

應用聲波都卜勒流速計於渠道實驗之量測

陳樹群⁽¹⁾ 王敦儀⁽²⁾ 嚴曉嘉⁽³⁾

摘 要

室內水工結構物周圍流場之觀測，早期因儀器多為接觸式測量，影響流場結構而無法準確量測，近年在流場變動細微或者需要精確觀測流場變動程度時，開始以光學儀器(如雷射都卜勒流速儀)觀測之，但在水流含砂、或者雜質較多的情形下，光學儀器易受到水中懸浮粒子之阻擋而影響其精確性。為兼顧量測簡便、高精確性，減少儀器接觸水流影響，又需克服水中懸浮粒子的影響，在近期的研究中，聲波都卜勒流速計(Acoustic Doppler Velocimeter，簡稱 ADV)逐漸普遍利用於實驗室中，研究不同流況下水流特性。本研究則利用 ADV 量測水流通過剛性與彈性障礙物時流速剖面的變化，從中瞭解 ADV 對於渠槽實驗之適用性及其可延伸應用之處。實驗結果可知渠槽實驗中使用 ADV 量測流速，由 ADV 需高雜訊比的設計，可無視水中泥沙等雜質之干擾，準確量測流速及其隨時間與空間之細微變化，亦可根據完整的量測數據經由進一步分析得知水流紊動強度，對於渠槽之定床或動床實驗，皆有優良之適用性。

(關鍵詞：音波都卜勒流速計、渠槽實驗、流速剖面、雜訊比)

Application of Acoustic Doppler Velocimeter in Flume Experiments

Su-Chin Chen⁽¹⁾ Den-Yi Wang⁽²⁾ Shiao-Chia Yen⁽³⁾

Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402. R.O.C.

Abstract

Flow investigation around hydro-structure was difficult to precisely measure because the velocimeters have to contact the flow and disturb the flow field incipiently. Recently investigators started to use the optical instruments to measure the tiny change of flow. However, if there were too many suspended particles in flow, high signal noise rate makes the optical instruments inaccurately. In order to keep accuracy and convenience, reduce the influence of disturbing the flow field, and avoid the interference with suspended particles, the Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) has been utilized in the laboratory to investigate the flow characteristics under various flow condition. In this study, we used ADV to survey the difference of velocity profile when flow came by the different types of obstruction, so that we can find the

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系教授
(2) 國立中興大學水土保持學系博士生
(3) 國立中興大學水土保持學系碩士生

applicability of ADV in flume experiments. According to the experiment results, we have found that using ADV to measure the flow velocity is helpful in flume experiments, because it can overleap the interference of the sediment and accurately measure the tiny change of velocity, we can be sure that using ADV in flume experiments is a satisfactory choice.

(**Keyword:** Acoustic-Doppler Velocimeter, Flume experiments, Velocity profile, Signal noise rate)

一、前言

ADV 為一根據都卜勒原理之感應系統，且適用於高精度的三維流速量測。可用在研究邊界層，或其他在水力學、水文學、海岸工程、海洋學、地球物理學、環境與生態系中的紊流測量。它的功能是以超音波測量水流流速，也可以知道整個水體中各點的水流速度，在很多的情況下我們希望知道水的流速，最直接的測量方式是像測量風速一樣，拿個螺旋槳或者旋轉杯放入水流，當其隨水流旋轉時，經過磁性線圈感應即可知該點的流速。事實上到目前為止，國內不少的海流測量仍這麼做。這類儀器其實問題很多，包括儀器本身的摩擦會使量測不準，同一個儀器隨著使用年齡增長會覺得水越流越慢。又施測時只能測一個點或一個深度的流速，而水是流體，各個水層流速應是不同的，如果要以這種傳統方式測量流速剖面，必須有多台流速儀或需配合精密的控制才能測得完整；另外在需要量測精密的流速變化時，由於螺旋槳會影響水流，使流況失真，在實驗室中往往無法得到理想結果，此類儀器唯一的好處是造價相當便宜。

相對的，ADV 不需要螺旋槳，直接利用聲波反射得到流速，即使裝在移動的船隻上或者安裝在水底也都可以運作，對於施測點流況的影響較小，對於使用者的唯

一缺點可能是價格較昂貴。

根據都卜勒原理(如圖 1)，接近中的聲源會顯得頻率較高，遠離時則會聽來變成較低音。因為聲音在空氣中傳播時，基本上速度不變，但是音源如果會動，相對速度就會不同。若聲源向聽者迫近，同一個時段內聲波數目會比較多，音頻則比較高；相對的，遠離時音頻較低。因此 ADV 利用此原理，在河川或海中對各方向射出聲波，河海中存在的懸浮顆粒會將聲波反射，儀器接收後便依據音頻的改變情形判斷顆粒的運動方向，並利用都卜勒原理換算出該顆粒的速度，假設該顆粒隨水流運動，則其流速流向可視為水流的流速流向。

$$F_{Doppler} = -2F_{source} \frac{V}{C} \quad (1)$$

式中 $F_{Doppler}$ 為接收到的頻率， F_{Source} 為聲音傳播頻率， V 為水流速度， C 為音速。

本研究即運用 ADV 於實驗室渠道試驗中，測量項目主要分為剛性結構物與彈性結構物上下游流況之量測兩類，除了驗證 ADV 在室內渠槽試驗中之適用性外，亦試圖由兩種不同情況所量測到的流速剖面，比較其中之異同。

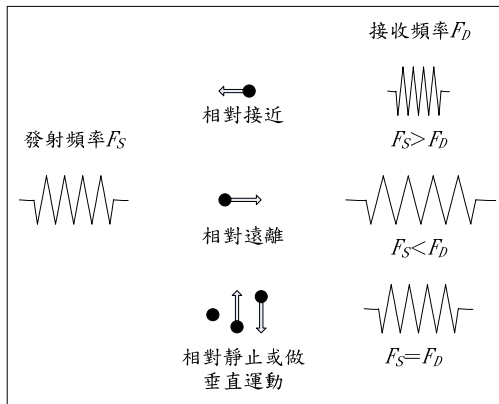


圖 1. 都卜勒原理

水流流速剖面之量測，一直是長期以來泥沙工作者面對的重要課題之一，即使是在具有許多控制條件下的渠槽試驗中，亦必須在盡量不干擾水流的情形下，以單點或多點的量測方式，求得流速剖面，方能進一步探求底床變動情形，近年相關研究主要利用光學及聲波儀器對流場進行測量。國內學者林(1988)則利用雷射都卜勒流速儀(LDV)測量斜坡上波動內部流場及底部邊界層之特性，此法乃利用水流通過雷射干涉條紋的頻率，計算通過該點之流速，並可藉由干涉條紋排列方式的改變，求得不同方向之流速變化。另尚有影像及微波雷達量測方法測量流速，其中影像量測由於具有非接觸全流場觀測的能力，在許多相關的研究發展下，逐漸成為量測流體速度場的良好工具，Nezu and Onitsuka(2001)利用質點影像流速儀(PIV)配合光纖雷射都卜勒流速儀(LDV)，以銅管模擬水中植物，並改變銅管配置，量測流場變化及流速剖面；Lin et. al.(2003)也利用同樣量測方法同時測量單一固定點之流速變化與全流場，提出一系列流場觀測與分析方法。Song and Graf(1996)利用聲波都卜勒流速計(Acoustic Doppler Velocity Profile, ADVP)，直

接量測垂向流速剖面。Stephan and Karl(2001)更進一步以 3D 聲波都卜勒流速計，量測水流通過三種不同隱沒植物之流速剖面，藉以瞭解不同種類植物遭水流沖擊彎曲時，對水流之有效影響高度。光學儀器的好處為可完全不接觸水流，量測精確性高，在量測精密流場時十分便利，缺點為水中懸浮雜質較多時，光波易受懸浮顆粒阻擋影響其精確性；相反聲波儀器無法在完全清澈的水中量測流場，需有一定量以上的懸浮顆粒方為準確，缺點是仍須接觸水流，但因量測點為接收器前方 5~10 公分處，可減小此影響。以渠槽實驗或現場觀察並配合光學或聲波儀器量測流場的方式，針對水中剛性或彈性障礙物對流況的影響情形進行探討，在國外可說是行之有年，也是相關主題中常見的研究方式，本研究即以 ADV 應用於實驗渠道量測，探討 ADV 在渠道試驗中之適用性及功效。

二、實驗設計

為瞭解 ADV 於渠槽實驗中之適用性，故設計水槽中置入剛性及彈性之結構物，以量測結構物前後之流速剖面變化為主，瞭解 ADV 用於渠槽實驗中所應注意事項及其可延伸應用之處。

1. 實驗渠槽(如圖 2)為長 8 公尺，寬 0.3 公尺，深 0.6 公尺之玻璃渠槽，可調整坡度，由定水頭水箱提供入流，並以閘門控制流量，渠槽末端設有尾水板以控制水深，出口設一水池，將流出之水以幫浦抽回上游之定水頭水箱，形成一循環系統。
2. 實驗儀器為都卜勒流速計 ADV(圖 3)，以可動式支架固定於渠槽上方，支架可在渠

槽上移動水平位置，並以螺旋轉盤控制 ADV 的高度，使 ADV 前端音鼓及接收器可沒入水中，並調整為各種不同水深位置，以測量同一橫斷面上不同水深位置的流速(如圖 4)。

3. 實驗配置分為兩大類，第一類以玻璃管模擬如橋墩之剛性水工結構物，直徑 2.5 公分，高 15 公分，將其固定於渠槽中，為避免受到渠槽上下游出入口影響，圓柱宜設在渠槽中段，即約 4 公尺處；第二類為彈性結構物，以 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)塑膠製成之彈性塑膠條模擬之，直徑 0.3~0.5 公分，高 30~40 公分，同樣將其固定於渠槽 4 公尺處。根據 Neill(1968)對於臨界啟動流速之估算式，依照本實驗水流條件，臨界啟動流速在 31.54~34.84cm/s 之間，本研究實驗水流平均流速則在 7~9cm/s 之間，因此底床僅在結構物周圍有局部沖刷。
4. 控制下游尾水板，使水深到達 10 公分，並控制渠槽坡度為水平，以 ADV 量測圓柱或塑膠條之上游，每隔適當間隔量測一斷面，每斷面從水面起每隔 0.5~1 公分量測一個點，下游亦同，並將各點所量得之流速繪成流速剖面圖。
5. 改變流量或結構物，重覆 1~4 步驟。



圖 2. 實驗渠槽

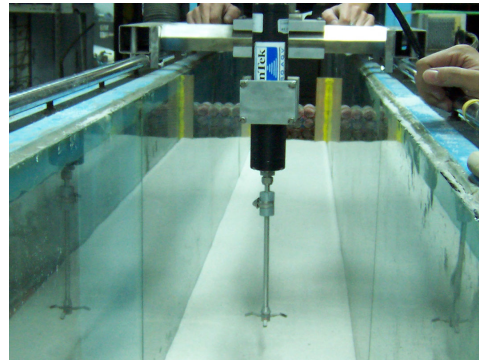


圖 3. ADV 垂直固定於渠槽中央



圖 4. 以可動式支架調整 ADV 位置

三、實驗量測、記錄與應用

依照實驗流程，將各實驗條件及其對應之沖刷深度結果整理如表 1。實驗條件之設定目的在於利用 ADV 進行量測流速之細微變化，因此所設定之水中結構物對於水流的干擾程度亦盡量減小，其中第 1、2 組水深與流量固定，其結構物為硬性幹材玻璃管及具環

陳樹群、王敦儀、嚴曉嘉：應用聲波都卜勒流速計於渠道實驗之量測

節之玻璃管上，由於 ADV 第 3、4、5 組爲了測量更完整資訊以供觀察，因此增加水深以測出更完整之流速剖面，結構物爲具環節之玻璃管及更細且具彈性之 ABS 塑膠條。

本實驗所使用之 ADV 及其專用軟體，所測得資訊皆可依使用者需要決定各欄位包含

內容，除前述流速、SNR、Corr 等外，尚可記錄水溫、時間、流向等資訊，所測得之原始數據資訊，其格式並無法直接分析，但可經過格式轉換以供常用之 Excel 等軟體處理，及作更進一步之分析。

表 1. 實驗條件表

組	水深(cm)	單寬流量 (cms/m)	結構物	沖刷坑深 (cm)	量測斷面數
1	11	0.010	直徑 2.5cm 高 15cm 之玻璃管	1.7	9(上游 9 下游 3)
2	11	0.010	同上玻璃管並具環節	0.68	6(上下游各 3)
3	20	0.015	同上	0.68	6(上下游各 3)
4	20	0.015	直徑 0.5cm 之 ABS 條,高 40cm	0.4	6(上下游各 3)
5	20	0.015	直徑 0.3cm 之 ABS 條,高 30cm	0.2	2(上下游 5cm 處)

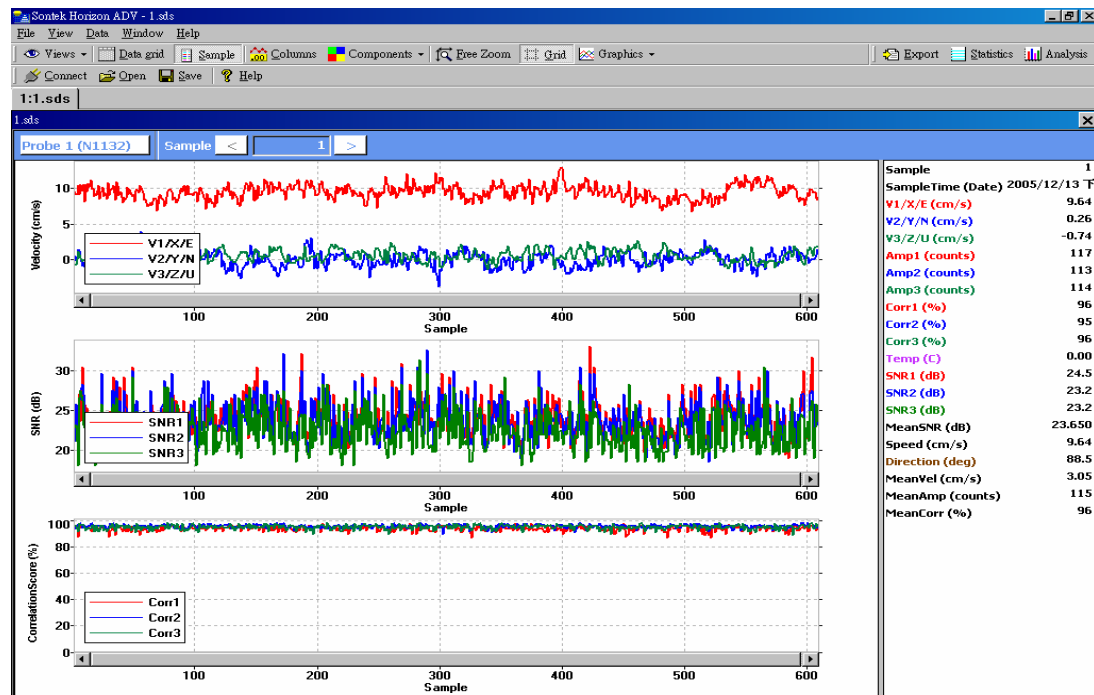


圖 5. ADV 量測軟體主要畫面

1. 實驗量測

使用 ADV 之前，需先對 ADV 之發射、取樣功能與所需資訊欄位進行設定，本實驗所使用之 ADV，可自行依所接觸之水溫校正音波波速與頻率，維持其量測精確性；而取樣頻率最高可達 25Hz，即每秒紀錄 25 筆資訊，本實驗所設定之取樣頻率為 10Hz，即每秒紀錄 10 筆資訊，資訊內容依本實驗需要主要包含三維流速、雜訊比(Signal Noise Rate，簡稱 SNR)、相關係數(Corr)等，圖 5 為 ADV 量測主要畫面，其中所含資訊左邊三圖即依次為流速、SNR、Corr 隨時間取樣之變化。取樣頻率的高低需視實驗目的所需而定，當實驗需觀察流場隨時間的細微變化時，流場的變動程度即為觀察重點，此時需將取樣頻率增高，以減少資訊均化的影響，一般多應用於觀測紊流流場；而當實驗著重於長期記錄或平均流速之量測時，則可將取樣頻率調低，以避免資料過多反而增加分析處理上的困難。SNR 為判斷實驗中訊號是否足以採信的依據，依照儀器使用手冊敘述，一般渠槽實驗中 SNR 至少要達到 15 以上方為可信，如本實驗所得之平均 SNR 值約為 20。SNR 值過低時，其原因不外乎接收有效訊號量過少或水中懸浮物太少，ADV 的原理中其接收訊號來自於水中懸浮粒子將音波反射，欲提高 SNR 值，可在水中增加懸浮粒子以增加訊號接收量，因此過於清澈的水流不利於 ADV 之運作，而水利、水土保持等學界常見的含砂水流渠槽實驗，因水中懸浮物質較多，若使用光學流速儀(如雷射都卜勒流速儀等)測量流速易受水中雜質干擾而較不適宜，反而適合 ADV 之特性，適度的懸浮粒子恰可提供 ADV 發揮的舞台。Corr 則顯示流速的變化程度，越小表示該點流速持續產生較大幅度

變動，導致每筆取樣流速與平均流速之差異較大，即相關程度較小，圖 5 中的流速區的波動幅度亦會較大，一般在水流紊動區常可見到此情形，Corr 越大則表示該點水流每筆取樣流速與平均流速差距越小，亦即水流越平穩，如圖 5 中三軸流速之 Corr 皆維持在約 95。流速則依照 ADV 前三支分岔的音鼓所發出的訊號，接收為三個互相垂直方向之流速，即可測得 x-y-z 三維流速，但須注意音鼓之擺放角度會影響所接收到的資訊精確性，以本實驗來說，將專責量測 x 軸流速之音鼓固定指向來流方向，則 y 軸為渠槽寬度，z 軸為渠槽深度，x 軸音鼓若無準確指向來流方向，所測得之流速會因音鼓角度而有所偏差，需經角度校正方可採用。

2. 實驗記錄

由 ADV 專用軟體之功能，使用者可自行決定開始紀錄與停止之時間間隔，並依照設定之取樣頻率自動記錄每筆資訊，如本實驗所設定之取樣頻率為 10Hz，則當記錄筆數達到 600 筆時停止，表示記錄了 10 秒的資訊，所記錄之資訊格式可以該軟體功能轉為常用之 Excel 檔案格式，以利使用分析，如圖 6。每次記錄由開始到停止，軟體會自行存成一獨立檔案，表示該測點在此測量時間內之各項基本資訊，根據該檔案內容可初步計算得出該點在測量時間內的平均流速及流速變動程度。若需測量某一垂直斷面之流速分佈，則需依賴垂直升降架，將 ADV 固定於垂直升降架後，由水面始，每下降一段距離，即針對該點施測一段時間，至底床為止，軟體可自動記錄為一連串檔案，取每個檔案中流速之平均，依照各測點之垂直位置排列，即可得到一垂直斷面之平均流速剖面。

Sample	SampleTime	V1/X/E	V2/Y/N	V3/Z/U	Corr1	Corr2	Corr3	SNR1	SNR2	SNR3	MeanSNR	Speed	Mean
1	2006/1/18	13.47	0.92	0.69	95	96	94	28.81	26.66	24.08	26.51667	13.50138	5.0
2	2006/1/18	13.73	1.79	0.32	94	95	94	25.37	26.66	23.65	25.22667	13.84619	
3	2006/1/18	13.27	0.69	-0.32	96	97	94	29.24	28.81	25.37	27.80667	13.28793	4.5
4	2006/1/18	13.98	1.31	-0.47	96	94	94	25.8	24.94	24.51	25.08333	14.04124	
5	2006/1/18	13.87	-0.4	-0.04	93	96	95	29.24	29.24	28.38	28.95333	13.87577	4.4
6	2006/1/18	12.91	-0.54	0	98	97	96	29.24	28.38	26.66	28.09333	12.92129	4.1
7	2006/1/18	12.52	1.14	0.11	96	92	90	24.94	24.51	23.65	24.36667	12.57179	
8	2006/1/18	12.54	0.46	0.29	95	96	97	28.38	29.67	30.53	29.52667	12.54843	
9	2006/1/18	13.1	0.82	0.12	96	97	95	27.95	27.09	26.23	27.09	13.12564	
10	2006/1/18	13.77	0.68	-0.2	94	94	94	26.23	27.95	25.37	26.51667	13.78678	
11	2006/1/18	14.02	0.79	-0.33	97	95	95	30.53	28.81	26.23	28.52333	14.04224	4.8
12	2006/1/18	15.99	0.49	-0.26	95	96	95	28.81	27.52	23.65	26.66	15.99751	5.4
13	2006/1/18	14.45	1.17	1.74	95	96	92	29.67	28.81	26.66	28.38	14.49729	5.7
14	2006/1/18	13.48	-0.21	1.28	94	97	95	31.82	30.96	28.81	30.53	13.48164	
15	2006/1/18	13.63	-0.03	1.03	96	97	96	30.53	27.95	26.66	28.38	13.63003	4.8
16	2006/1/18	14.53	-0.4	0.78	95	94	94	28.81	28.81	24.08	27.23333	14.5355	
17	2006/1/18	13.78	-0.03	1.11	93	94	92	25.8	26.66	23.65	25.37	13.78003	4.9
18	2006/1/18	14.46	0.38	0.26	98	98	96	30.1	30.96	28.38	29.81333	14.46499	5.0
19	2006/1/18	13.73	-0.24	0.16	97	96	95	32.68	31.39	27.52	30.53	13.7321	
20	2006/1/18	13.67	-0.5	0.36	90	96	93	27.09	25.8	24.51	25.8	13.67914	
21	2006/1/18	14.74	0.33	0.02	96	98	97	30.96	30.53	28.38	29.95667	14.74369	
22	2006/1/18	14.58	0.2	-0.41	97	95	94	26.66	26.66	27.09	26.80333	14.58137	
23	2006/1/18	14.04	-0.1	0.42	93	93	90	29.67	28.81	23.22	27.23333	14.04036	4.7
24	2006/1/18	14.58	0.39	1.49	95	96	97	31.39	30.53	26.66	29.52667	14.58521	5.4
25	2006/1/18	13.46	-0.78	1.98	88	96	93	24.94	24.94	23.22	24.36667	13.48258	4.8

圖 6. 紀錄之資料轉為 Excel 格式

3. 實驗數據之應用

每測點所得之資料檔案，如前述經過基本處理後，可得到平均流速，並依照測點垂直位置排列，可得由一連續測點所組合之流速剖面，如圖 7 為第一組實驗所測得之流速剖面，包含由玻璃管中心算起，上游 6.5~50cm 等不同位置，將其繪於同一圖上，可明顯比較各位置流速剖面之異同，以瞭解流場受水中障礙物影響之距離與程度，圖 8 則為第一組實驗中下游不同位置之流速剖面，下游 6.5cm 處最接近玻璃管，流速剖面結構改變程度最混亂，甚至可測量到負流速，表示該處附近有渦流產生。隨水流向下由傳遞，剖面逐漸恢復

為近似上游之流場，其中同一深度但不同位置測點之細微變化，經由 ADV 的測量可清楚顯示。由於儀器記錄流速為三軸流速分別記錄，因此若有需要亦可求得其他兩軸的流速變化。

除基本的平均流速之外，從原始流速資料中，由每筆測量數據可求得流速之振動量，使得該點水平流速 u 表示為下式：

$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

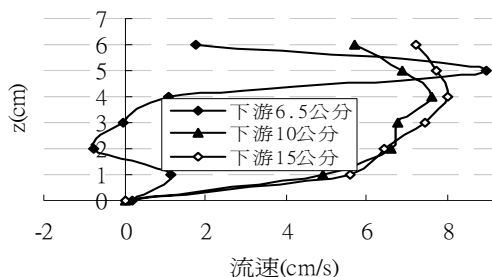


圖 8 . 第一組玻璃管下游之縱向流速剖面

其中 $\bar{u}$ 為該點之平均水平流速， u' 則為水平流速振動量，表示該點水平流速的隨時間的變異程度， u' 越大則該點附近水平流速變動越大，同理亦可求出 v' 、 w' 等值。進一步應用紊流理論，可依實驗量測數據求出各點之紊動強度或紊流剪應力 ($-\rho \bar{u'v'}$ 等)，以瞭解各位置之流場紊動產生的分佈情形，如圖 9 為第 3 組下游各位置之流場紊動強度分佈剖面，由於水流通過玻璃管時，受玻璃管阻擋而使其下游流速降低，通過玻璃管上方之水流卻並未受到影響而流速較快，上下兩層水流的速度差使上層水流向下推擠，在玻璃管下游形成一個漩渦區，此漩渦隨水流向下游逐漸減弱，因此可看到玻璃管下游靠近頂部有較大的紊動強度，且越往下游越弱。

實驗中使用了兩種水深，欲使障礙物玻璃管產生隱沒與非隱沒於水中兩種情形，以觀測其流場變化異同，可發現流速剖面皆受玻璃管影響而改變其結構，但變化型態各有不同，隱沒式的下游流場，僅在隱沒之玻璃管可影響之下層才有變化，上層水流流速不減。另在實驗設計時加入

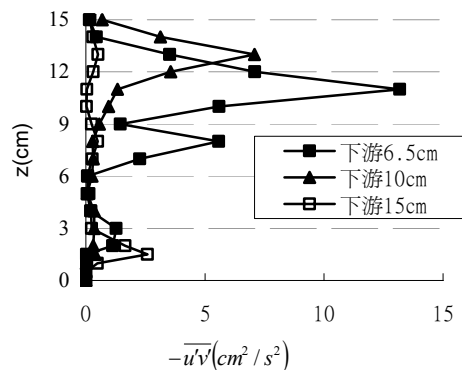


圖 9 . 紊動強度分佈圖

以極細的塑膠條(直徑 0.5cm 及 0.3cm)作為水中障礙物，因其對於水流的影響較微小，以此測試 ADV 對於微小流速變化的測量能力。經實驗量測塑膠條之上下游流速剖面，如圖 10、11，由圖 11 可看出，即使下游 10cm 至下游 30cm 之流速變化微小，僅約 2cm/s 的差距，ADV 量測結果仍能清楚分辨其間差異，足見其可應用於微小變動量之量測。而塑膠條為彈性材料，在水流中易受水流影響產生擺盪現象，其擺盪對於水流流速產生的反饋效應，理論上應可由各測點之 u' 、 v' 、 w' 變化，進而判斷擺盪動作對於流場的反饋影響，但本實驗由於流速較慢，塑膠條擺盪情形並不明顯，因此在此僅提供一參考方向，並無進一步測試。

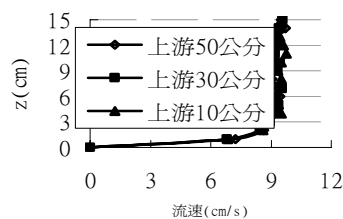


圖 10 . 直徑 0.5cm 塑膠條上游流速剖面

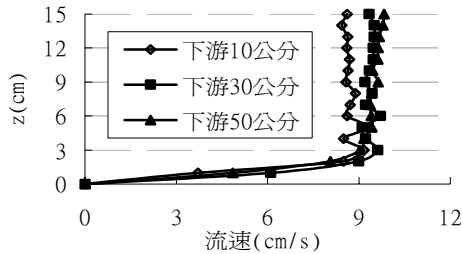


圖 11. 直徑 0.5cm 塑膠條下游流速剖面

四、結論

1. ADV 流速計對於渠槽實驗，在量測流速上有相當良好的功效，配合周邊器材的設計(升降架等)，可量測一斷面之流速剖面，瞭解水流受不同類型障礙物的影響，亦可量測流速隨時間的變化，瞭解水流紊動的情形，而不同方向的流速亦可藉由儀器功能得知，因此對於室內水槽實驗而言，為相當方便之工具。
2. ADV 的特點是水中需有一定量以上之懸浮粒子方可接收反射的音波，以求得該懸浮粒子的各方向速度，對於水利或水土保持類之室內渠槽實驗，常需底床鋪砂，甚至增加來砂量成為含砂水流，此特點恰符合儀器的使用要求，即使水流較混濁，對於此儀器的量測功能仍不受影響，相較於光學原理流速儀，ADV 更適用於含砂水流之量測。
3. 由各組彈性材料之實驗結果可知，ADV 足以量測極細微的流速變化，對於渠槽流場變化分析，有相當大的助益。

參考文獻

1. 林呈(1988)，「應用流場可視化法及 LDV 探討斜坡上波動內部流場及底部邊界層之特性」，博士論文。
2. Iehisa N., Kouki O.(2001), "Turbulent structures in partly vegetated open-channel flows with LDA and PIV measurements," *Journal of Hydraulic Research, IAHR* 39(6): 629-641.
3. Lin, C., Lin, W. J., Pai, C. Y., and Shih, C. M.(2003), "Experimental study on wake structures behind two square cylinders arranged side by side using PIV and FLDV," *Journal of Engineering, ASCE* 14(1):1-19.
4. Neill C. R.(1968), "Note on initial movement of coarse uniform material," *Journal of Hydraulic Research, IAHR* 17(2): 247-249.
5. Song, T. and Graf W. H.(1996), "Velocity and Turbulence Distribution in Unsteady Open-Channel Flow," *J. Hydr. Engineering, ASCE*, 122(3):141-154.
6. Ursula S., Karl W.(2001), "Experiments on Hydraulic Roughness of Macrophytes," *Environmental Hydraulics an Eco-Hydraulics. Proceedings Theme B. XXIX IAHR Congress, Beijing, China*, 358-363.

95 年 12 月 20 日 收稿

96 年 1 月 10 日 修改

96 年 1 月 16 日 接受