



逢甲大學學生報告 ePaper

河川流量觀測技術本土化之研究



作者：王傳益⁽¹⁾ 李昱廷⁽²⁾ 林保獅⁽³⁾ 李俊穎⁽⁴⁾

系級：

- (1) 逢甲大學水利工程學系副教授
- (2) 逢甲大學土木及水利工程研究所碩士
- (3) 逢甲大學土木及水利工程研究所碩士
- (4) 逢甲大學土木及水利工程研究所碩士



目錄

中文摘要	3
英文摘要	3
一、緒論	4
1.1 研究目的	4
1.2 文獻回顧	4
二、實驗設備及方法	5
2.1 實驗設備	5
2.2 實驗設計及流程	5
三、結果分析及討論	5
四、結論與建議	8
五、參考文獻	8



王傳益¹ 李昱廷² 林保獅³ 李俊穎⁴

摘要

台灣河川為湍流之翹楚，源自於高聳之中央山脈，河床比降陡峻，暴雨時水流湍急奔騰，水位漲落迅速，增加中高流量量測之困難度。而此等資料對於河川治理與水資源規劃又極為重要。天然河川在中高流量時多為變量流，為提高量測之效率，流量量測方法必須根據理論適當地簡化。本研究係於室內循環水槽中，利用光纖雷射杜卜勒測速儀 (FLDV)，進行陡坡光滑明渠水流之試驗研究，以深入瞭解光滑明渠紊流流場之水力特性，進而探討渠流中斷面平均流速與最大表面流速之關係。本研究完成後，其相關資料除可供紊流數值模擬率定與驗證之依據外，並可作為高效率流量量測方法建立之基礎，快捷而有效地獲取所需之中高流量資料。

Study on Native of River Discharge Measurement Techniques

Chuan-Yi Wang¹ Yui-Ting Lee² Pao-Shih Lin³ Jun-Ying Lee⁴

Abstract

Most of the rivers originate from Central Mountain Range in Taiwan, which are steep of the first for rapid flow. Discharges respond rapidly with rainfall intensity, and then streamflow measurements for the medium and high flows are difficult due to the geographical reasons. These data, however, are very important for the river regulation and water resources planning and design. The flows in the natural rivers are usually unsteady during the medium and high flow periods. In order to obtain these data more efficiently, it is necessary to simplify the measuring techniques based on the theory.

A laboratory study is to be conducted in a recirculating flume using FLDV to understand thorough of the characteristic for the steep channel turbulence flow with smooth boundary. Further, the study want to probe into the relation of the cross-sectional mean velocity and the maximum water surface velocity. The data collected in this study can be used to calibrate or verify the turbulent simulation model. The results will also be helpful for the study of the establishment of a high efficient streamflow measuring technique, and these data obtain more quickly efficiently.

- 1 逢甲大學水利工程學系副教授
- 2 逢甲大學水利工程學系碩士
- 3 4 逢甲大學水利工程學系研究生

一、緒論

1.1 研究目的

河川流量測定之方法有直接量測、斷面流速測量法、坡降面積法等，其中最常用的斷面流速測量法係根據流量等於水流面積乘上流速之原理。但往往無法即時同步獲致各垂線流速資料，所得結果與實際流量歷線差異甚大，以致量測結果之準確度降低。故陡坡急變量流之河川及洪水流況變化迅速之流量量測，需要更高效之觀測方法，方能較準確地量測寶貴之流量資料。

本文實驗係採用光纖雷射杜卜勒測速儀 (FLDV)，進行光滑床面陡坡明渠水流各項水力特性之研究，以瞭解坡度及寬深比的變化對平均流速分佈之影響。本研究應用斷面最大流速與其發生之垂線位置可了解整個斷面流速分佈型態，故進而探討渠流中全斷面平均流速與全斷面最大流速或全斷面最大表面流速之關係，再配合通水斷面積之推估方法，以快捷方式取代傳統流量量測方法。此外，文中亦由河川局水位流量站實測資料進行驗證分析，進而估算河川流量，以建構高效率流量量測方法。

2.2 文獻回顧

Prandtl 於 1925 年利用混合長度理論 (mixing length theory) 之假設，將雷諾應力表達成下列形式：

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \rho \ell^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1)$$

其中 $\ell = \kappa y$ ，為混合長度，而 κ 則為馮卡門常數 (von Karman constant)。故紊流剪應力可表成下式：

$$\tau_t = \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (2)$$

對於近壁區內，可假設其紊流剪應力均勻且近似於邊界之剪應力 τ_0 ，因此式(2)可改寫成：

$$\frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{\kappa y} = \frac{U_*}{\kappa y} \quad (3)$$

將(3)式對 y 積分即可得近壁區中之平均速度分佈式，或稱對數律 (log-law) 公式：

$$\begin{aligned} \frac{\bar{u}}{U_*} &= \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + \left(C + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\nu}{U_*} \right) \\ &= \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* y}{\nu} + A \quad (Y^+ > 30) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 A 為積分常數 (integral constant)

在外區中，平均速度剖面主要受雷諾應力控制，邊界層厚度為主要參數，將邊界條件 $y = H$ ， $\bar{u} = u_{\max}$ 代入式(4)，則積分常數 C 為：

$$C = \frac{u_{\max}}{U_*} - \frac{1}{\kappa} \ln H \quad (5)$$

故(4)式可改寫成速度欠損律 (velocity-defect law) 之平均速度分佈式

$$\frac{u_{\max} - u}{U_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{H} \right) \quad (6)$$

式中， u_{\max} = 主流方向垂線最大流速， H = 水深。

Coles(1965)將壁定理加上一經驗修正函數，使壁定理能延伸應用於外區，其平均速度分佈為：

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Y^+) + A + \omega \left(\frac{y}{H} \right) \quad (7)$$

式中， $\omega \left(\frac{y}{H} \right) = \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2H} \right)$ ；尾流函數 (wake function)； Π = Coles 參數；尾流函數之強度。式(7)可進一步改寫成速度欠損律的形式：

$$\frac{u_{\max} - u}{U_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{H} \right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2H} \right) \quad (8)$$

Nezu & Rodi(1986)提出當 $Re \geq 10^5$ 時，(8)式中之 Coles 參數趨近於一定值 0.2，該值遠小於由 Coles 所提出之 $\Pi = 0.55$ 。

Chiu(1988, 1989)根據 Shannon(1948)之熵 (entropy) 理論，藉以主導連續、動量及能量等方程式。並推導出邱氏流速分佈模式如下：

$$\frac{u}{U_{A-\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (9)$$

其中， $U_{A-\max}$ 為全斷面最大流速， M = 熵參數 (entropy parameter) ξ 值是以渠底 ξ_0 為最小值，而在最大流速發生的點 $\xi_{A-\max}$ 為最大值。 $(\xi - \xi_0)/(\xi_{A-\max} - \xi_0)$ 之物理意義為斷面中流速低於 u 之面積與總面積之比值。

(9)式為二維性流速分佈方程式，在寬廣渠道中，(9)式中之 $(\xi - \xi_0)(\xi_{\max} - \xi_0)^{-1}$ 可由 y/D 替代之，其中 D 為斷面最大流速發生之垂線的水深，而成為一維性流速分佈方程式，即：

$$\frac{u}{U_{A-\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D} \right] \quad (10)$$

根據邱氏理論 (Chiu, 1988)，若天然渠道斷面變化不大，則斷面平均流速與最大流速比值應會維持一穩定關係，以數學形式表示則為：

$$U_m = \phi U_{A-\max} \quad (11)$$

式中 ϕ 值為斷面平均流速與最大流速之比值。

由邱氏流速分佈理論，配合熵理論及機率分析進一步推導， ϕ 值可表如下式：

$$\phi = \frac{U_m}{U_{A-\max}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (12)$$

胡春宏(1995)採用極座標系統，考慮邊界剪應力之不均勻分佈，以及垂線最大流速位置隨 B/H 變化等影響因素，對三維矩形明渠流場之流速分佈進行了理論研究。在確定了邊界剪應力分布及其表達式和中垂線線上最大流速點位置 α 後，通過採用適當方法就可得矩形明渠中流速分布的形式，在斷面中垂線線上最大流速所在位置處的剪應力為零。假定：(1)由該點(即零剪應力點)向邊壁按任一方向引射線(如圖 1)，在該射線上任一點的剪應力 τ_r ，仍近似符合線性關係，即：

$$\tau_r = \tau' \frac{r}{x_h} \quad (13)$$

式中 τ' 為邊界剪應力， x_h 與 r 和 θ_h 有關，為零剪應力點到邊界的距離，圖 1 中採用的是較方便的極座標形式， θ_h 為任一射線與中垂線的夾角， τ' 為射線與固定邊界交匯處的邊界剪應力，射線與床面相交時 τ' 即為 τ_b ，與邊壁相交時為 τ_w 。(2) τ' 沿該射線仍可用 Prandtl 半經驗理論表達，且混合長度也能延射線引用圓管徑向的表達式：

$$\tau_r = -\rho l^2 \left(\frac{\partial u(r, \theta_h)}{\partial r} \right)^2 \quad (14)$$

$$l = \kappa (x_h - r) \sqrt{\frac{r}{\alpha x_h}} \quad (15)$$

式中 $\kappa \approx 0.4$ 。由對稱性可知，只討論明渠斷面的一半即可，由(14)式和(15)式相等得：

$$\tau' \frac{r}{x_h} = -\rho \kappa^2 (x_h - r)^2 \frac{r}{x_h} \left(\frac{\partial u(r, \theta_h)}{\partial r} \right)^2 \quad (16)$$

簡化並整理後得(τ' 只是 θ_h 的函數，而與 r 無關)：

$$\frac{U_{A-\max} - u(r)}{\sqrt{\tau'/\rho}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{x_h}{x_h - r} \quad (17)$$

式中 $U_{A-\max}$ 是斷面最大流速，同時是中垂線上最大流速

$$\text{當 } 0 \leq \theta_h \leq \tan^{-1} \left(\frac{B}{2\alpha H} \right), \tau' = \tau_b, x_h = \frac{\alpha H}{\cos \theta_h}$$

$$\text{當 } \tan^{-1} \left(\frac{B}{2\alpha H} \right) < \theta_h < 90^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{2(1-\alpha)H}{B} \right)$$

$$\tau' = \tau_w, x_h = \frac{B}{2 \sin \theta_h}$$

對前述任一射線均可作反向延伸，如果反向延伸與水面相交，則因水面剪應力分布規律未知，可將原射線用於該射線的反向延線上，原射線上的 τ' 與 x 都不變，即水面流速為：

$$u(r)_s = U_{A-\max} - \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau'}{\rho}} \ln \frac{x_h}{x_h - s_h} \quad (18)$$

由於在延長線上 r 最大可取 s_h ，而 $s_h < x_h$ 恒成立，因此在水面的流速不為零，至此就得到光滑邊界矩形明渠的流速分佈。當 B/H 增大到一定程度後，中垂線上最大流速位置趨於水面，兩壁對剪應力影響可以忽略不計，底部剪應力沿床面寬均勻分佈(即均為 γHS)，沿床面寬各垂線流速分佈均與中垂線相同，此時(18)式和 Prandtl 公式一致，由於(18)式乃由 Prandtl 假設得到，故均未計及因黏滯作用引起的剪應力，因此在非常接近底部的黏性次層就不適用。

二、實驗設備及方法

2.1 實驗設備

本實驗之主要設備為循環水槽及光纖雷射杜卜勒測速儀 (FLDV) 系統，示如圖 2。

2.2 實驗設計及流程

基於研究目的，本實驗為探討不同坡度與寬深比明渠水流流場之水力特性的初步研究，係以光滑 (smooth) 玻璃底床與邊壁之水槽進行穩定 (steady)，而且均勻 (uniform) 的流場試驗。因此本實驗之主要獨立變數為：渠道坡度、水流深度及距離邊壁的垂線位置。渠道坡度依據水流狀況採用 0.3%、1% 與 2% 三種，水深範圍 22 mm ~ 66 mm，而距離邊壁的垂線位置分別為 2.5 cm、5.0 cm、7.5 cm、10 cm 和 12.5 cm，詳細實驗設計如下所示：

- A. 獨立變數：坡度 S 、水深 H
- B. 坡度： $S = 0.3\%、1\%、2\%$
- C. 水深： $H = 22\text{mm} \sim 66\text{mm}$
- D. 垂線位置：2.5cm、5.0cm、7.5cm、10cm、12.5cm
- E. 雷諾數： $Re = U_m R / \nu = 10157 \sim 82900$
- F. 福祿數： $Fr = U_m / \sqrt{gH} = 0.978 \sim 2.722$
- G. 寬深比： $B/H = 3.79 \sim 11.36$

茲將全部實驗之流程，示如圖 3。

三、結果分析及討論

3-1 最大流速發生位置(α)的變化規律

圖 4 至圖 9 中顯示，坡度與平均速度剖面之變化關係，隨著坡度增加，相同寬深比與相同垂線位置之最大流速發生位置愈接近底床，

即 α 值(垂線最大流速發生距底床的距離與水深之比值)有遞減之趨勢。相同坡度和垂線位置, 隨著寬深比的變小, 垂線最大流速發生之位置, 距離液面愈遠, 在相同的坡度和寬深比, 隨著量測垂線愈接近邊壁, 垂線最大流速發生位置亦離液面愈遠, 即值 α 愈小。

α 值於各種水流條件下與垂線位置之關係圖, 經迴歸分析可得:

$$\log \alpha = -0.33 + 0.27 \log(B/H) + 0.18 * \log(1-Z) - 0.03 \log(S) \quad (19)$$

其判定係數 R-squared=0.84。

圖 10 及圖 11 顯示, 不同垂線位置的量測資料顯示愈靠近邊壁(即 Z 愈大)時, 受邊壁的影響愈大。然而對同一坡度來說, 隨著寬深比的減小, 速度梯度漸增以致剪應力分佈愈不均匀, 造成流場中二次流有逐漸增大之趨勢。當流槽中垂線的最大流速位置亦發生於液面下時, 整個流場可說已無二維流況, 其與對數公式所產生之誤差亦隨之增大。

對於外區 ($y/H > 0.2$) 之描述, 流槽中垂線處實驗結果與(6)式之比較如圖 12 所示。該圖顯示, 當垂線最大流速發生於液面或液面之上(即 $\alpha \geq 1$)時, 實測資料以速度欠損率來表示, 其結果頗為良好, 推估(9)式中尾流函數之 Coles 參數(Π)值為 0.067, 與 Cardoso(1989)之研究 Π 為 0.08 甚為接近。隨寬深比之遞減, 流場受二次流及邊壁效應之影響益趨增大, α 值變小, 因此外區之平均速度剖面式已無法以(6)式及(8)式表示, 詳如圖 13 所示。有鑑於此, 乃改用拋物線型式的流速分佈加以表示, 利用非線性迴歸分析得:

$$\frac{u_{\max} - u}{U_*} = 8.07 \left(\alpha - \frac{y}{H} \right)^2 \quad (20)$$

其中, 判定係數 R-squared=0.91。

另外, 垂線最大流速 u_{\max} 也是隨寬深比, 垂線位置而變化的, u_{\max} 的變化必然給垂線平均流速 u_m 帶來影響, 兩者的關係是密切的, 圖 15 為根據各種條件下實測點繪的 u_{\max}/U_* 與 u_m/U_* 的關係, 垂線最大流速與垂線平均流速呈線性關係, 如下式所示:

$$\frac{u_{\max}}{U_*} = 0.92 * \frac{u_m}{U_*} + 4.0 \quad (21)$$

其中, 判定係數 R-squared=0.90。

3-2 胡氏流速分佈模式

胡氏流速分佈模式使用之前, 必須先行取得斷面周界上剪應力分佈變化情形及斷面最大流速發生之位置, 因此必須藉由大量的試驗資料方能建立較為準確的流速分佈公式。本文利用前人對斷面周界剪應力的經驗分佈, 並配合

實際量測的中垂線最大流速和發生位置即可推求整個通水斷面的胡氏流速分佈模式。

圖 16 及圖 17 為實測流速分佈與胡氏模式流速分佈比較圖。圖中, $E(\text{誤差百分比}) = |(\text{實測斷面流速} - \text{胡氏模式推估斷面流速}) / \text{實測斷面流速}| \times 100$ 。由於明渠流中存在著自由液面, 當坡度較大或斷面窄縮, 兩邊壁之影響範圍較大, 使得邊界剪應力分佈極不均匀, 同時斷面上亦產生二次流之旋動現象, 流速分佈將受到明顯的影響。且胡氏之流速分佈模式係由 Prandtl 理論所推行, 故在靠近底床或邊壁時並不適用。由於當寬深比變小時, 在中垂線之最大流速發生位置會出現在液面下, 這時對數公式或速度欠損率已無法完整描述整個垂線的流速分佈, 會產生較明顯的誤差。

故本文藉由修正胡氏模式的流速分佈, 利用中垂線的表面流速來推估中垂線的最大流速, 由於渠道對稱, 在一般情況下中垂線的最大流速亦代表整個通水斷面的最大流速, 且在許多文獻中皆說明著全斷面的最大流速與全斷面的平均流速存在一穩定關係。

本文嘗試利用底床平均剪應力與實驗數據所迴歸之 α 值(垂線最大流速發生距底床的距離與水深之比值)獲致如下之修正公式:

$$u(r)_{S(Z=0)} = U_{A-\max} - \frac{c}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{\alpha}{2\alpha - 1} \quad (22)$$

式中, $\alpha = -11.665 * S + 0.598 * \ln \left(\frac{B}{H} \right)$; τ_0 為

底床剪應力

修正公式中之 $c = 0.648$, 判定係數 R-squared=0.99。此方法在本文的實驗條件中獲得極佳的結果, 代表在相似條件下只需量測中垂線的表面流速即可快速的推求全斷面最大流速。圖 18 為實測與修正胡氏模式所推估最大流速之比較圖($Z=0$), 顯示模擬結果頗佳。

3-3 邱式流速分佈模式

根據邱氏理論, 若渠道斷面變化不大, 則斷面平均流速與最大流速比值間應會維持一穩定關係 $U_m = \phi U_{A-\max}$, 由實驗資料迴歸得 $\phi = 0.857$, 判定係數 R-squared=0.99。

假如要使 ξ 與 u 沿垂直方向, 從底床 ($y=0$) 到水面 ($y=D$) 有一對一的關係, 可假定一適合方程式:

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp \left(1 - \frac{y}{D-h} \right) \quad (23)$$

D = 水面深度; h = 控制接近水表面速度分佈曲線的形狀跟斜率的參數。當 $h \leq 0$, ξ 從渠底床到水表面呈單調遞增, ξ 的範圍從 $0 (y=0)$ 到

ξ_{\max} ($y = D$)。當 $h > 0$ ， h 的大小表示最大速度低於水表面的深度，因此， ξ 從 $y = 0$ 增加到 $y = D - h$ ($\xi = \xi_{\max} = 1$)，然後從 $y = D - h$ 到 $y = D$ 遞減。配合幾何關係和機率觀點可得

(i) $h \leq 0$

$$\frac{y}{D} \exp\left(\frac{D+y}{D-y}\right) = \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \quad (24)$$

(ii) $h > 0$ ， $\xi_{\max} = 1$

$$\frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) = \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \quad (25)$$

根據實驗所得數據，利用(11)式分析求得 ϕ 值，如圖 19 所示 ϕ 值約為 0.857，並藉由(12)式得 M 值約為 6.958。

圖 20 為本實驗中垂線($Z=0$)實測資料與邱氏模式流速分佈之比較圖。圖中顯示邱氏模式流速分佈理論對於窄深明渠陡坡或緩坡流場，無論於中垂線最大流速發生位於液面上或液面下之情況大體皆可描述。又利用邱氏模式流速分佈公式推估之流速與實測流速相較平均誤差百分比約為 3.42%。

4-4 流速推估模式之應用

根據邱氏流速分佈公式，可以如下三式求得 $U_{A-\max}$ ：

$$u_{0.2D} = \frac{U_{A-\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.2} - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (26)$$

$$u_{0.8D} = \frac{U_{A-\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_{0.8} - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (27)$$

$$u_s = \frac{U_{A-\max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi_s - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (28)$$

配合(23)式，再根據 Y 軸處最大流速發生之位置(h 值)，利用(26)、(27)和(28)式可進一步推導如下之關係式：

(i) 最大流速發生於液面下， $h > 0$

$$u_{0.2D} = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 0.8 \times \frac{D}{D-h} \times \exp\left(1 - 0.8 \times \frac{D}{D-h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (29)$$

$$u_{0.8D} = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 0.2 \times \frac{D}{D-h} \times \exp\left(1 - 0.2 \times \frac{D}{D-h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (30)$$

$$u_s = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 1.0 \times \frac{D}{D-h} \times \exp\left(1 - 1.0 \times \frac{D}{D-h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (31)$$

(ii) 最大流速發生於液面時， $h \leq 0$

$$u_{0.2D} = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 0.8 \times \frac{D}{D+h} \times \exp\left(1 - 0.8 \times \frac{D}{D+h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (32)$$

$$u_{0.8D} = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 0.2 \times \frac{D}{D+h} \times \exp\left(1 - 0.2 \times \frac{D}{D+h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (33)$$

$$u_s = \ln \left[1 + (e^M - 1) \times 1.0 \times \frac{D}{D+h} \times \exp\left(1 - 1.0 \times \frac{D}{D+h}\right) \right] \times \frac{U_{A-\max}}{M} \quad (34)$$

依上述之方法，僅須獲致 Y 軸處之表面流速、0.2 倍水深流速及 0.8 倍水深流速，則透過(26)式至(34)式，即可推估 Y 軸處之最大流速，本文藉由實驗室資料驗證此一方法，並落實其可行性。

實驗室資料可由所量測的垂線來判斷 Y 軸，大致座落於中垂線上，故本文以 Y 軸處之表面流速、0.2 倍水深流速及 0.8 倍水深流速帶入上述之公式推求最大流速，並與實測之最大流速做一比較，示如圖 21。圖中顯示其擬合度極佳，利用上述之方法可減少量測的資料點，但依然可準確判斷出 Y 軸之最大流速。

同時本文也觀察 Y 軸處之表面流速與平均流速之間的關係，如圖 22 所示，可看出其也有一定的穩定性。由圖可看出當坡度漸增時，

ψ ($= \frac{U_m}{u_{s-\max}}$ ，即斷面平均流速與最大表面流速

之比值)值亦逐漸增大，研判其因可能係坡度增大，流體間的混滲更加均勻，雷諾數亦隨之增加，平均流速與最大流速或最大表面流速之值更加趨近所致。

本文接續利用河川局實測的資料分析，但天然河川斷面並非像實驗室一般固定，係動床變化，故本文除推估斷面平均流速之外，亦探討如何推估通水斷面，其方法如下：

$$A_{est} = a_1 (H - b_1)^{C_1} \quad (35)$$

$$A_{est} = a_2 (D - b_2)^{C_2} \quad (36)$$

$$A_{est} = a_3 (BD - b_3)^{C_3} \quad (37)$$

式中 a_i 、 b_i 、 C_i 為通水斷面積之參數， D 為 Y 軸處水深， B 為水面寬。

配合(35)至(37)式通水斷面積的推估，可依連續方程式，快速而有效率地推估流量，如下式：

$$Q = A_{est} \times U_{m(est)} = A_{est} \times \phi U_{A-\max(est)} \quad (38)$$

五堵站位於基隆市淡水河支流基隆河中游，此段河床平均坡度約為 0.03%，其近年來斷面頗為穩定。圖 23 五堵站 Y 軸與水位關係圖，可看出其有一定的穩定性，Y 軸不因水位不同而有大幅變動，其約略落在距左岸 36m 附近。

經分析本站實測流速資料，迴歸得知 U_m 與 $U_{A-\max}$ 比值約 0.705，即 ϕ 值等於 0.705。其值較高，推究其因可能係斷面集中，水流集中，

水流上下混滲較均勻所致，如圖 24。由圖 25 利用 BD 值法推估通水斷面積能得到最佳的推估結果。圖 26 為五堵站實測流量 Q_{obs} 與推估流量 Q_{est} 比較圖，其結果頗佳。

經由圖 27 之分析可看出 Y 軸處表面流速應與斷面平均流速也有一穩定的關係，復利用相同的方法推估流量，也有頗佳之結果，示如圖 28。本文假設 Y 軸處表面流速亦代表整個通水斷面最大表面流速，並以效率係數指標 (Coefficient of efficiency, CE) 來判斷精確度。

$$CE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{obs})^2}$$

若 CE 值越趨近 1，

則代表模擬結果與實際資料越一致，精確度越高。並將五堵站效率係數指標列如下表：

表 1 五堵站效率係數指標比較表

斷面最大流速		斷面最大表面流速 (即 Y 軸表面流速)	
H(標準化水位)	CE=0.970	H	CE=0.983
D(y 軸水深)	CE=0.957	D	CE=0.964
BD(水面寬與 Y 軸處水深之乘積)	CE=0.971	BD	CE=0.985

由五堵站效率係數指標可看出利用不同流速推估方法配合三種斷面積推估方法均可獲致頗佳之結果，研判可能係因五堵站經河道治理，故河道狀態比較穩定所致。惟仍以 BD 值法所獲精度較高，此乃因本法含有兩項斷面參數，因此以其推估斷面積之精度最佳。

四、結論與建議

1. 當斷面為窄深型，即 $B/H < 5$ 時，無法以二維流況描述實際之流速分佈，即垂線最大流速可能發生於液面下。而最大流速發生位置 α 值乃受到寬深比、垂線位置和坡度的影響，即：

$$\log \alpha = -0.33 + 0.27 \log(B/H) + 0.18 * \log(1-Z) - 0.03 \log(S)$$

其中，適用條件為

$$3.79 < B/H < 11.36, 0 < Z < 0.8, 0.3\% < S < 2\%$$

2. 壁定理、對數律公式和速度欠損律對於二維流況區域的速度剖面之描述足可因應，惟無法完整描繪整個渠道全斷面的三維流況速度剖面。三維流況之外區以拋物線形式之流速分佈可加以表達：

$$\frac{u_{max} - u}{U_*} = 8.07 \left(\alpha - \frac{y}{H} \right)^2$$

3. 本文利用前人迴歸之周界剪應力分佈，配合實測通水斷面的最大流速及其垂線發生位置，

推估胡式模式流速分佈，與實測值的擬合度尚佳。顧及應用的便捷性，獲致如下之修正公式：

$$u(r)_{S(Z=0)} = U_{A-max} - \frac{0.648}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{\alpha}{2\alpha - 1} \quad \text{式 中}$$

$$\alpha = -11.665 * S + 0.598 * \ln \left(\frac{B}{H} \right), 0.3\% < S < 2\%,$$

$3.79 < B/H < 11.36$ ； τ_0 為底床剪應力。爾後僅需量測中垂線表面流速，且配合坡度和寬深比等條件，即可獲致斷面最大流速，其結果甚佳。

4. 本文由實驗資料之三點流速，透過(29)式至(34)式，可推估 Y 軸處之最大流速，且擬合度佳。應用時，僅需透過垂線少數測點資料，即可準確判斷出 Y 軸處之最大流速。

5. 依循 $Q = A_{est} \times U_{m(est)} = A_{est} \times \phi U_{A-max(est)}$ ，吾人僅須於 Y 軸上量測得斷面最大流速，即可推得斷面平均流速，再配合斷面積推估方法，則可快捷獲致流量值，除節省時間與人力外，更可掌握流量之時變性，且精度皆在合理之範圍內。

6. 本文以 Y 軸處之表面流速(即最大表面流速)替代 Y 軸處最大流速，獲致不同之 ψ 值，經由相似之推估方式推估平均流速，再配合斷面積推估方法，亦可得到相似可靠之流量結果。本法應用於量測天然河川流量時，利用高效率的微波雷達或都卜勒雷達等自動化量測系統測得表面流速分佈，再結合電腦、通訊網路及控制系統技術傳送量測資料，除顧及便捷性與精確性外，更可保障工程人員的安全。

參考文獻

王傳益 (2000)，「湍流水力特性之研究」，中興大學土木工程學系博士論文。

周永鋒 (2002)，「光滑明渠紊流流場水力特性之研究」，中興大學土木工程學系碩士論文。

胡春宏、惠遇甲 (1995)，「明渠夾沙水流運動的力學河統計規律」，科學出版社。

楊翰宗 (1998)，「陡坡光滑渠流水力特性之研究」，中興大學土木工程學系碩士論文。

Chiu, C. L. (1988). "Entropy and 2-D Velocity Distribution in Open Channel." J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(7), 738-756.

Chiu, C. L. (1991). "Application of entropy concept in open-channel flow study." J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(5), 615-628.

Nezu, I., and Rodi, W. (1986). "Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer." J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(5), 335-355.

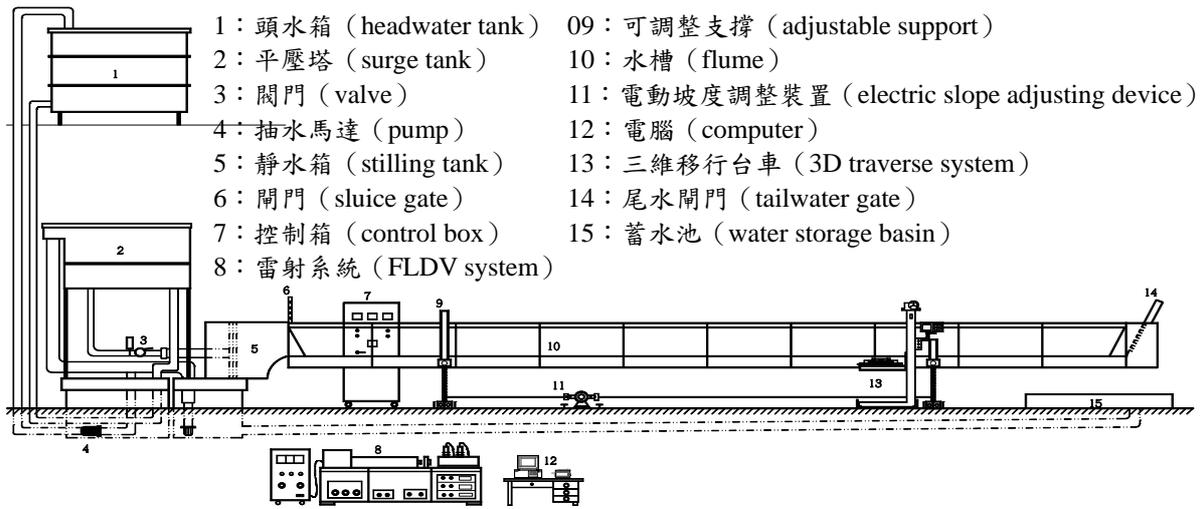


圖 2 循環水槽示意圖

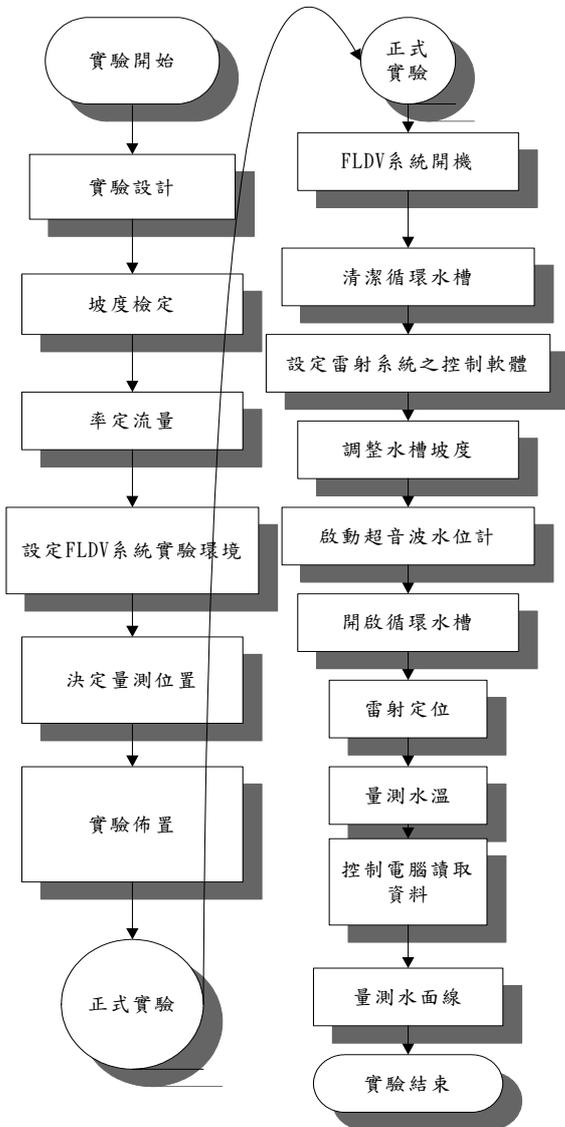


圖 3 實驗流程圖

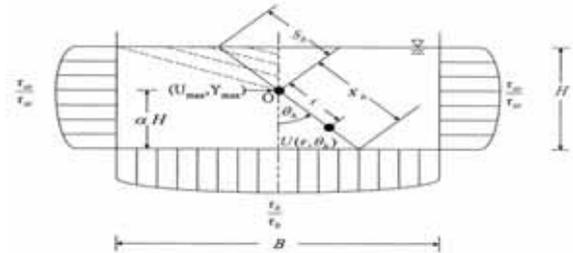


圖 1 胡氏断面流速分析示意圖

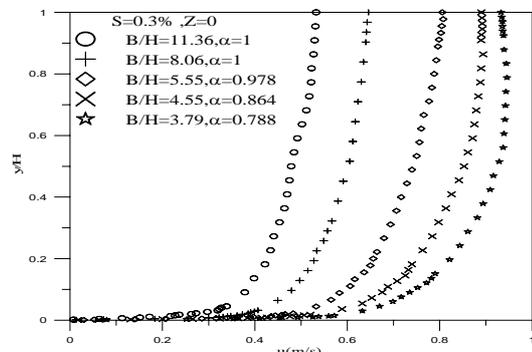


圖 4 平均速度剖面圖($S=0.3\%$ 、中垂線 $Z=0$)

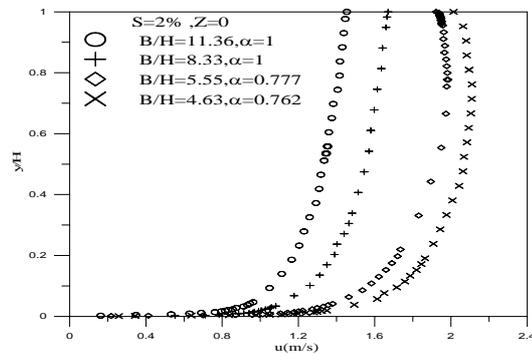


圖 5 平均速度剖面圖($S=2\%$ 、中垂線 $Z=0$)

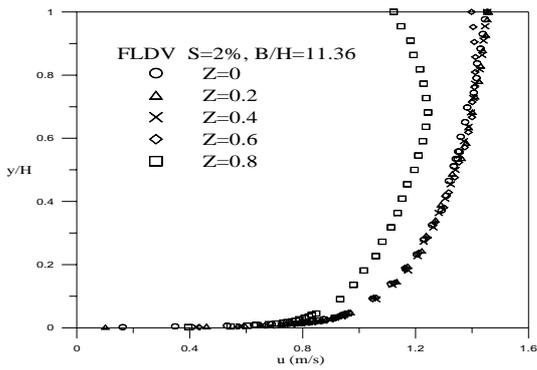


圖 6 平均速度剖面圖(S=2%、B/H=11.36)

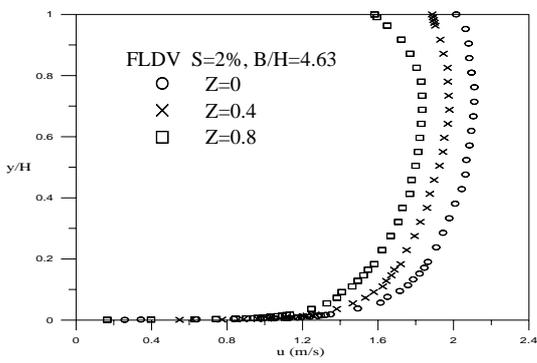


圖 7 平均速度剖面圖(S=2%、B/H=4.63)

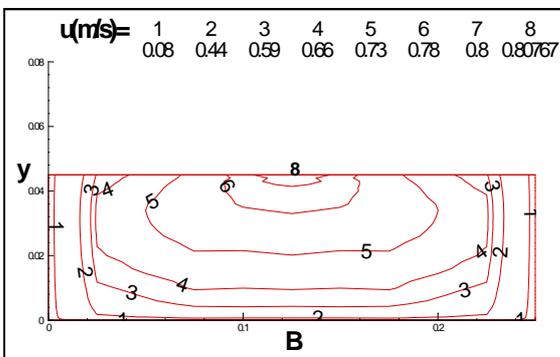


圖 8 橫斷面等流速線圖(S=0.3%、H=45mm)

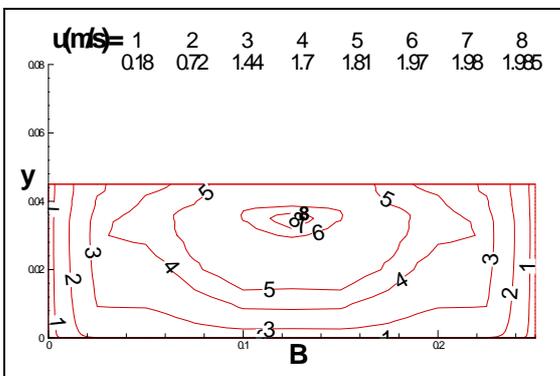


圖 9 橫斷面等流速線圖(S=2%、H=45mm)

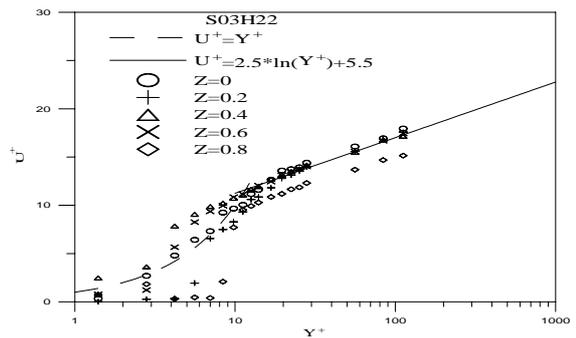


圖 10 實測資料與壁定理之比較圖(S=0.3%)

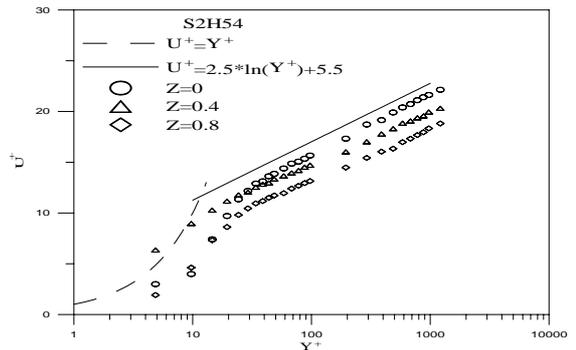


圖 11 實測資料與壁定理之比較圖(S=2%)

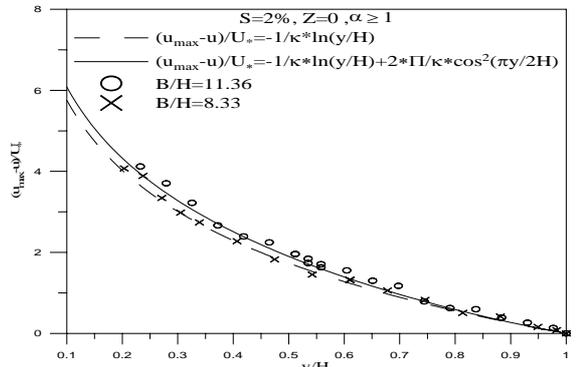


圖 12 外區實測資料與速度欠損律之比較圖
(中垂線 Z=0、 $\alpha \geq 1$)

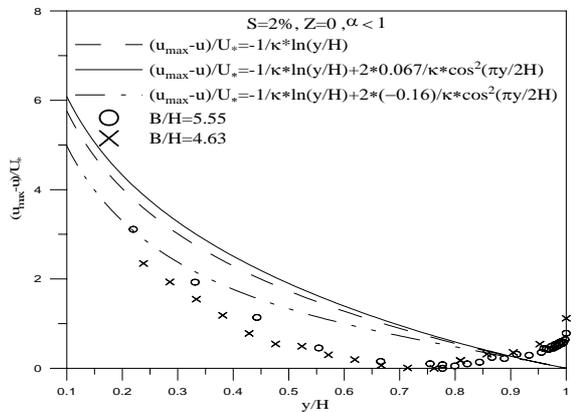


圖 13 外區實測資料與速度欠損律之比較圖
(中垂線 Z=0、 $\alpha < 1$)

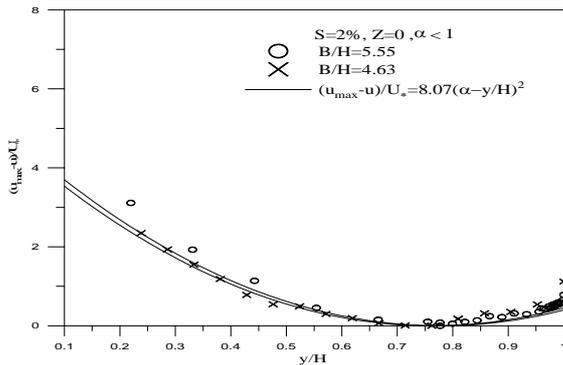


圖 14 外區實測資料與拋物線流速分佈比較圖 (中垂線 $Z=0$ 、 $\alpha < 1$)

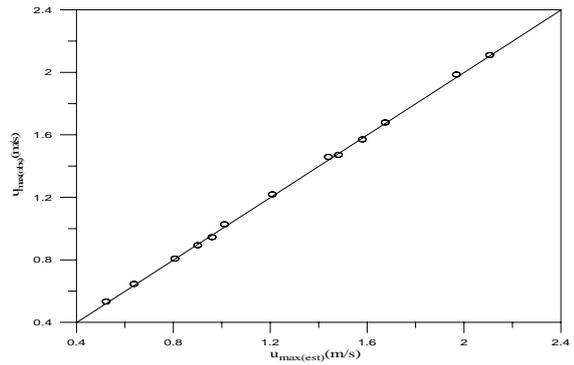


圖 18 實測與修正胡氏模式推估最大流速之比較圖 ($2Z/B=0$)

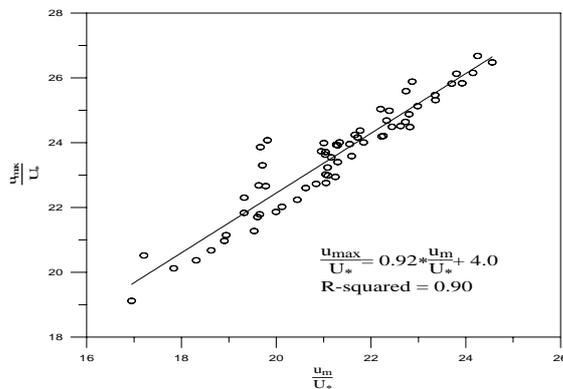


圖 15 垂線最大流速與垂線平均流速關係圖

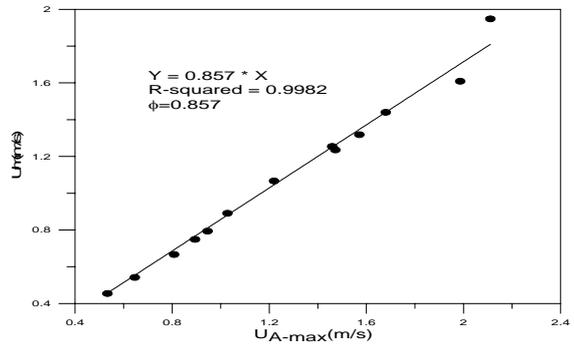


圖 19 實測斷面平均流速 U_m 與斷面最大流速 U_{A-max} 之關係圖

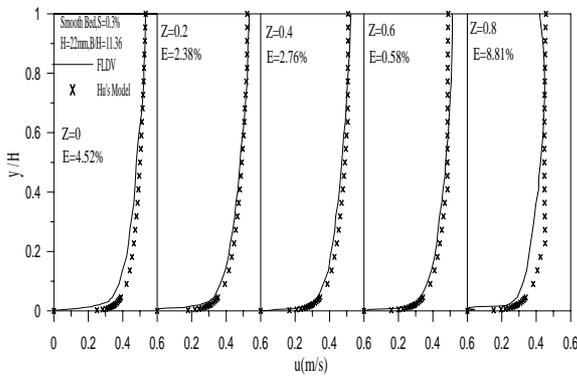


圖 16 實測與胡氏模式流速分佈比較圖 ($S=0.3\%$, $B/H=11.36$)

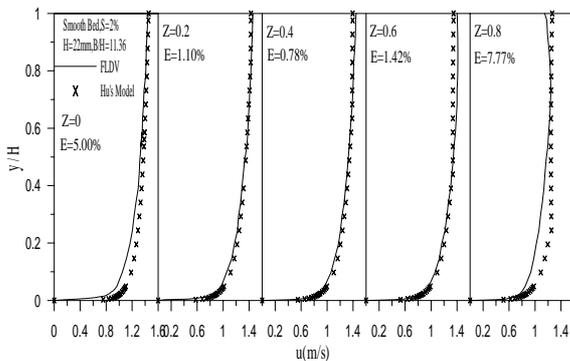
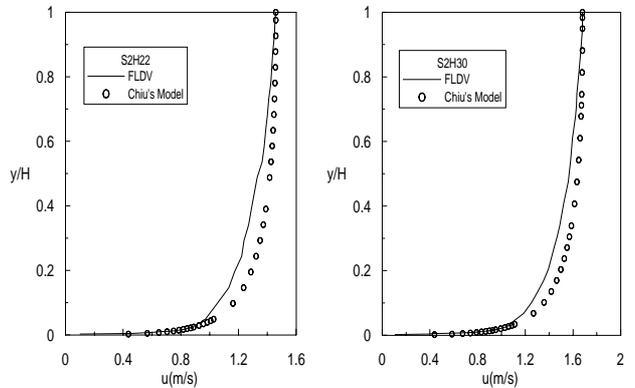


圖 17 實測與胡氏模式流速分佈比較圖 ($S=2\%$, $B/H=11.36$)

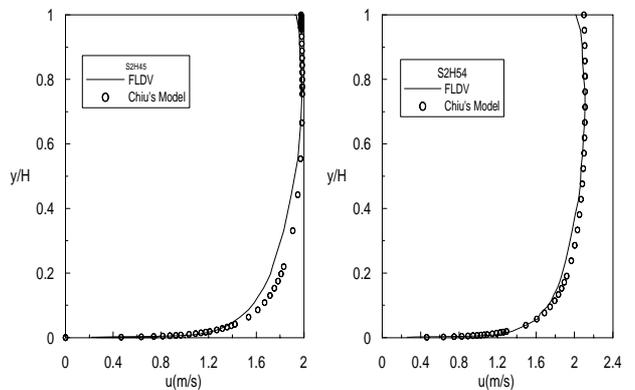


圖 20 邱氏流速公式與實測流速分佈比較圖 (中垂線 $Z=0$ 、 $S=2\%$ 、 $H=22$ 、 30 、 45 及 54 mm)

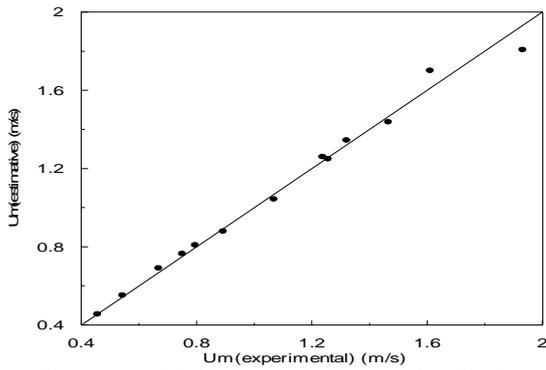


圖 21 實測與推估之 y 軸最大流速比較圖

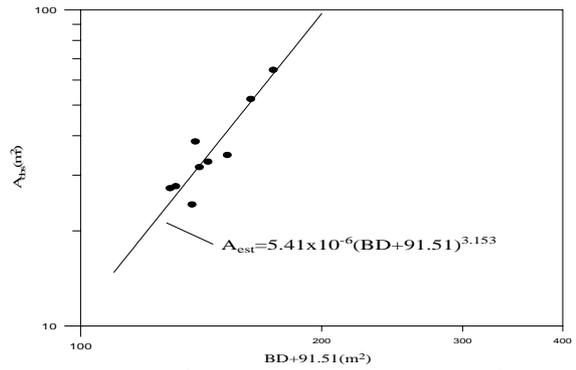


圖 25 五堵站實測斷面積 A_{obs} 與 BD 值關係圖

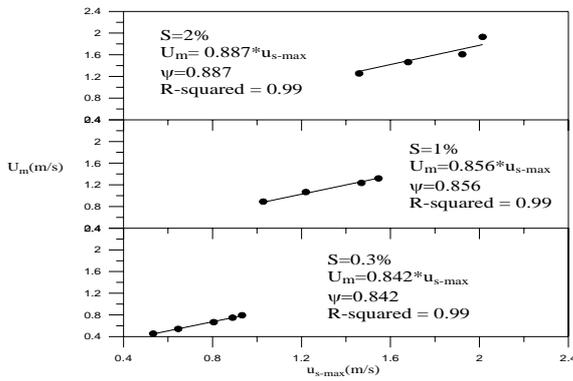


圖 22 利用 Y 軸實測平均流速與實測表面流速之比值(ψ)關係圖

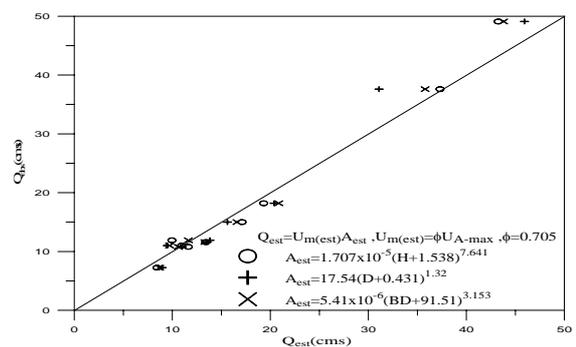


圖 26 實測 Q_{obs} 與推估流量 Q_{est} 比較圖

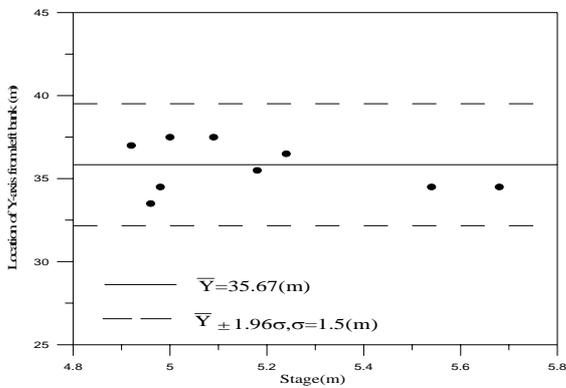


圖 23 五堵站 Y 軸與水位關係圖

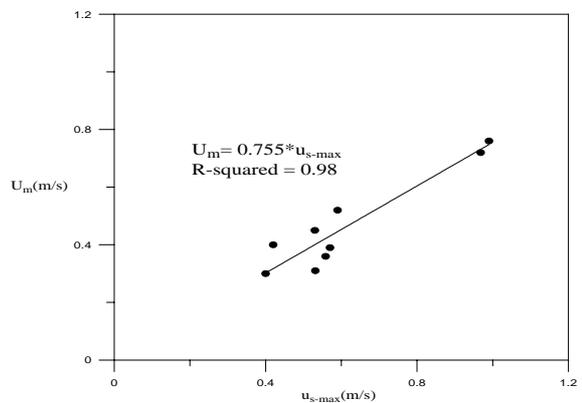


圖 27 五堵站 U_m 與 u_{s-max} 關係圖

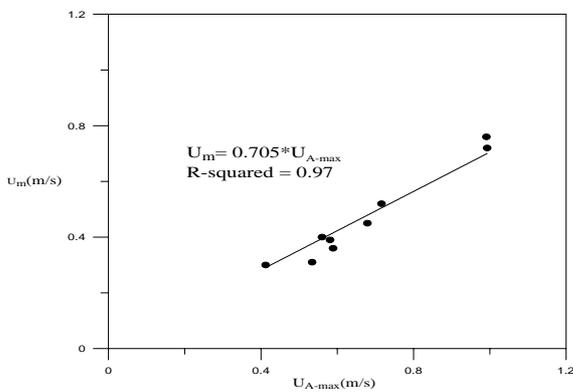


圖 24 五堵站 U_m 與 U_{A-max} 關係圖

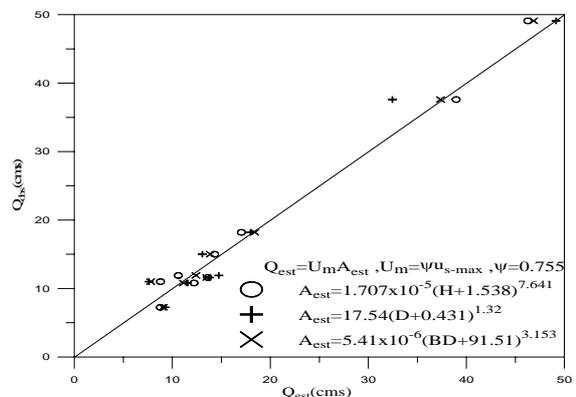


圖 28 五堵站實測流量 Q_{obs} 與利用表面流速推估流量 Q_{est} 比較圖