

不同孔隙比透水圓柱之定床流場實驗研究

Experimental Study Of Fixed-Bed Flow Characteristics For A Cylinder With Different Porosities

周 峻 暉	賴 悅 仁*	林 芳 宇	黃 進 坤
CHUN-WEI CHOU	STEVEN YUEH-JEN LAI	FANG-YU LIN	CHIN-KUN HUANG
國立成功大學 水利及海洋工程學系 博士候選人	國立成功大學 水利及海洋工程學系 助理教授	國立成功大學 水利及海洋工程學系 碩士	國立成功大學 水利及海洋工程學系 副教授

摘 要

本文主要於不同孔隙比的透水圓柱在定床試驗中，實際量測透水圓柱周圍流場之水深、流速等資料，以瞭解透水圓柱流場之平均流速、流場紊流強度、水流隨時間之變動與速度頻譜等與不同透水圓柱孔隙比之關係。實驗結果與相關理論驗證得知，水流通過不透水圓柱時，結構物後方流場極度紊亂，但當水流通過透水圓柱後，於結構物後方產生一流況穩定且流速低之「穩定低速區」。將實驗結果與石武融(2007)成果比較顯示，當孔隙比增加，最大流速衰退率(U_{d-max})將減小，而發生之位置會向下游延伸，此結果可提供透水圓柱現地擺設之數據參考。

關鍵詞：透水圓柱，穩定低速區，孔隙比，流速衰退率。

ABSTRACT

To clarify the effect of different porosity to a porous cylinder, a series of experiments were executed. The Profiling Velocimeter was used to measure the flow field around and behind the porous cylinder, including the depth-averaged velocity distribution, time sequence analysis of velocity and disturbance level to examine the characteristics of the effect due to different porous cylinder. Comparison of the experiment results and the related researches, the velocity and turbulence intensity after the impermeable cylinder was intensely changed. However, the flow field after the porous cylinder was steady and a steady low-velocity region was formed. In present experiment reports, as the porosity increased, the maximum velocity decay value decreased and the position where the minimum velocity occurred would move towards to downstream direction. While the porous cylinder was applied in the field, these results could provide as a design reference.

Keywords: porous cylinder, steady low-velocity area, velocity decay value.

* 通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系助理教授，70101臺南市東區大學路1號，stevenyjlai@mail.ncku.edu.tw

一、前言

台灣處於環太平洋地震帶，屬於典型板塊碰撞所產生之大陸邊緣島嶼。在板塊東西向劇烈的擠壓下，南北狹長、陡坡急流儼然成為台灣水域地貌之特色。近數十年來全球氣候受到溫室效應之影響，嚴重改變台灣原有的水文型態，降雨空間與時間上分佈極為不均，再加上人為的盜採砂石及不良的水土保持，打破自然河道沖淤之平衡，對於河川上水工結構物屢屢受到水流強烈衝擊或底床劇烈掏刷而遭受損毀，並嚴重危害人類的性命安全。

在地貌變化劇烈之環境下，首當其衝的便是水工結構物遭受破壞的問題。國內迄今常使用來保護水工結構物的工法如蛇籠、丁壩、拋石，或是混凝土護岸等，設置之位置隨著保護目標之所在而有所不同，主要利用單位塊體群直接阻擋水流對水工結構物之衝擊，而單位塊體群間之空隙可以間接擾亂水流流場，削弱能量，藉此達到降低橋墩河岸等水工結構物受水流沖刷之影響，以延長其使用壽命。根據Melville & Coleman (2000)將保護方法區分為兩大類：實心(solid)與非實心(porous)結構物，國內大多數的工法都屬於實心的結構體，然而，實心結構物經過多年現場長期觀察發現(黃進坤, 2006)，結構物本身之單位塊體阻水面積大，配合群體效應的影響下，河道通水斷面積嚴重地束縮，結構群的基腳上游迎水面遭受水流之掏刷沖蝕，單位塊體之重心失去平衡並受大流量水流之推移，更容易破壞保護工結構群之結構，進而喪失保護水工結構物之功效。

為了避免因增設保護工而讓底床掏刷更為嚴重的困擾，國外早已開始研究非實心保護工對河岸底床保護的研究(山本晃一, 1995; 章平平、張志樂, 2001; 吳龍華等, 2003; Ding *et al.*, 2006)。國內則由學者黃進坤(黃進坤、徐立昌, 2007; 黃進坤, 2011; 黃進坤、盧之偉, 2013)開始提倡透水保護工之新方法—「成功筐網」(如圖1及2所示)，利用塑膠格網容易塑形的特性，內部由數個小圓柱組成，外部再由一個大圓柱來包覆，此圓柱體具有極佳的穿透能力，屬於非實心結構物，中心軸則由H型鋼作為支撐，以



圖1 烏溪上游之成功筐網



圖2 成功筐網

增強結構體的抗衝擊能力。成功筐網施作於台灣各個流域，如烏溪上游河段、大甲溪、八掌溪及高屏溪下游河段、台南雙春海岸等(許少華等, 2009; 水利規劃試驗所, 2009; 水利署第七河川局, 2009; 徐立昌等, 2013)，透過結構體的高穿透特性，產生緩流區促使落淤，均有不錯的成效。

均勻流流經一實心圓柱體時，圓柱後方尾流區將產生穩定且具週期性的渦流型態，形成卡曼渦列(Karman Vortex trail) (Von Karman, 1912)，後來眾多學者紛紛開始著手研究實心圓柱之流場特性(Roshko *et al.*, 1969; Lienhard, 1966; Zdravkovich, 1997)。亦有學者利用可視化來了解實心圓柱所產生的渦流結構(Perry *et al.*, 1982; Akilli & Rockwell, 2002; Fransson *et al.*, 2004)。然而，在過去的研究之中，少有學者提出透水圓柱後方之三維流場特性。成功筐網之幾何型態為圓柱體，讓人懷疑揣測這種具高穿透的

圓柱體對水流流場之影響是否與實心圓柱相似，或是有自己獨特的物理現象。

本研究之主要目的為探究於定床實驗中，不同孔隙比透水圓柱周圍及後方之三維流場特性。希望透過定量的研究了解透水圓柱之三維流場結構型態，以輔助後人之相關研究，並作為相關單位於實際工程運用設計中之參考依據。

二、研究方法

2.1 儀器設備

為了簡化實際複雜之三維流場以釐清不同孔隙比之影響效應，於實驗室中我們以單一透水圓柱為研究對象(如圖3)。我們固定透水圓柱之高度 $h = 20$ cm與直徑 $d = 8$ cm。唯一改變的參數為格網孔洞的大小。本研究設計5種不同大小之孔隙比分別為0.41、0.50、0.61、0.69及0.83，並以實心圓柱做為比較依據。

透水圓柱孔隙比 ε 的定義為總孔洞面積與透

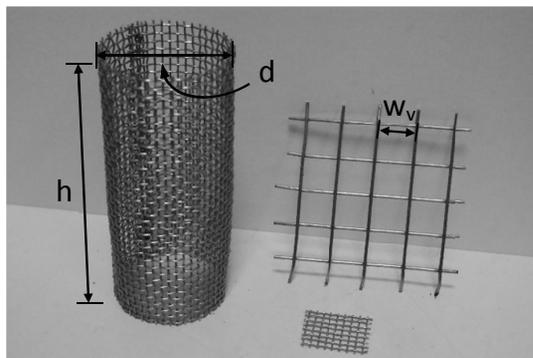


圖3 透水圓柱幾何示意圖

水圓柱表面積之比值百分比(如(1)式所示)。

$$\varepsilon = \frac{\sum w_v^2}{\pi dh} \quad (1)$$

式中， ε 為孔隙比， w_v 為網目內徑長度， π 為圓周率， d 為透水圓柱直徑， h 為透水圓柱高度。實心圓柱的孔隙比 $\varepsilon = 0$ 。本研究之實驗條件如表1所示。

本實驗於國立成功大學水利及海洋工程學系之試驗場所進行，實驗渠道由混凝土澆置而成，總長13公尺，寬1.6公尺，渠道上游共有四個蓄水槽(如圖4所示)；本實驗利用兩顆馬力為7.5 Hp與15 Hp之抽水馬達，將上游下方蓄水槽之水抽至上方蓄水槽，上方蓄水槽之蓄水再經由管路系統以重力排水形式排入試驗渠道，最後於迴水道迴流至上游下方蓄水槽，形成一循環式水路系統。渠道前5 m範圍內為整流段，整流段後方長6 m範圍內為實驗段，透水圓柱放置於試驗段起點下游2.6公尺處。在座標軸的設定上，採取三維卡氏座標，原點 $x = 0$ 與 $y = 0$ 位於透水圓柱中心處， $z = 0$ 為底床表面處。 x 軸以水流方向為正向(縱向)， y 軸為以左岸方向為正向(橫向)， z 軸以正上方為正向(垂向)。

本研究採用加拿大NORTEK公司所生產之剖面流速儀(VECTRINO-II Profiling Velocimeter)來量測流場(如圖5)。此剖面流速儀之量測系統根據都卜勒效應原理，由探頭中央之感應器發送聲波，再由周圍4個訊息接收器接收能量，藉以量測流場，此種流速儀利用水中粒子反射之聲波計算流速，適用於高精度之三維流速場測量，剖面流速儀非傳統式抓取單點資料，其優點可截取長3.4 cm範圍內的流速值。本實驗在垂直剖面量測

表1 實驗組別與水理條件

組別 set	表面孔隙比 ε	直徑 d (cm)	流量 Q (cm ³ /s)	水深 H _w (cm)	平均流速 U (cm/s)	坡度 S ₀	福祿數 Fr	雷諾數 Re
A1	0	8	54400	12	28.3	0.004	0.26	2.59 × 10 ⁴
A2	0.41							
A3	0.50							
A4	0.61							
A5	0.69							
A6	0.83							

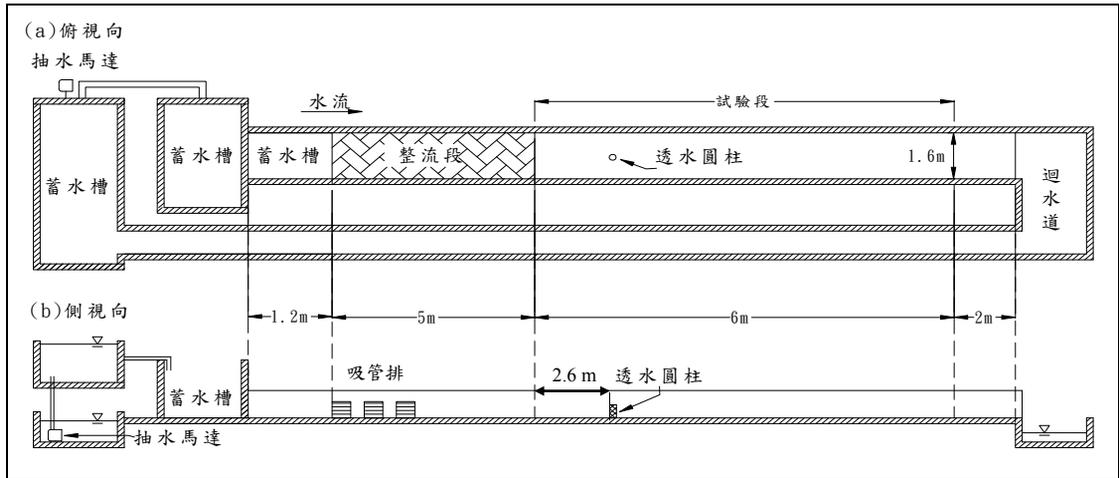


圖4 實驗渠道配置圖

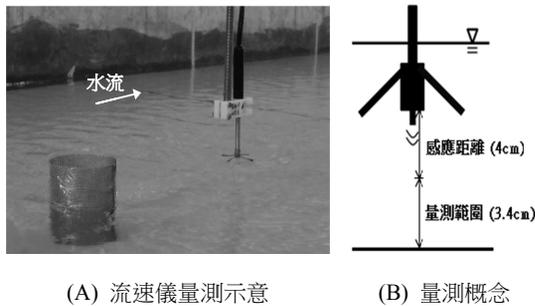


圖5 VECTRINO-II剖面流速儀

之過程中，受限流速儀的設計，流速值是由中央感應器往外4 cm處開始擷取，故最高位置的流速資料只能取得底床向上8 cm水深處。

2.2 因次分析

本研究為了瞭解並預測流場經透水圓柱結構影響後，主流方向流速衰退之特性，我們利用 Buckingham π 定理以建立透水圓柱流場流速衰退之無因次方程式(如(2)式)，以釐清透水圓柱對流場流速衰減之效應。

$$U_d = \frac{U - u}{U} \times 100\% \quad (2)$$

式中，平均流速(U)，當水流於無結構物之情況下流動時，各斷面之流速個別平均即為各個斷面之平均流速。流速(u)，當下於各位置實際量測之流速值。流速衰退率(U_d)，當流場通

過透水圓柱後，能減緩流速並降低水流強度，故定義當流場經過透水圓柱後，其主流方向減緩之流速($U - u$)占平均流速之比值為流速衰退率(velocity decay)。

影響流場之參數如表2所示。流速衰退率及各參數之關係如(3)式。

表2 影響流速衰退之參數

變數	因次	變數	因次
流速衰退率(U_d)	-	水深(H_w)	L
平均流速(U)	LT^{-1}	重力加速度(g)	LT^{-2}
通過結構物流速(u)	LT^{-1}	運動黏滯係數(ν)	LT^{-1}
出流流速位置(X_m)	L	圓柱直徑(d)	L
孔隙比(ϵ)	-		

$$U_d = f(U, H_w, x, g, \mu, d, \epsilon, \rho) \quad (3)$$

式中 ρ 為流體密度， d 為透水圓柱直徑和 U 為平均流速。經因次分析後，(3)式可改寫成無因次方程式，如下式。

$$U_d = f\left(\frac{X_m}{d}, \frac{U^2}{gd}, \frac{\rho d U}{\mu}, \frac{H_w}{d}, \epsilon\right) \quad (4)$$

由(4)式得知，透水圓柱之流速衰退率由上述五項無因次參數所主導。其中 X_m/d 代表減緩流速最明顯之發生位置關係項， U^2/gd 為水流之福祿數關係項，福祿數的特徵長度為水深 H_w ；

$\rho dU/\mu$ 為流場與結構物之雷諾數關係項，雷諾數的特徵長度則為透水圓柱直徑 d ； H_w/d 為水深與透水圓柱直徑之關係項， ε 則為孔隙比關係項。本實驗之設計為固定上述前4項之無因次參數，只改變透水圓柱之不同孔隙比，希望透過流場量測分析，以瞭解不同孔隙比對流速衰退率(ε)之影響程度。

2.3 實驗步驟

實驗流程分為三個階段，前置作業、主實驗流測量及數據分析。在前置作業中，除了製作6種孔隙比的透水圓柱、將透水圓柱固定於渠道內外，並調整試驗段流場近似均勻之流況，在橫斷面之流速為均勻流，在縱斷面受迴水影響為漸變流，試驗段上下游水深落差約3 cm。實驗進行時，每1 m量測一筆水深值，流測量測之基本單位為透水圓柱的直徑 d ，流測量測從原點(圓柱中心)為基準，在圓柱前後範圍5 d內量測斷面較為密集(間隔為1 d)，再往下游處之流場趨勢變化較小，測量斷面間距變大，縱向量測分別為 $x = -4 \sim 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, 28, 32, 36 d$ ，共19個斷面，原點(0, 0, 0)處無量測；橫向範圍量測到 $y = 3.5 d$ ，量測高度為 $z = 8 cm$ 。每筆流速值量測時間為30秒。

三、結果與討論

3.1 流場縱、橫斷面速度之變化

圖6為中心縱斷面方向各點位水深平均流速之沿程變化，其中x軸部分之距離以透水圓柱直

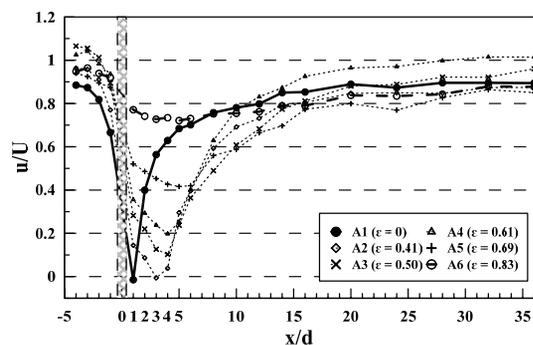


圖6 縱向水深平均流速比(u/U)之變化

徑無因次化為基準，y軸部分則將水深平均速度除以入流速度做無因次化。由圖可見，當圓柱具有穿透的能力時，皆會有流速衰退之現象產生，然而當孔隙比增加，流速最低點發生位置將會隨之向下游延伸。

組別A1為實心圓柱之情況，此時流速最低點發生位置於圓柱後方1倍直徑處，且觀察流速值轉為負值，是因為圓柱後方垂向渦流的形成導致迴流之情況發生；組別A2~A5孔隙比由0.41增加至0.69過程中，流速最低點發生位置自圓柱後方3倍直徑處往後延伸至5倍直徑處；然而當組別A6孔隙比達0.83時，流速衰退最低點位置並不明顯，在3~5倍直徑處流速變化不大。由圖6我們觀察到當孔隙比較低甚為零之情況下，結構體後方會產生負值的流速，而後隨著孔隙比的增加流速最低點位置會愈往下游移動，直至孔隙比高達0.83時，流速將不會有明顯衰退之現象。孔隙比除了影響流速最低點發生位置外，亦會影響後方流場流速之回復情況，在實心圓柱的現象中，流速恢復之曲線斜率較孔隙比0.41~0.83高，實心圓柱雖能大幅度地減緩流速，但流速將會較快回復至入流之流況。由上述得知透水圓柱後方約8~10 d的範圍內可有效地減緩流速，此範圍稱之為「庇護區」(shelter zone)，而穿越透水圓柱之水流稱之為「穿越流」(bleed flow)，穿越流流場的特性將在後面小節討論。

圖7為 $x/d = -4, -1, 1, 5, 10$ 與36處的垂向流速剖面分佈，在上游端 $x = -4 d$ 處流場尚未受到結構體的影響，6條流速剖面均呈現對數分佈，再往下游 $x = -1 d$ 處發現除了實心圓柱(實心圓圈)的流速剖面開始變化，流場受到圓柱的阻擋流速明顯減緩外，其餘5條為透水圓柱的流速仍維持著初始的速度往下游移動，而特別注意的是組別A2孔隙比為0.41的剖面流速因為圓柱格網的阻水面積較大，流速略有降低的趨勢。在下游端的剖面流速變化十分顯著，正常流況下水流流經實心圓柱的後方會產生複雜的三維性渦流， $x = 1 d$ 處實心圓柱的流速剖面在水深 $z/H_w = 0 \sim 0.3$ 範圍內產生了負值速度， $z/H_w = 0.3 \sim 0.7$ 範圍為正值速度，速度落差的緣故形成逆時針旋轉的垂向渦流，而 $x = 5 d$ 處的實心圓柱流場已迅速地回覆至上游流場的流況，由此可知1~5 d範圍內的流場

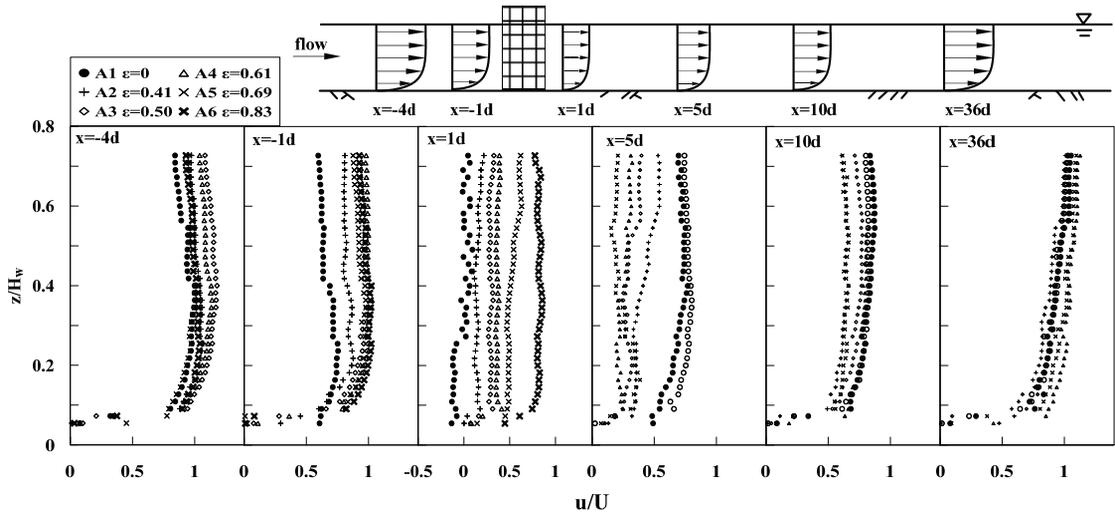


圖7 不同孔隙比流速縱向剖面沿程之變化

變化劇烈，能量間的轉換造成此範圍的流場及不穩定。接下來觀察透水圓柱流速發現除了孔隙比為0.83（空心圓圈）的流速剖面幾乎沒有變化與上游相近外，孔隙比0.41~0.69的4個速度剖面均有衰退之趨勢，流速沒有降低至負值便不會形成垂直向渦流，孔隙比愈大流速衰退變化愈小；4個孔隙比的速度場在 $x = 10d$ 處才緩慢地回復至上游端的流況。

圖8為 $x/d = 1$ 處橫向流速之趨勢，我們觀察到組別A1實心圓柱的流速在 $y/d = 0.5$ 範圍內產生負值，此範圍為實心圓柱沿著水流方向的投影面

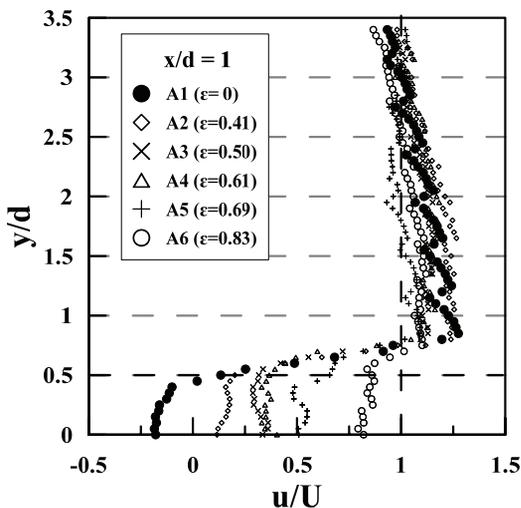


圖8 橫向流速於 $X/D=1$ 處之變化

積內， $x/d = 0.5$ 以外的正值流速往 $x/d = 0.5$ 內負值流速的方向呈順時針旋轉，而形成卡曼渦列。而具透水能力的圓柱(A2~A6)在 $x/d = 0.5$ 範圍內的流速值並無產生負值流速，在全部均為正值流速的流況下，透水圓柱後方的流場並不容易產生卡曼渦列。再者，由 $y/d = 0.5 \sim 1$ 範圍內得知實心圓柱流速回復十分迅速，斜率在所有組別中為最大，實心結構體造成兩側流速加快的現象屬於束縮效應的特點之一，而組別A2~A6的透水圓柱後方水流正射投影範圍內的流速均為正值，隨著孔隙比愈大而斜率愈小，表示透水圓柱對流場可減弱自身產生的斷面束縮效應，且穿越流具有將後方遮蔽區範圍橫向拓展之功效。

3.2 流速時序性之變化

為了瞭解透水圓柱對流場之影響程度，我們透過傅立葉轉換將瞬時流速轉換成振幅分量與頻率分量，進而繪出速度頻譜圖，分析其流場是否與實心圓柱產生具有週期性卡曼渦列的擺盪，以及流場振幅能量之大小。傅立葉積分公式如下：

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

其中 $u_x(t)$ 為時間之函數， $F(u_x)$ 為頻率之函數， $F(u)$ 而為一複數之數值，可改寫為下式：

$$F(u) = R(u) + iI(u) \quad (6)$$

其中 $R(u)$ 為傅立葉轉換之實數部， $I(u_c)$ 為傅立葉轉換之虛數部，而絕對值 $|F(u)|$ 為其振幅，以下式表示：

$$|F(u)| = \sqrt{R^2(u) + I^2(u)} \quad (7)$$

瞬時流速值取 $x/d = -1$ 、 1 、 2 、 5 及 10 倍直徑處， $y = 0$ 之中心軸，水深方向取 z 軸為距離底床 0.73 倍直徑處，時間範圍則取 4.1 秒~ 12.1 秒之瞬時流速，每秒取 25 個量測值，頻率為 25 Hz，縱、橫向瞬時流速變化及速度頻譜圖分別如圖9~12所示。

圖9A中我們觀察到實心圓柱後方流場的縱向瞬時流速極不穩定， $x/d = 20$ 處才回復至入流流速 $x/d = -1$ 的流況，而圖9B的速度頻譜中觀察不到任何明顯的振幅。圖10A為孔隙比 0.61 的瞬時流速變化，相較於實心圓柱可以明顯地發現透水圓柱後方 $x/d = 1 \sim 5$ 處的縱向流速格外地穩定，在本文平均流速為 0.283 m/s下，實心圓柱瞬時變化最大值達到 0.4 m/s左右，而透水圓柱卻是很穩定地維持在 0.283 m/s的流速中，由此得知透水圓柱

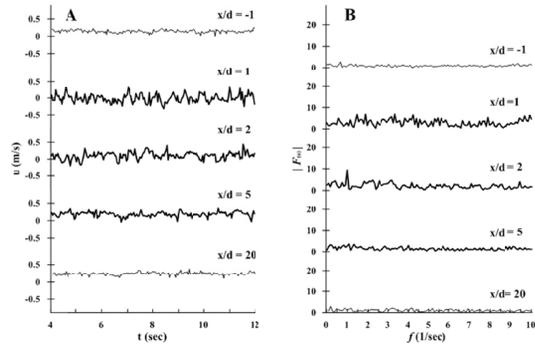


圖9 $\epsilon = 0$ 縱向瞬時流速變化(A)與速度頻譜(B)

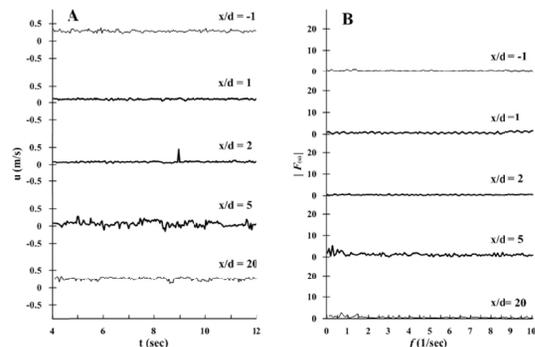


圖10 $\epsilon = 0.61$ 縱向瞬時流速變化(A)與速度頻譜(B)

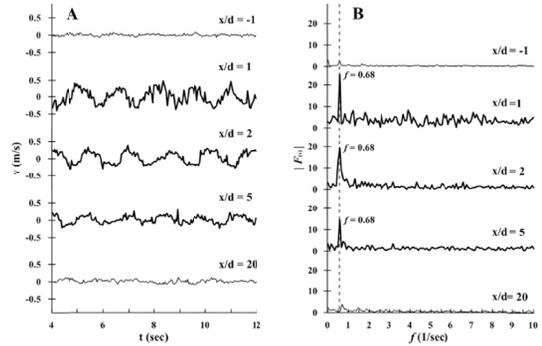


圖11 $\epsilon = 0$ 橫向瞬時流速變化(A)與速度頻譜(B)

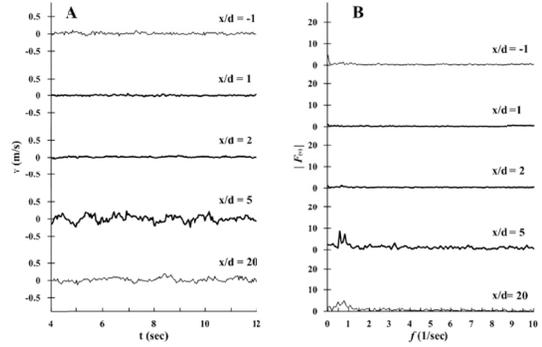


圖12 $\epsilon = 0.61$ 橫向瞬時流速變化(A)與速度頻譜(B)

具備了穩定流場的能力。而圖10B中由於瞬時速度擺盪變化小，因此並無任何頻率的產生。

圖11與12為橫向瞬時流速與速度頻譜圖。圖11A實心圓柱後方 $x/d = 1 \sim 5$ 範圍內的速度變化劇烈，再由圖11B觀察到後方流場發生擺盪的現象，頻率為 0.68 ，振幅的大小在 $x/d = 1$ 高達 25 ，愈往下游延伸振幅愈小，但是頻率值卻是維持在 0.68 ，表示實心圓柱後方確實會產生具週期性的卡曼渦列，此週期為 1.45 秒，直到 $x/d = 20$ 處無窩流震盪的現象。我們再觀察圖12A發現透水圓柱後方 $x/d = 1 \sim 5$ 範圍內橫向瞬時速度的變化比實心圓柱來得穩定，而圖12B亦無振幅的產生，此趨勢與縱向瞬時流速一致，表示透水圓柱可以穩定縱、橫斷面的流場變化，重要的是後方將不會產生具週期性擺盪的卡曼渦列。

對於由傅立葉分析所轉換出之頻率，利用史特赫數(Strouhal number, $S_t = f \frac{D}{U}$)進行驗證，當流體雷諾數到達時，史特赫數將維持定場數值 0.21 (Schlichting, 1979)，本實驗之雷諾數為，特徵直徑 D 為 0.08 cm，平均流速為 0.283 m/s，利

用史特赫數求得卡曼渦流之頻率 $f = 0.74$ ，周期為1.35秒。由此結果顯示，此實驗之測量流速頻率值與理論之數值差異不大。

當孔隙比為零或較小之情況下，橫向流速會因尾跡渦流強度增大而使瞬時流速有週期性震盪之變化，然而縱向主流速並未有如此之特性。此種縱、橫向之差異與Kiya and Matsumura (1988) 在風洞分析平板尾流特性所提出之結論相符合，Kiya指出流場中由相關結構所產生之擾動，主要會反映於橫方向之流速場之上。此種橫方向流速之週期性震盪情況，除了對流場結構特性造成差異之外，亦對於結構物之安全具有威脅性。透水圓柱因其具有穿越流可抑制尾流效應，減弱渦流所造成之週期性振動，能使結構物下游流場之穩定性相對提高，如此相對於不透水結構物而言，將更能穩定後方渠床之擾動。

3.3 流場穩定性分析

由3.2節可見，本實驗中流場固定位置上之流速具有擾動值會隨時間改變而改變，故利用紊流強度(turbulence intensity)分析以了解流場

之紊流大小與分布。紊流強度公式如下：

$$T_i = \frac{\sqrt{(u')^2 + (v')^2 + (w')^2}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \quad (8)$$

其中 T 為定義之紊流強度， i 為 x 、 y 、 z 其中一個方向。 $\sqrt{(u')^2 + (v')^2 + (w')^2}$ 分別為 x 、 y 、 z 三方向之紊流擾動量之均方根值，而 $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 則為流場之流速平均值。

實驗資料中我們以實心圓柱與孔隙比 $\varepsilon = 0.61$ 的透水圓柱做一比較。圖13為孔隙比 $\varepsilon = 0$ 與 $\varepsilon = 0.61$ 之紊流強度之縱橫斷面分佈圖，當顏色愈深表示水流之紊流強度愈高，反之則紊流強度則愈低。實驗資料顯示，在實心與透水圓柱上游之紊流強度皆無明顯變化。一旦水流通過實心圓柱，其後方紊流強度相當顯著，此紊亂的區域只侷限在實心圓柱下游約15倍直徑之內。下游15倍直徑以外的流況隨即回復至與圓柱上游相同。

實心圓柱後方之最大紊流強度發生於下游1倍直徑之處，愈往下游，紊流強度愈弱，原因為結構物後方之流體產生渦流剝離現象，形成週期性震盪之卡曼渦流，其三維之複雜渦流流場

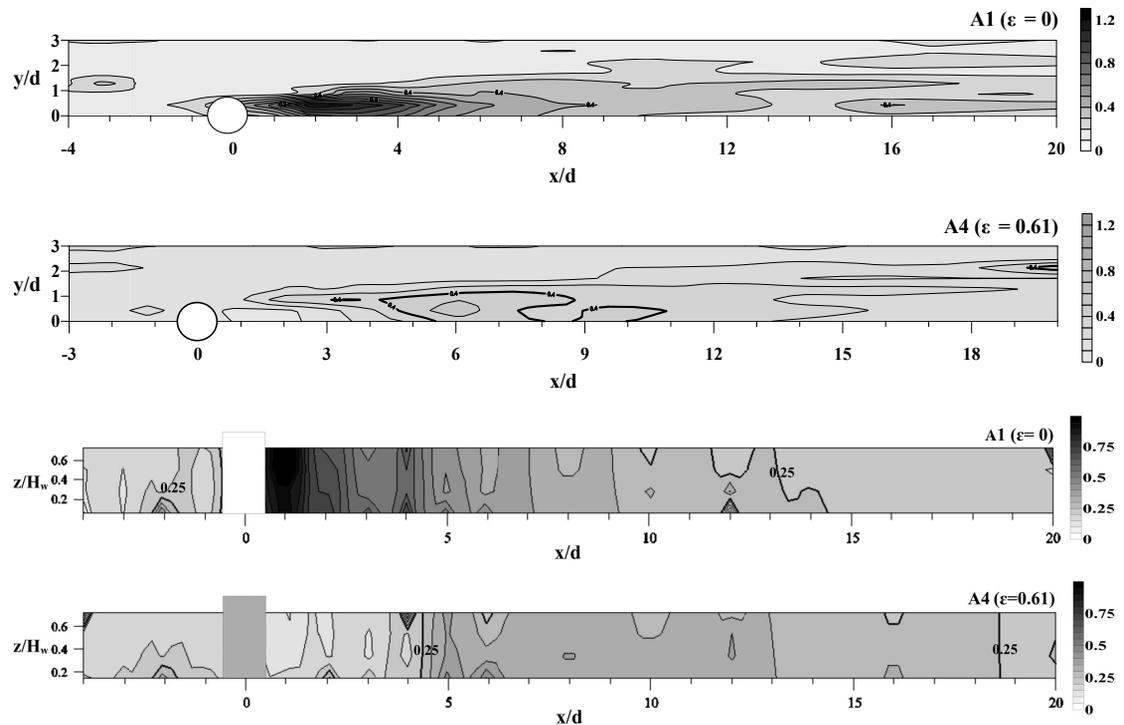


圖13 孔隙比 $\varepsilon=0$ 與 $\varepsilon=0.61$ 之縱斷面紊流強度分佈圖

為形成高度擾動之主因。在橫斷面上得知，實心圓柱之紊流強度超過0.4之範圍發生在不透水圓柱下游5倍直徑內，且範圍內之紊流強度最高到達1.2，隨後紊流強度愈往下游而減弱；由此可知，由於實心圓柱會在後方產生明顯之紊流強度擾動流場，會對底床產生局部沖刷之可能性，一旦局部沖刷產生後，沖刷坑可能會持續擴大，且紊亂之水流會將水中之泥沙顆粒底床載帶至更下游處，使結構物周圍之底床處於不穩定之狀態。孔隙比0.61時後方之水流紊流強度減弱最為明顯，且延伸至下游8至10倍直徑處。然而當水流通過透水圓柱之後，由於部分之水流形成穿越流經過透水圓柱抵達下游處，因此減弱後方尾流區之渦流強度，使流場擾動值減小，進而減小對底床之擾動，使原本懸浮於水體中之底床載落淤於結構物下游處，安定底床。

圖14為各組別垂直平均紊流強度之縱向變化，可以觀察到圓柱後方 $x/d = 1 \sim 5$ 範圍內實心圓柱之紊流強度高達1.02 m/s，透水圓柱最高也只達0.42 m/s，相較之下實心圓柱高達2.4倍之多，明顯呈現出實心結構物後方的流速擾動十分劇烈。此外，A2孔隙比0.41的最大紊流強度(0.42 m/s)發生於 $x/d = 3$ 處，A6孔隙比0.83的最大紊流強度(0.21)發生於 $x/d = 8$ 處，隨著孔隙比的增加，發生最大紊流強度的位置愈往下游延伸，最大紊流強度也隨之降低。

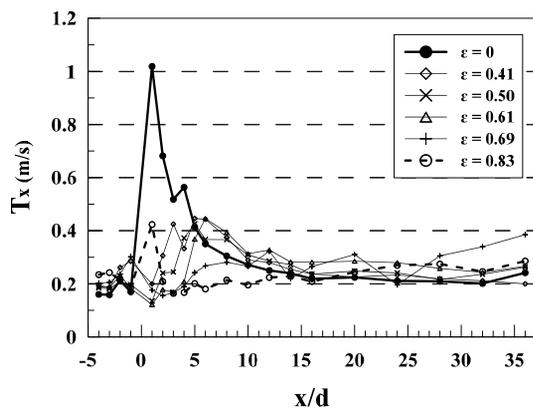


圖14 平均紊流強度之縱向變化趨勢

3.4 最大流速衰退率和孔隙比之關係

我們比較本實驗資料與石武融(2007)之實驗

資料，本實驗水理條件之福祿數為0.26，特徵雷諾數為，透水圓柱直徑為8 cm；而石武融實驗之福祿數為0.26，而特徵雷諾數為，透水圓柱直徑為10與16 cm，此2組不同實驗之水理條件皆為亞臨界流之紊流流況。

由圖15得知不論是孔隙比為0.41或0.61的直徑8 cm之透水圓柱所產生的最大流速衰退率均大於其它2個圓柱直徑(10 cm與16 cm)的流速最大衰退率，圓柱直徑愈大則流速最大衰退率愈小，可以解釋為當直徑小時，水流在較小的空間與時間上穿越透水圓柱，水流能量迅速地被削弱，進而達到較好的消能效果。同時，隨著孔隙比的增加，最大流速衰退率則愈小，表示孔隙比愈大則穿越流落淤的能力愈小。在流速最大衰退率的發生位置中(圖16)，當透水圓柱直徑改變時，並未對最大流速衰退率位置分佈造成明顯改變，而當孔隙比增加時，會使最大流速衰退率之位置向下游移動。透水圓柱之直徑大小僅會改變後方最大流速衰退率之數值大小，並不會影響最大流速衰退率之發生位置。

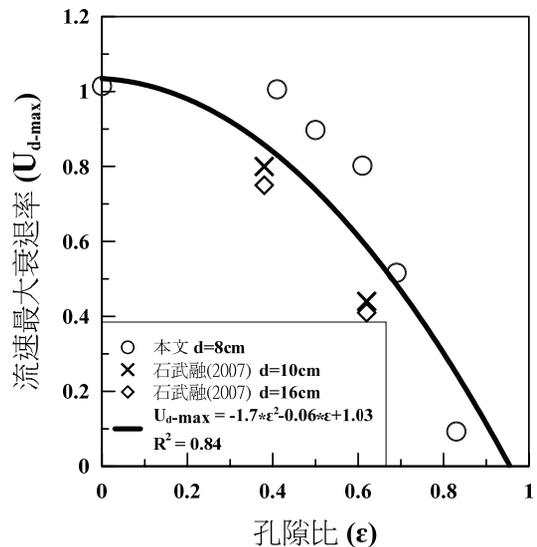


圖15 各孔隙比與最大流速衰退率之趨勢

四、結論與建議

本研究以實測流場資料比較透水圓柱孔隙比的不同，對於定床流場所造成之影響，由實驗後分析歸納出以下數點結論：

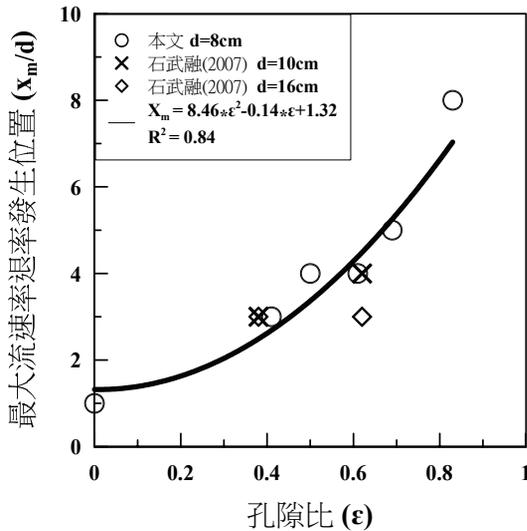


圖16 各孔隙比與最大流速衰退率發生位置之趨勢

1. 在縱斷面流場中，透水圓柱後方流速之減緩程度隨孔隙比增加而減少，影響範圍較不透水圓柱至更下游處。橫斷面流場中，透水圓柱後方減緩程度隨孔隙比增加而減少，影響範圍較不透水圓柱寬。
2. 速度頻譜圖顯示流場中由相關結構所產生之擾動，主要反映於橫方向之流速場之上；透水圓柱後方卡曼渦流主導性將隨孔隙比增加而減弱，至孔隙比0.69以上時已無明顯之支配頻率，振幅隨孔隙比增加而減弱。
3. 縱斷面紊流強度分佈圖中透水圓柱後方之紊流強度將會隨孔隙比增加而減弱，至孔隙比0.83時紊流強度已無明顯變化。
4. 孔隙比愈大時，會減小最大流速衰退率之值。而當孔隙比愈大時，最大流速衰退率發生位置會向下游移動。
5. 在透水圓柱後方 $x = 8 \sim 10 d$ 範圍內為庇護區，庇護區內之流速小、紊流強度弱，在實務上可利用此範圍流場之特性將上游移動至透水圓柱之底床載落淤在庇護區內而達到穩定底床的效果，提高水工結構物的使用壽命。
6. 建議未來進行試驗者可以考慮改變水深與管網高度之關係，進行更深入的研究以包含更廣泛之水力條件。

謝 誌

本研究承蒙科技部經費補助，黃進坤副教授門下碩士生對實驗的執行，使得本實驗得以順利完成，謹至謝忱。

參 考 文 獻

1. 山本晃一，1995，「日本の水制」，山海堂。
2. 石武融，2007，「透水性管網圓柱之流場試驗研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
3. 吳龍華，周春天，嚴忠民，王南海，2003，「架空率、桿件長寬比對四面六邊透水管架群減速促淤效果的影響」，水利水運工程學報，第3期，74-77。
4. 徐立昌、黃進坤、王順寬、鄭宇君、張憲國，2013，「海岸型管網對海岸保護成效之研究—以雙春海岸為例」，第35屆海洋工程研討會論文集，335-340。
5. 章平平、張志樂，2001，「混凝土四面六邊透水管架在壩下消能設計中的應用」，水利技術監督-工程實踐與研究，第二期，42-43。
6. 許少華、黃進坤、陳宴民，2009，「透水性管網圓柱保護堤岸之案例研究」，台灣水利，第57卷，第3期，20-27。
7. 黃進坤，2006，「橋墩保護新工法之研究」，台灣公路工程，第32卷，第8期，39-44。
8. 黃進坤、徐立昌(2007)，「橋墩保護工法之新概念」，台灣公路工程，第33卷，第5期，pp.39-49。
9. 黃進坤，2011，「河川橋梁基礎防冲刷研究案例」，土工技術，第127期，第71-78頁。
10. 黃進坤、盧之偉，「管網基樁群對橋墩冲刷保護之探討」，岩土工程學報，第35期，第982-985頁。
11. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2009，「河道固床工破壞機制與減冲促淤新工法研擬總報告」。
12. 經濟部水利署第七河川局，2009，「高屏溪本流冲刷機制及防護新工法之研究」。
13. Akilli, H. and Rockwell, D., 2002, "Vortex formation from a cylinder in shallow water," *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 9, 2957-2969.
14. Ding, B., Y. M. Chiew and H. W. Tang, 2006, "Scour protection around bridge piers using tetrahedron frames," *Proceedings of 3rd International conference on Scour and Erosion (ICSE-3)*, 1-3 November, Amsterdam, 174-181.
15. Fransson, J. H. M., Konieczny, P. and Alfredsson, P. H., 2004, "Flow around a porous cylinder subject to continuous suction or blowing," *Journal of Fluids and*

- Structures, Vol. 19, 1031-1048.
16. Kiya, M. and Matsumura, M., 1988, "Incoherent turbulence structure in the near wake of a normal plate," *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 190, 343-356.
 17. Lienhard, J. H., 1966, "Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders," Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin, 300.
 18. Melville, B. W., and Coleman, S. E., 2000, "Bridge Scour," Water Resources Publications, LLC, 193-196.
 19. Perry, A. E., M. S. Chong, and T. T. Lim, 1982, "The vortex shedding process behind two-dimensional bluff bodies," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 116, 77-90.
 20. Roshko, A., and W. Fiszdon, 1969, "On the persistence of transition in the near-wake," *Problems in Hydrodynamics and Continuum Mechanics*, Philadelphia, SIAM, 606-616.
 21. Von Karman, T., 1912, "Über den Mechanismus des Widerstandes den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt," *Nachrichten der k. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 547-556.
 22. Zdravkovich, M. M., 1997, "Flow Around Circular Cylinders," *Fundamentals*, Vol. 1. Oxford University Press.

收稿日期：民國 104 年 06 月 17 日

修正日期：民國 104 年 08 月 17 日

接受日期：民國 104 年 10 月 08 日