

農塘豎井底部安裝導管排淤之試驗研究

詹錢登^[1] 賴東暘^{[1]*} 王志賢^[2] 徐郁超^[2] 柯閔翔^[1]

摘要 本研究進行水槽試驗探討利用農塘豎井下緣出流孔及其加裝水平臥管的排淤效果。試驗在方形壓克力水槽進行，水槽內設有豎井，其底部設有排沙出流孔（豎井出流孔排沙）。此豎井出流孔可連接臥管，臥管上方有三個排沙出流孔（臥管出流孔排沙）。首先進行沒有淤沙情況的清水試驗，以瞭解水位與出流量之關係，然後進行沉澱為微細沙的排淤試驗，試驗有定水頭及變水頭兩種。試驗後量測排淤所形成的沖刷坑地形，用以分析不同排淤方式及相關條件對排淤量及排沙效率之影響。

關鍵詞：農塘、豎井排淤、臥管排淤、排淤沖刷坑、排沙效率。

Desilting Efficiency of Drainage Pipe Installed at the Bottom of a Vertical Shaft in a Farm Pond

Chyan-Deng Jan^[1] Tung-Yang Lai^{[1]*} Ji-Shang Wang^[2] Yu-Chao Hsu^[2]
Hong-Xiang Ko^[1]

ABSTRACT This study investigated the desilting efficiencies of a pond by using both the shaft orifice of the pond and the horizontal pipe that was connected to the shaft orifice. The experiments were conducted in a square acrylic tank. The tank featured one vertical square shaft, and the shaft had a bottom orifice that could be used for removing sediment from the tank. The shaft orifice could be installed using a horizontal pipe with three circular orifices that allowed for sediment removal. Water-flow tests without sediment were first conducted to determine the relationship between water level and discharge through the orifices. Desilting experiments were then conducted using fine sands as the pond deposit under both constant head and falling head conditions. The final topographies of scour cones formed through water flushing were used to analyze the influence of desilting arrangements and related conditions on the volume of desilted sediment and desilting efficiency.

Key Words: Farm pond, shaft orifice desilting, pipe orifice desilting, scour cone, desilting efficiency

一、前言

農塘具灌溉、滯洪、保水、沉沙、地下水補注、微氣候調節、生態環境、休閒遊憩等多元功能，然而在長年使用下農塘會有土沙淤積，導致蓄水空間減少的問題。基本上，農塘和水庫除了在大小、位置、結構及規模上的差異之外，它們淤積的原因及防淤和排淤的處理方式大致上是相似的。維護庫容以確保水庫永續利用之方法大致上有三種：(1) 減少上游來沙、(2) 浚渫水庫淤沙、及 (3) 減低水庫來沙落淤（經濟部水利署，2011）。理論上要維護農塘蓄水空間的方法也是如前所述：減少來沙、浚渫清淤及減低落淤等方式。對於已經落淤在水庫或農塘裡的淤沙，就只能有賴於機械或是水力浚渫的方式將淤沙排除以維護蓄水容量。機械浚渫和水力浚渫各有其優缺點；機械浚渫，無論是空庫乾挖清運或抽泥船清運，都要受限於操作時機，並要考量清淤的放置地點及其對環境之影響。水力浚渫是利用水流的力量將淤沙從蓄水區排放到其下游河道或灘地，

亦會受限於操作時機，需要考量排沙濃度對於下游河道環境的影響（王志賢，2019）。

利用壩體底部排沙孔進行淤沙排除是水力排沙的方法之一，排淤操作時，受出流引致之渦流及剪切流，在出流口附近會形成楔形的沖刷坑（Wedge-shape flushing cone），如圖 1 所示。前人的研究顯示，楔形沖刷坑的大小和水頭差、泥沙粒徑、出流孔大小、出流孔形狀及排沙引流裝置有密切的關係（Hotchkiss et al., 1995; Lai and Shen, 1996; Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam, 2006; Fathi-Moghadam et al.2010; Powell and Khan, 2012; Madadi et al., 2017）。賴進松和沈學汶（Lai and Shen, 1996）曾經進行矩形渠道洩降排沙（Drawdown flushing）試驗及收集中國大陸水庫洩降排沙現地實測資料，建立排沙量與出流量（ Q_0 ）、水面坡度及排沙渠道寬度之關聯性。伊朗學者 Fathi-Moghadam et al. (2010) 曾經進行圓形出流孔定水頭排沙試驗，使用 3 種不同粒徑大小的非凝聚性泥沙（ $d_{50}=0.27、0.42$ 及 1.2 mm）及幾種水深（ H_w ），探討平衡楔形

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立成功大學水土保持生態工程研究中心

Ecological Soil and Water Conservation Research Center, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: N88104018@gs.ncku.edu.tw

冲刷坑長度 (L) 及體積 (V_s) 和出流孔孔徑 (D_o)、流速 (U_o)、重力加速度 (g)、水密度 (ρ_w)、黏滯度 (μ)、水深 (H_w)、淤沙密度 (ρ_s) 及厚度 (H_s) 等因子之關係, 並以無因次分析將它們的關係表示成:

$$\frac{V_s}{D_o^3} = f\left(\frac{U_o}{\sqrt{g(G_s-1)d_{50}}}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{\rho_w U_o D_o}{\mu}\right) \quad (1)$$

$$\frac{L}{D_o} = f\left(\frac{U_o}{\sqrt{g(G_s-1)d_{50}}}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{\rho_w U_o D_o}{\mu}\right) \quad (2)$$

方程式右邊第一項參數為出流孔福祿數 $F_s (=U_o/\sqrt{g(G_s-1)d_{50}})$, $G_s = \rho_s/\rho_w$, 它表示孔口附近 Shield's number 的大小, 反映驅動力與泥沙抵抗力的比值; 第二項為相對水深 $H_w^* (=H_w/H_s)$; 第三項為雷諾數 $Re (= \rho_w U_o D_o/\mu)$ 。農塘排淤處於高雷諾數的情況, 可忽略雷諾數的影響。他們的試驗結果顯示出流孔福祿數 F_s 對於平衡冲刷坑體積及長度的影響較大; 相對水深 H_w^* 對於平衡冲刷坑體積及長度的影響較小。Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam (2014) 進一步進行凝聚性淤沙的排淤試驗, 結果顯示平衡冲刷坑體積及長度與淤沙的濕容積密度 (Wet bulk density) 有密切關係。

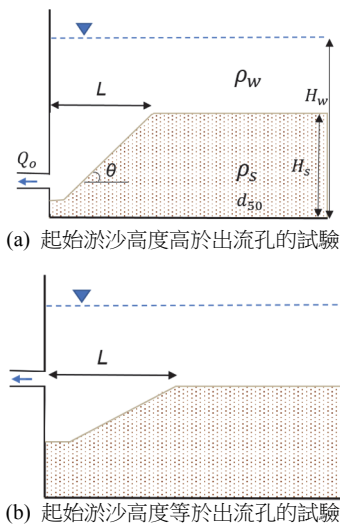


圖 1 壩體出流孔排淤試驗示意圖

Fig.1 Schematic diagram of desilting through a dam outlet

美國學者 Powell and Khan (2012) 也曾經進行圓形出流孔定水頭排淤試驗, 出流孔的位置設在緊鄰底床泥沙的上方 (圖 1b), 也就是說出流孔沒有被底床泥沙掩埋。觀察出流孔附近冲刷坑流場及冲刷坑幾何形狀, 探討不同泥沙粒徑及不同水深條件下平衡冲刷坑的長度 (L)、最大寬度 (W) 及最大深度 (d_m)。試驗結果顯示在出流孔上游面附近會形成近似半橢圓形的冲刷坑, 其寬度與長度的比值 (W/L) 約為 0.86。將離圓形出流孔的軸向距離 x 以無因次位置表示為 $X = x/L$, 軸向深度 d 以無因次冲刷深度 $D = d/d_m$ 表示 (d_m 為冲刷坑軸向之最大深度), 平衡冲刷坑軸向無因次剖面, 可以表示為:

$$D = \begin{cases} 1.0, & \text{if } 0 \leq X < 0.15 \\ 1.2(1-X), & \text{if } 0.15 \leq X \leq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

上式表示在接近出流孔附近 ($0 \leq X < 0.15$) 冲刷坑的軸向深度大約接近最大深度, 離出流遠一些 ($X \geq 0.15$), 冲刷坑的深度隨距離而線性遞減。另外, 伊朗學者 Madadi et al.(2017) 曾經

在出流孔上游加裝半圓形導流裝置, 探討其對增進排沙效率之助益, 試驗結果顯示安裝導流裝置可擴大冲刷坑的範圍。

前人的研究著重在壩體下方出流孔的排淤試驗, 本研究針對設有豎井排洪的農塘, 進行定水頭及變水頭在不同水位條件下, 豎井出流孔排淤及臥管出流孔排淤實驗 (王志賢, 2019; 柯閱翔, 2020), 並依據實驗結果進行分析。農塘設置豎井的主要目的在於排洪, 避免溢堤風險, 確保農塘安全。渾水流入農塘後, 由於泥沙沉積效應, 表層水含沙濃度較低, 豎井頂部排洪時水流無法帶出大量泥沙。本研究想利用豎井既有設施, 在不影響豎井排洪功能之下, 在其下方設置出流孔用於排除農塘底部淤泥, 探討不同條件下之排淤效果。

二、研究方法

1. 試驗設備與淤沙特性

本研究試驗在內徑 $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 壓克力水槽內進行, 如圖 2 所示, 此水槽視為一座正方形的農塘, 設有 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的方形豎井, 高 80 cm , 其中心距出流方向農塘邊界 15 cm 。豎井底端連接 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 方形水平出流導槽, 長 20 cm , 導槽底部距離水槽底部 3 cm 。豎井下緣設有圓形出流孔 (豎井出流孔), 直徑 $D_A = 3 \text{ cm}$, 出流孔下緣距離水槽底床高 $\delta = 5 \text{ cm}$ (如圖 2 所示)。當農塘內蓄水高於 5 cm 時, 在重力作用下, 農塘內蓄水可由出流孔經方形出流導槽流出到農塘外的蓄水槽。本研究試驗水槽循環系統, 如圖 3 所示, 除了農塘排淤試驗水槽之外, 還包括其上游的儲水箱、定水頭箱、下游蓄水槽、抽水馬達及相關控制水閥。下游蓄水槽接收排淤出來的水及沙, 並利用沉水馬達將蓄水槽中的水抽送回上游儲水箱進行水循環。沉水馬達周圍設有濾沙設施, 避免泥沙被抽回上游儲水箱。

本研究除了進行豎井出流孔排淤試驗之外, 也進行豎井出流孔安裝臥管之排淤試驗 (臥管出流孔排淤)。臥管外徑 3 cm , 內徑 $D_B = 2.8 \text{ cm}$, 臥管上方距豎井 12 、 20 及 28 cm 處設有 3 個開孔。排淤試驗使用的淤沙, 為非凝聚性泥沙, 粒徑介於 0.01 至 0.83 mm 之間, 如圖 4 所示, 它的中值粒徑 $d_{50} = 0.09 \text{ mm}$, 屬於微細沙, 孔隙率 $n \approx 0.42$, 乾燥時泥沙安息角約為 29° , 在水中時泥沙安息角約為 30° 。

本研究農塘豎井排淤模型試驗, 農塘水位 $H_w = 60 \sim 80 \text{ cm}$, 豎井出流孔採用 $D_A = 3 \text{ cm}$ (通水面積 $A = \pi D_A^2/4 \approx 7.07 \text{ cm}^2$); 假設農塘水深模型比為 5, 豎井出流孔 $D_o = 3 \text{ cm}$, 相當於實際尺寸為 15 cm 。豎井加臥管的排淤模型試驗, 臥管外徑也是 3 cm , 可使水平放置的臥管可與豎井出流孔緊密結合。臥管上可開孔的直徑必須小於 3 cm , 本研究選擇臥管上有 3 個相同的開孔, 開孔直徑有 1 cm 及 2 cm 兩種 (依照模型比相當於 5 cm 及 10 cm), 對應之通水面積分別為 2.36 cm^2 及 9.42 cm^2 兩種, 前者小於 7.07 cm^2 , 後者大於 7.07 cm^2 。本研究比較排淤方式、開孔大小及水位高低對於排淤效果之影響。

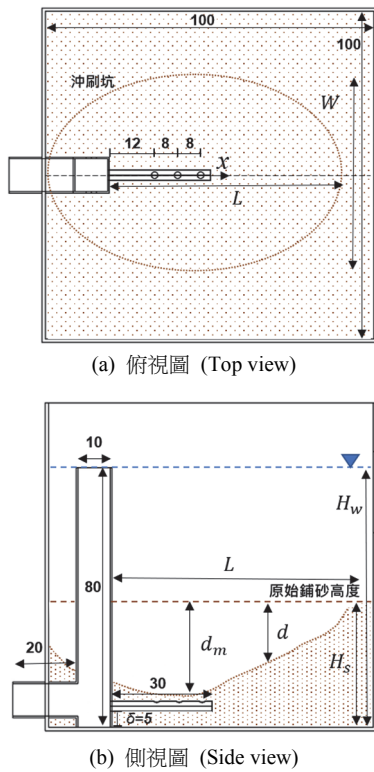


圖 2 農塘排淤試驗模型配置及排淤冲刷坑示意圖

Fig.2 Schematic diagrams of a tank arrangement for a farm-pond desilting experiments and desilted scour cone

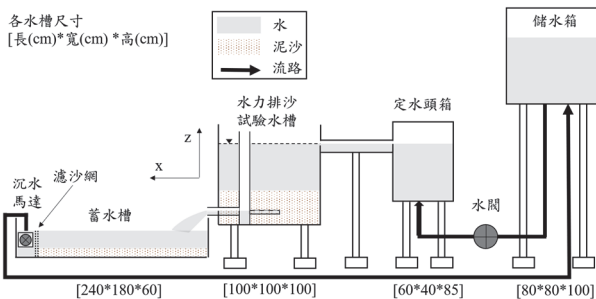


圖 3 農塘排沙實驗水循環系統示意圖

Fig.3 Schematic diagram of a water circulation system for farm-pond-desilting experiments

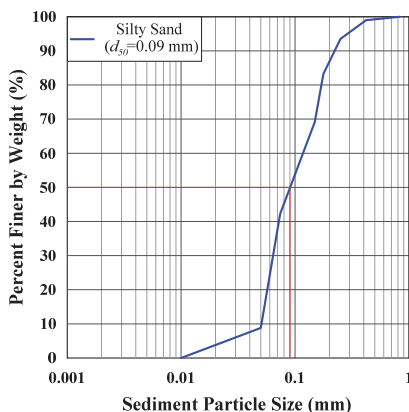


圖 4 本研究排淤試驗使用之泥沙粒徑分布

Fig.4 Grain size distribution of the sediment used in the experiments

2. 試驗條件與結果量測

本研究先進行沒有淤沙情況下的水槽試驗 (清水試驗)，用以瞭解水位 (H_w) 出流量 (Q_o) 之關係，然後再進行排淤試驗。清水試驗包含未安裝臥管之出流情形 (圖 5a) 及有安裝臥管之出流情形 (圖 5b) 兩種。試驗之入流量由入流水閥控制，水閥上有閥錶可顯示流量值 (閥錶事先經過率定)。試驗時設定好流量，水流經過入流水閥流入試驗水槽，待水槽內水位達穩定(入流量等於出流量)時，記錄該水位，得出定水頭條件下流量與水位之關係。依序由高水位 ($H_w = 80$ cm) 執行至低水位 ($H_w = 15$ cm)，以瞭解不同定水頭條件下農塘出流量 (Q_o) 之變化。

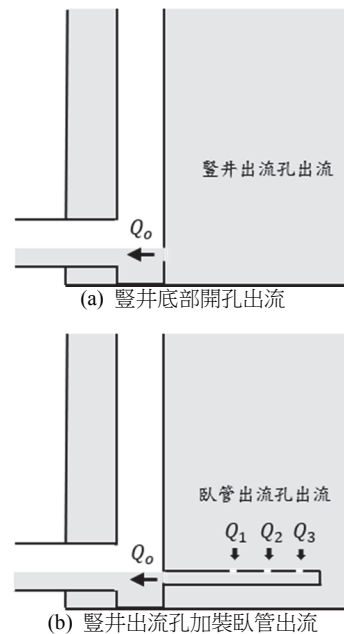


圖 5 豎井出流孔出流及臥管出流孔清水試驗配置示意圖

Fig.5 Schematic diagrams for clear-water flows through the pond-shaft bottom orifice and the holes of a horizontal drainage pipe

農塘排淤試驗包含豎井出流孔排淤試驗，及臥管出流孔排淤試驗兩大類。前者排淤試驗結果將作為後者排淤試驗結果的比較對象。試驗包含定水頭及變水頭兩種試驗。定水頭試驗是指在固定水位 (H_w) 下進行排淤試驗，試驗過程由供水系統持續供水，維持農塘內水頭高度一致，達到排淤時間後，農塘內蓄水持續排出直至終止試驗。在進行系列試驗之前，本研究先多次進行定水頭下排淤試驗，觀察冲刷坑的形狀及大小到達穩定所需時間。試驗結果顯示，在本研究定水頭試驗範圍內，排淤冲刷坑在排淤時間 1 小時內均可達到平衡狀態，此時冲刷坑的形狀及大小穩定，無明顯變化，因此後續定水頭下排淤系列試驗，定為 1 小時。變水頭試驗是指在沒有補充水的條件下，農塘內水位由起始水位 (H_w) 隨試驗時間逐漸下降，待水位低於出流孔高度時終止試驗，記錄試驗時間 (T)，並量測冲刷坑地形。試驗亦採用三種水位 (H_w)，分別為 60、70 及 80 cm。

本研究共執行 18 組排淤試驗，試驗條件如表 1 所示。試驗起始淤沙厚度 $H_s = 40$ cm，試驗前淤沙表面是水平的，試

驗過程水流經由出流孔排出並帶動泥沙排出，而後形成排淤冲刷坑。本研究使用 XYZPRINTING 公司手持式 3D 掃描器 (2.0 版) 進行冲刷坑的地形量測，藉由 Surfer 3D 繪圖軟體建立冲刷坑數值地形，據以分析冲刷坑形狀及體積，並將冲刷坑體積視為排淤總量。定水頭排淤試驗，固定水位持續供水，排淤冲刷坑發展穩定並趨於平衡，其形狀及大小趨於固定，因此定水頭試驗以進行 1 次為原則。在變水頭排淤試驗，排淤過程沒有再額外供水，排淤冲刷坑尚未完全發展，冲刷坑的形狀及大小較不穩定，必要時進行 2 次試驗。

表 1 農塘排淤試驗條件

Table 1 Experimental conditions of desilting sediment from a farm pond

水位條件	排淤方式	出流孔直徑
定水頭 $H_w = 60、70$ 及 80 cm	豎井出流孔排淤	$D_A = 3$ cm
	臥管出流孔排淤	$d_o = 1$ cm $d_o = 2$ cm
變水頭 $H_w = 60、70$ 及 80 cm	豎井出流孔排淤	$D_A = 3$ cm
	臥管出流孔排淤	$d_o = 1$ cm $d_o = 2$ cm

三、試驗結果與分析

1. 清水試驗

清水試驗的目的在於瞭解豎井底部出流孔流量 Q_o 與農塘水位 H_w 之關係。由射流理論可知豎井底部出流孔平均流出速度 U_o 與出流孔以上的水頭 h_o 之關係為 $U_o = \sqrt{2gh_o}$ ， g 為重力加速度。出流孔流量 Q_o 可以表示成：

$$Q_o = C_d A \sqrt{2gh_o} \quad (4)$$

其中， C_d 為流量係數， A 為出流孔通水斷面積。本研究豎井出流孔直徑 $D_A = 3$ cm，出流孔以上的水頭 h_o 與水位 H_w 之關係為 $h_o = H_w - 6.5$ (單位：cm)，出流孔斷面積 $A = \pi D_A^2 / 4 \approx 7.07$ cm²。清水試驗水位 H_w 介於 15 cm 至 80 cm 之間 (如圖 6 所示)，所對應之流量係數 C_d 約為 0.74 (如圖 7 所示)，出流量 (Q_o) 及水位 (H_w) 之關係可表示於式 5。

$$Q_o = 230\sqrt{h_o} = 230\sqrt{H_w - 6.5} \quad (Q_o \text{ in cm}^3/\text{s}, H_w \text{ in cm}) \quad (5)$$

當豎井出流孔安裝上水平臥管時，水流先經過臥管上三個開孔流入水平臥管，再導流至豎井出流孔，總出流量 Q_o 與水位 H_w 仍然有很密切之關係 (如圖 6 所示)。水位流量分析仍是以最後出流孔 (豎井出流孔) 為對象，有效水頭 $h_o = H_w - 6.5$ (單位：cm)。只是在相同水位 H_w 條件下，相較於未安裝水平臥管，出流量 Q_o 較小。這是因為安裝臥管後，出流路徑變長且較為複雜，而且出流孔的有效孔徑由原先的 3 cm 降為 2.8 cm (臥管內徑)，有效通水斷面積由原先的 7.07 cm² 降為 6.16 cm²。前述這些改變會造成水流阻力增大，導致在相同水頭 h_o (水位 H_w) 下出流量 (Q_o) 較小，也就是說會有較小的流量係數 C_d 。

當臥管上 3 個出流孔的直徑 d_o 均為 2 cm 時，此 3 個出流孔加起來的通水斷面積 $A_B = 3\pi D_B^2 / 4 \approx 9.42$ cm² > 6.16 cm² 這表示出流的主要控制斷面仍然在於豎井底部出流孔 (有效通水斷面積 $A = 6.16$ cm²)。依據實驗量測資料，由式 4 可推求得對

應之流量係數 C_d 大約為 0.61，出流量及水位之關係可表示於式 6。

$$Q_o = 165.3 \sqrt{H_w - 6.5} \quad (Q_o \text{ in cm}^3/\text{s}, H_w \text{ in cm}) \quad (6)$$

另外，當臥管上 3 個出流孔的直徑 d_o 均為 1 cm 時，此 3 個出流孔加起來的通水斷面積 $A_B = 3\pi D_B^2 / 4 \approx 2.36$ cm² < 6.16 cm²，這表示出流的主要控制斷面不在於豎井出流孔，而在於臥管上的 3 個出流孔。若仍然以豎井出流孔有效通水斷面積 $A = 6.16$ cm² 計算，則對應之流量係數 C_d 大幅降為 0.25 (若水位流量分析改以臥管出流孔為對象，以臥管上的 3 個出流孔的總通水斷面積 $A = 2.36$ cm² 計算，則對應之流量係數 $C_d \approx 0.65$)。當臥管上 3 個出流孔的直徑 d_o 均為 1 cm 時，水位流量分析仍是以最後出流孔 (豎井出流孔) 為對象，則出流量及水位之關係可表示於式 7。

$$Q_o = 69.3 \sqrt{H_w - 6.5} \quad (Q_o \text{ in cm}^3/\text{s}, H_w \text{ in cm}) \quad (7)$$

本研究排淤試驗，試驗前排淤出流孔淤埋在泥沙裡，由於泥沙屬於非黏滯性泥沙，排淤試驗開始時出流孔附近泥沙很快就被帶出，形成冲刷坑並露出出流孔。為了簡單估算排淤試驗出流量，忽略泥沙存在對於水位與流量關係影響，前述清水試驗豎井出流孔流量與水位之關係 (式 5 至式 7)，將被用於後續排淤試驗流量之估算。

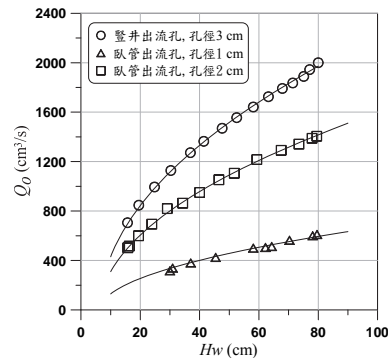


圖 6 三種不同出流配置條件下清水出流量與水位之關係

Fig.6 Relations between the clear-water discharges and water levels for 3 different outflow conditions

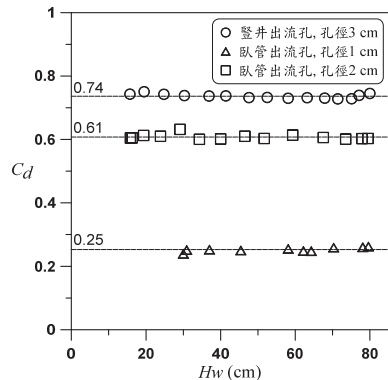


圖 7 三種不同出流配置條件下清水出流流量係數與水位之關係

Fig.7 Relations between the discharge coefficients and water levels for flows under 3 different outflow conditions

2. 豎井出流孔排淤試驗結果

本研究農塘排淤試驗分為豎井底部出流孔排淤試驗（簡稱豎井出流孔排淤）及豎井底部出流孔安裝臥管排淤試驗（簡稱臥管出流孔排淤）兩大類，根據供水方式之不同，試驗再

細分為定水頭試驗及變水頭試驗兩類（表 1）。試驗結束後量測農塘底床地形高程，並據以建立排淤沖刷坑數值地形，作為排淤沖刷坑體積計算及形狀分析之依據；不同排淤試驗之結果彙整如表 2 所示。

表 2 農塘排淤試驗結果彙整表

Table 2 Summary of Experimental Results

實驗配置	水位 $H_w(\text{cm})$	試驗時間 $T(\text{s})$	沖刷坑長 $L(\text{cm})$	沖刷坑寬 $W(\text{cm})$	沖刷坑體積 $V_s(10^3 \text{ cm}^3)$	排淤用水量 $V_w(10^3 \text{ cm}^3)$	排淤效率 $E_r(\%)$	
定水頭	豎井出流孔排淤	60	3600	62.5	100.0	117	61.0	1.94
		70	3600	64.5	100.0	119	66.0	1.81
		80	3600	66.6	100.0	125	72.0	1.77
	臥管1 cm出流孔排淤	60	3600	78.0	95.6	97	18.4	5.29
		70	3600	77.0	97.5	90	20.0	4.51
		80	3600	78.2	98.0	91	21.3	4.24
	臥管2 cm出流孔排淤	60	3600	80.0	100.0	125	43.6	2.86
		70	3600	80.0	100.0	126	46.7	2.69
		80	3600	80.0	100.0	117	49.4	2.37
變水頭	豎井出流孔排淤	60	326	31.9	72.7	54	3.4	15.9
		70	373	27.0	71.7	50	4.4	11.4
		80	482	44.6	86.9	83	5.4	15.4
	臥管1 cm出流孔排淤	60	1181	72.6	96.0	96	3.4	28.0
		70	1479	78.0	87.0	96	4.4	21.8
		80	1716	80.0	97.0	111	5.4	20.5
	臥管2 cm出流孔排淤	60	539	45.6	58.6	44	3.4	12.9
		70	567	68.9	84.8	75	4.4	16.9
		80	691	70.0	90.9	82	5.4	15.1

(1) 定水頭排淤試驗

圖 8a 及 圖 8b 分別為農塘水位 $H_w = 80 \text{ cm}$ 條件下豎井出流孔定水頭及變水頭排淤試驗後底床地形高程圖。由圖 8a 中可以看出豎井出流孔排淤所造成的沖刷坑最深處大約位於出流孔前約 5 cm 處，沖刷坑形狀大致上呈圓形狀。沖刷坑外緣離豎井出流孔軸向最大距離 $L = 66.6 \text{ cm}$ （縱向沖刷長度），縱向沖刷距離尚未達到農塘邊界，但是沖刷坑橫向最大寬度（ W ）已經觸及到農塘邊界。圖 8c 顯示豎井出流孔定水頭排淤沖刷坑的縱向形狀及沖刷長度（ L ）與農塘水位（ H_w ）之關係，由圖上可瞭解三種不同定水位之試驗（ $H_w = 60、70$ 及 80 cm ），其試驗後沖刷坑軸向剖面趨近一致，沖刷坑長度（ L ）分別為 62.5、64.5 及 66.6 cm，沖刷坑體積（ V_s ）分別為 117、119 及 $125 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。水位 H_w 對定水頭排淤沖刷坑長度（ L ）及體積（ V_s ）雖有影響但是影響很小（圖 9a）。圖 8c 也顯示沖刷坑最深處至沖刷坑外緣的坡面坡度變化不大，接近於直線，其坡面坡度介於 25.9° 至 27.7° 之間，外緣略陡些，平均坡度大約為 26.8° ，略小於泥沙安息角。上述分析結果顯示豎井出流孔定水頭排淤沖刷坑的形狀及大小已趨於穩定平衡狀態。實驗中可由地形量測及出流濃度量測來評估排淤沖刷坑已經達到穩定狀態。排淤試驗初期排淤量大，排淤出流濃度大，沖刷坑處於發展階段。當有充分之水源可進行排淤，沖刷坑處於穩

定平衡時，出流含沙濃度變得很小，接近清水。本研究大部分試驗以出流含沙濃度來評估排淤沖刷坑是否到達穩定平衡狀態。

(2) 變水頭排淤試驗

圖 8b 顯示農塘起始水位 $H_w = 80 \text{ cm}$ 條件下豎井出流孔變水頭排淤試驗結果（試驗過程水位逐漸下降），其排淤沖刷坑最深處大約也是發生在出流孔前約 5 cm 處，並以此處為中心大致上呈圓形狀展開，但是沖刷坑的外緣較不平整（高程有凹凸及陡升的現象）。沖刷坑自豎井出流孔至其外緣最大距離 $L = 44.6 \text{ cm}$ ，縱向及橫向沖刷距離均尚未達到農塘邊界。圖 8d 顯示農塘起始水位（ H_w ）分別為 60、70、80 cm 條件下，豎井出流孔變水頭排淤沖刷坑的縱向剖面形狀，由此可得沖刷坑長度（ L ）分別為 31.9、27.0、44.67 cm，沖刷坑體積（ V_s ）分別為 54、50 及 $83 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 。此外，沖刷坑最深處至沖刷坑的外緣的坡度大致上可區分為兩段，沖刷坑接近排淤出流孔的坡面較緩（約 18° ），小於此泥沙之安息角；接近沖刷坑外緣的坡面較陡（約 $70^\circ \sim 90^\circ$ ），比泥沙安息角大很多；沖刷坑外緣因坡陡而不穩定，易發生崩落，外緣高程較不平整（凹凸現象），這也是造成水位對於沖刷坑長度及沖刷坑體積雖有影響但不是很一致的原因。豎井出流孔變水頭排淤時間很短，水量就是農塘裡現有之水量，起始水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 所對應之排淤

時間分別為 326、373 及 482 秒，水流沒有足夠時間排淤。這些結果顯示豎井出流孔變水頭排淤所形成的沖刷坑未達到平衡狀態，沖刷坑形狀及大小明顯受限於起始水位 H_w 。

由前一章節清水試驗所建立的水位-流量關係式(式 5) 可以推估出農塘水位 H_w 固定為 60、70 及 80 cm 時，豎井出流孔流量分別為 $Q_o = 1,682、1,832$ 及 $1,971 \text{ cm}^3/\text{s}$ ；定水頭試驗時間為 1 小時，因此所對應總出水量分別約為 $V_w = 61.0、66.0$ 及 $72.0 \times 10^5 \text{ cm}^3$ 。將排淤沖刷坑體積 (V_s) 和排淤過程使用水量 (V_w) 的比值定義為排淤效率 E_s ，即

$$E_s = \frac{V_s}{V_w} \quad (8)$$

水位固定為 60、70 及 80 cm 時，沖刷坑體積 (V_s) 分別為 $117、119$ 及 $125 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ，由上式計算出豎井出流孔排淤效率 (E_s) 分別為 1.94%、1.81% 及 1.77%。顯示定水頭豎井出流孔排淤效率很低，須慎重選擇此方法的排淤時機，例如洪水期間水很多，不須考慮用水量；

或是排淤後的水另有使用規劃。對於變水頭豎井出流孔排淤試驗，排淤用水量為試驗開始前水槽內的水量，即起始水位 (H_w) 與鋪沙高度 (H_s) 之間的水量加上出流孔以上淤沙孔隙間的水量，因此變水頭試驗排出去的水量如式 9 所示：

$$V_w = [(H_w - H_s) + (H_s - \delta)n]A_T \quad (9)$$

其中，淤沙孔隙率 $n = 0.42$ ，水槽水平斷面積 $A_T = 9900 \text{ cm}^2$ ，當起始水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 時，對應之排淤用水量 (V_w) 分別約為 $3.4、4.4$ 及 $5.4 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ，對應之沖刷坑體積分別為 $V_s = 54、50$ 及 $83 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ，對應之變水頭豎井出流孔排淤效率分別為 $E_s = 15.9%、11.4%$ 及 $15.4%$ 。結果顯示雖然變水頭豎井出流孔單次排淤體積不是很多，但其排淤效率約有十幾個百分比，這反映豎井出流孔變水頭排淤效率比定水頭排淤效率高很多 (大約 6~9 倍)，所以如果採用多次性的變水頭排淤，可提升排淤量。

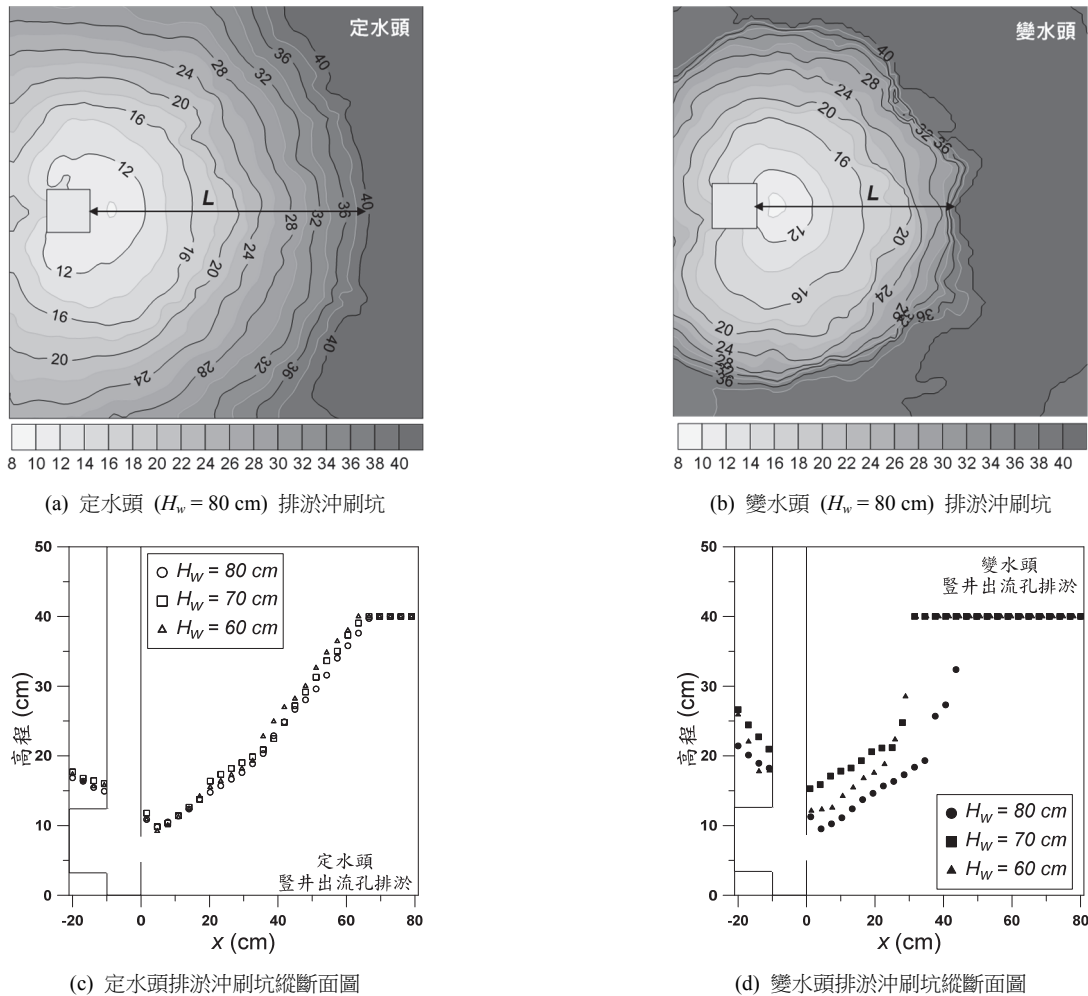


圖 8 豎井出流孔定水頭及變水頭排淤沖刷坑地形圖

Fig.8 Topographies of scour cones formed by the shaft-bottom-orifice desilting under constant-head and falling-head tests

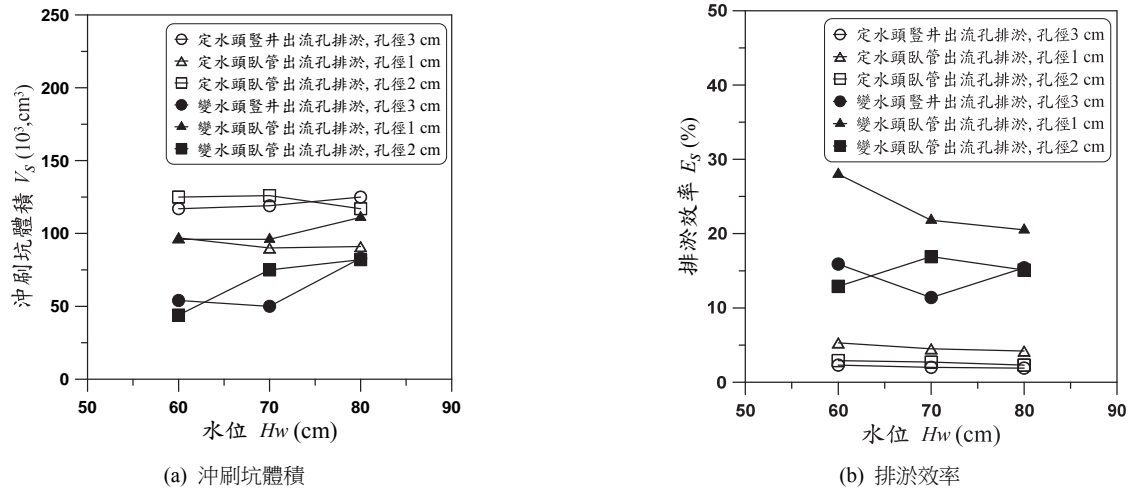


圖 9 不同排淤試驗條件下沖刷坑體積及排淤效率之比較

Fig.9 Comparisons on the scour-cone volume and desilting efficiency under different desilting-test conditions

3. 臥管出流孔排淤試驗結果

(1) 直徑 1 cm 出流孔排淤試驗

豎井出流孔安裝臥管試驗，由臥管上方三個出流孔排淤（簡稱臥管出流孔排淤），臥管長度 30 cm，開孔位置離豎井 12、20 及 28 cm 處，出流孔孔徑有 1 cm 及 2 cm 兩種。在農塘水位 $H_w = 80$ cm 及臥管出流孔直徑為 1 cm 條件下，臥管出流孔定水頭及變水頭排淤試驗後農塘底床地形高程，分別如圖 10a 及 圖 10b 所示，由圖中可以看出定水頭及變水頭排淤所造成的沖刷坑大小相近，近似橢圓形，最大深度大約位於臥管中間出流孔附近（離豎井 20 cm 附近），沖刷坑外緣離豎井最大距離分別約為 $L = 78.2$ cm 及 80.0 cm，最大寬度分別約為 $W = 98.0$ cm 及 97.0 cm，此顯示定水頭及變水頭排淤試驗結果相近。

當臥管開孔為 1 cm 時，孔徑較小，排淤出流時間較長，有充分時間讓排淤沖刷坑的形狀及大小發展趨於平衡狀態。沖刷坑發展到平衡狀態，其形狀及大小就不再變化，因此較多的水（較高水位）也沒有增加較大的排淤量。臥管 1 cm 出流孔在三種不同水位變水頭之排淤試驗，由於沖刷坑皆趨近於平衡，排淤量相近，但水位高者用水量較多，因此對應之排淤效率較低，如表 2 所示。圖 10c 及圖 10d 顯示三種不同水位下臥管出流孔定水頭排淤及變水頭排淤沖刷坑的縱向形狀，圖中顯示，無論是定水頭或變水頭排淤，不同水位的試驗後它們所對應之沖刷坑軸向剖面皆趨近一致。當水位 $H_w = 60$ 、70 及 80 cm 時，臥管出流孔定水頭排淤沖刷坑長度分別為 $L = 78.0$ 、77.0 及 78.2 cm，沖刷坑體積分別為 $V_s = 97$ 、90 及 $91 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ，由臥管出流關係（式 6）計算出流量分別為 $Q_o = 503$ 、554 及 603 cm^3 ，對應之總出水量分別約為 $V_w = 18.1$ 、20.0 及 $21.7 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ，排淤效率分別為 $E_s = 5.3\%$ 、4.5% 及 4.2%；另外，對於起始水位 $H_w = 60$ 、70 及 80 cm 的變水頭排淤結果，排淤時間分別為 1181、1479 及 1716 秒，排淤用水量分別約為

$V_w = 3.4$ 、4.4 及 $5.4 \times 10^5 \text{ cm}^3$ ，它所對應之沖刷坑長度分別為 $L = 72.6$ 、78.0 及 80.0 cm，沖刷坑體積分別為 $V_s = 96$ 、96 及 $111 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ，計算出排淤效率分別為 $E_s = 28.0\%$ 、21.8% 及 20.5%。由沖刷坑體積及軸向沖刷坑剖面可瞭解，臥管出流孔孔徑 1 cm 的變水頭排淤結果也是已經達到穩定平衡狀態，這是因為開孔孔徑較小（出流孔有效通水面積小於臥管通水面積），出流量受限於出流孔孔徑，排淤時間較長，這使得水流有足夠之時間讓沖刷坑達到穩定平衡。圖 9 中也顯示在水位 $H_w = 70$ 及 80 cm 的條件下，變水頭臥管排淤 1 公分出流孔的排淤量甚至略大於定水頭箱同水位試驗之結果。前述臥管出流孔孔徑 1 cm 的排淤試驗結果總結為：(1) 定水頭及變水頭排淤試驗結果相近，沒有顯著差異，這是因為變水頭排淤時間夠長足以使沖刷坑發展到平衡狀態；(2) 定水頭及變水頭排淤量大致相同，但以排淤效率而言，變水頭排淤優於定水頭排淤（大約 5~6 倍）；(3) 水位對於沖刷坑長度及沖刷坑體積雖有影響但是影響很小，在定水頭排淤試驗中，由於排淤過程水量可以持續的供給，因此用水量多寡不再是影響排淤量之主要因子，影響排淤量的主要因子是泥沙顆粒本身的特性，如密度、形狀及大小等因子。

此外，臥管出流孔為 1 cm 的定水頭排淤及變水頭排淤試驗，臥管前端 $x > 30$ cm 至沖刷坑外緣的坡面接近於固定坡度的直線，此結果亦顯示排淤沖刷坑已趨於穩定平衡狀態。

(2) 直徑 2 cm 出流孔排淤試驗

臥管出流孔直徑為 2 cm 及水位 H_w 為 80 cm 的條件下，臥管出流孔定水頭及變水頭排淤試驗後沖刷坑地形之結果，分別如圖 11a 及圖 11b 所示。圖中顯示定水頭排淤的沖刷坑略大於變水頭排淤的沖刷坑，前者沖刷坑在寬度及長度方面均已經觸及農塘邊界，後者沖刷坑較小，沒有觸及邊界，形狀較接近於圓形，沖刷坑最大深度大約位於臥管中間出流孔附近（離豎井 20 cm 附近）。

當水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 時，臥管出流孔定水頭排淤及變水頭排淤的沖刷坑縱向剖面形狀，如圖 11c 及圖 11d 所示。由圖 11c 顯示三種水位定水頭試驗結果沖刷坑軸向縱剖面雖然略有不同，但趨勢相當一致。當水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 時，臥管出流孔出流量分別為 $Q_o = 1,190、1,310$ 及 $1,423$ cm^3/s ，排淤用水量分別約為 $V_w = 42.8、47.1$ 及 51.2×10^5 cm^3/s ，沖刷坑體積分別為 $V_s = 125、126$ 及 117×10^3 cm^3 ，計算出定水頭排淤效率分別為 $E_s = 2.9\%、2.7\%$ 及 2.3% 。

在定水頭試驗中，由於排淤時間夠長，使得沖刷坑在排淤結束時皆趨近於平衡狀態，由前人研究可瞭解，影響排淤量（沖刷坑體積）之主要因子包含水頭差、泥沙粒徑、出流孔大小、出流孔形狀及排沙引流裝置等，本研究之淤沙高度一致且泥沙粒徑未做調整，水頭差雖有增加，但對於沖刷坑大小之影響不顯著，故在本研究中，影響排淤量之主要因子為出流孔大小（比較臥管開孔 1 cm 及 2 cm 試驗）及引流裝置之差異（比較豎井出流孔及安裝臥管試驗）。

在變水頭排淤方面，當起始水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 時，排淤用水量分別約為 $V_w = 3.4、4.4$ 及 5.4×10^5

cm^3 ，所對應之沖刷坑長度分別為 40.6、68.9 及 70.0 cm（圖 11d），沖刷坑體積分別為 $V_s = 44.75$ 及 82×10^3 cm^3 ，對應之排淤效率分別為 $E_s = 12.9\%、16.9\%$ 及 15.1% （圖 9）。顯然臥管 2 cm 出流孔的變水頭排淤結果尚未達到穩定平衡狀態，這是因為臥管開孔的孔徑較大，出流量較大，排淤時間較短；起始水位 $H_w = 60、70$ 及 80 cm 對應之排淤時間分別只有 539、567 及 691 秒，水流沒有足夠時間讓沖刷坑達到平衡，沖刷坑形狀及大小與水量（水位）有密切之關係，因此臥管 2 cm 出流孔變水頭排淤試驗結果水位高者排淤量較大，如表 2 所示。前述臥管 2 cm 出流孔排淤試驗結果總結為：(1) 定水頭及變水頭排淤試驗結果差異大，定水頭排淤有充足的時間排淤使得沖刷坑處於平衡狀態，沖刷坑形狀及大小受水位的影響不顯著；(2) 臥管 2 cm 出流孔變水頭排淤，由於孔徑較大，變水頭排淤時間較短，沖刷坑尚未發展到平衡狀態，其形狀及大小明顯受到起始水位的影響，起始水位大者沖刷坑較大；(3) 變水頭排淤量雖然小於定水頭排淤量，但若以排淤效率而言，變水頭排淤效率明顯優於定水頭排淤效率（大約 5~7 倍）。

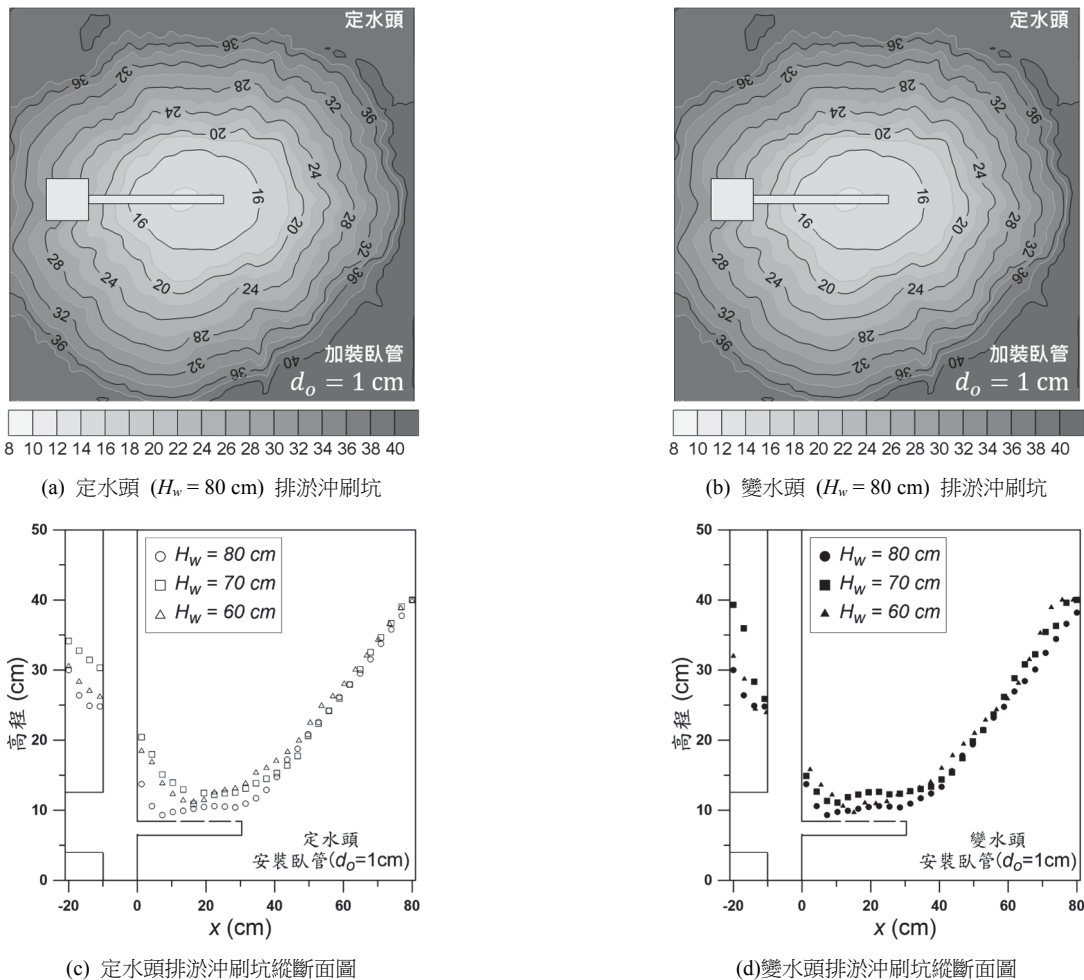


圖 10 臥管出流孔 ($d_o = 1$ cm) 定水頭及變水頭排淤沖刷坑地形圖

Fig.10 Topographical scour cones formed by the desilting through the drainage pipe (with three 1 cm holes) under constant-head and falling-head tests

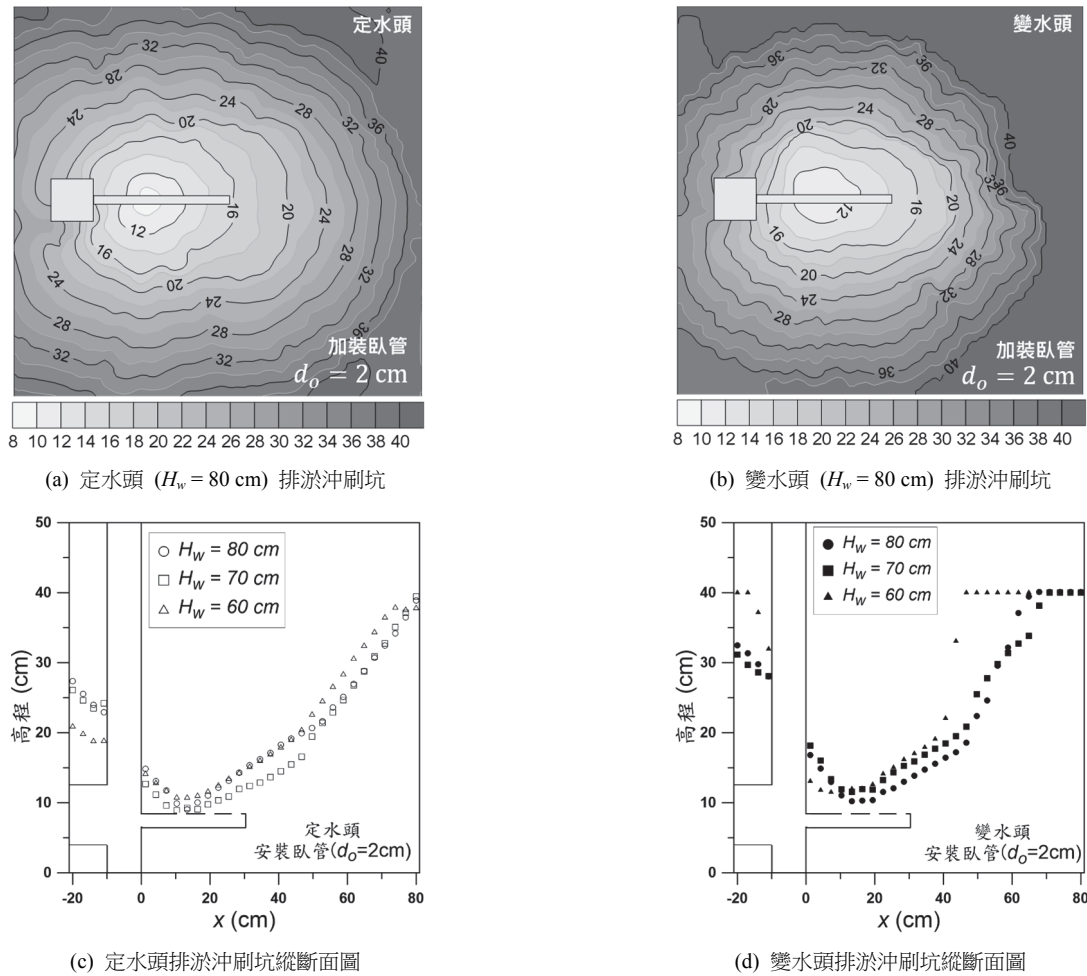


圖 11 臥管出流孔 ($d_o = 2\text{ cm}$) 定水頭及變水頭排淤冲刷坑地形圖

Fig.11 Topographical scour cones formed by the desilting through the drainage pipe (with three 2 cm holes) under constant-head and falling-head tests

四、結 論

本研究進行農塘豎井出流孔及豎井出流孔安裝臥管的非凝聚性沉滓排淤試驗，後者簡稱臥管出流孔排淤試驗，試驗包含定水頭試驗及變水頭試驗兩大類，試驗後量測排淤冲刷坑的地形，用以分析冲刷坑長度、寬度、縱向剖面、排淤體積及排淤效率。結果歸納出下列幾點結論：

1. 由清水試驗可瞭解豎井出流孔及臥管出流孔不同實驗配置下，出流量與農塘水位之關係，做為後續排淤試驗流量調控及計算之依據，並分析對應之流量係數 C_d 。結果顯示豎井出流孔的 $C_d \approx 0.74$ 。臥管出流孔的 C_d 值和開孔直徑有密切之關係，當開孔直徑為 2 cm 時，出流孔總截面積大於臥管截面積， $C_d \approx 0.61$ ；當開孔直徑為 1 cm 時，出流孔總截面積小於臥管截面積，出流量受限於臥管開孔，出水流量較小，流量係數大幅下降至 $C_d \approx 0.25$ 。
2. 豎井出流孔定水頭排淤試驗，排淤時間 1 小時，結果顯示排淤所形成的冲刷坑發展到一定程度之後就穩定下來達到平衡狀態，這表示排淤量有個上限，只能排出出流孔附近的淤沙，無法排除遠離出流孔的淤沙。水位對排淤冲刷坑長度及排淤體積雖有影響但影響很小。冲刷坑最深處至冲刷坑

- 的外緣的坡度介於 25.9° 至 27.7° 之間，近外緣段略陡些，近似斜直線，接近泥沙安息角。定義冲刷坑體積和排淤過程使用的水量之比值為排淤效率 E_s ，豎井出流孔定水頭排淤方式的排淤效率很低，大約只有 $E_s \approx 1.8\%$ 。變水頭排淤方式，水量較少，沒有足夠時間排淤，冲刷坑未發展至穩定狀態，雖然排淤量小，但是排淤效率大約為 15%，遠大於定水頭排淤效率。
3. 對於臥管出流孔排淤，其排淤量及排淤效率與其出流孔直徑有關。當出流孔直徑為 2 cm 時，出流孔總截面積大於臥管截面積，定水頭排淤試驗結果顯示冲刷坑趨於穩定，水位對排淤冲刷坑長度及排淤體積雖有影響但影響不大。在定水頭排淤試驗中，由於排淤過程水量可以持續的供給，因此用水量多寡不再是影響排淤量之主要因子，影響排淤量的主要因子是泥沙顆粒本身的特性，如密度、形狀及大小等因子。變水頭排淤結果顯示冲刷坑尚未到達穩定狀態，冲刷坑長度及排淤體積隨水位增加而增加。
 4. 當臥管出流孔直徑為 1 cm 時，出流孔總截面積小於臥管截面積，出流孔直徑較小，限縮了出流量而延長排淤時間，使排淤冲刷坑有機會發展至穩定平衡。定水頭及變水頭試驗

結果均顯示沖刷坑形狀已經趨於穩定，水位對沖刷坑長度及體積雖有影響但影響不大。變水頭試驗之排淤效率大約 23.5% 遠高於定水頭排淤效率 (大約 3.9%)。

- 豎井出流孔排淤主要是排除出流孔附近的淤沙，豎井出流孔安裝臥管排淤可擴展淤沙排除範圍。臥管出流孔排淤量及排淤效率與出流孔直徑有關。本研究試驗結果顯示直徑 1 cm 的臥管出流孔變水頭排淤量及排淤效率均高於其定水頭排淤量及排淤效率，而且比直徑 2 cm 的臥管出流孔排淤效果佳。因此適當選擇臥管出流孔直徑可以得到較好的排淤效果。
- 本排淤試驗研究侷限於非凝聚性沉澱，然而實際農塘淤泥含有大量黏性沉澱，未來有需要進一步進行黏滯性沉澱的排淤試驗，以了解黏滯性沉澱對於農塘排淤之影響。

誌 謝

本排淤試驗研究設備承蒙行政院農業委員會水土保持局臺南分局「築壩式農塘功能與壩體工法改善計畫 (2019)」的經費補助，及洪子傑先生在試驗操作與地形量測方面的協助，特此致謝。

符號說明

符號	說明
Q_o	出流量
H_w	水位，水面至水槽底床距離
h_o	水頭，水面至出流孔中心軸距離
D_o	出流孔孔徑
D_A	豎井底部圓形出流孔直徑
DB	臥管內徑
U_o	出流孔口流速
g	重力加速度
ρ_w	水密度
ρ_s	淤沙密度
μ	黏滯度
H_s	淤沙厚度
L	沖刷坑長度 (豎井出流孔至上游沖刷坑水平距離)
W	沖刷坑寬度
d_m	沖刷坑最大深度
x	位置，以豎井出流孔為0，向農塘入流方向為正
δ	出流孔下緣至水槽底床距離
d_0	臥管上圓形孔直徑
A	出口斷面積
C_d	流量係數
d_{50}	中值粒徑
n	孔隙率
V_w	排淤用水量
V_s	沖刷坑體積
E_s	V_s / V_w ，排淤效率
T	試驗操作時間

參考文獻

- 王志賢 (2019), 「築壩式農塘功能與壩體工法改善計畫」研究報告, 行政院農委會水土保持局臺南分局委託執行。(Wang, J.S. (2019). *The project of improvement the functions of dam-type farm ponds and dam constructed method*, Tainan branch, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, (in Chinese))
- 柯閔翔 (2020), 「豎井設置排沙臥管對農塘排沙效果影響之實驗研究」, 國立成功大學碩士論文 (指導教授: 詹錢登)。(Ko, H.X. (2020). *Experimental Study on Desilting Effects of a Vertical Shaft with a Horizontal Desilting Tube in a farm pond*, Master Thesis, National Cheng Kung University (advisor: Jan, C.D.), Taiwan, ROC. (in Chinese))
- 經濟部水利署 (2011), 「氣候變遷下水庫排沙對策研究總報告」, 2011。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. (2011). *Overall Report for Reservoir Sediment Releasing Countermeasures Cope with Climate Change*, Taiwan, (in Chinese))
- Emamgholizadeh, S., and Fathi-Moghadam, M. (2006). "Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4), 7-16.
- Emamgholizadeh, S., and Fathi-Moghadam, M. (2014). "Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs," *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, 674-681.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Bina, M., and Ghomeshi, M. (2010). "Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment," *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 509-514.
- Hotchkiss, R. H., and Huang, X., (1995). "Hydrosuction Sediment-Removal Systems (HSRS): Principles and Field Test," *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), 479-489.
- Lai, J.S., and Shen, H.W., (1996). "Flushing sediment through reservoirs," *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), 237-255.
- Madadi, M. R., Rahimpour, M., and Qaderi, K. (2017). "Improving the Pressurized Flushing Efficiency in Reservoirs: an Experimental Study." *Water Resources Management*, 31, 4633-4647.
- Powell, D. N., and Khan, A. A. (2012). "Scour upstream of a circular orifice under constant head." *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 28-34.

2022 年 04 月 20 日 收稿

2022 年 05 月 24 日 修正

2022 年 09 月 27 日 接受