

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(III)

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

計畫編號：NSC 89-2211-E-009-030

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：葉克家

國立交通大學土木工程學系

共同主持人：楊錦釧

國立交通大學土木工程學系

計畫參與人員：連和政

國家高速電腦中心

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，並探討二維採砂坑在直線渠道與彎道內之運移變化；本年度（第三年）工作為進行高屏溪實例模擬，以驗證模式之實用性，同時也進行砂坑運移試驗，以充分了解砂坑運移的物理特性。

關鍵詞：採砂坑運移、直流期、擴散期、數值模式、非均勻沉滓、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. Furthermore, the two-dimensional pit migration in both a straight and curved channels is also discussed. In this year(the third year), the target is to apply the developed model to Kao-Ping River, in order to verify its applicability and practical value. Meanwhile, the experiments of pit migration are done to help us realize the physical

phenomenon of pit migration.

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。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。因此，乃有本計畫之提出。

根據 Lee et al.(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。

有關採砂坑運移之研究並不多。Bell and Sutherland(1983)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。Lee et al.(1993)進行一維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。蔡(1990)曾對水流經方形坑之情況，進行試驗探討。Yeh and Tung(1993)針對 Lee et al.(1993)之實驗結果，探討採砂坑運移一段距離後，坑深變化之不確定性(uncertainty)情形。此外，Bianco and Gadin(1996)探討

連續兩個採砂坑在亞臨界流穩流作用下之交互關係，該文指出若兩砂坑之間距超過 10 倍採砂坑長度時，兩砂坑之運移變化並不會互相影響。

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：

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

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

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

式中， ζ 、 η = 平面上兩正交曲線之座標軸； h_1 = ζ 方向之幾何轉換係數； h_2 = η 方向之幾何轉換係數； d = 水深； u = ζ 方向之速度分量； v = η 方向之速度分量； g = 重力加速度； ρ = 流體密度； t = 時間； z_b = 底床高程； t_{s_i} 、 t_{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。

整體河床輸砂之質量守恆方程式：

$$\dots_s(1-p)h_1h_2\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h_2q_{b1}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_1q_{b2}) = 0 \quad (4)$$

式中， \dots_s =泥砂密度； p =孔隙率； q_{bi} = i 方向之河床載通量 (bed-load flux)。

輸砂控制方程式中河床載通量(q_b)之推估，採用 Van Rijn (1984)之輸砂公式：

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

式中， D_* = 無因次顆粒粒徑； T = 輸送參數； $s = \dots_s/\dots =$ 砂比重。

在清水或減載之冲刷過程中，為不平衡之輸砂行為，因此其輸砂量應做適度之修正，本模式採用 Bell and Sutherland (1983) 之不平衡輸砂公式：

$$q_s = [1 + (\frac{q_{so}}{q_{s0}} - 1)e^{-k_e(x-x_0)}]q_s^* \quad (6)$$

式中， q_s, q_s^* = 距離 x 處之單位寬度之不平衡及平衡輸砂量； x_0 = 不平衡輸砂計算之起點； q_{so}, q_{s0}^* = x_0 處之不平衡及平衡輸砂量； k_e = 負載率係數 (loading law coefficient) = 不平衡輸砂距離之倒數。其中不平衡輸砂距離取自渠道起始點至採砂坑上游面之距離。

當沉滓顆粒沿著順向坡度($r < 0$)或逆向坡度($r > 0$)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：

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

式中， τ'_{bc} = 斜坡上之底床臨界剪應力； τ_{bc} = 平床之底床臨界剪應力； $r = \tan^{-1}(\partial z_b / \partial x)$ = 底床坡度夾角； W_u = 逆坡上之砂礫內摩擦角； W_d = 順坡上之砂礫內摩擦角。

四、結果與討論

(1) 砂坑運移試驗

圖 1 為砂坑運移實驗水槽佈置圖，大型循環水槽，長 1860cm、寬 60cm、高 70cm，並在出口溢流處置一可調式之尾水板，用以調整水深。表 1 是砂坑運移的試驗條件，共進行 12 組實驗。圖 2 為試驗組數 2-2 於直流期 8.5 分鐘時所拍攝的坑形變化。式 (8) 及 (9) 分別為直流期與擴散期之坑深隨時間變化之迴歸式，。

$$\frac{H_c}{y} = 0.235 \left(\frac{t}{T_c} \right)^{-0.216} \left(\frac{u_* - u_{*c}}{u_{*c}} \right)^{-2.835} \quad (8)$$

$$\frac{H_d}{H} = 0.159 \left(\frac{t}{T_d} \right)^{-1.247} \left(\frac{u_* - u_{*c}}{u_{*c}} \right)^{-0.160} \quad (9)$$

式中， y = 正常水深； H = 原始坑深； t = 模擬時間； T_c = 直流期總時間； T_d = 擴散期總時間； u_* = 底床剪力速度； u_{*c} = 臨界底床剪力速度。

(2) 高屏溪砂坑運移模擬

為模擬高屏溪之採砂坑運移情況，茲假設在高屏溪河道斷面編號 61 至 60 (即模式計算斷面 50 至 62 間) 之左岸高灘地與主深水槽交接處，有一高約 5 公尺，寬約 480 公尺，長約 500 公尺之採砂坑。上游邊界條件入流量選用 $Q_{100} = 24200$ cms 洪水作用下，模擬 24 小時後之高屏溪底床高程變化情形。

圖 3 為高屏溪里嶺大橋 (斷面 71) 至高屏溪攔河堰 (斷面 49) 之格網佈置圖，河道長約 10 公里，河道坡降約 8.3×10^{-4} ，格點數為 121×35 。圖 4 為高屏溪左岸砂坑附近之局部流速向量圖。圖 5(a) 為模擬 24 小時後採砂坑附近床形變化圖，圖 5(b) 為模擬前初始床形。由模擬結果顯示，採砂坑內最大淤積深度係發生於砂坑缺口與主深水槽之交接處，而且模擬 24 小時後在計算斷面編號 51 處已約有 3.6 公尺之淤積深度，砂坑上游面往前運移之距離約為 8-10 公尺，此外，在採砂坑下游面往前之運移距離約 15 公尺，最大刷深深約為 2 公尺。

五、計畫成果自評

第三年預期完成之工作項目有：

- 1.基本資料之蒐集與整理
 - 2.二維非均勻質採砂坑運移模式之建立
 - 3.模式之測試、檢定與驗證
 - 4.砂坑運移模型試驗
 - 5.現場實例模擬
 - 6.報告撰寫
- 第三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] 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.
- [3] de Vriend, H. J., and Koch, F. G., (1977), "Flow of water in a curved open channel with a fixed plane bed," Report on experimental and theoretical investigations R675-V M1415 part I, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Van Rijn, L.C. (1980), "Computation of siltation in dredged trenches", Delft Hydraulic Lab., Report 1267-V, Delft, The Netherlands.
- [7] Van Rijn, L.C. (1984a), "Sediment transport, Part I: Bed load transport", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(10), 1431-1456.
- [8] Van Rijn, L.C. (1984b), "Sediment transport, Part II: Suspended load transport", J. of Hydraulic Engineering ASCE 110(11), 1613-1641.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 蔡憲宜(1990),「水流流經方形坑之實驗探討」國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。

表 1 砂坑運移試驗條件

試驗組數	流量 (cms)	上游加砂	下游邊界	試驗時間 (sec)	輸砂率 (g/sec)
1-1	0.027	清水	斜板式	2681	13.4
1-2	0.034	清水	斜板式	2004	19.1
1-3	0.041	清水	斜板式	1301	27.5
2-1	0.027	清水	直立式	5814	8.9
2-2	0.034	清水	直立式	2463	18.1
2-3	0.041	清水	直立式	1257	29.4
3-1	0.027	清水	自由溢流	2681	14.5
3-2	0.034	清水	自由溢流	2004	24.0
3-3	0.041	清水	自由溢流	1301	29.9
4-1	0.027	加砂(13.4g/sec)	斜板式	2681	14.1
4-2	0.034	加砂(19.1g/sec)	斜板式	1498	31.8
4-3	0.041	加砂(27.5g/sec)	斜板式	950	46.5

粒徑 $d_m = 1.18\text{mm}$, 渠道坡度 = 0.0037

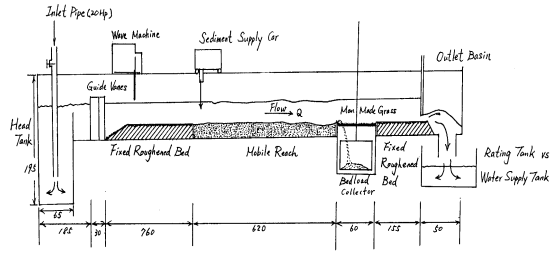


圖 1 砂坑運移實驗水槽佈置圖

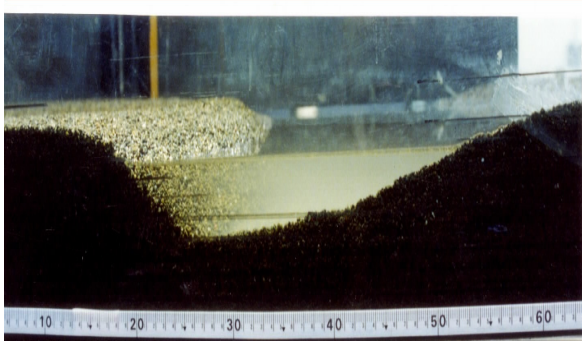


圖 2 直流期8.5min側視圖

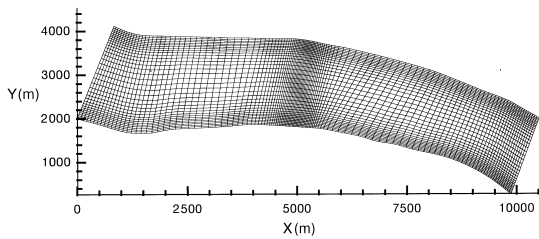


圖 3 高屏溪里嶺大橋(斷面71)至高屏溪攔河堰(斷面49)之格網佈置圖

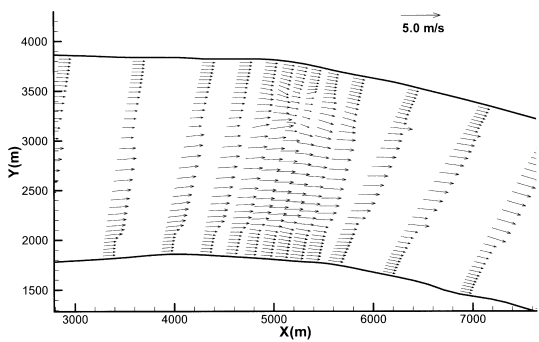


圖 4 高屏溪左岸砂坑之局部流速向量圖

圖 5 採砂坑附近床形變化圖 (a) 模擬24小時後 (b) 模擬前初始床形