

# 河川表面流速量測與平均流速推估

## Measurement of river surface velocity and mean velocity estimation

國家實驗研究院 台灣颱風洪水研究中心 副研究員 穰順忠 SHUN-CHUNG TSUNG	國立臺灣大學 生物環境系統工程學系 博士生 黃振家 CHENG-CHIA HUANG	國家實驗研究院 儀器科技研究中心 助理研究員 湯雅雯 YA-WEN TANG	國家實驗研究院 儀器科技研究中心 研究員 廖泰杉 TAI-SHAN LIAO
--	--	--	--

### 摘 要

河川流量觀測資料對河川整治規劃與洪水預警系統發展扮演重要角色，也就是流量觀測資料之正確與否明顯影響水文水理模式模擬結果。然而流量觀測中流速則為最重要參數，其量測最為耗時耗力。截至2010年止台灣河川共有93座流量站，而大部份皆以水位-流量關係曲線方式獲得流量資訊。建立可信之水位-流量關係則需要涵蓋高低水位下之流量觀測值。然而現有觀測資料多數為低流速時，此外洪水期間亦考慮作業安全，因此高流速量測資料缺乏。為使流速量測可達全時作業及降低安全風險，研究中以微波雷達方式量測河川表面流速。本研究以宜蘭河中山橋處為研究站址。水利署自1984年起於中山橋設置水位流量站(西門站)，並設有雷達波水位計，其量測頻率為10分鐘。以微波雷達方式進行表面流速量測已應用於其他河川，但為簡化資料分析及強化應用，研究中則於中山橋斷面位置之主深槽範圍內裝設兩具微波雷達表面流速儀，其量測頻率為1分鐘。為建立表面流速與對應通水斷面積平均流速之關係，本研究亦利用聲波都卜勒流速剖面儀進行數場河川流量量測並計算各場次平均流速，藉以建立表面流速與平均流速比值關係。利用測得之河川表面流速及與平均流速比值關係，以推求通水斷面之平均流速。再者，利用測得之水位及斷面量測資料求得通水斷面積。最後將平均流速與通水斷面積相乘而得流量。以上提出方式將可進行全時流速量測及推估可靠流量。

關鍵詞：表面流速、微波雷達、平均流速、聲波都卜勒流速剖面儀

## Abstract

Discharge is crucial data for river training plan and warning system development because discharge data significantly influence the performance of hydrological numerical simulations. Furthermore velocity is the most important portion of discharge measurement. In Taiwan, there are currently 93 discharge sites, which provide discharge by head-discharge relationship. The relationship should be built based on complete measurements including low and high discharges. However few high discharges were measured because of operation safety consideration. To achieve real-time velocity measurement and increase operation safety, microwave sensor is considered to measure river surface velocity in this study. The study site is the Chung-Shan Bridge in the Yilan River, the Yilan County, Taiwan. This site has been installed water level sensor and as discharge site by the Water Resource Agency since 1984. In this study, we installed two microwave sensors at this site to monitor river surface velocity in the main channel. To estimate mean velocity of cross section, the relationship between measured surface velocity and mean velocity should be built. Therefore Acoustic Doppler Current Profiler is used to directly measure discharge and calculate mean velocity. The surface-to-mean velocity ratio is then determined by comparing measured river surface velocity and calculated mean velocity. Cross section area of flow is calculated based on measured water level and cross section profile. For application, the proposed method will provide real-time velocity measurement data and reliable discharge information.

Keywords: Surface velocity, Microwave radar, Mean velocity, Acoustic Doppler Current Profiler

## 一、前言

目前台灣河川水文量測項目主要為水位，為推求河川流量部分測站則建有水位流量關係，也就水位流量率定曲線。測站利用經常流量觀測及洪水流量觀測資料建立水位流量率定曲線，為延伸率定曲線至高流量範圍。河川流量資料對於應用水文水理數值模式模擬時極其重要。進行河川洪水演算時，需給定流量及水位資料做為上下游邊界條件。因此，若可獲得可靠度較高之流量觀測資料則可提高水文模擬之精確度，同時也可以提升水文水理模式之改善。

河川流量觀測包含水位及流速量測，台灣河川管理單位對於此兩種水文量之量測作業皆有規範(水利署2010)。台灣地區目前河川水位量測大部份已經採用非接觸式之雷達波水位計，其特點為量測訊號不受環境改變影響。流速量測部分則計有三種量測方法：1) 普萊式或旋槳式流速儀；2) 浮標法；3) 手持式雷達波表面流速量測儀(或稱為雷達測速槍，簡稱 SVR)。普萊式或旋槳式流速儀常以一點式(0.6 水深)或二點式(0.2 及 0.8 水深)方法測得之流速做為該量測位置之平均流速。若是河川流速超過普萊式

或旋槳式流速儀之適用範圍 0.3 - 4 m/s，則採用浮標法。為增加河川流速量測參考性，台灣河川管理單位於 2005 年起使用手持式雷達波表面流速量測儀輔以進行河川表面流速量測作業。以上方式測得之平均流速將與水位配合斷面量測所推估之通水斷面積進行乘積而得流量。以上所規範之流量觀測方式皆需以人工方式進行觀測作業，因此需要大量人力。此外目前規範之觀測頻率低，因此不容易掌握完整洪水流量變化歷程，如此也不利於防洪預警。洪水通常發生於颱風期間，因此流量觀測作業人員則需暴露於風雨之中，對於人員安全產生極大之威脅，因此人工流量觀測作業逐漸式微而需以非接觸自動化儀器取代。

為掌握洪水期間河川流量全時變化，本研究將以宜蘭河中山橋為量測位置，並於該斷面主深槽左右區域各設置微波雷達表面流速儀一座，利用水利署西門橋站(即為中山橋)水位資料與颱風中心中山橋站表面流速資料建立流量觀測方法。研究中以蘇拉颱風(2012/8)為案例說明流量觀測結果。此外為降低水位及流速量測資料中雜訊對於流量觀測之影響，研究中將利用資料平滑方法進行離群值移除及資料平滑。

## 二、研究範圍與案例

圖 1 表示宜蘭河流域範圍內河川及橋梁。本研究中以中山橋為流量觀測位置，其地理位置恰於大礁溪、小礁溪、五十溪與大湖溪匯流後之控制點。因此可掌握宜蘭河流域上游集水區之逕流量。水利署自 1985 年起於中山橋建立水位流量站，設有雷達波水位計一座，其量測頻率為每 10 分鐘一次，並已建立水位流量率定曲線。圖 2 顯示宜蘭河於中山橋附近之現場狀況。圖 3 則表示中山橋位置之河道斷面，圖中可知斷面形狀包括主深槽及高灘地，且因為此斷面上游為左彎河道所以主深槽偏於右岸。斷面最低高程約為 1 m，而主深槽與高灘地交接處高程約為 5 m。圖 2 中三角形為標示研究中設置微波雷達表面流速儀之位置，其量測位置位於主深槽中左右兩區域，以掌握彎道效應造成兩岸流速差異之特性。目前使用微波雷達表面流速儀之型號為 RG-30 (Sommer，奧地利)，其量測頻率為每 1 分鐘一次。圖 4 為中山橋位置之水位流量率定曲線。



圖 1 宜蘭河流域與橋梁位置



圖 2 宜蘭河中山橋附近河道狀況及微波雷達表面流速儀架設位置(三角形標誌)；右岸 sensor 1，左岸 sensor 2

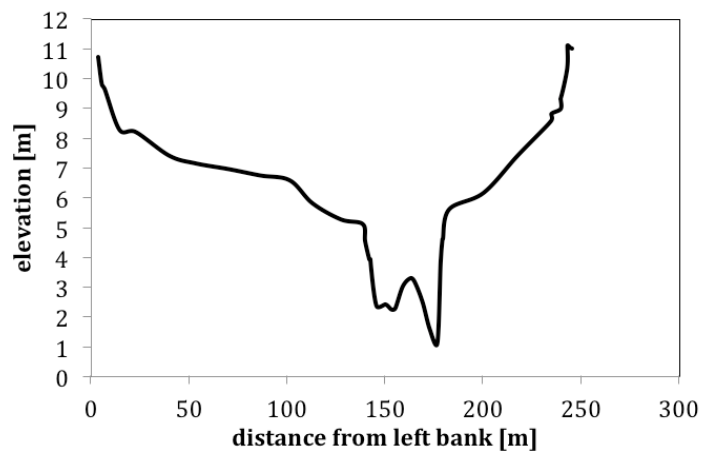


圖 3 宜蘭河中山橋位置河川斷面

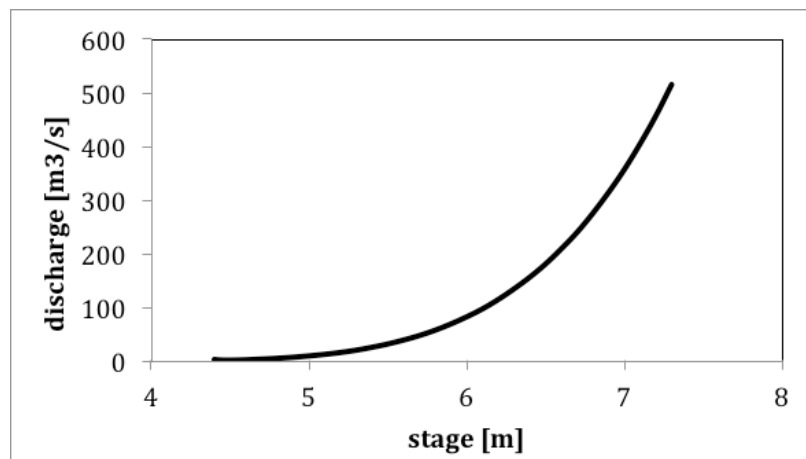


圖 4 水利署西門橋站(中山橋)水位流量率定曲線(2011)

### 三、河川流量觀測

本研究中河川流量推估程序如圖 5 所示。利用雷達波水位計測得之水面高程配合中山橋處大斷面量測結果推求通水斷面積。將微波雷達測得之河川表面流速( $u_s$ )，乘以給定之平均流速( $U$ )與表面流速比值(平均-表面流速比 $\alpha=U/u_s$ )，以推求河川平均流速。最

後將平均流速與通水斷面積相乘而求得流量( $Q = u_s * \alpha * A$ )。然而表面流速受水流速度與風吹影響，且平均流速計算結果亦受斷面流速分佈影響(朱木壽 2010)。因此流量推估程序中平均-表面流速比( $\alpha$ )受研究河段水理特性影響甚巨，所以量測斷面上之平均-表面流速比需配合實際河川流況給定，也就是說不同量測位置具有不同平均-表面流速比。

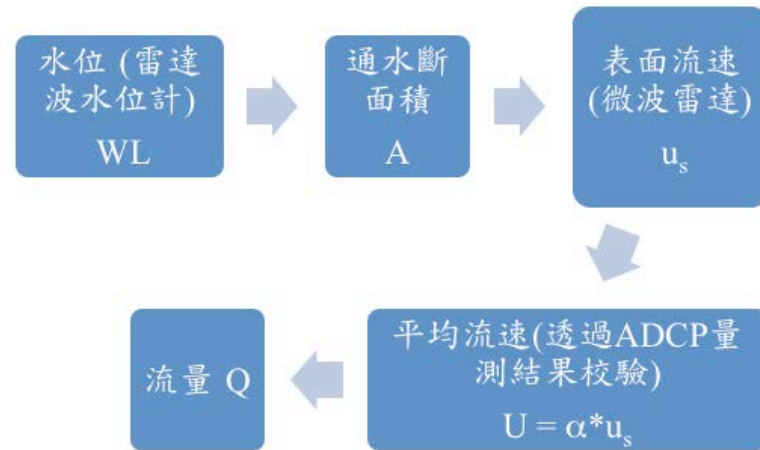


圖 5 利用量測水位及河川表面流速推估河川流量之程序

關於平均-表面流速比值，目前水利署現行流量觀測作業建議值為 0.85 (手持式雷達測速槍)。Costa et al. (2006) 及 Rantz et al. (1982) 建議寬廣河川中平均-表面流速比為 0.85。Fukami et al. (2008) 則認為需要視河川特性而定，其建議值為 0.85 - 0.9 間。Plant et al. (2005) 針對 Cowlitz River 進行流速分析，建議平均-表面流速比為 0.85。美國墾務局 (Water Measurement Manual, 1997) 建議依照不同水深給定不同比值。當水深為 1 - 15 ft 時則平均-表面流速比為 0.66 - 0.79；若水深超過 20 ft 時則建議採用 0.8。第六河川局 (2011) 針對曾文溪流域內 5 處流量站進行流速量測發現平均-表面流速比為 0.8 - 0.83 間，其結果說明雖然同一流域但各測站間仍有差異。以上前人研究成果顯示影響平均-表面流速比之原因包括測站河段水理特性、儀器裝設方式及水深等，且平均-表面流速比值應為動態。雖然相關研究已經建議平均-表面流速比之範圍值，但是即使同一河段不同測站推得之平均-表面流速比亦有明顯差異。為避免比值選擇不當造成過大流量估計誤差，因此研究中重新建立中山橋之平均-表面流速比。

為使平均-表面流速比可符合測站實際河川水理特性，研究中將除利用微波雷達表面流速儀量測河川表面流速外，亦利用聲波都卜勒流速剖面儀 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 進行河川流速剖面量測及計算流量，並利用觀測流量除以通水斷面積推求斷面平均流速。研究中利用多場流量觀測所得斷面平均流速與表面流速建立平均-表面流速比。現場量測情況如圖 6 所示。本研究所使用之 ADCP 為 SonTek 公司所生產的 RiverSurveyor M9，可量測最大流速為 20 m/s，可量測水深範圍為 0.2 - 80 m。

本研究利用 ADCP 進行量測時間為 2012/8/6 (蘇拉颱風後)，且共有三個時間點，分別為 11am、1pm 及 5pm。各時間點量測時之操作次數皆大於 10 次(趟)，並去除標準偏差大於 10% 之量測流量值，並以該時間點所有量測值之平均流量做為分析用，以降低不良量測值之影響。



圖 6 聲波都卜勒流速剖面儀(RiverSurveyor M9)於宜蘭河中山橋操作情況

#### 四、水位及表面流速監測結果與處理

一般水文監測資料皆含有雜訊及不合理資料，為避免雜訊及不合理資料影響整體監測資料，因此於進行流量計算前進行原始水位及表面流速量測資料處理。其資料處理包括除去離群值、資料補遺及資料平滑等三步驟。各步驟皆有理論可供應用，為整合以上三步驟與增加操作便利，研究中使用曲線配適(Curve Fitting)中修正局部推估散點平滑法(Robust Loess)對水位及表面流速資料進行處理，以求得平滑後之迴歸曲線(Fitting Curve)。詳細理論可參考 [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)。本研究中監測資料時間為 2012/7/31 - 8/4，共 5 天(120 小時)。圖 7 為利用修正局部推估散點平滑法進行中山橋水位與表面流速資料處理。

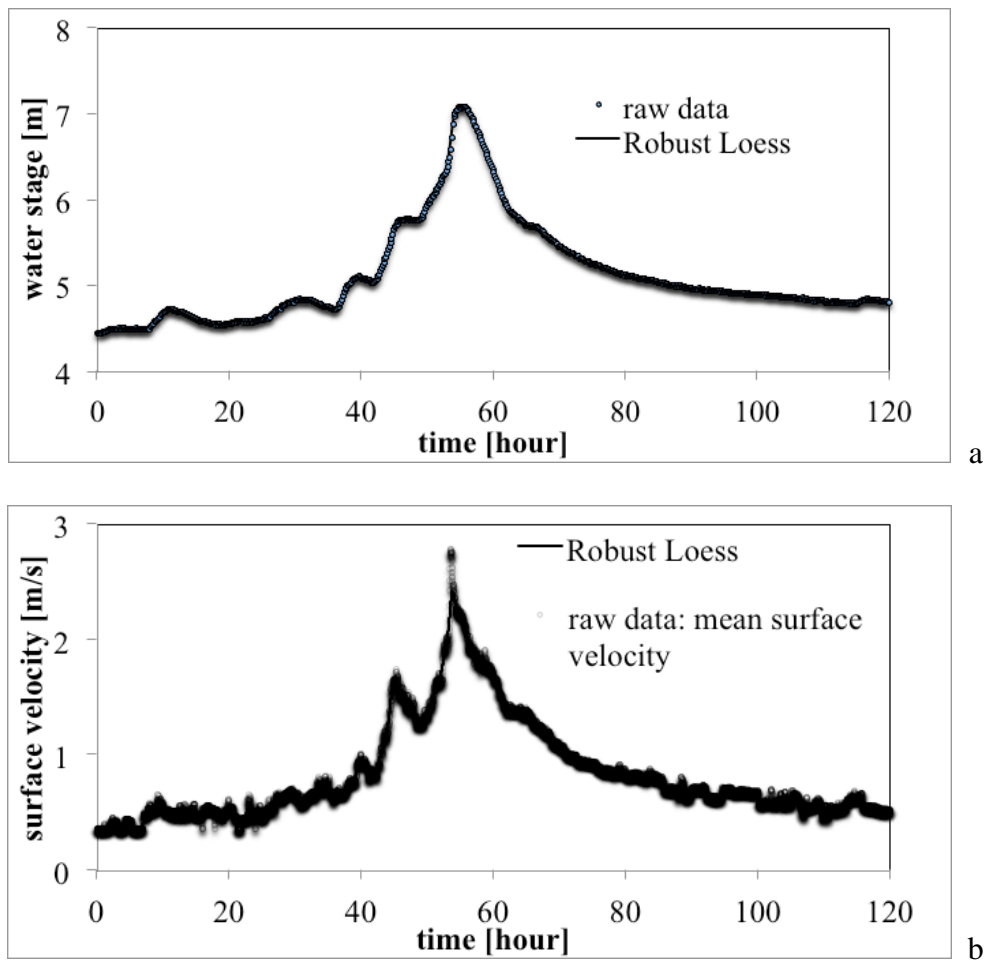


圖7利用修正局部推估散點平滑法進行中山橋量測資料處理2012/7/31至8/4：a) 水位；b) 表面流速。

## 五、結果與討論

### 平均-表面流速比值

表1列出不同時間點所測得之流量、水位及表面流速，其中包含利用大斷面量測資料進行通水斷面積推估並計算平均流速。此外亦列出利用水位流量率定曲線所推估之流量結果。研究中利用 ADCP 量測流量時間為 2012/8/6，也就是蘇力颱風後，此時流量皆已明顯低於颱風期間之流量。施測時流量為  $24.23 - 26.36 \text{ m}^3/\text{s}$  間，且平均三次量測之水位約為 4.67 m，平均流速約為 0.30 m/s，平均表面流速約為 0.52 m/s；而蘇力颱風期間最高水位為 7.08 m，最大平均表面流速為 2.41 m/s。綜合不同量測場次所得之平均-表面流速比之平均值為 0.59，然而由部分文獻可知平均-表面流速比隨著水深增加而增加。不過目前量測資料僅此三場，無法建立平均-表面流速比與水深之動態關係，因此本研究中僅使用固定平均-表面流速比。此外量測時之水位遠低於颱風期間，因此為合理反應颱風期間較高速水流導致不同水層動量交換效率高，而使表面流速與平均流速較為接近之情況。研究中將量測所得之平均-表面流速比值增加 10%，也就是進行流量計算時之平均-表面流速比為 0.65。

利用水利署公告之水位流量率定曲線所推求流量與 ADCP 量測結果比較發現明顯低估。當水位為 4.66 m 時，以 ADCP 測得之流量為 24.23 m<sup>3</sup>/s，而以水位流量率定曲線所推估之流量僅 1.44 m<sup>3</sup>/s，其兩者流量差異高達 94 %。若以水位流量率定曲線所得流量推算斷面平均流速則為 0.017 m/s (表面流速約為 0.026 m/s)，但以現場流況粗略判斷表面流速明顯大於 0.026 m/s；也就是說以水位流量率定曲線所推估此流況(水位為 4.66 m，流量為 24.23 m<sup>3</sup>/s)之流量時將發生明顯低估。然而於其他流況時是否同樣發生低估情況則需進一步透過實際量測得知。

表 1 ADCP 流量量測結果整理。

	量測時間(2012/8/6)		
	11 am	1 pm	5 pm
流量(ADCP) [m <sup>3</sup> /s]	26.36	24.60	24.23
水位 [m]	4.68	4.67	4.66
通水斷面積 [m <sup>2</sup> ]	83.51	83.10	82.70
平均流速 [m/s]	0.32	0.30	0.29
平均表面流速 [m/s]	0.48	0.54	0.53
平均-表面流速比	0.65	0.55	0.56
流量(H-Q) [m <sup>3</sup> /s]	1.79	1.57	1.44

### 流量推估結果

圖 8 為宜蘭河中山橋於蘇拉颱風期間水位及流速監測與流量推估結果。圖 8a 中顯示水位變化趨勢與流速大致相同，當水位上升與下降時流速亦隨之增加與減少。惟於 45 小時附近流速發生較大幅度下降，但水位卻僅於此附近時間內上升速度趨緩。蘇拉颱風案例中最高水位為 7.08 m，其發生時間為 2012/8/2 7.10 am；最大表面流速為 2.41 m/s，其發生時間為 2012/8/2 5.50 am。圖 8b 中顯示整體水位變化趨勢與流量歷程一致，而推求之最大流量為 429.10 m<sup>3</sup>/s，其發生時間為 2012/8/2 6.30 am。

為驗證本研究中表面流速推估流量方法之可信度，參考第一河川局於 2012/8/2 2.20 pm 以普萊式流速儀之中山橋流量量測結果，其測得流量為 101.01 m<sup>3</sup>/s；利用表面流速推估結果則為 134.81 m<sup>3</sup>/s，其差值為 25.07 %。然而第一河川局亦利用雷達測速槍(SVR)同步進行人工表面流速量測(採用平均-表面流速比 0.85)，其推估流量為 136.10 m<sup>3</sup>/s，與表面流速推估結果之差值則為 0.96 %。以上比較說明本研究之流量推估方法可合理提供颱風期間流量資訊。



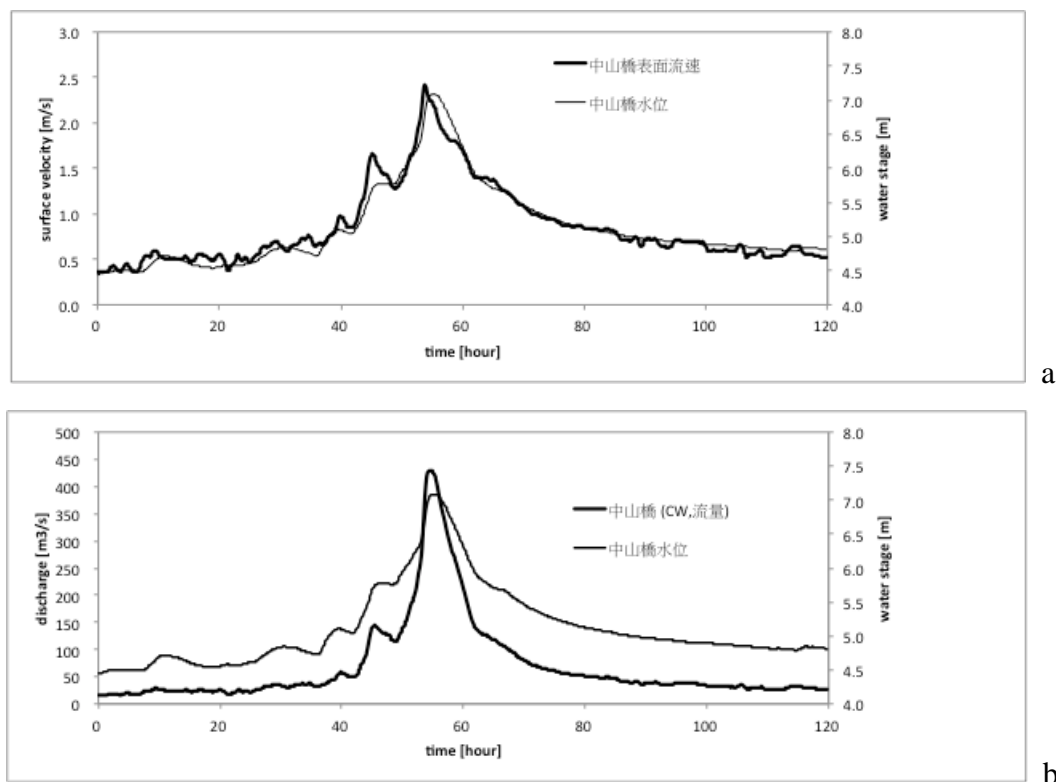


圖 8 宜蘭河中山橋於蘇力颱風期間量測結果(2012/7/31 - 8/4)：a) 水位與表面流速；  
b) 水位與流量

## 六、結論

本研究主要目的為建立非接觸式量測方法進行颱風期間全時流量量測作業。研究中以微波雷達測得之宜蘭河中山橋河川表面流速，並利用 ADCP 測得之河川流量與平均流速建立平均-表面流速比關係，以應用於颱風期間河川通水斷面之平均流速。最後求得之平均流速與通水斷面積相乘求得全時推估流量。此方法之最大優點為可進行非人工全時流速監測與流量推估。研究中以蘇拉颱風(2012/7/31 - 8/4)為研究案例，其結論與建議如下所列。

1. 研究中以 ADCP 進行現場河川流量量測，以求得平均流速並與同時間測得之表面流速比較後決定平均-表面流速比值；宜蘭河中山橋位置之平均-表面流速比為 0.65。如此做法可直接與可靠反應該量測位置之水文及地文特性，而避免引用其他測站結果或文獻資料，因為不同測站之水文地文條件皆不相同。
2. 透過與第一河川局現場流量量測結果比較，本研究利用量測表面流速推求蘇拉颱風期間流量具有較高可信度。蘇拉颱風期間中山橋位置推估之最大流量

為  $429.10 \text{ m}^3/\text{s}$ ，發生時間為 2012/8/2 6.30 am。

3. 然而目前僅考慮蘇拉颱風單一事件且量測流量小，因此仍不足以完整反應測站水文及地文特性於「平均-表面流速比」參數中。未來需要持續進行不同流量事件之 ADCP 量測作業，以建立完整與動態之平均-表面流速比。

## 七、參考文獻

1. Bureau of Reclamation (1997), Water Measurement Manual, U.S. Department of the Interior.
2. Costa, J.E., 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.
3. Fukami, K., T. Yamaguchi, H. Iamura, and 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, pp. 1-10.
4. Plant, W. J., W. C. Keller, K. Hayes, and K. Spicer, (2005), Streamflow properties from time series of surface velocity and stage, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 8, pp.657-664.
5. Rantz, S. E., and others, (1982), Measurement and computation of streamflow, Vol. 1. Measurement of stage and discharge, U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey.
6. 朱木壽 2010 渠道高流量非接觸式量測及其準確度之研究。博士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
7. 經濟部水利署(2010)，「因應氣候變遷河川量測觀測技術研發及建置先期計畫」。