

100-151-7569  
MOTC-IOT-98-H1EB005

# 河道水位與橋墩沖刷推估模式 之建立研究



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

100-151-7569  
MOTC-IOT-98-H1EB005

# 河道水位與橋墩沖刷推估模式 之建立研究

著者：邱永芳、謝明志、林雅雯、游保杉、呂珍謀  
楊道昌、詹勳全、陳薇伊、歐芳郡、周容辰  
陳潔、黃進國、羅冠顯、陳家隆

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 12 月

國家圖書館出入品預行編目(CIP)資料

河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究 / 邱永芳等著.

臺北市：交通部運研所，2011. 12

面； 公分

ISBN 978-986-03-1269-0 (平裝)

1. 橋樑工程 2. 河床

441.816

100027842

### 河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

著 者：邱永芳、謝明志、林雅雯、游保山、呂珍謀、楊道昌、詹勳全  
陳薇伊、歐芳郡、周容辰、陳 潔、黃進國、羅冠顯、陳家隆

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 台北市敦化北路 240 號

網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)

電 話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 100 年 12 月

印 刷 者：彩霖股份有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 150 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：300 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 台北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010004968

ISBN：978-986-03-1269-0 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010004968

定價:300 元

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-03-1269-0（平裝）	政府出版品統一編號 1010004968	運輸研究所出版品編號 100-151-7569	計畫編號 98-H1EB005
本所主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：謝明志 研究人員：林雅雯 聯絡電話：04-26587197 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立成功大學 計畫主持人：游保杉 教授 研究人員：呂珍謀、楊道昌、郭振民、詹勳全、 黃進國、羅冠顯、陳家隆 地址：臺南市東區大學路1號 聯絡電話：06-2757575		研究期間 自98年10月 至100年12月
關鍵詞：QPESUMS 降雨、降雨逕流模式、水理演算、河道沖刷			
摘要：  <p>本計畫旨在建立國道1號與國道3號跨越大甲溪橋梁橋墩之水位與沖刷深度推估模式。分析項目包含(1)應用雷達降雨預報資料提供集水區未來降雨空間變化(2)利用格網分布型降雨逕流模式分析石岡壩入流量(3)石岡壩下游橋梁數值模式的檢驗與沖刷預測。在雷達降雨預報資料應用方面，主要是提供降雨逕流模式所需要的空間降雨分布，利用支撐向量機迴歸法與Kriging空間誤差修正法估算各地區雨量分布，以掌握雨量的空間變化特性。在格網分布型降雨逕流模式方面，利用各格網的相關地文因子(地表高程、邊界長度、地表坡度、土地利用與入滲參數)與相關颱風場次資料所估算的模式參數，已能成功的模擬出其他歷史颱風事件的石岡壩入流量，配合石岡壩的操作規則即可提供橋梁數值模式所需要的石岡壩放流量。橋梁數值模式選用CCHE1D模式做為一維動床水理模擬模式，水理演算模式的驗證，以2005年的颱風事件紀錄與石岡壩放水量進行演算，水位模擬與實測趨勢頗為相近。動床水理模式模擬石岡壩放流後下游河道之洪水歷程，僅模擬之洪峰水位值稍略高於觀測之峰值，洪峰到達時刻與實際狀況十分吻合，因此本模式可以合理的模擬下游河道水位變化。一般沖刷的分析中，利用2008年辛樂克颱風的觀測資料檢驗，本計畫的動床模組具備模擬大甲溪颱風事件的能力，可以合理預測水位與底床變化。同時以2005年斷面資料與歷史颱風事件模擬下游河道在2008年的可能沖淤現象，發現其結果在計畫範圍的國道1號與國道3號大甲溪橋處的沖淤狀況與2008年調查結果吻合。本研究結果可以提供橋梁管理單位在颱風期間做為沖刷預警之用。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
100年12月	320	300	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價購買。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS**  
**INSTITUTE OF TRANSPORTATION**  
**MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

<b>TITLE: Prediction of Flood Stage and Scour Depth around Bridge Piers</b>			
<b>ISBN (OR ISSN)</b> ISBN 978-986-03-1269-0(pbk)	<b>GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER</b> 1010004968	<b>IOT SERIAL NUMBER</b> 100-151-7569	<b>PROJECT NUMBER</b> 98-H1EB005
DIVISION: Harbor and Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ming-Jyh Hsieh PROJECT STAFF: Ya-Wen Lin PHONE: 04-26587197 FAX:04-26564418			<b>PROJECT PERIOD</b> FROM October 2009 TO December 2011
RESEARCH AGENCY: NCKU Hydraulics and Ocean Engineering R&D Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: P. S. Yu PROJECT STAFF: J.M. Leu, T.C. Yang, C.M. Kuo, J.C. Chou, Chin-Kuo Huang, Guan-Suan Luo, Jia-Long Chen ADDRESS: 1, University Rd., Tainan 701, Taiwan R.O.C PHONE: 07-3814526ext5256			
<b>KEY WORDS: QPESUMS Rainfall, Rainfall-Runoff Model, Flow Routing, River Scour</b>			
<b>ABSTRACT:</b> <p>This study aims to develop a water level and scour depth-estimating model for the bridges of National Freeway No.1 and No.3 of which cross Dajia River. Three parts included in the study were executed and the results are presented herein. (1) Apply the QPESUMS real-time and forecasted rainfall data to provide the spatial variation of rainfall distribution in the watershed. (2) Estimate the inflow of Shih-Kang Reservoir by using the radar rainfall and the grid-based distributed rainfall-runoff model. (3) Test and verify the flow routing and scour estimating models for the bridges located downstream of Shih-Kang Reservoir. Firstly, the support vector machine regression model and the Kriging method were used to enhance the estimation of rainfall spatial distribution in the watershed. Then, the rainfall spatial distribution was input to the rainfall-runoff model. Combining with the related geographic characters of the watershed that were derived from DTM, satellite images and soil map to the rainfall-runoff model, the model can simulate the inflow of Shih-Kang Reservoir for selected flood events reasonably. Further, the outflow of Shih-Kang Reservoir was used to estimate the water levels of each cross section downstream through the CCHE1D model. With the testing of the flood in 2005, the CCHE1D model can be used to simulate the flow and water level well. Then the general scour module was tested successfully by using the scour observation data of the flood in 2008. Combining the flow routing and scour estimating models; the long-term simulation was tested with the major flood events during 2005 to 2008. The estimated scour depths of the bridges of National Freeway No.1 and No.3 of which cross Dajia River were close to the cross section investigations in 2008. In conclusion, this study successfully combines the QPESUMS radar rainfall, rainfall-runoff model, flow routing model and scour-estimating model to estimate the water level and scour depth of the bridges across Dajia River. The results of this study can provide the warning information to the bridge administration during the typhoon event in the future.</p>			
<b>DATE OF PUBLICATION</b> December 2011	<b>NUMBER OF PAGES</b> 320	<b>PRICE</b> 300	<b>CLASSIFICATION</b> <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
目錄 .....	III
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XIII
第一章 前言 .....	1-1
1.1 計畫緣由 .....	1-1
1.2 計畫架構與計畫範圍 .....	1-1
1.2.1 計畫架構 .....	1-1
1.2.2 計畫範圍 .....	1-4
1.3 計畫執行步驟與預期工作效益 .....	1-24
1.3.1 計畫執行步驟與預計進度 .....	1-24
1.3.2 預期工作效益 .....	1-27
第二章 文獻回顧 .....	2-1
2.1 雷達雨量預報相關文獻 .....	2-1
2.1.1 迴歸關係式修正雷達降雨 .....	2-1
2.1.2 空間內插法修正雷達降雨 .....	2-2
2.1.3 類神經網路修正雷達降雨 .....	2-3

2.2 分布型降雨逕流模式相關文獻.....	2-5
2.3 水理演算與橋墩沖刷相關文獻.....	2-6
第三章 大甲溪流域雷達降雨預報資料校正.....	3-1
3.1 雷達回波估計雨量方法.....	3-1
3.2 QPESUMS 觀測降雨技術概述.....	3-2
3.3 支撐向量迴歸.....	3-8
3.4 QPESUMS 降雨修正.....	3-15
3.4.1 研究區域.....	3-15
3.4.2 QPESUMS 二度分帶坐標格網繪製.....	3-16
3.4.3 分析資料收集.....	3-18
3.4.4 支撐向量機修正.....	3-20
3.4.5 SVR 之率定與驗證結果.....	3-23
3.4.6 雷達雨量修正方式改進.....	3-27
3.4.6.1 克利金推估法.....	3-27
3.4.6.2 區域變數理論.....	3-27
3.4.6.3 半變異元(semivariogram)分析.....	3-29
3.4.6.4 克利金推估法.....	3-31
3.4.6.5 克利金法修正雷達估計降雨.....	3-32
3.4.7 南瑪都颱風修正結果.....	3-40
第四章 格網式降雨逕流模式.....	4-1
4.1 格網分布型降雨逕流模式架構.....	4-1

4.1.1 流域物理特性 .....	4-2
4.1.2 降雨損失 .....	4-2
4.1.3 水流基本方程式 .....	4-3
4.2 地文參數建立 .....	4-4
4.2.1 集水區格網建立 .....	4-5
4.2.2 集水區地理特性 .....	4-6
4.2.3 地表高程與坡度 .....	4-7
4.2.4 漫地流流向 .....	4-9
4.2.5 渠道位置 .....	4-10
4.2.6 集水區土地利用分布 .....	4-10
4.2.7 集水區土壤參數建立 .....	4-14
4.3 水庫操作 .....	4-16
4.4 模式參數與模擬結果 .....	4-18
4.5 莫拉克颱風模擬 .....	4-28
4.6 南瑪都颱風模擬 .....	4-29
第五章 橋梁數值模式 .....	5-1
5.1 國內外動床水理模式研選 .....	5-2
5.1.1 水理模組測試與檢定 .....	5-5
5.1.2 水理模組測試與檢定成果 .....	5-11
5.1.3 水理模組敏感度分析 .....	5-14
5.1.4 洪峰抵達時刻分析 .....	5-16

5.2 一般沖刷預測 .....	5-18
5.2.1 大甲溪颱風一般沖刷歷史資料 .....	5-18
5.2.2 單場颱風事件之動床模組測試 .....	5-19
5.2.3 單場颱風事件之動床模組測試 .....	5-25
5.2.4 歷史多場颱風事件重現時之動床模組測試 .....	5-29
5.2.5 長期颱風作用動床模組測試成果 .....	5-31
5.3 莫拉克颱風流量沖刷預測 .....	5-33
5.4 南瑪都颱風流量沖刷預測 .....	5-46
5.5 各重現期流量可能沖刷分析 .....	5-56
第六章 結論與建議 .....	6-1
6.1 結論 .....	6-1
6.2 建議 .....	6-2
參考文獻 .....	參-1
附錄一 大甲溪發電廠運用要點 .....	附錄 1-1
附錄二 CCHE1D 動床水理模式簡介 .....	附錄 2-1
附錄三 期中期末報告審查意見處理情形表 .....	附錄 3-1
附錄四 期末報告簡報資料 .....	附錄 4-1

## 圖目錄

圖 1.1 研究流程圖 .....	1-3
圖 1.2 大甲溪流域雨量站分布位置圖 .....	1-5
圖 1.3 大甲溪流域等雨量線 .....	1-5
圖 1.4 大甲溪流域水位站分布圖 .....	1-7
圖 1.5 大甲溪流域堰壩位置圖 .....	1-9
圖 1.6 石岡壩現況照片 .....	1-9
圖 1.7 大甲溪石岡壩下游斷面位置圖(資料來源：大甲溪石岡壩下游河 段河床穩定方案之研究(2/4)) .....	1-15
圖 1.8(a) 大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖 .....	1-16
圖 1.8(b) 大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖 .....	1-17
圖 1.9 大甲溪 23-1 斷面國道 1 號高速公路橋歷年斷面變化 .....	1-22
圖 1.10 大甲溪 9-1 斷面國道 3 號高速公路橋歷年斷面變化 .....	1-23
圖 1.11 預定進度甘特圖(第一年度) .....	1-26
圖 1.11(續) 預定進度甘特圖(第二年度) .....	1-27
圖 2.1 沖刷深度隨時間變化圖(Melville and Chiew, 1999) .....	2-8
圖 2.2 水流流經圓柱型橋墩流況示意圖(修改自 Breusers and Raudkivi, 1991) .....	2-9
圖 3.1 雷達仰角回波示意圖(張智昌, 2006) .....	3-2
圖 3.2 QPESUMS 系統資料處理流程(改繪自中央氣象局) .....	3-5
圖 3.3 全省雷達網分布圖(丘台光等人, 2003) .....	3-6

圖 3.4 傳統迴歸與支撐向量迴歸以及損失函數比較圖 .....	3-10
圖 3.5 將資料經核函數映射至高維空間 .....	3-14
圖 3.6 非線性支撐向量迴歸架構示意圖(陳憲宗, 2008).....	3-14
圖 3.7 流域邊界與雨量站及七股雷達與高程分布圖 .....	3-16
圖 3.8 QPESUMS 雷達雨量網格節點繪製流程.....	3-17
圖 3.9 雷達估計雨量之輸入方式 .....	3-21
圖 3.10 大甲溪流域 SVR 率定結果比較 .....	3-24
圖 3.11 大甲溪流域 SVR 驗證結果比較 .....	3-24
圖 3.12 大甲溪流域各雨量站 SVR 修正結果 .....	3-25
圖 3.12(續) 大甲溪流域各雨量站 SVR 修正結果.....	3-26
圖 3.13 半變異元之示意圖 .....	3-29
圖 3.14 實驗半變異元函數 .....	3-30
圖 3.15 克利金誤差修正中使用的雨量站分布 .....	3-33
圖 3.16 海棠颱風第 40 小時自動搜尋理論半變異圖 .....	3-34
圖 3.17 即時克利金修正流程圖 .....	3-34
圖 3.18 率定雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之 比較.....	3-36
圖 3.18(續) 率定雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨 量之比較 .....	3-37
圖 3.19 驗證雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之 比較.....	3-38
圖 3.19(續) 驗證雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨	

量之比較.....	3-39
圖 3.20 SVR 的修正結果 .....	3-40
圖 3.21(a) 克利金率定站的修正結果 .....	3-40
圖 3.21(b) 克利金驗證站的修正結果 .....	3-41
圖 3.22 預報一小時雷達估計降雨.....	3-43
圖 3.23 預報二小時雷達估計降雨.....	3-44
圖 3.24 預報三小時雷達估計降雨.....	3-45
圖 4.1 分布型降雨逕流模式架構圖 .....	4-1
圖 4.2 地文參數建立過程 .....	4-5
圖 4.3 集水區格網示意圖 .....	4-6
圖 4.4 大甲溪石岡壩上游集水區高程分布圖 .....	4-7
圖 4.5 大甲溪石岡壩上游集水區衛星影像立體圖 .....	4-7
圖 4.6 大甲溪石岡壩上游集水區高程分布圖 .....	4-8
圖 4.7 大甲溪石岡壩上游集水區坡度分布圖 .....	4-9
圖 4.8 漫地流流向示意圖 .....	4-9
圖 4.9 渠道格網示意圖(左：原始渠道位置，右：流經指定格網中心).. .....	4-10
圖 4.10 監督式分類法之流程圖 .....	4-13
圖 4.11 利用衛星影像分析土地利用分類結果 .....	4-13
圖 4.12 降雨逕流模式率定結果 .....	4-21
圖 4.13 降雨逕流模式驗證結果 .....	4-22
圖 4.14 降雨逕流模式即時修正結果(率定場次).....	4-23

圖 4.14(續) 降雨逕流模式即時修正結果(率定場次).....	4-24
圖 4.15 降雨逕流模式即時修正結果(驗證場次).....	4-25
圖 4.15(續) 降雨逕流模式即時修正結果(驗證場次).....	4-26
圖 4.16 莫拉克颱風模擬結果 .....	4-28
圖 4.17 南瑪都颱風累積雨量分布圖(摘錄自中央氣象局網站).....	4-29
圖 4.18 南瑪都颱風石岡壩入流量模擬結果.....	4-30
圖 5.1 泰利颱風期間石岡壩放流歷線過程.....	5-10
圖 5.2 台 1 線大甲溪橋於泰利颱風期間之模擬與實測水位歷線比較 .... .....	5-13
圖 5.3 泰利颱風期間台 1 線大甲溪橋模擬與實測水位每小時比較 .	5-13
圖 5.4 台 1 線大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試 .....	5-14
圖 5.5 國道 1 號大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試 .....	5-15
圖 5.6 國道 3 號大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試 .....	5-15
圖 5.7 台 1 線大甲溪公路橋颱洪一般沖刷現地試驗佈置(取自「大甲溪 河段輸砂關係試驗研究(1/3)」).....	5-19
圖 5.8 辛樂克颱風期間石岡壩放流歷線過程.....	5-25
圖 5.9 辛樂克颱風期間台 1 線大甲溪橋下游河道一般沖刷深度變化 .... .....	5-27
圖 5.10 2005 年至 2008 年主要颱洪與暴雨洪水石岡壩放流歷線過程 .... .....	5-31
圖 5.11 實測與預測之底床高程縱剖面比較.....	5-32
圖 5.12 莫拉克颱風期間模擬石岡壩放流歷線過程 .....	5-38
圖 5.13 莫拉克颱風期間實測石岡壩放流歷線過程 .....	5-38

圖 5.14	埤豐橋沖刷深度變化 .....	5-41
圖 5.15	舊山線鐵路橋沖刷深度變化.....	5-42
圖 5.16	新山線鐵路橋沖刷深度變化.....	5-42
圖 5.17	后豐橋沖刷深度變化 .....	5-43
圖 5.18	國道 1 號大甲溪橋沖刷深度變化.....	5-43
圖 5.19	高速鐵路橋沖刷深度變化.....	5-44
圖 5.20	國道 3 號大甲溪橋沖刷深度變化.....	5-44
圖 5.21	海線鐵路橋沖刷深度變化.....	5-45
圖 5.22	台 1 線大甲溪橋沖刷深度變化.....	5-45
圖 5.23	台 61 線大甲溪橋沖刷深度變化.....	5-46
圖 5.24	南瑪都颱風期間石岡壩放流歷線過程 .....	5-51
圖 5.25	埤豐橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化 .....	5-51
圖 5.26	舊山線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-52
圖 5.27	新山線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-52
圖 5.28	后豐橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化 .....	5-53
圖 5.29	國道 1 號大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化... 5-53	
圖 5.30	高速鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-54
圖 5.31	國道 3 號大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化... 5-54	
圖 5.32	海線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-55
圖 5.33	台 1 線大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-55
圖 5.34	台 61 線大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化.....	5-56

圖 5.35 各重現期延時 100 小時流量歷線.....	5-60
圖 5.36 2 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-60
圖 5.37 5 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-61
圖 5.38 10 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-61
圖 5.39 20 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-62
圖 5.40 25 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-62
圖 5.41 50 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-63
圖 5.42 100 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-63
圖 5.43 200 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度.....	5-64

## 表 目 錄

表 1-1 大甲溪流域雨量站站況 .....	1-5
表 1-2 大甲溪流域水位站站況 .....	1-6
表 1-3 大甲溪流域各河段不同頻率的洪峰流量(單位：cms) .....	1-8
表 1-4 河床質平均粒徑與代表粒徑(1983 年).....	1-10
表 1-5 河床質平均粒徑與代表粒徑(2008 年).....	1-11
表 1-5(續) 河床質平均粒徑與代表粒徑(2008 年).....	1-12
表 1-6 國道 1 號及國道 3 號附近防洪構造物歷年受損情形 .....	1-18
表 1-7 國道 1 號橋墩附近河道現場照片(2009/9/17).....	1-20
表 1-8 國道 3 號橋墩附近河道現場照片(2009/9/17).....	1-21
表 2-1 橋墩沖刷理論分析 .....	2-11
表 2-1(續) 橋墩沖刷理論分析 .....	2-12
表 2-2 橋墩沖刷實驗分析 .....	2-13
表 2-2(續) 橋墩沖刷實驗分析 .....	2-14
表 2-2(續) 橋墩沖刷實驗分析 .....	2-15
表 3-1 大甲溪流域 14 個地面雨量站 .....	3-19
表 3-2 模式選取率定事件(2005~2008 年 3 場颱風事件) .....	3-19
表 3-3 模式選取驗證事件(2005~2008 年 6 場颱風事件) .....	3-19
表 3-4 SVR 模式率定前後結果之比較.....	3-25
表 3-5 常用理論半變異元模型 .....	3-30

表 3-6 克利金修正法率定用雨量站 .....	3-35
表 3-7 克利金修正法驗證用雨量站 .....	3-36
表 4-1 曼寧粗糙係數參考值 .....	4-14
表 4-2 土壤代號表 .....	4-14
表 4-3 起始入滲率 $f_0$ 的土壤分類代表值(顏清連等，1989).....	4-15
表 4-4 土壤最終入滲率 $f_c$ (王如意、易任，1984).....	4-15
表 4-5 土壤降雨後 1 小時之入滲率 $f_1$ (in/hr) (顏清連等，1989)...	4-15
表 4-6 大甲溪電廠系列水庫操作準則 .....	4-16
表 4-7 德基水庫排洪操作表 .....	4-17
表 4-8 德基水庫水位與蓄水量關係 .....	4-18
表 4-9 降雨逕流模式率定參數搜尋結果.....	4-20
表 4-10 降雨逕流模式驗證結果 .....	4-20
表 4-11 降雨逕流模式率定參數搜尋結果(組合一) .....	4-27
表 4-12 降雨逕流模式驗證結果(組合一).....	4-27
表 4-13 降雨逕流模式率定參數搜尋結果(組合二) .....	4-27
表 4-14 降雨逕流模式驗證結果(組合二).....	4-27
表 5-1 一維模式之功能比較 .....	5-4
表 5-2 石岡壩下游各斷面間之距離(單位：公尺) .....	5-7
表 5-3 石岡壩於泰利颱風期間放流量紀錄.....	5-8
表 5-3(續) 石岡壩於泰利颱風期間放流量紀錄 .....	5-9
表 5-4 大甲溪石岡壩下游河段曼寧糙度 $n$ 值計算成果表 .....	5-10

表 5-5 泰利颱風期間模式計算石岡壩與下游各橋梁洪峰發生時間	5-17
表 5-6 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄	5-22
表 5-6(續) 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄	5-23
表 5-6(續) 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄	5-24
表 5-7 辛樂克颱風期間石岡壩下游各橋梁附近河道一般沖刷預測	5-28
表 5-8 模擬放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果	5-39
表 5-9 實際放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果	5-39
表 5-10 模擬流量下預測最大局部沖刷深度	5-40
表 5-11 實測流量下預測最大局部沖刷深度	5-40
表 5-12 南瑪都颱風期間石岡壩下游各橋梁水理演算成果	5-49
表 5-13 南瑪都颱風期間預測最大局部沖刷深度	5-50
表 5-14 不同重現期距之石岡壩河段放流邊界條件(單位： $m^3/s$ )	5-58
表 5-14(續) 不同重現期距之石岡壩河段放流邊界條件	5-59
表 5-15 2 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-65
表 5-16 5 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-69
表 5-17 10 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-73
表 5-18 20 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-77
表 5-19 25 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-81
表 5-20 50 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-85
表 5-21 100 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-89
表 5-22 200 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度	5-93

# 第一章 前言

## 1.1 計畫緣由

本計畫旨在建立跨河橋梁橋墩沖刷預警方法，結合中央氣象局雷達雨量預報、現場水位與橋墩沖刷觀測資料，建立利用水文模式預報降雨事件在橋梁上、下游處可能的水位，然後根據橋墩觀測水位與橋墩沖刷資料建立之關係，進而估算此降雨對下游橋墩可能的沖刷深度，可以提供橋梁管理單位對於可能產生的災害提出預警。

由於臺灣地區河川短且陡，而氣候則屬於雨量充沛的情況，因此每逢暴雨時即造成河川集水區發生洪水，進而對橋梁的安全造成莫大之威脅。以 2000 年碧利斯颱風為例，當時台 1 線高屏大橋受到碧利斯颱風帶來暴漲溪水沖毀橋墩，造成長達 100 公尺的橋面掉落至高屏溪中，且有 22 位民眾受輕重傷，救難相關單位動員近千名人員前往救援。2008 年辛樂克颱風在中部地區帶來超過 700 毫米的降雨，大甲溪溪水暴漲造成台 13 線后豐大橋斷裂，造成民眾 2 死 4 失蹤。同一起颱風也同時造成台 20 線甲仙橋、台 21 線牛眠橋、台 18 線五虎寮橋及北港台糖復興橋等橋梁傳出斷橋意外。2009 年莫拉克颱風在中南部多處降下刷新歷史紀錄的大雨，雙園大橋橋墩被高屏溪洪水沖斷，造成斷橋長約 500 公尺，南端橋面剩 1100 公尺長，北端剩 200 公尺長，多位民眾失蹤。因此，若能發展一套對於在降雨期間的橋梁水位與沖刷深度關係，提供作為預警參考，應可給予民眾之生命財產更多的保障。

## 1.2 計畫架構與計畫範圍

### 1.2.1 計畫架構

本計畫是針對國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪下游的兩座橋梁進行橋梁水位與沖刷深度關係建立，並作為預警方法之參考。在發展過

程除蒐集相關文獻與大甲溪資料整理，主要分成三大部分，架構圖如圖 1.1 所示，摘要分述如下：

## 1. QPESUMS 雷達雨量預報應用

首先引入中央氣象局的 QPESUMS 降雨資料，QPESUMS 系統可以提供明確的降雨趨勢與降雨預報，本研究應用 QPESUMS 資料更詳盡的分析降雨的空間分布趨勢，以便分析集水區內降雨匯流成逕流之用。利用支撐向量迴歸法與 Kriging 法分析 QPESUMS 雨量觀測在集水區內的空間分布特性。同時，根據氣象局所提供的 QPESUMS 未來 1~3 小時的雨量預報，提供集水區未來可能降雨量。

## 2. 格網分布型降雨逕流估算下游洪水量

結合格網分布型降雨-逕流模式、QPESUMS 降雨資料與水庫操作規則，分別計算暴雨期間未來 1~3 小時德基水庫與石岡壩上游集水區的入流量與放流量，提供石岡壩下游河道變量流演算。格網分布型降雨-逕流模式具有模擬空間降雨、地文等特性，主要計算範圍由德基水庫上游沿大甲溪至石岡壩。

## 3. 水位與橋梁沖刷關係建立與預測

根據河道水理演算與沖刷深度分析結果可以建立水位與橋梁沖刷關係，首先要根據石岡壩在暴雨時期未來 1~3 小時的入流量(水位)與放水操作規則所得到的放水量作為起始條件，計算未來 1~3 小時石岡壩的放流量，藉由變量流水理模式模擬石岡壩以下河道水位，即可預測國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪下游橋梁的水理特性(水位與流量)，配合大甲溪跨越國道 1 與國道 3 之現場橋墩沖刷深度觀測資料，與水位的數值模式，建立跨河橋梁橋墩水位與沖刷深度的關係。水位與沖刷的計算範圍在大甲溪從石岡壩下游至出海口的河道部分。

## 4. 橋墩沖刷預警

整合以上模式期望預測未來 1~3 小時水位與沖刷深度，供其他子計畫分析橋墩安全，使橋梁管理單位對可能產生的災害提出預警。

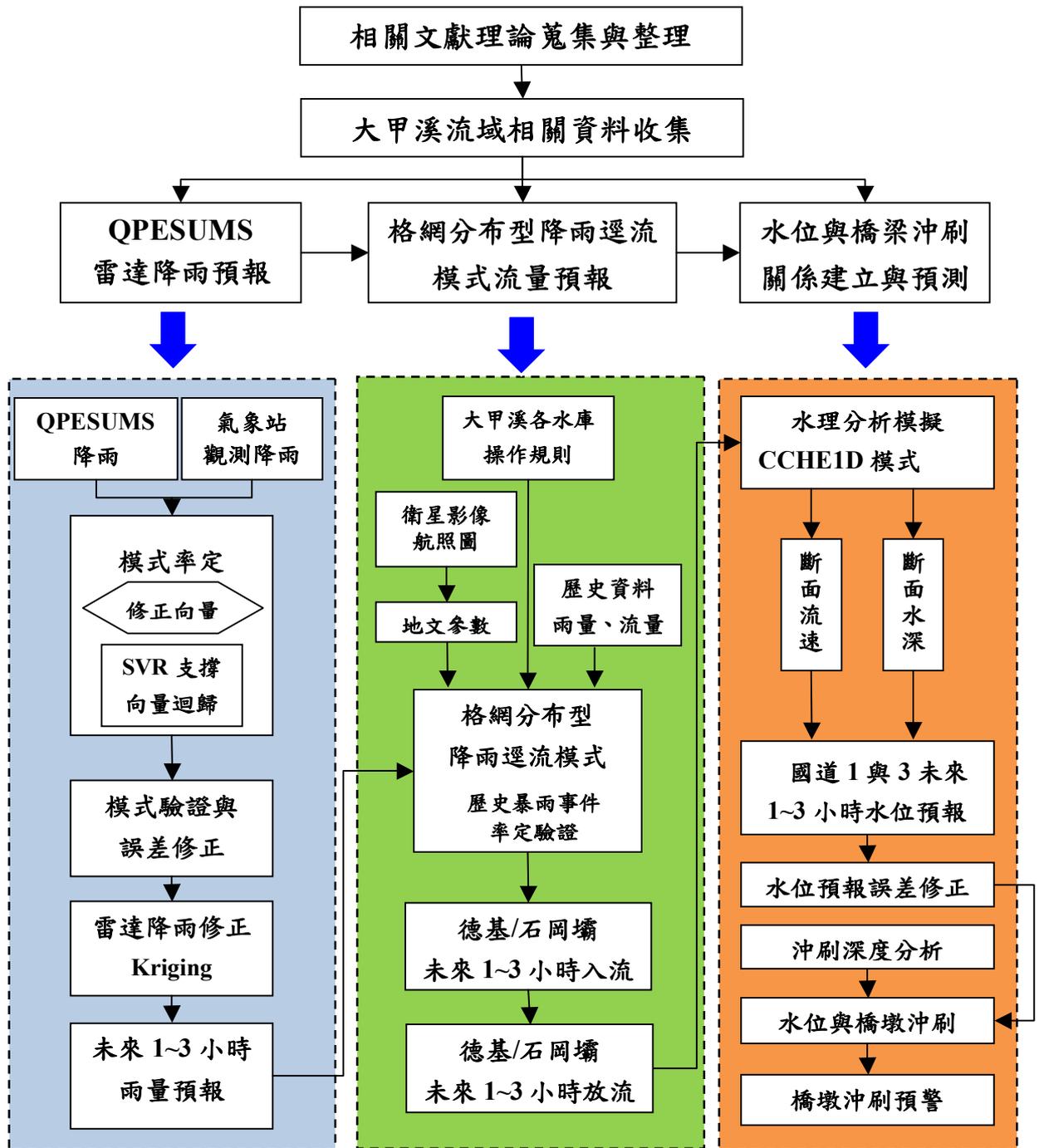


圖 1.1 研究流程圖

## 1.2.2 計畫範圍

雖然本計畫主要目的為建立國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪橋梁的橋墩水位與沖刷深度關係。由於，此兩橋梁處之流量係由大甲溪上游之降雨降至地面產生之逕流量而來，因此研究範圍必須擴展至整個大甲河流域。以下將針對本計畫區域進行概述。

### 1.大甲河流域概況

大甲溪為臺灣第四大河，位於臺灣本島中部西側，流貫臺灣西部，南北分別和烏溪與大安溪為鄰；大甲溪主幹長度 124km，流域面積 1235.7km<sup>2</sup>，其中山地占 90%，大部份地形都屬於山地是典型的急流河川。大甲河流域因山高河短，平地少，呈東高西低，坡度頗大的形勢。其主流河口段尚保持約 1/90 的河床坡降，為臺灣主要河川中最急流的河川。由於河床坡陡，落差極大，且流量均勻豐沛，因此其單位河長所蘊藏的水力高居全臺灣河川的首位，為臺灣水資源最豐富的河川，亦為水力發電的重心。

### 2.水文氣象

大甲河流域位於臺灣中部北迴歸線北方，屬於亞熱帶氣候區，冬季時受大陸性冷氣團籠罩，東北季風盛行，惟受到雪山山脈及中央山脈的阻擋，故下游地區雨量較少，而上游地區因有部分潮濕水氣越過蘭陽溪谷經思源啞口進入本流域，致雨量較多；夏秋兩季因西南風籠罩及颱風來襲，常帶來豪雨及陣雨。目前仍有進行雨量收集的有 15 站，測站的分布與等雨量線如圖 1.2 與圖 1.3 所示，站況列於表 1-1。由 2007 年到 2008 年的雨量資料顯示，流域內的降雨具有以平地向山地遞增。本流域的平均年雨量約為 2200 mm，平均月雨量的分布，以 5 月至 9 月豐水期的降雨量最多，約佔全年總降雨量的 67 %，枯水期則僅占 33 %，各月雨量分布與臺灣地區其他地區類似。



圖 1.2 大甲溪流域雨量站分布位置圖

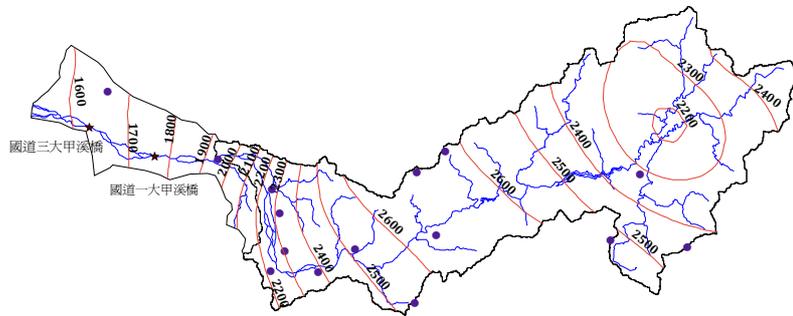


圖 1.3 大甲溪流域等雨量線

表 1-1 大甲溪流域雨量站站況

氣象局站號	站名	地址	標高(m)	記錄年份
01F100	八仙山(1)	臺中縣和平鄉	1600.00	1989~2008
C0F860	梨山	臺中縣和平鄉	1980.00	1990~2008
C0T790	大禹嶺	花蓮縣秀林鄉	2565.00	1996~2008
C1F850	東勢	臺中縣東勢鎮	320.00	1990~2008
C1F870	上谷關	臺中縣和平鄉	1045.00	1990~2008
C1F890	稍來	臺中縣和平鄉	2010.00	1990~2008
C1F910	新伯公	臺中縣東勢鎮	440.00	1990~2008
C1F920	石岡	臺中縣石岡鄉	280.00	1990~2008
C1F930	大甲	臺中縣大甲鄉	90.00	1990~2008
C1F940	雪嶺	臺中縣和平鄉	2605.00	1990~2008
C1H850	翠巒	臺中縣和平鄉	2297.00	1993~2008
C1F9C0	白冷	臺中縣和平鄉	619	1997~1997,2000~2008
C1F9D0	白毛臺	臺中縣新社鄉	613	1997~1997,2000~2008
C1F9E0	龍安	臺中縣新社鄉	537	1997~1997,2000~2008
C1F9G0	慶福山	臺中縣東勢鎮	782	1997~1997,2000~2008

### 3. 流量

#### (1) 河川流量

根據經濟部水利署中區水資源局 2006 年 8 月之「中區水資源永續經營管理策略規劃」，大甲溪平均年逕流量約為 67.71 cms(統計自 1959 年至 2005 年止)，相當於 21.35 億  $m^3$ ，而流域平均年雨量約為 2200 mm(統計自 1949 年至 2005 年止)折算體積為 27.37  $m^3$ ，概估流域平均逕流係數約為 0.78。再者，大甲溪在流入德基水庫前最重要的水文站為松茂，其平均年逕流量約為 7.7 億  $m^3$ 。一般而言，以 5 月到 10 月為豐水期，其逕流量約為 15.50 億  $m^3$ ，佔全年總逕流量 21.35 億  $m^3$  的 72.6 %；11 月至翌年 4 月為枯水期，其逕流量約為 5.85 億  $m^3$ ，占 27.4 %。為豐枯的月流量區別與臺灣地區的平均情況類似。目前大甲溪流域水位站站況如圖 1.4 與表 1-2 所示。

表 1-2 大甲溪流域水位站站況

站號	站名	地址	集水面積( $km^2$ )	標高(m)	記錄年份
1420H014	南湖	臺中縣和平鄉平等村	125.65	1467.61	1982~1982,1985~2007
1420H034	七家灣	臺中縣和平鄉平等村	110.71	1629	1982~1982,1985~2008
1420H035	松茂	臺中縣和平鄉梨山	417.08	1433.5	1982~1982,1985~1988,1990~1999,2007~2008
1420H037	白鹿橋	臺中縣和平鄉天輪村	916	533	1991~2001,2004~2008
1420H043	合歡	臺中縣和平鄉梨山	128.56	1471.85	1987~1999,2007~2008
1420H048	有勝溪	臺中縣和平鄉	31.12	1594.5	1996~2008
1420H052	天輪後池		870.95		2007~2008
1420H049	大甲溪橋	臺中縣清水鎮		57.5	2005~2008
1420H052	天輪後池		870.95		2000~2001,2003~2005,2007~2008
1420H054	谷關大橋	臺中市和平鄉			2006~2008
1420H055	東勢大橋	臺中縣東勢鎮		332.67	2007~2008
1420H056	后豐大橋	臺中縣后里鄉		217.86	2007~2008
1420H057	松鶴橋				2006~2008



圖 1.4 大甲溪流域水位站分布圖

## (2) 洪水量

經濟部水利署曾分析本流域中、下游河段各控制點的頻率洪峰流量，一並列於表 1-3。根據台灣電力公司的水文氣象年報，大甲溪松茂站的紀錄最大洪峰流量為 2834.62 cms，係在 2005 年 10 月初龍王颱風時所發生，其次為 2004 年 7 月初敏督利颱風時的 1728.64 cms，而石岡壩在敏督利颱風時的瞬間尖峰逕流量更高達 5815 cms，惟本流域的破紀錄洪水。

## (3) 輸砂量

大甲溪流域上游有德基水庫，其下有青山壩、谷關壩、天輪壩、馬鞍壩及石岡壩等水工結構物的攔蓄，加上水土保持的持續進行，因此如不考慮近年來的異常氣候條件，則在臺灣地區的主要河川中，大甲溪的平均年輸砂量為屬於較低者。經濟部水利署在其水文年報上，曾分析本流域的平均年輸砂量約為 4.03 百萬公噸。目前有含砂量紀錄者，以德基水庫上游松茂站的 49253 ppm 為最大，係在 1995 年 8 月 31 日肯特颱風時所發生的。

表 1-3 大甲溪流域各河段不同頻率的洪峰流量 (單位：cms)

河段 重現期(年)	上游			中、下游						
	七家 灣	南胡	松茂	十文 溪匯 前流	裡冷 溪匯 前流	東卯 溪匯 前流	橫流 溪匯 期流	天冷	石岡壩	河口
集水面積 (km <sup>2</sup> )	110.71	125.65	417.08	784.8	848.4	877.6	907.4	955.5	1,095.4	1,244.1
2	134	168	588	1,700	1,700	1,760	1,910	1,980	2,200	2,600
5	290	314	1,100	2,930	2,940	3,040	3,290	3,400	3,800	4,500
10	410	436	1,480	3,850	3,870	4,010	4,330	4,500	5,000	5,900
20	535	572	1,880	4,780	4,800	4,970	5,370	5,600	6,200	7,300
50	703	775	2,420	5,870	5,890	6,090	6,590	6,900	7,600	8,900
100	833	950	2,840	6,790	6,820	7,050	7,630	8,000	8,800	10,300
200	966	1,140	3,270	7,560	7,590	7,850	8,490	8,840	9,800	11,500
統計年份	1959~2005 年			摘自經濟部水利署「大甲溪治理規劃報告(1993)」及「大甲溪河川區域勘測報告(2003)」						

#### 4. 颱風

臺灣位於太平洋西岸，經常受到西太平洋風的侵襲，根據中央氣象局的資料統計，從 1926 年到 2005 年間，侵襲臺灣的颱風(含對臺灣有直接影響者)共有 392 次，而通過本流域或自附近及北部海面經過對本流域具影響的颱風亦達 152 次，約佔總發生次數的 39 %。

以往暴雨洪水對臺灣的威脅極大，為臺灣最大的天然災害。大甲溪流域的暴雨主要源自颱風、梅雨、雷陣雨及東北季風等，其中以颱風豪雨的影響最大。每年侵襲臺灣的颱風多發生於 5 月下旬至 11 月上旬，並以 8 月份最多，約佔 30 %，7 到 9 月則佔全年的 80 %。

#### 5. 水庫與重要水利設施

大甲溪流域內主要的水源調節設施為德基水庫與石岡壩，台電公司於這兩設施間設有一系列水力發電廠，因應其發電需求，並設有青山壩、谷關壩、天輪壩、馬鞍壩、馬鞍後池堰等調節池，以調整水量確保各電廠可穩定發電，大甲溪流域各水庫堰壩位置如圖 1.5 所示。

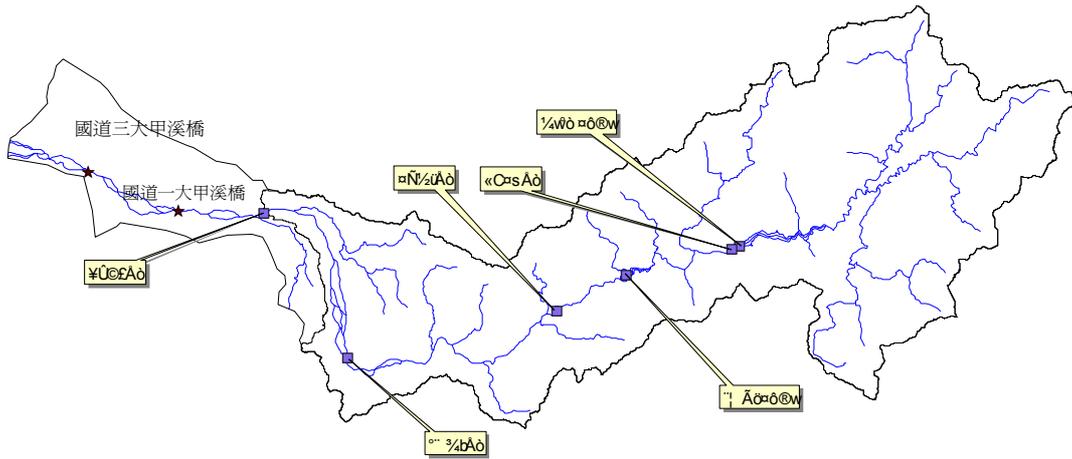


圖 1.5 大甲溪流域堰壩位置圖

石岡壩位於大甲溪中游，可說是大甲溪水源運用的樞紐，為大臺中地區公共給水的主要來源。1999 年 921 震災造成石岡壩第 16、17、18 號排洪門及重力壩斷裂等重大災損後，中區水資源局已於 2001 年完成壩體等修復及保護工作，並恢復石岡壩供水能力，修復後已開始運作，現況如圖 1.6 所示。



圖 1.6 石岡壩現況照片

## 6.河道基本資料之彙整與分析

針對目前收集之大甲溪相關資料進行彙整分析，包含流域概況、水文、地文資料、河道變遷資料、堤防與橋梁資料、構造物等，以便對本計畫應用對象石岡壩下游河道概況有所認知。其中，彙整資料包括一般動床河道模式模擬時所需之基本資料，如流量、水位邊界條件、初始床形、床質粒徑等。

### (1)河床質特性

1983 年大甲溪曾辦理斷面 68 以下河段之河床質採樣分析調查(大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討,2005 年 12 月),如表 1-4。其調查結果顯示,此段河床粒徑組成之縱向變化不大,各斷面河床底質平均粒徑在 71mm 至 115mm 間;於河口至石岡壩段介於 71mm~114mm 之間,砂質含量約在 10%~20%之間,河床屬卵石或塊石河床。另外,「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」(2009 年 7 月)於 2007 年 12 月對本計畫之河段進行河床質採樣分析,見表 1-5。2007 年最新調查結果顯示,於河口至石岡壩段介於 81mm~136mm 之間;底層之平均粒徑,於河口至石岡壩段介於 41mm~106 mm 之間;石岡壩下游主深槽或高灘地/河中砂洲之粒徑差異有限。

1983 年與 2008 年河床質平均粒徑變化顯示,大甲溪坡度陡、流速快,河床質粒徑並無明顯往下游粒徑愈小之趨勢,歷年床質平均粒徑變化差異不大。

表 1-4 河床質平均粒徑與代表粒徑(1983 年)

斷面	代表粒徑 (mm)			平均粒徑 Dm (mm)	泥砂含量(%)
	D <sub>35</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>65</sub>		
1	39.8	84.2	148.4	89.5	18.6
5	38.1	84.2	146.3	76.8	20.0
9	70.3	130.6	--	102.8	17.8
13	60.1	81.3	--	100.3	18.3
17	49.8	93.7	152.0	82.3	18.4
21	89.6	167.3	--	114.3	10.1
25	67.8	111.0	187.7	90.8	19.6
29	67.4	141.3	--	106.3	19.1
33	29.3	54.2	105.6	71.3	18.5
41	42.0	90.0	203.0	93.5	15.1
46	25.7	82.0	172.4	85.6	29.5
50	91.1	60.0	--	114.7	13.8
54	30.0	68.0	154.0	83.0	23.0
58	33.8	62.0	182.6	87.7	17.8
63	21.5	38.0	100.0	71.5	28.2
68	13.9	28.0	49.0	50.1	25.6

資料來源:「大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討」,2005 年 12 月。

表 1-5 河床質平均粒徑與代表粒徑(2008 年)

試坑編號	平均粒徑 Dm(mm)	各代表粒徑(mm)									最大粒徑 (mm)	粒徑 4.76 以下 砂質含量(%)
		D10	D20	D30	D35	D40	D50	D65	D75	D90		
断面	Dm(mm)	D10	D20	D30	D35	D40	D50	D65	D75	D90		
93-1(護甲層)	91.1	2.3	10	28	38	47	65	180	230	315	320	15.9
93-1(底層)	78.1	2.7	10	18	24	40	60	100	140	230	250	15.1
84(護甲層)	103.6	3.2	19	43	60	80	105	160	215	309	320	11.9
84(底層)	63.8	0.9	3.1	10	13	20	33	70	102	220	250	24.2
74-75(護甲層)	137	20	43	80	108	130	160	208	240	302	300	7.1
74-75(底層)	95.5	0.8	8	30	40	50	79	130	180	280	280	17.1
68(護甲層)	57.3	0.7	3	10.8	20	26	37	60	90	145	150	22.2
68(底層)	63	0.8	3.3	10.5	21	28	41	60	90	145	150	22.3
67-1(護甲層)	90.8	2.7	6	13	20	24	44	120	180	235	230	17.1
67-1(底層)	47.3	2	4	10	11	16	28	43	70	105	200	22.7
65(護甲層)	87.5	2.5	7	10.8	24	32	54	103	140	220	230	16.5
65(底層)	69.4	2	4.8	10	16	24	42	79	103	170	200	20.6
63(護甲層)	123.2	13	40	76	90	103	135	200	228	302	310	7
63(底層)	73.8	2	4.2	12	20	27	42	93	145	270	280	21.2
58(護甲層)	104.6	2	40	67	78	87	100	140	170	290	310	11.0
58(底層)	85.4	0.5	6	18	23	30	50	100	143	215	310	18.9
54(護甲層)	82.8	0.9	8.3	23	32	40	50	120	182	290	460	17.1
54(底層)	40.1	0.4	1.7	3	4	5.4	13	40	57	110	460	38
50(護甲層)	92	2	12	30	40	50	73	140	200	300	350	14.8
50(底層)	62.8	2	5	13	17	21	32	60	90	170	350	19.2
46(護甲層)	102.5	0.4	20	60	73	83	100	140	170	270	280	16.5
46(底層)	91.7	0.3	0.8	20	40	55	84	120	150	240	280	27.5
41(護甲層)	82.4	0.6	3.4	16	26	40	70	115	150	265	350	22.3
41(底層)	100.8	1.6	8.3	24	34	46	73	115	146	235	350	16.6
33(護甲層)	101.6	3	13	43	51	61	83	130	150	230	250	11.8
33(底層)	74.6	0.4	1	9	13	20	50	90	120	200	200	29.3
32 左上(護甲層)	104	0.3	4	40	60	90	140	225	270	335	350	14.5
32 左上(底層)	89.8	2.8	8.4	23	43	74	115	220	300	335	350	14.5
32 左下(護甲層)	104.3	0.2	6	40	60	90	140	230	290	330	370	19.5
32 左下(底層)	87.2	0.8	7	22	34	50	80	170	235	320	370	18.0

資料來源：「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」，2009年7月。

表 1-5(續) 河床質平均粒徑與代表粒徑(2008 年)

試坑編號	平均 粒徑 Dm(mm)	各代表粒徑(mm)									最大粒徑 (mm)	粒徑 4.76 以下 砂質含量(%)
		D10	D20	D30	D35	D40	D50	D65	D75	D90		
29 左(護甲層)	87.8	0.6	4	18	30	41	72	140	190	300	300	21.6
29 左(底層)	70.9	0.5	1.9	4	8	13	37	80	115	202	230	31.9
29 右(護甲層)	89.4	1	10	31	44	78	90	160	230	318	320	16.2
29 右(底層)	99.2	2	10	30	40	50	80	128	175	230	290	15.5
25 右(護甲層)	124.6	0.8	50	94	120	128	160	238	300	320	320	13.0
25 右(底層)	83.4	0.6	6	30	42	60	86	125	190	295	300	18.5
25 左(護甲層)	126.7	4	30	72	100	120	160	220	265	320	400	11
25 左(底層)	79.9	0.4	4	18	24	34	49	115	160	295	400	21.2
21 右(護甲層)	98.7	0.8	24	40	50	6	90	150	200	300	390	15.3
21 右(底層)	90.9	0.4	4	27	10	56	100	170	240	320	390	20.7
21 左(護甲層)	103.3	3	24	50	60	74	92	120	141	220	290	11.9
21 左(底層)	85.1	0.5	12	40	50	63	100	180	280	330	330	16.8
17 左(護甲層)	85.2	3	12	30	40	46	60	100	130	210	250	13.2
17 左(底層)	52.4	0.2	0.4	1	2	3.3	9.7	60	100	225	250	44.1
17 右(護甲層)	92.0	2	21	50	60	70	100	200	270	310	270	12.8
17 右(底層)	91.6	0.4	10	40	52	67	100	130	220	308	300	19.1
13(護甲層)	84.4	0.6	5	22	30	40	60	100	130	210	210	19.9
13(底層)	50.5	2.3	6	13	18	22	33	50	70	125	170	17.4
13 左(護甲層)	121.5	5	45	80	90	110	125	180	215	300	300	9.7
13 左(底層)	86.2	0.6	6	21	30	41	62	100	135	210	210	18.9
9 右(護甲層)	93.1	2	12	30	40	50	72	135	195	295	300	15.8
9 右(底層)	40.7	0.5	2	4	5	8	16	40	60	105	180	33.6
9(護甲層)	129.2	0.4	50	93	115	130	170	220	275	320	320	13.0
9(底層)	104.3	0.3	0.7	40	50	68	100	175	200	290	290	23.9
5 右(護甲層)	115.1	0.6	47	68	78	88	105	140	180	240	240	12.9
5 右(底層)	97.9	0.5	10	40	51	69	100	160	230	320	320	18.4
5 左(護甲層)	135.8	0.3	74	100	115	130	165	205	230	305	310	15.2
5 左(底層)	105.5	0.3	20	70	88	100	125	200	265	320	320	18.6
1(護甲層)	118.6	0.6	30	60	73	90	135	185	215	300	270	14.4
1(底層)	84.7	0.5	12	23	32	40	63	125	190	300	200	15.3

資料來源：「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」，2009年7月。

## (2)河道沖淤變動趨勢

依據所收集之大甲溪河道歷年斷面資料(1990年、1998年、2000年、2003年、2004年、2005年及2008年)，石岡壩下游斷面位置如圖 1.7 所示；整理歷年河床平均高程縱斷面變化情形，詳見圖 1.8。觀察大甲溪河道高程變化可以發現，雖然各斷面因局部地形特性差異而有沖淤互現情況，但整體河道沖淤變化大致以 2000 年作為分野，2000 年以前河道呈現沖刷趨勢，爾後轉為淤積趨勢，分析主要原因可能為 921 地震上游崩落之土砂，藉由河道往下游輸送的緣故，以下針對各斷面之河道高程有顯著變化之時間與情況加以說明。

### ①1990 年至 1998 年間

除台 1 線大甲溪橋下游約 1 公里內呈現淤積情況外，其餘河段則為沖刷。其中高程變化較劇烈處為斷面 4 附近及斷面 15 至國道 1 號大甲溪橋間，斷面 4 之累積沖刷量達 4 公尺，斷面 15 至國道 1 號大甲溪橋間最大沖刷可達 8 公尺（斷面 20 處），斷面 33 最大沖刷量可達 2 公尺。

### ②1998 年至 2000 年間

因 1999 年發生 921 地震且車籠埔斷層通過埤豐橋上游處，石岡壩處地層抬升達 10 公尺，埤豐橋至石岡壩河段有地層抬升現象。其餘河段普遍呈現沖刷現象，斷面 27 最大沖刷亦可達 6 公尺，斷面 19 處最大沖刷亦可達 8 公尺。

### ③2000 年至 2005 年間

國道 1 號大甲溪橋上游因 1999 年橋梁潛堰固床工完工影響，有明顯淤積現象；石岡壩於 921 地震時之地層抬升，水流能量水頭增高，而造成石岡壩下游河段主要呈現沖刷情況；新山線鐵路橋(斷面 30-1)，受下游內埔圳攔河堰遭敏督利颱風沖毀及河道本身泥岩地質條件易受沖刷影響，河床高程下降，最大沖刷可

達 7 公尺；高速鐵路橋上游有明顯淤積現象；其餘斷面則為沖淤互現情況。

④2005 年至 2008 年間

因受河道上游河床沖刷影響，水流挾帶泥砂於河口附近沉積，造成台 1 線大甲溪橋下游斷面 6 以下至河口間，平均河床高度上升高度約在 0.6 至 3.5 公尺之間；斷面 7 至國道 1 號大甲溪橋間，則無明顯沖淤行為，屬於沖淤互見情況；斷面 28(后豐橋)附近因橋梁相關工程施工影響導致河床明顯掏刷情況，平均河床高度下降深度最大可達 5.6 公尺；另外，后豐橋至石岡壩河段，仍因河道本身泥岩地質條件持續維持沖刷情狀，甚至在斷面 35-1(埤豐橋上游處)平均河床高度下降深度可達 8.6 公尺。

# 大甲溪河道斷面、防洪構造物、跨河構造物、支流、排水系統及取水口位置圖 (1/2)

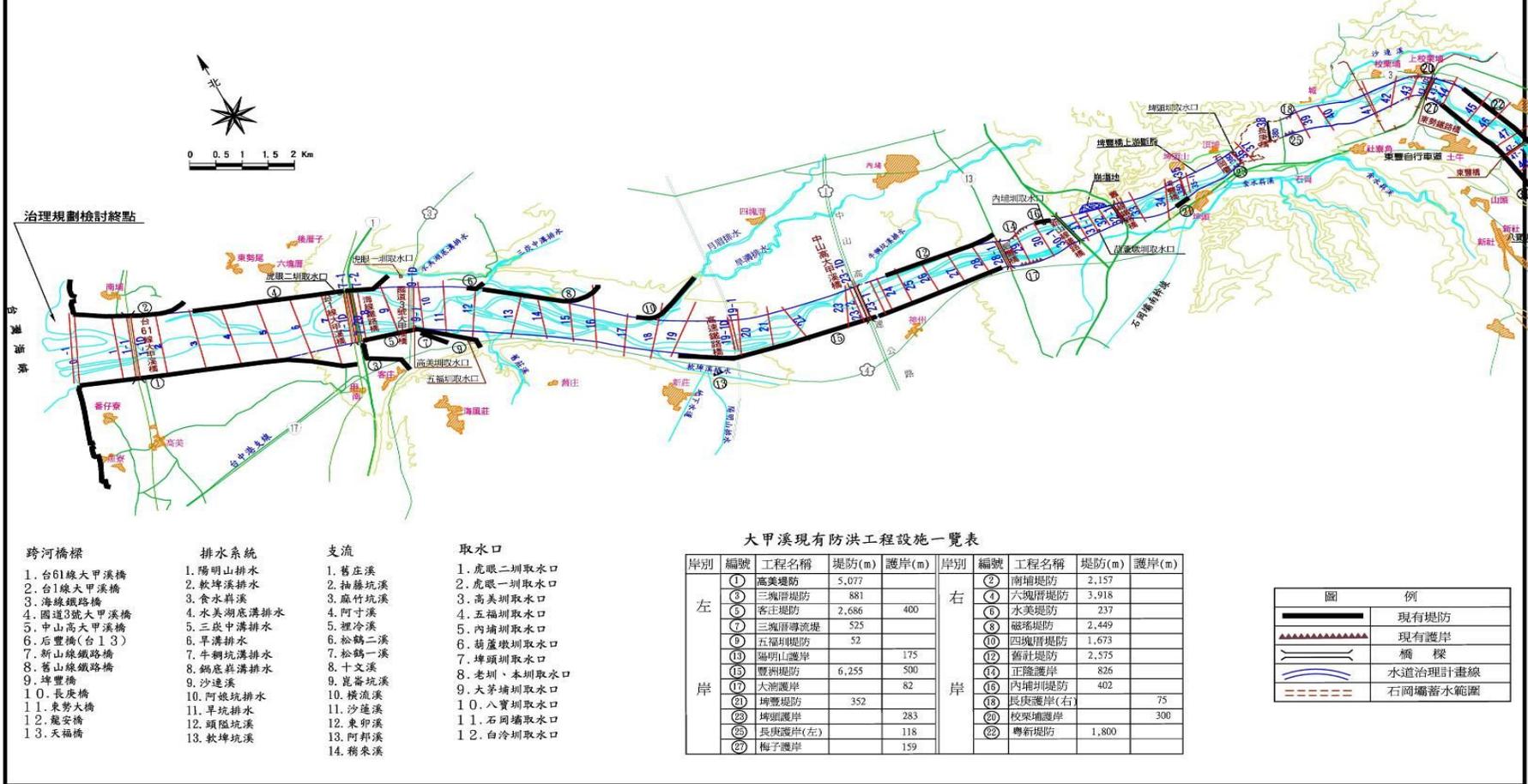


圖 1.7 大甲溪石岡壩下游斷面位置圖(資料來源：大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4))

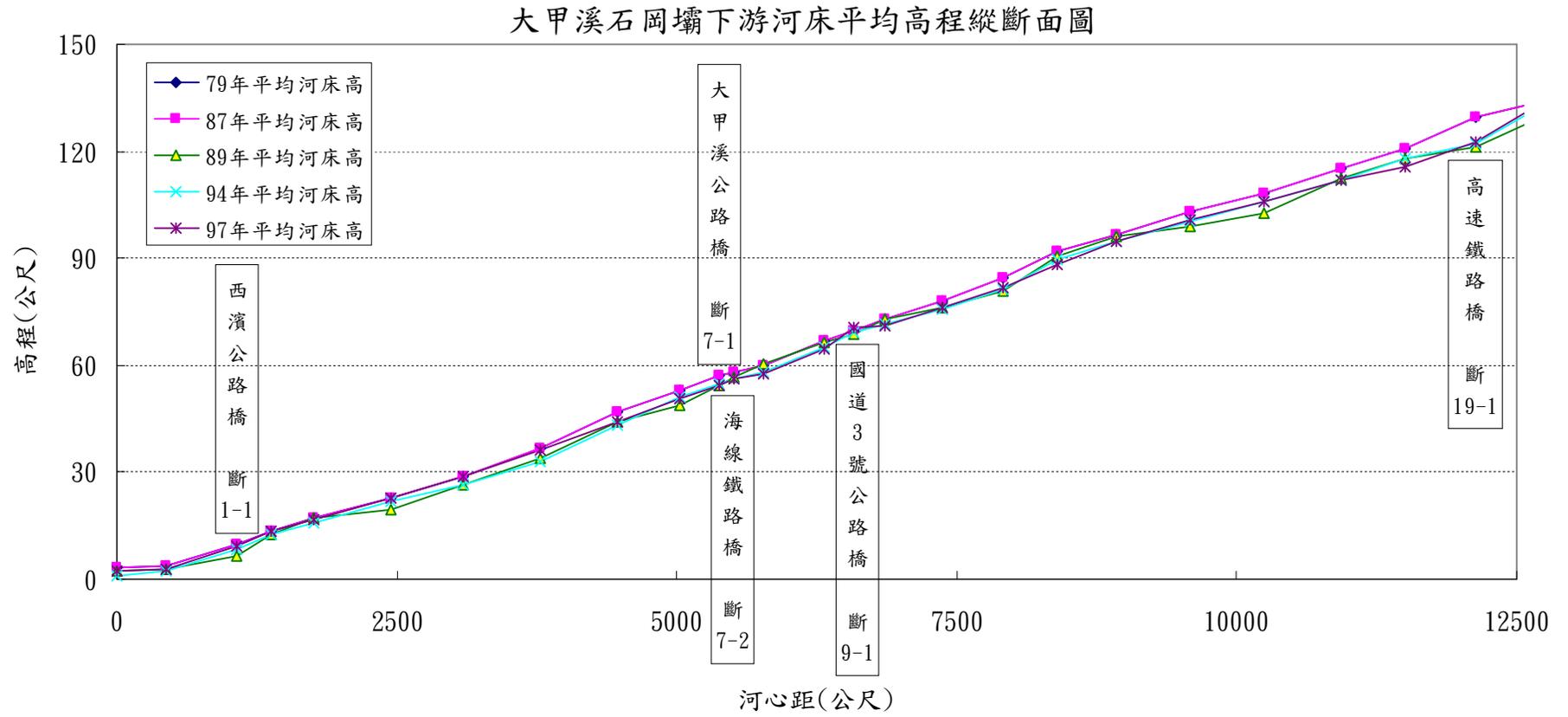


圖 1.8(a) 大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖

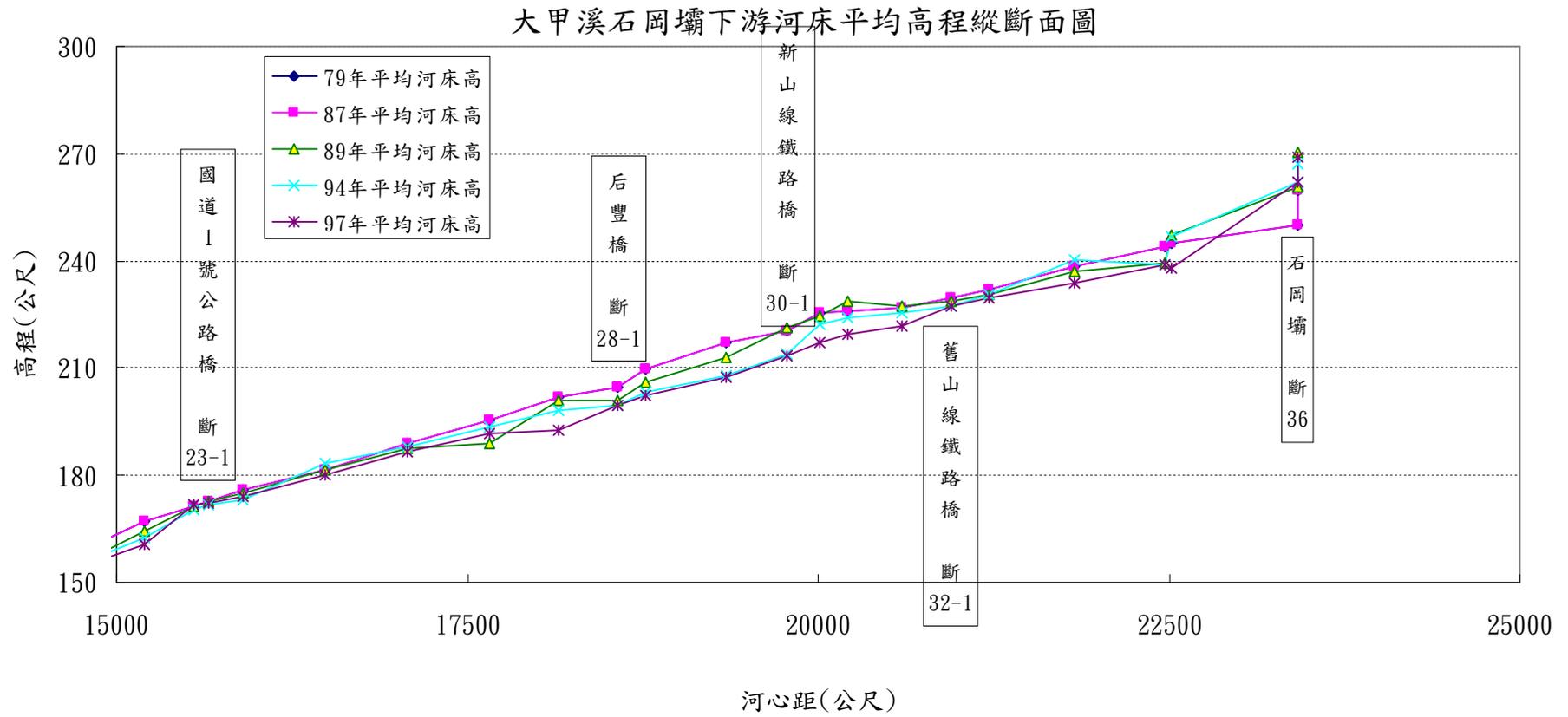


圖 1.8(b) 大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖

### (3)河道歷史災害

大甲溪流域石岡壩以下，因地勢較低，河道的災害型態屬自然環境因素加上颱風誘發之洪水災害為主，國道 1 號及國道 3 號附近河道在 2004 年 7 月敏督利颱風及 8 月之艾莉颱風、2005 年之馬莎颱風及 2008 年之辛樂克颱風等都有發生災情，表 1-6 為國道 1 號及國道 3 號附近防洪構造物歷年受損情形。

國道 1 號方面，2004 年 7 月敏督利颱風造成下游之水流沿潛堰固床工之法線方向沖擊北岸高灘地，因地勢以及慣性力影響水流走向而沖刷形成彎岸；2004 年 8 月艾利颱風水流持續沖刷使彎岸退後、曲率變小；2005 年 8 月馬莎颱風造成水流沿著繞過潛堰北側之流路持續沖刷北側高灘地，致使高灘地持續受沖刷而形成彎岸。國道 3 號下游之客庄堤防，因 2008 年 9 月辛樂克颱風帶來之洪水導致堤防部份段因堤腳掏刷、堤防未能承受自重而沈陷，造成堤面破裂，海線鐵路橋下之客庄堤防可能亦受大型混凝土撞擊而造成破損。

表 1-6 國道 1 號及國道 3 號附近防洪構造物歷年受損情形

構造物名稱	發生時間	發生原因	災害情形
國道 1 號下游 右岸	2004 年 7 月 1 日至 2004 年 7 月 4 日	敏督利颱風 (七二水災)	水流沿潛堰固床工之法線方向沖擊北岸高灘地，因地勢以及慣性力影響水流走向而沖刷形成彎岸。
	2004 年 8 月 23 日	艾利颱風	水流持續沖刷使彎岸退後、曲率變小。
	2005 年 8 月 4 日至 2005 年 8 月 6 日	馬莎颱風	水流沿著繞過潛堰北側之流路持續沖刷北側高灘地，致使高灘地持續受沖刷而形成彎岸。
國道 3 號下游 客庄堤防	2008 年 9 月 11 日至 2008 年 9 月 16 日	辛樂克颱風	造成國道 3 號下游、海線鐵路橋上游之客庄堤防部份段因堤腳掏刷、堤防未能承受自重而沈陷，造成堤面破裂；另海線鐵路橋下之客庄堤防可能亦受大型混凝土撞擊而造成破損。

#### (4) 國道 1 號及國道 3 號斷面變動趨勢

由圖 1.9 及圖 1.10 之 1990 年至 2008 年大斷面測量資料之歷年斷面變化可知，國道 1 號及國道 3 號高速公路橋上、下游河道呈現持續下切狀態。國道 1 號上、下游斷面因為河道深槽位置的變動，在橫距 300 公尺與 800 公尺出現兩處主要河床高程變動區域。相較於國道 1 號而言，國道 3 號高速公路橋沖刷現象較為劇烈，除了流路擺盪現象外，在橫距 300 公尺至 700 公尺間，出現河床高程顯著下降現象。前述之沖刷現象，與石岡壩興建後下游砂源補充不足、河川分類仍屬壯年期，故呈現自然沖刷趨勢及 921 地震後石岡壩地層抬升相關，受石岡壩隆起效應影響，增加下游河床沖刷能量，導致流路重新調整，水流逐年切割深水槽流路。

另外，依據本計畫團隊現場勘查照片(表 1-7 與表 1-8，拍攝日期 2009/9/17)顯示，國道 1 號附近河道護甲現象明顯，然部分橋墩附近之護甲層已經沖刷消失，並於橋墩周圍形成沖刷坑，導致部分橋墩出現基礎裸露情況，研判國道 1 號橋墩沖刷現象受局部沖刷所主導；從場堪照片清楚看到國道 3 號附近橋墩與上、下游河道皆存在護甲現象，靠近左岸橋墩之基礎出現裸露情況，由歷年斷面變化資料與現勘照片研判，後續橋墩局部沖刷預估需考慮護甲現象的影響。

表 1-7 國道 1 號橋墩附近河道現場照片(2009/9/17)

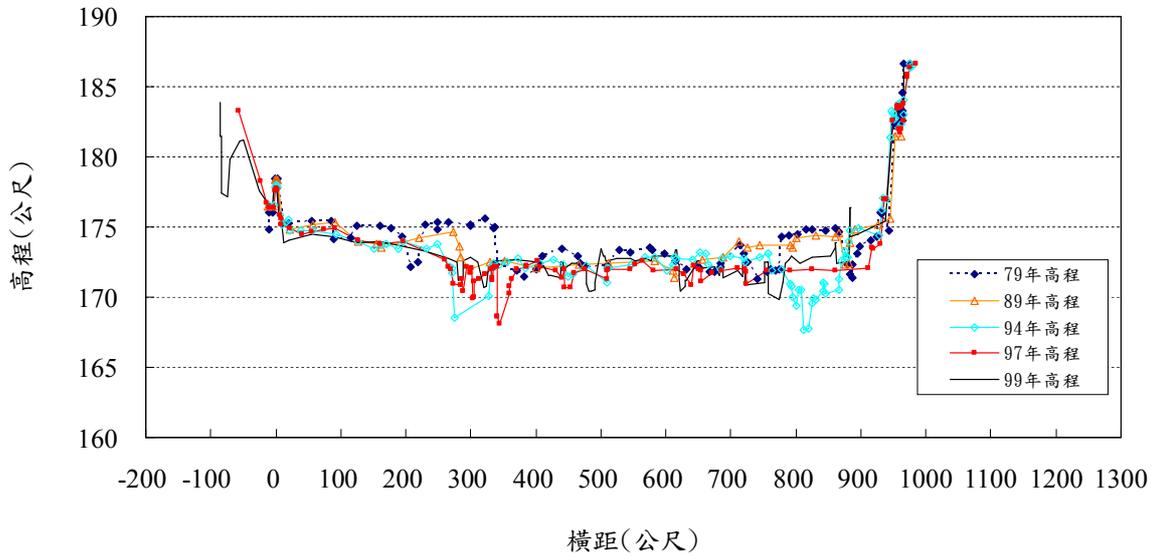
 <p>(a) 下游河道護甲現象</p>	 <p>(b) 上游河道護甲現象</p>
 <p>(c) 橋墩附近冲刷坑 1</p>	 <p>(d) 橋墩附近冲刷坑 2</p>
 <p>(e) 橋墩</p>	 <p>(f) 左岸圍堰</p>

表 1-8 國道 3 號橋墩附近河道現場照片(2009/9/17)

 <p>(a) 下游河道護甲現象</p>	 <p>(b) 上游河道護甲現象</p>
 <p>(c) 橋墩附近河道</p>	 <p>(d) 近左岸橋墩裸露情形</p>
 <p>(e) 橋墩</p>	

(a) 下游

23-1斷面 國道1號高速公路橋(下)



(b) 上游

23-1斷面 國道1號高速公路橋(上)

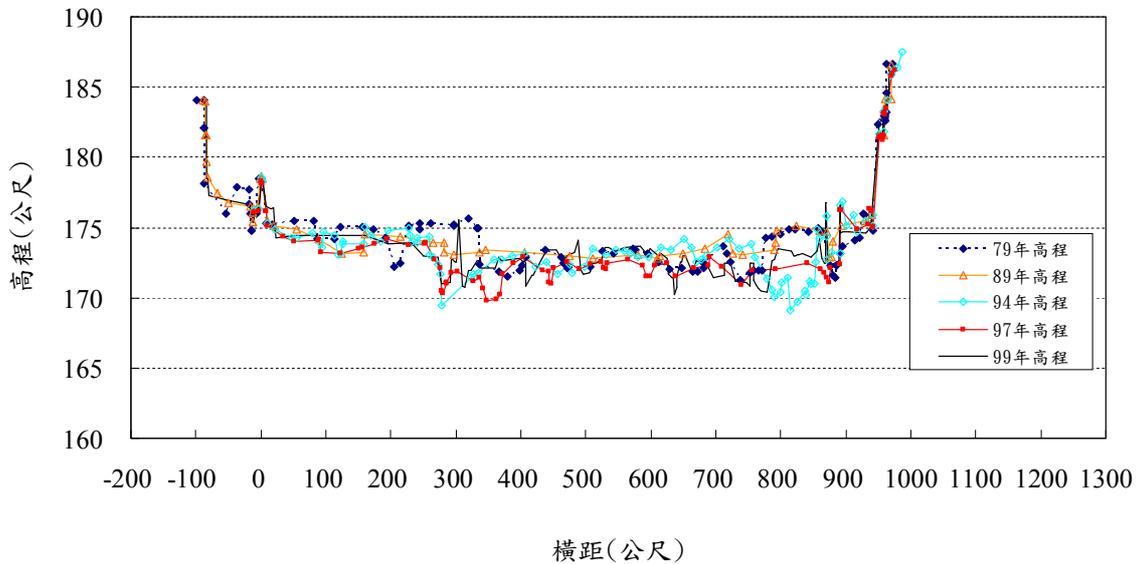
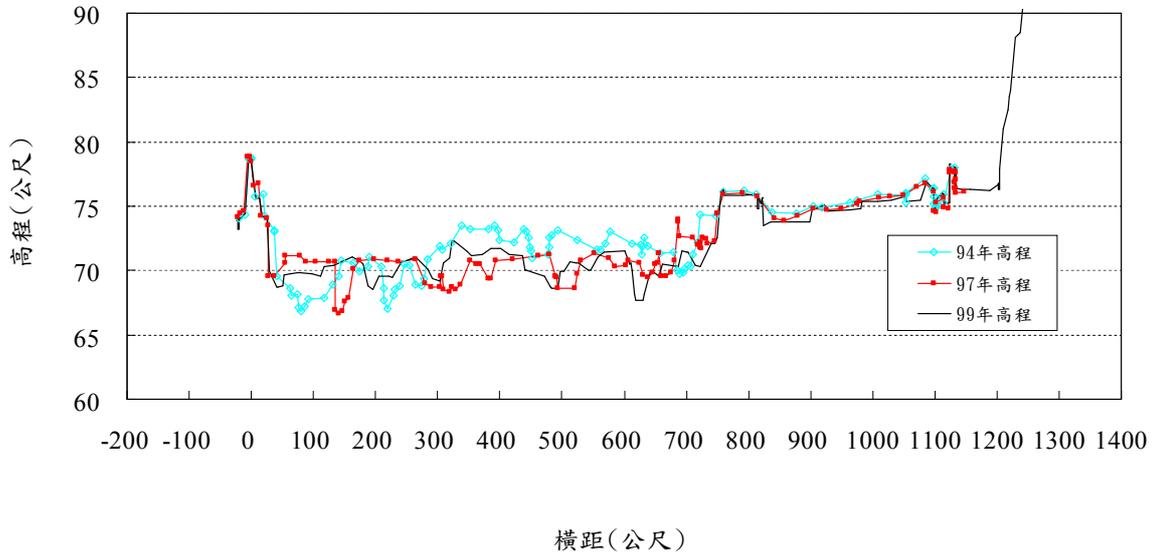


圖 1.9 大甲溪 23-1 斷面國道 1 號高速公路橋歷年斷面變化

(a) 下游

9-1斷面 國道3號高速公路橋(下)



(b) 上游

9-1斷面 國道3號高速公路橋(上)

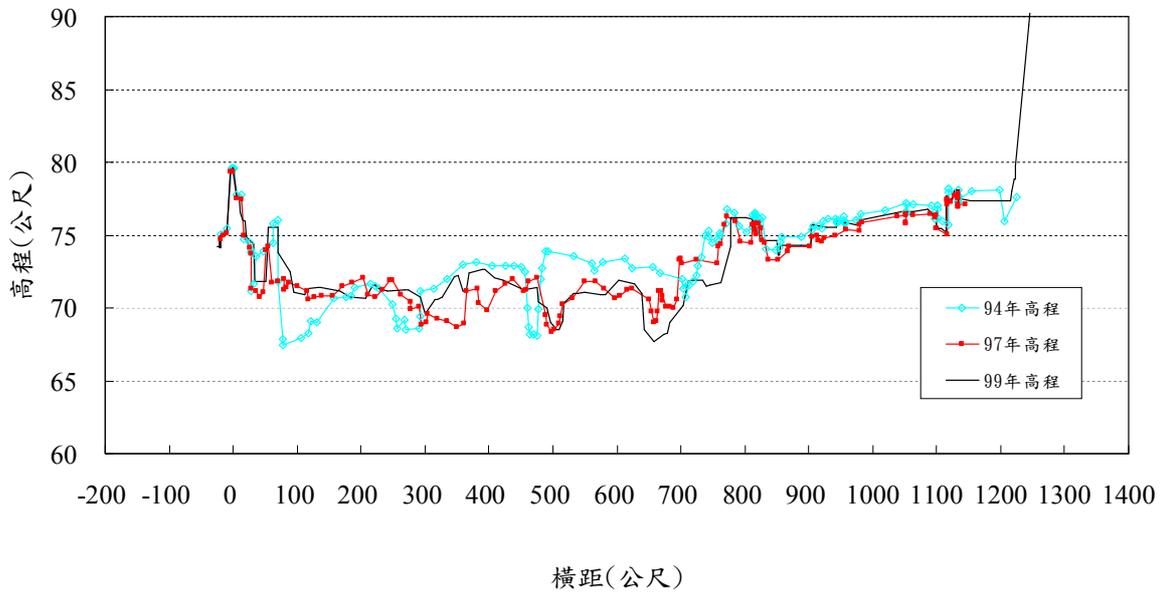


圖 1.10 大甲溪 9-1 斷面國道 3 號高速公路橋歷年斷面變化

## 1.3 計畫執行步驟與預期工作效益

### 1.3.1 計畫執行步驟與預計進度

本計畫共分為兩年，預計進度甘特圖如圖 1.11 所示，主要研究項目與其進行步驟如下：

**第一期(98/11/01~99/12/31)：**

#### 1. 資料收集與建置

本計畫需對下列資料進行收集：(1)水文資料與分析(包含雨量與流量資料)；(2)地文資料與分析(包含數值地型模型 DTM 資料、衛星影像圖、土壤數值圖與地形圖)；(3)橋墩現況調查與分析；(4)歷史災害資料收集與整理；(5)國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪下游的兩座橋梁降雨期間沖刷深度觀測資料。

#### 2. 大甲河流域雷達降雨預報資料校正

根據集水區現場地面雨量計的降雨觀測資料，配合中央氣象局所提供的 QPESUMS 雷達雨量觀測資料，建立大甲河流域 QPESUMS 雷達雨量觀測資料修正方法，以提升 QPESUMS 雷達雨量觀測資料的正確性。

#### 3. 建立大甲溪分布型降雨逕流模式

建立大甲河流域格網(grid-based)分布型降雨逕流模式，以整合大甲河流域 QPESUMS 雷達空間分布的雨量觀測，進行集水區水文模擬，並考慮橋梁上游堰壩人為操作放流，模擬石岡壩下游未來 1~3 小時的可能流量。

#### 4. 橋梁數值模式

藉由數值模式，模擬並預測國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪下游的兩座橋梁暴雨發生期間之水位，以及暴雨發生期間橋梁附近之跌水與水躍等水理現象，依據水理條件，進行橋墩水位與沖刷深度

間重要參數之檢定與分析，初步建立橋墩水位與沖刷深度關係。

## **第二期(100/01/01~100/12/31)：**

### **1. 水文水理估算結果的修正與驗證**

根據歷史觀測紀錄驗證大甲溪分布型降雨逕流模式的模擬結果，以修正石岡壩下游未來 1~3 小時可用水量的推估。以石岡壩放水量為邊界條件，預測國道 1 號與國道 3 號跨越大甲溪下游的兩座橋梁之水位，並進行水理估算結果之驗證。

### **2. 橋墩水位與沖刷深度關係建立**

透過橋墩沖刷深度觀測資料，配合河川變量流理論計算上游及下游(國道 1 號與國道 3 號)斷面之流量歷線及水位歷線，以數值模式推算橋墩沖刷深度，建立橋墩水位與沖刷深度關係。

### **3. 橋墩沖刷深度預警方法**

整合石岡壩下游未來 1~3 小時的可能洪水、與橋墩水位，建立可能沖刷深度關係，提供主辦單位參考。

第一年(98/11/01-99/12/31)

預定進度甘特圖(Gantt Chart)

工作項目	98 / 11	98 / 12	99 / 01	99 / 02	99 / 03	99 / 04	99 / 05	99 / 06	99 / 07	99 / 08	99 / 09	99 / 10	99 / 11	99 / 12	備 註
資料收集與建置					※										持續收集
大甲溪流域雷達 降雨預報資料校 正								※							
建立大甲溪分布 型降雨逕流模式															
橋梁數值模式										※			※		
第 1 次期中報告															
第 2 次期中報告															
第 3 次期中報告															
工作進度估計 百分比(累積數)	5	10	20	25	35	45	50	55	60	65	70	80	90	100	

圖 1.11 預定進度甘特圖(第一年度)

第二年(99/01/01-100/12/31)

預定進度甘特圖(Gantt Chart)

工作項目	100 / 01	100 / 02	100 / 03	100 / 04	100 / 05	100 / 06	100 / 07	100 / 08	100 / 09	100 / 10	100 / 11	100 / 12	備註	
資料收集與建置	■													持續收集
大甲溪分布型降雨逕流模式驗證	※	■												
水文水理估算結果的修正與驗證			※	■										
橋墩水位與沖刷深度關係建立				■					※					
橋墩沖刷深度預警方法								■			※			
第4次期中報告						■								
期末報告											■			
工作進度估計百分比(累積數)	15	25	35	45	50	60	70	80	90	95	100			

圖 1.11(續) 預定進度甘特圖(第二年度)

1.3.2 預期工作效益

第一期(98/11/1-99/12/31)：

1. 完成大甲溪流域雷達降雨預報資料校正。
2. 建立大甲溪格網(grid-based)分布型降雨逕流模式，整合QPESUMS雷達雨量觀測資料，模擬石岡壩未來1~3小時的可能入流量。
3. 建立河道水理模式，計算暴雨發生期間，國道1號與國道3號斷面之流量歷線及水位歷線。

4. 建立國道1號與國道3號跨越大甲溪下游的兩座橋梁暴雨發生期間之未來1~3小時水位預報。
5. 初步建立橋墩水位與沖刷深度關係。
6. 橋墩沖刷深度預警方法研擬。

**第二期(100/1/1-100/12/31)：**

1. 整合 QPESUMS 雷達雨量與格網分布型降雨逕流模式，並進一步率定與驗證，確認模式合理性與正確性。
2. 收集更完整資料，以驗證橋墩水位與沖刷深度關係，以確信方法可行。
3. 建立國道1號與國道3號跨越大甲溪下游的兩座橋梁在洪水期間水位與橋墩模式以提供主辦單位進行預警作業。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 雷達雨量預報相關文獻

雷達應用在天氣觀測上已發展一段時間，從最早期之單一雷達回波強度(Z)-降雨強度(R)關係式利用雷達回波來推估降雨強度，直至近年相關研究中使用(1)各種迴歸關係式，(2)空間內插法以及(3)類神經網路方法等，皆為了改善及提昇雷達觀測空間降雨之精確度。

#### 2.1.1 迴歸關係式修正雷達降雨

最早 Marshall & Palmer (1948)以電磁波相關研究為基礎，利用雷達回波因子(Z)和降雨強度(R)建立迴歸關係於，於二次世界大戰後計算出第一個 Z-R 關係式( $Z=200R^{1.6}$ )。Rosonfeld et al. (1994)以機率配合法(probability matching method)，建立雷達回波和降雨發生之機率曲線，透過兩者發生機率相同時之強度配合，建立一組回波強度(Z)與降雨強度(R)之對應關係；但有時在某些區域雷達回波不一定會對應該地區之降雨強度，因此作者另外提出窗型機率配合法(windows probability matching method)以雨量站為井字窗型區的周圍九個點回波強度值，透過兩者發生機率相同時之強度配合建立一組與回波因子(R)之間的對應關係。Borga (2002)使用 MFB (mean field bias)，以某一地區之地面雨量站與雷達估計雨量之日雨量的比值進行修正 Z-R 關係式，並且建議採用之地面雨量站數至少大於四個測站，以避免受到某一測站樣本有誤差存在而影響修正結果。Gjertsen et al. (2003)建議 G/R ratio 方法適用於長時間(例如，日、月)之雨量修正，且某一地區必須要有足夠之地面雨量站數，以避免因地面雨量觀測誤差而影響雷達估計雨量之修正結果。一般雷達估計雨量之修正的方法可分為兩大類：一種為利用不同雷達仰角高度之束波(VPR)和地面觀測雨量建立關係 (Kitchen et al., 1994; Joss and Lee, 1995)；另一種為整合地面及雷達雨量，其修正方法起源於 G/R ratio，目的是要將雷達雨量在某一地區乘上一個定值，

使得雷達估計雨量能整體提昇或整體減少。Morin et al. (2007)利用雷達回波因子和各雨量站與雷達站之距離、雨量站高程以及最低仰角高度建立三種迴歸關係式，並應用在以色列地中海型氣候，探討不同研究區域中地面雨量站和雷達站之距離與雷達估計雨量的相關性，發現當地面雨量站與雷達站之距離於 100 公里以內估計良好，而超過 100 公里以外則有低估現象。

### 2.1.2 空間內插法修正雷達降雨

在空間內插法研究方面，Kim et al. (2008)利用條件結合法(conditional merging method)，將時序列之雷達估計值視為邊界條件(boundary condition)，將地面觀測雨量以 kriging 內插法內插成網格並計算與雷達估計雨量之增減量進行雷達估計雨量之修正。Cole and Moore (2008)利用地形起伏特性，以網格多元二次曲面擬合技術(gridDED multiquadric surface fitting techniques) 將地面觀測雨量與雷達估計雨量進行整合，其方法為將地面觀測雨量先進行 Multiquadricfm 曲面擬合法進行內插後，再以雷達估計雨量與內插後之地面觀測雨量各加入一係數求得修正後之比值，進行雷達估計雨量之修正，並與地面觀測雨量以及雷達估計雨量做比較，作者發現利用 Multiquadricfm 曲面擬合法進行地面雨量站與雷達估計雨量整合(Moore et al., 1991, 1994; Wood et al., 2000)，比一般使用 cokriging 內插法計算簡單，且此方法應用於極端降雨事件之模擬表現良好(Wood et al., 2000)。De Gaetano and Wilks (2009)以雷達估計雨量和地面觀測雨量之差值，利用距離反比權重法(inverse distance weighted, IDW)進行網格內插，並採用兩種方法計算 IDW 之權重參數：第一種為利用地面雨量站與鄰近雷達網格點之距離進行兩次之交叉驗證(cross-validation)計算距離權重；另一種方法為利用地面雨量站與鄰近雷達網格點之距離與地面雨量站最遠距離之比值，建立迴歸關係式並計算修正後之距離權重。Garcia-Pintado et al. (2009)利用 CMA-OAS (concurrent multiplicative-additive objective analysis scheme)法，將 CMA 具有能計算出雷達估計雨量於空間之非均勻之偏差量(bias)以倍數或整數來表示之優勢，利用 Barnes 客觀分析法

(OAS)將偏差量內插回雷達網格後，計算修正後之雷達估計雨量，並與標準化之 MFB (standard mean field bias adjustment)和 cokriging 內插法比較，發現 CMA-OAS 法進行修正比另外兩種內插方法之結果表現還要優。國內學者楊正潭(2003)利用客觀分析配合比值方法(G/R ratio)將地面觀測總雨量(G)除以雷達估計總雨量(R)得到比值，再利用 kriging 內插法得到各網格之比值，進行逐時修正。張智昌(2006)利用中央氣象局提供之 QPESUMS 雷達估計雨量，以敏督利颱風以及艾利颱風兩個案，將雷達估計雨量與地面雨量站之誤差利用 kirging 以及 Barnes 兩種內插法進行整合，發現經校正後之雷達估計雨量可提昇與地面觀測雨量之相關性，且利用 kriging 整合雷達估計雨量比利用 Barnes 內插法所展現之空間降雨分布為佳，並由降雨統計分析之結果，發現雷達估計雨量與地面觀測雨量之差值並非距離函數，若以距離為內插權重進行分析時，則無法表現降雨於空間分布之特徵。王安翔、林李耀(2008)利用地面雨量對應 QPESUMS 雷達估計雨量資料得到誤差值，再以 kriging 方法將誤差值內插加回雷達網格，最後求得逐時之雨量站整合雷達估計雨量。另外張永欣(2007)以 2004 年艾利颱風為例，選取五分山雷達以及中大雷達回波資料，針對石門水庫集水區以多變量地質統計方法，利用 cokriging、simple kriging with varying local means 及 kriging with external drift 等方法結合雷達回波、高程、坡度與坡向等具有高密度特性且與雨量相關性高的因子進行空間內插，改善雨量站密度不足之問題。

### 2.1.3 類神經網路修正雷達降雨

另外結合類神經網路於雷達估計雨量方面，國外學者 Xiao and Chandrasekar (1995)及 Tsintikidis et al. (1996)以多層前饋式類神經網路結合衛星觀測資估計雷達降水；Xiao and Chandrasekar (1997) 建立前饋式類神經網路(feed-forward back-propagation neural network)整合地面觀測雨量應用於雷達估計降水；Liu et al. (2001)利用輻狀基底函數類神經網路(radial basis function neural network, RBFNN)，採取地面雨量站對應上方一公里處之九個雷達回波資料當作輸入因子；Li et al. (2003)

利用輻狀基底函數類神經網路(RBFNN)建立雷達回波資料與降雨強度之關係，並發現以雷達垂直仰角高度為 1~4 公里處之回波資料較其餘因子當作輸入向量為適合。此外，Teschl et al. (2007)利用倒傳遞式類神經網路(back propagation neural network, BPNN)，根據不同雷達仰角高度所偵測到之回波因子(距離地面 3、4、5、6 公里高度以及最高仰角高度)進行雷達雨量估計及預測未來五分鐘地面降雨量。國內方面，黃威雄(2000)利用倒傳遞式類神經網路(BPNN)，以輸入值為雷達回波資料而輸出值為石門水庫上游七個地面雨量站之觀測值建立逐時降雨模式，並分別建立三種不同情況之 Z-R 關係式做一探討：(1)將每場颱風事件視為單一事件，找尋每場之 Z-R 關係式；(2)以雨量站為一單位，求得各雨量站之觀測值與雷達資料之相關性；(3)將過去之颱風事件視為母體。劉清煌(2002)採用倒傳遞式類神經網路(BPNN)結合雷達觀測資料(包含中央氣象局所屬之五分山雷達資料，選取雷達仰角高度 0.5km、1.5km、2.5km 之回波資料)、衛星(IR1、IR2 及水汽頻道之雲頂溫度、經向及緯向雲頂溫度之梯度)以及其他與降雨有關之觀測資料(雨量站高度、颱風中心位置與雨量站之距離及時雨量)進行定量降雨估計，將所選取雨量站之位置對應上方九個點之平均回波值，當作雷達於該測站所觀測之回波值，並以三場颱風個案進行訓練及測試皆有不錯的表現。

雷達降雨的技術已經開始應用於水文模式上，Collier(1996)指出水文循環中其大部分變量皆具有很強烈的空間分布變化性，容易在時間序列上產生迅速變化的特徵，而降雨則在水文歷程研究上扮演著舉足輕重的角色，應盡可能於空間中各點進行降雨量之連續性紀錄，透過地面雨量站網的單點雨量資料乃不足以滿足分布型水文模式之需求，雷達測雨技術的開發，於降雨方面提供高解析度之時空資訊，並能有效提升洪水預報之精度。Corral(2000)使用雷達降雨推估值於半分布型水文模式上，其集水區格網尺度畫分為 1km×1km，並應用 TOPMODEL 模式於各網格計算上，且與集塊型 TOPMODEL 使用均勻空間降雨輸入之模擬結果進行比較，發現整合雷達雨量之半分布型水文模式，其

模擬結果明顯優於集塊型模式，也指出氣象雷達觀測降雨為水文應用發展上之有利工具。Philip(2003)利用地理資訊系統(GIS)結合美國雷達降雨推估系統(NEXRAD)與網際網路建立都市洪水警戒系統，透過雷達系統可有效得到即時的累積降雨資訊，並於防災預警方面獲得良好之成效。Habets (2004)利用數值氣象預測模型所獲得的降水預報應用於氣象與水文結合之系統 ASFRAN-ISBA-MODCOU (SIM)，其研究以日為時間間距，結果顯示利用雨量預報當作水文模式之輸入將有助於流量預報之發展。Collischonn (2005)利用不同尺度之區域數值氣象預測模式結合分布型水文模式作流量之預報，並與真實雨量所作之模擬結果比較，結果指出若能夠提升雨量預報之精確度將可以使流量之預報更為精確。

## 2.2 分布型降雨逕流模式相關文獻

分布型降雨-逕流模式雖然較集塊型模式複雜，但有較多優點。而分布型降雨-逕流模式主要的重點為空間的逕流模擬，透過其準確的模擬集水區水流運動的空間變化情形，以此為基礎可以再加以延伸至模擬集水區變化對逕流之影響、水質與生態之模擬、水文過程物理機制之研究...等。分布型降雨-逕流模式之發展相當早，近年隨著電腦運算技術快速地進步，地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)，數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)及遙感探測(Remote Sensing, RS)...等技術迅速發展，為建立分布型降雨-逕流模式之研究提供有利的技術與更詳盡可用的資訊。

在分布型降雨-逕流模式方面，國外自早期開始就有許多學者進行研究，如：Huggins & Monke (1968)、Smith & Woolhiser (1971)、Engman & Rogowski (1974)、Rovey et al. (1977)、Ross et al. (1979)、Kutchment (1980)等學者。而最具代表性的分布型降雨-逕流模式為 *Système Hydrologique Européen (SHE)* 模式(Jonch-Clausen, 1979)，此模式於 1970 年代由丹麥的 Danish Hydraulic Institute、英國的 Center of Ecology and Hydrology 及法國 SOGREAH 顧問公司等水文機構共同研發，此模式利

用 250m × 250m 的方形格網將集水區分割，其中主要的水文過程則利用質量、能量或動量守衡的偏微分方程式之差分形式與經過獨立實驗所獲得的經驗關係來描述，而每個格網與格網之間利用多個模組模擬逕流產生之過程，此模式乃是目前發展最複雜之分布型水文模式之一。

格網分布型水文模式是利用實際地形及河川走向將集水區分成若干小區域，每個小區域具有相似的水文特性，再根據河川網路給予適當連結成為多層核胞的形式，建立涵蓋整個集水區的分布型降雨-逕流模式。為配合雷達系統所提供之雨量資訊，本計畫採用 Yu (1987) 及其研究團隊(劉光武，1991；鄭玉菽，1995；陳信彰，1997；郭振民，1999；謝章廷，2007 與游保杉，2008)所發展之 GBDM (Grid-Based Distributed rainfall-runoff Model) 模式，此模式將集水區分割成許多邊界大小相同之元素，主要利用漫地流以及渠道流來模擬小集水區內部水流之流動，並利用儲蓄法描述降雨形成逕流流至集水區出口之過程，最後結合自動化參數搜尋來優選模式之最佳參數。

## 2.3 水理演算與橋墩沖刷相關文獻

河床沖刷行為大致可分為一般沖刷、局部沖刷與束縮沖刷。無論河道中是否有結構物存在，河床泥砂均會受水流作用產生一般沖刷。當水流流經橋墩之間時，因水工結構物阻礙，使通水斷面積減少，產生束縮沖刷。在橋墩前緣處，則因為水流因橋墩轉向，產生向下射流而造成橋墩前緣及周圍的局部沖刷。橋梁的破壞主因為橋墩基礎處河床遭水流淘刷導致橋基裸露，此橋端前緣及周圍的局部沖刷對橋梁之安全影響甚大。

根據 Raudkivi(1986)曾針對橋墩附近的沖刷情形做探討，其認為橋墩的沖刷現象可分為一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷等三個部分。

### 1. 一般沖刷(general scour)：

係指河道在未設置任何結構物時，水流對渠床沖刷造成高程下

降的情形。河床中的水流驅使泥砂運移，而泥砂影響水流結構，所以兩者是相互依存，河床型態永遠處於發展變化中。

## 2. 束縮沖刷(constriction scour)：

係指橋墩或橋台興建之後，以致佔據部分河寬，形成阻水效應，造成水流之通水斷面束縮，導致迴水效應(backwater)，而通過橋墩附近的水流流速增加，進而對橋墩附近的河床造成沖刷。

## 3. 局部沖刷(local scour)：

係指因河道設置橋墩或水工結構物，對於水流產生局部阻礙與干擾的現象，迫使水流在橋墩前緣壅水、繞流，流速與流向的劇烈變化，引起渦流和極強的河床面剪應力，進而造成河床局部的沖刷與高程的下降。

Melville 等(2000)則認為一般橋梁所造成之沖刷，亦有可能為兩種沖刷類別之加總。就工程實務而言，一般沖刷以探討大洪水事件之影響為最重要對象，應用時多以某一特定設計流量(例如 100 年頻率洪水量)條件，評估一般沖刷之程度。此一特定流量的大小則依結構物重要性而定。除自然因素外，人為採砂亦為河床下降原因之一，所造成之破壞往往大於自然演變，目前臺灣地區主要河川橋梁多少皆面臨下游河道降低之影響，經調查顯示主要歸咎於過量採取河床砂石且超過河川天然之補充量。束縮沖刷來自阻水效應影響，以目前的造橋技術，橋墩佔用河道斷面面積已可有效降低。局部沖刷來自於水流經過結構物周圍時，因流速加快，底床剪應力增大，導致局部區域有明顯沖刷現象，程度較一般沖刷嚴重。

除上述分類方法外，如以砂石補充觀點，則沖刷常又被分為兩種狀態：清水沖刷(clear-water scour)和濁水沖刷(sediment-transport scour or live-bed scour)。前者係指在沖刷作用時，上游水流並無挾砂，後者則係上游水流挾帶有泥砂輸送至下游，故在沖刷深度程度上以前者較為嚴重。在清水沖刷時，局部沖刷深度隨時間慢慢增加。在濁水沖刷

時，其達到平衡沖刷深度的時間要比清水沖刷來的快；但是濁水沖刷的平衡沖刷深度會因為底床沙丘之運移，而作不規則的振盪(如圖 2.1 所示)。

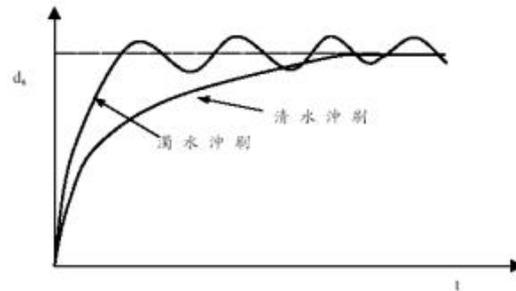


圖 2.1 沖刷深度隨時間變化圖(Melville and Chiew, 1999)

### 1. 橋墩附近之流況

當水流流經橋墩，因為橋墩阻礙了水流，將使得水流結構發生了變化，並導致局部沖刷現象的發生。圖 2.2 所示，其中以向下射流與馬蹄形渦流為造成橋墩局部沖刷之主因。橋墩附近之流場大致可分為下列四種流況：

#### (1)墩前壅水(surface roller)：

沿橋墩迎水面處，水流受阻礙之部分的動能轉換為位能，由縱剖面來看，水流則形成一分界面，分界面以上的水流受阻後導向水面，造成接近水面處湧波的發生，其後隨著水流改變方向而形成小型漩渦水流，稱之為墩前壅水。

#### (2)向下射流(down flow)：

當水流衝擊橋墩時，會在橋墩面上產生一停滯壓力，且由於垂直流速分布由上向下遞減，故壓力亦向下遞減而造成一壓力梯度，因而形成一向下射流。

(3)馬蹄形渦流(horseshoe vortex)：

由向下射流與受橋墩影響而改變方向的二次橫向水流相互作用，所產生之三維性渦流，其由橋墩迎水面之底床處開始產生，而沿著橋墩邊緣向下游傳遞，稱之為馬蹄形渦流。

(4)尾跡渦流(wake vortex)：

當水流流經橋墩後，在墩後下游側壁面會產生分離現象 (Separation)，導致速度剖面發生不連續面，而出現小渦流，在靠近底床處，此種渦流和馬蹄形渦流交互作用，使得水流尾跡產生側向與垂直方向游移擺動。此種渦流系統產生的低壓中心，可將泥沙顆粒拾起而帶至下游處淤積，稱為尾跡渦流。

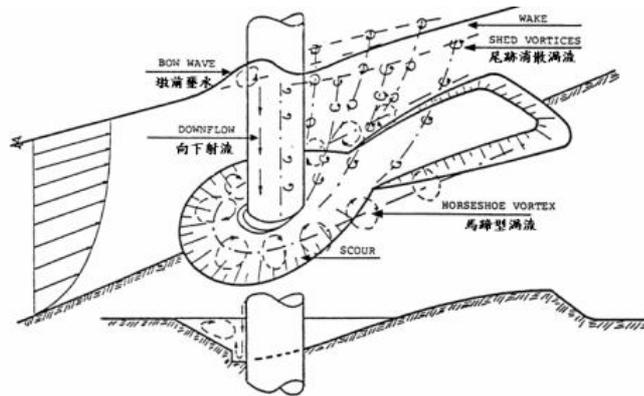


圖 2.2 水流流經圓柱型橋墩流況示意圖(修改自 Breusers and Raudkivi, 1991)

2. 橋墩沖刷因子之分類

由於橋墩周圍局部沖刷為三維流場，若純粹以理論分析方式推求橋墩周圍局部沖刷深度較為困難與複雜，故過去大多運用試驗方法量測橋墩周圍局部沖刷深度，並藉以推導出影響橋墩沖刷因子之權重及相關沖刷深度公式。影響橋墩沖刷之因子可歸納為，橋墩性質、水流性質、底床質特性、沖刷時間等，而這些因子又與下列條件有關：

(1)橋墩性質：

橋墩迎水面寬度、橋墩基礎寬度、水流攻角、橋墩形狀因子修正係數、不均勻面面積、橋墩迎水面面積。

(2)水流性質：

流體密度、運動黏滯係數、平均流速、水流深度、重力加速度。

(3)底床質特性：

中值粒徑、底床質幾何標準偏差、底床質密度、泥砂臨界啟動流速。

(4)時間：

沖刷時間、沖刷達平衡所需時間。

### 3. 橋墩局部沖刷之預測

由於橋墩附近流況變化極為複雜，利用數值方法計算局部沖刷深度仍多屬研究階段，其原因歸納如下：

(1)結構物附近之三維流況複雜，能量消散情形甚難掌握。

(2)附近之泥砂啟動條件受紊流掌控，但往昔泥砂啟動條件之發展，受限於觀測儀器，多不包含紊流效應。

(3)以往發展之泥砂輸送率公式，均屬一維泥砂單一方向輸送，無法描述三維之輸砂現象。

因此，數值方法計算在參數檢定方面出現難題，目前評估方法多以經驗公式進行。雖然研究局部沖刷經驗公式的文獻甚多，但局部沖刷的水理學仍未能被充分瞭解，常有在相同水力條件下，不同公式所得計算結果有明顯差異，經驗公式的選用需要經過審慎評估。蔡文鎗(1989)曾對數個著名橋墩局部沖刷深度估算式進行歸納如表 2-1 與表 2-2。

表 2-1 橋墩沖刷理論分析

作者	理論分析	結果
王燦汶	利用動量原理、愛因斯坦河床載公式泥砂連續方式做數學函數分析。	$(d_s)_{\max}^2 = -2(1 - \lambda)\tan\theta \times$ $\left[ \phi_5 \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \cdot \frac{K_1 DV^2}{gd_s d_{s0}} \right) - \phi_2 \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \cdot \frac{V^2}{d_{s0} C^2} \right) \right]$ <p><math>\phi_2</math>：表示上游之推移質沉澱量函數關係</p> <p><math>\phi_5</math>：馬蹄形渦流系統發展之剪應力及窩流洞內之沉澱輸送能力。</p> <p>C：Chezy C.</p>
吳建民	由觀察之沖刷坑形狀，利用沉澱在移動過程中輸砂量間呈平衡關係作數學函數分析。	$1 + 2 \left( \frac{d_{se}}{y} \right) = \alpha \left( \frac{1}{\phi} \right)^{1/3} \left( 1 + \frac{D/y}{(d_e/y)\cot\theta} \right)^{2/3}$ $\phi = \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \left( \sqrt{1 + \frac{\sin^2\phi}{\sin^2\theta m}} \right)^{3/2} \doteq 1$
顏榮甫	由觀察之沖刷坑形狀，並以攜離沖刷孔輸砂率之連續方程式，模擬清水沖刷之狀況。	$\frac{\pi}{2} \left[ \left( \frac{d_s}{D} \right) \cot\alpha \right] \left[ 1 + \frac{d_s}{D} \cot\alpha \right] \times \left[ \frac{\partial(d_s/D)}{\partial t} \right]$ $= \frac{K_1 K_3}{K_2} \frac{d}{D^3} I_p$ <p><math>I_p</math>：顆粒被捲離之機率</p> <p><math>K_1</math>：體積係數</p> <p><math>K_2 K_3</math>：面積係數</p>

資料來源：蔡文鎗，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，1989年。

表 2-1(續) 橋墩沖刷理論分析

作者	理論分析	結果
C.J.Baker	<p>假設沖刷過程中，沖刷坑內渦粒之大小與形狀，且考慮顆粒之受力情況，得出沖刷顆粒之數學模型。</p>	$\frac{d_{se}}{D} = K_1 N - K_2$ $K_1 = \frac{k_1}{Ck_3^{1/3}k_2} \frac{\Gamma 0}{D}$ $K_2 = \frac{\Gamma 0}{D} \frac{1}{k_2}$ $N = V / \left( \left( \frac{\rho s}{\rho} - 1 \right) g d \right)^{1/2} \quad \Gamma 0 : \text{渦粒半徑}$
Tetsuro Tsujimoto (1986)	<p>利用渦流理論配合輸砂連續方程式，並討論沙丘經過沖刷坑造成沖刷深度擾動的性質，建立數學函數模型。</p>	$\lambda_s(\zeta) \equiv \Lambda_s/b = w(\zeta) \left\{ 1 + \sqrt{\zeta [2w(\zeta) - \zeta] / w(\zeta)} \right\}$ <p>----- (<math>\zeta \leq \zeta_1</math>)</p> $\lambda_s(\zeta) \equiv \Lambda_s/b$ $= [cot\phi_r + (2 - cot\phi_r) K_w W_o] + (2 - cot\phi_r) W_o$ <p>----- (<math>\zeta &gt; \zeta_1</math>)</p> $\zeta_{max} = \zeta_e + \frac{3}{2} K_2 \gamma_{zy} \theta_d \frac{h}{D}$ $\zeta_e = dse/D$ <p>dse：平衡沖刷深度</p> $\theta_d = 0.119 \left[ 1 - \frac{l}{\eta} - 0.4 \tau_{mc} \eta \right]^2$ $K_1 = 5 \text{ (砂丘河床)}$ $\gamma_{zy} = (ds_{max} - ds_{msx})/H \text{ (可圖解)}$ <p>H：砂丘高度</p> <p><math>\Lambda_s</math>：墩前沖刷坑長度</p> <p><math>\phi_r</math>：墩前砂面水中靜止角</p> <p><math>W(\zeta)</math>：渦流強度</p> $\zeta : \frac{d_s}{b}$ $\zeta_1 : W_o (1 - K_w W_o) K_w \doteq \frac{1}{7} \quad W_o \doteq 0.2$

資料來源：蔡文鎗，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，1989年。

表 2-2 橋墩沖刷實驗分析

作者	實驗結果	實驗條件
Inglis (1948) Neill (1960) Thomas (1962)	$\frac{y + d_s}{D} = 2.32 \left( \frac{q^{2/3}}{D} \right)^{0.78}$	1. $d_{50} = 0.3, 1.3\text{mm}$ 2. 清水沖刷 3. $q^{2/3} = 2 \text{ to } 10 \text{ (m)}$
Blench (1962)	$\frac{y + d_s}{D} = 1.8 \left( \frac{D}{y} \right)^{1/4}$	$y = 1.334q^{2/3} \text{ (m)}$
ArVnachalam (1965, 1967)	$\frac{y + d_s}{D} = 1.95 \left( \frac{D}{y} \right)^{1/6}$	$y = 1.334q^{2/3} \text{ (m)}$
Neill (1964)	$\frac{d_s}{D} = 1.5 \left( \frac{D}{y} \right)^{0.3}$	矩形橋墩
Larras (1963, 1960)	$d_{sm} = 1.05D^{0.75}$	1. $d_{sm} \text{ (m)}$
Shen.H.W (1966)	$\frac{d_{sm}}{y} = 2F^{0.43} \left( \frac{y}{D} \right)^{0.5}$	$F = V/\sqrt{gy}$
Shen.H.W (1966)	$\frac{d_{sm}}{D} = 1.35 \left( \frac{y}{D} \right)^{0.3}$	1. $V > V_c$ , $d_{sm}$ 產生波動，故建議 $d_{sm} + 1/2$ 沙丘高作為深水沖刷時之沖刷深度 2. 圓柱形橋墩
Coleman (1971)	$\frac{d_s}{D} = 1.49 \left( \frac{V^2}{gy} \right)^{1/10}$	1. $D = 0.045, 0.076\text{m}$ 2. $d_{50} = 0.1\text{mm}$ 3. 渾水沖刷
王燦汶 (1971)	$\frac{(d_s)_{\max}}{y} = 2 \left( F^2 \left( \frac{D}{y} \right)^3 \right)^{1/5}$	1. $d_{50} = 0.15 \sim 0.57\text{mm}$ 2. $y = 3.7 \sim 53\text{cm}$ 3. $V = 15.24 \sim 125\text{cm/sec}$
吳建民 (1971)	(1) 推移質為主 $1 + 0.116 \left( \frac{d_{\max}}{y} \right) = \frac{1}{1.02} \left( 1 + \frac{D/y}{1.30(d_{\max})/y} \right)^{2/3}$ (2) 懸移質濃度高時 $\frac{(d_s)_{\max}}{y} = f \left( F, \frac{D}{y}, V_1/\phi V_{*c} \right)$	1. $d_m = 0.23, 0.42, 1.20\text{mm}$ 2. $y = 20\text{cm}$ 3. $V_{\max} = 60 \text{ cm/sec}$

資料來源：蔡文鎗，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，1989年。

表 2-2(續) 橋墩沖刷實驗分析

作者	實驗結果	實驗條件
Shen.H.W (1966,1969)	$d_s = 0.000059R^{0.512}$ (1966) $d_s = 0.000022R^{0.619}$ (1969)	1. $d_s(m)$
Hanco (1971)	(1)在低流速時 $\frac{d_s(V)}{d_{sm}} = \left(\frac{2V}{V_c} - 1\right)$ $\frac{d_{sm}}{D} = 2.42\left(\frac{V_c^2}{gD}\right)^{1/3}$ (2) $\frac{d_{sm}}{D} = 2.42\left(\frac{V_c^2}{gD}\right)^{1/3}$ (3)對於自然砂 $\frac{d_{sm}}{D} = 3.3\left(\frac{d}{D}\right)^{0.2}\left(\frac{y}{D}\right)^{0.13}$	1. $d_{50}=0.5, 2.5m$ $\frac{V_c^2}{gD} = 0.05 \text{ to } 0.6$ $V_c = 1.2\sqrt{gd\frac{\rho_s - \rho}{\rho}}\left(\frac{y}{D}\right)^{0.2}$ $\approx 1.54d^{0.3}y^{0.2}g^{0.5}$
Torsethaugen (1975)	$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left[-(t_o/t)^{0.5}\right]$ $\frac{d_{se}}{D} = 1.8\left(\frac{V}{V_c} - 0.54\right)\left(\frac{y}{D}\right)$	$\frac{V}{V_c} = 0.8$ $\frac{y}{D} = 0.2 \sim 0.65$
Carstens(1966)	$\frac{d_{se}}{D} = 0.546\left(\frac{N^2 - 1.25}{N^2 - 5.02}\right)^{5/6}$ $N = \frac{V}{\sqrt{(y/7-1)gd}}$	1. 渾水沖刷
Basaketal (1977)	$d_s = 0.558D^{0.586}$	1. 矩型橋墩 2. $d_s(m)$
Randkivi & Ettoma(1977)	$\frac{d_s}{D} = \csc \alpha = K_1 \ln\left[\left(\frac{d_{50}}{D}\right)\left(\frac{V_m t}{V_m D}\right)\right] + \ln K_2$ $K_1, K_2$ 為 係數	1. $d_{50} = 0.55mm$
Randkivi & Ettoma(1977)	$\frac{d_s}{D} = 2.1 \sim 2.3 \dots\dots$ $\frac{d_s}{D} = 1.4 \sim 1.5 \dots\dots$	$d > 0.7 \sim 0.9mm$ $d > 0.7 \sim 0.9mm$
Jain & Fischer (1980)	$\frac{d_s}{D} = 1.86\left(\frac{y}{D}\right)^{0.5} (F - F_c)^{0.25}$	1. $d_{50} = 0.25mm$ 2. $\sigma_g = 1.34$ 3. $1 \leq y/D \leq 2$
Jain(1981)	$\frac{d_s}{D} = 1.84\left(\frac{y}{D}\right)^{0.3} (F_c)^{1/4}$	整理多人數據迴歸
Randkivi & Ettoma(1983)	$\left[\frac{d_{se}(\sigma_g)}{D}\right]_{\max} = 2.3$	1. $d_{50} = 0.55mm$ 2. $\frac{V_m}{V_{ma}} = 0.9$
T. W. Wang (1984)	$\frac{d_{sm}}{D} = 2.735\left[F^2\left(\frac{D}{y}\right)^3\right]^{0.285}$	1. $d_{50} = 0.40, 0.55mm$

資料來源：蔡文鎗，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，1989年。

表 2-2(續) 橋墩沖刷實驗分析

Dan BatVca Bijan Dargahi (1986)	$\frac{d_s}{D} = 5.56 \left( \frac{V}{V_c} \right) 0.36 \left( \frac{D}{y} \right) 0.22 \cdot (F_r)^{1.41}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>d_{50} = 0.41</math></li> <li>2. <math>\sigma_g = 1.88</math></li> <li>3. <math>0.12 &lt; Fr &lt; 0.30</math></li> </ol>
顏榮甫 (1986)	$\frac{d_{se}}{D} = 0.0171 \left( \frac{D}{d} \right) 0.528 \left( \frac{y}{D} \right) - 0.23$ $\cdot (S) - 0.703$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>9.59 \leq y/d \leq 19.18</math></li> <li>2. <math>0.94 \leq F \leq 1.20</math></li> </ol>
Y.M.CHIEN & MELVILLE (1987)	$\frac{d_e}{D(D/d_{50})} = \frac{K(D/d)d_e}{D(D/d_{50} \geq d_{50})}$ $\frac{d_e}{D(y_0/D)} = \frac{K(y/D)d_e}{D}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>d_{50} = 0.6, 0.85mm</math></li> <li>2. <math>y = 130 \sim 240mm</math></li> </ol>
Chitale(1988)	$d_s = 2.5b$	
Breusers and Raudkivi(1991)	$\frac{d_s}{b} = 2.3K_y K_s K_d K_\sigma K_\theta$	
Chiew(1995)	$\frac{d_s}{b} = K_d K_h \left( 3.77 \frac{V}{V_c} - 1.13 \right)$	Kd:泥沙顆粒修正因子 Kh:水流深度修正因子
Melville(1997)	$d_s = K_{yb} K_1 K_d K_s K_\theta$	$\frac{b}{y} < 0.7 \rightarrow K_{yh} = 2.4b$ $0.7 < \frac{b}{y} < 5 \rightarrow K_{yb} = 2(yb)^{0.5}$ $\frac{b}{y} > 5 \rightarrow K_{yb} = 4.5y$
Bozkus and Yildiz(2004)	$\frac{d_s}{b} = f\left(\frac{y}{b}, F_r, \beta\right)$	$\beta$ :橋墩與垂直軸夾角

資料來源：蔡文鎗，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，1989年。

## 第三章 大甲溪流域雷達降雨預報資料校正

集水區雨量的空間與時間分布會直接影響下游地區河川的逕流量與下游橋梁沖刷估算。由於臺灣降雨的空間變異很大，尤其在山區，但以目前的地面雨量站分布狀態，並不足以能掌握降雨的空間變異特性；目前中央氣象局的 QPESUMS 降雨系統(以下簡稱 QPESUMS)可以提供空間降雨的特性以及雨量預報資料，本計畫應用 QPESUMS 降雨配合地面雨量觀測降雨與影響雷達降雨的重要因子(比如距離與高度)，進一步提昇雷達降雨量估算精度。另外，配合雷達雨量預報的修正，提供研究區域內各地未來 1~3 小時雨量預報。

### 3.1 雷達回波估計雨量方法

自 1960 年之後，由於大量的雨量站觀測資料開始被用於雷達資料校正所用，逐漸確認雷達能相當準確地估算雨量之能力。雷達之基本觀念乃由物理學中「都卜勒效應(Doppler effect)」原理進行運作，儀器藉由天線發射器(transmitter)發出電磁波，再接收經物體反射之回波，經由發射與接受電磁波之關係來偵測物體大小。雷達應用在氣象方面主要是用來觀測降雨與追蹤風暴，其運作方式為每次採取不同仰角高度從最低仰角高度至最高仰角高度掃描一圈，並根據都卜勒原理進行定量降雨量之觀測。由於臺灣地形複雜且山多，雷達在掃射時於低仰角高度易受到山脈阻擋，因此目前解決方法為將受到地形遮蔽阻擋的回波資料以較高層未受地形影響的回波資料取代，亦即在未受阻擋之區域選取最低仰角回波因子。圖 3.1 顯示雷達脈波體積之回波因子，當脈波體積之回波因子受山區阻擋超過 60%時或脈波體積中心點距離地表小於 50 公尺，則改取下一個仰角回波因子代替。

透過 Z-R 關係式的建立，並且與降雨地區地面所建立之雨量站，能夠提供該地區的降水量(即 R 值)，即可利用蒐集到的降水回波強度

(即 Z 值)，可以掌握大範圍地區的觀測資料，此乃與雨量站所反映出的小區域之雨量觀測不同。使用雷達針對大範圍地區蒐集雨量之空間分部資訊，乃是一種經濟且有效的方式。

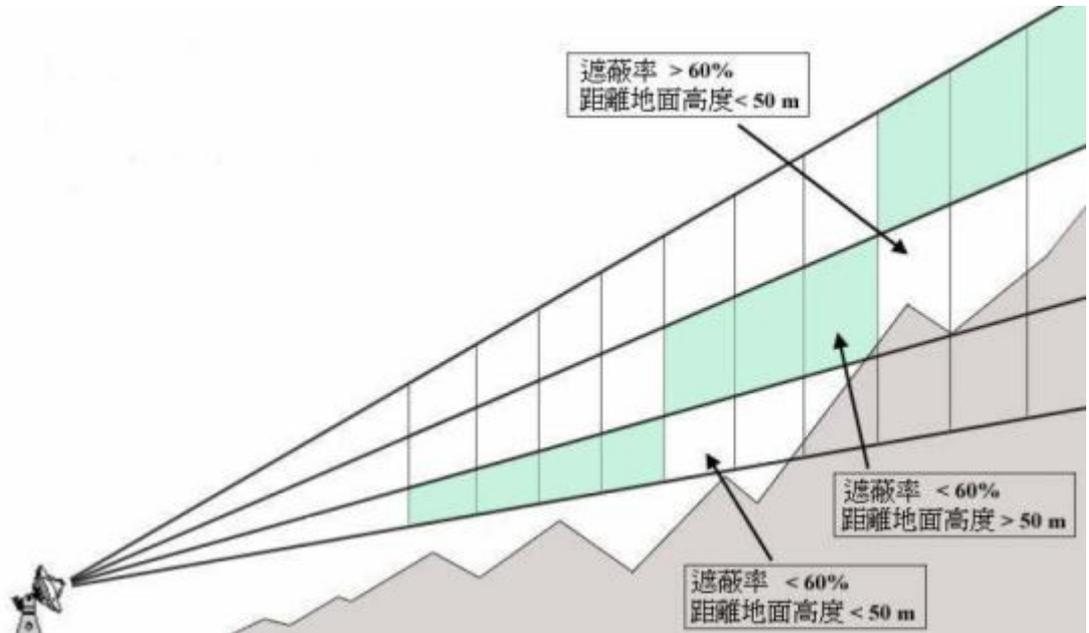


圖 3.1 雷達仰角回波示意圖(張智昌，2006)

### 3.2 QPESUMS 觀測降雨技術概述

中央氣象局與美國劇烈風暴實驗室(National Severe Storm Laboratory;NSSL)於 2002 年起開發「多重觀測工具之定量降雨估計與分類技術」(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiples Sensors; QPESUMS)，有效利用雷達、衛星及雨量計等觀測資料以準確估計降雨型態及降雨強度，並透過分析技術的開發，提昇對於劇烈或突變天氣發生之監測、分析與預警的能力。此系統除了提供氣象人員分析參考外，其他氣象、工程、防災、水利及水庫管理等各單位，將其做最充分之有效利用，可達到防災、減災之目的。然而目前關於定量降水估計方面，係由 2003 年各月份最低仰角合成回波(Hybrid Reflectivity)與降雨量所擬合之 Z-R 關係顯示，降雨粒子分布隨

季節不同而有顯著差異性存在，欲使用此單一 Z-R 關係式來進行臺灣地區不同降雨型態之降雨量估計，將存在極高的不確定性。

QPESUMS 系統由於具備氣象雷達之特性，可提供大範圍且空間上較為均勻、解析度較高的降雨資訊，因此為現階段改善降雨觀測不足之最有效的方法。其處理流程如圖 3.2 所示，而產品功能則簡略介紹如下：

雷達資料品質控制(radar data quality control)：QPESUMS 系統能處理雷達因受到天氣、地形等外界干擾所產生雜波而進行過濾，以提高觀測資料之準確度。

亮帶確認功能(bright band identification)：當雷達觀測到中低層大氣之融解層(melting layer)，若遇中高層之冰晶等固狀粒子下墜經過該層時，從雷達觀測中，在融解層附近會出現回波因子增強之情況，謂之「亮帶」(bright band)，此強回波會增加對於降雨估計之誤差。QPESUMS 能透過亮帶確認功能將回波因子修正，以減少降雨估計誤差。

三維回波顯示(3-D reflectivity mosaic)：QPESUMS 於顯示介面上能提供高解析時間與空間之三維結構，並且將雷達回波資料經 Barnes 內插法轉換成直角坐標系統(Cartesian coordinates)之網格資料。

降雨型態分類(precipitation typing and convective/ stratiform identification)：因雨滴直徑大小與季節、風暴等天氣系統之形成有關，不同降雨型態其雨滴分布與直徑大小皆不一樣，QPESUMS 系統能將降雨型態分為兩類，對流性狀水(convective precipitation)與層狀降水(stratiform precipitation)，經分類結果可提升雷達降雨推估之準確性。

混合掃描顯示(hybrid scan mosaic)：QPESUMS 結合氣象局四個雷達之整合回波資料，減少因蒸發、物態轉換(phase change)或平流(advection)等因素所產生之觀測誤差。

多重觀測定量估計(Multi-sensor QPE)：QPESUMS 亦結合衛星觀測資訊，提供多種降雨推估之比較以提升較準確之降雨估計技術。

中央氣象局已於 2001 年完成全省四個地區雷達站設置，並且完成全島雷達網的建立，圖 3.3 為全省雷達網分布圖。因為雷達觀測易受到地形屏障與雷達觀測距離的限制，仍需整合其他觀測工具來增加定量降水估計的正確性，特別是衛星與自動雨量站資料的配合。氣象雷達為美國 Weather Surveillance Radars-1988 Doppler(WSR-88D)都卜勒雷達。此雷達系統乃為美國 NWS(National Weather Service)所研發出的高敏感度且功能性強之雷達系統。WSR-88D 雷達不僅能提供局部地區之降水強度、移動性與劇烈降水偵測，並且能針對雪、冰雹等多種惡劣天氣現象觀測其資料，另外也提供局部地區之環境風場資訊。主要包含許多演算方式(algorithms)能夠產出多種雷達觀測產品，可依照任務設定而提供警示資訊和相關資料，也可透過系統內建功能介面與其他 WSR-88D 系統進行資料交換。

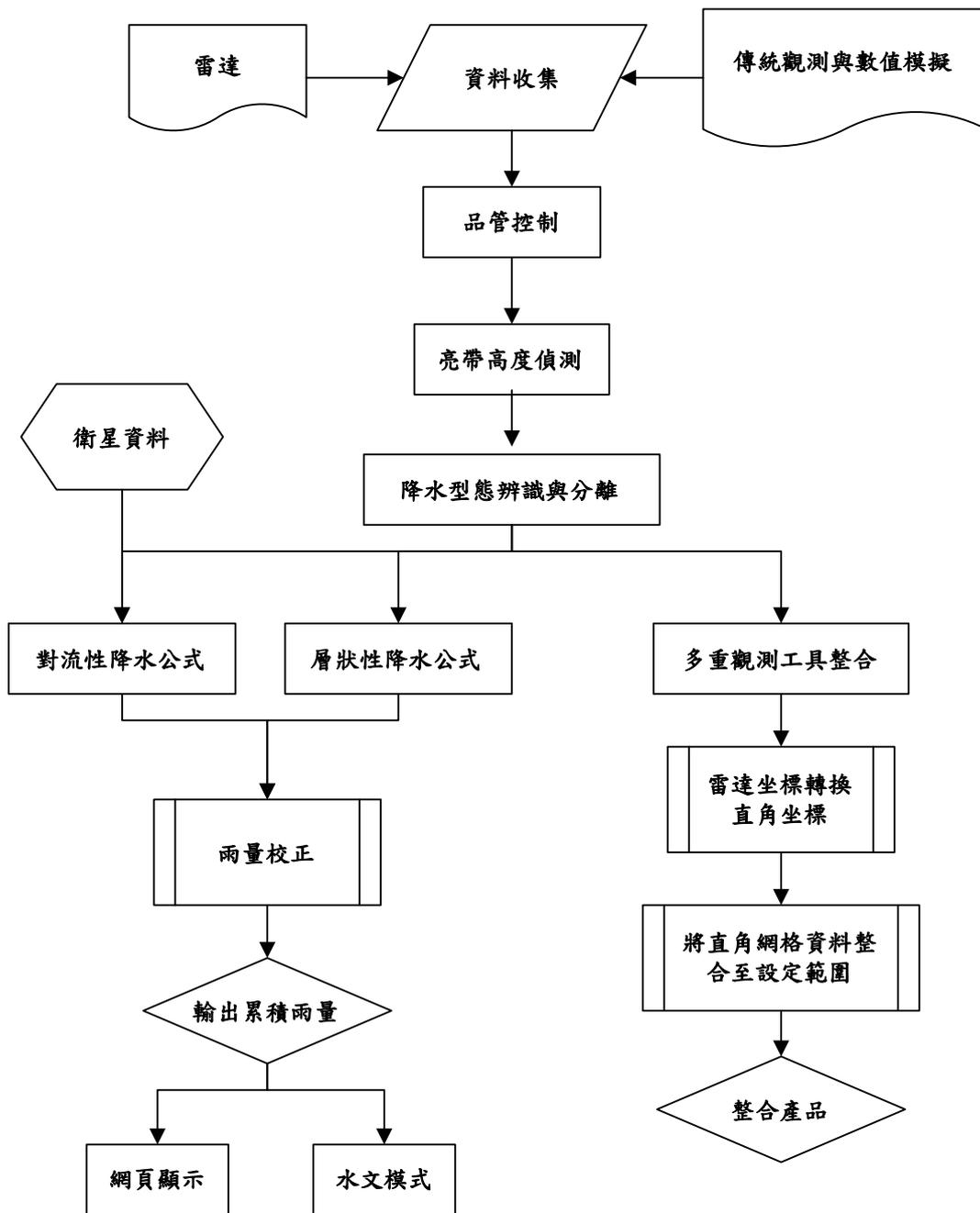


圖 3.2 QPESUMS 系統資料處理流程(改繪自中央氣象局)



圖 3.3 全省雷達網分布圖(丘台光等人，2003)

目前 QPESUMS 系統主要採用兩種方法並行之方式，分別為單一因子之降水估計：Power-law Z-R 關係式；多重因子之降水估計：雷達與地面雨量計配合法(Radar-Rain gauge Method)，現階段所使用之 Z-R 關係式為下式：

$$Z = 32.5R^{1.65} \dots\dots\dots(3-1)$$

上式主要是參考 Alberta, Canada 之夏季對流降雨與雷達觀測資料之關係式(Xin et al., 1997)。另外，雷達與雨量計配合法則是將地面雨量站所量測的雨量資料與該點之雷達回波強度進行比對，並將雨量站的影響半徑暫定為 25 公里，再以雷達回波的空間分布作為權重因數，將雨量之空間分布情形估算出來。由於 QPESUMS 系統能提供 406 個自動雨量站資料，但經過測試發現部分雨量站之資料品質不穩定，為減

少雨量推估誤差，故僅選用其中的 365 個站作為研究之用。

系統整合處理後可得到網格資料，該產品的解析度為  $1.25 \times 1.25$  公里 ( $0.0125^\circ \times 0.0125^\circ$ )，資料起始點為  $27^\circ\text{N}$ ， $118^\circ\text{E}$ ，範圍介於  $20^\circ\text{-}27^\circ\text{N}$ ， $118^\circ\text{-}123.5^\circ\text{E}$ ，其中南北向有 561 個格點資料；東西向有 441 個格點資料。時間尺度上最小可以提供至 10 分鐘雨量資訊，目前本文研究採用中央氣象局所提供之 QPESUMS 雷達雨量資料，以每小時之降雨空間資訊當作模式之輸入資料，資料記錄時間採用國際標準時間(UTC)，故使用時務必密切注意時間上的轉換，需轉換成臺灣時間(UTC+8 hr)。

QPESUMS 除了提供網格資料外，能提供自動雨量站、氣象局屬觀測資料以及颱風中心位置資料等各種監測資料，如下：

1. 地面自動雨量站—提供每 10 分鐘、3 小時、6 小時累積雨量資料，以及測站之基本資料，包含測站經緯度、測站高度等。
2. 氣象局測站資料—提供每 10 分鐘之風向、風速、溫度、濕度以及氣壓觀測值等測站原始資料。
3. 雷達推估颱風位置—颱風侵台時可藉由雷達觀測颱風中心位置了解其中心最大風速以及移動方向等，提升相關防災人員之預警能力。

目前國內外已有許多氣象雷達之相關研究，雖然目前雷達估計降水之精確度尚有待提升，但具備高解析度之時間與空間分布於雨量資訊上，值得深入研究與發展。例如美國之 NEXRAD 雷達網具有即時監測颱風風暴雨等自然災害；國內學者如李清勝等人(2005)利用 QPESUMS 系統提供雷達雨量，應用於土石流潛勢區之雨量估計與即時預報技術等；張智昌等人(2006)整合氣象雷達與即時降雨資訊於颱風推估之研究。雖然目前雷達定量降水估計技術精度上目前還在改善中，尤其在山區地形遮蔽影響較為嚴重，相信未來能改善地形效應影響或是其他雜訊問題等不確定性因素，可提升雨量在時空分布資訊之準確度。

### 3.3 支撐向量迴歸

近年來由 Vapnik 及其共同研究者基於統計學習理論(statistical learning theory)所提出的機器學習方法—支撐向量機(support vector machine, SVM)，最初應用於處理二位元分類的問題，後來漸漸應用於分類技術，並延伸至迴歸問題。Umehara et al. (2003)建立支撐向量機結合前饋式類神經網路模式用來估計雷達雨量，其作法為將地面雨量先利用 SVM 做降雨與不降雨分類，並將地面雨量站對應上方之雷達回波因子及周圍 20 個雷達網格回波因子做為模式輸入，並結合前饋式類神經網路建立雷達估計雨量模式。Trafalis et al. (2005)建立四種學習機器：類神經網路(ANN)、支撐向量迴歸(SVR)、最小平方支撐向量迴歸(LR-SVR)、以及簡單線性關係式(LR)和 Z-R 關係式，先經由主成份分析各種雷達因子，分別輸入四種模式並比較其結果顯示 SVR 以及 LR-SVR 皆表現比 ANN 要好。

本計畫將利用支撐向量迴歸(Support Vector regression, SVR)法修正 QPESUMS 雷達估計降雨量，期望解決雷達降雨量低估的問題，並可保有雷達雨量具高解析度及涵蓋完整區域之優點。

假使有一組資料序列  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i)\}$ ，其中  $x_i$  為迴歸函數之輸入向量， $y_i$  為迴歸函數之輸出值，則線性支撐向量迴歸(support vector regression, SVR)之函數如下式所示：

$$f(x) = w^T \cdot x + b \dots\dots\dots(3-2)$$

式中  $w$  為模式之權重，表示  $f(x)$  之平坦度(flatness)或複雜度(complexity)， $b$  值為常數，代表模式之位移量(bias)，位移量之目的是使模式經過水平移動後能落在空間中正確的位置，通常模式在  $w$  已訓練完畢後才決定  $b$  值。支撐向量迴歸基於 Vapnik's  $\epsilon$ -insensitive loss function，且根據結構風險最小化法則，將線性支撐向量迴歸問題表示如下：

$$\text{Minimize} \quad \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^l (\xi_i - \xi_i^*) \dots\dots\dots(3-3)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to} \quad & y_i - (\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b) \leq \varepsilon + \xi_i, \\ & (\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ & \xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad i = 1, \dots, l \end{aligned}$$

$$L_\varepsilon(y_i) = |y_i - f(\mathbf{x}_i)|_\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{for } |y_i - [\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b]| < \varepsilon \\ |y_i - [\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b]| - \varepsilon & \text{for } |y_i - [\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i + b]| \geq \varepsilon \end{cases} \dots\dots\dots(3-4)$$

其中  $\frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{w}$  代表模式複雜度， $\varepsilon$  為容許帶寬( $\varepsilon$ -tube)， $C \sum_{i=1}^l (\xi_i - \xi_i^*)$  代表控制經驗風險， $\xi_i$  與  $\xi_i^*$  為寬鬆變數(slack variable)，用以說明部份離群的訓練資料(如所示)，若  $\sum_{i=1}^l (\xi_i - \xi_i^*)$  越大，代表模式需要對資料做越大的調整，因此將所有寬鬆變數之和乘上一參數值  $C$ ，其中  $C$  為成本參數(cost parameter)或稱為懲罰參數(penalty parameter)，為經驗誤差和錯誤最小化(error minimization)間之權衡(trade-off)， $C$  越大代表誤差發生時對目標函數影響越大，錯誤最小化之重要性就越大，反之則影響越小，但經驗誤差之重要性就越大。

另外(3-4)式中之  $L_\varepsilon(y_i)$  為支撐向量迴歸之損失函數(loss function)， $y_i$  為實際值， $f(x_i)$  為估計值。由於定義一個誤差容忍區間( $\varepsilon$ -tube)，若實際值落於此區間中，則損失函數(loss function)值為 0，否則損失函數則不為 0，亦即只有當落於誤差容忍區間外才給予懲罰。因此經由損失函數即可定義出實際值與估計值之誤差，如圖 3.4 所示，而落於最小範圍區間外之資料點即為支撐向量。

上述結果得知，相較於傳統線性迴歸所使用最小二乘法(the ordinary least squares method)之二次損失函數(quadratic loss function)，如圖 3.4 所示，兩者主要差別在於支撐向量迴歸有容許誤差範圍的機

制，最小二乘法則無。因此，前者僅需「部份、有用」的資料即可建立決策函數，且具有一定的抗雜訊能力，能提高估計之穩健性；反之後者卻需要「全部」資料才能建立決策函數，即全部資料皆為模式訓練之對象。

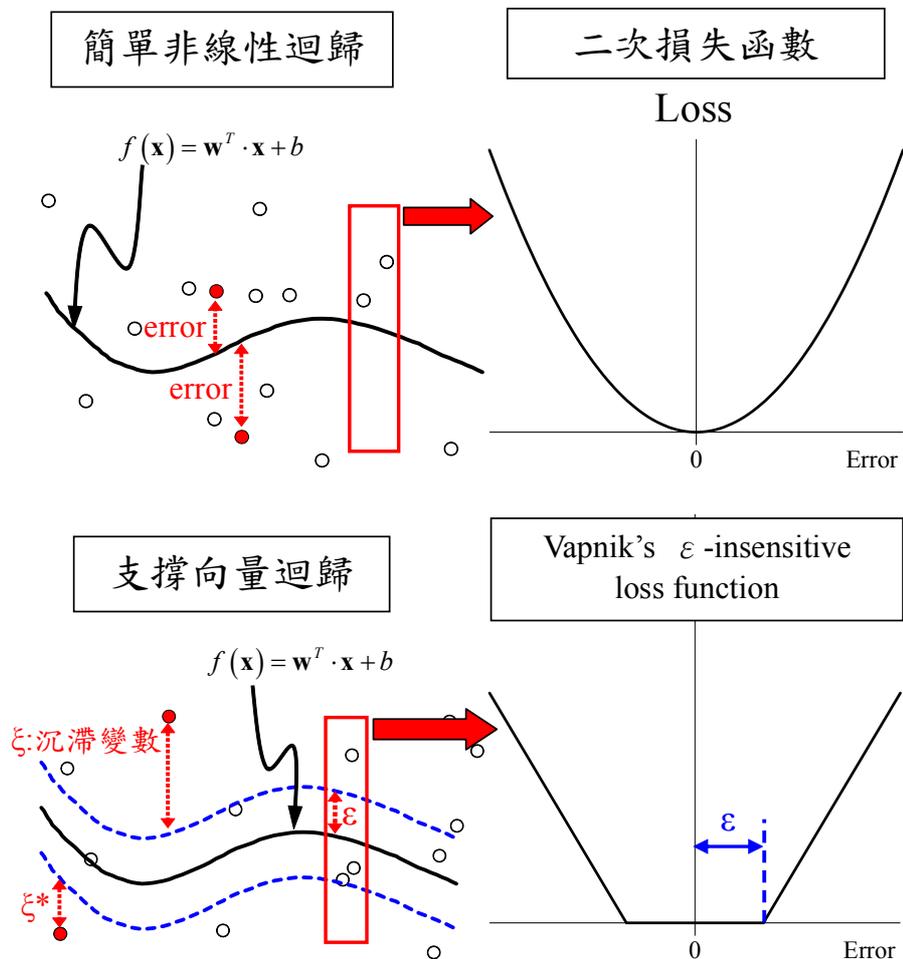


圖 3.4 傳統迴歸與支撐向量迴歸以及損失函數比較圖

(3-5)式中之最佳化問題則可引入 Lagrange multipliers  $\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*$  並利用 Lagrangian 求解：

$$\begin{aligned}
L_\varepsilon(\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*; \alpha, \alpha^*, \eta, \eta^*) &= \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{w} + C \left[ \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \right] \\
&\quad - \sum_{i=1}^l \alpha_i \left[ \varepsilon + \xi_i - y_i + (\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i) + b \right] \\
&\quad - \sum_{i=1}^l \alpha_i^* \left[ \varepsilon + \xi_i^* + y_i - (\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i) - b \right] - \sum_{i=1}^l (\eta_i \xi_i + \eta_i^* \xi_i^*) \\
\end{aligned}
\tag{3-5}$$

根據 Cortes and Vapnik (1995) 之文獻中，利用(3-5)式求解  $L_\varepsilon$  之極值為鞍點(saddle point of the Lagrangian)即

$\min_{\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*} \max_{\alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^*} L_\varepsilon(w, b, \xi, \xi^*, \alpha, \alpha^*, \eta, \eta^*)$ ，即可得下式：

$$\begin{cases}
\frac{\partial L_\varepsilon}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) x, \\
\frac{\partial L_\varepsilon}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \\
\frac{\partial L_\varepsilon}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow C - \alpha_i - \eta_i = 0, \\
\frac{\partial L_\varepsilon}{\partial \xi_i^*} = 0 \rightarrow C - \alpha_i^* - \eta_i^* = 0,
\end{cases}
\quad \alpha_i, \alpha_i^*, \eta_i, \eta_i^* \geq 0, \quad i = 1, \dots, l \tag{3-6}$$

將(3-6)式帶入(3-5)式，且把問題轉換為對偶問題(dual problem)：

Maximize

$$-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j)(\mathbf{x}_i^T \cdot \mathbf{x}_j) - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \tag{3-7}$$

$$\begin{aligned}
\text{subject to} \quad & \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\
& 0 \leq \alpha_i \leq C, \\
& 0 \leq \alpha_i^* \leq C, \quad i = 1, \dots, l
\end{aligned}$$

式(3-9)即為二次規劃(quadratic programming)問題，求解後即可得  $\alpha_i$  與  $\alpha_i^*$ ，每一組  $\alpha_i$  與  $\alpha_i^*$  對應每一筆訓練資料，若  $(\alpha_i - \alpha_i^*)$  不等於 0 的資料點之估計誤差將大於等於  $\varepsilon$ ，則這些資料點即表示該筆資料被用來建

立決策函數(decision function)，故稱「支撐向量」(support vector)。簡單來說，支撐向量即為用來代表支持或協助定義決策函數的資訊。最後藉由  $(\alpha_i - \alpha_i^*)$  不等於 0 的  $\alpha_i$  與  $\alpha_i^*$  求得  $w$ ，而  $b$  值可由 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions (Fletcher, 1987) 求得，如(3-8)式及(3-9)式。

$$w = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot x_i \dots\dots\dots(3-8)$$

$$\alpha_i (w \cdot x_i + b - y_i + \varepsilon + \xi_i) = 0 \dots\dots\dots(3-9)$$

因此最後支撐向量迴歸模式可表示為：

$$f(x) = \sum_{i,j} (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i^T \cdot x_j + b \dots\dots\dots(3-10)$$

其中  $\alpha_i - \alpha_i^* \neq 0$  所對應資料即為支撐向量。

上述皆針對線性支撐向量迴歸介紹，而當資料為非線性向量迴歸則利用非線性映射函數(nonlinear mapping function)  $\Phi$ ，將非線性問題映射到高維度特徵空間(feature space)，使資料特性變為線性問題，如圖 3.5 所示，因此決策函數變為：

$$f(x) = w^T \cdot \Phi(x) + b \dots\dots\dots(3-11)$$

原本(3-9)式變為下式，其餘限制不變。

Maximize

$$-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) (\Phi(x_i)^T \cdot \Phi(x_j)) - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \dots\dots\dots(3-12)$$

而真正會影響結果的是  $\Phi(x_i)^T \cdot \Phi(x_j)$ ，因此利用核函數  $K$  求解非線性問題，免除了在高維空間中  $w$  和  $\Phi(x)$  之內積計算，如下所示：

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \cdot \phi(x_j) \dots\dots\dots(3-13)$$

若  $K(x_i, x_j)$  為半正定函數(symmetric positive definite function)，滿

足 Mercer's condition :

$$\int K(x,y)z(y)dxdy \geq 0 \dots\dots\dots(3-14)$$

其中  $z(x)$ 與  $z(y)$ 為任何可積分函數，則函數  $K(x_i, x_j)$ 可以表示如 (3-15)式。一般常用之核函數(kernel function)如下：

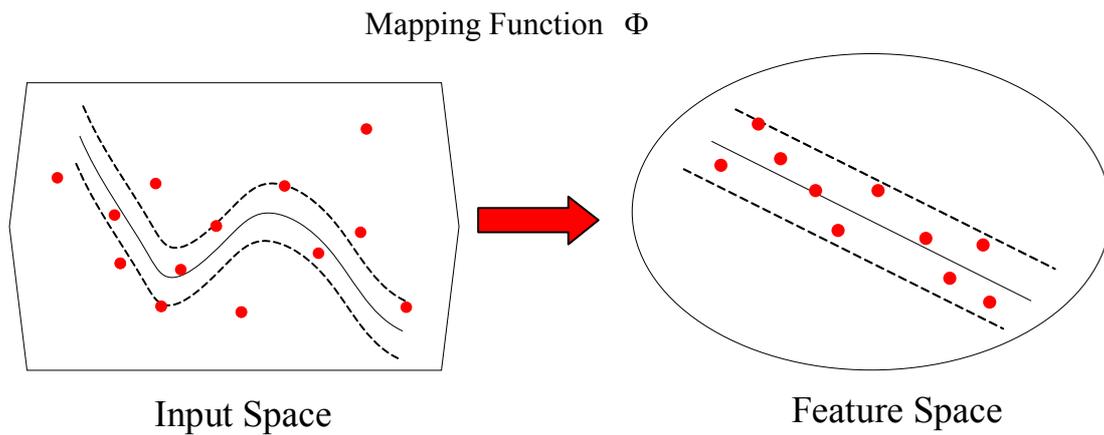
(1)Linear :  $K(x_i, x_j) = x_i \cdot x_j \dots\dots\dots(3-15)$

(2)Polynomial :  $K(x_i, x_j) = [\gamma(x_i, x_j) + c]^d \dots\dots\dots(3-16)$

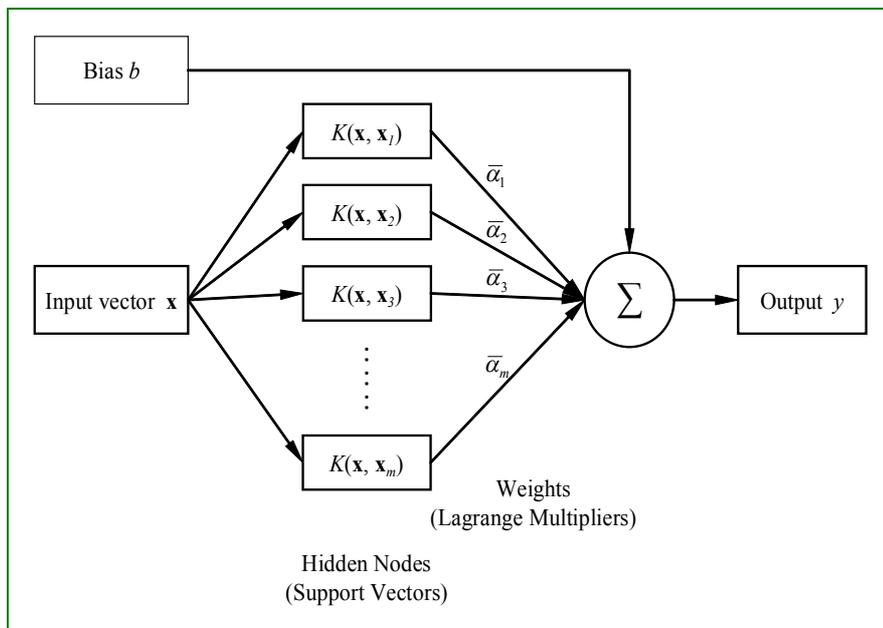
(3)Multi-layer perceptron :  $K(x_i, x_j) = \tanh[\gamma(x_i, x_j) + c] \dots\dots\dots(3-17)$

(4)Radial basis function :  $K(x_i, x_j) = \exp\left(-\gamma|(x_i, x_j)|^2\right) \dots\dots\dots(3-18)$

上式之  $\gamma$ 、 $c$ 、 $d$  為 kernel 參數，因此選擇不同之核函數，配合不同之參數設定，將對最後模式的結果產生不同的影響，必須審慎選擇適當之核函數。根據 Hsu et al. (2003)建議使用 RBF 核函數，因特徵值與目標值之間屬於非線性關係，可以將資料透過非線性映射至特徵空間，使資料間轉換為線性關係。另外也有許多研究證實輻狀基底函數(radial basis function, RBF)於水利方面有良好的應用成果(Liong and Sivapragasam, 2002; Yu et al., 2002; Vojinovic and Kecman, 2004; Yu and Liang, 2004; Cannas et al., 2006; Yu and Chen, 2005; Yu et al., 2006)。除此之外，輻狀基底函數相較於其他函數擁有較少參數。因此本計畫採用 RBF 核函數作為非線性資料映射之函數，圖 3.6 為非線性支撐向量迴歸(nonlinear SVR)之架構。



**圖 3.5 將資料經核函數映射至高維空間**



**圖 3.6 非線性支撐向量迴歸架構示意圖(陳憲宗，2008)**

本計畫利用非線性向量迴歸(nonlinear SVR)建立 QPESUMS 雷達估計降雨與地面雨量之模式，選擇輻狀基底函數為核函數，其所需率定之參數包括：成本參數  $C$ 、容許帶寬  $\varepsilon$  及核函數參數  $\gamma$ 。

支撐向量機目前研究大多使用試誤法(trial and error method)來優選參數，近來一些研究對於參數特性及其間之關係有所討論

(Cherkassky and Ma, 2004)，但至今仍無法得到最佳方法。Hsu et al. (2003)以兩階段格網搜尋(grid-search)法來優選參數，即先對三參數進行較粗略之搜尋(例如： $C = 2-5, 2-3, \dots, 215$ ;  $\varepsilon = 2-15, 2-13, \dots, 2-1$ ;  $\gamma = 2-15, 2-13, \dots, 23$ )，如此可得到參數較佳之區域，在對此區域進行較細之搜尋(例如： $C = 2-1, 2-0.75, \dots, 27$ ;  $\varepsilon = 2-10, 2-9.75, \dots, 2-3$ ;  $\gamma = 2-5, 2-4.75, \dots, 2-3$ )，最後可得到一組最佳參數。雖然此方法能較容易且徹底搜尋最佳參數，但是以此方法搜尋每個參數間隔是以指數增加，避免搜尋之網格大小差異太大，因此本計畫針對上述方法稍作修改，仍固定搜尋網格的大小，先針對較大範圍搜尋(例如： $C = 10, 20, \dots, 100$ ;  $\varepsilon = 0.05, 0.10, \dots, 0.50$ ;  $\gamma = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ )，找到較佳之範圍後，再針對此範圍搜尋(如： $C = 15.1, 15.2, \dots, 17.0$ ;  $\varepsilon = 0.255, 0.260, \dots, 0.350$ ;  $\gamma = 0.61, 0.62, \dots, 0.80$ )，如此一直向下搜尋，最後以均方誤差(mean square error, MSE)為指標來選最佳參數。本計畫使用 LIBSVM (Lin et al., 2004)來建立模式與率定參數，此模式之輸入資料必須標準化於 0 至 1 之間。有鑑於支撐向量機優越的擬合特性，本計畫採用支撐向量迴歸方法來修正 QPESUMS 雨量受到地形與距離的影響，以提供更可靠的雨量觀測值。

### 3.4 QPESUMS 降雨修正

本研究選用整個大甲河流域建立 SVR 模式，依雷達分布與搜尋範圍，本區域的 QPESUMS 雷達估計降雨資料可能是來自七股雷達或五分山雷達中較低仰角得到的值做為降雨值，同時選用 9 場颱風事件作為 SVR 模式之率定與驗證。

#### 3.4.1 研究區域

大甲溪沿岸平原與山區之降雨有著時間與空間分布不均勻的特性，圖 3.7 為流域範圍以及地面雨量測站、雷達站之分布圖，其中圓點即為所選取之 14 個地面雨量測站，而方塊為雷達測站。

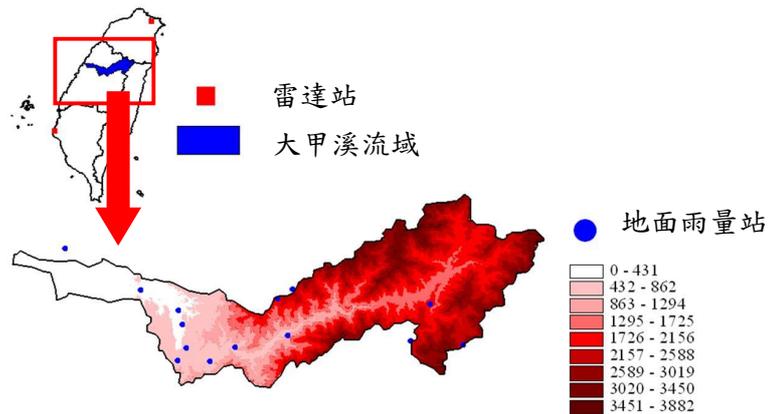


圖 3.7 流域邊界與雨量站及七股雷達與高程分布圖

### 3.4.2 QPESUMS 二度分帶坐標格網繪製

由於中央氣象局所提供之 QPESUMS 雷達雨量是以經緯度為基準觀測坐標，而中央氣象局及水利署所提供之地面雨量站坐標則是以臺灣二度分帶坐標(TM2)為主，因此欲進行地面雨量測站與對應之 QPESUMS 雷達網格前，必須先將坐標系統一致化。考慮到臺灣全島 DTM 資料之平面坐標系統採用二度分帶橫麥卡脫投影(Transverse Mercator Projection)，平面坐標以及高程之單位為公尺，為顧及後續水文相關領域上之使用便利性，本計畫將 QPESUMS 坐標系統自經緯度轉至以臺灣二度分帶坐標。

經緯坐標轉換(Transformed latitude/ longitude coordinate)為一種球坐標和地理坐標系統間之轉換關係式，可用球面三角學(spherical trigonometry)公式所推導出來(曾忠一，1997)。本計畫採用中央研究院計算中心地理資訊系統(geographic information system, GIS)小組於2003年所開發之坐標計算轉換程式。本計畫先將 QPESUMS 系統之所有雨量中心點的經緯度坐標依序列出，將各雷達雨量中心點經緯坐標轉換成二度分帶坐標。但球面坐標轉為平面坐標後皆有誤差之發生現象，根據不同單位開發之坐標換算程式相互計算之結果，誤差尚在容忍範

圍內(約 1~2 公尺)，故後續雨量計算使用不會有太大偏差效應發生。

研究為了擷取地面雨量站位置與選取之雷達網格資料之相對應代號，當所有之 QPESUMS 系統雨量中心點轉換成二度分帶坐標點皆確定完成後，取相鄰之雷達網格的四個中心點坐標，令其對於新的網格繪製節點之權重值皆為四分之一(如圖 3.8)所示，計算之簡單規則如下：

$$X_{N1} = \frac{(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)}{4} \dots\dots\dots(3-19)$$

$$Y_{N1} = \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{4} \dots\dots\dots(3-20)$$

上式中， $x$  代表各雷達資料點之二度分帶 X 坐標， $y$  代表各雷達資料點之二度分帶 Y 坐標，而  $X_N$  為經相鄰之雷達網格的四個中心點 X 坐標， $Y_N$  則為經相鄰之雷達網格的 4 個中心點 Y 坐標，如此能使繪出之新網格皆能使雷達資料點皆落於網格中心。當依序完成各雨量中心點之周圍繪製網格之節點後，使用 ArcGIS 軟體內 ArcTool 程式中，利用建立拓撲關係(relation of topology)之功能，將點與點之間的訊息轉成線之資訊後，建立各條線所切割出之面的空間資訊，最後將先前轉換坐標完成之雷達雨量位置套疊至面之網格內，完成點與面之相對關係，由於從球面坐標轉至平面坐標的緣故，所以在二度分帶坐標上之網格並非一規則之矩形，最後搭配中央氣象局之雷達雨量根據其相對應的編號，即可得到每個地面雨量站所對應之雷達網格雨量值。

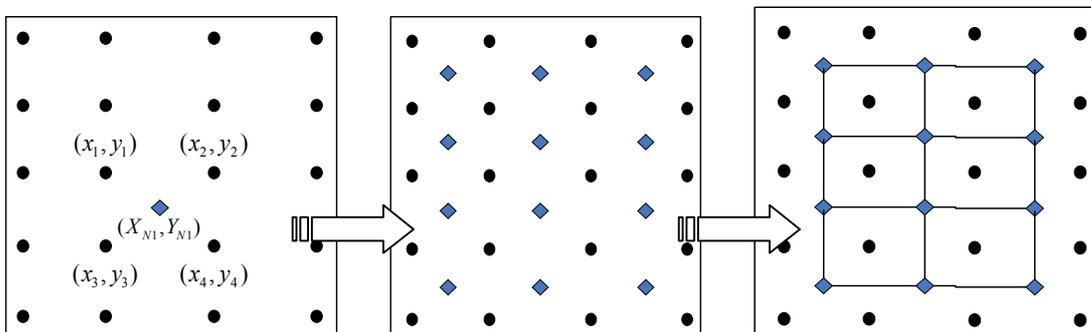


圖 3.8 QPESUMS 雷達雨量網格節點繪製流程

### 3.4.3 分析資料收集

本計畫在雨量資料收集的部分，總共整理了 14 個自記式地面雨量站以及 2 個氣象雷達測站，測站之基本資料包括各測站之名稱、測站代碼、二度分帶 X 坐標、二度分帶 Y 坐標及測站之海拔高度(m)，所有地面雨量站、五分山雷達站與七股氣象雷達站之分布如圖 3.7 所示，從圖中可明顯看出地面雨量站大多分布在平原地區，山區則較為稀少且分散，若以地面觀測雨量代表某一地區之降雨量，則無法得知實際上降雨之空間分布狀況；研究區域上除了雨量站外，還有 QPESUMS 雷達網格分布，每個網格的中心點都有雷達觀測資料，雖然雷達可提供高解析度及涵蓋完整區域之降雨分布狀況，能提供未設置雨量站區域之降雨資訊，但西南部之東部山區地勢高聳，雷達回波受到高山屏障造成雨量有低估的現象，研究所選取之地面雨量測站之基本資料如表 3-1 所示，而七股氣象雷達站與五分山雷達站隸屬於中央氣象局管轄，七股雷達站位置為  $120^{\circ}04'09''$  E， $23^{\circ}08'52''$  N，位於臺南縣七股鄉；五分山雷達站位於  $121^{\circ}46'22''$  E， $25^{\circ}04'22''$  N，位於臺北縣瑞芳鎮。

目前針對地面雨量站資料收集 2005~2008 年 9 場颱風事件時雨量觀測資料，分別為 2005 年之海棠颱風、馬莎颱風、泰利颱風，2006 年之碧利斯颱風，2007 年之聖帕颱風、科羅莎颱風，與 2008 年之鳳凰颱風、薔蜜颱風、辛樂克颱風；以馬莎颱風、鳳凰颱風、薔蜜颱風做為 SVR 模式之率定事件，如表 3-2 所列；以其餘的颱風作為模式之驗證事件，如表 3-3。由於 QPESUMS 系統所使用之時間為世界標準時間，轉換為臺灣時間需要加 8 個小時。

表 3-1 大甲河流域 14 個地面雨量站

測站代碼	測站名稱	二度分帶 X 座標	二度分帶 Y 座標	海拔高度(m)
C0F860	梨山	275498.57	2683538.11	1980
C0T790	大禹嶺	281268.30	2675862.89	2565
C1F850	東勢	232256.98	2682541.90	320
C1F870	上谷關	251100.45	2677762.27	1045
C1F890	稍來	249294.94	2684684.28	2010
C1F910	新伯公	233015.33	2679802.82	440
C1F920	石岡	225859.92	2686243.11	280
C1F930	大甲	212851.80	2694178.06	90
C1F940	雪嶺	251889.43	2686345.69	2605
C1H850	翠巒	272209.24	2676610.50	2297
C1F9C0	白冷	242041.34	2675487.84	619
C1F9D0	白毛臺	237692.73	2672783.72	613
C1F9E0	龍安	232103.91	2673004.96	537
C1F9G0	慶福山	233715.48	2675310.43	782

表 3-2 模式選取率定事件(2005~2008 年 3 場颱風事件)

颱風名稱	資料時間(年-月-日-小時)
馬莎 (MATSA)	2005-08-04-05~2005-08-05-04
鳳凰 (FUNG-WONG)	2008-07-28-03~2008-07-29-02
薔蜜 (JANGMI)	2008-09-28-17~2008-09-29-16

表 3-3 模式選取驗證事件(2005~2008 年 6 場颱風事件)

颱風名稱	資料時間(年-月-日-小時)
海棠 (HAITANG)	2005-07-18-24~2005-07-19-23
泰利 (TALIM)	2005-08-31-16~2005-09-01-15
碧利斯 (BILIS)	2006-07-13-12~2006-07-15-11
聖帕 (SEPAT)	2007-08-18-20~2007-08-19-19
柯羅莎 (KROSA)	2007-10-06-05~2007-10-07-04
辛樂克 (SINLAKU)	2008-09-14-05~2008-09-15-04

#### 3.4.4 支撐向量機修正

傳統地面雨量站雖然可提供單點可靠之觀測值，其空間行為表現能力低，僅能代表區域中某一點或是一小段範圍之降雨情況，無法充分掌握降雨之空間分布情形，但由於地面觀測降雨資料之紀錄年份長，資料記載詳細等優勢上，足夠提供使用者對於資料正確度擁有足夠之信賴程度，且蒐集之單點雨量值是具有佐證效果的確定性物理量；相對而言，雷達估計雨量具有高時空解析度力，足夠提供大範圍之降雨分布情形，但局部解析度卻受到許多不確定性因素的影響，間接造成雨量資料正確與否的質疑，故本計畫持續利用支撐向量迴歸(SVR)修正 QPESUMS 雷達估計降雨量，其目的為期望解決雷達降雨量低估的問題，並可保有雷達雨量具高解析度及涵蓋完整區域之優點。

首先根據 QPESUMS 二度分帶網格，計算出各點雨量站位置與最鄰近之雷達網格距離，當作地面雨量站對應上方之單點雷達網格編號，因此將所收集之 14 個地面雨量站與對應上方共 14 個單點雷達網格編號後，並將 QPESUMS 系統之標準時間(UTC)換算為臺灣時間(UTC+8 小時)，即可獲得地面觀測雨量與對應時間之各雷達雨量值。

在開始建立雷達雨量修正模式之前，必須先決定輸入因子為何。根據過去文獻之探討，本計畫參考 Liu et al. (2001)之做法，以地面雨量站對應上方之 9 個雷達估計雨量(共 9 筆雨量資料)，如圖 3.9 所示，另外加入地面雨量站位置之二度分帶 X 坐標與 Y 坐標、地面雨量站與七股雷達站之直線距離(m)、地面雨量站與五份山雷達站之直線距離(m)共五個因子做為模式之輸入因子。

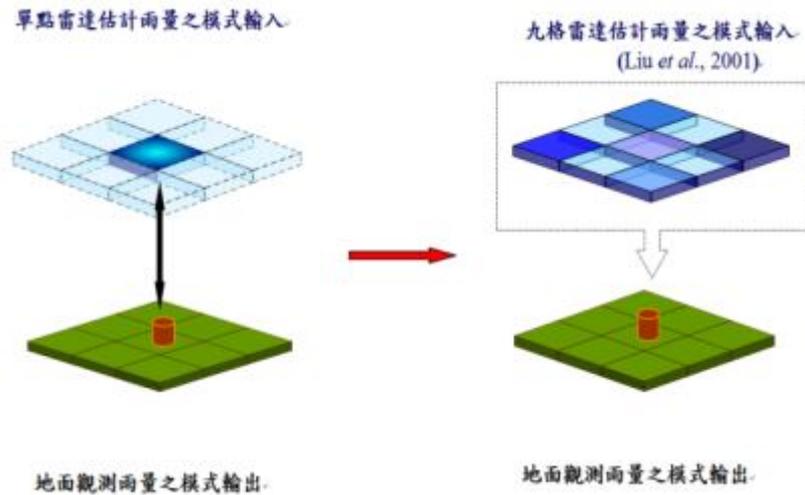


圖 3.9 雷達估計雨量之輸入方式

輸入向量已決定後，接著進行模式率定前之資料的建立，其資料處理方法如以下程序介紹：

- (1) 由於 QPESUMS 系統所使用之時間為世界標準時間(UTC)，必須將系統轉換為臺灣時間(UTC+ 8 小時)以選取與地面雨量相同時間之雷達估計時雨量資料。
- (2) 將所收集之 3 場率定事件，依照事件發生時間進行編排，選取對應時間與對應地面雨量站位置之雷達雨量。
- (3) 排除率定資料中之地面觀測雨量的缺測值，以避免影響最後模式建立的結果。
- (4) 接著將所有的輸入因子加以標準化，以各因子之率定資料除以各因子於率定資料之最大值，完成率定資料之正規化處理。
- (5) 將率定資料進行模式率定。

當資料準備完成後，接著開始進行模式的初始參數設定。本計畫使用兩種修正模式，其中模式之初始設定分別為：

- (1) SVR 之參數搜尋範圍：根據本計畫測試參數搜尋之合理範圍分別為，成本參數  $C=0.1\sim 10$ ；核函數  $\gamma=0.1\sim 10$ ；容許帶寬  $\varepsilon=0.001\sim 10$ ，並以修正後兩階段格網搜尋(grid-search)法進行參數之優選。
- (2) 交叉驗證：模式在進行率定前，為了避免訓練資料在率定時可能會有過度擬合的問題，或者是雷達雨量在修正時會有「事件型(case by case)」的問題，亦即在修正之雷達雨量可能只局限於歷史事件的降雨類型，而模式進行驗證時，會因為與過去之歷史事件中不同的降雨型態，使得結果有所差異，因此本文使用交叉驗證法中的 k-fold cross-validation 進行率定以及測試，以增進模式推估之準確性。在進行交叉驗證選擇  $k=10$ ，也就是將率定資料採用隨機選取的方法分成 10 個子集合，再以 9 個子集合做為率定資料，一個子集合作為測試資料，並且對模式進行率定 10 次後，最後以最小平均誤差結果做為模式之最佳率定參數。

為了對於建立結合地面雨量與雷達估計雨量之修正模式之優劣加以評鑑，採取下列兩項指標進行評估：

1. 相關係數(correlation coefficient, CC)：

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^k (P_i - \bar{P})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (P_i - \bar{P})^2 \times \sum_{i=1}^k (G_i - \bar{G})^2}} \dots\dots\dots(3-21)$$

(2)均方根誤差(Root Mean Squared Error, RMSE)：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - G_i)^2} \dots\dots\dots(3-22)$$

其中， $P_i$  為雷達雨量， $\bar{P}$  為雷達雨量之平均值， $G_i$  為地面觀測雨量， $\bar{G}$  為地面觀測雨量之平均值， $k$  為總資料筆數，相對偏差是評估兩種資

料總體間之高估或低估關係，越接近 1.0 效果越好。以此兩種指標作為評估之原因在於，相關係數(CC)能反應兩種資料序列之趨勢消長吻合程度，而均方根誤差(RMSE)可以看出雷達估計降雨與地面雨量站的誤差值的離散程度。

### 3.4.5 SVR 之率定與驗證結果

原始 QPESUMS 雨量如圖 3.10(a)所示，其中菱形點為原雷達估計時雨量，從圖中可看出大部分之雷達估計雨量有低估情形；而經過 SVR 修正後，如圖 3.10(b)，其均方根誤差由原本 10.81(mm/hr)降至 7.93(mm/hr)，比原來之雷達估計雨量減少約 27%，相關係數由 0.50 提升至 0.76。

驗證分析是以其餘 6 場颱風作為驗證事件，結果如圖 3.11 所示。再經過 SVR 修正後，其相關係數稍微提升且 RMSE 有下降，但幅度不大。雷達低估之狀況沒有明顯升。各雨量站的修正結果則列於圖 3.12 中。

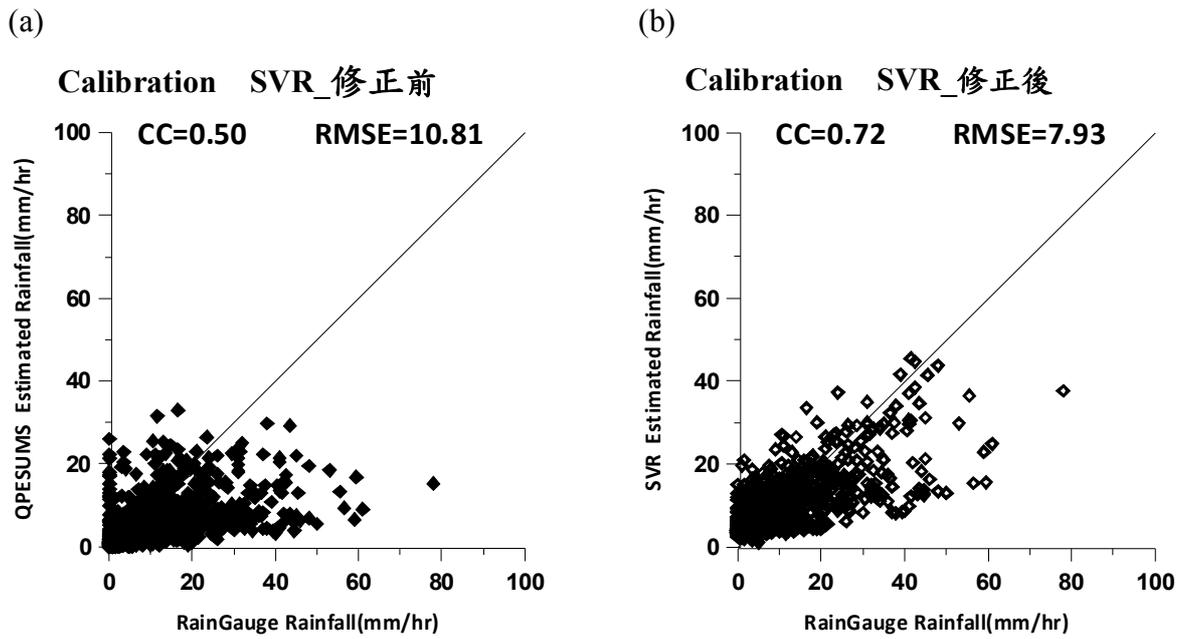


圖 3.10 大甲河流域 SVR 率定結果比較

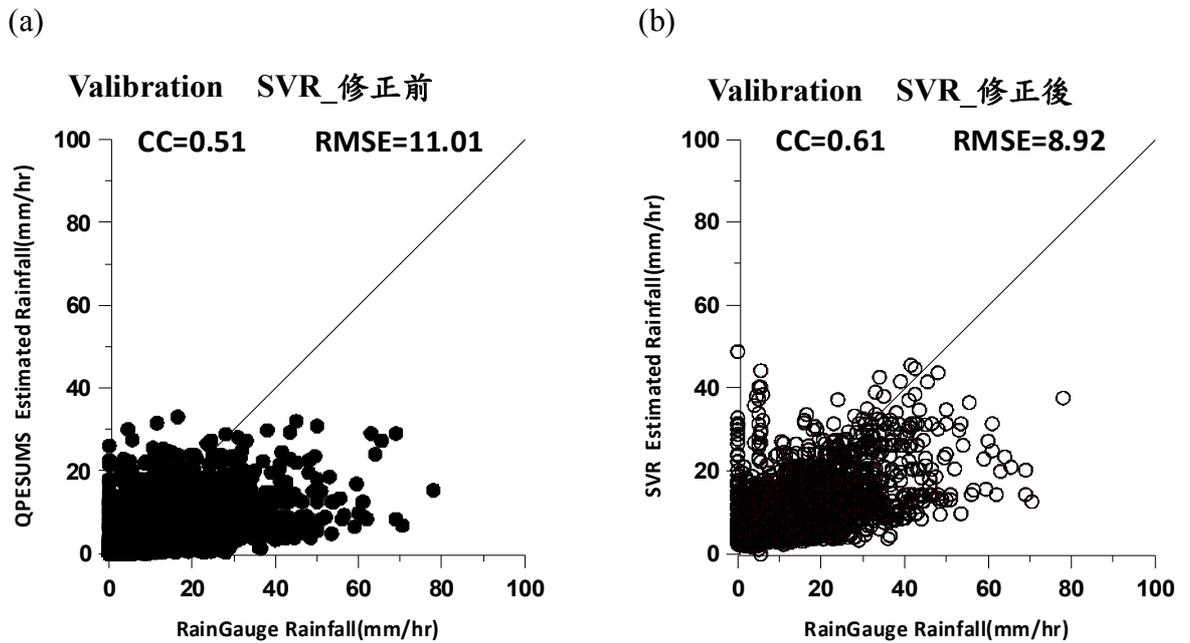


圖 3.11 大甲河流域 SVR 驗證結果比較

表 3-4 SVR 模式率定前後結果之比較

模式	均方根誤差	相關係數
QPESUMS	10.81	0.50
SVR	7.93	0.76

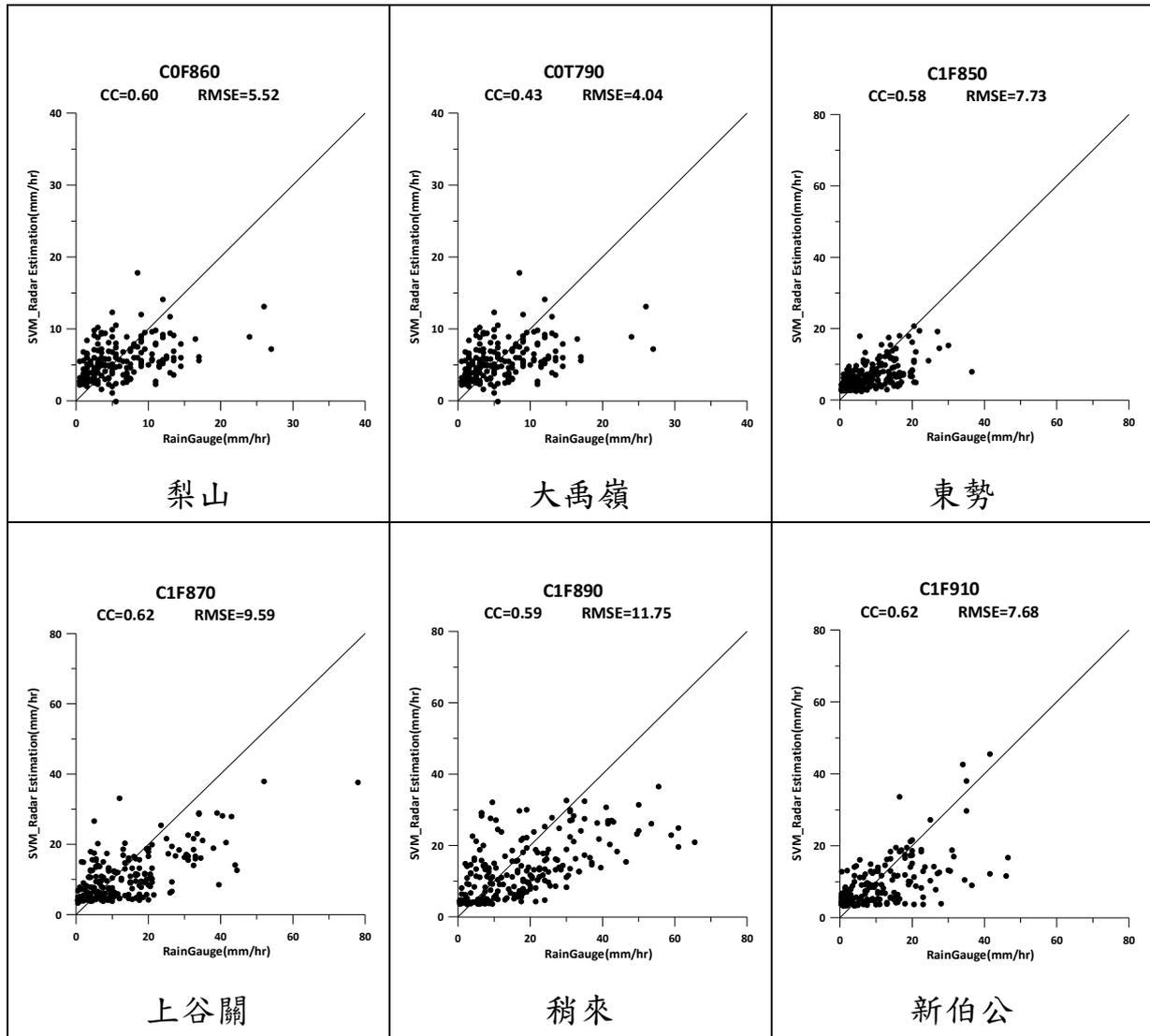


圖 3.12 大甲河流域各雨量站 SVR 修正結果

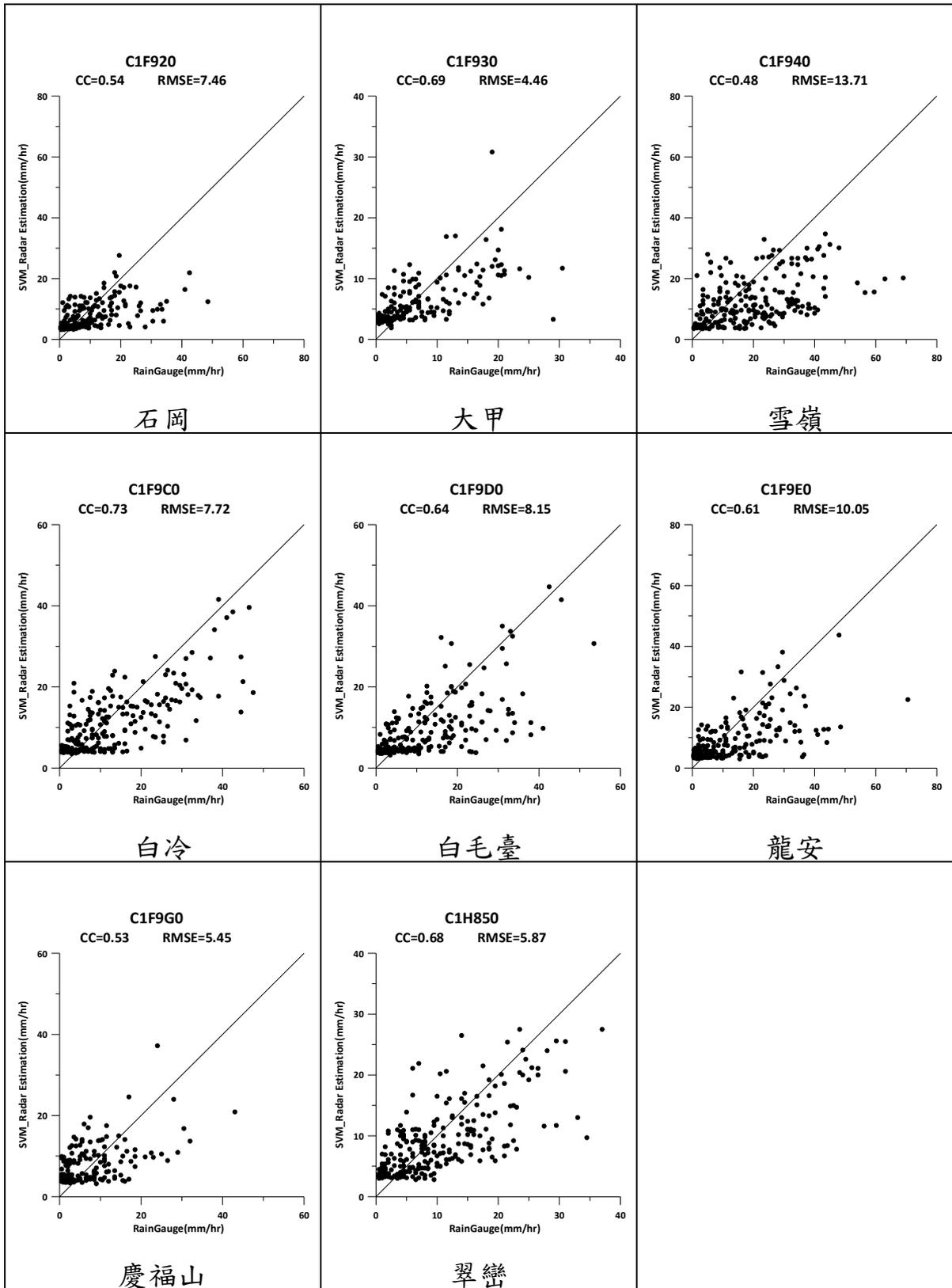


圖 3.12(續) 大甲河流域各雨量站 SVR 修正結果

### 3.4.6 雷達雨量修正方式改進

為了提高 SVR 修正的效果，本計畫加入克利金(Kriging)空間誤差修正法，將 SVR 修正後的雷達估計降雨再進行第二次的修正，Kriging 法必須結合地面雨量站使用兩者之間的誤差來建立誤差的空間分布，進行每小時即時的雷達估計降雨修正。

#### 3.4.6.1 克利金推估法

克利金推估法，為地質統計學(geostatistics)中用來推估未知點的內插方法。地質統計學以區域化變數(regionalized variable)理論為基礎，主要為探討自然現象的物理量，如降雨、氣溫...等等，在空間分布的結構特性，其定義在位置  $x$  上的觀測值  $Z(x)$  為一隨機變數，稱此隨機變數  $Z(x)$  為一個區域化變數；區域化變數的兩個特性，以局部來看時，點與點之間呈現不規則變化，可視為一隨機變數，但整體來看時，不同位置上之隨機變數間並非完全獨立，可能存在不同程度上之相關性，可用統計假設來描述之。克利金即為利用區域化變數理論，建立區域化變數於不同位置間的變異函數作為推估之依據，而克利金與傳統內插方法較為不同的地方，克利金不僅可以提估一個最小估計誤差的推估值，還可以指出其誤差值的變異大小。本研究利用地面雨量站與雷達估計降雨誤差值進行克利金的內插，產生一個空間誤差分布，使用原始雷達估計降雨加上此誤差值來修正雷達估計降雨量。

#### 3.4.6.2 區域變數理論

區域化變數基本假設， $Z(x)$  符合二階定常性(second-order stationarity)，當此區域化變數  $Z(x)$  符合二階定常性的假設時，應具有以下三種特性：

隨機變數在不同位置的期望值為一定值，即

$$E(Z(x)) = \mu = c, \forall x \dots\dots\dots(3-23)$$

隨機變數在不同位置的變異數為一定值，即

$$\text{Var}(Z(x)) = \sigma^2 = c, \forall x \dots\dots\dots(3-24)$$

空間任兩個位置之共變異數只與兩點之距離  $h$  有關與所在位置無關，即

$$\text{Cov}(Z(x), Z(x+h)) = C(h), \forall x \dots\dots\dots(3-25)$$

其  $\text{Cov}$  表示為共變異數。

然而在現實的現象中，區域化變數常常無法符合二階定性假設，故另提出了內在假設(intrinsic hypothesis)，即隨機變數之差於不同位置時，依然為一隨機變數，而期望值與變異數只與隨機變數間之距離有關，與其所在位置無關，當其隨機變數符合下列條件時，即為滿足內在假設。

空間任兩點位置之隨機變數  $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$ ，其差值之期望值為兩點間之距離函數

$$E(Z(x+h) - Z(x)) = m(h), \forall x \dots\dots\dots(3-26)$$

空間任兩位置之隨機變數  $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$ 的變異數與其所在位置無關，且等於兩倍的半變異數

$$\text{Var}(Z(x+h) - Z(x)) = 2\gamma(h), \forall x \dots\dots\dots(3-27)$$

其  $\gamma(h)$  為半變異元函數(semi-variogram)，為距離  $h$  的函數。

即  $Z(x)$  在區域之有限範圍內符合均一性，在此範圍外  $Z(x)$  則不具有均一性，此時隨機變數在有限範圍內滿足定常性之假設，即稱為準定常性假設(quasi-stationary hypothesis)，在應用上，變異函數或變異元函數往往只適用於一定距離之影響範圍，若超過此範圍時，隨機變數間便不再具有空間相依性。

### 3.4.6.3 半變異元(semivariogram)分析

區域化變數的空間變異情形，可由半變異元來表示，半變異元之特性與距離相關，即  $Z(x)$  與  $Z(x+h)$  隨著距離  $h$  增加而相關性降低且半變異元  $\gamma(h)$  越大，當距離  $h$  達到某一特定值後，其  $\gamma(h)$  趨近於一定值，此一定值稱為 sill 值，此時的距離  $h$  則被稱為影響範圍 range，圖 3.13 為半變異元之示意圖。

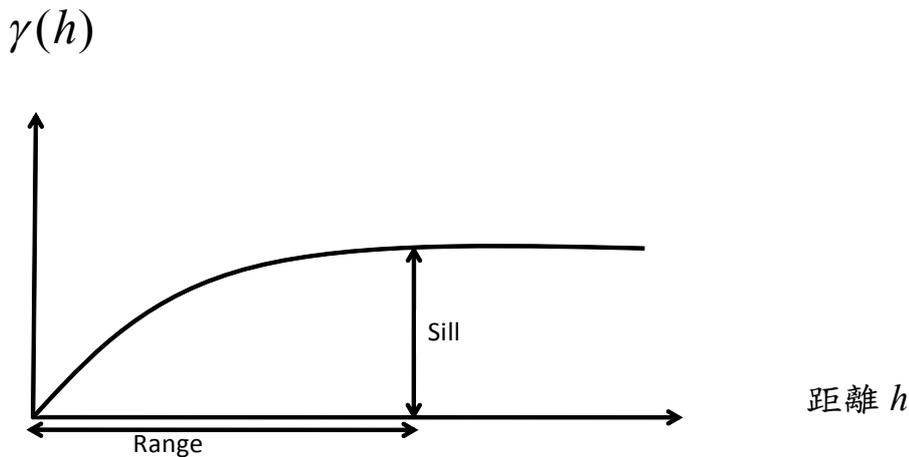


圖 3.13 半變異元之示意圖

在空間結構分析中，常以實驗半變異圖(experimental semivariogram)來進行，任取兩位置的觀測值做為配對，兩點間距離為  $h$ ，則半變異元定義為：

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - z(i+h)]^2}{2N} \dots\dots\dots(3-28)$$

其中， $z(i)$  表示為的  $i$  點上的區域化變數觀測值， $z(i+h)$  表示與  $i$  點距離  $h$  的區域化變數觀測值， $N$  表示空間中取樣點的配對數。

根據不同的間距  $h$  與所計算出的  $\gamma(h)$  值，即可繪出半變異元的函數圖，半變異元函數據有連續性的特質，一般而言，當  $h = 0$  時， $\gamma(0)$  應該為 0，即與觀測點距離為 0 的點，也就是本身的相關性應該最大，此時， $\gamma(h)$  為最小值，但在資料分析上，有時會出現當  $h$  趨近為 0 時， $\gamma(0)$

的值不為 0，而是一個定值  $C_0$ ，以數學式來表示時，即

$$\lim_{h \rightarrow 0} \gamma(h) = C_0 \dots\dots\dots(3-29)$$

而這種半變異元上的不連續，稱為塊金效應(nugget effect)。

實驗半變異元函數代表了觀測資料的空間變異情形，為克利金推估法中的重要核心，而由觀測值所計算出來的實驗半變異元函數，常為數個不連續的點所構成的折線圖形，如圖 3.14 所示，故在實際應用時，必須利用不同的連續性模式套配出一最佳代表性模式，才能應用於克利金推估上，此一連續性的代表模式稱為理論半變異元(variogram model)，常用的理論半變異元有四種模式，如表 3-5，而本次研究使用的理論半變異元採用指數函數模式。

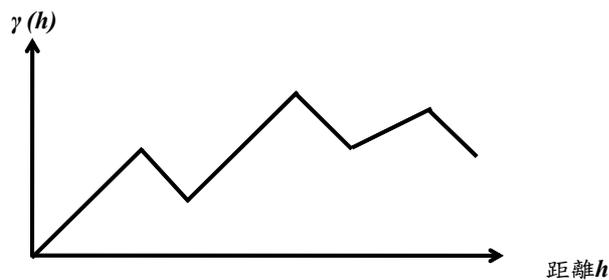


圖 3.14 實驗半變異元函數

表 3-5 常用理論半變異元模型

模式	函數形式	Range	Sill
球狀 (Spherical model)	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & h \leq a \\ C_0 + C_1, & h > a \end{cases}$	$a$	$C_0 + C_1$ $C_0$ : nugget effect
指數 (Exponential model)	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$	$3a$	$C_0 + C_1$ $C_0$ : nugget effect
高斯 (Gaussian model)	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]$	$\sqrt{3}a$	$C_0 + C_1$ $C_0$ : nugget effect
冪級數 (Power model)	$\gamma(h) = C_1 h^{\alpha}, \quad \alpha < 2$	$+\infty$	n/a

### 3.4.6.4 克利金推估法

克利金推估法，在一區域中，利用已知位置的隨機變數值  $Z(x_i)$ ，來推估該區域中之任一位置  $x_0$  之推估值。在統計觀點上，克利金推估法具有最佳線性不偏(Best Linear Unbiased Estimator，也稱為 BLUE)的特性，以下為特性說明：

線性(Linear)：估計值為其他觀測值之線性組合。

$$Z(x_0)^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), i=1,2,\dots,n \dots\dots\dots(3-30)$$

不偏估(Unbiased)：估計值之期望值等於隨機變數之期望值。

$$E[Z(x_0)^*] = E[Z(x_i)] \dots\dots\dots(3-31)$$

最佳化(Best)：估計值與觀測值之變異數為最小。

$$\min \left\{ \text{Var} \left[ Z(x_0)^* - Z(x_0) \right] \right\} = E \left\{ \left[ Z(x_0)^* - Z(x_0) \right]^2 \right\} \dots\dots\dots(3-32)$$

$Z(x_i)$ ：位置  $x_i$  的觀測值， $Z(x_0)^*$ ：為  $Z(x_0)$  的估計值。

本次研究，採用克利金法來進行雷達估計降雨修正，在克利金中， $Z(x)$  的期望值為定值，即  $E[Z(x)] = E[Z(x+h)] = c$  且滿足估計值為其他觀測值之線性組合，故將式(3-30)帶入式(3-31)，可得(3-33)式，即

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} = 1 \dots\dots\dots(3-33)$$

此外，為了求到最佳推估結果，將式(3-30)帶入式(3-31)，為了滿足最佳與不偏估的特性，利用拉格蘭茲法引入拉格蘭茲參數 (Lagrangian Multiplier) $\mu$ ，使得

$$\begin{aligned}
L &= Var\left[Z(x_0)^* - Z(x_0)\right] - 2\mu\left(\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} - 1\right) \\
&= E\left[Z(x_0)^* - Z(x_0)\right]^2 - 2\mu\left(\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} - 1\right) \dots\dots\dots(3-34) \\
&= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{0i} \lambda_{0j} \gamma(x_i - x_j) + 2\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} \gamma(x_i - x_0) - 2\mu\left(\sum_{i=1}^n \lambda_{0i} - 1\right)
\end{aligned}$$

將上式分別對  $\lambda_{0i}$  與  $\mu$  取偏微分，並令其為分式為零，可得

克利金系統方程式(kriging system equation)

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3-35)$$

克利金變異數  $\sigma_k^2$  (kriging variance)

$$\sigma_k^2 = Var\left[Z(x_0)^* - Z(x_0)\right] = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} \gamma_{i0} \dots\dots\dots(3-36)$$

利用克利金系統方程式可求的最佳估計權重  $\lambda_i$ ，代回(3-30)與(3-36)可求得最佳不偏推估值與相對應之變異數，若變異數越接近零，則代表推估結果越佳。

### 3.4.6.5 克利金法修正雷達估計降雨

由於克利金推估法須先尋找空間結構，依據地面雨量站的觀測值與相對應上方之雷達估計降雨之雨量的誤差值來討論誤差的空間分布特性，表 3-6 為進行 Kriging 空間誤差修正雨量站資料，表 3-7 為驗證用之雨量站資訊，圖 3.15 為進行 Kriging 空間誤差修正之雨量站空間分布。在進行克利金推估之前，由於雷達估計降雨與地面雨量站的誤差值有正值也有負值，且每小時誤差變動的幅度不太一定，在自動搜尋最佳理論半變異圖時，為使搜尋過程能更快速方便，先將誤差資料正規化，利用  $ERROR^* = (ERROR - Min_{ERROR}) / (Max_{ERROR} - Min_{ERROR})$ ，

使其誤差值介於[0,1]之間，之後找出每小時的實驗半變異元圖形如圖 3.16 所示，利用最小均方根誤差來自動擬合理論半變異元函數，決定每小時理論半變異元的 sill 以及 range 值，最後再使用一般克利金法，以最少 4 個鄰近點，最多 8 個鄰近點來建立每小時的克利金空間誤差分布來修正雷達估計降雨量；此外，為了測試克利金產生的誤差分布是否接近當時空間的誤差結構，另外使用 10 個雨量站作為克利金空間誤差分布的驗證站，圖 3.17 為即時克利金修正流程圖。

經由測試顯示：利用 Kriging 空間修正法可以有效修正雷達估計降雨。本計畫將所有颱風場次先使用經過 SVR 修正後的雷達估計降雨再進行 Kriging 法修正，經過 Kriging 二次修正後的雷達估計降雨與地面雨量站的誤差較單純只利用 SVR 修正來的小，其相關係數與 RMSE 也都有明顯改善，其修正結果如圖 3.18；在驗證站也有不錯的修正效果，如圖 3.19，由率定與驗證結果可發現：Kriging 可以掌握到大甲溪空間降雨誤差分布，進而有效提升 SVR 的修正成果。

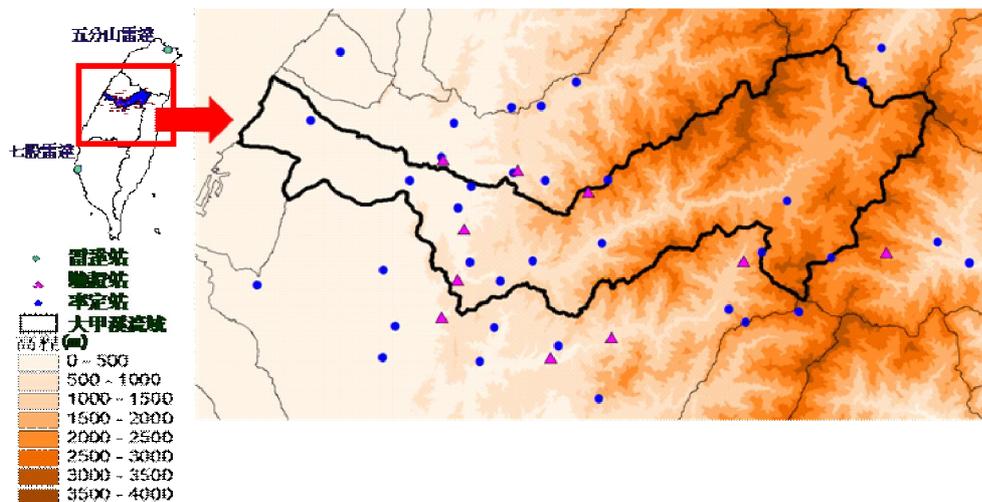


圖 3.15 克利金誤差修正中使用的雨量站分布

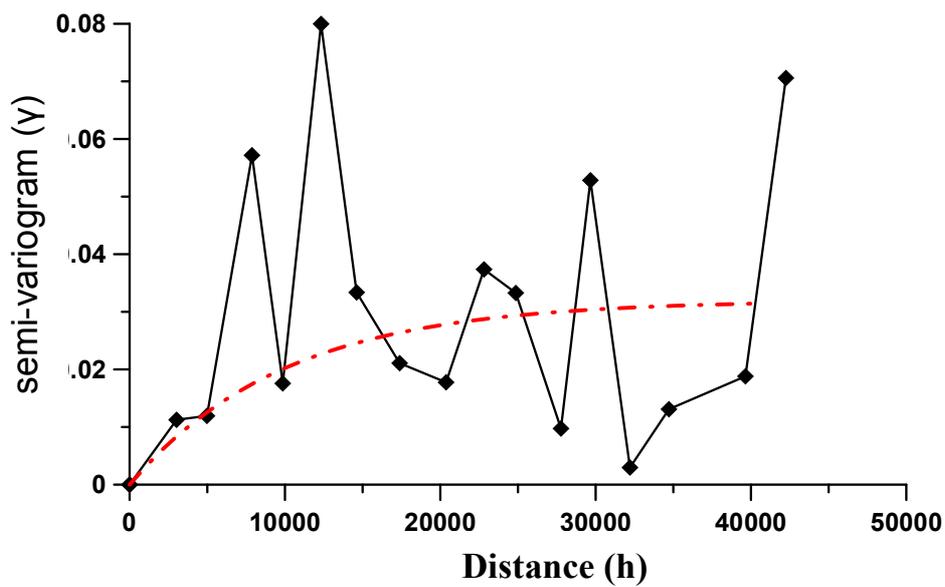


圖 3.16 海棠颱風第 40 小時自動搜尋理論半變異圖

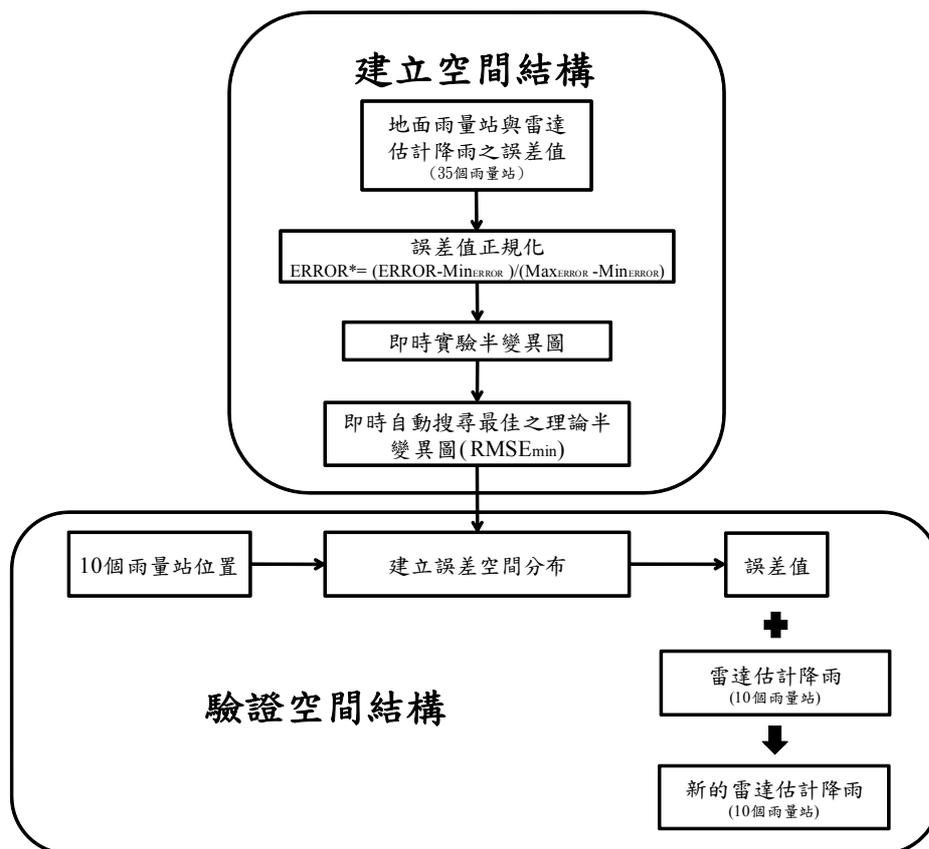


圖 3.17 即時克利金修正流程圖

表 3-6 克利金修正法率定用雨量站

測站站碼	測站名稱	所屬單位	二度分帶 X 座標	二度分帶 Y 座標	海拔高度(m)
C0E580	苑里	中央氣象局	216736.05	2703279.00	60
C0F860	梨山	中央氣象局	275497.91	2683511.50	1980
C0F900	雙崎	中央氣象局	239481.78	2687183.25	543
C0H990	昆陽	中央氣象局	276963.91	2668655.25	3235
C0T790	大禹嶺	中央氣象局	281296.28	2675862.75	2565
C0T820	天祥	中央氣象局	299530.16	2675207.00	550
C0U730	思源	中央氣象局	285358.22	2699253.75	2036
C1E450	象鼻	中央氣象局	243123.80	2696042.00	968
C1E460	松安	中央氣象局	247745.92	2699271.00	1400
C1E500	卓蘭	中央氣象局	230010.52	2689255.75	345
C1E510	新開	中央氣象局	231623.19	2693745.25	350
C1E710	馬拉邦山	中央氣象局	239178.67	2695921.50	959
C1F000	大肚	中央氣象局	205738.62	2672236.25	348
C1F850	東勢	中央氣象局	232257.77	2682515.25	320
C1F870	上谷關	中央氣象局	251100.52	2677735.75	1045
C1F920	石岡	中央氣象局	225860.84	2686216.50	280
C1F930	大甲	中央氣象局	212853.12	2694151.25	90
C1F940	雪嶺	中央氣象局	251889.06	2686319.00	2605
C1F970	大坑	中央氣象局	222369.20	2674255.50	170
C1F9A0	中竹林	中央氣象局	223907.38	2666746.25	425
C1F9B0	桐林	中央氣象局	222261.27	2662596.25	124
C1F9C0	白冷	中央氣象局	242041.84	2675461.25	619
C1F9D0	白毛臺	中央氣象局	237693.41	2672757.25	613
C1F9F0	伯公龍	中央氣象局	233868.64	2685405.00	504
C1F9G0	慶福山	中央氣象局	233716.09	2675283.75	782
C1F9H0	烏石坑	中央氣象局	243655.00	2686135.75	886
C1H000	翠峰	中央氣象局	269991.72	2667320.75	1655
C1H850	翠巒	中央氣象局	272208.62	2676583.00	2297
C1H860	瑞岩	中央氣象局	267787.84	2668948.25	1676
C1H880	凌霄	中央氣象局	250678.31	2657123.00	1318
C1H900	清流	中央氣象局	245396.06	2664200.25	934
C1H920	長福	中央氣象局	236953.55	2666543.75	736
C1H190	水長流	中央氣象局	235000.55	2662085.00	660
C1T800	洛韶	中央氣象局	295287.41	2677961.75	1260
C1U720	南山	中央氣象局	287853.22	2703721.25	1260

表 3-7 克利金修正法驗證用雨量站

測站站碼	測站名稱	所屬單位	二度分帶 X 座標	二度分帶 Y 座標	海拔高度(m)
C1F890	稍來	中央氣象局	249295.06	2684657.75	2010
C1F9E0	龍安	中央氣象局	232103.80	2672978.50	537
C1F910	新伯公	中央氣象局	233016.08	2679776.25	440
C1T810	慈恩	中央氣象局	288632.44	2676557.75	2049

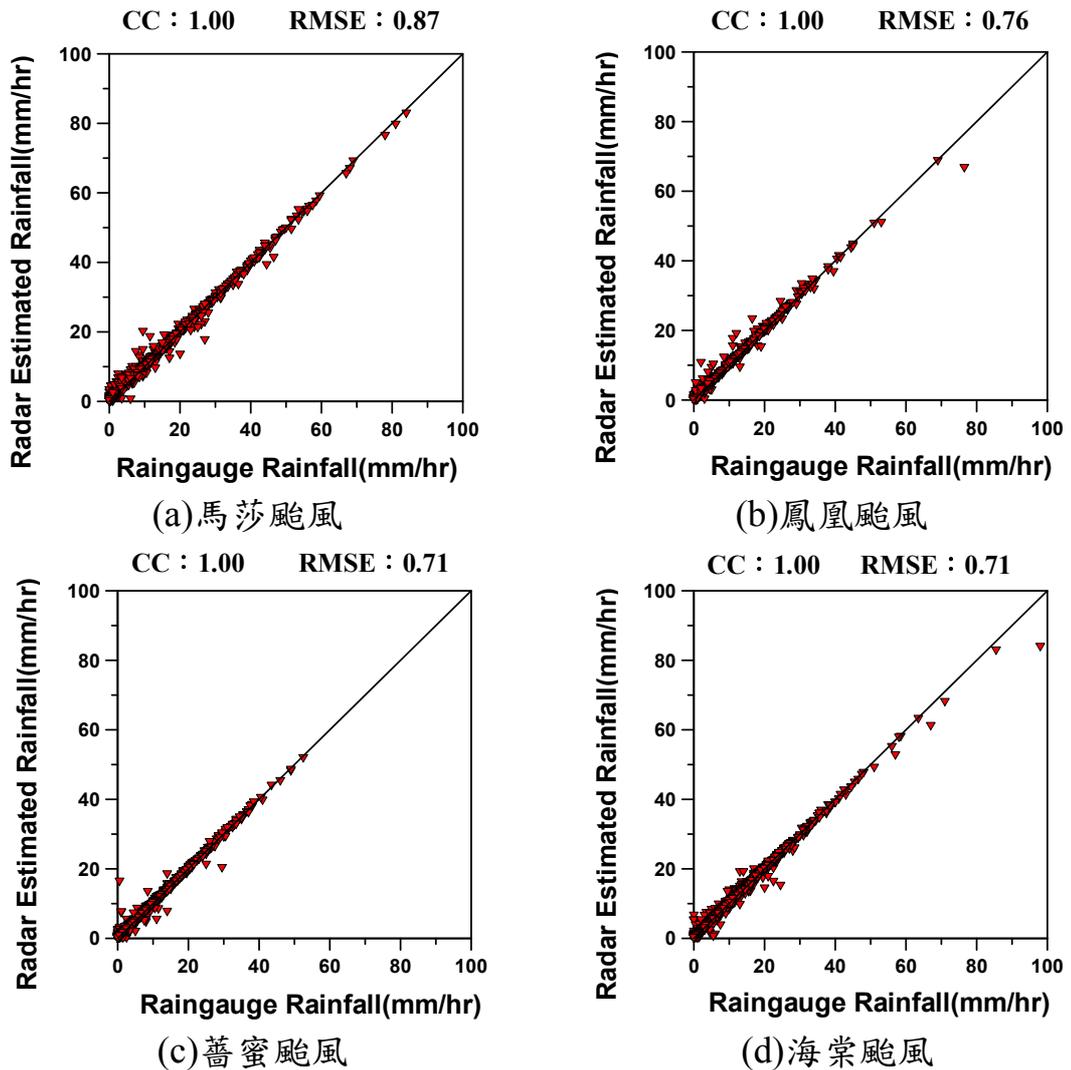
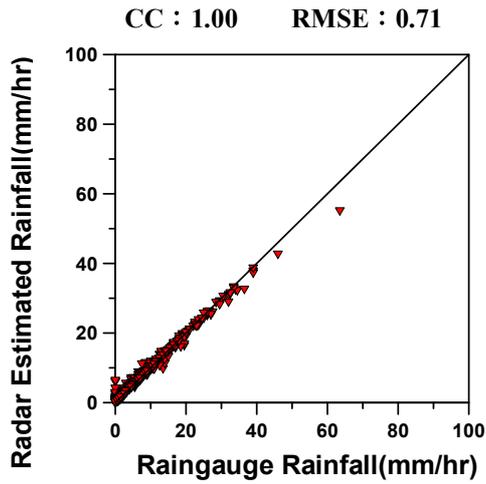
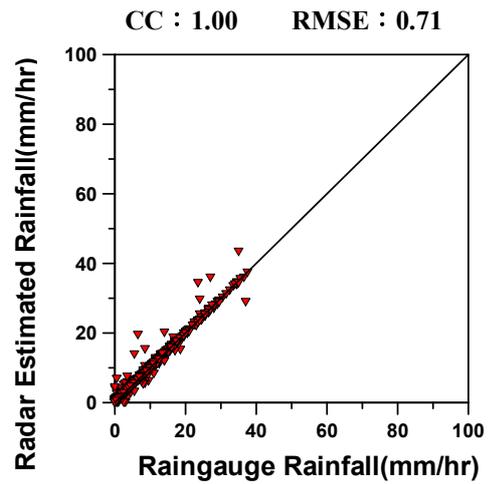


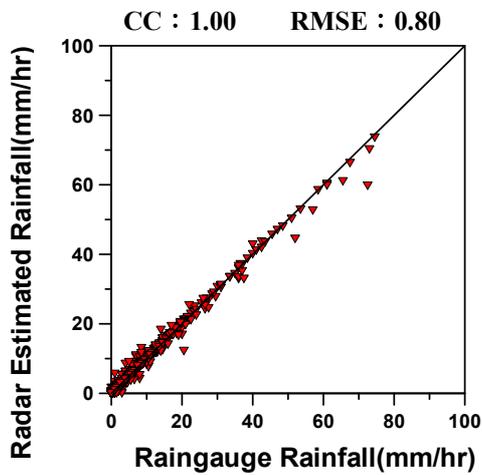
圖 3.18 率定雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之比較



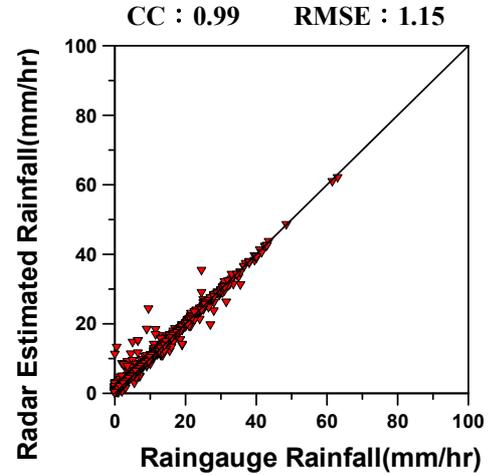
(e) 泰利颱風



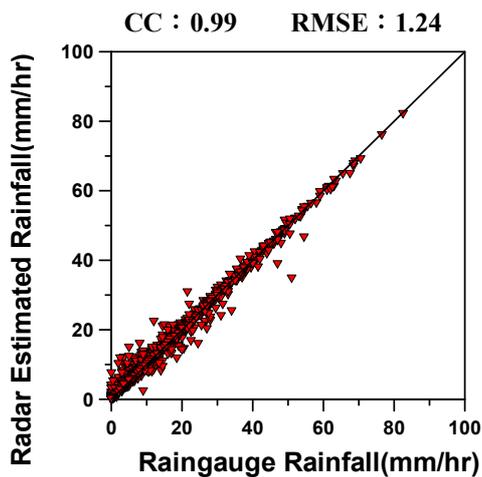
(f) 碧利斯颱風



(g) 聖帕颱風



(h) 柯羅莎颱風



(i) 辛樂克颱風

圖 3.18(續) 率定雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之比較

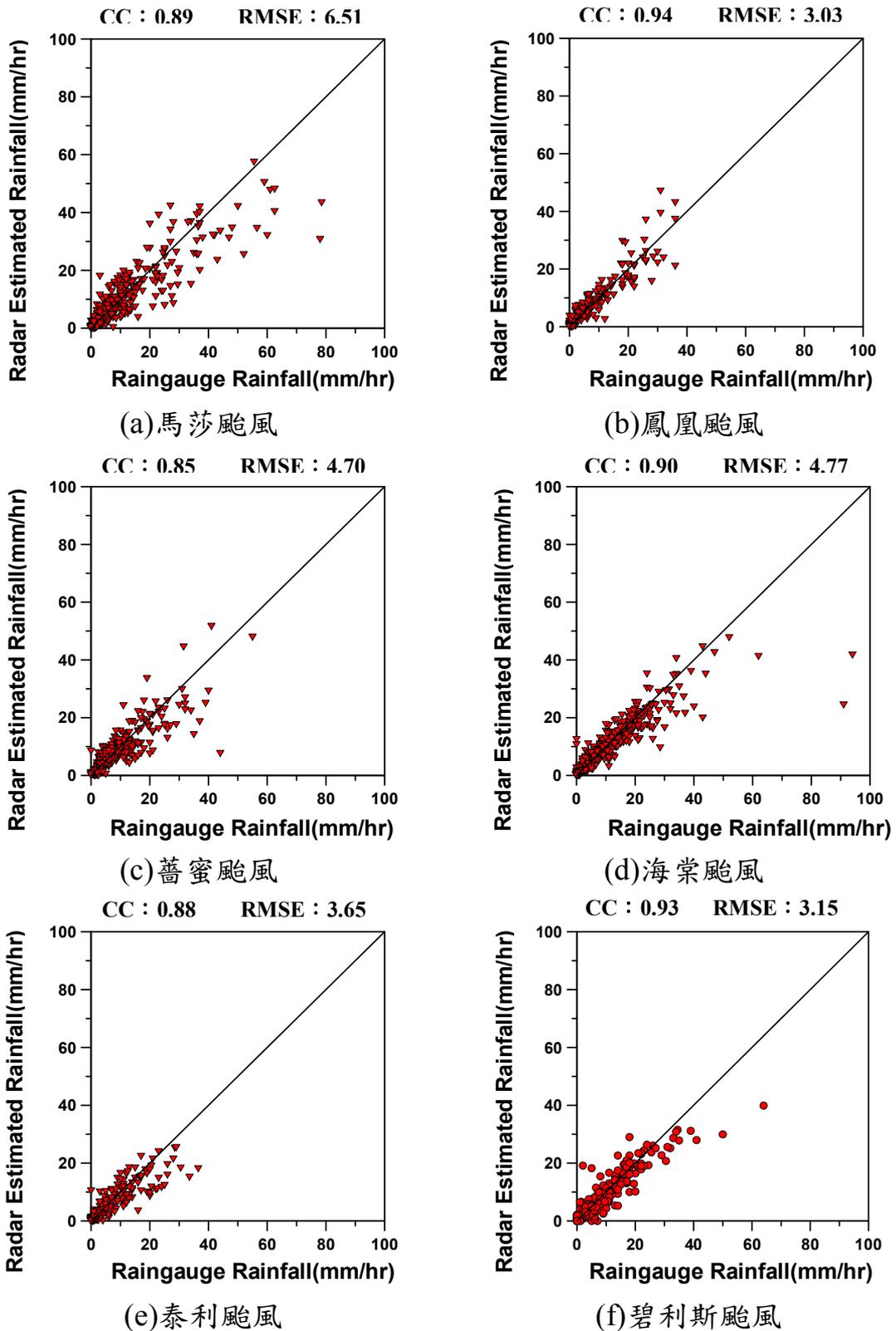
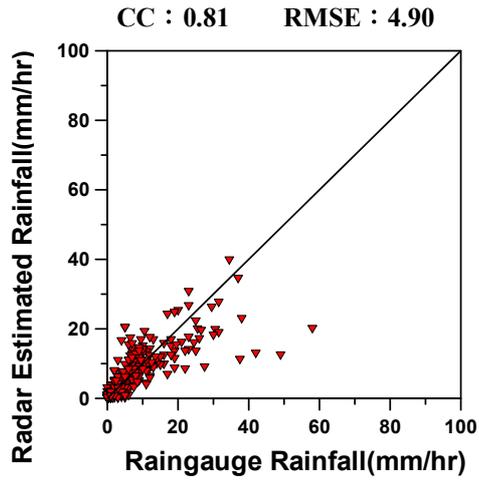
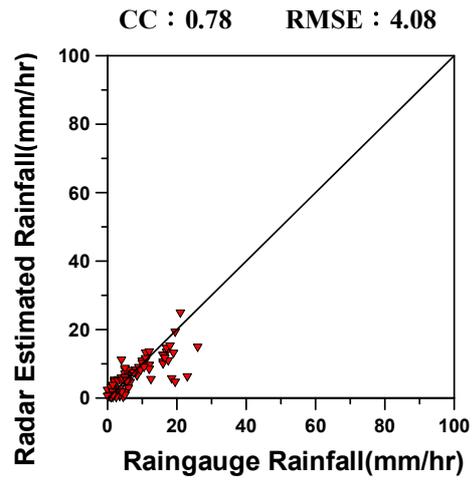


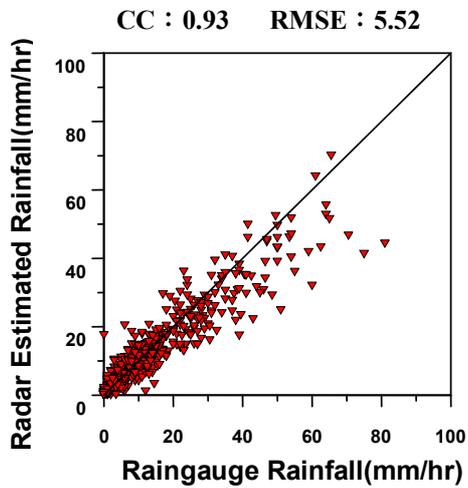
圖 3.19 驗證雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之比較



(g) 聖帕颱風



(h) 柯羅莎颱風



(i) 辛樂克颱風

圖 3.19(續) 驗證雨量站經過 Kriging 修正後之雷達估計降雨與地面雨量之比較

### 3.4.7 南瑪都颱風修正結果

本計畫使用 2011 年的南瑪都颱風進行 SVR 以及克利金修正雷達估計降雨，圖 3.20 為 SVR 的修正結果，圖 3.21(a)為克利金率定站的修正結果，(b)為驗證站的修正結果

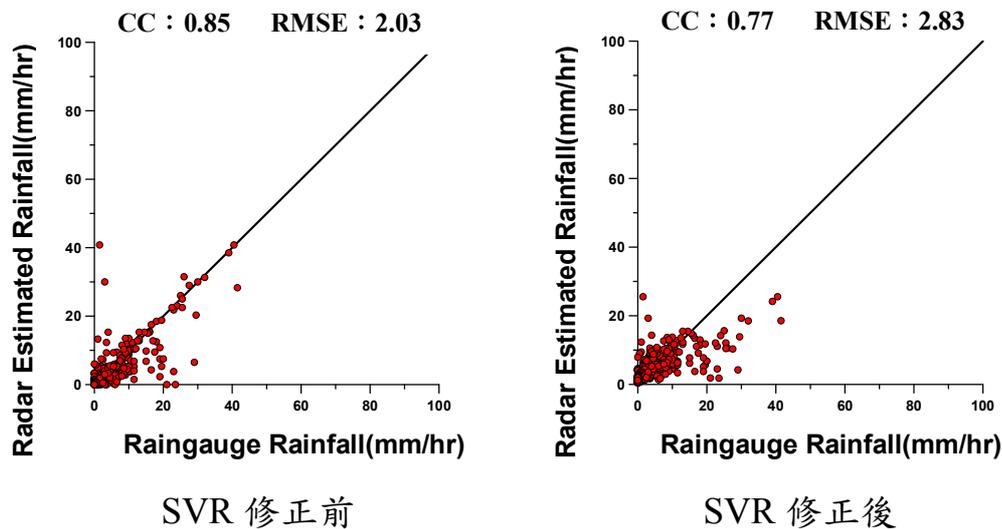


圖 3.20 SVR 的修正結果

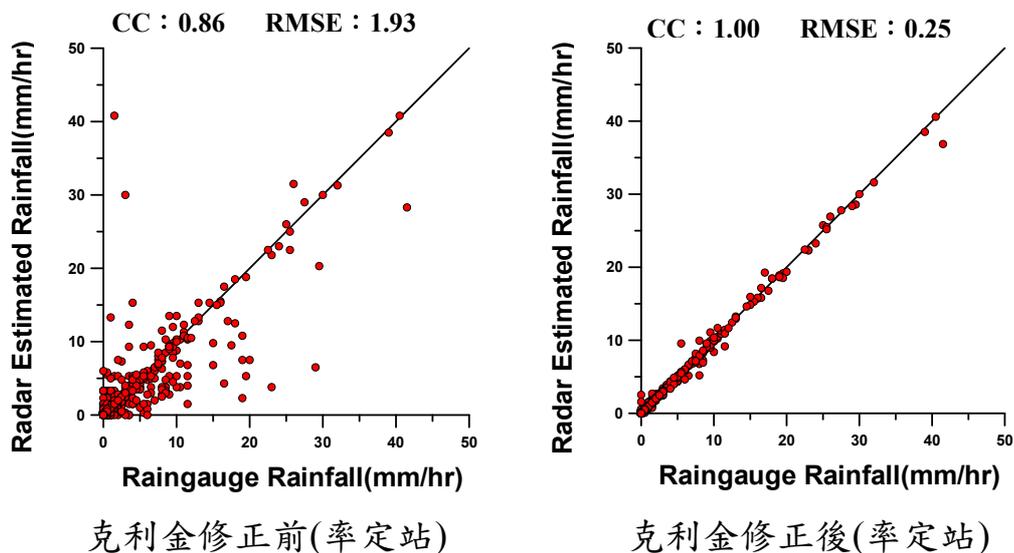


圖 3.21(a) 克利金率定站的修正結果

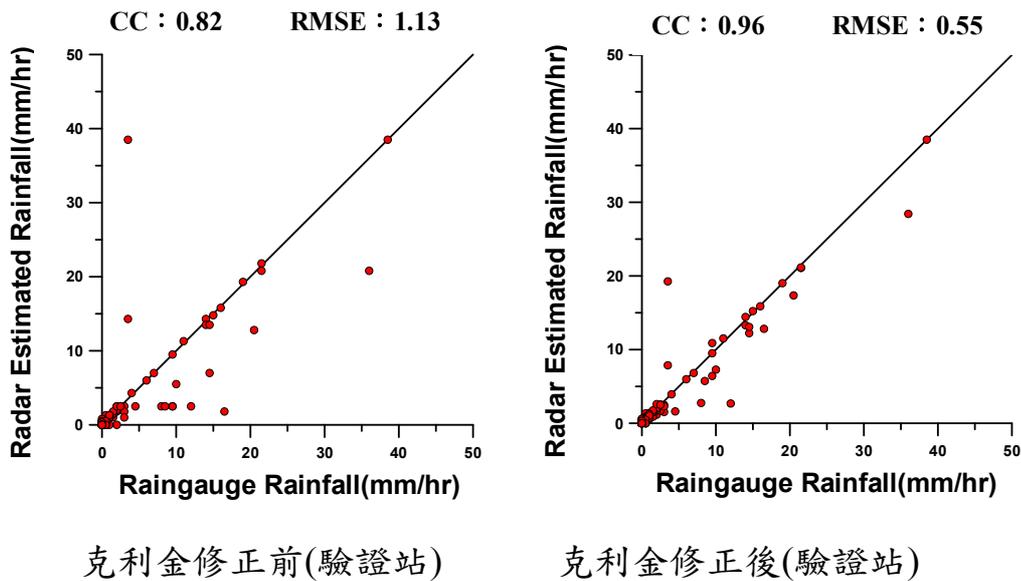


圖 3.21(b) 克利金驗證站的修正結果

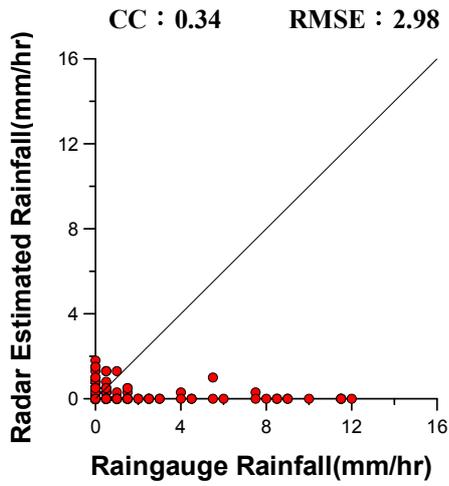
南瑪都颱風在克利金修正前，其雷達估計降雨在相關係數在 0.8 左右，而均方根誤差值也很小，大致上都在 1~2 之間。經過克利金修正後，在率定站的部分，相關係數高達 1.0，而在驗證站時，也有 0.9 的；而均方根誤差也都下降至 0.25 及 0.5，由結果可知，克利金可以更有效的修正雷達估計降雨。

在雷達與地面雨量站的資料上，發現雷達估計降雨的特性與過去 2005 年至 2010 年中有顯著的差異性，在過去資料中，其雷達估計降雨和地面雨量站的相關係數大約都只有 0.5 左右，但在 2011 年的南瑪都颱風，相關係數卻高達 0.8，推測其雷達估計降雨特性與過去資料較不相同，在進行 SVR 修正前，需再重新建立模式，以符合現在雷達估計降雨與地面雨量站的關係式，才能夠更準確的修正雷達估計降雨。

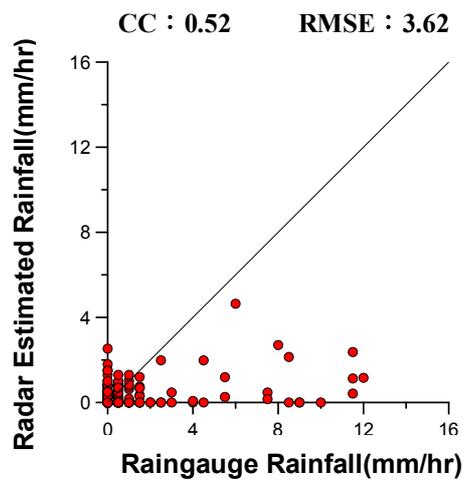
在預測雷達估計降雨方面，主要是考慮先前預報雨量與修正後的雷達雨量之間的誤差，並將此誤差視為系統誤差來修正 QPESUMS 的預報降雨。修正方法如下式所示：

$$C\_QPF_t^i = QPF_t^i + (P_{obs} - QPF_{t-i}^i) \dots\dots\dots(3-37)$$

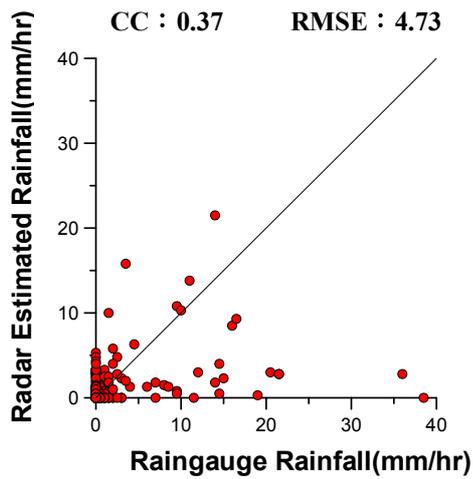
其中， $C\_QPF_t^i$  為 t 時刻時預報 i 小時後(i=1~3)的預報降雨修正， $QPF_t^i$  為經 SVR 修正後的 t 時刻預報 i 小時後(i=1~3)之 QPESUMS 降雨， $P_{obs}$  為第 t 時刻即時的修正降雨， $QPF_{t-i}^i$  為第 t-i 時刻預報 i 小時後之 QPESUMS 降雨。根據此誤差結果利用克利金建立誤差分布圖來修正未來 1~3 個小時的雷達預報降雨，隨著預報小時的增加，其相關係數有下降的趨勢，其圖 3.22 至圖 3.24 為雷達預報降雨的修正結果，圖 3.22 為預報一小時雷達估計降雨，圖 3.23 為預報兩小時，圖 3.24 為預報三小時的雷達估計降雨。



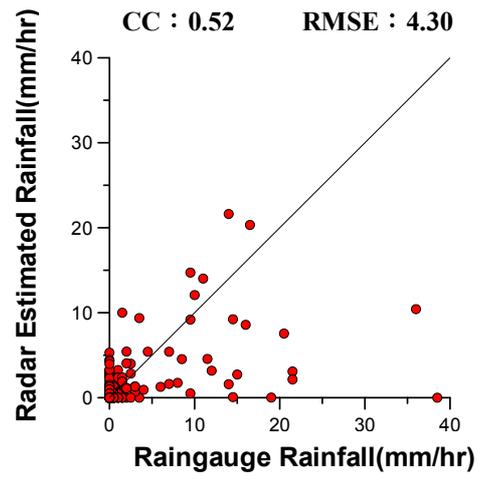
克利金修正前(率定站)



克利金修正後(率定站)

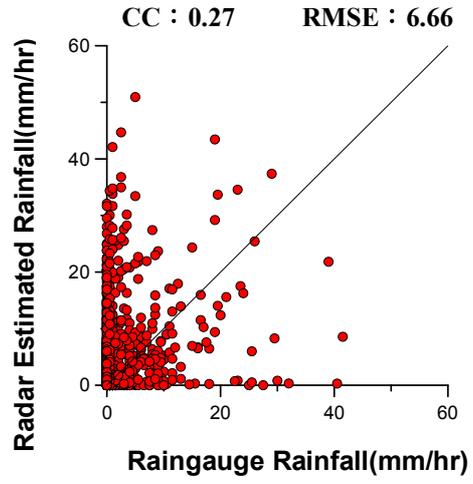
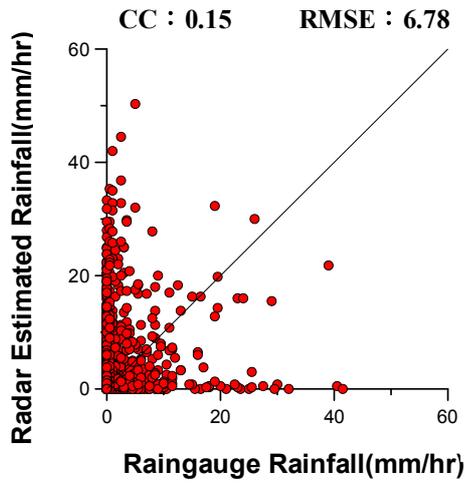


克利金修正前(驗證站)



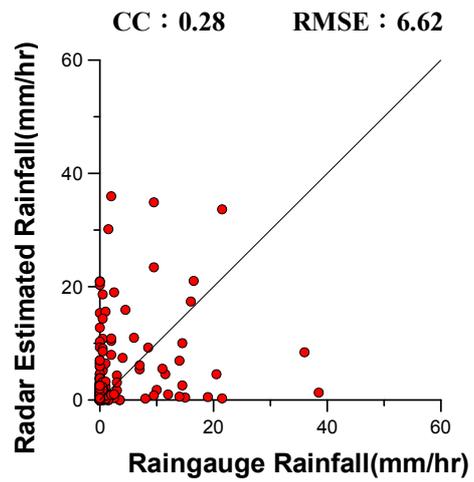
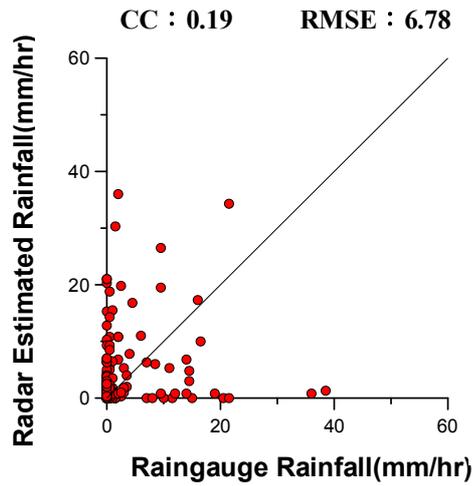
克利金修正後(驗證站)

圖 3.22 預報一小時雷達估計降雨



克利金修正前(率定站)

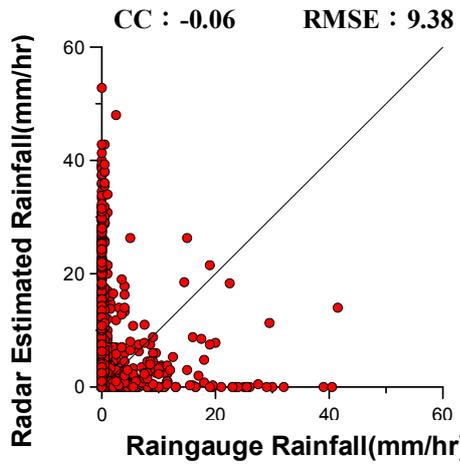
克利金修正後(率定站)



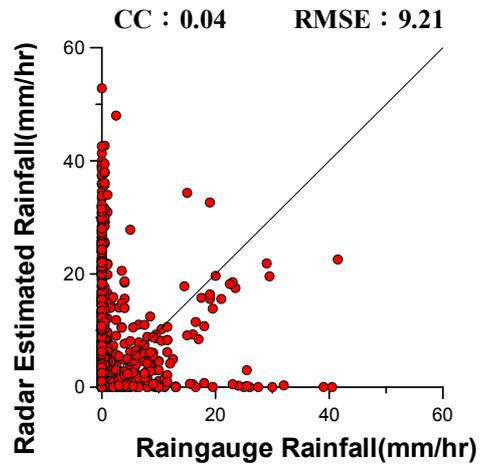
克利金修正前(驗證站)

克利金修正後(驗證站)

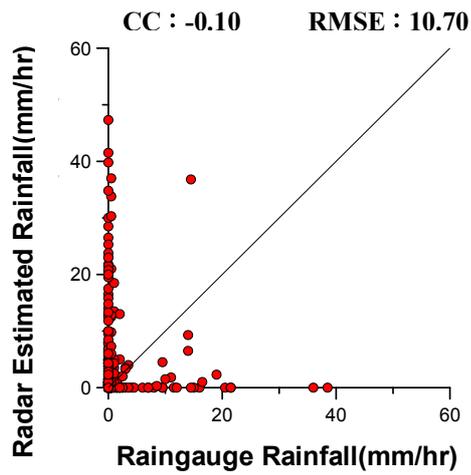
圖 3.23 預報二小時雷達估計降雨



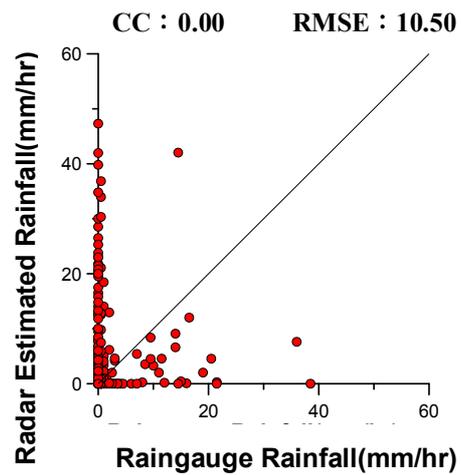
克利金修正前(率定站)



克利金修正後(率定站)



克利金修正前(驗證站)



克利金修正後(驗證站)

圖 3.24 預報三小時雷達估計降雨

## 第四章 格網式降雨逕流模式

石岡壩為大甲溪最下游的水利設施，上游有一系列的堰壩與調整池，因此本計畫擬選擇以石岡壩為分界，在石岡壩上游結合第三章的雷達降雨與本章的格網分布型降雨逕流模式來計算石岡壩的入流量，再配合石岡壩的操作規則即可以估算出石岡壩的放流量，提供石岡壩以下河道水理模式演算的輸入。

### 4.1 格網分布型降雨逕流模式架構

格網分布型降雨逕流模式，模擬暴雨時的洪水量，由三個主要因素組成：流域物理特性(地文因子)、降雨損失(入滲)與基本水流方程式(漫地流與渠道流)，如圖 4.1 所示，架構說明如下：

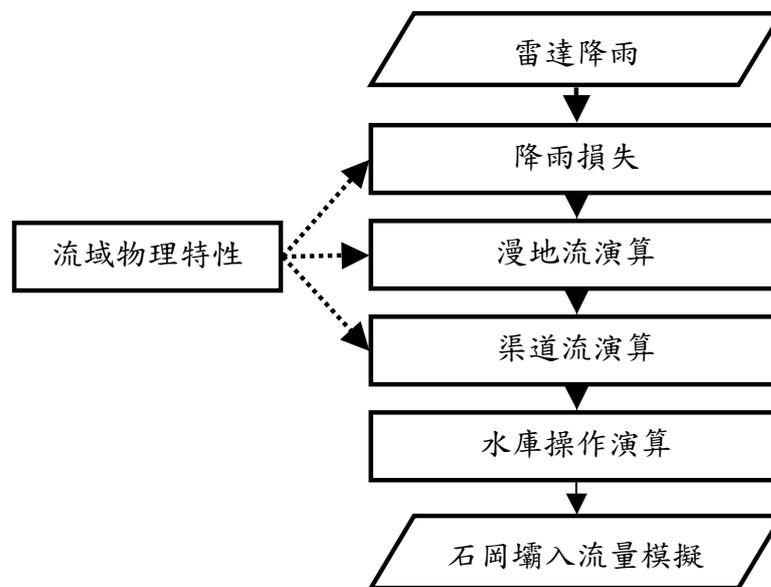


圖 4.1 分布型降雨逕流模式架構圖

#### 4.1.1 流域物理特性

流域物理特性主要為表現流域內的地文特性與水流狀況，本計畫將集水區劃分為等距格網，配合地理資訊系統與遙測資料，分別套疊計算各格網的地文特性，建立每一個格網之地形地貌資料，藉由數值高程模型(Digital Terrain Model, DTM)計算各格網的高程、坡度、面積及邊界長度；根據衛星影像或航照資料提供土地利用的情形；配合河道、集水區邊界與土壤等數化圖層，經由套疊分析可以提供河道位置與土壤等因子。

#### 4.1.2 降雨損失

降雨量由 QPESUMS 雷達降雨提供，暴雨期間由於降雨多數穿越植物，植生的截留量與蒸發散量比例較少，且地表下逕流與地下水流較緩慢，因此只考慮入滲損失部分，此部份參考鄭玉菽(1995)所提出的修正型 Horton 公式，修正降雨強度小於入滲容量時不合理狀況，其公式為：

$$f(t) = \min[f_p(t), i(t)] \dots\dots\dots(4-1)$$

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt_p} \dots\dots\dots(4-2)$$

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f_p(t)dt = f_c t_p + \frac{f_0 - f_c}{k}(1 - e^{-kt_p}) \dots\dots\dots(4-3)$$

其中， $F(t_p)$ 為總入滲量， $f_p(t)$ 為入滲容量， $f_0$ 為起始入滲率， $f_c$ 為最終入滲率， $k$ 為入滲衰減常數， $t_p$ 為入滲等值時間，這些入滲參數可以根據土壤種類來定義。

本計畫進一步修正上式在降雨強度小於入滲容量情況時之不合理性，修正方法詳鄭玉菽(1995)。此外由於入滲率因土壤性質、覆蓋情況及臨前條件之不同而異(顏清連等，1989)，因此模式引進一率定參數 Ch 期使能反應臨前條件的最佳值。

### 4.1.3 水流基本方程式

水流基本方程式方面，又可分為二部分，分別為漫地流演算及渠道流演算。在漫地流方面，由於分布型模式將集水區劃分為方形網格來模擬，每一網格均視為一概念水庫。其儲蓄量與出流量之關係以非線性水庫方式表示為：

$$\frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{2} = \frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} \quad (\text{連續方程式}) \dots\dots\dots(4-4)$$

$$S = K_{SN} Q^m \quad (\text{非線性水庫方程式}) \dots\dots\dots(4-5)$$

其中為  $I_t$  入流量， $Q_t$  為出流量， $S_t$  為貯蓄量， $K_{SN}$  為蓄水常數， $m$  為非線性冪次項。

漫地流演算過程中，格網蓄水量假設為格網寬度  $w$ 、長度  $L$  與水深  $y$  之乘積，公式為：

$$S = wyL \dots\dots\dots(4-6)$$

根據曼寧公式(Manning's Equation)，流量為：

$$Q = \frac{1}{n} wy^{5/3} S_b^{1/2} \dots\dots\dots(4-7)$$

其中  $n$  為曼寧粗糙係數， $S_b$  為地表坡度。

根據式(4-6)與式(4-7)可得，

$$S = \frac{n^{0.6} w^{0.4} L}{S_b^{0.3}} Q^{0.6} \dots\dots\dots(4-8)$$

比較式(4-5)與式(4-8)可得：

$$m = 0.6 \dots\dots\dots(4-9)$$

$$K_{SN} = N^{0.6} w^{0.4} S_b^{-0.3} L \dots\dots\dots(4-10)$$

藉由牛頓疊代法求得流量在  $t + \Delta t$  時刻之近似解，其疊代式：

$$Q'_{t+\Delta t} = Q_{t+\Delta t} - \frac{\Delta t(Q_{t+\Delta t} + Q_t - I_{t+\Delta t} - I_t) + 2K_{SN}(Q_{t+\Delta t}^m - Q_t^m)}{\Delta t + 2K_{SN}mQ_{t+\Delta t}^{m-1}} \dots\dots\dots(4-11)$$

上式疊代至  $|Q'_{t+\Delta t} - Q_{t+\Delta t}|$  小於容許誤差。其中入流量  $I_t$  包括了降雨量與周鄰格網漫地側流入流量，因此入流量  $I_t$  可寫成：

$$I_t = R_t + \sum_{j=1}^4 Q_j(t' + L_t) - f_t \dots\dots\dots(4-12)$$

其中  $R_t$  為降雨量， $j$  為方向編號， $L_t$  為稽延時間(水流於元素間之流動時間)， $Q_j(t' + L_t)$  代表  $j$  方向格網在  $t'$  時刻產生之出流量，經  $L_t$  稽延時刻後剛好到達計算格網之時刻  $t$  側入流量 ( $t' + L_t = t$ )， $f_t$  為入滲量。

在渠道流演算方面，將渠道置於網格中心並予以適當簡化，如同漫地流演算，視每一段渠道為一概念水庫。參照漫地流非線性模式之推演，其  $K_{CN}$  值如式(4-13)式所示：

$$K_{CN} = n_c^{0.6} w_c^{0.4} L_c S_c^{-0.3} \dots\dots\dots(4-13)$$

$K_{CN}$  為模式中河段之蓄水常數， $n_c$  為渠道曼寧粗糙係數， $w_c$  為渠道平均寬度， $L_c$  為河段長度視格網大小而定， $S_c$  為渠道坡度。理論上， $K_{SN}$  與  $K_{CN}$  可由物理參數決定，但因曼寧粗糙係數、地表坡度及渠道平均寬度不易決定，常經由人為判讀、計算，具有不確定性之影響，所以漫地流與渠道流計算方面各引入一率定參數  $C_s$ 、 $C_c$  修正，期使獲得蓄水常數之最佳值。

## 4.2 地文參數建立

集水區地文參數資料主要為配合模式計算之需要，傳統上是以人工判釋地形圖的方式進行，不但費時且相當不方便，為了加速模擬的效率，故需要精確與快速的方法來處理集水區地文因子資料。藉由地

理資訊系統的協助建立過程，考慮參數的地理特性以及空間分布，而資料來自衛星遙測、DTM 資料與土壤數化資料。特別是本計畫採用格網模式來模擬集水區逕流，這種屬於分布型模式的特色是將集水區以許多均勻格網劃分，每一個方塊格網所代表的是一均勻的區域，集水區的地理特性處理即是針對這些均勻網格賦予相關的地文參數。本計畫利用遙測與地理資訊系統等工具，將集水區中每個格網的地理條件加以數位化，建立空間資料，以利模式之模擬。分析流程如圖 4.2 所示。

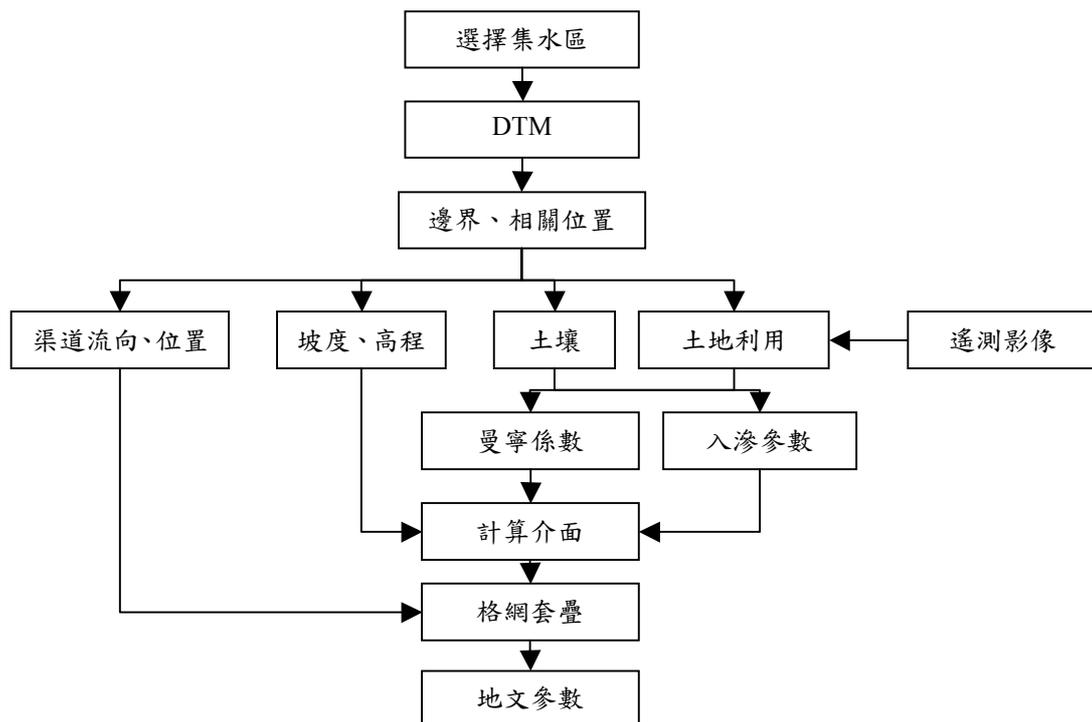


圖 4.2 地文參數建立過程

#### 4.2.1 集水區格網建立

集水區地理特性即是處理集水區內地形與地貌的過程，地形的高低起伏支配著集水區內水流的方向，地勢的陡峻或平緩影響水流的快慢。

集水區格網建立，常見的有規則格網與不規則格網，一般來說不規則格網是依據地表狀態來分割，不僅格網大小不一且計算較不易，

因此本模式採用規則方正格網來分割集水區以縮短模擬時間。劃分的原則是以太灣 2 度分帶座標為主，每 1000 公尺一格，利用 ArcGis 將集水區邊界與格網套疊後，並進一步建立位相關係，使得每個格網都能具有其相關的邊界長度、面積大小與座標資訊，套疊過程如圖 4.3 所示；另一方面，為能有效管理格網內部資料，各格網也分別予以編號，編號原則是由北到南及由東向西，套疊完成後總計有 1234 個格網。

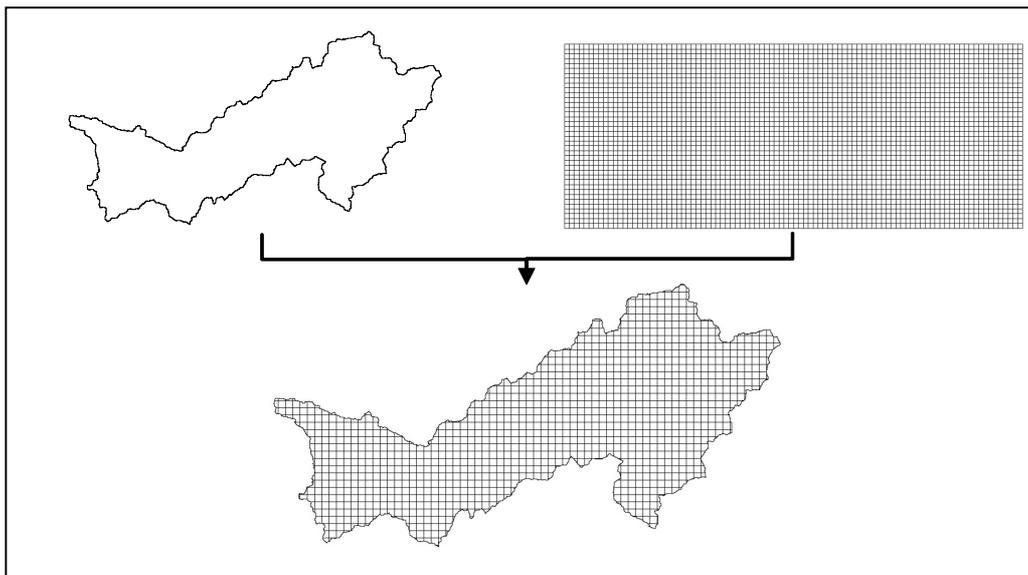


圖 4.3 集水區格網示意圖

#### 4.2.2 集水區地理特性

集水區地理特性包含高程、坡度、漫地流流向與渠道位置，這些特性主要為影響集水區內水的流動過程，為能掌握集水區實際的地表起伏狀態，必須藉由地理資訊系統與數值地形模型(DTM)來加以分析。所謂的數值地形模型是將地表高低起伏以數位化方式表示，即在一個連續的平面上，各點的(x, y)座標均有相對的高程 z 值。本計畫收集大甲溪在石岡壩上游集水區的 DTM 資料，如圖 4.4 所示，經過地理資訊系統處理之後套上該地區的衛星影像，集水區的衛星影像立體圖如圖 4.5 所示。

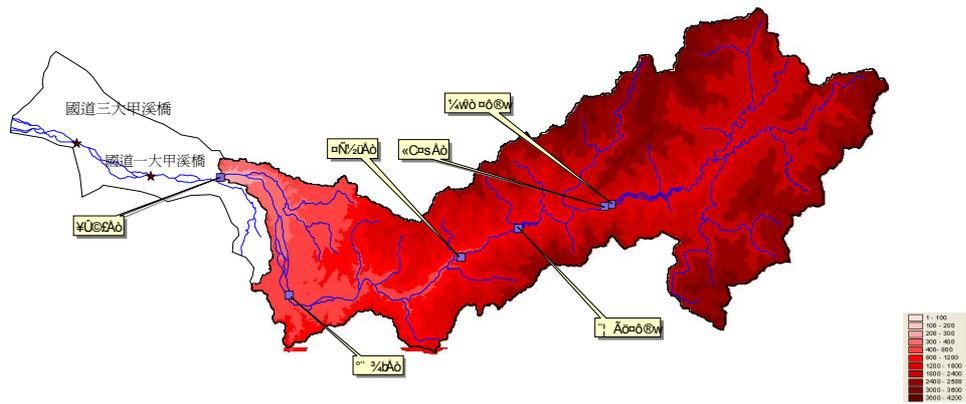


圖 4.4 大甲溪石岡壩上游集水區高程分布圖

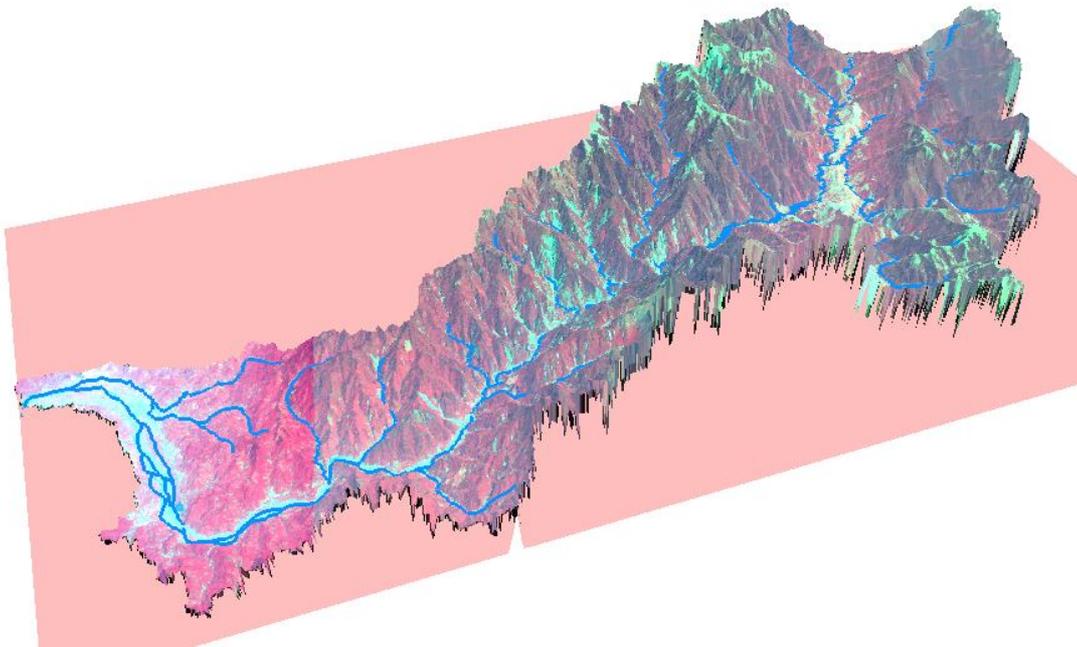


圖 4.5 大甲溪石岡壩上游集水區衛星影像立體圖

#### 4.2.3 地表高程與坡度

地表高程則為影響漫地流流向的最初依據，為完整反應集水區的實際情況，本計畫利用 DTM 配合 ArcGis 統計格網內部高程點，再以平均值代表每個格網的高程。集水區的地表高程如圖 4.6 所示。

地表坡度會影響漫地流的流速及流動時間，此處的地表坡度同樣是以 DTM 為基本資料，利用 ArcGis 軟體的 Spatial 模組計算集水區的坡度，主要是計算格網內部單一 Grid 與相鄰八個方向 Grid 間之坡度值，定義最大之坡度值為此 Grid 之坡度，經過與格網套疊過程後，將格網內的坡度值平均，此坡度值即為此格網的平均坡度，但須注意所得之結果為角度值，需要另行轉換成百分比，公式為如 4-14 式，坡度分布如圖 4.7 所示。

$$s = \tan\left(\frac{d \times 3.14159}{180}\right) \dots\dots\dots(4-14)$$

s：坡度百分比

d：坡度之角度值

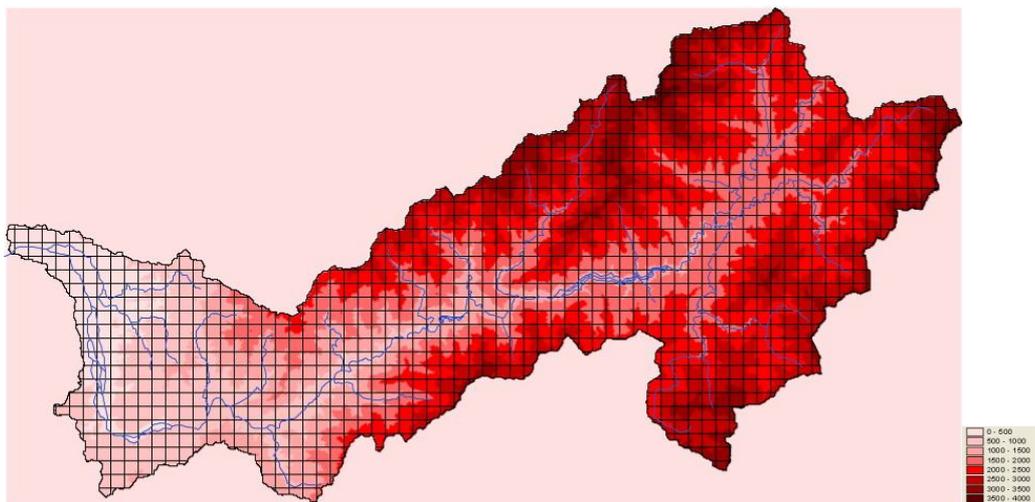


圖 4.6 大甲溪石岡壩上游集水區高程分布圖

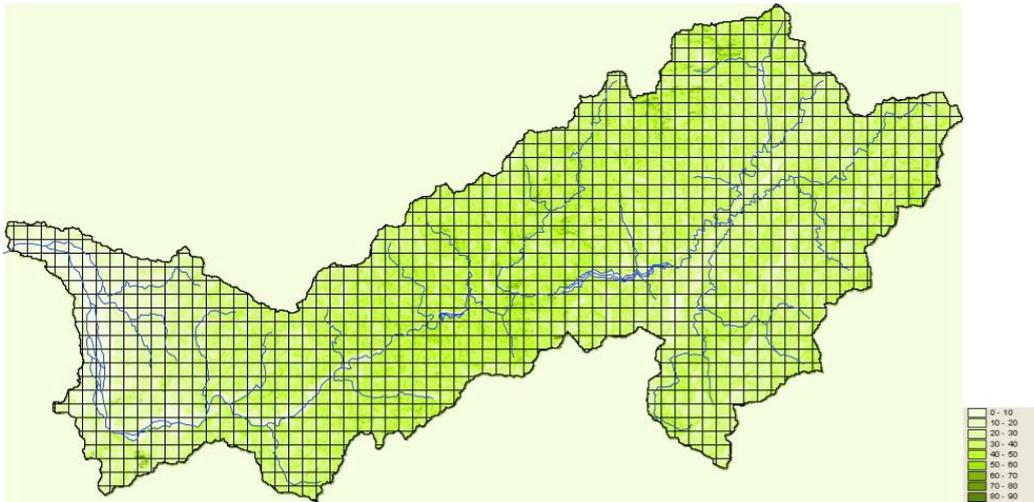


圖 4.7 大甲溪石岡壩上游集水區坡度分布圖

#### 4.2.4 漫地流流向

在模式模擬時，為考慮窪地流況，於各演算時刻均推算出每一格網之平均水深，並且以水面高程(水深+地表高程)作為漫地流流向之依據，再以二維的方式考慮漫地流流向，其流動方向如圖 4.8 所示，格網內之數值為高程，而漫地流演算中關於入流量是包括了降雨量及周鄰漫地流側流入量。

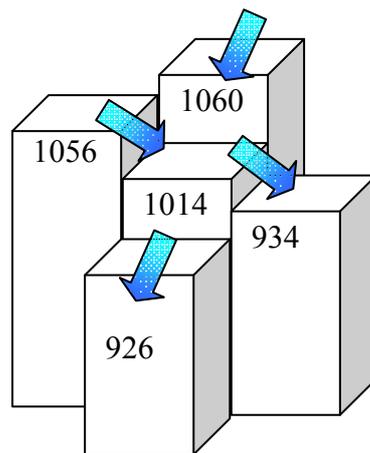


圖 4.8 漫地流流向示意圖

#### 4.2.5 渠道位置

為能使分布型模式得以合理描述渠道之現象，本計畫直接選取有河渠經過之格網，經連接上下游與編號後，將此等格網視為渠道位置，並定義渠道流經格網中心，以作為第三階段渠道流演算之依據，其示意圖如圖 4.9 所示。

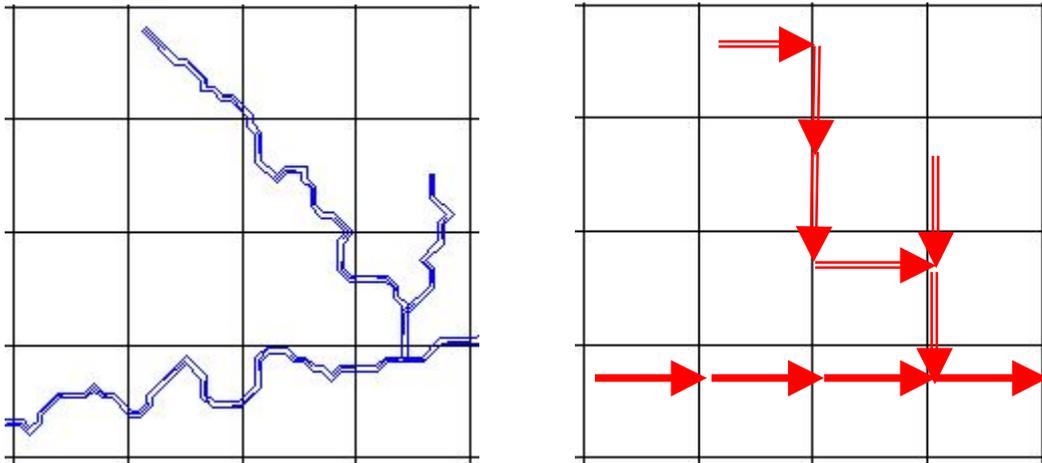


圖 4.9 渠道格網示意圖(左：原始渠道位置，右：流經指定格網中心)

#### 4.2.6 集水區土地利用分布

集水區土地利用狀態空間變異甚大，現場調查工作費時費力且不易進行，且地表入滲與曼寧粗糙係數會受地表覆蓋條件而有所不同，因此引進具空間變化掌握能力之衛星遙測技術，利用地表地物在不同光波段中有不同反射強度的特性，由資源衛星接收物體反射的電磁波，經由影像處理軟體加以分析地表地物的組成。利用此遙測影像，除了可以進行地物分類分析外，可利用不同年代的遙測資料來了解土地利用變化，加以分析地面情形，進而做更佳的決策。

##### 1. 遙測資料來源

使用的衛星影像購自成功大學地科系遙測影像處理與地球環境監測實驗室的福衛二號多光譜影像，為了可以獲得大甲溪流域清

晰的影像，選用攝影日期為 2007 年到 2008 年之間的四張清晰影像加以融合。在遙測影像拍攝過程中，由於衛星運行的軌道與地軸並不垂直，因此會呈現類似受擠壓之平行四邊形影像，而且因地球表面為一球面體，使得影像有扭曲之現象，造成衛星影像在方位及尺度上無法與實際影像符合，為使衛星影像與地表地形能夠配合，在影像分析前需先進行影像前期處理。影像前期處理旨在消除影像之扭曲與改正影像之偏移，如輻射性校正與幾何性校正，經過前期處理後的影像才能與一般的地形資料進行套疊以及分析之工作。經過該中心的處理後已經改正沿軌道方向及垂直軌道方向的誤差。

## 2. 監督式分類法

監督式分類法的首要工作為訓練樣區(Training Area)的選取，需經過人工選取後再行自動分類，傳統選取方式大致採用逐像元(Per-Pixel)方式，其單個像元分類結果可能造成某一個區塊內光譜的異質性(Heterogeneous)，以水稻田為例，水稻田內可能有數個像元分類正確，但另外數個像元卻受周圍地物影響而分類錯誤。若將水稻田區塊視為單元進行分類辨視得到的成果即為每個農地區塊的屬性，所以用區塊為單元的判釋方式與實際地表狀況較吻合，其分類概念亦與糧食局的調查方式一致(鄧敏松，1997)。

監督式分類法主要是根據地真(Ground Truth)，如航空照片、相片基本圖或其他主題圖等地面實際資料，將已知特定類組的像元利用特定訓練樣區用訓練分類演算，依調查目的先決定欲分出的類組，再圈選出各類組的訓練樣區以決定每一像元應歸入的類組，並計算各類組的均數與共變異矩陣等統計值，再依統計值產生之機率密度函數對整個影像各像元作分類。監督式分類法的優點為透過人工訓練判釋，所判釋之精確度較為穩定；缺點也因為利用人工判釋方法，需要訓練較具專業的判釋人員，同時分類所花費的時間隨地貌的複雜程度而有不同。以下為監督式分類法主要的五個步驟：

①目標物的訓練樣區選取，例如林地、水體、裸露地等。

- ②從影像中判釋具有代表性的目標物像元，即訓練樣區，若能同時配合土地利用資料選擇，此方式較易找到足夠之數量與純淨之樣本像元。此步驟甚為重要，因為訓練樣區的統計資料為分類時之標準，若其中摻雜太多的混合像元，容易導致分類結果錯誤。
- ③檢查圈選樣區內的像元個數是否足夠，避免因像元數太少無法進行統計分析，並從選出的訓練樣區中，計算各波段之統計資料。
- ④多波段影像中，相鄰波段的相關性很高，不同的物質可能在某些波段具有近似的反應，若事先已知悉它們的相關程度，則分類時可減少波段數目，以節省時間、提高效率。常用的方法是求取二類在某一波段的分離程度。
- ⑤利用上述步驟所決定之各項參數進行分類。

一般常見的監督式分類計算方法有：最小距離法(Minimum Distance to Means Classifier)、平行六面體法(Parallelepiped Classifier)、最大概似法(Maximum Likelihood Classifier)。本計畫採用含有機率概念的最大概似法進行分類，其流程如圖 4.10。

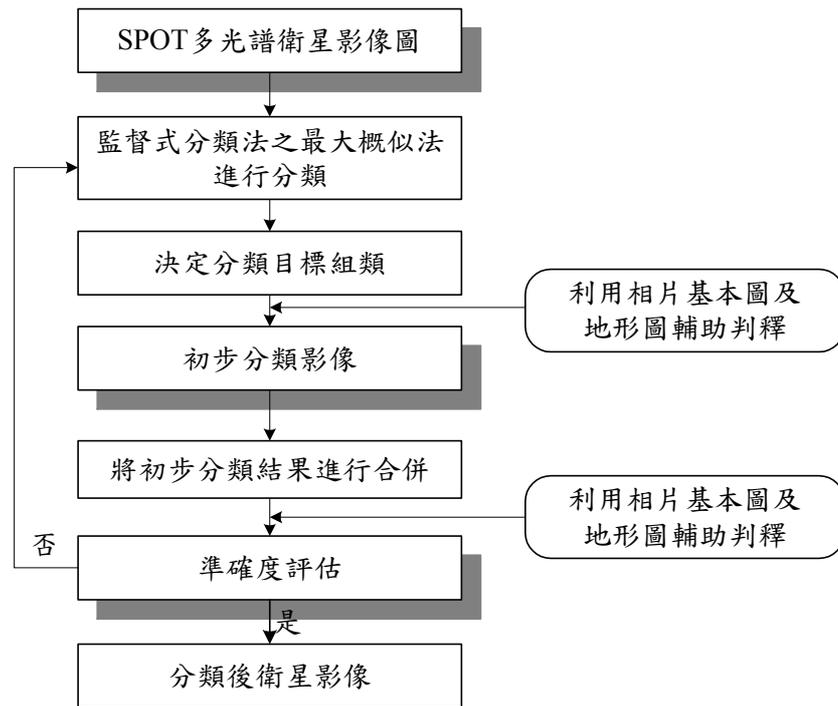


圖 4.10 監督式分類法之流程圖

### 3. 分類結果

分類參考資料為林務局的土地利用調查結果，於土地分類時用以輔助判釋，將地表覆蓋分為四大類，分別為裸露地、林地、旱田（或草地）與水體。土地利用的分類方法採最大概似法之監督式分類，分類後之影像，如圖 4.11。

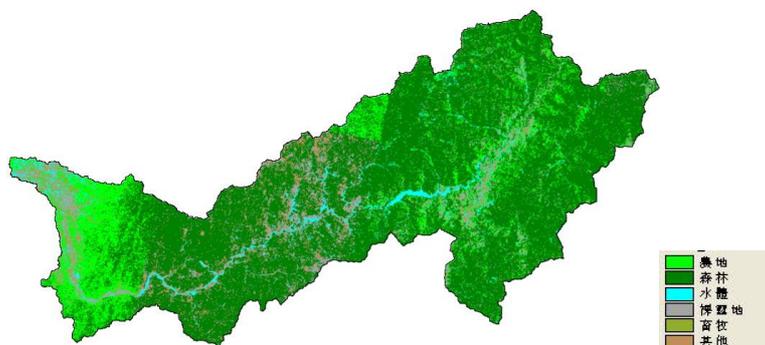


圖 4.11 利用衛星影像分析土地利用分類結果

根據地表地物分類結果，可以計算集水區的曼寧 n 值，曼寧係數乃是參考王如意與易任（1984）的建議值，如表 4-1 所示，其中道路與建物部分是參考瀝青面建議值。最後透過地理資訊系統以面積平均方式計算各格網的曼寧係數。

**表 4-1 曼寧粗糙係數參考值**

地表特性	曼寧粗糙係數
瀝青面	0.014
壓密黏土	0.03
草地	0.25
濃密草地	0.35
濃密灌林	0.40

#### 4.2.7 集水區土壤參數建立

降雨逕流模式的入滲計算過程中需考慮土壤分布狀態，而在相同的土壤條件下也必須考慮其植生覆蓋狀況，因此本計畫先將土壤資料與土地利用分析結果加以套疊，使套疊後圖層同時具有土壤與植生資訊，最後再與集水區格網套疊，如此格網之入滲參數即可以面積平均法計算，本計畫使用資料為水保局之臺灣山坡地數化土壤資料，比例尺為 1/25000，經差 2 度分帶座標，紀錄資料共有六欄，分別為：縣市、土類、土層厚度、坡度、土質地與土系，本計畫則是取用土質地資料，其代號意義如下表 4-2 所示。

**表 4-2 土壤代號表**

代號	土壤質地
0	粗砂土、砂土
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土
4	坩土、坩質壤土
5	壤土
6	砂質粘壤土
7	粘質壤土、坩質粘壤土
8	坩質粘土、砂質粘土
9	粘土

根據土壤與植生資料，可以定義集水區內各網格的土壤參數，包括起始入滲率( $f_0$ )，最終入滲率( $f_c$ )及衰減指數( $k$ )。本文之 $f_0$ 係參照土壤數化資料，了解整個流域各元素之土壤性質，並將土壤分類為砂粒、粉粒及粘粒之百分率，再依表 4-3 之入滲率加權累加以得起始入滲率 $f_0$ 值。 $f_c$ 值之推估則可參照表 4-4。 $k$ 值則可藉由表 4-5 土壤降雨 1 小時之入滲率 $f_1$ 加以推求。而參考文獻中 $f_c$ 與 $f_1$ 均存在區間，因此使用上以中間值為主。

表 4-3 起始入滲率 $f_0$ 的土壤分類代表值(顏清連等，1989)

類別	起始入滲率
A	乾土(無植物或有稀疏植物)
	砂土: 5 in/hr
	壤土: 3 in/hr
	黏土: 1 in/hr
B	乾土(有濃密植物) A項中各值乘以 2 倍

表 4-4 土壤最終入滲率 $f_c$  (王如意、易任，1984)

種類	最小入滲率 (in/hr)	土壤情形
A	0.30 - 0.45	深層砂土，深層黃土，集合沉泥
B	0.15 - 0.30	淺層黃土，砂質壤土
C	0.05 - 0.15	黏質壤土，淺層壤土，低有機含量壤土，高黏土含量壤土
D	0.00 - 0.05	潮濕層膨脹之土壤，高塑性黏土，鹹土

表 4-5 土壤降雨後 1 小時之入滲率 $f_1$  (in/hr) (顏清連等，1989)

土壤剖面特性	臨前狀況：乾		臨前狀況：濕	
	濃密草地	稀疏草地或不長草	濃密草地	稀疏草地或不長草
緊密塑性黏土	0.4	0.2	0.05	0.02
和				
粉質黏土	0.6	0.4	0.2	0.1
浸透性壤土	0.8	0.5	0.4	0.2
和				
細砂質土壤	1.2	0.7	0.8	0.4

### 4.3 水庫操作

台電公司於大甲溪流域內設置一系列的水力發電廠，由上游起共設置德基水庫、青山水庫、谷關水庫、天輪水庫與馬鞍水庫，根據每天的電力需求提供尖峰時間不足的電力。1996 年台電公司為精簡組織，將德基、青山、谷關、天輪、新天輪、社寮及大安溪后里電廠等 7 座電廠合併成立為大甲溪發電廠。此一系列電廠的水庫運用要點列於最後的附錄一，在颱風發生的時候，由大甲溪電廠根據德基水庫目前的水位與預估的入流量來決定是否需要排洪，而下游的各水庫的操作準則統整如表 4-6，基本上當德基水庫決定進行排洪時，下游各水庫則不再蓄水，直接將上游進來的水量排出，因此在降雨逕流模式中只需考慮到德基水庫的水庫操作與蓄洪的作用，德基水庫的排洪規則如表 4-7 所示。

表 4-6 大甲溪電廠系列水庫操作準則

	青山水庫	谷關水庫	天輪水庫	馬鞍水庫
最高洪水位	1245m	952m	749m	557.9m
排洪操作	民國 93 年敏督利颱風後，水庫放空自由流	德基水庫排洪預告時，開啟#2(開度 2m)直到水位降到 935m，若水位仍大於 935m，則#2 加開 2m 使水位保持在 935~940m  颱風期間，水位上升率對照淨流量達 170cms 且水位達 950m 已上時，開啟排洪門放水	德基水庫或谷關水庫排洪預告時，開啟#3 直到水位降到 744m 以下  德基水庫或谷關水庫開始排洪後，排洪門#1~#5 全開	天輪水庫排洪預告時，開啟#5 直到水位降到 553m 以下  天輪水庫開始排洪後，排洪門#1~#9 全開

表 4-7 德基水庫排洪操作表

情況	開門開啟時機水庫水位 (M)	水庫淨進水量 (CMS)	操 作 開 門												水庫排洪量 (未包括發電量) (CMS)								開啟或關閉所需時間 (分)						
			排洪閘門開度 (M)					壩頂溢洪門開度 (M)					壩身排砂門開度		1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408		1408.5	1408.8				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2															
1	WL ≥ 1407	Qi ≥ 100		1.3 0	1.7 3.4	1.3 0														380 290	410 300	440 320							6+5=11 12
2	WL ≥ 1406	Qi ≥ 300		1.4 0	1.8 3.6	1.4 0														380 290	400 310	430 320							6+5=11 12
3	WL ≥ 1405	Qi ≥ 500		2.3 1.9	3.2 2.6	2.3 1.9											550 470	600 500	640 530										11+8=19 9+7=16
4	WL ≥ 1404	Qi ≥ 700		2.5 2.0	3.6 2.9	2.5 2.0											550 460	600 500	660 540										12+9=21 10+7=17
5	WL ≥ 1403	Qi ≥ 900		2.7 2.2	4.1 3.3	2.7 2.2											550 460	600 500	660 550										14+9=23 11+8=19
6	WL ≥ 1402	Qi ≥ 1100		3.0 2.4	4.7 3.8	3.0 2.4											540 450	600 500	670 550										16+10=26 13+8=21
7	WL ≥ 1401	Qi ≥ 1300		F2	F1	F2											600	780	980	1190	1430	1680	1940	2190				47+37=84	
8	WL ≥ 1401	Qi ≥ 2100	7.9	F	F	F	7.9										630	860	1430	1430	1780	2170	2560	3000				84+26=110	
9	WL ≥ 1404	Qi ≥ 2600	7.9	F	F	F	7.9	F2	F1	F3										1470	1900	2400	2970	3630				110+69=179	
10	WL ≥ 1404	Qi ≥ 3100	7.9	F	F	F	7.9	F4	F	F	F	F5								1490	1980	2560	3250	4050	4470			179+46=225	
11	WL ≥ 1404	Qi ≥ 3600	7.9	F	F	F	7.9	F	F	F	F	F	F6							2230	2720	3310	4010	4810	5250			225+22=247	
12	WL ≥ 1404	Qi ≥ 4000	7.9	F	F	F	7.9	F	F	F	F	F	F	F7						2970	3460	4060	4770	5570	6030	6250			247+22=269

表中 F1、F2.....表示閘門全開及開啟優先次序。  
 情況 1~6 排洪閘門開度及水庫排洪量分別為洪峰來臨前、洪峰過後。  
 3. 閘門開啟或關閉速度 30 公分 / 分鐘。

水位	蓄水量	水位	蓄水量	水位	蓄水量
(M)	(CMS-H)	(M)	(CMS-H)	(M)	(CMS-H)
1409	46875.61	1389	25355.97	1369	10374.94
1408	45619.94	1388	24512.39	1368	9738.167
1407	44411.31	1387	23668.83	1367	9101.389
1406	43264.03	1386	22825.25	1366	8464.639
1405	42116.75	1385	21982.39	1365	7828.417
1404	40969.47	1384	21208.81	1364	7248.167
1403	39822.19	1383	20435.22	1363	6667.917
1402	38674.92	1382	19661.61	1362	6087.639
1401	37527.64	1381	18888.03	1361	5507.389
1400	36381.06	1380	18114.86	1360	4927.75
1399	35301.75	1379	17383.06	1359	4408.5
1398	34223.19	1378	16651.28	1358	3889.25
1397	33143.75	1377	15919.47	1357	3369.972
1396	32064.19	1376	15187.69	1356	2850.722
1395	30985.83	1375	14456.31	1355	2332
1394	30028.33	1374	13767.28	1354	1865.889
1393	29070.86	1373	13078.28	1353	1399.75
1392	28113.36	1372	12389.25	1352	933.6389
1391	27155.89	1371	11700.22	1351	467.5278
1390	26199.53	1370	11011.72	1350	0

表 4-8 德基水庫水位與蓄水量關係

降雨逕流模式的計算過程中，在德基水庫的格網處加入水庫的操作規則(表 4-7)，根據計算前一時刻的水庫體積與放水量配合此時刻的入流量，計算在此時刻的水庫體積變化，再以水位與蓄水量關係(表 4-8)換算成此時刻的水位，最後再根據此時刻的水位與入流量決定德基水庫在此時刻的排洪量(表 4-7)。

#### 4.4 模式參數與模擬結果

本計畫採用之降雨逕流模式中需要利用三個參數(Ch、Cs、Cc)來調整流量歷線的模擬結果，此三個參數則是根據歷史颱風事件來進行率定與驗證其成效。由雷達降雨修正的資料中，本計畫選擇馬莎、泰

利、科羅莎、鳳凰等四場颱風事件進行參數率定作業，而其餘五場中因碧利斯颱風無德基水庫排洪資料，蓄蜜颱風的德基水庫放流體積與石岡壩入流體積相近等因素，僅以海棠、聖帕、辛樂克颱風來展示模式的驗證成果。模式上游輸入為德基水庫放流量，集水區內的雨量則是對應每一個格網處的 SVR 修正後雷達降雨資料，最後以下游處的石岡壩的入流量進行檢核。

根據馬莎、泰利、科羅莎、鳳凰等四場颱風事件之率定結果，如圖 4.12 與表 4-6 所示，降雨逕流模式的模擬結果與觀測流量之間的  $R^2$  可以達到 0.7 以上，且模擬的流量趨勢均與實測流量相近。其中，雨量資料為經由 SVR 修正後雷達雨量在集水區內的面積雨量計算結果，模擬的流量的起伏趨勢均與面積雨量相符。

驗證事件的流量計算係利用率定場次的參數平均值( $C_s=0.84$ 、 $C_c=0.063$ 、 $C_h=1.46$ )。驗證事件分別為海棠、聖帕、辛樂克等三場颱風，其驗證結果如圖 4.13 與表 4-7 所示，驗證事件的計算結果相當不錯，唯辛樂克颱風的模擬較差，但辛樂克颱風的降雨與模擬流量的趨勢相近，因此可以推斷模擬的流量有反應出實際降雨。

後續，利用觀測入流量進行流量即時修正，其方法為利用前一時刻的觀測 $[Q_{obs}(t-1)]$ 與模擬 $[Q_{sim}(t-1)]$ 之間的誤差量視為本時刻模擬 $[Q_{sim}(t)]$ 計算的誤差，修正後的模擬流量 $[Q_{sim\_c}(t)]$ 可以用下式表示：

$$Q_{sim\_c}(t) = Q_{sim}(t) + [Q_{obs}(t-1) - Q_{sim}(t-1)] \dots\dots\dots (4-15)$$

經流量即時修正後，模擬流量的精確度均高於未修正前之模擬結果，如表 4-9 與表 4-10 所示，除了馬莎與鳳凰颱風之外，其餘颱風場次模擬的  $R^2$  值均大幅提升。修正後的德基水庫與石岡壩流量歷線如圖 4.14 與 4.15 所示，可以明顯發現模擬的流量歷線均能反應出實際的流量變化。

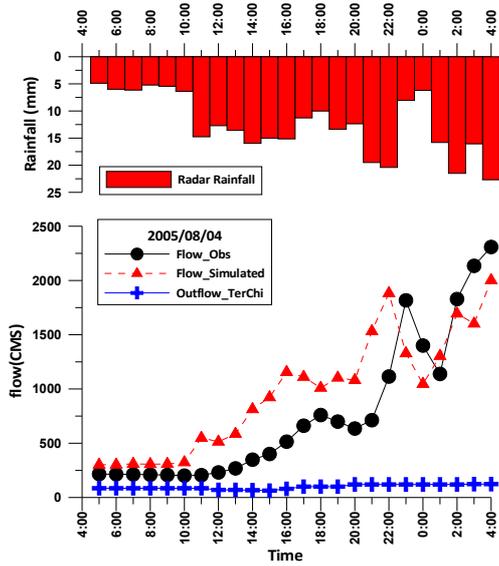
表 4-9 降雨逕流模式率定參數搜尋結果

	Cs	Cc	Ch	R <sup>2</sup>	修正 R <sup>2</sup>
(a)馬莎颱風	0.72	0.015	1.02	0.70	0.76
(b)泰利颱風	0.27	0.021	3.02	0.82	0.92
(c)科羅莎颱風	0.08	0.143	0.21	0.82	0.91
(d)鳳凰颱風	2.28	0.084	1.79	0.94	0.95
平均	0.84	0.063	1.46		

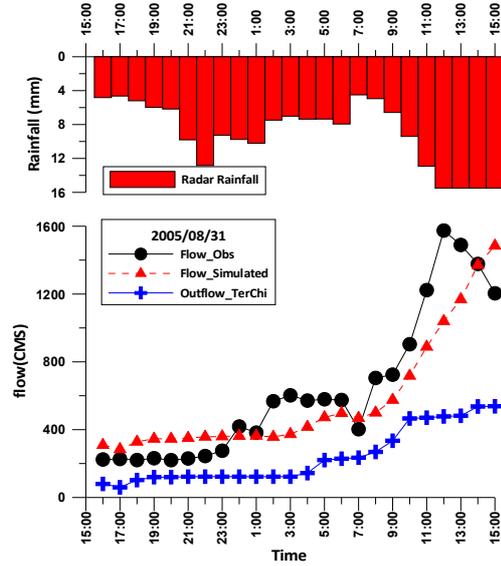
表 4-10 降雨逕流模式驗證結果

	Cs	Cc	Ch	R2	修正 R2
(a)海棠颱風				0.84	0.93
(b)聖帕颱風	0.84	0.063	1.46	0.90	0.93
(c)辛樂克颱風				0.67	0.90

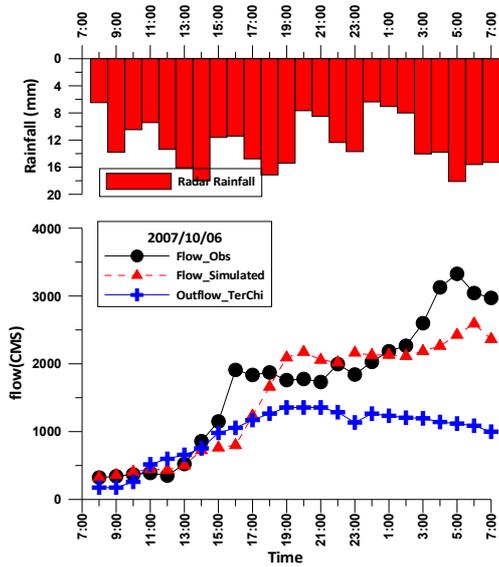
(a) 馬莎颱風



(b) 泰利颱風



(c) 科羅莎颱風



(d) 鳳凰颱風

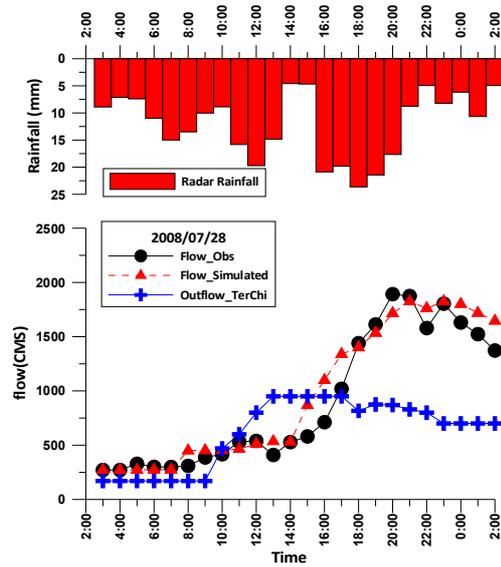
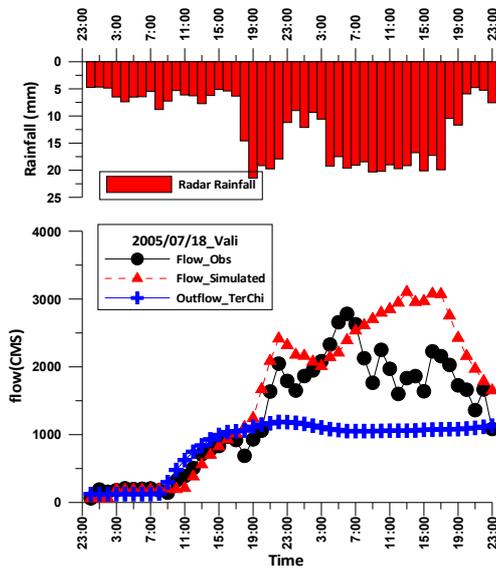
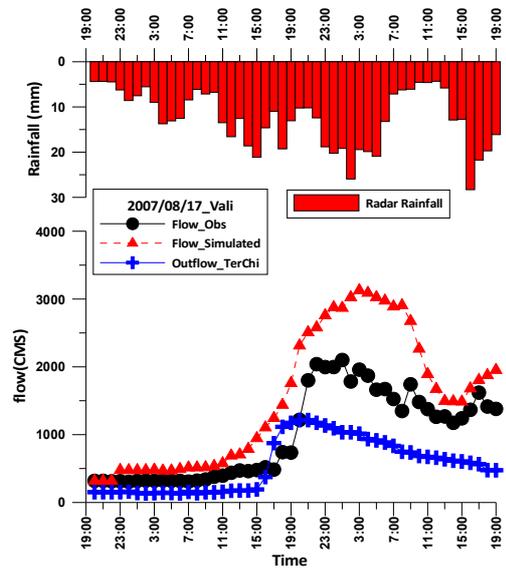


圖 4.12 降雨逕流模式率定結果

(a) 海棠颱風



(b) 聖帕颱風



(c) 辛樂克颱風

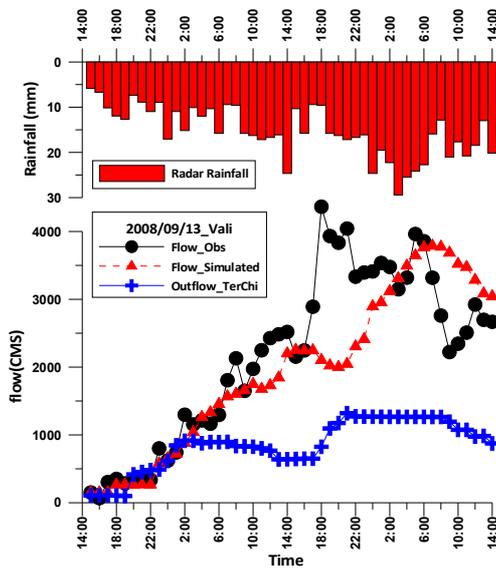
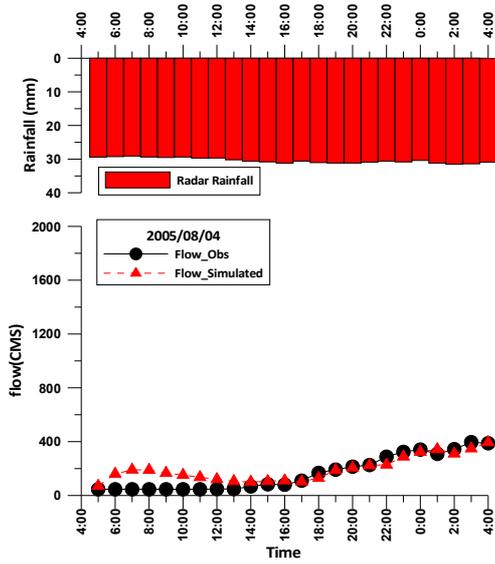
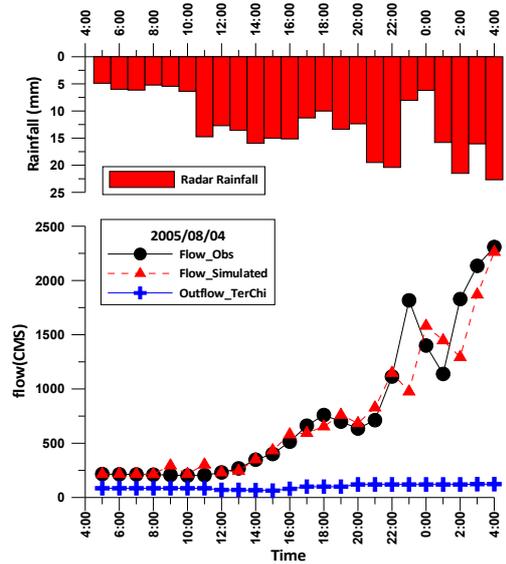


圖 4.13 降雨逕流模式驗證結果

(a) 馬莎颱風

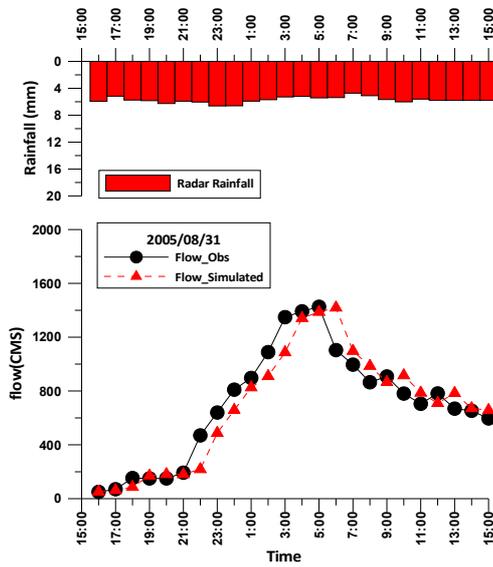


德基水庫

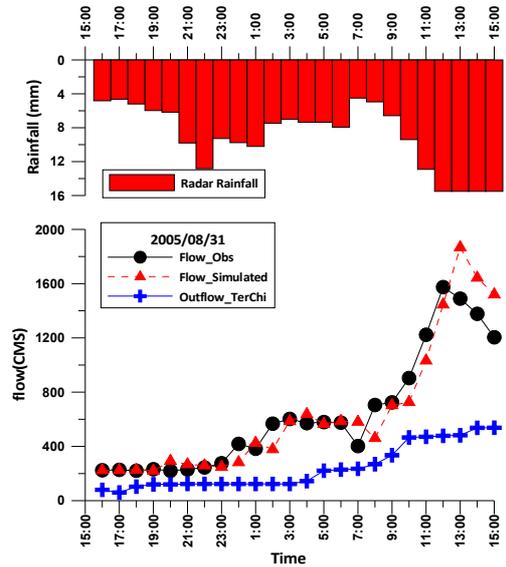


石岡壩

(b) 泰利颱風



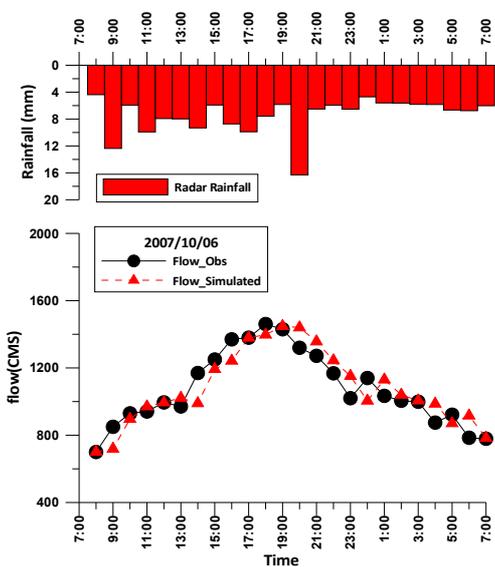
德基水庫



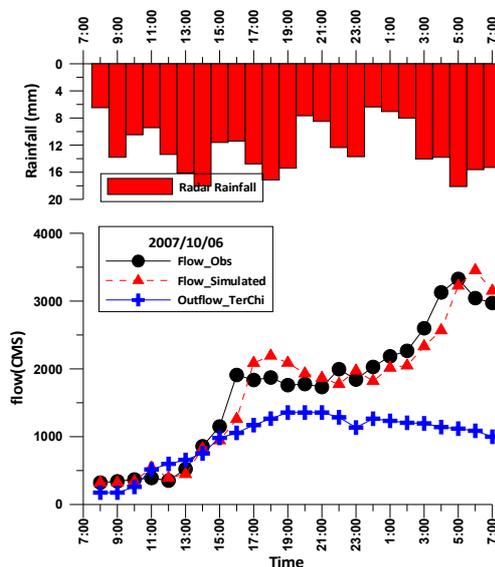
石岡壩

圖 4.14 降雨逕流模式即時修正結果(率定場次)

(c) 科羅莎颱風

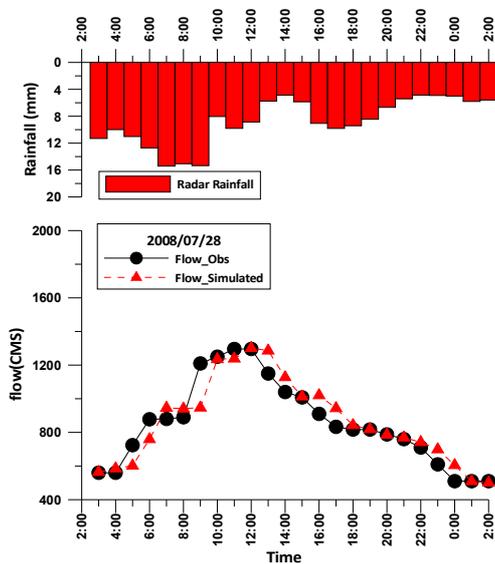


德基水庫

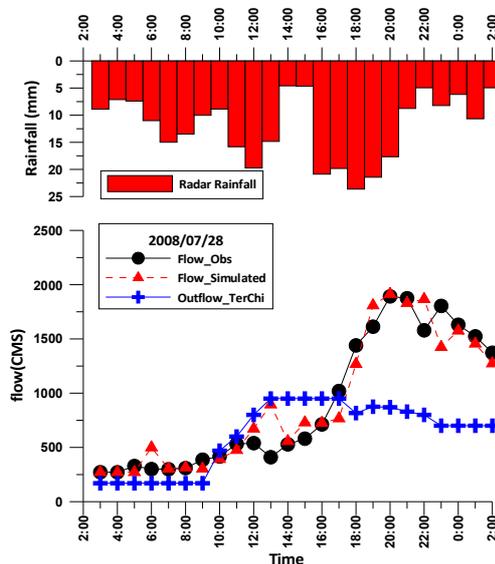


石岡壩

(d) 鳳凰颱風



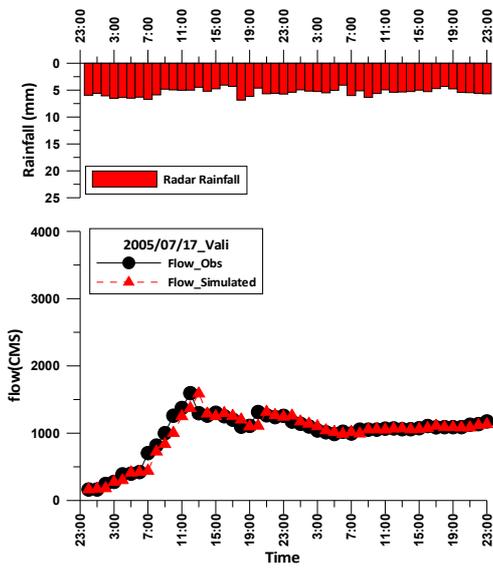
德基水庫



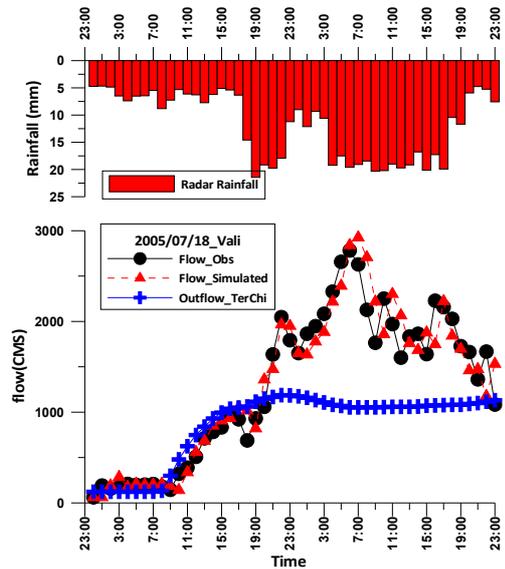
石岡壩

圖 4.14(續) 降雨逕流模式即時修正結果(率定場次)

(a) 海棠颱風

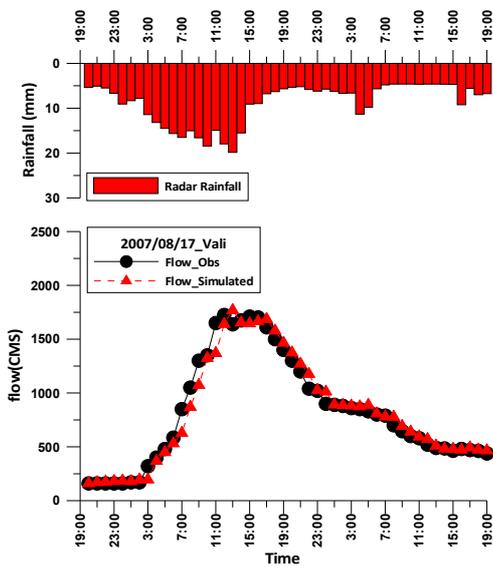


德基水庫

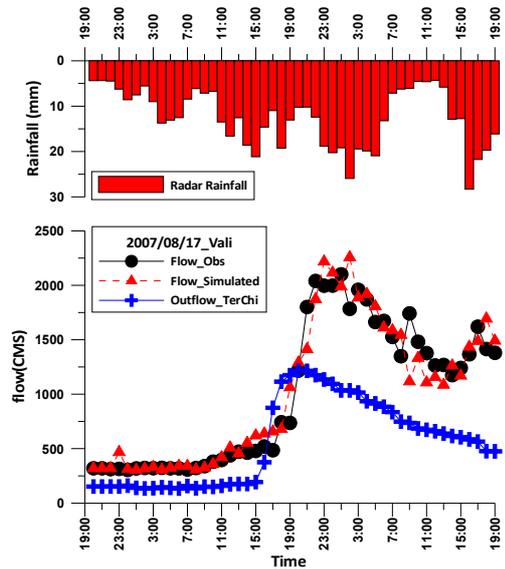


石岡壩

(b) 聖帕颱風



德基水庫



石岡壩

圖 4.15 降雨逕流模式即時修正結果(驗證場次)

(c) 辛樂克颱風

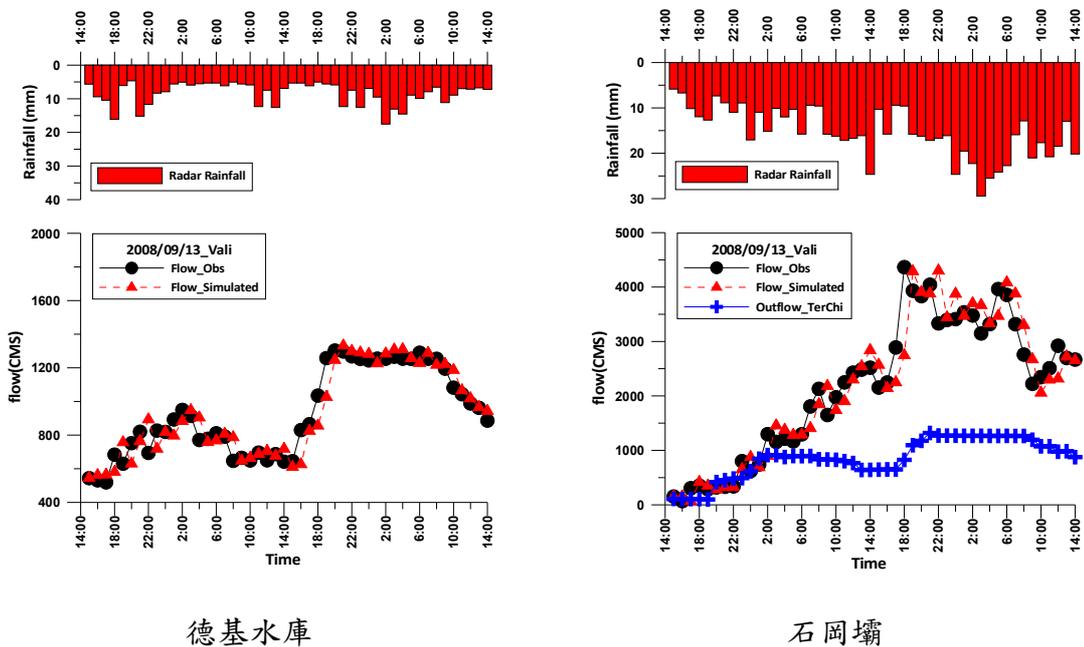


圖 4.15(續) 降雨逕流模式即時修正結果(驗證場次)

在模式率定過程中，不同事件組合的選擇可能會有不同的參數組合結果，因此嘗試以不同事件組合來檢驗模式的模擬成果。本計畫採用兩種模式組合來說明：[組合一]率定事件為馬莎、泰利、海棠與辛樂克颱風，驗證事件為科羅莎、鳳凰與聖帕颱風。參數搜尋與模擬成果如表 4-11 與表 4-12 所示；[組合二]率定事件為科羅莎、鳳凰、海棠與辛樂克颱風，驗證事件為馬莎、泰利與聖帕颱風，參數搜尋與模擬成果如表 4-13 與表 4-14 所示。兩種組合的驗證事件均有良好的模擬結果。可見不同事件組合所選取的參數組合並不會對模擬結果有太大的影響，且均能夠模擬出流量變化的趨勢。再經過流量即時修正更能提升模擬之精確性。

表 4-11 降雨逕流模式率定參數搜尋結果(組合一)

	Cs	Cc	Ch	R <sup>2</sup>	修正 R <sup>2</sup>
(a)馬莎颱風	0.72	0.015	1.02	0.70	0.76
(b)泰利颱風	0.27	0.021	3.02	0.82	0.92
(c)海棠颱風	0.37	0.053	1.57	0.83	0.91
(d)辛樂克颱風	0.15	0.012	1.53	0.68	0.91
平均	0.84	0.025	1.79		

表 4-12 降雨逕流模式驗證結果(組合一)

	Cs	Cc	Ch	R <sup>2</sup>	修正 R <sup>2</sup>
(a)科羅莎颱風				0.82	0.93
(b)鳳凰颱風	0.38	0.025	1.79	0.74	0.91
(c)聖帕颱風				0.76	0.84

表 4-13 降雨逕流模式率定參數搜尋結果(組合二)

	Cs	Cc	Ch	R <sup>2</sup>	修正 R <sup>2</sup>
(a)科羅莎颱風	0.08	0.143	0.21	0.82	0.91
(b)鳳凰颱風	2.28	0.084	1.79	0.94	0.95
(c)海棠颱風	0.38	0.054	1.57	0.83	0.91
(d)辛樂克颱風	0.15	0.012	1.54	0.68	0.91
平均	0.72	0.073	1.28		

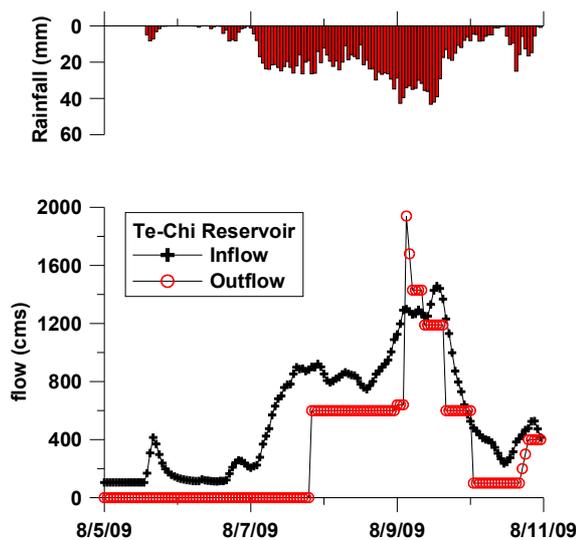
表 4-14 降雨逕流模式驗證結果(組合二)

	Cs	Cc	Ch	R <sup>2</sup>	修正 R <sup>2</sup>
(a)馬莎颱風				0.79	0.88
(b)泰利颱風	0.72	0.073	1.28	0.70	0.89
(c)聖帕颱風				0.89	0.94

## 4.5 莫拉克颱風模擬

2009年8月5日至8月10日，臺灣受到中度颱風莫拉克侵襲，氣象局發佈首次超大暴雨特報，此颱風對臺灣南部地區造成嚴重的災害，根據此段時間的雨量分析，其暴雨中心發生在阿里山站，累積降雨達到2884mm。為了檢視莫拉克颱風此種降雨規模對大甲溪流域可能造成的影響，本計畫嘗試將莫拉克降雨中心搬移至德基水庫，模擬此降雨所產生的逕流量，模擬時間為2009/8/5 00:00~2009/8/10 23:00。首先模擬德基水庫上游的入流量，經過水庫操作規則換算為模擬放流量，如圖4.16(a)所示；而石岡壩的模擬過程中則是以德基水庫的放流量為邊界輸入條件，並加上流域內部所產生的水量，模擬的結果如圖4.16(b)所示，入流量最大可達16000cms，不過在石岡壩的蓄洪調節下，間峰放流量的發生時間有往後移動約9小時，且尖峰放流量只達6700cms，可見石岡壩有足夠之調洪能力，後續將於第五章中利用此放流量計算可能產生的沖刷。

(a) 德基水庫模擬



(b) 石岡壩模擬

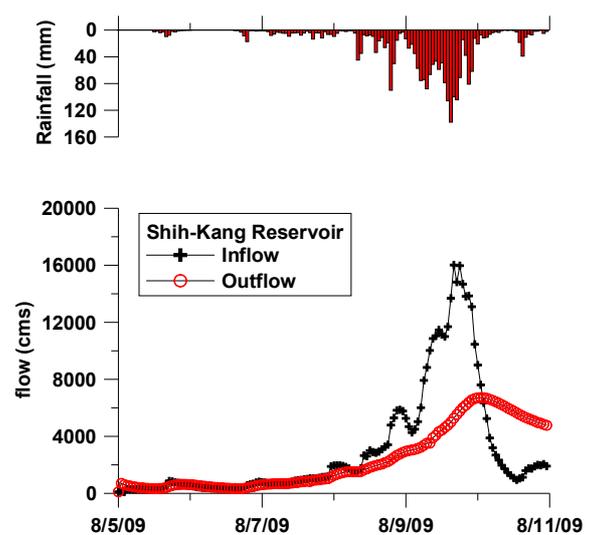
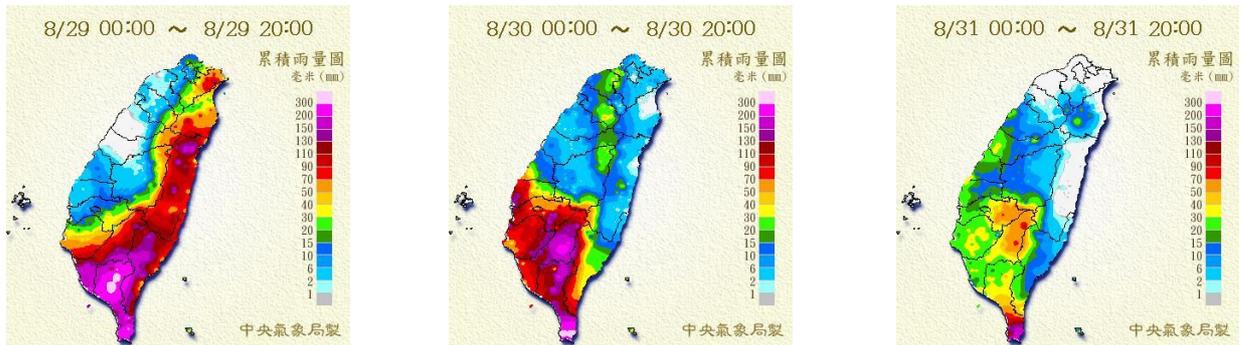


圖 4.16 莫拉克颱風模擬結果

## 4.6 南瑪都颱風模擬

2011年8月27日至8月31日間，強烈颱風南瑪都的颱風中心於8月29日4時由臺東縣大武附近登陸，8月29日13時左右在臺南附近出海，為東部與南部地區帶來豪雨，然而此颱風在中部地區僅帶來相當少之雨量，如圖4.17所示，因此大甲溪電廠並未進行排洪，德基水庫仍只根據平日的發電方式來操作。



2011/08/29 累積雨量

2011/08/30 累積雨量

2011/08/31 累積雨量

圖 4.17 南瑪都颱風累積雨量分布圖(摘錄自中央氣象局網站)

為了解本降雨逕流模式的模擬能力，在南瑪都颱風時大甲溪系列電場並無排洪操作知情況下，僅能利用馬鞍壩的放流紀錄來推算下游石岡壩的可能入流量，石岡壩入流量模擬結果如圖4.18所示，其模擬結果與實際觀測結果相近，由圖中可以發現石岡壩入流量明顯受到馬鞍水庫放流量的影響，因此未來若需要模擬非排洪時期的石岡壩入流量時，系統必須提供馬鞍水庫放水量才能演算。

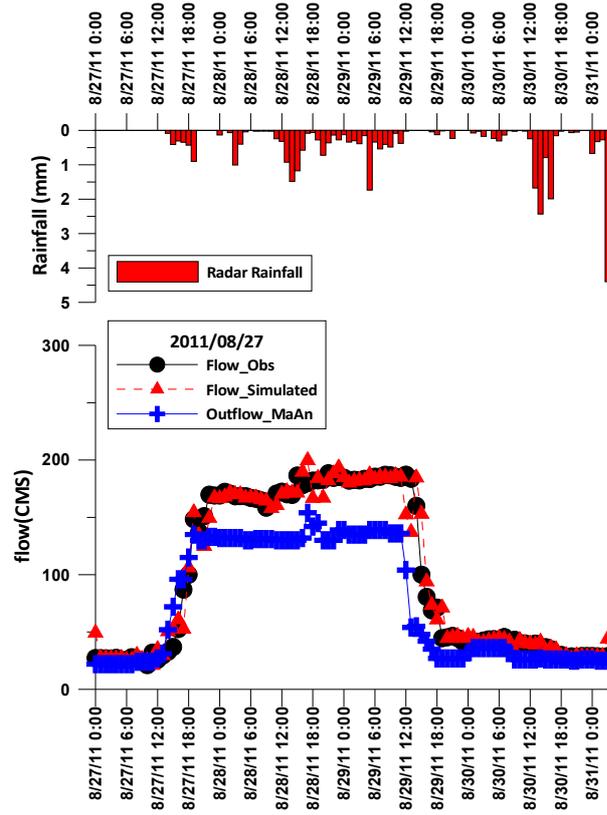


圖 4.18 南瑪都颱風石岡壩入流量模擬結果

## 第五章 橋梁數值模式

為監控水位，公路總局在橋梁底下由低而高畫出黃色及紅色兩條水位線，黃色代表警戒水位、紅色則是封橋水位。依據現行公路總局封橋標準作業程序(SOP)，警戒水位為距梁底淨空 1.5 公尺，封橋水位是距梁底淨空 1 公尺；倘若橋梁屬於危橋，則水位到達黃色水位線(淨空 1.5 公尺)，旋即進行封橋。

惟辛樂克颱風期間，后豐大橋在封橋過程中發生斷橋，2009 年八八水災，更多橋梁來不及封橋就斷橋。公路總局第一線人員進行封橋作業是按照標準作業程序進行，基於橋梁使用上安全的考量，需檢討時機點儘早封橋。保守的封橋標準是採用上游集水區的累積雨量，基於水流連續的觀念，降雨產生逕流，逕流流入河道匯流，上游降雨與下游河道的流量息息相關。未來除考慮降低封橋水位標準、兩端同時封橋，也將加強對河川水位以及橋梁附近河水流速的監測，納入降雨、流域、流速等因素，並將橋墩墩體受沖刷裸露情況納入考量。爰此，在決定封橋決策的過程中，利用 QPESUMS 降雨的預報作業，提供該集水區的降雨分布與特性，進而推估出石岡壩可能放流量後，需借重水理模式快速計算出洪水量在下游橋梁附近相應之水位與流速等水理參數，作為計算橋梁沖刷之依據。

傳統半經驗水理模式，如曼寧公式(Manning's formula)、謝塞公式(Chezy's formula)等，雖然能快速推估出水理參數，但實際之洪水過程屬變量流流況，水理參數隨時間變化，半經驗水理模式無時間連結，缺乏精確反應時變水理特性之能力，再者半經驗水理模式無法推估洪水過程底床變動量。因此，本計畫選用數值動床水理模式，進行之水理參數計算，模擬河道之變量流過程，快速計算橋墩附近水理參數。

## 5.1 國內外動床水理模式研選

動床水理模式發展至今已有二、三十年，並無所謂之萬用模式，其主要原因在於輸砂現象複雜，基本的物理機制未能充份了解，因此模式的發展均建立於許多的假設和簡化上，並針對欲解決之問題，加入特殊處理，使得各類不同型態之模式於應用上均有其特長，但也受到不同特定的限制。模式內輸砂公式參數敏感度分析以計畫河段為應用對象，針對河段內斷面之輸砂現象進行模擬，視河段的粒徑組成來判斷選擇合適公式，經由現場資料迴歸得到經驗式，並進行輸砂公式內相關參數檢定工作。

河道模擬之動床水理模式一般可分為一維、二維及三維數值模式。當研究對象(河川)之水流特性可用斷面平均表示時，通常採用一維模式即可；如果與水流橫向之特性必須納入考量時，則需採用二維模式；如果垂直方向之水流特性也必須考量時，則需採用三維模式。真實河道之水理特性複雜，多屬於三維流況，然往昔泥砂輸送率公式屬一維泥砂輸送，無法描述三維之輸砂現象，現有之三維河道數值模擬，仍停留於實驗室研發階段，實務上河道之數值模式仍以一維及二維為主，二維模式需要輸入精度高之資料進行河道模擬，且耗費冗長之計算時間與昂貴之計算機設備。本計畫之精神在於時間預警，寄望透過計畫之模式整合分析，提供現場工程師足夠時間進行封橋準備，有效地採取必要措施，消彌可能之損失。爰此，在河道動床水理模式的選取上，本計畫選用能快速提供結果之一維模式，進行洪水過程整體河道底床之沖淤模擬，並搭配橋墩沖刷經驗模式，估算橋墩周圍可能局部沖刷深度。

國內常用之一維動床水理模式眾多，由於臺灣河川坡陡流急，流量之豐枯差異懸殊，加上颱風暴雨導致高含砂水流與河床沖刷嚴重等特性，常見之動床水理模式存在不同程度之適用性問題。以水利工程常用美國陸軍工程師團水文工程中心發行之 HEC-RAS 模式為例，其 2008 年 5 月 HEC-RAS 4.0 正式版本，改進了若干 3.1.3 版本之問題，並在功能上主要增加了動床輸砂模擬分析(Sediment Transport/Movable

Bed Analysis)、河床沖淤分析(Sediment Impact Analysis Method,SIAM)水質分析、閘門開啟關閉設定、滿管壓力流模擬、泵浦啟動關閉設定、河道設計/修正工具、地理資訊系統參照工具(Geo-Referencing Tools)等功能，但受限於入流條件輸入組數(100 組)，無法滿足計算時距短、入流輸入組數多的需求。動床水理模式之選定需考量河段特性，並以模式可靠度、計算快速、方便操作、取得容易及輸入資料完整性為主要原則，本計畫蒐集國際上較知名之一維水理模式相關資訊，將相關功能加以整理列表(詳見表 5-1)，並以其功能是否滿足本計畫需求及程式獲得之難易做為模式評選依據，茲依據需求功能項目及滿足需求之模式進行逐級篩選。綜合研判結果且經由篩選，基於超臨界、亞臨界流混合流況計算能力，考慮短期與長期河川網路沖淤過程之模式，本計畫選擇美國密西西比大學國家計算水科學及工程中心發展之 CCHE1D 模式做為一維動床水理模擬模式。

藉由動床水理模式搭配不同之輸砂公式，可得到不同輸砂公式之模擬底床縱剖面，進行輸砂公式適用可行性評估。以研究範圍內歷年之大斷面資料，避開人為干擾事件，如：清淤作業，利用研究範圍上下游最近之流量水位測站為上下游邊界條件，以水理模式分析河床沖淤特性，評估洪水過程河床沖刷之程度。選擇以歷史颱風事件為基準，進行水理模擬床形比對，藉以評估輸砂公式之適用性。

表 5-1 一維模式之功能比較

模式名稱	流況					動床					河工結構	圖形介面	免費	研發單位／作者	
	定	變	亞	超	混	均	級	選	非	岸					
BRANCH		√	√		√									√	美國地質調查所
CCHE1D		√	√				√	√	√	√	√	√	√	√	美國密西西比大學國家計算水科學及工程中心
CHARIMA		√	√		√		√	√						√	美國愛荷華大學愛荷華水理研究所／F.M. Holly
CONCEPTS		√	√		√		√				√	√		√	USDA-ARS-NSL
FEQ		√	√		√						√			√	美國地質調查所
FLUVIAL-12		√	√		√		√						√	√	美國加州大學聖地牙哥分校／張海燕
GSTARS	√		√	√	√		√	√						√	美國墾務局(USBR)
HEC2SR	√		√		√		√	√						√	李日明
HEC-6	√		√		√		√							√	美國陸軍工兵團水文工程中心(HEC)
HEC-RAS	√		√	√	√		√	√	√		√	√		√	美國陸軍工兵團水文工程中心(HEC)
		√	√		√		√	√	√		√	√		√	
MIKE-11		√	√	√			√		√		√	√			丹麥水利研究所(DHI)
NETSTARS	√		√	√	√		√		√					√	台大土木／李鴻源
		√	√		√		√		√					√	
SOBEK-River		√	√	√			√				√	√			WL/DELFT HYDRAULICS
WSPRO	√		√		√						√			√	美國運輸部聯邦高速公路局(FHWA)

欄位說明：

定：定量流

變：變量流

亞：亞臨界流

超：超臨界流

混：混合流

均：均一粒徑

級：級配粒徑

選：水力分選

非：非平衡輸砂

岸：河岸沖刷

### 5.1.1 水理模組測試與檢定

動床水理模式內水理模組檢定方法係利用歷史颱風事件之實測水位與數值模擬結果相比較，研判數值模組之可靠性。本計畫動床水理模式之分析範圍為石岡壩至下游河口，全長約 23.24 公里。計畫區最近兩次河道大斷面測量分別在 2005 年 12 月及 2008 年 2 月施測。因此，理想之檢定方法即分別以 2005 年及 2008 年為地形條件，模擬 2005 年和 2008 年之颱風事件過程，比對數值模擬結果與實測水位之差異，藉以選定各項合適參數；然目前可獲得完整之石岡壩下游水位記錄站，僅 2005 年泰利颱風期間之台 1 線大甲溪橋水位記錄，現階段乃以泰利颱風之洪水過程為模式檢定對象，未來仍須進行相關資料收集，持續進行模式測試作業。

#### 1. 底床大斷面

測試與檢定之底床採用 2005 年水利署第三河川局提供之實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)，各斷面間之距離如表 5-2 所示。

#### 2. 模擬颱風

本計畫一維模式檢定所採用之流量，乃依據石岡壩運用日報表之紀錄（每小時記錄一次），放流進入下游河道之流量，為排洪道排洪量與排砂道排洪量之總和。2005 年泰利颱風期間，挑選出颱風過程完整流量上升與下降歷線(2005 年 8 月 31 日至 2005 年 9 月 6 日)，共整理出 168 筆資料，總延時為 7 天，整理結果詳表 5-3。

#### 3. 邊界條件

邊界條件方面，上游採用石岡壩於泰利颱風實測放流量，泰利颱風期間石岡壩放流歷線過程如圖 5.1 所示，最大放流量發生於 2005 年 9 月 1 日 12:000，當時放流量約為 1548cms。大甲溪河口附近並無設置潮位站，無法利用潮位記錄作為下游邊界條件，然觀察

2005 年大斷面資料可發現，大甲溪河口河床最低點高程在 0 公尺以上，即河道水位受潮位影響程度可加以忽略，本計畫進行水力分析作業採用下游水位邊界條件為自由流出(Open Downstream Boundary)狀態，並輔以下游潮位高程對水力計算之敏感度分析。

#### 4. 河道糙度值

依據 1993 年前臺灣省水利局「大甲溪治理規劃報告」、2004 年經濟部水利署「大甲溪馬鞍壩至天輪壩河段中長期治理策略」及 2009 年經濟部水利署「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」，大甲溪石岡下游河段之曼寧  $n$  值採用為 0.04，部分斷面採用 0.035 或 0.045。本計畫依據 2007 年 12 月河床質採樣分析成果，計算曼寧糙度  $n$  結果平均值分布在 0.031~0.034 之間，計算成果表如表 5-4 所示，計算結果顯示計畫河段之曼寧  $n$  變異並不顯著。本次模式測試與檢定過程所採用之河床糙度，參考現場勘查實際河道情況，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧  $n$  採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧  $n$  採用 0.035。

#### 5. 計算時間間距

動床水力模式在模擬過程須確認時間間距是否能滿足計算穩定，選取較小的時間間距，雖能確保計算過程相對穩定，卻要犧牲完成計算所花費之時間，本計畫目標為短時間內提供分析成果，如何兼顧計算穩定與最佳之效率便成為重要議題。經由測試結果顯示，在模擬實測泰利颱風洪水過程中，計算時間間距採用 5 分鐘，能獲致相當不錯之成效，僅需處理器計算時間(CPU Time)約 109 秒，即可完成整個泰利颱風 7 天洪水過程之演算。

表 5-2 石岡壩下游各斷面間之距離(單位：公尺)

斷面	距離	斷面	距離	斷面	距離
L36 至 36DA	121.42	L26 至 L25	548.18	L11 至 L10	445.75
36DA 至 L35-1	835.94	L25 至 L24	573.54	L10 至 L09-1	37.79
L35-1 至 L35	81.68	L24 至 L23-1	295.41	L09-1 至 L09-1D	68.58
L35 至 L35D	11.01	L23-1 至 L23-1D	39.6	L09-1D 至 L09	472.36
L35D 至 L34	598.31	L23-1D 至 L23-2	98.38	L09 至 L08	568.66
L34 至 L33	648.82	L23-2 至 L23	347.84	L08 至 L07-2	152.09
L33 至 L32-1	149.79	L23 至 L22	795.16	L07-2 至 L07-2D	17.68
L32-1 至 L32-1D	8.46	L22 至 L21	608.3	L07-2D 至 L07-1	122.52
L32-1D 至 L32	246.95	L21 至 L20A	617.16	L07-1 至 L07-1D	25.39
L32 至 L31-1	239.63	L20A 至 L19-1	87.08	L07-1D 至 L07	346.32
L31-1 至 L31	268.72	L19-1 至 L19-1D	15.81	L07 至 L06	563.19
L31 至 L30-1	361.52	L19-1D 至 L19	1116.49	L06 至 L05	639.39
L30-1 至 L30-1D	19.73	L19 至 L18	421.9	L05 至 L04	733.82
L30-1D 至 L30	247.87	L18 至 L17	554.56	L04 至 L03	641.31
L30 至 L29	812	L17 至 L16	590.76	L03 至 L02	707.05
L29 至 L28-1	204.78	L16 至 L15	474.94	L02 至 L01-1	378.1
L28-1 至 L28-1D	35.23	L15 至 L14	560.59	L01-1 至 L01-1D	42.82
L28-1D 至 L28	369.93	L14 至 L13	556.76	L01-1D 至 L01	432.49
L28 至 L27	498.73	L13 至 L12	778.84	L01 至 L00	791.83
L27 至 L26	561.78	L12 至 L11	556.59	L00 至 L-1	89.85

表 5-3 石岡壩於泰利颱風期間放流量紀錄

日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量
8月31日	00.00	237.73	9月1日	00.00	333.75	9月2日	00.00	1095.45	9月3日	00.00	399.23
8月31日	01.00	235.57	9月1日	01.00	507.01	9月2日	01.00	1067.88	9月3日	01.00	392.15
8月31日	02.00	216.33	9月1日	02.00	539.26	9月2日	02.00	1049.64	9月3日	02.00	392.15
8月31日	03.00	171.26	9月1日	03.00	571.33	9月2日	03.00	1031.51	9月3日	03.00	234.93
8月31日	04.00	178.96	9月1日	04.00	595.77	9月2日	04.00	1022.49	9月3日	04.00	253.87
8月31日	05.00	184.42	9月1日	05.00	582.04	9月2日	05.00	942.56	9月3日	05.00	262.40
8月31日	06.00	185.57	9月1日	06.00	574.04	9月2日	06.00	1004.53	9月3日	06.00	263.23
8月31日	07.00	185.57	9月1日	07.00	487.69	9月2日	07.00	1061.99	9月3日	07.00	261.56
8月31日	08.00	184.42	9月1日	08.00	629.65	9月2日	08.00	936.63	9月3日	08.00	260.71
8月31日	09.00	184.03	9月1日	09.00	701.88	9月2日	09.00	925.94	9月3日	09.00	259.83
8月31日	10.00	189.34	9月1日	10.00	871.78	9月2日	10.00	928.00	9月3日	10.00	265.37
8月31日	11.00	145.51	9月1日	11.00	1179.72	9月2日	11.00	895.10	9月3日	11.00	264.00
8月31日	12.00	236.38	9月1日	12.00	1548.80	9月2日	12.00	862.60	9月3日	12.00	253.45
8月31日	13.00	271.54	9月1日	13.00	1526.44	9月2日	13.00	849.71	9月3日	13.00	254.09
8月31日	14.00	251.99	9月1日	14.00	1389.80	9月2日	14.00	786.28	9月3日	14.00	239.18
8月31日	15.00	232.17	9月1日	15.00	1220.73	9月2日	15.00	742.88	9月3日	15.00	242.07
8月31日	16.00	226.71	9月1日	16.00	1094.58	9月2日	16.00	724.53	9月3日	16.00	243.22
8月31日	17.00	224.33	9月1日	17.00	1197.88	9月2日	17.00	715.52	9月3日	17.00	215.86
8月31日	18.00	220.28	9月1日	18.00	1221.32	9月2日	18.00	908.49	9月3日	18.00	260.16
8月31日	19.00	221.91	9月1日	19.00	1209.28	9月2日	19.00	673.55	9月3日	19.00	270.41
8月31日	20.00	218.64	9月1日	20.00	1243.90	9月2日	20.00	717.11	9月3日	20.00	268.04
8月31日	21.00	220.28	9月1日	21.00	1250.88	9月2日	21.00	622.32	9月3日	21.00	266.25
8月31日	22.00	226.71	9月1日	22.00	1179.61	9月2日	22.00	458.16	9月3日	22.00	265.05
8月31日	23.00	263.42	9月1日	23.00	1095.45	9月2日	23.00	407.57	9月3日	23.00	265.05

表 5-3(續) 石岡壩於泰利颱風期間放流量紀錄

日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量
9月4日	00.00	267.90	9月5日	00.00	354.52	9月6日	00.00	346.35
9月4日	01.00	267.90	9月5日	01.00	360.19	9月6日	01.00	345.70
9月4日	02.00	278.05	9月5日	02.00	361.82	9月6日	02.00	343.75
9月4日	03.00	292.13	9月5日	03.00	361.82	9月6日	03.00	341.78
9月4日	04.00	274.65	9月5日	04.00	361.01	9月6日	04.00	339.81
9月4日	05.00	282.17	9月5日	05.00	359.37	9月6日	05.00	337.15
9月4日	06.00	331.82	9月5日	06.00	358.55	9月6日	06.00	324.84
9月4日	07.00	354.12	9月5日	07.00	357.73	9月6日	07.00	329.33
9月4日	08.00	369.08	9月5日	08.00	355.25	9月6日	08.00	329.33
9月4日	09.00	365.34	9月5日	09.00	355.25	9月6日	09.00	329.33
9月4日	10.00	361.57	9月5日	10.00	358.55	9月6日	10.00	329.33
9月4日	11.00	352.51	9月5日	11.00	352.75	9月6日	11.00	328.06
9月4日	12.00	351.61	9月5日	12.00	340.62	9月6日	12.00	326.78
9月4日	13.00	348.88	9月5日	13.00	320.07	9月6日	13.00	326.13
9月4日	14.00	346.13	9月5日	14.00	321.37	9月6日	14.00	324.84
9月4日	15.00	334.73	9月5日	15.00	323.97	9月6日	15.00	323.55
9月4日	16.00	329.62	9月5日	16.00	325.26	9月6日	16.00	322.25
9月4日	17.00	332.19	9月5日	17.00	324.62	9月6日	17.00	320.29
9月4日	18.00	334.74	9月5日	18.00	316.98	9月6日	18.00	318.98
9月4日	19.00	338.11	9月5日	19.00	322.57	9月6日	19.00	311.09
9月4日	20.00	340.62	9月5日	20.00	325.66	9月6日	20.00	312.97
9月4日	21.00	345.43	9月5日	21.00	341.92	9月6日	21.00	312.97
9月4日	22.00	347.10	9月5日	22.00	356.67	9月6日	22.00	314.22
9月4日	23.00	351.24	9月5日	23.00	346.35	9月6日	23.00	314.84

表 5-4 大甲溪石岡壩下游河段曼寧糙度 n 值計算成果表

斷面	Stickler	Meyer-Peter	Einstein	Lane	n 平均值	n 最小值	n 最大值
	n=d501/6/25.68	n=d901/6/26	n=d651/6/75.75	n=d751/6/39			
33	0.031	0.030	0.030	0.034	0.031	0.030	0.034
32	0.034	0.032	0.033	0.038	0.034	0.032	0.038
29	0.032	0.032	0.031	0.037	0.033	0.031	0.037
25	0.035	0.032	0.032	0.038	0.034	0.032	0.038
21	0.032	0.031	0.030	0.036	0.032	0.030	0.036
17	0.032	0.032	0.032	0.038	0.033	0.032	0.038
13	0.030	0.030	0.028	0.034	0.030	0.028	0.034
9	0.035	0.032	0.032	0.038	0.034	0.032	0.038
5	0.035	0.032	0.032	0.037	0.034	0.032	0.037
1	0.034	0.031	0.032	0.037	0.033	0.031	0.037

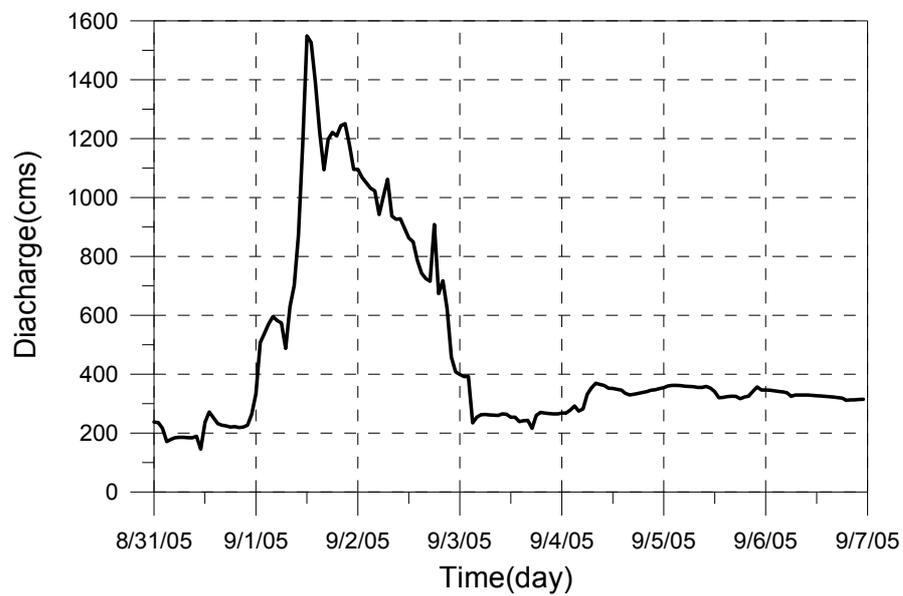


圖 5.1 泰利颱風期間石岡壩放流歷線過程

### 5.1.2 水理模組測試與檢定成果

圖 5.2 為台 1 線大甲溪橋位置(斷面 7-1)之模擬與實測水位歷線比較，該事件為 2005 年之泰利颱風，截取 9 月 1 日 1:00~9 月 4 日 9:00 洪水上升與下降過程之模擬結果進行繪圖，與台 1 線大甲溪橋水位站實際觀測值進行比較。由圖 5.2 可看出模擬與實測趨勢相近，洪峰到達前水位上升的變化與洪峰到達的時間完全為模式所掌握，9 月 2 日 17:00 後洪水退水的過程模式也能有合理的描述，僅 9 月 1 日 21:00~9 月 2 日 17:00 洪峰到達後開始退水之水位變化有較大誤差。大甲溪橋水位紀錄顯示水位有兩個高峯值(9 月 1 日 17:00 與 9 月 2 日 2:00)，且後者之水位高於前者，然上游石岡壩於泰利颱風放流量紀錄顯示放流量為單一洪峰之流量歷線，最大放流量發生於 9 月 1 日 12:00 (1548cms)、次大最大放流量發生於 2005 年 9 月 1 日 21:00 (1250cms)，流量紀錄與大甲溪橋水位紀錄存在差異，由於石岡壩下游並無支流匯入，大甲溪橋水位站 9 月 2 日 2:00 水位高於洪峰水位之現象並不合理，推測石岡壩放流量紀錄與大甲溪橋水位紀錄差異來源可能為洪水夾帶雜物於水位記觀測處堆積所造成。圖 5.3 為模式每小時計算值與水位實際觀測值(每小時記錄一次)之整體比較，可以發現其結果集中於 45 線左右，顯示模式計算結果極具代表性，可反應實際水位變化。

為能客觀地量化評估模式之合適性，本計畫分別以效率係數、峰值誤差及峰值到達時刻誤差等三項標準予以校驗模式計算結果。各項校驗標準如下：

#### A. 效率係數 $CE$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [H_{obs}(i) - H_{cal}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [H_{obs}(i) - \overline{H_{obs}}]^2} \dots\dots\dots(5-1)$$

式中， $i$  為時間， $H_{cal}$  為模式計算之水位， $H_{obs}$  為觀測之水位， $\overline{H_{obs}}$  為觀測水位之平均值。CE 值愈趨近於 1，表示模擬結果與實際資料愈

密合，精確度愈高。

### B. 洪峰水位誤差 $EH_p$

$$EH_p(\%) = \frac{H_{p,cal} - H_{p,obs}}{H_{p,obs}} \times 100\% \dots\dots\dots(5-2)$$

式中， $H_{p,cal}$  為模式計算之洪峰水位， $H_{p,obs}$  為觀測之洪峰水位。當  $EH_p$  為正值時，表示推估之洪峰值大於觀測值；若  $EH_p$  為負值，則表示推估之洪峰值小於觀測值；愈趨近於 0，表示模擬洪峰水位之精確度愈高。

### C. 洪峰到達時刻誤差 $ET_p$

式中， $T_{p,cal}$  為模式計算之洪峰到達時刻； $T_{p,obs}$  為觀測之洪峰到達時刻。 $ET_p$  值愈小，表示洪峰到達時刻估算愈準確。利用前述三項標準，校驗泰利颱風期間石岡壩放流後河道之洪水過程，經由台 1 線大甲溪橋觀測水位與模擬水位之比較可知，模式計算之效率係數為 0.93，洪峰水位誤差為 0.12%，峰時誤差時刻為 0 小時。由前述結果可知，本計畫採用之動床水理模式模擬石岡壩放流後下游河道之洪水歷程，僅模擬之洪峰水位值稍略高於觀測之峰值，洪峰到達時刻與實際狀況十分吻合；整體而言，僅細微之水位變化模式無法呈現外，估算之誤差影響仍在可接受範圍，模式計算之結果令人滿意。

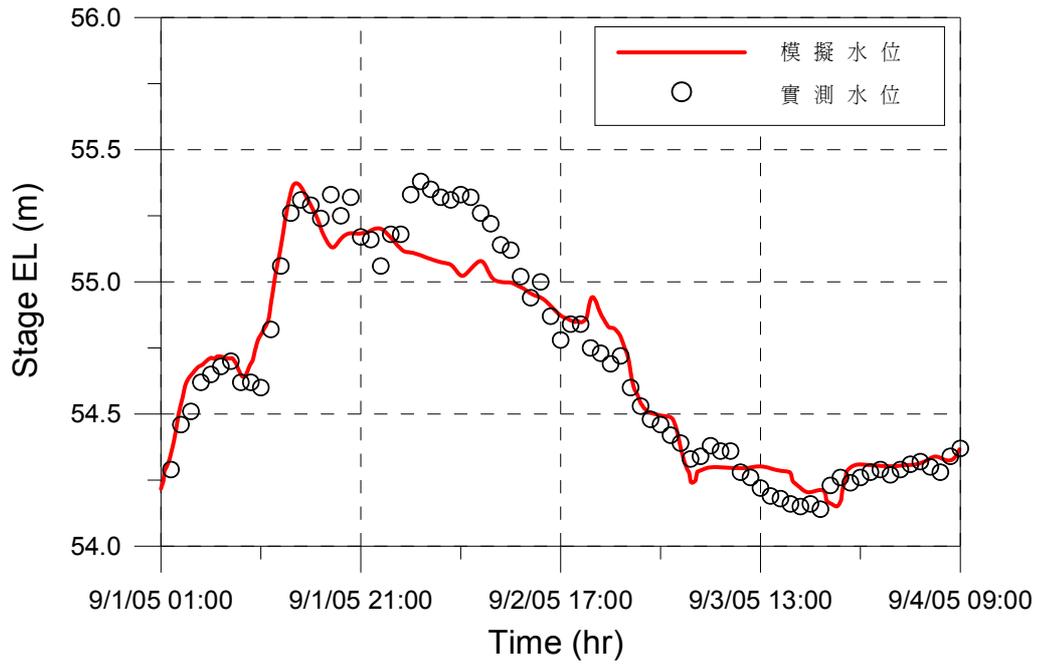


圖 5.2 台 1 線大甲溪橋於泰利颱風期間之模擬與實測水位歷線比較

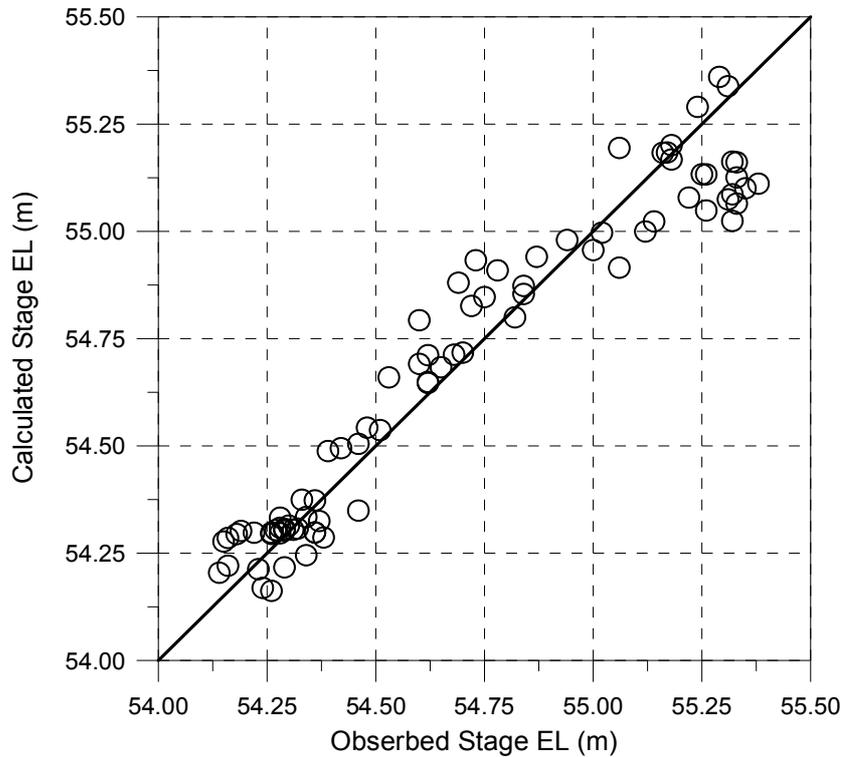


圖 5.3 泰利颱風期間台 1 線大甲溪橋模擬與實測水位每小時比較

### 5.1.3 水理模組敏感度分析

由於大甲溪下游出海口潮位不易獲得，為瞭解下游潮位邊界條件對整體計算結果的影響，乃進行水理模組下游邊界條件敏感度分析。在模式敏感度分析中，主要進行不同之下游邊界潮位進行比較，分析過程是建構在檢定案例中之相同模擬條件下，僅改變該分析參數值。

採用與水理模組測試與檢定相同之底床大斷面與河道糙度值，模擬颱風設定為泰利颱風，僅改變下游之潮位，分別採用大甲溪下游出海口平均潮位 1.5 公尺及 1.0 公尺進行分析，模擬台 1 線大甲溪橋於泰利颱風期間水位變化與前述之自由流出邊界條件比較如圖 5.4 所示。在泰利颱風洪水過程中，可看出採用自由流出邊界條件、平均潮位 1.5 公尺與 1.0 公尺三者水位於台 1 線大甲溪橋幾乎為重合。圖 5.5 與 5-6 為國道 1 號與國道 3 號大甲溪橋，於泰利颱風洪水水位變化於不同下游邊界條件情況的比較，亦可發現不同下游邊界條件無顯著差異，因此對本計畫而言，採用自由流出邊界條件估算之誤差影響仍在可接受範圍。

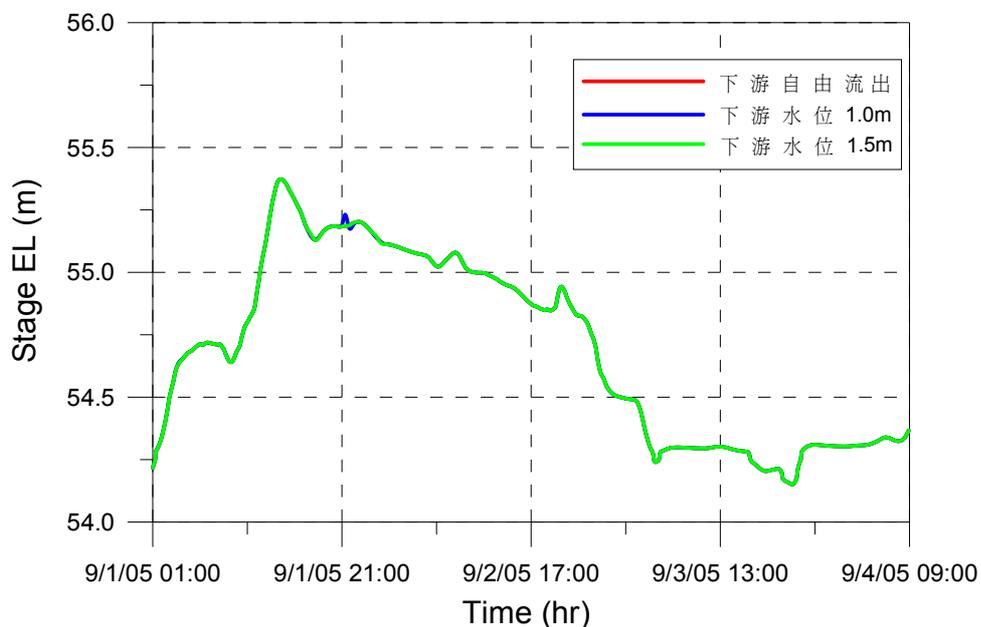


圖 5.4 台 1 線大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試

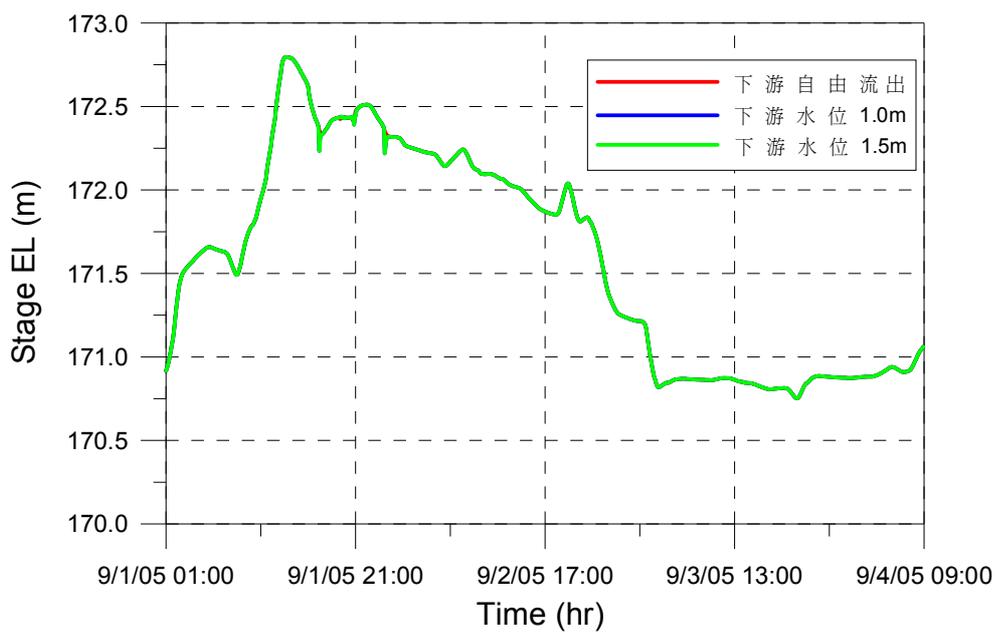


圖 5.5 國道 1 號大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試

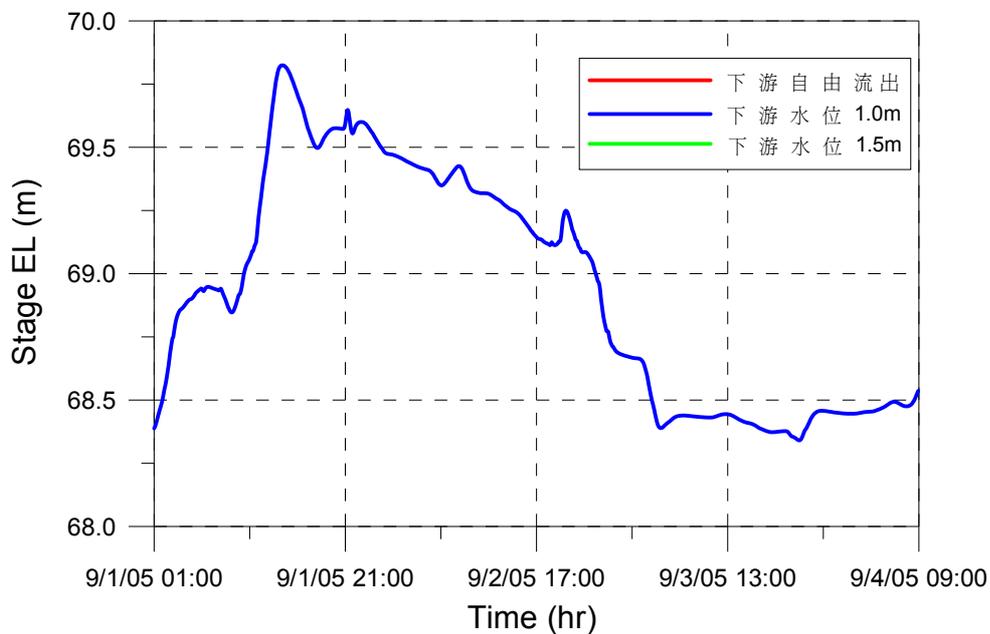


圖 5.6 國道 3 號大甲溪橋下游邊界潮位敏感度測試

#### 5.1.4 洪峰抵達時刻分析

為估算颱風時研究河段洪水波之運動特性，本節以泰利颱風洪水為例，利用數值模式計算石岡壩下游各重要橋梁之洪水歷線，其中包括石岡壩以下橋梁由上游至下游依序為埤豐橋、舊山線鐵路橋、新山線鐵路橋、后豐橋、國道 1 號大甲溪橋、高速鐵路橋、國道 3 號大甲溪橋、海線鐵路橋、台 1 線大甲溪橋及台 61 線大甲溪橋等 10 座橋梁，據以分析各橋梁發生洪峰之時刻，以石岡壩放流歷線之最大放流量發生時刻為零點，計算各橋梁發生洪峰時刻與零點之差異，作為洪峰發生之時間差，提供石岡下游橋梁管理單位進行各項管理措施之反映時間參考。

由石岡壩於泰利颱風放流歷線可知(圖 5.1)，最大放流量發生於 9 月 1 日 12:00，模式計算之石岡壩下游各橋梁洪峰發生時刻詳列於表 5-5，估計之洪峰石岡壩由運動至下游橋梁所需時間分別為：

1. 埤豐橋約需要 10 分鐘。
2. 舊山線鐵路橋約需要 20 分鐘。
3. 新山線鐵路橋約需要 25 分鐘。
4. 后豐橋約需要 30 分鐘。
5. 國道 1 號大甲溪橋約需要 40 分鐘。
6. 高速鐵路橋約需要 55 分鐘。
7. 國道 3 號大甲溪橋約需要 85 分鐘。
8. 海線鐵路橋約需要 90 分鐘。
9. 台 1 線大甲溪橋約需要 90 分鐘。
10. 台 61 線大甲溪橋約需要 105 分鐘。

橋梁管理單位需 1 小時之反映時間完成進行各項管理措施估算，水理模式估算結果顯示，於石岡壩因颱風進行放流時，國道 3 號大甲

溪橋、海線鐵路橋、台 1 線大甲溪橋及台 61 線大甲溪橋等 4 座橋梁，石岡壩最大放流量發生時間與下游橋梁相應之洪峰發生時間與相差有 1 小時以上，建議管理單位可利用石岡壩即時放流量為參考，進行各項管理措施佈置。另外，石岡壩最大放流量與下游橋梁相應之洪峰兩者之時間差約為 1 小時(相差約 55 分鐘)，亦可考慮以石岡壩即時放流量，進行橋梁管理；然埤豐橋、舊山線鐵路橋、新山線鐵路橋、后豐橋、國道 1 號大甲溪橋等 5 座橋梁，與石岡壩距離有限，颱風期間放流之洪水波迅速抵達橋址處，石岡壩最大放流量與下游橋梁相應之洪峰兩者之時間差甚小，模式估計之洪水峰移動至上述 5 座橋梁之時間差皆小於 1 小時，建議勿參考石岡壩即時放流量，進行各項管理措施佈置。

**表 5-5 泰利颱風期間模式計算石岡壩與下游各橋梁洪峰發生時間**

橋梁	泰利颱風尖峰流量發生時刻		預估洪峰由石岡壩至橋址時間(分鐘)
	日期	時間(小時)	
石岡壩		12.000027	—
埤豐橋	20050901	12.166693	10
舊山線鐵路橋	20050901	12.333359	20
新山線鐵路橋	20050901	12.416692	25
后豐橋	20050901	12.500025	30
國道 1 號大甲溪橋	20050901	12.666691	40
高速鐵路橋	20050901	12.916669	55
國道 3 號大甲溪橋	20050901	13.416688	85
海線鐵路橋	20050901	13.500021	90
台 1 線大甲溪橋	20050901	13.500021	90
台 61 線大甲溪橋	20050901	13.750002	105

註：日期格式為 yyyymmdd，其中 yyyy 為西元年、mm 為月份及 dd 為日期。

## 5.2 一般沖刷預測

橋墩沖刷為一般沖刷、局部沖刷與束縮沖刷等三種沖刷現象之總和，本節將針對模式之動床模組進行測試與檢定，進行一般沖刷推估準確性檢核工作，為了落實模式之應用，針對模式之預測過程中，採用之參數、條件等進行說明，並針對預測結果與實測資料進行比對。

### 5.2.1 大甲溪颱風一般沖刷歷史資料

2008 年國立中興大學執行經濟部水利署水利規劃試驗所委託之「大甲溪河段輸砂關係試驗研究(1/3)」，曾經在現場以沖刷磚塊觀測之方式，針對颱風過程大甲溪河段之一般沖刷進行現地試驗，其試驗位址位於台 1 線大甲溪橋，於颱風前於上下游斷面之主深槽各埋設約 5 公尺之沖刷磚柱，上游沖刷磚設置位址距離台 1 線大甲溪橋 155 公尺、下游沖刷磚設置位址距離台 1 線大甲溪橋 245 公尺，沖刷磚設置位址與台 1 線大甲溪橋如圖 5.7 所示，俟颱風退水後進行開挖，藉以得知河床最大一般沖刷深度之資訊。

經辛樂克颱風(2008 年 9 月 14 日)過後，中興大學之試驗結果顯示，於 2008 年 10 月 28 日開挖下游沖刷磚設置位址，原垂直埋設沖刷磚 90 塊(深度 5.4 公尺，單一磚塊高度約 0.06 公尺)，開挖後發現編號 15 號以下之沖刷磚，推估台 1 線大甲溪橋經辛樂克颱風後，橋址下游河道之最大一般沖刷深度達 4.5 公尺(75 塊沖刷磚)；另外，上游沖刷磚設置位址，因現場河道相關工程因素，於颱風後形成水潭，待枯水季於 2009 年 3 月 23 日開挖後，沖刷磚之深度顯示，原垂直埋設沖刷磚 83 塊，開挖後發現最上層編號 45 號之沖刷磚，上游河道之最大一般沖刷深度達 2.3 公尺，其沖刷深度不若下游河道主深槽。

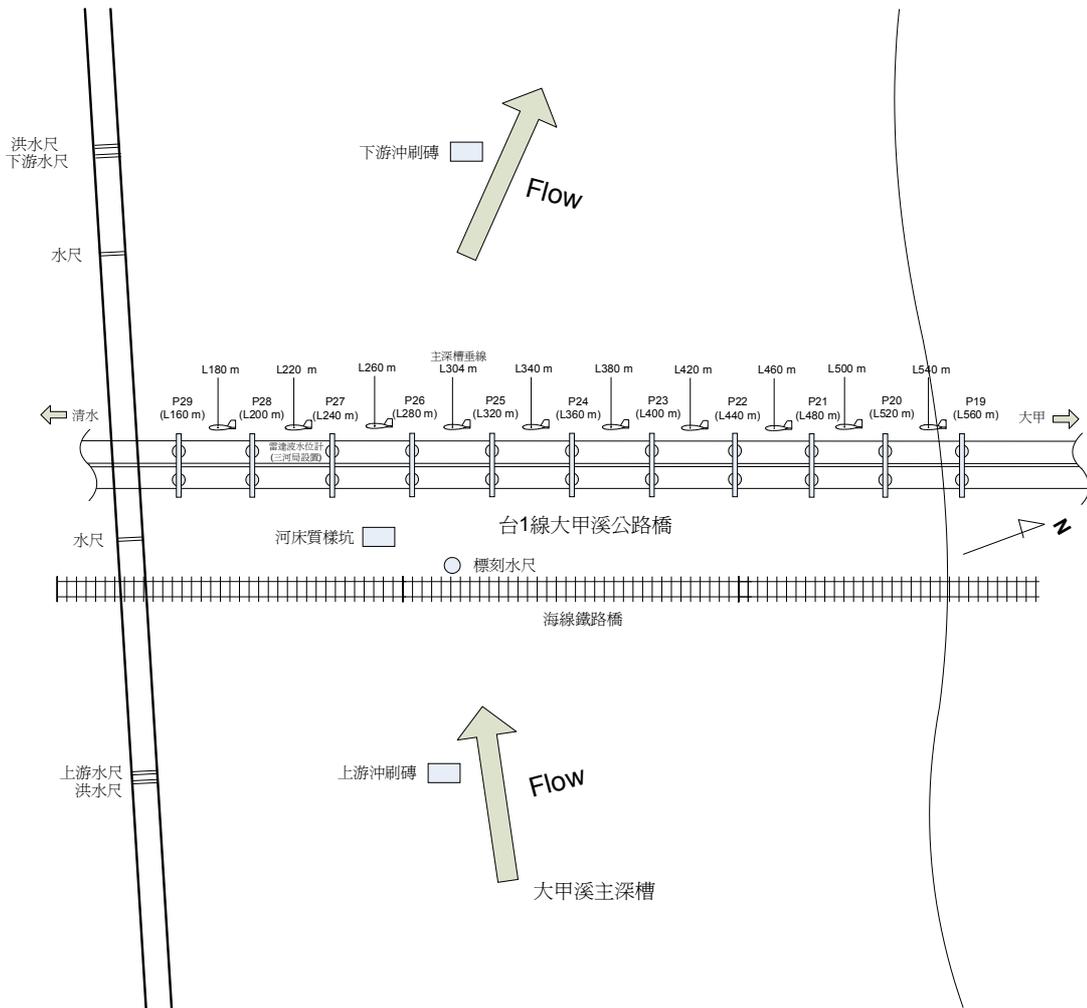


圖 5.7 台 1 線大甲溪公路橋颶洪一般沖刷現地試驗佈置(取自「大甲溪河段輸砂關係試驗研究(1/3)」)

### 5.2.2 單場颶洪事件之動床模組測試

為順利與前述之現地試驗資料進行比對，本計畫乃針對大甲溪石岡壩下游河段，進行 2008 年辛樂克颶風颶洪過程之底床沖淤預測模擬。動床模組計算之範圍與前節水理模組計算範圍相同，分析範圍為石岡壩至下游河口，全長約 23.24 公里，計畫區於 2005 年 12 月及 2008 年 2 月施測之河道大斷面，其斷面樁位置無明顯移動，故斷面間距離之設定與水理模組測試與檢定過程相似。針對辛樂克颶風之洪水導致河床之演變模擬過程，相關模擬條件與檢定驗證成果說明如下。

## 1.底床大斷面

測試與檢定之底床採用 2008 年年水利署第三河川局提供之實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)，各斷面間之距離如表 5-2 所示。

## 2.模擬颱風

本計畫動床模組測試所採用之流量，以石岡壩運用日報表之紀錄(每小時記錄一次)為基準，計算使用之流量為石岡壩放流進入下游河道之流量，乃排洪道排洪量與排砂道排洪量之總和。2008 年辛樂克颱風期間，颱風過程完整流量上升與下降歷線(2008 年 9 月 10 日至 2008 年 9 月 19 日)，共 240 筆資料，總延時為 10 天，石岡壩放流量整理結果詳表 5-6。

## 3.邊界條件

上邊界條件方面，上游採用石岡壩於辛樂克颱風實測放流量，辛樂克颱風期間石岡壩放流歷線過程如圖 5.8 所示，最大放流量發生於 2008 年 9 月 14 日 18:00，當時放流量約為 4,225cms；下游邊界條件方面，由前節下游潮位高程對水理計算之敏感度分析結果發現，下游邊界條件變化並無導致對水理之預測結果有顯著差異，再者大甲溪出海口無設置潮位站，無法適當之邊界條件資料可取得，因此動床模組計算過程，下游邊界採用自由流出邊界條件估算。

## 4.河道糙度值

本階段模式計算過程採用之河床糙度，依據前節水理模組測試與檢定之成果，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧  $n$  採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧  $n$  採用 0.035，進行動床模組測試。

## 5. 動床模組參數

經由本計畫採用之數值模式有不同之輸砂公式可供利用，在大甲溪流域以 Wu et al. (2000)之輸砂公式有較合理之預測結果，其中懸浮載調適係數  $\alpha$  採用 1.0，推移載調適長度採用 1,000 公尺，混合層厚度 (mixing layer) 設定為 0.25 公尺，使用總載輸砂模組，即河床質載與沖洗載皆考慮之，河床質孔隙率為 0.4。

## 6. 計算時間間距

在模擬颱風洪水動床過程中，由於增加動床模組，模式之測試過程顯示，動床模組之計算時距選用需要小於僅計算水理條件(定床)之情況，才能確保計算過程相對穩定，並獲得較佳之計算成效。在模擬辛樂克颱風底床變動過程中，計算時距設定為 2 分鐘，可獲得合理之計算結果，整個模式計算過程需處理器計算時間(CPU Time)約 300 秒，完成整個辛樂克颱風 10 天洪水與底床變動過程之演算。

表 5-6 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄

日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量
9月10日	00.00	15.33	9月11日	00.00	16.96	9月12日	00.00	72.87	9月13日	00.00	160.86
9月10日	01.00	15.30	9月11日	01.00	16.96	9月12日	01.00	72.56	9月13日	01.00	157.52
9月10日	02.00	15.27	9月11日	02.00	16.96	9月12日	02.00	72.71	9月13日	02.00	154.10
9月10日	03.00	15.24	9月11日	03.00	16.96	9月12日	03.00	86.43	9月13日	03.00	154.10
9月10日	04.00	13.04	9月11日	04.00	16.96	9月12日	04.00	99.21	9月13日	04.00	155.25
9月10日	05.00	13.02	9月11日	05.00	16.96	9月12日	05.00	110.21	9月13日	05.00	155.82
9月10日	06.00	12.97	9月11日	06.00	16.96	9月12日	06.00	119.09	9月13日	06.00	156.39
9月10日	07.00	11.48	9月11日	07.00	16.96	9月12日	07.00	115.47	9月13日	07.00	156.95
9月10日	08.00	11.44	9月11日	08.00	16.96	9月12日	08.00	114.37	9月13日	08.00	181.89
9月10日	09.00	11.39	9月11日	09.00	16.96	9月12日	09.00	113.81	9月13日	09.00	187.23
9月10日	10.00	11.32	9月11日	10.00	16.96	9月12日	10.00	113.53	9月13日	10.00	177.09
9月10日	11.00	11.28	9月11日	11.00	16.96	9月12日	11.00	113.53	9月13日	11.00	176.40
9月10日	12.00	11.23	9月11日	12.00	16.96	9月12日	12.00	122.00	9月13日	12.00	174.99
9月10日	13.00	11.21	9月11日	13.00	16.96	9月12日	13.00	134.97	9月13日	13.00	172.87
9月10日	14.00	11.18	9月11日	14.00	17.02	9月12日	14.00	132.74	9月13日	14.00	176.40
9月10日	15.00	11.23	9月11日	15.00	17.06	9月12日	15.00	130.80	9月13日	15.00	157.19
9月10日	16.00	11.30	9月11日	16.00	22.99	9月12日	16.00	129.82	9月13日	16.00	82.43
9月10日	17.00	11.41	9月11日	17.00	22.90	9月12日	17.00	130.15	9月13日	17.00	229.70
9月10日	18.00	11.53	9月11日	18.00	22.81	9月12日	18.00	155.59	9月13日	18.00	334.42
9月10日	19.00	16.79	9月11日	19.00	22.76	9月12日	19.00	156.35	9月13日	19.00	307.01
9月10日	20.00	16.82	9月11日	20.00	22.67	9月12日	20.00	194.75	9月13日	20.00	310.69
9月10日	21.00	16.89	9月11日	21.00	37.47	9月12日	21.00	183.03	9月13日	21.00	317.90
9月10日	22.00	16.92	9月11日	22.00	52.73	9月12日	22.00	173.08	9月13日	22.00	324.96
9月10日	23.00	16.92	9月11日	23.00	73.80	9月12日	23.00	165.75	9月13日	23.00	758.79

表 5-6(續) 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄

日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量	日期	時間	流量
9月14日	00.00	709.83	9月15日	00.00	3404.17	9月16日	00.00	1690.98	9月17日	00.00	518.67
9月14日	01.00	735.16	9月15日	01.00	3519.45	9月16日	01.00	1579.43	9月17日	01.00	529.51
9月14日	02.00	1280.25	9月15日	02.00	3475.42	9月16日	02.00	1502.89	9月17日	02.00	551.60
9月14日	03.00	1160.85	9月15日	03.00	3169.98	9月16日	03.00	1438.31	9月17日	03.00	562.52
9月14日	04.00	1207.38	9月15日	04.00	3300.97	9月16日	04.00	1353.71	9月17日	04.00	472.17
9月14日	05.00	1160.85	9月15日	05.00	3899.56	9月16日	05.00	1312.07	9月17日	05.00	374.67
9月14日	06.00	1276.11	9月15日	06.00	3854.87	9月16日	06.00	1260.64	9月17日	06.00	336.23
9月14日	07.00	1775.02	9月15日	07.00	3359.81	9月16日	07.00	1189.81	9月17日	07.00	350.22
9月14日	08.00	2099.79	9月15日	08.00	2802.43	9月16日	08.00	1081.36	9月17日	08.00	365.23
9月14日	09.00	1674.85	9月15日	09.00	2257.30	9月16日	09.00	1004.73	9月17日	09.00	368.33
9月14日	10.00	1954.45	9月15日	10.00	2334.33	9月16日	10.00	821.79	9月17日	10.00	336.23
9月14日	11.00	2222.56	9月15日	11.00	2491.25	9月16日	11.00	1131.69	9月17日	11.00	353.15
9月14日	12.00	2409.54	9月15日	12.00	2885.78	9月16日	12.00	997.40	9月17日	12.00	415.39
9月14日	13.00	2485.82	9月15日	13.00	2706.30	9月16日	13.00	1092.54	9月17日	13.00	368.33
9月14日	14.00	2511.07	9月15日	14.00	2665.48	9月16日	14.00	755.25	9月17日	14.00	323.37
9月14日	15.00	2174.60	9月15日	15.00	2802.43	9月16日	15.00	1077.99	9月17日	15.00	309.81
9月14日	16.00	2244.55	9月15日	16.00	2745.54	9月16日	16.00	988.55	9月17日	16.00	416.73
9月14日	17.00	2838.81	9月15日	17.00	2454.06	9月16日	17.00	993.61	9月17日	17.00	392.37
9月14日	18.00	4224.94	9月15日	18.00	2262.00	9月16日	18.00	973.46	9月17日	18.00	413.99
9月14日	19.00	3959.41	9月15日	19.00	2100.08	9月16日	19.00	1031.79	9月17日	19.00	397.57
9月14日	20.00	3840.01	9月15日	20.00	1954.45	9月16日	20.00	1036.66	9月17日	20.00	397.14
9月14日	21.00	4019.57	9月15日	21.00	1766.18	9月16日	21.00	993.61	9月17日	21.00	406.83
9月14日	22.00	3389.36	9月15日	22.00	1562.75	9月16日	22.00	803.82	9月17日	22.00	394.75
9月14日	23.00	3389.36	9月15日	23.00	1250.43	9月16日	23.00	675.51	9月17日	23.00	390.01

表 5-6(續) 石岡壩於辛樂克颱風期間放流量紀錄

日期	時間	流量	日期	時間	流量
9月18日	00.00	410.92	9月19日	00.00	439.30
9月18日	01.00	419.06	9月19日	01.00	455.73
9月18日	02.00	426.13	9月19日	02.00	475.89
9月18日	03.00	436.61	9月19日	03.00	482.71
9月18日	04.00	417.08	9月19日	04.00	481.01
9月18日	05.00	426.13	9月19日	05.00	474.17
9月18日	06.00	420.11	9月19日	06.00	468.10
9月18日	07.00	415.73	9月19日	07.00	462.84
9月18日	08.00	408.79	9月19日	08.00	460.18
9月18日	09.00	426.42	9月19日	09.00	458.41
9月18日	10.00	426.42	9月19日	10.00	456.62
9月18日	11.00	421.99	9月19日	11.00	453.03
9月18日	12.00	413.18	9月19日	12.00	449.41
9月18日	13.00	400.06	9月19日	13.00	445.76
9月18日	14.00	400.06	9月19日	14.00	441.15
9月18日	15.00	395.72	9月19日	15.00	438.37
9月18日	16.00	387.07	9月19日	16.00	440.23
9月18日	17.00	246.79	9月19日	17.00	440.23
9月18日	18.00	383.55	9月19日	18.00	433.68
9月18日	19.00	540.18	9月19日	19.00	430.85
9月18日	20.00	518.59	9月19日	20.00	435.56
9月18日	21.00	501.78	9月19日	21.00	567.30
9月18日	22.00	491.92	9月19日	22.00	559.61
9月18日	23.00	472.44	9月19日	23.00	480.75

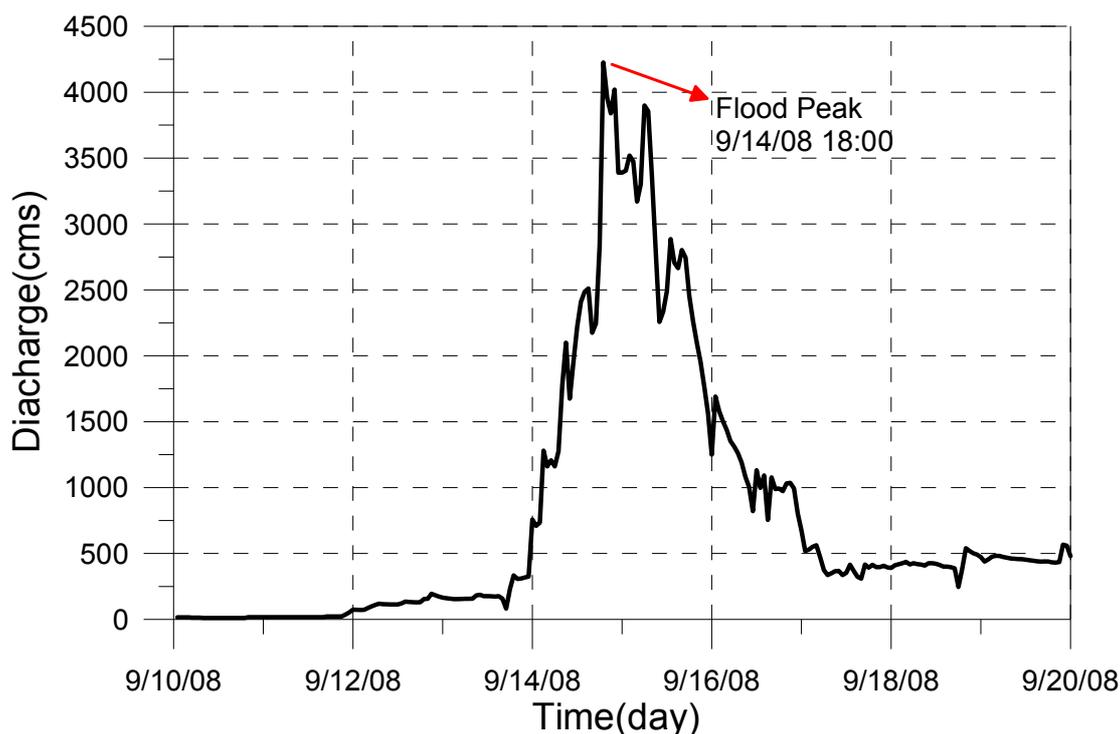


圖 5.8 辛樂克颱風期間石岡壩放流歷線過程

### 5.2.3 單場颱風洪水事件之動床模組測試

圖 5.9 為辛樂克颱風期間台 1 線大甲溪橋附近之模擬與實測一般沖刷深度比較，實測一般沖刷深度採「大甲溪河段輸砂關係試驗研究 (1/3)」台 1 線大甲溪橋下游 245 公尺觀測值，模擬一般沖刷深度為本計畫模式針對大甲溪大斷面 07-1D 之計算結果，實測一般沖刷深度為 2.3 公尺、模擬一般沖刷深度為 2.5 公尺，由圖可看出模擬與實測沖刷深度(圖中紅線標示之深度)相近，推估誤差來源為模式本身或模擬與實測位置差異所造成。整體而言，模式能夠合理預測河道之一般沖刷深度。

由沖刷深度發展之歷程來看，在颱風洪水事件初期沖刷深度累積緩慢，於 2008 年 9 月 10 日至 9 月 13 日期間，累積沖刷深度僅約 1 公尺，河道一般沖刷現象隨著颱風洪水歷線有著顯著的變化，圖中明顯

看到洪峰抵達時刻並非伴隨著最大沖刷速率發生。辛樂克颱風期間洪峰發生於 2008 年 9 月 14 日 18:00，然圖 5.9 可以看到，在洪峰發生前沖刷深度即迅速累積，2008 年 9 月 13 日 10:00 至 2008 年 9 月 14 日 19:00 期間，沖刷深度之曲線斜率瞬間遞增，此現象可以歸咎於，流量上昇時期之流速增加現象，水流藉由沖刷減低水流能量，並增加通水面積通過洪水，導致之河道沖刷增加；待洪峰通過後，於 9 月 15 日至 9 月 16 日期間，河道沖刷現象逐漸趨於緩和；另外，9 月 16 日至 9 月 18 日期間，在颱風洪水歷線退水階段，沖刷深度之曲線斜率有局部躍升之現象，沖刷深度於 9 月 16 日下午與 9 月 18 日晚間迅速增加，由流量歷線分析發現，可能為上游石岡壩排洪操作導致之流量短時間增加所引起之效應。

動床模組針對辛樂克颱風期間，預測石岡壩下游各橋梁附近河道之一般沖刷深度詳列於表 5-7。石岡壩下游河道之一般沖刷大致以國道 1 號大甲溪橋為分界，石岡壩到國道 1 號大甲溪橋間之埤豐橋、舊山線鐵路橋、新山線鐵路橋、后豐橋等橋梁，其附近河道之沖刷情況明顯，最多可達 4.0 公尺以上；高速鐵路橋與國道 3 號大甲溪橋及台 1 線大甲溪橋附近沖刷情況次之，橋梁附近河道之沖刷情約在 3.4 公尺附近；海線鐵路橋、台 1 線大甲溪橋及台 61 線大甲溪橋等附近河道，沖刷較前述橋址附近河道緩和趨勢，辛樂克颱風造成之河道沖刷情依然達 2.0 公尺左右。

總結來說，本計畫採用之水理與動床模組能夠模擬大甲溪颱風洪情況下之水理與輸砂行為，可合理預測水位與底床之變化。由上述台 1 線大甲溪橋之案例分析可知，河道一般沖刷現象複雜，在洪峰到達前，沖刷深度已經迅速累積，傳統橋梁安全警示僅採用水位為指標，僅能反應洪峰抵達效應，然沖刷深度累積之時間與抵達時間並不一致，相關管理單位需審慎注意此河道一般沖刷所衍生之橋梁管理問題。

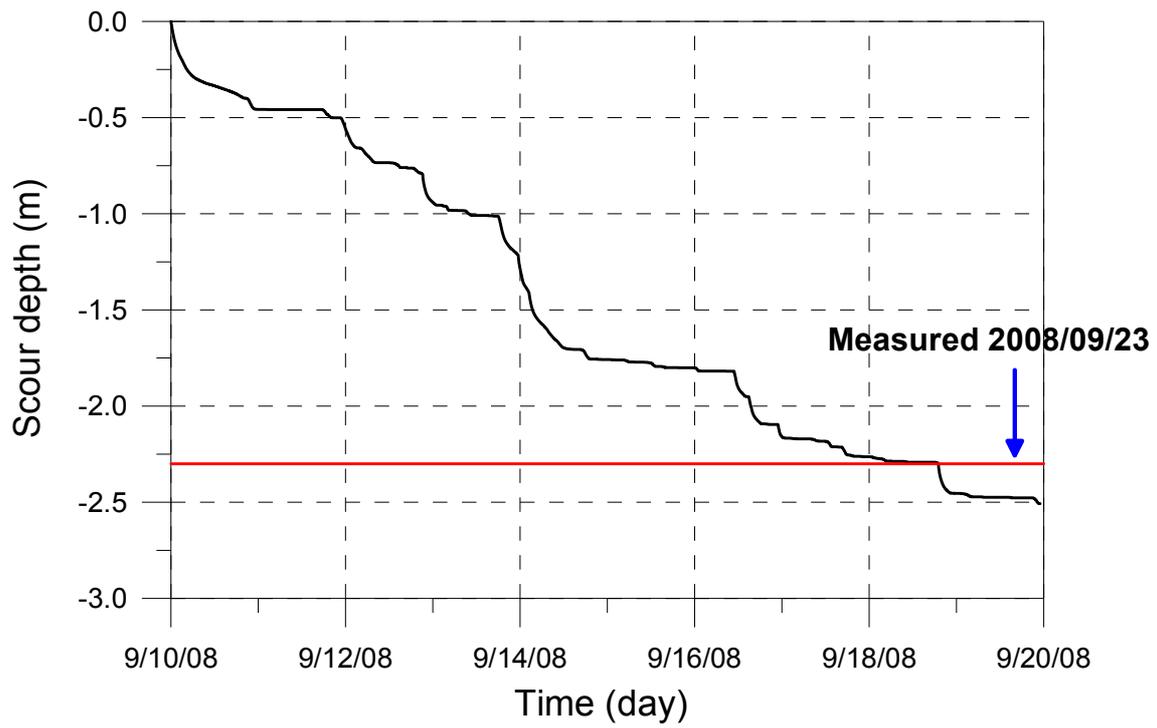


圖 5.9 辛樂克颱風期間台 1 線大甲溪橋下游河道一般沖刷深度變化

表 5-7 辛樂克颱風期間石岡壩下游各橋梁附近河道一般沖刷預測

橋梁	水利署斷面樁 編號	模式計算點位	辛樂克颱風		沖刷深度 (公尺)	備註
			原始河床高程 (公尺, 97 年實測值)	颱風後高程 (公尺, 預測值)		
埤豐橋	35	4	235.19	230.99	4.20	
舊山線鐵路橋	32-1	8	221.46	218.82	2.64	
新山線鐵路橋	30-1	13	209.21	205.96	3.25	
后豐橋	28-1	17	196.04	192.47	3.57	
國道 1 號大甲溪橋	23-1	24	168.10	167.30	0.80	
高速鐵路橋	19-1	31	134.27	130.80	3.48	
國道 3 號大甲溪橋	9-1	43	66.67	63.36	3.31	
海線鐵路橋	7-2	47	52.82	51.26	1.56	
台 1 線大甲溪橋	7-1	49	51.73	49.22	2.51	實測下游沖刷深度達 4.5 公尺 實測上游沖刷深度達 2.3 公尺
台 61 線大甲溪橋	1-1	57	10.08	7.86	2.22	

註：台 1 線大甲溪橋於辛樂克颱風之沖刷深度實測值取自水利署 2008 年「大甲溪河段輸砂關係試驗研究(1/3)」

#### 5.2.4 歷史多場颱風洪事件重現時之動床模組測試

為落實動床模組在大甲溪石岡壩下游河段之應用，進行長期颱風飆洪過程之底床沖淤預測模擬。動床模組計算之範圍與前節辛樂克颱風計算範圍相同，分析範圍為石岡壩至下游河口，全長約 23.24 公里，針對計畫區於 2005 年至 2008 年飆洪與暴雨洪水造成之底床變化進行預測，斷面間距離之設定與前節之設定相同。針對 2005 年至 2008 年期間颱風之洪水導致河床之演變模擬過程，相關模擬條件與檢定驗證成果說明如下。

##### 1. 底床大斷面

模式之起始底床採用 2005 年水利署第三河川局提供之實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)。

##### 2. 模擬飆洪

本計畫動床模組測試所採用之流量，以石岡壩運用日報表之紀錄(每小時記錄一次)為基準，計算使用之流量為石岡壩放流進入下游河道之流量，乃排洪道排洪量與排砂道排洪量之總和。選取 2005 年至 2008 年主要飆洪與暴雨洪水過程完整流量上升與下降歷線，總計算延時為 3866 小時。本計畫計算採用之 2005 年至 2008 年期間主要飆洪與暴雨洪水包括：

###### (1) 2005 年

海棠颱風、馬莎颱風、泰利颱風與龍王颱風；

###### (2) 2006 年

0425 豪雨、珍珠颱風、0528 豪雨、0713 豪雨、碧利絲颱風與凱米颱風；

###### (3) 2007 年

0607 豪雨、0812 豪雨、0917 豪雨與 1002 豪雨。

### 3.邊界條件

上邊界條件方面，上游採用石岡壩於 2005 年至 2008 年主要颱風與暴雨洪水期間實測放流量，石岡壩放流歷線過程如圖 5.10 所示；下游邊界條件方面，與前節辛樂克颱風之計算相同，採用自由流出邊界條件估算。

### 4.河道糙度值

本階段模式計算過程採用之河床糙度，依據水理模組測試與檢定之成果，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧  $n$  採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧  $n$  採用 0.035，進行動床模組測試。

### 5.動床模組參數

輸砂公式採用 Wu et al. (2000)之輸砂公式，其中懸浮載調適係數  $\alpha$  採用 1.0，推移載調適長度採用 1,000 公尺，混合層厚度(mixing layer)設定為 0.25 公尺，使用總載輸砂模組，即河床質載與沖洗載皆考慮之，河床質孔隙率為 0.4。

### 6.計算時間間距

計算時間間距採用樂克颱風底床變動計算檢定之結果，將計算時距設定為 2 分鐘。

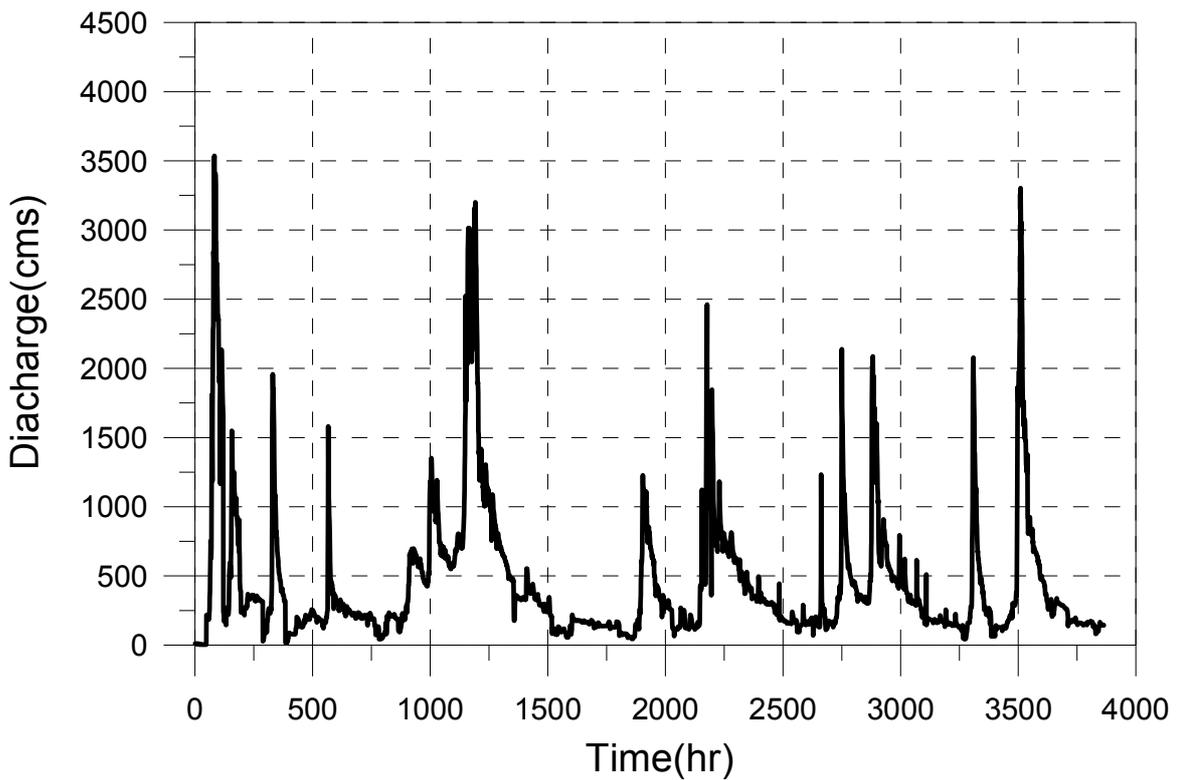


圖 5.10 2005 年至 2008 年主要颱風與暴雨洪水石岡壩放流歷線過程

### 5.2.5 長期颱風作用動床模組測試成果

圖 5.11 為實測與預測之底床高程縱剖面比較，圖中畫出 2005 年及 2008 年之實測值與 2008 年動床模組預測之預測值，底床高程縱剖面由底床最低點連線所繪製，預測底床高程係採用 Wu et al. (2000)之輸砂公式以 2005 年實測測底床高程是起始剖面計算之結果。

整體而言，動床模組可合理重現 2005~2008 年河道之沖淤過程，圖 5.11 中計算結果針對底床顯著變化區域之沖刷及淤積趨勢頗為一致，尤其在本計畫之目標區域國道 1 號橋與國道 3 號橋附近之底床高程皆可合理掌握，但全河段之細微沖淤處計畫採用之動床模組則無法呈現，如高速鐵路橋附近河段，可能受到模式求解過程之限制，無法實際反應現場應有之流況，模式預測該處出現劇烈沖刷與實測差異較大，但其他區域均有良好模擬成果。

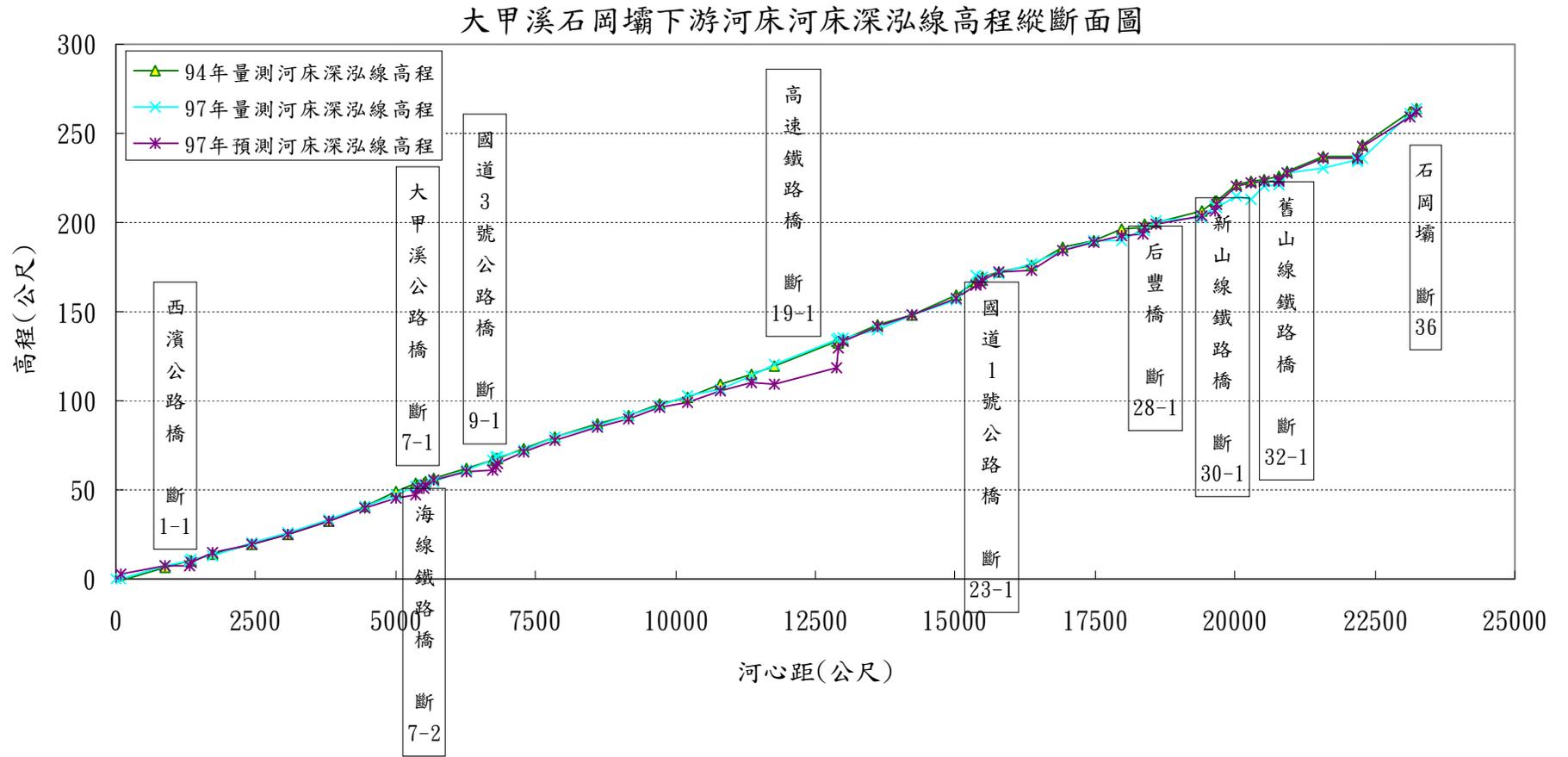


圖 5.11 實測與預測之底床高程縱剖面比較

### 5.3 莫拉克颱風流量沖刷預測

2009 年 8 月莫拉克颱風為南部地區帶來超額的雨量，也造成嚴重的災情，為了解莫拉克雨量若降在大甲溪流域，對石岡壩下游各橋梁的可能沖刷深度，在此，針對莫拉克颱風期間石岡壩的實際放流量與模擬莫拉克雨量降於大甲溪流域(第四章模擬的石岡壩放流量)，預估各橋梁的可能沖刷深度進行比較。針對莫拉克颱風實際與模擬之洪水導致河床之演變過程，相關模擬條件與計算成果說明如下：

#### 1.底床大斷面

測試與檢定之底床採用 2010 年交通部運輸研究所提供之實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)，各斷面間之距離如表 5-2 所示。

#### 2.模擬颱風洪

本研究假設莫拉克颱風降雨中心位於大甲溪流域上游，該雨量降於大甲溪流域所產生之逕流量經德基水庫與石岡壩操作之後，利用石岡壩之放流量做為動床模組測試之用，此為模擬事件之測試。同時，也根據石岡壩運用日報表之記錄，以石岡壩在莫拉克颱風發生期間實際放流量以動床模組計算沖刷量，此為實際事件之測試，做為模擬事件之比較依據。實際放流量以石岡壩運用日報表之紀錄（每小時記錄一次）為基準，計算使用之流量為石岡壩放流進入下游河道之流量，乃排洪道排洪量與排砂道排洪量之總和。2009 年莫拉克颱風期間，颱風過程完整流量上升與下降歷線(2009 年 8 月 5 日 00:00 至 2009 年 8 月 10 日 23:00)，延時 144 小時。表 5-8 與表 5-9 為模擬和實測尖峰流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果。

#### 3.邊界條件

上邊界條件方面，上游採用石岡壩於莫拉克颱風模擬和實測放流量，莫拉克颱風期間模擬和實測石岡壩放流歷線過程如圖 5.12 與圖

5.13 所示，模擬最大放流量發生於 2009 年 8 月 10 日 1:00，當時放流量約為 6,723.26cms，而實測最大放流量發生於 2009 年 8 月 9 日 17:00，當時放流量約為 3,546cms；在下游邊界條件方面，由前節下游潮位高程對水理計算之敏感度分析結果發現，下游邊界條件變化並無導致對水理之預測結果有顯著差異，再者大甲溪出海口無設置潮位站，無法適當之邊界條件資料可取得，因此動床模組計算過程，下游邊界採用自由流出邊界條件估算。

#### 4.河道糙度值

本階段模式計算過程採用之河床糙度，依據前節水理模組測試與檢定之成果，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧 n 採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧 n 採用 0.035，進行動床模組測試。

#### 5.預估局部沖刷深度

利用表 5-8 與表 5-9 為模擬和實測放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果，帶入交通部公路總局所建議之適合臺灣地區之六種局部沖刷公式，以下說明六種局部沖刷公式，藉由所篩選出之沖刷公式推估各橋梁最大局部沖刷深度如表 5-10 與表 5-11。

##### (1)Laursen(1962)

$$\frac{D_p}{y} = 5.5 \times \frac{y_{ls}}{y} \times \left[ \left( \frac{y_{ls}}{11.5 \times y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$$

$D_p$ =橋墩寬度(m)

$y$ =上游(墩前)水深(m)

$y_{ls}$ =局部沖刷深度(m)

**(2)Neill (1964)**

$$\frac{y_{ls}}{D_p} = 1.5 \left( \frac{y}{D_p} \right)^{0.3}$$

y=上游(墩前)水深(m)

D<sub>p</sub>=橋墩寬度(m)

y<sub>ls</sub>=局部沖刷深度(m)

**(3)Shen (1969)**

$$y_{ls} = 0.000223 \times \left( \frac{v \times D_p}{\nu} \right)^{0.619}$$

v=上游流速(m/s)

y<sub>ls</sub>=局部沖刷深度(m)

D<sub>p</sub>=橋墩寬度(m)

ν=水流運動黏滯係數(=10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s)

**(4)Jain (1980)**

$$\frac{y_{ls}}{D_p} = 1.86 \times \left( \frac{y}{D_p} \right)^{0.5} \times (F_r - F_{rc})^{0.25}$$

y<sub>ls</sub>=局部沖刷深度(m)

D<sub>p</sub>=橋墩寬度(m)

y=上游(墩前)水深(m)

$$F_r = \text{水流福祿數} = \frac{V_1}{\sqrt{g \times y_1}}$$

$$F_{rc} = \text{泥沙啟動臨界流速所對應之福祿數} \left( = \frac{V_{cr}}{\sqrt{g \times y}} \right)$$

$$V_{cr} = \text{泥沙啟動流速} = \sqrt{\frac{D_{50}}{0.0216}} (m/s)$$

$d_{50}$  = 河床質中質粒徑 (mm)

### (5) Froehlich(1991)

$$y_{ls} = 0.32 \times \phi \times (D_p)^{0.62} \times y^{0.47} \times Fr^{0.22} \times d_{50}^{-0.09} + D_p$$

$y_{ls}$  = 局部沖刷深度 (m)

$\Phi$  = 橋墩形狀因子修正係數 (1.3 方鼻、1.0 圓鼻、0.7 尖鼻)

$D_p$  = 橋墩寬度 (m)

$D_p'$  = 橋墩投影寬度

$y$  = 上游水深 (m)

$$F_r = \text{水流福祿數} = \frac{V_1}{\sqrt{g \times y_1}}$$

$d_{50}$  = 河床質中質粒徑 (mm)

### (6) HEC-18(1995)

$$\frac{y_{ls}}{y_l} = 2.0 K_s K_\theta K_3 K_4 \left( \frac{D_p}{y_l} \right)^{0.65} Fr^{0.43}$$

$K_s$  = 橋墩形狀因子修正係數 (1.3 方鼻、1.0 圓鼻、0.7 尖鼻)

$K_\theta$  = 水流攻角 (1.0 圓柱、 $(\frac{L}{D_p} \sin \theta + \cos \theta)^{0.65}$  非圓柱形)

$L$  = 橋墩順水流方向之長度

$$K_3 = \left\{ \begin{array}{ll} 1.1 & \text{清水冲刷} \\ 1.1 & \text{當 } 0.6 \leq H < 3 \\ 1.1 \sim 1.2 & \text{當 } 3 \leq H < 9 \\ 1.3 & \text{當 } H \geq 9 \end{array} \right\} = \text{底床型態修正因子}$$

$$K_4 = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{當 } d_{50} < 2\text{mm 或 } d_{95} < 20\text{mm} \\ 0.4(V_R)^{0.15} & \text{當 } d_{50} \geq 2\text{mm 且 } d_{95} \geq 20\text{mm} \end{array} \right\}$$

= 河床質粒徑護甲效應

$$V_R = \frac{V - V_{icd50}}{V_{cd50} - V_{icd95}} \quad (\text{m/s})$$

$$V_{icd_x} = 0.645 \times \left( \frac{d_x}{D_p} \right)^{0.053} \times V_{cd_x} \quad (\text{m/s});$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{cd_x} : \text{泥砂粒徑 } d_x \text{ 起始臨界流速} \\ V_{icd_x} : \text{泥砂粒徑 } d_x \text{ 起始冲刷的接近流速} \end{array} \right.$$

$$V_{cd_x} = K_u \times y_1^{1/6} \times d_x^{1/3}, \quad K_u \left\{ \begin{array}{l} 6.19 \text{ (m/s)} \\ 11.17 \text{ (ft/s)} \end{array} \right.$$

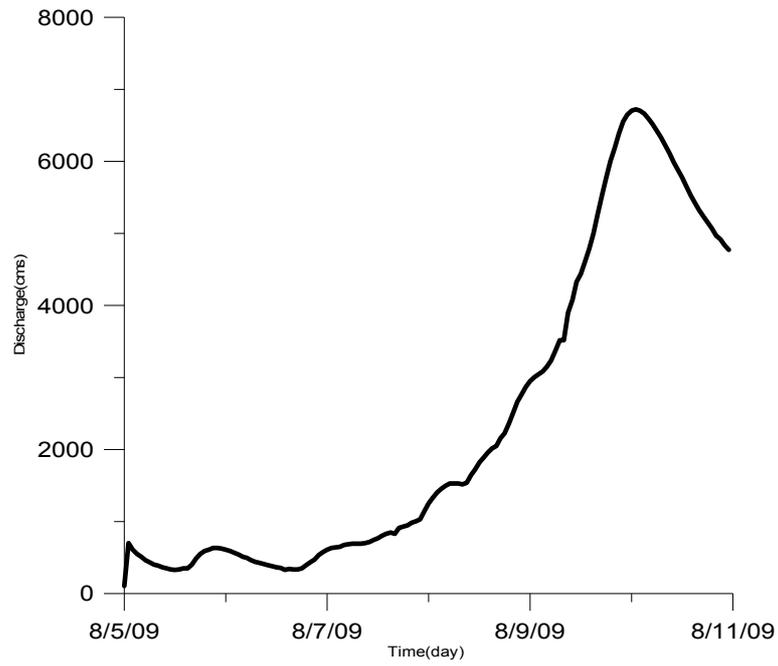


圖 5.12 莫拉克颱風期間模擬石岡壩放流歷線過程

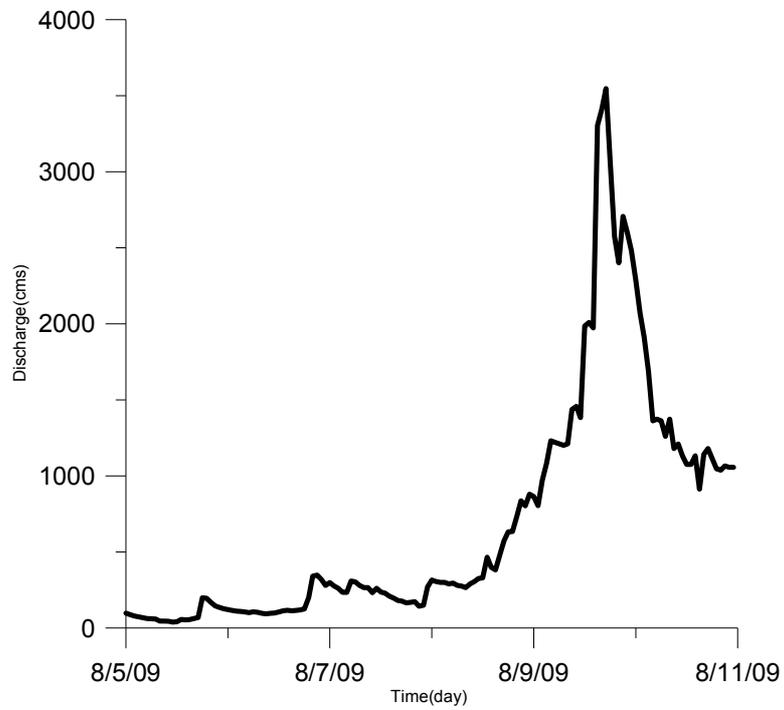


圖 5.13 莫拉克颱風期間實測石岡壩放流歷線過程

表 5-8 模擬放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果

橋梁名稱	斷面編號	流量 (cms)	通水面積(m2)	平均水深(m)	福祿數	流速(m/s)	橋寬(m)	D50(mm)	D90(mm)
台 61 線大甲溪橋	1-1	6,722.61	682.825	4.40024	1.49849	9.845	2.4	63	300
台 1 線大甲溪橋	7-1	6,722.05	813.605	3.29912	1.4523	8.262	2	100	290
海線鐵路橋	7-2	6,721.82	856.273	3.23564	1.39335	7.850	2.5	107.4	305
國道 3 號大甲溪橋	9-1	6,721.53	861.85	4.10876	1.22842	7.799	2.4	100	290
高速鐵路橋	19-1	6,720.99	1975.85	2.27369	0.720241	3.402	2.7	77.43	295.8
國道 1 號大甲溪橋	23-1	6,720.59	1128.65	2.26261	1.2639	5.955	2.3	83.75	310
后豐橋	28-1	6,719.67	990.23	1.50349	1.76696	6.786	2	49.25	225.25
新山線鐵路橋	30-1	6,719.53	1462.22	2.42181	0.942805	4.595	2.2	91.5	315
舊山線鐵路橋	32-1	6,719.52	1317.18	2.2208	1.09296	5.101	3	97.5	328
埤豐橋	35	6,719.07	2475.38	1.79372	0.647077	2.714	3.6	63	209

表 5-9 實際放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果

橋梁名稱	斷面編號	流量 (cms)	通水面積(m2)	平均水深(m)	福祿數	流速(m/s)	橋寬(m)	D50(mm)	D90(mm)
台 61 線大甲溪橋	1-1	3,541.18	437.102	3.47937	1.38669	8.101	2.4	63	300
台 1 線大甲溪橋	7-1	3,532.36	484.794	2.64003	1.43176	7.286	2	100	290
海線鐵路橋	7-2	3,528.88	521.032	3.09647	1.22887	6.773	2.5	107.4	305
國道 3 號大甲溪橋	9-1	3,526.25	576.847	2.93275	1.13967	6.113	2.4	100	290
高速鐵路橋	19-1	3,516.85	1364.19	1.7028	0.630759	2.578	2.7	77.43	295.8
國道 1 號大甲溪橋	23-1	3,511.45	795.422	1.60532	1.11243	4.415	2.3	83.75	310
后豐橋	28-1	3,500.59	601.867	1.10619	1.76559	5.816	2	49.25	225.25
新山線鐵路橋	30-1	3,497.82	957.797	1.82268	0.863643	3.652	2.2	91.5	315
舊山線鐵路橋	32-1	3,497.71	833.72	1.7393	1.01564	4.195	3	97.5	328
埤豐橋	35	3,491.43	1616.39	1.36812	0.589602	2.160	3.6	63	209

表 5-10 模擬流量下預測最大局部沖刷深度

橋梁名稱	斷面編號	預測最大局部沖刷深度					
		Laursen (1962)	Neill (1964)	Shen (1969)	Jain (1980)	Froehlich (1991)	HEC-18 (1995)
台 61 線大甲溪橋	1-1	3.56	4.32	8.17	6.38	3.95	6.12
台 1 線大甲溪橋	7-1	2.87	3.53	7.05	4.96	3.17	3.65
海線鐵路橋	7-2	3.25	4.16	7.29	5.46	3.83	3.89
國道 3 號大甲溪橋	9-1	3.44	4.23	7.08	5.67	3.78	3.87
高速鐵路橋	19-1	2.7	3.85	4.55	3.46	3.72	2.52
國道 1 號大甲溪橋	23-1	2.48	3.43	5.83	4.07	3.34	3.28
后豐橋	28-1	1.86	2.75	5.80	3.49	2.89	3.65
新山線鐵路橋	30-1	2.52	3.4	4.83	3.65	3.17	2.63
舊山線鐵路橋	32-1	2.81	4.11	6.25	4.29	4.16	3.33
埤豐橋	35	2.74	4.38	4.73	3.31	4.69	2.4

表 5-11 實測流量下預測最大局部沖刷深度

橋梁名稱	斷面編號	預測最大局部沖刷深度					
		Laursen (1962)	Neill (1964)	Shen (1969)	Jain (1980)	Froehlich (1991)	HEC-18 (1995)
台 61 線大甲溪橋	1-1	3.16	4.02	7.25	5.5	3.76	5.3
台 1 線大甲溪橋	7-1	2.33	3.26	6.06	4.28	3.03	3.17
海線鐵路橋	7-2	3.04	4.00	6.65	4.93	3.73	3.5
國道 3 號大甲溪橋	9-1	2.82	3.82	6.08	4.57	3.56	3.2
高速鐵路橋	19-1	2.33	3.53	3.83	2.55	3.57	2.00
國道 1 號大甲溪橋	23-1	1.96	3.09	4.83	3.16	3.16	2.61
后豐橋	28-1	1.53	2.51	5.26	2.95	2.76	3.2
新山線鐵路橋	30-1	1.91	3.11	4.18	2.9	3.03	2.17
舊山線鐵路橋	32-1	2.47	3.82	5.52	3.56	4.01	2.84
埤豐橋	35	2.15	4.04	4.11	2.44	4.54	1.96

在模式輸出上，以 5 分鐘為計算時間輸出間距，由於現場並無實測資料可供比對模式預測結果之正確性，僅能對求局部沖刷深度數值模式預測趨勢之合理性進行探究，茲將各斷面利用交通部公路總局所建議之適合臺灣地區之沖刷公式計算所得的局部沖刷深度值，求得平均值後並+1 個標準偏差進行計算，取其局部沖刷深度推估值結果落於平均值+1 個標準偏差為可靠數據，其結果如下圖 5.14~圖 5.23 所示。在埤豐橋(斷面 35)在實際放流量下，受九二一地震地層抬昇，造成河床坡度變陡影響，呈現沖刷使岩盤裸露，並形成斷層瀑布，故初始沖刷深度值略小，此區段河道本身為泥岩地質條件，故在模式推估時間後期，沖刷深度值有增加現象；從舊山線鐵路橋(斷面 32-1)至台 1 線大甲溪橋(斷面 7-1)，由於河床坡度較緩，從圖 1.8 大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖可看出，在 2005 年~2008 年此區段無明顯沖淤行為，局部沖刷模式所計算出沖刷深度值約落在 2m~3.5m 間；另外，從高速公路橋(斷面 23-1)至河口(斷面-1)的河槽型態屬寬廣型，斷面束縮效應較小，高流量時流速集中現象不明顯，故沖刷深度數值隨時間起伏之情形並不明顯。

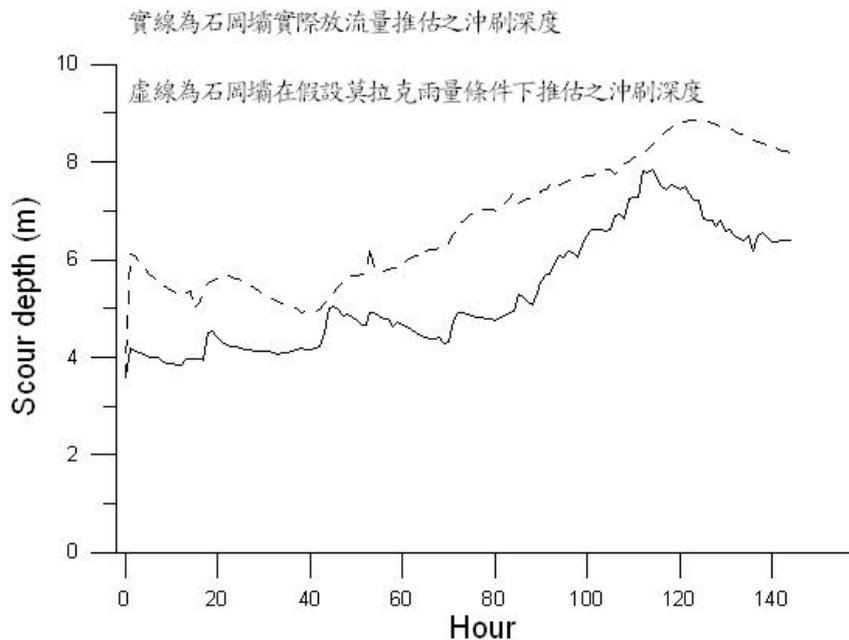


圖 5.14 埤豐橋沖刷深度變化

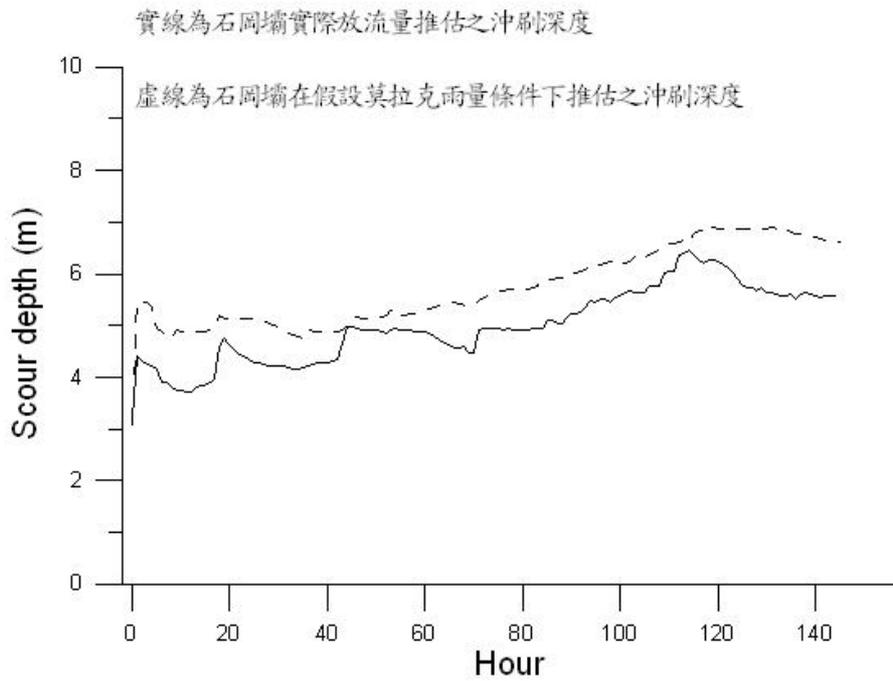


圖 5.15 舊山線鐵路橋沖刷深度變化

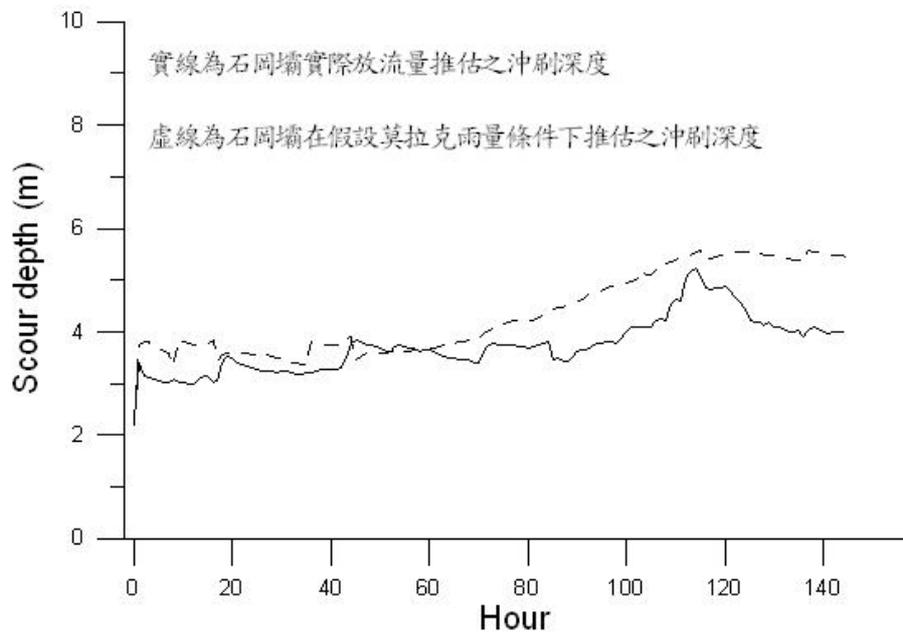


圖 5.16 新山線鐵路橋沖刷深度變化

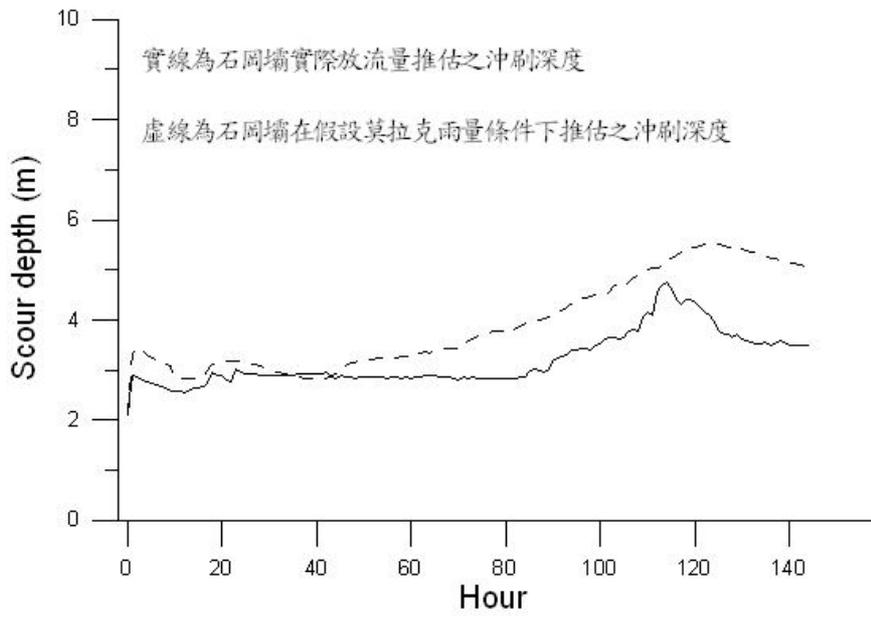


圖 5.17 后豐橋沖刷深度變化

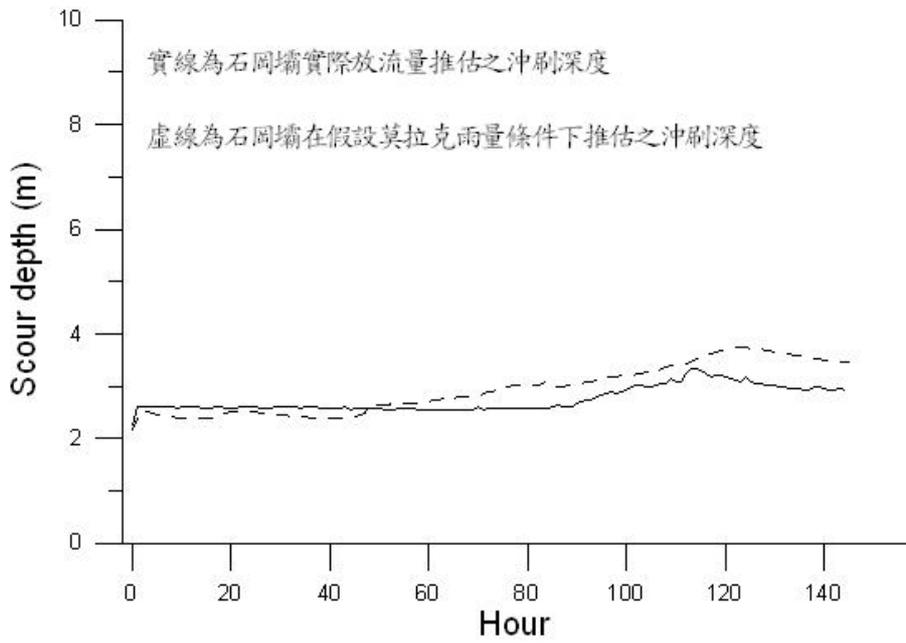


圖 5.18 國道 1 號大甲溪橋沖刷深度變化

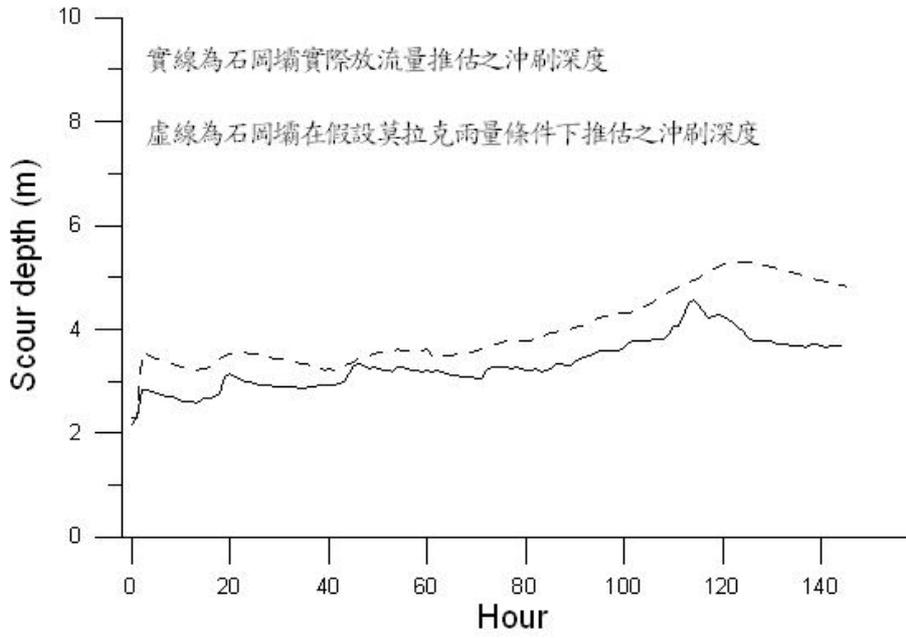


圖 5.19 高速鐵路橋沖刷深度變化

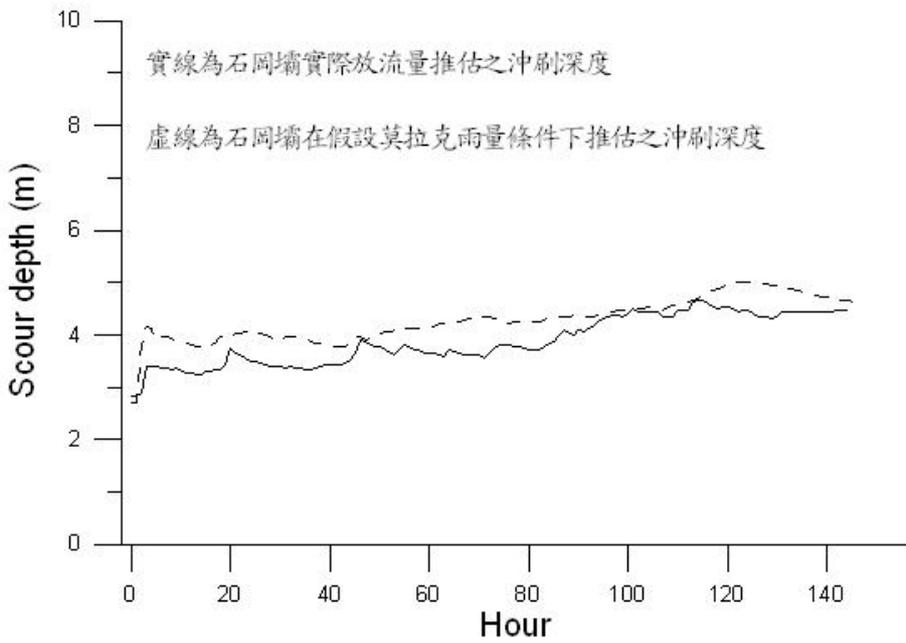


圖 5.20 國道 3 號大甲溪橋沖刷深度變化

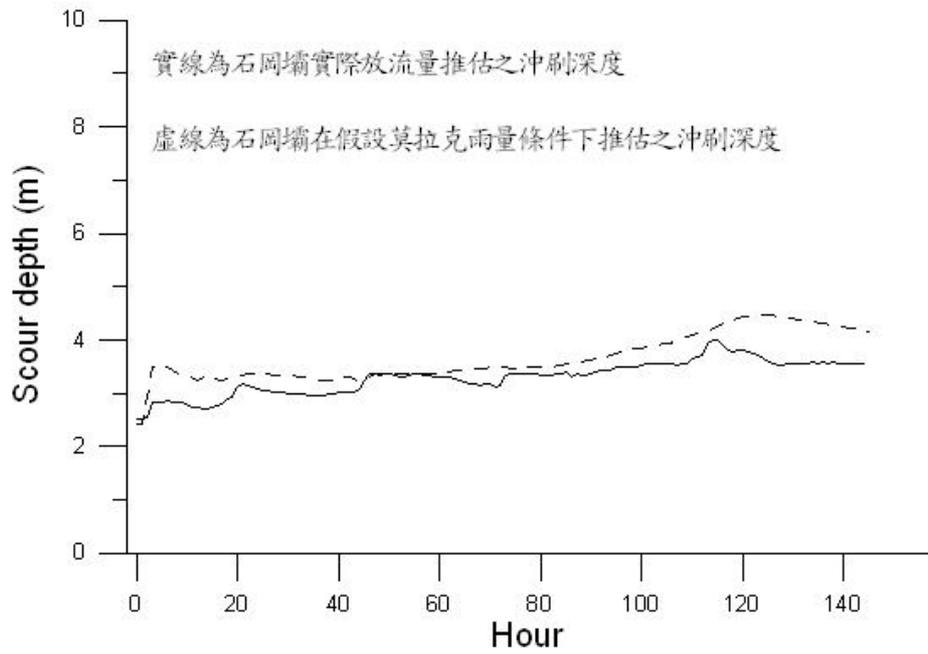


圖 5.21 海線鐵路橋沖刷深度變化

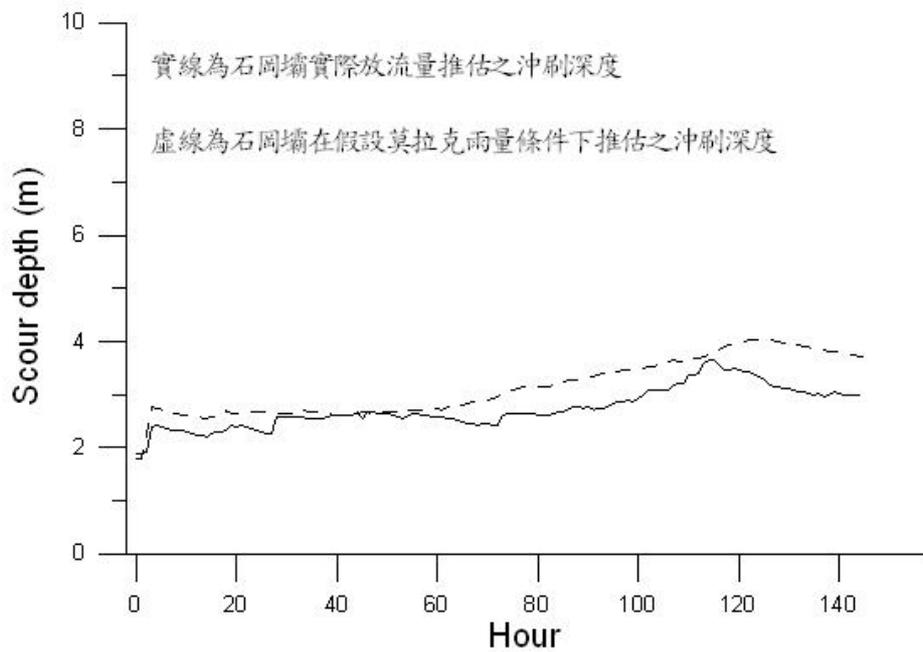


圖 5.22 台 1 線大甲溪橋沖刷深度變化

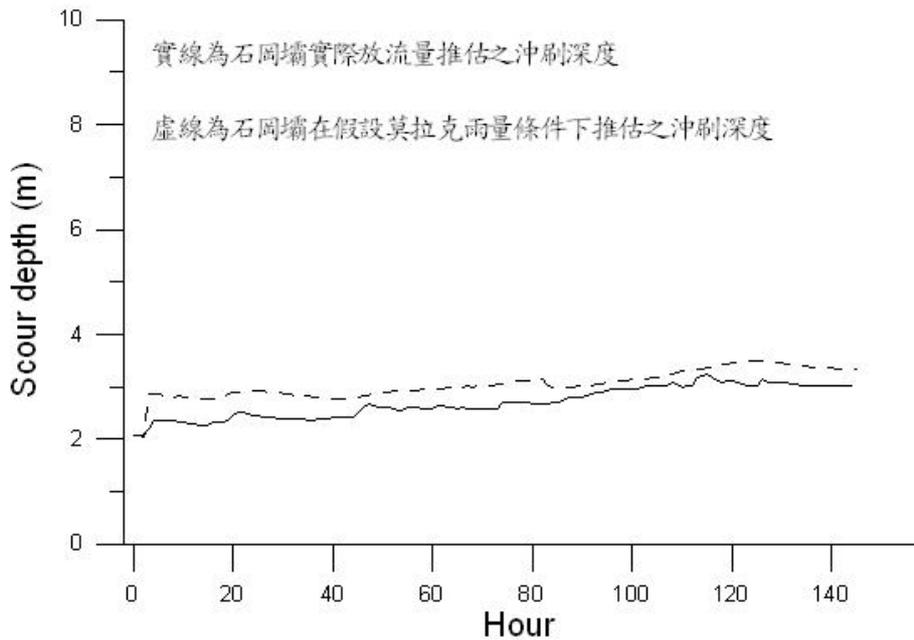


圖 5.23 台 61 線大甲溪橋沖刷深度變化

## 5.4 南瑪都颱風流量沖刷預測

2011 年 8 月強烈颱風南瑪都的颱風在中部地區僅帶來相當少之雨量，為測試模式進行可能局部沖刷深度預測之實際運作情況，斷面資料的採取上為第三河川局最新量測之 2010 年斷面資料，模擬時間為 2011 年 8 月 27 日至 2011 年 8 月 31 日，此颱風期間上游德基水庫並無排洪，因此石岡壩也未進行排洪，採用石岡壩之放流資料，針對南瑪都颱風實際洪水導致河床之演變過程，預估各橋梁的可能沖刷深度進行比較。相關模擬條件與計算成果說明如下：

### 1.底床大斷面

測試與檢定之底床採用第三河川局執行大甲溪河口至天輪壩大斷面及地形測量成果報告書所提供之 2010 年實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)。

## 2. 模擬颱風

此次颱風模擬事件所採用之流量，乃依據石岡壩運用日報表之紀錄(每小時記錄一次)，放流進入下游河道之流量，為排洪道排洪量與排砂道排洪量之總和。2011 年南瑪都颱風期間，石岡壩的實際放流歷線(2011 年 8 月 27 日至 2011 年 8 月 31 日)，共整理出 85 筆資料，總延時為 5 天，各橋梁水理演算成果如表 5-12 所示。

## 3. 邊界條件

上邊界條件方面，上游採用石岡壩於南瑪都颱風期間之實測放流量，南瑪都颱風於石岡壩放流歷線過程如圖 5.24 所示，實測最大放流量發生於 2011 年 8 月 29 日 08:00，當時放流量約為 183.61cms；在下游邊界條件方面，由於下游邊界條件變化並無導致對水理之預測結果有顯著差異，再者大甲溪出海口無設置潮位站，無法適當之邊界條件資料可取得，因此動床模組計算過程，下游邊界採用自由流出邊界條件估算。

## 4. 河道糙度值

本階段模式計算過程採用之河床糙度，依據前節水理模組測試與檢定之成果，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧  $n$  採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧  $n$  採用 0.035，進行動床模組測試。

## 5. 預估局部沖刷深度

利用實測放流量於石岡壩下游各橋梁水理演算成果，帶入沖刷經驗公式，而其公式的選取依 2008 年 12 月 31 日於交通部公路總局所召開之「研商『橋墩(基)局部公式及耐洪能力詳細評估辦法』計算準則，以便採用相同準則訂定封橋水位」之會議結論之適合臺灣地區之六種局部沖刷公式，在模式輸出上，以 5 分鐘為計算時間輸出間距，由於現場並無實測資料可供比對模式預測結果之正確性，僅能對求局部沖刷深度數值模式預測趨勢之合理性進行探究，

茲將各斷面利用交通部公路總局所建議之適合臺灣地區之沖刷公式計算所得的局部沖刷深度值，求得平均值平均值後並+1 個標準偏差進行計算，最大沖刷量如表 5-13 所示，詳如圖 5.25~圖 5.34 所示，石岡壩下游各橋梁在南瑪都颱風期間平均沖刷深度約在 2.5 公尺左右，在達到最大沖刷後均有回淤現象，模式預測之沖刷在埤豐橋、舊山線鐵路橋、高速鐵路橋、國道 3 號大甲溪橋與海線鐵路橋橋址附近沖刷較為嚴重，建議主管單位在未來管理上需加強監測，本次模擬並無實測資料可供比對，顯示橋墩局部沖刷監測技術研發與基本資料缺乏之窘況，由於本案沖刷模式之建構在水理與河道一般沖刷方面已經過資料檢定驗證工作，建議為來研究可朝沖刷監測之方向突破，藉以提供足夠資料進行局部沖刷模式之檢定與驗證。

表 5-12 南瑪都颱風期間石岡壩下游各橋梁水理演算成果

橋樑名稱	斷面編號	流量 (cms)	通水面積(m <sup>2</sup> )	平均水深(m)	福祿數	流速(m/s)	橋寬(m)	D50(mm)	D90(mm)
台 61 線大甲溪橋	1-1	183.217	200.924	0.509	0.408	0.912	2.4	63	300
台 1 線大甲溪橋	7-1	181.628	129.801	0.575	0.589	1.399	2	100	290
海線鐵路橋	7-2	181.625	90.500	1.033	0.631	2.007	2.5	107.4	305
國道 3 號大甲溪橋	9-1	181.587	62.605	0.908	0.972	2.901	2.4	100	290
高速鐵路橋	19-1	182.007	83.976	0.644	0.863	2.167	2.7	77.43	295.8
國道 1 號大甲溪橋	23-1	182.392	155.435	0.778	0.425	1.173	2.3	83.75	310
后豐橋	28-1	182.596	71.572	1.034	0.801	2.551	2	49.25	225.25
新山線鐵路橋	30-1	182.459	74.886	0.446	1.165	2.436	2.2	91.5	315
舊山線鐵路橋	32-1	182.312	64.551	1.213	0.819	2.824	3	97.5	328
埤豐橋	35	182.326	76.294	1.064	0.740	2.390	3.6	63	209

表 5-13 南瑪都颱風期間預測最大局部沖刷深度

橋樑名稱	斷面編號	預測最大局部沖刷深度					
		Laursen (1962)	Neill (1964)	Shen (1969)	Jain (1980)	Froehlich (1991)	HEC-18 (1995)
台 61 線大甲溪橋	1-1	2.43	1.87	0	2.83	1.18	1.77
台 1 線大甲溪橋	7-1	2.06	2.18	0	2.42	0	1.12
海線鐵路橋	7-2	2.87	3.13	0	3.13	1.26	0
國道 3 號大甲溪橋	9-1	2.69	3.84	1.94	3.04	1.72	1.58
高速鐵路橋	19-1	2.69	3.51	1.52	3.31	1.66	1.41
國道 1 號大甲溪橋	23-1	2.5	2.13	0	2.79	0	1.45
后豐橋	28-1	2.46	3.17	2.02	2.62	1.86	1.55
新山線鐵路橋	30-1	2.04	3.26	1.2	2.66	1.44	0.83
舊山線鐵路橋	32-1	3.43	4.47	2.38	3.82	2.1	2.06
埤豐橋	35	3.74	4.37	2.47	4.47	2.09	2.09

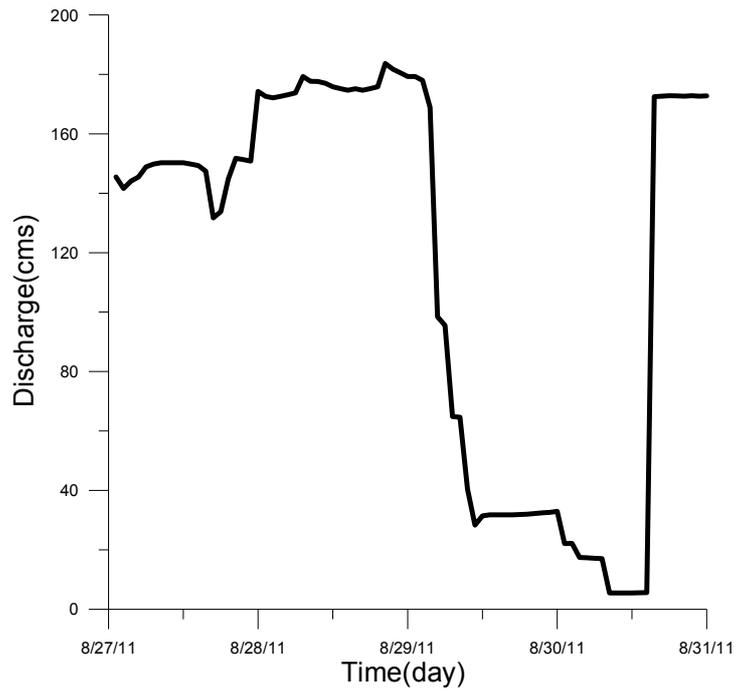


圖 5.24 南瑪都颱風期間石岡壩放流歷線過程

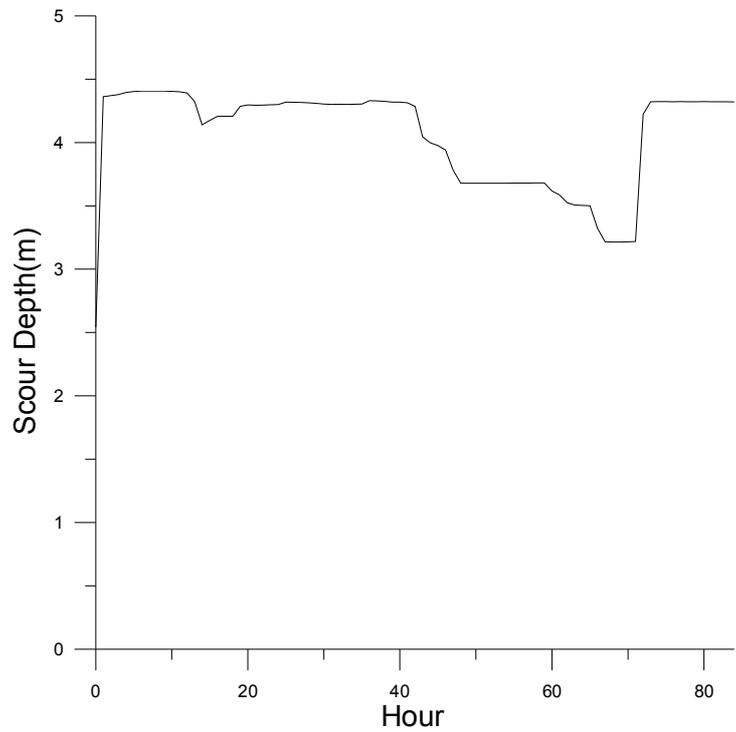


圖 5.25 埤豐橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

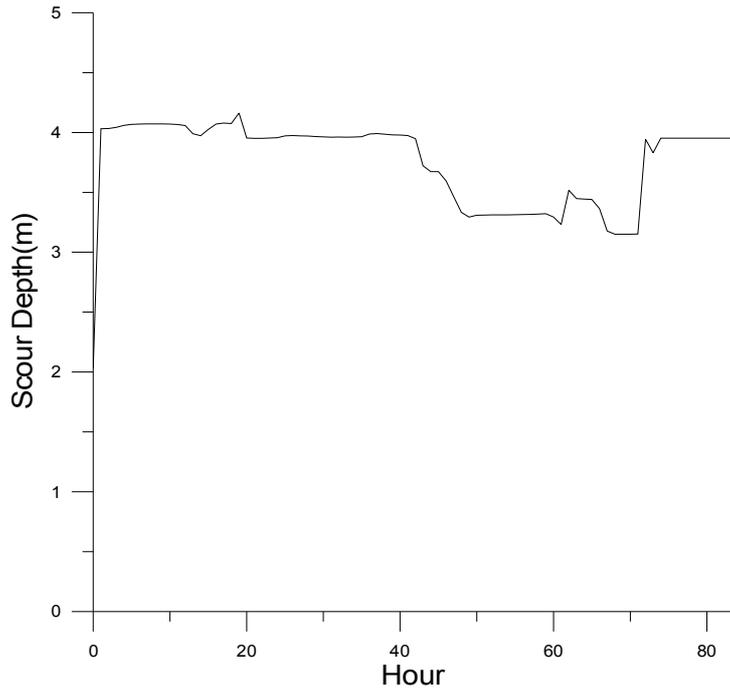


圖 5.26 舊山線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

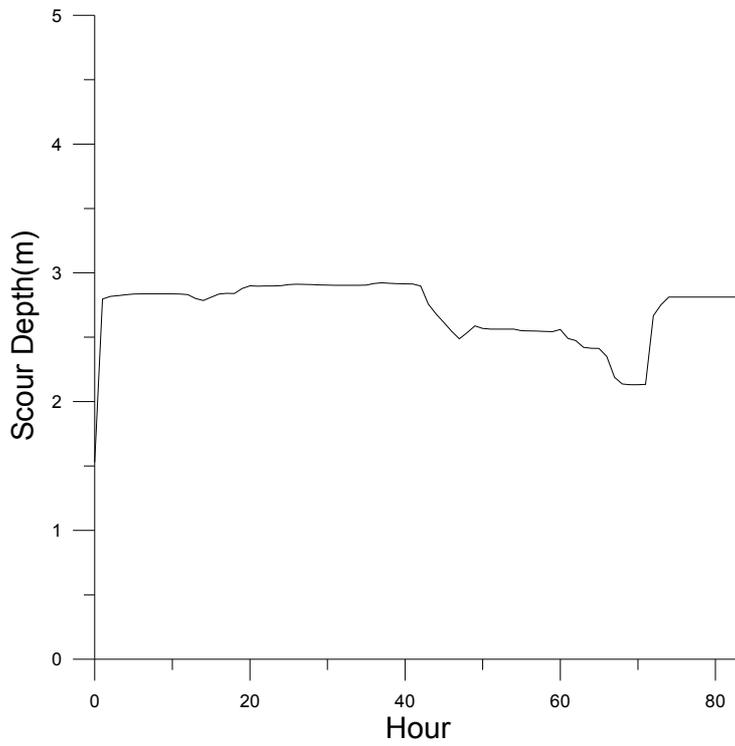


圖 5.27 新山線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

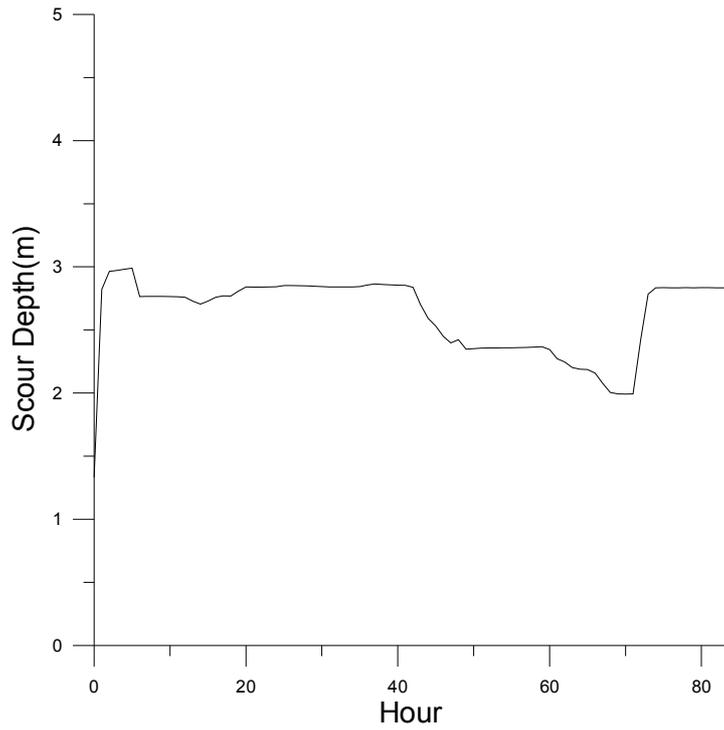


圖 5.28 后豐橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

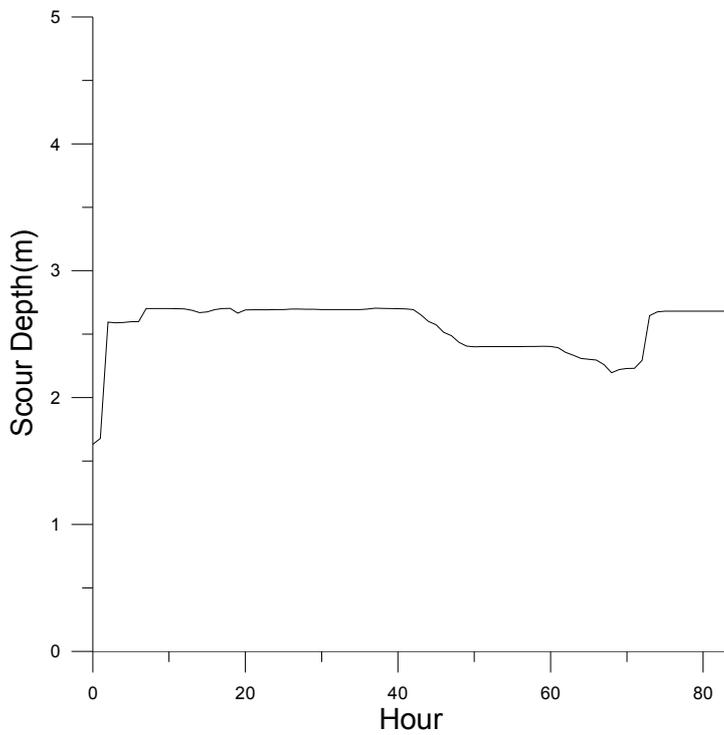


圖 5.29 國道 1 號大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

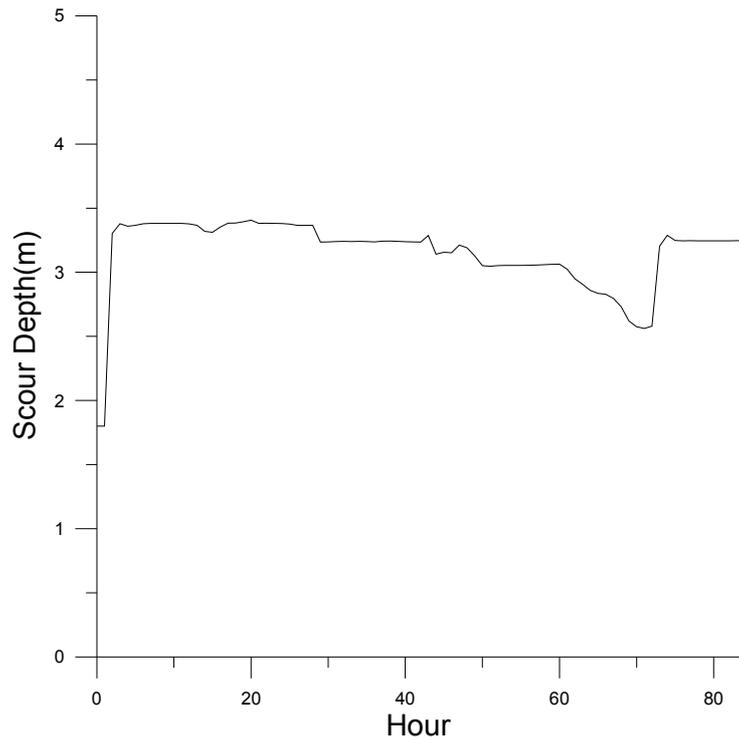


圖 5.30 高速鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

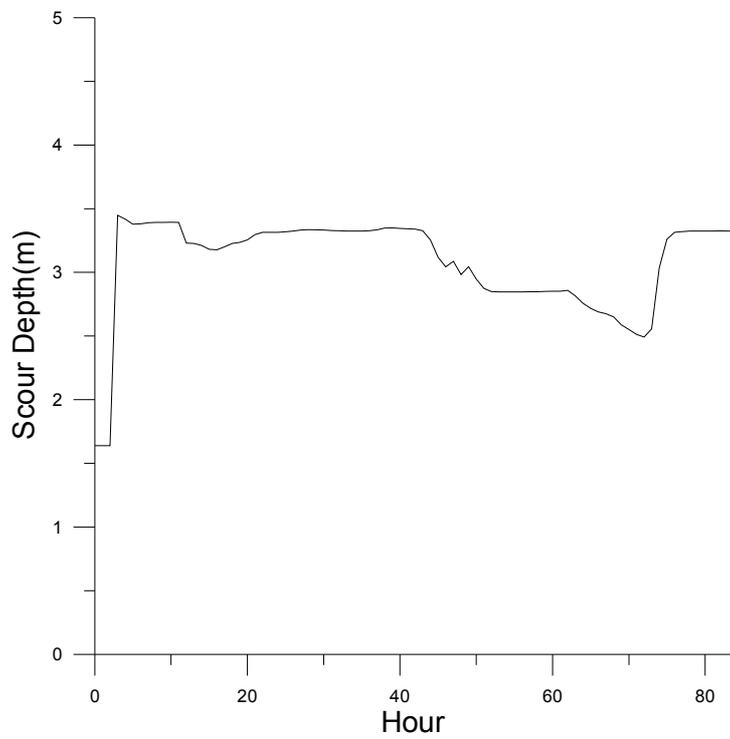


圖 5.31 國道 3 號大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

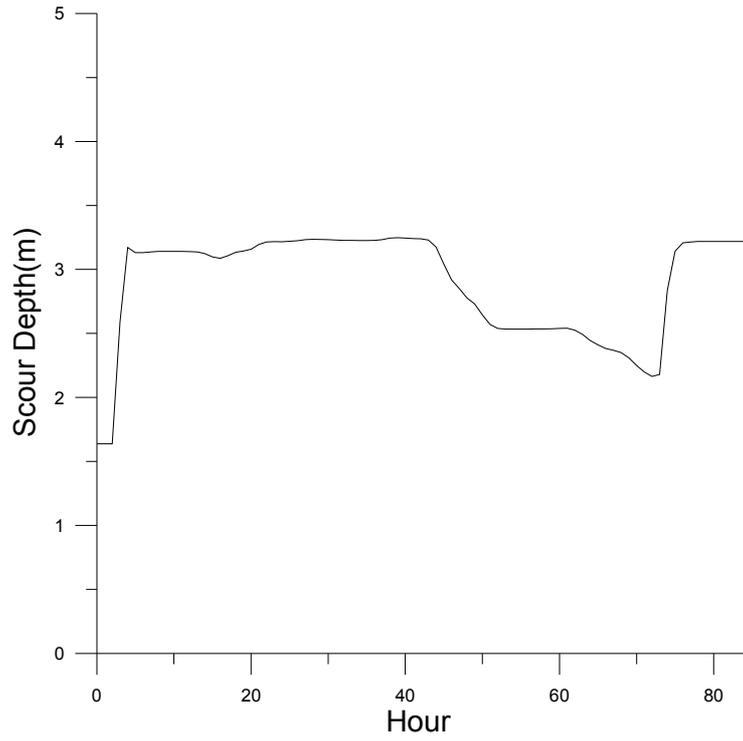


圖 5.32 海線鐵路橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

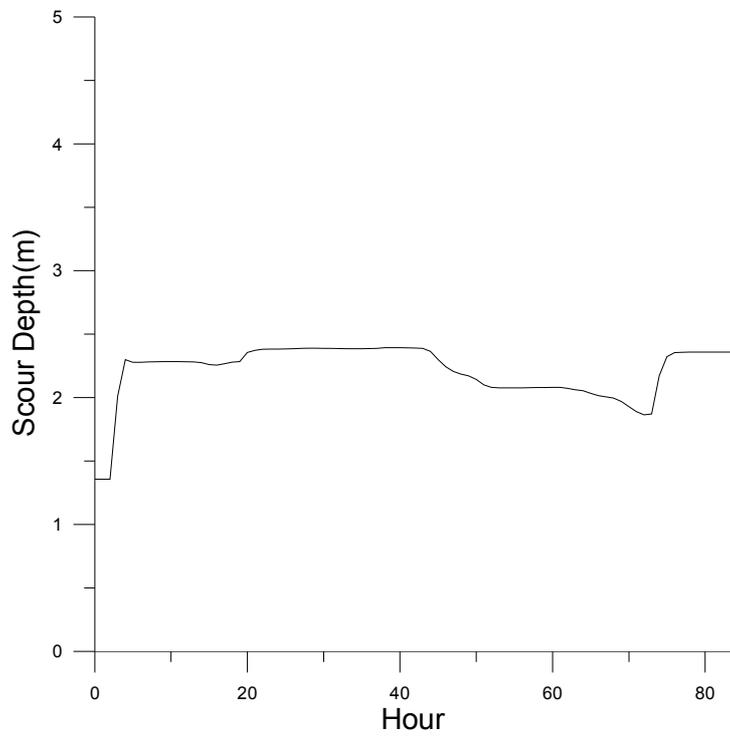


圖 5.33 台 1 線大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

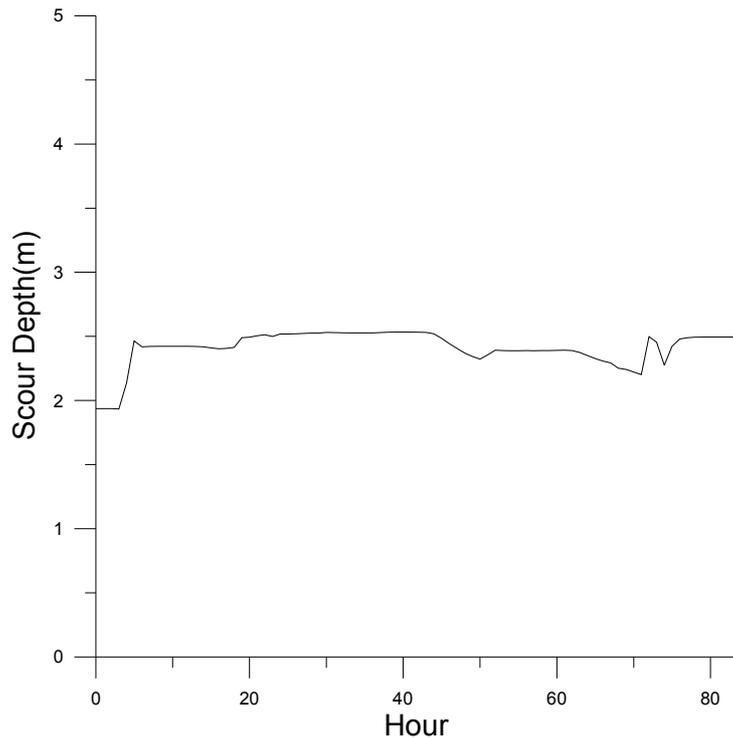


圖 5.34 台 61 線大甲溪橋在南瑪都颱風期間預測沖刷深度變化

## 5.5 各重現期流量可能沖刷分析

經莫拉克颱風影響南臺灣慘重，且近幾年降雨型態驟變，在雨型分析上也有所不同，為了解各頻率年流量作用下石岡壩下游各橋可能沖刷情形，以下分別就重現期 2 年、5 年、10 年、20 年、25 年、50 年、100 年和 200 年延時 100 小時的流量，做沖刷深度推算，相關之流量歷線乃引用經濟部水利署關於大甲溪最新版之規劃報告。相關模擬條件與計算成果說明如下：

### 1. 底床大斷面

測試與檢定之底床採用 2010 年交通部運輸研究所提供之實測大斷面資料，模擬範圍自上游石岡(斷面 36)至出海口(斷面-1)，各斷面間之距離如表 5-2 所示。

## 2. 邊界條件

以 2010 年 3 月經濟部水利署水利規劃試驗所「大甲溪治理規劃檢討(天輪壩至河口河段)」，所推估之河口至石岡壩河段之流量做為上游石岡壩放流之邊界條件。不同重現期距之石岡壩河段放流邊界條件見表 5-14，將石岡壩河段放流邊界條件繪為流量歷線後如圖 5.35 所示。

## 3. 河道糙度值

本階段模式計算過程採用之河床糙度，依據前節水理模組測試與檢定之成果，於石岡(斷面 36)至新山線鐵路橋(斷面 30-1)段之曼寧  $n$  採用 0.040，新山線鐵路橋至大甲溪出海口(斷面-1)段之曼寧  $n$  採用 0.035，進行水理模式計算。

## 4. 沖刷深度值推估

利用各重現期為計算的邊界條件經水理模式求得各水理因子後，在模式輸出上以 2 分鐘為計算時間輸出時間間距，於石岡壩下游各橋梁斷面，利用交通部公路總局所建議之適合臺灣地區之沖刷公式計算求得不同流量過程的局部沖刷深度值，由於本研究之局部沖刷深度預測值尚未經過實測資料檢定驗證，考慮各沖刷公式推估之不確定性，最後局部沖刷深度值取各沖刷公式平均值之平均值後 +1 個標準偏差為局部沖刷深度預測值，石岡壩下游各橋梁斷面其局部沖刷歷程計算結果如下圖 5.36~圖 5.43 所示，局部沖刷深度預測值並詳列於表 5-15~表 5-22，然未來於工程設計不宜直接採用前述表中不同重現期流量過程之局部沖刷深度預測值，局部沖刷深度的決定宜審慎評估。

表 5-14 不同重現期距之石岡壩河段放流邊界條件(單位：m<sup>3</sup>/s)

時間(小時)	重現期距(年)							
	2	5	10	20	25	50	100	200
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	1	2
3	0	0	0	1	1	2	4	6
4	0	0	1	3	4	6	10	15
5	0	1	3	7	8	14	21	31
6	0	2	6	13	15	26	39	56
7	0	5	12	23	27	44	66	93
8	1	9	21	38	43	70	103	144
9	2	15	33	59	67	106	153	211
10	4	24	51	88	99	155	221	301
11	8	38	77	129	144	221	310	419
12	13	58	111	182	203	305	423	566
13	20	83	154	247	274	408	560	742
14	31	115	209	329	363	533	725	952
15	45	157	278	430	473	686	924	1205
16	64	210	363	554	607	870	1162	1504
17	89	275	465	700	764	1085	1438	1849
18	120	354	588	874	951	1337	1760	2250
19	160	451	736	1081	1174	1637	2140	2720
20	210	569	915	1330	1440	1992	2587	3271
21	273	712	1128	1623	1754	2408	3109	3912
22	350	885	1383	1972	2127	2899	3723	4663
23	446	1092	1688	2385	2567	3476	4442	5538
24	573	1366	2088	2930	3149	4243	5402	6717
25	752	1744	2642	3684	3954	5304	6732	8350
26	960	2166	3242	4481	4800	6392	8064	9946
27	1160	2546	3759	5139	5489	7239	9054	11077
28	1336	2853	4154	5612	5977	7800	9665	11721
29	1481	3083	4428	5915	6281	8113	9962	11978
30	1596	3243	4599	6078	6437	8231	10020	11950
31	1682	3342	4683	6125	6470	8197	9897	11714
32	1741	3387	4691	6076	6403	8040	9633	11320
33	1775	3386	4639	5953	6260	7793	9269	10818
34	1789	3348	4540	5775	6060	7483	8840	10253
35	1786	3282	4407	5559	5822	7135	8376	9659
36	1768	3195	4250	5319	5561	6768	7898	9061
37	1739	3091	4075	5063	5284	6389	7416	8467
38	1699	2974	3889	4798	5000	6008	6939	7888
39	1653	2850	3697	4531	4715	5633	6476	7332
40	1600	2720	3502	4266	4433	5269	6031	6804
41	1544	2589	3309	4007	4159	4918	5609	6306
42	1484	2456	3118	3755	3893	4582	5206	5836
43	1422	2324	2931	3512	3637	4261	4825	5393
44	1359	2194	2750	3278	3391	3956	4465	4977
45	1296	2067	2575	3054	3156	3666	4125	4586
46	1233	1944	2406	2841	2933	3394	3806	4221
47	1171	1825	2246	2639	2722	3137	3508	3880
48	1110	1710	2093	2448	2523	2897	3230	3564
49	1051	1601	1948	2269	2336	2672	2971	3270
50	993	1497	1811	2100	2160	2462	2730	2998

表 5-14(續) 不同重現期距之石岡壩河段放流邊界條件(單位：m<sup>3</sup>/s)

時間(小時)	重現期距(年)							
	2	5	10	20	25	50	100	200
51	938	1398	1683	1943	1997	2267	2506	2745
52	885	1305	1562	1795	1844	2086	2299	2511
53	834	1217	1449	1659	1702	1918	2107	2296
54	786	1134	1343	1531	1570	1762	1931	2098
55	740	1057	1245	1413	1447	1619	1768	1916
56	696	984	1154	1304	1335	1487	1619	1749
57	654	916	1069	1203	1230	1365	1482	1597
58	615	853	990	1110	1134	1254	1357	1457
59	578	794	917	1024	1045	1151	1242	1330
60	543	739	849	944	963	1057	1137	1214
61	510	688	786	871	888	971	1041	1108
62	479	640	728	804	819	892	953	1012
63	450	596	675	742	755	819	873	924
64	422	554	625	685	696	753	800	844
65	397	516	580	632	642	692	733	771
66	372	481	537	584	593	636	672	705
67	350	447	498	539	547	585	616	644
68	328	417	462	498	505	539	565	589
69	308	388	429	461	467	496	519	539
70	290	362	398	426	431	457	476	494
71	272	337	369	394	399	421	437	452
72	256	315	343	365	369	388	402	414
73	240	293	318	336	339	356	368	378
74	226	273	294	310	313	326	336	345
75	212	253	271	285	287	299	308	315
76	199	235	250	262	264	275	282	287
77	186	217	231	241	243	252	258	262
78	173	201	213	222	224	231	236	240
79	161	186	196	204	205	212	216	219
80	150	172	181	188	189	195	199	201
81	139	159	167	173	174	179	182	184
82	129	147	154	160	161	165	168	169
83	119	136	143	148	149	152	154	155
84	110	125	132	136	137	140	142	142
85	102	116	122	126	127	130	131	131
86	94	107	113	117	118	120	121	121
87	87	100	105	108	109	111	111	111
88	81	92	97	100	101	103	103	102
89	75	86	90	93	93	95	95	94
90	69	80	84	87	87	88	88	87
91	64	74	78	81	81	82	82	81
92	60	70	73	75	75	76	76	75
93	56	65	68	70	70	71	70	69
94	52	61	64	65	65	66	65	64
95	49	57	60	61	61	61	60	59
96	46	54	56	57	57	57	56	55
97	43	51	53	54	54	53	52	51
98	40	47	49	50	50	50	49	47
99	37	44	46	47	47	46	45	44
100	35	42	43	44	44	43	42	40

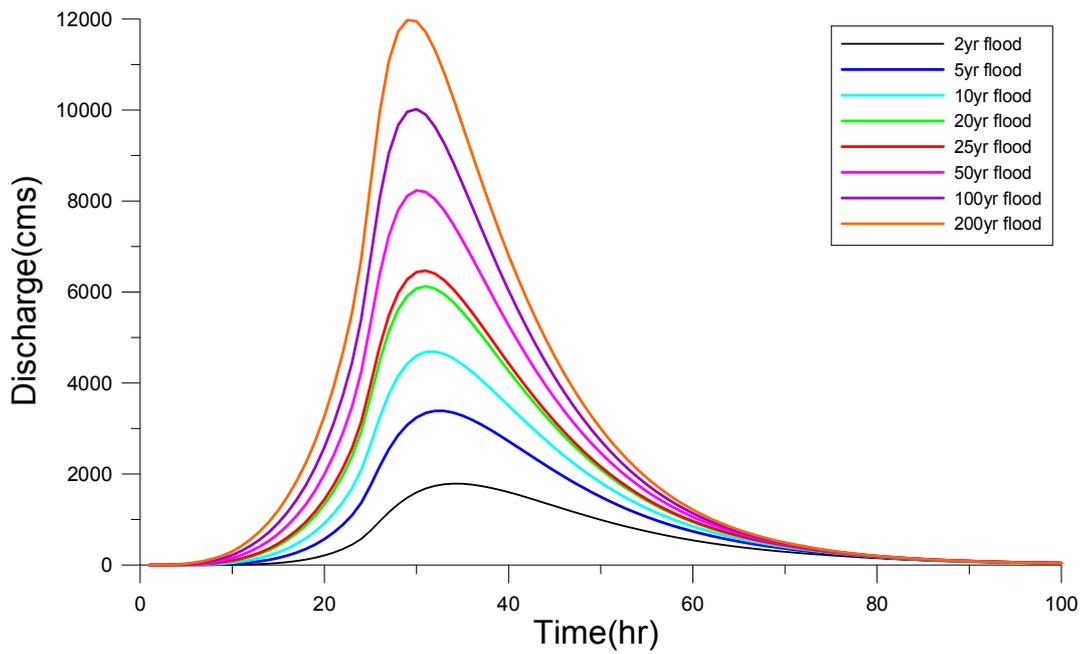


圖 5.35 各重現期延時 100 小時流量歷線

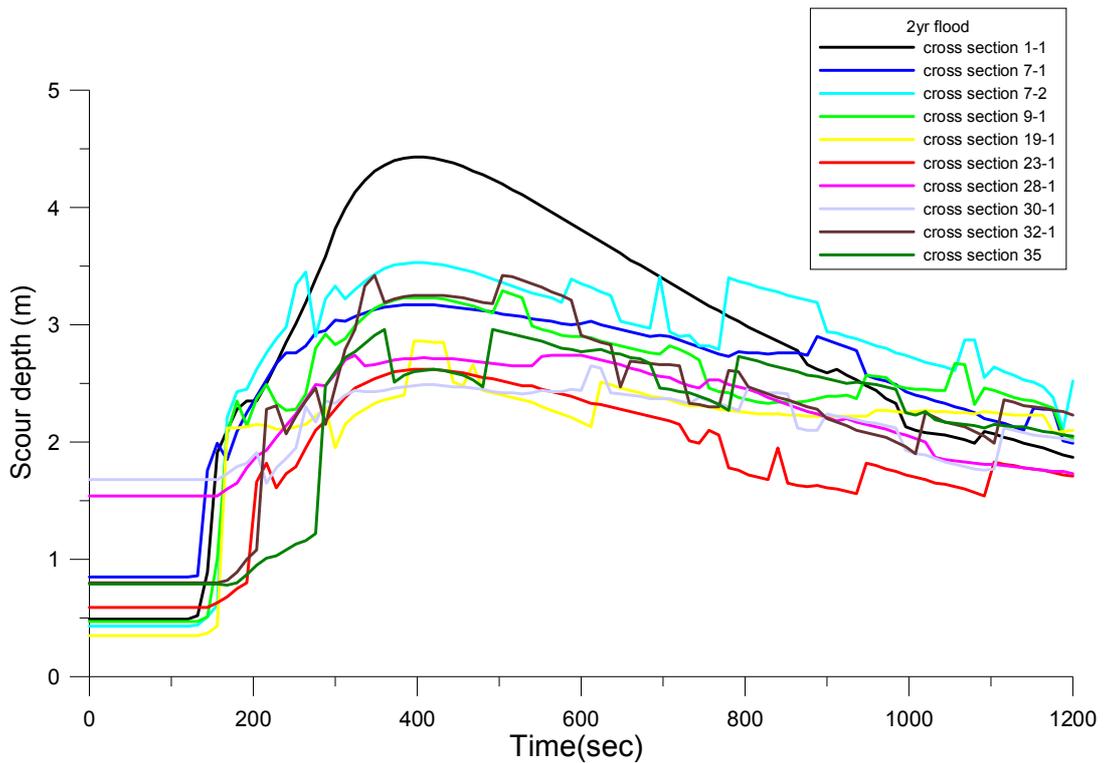


圖 5.36 2 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

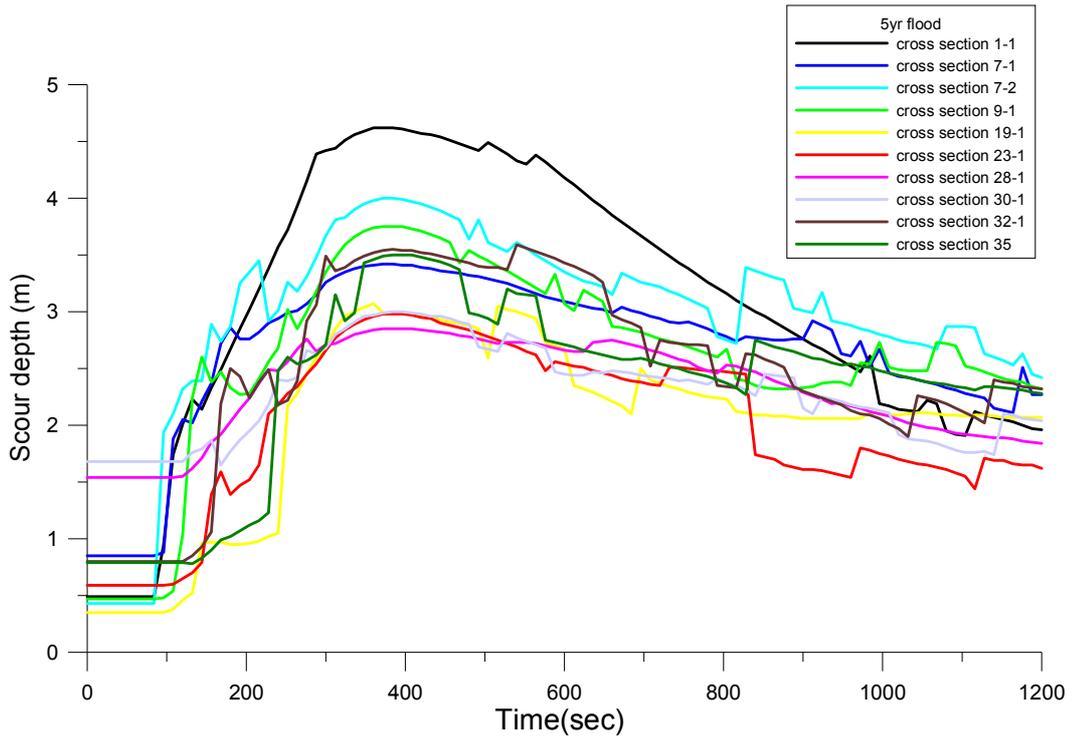


圖 5.37 5 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

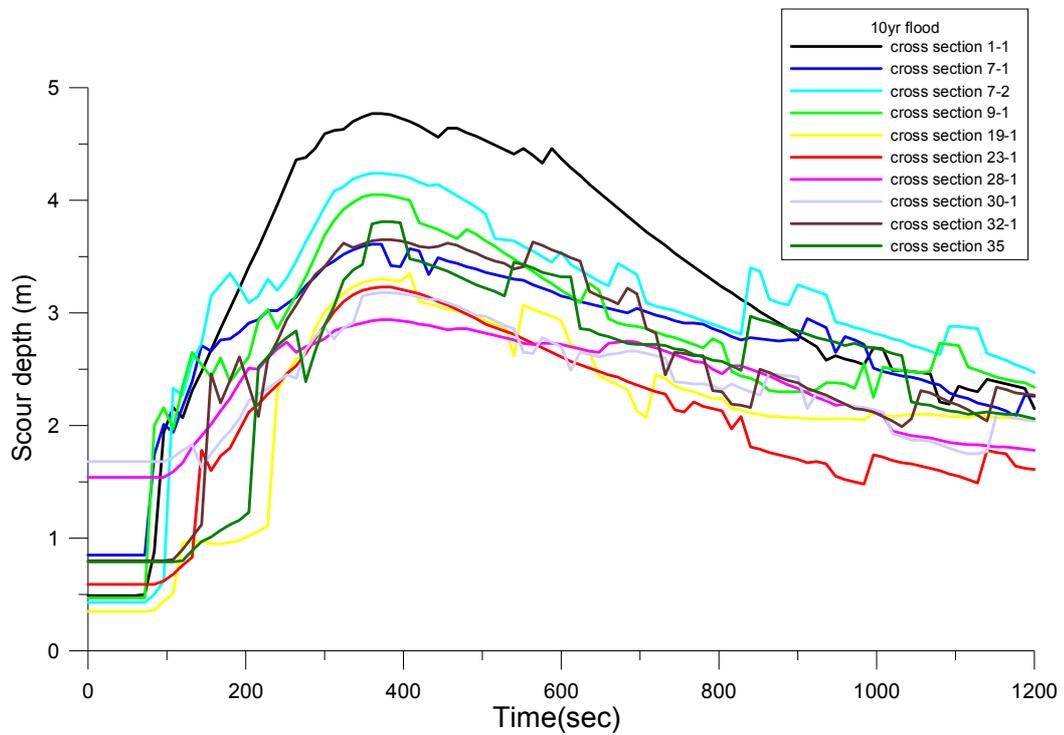


圖 5.38 10 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

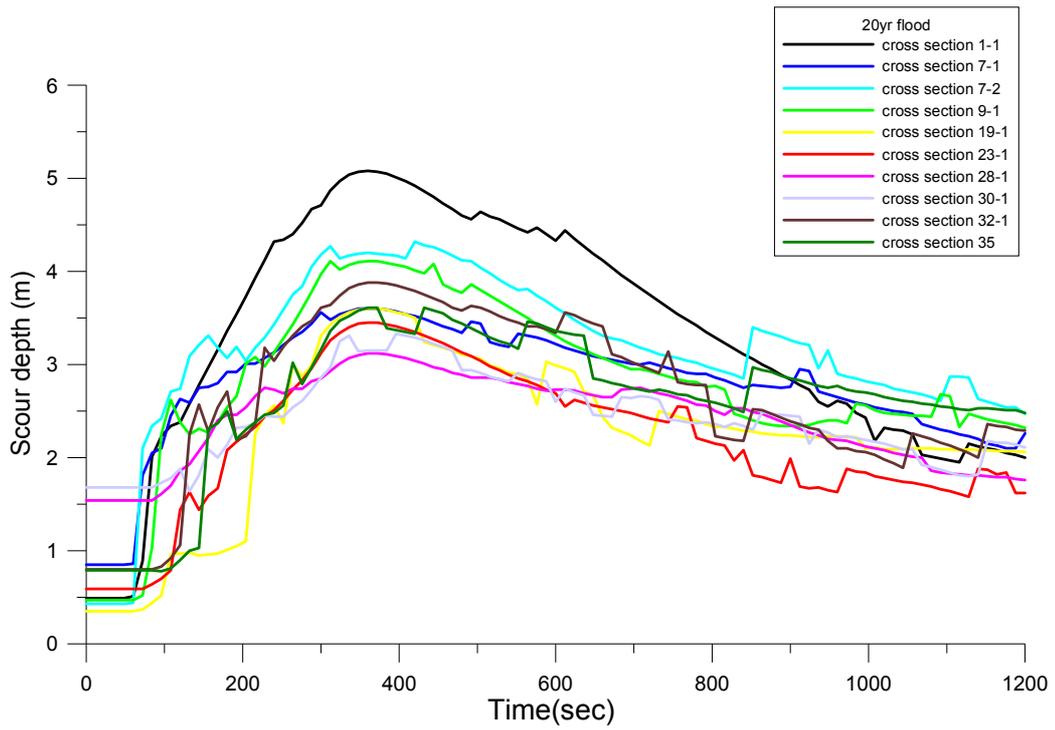


圖 5.39 20 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

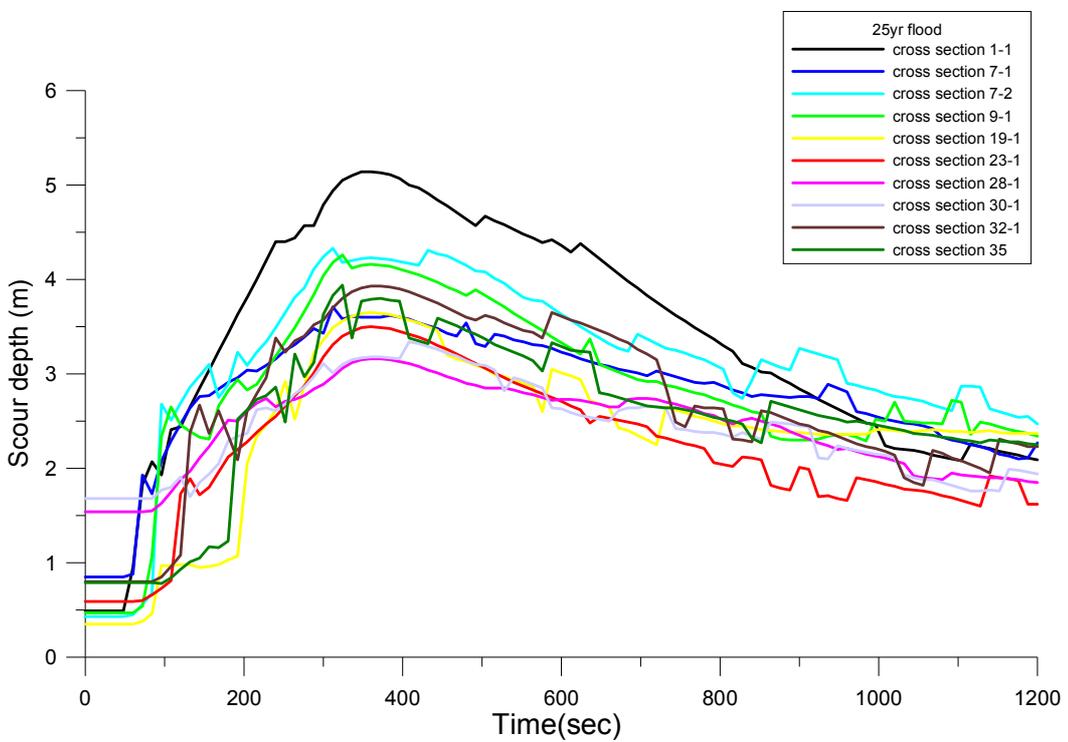


圖 5.40 25 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

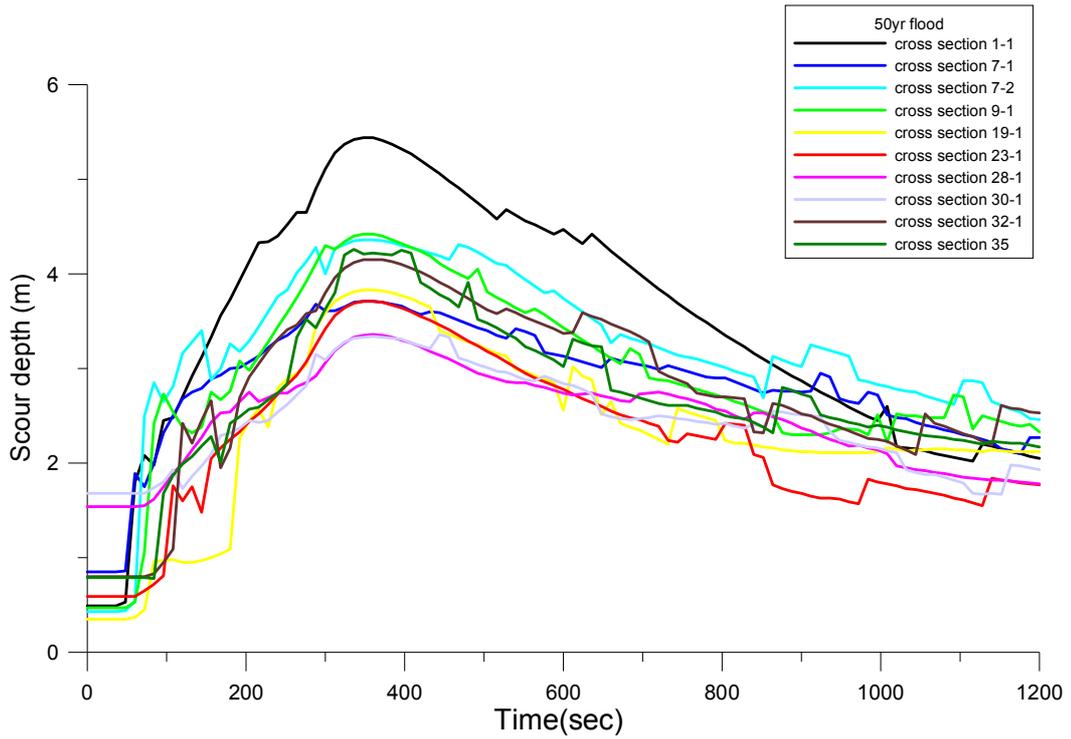


圖 5.41 50 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

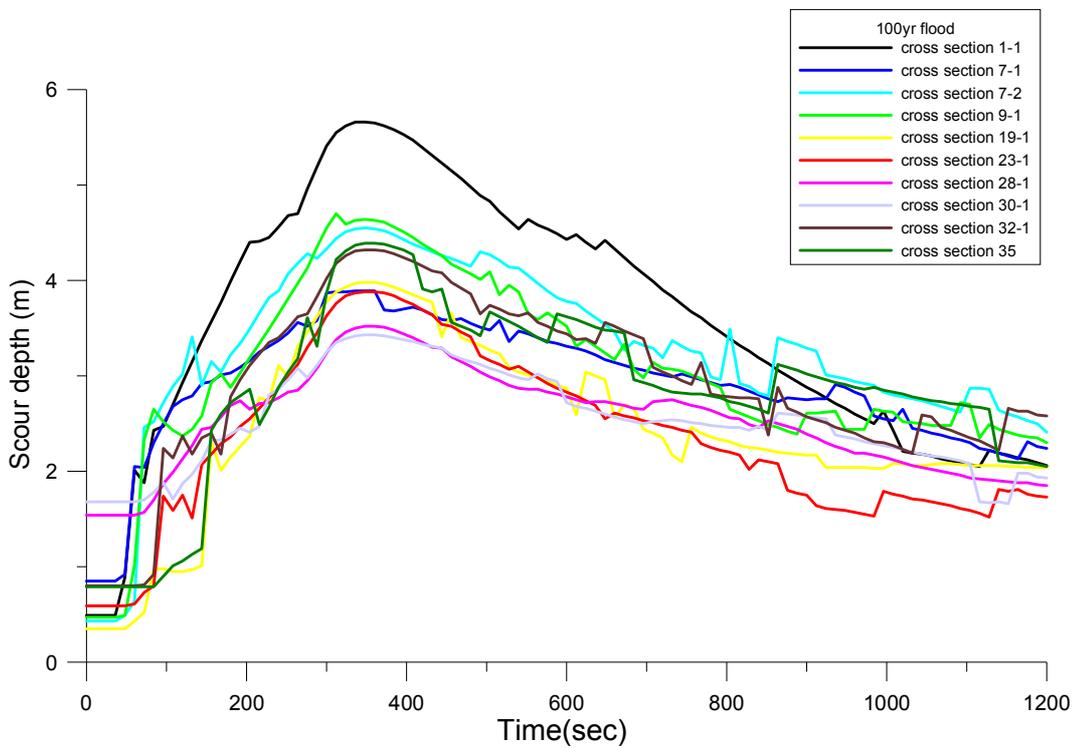


圖 5.42 100 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

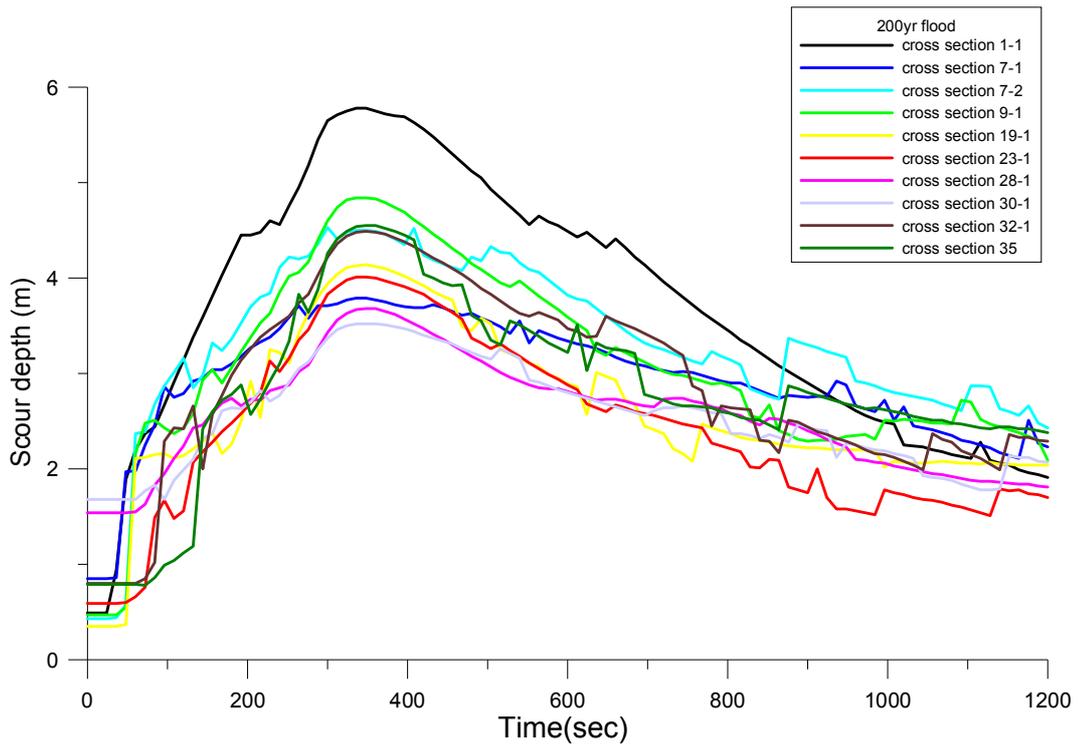


圖 5.43 200 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

表 5-15 2 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
48	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
60	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
72	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
84	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
96	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
108	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
120	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
132	0.52	0.86	0.44	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
144	0.89	1.76	0.51	0.51	0.37	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
156	1.91	1.99	0.61	1	0.43	0.63	1.54	1.68	0.8	0.79
168	2.1	1.85	2.21	2.07	2.12	0.68	1.6	1.73	0.82	0.78
180	2.28	2.09	2.43	2.35	2.12	0.75	1.65	1.79	0.89	0.8
192	2.35	2.25	2.45	2.14	2.13	0.8	1.78	1.82	1	0.87
204	2.35	2.39	2.62	2.37	2.15	1.66	1.88	1.91	1.08	0.95
216	2.5	2.53	2.76	2.49	2.14	1.82	1.93	1.65	2.28	1.01
228	2.67	2.67	2.88	2.33	2.11	1.61	2.04	1.78	2.31	1.03
240	2.85	2.76	2.98	2.27	2.11	1.73	2.14	1.86	2.07	1.08
252	3.01	2.76	3.34	2.28	2.13	1.79	2.24	1.95	2.22	1.13
264	3.19	2.82	3.45	2.41	2.15	1.95	2.36	2.3	2.35	1.16
276	3.39	2.93	2.9	2.8	2.22	2.1	2.49	2.17	2.46	1.22

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	3.58	2.95	3.22	2.92	2.29	2.18	2.48	2.35	2.15	2.48
300	3.82	3.04	3.33	2.83	1.95	2.28	2.58	2.33	2.47	2.6
312	3.99	3.03	3.22	2.88	2.15	2.38	2.7	2.4	2.79	2.72
324	4.13	3.07	3.3	2.99	2.23	2.46	2.74	2.44	2.96	2.77
336	4.23	3.1	3.37	3.07	2.28	2.5	2.65	2.43	3.33	2.84
348	4.31	3.13	3.43	3.14	2.33	2.54	2.66	2.43	3.42	2.91
360	4.36	3.15	3.48	3.18	2.36	2.57	2.68	2.44	3.19	2.96
372	4.4	3.16	3.51	3.21	2.38	2.6	2.7	2.46	3.22	2.51
384	4.42	3.17	3.52	3.23	2.4	2.61	2.71	2.47	3.24	2.57
396	4.43	3.17	3.53	3.23	2.86	2.62	2.71	2.48	3.25	2.6
408	4.43	3.17	3.53	3.23	2.86	2.62	2.72	2.49	3.25	2.61
420	4.42	3.17	3.52	3.23	2.85	2.62	2.71	2.49	3.25	2.62
432	4.4	3.16	3.51	3.22	2.85	2.61	2.71	2.48	3.25	2.61
444	4.38	3.15	3.49	3.2	2.51	2.6	2.71	2.47	3.24	2.59
456	4.35	3.14	3.47	3.18	2.48	2.59	2.7	2.47	3.23	2.57
468	4.31	3.13	3.45	3.16	2.66	2.57	2.69	2.46	3.21	2.53
480	4.28	3.12	3.42	3.13	2.44	2.55	2.68	2.45	3.19	2.47
492	4.24	3.11	3.39	3.1	2.42	2.54	2.67	2.43	3.18	2.96
504	4.2	3.09	3.36	3.29	2.4	2.52	2.66	2.42	3.42	2.94
516	4.15	3.08	3.33	3.26	2.38	2.5	2.65	2.42	3.41	2.92
528	4.11	3.07	3.3	3.23	2.36	2.48	2.65	2.41	3.38	2.9
540	4.06	3.05	3.27	2.99	2.34	2.48	2.65	2.42	3.35	2.88
552	4.01	3.04	3.25	2.96	2.3	2.45	2.73	2.44	3.32	2.86
564	3.96	3.03	3.23	2.94	2.27	2.43	2.74	2.43	3.28	2.83
576	3.91	3.01	3.19	2.91	2.24	2.41	2.74	2.43	3.25	2.8
588	3.86	3	3.39	2.9	2.21	2.39	2.74	2.45	3.21	2.79

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	3.81	3.01	3.35	2.9	2.17	2.36	2.74	2.44	2.91	2.77
612	3.76	3.03	3.32	2.89	2.13	2.33	2.72	2.65	2.88	2.78
624	3.71	3	3.28	2.86	2.51	2.32	2.7	2.63	2.85	2.79
636	3.66	2.98	3.25	2.84	2.49	2.3	2.68	2.42	2.83	2.76
648	3.61	2.96	3.03	2.82	2.46	2.28	2.66	2.41	2.47	2.75
660	3.55	2.94	3.01	2.8	2.44	2.26	2.63	2.4	2.69	2.72
672	3.51	2.92	2.99	2.78	2.42	2.24	2.61	2.39	2.68	2.71
684	3.46	2.9	2.97	2.76	2.39	2.22	2.58	2.37	2.67	2.67
696	3.41	2.91	3.41	2.75	2.38	2.2	2.56	2.37	2.66	2.46
708	3.36	2.9	2.94	2.82	2.36	2.18	2.55	2.37	2.66	2.45
720	3.31	2.87	2.9	2.79	2.33	2.15	2.51	2.35	2.65	2.43
732	3.26	2.84	2.91	2.75	2.31	2.01	2.48	2.33	2.33	2.42
744	3.21	2.81	2.82	2.7	2.31	1.99	2.46	2.38	2.32	2.39
756	3.16	2.78	2.82	2.46	2.3	2.1	2.53	2.35	2.3	2.36
768	3.12	2.75	2.79	2.43	2.28	2.06	2.53	2.33	2.3	2.32
780	3.07	2.73	3.4	2.42	2.27	1.78	2.49	2.3	2.61	2.27
792	3.03	2.77	3.37	2.38	2.26	1.76	2.47	2.27	2.6	2.73
804	2.98	2.76	3.35	2.36	2.25	1.72	2.45	2.47	2.47	2.71
816	2.94	2.76	3.32	2.34	2.24	1.7	2.42	2.44	2.44	2.69
828	2.9	2.75	3.3	2.33	2.24	1.68	2.38	2.42	2.41	2.66
840	2.86	2.76	3.28	2.34	2.24	1.95	2.35	2.42	2.38	2.64
852	2.82	2.76	3.25	2.34	2.23	1.65	2.32	2.41	2.36	2.62
864	2.78	2.76	3.23	2.34	2.23	1.63	2.29	2.12	2.33	2.6
876	2.66	2.74	3.21	2.35	2.22	1.62	2.26	2.1	2.3	2.57
888	2.62	2.9	3.19	2.37	2.22	1.63	2.24	2.1	2.28	2.56
900	2.59	2.87	2.94	2.39	2.22	1.61	2.21	2.24	2.2	2.54

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.62	2.84	2.93	2.39	2.22	1.6	2.18	2.22	2.17	2.52
924	2.57	2.81	2.9	2.4	2.22	1.58	2.2	2.21	2.14	2.5
936	2.53	2.78	2.88	2.37	2.22	1.56	2.17	2.19	2.1	2.51
948	2.48	2.57	2.85	2.57	2.22	1.82	2.15	2.17	2.08	2.5
960	2.44	2.54	2.82	2.56	2.27	1.8	2.13	2.16	2.06	2.49
972	2.37	2.52	2.8	2.55	2.27	1.77	2.11	2.14	2.04	2.47
984	2.33	2.49	2.76	2.48	2.26	1.75	2.08	2.12	2	2.45
996	2.13	2.43	2.74	2.46	2.25	1.72	2.06	1.93	1.96	2.25
1008	2.1	2.4	2.71	2.45	2.26	1.7	2.03	1.9	1.9	2.23
1020	2.08	2.38	2.68	2.45	2.27	1.68	2	1.89	2.25	2.26
1032	2.07	2.35	2.66	2.44	2.26	1.65	1.87	1.86	2.21	2.19
1044	2.06	2.33	2.64	2.44	2.26	1.64	1.85	1.83	2.17	2.17
1056	2.04	2.3	2.61	2.67	2.25	1.62	1.84	1.81	2.15	2.16
1068	2.02	2.28	2.87	2.66	2.25	1.6	1.83	1.79	2.13	2.15
1080	1.99	2.25	2.87	2.32	2.24	1.57	1.82	1.77	2.09	2.14
1092	2.09	2.2	2.55	2.46	2.26	1.54	1.81	1.76	2.05	2.12
1104	2.07	2.18	2.64	2.44	2.25	1.83	1.81	1.77	1.99	2.15
1116	2.04	2.16	2.6	2.41	2.24	1.81	1.8	2.12	2.36	2.14
1128	2.02	2.13	2.57	2.38	2.23	1.8	1.79	2.1	2.34	2.13
1140	1.99	2.1	2.53	2.36	2.23	1.78	1.78	2.08	2.31	2.13
1152	1.97	2.29	2.51	2.35	2.23	1.77	1.77	2.06	2.3	2.11
1164	1.95	2.28	2.47	2.32	2.23	1.76	1.76	2.05	2.29	2.09
1176	1.92	2.28	2.38	2.29	2.08	1.74	1.75	2.04	2.27	2.08
1188	1.89	2.01	2.11	2.07	2.09	1.72	1.75	2.03	2.26	2.06
1200	1.87	1.99	2.52	2.03	2.1	1.71	1.73	2.01	2.23	2.05

表 5-16 5 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
48	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
60	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
72	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
84	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
96	0.95	0.88	1.94	0.48	0.35	0.59	1.54	1.68	0.8	0.79
108	1.74	1.88	2.1	0.54	0.38	0.6	1.54	1.68	0.8	0.79
120	2.01	2.05	2.32	1.04	0.46	0.65	1.55	1.68	0.8	0.79
132	2.23	2.02	2.39	2.24	0.52	0.7	1.62	1.76	0.85	0.78
144	2.14	2.21	2.39	2.6	0.96	0.79	1.71	1.79	0.93	0.83
156	2.33	2.37	2.89	2.38	0.97	1.39	1.85	1.87	1.06	0.9
168	2.49	2.72	2.74	2.47	0.97	1.59	1.92	1.65	2.19	0.99
180	2.67	2.86	2.87	2.33	0.95	1.39	2.03	1.77	2.5	1.02
192	2.85	2.76	3.25	2.27	0.95	1.47	2.14	1.87	2.43	1.07
204	3.02	2.76	3.35	2.28	0.96	1.52	2.24	1.95	2.24	1.12
216	3.2	2.82	3.45	2.41	0.98	1.65	2.37	2.04	2.38	1.16
228	3.38	2.9	2.92	2.56	1.02	2.1	2.49	2.18	2.49	1.23
240	3.57	2.94	3.01	2.68	1.05	2.18	2.48	2.4	2.18	2.48
252	3.72	2.99	3.26	3.02	2.17	2.28	2.56	2.39	2.22	2.6
264	3.93	3.01	3.18	2.85	2.28	2.34	2.67	2.42	2.39	2.54
276	4.15	3.07	3.31	3	2.45	2.45	2.76	2.66	2.92	2.57

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	4.39	3.15	3.48	3.18	2.6	2.54	2.65	2.63	3.06	2.62
300	4.42	3.26	3.67	3.35	2.68	2.66	2.71	2.68	3.49	2.71
312	4.44	3.31	3.81	3.48	2.85	2.77	2.72	2.8	3.36	3.15
324	4.51	3.35	3.83	3.59	2.96	2.84	2.76	2.85	3.39	2.92
336	4.56	3.38	3.9	3.66	3	2.89	2.8	2.91	3.45	2.99
348	4.59	3.4	3.95	3.71	3.04	2.93	2.82	2.96	3.49	3.43
360	4.62	3.41	3.98	3.74	3.07	2.96	2.84	2.97	3.52	3.46
372	4.62	3.42	4	3.75	2.99	2.98	2.85	2.99	3.54	3.49
384	4.62	3.42	4	3.75	2.99	2.98	2.85	3	3.55	3.5
396	4.61	3.41	3.99	3.75	2.99	2.98	2.85	3	3.54	3.5
408	4.59	3.41	3.97	3.73	2.98	2.97	2.85	2.99	3.54	3.5
420	4.57	3.39	3.95	3.71	2.97	2.95	2.84	2.98	3.52	3.48
432	4.56	3.38	3.92	3.68	2.95	2.94	2.83	2.96	3.51	3.46
444	4.54	3.36	3.89	3.65	2.93	2.9	2.82	2.96	3.49	3.44
456	4.51	3.35	3.85	3.61	2.91	2.88	2.81	2.94	3.47	3.41
468	4.48	3.34	3.81	3.43	2.9	2.86	2.79	2.91	3.45	3.37
480	4.45	3.32	3.64	3.54	2.88	2.84	2.78	2.89	3.43	2.99
492	4.42	3.31	3.81	3.49	2.85	2.81	2.76	2.69	3.4	2.97
504	4.49	3.29	3.61	3.45	2.59	2.78	2.74	2.67	3.39	2.94
516	4.44	3.27	3.57	3.4	3.05	2.75	2.72	2.65	3.39	2.89
528	4.39	3.25	3.53	3.36	3.02	2.72	2.73	2.81	3.37	3.2
540	4.33	3.22	3.61	3.31	3	2.69	2.73	2.77	3.59	3.16
552	4.3	3.19	3.56	3.26	2.97	2.65	2.73	2.74	3.56	3.15
564	4.38	3.16	3.5	3.21	2.94	2.62	2.72	2.71	3.53	3.14
576	4.32	3.13	3.45	3.16	2.73	2.48	2.7	2.68	3.5	2.75
588	4.25	3.11	3.4	3.33	2.7	2.56	2.68	2.47	3.47	2.73

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.18	3.09	3.35	3.07	2.67	2.54	2.66	2.45	3.43	2.71
612	4.12	3.07	3.31	3.01	2.35	2.52	2.65	2.44	3.4	2.69
624	4.05	3.05	3.27	3.19	2.32	2.51	2.65	2.44	3.36	2.66
636	3.98	3.03	3.25	3.14	2.29	2.48	2.73	2.47	3.32	2.64
648	3.92	3.02	3.22	3.09	2.25	2.46	2.74	2.46	3.26	2.62
660	3.85	2.99	3.15	2.87	2.21	2.44	2.75	2.48	2.97	2.6
672	3.79	3.04	3.34	2.86	2.17	2.41	2.73	2.47	2.93	2.58
684	3.73	3.01	3.3	2.84	2.1	2.39	2.71	2.46	2.9	2.58
696	3.67	2.99	3.26	2.82	2.5	2.38	2.69	2.44	2.86	2.59
708	3.61	2.96	3.24	2.79	2.4	2.36	2.66	2.43	2.52	2.57
720	3.55	2.94	3.22	2.76	2.37	2.35	2.64	2.42	2.75	2.54
732	3.49	2.91	3.18	2.74	2.34	2.51	2.61	2.41	2.73	2.52
744	3.43	2.9	3.15	2.72	2.32	2.51	2.58	2.39	2.72	2.5
756	3.38	2.91	3.11	2.69	2.29	2.5	2.56	2.4	2.71	2.47
768	3.32	2.88	3.07	2.66	2.27	2.49	2.51	2.38	2.71	2.45
780	3.26	2.85	3.03	2.63	2.25	2.48	2.48	2.36	2.7	2.43
792	3.21	2.81	2.78	2.6	2.24	2.48	2.46	2.41	2.35	2.4
804	3.16	2.78	2.75	2.67	2.23	2.47	2.53	2.37	2.34	2.37
816	3.1	2.74	2.72	2.41	2.12	2.46	2.52	2.35	2.33	2.33
828	3.05	2.78	3.39	2.39	2.11	2.45	2.49	2.31	2.63	2.27
840	3	2.77	3.36	2.35	2.09	1.74	2.47	2.26	2.62	2.75
852	2.96	2.76	3.33	2.33	2.09	1.72	2.43	2.45	2.58	2.72
864	2.91	2.75	3.3	2.32	2.08	1.7	2.39	2.44	2.55	2.69
876	2.86	2.75	3.28	2.32	2.08	1.65	2.36	2.43	2.51	2.67
888	2.81	2.76	3.03	2.32	2.07	1.63	2.33	2.42	2.34	2.65
900	2.76	2.76	3.01	2.33	2.06	1.61	2.29	2.15	2.3	2.62

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.71	2.92	2.99	2.34	2.06	1.61	2.26	2.1	2.27	2.59
924	2.67	2.88	3.17	2.37	2.06	1.6	2.23	2.25	2.24	2.58
936	2.62	2.84	2.92	2.38	2.06	1.58	2.19	2.23	2.21	2.55
948	2.57	2.63	2.9	2.38	2.06	1.56	2.2	2.21	2.18	2.53
960	2.52	2.61	2.88	2.35	2.06	1.54	2.17	2.18	2.13	2.54
972	2.47	2.74	2.85	2.55	2.06	1.8	2.15	2.16	2.1	2.52
984	2.61	2.52	2.83	2.54	2.11	1.78	2.12	2.15	2.09	2.51
996	2.19	2.67	2.8	2.73	2.11	1.75	2.1	2.13	2.06	2.48
1008	2.17	2.46	2.78	2.51	2.09	1.73	2.08	2.11	2.01	2.46
1020	2.14	2.43	2.75	2.49	2.09	1.7	2.05	1.92	1.97	2.44
1032	2.13	2.42	2.73	2.48	2.1	1.68	2.02	1.88	1.9	2.42
1044	2.12	2.4	2.72	2.48	2.11	1.66	2	1.87	2.26	2.4
1056	2.22	2.38	2.7	2.48	2.11	1.65	1.98	1.86	2.24	2.38
1068	2.19	2.36	2.67	2.73	2.1	1.63	1.97	1.84	2.22	2.37
1080	1.95	2.33	2.87	2.72	2.09	1.61	1.95	1.81	2.19	2.36
1092	1.92	2.31	2.87	2.7	2.09	1.58	1.93	1.78	2.15	2.34
1104	1.91	2.28	2.87	2.52	2.08	1.55	1.92	1.76	2.11	2.33
1116	2.12	2.26	2.86	2.5	2.09	1.44	1.91	1.76	2.07	2.31
1128	2.09	2.24	2.63	2.47	2.09	1.71	1.9	1.77	2.02	2.34
1140	2.07	2.15	2.6	2.44	2.08	1.69	1.89	1.74	2.4	2.34
1152	2.05	2.13	2.57	2.41	2.07	1.69	1.89	2.1	2.38	2.33
1164	2.03	2.11	2.53	2.39	2.07	1.66	1.88	2.09	2.37	2.32
1176	2	2.51	2.63	2.38	2.07	1.65	1.86	2.06	2.34	2.31
1188	1.97	2.27	2.45	2.34	2.07	1.65	1.85	2.05	2.33	2.29
1200	1.96	2.27	2.42	2.32	2.07	1.62	1.84	2.04	2.32	2.28

表 5-17 10 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
60	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
72	0.50	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
84	0.88	1.74	0.50	2.00	0.36	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
96	1.94	2.01	0.62	2.16	0.44	0.62	1.54	1.68	0.80	0.79
108	2.16	1.94	2.33	1.97	0.51	0.68	1.59	1.72	0.81	0.79
120	2.07	2.17	2.27	2.35	0.96	0.76	1.67	1.78	0.90	0.80
132	2.31	2.39	2.57	2.65	0.97	0.83	1.81	1.83	1.01	0.89
144	2.48	2.71	2.73	2.54	0.97	1.78	1.91	1.63	1.12	0.97
156	2.67	2.66	3.15	2.43	0.95	1.60	2.01	1.75	2.46	1.01
168	2.86	2.76	3.25	2.60	0.95	1.73	2.13	1.86	2.20	1.07
180	3.04	2.77	3.35	2.39	0.96	1.80	2.24	1.95	2.40	1.12
192	3.22	2.83	3.23	2.50	0.98	1.96	2.38	2.06	2.61	1.16
204	3.41	2.91	3.09	2.61	1.02	2.12	2.51	2.22	2.35	1.23
216	3.58	2.94	3.15	2.93	1.06	2.19	2.50	2.28	2.08	2.52
228	3.77	3.02	3.30	3.03	1.11	2.28	2.60	2.33	2.59	2.61
240	3.96	3.02	3.20	2.86	2.31	2.36	2.68	2.39	2.75	2.71
252	4.16	3.08	3.31	3.01	2.46	2.46	2.74	2.45	2.94	2.78
264	4.36	3.14	3.46	3.16	2.59	2.53	2.65	2.42	3.07	2.84
276	4.38	3.24	3.63	3.32	2.64	2.64	2.70	2.67	3.21	2.39

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	4.46	3.32	3.78	3.50	2.86	2.77	2.73	2.79	3.34	2.66
300	4.59	3.41	3.94	3.69	3.01	2.89	2.77	2.87	3.41	2.89
312	4.62	3.46	4.08	3.82	3.10	3.01	2.84	2.77	3.52	3.06
324	4.63	3.52	4.12	3.92	3.17	3.10	2.87	2.87	3.62	3.29
336	4.70	3.56	4.19	3.98	3.23	3.16	2.89	2.91	3.58	3.38
348	4.74	3.59	4.22	4.03	3.27	3.20	2.91	3.15	3.61	3.43
360	4.77	3.61	4.24	4.05	3.29	3.22	2.93	3.17	3.64	3.79
372	4.77	3.61	4.24	4.05	3.30	3.23	2.94	3.18	3.65	3.81
384	4.76	3.42	4.23	4.04	3.29	3.23	2.94	3.18	3.65	3.81
396	4.73	3.41	4.22	4.02	3.28	3.21	2.93	3.17	3.64	3.80
408	4.70	3.57	4.20	4.00	3.35	3.19	2.92	3.16	3.62	3.48
420	4.66	3.55	4.16	3.80	3.10	3.17	2.90	3.14	3.59	3.46
432	4.61	3.34	4.13	3.77	3.08	3.14	2.89	3.12	3.58	3.43
444	4.56	3.49	4.14	3.74	3.06	3.10	2.87	3.12	3.59	3.40
456	4.64	3.46	4.09	3.70	3.03	3.07	2.85	3.09	3.62	3.37
468	4.64	3.44	4.04	3.66	3.02	3.03	2.86	3.06	3.60	3.33
480	4.60	3.41	3.99	3.74	2.99	2.99	2.86	3.02	3.56	3.29
492	4.57	3.39	3.94	3.70	2.96	2.95	2.84	2.98	3.53	3.25
504	4.53	3.36	3.88	3.64	2.93	2.90	2.82	2.97	3.49	3.22
516	4.49	3.34	3.66	3.59	2.90	2.87	2.80	2.93	3.46	3.19
528	4.45	3.32	3.65	3.53	2.88	2.84	2.78	2.89	3.44	3.15
540	4.41	3.30	3.64	3.48	2.62	2.81	2.76	2.86	3.39	3.45
552	4.46	3.29	3.59	3.42	3.07	2.77	2.73	2.65	3.41	3.43
564	4.40	3.25	3.55	3.37	3.03	2.73	2.72	2.64	3.63	3.40
576	4.33	3.22	3.50	3.31	3.00	2.69	2.73	2.78	3.60	3.36
588	4.46	3.19	3.45	3.26	2.97	2.65	2.73	2.74	3.56	3.34

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.37	3.15	3.54	3.20	2.93	2.61	2.72	2.70	3.53	3.32
612	4.29	3.13	3.43	3.15	2.72	2.57	2.70	2.49	3.49	3.32
624	4.22	3.10	3.38	3.09	2.68	2.54	2.68	2.65	3.46	2.86
636	4.14	3.08	3.33	3.26	2.65	2.51	2.66	2.63	3.19	2.85
648	4.07	3.06	3.28	3.20	2.44	2.48	2.65	2.61	3.15	2.81
660	4.00	3.04	3.24	2.95	2.40	2.45	2.73	2.63	3.12	2.79
672	3.93	3.02	3.44	2.91	2.36	2.43	2.74	2.64	3.08	2.76
684	3.86	3.00	3.39	2.89	2.32	2.39	2.75	2.66	3.22	2.73
696	3.79	3.04	3.34	2.88	2.13	2.36	2.74	2.66	3.17	2.72
708	3.72	3.01	3.09	2.86	2.07	2.33	2.71	2.64	2.86	2.72
720	3.66	2.98	3.06	2.83	2.45	2.30	2.69	2.62	2.82	2.72
732	3.60	2.96	3.04	2.80	2.42	2.28	2.66	2.60	2.45	2.71
744	3.53	2.93	3.02	2.78	2.35	2.14	2.63	2.39	2.65	2.68
756	3.47	2.91	2.99	2.75	2.32	2.12	2.60	2.38	2.64	2.67
768	3.41	2.91	2.96	2.72	2.30	2.21	2.57	2.37	2.62	2.63
780	3.35	2.90	2.93	2.69	2.27	2.17	2.56	2.37	2.62	2.61
792	3.29	2.86	2.90	2.77	2.24	2.15	2.50	2.35	2.31	2.58
804	3.23	2.83	2.87	2.73	2.24	2.13	2.46	2.32	2.30	2.57
816	3.18	2.79	2.84	2.48	2.15	1.97	2.53	2.37	2.19	2.53
828	3.12	2.76	2.81	2.44	2.14	2.08	2.53	2.33	2.18	2.49
840	3.07	2.78	3.40	2.42	2.11	1.81	2.50	2.30	2.16	2.97
852	3.01	2.77	3.37	2.38	2.10	1.79	2.47	2.27	2.50	2.94
864	2.96	2.76	3.12	2.31	2.08	1.76	2.44	2.47	2.47	2.92
876	2.91	2.75	3.09	2.30	2.08	1.74	2.40	2.45	2.43	2.89
888	2.86	2.76	3.07	2.30	2.07	1.72	2.36	2.44	2.40	2.86
900	2.80	2.76	3.25	2.30	2.07	1.70	2.33	2.43	2.38	2.84

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.75	2.95	3.22	2.30	2.06	1.67	2.29	2.15	2.33	2.81
924	2.70	2.91	3.19	2.32	2.06	1.68	2.25	2.29	2.30	2.78
936	2.58	2.87	3.16	2.38	2.06	1.66	2.22	2.24	2.27	2.76
948	2.62	2.65	2.92	2.38	2.06	1.55	2.18	2.22	2.23	2.74
960	2.59	2.79	2.90	2.37	2.06	1.52	2.19	2.19	2.19	2.71
972	2.57	2.76	2.87	2.33	2.06	1.50	2.16	2.17	2.15	2.73
984	2.54	2.72	2.85	2.55	2.05	1.48	2.15	2.16	2.14	2.70
996	2.69	2.51	2.82	2.25	2.11	1.74	2.12	2.14	2.12	2.69
1008	2.68	2.48	2.80	2.52	2.10	1.72	2.09	2.12	2.08	2.67
1020	2.49	2.46	2.77	2.50	2.08	1.69	1.95	1.93	2.04	2.64
1032	2.49	2.44	2.75	2.49	2.09	1.67	1.93	1.90	1.99	2.62
1044	2.48	2.43	2.71	2.48	2.10	1.66	1.91	1.87	2.06	2.21
1056	2.47	2.41	2.69	2.47	2.10	1.64	1.90	1.87	2.31	2.19
1068	2.46	2.38	2.66	2.48	2.10	1.62	1.89	1.86	2.29	2.18
1080	2.21	2.36	2.63	2.73	2.09	1.60	1.87	1.83	2.25	2.15
1092	2.19	2.29	2.88	2.72	2.08	1.57	1.85	1.80	2.21	2.13
1104	2.35	2.26	2.88	2.71	2.08	1.55	1.84	1.77	2.18	2.12
1116	2.32	2.24	2.87	2.52	2.07	1.52	1.83	1.75	2.14	2.10
1128	2.30	2.20	2.86	2.49	2.09	1.49	1.83	1.75	2.09	2.11
1140	2.41	2.18	2.64	2.46	2.08	1.78	1.82	1.77	2.04	2.12
1152	2.39	2.16	2.61	2.43	2.07	1.76	1.81	2.10	2.34	2.11
1164	2.37	2.13	2.58	2.41	2.07	1.75	1.81	2.09	2.32	2.10
1176	2.35	2.08	2.54	2.39	2.06	1.64	1.80	2.07	2.29	2.10
1188	2.33	2.27	2.51	2.38	2.06	1.62	1.79	2.05	2.28	2.08
1200	2.15	2.26	2.47	2.34	2.06	1.61	1.78	2.04	2.27	2.06

表 5-18 20 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
60	0.51	0.86	0.44	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
72	0.89	1.81	2.10	0.52	0.37	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
84	2.01	2.05	2.34	1.03	0.44	0.64	1.54	1.68	0.80	0.79
96	2.23	2.10	2.42	2.25	0.52	0.70	1.61	1.73	0.83	0.78
108	2.34	2.45	2.71	2.62	0.96	0.79	1.70	1.78	0.92	0.81
120	2.38	2.63	2.74	2.38	0.97	1.44	1.86	1.88	1.06	0.90
132	2.58	2.59	3.09	2.25	0.98	1.63	1.93	1.64	2.25	1.00
144	2.78	2.75	3.21	2.31	0.95	1.44	2.07	1.81	2.57	1.03
156	2.97	2.76	3.31	2.27	0.96	1.59	2.21	2.09	2.28	2.31
168	3.16	2.80	3.18	2.38	0.97	1.67	2.40	2.00	2.54	2.37
180	3.36	2.92	3.07	2.54	1.01	2.08	2.46	2.14	2.71	2.50
192	3.54	2.92	3.19	2.66	1.05	2.17	2.46	2.32	2.19	2.20
204	3.73	3.01	3.04	3.01	1.10	2.25	2.54	2.33	2.23	2.30
216	3.93	3.01	3.18	3.08	2.26	2.33	2.66	2.37	2.36	2.38
228	4.12	3.07	3.29	2.98	2.45	2.44	2.75	2.45	3.18	2.46
240	4.32	3.13	3.43	3.13	2.56	2.51	2.73	2.44	3.04	2.48
252	4.34	3.21	3.59	3.28	2.37	2.61	2.69	2.44	3.19	2.56
264	4.40	3.29	3.75	3.43	3.00	2.73	2.74	2.54	3.31	3.02
276	4.52	3.35	3.84	3.60	2.87	2.83	2.74	2.61	3.41	2.79

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	4.67	3.44	4.05	3.78	2.99	2.96	2.82	2.73	3.47	2.97
300	4.71	3.56	4.18	3.97	3.31	3.12	2.85	2.86	3.61	3.16
312	4.87	3.48	4.27	4.11	3.43	3.26	2.93	2.97	3.64	3.36
324	4.97	3.54	4.14	4.02	3.51	3.34	3.01	3.25	3.74	3.47
336	5.04	3.57	4.17	4.07	3.56	3.40	3.07	3.31	3.82	3.52
348	5.07	3.60	4.19	4.10	3.59	3.44	3.10	3.14	3.86	3.58
360	5.08	3.60	4.20	4.11	3.60	3.45	3.12	3.15	3.88	3.61
372	5.07	3.60	4.19	4.11	3.60	3.45	3.12	3.15	3.88	3.61
384	5.05	3.59	4.18	4.09	3.59	3.43	3.11	3.15	3.87	3.39
396	5.01	3.57	4.17	4.07	3.56	3.41	3.09	3.33	3.85	3.37
408	4.97	3.54	4.14	4.05	3.54	3.38	3.07	3.31	3.82	3.35
420	4.92	3.52	4.32	4.01	3.50	3.35	3.04	3.29	3.79	3.33
432	4.86	3.49	4.28	3.98	3.24	3.31	3.01	3.26	3.75	3.61
444	4.80	3.45	4.26	4.08	3.21	3.27	2.97	3.22	3.71	3.58
456	4.73	3.41	4.22	3.86	3.18	3.23	2.95	3.19	3.67	3.55
468	4.67	3.38	4.17	3.81	3.15	3.18	2.91	3.15	3.61	3.48
480	4.60	3.34	4.12	3.77	3.11	3.13	2.89	2.94	3.58	3.44
492	4.56	3.46	4.11	3.86	3.09	3.09	2.86	2.94	3.63	3.39
504	4.64	3.44	4.04	3.80	3.06	3.04	2.86	2.91	3.61	3.34
516	4.59	3.24	3.98	3.74	2.99	2.98	2.86	2.87	3.57	3.29
528	4.56	3.21	3.91	3.68	2.96	2.94	2.84	2.84	3.52	3.25
540	4.51	3.19	3.85	3.62	2.91	2.89	2.81	2.82	3.48	3.22
552	4.46	3.33	3.80	3.56	2.90	2.85	2.79	2.91	3.45	3.17
564	4.42	3.31	3.81	3.50	2.85	2.82	2.77	2.87	3.41	3.46
576	4.47	3.29	3.74	3.43	2.57	2.78	2.74	2.84	3.41	3.44
588	4.40	3.26	3.68	3.37	3.03	2.73	2.72	2.82	3.38	3.40

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.33	3.22	3.61	3.31	2.99	2.69	2.73	2.60	3.34	3.36
612	4.44	3.18	3.55	3.25	2.96	2.55	2.73	2.74	3.56	3.34
624	4.35	3.15	3.48	3.20	2.92	2.62	2.72	2.70	3.53	3.32
636	4.27	3.12	3.42	3.16	2.71	2.59	2.69	2.67	3.48	3.31
648	4.19	3.09	3.36	3.11	2.67	2.56	2.67	2.46	3.44	2.85
660	4.12	3.07	3.31	3.07	2.44	2.54	2.65	2.45	3.41	2.83
672	4.04	3.05	3.28	3.03	2.32	2.52	2.65	2.44	3.11	2.80
684	3.96	3.03	3.26	2.99	2.28	2.50	2.73	2.65	3.08	2.78
696	3.89	3.01	3.22	2.95	2.24	2.48	2.74	2.64	3.03	2.75
708	3.82	3.00	3.18	2.95	2.18	2.45	2.75	2.66	2.99	2.73
720	3.75	3.02	3.15	2.93	2.13	2.42	2.72	2.65	2.95	2.71
732	3.68	2.99	3.11	2.90	2.50	2.40	2.69	2.62	2.91	2.73
744	3.61	2.96	3.09	2.87	2.47	2.38	2.67	2.41	3.14	2.71
756	3.54	2.94	3.07	2.84	2.44	2.55	2.64	2.40	2.81	2.68
768	3.48	2.91	3.04	2.82	2.41	2.54	2.61	2.38	2.79	2.67
780	3.42	2.90	3.02	2.81	2.40	2.21	2.57	2.37	2.78	2.63
792	3.35	2.90	2.98	2.76	2.36	2.18	2.56	2.38	2.78	2.61
804	3.29	2.86	2.95	2.77	2.33	2.15	2.50	2.36	2.23	2.59
816	3.23	2.83	2.92	2.73	2.33	2.13	2.46	2.33	2.21	2.56
828	3.17	2.79	2.89	2.47	2.31	1.97	2.53	2.37	2.19	2.53
840	3.11	2.75	2.85	2.44	2.29	2.08	2.53	2.34	2.18	2.49
852	3.06	2.78	3.40	2.40	2.28	1.81	2.49	2.30	2.52	2.97
864	3.00	2.77	3.36	2.37	2.26	1.79	2.47	2.49	2.51	2.94
876	2.95	2.76	3.33	2.35	2.25	1.76	2.43	2.47	2.47	2.92
888	2.89	2.75	3.30	2.34	2.24	1.73	2.39	2.46	2.43	2.88
900	2.84	2.76	3.26	2.34	2.24	1.99	2.35	2.45	2.39	2.85

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.78	2.95	3.23	2.34	2.23	1.69	2.31	2.44	2.36	2.83
924	2.73	2.93	3.21	2.35	2.22	1.67	2.27	2.15	2.32	2.80
936	2.60	2.71	2.96	2.38	2.22	1.68	2.24	2.30	2.30	2.77
948	2.55	2.68	3.15	2.40	2.23	1.65	2.20	2.27	2.18	2.75
960	2.61	2.65	2.90	2.40	2.23	1.63	2.19	2.22	2.10	2.77
972	2.58	2.62	2.87	2.37	2.22	1.88	2.18	2.23	2.10	2.73
984	2.48	2.59	2.85	2.58	2.22	1.85	2.15	2.21	2.07	2.71
996	2.43	2.57	2.82	2.56	2.10	1.84	2.12	2.19	2.06	2.70
1008	2.18	2.54	2.80	2.51	2.11	1.80	2.10	2.17	2.03	2.68
1020	2.32	2.52	2.78	2.48	2.09	1.78	2.08	2.15	1.98	2.65
1032	2.30	2.50	2.74	2.47	2.09	1.76	2.05	2.12	1.94	2.63
1044	2.29	2.49	2.72	2.46	2.09	1.74	2.03	2.09	1.89	2.61
1056	2.25	2.47	2.70	2.45	2.10	1.73	2.01	2.09	2.26	2.60
1068	2.03	2.36	2.68	2.45	2.10	1.71	2.00	1.92	2.23	2.58
1080	2.01	2.33	2.65	2.44	2.10	1.69	1.86	1.90	2.20	2.57
1092	1.99	2.30	2.61	2.68	2.09	1.66	1.84	1.87	2.16	2.55
1104	1.97	2.28	2.87	2.66	2.09	1.64	1.83	1.84	2.13	2.54
1116	1.95	2.25	2.87	2.33	2.08	1.61	1.82	1.81	2.09	2.52
1128	2.15	2.23	2.86	2.47	2.09	1.58	1.81	1.80	2.05	2.51
1140	2.12	2.20	2.63	2.44	2.08	1.88	1.81	1.82	2.00	2.53
1152	2.10	2.15	2.60	2.41	2.08	1.87	1.80	2.18	2.36	2.53
1164	2.08	2.13	2.57	2.39	2.07	1.82	1.79	2.16	2.34	2.52
1176	2.05	2.10	2.54	2.37	2.07	1.84	1.79	2.16	2.33	2.51
1188	2.03	2.10	2.54	2.35	2.07	1.62	1.77	2.14	2.30	2.51
1200	2.00	2.26	2.47	2.32	2.06	1.62	1.76	2.11	2.29	2.48

表 5-19 25 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
60	0.95	0.88	0.45	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
72	1.83	1.93	0.56	0.54	0.38	0.60	1.54	1.68	0.80	0.79
84	2.07	1.73	0.68	1.07	0.46	0.66	1.55	1.68	0.80	0.79
96	1.93	2.08	2.68	2.34	0.97	0.73	1.63	1.77	0.85	0.78
108	2.41	2.29	2.51	2.65	0.97	0.81	1.75	1.80	0.96	0.84
120	2.44	2.47	2.69	2.46	0.98	1.73	1.88	1.91	1.08	0.93
132	2.65	2.64	2.86	2.39	0.98	1.89	1.97	1.70	2.38	1.01
144	2.85	2.76	2.98	2.33	0.95	1.72	2.11	1.85	2.67	1.05
156	3.04	2.77	3.10	2.31	0.96	1.80	2.23	1.94	2.37	1.17
168	3.24	2.84	2.75	2.66	0.98	1.96	2.37	2.05	2.61	1.16
180	3.43	2.91	2.89	2.82	1.03	2.12	2.51	2.29	2.35	1.23
192	3.63	2.96	3.23	2.94	1.07	2.20	2.50	2.34	2.09	2.52
204	3.81	3.04	3.09	2.83	2.05	2.28	2.61	2.37	2.61	2.62
216	4.00	3.03	3.23	2.89	2.34	2.38	2.69	2.62	2.79	2.73
228	4.20	3.09	3.34	3.04	2.46	2.47	2.74	2.64	2.96	2.77
240	4.40	3.16	3.49	3.19	2.62	2.55	2.65	2.61	3.38	2.86
252	4.40	3.25	3.65	3.34	2.92	2.66	2.71	2.68	3.23	2.49
264	4.44	3.31	3.81	3.49	2.52	2.77	2.73	2.79	3.35	3.21
276	4.57	3.39	3.91	3.66	2.87	2.87	2.77	2.86	3.40	2.97

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	4.57	3.48	4.11	3.84	3.22	3.01	2.84	2.97	3.52	3.12
300	4.79	3.43	4.24	4.04	3.36	3.18	2.89	3.11	3.57	3.63
312	4.94	3.71	4.33	4.18	3.49	3.31	2.97	3.01	3.70	3.83
324	5.05	3.58	4.18	4.26	3.56	3.40	3.06	3.10	3.80	3.94
336	5.10	3.61	4.20	4.12	3.61	3.45	3.12	3.15	3.87	3.38
348	5.14	3.60	4.22	4.15	3.64	3.49	3.15	3.17	3.91	3.77
360	5.14	3.60	4.23	4.16	3.65	3.50	3.16	3.18	3.93	3.79
372	5.13	3.60	4.22	4.15	3.64	3.49	3.16	3.18	3.93	3.80
384	5.11	3.62	4.21	4.14	3.63	3.48	3.15	3.17	3.92	3.78
396	5.07	3.60	4.19	4.11	3.60	3.45	3.13	3.16	3.90	3.77
408	5.00	3.58	4.17	4.08	3.57	3.42	3.11	3.34	3.87	3.38
420	4.97	3.54	4.15	4.05	3.54	3.39	3.08	3.32	3.83	3.35
432	4.91	3.51	4.31	4.01	3.50	3.35	3.04	3.29	3.79	3.32
444	4.84	3.48	4.27	3.97	3.46	3.30	3.01	3.26	3.75	3.59
456	4.78	3.43	4.25	3.92	3.20	3.26	2.97	3.22	3.70	3.55
468	4.71	3.40	4.20	3.88	3.16	3.21	2.94	3.19	3.65	3.51
480	4.64	3.54	4.15	3.83	3.13	3.16	2.90	3.14	3.60	3.46
492	4.57	3.32	4.09	3.89	3.09	3.11	2.88	3.10	3.57	3.42
504	4.67	3.29	4.08	3.83	3.06	3.06	2.85	3.09	3.62	3.37
516	4.62	3.42	4.01	3.77	2.99	3.01	2.85	3.04	3.59	3.31
528	4.58	3.40	3.96	3.71	2.97	2.96	2.85	2.82	3.54	3.27
540	4.53	3.36	3.88	3.64	2.93	2.91	2.83	2.96	3.50	3.23
552	4.48	3.34	3.81	3.58	2.90	2.87	2.80	2.93	3.46	3.19
564	4.44	3.31	3.78	3.52	2.87	2.83	2.78	2.89	3.44	3.14
576	4.39	3.30	3.77	3.46	2.60	2.79	2.75	2.85	3.38	3.03
588	4.42	3.27	3.70	3.39	3.05	2.75	2.72	2.64	3.65	3.33

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.36	3.23	3.63	3.33	3.01	2.71	2.73	2.63	3.61	3.29
612	4.29	3.20	3.57	3.27	2.98	2.66	2.73	2.59	3.57	3.25
624	4.38	3.16	3.50	3.21	2.94	2.62	2.72	2.56	3.54	3.24
636	4.30	3.13	3.44	3.37	2.72	2.48	2.70	2.54	3.50	3.23
648	4.22	3.10	3.38	3.10	2.68	2.55	2.68	2.52	3.46	2.80
660	4.14	3.08	3.32	3.06	2.65	2.53	2.65	2.50	3.42	2.78
672	4.06	3.05	3.27	3.02	2.43	2.51	2.65	2.61	3.37	2.75
684	3.98	3.03	3.24	2.98	2.40	2.49	2.73	2.64	3.33	2.72
696	3.91	3.01	3.42	2.94	2.35	2.47	2.74	2.64	3.26	2.69
708	3.83	2.98	3.37	2.92	2.30	2.44	2.74	2.66	3.21	2.66
720	3.76	3.03	3.32	2.92	2.25	2.34	2.73	2.65	3.15	2.65
732	3.69	3.00	3.27	2.88	2.65	2.32	2.70	2.63	2.85	2.64
744	3.62	2.97	3.25	2.86	2.62	2.29	2.68	2.42	2.49	2.64
756	3.56	2.94	3.22	2.83	2.59	2.26	2.65	2.41	2.44	2.62
768	3.49	2.91	3.18	2.80	2.55	2.24	2.62	2.39	2.66	2.60
780	3.43	2.90	3.15	2.78	2.53	2.21	2.58	2.38	2.64	2.57
792	3.37	2.91	3.10	2.74	2.50	2.06	2.56	2.38	2.64	2.54
804	3.30	2.87	3.05	2.71	2.47	2.04	2.51	2.36	2.63	2.52
816	3.24	2.83	2.80	2.67	2.45	2.02	2.47	2.33	2.31	2.50
828	3.11	2.80	2.74	2.64	2.45	2.12	2.51	2.38	2.30	2.47
840	3.07	2.76	2.93	2.60	2.43	2.11	2.53	2.34	2.28	2.32
852	3.02	2.78	3.15	2.58	2.41	2.09	2.50	2.31	2.61	2.27
864	3.01	2.77	3.11	2.34	2.40	1.82	2.47	2.49	2.59	2.71
876	2.95	2.76	3.07	2.31	2.39	1.79	2.44	2.48	2.55	2.68
888	2.90	2.75	3.04	2.30	2.38	1.77	2.39	2.47	2.51	2.65
900	2.84	2.76	3.27	2.30	2.38	2.01	2.35	2.45	2.47	2.62

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.79	2.76	3.24	2.30	2.37	1.99	2.31	2.44	2.45	2.59
924	2.73	2.74	3.21	2.31	2.36	1.70	2.27	2.11	2.40	2.56
936	2.68	2.89	3.18	2.34	2.36	1.71	2.24	2.10	2.38	2.54
948	2.63	2.85	3.15	2.36	2.36	1.68	2.20	2.24	2.34	2.52
960	2.58	2.81	2.90	2.36	2.36	1.66	2.21	2.21	2.30	2.49
972	2.53	2.60	2.88	2.33	2.36	1.90	2.18	2.19	2.26	2.50
984	2.48	2.58	2.85	2.29	2.36	1.88	2.15	2.17	2.23	2.48
996	2.46	2.55	2.83	2.52	2.41	1.86	2.13	2.15	2.21	2.46
1008	2.24	2.52	2.79	2.50	2.41	1.83	2.11	2.14	2.18	2.44
1020	2.21	2.50	2.76	2.70	2.40	1.81	2.08	2.11	2.14	2.42
1032	2.20	2.48	2.75	2.50	2.39	1.78	2.05	1.93	1.90	2.40
1044	2.19	2.47	2.73	2.49	2.39	1.77	1.92	1.90	1.85	2.37
1056	2.17	2.45	2.71	2.48	2.40	1.76	1.90	1.88	1.82	2.36
1068	2.14	2.42	2.67	2.48	2.41	1.74	1.89	1.88	2.19	2.35
1080	2.12	2.33	2.64	2.47	2.40	1.71	1.88	1.85	2.16	2.33
1092	2.10	2.30	2.61	2.72	2.39	1.69	1.95	1.82	2.11	2.32
1104	2.08	2.28	2.87	2.70	2.39	1.66	1.93	1.79	2.08	2.30
1116	2.26	2.25	2.87	2.36	2.38	1.63	1.92	1.76	2.04	2.29
1128	2.23	2.23	2.86	2.49	2.39	1.60	1.91	1.76	2.00	2.27
1140	2.21	2.20	2.63	2.47	2.40	1.92	1.90	1.77	1.95	2.30
1152	2.18	2.15	2.60	2.44	2.38	1.90	1.90	1.76	2.31	2.29
1164	2.16	2.13	2.57	2.41	2.37	1.89	1.89	1.99	2.28	2.28
1176	2.14	2.10	2.54	2.39	2.37	1.87	1.88	1.98	2.26	2.28
1188	2.11	2.11	2.55	2.37	2.37	1.62	1.86	1.96	2.23	2.26
1200	2.09	2.27	2.47	2.34	2.37	1.62	1.85	1.94	2.23	2.25

表 5-20 50 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	0.53	0.86	0.44	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
60	1.80	1.89	0.54	0.53	0.37	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
72	2.08	1.75	2.50	1.06	0.45	0.65	1.55	1.68	0.80	0.79
84	1.98	2.00	2.85	2.42	0.96	0.72	1.62	1.74	0.83	0.78
96	2.45	2.32	2.65	2.73	0.97	0.81	1.75	1.80	0.95	1.68
108	2.48	2.50	2.81	2.54	0.98	1.76	1.89	1.93	1.09	1.87
120	2.70	2.68	3.16	2.38	0.95	1.60	2.00	1.73	2.42	1.99
132	2.92	2.75	3.28	2.32	0.95	1.75	2.14	1.86	2.21	2.07
144	3.12	2.79	3.40	2.38	0.97	1.48	2.27	1.97	2.45	2.18
156	3.33	2.89	2.88	2.75	1.00	2.05	2.43	2.09	2.66	2.28
168	3.56	2.93	3.00	2.67	1.04	2.16	2.53	2.29	1.95	2.01
180	3.73	3.00	3.26	2.76	1.09	2.25	2.54	2.32	2.16	2.42
192	3.93	3.01	3.18	3.08	2.26	2.33	2.65	2.37	2.69	2.49
204	4.13	3.07	3.29	2.98	2.45	2.44	2.75	2.45	2.91	2.57
216	4.33	3.13	3.44	3.13	2.57	2.52	2.65	2.43	3.05	2.59
228	4.34	3.22	3.60	3.28	2.38	2.62	2.69	2.45	3.19	2.67
240	4.40	3.30	3.76	3.44	2.79	2.73	2.74	2.54	3.31	2.74
252	4.52	3.35	3.83	3.59	2.89	2.83	2.74	2.62	3.41	2.84
264	4.65	3.43	4.01	3.75	2.95	2.93	2.81	2.72	3.46	3.33
276	4.65	3.53	4.13	3.92	3.04	3.07	2.85	2.82	3.58	3.52

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	4.90	3.68	4.28	4.11	3.44	3.25	2.92	3.15	3.61	3.43
300	5.11	3.61	4.00	4.30	3.59	3.42	3.06	3.09	3.80	3.63
312	5.28	3.61	4.27	4.26	3.71	3.56	3.19	3.20	3.96	3.80
324	5.37	3.65	4.31	4.34	3.77	3.64	3.27	3.28	4.06	4.20
336	5.42	3.70	4.35	4.40	3.81	3.69	3.33	3.32	4.12	4.26
348	5.44	3.71	4.36	4.42	3.83	3.71	3.35	3.33	4.15	4.21
360	5.44	3.71	4.36	4.42	3.83	3.71	3.36	3.34	4.15	4.22
372	5.41	3.70	4.35	4.40	3.82	3.70	3.35	3.33	4.15	4.21
384	5.37	3.68	4.33	4.36	3.80	3.67	3.33	3.32	4.13	4.20
396	5.32	3.66	4.30	4.32	3.77	3.64	3.30	3.31	4.10	4.25
408	5.27	3.61	4.28	4.28	3.74	3.60	3.27	3.27	4.06	4.22
420	5.20	3.57	4.25	4.24	3.69	3.55	3.23	3.24	4.02	3.91
432	5.13	3.60	4.22	4.19	3.65	3.51	3.18	3.21	3.97	3.85
444	5.06	3.59	4.19	4.11	3.40	3.46	3.14	3.36	3.91	3.78
456	4.98	3.55	4.15	4.05	3.36	3.41	3.10	3.33	3.86	3.73
468	4.91	3.51	4.31	4.00	3.32	3.35	3.05	3.11	3.80	3.65
480	4.83	3.47	4.28	3.95	3.28	3.29	3.00	3.08	3.74	3.91
492	4.75	3.43	4.23	4.05	3.25	3.24	2.95	3.04	3.68	3.52
504	4.67	3.40	4.17	3.81	3.20	3.18	2.92	3.01	3.62	3.48
516	4.58	3.35	4.11	3.75	3.16	3.13	2.89	2.97	3.58	3.43
528	4.68	3.32	4.09	3.70	3.13	3.07	2.86	2.96	3.63	3.37
540	4.62	3.42	4.01	3.64	2.99	3.01	2.85	2.92	3.59	3.32
552	4.56	3.39	3.94	3.59	2.97	2.95	2.85	2.88	3.54	3.23
564	4.52	3.35	3.87	3.63	2.92	2.90	2.82	2.87	3.50	3.19
576	4.47	3.17	3.80	3.57	2.89	2.86	2.80	2.92	3.46	3.14
588	4.42	3.15	3.82	3.50	2.85	2.82	2.77	2.88	3.42	3.09

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.47	3.13	3.74	3.43	2.56	2.78	2.74	2.84	3.37	3.02
612	4.39	3.10	3.67	3.37	3.02	2.73	2.72	2.82	3.38	3.31
624	4.32	3.07	3.60	3.30	2.92	2.68	2.73	2.78	3.59	3.27
636	4.42	3.04	3.53	3.24	2.88	2.64	2.74	2.73	3.55	3.24
648	4.33	3.01	3.46	3.17	2.51	2.60	2.71	2.52	3.52	3.23
660	4.24	3.11	3.27	3.11	2.65	2.55	2.69	2.49	3.47	2.77
672	4.16	3.08	3.36	3.05	2.42	2.51	2.66	2.47	3.43	2.75
684	4.08	3.06	3.32	3.21	2.38	2.48	2.65	2.46	3.39	2.72
696	4.00	3.04	3.29	3.15	2.35	2.46	2.73	2.47	3.34	2.69
708	3.92	3.02	3.26	2.90	2.30	2.42	2.74	2.48	3.28	2.66
720	3.84	2.99	3.22	2.88	2.25	2.39	2.75	2.50	2.97	2.63
732	3.77	3.03	3.18	2.87	2.20	2.24	2.73	2.49	2.92	2.61
744	3.69	3.00	3.14	2.84	2.58	2.22	2.70	2.47	2.88	2.61
756	3.62	2.97	3.12	2.81	2.54	2.31	2.68	2.46	2.84	2.61
768	3.55	2.94	3.10	2.78	2.51	2.29	2.65	2.44	2.74	2.58
780	3.49	2.91	3.07	2.75	2.48	2.27	2.62	2.43	2.72	2.56
792	3.42	2.90	3.04	2.72	2.45	2.25	2.57	2.41	2.70	2.54
804	3.35	2.90	3.01	2.69	2.24	2.42	2.55	2.42	2.70	2.50
816	3.29	2.86	2.97	2.65	2.21	2.41	2.50	2.39	2.69	2.48
828	3.23	2.82	2.94	2.62	2.21	2.40	2.46	2.37	2.68	2.47
840	3.16	2.78	2.91	2.58	2.19	2.09	2.53	2.41	2.33	2.43
852	3.10	2.74	2.69	2.54	2.17	2.06	2.53	2.38	2.32	2.38
864	3.04	2.77	3.13	2.51	2.16	1.77	2.49	2.55	2.63	2.32
876	2.98	2.76	3.09	2.32	2.14	1.73	2.46	2.54	2.61	2.80
888	2.92	2.76	3.05	2.30	2.13	1.70	2.42	2.52	2.57	2.77
900	2.87	2.75	3.02	2.30	2.12	1.68	2.37	2.51	2.52	2.73

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.81	2.76	3.25	2.30	2.12	1.65	2.34	2.50	2.50	2.70
924	2.75	2.95	3.22	2.30	2.11	1.63	2.29	2.49	2.45	2.51
936	2.70	2.91	3.19	2.32	2.11	1.63	2.25	2.33	2.41	2.48
948	2.65	2.68	3.16	2.36	2.11	1.62	2.22	2.24	2.38	2.46
960	2.59	2.65	3.13	2.36	2.11	1.59	2.18	2.22	2.34	2.43
972	2.54	2.63	2.88	2.35	2.11	1.57	2.19	2.19	2.30	2.41
984	2.49	2.75	2.86	2.30	2.11	1.83	2.16	2.17	2.26	2.38
996	2.45	2.72	2.83	2.51	2.12	1.80	2.14	2.16	2.25	2.40
1008	2.60	2.51	2.81	2.22	2.16	1.78	2.10	2.13	2.23	2.38
1020	2.17	2.48	2.78	2.52	2.15	1.76	1.97	2.11	2.18	2.35
1032	2.16	2.47	2.76	2.50	2.13	1.73	1.95	1.93	2.14	2.33
1044	2.15	2.43	2.75	2.50	2.14	1.72	1.93	1.90	2.09	2.31
1056	2.13	2.40	2.71	2.48	2.14	1.70	1.92	1.88	2.52	2.29
1068	2.10	2.38	2.68	2.48	2.15	1.68	1.90	1.88	2.42	2.28
1080	2.08	2.35	2.65	2.48	2.15	1.66	1.89	1.85	2.39	2.27
1092	2.06	2.33	2.62	2.72	2.14	1.63	1.87	1.82	2.35	2.25
1104	2.04	2.30	2.87	2.70	2.14	1.61	1.85	1.79	2.31	2.24
1116	2.02	2.28	2.87	2.36	2.13	1.58	1.84	1.68	2.28	2.22
1128	2.20	2.25	2.85	2.50	2.12	1.55	1.83	1.67	2.23	2.20
1140	2.18	2.22	2.65	2.47	2.14	1.84	1.82	1.68	2.19	2.23
1152	2.15	2.15	2.61	2.44	2.13	1.82	1.82	1.67	2.61	2.22
1164	2.12	2.13	2.57	2.41	2.12	1.81	1.81	1.98	2.58	2.21
1176	2.10	2.10	2.54	2.39	2.12	1.79	1.80	1.97	2.57	2.21
1188	2.07	2.27	2.47	2.41	2.12	1.78	1.79	1.95	2.54	2.19
1200	2.05	2.27	2.46	2.33	2.12	1.77	1.78	1.93	2.53	2.17

表 5-21 100 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	0.89	0.92	0.49	0.49	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
60	2.01	2.05	0.64	1.02	0.43	0.61	1.54	1.68	0.80	0.79
72	1.88	2.04	2.46	2.33	0.52	0.73	1.57	1.70	0.81	0.79
84	2.43	2.30	2.52	2.65	0.97	0.80	1.70	1.78	0.92	0.79
96	2.47	2.50	2.72	2.52	0.98	1.74	1.87	1.88	2.24	0.90
108	2.70	2.68	2.89	2.43	0.95	1.59	1.99	1.71	2.14	1.01
120	2.93	2.75	3.02	2.37	0.95	1.75	2.13	1.87	2.37	1.06
132	3.15	2.79	3.41	2.44	0.97	1.51	2.27	1.97	2.18	1.13
144	3.37	2.92	2.90	2.58	1.01	2.07	2.44	2.11	2.35	1.19
156	3.57	2.94	3.15	2.93	2.31	2.18	2.46	2.32	2.40	2.43
168	3.77	3.01	3.04	3.02	2.01	2.29	2.57	2.33	2.18	2.60
180	3.99	3.03	3.22	2.88	2.15	2.36	2.69	2.39	2.78	2.72
192	4.20	3.09	3.34	3.03	2.26	2.47	2.74	2.45	2.96	2.79
204	4.40	3.16	3.49	3.19	2.37	2.55	2.65	2.41	3.11	2.86
216	4.41	3.25	3.66	3.34	2.77	2.66	2.71	2.47	3.23	2.49
228	4.45	3.31	3.82	3.49	2.74	2.77	2.72	2.80	3.35	2.67
240	4.56	3.37	3.89	3.65	3.11	2.87	2.77	2.86	3.40	2.88
252	4.68	3.45	4.07	3.81	2.99	2.99	2.83	2.96	3.50	3.04
264	4.70	3.56	4.18	3.97	3.31	3.12	2.85	3.08	3.62	3.18
276	4.96	3.52	4.28	4.13	3.46	3.30	2.95	2.98	3.65	3.61

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	5.19	3.58	4.23	4.35	3.62	3.45	3.08	3.11	3.83	3.31
300	5.41	3.87	4.33	4.55	3.78	3.63	3.24	3.25	4.02	3.87
312	5.55	3.88	4.44	4.70	3.88	3.76	3.38	3.35	4.18	4.22
324	5.62	3.88	4.51	4.59	3.93	3.84	3.46	3.39	4.26	4.31
336	5.66	3.89	4.54	4.63	3.97	3.87	3.50	3.42	4.31	4.37
348	5.66	3.89	4.55	4.64	3.98	3.88	3.52	3.43	4.32	4.39
360	5.65	3.89	4.54	4.63	3.98	3.88	3.52	3.43	4.32	4.39
372	5.62	3.69	4.52	4.61	3.96	3.87	3.51	3.42	4.31	4.38
384	5.58	3.68	4.48	4.56	3.93	3.84	3.48	3.40	4.28	4.35
396	5.53	3.70	4.43	4.51	3.89	3.79	3.44	3.38	4.24	4.32
408	5.47	3.72	4.38	4.45	3.85	3.75	3.40	3.36	4.20	4.27
420	5.39	3.69	4.34	4.38	3.81	3.69	3.35	3.33	4.15	3.91
432	5.31	3.64	4.30	4.32	3.77	3.64	3.30	3.31	4.10	3.88
444	5.23	3.59	4.26	4.26	3.41	3.54	3.29	3.29	4.08	3.91
456	5.15	3.58	4.23	4.17	3.66	3.52	3.20	3.22	3.98	3.56
468	5.07	3.60	4.19	4.12	3.40	3.46	3.15	3.18	3.92	3.52
480	4.98	3.55	4.15	4.07	3.36	3.41	3.10	3.15	3.86	3.48
492	4.89	3.51	4.30	4.01	3.32	3.21	3.04	3.12	3.65	3.42
504	4.83	3.48	4.27	4.09	3.27	3.16	2.99	3.08	3.74	3.67
516	4.72	3.58	4.21	3.85	3.23	3.12	2.95	3.05	3.70	3.62
528	4.63	3.36	4.14	3.95	3.09	3.07	2.90	3.01	3.65	3.57
540	4.54	3.47	4.13	3.88	3.04	3.10	2.87	2.98	3.63	3.52
552	4.64	3.44	4.05	3.65	3.01	3.04	2.86	2.96	3.66	3.46
564	4.58	3.40	3.97	3.59	2.98	2.98	2.86	3.02	3.56	3.40
576	4.54	3.36	3.89	3.66	2.94	2.92	2.83	2.97	3.52	3.35
588	4.49	3.34	3.82	3.59	2.90	2.87	2.81	2.94	3.47	3.65

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.43	3.31	3.78	3.52	2.87	2.83	2.78	2.72	3.44	3.62
612	4.48	3.29	3.76	3.31	2.59	2.79	2.75	2.68	3.38	3.59
624	4.40	3.26	3.68	3.38	3.04	2.74	2.72	2.66	3.39	3.55
636	4.33	3.22	3.61	3.31	3.00	2.69	2.73	2.63	3.34	3.51
648	4.42	3.17	3.54	3.24	2.96	2.55	2.73	2.60	3.56	3.48
660	4.33	3.14	3.46	3.17	2.56	2.61	2.71	2.57	3.52	3.47
672	4.24	3.11	3.27	3.33	2.70	2.58	2.69	2.54	3.47	3.45
684	4.15	3.08	3.36	3.07	2.66	2.56	2.66	2.52	3.43	2.96
696	4.07	3.06	3.32	2.98	2.44	2.53	2.65	2.50	3.39	2.93
708	3.99	3.03	3.29	3.14	2.40	2.51	2.73	2.52	3.09	2.90
720	3.90	3.01	3.19	3.08	2.35	2.48	2.74	2.53	3.04	2.86
732	3.83	2.99	3.37	3.07	2.17	2.46	2.75	2.54	3.00	2.83
744	3.75	3.02	3.31	3.05	2.10	2.43	2.72	2.53	2.95	2.82
756	3.67	2.99	3.26	3.01	2.46	2.41	2.69	2.51	2.91	2.81
768	3.61	2.96	3.24	2.97	2.40	2.29	2.67	2.50	3.14	2.81
780	3.53	2.93	2.99	2.92	2.36	2.25	2.64	2.48	2.81	2.79
792	3.46	2.90	2.96	2.88	2.33	2.22	2.60	2.47	2.79	2.77
804	3.39	2.91	3.49	2.65	2.31	2.20	2.56	2.46	2.78	2.73
816	3.32	2.88	2.92	2.61	2.27	2.17	2.55	2.46	2.77	2.71
828	3.26	2.84	2.89	2.57	2.25	2.02	2.49	2.43	2.77	2.68
840	3.19	2.80	2.82	2.53	2.24	2.12	2.46	2.47	2.76	2.65
852	3.13	2.76	2.79	2.49	2.22	2.10	2.53	2.43	2.38	2.61
864	3.06	2.73	3.40	2.46	2.20	2.08	2.50	2.61	2.88	3.12
876	3.00	2.77	3.36	2.42	2.19	1.80	2.47	2.60	2.66	3.09
888	2.94	2.76	3.33	2.39	2.18	1.77	2.44	2.59	2.62	3.06
900	2.88	2.75	3.29	2.61	2.17	1.75	2.39	2.57	2.57	3.02

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.83	2.76	3.26	2.61	2.17	1.64	2.35	2.56	2.54	2.99
924	2.77	2.76	3.01	2.62	2.04	1.61	2.30	2.55	2.51	2.96
936	2.71	2.91	2.99	2.63	2.04	1.60	2.26	2.38	2.46	2.93
948	2.66	2.88	2.97	2.44	2.04	1.59	2.23	2.36	2.43	2.91
960	2.60	2.83	2.94	2.44	2.04	1.57	2.19	2.34	2.40	2.88
972	2.55	2.79	2.92	2.44	2.04	1.55	2.19	2.31	2.35	2.86
984	2.50	2.58	2.90	2.65	2.03	1.53	2.17	2.29	2.31	2.88
996	2.63	2.55	2.83	2.63	2.03	1.79	2.15	2.27	2.30	2.85
1008	2.43	2.53	2.80	2.62	2.08	1.76	2.12	2.25	2.27	2.83
1020	2.21	2.65	2.78	2.52	2.08	1.74	2.09	2.23	2.23	2.81
1032	2.19	2.45	2.76	2.51	2.06	1.71	2.06	2.20	2.19	2.78
1044	2.18	2.43	2.74	2.50	2.06	1.70	2.04	2.18	2.59	2.76
1056	2.16	2.40	2.71	2.48	2.07	1.68	2.02	2.16	2.57	2.74
1068	2.13	2.38	2.68	2.48	2.08	1.66	2.00	2.15	2.46	2.73
1080	2.11	2.35	2.65	2.48	2.08	1.64	1.98	2.13	2.43	2.71
1092	2.09	2.33	2.62	2.72	2.07	1.61	1.96	2.11	2.39	2.70
1104	2.07	2.30	2.87	2.70	2.06	1.59	1.93	2.08	2.35	2.68
1116	2.05	2.24	2.87	2.35	2.06	1.56	1.92	1.68	2.32	2.67
1128	2.22	2.22	2.86	2.49	2.06	1.52	1.91	1.67	2.27	2.65
1140	2.19	2.19	2.64	2.44	2.06	1.81	1.90	1.68	2.22	2.11
1152	2.17	2.16	2.60	2.41	2.05	1.79	1.89	1.66	2.66	2.10
1164	2.14	2.13	2.57	2.38	2.05	1.81	1.88	1.98	2.63	2.09
1176	2.12	2.31	2.53	2.36	2.04	1.76	1.88	1.98	2.63	2.09
1188	2.09	2.26	2.50	2.35	2.04	1.74	1.86	1.94	2.59	2.07
1200	2.06	2.24	2.41	2.30	2.04	1.73	1.85	1.93	2.58	2.05

表 5-22 200 年重現期流量各橋梁斷面推估局部沖刷深度

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
0	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
12	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
24	0.49	0.85	0.43	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
36	0.94	0.86	0.44	0.47	0.35	0.59	1.54	1.68	0.80	0.79
48	1.89	1.97	0.58	0.55	0.37	0.60	1.54	1.68	0.80	0.79
60	2.20	1.98	2.37	2.16	2.11	0.66	1.55	1.68	0.80	0.79
72	2.37	2.25	2.39	2.48	2.12	0.76	1.63	1.77	0.85	0.78
84	2.44	2.46	2.68	2.51	2.15	1.49	1.83	1.83	1.02	0.86
96	2.67	2.86	2.87	2.43	2.16	1.67	1.95	1.68	2.29	0.99
108	2.91	2.75	3.01	2.37	2.11	1.48	2.11	1.88	2.43	1.04
120	3.14	2.79	3.16	2.43	2.14	1.56	2.24	1.99	2.42	1.12
132	3.38	2.92	2.85	2.58	2.21	2.07	2.43	2.10	2.66	1.19
144	3.59	2.95	2.98	2.93	2.29	2.18	2.46	2.32	2.00	2.42
156	3.81	3.04	3.32	3.04	2.38	2.28	2.59	2.37	2.57	2.60
168	4.03	3.04	3.24	2.90	2.16	2.39	2.69	2.61	2.77	2.72
180	4.24	3.10	3.36	3.06	2.26	2.48	2.74	2.64	2.98	2.78
192	4.45	3.18	3.53	3.23	2.50	2.58	2.66	2.63	3.14	2.88
204	4.45	3.27	3.70	3.38	2.92	2.69	2.73	2.70	3.26	2.57
216	4.48	3.33	3.80	3.53	2.54	2.80	2.72	2.82	3.38	2.73
228	4.60	3.38	3.84	3.63	3.25	3.13	2.82	2.71	3.46	2.92
240	4.56	3.47	4.11	3.85	3.22	3.02	2.85	2.77	3.53	3.10
252	4.76	3.59	4.22	4.02	3.11	3.16	2.88	2.91	3.60	3.34
264	4.95	3.71	4.20	4.06	3.42	3.35	3.02	3.05	3.74	3.83
276	5.18	3.58	4.23	4.17	3.63	3.46	3.09	3.12	3.83	3.64

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
288	5.45	3.71	4.36	4.40	3.80	3.65	3.26	3.25	4.03	3.88
300	5.65	3.71	4.53	4.60	3.94	3.83	3.43	3.37	4.22	4.26
312	5.71	3.73	4.41	4.74	4.04	3.91	3.56	3.46	4.36	4.41
324	5.75	3.77	4.48	4.82	4.11	3.98	3.63	3.50	4.44	4.49
336	5.78	3.79	4.50	4.84	4.13	4.01	3.67	3.52	4.48	4.54
348	5.78	3.79	4.50	4.84	4.14	4.01	3.68	3.52	4.49	4.55
360	5.75	3.77	4.49	4.83	4.12	4.00	3.68	3.52	4.48	4.55
372	5.72	3.75	4.46	4.79	4.10	3.97	3.65	3.51	4.46	4.52
384	5.70	3.72	4.41	4.74	4.06	3.94	3.62	3.49	4.42	4.49
396	5.69	3.70	4.35	4.69	4.02	3.91	3.57	3.47	4.38	4.45
408	5.63	3.69	4.52	4.61	3.97	3.87	3.52	3.44	4.33	4.40
420	5.56	3.69	4.24	4.54	3.92	3.83	3.47	3.40	4.27	4.04
432	5.48	3.72	4.19	4.46	3.86	3.76	3.41	3.37	4.21	4.00
444	5.39	3.69	4.15	4.39	3.81	3.70	3.36	3.34	4.16	3.95
456	5.30	3.65	4.11	4.31	3.77	3.64	3.30	3.31	4.10	3.92
468	5.21	3.61	4.08	4.24	3.49	3.57	3.24	3.26	4.04	3.93
480	5.12	3.63	4.22	4.15	3.45	3.37	3.18	3.22	3.97	3.61
492	5.05	3.58	4.18	4.09	3.58	3.32	3.13	3.18	3.89	3.55
504	4.93	3.54	4.33	4.02	3.52	3.26	3.07	3.15	3.83	3.35
516	4.84	3.49	4.27	3.95	3.25	3.31	3.01	3.26	3.76	3.30
528	4.75	3.42	4.26	3.91	3.21	3.24	2.96	3.21	3.69	3.55
540	4.66	3.55	4.16	3.97	3.16	3.18	2.92	3.16	3.63	3.51
552	4.56	3.32	4.09	3.89	3.11	3.11	2.88	2.93	3.60	3.45
564	4.65	3.45	4.06	3.81	3.07	3.05	2.85	2.91	3.64	3.39
576	4.59	3.41	3.98	3.74	2.99	2.99	2.84	2.87	3.60	3.32
588	4.55	3.37	3.90	3.67	2.95	2.94	2.84	2.83	3.56	3.27

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
600	4.49	3.34	3.82	3.59	2.89	2.88	2.81	2.80	3.47	3.22
612	4.43	3.31	3.78	3.52	2.86	2.83	2.78	2.77	3.44	3.51
624	4.48	3.29	3.76	3.45	2.57	2.68	2.75	2.74	3.38	3.03
636	4.40	3.26	3.68	3.24	3.01	2.64	2.72	2.71	3.39	3.32
648	4.32	3.22	3.60	3.19	2.97	2.60	2.73	2.68	3.60	3.27
660	4.41	3.17	3.53	3.27	2.93	2.67	2.73	2.65	3.55	3.25
672	4.32	3.13	3.45	3.22	2.72	2.64	2.71	2.62	3.51	3.24
684	4.22	3.10	3.38	3.17	2.68	2.60	2.68	2.59	3.47	3.21
696	4.14	3.08	3.32	3.12	2.45	2.58	2.66	2.56	3.42	2.78
708	4.05	3.05	3.28	3.07	2.41	2.56	2.65	2.61	3.37	2.75
720	3.96	3.03	3.25	3.02	2.37	2.53	2.73	2.64	3.32	2.72
732	3.88	3.01	3.21	2.99	2.21	2.50	2.74	2.64	3.25	2.68
744	3.80	3.02	3.17	2.98	2.16	2.47	2.74	2.66	3.19	2.66
756	3.72	3.01	3.13	2.95	2.08	2.45	2.71	2.64	2.87	2.66
768	3.64	2.98	3.10	2.92	2.47	2.43	2.69	2.62	2.82	2.65
780	3.57	2.95	3.23	2.89	2.43	2.27	2.65	2.59	2.45	2.64
792	3.50	2.92	3.18	2.90	2.40	2.24	2.63	2.58	2.66	2.60
804	3.43	2.90	3.14	2.87	2.37	2.21	2.58	2.37	2.64	2.58
816	3.35	2.90	3.09	2.82	2.33	2.18	2.56	2.37	2.63	2.54
828	3.29	2.86	2.84	2.56	2.31	2.02	2.50	2.35	2.62	2.52
840	3.22	2.82	2.80	2.53	2.30	2.01	2.46	2.32	2.30	2.51
852	3.15	2.78	2.76	2.67	2.28	2.10	2.53	2.36	2.29	2.46
864	3.08	2.74	2.73	2.40	2.26	2.09	2.52	2.33	2.17	2.41
876	3.02	2.77	3.37	2.36	2.24	1.81	2.48	2.28	2.51	2.87
888	2.96	2.76	3.33	2.31	2.23	1.78	2.45	2.47	2.49	2.84
900	2.90	2.75	3.30	2.29	2.22	1.75	2.40	2.43	2.44	2.80

時間(sec)	台 61 線 大甲溪橋	台 1 線 大甲溪橋	海線 鐵路橋	國道 3 號 大甲溪橋	高速 鐵路橋	國道 1 號 大甲溪橋	后豐橋	新山線 鐵路橋	舊山線 鐵路橋	埤豐橋
912	2.84	2.76	3.27	2.30	2.22	2.00	2.36	2.41	2.39	2.77
924	2.78	2.76	3.23	2.30	2.21	1.70	2.31	2.40	2.36	2.74
936	2.72	2.92	3.20	2.31	2.20	1.58	2.27	2.12	2.32	2.71
948	2.67	2.88	3.17	2.34	2.20	1.58	2.23	2.27	2.29	2.68
960	2.61	2.66	2.92	2.35	2.20	1.56	2.10	2.25	2.25	2.66
972	2.56	2.63	2.90	2.36	2.20	1.54	2.09	2.22	2.20	2.63
984	2.52	2.60	2.87	2.31	2.20	1.52	2.07	2.20	2.16	2.64
996	2.49	2.72	2.83	2.51	2.02	1.78	2.06	2.19	2.15	2.62
1008	2.47	2.51	2.80	2.50	2.08	1.75	2.03	2.16	2.12	2.60
1020	2.25	2.65	2.78	2.52	2.07	1.73	2.01	2.14	2.08	2.58
1032	2.24	2.45	2.76	2.51	2.06	1.70	1.99	2.11	2.04	2.55
1044	2.23	2.43	2.74	2.50	2.06	1.68	1.97	1.93	1.99	2.53
1056	2.20	2.41	2.72	2.48	2.07	1.67	1.95	1.91	2.37	2.51
1068	2.18	2.38	2.68	2.48	2.08	1.65	1.94	1.90	2.31	2.51
1080	2.15	2.35	2.65	2.47	2.07	1.62	1.92	1.88	2.28	2.48
1092	2.13	2.30	2.61	2.72	2.06	1.60	1.90	1.84	2.19	2.47
1104	2.11	2.28	2.87	2.70	2.06	1.57	1.88	1.81	2.15	2.45
1116	2.28	2.25	2.87	2.52	2.05	1.54	1.87	1.78	2.11	2.43
1128	2.09	2.22	2.86	2.47	2.07	1.51	1.87	1.78	2.05	2.42
1140	2.06	2.17	2.63	2.44	2.05	1.79	1.86	1.79	1.99	2.44
1152	2.04	2.14	2.60	2.41	2.05	1.77	1.85	2.14	2.36	2.44
1164	1.99	2.11	2.56	2.38	2.04	1.78	1.84	2.12	2.33	2.42
1176	1.96	2.51	2.66	2.34	2.04	1.74	1.84	2.12	2.33	2.42
1188	1.94	2.27	2.48	2.30	2.04	1.73	1.82	2.08	2.30	2.40
1200	1.91	2.23	2.43	2.09	2.04	1.70	1.81	2.07	2.29	2.38

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

本計畫整合雷達降雨、格網分布型降雨逕流模式、水理模式與沖刷分析，提供大甲溪流域橋墩沖刷推估模式，相較於直接利用中央氣象局 QPESUMS 資料間接建立沖刷指標之相關研究，本計畫考量完整的物理機制，模擬降雨落至地面、地面水匯流至河川、河川進入與離開水庫、水庫放水後水流到下游各斷面與斷面的沖刷計算，透過物理的演算方式呈現接近現實的模擬成果。本計畫所建立的模式經歷史資料驗證與近期颱風事件之分析，展現出完整的分析能力，且已整合交由台科大子計畫團隊中，利用網頁方式呈現，成功建立橋樑沖刷預警系統提供管理單位進行決策與防災之用。計畫成果說明如下：

#### 1. 雷達降雨

雷達雨量修正是參考大甲溪流域內的雨量站來進行 SVR 修正作業，考慮的因子有雷達格網的位置、上方九格雷達雨量與相距雷達站的距離等因子進行修正，修正後的成果可以有效提升雷達雨量的精確度。另外，為了修正雷達預報雨量，本計畫採用 Kriging 空間修正法具有明顯之修正成效。

#### 2. 格網分布型降雨逕流模式

格網分布型降雨逕流模式是根據德基水庫在颱風事件時的放流資料與雷達降雨資料來計算下游石岡壩的入流量，配合地理資訊系統與遙測影像來建立集水區的地文特性，同時以不同的颱風歷史資料來建立模式的參數，驗證後本模式可以有效的模擬石岡壩的入流，未來配合雷達預報降雨資料量將可提供石岡壩以下橋梁水理演算之需。

### 3.橋梁數值模式

橋梁數值模式計算是利用 CCHE1D 模式計算石岡壩以下各斷面位置處的水位，並根據動床模組分析沖刷深度，根據辛樂克颱風在台 1 線大甲溪橋附近的沖刷結果比較，本模式可以合理預測河道的一般沖刷。本模式並根據 2005 年的調查斷面與 2005-2008 年颱風資料分析 2008 年可能的沖淤情況，其結果顯示本計畫之目標區域國道 1 號橋與國道 3 號橋附近之底床高程皆可合理掌握，對於後續之沖刷預報分析提供頗為重要之參考數據。

## 6.2 建議

### 1.模式的延續性

目前模式已經上線運行，但是未來仍會有更多新的降雨或是斷面資料，應持續收集與更新資料，確保模式可以持續運行。

### 2.模式的應用性

本計畫的模式整合架構相當完整，目前已經成功應用於大甲溪流域，在此條件下，應延續此模式的功效，以利其他流域的橋樑沖刷預警。

### 3.模式資料改進

(1)降雨預報誤差仍相當大，未來氣象局若有更佳的預報成果，將可以提升本計畫之實力。(2)石岡壩上游水量受德基水庫操作影響甚鉅，建議加入大甲電廠即時水文資料。

## 參考文獻

1. 王安翔、林李耀，2008，「子計畫一：流域集水區之雷達定量降雨預報技術發展(2/3)」，行政院國家科學委員會專題研究計畫報告。
2. 丘台光、陳嘉榮、張保亮、林品芳，2003，「應用多重觀測工具之定量降雨估計之研究」，中央氣象局氣象衛星中心。
3. 李清勝、劉格非、周仲島、何興亞、林李耀、陳建元、王安翔、林聖琪、黃柏誠、張智昌、黃麗蓉、周恆毅，2005，「土石流潛勢區之雨量估計與即時預報技術發展研究(一)」，行政院農業委員會水土保持局。
4. 郭振民，1999，「應用遙測與地理資訊系統於分布型降雨-逕流模式之研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
5. 陳信彰，1997，「分布型降雨-逕流模式之不確定性與敏感度分析」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
6. 陳憲宗，2006，「Real-time Probabilistic Flood Stage Forecasting Using Support Vector Machines and Fuzzy Inference Model」，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
7. 張永欣，2007，「以多變量地質統計方法進行雨量空間內插」，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所。
8. 張智昌，2006，「整合氣象雷達與即時降雨資料於颱風降雨推估之研究」，碩士論文，國立台灣大學地理環境資源研究所。
9. 張智昌、孫志鴻、賴進貴，2006，「整合氣象雷達與即時降雨資料於颱風降雨推估之研究」，環境與世界，第13期，1-22頁。
10. 黃威雄，2000，「應用類神經網路於颱風期間雷達降雨模擬之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所。
11. 楊政潭，2003，「雷達回波應用於颱風降雨空間分布與總量之研究—以納莉颱風為例」，碩士論文，國立中央大學水文科學研究所。

12. 游保杉，2008，雷達降雨應用在洪水及淹水預報之研究－總計畫暨子計畫：空間逕流量即時分析與預報技術研發，行政院國家科學委員會專題研究計畫報告。
13. 劉光武，1991，「分布型降雨-逕流模式之研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
14. 劉清煌，2002，「雷達雨量估計與雨量即時預報技術-利用雷達及衛星資料與類神經網路之結合颱風降水估計之研究-類神經網路」，行政院國家科學委員會專題研究計畫報告。
15. 曾忠一，1997，「大氣動力學」，國立編譯館。
16. 鄭玉菽，1995，「格網式分布型降雨-逕流模式之研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
17. 蔡文鎗，1989，「圓柱形橋墩之沖刷研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
18. 謝章廷，2007，「應用雷達降雨於分布型水文模式與不確定性分析」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所。
19. 經濟部水利處水利規劃試驗所，2005，「大甲河流域聯合整體治理規劃檢討」。
20. 經濟部水利處水利規劃試驗所，2009，「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」。
21. Borga, M., 2002, "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." , Journal of Hydrology. Vol.267:26-39.
22. Breusers H. N. C., and Raudkivi A. J., 1991, "Scouring" , A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
23. Cannas, B., Fanni, A., See, L., and Sias G., 2006, "Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: Wavelet transforms and data partitioning" , Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C Vol. 31(18): 1164-1171.

24. Cherkassky, V. and Ma, Y., 2004, "Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression" , Neural Networks, Vol.17: 113 – 126.
25. Cole, S. J. and Moore, R. J., 2008, "Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall." Journal of Hydrology. Vol.358:159-181.
26. Collier, C. G., 1996, "Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar in Meteorology and Hydrology." , John Wiley 2d ed.: 383
27. Collischonn, W., Reinaldo H., Ivanilto A., and Carlos E. M. T., 2005, "Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model", Journal of Hydrology. Vol.305:87-98.
28. Corral, C., Sempere-Torres, D., Revilla, M., and Berenguer, M., 2000, "A Semi-Distributed Hydrological Model Using Rainfall Estimates by Radar. Application to Mediterranean Basins", Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. Vol. 25:1133-1136.
29. DeGaetano, A. T. and Wilks, D. S., 2009, "Radar-guided interpolation of climatological precipitation data" , International Journal of Climatology Int. J. Climatol. Vol.29:185-196.
30. Engman, E.T., and A.S. Rogowski, 1974, "A partial area model for stormflow synthesis." , Water Resources Research, v10, 464-472.
31. Fletcher R., 1987, "Practical Methods of Optimization Chichester" , second ed.
32. Garcia-Pintado, J., Barbera, G. G., Erena, M., and Castillo, V. M., 2009, "Rainfall estimation by rain gauge-radar combination: A concurrent multiplicative-additive approach", Water Resources Research: 45, W01415
33. Gjertsen, U., Salek M., et al., 2003, Gauge-adjustment of radar-based precipitation estimates-a review: 1-17.
34. Habets, F., Patrick L., and Joël N., 2004, "On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for stream-flow forecasting", Journal of Hydrology: 293, 270-288.

35. Hsu, C. W., C. C. Chang, and C. J. Lin, "A Practical Guide to Support Vector Classification" , Technical report, Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Available at : <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide.pdf>, 2003.
36. Huggins, L.F., and E.J. Monke, 1968, "A mathematic model for simulating the hydrologic response of a watershed", *Water Resources Research*, 4(3), 529 - 539.
37. Jonch-Clausen, T. , 1979, "Système Hydrologique Européen, A Short Description", Danish Hydraulic Institute.
38. Joss, J. and R. Lee, 1995, "The application of radar gauge comparisons to operational precipitation profile corrections." *J. Appl. Meteor*: 34, 2612-2630.
39. Joss, J., Schädler, B., Galli, G., Cavalli, R., Boscacci, M.,Held, E., Della Bruna G., Kappenberger, G., Nespor, V., and Spiess, R., 1998, "Operational use of radar for precipitation measurements in Switzerland." In: *Final Scientific Report of the National Research Programme NRP 31*, Swiss National Science Foundation, 108.
40. Kim, B. S., B. K. Kim, et al., 2008, "Flood simulation using the gauge-adjust -ed radar rainfall and physics-based distributed hydrologic model.", *Hydrological Process* DOI: 10.1002: hyp.7043.
41. Kitchen, M., R. Brown, et al., 1994, "Real time correction of weather radar for the effects of bright band range and orographic growth in widespread precipitation." *Q. J. R. Meteorol.* Vol.120:1231-1254.
42. Kutchment, L.S., 1980, "A two-dimensional rainfall-runoff model: identification of parameter and possible use for hydrological forecasts", *Hydrological Forecasting*, v129, 215 - 219.
43. Li, W., V. Chandrasekar, et al., 2003, "Investigations in radar rainfall estimation using neural networks. ", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*.
44. Lin,C.J.and co-wokers(2004)LIBSVM Software(Version 2.71,released on November 20,2004),Available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/>

libsvm/index.html

45. Liong, S.-Y. and C. Sivapragasam (2002). "Flood Stage Forecasting with Support Vector Machine." *Journal of The American Water Resources Association*. Vol.3:173-185.
46. Liu, H., V. Chandrasekar, et al., 2001, "An adaptive neural network scheme for rainfall estimation from WSR-88D observations.", *Journal of Applied Meteorology*. Vol.40:2038 - 2050.
47. Marshall, J. S. and W. M. Palmer, 1948, "The distribution of raindrops with size.", *J. Meteor.* Vol.5:165-166.
48. Melville, B.W., and Chiew, Y.M., 1999, "Time scale for local scour at bridge piers." *J. Hydraul. Eng.* Vol.125(1):59-65.
49. Melville, B. W., and S. E. Coleman, 2000, "Bridge Scour." *Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, USA.*
50. Moore, R. J., May, B.C., Jones, D.A., Black, K.B., 1994, "Local calibration of weather radar over London. In: Almeida-Teixeira, M.E., Fantechi, R., Moore, R., Silva, V.M. (Eds.).", *Advances in Radar Hydrology Proceedings of an International Workshop, 11-13 November, Lisbon, Portugal. Report EUR 14334 EN, European Commission.* 186 - 195.
51. Moore, R. J., Watson, B.C., Jones, D.A., Black, K.B., 1991, "Local recalibration of weather radar. In: Cluckie, I.D., Collier, C.G. (Eds.).", *Hydrological Applications of Weather Radar Ellis Horwood Chichester.* 65-73.
52. Morin, E. and M. Gabella, 2007, "Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes." *Journal of Geophysical Research.* 112, D20108.
53. Philip B. Bedient, Anthony Holder, Jude A. Benavides, and Baxter E. Vieux, 2003, "Radar-Based Flood Warning System Applied to Tropical Storm Allison", *Journal of Hydrologic Engineering.* Vol.8(6):308-318.
54. Raudkivi A. J., 1986, "Functional trends of scour at bridge piers",

Journal of ydraulic Engineering, ASCE: 112, No.3, 1-13.

55. Rosenfeld, D., Wolff, D. B., and Amitai, E., 1994: "The window probability matching method for rainfall measurement with radar" , Journal of Applied Meteorology. Vol.33: 682 – 693.
56. Ross, B.B., D.N. Contractor, and V.O. Shanholz, 1979, "A finite element model for overland and channel flow for assessing the hydrological impact of land-use change", Journal of Hydrology, v41, 11-30.
57. Rovey E.W., D.A. Woolhiser, and R.E. Smith, 1977, "A distributed kinematic model of upland watershed", Hydrology Paper 93, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
58. Smith, R.E., and D.A. Woolhiser, 1971, "Overland flow on an infiltrating surface", Water Resources Research, 7(4), 899-913.
59. Teschl, R., W. L. Randeu, et al., 2007, "Improving weather radar estimates of rainfall using feed-forward neural networks.", Neural Networks. Vol.20:519 – 527.
60. Trafalis, T. B., Santosa, B., et al. (2005). "Learning networks in rainfall estimation." Computational Management Science. Vol.2: 229-251.
61. Tsintikidis, D., J. Haferman, et al., 1996, "A neural network approach to estimating rainfall from spaceborne microwave data.", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol.35:1079-1093.
62. Umehara, S., Yamazaki, T. et al., 2006, "A Precipitation Estimation System Based on Support Vector Machine and Neural Network." Electronics and Communications in Japan, Part 3 89, No. 3(Translated from Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi, Vol. J86-D-II, No. 7, July 2003, pp. 1090 – 1098): 38-47.
63. Vojinovic, Z., Kecman, V., 2004, "Contaminant Transport Modelling with Support Vector Machine Model: An Alternative to Classical Advection-Dispersion Equation" , 6 th International Conference on Hydroinformatics, IIHR, Singapore.
64. Wood, S. J., Jones, D.A., Moore, R.J., 2000, "Static and dynamic

- calibration of radar data for hydrological use.", *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol.4(4):545 – 554.
65. Xiao, R. and V. Chandrasekar, 1995, Multiparameter radar rainfall estimation using neural network techniques. Preprints, 27th Conf, Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc.
  66. Xiao, R. and V. Chandrasekar, 1997, "Development of a neural network based algorithm for rainfall estimation from radar observations." *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.35:160 – 171.
  67. Xin, L., G. Recuter and B. Larochelle, 1997, "Reflectivity-rain rate relation-ship for convective rainshowers in Edmonton." *Atmos. Ocean*. Vol.35:513 -521.
  68. Yu, P.S., 1987, "Real-Time Grid Based Distributed Rainfall-Runoff Model for Flood Forecasting with Weather Radar", PhD Thesis, University of Birmingham.
  69. Yu, P. S., and Chen, S. T., 2005, "Updating real-time flood forecasting using a fuzzy rule-based model" , *Hydrological Sciences Journal*. Vol.50(2): 265 – 278.
  70. Yu, P. S., Chen, S. T., and Chang, I. F., 2006, "Support vector regression for real-time flood stage forecasting" , *Journal of Hydrology* Vol.328(3 – 4): 704 – 716.
  71. Yu, X.Y., Liong, S.Y., and Babovic, V., 2004, "EC-SVM Approach for Real Time Hydrologic Forecasting" , *Journal of Hydroinformatics*. Vol.6(3): 209-22

## 附錄一

# 大甲溪發電廠運用要點

# 附錄一 大甲溪發電廠運用要點

## 德基水庫運用要點

### 第一章 總則

一、經濟部為調蓄德基水庫（以下簡稱本水庫）水量，供應大甲溪發電廠德基分廠及其下游各水力發電廠發電運轉，並配合下游各標的用水需求，特訂定本要點。

二、本水庫以台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電公司）為管理機構，並由大甲溪發電廠負責營運管理。

三、本水庫位於臺中縣和平鄉大甲溪本流上游，水源除攔蓄大甲溪本流流量外並自志樂溪越域引水，其運轉主要設施如下：

（一）大壩。

（二）排洪隧道。

（三）壩頂排洪門。

（四）壩身排砂門。

（五）放水閘。

（六）發電取水門。

（七）消能副壩。

四、本要點之用詞定義如下：

（一）蓄水利用運轉：以水庫蓄水調節供應水力用水，並配合下游各標的用水需要放水之運轉。

（二）防洪運轉：颱風或豪雨期間，經由排洪隧道或其他放水設施放水之運轉。

(三) 緊急運轉：在發生特殊洪水或災變，危及水庫安全，情況危殆，嚴重威脅公眾生命及財產之安全時，所採取之因應運轉。

(四) 水庫運用規線：為執行蓄水利用運轉，依水庫水位劃定界線，以表示水庫蓄水量之豐枯情形。

(五) 調節性放水：防洪運轉時，在水庫水位趨近滿水位時，經由排洪隧道或其他放水設施預先排放水量，以調節水庫水位之放水。

(六) 颱風情況：中央氣象局發佈海上陸上颱風警報，且本水庫集水區列入警戒區域者。

(七) 豪雨情況：中央氣象局發佈本水庫集水區豪雨特報或因颱風引進西南氣流之豪雨。

## 第二章 蓄水利用運轉

五、本水庫可發電運轉水位為標高 1408 公尺至標高 1350 公尺，其中標高 1408 公尺至標高 1366 公尺為正常發電水位，標高 1366 公尺至標高 1350 公尺間為緊急發電水位。

六、本水庫運用規線如附圖，並依下列規定辦理：

(一) 水庫水位高於運用規線時，以電力系統調度為主，並配合下游各標的用水需求放水。

(二) 水庫水位等於或低於運用規線時，除電力系統處於緊急狀況外，應配合下游各標的用水需求放水。

七、本水庫運轉操作原則如下：

(一) 本水庫蓄水由台電公司依臺灣本島電力需求及配合下游各標的用水需求調度運轉，蓄水利用期間應與經濟部水利署中區水資源局石岡壩管理中心（簡稱石管中心）傳遞資訊。

(二) 本水庫得於臺灣本島電力系統緊急需求時作緊急發電出力運轉。

(三) 大甲溪發電廠如遇臨時增加或減少發電用水量，應視放水量增減幅度及時間持續情形通知石管中心。

### **第三章 防洪運轉**

八、本水庫最高洪水位為標高 1408.8 公尺。

九、颱風或豪雨情況時，本水庫得依實際狀況進行調節性放水。

十、颱風或豪雨情況時，本水庫之防洪運轉：其最高放水流量，不得大於最高進流量；放水量之增加率，不得超過本水庫進流量之最高增加率。

十一、本水庫洩洪操作前 1 小時，應由大甲溪發電廠通知下游各廠、各壩及石管中心、經濟部水利署第三河川局、臺中縣警察局和平分局、東勢分局等有關單位；並啟動洩洪廣播系統通知沿溪河床民眾走避。

### **第四章 緊急運轉**

十二、本水庫於緊急時或因地震致壩體有滲水、龜裂、滑動等因素，危及大壩安全時，大甲溪發電廠得逕作緊急運轉，以壩頂排洪門及排洪隧道緊急洩降水位至不影響壩體安全為止。

十三、本水庫因緊急運轉實施洩洪時，應依第十一點規定通知或通報，無法事先通知或通報時，得播放放水廣播後放水。

十四、本水庫緊急應變處理經過，應依程序層報經濟部水利署備查。

# 青山水庫運用要點

## 第一章 總則

一、經濟部為調蓄青山水庫（以下簡稱本水庫）水量，供應大甲溪發電廠青山分廠及其下游各水力發電廠發電運轉，特訂定本要點。

二、本水庫以台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電公司）為管理機構，並由大甲溪發電廠負責營運管理。

三、本水庫位於臺中縣和平鄉大甲溪本流上游之德基水庫下游約 1 公里處，其運轉主要設施如下：

（一）大壩。

（二）壩身排砂門。

（三）壩身排洪門。

（四）虹吸溢洪道。

（五）發電取水門。

四、本要點之用詞定義如下：

（一）蓄水利用運轉：以水庫蓄水調節供應水力用水之運轉。

（二）防洪運轉：颱風或豪雨期間，經由壩身排洪門或其他放水設施放水之運轉。

（三）緊急運轉：在發生特殊洪水或災變，危及水庫安全，情況危殆，嚴重威脅公眾生命及財產之安全時，所採取之因應運轉。

（四）調節性放水：防洪運轉時，在水庫水位趨近滿水位時，經由壩身排洪門或其他放水設施預先排放水量，以調節水庫水位之放水。

(五) 颱風情況：中央氣象局發佈海上陸上颱風警報，且本水庫集水區列入警戒區域者。

(六) 豪雨情況：中央氣象局發佈本水庫集水區豪雨特報或因颱風引進西南氣流之豪雨。

## 第二章 蓄水利用運轉

五、本水庫蓄水利用目標為發電運轉，以配合德基水庫運轉為主，可發電運轉水位下限為標高一二三六公尺，上限標高一二四五公尺。

六、本水庫運轉操作原則如下：

(一) 大甲溪發電廠依台電公司電力調度處指令發電，無發電需要時得視情況放空水庫。

(二) 大甲溪發電廠德基及青山分廠皆滿載運轉或緊急狀況時，本水庫多餘蓄水得由虹吸溢洪道溢流至下游。

## 第三章 防洪運轉

七、本水庫最高洪水位為標高一二四五公尺。

八、颱風或豪雨情況時，本水庫得依實際狀況進行調節性放水。

九、颱風或豪雨情況時，本水庫應配合德基水庫防洪運轉操作（德基水庫排洪時，本水庫應注意迴水位達標高一二二七公尺時開啟各排洪門及排砂門）。

十、本水庫洩洪操作前一小時，應由大甲溪發電廠通知下游各分廠、各壩及經濟部水利署中區水資源局石岡壩管理中心、經濟部水利署第三河川局、臺中縣警察局和平分局、東勢分局等有關單位。並啟動洩洪廣播系統通知沿溪河床民眾走避。

## 第四章 緊急運轉

十一、本水庫於緊急時或因地震致壩體有滲水、龜裂、滑動等因素，

危及大壩安全時，大甲溪發電廠得逕作緊急運轉，以排洪門及排砂門緊急洩降水位至不影響壩體安全為止。

十二、本水庫因緊急運轉實施洩洪時，應依第十點規定通知或通報，無法事先通知或通報時，得播放洩洪廣播後放水。

十三、本水庫緊急應變處理經過，應依程序層報經濟部水利署備查。

# 谷關水庫運用要點

## 第一章 總則

一、經濟部為調蓄谷關水庫（以下簡稱本水庫）水量，供應大甲溪發電廠谷關分廠及其下游各水力電廠發電運轉，特訂定本要點。

二、本水庫以台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電公司）為管理機構，並由大甲溪發電廠負責營運管理。

三、本水庫位於臺中縣和平鄉大甲溪本流上游，水源除攔蓄大甲溪本流流量外並自小雪溪越域引水，其運轉主要設施如下：

（一）大壩。

（二）壩身排洪門。

（三）壩身溢洪道

（四）發電取水門。

四、本要點之用詞定義如下：

（一）蓄水利用運轉：以水庫蓄水調節供應水力用水之運轉。

（二）防洪運轉：颱風或豪雨期間，經由壩身排洪門或壩身溢洪道放水之運轉。

（三）緊急運轉：在發生特殊洪水或災變，危及水庫安全，情況危殆，嚴重威脅公眾生命及財產之安全時，所採取之因應運轉。

（四）調節性放水：防洪運轉時，在水庫水位趨近滿水位時，經由壩身排洪門或壩身溢洪道預先排放水量，以調節水庫水位之放水。

（五）颱風情況：中央氣象局發佈海上陸上颱風警報，且本水庫集水區列入警戒區域者。

（六）豪雨情況：中央氣象局發佈本水庫集水區豪雨特報或因颱風

引進西南氣流之豪雨。

## 第二章 蓄水利用運轉

五、本水庫蓄水利用目標為發電運轉，可發電運轉水位為下限標高九二八公尺至上限標高九五二公尺。其中標高九二八公尺至標高九五二公尺為正常運轉水位，標高九五二公尺至標高九五二公尺為緊急發電運轉水位。

六、大甲溪發電廠依台電公司電力調度處指令發電，無發電需要時，得視情況放空水庫。

## 第三章 防洪運轉

七、本水庫最高洪水位為標高九五二公尺。

八、颱風或豪雨情況時，本水庫得依實際狀況進行調節性放水。

九、颱風或豪雨情況時，本水庫應配合德基水庫防洪運轉操作（德基水庫排洪前一小時本水庫開啟排洪門，調整水位至標高 935 公尺以下）。

十、本水庫排洪操作前一小時，應由大甲溪發電廠通知下游各分廠、各壩及經濟部水利署中區水資源局石岡壩管理中心、經濟部水利署第三河川局、臺中縣警察局和平分局、東勢分局等有關單位，並啟動洩洪廣播系統通知沿溪河床民眾走避。

## 第四章 緊急運轉

十一、本水庫於緊急時或因地震致壩體有滲水、龜裂、滑動等因素，危及大壩安全時，大甲溪發電廠得逕作緊急運轉，以排洪門緊急洩降水位至不影響壩體安全為止。

十二、本水庫因緊急運轉實施洩洪時，應依第十點規定通知或通報，無法事先通知或通報時，得播放洩洪廣播後放水。

十三、本水庫緊急應變處理經過，應依程序層報經濟部水利署備查。

# 天輪水庫運用要點

## 第一章 總則

一、經濟部為調蓄天輪水庫（以下簡稱本水庫）水量，供應大甲溪發電廠天輪分廠及其下游各水力發電廠發電運轉，特訂定本要點。

二、本水庫以台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電公司）為管理機構，並由大甲溪發電廠負責營運管理。

三、本水庫位於臺中縣和平鄉大甲溪本流上游，其運轉主要設施下：

（一）大壩。

（二）壩身排洪門。

（三）壩身排砂門。

（四）發電取水門。

四、本要點之用詞定義如下：

（一）蓄水利用運轉：以水庫蓄水調節供應家用及公共給水、農業用水、水力用水或其他用水之運轉。

（二）防洪運轉：颱風或豪雨期間，經由壩身排洪門放水之運轉。

（三）緊急運轉：在發生特殊洪水或災變，危及水庫安全，情況危殆，嚴重威脅公眾生命及財產之安全時，所採取之因應運轉。

（四）調節性放水：防洪運轉時，在水庫水位趨近滿水位時，經由排洪門或排砂門預先排放水量，以調節水庫水位之放水。

（五）颱風情況：中央氣象局發佈海上陸上颱風警報，且本水庫集水區列入警戒區域者。

（六）豪雨情況：中央氣象局發佈本水庫集水區豪雨特報或因颱風引進西南氣流之豪雨。

## 第二章 蓄水利用運轉

五、本水庫蓄水利用目標為發電運轉，可發電運轉水位為下限標高 740 公尺至上限標高 749 公尺，其中標高 740 公尺至標高 747.8 公尺為正常發電運轉水位，標高 747.8 公尺至標高 749 公尺為緊急發電運轉水位。

六、大甲溪發電廠依台電公司電力調度處指令發電。無發電需要時得視情況放空水庫。

## 第三章 防洪運轉

七、本水庫最高洪水位標高 749 公尺。

八、颱風或豪雨情況時，本水庫得依實際狀況進行調節性放水。

九、颱風或豪雨情況時，本水庫應配合上游各水庫防洪運轉操作（德基、青山水庫排洪前 1 小時或谷關水庫防洪運轉時，本水庫開啟排洪門，調整水位至標高 744 公尺以下。）

十、本水庫排洪操作前 1 小時，應由大甲溪發電廠通知下游各分廠、各壩及經濟部水利署中區水資源局石岡壩管理中心、經濟部水利署第三河川局、臺中縣警察局和平分局、東勢分局等有關單位，並啟動洩洪廣播系統通知沿溪河床民眾走避。

## 第四章 緊急運轉

十一、本水庫於緊急時或因地震致壩體有滲水、龜裂、滑動等因素，危及大壩安全時，大甲溪發電廠得逕作緊急運轉，以排洪門及排砂門緊急洩降水位至不影響壩體安全為止。

十二、本水庫因緊急運轉實施洩洪時，應依第 10 點規定通知或通報，無法事先通知或通報時，得播放洩洪廣播後放水。

十三、本水庫緊急應變處理經過，應依程序層報經濟部水利署備查。

# 馬鞍水庫運用要點

## 第一章 總則

一、經濟部為調蓄馬鞍水庫（以下簡稱本水庫）水量，供應大甲溪發電廠馬鞍機組及其下游水力發電廠發電運轉，特訂定本要點。

二、本水庫以台灣電力股份有限公司（以下簡稱台電公司）為管理機構，並由大甲溪發電廠負責營運管理。

三、本水庫於臺中縣和平鄉大甲溪本流大甲溪發電廠天輪分廠發電尾水出口下游 900 公尺處，其運轉主要設施如下：

（一）大壩。

（二）壩身排洪門。

（三）壩身排砂門。

（四）壩身溢洪道。

（五）放水門。

（六）發電取水口。

四、本要點之用詞定義如下：

（一）蓄水利用運轉：以水庫蓄水調節供應水力用水之運轉。

（二）防洪運轉：颱風或豪雨期間，經由壩身排洪門、排砂門及溢洪道放水之運轉。

（三）緊急運轉：在發生特殊洪水或災變，危及水庫安全，情況危殆，嚴重威脅公眾生命及財產之安全時，所採取之因應運轉。

- (四) 洩洪量：防洪運轉時，經由排洪門、排砂門或放水門進行放水之總放水量。
- (五) 調節性放水：防洪運轉時，在水庫水位趨近滿水位時，經由排洪門、排砂門或放水門預先排放水量，以調節水庫水位之放水。
- (六) 颱風情況：中央氣象局發佈海上陸上颱風警報，且本水庫集水區列入警戒區域者。
- (七) 豪雨情況：中央氣象局發佈本水庫集水區豪雨特報或因颱風引進西南氣流之豪雨。

## 第二章 蓄水利用運轉

五、本水庫蓄水利用目標為發電運轉，可發電運轉水位為下限標高 550 公尺至上限標高 553.4 公尺，其中標高 550 公尺至標高 553 公尺為正常運轉水位，標高 553 公尺至標高 553.4 公尺為緊急發電運轉水位。

六、大甲溪發電廠依台電公司電力調度處指令發電。無發電需要時得視情況放空水庫。

## 第三章 防洪運轉

七、本水庫最高洪水位標高 557.9 公尺。

八、颱風或豪雨情況時，本水庫得依實際狀況進行調節性放水，以調整水位至標高 553.4 公尺以下。

九、天輪壩洩洪量超過 100 立方公尺/秒時，馬鞍機組不發電，本水庫開啟排砂門排砂。

十、本水庫排洪操作前 1 小時，應由大甲溪發電廠通知下游各分廠、各壩及經濟部水利署中區水資源局石岡壩管理中心、經濟部水利署第三河川局、臺中縣警察局和平分局、東勢分局等有關單位，並啟動洩

洪廣播系統通知沿溪河床民眾走避。

#### **第四章 緊急運轉**

十一、本水庫於緊急時或因地震致壩體有滲水、龜裂、滑動等因素，危及大壩安全時，大甲溪發電廠得逕作緊急運轉，以排洪門及排砂門緊急洩降水位至不影響壩體安全為止。

十二、本水庫因緊急運轉實施洩洪時，應依第 10 點規定通知或通報，無法事先通知或通報時，得播放洩洪廣播後放水。

十三、本水庫緊急應變處理經過，應依程序層報經濟部水利署備查。

## 附錄二

### CCHE1D 動床水理模式簡介

## 附錄二 CCHE1D 動床水理模式簡介

CCHE1D 動床水理模式係美國密西西比大學之國家水科學及工程中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)所發展而成，其後歷經多次修改，使模式更為完善。本模式為一維變量流動床模式，適用於沖積河川及間歇性河川。以下介紹本模式所採用之基本控制方程式：

### (一)模式基本理論假設與數值方法

#### 1. 水流部份

水理模組求解聖凡南(Saint-Venant)方程式，滿足流體為不可壓縮、靜水壓分布、忽略風力、科氏力之假設，採用普利司蒙(Preissmann)四點隱式有限差分法離散控制方程式，並針對離散之控制方程式發展一套線性疊代法，利用雙掃法求解之，其一維水理控制方程式如下所示：

連續方程式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots (A-1)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\beta Q^2}{2 A^2} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + g (S_f - S_0) = 0 \dots\dots\dots (A-2)$$

式中， $A$ =通水斷面積； $Q$ =流量； $q$ =單位寬度側入流量； $t$ =時間； $x$ =水平座標； $g$ =重力加速度； $h$ =水深； $\beta$ =動量校正係數； $S_f$ =摩擦坡降； $S_0$ =底床坡降。

## 2. 輸砂部份

CCHE1D 模式使用非平衡輸砂概念計算河川之非均勻泥砂傳輸，對於總載形式之非平衡、非均勻輸砂控制方程式表示如下：

$$\frac{\partial(AC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} + \frac{1}{L}(Q_{tk} - Q_{t^*k}) = q_{lk} \dots\dots\dots (A-3)$$

式中 A 為通水面積；C<sub>tk</sub> 為總載情況下某種粒徑 k 之平均濃度；Q<sub>tk</sub> 為實際總載輸砂率；Q<sub>t<sup>\*</sup>k</sub> 為總載輸砂量；L 為輸砂調適長度；q<sub>lk</sub> 為岸壁或支流所額外增加之單位長度側向輸砂量。

輸砂調適長度 L 可特徵化泥砂由非平衡到平衡之距離。對推移載而言，調適長度 L<sub>b</sub> 為相對於床形之維度；對懸浮載而言，調適長度 L<sub>s</sub> = uh/αω<sub>sk</sub>，式中 α 為調適係數，其中 α 可由 Armanini and de Silvio(1988) 提出之方法計算，或當嚴重淤積時，α 可採 0.25，嚴重沖刷時，α 可採 1.0，輕微淤積與沖刷時，α 採 0.5，u 為水流平均流速，h 為水深，ω<sub>sk</sub> 為泥砂沉降速度；對河床質載而言，調適長度可給定為 L<sub>s</sub> 與 L<sub>b</sub> 之最大值；對沖洗載而言，忽略其與底床間之交換，調適長度 L 可視為無限大。

目前 CCHE1D 模式輸砂量 Q<sub>t<sup>\*</sup>k</sub> 之計算可採用以下輸砂公式：

- (1) SEDTRA module (Garbrecht et al., 1995)
- (2) Wu et al. formula (2000)
- (3) Modified Ackers-White formula (Proffitt & Sutherland, 1983)
- (4) modified Engelund-Hansen formula (Wu and Vieira, 2002)

有關 Q<sub>t<sup>\*</sup>k</sub> 之計算又可寫成以下通用形式：

$$Q_{t^*k} = p_{bk} Q_{tk}^* \dots\dots\dots (A-4)$$

式中 p<sub>bk</sub> 為混合層之床質分布，Q<sub>tk</sub><sup>\*</sup> 為潛勢輸砂率。某一粒徑 k 相應之底床變化可以下式推算：

$$(1 - p'_m) \frac{\partial A_{bk}}{\partial t} = \frac{1}{L_s} (Q_{tk} - Q_{r^*k}) \dots\dots\dots (A-5)$$

式中  $p'_m$  為河床質孔隙率， $\partial A_{bk} / \partial t$  為粒徑  $k$  之底床變形率。模式中將河床劃分為數層，其中混合層之床質分布  $p_{bk}$  可由下式計算：

$$\frac{\partial (A_m p_{bk})}{\partial t} = \frac{\partial A_{bk}}{\partial t} + p_{bk}^* \left( \frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\partial A_b}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (A-6)$$

式中  $A_m$  為混合層所佔之斷面積，其厚度設定為  $\max[0.5\Delta, 2d_{50}]$ ， $\Delta$  代表藉由 van Rijn (1984) 公式計算之砂丘高度， $d_{50}$  代表河床質之中值粒徑； $\partial A_b / \partial t$  為底床總變形率，由  $\partial A_b / \partial t = \sum_{k=1}^N \partial A_{bk} / \partial t$  累加計算， $N$  為代表粒徑總數；當  $\partial A_b / \partial t - \partial A_m / \partial t \geq 0$ ，式中  $p_{bk}^*$  可由混合層之床質分布  $p_{bk}$  替代之，反之當  $\partial A_b / \partial t - \partial A_m / \partial t < 0$ ， $p_{bk}^*$  為混合層下層粒徑  $k$  所佔之百分比。

式(A-3)藉由普利司蒙隱式法離散化，且為了滿足泥砂之連續條件，式(A-5)等號右邊項與式(A-3)之源項藉由同樣方法離散之，式(A-6)則採用有限差分法且滿足質量守恆離散化之，再利用隱式結合演算法配合代數方程處理式(A-4)中的  $p_{bk}$  與式(A-3)-(A-6)，即可計算泥砂傳輸、床形變化與床質粒徑變化，此種隱式結合演算法相對於分離演算法來得穩定且容易計算，然而，上述之結合演算法僅結合泥砂傳輸、床形變化與床質變化，泥砂與水流在演算流程上仍然為分離演算。

CCHE1D 模式使用 Arulanandan et al. (1980) 經驗公式計算岸壁基腳沖刷，使用 Osman and Thorne(1988) 理論計算岸壁破壞，岸壁沖刷之輸砂量加入式(A-3)之源項。

## (二) 超亞臨界混合流處理技巧

在現場案例中，天然河川往往會遭遇到超臨界流、臨界流之流況。雖然採用完全動力波模式(fully dynamic wave model)可求解超亞混合流況之問題，但此需要更先進之數值方法、內部邊界特殊處理及更多的

計算時間。CCHE1D 採用混合模式(hybrid dynamic/diffusive wave model)處理超亞混合流之問題。當福祿數小於 0.9 時，使用動力波模式；當更高福祿數時則採用擴散波模式。利用這種混合模式方法可以有效避免動力波模式在超亞混合流所產生之數值震盪，且可輕易地建構在原本 CCHE1D 模式架構中(普利司蒙隱式法、雙掃法)。若流況越接近均勻流，此混合模式替代法所產生之誤差將越小，當河道變化劇烈時，所產生的誤差則可能相當顯著，但如沒有水躍的發生，此誤差可藉由曼寧 n 值之重複校正而減少。

### (三)輸砂公式

目前版本之 CCHE1D 模式中，共有四種輸砂公式可供使用者依不同需求來選取使用，分別為 SEDTRA module、Wu et al's formula、Modified Ackers and White's formula、Modified Engelund and Hansen's formula，以下對各公式加以介紹。

#### 1.SEDTRA module (Garbrecht, Kuhnle and Alonson, 1995)

本模組可依不同底床粒徑，來選取合適之輸砂公式求取河床質載輸砂量，當床質粒徑介於 0.01mm~0.25mm，使用 Laursen's (1958) formula；介於 0.25mm~2.0mm，使用 Yang's (1973) formula；介於 2.0mm~50.0mm，使用 Meyer-Peter and Mueller's (1948) formula。

河川底床質載輸砂量可由  $C_{*t} = \sum_k p_k C_{*k}$  式來計算，其中  $C_{*t}$  為河床質載輸砂能力(ppmw)， $C_{*k}$  為某 k 粒徑之輸砂能力(ppmw)， $p_k$  為某一粒徑 k 佔總粒徑的百分比。

同時為了模擬非均勻輸砂中床質之隱顯效應(hiding and exposure)，應用(A-28)式計算出某 k 粒徑之臨界水流強度，其中  $d_k$  為粒徑 k 之平均值， $d_m$  為底床質之平均粒徑，而 x 為一經驗參數。

$$d_{ek} = d_k \left( \frac{d_k}{d_m} \right)^{-x} \dots\dots\dots (A-7)$$

本輸砂模組藉由 Brownlie 之實驗數據(1981)來進行檢定驗證，共有 5,263 組實驗室資料及 1,764 組現地觀測資料，其中現地資料皆是在相同或極相似狀況下進行測量。

## 2.Wu, Wang and Jia's (2000) Formula

本輸砂公式應用隱顯參數(hiding and exposure factor)來建立非均勻輸砂之啟動門檻、推移載及懸浮載，將推移載及懸浮載加總即為所需之河床質載輸砂量，其輸砂公式表示如下：

$$\frac{q_{bk}}{p_{bk} \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1) g d_k^3}} = 0.0053 \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_b}{\tau_{ck}} - 1 \right]^{2.2} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \dots\dots (A-8)$$

$$\frac{q_{sk}}{p_{bk} \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1) g d_k^3}} = 0.0000262 \left[ \left( \frac{\tau}{\tau_{ck}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_k} \right]^{1.74} \dots\dots\dots (A-9)$$

$$\tau_{ck} = 0.03 \varepsilon_k (\gamma_s - \gamma) d_k \dots\dots\dots (A-10)$$

$$\varepsilon_k = \left( \frac{p_{ek}}{p_{hk}} \right)^m \dots\dots\dots (A-11)$$

$$p_{hk} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_j}{d_k + d_j} \dots\dots\dots (A-12)$$

$$p_{ek} = \sum_{j=1}^N p_{bj} \frac{d_k}{d_k + d_j} \dots\dots\dots (A-13)$$

其中  $q_{bk}$  及  $q_{sk}$  分別為某粒徑  $k$  之推移載與懸浮載單位寬度輸砂量 ( $m^2/s$ )， $p_{bk}$  為某粒徑  $k$  所佔總粒徑之百分比， $n$  為糙度係數曼寧  $n$  值， $n'$  為相對糙度曼寧  $n$  值， $\tau_b$  為底床剪應力， $\tau_{ck}$  為某粒徑  $k$  啟動之臨界剪

應力， $\varepsilon_k$ 為某粒徑  $k$  的隱顯參數， $\omega_k$ 為某  $k$  粒徑之沉降速度， $m$  為實驗參數 (CCHE1D 設定為 0.6)，本輸砂公式之粒徑適用範圍介於 0.01mm~250mm。

上述公式在均勻輸砂之檢定驗證上，是從 Brownlie (1981)之實驗數據挑出 1,859 組河床質載資料來進行比較；對於推移載輸砂量，又再從 1,859 組資料中挑出 1,345 組推移載資料來進行比較調整。

在非均勻輸砂之檢定驗證上，挑選自 Toffaleti (1968)之實驗數據，分別是來自三組不同實驗團隊：Nomicos、Einstein-Chien、Vanoni-Brooks 於 Rio Grande River、Middle Loup River、Niobrara River 及 Mississippi River 的實驗結果。

### 3.Modified Ackers & White's formula (Proffitt & Sutherland, 1983)

本輸砂公式應用 Bagnold 之水流功率概念及相似性理論推導而成，但由於原始公式會超量預測輸砂量，HR Wallingford (1990)將原始公式加以修正，使粒徑適用範圍更為廣泛。

$$F_{gr,k} = \varepsilon_k \frac{U_*^n}{[(\gamma_s / \gamma - 1)gd_k]^{1/2}} \left[ \frac{V}{\sqrt{32} \log(10h / d_k)} \right]^{1-n} \dots\dots\dots (A-14)$$

上式之  $\varepsilon_k$  為校正係數 (correction factor)，表示如下：

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 1.30, & d_k / d_u > 3.7 \\ 0.53 \log(d_k / d_u) + 1.0, & 0.075 < d_k / d_u \leq 3.7 \\ 0.40, & d_k / d_u \leq 0.075 \end{cases} \dots\dots\dots (A-15)$$

其中  $d_k$  為某粒徑  $k$  之平均值， $d_u$  為相對粒徑。

$$G_{gr,k} = C \left( \frac{F_{gr,k}}{A} - 1 \right)^m \dots\dots\dots (A-16)$$

$$G_{gr,k} = \frac{C_k h}{p_{bk} d_k \gamma_s / \gamma} \left( \frac{U_*}{V} \right)^n \dots\dots\dots (A-17)$$

其中， $C_k$  即為總輸砂濃度(ppmw)。

本公式經與 Proffitt and Sutherland 之實驗數據比較，其輸砂量跟實驗數據相似度較高，但與現場案例結果比較，其精準度較差。

#### 4.Modified Engelund & Hansen's 1967 Formula (with Wu et al's correction factor, 2000)

本公式應用 Bagnold 之水流功率概念及相似性理論推導而成，並導入 Wu et al. (2000)輸砂公式之校正係數來調整隱顯作用在非均勻輸砂中之影響，公式如下：

$$f' \phi_k = 0.1 (\varepsilon_k \tau_{*k})^{5/2} \dots\dots\dots (A-18)$$

$$f' = \frac{2gSd}{U^2} ; \tau_{*k} = \tau_0 / [(\gamma_s / \gamma) d_k] ; \varepsilon_k = \left( \frac{p_{ek}}{p_{hk}} \right)^{0.45} \dots\dots\dots (A-19)$$

$$\phi_k = q_{i*k} / \left[ p_{bk} \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1) g d_k^3} \right] \dots\dots\dots (A-20)$$

其中  $\tau_{*k}$  為無因次底床剪應力， $\varepsilon_k$  為隱顯效果校正係數， $\phi_k$  為無因次輸砂量， $q_{i*k}$  為單位寬度河床質載輸砂量(m<sup>2</sup>/s)。

## 參考文獻

1. Armanini, A. and di Silvio, G., 1988, "A one-dimensional model for the transport of a sediment mixture in non-equilibrium conditions." *J. Hydr. Res., IAHR*, Vol. 26(3): 275–292.
2. Arulanandan, K., Gillogley, E., and Tully, R., 1980, "Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of naturally undisturbed cohesive soils." Rep. GL-80-5, U.S. Army Engineers Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
3. Brownlie, W. R., 1981, "Compilation of fluvial channel data: laboratory and field." Rep. No. KH-R-43B, W. M. Keck Lab. of Hydr. and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
4. Engelund, F. and Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
5. Garbrecht, J., Kuhnle, R., and Alonson, C., 1995, "A sediment transport capacity formulation for application to large channel networks." *J. Soil and Water Conserv.*, Vol.50(5): 527-529.
6. HR Wallingford, 1990, "Sediment transport, the Ackers and White theory revised," Report SR237, HR Wallingford, England.
7. Laursen, E., 1958, "The total sediment load of streams," *J. of Hydraulics Division, ASCE*, Vol.108, 36p.
8. Meyer-Peter, E. and Mueller, R., 1948, "Formulas for bed-load transport," Report on Second Meeting of IAHR, Stockholm, Sweden, 39-64.
9. Osman, A. M. and Thorne, C. R., 1988, "Riverbank stability analysis, I:

- Theory,” J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.114(2): 134–150.
10. Osman, A. M. and Thorne, C. R., 1988b, “Riverbank stability analysis, II: Application,” J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.114(2): 151-172.
  11. Proffit, G.T. and Sutherland, A.J., 1983, “Transport of nonuniform sediment.” J. Hydr. Res., IAHR, Vol.21(1): 33-43.
  12. Toffaleti, F. B., 1968, “A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface,” Technical Report No.5, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss.
  13. van Rijn, L.C., 1984a, “Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110(11): 1431-1456.
  14. van Rijn, L.C., 1984b, “Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110(11): 1613-1641.
  15. Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y., 2000, “Nonuniform sediment transport in alluvial rivers.” J. Hydr. Res., IAHR, Vol.38(6): 427-434.
  16. Wu, W. and Vieira, D. A., 2002, “One-dimensional channel network model CCHE1D 3.0 -- Technical manual,” Technical Report No. NCCHE-TR-2002-1, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, USA.
  17. Yang, C. T., 1973, ““Incipient motion and sediment transport”,” J. of Hydraulics Division, ASCE, Vol.99(HY10): 1679-1704.

### 附錄三

#### 期中期末報告審查意見處理情形表

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 1 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、國立中央大學 吳祚任教授		
1.WRF 模式在降雨量計算上誤差較大，盡量只利用其趨勢及 QPESUMS 預報。	1.感謝委員的建議，本團隊將會利用 WRF 模式的趨勢預報與 QPESUMS 的預報成果來進行雨量預報作業	同意。
2.迴歸方法修正可多嘗試幾組組合。	2.感謝委員的建議，本團隊除了將重新檢視資料門檻修正處理過程外，還會嘗試不同影響因子組合的修正。	同意。
3.橋梁數值模式尚需與實際觀測比較，如有流量比較更佳。	3.洪水過程模擬需要有連續觀測資料比對，然水利單位現有連續觀測資料以水位為主，未來若有其他觀測資料(如：流量)可納為比較對象。	同意。
二、國立臺灣大學 賴進松研究員		
1.QPESUMS 預報是否可以加長至三小時?可利於橋梁預警之用。	1.感謝委員寶貴意見，本團隊目前將先針對合約範圍的一小時預報進行分析，若有餘力再考慮延長至三小時預報。	同意。
2.power-Law Z-R 關係式在大甲溪流域與 SVR 的修正雷達雨量結果，是否可加以分析比較，以利說明。	2.感謝委員寶貴意見，該結果已經列在報告的第 74~76 頁中，其中圖 3.12(a)即為 Z-R 關係式的結果，其他圖 3.12(b)~(k)則為 SVR 之修正結果。	同意。
3.石岡壩上游集水區之 QPESUMS 預報，如何考慮大甲溪各水庫之操作規則?如此，才可準確推估石岡壩支出流歷線。	3.感謝委員寶貴意見，本團隊已收集各水庫之操作規則，並在格網式降雨逕流模式中納入操作規則。	同意。
4.一維動床模擬泰利颱風的成果與實測水位比較十分接	4.感謝委員肯定，泰利颱風過程模擬比對為定床結果，後續將進行	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 1 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
近，但是否是以定床進行模擬？	動床分析。	
5.簡報中(P.25)歷年斷面變化(圖 1.9、1-10)在橫斷面地形高程之變化其實仍有明顯沖淤行為，所以未來對於地形高程變化(模式沖淤之比較)對模擬會有顯著之影響。	5.感謝委員寶貴意見，後續會加強地形變化之描述，了解地形變化對模擬結果之影響。	同意。
<b>三、中興顧問 廖翊鈞工程師</b>		
1.第 88 頁，有關 HEC-RAS 的描述，目前 HEC-RAS 已能處理超、亞混合流況，請確認。	1.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。
2.表 4-1，HEC-RAS 已能做動床分析，請補充。另外表格的定義能否再詳盡？例如流況分類裡面的「定」量流應是指該模式只能模擬定量流。	2.感謝委員寶貴意見，最新版本之 HEC-RAS 能進行動床模擬。	同意。
3.本計畫採用 CCHE1D 模式係求解 de Saint_Venant 方程式。在模擬泰利颱風時，計算時間間距採用 5 分鐘，時間間距是否過長？	3.泰利颱風過程模擬採 5 分鐘為計算時距乃模式檢定後之結果，與實測水位歷線相當符合。	同意。
<b>四、公路總局翟慰宗幫工程司</b>		
1.上游雨量站雨量大小、石岡壩放流量與大甲溪各流域各重要橋梁橋址流量、水位關係，可否簡化以明確表列方式以供參考。	1.感謝委員寶貴意見，未來第二次期中報告將詳列大甲溪流域石岡壩下游橋址水位流量關係表。	同意。
2.上游洪峰流量到達大甲溪流域各重要橋梁之預警時間估算，建議可後續列入研究。	2.感謝委員寶貴意見，目前將先進行合約範圍內的橋墩沖刷推估，若有餘力則再考量預警時間估	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 1 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩冲刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	算。	
3.對於橋梁數值模式，模擬事件建議可增加其他歷史事件以驗證。	3.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。
<b>五、本所港研中心 邱永芳主任</b>		
1.希望在本年度汛期前，讓本系統建立完成，並納入預警系統中，提供本年度防災應變策試之用。	1.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。
2.希望進一步探討 QPESUMS 直接計算雨量結果與加入 WRF 之後的雨量趨勢判斷兩種方法，並比較兩者之間的準確性。	2.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、中興工程顧問股份有限公司 廖翊鈞工程師		
1.圖 1.8 繪製的河段相當長，以致高程變化不易辨識，建議另以國道一號至三號間河段另繪河床縱斷面圖。	1.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。
2.表 2-2「實驗條件」欄位中，有部分資料被截切，請調整。	2.感謝委員的建議，遵照辦理。	同意。
3.第 81 頁，本計畫集水區格網劃分是以 TW67 為參考座標，惟目前所有的數值地表高程資料皆為 TW97 系統。為方便日後更新，格網座標能否轉為 TW97 系統？	3.感謝委員的建議，將遵照建議將座標改為 TW97。	同意。
4.第 109 頁，本計畫目前僅有辛樂克颱風資料作檢定，而「動床模組參數」之描述似為檢定後之成果，因此「預先檢定分析」之用詞是否必要？同時 Wu et al(2000)之公式能否計算沖洗載？請確認。	4.感謝委員指正，「預先檢定分析」將於報告中修正。沖洗載一般認定不會與床砂進行交換，本計畫將調適長度設定為無限大，忽略沖洗載與底床間之交換。	同意。
二、台灣大學水工試驗所 賴進松研究員		
1.QPESUMS 利用大甲流域的雨量站(15 個)全數來用在與地面時雨量作比較，建議可依各雨量站分別比較修正後的成效，如此也可分辨各站修正的好壞。	1.感謝委員的建議，將遵照建議繪製各站修正成果。	同意。
2.橋梁數值模式時潮位下游邊界條件之敏感度分析，是利用 1.5m 及 1.0m 作為邊界之影響條件，建議可參考河口之暴潮	2.感謝委員寶貴意見。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
位在 100 年或 200 年洪水重現期所對應之河口潮位條件，以進行較嚴重條件下，對影響河段範圍之分析。		
3.一維動床河道計算時，所計算出的沖刷深度(一般沖刷)，與實測資料比較時，應說明是主深槽的沖刷深度或是平均底床深度。	3.計算沖刷深度與實測資料之比對，乃針對深槽的沖刷深度進行比較。	同意。
4.束縮沖刷也可利用水理計算之結果進行推估比較。	4.模式計算過程以考慮橋墩束水效應，束縮沖刷以納入模式計算結果。	同意。
三、交通大學土木工程系 葉克家教授		
1.計畫緣由中，建議加入莫拉克颱風造成高屏溪雙園大橋斷裂之災害。	1.感謝委員寶貴意見，高屏溪雙園大橋斷裂將增列於後續報告。	同意。
2.大甲溪近幾年來有許多治理規畫報告，建議就與本計畫有關之資料予以彙整。	2.感謝委員的建議，遵照辦理。	同意。
3.橋墩局部沖刷近幾年來之研究文獻，建議再加收集納入報告中。	3.感謝委員的建議，遵照辦理。	同意。
4.表 2-1 中，應為”吳建民”；報告中有些地方列述”回歸”分析，請改為”迴歸”。	4.感謝委員的建議，遵照辦理。	同意。
5.降雨-逕流模式中，漫地流與導流之交換機制，建議有所說明；本模式在大甲河流域之檢定、驗證是否有足夠之資料，建議有所說明。	5.感謝委員的建議，此部分為下一階段工作項目，將於下次期中報告中呈現。	同意。
6.CCHE1D 動床模式之檢定驗	6.感謝委員寶貴意見，遵照辦理。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
證，建議有所說明；另河道沖淤變化建議有河道縱剖面圖之繪製。		
7.圖 5.9 之時間軸應為 2008 年，該圖稱”大甲溪橋附近河道”，建議給予較明確位置之敘述，圖中實測刷深是否有局部沖刷在內，請有所說明。	7.沖刷深度實測資料僅針對河道一般沖刷，並不包括局部沖刷。	同意。
8.本計畫與另一計畫「橋墩沖刷計算模式之建立研究」，在成果上如能整合之部分，建議有所整合，以增進計畫成果之實用性與精確度。	8.感謝委員的建議，遵照辦理。	同意。
四、交通部科顧室 許書王技正		
1.取用 13 場颱風，其每個颱風造成洪水的內涵是否有明顯差異，例如水質(其會影響流速，進而影響水位)，例如有漂流木橫隔...，請卓參。	1.感謝委員的建議，13 場颱風是上游的降雨逕流模式率定參數之用，再利用雷達降雨資料配合降雨逕流模式計算出下游石岡壩的入流量，石岡壩以下的河道再以水理模式進行計算，模式計算時已有考慮相關物理機制與河道糙度。	同意。
2.不同的河道底床及不同的墩形是否亦為影響因素，是否會與其他因素產生交互作用。	2.本計畫提出之一為模式無法反應床形變化對沖刷深度的影響；不同的墩形會影響局部沖刷深度，後續推估局部沖刷深度有考慮墩形之變化。計算局部沖刷時，會考慮橋墩的形狀，依據橋墩實際的形狀輸入進行估算。	同意。
3.地表滲入的影響，如兩颱風相	3.感謝委員的建議，地表入滲的	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
近，第一個颱風可能地表滲入大於第二個，如此對水位推估會有影響。	計算已在格網分布型模式中考慮，河道水位推估是利用格網分布型模式計算的石岡壩的放流量來演算，故不會受到入滲的影響。	
4.不同河道的參數是否一樣？建議多加驗證或對參數詳加舉列說明應用方式。	4.水文與水理模式內相關參數，必須反映區域特性，計畫目標區域為大甲溪河道，模式參數之檢定乃針對計畫區域進行。	同意。
<b>五、本所港研中心 朱金元副主任</b>		
1.支撐向量機修正向量分析中，有雷達距離及雷達空間距離，兩者之差異性如何？	1.感謝委員的建議，雷達距離是考慮雷達站與雨量站的位置二維距離，空間距離是考慮雷達站到雨量站的高程和位置所計算出來的三維距離。但是此兩距離的差異不太大且有高度相關性，後續將只考慮二維距離。	同意。
2.V5 與 V11 之均方根誤差及相關係數均相同，為何選 V5？	2.感謝委員的建議，V5 是考慮到格網座標位置的影響，V11 是考慮到高程的影響，兩者結果雖然相近，但若考量資訊取得的方便性和準確度，格網座標位置的資訊會較高程來的方便和準確，在後續的即時修正時，將會進行雷達網格內插，而高程資訊需比對 DTM 的資料，而準確度也較差，所以還是會選擇 V5，在進行模式的率定和後續的研究上都能夠得到較佳的結果。	同意。
3.利用 SVR 模式修正 QPESUMS	3.感謝委員的建議，SVR 模式修	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
雷達降雨，如何修正？如何判定修正之結果比較好，好在哪裡？	正 QPESUMS 雷達降雨的方法，請參閱期中報告 P46 頁說明。其結果好壞可以根據報告 P76 頁中圖 3.15(a)，未經過 SVR 修正的雷達降雨大部分有低估的趨勢，修正後的結果如圖 3.15(b)所示，SVR 修正結果與地面雨量站觀測結果較為接近，且相關係數和 RMSE 都有很大的提升。	
4.為何用 SVR 模式校正。	4.QPESUMS 雨量與地漫雨量站觀測結果差異甚大，無法直接以線性方式修正，而非線性的修正方法中根據 2009 年成功大學劉鑛鏞的碩士論文-利用機器學習修正 QPESUMS 雷達估計降雨，該研究比較類神經的 RBFNN 法與支撐向量機的 SVR 法來修正雷達降雨，其結果顯示 SVR 的修正效果較 RBFNN 來的佳。因此本團隊採用 SVR 模式來修正。	同意。
5.雨量站位置(X, Y)、距離、空間距離這 3 個因子，基本上都是很相似的，不太適合放在一起作迴歸分析。	5.感謝委員的建議，本團隊有計算雨量站位置和距離因子的相關性，其結果相關性不大，但是距離和空間距離的相關性較大，後續的研究將不再考慮空間距離。	同意。
六、高公局中工處		
1.報告中之橋「樑」，建議修改統一慣用字為橋「梁」。	1.感謝委員的建議，將遵照辦理。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
2.P21, 圖 1.9, 建議註明資料來源出處。	2.感謝委員寶貴意見, 遵照辦理。	同意。
3.P105, 報告中述及中山高大甲橋梁請統一為「國道 1 號大甲溪橋」。	3.感謝委員的建議, 將遵照辦理。	同意。
4.P106, 內容述及「...時間差皆小於 1hr, 建議勿參考石岡壩即時放流量, ...」, 此部分研究團隊是否有較佳之建議, 建議於報告中提出。	4.感謝委員建議, 此部分分析乃遵照第一次期中審查委員公路總局翟慰宗幫工程司建議進行, 針對洪峰抵達時間進行分析。	同意。
5.建議內容可加入高公局辦理之「高科技監測系統試辦計畫」研究方式推估理論, 作比較(雨量、水位、流速、沖刷深度)。	5.感謝委員寶貴意見, 「高科技監測系統試辦計畫」為執行中計畫, 尚無具體結論產生, 未來將參酌其結案報告, 進行分析比較。	同意。
6.建議研究案於沖刷深度推估之文獻列入目前各單位辦理之研究案。	6.沖刷深度推估法乃參考國內外相關報告, 並詳列於計畫參考文獻中。	同意。
七、本所港研中心 林雅雯副研究員		
1.大甲溪現地觀測雨量、水位站水位, 請說明其與本研究分析之相關性, 是否有應用。	1.雷達降雨經 SVR 修正後仍會進行及時修正作業, 因此需要雨量資料; 而水位站水位主要是為了進行水理演算的水位驗證之用。	同意。
2.石岡壩以上橋梁之水位、流量、沖刷深度分析情形, 請說明。	2.感謝委員寶貴意見, 目前將先進行合約範圍內的橋墩沖刷推估, 若有餘力會全力支援此工作項目, 相關成果並納入報告中。	同意。
3.研究團隊已分析出辛樂克颱風大甲溪石岡壩以下橋梁一般沖	3.感謝委員的建議, 將遵照辦理。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 2 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
刷沖刷深度，請提供台科大以便執行橋梁預警系統沖刷深度計算。		

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 3 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、中興工程顧問股份有限公司 廖翊鈞工程師		
1.第 58 頁提到利用 2005~2007 年九場颱風事件,但是表 3-2 與表 3-3 中卻是有十場颱風事件,請確認。	1.感謝委員寶貴的意見,此部分文字已進行修改,改為”收集 2005~2008 年 9 場颱風事件時雨量觀測資料,分別為 2005 年之海棠颱風、馬莎颱風、泰利颱風,2006 年之碧利斯颱風,2007 年之聖帕颱風、科羅莎颱風,與 2008 年之鳳凰颱風、薔蜜颱風、辛樂克颱風”。同時一併修改表 3-2 與 3-3 的颱風場次。	同意。
2.第 111 頁,圖 5.11 高速鐵路橋 19-1 斷面有明顯的差異,請說明。	2.可能為河川管理單位於附近施工所致。	同意。
3.建議本計畫與另一計畫「橋墩沖刷計算模式之建立研究」後續能整合以增進計畫成效。	3.本計畫相關計算成果可作為「橋墩沖刷計算模式之建立研究」分析模式輸入所需之邊界條件。	同意。
二、中山大學 李忠潘教授		
1.請於第五章摘要加入本研究所涉及的理論及相關經驗式。	1.已增加於附錄中。	同意。
2.請於 5.2.2 列出 Wu et al.(2000)之經驗式。	2.已增加經驗公式於附錄一動床水理模式。	同意。
3.請於 Fig.5-8 標示洪峰到達及退水的時間。	3.圖.5-8 已標示洪峰時間。	同意。
4.動床模組測試結果,於大甲溪橋(1)下游 245m 處,預測值為 2.3m,而實測則為 4.5m,相差甚多,需再改善。(2) 上游 155m 處另有實測沖刷值,可以用來測試。	4.2.3m 為距上游 155m 處實測沖刷值;4.5m 為距下游 245m 處實測沖刷值,實測平均值為 3.4m,模式推估結果為 2.51m,誤差在 1m 以內,尚在合理範圍之內。	同意。
5.表 5-7,”台 1 線大甲溪橋”預測沖刷深度 2.51 公尺,應加註預測的	5.表 5-7 中預測的位置與實測的位置之關係可參考圖 5.7 所示。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 3 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
位置，以與實測的上、下沖刷深度比較。		
6.圖 5.10 橫軸請標示年份及相對應颱風。	6.圖 5.10 橫軸乃 2005 年至 2008 年主要颱風與暴雨洪水期間實測放流量所串連而成。	同意。
7.河床質孔隙率 0.4 是否偏大呢？	7.曼寧 n 值選定依 2007 年河床值採樣分析結果及現場勘查結果所決定。	同意。
三、台灣大學水工試驗所 賴進松研究員		
1.潮位邊界條件給定 1.5m 及 1.0m 作為測試條件時，在泰莉颱風條件下所得的結果發現並不會影響國道 1 號及 3 號大甲溪橋的水位。其實也可由大甲溪橋的縱斷面變化(即河床坡度變化)來說明其不具影響性，請在報告 5.1.3 節中補充之。	1.感謝委員寶貴的意見。	同意。
2.在長期颱風作用動床組測試案例中，97 年預測的深泓線比實測的底床值有明顯的差異(如高鐵橋、新舊山線橋斷面之間、國道 3 線大甲溪橋)，是否因有橋梁結構物時之處理(如束縮條件)尚未能模擬良好之故，請補充之。	2.由於橋梁附近流場三維性較強，一維模式並無法針對結構物流場完全掌握，因此本計畫在處理橋梁附近沖刷時輔以局部沖刷公式進行推估。	同意。
3.後續的橋梁沖刷推估模式工作內容，如何與「二維橋墩沖刷計算模式之建立研究」該計畫配合銜接請在第一章中補充之。	3.本計畫相關計算成果可作為「橋墩沖刷計算模式之建立研究」分析模式輸入所需之邊界條件。	同意。
4.未來後續在 QPESUMS 雷達降雨分析時，應能預報模擬出石岡壩的放流量，並提供給水理沖刷模	4.感謝委員寶貴的意見，後續將會加入石岡壩放流量模擬計算。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第3次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
式使用。		
四、交通大學土木工程系 葉克家教授		
1.P.24 預定進度甘特圖(第一年)與第一年之工作內容及預期成果並不一致，如第一年之預期成果敘及將初步建立橋墩水位與沖刷深度關係，請再加檢核及說明。	1.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理，相關分析見各頻率年流量可能沖刷分析。	同意。
2.P.84 圖 4.13 有關降雨逕流模式之驗證，整體而言，模擬結果與實測值有頗大之差異，其可能原因，建議有進一步之評估。	2.感謝委員寶貴的意見，降雨逕流模式經過誤差即時修正之後其表現結果相當不錯，請參閱圖 4.14 與圖 4.15。	同意。
3.表 5-1 一維模式功能比較表中，HEC-RAS 及 NETARS 模式均有其差異宜有所說明。	3.感謝委員寶貴的意見。	同意。
五、本所港研中心 林雅雯副研究員		
1.報告中敘述雷達降雨至石岡壩入流量模擬及一維動床水理模擬 CCH1D，建議針對一颱風豪雨事件，全程從 QPESUMS 石岡壩入流、放流量、下流各壩至臺一線大甲溪橋水位站即時及未來預測一小時的模擬、驗證納入報告中。	1.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
2.QPESUMS 雷達降雨經支撐向量回歸 SVR 及 Kriging 修正後，誤差仍有 23mm/hr，請說明修正後誤差範圍。	2.感謝委員寶貴的意見，QPESUMS 降雨經過 SVR 與 Kriging 修正後，其誤差如圖 3.14 與圖 3.15 所示。	同意。
3.石岡壩以上東勢大橋等橋梁之流量、水位歷線等，於報告中未述及。	3.感謝委員寶貴的意見，現階段先針對石岡壩以下橋梁建立模式，若計畫時程與人力許可乃針對石	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第3次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	岡壩以上橋梁建立模式。	
4.沖刷深度計算模式如有初步成果，請提供台科大以納入橋梁預警系統。	4.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
六、本所港研中心 邱永芳主任：		
1.請將石岡壩上游全部跨河橋梁的一維數值模式，一併完成計算。	1.感謝委員寶貴的意見，現階段先針對石岡壩以下橋梁建立模式。	同意。
2.7 場颱風所率定而得之逕流模式參數差異性大，使用平均值作為參數結果是否過於失真？可嘗試交叉任取幾場颱風作為率定的計算。	2.感謝委員寶貴的意見，交叉驗證之結果請參考 4.3 的成果，利用不同的組合方式所模擬的成果雖然會有差異，但是模擬的流量歷線趨勢卻是跟實際流量一樣，所以本研究最後加入即時誤差修正的方式調整即可獲得較佳之模擬結果。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 4 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<b>一、中興工程 廖翊鈞工程師</b>		
1.請說明如何將 kriging 修正結果應用於雷達降雨預報的修正。	1.感謝委員寶貴的意見，已將 kriging 方法列於第三章的 3.4 節中。	同意。
2.目前水利署已有最新的斷面資料，建議改用新的資料來分析沖刷。	2.感謝委員建議，研究團隊已利用第三河川局執行大甲溪河口至天輪壩大斷面及地形測量成果報告書所提供之 2010 年實測大斷面資料進行模式地形之建構。	同意。
3.莫拉克沖刷分析中，圖 5.14~圖 5.23 不易判斷，請改善。	3.感謝委員建議，圖 5.14~圖 5.23 已重新繪製。	同意。
4.第三章與第四章中，分別出現”瑪”莎颱風與”馬”莎颱風，請根據中央氣象局的命名統一。	4.感謝委員寶貴的意見，將統一採用中央氣象局的命名。	同意。
<b>二、臺灣大學水工試驗所 賴進松研究員</b>		
1.在降雨逕流模式中有無考慮德基壩與石岡壩之間的水庫操作(如谷關、天輪壩...)?請分析是否會影響石岡壩流量的推估模擬。	1.感謝委員寶貴的意見，根據大甲溪電廠的操作規定，上游德基水庫若開始排洪，下游所有發電水庫則不蓄水，直接進行排洪。因此本模式設定德基水庫排洪時，不考慮其他電廠的蓄水。	同意。
2.在橋梁數值模擬時，在大甲溪台 1 線公路比較一般沖刷現地試驗的資料，因實測的量測沖刷數據點位與橋梁斷面間有一段距離，請說明模擬一般沖刷結果的斷面位置，會不會受橋梁墩柱之影響?	2.感謝委員寶貴的意見，盧等人之一般沖刷現地試驗位址在上游距離橋梁 155 公尺、下游橋梁 245 公尺，一般局部沖刷坑之尺度為數公尺至數十公尺，預測之一般沖刷應無受橋墩影響之疑慮。	同意。
3.橋墩局部沖刷的推估是否由二維模式(中興公司負責的計	3.二維模式較能表現河段各橋墩附近之水理特性，本案之一維模式	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 4 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
畫工作項目)來推估提供即可。	為斷面之平均特性，特性為快速提供沖刷深度供參考，在局部之特性較難掌握，橋墩局部沖刷的推估由二維模式來推估提供較為適合。	
4.石岡壩的出流量及砂量是作為河道沖刷的上游邊界，入流砂量如何給定請在報告中說明之。	4.由於水庫之囚砂作用，故石岡壩的出流採清水。	同意。
三、國立中央大學 吳祚任教授		
1.kriging 修正結果相當優良，值得肯定。	1.感謝委員的肯定。	同意。
2.水理計算中，橋墩周圍之解析度為何？是否足夠描述橋基以下群樁裸露之水理情況？	2.本案之一維模式為斷面之平均特性，在局部之特性較難掌握，但可快速計算沖刷深度供主管機關作為防災用途。	同意。
3.水理計算中如何克服河道彎曲所產生之三維河道二次流之情況？	3.本案之計畫目標為快速計算沖刷深度以增取時效進行封橋準備，三維模式雖能精細掌握水理特性，但計算時間很長，適合進行學術探討。	同意。
4.沖刷經驗公式目前取六組，是如何選取？	4.沖刷經驗公式的選取依 2008 年 12 月 31 日於交通部公路總局所召開之「研商『橋墩(基)局部公式及耐洪能力詳細評估辦法』計算準則，以便採用相同準則訂定封橋水位」之會議結論，建議適用於臺灣地區之局部沖刷公式。	同意。
5.沖刷深度之準確度還需再提昇，要如何調校？	5.校正之準確性還是會有天然及人為因素存在，若可藉由現場實際測量沖刷深度最為準確、可靠。	同意。

**交通部運輸研究所合作研究計畫  
第 4 次期中報告審查意見處理情形表**

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
6.沖刷為三維行為，很難由深度積分之淺水波方程式描述，因此即使在某流量下修正係數與結果，仍舊很難保證在高流量下之精確度，要如何克服？	6.感謝委員的指教，現況三維模式所採用之泥砂啟動公式亦為平均流之情況，高流量之適用性仍須進一步探討，本案沖刷模式之建構在水理與河道一般沖刷方面已經過高流量資料驗證工作，希望未來有較多實測局部沖刷資料可供驗證用途。	同意。
<b>四、本所港研中心 朱金元副主任</b>		
1.報告中並未說明如何將模式推估水位推算轉換至沖刷深度，請說明之。	1.由一維水理模式可推之各斷面的流量、流速、水深等基本資料，再帶入局部沖刷公式進行計算的支沖刷深度。	同意。
2.一維沖刷預測，橋墩附近以沖刷深度為主，是否有關於沖刷位置比較？報告中有提到造成沖刷問題主要是束縮影響，請問如何驗證？	2.一維模式為斷面之平均特性，在局部之特性無法由本案之模式得知。	同意。
<b>五、本所港研中心 林雅雯研究員</b>		
1.建議報告補充大甲溪水庫操作，在推估中如何考量章節。	1.感謝委員寶貴的意見，大甲溪水庫操作規則列於第四章的 4.3 節中。	同意。
2.橋梁數值模式只有泰利颱風一場模擬驗證，建議再增加。	2.在檢定 2005 年歷史颱風洪事件中，僅一場泰利颱風有完整的水位記錄站資料。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
一、中興工程 廖翊鈞工程師		
1.雷達雨量修正的部份，關於預報修正建議增加理論或是修正方法的說明。	1.感謝委員寶貴的意見，已將方法增列於 3.4.7 中。	同意。
2.P.133 中，長期沖刷模擬的成果中，高鐵橋的部分有沖刷較深的結果，是否在高速鐵路橋的地方有施作保護工而造成較大的沖刷模擬結果。	2.感謝委員寶貴的意見，此斷面河寬有較小趨勢，在加上保護工的施作，故沖刷較深。	同意。
3.P.142~P.147 的圖形中，橫軸的時間單位是否有問題?模擬時間為 144hrs，但是圖上只有出現 1600sec(不到 1 小時)。	3.感謝委員寶貴的意見，已經修正錯誤的時間軸單位。	同意。
4.P.151~P.156 的說明中，”實測南瑪都颱風期間沖刷”，會造成誤解為該地點有沖刷的實際觀測，應是南瑪都颱風期間利用石岡壩實測放流量推算出該橋梁的沖刷深度變化，請更改說明。	4.感謝委員寶貴的意見，以更改圖示說明。	同意。
二、中山大學 李潘忠教授		
1.Fig1-1 流程圖最右欄之橋墩附近流速與水位並非起始條件，不宜引為模式的輸入條件。	1.感謝委員寶貴的意見，已經修正。	同意。
2.表 1-4 及 1-5 之斷面位置，請另以圖標示。	2.感謝委員寶貴的意見，此兩張表的斷面位置請參閱圖 1.7。	同意。
3.表 1-7 及 1-8 請標示年、月、日。	3.感謝委員建議，照片已增加年、月、日	同意。
4.圖 1-9 及 1-10 請 update 至	4.已更新國道一、三號斷面至 99 年	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
2011。	高程變化。	
5.P.107 第三段所述，本研究之模式似尚未能”精確”及”真實”模擬實際流場與沖刷(如 P.108 所述)請修正。	5.文字說明不妥部分已修正。	同意。
6.P.110 之實測大斷面，請另以圖標示。	6.99 年實測斷面已加入大甲溪石岡壩下游河床平均高程縱斷面圖。	同意。
7.圖 5-14 至 5-23，模擬值均大於觀測值，請說明改進方法，另外如圖中所示模擬值於一開始即急速拉高的原因為何?	7.初始流速小時不至於造成沖刷，當啟動流速大於臨界流速開始形成沖刷之時，以致模擬沖刷深度直急速拉高。	同意。
三、臺灣大學水工試驗所 賴進松研究員		
1.研究團隊在期中報告中，將河道演算部分加入水庫操作準則，並進行幾場颱風事件之參數率定，成果十分良好。但海棠、聖帕及辛樂克三場其洪峰尚未能準確模擬，可多加說明可能之原因。	1.感謝委員寶貴的意見，降雨逕流模式經過即時修正後已能合理的掌握各颱風事件的洪峰。	同意。
2.在 5.2.4 節中提到”長期颱風作用動床模組測試”，建議此標題可改為”歷史多場颱風事件重現時之動床模組測試”，另外，5.2.2 及 5.2.3 節也可考慮改為”單場颱風事件之動床模組測試”。	2.感謝委員建議，已修改標題名稱	同意。
3.石岡壩下游多為岩盤裸露的河床，CCHE1D 模式是否有啟用岩床沖刷模組?埤豐橋(斷面 35)的沖刷深度(如圖	3.CCHE1D 模式在輸砂公式計算上如附錄二所介紹，尚未啟用岩床沖刷模組。模式之計算根據當時放流量計算可能流速、水深等，	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
5-14)有隨時間回淤之特性，請說明其沖刷過程的可能機制。	再利用局部沖刷經驗公式預測沖刷深度。	
4.各種重現期洪水流量之局部沖刷分析，所得的表5-15~5-22是十分有用的資料，但目前並無一般沖刷或束縮沖刷的分析，請補充之。也請將”頻率年”改為”重現期”。	4.模式計算中已考慮一般沖刷及束縮沖刷的分析，另已將”頻率年”改為”重現期”。	同意。
5.表5-15~5-22中的資料，如何與其他子計畫互相銜接，例如與二維水理輸砂模式所獲得的橋墩沖刷計算結果，如何比較整合?請簡述之。	5.一維水理計算結果是最為二維水理演算的熱機條件。	同意。
四、交通大學土木工程系 葉克家教授		
1.表2-1 橋墩沖刷公式收集至1987年，其後如有新的公式，宜納入之。	1.感謝委員寶貴的意見，已增加新的橋墩沖刷公式。	同意。
2.表5-7 辛樂克颱風後，台一線大甲溪橋下游實測沖刷深度達4.5公尺，本計劃數模結果如何，建議有所說明。	2.利用辛樂克歷史颱風事件計算一般沖刷深度，模式計算出一般沖刷深度為2.51公尺，故在實際量測值採用上、下游平均值沖刷深度為3.4公尺。	同意。
3.莫拉克颱風事件，石岡壩模擬及實測放流歷線(圖5-12、圖5-13)之洪峰流量有頗大之差距，其理由應有所說明。P.134敘及大甲溪出口潮位站，而採自由流出為下游邊界，為考慮暴潮位之影響，未來可	3.感謝委員建議，此計畫是利用自由流出、平均潮為1.5公尺和1.0公尺，所得之結果無顯著差異。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
以鄰近之潮位站推估之。		
4.在莫拉克颱風事件下，各橋墩之沖刷深度(圖 5-14~圖 5-23)有二條沖刷歷線，其圖例說明是否正確?其結果應為局部沖刷深度，其一般沖刷、束縮沖刷深度為何，建議有所說明。另埤豐橋河段底床為岩壁，既有沖刷公式是否適用，宜有所說明。	4.莫拉克颱風事件為預測局部沖刷深度，圖例說明錯誤部份已修正。模式之計算根據當時放流量計算可能流速、水深等，再利用局部沖刷經驗公式預測沖刷深度。故能否應用於埤豐橋河段是否適用，需有實際測量資料說明較可行	同意。
5.P.156 5.5 節”各頻率年”建議改為”各重現期”，在模擬各重現期流量下各橋梁處之局部沖刷，其一般及束縮沖刷建議有所評述。由圖 1-1 研究流程圖，有關水位與橋墩沖刷深度關係建立及預警，宜有所評述。	5.感謝委員建議，已將”頻率年”改為”重現期”。	同意。
6.第六章名宜改為結論與建議，建議其內容再加補強，以凸顯本計劃之具體成果。	6.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
7.P.132 倒數第三行應為”全河段”，P.99 倒數第四行應為”表 4-10”，第五章之章名建議為橋墩沖刷數值模式。	7.感謝委員建議，已修正於內文中	同意。
五、本所港研中心 謝明志科長		
1.圖 5-14 到 5-23 陳列本模式數值模擬的結果，也和觀測值做比對，趨勢還算接近，但誤差最大約有 2m，且圖 5-15 模擬曲線上有一明顯突峰，	1.感謝委員寶貴的意見，錯誤部份已修正。	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
這些值需探討改進。		
2.目前模式應用係針對大甲溪下游段，未來應用於其他河系時，程式設定參數及格網建立，盼提供步驟及注意事項以供使用單位參照應用。	2.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
3.P.52 公式文字模糊，其他地方也有類似情形，請修正。	3.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
六、交通部臺灣區國道高速公路局		
1.當本計劃之雷達與地面雨量站建立合理模式後，測得上游降雨量增加，將造成河川斷面流量增加時，是否可建立預警系統經專業評估後，提供橋梁管理單位進行封橋建議。	1.感謝委員寶貴的意見，本計畫的成果已經交由台科大團隊的子計畫建立預警系統，該系統持續運作中。	同意。
2.以斷面平均沖刷深度、流速、水位是否不足以提供橋梁破壞的預警機制，是否需針對河道的局部嚴重沖刷情況，進行橋梁破壞評估。	2.感謝委員寶貴的意見，本計畫主要是進行一維斷面的計算，詳細的二維計算與橋墩破壞計算是由中興顧問團隊與海洋大學團隊子計畫來進行，同時也已整合在台科大團隊的預警系統中。	同意。
七、本所港研中心 林雅雯研究員		
1.報告 P.78 南瑪都颱風經由 SVR 修正部份，需再重新建立模式，請補充說明目前及未來模式建立情形。	1.原始的模式是以 2005~2008 共 3 場颱風作為模式的建立，但是過去資料中，雷達估計降雨和地面雨量站的相關性與 2011 年的資料相關性有所差異，建議是以 2011 年的颱風事件重新率定 SVR 模式。	同意。
2.報告 P.142~147 模擬與觀測沖	2.感謝委員寶貴的意見，已修正於圖	同意。

交通部運輸研究所合作研究計畫

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：河道水位與橋墩冲刷推估模式之建立研究

合作研究單位：國立成功大學

參與審查人員及其所提之意見	研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
刷深度，圖上建議說明模擬流量與實際流量，以避免誤解為實際觀測冲刷深度。	示中。	
3.第六章”結語”，建議改為”結論與建議”。	3.感謝委員寶貴的意見，遵照辦理。	同意。
4.德基水庫入流及放流量模擬與實際比較圖，建議補充於報告中。	4.感謝委員寶貴的意見，已增加於4.4中。	同意。

## 附錄四

### 期末報告簡報資料

交通部運輸研究所 MOTC-IOT-98-H1EB005

# 河道水位與橋墩沖刷推估模式 之建立研究



成功大學  
National Cheng Kung University

期末報告

計畫主持人：游保杉  
成功大學工學院院長  
水利及海洋工程系特聘教授

財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會



## 報告大綱

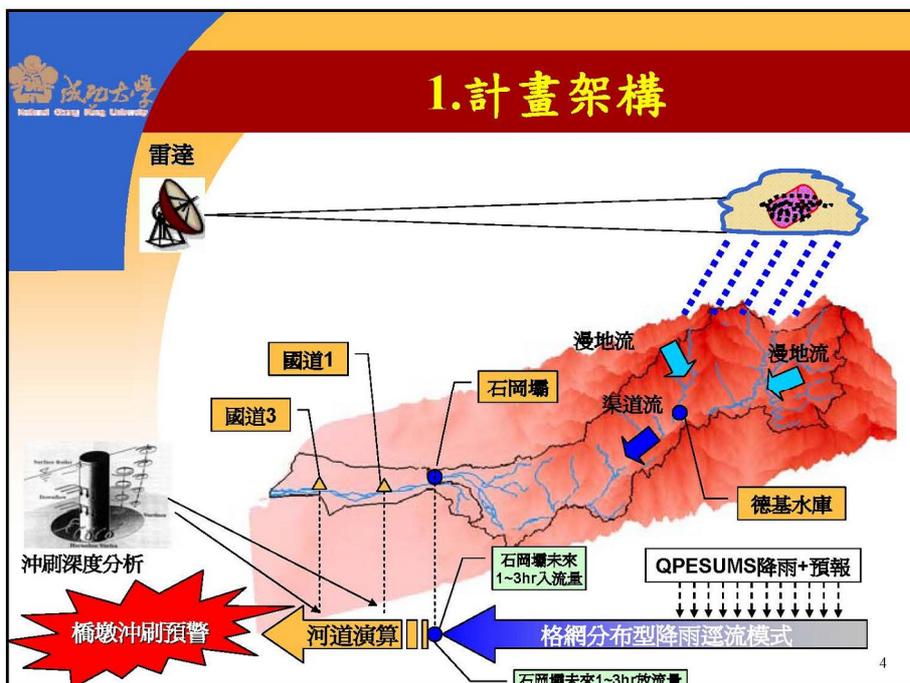
1. 計畫架構
2. 工作項目
3. 雷達降雨預報資料修正
4. 格網分布型降雨逕流模式
5. 橋梁數值模式
6. 莫拉克/南瑪都颱風模擬
7. 結語

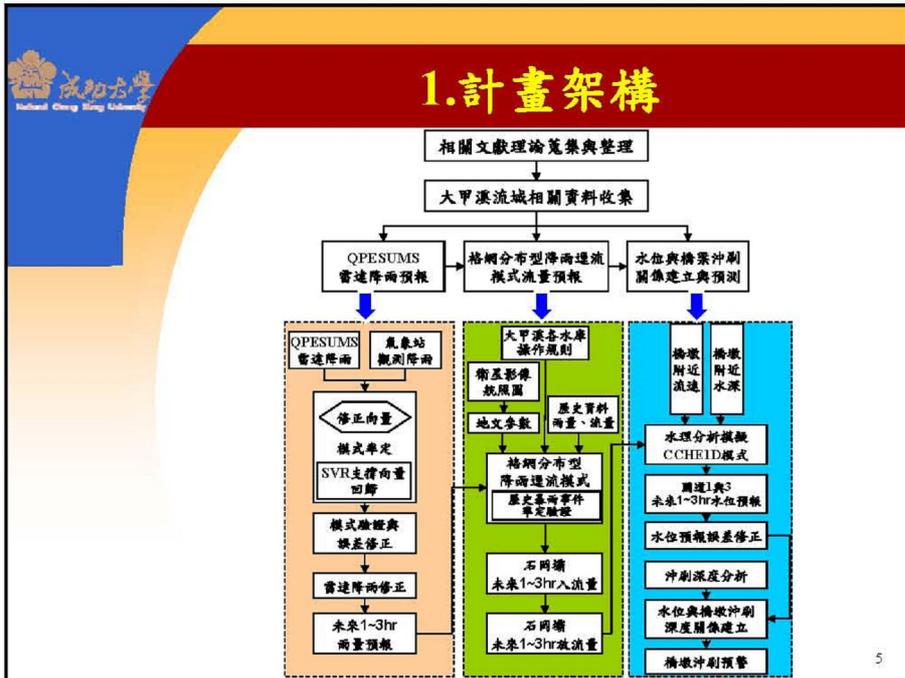


**1. 計畫架構**

- 計畫緣由
  - ◎ 2008年辛樂克颱風，后豐大橋斷裂
  - ◎ 建立橋梁沖刷預警系統，保障民眾生命財產
- 計畫目的
  - ◎ 建立國道1號與國道3號跨越大甲溪下游兩座橋梁橋墩之水位與沖刷深度推估模式
  - ◎ 主要內容
    - QPESUMS 雷達雨量修正
    - 格網分布型降雨逕流模式估算洪水量
    - 河川下游水理演算與沖刷分析

3





## 2.工作項目

### ● 全程進度

- ◎ 第一期(98/11/01~99/12/31)：
  - 資料收集與建置
  - 大甲溪流域雷達降雨預報資料校正
  - 建立大甲溪分布型降雨逕流模式
  - 橋梁數值模式
- ◎ 第二期(100/01/01~100/12/31)：
  - 水文水理估算結果的修正與驗證
  - 橋墩水位與沖刷深度關係建立
  - 橋墩沖刷深度預警方法

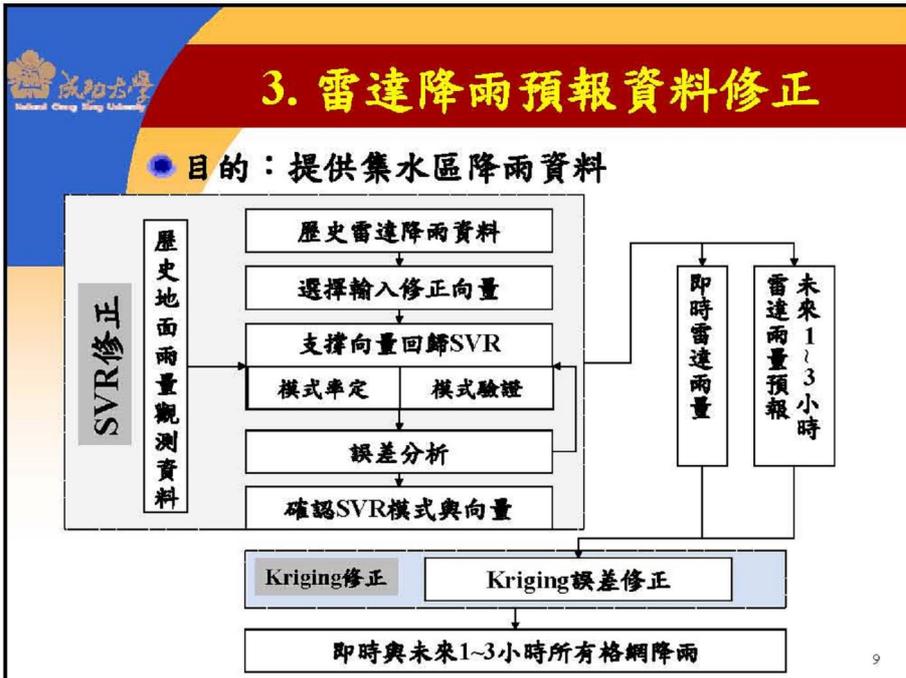
7

## 2.工作項目

### ● 本次工作項目(100/07~100/11)

- ◎ 資料收集與建置
- ◎ 雷達降雨預報資料校正
  - Kriging法修正雷達降雨
- ◎ 大甲溪分布型降雨逕流模式驗證
  - 南瑪都颱風石岡壩入流模擬
- ◎ 水文水理估算結果的修正與驗證
  - 南瑪都颱風模擬石岡壩下游水位與沖刷演算

8



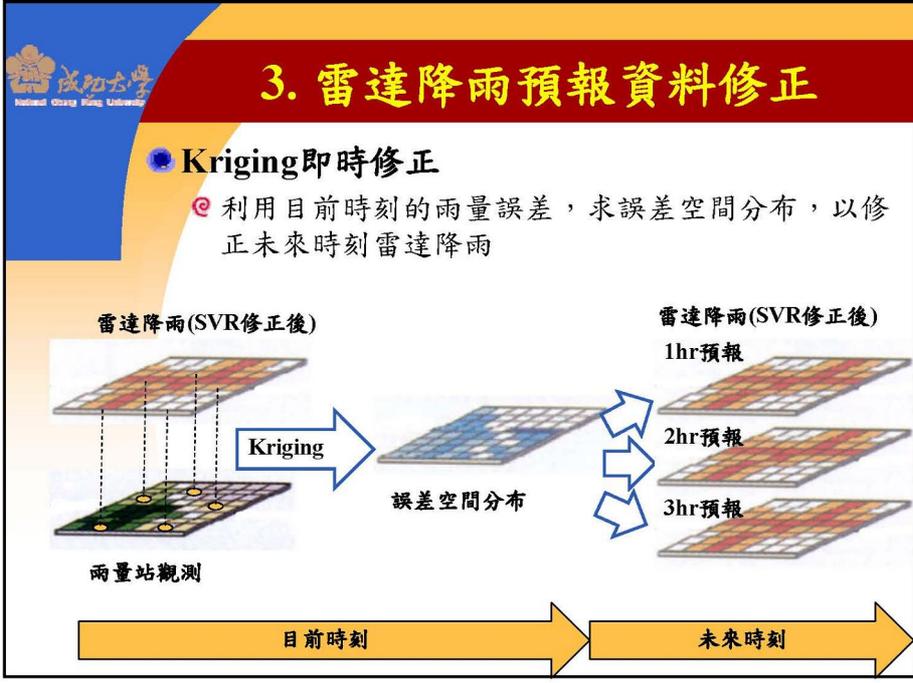
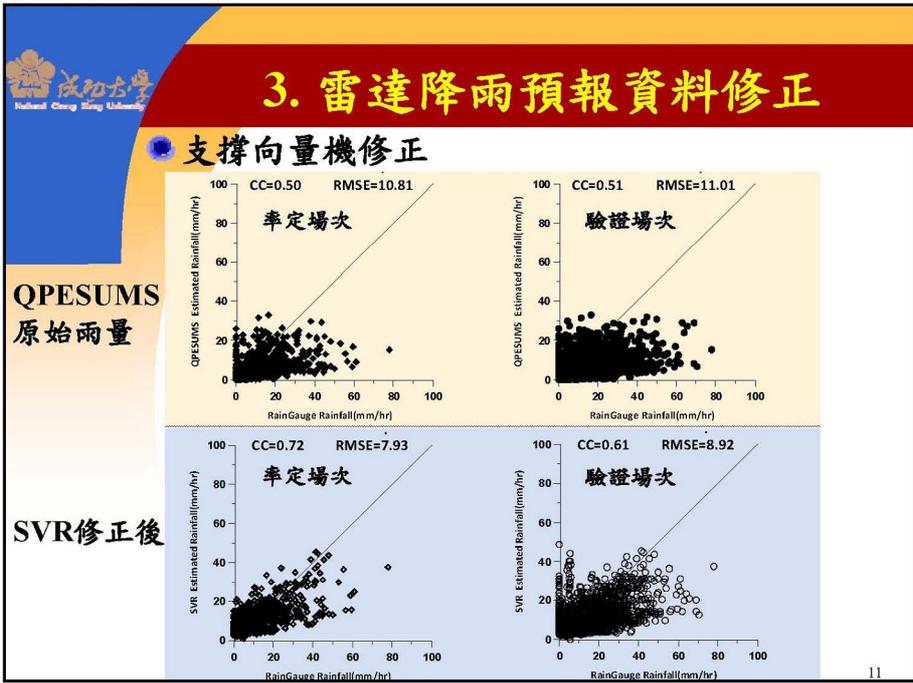
**3. 雷達降雨預報資料修正**

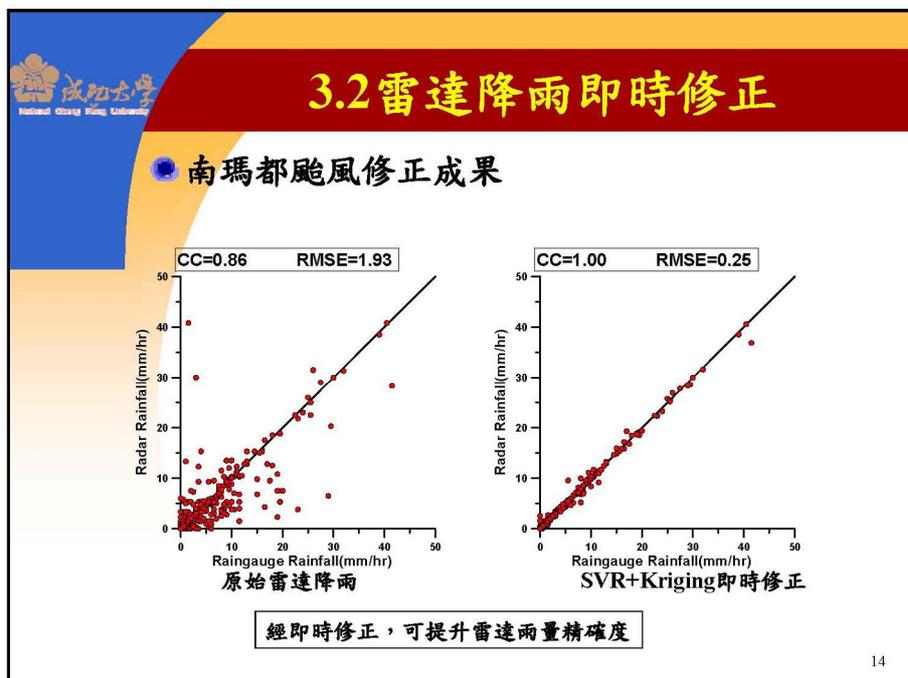
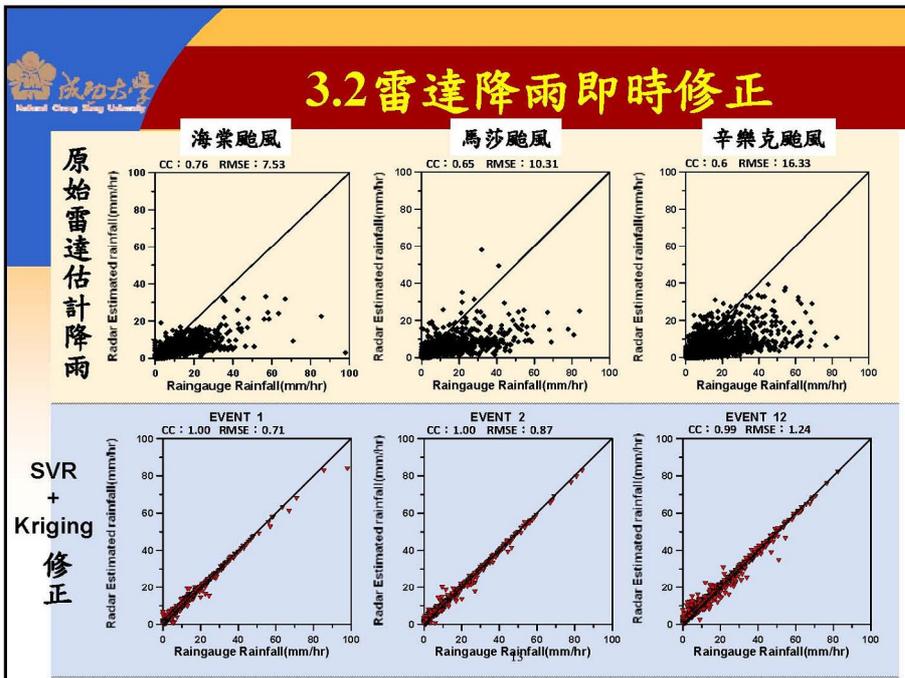
● 支撐向量機(SVR)修正

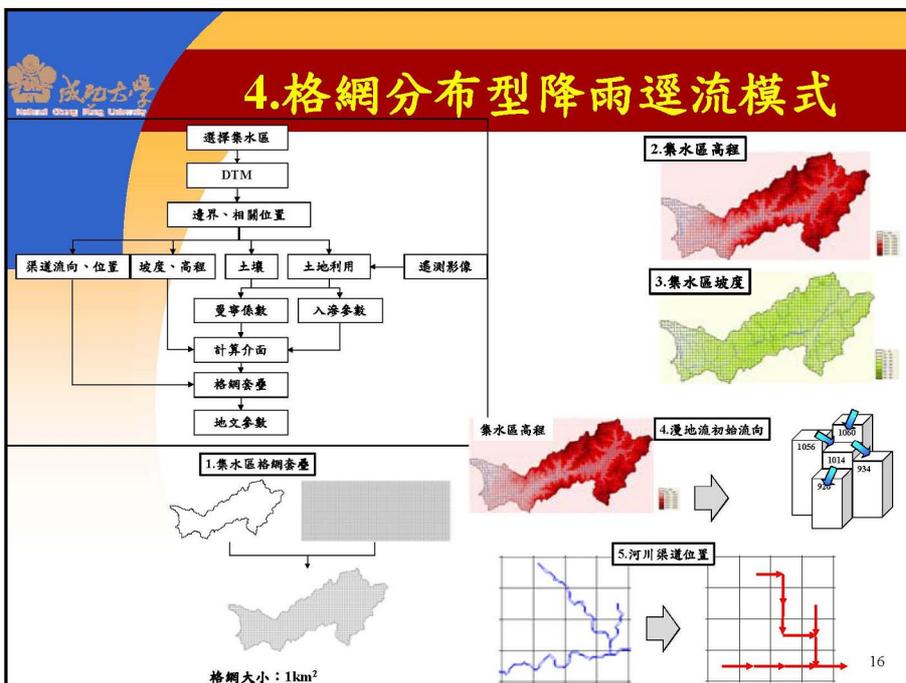
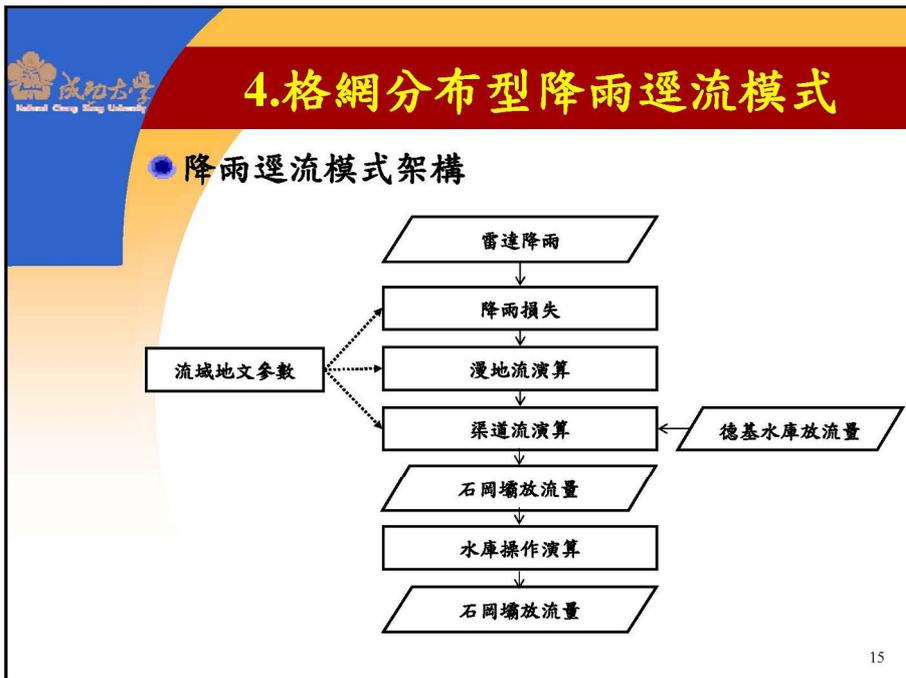
- ⊙ 雨量站(中部地區)：中央氣象局地面雨量站(14站)
- ⊙ 雷達降雨資料：
  - 收集資料記錄年份：2005~2008年。
  - 共取9場颱風，其中3場作為建立模式使用。

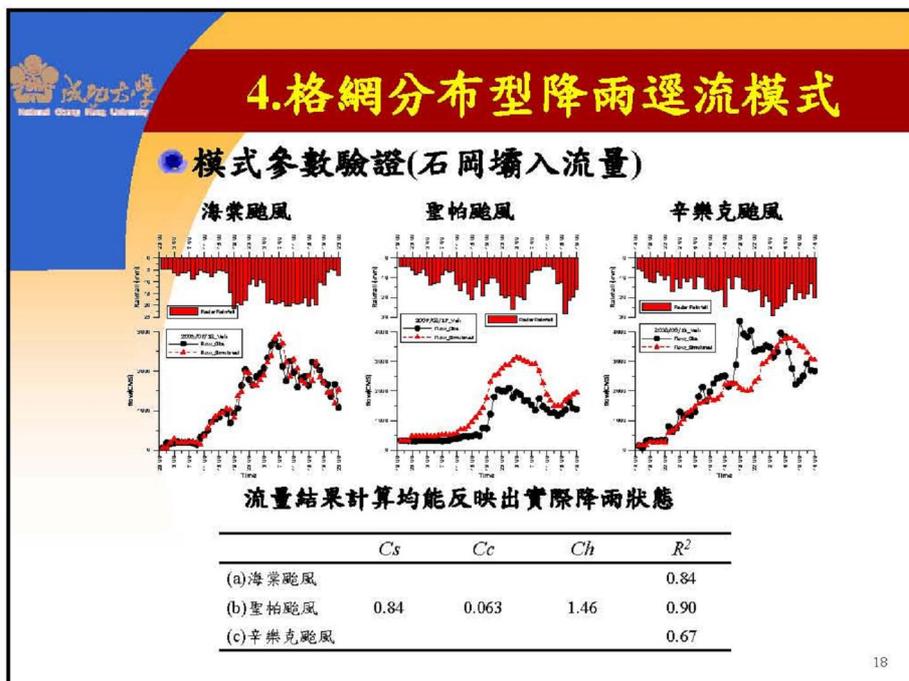
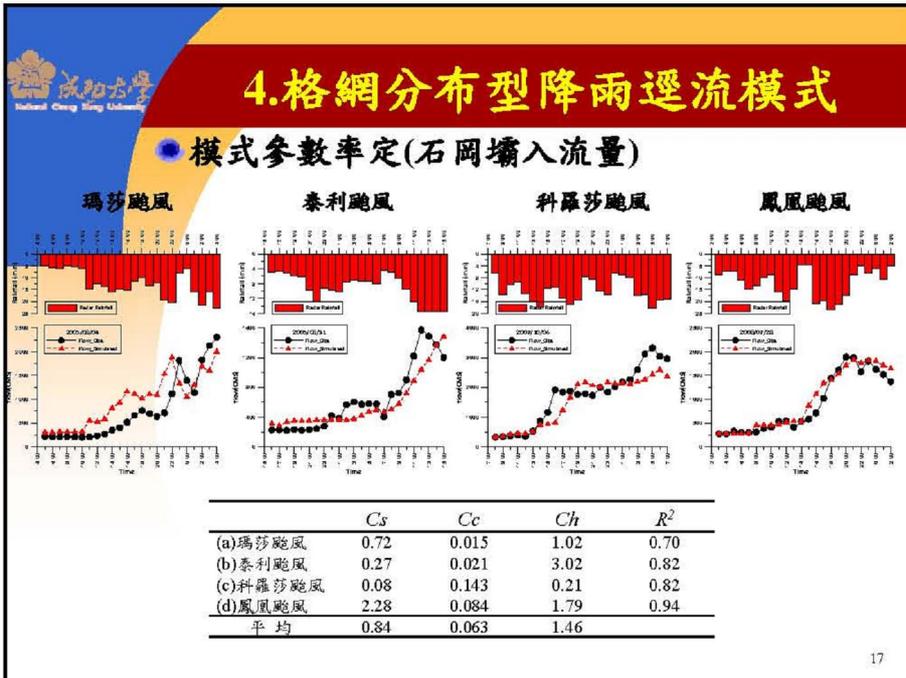
	颱風名稱	資料時間(年-月-日-小時)
<b>串定場次</b>	馬莎 (MATSA)	2005-08-04-05~2005-08-05-04
	鳳凰 (FUNG-WONG)	2008-07-28-03~2008-07-29-02
	薺靈 (JANGMI)	2008-09-28-17~2008-09-29-16
<b>驗證場次</b>	海棠 (HAITANG)	2005-07-18-24~2005-07-19-23
	泰利 (TALIM)	2005-08-31-16~2005-09-01-15
	碧利斯 (BILIS)	2006-07-13-12~2006-07-15-11
	聖帕 (SEPAT)	2007-08-18-20~2007-08-19-19
	柯羅莎 (KROSA)	2007-10-06-05~2007-10-07-04
	辛樂克 (SINLAKU)	2008-09-14-05~2008-09-15-04

10









**4. 格網分布型降雨逕流模式**

● 即時修正

$$Q_{sim\_c}(t) = Q_{sim}(t) + [Q_{obs}(t-1) - Q_{sim}(t-1)]$$

19

**4. 格網分布型降雨逕流模式**

馬莎颱風      泰利颱風      辛樂克颱風

修正前

即時修正後

20

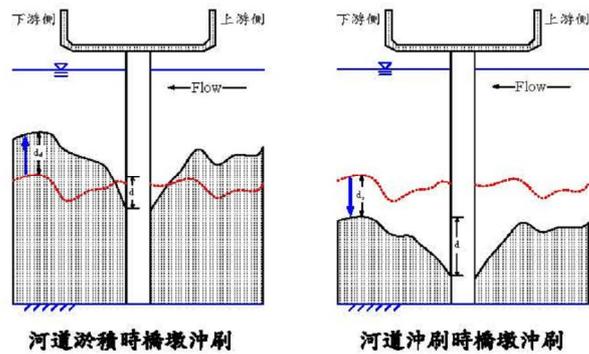
附錄 4-10

## 5. 橋梁數值模式

### 橋墩沖刷預測

同時考慮

河道底床之變動+橋墩局部沖刷



21

## 5. 橋梁數值模式

### 橋墩沖刷預測流程

求解水理模式

輸入：斷面幾何、上下游邊界條件、河道糙度

獲得水流性質

求解輸砂模式

輸入：底床性質

獲得洪水過程底床變動資訊

模式預測局部沖刷

輸入：底床性質、橋墩特性

獲得橋墩附近局部沖刷

中興顧問子計畫

22

## 5. 橋梁數值模式

### ● 水理與輸砂數值模式：CCHE1D模式

- ◎ 求解完整之迪聖凡南(de Saint-Venant) 方程式。
- ◎ 可計算超臨界流、亞臨界流及混合流況，適合橋墩附近跌水與水躍之情況。
- ◎ 具計算變量流功能，反應感潮河段之水理。
- ◎ 含水工結構物計算，估算橋址水位抬升量。
- ◎ 成功應用於國內許多水庫洩洪對河系洪流影響，成果甚佳，可信度高。
- ◎ CCHE1D模式能合理計算洪水過程橋墩附近水位與流速歷線。

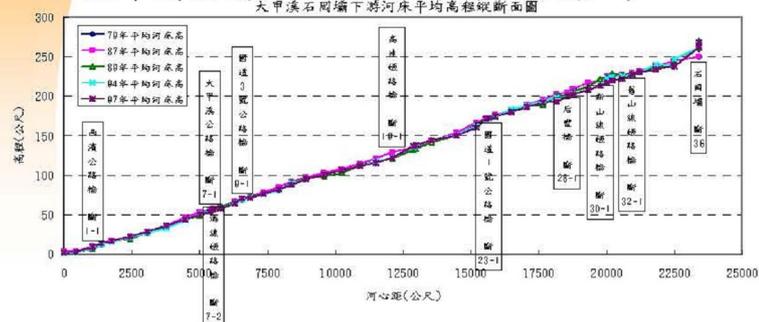
23

## 5. 橋梁數值模式

### ● 現有断面資料

- ◎ 1983、1990、1998、2000、2005、2008及2010年

### ● 歷年断面高程變化(石岡壩至出海口)



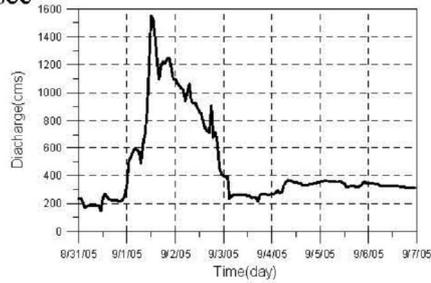
歷年断面變化顯示無明顯沖淤行為

24

## 5.橋梁數值模式

### ● 水理模式參數率定：泰利颱風

- ⊗ 選取石岡壩放流記錄
- ⊗ 包含完整之洪水上升與退水歷程
- ⊗ 延時7天洪水，採時距5分鐘，定床計算時間只需109sec



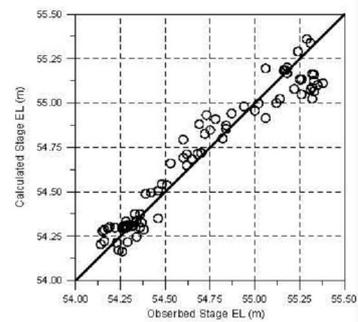
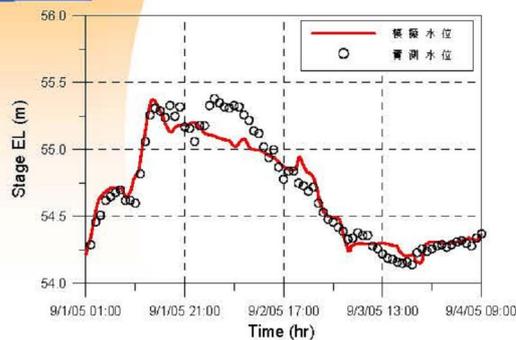
石岡壩放流流量紀錄

25

## 5.橋梁數值模式

### ● 水理模式參數率定：泰利颱風

- ⊗ 大甲溪公路橋水位模擬結果



26

## 5. 橋梁數值模式

### ● 水理模式參數率定：泰利颱風

#### ◎ 測試與檢定成果

##### ● 效率係數

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [H_{obs}(i) - H_{cal}(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [H_{obs}(i) - \overline{H_{obs}(i)}}]^2} = 0.93$$

##### ● 洪峰水位誤差

$$EH_p(\%) = \frac{H_{p,cal} - H_{p,obs}}{H_{p,obs}} \times 100\% = 0.12\%$$

##### ● 洪峰到達時刻誤差

$$ET_p = T_{p,cal} - T_{p,obs} = 0$$

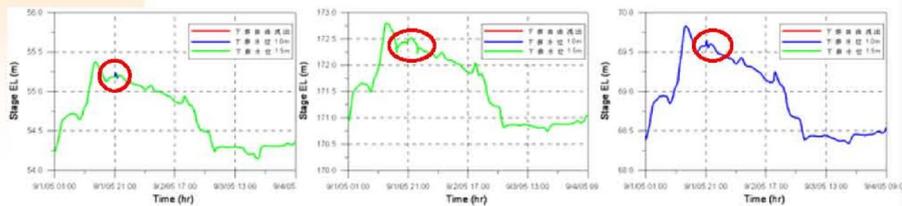
27

## 5. 橋梁數值模式

### ● 水理模式參數率定：泰利颱風

#### ◎ 敏感度分析(下游邊界潮位敏感度測試)

- 出海口潮位不易獲得，分析下游邊界(潮位)對結果影響。
- 出海口分別採用自由流出、平均潮位1.5公尺及1.0公尺進行分析。
- 不同下游條件對橋墩水位計算結果無顯著差異。



台1線大甲溪橋

國道1號大甲溪橋

國道3號大甲溪橋

28

**5. 橋梁數值模式**

- 水理模式參數率定：泰利颱風
  - ◎ 洪峰抵達時刻分析
    - 預估石岡壩放流至下游各橋梁之時間差

1小時

石岡壩

台61線大甲溪橋：105分鐘

台1線大甲溪橋：85分鐘

國道3號大甲溪橋：90分鐘

海線鐵路橋：90分鐘

高遼鐵路橋：55分鐘

國道1號大甲溪橋：40分鐘

后豐橋：30分鐘

舊山線鐵路橋：10分鐘

新山線鐵路橋：25分鐘

石岡壩

29

**5. 橋梁數值模式**

- 動床輸砂模組測試：辛樂克颱風
  - ◎ 選取石岡壩放流記錄
  - ◎ 包含完整之洪水上升與退水歷程，延時10天
  - ◎ Wu et al. (2000)之輸砂公式，配合懸浮載調適係數採用1.0、推移載調適長度採用1,000公尺、混合層厚度0.25公尺、河床質孔隙率為0.4、時距2分鐘
  - ◎ 動床計算時間需300sec

Discharge (cms)

Time (day)

石岡壩放流量紀錄

30

**5. 橋梁數值模式**

● **動床輸砂模組測試：辛樂克颱風**

◎ 辛樂克颱風大甲溪河道沖刷觀測資料

- 2008年中興大學執行水利署  
「大甲溪河段輸砂關係試驗研究(1/3)」
- 針對台1線大甲溪公路  
進行一般沖刷現地試驗

31

**5. 橋梁數值模式**

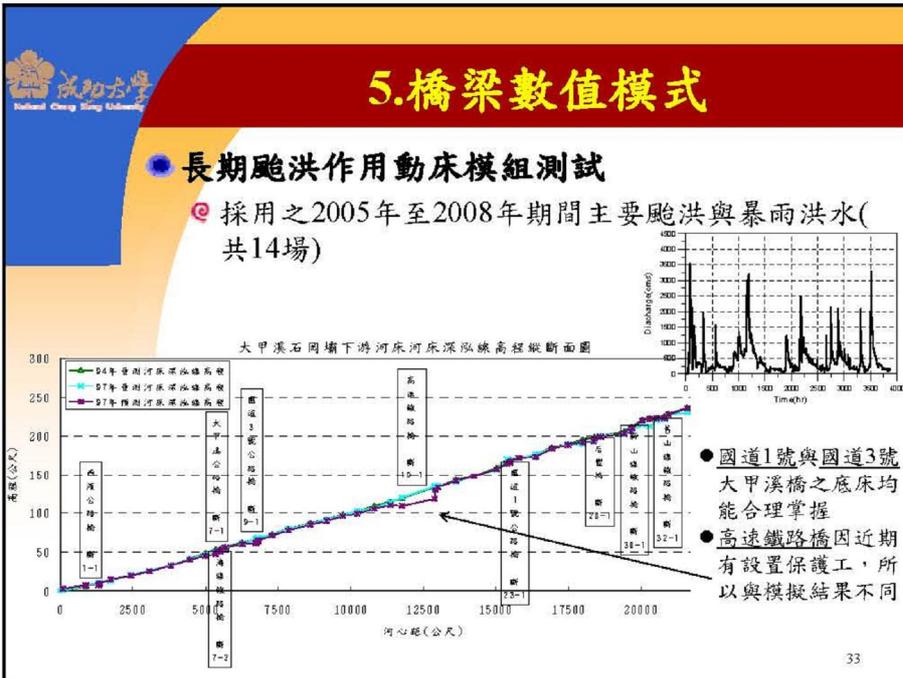
● **動床輸砂模組測試：辛樂克颱風**

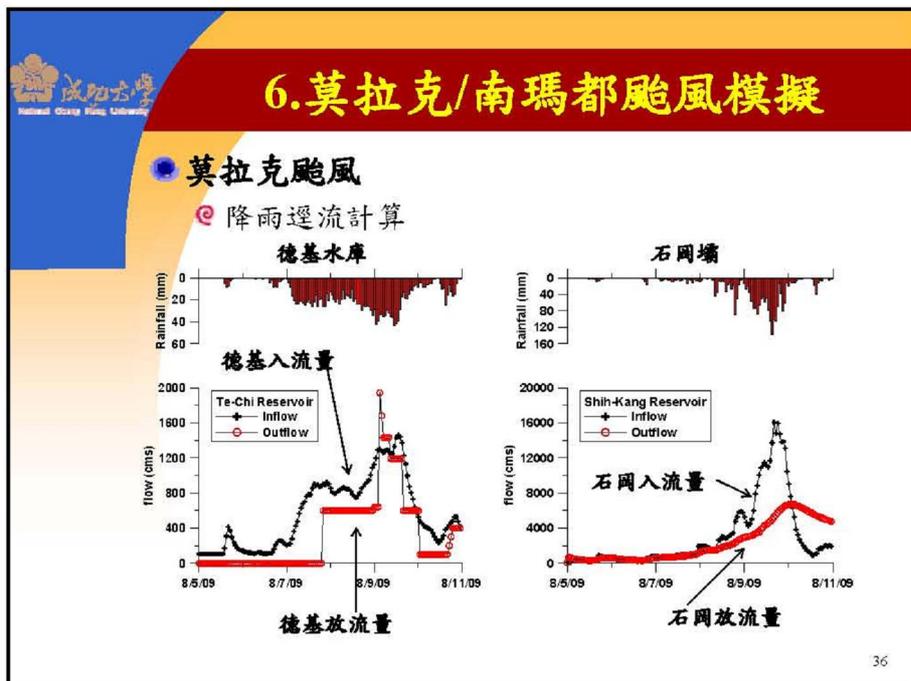
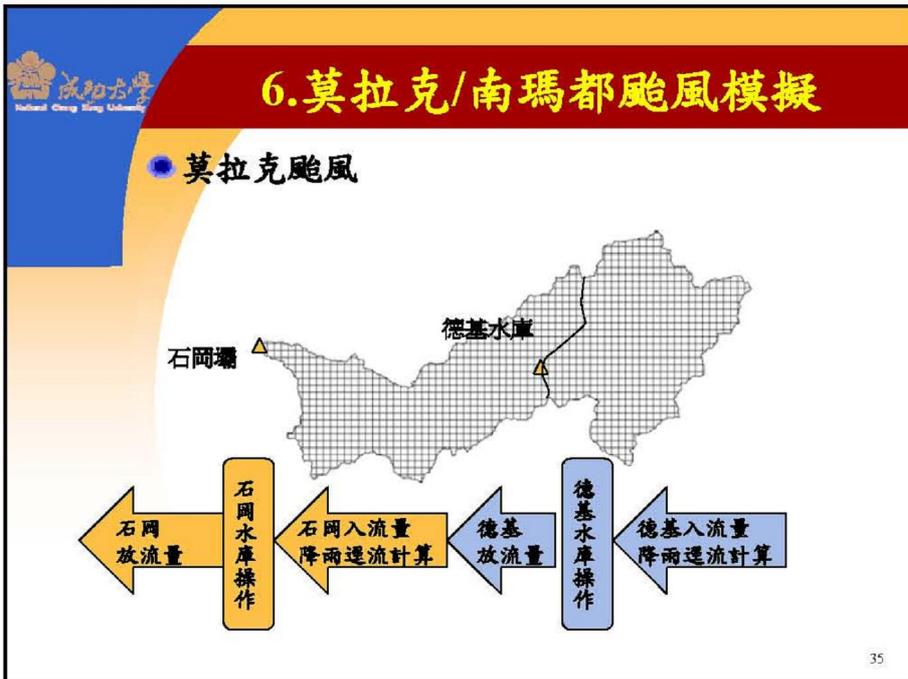
◎ 石岡壩下游各橋梁附近河道一般沖刷預測

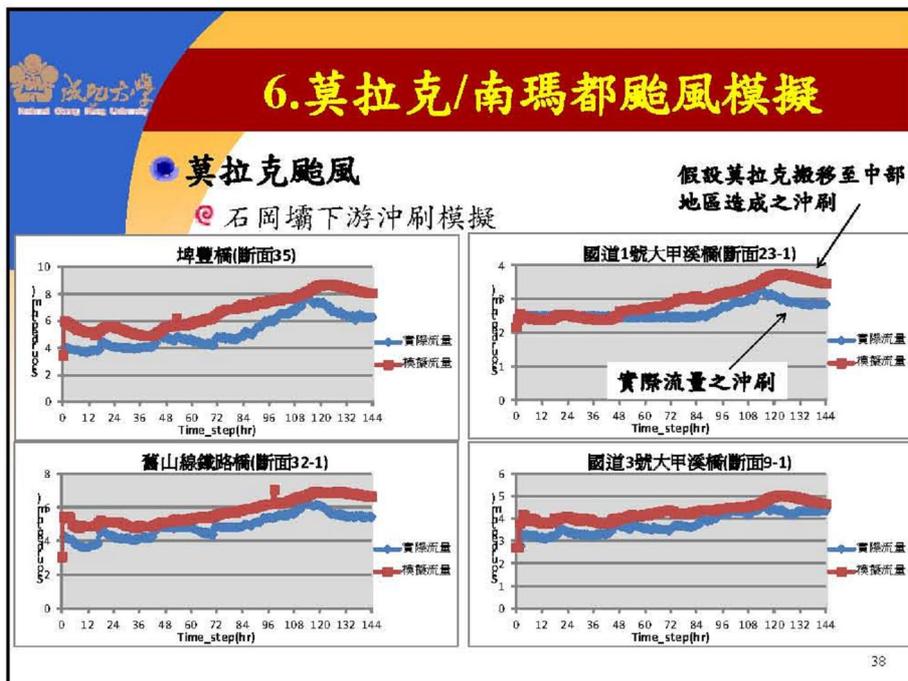
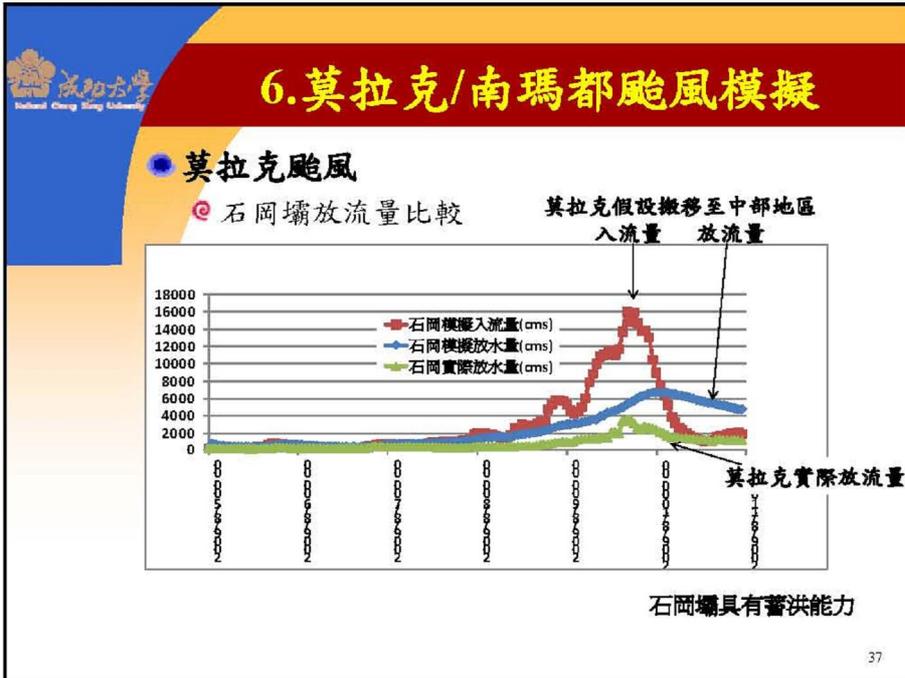
橋梁	水利署斷面橋編號	模式計算點位	辛樂克颱風		沖刷深度 (公尺)
			原始河床高程 (公尺, 97年實測值)	颱風後高程 (公尺, 預測值)	
埤豐橋	35	4	235.19	230.99	4.20
舊山線鐵路橋	32-1	8	221.46	218.82	2.64
新山線鐵路橋	30-1	13	209.21	205.96	3.25
后豐橋	28-1	17	196.04	192.47	3.57
國道1號大甲溪橋	23-1	24	168.10	167.30	0.80
高速鐵路橋	19-1	31	134.27	130.80	3.48
國道3號大甲溪橋	9-1	43	66.67	63.36	3.31
海線鐵路橋	7-2	47	52.82	51.26	1.56
台1線大甲溪橋	7-1	49	51.73	49.22	2.51
台61線大甲溪橋	1-1	57	10.08	7.86	2.22

實測上游沖刷4.5m  
實測下游沖刷2.3m

32



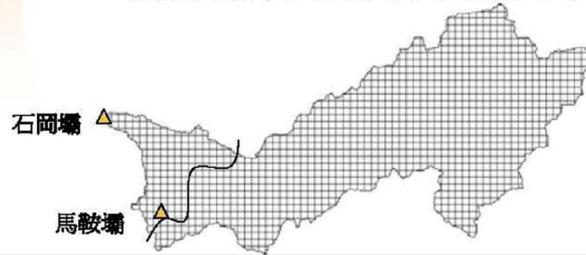




## 6. 莫拉克/南瑪都颱風模擬

### ● 南瑪都颱風

- ◎ 2011/08/27~08/31，對南部與東部帶來豪雨
- ◎ 大甲溪電廠
  - 排洪操作規則：德基排洪時，下游各水庫不蓄洪。
  - 南瑪都颱風，德基水庫並無進行排洪，僅進行發電操作。
- ◎ 石岡壩入流量模擬
  - 僅能根據最下游的馬鞍水庫放流量來計算。

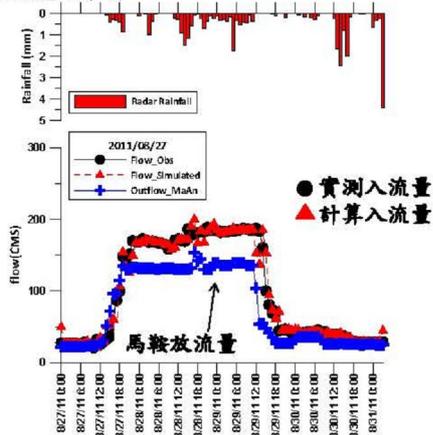


39

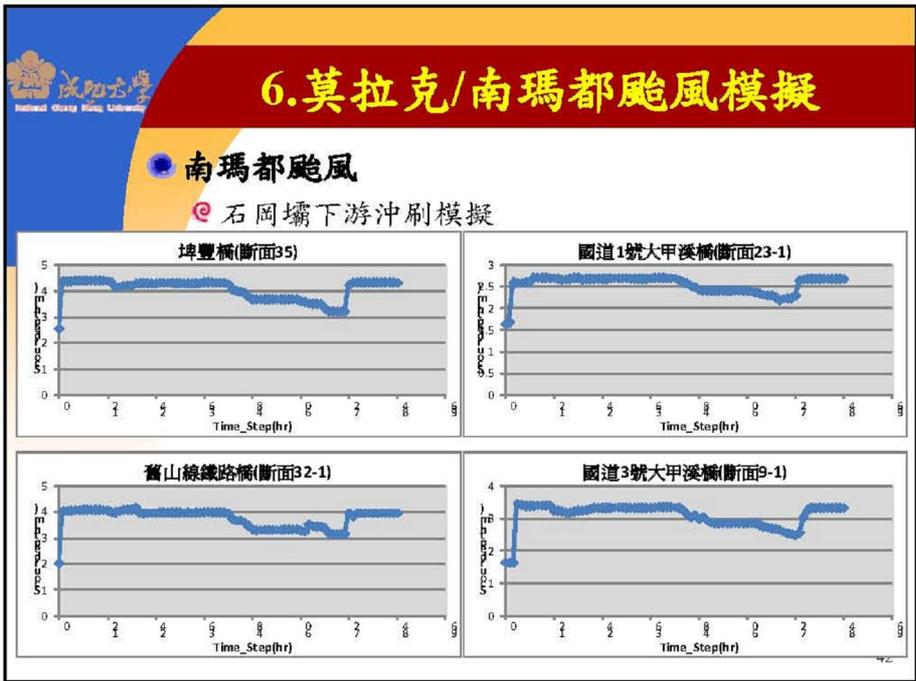
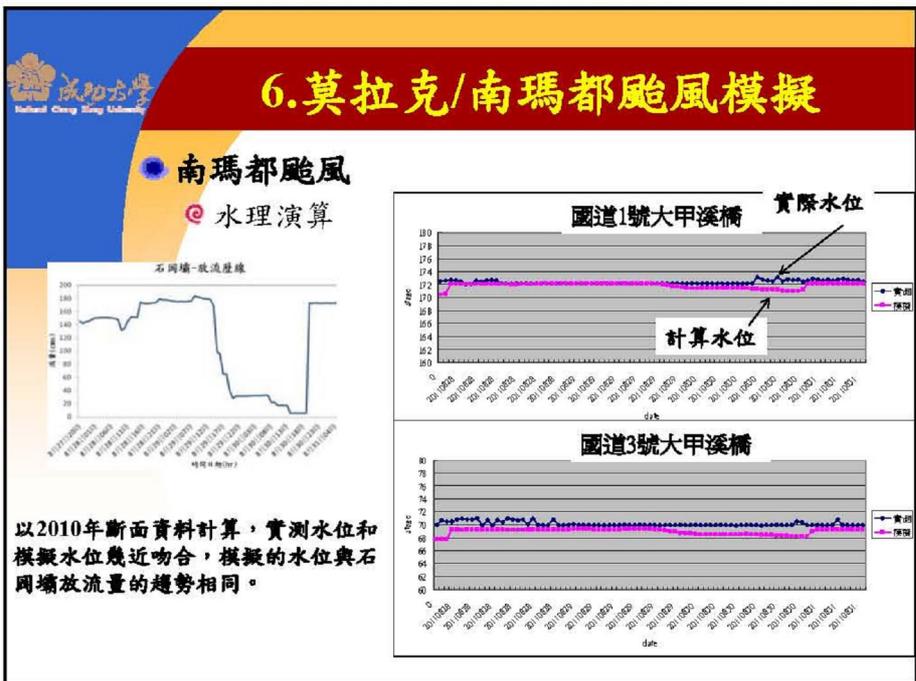
## 6. 莫拉克/南瑪都颱風模擬

### ● 南瑪都颱風

#### ◎ 石岡壩入流量計算



40



 **7.結語**

**● 結論**

- ◎ 本研究整合雷達降雨修正、格網分布型降雨逕流模式、水理模式與沖刷分析，提供大甲溪流域橋墩沖刷推估模式。
- ◎ 本模式經歷史資料驗證與近期颱風事件之分析，展現完整的分析能力。
- ◎ 本模式之成果已整合交由台科大子計畫團隊，成功建立橋樑沖刷預警系統。

43

 **7.結語**

**● 結論**

◎ 細部工作項目之成效

- 雷達降雨修正
  - 利用SVR+Kriging修正可以提升雷達降雨的精確度。
- 格網分布型降雨逕流模式
  - 整合雷達降雨、地文特性與水庫操作規則，經即時修正之後可以提供排洪期間石岡壩放流量預報。
- 橋梁數值模式
  - 利用CCHE1D模式，計算石岡壩下游各斷面水位，並根據動床模式分析沖刷深度。
  - 配合石岡壩放流量預報資料，提供下游的沖刷預報。

44

 **7.結語**

**建議**

- ◎ 模式的延續性
  - 應繼續收集與更新資料，確保模式可以持續運行。
- ◎ 模式的應用性
  - 本模式架構完整，成功應用於大甲溪流域，應延續此模式的功效，以利其他流域的橋樑沖刷預警。
- ◎ 模式資料改進
  - 降雨預報誤差仍相當大，未來氣象局若有更佳的預報成果，將可以提升本計畫之實力。
  - 石岡壩上游水量受德基水庫操作影響甚鉅，建議加入大甲電廠即時水文資料。

45

 **成功大學**  
National Cheng Kung University

**報告完畢 敬請指教**

46