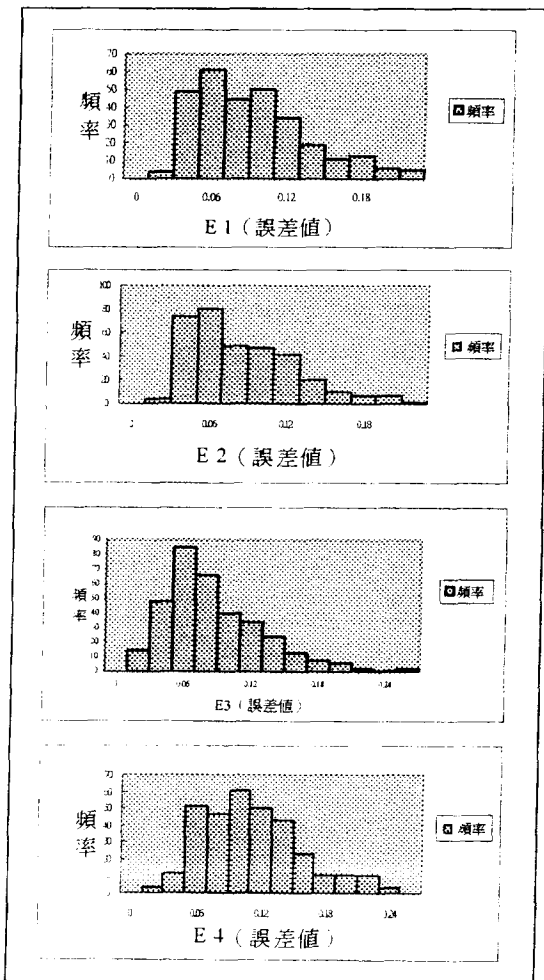
本研究已初步建立三維空間泥砂顆粒碰撞行為之特性，未來可加入如床型變化、間留效應等因子加以考量，可以有更明確之定性研究。

五. 參考文獻

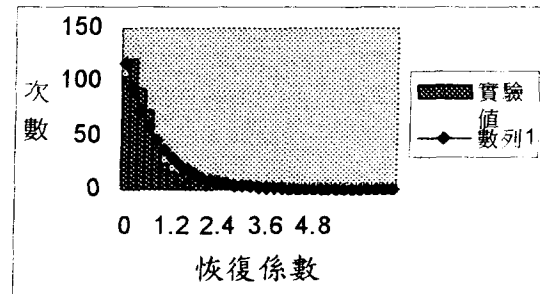
1. 許盈松(1996)，「近床區域泥砂運動之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
2. 游景雲(1999)，「多顆粒泥砂連續躍移模式之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
3. 林穎典(2000)，「三維泥砂顆粒連續躍移模式之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
4. 胡春宏、惠遇甲(1995)「明渠挾砂水流運動的力學和統計規律」，科學出版社。
5. 錢寧、萬兆惠(1983)，「泥砂動力學」，科學出版社。

6. 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.
7. 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.
8. 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 實驗誤差分佈圖



圖二 實驗恢復係數圖