

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

導流板對橋墩沖刷保護之試驗研究

Experimental Study on Guide Vanes for
Bridge Pier Scour Protection

研 究 生: 邱宇翔

指 導 教 授: 葉克家 博士

中華民國九十八年七月

導流板對橋墩沖刷保護之試驗研究

Experimental Study on Guide Vanes for Bridge Pier
Scour Protection

研究生:邱宇翔

Student: : Yu-Hsiang Chiu

指導教授:葉克家

Advisor : Keh-Chia Yeh

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis
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
July 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

導流板對橋墩沖刷保護之試驗研究

研究生:邱宇翔

指導教授:葉克家

國立交通大學土木工程研究所

摘要

天然河道因設置橋墩使水流通水面積減少，導致橋墩周圍流場產生劇烈變化，並改變原有輸砂行為，對底床造成局部沖刷，進而使橋墩基礎受到侵蝕而裸露，造成橋樑之破壞。一般橋墩保護方式如固床工、拋石與蛇籠等，皆為剛性保護工法，因此，本研究建議利用導流板以引導水流之方式，降低水流於橋墩沖刷之能力。

本研究在清水沖刷條件下，於直線形水槽進行模型佈置，採用對稱之雙片導流板置於圓柱橋墩前方，進行局部沖刷試驗。由於造成橋墩局部沖刷原因為水流衝擊橋墩後所產生之向下射流(down flow)與馬蹄形渦流(horseshoe vortex)，故減少此沖刷之效應，為試驗之主要目的。試驗中將探討不同導流板佈置方案對橋墩局部沖刷之影響，評估導流板對橋墩沖刷保護之效果。

此外，由於水流在橋墩的沖刷擾動，其流場變化瞬息萬變，若使用單點之量測法量測，對於局部沖刷之流場缺乏整體、有效的了解。因此，本研究利用非侵入式彩色質點影像測速法(color particle image velocimetry, CPIV)，進行橋墩沖刷之垂直二維流場量測，藉由質問窗(interrogation window)設定與影像分析，以獲得流速向量與渦度場分佈。

經由試驗結果顯示，在直線形水槽中，於清水沖刷條件下進行局部沖刷試驗，當導流板(長 2cm)與橋墩(墩徑 2cm)間距為 3 倍橋墩直徑、開口大小為 0.5 倍橋墩直徑及攻角為 15 度時，為導流板於橋墩沖刷保護之最佳化佈置，對橋墩最大沖刷深度減少率可達到 54.1 %。

關鍵詞：橋墩、局部沖刷、導流板、彩色質點影像測速法

Experimental Study on Guide Vanes for Bridge Pier Scour Protection

Student: Yu-Hsiang Chiu

Advisor: Keh-Chia Yeh

**Institute of Civil Engineering
National Chiao Tung University**

Abstract

The construction of bridge piers in natural river channels reduces the cross sectional area of flow which causes drastic variation of flow field around these piers, alters the sediment transport characteristics, and develops local scour at the riverbed. These physical phenomena in term result in erosion, which would expose the pier footings and cause damages that may threaten its structural integrity. Apart from the present methods for bridge pier protection such as the grade control structures, the ripraps, and the gabions...etc., this study proposes the use of vanes as flow deflector to reduce the action of flow on bridge pier scour.

This research involves a scaled model consisted of two vanes in front of a single cylindrical bridge pier for the experimental study of local scour in a straight channel under clear water condition. Local scour at bridge piers occurs through the action of the down flow and the horseshoe vortex when water impacts the bridge piers. The reduction of this scouring phenomena is the main purpose of this study, with evaluation on the effects of various arrangements of vanes on local scour and hence the efficiency of using these vanes as bridge pier protection.

The flow field changes rapidly as channel bed varies through process of scouring around the pier. Under such circumstances, traditional single-point measurement at a specific time would not be able to obtain the variation of the velocity field completely and effectively. Therefore this study adopts the non-intrusive color particle image velocimety (CPIV) to measure the vertical 2-D flow field in the channel in order to obtain the velocity and vortex field through the set-up of interrogation window and image analysis.

The experimental result reveals an optimal arrangement of vanes for bridge pier protection when maximum percentage reduction of scour depth (54.1%) is reached under the following three conditions: 1. when the distance between the vanes (with length of 2 cm) and the pier (with diameter of 2cm) is 3 times of the pier diameter; 2. when the spacing between the vanes is equal to 0.5times of the pier diameter; 3. when the attack angle is 15° .

Keywords: bridge pier, local scour, vanes, 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。研究所期間，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，承蒙台灣大學許教授銘熙、成功大學蔡教授長泰、國網中心蔡主任惠峰不吝斧正，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、宥達、誠達、峰志、環宇、力偉學長、秀容學姊及曉萍學姐在課業上的提攜和生活中的幫助與鼓勵，還有研究室同學冠曄、柏傑、全謚、俊宏、振家、歆淳及水利、海洋組全體同學，這兩年因為認識了你們，使研究生活更加豐富、快樂。

最要感謝的是含辛茹苦、撫育我成長的父母，由於你們的扶持與栽培，使我有往前邁進的動力，還有一路上鼓勵支持我、陪伴我的親人與朋友們，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.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
符號說明表.....	XI
第一章 導論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 研究目的.....	2
1-3 文獻回顧.....	2
1-3-1 質點影像測速法.....	2
1-3-2 橋墩沖刷與導流板相關研究.....	4
1-4 研究方法.....	8
1-5 本文組織.....	9
第二章 CPIV 法影像處理流程與沖刷原理.....	11
2-1 CPIV 法影像處理流程.....	11
2-1-1 數位影像擷取.....	11
2-1-2 程式運算分析.....	11
2-2 CPIV 法之誤差來源.....	14
2-3 沖刷原理.....	16
2-4 導流板區域流場.....	19
第三章 試驗儀器與佈置規劃.....	20
3-1 CPIV 儀器系統.....	20
3-1-1 設備系統.....	20
3-1-2 訊號控制系統.....	21
3-1-3 影像系統.....	21
3-2 CPIV 試驗程序.....	22
3-3 沖刷試驗條件.....	23
3-3-1 試驗泥砂.....	23
3-3-2 流量率定與試驗流速.....	23
3-3-3 沖刷時間.....	23
3-3-4 橋墩沖刷試驗設備.....	24
3-4 試驗步驟.....	24
第四章 試驗結果分析.....	26
4-1 導流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	導流板佈置探討.....	28
4-3-1	間距佈置探討.....	28
4-3-2	開口佈置探討.....	29
4-3-3	攻角佈置探討.....	31
4-4	綜合討論.....	32
第五章	結論與建議.....	34
5-1	結論.....	34
5-2	建議.....	35
參考文獻	37



表目錄

表 4-1 案例佈置條件與結果	41
表 4-2 案例佈置無因次參數對應墩鼻端沖刷深度迴歸分析係數表	42



圖目錄

圖 1-1 Ghorbani and Kells 單導流板佈置圖	43
圖 1-2 Ghorbani and Kells 雙導流板佈置圖	43
圖 2-1 原始影像擷取圖	44
圖 2-2 藍、綠影像亮度分佈示意圖	44
圖 2-3 imb、img 比對方式	45
圖 2-4 將綠色點位移(m,n)後與藍色點重疊(matching)情況	45
圖 2-5 互相關計算所得之 C(m,n)分佈示意圖	45
圖 2-6 不一致流速向量圖	46
圖 2-7 去除不一致流速向量圖	46
圖 2-8 RMS 誤差之示意圖	46
圖 2-9 偏差誤差之示意圖	47
圖 2-10 已知位移量 8 畫素之計算結果	47
圖 2-11 橋墩局部沖刷水流結構示意圖	47
圖 2-12 導流板設置後產生尾跡漩渦及螺旋水流示意圖	48
圖 2-13 導流板產生尾跡渦流影響底床變化示意圖	48
圖 3-1 CPIV 儀器架設圖	49
圖 3-2 雷射光頁照射與影像擷取位置示意圖	49
圖 3-3 Argon 雷射	50
圖 3-4 多彩聲光調變器 (PCAOM)	50
圖 3-5 PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖	51
圖 3-6 PCI-6601 訊號控制卡	51
圖 3-7 自製降壓電路板	52
圖 3-8 試驗泥砂粒徑分佈曲線	52
圖 3-9 流量率定曲線	53
圖 3-10 最大沖刷深度流速條件示意圖	53
圖 3-11 均勻粒徑之 Shields 始動剪力速度圖	54
圖 3-12 橋墩沖刷平衡時間歷程圖	54
圖 3-13 試驗水槽佈置示意圖	55
圖 3-14 導流板與橋墩佈置示意圖	55
圖 3-15 相機角架固定裝置	56
圖 4-1 間距佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖	57
圖 4-2 間距佈置對應橋墩沖刷效益圖	57
圖 4-3 間距佈置對應橋墩中心縱剖面圖	57
圖 4-4 開口佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖	58
圖 4-5 開口佈置對應橋墩沖刷效益圖	58
圖 4-6 開口佈置對應橋墩中心縱剖面圖	58
圖 4-7 攻角佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖	59

圖 4-8 攻角佈置對應橋墩沖刷效益圖	59
圖 4-9 攻角佈置對應橋墩中心縱剖面圖	59
圖 4-10 案例 1 底床高程圖	60
圖 4-11 案例 1 橋墩中心縱剖面圖	60
圖 4-12 案例 1 影像圖	61
圖 4-13 案例 1 速度向量圖	61
圖 4-14 案例 1 渦度場圖	61
圖 4-15 案例 2 底床高程圖	62
圖 4-16 案例 2 橋墩中心縱剖面圖	62
圖 4-17 案例 2 速度向量圖	63
圖 4-18 案例 2 影像圖	63
圖 4-19 案例 2 渦度場圖	63
圖 4-20 案例 3 底床高程圖	64
圖 4-21 案例 3 橋墩中心縱剖面圖	64
圖 4-22 案例 3 影像圖	65
圖 4-23 案例 3 速度向量圖	65
圖 4-24 案例 3 渦度場圖	65
圖 4-25 案例 4 底床高程圖	66
圖 4-26 案例 4 橋墩中心縱剖面圖	66
圖 4-27 案例 4 影像圖	67
圖 4-28 案例 4 速度向量圖	67
圖 4-29 案例 4 渦度場圖	67
圖 4-30 案例 5 底床高程圖	68
圖 4-31 案例 5 橋墩中心縱剖面圖	68
圖 4-32 案例 5 影像圖	69
圖 4-33 案例 5 速度向量圖	69
圖 4-34 案例 5 渦度場圖	69
圖 4-35 案例 6 底床高程圖	70
圖 4-36 案例 6 橋墩中心縱剖面圖	70
圖 4-37 案例 6 影像圖	71
圖 4-38 案例 6 速度向量圖	71
圖 4-39 案例 6 渦度場圖	71
圖 4-40 案例 7 底床高程圖	72
圖 4-41 案例 7 橋墩中心縱剖面圖	72
圖 4-42 案例 7 影像圖	73
圖 4-43 案例 7 速度向量圖	73
圖 4-44 案例 7 渦度場圖	73
圖 4-45 案例 8 底床高程圖	74



圖 4-46 案例 8 橋墩中心縱剖面圖	74
圖 4-47 案例 8 影像圖	75
圖 4-48 案例 8 速度向量圖	75
圖 4-49 案例 8 渦度場圖	75
圖 4-50 案例 9 底床高程圖	76
圖 4-51 案例 9 橋墩中心縱剖面圖	76
圖 4-52 案例 9 影像圖	77
圖 4-53 案例 9 速度向量圖	77
圖 4-54 案例 9 渦度場圖	77
圖 4-55 案例 10 底床高程圖	78
圖 4-56 案例 10 橋墩中心縱剖面圖	78
圖 4-57 案例 10 影像圖	79
圖 4-58 案例 10 速度向量圖	79
圖 4-59 案例 10 渦度場圖	79
圖 4-60 案例 11 底床高程圖	80
圖 4-61 案例 11 橋墩中心縱剖面圖	80
圖 4-62 案例 11 影像圖	81
圖 4-63 案例 11 速度向量圖	81
圖 4-64 案例 11 渦度場圖	81
圖 4-65 案例 12 底床高程圖	82
圖 4-66 案例 12 橋墩中心縱剖面圖	82
圖 4-67 案例 12 影像圖	83
圖 4-68 案例 12 速度向量圖	83
圖 4-69 案例 12 渦度場圖	83
圖 4-70 案例 13 底床高程圖	84
圖 4-71 案例 13 橋墩中心縱剖面圖	84
圖 4-72 案例 13 影像圖	85
圖 4-73 案例 13 速度向量圖	85
圖 4-74 案例 13 渦度場圖	85
圖 4-75 案例 14 底床高程圖	86
圖 4-76 案例 14 橋墩中心縱剖面圖	86
圖 4-77 案例 14 影像圖	87
圖 4-78 案例 14 速度向量圖	87
圖 4-79 案例 14 渦度場圖	87
圖 4-80 案例 15 底床高程圖	88
圖 4-81 案例 15 橋墩中心縱剖面圖	88
圖 4-82 案例 15 影像圖	89
圖 4-83 案例 15 速度向量圖	89

圖 4-84 案例 15 渦度場圖	89
圖 4-85 案例 16 底床高程圖	90
圖 4-86 案例 16 橋墩中心縱剖面圖	90
圖 4-87 案例 16 影像圖	91
圖 4-88 案例 16 速度向量圖	91
圖 4-89 案例 16 渦度場圖	91



符號說明表

D	: 橋墩墩徑
V	: 上游水流平均流速
V_c	: 試驗砂啟動流速
d_{50}	: 試驗砂中值粒徑
σ_g	: 試驗砂幾何標準偏差
C_u	: 試驗砂均勻係數
C_c	: 試驗砂曲率係數
G_s	: 試驗砂比重
ρ_s	: 試驗砂密度
μ	: 流體動力黏滯係數
g	: 重力加速度
h	: 水流上游水深
ρ	: 水密度
B	: 渠道寬度
s	: 渠道底床坡降
θ	: 導流板攻角
S	: 導流版開口
L	: 導流板前緣與橋鼻端間距
V_l	: 導流板長度
V_h	: 導流板入水深度
d_{sp}	: 墩鼻端沖刷深度
$d_{sv_{max}}$: 導流板最大沖刷深度



第一章 導論

1-1 研究動機

台灣為一南北狹長、東西短促之島嶼，其南北縱長約 395 公里，東西寬度約 145 公里，其中，主要分水嶺中央山脈為南北走向，導致全島河川大多呈東西流向，使南北交運須藉由跨河橋樑，造成天然河道通水面積減少，水流產生束縮效應而淘刷河床。此外，由於全島降雨分布不均，使河川具有水流湍急、河床坡度陡峭、含砂濃度高、枯豐水期流量懸殊等特性，於此自然條件下，在洪水期間往往造成橋墩基礎受沖刷而裸露，對橋樑結構安全構成威脅，因此，如何減少橋墩沖刷為一具急迫性之問題。

一般橋墩保護工法大多為設置固床工、拋石、蛇籠等，除人力外，亦須花費大量的財力與物力，此類工法通常為增加橋墩抵抗水流沖擊能力，但保護橋墩局部沖刷的效果有限，若能於橋墩周圍設置導流裝置，將沖擊水流導引至向後，降低沖刷程度，不但具有佈置方便與減少經費等特性，更不會因抵擋沖擊水流而增加橋墩間之束縮效應，使底床加速沖刷而造成橋樑之破壞。其中，採用導流板對水流進行分流，為改善橋墩沖刷問題的可能工法之一，以設置導流板於橋墩前方導引沖擊水流之能量，改變底床形狀與泥砂沖淤情況，達到保護橋墩的作用。

本研究將導流板佈置於圓形橋墩前方，經由不同配置方式，對橋墩沖刷保護效果作探討；除量測底床沖刷程度比較，研究中亦採用彩色影像質點測速法(CPIV)，以非侵入式之量測技術，計算速度向量與渦度，應用於橋墩沖刷流場觀測，並對應橋墩沖刷結果作比較，以提供後續相關水利工程實務參考。

1-2 研究目的

一般造成橋墩局部沖刷的主要原因，為水流沖擊橋墩產生之向下射流(down flow)與馬蹄形渦流(horseshoe vortex)，此兩種沖刷機制於橋墩附近造成沖刷坑，進而影響橋墩之安全性。本研究中採用橋墩模型為圓柱狀，在橋墩上游面改變導流板攻角、開口大小、前端與橋墩迎水面之距離三種因子，於直線水槽進行佈置試驗。並藉由底床量測與 CPIV 法量測技術，針對橋墩局部沖刷進行比較，探討沖擊水流對橋墩沖刷程度造成之影響。

1-3 文獻回顧

1-3-1 質點影像測速法

一、非侵入式流速量測技術

一般傳統流場量測方法，只能做單點量測，如都卜勒流速儀器(acoustic Doppler velocimeter)，且為侵入式，即須置入儀器至流場內感應，無法對流場區域作無擾動的量測，因而影響流場本身之結構，形成相當程度的誤差。當流場內部的流速變化較大、且有渦流存在時，傳統的量測方法較難實現流場的準確量測。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 QI (quantitative image)，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。

PIV 系統運作是在二維光頁打入流場的狀態下，於流場中加入不連續的質點(晶體)，經高速攝影機將瞬時數位影像擷取後儲存於電腦

之中，以初時刻和時間間距內所擷取的影像，利用快速傅立葉轉換 (FFT) 頻域的交互相關函數，於已知的時間間距，分析計算影像內質點的位移量，即可得到流場內各個位置之瞬時速度量值，並繪出整體流場速度向量圖。因此，於 PIV 量測技術過程分為兩個主要部份，一為實驗的佈置部分，包含光頁照射、灑入質點與影像擷取儲存；另一為 PIV 分析部份，此部份為應用圖形辨識與影像處理，使用觀察區域之自動與交互相關計算出平均位移，此演算法通常依賴交互協方差函數，協方差一般為利用快速傅立葉轉換來計算，以便得知流場速度向量分佈與其他資訊。

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 Keane and Adrian (1990)、Adrian (1991)、Willert and Gharib (1991)、Westerweel et al. (1996)，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：

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

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：

$$\Phi_{ij}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j)] \cdot [img(i-m, j-n)] \quad (1-2)$$

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的速度向量值；二為帶有不確定因素之誤差的量測數值。

2. Nogueira et al. (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 et al. (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。

1-3-2 橋墩沖刷與導流板相關研究

Raudkivi 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，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，但於濁水沖刷條件下之試驗則較無影響。

Gill (1981) 考慮橋墩造成河道斷面減少，引起束縮沖刷，對束縮沖刷深度作探討，可表示為：

$$\text{清水束縮沖刷： } y_s = y_1 \left[\left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} \left(\frac{\tau_c}{\tau_l} \right)^{-3/7} - 1 \right] \quad (1-3)$$

$$\text{臨界束縮沖刷： } y_s = y_1 \left[\left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{6/7} - 1 \right] \quad (1-4)$$

$$\text{濁水束縮沖刷： } y_s = y_1 \left[\left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{9/14} - 1 \right] \quad (1-5)$$

上述三式中， y_s = 束縮沖刷深度(m)； y_1 = 上游段水深(m)； B_1 = 鄰近上游段之河寬(m)； B_2 = 束縮河段之河寬(m)； τ_l = 鄰近上游段之底床剪應力(N/m^2)； τ_c = 臨界底床剪應力(N/m^2)。

Raudkivi and Ettema (1983) 於清水沖刷條件中，施行橋墩沖刷試驗，並依試驗結果將泥砂類型分為四類：(1) 當 $D/d_{50} \geq 130$ 時，為細顆粒泥砂；(2) $130 > D/d_{50} \geq 30$ ，為中顆粒泥砂；(3) $30 > D/d_{50} \geq 8$ ，為粗質顆粒泥砂；(4) $D/d_{50} < 8$ ，為大顆粒泥砂；而在 $D/d_{50} \geq 20 \sim 25$ 的條件之下，其平衡沖刷深度則較不受泥砂粒徑之影響。

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。

Melville and Chiew (1999) 提出以平均水流流速 V 和泥砂啟動流

速 V_c 比值關係分隔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直粒徑比值 $D/d_{50} < 50$ 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，為小於橋墩直徑的 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 橋墩前方設置列狀導流板(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。

Odgaar and Wang (1991) 對於導流板周圍渦流結構表示，在單一導流板於渠道中，作 15 至 25 度沖擊角佈置條件下，因導流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，在導流板後產生環流量，逐漸形成一沿水流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。在導流板應用於河川方面，以導流板之設置達到

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

郭丁元 (1994) 利用表層式導流隔板於橋墩上游進行佈置，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，其墩鼻端沖刷保護效果達 89% 左右。

Marelius and Sinha (1998) 佈置單一導流板於直線渠道，並以較大之導流板攻角作試驗，使水流沿著導流板迎水面兩側流過，且水流大部分由順水端向後分流，藉此探討出導流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 度時受導流板背水面較低壓力分佈與流過逆水端水流之影響，使導流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導流板後方產生之單一渦流呈明顯對比。

Barkdoll (1999) 於取水口設置六列導流板，探討迎水流沖擊角為 20、40 度時與未設置導流板沖淤情況，發現當導流板迎水流沖擊角增大為 40 度時，其導流板周圍形成一較大沖刷坑，嚴重影響泥砂傳輸情形，於取水口改善效果較差。

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，以單一鋼製導流板施行 15 至 90 度不同導流板角度配置，探討導流板周圍底床載運移行為，經由試驗得知，導流板迎水流沖擊角度為 30 度時，其輸砂運移行為最佳。

盧志晃、歐陽慧濤 (2006) 探討導流板最佳佈置之研究，研究中採用彎道正交曲線座標系統，針對導流板之攻角、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導流板設置位置之影響最大。

Ghorbani and Kells (2008) 將導流板設置於橋墩前方，探討水流沖擊圓柱型橋墩時，對沖刷深度之影響，其佈置方式分為單導流板與雙導流板，且分別改變導流板入水深、沖擊角度進行試驗。在單導流板佈置方面，於距離橋墩直徑 1.5 倍上游處設置單一導流板，如圖 1-1 所示。而雙導流板則連結於橋墩邊壁，面對上游處進行對稱佈置，如圖 1-2 所示。經由試驗結果發現，在單一導流板入水深度 0 公分、沖擊角度 8.5 度時為最佳配置，對墩鼻端沖刷深度約減少 17.3%。而雙導流板在橋墩左右兩端、入水深度 0 公分、且沖擊角 18.5 度時為最佳佈置，於端鼻端沖刷深度減少約 87.7%，且沖刷坑由橋墩前緣轉移至導流板前端之位置。

1-4 研究方法

本研究主要分為兩個部份，一部分為沖刷試驗部分，另一部份為 CPIX 觀測流場部份。

第一部份(沖刷試驗)：將橋墩及導流板模型依試驗配置固定於渠道位置上，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，到達試驗時間後關閉馬達，待渠道內水排出後，利用水尺

計量測底床高程與橋墩中心剖面線沖刷深度。

第二部份(CPIV 試驗)：以雷射光束作為光源，其光源為 Argon 氬氣雷射之藍(488 nm)、綠(514 nm)之混合光，利用反射鏡將光源引導至試驗水槽，於雷射光路徑中架設兩面凸透鏡，其中一面全反射、一面半反射，把光線在反射鏡間來回反射，讓光源得到足夠的放大，使雷射光源強度不致衰退，而後直射至多彩聲光調變器(polychromatic acousto-optic modulator, PCAOM)，藉由不同之電壓將藍綠混合光區分於藍光及綠光後，再經由反射鏡射至光學玻璃管形成雷射光頁。流體影像擷取則由 DuncanTech MS300 型之 CCD 攝影機，擷取通過雷射光頁下之質點影像，質點曝光數由快門(1/5 至 1/4000 秒)所決定，而後利用影像轉檔程式及影像分析與計算程式，將攝影機所擷取之影像進行演算分析。

1-5 本文組織

本研究經由沖刷試驗之底床量測與彩色質點影像測速法，應用於橋墩沖刷程度比較與流場之觀測。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、導流板工法與 CPIV 法測量技術相關研究做一整理。

第二章為 CPIV 法測量技術、影像處理流程與沖刷機制之原理說明。

第三章為 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)與導流板相關佈置、試驗條件及步驟。

第四章為橋墩局部沖刷之結果分析，探討不同導流板佈置下之橋墩局部沖刷程度，以及 CPIV 法之流場觀測。

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 CPIV 法影像處理流程與沖刷原理

2-1 CPIV 法影像處理流程

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), 茲說明如下:

2-1-1 數位影像擷取

彩色質點影像測速法(CPIV)之影像擷取係由多彩聲光調變(PCAOM)利用同步訊號控制器之功能, 將 ARGON 雷射之混合光束個別區分為藍色及綠色光束, 經由反射鏡射至光學玻璃圓柱形成一藍、綠間隔之光頁, 流體影像則經由 CCD 彩色攝影機之電子快門進行重複曝光, 而後擷取數位影像, 如圖 2-1 所示。

2-1-2 程式運算分析

影像經由程式初步前處理後, 如圖 2-2 所示。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 2-3 所示, 並且決定其影像質點位移量, 如圖 2-4 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 2-5 所示。

其中, 互相關函數法計算, 方程式為:

$$C_{ij}(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j)] \cdot [img(i-m, j-n)] \quad (2-1)$$

其中， $C_{ij}(m,n)$ 為摺合積分值，其最大值用以判定 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，因此將相關值予常態化。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

$$\overline{C}_{ij}(m,n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [imb(i,j) - \overline{imb}] [img(i-m, j-n) - \overline{img}]}{\sqrt{\sigma_1(i,j) \sigma_2(i,j)}} \quad (2-2)$$

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

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [img(i-m, j-n) - \overline{img}]^2 \quad (2-4)$$

$$\overline{imb} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N imb(i,j) \quad (2-5)$$

$$\overline{img} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N img(i-m, j-n) \quad (2-6)$$

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 方向之大小。

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 $\bar{C}_{ij}(m,n)$ 作設定，如 $\bar{C}_{ij}(m,n)$ 趨近於 1.0，則代表其質點之位移於質問窗中為高度相關，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，以精確算出位移量。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：

$$x = x_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) - \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0 - 1, y_0) + \log \bar{C}(x_0 + 1, y_0) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (2-7)$$

$$y = y_0 + \frac{\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) - \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1)}{2 \left[\log \bar{C}(x_0, y_0 - 1) + \log \bar{C}(x_0, y_0 + 1) - 2 \log \bar{C}(x_0, y_0) \right]} \quad (2-8)$$

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、不一致資料之去除

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 2-6 所示。因此，須將這些不一致之

速度向量值去除，如圖 2-7 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：

$$Vel = \frac{\sum_{i=1}^8 |v_i - v_0|}{\sum_{i=0}^8 |v_i|} \quad (2-9)$$

$$v_i(i, j) = \sqrt{u(i, j)^2 + v(i, j)^2} \quad (2-10)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^8 |\theta_i - \theta_0|}{\sum_{i=0}^8 |\theta_i|} \quad (2-11)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{v(i, j)}{u(i, j)} + 360^\circ \quad (2-12)$$

$$val(i, j) = \sqrt{Vel^2 + \theta_i^2} \quad (2-13)$$

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. 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，並將不一致速度向量去除。

2-2 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 綠色影像訊號質問窗與 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降來降低其誤差。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 2-8 所示。質問窗之位移平均值定義如下：

$$d_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (2-14)$$

其中， d_i 為質問窗之位移量；而 RMS 誤差(σ)定義為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2} \quad (2-15)$$

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)。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 2-9 所示。其公式如下：

$$d_b = d_m - d_a \quad (2-16)$$

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，計算結果如圖 2-10 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 0.0719、平均偏差量 (d_b) 約為 0.0058。

由圖 2-10 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。

2-3 沖刷原理

在地文演變、氣候影響及人工結構物影響下，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，形成迴水(backwater)效應，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，引發渦流與水流剪應力等現象，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。

橋墩沖刷屬於局部沖刷探討之類型，由於局部沖刷由於沖刷區域內泥砂入流量以及泥砂出流量的不平衡，以輸砂連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial V}{\partial t} = q_{s-out} - q_{s-in} \quad (2-17)$$

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、橋墩周圍局部沖刷流況

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，破壞底床泥砂原有平衡，在此局部沖刷發展過程，其流經橋墩周圍之水流結構如圖 2-11 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，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。

2-4 導流板區域流場

在渠道設置一沖擊角(angle of attack)之導流板情況下，水流將沿著導流板迎水面兩側流過，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，於導流板下游處產生一螺旋水流，如圖 2-12 所示。

螺旋水流之產生係因在導流板兩側之垂直向壓力梯度不同(迎水面壓力由下往上遞減，而背水面壓力則由下往上遞增)，使得在高壓側產生一向上之速度分量，而於低壓側形成一向下之速度分量，因而產生一作螺旋運動之渦流。而後漩渦(vortex)逐漸於導流後方滾動成長，於導流板邊壁端形成一較大之邊壁漩渦(tip vortex)後脫離導流板後，形成螺旋狀水流與尾跡渦流往下游移動，如圖 2-13 所示。而後於導流板下游處擾動，進而改變下游底床泥砂運動方向、底床剪應力以及下游底床型態。

第三章 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，取像大小為 2.5cm*2.0 cm，其佈置與光頁量測位置如圖 3-1、圖 3-2 所示。而在橋墩沖刷試驗可分為試驗條件、設備儀器與步驟等部分，茲分別說明如下：

3-1 CPIV 儀器系統

3-1-1 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 3-3 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 3-3 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管形成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面凸透鏡，其中一面全反射、一面半反射，把光線在反射鏡間來回反射，讓光源得到足夠的放大，使雷射光源不致衰退，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 3-4、圖 3-5 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變化而改變，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。

3-1-2 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，其功能主要控制 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 3-6 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 3-7 所示。透過降壓之方式，方可達到合適之訊號。
2. 示波器：其功能主要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。

3-1-3 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所組成，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，但此卡本身不具備任何記憶體，因此須電腦上之記憶體來搭配，且擷取之影像數目可儲存於電腦上之硬碟空間，適用於連續畫面之擷取。

3-2 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：

一、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，再射至光學玻璃管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 3-4，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。

二、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，在此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。

三、影像擷取

將顯影質點顆粒混合水注入循環水槽內，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，所擷取之影像為 1392*1040 畫素之彩色數位影像，其攝影機電子快門速度為 1/125(sec)。

3-3 沖刷試驗條件

3-3-1 試驗泥砂

在相同水流強度條件下，若床質之幾何標準偏差 σ_g 增加時，沖刷深度將隨著減少，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 3-8 所示。中值粒徑 $d_{50} = 0.42$ (mm)，均勻係

數 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.42$ ，曲率係數 $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \times D_{10})} = 0.93$ ，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 $G_s = 2.50$ 。

3-3-2 流量率定與試驗流速

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 3-9 所示。經迴歸分析得流量率定公式為 $Q = 0.0003x - 0.0003$ (m^3/s)， $R^2 = 0.987$ ，其中 x 為幫浦轉速(rpm)，由曲線方程式算得流量為 $0.0054 m^3/s$ 。其中，試驗區上游流速為 $0.27 m/s$ ，平均水深為 $5 cm$ ，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 3-10 所示。其中，泥砂啟動剪力流速可經由均值粒徑 Shields 圖求得 $V_{*c} = 0.017 m/s$ ，如圖 3-11 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(3-1) (Melville and Sutherland, 1988) 推得啟動流速 $V_c = 0.276 m/s$ ，水流流速與泥砂啟動流速比值為 $V/V_c = 0.978$ 。

$$\frac{V_c}{V_{*c}} = 5.75 \times \log \left[5.53 \times \left(\frac{h}{d_{50}} \right) \right] \quad (3-1)$$

3-3-3 沖刷時間

本試驗於進行導流板工法前，以橋墩局部沖刷隨時間變化作為沖刷時間試驗，如圖 3-12 所示。由沖刷深度隨時間關係圖可發現，連

續沖刷 3 小時橋墩局部沖刷深度可達到 24 小時沖刷深度的 89.2%，已能充分展現橋墩局部沖刷程度，故本試驗採用連續 3 小時為沖刷試驗時間。

3-3-4 橋墩沖刷試驗設備

1. 試驗水槽：水槽為一循環水路系統，水槽模型佈置如圖 3-13、圖 3-14 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，將懸浮於水中之砂粒沉降於此，於試驗結束時再循環使用，試驗渠槽雷射光照射另一面以黑色壁紙覆蓋為背景，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 公分、高 18 公分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. 導流板模型：為長 2 公分、厚 2mm 之透明壓克力材質板。
4. 整流器：利用吸管集成之整流裝置。
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. 水尺計：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，使取像鏡頭定位及避免人為因素導致鏡頭產生偏移，如圖 3-15 所示。
8. 其他：馬錶、捲尺、美工刀、量角器、砂橡膠等。

3-4 試驗步驟

1. 將橋墩與導流板模型佈置於試驗位置並固定之，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. 在水槽內慢慢加水至所需深度，啟動抽水馬達，調整轉速至所需流量。
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. 於停水待水退後，量測沖刷坑附近地形。
6. 變更導流板佈置，重複上述 1~5 之步驟。



第四章 試驗結果分析

本章將進行不同導流板佈置之沖刷試驗研究，所量測之底床地形圖、沖刷深度減少率，配合 CPIV 法分析之影像作一比對，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，渦度值越大代表梯度總合越大，其速度變化也越劇烈。

4-1 導流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，分別為流體性質、水力特性、底床質特性與幾何特性。流體性質包括：流體密度(ρ)、流體動力黏滯係數(μ)、重力加速度(g)；水力特性包括：水流上游流速(v)、水流上游水深(h)；底床質特性包括：試驗砂密度(ρ_s)、試驗砂中值粒徑(d_{50})、試驗砂幾何標準偏差(σ_g)；幾何特性包括：渠道寬度(B)、底床坡度(s)、導流板攻角(θ)、導流版開口(S)、導流板前緣與橋鼻端間距(L)、導流板長度(V_l)、導流板入水深度(V_h)、橋墩墩徑(D)。將上述影響因子利用白金漢定理知橋墩局部沖刷深度 d_{sp} 如下函數式：

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

選取 ρ 、 v 、 D 為重複參數，將(4-1)式無因次化如下：

$$\frac{d_{sp}}{D} = f\left(\frac{h}{D}, \frac{\mu}{\rho v D}, \frac{v^2}{g D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{D}, \sigma_g, \frac{B}{D}, s, \theta, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}, \frac{V_l}{D}, \frac{V_h}{D}\right) \quad (4-2)$$

由於渠道寬度 B 、底床坡度(s)、導流板長度(V_l)、導流板入水深度(V_h)與橋墩墩徑(D)均為定值，且試驗於常溫、相同上游流況及底床質特性下，故 $\frac{h}{D}$ 、 $\frac{\mu}{\rho v D}$ 、 $\frac{v^2}{g D}$ 、 $\frac{\rho_s}{\rho}$ 、 $\frac{d_{50}}{D}$ 、 σ_g 、 $\frac{B}{D}$ 、 s 、 $\frac{V_l}{D}$ 、 $\frac{V_h}{D}$ 可視為定值，因此(4-2)

式可簡化為：

$$\frac{d_{sp}}{D} = f\left(\theta, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}\right) \quad (4-3)$$

依據上述因次分析結果，影響橋墩沖刷深度為導流板攻角、導流板開口大小及導流板前緣與橋鼻端之間距。因此，以此三項參數進行不同試驗案例之設計，並比較各案例橋墩及導流板最大沖刷深度，試驗案例與結果如表 4-1 所示。其中，案例 1 為單一橋墩沖刷試驗佈置，案例 2 至案例 6 為變更間距佈置，案例 7 至案例 11 為變更開口佈置，而案例 12 至案例 16 則為變更攻角佈置。此外，亦將各案例中導流板攻角、開口大小、前緣與橋鼻端之間距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 4-2 所示。

4-2 單一橋墩沖刷探討

在案例 1 的試驗中，由於橋墩阻礙水流、造成斷面束縮，使橋墩兩側水流流速加快，加上橋墩柱體前停滯點之壓力梯度效應，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底床進行淘刷，產生局部沖刷現象，於橋墩週遭形成一明顯沖刷坑，其型態大致為左右對稱，如圖 4-10 所示。而於橋墩沖刷坑發展過程中，當沖擊水流流經橋墩後，沖刷坑開始於橋墩兩側發展，且迅速由橋墩周圍往上游處淘刷，在墩鼻端處產生最大沖刷深度，且泥砂顆粒因向下射流與馬蹄形渦流的螺旋運動干擾，部份流出沖刷坑傳遞至下游處，或沿橋墩周圍繞至橋墩背面呈淤積狀態。

在沖刷過程中，墩鼻端處由於通水斷面積隨著沖刷坑體積的增大，連帶使沖刷坑局部水流流速漸緩，減少向下射流與馬蹄形渦流的強度。待達到水流沖刷平衡時，沖刷坑內仍有些許泥砂顆粒於坑面上擺動，但不至於被水流運移至沖刷坑外，使沖刷坑深度不再產生變化。而於橋墩後方，懸浮載被渦流機制運移到墩後的尾跡區時，由於水流的挾砂能力降低，而造成墩後之淤積，此時尾跡渦流使泥沙顆粒

於該區域不斷打轉，同時底床開始無明顯變化，至此橋墩周遭局部沖刷之型態大致底定。另外，由圖 4-12~圖 4-14 亦可發現，愈接近墩鼻端下方處，速度向量向下行進方向與強度則愈明顯，顯示向下射流於墩鼻端處發展達到最大強度，同時於墩鼻端與近沖刷坑區域亦有較大之渦度分佈。

4-3 導流板佈置探討

本試驗於導流板佈置方面，分別採五種不同間距、攻角及開口，藉由三種影響因子逐一討論，並將墩鼻端沖刷深度與導流板最大沖刷深度無因次化加以比較，另配合底床高程、橋墩中心縱剖面、速度向量與渦度場圖，作為導流板最佳化佈置之探討，共有案例 2 至案例 16，期望透過最佳化導流板設置方式，達到減少橋墩沖刷之效用。

4-3-1 間距佈置探討

在導流板間距佈置方面，間距 L 定義為導流板前端與墩鼻端迎水面之距離(見圖 3-14)，案例佈置分別為案例 2、3、4、5 與案例 6，且採用固定攻角 30 度、導流板前端開口 1 公分，改變間距之佈置方式，試驗比較結果如圖 4-1、圖 4-2 與圖 4-3 所示。由比較圖得知，隨著間距與墩徑比 L/D 的增大，墩鼻端的沖刷深度有增加的趨勢，且沖刷減少率逐漸遞減，於 L/D 為 7 時達到最大沖刷深度。而由橋墩中心縱剖面圖可發現，間距的增大對於導流板後端所形成之底床淤積，有明顯抬升的現象，並於墩鼻端之沖刷深度也逐漸加大。在渠道底床方面，案例 2 至案例 6 的沖刷與流場分布圖亦有相同之現象(圖 4-15~圖 4-39)。在底床高程圖可明確觀察出，隨間距的拉長，導流板區域產生之沖刷坑亦逐漸遠離橋墩佈置區，但保護沖刷程度也隨之削減。而由速度向量、渦度場圖可觀察到，於間距佈置拉大至 10 公分後，靠近橋鼻端之向下射流有明顯增強的趨勢，且整體渦度場區域也隨之

增大，其近沖刷坑底床處亦有較大之渦度分佈。

由觀察試驗結果可發現，隨著導流板佈置距離的拉長，使通過導流板開口水流的強度發展段增加，且下方底床的抬升使通水斷面積漸減，導致通過此區域的流速加快，使導流板後方產生之螺旋水流與尾跡渦流抑制效用降低，導致墩鼻端沖刷程度的增長。在導流板沖刷程度方面，由於導流板佈置角度與開口影響因子並無改變，且位於佈置區域的上游端位置，因此受到此區域流場改變的影響較不明顯。由導流板間距佈置結果可得知，對墩鼻端沖刷減少率之最大值與最小值相差約為 35 %，其適合之間距因子以間距 6 公分為較佳佈置，即間距與墩徑比 L/D 為 3 時能有較佳保護效果。

4-3-2 開口佈置探討

在導流板開口佈置試驗中， S 定義為導流板前端之開口大小(見圖 3-14)，案例佈置分別為案例 7、8、9、10 與案例 11，而經由間距佈置探討得知，間距與墩徑比 L/D 為 3 時為較佳之佈置方式，因此對於導流板開口佈置之探討，為固定攻角 30 度、間距 6 公分、改變開口大小作為佈置方式，試驗結果如圖 4-4、圖 4-5 與圖 4-6 所示。當開口大小在閉合時(即開口為 0 公分)，由其沖刷量可知為非最佳之保護效果，而是以開口 1 公分之佈置方案較佳。在開口 1 公分佈置後，隨著開口與墩徑比 S/D 的增大，墩鼻端的沖刷深度也隨之增加，沖刷減少率亦逐漸遞減，最後於 S/D 為 2 時達到最大沖刷深度。由橋墩中心縱剖面圖可發現，導流板開口閉合時於導流板後方底床處有明顯之淤積，不過在遠離導流板區域後，接近墩鼻端區域時其底床高程隨即遞減。而在其他佈置方面，隨著開口的增大其底床於墩鼻端之沖刷深度也逐漸加大。而於渠道底床方面，案例 7 至案例 11 的沖刷與流場分布圖也有相同之現象(圖 4-40~圖 4-64)。於底床高程圖可明確觀察出，

在導流板開口閉合時，於導流板尾端後方各形成一較大之沖刷坑，而在開口 1 至 4 公分佈置時，其導流板週遭之沖刷坑隨著開口的增大而有向渠道外側發展的趨勢，且墩鼻端的沖刷程度也隨之增加。另外，由各案例之速度向量、渦度場圖可觀察到，開口增大至 3 公分後，於墩鼻端之向下射流明顯增強，且在開口 4 公分時此一趨勢更為明顯，另在渦度場方面，於開口 2 公分後有較強烈之渦度分佈，近沖刷坑底床處亦有較大之渦度值分佈，但整體渦度場分佈仍以開口 3、4 公分之案例較為強烈。

整體而言，在導流板開口閉合時，其沖擊水流於導流板區域受到完全的阻擋，雖使導流板後側受到保護作用，但水流此時只經由導流板順水端而過，而無受到導流板背水端的二次導流作用，因此形成單純束縮沖刷流況，使流經導流板區域後之水流流速迅速加快，於導流板尾端後方形成較大之沖刷坑，且由於導流板前端直接抵擋上游之沖擊水流，因而使導流板前端之沖刷範圍擴大，進而影響導流之作用。而在開口逐漸加大之後，因流經導流板開口水流流量的增加，導致橋墩迎水面所承受之沖擊水流能量亦隨之遞增，且導流後方形成之螺旋水流與尾跡渦流，其擾動範圍因逐漸遠離馬蹄形渦流產生之區域，而無法於沖刷坑區域內，對此沖刷機制形成抑制，至開口 4 公分時導流板幾乎沒有發揮保護橋墩的作用。此外，在導流板沖刷方面，由於開口的增大，導致單一導流板承受之水流沖擊負擔增加，因此於導流板迎水面的沖刷程度亦有遞增之現象。由導流板開口佈置可得知，對墩鼻端沖刷減少率之最大值與最小值相差約為 30%，且較適合開口因子以開口 1 公分為較佳佈置，即在開口與墩徑比 S/D 為 0.5 時有較佳保護效果。

4-3-3 攻角佈置探討

在導流板攻角佈置試驗中， θ 定義為導流板攻角大小(見圖 3-14)，案例佈置分別為案例 12、13、14、15 與案例 16，而經由間距與開口佈置探討得知，間距與墩徑比 L/D 為 3、開口與墩徑比 S/D 為 0.5 時為較佳之佈置方式，因此對於導流板攻角佈置之探討，為固定間距 6 公分、開口 1 公分、改變攻角大小作為佈置方式，試驗比較結果如圖 4-7、圖 4-8 與圖 4-9 所示。由比較圖得知，隨著導流板攻角 θ 的增大，在墩鼻端的沖刷深度亦有增加的趨勢，於 θ 為 75 度時達到最大沖刷深度。由橋墩中心縱剖面圖可發現，攻角的增加對於導流板週遭及其後方之底床高程，有明顯下降之趨勢，於墩鼻端之沖刷深度亦逐漸加大。而由案例 12 至案例 16 之沖刷與流場分布圖也可觀察到相同的現象(圖 4-65~圖 4-89)。於底床高程圖明顯呈現出，隨著導流板攻角的增大，在導流板週遭所形成之沖刷坑區域有增加的趨勢，且於攻角 75 度時，沖刷坑深度與影響範圍最廣，其範圍甚至直接影響至橋鼻端的沖刷區域。在速度向量、渦度場圖方面，整體速度場之向下水流以攻角 60、75 度較為明顯，另在渦度場區域分佈亦隨攻角加大而遞增，至攻角 45 度過後開始出現較大之渦度值分佈，以整體渦度場而言，仍以攻角 75 度佈置較為強烈。

對於攻角佈置方案，導流板隨攻角的加大、增加阻水面積，且流經之水流，其水流流向逐漸朝向渠道左右兩側沖擊，加上受到渠道之左右通水斷面積的束縮效應，而使導流板與橋鼻端之間區域流況擾動較為劇烈，雖導流板仍有導流與降低墩鼻端沖擊水流之作用，但導流板後方之螺旋水流與尾跡渦流亦隨著攻角的增大，使其行進方向偏向下游之左右兩側，而無法對向下水流與馬蹄形渦流系統執行有效之抑制，因此於攻角 75 度時，已幾乎無產生保護橋墩沖刷之功能，且在

攻角 75 度時於導流板週遭形成之沖刷坑範圍與深度亦於所有案例中最為劇烈。而由導流板攻角佈置結果可知，對墩鼻端沖刷減少率之最大值與最小值相差約為 46%，而適合之攻角因子以攻角 15 度為較佳佈置，且此佈置方式為所有案例中保護橋墩沖刷程度之最佳佈置方式。

4-4 綜合討論

本研究主要針對導流板三種影響因子，作為對應橋墩沖刷保護進行探討，綜合以上之分析探討，得知若能對導流板之佈置方式作適當之設計，將可有效減少橋墩沖刷之程度。但於探討沖刷程度方面，若單以橋墩最大沖刷程度作為討論，往往會忽略橋墩於渠道週遭的局部沖刷型態，因此，本研究另配合橋墩中心縱剖面、渠道底床量測與流場分佈圖進行比對探討。

在導流板間距 6 公分、開口 1 公分與攻角 15 度的案例佈置情況下，為導流板保護橋墩沖刷程度之最適當佈置方式，於墩鼻端沖刷減少率可達到 54.1%，且導流板受水流之沖刷程度亦最小，在流場分佈圖中，其速度向量與渦度分佈影響均較為輕微，最後與單一橋墩沖刷結果以底床量測圖比較，於橋墩局部沖刷亦可得到明顯之保護效果。由此可知於相同流況下，藉由導流板在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利用導流板尾端產生之螺旋水流與尾跡渦流，可有效抑制造成橋墩局部沖刷的主要沖刷機制(如向下射流、馬蹄形渦流)，且經由導流板後方產生之泥砂淤積，補注墩鼻端沖刷坑區域之泥砂沖刷，同時能減少沖刷坑之沖刷深度與沖刷範圍。此外，為了解導流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，因此將試驗案例之間距因子($\frac{L}{D}$)、開口因子($\frac{S}{D}$)、攻

角因子(θ)以及墩鼻端沖刷程度之因子($\frac{d_{sp}}{D}$)，經迴歸分析後作進一步探討($\theta=15^\circ\sim 75^\circ$ 、 $S=1\sim 4\text{cm}$ 、 $L=6\sim 14\text{cm}$ 、 $D=2\text{cm}$)，其關係式如下：

$$\frac{d_{sp}}{D} = 0.013\theta + 0.5\frac{S}{D} + 0.146\frac{L}{D} - 0.074, \quad (R^2 = 96.4\%) \quad (4-4)$$



第五章 結論與建議

本研究於試驗水槽中(見圖 3-14)，改變導流板佈置方式(間距、開口與攻角)，以量測沖刷試驗後之底床高程，配合彩色值點影像測速法(CPIV 法)，擷取分析之流場分佈圖，針對橋墩沖刷保護程度加以探討，綜合試驗結果，獲致如下結論與建議：

5-1 結論

1. 本研究將導流板(長 2cm、厚 2mm)於橋墩(墩徑 2cm)上游進行對稱佈置，於固定流量($0.0054 \text{ m}^3/\text{s}$)、流速(0.27 m/s)與水深(5 cm)進行橋墩沖刷保護之試驗，而在沖刷試驗量測結果與流場分佈圖比對得知，佈間距置為 6 公分、即接近橋墩較佳、愈遠則保護效果隨之遞減，開口佈置以 1 公分開口大小為最佳、開口愈大則保護效果較差，在攻角佈置方面以 15 度為最佳佈置、其沖刷保護作用則隨攻角的增大而遞減。
2. 在本試驗探討的三種影響因子中，於固定流量與均勻床質粒徑 $d_{50} = 0.42\text{mm}$ 之試驗條件下，得知保護效率與導流板之佈置方式有密切之關係，其中又以改變攻角之佈置，所造成之影響差異較為明顯，對墩鼻端沖刷減少率之最大值與最小值相差約為 46%。經由比較案例得知，其導流板間距為 6 公分、開口大小為 1 公分以及攻角佈置為 15 度時，為導流板於橋墩保護之最佳化佈置，對墩鼻端最大沖刷深度減少率可達到 54.1%。
3. 在開口大小在閉合時，並非最佳佈置之案例，主要原因為沖擊水流於導流板區域受到完全的阻擋，水流此時只經由導流板順水端而過，而無受到導流板背水端的二次導流作用，因此使流經導流板區域後之水流流速加快，加上導流板前端直接抵擋上游之衝擊水流，因而使導流板前端之沖刷範圍擴大，進而影響其導流之作

用。

4. 在 CPIV 流場觀測方面，隨著墩鼻端沖刷程度加劇，靠近墩鼻端邊壁以及近沖刷坑底床處區域之速度向量，其向下射流亦明顯增強，而整體渦度分佈也較為劇烈，於接近沖刷坑底床處亦有較大之渦度值分佈。
5. 經由導流板之適當設計，藉由導流板於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之螺旋水流與尾跡渦流，可有效抑制造成橋墩局部沖刷的沖刷機制，且經由導流板後方產生之泥砂淤積，補注墩鼻端沖刷坑區域之泥砂沖刷，將能提供橋墩沖刷保護之良好效果。
6. 針對試驗案例之結果，以間距因子($\frac{L}{D}$)、開口因子($\frac{S}{D}$)與攻角因子(θ)之間互相影響參數的權重，對應墩鼻端沖刷程度因子($\frac{d_{sp}}{D}$)之相關性，經迴歸分析後作進一步探討($\theta=15^\circ\sim 75^\circ$ 、 $S=1\sim 4\text{cm}$ 、 $L=6\sim 14\text{cm}$ 、 $D=2\text{cm}$)，其關係式為：

$$\frac{d_{sp}}{D} = 0.013\theta + 0.5\frac{S}{D} + 0.146\frac{L}{D} - 0.074, (R^2=96.4\%)$$

5-2 建議

1. 本研究中採用之導流板與橋墩模型均為單一尺寸形式，且入水深度均與試驗水深相同，建議將來可改變導流板長度尺寸或橋墩類型，研究其他試驗佈置方式(例潛沒式導流板、橢圓形橋墩模型配置)，對沖刷結果與流場影響之差異性。
2. 本研究於試驗中為觀察較明顯之沖刷深度，係以清水沖刷作為試驗條件，將來可考慮濁水沖刷之試驗條件，對於導流板於施作現場之效用可有進一步的了解。
3. 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，以呈現流場之三維流況變化。
4. 本研究以定量流流況為試驗條件，建議將來可考慮變量流之流況，以符合現地河川之流況。



參考文獻

1. Adrian, R. J. (1991), "Particle image techniques for experimental fluid mechanics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.
2. Barkdoll, B.D. (1999). "Experiment investigation of flow past submerged vanes." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, Vol 124, No. 5, 896-899.
3. Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. (1991). "Scouring." *Hydraulic Structures Design Manual*, 51-99.
4. Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, Vol.116, No.10, 1197-1214.
5. Fincham, A.M. and Spedding, G.R. (1997). "Low cost high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow." *Experiments in Fluids*, 23, 449-462.
6. 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.
7. Gill, M.A. (1981). "Bed erosion in rectangular long contraction." *J. Hydr. Division, ASCE*, Vol. 107(HY3), 273-294.
8. Huang, H., Dabiri, D., and Gharib, M. (1997). "On error of digital particle image velocimetry." *Meas. Sci. Technol.*, 8, 1427-1440.
9. Keane, R. D. and Adrian, R. J. (1990), "Optimization of particle image velocimeters, Part I: Double pulsed systems", *Mease. Sci. Technol.* 1, 1202-1215.
10. Liang, D. F. and Jiang, C.B. (2002), "A combination correlation-based interrogation and tracking algorithm for digital PIV evaluation",

- Experiments in Fluids, 33, 684-695.
11. Marelius, F. and Sinha, S.K. (1998). "Experimental investigation of flow past submerged vanes." J. Hydraulic Engrg. , ASCE, Vol.124, No. 5, 542-545.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Melville, B.W. (1997). "Pier and abutment scour: integrated approach." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol.123, No.2, 125-136.
 15. 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.
 16. Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). "Bridge Scour." Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, USA.
 17. Nogueira, J., Lecuona, A., and Rodriguez, P.A. (1997). "Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data." Meas. Science and Technology, 8, 1493-1501.
 18. Odgaard, A.J. and Mosconi, C.E. (1987). "Streambank protection by submerged vanes." J. Hydraulic Engrg., ASCE, 113(4), 520-536.
 19. 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.
 20. Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1990). "Sediment control in bridge water ways." IIHR Report No.336, Univ. of Iowa.

21. Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991). "Sediment management with submerged vanes. I: Theory." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, 117(3), 267-283.
22. Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1991). "Sediment management with submerged vanes. II: Application." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, 117(3), 284-302.
23. Parola, A.C. Mahavadi, S.K., Brown, B.M., and El Khoury, A. (1996). "Effects of rectangular foundation geometry on local pier scour." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, Vol.122, No.1, 35-40.
24. 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.
25. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, Vol.111, No.4, 713-731.
26. Raudkivi, A.J. (1986). "Functional trends of scour at bridge piers." *J. Hydraulic Engrg., ASCE*, Vol.112, No.1, 1-13.
27. Tan, S.K. (2005). "Flow structure and sediment motion around submerged vanes in open channel." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131, No. 3, p132-136.
28. Westerweel, J. (1994), "Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data", *Experiment in Fluids*, 16, 236-247.
29. Westerweel, J., Draad, A., Hoeven, J., and Oord, J. (1996), "Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry", *Exp. Fluids*, 20, 165-177.
30. Willert, C. E. and Gharib, M. (1991), "Digital particle image velocimetry", *Exp. Fluids*, 10, 181-193.

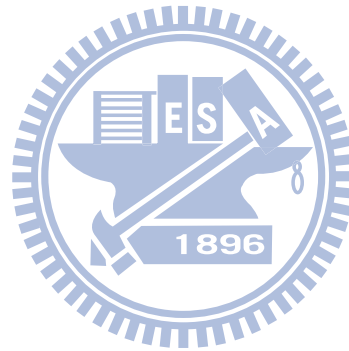
31. Yanmaz, A.M. and Attinbilek, H.D. (1991). "Study of time-dependent local scour around bridge piers." J. Hydraulic Engrg., ASCE, Vol.117, No.10, 1247-1268.
32. 周憲德等 (2001), "橋台及橋墩沖刷防治工法之探討(二)", 交通部委託研究計畫。
33. 郭丁元 (1994), "表層隔板對橋墩沖刷保護之研究", 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
34. 程仕帆 (2003), "套環保護工法對減少橋墩局部沖刷之研究", 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
35. 楊昇學 (2002), "彩色值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。
36. 盧志光、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, N 37-N 41。
37. 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。

表 4-1 案例佈置條件與結果

案例	間距 L (cm)	開口 S (cm)	攻角(θ)	墩鼻端沖刷深度 dsp (cm)	導流板最大沖刷深度 dsv _{max} (cm)	墩鼻端沖刷深度減少率(%)
1	no vane	no vane	no vane	3.7	no vane	0.00
2	6	1	30	2.0	3.0	46.0
3	8	1	30	2.3	3.0	37.8
4	10	1	30	2.6	3.2	29.7
5	12	1	30	2.8	3.2	24.3
6	14	1	30	3.3	3.2	10.8
7	6	0	30	2.4	3.2	35.1
8	6	1	30	2.0	3.0	46.0
9	6	2	30	2.7	3.3	27.0
10	6	3	30	3.0	3.4	18.9
11	6	4	30	3.5	3.6	5.4
12	6	1	15	1.7	2.4	54.1
13	6	1	30	2.0	3.0	46.0
14	6	1	45	2.5	3.5	32.4
15	6	1	60	2.6	4.0	29.7
16	6	1	75	3.4	4.5	8.1

表 4-2 案例佈置無因次參數對應墩鼻端沖刷深度迴歸分析係數表

參數	θ	S/D	L/D	R-Sq
係數	0.013	0.5	0.146	0.964



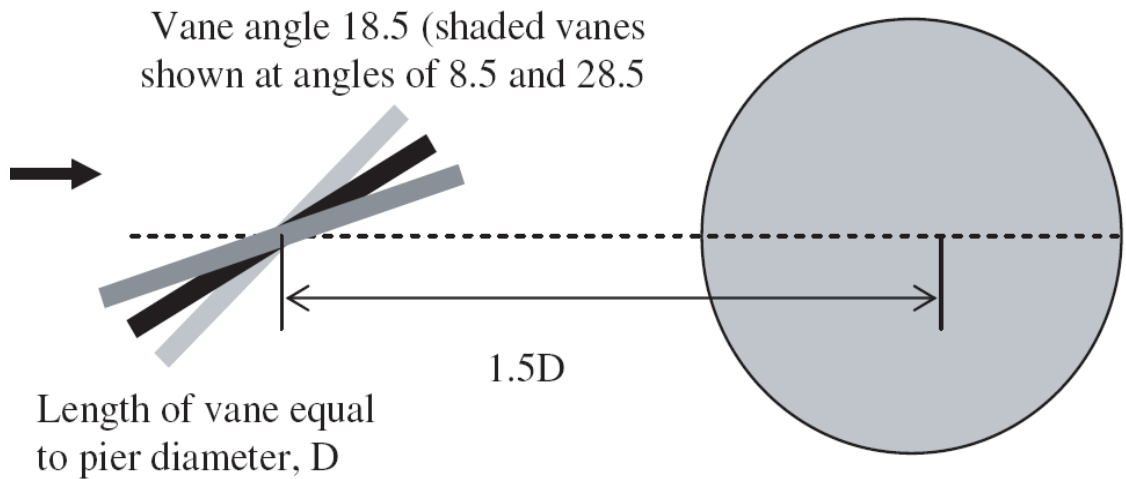


圖 1-1 Ghorbani and Kells 單導流板佈置圖
(Ghorbani and Kells , 2008)

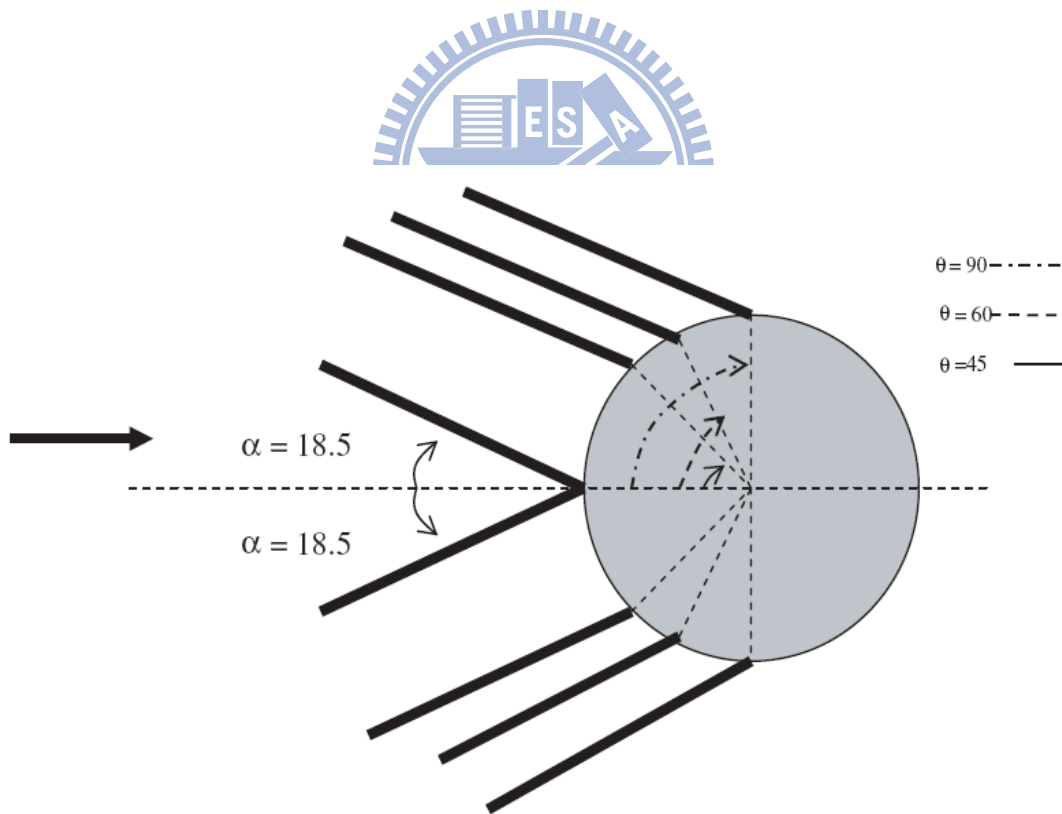


圖 1-2 Ghorbani and Kells 雙導流板佈置圖
(Ghorbani and Kells , 2008)

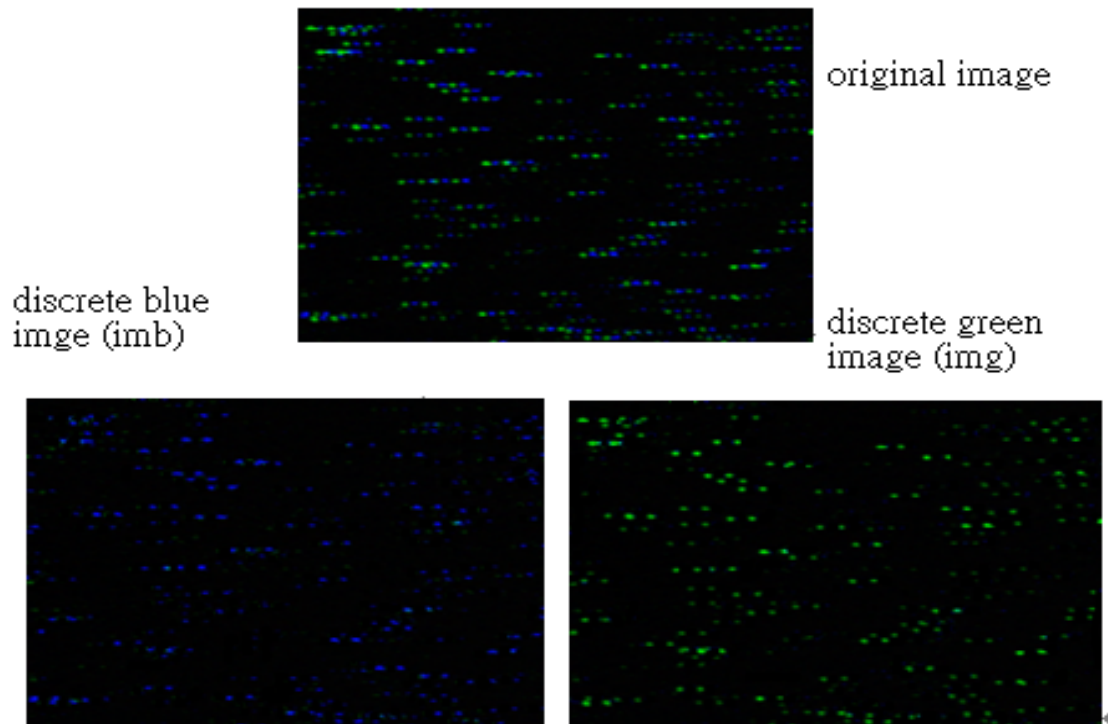


圖 2-1 原始影像擷取圖

(上圖為原圖，左下為分離之藍色影像圖檔，右下為綠色影像圖檔)

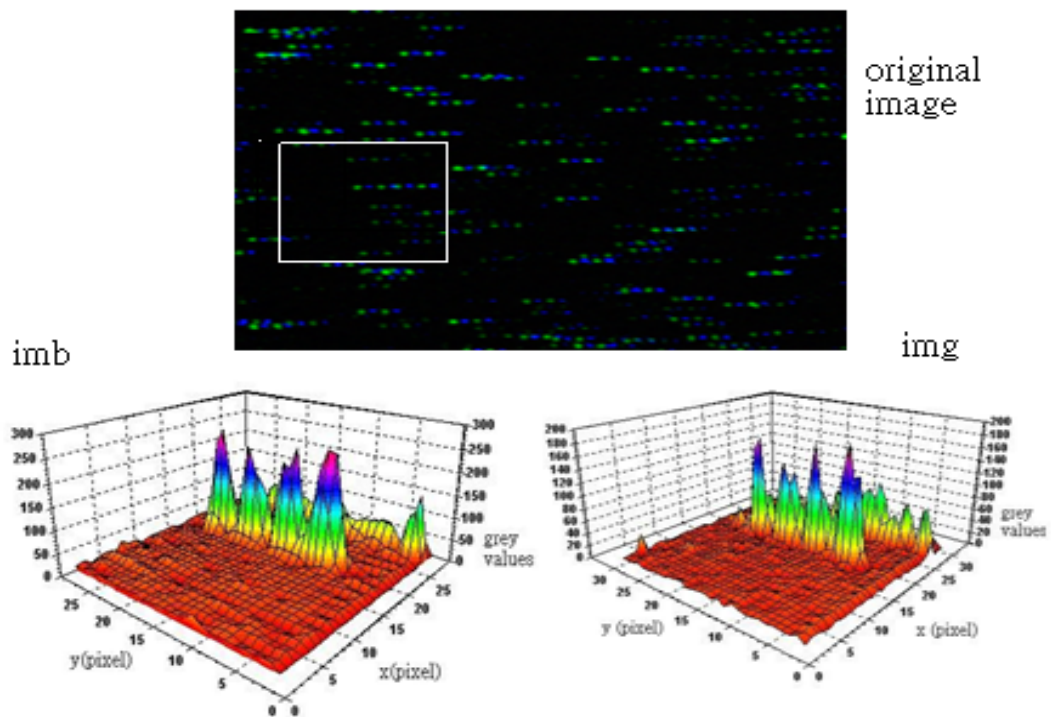


圖 2-2 藍、綠影像亮度分佈示意圖

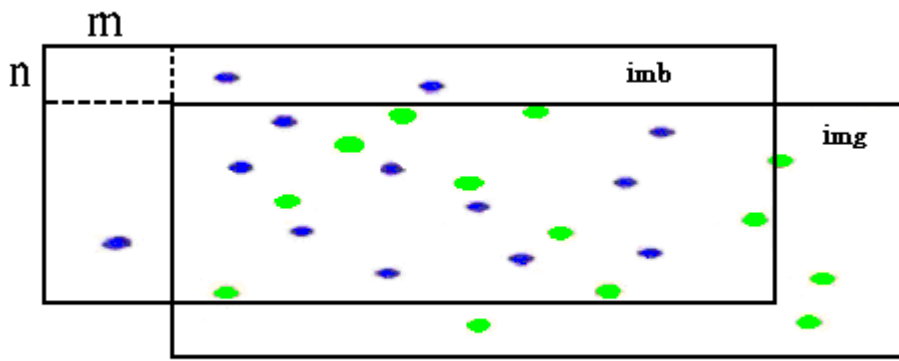


圖 2-3 imb、img 比對方式

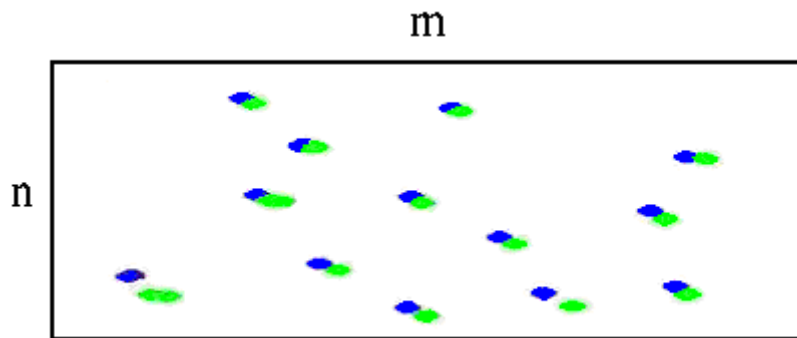


圖 2-4 將綠色點位移(m,n)後與藍色點重疊(matching)情況

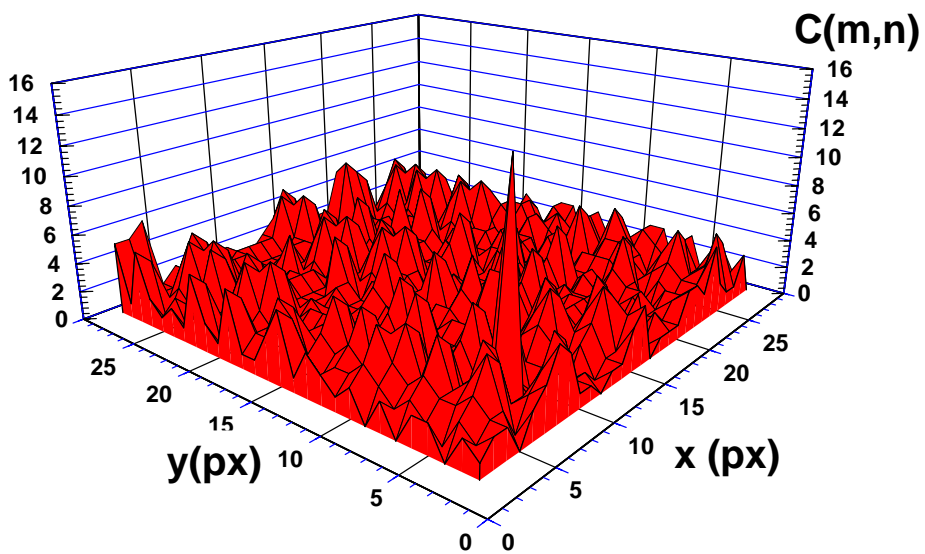


圖 2-5 互相關計算所得之 $C(m,n)$ 分佈示意圖

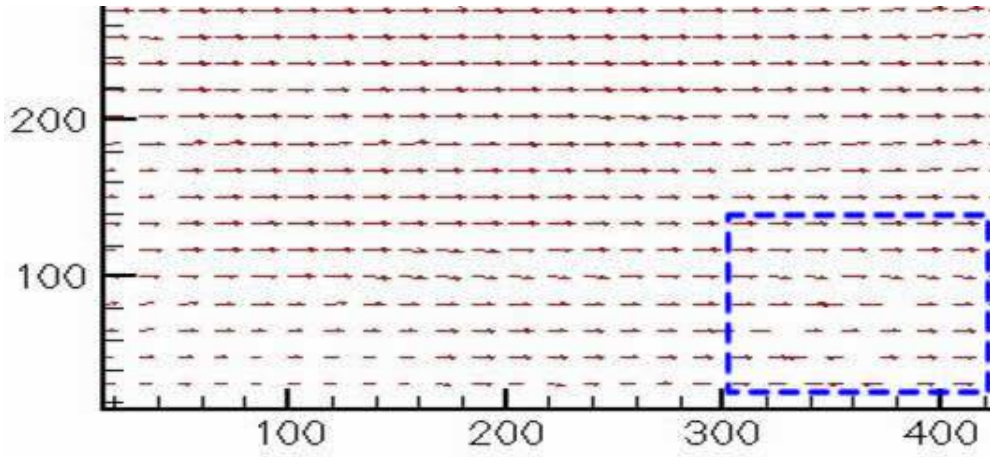


圖 2-6 不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

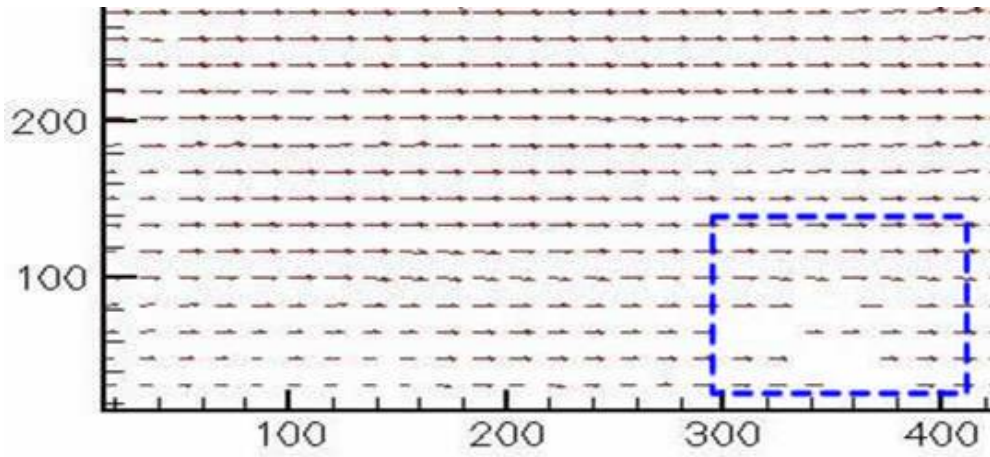


圖 2-7 去除不一致流速向量圖(右下角虛線框處)

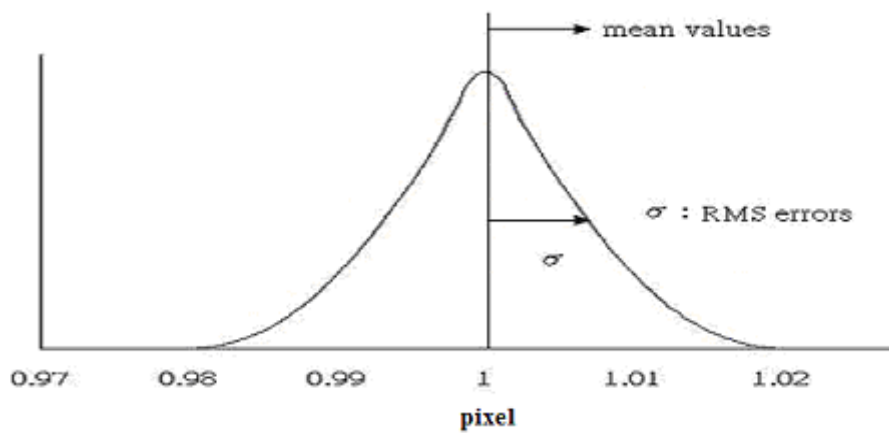


圖 2-8 RMS 誤差之示意圖

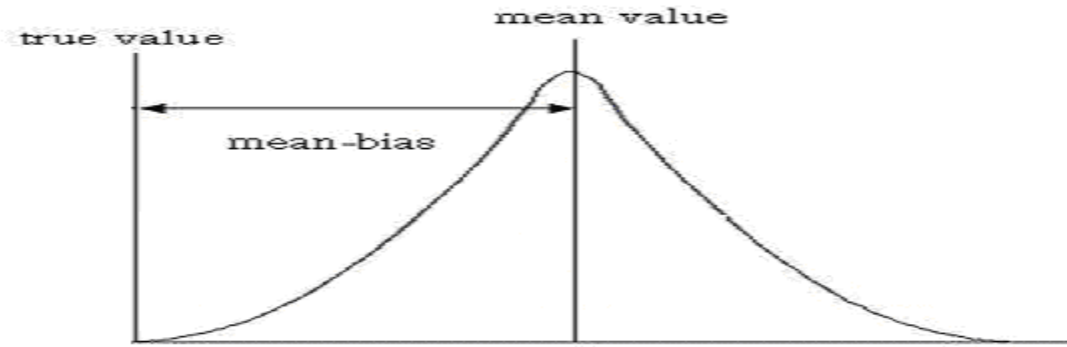


圖 2-9 偏差誤差之示意圖

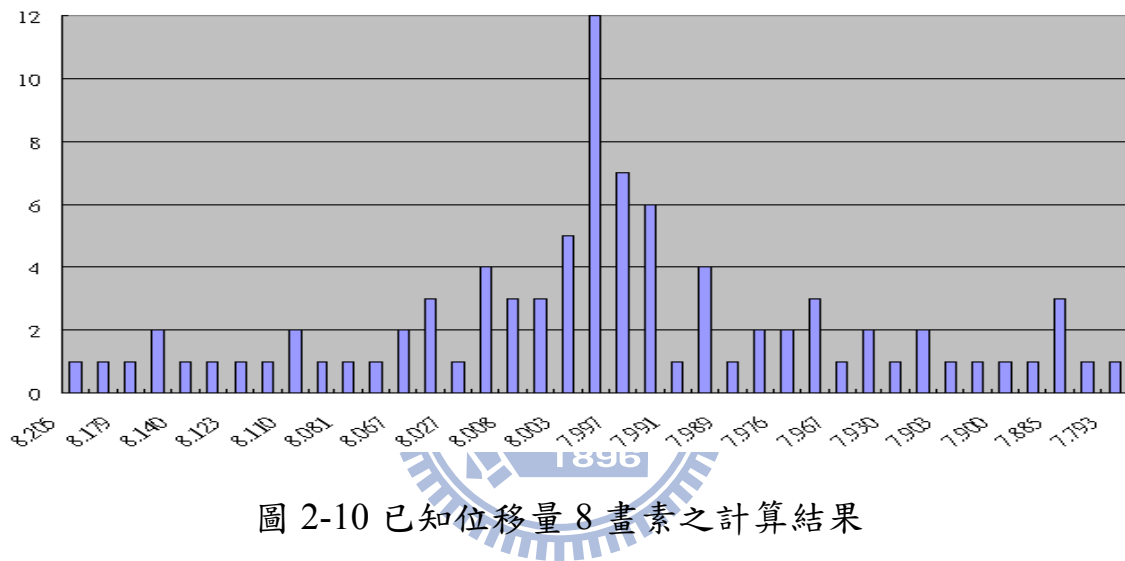


圖 2-10 已知位移量 8 畫素之計算結果

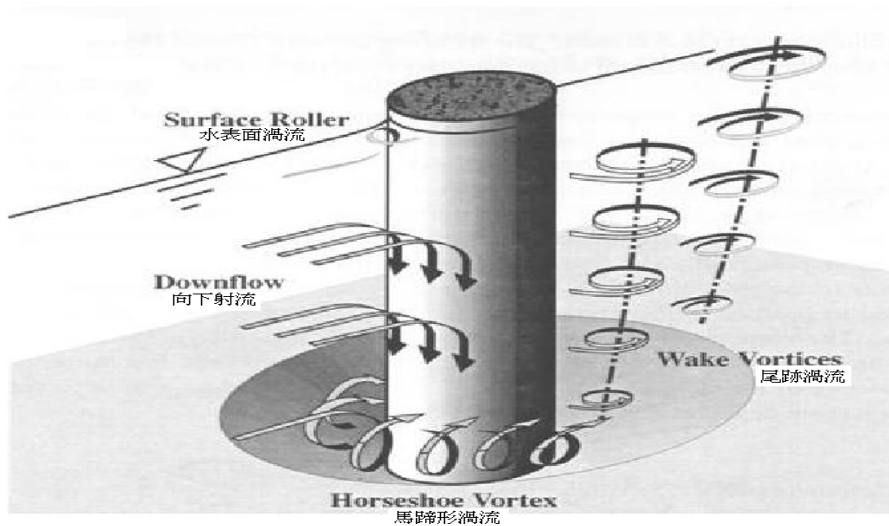


圖 2-11 橋墩局部沖刷水流結構示意圖

(Melville and Coleman, 2000)

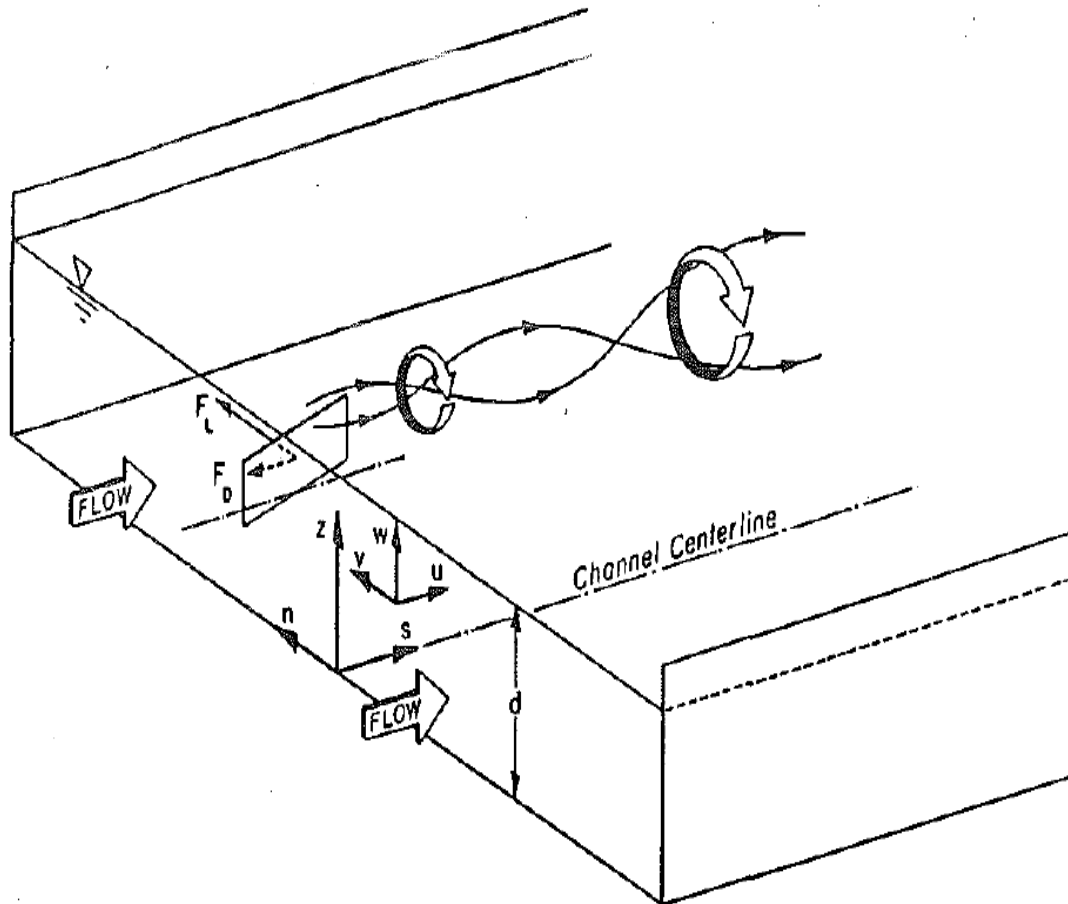


圖 2-12 導流板設置後產生尾跡漩渦及螺旋水流示意圖

(Odgaard & Wang, 1991)

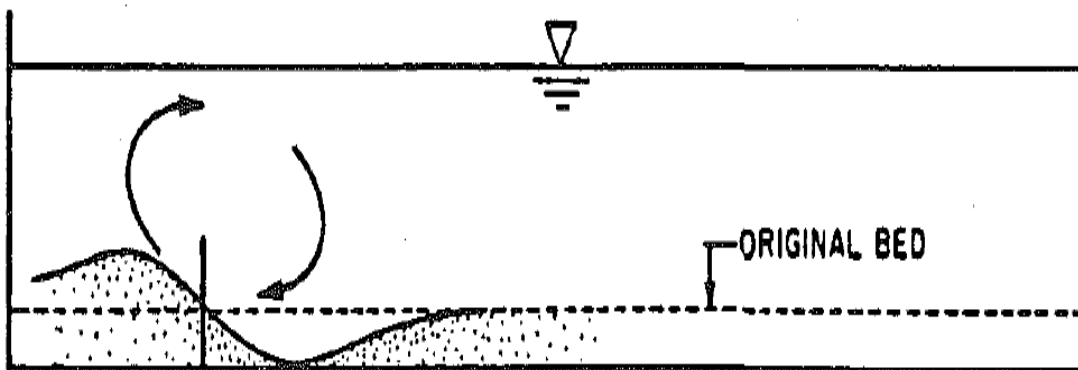


圖 2-13 導流板產生尾跡渦流影響底床變化示意圖

(Odgaard & Wang, 1991)



圖 3-1 C-PIV 儀器架設圖

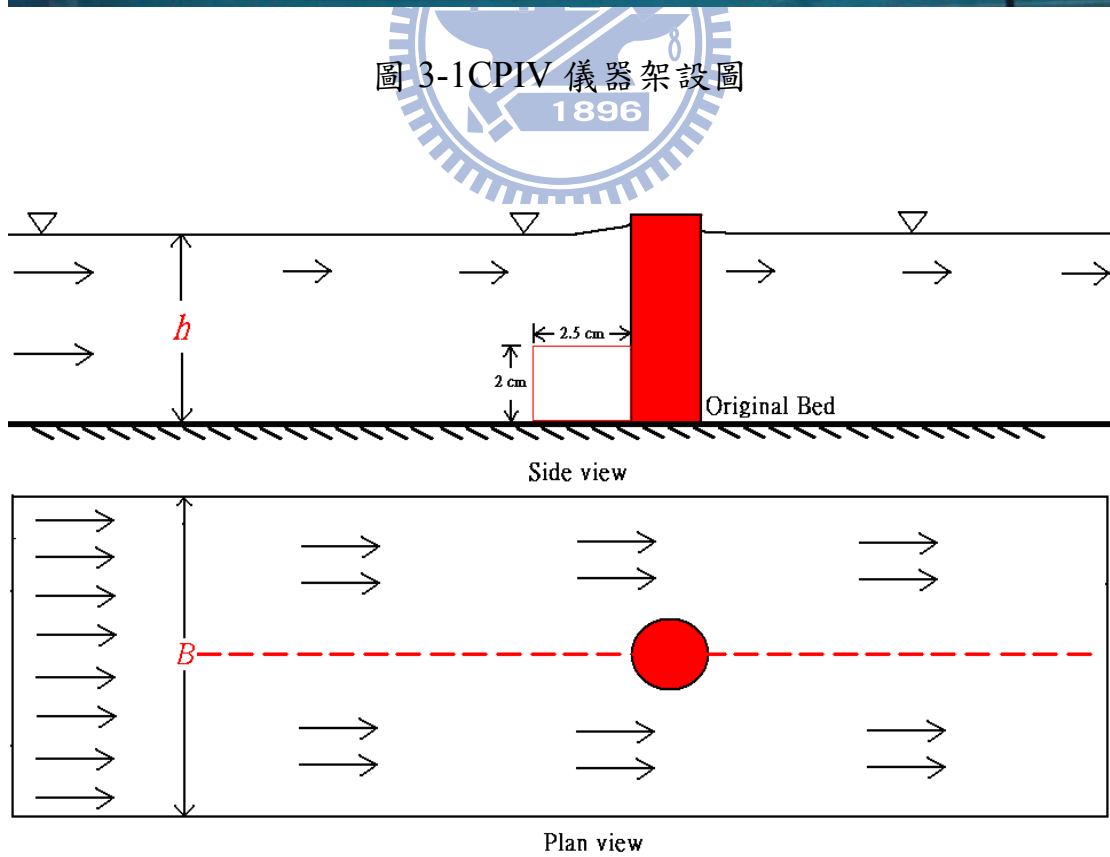


圖 3-2 雷射光頁照射與影像擷取位置示意圖



圖 3-3 Argon 雷射



圖 3-4 多彩聲光調變器 (PCAOM)

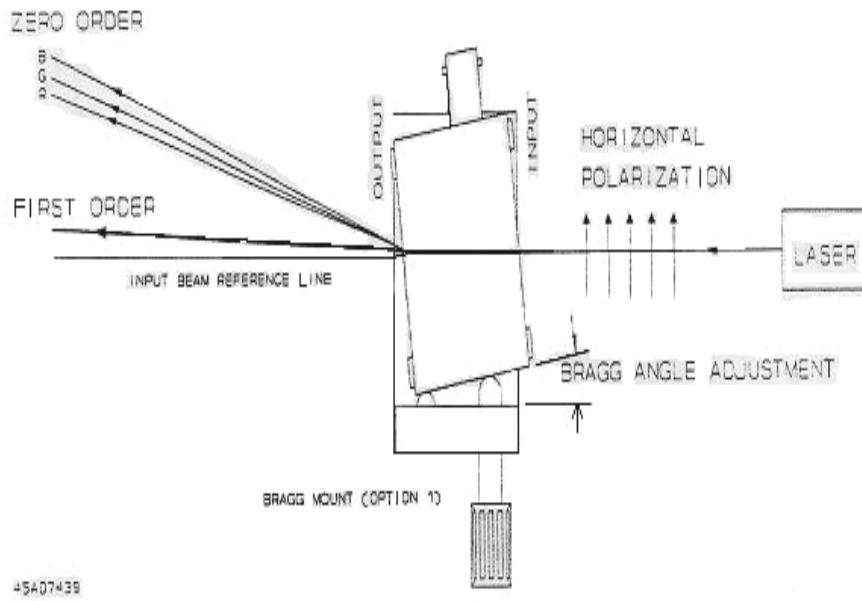


圖 3-5 PCAOM 所分出來之藍光及綠光示意圖



圖 3-6 PCI-6601 訊號控制卡

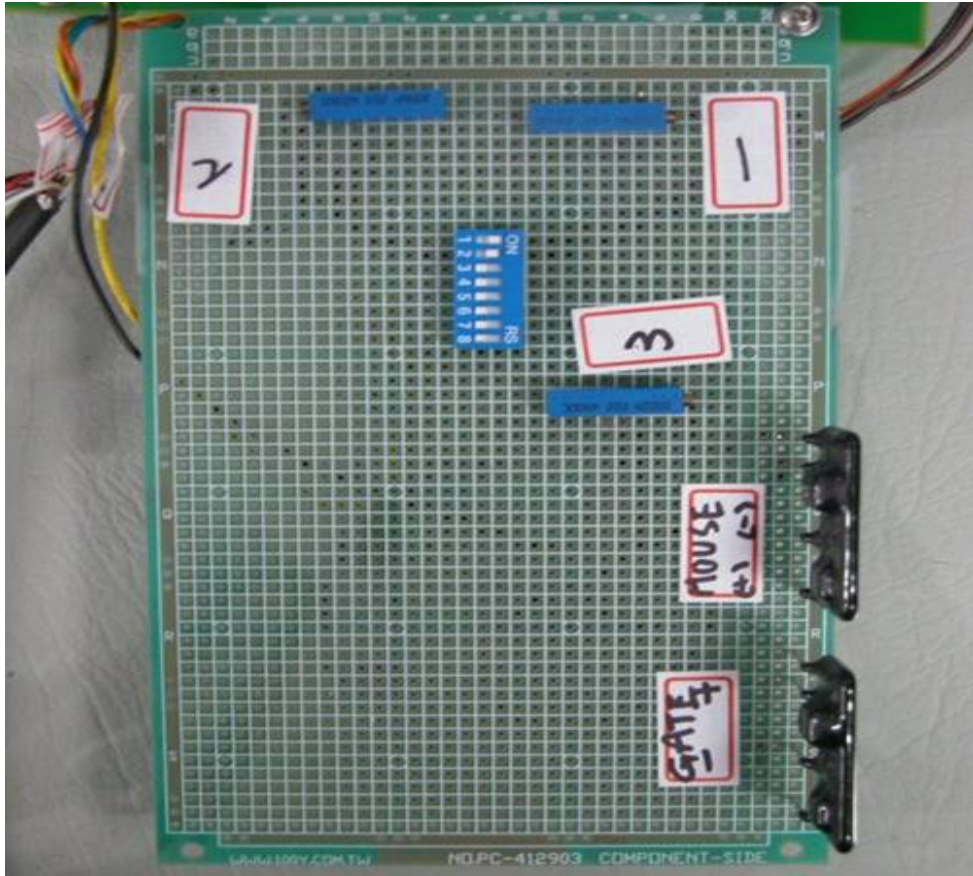


圖 3-7 自製降壓電路板

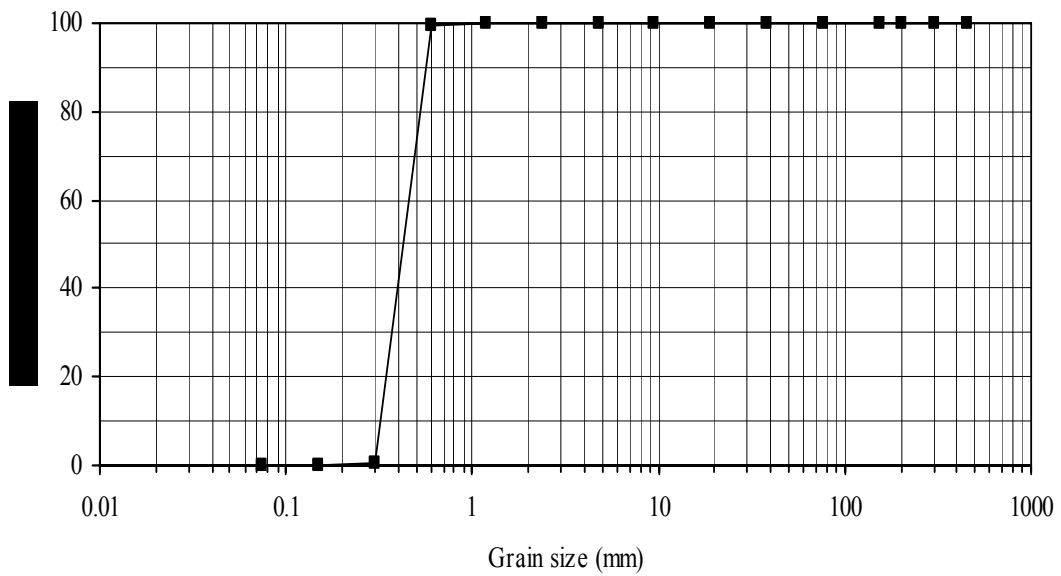


圖 3-8 試驗泥砂粒徑分佈曲線

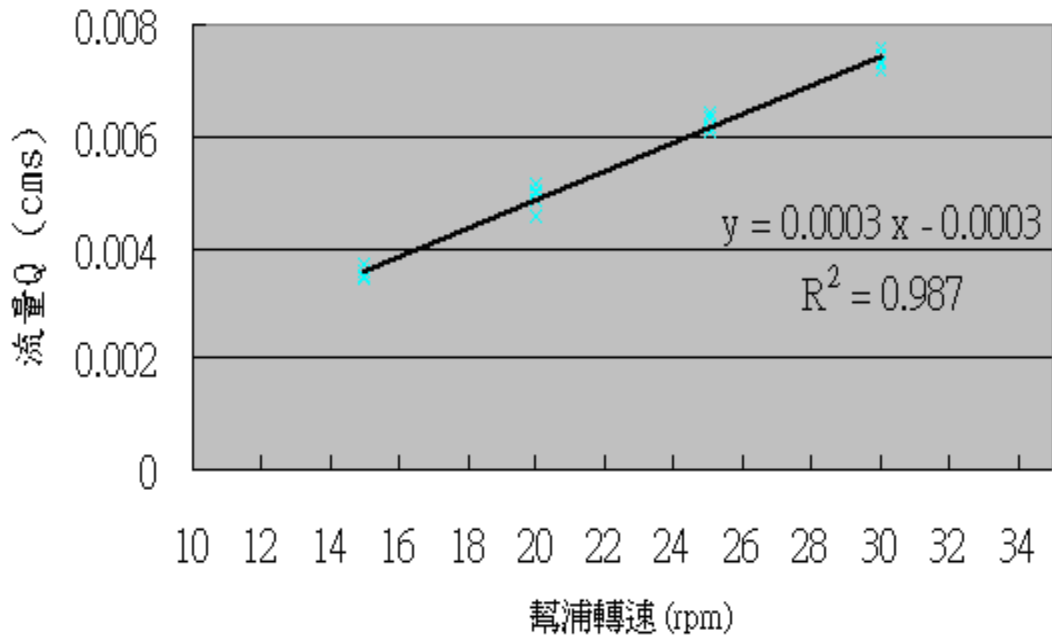


圖 3-9 流量率定曲線

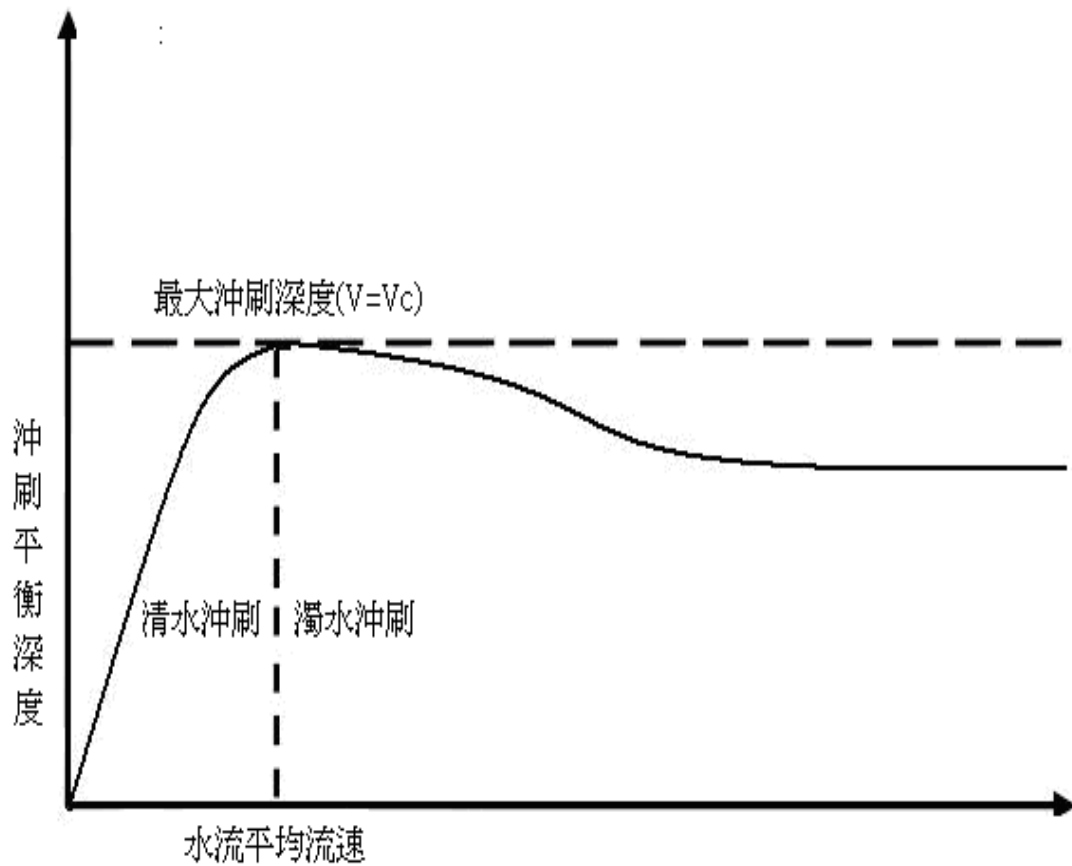


圖 3-10 最大冲刷深度流速条件示意图

(Melville and Coleman, 2000)

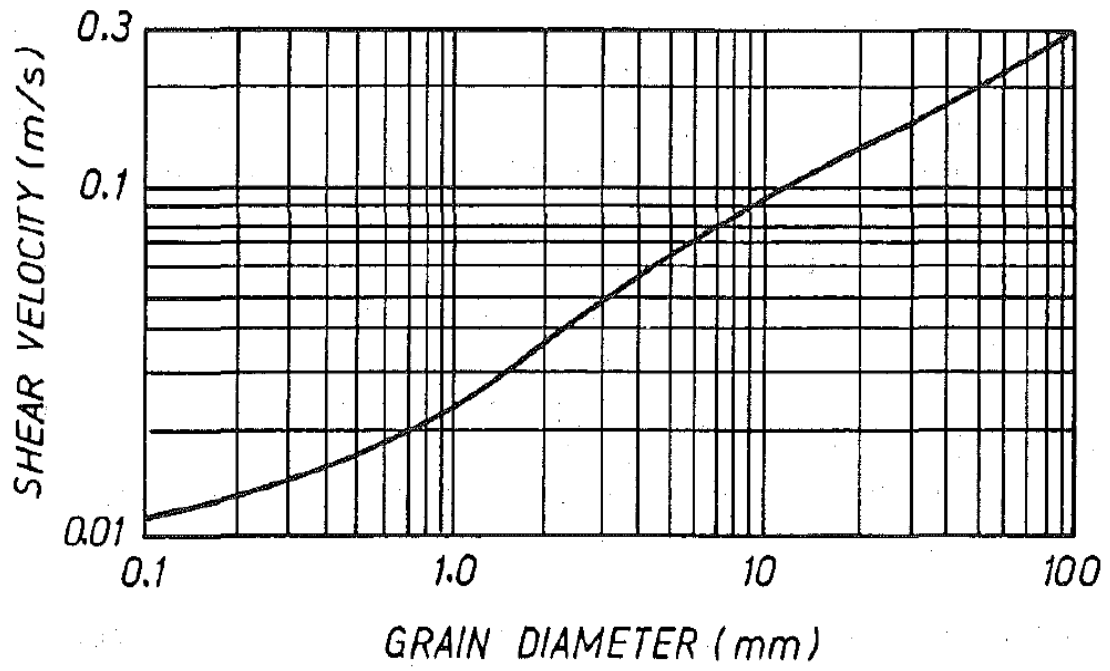


圖 3-11 均勻粒徑之 Shields 始動剪力速度圖

(Melville and Sutherland, 1988)

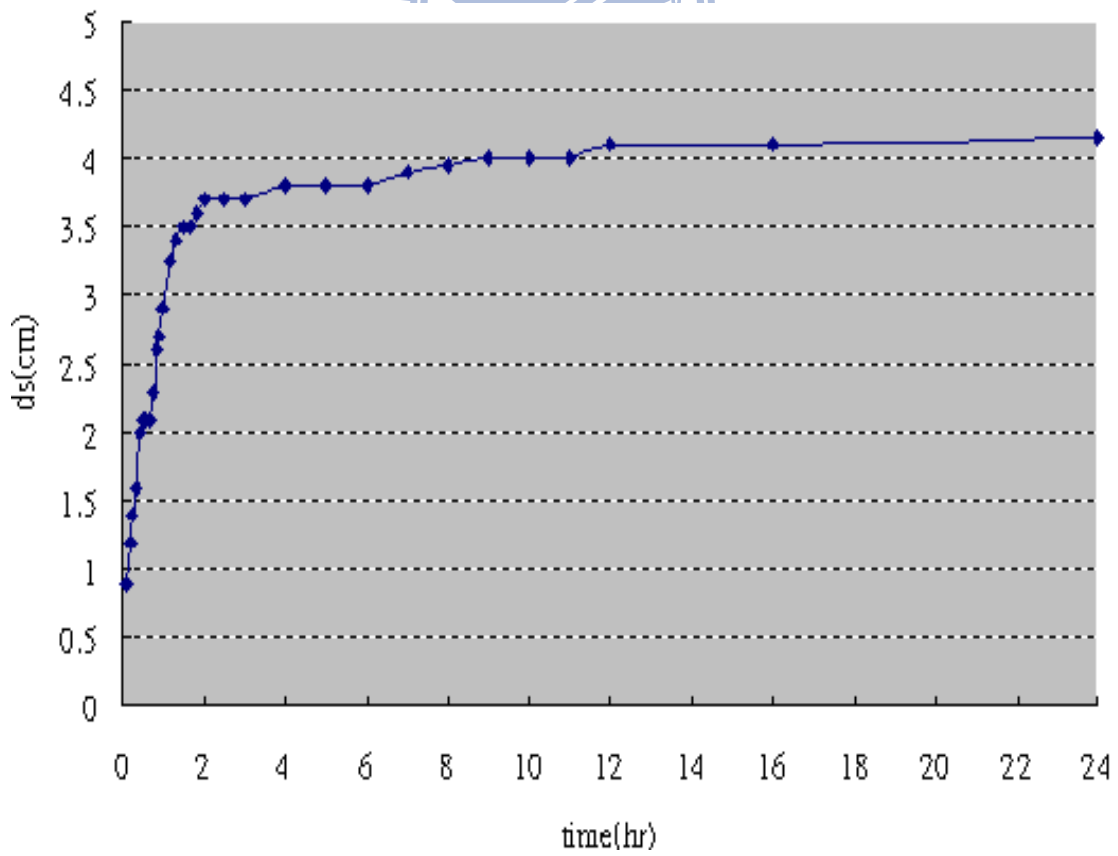


圖 3-12 橋墩沖刷平衡時間歷程圖

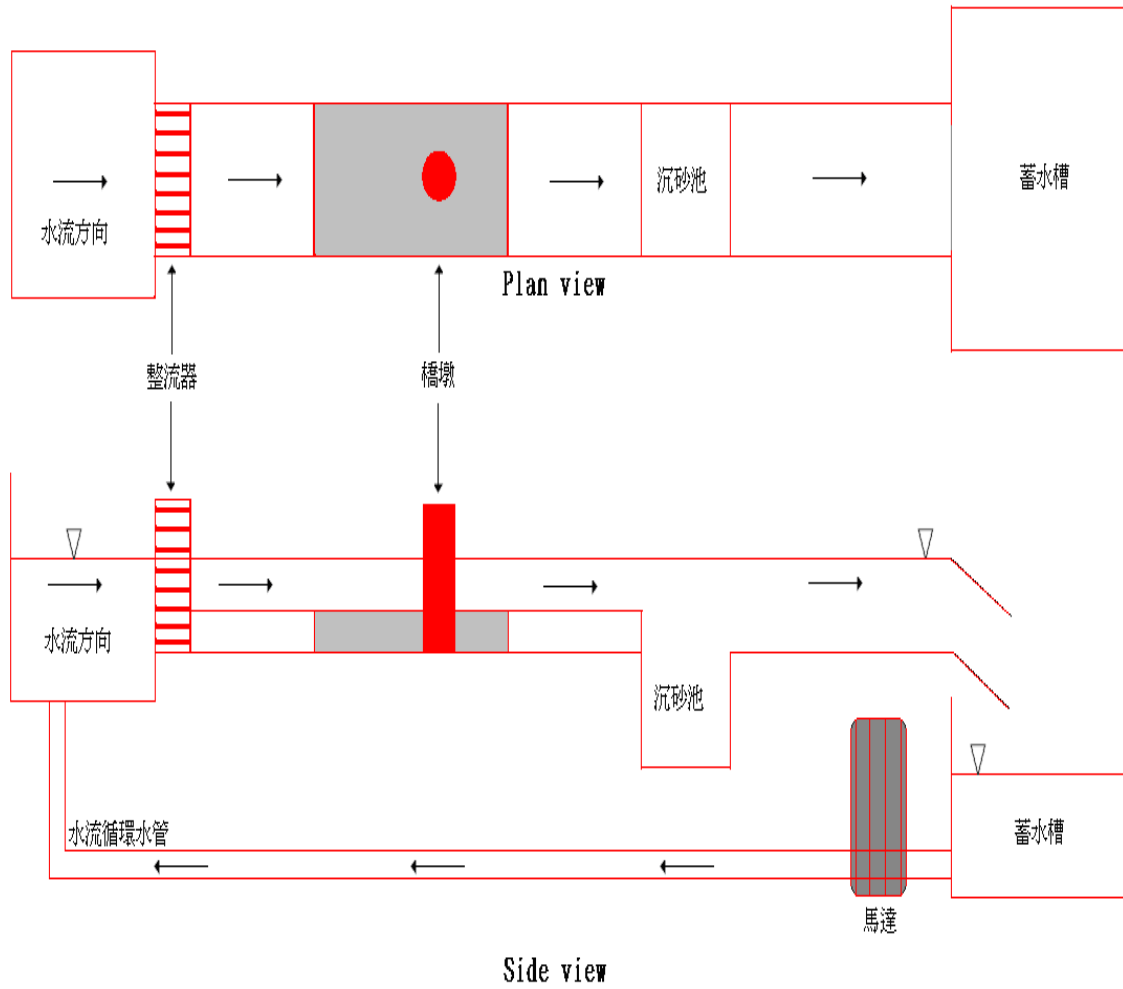


圖 3-13 試驗水槽佈置示意圖

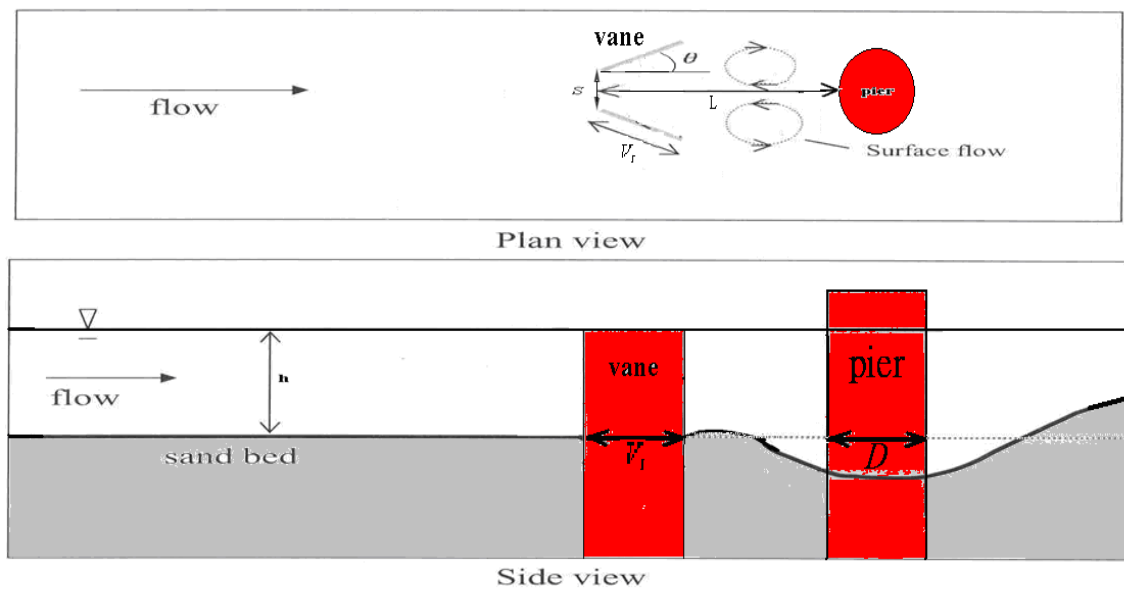


圖 3-14 導流板與橋墩佈置示意圖



圖 3-15 相機角架固定裝置



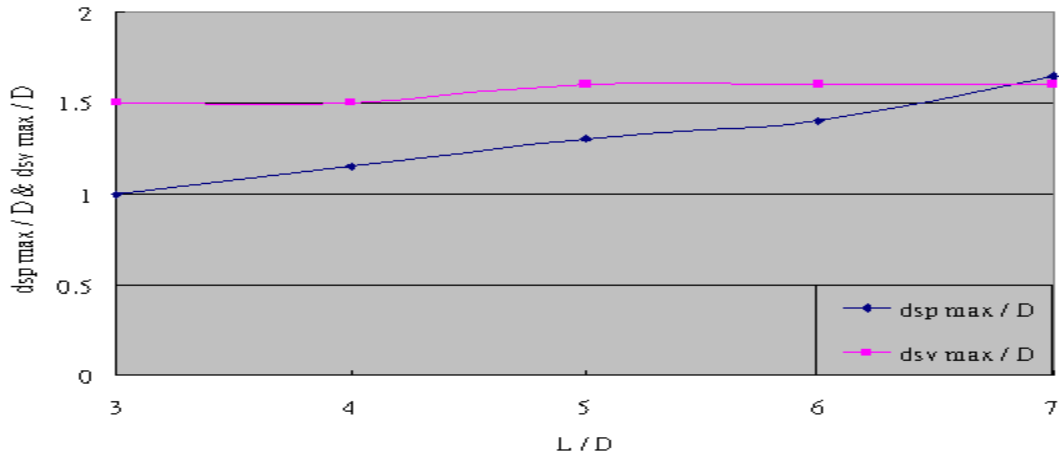


圖 4-1 間距佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖

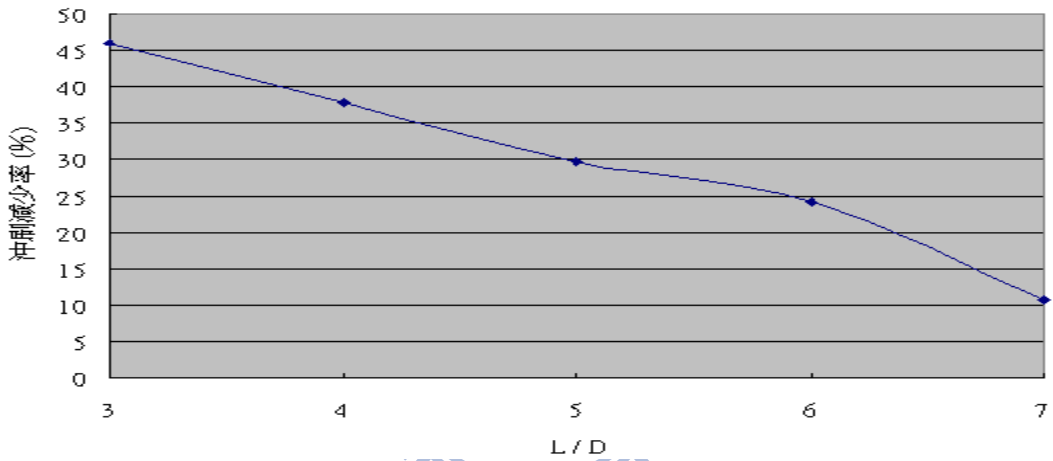


圖 4-2 間距佈置對應橋墩冲刷效益圖

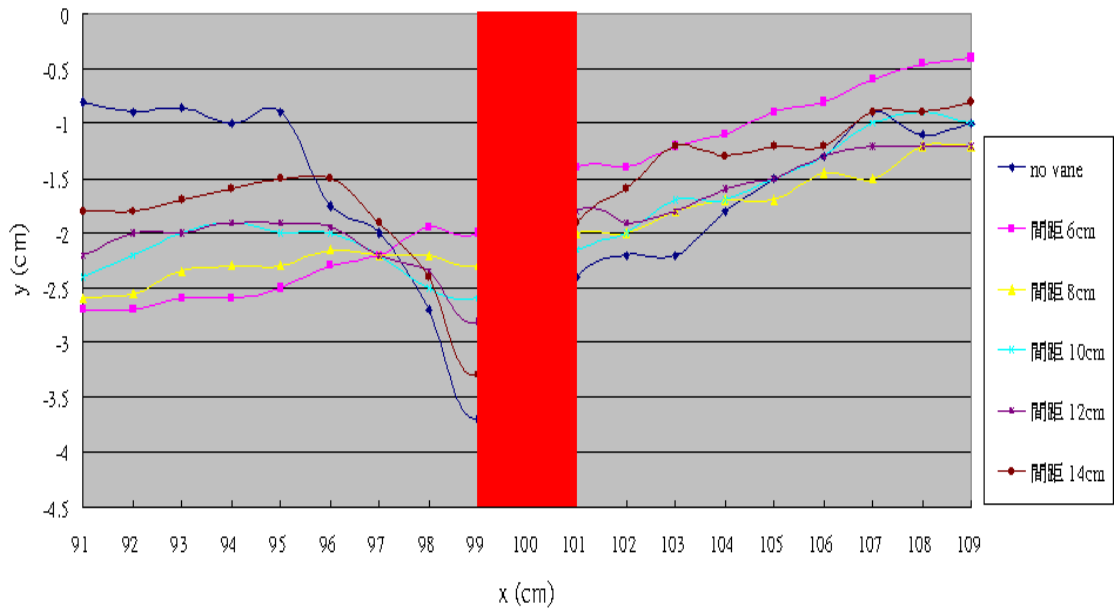


圖 4-3 間距佈置對應橋墩中心縱剖面圖

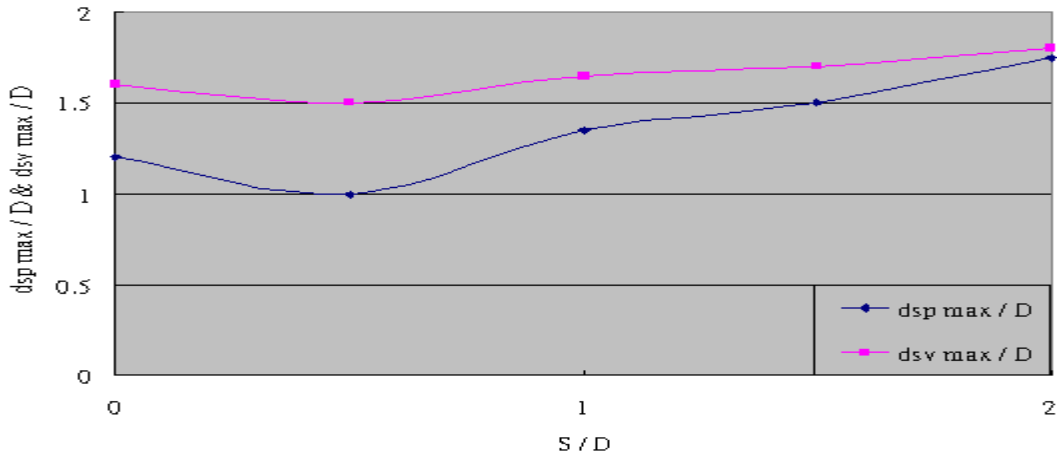


圖 4-4 開口佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖

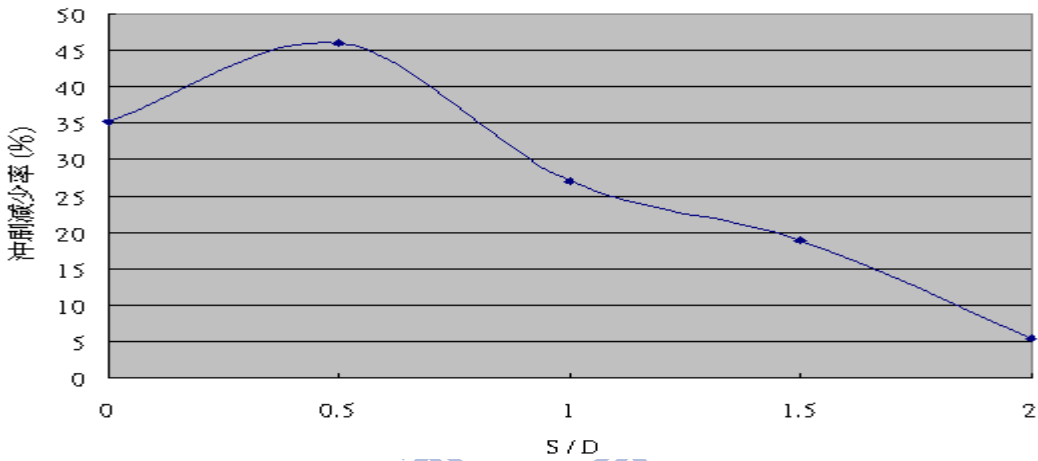


圖 4-5 開口佈置對應橋墩沖刷效益圖

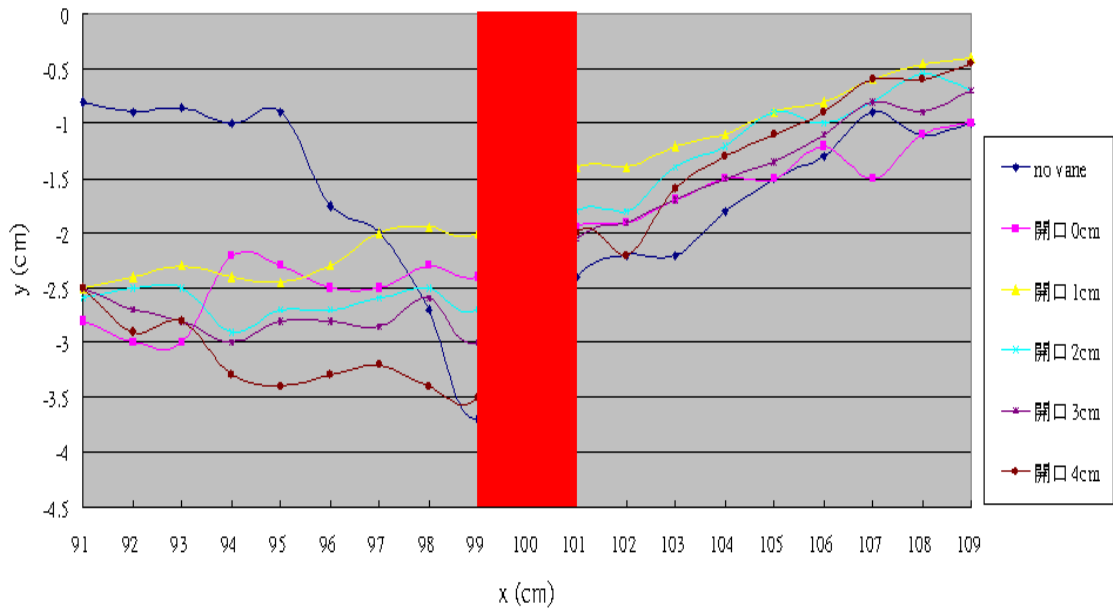


圖 4-6 開口佈置對應橋墩中心縱剖面圖

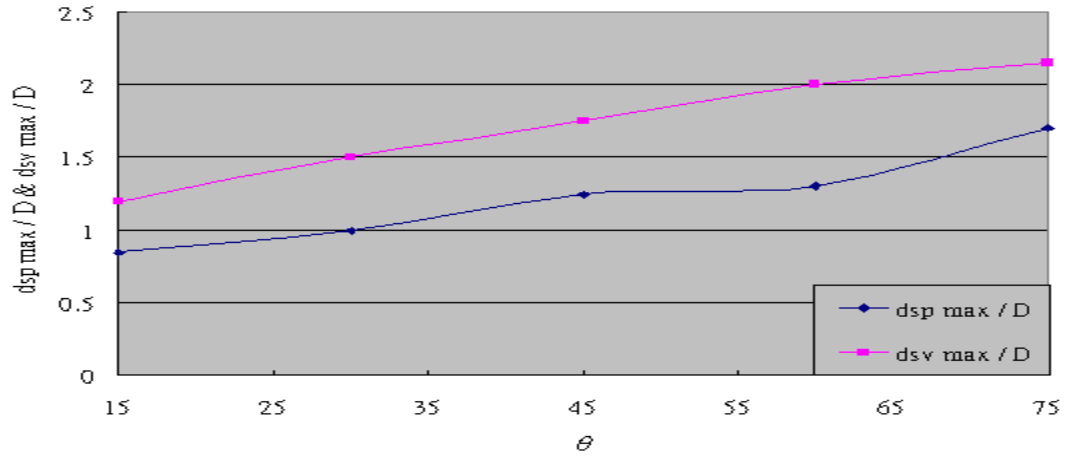


圖 4-7 攻角佈置與橋墩、導流板最大沖刷深度關係圖

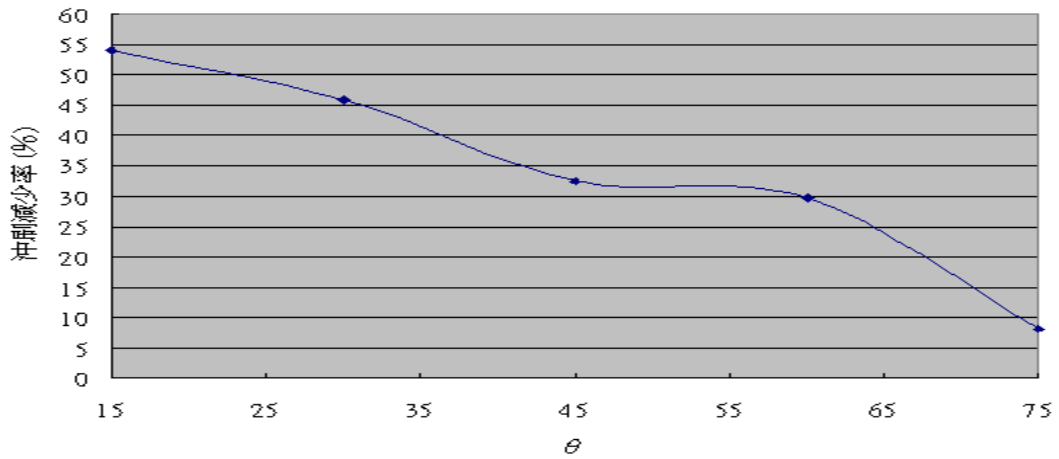


圖 4-8 攻角佈置對應橋墩沖刷效益圖

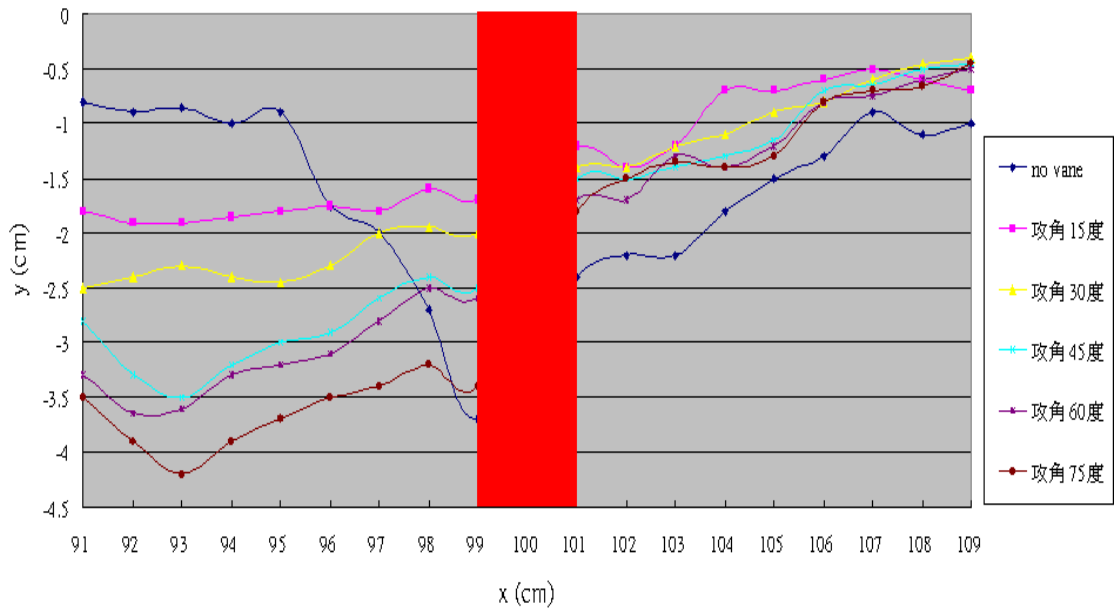


圖 4-9 攻角佈置對應橋墩中心縱剖面圖

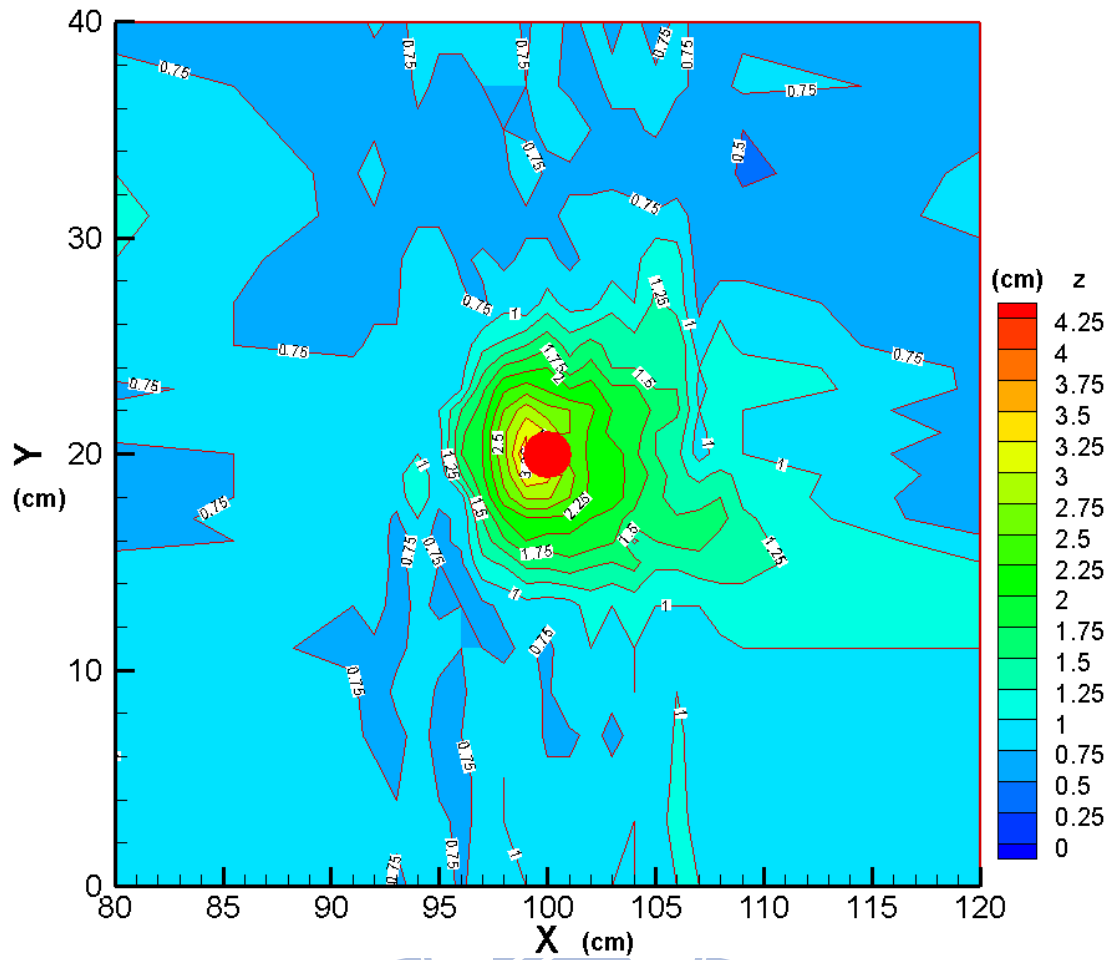


圖 4-10 案例 1 底床高程圖

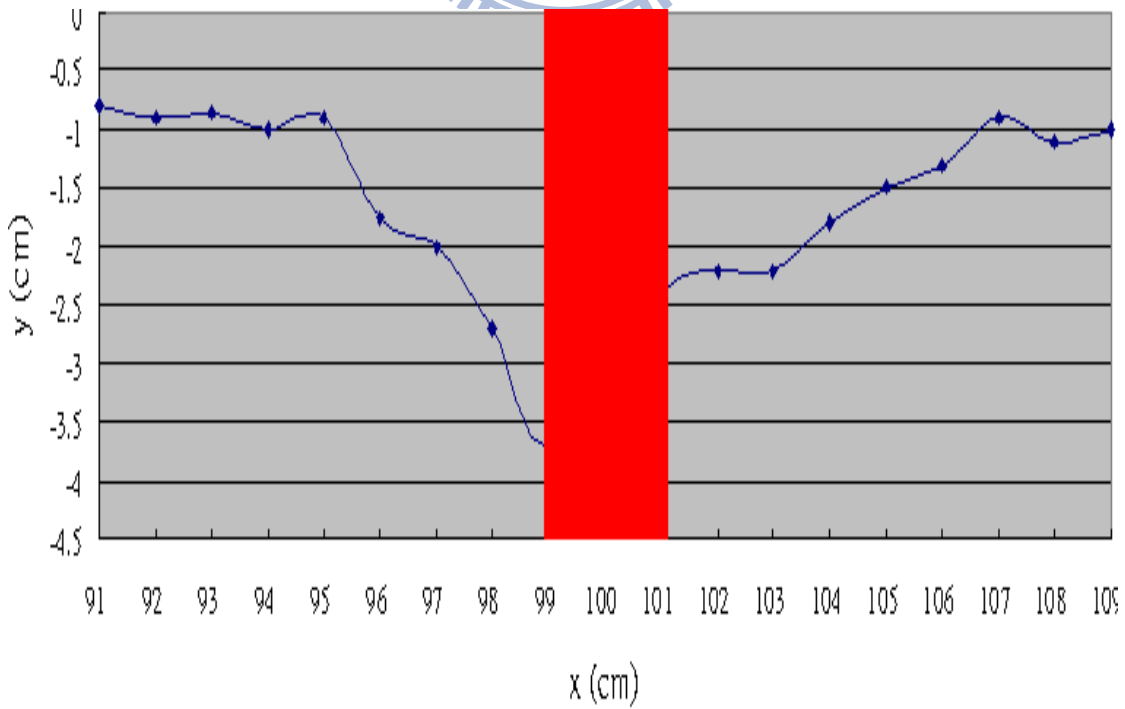


圖 4-11 案例 1 橋墩中心縱剖面圖

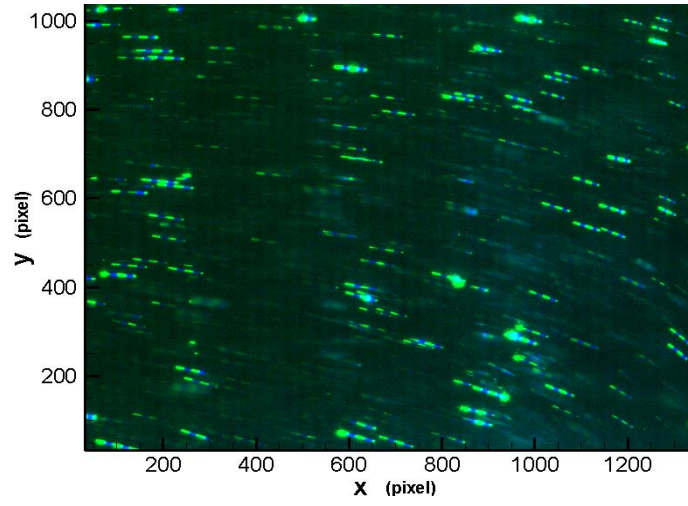


圖 4-12 案例 1 影像圖

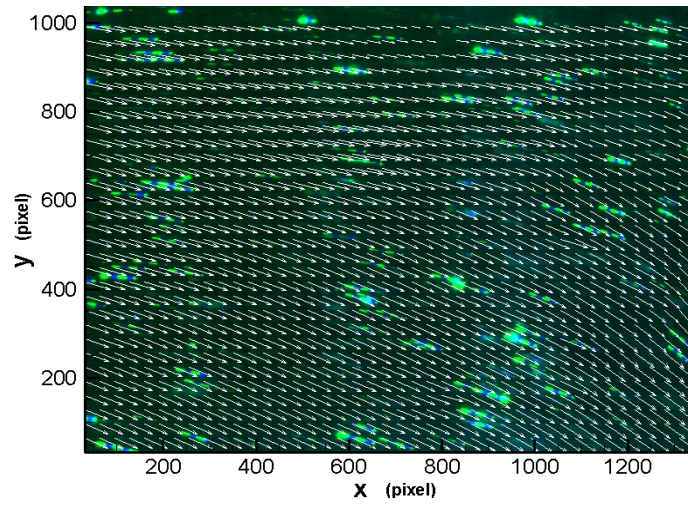


圖 4-13 案例 1 速度向量圖

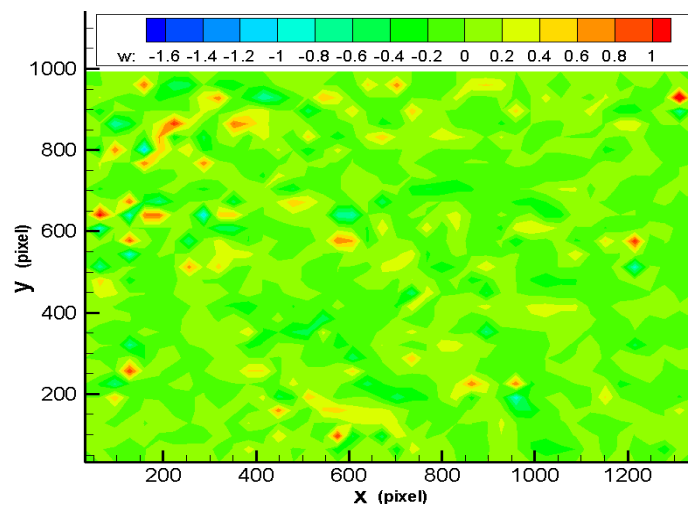


圖 4-14 案例 1 渦度場圖

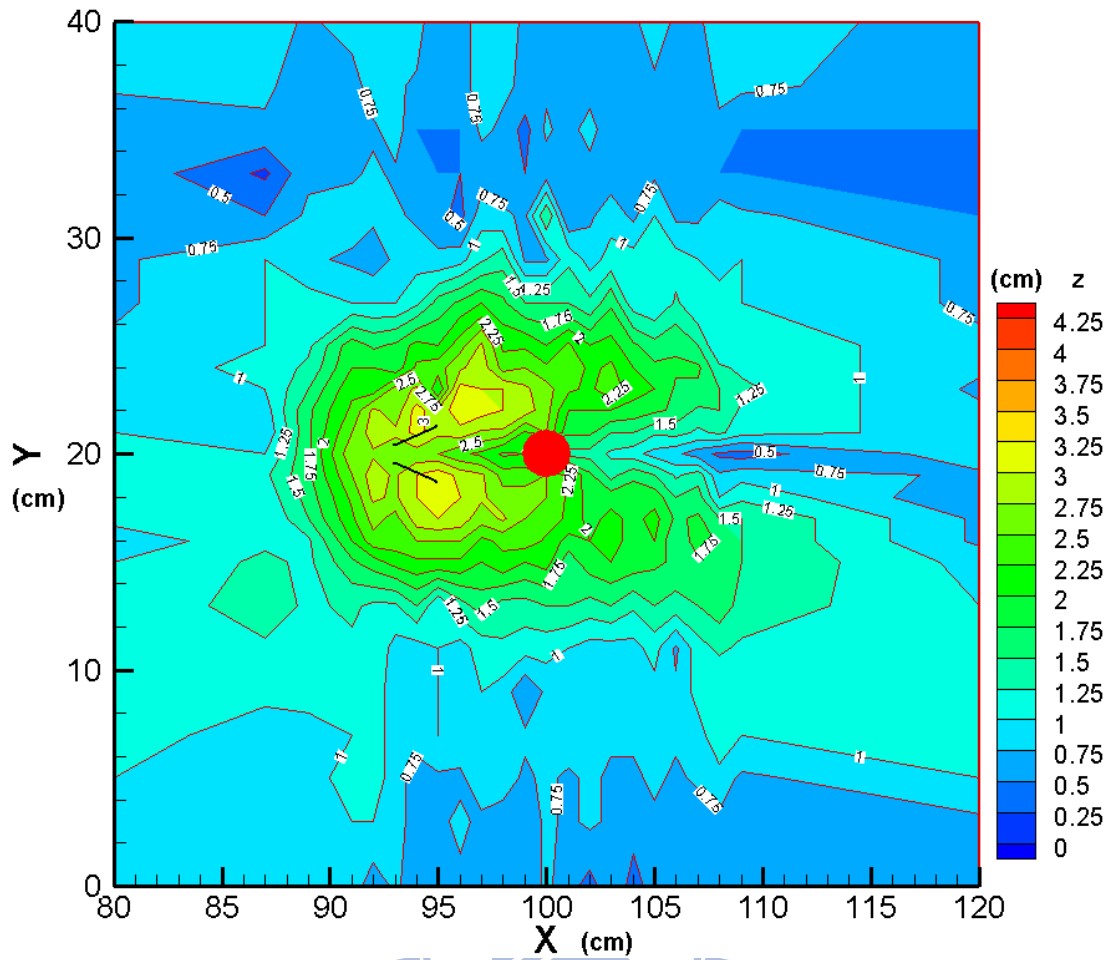


圖 4-15 案例 2 底床高程圖

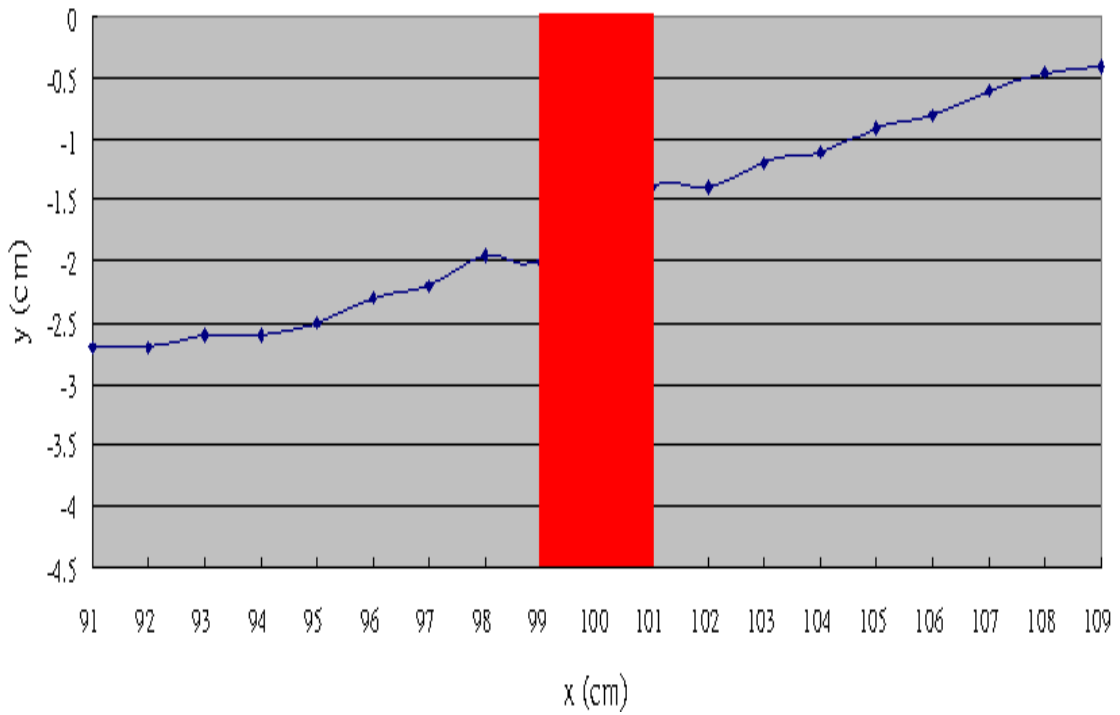


圖 4-16 案例 2 橋墩中心縱剖面圖

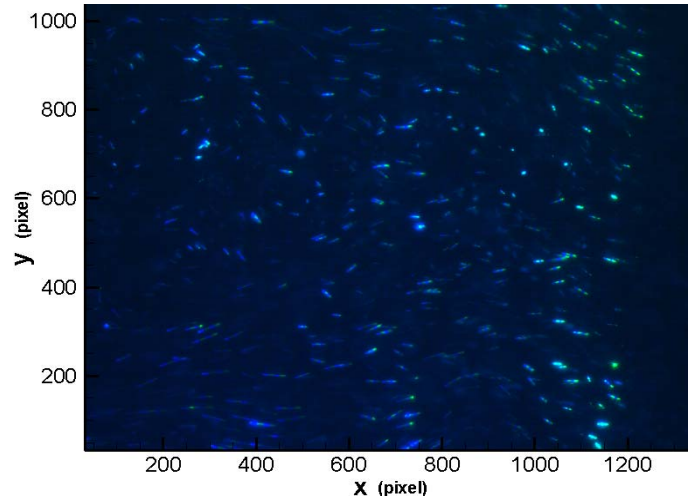


圖 4-17 案例 2 速度向量圖

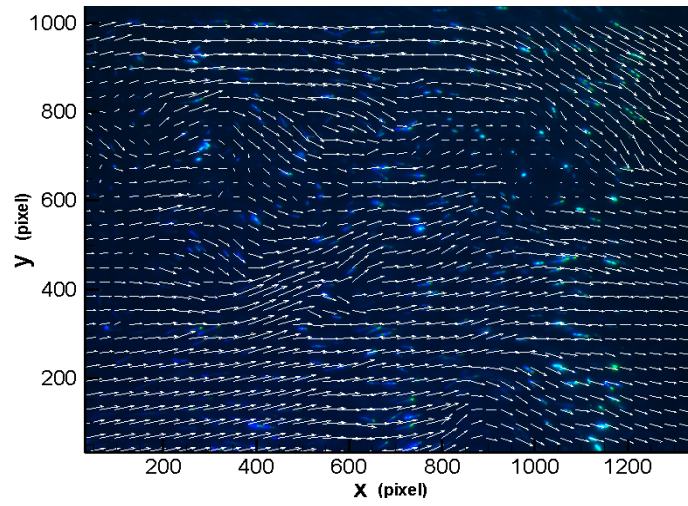


圖 4-18 案例 2 影像圖

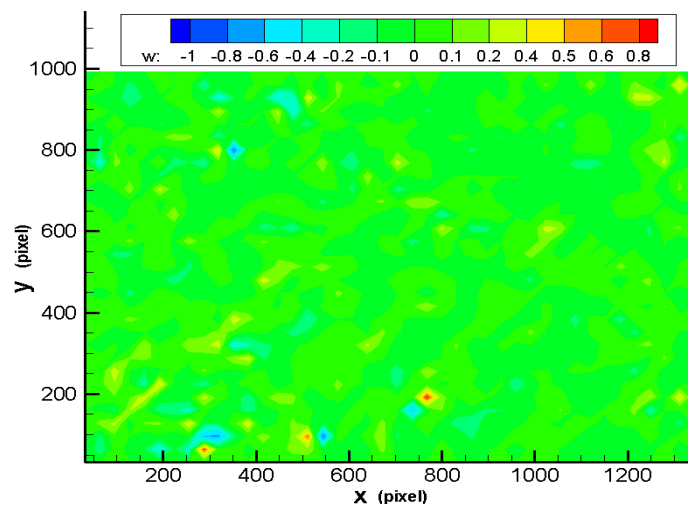


圖 4-19 案例 2 渦度場圖

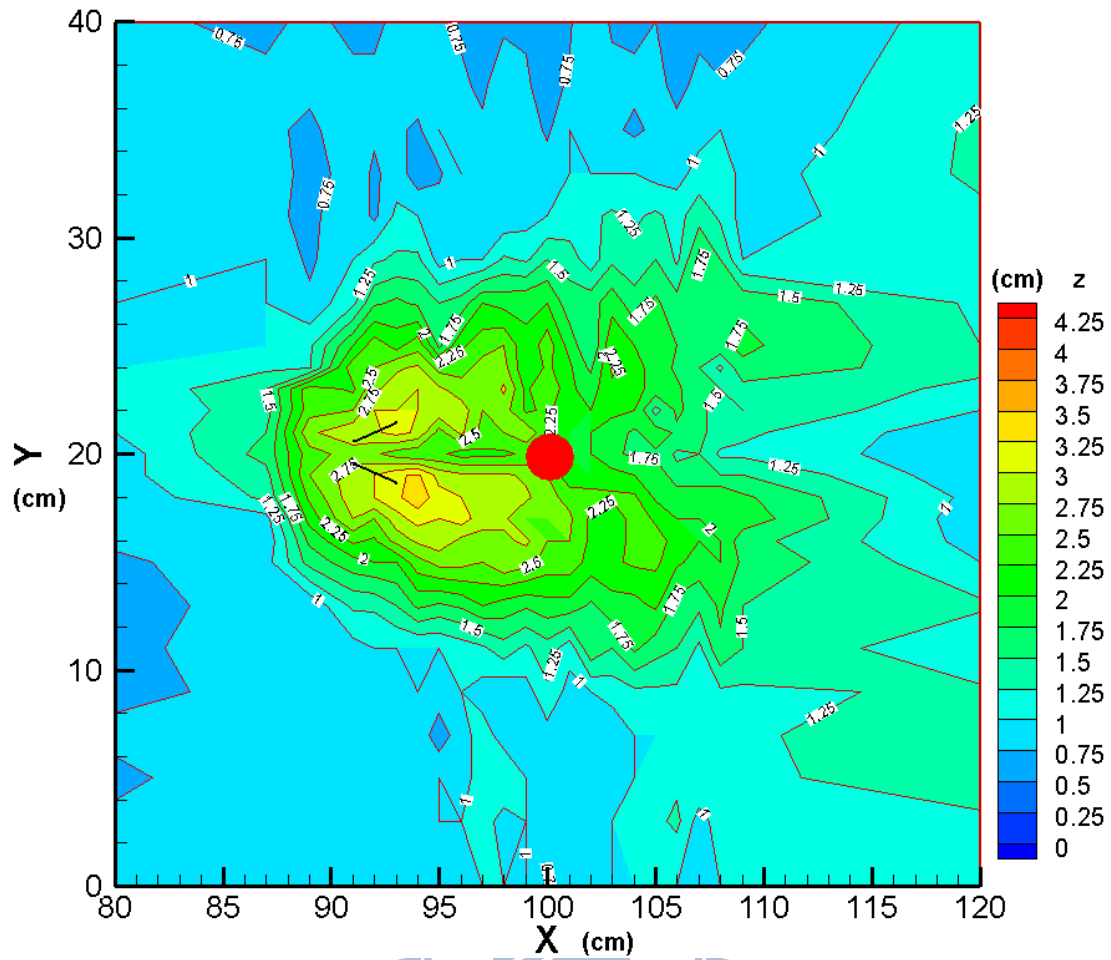


圖 4-20 案例 3 底床高程圖

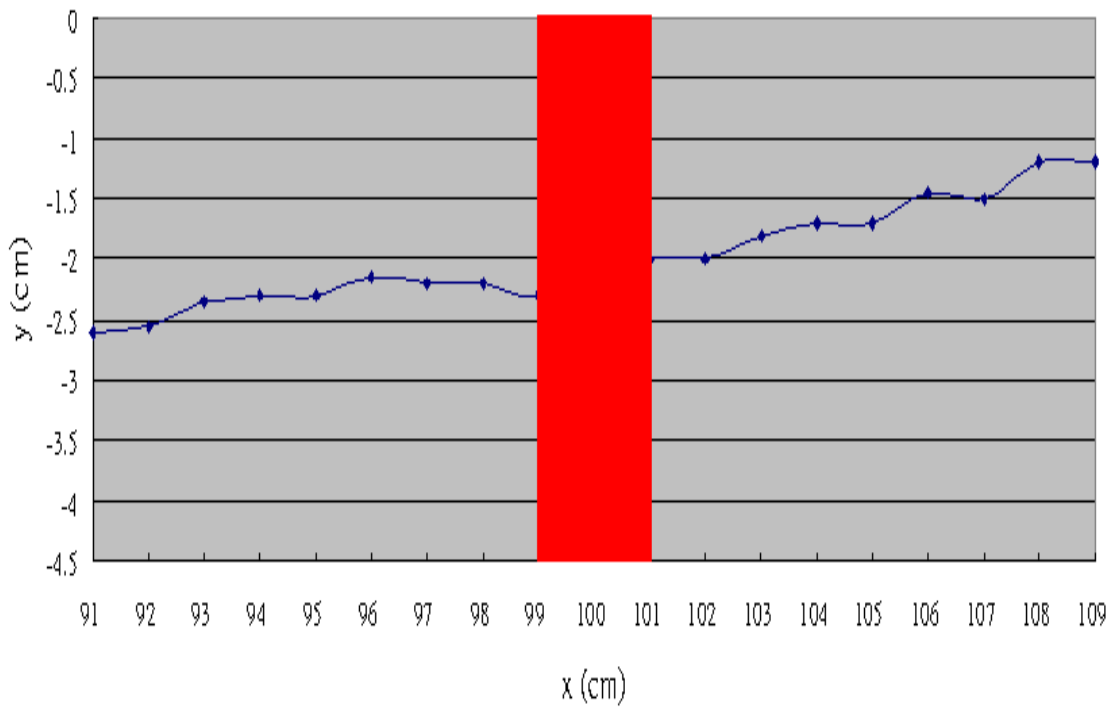


圖 4-21 案例 3 橋墩中心縱剖面圖

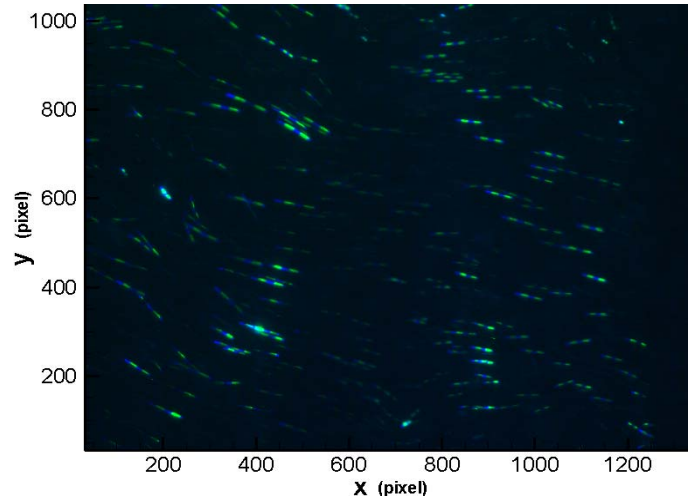


圖 4-22 案例 3 影像圖

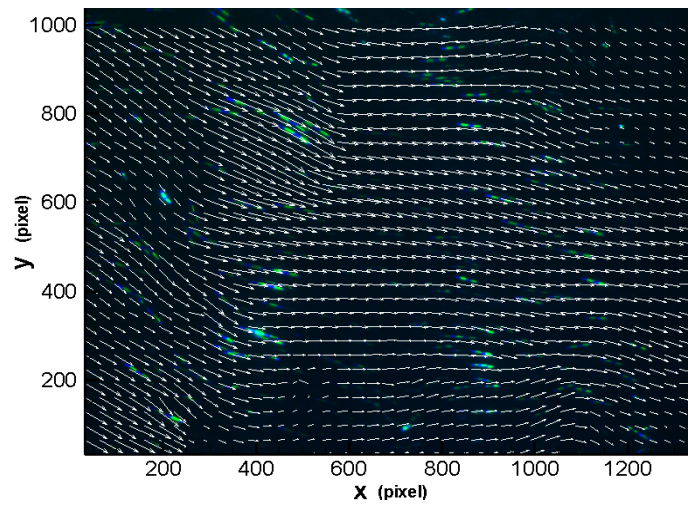


圖 4-23 案例 3 速度向量圖

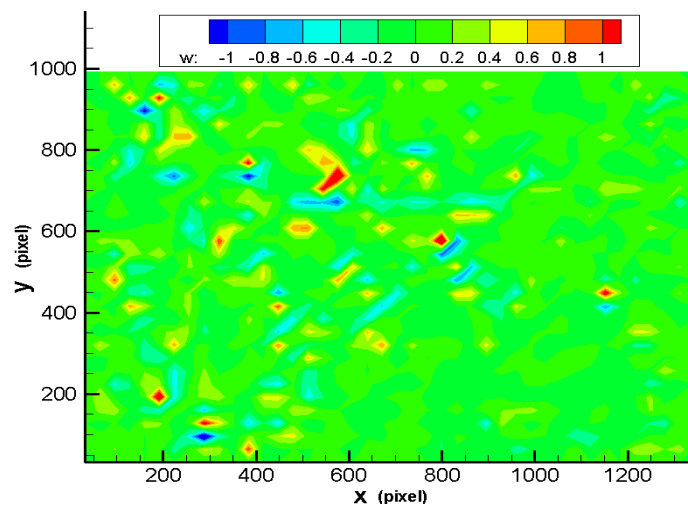


圖 4-24 案例 3 渦度場圖

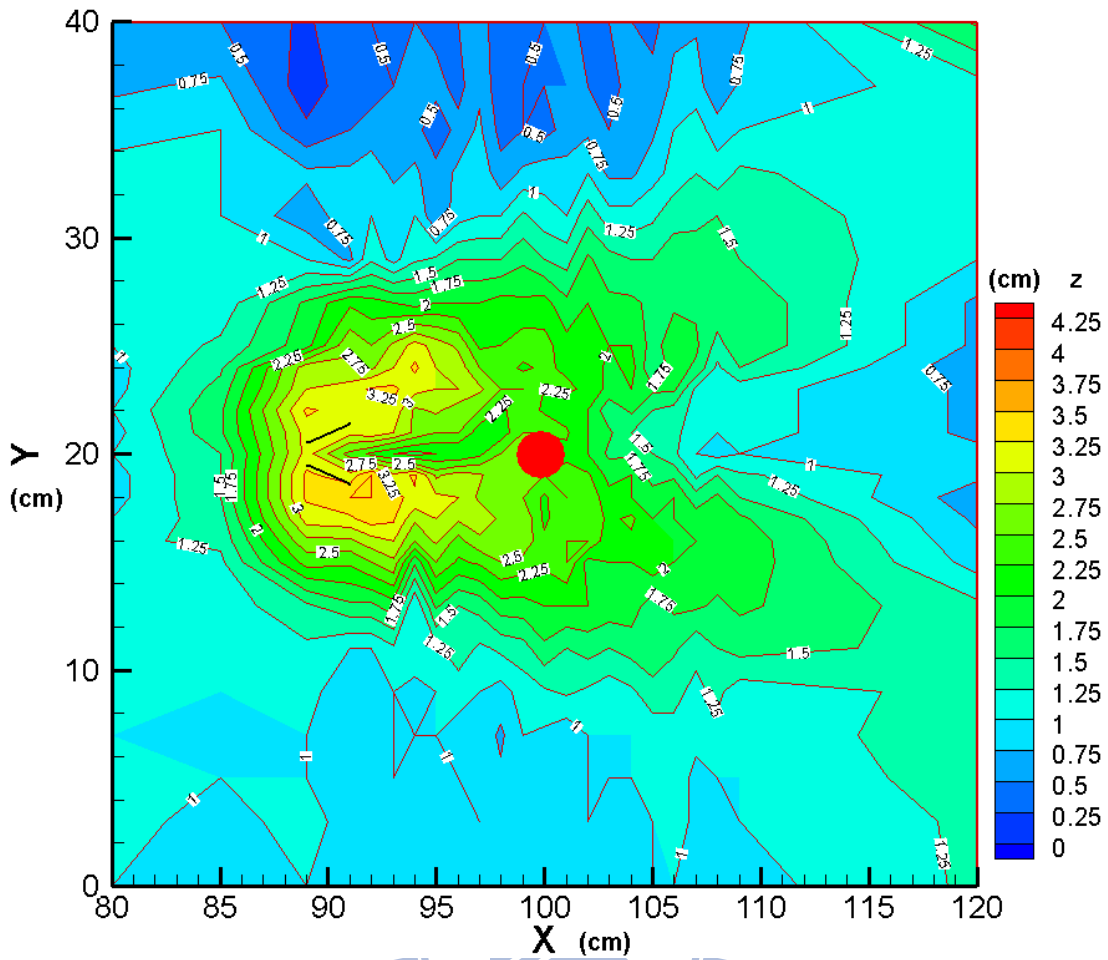


圖 4-25 案例 4 底床高程圖

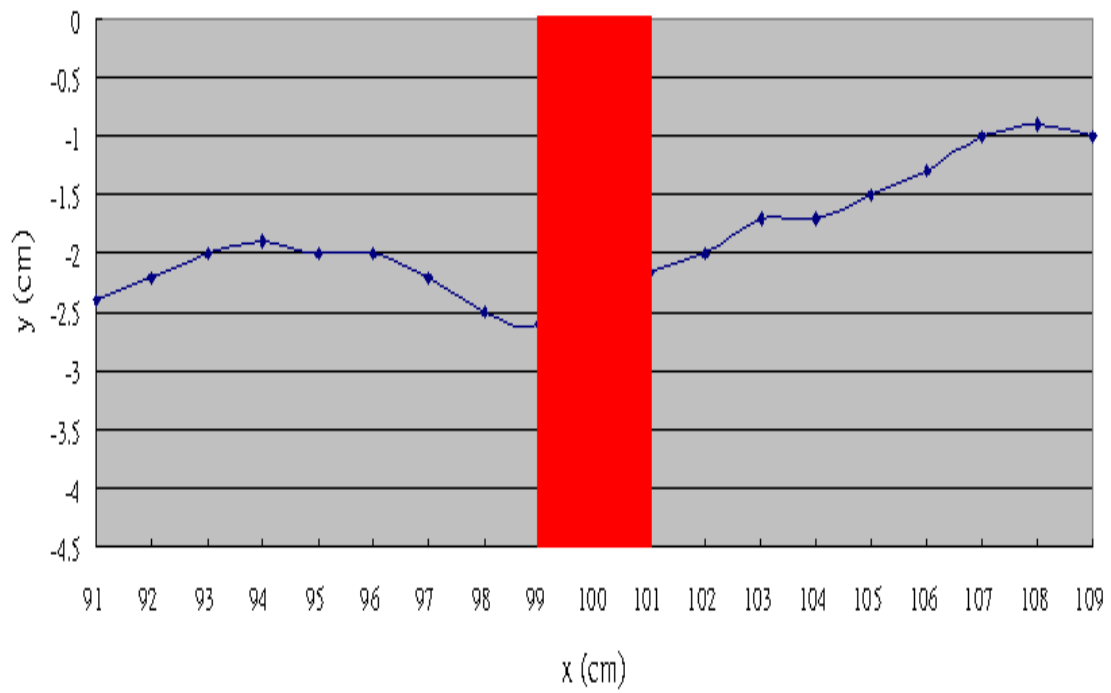


圖 4-26 案例 4 橋墩中心縱剖面圖

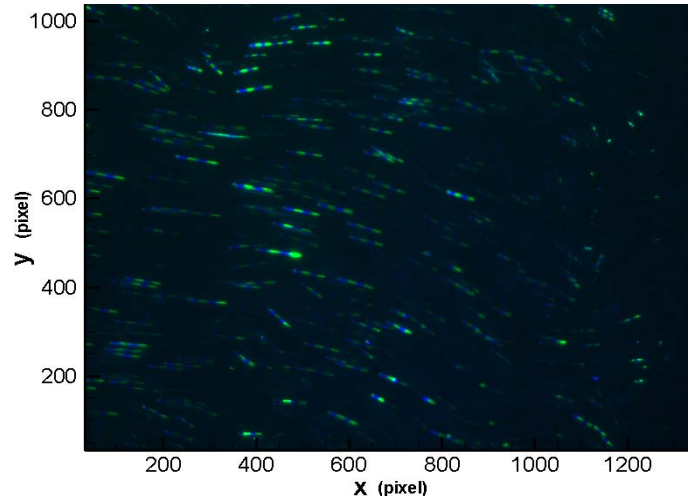


圖 4-27 案例 4 影像圖

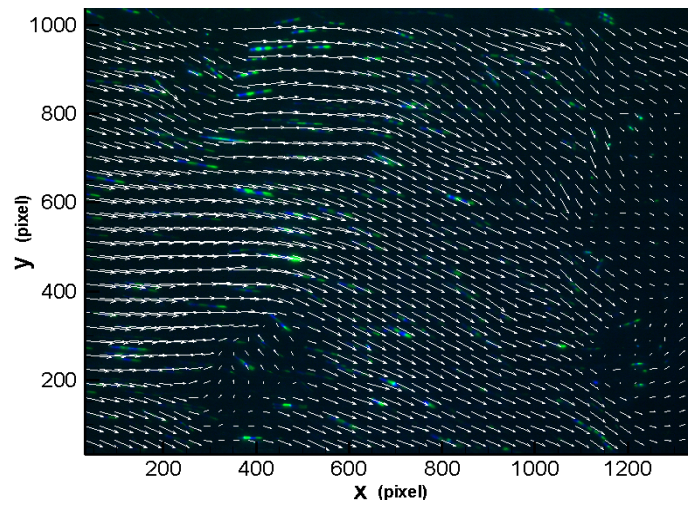


圖 4-28 案例 4 速度向量圖

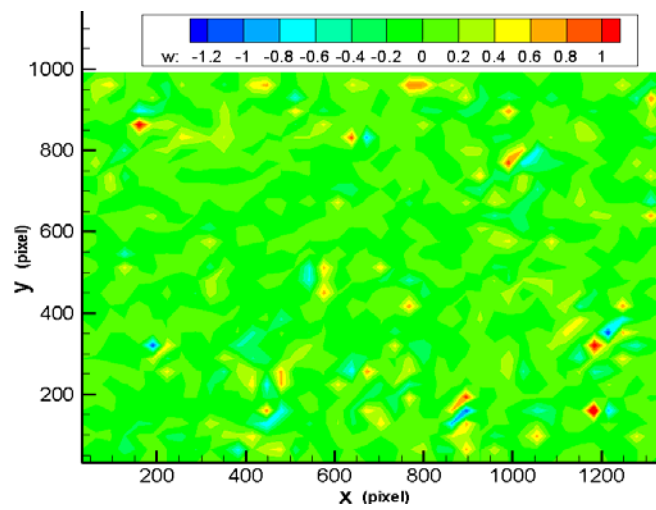


圖 4-29 案例 4 渦度場圖

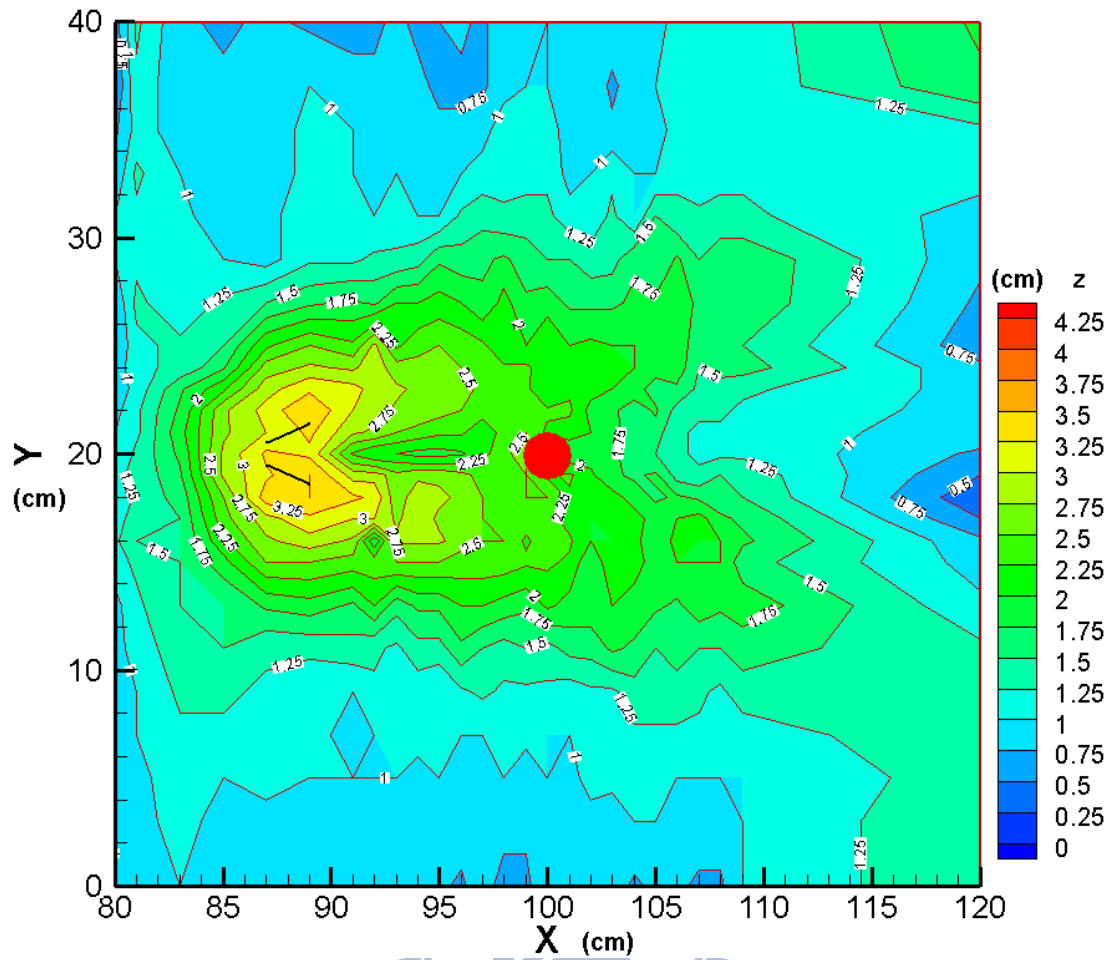


圖 4-30 案例 5 底床高程圖

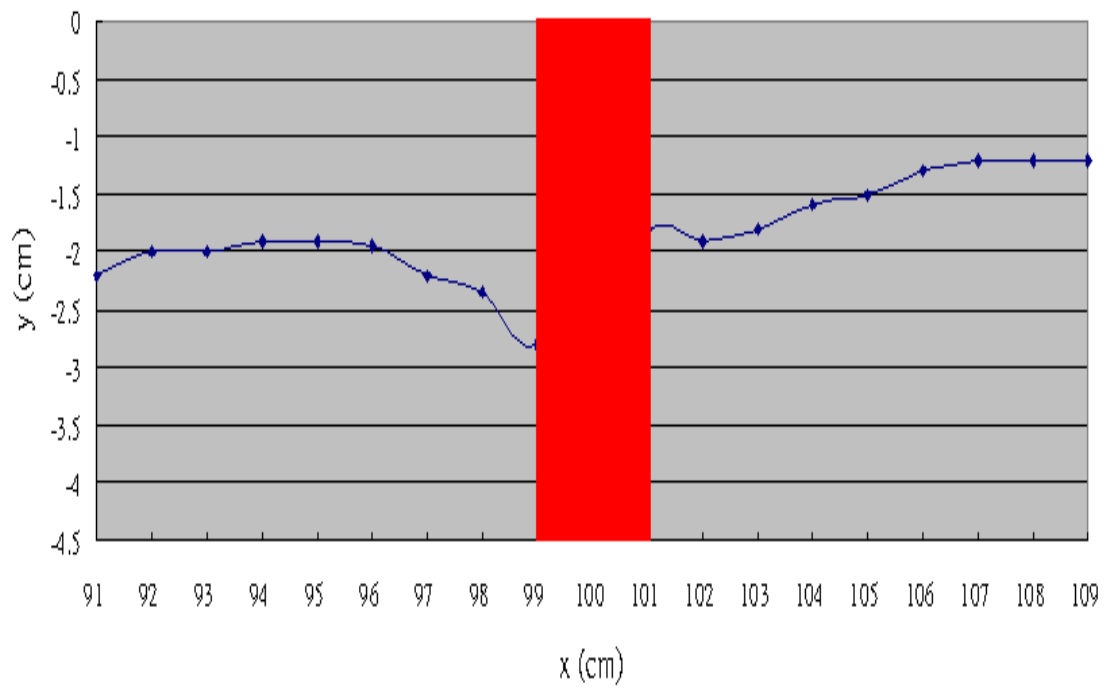


圖 4-31 案例 5 橋墩中心縱剖面圖

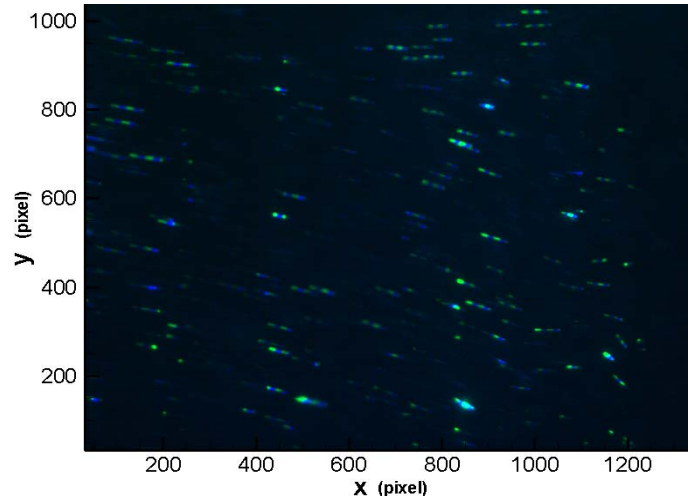


圖 4-32 案例 5 影像圖

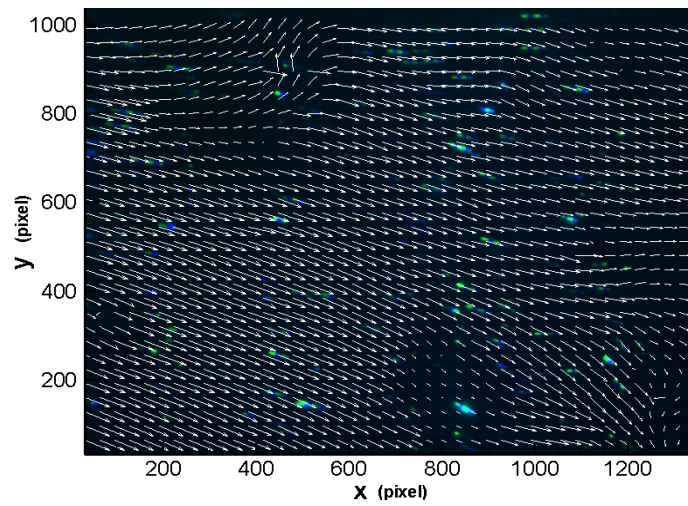


圖 4-33 案例 5 速度向量圖

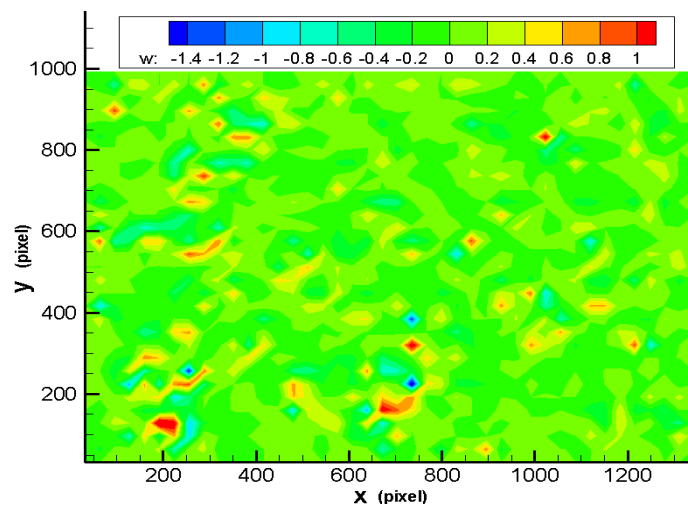


圖 4-34 案例 5 渦度場圖

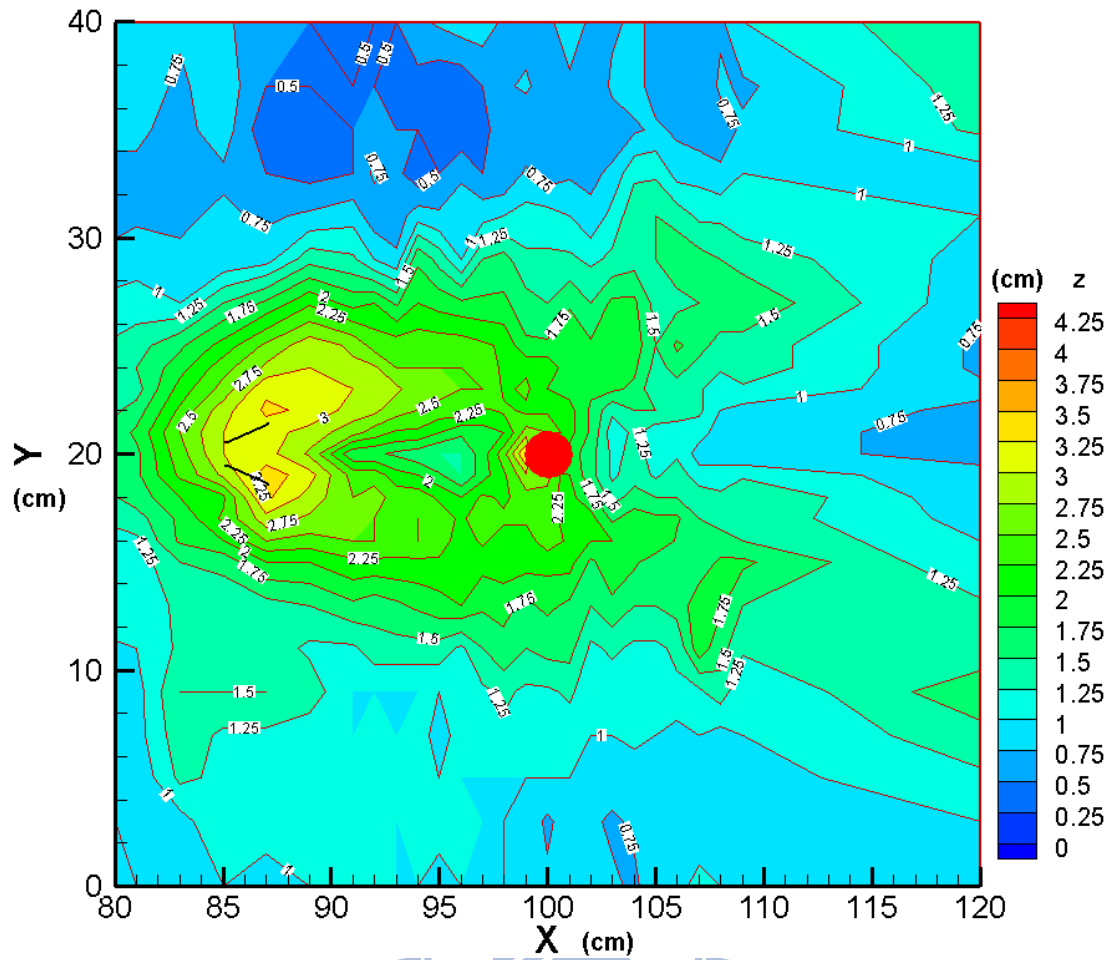


圖 4-35 案例 6 底床高程圖

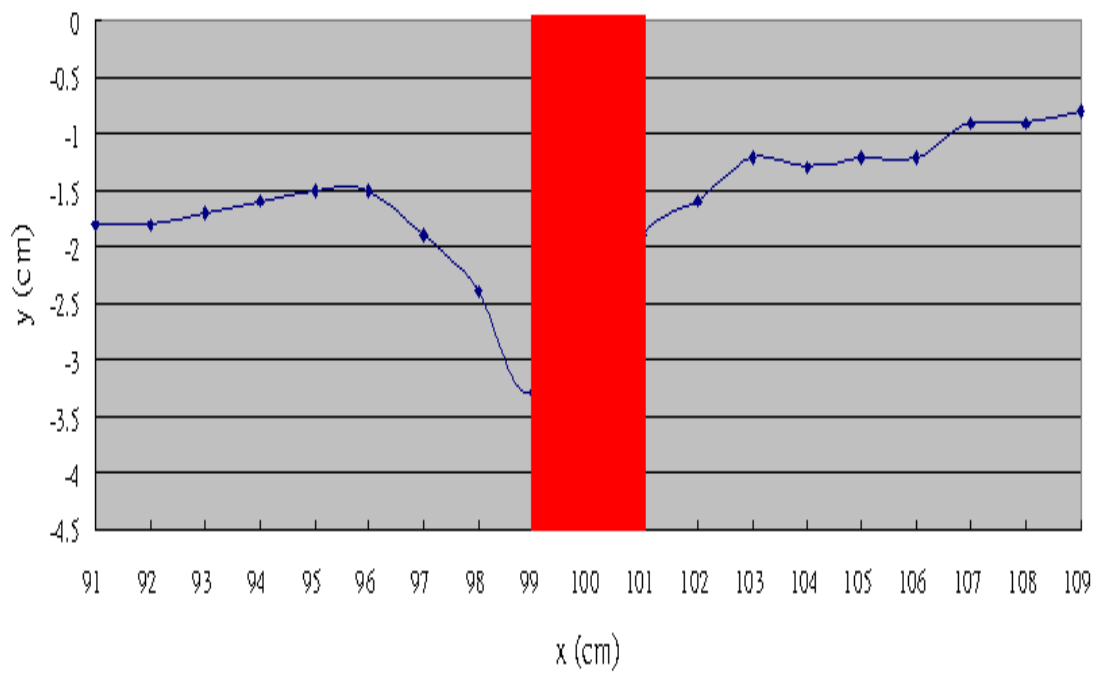


圖 4-36 案例 6 橋墩中心縱剖面圖

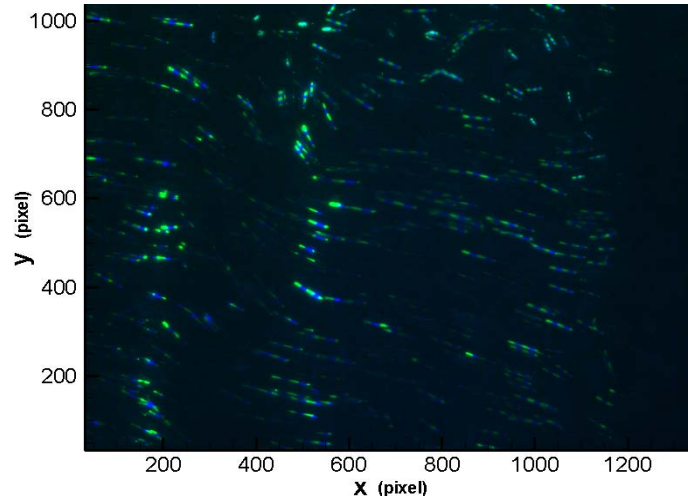


圖 4-37 案例 6 影像圖

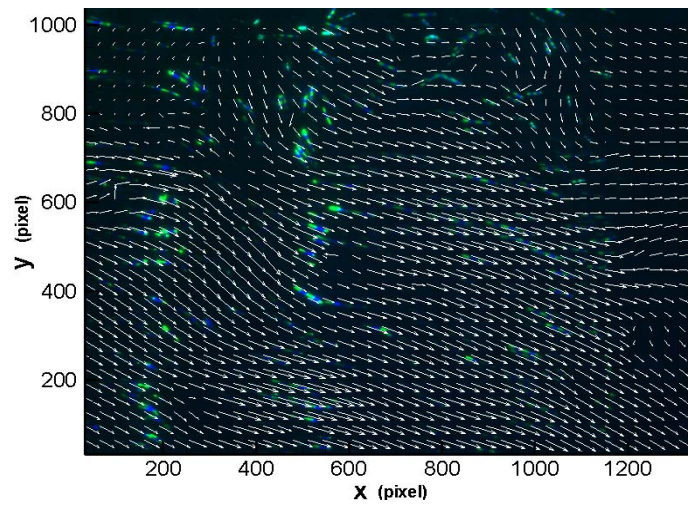


圖 4-38 案例 6 速度向量圖

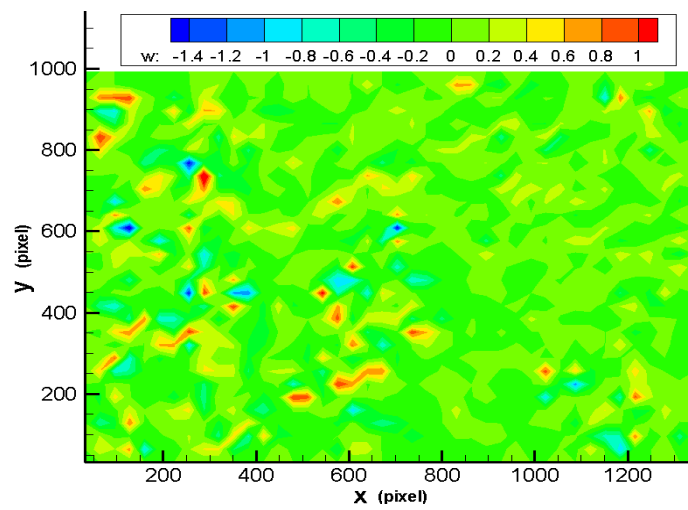


圖 4-39 案例 6 渦度場圖

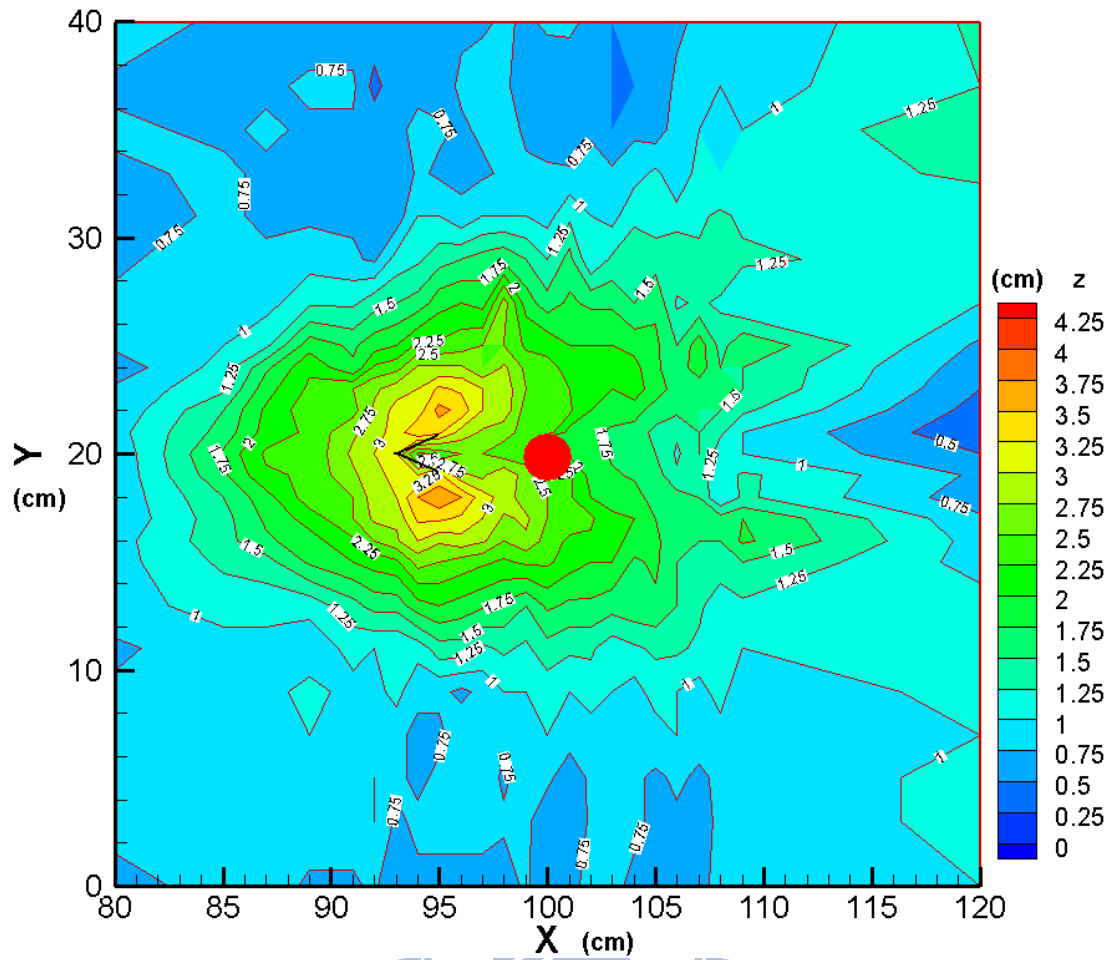


圖 4-40 案例 7 底床高程圖

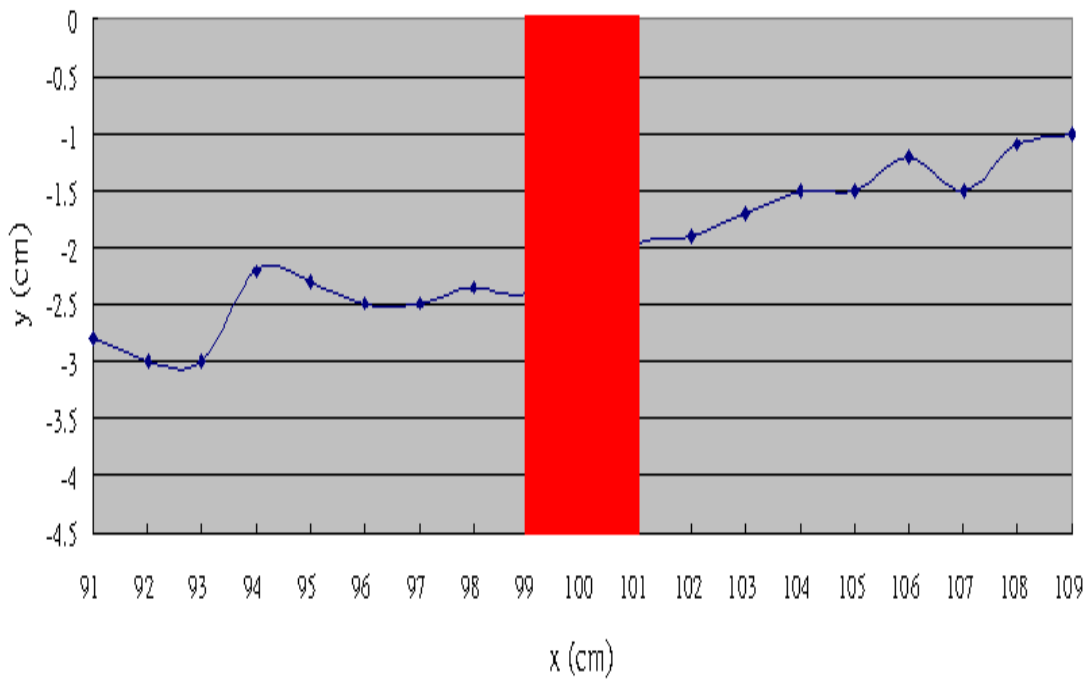


圖 4-41 案例 7 橋墩中心縱剖面圖

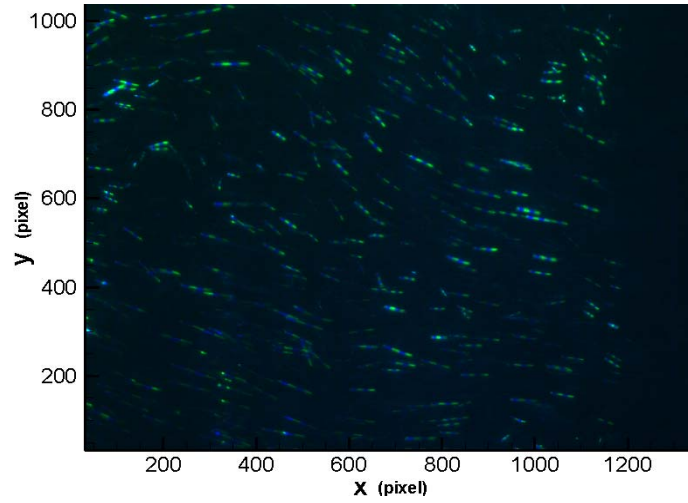


圖 4-42 案例 7 影像圖

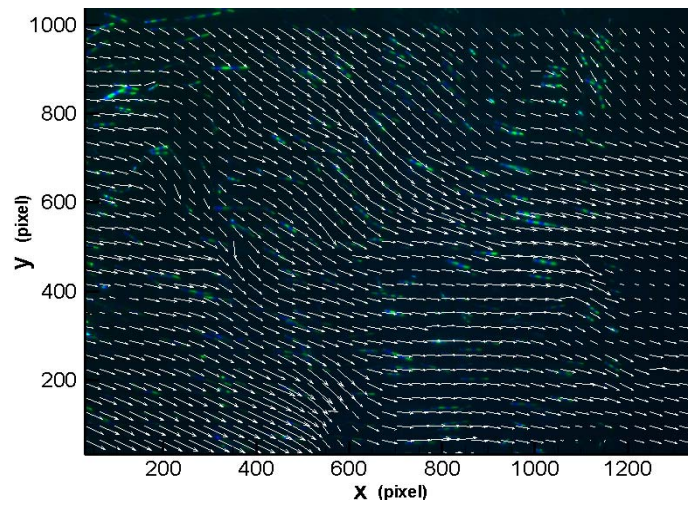


圖 4-43 案例 7 速度向量圖

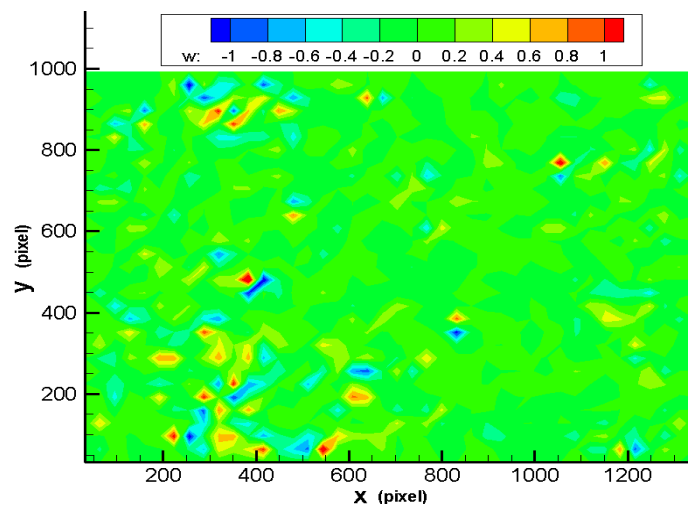


圖 4-44 案例 7 渦度場圖

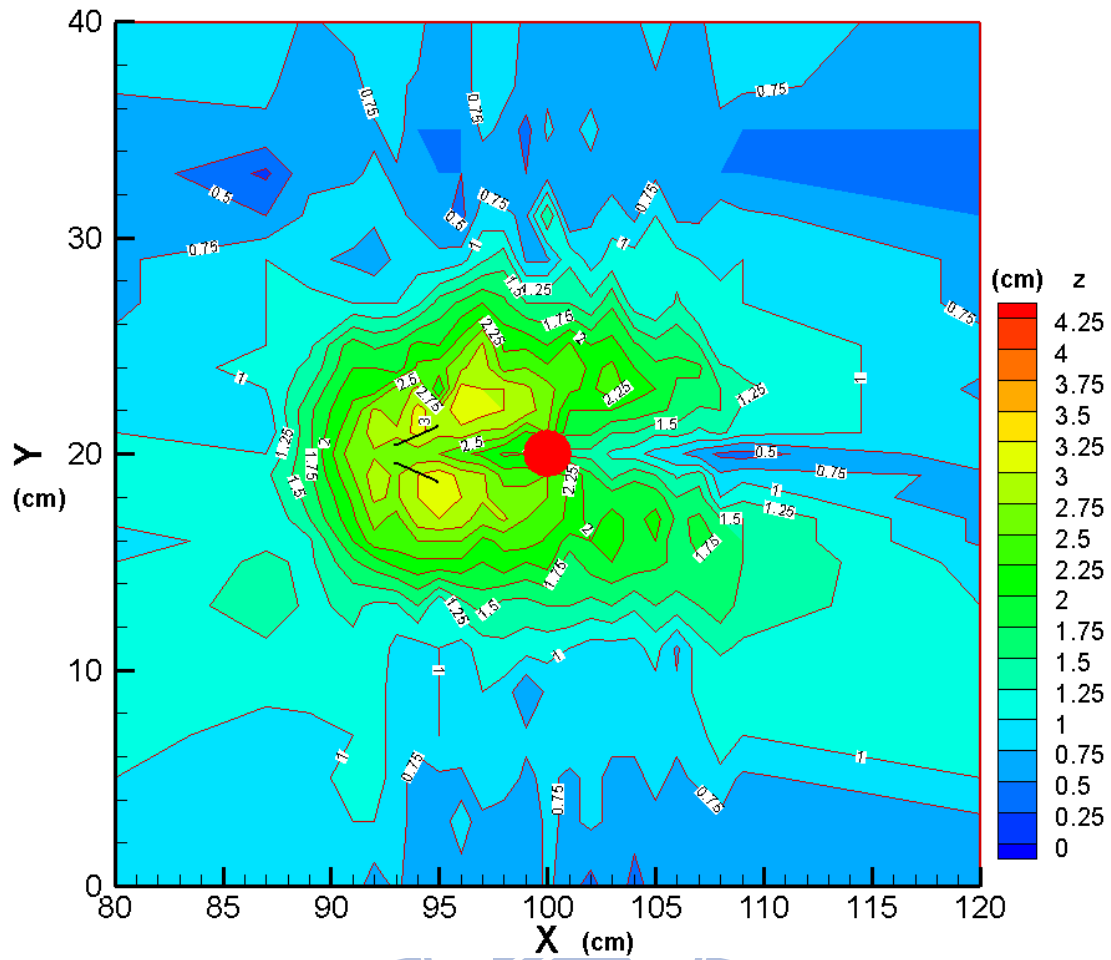


圖 4-45 案例 8 底床高程圖

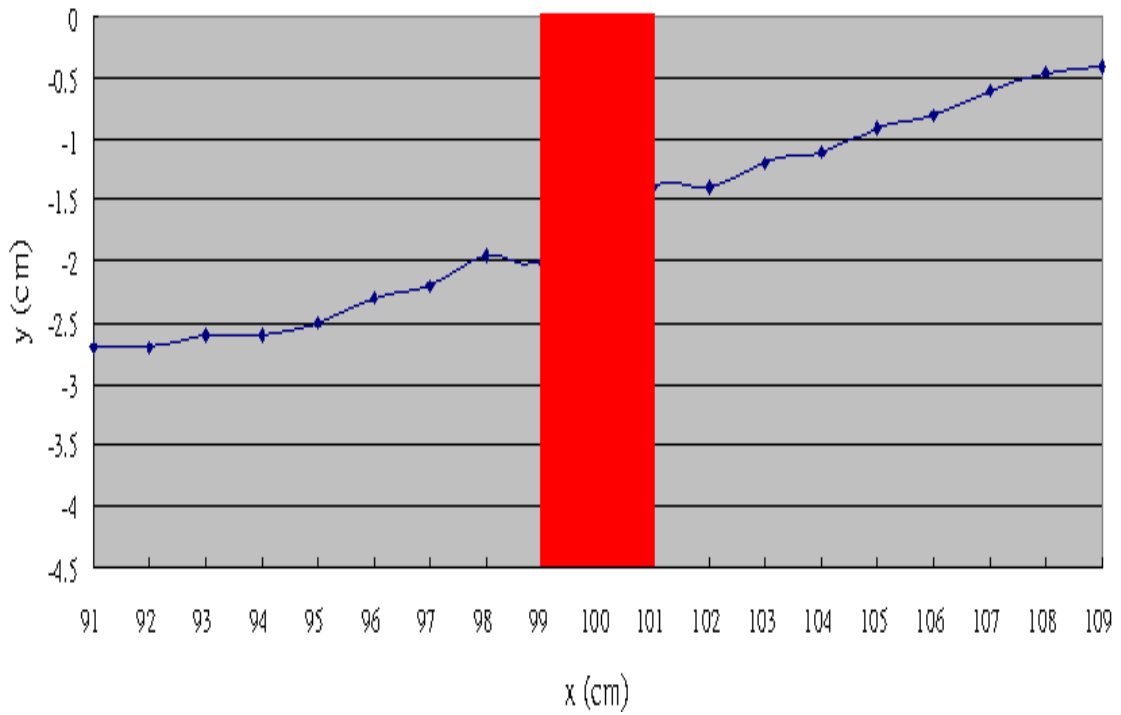


圖 4-46 案例 8 橋墩中心縱剖面圖

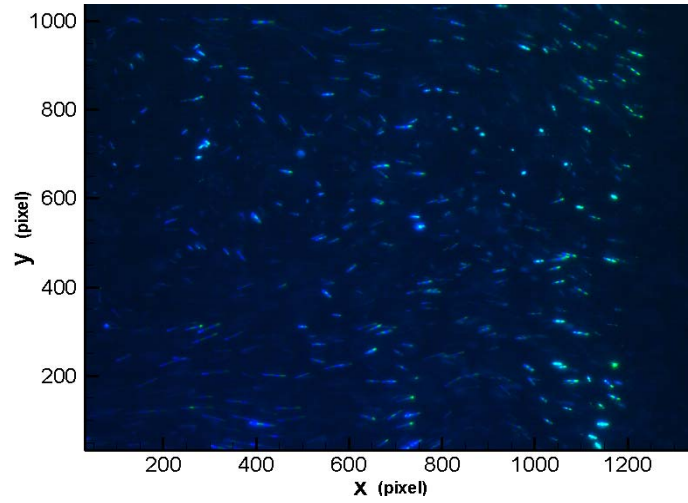


圖 4-47 案例 8 影像圖

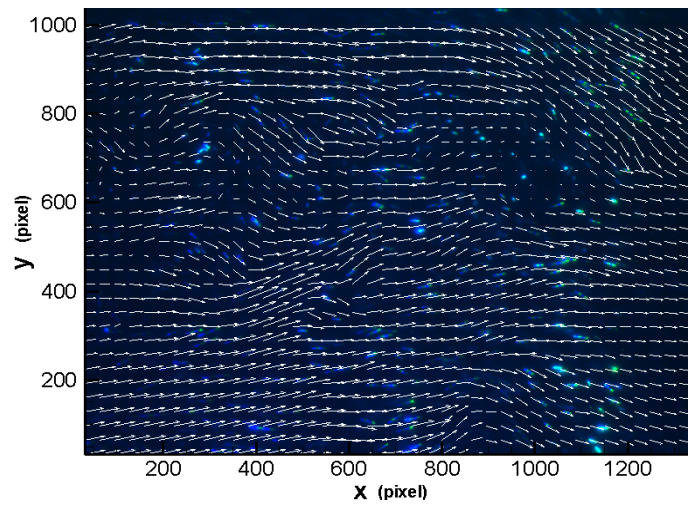


圖 4-48 案例 8 速度向量圖

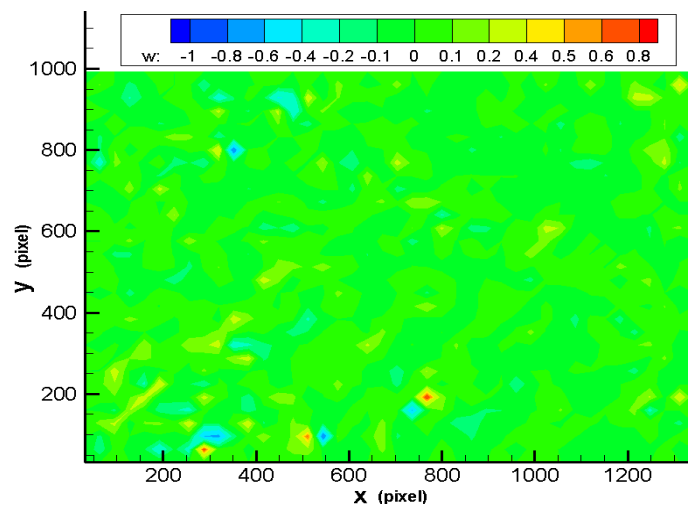


圖 4-49 案例 8 渦度場圖

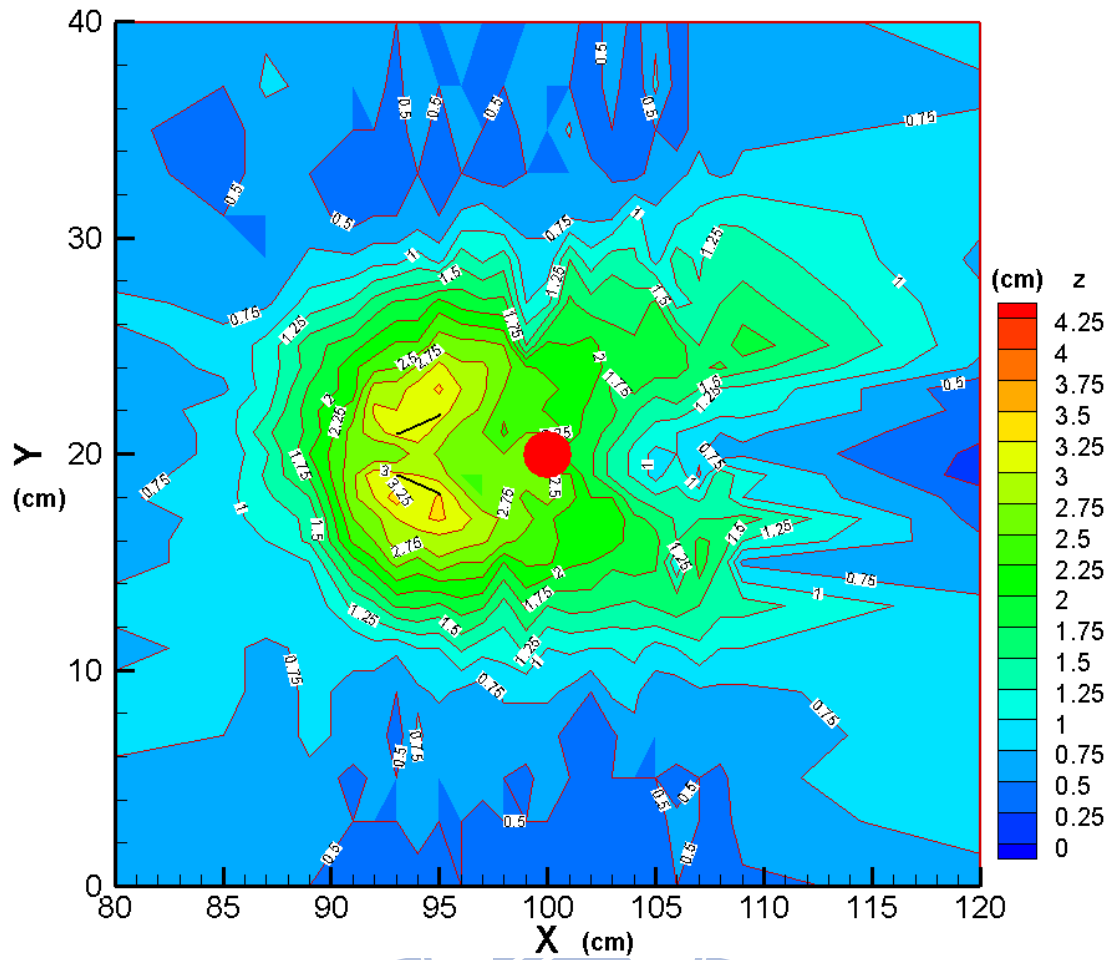


圖 4-50 案例 9 底床高程圖

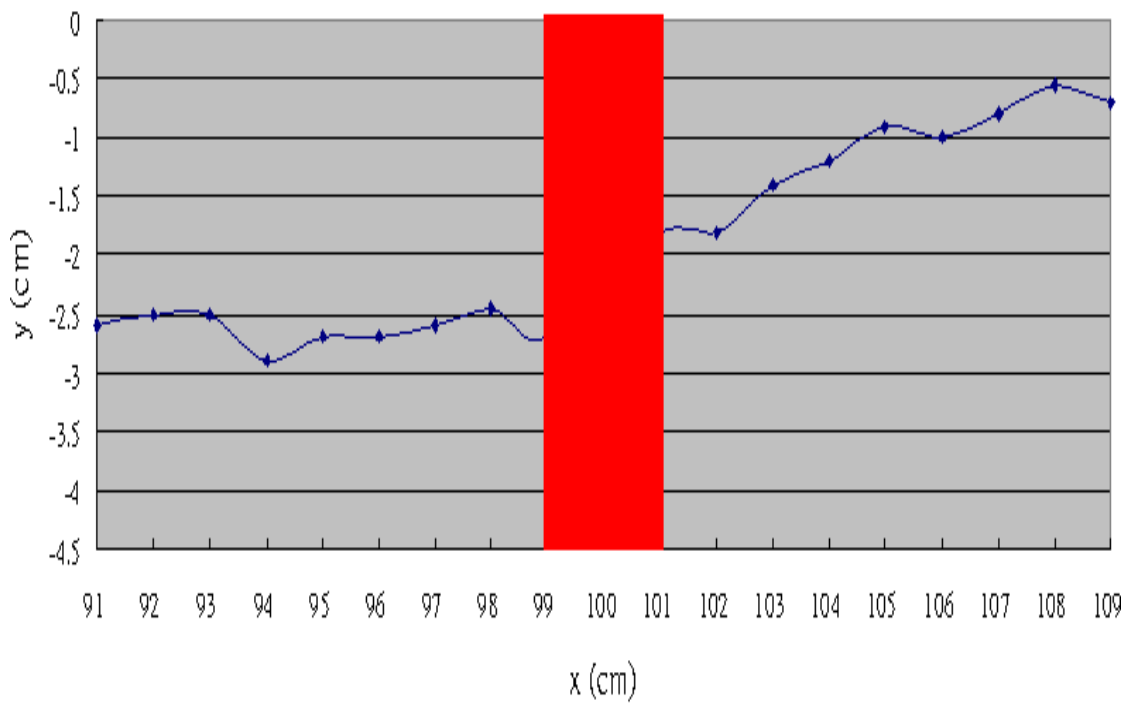


圖 4-51 案例 9 橋墩中心縱剖面圖

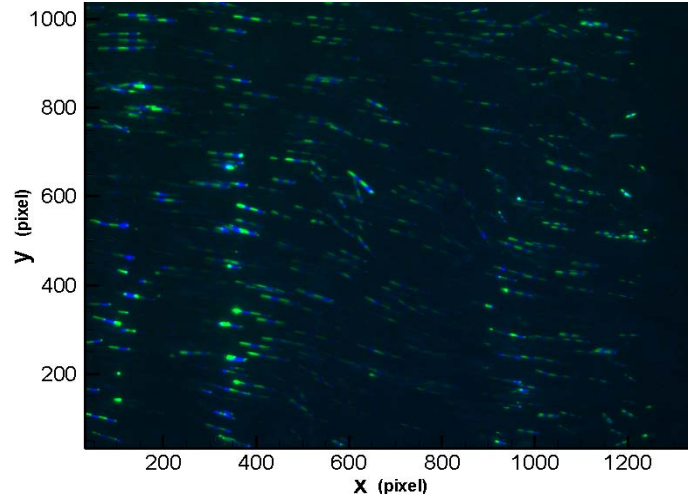


圖 4-52 案例 9 影像圖

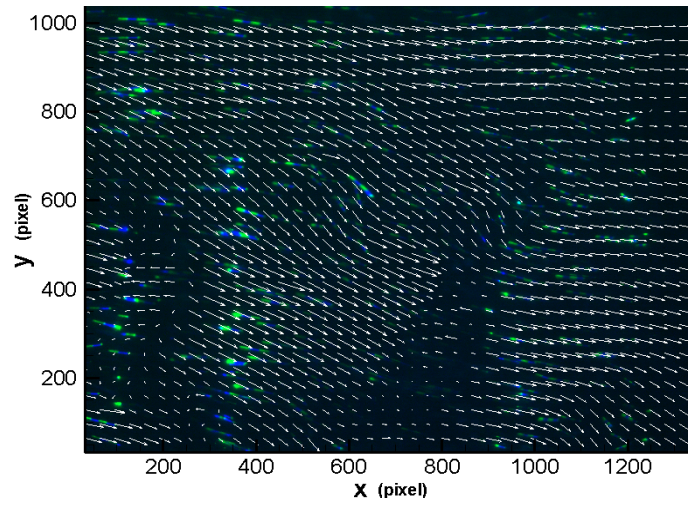


圖 4-53 案例 9 速度向量圖

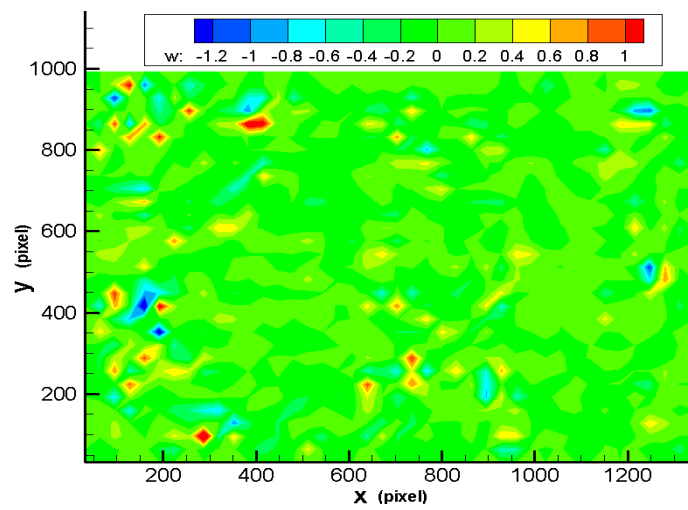


圖 4-54 案例 9 渦度場圖

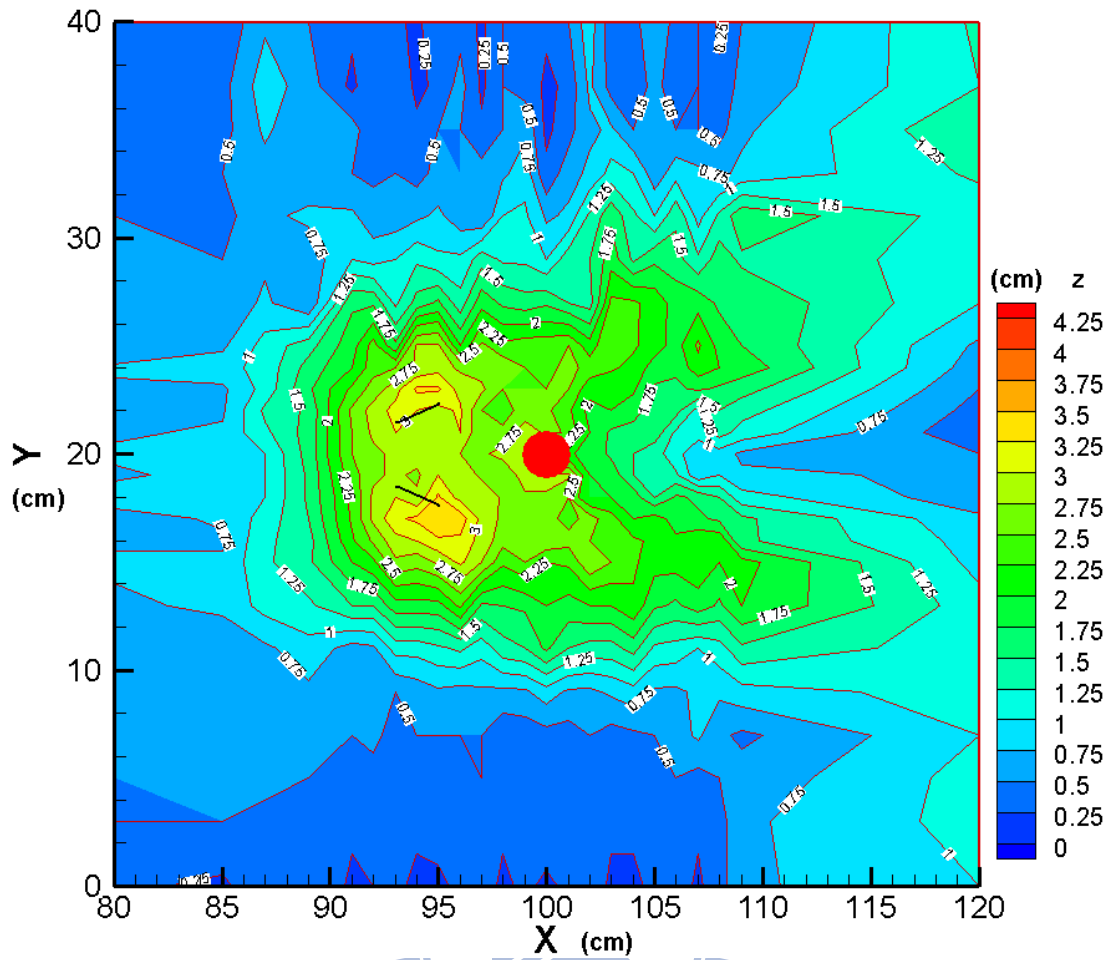


圖 4-55 案例 10 底床高程圖

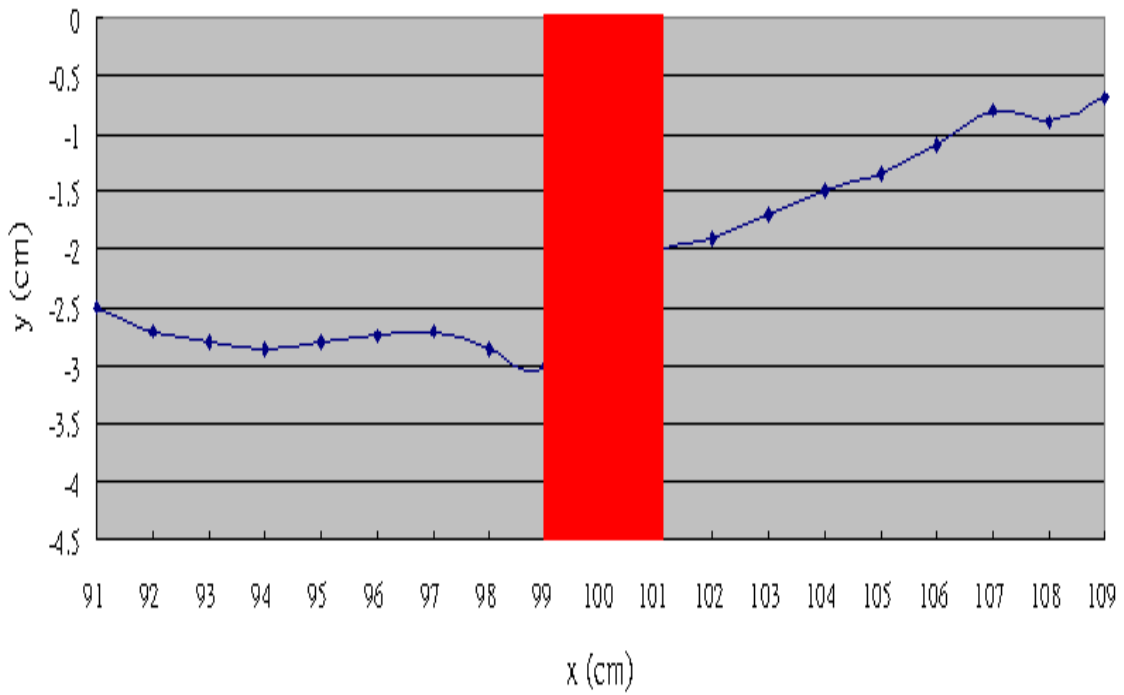


圖 4-56 案例 10 橋墩中心縱剖面圖

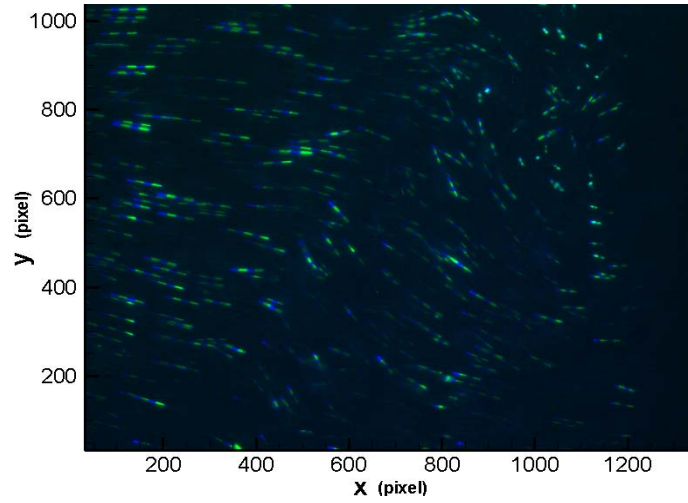


圖 4-57 案例 10 影像圖

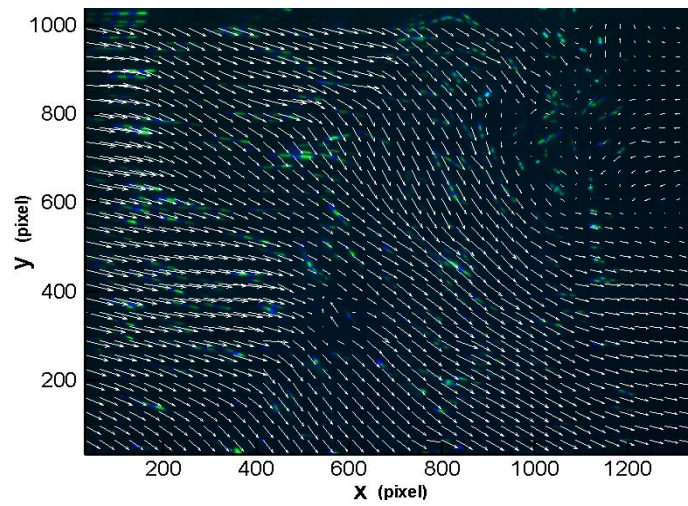


圖 4-58 案例 10 速度向量圖

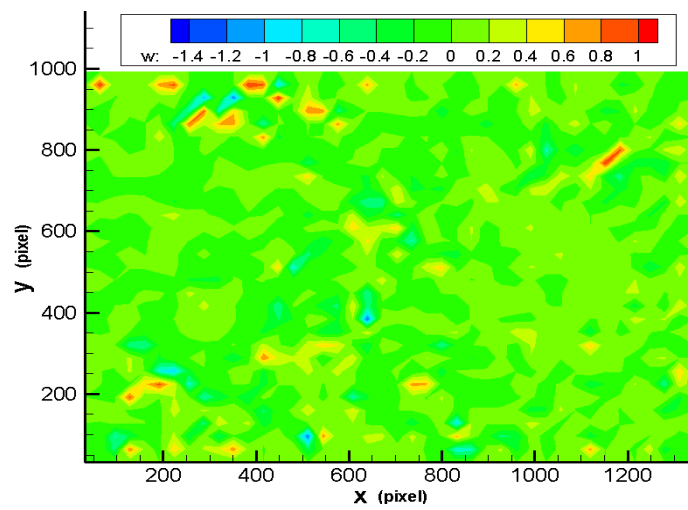


圖 4-59 案例 10 渦度場圖

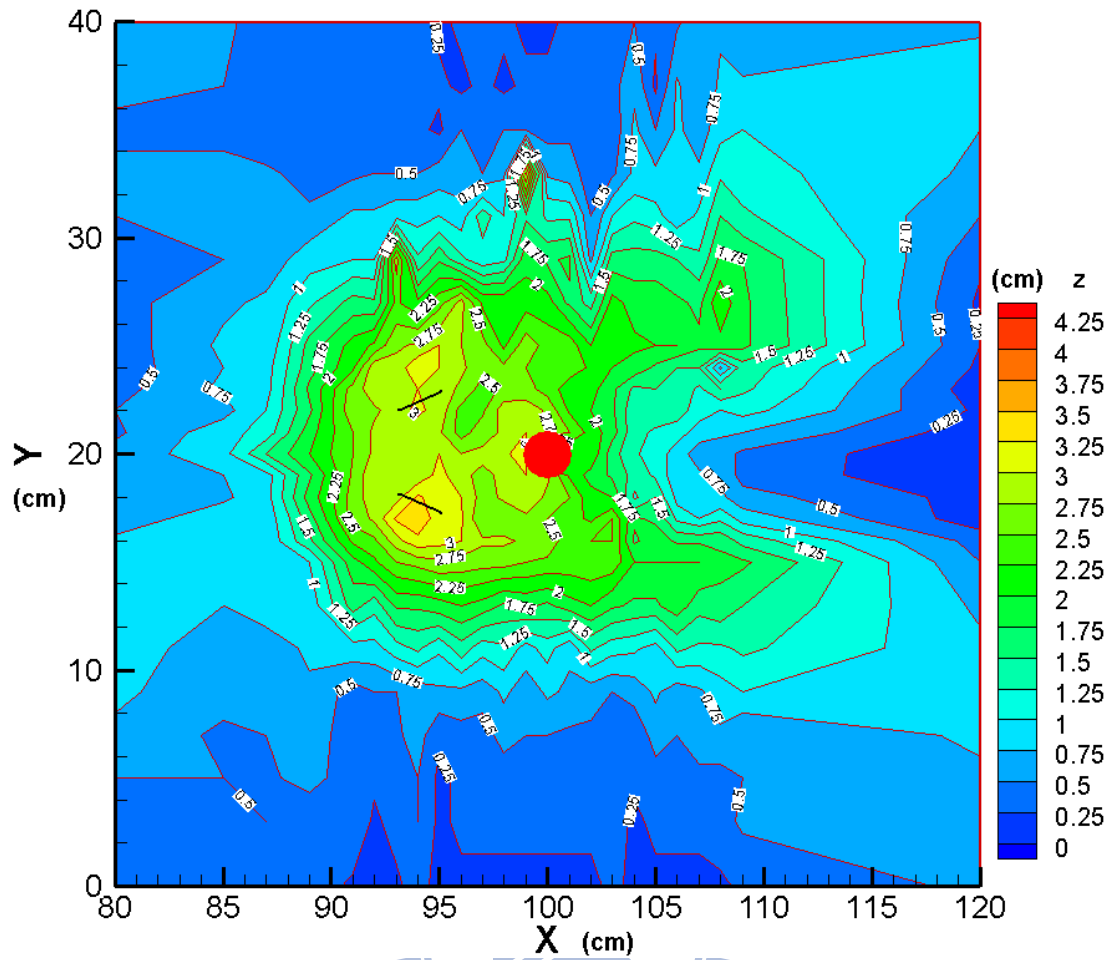


圖 4-60 案例 11 底床高程圖

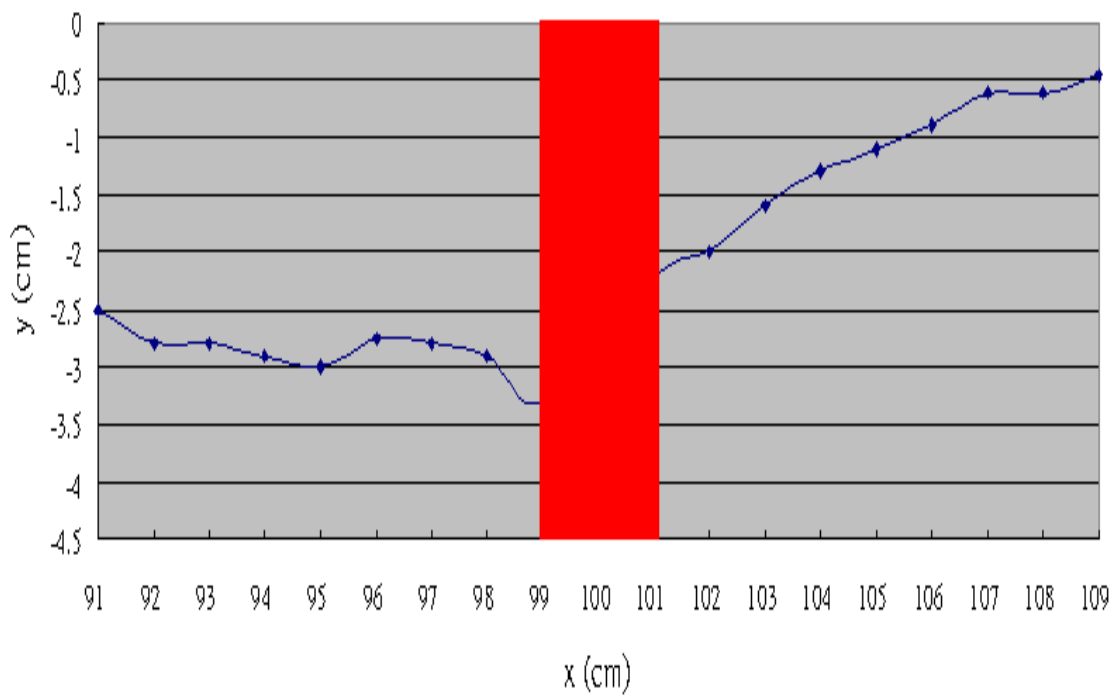


圖 4-61 案例 11 橋墩中心縱剖面圖

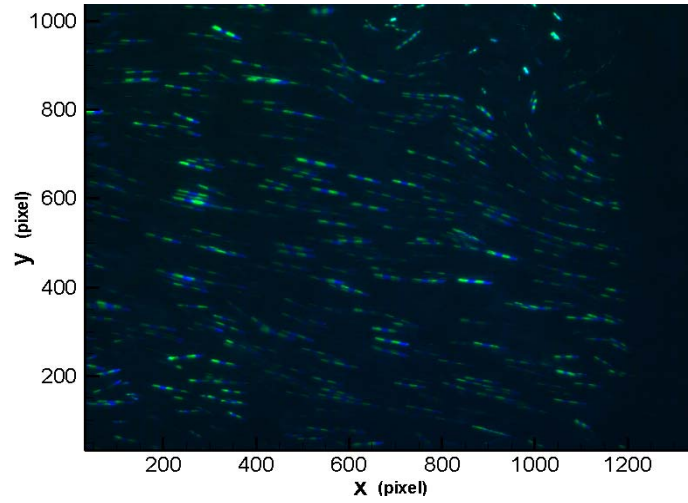


圖 4-62 案例 11 影像圖

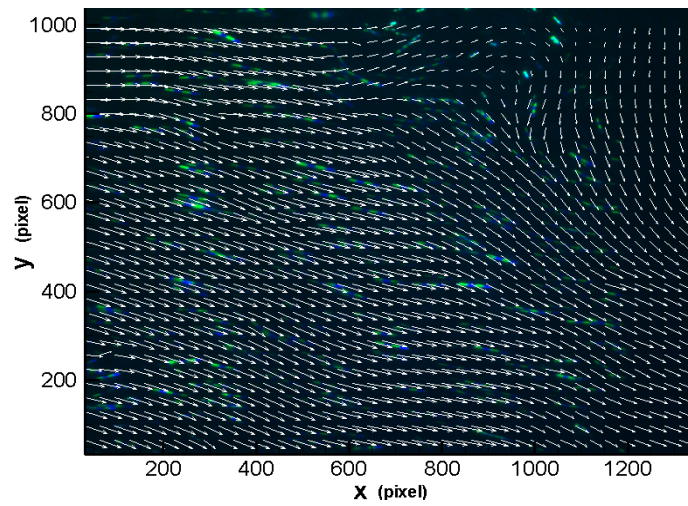


圖 4-63 案例 11 速度向量圖

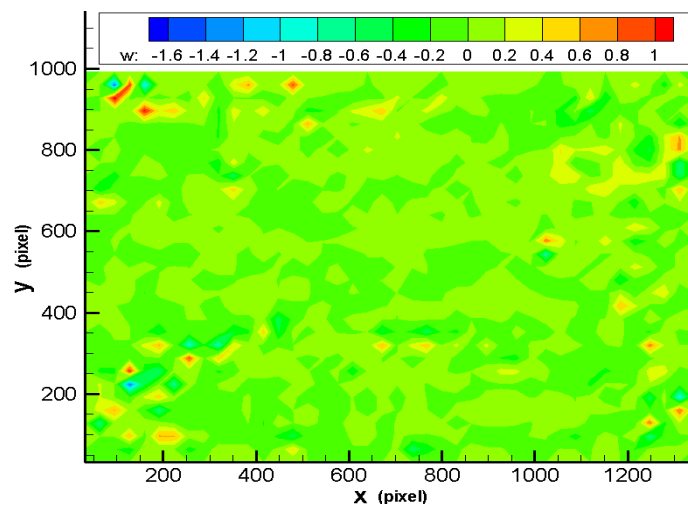


圖 4-64 案例 11 渦度場圖

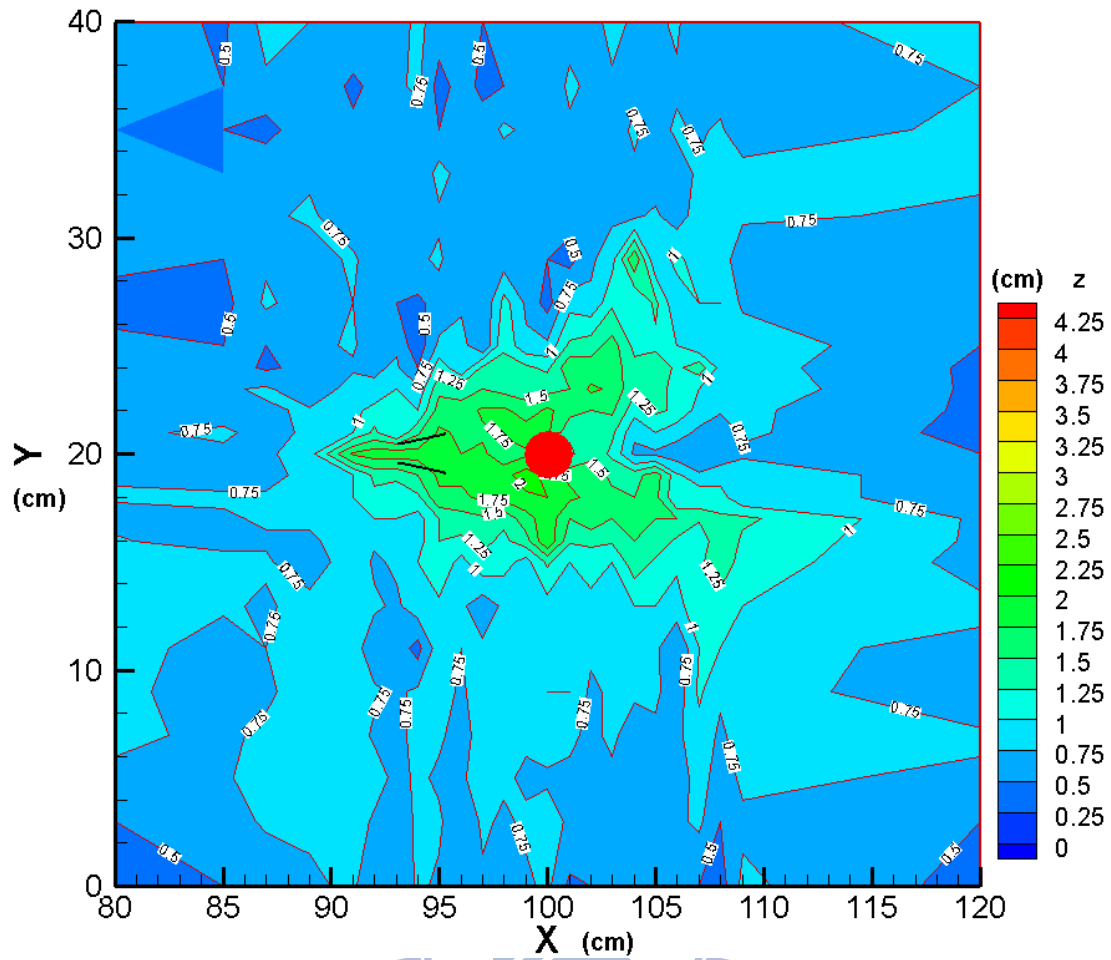


圖 4-65 案例 12 底床高程圖

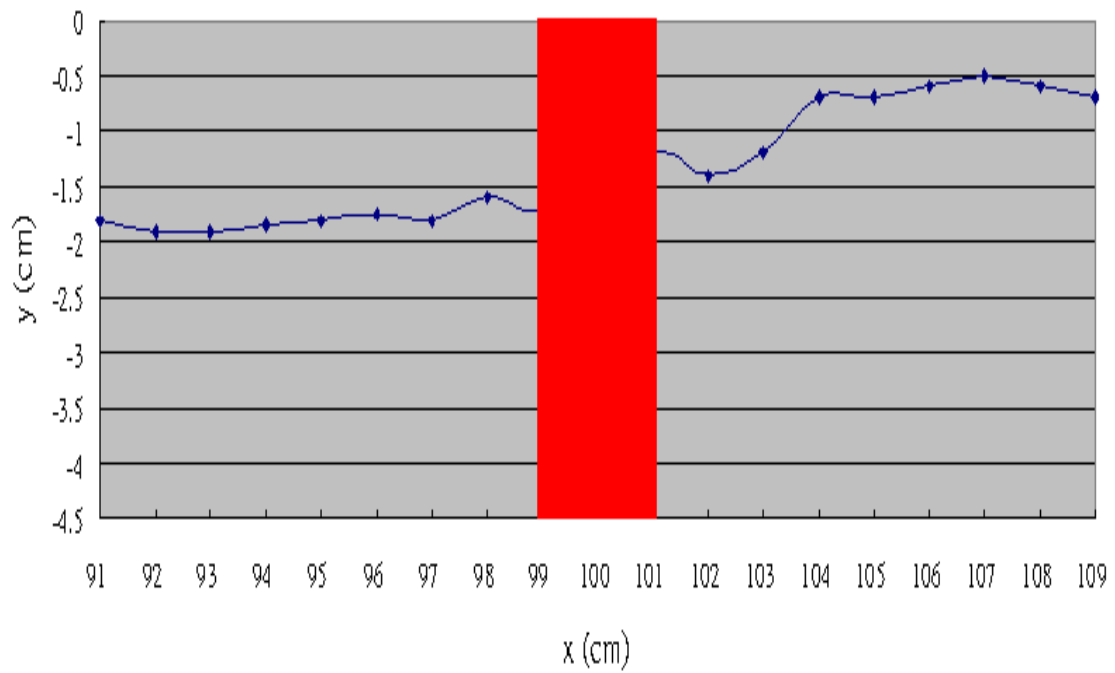


圖 4-66 案例 12 橋墩中心縱剖面圖

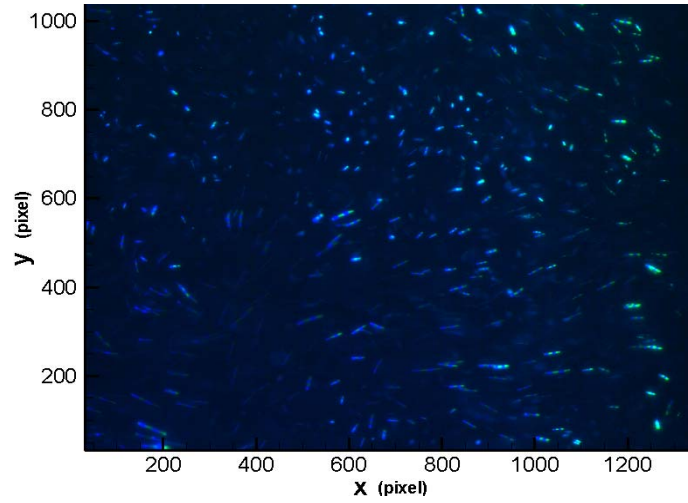


圖 4-67 案例 12 影像圖

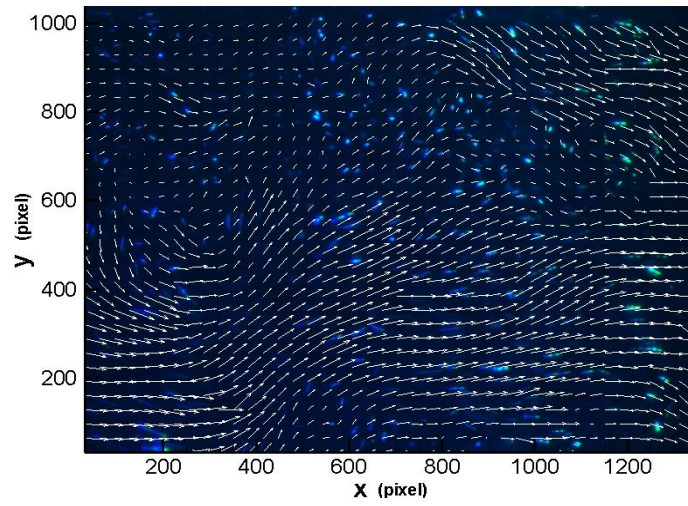


圖 4-68 案例 12 速度向量圖

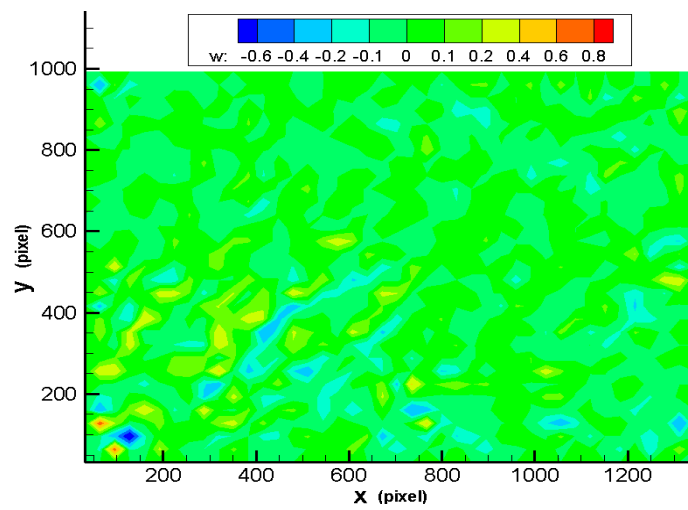


圖 4-69 案例 12 渦度場圖

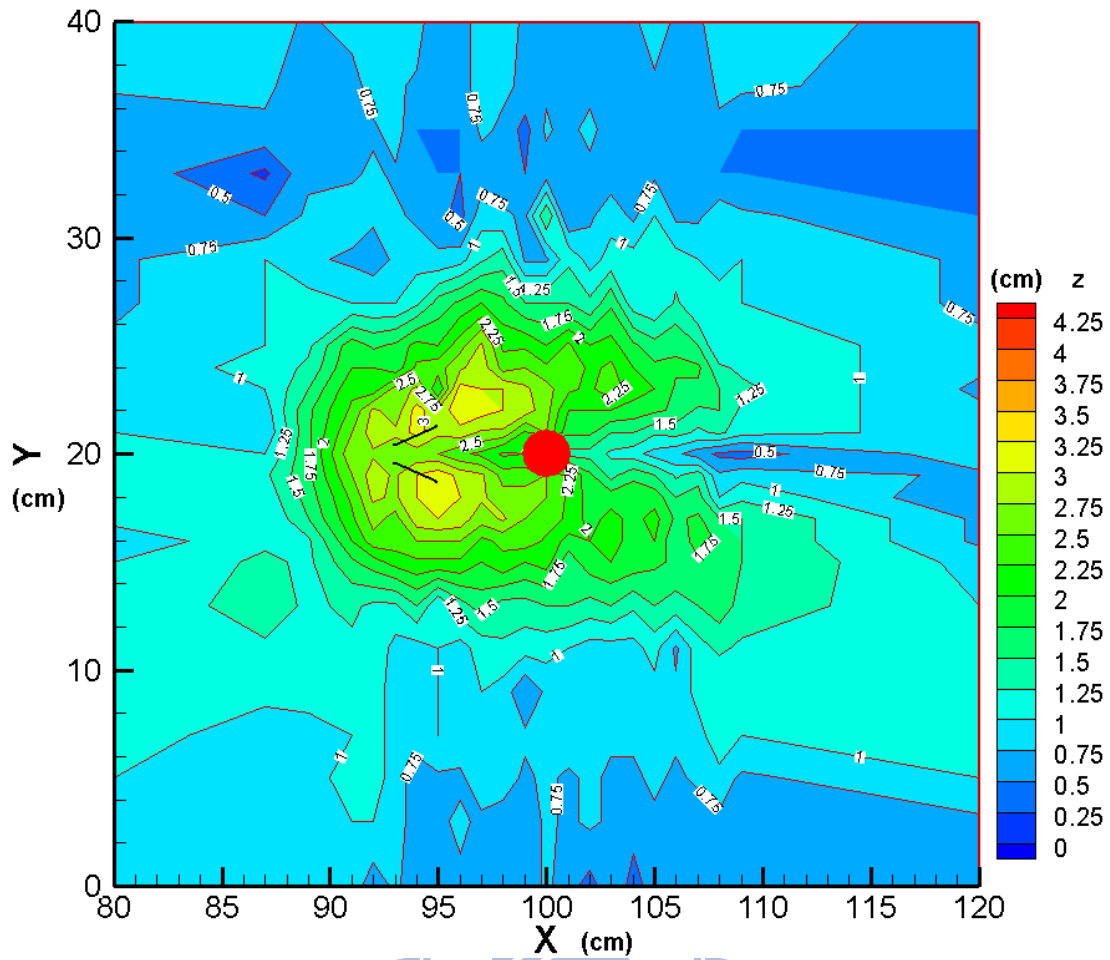


圖 4-70 案例 13 底床高程圖

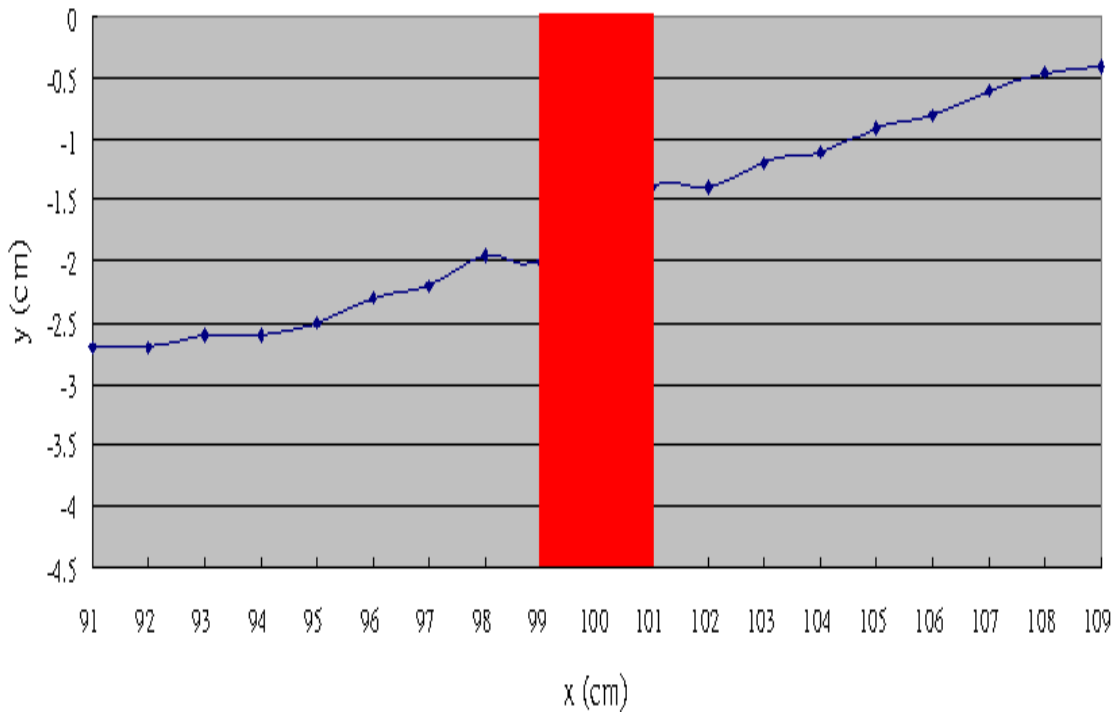


圖 4-71 案例 13 橋墩中心縱剖面圖

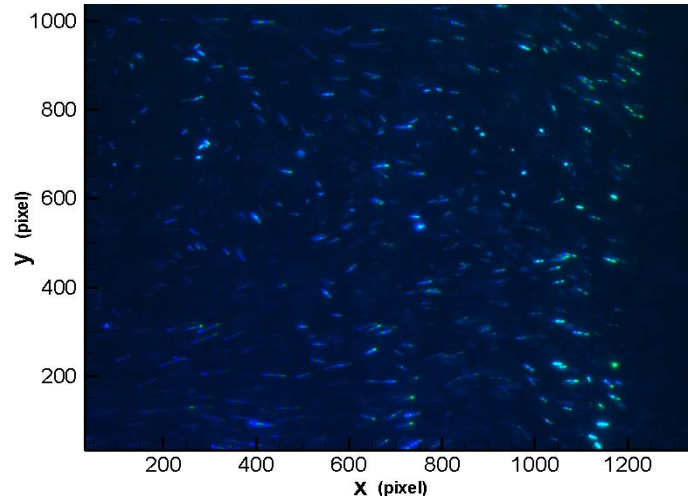


圖 4-72 案例 13 影像圖

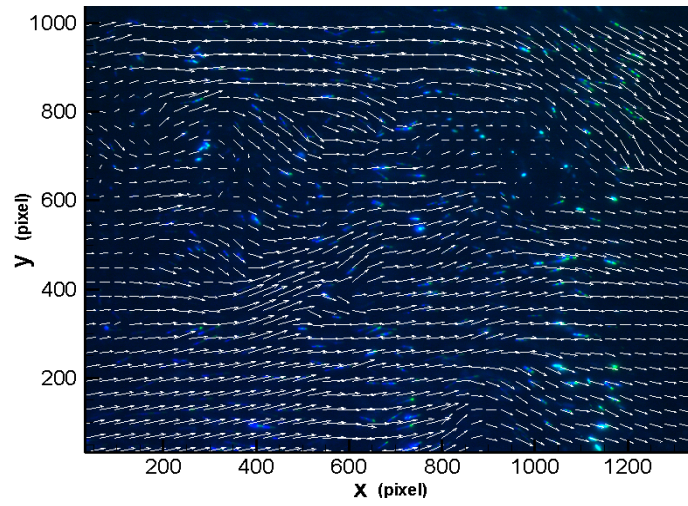


圖 4-73 案例 13 速度向量圖

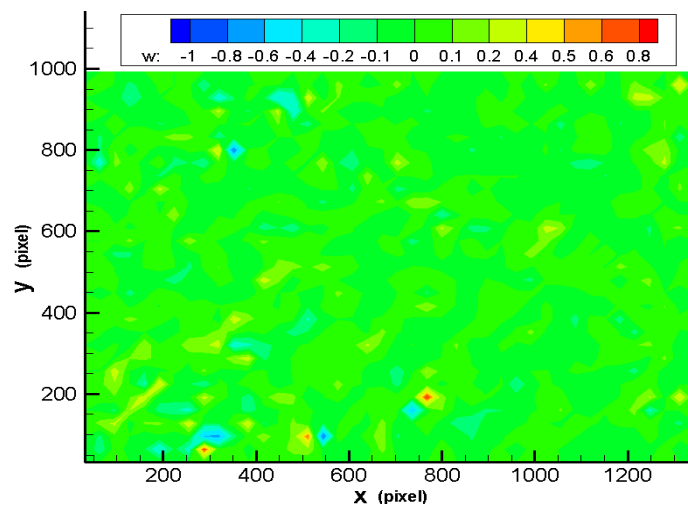


圖 4-74 案例 13 渦度場圖

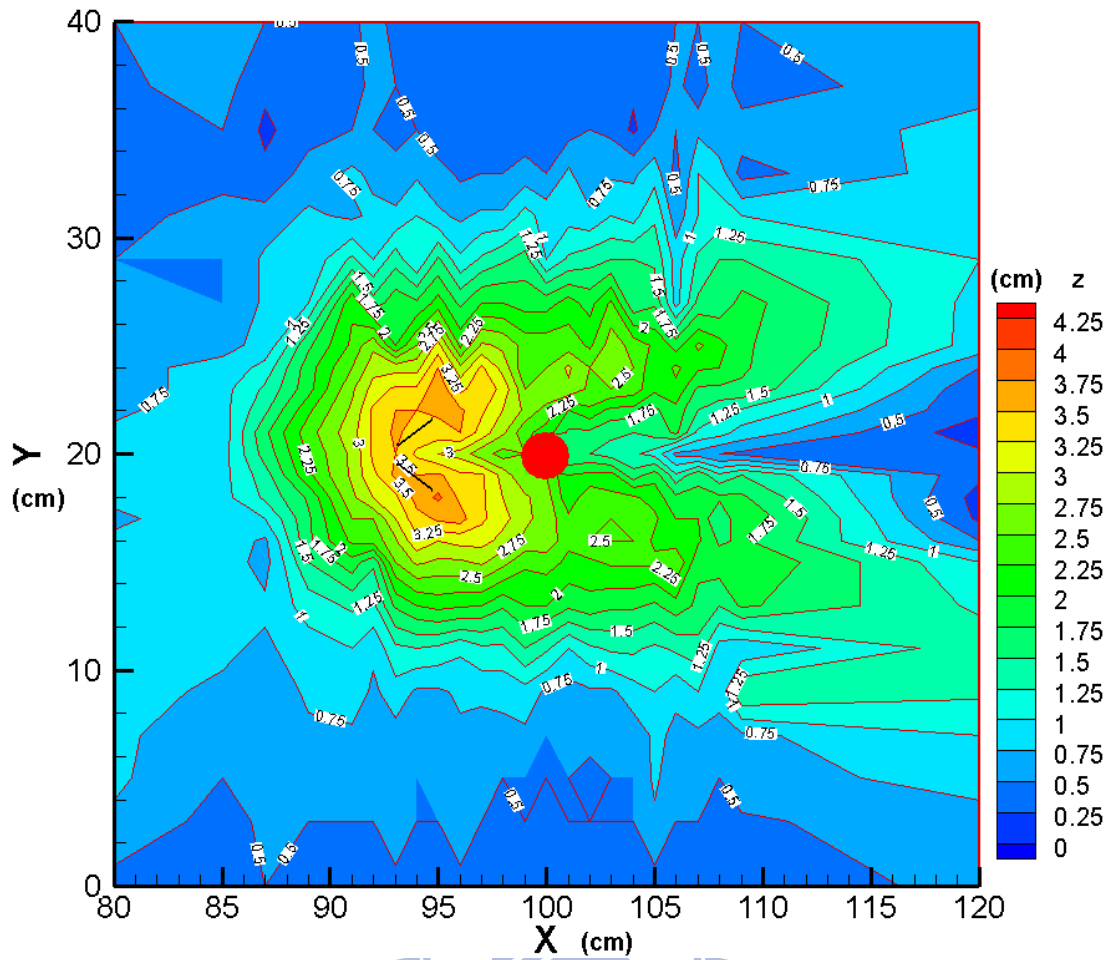


圖 4-75 案例 14 底床高程圖

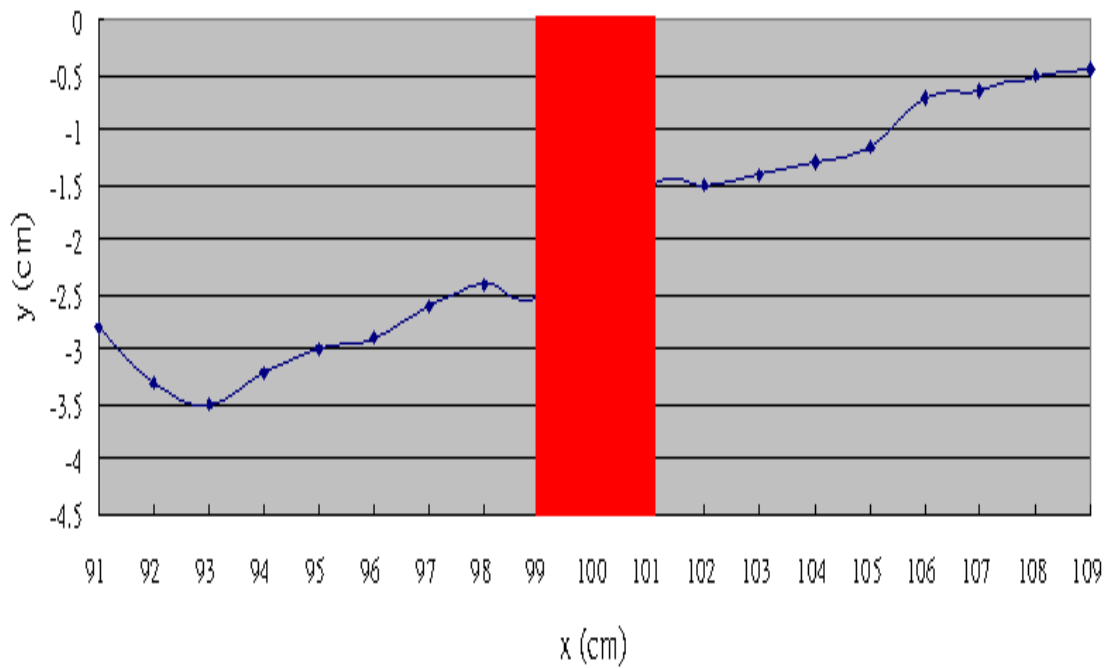


圖 4-76 案例 14 橋墩中心縱剖面圖

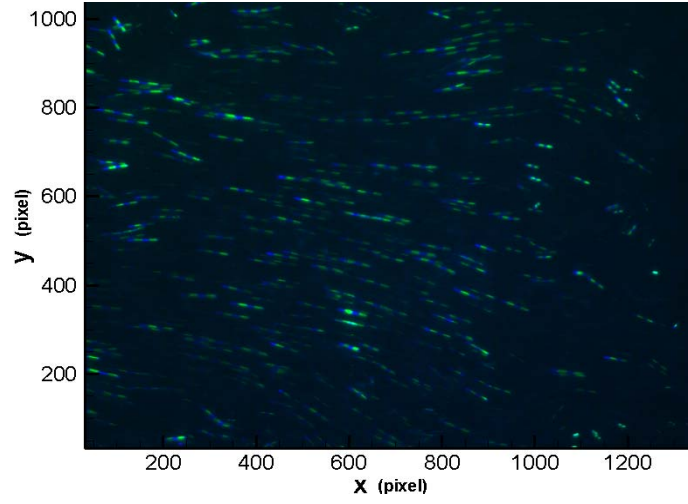


圖 4-77 案例 14 影像圖

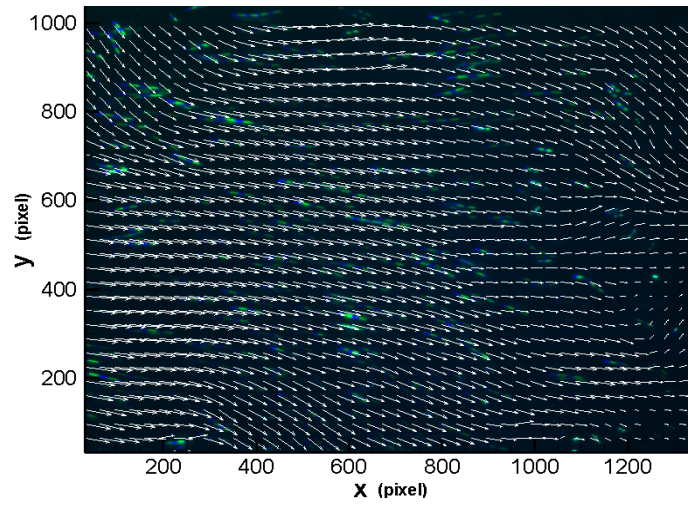


圖 4-78 案例 14 速度向量圖

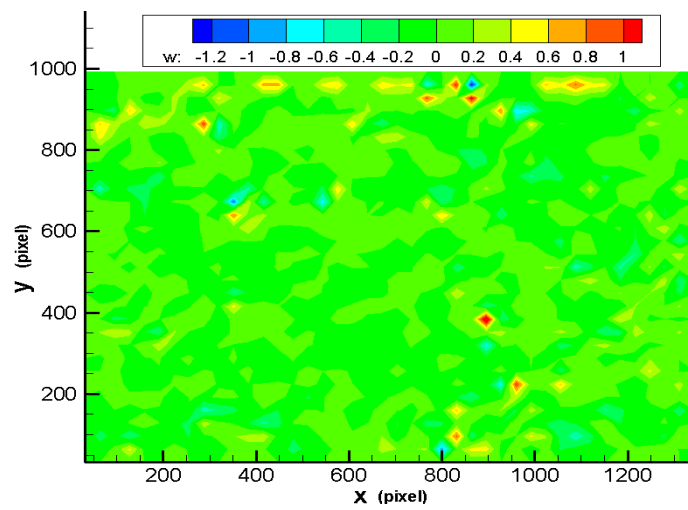


圖 4-79 案例 14 渦度場圖

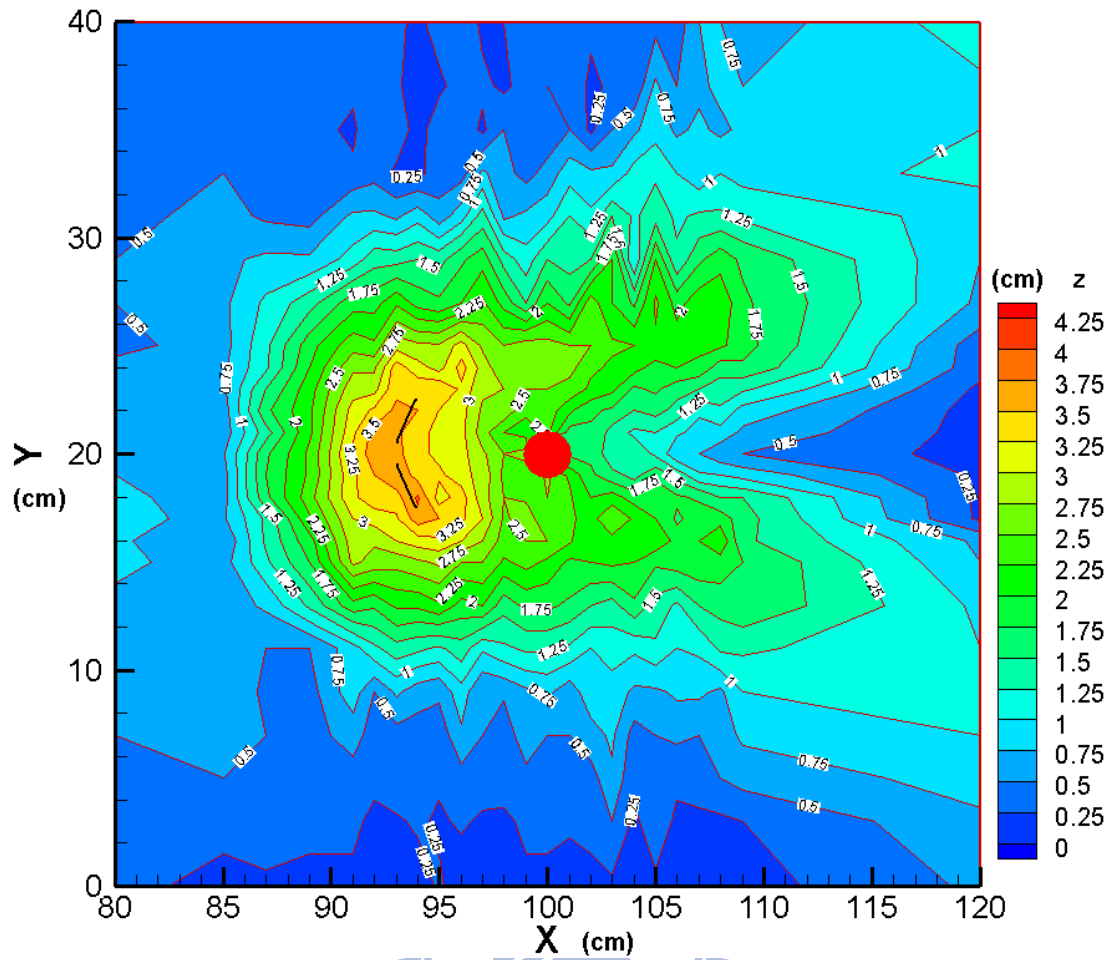


圖 4-80 案例 15 底床高程圖

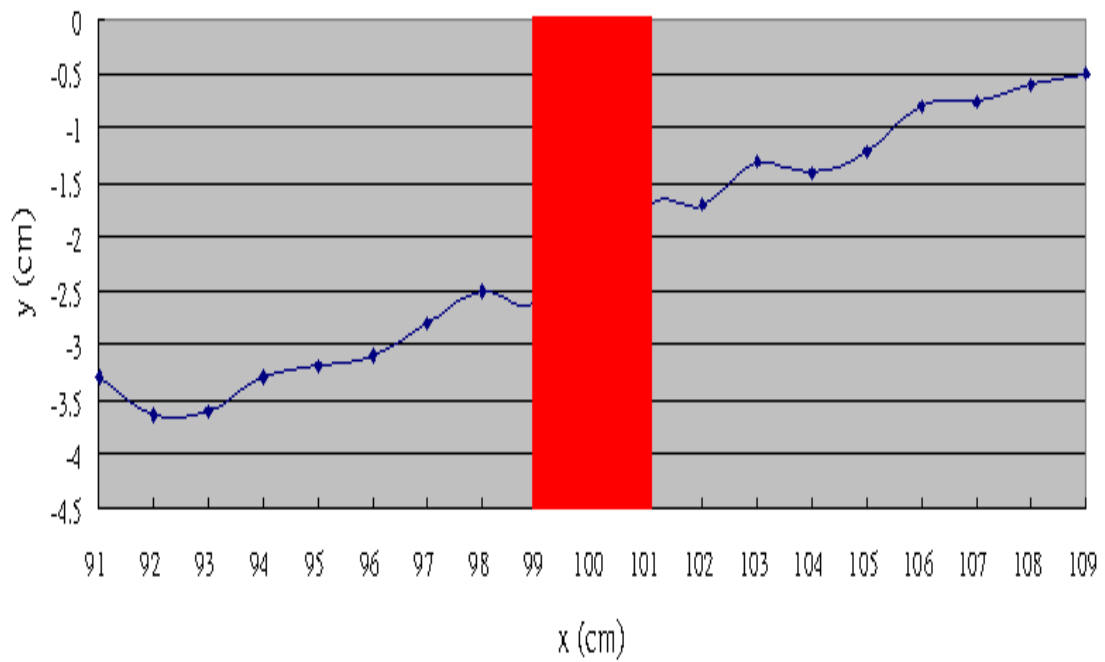


圖 4-81 案例 15 橋墩中心縱剖面圖

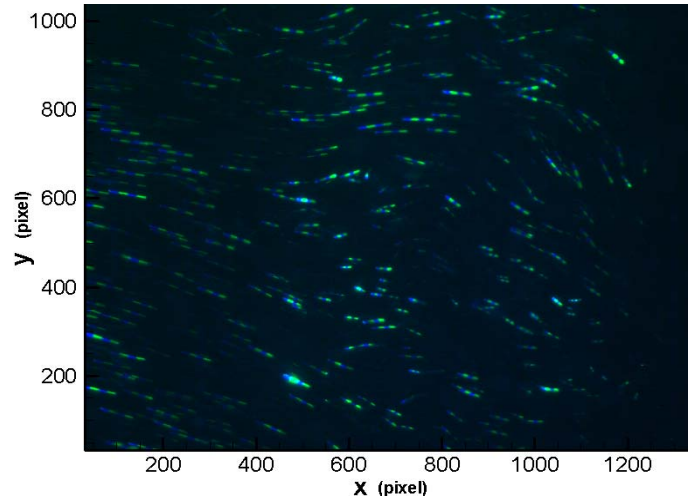


圖 4-82 案例 15 影像圖

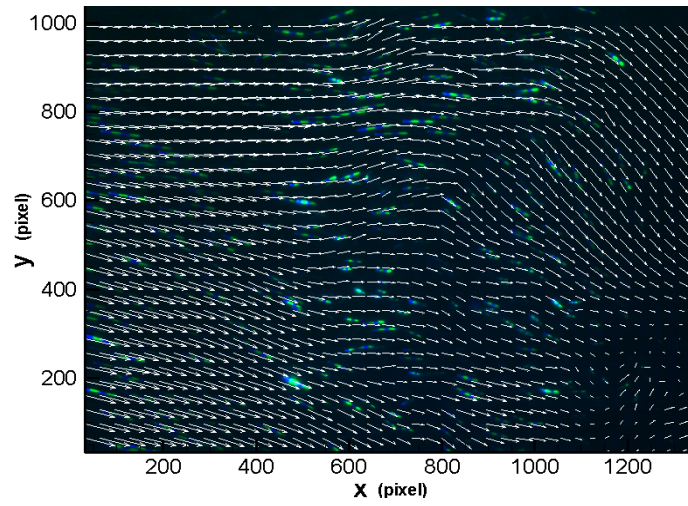


圖 4-83 案例 15 速度向量圖

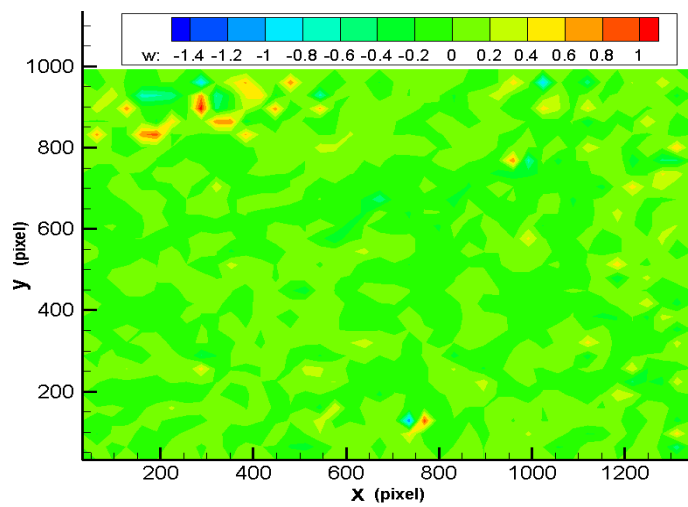


圖 4-84 案例 15 渦度場圖

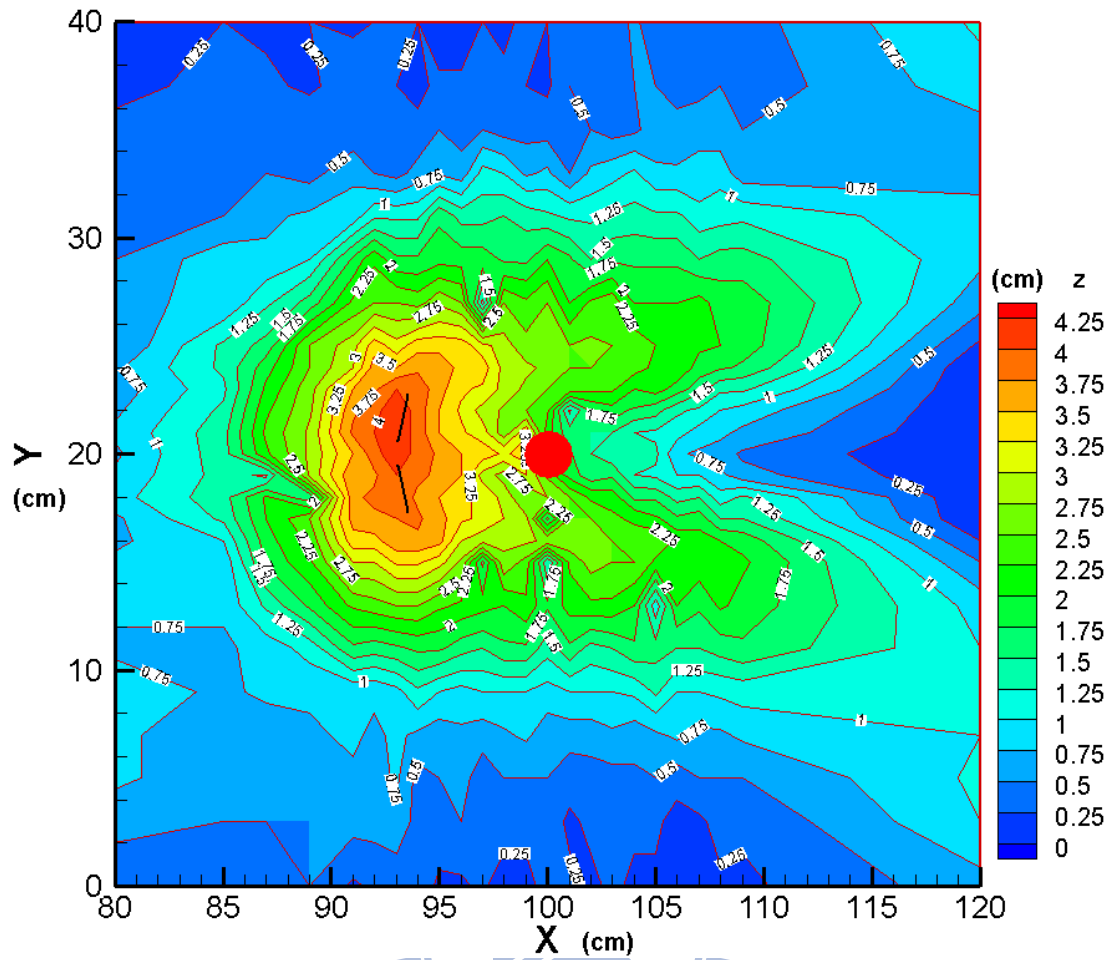


圖 4-85 案例 16 底床高程圖

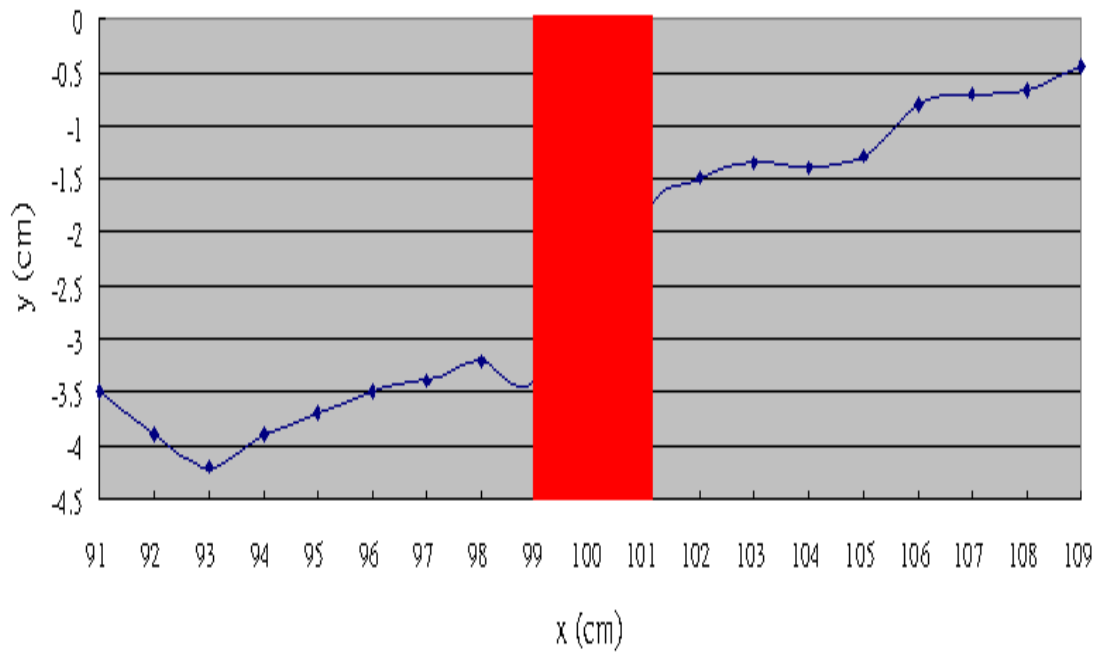


圖 4-86 案例 16 橋墩中心縱剖面圖

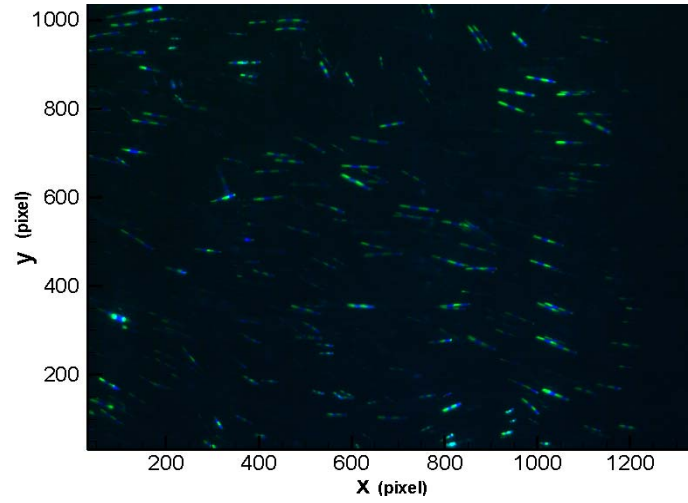


圖 4-87 案例 16 影像圖

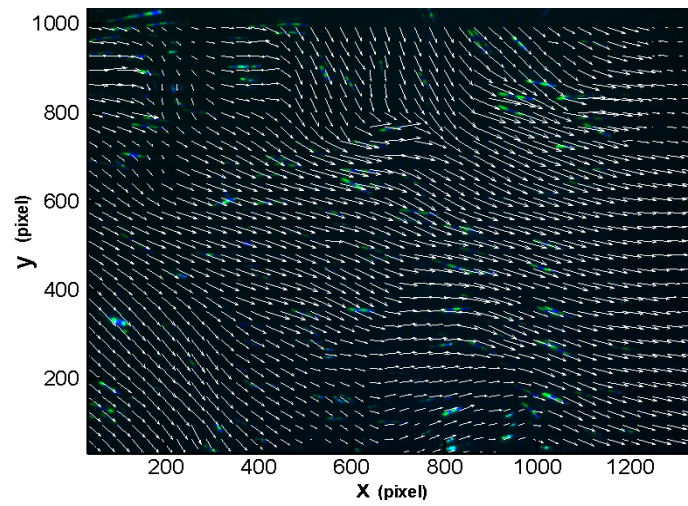


圖 4-88 案例 16 速度向量圖

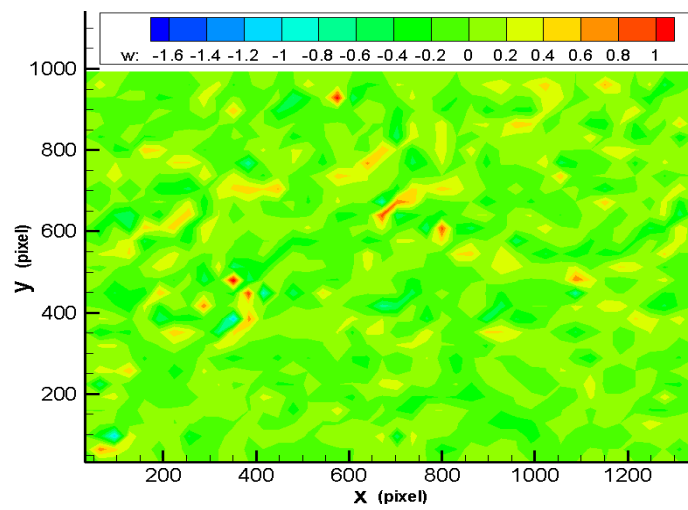


圖 4-89 案例 16 渦度場圖