

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

潛板對橋墩沖刷保護之試驗研究

Experimental Study on Submerged Vanes for
Bridge Pier Scour Protection

研究生：何浚騰

指導教授：葉克家 博士

中華民國九十九年八月

潛板對橋墩沖刷保護之試驗研究

Experimental Study on Submerged Vanes for Bridge Pier

Scour Protection

研究生：何浚騰

Student：He-Jyun Teng

指導教授：葉克家

Advisor：Keh-Chia Yeh

國立交通大學



Submitted to Institute of Civil Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

In

Civil Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年八月

潛板對橋墩沖刷保護之試驗研究

學生：何浚騰

指導教授：葉克家

國立交通大學土木工程學系

摘要

由於台灣河川坡度陡峭、豪大雨集中，橋墩附近因洪流產生嚴重的局部沖刷，造成橋墩基礎承載強度下降，進而導致橋樑倒塌。目前在橋墩保護工法上設置蛇籠、固床工、拋石、消能塊等，費時又未必能達到最佳效果，因此研究新的保護橋墩工法有其必要性。

本研究在清水沖刷條件下，於橋墩上游處設置雙片之對稱潛板（潛沒於水面下），進行局部沖刷試驗。由於橋墩局部沖刷之以向下射流（down flow）與馬蹄形渦流（horseshoe vortex）為影響橋樑基礎沖刷中兩重要機制。本試驗探討不同潛板佈置方案、橋墩間之渦度場對於底床泥沙沖刷深度之影響，評估潛板對橋墩沖刷保護之效果。並以非侵入式彩色質點影像測速法（color particle image velocimetry, CPIV）之量測方法進行橋墩局部沖刷之流場觀測研究，了解橋墩沖刷二維流場變化。並藉由攝影機（CCD）擷取流場影像，進而影像分析，以獲得流場之速度向量與渦度場分佈。當固定流量 0.007cms （福祿數 $Fr=0.35$ ）、均勻粒徑（ $d_{50}=0.42\text{mm}$ ）、橋墩直徑 2cm 與潛板長 5cm 條件下，進行橋墩局部沖刷與渦度場之試驗結果顯示出，當潛板沖擊角度約為 15 度、潛板前緣與墩鼻端的距離為 3 倍之橋墩直徑、潛板前端開口為 0.5 倍之橋墩直徑、潛板入水深度約為 0.48 倍之平均水深，減少沖刷深度達到 54.6% ，且在較大流量下潛板最佳化佈置也能顯示出作用。

關鍵詞：橋墩、局部沖刷、潛板、渦度場、彩色質點影像測速法

Experimental Study on Submerged Vanes for Bridge Pier

Scour Protection

Student: He-Jyun Teng

Advisor: Keh-Chia Yeh

Institute of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Due to rivers with steep gradients and excessively concentrated rainfalls in Taiwan, floods generate severe local scours around bridge piers that reduce the bearing strength of pier foundations; more seriously they will result in the collapse of bridges. Present engineering methods of constructing gabions, ground sill works, ripraps, and armor units for pier protection are taking lots of time and uncertainly reaching its best effectiveness; therefore, it is necessary to develop the new modes of engineering methods for bridge pier protection.

This research is to study on the local scour under the condition of clear water scouring with a pair of symmetrical submerged vanes upstream of bridge pier. Local scour at bridge piers occurs mainly because of the down flow and horseshoe vortex, the two major mechanisms. This experiment is conducted to study different layouts of submerged vanes and vortex fields between the vanes and the bridge piers that both affect the scour depth on the river bed, and estimate the protective effectiveness of submerged vanes against the local scour around bridge pier; moreover, it studies on the field observation of local scours at bridge piers with the method of non-intrusive color particle image velocimetry to understand the variation of 2-D flow field of local scours at bridge piers. In addition, the field images captured by charge-coupled devices will be analyzed to obtain the velocity vector of the field and the layouts of vortex field. When the constant flow is 0.007cms (Froude number, $Fr = 0.35$), same bed material ($d_{50} = 0.42$ mm), the diameter of the pier is 2cm, and the length of submerged vane is 5cm, the result of this experiment testing on local scours at bridge piers and vortex fields by estimating the river bed and conducting field experiments shows when the angle of attack of the submerged vane is round 15° , the

distance between the submerged vane and pier is three times length of the pier diameter, the front opening of submerged vane is 0.5 times length of the pier diameter, and the submerged water is around 0.48 times than the average depth of water; reduce the scouring depth to 54.6%, further, under the condition of greater scouring submerged vanes with the most effective layouts still function well.

Keywords : bridge piers, local scour, submerged vanes, vorticity, CPIV



誌 謝

本文承蒙恩師 葉教授克家兩年來悉心指導與諄諄教誨，得以順利完成學業。就讀研究所兩年期間，恩師對於做事方法與態度、分析問題、獨立解決問題能力之培養、邏輯思考的訓練、論文寫作的技巧等，用心指導讓學生受益良多。並於日常生活中，受到許多關心與照顧，僅此獻上最誠摯之謝忱。

文稿初成，承蒙成功大學蔡教授長泰、逢甲大學許教授盈松、水利所河川規劃課陳課長春宏不吝斧正，並提供許多寶貴意見，使得本文更加完整，僅致衷心之謝忱。

研究所期間，非常感謝博士班楊昇學學長頃囊相授、盡心盡力的指導，也感謝仲達、柏傑、仁凱、宇翔、冠曄、全謚、宥達、環宇學長、珊瑚學姊及曉萍學姐不僅在課業的提攜也在生活中幫忙與鼓勵，最要好的研究室同學新詠、明儒、勁頤、昀軒、仁猷、群玲、琦雯及水利、海洋組全體同學因為有你們研究生生活才會如此豐富，以及感謝學弟妹們的幫忙與參與，這兩年因為認識了你們而研究生生活更加豐富、快樂。

最重要感謝的是含辛茹苦、撫育我成長的父母與家人，由於你們的扶持與栽培，使我有往前邁進的動力，還有一路上鼓勵我的朋友們，摯友樺琨、展功、大寶、威彤，屏科同學阿彬、哈草、士傑、為杰、毓雀、佳潤、騫璘，以及高職同學健珉、昌昇、小徐、阿姚、小田，即使我遇到困難你們還是永遠在我後面位我加油打氣，這份榮耀是屬於你們的。

謹將本文獻給關心我的家人師長、朋友，以及所有的同學們。

目錄

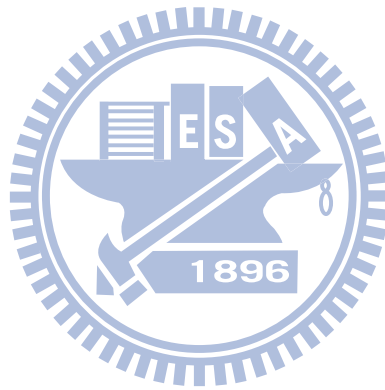
摘要.....	III
Abstract.....	IV
誌謝.....	VI
目錄.....	VII
圖目錄.....	X
符號說明.....	XIV
第一章 導論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 研究目的.....	1
1-3 文獻回顧.....	2
1-3-1 橋墩沖刷與潛板相關研究.....	2
1-3-2 彩色質點影像測速法.....	6
1-4 研究方法.....	8
1-5 本文組織.....	8
第二章 試驗儀器與佈置規劃.....	10
2-1 CPIV 儀器系統.....	10
2-1-1 設備系統.....	10
2-1-2 訊號控制系統.....	11
2-1-3 影像系統.....	11
2-2 CPIV 試驗程序.....	12
2-3 沖刷試驗條件.....	13
2-3-1 試驗泥砂.....	13
2-3-2 流量與流速率定.....	13
2-3-3 沖刷時間.....	14
2-3-4 試驗設備.....	14
2-4 橋墩局部沖刷試驗程序.....	15
第三章 CPIV 法影像處理與橋墩沖刷之潛板設置原理.....	16
3-1 CPIV 法影像處理流程.....	16
3-2 程式運算分析.....	16
3-3 CPIV 法之誤差來源.....	20
3-4 沖刷原理.....	22
3-5 潛板理論.....	24
3-6 潛板減少橋墩沖刷之原理.....	25
第四章 試驗結果分析.....	26
4-1 潛板於橋墩佈置試驗之因次分析.....	26
4-2 單一橋墩沖刷探討.....	27

4-3	潛板佈置探討.....	28
4-3-1	攻角佈置之探討.....	28
4-3-2	間距佈置之探討.....	29
4-3-3	開口佈置之探討.....	30
4-3-4	入水深度佈置之探討.....	31
4-4	沖刷結果討論.....	32
4-5	渦度場試驗.....	32
4-5-1	單一橋墩與潛板沖刷影響較小佈置案例探討.....	32
4-6	渦度場結果討論.....	33
第五章	結論與建議.....	35
5-1	結論.....	35
5-2	建議.....	36
參考文獻	38



表目錄

表 4-1 不同佈置案例與結果	41
表 4-2 渦度場案例與結果	42
表 4-3 案例佈置無因次參數對應橋墩沖刷深度迴歸分析係數表	43



圖目錄

圖 1-1 潛板與橋墩佈置示意圖	44
圖 1-2 Ghorbani and Kells 單一導流板佈置圖	44
圖 1-3 Ghorbani and Kells 雙導流板佈置圖	45
圖 1-4 表層隔板與橋墩示意圖	45
圖 1-5 底部隔板與橋台示意圖	46
圖 2-1 儀器架設示意圖	46
圖 2-2 CPIV 儀器架設圖	47
圖 2-3 Argon 雷射	47
圖 2-4 多彩聲光調變器 (PCAOM)	48
圖 2-5 PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖	48
圖 2-6 PCI-6601 訊號控制卡	49
圖 2-7 自製降壓電路板	49
圖 2-8 影像擷取位置示意圖	50
圖 2-9 試驗泥砂粒徑分佈曲線	50
圖 2-10 最大沖刷深度流速條件示意圖	51
圖 2-11 流量率定曲線	51
圖 2-12 均勻粒徑之 Shields 始動剪力速度圖	52
圖 2-13 橋墩沖刷平衡時間歷程圖	52
圖 2-14 試驗水槽佈置示意圖	53
圖 2-15 相機角架固定裝置	53
圖 3-1 原始影像擷取圖	54
圖 3-2 藍、綠影像亮度分佈示意圖	54
圖 3-3 imb、img 比對方式	55
圖 3-4 將綠色點位移(m, n)後與藍色點重疊(matching)情況	55
圖 3-5 互相關計算所得之 C(m, n)分佈示意圖	56
圖 3-6 不一致流速向量圖(右下角虛線框處)	56
圖 3-7 去除不一致流速向量圖(右下角虛線框處)	56
圖 3-8 RMS 誤差之示意圖	57
圖 3-9 偏差誤差之示意圖	57
圖 3-10 已知位移量 8 畫素之計算結果	57
圖 3-11 橋墩局部沖刷水流結構示意圖	58
圖 3-12 導流板設置後產生尾跡漩渦及螺旋水流示意圖	58
圖 3-13 導流板產生尾跡渦流影響底床變化示意圖	59
圖 4-1 攻角佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖	60
圖 4-2 攻角佈置對橋墩減少沖刷效益圖	60
圖 4-3 攻角佈置對橋墩中心縱剖面圖	60

圖 4-4 間距佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖	61
圖 4-5 間距佈置對橋墩減少沖刷效益圖	61
圖 4-6 間距佈置對橋墩中心縱剖面圖	61
圖 4-7 開口佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖	62
圖 4-8 開口佈置對橋墩減少沖刷效益圖	62
圖 4-9 開口佈置對橋墩中心縱剖面圖	62
圖 4-10 入水深度佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖	63
圖 4-11 入水深度佈置對橋墩減少沖刷效益圖	63
圖 4-12 入水深度佈置對橋墩中心縱剖面圖	63
圖 4-15 案例 1 底床高程圖(t=3hr)	64
圖 4-16 案例 1 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	64
圖 4-17 案例 1 影像圖	65
圖 4-18 案例 1 速度向量圖	65
圖 4-19 案例 1 渦度場圖	65
圖 4-20 案例 2 底床高程圖(t=3hr)	66
圖 4-21 案例 2 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	66
圖 4-22 案例 2 影像圖	67
圖 4-23 案例 2 速度向量圖	67
圖 4-24 案例 2 渦度場圖	67
圖 4-25 案例 3 底床高程圖(t=3hr)	68
圖 4-26 案例 3 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	68
圖 4-27 案例 3 影像圖	69
圖 4-28 案例 3 速度向量	69
圖 4-29 案例 3 渦度場圖	69
圖 4-30 案例 4 底床高程圖(t=3hr)	70
圖 4-31 案例 4 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	70
圖 4-32 案例 4 影像圖	71
圖 4-33 案例 4 速度向量圖	71
圖 4-34 案例 4 渦度場圖	71
圖 4-35 案例 5 底床高程圖(t=3hr)	72
圖 4-36 案例 5 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	72
圖 4-37 案例 5 影像圖	73
圖 4-38 案例 5 速度向量圖	73
圖 4-39 案例 5 渦度場圖	73
圖 4-40 案例 6 底床高程圖(t=3hr)	74
圖 4-41 案例 6 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	74
圖 4-42 案例 6 影像圖	75
圖 4-43 案例 6 速度向量圖	75

圖 4-44 案例 6 渦度場圖	75
圖 4-45 案例 7 底床高程圖(t=3hr)	76
圖 4-46 案例 7 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	76
圖 4-47 案例 7 影像圖	77
圖 4-48 案例 7 速度向量圖	77
圖 4-49 案例 7 渦度場圖	77
圖 4-50 案例 8 底床高程圖(t=3hr)	78
圖 4-51 案例 8 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	78
圖 4-52 案例 8 影像圖	79
圖 4-53 案例 8 速度向量圖	79
圖 4-54 案例 8 渦度場圖	79
圖 4-55 案例 9 底床高程圖(t=3hr)	80
圖 4-56 案例 9 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	80
圖 4-57 案例 9 影像圖	81
圖 4-58 案例 9 速度向量圖	81
圖 4-59 案例 9 渦度場圖	81
圖 4-60 案例 10 底床高程圖(t=3hr)	82
圖 4-61 案例 10 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	82
圖 4-62 案例 10 影像圖	83
圖 4-63 案例 10 速度向量圖	83
圖 4-64 案例 10 渦度場圖	83
圖 4-65 案例 11 底床高程圖(t=3hr)	84
圖 4-66 案例 11 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	84
圖 4-67 案例 11 影像圖	85
圖 4-68 案例 11 速度向量圖	85
圖 4-69 案例 11 渦度場圖	85
圖 4-70 案例 12 底床高程圖(t=3hr)	86
圖 4-71 案例 12 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	86
圖 4-72 案例 12 影像圖	87
圖 4-73 案例 12 速度向量圖	87
圖 4-74 案例 12 渦度場圖	87
圖 4-75 案例 13 底床高程圖(t=3hr)	88
圖 4-76 案例 13 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	88
圖 4-77 案例 13 影像圖	89
圖 4-78 案例 13 速度向量圖	89
圖 4-79 案例 13 渦度場圖	89
圖 4-80 案例 14 底床高程圖(t=3hr)	90
圖 4-81 案例 14 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	90

圖 4-82 案例 14 影像圖	91
圖 4-83 案例 14 速度向量圖	91
圖 4-84 案例 14 渦度場圖	91
圖 4-85 案例 15 底床高程圖(t=3hr)	92
圖 4-86 案例 15 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	92
圖 4-87 案例 15 影像圖	93
圖 4-88 案例 15 速度向量圖	93
圖 4-89 案例 15 渦度場圖	93
圖 4-90 案例 16 底床高程圖(t=3hr)	94
圖 4-91 案例 16 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	94
圖 4-92 案例 16 影像圖	95
圖 4-93 案例 16 速度向量圖	95
圖 4-94 案例 16 渦度場圖	95
圖 4-95 案例 17 底床高程圖(t=3hr)	96
圖 4-96 案例 17 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	96
圖 4-97 案例 17 影像圖	97
圖 4-98 案例 17 速度向量圖	97
圖 4-99 案例 17 渦度場圖	97
圖 4-100 案例 18 底床高程圖(t=3hr)	98
圖 4-101 案例 18 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	98
圖 4-102 案例 18 影像圖	99
圖 4-103 案例 18 速度向量圖	99
圖 4-104 案例 18 渦度場圖	99
圖 4-105 案例 19 底床高程圖(t=3hr)	100
圖 4-106 案例 19 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	100
圖 4-107 案例 19 影像圖	101
圖 4-108 案例 19 速度向量圖	101
圖 4-109 案例 19 渦度場圖	101
圖 4-110 案例 20 底床高程圖(t=3hr)	102
圖 4-111 案例 20 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)	102
圖 4-112 案例 20 影像圖	103
圖 4-113 案例 20 速度向量圖	103
圖 4-114 案例 20 渦度場圖	103

符號說明

ρ : 流體密度

g : 重力加速度

μ : 動力黏滯係數

H : 平均水深

V : 平均流速

d_{50} : 試驗砂中值粒徑

ρ_s : 試驗砂密度

σ_g : 試驗砂幾何標準差

S : 底床坡度

D : 橋墩直徑

B : 渠槽寬度

h_l : 潛板長度

h_v : 潛板入水深度

θ : 潛板攻角

S : 潛板開口

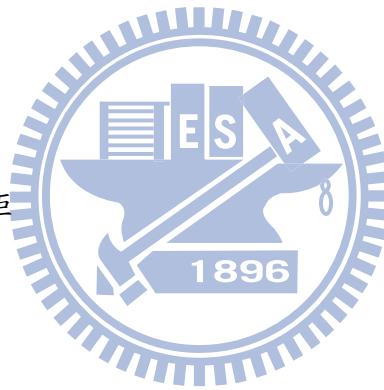
L : 潛板前緣與墩鼻端間距

d_p : 墩鼻端沖刷深度

d_{sv} : 潛板局部沖刷深度

Q : 流量

Fr : 福祿數



第一章 導論

1-1 研究動機

由於台灣河川坡度陡峭，豪大雨過於集中，洪水使得橋墩附近產生嚴重的局部沖刷，可能造成橋墩基礎受損，導致橋墩結構強度下降，嚴重則會產生基礎承載損壞而使橋樑傾倒或倒塌。因此，如何降低橋墩沖刷所帶來之問題為本研究之重點。

因為河川泥砂運移之不平衡而形成河床沖刷與淤積現象，使得在橋墩基礎附近造成沖刷現象、彎道凹岸沖刷、取水口泥沙淤積，都是河川常見之輸砂問題。而目前在橋墩保護工法上設置蛇籠、固床工、拋石、消能塊等，施工經費較高且未必能達到保護效果。本研究於實驗室室內研擬於橋墩前設置潛沒式導流板（潛板）對水流進行消能導流，以改善墩鼻前之沖刷問題，此方法將潛板設置於橋墩前方適當之位置，藉以降低底床之刷深。此外，設置潛板不需要耗費大量的工程經費，且潛板設置於水面下，對自然環境景觀之影響較小。

本研究採用潛板佈置於圓形橋墩前方，如圖 1-1 所示。經由各種不同角度、間距、開口方式與入水深度（突出底床面高度）等情況下，對橋墩沖刷保護效果進行探討。研究結果除了量測底床沖刷程度比較，亦採用彩色質點影像測速法（CPIV），以非入侵式之量測技術量測橋墩沖刷時之水流流場變化，探討不同位置之潛板與橋墩間之速度場與渦度場對底床沖刷過程變化之影響，以提供後續相關水利工程實務參考。

1-2 研究目的

造成橋墩局部沖刷主要以向下射流（down flow）與馬蹄形渦流（horseshoe vortex）為影響橋樑基礎沖刷中兩重要機制。因此本研

究主要目的有二，一為於直線水槽進行潛板佈置與沖刷試驗後量測底床之變化，另一為 CPIV 法量測技術，針對橋墩局部沖刷之流場進行試驗，藉以探討水流沖擊橋墩之機制。藉由上述試驗方法以了解潛板佈置對橋墩前沖刷改善之影響，期可得到最佳潛板佈置案例。

1-3 文獻回顧

1-3-1 橋墩沖刷與潛板相關研究

Randkivi and Ettema (1977) 提出泥砂粗糙度會對河床砂質臨界啟動流速產生影響，當河床質中值粒徑 d_{50} 與橋墩迎水面寬度 D 之比值 $\frac{d_{50}}{D}$ 小於 0.02 時為細粒徑，粒徑與沖刷深度無關。若 $\frac{d_{50}}{D}$ 大於 0.02，則沖刷深度將隨中值粒徑增大而減小。此外，於清水沖刷時，粒徑幾何標準偏差 (σ_g) 大小對橋墩局部周圍沖刷深度有顯著的影響，其中 σ_g 大於 1.3 時，將形成護甲現象 (armoring)，使沖刷深度明顯變小，降低沖刷程度；但於濁水沖刷條件下之試驗則較無影響。

Raudkivi (1986) 提出沖刷深度受橋墩迎水面寬度影響甚大，於迎水面水流攻角增大時，由於橋墩迎水面寬度的增加，使沖刷深度隨之加深，橋墩週遭之沖刷坑範圍亦會隨橋墩左右兩側擴大發展。

Dargahi (1990) 於橋墩沖刷試驗中，提出馬蹄形渦流為形成橋鼻端前沖刷之主要原因，於初始時期時並無沖刷產生，而至主要沖刷時期時，其沖刷程度開始增大，到沖刷後期時，其沖刷坑深度以及輸砂率即隨時間遞減。

Marelius and Sinha (1998) 佈置單一潛板於直線渠道，並以較大之潛板攻角作試驗，使水流沿著潛板迎水面兩側流過，且水流大部分由順水端向後分流，藉此探討出潛板迎水面存在一停滯分流線，而使水流進行分流。此外，也發現於攻角 40 度時受潛板背水面較低壓

力分佈與流過逆水端水流之影響，使潛板後方產生兩個明顯的逆時針方向渦流，此現象與以往研究假設對小攻角潛板後方產生之單一渦流呈明顯對比。

Melville and Chiew (1999) 提出以平均水流流速 V 和泥砂啟動流速 V_c 比值關係區分清水沖刷與濁水沖刷機制，當 $\frac{V}{V_c}$ 小於 1.0 時為清水沖刷，於 $\frac{V}{V_c}$ 等於 1.0 時會達到最大沖刷情況；若 $\frac{V}{V_c}$ 大於 1.0 時，則為濁水沖刷，其最大沖刷深度通常較清水沖刷小；並指出於均勻泥砂時，橋墩局部沖刷深度不受泥砂粒徑大小影響，但當橋墩直徑與泥砂中值粒徑比值 $\frac{D}{d_{50}} < 50$ 時，局部沖刷深度受到泥砂粒徑大小的影響。而在沖刷時間方面，則提出橋墩沖刷深度在 24 小時內的沖刷深度增加率小於橋墩直徑的 5% 時，此沖刷深度可視為平衡沖刷深度，達到平衡沖刷深度所對應之時間則視為沖刷平衡時間。

Melville and Coleman (2000) 提出清水沖刷達到臨界流況時，其沖刷坑因沖刷機制的減緩而不再受到淘刷，使其沖刷深度趨於平衡，但濁水沖刷因有上游泥砂作為補充，其平衡沖刷深度將隨著時間的增長，而形成不規則的振盪，但此振盪之現象會隨著流速的增加而趨於平緩。此外，底床泥砂在達到臨界起動流速時將形成最大沖刷深度，而濁水沖刷之平均沖刷深度通常小於清水沖刷，因此橋墩沖刷問題仍以清水沖刷形成之平衡沖刷深度為主要研究對象。

Odgaard and de Witt (1989) 於愛荷華州 West Fork Cedar River 橋墩前方設置導流板(或稱潛板)，有效地將原河川偏右岸之流心，引導至河道中央，減緩因河川彎曲造成之岸壁沖刷情形。

Odgaard and Wang (1991) 探討潛板周圍之渦流結構，當單一潛板，作 15 至 25 度沖擊角之佈置，因潛板兩側垂直壓力不同，使高壓

側形成一向上速度分量，而於低壓處形成一向下速度分量，在潛板後方產生環流量，逐漸形成一沿水流方向之頂端渦流向下游移動，其渦流與彎道產生之反方向二次流及剪應力相抵消，而達到凹岸保護之目的。在潛板應用於河川方面，以潛板之設置達到淤積之效果，防止河川局部沖刷與岸壁沖刷，達到通水斷面均勻目的。其中包含：

1. 河岸彎道凹岸保護；
2. 削減橋墩附近沙洲；
3. 使直線河道通水斷面均勻；
4. 讓橋墩附近彎曲幅度較大河道之流心偏靠河道中央；
5. 設置在取水口與分流處；
6. 於匯流處設置，以削減匯流口淤積情況。

Tan (2005) 採用塑膠砂粒於長 30 公尺、寬 6 公尺之大型水槽進行模型試驗，以單一鋼製潛板施行 15 至 90 度不同潛板角度配置，探討潛板周圍底床載運移行為。經由試驗得知，潛板沖擊角度為 30 度、最佳潛板高度為 2 至 3 倍時，阻擋水流沖擊對底床沖刷達到保護效果。

Ghorbani and Kells (2008) 將潛板設置於橋墩上游處，探討水流沖擊圓柱型橋墩時，對沖刷深度之影響，其佈置方式分為單潛板與雙潛板，且分別改變潛板入水深、沖擊角度進行試驗。在單潛板佈置方面，在距離橋墩直徑 1.5 倍上游處設置單一潛板，如圖 1-2 所示。而雙潛板則於連結於橋墩邊壁上，迎向上游處進行對稱佈置，如圖 1-3 所示。經由試驗結果可知，當單一潛板入水深度 0 公分(與底床面同高度)、沖擊角度 8.5 度時為最佳配置，橋墩沖刷深度減少率約 17.3%。而雙潛板在橋墩左右兩側、入水深度 0 公分、且以固定沖擊角度 30 度時為最佳佈置，橋墩沖刷深度減少率 87.7% 左右。

郭丁元 (1994) 利用兩片表層隔板於橋墩上游進行佈置，如圖

1-4 所示，用於破壞墩前向下水流結構，以削減其沖刷之能力。經試驗結果發現，當表層隔板沖擊角度 60 度、與橋墩間距為 2~3 倍橋墩直徑、開口為 0.1~0.25 倍之橋墩直徑、入水深度為水深之 0.6~0.8 倍時為最佳配置，其橋墩沖刷保護效果為單樁墩鼻端最大沖刷深度與隔板下最大沖刷深度之比達到 89% 左右。

劉安剛 (2001) 以單一片底部導流隔板佈置在橋台突出端附近，如圖 1-5 所示，用於削減向下水流產生螺旋狀的馬蹄形渦流淘刷破壞橋基深度。藉由實驗結果可知，當底部導流隔板沖擊角度 135 度、寬度 63 公分、入水深度 1 公分、與橋台間距 0 公分時，為底部導流隔板在橋台沖刷保護之最佳設置，其橋台沖刷保護效果為橋台最大沖刷深度與隔板最大沖刷深度之比達到 99% 左右。

盧志晃、歐陽慧濤 (2006) 探討潛板最佳佈置之研究，研究中採用彎道正交曲線座標系統，針對潛板之攻角、高度、長度、渠道曲寬比、寬深比與沈滓福祿數等導流板與流場相關參數進行探討，研究結果顯示，渠道之曲寬比及寬深比因子對潛板設置位置之影響最大。

邱宇翔 (2009) 採用兩片導流板於橋墩上游處佈置，用於導流板迎水面與背水面將水流進行二次導流、削減墩鼻端前沖擊水流與導流板尾端產生螺旋水流與尾跡渦流，可有效抑制橋墩局部沖刷。經實驗結果可知，當導流板沖擊角度 15 度、開口 1 公分、與橋墩間距 6 公分，為導流板於橋墩保護之最佳佈置，對橋鼻端沖刷深度減少率約 54.1%。

根據上述文獻研究結果顯示，潛板與導流板對橋墩、彎道、橋台泥砂沖刷保護之研究，鮮少針對潛板與橋墩間之物理現象進行定量探討。因此，本研究將量測潛板對橋墩沖刷深度、速度向量場、渦度場定量探討。

1-3-2 彩色質點影像測速法

一、非侵入式流速量測技術發展

在傳統流場量測方法中，通常採用熱膜(hot wire)、皮托管(pitot tube)，只能做單點量測，且為侵入式，需置入探頭至流場內感應，而影響流場本身之結構形成誤差。近二十幾年來，由於相機與圖像處理技術的迅速發展，流場量測技術已逐漸由單點侵入式發展為二、三維非侵入式觀測，如定量影像量測技術(quantitative image，簡稱 QI)，其中包含 LSV (laser speckle velocimetry)、PIV (particle image velocimetry)、PTV (particle tracking velocimetry) 與 PSV (particle streak velocimetry) 等光學量測方法，其中，QI 法中的 PIV 量測方式在近十多年期間被注重，而 PIV 技術在圖形辨識與影像處理流程方面，對於真實流場中的流況亦有較佳的觀察性。

二、影像分析演算發展

對於影像分析方面，利用質問窗為基礎的互相關演算方法(cross-correlation algorithm)被廣泛地使用在 PIV 的計算方面，如 Liang et al. (2002)、Thomas et al. (2005)、Theunissen et al. (2007)、Goubergrits. et al. (2009)，利用時序性單一曝光之兩張影像，於同位置，利用相同的質問窗演算位移量 (displacement)，其相關函數法如下式所示：

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i, j) \cdot g_2(i + m, j + n)$$

(1-1)

上式中， $\Phi(m, n)$ 為相關函數之摺合積分； $g_1(i, j)$ 與 $g_2(i, j)$ 為時序性影像亮度值分佈； $M \times N$ 為質問窗大小； i 與 j 為兩張影像比對之初始位置； m 及 n 為 i 方向及 j 方向之位移量，而計算 $\Phi(m, n)$ 為使用快

速傅立葉轉換(FFT)演算法作為計算方式。

在 CPIV 法分析係藉由彩色質點影像之訊號區分為兩組不同顏色之訊號，如藍、綠亮度分佈值之影像訊號，亦採用互相關函數法進行分析，得到質問窗 (interrogation windows) 內質點之位移量 (Willert and Gharib 1991)，其方程式如下：

$$\Phi_{ij}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j)] \cdot [img(i-m,j-n)]$$

(1-2)

上式中，*imb* 與 *img* 分別為藍色及綠色亮度分佈值之影像訊號； $\Phi_{ij}(m,n)$ 為互相關函數值，最大值為質點之最可能位移量；*i* 與 *j* 為兩張影像比對之初始位置，*M***N* 為質問窗大小(單位:pixel)，*m* 及 *n* 為 *imb* 及 *img* 橫軸及縱軸之位移量，因此 $(i-m, j-n)$ 為 *img* 與 *imb* 相配(matching)的位置。

三、誤差分析

1. Westerweel (1994) 提出 PIV 量測數值資料誤差可分為兩類：一為量測錯誤之數值或計算錯誤產生之不合理速度向量值；二為帶有不確定因素之誤差的量測數值。
2. Nogueira (1997) 對於量測錯誤的數值或因演算錯誤而產生不合理的速度向量值，研究如何判斷數值資料的正確性，並對不合理之向量作修正。
3. Huang (1997) 研究 PIV 影像計算的誤差，歸納出二個主要計算誤差，分別為方均根誤差 (root-mean-square) 與偏移誤差 (bias error)，並對此二誤差作量化探討。

根據上述文獻研究結果顯示，PIV 一般運用在質問窗、粒子影像圖計算提高精確度與醫學血液流動方面等，而鮮少運用在橋墩沖刷保護探討。因此，本研究將 PIV 運用在橋墩與潛板之間量測速度向量

場、渦度場變化之探討。

1-4 研究方法

本研究主要分二部份，第一部份為沖刷試驗部份，第二部份為 CPIV 觀測流場部份。

第一部份沖刷試驗，係將橋墩及潛板模型依試驗佈置固定於渠槽位置上，使用刮砂器刮平試驗段中鋪砂床面，調整馬達轉數至試驗所需流量，試驗結束時關閉馬達，待渠道內水排出後，利用測針量測底床高程與橋墩墩鼻端沖刷深度。

第二部份 CPIV 試驗，係在沖刷時間 3 小時達到平衡沖刷深時擷取影響進而分析，以 Argon 雷射光束作為光源，其光源為藍(488 nm)、綠(514 nm)之混合光，利用反射鏡將光源導入至試驗水槽上方，光源直射至多彩聲光調變器 (polychromatic aco-usto-optic modulator, PCAOM)，藉由 NI-6601 之外部訊號控制 PCAOM 之不同電壓將混合光區分於藍光及綠光兩道光束，再經由光學玻璃柱形成雷射光頁，並藉由 DuncanTech MS300 型之 CCD 攝影機，擷取通過雷射光頁下之質點影像，影像擷取後藉由影像處理與 PIV 計算程式，得到速度向量場與渦度場。最後，探討其相關物理量。

1-5 本文組織

本研究為潛板對橋墩保護進行試驗研究，全文共分為五章，茲簡述章節內容如下：

第一章為本文之研究動機與研究目的，簡述實驗研究方法以及本研究組織架構。相關文獻之回顧，對於橋墩局部沖刷、潛板工法與 CPIV 法測量技術相關研究做一整理。

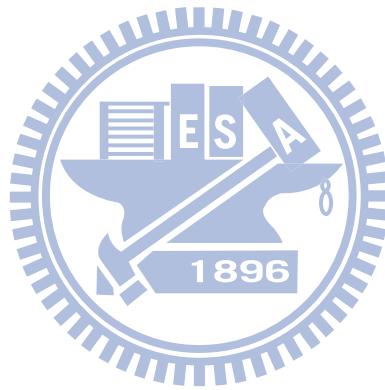
第二章為 CPIV 試驗之儀器佈置(包含光學設備系統、訊號控制系

統、影像系統)與潛板相關佈置、試驗條件及步驟。

第三章為 CPIV 法測量技術、影像處理流程、沖刷機制之原理說明。

第四章為實驗結果分析，比較不同潛板佈置下之單一橋墩局部沖刷程度，並以 CPIV 法觀測流場之變化，藉此得到潛板最佳佈置案例。探討不同流量下最佳案例與無潛板設置，分析出兩者之間的渦度場對泥沙沖刷刷深量影響性。

第五章為結論及建議，歸納本研究所得之結果，提出建議與未來研究之方向。



第二章 試驗儀器與佈置規劃

CPIV 光學觀測試驗可分為設備系統、訊號控制與影像系統部份，其佈置與光頁量測位置如圖 2-1、圖 2-2 所示，有關實驗儀器、步驟，摘錄楊(2002)之論文於 2-1、2-2 節加以作詳細說明。橋墩沖刷試驗部份，可分為試驗條件、試驗儀器與步驟等部分，詳見 2-3、2-4 節。

2-1 CPIV 儀器系統

2-1-1 設備系統

CPIV 之光學設備系統包括 ARGON 雷射、聚光凸透鏡、多彩聲光調變器(PCAO)三部分，茲說明如下：

- 1 ARGON 雷射：如圖 2-3 所示。雷射光源為 7 瓦之氬氖雷射，ARGON 雷射混合光束，經由反射鏡及凸透鏡將雷射光束射至多彩聲光調變器 (PCAO)，可分離為藍色光束及綠色光束，如圖 2-4 所示，其綠光為 1.4 瓦(波長為 514nm)，藍光則為 1.3 瓦(波長為 418nm)，再經由反射鏡射至光學玻璃柱形成一藍一綠間隔之光頁。
- 2 聚光凸透鏡：由於雷射光束經由反射鏡及光束路徑之影響而減弱了雷射光強度，因此，於雷射光路徑中架設兩片聚光凸透鏡，而後將雷射光束聚集後射至多彩聲光調變器(PCAO)切光，使雷射光束不至於減弱。
- 3 多彩聲光調變器 (PCAO)：如圖 2-4、圖 2-5 所示。PCAO(Polychromatic acousto-optic modulator)，可將 ARGON 雷射分為藍光及綠光，係由二氧化碲(TeO_2)之材料製成，其晶體的排列方式會隨著外在電壓之大小而改變，使特定波長之光束通過，且輸入此元件之電壓必須小於 5.0V，方能達到實驗所需之切換藍、綠光束功能。

2-1-2 訊號控制系統

同步訊號控制系統部份主要由同步訊號控制器及示波器兩種儀器所組合而成，其功能為控制 PCAOM 切換藍綠光的頻率，切換頻率是否合適為決定結果優劣的關鍵，儀器功能說明如下：

1. 訊號控制器：為利用 NI (National Instruments) 公司所製之 PCI-6601 訊號控制卡如圖 2-6 所示。控制 PCAOM 之切換頻率，此卡安裝於 PC 上，可穩定送出四道頻率，訊號可分為進入及輸出，進入之部分由控制卡透過軟體產生一穩定之訊號，再將此訊號送至 PCAOM 切換藍綠光束，但由於 PCAOM 可以承受之電壓為 5.0V，而 PCI-6601 所產生之訊號為 5.8V，因此必須再透過自製的電路板如圖 2-7 所示。
2. 示波器：其功能為顯示由訊號產生器所輸出至同步訊號控制器內部訊號之穩定性，包括了波形穩定性、脈衝電壓（類比訊號）之穩定性、頻譜顯示及週期之監視功能，以確定訊號在同步處理中。

2-1-3 影像系統

此系統主要由數位攝影機(3-CCD, 3-chip charge coupled device)及影像擷取卡兩部分組成，茲說明如下：

1. 數位攝影機：本試驗使用 DuncanTech MS300 數位攝影機，為藍、綠、紅三顏色之固態感光面，各有 1392(H)×1040(V)個畫素，各畫素有 0-255 之亮度值。且攝影機備有電子快門，可調整影像之曝光時間，另外也含其他影像之功能鍵。
2. 影像擷取卡：可將攝影機擷取之影像即時顯示於電腦螢幕上，但此卡不具備任何記憶體，因此須電腦上之記憶體來搭配，且擷取之影像可儲存於電腦上之硬碟空間，適用於連續畫面之擷取。

2-2 CPIV 試驗程序

試驗程序分為雷射光束啟動及路徑設置、訊號控制與影像擷取三部分，茲說明如下：

第一部份：雷射光束啟動及之路徑設置

1. 開啟雷射冷卻水，使雷射冷卻水水壓能穩定流量進入，將雷射開啟。等待雷射光輸出約 1 分鐘後，可將雷射功率微調增加至 1 瓦，以適合調整雷射光束路徑。
2. 利用三個反射鏡與兩個凸透鏡將雷射光束導引至試驗斷面並聚光射至多彩聲光調變器(PCAO M)，於 PCAOM 處將光束分為藍、綠兩光，再射至光學玻璃柱於水中橫切面形成藍綠相間之光頁。
3. 在調控 PCAOM 方面，微調分光過程中會出現零階(zero order)及一階(first order)光束如圖 2-5 所示，微調時雷射光強度依然為 1 瓦，並選用強度較強的一階光束作為試驗所需要之光束。

第二部份：訊號控制

同步訊號調控由 NI 公司之 PCI-6601 卡控制，此卡可穩定送出四道頻率，本研究只使用中間兩控制鈕操控 PCAOM 儀器之藍、綠光切換，其切換頻率之部分由電腦內之軟體控制並輸出至控制卡中。本試驗訊號輸送頻率為 500Hz，即完成一次藍、綠切換時間差為 1/1000 秒。

第三部份：影像擷取

將顯影質點顆粒混合水倒入循環水槽內，使質點於雷射光頁下顯現出光點，利用 CCD 攝影機擷取經過雷射光頁下之質點影像，取像位置大小為 4.7*3.5cm，如圖 2-8 所示。所擷取之影像為 1392*1040 畫素之彩色數位影像，攝影機電子快門速度為 1/125(m/sec)。

2-3 沖刷試驗條件

2-3-1 試驗泥砂

在相同水流強度條件下，底床質之幾何標準偏差 σ_g 增加時，沖刷深度將隨著減少，且此現象於清水沖刷條件下更為明顯。本試驗試驗用砂粒徑曲線分布圖如圖 2-9 所示。中值粒徑 $d_{50} = 0.42 \text{ mm}$ ，均勻係

數 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.42$ ，泥砂幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} = 1.27$ ，為較均勻泥

砂，泥砂比重 $G_s = 2.50$ 。

2-3-2 流量與流速率定

水槽流量率定經由觀測水位流量比對馬達轉數，率定結果如圖 2-10 所示。經迴歸分析得流量率定公式為 $Q = 0.0003x - 0.0003 \text{ (m}^3/\text{s)}$ ， $R^2 = 0.987$ 。在試驗中，考慮二種流量：(1)流量為 $0.007 \text{ m}^3/\text{s}$ ，平均流速為 0.28 m/s ，水深為 6.3 cm ，底床坡度為 0.003 ；(2)流量為 $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ ，平均流速為 0.24 m/s ，水深為 8.5 cm ，底床坡度為 0.003 。

針對橋墩局部沖刷部分，可分為清水沖刷及濁水沖刷，而清水沖刷在局部沖刷試驗上通常可達較深的沖刷深度，如圖 2-11 所示。其中，泥砂啟動剪力流速可經由 Shields 圖求得 $V_{*c} = 0.017 \text{ m/s}$ ，如圖 2-12 所示。而後利用中值粒徑 d_{50} 與水深 h 經由泥砂啟動流速公式(2-1) (Melville and Sutherland, 1988)，推得啟動流速 $V_c = 0.285 \text{ m/s}$ 。水流流速與泥砂啟動流速比值在試驗流量 0.007 cms 時為 $V/V_c = 0.982$ ，試驗流量 0.008 cms 時為 $V/V_c = 0.805$ 。

$$\frac{V_c}{V_{*c}} = 5.75 \times \log \left[5.53 \times \left(\frac{h}{d_{50}} \right) \right] \quad (2-1)$$

2-3-3 沖刷時間

由沖刷坑深度與時間關係圖(如圖 2-13)，可發現連續沖刷 3 小時，橋墩局部沖刷深度可達到平衡沖刷深度(24 小時)約 90.2%，與 Melville and Chiew(1999)提到橋墩沖刷深度 24 小時內的沖刷深度增加率小於橋墩直徑的 5%時，此沖刷深度視為平衡沖刷深度，而其所對應時間為平衡沖刷時間，故本試驗採用連續 3 小時為沖刷試驗時間。

2-3-4 試驗設備

1. 試驗水槽：為一循環水路系統，水槽模型佈置如圖 2-14 所示。循環水槽長 10 m、寬 0.4 m、高 0.5 m，於水槽中段設置一長 3 m、寬 0.4 m、高 5 cm 之試驗區段。水流經過試驗段後流經沉砂池，懸浮於水中之砂粒沉降於此，於試驗結束時再循環使用。試驗水槽雷射光照射另一面以黑色壁紙覆蓋，其目的為加強 CPIV 法擷取影像畫面對比度及阻截雷射光散射。
2. 橋墩模型：為直徑 2 cm、高 18 cm 之壓克力材質實心圓柱，柱體外圍均以黑色噴漆上色，避免 CPIV 試驗進行時造成雷射光散射。
3. 潛板模型：為長度 5 cm、厚度 2 mm 之透明壓克力材質板。
4. 整流器：利用吸管集合而成之整流裝置。
5. 刮砂器：壓克力製之平板，用以刮平沖刷試驗區之鋪砂床面。
6. 測計：架設於平面水槽上方，並設有刻度尺，用以量測底床高程。
7. 相機腳架：為固定相機之裝置，於腳架下方裝設吸盤與壓克力板吸附固定之，使相機鏡頭定位及避免人為因素導致鏡頭產生偏移，如圖 2-15 所示。
8. 其他：馬錶、捲尺、美工刀、量角器、氯乙炔塑膠接著劑等。

2-4 橋墩局部沖刷試驗程序

1. 將橋墩與潛板模型佈置於試驗區段並固定之，以免試驗時受水流沖擊而偏移。
2. 將試驗用砂鋪設於水槽試驗區內並均勻壓實，而後將砂面用刮砂器抹平，維持試驗區泥砂高度。
3. 啟動抽水馬達，調整轉速至所需流量，並將水注入試驗渠槽中，在水槽內慢慢加水至所需深度，避免流速太快而導致一開始就形成底床沖刷現象。
4. 待至沖刷平衡時間，利用 CPIV 法擷取影像，而後關掉馬達停止供水。
5. 於待水退後，量測整個沖刷坑及附近地形。
6. 變更潛板佈置，重複上述 1~5 之步驟。



第三章 CPIV 法影像處理與橋墩沖刷之潛板設置原理

彩色質點影像測速法(CPIV)之影像處理流程大致可分為數位影像擷取與程式運算分析部份(楊, 2002), 另對橋墩沖刷及潛板之原理亦有探討; 茲說明如下:

3-1 CPIV 法影像處理流程

在 CPIV 影像初步處理過程, 首先將所擷取之數位影像檔進行處理, 利用 Matlab 影像轉檔程式將影像原始之二為 RGB 亮度訊號值轉為 ASCII 檔, 並將影像區分為藍色(*imb*)及綠色(*img*)之實數格式兩個檔案儲存如圖 3-1、圖 3-2 所示, 其亮度值範圍為 0-255(0 為最暗, 255 為最亮), 再進行影像分析即相關函數計算。

3-2 程式運算分析

影像經由程式初步前處理後, 接著將影像劃分為數個小區塊 (small pattern), 進行質問窗(interrogating window)之設定, 以質問窗為影像計算處理之基準, 將質問窗劃分設定完畢後, 進入影像質點位移程式計算部分, 所應用理論如下:

一、互相關函數法(cross correlation function)

由影像訊號亮度值及設定質問窗大小對影像進行分析, 步驟如下:

1. 以 *imb* 藍色影像訊號值為基礎, 設定質問窗大小並且決定形心位置點。
2. 以 *img* 綠色影像訊號值為影像訊號值位移與 *imb* 進行比對, 如圖 3-3 所示。並且決定其影像質點位移量, 如圖 3-4 所示。位移量以互相關函數法摺積作計算, 其最大值視為最有可能之位移量 (m, n), 此位移量即代表該質問窗之平均位移量, 如圖 3-5 所示。

其中, 互相關函數法計算, 方程式為:

$$C_{ij}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j)] \cdot [img(i-m, j-n)]$$

(3-1)

其中， $C_{ij}(m,n)$ 為摺合積分值，其最大值為判定 m 與 n 之位移量； imb 及 img 分別為藍、綠影像之亮度分佈值； i 及 j 為兩張影像比對之初始位置、 m 及 n 為 imb 與 img 橫軸及縱軸之位移量、 $(i-m, j-n)$ 為 img 與 imb 影像相配(matching)之位置。

二、影像演算法-常態化互相關係數法(NCC)法

為計算互相關函數所得之最大值與其餘值的相關程度，因此將相關值於常態化。在常態化互相關係數法(normalized cross correlation coefficient, NCC 法)中，直接設定質問窗大小與可比對之最大範圍，質點密度分佈可設定有效質點數作為質問窗內之代表訊號，並針對計算所得之相關程度(0~1)進行決定，以相關係數值之最大值，做為質問窗之位移量，其分析方程式如下：

$$\overline{C}_{ij}(m,n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j) - \overline{imb}] [img(i-m, j-n) - \overline{img}]}{\sqrt{\sigma_1(i,j) \sigma_2(i,j)}}$$

(3-2)

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j) - \overline{imb}]^2 \quad (3-3)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [img(i-m, j-n) - \overline{img}]^2$$

(3-4)

$$\overline{imb} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N imb(i,j)$$

(3-5)

$$\overline{img} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N img(i-m, j-n) \quad (3-6)$$

其中， \overline{imb} 為 imb 影像畫素之平均值， \overline{img} 為 img 影像畫素之平均值； m 與 n 為質問窗內之位移量； M 及 N 分別為質問窗在 i 方向及 j 方向大小。

質問窗內之數位影像訊號係經由 NCC 法計算得出質問窗之平均位移量，再利用 $\overline{C}_{ij}(m,n)$ 判定質問窗內之相關程度是否可代表該質問窗之位移量，因此可針對 $\overline{C}_{ij}(m,n)$ 作設定，如 $\overline{C}_{ij}(m,n)$ 趨近於 1.0，則代表其質點之位移為高度相關於質問窗中，可判定為此質問窗內之位移量為有效平均位移量；若趨近於 0，則反之。

三、子畫素修正

子畫素修正之目的主要是使互相關計算時以整數畫素做運算，當質點位於兩個整數畫素間 $(i, i+1)$ 時，質點在位移判斷上會有 ± 0.5 個畫素位移誤差值，為降低此 ± 0.5 個畫素位移誤差值，利用子畫素法作修正，增加計算之準確性，精確的算出位移量。其方法有很多種，如高斯曲線子畫素修正法 (Gaussian curve-fitting)、拋物線子畫素修正法 (parabolic curve-fitting)、形心子畫素修正法 (centroid method) 等方法來降低位移誤差值。以上修正法中，以高斯曲線修正法較被廣泛使用，原因為由影像分析中得到之質點強度分佈較接近高斯分佈，因此根據兩張影像之質點分佈情況，經高斯曲線修正計算後亦為高斯分佈。因此，於子畫素修正法中使用高斯曲線修正法較為合理。

其差分演算法是利用鄰近之質問窗所得之相關係數值作為差分修正，演算式如下：

$$x = x_0 + \frac{\log \overline{C}(x_0 - 1, y_0) - \log \overline{C}(x_0 + 1, y_0)}{2 \left[\log \overline{C}(x_0 - 1, y_0) + \log \overline{C}(x_0 + 1, y_0) - 2 \log \overline{C}(x_0, y_0) \right]}$$

(3-7)

$$y = y_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) - \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) + \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]}$$

(3-8)

其中， (x, y) 為修正後之位移量， (x_0, y_0) 為質問窗峰值之整數位移， $\bar{C}(m, n)$ 為數位相關計算所得之高斯分佈值。

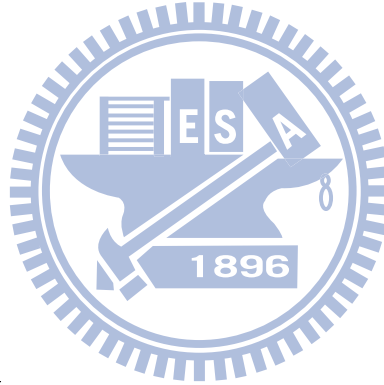
四、不一致資料去除

在影像計算過程中，質點與質點的比對過程，有時會發生誤判，而產生不一致向量之結果，如圖 3-6 所示。因此，須將這些不一致之速度向量值去除，如圖 3-7 所示。去除方法為利用周邊鄰近質問窗內速度向量值作判別，其方法如下：

1. 找出相對誤差值：

$$Vel = \frac{\sum_{i=1}^8 |v_i - v_0|}{\sum_{i=0}^8 |v_i|}$$

(3-9)



$$v_i(i, j) = \sqrt{u(i, j)^2 + v(i, j)^2}$$

$$(3-10) \quad \theta = \frac{\sum_{i=1}^8 |\theta_i - \theta_0|}{\sum_{i=0}^8 |\theta_i|}$$

(3-11)

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{v(i, j)}{u(i, j)} + 360^\circ$$

(3-12)

$$val(i, j) = \sqrt{Vel^2 + \theta_i^2}$$

(3-13) 其中， Vel 為周邊速度向量值之絕對差值，容忍範圍為

20~35%(Nogueira et al . 1997)； v_0 為各個位置之速度向量值； v_i 為 v_0 周邊八個速度向量； i 與 j 為質問窗位置； $u(i, j)$ 與 $v(i, j)$ 為質問窗水平與垂直速度； θ_i 為 $u(i, j)$ 與 $v(i, j)$ 之夾角，加 360° 可使 θ_i 為正值， val 為判別有效之向量值。

2. 為判別 v_i 是否為有效值，在 val 設一有效標準值，根據前人(Jaw and Chen, 2000; Jaw et al., 2001; Nogueira et al., 1997)建議，依不同影像條件，設 val 值於25~30%以內為有效向量值。

3. 根據此法重複1及2點，將影像向量值全部掃過，判別有效速度向量值，留下有效之速度向量，並將不一致之速度向量去除。

3-3 CPIV 法之誤差來源

影像計算之誤差約可分為以下三大類型：1. 質問窗內質點的脫離或配對錯誤；2. 隨機誤差(random error)或方均根誤差(root-mean-square)；3. 系統誤差(systematic error)或偏移誤差(bias error)。茲說明如下：

1. 質問窗內質點的脫離或配對錯誤：

若imb 藍色影像訊號質問窗較小，而img 綠色影像訊質問窗與imb 藍色影像訊號質問窗比對過程中可能因質點位移較大或離開量測位置，造成質點不在質問窗範圍內而產生位移誤差，導致這些誤差可能原因有流速過快、速度梯度過大、三維流場的變化使質點離開觀測位置。

2. 隨機誤差或方均根誤差：

隨機誤差係由隨機性之因素所造成，且量測值會產生隨機分佈之誤差，誤差來源可能由於質點的比重與分佈密度、流體三維運動劇烈、較大的速度梯度或剪力場、擷取影像之背景雜訊影響等因素，一般可藉由增加實驗量測次數來降低其誤差。此類誤差亦稱為精確誤差

(precision error)，其分散程度的大小則取決於測量值之標準差 (standard deviation) 或 RMS 誤差，如圖 3-8 所示。質問窗之位移平均值定義如下：

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i$$

(3-14) 其中， d_i 為質問窗之位移量；而 RMS 誤差 (σ) 定義為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2}$$

(3-15)

其中，RMS 誤差 (σ) 為質問窗位移量與平均值位移差之平方總和。

3. 系統誤差或偏移誤差：

系統誤差來自於一些已知因素，如外在環境因素(溫度、電壓或 CCD 影像擷取、儲存傳輸過程)、人為操作不熟悉或設計原理有失誤造成系統偏差，此類誤差不含有隨機分佈之誤差，其偏差量有一致性，此類偏差可經由修正方法降低其誤差量，因此系統誤差亦稱為偏移誤差(bias error)。而於影像分析計算過程中，偏移誤差與互相關函數法之峰度值鎖定(peak-locking)有關，主要係因質問窗計算所得之峰度值(最有可能之位移值)與質問窗內之真實位移值無法完全吻合。偏移誤差(d_b)可利用已知之真實位移值(d_a)，如位移 0 畫素(zero particle image displacement)或位移大於 1 畫素，與質問窗內計算所得之平均值(d_m)之差，如圖 3-9 所示。其公式如下：

$$d_b = d_m - d_a \quad (3-16)$$

本研究利用十組影像，其位移量為已知之 8 畫素進行模擬 (Liang et al. 2002)，此外亦進行隨機誤差分析，以確定影像分析方法適用於流場分析，其模擬影像大小為 400*300 畫素、質問窗為

32*32 畫素，分別利用高斯子畫素修正法，如圖 3-10 所示，為位移 8 畫素之計算結果。並測試十張不同影像，其統計分析結果在 x 方向之方均根 (σ) 平均為 0.072、平均偏差量 (d_b) 約為 0.0058。由圖 3-10 顯示，計算偏差值接近於整數畫素位置上，且偏移誤差相對於隨機誤差相差一個級數 (order)，因此，於計算誤差上主要誤差量來自於隨機誤差，且偏差量對計算誤差影響不大。

3-4 沖刷原理

在地文演變、氣候影響及水工結構物影響下，均會造成河床高程之抬升與下降，茲就河道水流沖刷行為敘述如下 (Melville and Coleman, 2000)：

一、沖刷形式分類

1. 一般沖刷 (general scour)：自然河道因水流沖刷而影響泥砂運動，進而使河床高程變動之沖刷行為。此外，一般沖刷分為長期沖刷與短期沖刷，長期沖刷為長時間水流對泥砂累積之沖刷，短期沖刷則為較短時間尺度內單一或數個洪水對泥砂之沖刷。
2. 束縮沖刷 (contraction scour)：受到水工結構物影響，使河道斷面束縮，阻擋水流流況，而導致水流流經此區域之流速加快，造成束縮區域內的沖刷行為。
3. 局部沖刷 (local scour)：因水工結構物的存在，於週遭之水流產生局部阻礙或干擾現象，迫使水流流速、方向產生劇烈變化，引發渦流與底床剪應力等現象，影響河床局部泥砂運動行為，造成河床高程下降之沖刷現象。

由於局部沖刷區域內泥砂入流量以及出流量的不平衡，以輸砂連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial V}{\partial t} = q_{s-out} - q_{s-in}$$

(3-17)

式中， $\frac{\partial V}{\partial t}$ ：泥砂體積隨時間之變化率

q_{s-in} ：沖刷區域泥砂入流量

q_{s-out} ：沖刷區域泥砂出流量

若 (q_{s-out}) 與 (q_{s-in}) 產生不平衡現象，則表示沖刷區域內可能出現泥砂沖刷或淤積變動的情況，根據兩者之關係，局部沖刷可分為三類：

(1) $q_{s-out} \cong q_{s-in}$ 無沖刷

代表沖刷區域內無沖刷與淤積現象，而達到沖淤平衡之情況。

(2) $q_{s-out} > q_{s-in} \cong 0$ 清水沖刷(clear-water scour)

沖刷坑上游水流速度在小於泥砂起動流速的條件下，為清水沖刷。在無泥砂補充情況下，沖刷坑流速會隨沖刷坑的增大而逐漸減緩，當沖刷坑內之泥砂無法由水流帶動時，即達到沖刷靜態平衡。

(3) $q_{s-out} > q_{s-in} > 0$ 濁水沖刷(live-bed scour)

水流流速大於泥砂起動條件下，為濁水沖刷，同時上游水流將夾帶泥砂進入沖刷坑中，同樣於沖刷坑的增大而減緩流速，至泥砂入流量等於出流量時，達到輸砂動態平衡狀態。

二、橋墩周圍局部沖刷機制

水流流經橋墩時，由於受到橋墩的阻擋，使水流流場產生變化，包括水流束縮與向下水流等發生，在此局部沖刷發展過程，其流經橋墩周圍之水流結構如圖 3-11 所示。可分為四個部份：

(1) 水表面渦流(surface roller)

水流通過橋墩時，阻水面積增加，於橋墩迎水面區域，水流動能轉化成位能，造成墩鼻端前水位抬升，且在水面處形成湧水現象，而後隨水流改變方向形成小型漩渦，即水表面渦流。

(2) 向下射流(down flow)

水流沖擊橋墩迎水面時，橋墩垂線流速分佈由於河床邊界影響，而使速度剖面形成一速度梯度，且於橋鼻端處產生停滯壓力(stagnation pressure)，其停滯點壓力由水表面處向下遞減形成壓力梯度，愈接近河床區域壓力強度愈小，而產生向下射流，此水流通常為造成局部沖刷之主要因素。

(3) 馬蹄形渦流(horseshoe vortex)

向下射流與二次橫向水流結合後，沿橋墩周圍形成的三維性渦流，此一渦流因作螺旋性運動，而形成馬蹄形狀渦流於橋墩迎水面與兩側，故稱馬蹄形渦流。馬蹄形渦流通常沿橋墩邊緣向外側進行擾動或向下游傳遞，因而帶動泥砂向下游移動，對沖刷坑河床質運移影響甚大，而後馬蹄形渦流通過橋墩兩側減弱強度，降低沖刷能力，消散後形成一般的亂流。

(4) 尾跡渦流(wake vortex)

水流流經橋墩後，於下游側壁面產生分離點(separation point)，使速度剖面產生不連續面造成消散渦流(cast-off vortices)，在底床處與馬蹄形渦流交互作用，使水流尾跡向下游傳遞時做橫向與垂向擺動，可將泥砂顆粒向下游輸送或於橋墩後方形成淤積，稱為尾跡渦流。

3-5 潛板理論

在渠道佈置沖擊角度(angle of attack)之潛板情況下，水流流過潛板迎水面兩側，且大部分水流由順水端向後進行分流，在水流流動過程之中，於潛板下游處產生一螺旋水流，如圖 3-12 所示。

螺旋水流之產生係因在潛板兩面之垂直向壓力梯度不同(迎水面壓力由上往下遞增，而背水面壓力則由上往下遞減)，使得在高壓面產生一向上之速度分量，而於低壓面形成一向下之速度分量，因而產

生一作螺旋運動之渦流。而渦旋(vortex)逐漸向潛板尾端上方與後方滾動成長，於潛板邊壁端形成較大之邊壁漩渦(tip vortex)後脫離潛板後，形成螺旋狀水流與尾跡渦流往下游移動，如圖 3-13 所示。而潛板下游處擾動，進而改變下游底床泥砂運移、剪應力以及沖淤底床型態。

3-6 潛板減少橋墩沖刷之原理

在潛板對橋墩沖刷過程中，水流通過潛板時，潛板迎水面兩側受到渦流影響形成初始沖刷位置，而潛板背水面因與水流逆向相交形成一股強烈渦流，導致下游處沖刷更劇烈且沖刷坑發展更快速，所以在沖刷初期沖刷坑位置發生於潛板上游處，但因水流沖擊潛板產生反二次流，與潛板背水面低壓引力影響形成一股渦流，與橋墩前端的向下射流互相抵制作用，削減對橋墩沖刷的能力，且潛板背水面接近底床附近產生一螺旋流，將泥砂往上帶離底床，由沖刷坑淘起之砂粒藉尾跡渦旋帶往下游處沉積，達到降低橋墩沖刷深度之效果。

第四章 試驗結果分析

本章將探討兩部份試驗，第一部份為不同潛板佈置之沖刷試驗，所量測之底床地形圖、沖刷深度減少率，再配合 CPIV 法分析之影像作一比對。第二部份為以不同流量下對單一橋墩與潛板最佳佈置案例之渦度場試驗，並藉由 CPIV 法分析之影像得到渦度場變化。其中，CPIV 法分析影像將分為原始擷取影像、速度向量分佈與渦度場部份，渦度場之定義為 $2\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ ，表示 u 、 v 速度分量之梯度總和，渦度值越大代表速度梯度越大，其速度變化也越劇烈。

4-1 潛板於橋墩佈置試驗之因次分析

為決定影響橋墩沖刷坑深度之相關物理參數，本試驗將影響物理參數因子分為四類，分別為流體特性、水流特性、底床質特性與幾何特性。流體特性包括：流體密度(ρ)、重力加速度(g)、動力黏滯係數(μ)；水流特性：上游水深(h)、上游流速(v)；底床質特性：試驗砂中值粒徑(d_{50})、試驗砂密度(ρ_s)、試驗砂幾何標準偏差(σ_g)、底床坡度(s)；幾何特性：橋墩直徑(D)、渠槽寬度(B)、潛板長度(h_l)、潛板入水深度(h_v)、潛板攻角(θ)、潛板開口(S)、潛板前緣與橋墩墩鼻間距(L)。將上述影響因子利用柏金漢定理可知橋墩局部沖刷深度 d_p 如下函數式：

$$d_p = f(\rho, g, \mu, h, v, d_{50}, \rho_s, \sigma_g, s, D, B, h_l, h_v, \theta, S, L) \quad (4-1)$$

選取 ρ 、 v 、 D 為重複參數，將(4-1)式無因次化如下：

$$\frac{d_p}{D} = f\left(\frac{v^2}{gh}, \frac{\mu}{\rho v D}, \frac{h}{D}, \frac{B}{D}, \frac{h_l}{D}, \frac{h_v}{h}, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, s, \theta\right) \quad (4-2)$$

由於底床坡度 (s)、渠道寬度(B)、潛板長度(h_l)與橋墩直徑(D)均為

定值，且試驗於常溫、相同上游流況、幾何特性及底床質特性下，故

$\frac{v^2}{gh}$ 、 $\frac{\mu}{\rho v D}$ 、 $\frac{h}{D}$ 、 $\frac{B}{D}$ 、 $\frac{h_l}{D}$ 、 $\frac{d_{50}}{D}$ 、 $\frac{\rho_s}{\rho}$ 、 σ_g 、 s 可視為定值，因此(4-2)

式可簡化為：

$$\frac{d_p}{D} = f\left(\frac{h_v}{h}, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}, \theta, \frac{v^2}{gh}\right)$$

(4-3)

根據上述因次分析結果，影響橋墩沖刷深度為潛板入水深度、潛板開口大小、潛板前緣與墩鼻端之間距、潛板攻角及福祿數。因此，以前四項參數進行不同試驗案例之設計，並比較各種案例對橋墩與潛板最大沖刷深度，試驗案例與結果如表 4-1 所示。其中，案例 1 為單一橋墩佈置，案例 2 至 6 為改變攻角佈置探討，案例 7 至 9 為改變間距佈置探討，案例 10 至 12 為改變開口佈置探討，案例 13 至 16 為改變入水深度佈置探討。此外，將各案例中潛板入水深度、開口大小、前緣與墩鼻端之間距、攻角參數與橋墩最大沖刷深度，其互相影響之無因次化相關性進行迴歸分析，分析結果如表 4-3 所示。

4-2 單一橋墩沖刷探討

以固定流量 0.007cms (福祿數 $Fr=0.35$) 流況條件下，在案例 1 試驗中，由於橋墩阻礙水流，造成水流流向改變，在通過橋墩迎水面兩側水流流速加快，且因橋墩柱體前停滯壓力梯度效應，導致橋墩迎水面形成向下射流與馬蹄形渦流，使水流於橋墩迎水面下底床進行掏刷，產生局部沖刷現象，造成橋墩週遭形成一明顯沖刷坑，其整體大致為左右對稱，如圖 4-15 所示。在橋墩沖刷過程中，當沖擊水流流經橋墩後，沖刷坑開始於橋墩兩側發展，且迅速由橋墩迎水面往上游處淘刷，在墩鼻端處產生最大沖刷深度，隨著沖刷坑逐漸加大，使沖刷坑通水斷面積增加，連帶使沖刷坑局部水流流速減緩，消滅向下射

流與馬蹄形渦流的強度。待達到沖刷平衡時間時，沖刷坑深度不再產生變化，使得部分泥沙流出被渦流機制運移到橋墩背水面尾跡渦流區下游處淤積。另外，由圖 4-17 至 4-19 所示可發現到，速度向量圖中流線較均勻分布，而在渦度場圖上整體渦度值較高，顯示出在墩鼻前受到向下射流與馬蹄形渦流效應造成流場速度變化劇烈。

4-3 潛板佈置探討

本實驗於潛板佈置方面，以固定流量 0.007cms(福祿數 $Fr=0.35$) 流況條件下，分別對三種不同間距、開口與五種不同攻角與四種不同入水深度，藉由四種影響因子逐一探討，並將墩鼻端沖刷深度、墩鼻減少沖刷率($\frac{\text{單一墩鼻端沖刷深度}-\text{潛板保護後墩鼻端沖刷深度}}{\text{單一墩鼻端沖刷深度}}*100\%$)與潛

板最大沖刷深度作無因次化加以比較，另外再配合底床高程、橋墩中心縱剖面、速度向量與渦度場，共有案例 2 至案例 16，作為潛板最佳佈置之探討，達到減少沖刷保護的效果。

4-3-1 攻角佈置之探討

在潛板攻角佈置試驗中， θ 定義為潛板沖擊角度，如圖 1-1 所示。共有案例 2、3、4、5、6 作不同角度佈置，且採用固定入水深度為 0 公分、開口 1 公分、間距 6 公分、改變攻角 15、30、45、60、75 度佈置。試驗比較結果如圖 4-1、圖 4-2、圖 4-3 所示，而攻角 30 至 75 度時墩鼻減少沖刷率與橋墩中心縱剖面圖相對下沖刷深度逐漸加深，顯示出潛板攻角 θ 加大，橋墩前後端沖刷深度也增大趨勢。而從案例 2 至 6 中底床高程、流場分佈圖可相互對照比較(圖 4-20 至圖 4-44 所示)，在底床高程圖中，攻角 15 至 75 度沖刷面積隨著攻角變大而增加情形，於攻角 75 度時沖刷範圍最大且劇烈。在流場分佈方面，速度向量圖上以攻角 30 至 75 度時流線分佈速度流場較強烈，而渦度場圖上在攻角 30 至 75 度渦度值漸增大趨勢，因潛板迎水面寬度

逐漸變大，導致潛板下較大之沖刷，且影響橋墩沖刷深度、底床面積加大。

從以上分析結果得知，潛板入水深度 0 公分(與底床面同高度)時，當水流流經一段時間逐漸顯露出潛板且發揮作用，潛板攻角加大、阻礙水流流向，使橋墩迎水面左右兩側通水斷面積減少而束縮沖刷增大，而橋墩與潛板之間底床泥砂運動、速度與渦度流場較劇烈，雖潛板有抵擋與導流水流沖擊作用，而攻角變大至有限範圍時就失去功能，於攻角 30 至 75 度時顯示出潛板無法發揮橋墩沖刷保護的作用。而攻角 15 與 75 度在墩鼻減少沖刷率相差達到 26.7%。由此，可知攻角 15 度為對橋墩墩鼻刷深程度影響較小佈置案例。

4-3-2 間距佈置之探討

在潛板間距試驗中， L 定義為潛板前端與墩鼻前迎水面之距離，如圖 1-1 所示。共有案例 7、8、9 作不同間距佈置，由攻角佈置試驗可知攻角 15 度為最佳配置，所以採固定入水深度 0 公分、開口 1 公分、攻角 15 度、改變間距 6、9、12 公分佈置。從試驗比較結果，如圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6 所示，可知間距與墩徑比 L/D 增加，而橋墩、潛板最大沖刷深度也隨著加大有著相對應關係，且 L/D 加大在減少沖刷率隨之遞減，於 L/D 為 6 時對橋墩、潛板最大沖刷深度時達到最大沖刷深度，而對橋墩沖刷減少率也是最低。在橋墩中心縱剖面圖中，間距拉大對於墩鼻端沖刷深度相對加大，且在橋墩前後端沖刷深度逐漸增大趨勢。在案例 7 至 9 中底床高程、流場分佈圖上(圖 4-45 至圖 4-59 所示)，而在底床高程圖中，顯示出間距拉大對底床面積、沖刷深度都隨著擴大與刷深趨勢，於間距 12 公分時為最嚴重。在流場分佈方面，速度向量圖整體流場流線分佈隨著間距變大而速度變化強烈，於間距 9 與 12 公分時顯示出流線較混亂，而渦度場圖上間距拉

大對渦度值逐漸加大現象，看出間距 6 公分之後速度梯度變大且速度變化強烈。

從分析結果可知，雖潛板佈置在橋墩迎水面下，而潛板距離拉長，會使得水流流經潛板開口時水流沖擊強度加大，造成橋墩周圍底床面積擴大且墩鼻端沖刷深度加大。以間距 12 公分可看出整個沖刷深度與底床面積達到較嚴重趨勢。在間距 6 與 12 公分時墩鼻端減少沖刷率上相差 25.2%，可知間距 6 公分時為沖刷影響較小佈置案例。

4-3-3 開口佈置之探討

在潛板開口試驗中，S 定義為潛板前端開口，如圖 1-1 所示。共有案例 10、11、12 作不同開口佈置，從攻角、間距佈置探討中，可得知攻角 15 度、間距 6 公分為最佳配置，所以採固定入水深度 0 公分、間距 6 公分、攻角 15 度、改變開口 1、3、5 公分佈置。在試驗比較結果，如圖 4-7、圖 4-8、圖 4-9 所示，可得知開口與墩徑比 S/D 時隨著橋墩、潛板最大沖刷深度遞增，以開口 5 公分對橋墩與潛板沖刷影響最高，而在沖刷減少率上， S/D 增大反而墩鼻端減少沖刷率越降低， S/D 為 1.5 至 2.5 之間下降最為明顯，在開口佈置對橋墩中心縱剖面圖上，對橋墩的刷深量可看出橋墩前開口 1 至 5 公分沖刷深度比橋墩後之影響差異性較小，反而開口 3 公分對橋墩前後沖刷較嚴重。在案例 10 至 12 中底床高程、流場分佈圖上(圖 4-60 至圖 4-74)，在底床高程圖中，開口 1 至 3 公分時橋墩沖刷對底床面積影響開始擴大，直到開口 5 公分就不再刷深擴大但墩鼻端刷深量達到最大，而在流場分佈方面，速度向量圖上以開口 5 公分流線分佈在靠近墩鼻前較增強趨勢，可看出水流沖擊潛板時螺旋水流增大導致墩鼻端區域沖刷深度較深，而在渦度場圖上，開口加大對於渦度值也逐漸升高，對速度流場變化很強烈。

由此可得分析結果，因水流經過潛板開口加大時並無阻擋水流沖擊之作用，反而使潛板與橋墩間形成一股螺旋流對於橋墩周邊區域沖刷深度有一定上升趨勢。此外，以開口 1 與 5 公分對墩鼻減少沖刷率相差 9.3%，顯示出開口 1 公分沖刷影響較小配置案例。

4-3-4 入水深度佈置之探討

在潛板入水深度佈置上， h_v 定義為潛板頂端突出底床面高度，如圖 1-1 所示。共有案例 13、14、15、16 作不同入水深度佈置，由以上攻角、間距、開口佈置分析結果中得到較佳配置，所以採固定攻角 15 度、間距 6 公分、開口 1 公分、改變入水深度 0、1、2、3 公分佈置。試驗比較結果中，如圖 4-10、圖 4-11、圖 4-12 所示，在入水深度佈置對橋墩、潛板最大沖刷深度相對關係圖中，入水深度與平均水深比 h_v/h 增加時對於墩鼻端最大沖刷深度與墩徑比 d_{pmax}/D 呈現遞減情形，但 $\frac{h_v}{h}$ 為 0 至 0.32 時潛板最大沖刷深度與墩徑比 d_{svmax}/D 呈現上升情形，而至 $\frac{h_v}{h}$ 為 0.32 就漸漸趨勢平衡。在減少沖刷率圖中，顯示出 h_v/h 與減少沖刷率呈現遞增對應關係，在入水深度佈置對橋墩中心縱剖面圖上，入水深度 0 至 3 公分時在墩鼻端沖刷深度顯示出先增後降趨勢，而在橋墩前後沖刷深度呈現出先降後增現象。在案例 13 至 16 中底床高程、流場分佈圖上(圖 4-75 至圖 4-94)，在底床高程圖中，入水深度 0 至 3 公分時整體底床沖刷面積趨勢逐漸縮小範圍，且橋墩周圍刷深量有遞減情形，可看出入水深度 0 至 2 公分時雖沖刷深度與面積有下降現象，但入水深度 3 公分時刷深面積與沖刷深度達到最少。在流場分佈上，速度向量場圖中看出入水深度 0 至 3 公分流線分佈穩定到呈現許多渦流現象，以入水深度 3 公分突出底床面阻擋通水面積造成附近渦流，而渦度場圖上入水深度 0 至 2 公分時渦度值較高

而入水深度 3 公分渦度值較小，顯示潛板入水深度 3 公分時產生渦流削減向下射流與馬蹄形渦流。

對於入水深度佈置結果，可知潛板設置於水面下，入水深度 0 至 3 公分時沖刷深度逐漸變小趨勢，因潛板突出底床面時且水流經過潛板頂端水流沖擊時產生向下螺旋流，進而墩鼻前向下射流、馬蹄形渦流互相抵制作用，造成墩鼻端前沖刷深度逐漸縮小達到保護效果，以入水深度 3 公分時底床高程面積、墩鼻端刷深量結果顯示出沖刷影響較小佈置案例。

4-4 沖刷結果討論

本研究針對潛板四種不同影響因子進行試驗分析，對於墩鼻端沖刷深度、橋墩減少沖刷率、底床高程面積、速度向量與渦度場分析，可知攻角 15 度、間距 6 公分、開口 1 公分、入水深度 3 公分為最佳佈置案例，且對於橋墩減少沖刷率達到 54.6%。且在流場分佈中，渦度場圖渦度值較小速度變化影響較輕微，因潛板高於底床面時，水流沖擊而顯露出潛板迎水面抵擋水流沖擊與背水面壓力梯度由上而下遞減產生一股渦流削減向下射流與馬蹄形渦流水流強度進而減低墩鼻端沖刷深度，而達到保護橋墩沖刷效果。

4-5 渦度場試驗

在渦度場試驗中，共有 4 種佈置案例如表 4-2。改變流量 Q 為 0.0054cms、0.007cms、0.008cms 分別對案例 17 至 22(案例 17、19、21 為單一橋墩佈置，案例 18、20、22 為潛板沖刷影響較小佈置)之單一橋墩與潛板沖刷影響較小佈置(攻角 15 度、間距 6 公分、開口 1 公分、入水深度 3 公分)案例，在不同流量下，單一橋墩與潛板沖刷影響較小佈置案例之福祿數(Fr)探討。

4-5-1 單一橋墩與潛板沖刷影響較小佈置案例探討

在流量 0.007cms 條件下，案例 17 與 18 之底床高程、流場分佈圖上(圖 4-95 至圖 4-104)，在墩鼻端沖刷深度上，可知案例 18 比案例 17 沖刷深度較小且兩者墩鼻端沖刷深度相差 0.8cm，可知潛板佈置於墩鼻前有達到保護效益。而在速度向量圖中，可看出案例 17 比案例 18 流線分佈較均勻，而案例 18 流線分佈速度變動較大受到潛板迴流與渦流效應，對墩鼻前向下射流、馬蹄形渦流影響，造成流線較不均勻。且在渦度場圖中可看出案例 17 比案例 18 渦度值較大，代表著整個流場速度變化影響也加劇。

在流量 0.008cms 條件下，案例 19 與 20 之底床高程、流場分佈圖上(圖 4-105 至圖 4-114)，在墩鼻端沖刷深度中，案例 20 比案例 19 沖刷深度刷深量較低且沖刷深度相差達到 0.9cm，可看出潛板沖刷影響較小佈置案例對橋墩周圍底床面積產生抵擋水流沖擊與導引二次流，使潛板下游處回淤達到保護橋墩效果。而在速度向量圖上，案例 19 比案例 20 流線分佈接近墩鼻前受到向下射流與馬蹄形渦流影響，導致流場變動比較強烈，在渦度場圖上，案例 19 比案例 20 之渦度值較大，因速度梯度擾動變化較劇烈，其速度流場較不穩定，顯示出案例 19 在無佈置橋墩保護工法之下，明顯看出向下射流與馬蹄形渦流效應，造成墩鼻前嚴重刷深與沖刷坑逐漸加大趨勢。

在流量 0.0054cms 條件下，在墩鼻端沖刷深度中，案例 21 比案例 22 墩鼻端刷深量明顯較嚴重相差達到 2.25cm，可看出潛板沖刷影響較小佈置案例對於水流沖擊橋墩迎水面有發揮出導引與阻擋水流效能，有效地降低墩鼻前刷深量達到保護的效果。

4-6 渦度場結果討論

由以上三種流量 0.0054cms、0.007cms 與 0.008cms 流況條件下，在單一橋墩與潛板沖刷影響較小佈置案例中，顯示出沖刷影響較小佈

置，水流流經潛板頂端沖擊之下形成一股向下水流與潛板迎水面通過開口時形成迴流與螺旋渦流效應下，擾亂橋墩前水流流場結構進而削減向下射流與馬蹄形渦流之水流機制，而在下游處發展一股螺旋水流，進而改變泥砂運動方向，造成橋墩後方抬升現象。在福祿數方面，福祿數增加對於墩鼻端沖刷深度也相對加深現象，且對沖刷深度減少率時也隨著福祿數增加而遞減趨勢。因此，在流量與福祿數增加時，可看出潛板沖刷影響較小佈置案例與單一橋墩相較之下，墩鼻端刷深量明顯沖刷較少，可知潛板沖刷影響較小佈置(θ 為 15 度、 $\frac{L}{D}$ 為 6、 $\frac{S}{D}$ 為 1、 $\frac{h_v}{h}$ 為 3)發揮出保護橋墩之效果。另外，為了解潛板影響因子與沖刷深度之關係，和因子之間互相影響參數的權重，因此將試驗案例之攻角因子 (θ)、間距因子 ($\frac{L}{D}$)、開口因子 ($\frac{S}{D}$)、入水深度因子 ($\frac{h_v}{h}$)、福祿數因子 ($\frac{v^2}{gh}$) 與沖刷因子 ($\frac{d_p}{D}$) 經迴歸分析進一步探討($\theta = 15^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 、 $L = 6 \sim 9\text{cm}$ 、 $S = 1 \sim 5\text{cm}$ 、 $h_v = 0 \sim 3\text{cm}$ 、 $\frac{v^2}{gh} = 0.26 \sim 0.39$ 、 $D = 2\text{cm}$)

$$\frac{d_p}{D} = 0.0086 \theta + 0.172 \frac{L}{D} + 0.07 \frac{S}{D} - 0.561 \frac{h_v}{h} + 4.4 \frac{v^2}{gh} - 0.954 \quad R^2 = 88.7\%$$

第五章 結論與建議

本研究於實驗渠槽中，在固定之流量 0.007cms（福祿數 $Fr=0.35$ ）、均勻粒徑（ $d_{50}=0.42\text{ mm}$ ）、墩徑 2cm 與潛板長 5cm 等條件下，改變潛板不同攻角、間距、開口、入水深度之佈置方式與以不同流量條件對潛板沖刷影響較小佈置之探討，以量測底床高程、墩鼻端沖刷深度並藉由彩色質點測速(CPIV)法觀察速度向量、渦度場試驗之比較，可得以下幾點結論與建議：

5-1 結論

- 1 在潛板佈置探討中，以清水沖刷(固定流量 0.007cms)條件下，對四種影響因子進行橋墩沖刷保護試驗研究，經量測底床與流場試驗，可得知 θ 為 15 度、 $\frac{L}{D}$ 為 6、 $\frac{S}{D}$ 為 1、 $\frac{h_v}{h}$ 為 3 佈置案例對於橋墩沖刷保護較佳，且減少沖刷率達到 54.6%。
- 2 在潛板佈置探討中，可得知 θ 增大對於橋墩刷深程度上，反而刷深程度越嚴重，以攻角為 30 至 75 度間整個沖刷深度與底床面積相對加深與擴大，顯示出潛板攻角 15 度佈置在兩面迎水面可有效的發揮出阻擋與導引水流沖擊，達到最高橋墩沖刷保護。
- 3 在改變潛板 $\frac{L}{D}$ 、 $\frac{S}{D}$ 佈置中，間距比拉大對橋墩墩鼻端沖刷深度與底床面積相對加深而增大。因間距拉大離橋墩越遠而潛板阻擋與導引水流沖擊產生之迴流與螺旋流，並無法達到削減向下射流功效且形成一股更大螺旋流沖刷情況更嚴重。而在開口佈置上，於開口 3 至 5 公分時底床面積增大情形而橋墩沖刷深度隨著開口增大相對增加趨勢。
- 4 在改變潛板 $\frac{h_v}{h}$ 佈置中，入水深度為 3 公分為最佳潛板高度配置，因水流流經潛板頂端沖擊之下形成一股向下水流與潛板迎水面

通過開口時形成迴流與螺旋渦流之效應下，擾亂橋墩前水流流場結構進而削減向下射流與馬蹄形渦流之水流機制，而在下游處發展一股螺旋水流，進而改變泥砂運動方向，造成橋墩後方抬升現象。

- 5 在渦度場試驗中，福祿數增加對於墩鼻端沖刷深度也相對刷深現象，且對沖刷深度減少率時也隨著福祿數增加而遞減趨勢，可看出潛板沖刷影響較小佈置案例與單一橋墩相較之下，墩鼻端刷深量明顯沖刷較少，可知潛板沖刷影響較小佈置(θ 為 15 度、 $\frac{L}{D}$ 為 6、 $\frac{S}{D}$ 為 1、 $\frac{h_v}{h}$ 為 3)發揮出保護橋墩之效果。

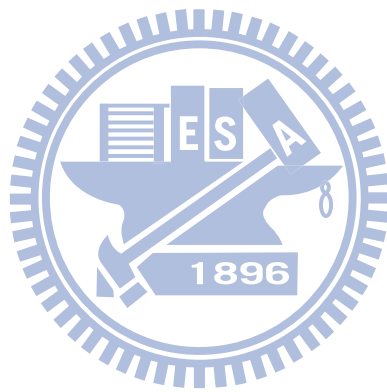
- 6 對潛板影響因子與沖刷深度之結果關係，以攻角因子(θ)、間距因子($\frac{L}{D}$)、開口因子($\frac{S}{D}$)、入水深度因子($\frac{h_v}{h}$)、福祿數因子($\frac{v^2}{gh}$)與沖刷因子($\frac{d_p}{D}$)經迴歸分析進一步探討，可得

$$\frac{d_p}{D} = 0.0086\theta + 0.172\frac{L}{D} + 0.07\frac{S}{D} - 0.561\frac{h_v}{h} + 4.4\frac{v^2}{gh} - 0.954 \quad R^2 = 88.7\%$$

5-2 建議

- 1 本試驗採用雙片潛板於橋墩佈置，而將來可考慮設置四、八至多片潛板進行探討對橋墩沖刷與流場情況之差異性。
- 2 本研究潛板對橋墩沖刷保護中，係以清水沖刷為試驗條件，進行探討。而將來可考慮以濁水沖刷條件來試驗探討，以符合現場上的運用。
- 3 本試驗以定量流流況條件，將來可考慮以變量流流況探討，以符合現地河川流況現象。
- 4 橋墩沖刷流場之流動為三維之複雜流況，而本研究之彩色質點影

像觀測法為二維試驗量測，因此對整體流場之流向以及流況之變化，無法完全觀測到，建議將來可發展三維之量測技術，同時對主流與側向流場流況作一整體量測，以呈現整體流場之三維流況變化。



參考文獻

- 1 Barkdoll, B.D. (1999). "Experiment investigation of flow past submerged vanes." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 5, 896-899.
- 2 Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol. 116, No. 10, 1197-1214.
- 3 Ghorbani, B. and Kells, J.A. (2008). "Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier." J. Hydr. Res., IAHR, Vol. 46, No. 5, 610-619.
- 4 Goubergrits, L., Weber, S., Petz, Ch, Hege, H-Ch, Spuler, A, Poethke, J, Berthe, A, and Kertzscher., U (2009). "Wall-PIV as a near wall flow validation tool for CFD: application in a pathologic vessel enlargement (aneurysm)." Journal of Visualization, Vol.12, No.3, 241-250.
- 5 Huang, H, Dabiri, D, and Gharib, M (1997) "On errors of digital particle image velocimetry." Meas. Sci. Technol. 8, 1427-1440.
- 6 Liang, D.F., Jiang, C.B., and Li, Y.L. (2002). "A combination correlation-based interrogation and tracking algorithm for digital PIV evaluation". Experiment in Fluids.33, 684-695.
- 7 Marelius, F. and Sinha, S.K. (1998). "Experimental investigation of flow past submerged vanes." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 5, 542-545.
- 8 Melville, B.W. and Sutherland, A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers." J. Hydraulic Engrg. ASCE, Vol. 114, No. 10, 1210-1226.
- 9 Melville, B.W. and Raudkivi A.J. (1996). "Effect of foundation geometry on bridge pier scour." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol. 122, No. 4, 203-209.

- 10 Melville, B.W. (1997). "Pier and abutment scour: integrated approach." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 2, 125-136.
- 11 Melville, B.W. and Chiew, Y.M., (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol.125, No. 1, 59-65.
- 12 Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). "Bridge Scour." Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, USA.
- 13 Nogueira, J, Lecuona A, and Rodríguez P.A. (1997) "Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data." *Meas. Sci. Technol.* 8, 1493–1501.
- 14 Odgaard, A.J. and DeWitt, R.J. (1989). "Sediment control by submerged vanes." *Proc. 20th Annual Conf. of the Int. Erosion Control Assoc.*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- 15 Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1990). "Sediment control in bridge water ways." IIHR Report No. 336, Univ. of Iowa.
- 16 Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991). "Sediment management with submerged vanes. I: Theory." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, 117(3), 267-283.
- 17 Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991). "Sediment management with submerged vanes. II: Application." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, 117(3), 284-302.
- 18 Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1977). "Effect of sediment gradation on clear water scour." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol.109, No. 3, 338-349.
- 19 Raudkivi, A.J. (1986). "Functional trends of scour at bridge piers." *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 1, 1-13.
- 20 Tan, S.K. (2005). "Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* , ASCE, Vol. 131, No. 3, 132-136.
- 21 Thomas, Mani, Misra Shubhra, and Kambhamettu Chandra (2005)

- “A robust motion estimation algorithm for PIV.” Meas. Sci. Technol., 16, 865–877.
- 22 Theunissen, R, Scarano, F, and Riethmuller, M L (2007). “An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV.” Meas. Sci. Technol., 18, 275–287.
- 23 Westerweel, J (1994) “Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data.” Experiments in Fluids, Vol 16, No. 3-4, 236-247.
- 24 郭丁元 (1994), “表層隔板對橋墩沖刷保護之研究”, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 25 劉安剛 (2001), “底部導流隔板對橋台沖刷保護之研究”, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
- 26 楊昇學 (2002), “彩色質點影像測速法於瞬間潰壩流場之試驗研究”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- 27 盧昭堯等 (2004), “河道深槽沖淤量測及預測模擬變化潛勢評估(以濁水溪為研究案例)(2/3)”, 經濟部水利署水利規劃試驗所委託研究計畫成果報告。
- 28 盧志晃、歐陽慧濤 (2006), “河川潛板系統最佳設置位置之研究”, 第十五屆水利工程研討會, N37-N41。
- 29 邱宇翔 (2009), “導流板對橋墩沖刷保護之試驗研究”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。

表 4-1 不同佈置案例與結果

案例	入水深度 (h_v)	開口(S)	間距(L)	攻角(θ)	墩鼻端沖刷深度 d_p (cm)	潛板最大沖刷深度 d_{svmax} (cm)	墩鼻端沖刷深度 減少率(%)
1	no vanes	no vanes	no vanes	no vanes	3.75	no vanes	0.00
2	0	1	6	15	2.5	1.3	33.3
3	0	1	6	30	3	2.2	20
4	0	1	6	45	3.1	2.3	17.3
5	0	1	6	60	3.3	2.2	12
6	0	1	6	75	3.5	2.2	6.6
7	0	1	6	15	2.5	1.3	33.3
8	0	1	9	15	3.27	1.38	12.8
9	0	1	12	15	3.45	1.69	8.1
10	0	1	6	15	2.5	1.3	33.3
11	0	3	6	15	2.6	1.8	30.7
12	0	5	6	15	2.85	2.02	24
13	0	1	6	15	2.5	1.3	33.3
14	1	1	6	15	2.3	1.8	38.7
15	2	1	6	15	1.9	1.9	49.3
16	3	1	6	15	1.7	1.9	54.6

表 4-2 渦度場案例與結果

案例	入流量(cms)	墩鼻端沖刷深度 d_p (cm)	墩鼻端沖刷深度減少率(%)	福祿數(Fr)
17	0.007	3.75	0	0.35
18		1.7	54.6	
19	0.008	3.8	0	0.39
20		2.9	23.7	
21	0.0054	3.7	0	0.26
22		1.45	60.8	

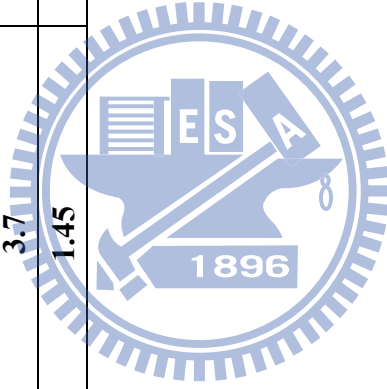
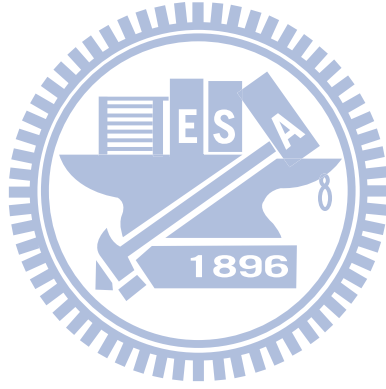
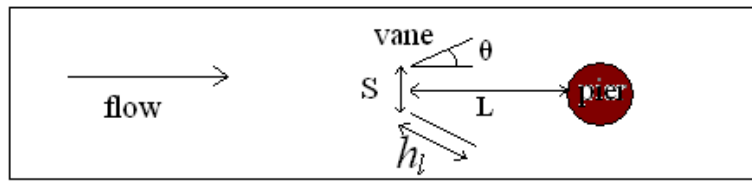


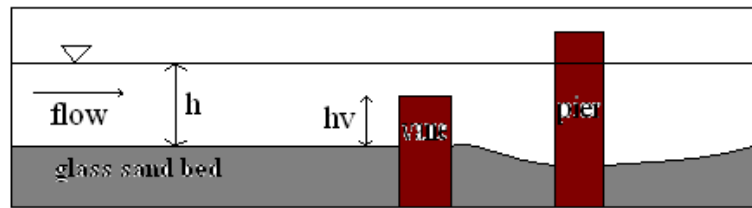
表 4-3 案例佈置無因次參數對應橋墩沖刷深度迴歸分析係數表

參數	θ	L/D	S/D	h_v/h	Fr	R-Sq
係數	0.0086	0.172	0.07	-0.933	4.4	0.887





Plan view



Side view

圖 1-1 潛板與橋墩佈置示意圖

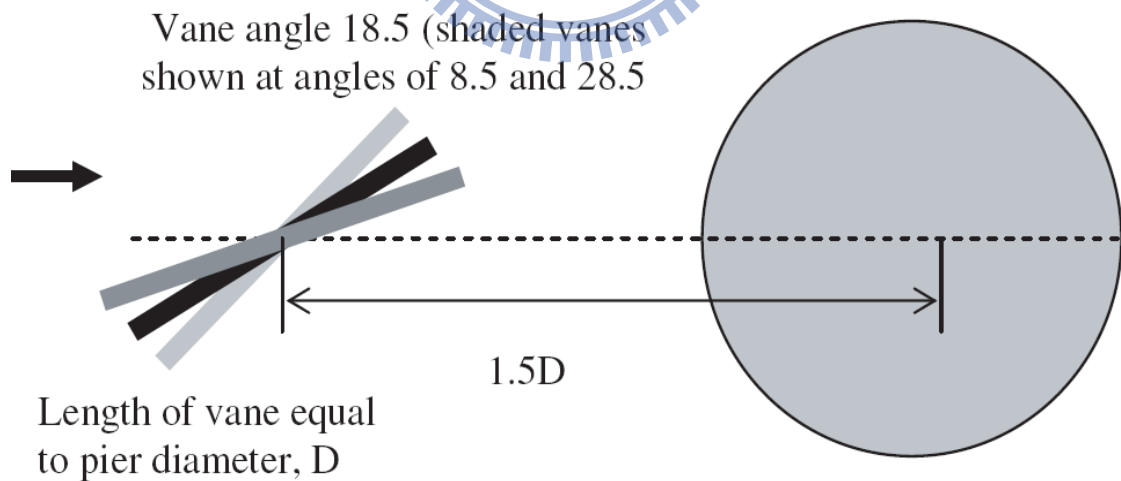


圖 1-2 Ghorbani and Kells 單一導流板佈置圖

(Ghorbani and Kells, 2008)

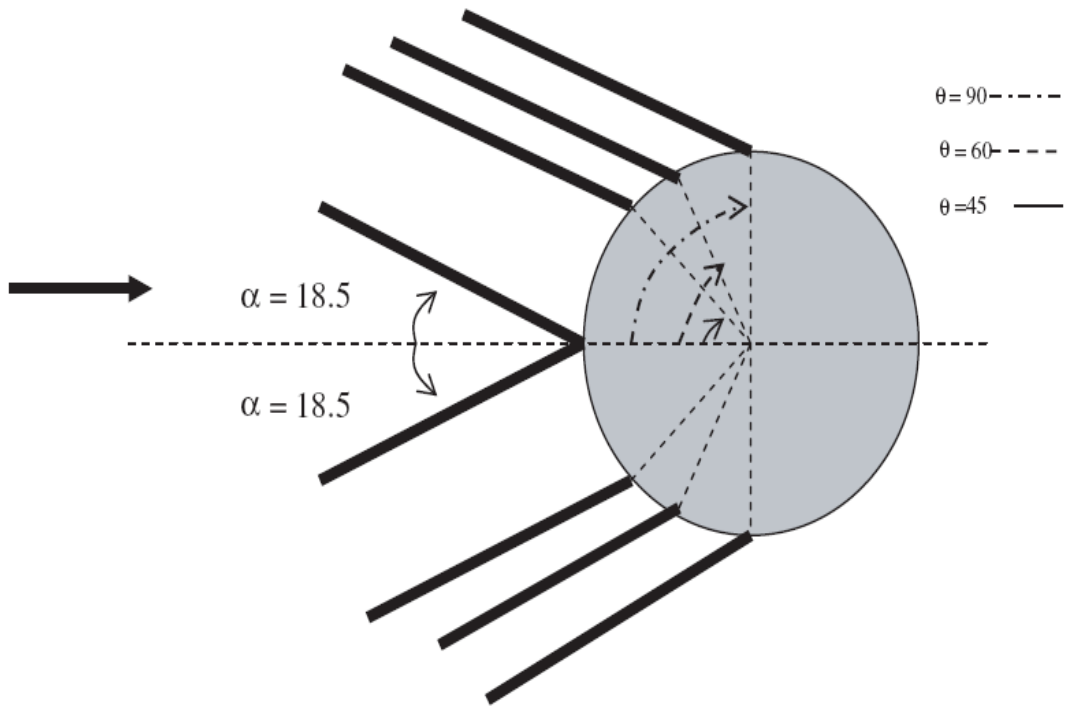
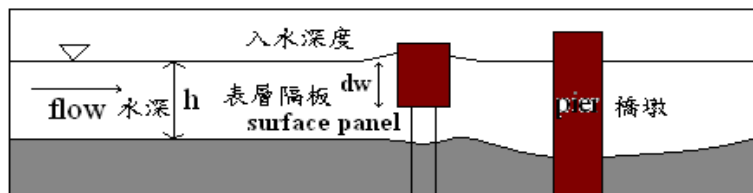


圖 1-3 Ghorbani and Kells 雙導流板佈置圖
(Ghorbani and Kells, 2008)



Plan view



Side view

圖 1-4 表層隔板與橋墩示意圖

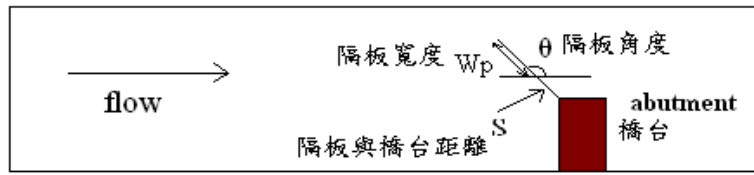


圖 1-5 底部隔板與橋台示意圖

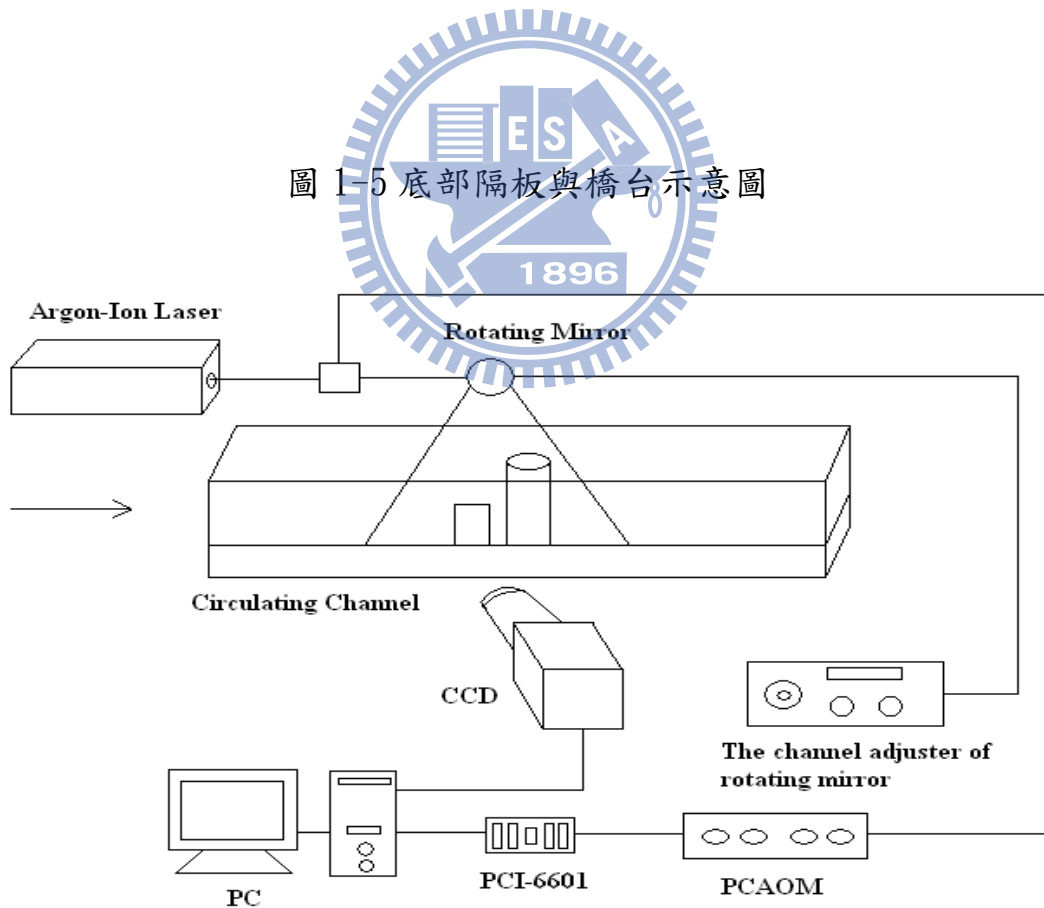


圖 2-1 儀器架設示意圖

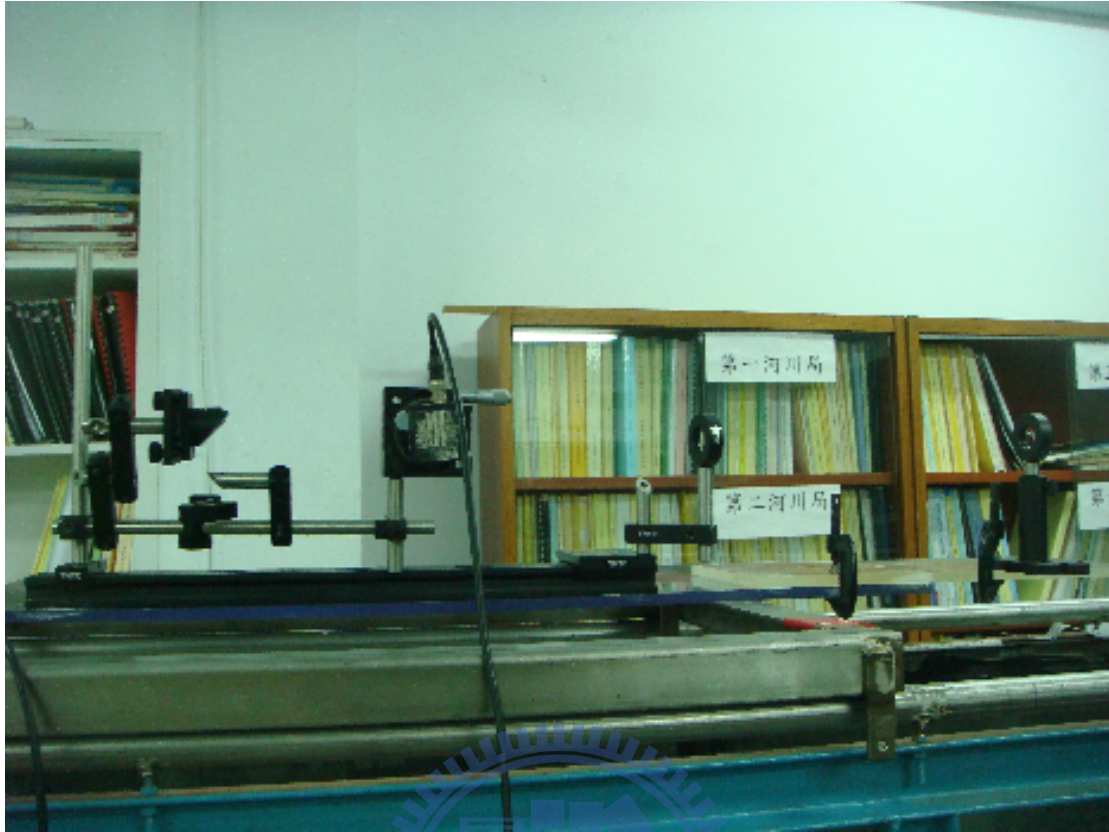


圖 2-2 CPIV 儀器架設圖



圖 2-3 Argon 雷射

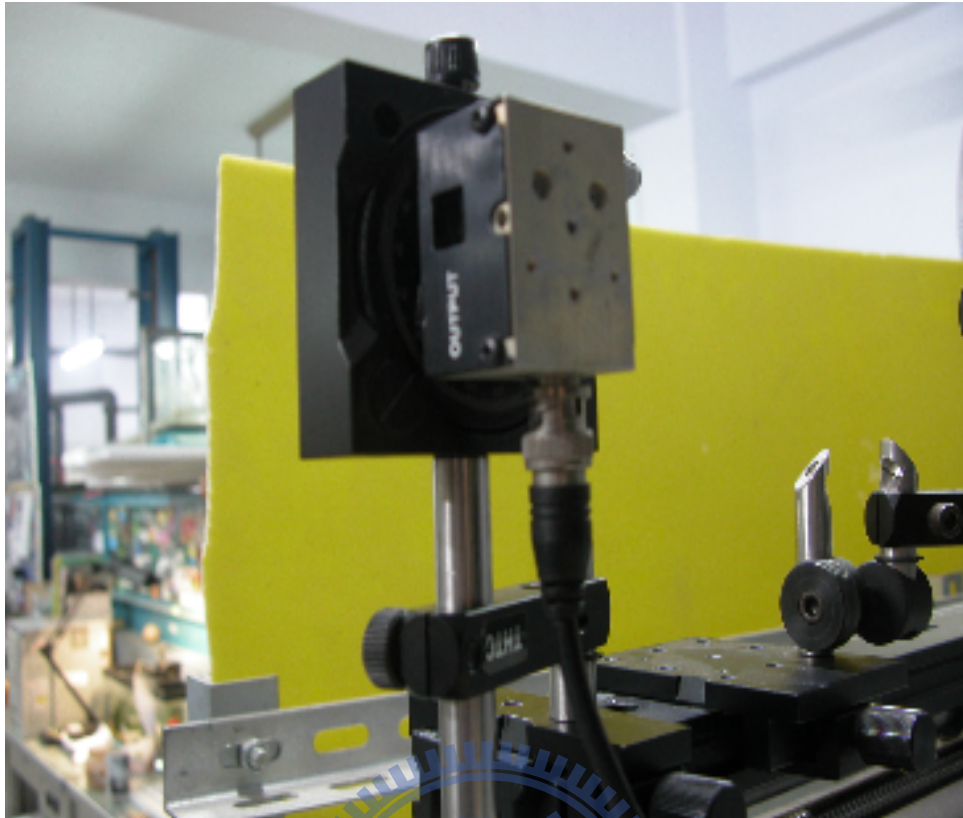


圖 2-4 多彩聲光調變器 (PCAOM)

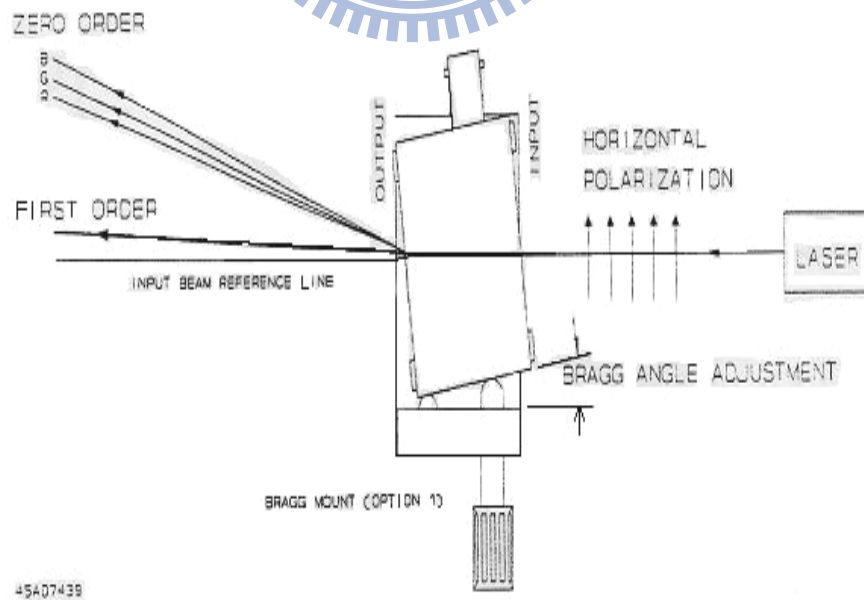


圖 2-5 PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖



圖 2-6 PCI-6601 訊號控制卡

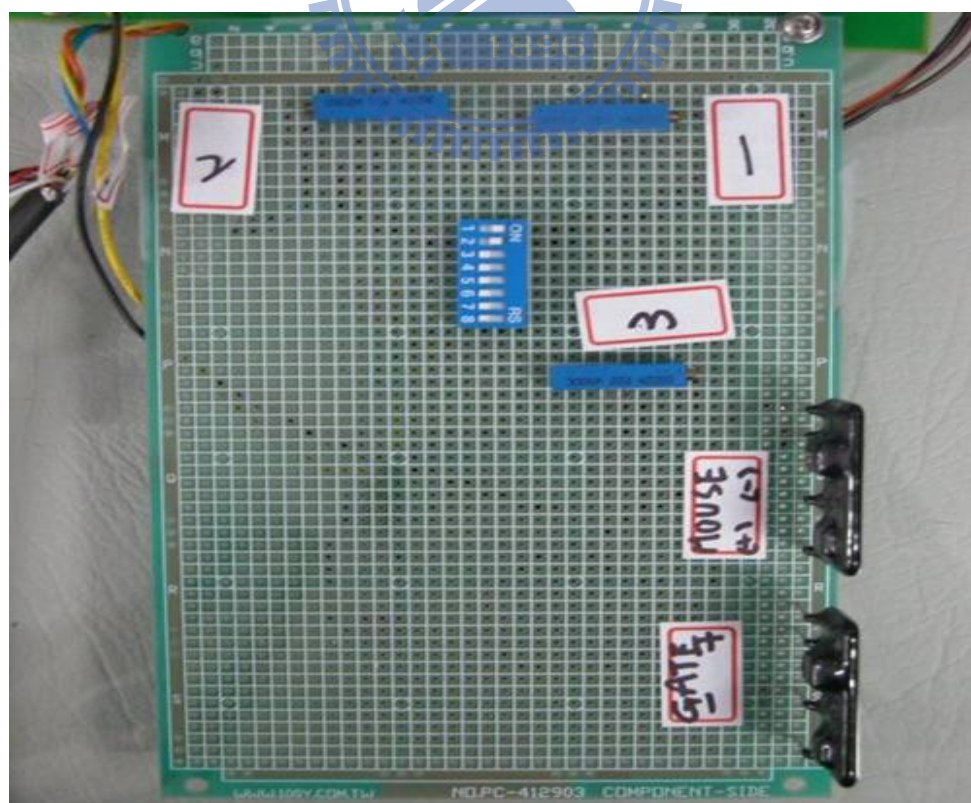


圖 2-7 自製降壓電路板

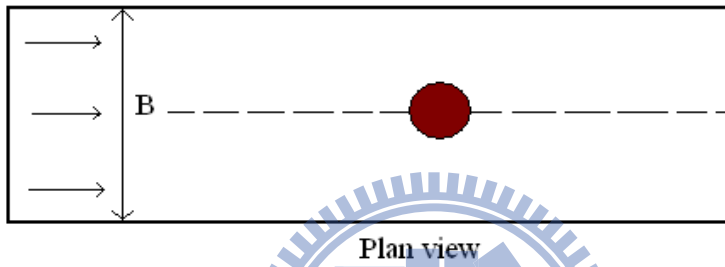
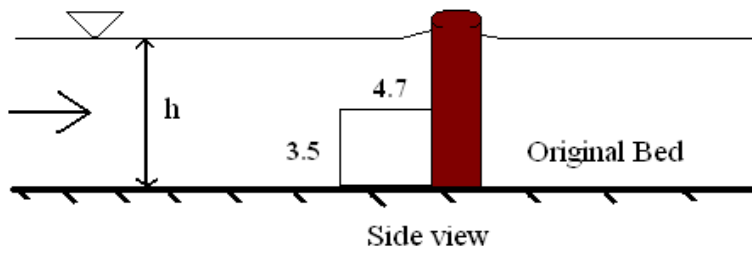


圖 2-8 影像擷取位置示意圖

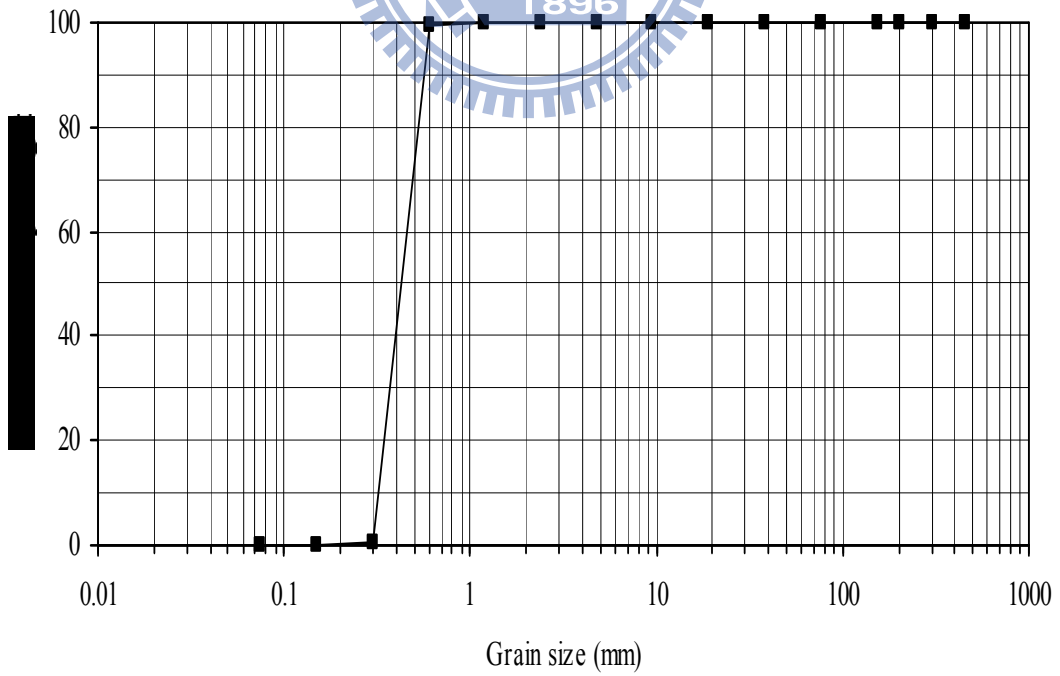


圖 2-9 試驗泥砂粒徑分佈曲線

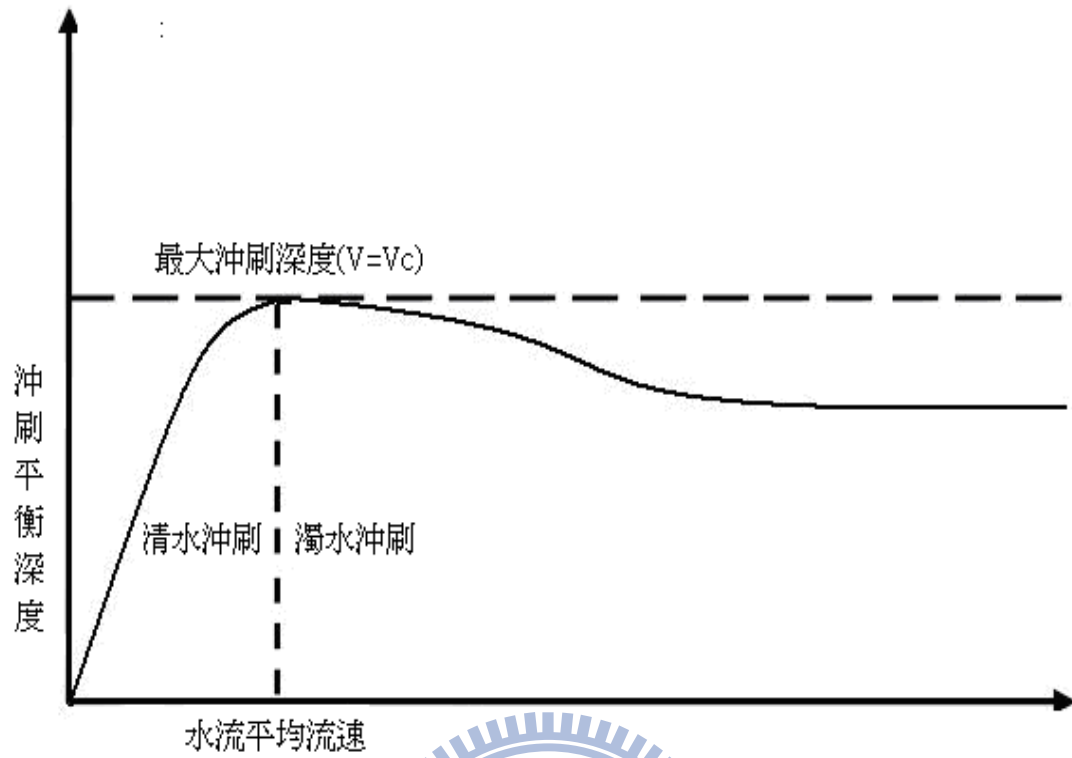


圖 2-10 最大沖刷深度流速條件示意圖

(Melville and Coleman, 2000)

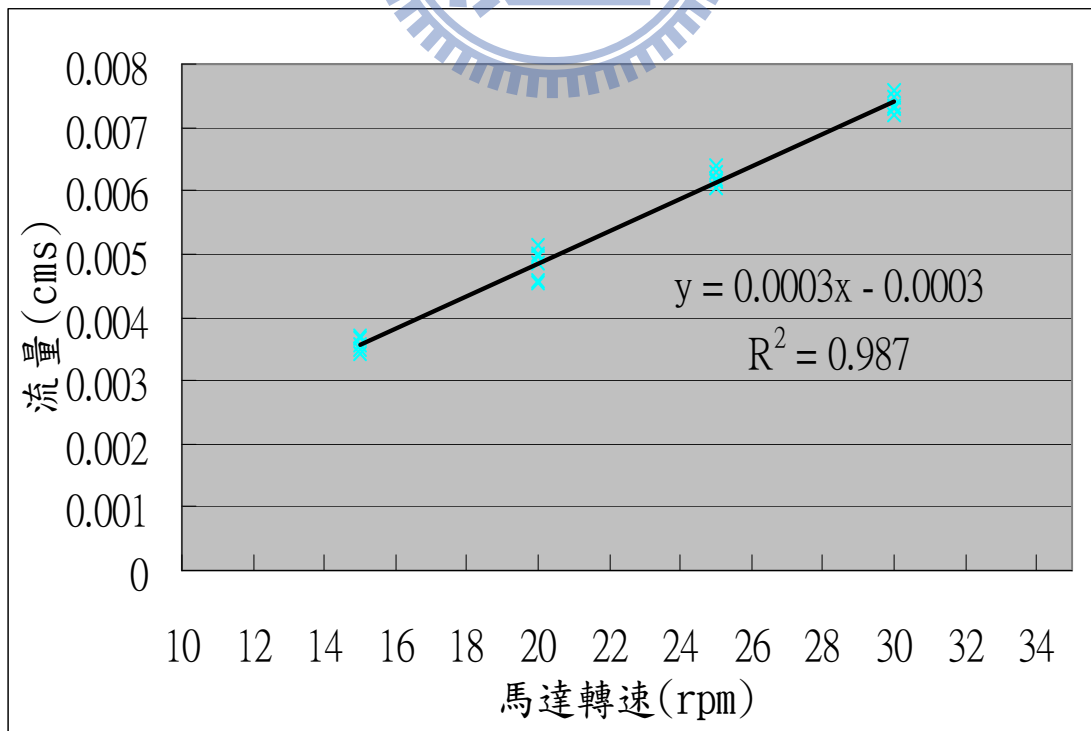


圖 2-11 流量率定曲線

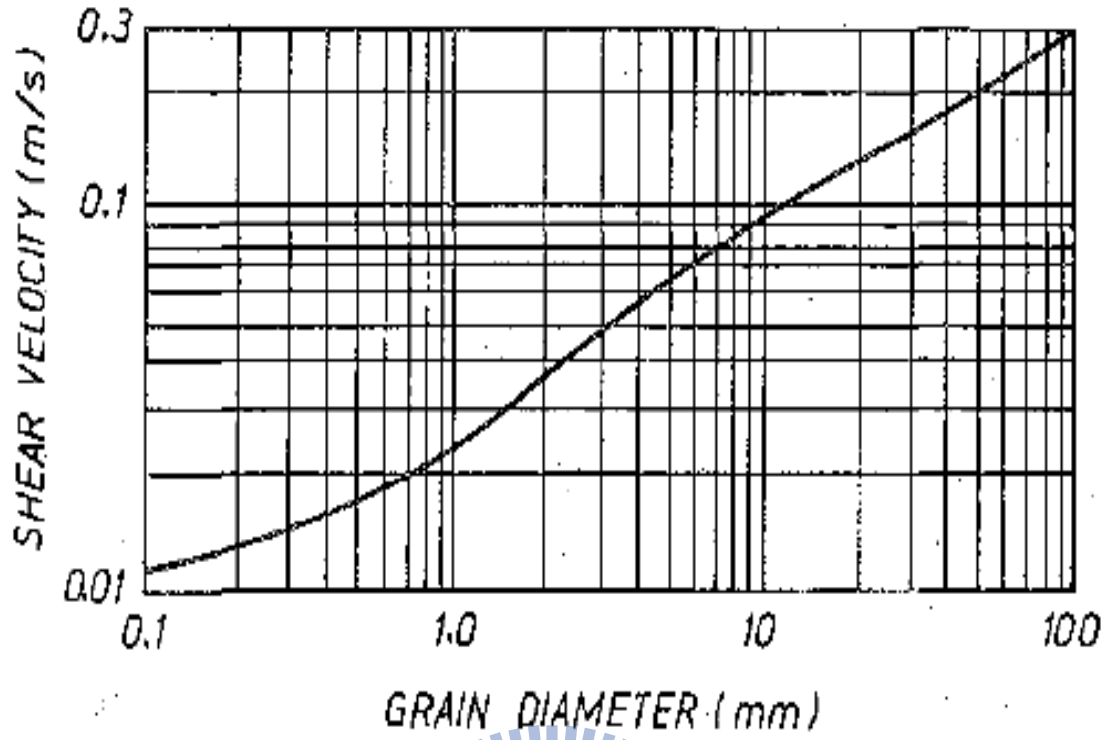


圖 2-12 均勻粒徑之 Shields 始動剪力速度圖

(Melville and Sutherland, 1988)

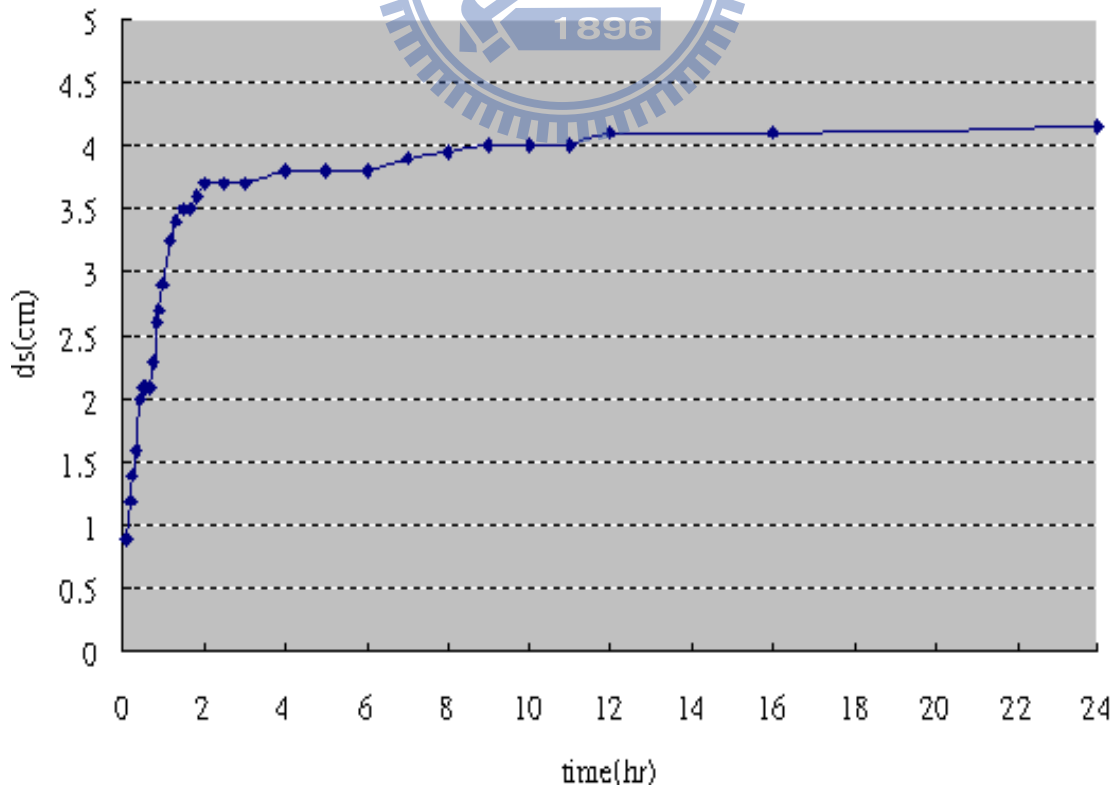


圖 2-13 橋墩沖刷平衡時間歷程圖

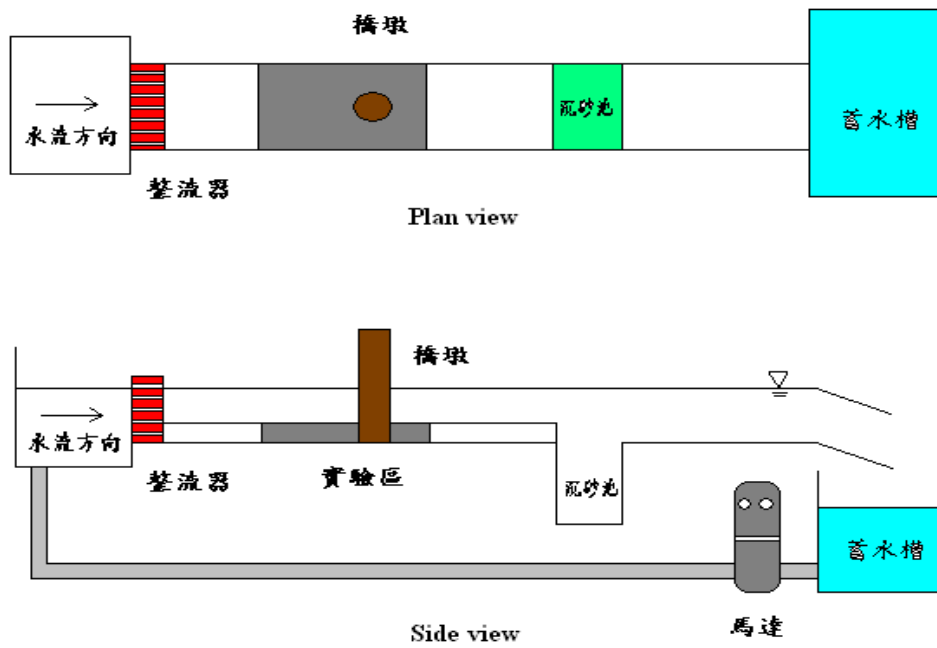


圖 2-14 試驗水槽佈置示意圖



圖 2-15 相機角架固定裝置

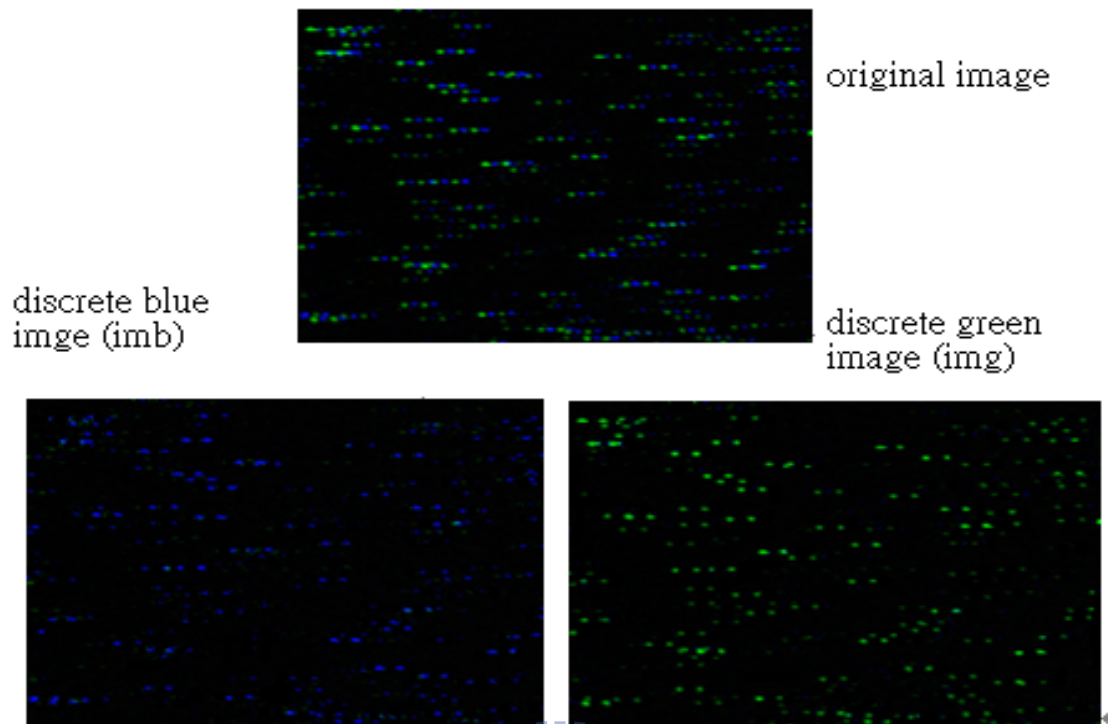


圖 3-1 原始影像擷取圖

(上圖為原圖，左下為分離之藍色影像圖，右下為綠色影像圖)

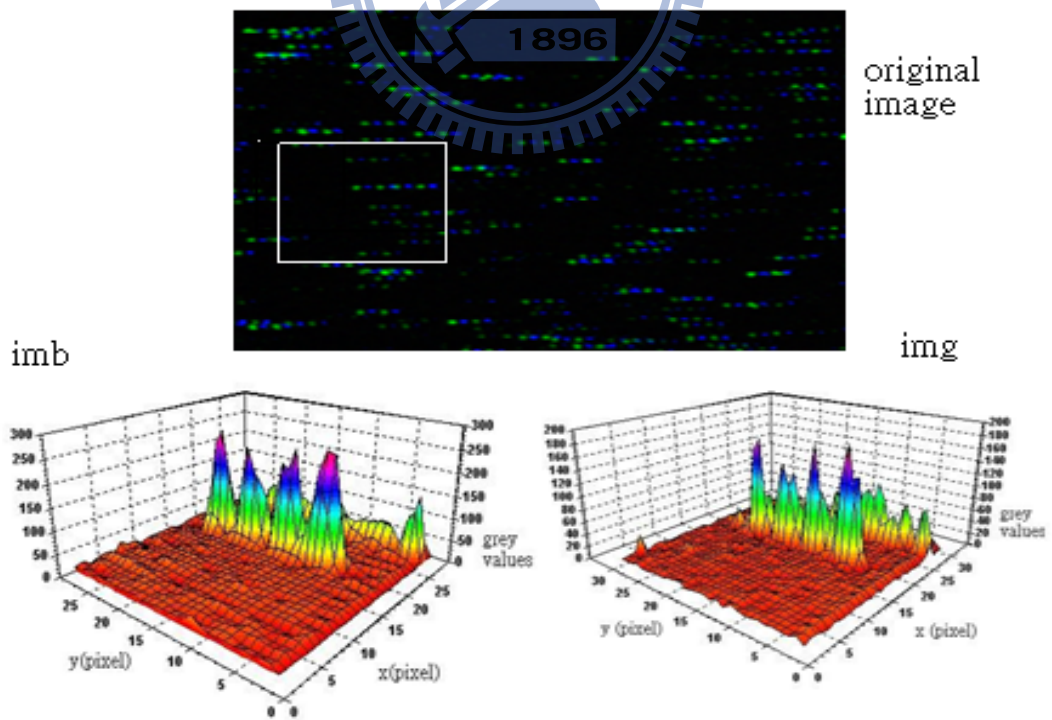


圖 3-2 藍、綠影像亮度分佈示意圖

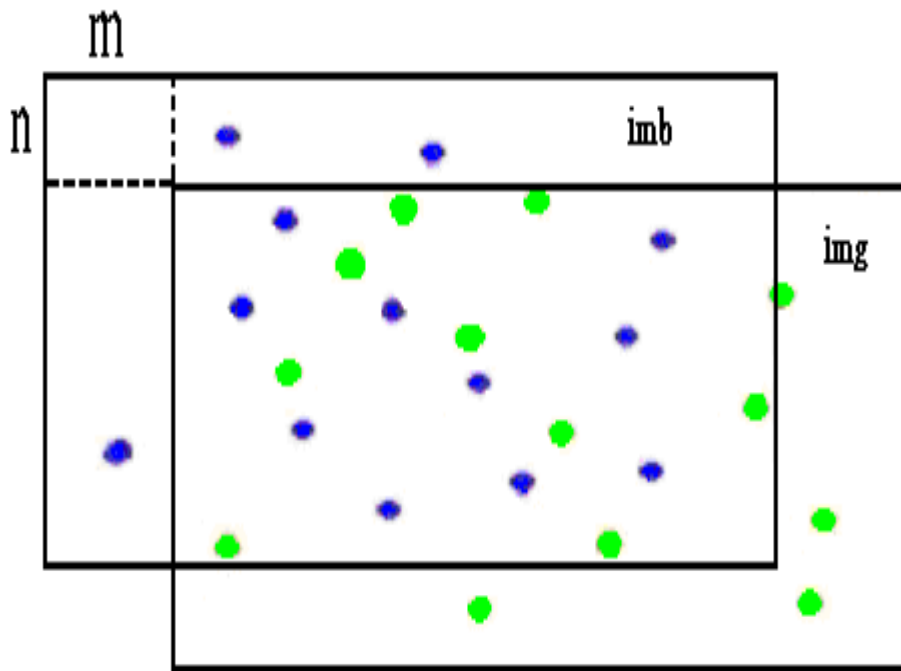


圖 3-3 imb、img 比對方式

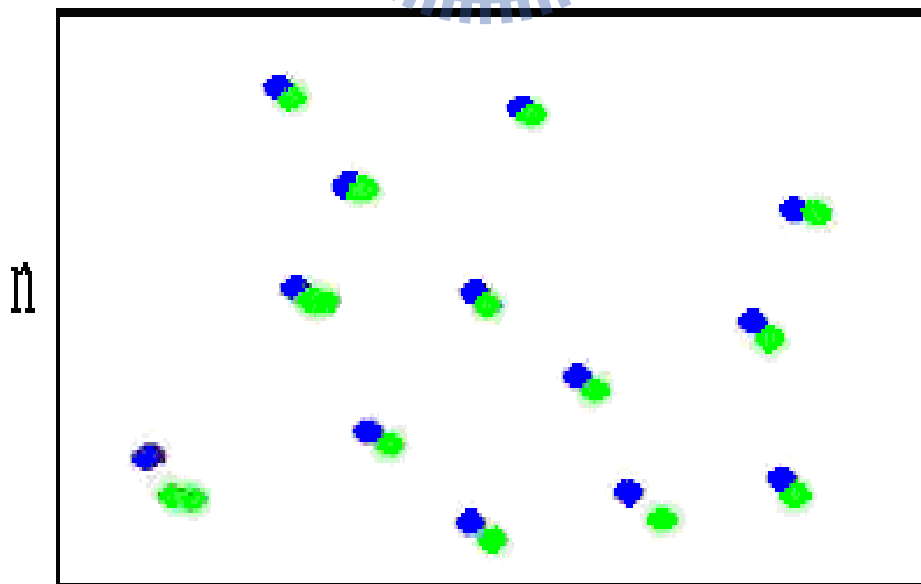


圖 3-4 將綠色點位移 (m, n) 後與藍色點重疊(matching)情況

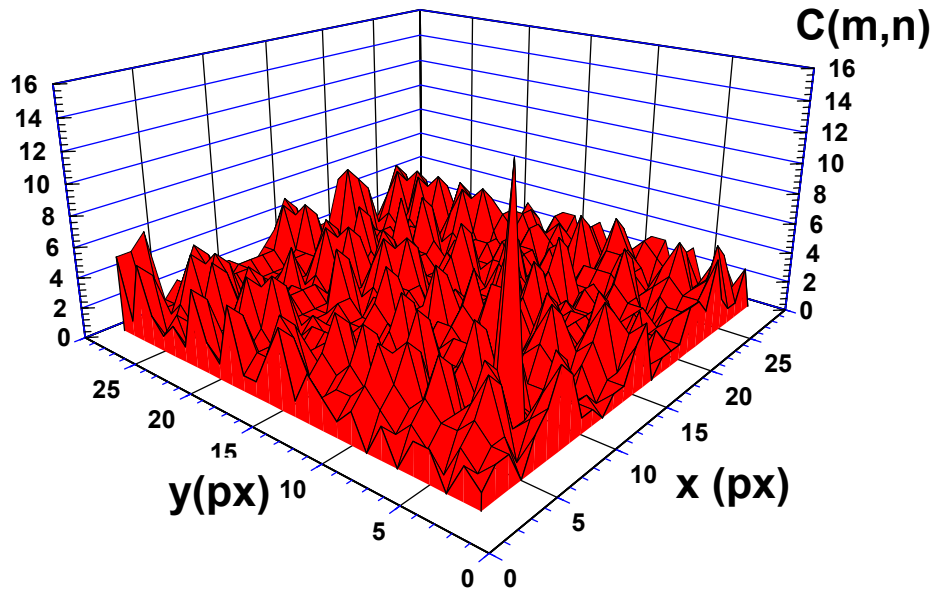


圖 3-5 互相關計算所得之 $C(m, n)$ 分佈示意圖

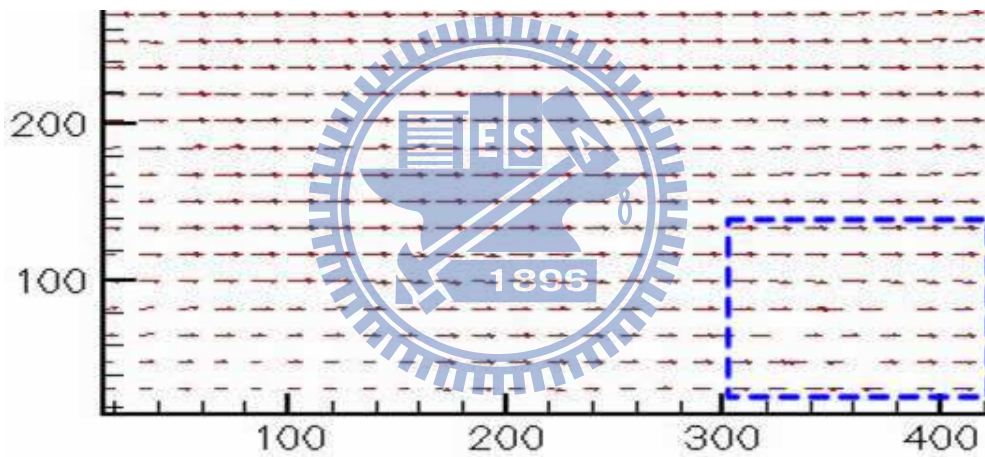


圖 3-6 不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

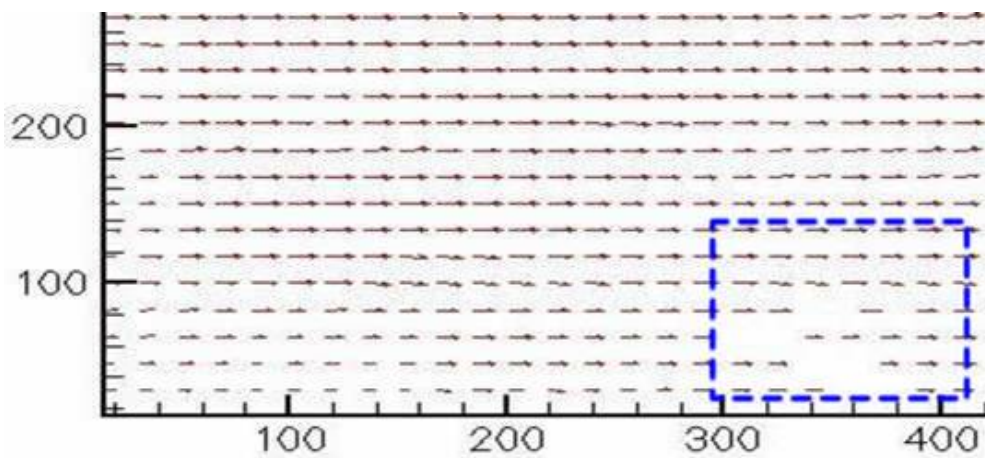


圖 3-7 去除不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

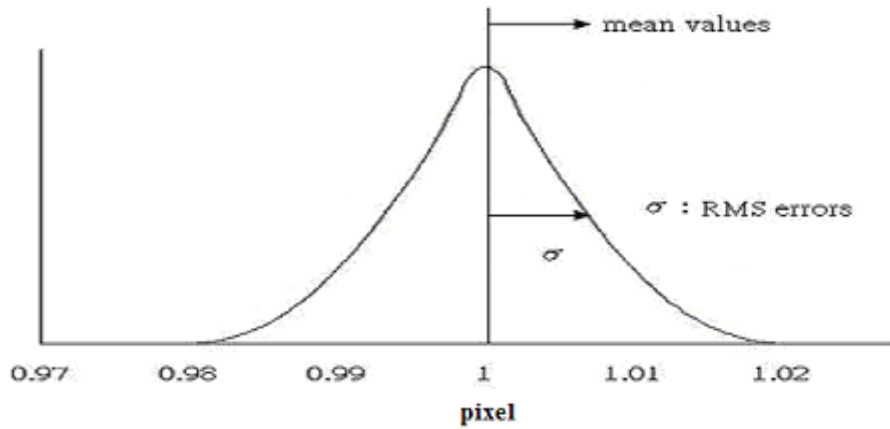


圖 3-8 RMS 誤差之示意圖

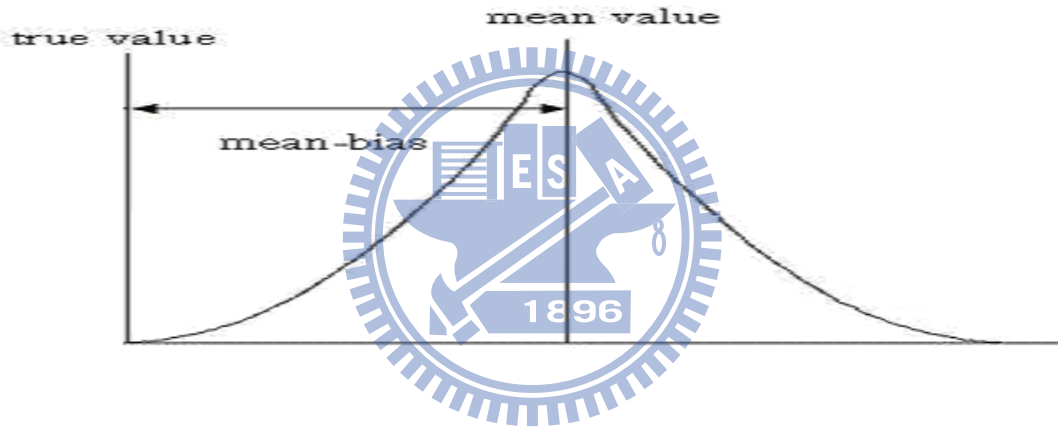


圖 3-9 偏差誤差之示意圖

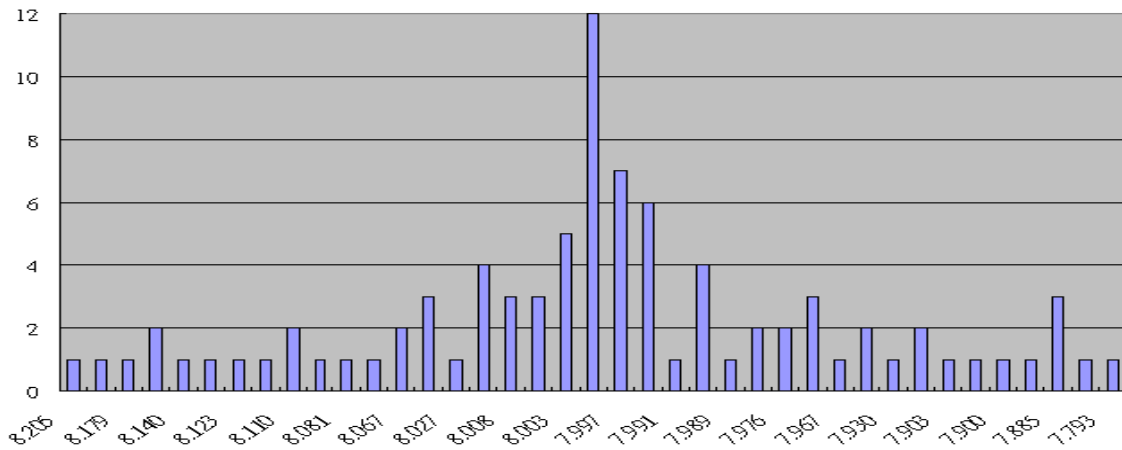


圖 3-10 已知位移量 8 畫素之計算結果

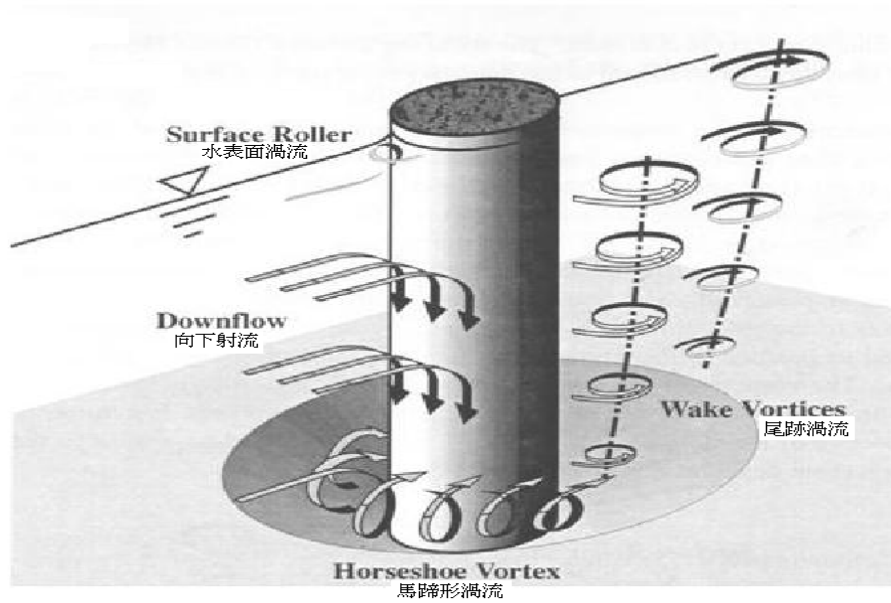


圖 3-11 橋墩局部沖刷水流結構示意圖

(Melville and Coleman, 2000)

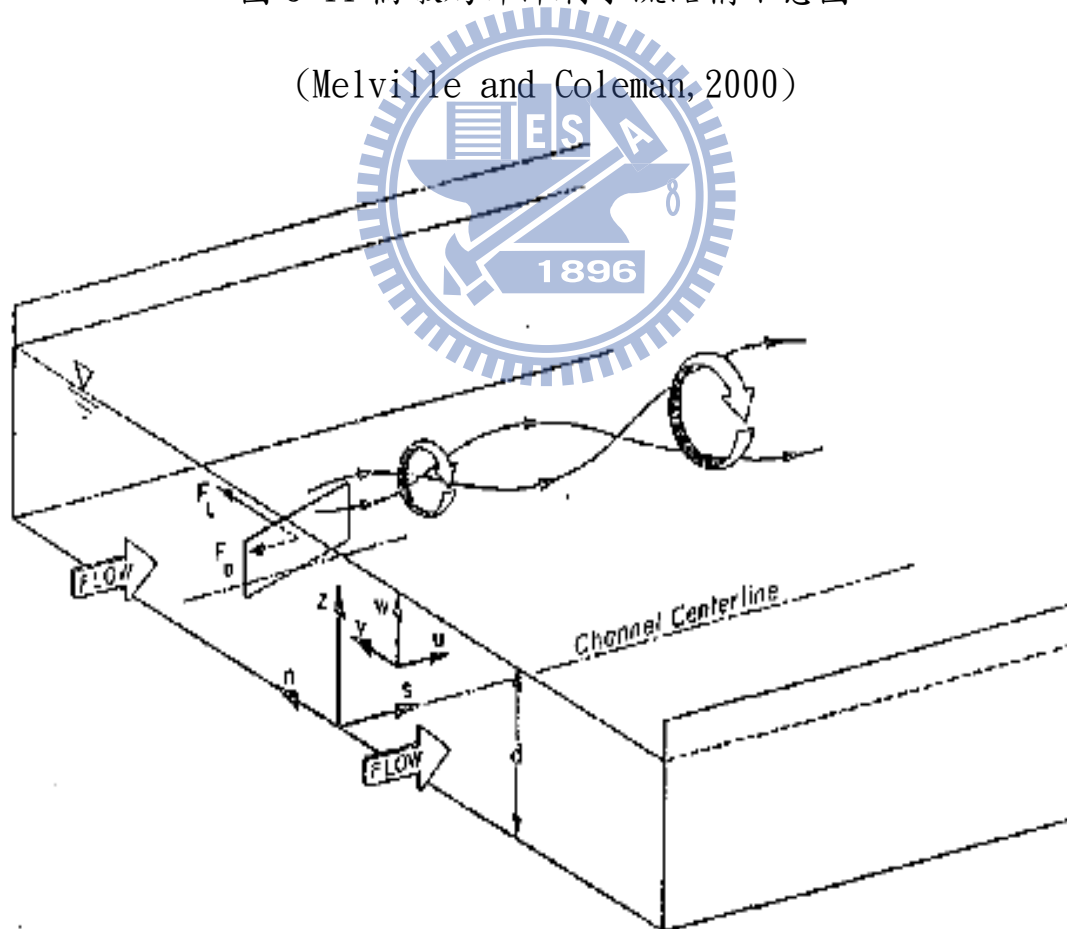


圖 3-12 潛板設置後產生尾跡漩渦及螺旋水流示意圖

(Odgaard & Wang, 1991)

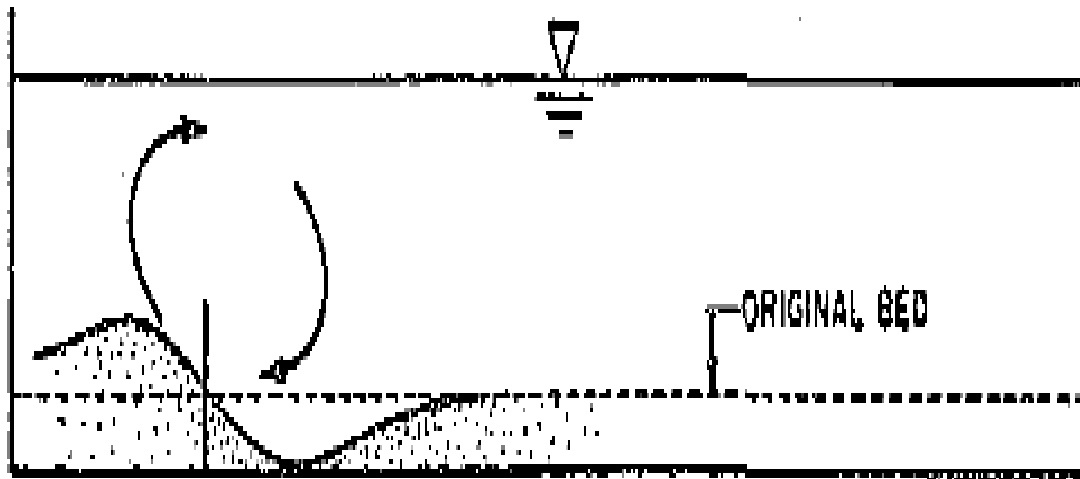


圖 3-13 潛板產生尾跡渦流影響底床變化示意圖

(Odgaard & Wang, 1991)



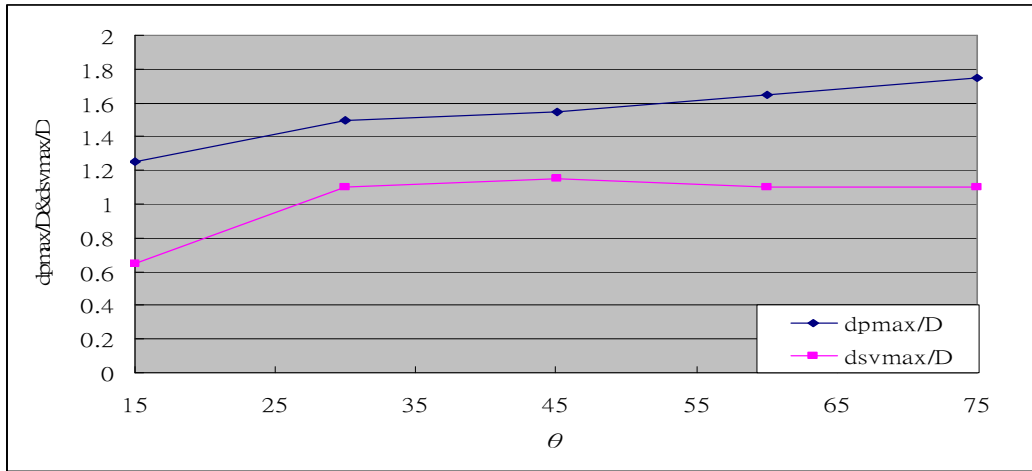


圖 4-1 攻角佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖

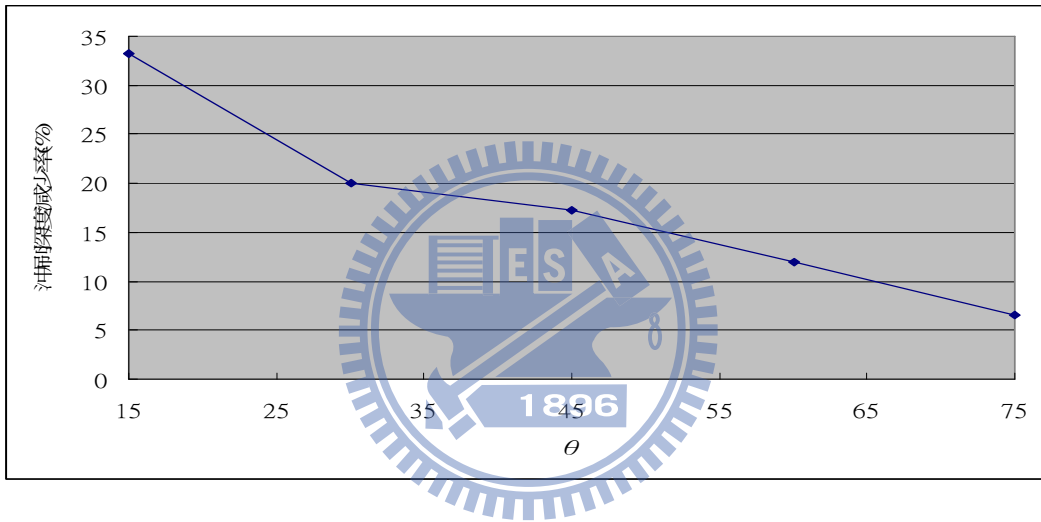


圖 4-2 攻角佈置對橋墩減少沖刷率圖

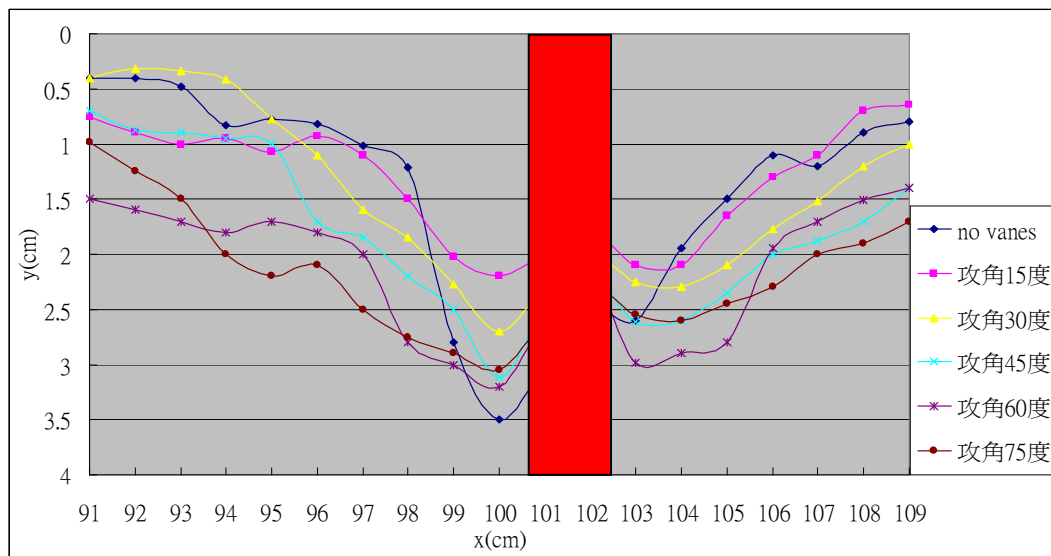


圖 4-3 攻角佈置對橋墩中心縱剖面圖

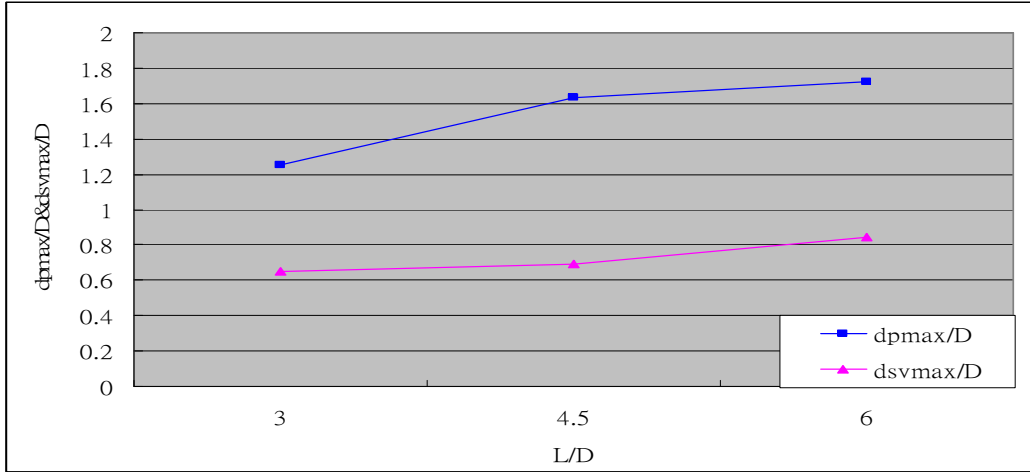


圖 4-4 間距佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖

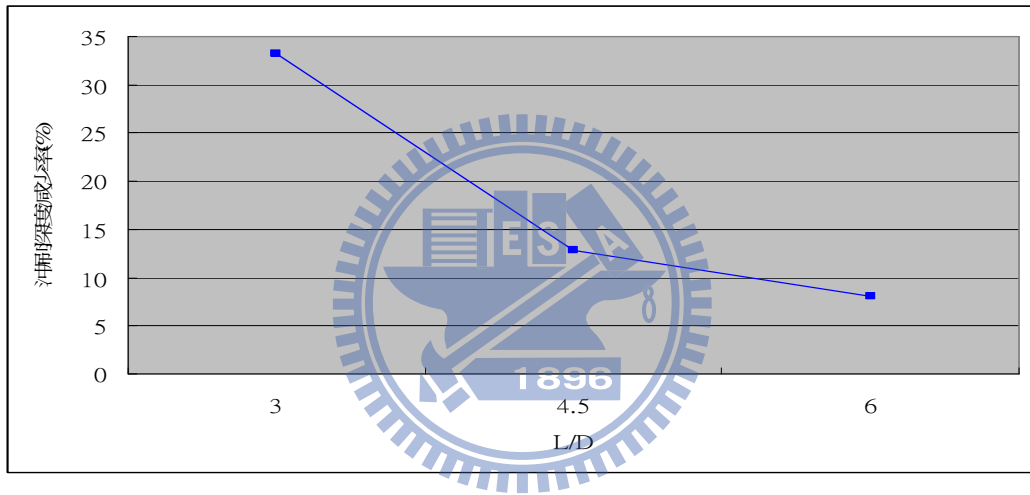


圖 4-5 間距佈置對橋墩減少沖刷率圖

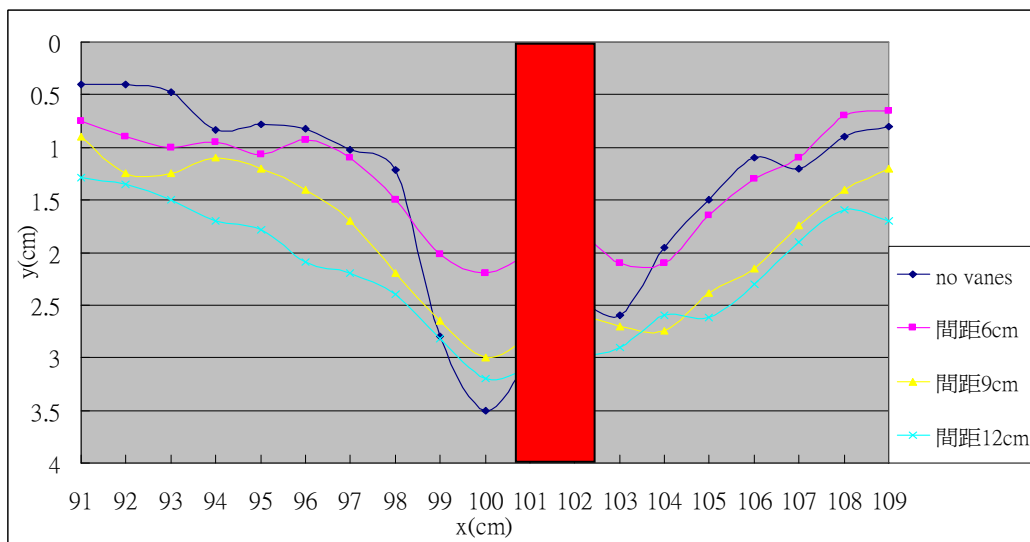


圖 4-6 間距佈置對橋墩中心縱剖面圖

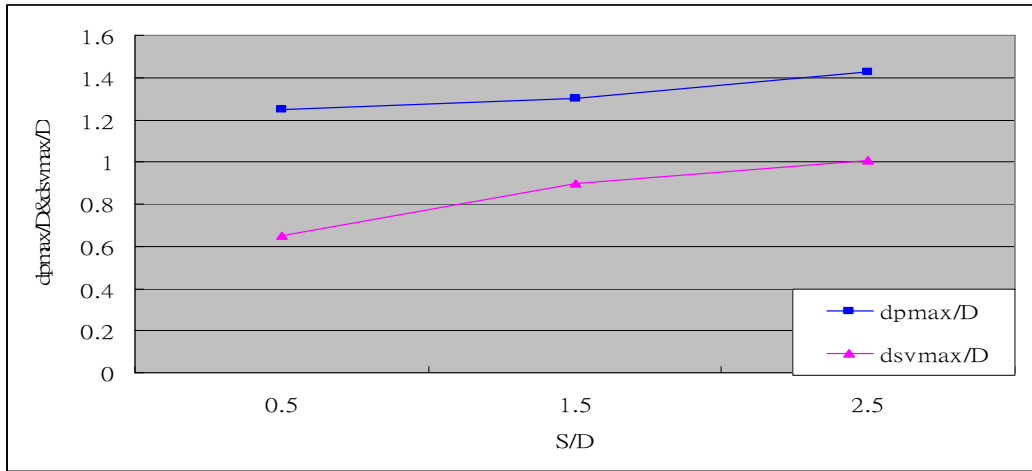


圖 4-7 開口佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖

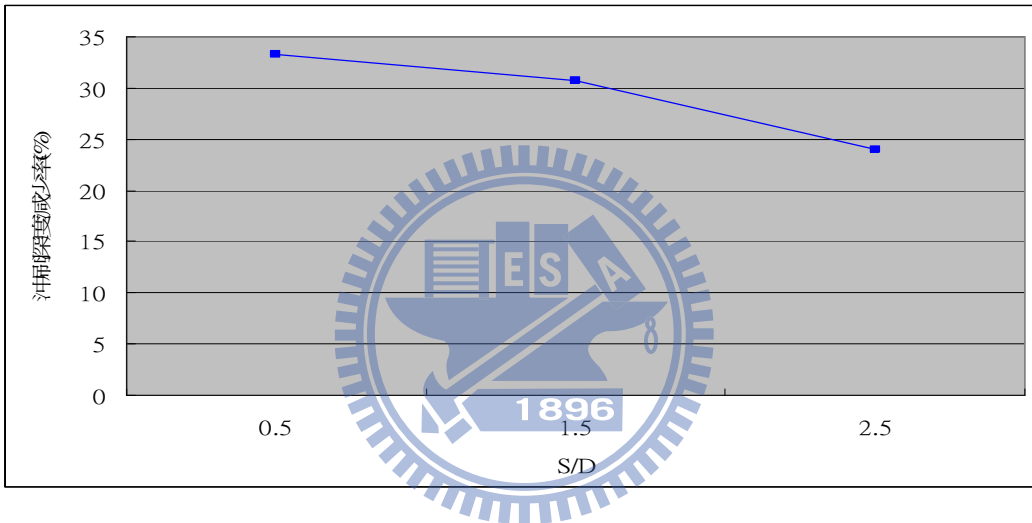


圖 4-8 開口佈置對橋墩減少沖刷率圖

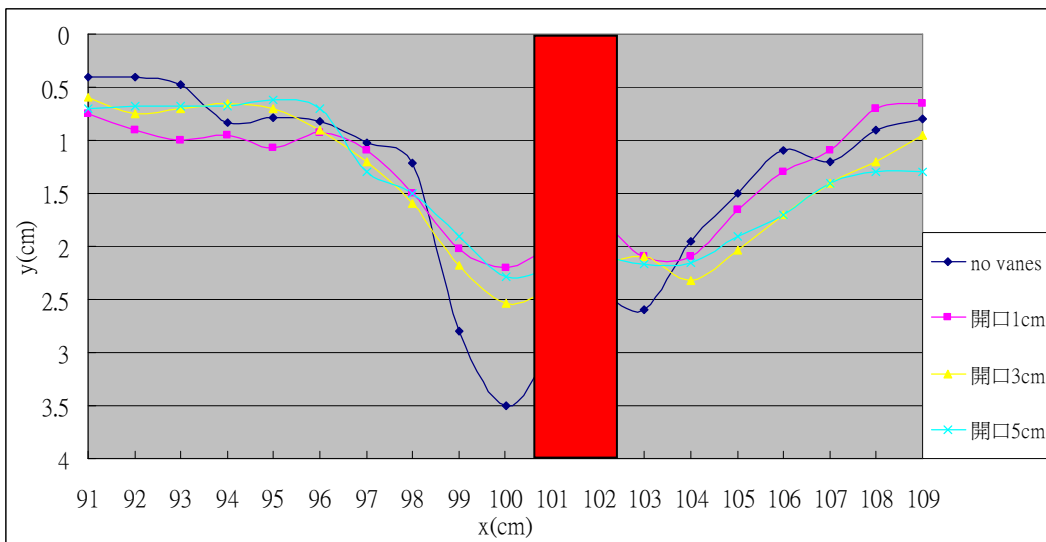


圖 4-9 開口佈置對橋墩中心縱剖面圖

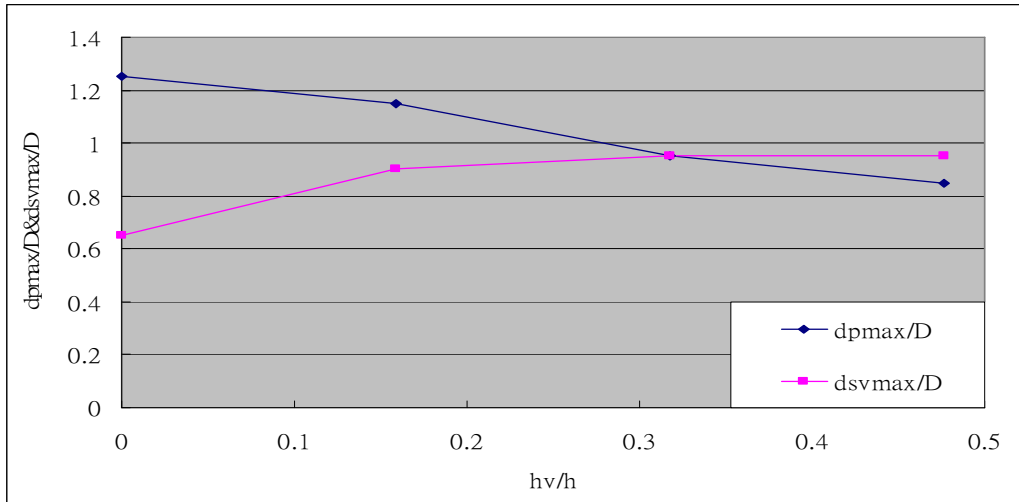


圖 4-10 入水深度佈置與橋墩、潛板最大沖刷深度關係圖

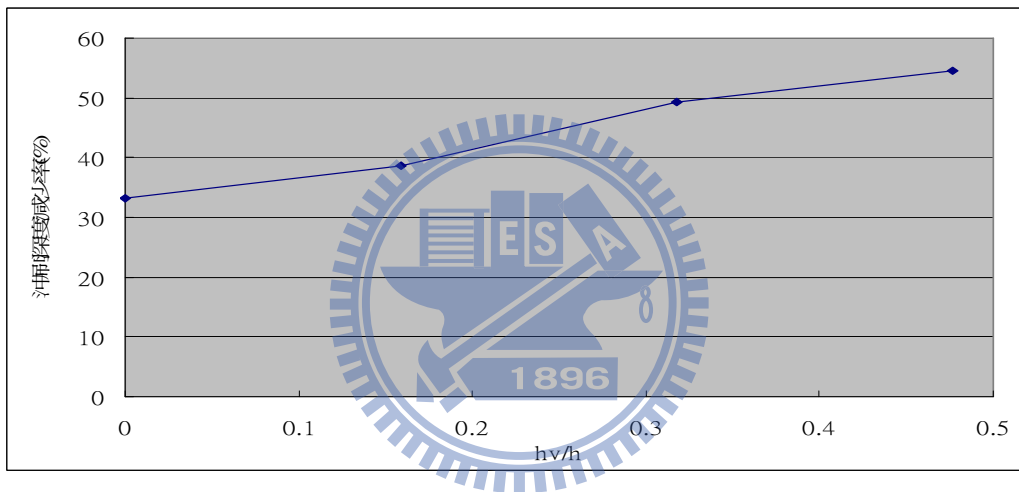


圖 4-11 入水深度佈置對橋墩減少沖刷率圖

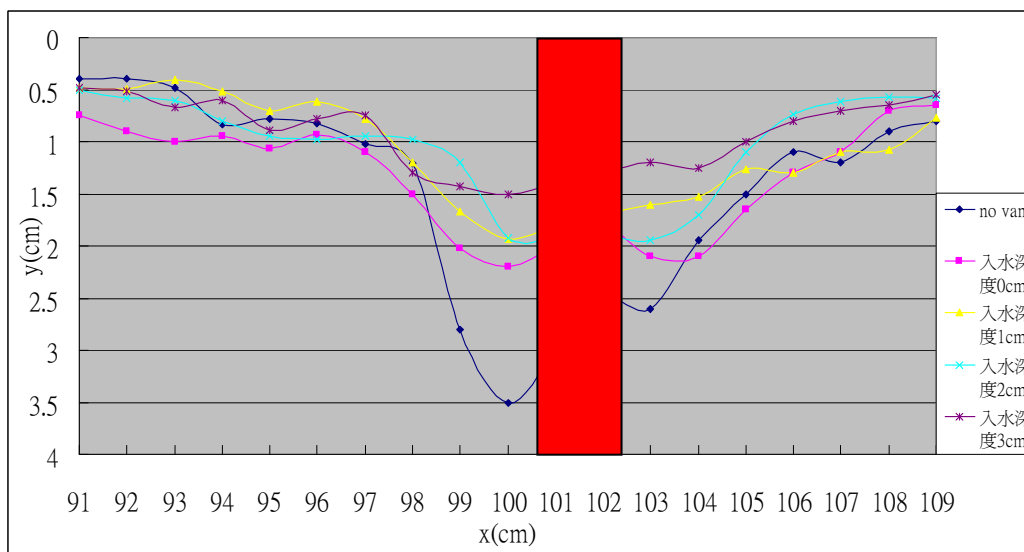


圖 4-12 入水深度佈置對橋墩中心縱剖面圖

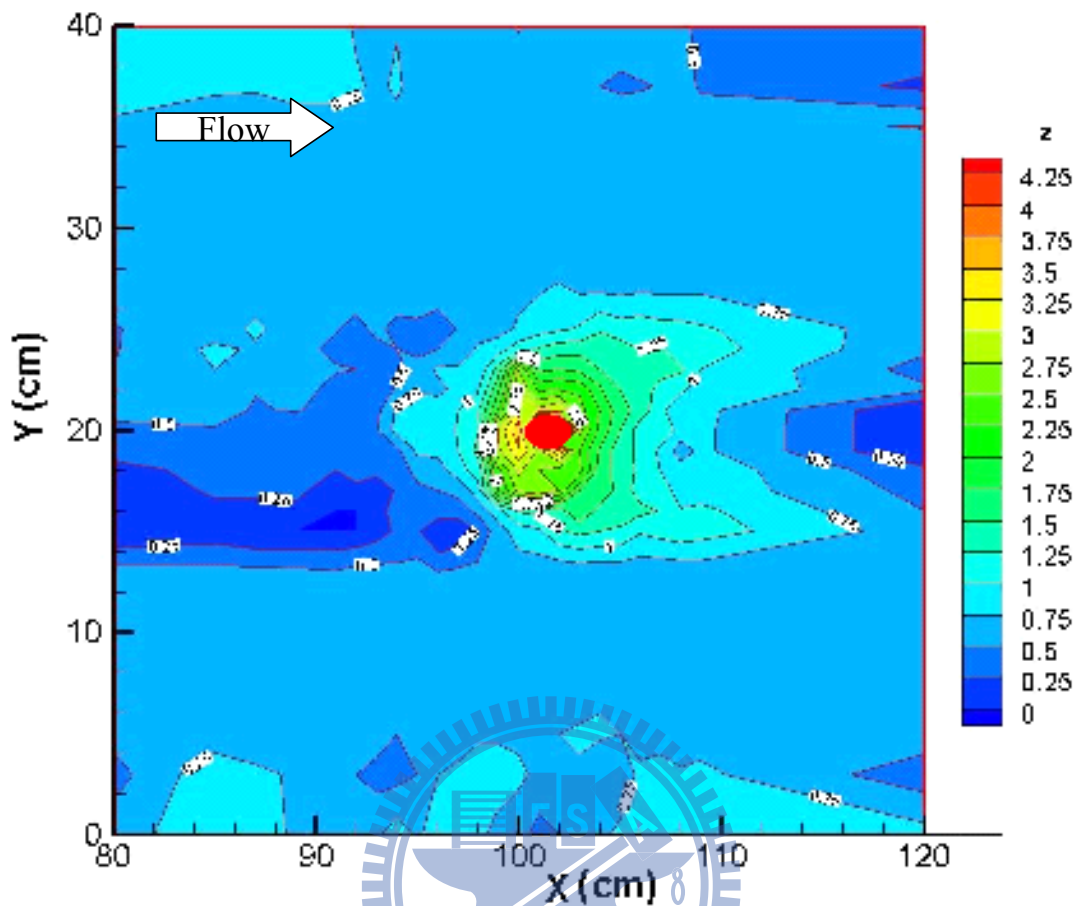


圖 4-13 案例 1 底床高程圖 (t=3hr)

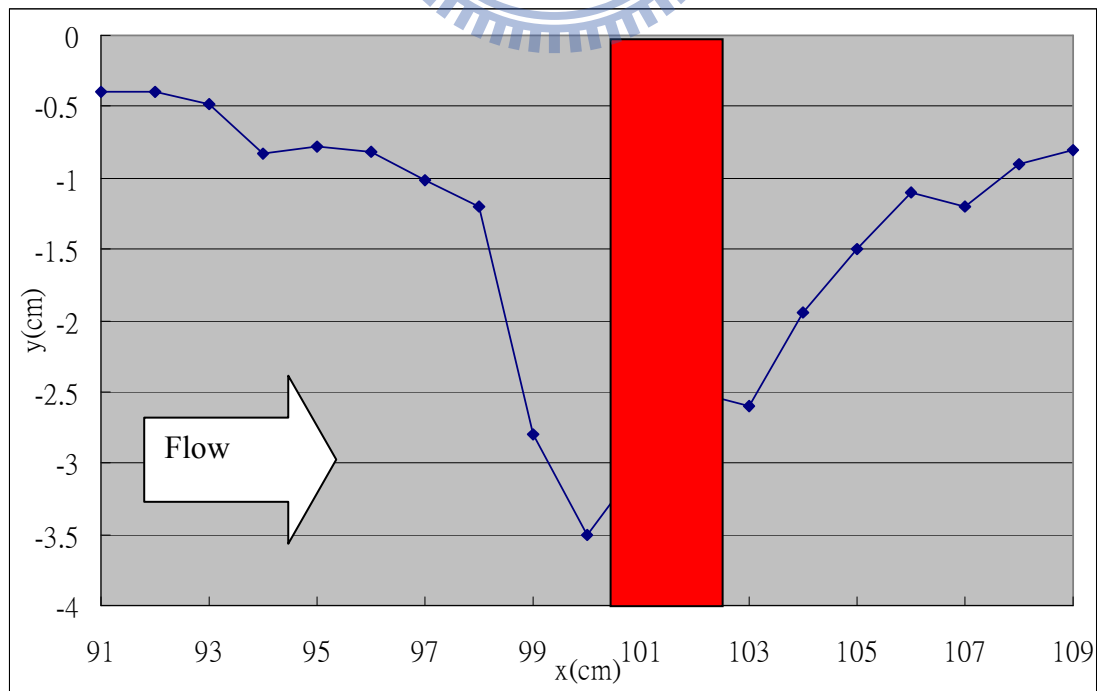


圖 4-14 案例 1 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

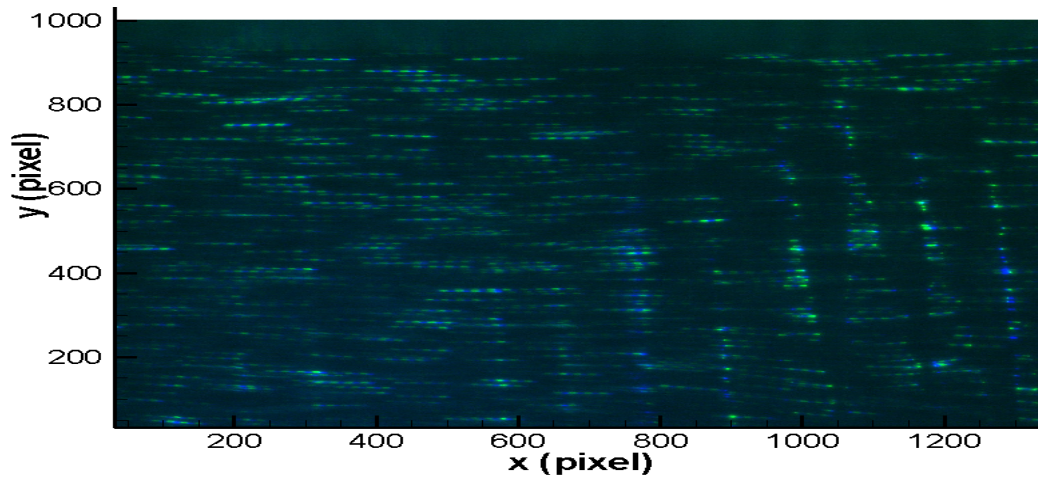


圖 4-15 案例 1 影像圖

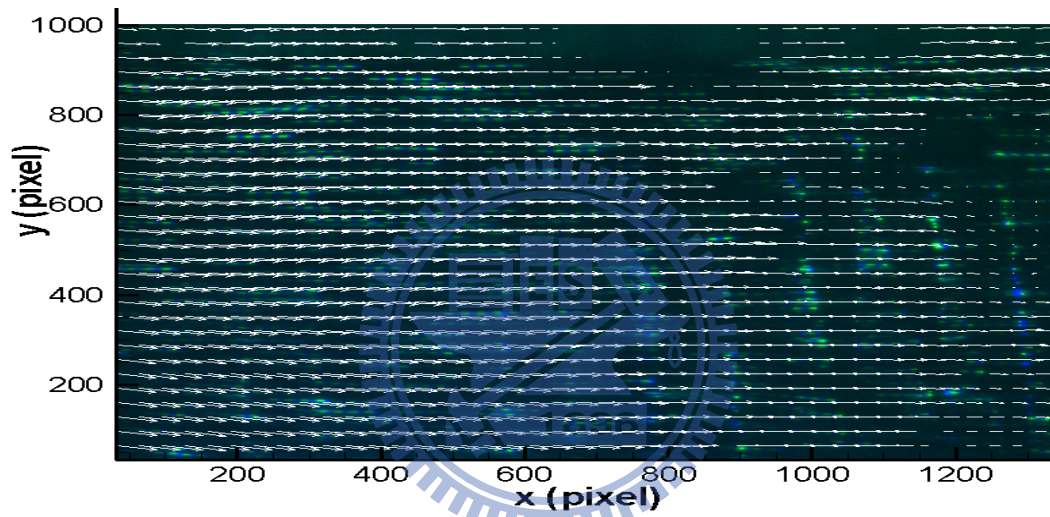


圖 4-16 案例 1 速度向量圖

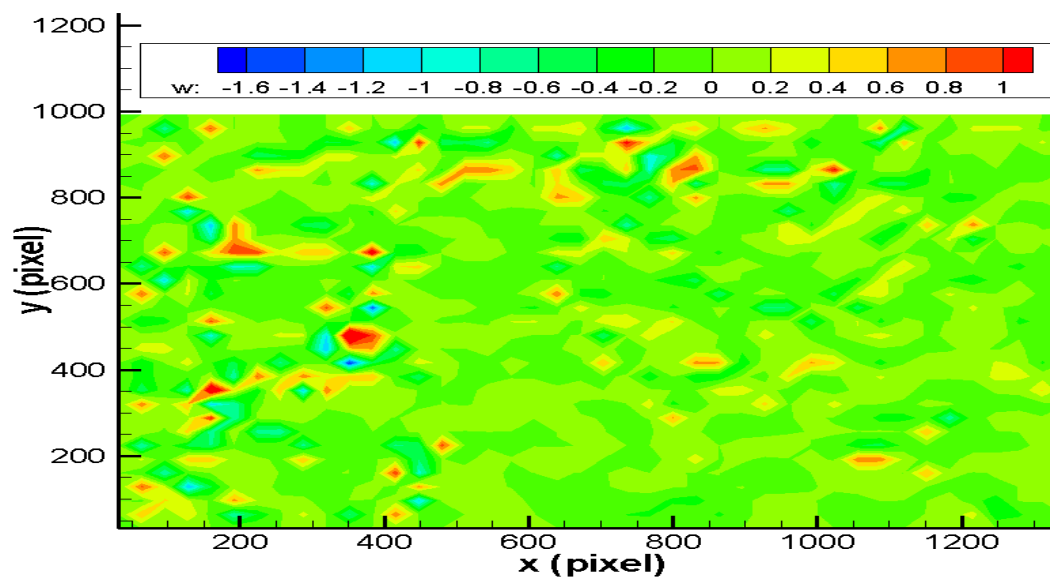


圖 4-17 案例 1 渦度場圖

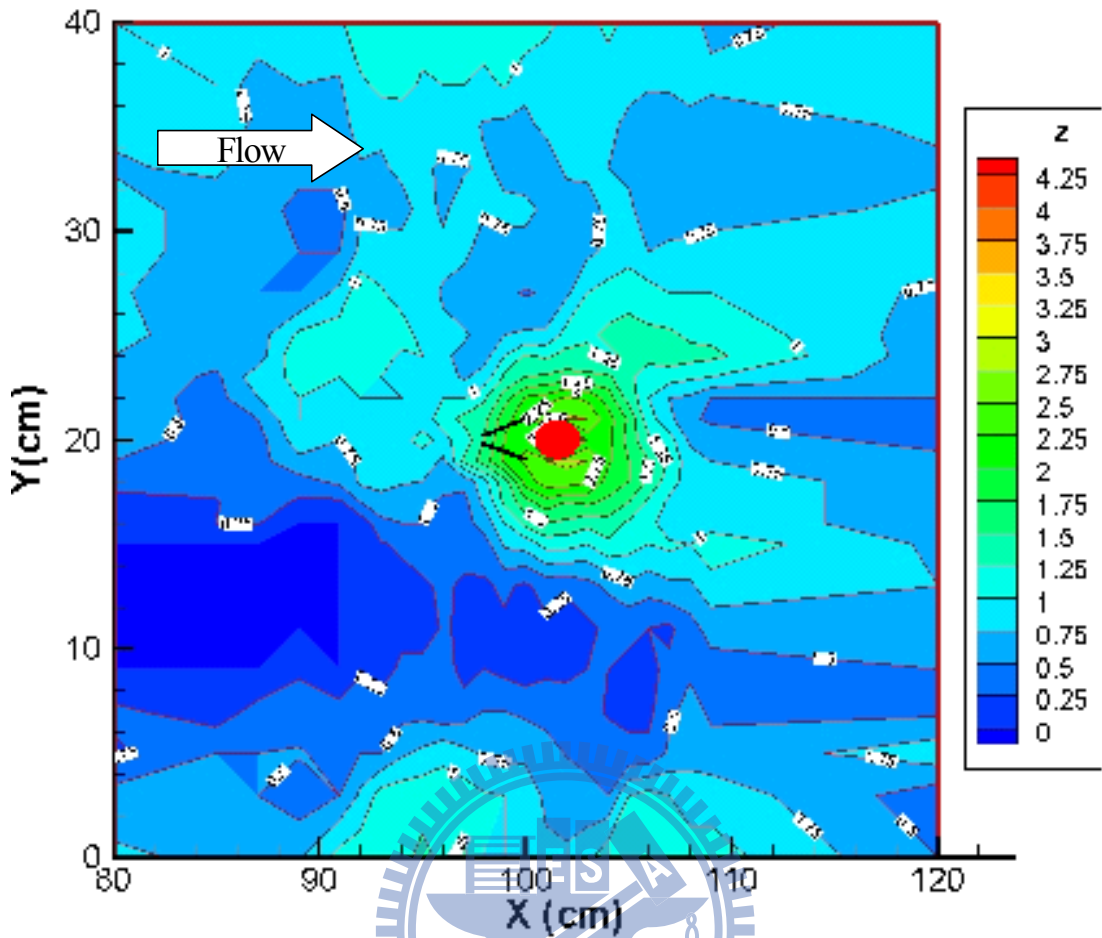


圖 4-18 案例 2 底床高程圖 (t=3hr)

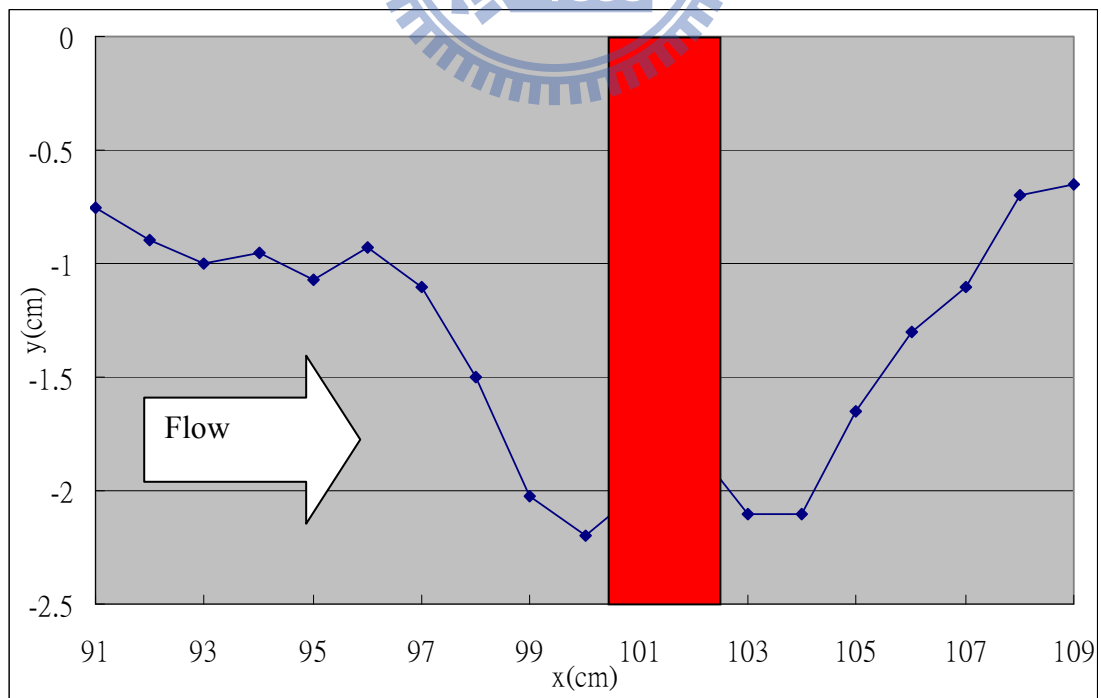


圖 4-19 案例 2 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

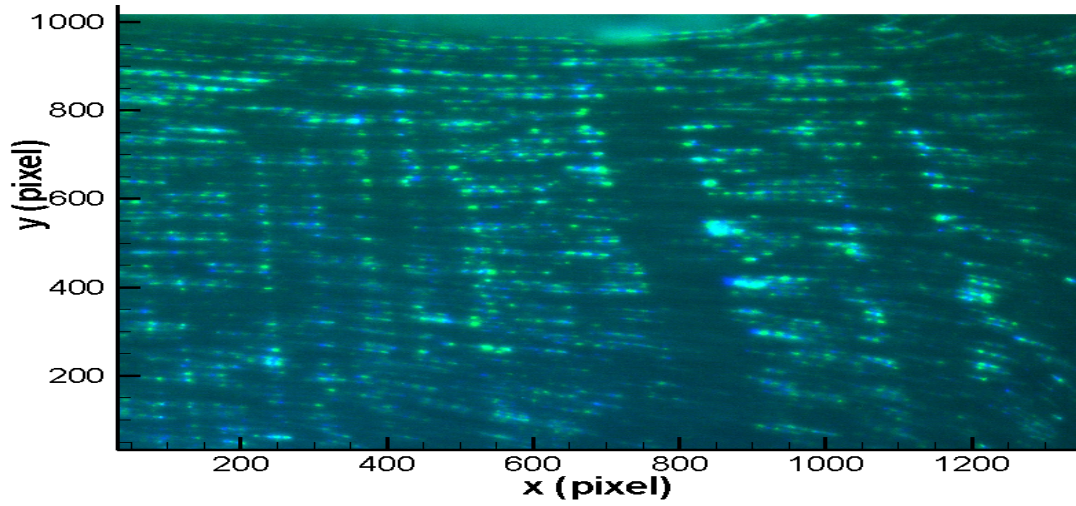


圖 4-20 案例 2 影像圖

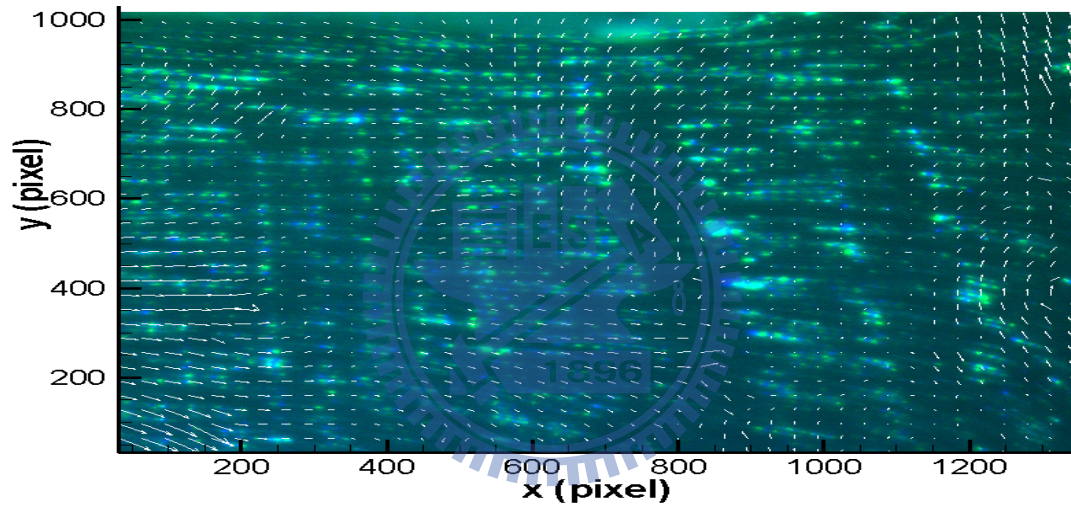


圖 4-21 案例 2 速度向量圖

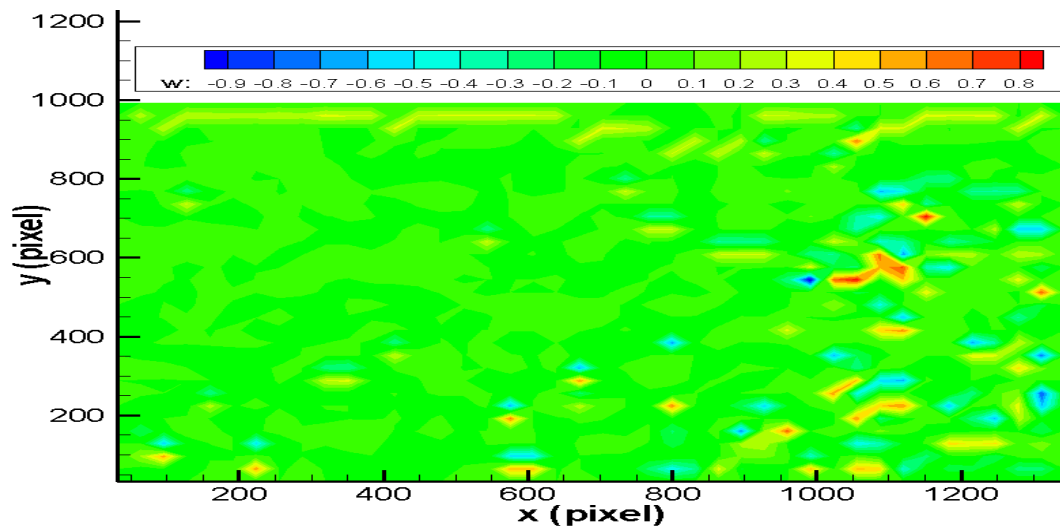


圖 4-22 案例 2 渦度場圖

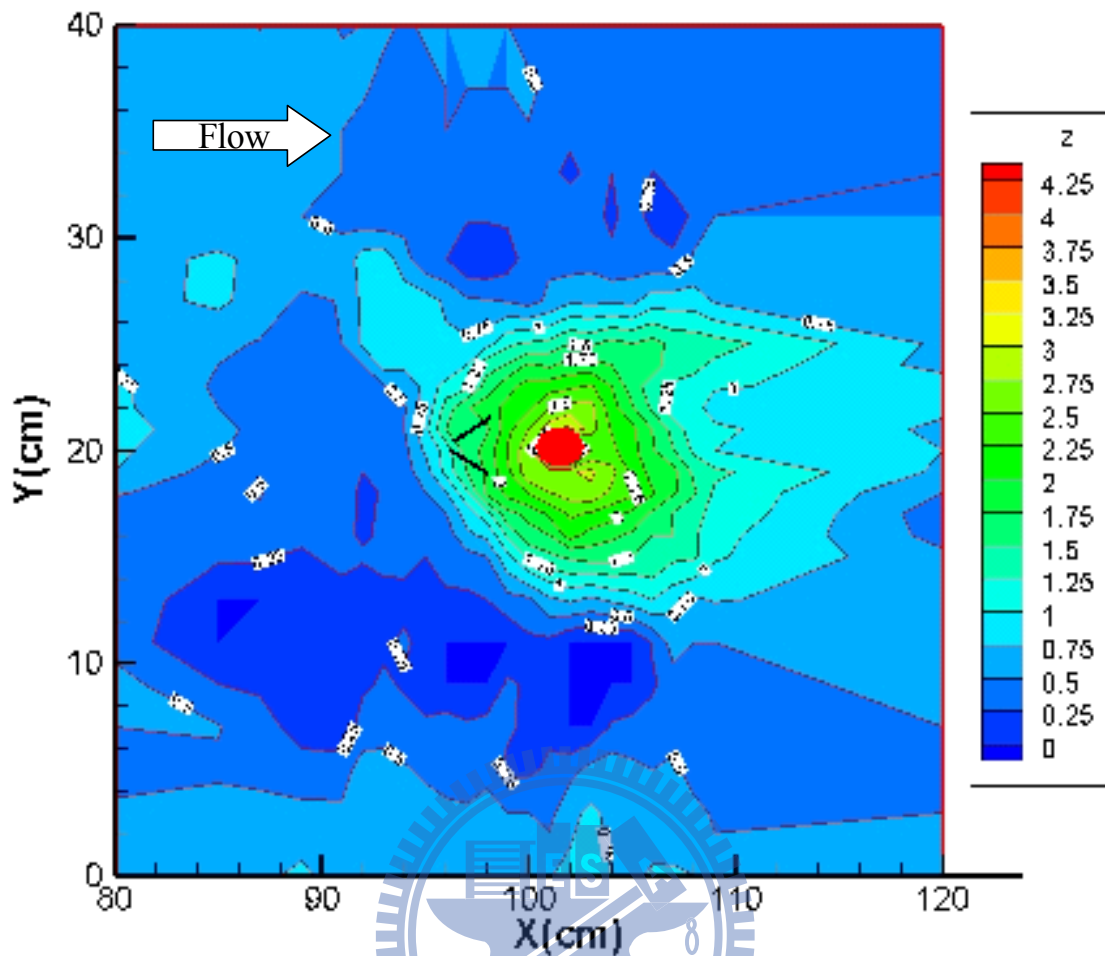


圖 4-23 案例 3 底床高程圖(t=3hr)

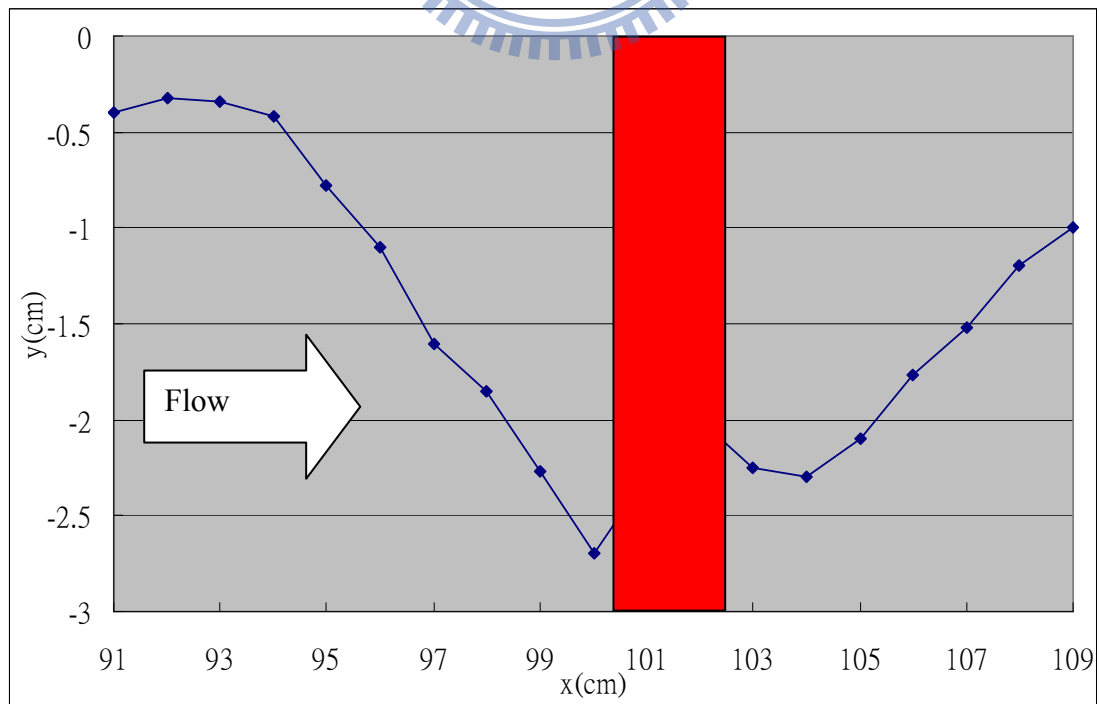


圖 4-24 案例 3 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

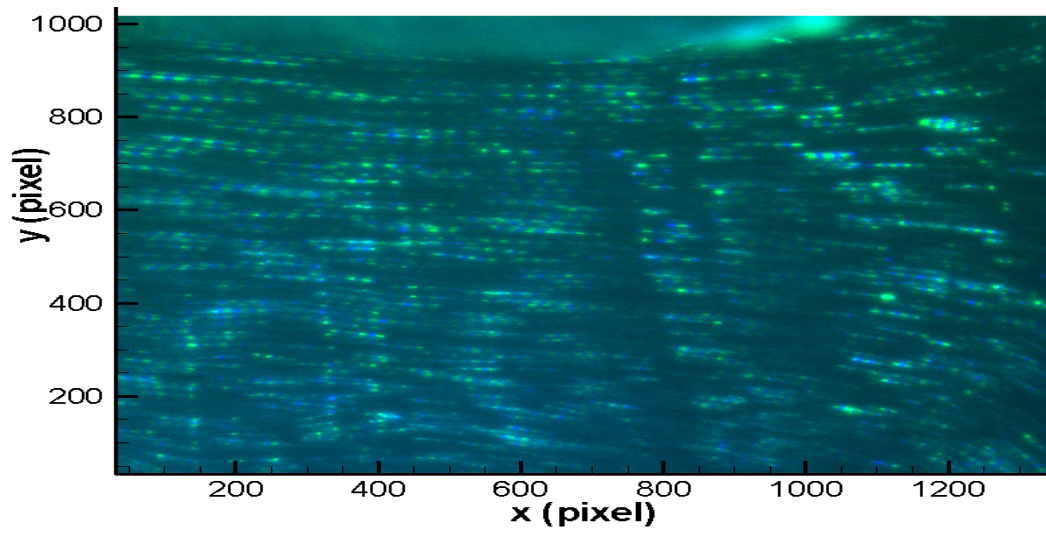


圖 4-25 案例 3 影像圖

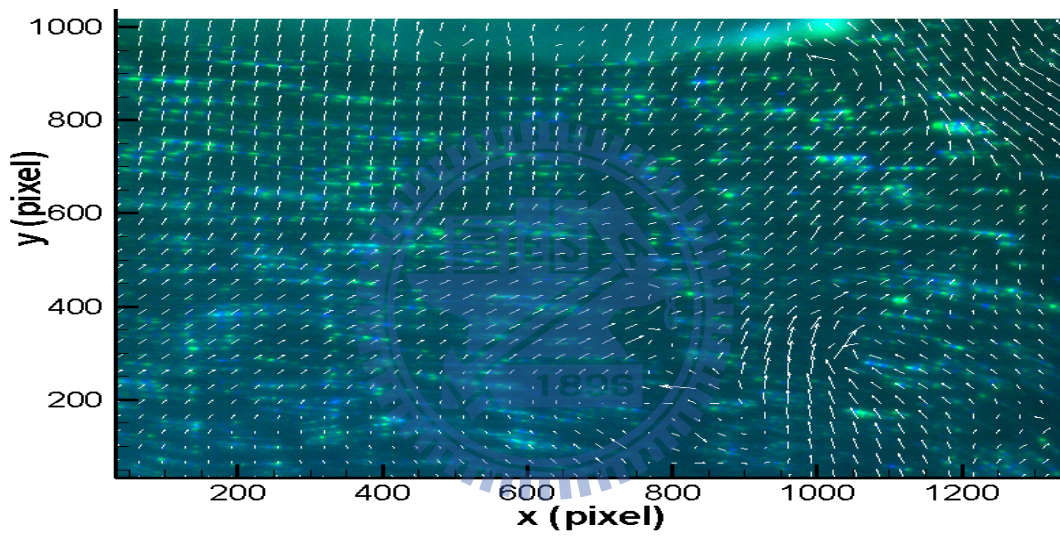


圖 4-26 案例 3 速度向量

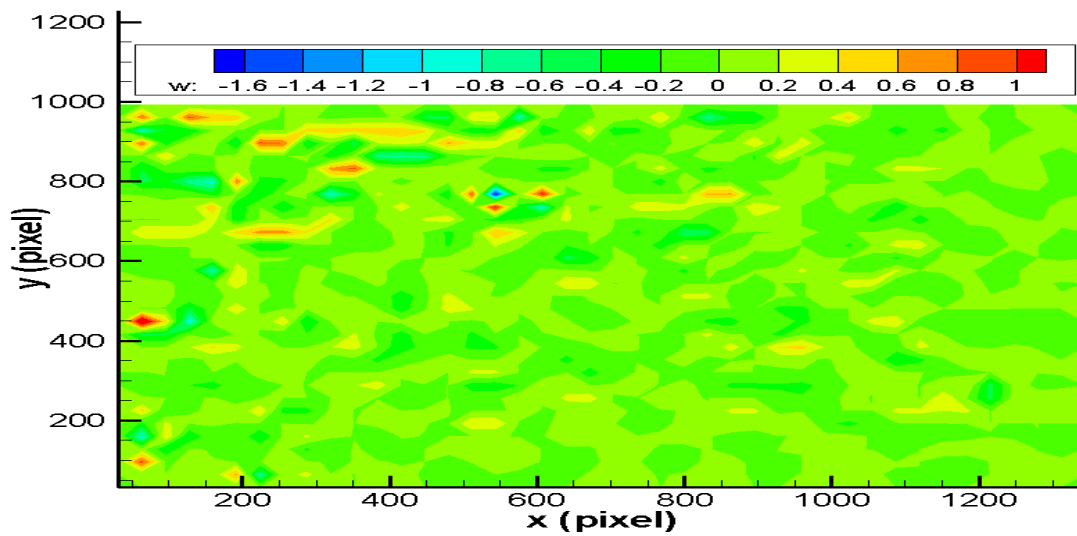


圖 4-27 案例 3 渦度場圖

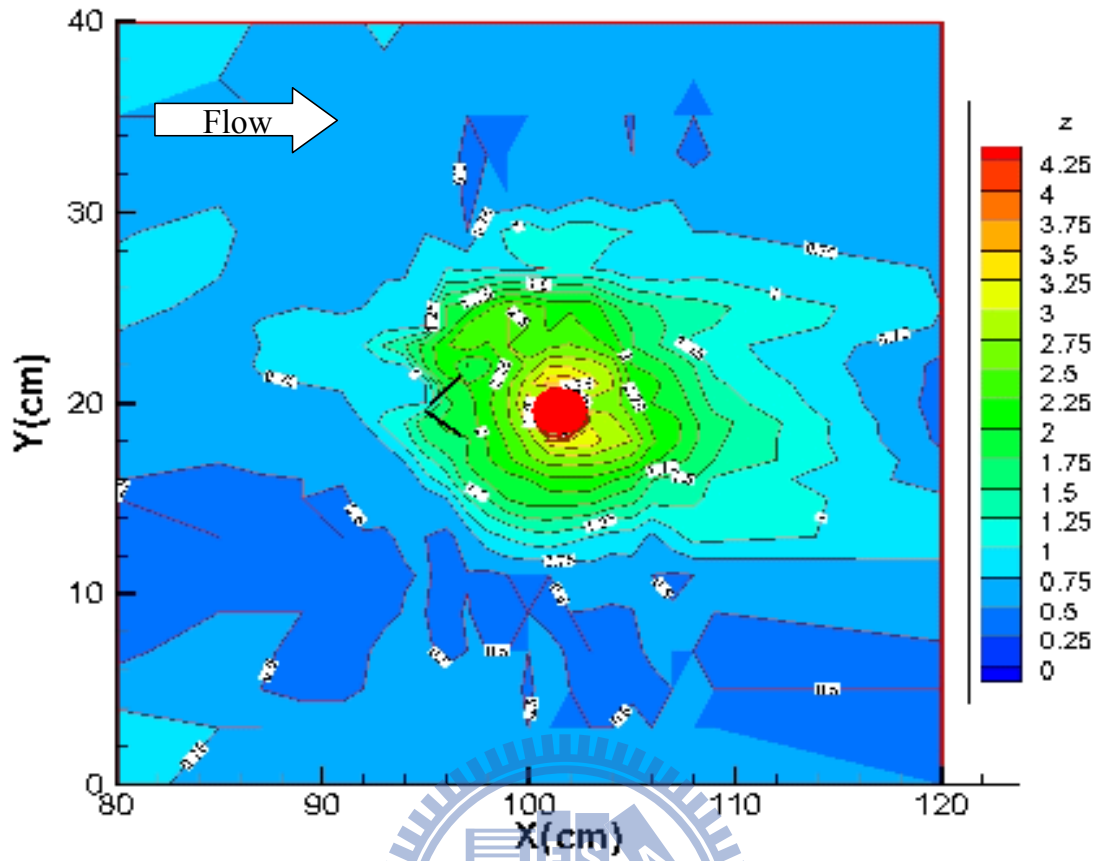


圖 4-28 案例 4 底床高程圖 (t=3hr)

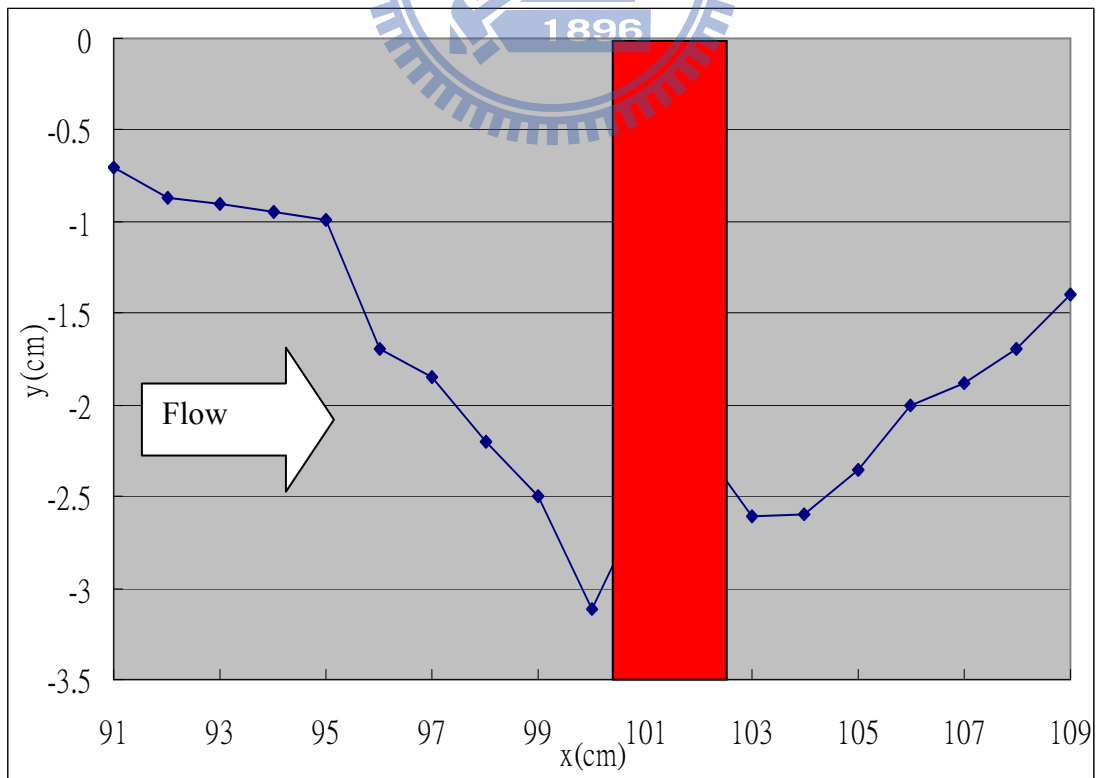


圖 4-29 案例 4 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

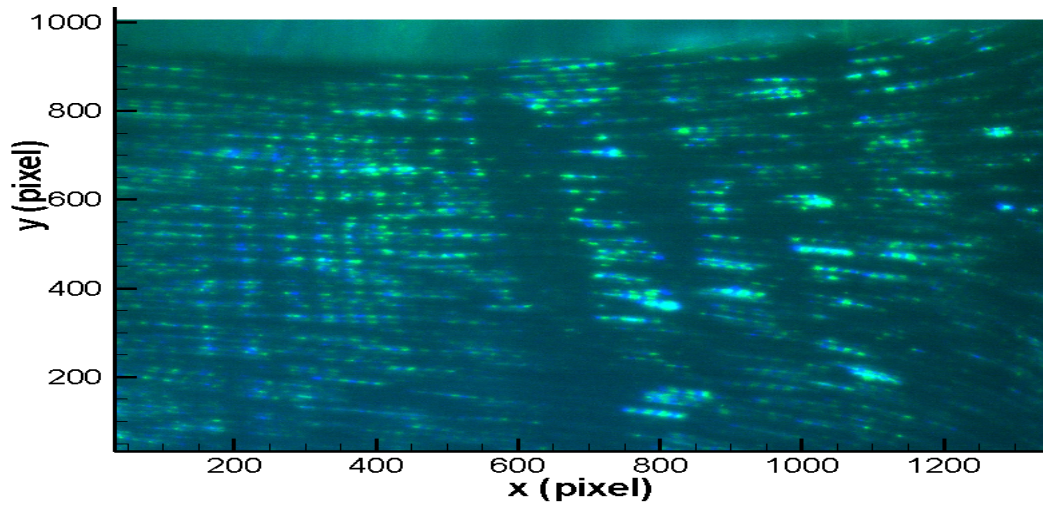


圖 4-30 案例 4 影像圖

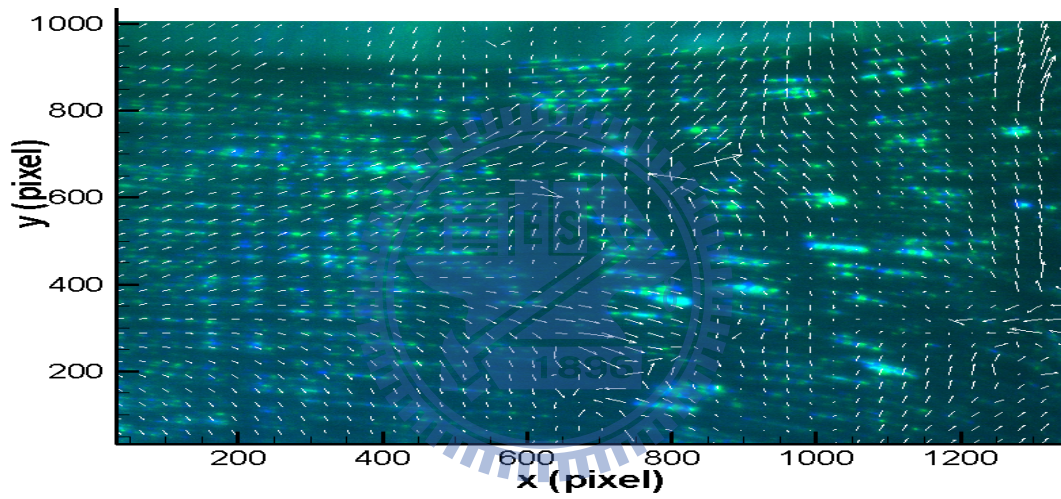


圖 4-31 案例 4 速度向量圖

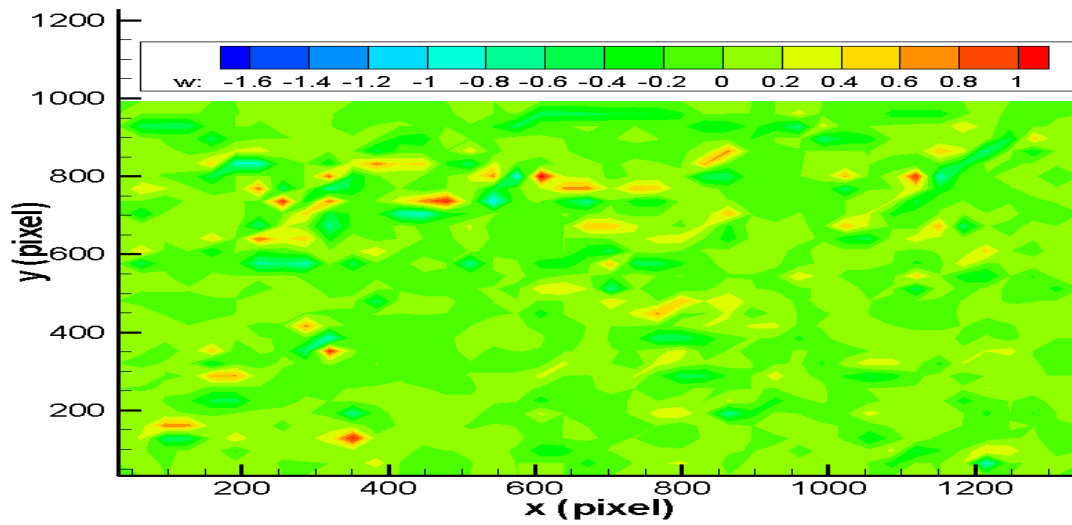


圖 4-32 案例 4 渦度場圖

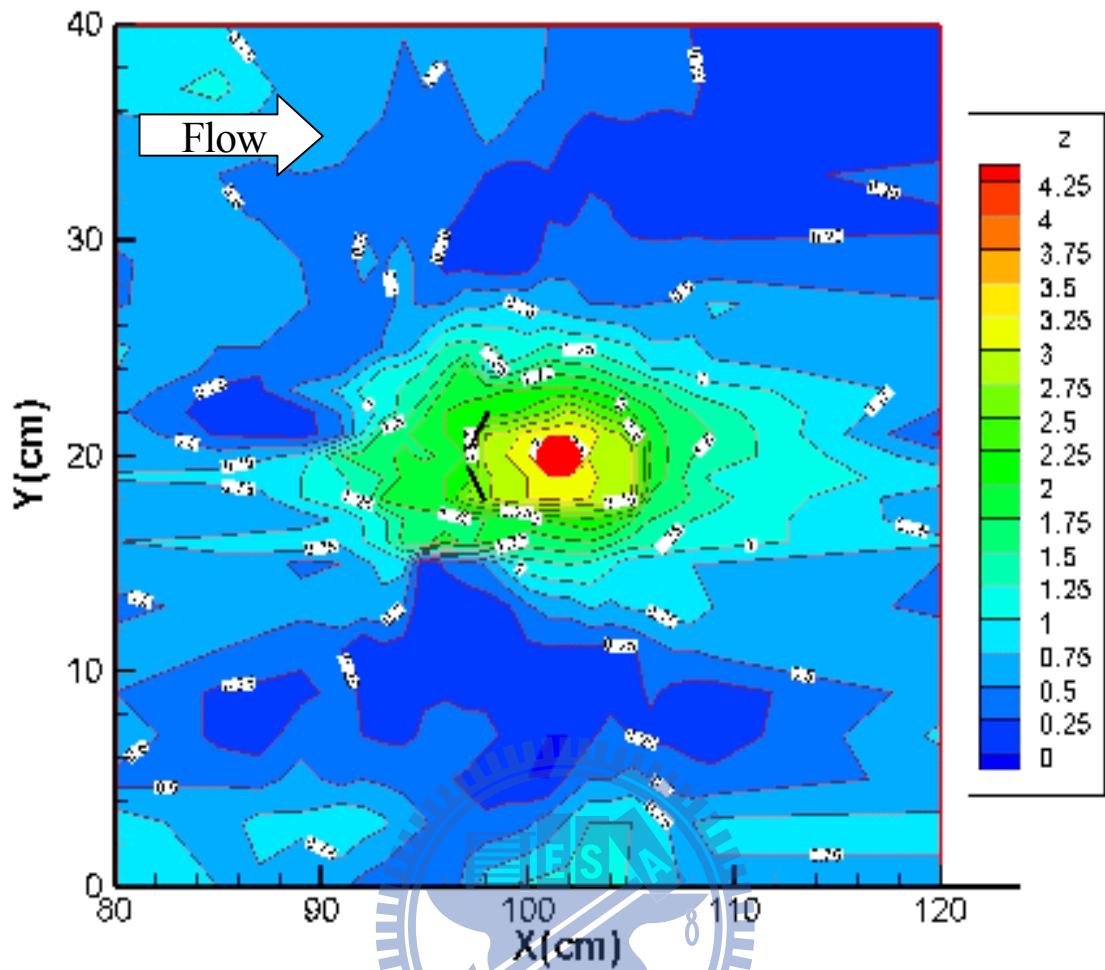


圖 4-33 案例 5 底床高程圖 (t=3hr)

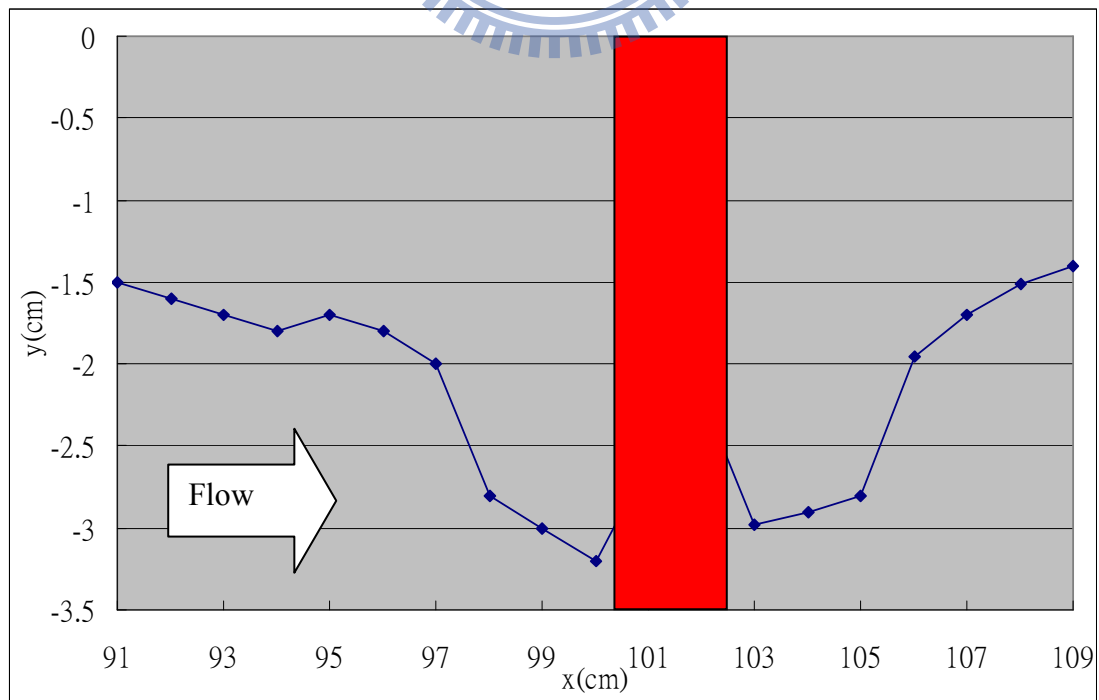


圖 4-34 案例 5 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

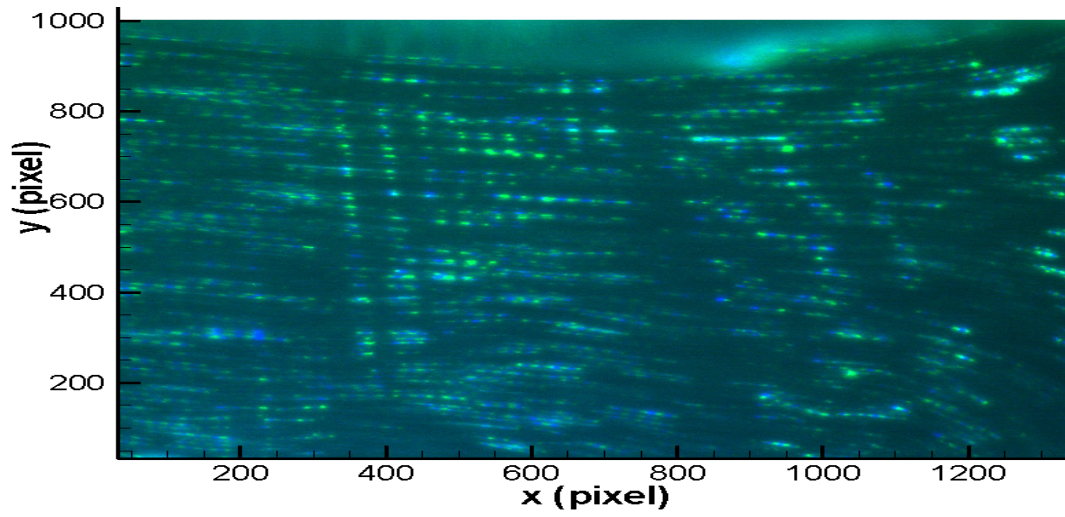


圖 4-35 案例 5 影像圖

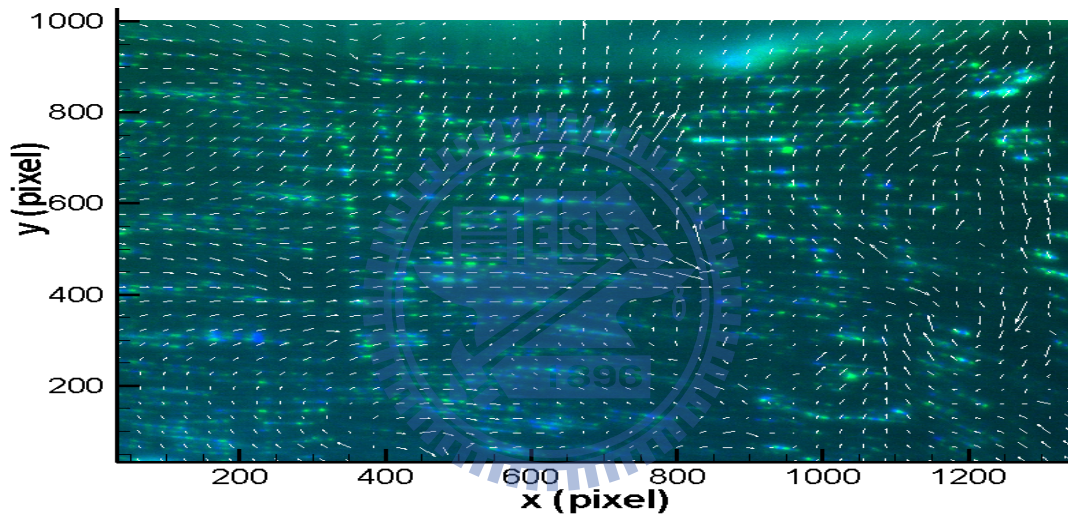


圖 4-36 案例 5 速度向量圖

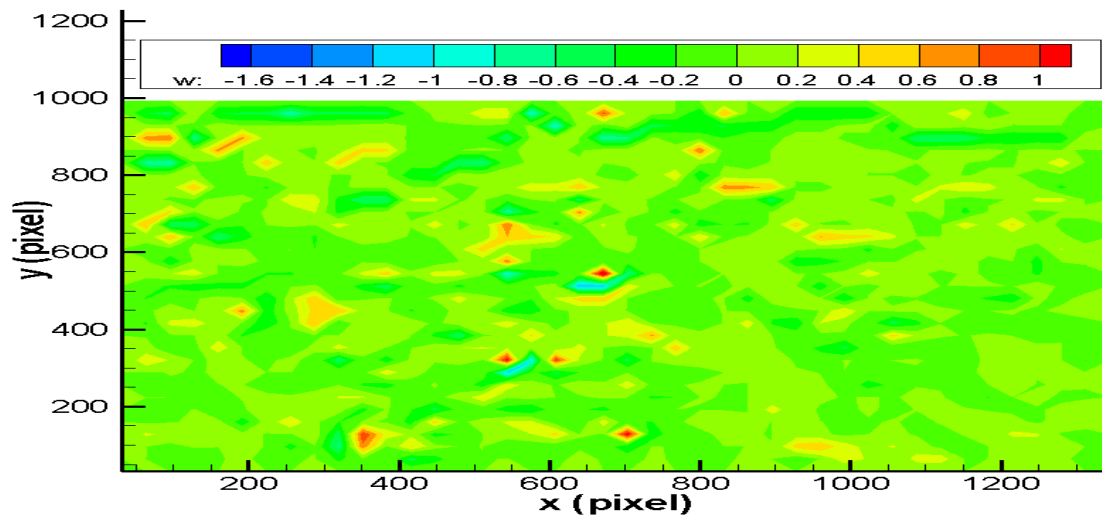


圖 4-37 案例 5 渦度場圖

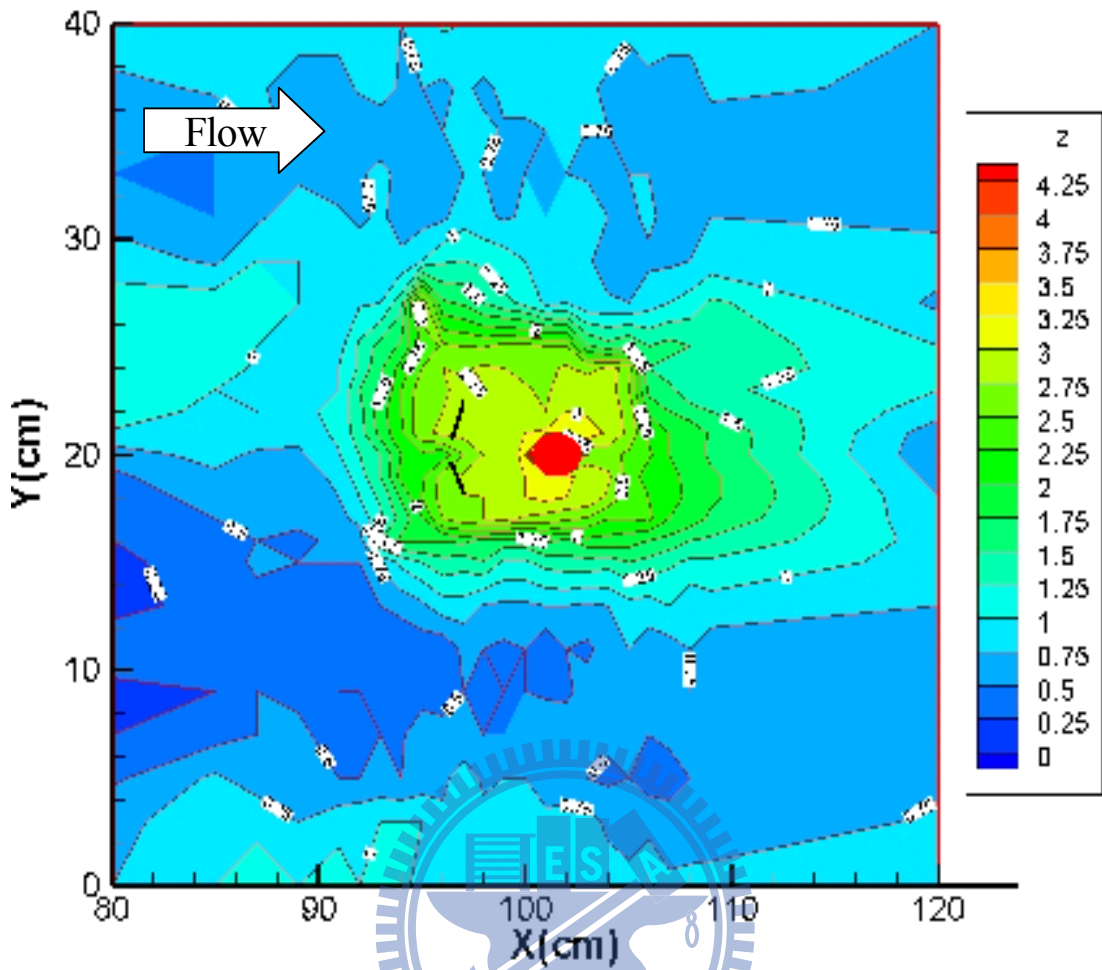


圖 4-38 案例 6 底床高程圖 (t=3hr)

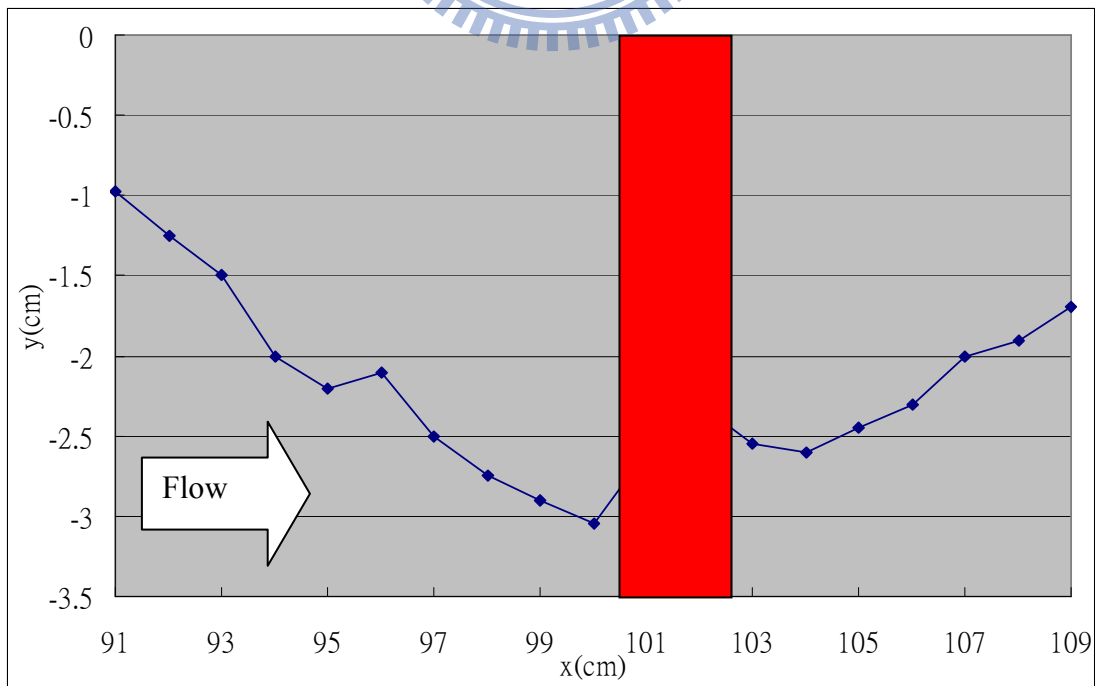


圖 4-39 案例 6 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

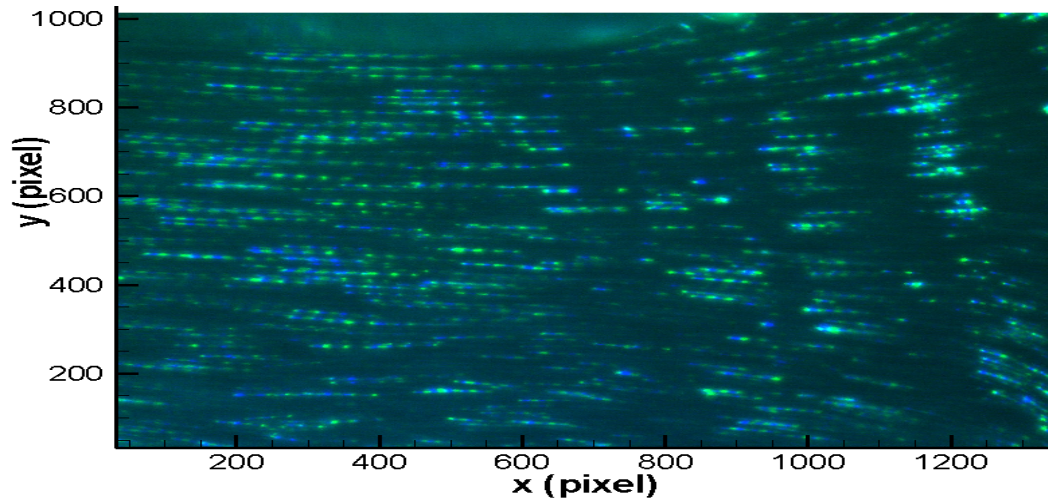


圖 4-40 案例 6 影像圖

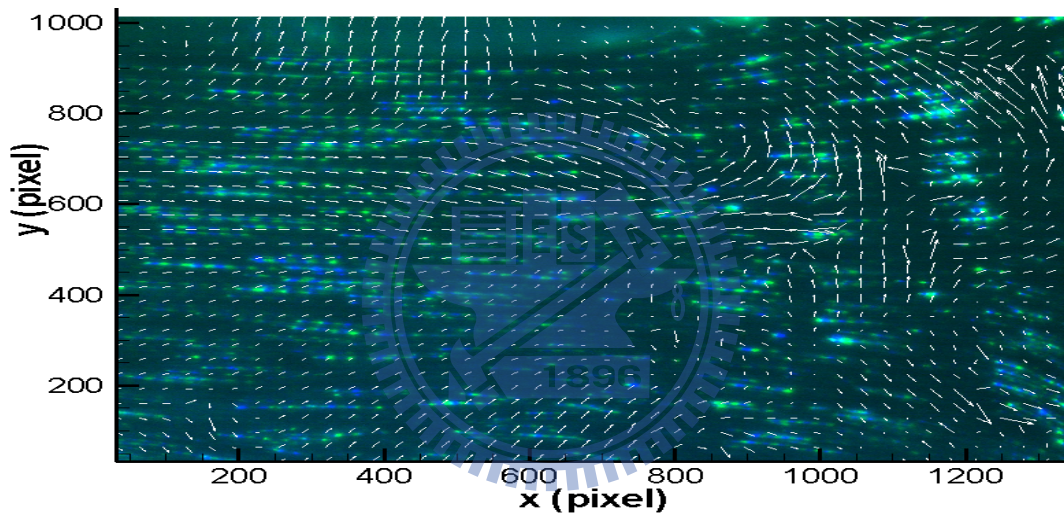


圖 4-41 案例 6 速度向量圖

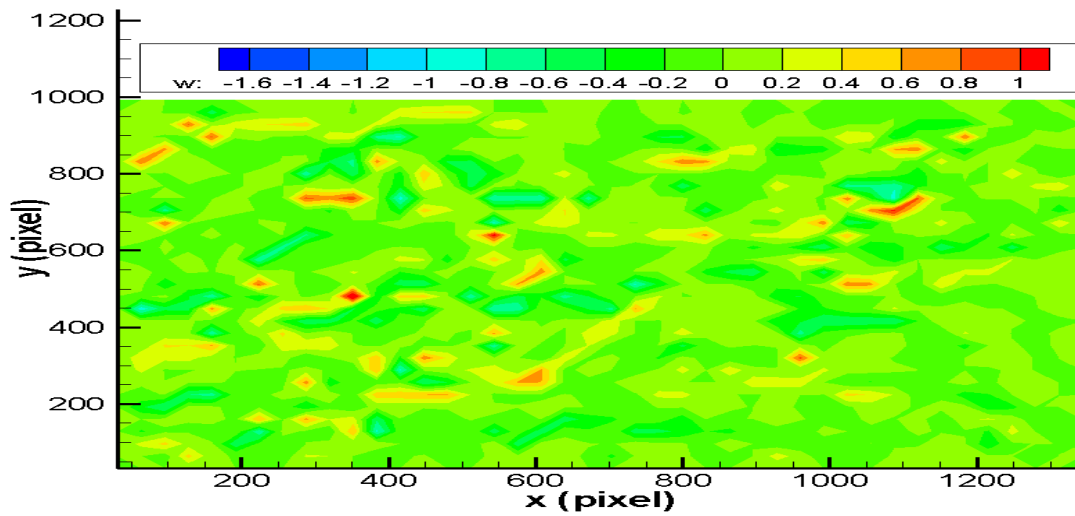


圖 4-42 案例 6 渦度場圖

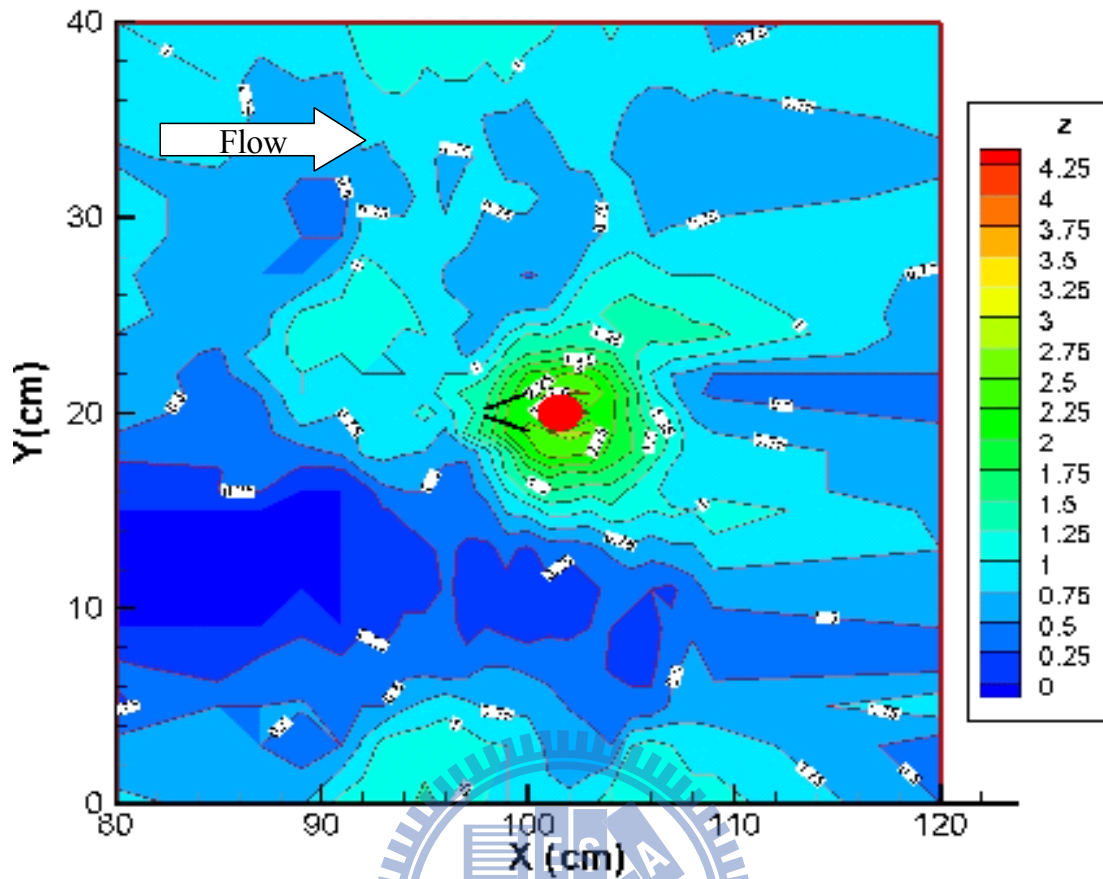


圖 4-43 案例 7 底床高程圖 (t=3hr)

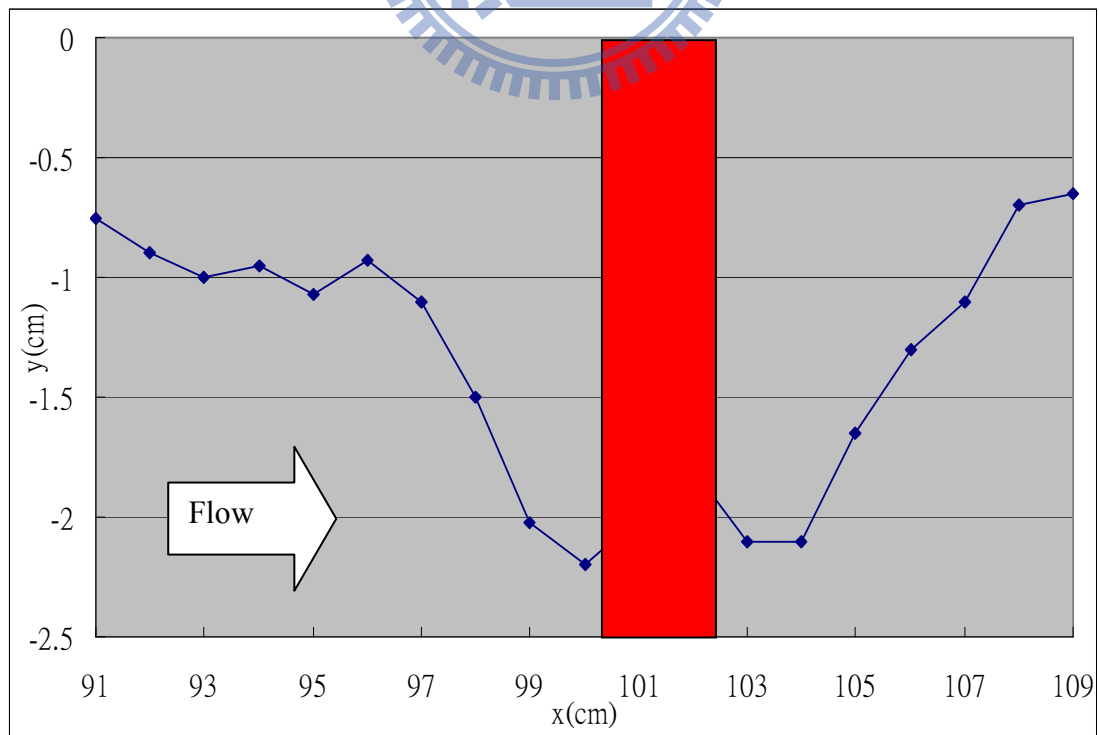


圖 4-44 案例 7 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

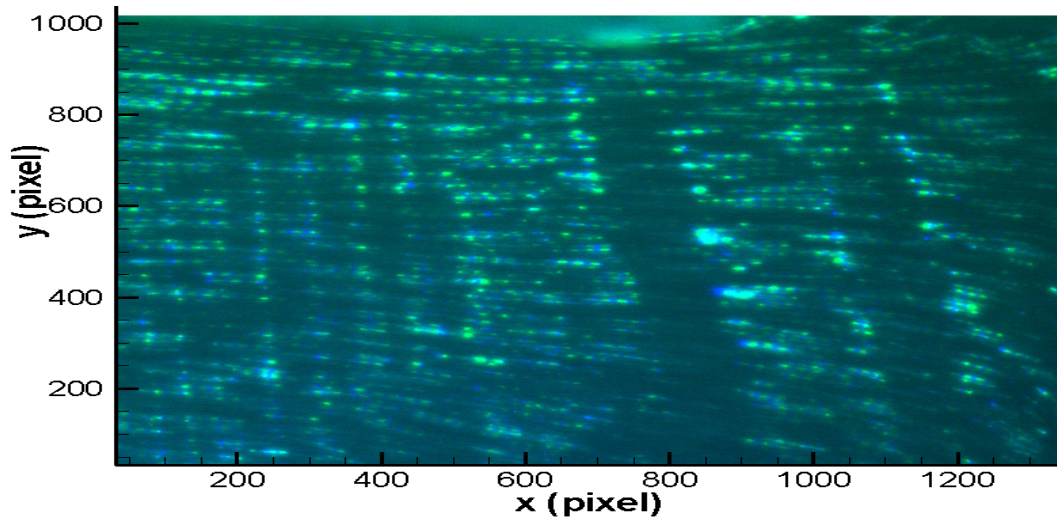


圖 4-45 案例 7 影像圖

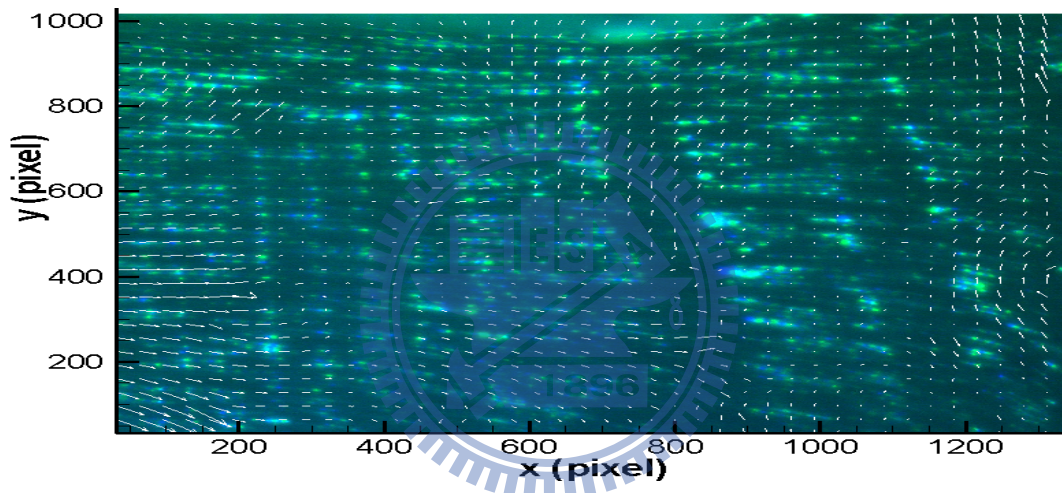


圖 4-46 案例 7 速度向量圖

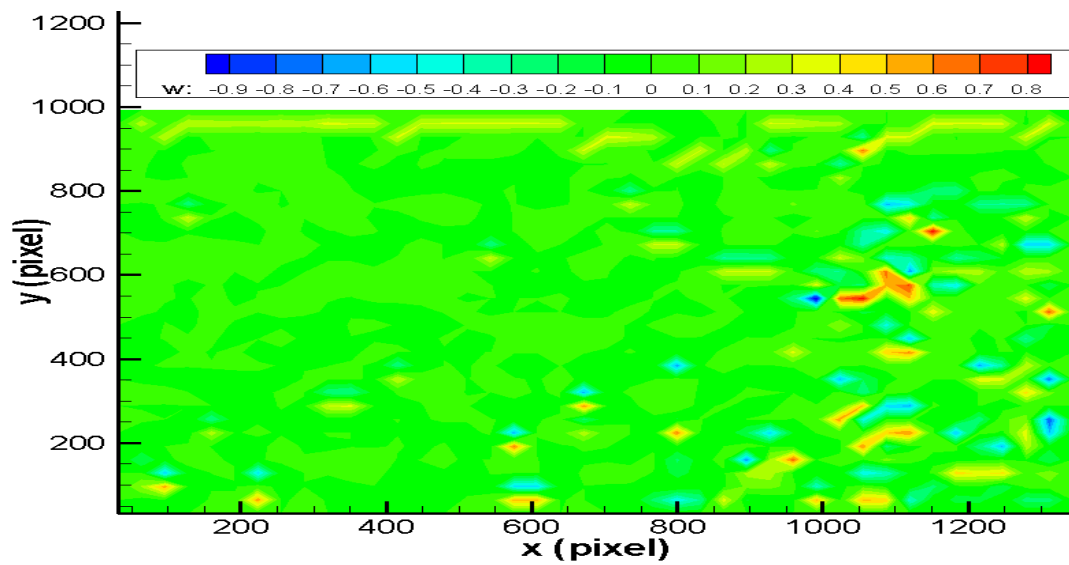


圖 4-47 案例 7 渦度場圖

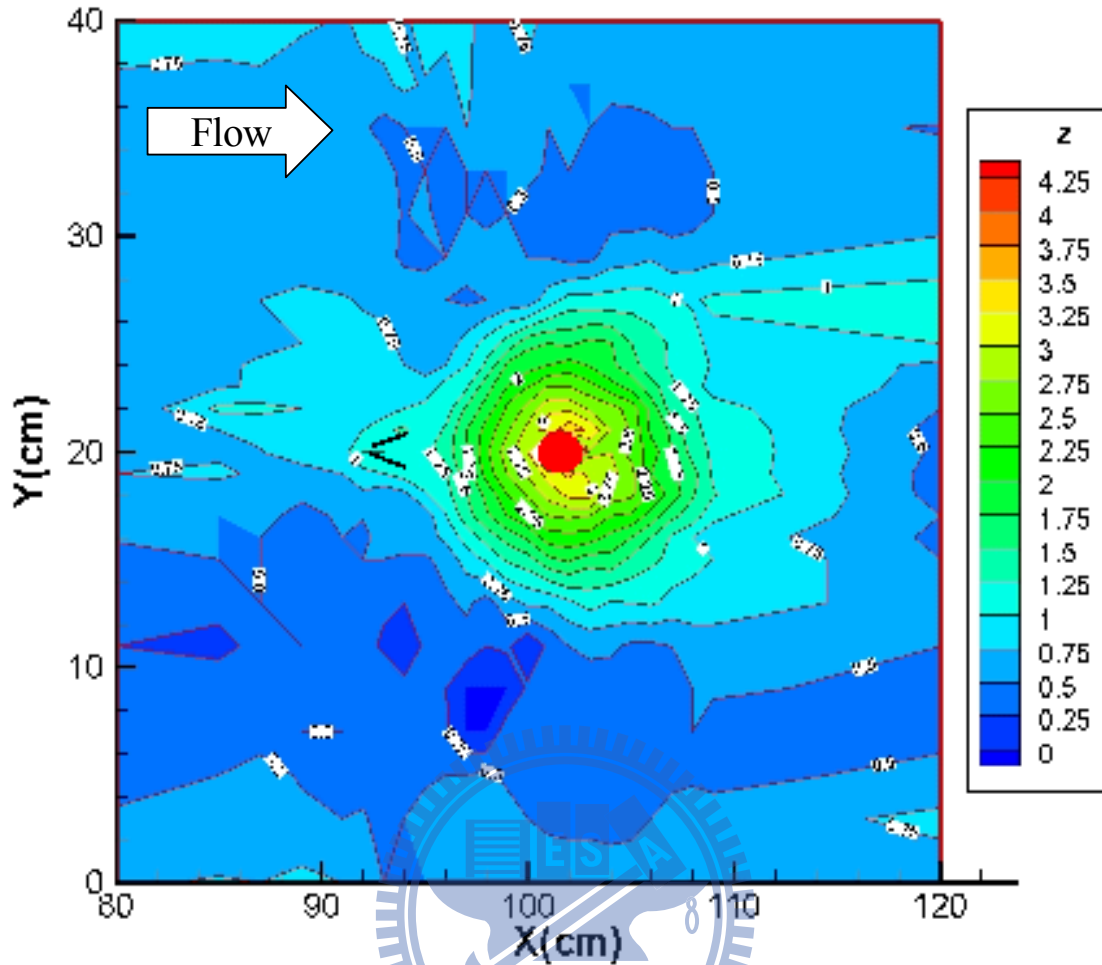


圖 4-48 案例 8 底床高程圖 (t=3hr)

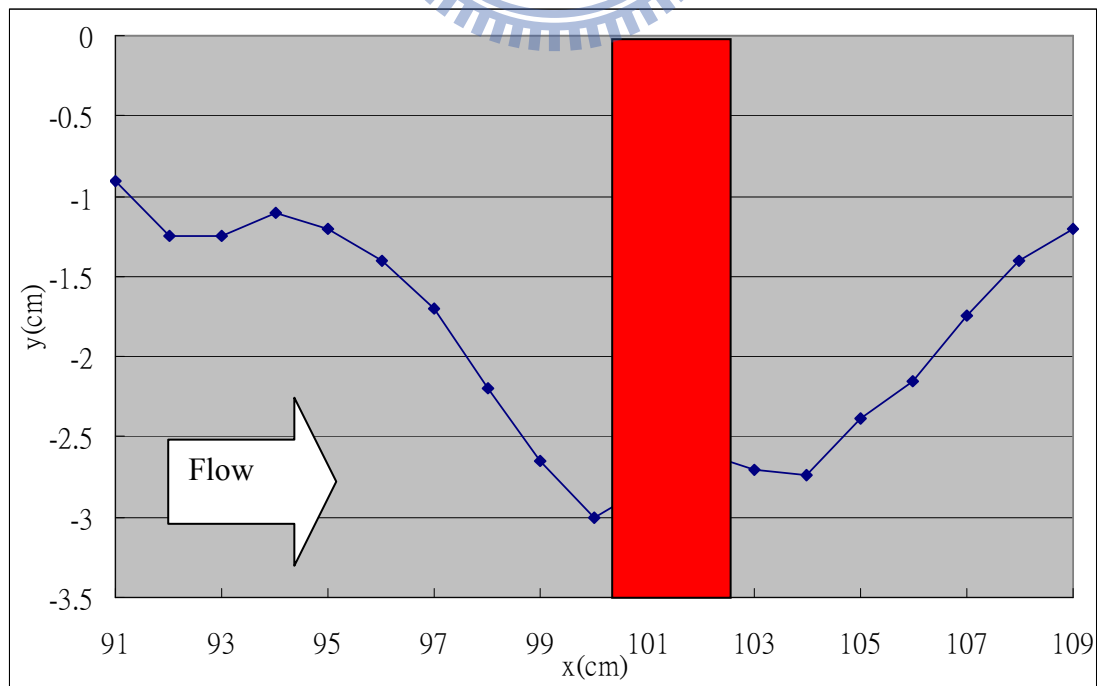


圖 4-49 案例 8 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

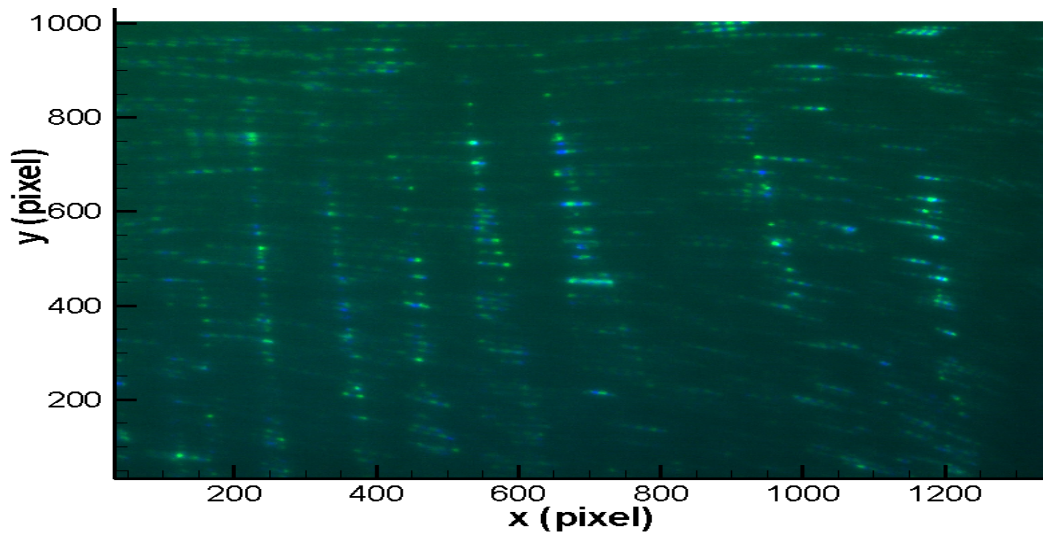


圖 4-50 案例 8 影像圖

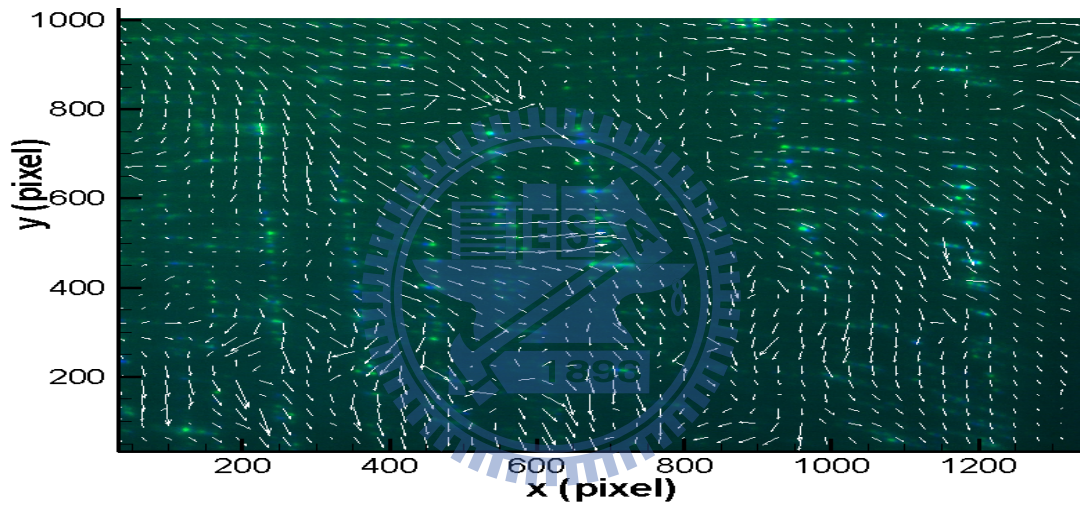


圖 4-51 案例 8 速度向量圖

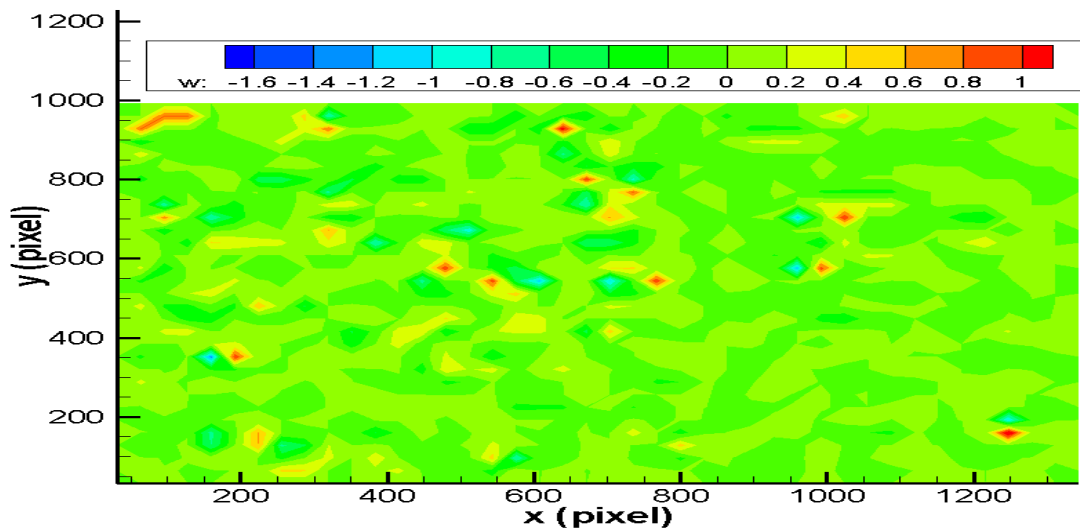


圖 4-52 案例 8 渦度場圖

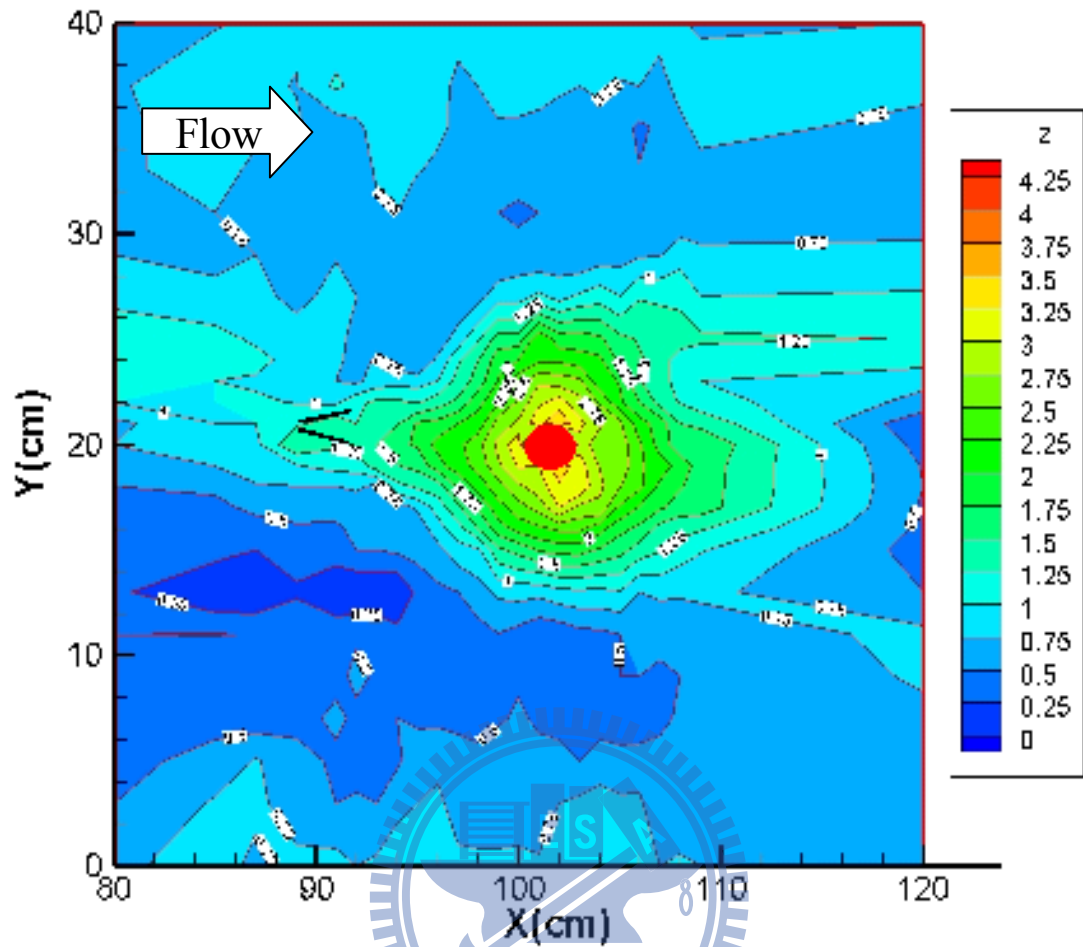


圖 4-53 案例 9 底床高程圖 (t=3hr)

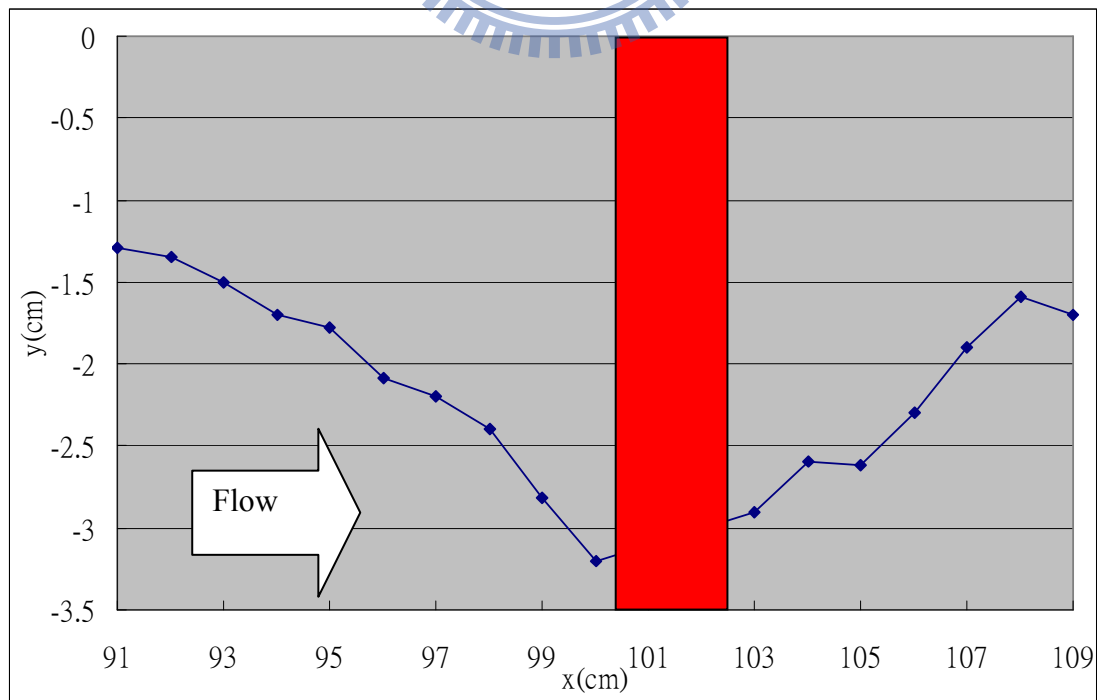


圖 4-54 案例 9 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

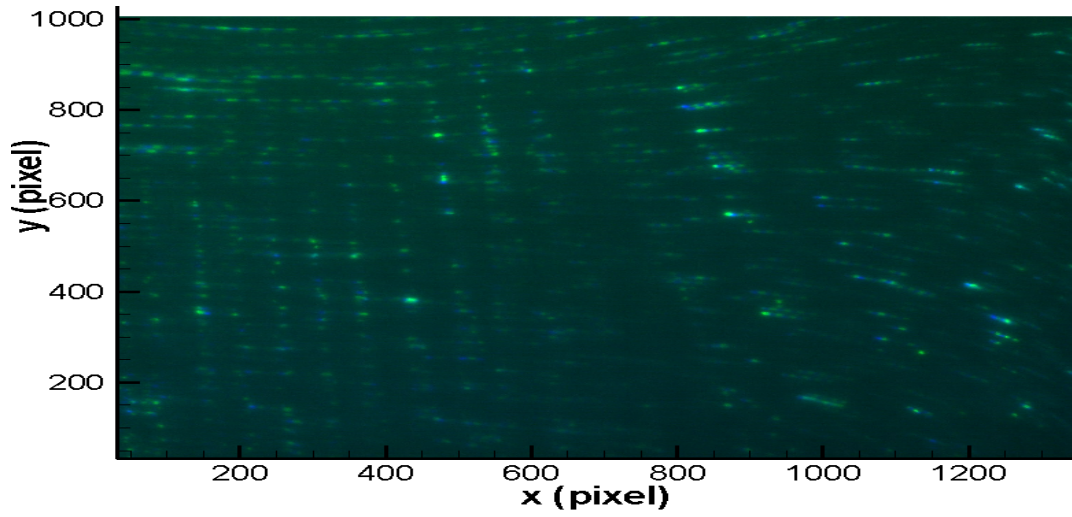


圖 4-55 案例 9 影像圖

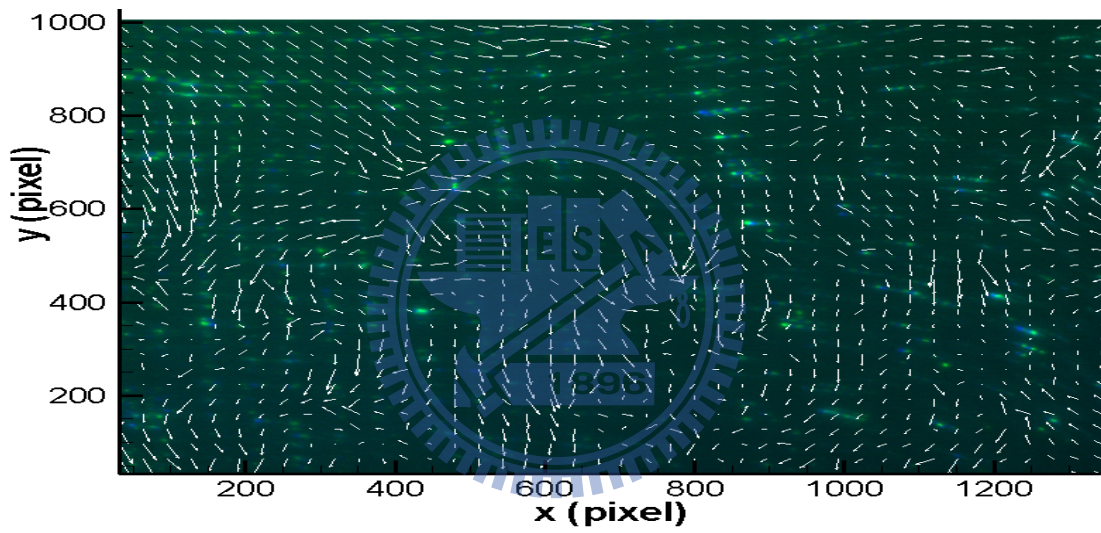


圖 4-56 案例 9 速度向量圖

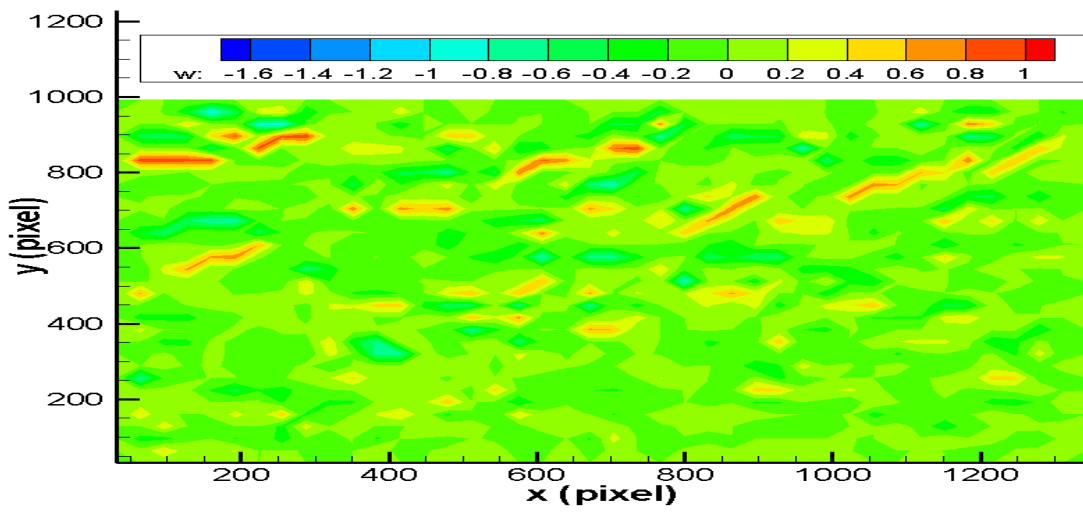


圖 4-57 案例 9 渦度場圖

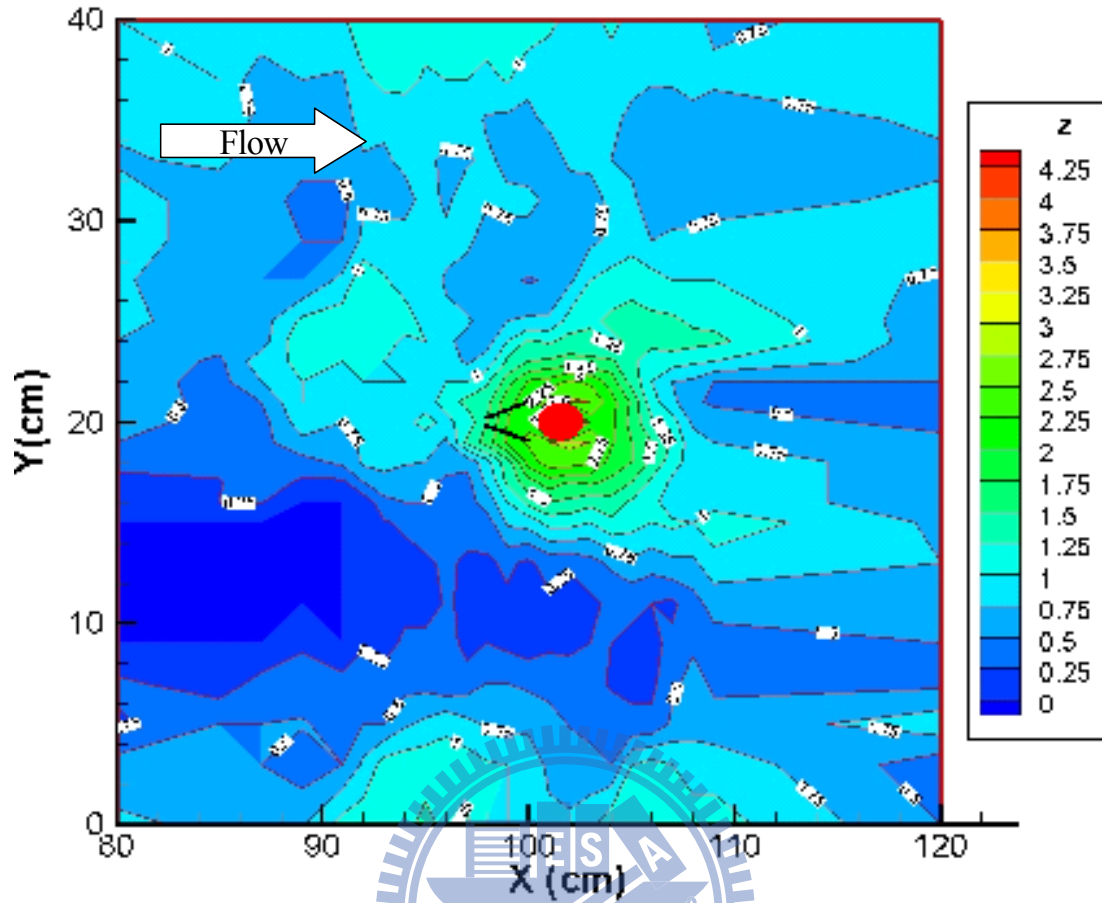


圖 4-58 案例 10 底床高程圖(t=3hr)

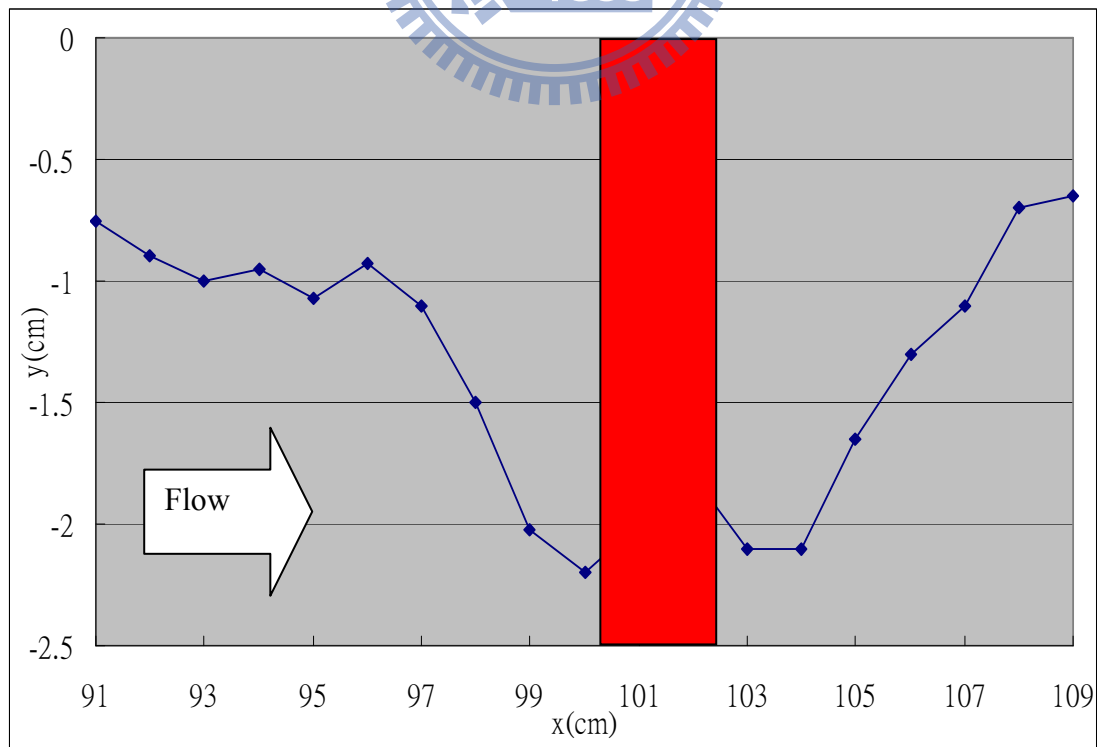


圖 4-59 案例 10 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

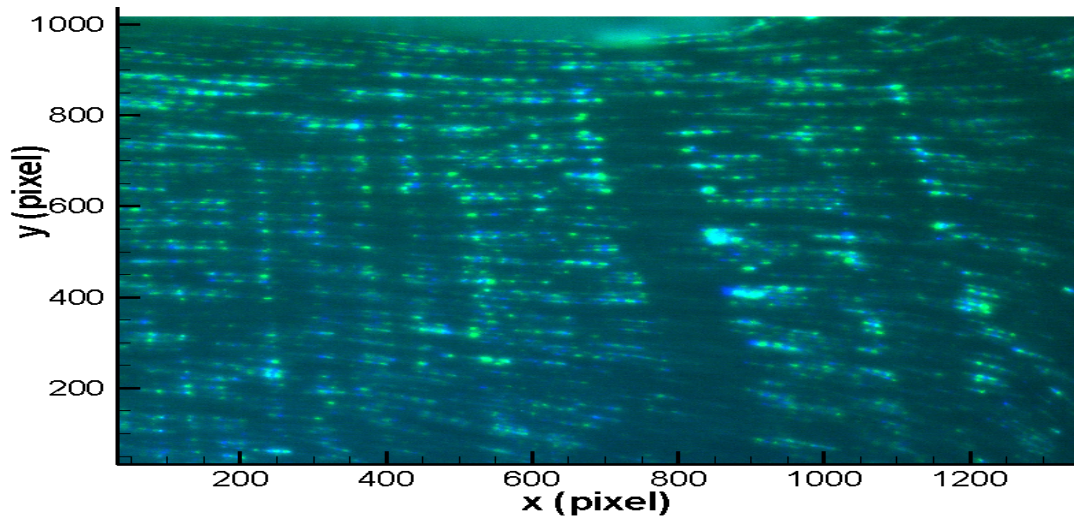


圖 4-60 案例 10 影像圖

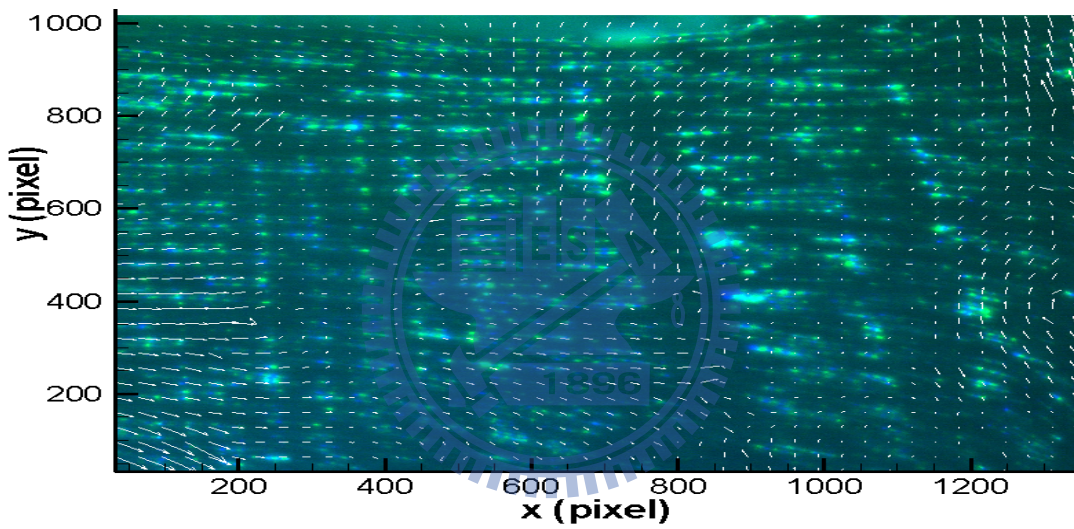


圖 4-61 案例 10 速度向量圖

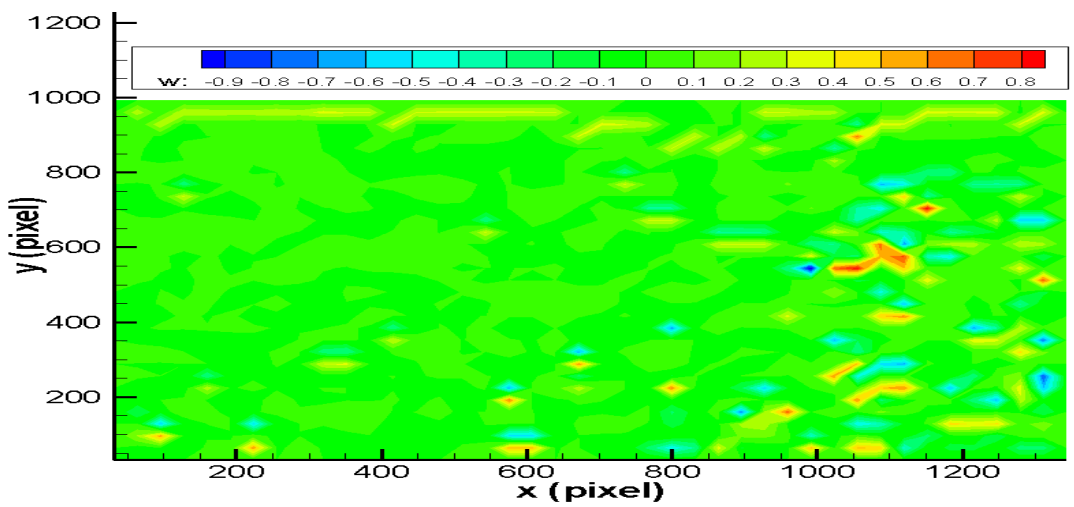


圖 4-62 案例 10 渦度場圖

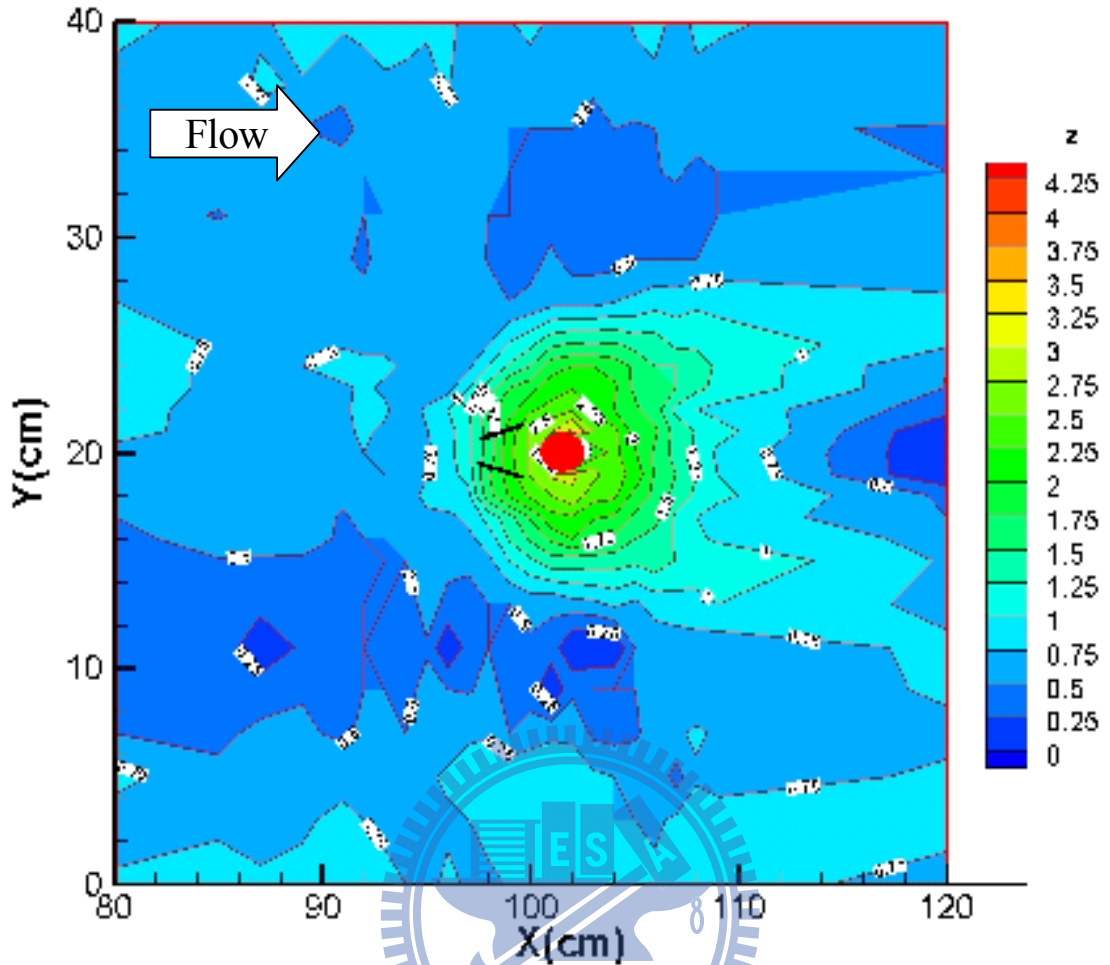


圖 4-63 案例 11 底床高程圖(t=3hr)

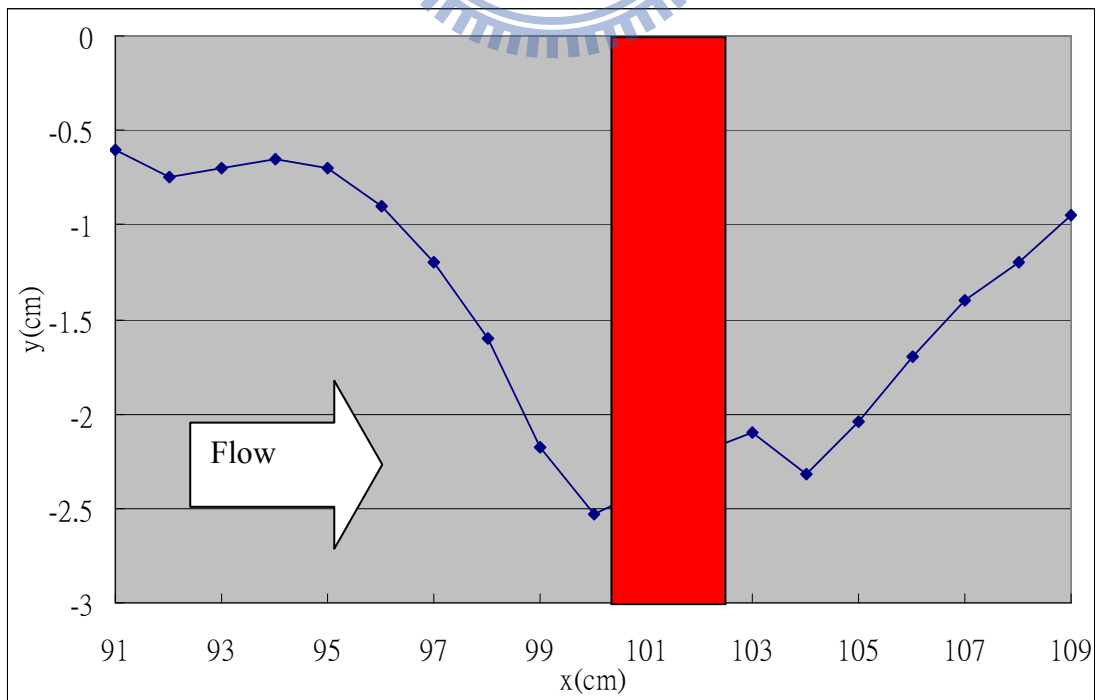


圖 4-64 案例 11 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

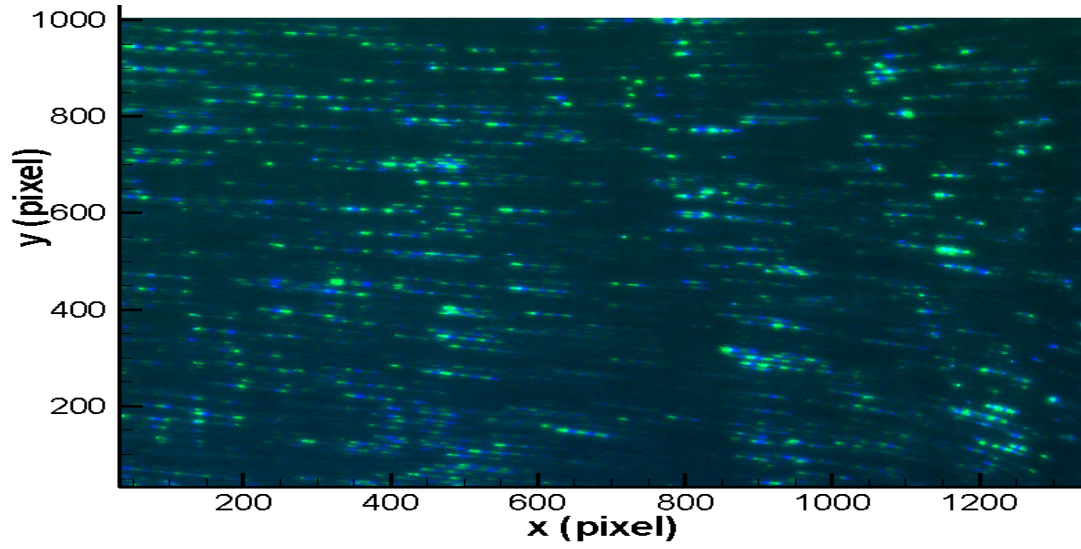


圖 4-65 案例 11 影像圖

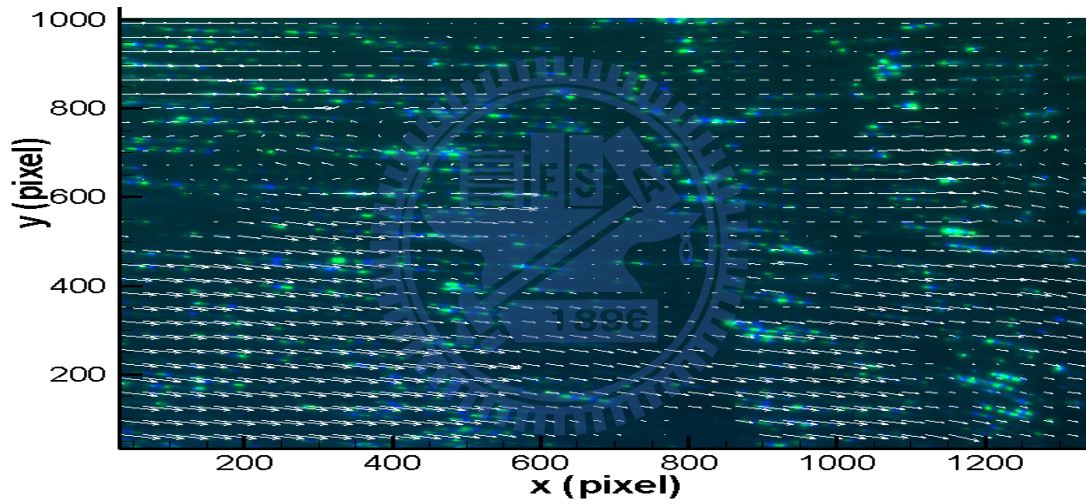


圖 4-66 案例 11 速度向量圖

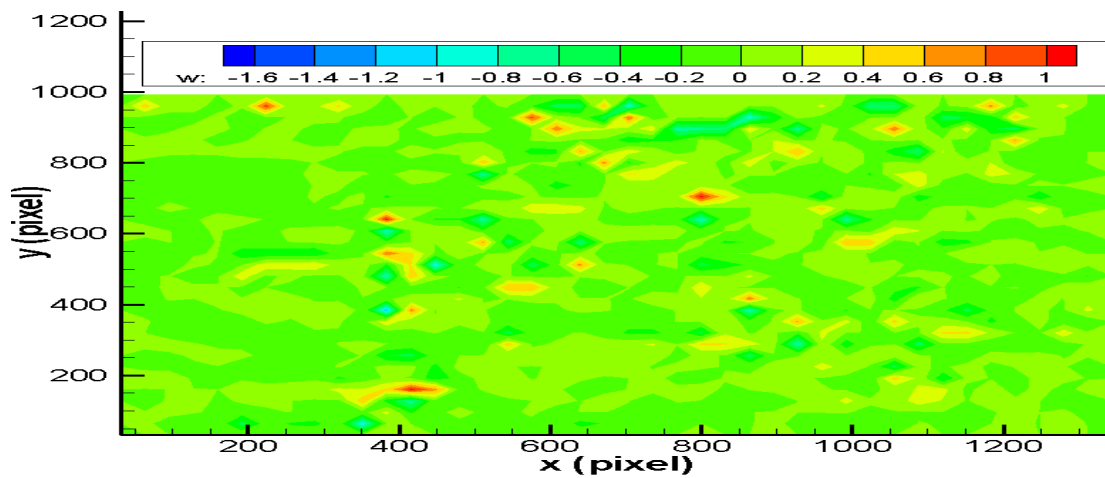


圖 4-67 案例 11 渦度場圖

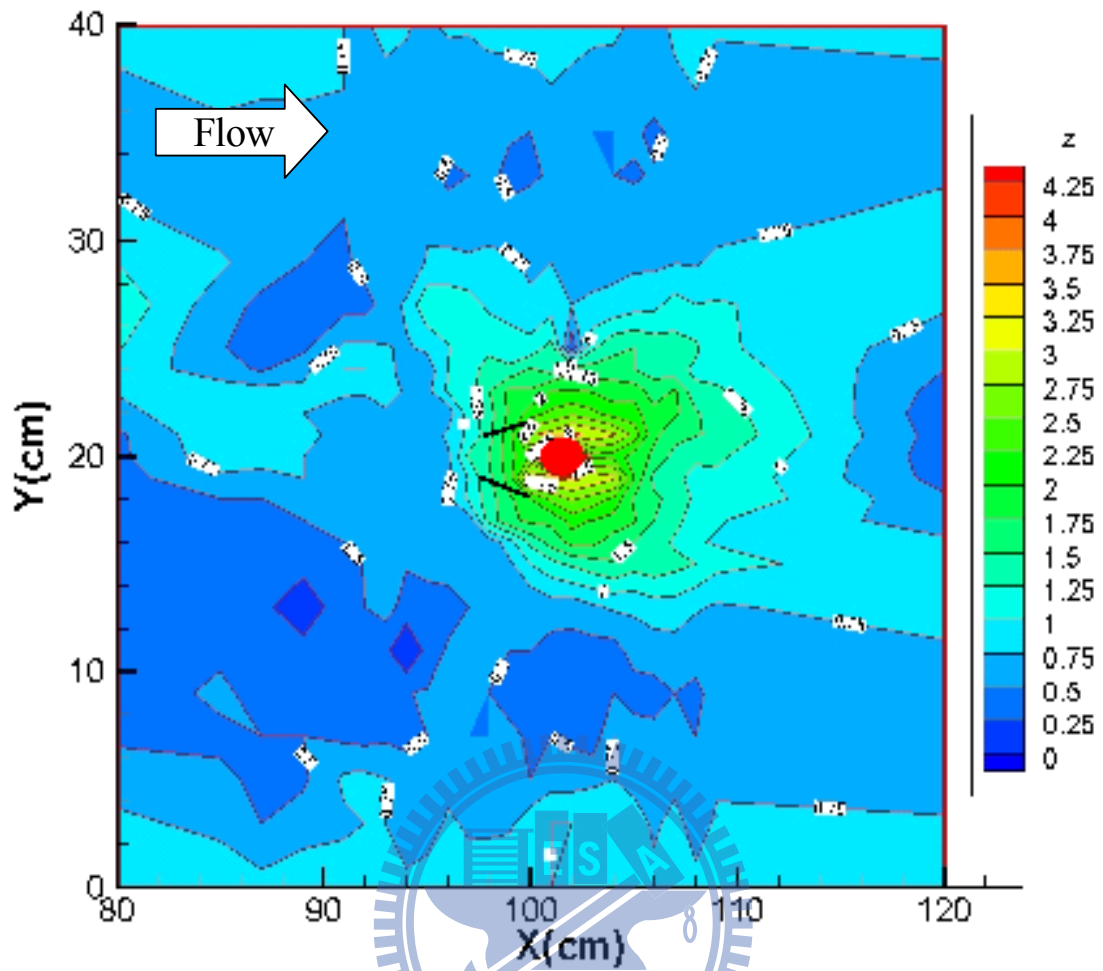


圖 4-68 案例 12 底床高程圖(t=3hr)

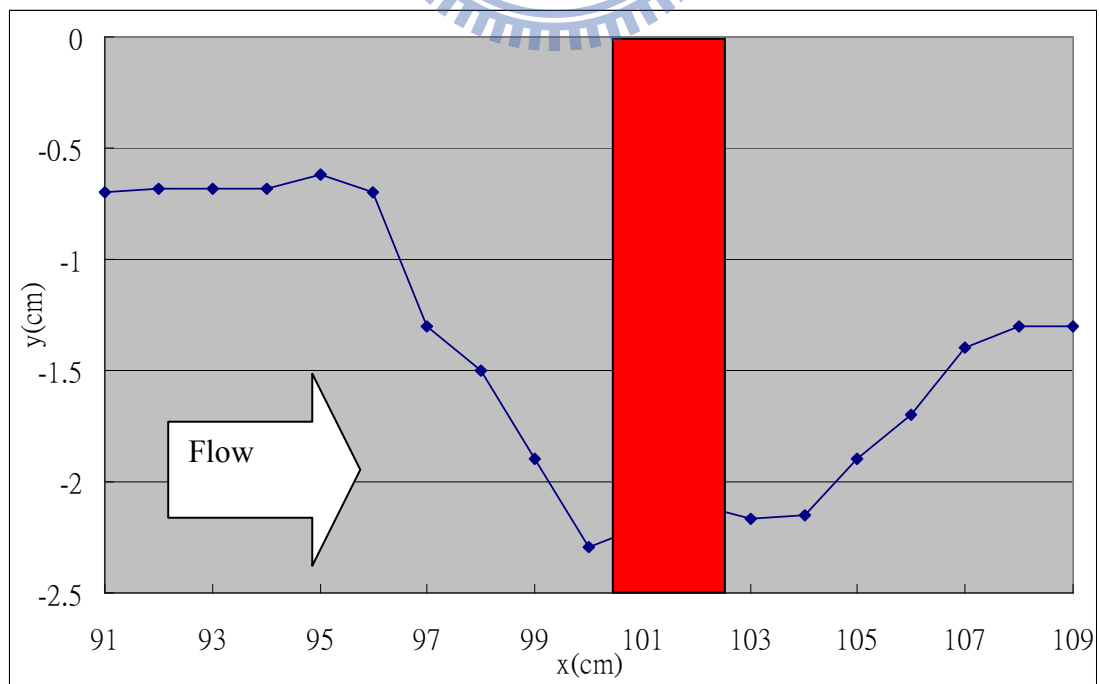


圖 4-69 案例 12 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

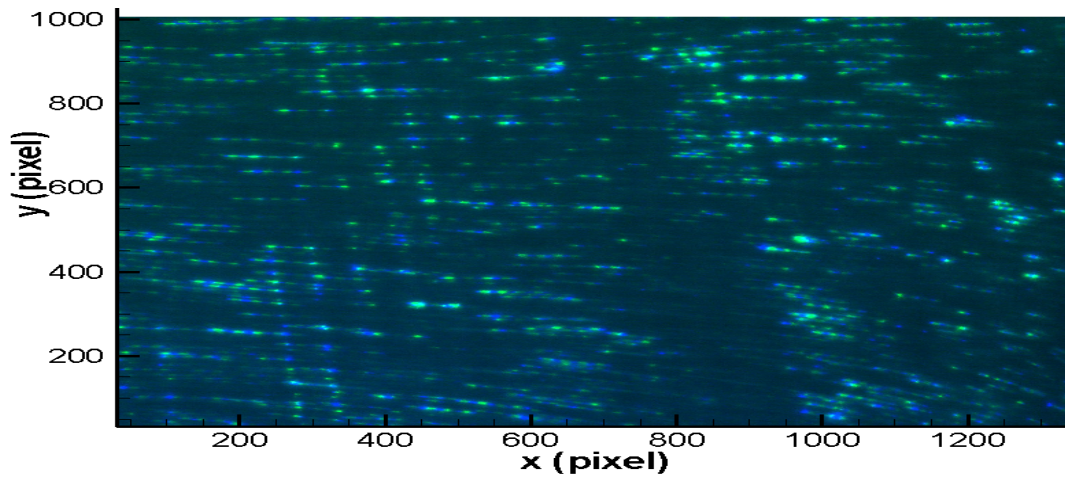


圖 4-70 案例 12 影像圖

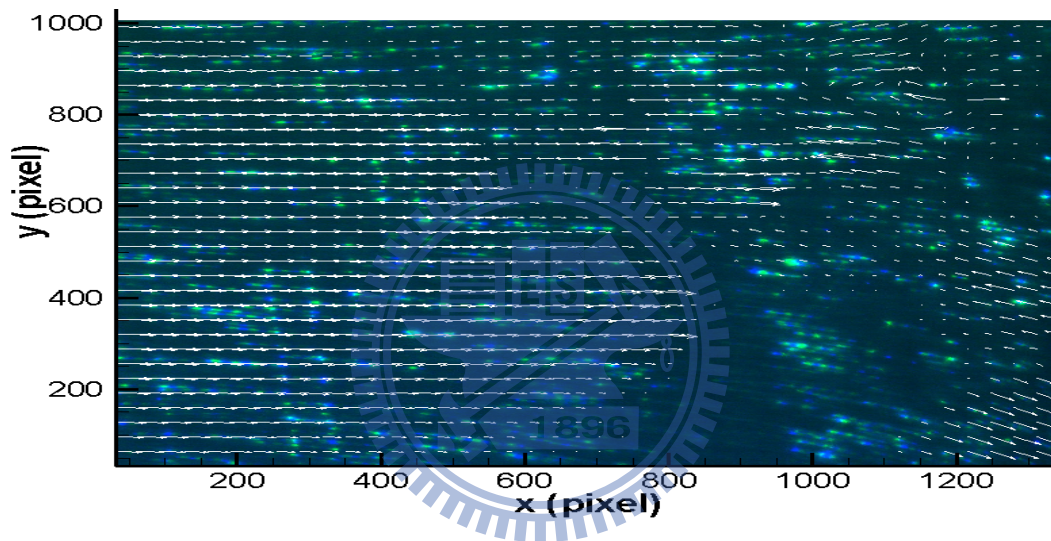


圖 4-71 案例 12 速度向量圖

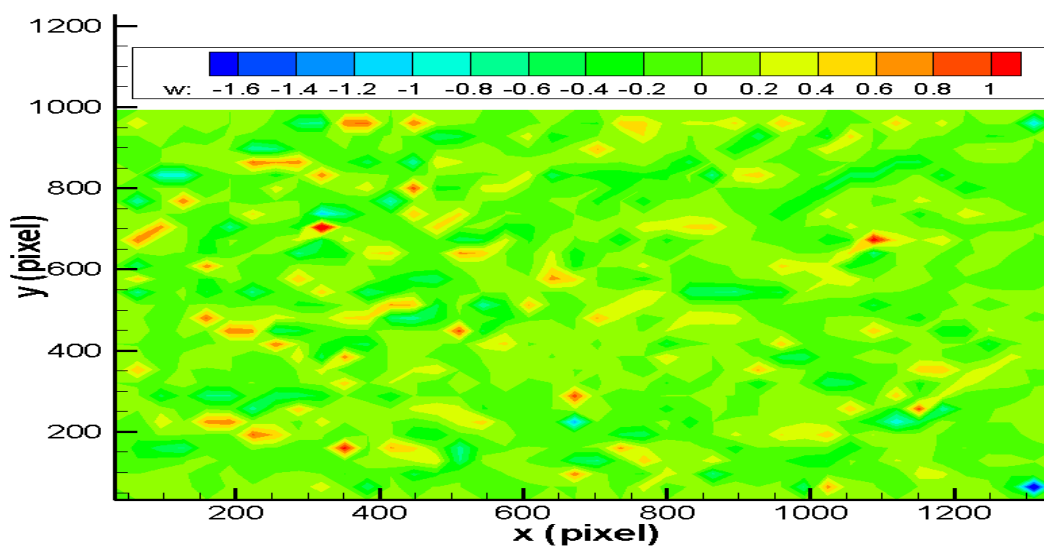


圖 4-72 案例 12 渦度場圖

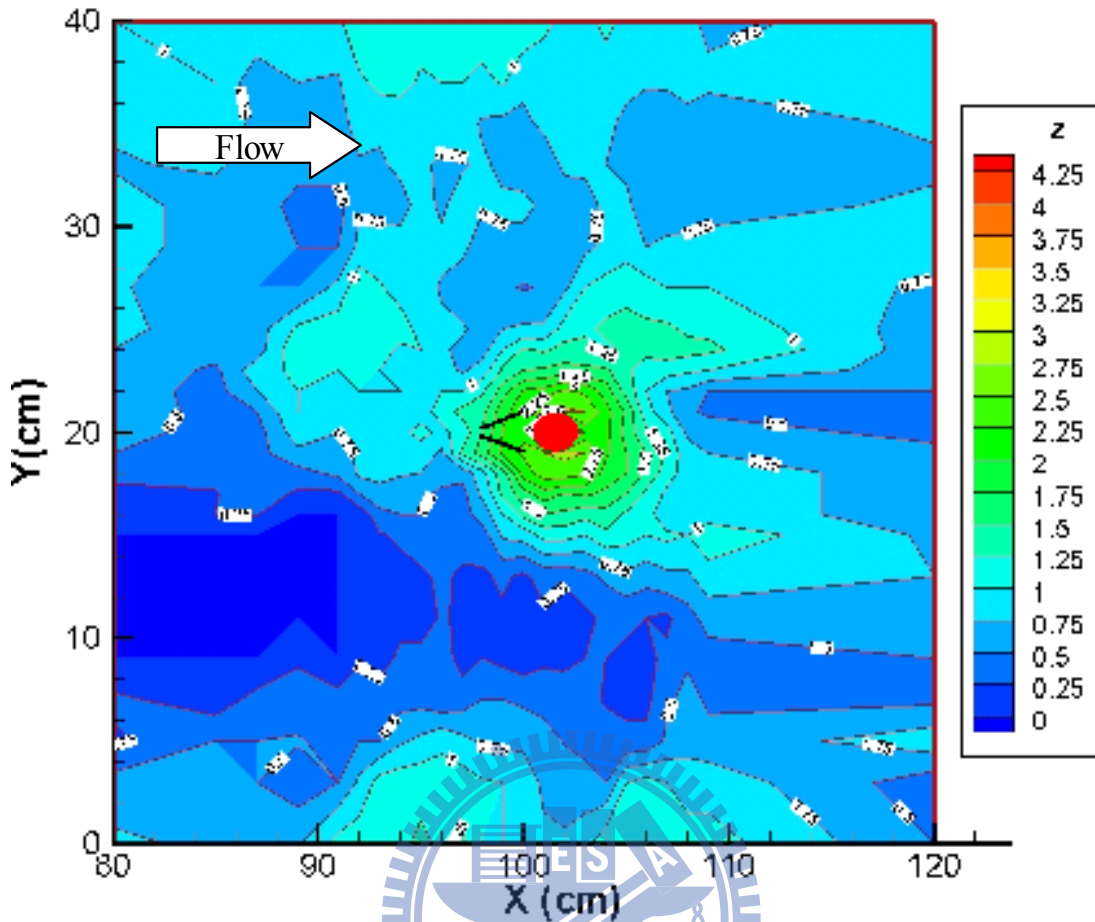


圖 4-73 案例 13 底床高程圖(t=3hr)

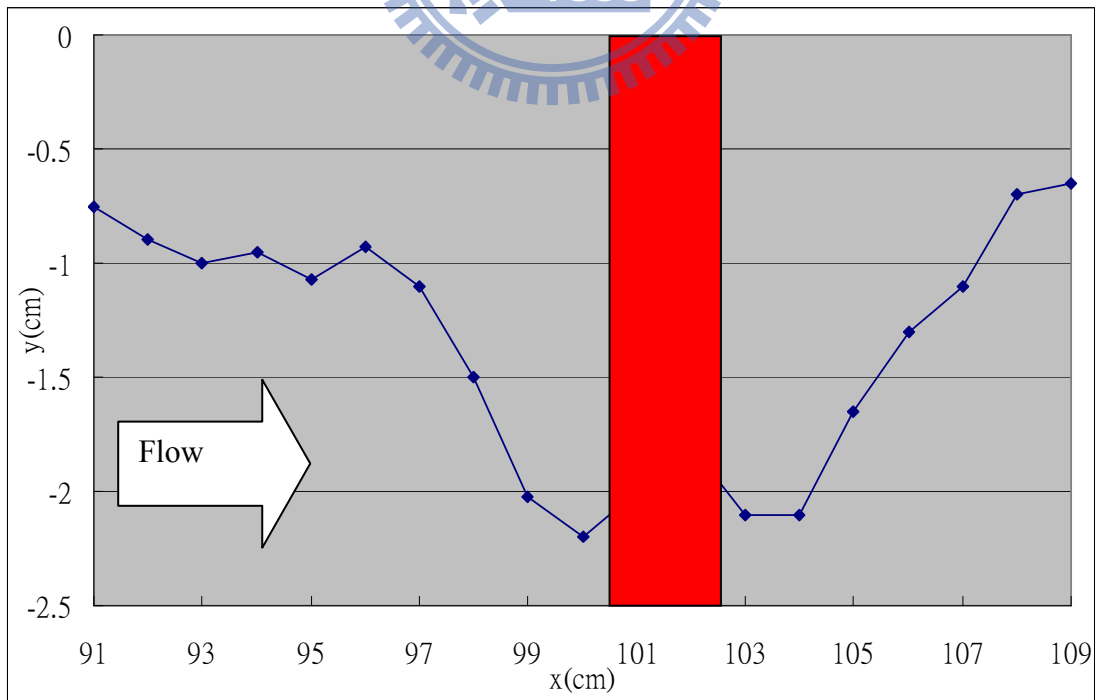


圖 4-74 案例 13 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

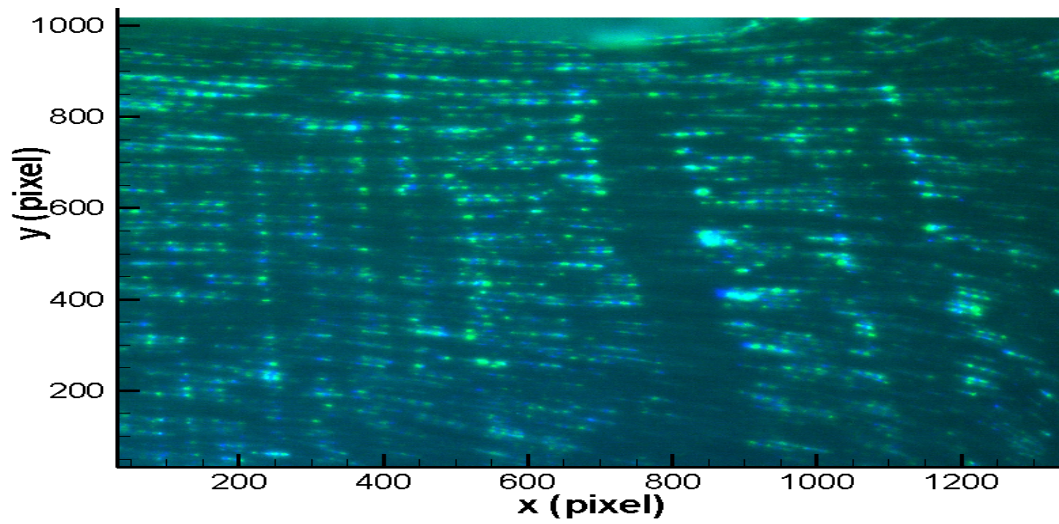


圖 4-75 案例 13 影像圖

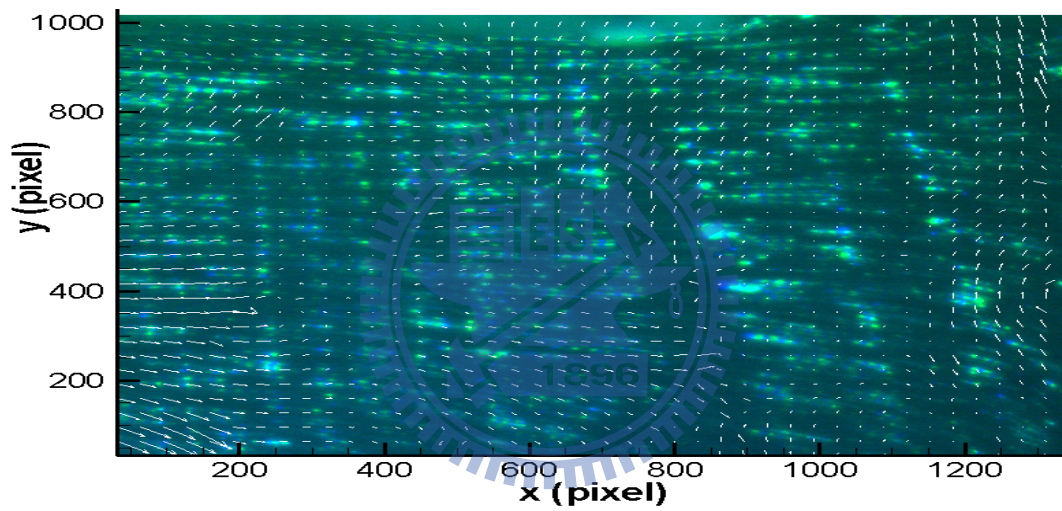


圖 4-76 案例 13 速度向量圖

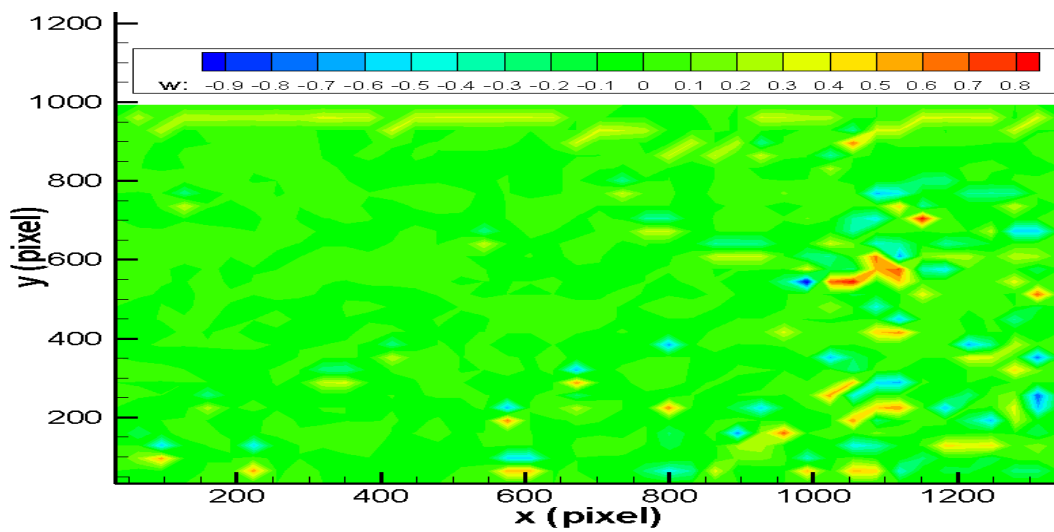


圖 4-77 案例 13 渦度場圖

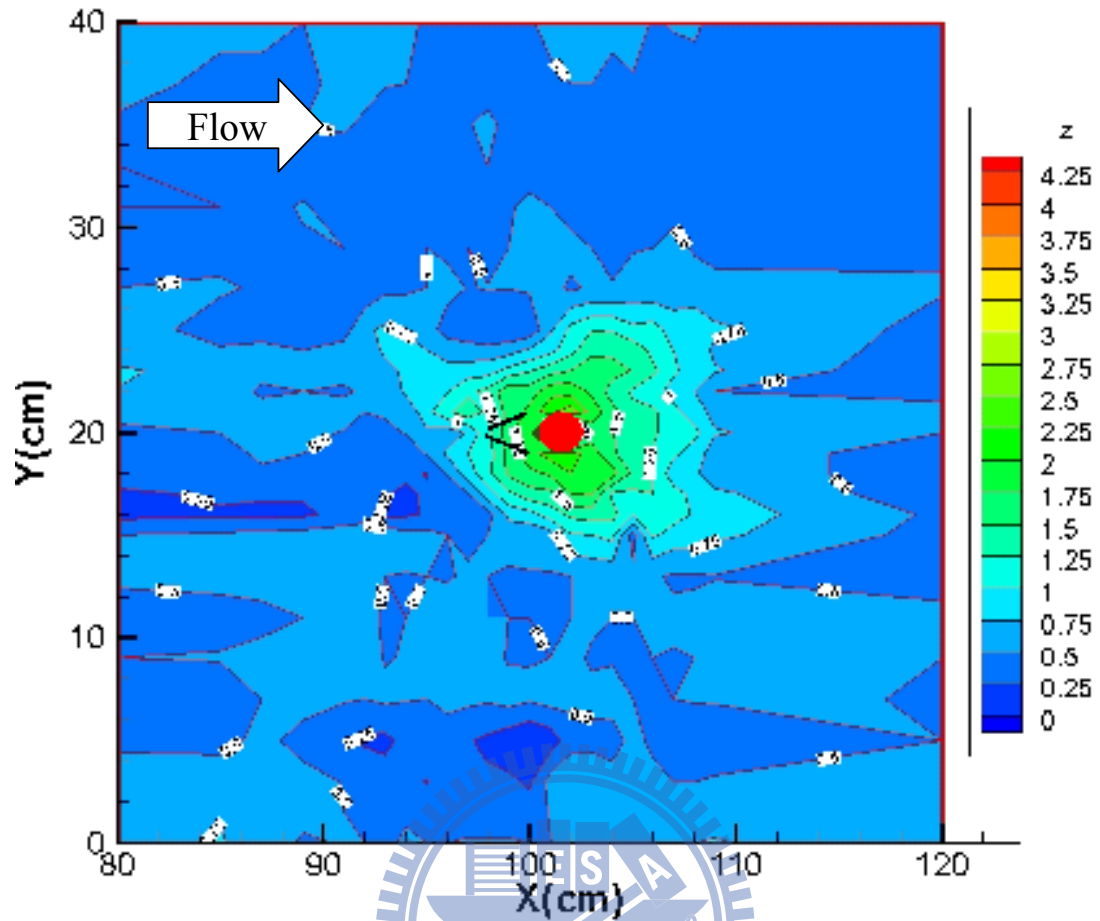


圖 4-78 案例 14 底床高程圖 (t=3hr)

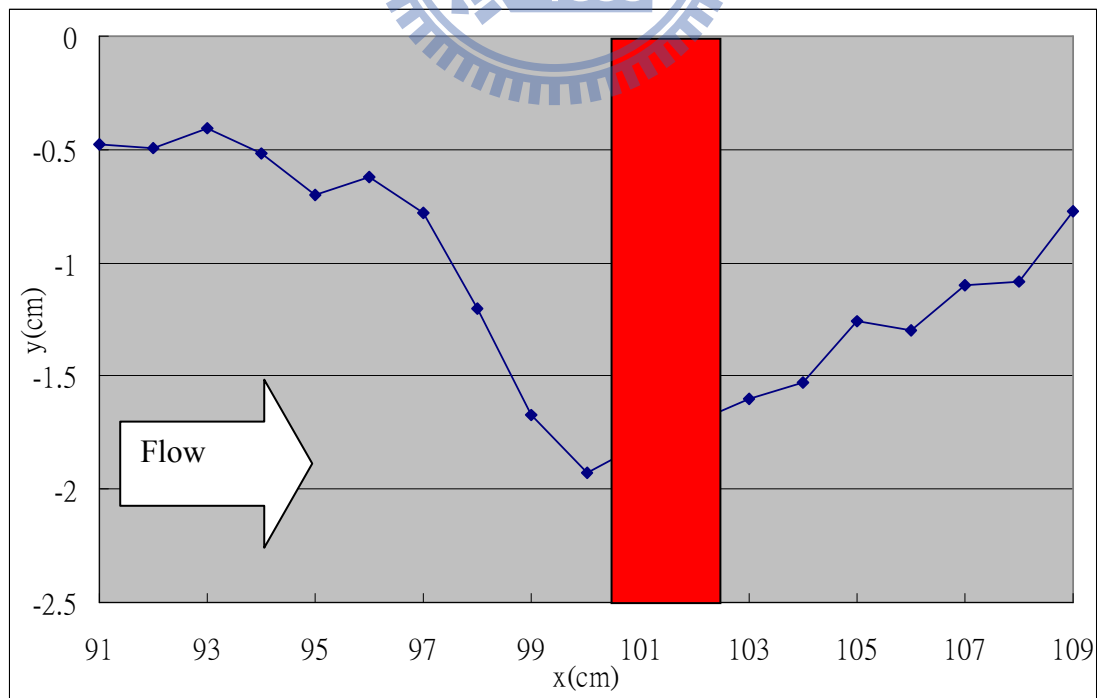


圖 4-79 案例 14 橋墩中心縱剖面圖 (t=3hr)

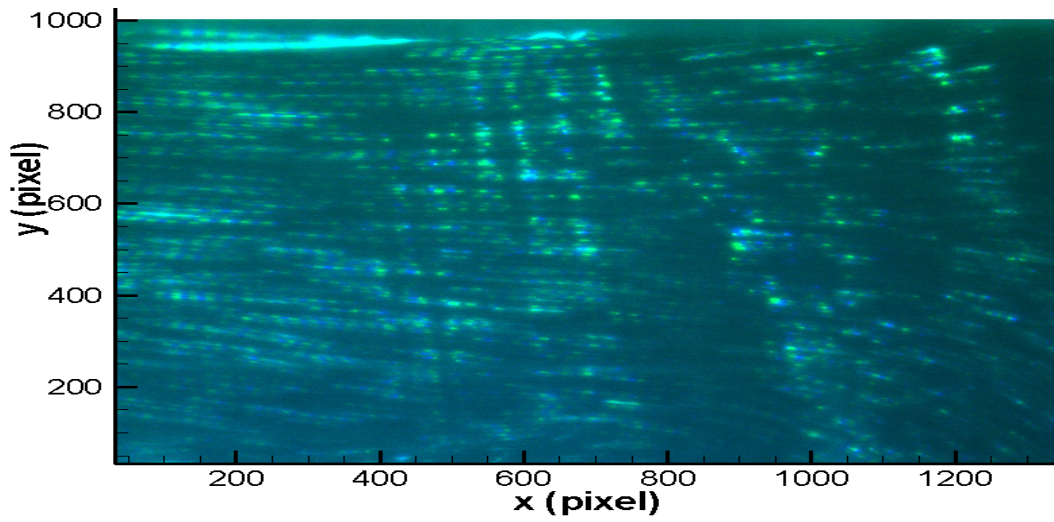


圖 4-80 案例 14 影像圖

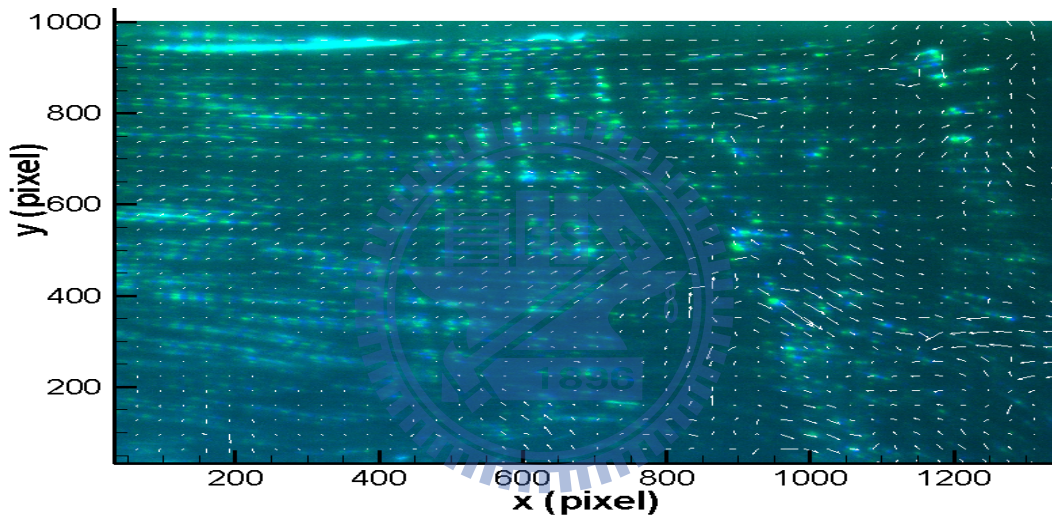


圖 4-81 案例 14 速度向量圖

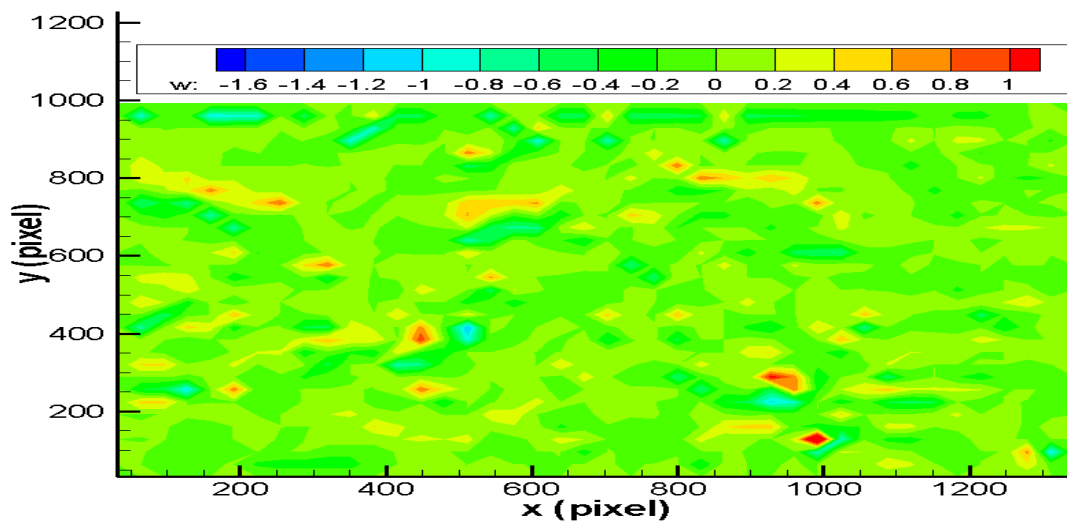


圖 4-82 案例 14 渦度場圖

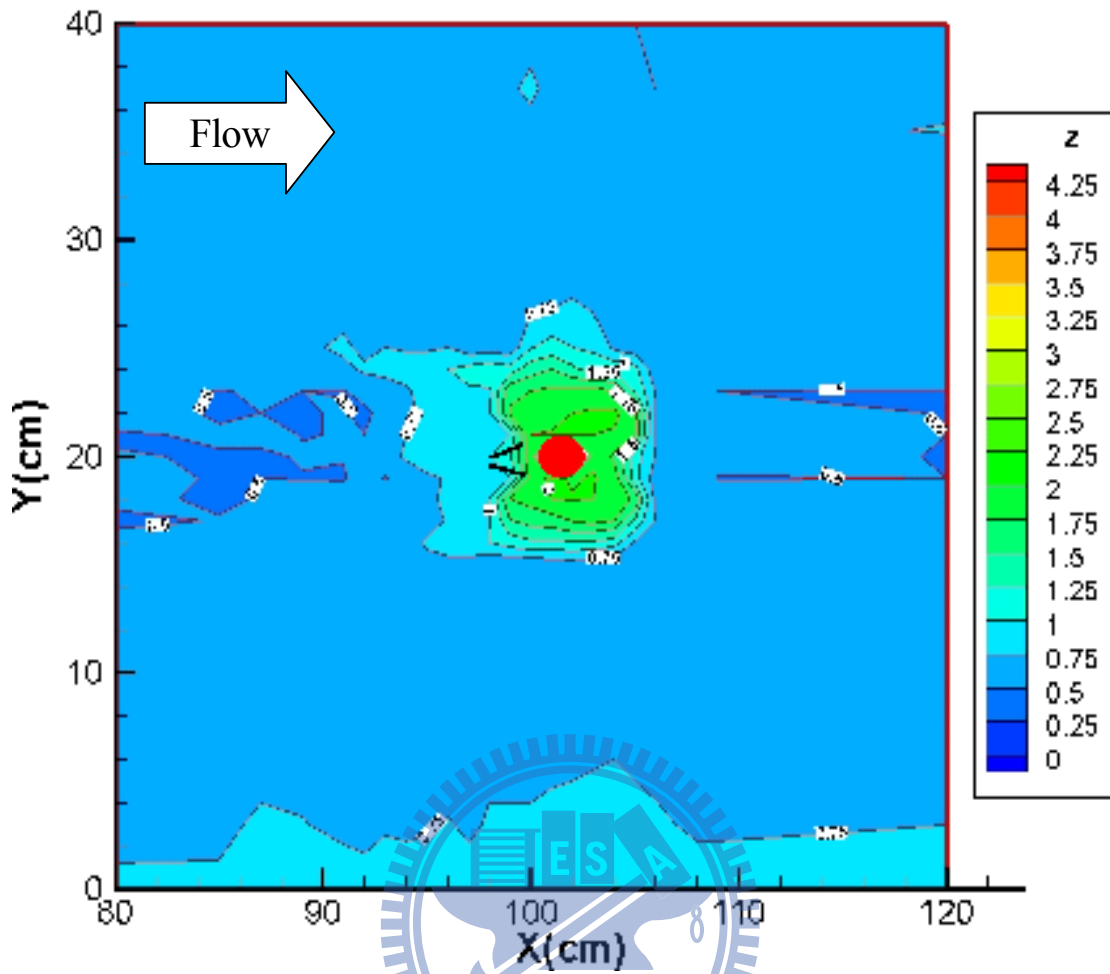


圖 4-83 案例 15 底床高程圖(t=3hr)

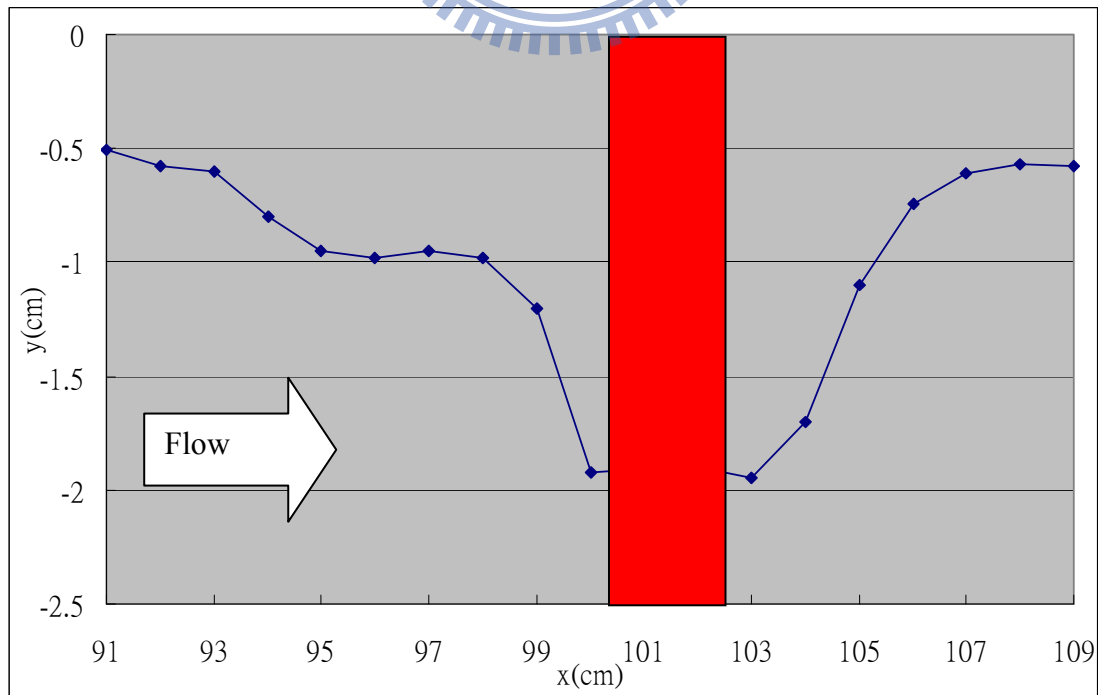


圖 4-84 案例 15 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

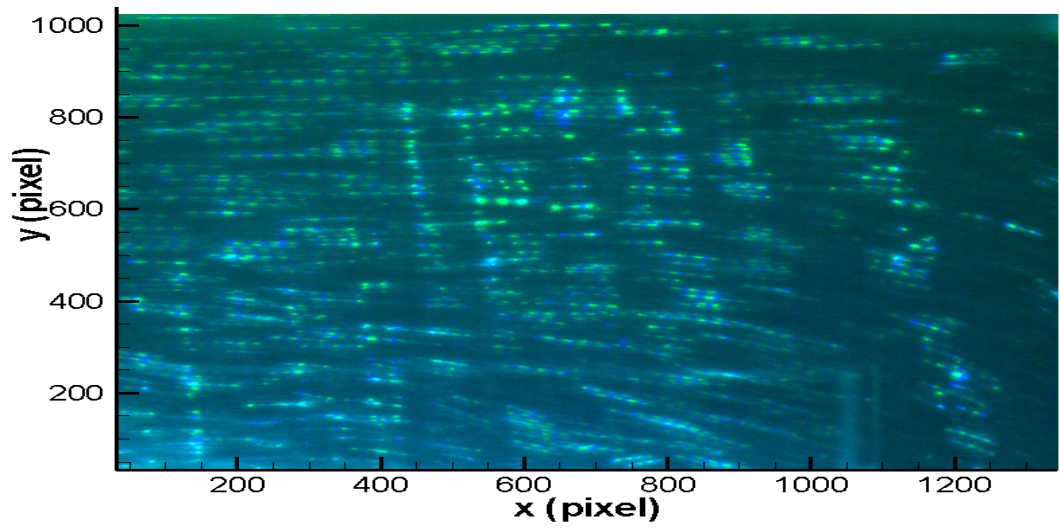


圖 4-85 案例 15 影像圖

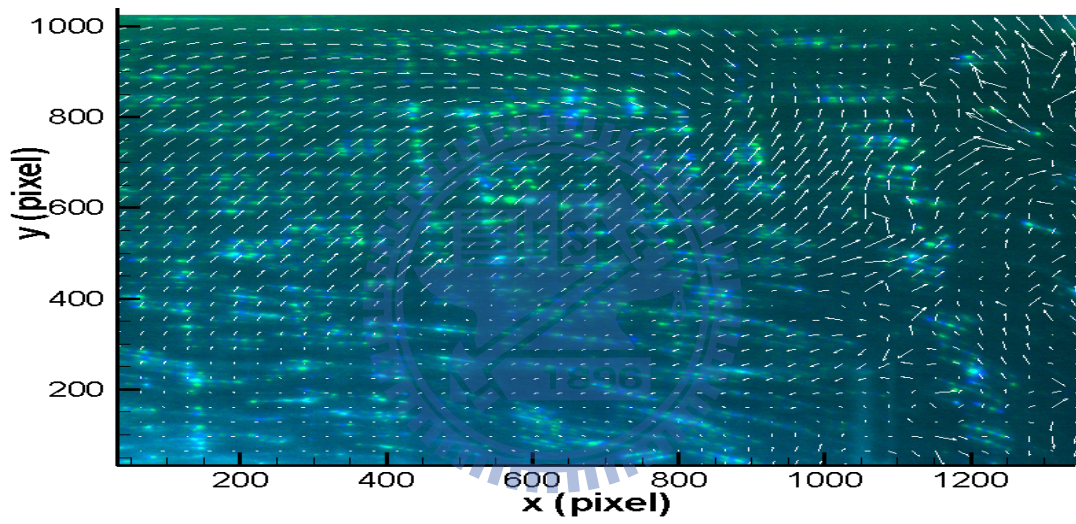


圖 4-86 案例 15 速度向量圖

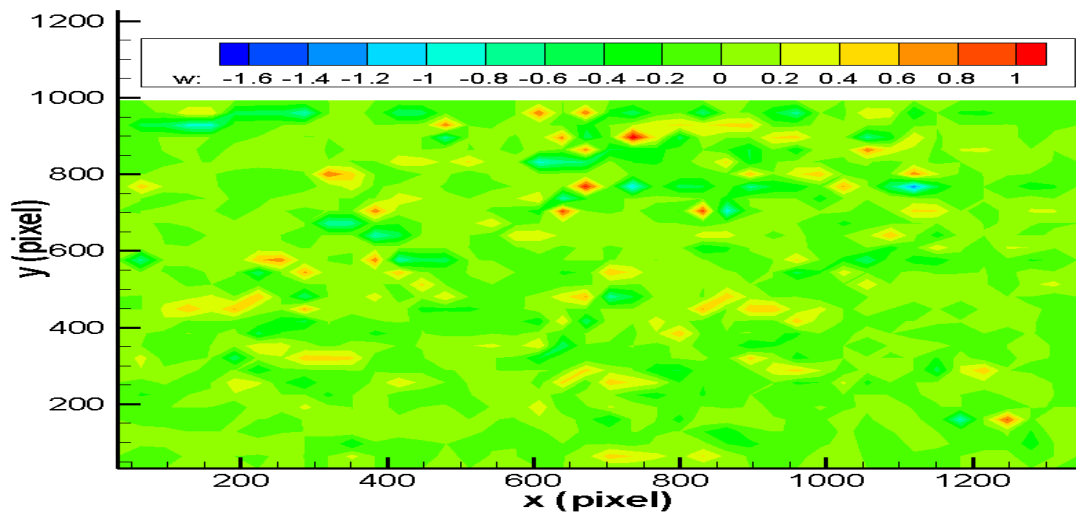


圖 4-87 案例 15 渦度場圖

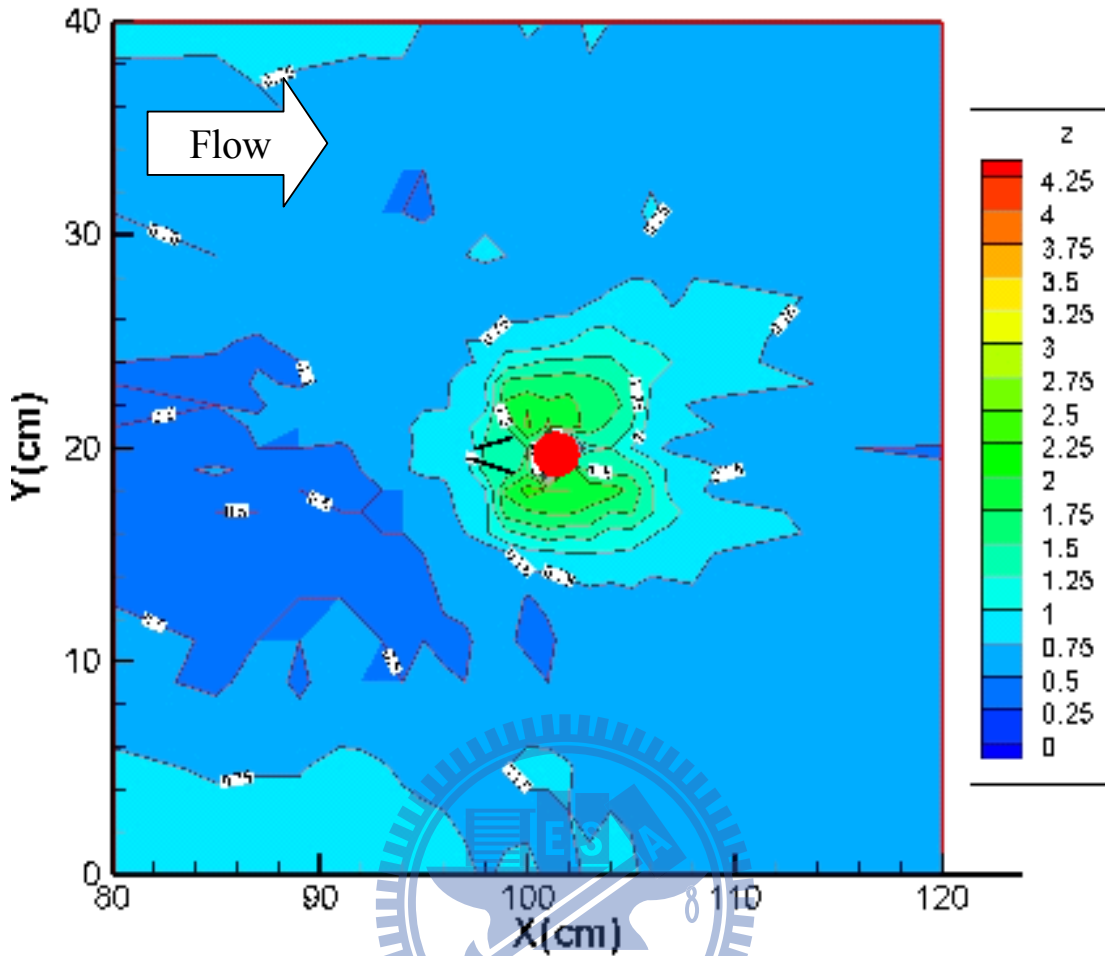


圖 4-88 案例 16 底床高程圖(t=3hr)

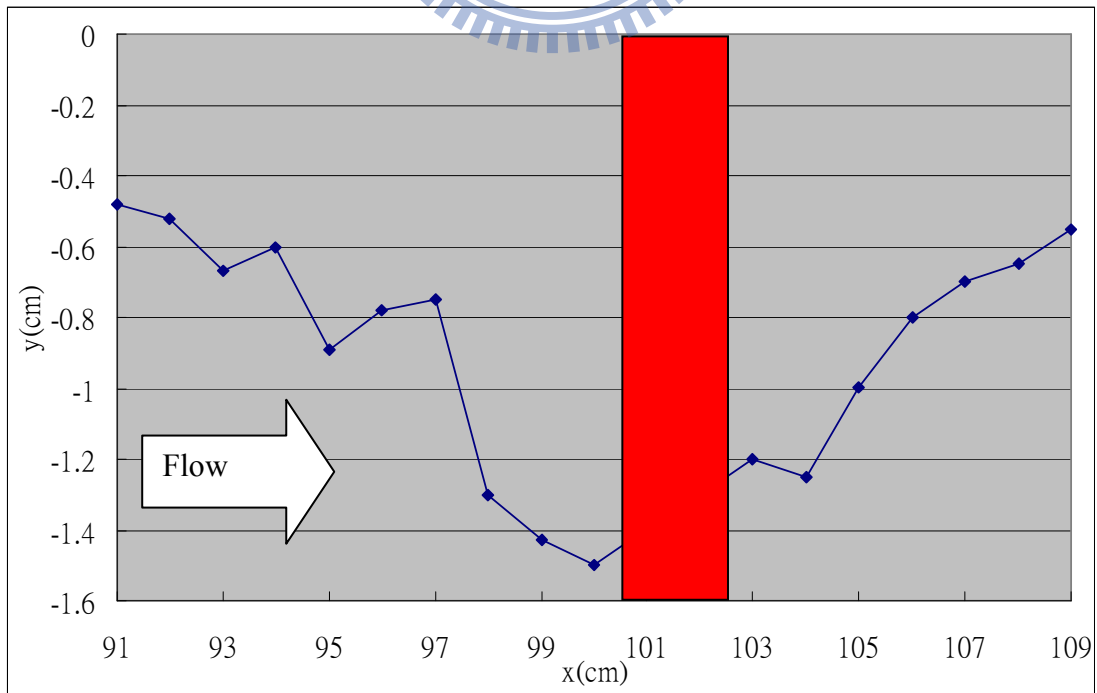


圖 4-89 案例 16 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

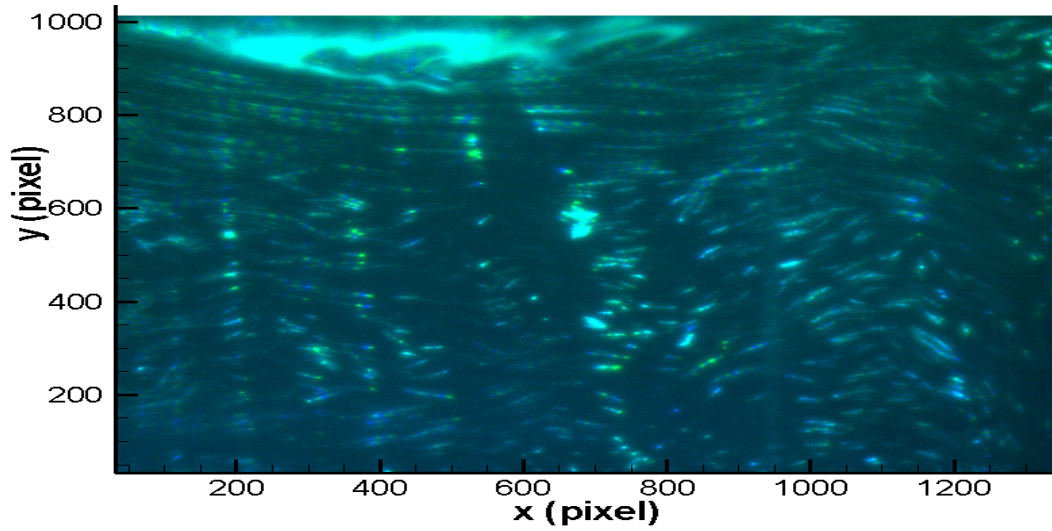


圖 4-90 案例 16 影像圖

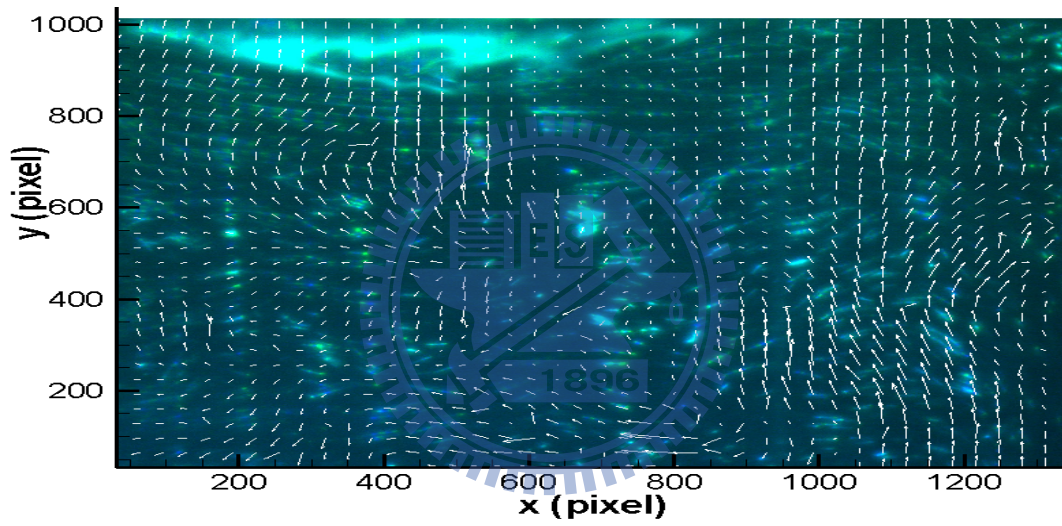


圖 4-91 案例 16 速度向量圖

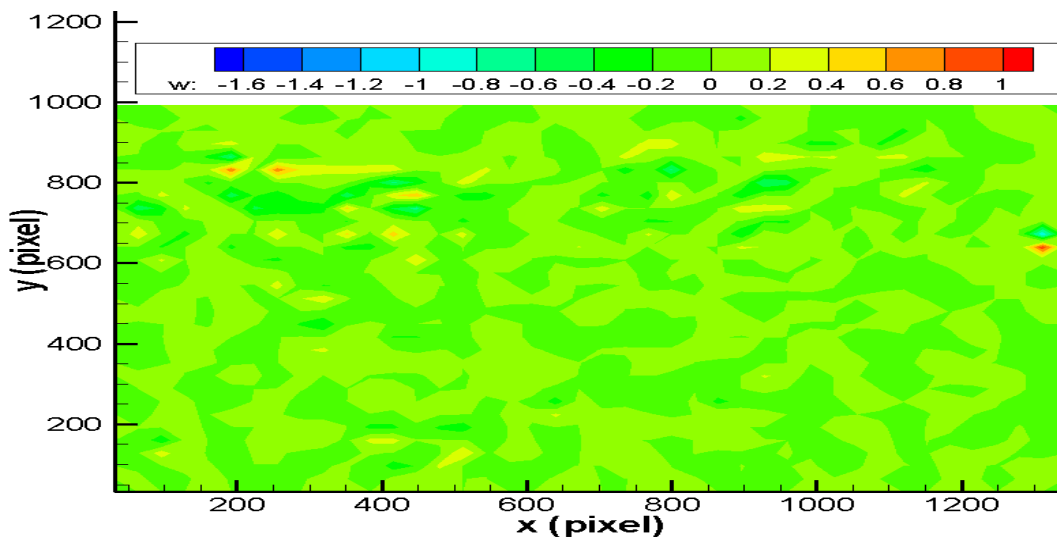


圖 4-92 案例 16 渦度場圖

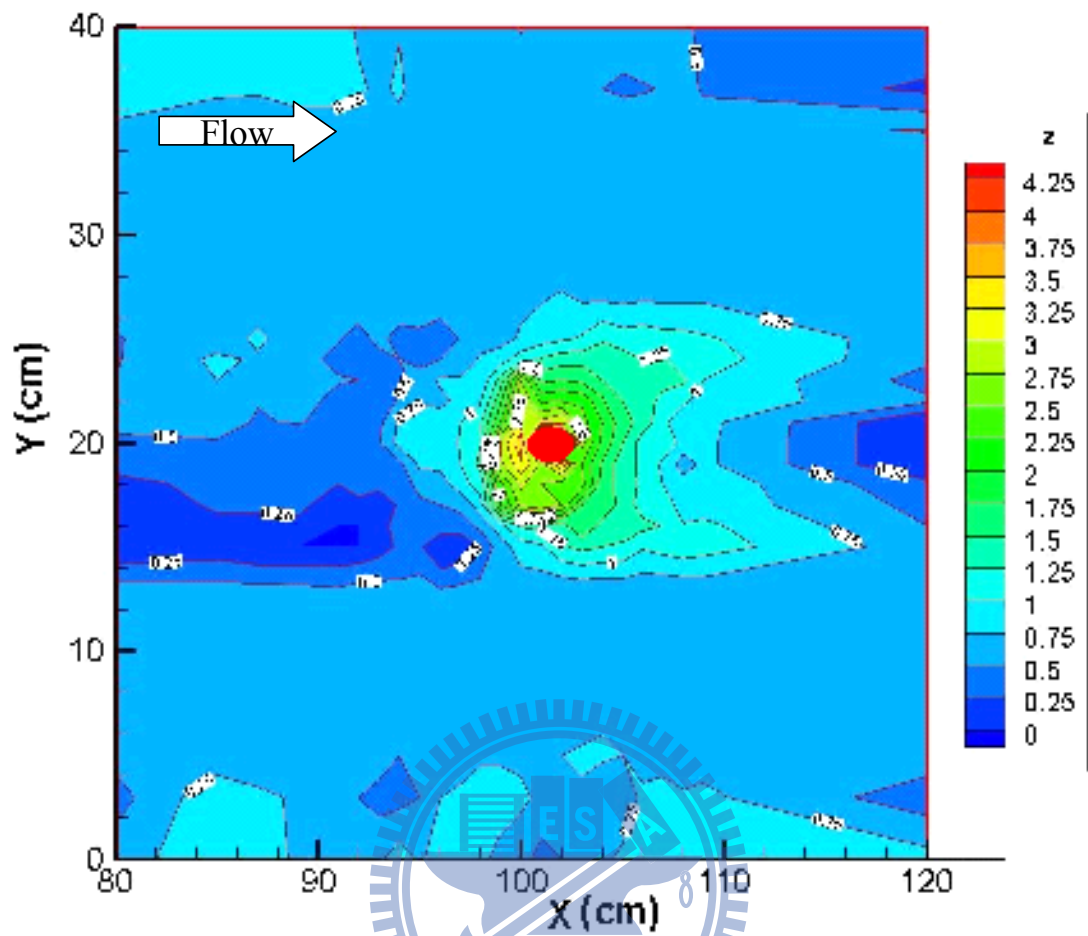


圖 4-93 案例 17 底床高程圖(t=3hr)

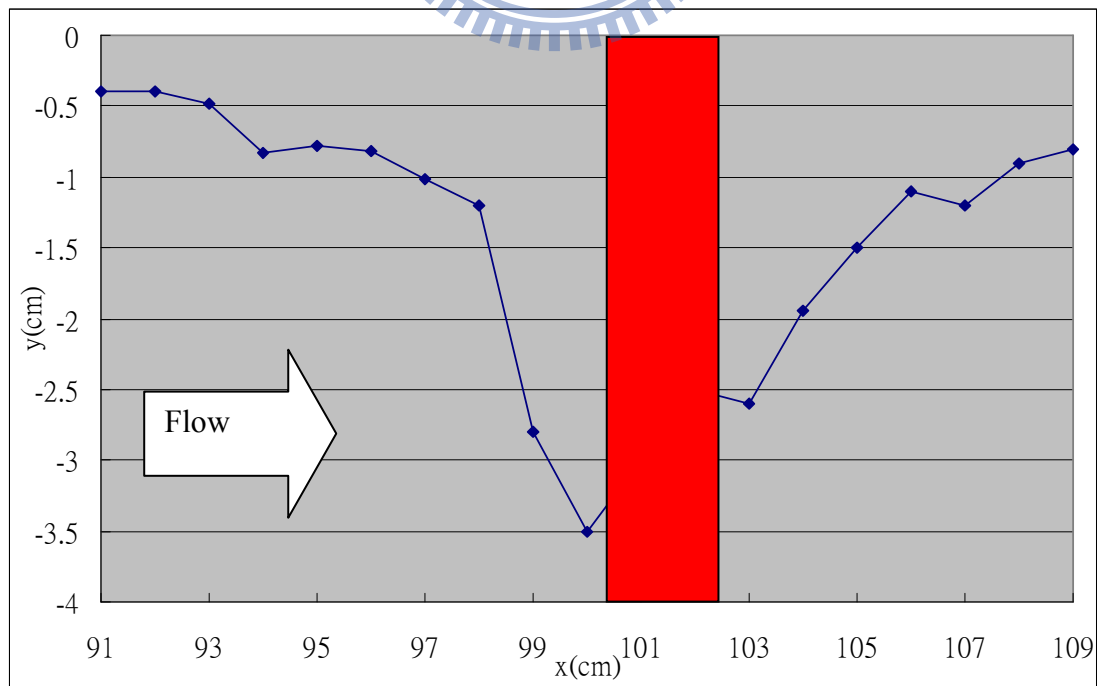


圖 4-94 案例 17 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

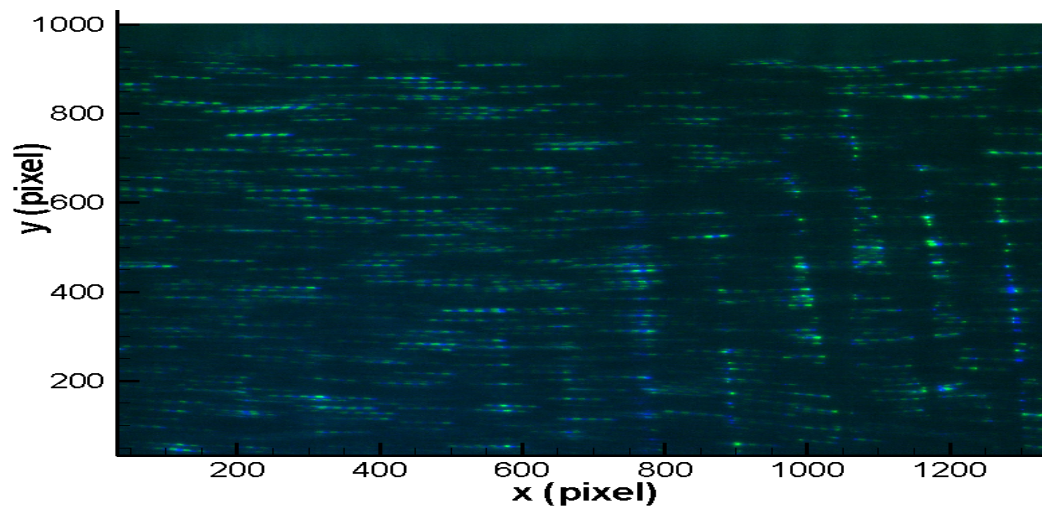


圖 4-95 案例 17 影像圖

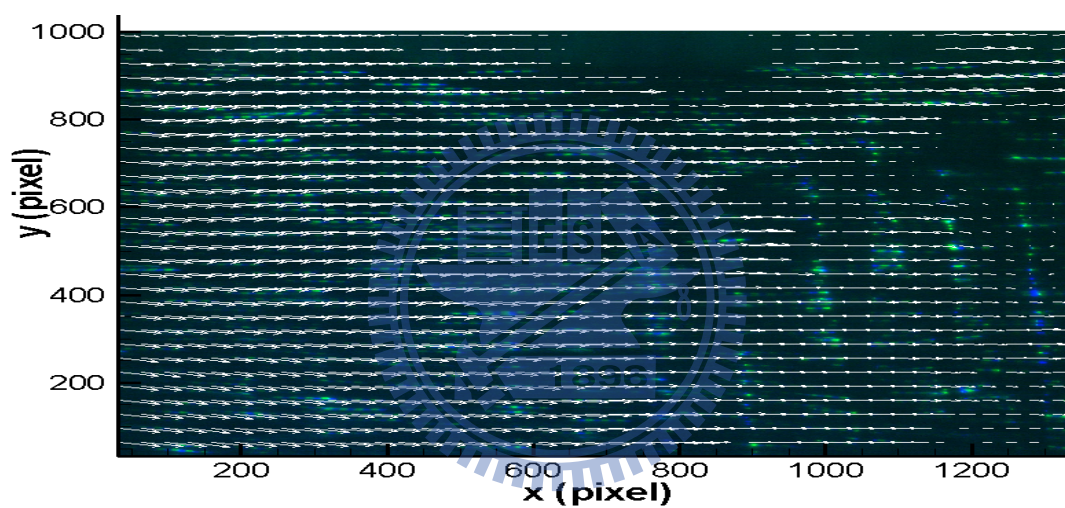


圖 4-96 案例 17 速度向量圖

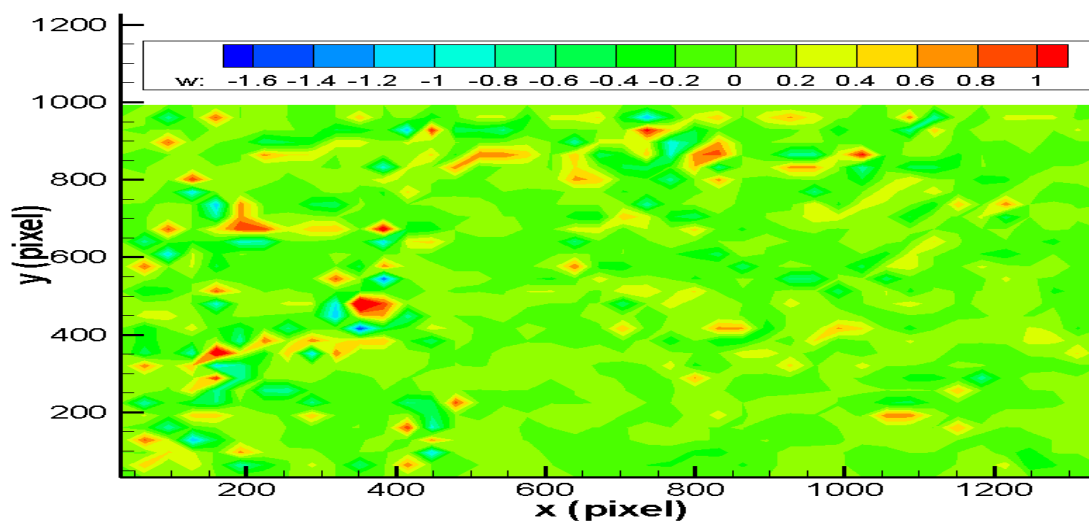


圖 4-97 案例 17 渦度場圖

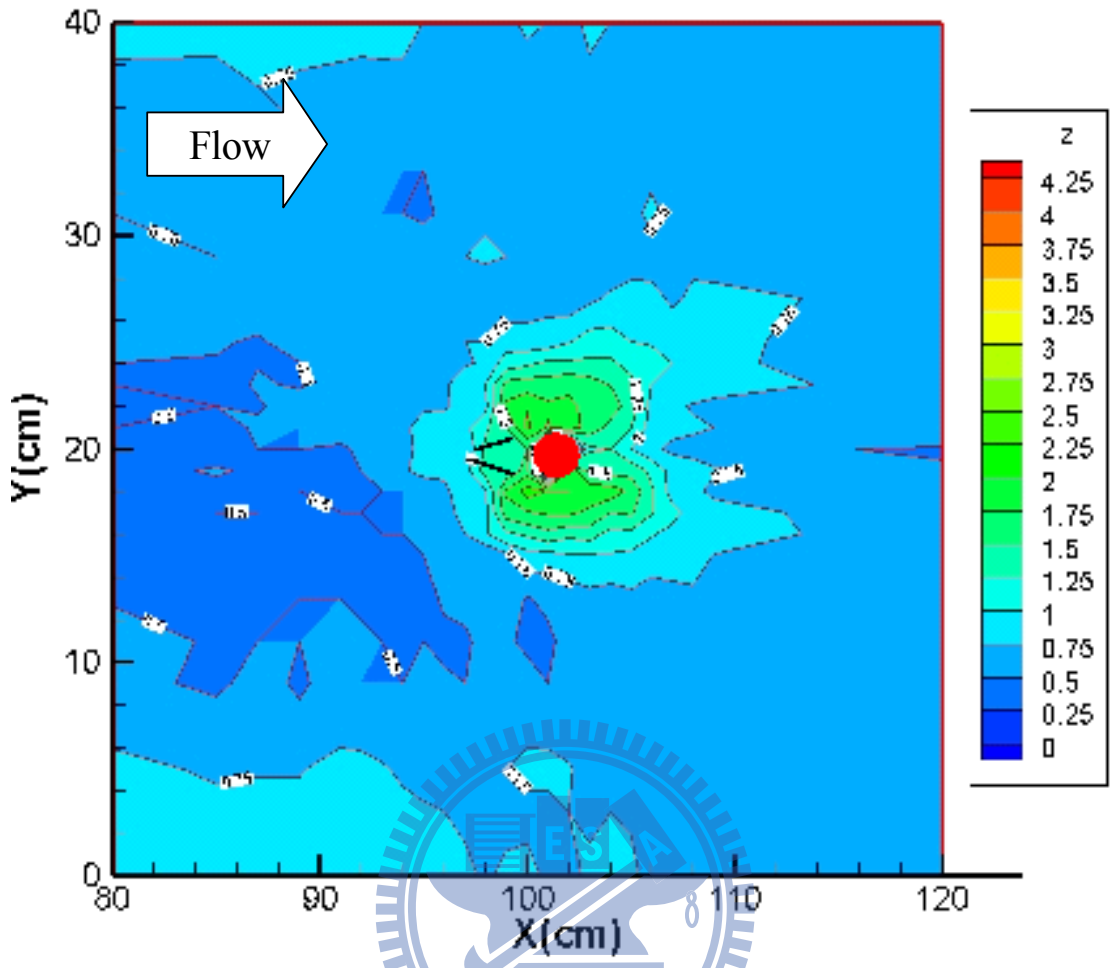


圖 4-98 案例 18 底床高程圖(t=3hr)

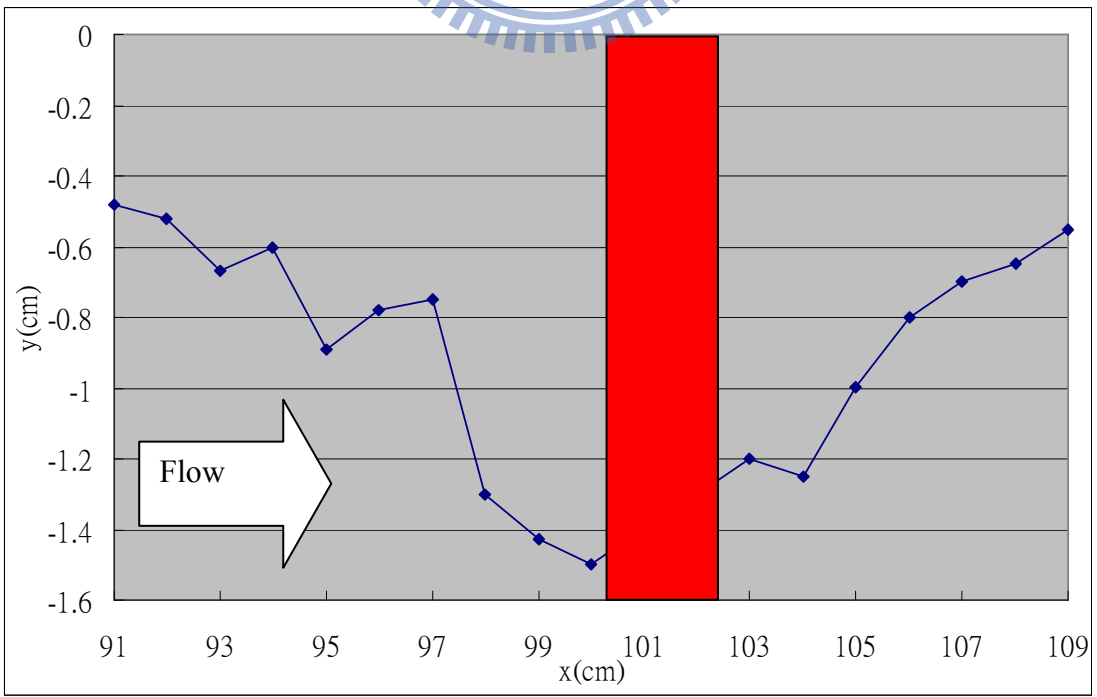


圖 4-99 案例 18 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

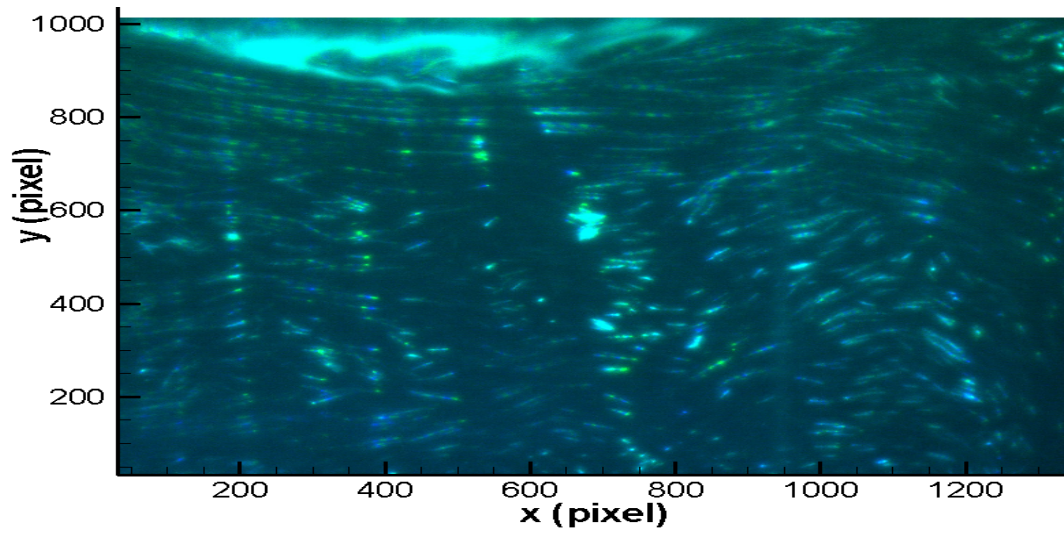


圖 4-100 案例 18 影像圖

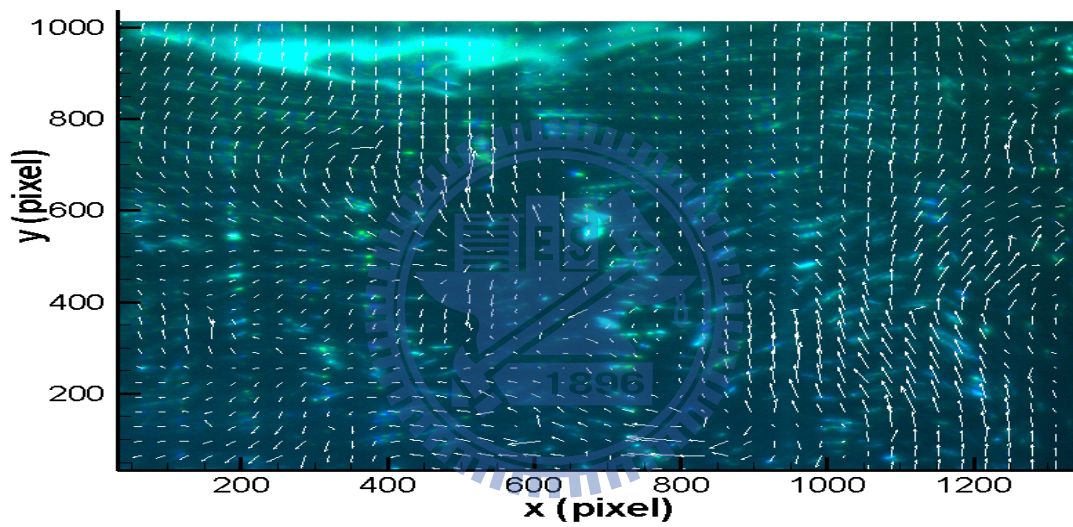


圖 4-101 案例 18 速度向量圖

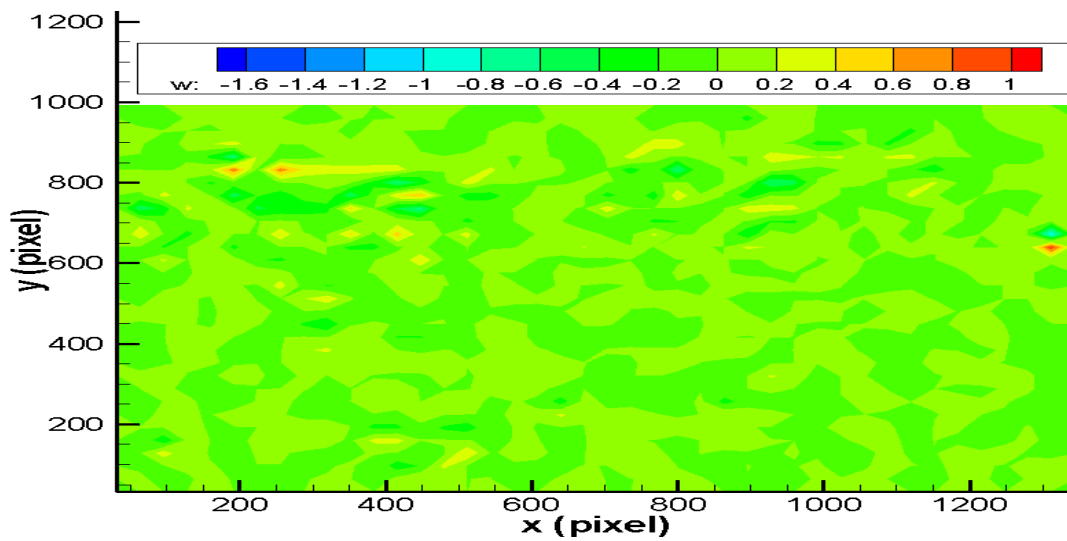


圖 4-102 案例 18 渦度場圖

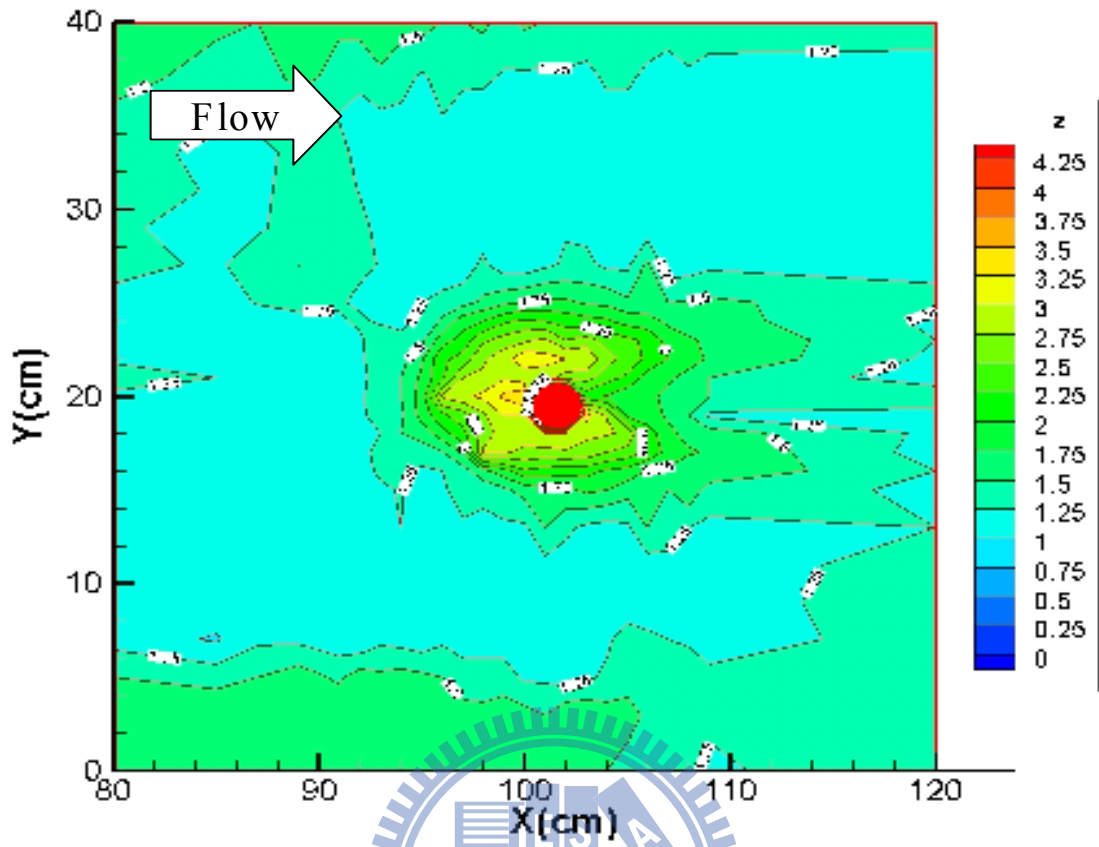


圖 4-103 案例 19 底床高程圖(t=3hr)

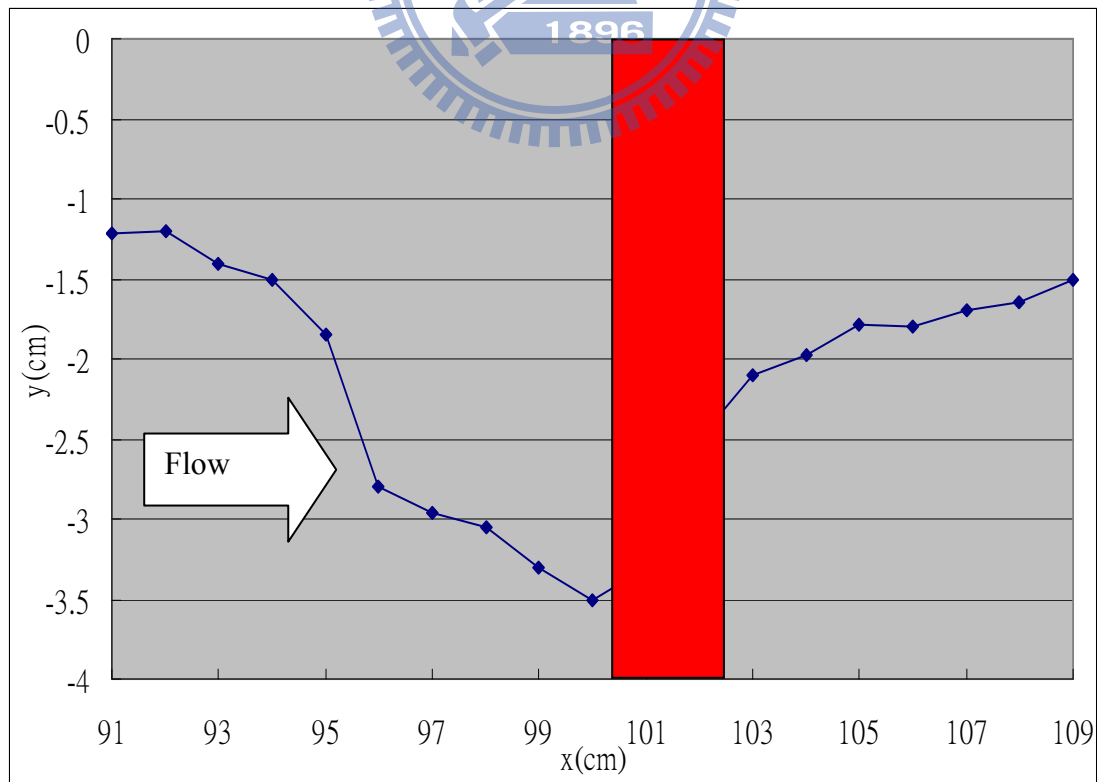


圖 4-104 案例 19 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

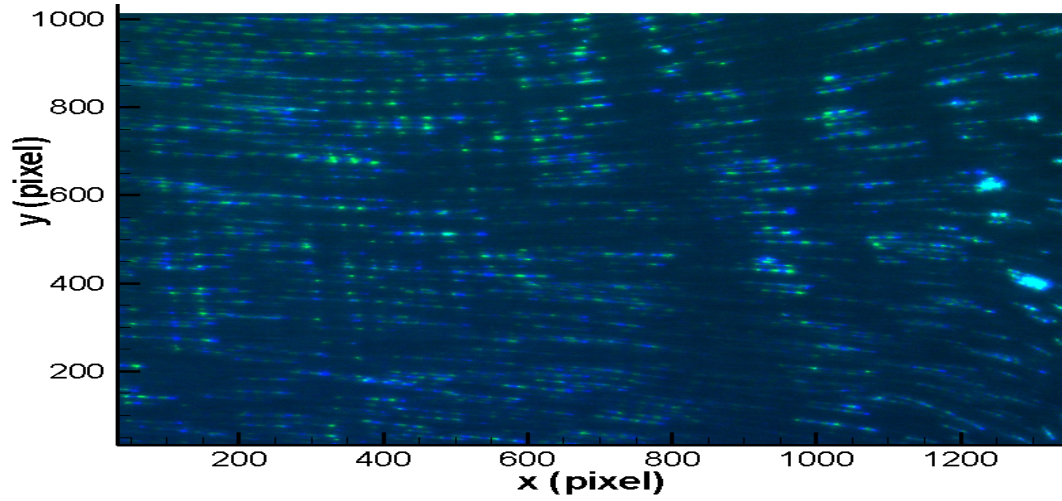


圖 4-105 案例 19 影像圖

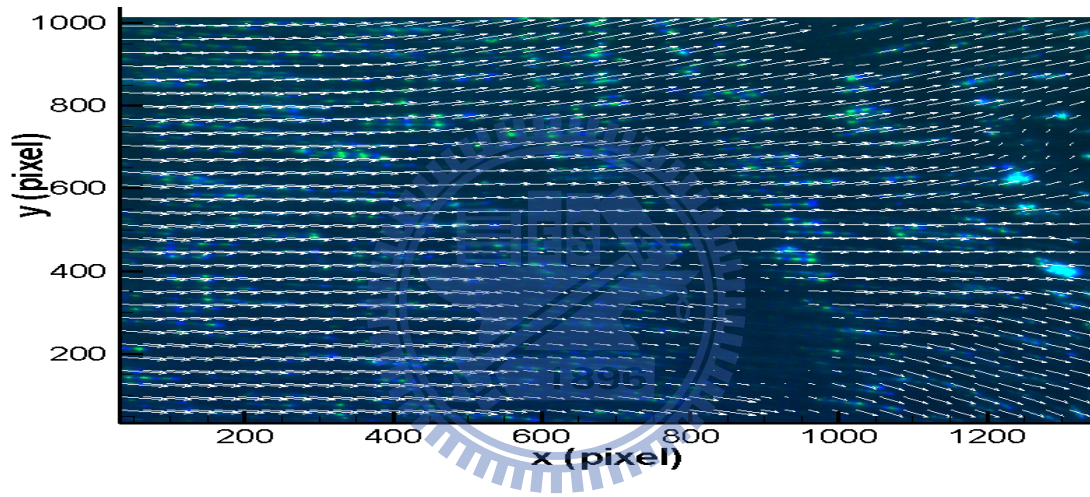


圖 4-106 案例 19 速度向量圖

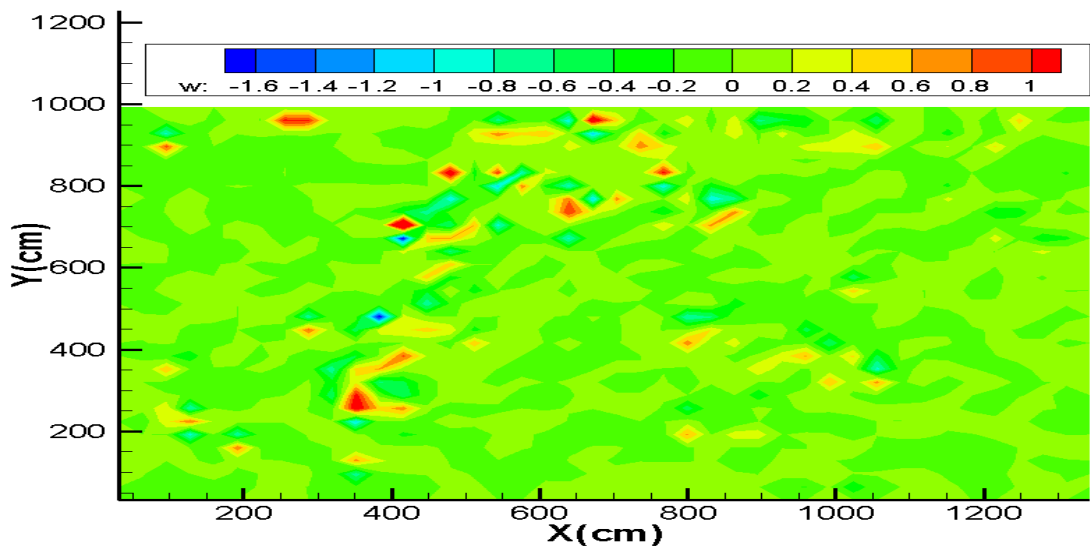


圖 4-107 案例 19 渦度場圖

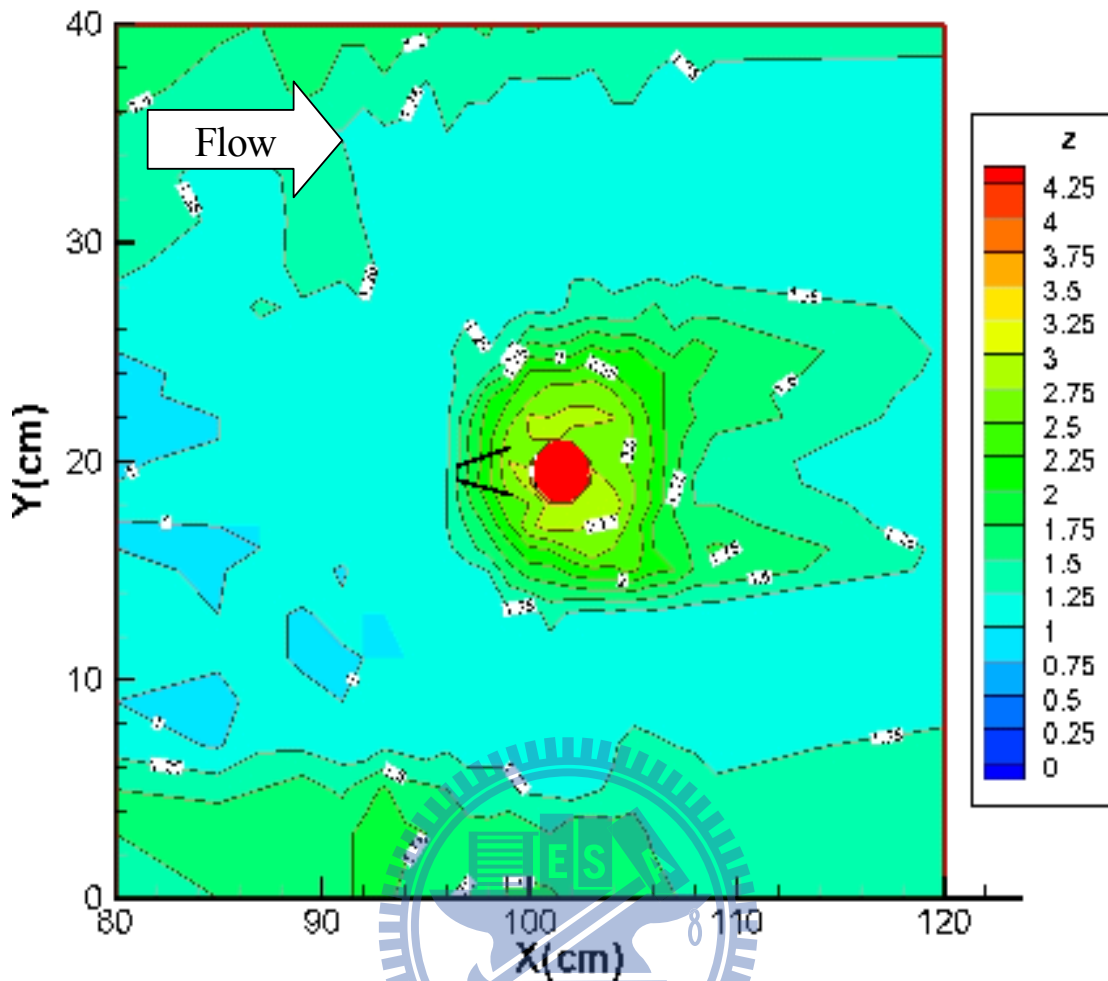


圖 4-108 案例 20 底床高程圖(t=3hr)

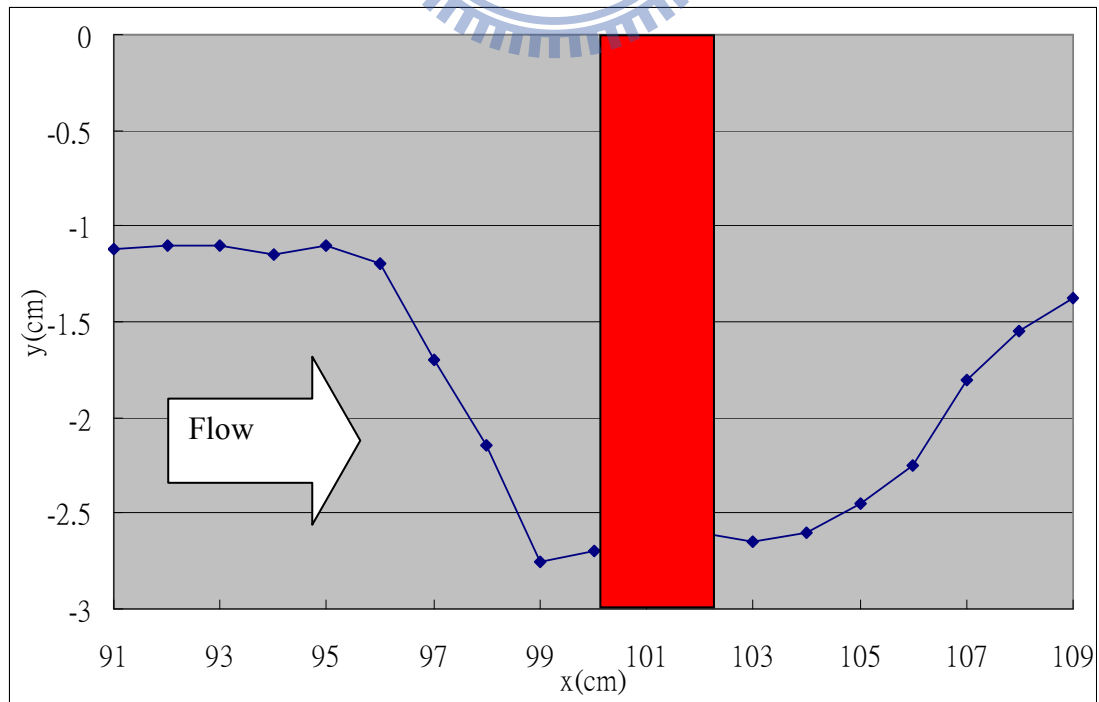


圖 4-109 案例 20 橋墩中心縱剖面圖(t=3hr)

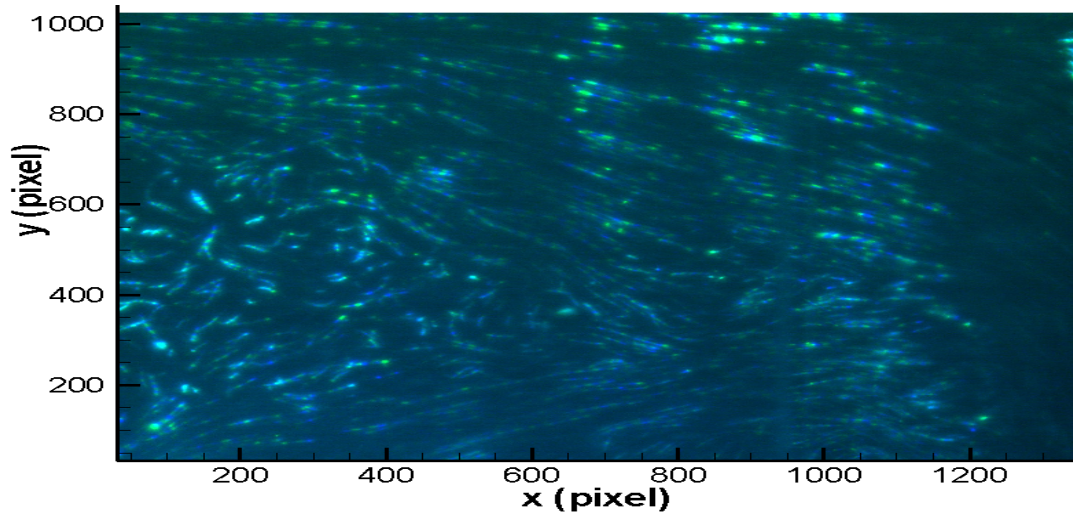


圖 4-110 案例 20 影像圖

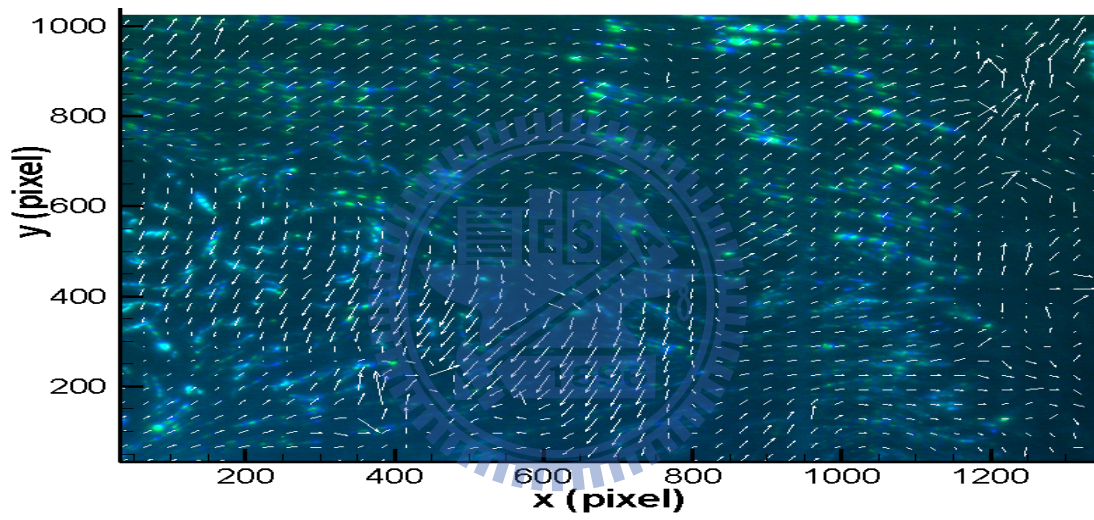


圖 4-111 案例 20 速度向量圖

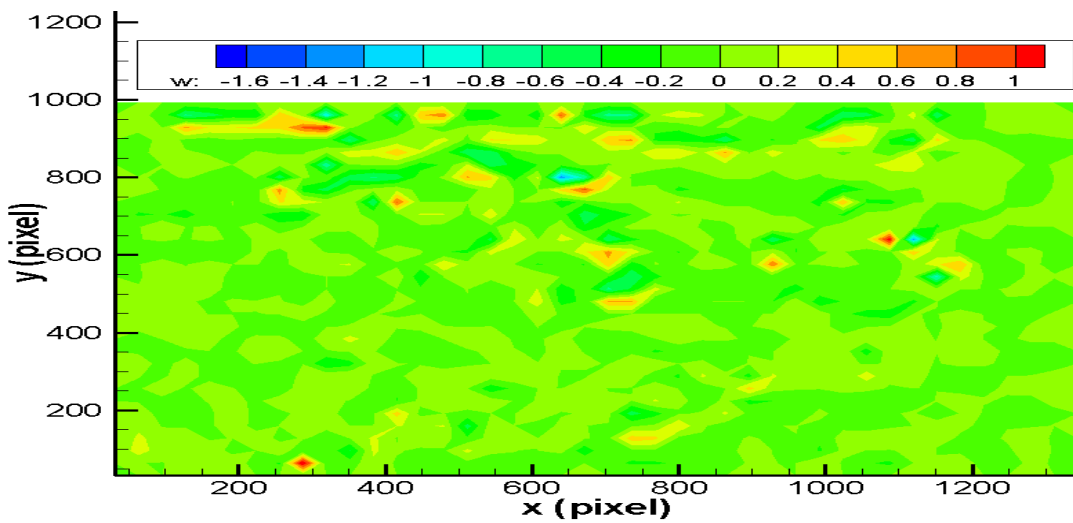


圖 4-112 案例 20 渦度場圖