

## 利用實測表面流速推估高流量之研究

林穎志<sup>[1]</sup> 朱木壽<sup>[2]</sup> 詹勳全<sup>[3]\*</sup> 高昇敬<sup>[4]</sup> 呂珍謀<sup>[1]</sup>

**摘要** 為能安全即時地獲取高流量流況之實測流量，近年來已陸續發展數種不需接觸水體即能測得水流表面流速之儀器，並逐漸應用於實務量測作業。本文以連續波微波雷達表面流速儀搭配水位計等非接觸式儀器設計建構全自動量測系統，其所測得渠道高流量期間表面流速及水位之短期距資料，則由垂直剖面速度分布經驗公式轉換為平均流速進而推得流量。藉由渠道試驗，以入流量為參考基準，探討非接觸式量測系統所測得高流量資料之準確性，研究過程採用表面流速儀分別以 30°、45°及 60°等三種俯角測得表面流速，流量推估結果與入流量比較之平均差異分別為 34.9%、14.4%及-0.6%。另外，現場資料驗證採曾文溪新中水位流量站所設之非接觸式量測系統，以系統設置期間測得之颱風資料，顯示量測系統可全天候地測得洪水歷程短期距之水位及表面流速變化情形，由分析資料則可呈現出洪水期間之遲滯效應，此為傳統實測作業不易獲取之資訊。

**關鍵詞**：流量、表面流速、非接觸量測。

## Estimation of High Discharge Using Measured Surface Velocity

Ying-Chih Lin<sup>[1]</sup> Mu-Shou Chu<sup>[2]</sup> Hsun-Chuan Chan<sup>[3]\*</sup> Shen-Ching Kao<sup>[4]</sup> Jan-Mou Leu<sup>[1]</sup>

**ABSTRACT** Surface velocity distribution measured by non-contact techniques is currently used to obtain the flow information during floods. A non-contact measurement system, consisted of a continuous wave microwave Doppler radar and an ultrasonic sensor gauge, is established to measure stages and surface velocities of floods. This system obtains flood discharge without operation of human power and invasive measurement. In the laboratory flume, the non-contact measurement system is used to measure the inflow discharge. The continuous wave microwave radar is installed in three depression angles of 30°, 45° and 60°. The discrepancies between measured discharge and the inflow discharge are 34.9%, 14.4% and -0.6%, respectively. The field data of the non-contact measurement system established in Zengwen River indicates the system successfully captures continuous flood discharge during typhoons. The measured surface velocities and water levels both

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

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

[2] 國立成功大學水工試驗所

Associate research fellow, chief, Tainan Hydraulics Laboratory, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

[3] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[4] 經濟部水利署北區水資源局石門水庫管理中心

Shihmen Reservoir, Northern Region Water Resources Office, Water Resource Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan, R.O.C.

\* Corresponding Author. E-mail address : hcchan@nchu.edu.tw

present the effect of hysteresis which is difficult to capture by the conventional flow measurement.

**Key Words:** discharge, surface velocity, non-contact measurement.

## 一、前言

具有自由液面之渠道水流普遍存在於自然界中，舉凡灌溉排水渠道、溪流河川等皆屬之，河川逕流為規模最大之渠道水流型態，屬水文循環中重要環節，其豐枯季節流量變化更為水文觀測之重要項目，水資源管理調配、工程規劃設計、生態保育及學術研究等，均需賴其準確可靠之觀測資料作為基礎參據，方得以進行相關分析作業。渠道水流之流量係由通水斷面積與平均流速計算而得，《宋史》河渠志中記載於宋元豐元年（西元 1078 年）以通水斷面積和流速來估計汜水流量，為中國水利史首次出現關於渠道流量量測作業之文獻紀錄，而古希臘雖曾出現過渠道流量量測概念，惟至文藝復興時期義大利科學家達文西（Leonardo da Vinci, 1452-1519）才重新確認其量測方法，並據以建立水流連續方程式（Ruff, 2008）。

現場實務進行流量量測，係將其通水斷面切分為數個子斷面（subsection），並以流速量測儀器測得各子斷面平均流速後，乘上子斷面通水面積，累加子斷面流量即得全斷面流量（Rantz et al., 1982），平均流速觀測採人力操作浸沒於水流中之機械式流速儀（如旋槳式流速儀或旋杯式之普萊氏流速儀）逐步量測水流，當累積一定次數以上之流量實測作業後，將歷次水位與對應流量之資料點整理繪製作成率定曲線，再由水位連續觀測紀錄依此率定關係間接推定期間內之時序列流量資料。換言之，連續流量需歷一段長時間資料收集與分析才能推算而得，當平常時期流量在時間上變異不大情況下，此時河幅小、水位流速均低，執行流量實測作業尚為易行，然台灣河川多屬坡陡流急型態，洪水期間之變量流況（unsteady flow）水位漲退變化快速，其河面寬廣程度更為平常時期之數倍甚或數十倍，採此作業方式相當費時費力，量測準確度與時效性均不足，加上風強雨驟、洪水流速湍急並含大量漂流物，人員與機具暴露於此惡劣天候環境極具風險，為顧慮人員及設備安全，颱風期間鮮少進行連續流量實測作業。洪峰及洪水期間之高流量資料多藉由水位-流量率定曲線延伸外插方式推計而得，傳統流量觀測作業方式對洪水期間流量變化掌握存有相當大之

不確定性。

近年來流速觀測方式推陳出新，聲波都普勒流速剖面儀（Acoustic Doppler Current Profile, ADCP）可同時量測多層點位之三維流速，盧昭堯等人（1995、1996 及 1997）曾對 ADCP 應用於台灣河川之情況進行廣泛研究，相較於傳統機械式流速儀，雖顯著提高整體量測效率，然其儀器設備仍需浸沒於水流中，高流量時期水流漂浮物有撞擊損毀儀器之虞，且隨泥沙濃度升高將降低其聲波訊號之穿透能力及量測品質。為解決洪水期間儀器浸沒水中實務面臨之課題，河川流速觀測陸續研發出利用影像解析（image analysis）或都普勒效應（Doppler effect）等原理之質點影像（particle image）、超音波（ultrasonic）、雷達波（radar wave）等非接觸式量測技術與儀器，希冀由水流表面流速、水位等相關資訊，藉轉換或推得平均流速、水深及通水面積等，配合相關參數之決定進而推定流量。非接觸式表面流速觀測儀器中，連續波微波雷達（continuous wave microwave radar）可載掛於橋樑上，配合水位觀測可建構非接觸式流量量測系統，為全天候無人操作自動化連續量測洪水流量可行方式。本文研究目的，即利用連續波微波雷達測得洪水表面流速連續資料推估渠道流量，並據以比對推估流量與傳統量測法之差異，以提供現場實務應用參考。

## 二、理論分析

直接量測渠道流量係採流速面積法，由測得各子斷面之平均流速及其面積後，進而計算其流量再據以積算得總流量，流量計算式表示為，

$$Q = \sum Q_i = \sum U_i A_i \quad (1)$$

式中， $Q$  為渠道總流量， $Q_i$  為子斷面流量， $U_i$  為子斷面之平均流速， $A_i$  為子斷面之面積，上述各項物理量如圖 1 所示，Whalley (2001) 整理不同量測部分斷面數量與量測結果誤差間之關係，其結果顯示子斷面數量愈多，其量測準確度愈高，Rantz et al. (1982a)

則建議可採 25 至 30 個子斷面量測之，然此除非多組人員同步作業，否則採單組人力即需更長之作業時間，若作業過程流況變化則增加量測結果之不確定性。前述之子段流速須仰賴機械式流速儀觀測，高流量時期機械式流速儀難以操控或逾其適用範圍時，一般採用浮標法觀測水流表面流速，台灣常用之浮標型式有玻璃瓶、寶特瓶、桂竹、浮球等，其測得水流表面流速轉換為平均流速之係數則視浮標型態而定。利用水流表面流速轉換為平均流速，係假設渠道水流垂向流速分布如圖 2 所示。則幕次律垂向流速剖面可表示為，

$$\frac{u(y)}{u_*} = a\left(\frac{y}{y'}\right)^m \quad (2)$$

式中， $u(y)$  為距離底床  $y$  處之縱向流速，縱向表面流速則表示為  $u_s$ ，即  $u(h) = u_s$ ； $u_*$  為底床剪力速度， $u_* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{gRS_f}$ ，其中， $\tau$  為水流作用於底床之剪應力， $\rho$  為水體密度，水力半徑  $R$  於部分斷面處則取其水深  $h$ ； $y'$  為特徵長度，Chow (1959) 依 Nikuradse (1932) 建議，指出天然河川中多屬粗糙底床， $y'$  可視為底床粗糙高度 (roughness height)  $k_s$  之函數，其物理意義代表流速為零處距離底床之距離，即一般稱為虛擬底床之位置，粗糙長度則為度量床面粗糙程度之參數，可視之為相當糙率，倘為光滑底床則  $y'$  與水流運動黏滯係數  $\nu$  有關，則可表示為  $y' = \nu/9u$ ，倘為粗糙底床， $y'$  則與底床粗糙長度  $k_s$  有關，依 Nikuradse (1932) 建議其間關係可表示為  $y' = k_s/30$ 。此外，係數  $a$ 、幕次  $m$  為與河床型態及流況有關之參數，主要依據河川整體之相對糙度及雷諾數所決定，一般由經驗法則所控制，意即不同流況可以選擇不同之  $a$  及  $m$  去描述垂向流速剖面。Chen (1991) 利用幕次律去擬合對數律垂向流速分布如下式所示，

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y'}\right) \quad (3)$$

式中， $\kappa$  為 von Kármán 常數，其值主要受水中含沙量之影響，清水流中  $\kappa$  介於 0.38 至 0.41 間，其平均值約 0.4，而當懸浮質濃度越大時  $\kappa$  值則越小，若

$\kappa = 0.4$  則  $ma = 0.92$ ，也就是說於描述流速分布時  $a$  與  $m$  呈反比關係。其分析結果顯示當幕次律與對數律相等時之  $\kappa$ 、 $m$ 、 $a$  與  $e$  之乘積等於 1，其中， $e = 2.71828$ 。圖 3 即為其以不同之  $m$  值之幕次律與對數律比較圖，顯示經由改變  $m$  值可以適用於描述不同流況及相對糙度下之流速分布，倘以  $m = 1/6$  為例，其  $u/u_*$  及  $y/y'$  之適用範圍分別為 9.86 至 21 及 36.8 至 3,490。由式 (2) 可知縱向表面流速  $u_s$  對應之垂向流速剖面公式為，

$$\frac{u_s}{u_*} = a\left(\frac{h}{y'}\right)^m \quad (4)$$

將  $u_* = \sqrt{ghS_f}$  代入式 (4) 後可表示為，

$$\frac{u_s}{\sqrt{ghS_f}} = a\left(\frac{h}{y'}\right)^m \quad (5)$$

推導可得水深  $h$  與表面流速  $u_s$  之關係為，

$$h = \left[ \frac{u_s k_s^m}{30^m a \sqrt{gS_f}} \right]^{\frac{2}{2m+1}} \quad (6)$$

以經驗式  $A = 30^m a / (1+m)$  代入式 (6) 則可得，

$$h = \left[ \frac{u_s k_s^m}{A(1+m)\sqrt{gS_f}} \right]^{\frac{2}{2m+1}} \quad (7)$$

其中， $A$  經驗係數，與  $a$ 、 $m$  及相對糙度  $h/k_s$  有關，錢寧、萬兆惠 (1991) 指出天然河川根據 Manning-Strickler 經驗公式得  $m = 1/6$ 、 $A = 7.68$ ，倘依 Engelund (1972) 建議則  $m = 1/8$ 、 $A = 9.45$ ，由實測資料分析顯示於 Manning-Strickler 公式中，當  $2 < h/k_s < 1,500$  時， $A = 7.68$  可視為常數，故認為 Manning-Strickler 公式對於一般礫石河川較為適用，而 Engelund 公式則適用於  $13 < h/k_s < 15,000$  時，即水深較大或底床粒徑小之河川較合適。此外，將式 (2) 沿水深方向積分，

$$\int_{y'}^{h+y'} \frac{u}{u_*} dy = \int_{y'}^{h+y'} a \left( \frac{y}{y'} \right)^m dy \quad (8)$$

將常數項提出可得，

$$\frac{1}{u_*} \int_{y'}^{h+y'} u dy = \frac{a}{y'^m} \int_{y'}^{h+y'} y^m dy \quad (9)$$

將右式積分可得，

$$\frac{1}{u_*} \int_{y'}^{h+y'} u dy = \frac{a}{y'^m (m+1)} \left[ (y^{m+1}) \Big|_{h+y'} - (y^{m+1}) \Big|_{y'} \right] \quad (10)$$

$$\frac{1}{u_*} \int_{y'}^{h+y'} u dy = \frac{a}{y'^m (m+1)} \left[ (h+y')^{m+1} - y'^{m+1} \right] \quad (11)$$

將左右式均除以水深  $h$ ，

$$\frac{1}{u_*} \frac{\int_{y'}^{h+y'} u dy}{h} = \frac{a}{y'^m h (m+1)} \left[ (h+y')^{m+1} - y'^{m+1} \right] \quad (12)$$

因垂向平均流速  $U = \frac{\int_{y'}^{h+y'} u dy}{h}$ ，代入式 (12) 可得，

$$\frac{U}{u_*} = \frac{a}{y'^m h (m+1)} \left[ (h+y')^{m+1} - y'^{m+1} \right] \quad (13)$$

將式 (13) 除以式 (4)，得

$$\frac{U}{u_s} = \frac{1}{h^{m+1} (m+1)} \left[ (h+y')^{m+1} - y'^{m+1} \right] \quad (14)$$

將右式乘上  $\frac{y'^{m+1}}{y'^{m+1}}$ ，得

$$\frac{U}{u_s} = \frac{1}{h^{m+1} (m+1)} \left[ (h+y')^{m+1} - y'^{m+1} \right] \times \frac{y'^{m+1}}{y'^{m+1}} \quad (15)$$

$$\frac{U}{u_s} = \frac{1}{(m+1)} \left( \frac{y'}{h} \right)^{m+1} \left[ \left( \frac{h}{y'} + 1 \right)^{m+1} - 1 \right] \quad (16)$$

依前述 Nikuradse (1932) 建議之粗糙底床  $y' = k_s / 30$ ，可得平均流速  $U$  與表面流速  $u_s$  關係式為：

$$\frac{U}{u_s} = \frac{1}{(m+1)} \left( \frac{k_s}{30h} \right)^{m+1} \left[ \left( \frac{30h}{k_s} + 1 \right)^{m+1} - 1 \right] = u_r \quad (17)$$

式中， $u_r$  即為垂向平均流速與表面流速之流速比。Costa et al. (2006) 建議於寬廣河川對流速比之採用可依 Rantz et al. (1982) 建議範圍採 0.85；Fukami et al. (2008) 指出流速比需視河川特性可採 0.85 至 0.90；Polatel (2006) 進行平均流速與表面流速間流速比之水槽實驗，於平坦底床與不同底床糙度型態下，流速比介於 0.824 至 0.910 之間；Plant et al. (2005) 針對 Cowlitz River 量測斷面之流速比以對數律速剖公式進行分析，結果顯示其不受下游控制斷面之影響，圖 4 (a) 中實線為表面流速，其與  $(U_{0.2} + U_{0.8})/2$  之實測平均流速(圖中虛線連結之空心圓點)比較可得其流速比  $\approx 0.85$ ，圖 4 (b) 則為其分析不同底床粗糙長度  $z_0$  (即  $k_s$ ) 之影響，顯示流速比有隨水深增加而加大並趨於穩定現象。

利用微波雷達觀測表面流速主要係依據布拉格散射 (Bragg scattering) 與都普勒效應二項原理，其中，布拉格散射於物理學上最早是由 W. L. Bragg 利用 X 射線入射晶體光柵時，發現當晶體粒子排列間距為入射波長之  $N/2$  倍時，會產生最大散射共振現象。Plant and Keller (1990) 在經由一連串實驗驗證後，指出大尺度之水面波會因為風、紊流或波浪之升降作用而產生公分級小波紋，並進一步驗證小尺度表面波漂浮於大尺度波浪上之運動現象，同時發展分析模式以降低風力作用之影響，以準確獲得布拉格共振頻率。當渠流之自由水面因風力之作用或水流紊流作用產生微小之表面波紋，此微小波紋之波長尺度約為 1cm 至 2cm 間，於水流流動時，此微小波紋將隨水流表面移動，因此可將小波紋移動速度視為水流之表面流速，若將水面波紋視為平面排列之晶格，則當雷達波入射此水流表面時，入射波長為水面波長之  $N/2$  倍時 (如圖 5)，因雷達波與水面波交互作用而產生布拉格散射，在回波之都普勒頻譜中即產生布拉格共振，當水面波移動時，布拉格共振頻率於是產生都普

勒偏移, 經由分析計算此頻率偏移, 可獲得水面波之移動速度, 此即雷達測流之基本原理。

Yamaguchi (1994) 於 1989 至 1991 年間, 將連續波微波雷達表面流速儀以 4 具併聯方式架設於日本 Matsubara 橋 (Furu 河) 及 Nekoya 橋 (Uono 河) 進行量測, 利用平均流速與表面流速的率定關係推算流量。Kimura et al. (2005) 及 Fukami et al. (2008) 針對日本 Yattajima 橋 (長約 450m, Tone 河)、Satsunai 橋 (長約 650m, Satsunai 河) 及 Otanashi 橋 (長約 920m, Yura 河) 設置併聯式超

音波與連續波微波雷達表面流速儀測站 (前兩處測站流速儀數量均為 8 具, Otanashi 橋則為 10 具), 分析數場颱風量測資料, 經與浮標實測結果比較, 獲致合理之流量推估值。Plant et al. (2005) 則利用工作頻率為 24GHz 之連續波微波雷達表面流速儀, 以偵測更小的水面波紋, 並將 8 組連續波微波雷達天線併聯架設於華盛頓州 Cowlitz 河的橋樑上量測水面流速橫向分布狀態, 進而獲得流量, 並利用對數律之速剖公式分析指出平均流速與表面流速關係不受下游迴水控制影響。

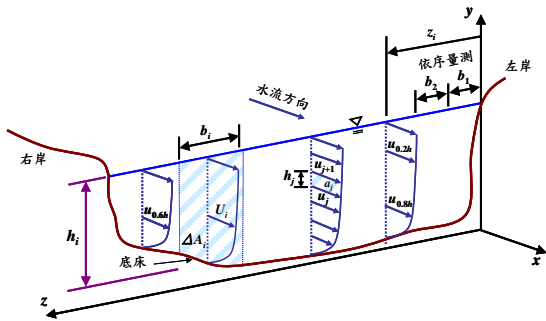


圖 1 流速面積法及坐標系統示意圖  
Fig.1 Schematic diagram of the velocity-area method and coordinate system.

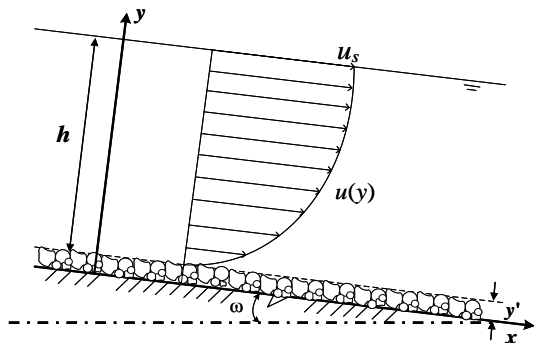


圖 2 渠道垂向流速分布示意圖  
Fig.2 Schematic diagram of the vertical distribution of the velocity profile.

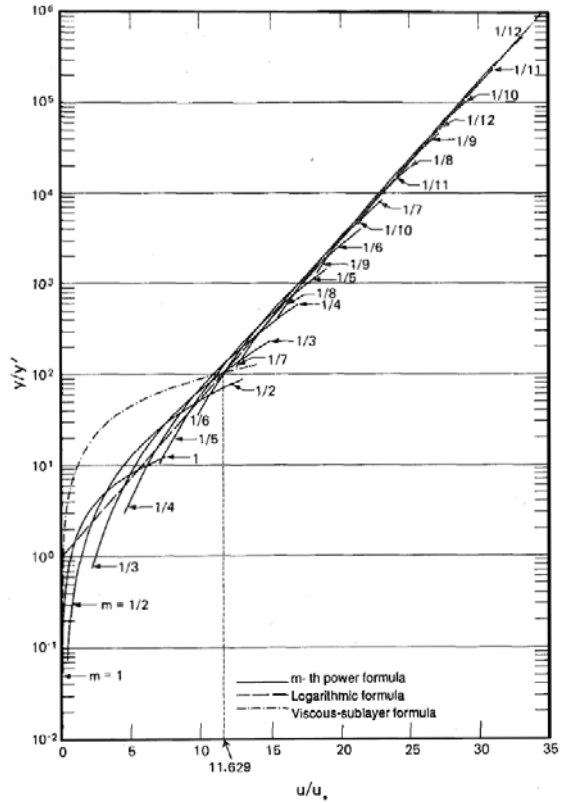


圖 3 幕次律中不同 m 值與對數律之比較圖 (Chen, 1991)  
Fig.3 Comparison of logarithmic and power velocity distributions of turbulent flow (Chen, 1991).

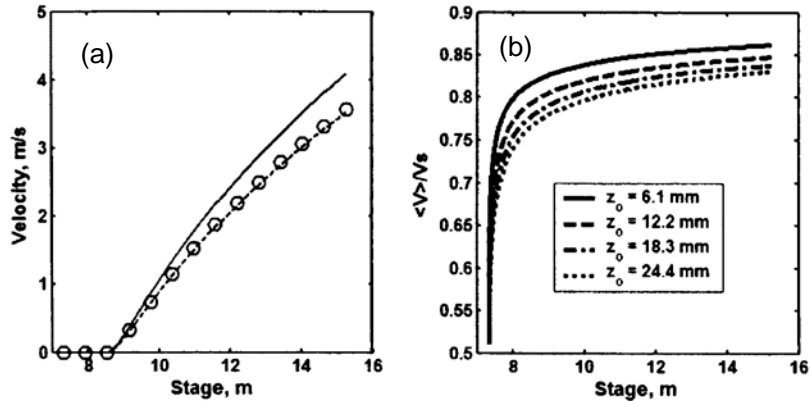


圖 4 Plant et al. (2005) 表面流速、平均流速及水位實測資料圖

Fig.4 Measured data of surface velocities and averaged velocities and water stages of Plant et al. (2005).

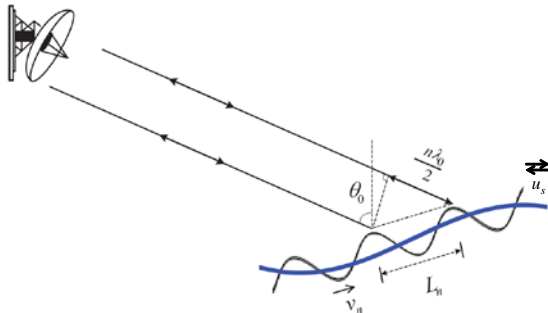


圖 5 雷達波入射水面造成之布拉格散射現象

Fig.5 Bragg scattering from short waves produced by turbulent boils on the surface of the river.

### 三、儀器設備與試驗方法

配合本研究所需之高流量條件，茲於供水系統最大入流量 0.9239cms 之成功大學水工試驗所戶外平面試驗場佈設試驗場地，配置有水源蓄存池、揚水泵浦、入流靜水池、體積池、消能整流段、試驗渠段、尾水導流渠段等部分，構成循環試驗系統，其佈置狀況如圖 6 所示。試驗採用儀器主要為非接觸式之連續波微波雷達表面流速儀、超音波水位計以量測試驗渠段之表面流速及水位，另搭配接觸式之試驗室型聲波都普勒流速儀量測斷面流速分布。

#### 1. 連續波微波雷達表面流速儀

試驗之表面流速量測係採用 Sommer RG-24 表

面流速儀 (如圖 7 所示)，微波頻率為 24GHz，發射角度為  $11^\circ$ ，探頭直徑 80mm，流速量測範圍為 0.3 至 8m/s，解析度為 0.01m/s，精度為量測值之  $\pm 5\%$ 。其與受測水流表面垂距至少需 0.5m，最遠則為 15m，其以一俯角投射訊號至水流表面之量測區概呈橢圓形，圖 8 則為其量測範圍示意圖。此外，流速儀之投射俯角調整係以氣泡式量角器測定之。

#### 2. 聲波都普勒流速儀 (ADV)

此流速儀係採用由 Nortek AS 公司所產製之 Vectrino 側視型三維 ADV，其最小量測水深為 0.05m，其係量測感應頭前方約 5cm 處，高 3 至 15mm (可予調整，試驗設定為 7mm) 圓柱體區域之流速 (如圖 9 所示)，取樣頻率可調整為 1 至 25Hz (試驗設定為 25Hz)，量測速度範圍依水流狀況可選擇  $\pm 0.01$ 、0.1、0.3、1.0、2.0、4.0m/s 等六種模式，精度為量測值之  $\pm 0.5\%$ ，將之架設於台車基座固定架，可量測斷面中不同橫向及垂向位置流速。

#### 3. 超音波水位計

採用 Honda HAL 420 超音波水位計，量測範圍為 0.3m 至 6.5m，解析度為 0.001m，最小取樣頻率為 1Hz。水位計共有 7 具，分別架設於入流量水堰上游量測斷面、體積池及試驗渠道。經測試結果顯示日照溫度對本文試驗所採超音波水位計之影響並不顯著。

#### 4. 試驗台車

為便於不同斷面之流場量測作業，茲以矩形鋁材組合成移動式試驗台車，架設於渠道邊牆軌道上方。台車儀器固定支架配有垂向及橫向螺桿，其可調範圍各為 30cm 及 130cm，最小刻度為 2mm，並以鋼管連結支撐特氟龍裁切之直徑 63.5cm 圓孔支架，可將流速儀固定其上，超音波水位計則載掛於上游側之桁架上。

為檢測試驗渠道完全發展段範圍以確定量測儀器架設適當位置，茲以試驗台車載掛 ADV 於 23m 斷面至 37m 斷面間移動，量測近水面處橫向之速度分布及渠道中心點垂向之速度分布狀況，由各斷面橫向及垂向流速分布狀況顯示 27m 至 35m 間斷面之流速分布

較為一致，已屬完全發展流流況，故試驗段訂於 27m 至 35m 斷面間。試驗作業自泵浦開機至穩定段之 5 分鐘後開始量測，RG-24 表面流速儀架設於試驗渠道側牆上 50cm 處，其與水面垂距依各試次之水位高低而有所不同，量測區範圍則與此垂距及其俯角有關，流速儀量測試驗之俯角計採 30°、45°及 60°等三種角度。以表面流速儀與水面垂距 1m 為例，俯角 45°之橢圓形量測區短軸徑長約為 27cm，俯角為 30°及 60°時則分別為 38cm 與 22cm。

圖 6 試驗場地及相關設備配置示意圖

Fig.6 Experimental configuration in the recirculating laboratory flume.



圖 7 表面流速儀及其架設方式

Fig.7 Setup of the continuous wave microwave Doppler radar.

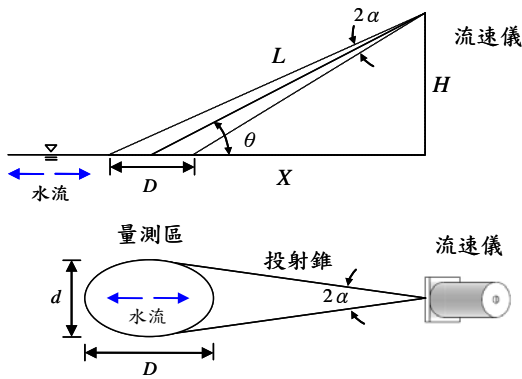


圖 8 表面流速儀量測範圍示意圖

Fig.8 Measuring Area of the continuous wave microwave Doppler radar.

### 四、試驗結果

表 1 為表面流速儀於不同量測俯角於各試次量測之表面流速推算流量與堰流之入流量比較，圖 10 為流速儀俯角 45°時各試次流量之表面流速量測資料時序列圖。表 1 中表面流速推算流量欄計算，係直接採用實測表面流速 (如圖 10)，配合台車上游側超音波水位計量測水位獲取對應之斷面，表中顯示表面流速儀俯角愈大，所測之表面流速與斷面平均流速愈接近，俯角愈小則表面流速愈偏離斷面平均流速。另外，試驗過程中曾加大俯角至 70°及 80°，然流速儀輸出資料已呈不穩定現象，應係逾其適用範圍所致，圖 10 中右下角小圖為以俯角 70°及 80°於各試次流量條件下量測之資料點，顯示其無法於定流量條件下測得穩定之表面流速資料。

茲將不同俯角量測表面流速乘上 Plant et al. (2005) 採用之流速比 0.85，以轉換為斷面平均流速後，即為表面流速推算流量 ( $Q_{SV}$ )，各試次推算成果與入流量  $Q_{weir}$  間相對關係如圖 11 所示，其間率定關係整理如后。

$$(Q_{SV})_{30^\circ} = 1.295Q_{weir} + 0.018, r^2 = 0.998 \quad (18)$$

$$(Q_{SV})_{45^\circ} = 1.136Q_{weir} + 0.003, r^2 = 0.996 \quad (19)$$

$$(Q_{SV})_{60^\circ} = 0.995Q_{weir} - 0.001, r^2 = 0.998 \quad (20)$$

依此率定關係，則表面流速儀以俯角 30°量測各試次之水流表面流速所推算之斷面流量 ( $Q_{SV}$ )<sub>30°</sub> 相較於入流量  $Q_{weir}$  間之平均準確度為 34.9%，表面流速

儀另採 45°及 60°俯角所測得各試次斷面流量之平均準確度則分別為 14.4%與-0.6%，顯示俯角 60°之推算流量與入流量最為接近，應係其量測範圍小 (流速儀與水面垂距約為 1m，故其俯角 60°、45°及 30°時投射水面之橢圓形量測區短軸徑長各約為 22cm、27cm 及 38cm)，較接近局部區域之水理特性之故。

倘依各試次入流量推算斷面之平均流速與表面流速儀採用上述三種俯角測得之表面流速比較，可得其關係為，

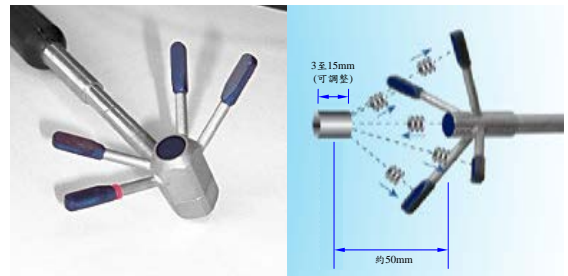


圖 9 ADV 量測單元示意圖

Fig.9 Measurement probe of ADV.

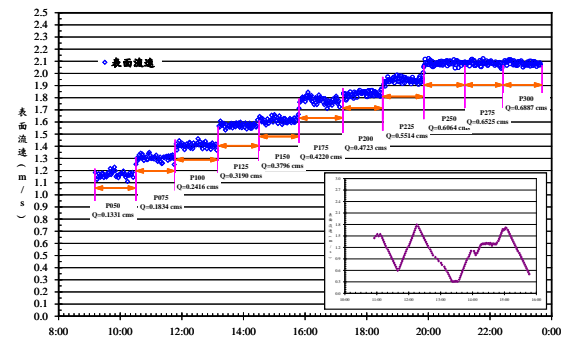


圖 10 各試次之表面流速量測資料圖 (以流速儀俯角



45°為例)

**Fig.10 Surface velocities during the experiments (taking the angle of depression equal to 45° for example).**

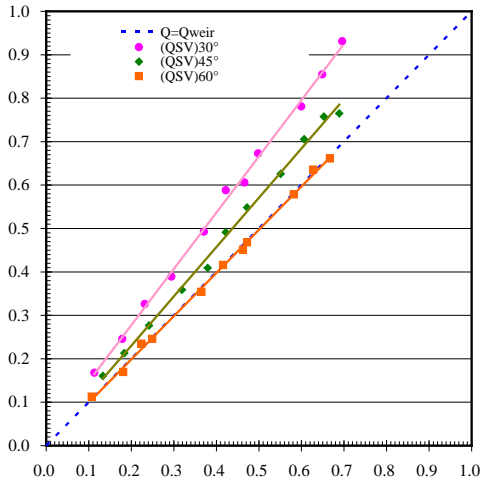


圖 11 各試次表面流速儀推算流量與入流量關係圖

**Fig.11 Comparison between the inflow discharge and estimated discharge.**

$$(u_s)_{30^\circ} = 0.655\bar{U} - 0.013, \quad r^2 = 0.998 \quad (21)$$

$$(u_s)_{45^\circ} = 0.746\bar{U} - 0.001, \quad r^2 = 0.996 \quad (22)$$

$$(u_s)_{60^\circ} = 0.852\bar{U} + 0.001, \quad r^2 = 0.998 \quad (23)$$

基此，本文試驗條件範圍內之流速儀安裝俯角  $\theta$  (30°至 60°)與其對應流速比值間關係可表示為，

$$\frac{\bar{U}}{(u_s)_\theta} = 0.0066\theta + 0.456, \quad r^2 = 0.998 \quad (24)$$

河川現場採用 Sommer RG-24 連續波微波雷達表面流速儀量測表面流速時，其與水面間垂距常逾 10m，依表 1 推算其量測區短軸徑長將達 2 至 3m 之譜，其間垂距隨著洪水期間水位升高而相對縮短，量測區短軸則隨之變小，其量測範圍相對於寬逾百公尺之河川斷面而言，應仍可適用於局部測點垂向速剖關係，倘流速儀裝設俯角採 60°，則推算部分斷面平均流速之流速比可採式 (23) 所示之 0.852 推算，此與一般常用之 0.85 近似，倘採用 30°至 60°間之俯角架設之，則可利用式 (24) 推算其流速比由測得表面流速求得對應之平均流速。

表 1 表面流速推算流量與入流量彙整表

**Table 1 Summary of the inflow discharge and estimated discharge.**

流速儀俯角	方案	堰上水位 (m)	入流量 $Q_{weir}$ (cms)	表面流速推算流量 $Q_{sv}$ (cms)	$Q_{weir}/Q_{sv} \times 100$	福祿數 $Fr$	雷諾數 $Re$
30°	P40	0.089	0.1131	0.1974	57.3	0.715	$3.94 \times 10^5$
	P50	0.120	0.1788	0.2891	61.9	0.763	$5.25 \times 10^5$
	P60	0.142	0.2315	0.3837	60.3	0.762	$6.63 \times 10^5$
	P40+P50	0.166	0.2942	0.4579	64.2	0.802	$8.42 \times 10^5$
	P40+P60	0.193	0.3707	0.5795	64.0	0.815	$9.72 \times 10^5$
	P50+P60	0.210	0.4220	0.6920	61.0	0.799	$1.05 \times 10^6$
	2P60	0.224	0.4659	0.7129	65.4	0.790	$1.15 \times 10^6$
	P40+P50+P60	0.234	0.4982	0.7916	62.9	0.829	$1.31 \times 10^6$
	2P50+P60	0.264	0.5994	0.9187	65.2	0.845	$1.41 \times 10^6$
	P50+2P60	0.278	0.6489	1.0058	64.5	0.817	$1.48 \times 10^6$
3P60	0.291	0.6960	1.0956	63.5	0.849	$1.56 \times 10^6$	
45°	P40	0.099	0.1331	0.1891	70.4	0.691	$3.40 \times 10^5$
	P50	0.122	0.1834	0.2504	73.2	0.764	$5.13 \times 10^5$
	P60	0.146	0.2416	0.3257	74.2	0.737	$6.36 \times 10^5$
	P40+P50	0.175	0.3190	0.4223	75.5	0.797	$7.87 \times 10^5$
	P40+P60	0.196	0.3796	0.4814	78.9	0.827	$9.57 \times 10^5$
	P50+P60	0.21	0.4220	0.5778	73.0	0.792	$1.05 \times 10^6$

流速儀俯角	方案	堰上水位 (m)	入流量 $Q_{weir}$ (cms)	表面流速 推算流量 $Q_{sv}$ (cms)	$Q_{weir} / Q_{sv}$ $\times 100$	福祿數 $Fr$	雷諾數 $Re$
	2P60	0.226	0.4723	0.6452	73.2	0.817	$1.15 \times 10^6$
	P40+P50+P60	0.25	0.5514	0.7364	74.9	0.791	$1.20 \times 10^6$
	2P50+P60	0.266	0.6064	0.8302	73.0	0.865	$1.41 \times 10^6$
	P50+2P60	0.279	0.6525	0.8915	73.2	0.803	$1.47 \times 10^6$
	3P60	0.289	0.6887	0.8999	76.5	0.829	$1.56 \times 10^6$
60°	P40	0.086	0.1073	0.1327	80.8	0.676	$3.23 \times 10^5$
	P50	0.121	0.1811	0.1996	90.7	0.776	$5.20 \times 10^5$
	P60	0.139	0.2241	0.2760	81.2	0.725	$6.17 \times 10^5$
	P40+P50	0.149	0.2493	0.2891	86.2	0.790	$6.84 \times 10^5$
	P40+P60	0.191	0.3648	0.4166	87.6	0.827	$9.44 \times 10^5$
	P50+P60	0.208	0.4158	0.4893	85.0	0.796	$1.04 \times 10^6$
	2P60	0.223	0.4627	0.5303	87.2	0.822	$1.14 \times 10^6$
	P40+P50+P60	0.226	0.4723	0.5511	85.7	0.794	$1.15 \times 10^6$
	2P50+P60	0.259	0.5821	0.6804	85.6	0.865	$1.38 \times 10^6$
	P50+2P60	0.272	0.6275	0.7475	83.9	0.835	$1.45 \times 10^6$
	3P60	0.283	0.6669	0.7777	85.7	0.815	$1.51 \times 10^6$

## 五、現場應用

為瞭解及驗證連續波微波雷達表面流速儀為主體建構之非接觸式流量量測系統於河川洪水期間實務應用能力，本文蒐集整理經濟部水利署建置於曾文溪之非接觸式流量測站之量測資料，藉建立之流量分析模式推算其洪水歷程流量並與河川局實測及率定曲線推算流量進行比較。經濟部水利署於 2007 年 6 月在曾文溪設非接觸式水位流量觀測系統，位居下游之新中水位流量站（曾斷 78A），連續波微波雷達置於連接台南縣官田鄉及善化鎮之台一省道曾文二號橋，測站主要設備配置及相對位置則如圖 12 所示，橋面版上游側緣設置 10 具 RG-24 連續波微波雷達表面流速儀（高程為 20m），組成多點併聯式表面流速觀測系統，以量測水流於斷面橫向不同位置之表面流速，曾文二號橋斷面總寬度為 410m，10 具流速儀與墩柱間關係整理如表 2 所示，各流速儀之架設俯角均為 60°。

曾文二號橋非接觸式流量測站自 2007 年 6 月設置完成運轉，然因曾文二號橋屬交通部公路總局評估為亟需改善橋樑，並於 2009 年 7 月進行下游側南下路段拆除作業啟動重建工程，經濟部水利署遂將所有儀器設備遷移至上游之國道三號曾文溪橋上另行量測，原新中水位流量站亦暫停觀測，改至其上游舊曾文溪橋另行觀測。故測站設置於曾文二號橋之 2007 至 2008 年間，計有柯羅莎颱風（2007/10/6 至 2007/10/9）、卡玫基颱風（2008/7/17 至 2008/7/20）、辛樂克颱風（2008/9/13 至 2008/9/17）及 薔蜜 颱風（2008/9/29 至

2008/10/2）等期間，測站水位均逾二年重現期洪水水位，其中，卡玫基颱風期間因電力系統故障，致表面流速儀量測資料不完整，柯羅莎颱風引致之洪水規模最大，河川局於其退水期間執行實測作業所得流量亦為設站以來所測得之最大流量，圖 13 為該颱風期間之河道水流狀況，故相關分析即以該場颱風為例進行推算成果說明，圖 14 為流量測站歷年斷面，顯示底床變化幅度不大，底床斷面於 2006 年至 2007 年期間尚稱穩定，然因洪水期間底床沖淤歷程未有實測資料，計算所需之斷面採洪水後之底床為計算斷面，依洪水歷程水位資料推估其通水斷面積進而推算流量。

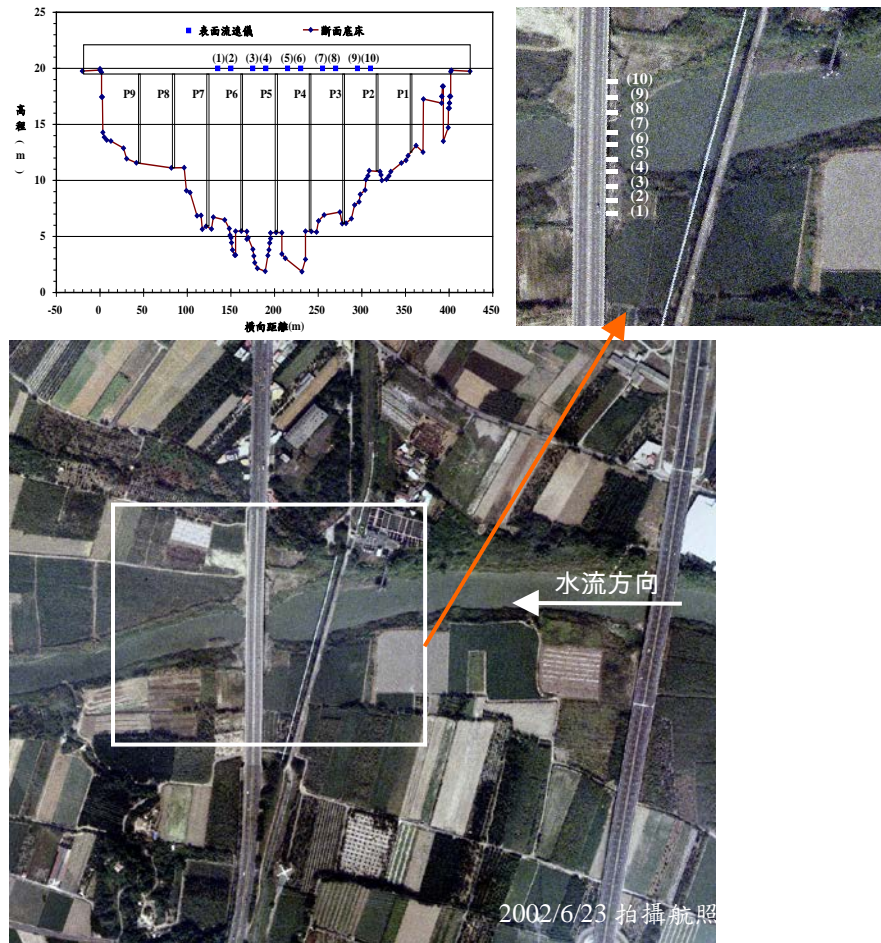
圖 15 為 2007 年柯羅莎颱風期間曾文二號橋水位及表面流速觀測歷線資料，其中，考慮流速不大時主深槽水面風吹小波紋及高灘地植生飄動之影響，表面流速低於 0.3m/s 者即先予濾除，此外，倘水位或表面流速較其前後時段資料明顯異常者亦予排除。

圖中顯示最大表面流速發生於最高水位到達之前，而流速儀觀測之表面流速與水位漲退趨勢則大致相符，可確實掌握洪水期間表面流速之變化。其中，位於右岸高灘地之表面流速儀（8）及流速儀（9）之表面流速較位於左岸高灘地之表面流速儀（2）及流速儀（3）為高，應係國道三號橋之上游為轉彎段，測站右岸屬於該凹岸之下游故流速較快，且舊曾文溪橋上游側右岸之自來水公司取水塔亦有部分影響。另，圖 16 為柯羅莎颱風期間流速儀（3）至流速儀（8）表面流速與水位之相對關係圖，圖中漲退水階段各流速儀可呈現水位及表面流速間不同迴圈關係，顯示此量測系統可掌握洪水歷程水流之漲退特性，圖中流速儀（7）及流速儀（8）之表面流速於水位漲升段 9m 至 11m

處之增幅趨緩現象，研判應係水位漲升至其右側高灘地，需克服其植被致流速略有減緩，之後再隨水位漲升而持續加速。退水期間則自水位 11m 以降，因水流由漫溢於高灘地漸歸於主深槽，而使得表面流速隨水位降低之減速趨勢變緩且反而略有加速之現象，俟水流盡歸主深槽後，才恢復流速隨水位降減而減速之狀態。

圖 17 為柯羅莎颱風期間之洪水歷程推估流量之比較，率定曲線推計流量依經濟部水利署第六河川局繪製對應年度之率定曲線，表面流速推估流量係採流速比依曾文溪測站底床代表粒徑  $d_{75}$  為 0.055mm，測站底床粗糙高度  $k_s$  依 Lane and Carlson (1953) 之建議採 3.2 倍代表粒徑為 0.176mm，因屬底床粒徑小的河川，垂向速度剖面可依 Engelund (1972) 建

議  $m=1/8$  之幕次律表示之，依式 (16) 據以推算測站於不同水深之流速比，圖中顯示表面流速法及率定曲線法均可推算洪水過程短期距之流量變化，率定曲線之洪峰流量與表面流速法測得流量之差異度分別為 32%，河川局於柯羅莎颱風洪水期間退水段實測流量 4,682cms 為新中水位流量站歷年來之實測最大流量，較表面流速法同時段所測流量值低約 350cms。利用表面流速法推算之流量繪製其水位流量率定關係，將之與河川局建立水位流量率定曲線進行比較如圖 17 所示，河川局建立之水位流量率定曲線以外插延伸方式所得洪峰流量明顯小於非接觸式量測法所測得者，顯示此外插延伸致高流量值有低估之現象，依實測最高水位所推得洪峰流量與非接觸式量測法所測得者間差距達 2,000cms 至 3,000cms 之譜。



備註：左上為斷面及流速儀器配置；右上為流速儀佈置，流速儀編號自左岸起算。

圖 12 曾文二號橋儀器設備配置示意圖

Fig.12 Setup of the continuous wave microwave Doppler radar on Tsengwen No. 2 Bridge.



圖 13 2007 年柯羅莎颱風期間測站河道水流狀況

Fig.13 River flows during Typhoon Krosa in 2007.

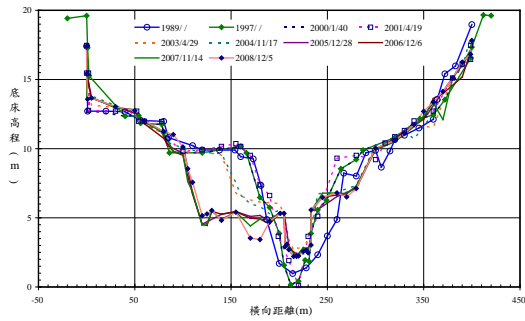


圖 14 新中水位流量站斷面歷年變化圖

Fig.14 Variations of the cross-section of Hsin-Chung discharge station.

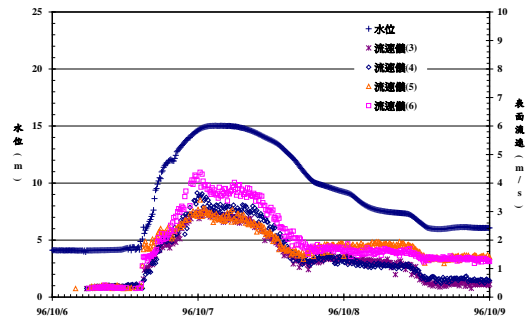
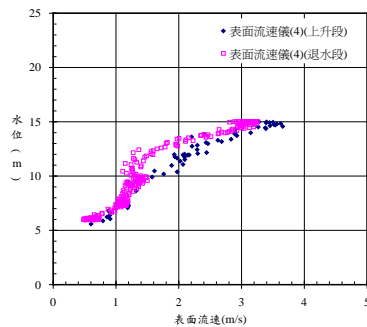
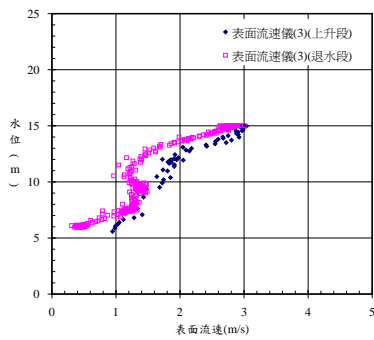


圖 15 2007 年柯羅莎颱風期間測站水位第 3 至 6 表面流速儀觀測資料歷線圖

Fig.15 Measured surface velocities of third and 6th radar during Typhoon Krosa.



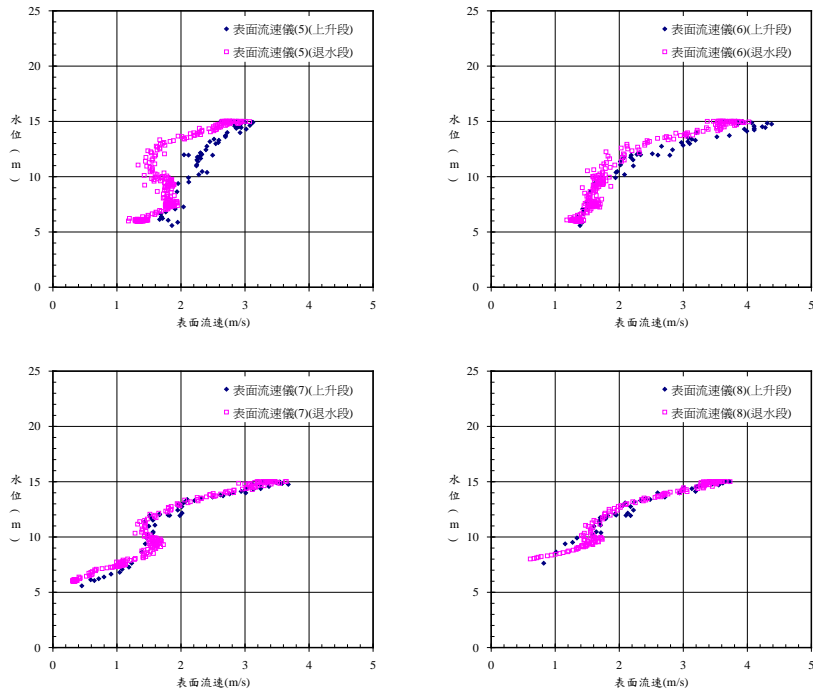


圖 16 柯羅莎颱風期間水位與表面流速相對關係圖

Fig.16 Measured surface velocities and water stages during Typhoon Krosa.

### 七、結論與建議

本研究利用人工渠道進行水工試驗，驗證非接觸式量測系統具有良好之準確度，確認系統實務應用價值，收集分析非接觸式量測系統於現場颱風之觀測資料，證實其可掌握洪水全部過程流量變化，顯示此系統具有全天候量測能力，可填補傳統人工量測作業未能取得高流量實測資料之困境，經由渠道與現場試驗之研究結果顯示：

1. 依據渠道試驗結果，表面流速儀最大可測俯角以  $60^\circ$  為限，流速儀以  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  及  $60^\circ$  等三種俯角測得之表面流速，採用 0.85 為流速比推算平均流速並得其斷面流量，各試次推算成果經與基準流量比較之平均準確度分別為 34.9%、14.4% 及

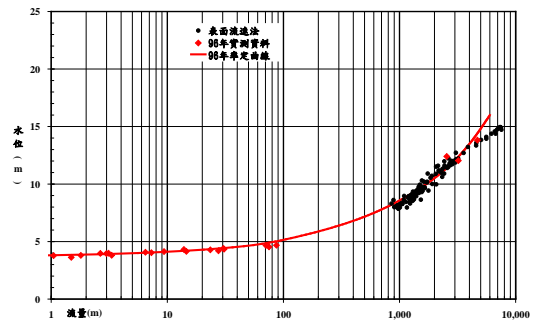


圖 17 2007 年表面流速法推估流量與率定曲線比較圖

Fig.17 Comparison between the discharge estimated from the surface velocity and rating curve.

表 2 表面流速儀安裝位置與墩柱關係表

Table 2 Summary of the continuous wave microwave Doppler radar at bridge pier.

流速儀編號	自左岸起算位置	與墩柱關係
1	135m	P6 及 P7 墩柱間

2	150m	P5 及 P6 墩柱間
3	175m	
4	190m	
5	215m	P4 及 P5 墩柱間
6	230m	
7	255m	P3 及 P4 墩柱間
8	270m	
9	295m	P2 及 P3 墩柱間
10	310m	

-0.6%。由渠道斷面平均流速與試驗所用表面流速儀以 30°、45°及 60°俯角所測得表面流速，可得其間流速比關係分別為 0.655、0.746 及 0.852。

- 根據河川測站現地量測結果分析比較，顯示非接觸式量測系統可快速有效地測得洪水歷程高流量流況下水位及表面流速短期距變化情形，並可呈現出洪水期間之遲滯效應，此為傳統實測作業不易獲取之資訊。
- 經選取與河川局實測資料比較，其間雖有差異，然此傳統作業於各場颱風以多名人力耗時數小時僅可測得一筆流量資料。顯示非接觸式量測系統確有實務應用之能力與價值，可大幅改善傳統接觸式流量觀測作業耗時費力之現象，免除人員機具長期暴露惡劣天候及洶湧流況之安全風險。
- 未來可考慮底床不規則及動床效應部分持續研究；另外，當表面流速儀與河川水面距離過大時（10 公尺以上），其橢圓量測區之短軸直徑將增大至 2~3 公尺之譜，相對於小型渠道斷面是否適用，可至野外中大型人工輸水渠道進行研究，以符合實務應用之需求。

## 參考文獻

- 盧昭堯、邱照淋、陳正炎、林 呈、王傳益 (1995)，「台灣河川流量觀測技術之開發與應用(一)」，台灣省水利局研究報告。(Lu, J.Y., Chiu, C.L., Chen, J. Y., Lin, C. and Wang, C. Y. (1995). *Development and Application of an Efficient Method for Streamflow Measurement in Taiwan (I)*, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan. (in Chinese))
- 盧昭堯、邱照淋、陳正炎、林 呈、王傳益 (1996)，「台灣河川流量觀測技術之開發與應用(二)」，台灣省水利局研究報告。(Lu, J.Y., Chiu, C.L., Chen, J. Y., Lin, C. and Wang, C. Y. (1996). *Development and Application of an Efficient Method for Streamflow Measurement in Taiwan (II)*, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan. (in Chinese))
- 盧昭堯、邱照淋、陳正炎、林 呈、王傳益 (1997)，「台灣河川流量觀測技術之開發與應用(三)」，台灣省水利局研究報告。(Lu, J.Y., Chiu, C.L., Chen, J. Y., Lin, C., and Wang, C. Y. (1997). *Development and Application of an Efficient Method for Streamflow Measurement in Taiwan (III)*, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taiwan. (in Chinese))
- 錢寧、萬兆惠 (1991)，泥沙運動力學，科學出版社，北京。(Qian, N. and Wan, Z. H. (1991). *Mechanics of Sediment Transport*, Science Press, Beijing)
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Chen, C. L., (1991). "Unified theory on Power law for Flow resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3), 371-389.
- Costa, J.E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C. and Barrick, D. (2006). "Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods." *Water Resources Research*, 42, W07422.
- Engelund, F. and Hansen, E. (1972). "A monograph on sediment transport in alluvial streams." *Teknisk Forlag*, Copenhagen, 62.
- Fukami, K., Yamaguchi, T., Iamura, H. and Tashiro, Y. (2008). "Current status of river discharge observation using non-contact current meter for operational use in Japan." *World Environmental and Water Resources Congress 2008 Alupua'a*, 1-10.
- Kimura, Y., Satoshi, I. and Hiroaki, M. (2005). "River flow information system with RF current sensors." *21st International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology*, Session 10.8, The 85th AMS Annual Meeting (San Diego,

- CA).
11. Nikuradse, J. (1932). "Gestzmassigkeiten der turbulenten Stromung in glatten Rohren." *Ver. Deut. Ing.*, Forschungsheft 356.
  12. Plant, W. J. and Keller, W. C. (1990). "Cross sections and modulation transfer functions at L and Ku bands measured during the tower ocean wave and radar dependence experiment." *Journal of Geophysical Research*, 95(C9), 16,277-16,289.
  13. Polatel, C., (2006), Large-scale roughness effect on free-surface and bulk flow characteristics in open-channel flows, Ph. D. thesis, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, U.S.A.
  14. Plant, W. J., Keller, W. C., Hayes, K. and K. Spicer (2005). "Streamflow properties from time series of surface velocity and stage." *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(8), 657-664.
  15. Rantz, S. E., and others (1982a). "Measurement and computation of streamflow." *Vol. 1. Measurement of stage and discharge*, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey.
  16. Rantz, S.E., and others (1982b). "Measurement and computation of streamflow." *Vol. 2. Computation of discharge*, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey.
  17. Ruff, J. F. (2008). *Flow measurement: history, encyclopedia of water science*, Second Edition, 1: 1, 388-393, Informa Ltd., London, UK.
  18. Whalley, N., Iredale, R. S. and Clarel, A. F. (2001). "Reliability and uncertainty in flow measurement techniques - some current thinking, Physics and Chemistry of the Earth." *Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(10-12), 743-749.
  19. Yamaguchi, T. and Niizato, K. (1994). "Flood Discharge Observation System using Radio Current meter." *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, 497, 41-50. (in Japanese)

---

2010年11月17日 收稿

2011年02月18日 修正

2011年03月04日 接受

(本文開放討論至 2011 年 09 月 30 日)