

整合即時河川表面流速及水位推估流量

Development of River Discharge Estimation Using Real-Time Water Stage and Surface Velocity

王豪偉¹、樺順忠²、洪健豪³、張雅琪⁴、王毓麒⁵、陳政欣⁶

Hau-Wei Wang¹; Shun-Chung Tsung²; Jian-Hao Hong³; Ya-Chi Chang⁴;
Yu-Chi Wang⁵; Cheng-Hsin Chen⁶

摘要

實測河川流量資料向為河川治理、水庫攔河堰營運操作、跨河橋梁與堤防重建修復及河川復育等工作之重要參考依據。然而，實測流量資料的取得耗費人力物力甚巨，若能建立自動化流量觀測站，除可避免觀測人員在極端天候下於現場量測所承擔之安全風險外，更可將即時河川流量資訊透過網路傳輸不受時間與空間之限制，提供防災指揮官作為決策參考之依據。因此，本研究於宜蘭河員山大橋建立自動化即時流量觀測站，嘗試以接觸式之聲波杜普勒流速儀觀測實際河川流量，搭配非接觸式之微波雷達表面流速計、雷達波水位計、太陽能供電系統及以 LabVIEW 撰寫之流量推估系統平台，整合即時河川水位、實測表面流速與河床斷面計算即時流量。本研究利用颱風中心於 2012-2013 年之 11 場聲波杜普勒流速儀之實測流量及流速資料，率定流量推估方法所需之參數，並以另外 5 場作為流量推估驗證比較之用。研究中發現，實測表面流速與平均流速之比值 K 非為定值，隨水位之改變而異。惟目前觀測資料範圍有限，後續仍須持續現場流量觀測，以確定宜蘭河員山大橋適合之流量推估方法。

關鍵字：表面流速、河川流量推估、表面流速與平均速度比值

¹ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員
² 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員
³ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員
⁴ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員
⁵ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 副研究員
⁶ 國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心 助理研究員

一、前言

河川流量資料為水資源規劃、河川治理、河川生態復育的重要依據，為水文模式的重要邊界條件，流量推估結果的正確與否就非常重要。過去長期多採用螺旋槳式流速儀、懸杯式流速儀或浮標量測，但受限颱風時期之狂風暴雨常威脅施測人員的安全，湍急水流、高含砂量及漂流木易毀損或影響儀器運作致高流量資料取得不易。

自 80 年代末 90 年代初期至今已許多國家已廣泛採用較為精密的聲波都普勒流速儀(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)應用在河川、湖泊及河口之流速及流量觀測上。Garcia 等人(2012)指出 2010 年全美國地質調查所 (U.S. Geological Survey, USGS) 之流量觀測站有超過 82% 係非以傳統手持式螺旋流速儀 (propeller current meter) 涉水進行流量觀測作業。而其中更有高達 69% 之非涉水 (non-wading) 流量觀測作業係以聲波都普勒流速儀來進行。在台灣，水利署委託盧昭堯等(2002)又陳彥璋等(2007)以 ADCP 進行流量觀測之研究。以聲波都普勒流速儀觀測所獲得之流量資料已被廣泛接受並具有代表性。但應用於坡陡流急的台灣，仍有天候及安全上的限制，依然無法應用於全洪程觀測。因此，如何藉由平時 ADCP 中、低流量的觀測，並以觀測結果作為後續各種流量推估方法之基準，以期建立適合該測站推估高水位高流速情況下之流量推估作業。

故非接觸式的觀測，如微波雷達表面流速儀及 LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocity) 的發展為重點，但如何將表面流速推求為平均流速關係到流量的準確性。Plant et.al. (2005) 收集位於 Castle Rock, Wash 的 Cowlitz 河的表面流速及水位資料，推求出該站的平均流速與表面流速比值約為 0.85，算出的流量結果與 USGS 的率定曲率吻合，並結合模式得知下游控制點對量測所造成的影響，皆證實微波雷達表面流速儀應用在非

穩定河床作為流量觀測的可行性。FUKAMI et.al. (2008)利用微波雷達及聲波型等的都普勒流速儀分別在 Satsunai Bridge, Yattajima 及 Otonashi Bridge 上進行測試，兩種類型的表面流速儀量測結果除峰值外大致上吻合，並以 10 米高的風速進行表面流速修正，平均流速與表面流速比值推估的實測資料以傳統流速儀置於固定位置量測垂直剖向的流速分布，以對數分佈律、Bazin 公式及 Aki 公式進行迴歸，Aki 公式得可較佳的結果，推得 Tone River 的 Yattajima 橋之比值為 0.88，另兩座橋因尚未得到，故以 0.85 作為轉換係數，結論建議未來以 ADCP 的量測更為準確、解析度更高的結果。此外，Rantz(1982)建議比值採 0.8 至 0.9 間計算平均流速，而日本在 Tone 河之 Yattajima 測站之觀測採用 0.88，而在 Otonashi 及 Statunai 測站採用 0.85。李與王(2010)應用微波雷達表面流儀於青海三江源區進行測試，測試結果滿足中國的水文規範。

我國水利署長期推展流量觀測自動化，2005 年「河川流量量測技術革新研究計畫」購置手持式微波雷達表面流速儀 Decatur-SVR，各河川局開始應用手持式微波雷達表面流速儀輔以進行流速觀測。2009 年委託巨廷公司應用表面流速推估水深能力、藉以分析莫拉克颱風曾文溪示範站河床沖淤歷程，結果反應表面流速變化可作為河床沖淤推估指標之發展潛力。2007 年分別在頭前溪中正大橋及曾文溪二號橋建立水位流量示範站，流量觀測包括表面流速法與坡度面積法。其中，表面流速法分別於上游側橋面配置十具連續波微雷達表面流速儀。2010 年及 2011 年委託巨廷公司建立流量分析系統(水利署，2010、2011)，系統分成 web 應用程式、資料處理與流量計算服務端及資料庫三部份。以 Fortran 程式撰寫的流量計算程式每隔一段時間查看是否有資料，若有資料則從資料庫取出水位或流速紀錄組成輸入檔計算流量，再將流量結果存回資料庫中。報告

中根據河床資料推估表面流速與垂直平均流速比與水深變化，變動範圍為 0.85~0.90 與 0.89~0.93 不等，最後比值暫訂為 0.85。

以微波雷達表面流速儀做為流量觀測為目前可靠的方法之一，台灣颱風洪水研究中心整合宜蘭河流域員山大橋水位流量站(國家級防災監測及模式測試基地，2012)之斷面、水位及表面流速資料，透過不同水深的流速剖面資料建立與表面流速之關係以推求平均流速，建立流量推估系統做即時流量推估、視窗化展示及分析，便利使用者即時獲取相關水理資訊。

二、研究區域概述

水利署自民國 101 年起，委託台灣颱風洪水研究中心於宜蘭河流域建置國家級防災監測及模式測試基地(水利署，2012)，測站分佈情形如圖 1。位於台灣東部的宜蘭河發源自宜蘭縣礁溪鄉與新北市烏來區的大礁溪山(1161 m)和小礁溪山(1147 m)，上游由大礁溪、小礁溪、五十溪及大湖溪等匯流而成。宜蘭河流域西起雪山山脈之大、小礁溪山與大湖溪沖積扇，東至壯圍沙丘海岸，呈現西高東低的地勢，大湖溪為宜蘭河之支流，於員山鄉員山大橋附近與五十溪匯合，至下游再與大、小礁溪匯合，於新城附近匯集成宜蘭河主流，並於宜蘭市北邊壯圍鄉附近匯入蘭陽溪。流域面積 149.06 km²，主流長 17.25 km，涵蓋礁溪、員山、宜蘭及壯圍等鄉市。

流域內自新城橋與員山大橋下游則坡度逐漸平緩，河道坡度由 1/20 降至 1/2000。宜蘭河已經整治，因此少有河道溢淹情況，且河道中泥砂量與河床變動小。隨著經濟發展及人口漸增之後，目前都市計畫區佔流域面積 12.3%，非都市土地面積則佔 68%，其他地區未列入土地使用分區；也因此近年來宜蘭河的環境問題已日益多樣，加上部分地區地勢較低，如美福與新南地區，則常因雨勢過大導致排水系統無法負荷而導致淹

水。

流域內之流速測站計有員山大橋、新城橋、及中山橋共三站，為颱風中心所建置，測站具有一部雷達波水位計、二部微波雷達表面流速儀與即時傳輸設備，目的為利用測得流速及水位推求流量，以提供河川洪水演算模式重要的上游邊界條件。

雷達波水位計採用德國 VEGA 公司型號 VEGAPULS61 的水位計，利用雷達波探頭連續的雷達波信號，藉由天線接收反射迴響來計算水位，量測範圍可達 75m、量測精度±2mm 以內、有效波束角 8°，現場每一分鐘一筆數據。連續微波雷達表面流速儀採用奧地利 Sommer 公司所生產的 RG-30，原理主要依據布拉格(Bragg)散射與都普勒效應，操作頻率 24GHz(K-Band)、量測範圍 0.15~15m/s、可量測距離 0.5-35m，現場每一分鐘量測一筆數據。

三、自動流量推估

本文以 LabVIEW 圖形化語言進行流量推估系統的撰寫。LabVIEW 為美商國家儀器公司(National Instruments)所開發，具有人機介面讓操作者可與程式互動。LabVIEW 的另外一項重要特徵是可以整合諸多通訊協定，未來可以整合 GPIB、VXI、PXI、RS232、RS485 以及 DAQ 等裝置；甚至可以進行網路連結應用、TCP/IP 資料傳遞與分享、以及 ActiveX 元件應用等功能，建立一個完整的測試與量測功能、資料擷取、儀器控制、量測分析、理論模擬驗證平台。

3.1 水位、表面流速及斷面整合

流量推估系統結合即時河川斷面、即時水位與即時流速資料，並結合藉由 ADCP 的實測流速資料分析而得的對數律、二次函數或其它可能的函數推求平均流速與表面流速之比值以推估流量。

圖 2 及圖 3 為即時展示畫面。圖 2 結合斷面、水位的即時展示，圖中以宜蘭河員山大橋水位流量站為例，因設有兩台表面流速儀，程式將斷面分成兩個子斷面各自推求流量，而後加總得到總流量，由此圖可明確得知該站斷面狀況、水位相對位置，及即時的水位數據及通水斷面積資訊。圖 3 為即時的水位及流量歷線，橫座標為即時的對應時間，以掌握水位及流量的即時變化供研判。本系統可展示固定時間區間內之 H-Q 曲線(圖 4) 及水位、流量歷線(圖 5)，用以判斷所推求之流量與水位關係的合理性。

3.2 ADCP 量測

本文採用 SonTek 公司所生產的 RiverSurveyor M9 系統量測流速剖面，主要原理為利用水下聲波發射端發出聲波，當聲波碰到水中的懸浮物而反射，藉由接收聲波頻率的改變，利用都普勒原理算出水流速度，同時水深及河川斷面可同時得知。操作方式為將聲波都普勒流速儀架設於船形載具上，並以繩於兩岸緩慢拖曳進行流速量測。本研究以 2012-2013 年間於宜蘭河員山大橋之 16 場的 ADCP 觀測資料進行分析。

3.3 流量推估方法

流量推估之方法，大致可歸納為(1)水位流量率定曲線法;(2)表面流速法;(3)邱式理論及(4)坡度面積法。本研究暫不討論坡度面積法，而僅以 ADCP 實測之流量資料作為各種方法推估比較之依據。其中表面流速法及邱式理論基本上是建立在流量(Q)為斷面平均速度(\bar{U})與通水斷面積(A)之乘積上，皆以推求斷面平均速度(\bar{U})為主。值得一提的是，各種方法適用之前提皆建立在通水斷面穩定，即洪水作用下，斷面沖淤變動相對不顯著。本文以 16 場 ADCP 觀測資料的 11 場作為各種流量推估方法所需參數率定之用，另外 5 場作為後續驗證比較，茲將各種流量推估方法分析說明如後：

3.3.1 水位流量率定曲線

以實測流量為橫軸，水位為縱軸繪製。透過統計迴歸，獲得該觀測站之水位流量關係式，並據此關係式推估高水位之通洪流量。圖 6 為 ADCP 實測流量與水位之關係。基本上，員山大橋站之流量隨水位上昇而增加，顯示 ADCP 觀測結果應屬合理。

3.3.2 表面流速法

理論上而言，K 值應與水位、通水斷面型態、底床粗糙度及表面流速儀相對於斷面之架設位置有關。本研究之員山大橋測站，其斷面型態相對穩定，表面流速儀係固定架設在深槽上游橋面。因此，影響 K 值可簡約從水位變化觀之。

圖 7 係颱風中心宜蘭河員山大橋 ADCP 實測平均速度與微波雷達表面流速之比值 K 與水位變化之關係。就目前觀測資料結果顯示，K 值表現在與水位之關係上有兩個分群，一則在低水位時 ($Z < 5.6\text{m}$)，K 值與傳統採用值 0.85 相近。然而，當水位相對較高時 ($6.5 < Z < 7$)，K 值約介於 0.4-0.7 之間。雖然目前缺乏水位 5.6-6.5m 之觀測資料，不過就目前資料之趨勢顯示，宜蘭河員山大橋之 K 值可能隨水位上升而下降，並當水位漫灘後而逐漸趨於定值。此一初步結論尚須更多實測資料驗證。

3.3.3 邱式理論

邱式 (Chiu, 1989) 通過機率之概念，推求出天然河川在通水斷面型態相對穩定之情況下，則流速分佈可表為下式：

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \text{Ln} \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi}{\xi_{\max}} \right] \quad (1)$$

其中，u 為距底床某一高度之流速； u_{\max} 為斷面最大流速；M 為參數 (需經由歷史觀測資料決定)； ξ 為流速分佈座標系統之等流速線； ξ_{\max} 為流速分佈座標系統之等流速線最大值。邱式認為斷面最大流速發生之垂線位置稱之為 y 軸

(y-axis)，則 ξ 可表為下式：

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right) = \frac{\frac{y}{D}}{1 - \frac{h}{D}} \exp\left(1 - \frac{\frac{y}{D}}{1 - \frac{h}{D}}\right) \quad (2)$$

其中， y 為與底床之距離； D 為最大流速發生位置之水深； h 為最大流速發生位置與液面之距離。Chiu and Tung (2002) 分析天然河川之實測流速分佈，發現斷面最大流速一般發生在液面或液面之下某處。因此，Chiu and Tung (2002) 進一步分析 Einstein 及 Chien (1955) 直線渠槽與 Yen (1965) 彎道水槽資料，並加入 USGS (1963-1999) 之野外觀測資料得出最大流速發生位置與 y 軸處水深之關係為：

$$\frac{h}{D} = -0.2 \ln \frac{G(M)}{58.3} \quad (3)$$

其中， $G(M) = (e^M - 1)/M\phi$ ； ϕ 可表為下式：

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (4)$$

Chiu and Yung (2002) 認為，一旦觀測斷面之 M 值透過歷史資料配合式(4)決定後，則吾人可於 y 軸處之橋面上架設表面流速計，透過 y 軸處表面流速之觀測值 ($U_{\text{surf},y\text{-axis}}$)，合併式(1)與(2)，則最大流速可表為下式：

$$u_{\max} = \frac{U_{\text{surf},y\text{-axis}} \times M}{\ln\left[1 + (e^M - 1) \frac{\frac{1}{h} \exp\left(1 - \frac{1}{h}\right)}{1 - \frac{1}{D}}\right]} \quad (5)$$

最後搭配式(4)即可獲得通水斷面之平均速度，進而推估流量。

圖 8 係利用颶洪中心於 2012 年 2 月至 2013 年 7 月蘇力颱風於宜蘭河員山大橋之觀測資料所繪製之斷面平均流速與最大流速之關係。配合邱式理論之式(4)，得出該處之 M 值為 1.77， K 值為 0.76。

四、流量推估結果比較

本研究選取 5 場未加入前節推求各種流量推估方法所需參數之觀測資料，作為初步分析比較之參考。圖 9 顯示各種推估方法所推估流量與實際觀測流量之比較。整體而言，由水位流量率定

曲線所推估之結果較接近實測值。若已 USGS 建議之 0.85 為 K 值，其推估結果大多高估。邱式理論推估之 K 值為 0.76，其流量推估結果較以 0.85 作為 K 值所推估之結果更為接近觀測值，然整體而言仍略微高估。考慮 K 值隨水位變化所推估之結果，基本上較以固定 K 值所推估結果為佳。值得一提的是，目前之比較結果僅限於建立各種流量推估方法之流量範圍內，未來仍需持續以 ADCP 進行更多場次之中、高流量觀測，以確定宜蘭河員山大橋之流量推估方式。

在無相當可靠之中、高流量資料下，目前建議以上述各種推估方法，搭配 LabVIEW 推估即時流量，提供洪水期間，任一時刻之可能流量範圍，供水利主管單位參考。

五、結論

水利署自 2005 年起的中高流量觀測輔以測速槍得到表面流速，以比值 0.85 推求平均流速，依所記錄時間對應通水斷面積而得到流量。國內外關於平均流速-表面流速比值的推估多採用定值，一般均在 0.85 至 0.9 之間，但台灣河川斷面狀況複雜，深槽窄小、洪水平原寬廣、雜草叢生且高大，若任何水深採用相同比值恐有不合理之處，故本研究整合即時河川表面流速、水位及探討不同平均流速-表面流速比值進行流量推估。

1. 本文以 LabVIEW 程式結合斷面、即時水位及流速資訊進行即時流量推估，將資料處理、流量推估、展示及儲存一貫化。
2. 透過 ADCP 之實測資料，驗證流量率定曲線、斷面平均流速與表面流速之比值 K ，並探討各種 K 值建議方法在宜蘭河員山大橋之適用性。
3. 本文發現 K 值並非定值隨水位上升而下降，差異可達兩倍，初步判斷高水位溢淹漫灘，形成近液面區流速仍大而近床區及中層水深

處之流速受灘地植生影響甚巨所致。

4. 透過本系統的開發整合斷面、水位及流速，建立平均流速與表面流速隨水深變化的關係即時推估流量，將有助於水利署即時流量觀測站的現代化。
5. 未來仍需透過更多 ADCP 於更高水位的量測資料，改良不同水深的平均流速-表面流速比值，將得到更多適合台灣河川斷面的分析結果。

參考文獻

1. 李光泉、王秀蓮，(2010)，”電波流速儀在青海三江源區水文監測中的應用”，人民長江，Vol.41, No.14.
2. 許盈松、童琮志、周湘俊、張國強、李建君、喻秉輝、黃柏彰，(2006)，”微波雷達流速儀觀測特性研究”，Journal of Taiwan Water Conservancy Vol. 54, No. 3, September 2006.
3. 陳彥璋、郭振泰、楊翰宗、游勝任、楊孝忠，2007，”高水位時期河川流量觀測”，Journal of Taiwan Water Conservancy Vol. 55, No. 4, December 2007.
4. 盧昭堯，2002，”河川流量新量測技術之研發(2/2)”
5. 河川流量量測技術革新技術革新研究計畫，2005，經濟部水利署。
6. 國家級防災監測及模式測試基地建置(1/3)，2012，經濟部水利署水利規劃試驗所。
7. 自動化流量站觀測資料分析檢討暨全洪程觀測方式更新研究(1/2)，2010，經濟部水利署。
8. 自動化流量站觀測資料分析檢討暨全洪程觀測方式更新研究(2/2)，2011，經濟部水利署。
9. Chiu, C. L. (1989). “Velocity distribution in open channel flow.” Journal of Hydraulic Engineering, 115(5): 576-594.
10. Chiu, C. L. and Tung, N. C. (2002). “Maximum velocity and regularities in open-channel flow.” Journal of Hydraulic Engineering, 128(4): 390-398.
11. Einstein, H. A. and Chien, N. (1955). Effect of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution. University of California Institute of Engineering Research, Berkeley, Calif.
12. G. Corato, T. Moramarco, and T. Tucciarelli, (2011), “Discharge estimation combining flow routing and occasional measurements of velocity”, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 2979-2994, 2011. Journal of Hydraulic Engineering, 138(8): 684-694.
13. Garcia, C. M., Tarrab, L., Oberg, K., Szupiany, R., and Cantero, M. I. (2012). “Variance of discharge estimates sampled using acoustic Doppler current profilers from moving boats.”
14. Kazuhiko Fukami, Takayuki Yamaguchi, Hitoki Imamura and Yoichi Tashiro, (2008), “Current status of river discharge observation using non-contact current meter for operational use in Japan”, World Environmental and Water Resources Congress.
15. J. E. Costa, R. T. Cheng, F. P. Haeni, N. Melcher, K. R. Spicer, E. Hayes, W. Plant, K. Hayes, C. Teague, and D. Barrick, (2006), “Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods”, Water Resources Research, Vol. 42, W07422.
16. John Fulton, Joseph Ostrowski, (2008), “Measuring real-time streamflow using emerging technologies: Radar, hydroacoustics, and the probability concept”, Journal of Hydrology 2008 357, 1-10.

17. M. Muste, I. Fujita, and A. Hauet, (2008), "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments", *Water Resources Research*, Vol. 44, W00D19.
18. William J. Plant, William C. Keller, Kenneth Hayes, and Kurt Spicer, (2005), "Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage", *J. Hydraul. Eng.* 2005. 131: 657-664.
19. Yen, B. C. (1965). "Charateristics of subcritical flow in a meandering channel." Technical Report, Institute of Hydrolic Research, University of Iowa, Iowa City, Iowa.

圖 3、即時水位、流量歷線展示界面

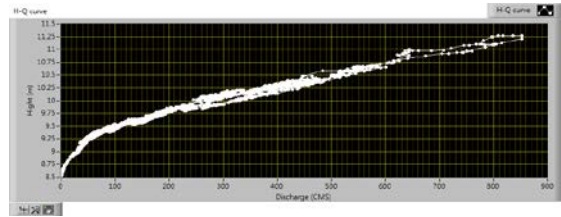


圖 4、固定時間區間內之 H-Q 曲線展示。

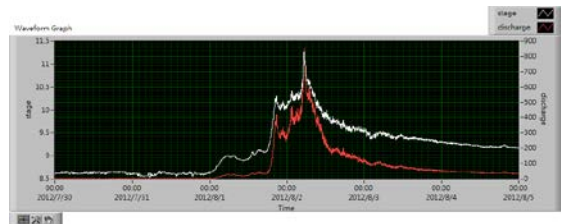


圖 5、固定時間區間內之水位、流量歷線展示。

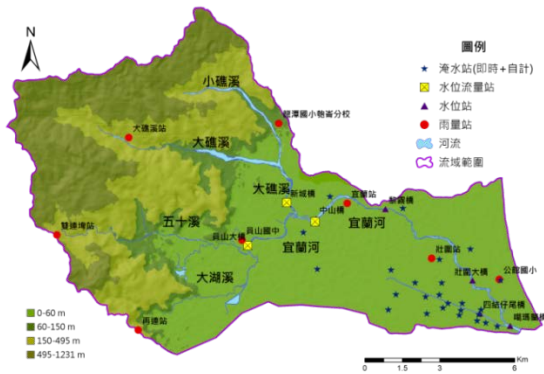


圖 1、宜蘭河測試基地之測站分佈。

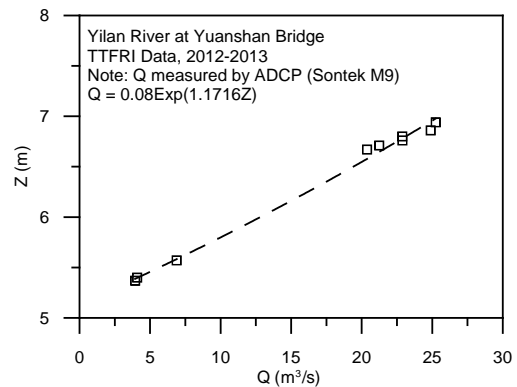


圖 6、員山大橋水位流量率定曲線

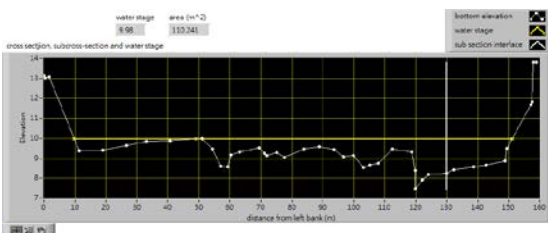


圖 2、結合即時河川斷面、水位之展示界面

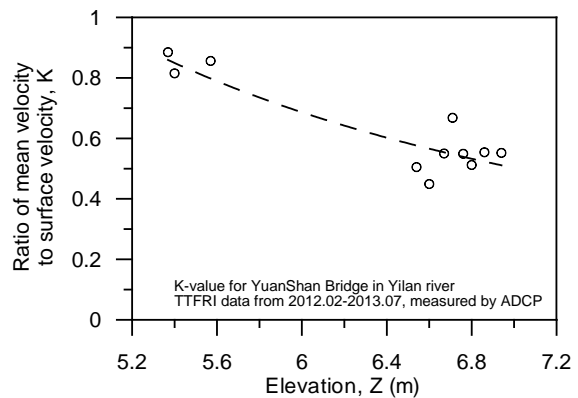
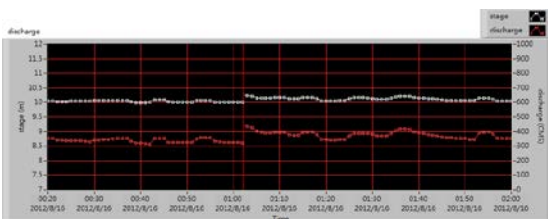


圖 7、員山大橋 K 值與水位關係。



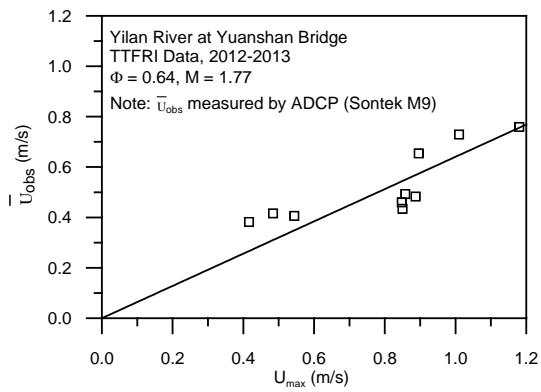


圖 8、員山大橋斷面平均速度與最大流速之關係

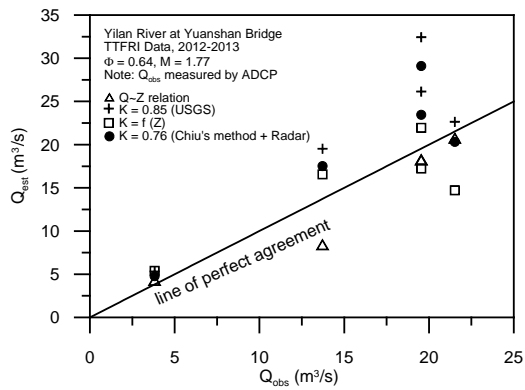


圖 9、員山大橋流量推估比較圖