

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 洪水過程中採砂坑移動對水工結構物影響之研究(I)

### A Study on the Safety of Hydraulic Structure due to the Pit Migration during Flood (I)

計畫編號：NSC 87-2211-E-009-035

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：葉克家、楊錦釗

研究助理：連和政

E-mail：kcyeh@cc.nctu.edu.tw

執行機構：國立交通大學土木工程學系

#### 一、中文摘要

台灣建築用之砂石料主要來自於河川。由於缺乏管理，除因大量開採將造成河床全面下降外，局部深達數公尺以上之採砂坑在洪水通過時，往下游運移將造成水工結構物附近之額外刷深，此一刷深量對水工結構物安全具有重要之影響；除水工模型試驗外，可藉由數值模式加以評估。

本計畫即針對採砂坑運移問題，研發二維動床數值模式。由於採砂坑附近之流場變化劇烈，欲以數值模式求解，將遭遇一些困難。因此本計畫擬以三年時間完成此一數值模式之研發。第一年工作為一維均勻質模式之建立，並以 Lee et al.(1993)之實驗資料加以驗證；第二年工作為二維均勻質模式之研發，目的在考慮二維採砂坑在側向之變形；第三年工作為完整二維非均勻質模式之建立，考慮篩分及護甲機制，並以實例為模擬對象，以驗證模式之實用性。

關鍵詞：採砂坑運移、直流期、擴散期、數值模式、非均勻沉澱、不平衡輸砂

#### Abstract

The construction material in Taiwan comes mainly from the rivers. Because of the improper management, overall degradation of

the river bed occurs due to massive mining from the river bed. The downstream migration pits with depth over several meters, during the passage of flood, will result in the additional scouring depth around the hydraulic structure. This scouring depth has important impact on the safety of the hydraulic structure. Besides the physical model experiments, the numerical model can be developed to evaluate this additional scour.

This proposal aims at the pit migration problem and tries to develop a 2-D mobile-bed numerical model. Numerical solution for the problem might encounter some difficulties because of the rapid variation of the flow field near the pit. Hence, the goal of the proposal will be completed in three years. The task in the first year is to develop the 1-D uniform-sediment model, and to verify the model with Lee et al.'s (1993) experimental data. The task in the second year is to develop the 2-D uniform-sediment model for the purpose of considering the lateral deformation of the pit during migration. The target of the third year is to develop the complete 2-D nonuniform model, in which the hydraulic sorting and armoring mechanisms are included. In addition, the model will be used to simulate a real case to verify its applicability and practical value.

**Keywords:** Pit migration, Convection period,

Diffusion period, Numerical model,  
Non-uniform sediment, Non-equilibrium  
sediment transport

## 二、緣由與目的

台灣目前及未來各項公共或私人建設所需之砂石料數量極為龐大，在河床上採取砂石，為主要砂石來源之一；但由於缺乏管理，河床上常存有數量不清而形狀、大小不同之採砂坑。根據現象調查資料，有些採砂坑在河床面下達二、三十公尺之深，顯見河床因採砂坑存在之局部劇烈變化事實。這些人為不當採砂所造成之局部坑洞，受到稍具規模以上洪水作用後，往下游運移擴散，將對水工結構物如丁壩、護岸、橋墩等附近之河床，造成額外之刷深。此一額外之刷深量，亟需妥切評估，以供橋墩及水工結構物基礎補強之依據。此外，現階段水利主管機關規定在橋樑上下游五百公尺內不得採砂，是否得宜，亦值得加以探討。因此，乃有本計畫之提出。

就學理上而言，當河床水工結構物完成後，不論其河床是否達到新的平衡狀態，如出現新的人為採砂坑，則河床將朝向新的平衡方向發展。當水流流經採砂坑時，坑內上游面之流速因水深增加而減緩，使得水體中沉滓淤降於該處；另一方面，坑內下游面之流速則因通水面積減少而增快，造成該處底床產生局部沖刷。因此，採砂坑坑內上下游面之一淤一沖，是為採砂坑運移之現象。根據 Lee 等(1993)之試驗研究指出，採砂坑之運移可分成兩個階段。第一階段為直流期(convection period)，即採砂坑之上游面向下游淤積，直至其原下游面為止，此一過程中，坑深幾乎保持不變；第二階段稱為擴散期(diffusion period)，即當採砂坑上游面運移至下游面後，再繼續往下運移時，其坑深隨時間及距離逐漸衰減。另外，當採砂坑在主流方向之長度很長時，河床縱剖面有如階梯，稱為床梯，此為採砂坑之一特例。在此情況下，由於床梯附近水面線束縮，而造成床梯附近明顯之局部沖刷，並向上

游傳遞，此稱之為溯源沖刷(head cutting)。此一額外之沖刷量，亦可能影響到床梯上游水工結構物之安全。

有關採砂坑運移之研究並不多，主要係就模型試驗及數值模擬二方面進行。Bell and Sutherland(1983)在試驗渠槽探討定量流況下，探討由定床到動床因不平衡輸砂造成底床之沖刷特性，發現利用傳統在平衡輸砂下之輸砂公式無法模擬出其實驗之結果，故獲得其著名之不平衡之輸砂公式。在採砂坑附近之流速梯度大，為局部之不平衡輸砂區域，因此 Bell and Sutherland 之不平衡輸砂觀念須納入考慮。Van Rijn(1980)曾進行水槽中砂坑運移之試驗研究，量取水流之速度剖面、含砂濃度及坑形之變化等。Kornize and Laczay (1988)探討多瑙河於長期低流量下，疏濬對河床所造成之影響。Cotton and Ottozawa-Chatupron (1990)針對亞利桑那州採砂河段，建立一套模擬短期因河床採砂所造成河床縱剖面變化之模式並考慮在有護甲(armoring)情況下之影響。Lee et al.(1993)因台灣砂石濫採嚴重，在省水利局委託下，進行一維均勻及非均勻床質之採砂坑運移試驗研究，獲得一些有關坑深及坑形之迴歸公式。其後 Lee and Hwang(1994)更進一步對床梯進行試驗研究及解析模擬。蔡(1990)曾對水流經方形坑之情況，進行試驗探討。此外，Yeh and Tung(1993)針對 Lee et al.(1993)之實驗結果，考慮採砂坑運移過程中可能之諸多不確定性(uncertainty)因子，探討其運移一段距離後，坑深變化之不確定性情形。

根據上述，本計畫之目的為研發一水深平均之二維動床數值模式，在某種規模洪水下，模擬距水工結構物不同位置，存在尺寸、形狀及數量不等之採砂坑，對結構物基礎處額外刷深之情形，以供現有水工結構物安全評估之參考。再者，或可由這些模擬之成果，對採砂坑與水工結構物間之安全距離有較客觀之描述。

## 三、控制方程式

假設流體性質具不可壓縮性及其黏滯度為定值，且壓力分佈在水深方向僅考慮靜水壓變化，則水深平均之連續方程式及動量方程式在正交曲線座標系統下可表為：

$$h_1 h_2 \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 \bar{u} d) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 \bar{v} d) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \eta} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{u} \bar{v} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{v}^2 \\ = -\frac{g}{h_1} \frac{\partial}{\partial \xi} (z_b + d) + \frac{\tau_{s\xi} - \tau_{b\xi}}{\rho d} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{h_1} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \xi} + \frac{\bar{v}}{h_2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} \bar{u} \bar{v} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \bar{u}^2 \\ = -\frac{g}{h_2} \frac{\partial}{\partial \eta} (z_b + d) + \frac{\tau_{s\eta} - \tau_{b\eta}}{\rho d} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $\xi$ 、 $\eta$  = 平面上兩正交曲線之座標軸； $h_1 = \xi$  方向之幾何轉換係數； $h_2 = \eta$  方向之幾何轉換係數； $d$  = 水深； $u = \xi$  方向之速度分量； $v = \eta$  方向之速度分量； $g$  = 重力加速度； $\rho$  = 流體密度； $t$  = 時間； $z_b$  = 底床高程； $\tau_{s_i}$ 、 $\tau_{b_i}$  = 水表面剪應力與底床剪應力在  $i$  方向之分量； $\bar{\quad}$  = 水深平均符號。

整體河床輸沙之質量守恆方程式：

$$\rho_s (1-p) h_1 h_2 \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 q_{b_1}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 q_{b_2}) = 0 \quad (4)$$

式中， $\rho_s$  = 泥沙密度； $p$  = 孔隙率； $q_{b_i}$  =  $i$  方向之河床載通量 (bed-load flux)。

輸沙控制方程式中河床載通量 ( $q_b$ ) 之推估，採用 Van Rijn (1984) 之輸沙公式：

$$q_b = 0.053 \rho_s \sqrt{(s-1)gDD} \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \quad (5)$$

式中， $D_*$  = 無因次顆粒粒徑； $T$  = 輸送參數； $s = \rho_s / \rho$  = 沙比重。

在清水或減載之沖刷過程中，為不平衡之輸沙行為，因此其輸沙量應做適度之修正，本模式採用 Bell and Sutherland (1983) 之不平衡輸沙公式：

$$q_s = [1 + (\frac{q_{so}}{q_s^*}) e^{-k_e(x-x_1)}] q_{so}^* \quad (6)$$

式中， $q_s$ 、 $q_s^*$  = 距離  $x$  處之單位寬度之不平衡及平衡輸沙量； $x_1$  = 不平衡輸沙計算之起點； $q_{so}$ 、 $q_{so}^*$  =  $x$  處之不平衡及平衡輸沙量； $k_e$  = 負載率係數 (loading law coefficient) = 不平衡輸沙距離之倒數。

當沉澱顆粒沿著順向坡度 ( $\alpha < 0$ ) 或逆向坡度 ( $\alpha > 0$ ) 運移時，斜坡上之臨界剪應力應作適度之校正，本模式採用 Van Rijn (1987) 之臨界剪應力於斜坡上之修正式：

$$\tau'_{bc} = \begin{cases} \tau_{bc} \frac{\sin(\phi_u + \alpha)}{\sin \phi_u} & \alpha > 0 \\ \tau_{bc} \frac{\sin(\phi_d + \alpha)}{\sin \phi_d} & \alpha < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\tau'_{bc}$  = 斜坡上之底床臨界剪應力； $\tau_{bc}$  = 平床之底床臨界剪應力； $\alpha = \tan^{-1}(\partial z_b / \partial x)$  = 底床坡度夾角； $\phi_u$  = 逆坡上之沙礫內摩擦角； $\phi_d$  = 順坡上之沙礫內摩擦角。

#### 四、結果與討論

本研究計畫第一年擬發展一維動床數值模式，模擬採沙坑在定量流作用下之運移變化。當水流流經一採沙坑時，坑內上游端之流速因通水面積增加而減緩，在坑內下游端則因通水面積減少而加快，在如此局部變化劇烈之流場下，平衡輸沙公式無法完全掌握採沙坑附近淤積與沖刷之情形。除此之外，由於採沙坑附近底床變化相當大，斜坡上之臨界底床剪應力應作適度之修正，當沉澱顆粒順坡 ( $\alpha < 0$ ) 運移時，順坡之臨界剪應力應小於平床之臨界剪應力，反之泥沙逆坡 ( $\alpha > 0$ ) 運移時，逆坡之臨界剪應力應大於平床之臨界剪應力。此斜坡上臨界底床剪應力之修正，可避免採沙坑附近底床變化之數值模擬產生不合理之震盪。本研究結合 Bell and Sutherland (1983) 之不平衡輸沙公式與 Van Rijn (1987) 之臨界剪應力於斜坡上之修正式，模擬採沙坑之運移變化，並與 Lee et al. (1993) 之採沙坑實驗結果比較。

Lee et al. (1993)共進行十組採沙坑寬度與渠道寬度等寬之沙坑運移試驗，實驗條件控制在：(1)亞臨界流；(2)無沙漣(ripple)發生；(3)避免沉滓懸浮。本研究選取第三組試驗資料進行模式模擬，實驗佈置之渠道幾何大小與水流條件如表一所示。

圖 1 為不考慮修正斜坡上臨界剪應力之模擬結果，圖中顯示採沙坑內之淤積波產生不合理之震盪。由於採沙坑存於渠床上，使渠床坡度有局部較大之變化，因此在考量沉滓顆粒沿著順向坡度( $\alpha < 0$ )或逆向坡度( $\alpha > 0$ )運移時，斜坡上之臨界底床剪應力應作適度之校正。圖 2 及圖 3 分別為直流期與擴散期之底床高程模擬結果與實驗值之比較，顯示本模式對採沙坑縱向運移行為能適切模擬，同時，不合理之底床震盪情形亦獲得改善。

## 五、計畫成果自評

第一年預期完成之工作項目有：

- 1.基本資料之蒐集與整理
- 2.二維正交貼壁系統及控制方程式之推導
- 3.一維均勻質採砂坑運移模式之建立
- 4.模式之測試、檢定與驗證
- 5.報告撰寫

第一年之研究報告內容完全符合預期完成之工作。

本研究之貢獻在學術研究方面，所發展之水深平均二維一般化採砂坑運移數值模式，可模擬二維採砂坑之變形運移，包括在天然河川之直線或彎道中，任意之坑形、礫石或砂質河床、就數值模式之研發而言，應為頗先進之成果。

在工程實務上之貢獻，可藉由本模式之建立，對於採砂坑在洪水通過時，其運移變形造成其附近水工結構物或橋墩之額外刷深，將有較客觀合理之推估。此一成果對水利機關無論在河川管理或既有水工結構物及橋樑之安全評估上，均有重要之參考價值。

## 六、參考文獻

- [1] Bell, R.G., and Sutherland, A.J. 1983, "Nonequilibrium bedload transport by steady flow", J. of Hydraulic Div., ASCE, 109(3), 351-367.
- [2] Cotton, G.K., and Ottozawa-Chatupron, V. 1990, "Longitudinal channel response due to in-stream mining", Proc. of ASCE, Speciality Conference of Hydraulic Engineering.
- [3] Darby, S.E., and Thorne, C.R. (1996), "Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers, I: model development." J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 122(4), 184-193.
- [4] Holly, F.M., Karim, M.F., and Yang, J.C. (1987), "IALLUVIAL: Numerical simulation of mobilebed rivers. Part I: Theoretical and numerical principles." IIHR Report No. 309, Univ. of Iowa, USA.
- [5] Kornis, S., and Laczay, I.A. (1988), "Effects of extensive dredging on the river regime", International Conference on River Regime.
- [6] Lee, H.Y., Fu, D.T., and Song, M.H. (1993), "Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediment", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(1), 64-80.
- [7] Lee, H.Y., and Hwang, S.T. (1994), "Migration of backward-facing step." J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(6), 693-705.
- [8] Lien, H.C., Yang, J.C., and Yeh, K.C. (1996), "Simulation of bend flow by a depth-averaged two-dimensional model." Hydraulic Software VI, ed. by W.R. Blain, 195-204.
- [9] Van Rijn, L.C. (1980), "Computation of siltation in dredged trenches", Delft Hydraulic Lab., Report 1267-V, Delft, The Netherlands.
- [10] Van Rijn, L.C. (1984a), "Sediment transport, Part I: Bed load transport", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(10), 1431-1456.
- [11] Van Rijn, L.C. (1984b), "Sediment transport, Part II: Suspended load transport", J. of Hydraulic Engineering ASCE 110(11), 1613-1641.
- [12] Van Rijn, L.C. (1987), "Mathematical modeling of morphology process in the case of sediment transport", Delft Hydraulic Communication Report No. 382, Delft, The Netherlands.
- [13] Yeh, K.C., and Tung, Y.K. (1993), "Uncertainty and sensitivity analyses of pit migration model", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(6), 693-705.
- [14] 曾明性(1994)，「橋墩周圍流場與底床沖刷之模擬研究」，國立台灣大學博士論文。
- [15] 蔡憲宜，「水流流經方形坑之實驗探討」，台灣大學

表一 Lee et al.(1993)之實驗條件

試驗編號 No.	流量 Q (cms)	水深 d (m)	渠寬 B (m)	坑寬 b (m)	坑高 h (m)	坑長 l (m)	泥沙 粒徑 $D_m$ (mm)	坡度 $S_0$
Run 3	0.025	0.078	0.6	0.6	0.04	0.54	1.4	0.002

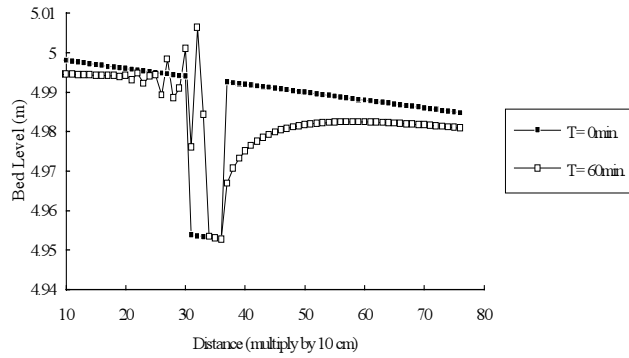


圖 1 不考慮修正斜坡上臨界剪應力

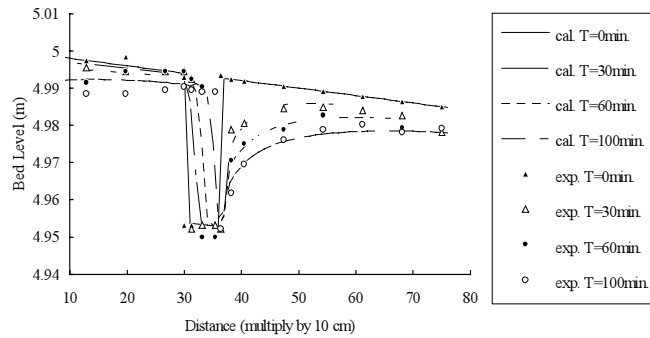


圖 2 考慮修正斜坡上臨界剪應力(直流期)

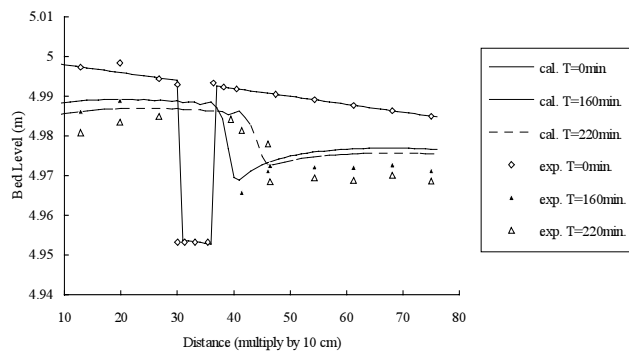


圖 3 考慮修正斜坡上臨界剪應力(擴散期)