

複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用

Establishment and Application of The Multi-Automatic Discharge Measurement System for River

宋長虹⁽¹⁾、朱木壽⁽²⁾、劉俞佑⁽³⁾、蘇俊明⁽⁴⁾、黃俊仁⁽⁵⁾

⁽¹⁾巨廷工程顧問股份有限公司 總經理、水利技師
⁽²⁾國立成功大學水工試驗所 助理研究員
⁽³⁾巨廷工程顧問股份有限公司 工程師
⁽⁴⁾經濟部水利署 科長
⁽⁵⁾經濟部水利署 正工程司

摘要

現行河川流量觀測作業主要藉由水位流量率定關係而得，然而台灣地區河川多屬坡度陡流急之流況，當颱風規模漸增、流量漸大、泥砂濃度漸高、漂流物漸多，致危及操作人員及儀器安全之際，現場量測作業即無法進行，僅可利用水位觀測資料藉水位流量率定曲線採延伸外插方式推計，因此，整合先進自動化儀器量測技術，改善高流量流況下流量觀測作業之安全性及觀測資料之完整性與準確性，為水文觀測現代化之重要課題之一。本研究茲於曾文溪以非接觸式連續波微波雷達表面流速儀量測表面流速搭配雷達波水位計量測水位變化以推計流量，再輔以坡度面積法建構複合式自動化水位流量觀測系統，經 96 及 97 年於數場颱風暴雨期間以表面流速法及坡度面積法進行觀測資料分析推計流量，並與河川局實際流量觀測作業測得之流量資料比對後，其成果初步顯示運用此兩種方法推計洪水流量具實務可行性。

關鍵詞：非接觸式、複合式自動化流量觀測

一、前言

河川流量觀測為水文觀測作業重要環節，觀測資料品質之良窳及測站位置之擇定攸關流域水資源利用、生態保育措施及洪災降減之成效。然傳統之河川流量觀測主要採人力現場觀測，耗時費力且洪水期間常因作業人員之安全顧慮而無法觀測，故洪程流量觀測作業主要藉由水位流量率定曲線推計而得，囿於觀測設備精度易受橋樑等跨河構造物干擾及人員操作誤差，且河床斷面變化過程掌握不易等因素，亟待逐步依河川流量特性，建置標準斷面自動化水位流量觀測方法與評估技術，引進先進觀測儀器，提昇國內流量觀測技術與

資料品質。行政院核定之「台灣地區水文觀測現代化整體計畫第二期實施計畫」中「健全水文站網整體功能，掌握水文基本情勢」策略中之實施要項(二)：「檢討並改善台灣地區之雨量、水位流量觀測站網，掌握水文基本情勢，以健全站網體系」之項下具體工作項目，期能擇選適合河段或配合水工構造物設置標準斷面，以改善斷面、水位、流速等觀測條件，減少動床誤差，提供規劃、設計、水文分析所需之有效水理參數。」經濟部水利署爰成立委辦計畫積極辦理之。

二、標準斷面自動化水位流量站建置規劃

2.1 自動化水位流量測站規劃思考方向

河川流量觀測誤差主要來自速度項(公式係數或參數)及通水斷面積項(河床沖刷或淤積變動)之量測與計算，兩者皆有可能發生量測設備誤差與計算方法誤差。基於降低速度項及通水斷面積項之量測與計算誤差，提升流量推計準確度之理念，標準斷面自動化水位流量站設置之目的即在於克服河道變遷及底床沖淤歷程不易掌握之影響，及高流量觀測因資料不足致需採率定曲線延伸外插問題，以提升流量量測之準確度，並兼顧操作人員安全性、儀器操作維護之便利性及建立長期觀測資料之可行性，其適合量測方法之評估擇選主要由二方面思考之：

(一) 運用直接量測法提高流量量測精度

常用之河川流量觀測方法，依其流速量測方法或流量積算方法之不同可概分直接及間接量測法二類。其中，間接量測法中河川水位與流量率定曲線關係係顯示河渠斷面面積、形狀、坡度及糙率等河渠特性，惟因河道變遷及底床沖淤等影響，每年水位流量資料繪製之率定曲線即有不同，而洪水

期間因水流流速湍急，傳統流速觀測方法因需人員現場操作致施行不易，一般多以水位觀測值利用原率定曲線延伸外插方式推計流量，惟此推計值之準確度較難掌握。為能克服水位觀測間接推計流量面臨問題，一般即以坡度面積法(Slope-Area Method)、控制斷面法(Controlled section Method)、聲波都普勒流速儀或側掃式聲波都普勒流速儀(ADCP 或 H-ADCP)或微波雷達波表面流速儀等直接量測法進行自動化水位流量觀測工作，期克服洪水期間無法觀測之問題。其中，微波雷達波表面流速儀流量觀測法可藉回波條件或藉速剖定律推計水深，作為掌握測站處河床沖淤變化影響之參考。

(二) 穩定渠道斷面設計減少河床變動影響

一般而言，河川因洪水期間流量變動及河床沖淤現象，肇致水流通水斷面隨時間變化(請參見圖 1)，即

$$A(t) = A_{\text{int}} + \Delta A_{a/d}(t) + \Delta A_w(t),$$

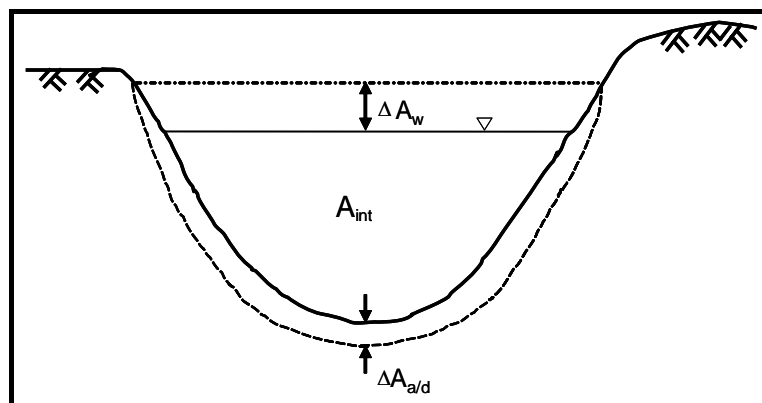


圖 1 河川通水斷面積變化示意圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

式中， $A(t)$ 為通水斷面積， A_{int} 為起始通水斷面積， $\Delta A_{y/d}(t)$ 為河床沖淤引致之通水斷面變化量， $\Delta A_w(t)$ 為水位升降引致之通水斷面積變化量。如 $\Delta A_{y/d}(t)=0$ ，表示河道斷面在洪水期間保持不沖淤之穩定狀態；倘 $\Delta A_{y/d}(T) \neq 0$ ，其中， T 為洪水延時，則表示河道經沖淤變化過程後仍恢復起始平衡狀態。基本上， A_{int} 可由斷面高程測量得之， $\Delta A_w(t)$ 則可藉由水位觀測資料配合斷面高程測量資料推計之。而 $\Delta A_{y/d}(t)$ 因涉及水流挾砂能力及底床質特性而難於洪水過程中直接量測，因此，若欲獲得準確之河川流量觀測值， $\Delta A_{y/d}(t)$ 值之推估具有關鍵影響。一般而言，為降減河床沖淤變化對河川流量推估之負面影響，傳統多選擇「穩定斷面型態」河段 (Stable Channel, 即 $\Delta A_{y/d}(t) \approx 0$) 設置水位流量站，此穩定渠道斷面須藉長期地形測量資料研判或藉河道整治等人為方式設計而得。為期流量觀測不受河床沖淤變化影響量測之準確性，除運用跨河構造物 (如攔河堰或固床工) 固定渠底高程之特性設置標準斷面外，亦可採配合河渠整治，規劃設置穩定渠道 (stable channel) 斷面。穩定渠道設計方法可概分為砌面渠道 (lined channel)、經驗公式 (empirical method 或稱 regime theory)、最大允許流速設計法、拖引力設計法及數值模擬法等。然因天然河川渠道底床於洪水過程中多係呈沖淤互見狀態，依穩定渠道斷面設計方法設置定型化渠道，需注意下列事項：

1. 穩定河渠設計概念可概分為鋪面保護，不淤積 (經驗公式)、不沖刷 (始動流速/始動剪應力)，其考量條件包括流量、底床質、輸砂率及河渠幾何斷

面諸項，因河川流量屬變量流況，且底床質呈級配分布，若欲以人為方式設計達不沖不淤穩定狀態有其困難，僅能藉此分析河段應如何整治能趨於穩定方向發展，降減河床沖淤變化對流量觀測之影響。

2. 流量測站上下游範圍應長期進行斷面量測作業，包括洪水前後之量測，以配合底床質、流量資料分析其穩定性發展條件，逐步進行修整，以建構穩定河床。

2.2 標準斷面自動化水位流量站建置規劃方向

衡酌台灣地區河川多屬坡陡流急之流況，且豐枯流量差距懸殊，穩定渠道斷面設置之後續維護作業實屬不易，因此規劃之標準斷面自動化水位流量站除因其他目的所建之水利工程設施 (如攔河堰或固床工) 河段，可形成控制斷面或穩定渠道條件者外，不刻意規劃設計穩定渠道斷面。規劃作業將衡酌河川流域現有水位流量站，配合其歷年實測斷面資料研判河渠沖淤變動趨勢，作為選擇適合設置標準斷面自動化水位流量站之河段參考依據。

各中央管河川之標準斷面自動化水位流量站站址主要以現有水位流量站依流域觀測網、河相穩定條件、區位環境配合條件等三項檢討原則進行篩選，選定之河段如原已設置跨河水工構造物 (如攔河堰或固床工)，利用構造物具有不沖淤特性，且因斷面條件引致自由跌流而產生臨界水深之水理狀況，可採控制斷面法施測流量，據以建立恆定之水位流量定率關係，提高量測精度；倘無可形成控制斷面之設施者，則可依據河床穩定性與否作為量測方

法之擇選判斷之基準。量測儀器方面經衡酌人員操作及儀器安全需求，主要採非接觸式之連續波微波雷達表面流速儀量測表面流速搭配雷達波水位計量測水位變化以推計流量，再輔以坡度面積法及原水位流量率定曲線推計流量以相互檢核比較，依此原則建構複合式之標準断面自動化水位流量觀測系統，期於長期運轉後能建立各觀測法之適切觀測範圍，以兼顧低中高流量觀測作業需求。其中，坡度面積法係於河段上下游分別設置主水位站及輔助水位站，測得水面坡降以推算流量，站址間距之決定，須考量其水位差變動範圍及儀器量測精度。連續波微波雷達主要採多點併聯方式載掛於橋樑或跨河構造物上游側，利用速剖公式依測得各點位表面流速推計

該位址之水深變化，藉以推估洪水歷程中該断面之沖淤變化情形(參見圖 2)。

此外，標準断面自動化水位流量站設置係以非觸式長期自動化連續觀測為目標，惟設站初期仍需各類量測方法均須藉由計算公式推計流量，各公式引入之參數需經由長期觀測資料校核之，因此，設站初期仍需結合經常流量觀測作業建立之水位流量率定曲線進行校核；為提升相關參數推計準確性，為能提高其推計流量之準確性，於中低流量條件下利用 ADCP 進行全断面流速分布觀測，以率定曼寧公式之曼寧糙率 n 及坡度面積法相關係數，如能量修正係數 α 及動量修正係數 β 等相關參數。

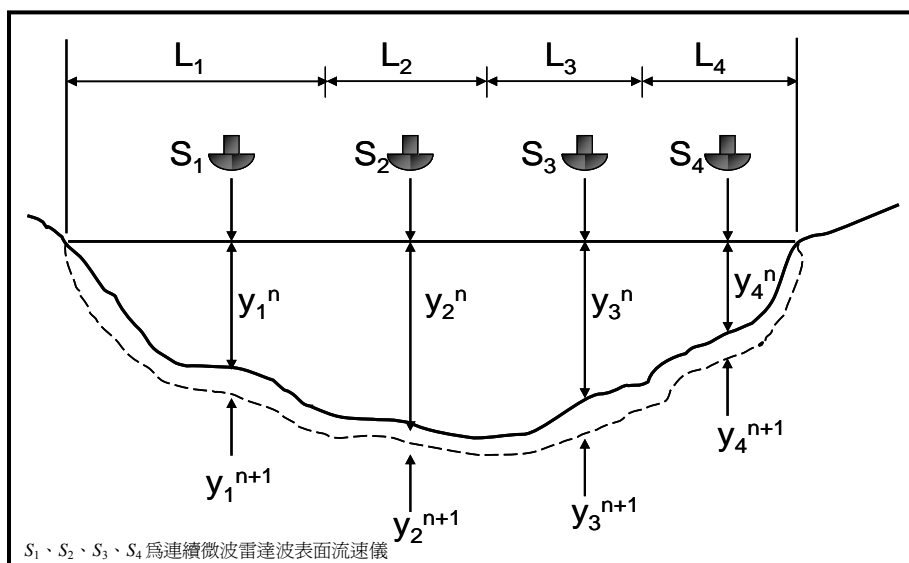


圖 2 多點併聯式連續波微波雷達量測系統推知底床變化量示意圖

2.3 標準断面自動化水位流量站系統架構

標準断面自動化水位流量站量測系統整體架構包括量測儀器單元、電力單元、

通訊傳輸單元及資料紀錄單元及後端觀測資料分析單元，其系統架構如圖 3 所示。各部單元之功能特性說明如后。

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

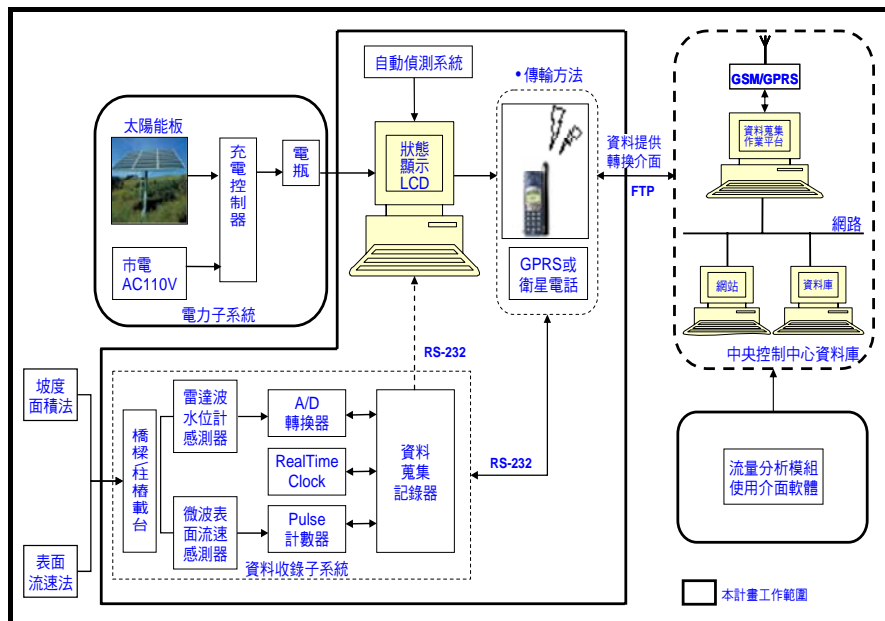


圖 3 標準断面自動化水位流量站量測系統規劃架構示意圖

(一)量測儀器及載掛方式

經濟部水利署規劃建置之標準断面自動化水位流量站採用之量測儀器主要為非接觸式之雷達波水位計及連續波微波雷達表面流速儀，其中，連續波微波雷達表面波流速儀係採多點併聯方式掛載於橋樑或跨河構造物下方以量測同一断面不同橫向位置之表面流速，再據以推計水深、全断面平均流速及流量。因其係以適當俯角向上游觀測，其量測位置距墩柱一段距離，水流流場可不受墩柱影響。另，雷達波水位計則需置放於待測水體表面正上方，其儀器載掛方式可分為水位塔、橋樑或跨河構造物、柱樁載台、門樑支架、懸臂式支架、棧橋幾種方式，經衡酌對河川流場影響及施設維護等項目，主要採柱樁或橋樑為載台方式載掛雷達波水位計作為規劃設計方向。不同量測方法之儀器載掛方式規劃原則如下：

1.坡度面積法：於測站站址上、下游利

用現有跨河構造物(如橋樑)或施設柱樁觀測塔載掛非接觸式之雷達波水位計，自動記錄兩断面間之水位差。

2.控制断面法：於控制断面構造物上游端之上游 3 至 4 倍最大水頭距離處，利用橋樑、跨河構造物或施設懸臂支架、棧橋、柱樁觀測塔等建造物以載掛非接觸式雷達波水位計進行量測。

3.表面流速量測法：表面流速儀係採多組併聯方式掛載於橋樑或跨河構造物上游側下方位置，以量測同一断面不同橫向位置之表面流速，再據以推計水深、平均流速及全断面平均流速及流量。

(二)電力系統：

1.以太陽能光電系統為主要電源，台灣電力公司供應 110V 交流市電則為備援供應系統，由電力切換模組進行控制。電源藉自動充電機對外接蓄電池組進行充電，俾於電力來源均中斷期

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

間，可提供系統運作至少 7 至 14 日之備用電力，以確保觀測站正常運作。

- 2.倘架設市電有困難之處，則以太陽能光電系統為主要供電來源。
- 3.裝設標準型式避雷裝置以防落雷襲擊對儀器設備之影響。

(三)通訊方式：

- 1.主要利用 GPRS 整體封包無線電服務連結網際網路，以 FTP 公開化檔案傳輸協定將收錄的資料隨時回傳控管中心供後續資料統計分析。
- 2.以有線電話為備援系統，當 GPRS 無線電話線路中斷時，可自動改用備援之有線電話傳輸資料，俾傳輸作業不致中斷。

三、測站建置情形

經濟部水利署茲依前述規劃於曾文溪及頭前溪建置標準断面自動化水位流量觀測系統，本文僅以曾文溪之觀測系統配置情況分述如后。

3.1 測站量測系統配置

曾文河流域之標準断面自動化水位流量站選定之設置地點係位於曾文二號橋(曾斷 78.1)與渡仔頭溪匯入點前曾斷 76 間之河段，其間距離約 1,130 公尺，曾文溪自曾文二號橋即進入人口、產業密集之平原地區，流量觀測有其重要性，目前於曾文二號橋即為新中水位流量站站址，其流量觀測資料亦可與既有之水位流量率定曲線推計之觀測資料進行比較。示範站係以曾文二號橋現有水流量測設施作為主要水位站，配合於曾斷 76 處設置輔助水位站，建構坡度面積法流量測站，同時二號橋上游側設置 1 套多點併聯式連續波微波雷達

(四)資料紀錄功能：

- 1.為防通訊中斷導致量測資料無法傳輸，採用資料收錄系統(Datalogger)將儀器測得之水位、流速等訊號收錄存檔。
- 2.除透過檔案傳輸協定(FTP)將收錄資料傳回控制中心整理分析外，並可在必要時下載新的系統設定及更新量測參數，以遠端變更觀測或傳輸資料時距。
- 3.設計可監看蓄電池電力容量狀態功能，以利電力狀況之掌握。系統設計於電力完全中斷後，當電力恢復供應時可自動復歸原設定參數，讓測站相關功能可立即恢復以持續正常運作。

表面流速觀測系統進行流量觀測，俾綜合比較表面流速法與坡度面積法及水位流量率定曲線量測結果，各方法儀器配置如下：

(一)表面流速法

曾文二號橋上游側橋面配置裝設 1 組併聯式連續波微波雷達表面流速儀量測断面橫向不同位置之水流表面流速，配合雷達波水位計測定水位，以建立非接觸式量測系統推計其流量。

(二)坡度面積法

於曾文二號橋下游 1.13 公里處主深槽右側約 30 公尺處之台電公司嘉南供電區營運處配電塔近主深槽之臂樑末端設置雷達波水位計，俾與曾文二號橋水位流量站間以坡度面積法推計流量。

(三)率定曲線法

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

曾文二號橋下游側為經濟部水利署設置之新中水位流量站，經濟部水利署第六河川局每年均製作其水位流量率定曲線，因此可由測得水位資料以前一年之率定曲線推計其對應流量。

3.2 儀器規格

(一)量測儀器系統

- 1.量測儀器設備：雷達波水位計、連續波微波雷達表面流速儀。
- 2.相關儀器設備：資料記錄器、數據傳輸發送接收設備、電力供應系統、戶外型防水儀器箱、防雷擊相關設備、水位標示水尺、台電塔基直立爬

梯護欄及臂樑末梢護欄。

(二)量測儀器安裝地點及數量

- 1.雷達波水位計：曾文二號橋、曾文溪橋各裝設 2 具，曾文二號橋下游主深槽旁台電塔基之臂樑末梢裝設 1 具，共計 5 具。
- 2.連續波微波雷達表面流速儀：曾文二號橋裝設固定式之連續波微波雷達表面流速儀計 10 具天線。

曾文二號橋 2 具雷達波水位計及 10 具微波雷達表面流速儀之安裝位置如圖 4 所示。各項量測儀器安裝地點之相對位置如圖 5 所示。

四、流量分析方法說明

自動化水位流量測站量測儀器觀測資料為水位及表面流速等物理量，需藉由流量分析公式推計其流量值，本文主要利用

坡度面積法及表面流速法，各流量分析方法概述如后。

4.1 坡度面積法

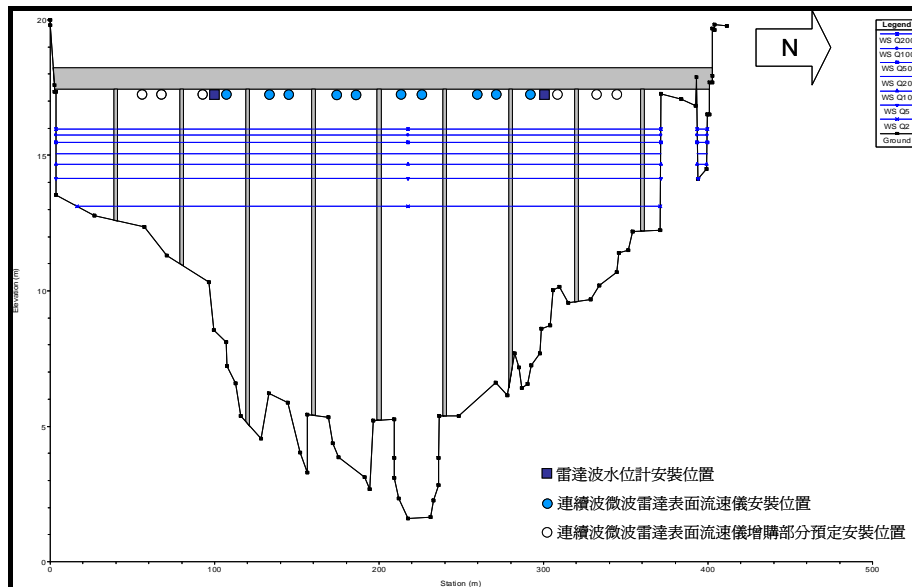


圖 4 曾文溪曾文二號橋設備安裝位置示意圖

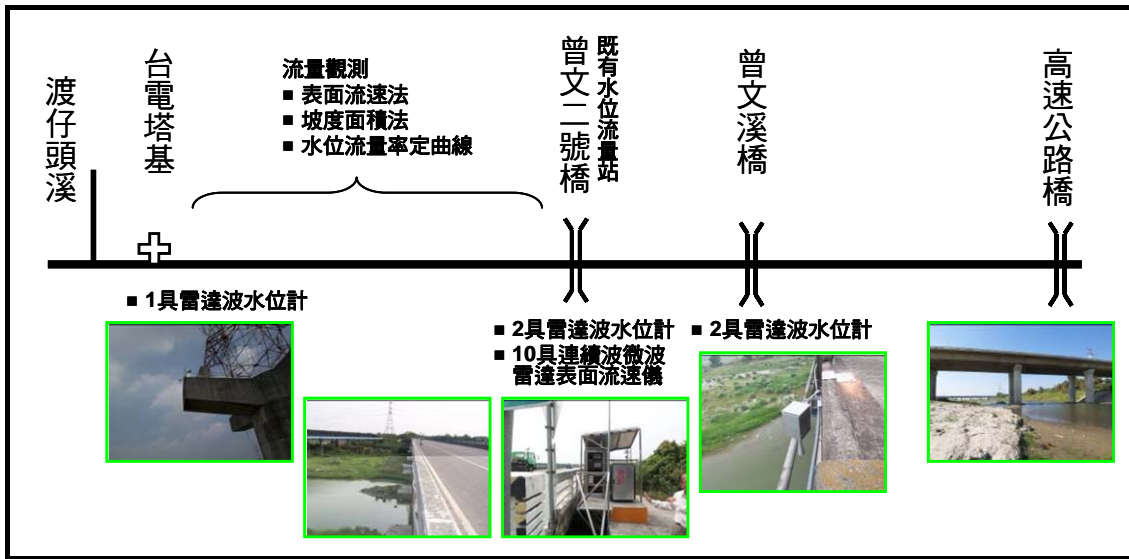


圖 5 曾文溪流量觀測系統儀器設備配置示意圖

坡度面積法依 ISO 1070 之規範內容，一般係應用於具穩定底床與邊坡之勻直河段，應可相當準確地推算流量。其中，流速之推估係以曼寧公式為之，乘以斷面積後，可得斷面平均流量 Q ，即，

$$Q = \int V(h)dA(h) = \bar{V}A = \frac{1}{n}R^{2/3}S_f^{1/2}A, \quad (1)$$

式中， \bar{V} 為平均流速， R 為水力半徑， S_f 為能量坡降， n 為曼寧糙度係數， A 為通水斷面積。實務上，能量坡降計算可有二種處理方式，

$$S_f = S_0 - \frac{\partial Y}{\partial x} = S_w - \frac{h_u - h_d}{L}, \quad (2)$$

$$S_f = S_w + \frac{dh_v}{L} = \frac{(h_u - h_d) + \left(\frac{\alpha_u V_u^2}{2g} - \frac{\alpha_d V_d^2}{2g} \right) (1 - K_e)}{L} \quad (3)$$

式中， h_v 為速度水頭， h_u 、 h_d 為上下游水位， α 為流速修正係數， K_e 為能量損失係數，各物理量之意義請參見圖 6。如運用方式(2)可直接由上下游水位推求河段平均流量，倘運用方式(3)則須以下列程序進行疊代，

1. 上下游水文站址之通水面積(A)，水

力半徑(R)，曼寧係數(n)及河段水面坡降(S_w)。

2. 上下游水文站址之輸送值 (conveyance)(K_u 及 K_d)

$$K_u = \frac{1}{n_u} R_u^{2/3} A_u, K_d = \frac{1}{n_d} R_d^{2/3} A_d \quad (4)$$

3. 算河段平均輸送值 K

$$K = (K_u K_d)^{0.5} \quad (5)$$

4. 設速度水頭差為零，則能量坡降 (S_f) 等於水面坡降(S_w)，利用 S_w 計算河段平均流量

$$\bar{Q} = K S_w^{1/2} \quad (6)$$

5. 計算上下游水文站址間之速度頭能量損失

$$dh_u = \frac{\bar{Q}^2}{2g} \left(\frac{\alpha_u}{A_u^2} - \frac{\alpha_d}{A_d^2} \right) (1 - K_e) \quad (7)$$

6. 計算能量坡降

$$S_f = \frac{(h_u - h_d) + dh_u}{L} \quad (8)$$

7. 利用 S_f 計算河段平均流量

$$\bar{Q} = K S_f^{1/2} \quad (9)$$

8. 重複步驟 5 至 7 直至收斂至給定精度範圍內。

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

4.2 表面流速法

由微波雷達表面流速儀測得表面流速後(參見圖 7)即可利用指數律速度剖面公式推算平均流速及水深，指數律速剖公式為

$$\frac{\bar{u}_s}{u_*} = a \left(\frac{h}{z'} \right)^m \quad (10)$$

式中 \bar{u}_s 為表面流速， h 為水深， u_* 為剪力速度 $= \sqrt{\tau/\ell} = \sqrt{gRS_f}$ ， R 為水力半徑；天然河川中， $z' = k_s/30$ ， k_s 為底床粗糙長度(roughness length)則水深與表面流速關係式

$$h = \left(\frac{\bar{u}_s k_s^m}{A(1+m)\sqrt{gS_f}} \right)^{\frac{2}{2m+1}} \quad (11)$$

其中， A 為經驗係數，與 a 、 m 及相

對糙度 h/k_s 有關，可表示為

$$A = 30^m a / (1+m) \quad (12)$$

於天然河川中，根據 Manning-Strickler 的經驗公式，得 $m=1/6$ 、 $A=7.68$ ，Engelund(1972)則建議 $m = 1/8$ 、 $A = 9.45$ 。錢和萬(1991)由實測資料分析顯示在 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 公式則適用在 $13 < h/k_s < 15,000$ 時，即水深較大或底床粒徑小的河川較合適。圖 8 為底床剪應力及流速關係與底床型態有明顯變化，換言之，無因次表面速度參數與無因次水深參數之速剖關係將隨河川底床沖淤變化有關。

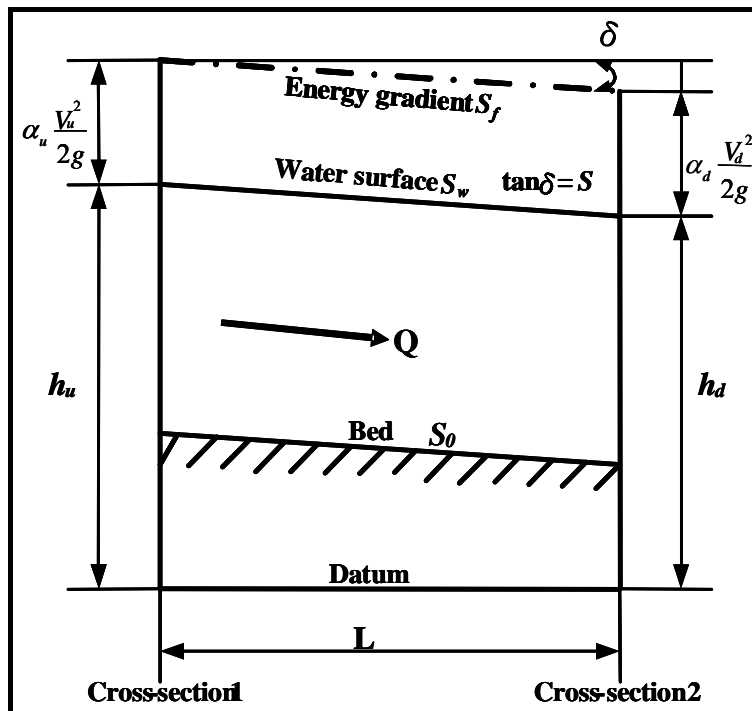


圖 6 沿河道單寬能量變化示意圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

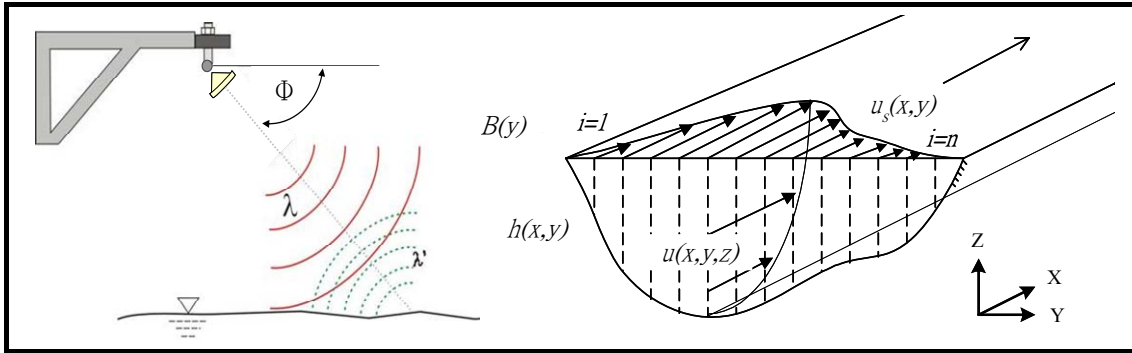


圖 7 微波雷達量測方法示意圖

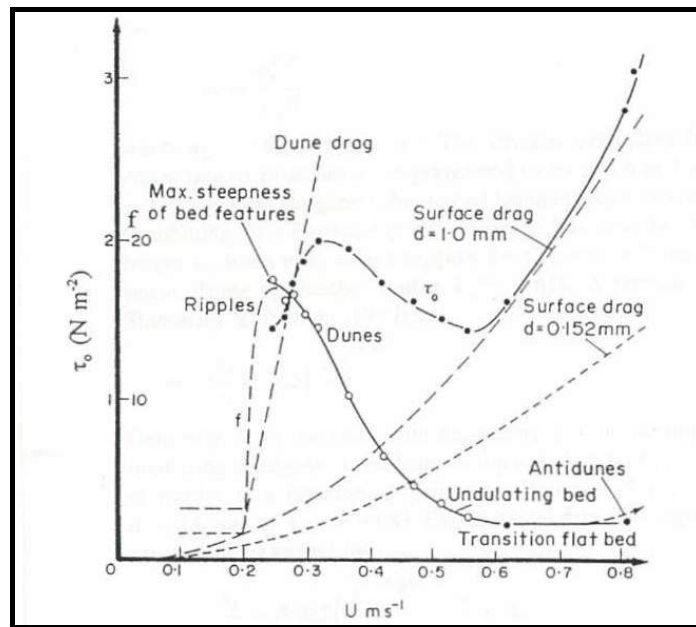


圖 8 底床剪應力及流速關係圖

由推算之平均流速及水深據以推計流量(參見圖 9)，其步驟有三，

1. 橫斷面由表面流速分段計算水深與

平均流速，

2. 計算分段通水面積與平均流速之乘積，

3. 總合分段流量值， $Q = \sum V \cdot dA$ 。

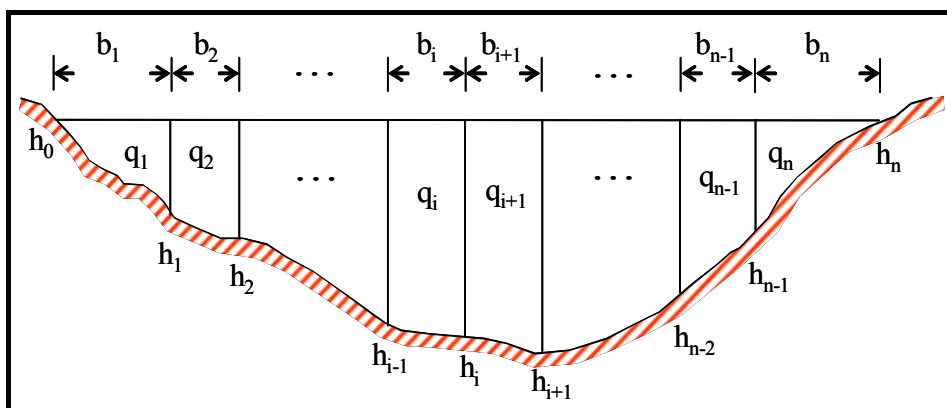


圖 9 流速面積法示意圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

五、流量推計方法探討

示範站之流量推計方法有坡度面積法，表面流速法及測站轄管河川局之率定曲線法。本文茲整理民國 96、97 年侵襲台灣之颱風基本資料如表 1 所示。因各颱風對台灣各地區影響程度不一，為利評估分析茲篩取曾文溪曾文二號橋站超逾二年重現期降雨之柯羅莎、鳳凰、辛樂克及薔蜜颱風事件，依其觀測系統上下游測站水位及表面流速資料進行分析。

5.1 表面流速法探討

表面流速法推測流量資料分析程序概為：

- 1.繪製上下游測站觀測水位及歷線值(如圖 8 所示)，
- 2.坡度面積法計算流量值 Q 及觀測河段之能量坡降值 S_f ，
- 3.計算底床剪力 τ 及剪力速度值 u_* (參見圖 9 所示)，
- 4.依河床質粒徑 d_{75} (參見表 2)及底床型態給定底床粗糙長度 k_s ，
- 5.繪製無因次表面流速參數 u_s / u_* ，與無因次水深參數 h / z' 關係圖(參見圖 10 及圖 11)。

表 1 96、97 年度示範站颱風豪雨期間資料觀測狀況表

颱風名稱	警報期間	強度	曾文溪測站觀測資料狀況
帕布 PABUK	96/08/06~08/08	輕度	-(未達 2 年重現期洪水位)
梧提 WUTIP	96/08/08~08/09	輕度	-(未達 2 年重現期洪水位)
聖帕 SEPAT	96/08/16~08/19	強烈	-(未達 2 年重現期洪水位)
韋帕 WIPHA	96/09/17~09/19	中度	-(未達 2 年重現期洪水位)
柯羅莎 KROSA	96/10/0~10/07	強烈	○(近 20 年重現期洪水位)
米塔 MITAG	96/11/26~11/27	中度	-(未達 2 年重現期洪水位)
卡玫基 KALMAEGI	97/07/16~07/18	中度	△
鳳凰 FUNG-WONG	97/07/26~07/29	中度	○(達 5 年重現期洪水位)
如麗 NURI	97/08/19~08/21	中度	-(未達 2 年重現期洪水位)
辛樂克 SINLAKU	97/09/11~09/16	強烈	○(近 5 年重現期洪水位)
哈格比 HAGUPIT	97/09/21~09/23	中度	-(未達 2 年重現期洪水位)
薔蜜 JANGMI	97/09/26~09/29	強烈	○(達 2 年重現期洪水位)

註：「○」表已達豪雨標準，「-」表未達豪雨標準，「x」表遭竊致無資料，「△」表資料紀錄不完整。

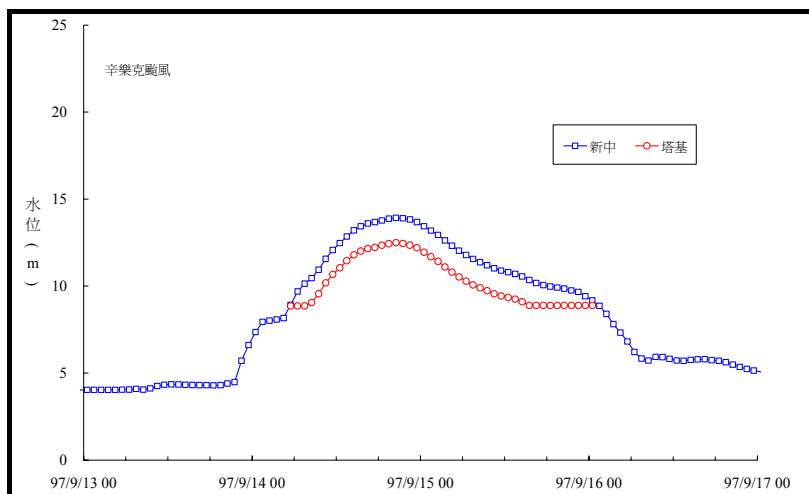


圖 8 辛樂克颱風期間曾文溪示範站上下游測站觀測水位歷線

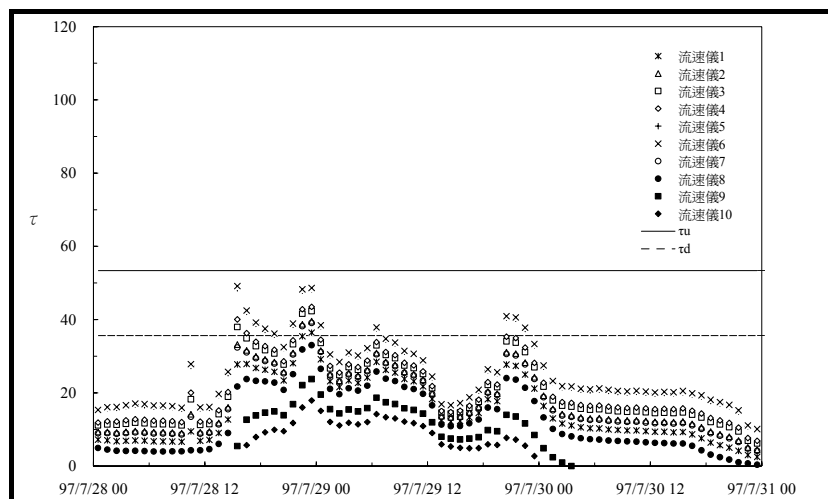


圖 9 辛樂克颱風期間曾文溪示範站底床剪力

表 2 曾文溪歷次河床質平均粒徑及代表粒徑分析成果比較表

斷面編號	平均粒徑 dm (mm)			代表粒徑 (mm)									備註
				d_{50}			d_{65}			d_{75}			
	63 年	79 年	94 年	63 年	79 年	94 年	63 年	79 年	94 年	63 年	79 年	94 年	
21	0.160	0.023	0.0228	0.160	0.015	0.014	0.170	0.023	0.020	0.180	0.032	0.026	國聖大橋
39	0.270	0.025	-	0.210	0.016	-	0.270	0.026	-	0.310	0.037	-	
58	0.260	0.033	0.0967	0.230	0.027	0.021	0.305	0.041	0.045	0.345	0.051	0.080	麻善大橋
79	0.300	0.038	-	0.170	0.032	-	0.250	0.046	-	0.320	0.055	-	
88	27.30	0.165	0.0554	0.670	0.052	0.036	20.000	0.086	0.065	53.000	0.130	0.083	北勢洲橋
100	47.80	67.87	87.870	32.00	56.00	73.50	61.00	89.00	124.00	78.00	115.00	140.00	二溪大橋
123	79.80	126.72	129.790	61.50	109.00	113.00	107.00	152.00	170.00	140.00	190.00	205.00	走馬瀨橋

資料來源：經濟部水利署第六河川局，「曾文溪治理、區域排水及都市計畫之整體排洪關係」，民國 95 年。

由圖 10 至圖 11 可知，觀測之表面流速與水深關係與 Manning-Strickle 經驗公式 ($m=1/6$, $A=7.66$) 及 Engelund 建議值 ($m=1/8$, $A=9.45$) 之速剖曲線比較後，顯示天然河川觀測之無因次表面流速與水深參數關係較散亂，此原因乃速剖公式係基於穩流 (steady state) 條件，所推導而得此與天然河川洪水流量為變量流過程有別且底床

型態亦隨洪水漲落而有變化，速剖公式中 u_* 值及 k_s 值之給定亦為具時變特性之局部 (local) 物理量等因素而肇致此散亂情況。倘由表面流速代入速剖公式推算水深及平均流速之計算流程，會因表面流速散亂狀況肇致推算水深不合理現象而影響流量推計合理性。因此，本文茲另採流速比概念進行流量推計。其程序說明如下：

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

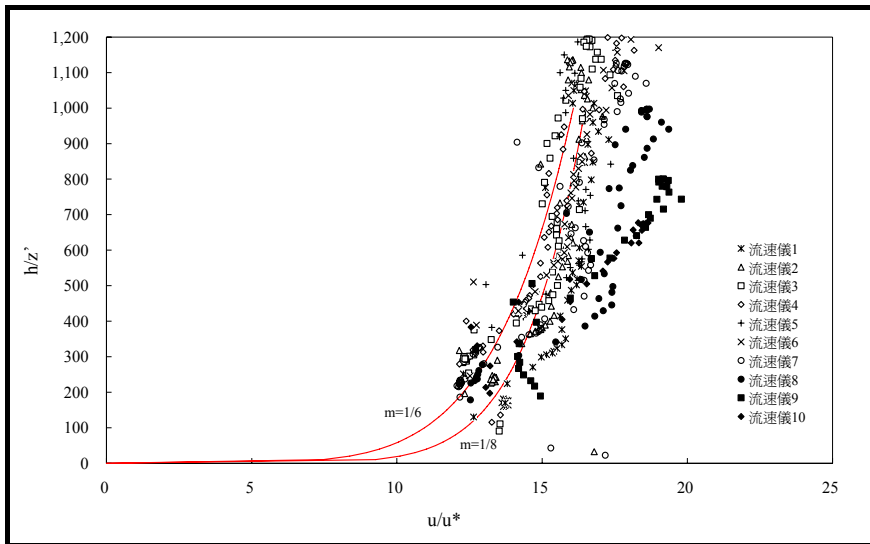


圖 10 柯羅莎颱風期間曾文溪測站表面流速與水深無因次關係圖

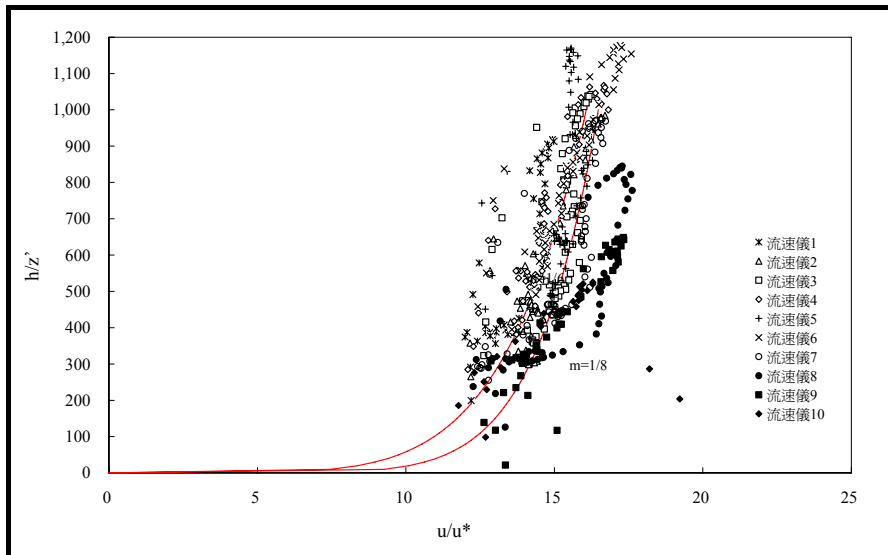


圖 11 薔蜜颱風期間曾文溪測站表面流速與水深無因次關係圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

1. 假設底床在洪水過程中不沖不淤。為確定此假設合理性，則依據底床泥砂粒徑資料推估始動臨界剪應力值，即

$$\tau_c = (0.04 \sim 0.06)(\gamma_s - \gamma)D \quad (13)$$
 與坡度面積法計算之底床剪應力相較(如圖 9)由圖中顯示颱風過程底床變動不大。較圖 12 兩處示範站斷面測量成果顯示假設尚屬合理。
2. 假設平均流速與表面流速存在比例關係，即依幕次律流速分布公式將

(10)式水深積分平均後可得平均流速 U 與表面流速 u_s 之關係為

$$\frac{U}{u_s} = \frac{1}{1+m} \left(\frac{k_s}{30h} \right)^{m+1} \left[\left(\frac{30h}{k_s} + 1 \right)^{m+1} - 1 \right] \quad (14)$$

可得，

$$U = \alpha u_s \quad (15)$$

其中， α 稱為流速比。由速剖公式可知，曾文二號橋測站之流速比 α 值與水深變化關係如圖 13 所示，本文令 α 值為 0.85。

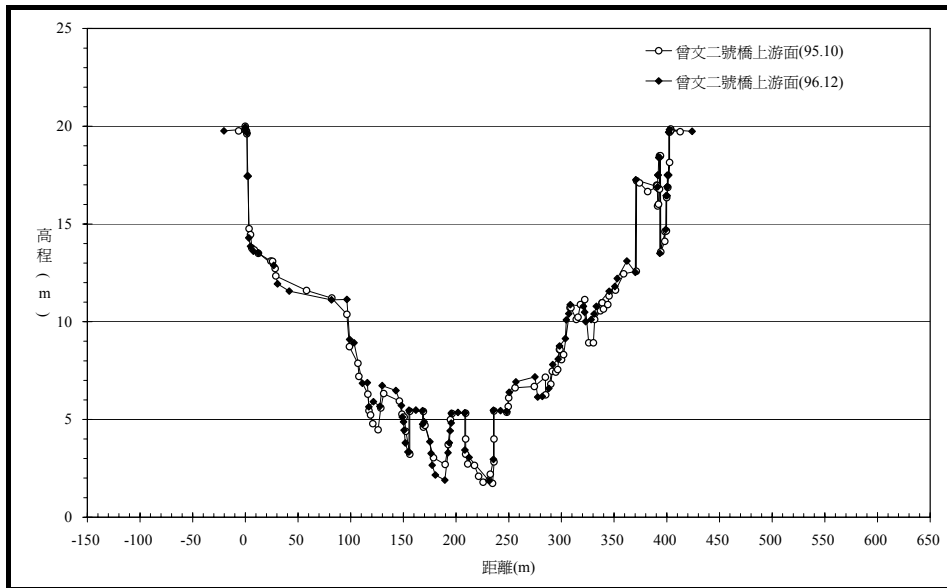


圖 12 95 年 10 月及 96 年 12 月辦理曾文二號橋斷面測量成果圖

3.由各表面流速值推計平均流速後，運用式(16)方式推計流量，

$$Q = \int_0^{B_w} (U \cdot h) dx \approx \sum_{i=0}^n \left[\frac{1}{4} (U_i + U_{i+1}) \cdot (h_i + h_{i+1}) \cdot \Delta B_{wi} \right] \dots\dots\dots (16)$$

曾文溪測站於 96 年柯羅莎颱風及 97 年鳳凰、辛樂克及薔蜜颱風期間流量推估成果如表 3、圖 14 至圖 17 所示，除列示坡度面積法及表面流速法之推計成果外，亦將率定曲線法推計之流量值繪製其中，因第六

河川局亦在某些颱風過程中曾進行洪流觀測，其成果亦標示以資比較。推估資料顯示坡度面積法及表面流速法之推計流量大於河川局 96 年製作之率定曲線推計值，尤以洪峰期間更為明顯。

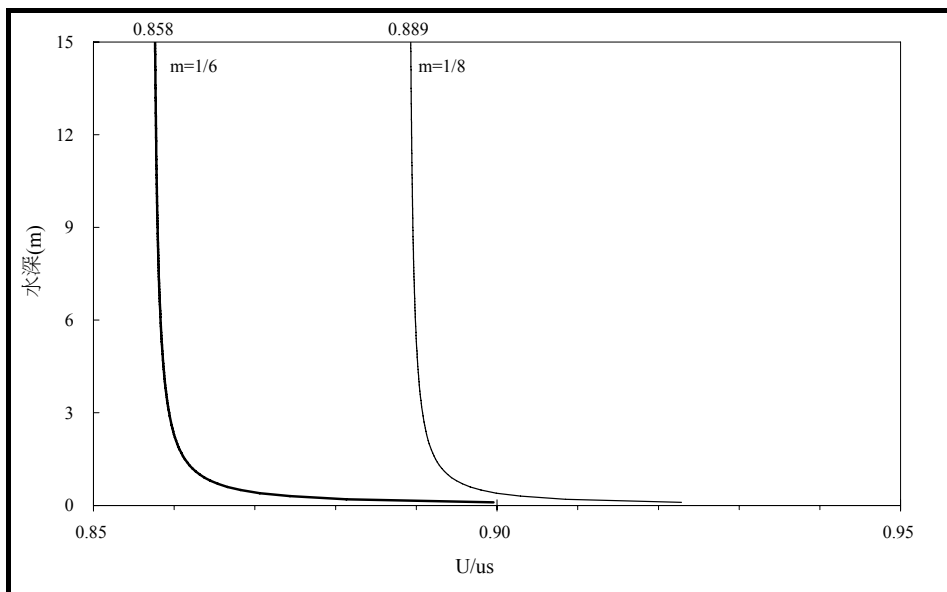


圖 13 曾文溪測站水深流速比關係圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

表 3 曾文溪示範站不同方法推計之洪峰流量值比較表

推算方法	$Q_p(\text{cms})$	柯羅莎颱風	鳳凰颱風	辛樂克颱風	蓄蜜颱風
表面流速法		7,547	3,586	5,274	4,694
坡度面積法(ISO)		7,268	3,457	5,192	4,605
率定曲線法		5,101	3,253	4,314	3,950
曾文水庫洩洪量		4,850	1,550	2,840	1,940

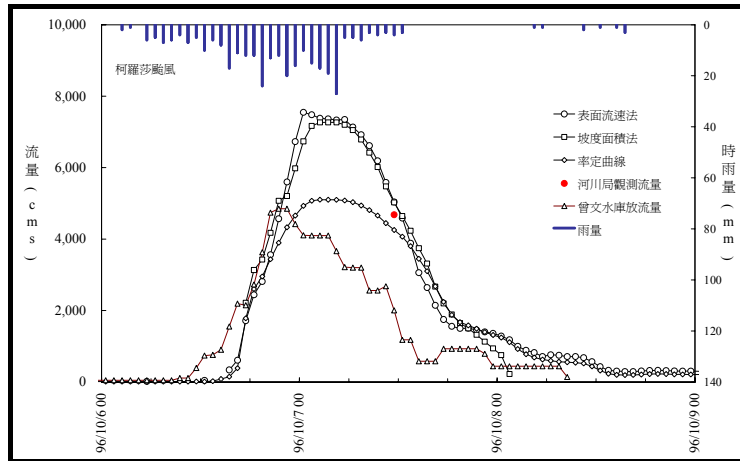


圖 14 96 年 10 月柯羅莎颱風期間曾文溪測站流量推估歷線圖

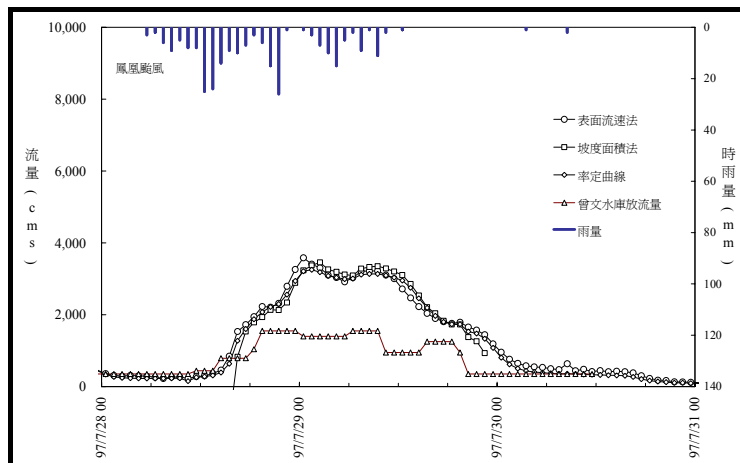


圖 15 97 年 7 月鳳凰颱風期間曾文溪測站流量推估歷線圖

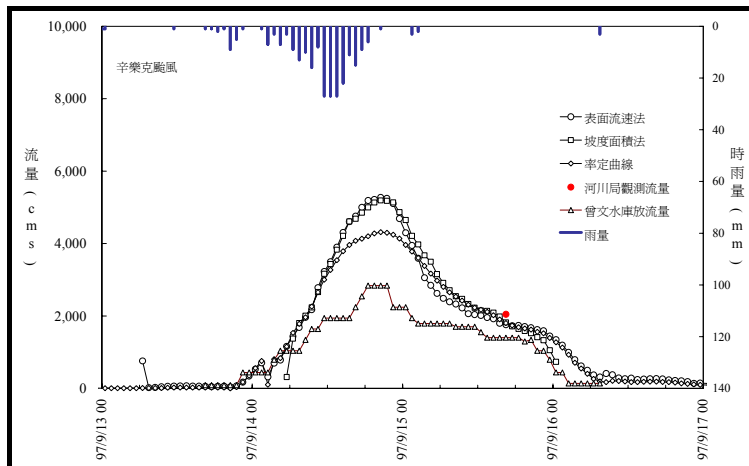


圖 16 97 年 9 月辛樂克颱風期間曾文溪測站流量推估歷線圖

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

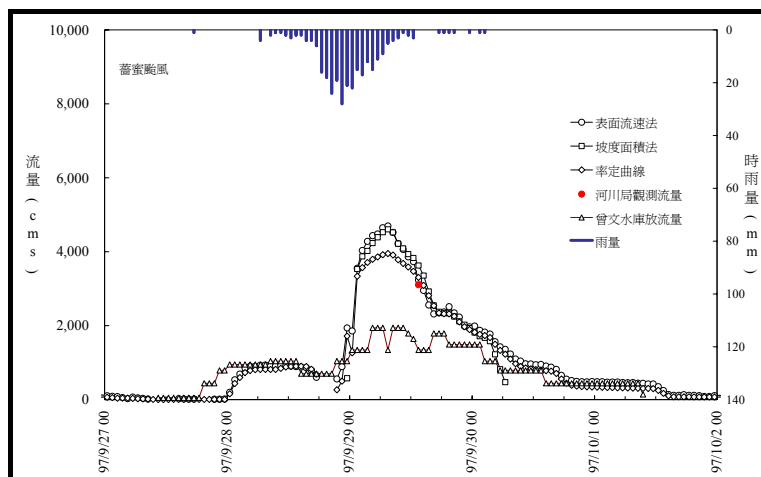


圖 17 97 年 9 月蓄蜜颱風期間曾文溪測站流量推估歷線圖

5.2 各流量推計方法適合性探討

經比較可發現表面流速法與坡度面積法計算之流量值較近，與率定曲線法有較明顯差異，河川局實測值則與本文坡度面積法與表面流速法推計值較接近。倘以河川局辦理之流量觀測值進行比較(如表 4 所示)，顯示不同推計方法與觀測流量值差異均小於觀測值 20%，較佳者可達 4%。由圖 18 中曾文溪測站以傳統率定曲線推計之流量，明顯低於坡度面積法推計之水位流量關係值，顯示因傳統率定曲線於高流量期間採外差延伸方式推計流量之處理仍有不足之處，而自動化流量推計方式於人員機具操作安全考量下無法實際觀測

時，應可作為洪峰流量推計之參考。

此外，颱風期間觀測之表面流速可利用 11 式推計對應之水深，以觀測水位扣減斷面測量底床高程值之固床水深 $h_o(t)$ ，倘 $h(t) - h_o(t) > 0$ ，則表示底床呈淤積狀態；倘 $h(t) - h_o(t) < 0$ ，則表示底床呈冲刷狀態；倘 $h(t) - h_o(t) = 0$ ，則表示底床呈不沖不淤狀態。由曾文溪測站於辛樂克及蓄蜜颱風期間觀測之表面流速及水位資料，推計其颱風過程之水深變化情形如圖 19 及圖 20，可做為颱風期間底床變化情形之參考，未來倘可利用底床變動觀測儀器進行比對，即可驗證其推計準確度。

表 4 曾文溪示範站不同推計方法推估流量值與觀測流量值比較表

推算法	柯羅莎颱風	辛樂克颱風	蓄蜜颱風
表面流速法	5,039 (8%)	1,760 (14%)	3,233 (4%)
坡度面積法(ISO)	5,027 (7%)	1,823 (11%)	3,626 (17%)
率定曲線法	4,254 (9%)	1,805 (12%)	3,305 (6%)
河川局觀測流量	4,682 (-)	2,046 (-)	3,106 (-)

註：括弧內值為流量推計值與河川局洪水期間觀測值之差值百分比

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

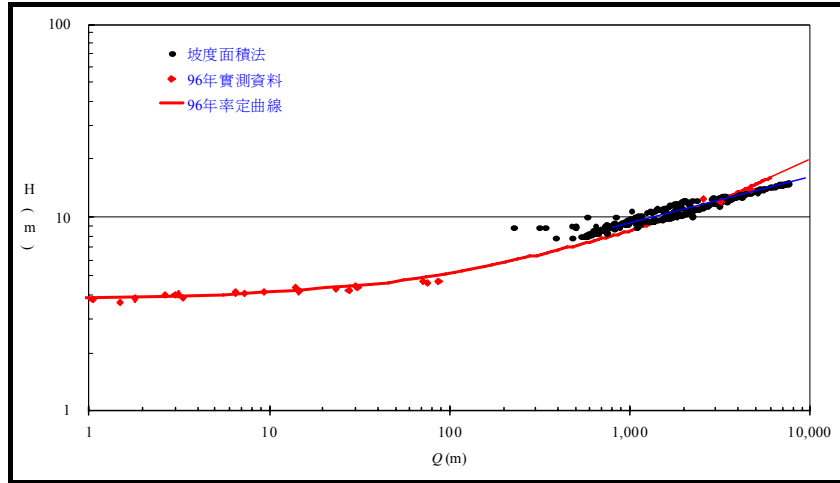


圖 18 曾文溪測站率定曲線延伸及坡度面積法率定結果比較圖

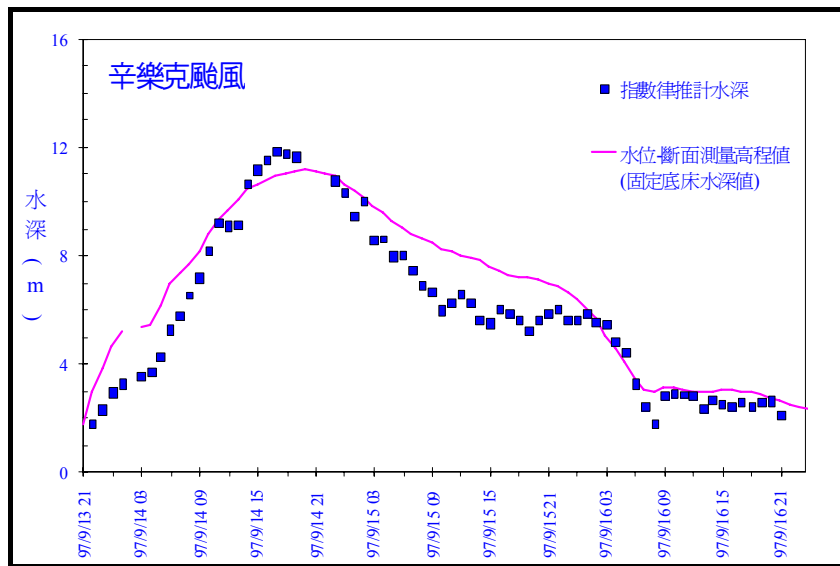


圖 19 辛樂克颱風期間曾文溪測站推算水深和底床不動水深的比較

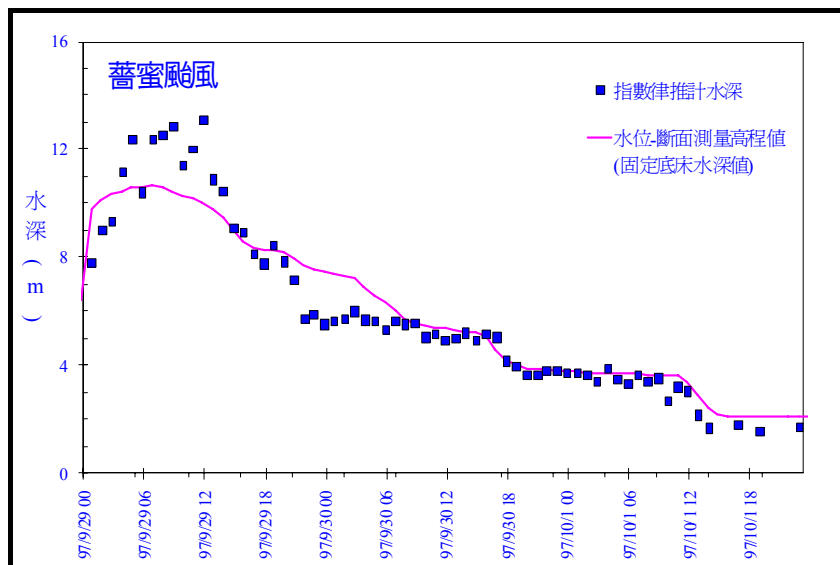


圖 20 薔蜜颱風期間曾文溪測站推算水深和底床不動水深的比較

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》

六、結論與建議

6.1 結論

- 1.依標準斷面自動化流量觀測系統設計建置之曾文溪測站，於96年及97年數場颱風事件觀測紀錄資料，以坡度面積法及表面流速法進行分析檢討，其成果與率定曲線法及河川洪水觀測流量值相比較，初步顯示運用此兩種方法推計洪程流量具實務可行性。
- 2.採用非接觸式流量量測系統，可快速、連續觀測全洪程流量變化，因其無需人力現場操作，可省卻傳統

流量觀測作業人員及機具操作安全顧慮，且可利用無線或有線傳輸方式將即時資料傳回遠端資訊系統，可提供監控及相關分析應用。

6.2 建議

- 1.加強測站傳統流量觀測頻度，以增加流量資料比對基準。
- 2.可運用超音波都普勒流速測量儀器 ADCP 辦理平常流量觀測及藉增加颱風事件前後斷面測量頻率方式，持續檢討坡度面積法參數及表面流速法流速比值給定之合理性。

七、參考文獻

- 1.Chen, C. L., 1991, "Unified theory on Power law for Flow resistance," J. Hydraul. Eng., Vol. 117, No. 3., pp. 371-389.
- 2.Costa, J.E., et al., 2000, Measuring stream discharge by non-contact methods: a proof-of-concept experiment, Geophys. Res. Let., vol.27, No.4, pp.553-556.
- 3.Costa, J.E., et al., 2006, Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods, Water Resources Research, Vol. 42, W07422.
- 4.Fukami K., T. Yamaguchi, H. Iamura, Y. Tashiro, 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.
- 5.Haeni, F.P., et al., 2000, Ground-penetrating radar methods used in surface-water discharge measurements, Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar: University of Queensland, Queensland, Australia, p.494-500.
- 6.ISO 1070, 1992, Liquid flow measurement in open channels—Slope-area method.
- 7.錢寧、萬兆惠,1991,「泥沙運動力學」,科學出版社,北京,第206-209頁。
- 8.李明靜,2003,「河川表面流速與流量非接觸式量測方法之發展及應用」,國立成功大學水利及海洋研究所博士論文。
- 9.經濟部水利署,2005,「水文觀測站新建暨改善流量觀測工程規劃」。
- 10.經濟部水利署,2006~2007,「中央管河川流量量測規劃改善計畫及工法之擬定(1)~(2)」。
- 11 經濟部水利署,2008,「中央管河川自動化流量站設置與量測工法改善」。

宋長虹、朱木壽、劉俞佑、蘇俊明、黃俊仁《複合式河川流量自動化觀測系統建構與應用》