

潛沒式導流板之形狀對交互作用現象的影響

歐陽慧濤^{[1]*} 賴進松^[2] 林政斌^[1] 羅元宏^[1]

摘 要 潛沒式導流板為國外常見的河川治理工法，其應用範圍甚廣，諸如穩定河川岸壁、取水口泥砂排除、渠道疏濬等方面的應用皆有良好的成效。由於單一潛板的影響範圍有限，於實務應用時通常沿一河川斷面上設置一系列的潛板組成一潛板系統以增加其影響範圍。過去的研究指出潛板系統間有交互作用現象存在，各潛板彼此互相影響而造成導流效果下降，然而由於理論的限制，此方面的研究多僅針對矩形潛板進行探討，至於其他形狀的潛板系統中之交互作用現象的相關研究則較少。本文應用機翼理論中的小板法針對各種不同形狀的多潛板系統進行模擬，並結合鏡像法將水面及底床等邊界的影響以虛擬潛板系統的概念納入流場計算中，藉由分析各形潛板系統所產生的徑向流速分布，探討不同的潛板形狀對潛板系統間的交互作用現象所造成的影響。研究結果顯示潛板系統間的交互作用現象隨潛板的設置角度增大而增強，並隨設置間距的增加而減弱。潛板系統間各板的導流效果並不相同，各板效能的差異以束縮板最為明顯，前傾板次之，矩形板則最為接近。

關鍵詞：潛板形狀、交互作用、潛板系統、小板法、鏡像法。

The effect of submerged vane shape on the interaction between the vanes

Huei-Tau Ouyang^{[1]*} Jih-Sung Lai^[2] Cheng-Pin Lin^[1] Yuan-Hung Luo^[1]

ABSTRACT Submerged vane is a technique for river management with a wide range of applications such as channel bank protection, sediment exclusion for water intake, and dredging for navigational channels. Since the area affected by a single vane is limited, in applications, several vanes are usually installed in a row along a channel cross-section to widen the affected area of the vanes. Previous researchers found the vanes in a row interact with one another, thus reducing the vanes' capability in sediment management. However, due to the simplification of the theory, most of the researches on the interaction effect have so far been restricted to rectangular vanes. Few have mentioned vanes of other shapes, and even less the interaction effect of these types of vanes. The goal of this research is to study the interaction effect between vanes of various shapes by utilizing the panel method and theorem of images in aerodynamics. The results show the interaction effect increases with the angle of the vane to the flow, and decreases with the shorter distance between the vanes. The sediment management capability for each of the vanes in a row is not the same. The differences are clearest for the tapered vanes,

[1] 國立宜蘭大學土木工程學系
Department of Civil Engineering, National Ilan University, Yilan City, 260, Taiwan.
[2] 國立台灣大學水工試驗所
Hydrotech Research Institute, National Taiwan University, Taipei, 10617, Taiwan.
*Corresponding Author. E-mail address: htouyang@niu.edu.tw

less for the forward-swept vanes, and the least for the rectangular vanes.

Key Words: vane shape, interaction effect, vane system, panel method, theorem of images.

一、前言

天然河川大多呈現蜿蜒曲折的彎曲河道，水流通過彎道時由於離心力的作用與上下層水體間的速度差，產生一特殊的二次流現象(secondary current)，造成上層水體的流向朝凹岸偏移而下層水體的流向則朝凸岸偏移的流動特性，使得彎道中的水體呈現一螺旋狀的流動狀態。此二次流現象目前已知是造成河川彎道凹岸淘刷與凸岸淤積的主要原因，對於河道的穩定有重要的影響。

針對此一造成河岸侵蝕的成因，遂有研究者提出以潛沒式導流板(簡稱潛板)的水工設施來改變彎道中的流場，減低二次流的強度進而達到保護河岸的效果。潛板係一系列垂直設置於渠道底床上且與水流方向呈一夾角之薄板，利用水流通過時於潛板的兩側所產生的速度差，於下游流場中捲合成一與河川二次流方向相反之尾跡渦流，以抵消或減小彎道二次流的強度，降低河岸的淘蝕，達到保護河岸的目的。

在前人的研究中(Odgaard and Wang, 1991a; Ouyang *et al.*, 2008)曾指出在一潛板系統內各板間的流場會產生交互作用，彼此互相影響而導致各板的導流效果降低，Ouyang *et al.* (2008)並曾針對矩形板間的交互作用現象進行理論的分析，並推導出矩形板因交互作用而產生的效能折減公式。然而，由於前人的研究大多採用簡化的渦流理論探討此一交互作用現象，因此研究結果多僅適用於矩形潛板系統，至於其他形狀的潛板系統間的交互作用現象，則較少有研究者觸及。本研究的目的旨在針對前人的理論加以改進，發展一可用以估算任何形狀的潛板系統所產生流場與床形模式，並針對矩形、板頂前傾、板頂束縮等三種不同板形所組成的潛板系統，探討各形潛板間的交互作用現象，以瞭解潛板的形狀對交互作用現象的影響。

二、文獻回顧

關於潛板的研究首推美國愛荷華大學水力研究所(Iowa Institute of Hydraulic Research, IIHR)近三十年來的一系列理論推導與實驗分析，陸續的研究者包括 Odgaard and Kennedy (1983)，Odgaard

and Lee (1984)，Odgaard and Mosconi (1987)，Odgaard and Sporjaric (1986)，及 Odgaard and Wang (1991a; 1991b) 等。Odgaard and Kennedy (1983) 將空氣動力學中的機翼理論應用至潛沒式導流板的研究中，並根據二次流與潛板系統所產生的力矩平衡，成功推導出了彎道水流與潛板系統的關係式。Odgaard and Mosconi (1987) 之後更進一步將這套方法加以改良，應用鏡像法(Method of Images)模擬底床與水面邊界的影響，並應用 Prandtl 的有限翼理論(Finite Wing Theorem)於潛板的理論推導中，最後獲得的關係式可以準確地推估潛板的展弦比(高度與長度之比值)對其導流效果的影響，他們的理論研究成果之後則由 Spoljaric (1988) 以實驗加以證實。Odgaard and Sporjaric (1986) 並且將潛板的應用範圍延伸到人工運河的疏浚工程中，運用潛板所產生的側向水流，成功地運用水流能量將運河底床的泥沙重新分佈，而達到疏浚的效果。Wang (1991)，Odgaard and Wang (1991a)，及 Wang and Odgaard (1993) 應用空氣動力學中的雙翼理論(Theorem of Bi-plane)，將單片潛板的理論推展至多片的潛板矩陣系統。他們的理論中考慮了因潛板之間交互作用所導致的環流縮減(circulation reduction) 效應等影響，進而推導出不同排列模式下的潛板矩陣系統所產生的整體效應。Wang (1991) 並且解出一維彎道水流的動量方程式，進而推導出以潛板系統抵消彎道二次流時每一片潛板所需提供的底床剪應力。Ouyang *et al.* (2008) 則考慮到 Wang and Odgaard (1993) 的模式中各板之間的環流縮減皆相等的假設並不符合實際現象，進而將其加以改良，並推導出可適用於非等間距排列的潛板系統間的環流縮減公式。此外，Ouyang (2009) 則以機翼理論中的小板法探討各種形狀的單一潛板所產生的導流效果，結果顯示潛板的最佳高度約為 0.58 至 0.7 倍水深，且在潛板面積固定下，板頂束縮(tapered vane)及板頂前傾(forward-swept vane)兩種形狀可以加強潛板的效能。

綜觀前人關於潛板間交互作用現象的研究，由於受限於理論的簡化，多僅針對矩形的潛板進行探討，Spoljaric (1986) 及 Ouyang (2009) 雖曾探討各

種形狀的潛板與導流效果之間的關係，然其研究僅針對單一潛板，並未涉及潛板系統間的交互作用現象。至於潛板的形狀與潛板系統間交互作用現象之間的關係，目前的相關研究則甚少，仍有待進一步的探討。

三、研究方法

1. 潛板系統流場模式

當水流通過與流向呈一夾角之潛板時，因潛板兩側的流速差而產生一環繞於潛板之渦流，此渦流一般稱為範束渦流 (bound vortex)。範束渦流到達潛板頂端時，受到水流的帶動而轉變成一向下游之渦流，此渦流一般稱為尾跡渦流 (wake vortex) 或翼尖渦流 (tip vortex)。潛板即是利用此尾跡渦流改變下游的流場及底床剪應力分布，使得底床沉滓產生橫向運移，進而改變渠道斷面床形，達到鞏固河岸基礎的效果。

在前人的研究中，多採用簡化的單一範束渦流及尾跡渦流以模擬潛板所產生的流場，此簡化模式雖可大致反映出潛板的流場特性，然而卻只能適用於矩形的潛板。為探討其他形狀的潛板之間的交互作用現象，本研究延續 Ouyang (2009) 改採機翼理論中的小板法進行流場的模擬。

小板法的原理係將每一潛板切分為數個密佈於潛板上的小板，並以一四邊形之環狀渦流模擬每片小板所產生之流場，而整個潛板系統所產生的流場則可由各小板上的環狀渦流組成一渦流系統加以模擬，如圖 1 所示。

考慮一含有 N 片潛板所組成的潛板系統，系統中

第 m 片潛板上的第 j 個渦流環於第 n 片潛板上的第 i 個小板中心所產生之速度場 $\vec{q}_{ni,mj}$ 為

$$\vec{q}_{ni,mj} = \Gamma_{mj} \vec{f}_{ni,mj} \tag{1}$$

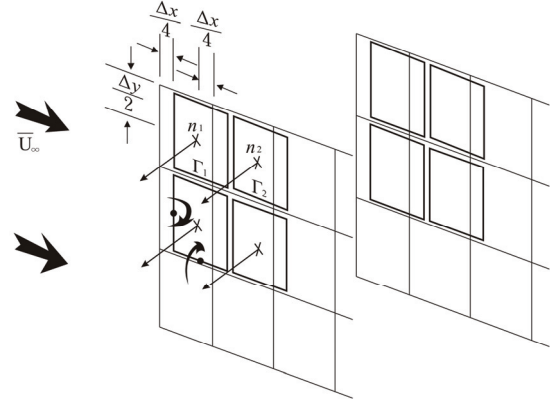


圖 1 小板法渦流環示意圖
Fig.1 Vortex rings in panel method

式中 Γ_{mj} 為第 m 片潛板上第 j 個渦流環的強度； $\vec{f}_{ni,mj}$ 為影響係數向量，可依據 Biot-Savart Law 以下式計算 (Ouyang, 2009)

式中 $\vec{r}_{ni,mj,1}$ 至 $\vec{r}_{ni,mj,4}$ 分別為第 n 片潛板上的第 i 個小板中心指向第 m 片潛板上的第 j 個渦流環的四邊起點之方向向量； $\vec{R}_{mj,1}$ 至 $\vec{R}_{mj,4}$ 則分別為第 m 片潛板上的第 j 個渦流環之四邊的方向向量，並以左手定則環繞該小板之法線方向為正，如圖 2 所示。

$$\vec{f}_{ni,mj} = \frac{1}{4\pi} \left[\begin{aligned} & \frac{\vec{r}_{ni,mj,1} \times \vec{r}_{ni,mj,2}}{|\vec{r}_{ni,mj,1} \times \vec{r}_{ni,mj,2}|^2} \vec{R}_{mj,1} \cdot \left(\frac{\vec{r}_{ni,mj,1}}{|\vec{r}_{ni,mj,1}|} - \frac{\vec{r}_{ni,mj,2}}{|\vec{r}_{ni,mj,2}|} \right) \\ & + \frac{\vec{r}_{ni,mj,2} \times \vec{r}_{ni,mj,3}}{|\vec{r}_{ni,mj,2} \times \vec{r}_{ni,mj,3}|^2} \vec{R}_{mj,2} \cdot \left(\frac{\vec{r}_{ni,mj,2}}{|\vec{r}_{ni,mj,2}|} - \frac{\vec{r}_{ni,mj,3}}{|\vec{r}_{ni,mj,3}|} \right) \\ & + \frac{\vec{r}_{ni,mj,3} \times \vec{r}_{ni,mj,4}}{|\vec{r}_{ni,mj,3} \times \vec{r}_{ni,mj,4}|^2} \vec{R}_{mj,3} \cdot \left(\frac{\vec{r}_{ni,mj,3}}{|\vec{r}_{ni,mj,3}|} - \frac{\vec{r}_{ni,mj,4}}{|\vec{r}_{ni,mj,4}|} \right) \\ & + \frac{\vec{r}_{ni,mj,4} \times \vec{r}_{ni,mj,1}}{|\vec{r}_{ni,mj,4} \times \vec{r}_{ni,mj,1}|^2} \vec{R}_{mj,4} \cdot \left(\frac{\vec{r}_{ni,mj,4}}{|\vec{r}_{ni,mj,4}|} - \frac{\vec{r}_{ni,mj,1}}{|\vec{r}_{ni,mj,1}|} \right) \end{aligned} \right] \tag{2}$$

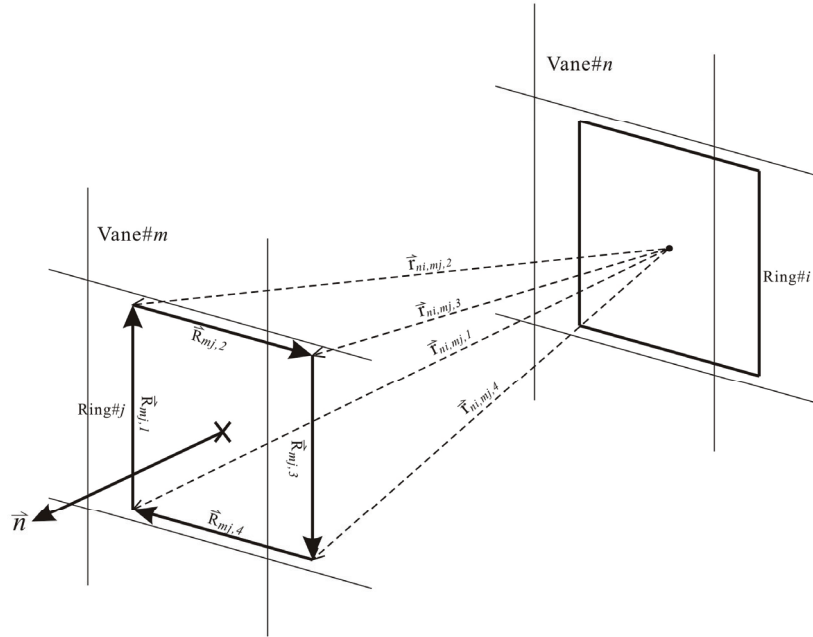


圖 2 小板法中各向量之定義

Fig.2 Vector definitions in panel method

潛板系統中各片潛板上之渦流系統與水流的合成流場必須要滿足各片潛板面上法線方向速度為零的條件，如下式所示

$$\sum_{\substack{m=1,N \\ j=1,M}} (\bar{q}_{ni,mj} + \bar{u}) \cdot \bar{n}_{ni} = 0, \quad n = 1, \dots, N, \quad i = 1, \dots, M \quad (3)$$

式中 N 為潛板數量； M 為每片潛板上的小板數量； \bar{n}_{ni} 為第 n 片潛板上的第 i 個小板中心之單位法線向量； \bar{u} 為入流之流速向量，其分布以幕次律估算

$$\frac{u}{\bar{u}} = \frac{m+1}{m} \left(\frac{z}{d} \right)^{1/m} \quad (4)$$

式中 \bar{u} 為深度平均流速； m 為縱向流速幕次律指數； d 為水深； z 則為各小板中心點與底床之距離。

(3)式可改寫成一線性方程式系統如下

$$\begin{pmatrix} a_{11,11} & a_{11,12} & \dots & a_{21,11} & \dots & \dots & a_{N1,NM} \\ a_{12,11} & a_{12,12} & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{N2,NM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{21,11} & \dots & \dots & a_{22,11} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{NM,11} & a_{NM,12} & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{NM,NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{12} \\ \dots \\ \Gamma_{21} \\ \dots \\ \dots \\ \Gamma_{NM} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \bar{u} \cdot \bar{n}_{11} \\ \bar{u} \cdot \bar{n}_{12} \\ \dots \\ \bar{u} \cdot \bar{n}_{21} \\ \dots \\ \dots \\ \bar{u} \cdot \bar{n}_{NM} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 $a_{ni,mj}$ 為第 m 片潛板的第 j 個渦流環於第 n 片潛板上的第 i 個小板中心點之影響係數向量於該點法線方向上的分量，如下式所示

$$a_{ni,mj} = \vec{f}_{ni,mj} \cdot \vec{n}_{ni} \quad (6)$$

(5)式的解即為各潛板上各小板之渦流環的強度。

2. 水面及底床與岸壁等邊界之影響

渠道中的水流同時亦受到自由水面及底床與岸壁等邊界的影響，本研究採用鏡像法 (method of images) 針對這些邊界的效應進行模擬。延續 Wang 與 Odgaard (1993) 的假設，當福祿數 (Froude number) 甚小時，水面可視為一固定邊界 (rigid boundary)，此邊界對流場的影響可用虛擬的潛板鏡像 (images) 加以模擬，虛擬板上的渦流系統強度與實體板完全相同，但方向相反。同理，底床的影響也可採相同方式處理，在此二邊界的相互影響下，流場可由無限多層潛板的鏡像所產生的速度場疊加而得，同理兩側岸壁的邊界效應則可利用在岸壁外的水平對應位置處設置潛板系統的虛擬鏡像加以模擬，如圖 3 所示。

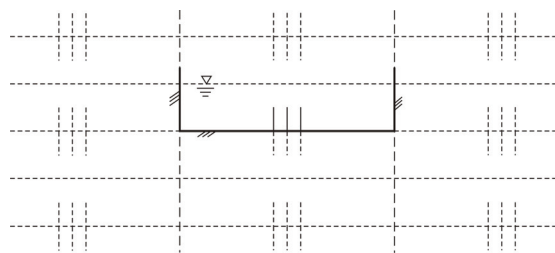


圖 3 潛板鏡像示意圖

Fig.3 Images of a submerged vane system

在前人的研究中 (Wang and Odgaard, 1993; Ouyang et al., 2008; Ouyang, 2009)，鏡像潛板上的渦流強度係直接採用實體潛板上的渦流強度，亦即解出(5)式後直接代入鏡像潛板上的渦流系統。然而，考慮到鏡像潛板也會對流場產生影響，因此對實體潛板上的渦流系統強度也將造成影響，亦即鏡像潛板系統與實體潛板系統之間亦應會產生交互作用，在計算實體潛板上的渦流系統強度時亦應將鏡像潛板的影響一併考慮，因此(5)式須再加以修正。

本研究將鏡像潛板也視為潛板系統的一部份，將鏡像潛板與實體潛板組合成一含有無限多片潛板的潛板矩陣系統，並將各潛板上 (包含實體潛板與鏡像潛板) 的渦流系統強度皆視為待求解之未知數，(5)式則擴增成一無限大之矩陣系統，如下式所示：

$$\begin{pmatrix} a_{re(11),re(11)} & \dots & a_{re(N1),re(NM)} & a_{re(11),im1(11)} & \dots & \dots & a_{re(N1),im\infty(NM)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{re(NM),re(11)} & \dots & a_{re(NM),re(NM)} & a_{re(NM),im1(11)} & \dots & \dots & a_{re(NM),im\infty(NM)} \\ a_{im1(11),re(11)} & \dots & a_{im1(N1),re(NM)} & a_{im1(11),im1(11)} & \dots & \dots & a_{im1(N1),im\infty(NM)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{im\infty(NM),re(11)} & \dots & a_{im\infty(NM),re(NM)} & a_{im\infty(NM),im1(11)} & \dots & \dots & a_{im\infty(NM),im\infty(NM)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_{re(11)} \\ \dots \\ \Gamma_{re(NM)} \\ \Gamma_{im1(11)} \\ \dots \\ \dots \\ \Gamma_{im\infty(NM)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \vec{u} \cdot \vec{n}_{re(11)} \\ \dots \\ \vec{u} \cdot \vec{n}_{re(NM)} \\ \vec{u} \cdot \vec{n}_{im1(11)} \\ \dots \\ \dots \\ \vec{u} \cdot \vec{n}_{im\infty(NM)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中下標 re 代表實體潛板系統， $im1$ 至 $im\infty$ 則代表鏡像潛板系統重覆反射所產生的鏡像層別，例如元素 $a_{re(12),im3(45)}$ 代表第 3 層鏡像潛板系統中第 4 片鏡像潛板上的第 5 個渦流環對實體潛板系統中第 1 片潛板上的第 2 個小板中心所產生的影響係數。

上式的方程式系統含有無限多個待求解之未知數，即使忽略較遠處之鏡像潛板的影響，方程式系統仍十分龐大，實際計算上非常耗費電腦資源，由於電腦硬體的限制，直接求解(7)式幾已不可行。然而，考慮到鏡像潛板係由實體潛板映射而成此一事實，因此其渦流系統的強度理應與實體潛板相同，而數值正負則相反。同理，第二層鏡像潛板係由第一層鏡像潛板映射而成，因此其渦流系統的強度也應相同，而數值正負則再相反，因此與實體潛板相同，各層鏡像潛板上的渦流系統依此類推，可得如下關係式

$$\Gamma_{re(mj)} = -\Gamma_{im1(mj)} = \Gamma_{im2(mj)} = -\Gamma_{im3(mj)} = \dots, \quad m=1, \dots, N \quad j=1, \dots, M \quad (8)$$

將上式代入(7)式並加以推導後，可將方程式系統大幅縮減如下

$$\begin{pmatrix} a_{re(11),re(11)} - a_{re(11),im1(11)} + \dots - a_{re(11),im\infty(11)} & \dots & a_{re(N1),re(NM)} - a_{re(N1),im1(NM)} + \dots - a_{re(N1),im\infty(NM)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{re(NM),re(11)} - a_{re(NM),im1(11)} + \dots - a_{re(NM),im\infty(11)} & \dots & a_{re(NM),re(NM)} - a_{re(NM),im1(NM)} + \dots - a_{re(NM),im\infty(NM)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_{re(11)} \\ \vdots \\ \Gamma_{re(NM)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \bar{u} \cdot \bar{n}_{re(11)} \\ \vdots \\ \bar{u} \cdot \bar{n}_{re(NM)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

上式的待求解未知數僅剩實體潛板系統上的渦流環強度 $\Gamma_{re(11)}$ 至 $\Gamma_{re(NM)}$ ，其數量為 $N \times M$ 個，在計算上已屬可行。係數矩陣中的各元素雖仍須由無限多項疊加而成，但考慮到距離較遠處的鏡像潛板所產生的影響已甚微小，經測試後顯示 30 層鏡像以上之計算結果的差異已低於萬分之一，於計算時可忽略不計。

解出(9)式之潛板系統上的渦流強度後，流場中任一點 p 之流速可應用重疊原理 (Theorem of Superposition) 將包含實體潛板系統與鏡像潛板系統上各渦流環所產生的速度場與入流流速加以組合而成，如下式所示

$$\bar{V}_{ind} = \left[\bar{f}_{p,re(11)+im1(11)+\dots} \quad \bar{f}_{p,re(12)+im1(12)+\dots} \quad \dots \quad \bar{f}_{p,re(NM)+im1(NM)+\dots} \right] \begin{pmatrix} \Gamma_{re(11)} \\ \Gamma_{re(12)} \\ \vdots \\ \Gamma_{re(NM)} \end{pmatrix} + \bar{u} \quad (10)$$

其中 $\bar{f}_{p,re(mj)+im1(mj)+\dots}$ 為實體潛板系統與各層鏡像潛板系統中第 m 片潛板上的第 j 個渦流環對計算點 p 所產生的影響係數向量。

3. 潛板系統床形模式

計算出潛板系統所產生的流場後，可再進一步推算底床的徑向剪應力分布。根據前人的研究 (Rozovskii, 1957; Odgaard, 1989; Odgaard and Wang, 1991a)，底床徑向與縱向剪應力的比值與近床處徑向與縱向流速的比值約略相同，如下式所示

$$\frac{\tau_{vm}}{\tau_{bs}} = \frac{V_{vb}}{u_b} \quad (11)$$

式中 V_{vb} 為潛板所產生的近床徑向流速，可由流場模式獲得； u_b 為近床縱向流速，與縱向平均流速之關係為

$u_b = \bar{u} / k$ ，其中 k 約為 1 (李鴻源、葉克家，2002)； τ_{bs} 則為底床縱向剪應力，可由下式估算 (Zimmermann and Kennedy, 1978)

$$\tau_{bs} = \frac{\rho \kappa^2 \bar{u}^2}{m^2} \quad (12)$$

其中 κ 為 von Karman 常數，其值約為 0.4； ρ 為水體密度。

由(11)式得出潛板系統所產生的底床徑向剪應力分布後，結合 Odgaard and Wang (1991a) 所發展的彎道床形模式，可進一步得出潛板系統所產生的床形

$$\frac{d(d)}{dn} = - \frac{m}{\rho \kappa \bar{u} \beta \sqrt{\theta \Delta g D}} \tau_{bn} \quad (13)$$

式中 d 為水深； n 為徑向座標； B 與 Coulomb 動摩擦係數及河床上沈滓所受上舉力與拖曳力之比值有關，

其值介於 3 至 6 之間 (Odgaard, 1989; Odgaard and Wang, 1991a; Ikeda and Nishimura,

1985); θ 為臨界 Shields 剪應力; $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$; ρ_s 為沈澱密度; D 為沈澱之中值粒徑; τ_{bn} 為底床徑向剪應力, 可由下式決定:

$$\tau_{bn} = -\frac{k(2m+1)(m+1)}{m^2[2m^2+k(m+1)]} \rho d \frac{\bar{u}^2}{r} + \tau_{vn} \quad (14)$$

上式中等號右邊的第一項為彎道中二次流所產生的底床徑向剪應力 (Odgaard, 1989), 而第二項 τ_{vn} 則為潛板在底床所產生的徑向剪應力

連結(2)至(10)式的潛板系統流場模式與(11)至(14)式的床形模式, 即可推估彎道中設置潛板系統後的徑向床形變化。同時, 由(14)式可知, 當 r 放大至無限大時, 二次流的影響消失, 模式退化成直渠道的情況, 因此, 本模式亦可適用於直渠道中設置潛板系統後的斷面床形模擬。

四、模式驗證

本研究採用 Odgaard and Wang (1991b) 之水槽試驗資料進行模式的驗證, 該試驗分為直渠道及彎曲渠道二種配置, 其中直渠道試驗的佈置如下: 渠道寬 2.44m; 水深 0.1615 m; 沉澱中值粒徑 0.41 mm; 渠道平均流速為 0.3383 m/s; 縱向流速剖面指數 $m=4.7$ 。於一橫斷面上設置四片矩形潛板, 板高為 0.0762 m, 板長為 0.1524 m, 設置角度為 20 度, 設置位置分別為距岸壁 0.59 m、0.74 m、0.89 m 及 1.09 m 處。彎曲渠道的試驗佈置如下: 彎道中心曲率半徑 $r=12.68m$; 渠道寬度 1.94 m; 水深 0.1524 m; 沉澱中值粒徑為 0.41 mm; 渠道平均流速為 0.4023 m/s; 縱向流速剖面指數 $m=4.8$ 。於徑向設置二矩形潛板, 板高為 0.0762 m, 板長為 0.1524 m, 設置角度為 15 度, 設置位置分別為距凹岸 0.27 m 及 0.45 m 處。

圖 4 及圖 5 分別為直渠道及彎曲渠道之試驗資料與模式之計算床型的比對結果, 圖中顯示在兩種試驗中之計算床型與量測資料皆可大致相符, 驗證結果尚稱滿意。

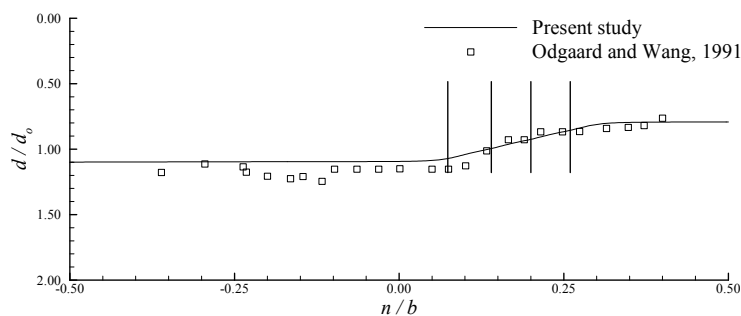


圖 4 計算床形與試驗資料比較 (直渠道)

Fig.4 Comparison of the calculated bedform with data (straight channel)

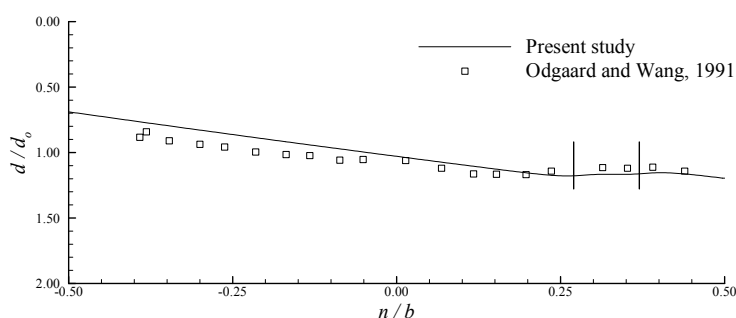


圖 5 計算床形與試驗資料比較 (彎曲渠道)

Fig.5 Comparison of the calculated bedform with data (curved channel)

五、結果與討論

本文旨在探討潛板的形狀對潛板系統之交互作用現象的影響，探討的板形則依循 Ouyang (2009) 的定義，分為矩形板 (rectangular vane)、傾斜板 (swept vane) 及束縮板 (tapered vane) 三種板形。矩形板係一外形為矩形之平板，其長度與高度分別為 L 與 H 。傾斜板係一長度為 L 高度為 H 之平行四邊形板，其板頂沿水流方向位移一 δ_t 長度，並定義其傾斜程度為板頂之位移量與板長之比如下式所示

$$\Lambda = \frac{\delta_t}{L} \quad (15)$$

其中 Λ 為傾斜比 (swept ratio)， δ_t 為板頂之位移量。當 $\Lambda < 0$ 時，潛板為前傾形 (forward-swept vane)，而當 $\Lambda > 0$ 時，板形則為後傾板 (aft-swept vane)。束縮板係自板底向板頂逐漸束縮且各截面四分之一板長之連線為一垂直線之梯形板，其束縮程度則以板頂長度與板底長度之比值加以定義，如下式所示

$$\eta = \frac{L_t}{L_b} \quad (16)$$

其中 η 為束縮比， L_t 為板頂之長度， L_b 為板底之長度。

依據 Ouyang (2009) 的研究，矩形板之最佳板高與板長之比為 0.65，因此本文採用此種比例做為矩形潛板之基準板形。該研究中同時指出傾斜板以 $\Lambda = -0.5$ 的前傾形的導流效果為最佳，束縮板的板形則以束縮比 $\eta = 0.5$ 的效果最好，因此本文亦以此二種比例的板形進行討論，各形潛板的面積與板高則皆相同，以維持同一基準下三種板形對交互作用現象之影響的比較。

為探討潛板間的交互作用現象，定義潛板的交互作用因子如下 (Odgaard and Wang, 1991a; Ouyang et al., 2008)

$$\lambda_i = \frac{V_i}{V_w} \quad (17)$$

式中 λ_i 為第 i 片潛板之交互作用因子； V_i 為第 i 片潛板所產生之最大徑向流速； V_w 為單一潛板所產生之最大徑向流速。 λ_i 的值介於 0~1 之間，代表第 i 片潛板受到交互作用的影響後其導流效果的折減程度，其值越小代表交互作用的影響越強，折減後的導流效果越低。

考慮由二片潛板所組成的二潛板系統，潛板的編號方式如圖 6 所示，由板尾的指向開始編號。圖 7 至圖 9 分別為矩形板、前傾板、束縮板所組成的二潛板系統在 $\alpha = 10^\circ$ 及 20° 時之交互作用因子隨二板間距 δ/d_0 的變化情形，圖中顯示，不論板形為何，二板的 λ 值皆隨 δ/d_0 減小而縮減，顯示二板間的距離愈近，交互作用愈強，導致二板的導流效果皆下降，而當 δ/d_0 增大，二板的 λ 值也朝向 1 接近，顯示交互作用現象逐漸減弱。圖中同時顯示，在相同的入流條件下，二板的交互作用因子並不相同，此結果與 Ouyang et al. (2008) 以簡化模式所獲得的結果相符。當 δ/d_0 較大時，二號板的 λ 值皆大於一號板，而當 δ/d_0 較小時，則呈現相反的情況，二號板的 λ 值皆小於一號板，二板效能變換的發生間距與板形有關，矩形板出現在 $\delta/d_0 = 0.5$ 的位置處，前傾板則發生於 $\delta/d_0 = 0.7$ 處，束縮板則約在 $\delta/d_0 = 0.9$ 處。三種板形於 $\alpha = 20^\circ$ 時二板間之 λ 值的差異皆大於 $\alpha = 10^\circ$ 時，顯示潛板的設置角度越大，二潛板間的交互作用越劇烈，導流效能的差異也愈大。圖中同時顯示，潛板的設置角度並不影響二潛板效能產生變換時的間距。

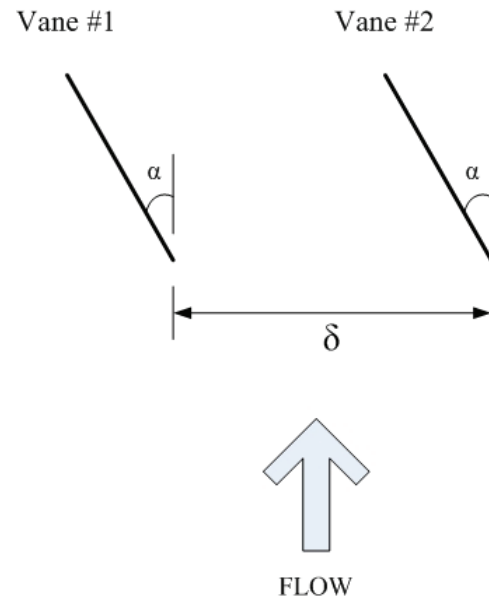


圖 6 潛板系統之設置與編號方式

Fig.6 Configuration and numbering of a vane system

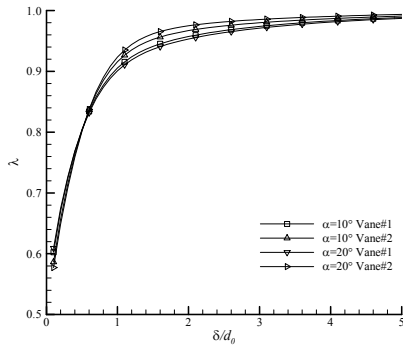


圖 7 矩形板之交互作用因子隨設置間距之變化
Fig.7 Interaction factor versus distance between vanes (Rectangular vane)

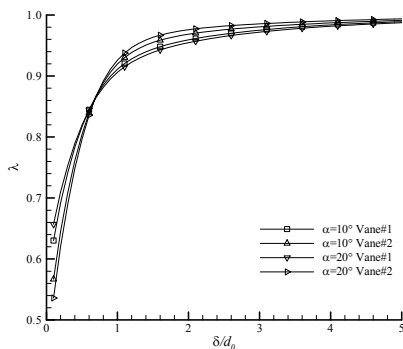


圖 8 前傾板之交互作用因子隨設置間距之變化
Fig.8 Interaction factor versus distance between vanes (Forward-swept vane)

圖 10 至圖 12 分別為矩形板、前傾板、束縮板於 $\alpha=10^\circ$ 與 20° 時二板之交互作用因子的比值 λ_2/λ_1 隨二板間距 δ/d_0 的變化情形，圖中顯示潛板間距較大時 λ_2/λ_1 大於 1，即 2 號板的效能大於 1 號板的效能，而當潛板間距較近時 λ_2/λ_1 則小於 1 時，亦即 2 號板的效能反而小於 1 號板的效能，此現象隨潛板設置角度的增大而越加明顯。觀察圖 10 中矩形板的 λ_2/λ_1 之變化，顯示矩形板的二板效能比差異不大，當 $\alpha=10^\circ$ 時約介於 0.97 至 1.01 之間，當 $\alpha=20^\circ$ 時，變化範圍則略增大為 0.95 至 1.03 之間。反觀圖 11 與圖 12 之前傾板與束縮板，則明顯可觀察到二板效能比的變化，當 $\alpha=20^\circ$ 時，前傾板的 λ_2/λ_1 約介於 0.82 至 1.03 之間，於束縮板則約介於 0.80 至 1.03 之間，顯示此二

種板形之雙潛板系統的二板效能差異較矩形板為明顯，且束縮板的效能差異又略大於前傾板。

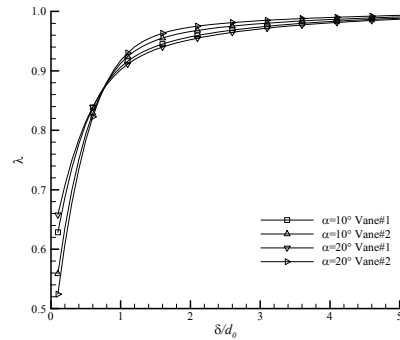


圖 9 束縮板之交互作用因子隨設置間距之變化
Fig.9 Interaction factor versus distance between vanes (Tapered vane)

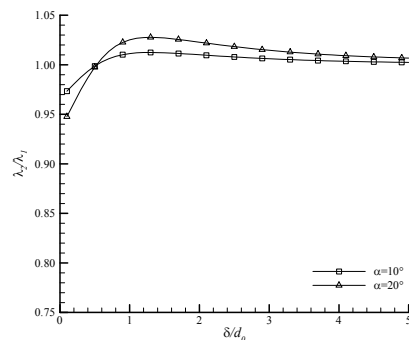


圖 10 矩形板二板效能比隨設置間距之變化
Fig.10 Ratio of interaction factors versus distance between vanes (Rectangular vane)

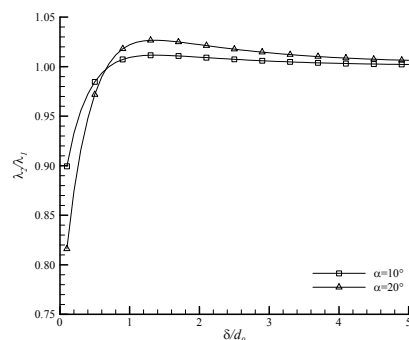


圖 11 前傾板二板效能比隨設置間距之變化
Fig.11 Ratio of interaction factors versus distance between vanes (Forward-swept vane)

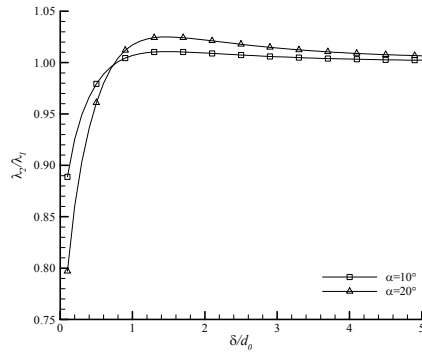


圖 12 束縮板二板效能比隨設置間距之變化
Fig.12 Ratio of interaction factors versus distance between vanes (Tapered vane)

圖 13 為三種板形之 1 號板於 $\alpha=20^\circ$ 時之交互作用因子 λ_1 變化情形的比較，圖中顯示各板形的 1 號板於二潛板接近時以矩形板的 λ_1 值下降程度最快，前傾板及束縮板的 λ_1 值則下降較慢，且二種板形的變化幾乎相同，隨著二潛板間距逐漸增加，三種板形的交互作用現象皆逐漸降低， λ_1 值也逐漸趨近於 1。圖 14 則為三種板形之 2 號板的交互作用因子 λ_2 的變化比較，與 λ_1 的變化情形相反，當二潛板接近時以矩形板的 λ_2 值下降最慢，而前傾板及束縮板的 λ_2 值則下降較快，其中又以束縮板的下降程度略微高於前傾板。

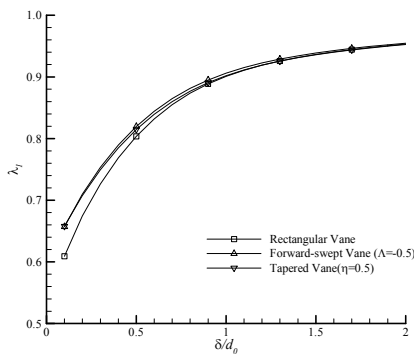


圖 13 各板形之 1 號板的交互作用因子比較 ($\alpha = 20^\circ$)
Fig.13 Comparison of the interaction factors for vane 1 with different vane-shapes ($\alpha = 20^\circ$)

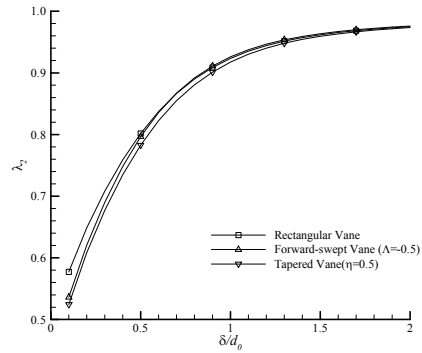


圖 14 各板形之 2 號板的交互作用因子比較 ($\alpha = 20^\circ$)
Fig.14 Comparison of the interaction factors for vane 2 with different vane-shapes ($\alpha = 20^\circ$)

比較各板形之 λ_2 / λ_1 在 $\alpha=20^\circ$ 時的變化，如圖 15 所示。圖中顯示二潛板的效能比在 δ/d_0 小於 1.6 時與板形相關，以矩形板的差異最小，束縮板則差異最大，其 λ_2 / λ_1 值可達 0.8 以下，前傾板則次之，二板的效能差異隨間距增大而逐漸接近，當 δ/d_0 大於 1.6 後，三種板形的二板效能比已大致相同。

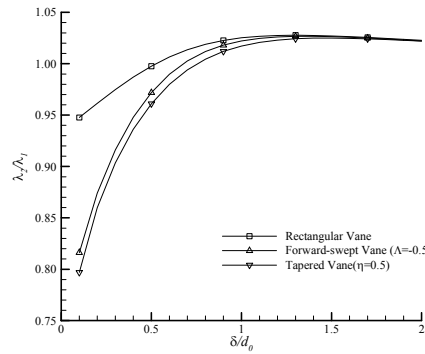


圖 15 各板形之二板效能比之變化 ($\alpha = 20^\circ$)
Fig.15 Comparison of the interaction factor ratios with different vane-shapes ($\alpha = 20^\circ$)

六、結 論

本研究發展一數值模式，可針對任何形狀之潛板系統所產生的交互作用現象進行模擬。研究結果顯

示, 在一由兩片潛板所組成的雙潛板系統中, 二潛板的導流效果並不相同, 隨間距的不同而有效能上的差異, 甚至有強弱互換的現象出現。在板形的影響方面, 矩形板的 λ_1 隨二板間距的縮小而下降最快, 前傾板及束縮板的 λ_1 則下降較慢且差異不大。 λ_2 的變化趨勢則相反, 以矩形板下降最慢, 前傾板次之, 束縮板則最快。二板的效能差異以矩形板最為接近, 而束縮板的效能差異則最為明顯, 前傾板次之。各種板形對二板效能差異的影響隨其間距的增加而逐漸減小, 當潛板的間距大於 1.6 倍水深時, 板形的影響已不明顯。

誌 謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會補助經費 (NSC 98-2625-M-197-001), 特此謹致謝忱。

參考文獻

- 李鴻源, 葉克家 (2002), 基隆河水尾灣彎道潛板之可行性研究, 經濟部水利署第十河川局。
- Ikeda, S. and T. Nishimura (1985), "Bed topography in bends of sand-silt rivers," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 111(1):1397~1411.
- Odgaard, A.J. (1989), "River-meander model. 1: Development," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 115(11):1433~1450.
- Odgaard, A.J. and J.F. Kennedy (1983), "River-bend bank protection by submerged vanes," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 109(8):1161~1173.
- Odgaard, A.J. and H.Y.E. Lee (1984), Submerged vanes for flow control and bank protection in streams, *IIHR Report No.279*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, Iowa.
- Odgaard, A.J. and C.E. Mosconi (1987), "Streambank protection by submerged vanes," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 113(4):520~536.
- Odgaard, A.J. and A. Spoljaric (1986), "Sediment control by submerged vanes," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 112(12):1164~1181.
- Odgaard, A.J. and Y. Wang (1991a), "Sediment management with submerged vanes. I. Theory," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(3):267~283.
- Odgaard, A.J. and Y. Wang (1991b), "Sediment management with submerged vanes. II. Applications," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(3):284~302.
- Ouyang, H.T. (2009), "Investigation on the Dimension and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(3):209~217.
- Ouyang, H.T., J.S. Lai, H. Yu, and C.H. Lu (2008), "Interaction between submerged vanes for sediment management," *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 46(5): 620~627.
- Rozovskii I.L.(1957), *Flow of water in bends of open channels*, The Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel.
- Spoljaric, A. (1988), *Mechanics of submerged vanes on flat boundaries*, Doctoral thesis, Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Wang, Y. (1991), *Sediment control with submerged vanes*, Ph. D. thesis, Univ. of Iowa, U.S.A.
- Wang, Y. and, A.J. Odgaard (1993), "Flow control with vorticity," *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 31(4):549~562.
- Zimmermann, C. and J.F. Kennedy (1978), "Transverse bed slopes in curved alluvial streams," *Journal of the hydraulics division, ASCE*, 104(HY1):33~48.

2010年6月14日 收稿

2010年8月16日 修正

2010年9月9日 接受

(本文開放討論至 2011 年 6 月 30 日)