

高桶式旋流漏斗排砂器的柱體區高度變化 對泥砂去除效率影響之試驗研究

Effect of Cylinder Heights of a Deep-Depth Vortex Chamber Type Sediment Extractor on Sediment Removal Efficiency: Experiments

國立成功大學
水利及海洋工程學系
特聘教授

詹錢登

Chyan-Deng Jan

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士生

楊致遠

Chih-Yuan Yang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士後研究員

徐郁超*

Yu-Chao Hsu

國立成功大學
水利及海洋工程學系
碩士

向韋誠

Wei-Cheng Siang

摘要

高桶式旋流漏斗排砂器主要是將含砂水流導引流入旋流漏斗排砂器內進行圓周運動，利用離心力與重力之交互作用將水砂分離，進而使含砂濃度較高之渾水由排砂器底部的排砂底孔排出，而含砂濃度較低之渾水則由表層出口流出，以達到排渾取清之目的。本研究使用直徑 48 cm 及高度 130 cm 的高桶式旋流漏斗排砂器進行試驗，且排砂器內設有寬 12 cm 的水平懸板及直徑 3 cm 的入流管。試驗配置包含三種排砂底孔直徑($D_u = 0.5$ cm、 0.7 cm 及 1.0 cm)與三種柱體區高度($H_o = 50$ cm、 60 cm 及 70 cm)，柱體區高度和排砂器直徑之比值分別為 1.04、1.25 及 1.46。渾水試驗採用的入流量介於 80×10^{-6} m³/s 至 770×10^{-6} m³/s 之間，試驗所使用的泥砂為粉土泥砂，其中值粒徑為 0.041 mm，入流含砂濃度控制於 60.0 g/L 至 65.0 g/L 之間。試驗結果可知，當底孔直徑較小時($D_u = 0.5$ cm)，柱體區高度較大者($H_o = 70$ cm)有較好的排砂效果，其平均泥砂去除效率與平均表層流出含砂濃度分別約為 99.2%與 0.50 g/L，但排砂底孔直徑較大時，柱體區高度對於泥砂去除效果的影響則較不顯著。

關鍵詞：旋流漏斗排砂器，柱體區高度，渾水試驗，泥砂去除效率。

ABSTRACT

The muddy water flows into the vortex chamber type sediment extractor through tangential inlet pipe, and moves as a vortex flow inside the chamber. The water and

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員，70101 台南市大學路 1 號，10yuchao30@gmail.com

sediment of the muddy water will be separated due to the gravity and centrifugal force. The flow through the bottom orifice contains higher sediment concentration, corresponding to the inflow while the flow through the overflow weir contains much lower sediment concentration. The experimental study was conducted in a deep-depth vortex chamber type sediment extractor which has a total height of 130 cm and an internal diameter of 48 cm. The horizontal deflectors of 12 cm wide are installed inside the vortex chamber. The experimental arrangement contains: one kind of inlet pipe size ($D_i = 3$ cm), three kinds of bottom orifice size ($D_u = 0.5, 0.7, 1.0$ cm), and three kinds of overflow weir height ($H_o = 50, 60, 70$ cm) corresponding to three kinds of the bucket depth ratio (H_o/D) (i.e., 1.04, 1.25, 1.46). The inflow discharge of muddy water varied from 80×10^{-6} to 770×10^{-6} m³/s. The inflow sediment concentrations are between 60.0 g/L and 65.0 g/L and the sediment used in experiments is silt sand having a median diameter of 0.041mm. According to the results of experiment, the sediment removal efficiency and overflow sediment concentration ($\eta_s = 99.2\%$ and $C_o = 0.50$ g/L) for the experiment using the bottom orifice of 0.5 cm and overflow weir height of 70 cm is better. But the bottom orifice diameter is larger, the overflow weir height is not significantly associated with the sediment removal efficiency and overflow sediment concentration.

Keywords: Vortex chamber type sediment extractor, Cylinder height, Muddy water experiment, Sediment removal efficiency.

一、前言

水力旋流漏斗排砂器主要由圓形漏斗室、下層入流渠道及上層溢流渠道所組成。入流渠道將含砂水流引入漏斗室做圓周運動，利用離心力與重力之交互作用將泥砂由排砂器底部的排砂底孔排出，而含砂濃度較低之水流則由排砂器上層的出口流出以茲利用，如圖 1 所示。水力旋流漏斗排砂器是由 Salakhov(1975)提出渦流室概念所建構的排砂設施，以解決大量河砂進入水力發電廠的問題。爾後國際上陸續有許多國家的研究人員開始針對水力旋流漏斗排砂器進行相關研究及應用，例如：周著等(1991)、唐毅等(1996)、王順久等(1997)、譚冬初等(1998)、邱秀云等(1999)、侯杰等(2000)、Athar *et al.* (2002)、劉善均等(2003)、詹錢登等(2006)、Keshavarzi *et al.* (2006)、李琳等(2007)及 Chapokpour *et al.* (2011) 等。

國立成功大學詹錢登教授研究團隊自 2006

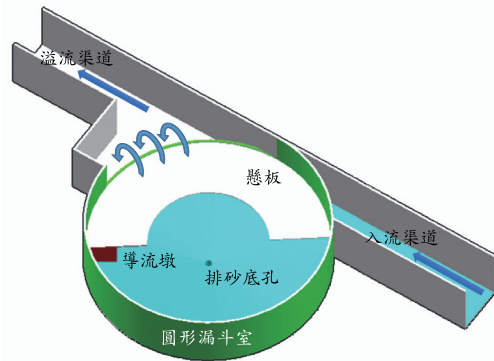


圖 1 水力旋流漏斗排砂器(低桶式)立體圖(詹錢登等, 2014)

年開始，陸續進行水力旋流漏斗排砂器之相關試驗研究(詹錢登等, 2006、2007、2014)，初期以低矮型的水力旋流漏斗排砂器為研究對象，以探討水力旋流漏斗排砂器的配置變化對泥砂去除效率之影響，其結果顯示泥砂粒徑越小，水力旋流漏斗排砂器的泥砂去除效率也逐漸降低，如表 1

表 1 前人水力旋流漏斗排砂器試驗之相關結果

泥砂粒徑範圍(mm)	泥砂中值粒徑(mm)	泥砂去除效率(%)
0.59-0.30	0.445	98.2-91.3
0.30-0.15	0.225	99.1-89.7
0.15-0.07	0.110	66.4-45.4
0.07-0.054	0.062	52.4-32.3

資料來源：詹錢登等(2006、2007)

表 2 前人水力旋流漏斗排砂器試驗之邊壁水深及其與漏斗直徑之比值

研究作者(年)	漏斗直徑 D (m)	漏斗水深 H_p (m)	H_p/D 之比值
Curi <i>et al.</i> (1979)	0.9	0.069-0.148	0.077-0.164
Mashauri (1986)	0.5	0.1	0.2
Paul <i>et al.</i> (1991)	4.25	0.201-0.290	0.047-0.068
譚初冬等(1998)	12.0	1.46	0.122
邱秀云等(1999)	0.26	0.031	0.119
Athar <i>et al.</i> (2002)	1.0	0.15-0.28	0.15-0.28
劉善均等(2003)	40-60	3.3-7.2	0.105-0.120
Gheisi <i>et al.</i> (2006)	1.0	0.7	0.7
徐燕等(2006)	1.1	1.265	1.15
詹錢登等(2006)	0.5	0.08-0.09	0.16-0.18
李琳等(2007)	15	2.05-2.11	0.137-0.141
詹錢登等(2007)	1.0	0.1-0.115	0.1-0.115
詹錢登等(2010)	0.48	0.707-0.72	1.47-1.50
Chapokpour <i>et al.</i> (2011)	1.5	0.7	0.467
詹錢登等(2011)	0.48	0.707-0.72	1.47-1.50
Hsu <i>et al.</i> (2013)	0.48	0.7-0.712	1.46-1.48

資料來源：詹錢登等(2011)與 Hsu *et al.* (2013)

所示，當泥砂粒徑小於 0.1 mm 時，泥砂去除效率會有顯著的降低。整體而言，水力旋流漏斗排砂器對於粗顆粒泥砂(粒徑 > 0.1 mm)的排砂效果較佳，但對於去除細顆粒泥砂(粒徑 < 0.1 mm)的效果不夠理想，這是因為泥砂粒徑較小受到水流的影響大於重力作用，不利於泥砂沉降。有鑑於此，為了增加細顆粒泥砂的排砂效果，近年有些學者開始針對圓形漏斗室高度較高的水力旋流漏斗排砂器進行試驗研究，並探討其排砂效果及水流特性(Jan *et al.*, 2010、2011；詹錢登等, 2010、2011；Hsu *et al.*, 2013)。詹錢登等(2010)進行高桶式旋流漏斗排砂器的泥砂去除效率試驗研究，其結果顯示排砂器的漏斗室較高，渾水在進入漏斗室後停留的時間較長，有利於排除較細顆粒泥砂。他們依照排砂器漏斗的邊壁水深

(H_p)與漏斗直徑(D)之比值(H_p/D)初步將水力旋流漏斗排砂器區分為「低桶式旋流漏斗排砂器」及「高桶式旋流漏斗排砂器」，因此於固定漏斗直徑(D)的情況下，柱體區的高度越高，表示排砂器內的水位也越高，其比值(H_p/D)亦越大，如表 2 所示。他們將水力旋流漏斗排砂器 H_p/D 大於等於 1.0 者，稱為「高桶式旋流漏斗排砂器」，反之小於 1.0 者則稱為「低桶式旋流漏斗排砂器」。詹錢登等(2011)進一步探討高桶式旋流漏斗排砂器內配置水平懸板對於水流穩定及排砂效果之影響，其結果顯示上懸板有穩定表面流況、減緩渾清交界面波動與區隔渾水交界面的功能；中懸板能穩定柱體區內之流況；下懸板則有抑制入射水流紊動、穩定流場的功能，及提升錐體區的徑向流速，有利於泥砂由排砂底孔排出。

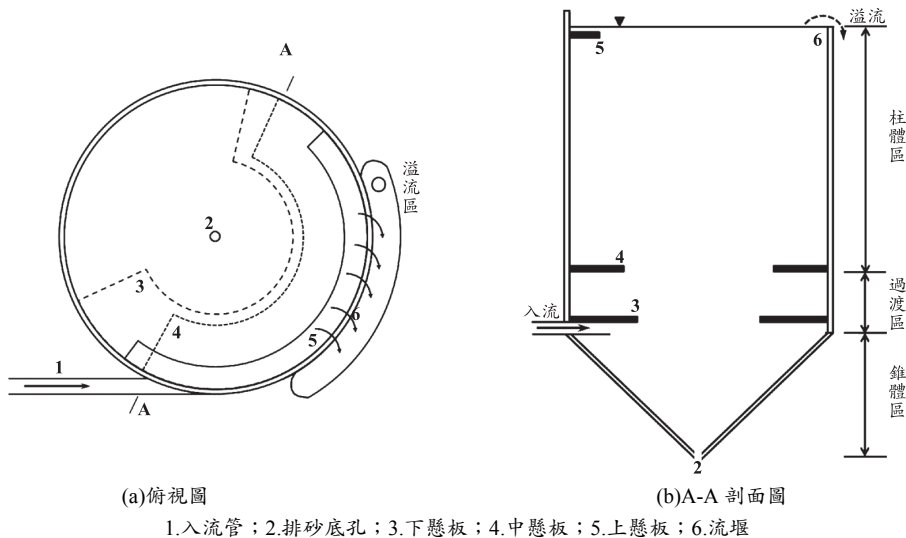


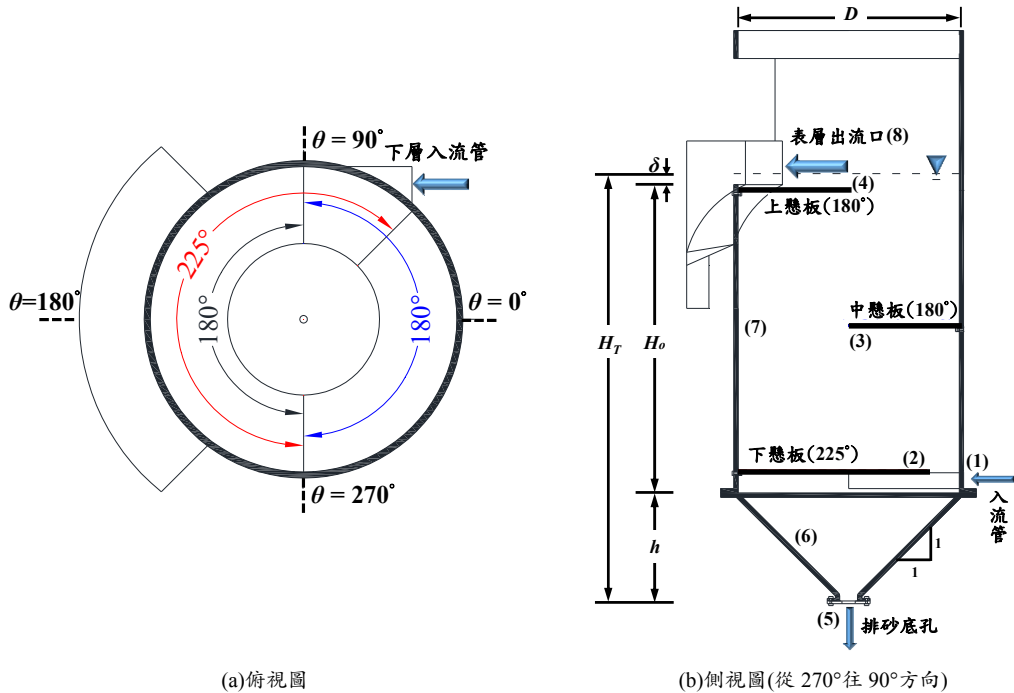
圖 2 高桶式旋流漏斗排砂器斷面示意圖(詹錢登等，2011)

國外針對高桶式旋流漏斗排砂器(簡稱排砂器)所進行的相關模型試驗與數值模擬研究，包含：邱秀云等(2006)、徐燕等(2006)、肖俊等(2006)、李琳等(2007)、劉芬等(2007)、陳偉東等(2007)、余新豔等(2008)、趙濤等(2011)。其中，邱秀云等(2006)利用粒子圖像測速法(Particle Image Velocimetry, PIV)進行排砂器之清水流場試驗，進而分析其內部流場之分布特性，他們將排砂器分為三個區域：柱體區(重力區)、錐體區及過渡區(錐體區與柱體區之間)，如圖 2 所示。柱體區(重力區)內的流場主要為強制渦流，此區域能讓細顆粒泥砂有較長的時間進行沉降運動。當整個系統達到平衡時，柱體區的水位會維持一定(略高於出流口位置)，而泥砂於重力作用下持續進行沉降運動，因此於柱體區水體的表層形成清水層，此清水層的水體經由出流口流出，以達到水砂分離之目的。在錐體區部分，水流由入流管沿漏斗圓周邊壁，以切線方向流入錐體區內做圓周運動形成渦流，由於離心力較大，形成自由渦流與強制渦流共存的渦流現象，並以渦流機制及重力作用將泥砂顆粒自排砂底孔排出。在過渡區(錐體區與柱體區之間)因為受到入射水流之影響，水流流況較為混亂。余新豔等(2008)針對排砂器之效能進行試驗研究，試驗結果顯示排

砂器上層溢流含砂濃度隨著柱體區高度與排砂底孔直徑的增加而減小，但隨著入流量與入流含砂濃度的增大而增加；表層出流量隨著柱體區高度及排砂底孔直徑的增加而減小，且隨著入流量的增大而增大，但其與入流含砂濃度沒有顯著關係，其研究結果建議排砂器之柱體區高度不宜過高。趙濤等(2011)利用計算流體動力學軟體(Fluent)分析排砂器內部之流場分布特性，數值模擬結果顯示柱體區高度的增加將會導致切向速度的減小，亦表示離心力將隨柱體區高度的增加而逐漸減少。當柱體區高度較小時，中心軸線兩側均存在明顯的循環渦流，因此會降低泥砂顆粒向排砂器上方的表層出流口流動的可能性，因此建議排砂器的柱體區高度不宜過高，其深寬比(H_0/D)以 1.25 至 1.45 之間為宜。依據上述前人的研究結果，本研究進一步透過清水與渾水試驗探討排砂器於不同柱體區高度對泥砂去除效率之影響。

二、試驗模型配置與條件

排砂器內部流況屬於三維的流動特性，因此改變水平懸板配置、入流管尺寸、排砂底孔尺寸與出流口配置型式皆會影響流動特性。本研究參考國內外的相關研究，進行試驗模型配置及條件



1.入流管；2.下懸板；3.中懸板；4.上懸板；5.排砂底孔；6.圓形漏斗室；7.圓形柱體室；8.表層出口口

圖 3 本研究高桶式旋流漏斗排砂器之斷面示意圖(以 $H_o = 70$ cm 為例)

規劃。試驗模型由循環水系統與排砂器兩大部分所組成，以下說明排砂器之相關配置。

2.1 高桶式旋流漏斗排砂器之配置

排砂器的基本結構由下而上包括排砂底孔、圓形漏斗室、入流管、圓形柱體室及表層出口口所組成。在細部結構上，為穩定水流及提升泥砂去除效率，可在圓形柱體室內增設水平懸板配置。本研究所使用的排砂器，如圖 3 所示，主要材質為厚度 1.0 cm 之透明壓克力，以方便試驗觀察。

本研究的排砂器可分為圓形漏斗室與圓形柱體室兩部分。圓形漏斗室的直徑(D)為 48 cm，深度(h)25 cm，底部坡度(S_c)為 45°，在圓形漏斗室底部的排砂底孔直徑(D_u)可以調整，分別為 0.5 cm、0.7 cm 及 1.0 cm。圓形柱體室的直徑(D)為 48 cm 及其高度(H_o)可調整，分別為 50 cm、60 cm 與 70 cm，其所對應之深寬比(H_o/D)依序為 1.04、

1.25 與 1.46，如圖 4 所示。在圓形柱體室下方的入流管直徑(D_i)為 3 cm，其先以長度 10 cm 的水平管連接圓形柱體室，然後再以 45°傾斜角度的水管連接定水頭箱底部，而水流經由入流管以切線方向進入排砂器。表層出口口位置可調整，從圓形柱體室底部起算 50 cm 至 70 cm 處，出口口的開口寬度則是以相對於入流方向通過柱體圓心左右各開 45°，溢流堰則設置於表層出口口外緣，其高度為 1 cm，從表層出口口溢流的水體，用漏斗槽集中輸送回蓄水槽，以形成一循環系統。本試驗為了加強排砂器內流場的穩定性，於排砂器內部安裝寬度 12 cm 且厚度 0.5 cm 的上懸板、中懸板及下懸板。上懸板為圓心角 180° (90°至 270°)的環狀懸板，裝設於表層出口口位置之下方 1 cm 處；下懸板為圓心角 225° (45°至 270°)的環狀懸板，裝設於入流管位置的上緣，可避免入射水流直接影響圓形柱體室之水體；中懸板為圓心角 180° (270°至 90°)的環狀懸板，裝設於上

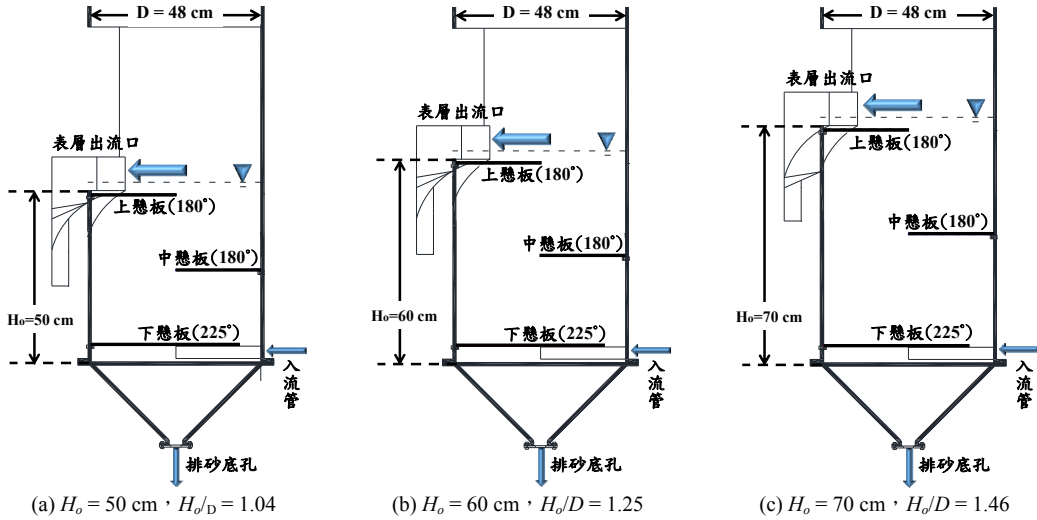


圖 4 高桶式旋流漏斗排砂器不同柱體區高度模型配置圖

表 3 本研究高桶式旋流漏斗排砂器之清水及渾水試驗條件

試驗編號	懸板數量	懸板位置	入流管直徑 D_i (cm)	柱體區高度 H_o (cm)	深寬比 H_o/D	底孔直徑 D_u (cm)	入流量 Q_i ($10^{-3}m^3/s$)	泥砂中值粒徑 d_{50} (mm)	入流含砂濃度 C_i (g/L)	
RunA ₁	3	上-中-下	3.0	50	1.04	0.5	0.07-1.00	0.041	清水試驗 $C_i = 0$	
RunA ₂						0.7				
RunA ₃						1.0				
RunB ₁				60	1.25	0.5				渾水試驗 $C_i = 60-65$
RunB ₂						0.7				
RunB ₃						1.0				
RunC ₁				70	1.46	0.5				
RunC ₂						0.7				
RunC ₃						1.0				

懸板及下懸板的中間位置。

2.2 試驗條件及分析項目

本研究依據前述排砂器基本配置，調整圓形柱體室的三種柱體區高度($H_o = 50\text{ cm}$ 、 60 cm 、 70 cm)及排砂底孔的三種直徑尺寸($D_u = 0.5\text{ cm}$ 、 0.7 cm 、 1.0 cm)，因此於相同試驗條件中可以組合成 9 種試驗項目，如表 3 所示，進而透過清水與渾水試驗，以分析比較排砂器的泥砂去除效果。本研究首先進行清水試驗，其入流量以圓形漏斗室內水流恰好可溢流過表層取水口後開始起算，此時的入流量(Q_i)約為 $70 \times 10^{-6}\text{ m}^3/s$ ，然後逐漸增加入流量至 $1,000 \times 10^{-6}\text{ m}^3/s$ ，其所對應的表層取水

率約介於 7%至 78%之間，然而在排砂器的排砂系統達到穩定平衡情況時，其入流量等於底孔出流量與表層出流量之合，即 $Q_i = Q_u + Q_o$ 。後續進行的渾水試驗，其入流量介於 $80 \times 10^{-6}\text{ m}^3/s$ 至 $770 \times 10^{-6}\text{ m}^3/s$ 之間，相對應的表層取水率約介於 23%至 71%之間，而入流含砂濃度(C_i)控制於 60 g/L 至 65 g/L 之間，試驗使用的泥砂材料為粉土泥砂，比重、有效粒徑(d_{10})與中值粒徑(d_{50})分別約為 2.55、0.008 mm 與 0.041 mm，如圖 5 與圖 6 所示，而試驗泥砂分布特性的均勻係數(d_{60}/d_{10})及分選係數($\sqrt{d_{75}/d_{25}}$)分別約為 5.88 與 1.54。

本研究先進行清水試驗以瞭解排砂器內部渦流的變化情形，以做為渾水試驗條件控制之參

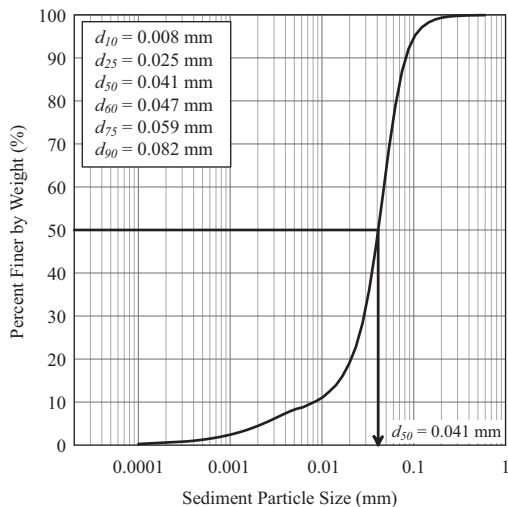


圖 5 本試驗所使用泥砂材料的累積通過百分比曲線圖

黏粒 (Clay)	粉砂 (Silt)	細砂 (Fine Sand)	粗砂 (Sand)	礫石 (Gravel)	卵石 (Cobble)	漂石 (Boulder)
0.002		0.02	0.2	2	20	200
粉土泥砂之粒徑範圍						
粒徑 (mm)						

圖 6 試驗泥砂粒徑所對應之阿特堡及國際土壤學會之泥砂分類

考，進而探討排砂器的排砂效果。排砂器內部渦流強度與穩定性主要受柱體區的高度、底孔直徑的尺寸與流入流量的多寡等因素影響，且其與排砂器去除泥砂的效果有著極大的關係，然而受到過強或不穩定的渦流流動都不利泥砂於柱體區內進行泥砂沉降運動。

根據 Jan *et al.* (2010、2011) 的清水試驗結果顯示，透過底孔流量係數(C_d)的變化可進一步說明排砂器內部渦流的流動情況，然而受到排砂器內部渦流的離心力與空氣柱(底孔出流面積減少)等變化因素影響，底孔出流量隨著渦流強度的增加而有降低的情形。因此清水試驗將藉由底孔流量係數探討排砂器於不同配置條件下，瞭解其內部流況變化的情形，其中底孔流量係數的定義為試驗實際量測之底孔出流量與其計算值的比值，如式(1)所示。

$$C_d = \frac{Q_u}{Q_{uc}} = \frac{Q_u}{A\sqrt{2g(H_p + h)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$= \frac{Q_u}{(0.25\pi D_u^2 \sqrt{2g(H_p + h)})}$$

其中， C_d 為底孔流量係數， Q_u 為實際量測的底孔出流量， Q_{uc} 由經驗公式計算出的底孔出流量， A 為底孔通水斷面積， g 為重力加速度， H_p 為圓形柱體室水深($H_p = H_o + \delta$)， H_o 為圓形柱體室高度， δ 為溢流出水高度， h 為圓形漏斗室深度， D_u 為底孔直徑。

渾水試驗的目的在於探討排砂器於不同配置變化對於表層出流含砂濃度與泥砂去除效率之影響，進而分析比較排砂器的排砂效果，其中泥砂去除效率(η_s)的定義，如式(2)所示。

$$\eta_s = [(C_i - C_o)/C_i] \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

其中， C_i 為入流含砂濃度， C_o 為表層出流含砂濃度。

三、試驗結果分析與討論

本研究首先以清水試驗透過改變三種底孔直徑($D_u = 0.5 \text{ cm}$ 、 0.7 cm 、 1.0 cm)與三種柱體區高度($H_o = 50 \text{ cm}$ 、 60 cm 、 70 cm)，探討其對於排砂器的底孔出流量(Q_u)與底孔流量係數(C_d)之影響，再進一步透過渾水試驗探討排砂器的泥砂去除效率(η_s)與表層出流含砂濃度(C_o)的變化情況。

3.1 清水試驗結果與分析

3.1.1 三種不同底孔直徑的配置

本研究比較三種不同底孔直徑(D_u)配置之試驗結果，當底孔直徑選用 0.5 cm (RunA₁、RunB₁、RunC₁)時，底孔出流量介於 $61.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $67.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 之間，其平均值約為 $64.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與標準偏差(SD)約為 $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，當底孔直徑為 0.7 cm (RunA₂、RunB₂、RunC₂)與 1.0 cm (RunA₃、RunB₃、RunC₃)時，底孔出流量分別介於 $110.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $126.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 $220.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $256.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 之間，其平均值分別約為 $117.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $236.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，而標

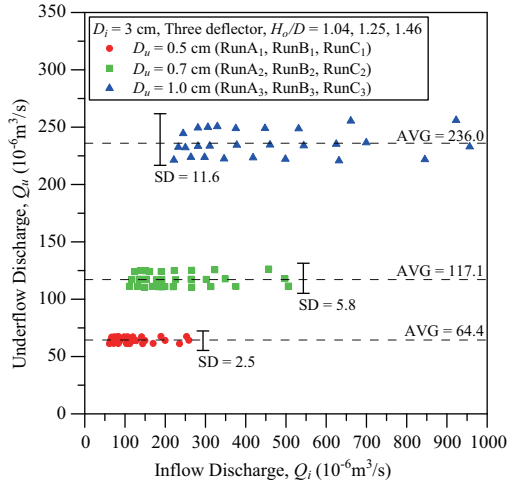


圖 7 三種底孔直徑(D_u)條件下入流量與底孔出流量之關係

準偏差分別約為 $5.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $11.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，如圖 7 所示。由上述試驗結果可知，底孔直徑較小($D_u = 0.5 \text{ cm}$)的底孔出流量也相對較低，且底孔出流量的標準偏差值也較小。根據試驗觀察的情形瞭解，底孔直徑較小($D_u = 0.5 \text{ cm}$)時，排砂器內部流況較為穩定，但隨著底孔直徑的增大($D_u = 1.0 \text{ cm}$)，排砂器內部流況則會呈現較為不穩定的情形，並產生渦流空氣柱之現象，顯示當底孔直徑為 0.5 cm 時，排砂器內部的渦流強度也較小且流況較為穩定，因此底孔出流量的變化幅度也相對較小。本研究進一步分析入流量(Q_i)與底孔流量係數(C_d)之關係，如圖 8 所示。當底孔直徑為 0.5 cm 時，底孔流量係數約為 0.80 ，而底孔直徑的增大($D_u = 1.0 \text{ cm}$)，其底孔流量係數逐漸降低至 0.74 ，顯示隨著底孔直徑的增大，底孔流量係數也隨之降低，亦表示排砂器內部的渦流強度也逐漸增大，同時導致排砂器內部的流況穩定性也隨之降低，然而排砂器內流況的不穩定與渦流強度的增大都不利於細顆粒泥砂的排除。整體而言，底孔直徑的尺寸對於排砂器內部流況的穩定與其渦流強度之影響頗為顯著。

3.1.2 三種不同柱體區高度的配置

當柱體區高度為 50 cm (RunA₁、RunA₂、RunA₃)時，底孔出流量介於 $61.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至

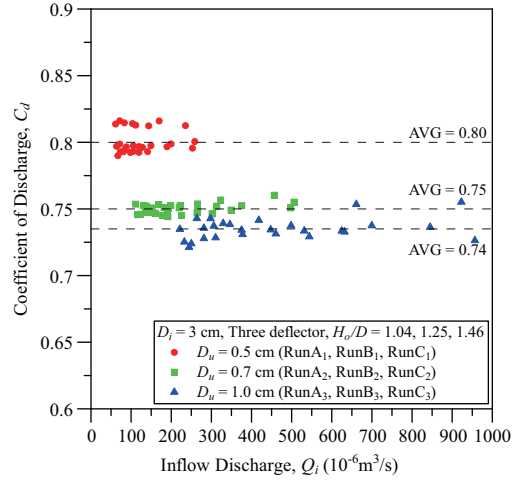


圖 8 三種底孔直徑(D_u)條件下入流量與底孔流量係數之關係

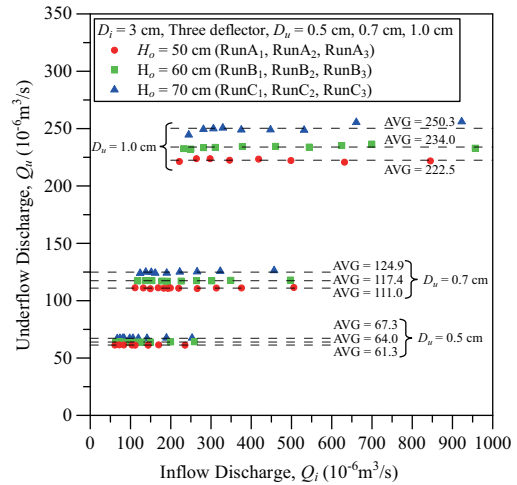


圖 9 三種柱體區高度(H_o)條件下入流量與底孔出流量之關係

$223.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 之間，而柱體區高度為 60 cm (RunB₁、RunB₂、RunB₃)與 70 cm (RunC₁、RunC₂、RunC₃)時，其底孔出流量則分別介於 $63.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $236.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 $67.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $256.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 之間，如圖 9 所示。由上述之試驗結果可知，在三種底孔直徑條件下，隨著柱體區高度越高，排砂器內的溢流水位也越高，同時底孔出流量也隨之增加，因此當入流量不變時，底孔出流量隨著柱體區高度增高而增大，此時表

表 4 本研究高桶式旋流漏斗排砂器之渾水試驗配置與結果

試驗編號	懸板數量	入流管直徑 D_i (cm)	柱體區高度 H_o (cm)	底孔直徑 D_u (cm)	入流量 Q_i (10^{-6} m ³ /s)	表層取水率 η_o (%)	入流含砂濃度 C_i (g/L)	表層出流含砂濃度 C_o (g/L)	泥砂去除效率 η_s (%)
RunA ₁	3	3.0	50	0.5	80.8-192.3	24.8-69.2	60-65	1.25-1.70	97.2-98.0
RunA ₂				0.7	151.8-384.4	25.1-70.8		2.40-10.5	82.5-96.2
RunA ₃				1.0	302.6-738.9	25.5-69.6		3.06-35.8	41.8-95.2
RunB ₁			60	0.5	86.4-209.8	25.7-69.5		0.57-1.31	97.8-99.1
RunB ₂				0.7	154.9-390.1	23.4-70.0		1.27-9.14	85.2-98.0
RunB ₃				1.0	317.5-768.5	24.8-68.9		1.75-36.7	40.1-97.2
RunC ₁			70	0.5	86.5-215.3	24.4-69.5		0.39-0.61	99.0-99.4
RunC ₂				0.7	152.8-370.8	24.4-69.2		0.65-10.8	82.9-99.0
RunC ₃				1.0	326.3-701.4	24.3-64.7		0.96-31.6	49.5-98.5

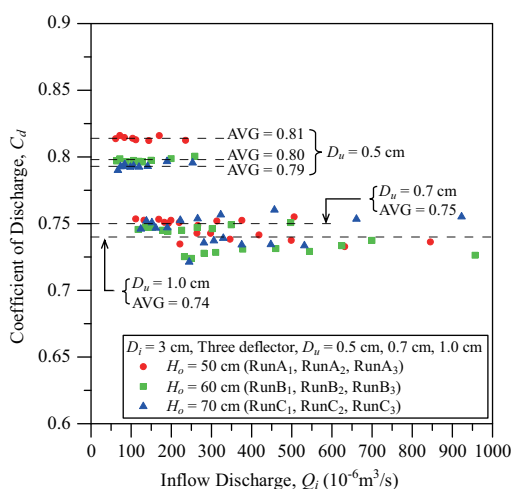


圖 10 三種柱體區高度(H_o)條件下入流量與底孔流量係數之關係

層出流量則隨之降低，顯示於泥砂排除過程中也將消耗較多的水體。本研究進一步分析入流量(Q_i)與底孔流量係數(C_d)之關係，如圖 10 所示，當入流量較小($Q_i < 260 \times 10^{-6}$ m³/s)時，柱體區高度為 50 cm 的底孔流量係數略高於柱體區高度為 60 cm 與 70 cm，但當入流量大於 260×10^{-6} m³/s 時，三種柱體區高度配置的平均底孔流量係數皆約為 0.74，顯示入流量過大會造成排砂器內部的渦流強度大幅增強，並降低其流況穩定性，導致三種柱體區高度配置的底孔流量係數並無顯著的差異，但透過分析瞭解隨著入流量的逐漸增加，柱體區高度為 50 cm (SD = 0.028)的底孔流量係數變化幅度較大於柱體區高度為 60 cm

(SD = 0.026)與 70 cm (SD = 0.022)。綜觀上述之試驗結果可知，當入流量較小時，排砂器內部的渦流強度會受到柱體區高度(溢流水位高度)的增加，而有逐漸增強的情況，但隨著入流量逐漸增大，柱體區高度越低($H_o = 50$ cm)，排砂器內的溢流水位也相對越低，且其承載的水體量也越少，導致排砂器內部流況越容易受到入流量的影響，進而大幅增強排砂器內部的渦流強度，並造成其內部流況的不穩定。整體而言，柱體區高度的配置對於排砂器內部流況的穩定與渦流強度之影響確實有明顯的差異。

3.2 渾水試驗結果與分析

渾水試驗的目的在於探討排砂器的柱體區高度($H_o = 50$ cm、60 cm、70 cm)與底孔直徑($D_u = 0.5$ cm、0.7 cm、1.0 cm)變化對於表層出流含砂濃度與泥砂去除效率之影響。渾水試驗配置與其結果彙整於表 4。

3.2.1 三種底孔直徑配置變化

根據三種不同底孔直徑($D_u = 0.5$ cm、0.7 cm、1.0 cm)配置的渾水試驗結果可知，在相同表層取水率範圍內(介於 23%至 71%之間)，不同底孔直徑配置的排砂器所能處理的入流量也所不同(表 4)。其中，底孔直徑為 0.5 cm (RunA₁、RunB₁、RunC₁)時，入流量的範圍介於 80.8×10^{-6} m³/s 至 215.3×10^{-6} m³/s 之間；底孔直徑為 0.7 cm (RunA₂、RunB₂、RunC₂)時，入流量的範圍介於 151.8×10^{-6} m³/s 至 390.1×10^{-6} m³/s 之間；底孔直

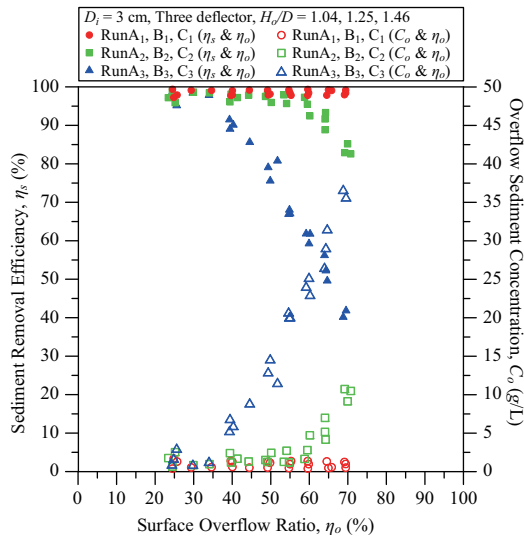


圖 11 三種底孔直徑(D_w)條件下表層取水率與泥砂去除效率及表層出流含砂濃度之關係

徑為 1.0 cm (RunA₃、RunB₃、RunC₃)時，入流量的範圍介於 $302.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $768.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 之間。由表層取水率(η_o)與泥砂去除效率(η_s)及表層出流含砂濃度(C_o)之關係可知，如圖 11 所示，當底孔直徑為 0.5 cm 時，其表層取水率介於 24.4%至 69.5%，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，則分別介於 0.39 g/L 至 1.70 g/L 與 97.2%至 99.4%之間；底孔直徑為 0.7 cm 時，其表層取水率介於 23.4%至 70.8%，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，則分別介於 0.65 g/L 至 10.8 g/L 與 82.5%至 99.0%之間；底孔直徑為 1.0 cm 時，其表層取水率介於 24.3%至 69.6%，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，則分別介於 0.96 g/L 至 36.7 g/L 與 40.1%至 98.5%之間。根據上述試驗結果可知，當底孔直徑為 0.5 cm 時，隨著表層取水率的增加，其泥砂去除效率皆維持於 97%以上，但當底孔直徑為 0.7 cm 與 1.0 cm 時，隨著表層取水率的增加，排砂器的泥砂去除效率則隨之降低。其中，表層取水率為 50%時，底孔直徑為 0.5 cm、0.7 cm 與 1.0 cm 條件下，其泥砂去除效率分別大於 97.5%、95%與 75%，顯示底孔直徑為 0.5 cm 的泥砂去除效率較優於底孔直徑為 0.7 cm 與 1.0 cm，因此隨

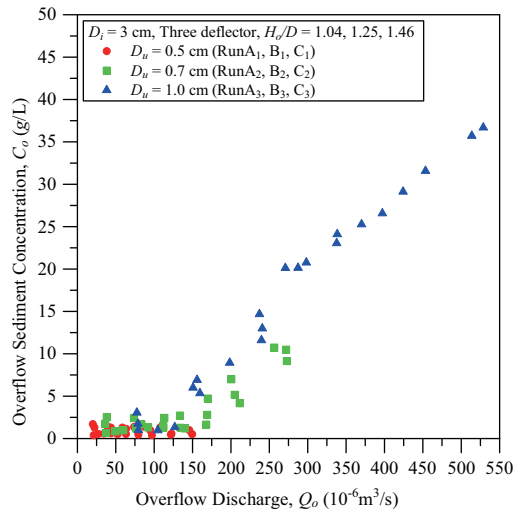


圖 12 三種底孔直徑(D_w)條件下表層出流量與表層出流含砂濃度之關係

著底孔直徑與表層取水率的增加，表層出流含砂濃度也將隨之增高，同時降低排砂器的泥砂去除效率。

本研究進一步透過表層出流量(Q_o)與表層出流含砂濃度(C_o)之關係瞭解，如圖 12 所示，當底孔直徑為 0.5 cm 條件下，其表層出流量小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，表層出流含砂濃度變化的幅度不大，且皆小於 1.70 g/L，但底孔直徑為 0.7 cm 與 1.0cm 條件下，其表層出流量分別小於 $275 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $530 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，表層出流含砂濃度則分別小於 10.8 g/L 與 37.0 g/L，顯示出流含砂濃度隨著表層出流量的增加而大幅度的上升。綜觀上述試驗結果可知，排砂器內部流況的變化隨著底孔直徑的縮小，其渦流強度逐漸降低且流況較為穩定，但不同底孔直徑配置下，排砂器所能處理的入流量也所不同，而隨著入流量的增加，表層出流量也隨之增加，進而導致表層出流含砂濃度的上升，亦造成排砂器的泥砂去除效率也隨之降低。

3.2.2 三種柱體區高度配置變化

根據三種不同柱體區高度($H_o = 50 \text{ cm}$ 、 60 cm 、 70 cm)配置的渾水試驗結果可知，如圖 13 所示，當柱體區高度為 50 cm (RunA₁、RunA₂、

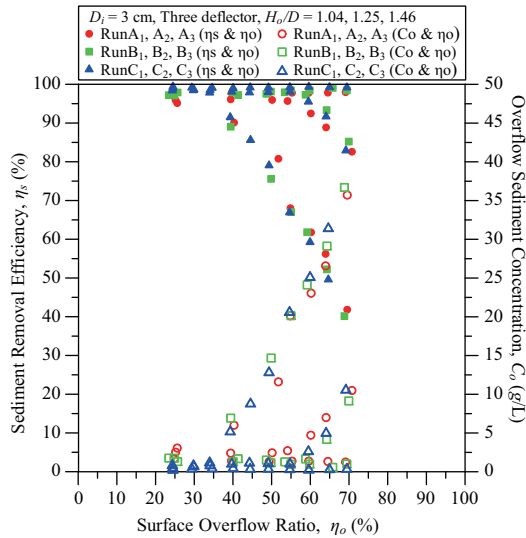


圖 13 三種柱體區高度(H_o)條件下表層取水率與泥砂去除效率及表層出流含砂濃度之關係

RunA₃)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $80.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $738.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 24.8%至 70.8%之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，則分別介於 1.25 g/L 至 35.8 g/L 以及 41.8%至 98.0%之間；柱體區高度為 60 cm (RunB₁、RunB₂、RunB₃)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $86.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $768.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 23.4%至 70.0%之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 0.57 g/L 至 36.7 g/L 以及 40.1%至 99.1%之間；柱體區高度為 70 cm (RunC₁、RunC₂、RunC₃)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $86.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $701.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 24.3%至 69.5%之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 0.39 g/L 至 31.6 g/L 以及 49.5%至 99.4%之間。根據渾水試驗結果可知，在三種柱體區高度的試驗條件下，隨著入流量的增加，表層出流量也隨之增加，導致更多的細顆粒泥砂經由表層出口流出，同時表層出流含砂濃度也逐漸增加，亦造成排砂器的泥砂去除效率也隨之降低。

本研究進一步透過表層出流量(Q_o)與表層出流含砂濃度(C_o)之關係瞭解，如圖 14 所示，當表

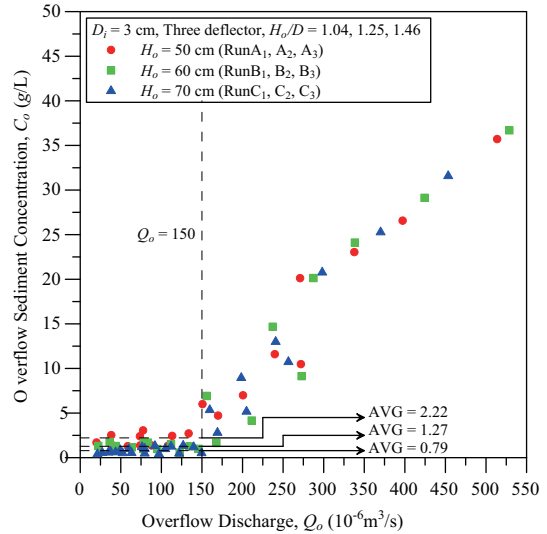


圖 14 三種柱體區高度(H_o)條件下表層出流量與表層出流含砂濃度之關係

層出流量小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，柱體區高度為 50 cm 的平均表層出流含砂濃度約為 2.22 g/L，而柱體區高度為 60 cm 與 70 cm 的平均表層出流含砂濃度分別約為 1.27 g/L 與 0.79 g/L，但當表層出流量大於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，隨著表層出流量的增加，三種柱體區高度配置的表層出流含砂濃度則開始逐漸大幅度增加，因此造成排砂器的泥砂去除效率也隨之降低。綜觀上述之試驗結果可知，當入流量較小時，隨著柱體區高度的降低，表層出流含砂濃度則逐漸增加，導致泥砂去除效率也隨之降低，但隨著入流量的逐漸增大，三種柱體區高度配置的表層出流含砂濃度皆大幅度增加，且整體差異並不顯著。整體而言，柱體區高度為 70 cm 的表層出流含砂濃度與泥砂去除效率較優於柱體區高度為 60 cm 與 50 cm。

綜觀柱體區高度配置的分析結果，進一步探討三種底孔直徑($D_u = 0.5 \text{ cm}$ 、 0.7 cm 、 1.0 cm)變化下的渾水試驗結果。當底孔直徑為 0.5 cm (RunA₁、RunB₁、RunC₁)條件下，如圖 15 所示，在柱體區高度為 50 cm (RunA₁)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $80.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $192.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 24.8%至 69.2%之間，而表層出流含砂濃度的範圍介於 1.25 g/L 至 1.70 g/L

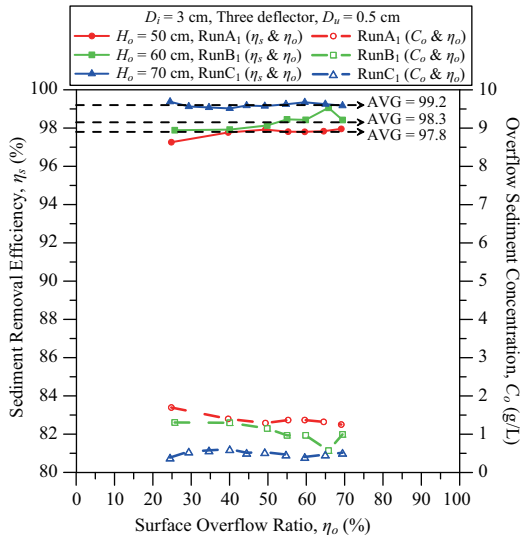


圖 15 底孔直徑(D_u)為 0.5cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層取水率與泥砂去除效率及表層出流含砂濃度之關係

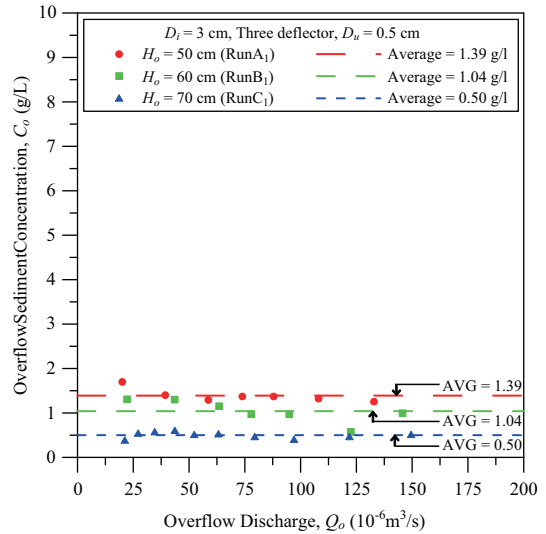


圖 16 底孔直徑(D_u)為 0.5cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層出流量與表層出流含砂濃度之關係

與泥砂去除效率於 97.2%至 98.0%之間；柱體區高度為 60 cm (RunB₁)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $86.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $209.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 25.7%至 69.5%之間，而表層出流含砂濃度的範圍介於 0.57 g/L 至 1.31 g/L 與泥砂去除效率於 97.8%至 99.1%之間；柱體區高度為 70 cm (RunC₁)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $86.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $215.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以及 24.4%至 69.5%之間，而表層出流含砂濃度的範圍介於 0.39 g/L 至 0.61 g/L 與泥砂去除效率於 99.0%至 99.4%之間。根據上述試驗結果可知，當底孔直徑為 0.5 cm 時，對於排砂器內部流況的穩定與渦流強度的影響較小，且三種柱體區高度配置的泥砂去除效率皆大於 97%，其中柱體區高度 50 cm (RunA₁)、60 cm (RunB₁)與 70 cm (RunC₁)的平均泥砂去除效率分別約為 97.8%、98.3%與 99.2%，顯示隨著柱體區高度的增加，排砂器排除泥砂的效率也逐漸提升。進一步分析表層出流含砂濃度的試驗結果可知，配置 RunA₁($H_o = 50 \text{ cm}$)的平均表層出流含砂濃度約為 1.39 g/L，而相較於配置 RunB₁($H_o = 60 \text{ cm}$)的 1.04 g/L 與配置 RunC₁($H_o = 70 \text{ cm}$)的 0.50 g/L，則分別降低約 25.2

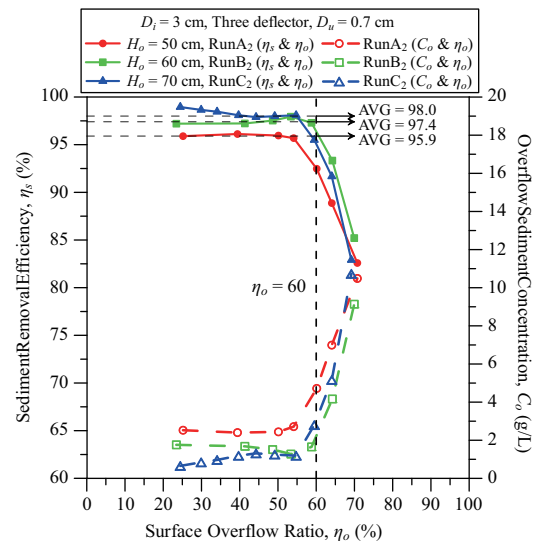


圖 17 底孔直徑(D_u)為 0.7cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層取水率與泥砂去除效率及表層出流含砂濃度之關係

%與 64.0%，如圖 16 所示。

當底孔直徑為 0.7 cm (RunA₂、RunB₂、RunC₂)條件下，如圖 17 所示，在柱體區高度為 50 cm (RunA₂)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別

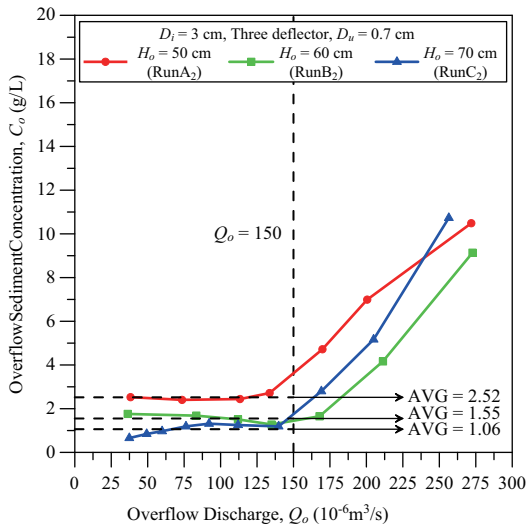


圖 18 底孔直徑(D_u)為 0.7cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層出流量與表層出流含砂濃度之關係

介於 $151.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $384.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 25.1% 至 70.8% 之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 2.40 g/L 至 10.5 g/L 與 82.5% 至 96.2% 之間；柱體區高度為 60 cm (RunB₂) 時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $154.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $390.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 23.4% 至 70.0% 之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 1.27 g/L 至 9.14 g/L 與 85.2% 至 98.0% 之間；柱體區高度為 70 cm (RunC₂) 時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $152.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $370.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 24.4% 至 69.2% 之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 0.65 g/L 至 10.8 g/L 與 82.9% 至 99.0% 之間。依據上述試驗結果可知，當表層取水率小於 60% 時，配置 RunA₂、RunB₂ 及 RunC₂ 的泥砂去除效率皆大於 95%，其中以配置 RunC₂ ($\bar{\eta} = 98.0\%$) 略優於配置 RunB₂ ($\bar{\eta} = 97.4\%$)，且更優於配置 RunA₂ ($\bar{\eta} = 95.9\%$)，但隨著表層取水率逐漸增加至 70%，其泥砂去除效率則大幅降低且表層出流含砂濃度也有顯著的增加，此時配置 RunA₂、RunB₂ 及 RunC₂ 的泥砂去除效率差異並不顯著。進一步分析表層出流量與表層出流含

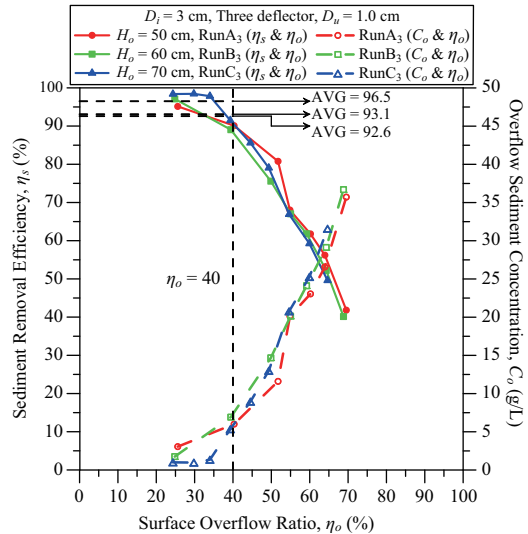


圖 19 底孔直徑(D_u)為 1.0cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層取水率與泥砂去除效率及表層出流含砂濃度之關係

砂濃度之關係，如圖 18 所示，當表層出流量(Q_o) 小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，排砂器的表層出流含砂濃度變動幅度並不明顯，而配置 RunA₂ ($H_o = 50 \text{ cm}$)、RunB₂ ($H_o = 60 \text{ cm}$) 與 RunC₂ ($H_o = 70 \text{ cm}$) 的平均表層出流含砂濃度分別約為 2.52 g/L、1.55 g/L 與 1.06 g/L，其中配置 RunB₂ 及配置 RunC₂ 相較於配置 RunA₂ 的平均表層出流含砂濃度分別降低約 38.1% 與 57.9%，但隨著表層出流量逐漸增大至 $250 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，其表層出流含砂濃度皆大幅增加至 10.0 g/L 左右，亦大幅度的降低排砂器的排砂效果。

當底孔直徑為 1.0 cm (RunA₃、RunB₃、RunC₃) 條件下，如圖 19 所示，在柱體區高度為 50 cm (RunA₃) 時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $302.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $738.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 25.5% 至 69.6% 之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 3.06 g/L 至 35.8 g/L 與 41.8% 至 95.2% 之間；柱體區高度為 60 cm (RunB₃) 時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $317.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $768.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 24.8% 至 68.9% 之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 1.75 g/L 至 36.7 g/L 與

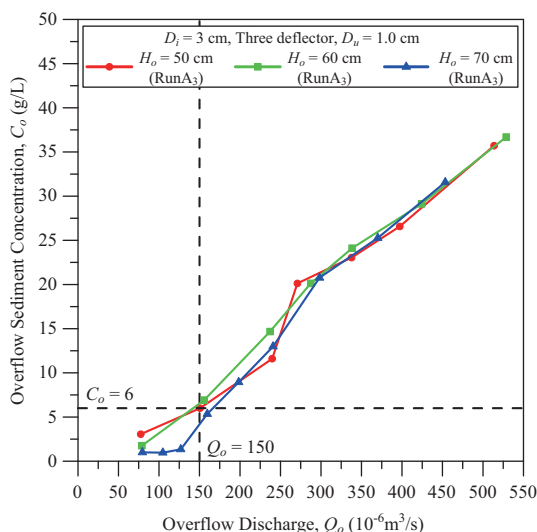


圖 20 底孔直徑(D_u)為 1.0cm 條件下三種柱體區高度(H_o)對表層出流量與表層出流含砂濃度之關係

40.1%至 97.2%之間；柱體區高度為 70 cm (RunC₃)時，其入流量與表層取水率的範圍，分別介於 $326.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $701.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 與 24.3% 至 64.7%之間，而表層出流含砂濃度與泥砂去除效率的範圍，分別介於 0.96 g/L 至 31.6 g/L 與 49.5%至 98.5%之間。依據上述試驗結果可知，當表層取水率小於 40%時，配置 RunA₃、RunB₃ 及 RunC₃ 的泥砂去除效率皆大於 90%，其平均泥砂去除效率分別約為 92.6%、93.1%與 96.5%，但當表層取水率大於 60%時，各配置(RunA₃、RunB₃、RunC₃)的泥砂去除效率皆降低至 50%以下。根據表層出流量與表層出流含砂濃度之關係(圖 20)可知，當表層出流量小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，各配置(RunA₃、RunB₃、RunC₃)的表層出流含砂濃度皆小於 6.0 g/L，但隨著表層出流量逐漸增大至 $500 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，其表層出流含砂濃度皆上升至 35.0 g/L。綜觀上述之試驗結果可知，當底孔直徑為 1.0 cm 時，其對於排砂器內部流況的穩定與渦流強度的影響較大，因此相較之下柱體區高度的變化，對於排砂器排砂效果的影響則較不顯著。

綜觀清水與渾水之試驗結果顯示，當底孔直徑較小時(RunA₁、RunB₁、RunC₁)，排砂器內部

的渦流強度較小且流況較為穩定，因此對於排除細顆粒泥砂有較佳的效果，但隨著底孔直徑的增大(RunA₃、RunB₃、RunC₃)，會造成排砂器內部流況的不穩定與渦流強度逐漸的增大，並大幅度降低排砂器的泥砂去除效率。但當表層出流量小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，三種柱體區高度($H_o = 50 \text{ cm}$ 、60 cm、70 cm)條件下，排砂器皆能有效排除中值粒徑為 0.041 mm 的細顆粒泥砂，且泥砂去除效率皆大於 90%，其中又以柱體區高度 $H_o = 70 \text{ cm}$ 配置略優於 $H_o = 60 \text{ cm}$ 配置，且更優於 $H_o = 50 \text{ cm}$ 配置，顯示隨著柱體區高度的增加，有助於提升排砂器的排砂效果。

四、研究結論

高桶式旋流漏斗排砂器的原理是將渾水引入漏斗室內進行旋流運動，在重力及離心力交互作用下，達到水砂分離的效果。本研究調整三種柱體區高度($H_o = 50 \text{ cm}$ 、60 cm、70 cm)與三種底孔直徑($D_u = 0.5 \text{ cm}$ 、0.7 cm、1.0 cm)，探討排砂器內部之流況及比較其排砂效果之差異。研究結論說明如下。

1. 清水試驗結果顯示，底孔直徑較小($D_u = 0.5 \text{ cm}$)時，排砂器內部的流況較為穩定，但隨著底孔直徑的增大，底孔流量係數也隨之降低，而排砂器內部的渦流強度也逐漸增大，並產生渦流空氣柱的現象，導致排砂器內部流況的穩定性也隨之降低，因此底孔直徑尺寸對於排砂器內部流況的穩定與其渦流強度之影響頗為顯著。
2. 清水試驗結果分析可知，當入流量較小時，排砂器內部的渦流強度會受到柱體區高度的增加，而有逐漸增強的趨勢，但隨著入流量逐漸增大，柱體區高度越高($H_o = 70 \text{ cm}$)時，排砂器內的溢流水位也相對較高，其承載水量也較多，因此排砂器內部流況較不易受到入流量變化的影響，進而減緩排砂器內部渦流的強度並穩定其流況，但隨著柱體區高度越高，底孔出流量也隨之增加，因此於泥砂排除過程中也將消耗較多的水量。
3. 渾水試驗結果分析可知，排砂器內部流況的變

化隨著底孔直徑的縮小，其渦流的強度逐漸降低且流況較為穩定，但不同底孔直徑配置下，排砂器所能處理的入流量也所不同，而隨著入流量逐漸的增加，表層出流量也隨之增加，進而導致表層出流含砂濃度的上升，亦造成排砂器的泥砂去除效率也隨之降低。

4. 渾水試驗結果分析可知，當表層出流量小於 $150 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 時，於三種柱體區高度 ($H_o = 50 \text{ cm}$ 、 60 cm 、 70 cm) 條件下，排砂器皆能有效排除中值粒徑為 0.041 mm 的細顆粒泥砂，且泥砂去除效率皆大於 90% ，其中以柱體區高度為 70 cm 的平均表層出流含砂濃度較低於柱體區高度為 60 cm 約 30.0% ，且更低於柱體區高度為 50 cm 約 60.0% ，然而隨著表層出流量的增大，於不同配置的表層出流含砂濃度皆有增加的趨勢，亦導致排砂器的泥砂去除效率也隨之降低。
5. 渾水試驗結果分析可知，當底孔直徑 ($D_u = 0.5 \text{ cm}$) 較小時，排砂器內部的渦流強度較小且流況較為穩定，因此對於排除細顆粒泥砂有較佳的效果，且隨著柱體區高度的增加 ($H_o = 70 \text{ cm}$)，排砂器的排砂效果亦有顯著提升之趨勢，但隨著底孔直徑的增大 ($D_u = 1.0 \text{ cm}$)，造成排砂器內部流況的不穩定與渦流強度的增大，因此大幅降低排砂器的泥砂去除效率。

謝 誌

本研究承蒙科技部專題研究計畫「水力旋流器排除懸浮泥砂之力學機制研究」(NSC 100-2221-E-006-202-MY3) 與延攬博士後研究 (MOST 104-2811-M-006-038) 的經費補助與研究成果，特此誌謝。

參考文獻

1. 王順久、侯杰、邱秀云，「以流場分析初步探討排沙漏斗的輸沙機理」，新疆農業大學學報，第 20 卷，第 3 期，第 12-16 頁，1997。
2. 余新豔、邱秀云、劉芬、牧振偉、李琳，「渾水水力分離清水裝置溢流性能的影響因素試驗研究」，新疆農業大學學報，第 31 卷，第 2 期，第 81-84 頁，2008。
3. 李琳、牧振傳、周著，「排沙漏斗截沙率計算」，水利水電科技進展，第 27 卷，第 4 期，第 50-54 頁，2007。
4. 李琳、邱秀云、龔守遠、劉芬，「渾水水力分離清水裝置弱旋流場特性研究」，水動力學研究與發展，第 22 卷，第 4 期，第 520-528 頁，2007。
5. 肖俊、邱秀云、肖俊、周著、侯杰、龔守遠，「應用 PIV 技術測試渾水水力分離清水裝置的清水流場流動特性」，水利水運工程學報，第 1 期，第 54-58 頁，2006。
6. 周著、王長新、侯杰，「強螺旋流排沙漏斗的模型試驗和原型觀測」，水利水電技術，第 11 期，第 44-48 頁，1991。
7. 邱秀云、肖俊、周著、侯杰，「渾水水力分離清水裝置清水流場特性試驗研究」，新疆農業大學學報，第 29 卷，第 4 期，第 56-61 頁，2006。
8. 邱秀云、侯杰、周著，「排沙漏斗的流場特性及輸沙機理」，中國農村水利水電，第 4 期，第 3-6 頁，1999。
9. 侯杰、王順久、周著、王忠、欒文，「全沙排沙漏斗渾水流場特性及輸沙規律」，泥沙研究，第 6 期，第 63-67 頁，2000。
10. 唐毅、吳持恭、周著，「設導流墩排沙漏斗清水流場的測試研究」，實驗力學，第 12 卷，第 4 期，第 556-563 頁，1996。
11. 徐燕、邱秀云、李琳、陳偉東，「渾水分離清水裝置無懸板時的流場數值模擬」，新疆農業大學學報，第 29 卷，第 1 期，第 58-62 頁，2006。
12. 陳偉東、徐燕、邱秀云、劉芬，「渾水水力分離清水裝置的流場數值模擬」，水力發電，第 33 卷，第 5 期，第 27-30 頁，2007。
13. 詹錢登、阮光長、徐郁超、林程翰，「高桶式旋流排砂器排砂效率之試驗研究」，中華防災學刊，第 2 卷，第 2 期，第 137-150 頁，2010。
14. 詹錢登、徐郁超、林程翰、曾奕超，「懸板

- 配置對高桶式旋流漏斗排砂器排砂效率影響之試驗研究」，農業工程學報，第 57 卷，第 4 期，第 84-96 頁，2011。
15. 詹錢登、徐郁超、黃聰憲，「導流墩配置對旋流漏斗排砂器內渦流穩定性影響之試驗研究」，台灣水利，第 62 卷，第 1 期，第 44-55 頁，2014。
 16. 詹錢登、羅偉誠、蔡長泰，「水力旋流漏斗排砂之試驗研究(1/2)」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2006。
 17. 詹錢登、羅偉誠、蔡長泰，「水力旋流漏斗排砂之試驗研究(2/2)」，經濟部水利署水利規劃試驗所，2007。
 18. 趙濤、陳偉東、邱秀云，「渾水水力分離清水裝置柱體高度對流場影響的數值模擬研究」，水動力學研究與發展，第 26 卷，第 6 期，第 681-688 頁，2011。
 19. 劉芬、邱秀云、陳偉東、李琳、趙濤，「渾水水力分離清水裝置的優化試驗研究」，新疆農業大學學報，第 30 卷，第 2 期，第 81-86 頁，2007。
 20. 劉善均、張建民、曲景學、伊曉林，「排砂漏斗優化及輸砂特性試驗研究」，四川大學學報，第 35 卷，第 4 期，第 6-9 頁，2003。
 21. 譚冬初，「烏斯圖河渠首的排沙漏斗設計」，水利水電科技進展，第 18 卷，第 6 期，第 50-53 頁，1998。
 22. Athar, M., Kothiyari, U. C. and Garde, R. J., "Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(12), 1051-1059, 2002.
 23. Chapokpour, J. and Farhoudi, J., "Sediment extraction and flow structure of vortex settling basin," *World Applied Sciences Journal*, 14(5), 782-793, 2011.
 24. Curi, K. V., Esen, I. I. and Velioglu, S. G., "Vortex type solid liquid separator," *Prog. Water Technol.*, 7(2), 183-190, 1979.
 25. Gheisi, A. and Keshavarzi, A., "Riverine flow sediment exclusion using vortex chamber," *Journal of fisheries and aquaculture*, 1(2), 142-156, 2006.
 26. Hsu, Y. C., Yang, C. Y. and Jan, C. D., "Experimental study on the effect of inflow sediment concentration on sediment removal efficiency of a deep-depth vortex chamber type sediment extractor," 35th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress, Chengdu, China, 2013.
 27. Jan, C. D. and Nguyen, Q. T., "Discharge coefficient for a water flow through a bottom orifice of a conical hopper," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8), 567-572, 2010.
 28. Jan, C. D. and Nguyen, Q. T., "Discharge coefficient for bottom orifice of vortex chamber," *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 388-391, 2011.
 29. Keshavarzi, A. R. and Gheisi, A. R., "Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 55(4), 419-434, 2006.
 30. Mashauri, D. A., "Modelling of a vortex settling basin for primary clarification of water," Ph. D. thesis, Tampere Univ. of Technology, Tampere, Finland, 1986.
 31. Paul, T. C., Sayal, S. K., Sakhuja, V. S. and Dhillon, G. S., "Vortex-settling basin design considerations," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(2), 172-189, 1991.
 32. Salakhov, F. S., "Rotational designs and methods of hydraulic calculation of load- controlling water intake structures for mountain rivers," *Proc. 9th ICID Congress, Moscow, Soviet Union*, 151-161, 1975.

收稿日期：民國 104 年 9 月 24 日
 修正日期：民國 105 年 1 月 20 日
 接受日期：民國 105 年 2 月 2 日