



經濟部水利署

臺北辦公室

地址：臺北市信義路三段41之3號9-12樓

網址：<http://www.wra.gov.tw>

總機：(02)37073000

傳真：(02)37073166

免費服務專線：0800212239

臺中辦公室

地址：臺中市黎明路二段501號

總機：(04)22501250

傳真：(04)22501635

免費服務專線：0800001250

北區水資源局

地址：桃園縣龍潭鄉佳安村佳安路2號

網址：<http://www.wranb.gov.tw>

總機：(03)4712001

傳真：(03)4713343

免費服務專線：0800-200233

定價：新臺幣300元
EBN：10102E0017

石門水庫防洪、排淤及供水運轉系統 建置及運轉操作諮詢

Developing an Operation System of Flood Control, Sediment Removal and Water Supply for Shihmen Reservoir and Providing Operation Consulting Service



主辦機關：經濟部水利署北區水資源局

執行單位：淡江大學水資源及環境工程學系

中華民國 102 年 12 月

摘要

石門水庫原建庫主要標的為灌溉與防洪，近年來桃園地區社會經濟發展迅速，水庫年運用次數高達 4 至 5 次始能滿足各標的用水需求，供水標的演變為公共給水與灌溉並重；近年來颱風所帶來降雨有強度越高與延時越長之趨勢，造成土石大量崩塌，快速地減少有效蓄水容量，對民眾生活衝擊甚大。為達到水庫防洪安全、防淤延壽與穩定供水需要，石門水庫必須在防洪運轉同時進行防淤操作並考量穩定供水風險。

本計畫工作分為三大部分：(1)石門水庫防洪運轉資料蒐集與建置：已蒐集與分析 61 場颱風豪雨事件之防洪運轉資料，並以標準的 EXCEL 試算表儲存格式建置儲存；依據水庫實際運轉操作情形，提出「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」修訂建議。(2)建置相關模式與模組：本計畫以自組特徵映射網路(SOM)、倒傳遞類神經網路(BPNN)、調適性網路模糊推論系統(ANFIS)分別建置歷史颱風路徑分類模式、未來 5 小時石門水庫入流量預測模式、智慧型水庫防洪模糊控制模式，提供颱風流量歷程之推估、未來 5 小時石門水庫入流量之預報、以及預先調節性放水策略分析及即時水庫防洪操作。排砂防淤策略分析依據石門水庫歷年洪水事件分析各出流設施排砂比、應用異重流模式分析異重流於石門水庫庫區移動情況、建立各出流設施排砂防淤操作之條件評估與下游穩定供水風險分析。(3)開發水庫運轉操作決策支援系統：整合颱風路徑比對及流量歷程套配分析模組、調節性放水策略分析模組、水庫即時入流量分析模組、水庫排砂分析模組及下游穩定供水風險分析模組等 5 個子模組，並開發視窗化界面之應用程式於颱風豪雨期間提供協勤諮詢，掌握洪水歷程、異重

流渾水排淤與下游供水風險，提供水庫防洪、排淤及供水整體操作運轉策略，以供運轉操作人員參考，提升防洪防淤運轉成效。

Abstract

The Shihmen Reservoir was originally built for irrigation and flood control. In recent years, however, the rapid growth of socio-economic development in Taoyuan area results in significant increase in public water supply that requires a fast turnover of reservoir water in about four or five times a year for satisfying various water users. Besides, the increasing trends of high intensive and long-duration rainfalls brought by typhoons and storms have notoriously resulted in a number of debris and reduced the reservoir capacity, which has made tremendous impacts on the livelihoods of residents. In order to achieve flood prevention, conduct anti-silting control and stabilize water supply, it is necessary for the Shihmen Reservoir to operate for sediment control and consider the risk of stable water supply while operating for flood control.

This project is divided into three parts: (1)Collect the historical reservoir flood control operation during typhoons since the commencement of the reservoir. The data of sixty-one typhoons have been collected and saved as the established standard formats by using MS EXCEL. A number of suggestions for amending 「The Usage Regulations of Shihmen Reservoir」 and 「The Operational Regulations on Gate of Shihmen Reservoir」 are proposed. (2) Build the related models and modules. This project has built the Self-Organizing Map (SOM), the Back-Propagation Neural Network (BPNN) and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for the typhoon track clustering, five-hour-ahead inflow forecast models, and intelligent reservoir flood fuzzy control model, respectively. They can estimate the hydrograph of reservoir inflow, forecast five-hour-ahead inflow, and make a pre-release strategy and real-time reservoir flood operating. The sediment control strategy is proposed for calculating sediment release ratios of all water-release facilities, analyzing gravity current motion by simulation model, evaluating the sediment release operation conditions and providing the risk analysis of stable water supply in downstream areas. (3)Construct a reservoir operation decision support system. This project has constructed a graphical user interface to integrate five modules, the

typhoon track-inflow hydrograph, the reservoir pre-release strategy, the inflow forecast models, the reservoir sediment control strategy, and the risk analysis of stable water supply. This decision support system can provide reservoir operators with a comprehensive reservoir operation strategy of flood control, sediment release and water supply based on flood hydrograph, the gravity current and the risk of water supply in downstream areas in order to improve the effectiveness of reservoir operation.

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XII
一、前言.....	1
1-1 計畫緣起.....	1
1-2 計畫目的.....	2
1-3 計畫工作項目.....	2
1-4 預定進度甘梯圖(Gantt Chart).....	5
二、資料蒐集與分析.....	6
2-1 研究區域基本資料蒐集.....	6
2-2 颱風豪雨事件之資料建檔.....	9
2-3 防洪、排砂防淤設施閘門開度指令自動化.....	14
2-4 水庫防洪操作規範修訂建議.....	15
三、理論概述.....	18
3-1 類神經網路.....	18
3-1-1 自組特徵映射網路.....	18
3-1-2 倒傳遞類神經網路.....	20
3-1-3 調適性網路模糊推論系統.....	22
3-2 異重流模式.....	25
四、歷史颱風路徑及流量歷程套配.....	31
4-1 歷史颱風路徑分類.....	31
4-2 歷史颱風流量資訊套配.....	37
4-3 颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式.....	40
五、預先調節性放水策略分析.....	55
5-1 流量歷程套配.....	56
5-2 水庫最佳防洪操作.....	56
5-2-1 搜尋最佳防洪操作歷程.....	57
5-2-2 防洪操作模式建置.....	59

5-3 調節性放水策略分析模式.....	62
六、降雨-逕流模式檢定.....	67
6-1 QPESUMS 雷達降雨推估產品.....	67
6-2 降雨-逕流模式建立與檢定.....	68
6-3 2013 颱風事件之降雨-逕流預測模式驗證.....	76
6-3-1 2013 蘇力颱風.....	77
6-3-2 2013 潭美颱風.....	79
6-3-3 2013 天兔颱風.....	81
6-3-4 2013 菲特颱風.....	83
七、排砂防淤策略分析.....	85
7-1 分析水庫在歷年洪水事件各出流設施排砂比.....	85
7-2 應用異重流模式分析其運行及抵達大壩時間.....	92
7-3 水庫各出流設施排砂防淤操作條件評估.....	107
7-4 水庫排砂分析模組.....	112
八、後池濁度影響與下游穩定供水風險分析.....	115
8-1 下游各用水單位處理水庫原水條件評估.....	115
8-2 出流設施原水濁度分析及後池濁度變化情形推估.....	116
8-3 下游穩定供水分析模式.....	120
九、颱風、豪雨期間協勤作業.....	122
9-1 即時水庫操作策略.....	122
9-2 颱風事件最佳防洪、排砂防淤運轉放水策略驗證.....	123
9-2-1 蘇力颱風.....	123
9-2-2 潭美颱風.....	126
9-2-3 康芮颱風.....	128
9-2-4 0831 豪雨.....	130
9-2-5 天兔颱風.....	132
9-2-6 菲特颱風.....	135
9-2-7 綜合討論.....	138
十、視窗化水庫運轉操作決策支援系統建置.....	139
10-1 整合各模組以開發水庫運轉操作決策支援系統.....	139
10-2 流量歷程套套配析模組.....	141

10-3 調節性放水策略分析	142
10-4 降雨-逕流推估模組.....	144
10-5 排砂分析模組	146
10-6 下游穩定供水風險分析模組	147
10-7 即時水庫操作模組	149
十一、教育訓練	150
十二、結論與建議	151
12-1 結論	151
12-2 建議	152
附錄一、參考文獻	154
附錄二、期初審查意見回覆	158
附錄三、期中審查意見回覆	166
附錄四、0730 工作會議查意見回覆	176
附錄五、期末審查意見回覆	179

圖目錄

圖 2-1-1 石門水庫測站位置圖.....	7
圖 2-2-1 颱風事件氣象資訊.....	12
圖 2-2-2 石門水庫防洪運轉資訊歷程圖.....	12
圖 2-2-3 雨量站降雨組體圖與水位站水位歷程圖(部分範例).....	13
圖 2-3-1 石門水庫溢洪道閘門操作關係曲線圖.....	15
圖 2-3-2 各排洪設施閘門開度自動化查詢模組.....	15
圖 3-1-1 二維矩陣的 SOM 架構圖.....	19
圖 3-1-2 SOM 網路優勝神經元與鄰近神經元示意圖.....	20
圖 3-1-3 倒傳遞類神經網路之架構圖.....	21
圖 3-1-4 ANFIS 架構圖.....	23
圖 3-2-1 鳳凰颱風期間出水工之泥砂粒徑.....	29
圖 3-2-2 卡玫基颱風期間出水工之泥砂粒徑.....	29
圖 3-2-3 垂直二維異重流數值模式模擬之異重流運移情況.....	30
圖 3-2-4 垂直二維異重流數值模式模擬之異重流抵達壩址情況.....	30
圖 4-1-1 中央氣象局颱風路徑分類圖(中央氣象局, 2004).....	34
圖 4-1-2 臺灣鄰近區域之網格座標圖.....	34
圖 4-1-3 颱風路徑與網格座標套疊圖(2000 象神颱風).....	35
圖 4-1-4 SOM 之颱風路徑輸入向量(2000 象神颱風).....	35
圖 4-1-5 颱風路徑分類結果拓撲圖.....	36
圖 4-2-1 SOM 各神經元分類之颱風流量特徵曲線圖.....	38
圖 4-2-2 SOM 之流量特徵曲線圖.....	39
圖 4-3-1 颱風警報單預報路徑.....	40
圖 4-3-2 流量特徵示意圖.....	41
圖 4-3-3 預測之流量歷線.....	41
圖 4-3-4 颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式流程圖.....	42
圖 4-3-5 2008 辛樂克颱風警報單之預報路徑圖.....	43
圖 4-3-6 2008 辛樂克颱風實際路徑圖.....	44
圖 4-3-7 2008 辛樂克颱風模式預測結果.....	45
圖 4-3-8 2013 蘇力颱風警報單之預報路徑圖.....	46
圖 4-3-9 2013 蘇力颱風實際路徑圖.....	47
圖 4-3-10 2013 蘇力颱風模式預測結果.....	48
圖 4-3-11 2013 潭美颱風警報單之預報路徑圖.....	49
圖 4-3-12 2013 潭美颱風實際路徑圖.....	50
圖 4-3-13 2013 潭美颱風模式預測結果.....	51
圖 4-3-14 2013 菲特颱風警報單之預報路徑圖.....	52

圖 4-3-15 2013 菲特颱風實際路徑圖.....	53
圖 4-3-16 2013 菲特颱風模式預測結果.....	54
圖 5-1 調節性放水策略分析模組流程圖.....	55
圖 5-2-1 颱洪時期排洪設施閘門操作流程示意圖.....	56
圖 5-2-2 智慧型水庫防洪模糊控制模式建置流程圖	57
圖 5-2-3 智慧型水庫防洪模式之操作流程圖.....	60
圖 5-2-4 歷史颱風模擬操作放流量歷程圖(部分列出).....	62
圖 5-3-1 2004 艾利颱風入流量歷程.....	63
圖 5-3-2 2004 年艾利颱風水庫各排洪設施閘門操作模擬結果	64
圖 5-3-3 2007 柯羅莎颱風入流量歷程.....	65
圖 5-3-4 2007 年柯羅莎颱風水庫各排洪設施閘門操作模擬結果	66
圖 6-2-1 石門水庫集水區分區.....	69
圖 6-2-2 石門水庫 T+1 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖..	72
圖 6-2-3 石門水庫 T+2 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖..	73
圖 6-2-4 石門水庫 T+3 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖..	74
圖 6-2-5 石門水庫 T+4 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖..	75
圖 6-2-6 石門水庫 T+5 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖..	76
圖 6-3-1 2013 蘇力颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖	77
圖 6-3-2 石門水庫入流量預測模式於 2013 蘇力颱風侵台期間預測結果.....	78
圖 6-3-3 2013 潭美颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖	79
圖 6-3-4 石門水庫入流量預測模式於 2013 潭美颱風侵台期間預測結果.....	80
圖 6-3-5 2013 天兔颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖	81
圖 6-3-6 石門水庫入流量預測模式於 2013 天兔颱風侵台期間預測結果.....	82
圖 6-3-7 2013 菲特颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖	83
圖 6-3-8 石門水庫入流量預測模式於 2013 菲特颱風侵台期間預測結果.....	84
圖 7-1-1 2008 辛樂克颱風出流濃度歷線圖.....	87
圖 7-1-2 2008 鳳凰颱風出流濃度歷線圖.....	87
圖 7-1-3 2008 薔蜜颱風出流濃度歷線圖.....	88
圖 7-1-4 2009 莫拉克颱風出流濃度歷線圖.....	88
圖 7-1-5 2010 凡那比颱風出流濃度歷線圖.....	89
圖 7-1-6 2012 蘇拉颱風出流濃度歷線圖.....	89
圖 7-1-7 2013 蘇力颱風出流濃度歷線圖.....	90
圖 7-1-8 2013 潭美颱風出流濃度歷線圖.....	90
圖 7-1-9 入流量與排砂比關係圖(不包含 2013 年颱風事件).....	91

圖 7-1-10 入流量與排砂比關係圖(包含 2013 年蘇力及潭美).....	91
圖 7-1-11 入流量與電廠改建前後排砂比關係圖.....	92
圖 7-2-1 蘇力颱風於不同垂直深度之濃度模擬值.....	94
圖 7-2-2 潭美颱風於不同垂直深度之濃度模擬值.....	94
圖 7-2-3 蘇力颱風異重流運移及沿程濃度變化圖.....	95
圖 7-2-4 潭美颱風異重流運移及沿程濃度變化圖.....	96
圖 7-2-5 流量與異重流到達壩前時間相關性.....	96
圖 7-2-6 泥砂濃度與異重流到達壩前時間相關性.....	96
圖 7-2-7 異重流頭部運移之厚度變化.....	98
圖 7-2-8 莫拉克颱風各斷面密度福祿數變化.....	105
圖 7-2-9 鳳凰颱風各斷面密度福祿數變化.....	105
圖 7-2-10 蘇力颱風各斷面密度福祿數變化.....	106
圖 7-2-11 潭美颱風各斷面密度福祿數變化.....	106
圖 7-3-1 排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖	108
圖 7-3-2 2005 海棠颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖	109
圖 7-3-3 出水工排砂量與後池濃度關係圖.....	109
圖 7-3-4 溢洪道增加放流量 220cms 時對折減後池濃度關係圖	110
圖 7-3-5 溢洪道增加放流量 610cms 時對折減後池濃度關係圖	110
圖 7-3-6 溢洪道增加放流量 1,070cms 時對折減後池濃度關係圖 ...	111
圖 7-3-7 溢洪道增加放流量 2,000cms 時對折減後池濃度關係圖 ...	111
圖 7-3-8 溢洪道增加放流量 1,070cms 時對折減後池濃度關係圖(無 102 年蘇力及潭美).....	112
圖 7-4-1 出水工排砂量與後池排砂量關係圖.....	114
圖 7-4-2 推估之發電出流泥砂濃度與實測值之比較圖	114
圖 8-1-1 後池濁度與鳶山堰濁度關係圖.....	116
圖 8-2-1 2007 韋帕颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖	117
圖 8-2-2 2013 蘇力颱風排洪隧道稀釋效果.....	117
圖 8-2-3 2013 潭美颱風排洪隧道稀釋效果.....	118
圖 8-2-4 2009 莫拉克颱風濁度變化.....	119
圖 8-2-5 2007 聖帕颱風濁度變化.....	120
圖 8-2-6 2005 泰利颱風濁度變化.....	120
圖 8-3-1 下游穩定供水分析模式流程圖.....	121
圖 9-2-1 蘇力颱風水庫模擬操作歷程圖.....	125
圖 9-2-2 潭美颱風水庫模擬操作歷程圖.....	128
圖 9-2-3 康芮颱風水庫模擬操作歷程圖.....	130
圖 9-2-4 0831 豪雨水庫模擬操作歷程圖.....	132
圖 9-2-5 天兔颱風水庫模擬操作歷程圖.....	134
圖 9-2-6 菲特颱風水庫模擬操作歷程圖.....	137

圖 10-1-1 模式流程圖.....	139
圖 10-1-2 展示介面主畫面.....	140
圖 10-1-3 水庫閘門開度查詢模組.....	140
圖 10-2-1 颱風路徑比對及流量套配分析模組.....	141
圖 10-3-1 調節性放水策略分析模組.....	142
圖 10-3-2 調節性放水策略分析模組水位歷程圖.....	143
圖 10-3-3 調節性放水策略分析模組排洪隧道開度歷程圖	143
圖 10-3-4 調節性放水策略分析模組溢洪道開度歷程圖	143
圖 10-3-5 調節性放水策略分析模組放流資訊表格.....	143
圖 10-4-1 石門水庫入流量推估模組.....	144
圖 10-4-2 石門水庫入流量推估模組手動輸入模式參數介面	145
圖 10-4-3 石門水庫入流量推估模組整場颱風歷程圖	145
圖 10-5-1 排砂分析模組.....	146
圖 10-6-1 下游穩定供水風險分析模組.....	147
圖 10-6-2 下游穩定供水風險分析模組兩階段排砂分析結果	148
圖 10-6-3 下游穩定供水風險分析模組供水風險分析(正常供水)....	148
圖 10-6-4 下游穩定供水風險分析模組供水風險分析(分層取水及聯合排砂).....	148
圖 10-7-1 水庫即時入流量分析模組展示圖.....	149

表目錄

表 2-1-1 石門水庫 10 站雨量站資訊.....	7
表 2-1-2 本計畫建置儲存之颱風事件.....	8
表 2-2-1 石門水庫防洪運轉資訊表.....	10
表 2-2-2 石門水庫 10 站雨量站時雨量資料表.....	11
表 2-2-3 石門水庫 5 站水位站時水位資料表.....	11
表 2-3-1 溢洪道閘門開度與洩洪量對照表.....	14
表 3-2-1 參數列表及建議值.....	28
表 4-1-1 颱風路徑分類模式事件分組表.....	32
表 4-1-2 設計網格資料.....	33
表 4-3-1 2008 辛樂克颱風模式輸出結果比較表.....	43
表 4-3-2 2013 蘇力颱風模式輸出結果比較表.....	46
表 4-3-3 2013 潭美颱風模式輸出結果比較表.....	48
表 4-3-4 2013 菲特颱風模式輸出結果比較表.....	51
表 5-3-1 2004 艾利颱風預先調節性放水評估指標.....	63
表 5-3-2 柯羅莎颱風預先調節性放水評估指標.....	65
表 6-1-1 降雨-逕流模式使用之颱風事件.....	68
表 6-2-1 降雨-逕流模式不同時距子模式輸入因子對照表.....	69
表 6-2-2 石門水庫入流量預測模式評估指標 1.....	71
表 6-2-3 石門水庫入流量預測模式評估指標 2.....	71
表 6-3-1 2013 蘇力颱風石門水庫預報結果評估指標.....	77
表 6-3-2 2013 潭美颱風石門水庫預報結果評估指標.....	79
表 6-3-3 2013 天兔颱風石門水庫預報結果評估指標.....	81
表 6-3-4 2013 菲特颱風石門水庫預報結果評估指標.....	83
表 7-1-1 現況條件下歷年颱風事件排砂比.....	86
表 7-2-1 實測與模擬之運移時間及速度比較表(2013 蘇力及潭美颱風)	93
表 7-2-2 各實驗室研究異重流潛入點之密度福祿數.....	98
表 7-2-3 颱風事件入流泥砂濃度運移時間及運移速度.....	98
表 7-2-4 莫拉克颱風異重流運行及抵達大壩時間推估.....	101
表 7-2-5 鳳凰颱風異重流運行及抵達大壩時間推估.....	102
表 7-2-6 蘇力颱風異重流運行及抵達大壩時間推估.....	103
表 7-2-7 潭美颱風異重流運行及抵達大壩時間推估.....	104
表 8-2-1 颱風事件後池及鳶山堰尖峰濁度.....	119
表 9-2-1 2013 年颱風暴雨事件基本資料.....	123
表 9-2-2 蘇力颱風模擬操作與原操作比較表.....	125
表 9-2-3 潭美颱風模擬操作與原操作比較表.....	128

表 9-2-4 康芮颱風模擬操作與原操作比較表.....	130
表 9-2-5 0831 豪雨模擬操作與原操作比較表.....	132
表 9-2-6 天兔颱風模擬操作與原操作比較表.....	135
表 9-2-7 菲特颱風模擬操作與原操作比較表.....	137
表 11-1 教育訓練議程.....	149

一、前言

1-1 計畫緣起

石門水庫位於大漢溪中游石門峽谷，自民國 53 年興建完工，至今已 49 年歷史，原建庫主要標的為灌溉與防洪，前後歷經各項改善措施，如早期增設排洪隧道、水庫大壩心層加高到近期的石門電廠防淤改善工程，其目的皆希望水庫能夠永續發展，供後代子孫繼續使用。近年來桃園地區社會經濟發展迅速，水庫年運用次數高達 4 至 5 次始能滿足各標的用水需求，供水標的演變為公共給水與灌溉並重，同時具有發電及觀光功能，為一多目標水庫。石門水庫滿水位 245m，有效蓄水容量 2 億 876 萬 m^3 ，集水區面積 763.4 平方公里，集水區地勢陡峻，地質疏鬆，常因豪雨造成崩坍致泥砂下移流入水庫造成淤積，近年來受氣候變遷影響，颱風豪雨所帶來降雨有強度變高、延時便長之趨勢，如民國 93 年的艾莉颱風事件，集水區平均累計降雨量 973 毫米，造成土石大量崩塌、大量泥砂沖入水庫中，石門水庫淤積量增加 2,788 萬 m^3 ，約為水庫過去 14 年淤積量的總和，減少約 11% 的有效蓄水容量，高濁度之原水超過水廠處理能力，並造成桃園地區連續 18 天供水短缺，對民眾生活衝擊甚大。

石門水庫自建庫以來雖經歷數十次颱風事件皆能安全、有效地完成防洪操作，但在社會發展與經濟變遷，人民對生活品質要求越來越高，因此，供水的穩定性、用水品質也逐漸成為水庫防洪操作重要考量之一環。為維持水庫之功能，立法院於民國 95 年通過「石門水庫及其集水區整治特別條例」，由經濟部依該條例研擬『石門水庫及其集水區整治計畫』，以期徹底解決水庫淤積與供水問題。該整治計畫可分為 1. 緊急供水工程暨水庫更新改善、2. 穩定供水設施與幹管改善、3. 集水區保育治理等三大部分，共分兩階段執行：95~97 年度為第一階段，主要進行災害復舊、爭議較低之項目為主，以成本效益較高者為原則；98~100 年度為第二階段，主要延續第一階段之工作、執行已規劃且評估確須執行之項目及需較長時間觀測分析之工作項

目。目前已完成的有電廠及永久河道放流口緊急修復、增設水庫取水工程及水庫既有設施排砂功能改善工程一期石門電廠防淤改善工程等三項，不但能有效降低濁度影響，增加水庫於颱風時期的供水量，亦加強水庫排砂能力，改善淤積問題。在水庫操作相關計畫方面，目前有『石門水庫長期監測計畫與防淤操作模擬分析(1/2)』及『石門水庫供水操作暨水源及自來水系統最佳化調配研究』等。本計畫則配合已完成之分層取水工程及電廠防淤改善工程等更新改善工作，探討水庫防洪、排淤與供水設施聯合操作運轉等議題，建立相關分析模組，以提供相關人員於颱風時期之操作參考及法規修訂建議。

1-2 計畫目的

為達到水庫防洪安全、減淤延壽與穩定供水需要，石門水庫必須在防洪運轉同時進行防淤操作並考量穩定供水風險，石門水庫並已陸續辦理分層取水工程及電廠防淤改善工程等更新改善工作。本計畫主要目的即為配合最新公告之「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」規定，以及水庫既有設施(包含溢洪道、排洪隧道、河道放水道、石門電廠、石門大圳、2013 年完工之排砂隧道及後池桃園大圳、沖刷道)於水庫防洪、排淤與供水設施聯合操作運轉，建立相關分析模組、決策支援系統以及颱風豪雨期間協勤諮詢，於颱風豪雨期間掌握洪水歷程、異重流渾水排淤與下游供水風險，提供水庫防洪、排淤及供水整體操作運轉策略，以供運轉操作人員參考，提升防洪防淤運轉成效，並依據水庫實際運轉操作情形，提出「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」修訂建議。

1-3 計畫工作項目

本計畫鑑於最新修訂「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」規定，以及排砂隧道完工納入石門水庫防洪、排淤與供水設施聯合操作運轉，根據相關資料蒐集與分析、建立分析模組，以利整體水庫操作策略之研析。整體工作項目如下：

1.基本資料蒐集與分析

- (1) 蒐集最新與補充過去缺漏的氣象、水文、颱風基本資料等資料。
- (2) 整理更新自建庫以來的颱風豪雨事件之小時防洪運轉資料，研擬標準的 EXCEL 試算表儲存格式，以年度為單位建檔，將每場洪水事件之石門水庫運轉過程資料建立一試算表，表內建入颱風路徑、颱風豪雨期間每小時之集水區內各雨量站雨量、各水位站水位、各流量站流量、水庫水位、水庫蓄水量、各放水設施閘門啟閉開度、放水流量、進水流量、放水量之含砂濃度及雨量組體圖、水位歷線、流量歷線等，並對每場洪水事件之防洪、排淤運轉統計最大進水流量、最大放水流量、總放水量、總排砂量、逕流係數 C 值等。
- (3) 防洪、排砂防淤設施閘門開度指令電腦化，依據水庫水位及防洪、排砂防淤設施擬放水流量，自動化產生所需開啟閘門數目及閘門開度。
- (4) 對於排砂隧道完工納入水庫防洪、排淤與供水設施聯合操作運轉，以及水庫實際運轉操作情形，提出「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」修訂建議。

2. 颱風路徑比對及歷史颱風流量歷程套配

- (1) 颱風路徑比對：建立歷史颱風路徑分析比對條件，以判定現況颱風近似路徑之歷史颱風。
- (2) 歷史颱風流量歷程套配：依據判定出之歷史颱風流量歷程，提供現況颱風未來流量歷程預測。
- (3) 建立颱風路徑比對及流量歷程套配分析模組。

3. 預先調節性放水策略分析

- (1) 海上颱風警報或豪雨特報發布後，依據中央氣象局、QPESUMS 之預報雨量資訊，研擬石門水庫調節性放水策略。
- (2) 參考預測降雨量、歷史颱風降雨雨型套配結果，依據現況水庫水位蓄洪空間，分析調節性放水起始水位及放水設施策略，並依據中央氣象局持續發布修正之預測降雨量，同步修正調節性放水策略。
- (3) 依流量預測，建立調節性放水策略分析模組。

4. 降雨逕流模式檢定及模擬

應用經檢定與驗證適用石門水庫集水區之降雨逕流模式，建立水庫即時入流量分析模組，於颱風豪雨洪水期間，推估未來至少 3 小時水庫入流量，並檢定流量預測之精確度。

5.排砂防淤策略分析

- (1) 依據石門水庫歷年洪水事件，分析水庫各出流設施排砂比。
- (2) 應用異重流模式分析異重流於石門水庫庫區之運行及抵達大壩時間；應用渾水潭模式分析壩址渾水潭升降情形。
- (3) 水庫各出流設施排砂防淤操作條件評估。
- (4) 建立水庫排砂分析模組，推估水庫排砂量。

6.後池濁度影響與下游穩定供水風險分析

- (1) 下游各用水單位處理水庫原水條件評估。
- (2) 水庫各出流設施原水濁度分析及後池濁度變化情形推估。
- (3) 建立下游穩定供水風險分析模組。

7.颱風、豪雨期間協勤作業

- (1) 海上颱風警報發布後及本局防汛應變小組三級開設時，廠商應即協助本局 石門水庫管理中心至三級開設解除，執行水庫防洪、排淤及穩定供水運轉模擬及分析評估，提供全洪程即時運轉操作之策略建議。
- (2) 依據水庫即時入流量分析及排砂防淤操作條件，進行考慮防洪、排砂防淤之即時水庫操作模擬。
- (3) 洪水退水段水庫排砂防淤及關閉洩洪回蓄庫水之條件評估。
- (4) 每一洪水事件水庫運轉結束後，依實際降雨及水庫進水流量過程，分析最佳防洪、排砂防淤運轉放水策略，以評估本系統資訊可靠度及決策風險。

8.視窗化水庫運轉操作決策支援系統建置

- (1) 整合颱風路徑比對及流量歷程套配分析模組、調節性放水策略分析模組、水庫即時入流量分析模組、水庫排砂分析模組、下游穩定供水風險分析模組，完成水庫防洪、排淤及供水運轉操作決策支援系統之開發建置。
- (2) 完成系統各項模組執行、展示及分析結果輸出功能選項及視窗化使用者介面開發建置。

9.操作運轉簡報、報告撰寫

- (1) 期初、期中、期末簡報及成果報告編撰印製，期末報告內容應包括本委辦計畫之所有工作項目，報告封面格式依經濟部水利署出版品封面格式，另須配合本局指示辦理相關工作執行報告。
- (2) 計畫執行期間，每一洪水事件水庫運轉結束後，編製水庫操作運轉工作執行報告。

10.製作教育訓練範例及辦理教育訓練

- (1) 依據歷史颱風豪雨洪水水庫運轉案例，建立操作運轉教育訓練學習範例，供水庫操作運轉人員學習與提升作業能力。
- (2) 針對本計畫成果建立教材，辦理一場實際操作運轉之教育訓練。

1-4 預定進度甘梯圖(Gantt Chart)

工作項目	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	執行狀況	
基本資料蒐集與分析		■												完成
颱風路徑比對及 歷史颱風流量歷程套配		■												完成
預先調節性放水策略分析		■											完成	
降雨-逕流模式檢定及模擬		■											完成	
排砂防淤策略分析		■										完成		
後池濁度影響與下游 穩定供水風險分析		■										完成		
颱風、豪雨期間協勤作業		■										完成		
水庫運轉操作 決策支援系統建置			■									完成		
報告撰寫及教育訓練	期初報告	■				期中報告	■		教育訓練	■	期末報告	■	完成	
預定進度累計百分比		5	14	25	36	45	54	64	75	85	94	100	100	

二、資料蒐集與分析

本計畫以石門水庫防洪、排淤、供水運轉操作為主，首先介紹石門水庫的地理位置及水庫營運概況，並蒐集最新與補充過去缺漏的氣象、水文、颱風基本資料等；研擬標準 EXCEL 試算表儲存格式，將每場洪水事件之石門水庫運轉過程資料建立試算表，包含雨量、水位、流量、閘門開度、放水量含砂濃度...等資料；並針對各防洪、排砂防淤設施閘門開度指令電腦化，依據水庫水位及防洪、排砂防淤設施擬放水流量，自動化產生所需開啟閘門數目及閘門開度，並提出「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」修訂建議。

2-1 研究區域基本資料蒐集

石門水庫位於桃園縣大漢溪上游，水庫集水區呈南北向之長方形，流域全區橫跨東經 121 度 10 分至 28 分、北緯 24 度 25 分至 51 分間，集水區面積達 763.4 平方公里，滿水位標高 245m，呆水位標高 195m。現有效容量 2 億 876 萬 m^3 ，集水區內有 15 氣象站、6 個水文測站，其相關地理位置如圖 2-1-1 所示(出處：石門水庫營運四十年特刊)。在民國 52 年 9 月即將完工之際，葛樂禮颱風帶來破紀錄之洪水量高達 10,200cms，與原設計之最大可能洪水量 10,900cms 相當接近；因此，將大壩及溢洪道臨水庫面標高從 251m 提高為 252.5m，而水庫最高洪水位也提高至 251m，溢洪道最大洩洪量增為 11,400cms。爾後，自民國 53 年 6 月完工營運至今，經歷多次洪水侵襲，皆能發揮水庫調節功能。

本計畫蒐集最新以及補充過去缺漏之水文、颱風基本等資料以確保資料之完整性。在石門水庫集水區內共有 10 站常用之雨量站，詳細資訊如表 2-1-1，分別為石門、霞雲、高義、巴陵、嘎拉賀、玉峰、白石、鎮西堡、西丘斯山、池端。水文站則為霞雲、高義、稜角、玉峰、秀巒等 5 個現存水位站。在水文觀測站中，資料可能產生缺漏或無資料之情況，可能為人為因素遺失紀錄或是未能讀取當時之雨量

資料或機械故障，導致資料無法正確讀取或是回傳資料有誤；為力求完整無缺、連續不斷之水文資料，依缺漏資料的情況選擇鄰近站以正比法或算術平均法進行補遺，或以雙累積曲線法校正雨量資料，將部分缺漏或錯誤資料補充完整。目前已完整蒐集彙整自建庫以來在颱風時期進行水庫防洪操作之颱風事件共 61 場如表 2-1-2 所示。



資料來源：石門水庫營運四十年特刊

圖 2-1-1 石門水庫測站位置圖

表 2-1-1 石門水庫 10 站雨量站資訊

站名	二度分帶 X	二度分帶 Y	標高(m)	設站日期
石門	273867.9	2745779.0	255	民國 15 年 1 月
霞雲	286070.1	2743033.2	350	民國 54 年 4 月
高義	285756.1	2734043.1	620	民國 43 年 5 月
巴陵	289171.3	2731177.4	1220	民國 43 年 6 月
嘎拉賀	289655.7	2726339.5	1260	民國 45 年 7 月
玉峰	279650.7	2728315.7	780	民國 43 年 5 月
白石	275537.0	2720438.0	1620	民國 43 年 7 月
鎮西堡	280235.9	2718811.3	1630	民國 43 年 7 月
西丘斯山	286024.0	2713155.3	2000	民國 71 年 1 月
池端	297235.1	2727446.2	1150	民國 53 年 6 月

表 2-1-2 本計畫建置儲存之颱風事件

颱風名稱	英文名稱	起迄時間	颱風強度	資料天數	洪峰流量 (cms)	總入流量 (萬噸)
1971 艾妮絲	AGNES	09/16~09/20	中度	共 5 天	2,431	23,470
1971 貝絲	BESS	09/19~09/24	強烈	共 6 天	5,173	47,336
1972 貝蒂	BETTY	08/13~08/18	強烈	共 6 天	5,665	43,751
1979 歐敏	IRVING	08/11~08/17	中度	共 8 天	2,006	21,349
1981 莫瑞	MAUARY	07/19~07/21	輕度	共 3 天	2,217	38,003
1984 芙瑞達	FREDA	08/05~08/09	輕度	共 5 天	1,721	10,948
1984 傑魯德	GERALD	08/15~08/20	輕度	共 6 天	1,444	28,536
1984 郝麗	HOLLY	08/16~08/20	中度	共 5 天	2,166	27,854
1985 尼爾森	NELSON	08/19~08/25	中度	共 7 天	4,906	33,847
1986 韋恩	WAYNE	08/23~08/26	輕度	共 4 天	1,773	20,276
1986 艾貝	ABBY	09/15~09/21	強烈	共 7 天	2,129	19,803
1987 傑魯德	GERALD	09/06~09/12	強烈	共 7 天	1,444	17,345
1987 琳恩	LYNN	10/21~10/28	強烈	共 8 天	1,688	20,585
1989 莎拉	SARAH	09/07~09/14	強烈	共 8 天	2,959	41,053
1990 楊希	YANCY	08/16~08/21	中度	共 6 天	4,344	27,684
1990 亞伯	ABE	08/28~09/01	中度	共 5 天	3,358	28,503
1990 黛特	DOT	09/05~09/09	中度	共 5 天	2,593	28,231
1992 寶莉	POLLY	08/26~09/01	輕度	共 7 天	2,243	29,270
1992 歐瑪	OMAR	09/04~09/05	中度	共 2 天	870	13,316
1992 泰德	TED	09/19~09/24	輕度	共 6 天	899	16,567
1994 道格	DOUG	08/05~08/10	強烈	共 6 天	3,065	25,429
1994 弗雷特	FRED	08/18~08/23	強烈	共 6 天	2,440	23,540
1994 席斯	SETH	10/06~10/12	強烈	共 7 天	3,638	26,133
1996 賀伯	HERB	07/28~08/02	強烈	共 6 天	6,363	43,473
1997 溫妮	WINNIE	08/15~08/20	中度	共 6 天	3,411	31,147
1998 瑞伯	ZEB	10/12~10/18	強烈	共 7 天	4,643	36,108
2000 碧利斯	BILIS	08/20~08/24	強烈	共 5 天	2,230	15,266
2000 象神	XANGSANE	10/29~11/02	中度	共 5 天	1,852	13,601
2001 納莉	NARI	09/12~09/20	中度	共 9 天	4,123	54,070
2001 利奇馬	LEKIMA	09/22~09/29	中度	共 8 天	1,505	36,703
2002 雷馬遜	RAMMASUN	07/01~07/05	中度	共 5 天	2,536	18,248
2004 艾利	AERE	08/22~08/27	中度	共 6 天	8,594	75,218
2004 海馬	HAIMA	09/11~09/13	輕度	共 3 天	1,637	35,317
2004 納坦	NOCKTEN	10/25~10/26	中度	共 3 天	958	20,663
2005 海棠	HAITANG	07/15~07/21	強烈	共 7 天	3,199	28,064
2005 馬莎	MATSA	08/02~08/07	中度	共 6 天	5,322	53,147
2005 泰利	TALIM	08/29~09/02	強烈	共 5 天	3,689	21,619
2005 龍王	LONGWANG	09/29~10/04	強烈	共 6 天	1,369	10,872
2006 碧利斯	BILIS	07/11~07/16	輕度	共 6 天	662	8,077
2006 寶發	BOPHA	08/06~08/10	輕度	共 5 天	105	1,739

2006 珊珊	SHANSHAN	09/13~09/17	中度	共 5 天	979	10,622
2007 帕布	PABUK	08/05~08/09	輕度	共 5 天	235	3,373
2007 聖帕	SEPAT	08/15~08/20	強烈	共 6 天	1,844	19,008
2007 韋帕	WIPHA	09/16~09/20	中度	共 5 天	2,788	21,232
2007 柯羅莎	KROSA	10/03~10/08	強烈	共 6 天	5,300	42,573
2007 米塔	MITAG	11/25~11/28	中度	共 4 天	259	4,236
2008 卡玫基	KALMAEGI	07/15~07/20	中度	共 6 天	203	2,856
2008 鳳凰	FUNG-WONG	07/25~07/30	中度	共 6 天	2,040	14,892
2008 辛樂克	SINLAKU	09/10~09/17	強烈	共 8 天	3,447	63,423
2008 薔蜜	JANGMI	09/25~09/30	強烈	共 6 天	3,292	26,672
2009 莫拉克	MORAKOT	08/04~08/11	中度	共 8 天	1,838	28,455
2009 芭瑪	PARMA	10/03~10/06	中度	共 3 天	657	8,963
2010 凡那比	FANAPI	09/17~09/20	中度	共 3 天	1,056	12,201
2010 梅姬	MEGI	10/21~10/23	中度	共 3 天	859	20,464
2011 米雷	MEARI	06/23~06/25	輕度	共 3 天	1,059	13,520
2012 蘇拉	SAOLA	07/29~08/04	中度	共 7 天	5,385	50,940
2013 蘇力	SOULIK	07/12~07/18	強烈	共 8 天	5,458	28,215
2013 潭美	TRAMI	08/20~08/26	輕度	共 7 天	2,413	26,415
2013 康芮	KONG-REY	08/27~08/31	輕度	共 5 天	152	3,852
2013 天兔	USAGI	09/20~09/24	強烈	共 5 天	1,195	11,910
2013 菲特	FITOW	10/04~10/10	中度	共 7 天	1,393	16,694

2-2 颱風豪雨事件之資料建檔

本節說明本計畫所整理與建置之 61 場颱風豪雨事件資料，並將資料建於所訂定之標準 EXCEL 試算表儲存格式中，一場颱風事件資料紀錄於一個 EXCEL 檔案中，並分為多個頁面儲存資料，主要可分為可分為 4 部分：

第 1 部分 水庫運轉資訊(表 2-2-1)：包含水位、蓄水量、河道放水口流量、石門電廠流量、石門大圳流量、分層取水工流量、排洪隧道流量、溢洪道流量、總出水量、總進水量、出水含砂濃度、進水含砂濃度、出水增加率、進水增加率、閘門開度等資訊。綠色儲存格為為欄位名稱，藍色儲存格為時間歷程，黃色儲存格為各資料之統計值包括：最大值、總量、逕流係數 C 值、水位差、最大水位、容量差、最大容積、總排砂量等。以便於清楚的掌握各颱風事件之進流及放流情況，並能

快速的了解整場事件之水庫水位變化情形。

第 2 部分 雨量資訊(表 2-2-2)：包含石門水庫集水區 10 站雨量站資料。綠色儲存格雨量站名稱，藍色儲存格為時間歷程，黃色儲存格為每站雨量站一場颱風事件之總雨量，橘色儲存格分別為每小時 10 站加權平均雨量、10 站算術平均雨量，在資料表白色儲存格為每站每小時之降雨量。此資料表格設計可清楚顯示石門水庫集水區內每場颱風事件各時刻之降雨情形，及所選定不同之加權平均降雨量。

第 3 部分 水位資訊(表 2-2-3)：包含石門水庫 5 站水位站資料。綠色儲存格為水位站名稱，藍色儲存格為時間歷程，黃色儲存格為每站水位站在一場颱風事件之最大水位及其發生時間，在資料表白色儲存格為各水位站在每小時之水位。

第 4 部分 水庫相關運轉圖(圖 2-2-1 至圖 2-2-3)：包含中央氣象局颱風警報發布概況表及颱風路徑如圖 2-2-1 所示；水庫運轉資訊歷程圖(降雨組體圖、雨量累積曲線、水位歷線圖、流量歷線圖、運轉歷程圖)如圖 2-2-2 與圖 2-2-3 所示。

表 2-2-1 石門水庫防洪運轉資訊表

時間	水位	蓄水量	河道放水口	排砂隧道	石門電廠	石門大壩	分層取水工供水	排洪隧道	溢洪道	出水量	進水量	出水含砂濃度	進水含砂濃度
hr	m	萬立方公尺	cms	cms	cms	cms	cms	cms	cms	cms	cms		
2013/7/18 12:00	239.40	16879.88	0.00	0.00	50.00	6.57	0.00	0.00	0.00	56.57	98.81		
2013/7/18 13:00	239.42	16895.09	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	125.32		
2013/7/18 14:00	239.45	16917.90	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	83.08		
2013/7/18 15:00	239.46	16925.50	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	125.32		
2013/7/18 16:00	239.49	16948.31	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	83.08		
2013/7/18 17:00	239.50	16955.91	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	104.20		
2013/7/18 18:00	239.52	16971.12	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	104.44		
2013/7/18 19:00	239.54	16986.41	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	104.20		
2013/7/18 20:00	239.56	17001.62	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	125.56		
2013/7/18 21:00	239.59	17024.52	0.00	0.00	50.00	13.07	0.00	0.00	0.00	63.07	105.55		
2013/7/18 22:00	239.61	17039.81	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	125.56		
2013/7/18 23:00	239.64	17062.70	0.00	0.00	48.89	13.07	0.00	0.00	0.00	61.96	104.44		
		單位	河道放水口	排砂隧道	石門電廠	石門大壩	分層取水工供水	排洪隧道	溢洪道	出水量	進水量		
合計		CMSD	82.84	0.00	593.21	66.57	76.59	976.78	1466.73	3262.72	3289.16		
		萬立方公尺	715.72	0.00	5125.35	575.19	661.74	8439.34	12672.52	28189.86	28418.30		
		CMS	34.00	0.00	350.00	13.50	15.50	596.78	4538.94	4949.47	5457.88		
最大值		萬立方公尺	12.24	0.00	126.00	4.86	5.58	214.84	1634.02	1781.81	1964.84		
		發生時間	7/16 22:00	7/11 00:00	7/13 09:00	7/13 09:00	7/15 16:00	7/17 05:00	7/13 09:00	7/13 09:00	7/13 07:00		
運流係數		0.83											
水位差		0.28	公尺										
最大水位		244.00	公尺										
容量差		213.15	萬立方公尺										
最大容積		20618.15	萬立方公尺										
總排砂量			萬噸										

表 2-2-2 石門水庫 10 站雨量站時雨量資料表

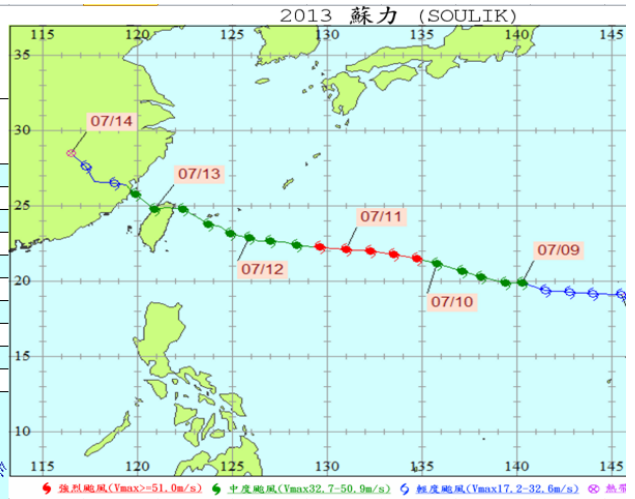
權重	0.0432	0.1703	0.0929	0.0731	0.1002	0.0934	0.1152	0.1274	0.1446	0.0397		
時間	石門	霞雲	高義	巴陵	嘎拉賀	玉峰	白石	鎮西堡	西丘斯山	池端	十站加權平均	十站算術平均
hr	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2008/9/28 1:00	4	9	3	1	2	1	0	4	5	2	3.66	3.1
2008/9/28 2:00	12	11	13	3	5	2	2	4	10	4	6.85	6.6
2008/9/28 3:00	17	12	18	9	6	5	4	4	10	3	8.71	8.8
2008/9/28 4:00	14	16	10	8	7	6	5	8	19	2	10.53	9.5
2008/9/28 5:00	6	16	16	21	15	10	10	11	17	4	13.61	12.6
2008/9/28 6:00	16	16	27	33	24	21	20	20	38	1	23.09	21.6
2008/9/28 7:00	23	27	33	28	14	16	8	9	19	1	18.46	17.8
2008/9/28 8:00	31	2	3	6	10	5	10	9	18	1	8.81	9.5
2008/9/28 9:00	16	20	24	18	24	10	10	19	27	2	18.54	17
2008/9/28 10:00	30	34	24	21	21	10	21	24	43	4	25.74	23.2
2008/9/28 11:00	4	6	13	17	15	6	8	11	18	2	10.71	10
2008/9/28 12:00	9	12	15	24	20	6	13	15	21	3	14.71	13.8
2008/9/28 13:00	17	21	20	26	18	14	19	12	32	1	19.57	18
2008/9/28 14:00	11	14	17	33	30	14	16	17	39	1	20.85	19.2
2008/9/28 15:00	22	26	39	38	27	21	18	24	37	1	26.97	25.3
2008/9/28 16:00	37	42	44	37	25	25	25	26	28	1	30.66	29
2008/9/28 17:00	7	19	17	17	13	9	10	8	22	2	13.94	12.4
2008/9/28 18:00	2	8	21	21	11	8	6	5	14	3	10.26	9.9
2008/9/28 19:00	0	0	3	14	5	3	5	4	18	6	6.01	5.8
2008/9/28 20:00	1	1	4	4	6	3	8	12	20	4	7.26	6.3
累計	279	312	364	379	298	195	218	246	455	48	298.94	279.4

表 2-2-3 石門水庫 5 站水位站時水位資料表

時間	霞雲	高義	稜角	玉峰	秀巒
hr	m	m	m	m	m
2008/9/25 0:00	247.51	442.91	529.95	684.12	831.17
2008/9/25 1:00	247.5	442.91	529.95	684.12	831.17
2008/9/25 2:00	247.5	442.91	529.95	684.12	831.16
2008/9/25 3:00	247.5	442.91	529.95	684.12	831.16
2008/9/25 4:00	247.5	442.91	529.95	684.12	831.16
2008/9/25 5:00	247.49	442.91	529.95	684.11	831.16
2008/9/25 6:00	247.49	442.91	529.95	684.11	831.16
2008/9/25 7:00	247.49	442.91	529.94	684.11	831.16
2008/9/25 8:00	247.49	442.91	529.94	684.11	831.15
2008/9/25 9:00	247.48	442.91	529.94	684.11	831.15
2008/9/25 10:00	247.48	442.91	529.94	684.1	831.15
2008/9/25 11:00	247.48	442.91	529.94	684.1	831.15
2008/9/25 12:00	247.47	442.91	529.94	684.1	831.15
2008/9/25 13:00	247.48	442.91	529.94	684.1	831.15
2008/9/25 14:00	247.47	442.91	529.94	684.1	831.14
2008/9/25 15:00	247.47	442.91	529.94	684.1	831.14
2008/9/25 16:00	247.47	442.91	529.94	684.1	831.14
2008/9/25 17:00	247.46	442.91	529.94	684.09	831.14
2008/9/25 18:00	247.46	442.91	529.93	684.09	831.14
最大值	247.51	442.91	529.95	684.12	831.17
最大值時間	2008/9/25 0:00	2008/9/25 0:00	2008/9/25 0:00	2008/9/25 0:00	2008/9/25 0:00

中央氣象局颱風警報發布概況表

名稱	蘇力(SOULIK)
編號	1307
生成地點	關島北方海面
侵(近)台日期	2013年7月13日
發布時間	海上:2013年7月11日8時30分 陸上:2013年7月11日20時30分
解除時間	海上:2013年7月13日23時30分 陸上:2013年7月13日23時30分
發布報數	22
最大強度	強烈
近中心最大風速	51.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	2
登陸地段	新北市與宜蘭縣交界處
動態	7月8日關島北方海面生成，9日增強為中度颱風並穩定地往西北西移動，10日8時增強為強烈颱風後仍持續往西北西移動，11日20時強度減弱為中度颱風，12日8時移動方向轉為略向西北進行並朝臺灣東部海面接近，13日3時於新北市及宜蘭縣交界處登陸並持續往西北移動，8時於新竹附近出海後16時進入大陸，17時減弱為輕度颱風。
災情	颱風帶來全臺出現強風、豪雨，新竹縣、苗栗縣、台中市、高雄市及南投縣等地區降下超大豪雨；宜蘭縣及基隆市出現達13至15級的瞬間陣風，台北市、新竹縣、台中市及台東縣出現的瞬間陣風亦達11至12級，臺東地區亦有焚風發生。颱風造成各地淹水、積水、溪水暴漲、道路坍方、鐵路及航空交通中斷、電力及電信系統受損等災情，共計有2人死



中央氣象局資料 http://cdc28.cwb.gov.tw/data.php?num=2013070708&year=2013&c_name=%C4%A4&e_name=SOULIK

圖 2-2-1 颱洪事件氣象資訊

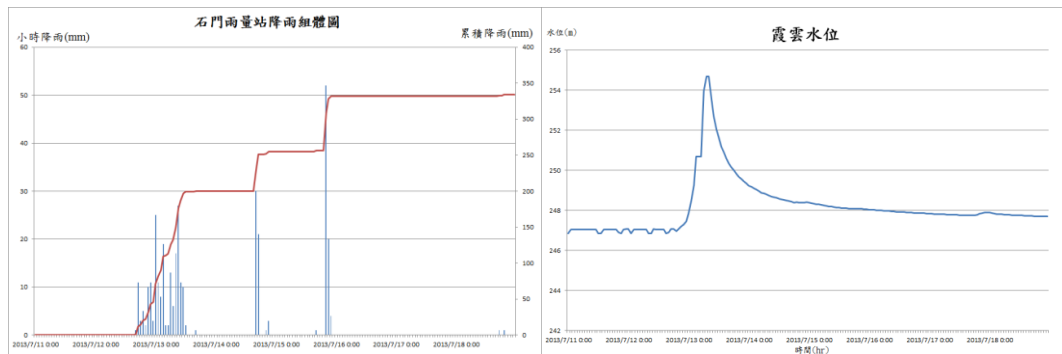


圖 2-2-2 石門水庫防洪運轉資訊歷程圖

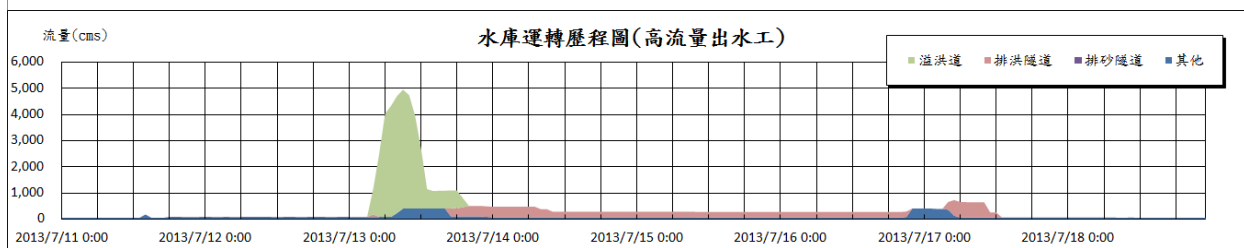
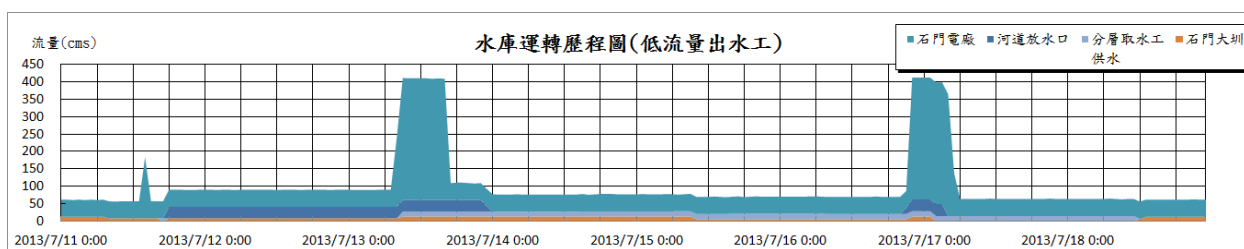
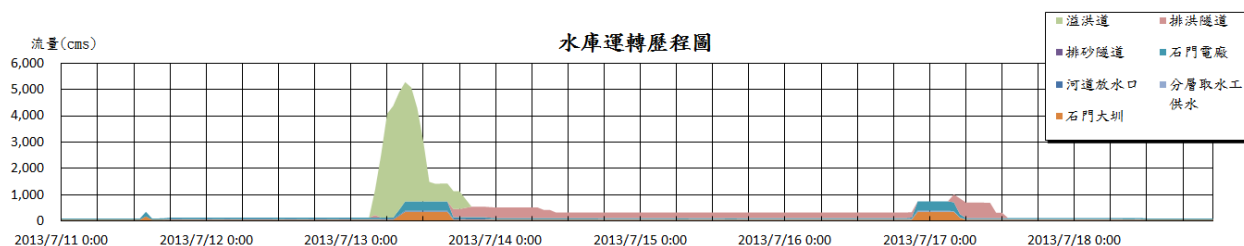
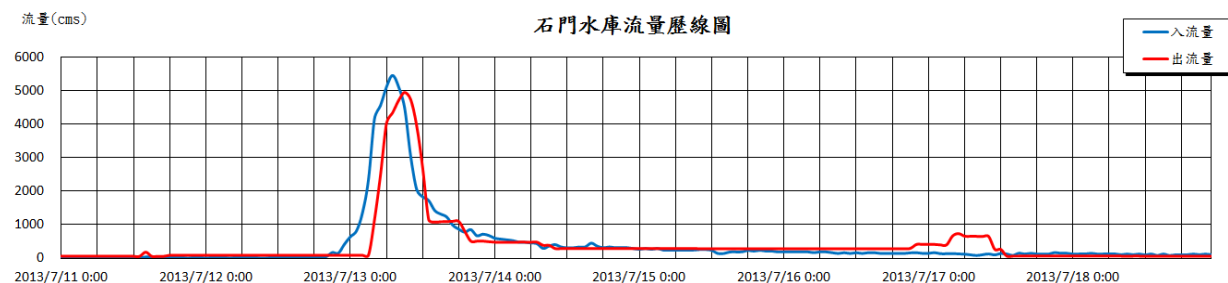
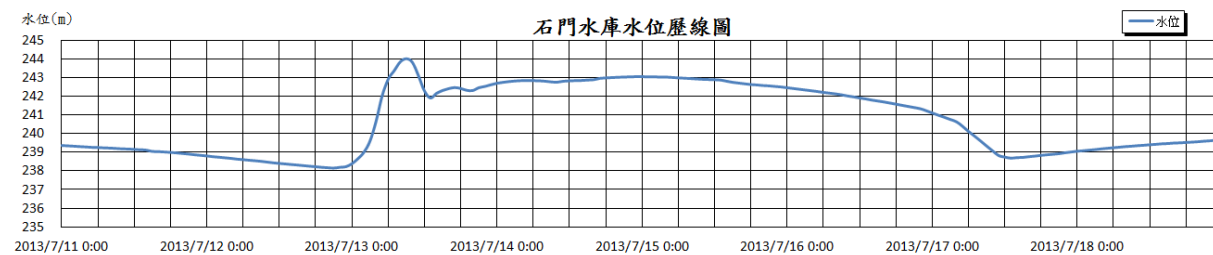
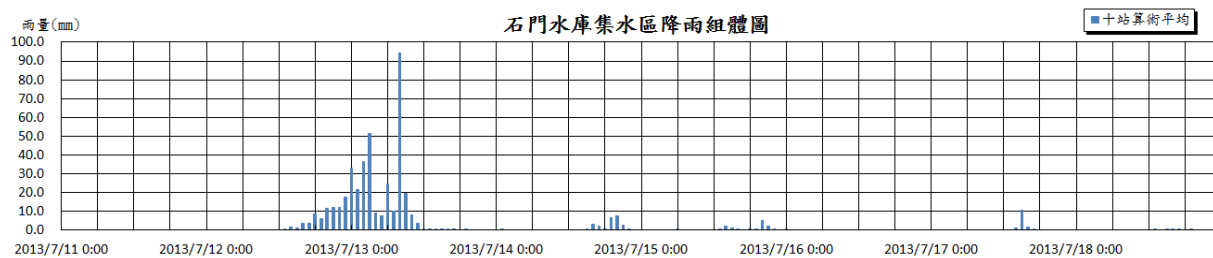


圖 2-2-3 雨量站降雨組體圖與水位站水位歷程圖(部分範例)

2-3 防洪、排砂防淤設施閘門開度指令自動化

洪水來臨時，石門水庫管理中心人員經由中央氣象局預報之氣象資訊，並即時掌握上游集水區之最新雨量及水位資料，模擬研判水庫水位未來趨勢，並在排洪、排砂防淤及閘門操作限制條件下，參考閘門率定曲線研判出最恰當之操作開度，經審核確認後轉交台電公司石門發電廠閘門組執行，並隨時監控閘門開度以確定放流無誤。本計畫參考石門水庫管理中心提供之水庫各出水工閘門開度與洩洪量對照表(如表 2-3-1)，以多項式迴歸公式建立各閘門的率定曲線關係式，並撰寫視窗畫面之電腦應用程式，使其達到閘門開度指令自動化。目前已蒐集到溢洪道、排洪隧道(單條及同時操作)、排砂隧道(單條及同時操作)、河道放水道(PRO)、石門大圳、桃園大圳淨水井、後池堰沖刷道與後池右岸溪洲圳等閘門放流量對照表，經由迴歸分析後率定曲線如圖 2-3-1 所示，並提供「各排洪設施閘門開度自動化查詢模組」如圖 2-3-2 所示，該模組可將水庫庫區及後池堰水位統一輸入，再針對各排洪設施欲放流量進行輸入，經由計算後可找出最接近放流量之閘門開度，以利水庫操作人員之操作。

表 2-3-1 溢洪道閘門開度與洩洪量對照表

(單位：cms)

開度(m) 水位(m)	0.6	1.2	2.1	3.0	3.9	5.1	6.0	7.8	10.2	12.3
237.5	174	334	527							
238	196	380	621	787						
239	233	461	779	1049	1242					
240	267	533	916	1264	1559	1817				
241	298	598	1040	1455	1829	2230	2423			
242	327	659	1154	1630	2071	2580	2882			
243	354	717	1262	1792	2294	2895	3279	3817		
244	380	771	1363	1944	2503	3186	3640	4361		
245	404	823	1459	2089	2700	3459	3974	4844	5533	
246	428	872	1551	2227	2887	3716	4289	5289	6243	
247	451	920	1640	2360	3066	3962	4587	5705	6865	7409
248	473	966	1725	2487	3238	4197	4873	6099	7436	8238
249	495	1011	1808	2611	3405	4424	5146	6475	7971	8962
250	515	1055	1888	2730	3565	4643	5410	6835	8479	9630

(資料來源：石門水庫管理中心)

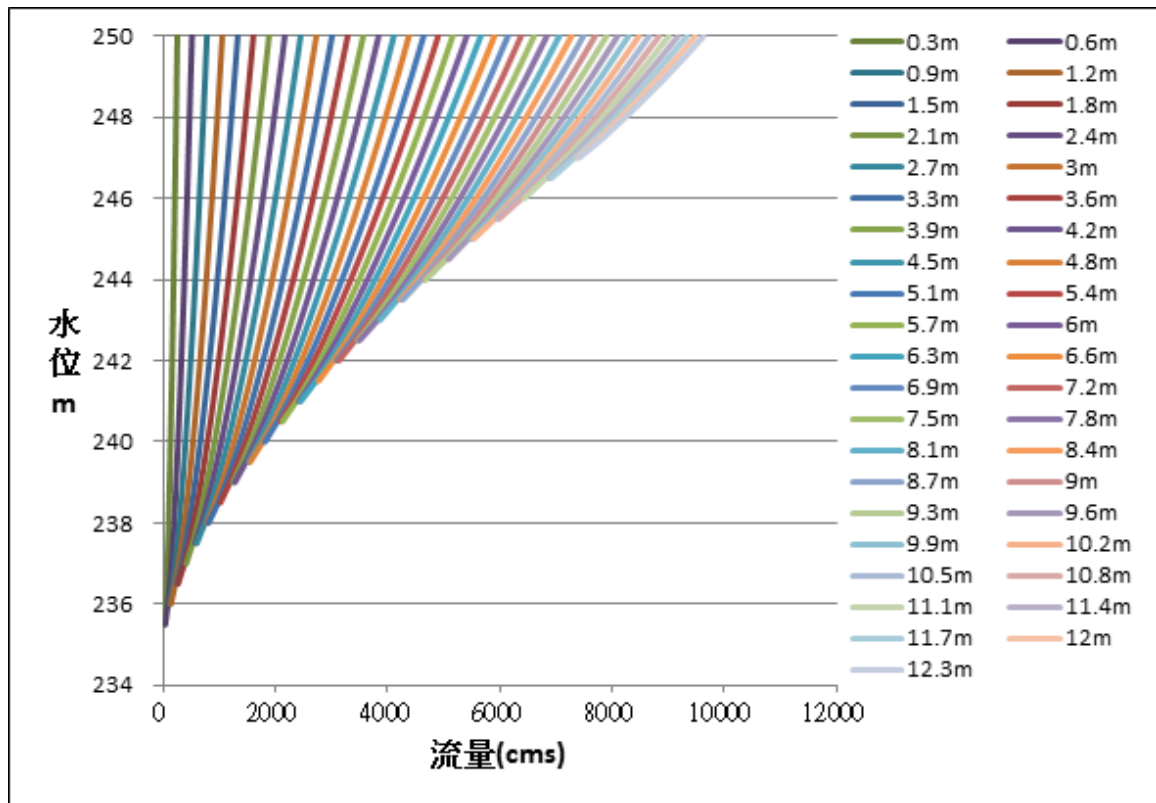


圖 2-3-1 石門水庫溢洪道閘門操作關係曲線圖

Facility	Water Level (m)	Flow Rate (cms)	Best Opening (m)	Recommended Flow (cms)
1. 溢洪道	240.00	600	1.5	662.8
2. 排洪隧道(單條)	240.00	0	0	0.0
3. 排洪隧道(兩條)	240.00	0	0	0.0
4. 永久放流道(PRO)	240.00	0	0%	0.0
5. 電廠排砂道(單條)	240.00	0	0%	0.0
6. 電廠排砂道(兩條)	240.00	0	0%	0.0
7. 石門大壩進水口	240.00	0	0	0.0
水庫庫區	240.00	-	-	-
A. 桃園大壩蓄水井	130	-	-	4.4
B. 後池堰沖刷道	135.00	0	0	0.0
C. 後池右岸溪洲圳	135.00	0	0	0.0
後池堰	135.00	-	-	-

圖 2-3-2 各排洪設施閘門開度自動化查詢模組

2-4 水庫防洪操作規範修訂建議

石門水庫之防洪操作運轉係根據「石門水庫運用要點」與「石門

水庫水門操作規定」辦理，遵循以上相關規範及憑藉著水庫操作人員專業的操作經驗，歷經多次的颱風事件，均能發揮水庫調豐濟枯之功效。但近年來颱風時期降雨強度與累積量皆有增加之趨勢，而為了水庫之永續經營、減緩颱風時期水庫淤積的速率，石門水庫需在颱風時期進行排砂，以利於水庫經營管理以及確保供水之穩定性。在防洪與排砂操作間，確實在颱風時期水庫操作之相當重要的考量，同時兩者操作與水庫安全、維持供水穩定性間有些衝突。在防洪操作概念中，考量水庫臨前水位，以盡量維持低水位可有效地消減洪峰；在排砂操作則欲維持較高水位，在異重流到達大壩時可以有充足的水量進行排砂操作以及調整水質濁度。本研究團隊於今年蘇力、潭美、康芮、天兔與菲特等 5 場颱風皆派員至石門水庫管理中心現場協勤，提供颱風相關資訊、水庫入流量預報資訊、防洪即時操作之決策支援等，根據現場提供即時資訊，本計畫提供下列幾點水庫防洪操作規範修訂之初步建議，若於日後考慮進行修訂宜編列相關研究計畫模擬、優選或分析其實用性與安全性。

(一)水庫運用要點修訂建議

(1) 第三章防洪運轉十二、(一)

原文：洪水來臨前：集水區開始明顯降雨，水庫進水流量未達每秒一千立方公尺前，以發電隧道及尾水路、河道放水道、排砂隧道及排洪隧道，進行調節性放水降低水庫水位。若水庫水位於標高二百三十七·五公尺以上水位仍持續上升時，得視水庫水位、雨量及流量狀況，增加溢洪道洩洪調降水庫水位。每年洪水期第一次颱風情況發生後，水庫水位標高應儘可能降至上限以下，如水位因攔蓄洪水而升高至標高二百四十公尺以上時，在次一颱風情況發生後，應儘可能降低至標高二百四十公尺以下。

說明：因應全球暖化與氣候變遷之影響，颱風侵襲時降雨強度與降雨延時屢破新高，又水庫淤積影響庫容量已減少，應考慮上述標高是否重新修訂。

(二)水庫水門操作規定修訂建議

(1) 四、(二) 1.(1) 排洪隧道閘門

原文：開啟閘門之最低洪水位為標高二百二十七公尺，其每條隧道之最低放水量二百秒立方公尺。

說明：建議刪除或修訂「開啟閘門之最低洪水位為標高二百二十七公尺」，因標高二百二十七公尺不能稱為洪水位，且正常情況下水位在此一標高應不可能會開啟排洪隧道。

三、理論概述

3-1 類神經網路

類神經網路(Artificial Neural Networks, ANNs)的概念是來自於研究生物神經網路系統，主要是以模仿人類腦神經系統而發展，因為人類在歸納推演、語音、影像辨識及推估等方面都有優異的能力，因此 ANN 藉以各種不同的學習演算法來模擬大腦強大的學習能力，期可應用於各種領域有傑出的表現。ANN 擁有許多跟人類大腦相近似能力的特性，最重要的三項有學習(learning)、回想(recall)與歸納推演(generalization)；學習能力可從歷史事件或經驗中學習系統的特性，以建立具有歸納推演能力的模式，有效地改善預測誤差、提高模式精確度，回想能力提供快速的計算與推估，節省運算時間。因不同的 ANN 模式具有不同特性，本計畫依不同 ANN 模式特性建置不同功能之模式，提供水庫操作之相關資訊；SOM 聚類能力分析颱風路徑之分類、BPNN 非線性能力建立集水區降雨-逕流模式、ANFIS 以模糊規則建立水庫防洪控制模式。下列小節為此三個模式理論之概述。

3-1-1 自組特徵映射網路

自組特徵映射網路(Self-Organizing Map, SOM)於 1982 年首先由 Kohonen 提出，屬於前饋式、非監督式與競爭式神經網路，其演算法以特徵映射方式將任意維度的輸入向量映射至較低維度的特徵映射圖(拓樸層)如圖 3-1-1 所示，依據輸入向量與神經元之相似度彼此競爭，距離最近者為優勝神經元可獲得調整連結權重的機會，SOM 的神經元間具有鄰近關係的特性，故當優勝神經元被調整時，其鄰近神經元也會進行連結權重的調整，最後拓樸層的神經元會依輸入向量的「特徵」以有意義的「拓樸結構(topology structure)」表現在輸出層，也可稱為拓樸圖(topology)。

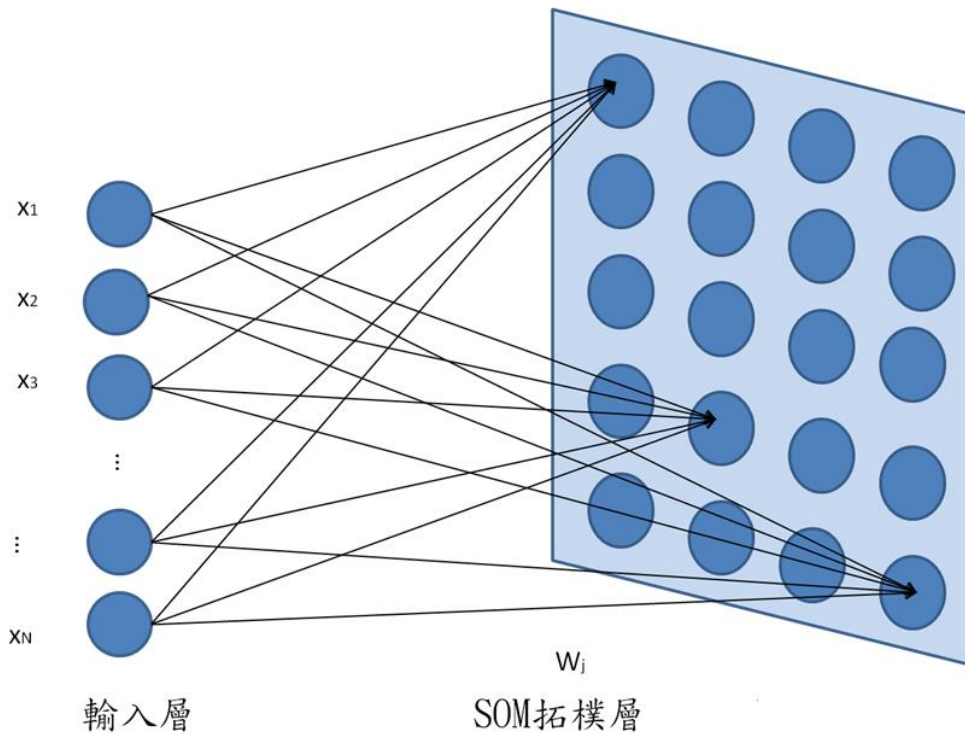


圖 3-1-1 二維矩陣的 SOM 架構圖

(圖片來源：張斐章、張麗秋，2010)

SOM 網路架構可分為輸入層與輸出層，輸入資料映射至拓樸層上的各個神經元，若以 X 表示 N 個維度的輸入向量如(3-1)式所示：

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T \quad (3-1)$$

拓樸層上的第 j 個神經元之連結權重 w ，如(3-2)式所示：

$$w_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jN}]^T \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3-2)$$

式中 M 為 SOM 網路的總神經元個數。

決定優勝神經元的方式是比較所有神經元的連結權重與輸入向量間的距離，距離最小的神經元為優勝神經元，如(3-3)式所示：

$$q(X) = \min_{\forall_j} \|X - w_j\|_2 \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (3-3)$$

式中 $q(X)$ 為輸入向量 X 與所有神經元連結權重的距離最小者。

在 SOM 網路的學習過程當中，當優勝神經元被調整時，其鄰近的神經元也隨著進行調整，此鄰近關係建立了神經元間的拓樸映射關係。鄰近關係之參數有：鄰近半徑、鄰近區域、鄰近函數與鄰近中心等，如圖 3-1-2 所示。

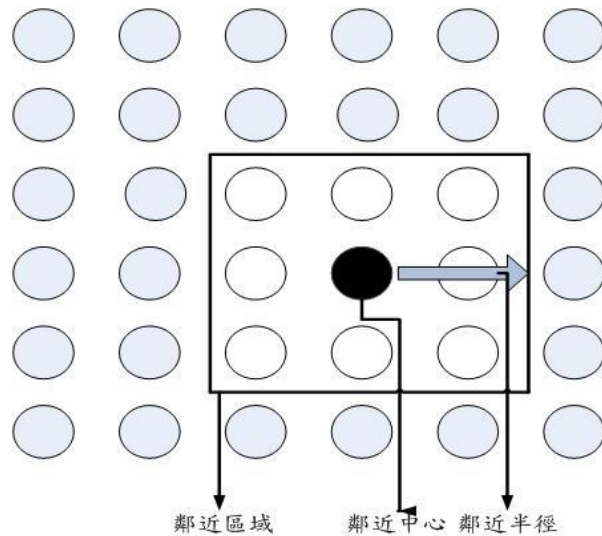


圖 3-1-2 SOM 網路優勝神經元與鄰近神經元示意圖

(圖片來源：張斐章、張麗秋，2010)

對初始權重為隨機亂數且無任何拓樸關係的網路而言，經過競爭式與鄰近關係的學習，逐漸地形成神經元間的拓樸結構，神經元也隨著調整而逐漸獲得訓練資料的聚類結果與資料分布的拓樸特性。

3-1-2 倒傳遞類神經網路

倒傳遞類神經網路(Back Propagation Neural Network, BPNN) 在各領域運用最為廣泛之類神經網路，其架構圖如圖 3-1-3 所示。BPNN 為一多層前饋式網路，可分為輸入、隱藏及輸出三層，每層架構中都包含若干個神經元(處理單元)，由權重連結各層間的神經元，輸入訊息由輸入層直接傳入隱藏層，經隱藏層加權累加後透過活化函數轉換處理傳至下一層隱藏層或輸出層，各層重複類似的運算，最後在輸出層計算出網路輸出值。以監督式學習方式來處理輸入與輸出間的非線性映射關係，目的在降低網路輸出值與目標輸出值間的差距，透過修改各層神經元的權重與偏權值，使誤差函數值達到容忍誤差範圍而停止。

在倒傳遞類神經網路中，第 n 層第 j 個神經元的輸入值為第 $n-1$ 層神經元輸出值的非線性函數如(3-4)式：

$$y^n_j = F(\text{net}^n_j) \quad (3-4)$$

式中 y^n_j 為第 n 層的輸出值，對第一層來說為輸入值， F 為活

化函數， net_j^n 為第 $n-1$ 層輸出值的權重累加值，可表示為(3-5)式：

$$net_j^n = \sum_{i=1}^m w_{ji}^n x_i + b_j^n \quad (3-5)$$

式中 w_{ji}^n 為第 n 層第 j 個神經元與第 $n-1$ 層第 i 個神經元的連結權重， b_j^n 為第 n 層第 j 個神經元的偏權值。網路輸出之誤差函數 E 定義為(3-6)式：

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - y_k)^2 \quad (3-6)$$

式中 d_k 為第 k 個神經元的目標輸出值， y_k 為輸出層第 k 個神經元的網路輸出值。因此，網路的學習目的為使誤差函數 E 最小化，一般利用最陡坡降法搜尋 E 的最佳解，也就是最小的誤差平方和。每當輸入一筆訓練資料，網路就稍微調整加權值的大小，調整的幅度和誤差函數對權重連結值的敏感程度成正比，也就是和誤差函數對權重值的導函數大小成正比，每輸入一組訓練範例(也就是有輸入項與目標輸出值)，各連結的權重即可加以調整。

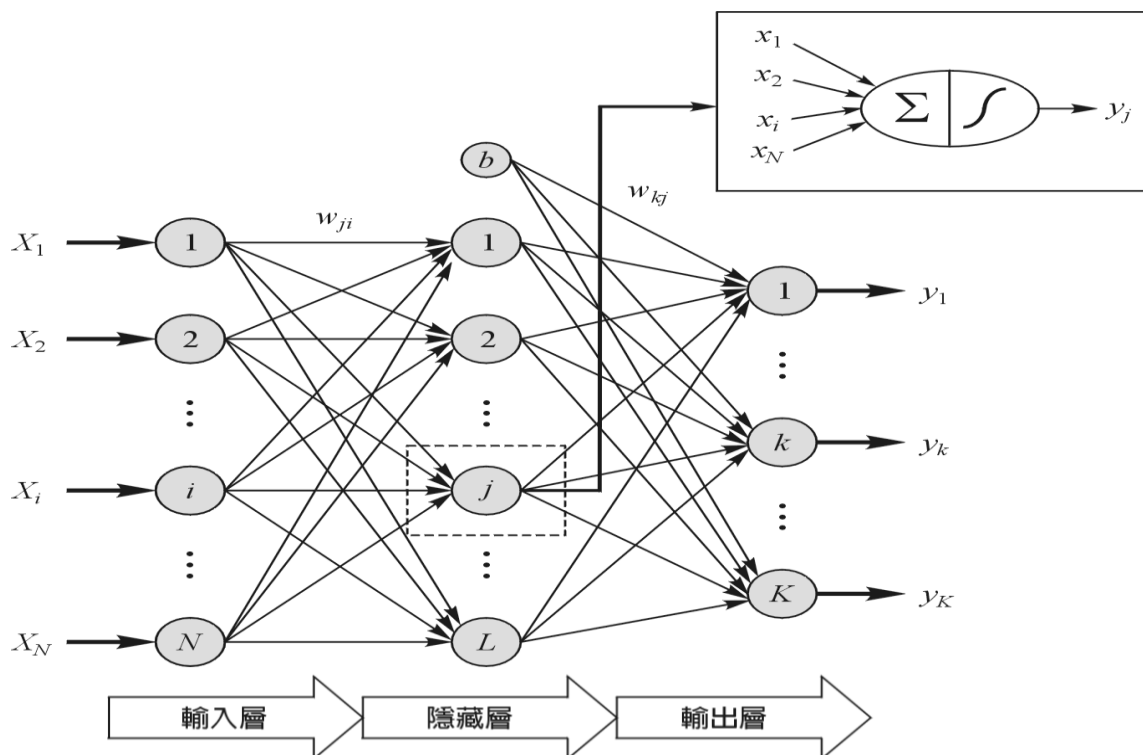


圖 3-1-3 倒傳遞類神經網路之架構圖

(圖片來源：張斐章、張麗秋，2010)

3-1-3 調適性網路模糊推論系統

模糊推論系統 (Fuzzy Inference System, FIS) 的理論源自於模糊集合理論、模糊 IF-THEN 規則以及模糊推論等理論基礎，主要架構包括：模糊化 (fuzzifier)、模糊規則庫 (fuzzy rules)、隸屬函數 (membership function) 資料庫、推論引擎 (inference engine) 與解模糊化 (defuzzifier) 等五大部分。

類神經網路雖無法處理定性的知識與邏輯推論過程，卻具有極佳的自我學習與組織能力，其強大的調整能力正可用來作模糊系統的結構與參數之調整，使合乎模糊推論系統中輸入、輸出間的關係。調適性網路模糊推論系統 (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS) 利用以上二種技術加以整合並相互補償個別技術的缺點，使結合的系統將具有類神經網路的優點 (如：學習能力、連結式的結構)，與模糊推論系統的優點 (如：接近人類的思考行為、容易結合專家知識)，可充分發揮模式對於系統不確定性與不精確性的處理能力，以及優異的學習與自我調適能力求得參數最佳解。如此可有效地解決非線性系統的建構與控制問題。

調適性網路：調適性網路乃是一多層前饋式網路，網路結構中包含了節點與節點間之連結，網路中部份或全部的節點具有調適性，而節點的輸出即依據其參數所決定，因此網路學習法則為如何調整這些參數使誤差減低。欲建立模糊模式，首先需訂出輸入與輸出變數的種類、數量與類型：(1) 輸入變數：輸入的數量取決於影響流量預測之幾項重要因素，由於影響流量預測因素眾多，無法直覺判斷或透過系統分析找出輸入與輸出的關係，因此需要自輸入與輸出資料中，利用試誤法將上述變數以不同的組合代入模式中，找出訓練誤差值最小的組合方式，以確保訓練得之模式可有效的描述出數據的特性。(2) 輸出變數：輸出變數只有一個，建構的模式採用一階 sugeno 模糊推論模式，故輸出變數為輸入變數的線性函數。

調適性網路模糊推論系統：ANFIS (Jang, 1993) 乃結合神經網路自

我組織的特性架構而成。模糊推論系統藉由模糊 IF-THEN 規則對於人類知識與推論過程進行定性描述與分析，然而模糊系統表現的好壞往往決定於輸入、輸出變數之隸屬函數、模糊規則及推論機制。模糊系統通常是根據許多經驗以適合的知識來表示，發展過程中卻無法決定初始模糊規則及調整初始規則及其隸屬函數。傳統的方法是由該領域的專家，依其專家知識建立初始規則及其隸屬函數。很明顯地，對於一個複雜系統要檢測其中所有的輸入-輸出關係，並同時調整相對應的規則與函數，即使對專家而言也很不容易。整體而言，網路模糊推論系統需進行二項調整：一是結構的調整，二是參數調整。

ANFIS 之架構，如圖 3-1-4 所示，分為五層，同一層節點的隸屬函數或轉換函數採用相似的函數；在學習與調整參數方面，則是結合前饋式類神經網路與監督式學習方法，使得模糊推論系統的所有參數可獲得適當的調整，讓模式具有自我學習與組織能力。

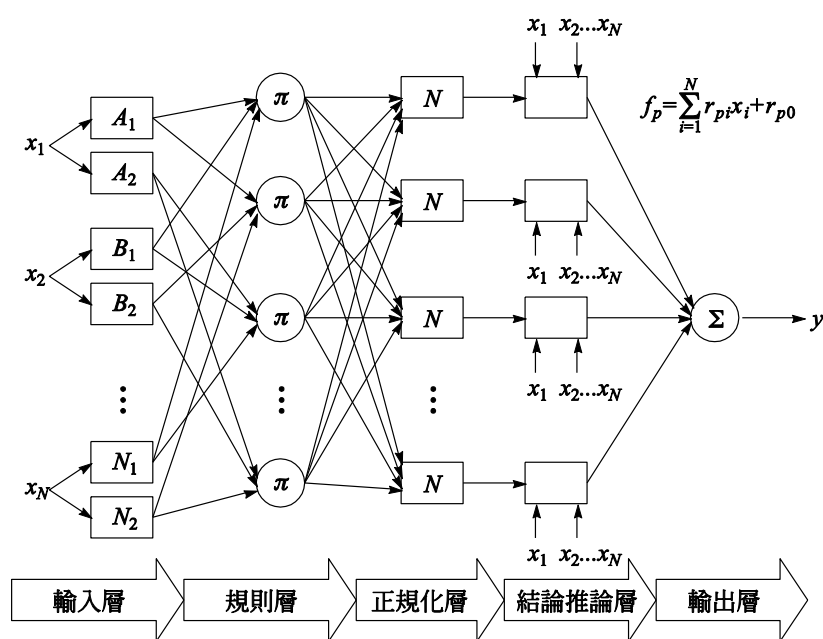


圖 3-1-4 ANFIS 架構圖

第一層 輸入層

將輸入變數映射至模糊集合，以設定之隸屬函數估算其隸屬度，在此隸屬函數以 S 型函數為例：

$$\begin{aligned}
 O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i=1,2 \\
 O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i=3,4
 \end{aligned}
 \tag{3-7}$$

$$\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + e^{-a_i(x-c_i)}}, \quad \mu_{B_{i-2}} = \frac{1}{1 + e^{-a_i(y-c_i)}}$$

其中 O_1 為輸入值相對於模糊集合之隸屬函數， $\{a_i, c_i\}$ 為模糊隸屬函數的參數，即前提項參數，當這些參數值改變，隸屬函數形式也會跟著改變。

第二層 規則層

進行變數間模糊邏輯規則之先決條件配對，以得到各規則之 firing strength (即權重值)，再利用 T-norm 乘積運算，即輸出值為所有輸入訊息之乘積：

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1, 2 \quad (3-8)$$

第三層 權重平均

此層各節點計算該規則相對於所有規則的 firing strength 之比例，也就是將第 i 條規則的輸出結果除以所有規則之輸出結果，使其輸出值介於 0 到 1 之間。

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (3-9)$$

第四層 結論推論層

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2 \quad (3-10)$$

其中 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 為模糊推論之結論參數，即推論項(consequent)參數。

第五層 輸出層

將前層訊息加總以計算輸出變數值，一如解模糊化之功能：

$$\text{輸出值：} O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (3-11)$$

ANFIS 結合了前饋式類神經網路的監督式學習法，在代入訓練範例後，比較真實輸出值與模式推估值間的誤差，在求得誤差的最小平方和過程中，使模糊推論系統中的所有參數作適當的調整。參數的修正方法是採用二階段的複合式學習演算法：(1)在訊號向前傳的部分，各層節點輸出值往前傳至第四層後，藉由最小平方推估法來調整推論項參數。(2)誤差訊號逐層逆向傳導至第一層，再利用最陡坡降法將誤

差往前傳以更新前提項參數。當前提項參數與推論項參數在改變的過程中，其各個隸屬函數亦隨之改變，最後當前提項參數與推論項參數固定後，就出現了各個配合適當之隸屬函數。藉由這樣的二階段學習程序，ANFIS 即可透過輸入—輸出資料與專家知識(化為模糊 IF-THEN 規則形式)建立出輸入—輸出之映射關係。

3-2 異重流模式

本計畫所採用之異重流數值模式在於具備實用性與準確性，在模擬精度可接受的前提下，該模式必須符合水庫異重流垂向變化之流速與濃度特性，並與本計畫或先前計畫之量測成果，進行模式之檢定驗證，而數值模擬之條件，必須根據實際颱風水文歷線及水庫防汛操作進行設定。

水庫異重流本身雖然含有液相（水體）與固相（泥砂）兩種，是屬於水、砂混合的二相流問題，但是水庫淤積三角洲至壩址間，大多是粉土(silt)及粘土(clay)，泥砂顆粒微小，若是不考慮泥砂顆粒間的碰撞與水砂間動量的轉換問題，則可視為單相流體；若是將異重流本身水及砂視為一體，便可使用代數滑移數值方法(Algebraic Slip Model, ASM)的模擬概念，將延散多相流方程式簡化成單一流體方程式，用來求解含微小顆粒或低濃度含砂水流的流況，此種模式假設微小顆粒或泥砂本身的延遲時間(sediment relaxation time)遠小於整個水流的計算時間，也就是分散項的體積分率非常小，是不需要利用動量方程式求解顆粒的運動狀態，而僅需要考慮顆粒或泥砂在載體(指水體)中的沉降速度來求解顆粒或泥砂的濃度分佈，在計算上可縮短許多時間。

基本而言，由於 ASM 數值方法可視為連續延散二相流模式的簡化模式，此種模式中微小顆粒或泥砂本身的平衡延遲時間須遠小於整個流場的特徵時間，也就是說此種顆粒或泥砂在流場裡是隨時達至其終端速度，因此不需要利用動量方程式來求解顆粒或泥砂的運動狀態。原則上，使用 ASM 數值方法的適用環境條件為顆粒或泥砂直徑 d 約為 10^{-5} m(=10 μ m)之尺度 (Manninen et al., 1996)，在此條件下，模

式需輸入的參數為顆粒或泥砂的沉降速度 ω ，圖 3-2-1 及圖 3-2-2 顯示鳳凰颱風及卡玫基颱風時運移到壩前之泥砂粒徑大小，中值粒徑 d50 約介於 5~10 μm ，因此可適用於 ASM 數值演算方式。

因此，本計畫採用 ASM 數值演算方式，建立石門水庫異重流運移模式，作為分析異重流於石門水庫庫區之運行及抵達大壩時間之推估方法，並利用泥砂顆粒之沉降速度分析壩址渾水潭升降情形。本計畫使用之連續方程式、動量方程式與濃度方程式如下表示：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_m) + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) = & -\nabla P_m + \nabla \rho_m g + \mu_m [\nabla u_m + (\nabla u_m)^T] \\ & - \nabla \cdot [\rho_m c_p (1 - c_p) u_{sp} u_{sp}] \end{aligned} \quad (3-13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_p) + \nabla \cdot \{c_p [(u_m + (1 - c_p) u_{sp})]\} = 0 \quad (3-14)$$

$$|u_{sp}| u_{sp} = \frac{4d_p}{3C_D} \frac{(\rho_p - \rho_w)}{\rho_w} [g - (u_m \cdot \nabla) u_m] \quad (3-15)$$

$$\begin{aligned} C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) & \quad \text{Re}_p < 1000 \\ = 0.44 & \quad \text{Re}_p > 1000 \end{aligned} \quad (3-16)$$

其中 ρ_m 為異重流密度： $\rho_m = (1 - \alpha_p) \rho_w + \alpha_p \rho_p$ ； α_p 為泥砂體積分率； ρ_w 為清水密度； ρ_p 為泥砂密度， u_m 為異重流速度： $u_m = (1 - \alpha_p) u_w + \alpha_p u_p$ ； u_w 為清水速度； u_p 為泥砂的速度， p_m 為異重流壓力： $p_m = p_w = p_p$ ， $\nabla \rho_m$ 為泥砂與清水之密度差： $\nabla \rho_m = \rho_m - \rho_w$ ， g 為重力加速度， μ_m 為異重流黏滯係數： $\mu_m = (1 - \alpha_p) \mu_w + \alpha_p \mu_p$ ； μ_w 為清水之黏滯係數； μ_p 為泥砂之黏滯係數， c_p 為泥砂質量分率， u_{sp} 為泥砂沉降速度； d_p 為泥砂粒徑； Re_p 為泥砂顆粒之雷諾數。此外 u_{sp} 可根據 Richardson and Zaki(1954)之研究結果進行給定，其方程式如下所示：

$$u_{sp} = u_0 (1 - V_f)^m \quad (3-17)$$

其中 u_0 為群體顆粒之沉降速度； V_f 為泥砂顆粒之體積濃度； m 則為泥砂顆粒雷諾數之函數，根據穩定流態之試驗數據顯示其值約介於 2.39 及 4.65 之間，但根據(Xia and Wang 1982)之試驗結果則顯示，在

不具凝聚性之泥砂運移過程中 m 之值可達 7 左右；而本計畫之垂直二維數值模擬範圍則從石門水庫上游 32 斷面(羅浮)到壩前之區域內，運移之泥砂顆粒應具備非凝聚性與凝聚泥砂兩種，因此 m 之值應介於 2~7 之間。

由異重流運移模擬之文獻收集可知，(Akiyama and Stefan 1985)利用二維緩變異重流的方程式，同時考量異重流的沖刷與淤積效應；(Parker et al., 1986)則發展二維可求解含砂水流捲水效應的方程式；(Farrel and Stefan 1988)利用二維方程式模擬潛入點發生的原因；(Garcia 1992)利用(Parker et al., 1986)所推導的二維方程式，將其應用在無黏滯性含砂水流在動床下的運移模擬；(方春明 1997)對異重流潛入條件進行理論分析，並用垂直二維數值模式模擬，提出潛入時的能量損失係數為影響臨界潛入條件的主要因素，且水流擴散係數與河床坡降對潛入條件皆有一定程度的影響；(Gu and Chung 1998)以二維數值模式探討水庫異重流潛入條件及各參數的敏感度，所得結果得知密差福祿數以及雷諾數的敏感度比其他參數的敏感度都要來的大；(Fukushima 1998)則假設異重流頭部為半圓球狀，利用一維方程式求解其運動，並且推導出二維層流非穩態的控制方程式解；(吳等 2000)利用鹽水試驗，進行鹽水異重流的沿程速度與濃度分佈模擬；(Firoozabad et al., 2003)則考量垂直二維兩種泥砂粒徑所產生的異重流濃度及速度的運移現象；(Young and Lin 2005)則利用垂直二維方程式求解溫度分層明顯水庫的溫度分佈，其模式利用美國陸軍工兵團的水槽試驗檢定驗證參數，最後將其應用於德基水庫的模擬，其水位與溫度分層的模擬與量測值相當接近；(Oehy and Schleiss 2007)則利用 CFX，模擬垂直二維混濁的流體受到砂質或是可穿透的障礙物的影響，並透過試驗驗證模式的準確性，其模擬結果顯示設計得當的結構物可有效阻擋濁水流體進入下游區域；(Chung 2009)考慮三種不同的泥砂沉降特性，包含整體沉降速度、不同顆粒沉降速度及濃度變化所導致之沉降速度變化，利用垂直二維模式進行水庫異重流模擬；(李 2010)利用計算流體力學模擬模式(CFX)，以及水槽試驗的試驗結果，模擬異重流於試驗水槽中的運移過程，其中包含異重流頭部與本體的

運移、異重流沿著下游尾水板爬升與異重流正湧波的形成；在不考慮泥砂與清水間之動量交換條件下，採用代數滑移數值方法 (Algebraic Slip Model, ASM)來模擬異重流濃度與速度隨著時間的變化，以及異重流正湧波的沿程運移。

根據上述文獻及水庫之水流型態屬於垂直二維運動型態，因此大多數之二維數值模擬皆以垂直二維為主要異重流模擬方式，因此本研究同樣採用此種方式，並選取近年來已在曾文水庫使用廣泛且經過驗證之 CFX 數值模擬軟體[ANSYS CFX 2009]，建立石門水庫異重流運移模式，作為分析異重流於石門水庫庫區之運行及抵達大壩時間之推估方法，並利用泥砂顆粒之沉降速度分析壩址渾水潭升降情形。主要之數值模式參數值則列於表 3-2-1。

其中圖 3-2-3 及圖 3-2-4 為本計畫初步測試垂直二維數值模式之結果，模擬過程一併考慮水流溫度影響泥砂濃度與異重流運移之影響，由圖中可知所採用之 ANSYS CFX 軟體可適當模擬水庫異重流運移之型態。

表 3-2-1 參數列表及建議值

參數	建議值	模式率定值
泥砂顆粒雷諾數之函數(m)	2~7	2.39
群體顆粒之沉降速度(μ_0)	0.2~0.005	0.1
紊流強度	1%或 5%	5%
演算時間間距(dt)	5min~10sec	10sec

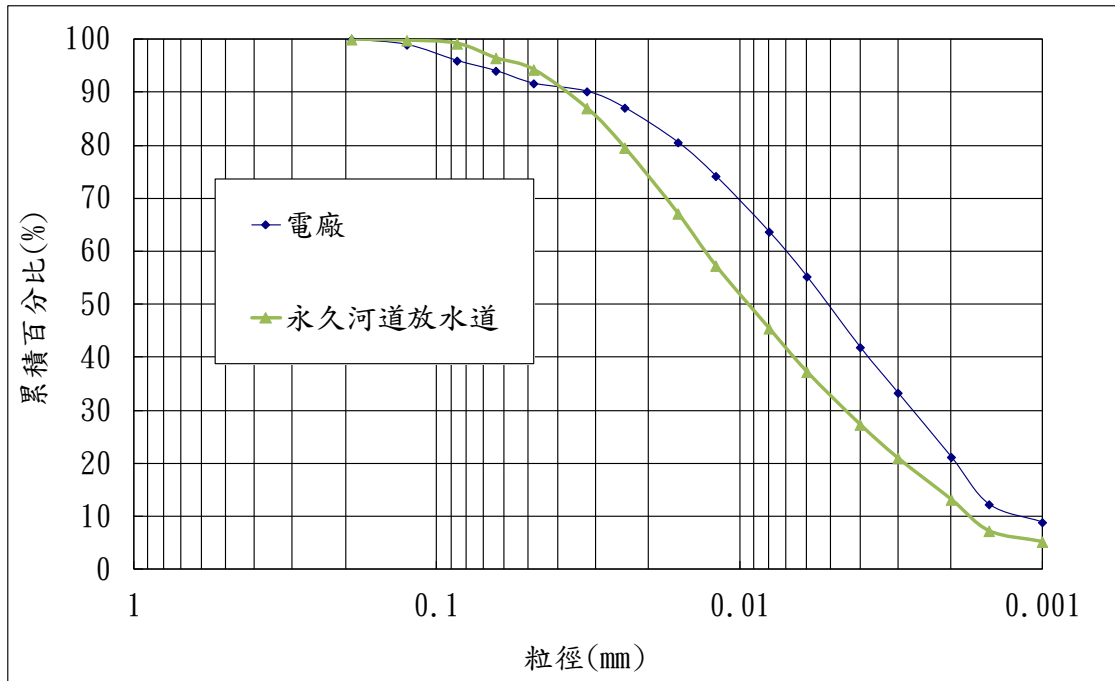


圖 3-2-1 鳳凰颱風期間出水工之泥砂粒徑

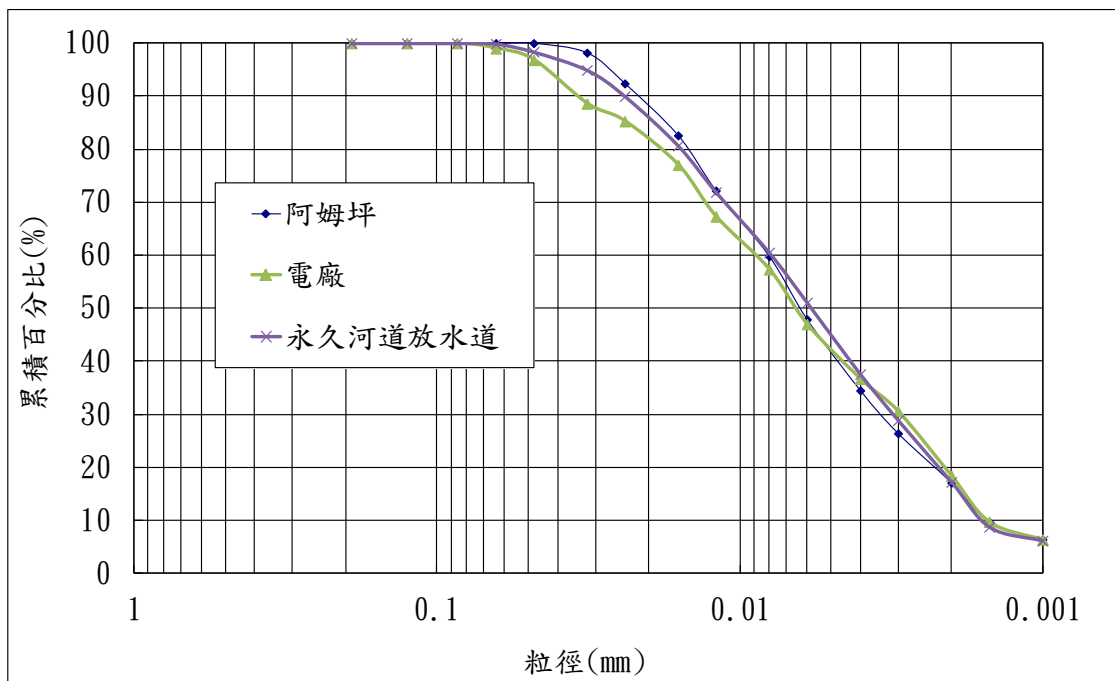


圖 3-2-2 卡孜基颱風期間出水工之泥砂粒徑

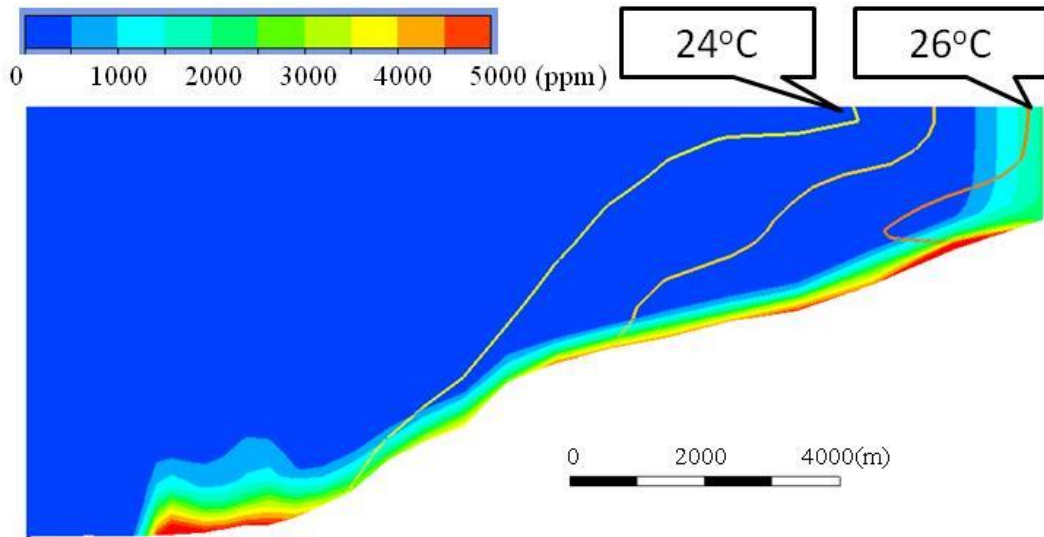


圖 3-2-3 垂直二維異重流數值模式模擬之異重流運移情況

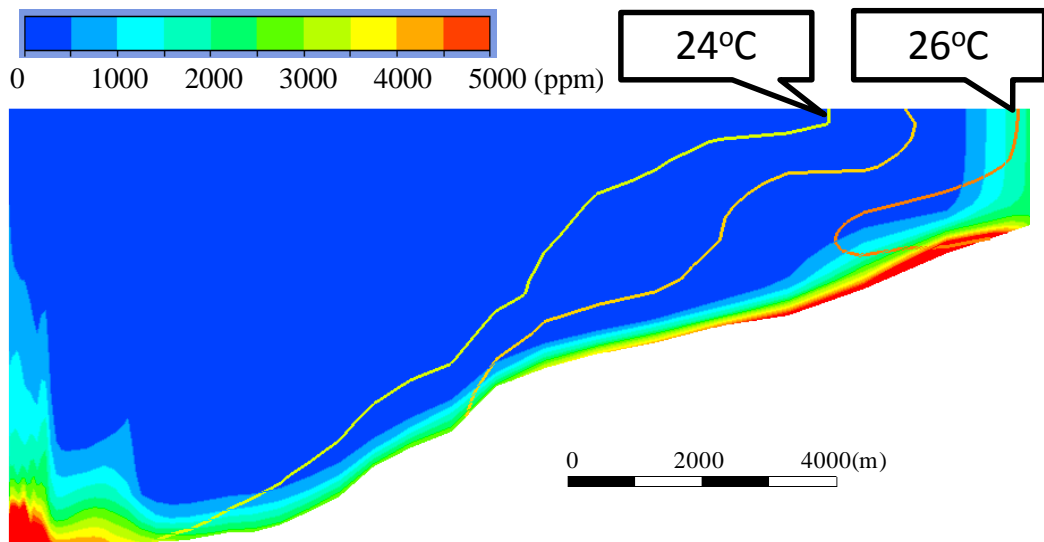


圖 3-2-4 垂直二維異重流數值模式模擬之異重流抵達壩址情況

四、歷史颱風路徑及流量歷程套配

颱風的行進路徑影響集水區之降雨型態(分布)，對集水區流量歷程有極大的影響，傳統的方法將颱風路徑大略分為幾大類，其路徑涵蓋之範圍相當模糊，並未明確定義出何種颱風路徑可能造成的降雨分布及影響，無法從颱風路徑分類預測降雨(量)時間分布與集水區流量歷程，若能分類出該颱風路徑屬於何種分類，進而建立相關預測模式即可提供防洪策略與水庫操作上更多的資訊，以利其參考。本計畫將歷史颱風路徑以自組特徵映射網路(Self-Organizing(Feature) Map, SOM)分類，找出其路徑分類，並進一步地計算各路徑分類之對應流量特徵，可應用於颱風警報單之預報路徑，比對颱風路徑分類之 SOM 模式，找出最相似的路徑分類，並對應於該分類之流量特徵以換算出流量歷程作為預報結果(蕭, 2012)。

4-1 歷史颱風路徑分類

本計畫所蒐集資料從 1971 年至 2012 年間之颱風事件，選取洪峰流量大於 600cms 且氣象資料完整之颱風事件共 38 場進行路徑分類，資料包含流量資料及氣象資料兩類，以下分別說明之：

(一) 氣象資料：

颱風時期氣象資料來源為中央氣象局，包含路徑座標、氣壓、風速及暴風半徑，依颱風中心與臺灣距離遠近分別以 6 小時、3 小時以及最接近臺灣 1 小時 1 筆資料記錄，因資料時間間距不一致，使得模式建置困難，故以內插法計算以獲得每小時 1 筆颱風路徑座標。

(二) 流量資料：

石門水庫時流量資料為從 1971 年貝絲颱風至 2012 年蘇拉颱風共 38 場事件。

表 4-1-1 颱風路徑分類模式事件分組表

颱風名稱	英文名稱	起迄時間	颱風強度	洪峰流量 (cms)	總入流量 (萬噸)	資料分組
1971 貝絲	Bess	09/22~09/24	強烈	5,173	47,336	訓練
1979 歐敏	Irving	04/14~08/16	中度	2,006	21,349	訓練
1981 莫瑞	Maury	07/19~07/21	輕度	2,217	38,003	訓練
1985 尼爾森	Nelson	08/22~08/24	中度	4,906	33,847	訓練
1986 艾貝	Abby	09/18~09/20	強烈	2,129	19,803	訓練
1987 傑魯德	Gerald	09/09~09/11	強烈	1,444	17,345	訓練
1989 莎拉	Sarah	09/10~09/13	強烈	2,959	41,053	訓練
1990 楊希	Yancy	08/18~08/20	中度	4,344	27,684	訓練
1990 黛特	Dot	09/07~09/09	中度	2,593	28,231	訓練
1992 歐瑪	Omar	09/04~09/05	中度	870	13,316	訓練
1994 道格	Doug	08/07~08/09	強烈	3,065	25,429	訓練
1994 弗雷特	Fred	08/20~08/22	強烈	2,440	23,540	訓練
1996 賀伯	Herb	07/31~08/22	強烈	6,363	43,473	訓練
1997 溫妮	Winnie	08/17~08/19	中度	3,411	31,147	訓練
1998 瑞伯	Zeb	10/15~10/17	強烈	4,643	36,108	訓練
2000 碧利斯	Bilis	08/22~08/24	強烈	2,230	15,266	訓練
2000 象神	Xangsane	10/31~11/02	中度	1,852	13,601	訓練
2001 納莉	Nari	09/16~09/19	中度	4,123	54,070	訓練
2001 利奇馬	Lekima	09/25~09/28	中度	1,505	36,703	訓練
2004 艾利	Aere	08/23~08/27	中度	8,594	75,218	訓練
2004 海馬	Haima	09/11~09/13	輕度	1,637	35,317	訓練
2004 納坦	Nockten	10/25~10/26	中度	958	20,663	訓練
2005 海棠	Haitang	07/17~07/19	強烈	3,199	28,064	訓練
2005 馬莎	Masa	08/04~08/06	中度	5,322	53,147	訓練
2005 泰利	Talim	08/31~09/02	強烈	3,689	21,619	訓練
2005 龍王	Longwang	09/30~10/03	強烈	1,369	10,872	訓練
2006 碧利斯	Bilis	07/12~07/15	輕度	662	8,077	訓練
2007 聖帕	Sept	08/16~08/19	強烈	1,844	19,008	訓練
2007 韋帕	Wipha	09/17~09/19	中度	2,788	21,232	訓練
2007 柯羅莎	Krosa	10/04~10/07	強烈	5,300	42,573	訓練
2008 鳳凰	Fung-wong	07/26~07/29	中度	2,040	14,892	訓練
2008 辛樂克	Sinlaku	09/11~09/16	強烈	3,447	63,423	測試
2008 薔蜜	Jangmi	09/21~09/23	強烈	3,292	26,672	測試
2009 莫拉克	Morakot	08/08~08/10	中度	1,838	28,455	測試
2010 凡那比	Fanapi	09/17~09/20	中度	1,056	12,201	測試
2010 梅姬	Megi	10/21~10/23	中度	859	20,464	測試
2011 米雷	Meari	06/23~06/25	輕度	1,059	13,520	測試
2012 蘇拉	Saola	07/30~08/03	中度	5,385	50,940	測試

考量颱風在臺灣鄰近範圍內之行經路徑及其分類，首先將臺灣周圍之海域與臺灣劃分為4種不同之正方形網格共133個如表4-1-2所示，網格涵蓋之範圍西起東經116.02°、東至東經129.22°、南起北緯18.95°、北至北緯30.35°；其次，參考中央氣象局所發布之颱風路徑分類圖，如圖4-1-1所示；再者，颱風路徑距離集水區之距離對集水區之降雨—逕流過程之影響不盡相同，因此，颱風路徑在石門水庫鄰近範圍內對其入流量影響較大，故建置較精細的網格，以凸顯出颱風路徑之特徵，期可得較佳之路徑分類。

透過地理資訊系統(GIS)繪製出颱風路徑與網格座標圖層(如圖4-1-2所示)，將颱風路徑與網格座標圖層套疊後可得圖4-1-3，轉換為颱風路徑之輸入向量(如圖4-1-4所示)；颱風對臺灣影響之時間定義為從颱風進入網格至離開網格所歷經之時間，同時為流量及雨量資料之選取時間；所選取之颱風事件分為時間最近7場颱風為測試事件、其餘31場颱風為訓練事件，如表4-1-1所示。神經元個數以試誤法測試不同組合，將訓練事件之颱風路徑輸入SOM分類模式後，最後選定4x3(12個)為最佳組合，其分類結果(拓撲圖)如

圖4-1-5所示，由該圖可見各神經元皆能有一個與其他神經元不重複的颱風路徑。

表 4-1-2 設計網格資料

類別	寬度(經度)	長度(緯度)	數量(個)
巨大	264km(約 2.64°)	264km(約 2.32°)	16
大	132km(約 1.32°)	132km(約 1.16°)	21
中	66 km(約 0.66°)	66 km(約 0.58°)	48
小	33 km(約 0.33°)	33 km(約 0.29°)	48

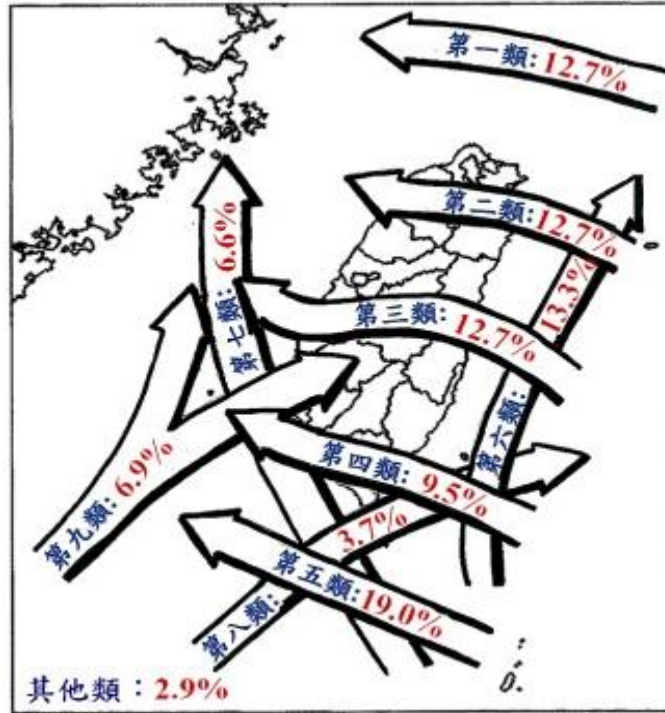


圖 4-1-1 中央氣象局颱風路徑分類圖(中央氣象局，2004)

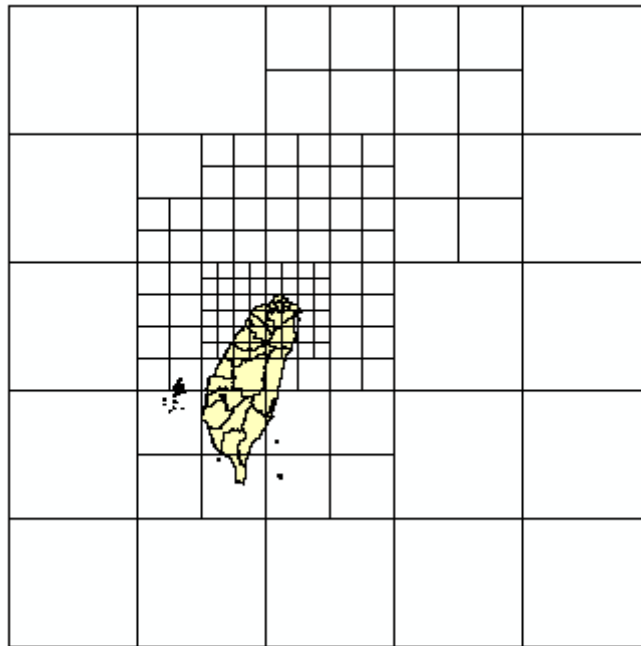


圖 4-1-2 臺灣鄰近區域之網格座標圖

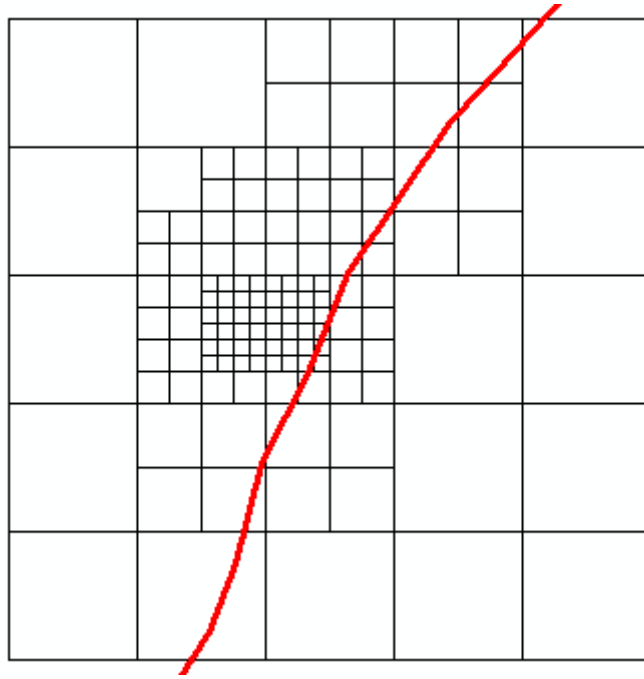


圖 4-1-3 颱風路徑與網格座標套疊圖(2000 象神颱風)

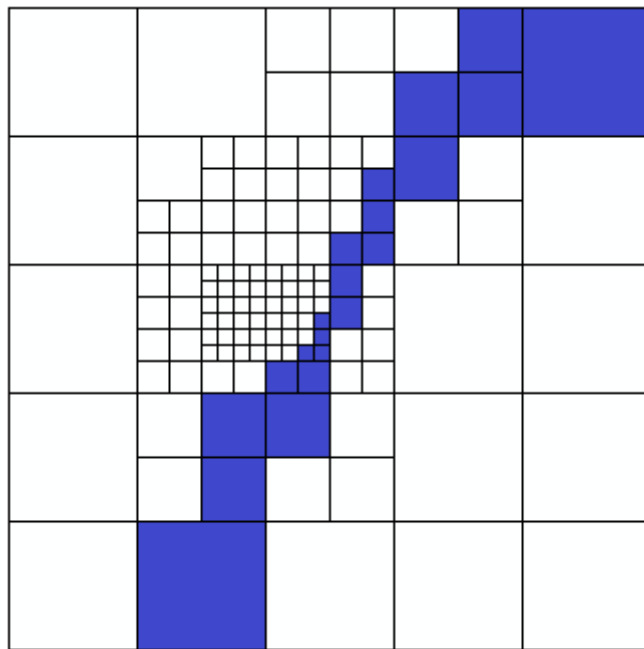


圖 4-1-4 SOM 之颱風路徑輸入向量(2000 象神颱風)

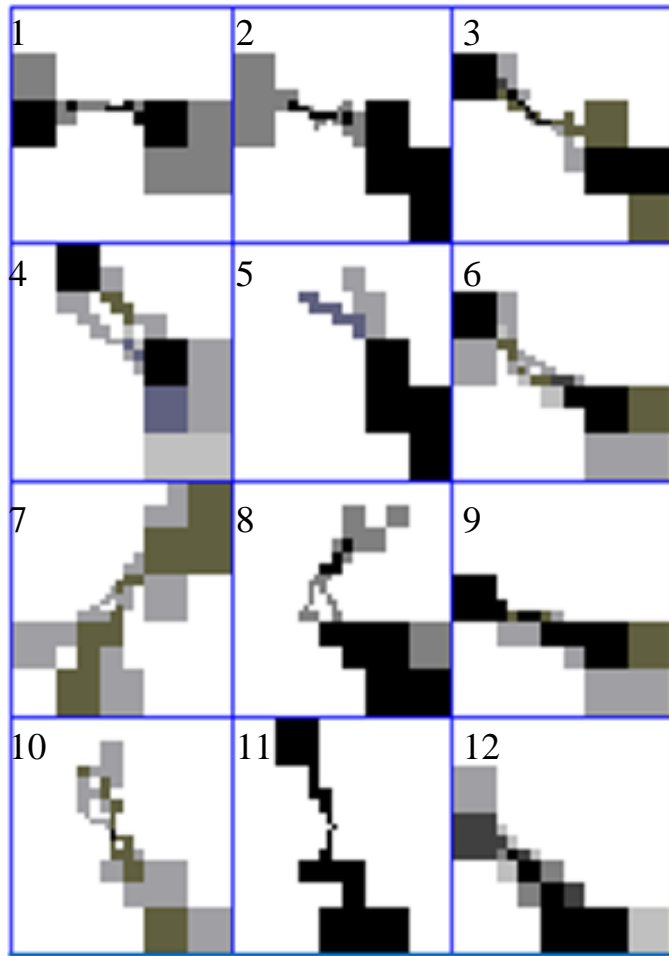


圖 4-1-5 颱風路徑分類結果拓樸圖

4-2 歷史颱風流量資訊套配

颱風路徑經 SOM 分類後，不同特徵的路徑已儲存於網路之神經元中，歷史颱風事件的路徑皆可被分類至特定神經元(路徑特徵)，找出每個神經元內所屬數個颱風事件之水庫入流量，以計算各神經元專屬之流量特徵，即累積流量百分比曲線。累積流量百分比曲線計算方法如下：

- 1.依颱風路徑進入網格至離開網格時間可計算相對應之累積流量百分比，以及相對應時間以累積時間百分比顯示。
- 2.將分類至該神經元之數個颱風之累積流量百分比曲線平均，可獲得該神經元特性之累積流量百分比曲線（即流量特徵曲線）。

圖 4-2-1 為各神經元被分類颱風之累積流量百分比曲線，可發現大部分神經元內之各場流量特徵相近似，僅有少數神經元之各場流量特徵有較大的差異；圖 4-2-2 為代表各神經元之累積流量百分比曲線，於未來發生颱風事件時，以 SOM 分類颱風路徑後，再經由代表該類別的神經元流量特徵結合該場颱風之目前累積入流量，即可推算出未來 72 小時內(氣象局發佈之颱風警報單路徑預報以 72 小時為限)之水庫入流量歷程，提供調節性放水之參考資訊。

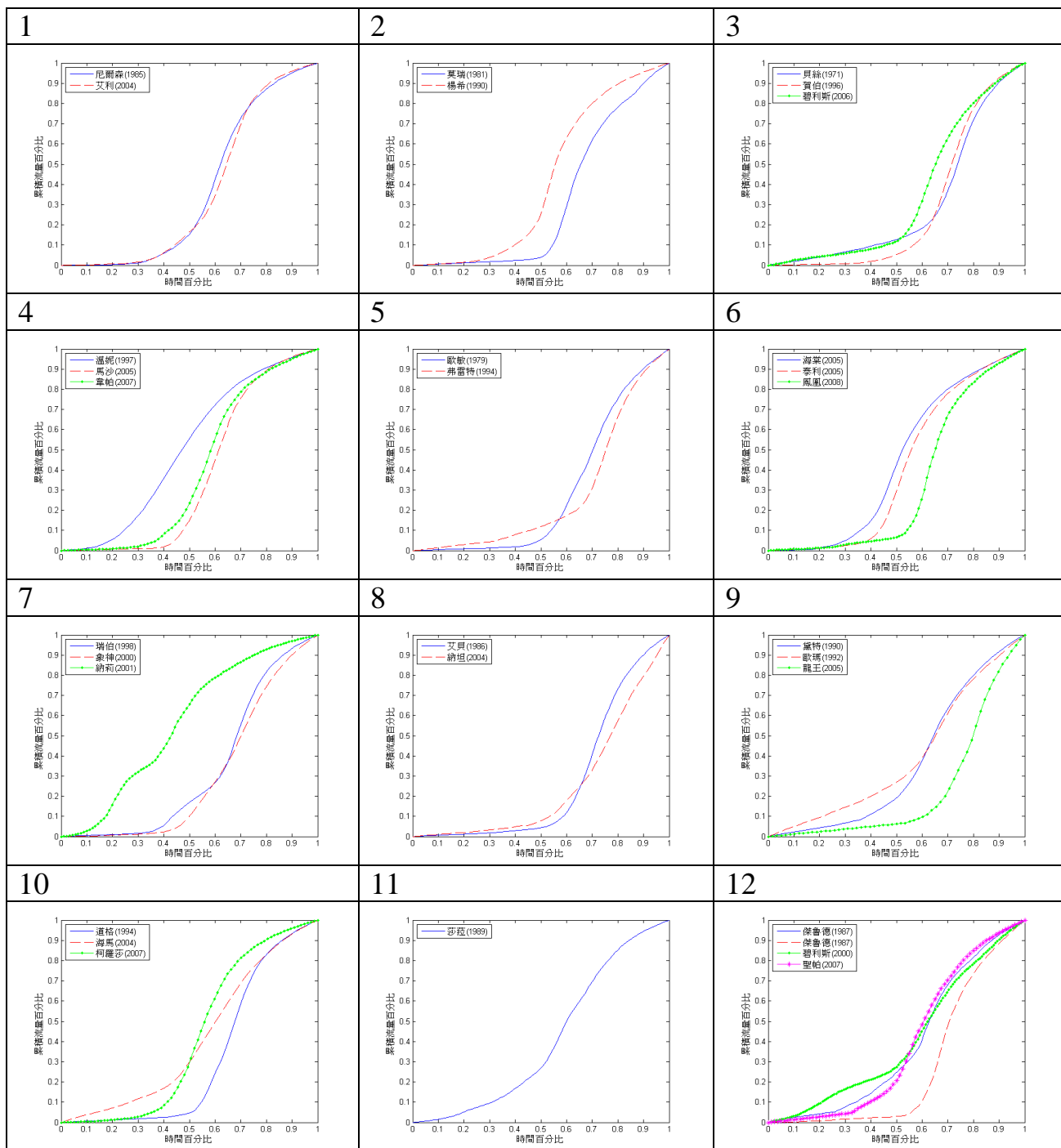


圖 4-2-1 SOM 各神經元分類之颱風流量特徵曲線圖

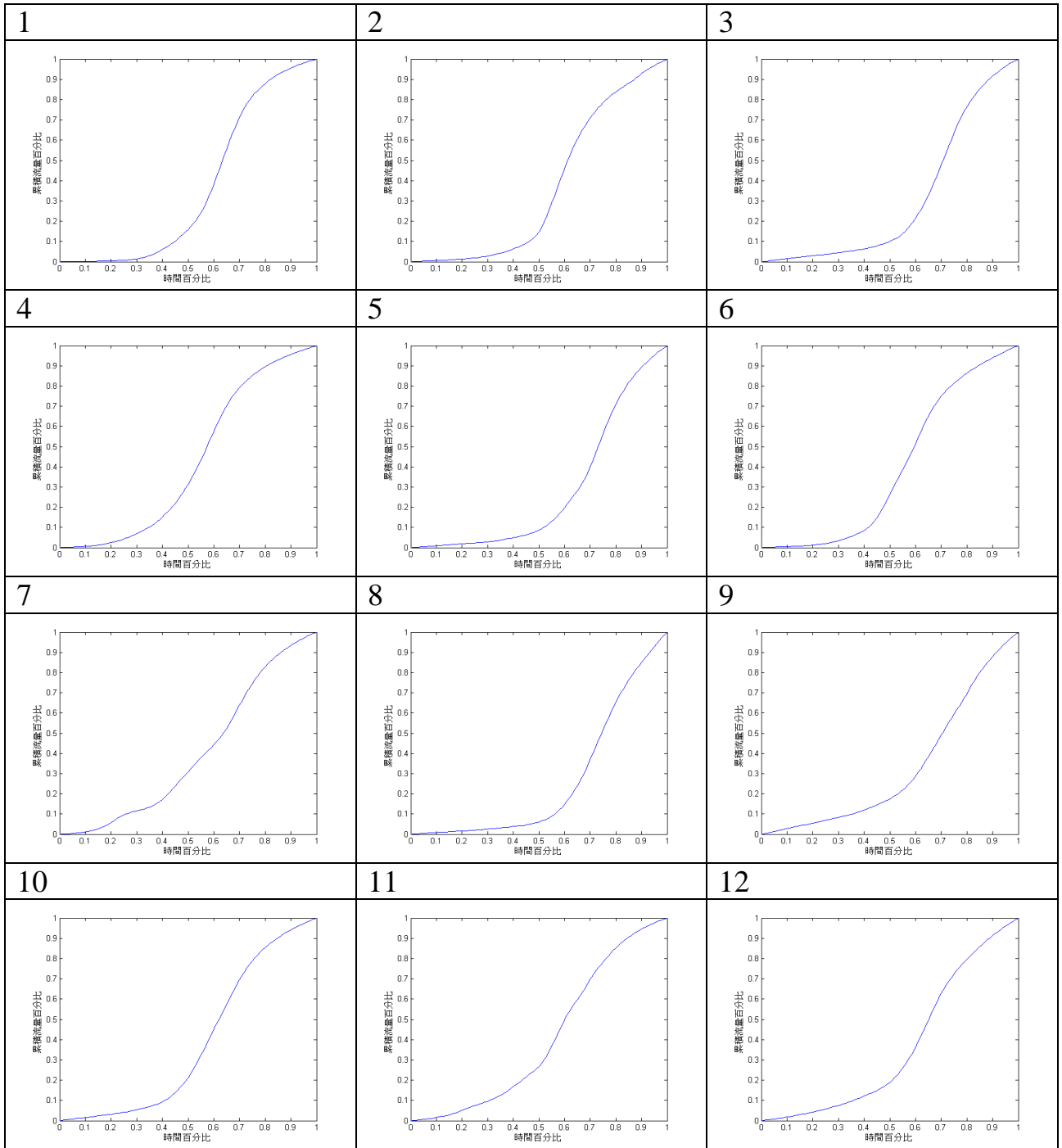


圖 4-2-2 SOM 之流量特徵曲線圖

4-3 颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式

石門水庫集流時間僅有數小時，要推估整場颱風之流量歷線實屬不易，但由颱風預報得知，在預報 3 天、5 天後或更長時間的颱風路徑雖不精確，但其完整之颱風預報路徑仍有助於了解颱風可能侵襲之區域，進而能粗略預測集水區降雨情況，故對颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式有其重要性。本計畫採用氣象局在颱風侵台期間內所公布之以颱風警報單(如圖 4-3-1)未來 12、24、48、72 小時預報路徑視為颱風路徑，使用該警報單之預報路徑比對 SOM 路徑分類模式，而結束時間依警報單上之預報時間(最長 72 小時)或離開定義網格範圍。由 SOM 將預報路徑分類後，以該時刻之累積時間百分比對應該神經元之流量特徵曲線，可得該時刻之累積流量百分比(如圖 4-3-2 所示)，再以該時刻之累積流量可推求出颱風侵台期間之總流量與流量歷程(圖 4-3-3 所示)，模式流程如圖 4-3-4 所示。此外，本模式可根據中央氣象局所更新之最新颱風預報路徑即時更新路徑分類以修正流量歷程預測。

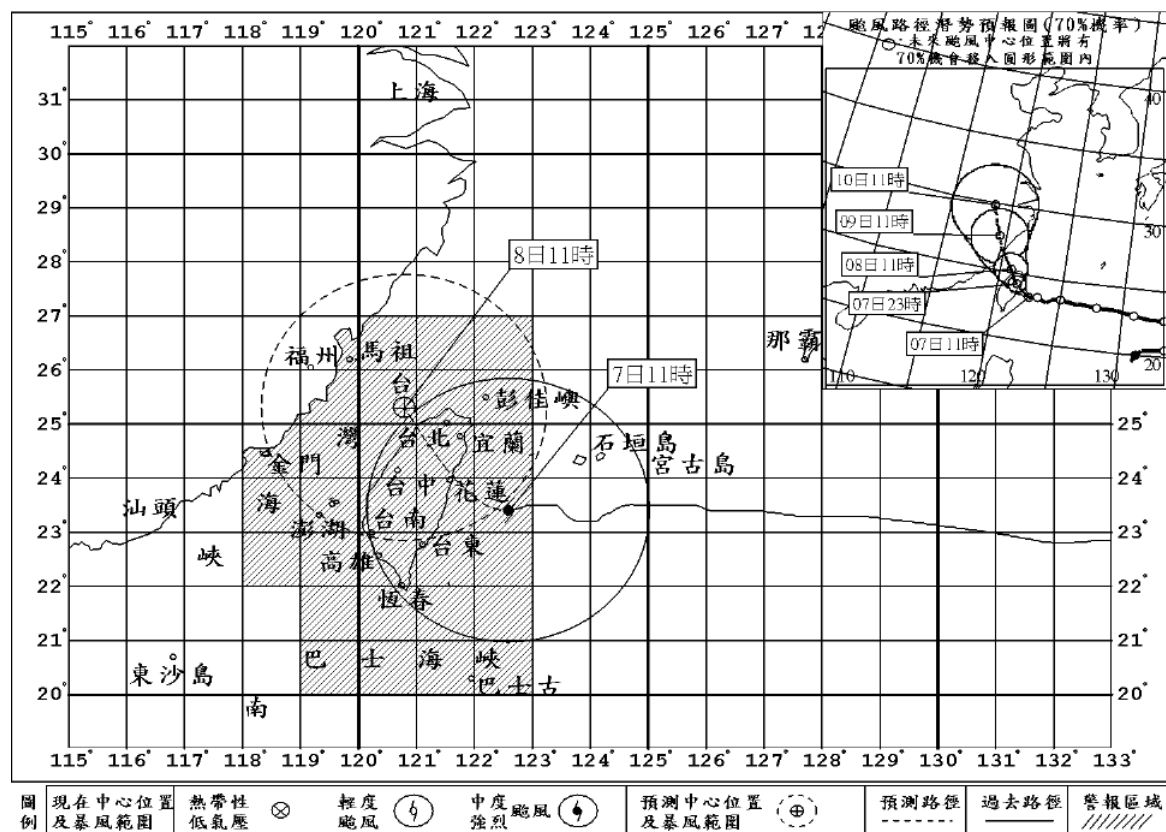


圖 4-3-1 颱風警報單預報路徑

颱風警報單使用步驟：

1. (該預報時間/預估颱風在網格內總時間) = 時間累積百分比
2. 從流量特徵圖可對應到該時間累積百分比之相對應累積流量百分比。
3. 該時刻之實際累積流量除以步驟 2 之累積流量百分比可得總流量。
4. 獲得總流量後，可由流量特徵曲線換算預報期間每小時之入流量。

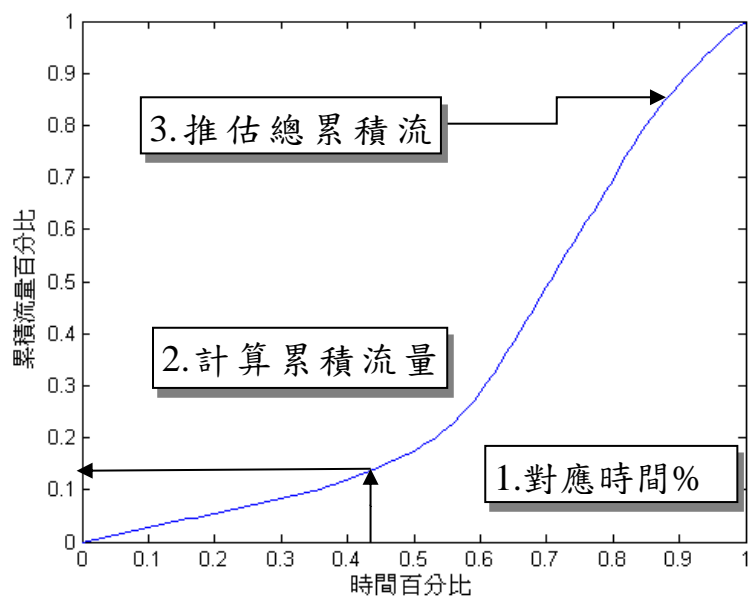


圖 4-3-2 流量特徵示意圖

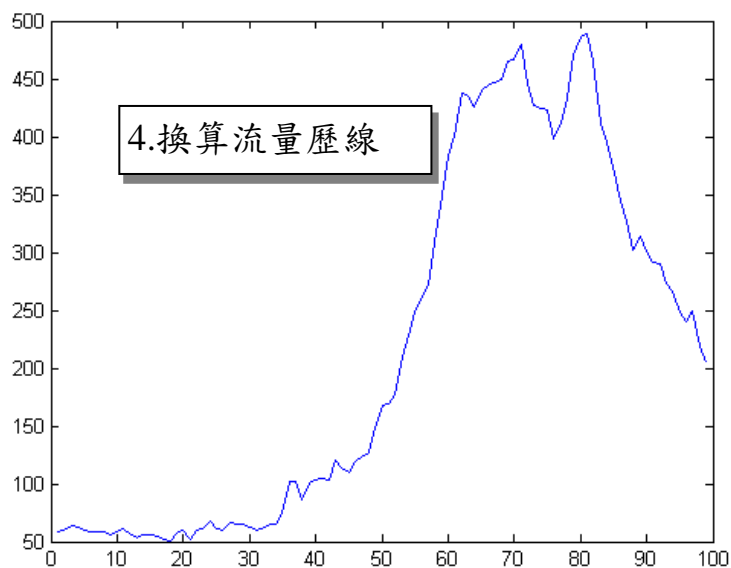


圖 4-3-3 預測之流量歷線

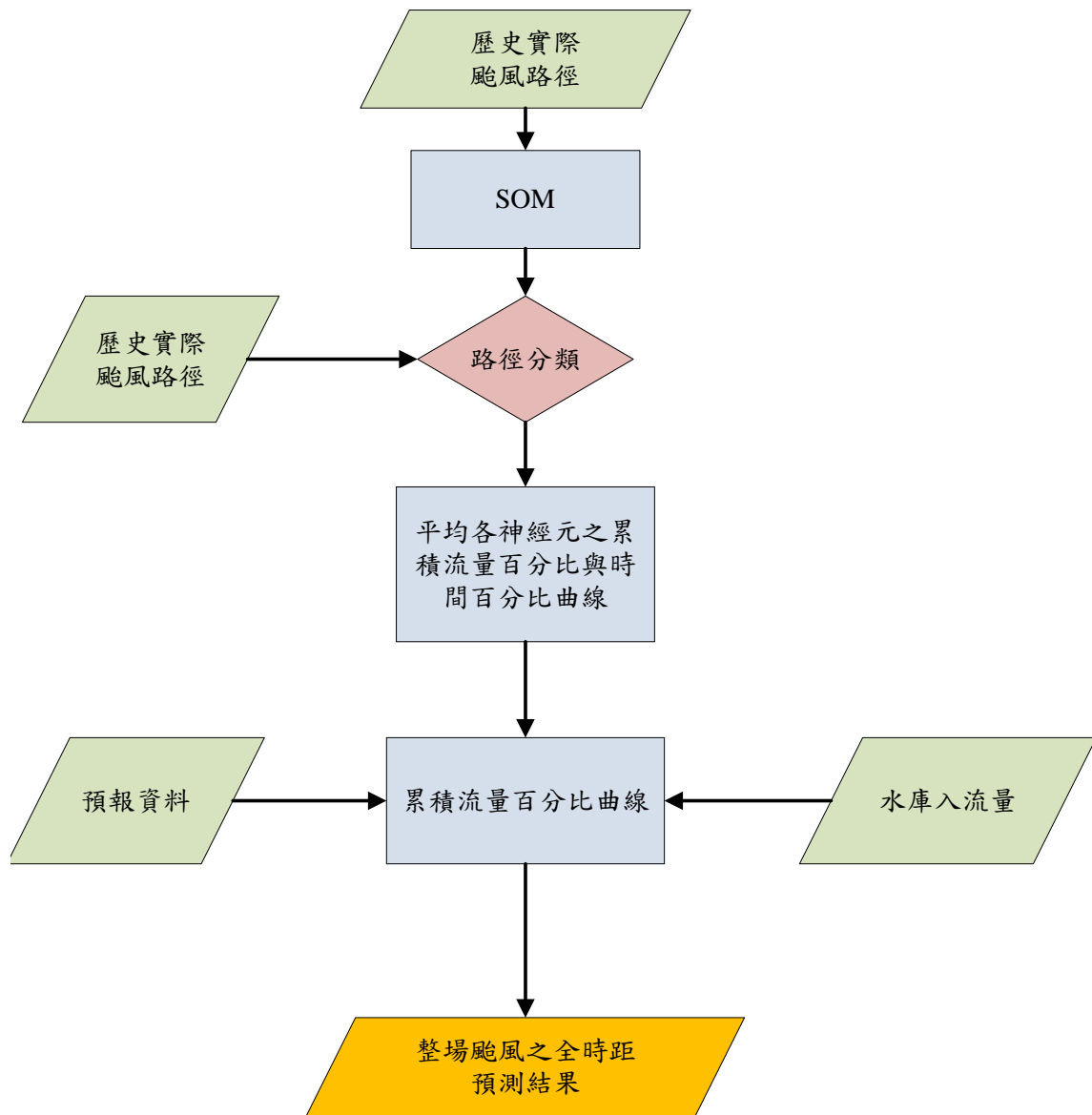


圖 4-3-4 颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式流程圖

本計畫以 2008 辛樂克及 2013 菲特颱風為例，以該颱風三張不同時刻之警報單預報路徑輸入颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式，並比較模式輸出結果與觀測結果之差異。

2008 辛樂克颱風

表 4-3-1 為模式輸出結果比較表，包含三張警報單預報路徑之流量預測結果及以真實路徑對應警報單時間之流量預測結果；圖 4-3-5 為三張颱風警報單之預報路徑圖及一張颱風已遠離臺灣地區之預報路徑圖；圖 4-3-6 為颱風實際路徑圖。

表 4-3-1 2008 辛樂克颱風模式輸出結果比較表

預報時間	(a)09/12 23:30	(b)09/13 14:30	(c)09/13 23:30	(a)09/12 23:30	(b)09/13 14:30	(c)09/13 23:30
預報路徑分類	4	7	4	實際路徑分類：10		
預測路徑分類 累積流量(cms)	50,706	91,196	159,526	30,882	148,311	214,580
預測累積流量 佔實際總流量 之百分比	28%	52%	91%	17%	85%	122%
洪峰時間差(hr)	-10	22	11	-5	5	10
預測時距(hr)	71					

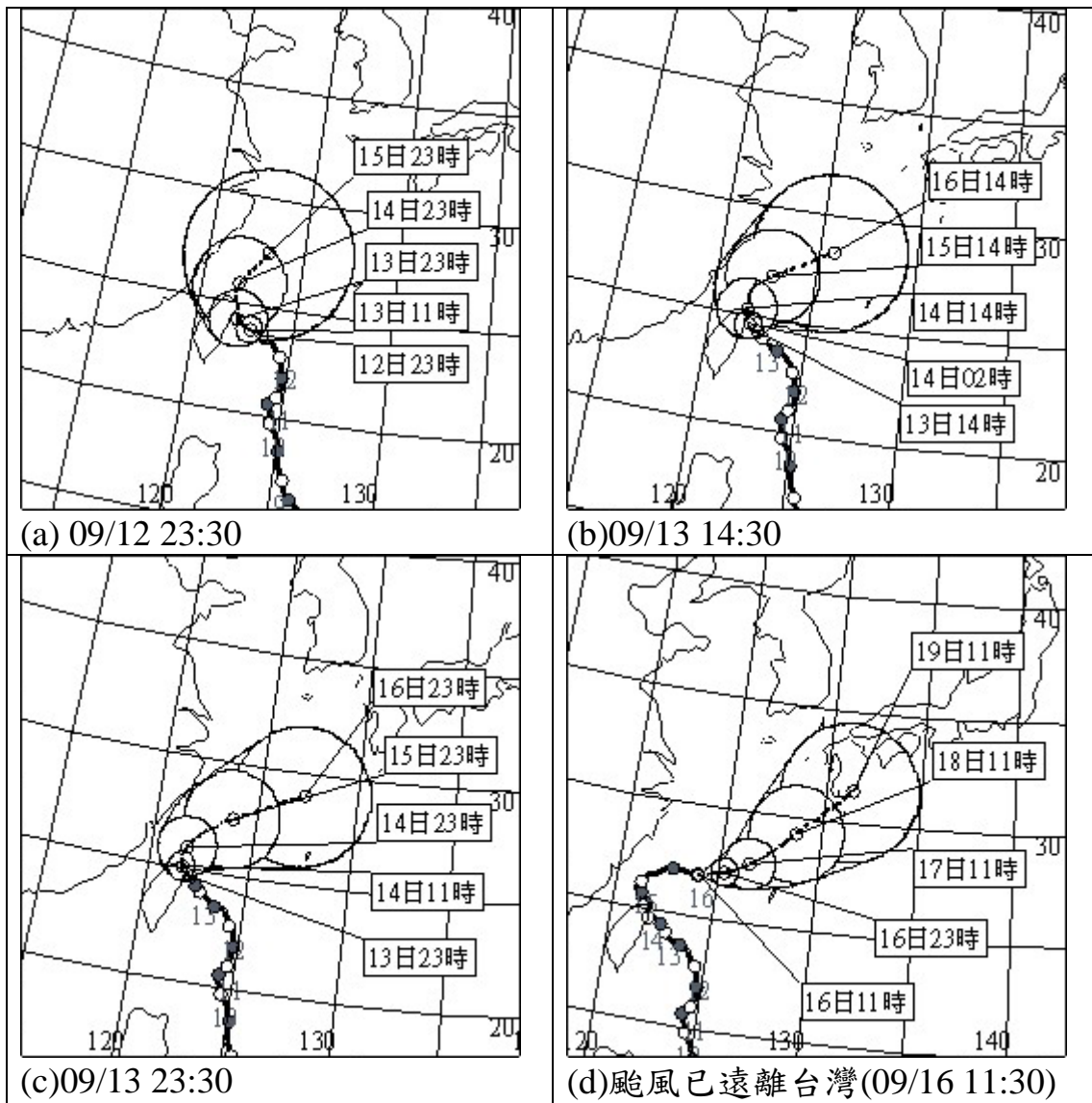


圖 4-3-5 2008 辛樂克颱風警報單之預報路徑圖

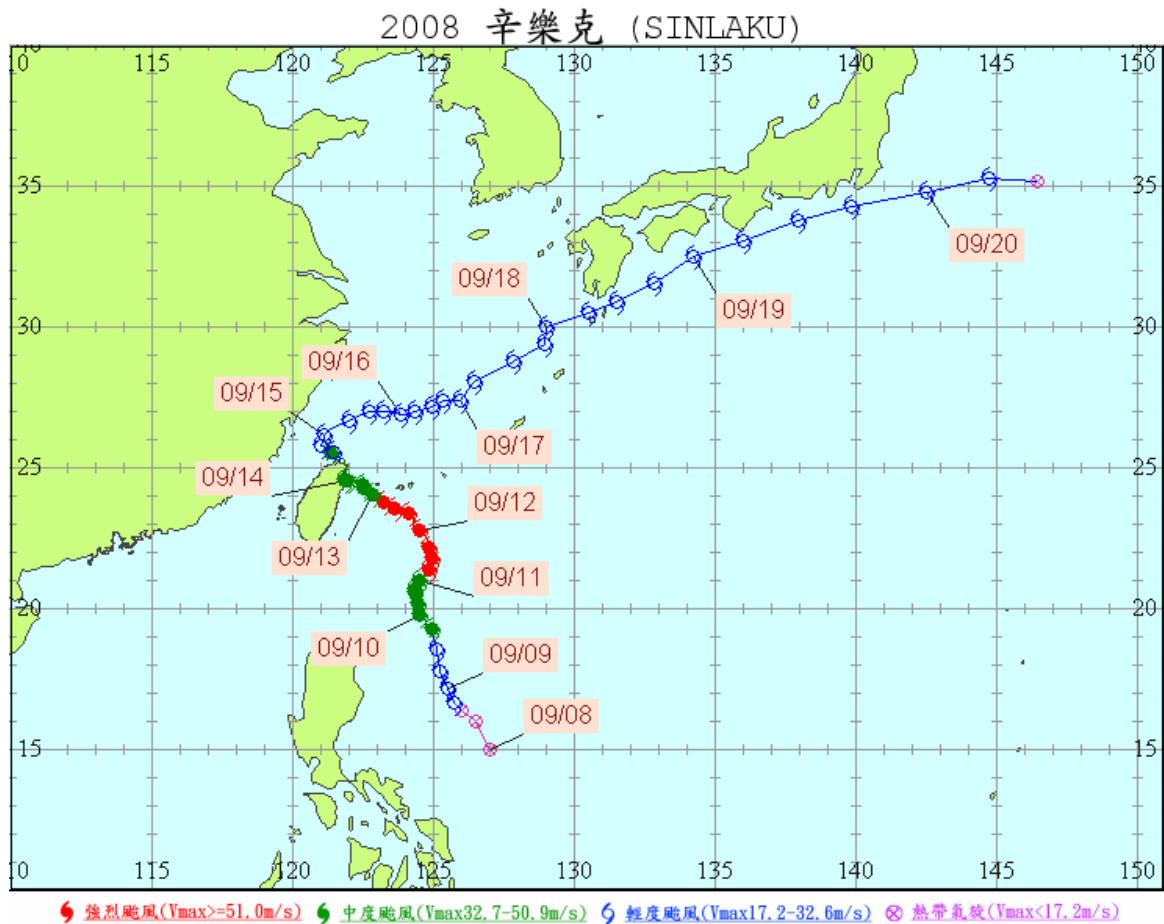
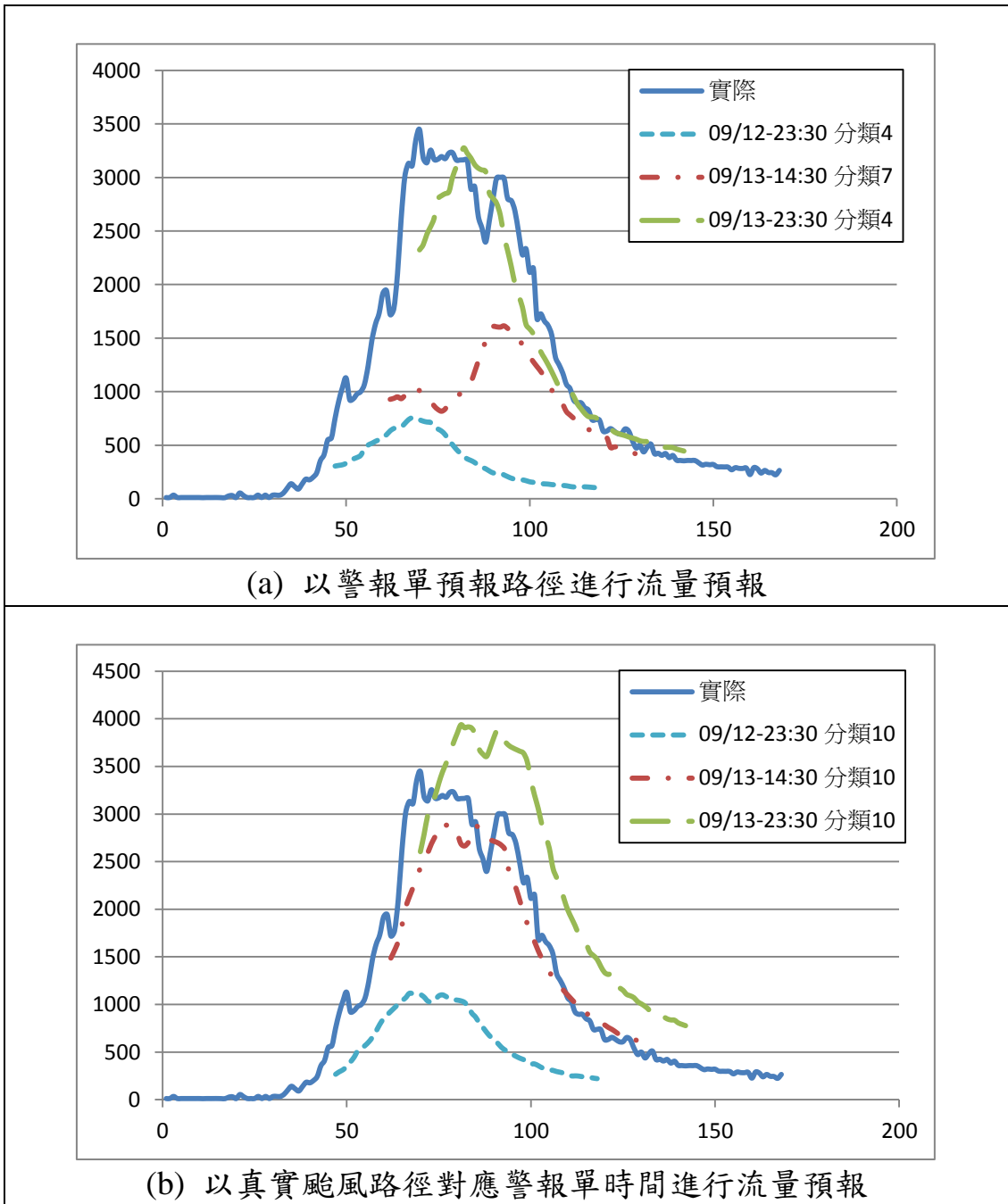


圖 4-3-6 2008 辛樂克颱風實際路徑圖

以此三張颱風警報單來討論整場事件入流歷程預測結果(圖 4-3-7)，9 月 12 日 23 時 30 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 4 神經元，與實際路徑圖較為相似，因其預報路徑時颱風並未對水庫造成明顯的降雨，導致模式在推估全時距流量時有明顯低估的情況，但其趨勢與實際流量歷程是相似的；9 月 13 日 14 時 30 分發布之警報單中，預報路徑分類分別為第 7 個神經元，與實際路徑圖差異較大(較為偏北)，使模式所輸出之流量歷程與實際流量歷程有相當的誤差；最後一張 9 月 13 日 23 時 30 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 4 神經元，與第一張警報單相同，由於集水區已有明顯降雨，使其預測之總流量與實際總流量較為接近(如表 4-3-1 所示)。由本模式得知，隨著颱風逐漸接近台灣，集水區流量逐漸加大後，預報數值越接近真實流量(如圖 4-3-7 b)，在使用 SOM 將預報路徑分類時，警報單預報路徑之正確性對模式影響極大，隨著氣象局對颱風路徑之修正，本模式預測值也越趨近於真實流量(圖 4-3-7 a)。



2013 蘇力颱風

表 4-3-2 為模式輸出結果比較表，包含三張警報單預報路徑之流量預測結果，由於預報路徑分類與真實路徑分類相同，故省略真實路徑分類對應警報單時間之流量預測結果；圖 4-3-8 為三張颱風警報單之預報路徑圖及一張颱風已遠離臺灣地區之預報路徑圖；圖 4-3-9 為颱風實際路徑圖。

表 4-3-2 2013 蘇力颱風模式輸出結果比較表

預報時間	(a)07/13 00:15	(b)07/13 10:00	(c)07/13 18:00
預報路徑分類 (與實際路徑分類同)	2	2	2
預測路徑分類累積 流量(cms)	16,664	84,204	68,089
預測累積流量佔實 際總流量之百分比	28%	141%	114%
洪峰時間差(hr)	2	2	2
預測時距(hr)	62		

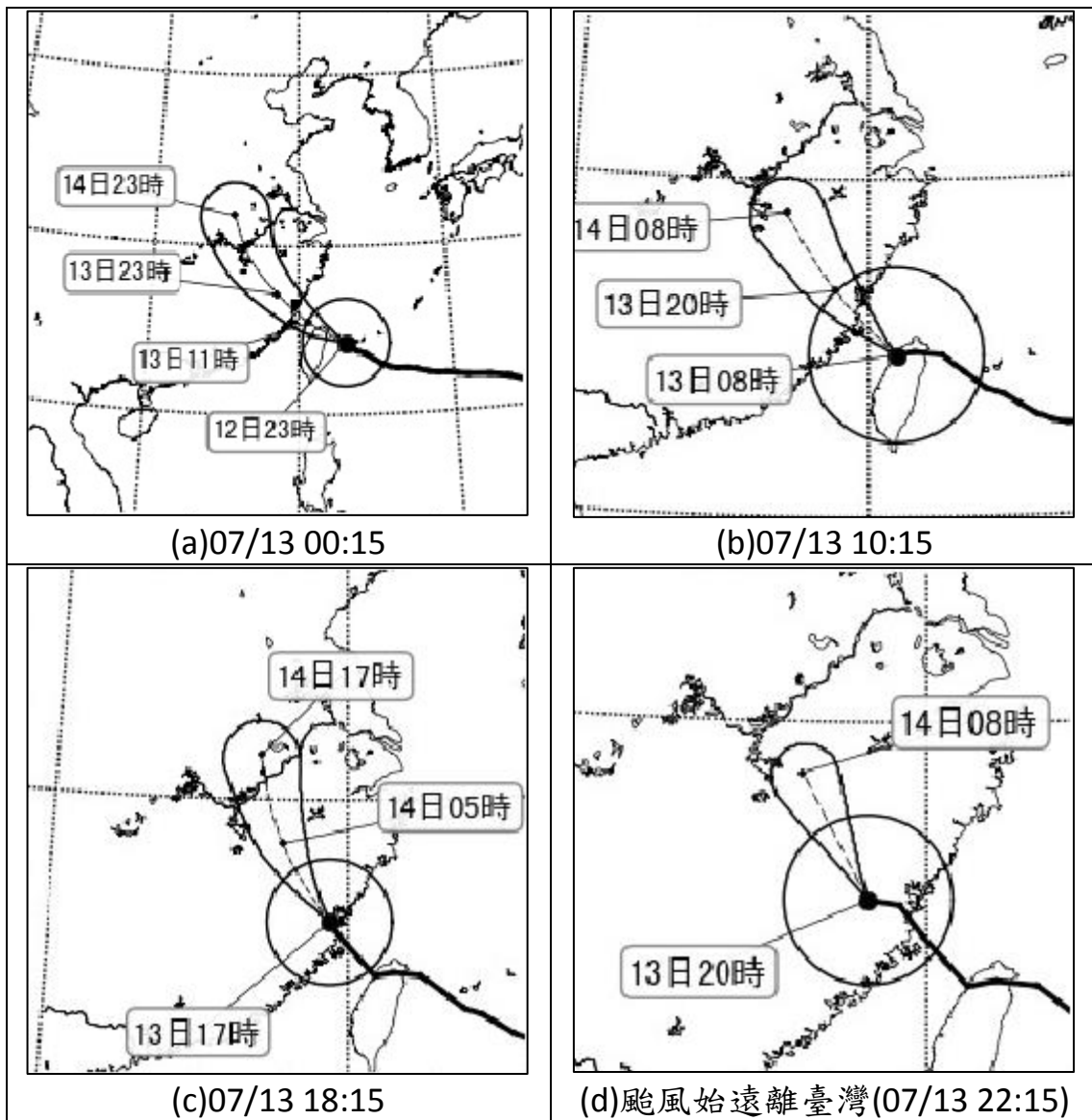


圖 4-3-8 2013 蘇力颱風警報單之預報路徑圖

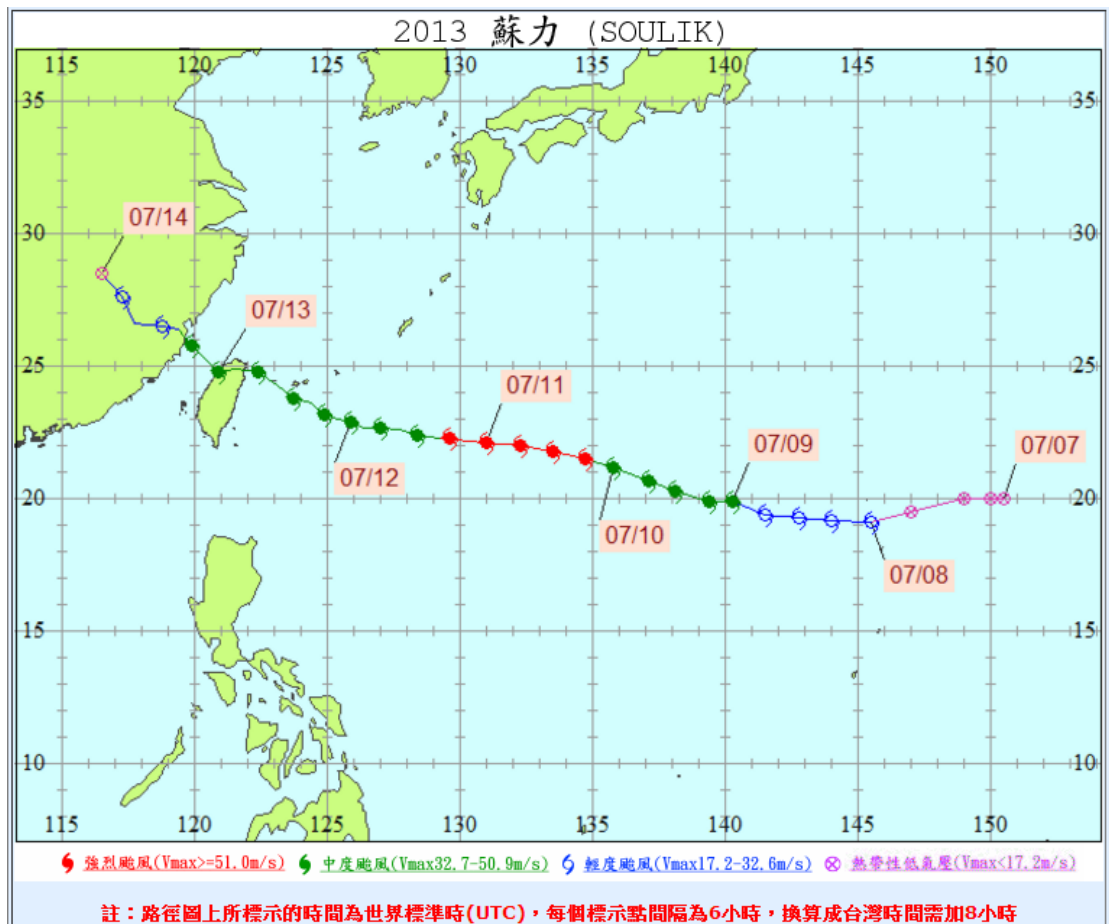


圖 4-3-9 2013 蘇力颱風實際路徑圖

以 2013 蘇力颱風的三張颱風警報單來討論整場事件入流歷程預測結果(圖 4-3-10)，蘇力颱風警報單預測颱風路徑與實際路徑相當一致，皆分類為第 2 神經元。07 月 13 日 00 時 15 分颱風對水庫流量尚未有明顯影響，使得推估全時距流量有低估情況；07 月 13 日 10 時 15 分，而模式所輸出之流量歷程較為接近實際流量歷程，整體趨勢與前一時刻比較更接近實際流量歷程；最後一張 07 月 13 日 18 時 15 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 2 神經元，實際路徑分類為第 2 神經元，所推估之全時距流量歷線也更與實際歷線相似，因推估時間越接近而累積總流量之誤差則隨之減小，呈現出較佳之結果。由本模式得知，在使用 SOM 將預報路徑分類時，警報單預報路徑之正確性對模式影響極大，隨著氣象局對颱風路徑之修正，本模式預測值也越趨近於真實流量，圖 4-3-10 所示。

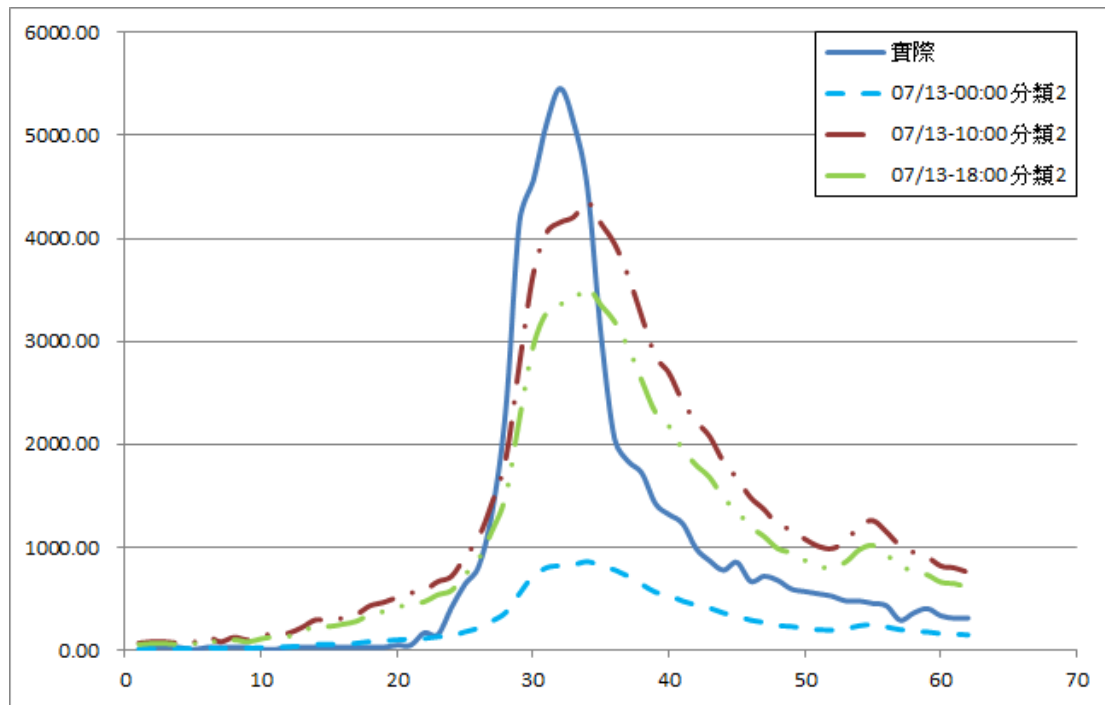


圖 4-3-10 2013 蘇力颱風模式預測結果

2013潭美颱風

表 4-3-3 為模式輸出結果比較表，包含三張警報單預報路徑之流量預測結果，由於預報路徑分類與真實路徑分類相同，故省略真實路徑分類對應警報單時間之流量預測結果；圖 4-3-11 為三張颱風警報單之預報路徑圖及一張颱風已遠離臺灣地區之預報路徑圖；圖 4-3-12 為颱風實際路徑圖。

表 4-3-3 2013 潭美颱風模式輸出結果比較表

預報時間	(a)08/20 21:15	(b)08/21 18:15	(c)08/21 23:30
預報路徑分類	1	1	1
預測路徑分類 累積流量(cms)	125,846	27,579	30,864
預測累積流量 佔實際總流量 之百分比	3.07	0.67	0.75
洪峰時間差(hr)	-1	-1	-1
預測時距(hr)	56		

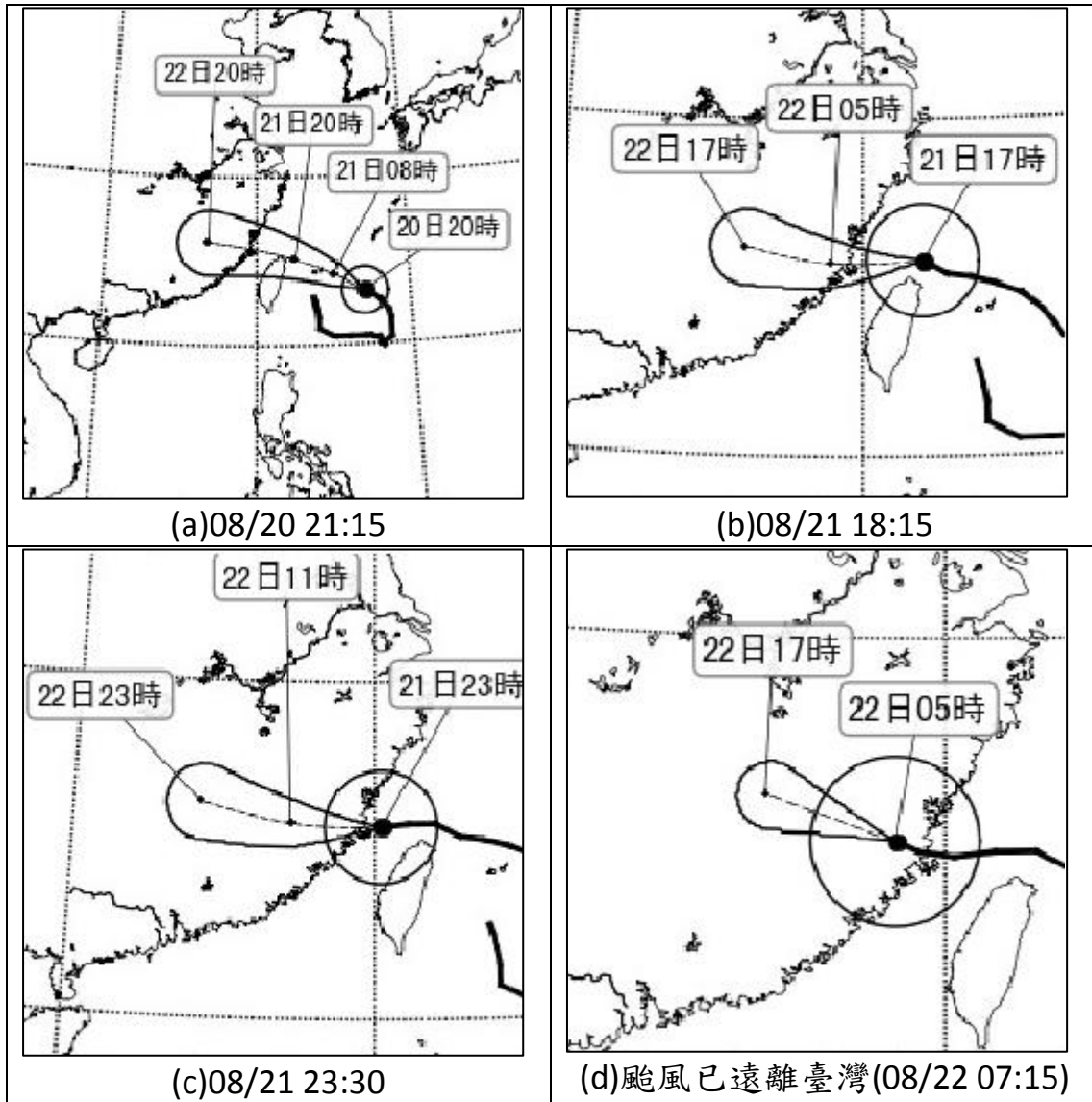


圖 4-3-11 2013 潭美颱風警報單之預報路徑圖

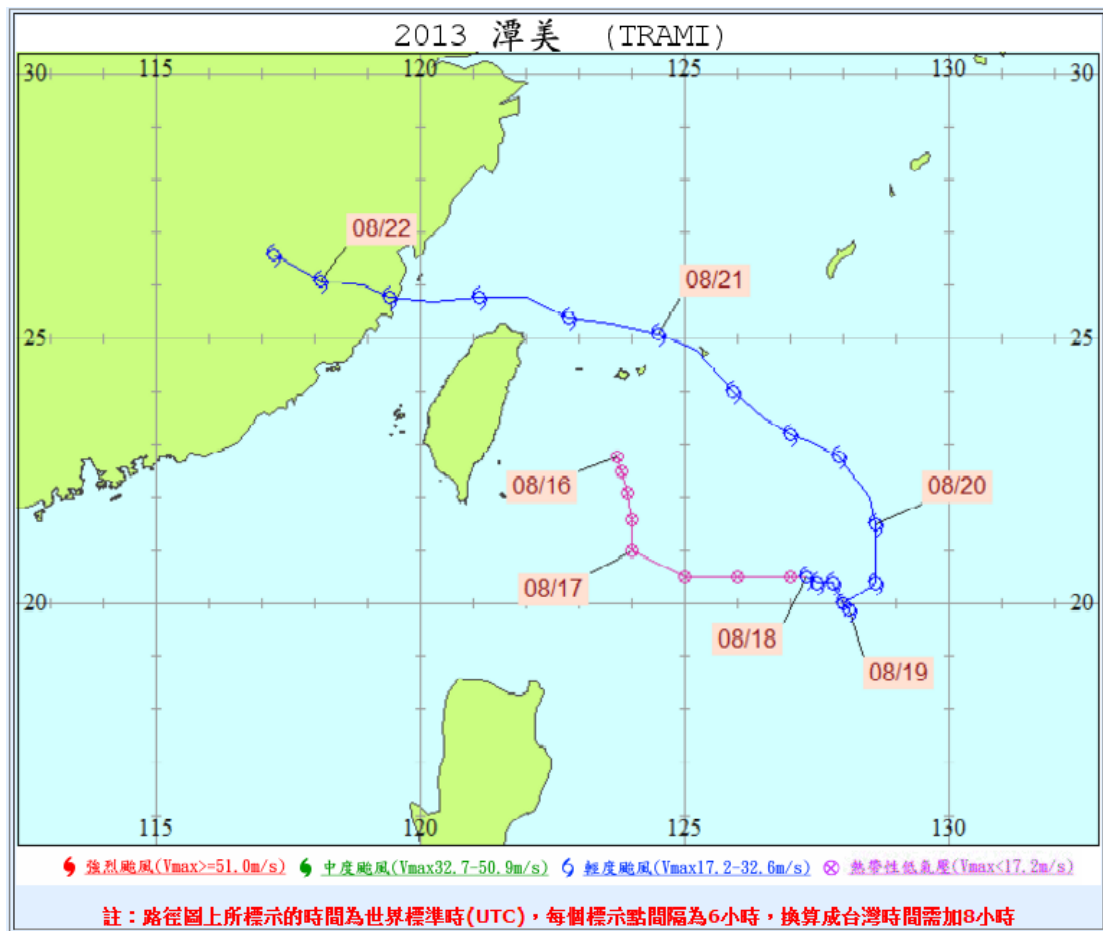


圖 4-3-12 2013 潭美颱風實際路徑圖

以 2013 潭美颱風的三張颱風警報單來討論整場事件入流歷程預測結果(圖 4-3-13)，08 月 20 日 21 時 15 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 1 神經元，與實際路徑圖較相似，故模式在推估全時距流量時即可掌握整體趨勢及洪峰時間；08 月 21 日 18 時 15 分發布之警報單中，預報路徑分類仍為第 1 個神經元，與前一時刻之路徑預報相似，而實際路徑分類也為第 1 神經元，而模式所輸出之流量歷程與實際流量歷程在集水區有明顯之降雨後推估較為準確，推估累積流量也較接近實際累積流量；最後一張 08 月 21 日 23 時 30 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 1 神經元，實際路徑分類為第 1 神經元，所推估之全時距流量歷線也與實際歷線相似，因推估時間越接近而累積總流量之誤差則隨之減小，呈現出較佳之結果。由本模式得知，在使用 SOM 將預報路徑分類時，警報單預報路徑之正確性對模式影響極大，隨著氣象局對颱風路徑之修正，本模式預測值也越趨近於真實流量，圖 4-3-13 所示。

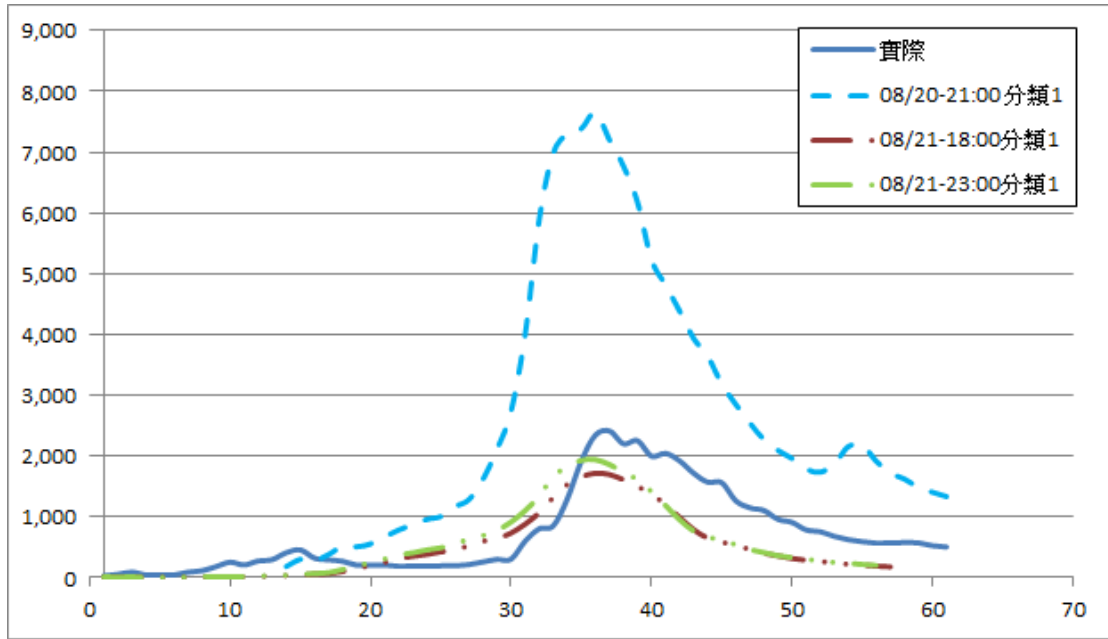


圖 4-3-13 2013 潭美颱風模式預測結果

2013 菲特颱風

表 4-3-4 為模式輸出結果比較表，包含三張警報單預報路徑之流量預測結果，由於預報路徑分類與真實路徑分類相同，故省略真實路徑分類對應警報單時間之流量預測結果；圖 4-3-14 為三張颱風警報單之預報路徑圖及一張颱風已遠離臺灣地區之預報路徑圖；圖 4-3-15 為颱風實際路徑圖。

表 4-3-4 2013 菲特颱風模式輸出結果比較表

預報時間	(a)10/06 11:30	(b)10/06 20:30	(c)10/0 00:30
預報路徑分類	4	4	4
預測路徑分類 累積流量(cms)	31,155	27,638	27,513
預測累積流量 佔實際總流量 之百分比	94%	93%	99%
洪峰時間差(hr)	0	-2	-1
預測時距(hr)	55		

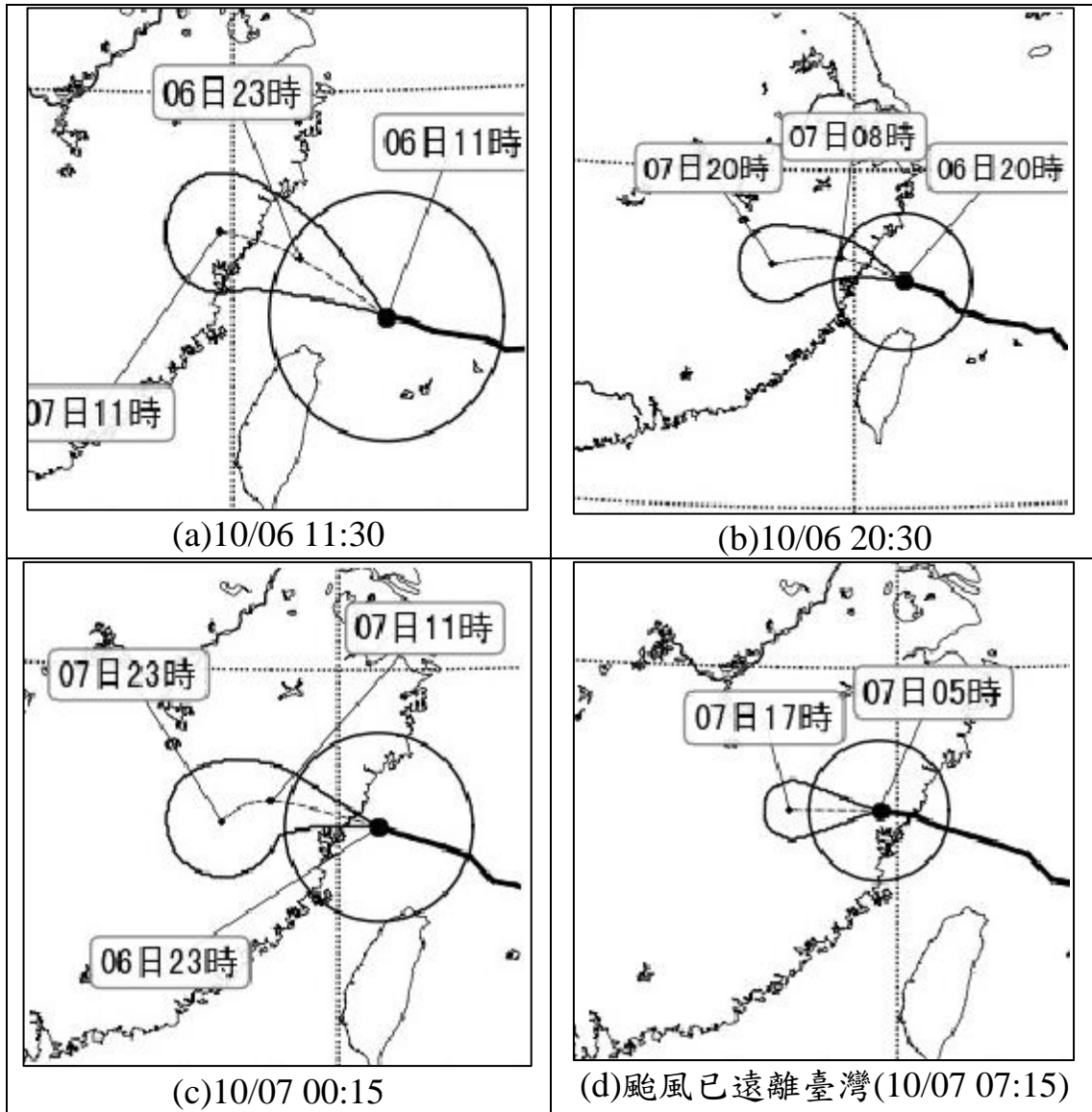


圖 4-3-14 2013 菲特颱風警報單之預報路徑圖

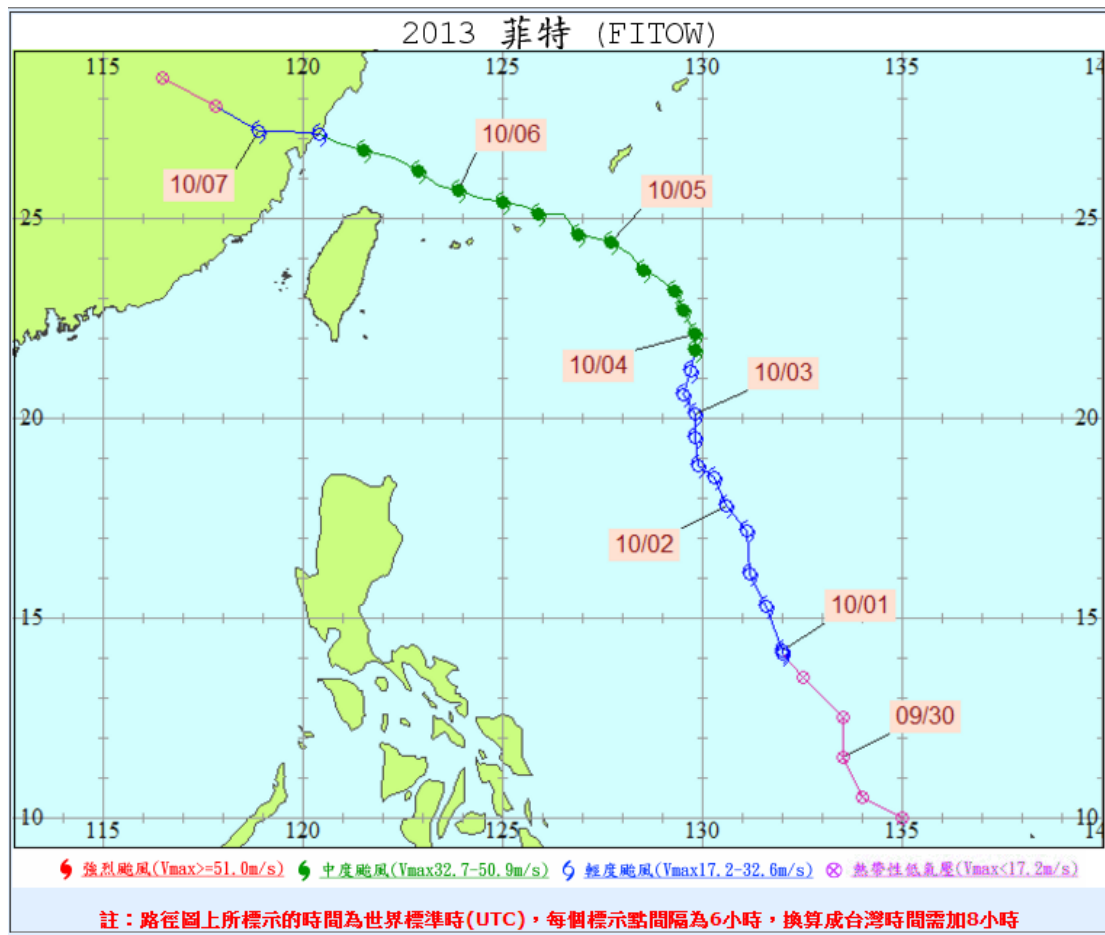


圖 4-3-15 2013 菲特颱風實際路徑圖

以 2013 菲特颱風的三張颱風警報單來討論整場事件入流歷程預測結果(圖 4-3-16)，10 月 6 日 11 時 30 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 4 神經元，與實際路徑圖較為相似，故模式在推估全時距流量時即可掌握其洪峰及累積總流量；10 月 6 日 20 時 30 分發布之警報單中，預報路徑分類仍為第 4 個神經元，與前一時刻之路徑預報相似，而實際路徑分類也為第 4 神經元，而模式所輸出之流量歷程與實際流量歷程極為相似，累積總流量之誤差約為 10% 以內；最後一張 10 月 7 日 0 時 15 分發布之警報單預測颱風路徑分類為第 4 神經元，實際路徑分類為第 4 神經元，所推估之全時距流量歷線也與實際歷線相似，而累積總流量之誤差則隨之減小，呈現出較佳之結果。由本模式得知，在使用 SOM 將預報路徑分類時，警報單預報路徑之正確性對模式影響極大，隨著氣象局對颱風路徑之修正，本模式預測值也越趨近於真實流量，如圖 4-3-16 所示。

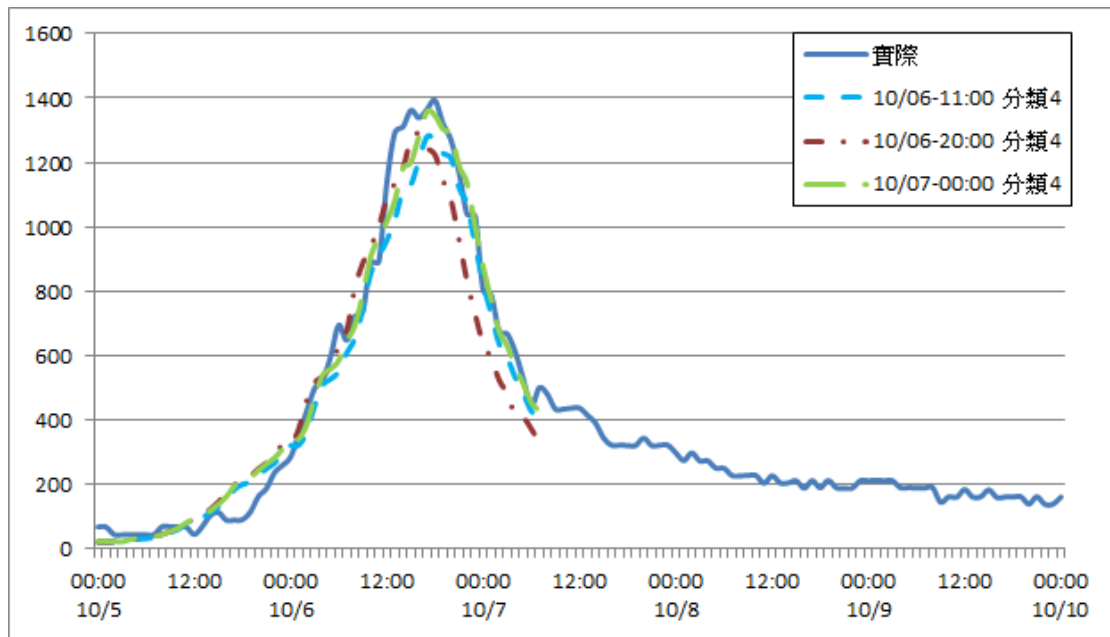


圖 4-3-16 2013 菲特颱風模式預測結果

五、預先調節性放水策略分析

預先調節性放水之主要目的為減少水庫防洪操作風險，同時也需考慮後續水庫供水功能；預先調節性放水若過度放水可能造成水庫儲水量不足，影響後續水庫正常的供水營運狀況；預先調節性放水若未提早預留蓄洪空間，可能提高水庫防洪操作風險。因此，本章節以歷史颱風流量歷程套配所研判之流量歷程，以不同的起始水位下進行防洪操作模擬，研擬出一套預先調節性放水決策系統之策略分析模組，以提供颱風來臨前水庫操作之參考。

預判是否進行調節性放水之流程，在海上颱風警報或豪雨特報發布後，依據中央氣象局之預報資訊結合第四章歷史颱風路徑及流量歷程套配所預測出之當前颱風流量歷程，並遵守「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」等相關規範進行模擬洩洪操作，分析在不同起始水位情況下，進行水庫防洪操作實際情況模擬，提供操作過程中最高水位、洪峰削減率與操作結束水位為評估指標，作為比較依據，並可根據中央氣象局持續發布之預測路徑，同步修正調節性放水策略，以供水庫操作人員參考。調節性模組流程可分為流量歷程套配及水庫防洪操作模擬兩部分，模組運作流程如圖 5-1 所示，以下分別介紹：

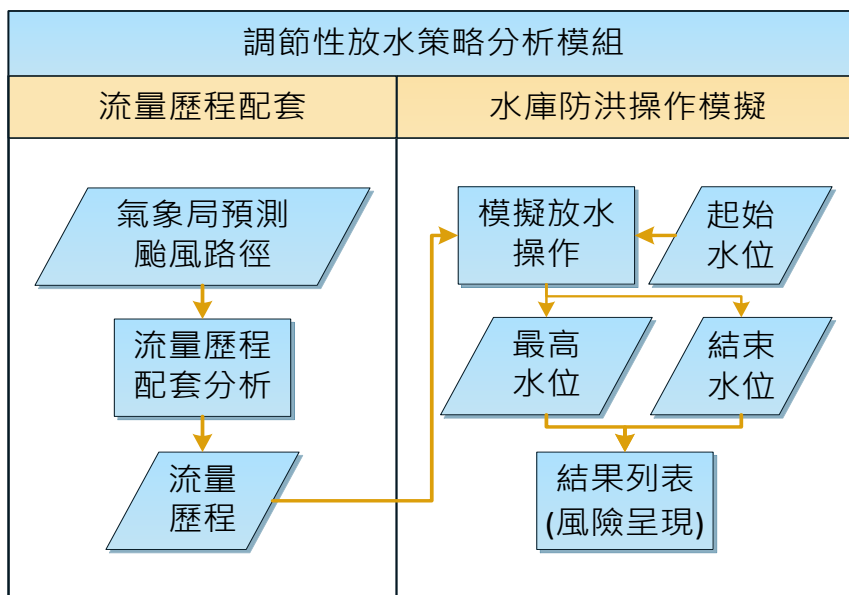


圖 5-1 調節性放水策略分析模組流程圖

5-1 流量歷程套配

本計畫於接收到氣象局發布之最新颱風警報資料即開始進行模式分析，以氣象局預測之颱風路徑進行入流量歷程套配分析，推估該次颱風之累積入流量百分比曲線，並以當時累積流量換算為該次颱風之流量歷程，詳細流程已於第四章中說明，待預報出整場颱風之流量歷程後即可進行下一步驟水庫防洪操作模擬。

5-2 水庫最佳防洪操作

颱洪時期水庫排洪設施閘門之操作為一具有連續性且急迫性的複雜問題，當颱風來臨時，石門水庫管理中心除需了解集水區內各方面之水文資訊外，並在種種法令規範下，為達到降低下游洪峰量及期末蓄水之目的，必須經由繁複計算及經驗判斷後方能決定閘門開度以獲得實際放流量，如圖 5-2-1 颱洪時期排洪設施閘門操作流程示意圖。

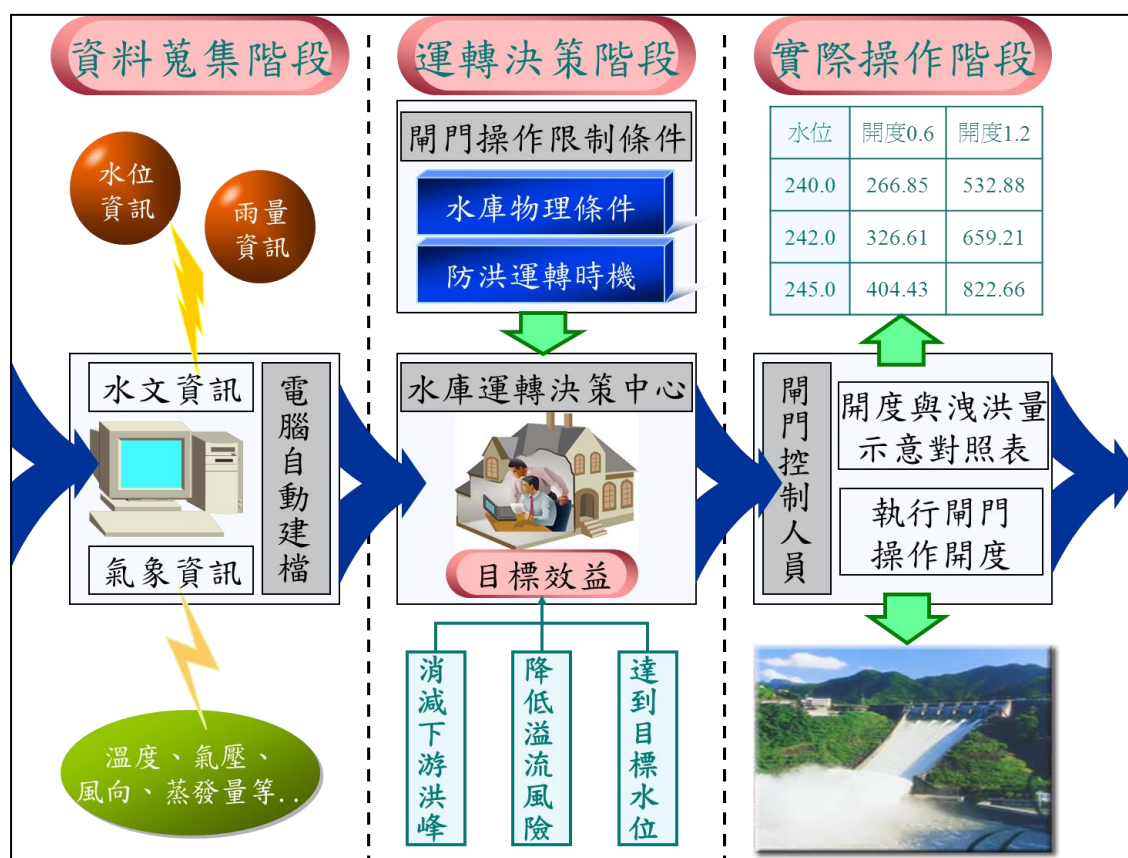


圖 5-2-1 颱洪時期排洪設施閘門操作流程示意圖

本計畫以智慧型水庫防洪模糊控制模式 (Intelligent Flood Operation Fuzzy Control Model, IFOFCM) (許弘政, 2007; Chang et al., 2010)作為水庫操作模式，進行水庫放流模擬，分析不同操作起始水位對洪峰流量及回蓄水位之影響。模式建置所用之水庫放流歷程，以最佳化模式搜尋出歷年颱風事件水庫防洪操作最佳放流歷程，再以該歷程水庫操作模式。整體建置及應用流程如圖 5-2-2 所示。

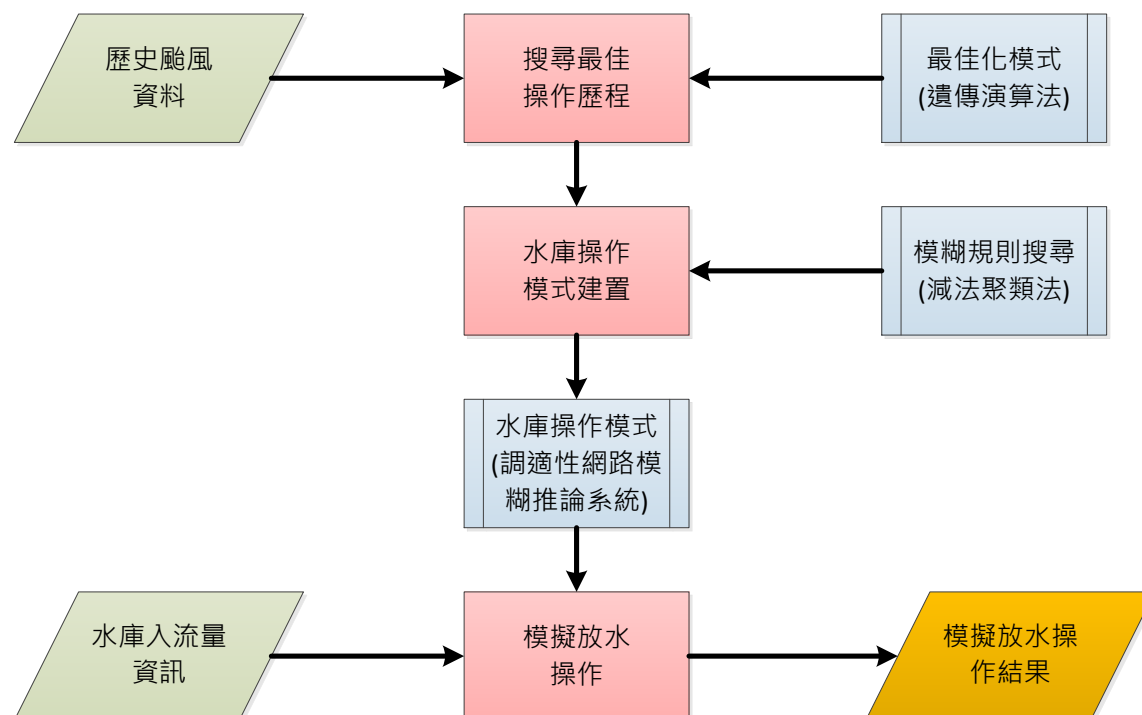


圖 5-2-2 智慧型水庫防洪模糊控制模式建置流程圖

5-2-1 搜尋最佳防洪操作歷程

本計畫依據「石門水庫運用要點」與「石門水庫水門操作規定」，整理歸納出溢洪道閘門操作之相關限制條件，以遺傳演算法 (Genetic Algorithm, GA) ，搜尋最佳防洪放流操作。限制條件可分為兩類：

1. 水庫物理條件
 - (1a)水庫容量限制：水庫蓄水量不得大於水庫最大容量。
 - (1b)水庫放流量限制：受限於水庫之最大可能放流量。
2. 溢洪道閘門操作運轉原則
 - (2a)洪水來臨前階段：水位未達 237.5m 不得開啟溢洪道。

(2b)洪峰發生前階段：

- i. 放流量不大於入流量。
- ii. 放流量增加率不得超過水庫至現時刻之入流量最高增加率。
- iii. 每一時刻之放流量不宜較前一時刻之放流量小。

石門水庫運用要點中定義當水庫入流量大於 1000cms 以上至洪峰後之退水曲線流量為洪峰流量百分之九十前，其最高放流流量，不得大於流入水庫之最高入流量；水庫放流流量之增加率，不得超過該水庫入流量之最高增加率。第 ii 與 iii 點為較嚴格之限制式，避免造成違反相關法規之操作。

(2c)洪峰發生後階段：

- i. 放流量不得大於洪峰流量。
- ii. 每一時刻之放流量不宜較前一時刻之放流量大。

石門水庫運用要點中定義當集水區降雨量明顯降低且水庫入流量逐漸減少，經研判洪峰已過時，放流量不得大於洪峰流量。第 ii 點限制式即考量閘門操作之安全性、合理性與便利性，使閘門能在洪峰發生後階段逐漸關閉。

將上述規則分別轉換成數學限制式，如(5-1)至(5-9)式所示：

$$S_t \leq S_{\max} \quad (5-1)$$

$$O_t \leq O_{\max} \quad (5-2)$$

$$O_t \leq I_t \quad \text{when } t = 1, 2, \dots, t' \quad (5-3)$$

$$O_{t-1} \leq O_t \quad \text{when } t = 1, 2, \dots, t' \quad (5-4)$$

$$O_t - O_{t-1} \leq \Delta I_{\max} \quad \text{when } t = 1, 2, \dots, t' \quad (5-5)$$

$$O_t \leq I_{\max} \quad \text{when } t = t', t' + 1, t' + 2, \dots, n \quad (5-6)$$

$$O_{t-1} \geq O_t \quad \text{when } t = t', t' + 1, t' + 2, \dots, n \quad (5-7)$$

$$H_t \leq 249.5m \quad (5-8)$$

$$S_t, S_{\max}, O_t, O_{\max}, I_t, I_{\max}, \Delta I_{\max}, H_t \geq 0 \quad (5-9)$$

式中 t 表示時間， n 表示颱風事件之歷時， t' 為洪峰發生後階段之開始時間； S_t 、 I_t 、 O_t 、 H_t 分別為 t 時刻之水庫庫容、入流量、放流量及水位； S_{\max} 、 O_{\max} 、 I_{\max} 、 ΔI_{\max} 分別為水庫最大庫容、最大放流量、洪峰入流量與水庫現時刻入流量之最高增加率。(5-1)式為水庫物理條件之(1a)水庫容量限制；(5-2)式為(1b)水庫最大放流量限制；(5-3)式~(5-5)式為(2b)洪峰發生前階段限制條件；(5-6)式及(5-7)式為(2c)洪峰發生後階段限制條件；(5-8)式及(5-9)式為物理條件限制式，所有值均須為正值。

5-2-2 防洪操作模式建置

本計畫選用洪峰流量大於 600cms 之 38 場颱風事件建置水庫操作模式(如表 4-1-1 所示)，經最佳化模式搜尋最佳操作歷程後，以減法聚類分析萃取出模糊規則，建立以調適性網路模糊推論系統(ANFIS)為核心之水庫操作模式，架構如圖 5-2-3 所示。首先輸入水庫入流量、水位、目標(回蓄)水位及洪峰資訊等資訊，由 ANFIS 模式計算模擬放流量，再將該放流量依各排洪設施操作順序及閘門開度-流量率定曲線計算實際放流量，最後由連續方程式 $S_{t-1} = S_t + I_t - O_t$ 及水庫水位-庫容率定曲線計算下一小時水庫水位，往後僅需持續輸入每一小時水庫入流量歷程，即可自動完成整場颱風事件水庫模擬操作。歷史颱風事件模擬操作結果如圖 5-2-4 所示。

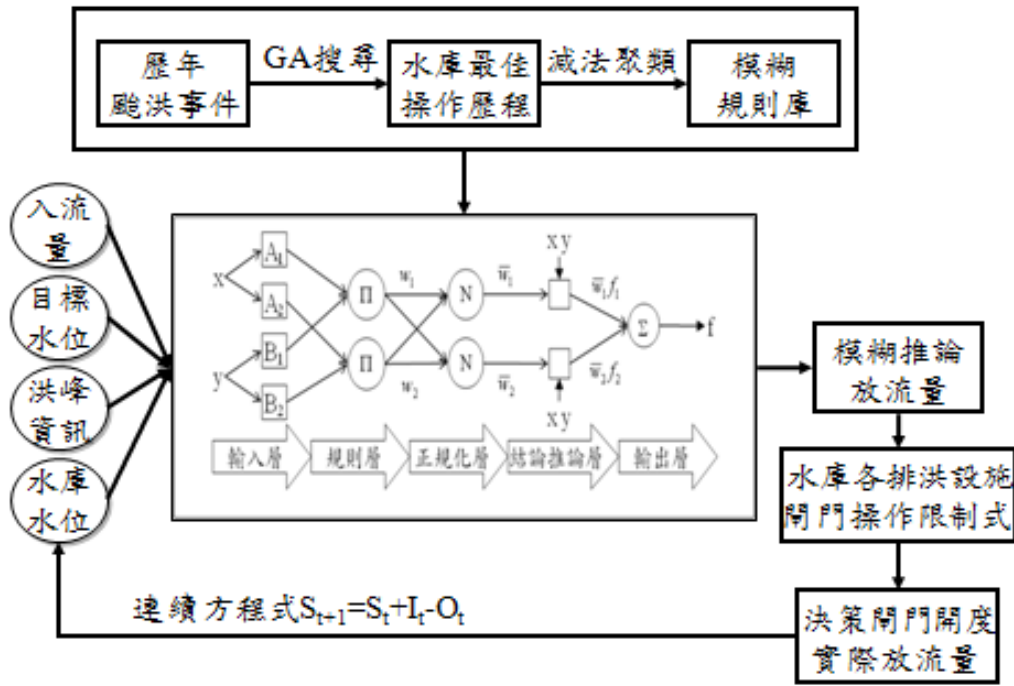
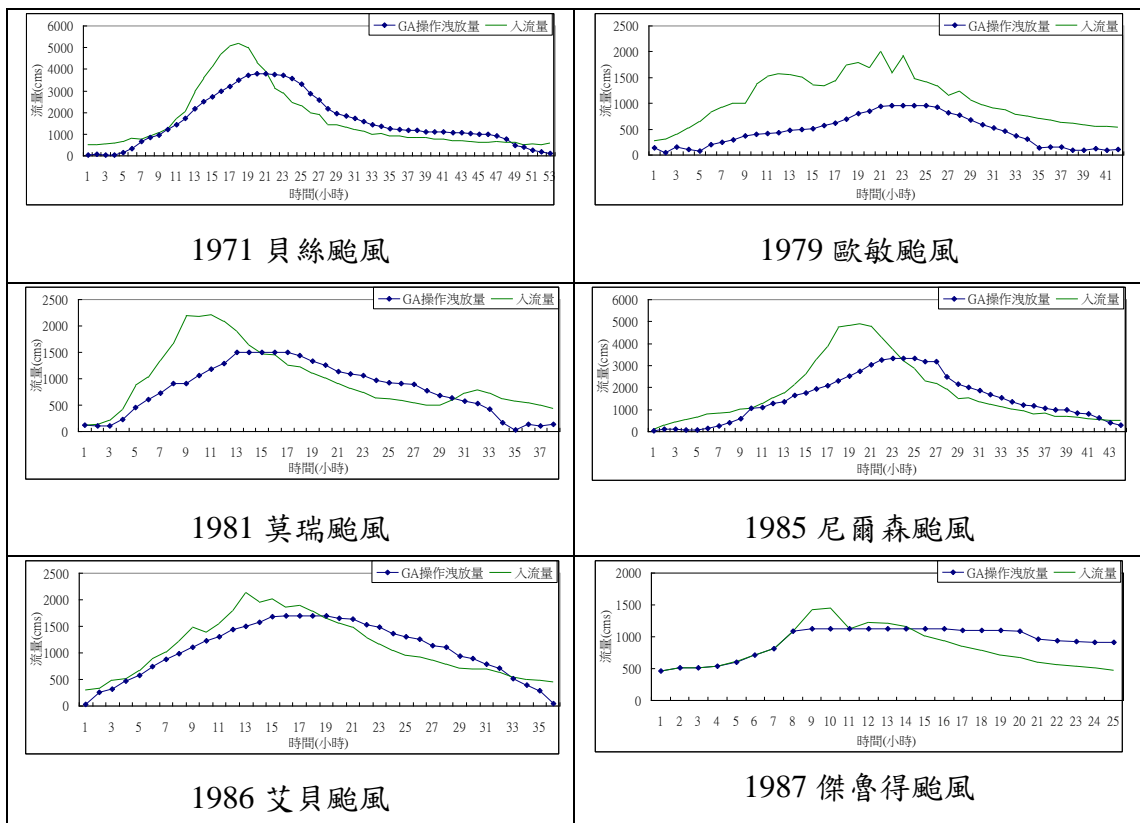
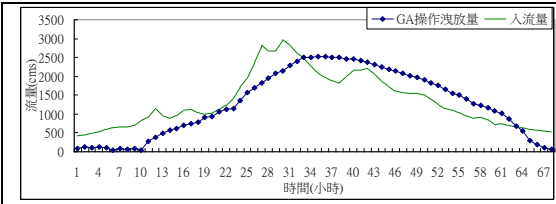
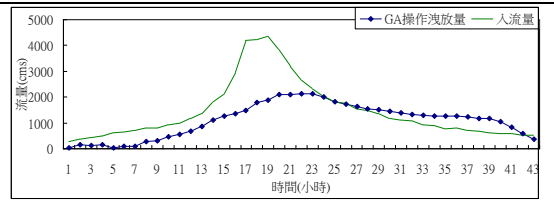


圖 5-2-3 智慧型水庫防洪模式之操作流程圖

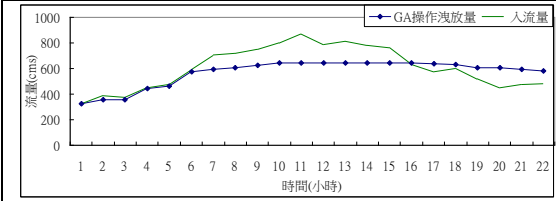




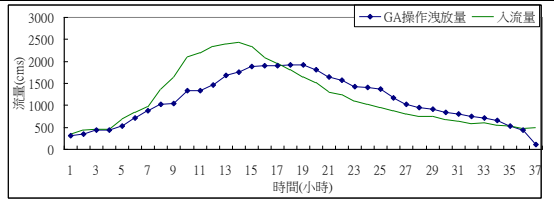
1989 莎拉颱風



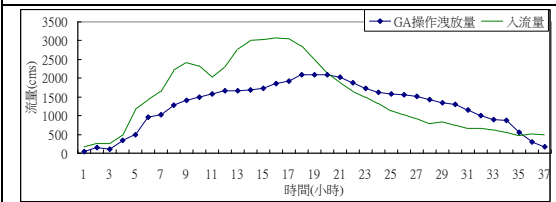
1990 楊希颱風



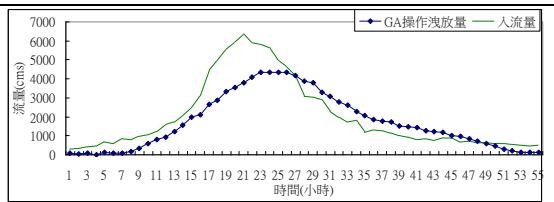
1992 歐馬颱風



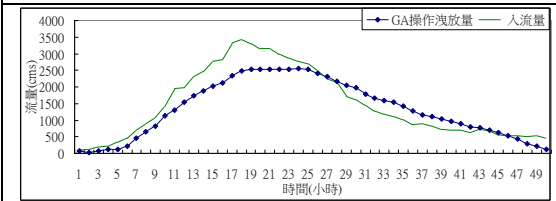
1994 弗雷特颱風



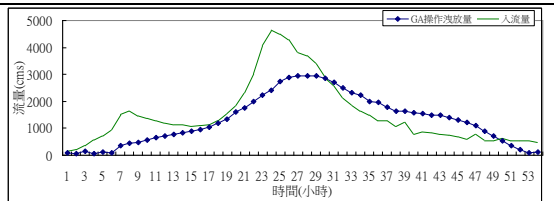
1994 道格颱風



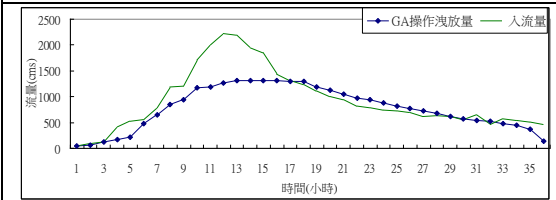
1996 賀伯颱風



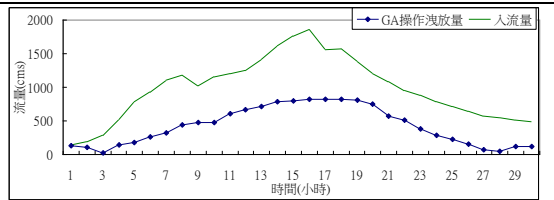
1997 溫妮颱風



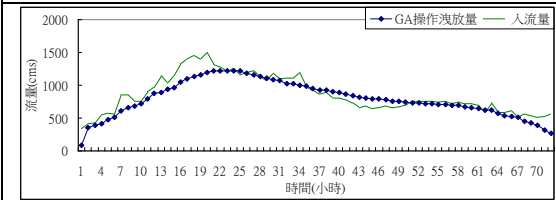
1998 瑞伯颱風



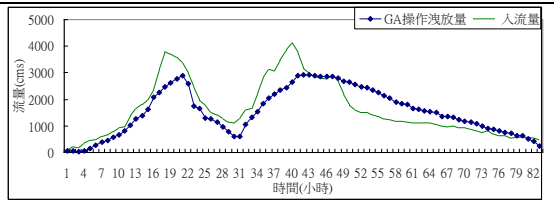
2000 碧利斯颱風



2000 象神颱風



2001 利奇馬颱風



2001 納莉颱風

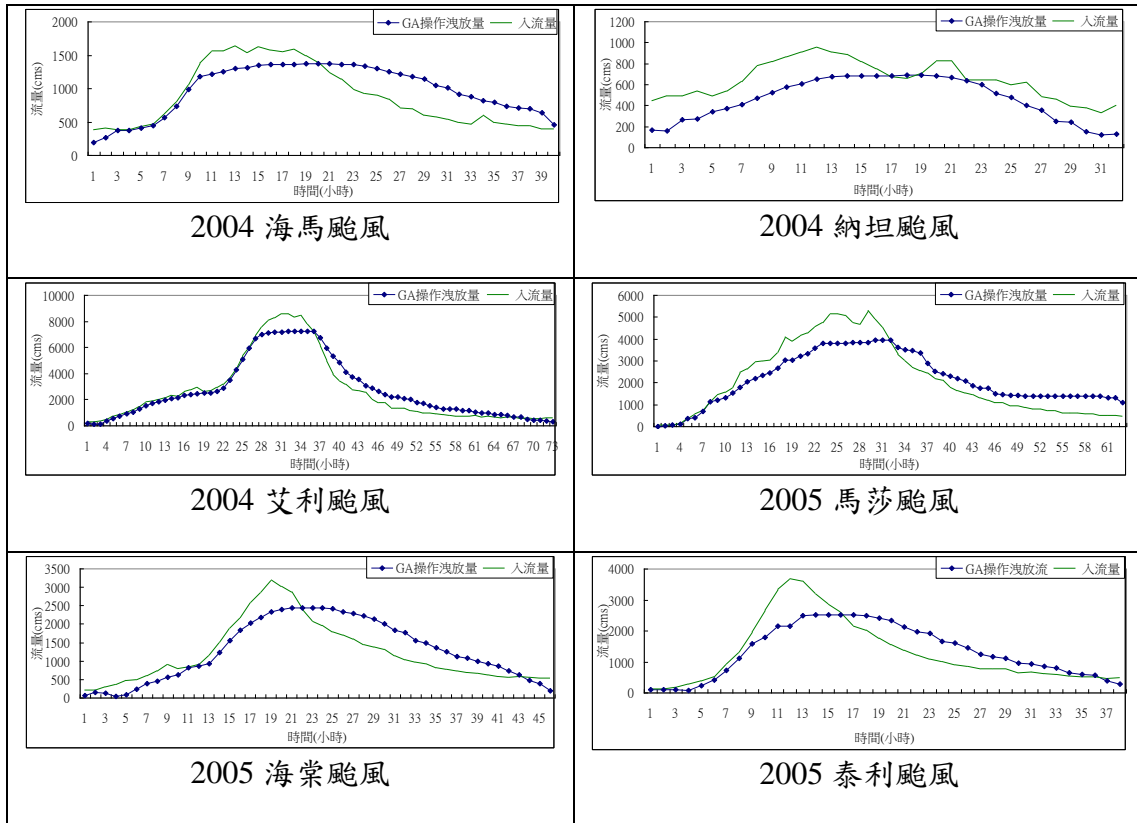


圖 5-2-4 歷史颱風模擬操作放流量歷程圖(部分列出)

5-3 調節性放水策略分析模式

分析模式流程如**錯誤! 找不到參照來源**。所示，流量歷程套配及水庫最佳防洪操作搜尋與模式建置已於 5-1 節及 5-2 節詳述，本節列舉兩場歷史颱風之總入流量相當高作為起始水位分析範例進行驗證。分別為 2004 年艾利颱風及 2007 年柯羅莎颱風；這兩場颱風的特色在於颱風侵襲時，水庫的起始水位屬於偏高或超越上限水位之事件，因此有探討預先調節性放水策略之必要，其餘較大的颱洪事件如 1996 賀伯、2001 納莉及 2005 馬莎颱風等，雖然也有極高的入流量，但起始水位均屬於偏低，皆在上限以下，故不需要探討預先調節性放水之問題。

艾利颱風：

艾利颱風發布颱風警報時間為 2004 年 8 月 23 日至 8 月 26 日，參考圖 5-3-1 為艾利颱風流量歷程圖，流量開始有明顯上升趨勢時為

8月23日下午8點當時水位242m，颱風警報發布時間為8月23日凌晨2點，當時水位為242.71m，此場颱風的預先調節性放水時機即在颱風警報發布後至入流量還沒明顯增加前，也就是8月23日凌晨2點至8月23日下午8點之間，本模式就提供了設定不同起始水位之操作模擬，水位1為假設無預先調節性放水策略之情況，水位為242m；水位2為假設有預先調節性放水2m(可彈性調整)，水位為240m，以此兩種不同起始水位下進行操作模擬，來分析比較入流量、放流量、水位及各排洪設施閘門運作的變化的情況，來探討是否進行水庫預先調節性放水，詳細評估指標及操作過程如表5-3-1及圖5-3-2所示，從表5-3-1的評估指標來看，艾利颱風的確是場相當大的颱風，在操作過程中出現超高水位的情況，若預先調節性放水，可減緩水庫操作過程中超高水位情況發生；另外在洪峰消減率及期末水位回蓄則都表現不錯。圖5-3-2為各排洪設施閘門操作模擬結果圖，可分析兩種不同起始水位下之各閘門開啟運作的情況，提供給水庫人員參考及評估預先調節性放水之風險。

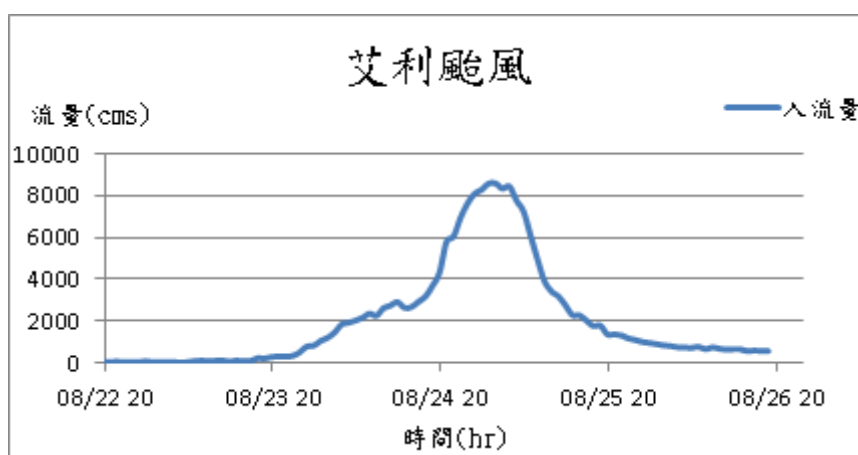
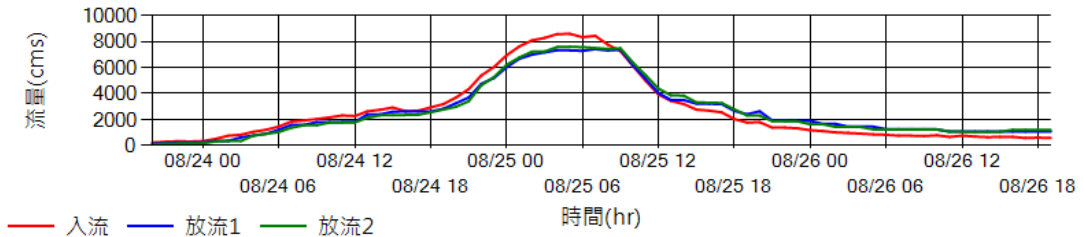


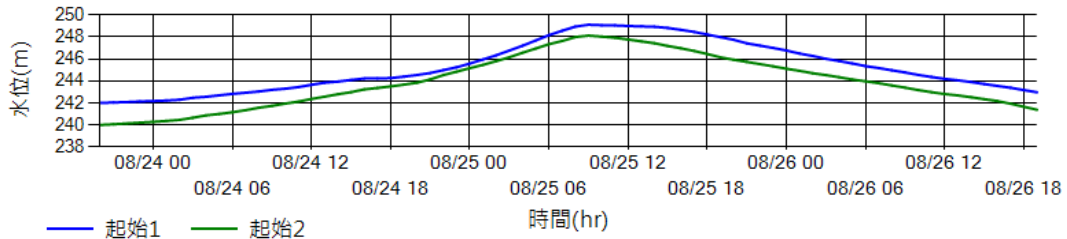
圖 5-3-1 2004 艾利颱風入流量歷程

表 5-3-1 2004 艾利颱風預先調節性放水評估指標

起始水位(m)	最高水位(m)	洪峰削減率(%)	期末水位(m)
242	249.1	13.7%	242.8
240	248.1	11.7%	241.1



(a)入流量及放流量



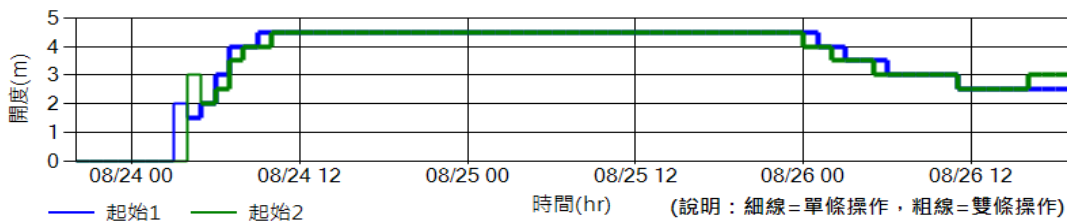
(b)水位變化



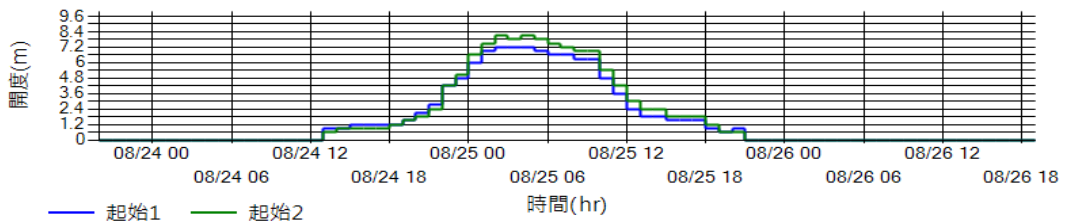
(c)河道放水道



(d)排砂隧道



(e)排洪隧道



(f)溢洪道

圖 5-3-2 2004 年艾利颶風水庫各排洪設施閘門操作模擬結果
註：發電放流於防洪時期以滿載為考量

柯羅莎颱風：

柯羅莎颱風發布颱風警報時間為 2007 年 10 月 4 日至 10 月 7 日，參考圖 5-3-3 為柯羅莎颱風流量歷程圖，流量開始有明顯上升趨勢時為 10 月 5 日下午 8 點當時水位 242.82m，在此時刻設定不同起始水位之操作模擬，水位 1 為假設無預先調節性放水策略之情況，水位為 242.82m；水位 2 為假設有預先調節性放水至水位 240m 處，以此兩種不同起始水位下進行操作模擬，詳細評估指標及操作過程如表 5-3-2 及圖 5-3-4 2007 年柯羅莎颱風所示，從表 5-3-2 的評估指標來看，有無預先調節性放水在操作過程中出現的最高水位皆維持在良好的狀態下，期末水位皆可回蓄至上限水位 245m，但在洪峰消減率方面，預先的調節性放水策略能降低洪峰量，減緩對下游環境造成之衝擊。從圖 5-3-4 2007 年柯羅莎颱風為各排洪設施閘門操作模擬結果圖中，可分析兩種不同起始水位下個閘門開啟運作的情況，提供給水庫人員參考及評估預先調節性放水之適當性。

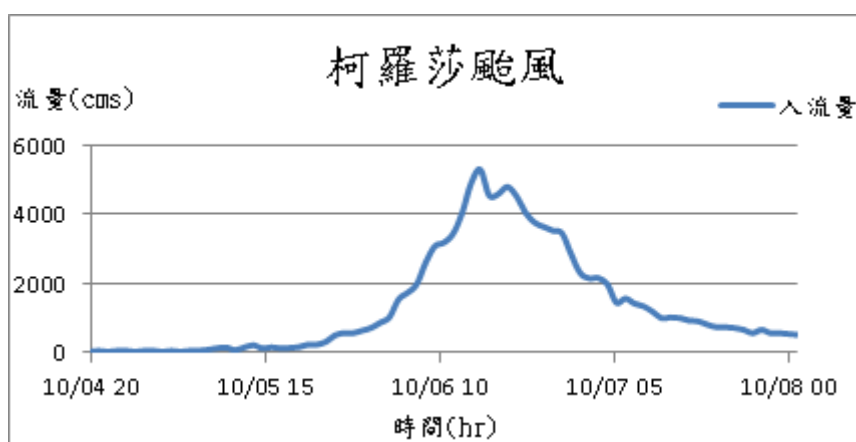
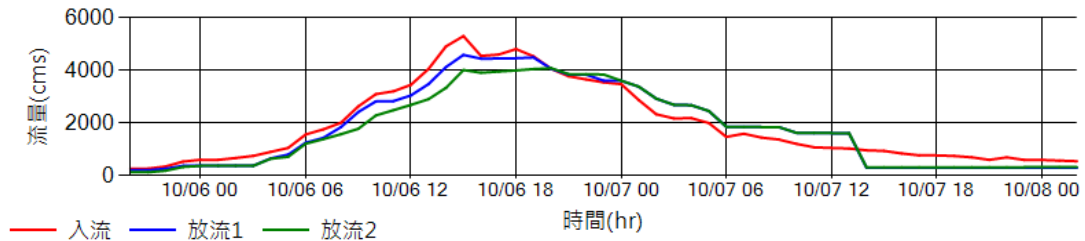


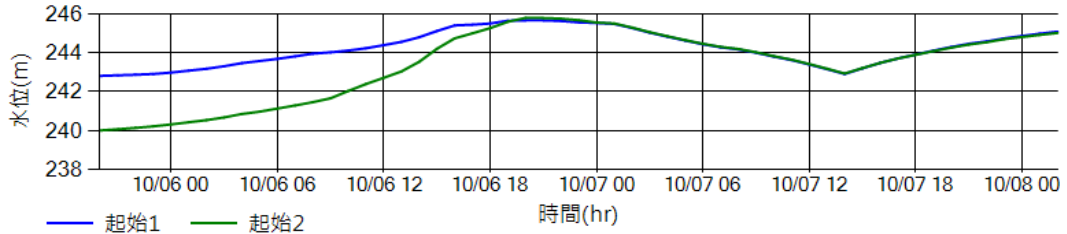
圖 5-3-3 2007 柯羅莎颱風入流量歷程

表 5-3-2 柯羅莎颱風預先調節性放水評估指標

起始水位(m)	最高水位(m)	洪峰削減率(%)	期末水位(m)
242.82	245.7	13.5%	245.2
240	245.8	23.1%	245.1



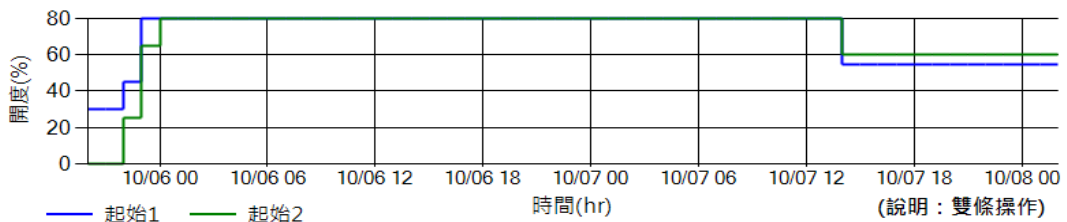
(a)入流量及放流量



(b)水位變化



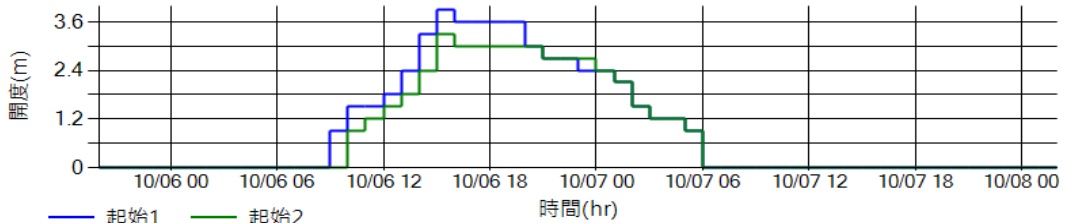
(c)河道放水道



(d)排砂隧道



(e)排洪隧道



(f)溢洪道

圖 5-3-4 2007 年柯羅莎颱風水庫各排洪設施閘門操作模擬結果
註：發電放流於防洪時期以滿載為考量

六、降雨-逕流模式檢定

經濟部水利署「整合多重觀測資訊於山區雨量推估及洪水預報風險管理評估(2/2)」，計畫建立完善之石門水庫降雨-逕流模式，且結果已發表於國外著名期刊(Tsai et al. 2012)。本計畫沿用其經檢定與驗證後之降雨-逕流推估模式，於石門水庫集水區預報未來 5 小時水庫入流量，並以 QPESUMS 雷達降雨推估產品為雨量資訊來源；以 BPNN 為架構建立石門水庫入流量推估模式。

6-1 QPESUMS 雷達降雨推估產品

多重觀測工具之定量降雨估計與分類技術 QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor) 為經濟部水利署、中央氣象局及美國劇烈風暴實驗室整合多重氣象觀測資料並結合地理資訊系統發展劇烈天氣監測系統，該系統提供台灣地區整合後之定量降水估計與極短時之定量降水外延預報產品 (丘台光等人，2009)。

QPESUMS 系統網格資料起始點為 27°N ， 118°E ，範圍介於 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ ， $118^{\circ}\sim 123.5^{\circ}\text{E}$ ，其南北方向共有 561 個網格；東西方向共有 441 個網格。產品空間解析度為 $0.0125^{\circ}\times 0.0125^{\circ}$ ；時間解析度為 10 分鐘。本計畫透過中央氣象局提供 QPESUMS 雷達降雨推估產品，其所蒐集資料再細分為二部份：

- (1) 校正前：QPESUMS 系統針對最低可用仰角回波資料設定一 Z-R 關係式，透過 Z-R 關係式推估降雨量，目前系統使用 $Z=32.5R^{1.65}$ (Z: 雷達回波值; R: 雨量值) 為參考 Alberat, Canada 之夏季對流降雨與雷達觀測資料之關係 (Xin et al. 1997)
- (2) 校正後：QPESUMS 系統針對 $Z=32.5R^{1.65}$ 推估所得之雨量，透過雷達與地面雨量計整合法 (radar-rain gauge method)，將距離網格 30 公里內之雨量站，以距離網格平方反比取權重進行幾何校正。

受限於 QPESUMS 為氣象局 2004 年所建置之系統，僅提共 2005 年後的資料，去除資料缺漏的場次後共有 18 場颱風事件，如表 6-1-1 所示。

表 6-1-1 降雨-逕流模式使用之颱風事件

颱風名稱	英文名稱	起迄時間	颱風強度	洪峰流量 (cms)	總入流量 (萬噸)	資料分組
2005 海棠	Haitang	07/17~07/19	強烈	3,199	28,064	訓練
2005 馬莎	Masa	08/04~08/06	中度	5,322	53,147	訓練
2007 韋帕	Wipha	09/17~09/19	中度	2,788	21,232	訓練
2007 柯羅莎	Krosa	10/04~10/07	強烈	5,300	42,573	訓練
2008 辛樂克	Sinlaku	09/11~09/16	強烈	3,447	63,423	訓練
2008 薔蜜	Jangmi	09/21~09/23	強烈	3,292	26,672	訓練
2009 莫拉克	Morakot	08/08~08/10	中度	1,838	28,455	訓練
2009 芭瑪	Parma	10/03~10/06	中度	657	8,963	訓練
2005 泰利	Talim	08/31~09/02	強烈	3,689	21,619	驗證
2006 寶發	Bopha	08/07~08/09	輕度	105	1,739	驗證
2008 鳳凰	Fung-wong	07/26~07/29	中度	2,040	14,892	驗證
2005 龍王	Longwang	09/30~10/03	強烈	1,369	10,872	測試
2006 珊珊	Shanshan	09/14~09/16	中度	979	10,622	測試
2007 聖帕	Sept	08/16~08/19	強烈	1,844	19,008	測試
2010 凡那比	Fanapi	09/17~09/20	中度	1,056	12,201	測試
2010 梅姬	Megi	10/21~10/23	中度	859	20,464	測試
2011 米雷	Meari	06/23~06/25	輕度	1,059	13,520	測試
2012 蘇拉	Saola	07/30~08/03	中度	5,385	50,940	測試

6-2 降雨-逕流模式建立與檢定

本模式沿用「整合多重觀測資訊於山區雨量推估及洪水預報風險管理評估(2/2)」中三組輸入及輸出因子中之最佳方案，以雷達推估雨量與水庫入流量間時間延遲關係配合 DEM 資料計算河川流向，可將石門水庫集水區劃分為三區，如圖 6-2-1 石門水庫集水區分區所示，第 I 區雨量與入流量之時間延遲約為 1~2 小時，第 II 區時間延遲為 2~3 小時；第 III 區時間延遲約為 3~4 小時。模式以 QPESUMS 雨量資訊及水庫入流量資為輸入因子，參考子集水區降雨-逕流時間延時，選取不同時距預測模式輸入項如表所示。

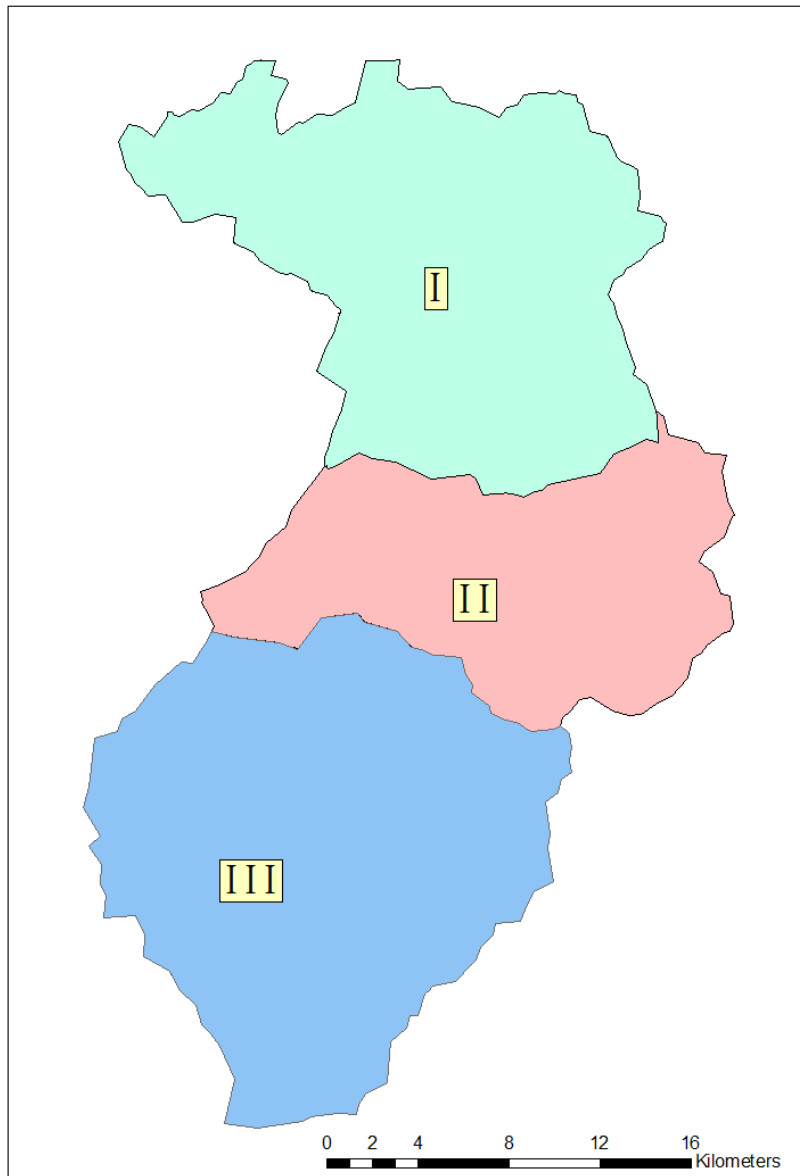


圖 6-2-1 石門水庫集水區分區

表 6-2-1 降雨-逕流模式不同時距子模式輸入因子對照表

預測 時距	輸入項 個數	輸入因子			
		第 I 區雨量	第 II 區雨量	第 III 區雨量	水庫入流量
T+1	4	T-2	T-2	T-3	T
T+2	3		T	T-1	T
T+3	3		T	T-1	T
T+4	3		T	T-1	T
T+5	2			T	T

模式建立挑選實際影響石門集水區之颱風事件共 18 場，將之分為訓練、驗證、測試三組，訓練組用來訓練模式，使之調整內部權重及參數，驗證組則進行模式架構之挑選，而測試組用以測試模式之表

現，各分為訓練 8 場、驗證 3 場及測試 7 場事件如表 6-1-1 所示。為評估流量預報模式之表現並比較不同輸入項對於模式預報精確性之差異，本計畫採用 4 個指標作為評估標準，探討不同雨量觀測資訊應用於流量預報之差異與優劣，評估指標包括決定係數(Coefficient of Determination, R^2)、方均根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)、洪峰流量差及洪峰發生時間差，用以評估模式預測結果之精確性與穩定性，各指標之定義如(6-1)式至(6-4)式所示：

(1) R^2 (Coefficient of Determination)：

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{t=1}^N [Q_{pre}(t) - \bar{Q}_{pre}(t)][Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [Q_{pre}(t) - \bar{Q}_{pre}(t)]^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2}} \right]^2 \quad (6-1)$$

(6-1)式中 N 為資料筆數， $Q_{pre}(t)$ 為預報流量， $Q_{obs}(t)$ 為實際觀測流量， $\bar{Q}_{obs}(t)$ 為實際觀測流量平均值， $\bar{Q}_{pre}(t)$ 為預報流量平均值，當 R^2 值越接近於 1 時，表示流量預報值與實際觀測值線性程度越高。

(2) RMSE (Root Mean Square Error)：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N [Q_{pre}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{N}} \quad (6-2)$$

評估中或高降雨量時，RMSE 值能明顯看出颱風降雨預報模式之優劣，當 RMSE 值愈小則代表模式之準確性愈高。

(3) 平均洪峰流量差：

$$\frac{\sum_{t=1}^N Q_{p,pre} - Q_{p,obs}}{N} \quad (6-3)$$

(4) 平均洪峰發生時間積延：

$$\frac{\sum_{t=1}^N T_{Q_{p,pre}} - T_{Q_{p,obs}}}{N} \quad (6-4)$$

各項評估指標如表 6-2-2 及表 6.4 所示，整體而言，訓練及測試階段 T+1~T+3 預測結果表現 R^2 均具有 0.9 以上的水準，T+4 與 T+5 亦有 0.78 以上水準；測試階段之 RMSE 結果在 T+1~T+3 預測結果皆

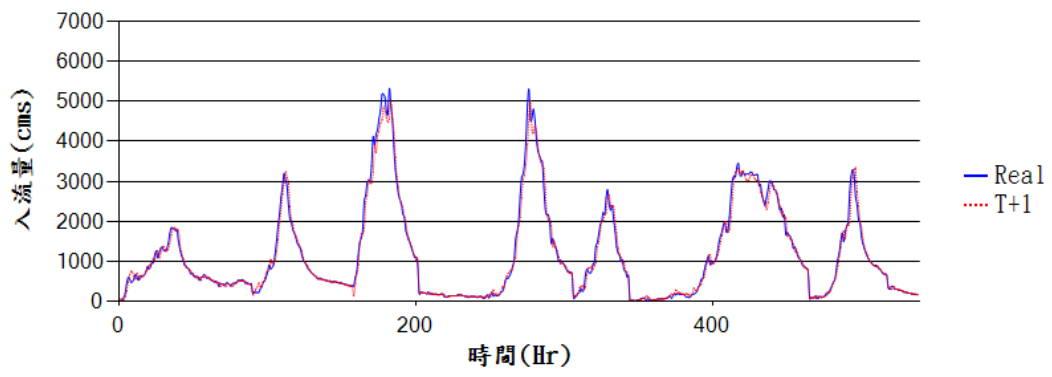
在 240cms 以下，T+4 與 T+5 則小於 360cms；測試階段之平均洪峰流量差在 T+1~T+3 預測模式均於正負 50cms 以下，平均洪峰發生時間積延小於 2 小時。圖 6-2-2 至圖 6-2-2 為 T+1~T+5 預測模式的預報結果，T+1~T+3 預測模式之訓練、驗證及測試之預報不論於低流量或中高流量都有相當精確的預測。結果顯示此模式以 QPESUMS 雨量資訊探討降雨-逕流時間延遲關係，除了可提供預報模式時間軸上之變異，亦可提供完整空間軸上之變異，於颱風豪雨期間，推估未來至少 3 小時水庫入流量仍保持高度精確。T+4 及 T+5 模式則受限於缺乏適當延時之集水區雨量資訊，而略有時間積延(Time Lag)情形發生。

表 6-2-2 石門水庫入流量預測模式評估指標 1

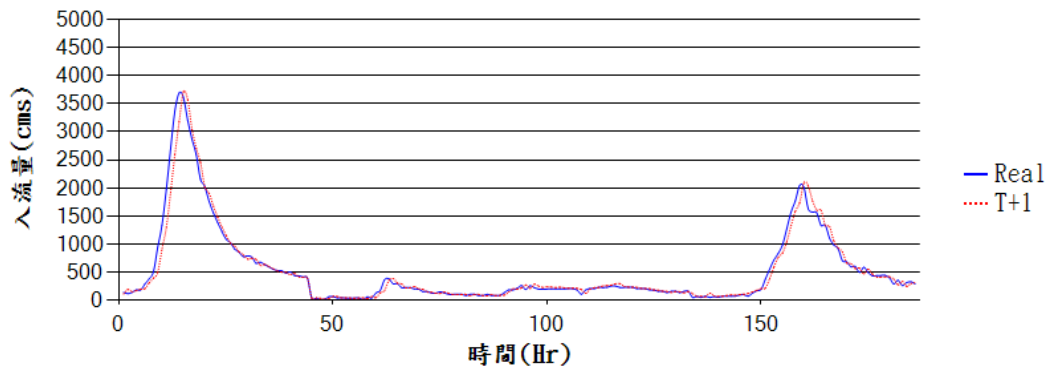
Node numbers		R ²			RMSE(cms)		
		training	validation	testing	training	validation	testing
T+1	4	0.98	0.96	0.97	163.15	137.95	127.44
T+2	4	0.96	0.90	0.94	232.75	219.78	178.24
T+3	4	0.94	0.79	0.90	312.08	320.14	237.22
T+4	4	0.90	0.67	0.85	392.15	410.20	293.35
T+5	4	0.84	0.57	0.78	479.38	472.07	353.93

表 6-2-3 石門水庫入流量預測模式評估指標 2

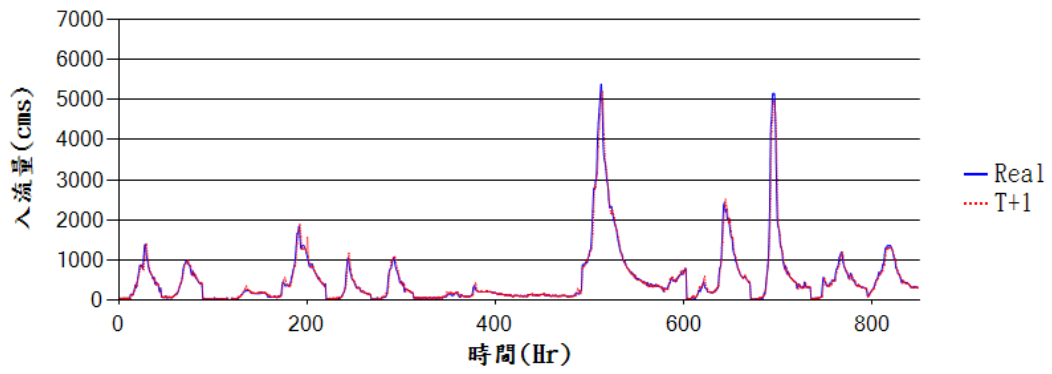
Node numbers		平均洪峰流量差(cms)			平均洪峰發生時間積延(hr)		
		training	validation	testing	training	validation	testing
T+1	4	-110	26	25	1	1	1
T+2	4	-97	-113	-4	1	1	1
T+3	4	-123	-80	50	2	2	1
T+4	4	-183	-91	104	3	3	2
T+5	4	-48	-65	81	3	4	2



(a) 訓練階段

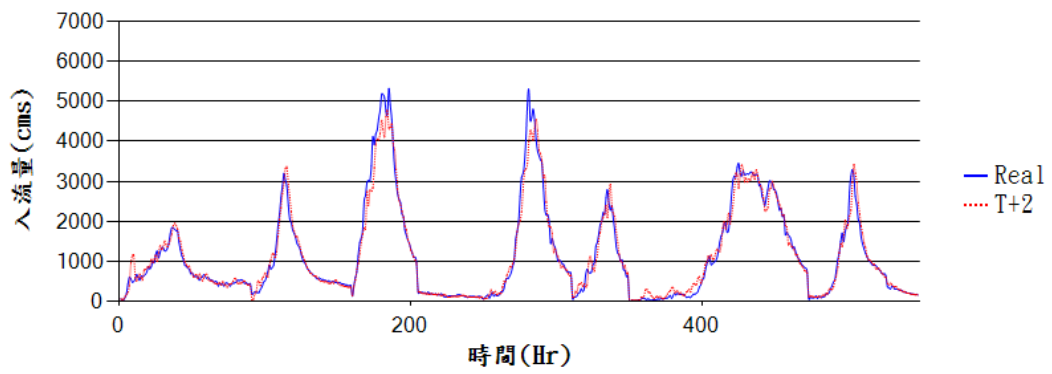


(b) 驗證階段

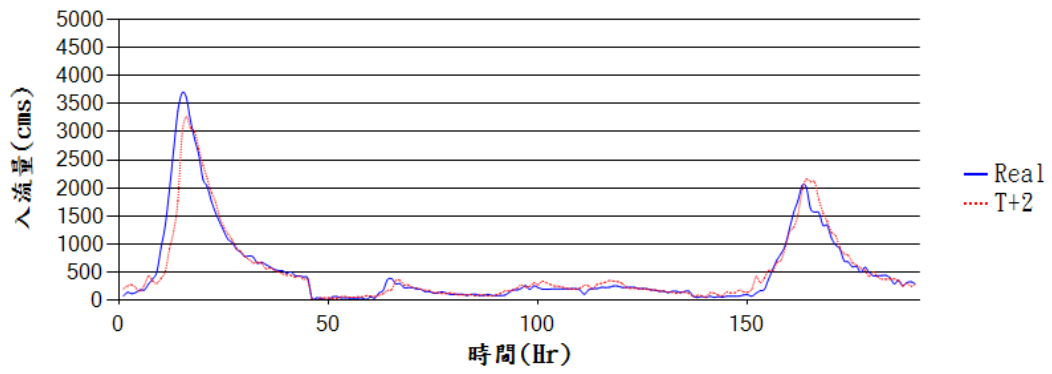


(c) 測試階段

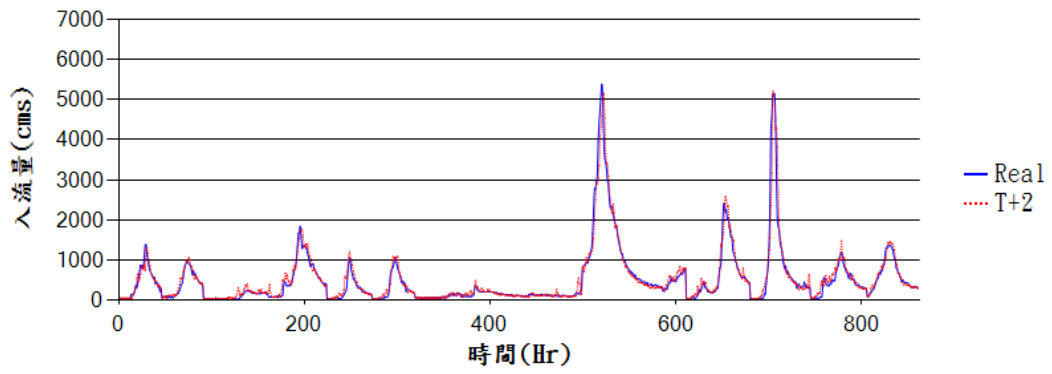
圖 6-2-2 石門水庫 T+1 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖



(a) 訓練階段

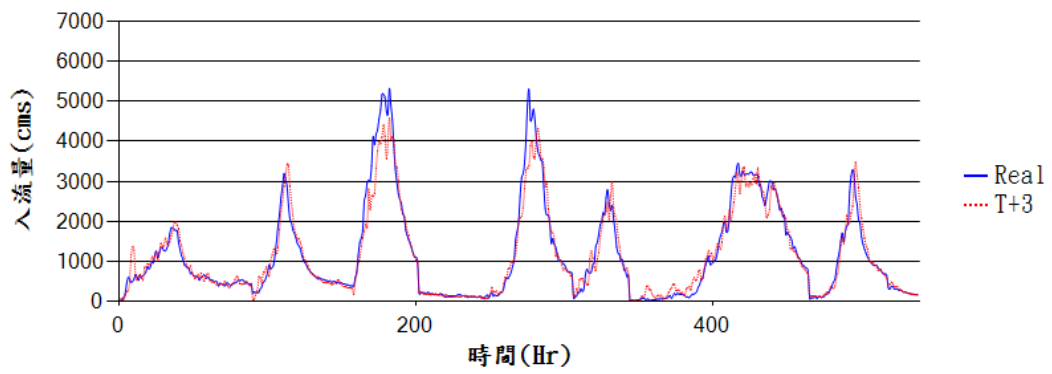


(b) 驗證階段

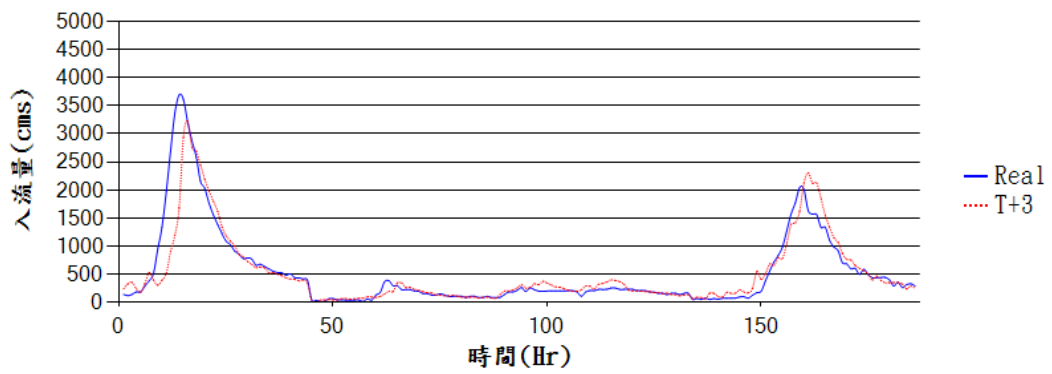


(c) 測試階段

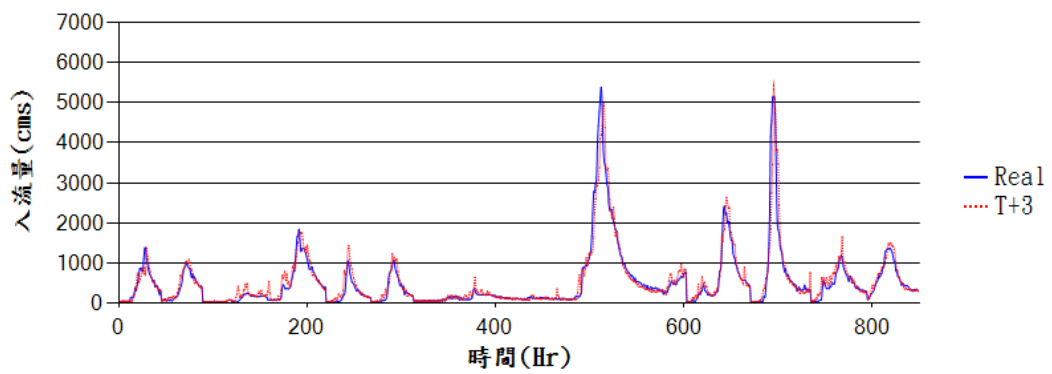
圖 6-2-3 石門水庫 T+2 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖



(a) 訓練階段

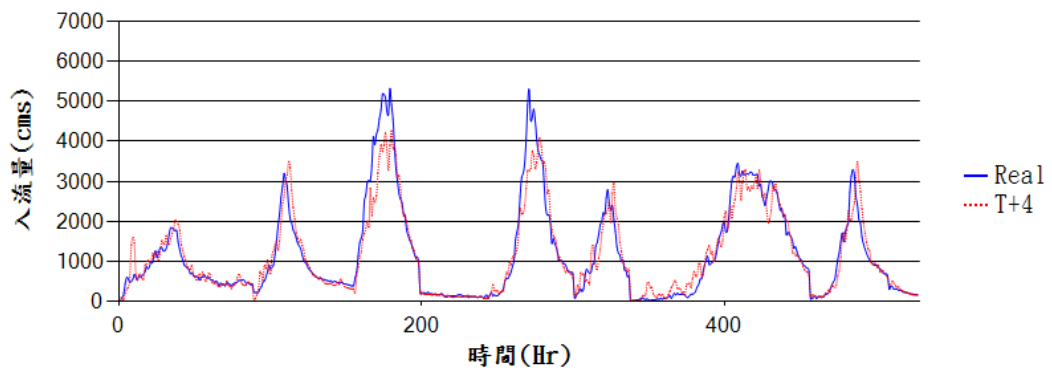


(b) 驗證階段

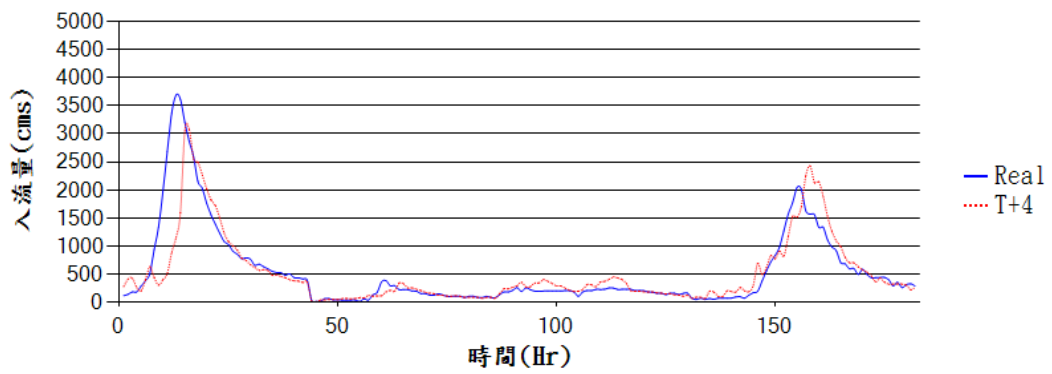


(c) 測試階段

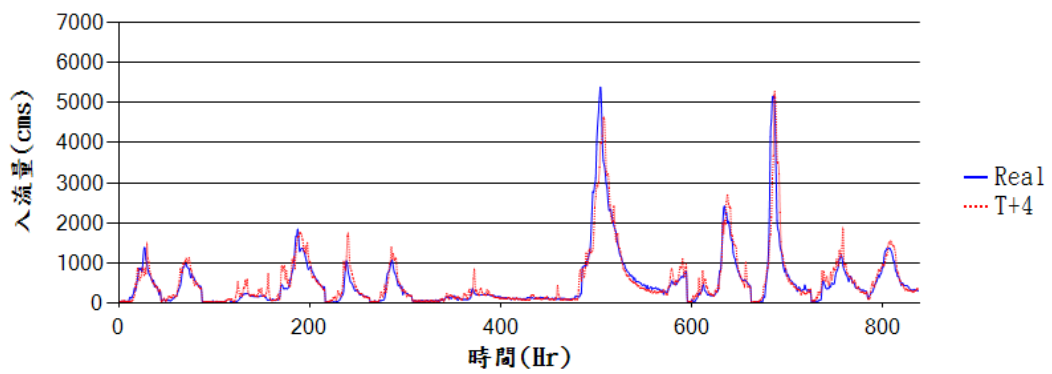
圖 6-2-4 石門水庫 T+3 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖



(a) 訓練階段

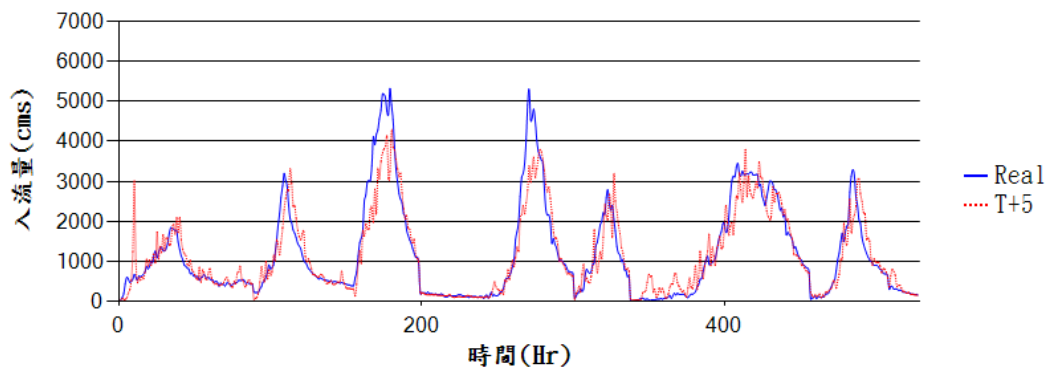


(b) 驗證階段

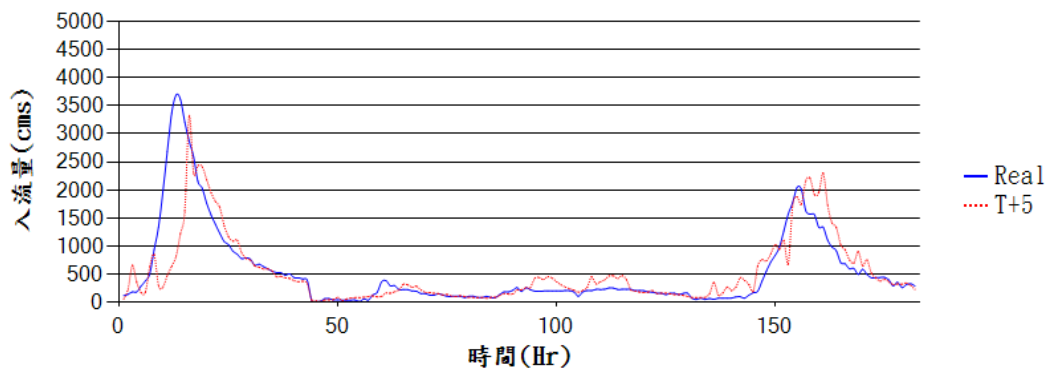


(c) 測試階段

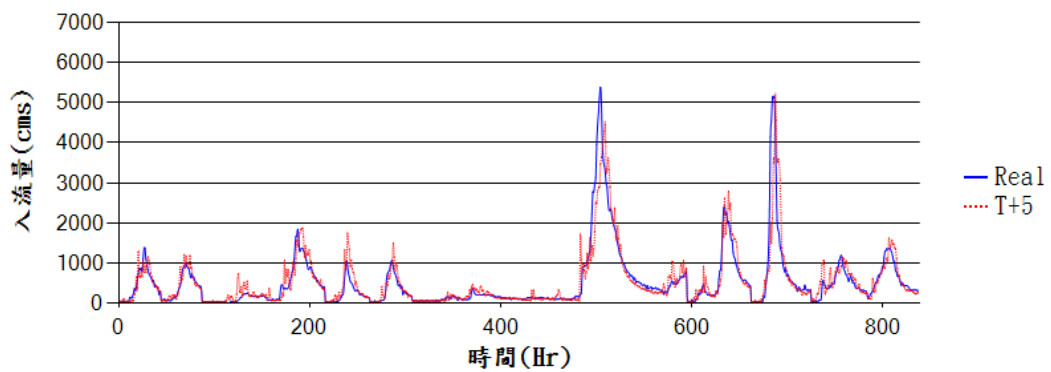
圖 6-2-5 石門水庫 T+4 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖



(a) 訓練階段



(b) 驗證階段



(c) 測試階段

圖 6-2-6 石門水庫 T+5 入流量預測模式訓練、驗證與測試結果圖

6-3 2013 颱風事件之降雨-逕流預測模式驗證

以蘇力、潭美、天兔及菲特共 4 場颱風事件，進行流量預測模式驗證，檢定未來 1~5 小時之預測結果。

6-3-1 2013 蘇力颱風

2013 蘇力颱風於 7 月 11 日 20 點 30 分發佈陸上颱風警報，於 7 月 13 日 23 點 30 分解除警報，從圖 6-3-1 石門水庫集水區平均降雨量組體圖中得知雨量集中於 7 月 12 日 18 時至 7 月 13 日 11 時之間。

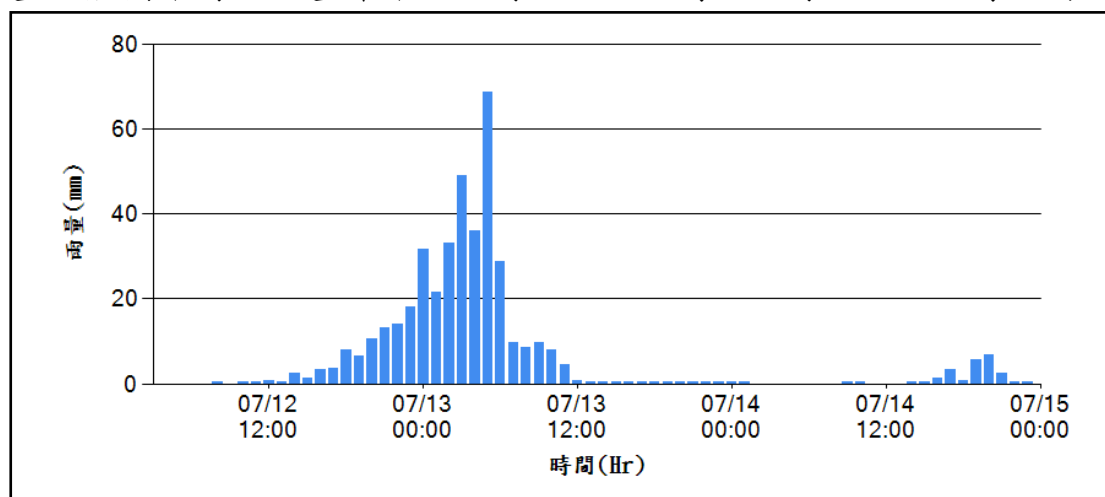
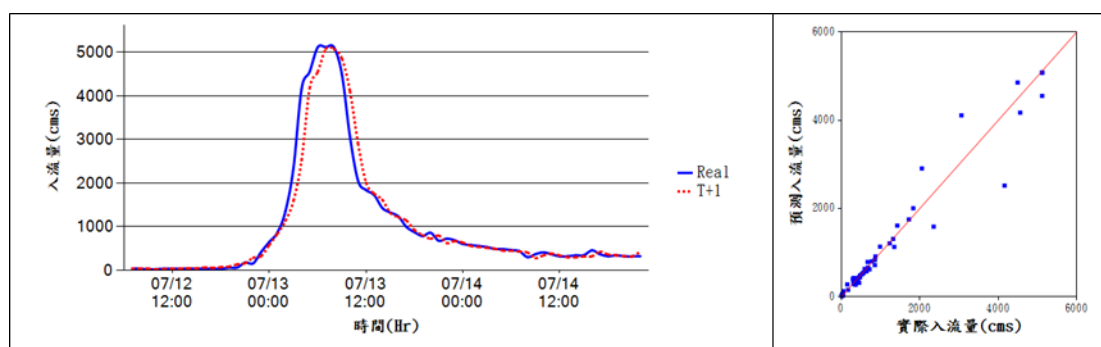


圖 6-3-1 2013 蘇力颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖

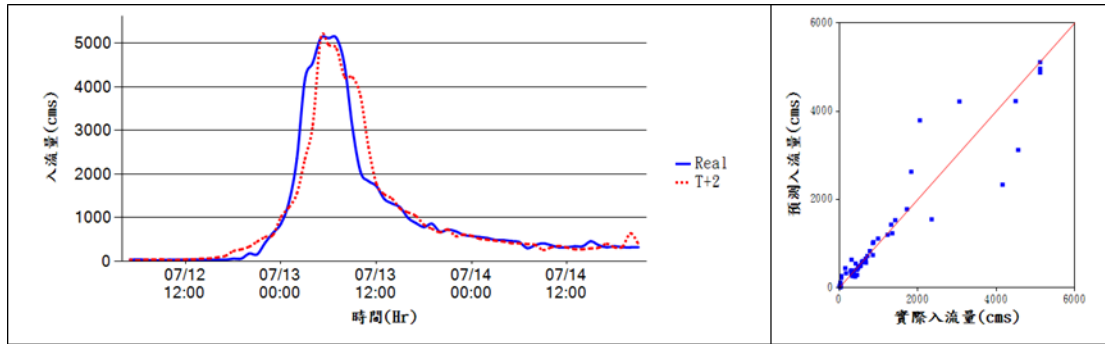
水庫於 7 月 12 日 4 時開始有入流量資料上線，彙整流量較大且颱風期間 T+1 至 T+5 模式皆有預測結果的時段及其預測值於圖 6-3-2，可觀察到各預測時距模式預測結果皆能掌握洪峰流量，僅 T+4 與 T+5 模式有較明顯的時間積延現象。各模式評估指標如表 6-3-1 所示。

表 6-3-1 2013 蘇力颱風石門水庫預報結果評估指標

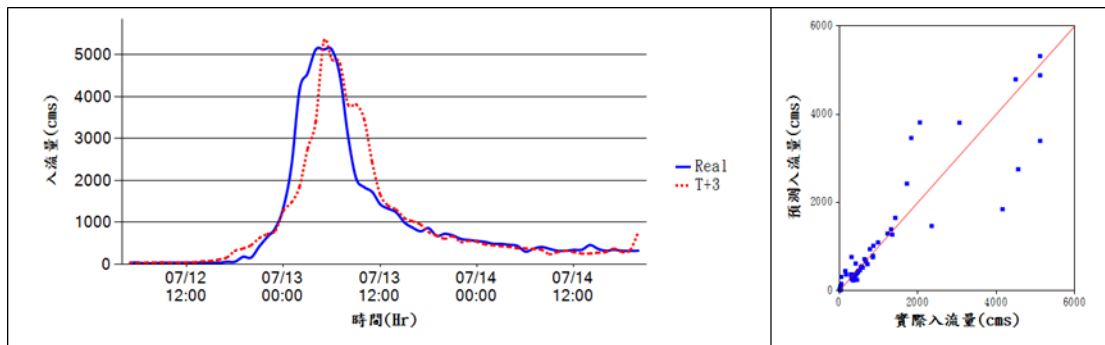
評估指標	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5
RMSE	306.11	424.89	559.72	685.16	854.32
R^2	0.95	0.90	0.83	0.75	0.62



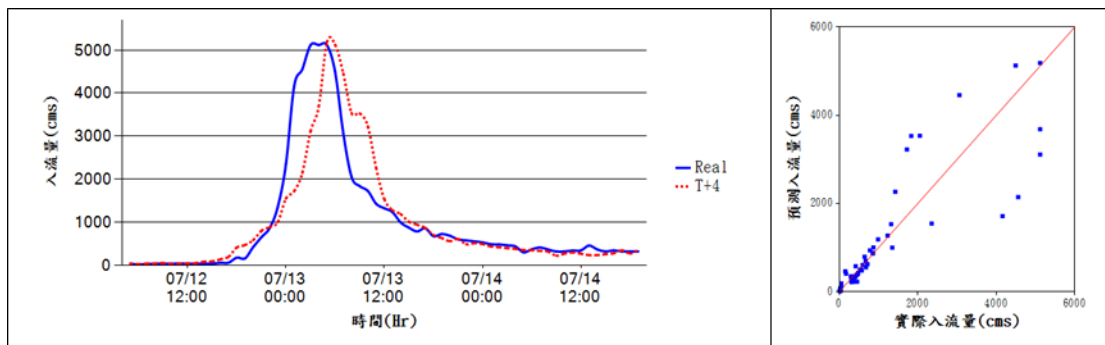
(a) T+1



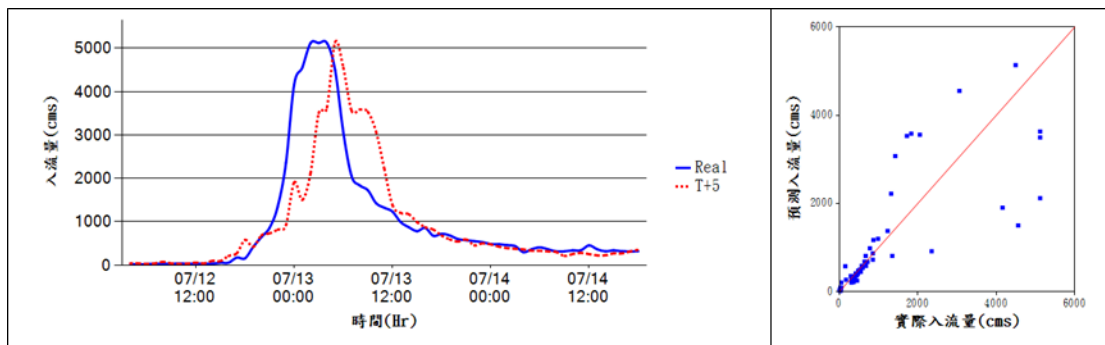
(b) T+2



(c) T+3



(d) T+4



(e) T+5

圖 6-3-2 石門水庫入流量預測模式於 2013 蘇力颱風侵台期間預測結果

6-3-2 2013 潭美颱風

2013 潭美颱風於 8 月 21 日 8 點 30 分發佈陸上颱風警報，於 8 月 22 日 8 點 30 分解除警報，從圖 6-3-3 石門水庫集水區平均降雨量組體圖中得知雨量集中於 8 月 21 日 6 時至 8 月 22 日 6 時之間。

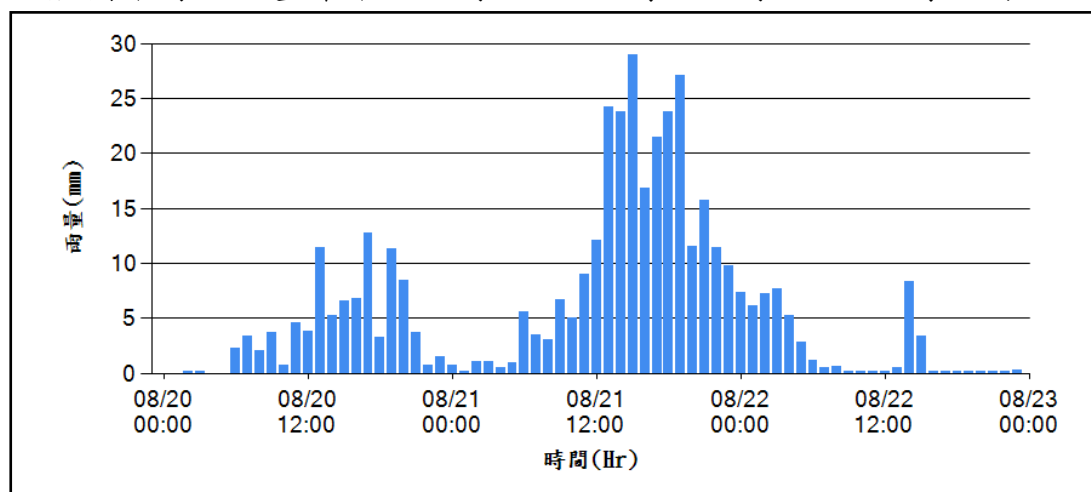
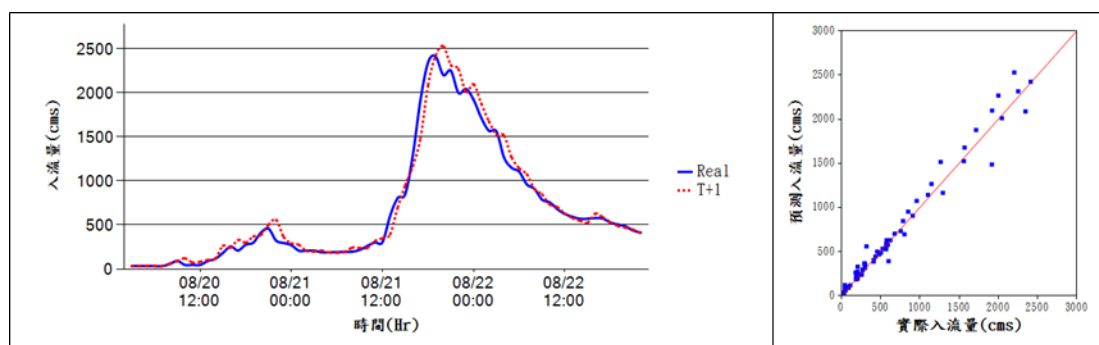


圖 6-3-3 2013 潭美颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖

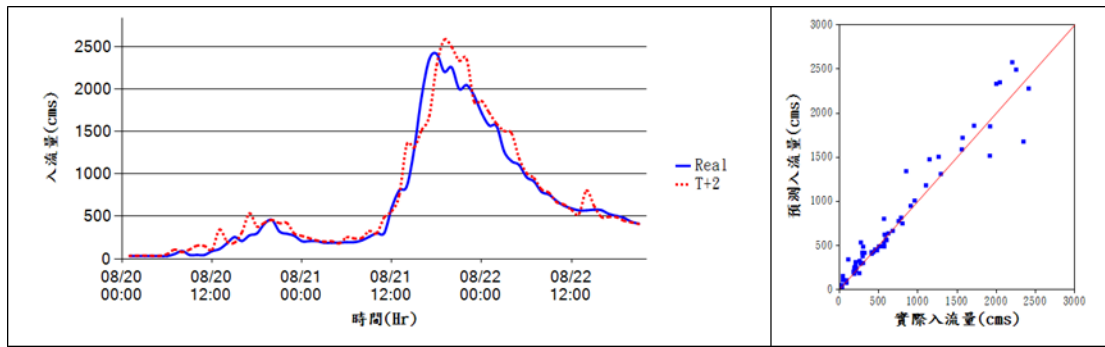
水庫於 8 月 20 日 0 時開始有入流量資料上線，彙整流量較大且颱風期間 T+1 至 T+5 模式皆有預測結果的時段及其預測值於圖 6-3-4，觀察 T+1 至 T+3 預測結果可掌握洪峰流量，僅有 T+4 及 T+5 於洪峰附近受降雨量變化較大之影響，有震盪情形產生。各模式評估指標如表 6-3-2 所示。

表 6-3-2 2013 潭美颱風石門水庫預報結果評估指標

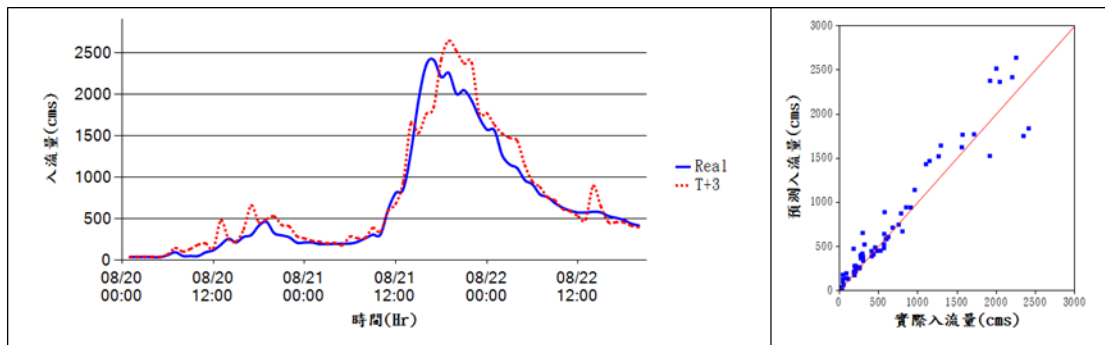
評估指標	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5
RMSE	108.38	162.15	196.28	228.10	261.62
R^2	0.98	0.95	0.93	0.91	0.88



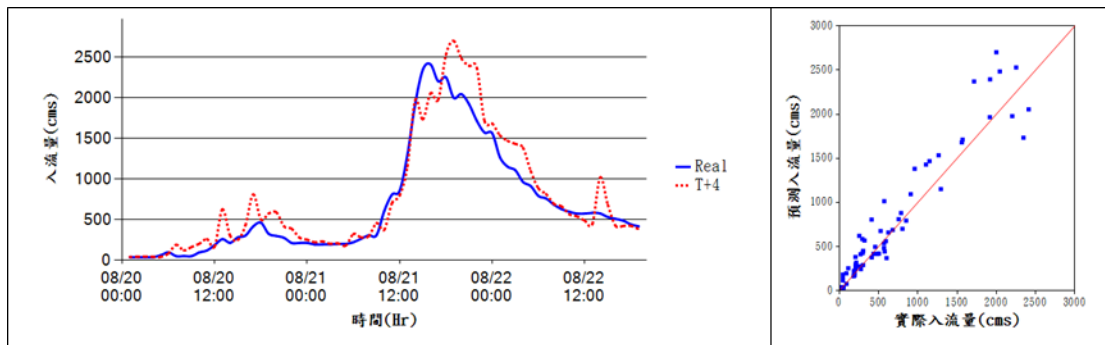
(a) T+1



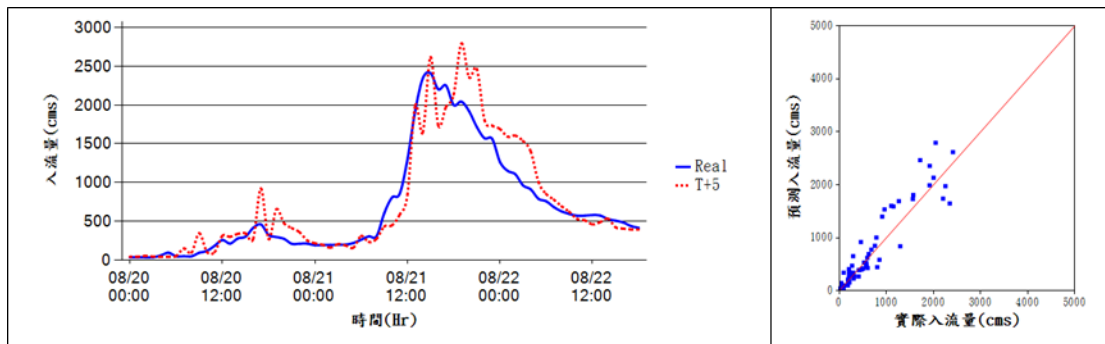
(b) T+2



(c) T+3



(d) T+4



(e) T+5

圖 6-3-4 石門水庫入流量預測模式於 2013 潭美颱風侵台期間預測結果

6-3-3 2013 天兔颱風

2013 天兔颱風於 9 月 20 日 8 點 30 分發佈陸上颱風警報，於 9 月 22 日 8 點 30 分解除警報，從圖 6-3-5 石門水庫集水區平均降雨量組體圖中得知雨量集中於 9 月 21 日 4 時至 9 月 21 日 20 時之間。

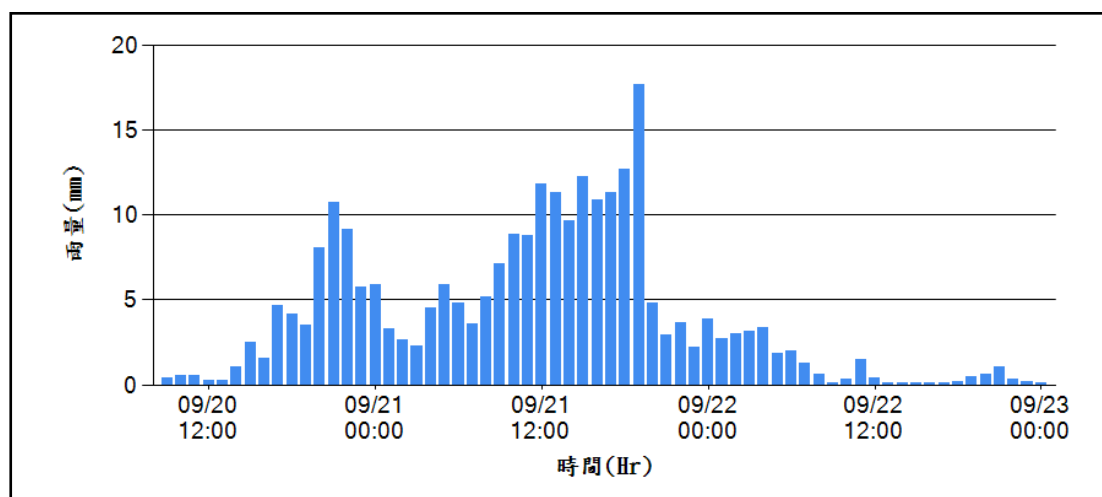
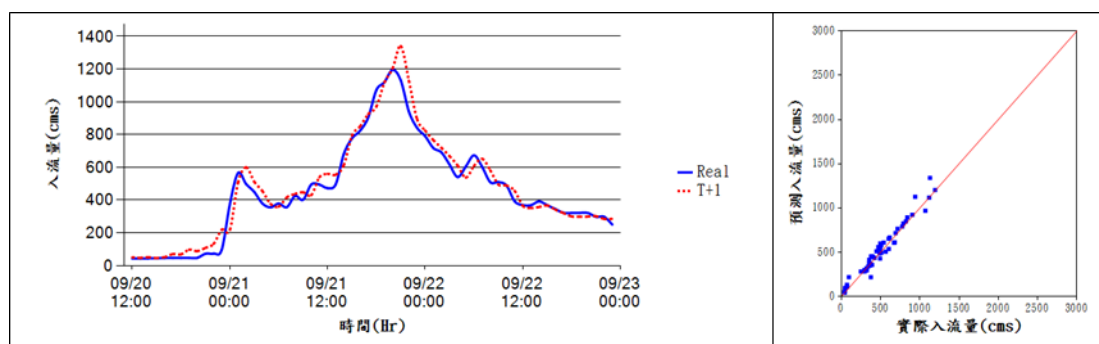


圖 6-3-5 2013 天兔颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖

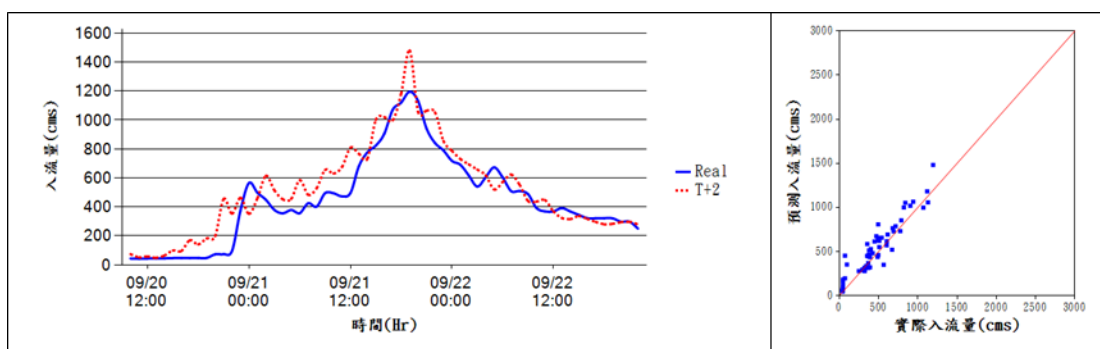
水庫於 8 月 20 日 0 時開始有入流量資料上線，彙整流量較大且颱風期間 T+1 至 T+5 模式皆有預測結果的時段及其預測值於圖 6-3-6，觀察 T+1~T+4 預測結果可掌握入流量趨勢，僅 T+5 於上升段有較明顯震盪情形發生。各模式評估指標如表 6-3-3 所示。

表 6-3-3 2013 天兔颱風石門水庫預報結果評估指標

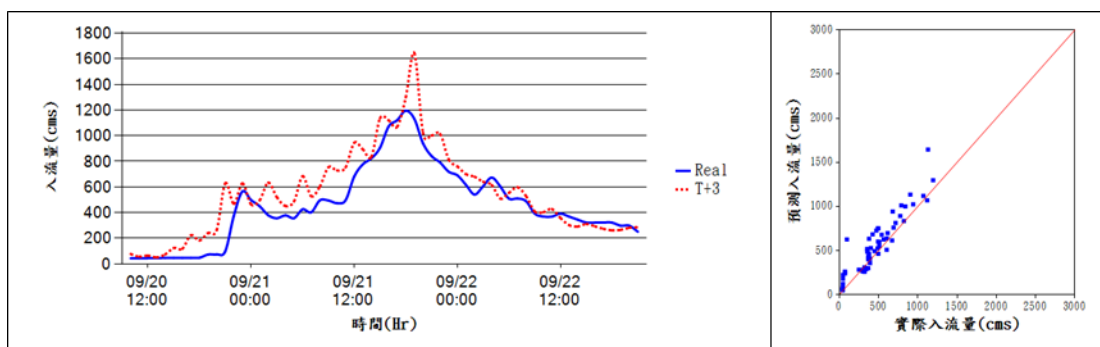
評估指標	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5
RMSE	62.27	124.79	153.70	201.95	212.39
R ²	0.96	0.88	0.87	0.82	0.64



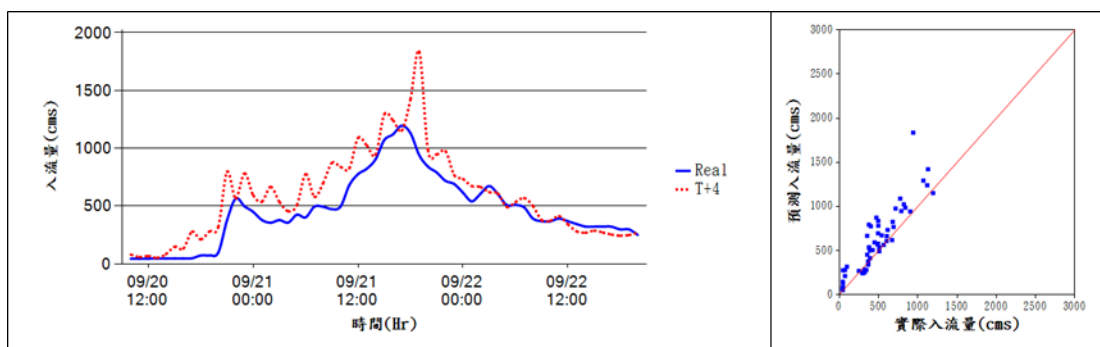
(a) T+1



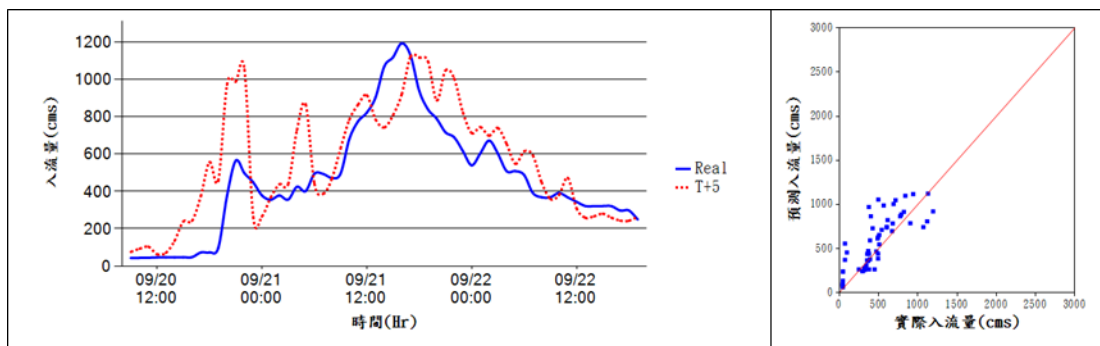
(b) T+2



(c) T+3



(d) T+4



(e) T+5

圖 6-3-6 石門水庫入流量預測模式於 2013 天兔颱風侵台期間預測結果

6-3-4 2013 菲特颱風

2013 菲特颱風於 10 月 5 日 14 點 30 分發佈陸上颱風警報，於 10 月 7 日 8 點 30 分解除警報，從圖 6-3-7 石門水庫集水區平均降雨量組體圖中得知雨量集中於 10 月 5 日 18 時至 10 月 6 日 20 時之間。

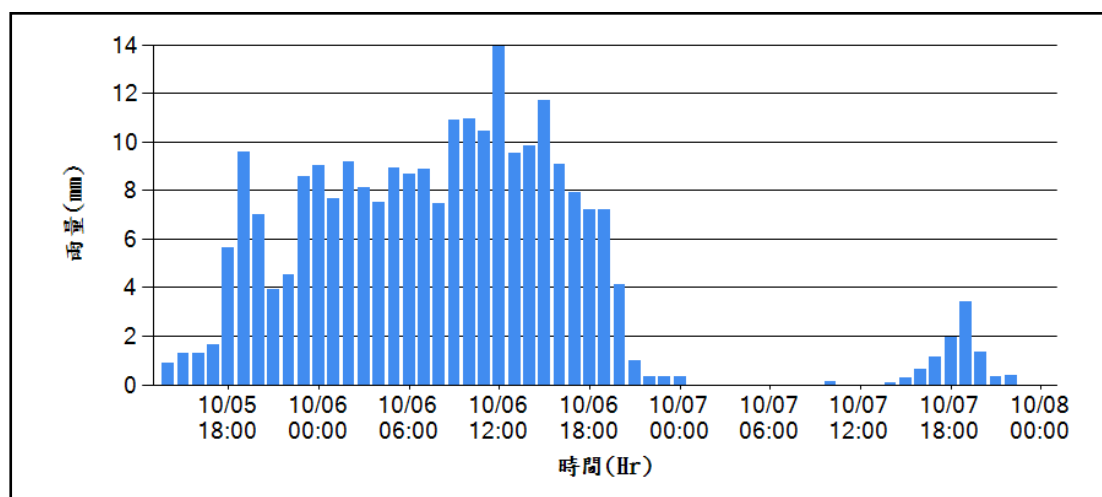
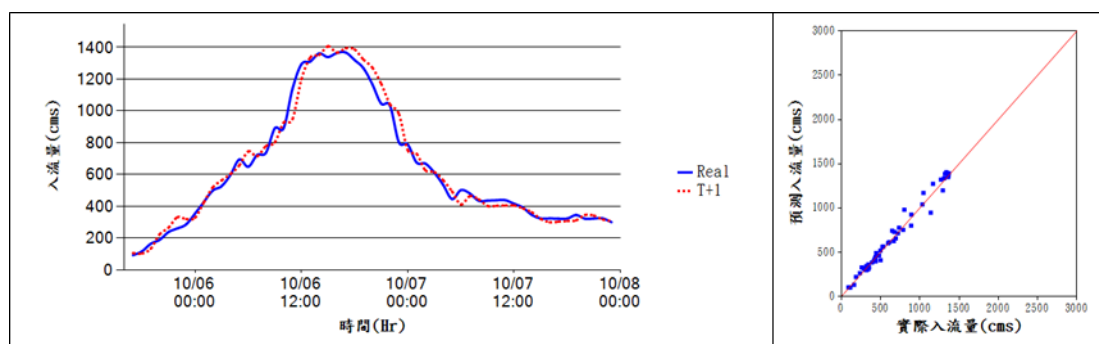


圖 6-3-7 2013 菲特颱風於石門水庫集水區平均降雨量組體圖

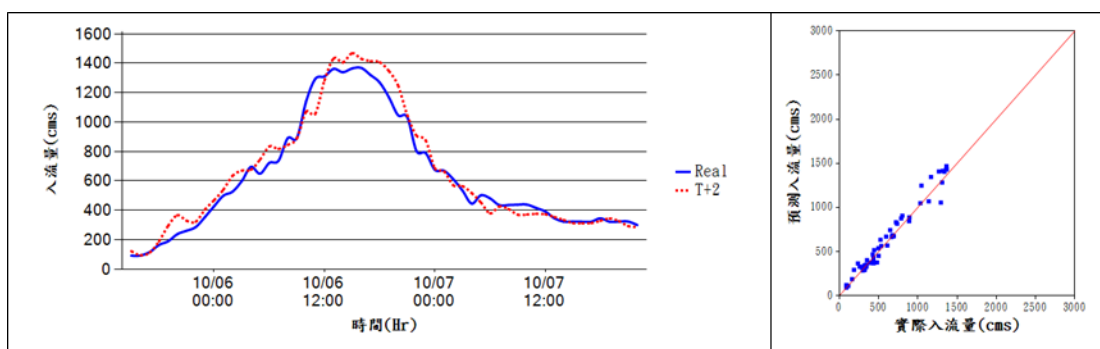
水庫於 10 月 5 日 14 時開始有入流量資料上線，彙整流量較大且颱風期間 T+1 至 T+5 模式皆有預測結果的時段及其預測值於圖 6-3-8，觀察各時距預測結果，皆可掌握實際流量變化趨勢，僅 T+4 及 T+5 有較明顯時間積延現象。各模式評估指標如表 6-3-4 所示。

表 6-3-4 2013 菲特颱風石門水庫預報結果評估指標

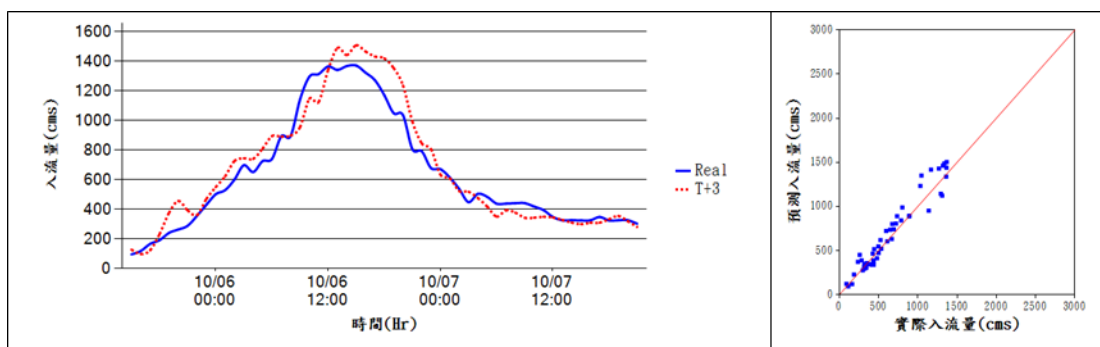
評估指標	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5
RMSE	56.56	76.69	106.35	142.64	180.08
R ²	0.98	0.97	0.94	0.90	0.83



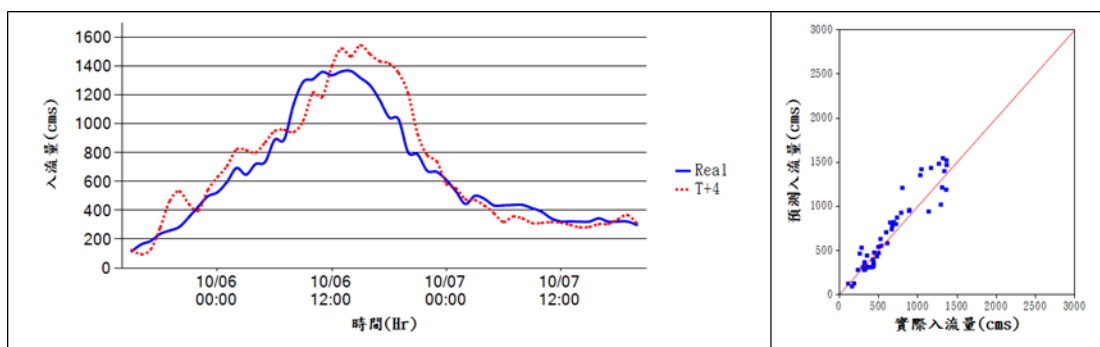
(a) T+1



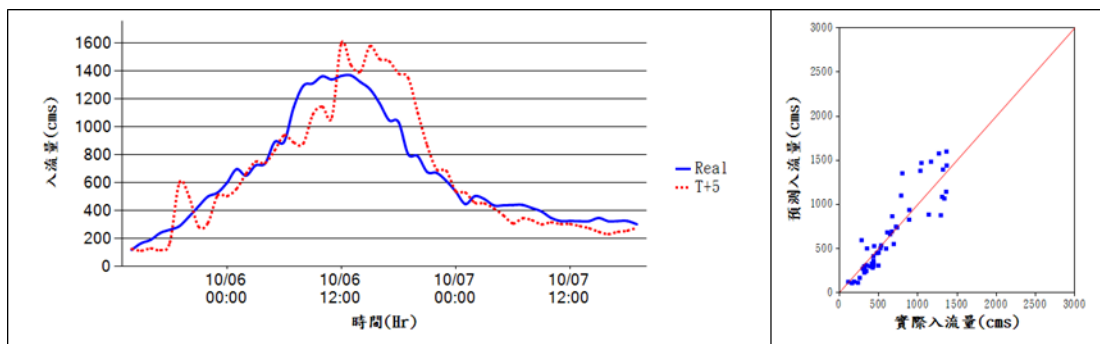
(b) T+2



(c) T+3



(d) T+4



(e) T+5

圖 6-3-8 石門水庫入流量預測模式於 2013 菲特颱風侵台期間預測結果

七、排砂防淤策略分析

7-1 分析水庫在歷年洪水事件各出流設施排砂比

本計畫收集並分析 2004 艾利颱風之後，於石門水庫所觀測之各出流設施排砂濃度逐時數據，進而計算各出流設施之排砂比，圖 7-1-1 至圖 7-1-8 分別為本團隊所收集之 2008 辛樂克颱風、鳳凰颱風、薔蜜颱風、2009 莫拉克颱風、2010 凡那比颱風、2012 蘇拉颱風及 2013 蘇力及潭美颱風於石門水庫所觀測之各出水工排砂濃度值，而各場颱風之入流砂量資料則依據羅浮站所觀測之泥砂濃度為基準，因此各出水工之排砂比可直接根據實測資料進行分析，此外本計畫亦納入水規所所執行之石門水庫艾利颱風試驗成果，已達到充分收集及整理歷年洪水事件各出流設施排砂比之目的，表 7-1-1 即為各颱風事件中之尖峰流量與各出水工之排砂比實測值，由表中可得知入流量較大之颱風其總排砂比亦相對較高，其趨勢及關係可從圖 7-1-9 中獲得，由圖 7-1-9 中可初步得到入流量較大之颱風其總排砂比亦相對較高，但 2012 蘇拉颱風略為偏離趨勢線，且 2013 年由於啟用排砂隧道，所以在相同流量下達到更大的排砂比；圖 7-1-10 針對有進行排砂隧道操作的兩場颱風事件(蘇力颱風和潭美颱風)的尖峰入流量與排砂比進行迴歸，可發現排砂效率有顯著提升，相同入流量之下排砂比較高；圖 7-1-11 為電廠改建前後已水工模型試驗所得之排砂比之關係圖，其顯示新增排砂隧道有助於提升水庫排砂比。此外，由表 7-1-1 中可知，溢洪道與排洪隧道等較高高程出水工，其排砂濃度最大分別約 3.83 kg/m³(蘇力颱風)及 4.6 kg/m³(艾利颱風)，相對於排砂隧道於蘇力及潭美颱風期間排砂濃度最大分別約 34.19kg/m³(蘇力颱風)及 21.66 kg/m³(艾利颱風)低許多，可見改建後之排砂隧道可達到排出泥砂濃度將近 5~10 倍於溢洪道與排洪隧道出流泥砂濃度之功效，成效顯著。

表 7-1-1 現況條件下歷年颱風事件排砂比

年份	2004	2008	2008	2008	2009	2010	2012	2013	2013
颱風	艾利	辛樂克	鳳凰	薔蜜	莫拉克	凡那比	蘇拉	蘇力	潭美
Qpeak(cms)	8594	3447	2040	3292	1838	1056	5385	5458	2412
總排砂比(%)	56.77	24.20	12.90	13.20	14.30	2.70	15	34.34	37.2
石門電廠排砂比(%)	14.6	9.4	8.9	8.7	9.2	1.5	2.0	17.6	8.1
石門電廠平均排砂濃度(kg/m ³)	92.3	32.5	11.13	23.4	7.62	0.84	8.03	91.94	24.18
溢洪道排砂比(%)	19.9	5.4	1.1	0.1	0.0	0.0	7.1	4.8	5.8
溢洪道平均排砂濃度(kg/m ³)	8.1	2.75	0.99	0.55	0	0	2.13	3.83	2.83
排洪隧道排砂比(%)	7.97	9.3	2.6	4.3	3.8	1.0	3.3	2.5	2.3
排洪隧道平均排砂濃度(kg/m ³)	4.6	2.15	0.22	1.38	1.22	0.52	2.02	3.35	1.21
石門大圳排砂比(%)	1.13	0.3	0.3	0.3	0.7	0.5	0.2	1.3	0.4
石門大圳平均排砂濃度(kg/m ³)	56.5	7.27	3.61	6.96	2.25	0.85	4.43	37.07	6.61
PRO 排砂比(%)	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.8	7.2
PRO 平均排砂濃度(kg/m ³)	95.4	22.59	0	9.49	0	0	19.36	52.15	23.34
排砂隧道排砂比(%)	-	-	-	-	-	-	-	6.3	13.3
排砂隧道平均排砂濃度(kg/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	34.19	21.66
備註	試驗	實測	實測	實測	實測	實測	實測	實測 (電廠改建完成)	實測 (電廠改建完成)

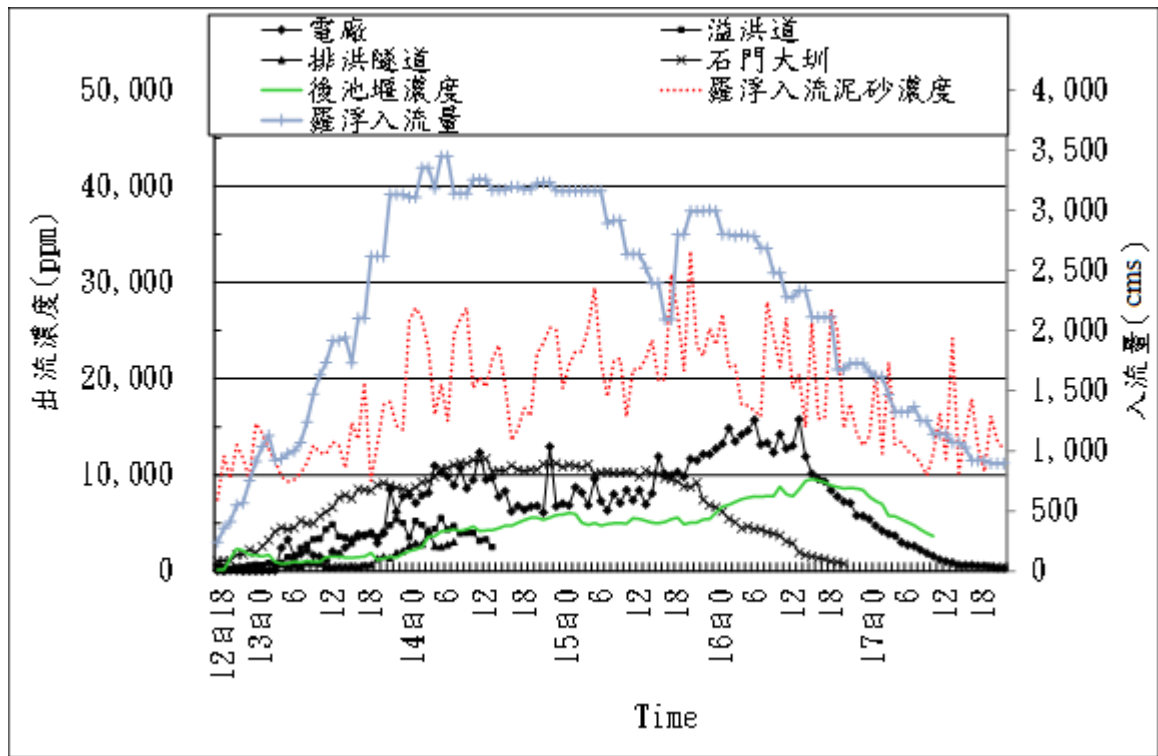


圖 7-1-1 2008 辛樂克颱風出流濃度歷線圖

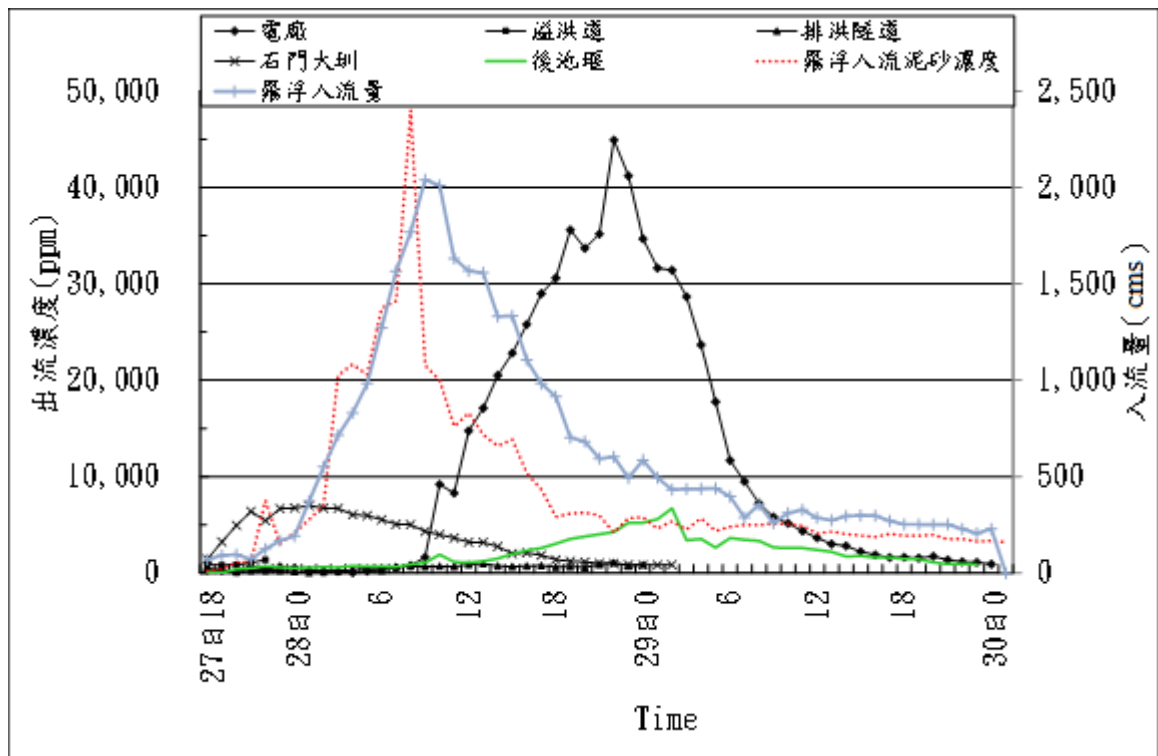


圖 7-1-2 2008 鳳凰颱風出流濃度歷線圖

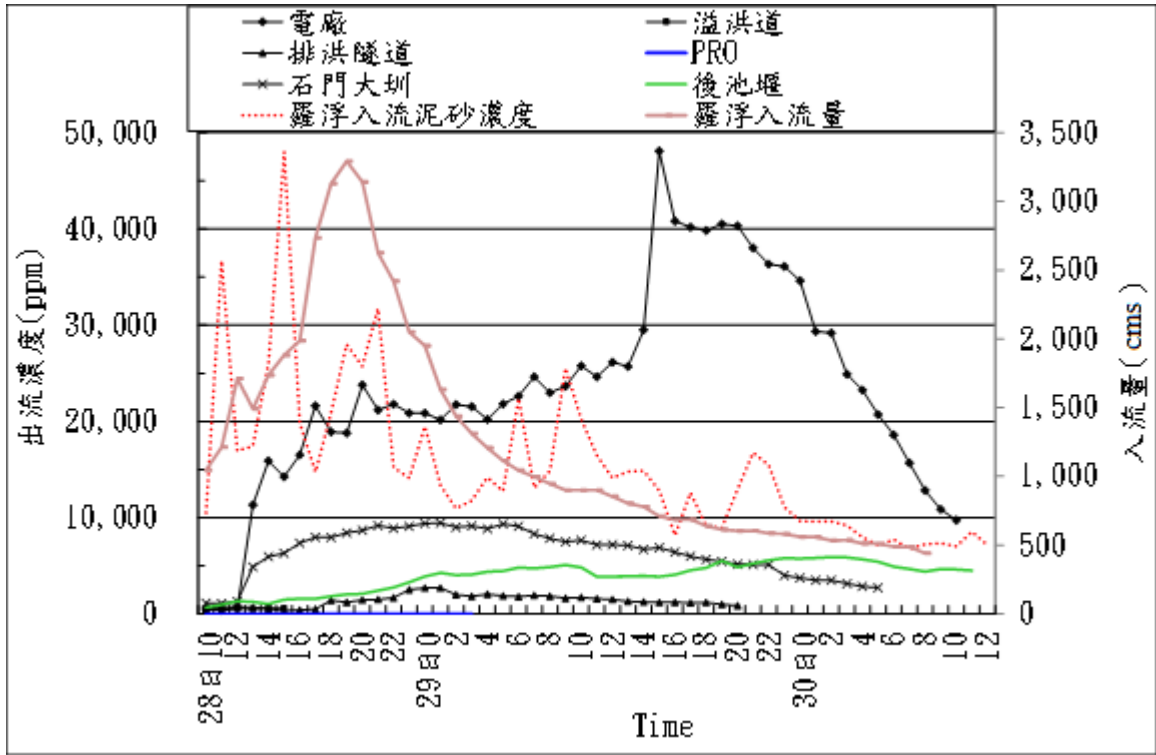


圖 7-1-3 2008 薈蜜颱風出流濃度歷線圖

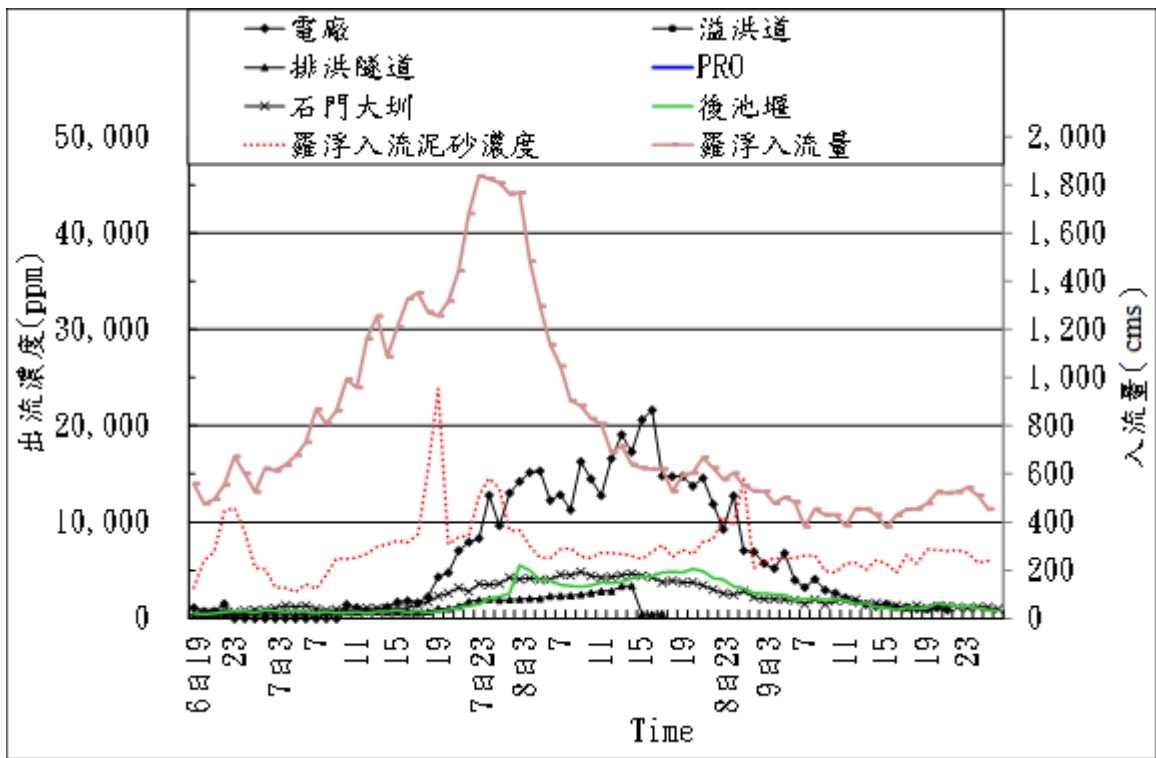


圖 7-1-4 2009 莫拉克颱風出流濃度歷線圖

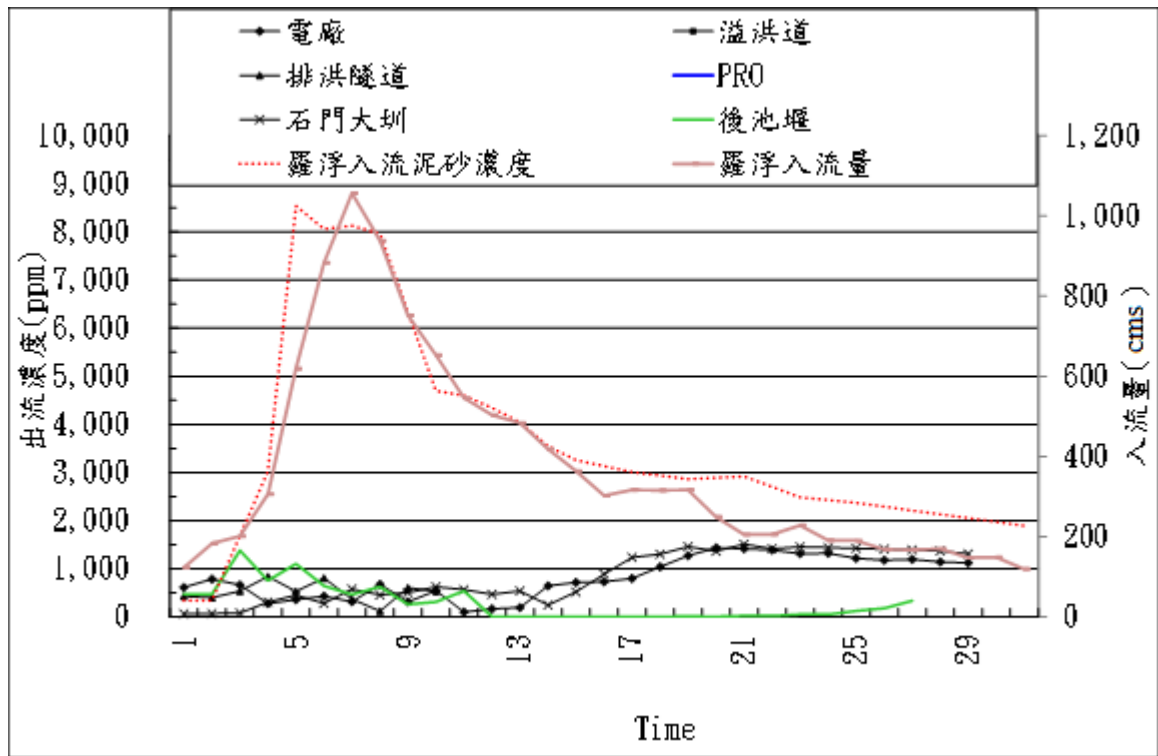


圖 7-1-5 2010 凡那比颱風出流濃度歷線圖

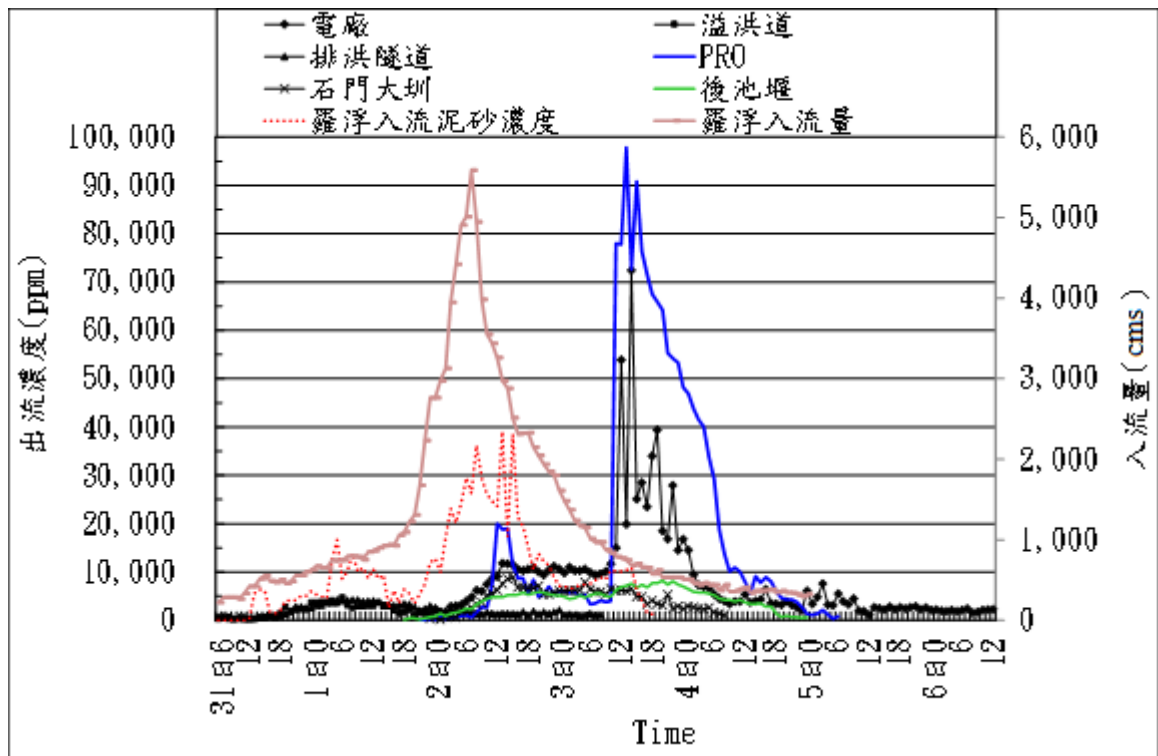


圖 7-1-6 2012 蘇拉颱風出流濃度歷線圖

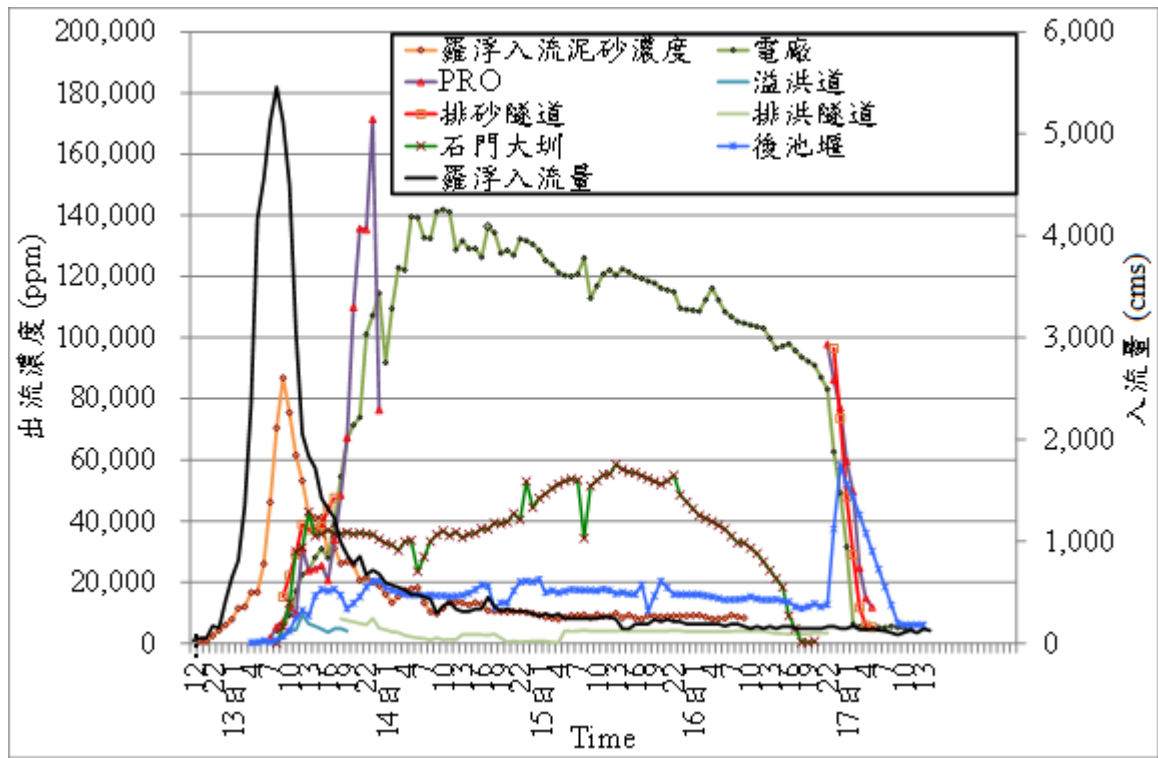


圖 7-1-7 2013 蘇力颱風出流濃度歷線圖

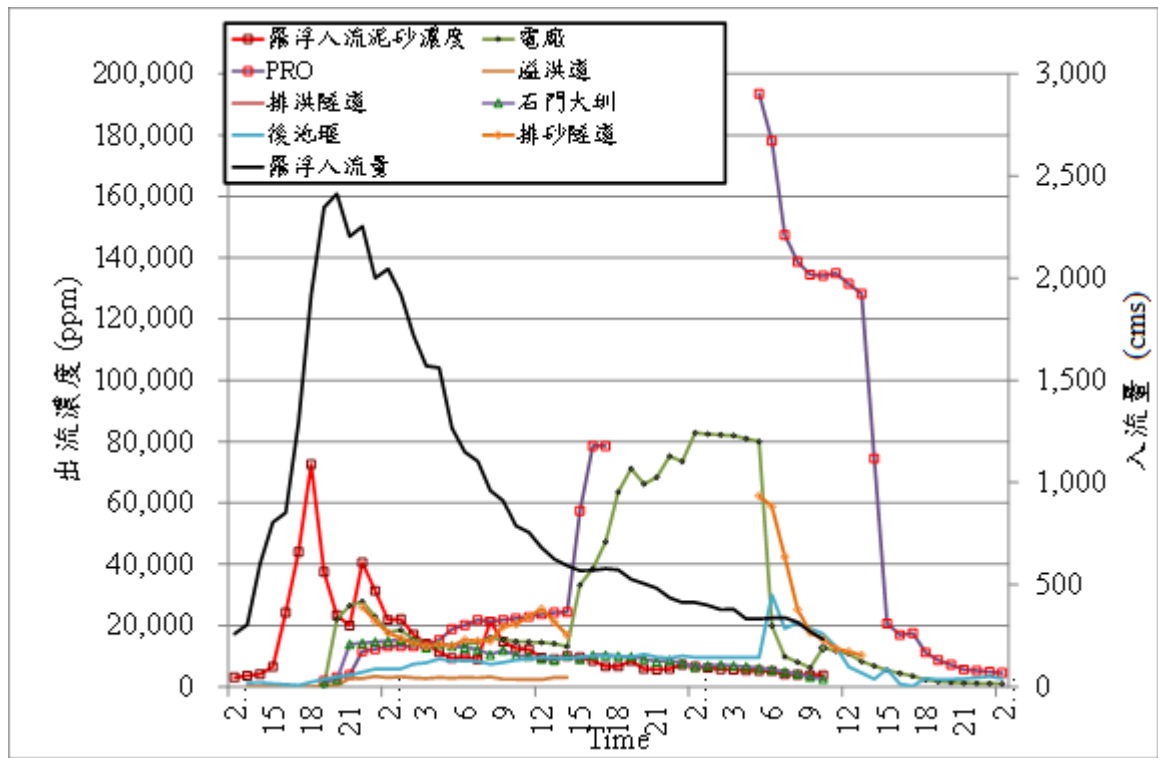


圖 7-1-8 2013 潭美颱風出流濃度歷線圖

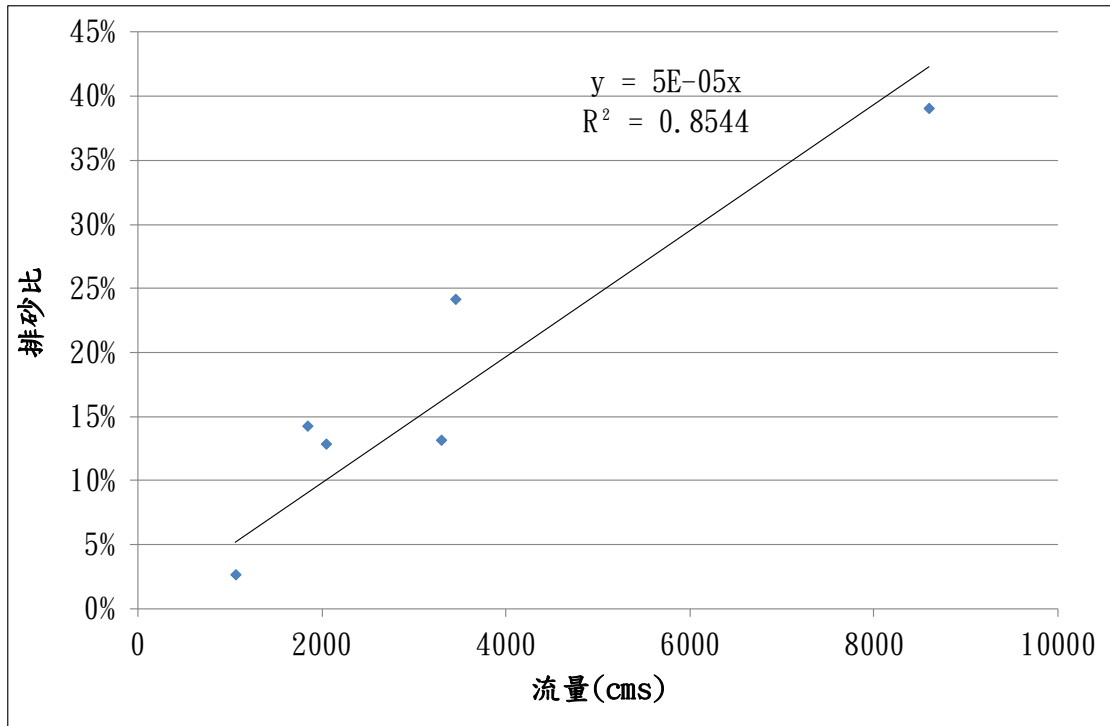


圖 7-1-9 入流量與排砂比關係圖(不包含 2013 年颱風事件)

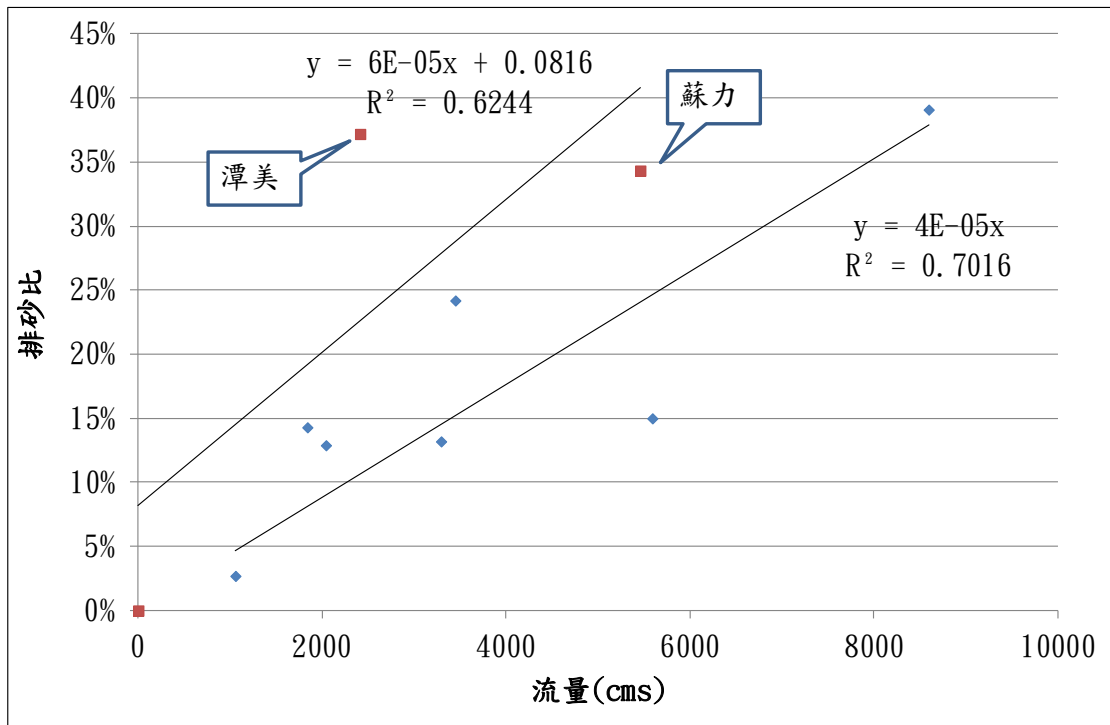


圖 7-1-10 入流量與排砂比關係圖(包含 2013 年蘇力及潭美)

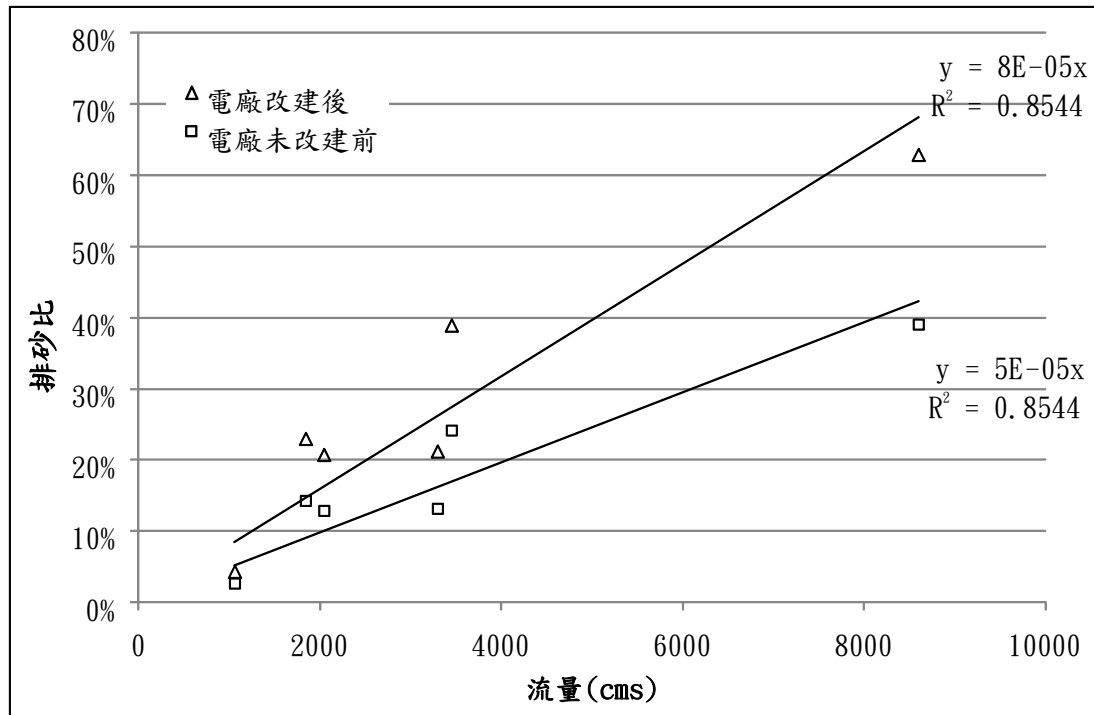


圖 7-1-11 入流量與電廠改建前後排砂比關係圖

7-2 應用異重流模式分析其運行及抵達大壩時間

本研究已於 3-2 節中詳述異重流模式之緣起，其所採用之 CFX 數值模擬軟體之統御方程式也已於該節中說明，因此本研究以石門水庫為案例，建立石門水庫異重流運移模式。模式首先須進行檢定驗證，在經辛樂克颱風(檢定案例)及鳳凰颱風(驗證案例)之模式案例檢驗後，異重流模式能適切的反應庫區壩前濃度之漲退情形，因此可作為分析異重流於石門水庫庫區之運行及推估抵達大壩之運移時間。

模式輸入邊界條件如圖 7-1-7 及圖 7-1-8 所示，選用羅浮之入流量及入砂量作為入流邊界條件給定，出流邊界則設定為開放邊界。圖 7-2-1 及圖 7-2-2 為本計畫應用案例之模擬結果，應用案例分別為蘇力颱風與潭美颱風，由於上述兩場颱風於庫區內不同垂直深度之出水工皆有濃度採樣資料，故可利用該兩場颱風量測資料進行模式比對。

蘇力颱風之模擬結果如圖 7-2-1 所示，其中溢洪道並未全程排洪，故模擬及實測值於第 15 個小時即結束，溢洪道實測之尖峰濃度為 9,442ppm，而模擬尖峰濃度則為 7,025 ppm；排洪隧道之實測尖峰濃度則出現在第 19 小時(8,192 ppm)，而模擬尖峰濃度則在第 35 小時

達到 4,050 ppm，而在第 55 小時仍有 3,050ppm，因此雖模擬值與實測值相比之尖峰濃度延遲約 16 小時，但考量整體異重流運移歷程，模擬值在尖峰段雖較為低估，但漲水段及退水段之模擬趨勢並無太大誤差；而石門大圳之模擬值與實測值趨勢相符，但尖峰濃度發生時間分別為：第 57 小時(實測)及第 50 小時(模擬)，其濃度分別為 58,495ppm(實測)及 49,880ppm(模擬)；排砂隧道則因開啟時機不長，並無法呈現完整歷線，但仍可由圖看出，在異重流抵達壩前後，濃度即產生劇烈變化，模擬值與實測值中此現象相符。圖 7-2-2 則為潭美颱風之模擬結果，其溢洪道及排洪隧道之趨勢與蘇力颱風相似；石門大圳之實測值於 30 小時開始有下降趨勢，但模擬值並未有此現象；排砂隧道之實測值則於異重流抵達壩前後下降，而模式為上升趨勢，此為本案例較不合理之處。由上述說明可知，各不同高程出水工之濃度與離底床距離成反比，濃度之分布呈現底部較高而進水面處較低之趨勢，符合庫區發生異重流時之泥砂運移型態。

圖 7-2-3 及圖 7-2-4 分別為 2013 蘇力及潭美颱風異重流運移及沿程濃度變化圖，由圖可知兩案例之異重流抵達壩前時間分別為第 5.5 小時與第 6.5 小時。因此可將此數據匯入表 7-2-1 中進行比較，由表 7-2-1 可知，兩場颱風時測與模擬之異重流運移時間之誤差皆在 1 小時之內，故運移速度相當接近，因此異重流模式可適切的模擬並推估颱風時期之異重流運移現象。圖 7-2-5 及圖 7-2-6 分別為流量及入流尖峰泥砂濃度與異重流到達壩前時間之相關性，由圖上可知此兩種參數無法完全掌握異重流到達壩前時間，因此應進一步研究掌握異重流到達壩前時間之重要因子或是複合性因子之關連性。

表 7-2-1 實測與模擬之運移時間及速度比較表(2013 蘇力及潭美颱風)

颱風事件	2013 蘇力		2013 潭美	
	實測	模擬	實測	模擬
運移時間(hr)	7	6.5	6	5.5
運移速度(m/s)	0.52	0.48	0.63	0.58

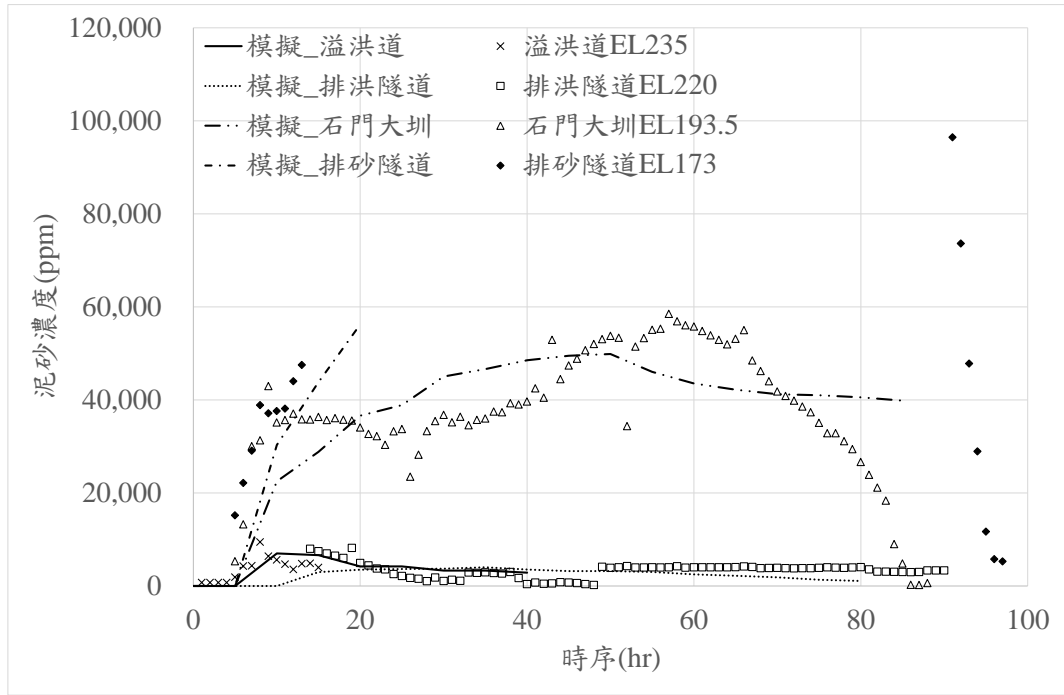


圖 7-2-1 蘇力颱風於不同垂直深度之濃度模擬值

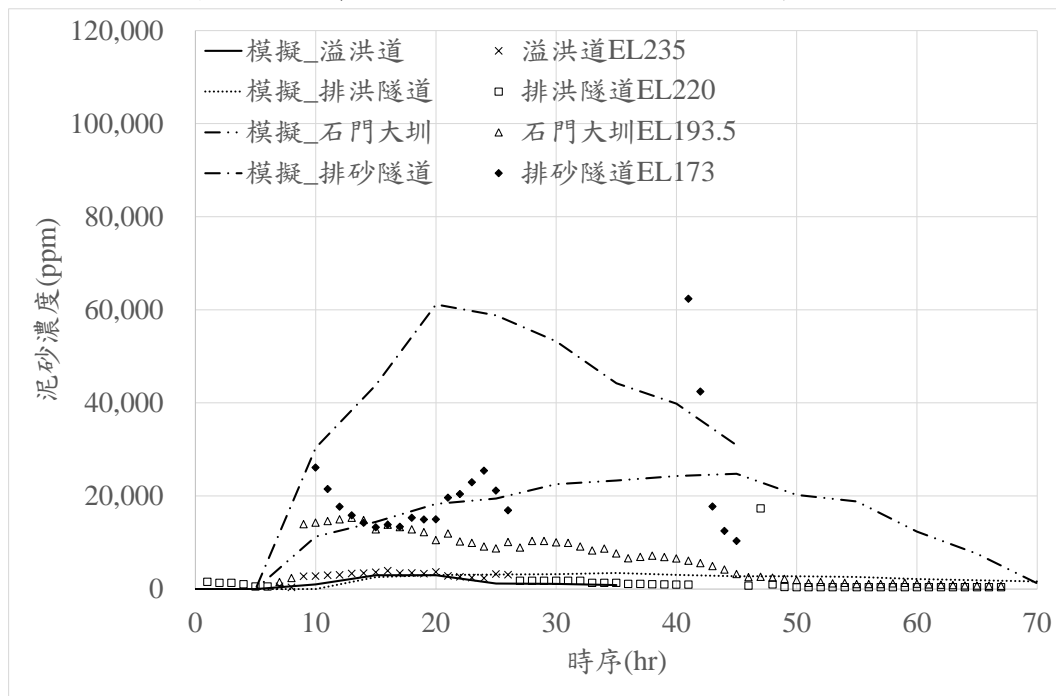
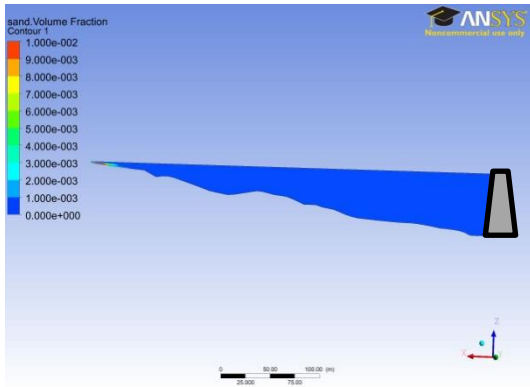
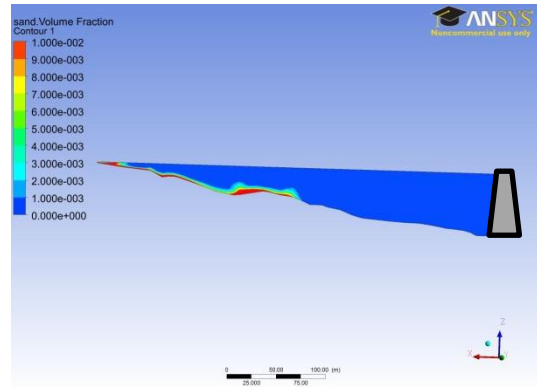


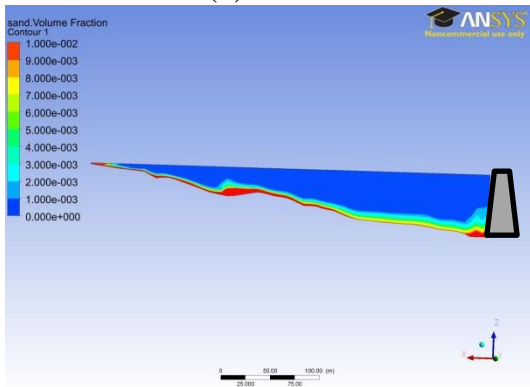
圖 7-2-2 潭美颱風於不同垂直深度之濃度模擬值



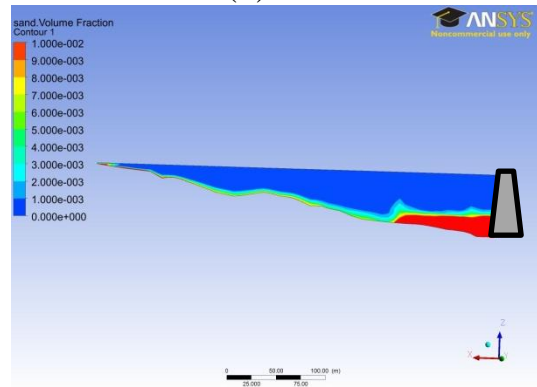
(a) 0.5hr



(b) 3hr

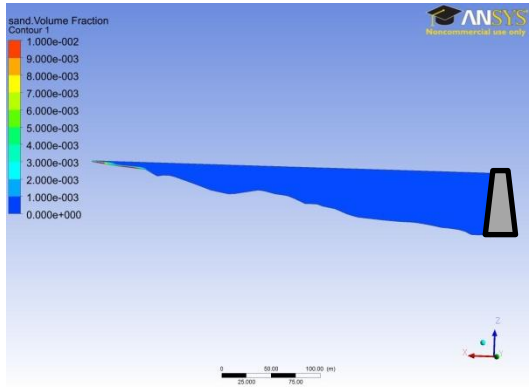


(c) 5.5hr

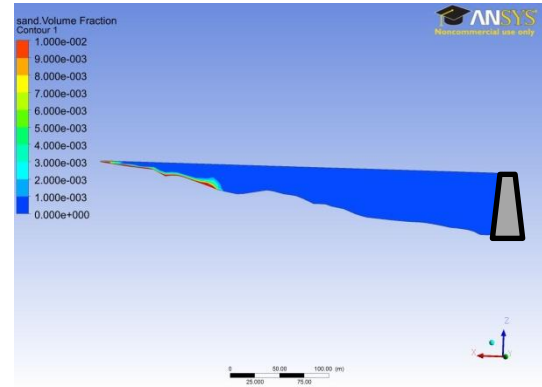


(d) 13hr

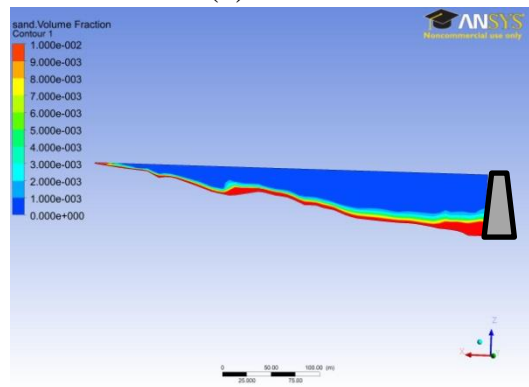
圖 7-2-3 蘇力颱風異重流運移及沿程濃度變化圖



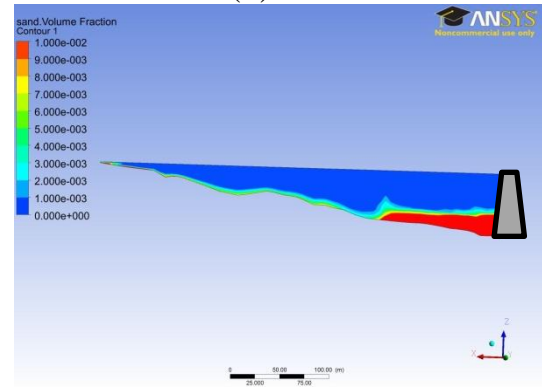
(a) 0.5hr



(b) 3hr



(c) 6.5hr



(d) 15hr

圖 7-2-4 潭美颱風異重流運移及沿程濃度變化圖

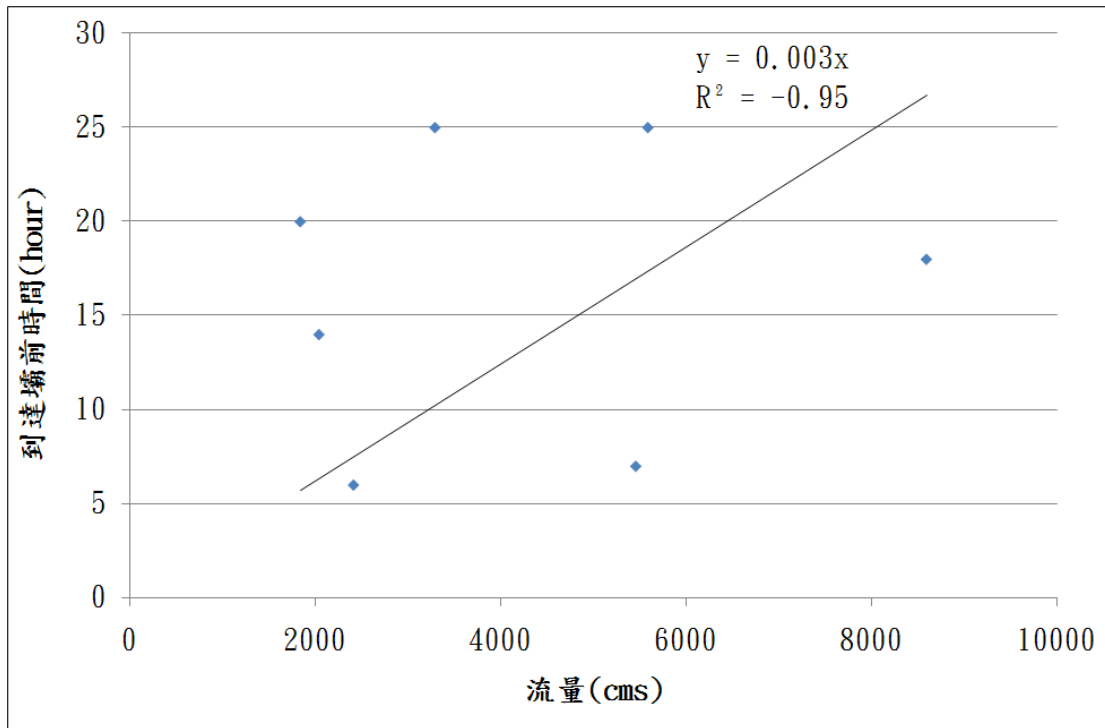


圖 7-2-5 流量與異重流到達壩前時間相關性

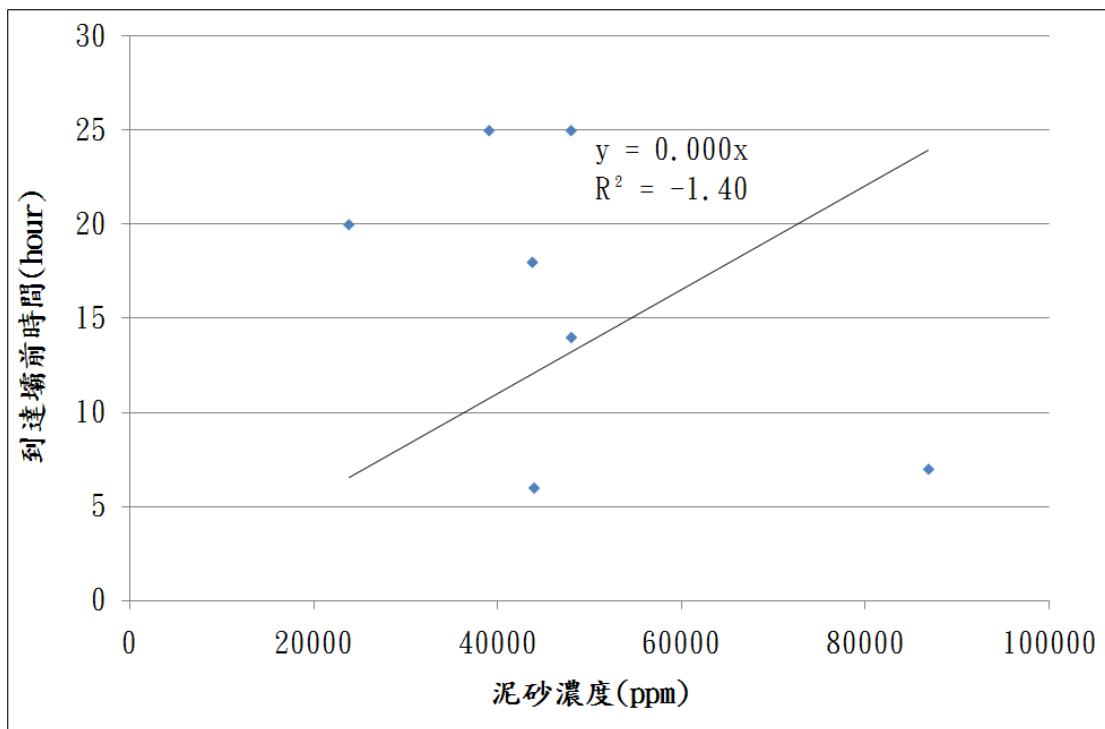


圖 7-2-6 泥砂濃度與異重流到達壩前時間相關性

本計畫除了根據異重流速值模式分析異重流運行及抵達大壩時間外，亦可根據經驗式及試驗室結果推估該時間，因此根據圖 7-2-7

所示，異重流運移速度主要跟頭部運移速度有關，因此異重流頭部運移速度亦可由以下三種方式進行簡易估算，進而推估異重流運行及抵達大壩時間：

1. $U_f = \sqrt{2\left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a}\right)gh} = \sqrt{2g'h}$ (quasi-uniform、horizontal slop、without friction and mixing)(Turner, 1973)
2. $U_f = 0.75\sqrt{g'H_f}$ (for a large range of slopes and of roughness)(Altinakar, 1990)
3. $U_f = (g'q)^{1/3} f(\alpha)$ ，sediment flux $B_0 = g'q$ ，bed slop α ，單寬流量 q ：
 - i. for large slopes(See Britter and Linden, 1980) $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
 $\Rightarrow \frac{U_f}{B_0^{1/3}} = 1.5 \pm 0.2$
 - ii. for small slopes(See Altinakar et al., 1990) $\alpha < 5^\circ \Rightarrow$
 $0.7 < \frac{U_f}{B_0^{1/3}} < 1.5$

其中 U_f 代表頭部運移速度， H_f 代表頭部厚度， $g' = g\left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a}\right)C_s$ ， ρ_a ：ambient fluid density (周遭水體的密度：清水)， ρ_t ：gravity fluid density(異重流密度)， C_s 為異重流體積濃度， h 為異重流本體厚度

$h = \frac{\int_0^{h_t} u dz}{U}$ ， z 為垂向高度(底床為零)， h_t 為速度為零處與底床之距離， u 為對應高度 z 的速度， \bar{U} 為異重流平均速度 (Ellison and Turner, 1959；Parker et al., 1987)。此外， h 亦可以利用潛入點之厚度進行給定，而潛入點位置之判斷則可以利用密度福祿數進行推估，(7-1)式即為判斷潛入點位置之經驗式：

$$\frac{U_p}{\sqrt{\frac{\Delta\gamma}{\gamma} gH_p}} = F_{rp} \quad (7-1)$$

式中 U_p 表示潛入點前之平均流速； $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_w$ ； γ 表示異重流比

重； γ_w 表示清水比重； H_p 表示潛入點水深； g 表示重力加速度； F_{rp} 表示潛入點前之密度福祿數，蒐集參考文獻中各實驗室對 F_{rp} 試驗之結果列於表 7-2-2，統整後可得知異重流潛入發生時，密度福祿數之值可能介於 0.45 至 1.0 之間。

表 7-2-2 各實驗室研究異重流潛入點之密度福祿數

參考文獻	福祿數試驗結果
Ellison and Turner, 1959 Alavian, 1986	0.45~0.55
Wunderlich and Elder, 1973	0.5
Fan et al., 1980	0.78
Akiyama and Stefan, 1985	0.68
Farrell, 1986	0.67
Schlapfer, 1987	0.7754~1.0
Farrell and Stefan, 1988	0.49

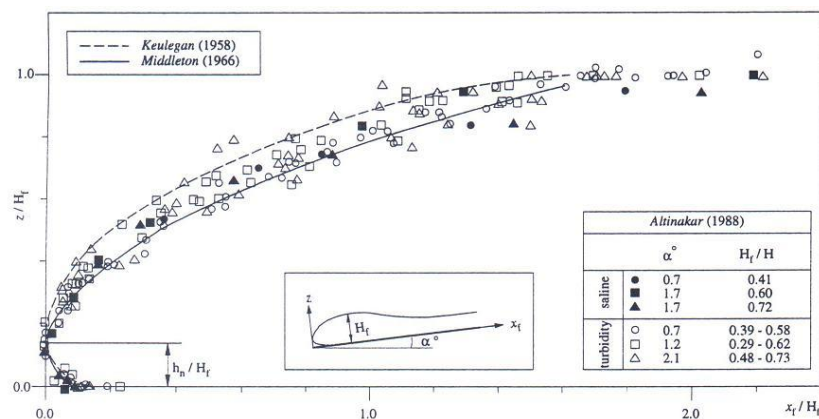


圖 7-2-7 異重流頭部運移之厚度變化

由以上兩種方法(垂直二維模式及異重流運移速度簡易推估法)，即可分析異重流於石門水庫庫區運行及抵達大壩之時間，進而提供水庫各出流設施出流設施原水濁度分析及後池濁度變化情形推估、排砂防淤操作條件評估、水庫排砂量及排砂防淤之即時水庫操作。

表 7-2-3 列出各颱風事件之異重流運行速度，內容包括 200494 艾利颱風、2008 鳳凰颱風、辛樂克颱風、2009 莫拉克颱風、2012 蘇拉颱風以及 2013 蘇力及潭美颱風，由表中可知異重流運行時間在流量範圍介於 1,838cms~8,594cms 之間時，大約介於 14~25 小時之間，而運行速度從羅浮到大壩介於 0.21m/s~0.38m/s 之間。

表 7-2-3 颱風事件入流泥砂濃度運移時間及運移速度

年份	2004	2008	2008	2009	2012	2013	2013
颱風	艾利	鳳凰	辛樂克	莫拉克	蘇拉	蘇力	潭美
臨前水位(m)	242.7	242.2	240.64	222.9	240.5	239.34	242.03
Qpeak(cms)	8,594	2,040	3,447	1,838	5,385	5,458	2,413
Cpeak(ppm)	43,800	48,028	38,284	23,864	39,100	86,833	43,990
運移時間(hr)	18	14	61	20	25	7	6
運移速度(m/s)	0.29	0.38	0.63	0.26	0.21	0.52	0.63

此外，根據(7-1)式及 F_{rp} 經由試驗之結果介於 0.45 至 1 之間，即可將其應用於 2009 莫拉克颱風、2008 鳳凰颱風、2013 蘇力颱風及 2013 潭美颱風，藉由此四場颱風檢驗判斷潛入點位置之經驗式及推估異重流運行及抵達大壩時間公式之適用性，圖 7-2-8 至圖 7-2-11 及表 7-2-4 至表 7-2-7 即為 2009 莫拉克颱風、2008 鳳凰颱風、2013 蘇力颱風及潭美颱風逐時各斷面之密度福祿數變化，由圖中可知在事件初期庫區上游斷面最先到達此一異重流潛入條件，接著隨著入流量變大，滿足異重流潛入條件之斷面往壩前推進，隨後因為入流量減少滿足異重流潛入條件之斷面又回到水庫上游斷面，由此可知異重流潛入位置是隨著入流量變動；由圖 7-2-8 及圖 7-2-9 可知，2009 莫拉克颱風異重流潛入斷面介於 26~30 之間，而 2008 鳳凰颱風異重流潛入斷面介於 32~28 之間，且本計畫採用 $U_f = \sqrt{2\left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a}\right)gh} = \sqrt{2g'h}$ 計算異重流運移速度時，可發現 2009 莫拉克颱風於 8 月 7 日 10 時及 11 時所產生異重流於第 26 號斷面潛入可最先運移至壩前，異重流運移速度分別為 0.20m/s 及 0.21m/s，異重流運移時間分別為 15 小時及 14 小時；2008 鳳凰颱風則於 7 月 28 日 8 時及 12 時所產生異重流於第 31 號及第 29 號斷面潛入可最先運移至壩前，異重流運移速度分別為 0.30m/s 及 0.38m/s，異重流運移時間分別為 14 小時及 10 小時，由以上之結果可知，最早潛入之異重流不一定可最先運移到壩前，隨著入流量的增加，較晚潛入之異重流也有可能超越先前潛入之異重流；換言之，異重流運移速度不僅跟潛入斷面有關，亦跟當時之入流量高度相關，且由異重流之頭部運移速度推估可知，異重流之頭部運移速度與表 7-2-3 中颱風事件尖峰入流泥砂濃度運移時間及運移速度不盡相同，若是入流尖峰泥砂濃度所產生之異重流最先運移至壩前，則其

到達壩前時間與速度即與異重流頭部運移時間與速度相同(2008 鳳凰颱風)，若是入流尖峰泥砂濃度所產生之異重流不一定最先到運移至壩前，則其到達壩前時間與速度即與異重流頭部運移時間與速度不同(2009 莫拉克颱風)，雖然入流尖峰泥砂濃度運移速度較快亦無法趕上較早潛入且運移至壩前之異重流頭部，所以導致 2008 鳳凰颱風異重流頭部到達壩前時間與速度與表 7-2-3 相同，但是 2009 莫拉克颱風異重流頭部到達壩前時間與速度較表 7-2-3 要小。

圖 7-2-10 及圖 7-2-11 為根據 2013 蘇力颱風及 2013 潭美颱風所繪成的，由圖中可知，2013 蘇力颱風異重流潛入斷面介於 29~32 之間，而 2013 潭美颱風異重流潛入斷面介於 30~32 之間；2013 蘇力颱風於 7 月 13 日 4 時所產生之異重流於第 29 號斷面潛入，且最先運移至壩前，異重流運移速度為 0.52m/s，異重流運移時間為 7 小時，預計到達壩前時間為 7 月 13 日 11 時，與電廠尖峰濃度發生時刻 7 月 13 日 10 時相差 1 個小時；2013 潭美颱風則於 8 月 21 日 17 時產生異重流於第 29 號斷面潛入，且最先運移至壩前，異重流運移速度為 0.63m/s，異重流運移時間分別為 6 小時，預計到達壩前時間為 8 月 21 日 23 時，與電廠尖峰濃度發生時刻 8 月 21 日 22 時相差 1 個小時。

由 2013 蘇力颱風與潭美颱風的石門水庫異重流推估速度來看，異重流運移速度推估值與實測值相當接近，誤差皆為 1 小時，可供主管機關在水庫排砂操作時參考。

表 7-2-4 莫拉克颱風異重流運行及抵達大壩時間推估

月/日	hr	T(hour)	潛入斷面	潛入水深(m)	距離(m)	Q(m ³ /s)	C(ppm)	異重流速度(m/s)	異重流運行時間(hour)	異重流運行至壩址時間(hour)
8/7	2	7	26	3.25	10805.78	526.08	5275.00	0.12	24	31
8/7	3	8	26	3.69	10805.78	623.52	5112.00	0.13	23	31
8/7	4	9	26	4.11	10805.78	614.08	3210.00	0.11	27	36
8/7	5	10	26	4.54	10805.78	637.60	3202.00	0.11	26	36
8/7	6	11	26	4.99	10805.78	676.72	2748.00	0.11	27	38
8/7	7	12	26	5.47	10805.78	732.88	3584.00	0.13	22	34
8/7	8	13	26	6.03	10805.78	868.48	3058.00	0.13	23	36
8/7	9	14	26	6.53	10805.78	809.83	4555.00	0.16	18	32
8/7	10	15	26	7.05	10805.78	863.60	6241.00	0.20	15	30
8/7	11	16	26	7.64	10805.78	992.93	6201.00	0.21	14	30
8/7	12	17	26	8.20	10805.78	959.39	6336.00	0.22	14	31
8/7	13	18	26	8.87	10805.78	1161.99	6728.00	0.23	13	31
8/7	14	19	27	1.96	11861.78	1256.03	7459.00	0.12	29	48
8/7	15	20	27	2.56	11861.78	1087.34	7697.00	0.13	25	45
8/7	16	21	28	1.55	12933.81	1211.33	8092.00	0.11	34	55
8/7	17	22	28	2.22	12933.81	1327.16	7906.00	0.13	28	50
8/7	18	23	28	2.89	12933.81	1352.36	8764.00	0.15	24	47
8/7	19	24	28	3.5	12933.81	1272.15	15579.00	0.22	16	40
8/7	20	25	28	4.09	12933.81	1256.73	23864.00	0.30	12	37
8/7	21	26	28	4.7	12933.81	1317.29	7692.00	0.18	20	46
8/7	22	27	28	5.36	12933.81	1443.91	8470.00	0.20	18	45
8/7	23	28	28	6.12	12933.81	1681.38	8612.00	0.22	16	44
8/7	24	29	29	8.64	13615.35	1837.54	12771.00	0.32	12	41
8/8	8日1	30	29	9.44	13615.35	1825.89	14593.00	0.35	11	41
8/8	2	31	29	10.21	13615.35	1808.47	13535.00	0.35	11	42
8/8	3	32	29	10.76	13615.35	1764.02	9112.00	0.30	13	45
8/8	4	33	29	11.12	13615.35	1767.88	9148.00	0.30	12	45
8/8	5	34	29	11.35	13615.35	1482.71	7512.00	0.28	14	48
8/8	6	35	30	4.64	14423.25	1296.84	6341.00	0.16	25	60
8/8	7	36	30	4.68	14423.25	1137.53	6291.00	0.16	25	61
8/8	8	37	30	4.71	14423.25	1049.02	7204.00	0.18	23	60

表 7-2-5 鳳凰颱風異重流運行及抵達大壩時間推估

月/日	hr	T(hour)	潛入斷面	潛入水深(m)	距離(m)	Q(m ³ /s)	C(ppm)	起始厚度(m)	異重流速度(m/s)	異重流運行時間(hour)	異重流運行至壩址時間(hour)	壩前異重流厚度(m)	壩前異重流厚度高程(m)
7/28	1	8	32	0.66	16206.17	373.01	5514.00	0.48	0.05	87	95	32.89	216.81
7/28	2	9	31	1.94	15413.51	550.94	7035.00	1.42	0.11	38	47	32.24	216.16
7/28	3	10	31	1.9	15413.51	715.18	20486.00	1.39	0.19	23	33	32.21	216.13
7/28	4	11	31	1.78	15413.51	831.05	21657.00	1.30	0.19	23	34	32.13	216.04
7/28	5	12	31	1.73	15413.51	982.46	20589.00	1.26	0.18	24	36	32.09	216.00
7/28	6	13	31	1.81	15413.51	1272.53	27472.00	1.32	0.21	20	33	32.15	216.06
7/28	7	14	31	1.98	15413.51	1565.18	28235.00	1.45	0.22	19	33	32.27	216.19
7/28	8	15	31	2.06	15413.51	1767.86	48028.00	1.50	0.30	14	29	32.33	216.24
7/28	9	16	31	2.15	15413.51	2039.78	21545.00	1.57	0.20	21	37	32.40	216.31
7/28	10	17	30	3.37	14423.25	2010.98	19966.00	2.46	0.25	16	33	31.31	215.22
7/28	11	18	30	3.25	14423.25	1631.48	15197.00	2.37	0.21	19	37	31.22	215.13
7/28	12	19	29	9.62	13615.35	1567.55	16607.00	7.02	0.38	10	29	34.25	218.17
7/28	13	20	29	9.57	13615.35	1557.56	14326.00	6.99	0.35	11	31	34.22	218.13
7/28	14	21	29	9.42	13615.35	1330.97	13185.00	6.88	0.34	11	32	34.11	218.02
7/28	15	22	29	9.36	13615.35	1333.88	13850.00	6.83	0.34	11	33	34.06	217.98
7/28	16	23	29	9.2	13615.35	1104.81	10354.00	6.72	0.29	13	36	33.95	217.86
7/28	17	24	28	9.07	12933.81	982.26	8651.00	6.62	0.27	13	37	32.49	216.40
7/28	18	25	28	8.95	12933.81	915.42	5835.00	6.53	0.22	17	42	32.40	216.31
7/28	19	26	28	8.92	12933.81	702.44	6170.00	6.51	0.22	16	42	32.38	216.29
7/28	20	27	28	8.88	12933.81	682.27	6262.00	6.48	0.22	16	43	32.35	216.26
7/28	21	28	28	8.82	12933.81	593.50	5977.00	6.44	0.22	16	44	32.31	216.22
7/28	22	29	28	8.82	12933.81	602.28	4216.00	6.44	0.18	20	49	32.31	216.22
7/28	23	30	28	8.82	12933.81	493.03	5683.00	6.44	0.21	17	47	32.31	216.22
7/28	24	31	28	8.86	12933.81	585.66	5791.00	6.47	0.22	17	48	32.34	216.25
7/29	24	32	29	2.44	13615.35	493.96	4609.00	1.78	0.10	37	69	29.01	212.92

表 7-2-6 蘇力颱風異重流運行及抵達大壩時間推估

月/日	T(hour)	潛入斷面	潛入水深(m)	距離(m)	Q(m ³ /s)	C(ppm)	起始厚度(m)	異重流速度(m/s)	異重流運行時間(hour)	異重流運行至壩址時間(hour)
2013/7/12 20:00	1	32	0.44	16206.17	49.93	610.00	0.32	0.02	222	223
2013/7/12 21:00	2	32	0.55	16207.17	49.93	610.00	0.40	0.02	198	200
2013/7/12 22:00	3	32	0.66	16208.17	170.50	2417.00	0.48	0.05	91	94
2013/7/12 23:00	4	32	0.76	16209.17	151.69	4224.00	0.55	0.07	64	68
2013/7/13 0:00	5	31	2.23	15413.51	416.65	6031.00	1.63	0.14	30	35
2013/7/13 1:00	6	31	2.38	15413.51	644.65	7839.00	1.74	0.17	25	31
2013/7/13 2:00	7	31	2.53	15413.51	814.42	11471.20	1.85	0.21	20	27
2013/7/13 3:00	8	31	2.72	15413.51	1350.34	11933.33	1.99	0.22	19	27
2013/7/13 4:00	9	29	10.57	13615.35	2351.62	16650.00	7.72	0.52	7	16
2013/7/13 5:00	10	29	10.75	13615.35	4159.61	16700.00	7.85	0.52	7	17
2013/7/13 6:00	11	29	10.92	13615.35	4556.02	26000.00	7.97	0.66	6	17
2013/7/13 7:00	12	29	11.01	13615.35	5117.62	46166.67	8.04	0.88	4	16
2013/7/13 8:00	13	29	11.08	13615.35	5457.88	70466.67	8.09	1.08	3	16
2013/7/13 9:00	14	29	11.16	13615.35	5117.85	86833.33	8.15	1.20	3	17
2013/7/13 10:00	15	29	11.18	13615.35	4492.75	75457.66	8.16	1.12	3	18
2013/7/13 11:00	16	29	11.20	13615.35	3060.02	61520.71	8.18	1.02	4	20
2013/7/13 12:00	17	30	4.82	14423.25	2052.59	53104.60	3.52	0.62	6	23
2013/7/13 13:00	18	30	4.87	14423.25	1834.45	42192.98	3.56	0.56	7	25
2013/7/13 14:00	19	30	4.94	14423.25	1721.60	41021.68	3.61	0.55	7	26
2013/7/13 15:00	20	30	5	14423.25	1424.36	41237.60	3.65	0.56	7	27
2013/7/13 16:00	21	30	5.06	14423.25	1318.97	29084.27	3.69	0.47	8	29
2013/7/13 17:00	22	30	5.16	14423.25	1230.79	31096.39	3.77	0.49	8	30

表 7-2-7 潭美颱風異重流運行及抵達大壩時間推估

月/日	T(hour)	潛入斷面	潛入水深(m)	距離(m)	Q(m ³ /s)	C(ppm)	起始厚度(m)	異重流速度(m/s)	異重流運行時間(hour)	異重流運行至壩址時間(hour)
2013/8/21 10:00	34	30	1.92	14423.245	216.05	185.78	1.40	0.02	171	205
2013/8/21 11:00	35	30	1.86	14423.245	259.54	267.62	1.36	0.03	145	180
2013/8/21 12:00	36	30	1.82	14423.245	302.02	361.84	1.33	0.03	126	162
2013/8/21 13:00	37	30	1.84	14423.245	303.73	365.93	1.34	0.03	125	162
2013/8/21 14:00	38	30	2	14423.245	602.06	4129.00	1.46	0.11	36	74
2013/8/21 15:00	39	29	6.91	14423.245	804.80	6537.00	5.04	0.26	15	54
2013/8/21 16:00	40	29	7.03	14423.245	852.07	24208.00	5.13	0.51	8	48
2013/8/21 17:00	41	29	7.31	14423.245	1293.52	36122.00	5.34	0.63	6	47
2013/8/21 18:00	42	29	7.87	14423.245	1918.27	48736.00	5.75	0.76	5	47
2013/8/21 19:00	43	29	8.34	14423.245	2345.55	30542.00	6.09	0.62	6	49
2013/8/21 20:00	44	29	8.56	14423.245	2412.49	22687.00	6.25	0.54	7	51
2013/8/21 21:00	45	29	8.67	14423.245	2203.37	19728.00	6.33	0.51	8	53
2013/8/21 22:00	46	29	8.92	14423.245	2253.13	29043.50	6.51	0.63	6	52
2013/8/21 23:00	47	29	9.04	14423.245	2000.05	30959.50	6.60	0.65	6	53
2013/8/22 00:00	48	31	3.23	14423.245	2045.02	21279.50	2.36	0.32	12	60
2013/8/22 01:00	49	31	3.3	15413.51	1920.69	17172.00	2.41	0.29	15	64
2013/8/22 02:00	50	31	3.57	15413.51	1716.38	14659.00	2.61	0.28	15	65
2013/8/22 03:00	51	31	3.77	15413.51	1570.28	11258.00	2.75	0.25	17	68
2013/8/22 04:00	52	31	3.96	15413.51	1561.74	10803.00	2.89	0.26	17	69
2013/8/22 05:00	53	31	4.02	15413.51	1265.62	9166.50	2.93	0.24	18	71
2013/8/22 06:00	54	31	4.03	15413.51	1149.10	9135.00	2.94	0.24	18	72

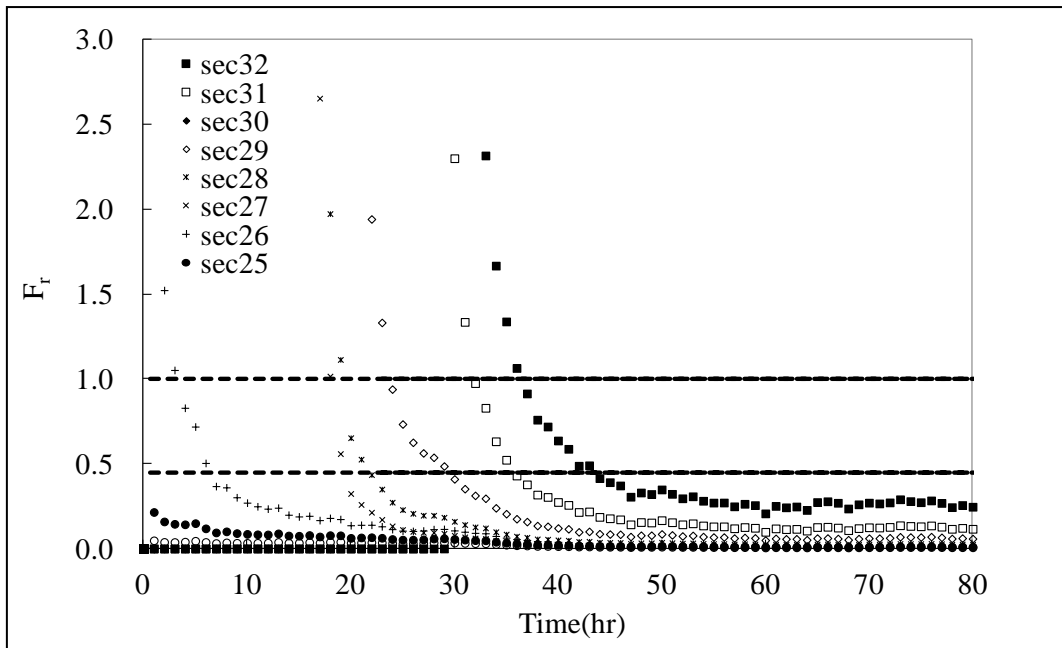


圖 7-2-8 莫拉克颱風各斷面密度福祿數變化

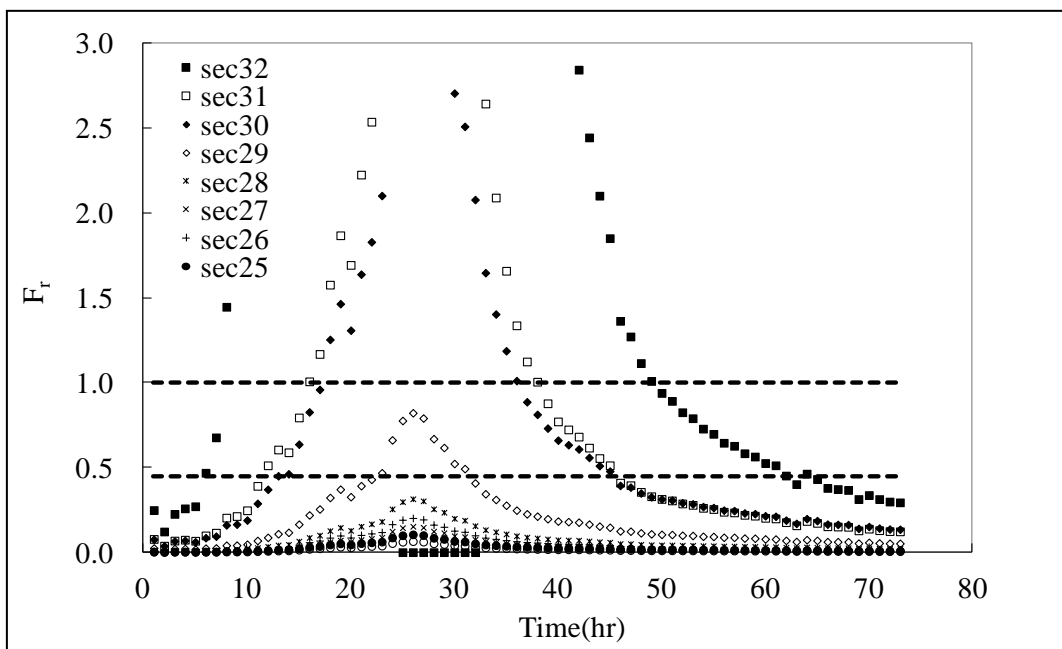


圖 7-2-9 鳳凰颱風各斷面密度福祿數變化

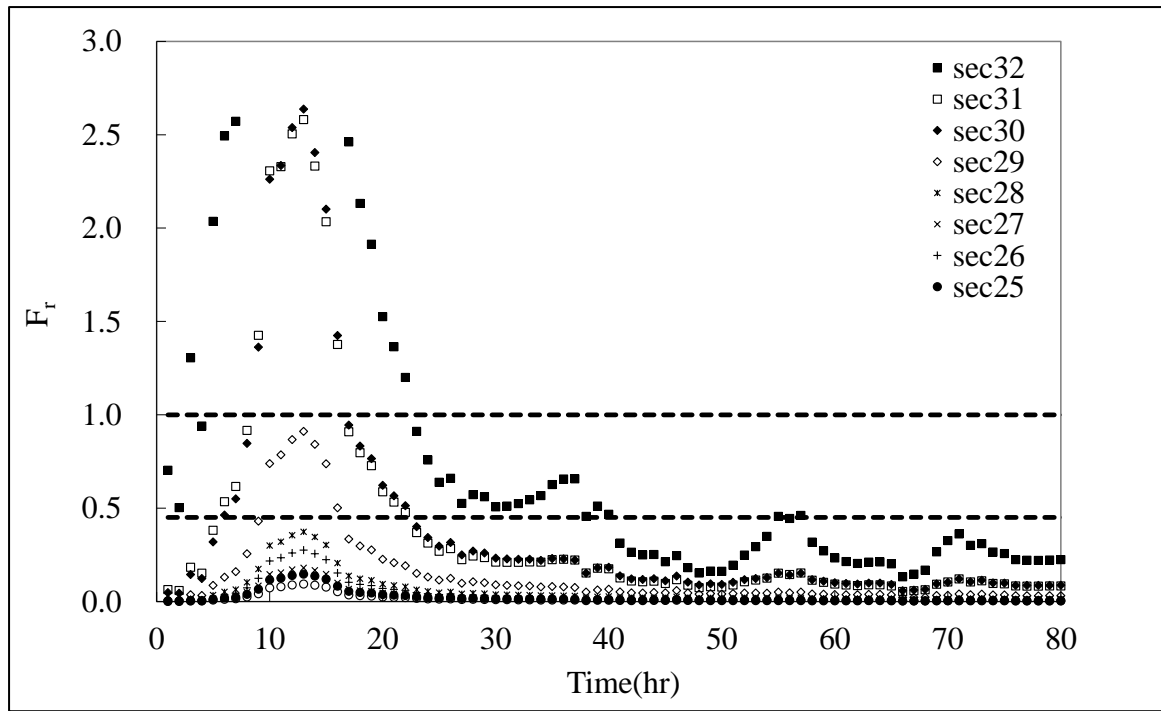


圖 7-2-10 蘇力颱風各斷面密度福祿數變化

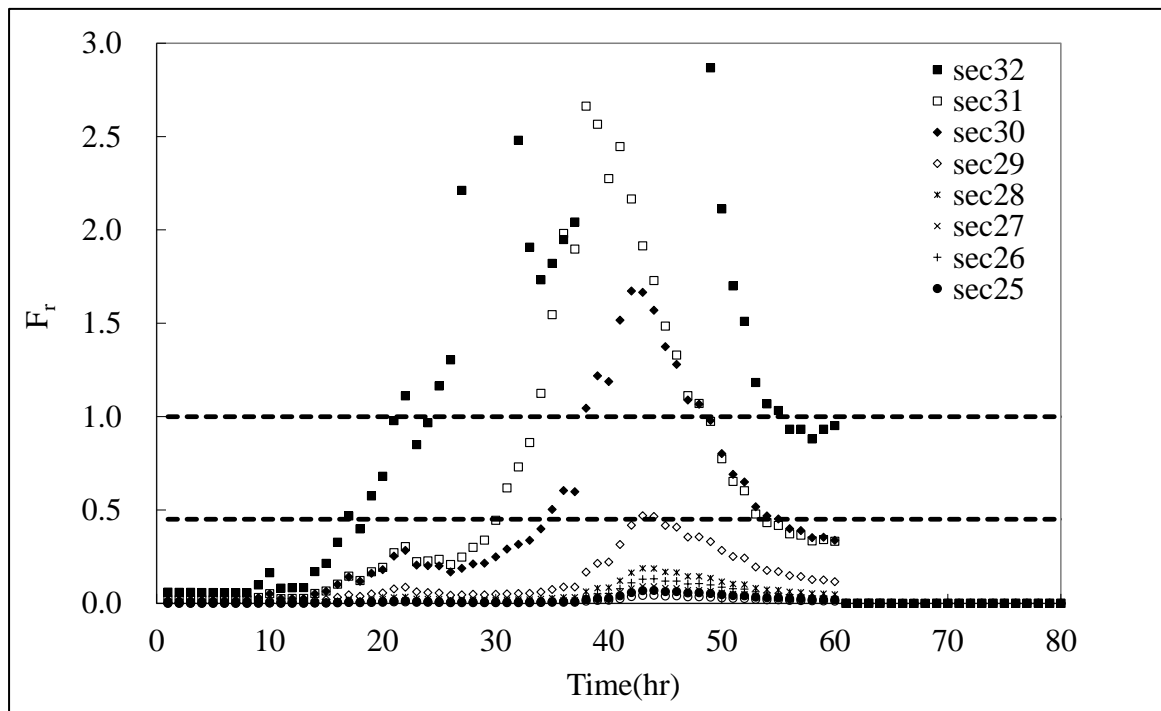


圖 7-2-11 潭美颱風各斷面密度福祿數變化

7-3 水庫各出流設施排砂防淤操作條件評估

因各出流設施排砂防淤操作條件評估，主要跟各出水工所排放之砂濃度、流量及下游河道各取水設施之容忍度有關，根據李等(2013)「石門水庫水庫排砂操作影響鳶山堰取水之研究」顯示，石門水庫在颱風豪雨時期底孔出水工(石門電廠取水口、河道放水道及石門大圳取水口)之排砂濃度皆較頂層出水工(溢洪道及排洪隧道)為高，且根據石門水庫之操作經驗可知，可利用溢洪道或是排洪隧道之出流量稀釋後池堰之泥砂濃度，進而達到下游取水工鳶山堰所引用之原水濁度達到自來水可處理之程度，因此根據自來水廠之處理能力，鳶山堰最大取水濃度應小於 6,000ppm 左右。所以，本計畫各出流設施排砂防淤操作可利用同樣之方法進行評估，若以排洪隧道進行排砂防淤操作則可依據如下說明進行評估(北水局，2010)。

根據濁度約略等同於濃度之假設條件下，水庫排砂期間操作條件即針對鳶山堰取水濃度應小於 6,000ppm 進行擬定，換句話說，後池堰泥砂濃度應小於 6,742ppm，才能滿足鳶山堰穩定供水之操作，而圖 7-3-1 即為利用排洪隧道操作規則探討更新操作前後對於後池堰濁度之影響，其中更新後之流量係針對排洪隧道在滿水位時閘門開啟與出流量之關係給定，換言之，在原始操作下若排洪隧道出流量增加 200cms、275cms、350cms、440cms、520cms、610cms、720cms、830cms、950cms 及 1,070cms 時之後池堰泥砂濃度變化，由圖上可知當排洪隧道流量額外增加至 2,600cms(此為假設值)時，額外增加出流量之效果已跟原本操作之泥砂濃度差異不大，且歷史排洪隧道操作增排量皆小於 1,000cms，因此，可針對排洪隧道增排 0 cms 至 1,070cms，進行排洪隧道更新操作前後對於後池堰泥砂濃度之影響。由歷史資料顯示 2005 海棠颱風及 2007 韋帕颱風之後池堰濁度皆超過自來水廠之處理極限，因此利用 2005 海棠颱風為範例進行鳶山堰穩定供水時石門水庫之排砂操作，圖 7-3-2 顯示 2005 海棠颱風在排洪隧道額外增排 440cms 時可使得後池堰泥砂濃度降低至 6,742ppm 以下，經由上述之排砂操作即可滿足水庫排砂以及鳶山堰穩定供水之需求，進而達到石

門水庫出流設施排砂防淤操作條件評估。

然而溢洪道之額外增排流量對於後池堰濁度降低至 6,742ppm 以下之效果則不如排洪隧道，本計畫根據所收集之 2004 艾利颱風、2008 鳳凰及 2008 薔蜜颱風、2009 莫拉克颱風、2012 蘇拉颱風、2013 蘇力颱風以及 2013 潭美颱風之出水工排砂量對於後池泥砂濃度之影響，可建立石門水庫出水工排砂量與後池泥砂濃度相關性及其影響程度，其中出水工排砂量係指石門水庫所有放流設施之加總結果，由圖 7-3-3 可知所收集之 7 場事件中有部分時刻出水工排砂量，將造成後池泥砂濃度超過 6,742ppm，若是仿造排洪隧道之額外增排流量，則可探討溢洪道之額外增排流量對於後池堰濁度降低至 6,742ppm 以下之效果，圖 7-3-4 至圖 7-3-7 即為溢洪道增加放流量 220cms、610cms、1,070cms 及 2,000cms 時對折減後池濃度關係圖，由此 4 圖之結果可知，溢洪道之額外增排量須達到 2,000cms 時，方可將後池絕大部分時間之泥砂濃度降低至 6,742ppm 以下；而圖 7-3-8 為啟用排砂隧道前之溢洪道稀釋效果，圖上顯示溢洪道之額外增排量須達到 1,070cms 時，可將後池絕大部分時間之泥砂濃度降低至 6,742ppm 以下，可見溢洪道對於稀釋後池泥砂濃度之效果不如排洪隧道，且 2013 新增排砂隧道後溢洪道稀釋效果所需增排之水量亦提升 1 倍。

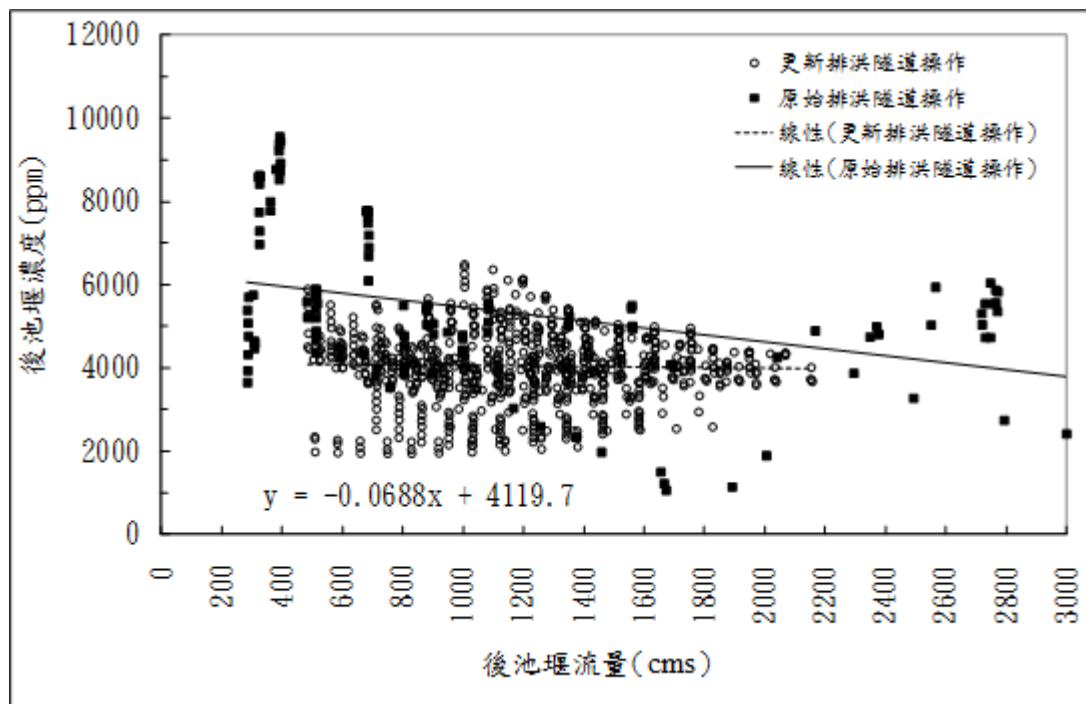


圖 7-3-1 排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖

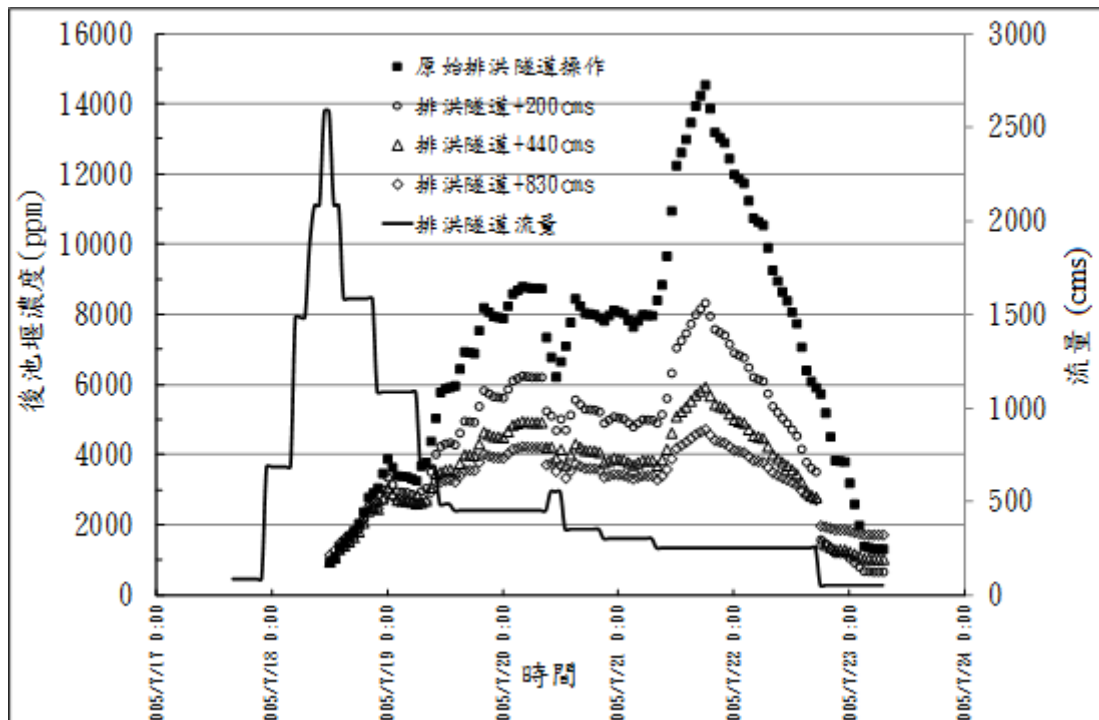


圖 7-3-2 2005 海棠颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖

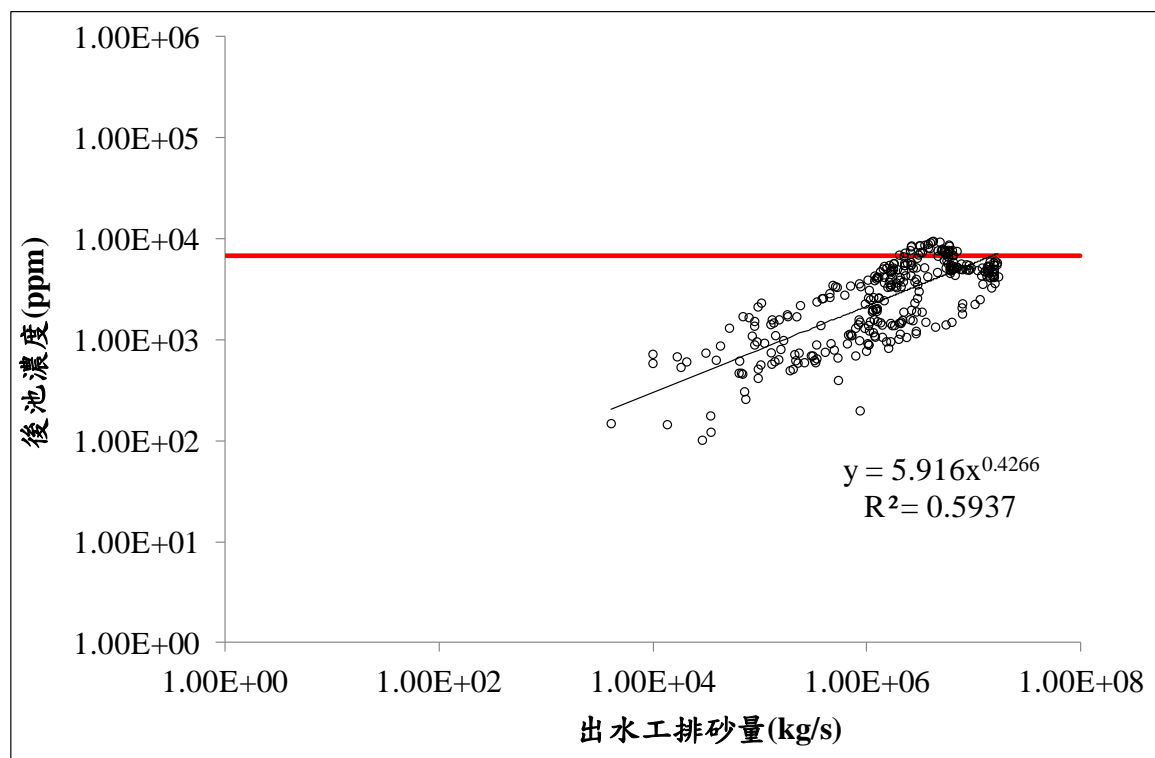


圖 7-3-3 出水工排砂量與後池濃度關係圖

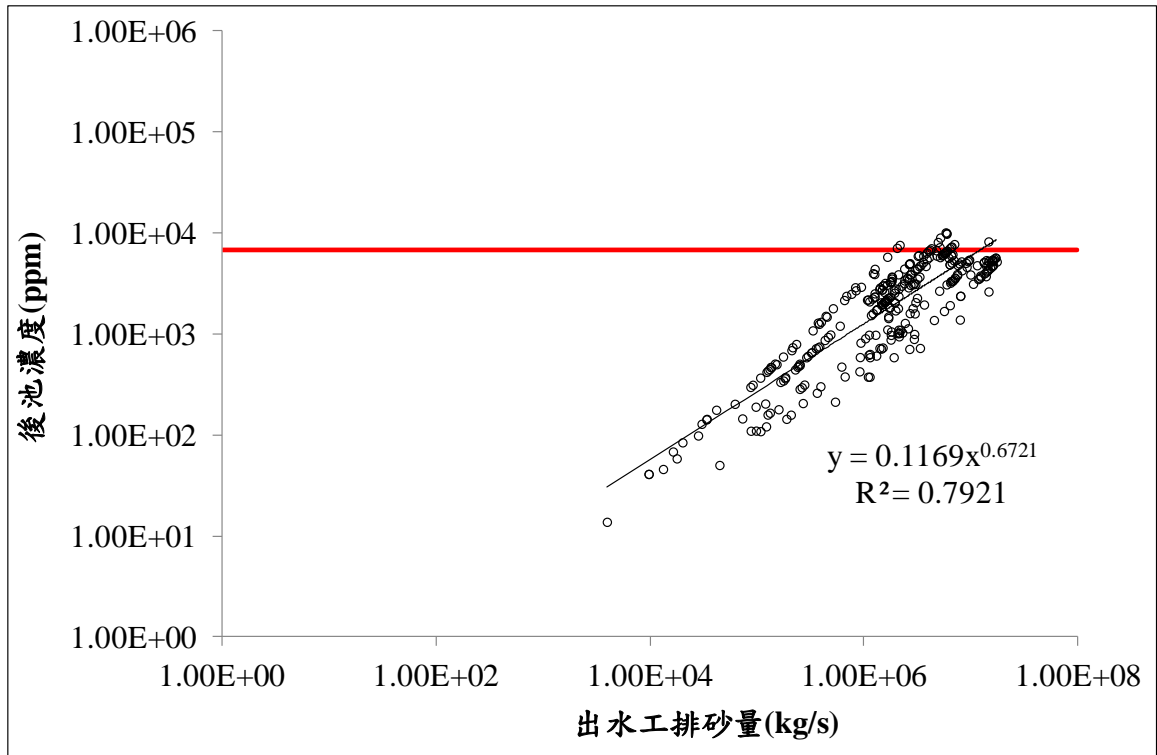


圖 7-3-4 溢洪道增加放流量 220cms 時對折減後池濃度關係圖

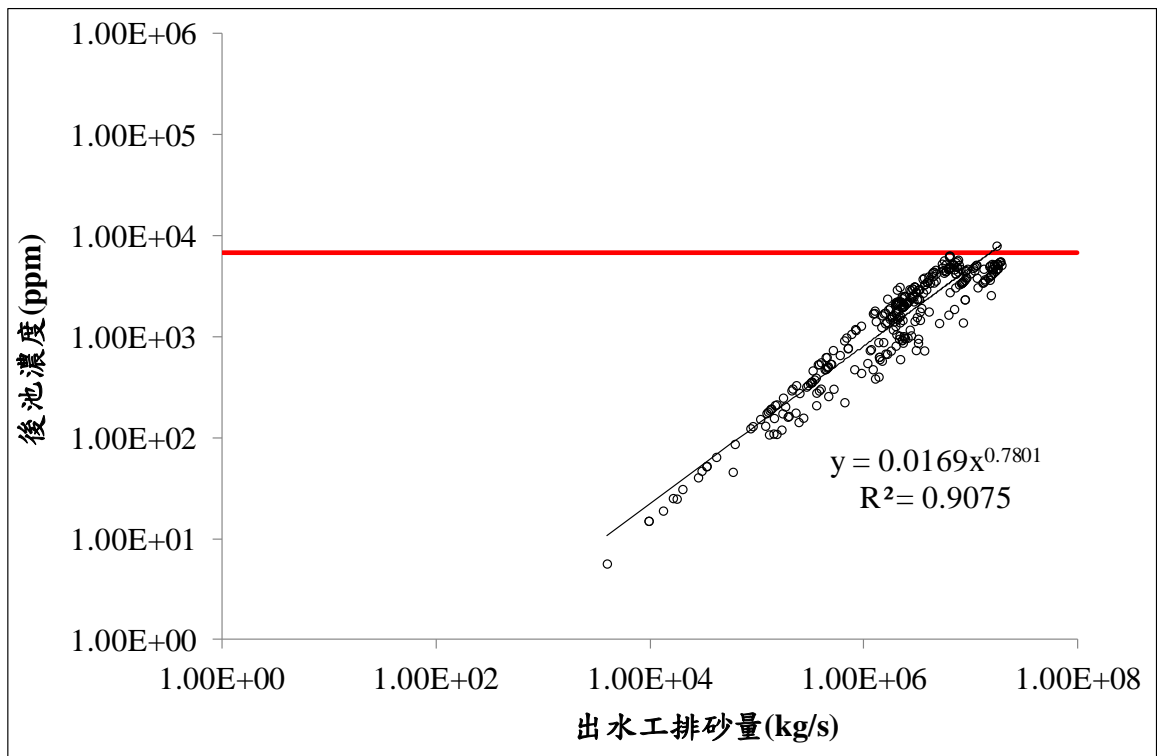


圖 7-3-5 溢洪道增加放流量 610cms 時對折減後池濃度關係圖

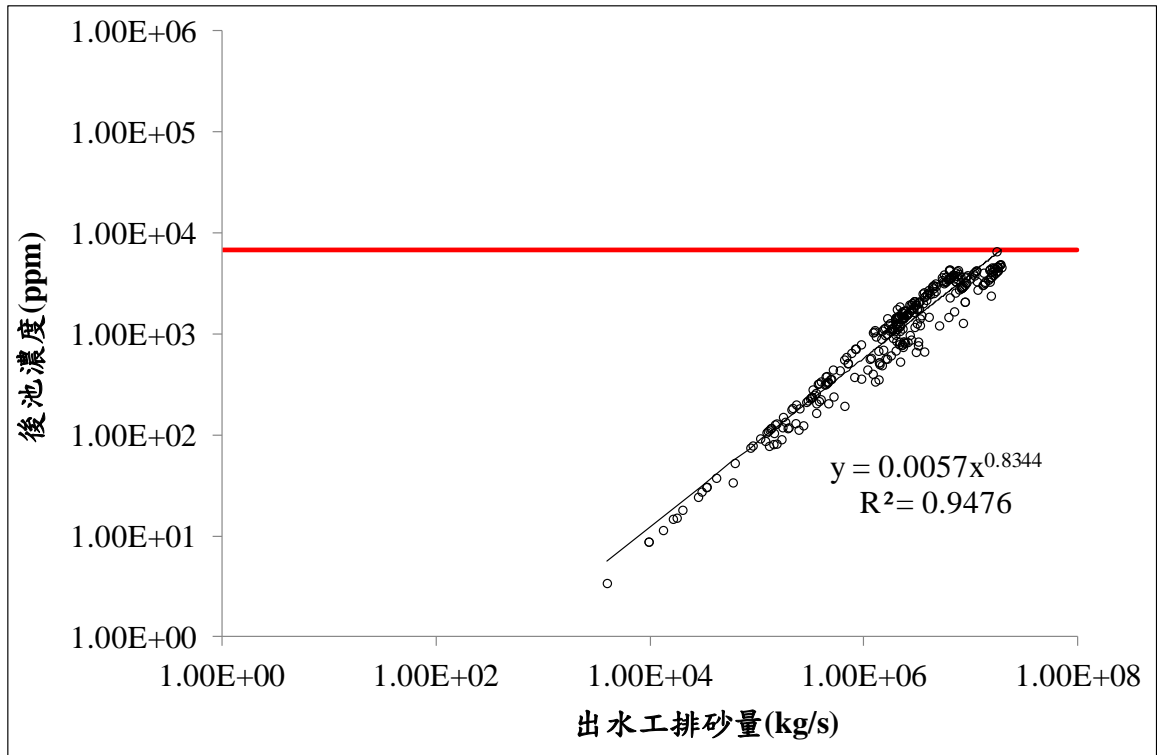


圖 7-3-6 溢洪道增加放流量 1,070cms 時對折減後池濃度關係圖

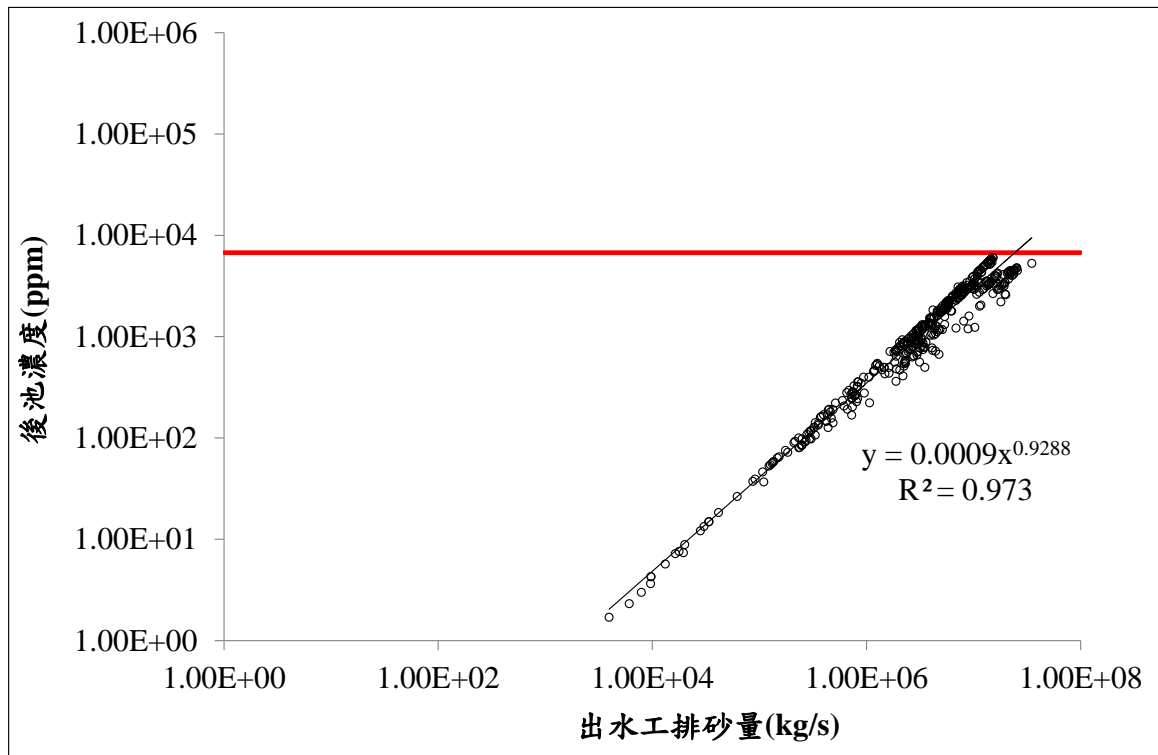


圖 7-3-7 溢洪道增加放流量 2,000cms 時對折減後池濃度關係圖

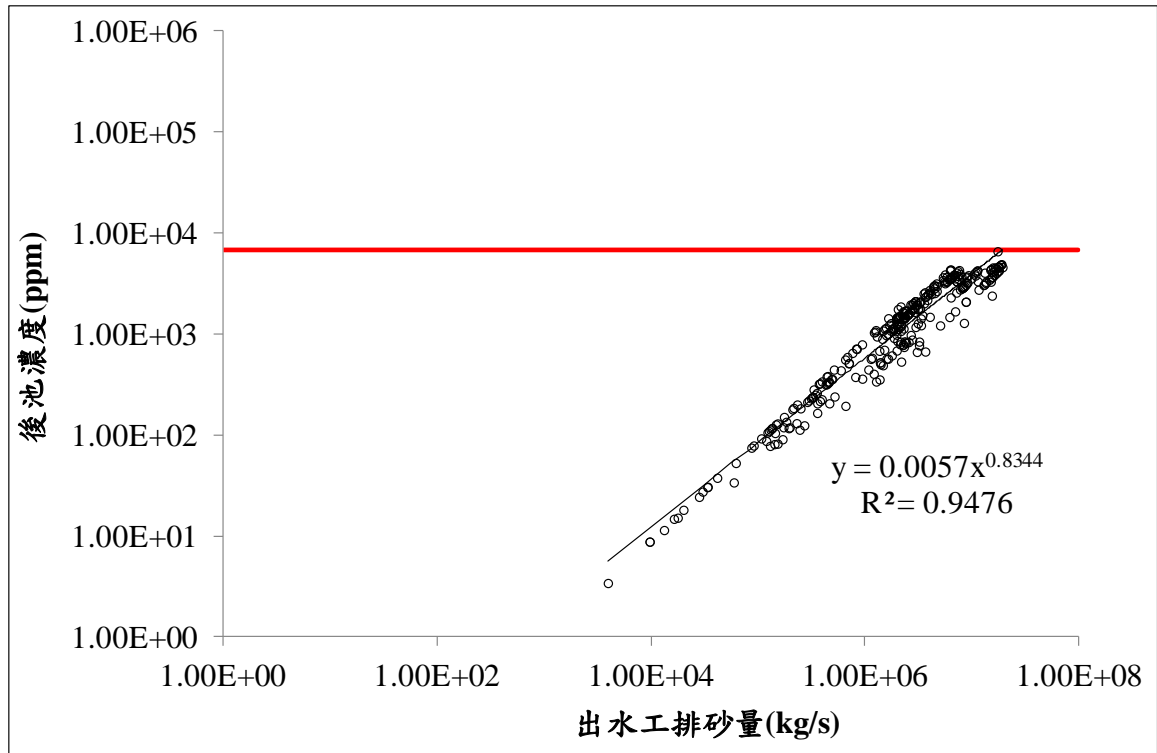


圖 7-3-8 溢洪道增加放流量 1,070cms 時對折減後池濃度關係圖(無 102 年蘇力及潭美)

7-4 水庫排砂分析模組

根據 7-1 節所收集之歷年洪水事件各出流設施排砂比(2004 年~2013 年),結合 7-2 節所開發之異重流模式,以及模式檢定驗證結果,即可檢定驗證數值模式之適用性與準確性,接著即可利用檢定驗證完成之異重流數值模式,或是簡易之經驗公式與試驗室研發成果,搭配 7-2 節中(7-1)式異重流潛入判斷公式,針對不同頻率年與入砂量計算異重流運移至壩前之厚度與泥砂濃度,即可計算各出水工之排砂量,進而得到不同水文條件下之水庫排砂比,此外圖 7-4-1 顯示出水工排砂量與後池排砂量關係圖,由圖上可知若是能準確推估各出水工之出流泥砂量,即可準確計算後池溢流至下游之泥砂量,且由圖 7-4-1 亦可看出後池囚砂效果約為出水工排出泥砂之 8%。

本計畫除了可以根據異重流數值模式,計算異重流潛入且運移到壩前之垂向泥砂濃度與厚度變化外,經驗公式與試驗室研發成果計算異重流運移至壩前之沿程厚度,如(7-2)式所列(俞,1991):

$$h = 0.002X_p + 0.73h_i \quad (7-2)$$

式中 X_p 為異重流潛入點至壩址之距離； h_i 為起算厚度，可假設為潛入水深之 0.7 倍，而潛入水深則可利用(7-1)式進行判斷，此外，若假設運移到壩前之泥砂濃度與上游入流時之泥砂濃度相同，則可利用下式進行底孔排砂比計算(Lee et al., 2013)：

$$\eta_s = \sum Q_{out} \times KC_{ave} \left[\frac{(s-1)gh_{ave}^5}{Q_{out}^2} \right]^{1/5} / \sum Q_{sin} \quad (7-3)$$

式中 η_s 為底孔排砂比， Q_{out} 為底孔出流量， Q_{sin} 為入流砂量， s 為泥砂比重， g 為重力加速度， K 為待定係數($K=0.19\sim0.29$) (Lee et al., 2013)，圖 7-4-2 即為初步利用此方法所推估之發電出流泥砂濃度與實測值之比較圖，所採用資料為 2009 莫拉克颱風及 2008 鳳凰颱風，然而圖上所推估之發電出流泥砂濃度與實測值之相關性有待提升，提升之方法則為利用檢定驗證完成之異重流數值模式，計算準確之異重流運移厚度與泥砂濃度，搭配所收集之 2004 艾利颱風、2008 薔蜜颱風、2012 蘇拉颱風以及 2013 蘇力颱風和潭美颱風之公式推估結果一併進行相關性迴歸，即可得到更適當之推估發電出流泥砂濃度與實測值相關性。

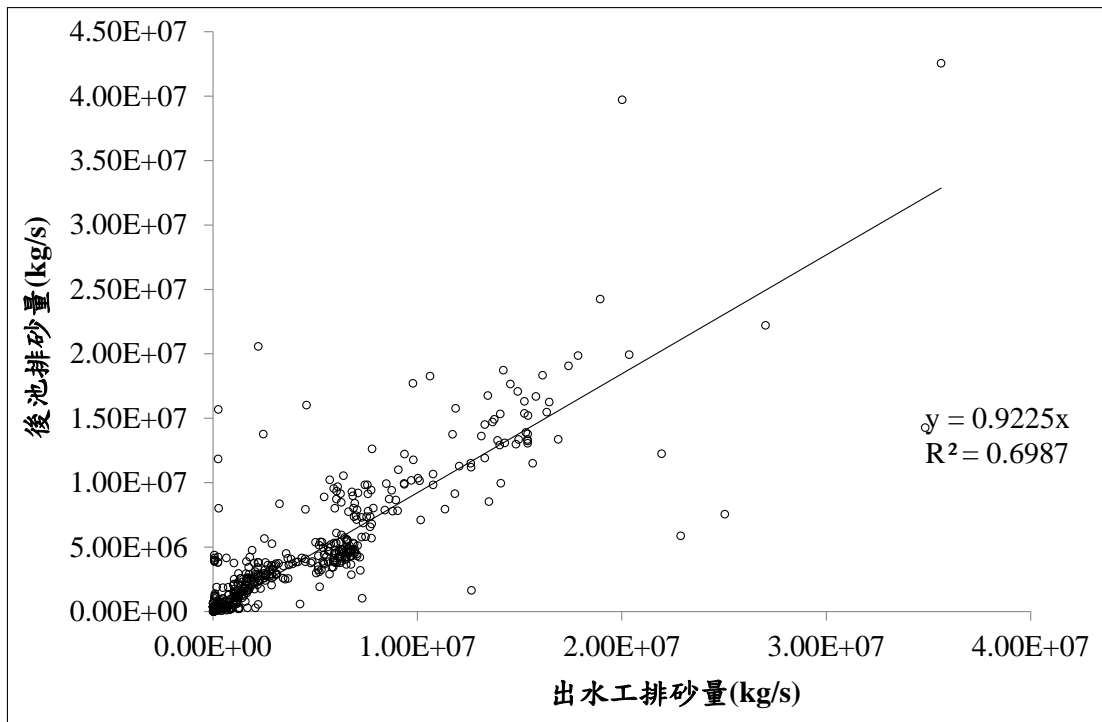


圖 7-4-1 出水工排砂量與後池排砂量關係圖

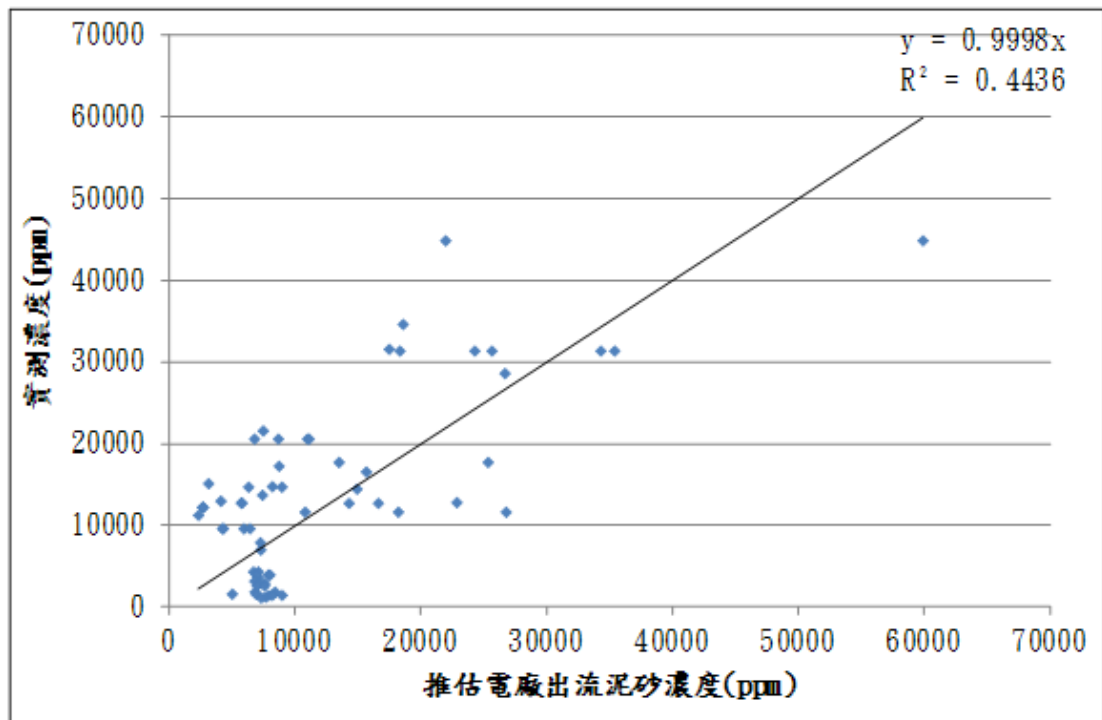


圖 7-4-2 推估之發電出流泥砂濃度與實測值之比較圖

八、後池濁度影響與下游穩定供水風險分析

8-1 下游各用水單位處理水庫原水條件評估

依據水利規劃試驗所「石門水庫水砂運移監測與異重流模式開發及應用研究」顯示濁度與濃度關係約為 $1.35\text{ppm}=\text{NTU}$ ，但依據歷史量測事件(2008 辛樂克、2008 鳳凰及 2008 薔蜜颱風)之迴歸結果， $1\text{ppm}\sim 1.0\text{NTU}$ (北水局,2010「石門水庫運轉規線下限及嚴重下限提升改善可行性評估及規劃」)，又水庫之泥砂監測數值皆以濃度(ppm)為量測結果，因此下游各用水單位處理水庫原水條件評估，本章節以自來水廠為例進行說明，以自來水廠之處理能力為例，鳶山堰取水濃度應小於 $6,000\text{ppm}$ 左右。所以，本章節之下游各用水單位處理水庫原水條件評估皆以濃度作說明如下。

根據上述之濁度與濃度換算結果，水庫排砂期間自來水廠處理水庫原水條件，即針對鳶山堰取水濃度應小於 $6,000\text{ppm}$ 進行擬定，由李等(2012)「石門水庫水庫排砂操作影響鳶山堰取水之研究」顯示，後池堰至鳶山堰之泥砂濃度折減率約為 0.89 ，，如圖 8-1-1 所示，因此反推後池堰可容許之排放泥砂濃度約為 $6,742\text{ppm}$ ，所以本計畫針對此一限制擬定下游各用水單位處理水庫原水條件，需滿足(8-1)式或是(8-2)式之後池堰排放濃度，以確保鳶山堰能正常取水，並達到水庫蓄滿與排砂之目的。

$$Q_{s後} = Q_{溢} * C_{溢} + Q_{排} * C_{排} + Q_P * C_P + Q_{發} * C_{發} + Q_{排砂道} * C_{排砂道} \quad (8-1)$$

$$\frac{Q_{s後}}{Q_{後}} \leq C_{max} \quad (8-2)$$

式中 $Q_{溢}$ 表示溢洪道的出流量， $C_{溢}$ 表示溢洪道的出流濃度， $Q_{排}$ 表示排洪隧道的出流量， $C_{排}$ 表示排洪隧道的出流濃度， Q_P 表示河道放水道(PRO)的出流量， C_P 表示河道放水道的出流濃度， $Q_{發}$ 表示發電隧道的出流量， $C_{發}$ 表示發電隧道的出流濃度， $Q_{排砂道}$ 表示排砂隧道的出流量， $C_{排砂道}$ 表示排砂道的出流濃度， $Q_{s後}$ 表示後池堰排放之泥

砂量， Q 後表示後池堰之出流量， C_{\max} 表示水庫可排放之最大容忍濃度，以確保鳶山堰可正常取水。

由以上分析可知，下游各用水單位處理水庫原水條件評估之準則，在於了解石門水庫所排放之泥砂濃度到達下游各用水單位取水口之折減率，進而限定石門水庫所能排放之最大泥砂濃度，並將此一限制作為 7-3 節之極限條件，即可評估在不同排砂操作條件下，下游各用水單位是否有能力處理水庫原水條件。

未來中庄調整池建置完成後，桃園地區即有約 6 天之備源水量，因此即可將此最大容忍濃度(C_{\max})於此 6 天內去除，達到最大排砂效益與穩定供水之目標。

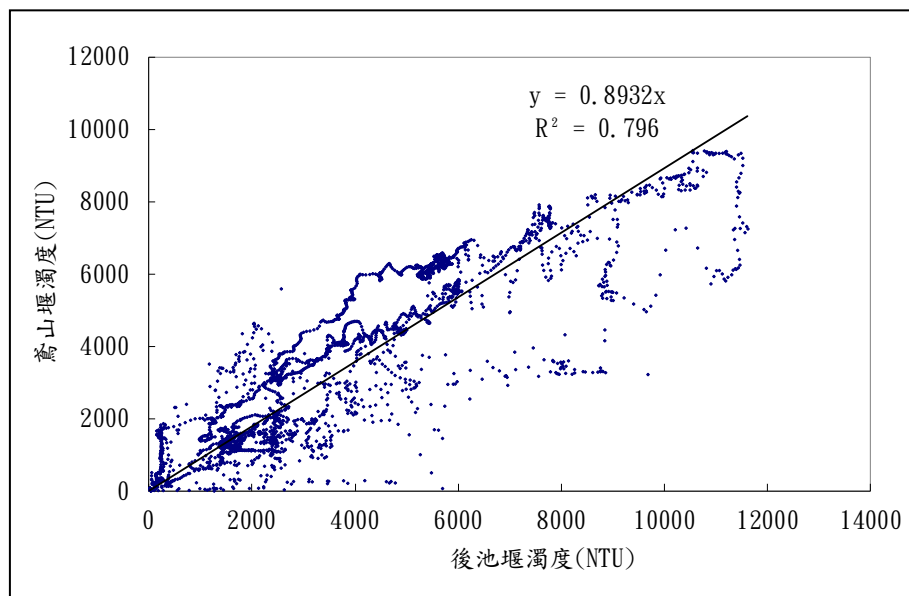


圖 8-1-1 後池濁度與鳶山堰濁度關係圖

8-2 出流設施原水濁度分析及後池濁度變化情形推估

由 7-2 節所建立之異重流數值模式及 7-4 節所建立之水庫排砂分析模組所推估水庫排砂量，即可分析出流設施原水濁度，並且依據 8-1 節(8-1)與(8-2)式即可進行後池濁度變化情形推估，如圖 8-2-1 所示，即由排洪隧道之出流量與各出土工之混合泥砂濃度，所推估之後池濁度變化情形。

將增加排洪隧道流量，以降低後池濃度之推估方法套用至 2013 蘇力颱風和潭美颱風案例(圖 8-2-2 及圖 8-2-3)，顯示排洪隧道流量

增加 200cms、400cms 和 600cms 時，後池濁度明顯下降。但排洪隧道流量之稀釋效果需要對應當時之排砂道與其餘底孔之排砂濃度，透過(8-1)式及(8-2)式之計算成果方能瞭解其實際稀釋效果。

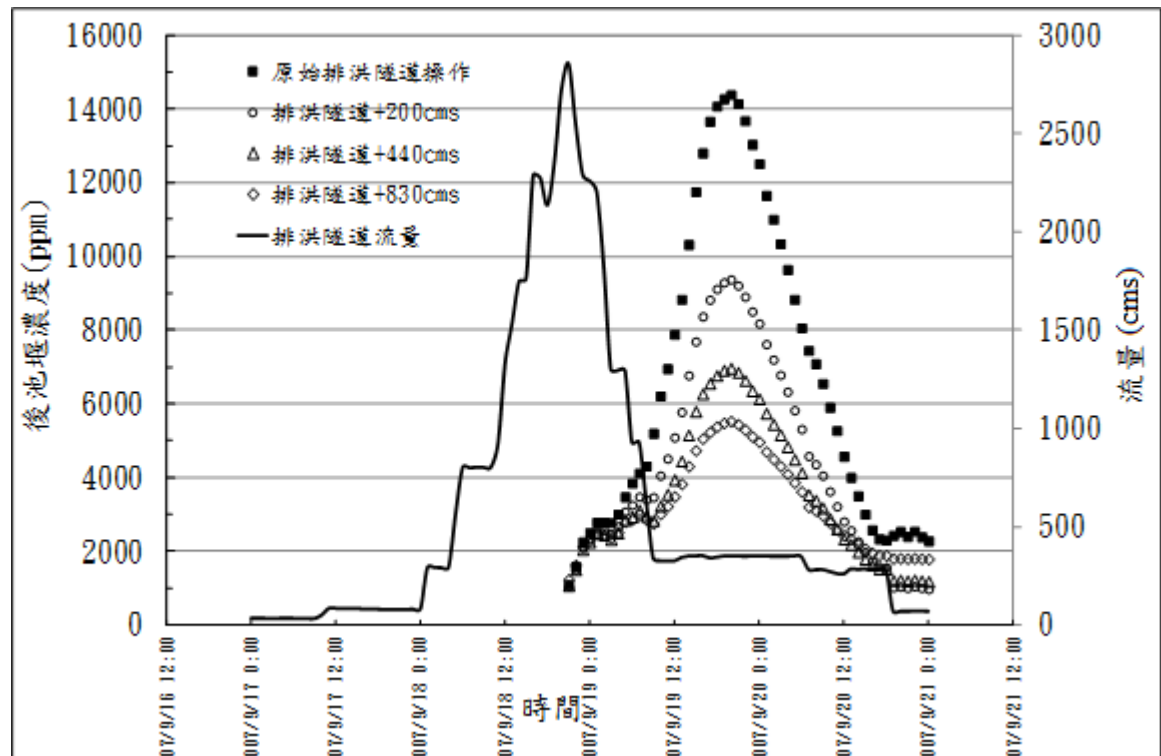


圖 8-2-1 2007 韋帕颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖

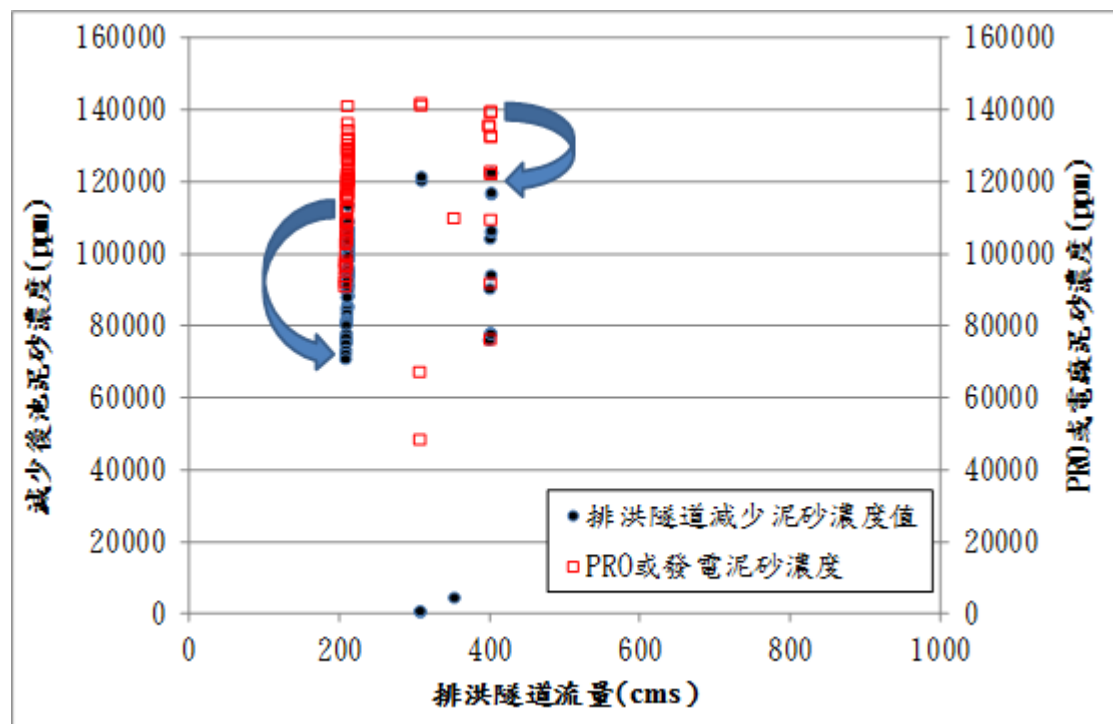


圖 8-2-2 2013 蘇力颱風排洪隧道稀釋效果

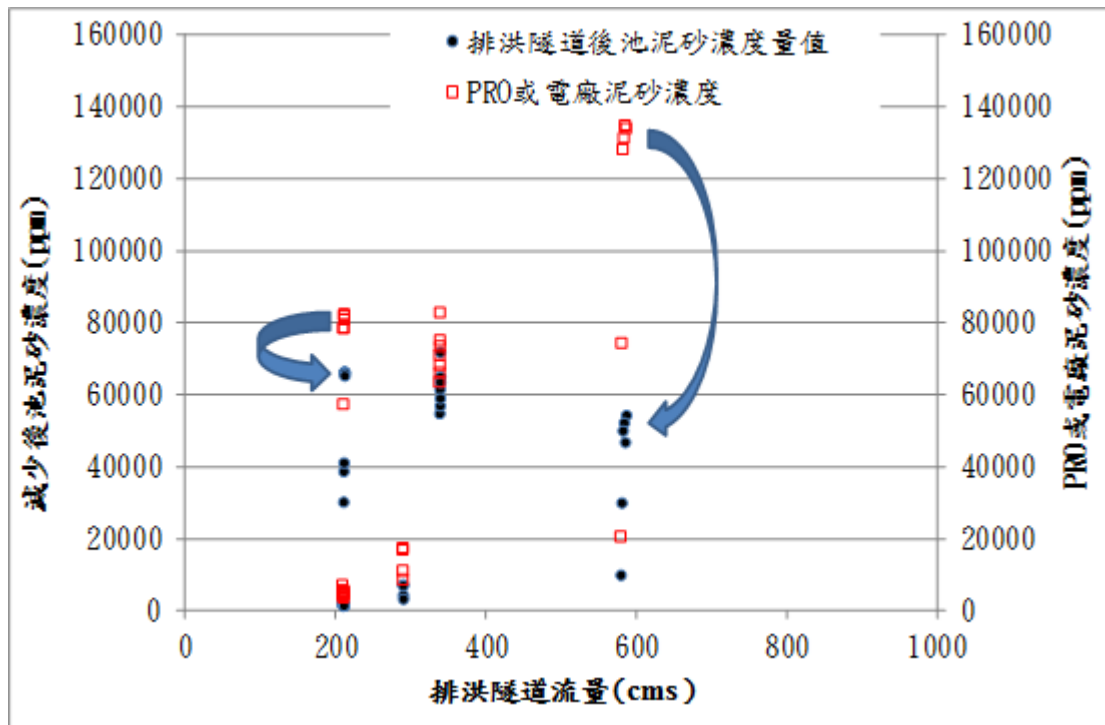


圖 8-2-3 2013 潭美颱風排洪隧道稀釋效果

此外，根據 2010 年北水局「石門水庫運轉規線下限及嚴重下限提升改善可行性評估及規劃」計畫所蒐集之 2005~2009 年 10 場颱風事件可知(表 8-2-1)，除了鳳凰颱風期間鳶山堰濁度計故障，2009 莫拉克颱風(圖 8-2-4)、2007 聖帕颱風(圖 8-2-5)及 2005 泰利颱風(圖 8-2-6)期間鳶山堰濁度大於後池排放濁度外，其餘事件鳶山堰濁度約為後池排放濁度之 0.89 倍。

而 2009 莫拉克颱風、2007 聖帕颱風及 2005 泰利颱風期間鳶山堰濁度大於後池排放濁度之原因尚待調查，但可能原因為，2009 莫拉克颱風及 2007 聖帕颱風均為該年第一場颱風，因此河道乾燥多砂，容易造成沿程濁度增加，由 3 場觀測數據可知鳶山堰濁度比後池排放濁度高出約 1.5~2 倍，且在後池排放濁度在 4,000~6,000NTU 時發生，或是前一場排砂量大時發生(如 2005 瑪莎颱風)，造成河道淤積，導致 2005 泰利颱風之鳶山堰濁度大於後池排放濁度。

綜合上述造成鳶山堰濁度大於後池排放濁度推測可能原因為：

1. 該年第一場大颱風。
2. 前一場颱風排放砂量大於 600 萬噸(2005 瑪莎颱風)。

但須進一步研討與研究方能確定(李等,2012)，但由今年蘇力颱風

之第 1 次與第 2 次排砂操作可知，第 1 次排砂屬於異重流排砂，後池濁度最大約為 12,000NTU 左右，而鳶山堰濁度約為 8,000NTU 左右，但第 2 次排砂時，後池濁度最大約為 59,000NTU，但鳶山堰濁度可高達 10 萬 NTU 以上，此一現象與上述第 2 點原因接近，目前初步依據實際操作果可知，若前 1 次有較大排砂量時，會造成第 2 次排砂時鳶山堰濁度較後池堰偏高之現象，但此一現象仍待實測資料加以佐證。

表 8-2-1 颱風事件後池及鳶山堰尖峰濁度

年度	中文名稱	後池尖峰濁度	鳶山堰尖峰濁度	狀況
2009	莫拉克	4,771	8,500	異常
2008	薔蜜	6,062	5,860	正常
2008	辛樂克	11,611	9,427	正常
2008	鳳凰	5,146	81	正常
2007	柯羅莎	24,900	5,000	正常
2007	韋帕	14,381	6,115	正常
2007	聖帕	5,175	4,305	流量上升段異常
2005	泰利	5,990	9,900	異常
2005	馬莎	45,030	37,000	正常
2005	海棠	14,550	5,600	正常

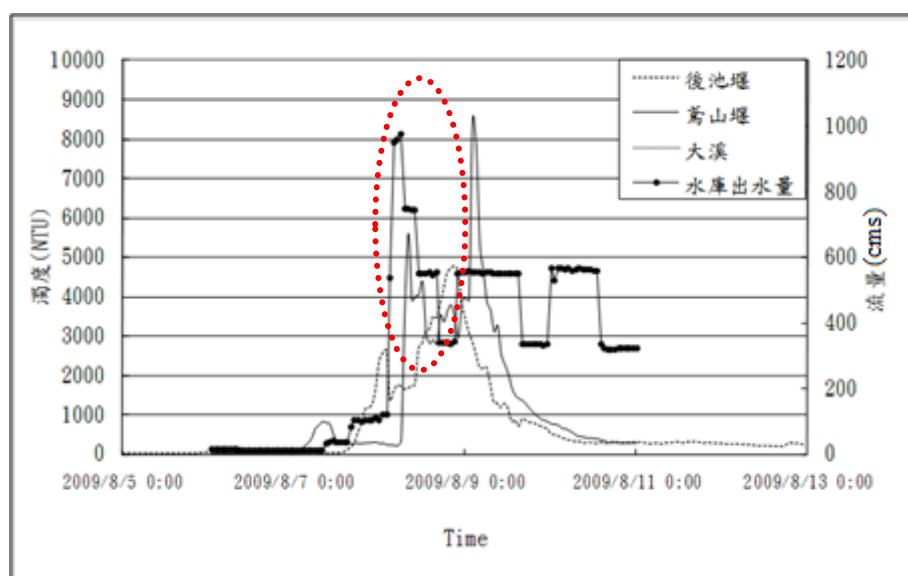


圖 8-2-4 2009 莫拉克颱風濁度變化

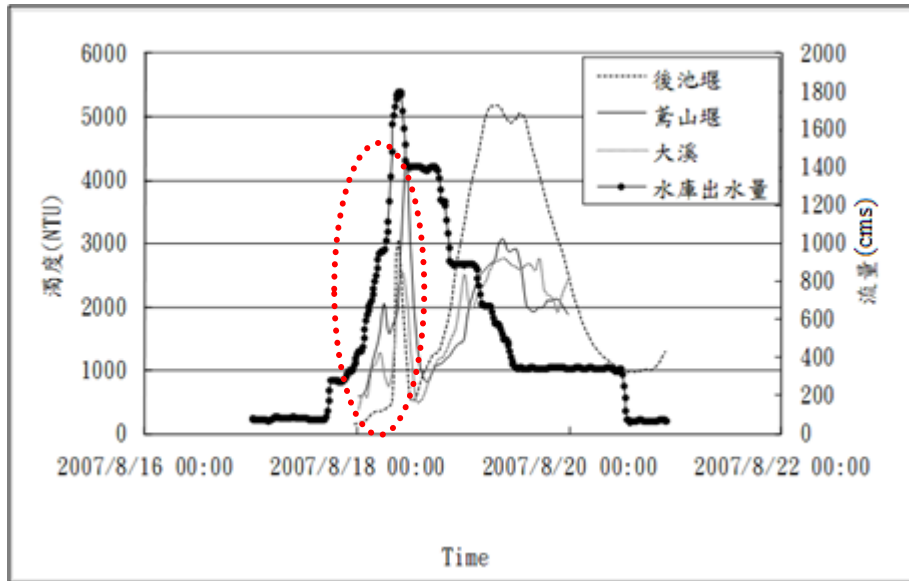


圖 8-2-5 2007 聖帕颱風濁度變化

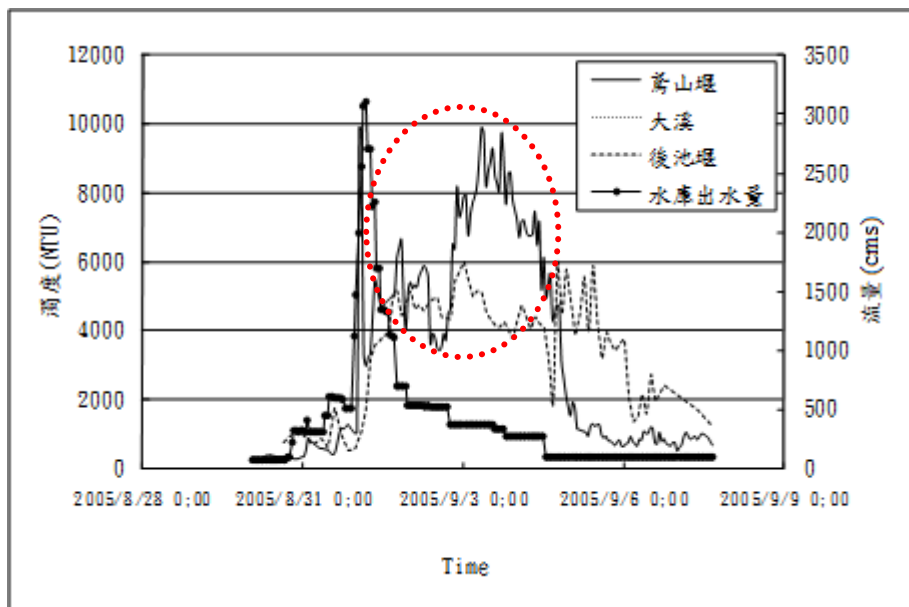


圖 8-2-6 2005 泰利颱風濁度變化

8-3 下游穩定供水分析模式

本計畫以(8-1)式及(8-2)式作為分析模組主架構，推估各出水工放流水於後池混合之濃度，如果該濃度超過水庫可排放之最大容忍濃度，則提供排洪隧道或溢洪道增加排放量之操作建議，供水庫操作人員參考。模式流程圖如圖 8-3-1 所示。

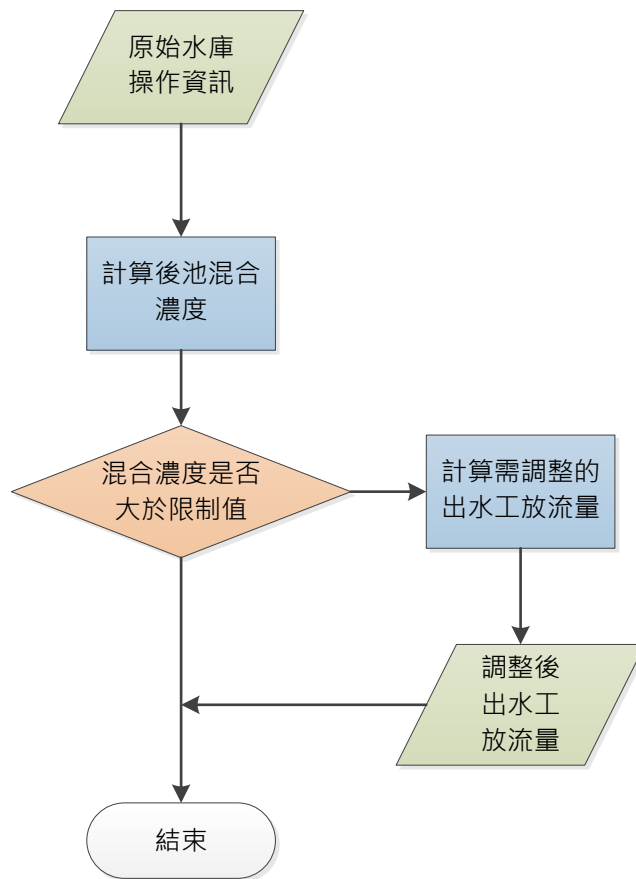


圖 8-3-1 下游穩定供水分析模式流程圖

九、颱風、豪雨期間協勤作業

本計畫於今年度執行期間已有 5 場颱風事件進行協勤作業，北區水資源局防汛應變小組三級開設時，即協助石門水庫管理中心至三級開設解除，執行水庫防洪、排淤及穩定供水運轉模擬及分析評估，提供全洪程即時運轉操作之策略建議、水庫未來 5 小時入流量預報及異重流到達時間分析，進行考慮排砂條件之即時水庫防洪操作，派員與相關資料如表 9-1 所示。並於颱風事件結束後，編製水庫操作運轉工作執行報告，彙整颱風時期石門水庫防洪運轉操作資訊、本系統之輸出成果與提供之資訊等；另於每一洪水事件水庫運轉結束後，依實際降雨及水庫進水流量過程，分析最佳防洪、排砂防淤運轉策略，以評估本系統資訊可靠度及決策風險。

表 9-1 本團隊派員至石門水庫協勤資料

颱風	日期	派員情況	協勤任務
蘇力	07/11~07/13	淡江大學(專任助理 1 名) 臺灣大學(專任助理 1 名)	模式分析及報告、 協助操作模式
潭美	08/20~08/22	淡江大學(博士 1 名、碩士生 1 名) 臺灣大學(碩士生 1 名)	模式分析及報告、 協助操作模式
康芮	08/28~08/29	淡江大學(博士 1 名、專任助理 1 名、 碩士生 1 名)	模式分析及報告、 協助操作模式
天兔	09/20~09/22	淡江大學(專任助理 1 名) 臺灣大學(專任助理 1 名、碩士生 2 名)	模式分析及報告、 協助操作模式、異 重流排砂分析
菲特	10/05~10/07	淡江大學(專任助理 3 名) 臺灣大學(專任助理 1 名)	模式分析及報告、 協助操作模式、 異重流排砂分析

9-1 即時水庫操作策略

本計畫以 5-2 節建置之智慧型水庫防洪模糊控制模式(IFOFCM)結合 6-2 節降雨-逕流模式所推估之未來 5 小時水庫入流量預測結果進行即時水庫操作，分析未來 5 小時最佳操作歷程已提供石門水庫管理中心參考。操作流程圖如圖 5-2-3 所示，相關模式建置過程請詳見第五章及第六章說明。

9-2 颱風事件最佳防洪、排砂防淤運轉放水策略驗證

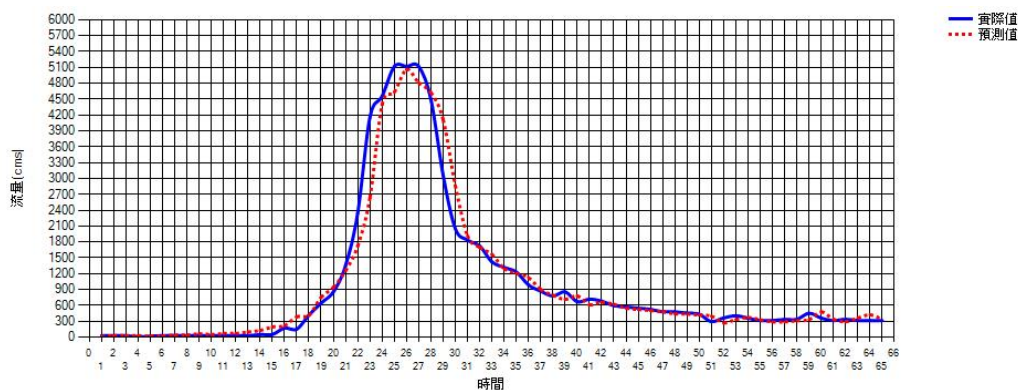
本計畫以 2013 年製作水庫操作運轉工作執行報告之颱風事件進行全洪程水庫操作策略分析，相關颱風場次如表所示：

表 9-2-1 2013 年颱風暴雨事件基本資料

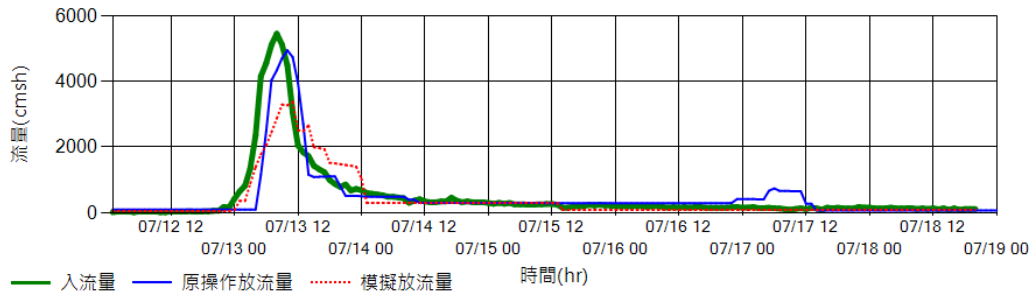
時間	事件名稱	颱風強度	累積雨量 (mm)	洪峰流量 (cms)	資料天數
2013/07/12~2013/07/18	蘇力颱風	強烈	450	5457	共 7 天
2013/08/20~2013/08/26	潭美颱風	輕度	538	2413	共 7 天
2013/08/27~2013/08/31	康芮颱風	輕度	24	162	共 5 天
2013/08/31~2013/09/01	0831 豪雨	-	78.8	406	共 3 天
2013/09/20~2013/09/24	天兔颱風	強烈	270	1195	共 5 天
2013/10/04~2013/10/10	菲特颱風	中度	279	1392	共 7 天

9-2-1 蘇力颱風

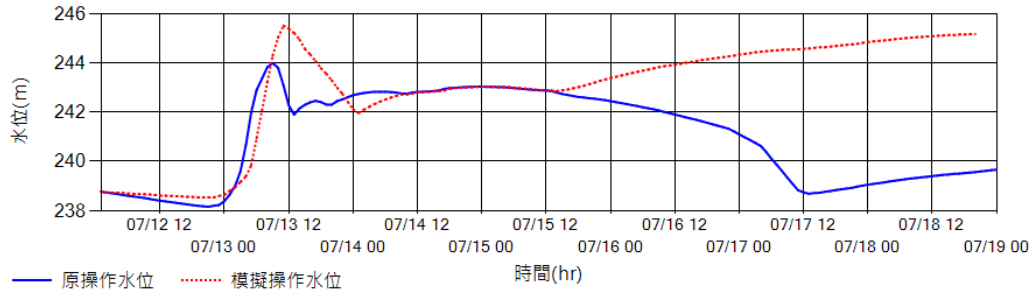
蘇力颱風於 102 年 7 月 11 日 8 時 30 分發布海上颱風警報，運轉工作執行報告紀錄時間為 7 月 12 日 1 時起至 7 月 19 日 0 時止，共計 7 日。本次模擬操作起始水位為 238.76m，以發電廠滿載放流進行調節性放水；12 日 23 時開啟河道放水道放水；13 日 0 時開啟排砂隧道放水；13 日 2 時開啟排洪隧道放水；13 日 3 時關閉排洪隧道，改以溢洪道放水，並隨入庫流量調增溢洪道開度，至 13 日 9 時達到最大開度 5.1m。洪峰於 13 日 8 時發生，流量為 5117.62cms，之後逐漸調減水庫放流量；14 日 0 時關閉溢洪道及排砂隧道，改以排洪隧道放水；15 日 13 時關閉排洪隧道回蓄庫水，統計至 7 月 18 日 0 時水庫水位已回升至 244.85m。相關模擬操作歷程請詳見圖 9-2-1。



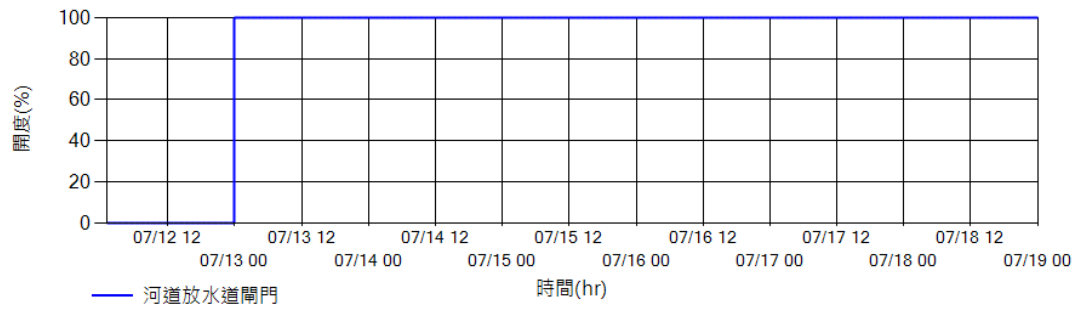
(a)降雨-逕流模式預報結果



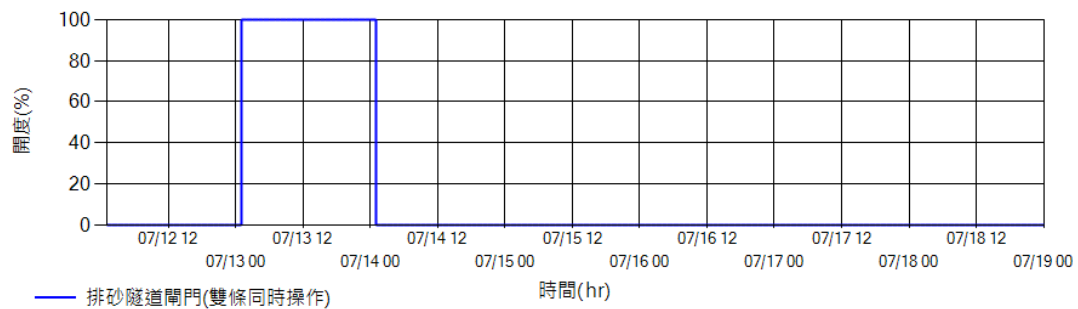
(b)流量歷程圖



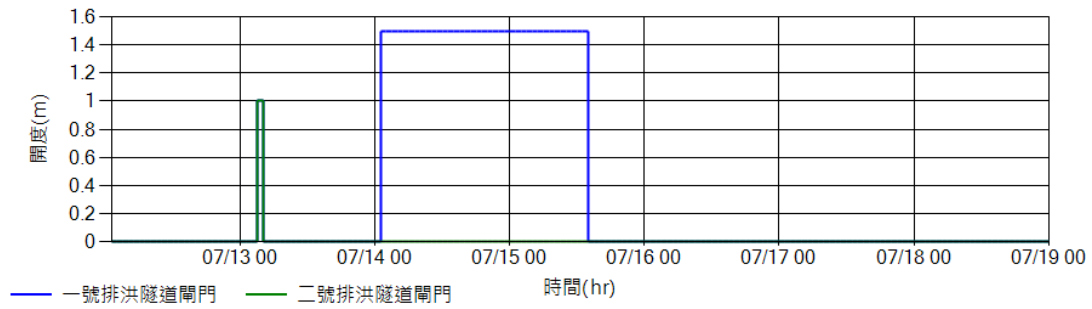
(c)水位歷程圖



(d)河道放水道開度



(e)排砂隧道開度



(f)排洪隧道開度



(g)溢洪道開度

圖 9-2-1 蘇力颱風水庫模擬操作歷程圖

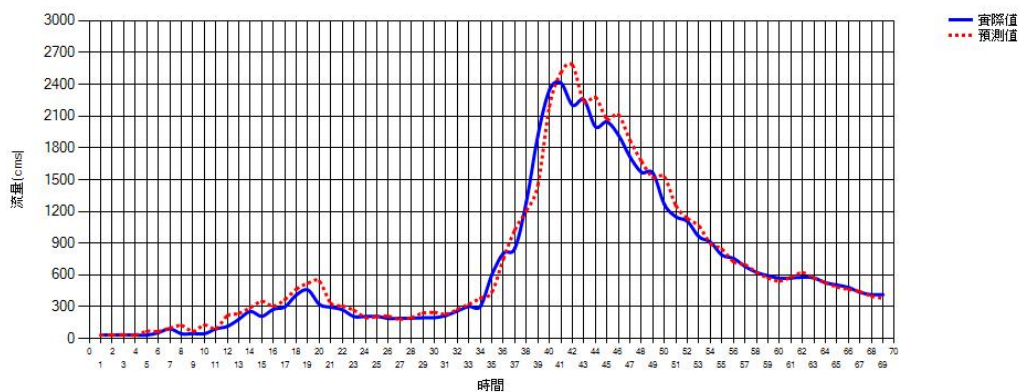
表 9-2-2 蘇力颱風模擬操作與原操作比較表

操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰消減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	4949.47	244.00	9.32	239.66
模擬操作	3292.75	245.52	39.67	245.25

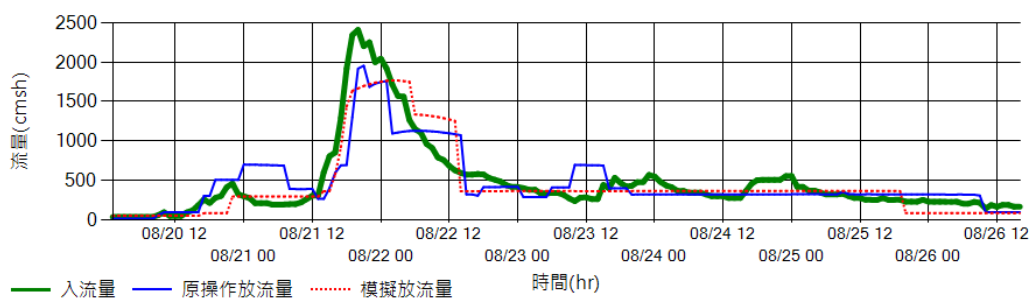
表 9-2-2 蘇力颱風模擬操作與原操作比較表，模擬操作之最大放流量為 3292.75cms 低於原操作 4949.47cms；模擬操作洪峰消減率達 39.67% 優於原操作 9.32%；但水庫最高水位高達 245.52m 較原操作 244.0m 高。整體而言，模擬操作可有效地減少下游洪水量、操作期間之水庫最高水位也在容許範圍內、操作結束亦可回蓄水量，同時亦有排砂隧道操作時間較長，回蓄庫水時間較短等改善。此外，如果考量排砂隧道不宜操作之時機(如濁度太高增加供水風險)，亦可關閉排砂隧道，改由排洪隧道放流，並藉由提早回蓄之庫水進行兩階段排砂操作，以達到下游穩定供水及排砂之目的。

9-2-2 潭美颱風

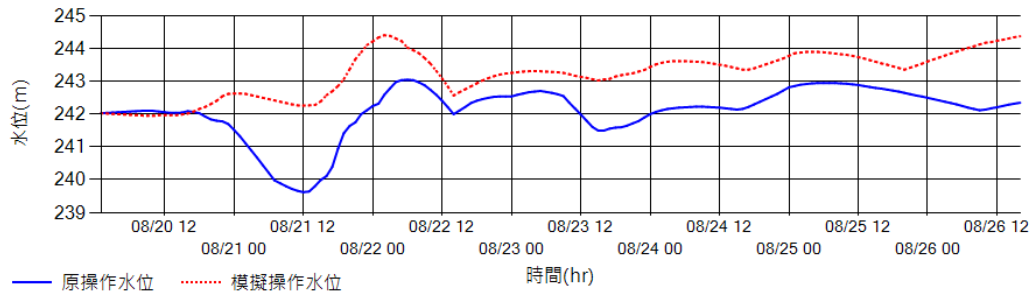
潭美颱風於 102 年 8 月 20 日 11 時 30 分發布海上颱風警報，運轉工作執行報告紀錄時間為 8 月 20 日 1 時起至 8 月 26 日 16 時止，共計 6.6 日。本次模擬操作起始水位為 242.03m，以發電廠滿載放流進行調節性放水；20 日 16 時開啟河道放水道放水；20 日 21 時開啟排洪隧道放水；21 日 13 時開啟排砂隧道放水；21 日 17 時關閉排洪隧道，改以溢洪道放水，並隨入庫流量調增溢洪道開度，至 21 日 18 時達到最大開度 2.1m；洪峰於 21 日 20 時發生，流量為 2412.49cms，之後逐漸調減水庫放流量；22 日 13 時關閉溢洪道及排砂隧道，改以排洪隧道放水；26 日 9 時關閉排洪隧道回蓄庫水，統計至 8 月 26 日 16 時水庫水位已回升至 244.38m。相關模擬操作歷程請詳見圖 9-2-2。



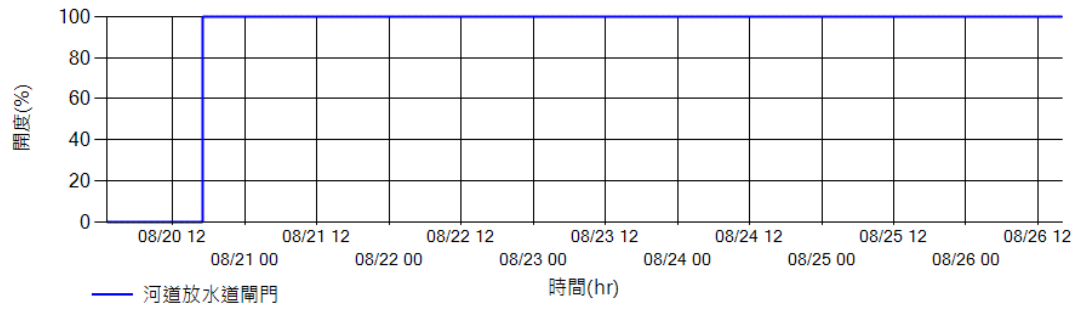
(a)降雨-逕流模式預報結果



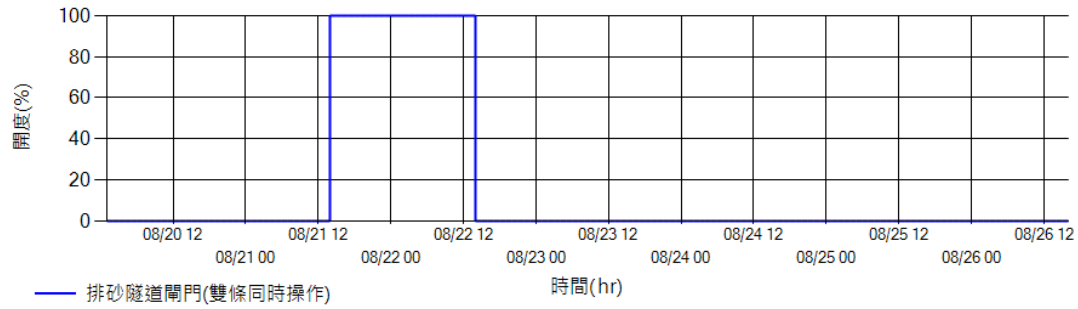
(b)流量歷程圖



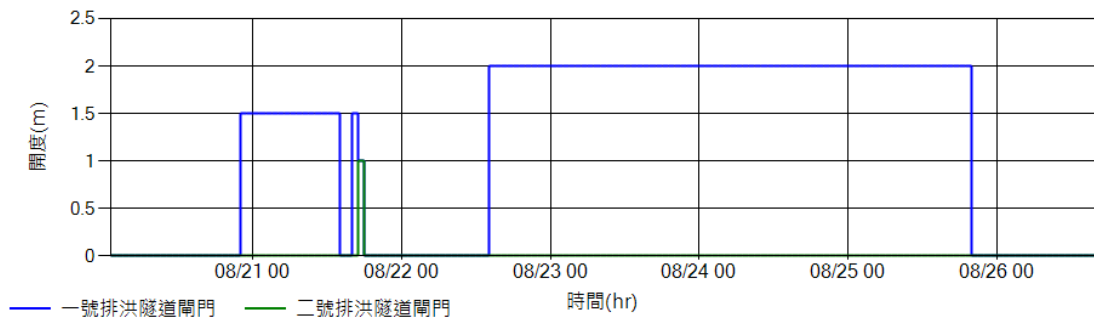
(c)水位歷程圖



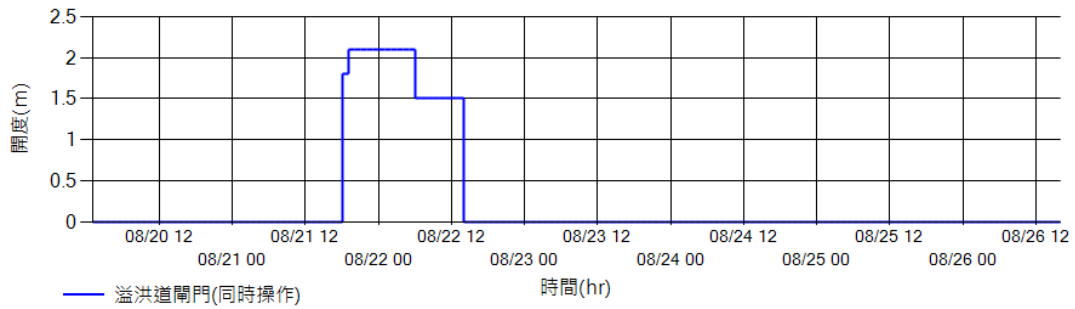
(d)河道放水道開度



(e)排砂隧道開度



(f)排洪隧道開度



(g) 溢洪道開度

圖 9-2-2 潭美颱風水庫模擬操作歷程圖

表 9-2-3 潭美颱風模擬操作與原操作比較表

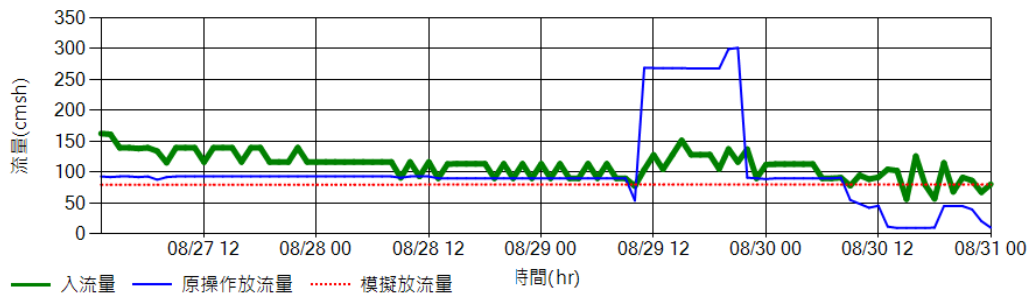
操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰削減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	1955.21	242.97	18.95	242.35
模擬操作	1769.02	244.41	26.67	244.38

表 9-2-3 潭美颱風模擬操作與原操作比較表，模擬操作之最大放流量為 1769.02cms 低於原操作 1955.21cms；模擬操作洪峰消滅率達 26.67% 優於原操作 18.95%；但水庫最高水位高達 244.38m 較原操作 242.35m 高。整體而言，模擬操作可有效地減少下游洪水量、操作期間之水庫最高水位也在容許範圍內、操作結束亦可回蓄水量，同時亦有排砂隧道操作時間較長，回蓄庫水時間較短等改善。此外，如果考量排砂隧道不宜操作之時機(如濁度太高增加供水風險)，亦可關閉排砂隧道，改由排洪隧道放流，並藉由提早回蓄之庫水進行兩階段排砂操作，以達到下游穩定供水及排砂之目的。

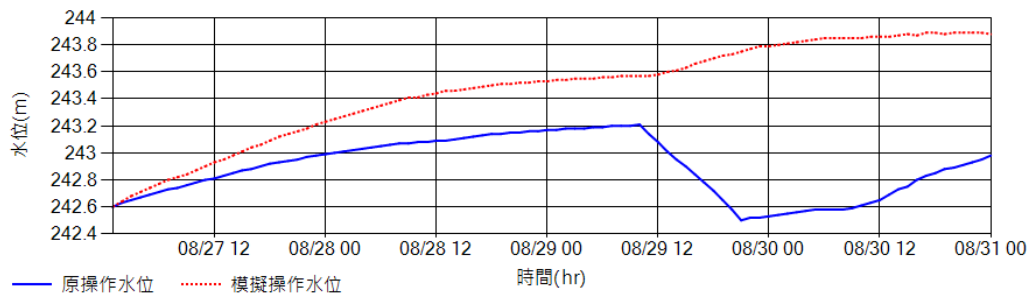
9-2-3 康芮颱風

康芮颱風於 102 年 8 月 27 日 11 時 30 分發布海上颱風警報，運轉工作執行報告紀錄時間為 8 月 27 日 1 時起至 8 月 31 日 0 時止，共計 3 日。本次模擬操作起始水位為 242.6m，以發電廠滿載放流及河道放水道進行調節性放水，由於整場颱風事件入流量均小於 300cms，排砂隧道、排洪隧道及溢洪道均未進行操作。此外，由於此颱風事件入流量較小，不進行降雨-逕流預報，相關模擬操作歷程詳

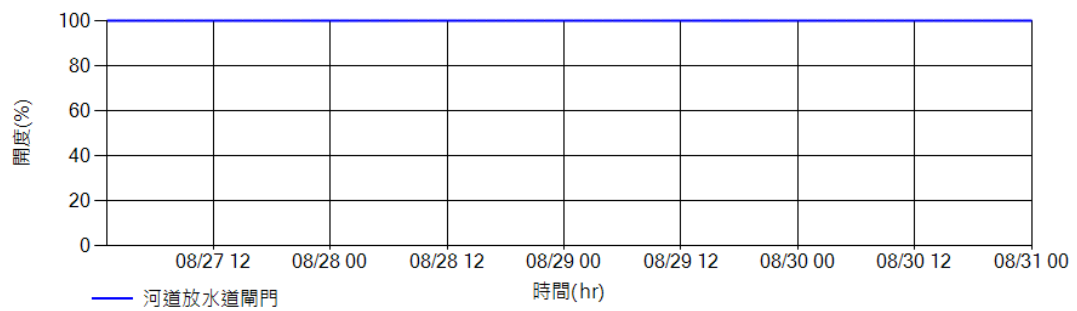
見圖 9-2-3。



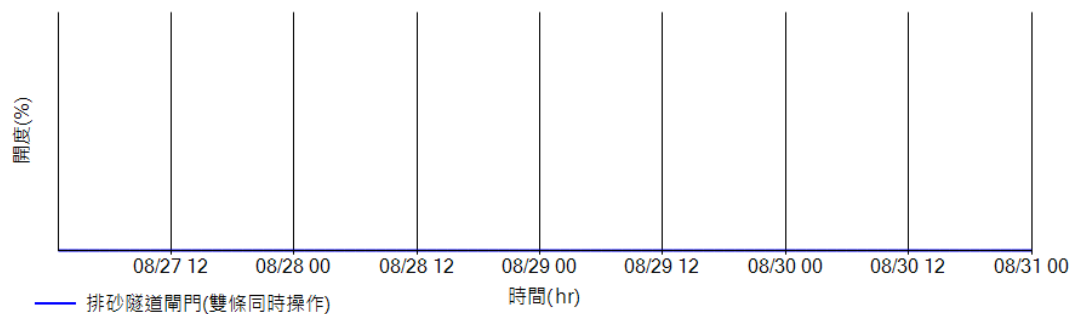
(a)流量歷程圖



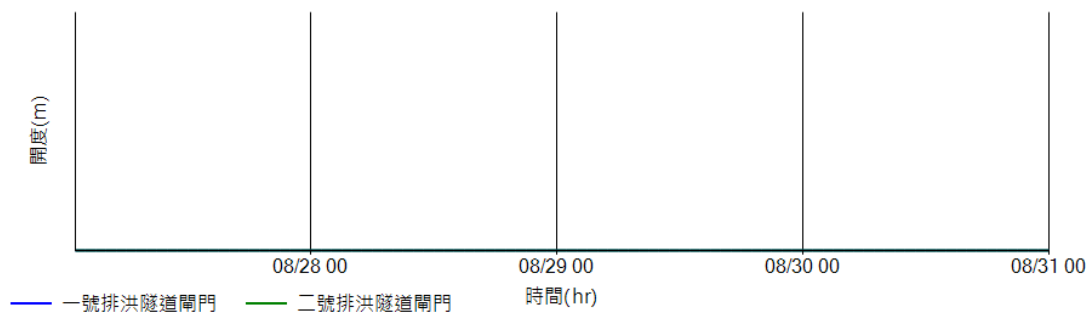
(b)水位歷程圖



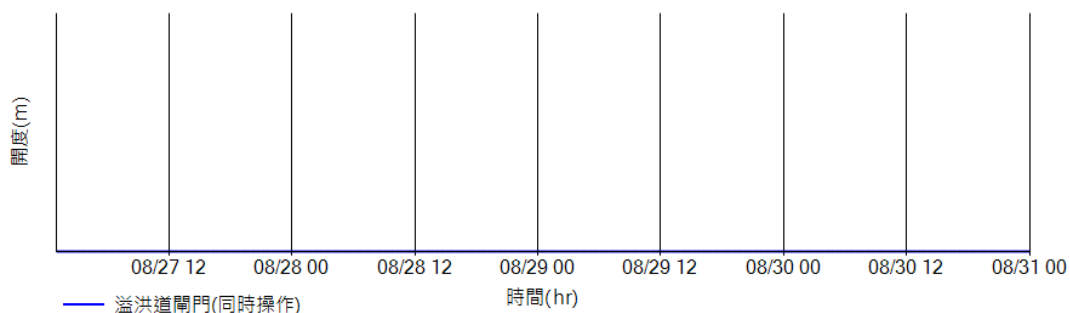
(c)河道放水道開度



(d)排砂隧道開度



(e)排洪隧道開度



(f)溢洪道開度

圖 9-2-3 康芮颱風水庫模擬操作歷程圖

表 9-2-4 康芮颱風模擬操作與原操作比較表

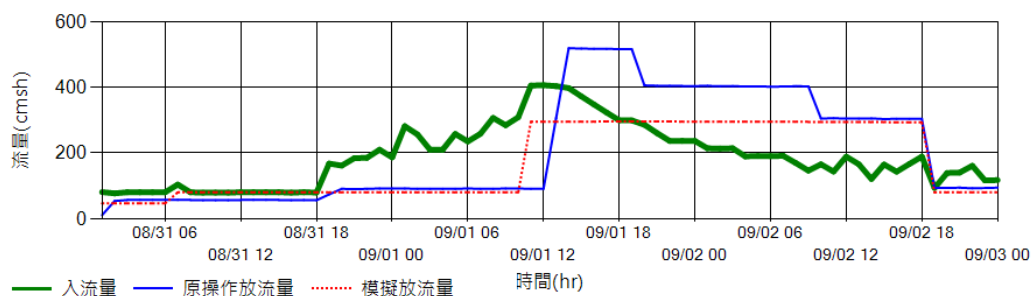
操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰削減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	301.44	-	-	242.98
模擬操作	79.83	-	-	243.88

由於未開啟排砂隧道、排洪隧道或溢洪道高放流設施，表 9-2-4 康芮颱風模擬操作與原操作比較表僅展示最高放流量及期末水位。由於模擬操作採取發電廠滿載及河道放水道放水等操作減緩水位上升速度之策略，不但減少操作次數，期末水位亦可維持較高水位。

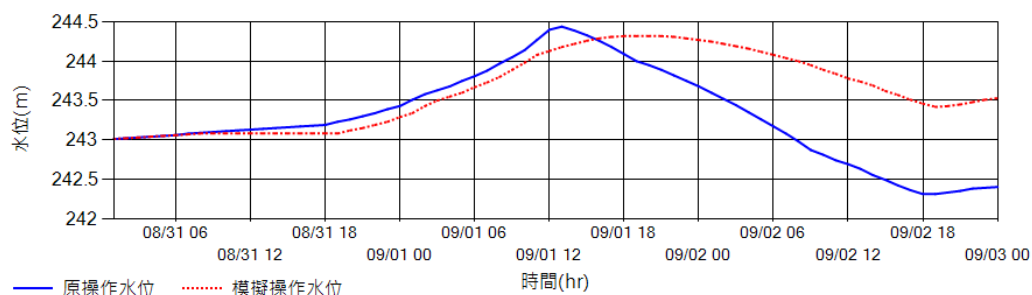
9-2-4 0831 豪雨

0831 豪雨事件發生於康芮颱風事件之後，運轉工作執行報告紀錄時間為 8 月 31 日 1 時起至 9 月 3 日 0 時止，共計 3 日。本次模擬操作起始水位為 243.01m，以發電廠滿載放流進行調節性放水；8 月 31 日 6 時開啟河道放水道；9 月 1 日 10 時開啟排洪隧道；洪峰於 9

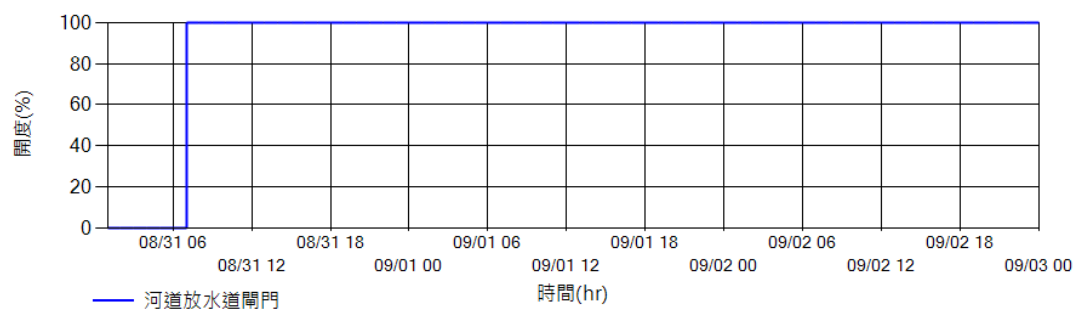
月 1 日 12 時發生，流量為 406.83cms，之後逐漸調減水庫放流量；9 月 2 日 18 時關閉排洪隧道，統計至 9 月 3 日 0 時水庫水位已回升至 243.53m。此外，由於本次事件非颱風事件且入流量較小，不進行降雨-逕流預報，相關模擬操作歷程詳見圖 9-2-4。



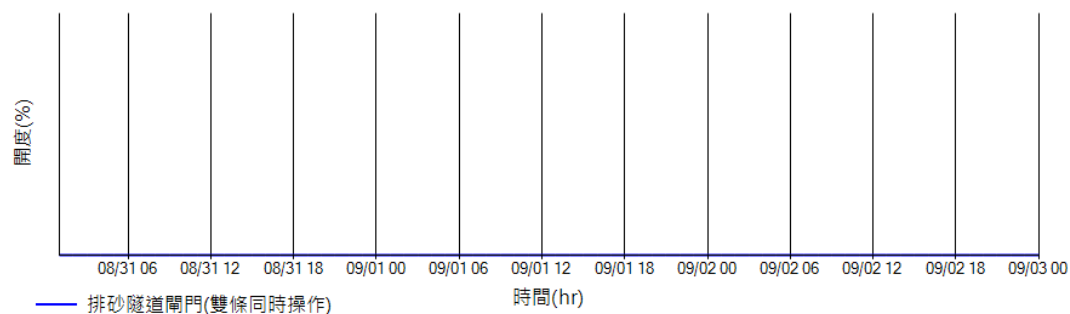
(a)流量歷程圖



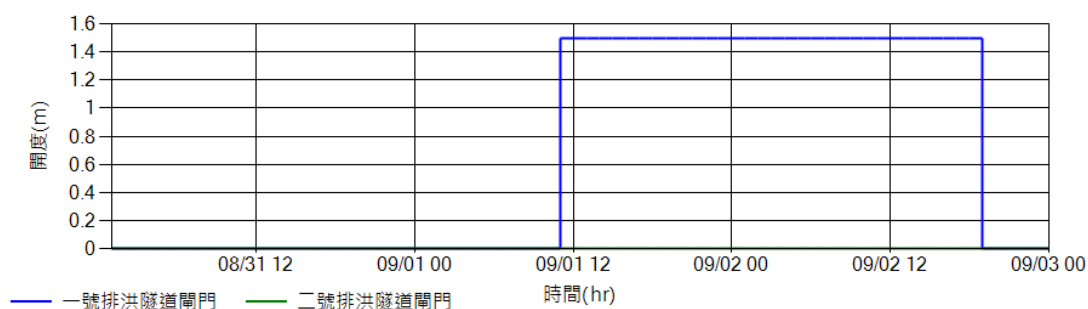
(b)水位歷程圖



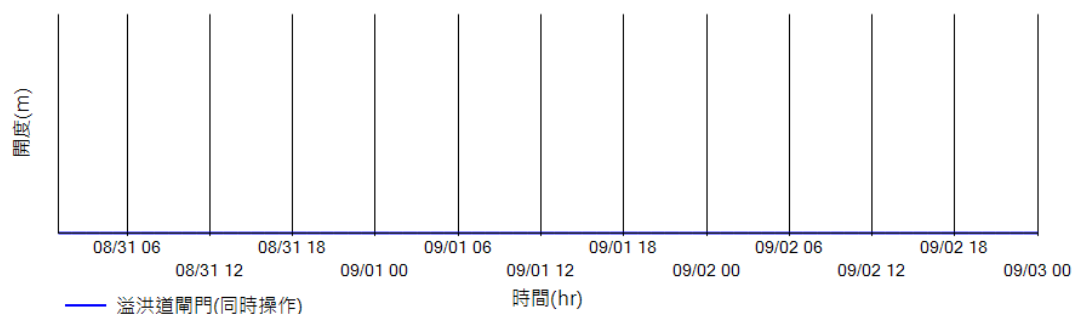
(c)河道放水道開度



(d)排砂隧道開度



(e)排洪隧道開度



(f)溢洪道開度

圖 9-2-4 0831 豪雨水庫模擬操作歷程圖

表 9-2-5 0831 豪雨模擬操作與原操作比較表

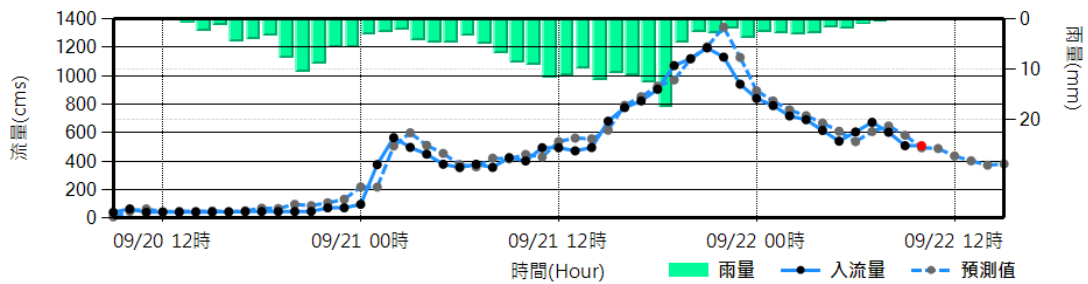
操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰削減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	519.92	244.44	-27.8	242.4
模擬操作	295.75	244.31	27.3	243.53

表 9-2-5 0831 豪雨模擬操作與原操作比較表，模擬操作之最大放流量為 295.75cms，原操作之最大放流量為 519.92cms，因入流量僅 406.83cms，因此，此一事件無須評估是否有效消滅洪峰。但此豪雨事件也驗證本操作模式仍可應用於暴雨事件之操作，有效地改善放流量並可在操作結束回蓄水量。

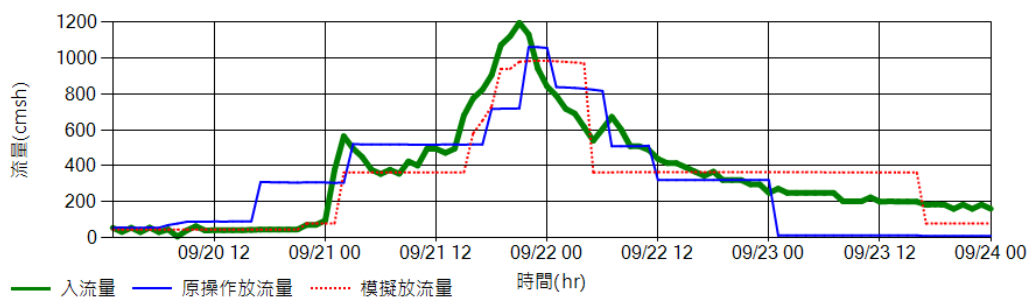
9-2-5 天兔颱風

天兔颱風於 102 年 9 月 19 日 23 時發布海上颱風警報，運轉工作執行報告紀錄時間為 9 月 20 日 1 時起至 9 月 24 日 0 時止，共計 4 日。

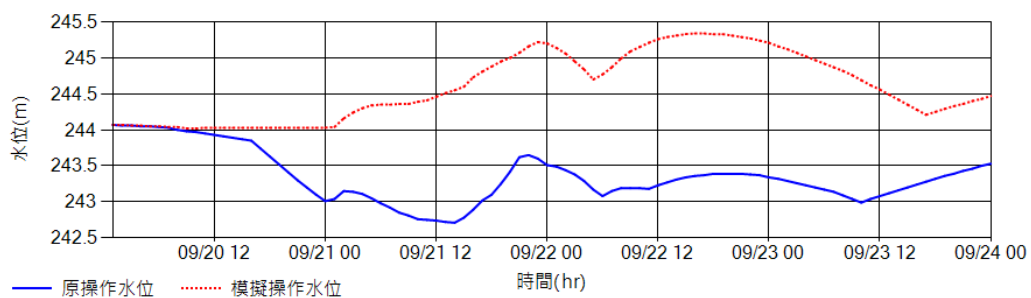
本次模擬操作起始水位為 244.07m，以發電廠滿載放流進行調節性放水；20 日 21 時開啟河道放水道；21 日 1 時開啟排砂隧道放水；21 日 15 時開啟排洪隧道放水；21 日 20 時關閉排洪隧道，改以溢洪道放水；洪峰於 21 日 21 時發生，流量為 1195.2cms，之後逐漸調減水庫放流量；至 22 日 4 時關閉溢洪道；23 日 16 時關閉排砂隧道回蓄水，統計至 9 月 24 日 0 時水庫水位已回升至 244.47m。相關模擬操作歷程詳見圖 9-2-5。



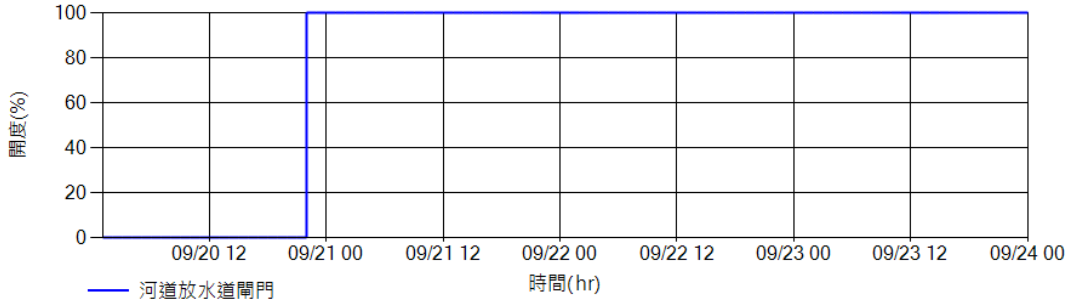
(a)降雨-逕流模式預報結果



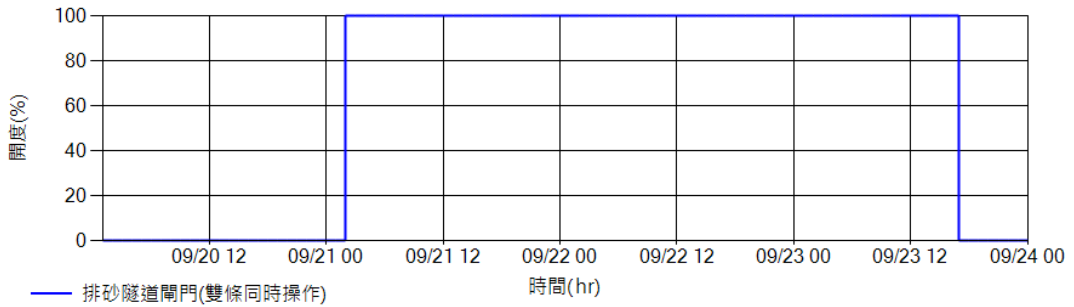
(b)流量歷程圖



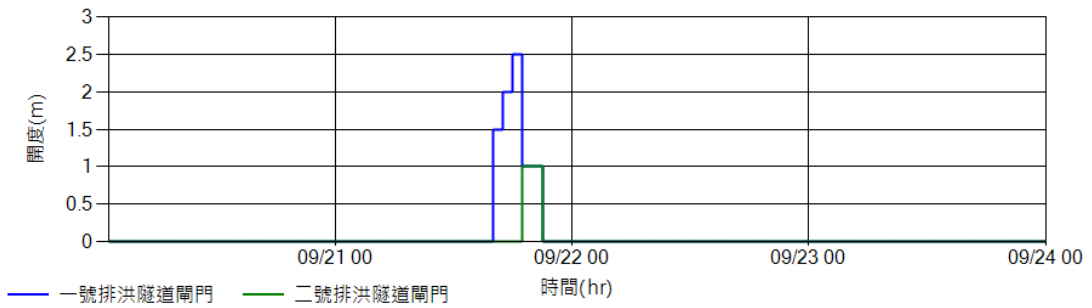
(c)水位歷程圖



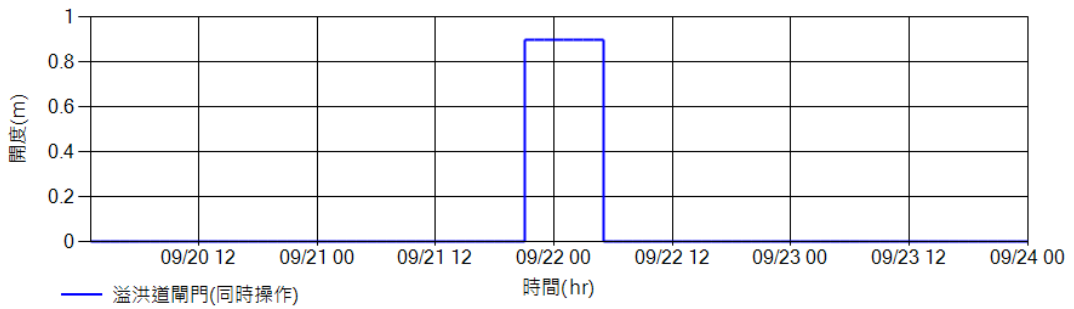
(d)河道放水道開度



(e)排砂隧道開度



(f)排洪隧道開度



(g)溢洪道開度

圖 9-2-5 天兔颱風水庫模擬操作歷程圖

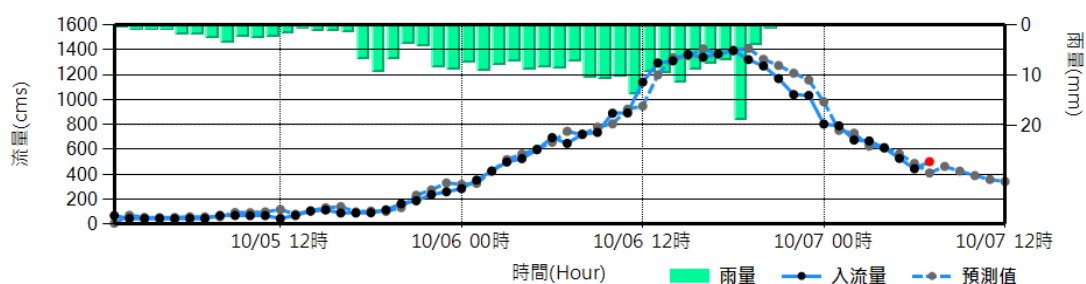
表 9-2-6 天兔颱風模擬操作與原操作比較表

操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰削減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	1059.78	244.07	11.33	243.53
模擬操作	984.21	245.34	17.65	244.47

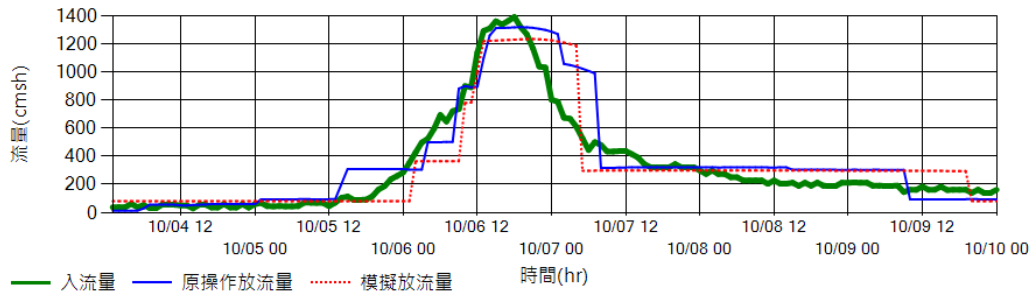
表 9-2-6 天兔颱風模擬操作與原操作比較表，模擬操作之最大放流量為 984.21cms 低於原操作 1059.78cms；模擬操作洪峰消滅率達 17.65% 優於原操作 11.33%；但水庫最高水位高達 245.34m 較原操作 244.07m 高。整體而言，模擬操作可有效地減少下游洪水量、操作期間之水庫最高水位也在容許範圍內、操作結束亦可回蓄水量，同時亦有排砂隧道操作時間較長，回蓄庫水時間較短等改善。此外，如果考量排砂隧道不宜操作之時機(如濁度太高增加供水風險)，亦可關閉排砂隧道，改由排洪隧道放流，並藉由提早回蓄之庫水進行兩階段排砂操作，以達到下游穩定供水及排砂之目的。

9-2-6 菲特颱風

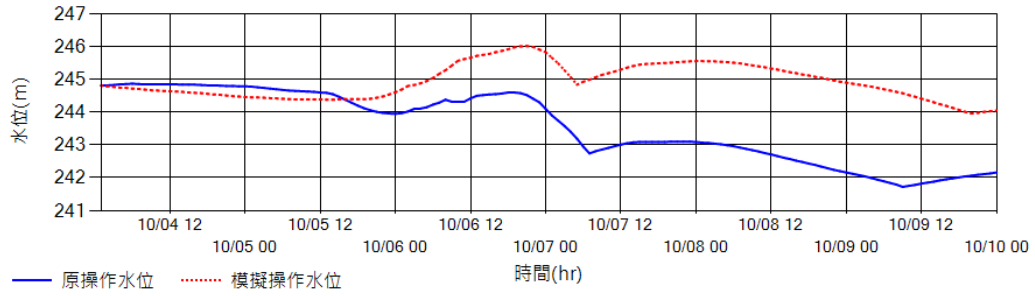
菲特颱風於 102 年 10 月 4 日 23 時 30 分發布海上颱風警報，運轉工作執行報告紀錄時間為 10 月 4 日 1 時起至 10 月 10 日 0 時止，共計 6 日。本次模擬操作起始水位為 244.81m，以發電廠滿載放流及河道放水道進行調節性放水；6 日 1 時開啟排砂隧道放水；6 日 9 時開啟溢洪道放水；洪峰於 6 日 18 時發生，流量為 1392.63cms，之後逐漸調減水庫放流量；7 日 4 時關閉溢洪道及排砂隧道，改以排洪隧道放水；9 日 19 時關閉排洪隧道回蓄庫水，統計至 10 月 10 日 0 時水庫水位已回升至 244.05m。相關模擬操作歷程詳見圖 9-2-6。



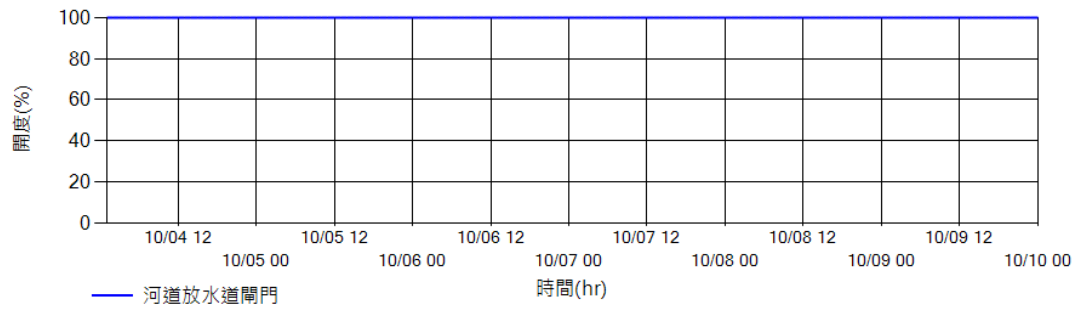
(a)降雨-逕流模式預報結果



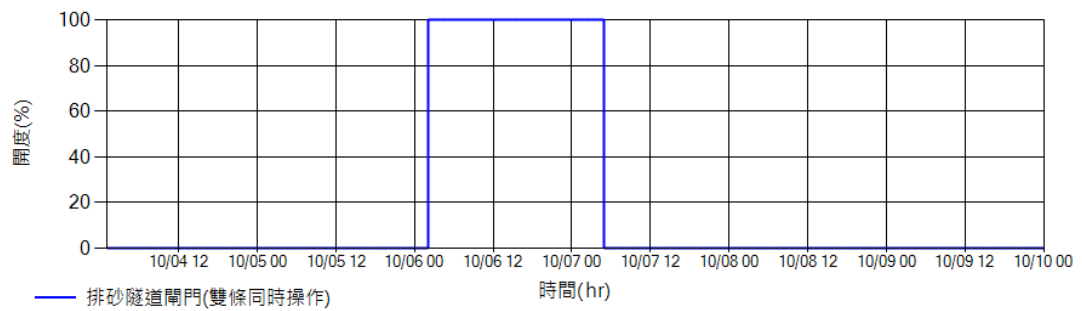
(b)流量歷程圖



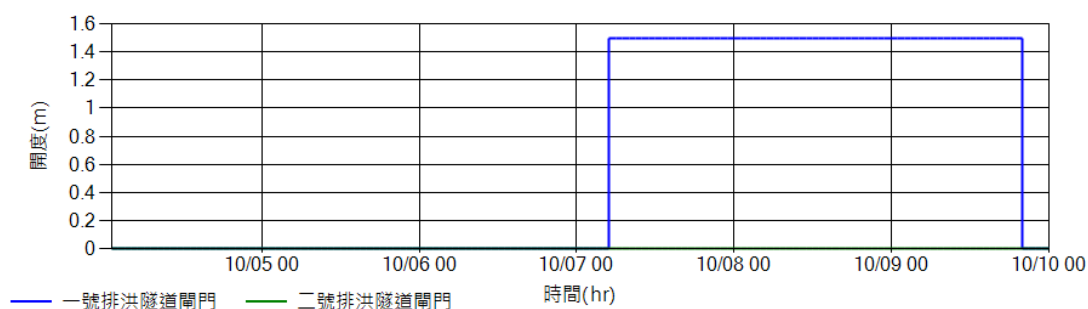
(c)水位歷程圖



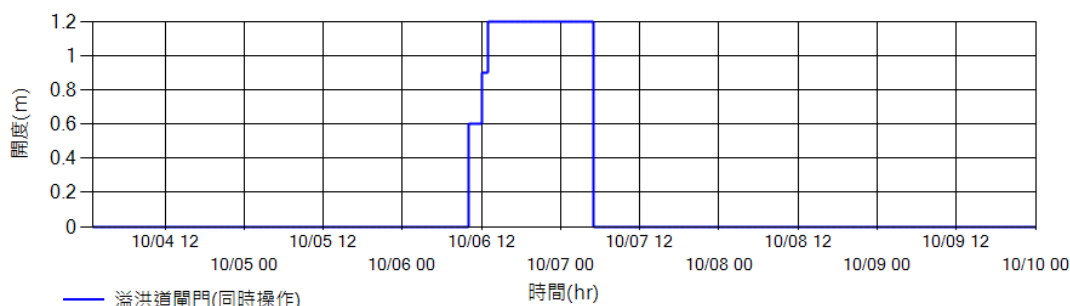
(d)河道放水道開度



(e)排砂隧道開度



(f)排洪隧道開度



(g)溢洪道開度

圖 9-2-6 菲特颱風水庫模擬操作歷程圖

表 9-2-7 菲特颱風模擬操作與原操作比較表

操作類別	最高放流量 (cms)	最高水位 (m)	洪峰削減率 (%)	期末水位 (m)
原操作	1320.11	244.87	5.21	242.16
模擬操作	1235.35	246.02	11.29	244.05

表 9-2-7 菲特颱風模擬操作與原操作比較表，模擬操作之最大放流量為 1235.35cms 低於原操作 1320.11cms；模擬操作洪峰消滅率達 11.29% 優於原操作 5.21%；但水庫最高水位高達 246.02m 較原操作 244.87m 高。整體而言，模擬操作可有效地減少下游洪水量、操作期間之水庫最高水位也在容許範圍內、操作結束亦可回蓄水量，同時亦有排砂隧道操作時間較長，回蓄庫水時間較短等改善。此外，如果考量排砂隧道不宜操作之時機(如濁度太高增加供水風險)，亦可關閉排砂隧道，改由排洪隧道放流，並藉由提早回蓄之庫水進行兩階段排砂操作，以達到下游穩定供水及排砂之目的。

9-2-7 綜合討論

比較 2013 年 6 場颱風事件模擬操作結果與原操作結果，可驗證本計畫所建置之智慧型水庫防洪模糊控制模式(IFOFCM)於防洪最佳化方面，可提供最佳洪峰消減率之操作歷程；於排砂最佳化方面，可提供較長排砂隧道開啟時間，且期末水位較高，有助於後續兩階段排砂操作。整體而言，模擬操作結果雖屬於事後分析，但已充分驗證智慧型水庫防洪模糊控制模式對於水庫即時操作的可靠度。未來若能建立不同操作影響各閘門出流水泥砂濃度變化之模式，將有助於進一步強化控制模式排砂及供水等目標之最佳化能力。

十、視窗化水庫運轉操作決策支援系統建置

本計畫包含數個分析模組，以 Microsoft .NET Framework C# 建立視窗化操作介面，以供水庫操作決策者快速瀏覽各模組分析結果，節省判斷時間。

10-1 整合各模組以開發水庫運轉操作決策支援系統

本計畫整合颱風路徑比對及流量歷程套配分析模組、調節性放水策略分析模組、水庫即時入流量分析模組、水庫排砂分析模組及下游穩定供水風險分析模組等 5 個子模組，建立水庫運轉操作決策支援系統視窗化介面，其架構可概略分為三大部分，如圖 10-1-1 所示：

集水區即時入流量分析：

以過去雨量及入流量推估水庫未來入流量。

流量歷程與調節性放水分析：

以歷史颱風資料及預報路徑分析未來流量歷程。

排砂與穩定供水(濁度)分析：

以濁度觀測值及各出水工流量分析水庫排砂量及下游供水風險。

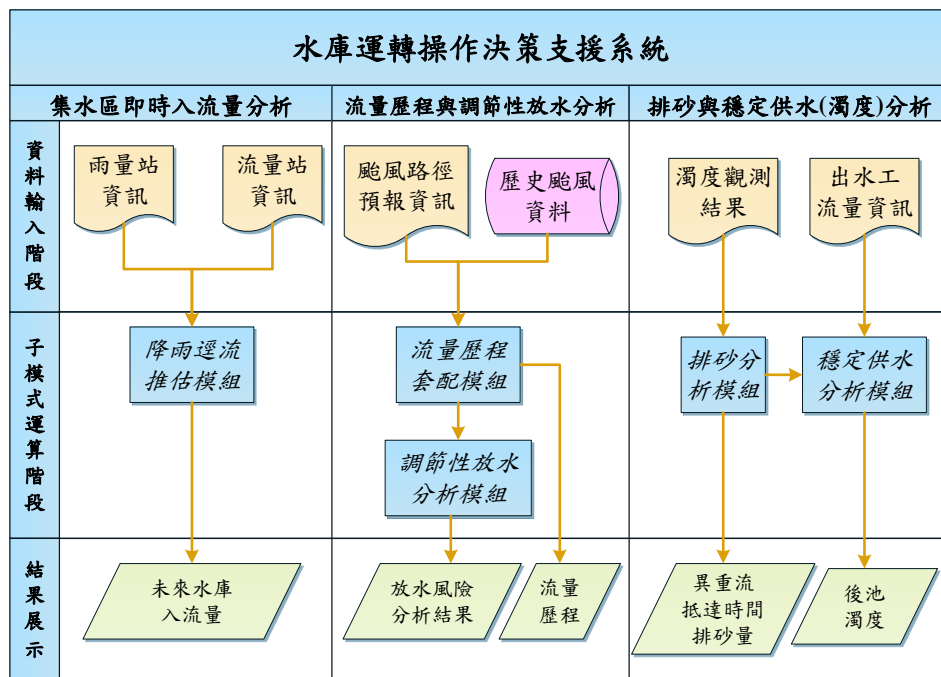


圖 10-1-1 模式流程圖

圖 10-1-2 為展示介面主畫面，共有三大功能，分述如下：

1. 線上即時分析模擬：

點選畫面左上角線上即時分析模擬後，系統會自動抓取各項水庫即時資料進行分析，使用者可點選右上方的功能選單觀看各子模組分析結果。

2. 歷史颱風分析結果展示：

由下拉式選單選擇颱風名稱與模式時間後，點選讀取資料即可讀取歷史資料，使用者可點選右上方的功能選單觀看各子模組分析結果。

3. 水庫閘門開度查詢：

點選水庫閘門開度查詢可開啟水庫閘門開度查詢模組，如圖 10-1-3 所示，使用者可輸入水庫(後池)水位及需求放流量，推算出適當開度及合理放流量。

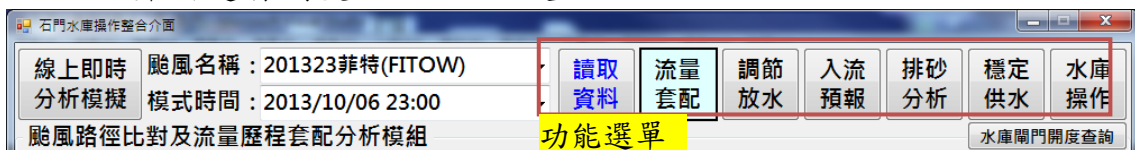


圖 10-1-2 展示介面主畫面



圖 10-1-3 水庫閘門開度查詢模組

10-2 流量歷程套套配析模組

本模組主要功能為將颱風路徑進行分類，找出最合適的百分比流量累積曲線，並藉由使用者輸入現時刻累積入流量，進一步推算出整場颱風事件的流量歷程。模組介面如圖 10-2-1 所示，路徑分類及座標位置圖區塊顯示目前颱風路徑、7 級風半徑及分類結果；流量套配區塊顯示目前累積入流量、統計起訖時間及該累積量占推估流量歷程總累積流量的百分比；模擬流量歷程統計資料區塊顯示推估流量歷程的洪峰流量、洪峰到達時間及推估總累積流量；模擬流量歷程圖區塊中顯示水庫實際入流量歷程及推估入流量歷程。

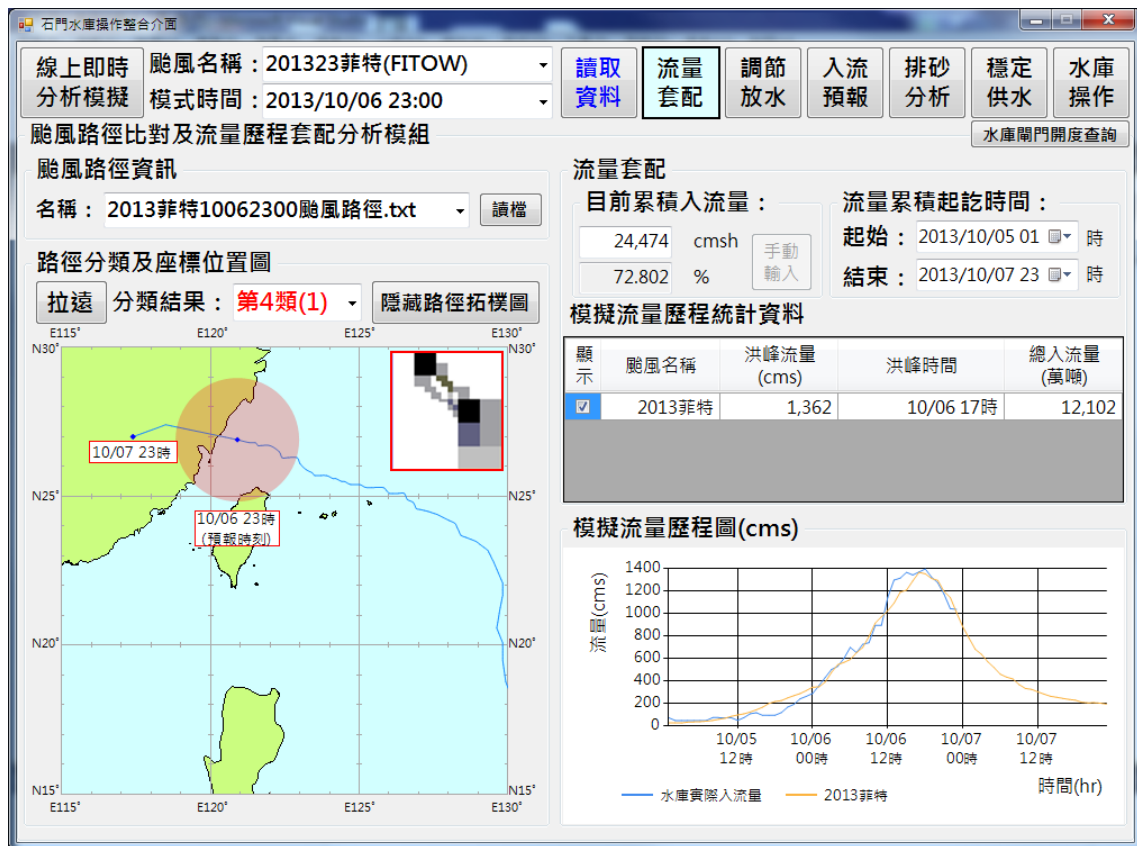


圖 10-2-1 颱風路徑比對及流量套配分析模組

10-3 調節性放水策略分析

本模組以流量歷程套配分析模組所推估的流量歷程進行放水模擬，包含水庫放流設施開度歷程模擬與操作結果分析。模組介面如圖 10-3-1 所示，水位設定區塊可設定操作起始水位及操作結束後的目標水位；評估指標展示區塊展示不同起始水位的操作結果，包含最高水位、最大放流量及期末水位等資訊；水庫操作歷程區塊展示入流量歷程線、模擬放流量歷程線、水位歷程線(圖 10-3-2)、各出水工放流歷程線(如圖 10-3-3 與圖 10-3-4)及放流資訊表格(圖 10-3-5)。各出水工之模擬操作依照「石門水庫水門操作規定」及「修正石門水庫運用要點」進行，預設石門電廠為滿載，河道放水道全閉或全開，排砂隧道於調節性放水操作中暫時不列入考慮，排洪隧道於模擬放流量大於 200cms 未滿 400cms 時採單條操作，大於 400cms 時採雙條操作，如果模擬入流量超過 700cms 則關閉排洪隧道，改用溢洪道進行放流。

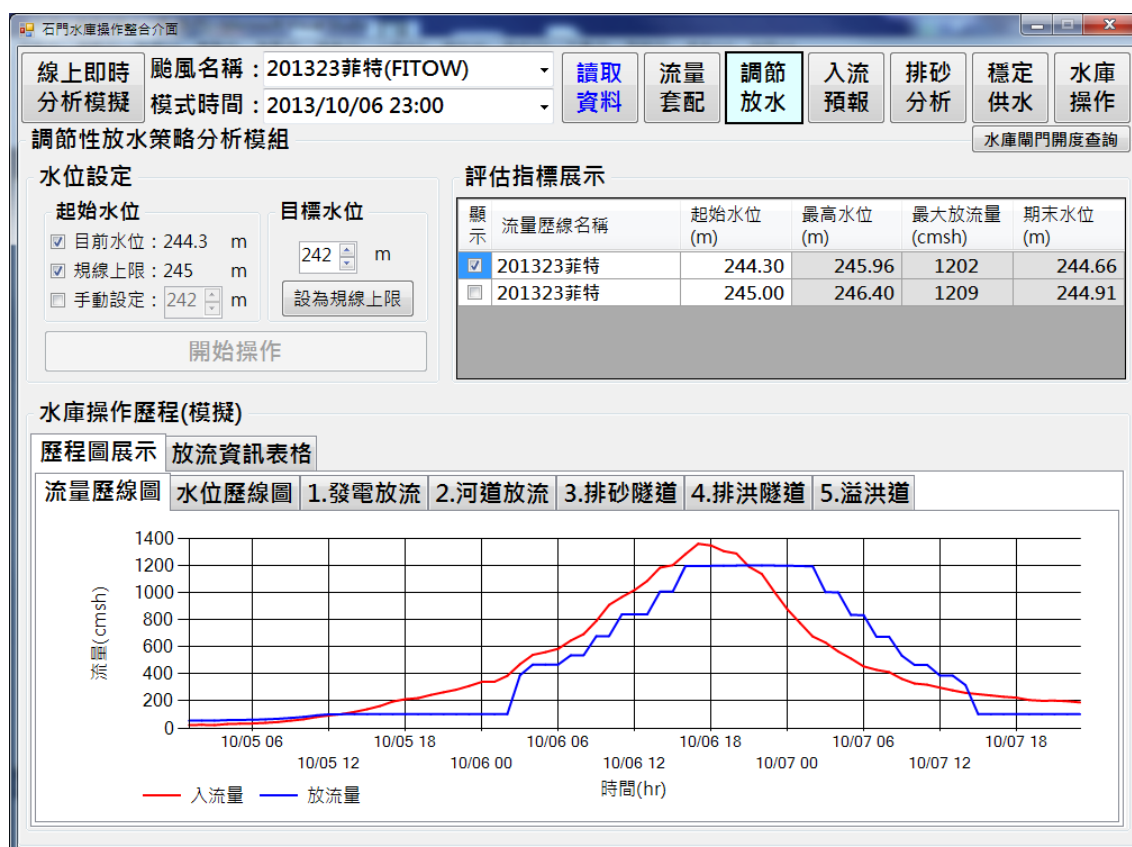


圖 10-3-1 調節性放水策略分析模組

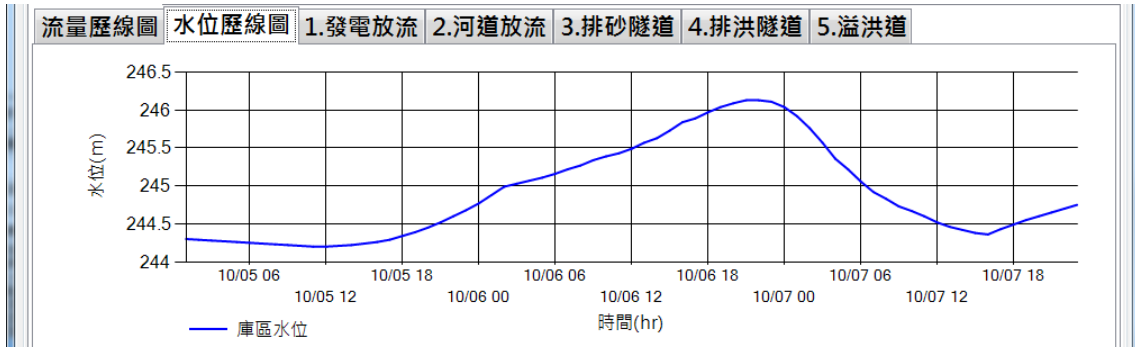


圖 10-3-2 調節性放水策略分析模組水位歷程圖

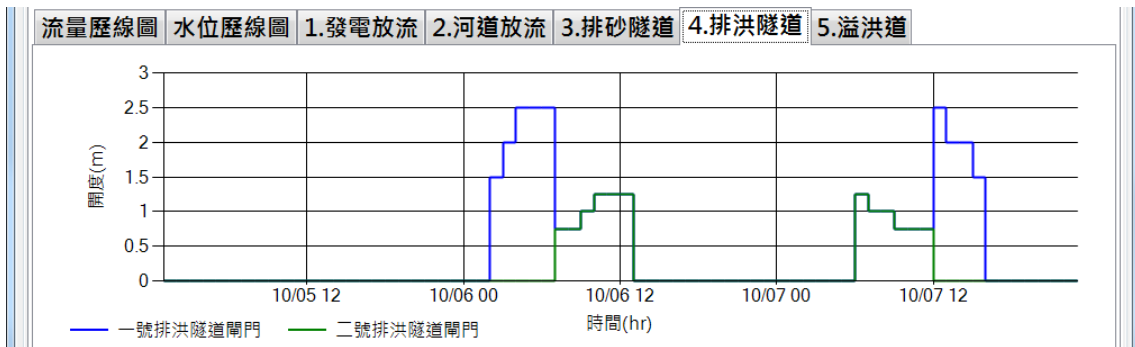


圖 10-3-3 調節性放水策略分析模組排洪隧道開度歷程圖

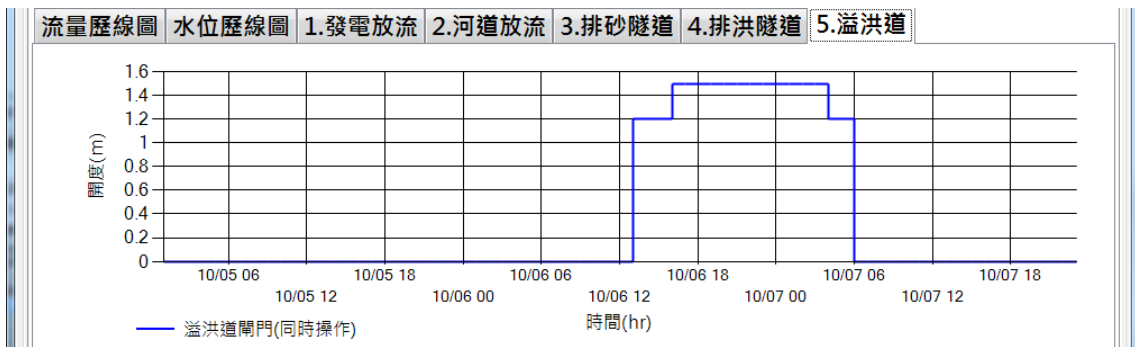


圖 10-3-4 調節性放水策略分析模組溢洪道開度歷程圖

時間	水庫水位(m)	水庫入流量(cms)	水庫放流量(cms)	河道放水道(%)	排砂隧道(%)	一號排洪隧道(m)	二號排洪隧道(m)	溢洪道(m)
10/05 01:00	244.30	23	55	25	0	0.0	0.0	0.0
10/05 02:00	244.29	24	55	25	0	0.0	0.0	0.0
10/05 03:00	244.28	22	55	25	0	0.0	0.0	0.0
10/05 04:00	244.27	30	60	35	0	0.0	0.0	0.0
10/05 05:00	244.26	32	60	35	0	0.0	0.0	0.0
10/05 06:00	244.25	34	63	40	0	0.0	0.0	0.0
10/05 07:00	244.24	39	65	45	0	0.0	0.0	0.0
10/05 08:00	244.23	45	70	55	0	0.0	0.0	0.0
10/05 09:00	244.22	55	76	75	0	0.0	0.0	0.0
10/05 10:00	244.21	65	80	100	0	0.0	0.0	0.0
10/05 11:00	244.20	82	80	100	0	0.0	0.0	0.0
10/05 12:00	244.20	94	80	100	0	0.0	0.0	0.0

圖 10-3-5 調節性放水策略分析模組放流資訊表格

10-4 降雨-逕流推估模組

本模組以過去石門水庫集水區 QPESUMS 雨量資料及入流量資料推估未來水庫 5 小時入流量。模組介面如圖 10-4-1 所示，模式資訊區塊包含降雨逕流推估結果及手動輸入模式參數兩個介面：降雨逕流推估結果介面可觀看過去 8 小時日期時間、雨量、實際入流量、預測入流量、放流量、水位、蓄水量，已達滿庫(245m)庫容百分比、到滿庫庫容剩餘容量、已達最高洪水位(250m)庫容百分比及到最高洪水位剩餘容量等資訊；手動輸入模式介面(圖 10-4-2)參數可讓使用者修改模式輸入資訊，以解決即時資料無法取得或有錯誤等情況；降雨-逕流歷程圖區塊顯示近 8 小時或整場颱風事件(圖 10-4-3)的降雨組體圖、實際入流量歷程及模式推估流量歷程。

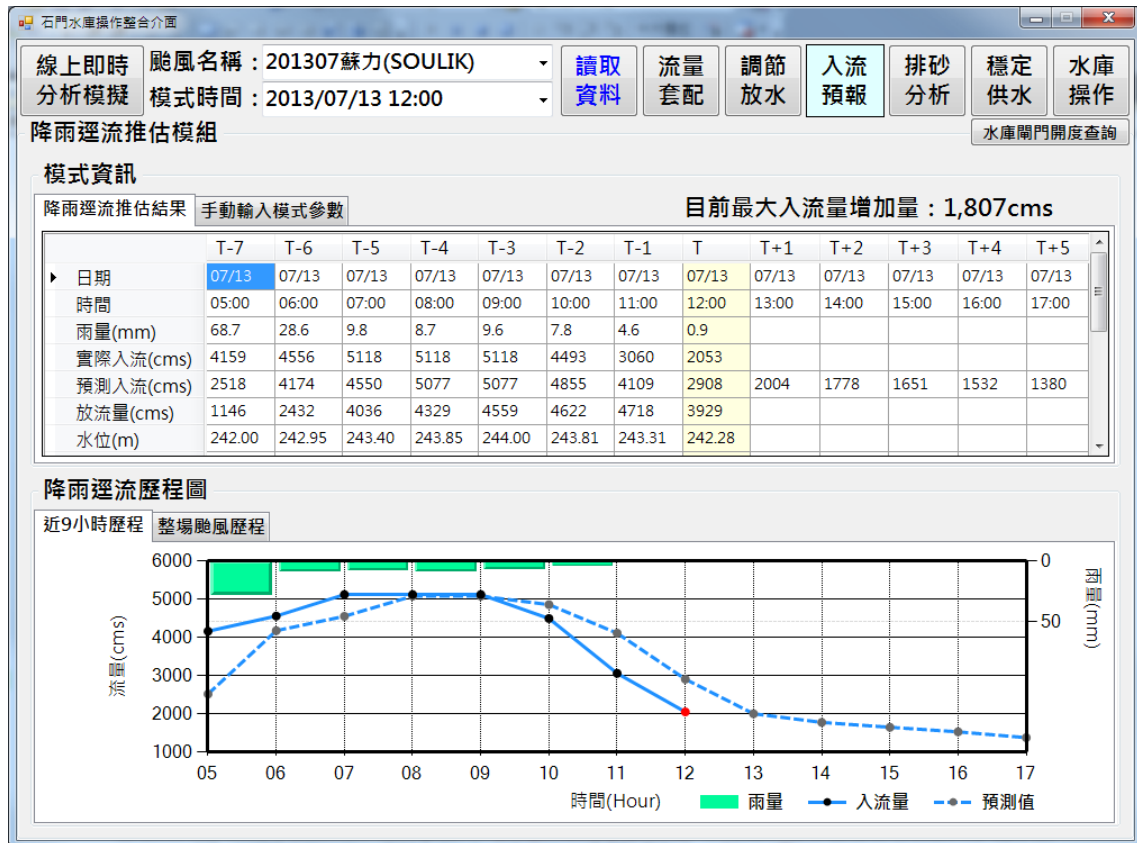


圖 10-4-1 石門水庫入流量推估模組



圖 10-4-2 石門水庫入流量推估模組手動輸入模式參數介面

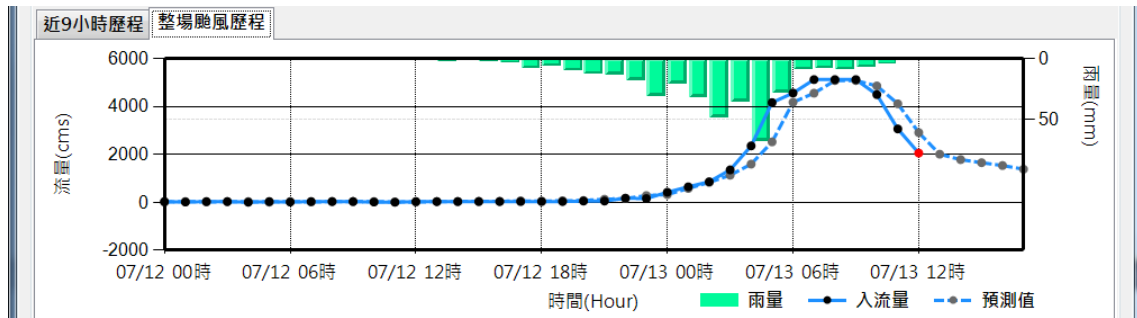


圖 10-4-3 石門水庫入流量推估模組整場颱風歷程圖

10-5 排砂分析模組

本模組使用水庫水位、入流量及羅浮水位站所測量的泥砂濃度推估異重流到達時間及到達時大壩前產生的渾水潭厚度，並假設該渾水潭平均泥砂濃度為羅浮水位站的泥砂濃度，分析使用石門大圳、石門電廠、河道放水道及排砂隧道進行渾水潭排出操作所需時間、排出渾水量及排出砂量等資訊。模組介面如圖 10-5-1 所示，異重流到達時間分析區塊顯示異重流最早到達的時間，使用者可透過下拉式選單選擇羅浮水位站的濁度資料來源，以切換不同來源資料的分析結果；泥砂濃度觀測資料區塊顯示過去羅浮水位站所觀測到的泥砂濃度及異重流潛入斷面、移動速度及到達時間推估結果，使用者可點選資料表中的[→]按鈕直接進行該筆異重流資料產生之渾水潭排出分析；渾水潭排出分析區塊顯示最快到達或使用者選擇的異重流料產生之渾水潭推估結果，同時可勾選各種排砂設施進行排出時間推估及排砂量推估。

石門水庫操作整合介面

線上即時分析模擬 颱風名稱：201307蘇力(SOULIK) 模式時間：2013/07/13 12:00

水庫排砂分析模組

異重流到達時間分析
濁度資料來源：[人工]羅浮EL242.5 最快到達時間：07/13 15:35 到達厚度：31.31

泥砂濃度觀測資料
異重流模式資料表 隱藏未發生異重流資料

資料時間	泥砂濃度 (ppm)	水位 (m)	入流量 (cms)	潛入斷面	移動速度 (m/s)	異重流到達時間	排砂分析
07/13 01:00	7,839	238.67	645	29	0.26	07/13 15:35	→
07/13 18:00	14,341	242.41	988	31	0.27	07/14 09:42	→
07/13 19:00	12,360	242.31	869	31	0.25	07/14 12:10	→
07/13 20:00	15,687	242.30	779	30	0.33	07/14 08:12	→
07/13 21:00	22,326	242.45	854	31	0.34	07/14 09:32	→
07/13 22:00	6,514	242.52	670	32	0.15	07/15 04:39	→
07/13 23:00	22,496	242.61	719	32	0.28	07/14 15:12	→
07/14 00:00	17,730	242.69	680	32	0.25	07/14 17:55	→
07/14 01:00	17,229	242.74	596	32	0.25	07/14 18:59	→
07/14 02:00	9,016	242.78	572	32	0.18	07/15 02:37	→
07/14 03:00	11,834	242.81	549	32	0.21	07/15 00:22	→
07/14 04:00	11,834	242.83	526	32	0.21	07/15 01:17	→
07/14 05:00	10,587	242.83	480	32	0.20	07/15 03:30	→

渾水潭排出分析 重新計算

渾水潭資料
渾水潭高程：201.31 (m)
庫底高程：170.00 (m)
渾水潭水深：31.31 (m)
渾水潭濃度：7839 (ppm)

排砂設施
 石圳退水路(13.5cms)
 石門電廠 (47.5cms)
 河道放水道(34cms)
 排砂隧道 (300cms)

推估結果
渾水潭水量：1364 萬噸
排砂放流量：0.0 cms
排出時間：0.0 小時
總排砂量：0.0 萬噸

圖 10-5-1 排砂分析模組

10-6 下游穩定供水風險分析模組

本模組具有兩種控制下游濁度的操作模式分析功能，包含增加排洪隧道或溢洪道放水量以稀釋後池濁度及兩階段排砂等，此外，展示各種水庫供水模式，包含正常取水，以分層取水工取水及水庫、後池與鳶山堰聯合排淤操作時的供水模式。模式介面如圖 10-6-1 所示，於後池濁度及排砂分析分頁中，使用者須輸入水庫各放流設施的出流量及泥砂濃度，以便後續推估模式運作；後池濃度計算區塊可依使用者設定之後池目標泥砂濃度及各放流設施流量及泥砂濃度，分析需要增加多少排洪隧道或溢洪道放流量以達到濃度目標；兩階段排砂分析區塊可設定水庫排砂與河道沖刷所使用的放流設施、操作時間比或放水量比，並依據設定之操作起始水位、結束水位及平均入流量，自動計算可操作放水量及各階段操作情形(圖 10-6-2)，包含各放流設施放流量、操作時間及總放水量等資訊；於供水風險分析分頁中(圖 10-6-3 及圖 10-6-4)，展示不同供水模式的供水概況及各淨水廠於不同原水泥砂濃度下的處理能力。

石門水庫操作整合介面

線上即時分析模擬 鵬風名稱：201323菲特(FITOW) 模式時間：2013/10/06 00:00

讀取資料 流量套配 調節放水 入流預報 排砂分析 穩定供水 水庫操作

下游穩定供水風險分析模組 水庫開門開度查詢

後池濁度及排砂分析 供水風險分析

相關設施放流量及泥沙濃度

	出流量 (cms)	泥砂濃度 (ppm)
電廠尾水路	46	16000
河道放水道	34	18000
石圳退水路	13.5	14000
排砂隧道	300	17000
排洪隧道	0	0
溢洪道	600	3500

兩階段排砂分析

操作放流設施選擇

	排砂	沖刷
電廠尾水路	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
河道放水道	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
石圳退水路	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
排砂隧道	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
排洪隧道	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
溢洪道	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

操作設定

起始水位：244.00 m
結束水位：242.00 m
平均入流量：2000 cms
操作時間 (hr)：8.00
階段別 排砂：沖淤
● 時間比 1：1.00
● 水量比 1：12.1

開始分析

後池濃度計算

目標設定
後池目標泥砂濃度：6700 ppm
要調整的放水設施：● 排洪隧道 ● 溢洪道 計算

計算結果
混合後，後池泥砂濃度推估為8,794ppm
需增加溢洪道放流量為1,250cms

分析結果

● 整體 ● 排砂階段 ● 沖淤階段

	放水量(萬噸)	時間(hr)	放流量(cms)
排砂總計	567	4.00	394
沖淤總計	6,880	4.00	4,778
操作總計	7,447	8.00	

圖 10-6-1 下游穩定供水風險分析模組

● 整體 ● 排砂階段 ● 沖淤階段

	放水量(萬噸)	時間(hr)	放流量(cms)
電廠尾水路	66	4.00	46
河道放水	49	4.00	34
石圳退水路	19	4.00	14
排砂隧道	432	4.00	300
排洪隧道	0	0.00	0
溢洪道	0	0.00	0
排砂總計	567	4.00	394

● 整體 ● 排砂階段 ● 沖淤階段

	放水量(萬噸)	時間(hr)	放流量(cms)
電廠尾水路	66	4.00	46
河道放水	0	0.00	0
石圳退水路	0	0.00	0
排砂隧道	0	0.00	0
排洪隧道	0	0.00	0
溢洪道	1,630	4.00	1,132
沖淤總計	1,696	4.00	1,178

圖 10-6-2 下游穩定供水風險分析模組兩階段排砂分析結果

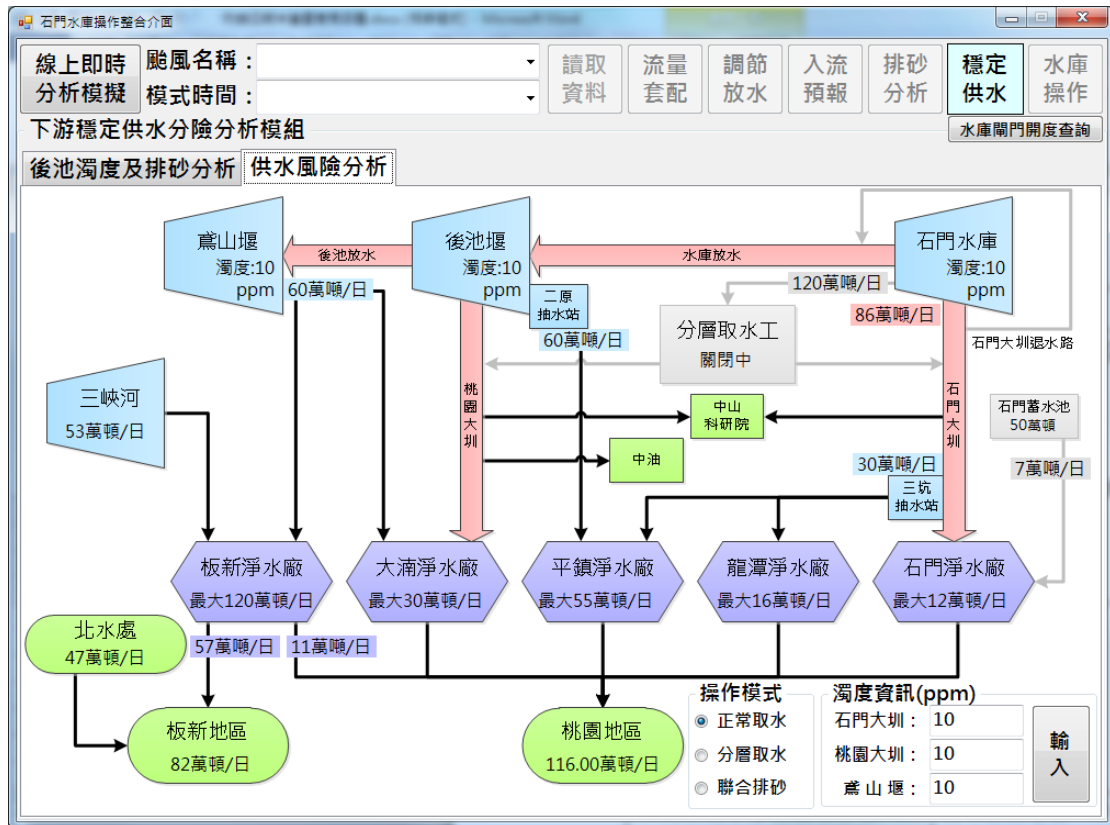


圖 10-6-3 下游穩定供水風險分析模組供水風險分析(正常供水)

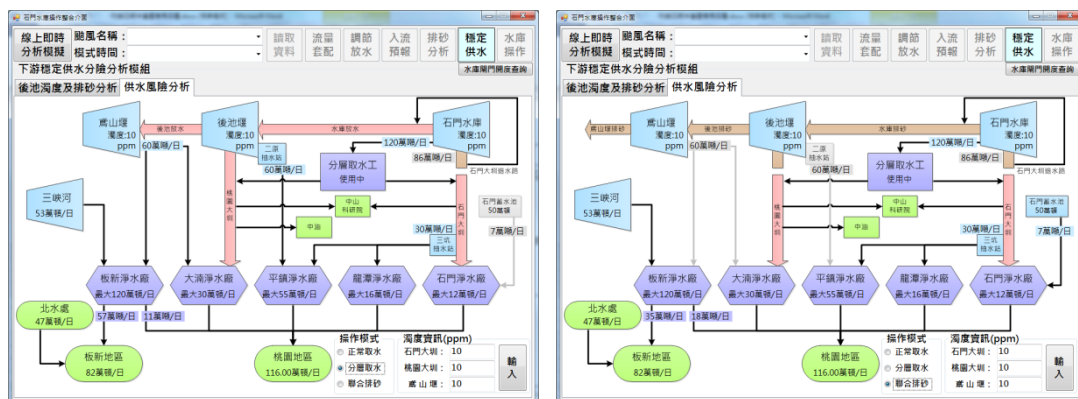


圖 10-6-4 下游穩定供水風險分析模組供水風險分析(分層取水及聯合排砂)

10-7 即時水庫操作模組

本模組將現時刻水庫入流量及降雨逕流推估模組所推估的未來 5 小時入流量進行水庫模擬放水操作，並將操作結果以展示在介面上。模式介面如圖 10-7-1 所示，水庫操作資訊顯示現時刻及未來 5 小時模擬操作結果，使用者可透過顯示閘門開度資訊按鈕切換顯示各放流設施開度或放流量，勾選開啟排砂隧道核取方塊選擇模擬過程是否開啟排砂隧道調整目標水位以設定模擬放流模式的期末水位目標；情境示意圖顯示水庫庫區、後池資訊及各放流設施概略位置及其參考現時刻水庫入流量及水位所模擬的開度及放流量，左側水庫流量與庫容推估歷程圖顯示未來 5 小時模擬操作下的入流量、放流量及目前水位換算的水庫庫容使用量百分比。

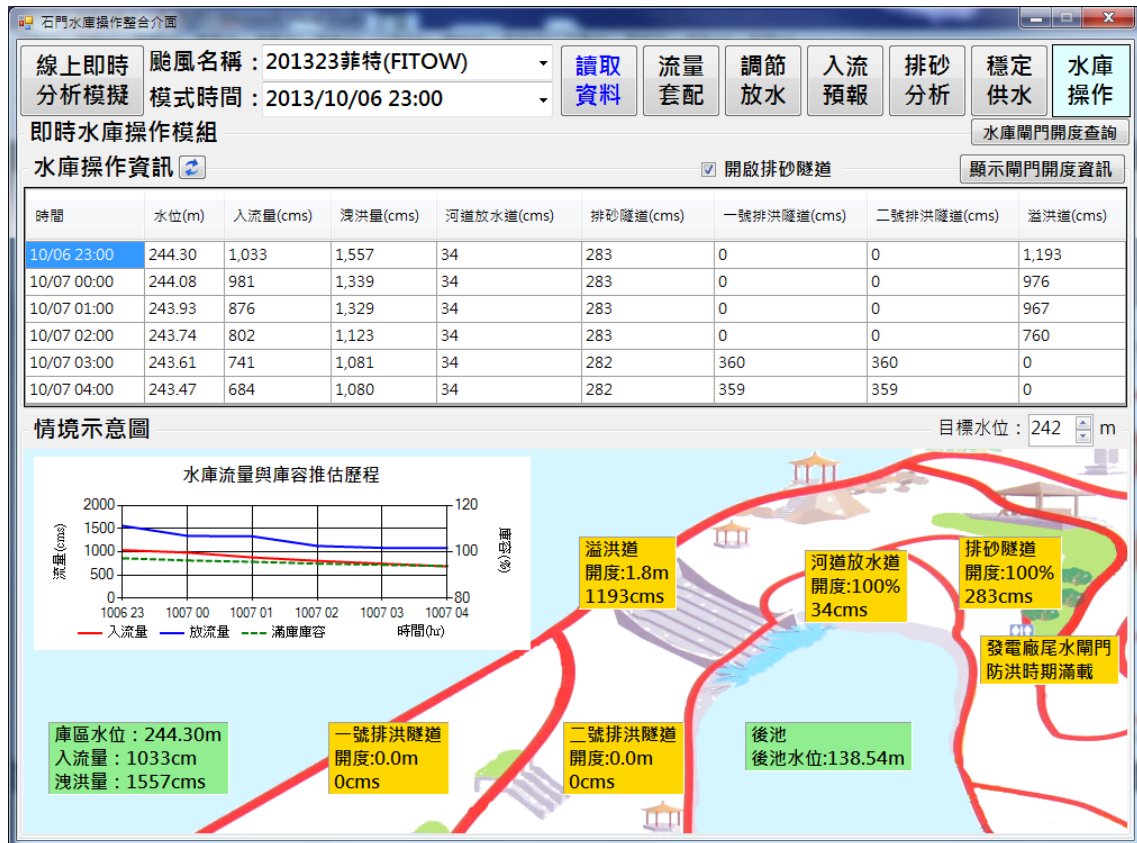


圖 10-7-1 水庫即時入流量分析模組展示圖

十一、教育訓練

本團隊於 102 年 11 月 1 日，於石門水庫管理中心會議室舉行教育訓練，參與人員為北水局各單位同仁，主要內容包含兩部分：(一)說明本計畫各工作項目執行概況及預報系統使用之模式理論概述；(二)針對開發之視窗化水庫運轉操作決策支援系統展示介面進行功能與介面解說，並由開發者示範操作；希望藉由這次教育訓練能使與會者更瞭解各工作項目模組之所開發之子模組功能，並藉由相關人員互相討論，期在決策支援系統上的規劃更符合石門水庫管理中心之預報需求。

本次教育訓練的重點：一、類神經網路之理論與應用；二、異重流模式理論及應用；三、展示介面介紹與操作，相關內容詳見表 11-1。

表 11-1 教育訓練議程

時間	課程說明	講師
10:00—10:30	報到	
10:30—10:40	長官致詞	北水局張庭華主任
10:40—11:00	計畫成果說明	淡江大學 張麗秋教授
11:00—12:00	類神經網路 一、類神經網路介紹 二、颱風路徑分類 三、降雨逕流模式 四、自動化水庫操作模式	淡江大學 張麗秋教授
12:00—13:00	午餐	
13:00—14:00	異重流運移及排砂操作 五、異重流運移速度推估 六、排砂操作	臺灣大學 李豐佐碩士
14:00—15:00	展示介面介紹與操作練習 七、展示介面功能介紹 八、歷史颱風事件操作演練	淡江大學 高毅灃碩士
15:00—15:30	結訓及綜合討論	北區水資源局

十二、結論與建議

12-1 結論

1. 本計畫訂定標準 EXCEL 試算表格式，以一場颱風事件儲存一個檔案方式，完整建置 61 場颱風之氣象、水文、防洪運轉等資料與運轉歷程圖。
2. 應用自組特徵映射網路(SOM)建置颱風路徑分類模式，並建置各分類對應之累積流量百分比圖。在實際應用上，根據氣象局預報之颱風路徑進行分類，並對應相對之累積流量百分比，可推估整場事件之入流量歷程，分析洪峰到達時間及總入流量。
3. 結合遺傳演算法(GA)及調適性模糊推論系統(ANFIS)，搜尋歷史颱風事件之最佳防洪操作，並建置智慧型水庫防洪模糊控制模式。實際應用於預先調節性放水策略分析與即時水庫防洪操作；在預先調節性放水策略分析亦可提供不同起始水位之防洪操作，比較其操作之成效。
4. 以倒傳遞類神經網路(BPNN)建置石門水庫集水區之降雨-逕流模式，氣象局 QPESUMS 雨量資訊及石門水庫入流量為輸入資訊，預測未來 5 小時入流量。模式預測成效顯示未來 1~3 小時入流量預測結果有良好成效；未來 4~5 小時入流量預測結果數值精確度較 1~3 小時差，但可供入流量趨勢之參考。
5. 蒐集判斷異重流潛入之經驗公式、異重流頭部運移速度之試驗室公式以及異重流數值模式，分析異重流頭部運移速度及入流尖峰泥砂濃度運移速度之差異性，提供即時計算異重流到達時間。
6. 應用試驗室所得到之異重流沿程厚度變化公式以及文獻所建立之排砂比計算公式，推估發電出流泥砂濃度與實測值相關性，但精確度待提升。
7. 水庫各出流設施排砂防淤操作條件評估分析，建立石門水庫

各出水工排砂量對後池濁度影響之分析模式。若在鳶山堰最大取水濃度於 6,000ppm 的限制下，溢洪道增排流量消滅後池泥砂濃度之效果不如排洪隧道之成果。

8. 本研究團隊於今年計畫執行期間，已完成 5 場颱風事件之協勤作業，提供水庫防洪、排淤及穩定供水運轉模擬及分析評估及全洪程即時運轉操作之策略建議。
9. 建置視窗化水庫運轉操作決策支援系統，包含颱風路徑比對及流量歷程套配分析、調節性放水策略分析、水庫即時入流量分析、水庫排砂分析及下游穩定供水風險分析等子模組，並具備自動化下載所需資訊及分析之功能，提供水庫操作於防洪、排砂防淤及穩定供水等目標之參考資訊。
10. 以 2013 年 5 場颱風事件及 1 場暴雨事件進行全洪程水庫操作策略分析，結果驗證本系統具有即時性、實用性與可靠性，本計畫建置水庫運轉操作之決策支援系統，可提供石門水庫管理中心在颱風時期水庫防洪運轉之重要參考資訊。

12-2 建議

1. 建置水庫運轉操作資料庫，整合相關集水區水文及水庫操作資訊，並提供石門水庫管理中心內部網路線上查詢功能。
2. 因應全球暖化與氣候變遷之影響，颱風侵襲時降雨強度與降雨延時屢破新高，又水庫淤積影響庫容量已減少，建議相關水利法與水庫運轉辦法宜編列相關研究計畫模擬、優選或分析，重新檢討法規之合宜性。
3. 除了進一步了解各種颱風事件條件下排洪隧道與溢洪道對於消滅後池泥砂濃度之效果外，亦建議進一步探討所排放泥砂於下游河道之運移情況及對各取水口之影響。
4. 宜編列長年研究計畫持續研究，以達成水庫防洪操作、排砂操作與供水穩定性之綜效。
5. 建議提供更多實務上水庫即時操作根據與規則，無論是針對防洪或防淤策略，以利於水庫即時操作模式建立的更加符合

實際應用情況，能夠趨於完整。

6. 排砂隧道於今年兩場颱風事件中皆能順利解決供水問題，唯兩場數據尚不足以分析兼顧排砂與供水之最佳操作，建議未來於洪峰發生前階段可先與排洪隧道共同操作，以便蒐集更多操作資訊。
7. 建議之排砂策略:
 - (a) 傳統上在防洪期間可利用排洪隧道流量稀釋後池濁度。
 - (b) 備原水量充足時(高水位)，可等待庫區內泥砂自然沉降，以穩定供水。
 - (c) 積極面可採用蘇力颱風防洪期間，開啟排砂隧道與其餘底孔出水工進行排砂，且鳶山堰配合排砂操作，可縮短鳶山堰高濁度影響時間。
 - (d) 壩址底孔排砂在入流量不大時，僅能排除其出水工影響範圍內之懸浮質泥砂。
 - (e) 利用底孔排砂時應注意是否有多餘水量於排砂後清洗後池至鳶山堰之淤積泥砂。
 - (f) 排砂操作時若鳶山堰濁度已降至可處理範圍，石門水庫即應停止排砂，或加大放流量，以免大量泥砂落淤於河道。

附錄一、參考文獻

1. Akiyama, J. and Stefan, H., 1985, "Turbidity Current with Erosion and Deposition," *Journal of Hydraulic Engineering*, V111(12): 1473-1496.
2. Altinakar M. S., Graf W. H. and Hopfinger E. J., 1990, "Weakly Depositing Turbidity Current on a Small Slope," *Journal of Hydraulic Research*, IAHR 28: 55-80.
3. ANSYS, Inc., 2009, "ANSYS-CFX reference guide."
4. Britter, R. E. and Linden, P. F., 1980, "The Motion of the Front of a Gravity Current Travelling Down an Incline," *J. Fluid Mech.*, 99(3): 531-543.
5. Chang, F. J., Chang, L.C., Kao, H.S. and Wu, G.R., 2010, "Assessing the Effort of Meteorological Variables for Evaporation Estimation by Self-Organizing Map Neural Network," *Journal of Hydrology*, 384: 118-129.
6. Chang L. C., and Chang F. J., 2001, "Intelligent Control for Modelling of Real Time Reservoir Operation," *Hydrological Processes*, 15(9): 1621-1634.
7. Chang L. C., 2008, "Guiding Rational Reservoir Flood Operation Using Penalty-Type Genetic Algorithm," *Journal of Hydrology*, 358: 24-34.
8. Chang, L. C., Chang, F. J. and Hsu, H. C., 2010, "Real-Time Reservoir Operation for Flood Control Using Artificial Intelligent Techniques", *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 11(11): 887-902.
9. Chang, K. T., Chiang, S.H., and Lei, F., 2008, "Analysing the Relationship Between Typhoon-Triggered Landslides and Critical Rainfall Rnditions," *Eeath Surface Processes and Landforms*, 33: 1261-1271.
10. Chung, S. W. and Lee, H. S., 2009, "Characterization and Modeling of Turbidity Density Plume Induced into Stratified Reservoir by Flood Runoffs," *Water Science and Technology*, 59(1): 47-55.
11. Chiang Y. M., Hsu K. L., Chang F. J., Hong Y., Sorooshian S., 2007, "Merging Multiple Precipitation Sources for Flash Flood Forecasting," *Journal of Hydrology*, 340: 183-196.
12. Chang Y. T., Chang L. C., and Chang F. J., 2005, Intelligent Control for Modelling of Real Time Reservoir Operation: Part II ANN with Operating Curves," *Hydrological Processes*, 19(7): 1431-1444.
13. Ellison, T. H. and Turner, J. S., 1959, "Turbulent Entrainment in Stratified Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, 6: 423-448.
14. Farrel, G. J. and Stefan, H., 1988, "Mathematical Modeling of

- Plunging Reservoir Flows,” *Journal of Hydraulic Research*, 26(5): 525-537.
15. Firoozabadi, B., Farhanieh, B. and Rad, M., 2003, “Hydrodynamics of Two-Dimensional, Laminar Turbid Density Currents,” *Journal of Hydraulic Research*, 41(6): 623-630.
 16. Fukushima, Y., 1998, “Numerical simulation of gravity current front,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6): 572-578.
 17. Garica, M. H., 1992 “Turbidity Currents,” *Encyclopedia of Earth System Science*, 4: 399-408.
 18. Gu, R. and Chung, S. W., 1998, “Reservoir Flow Sensitivity to Inflow and Ambient Parameters,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(3): 119-128.
 19. Hsu, K. L., Gao, X., Sorooshian, S., and Gupta, H.V., 1997, “Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks,” *Journal of Applied Meteorology*, 36: 1176-1190.
 20. Lin, G. F., Huang, P. Y. and Chen, G. R., 2010, “Using Typhoon Characteristics to Improve the Long Lead-time Flood Forecasting of a Small Watershed,” *Journal of Hydrology*, 380: 450-459.
 21. Lin, G. F. and Wu, M. C., 2009, “A Hybrid Neural Network Model for Typhoon-Rainfall Forecasting,” *Journal of Hydrology*, 375: 450-458.
 22. Manninen, M., Taivassalo, V. and Kallio, S., 1996, *On the Mixture Model for Multiphase Flow*, Finland: Technical Research Centre of Finland.
 23. Mingoti, S. A. and Lima, J. O., 2006, “Comparing SOM Neural Network with Fuzzy C-Means, K-means and Traditional Hierarchical Clustering Algorithms,” *European Journal of Operational Research*, 174: 1742-1759.
 24. Oehy, C. D. and Schleiss, A. J., 2007, “Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 637-648.
 25. Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H. M, 1986, “Self-Accelerating Turbidity Current,” *Journal of Fluid Mechanics*, 171: 145-181.
 26. Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y and Yu, W., 1987, “Experiment on Turbidity Currents: Theory and Observation,” *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 123-147.
 27. Richardson, J. F. and Zaki, W. N., 1954, “Sedimentation and Fluidization, Pt. I. Trans. Inst.,” *Trans. Inst. Chem. Eng*, 32: 35–53.
 28. Tsai, M. J., Abrahart, R. J., Mount, N. J. and Chang, F. J., 2012, “Including Spatial Distribution in a Data-Driven Rainfall-Runoff Model to Improve Reservoir Inflow Forecasting in Taiwan”, *Hydrological Process*, 27(13): DOI: 10.1002/hyp.9559

29. Turner, J. S., 1973, Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press.
30. Xin, L., Reuter, G., and Larochelle, B., 1997, "Reflectivity-Rain Rate Relationships for Convective Rainshowers in Edmonton: Research Note," Atmosphere-Ocean, 35(4): 513-521.
31. Xia, Z. and Wang, G., 1982, "The Settling of Non-Cohesive Particles in Flocculated Suspension in Chinese," Journal of Sediment Research, 1: 14-23.
32. Young, D. L. and Lin, Q. H., 2005, "Two-Dimensional Simulation of a Thermally Stratified Reservoir with High Sediment-Laden Inflow," Journal of Hydraulic Research, 43(4): 351-365.
33. 方春明、韓其為、何明民，1997，「異重流潛入條件分析及立面二維數值模擬」，《泥砂研究》，10: 68-75。
34. 王國威，2006，《運用懲罰機制遺傳演算法於水庫颱風操作之規劃》，淡江大學水資源及環境工程學研究所碩士論文。
35. 丘台光、陳嘉榮、張保亮、林品芳，2009，《劇烈天氣監測系統QPESUMS之服務與應用》，中央氣象局。
36. 許弘政，2007，《模糊控制模式於颱風時期水庫即時操作之研究》，私立淡江大學水資源及環境工程學研究所碩士論文。
37. 李豐佐、賴進松、郭文達、黃振家、張斐章、譚義績，2013，「石門水庫水庫排砂操作影響鳶山堰取水之研究」，《農工學報》，59(1): 80-94。
38. 李豐佐、賴進松、譚義績、李隆正、林永峻，2010，「異重流運移之水槽試驗與數值模擬」，《臺灣水利》，58(4): 1~12。
39. 李豐佐、賴進松、譚義績、李鴻源、林子傑，2010，「水庫壩體坡度影響異重流運移之試驗研究」，《臺灣水利》，58(2): 11~21。
40. 吳銘順、廖清標、許少華，2000，「立面二維鹽水異重流數值模擬」，《水利工程研討會論文集》，11: 13~18。
41. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2010，《石門水庫水砂運移監測與異重流模式開發及應用研究》，國立交通大學防災工程研究中心。
42. 經濟部水利署北區水資源局，2010，《石門水庫運轉規線下限及嚴重下限提升改善可行性評估及規劃》，臺灣大學水工試驗所。
43. 蕭閔鍾，2011，《類神經網路應用於颱風時期集水區流量預測之研究》，淡江大學水資源及環境工程學研究所碩士論文。
44. 張斐章、張麗秋，2010，《類神經網路導論：原理與應用》，滄海書局。
45. 經濟部水利署北區水資源局，2005，《石門水庫營運四十年特刊》。
46. 經濟部水利署北區水資源局，2013，《石門水庫水門操作規定》。

47. 經濟部水利署北區水資源局，2013，《經濟部石門水庫運用要點》。
48. 經濟部水利署，2011，《整合多重觀測資訊於山區雨量推估及洪水預報風險管理評估(2/2)》。

附錄二、期初審查意見回覆

- 一、 會議時間：102 年 3 月 21 日（星期四）上午 10 時整
- 二、 會議地點：本局第 1 會議室
- 三、 主持人：簡昭群副局長
- 四、 審查結果及主席結論：
 - (1) 預先調節放水並符合水利法運用要點及水門操作規定，依不同水位不同放流量及放水時間研擬最佳操作方式。
 - (2) 颱風豪雨協勤作業請石管中心協調作業地點及協勤辦理事項內容。
 - (3) 水文資料建檔請提供本局往年相關計畫建檔資料，原則有降雨量發生之颱風均予以建檔，並建置警報發布至解除期間之水文及放流量資料。
 - (4) 洪水來臨前水庫調降水位之放流量，請考量下游河道水位，放流量控制在深槽原則，不影響高灘地安全。
 - (5) 防洪即時操作因水文自動觀測為每小時傳遞，計算之進流量為前一小時，建議放流量請檢討 5 分鐘、30 分鐘、1 小時等不同操作間距之操作方式。
 - (6) 本報告原則認可，請依委員及與會人員意見於下次報告修正及補充。
- 五、 審查委員意見：

意見	意見回覆
交通大學資訊工程學系袁委員賢銘	
1.路徑及流量歷程套配之預報結果（2008 年辛樂克）之準確性似乎不夠，請問應如何修正？P.55。	臺灣目前對流量預報之相關研究通常在超過 4-6 小時以上之預報準確度差，流量歷程預報對水文分析是相當大之挑戰。本計畫配合工作項目要求提出長時距流量預報歷程，以目前氣象局颱風路徑預報及降雨預報也皆有相當程度之誤差，而在水庫操作之重要參考流量資訊還是以流量趨勢與總流量為主。
2.請說明協勤作業初步分析結果中模式 2 對流量水位及開度操作與原操作之差異及比較解釋，以說明模式 2 之優劣點。	已於期中報告中加以詳細說明。

3. SOM 模式以 12 個神經元，12 的選擇依據為何？	神經元個數係以試誤法測試不同組合，並依其分類結果是否能區別不同颱風特徵，且各類別至少要包含一場訓練資料中的颱風等條件，決定以 4x3(12)神經元為最佳選擇。
台灣大學工程科學及海洋工程學系林委員銘崇	
1.水庫多目標功能是否納入運轉系統規劃？	水庫防洪運轉操作以防洪目標為優先考量目標，本計畫也將防淤納入一併考量。
2.颱風強度與雨量並非成正比例關係，此現象是否反應於應用模式？	本計畫所提出之模式並無考慮颱風強度，僅以雨量或流量為依據建置模式。
3.異重流模式並未考量風效應，是否完備合理？	由於異重流主要係沿著庫底運移，因此水面風場之影響僅限水面局部區域，因此不影響整體異重流之運移特性。
4.排砂（淤）作業僅針對颱風時期，是否亦須考慮平時或季風時期？	由於排砂(淤)需要大量之水體實施操作，且礙於法規之限制，目前僅能於颱風豪雨時操作，因此平時或季風時期非本計畫考量範圍。
石管中心主任張委員庭華	
1.報告內容對於石門水庫有效蓄水量之敘述不一，請確認修正。	已修正
2.石門水庫相關設施閘門之操作係由台電公司石門發電廠閘門組負責，報告內容請酌予修正。	已修正
3.石門水庫防洪運轉操作洪峰發生前階段第 C 項預定總降雨量對應之操作方式是否應考量降雨延時？請說明。	洪峰發生前階段已依據石門水庫運用要點 102 年最新版本做修正，未考量總降雨量對應之操作方式；期末可對石門水庫防洪操作規範考慮是否需提出考量降雨延時之修訂建議。
4.歷史颱風事件及水庫即時操作結果資料蒐集建議至 2012 年。	遵照辦理。
5. 2012 年蘇拉颱風之 Qp 請再與	已確認。2012 年蘇拉颱風之 Qp

主辦單位確認。	為 5588.54cms。
6.雖然石門水庫運用要點規定每年洪水期第一次颱風情況發生後，水庫水位標高應盡可能降至上限以下，惟考量供水需求，實際上不易大幅降低水位，於智慧型水庫防洪模式操作時是否以水庫當時實際水位來模擬？請說明。	智慧型水庫防洪模式操作是以當時實際水位來進行即時操作，並根據當時的入流量，來推估放流量以達成操作。期中報告已有兩場颱風模擬操作說明
7.簡報中模擬賀伯及納莉颱風之水庫防洪操作與實際操作十分接近，在颱風、豪雨期間協勤作業如何協助本中心進行即時運轉決策？請說明。	目前已建立石門水庫即時操作介面，在今年颱風、豪雨期間直接進駐中心，即時操作系統可供貴中心參考本系統所提供之決策資訊。
石管中心徐委員名顯	
1. 歷史颱風路徑及流量歷程套配部分，因路徑預報誤差大，建議加入總降雨量預估量運算，並考量增加拓樸圖數量以提升準確度。	感謝委員建議。因可用之颱風場次不足，增加神經元個數，將造成部分神經元無颱風可對應。本計畫將斟酌考慮總降雨量預估之可行性，並於期末報告評估總降雨量推估之成效。
2. 降雨逕流模式預報成果相當準確，是否考慮將結果運用在前減量過程之校正，另請教是否考量以集水區雨量站資料進行預報。	降雨逕流模式預報成果相當準確，將應用在後續水庫即時操作部分；集水區雨量站由於目前尚無法即時上傳，無法即時獲取資訊，因此暫時不考量。
3. 協勤作業啟動條件建議除三級開啟外，建議將雨量之限制條件加入機制。	配合辦理
4. 調節性放水策略分析及協勤作業內，閘門操作建議方式，建議以多種搭配方式呈現，可以閘門開度試算程式介面為基底，做一展示之建議結果。	感謝委員建議，後續閘門操作將以多種搭配方式呈現，並建立一展示介面。
5. 本局目前有建置水文資料庫，即有資料可供本案執行團隊做參考。	感謝提供資料。

6. 支援系統建立，建議朝展示介面方式建置，實際協勤時期可盡量減少需輸入之欄位，以展示結果為之（必要輸入之內容方式可再討論）	遵照辦理
石管中心孟委員中杰	
1. p.13 石門水庫集水區內為 15 站雨量站，不含十一份，6 站水位站，圖 2.3 鳶山堰應改為石門。	遵照辦理。
2. p.22 圖 2.12 閘門開度自動查詢功能請依石門水庫水門操作規定各閘門之最大放水量作查詢限制條件，避免誤用，另桃園指令是進水口內靜水池水深與流量。	感謝委員指正，已於期中報告成果中加入查詢限制條件，以避免誤用。
3. p.39 颱風路徑與流量歷程套配模式及 p.61 降雨逕流模式，建立模式使用之颱風事件是否可加入至 2012 年事件資料。	遵照辦理，將加入 2012 年颱風事件作為模式驗證之用。
4. p.39 颱風路徑與流量歷程套配模式，可否建立隨氣象預報資料同步更新預報分析。	本模式可經由輸入氣象局更新之預報結果，達到同步更新預報分析之功能。
5. p.39 以原始 6 小時、3 小時、1 小時颱風資料是否無法建立模式，模式建置是否需要資料時距一致。	感謝委員指教，本模式輸入資訊時間解析度為 1 小時，如原始資料僅提供 6 小時、3 小時颱風資料，則以線性內差調整為 1 小時
6. p.55 颱風路徑與流量歷程套配模式預報結果，洪峰流量及洪峰稽延時之準確性是否進行相關評估指標分析，另預報結果表現與預報時間、各預報分類路徑是否有關係。	已於期中報告補充評估指標分析。本模式預報結果與氣象局預報路徑準確度有關，若能提供較準確的預報路徑將有助於模式分類路徑，進而提供準確度更高之預報結果。
7. p.76-77 有關石門水庫防洪操作及各設施閘門操作內容，請石門水庫運用要點及水門操作規定補正。	已於期中報告中修正。

8. 請提供本計畫執行所需排砂與氣象相關資料格式，俾利收集提供。	遵照辦理，已將所需相關資料格式綜合整理並提送承辦單位。
計畫課周委員家培	
1. P.23 有標高 237.5 公尺與標高二百三十七·五公尺請修正報告內使用統一表示方式。	已於期中報告中統一表示方式。
2. P.40 的 10 個雨量站 (如表 4.2 所示)，與 P.14 石門水庫有 16 個雨量站，兩者之間差異為何？請敘明。	P.40 的雨量站為資料齊全之雨量站，可為建置模式使用；P.14 石門水庫有 16 個雨量站為石門水庫集水區內所有雨量站，用於輸入資料於 EXCEL 表上用，後續將與承辦單位再次確認需建置之雨量站資料。
3. P.75 文字編排之行距與報告內其他章節不一致，建請修正。	感謝委員指正，已於期中報告中修正。
4.表 7.2 異重流運行及抵達大壩時間，似與石門水庫防淤隧道可行性規劃總報告內容不一致，建請檢討兩者之差異原因，於後續工作中提出說明。	根據本計畫與石門水庫防淤隧道可行性規劃總報告中之莫拉克與鳳凰颱風之運移速度比較，兩者數值相等，但本團隊將確認兩者計算方式之異同。
5.報告中，七、排砂防淤策略分析與八、後池濁度影響與下游穩定供水風險分析，兩個章節內容似不足，建議後續工作能將完成之成果納入，係瞭解模擬與實際之差異。	謹遵辦理，工作執行計畫書係將方法呈現，後續將納入研究成果並加以分析。
6.期初資料應說明本委辦計畫各階段完成工作項目內容及時間，以利進度控管。	感謝委員建議，於期中報告中補上。
水規所正工程司吳委員慶現	
1. 建議「排淤」改為「防淤」，尤其目前石門水庫既有設施改善後，係針對入庫異重流渾水(尚未落淤)進行防淤操作。	謹遵辦理。
2. 統計颱風事件 (1964~2012)328 場，建議選取	感謝委員建議，後續將與承辦單位進行進一步討論與研擬，將其

<p>入庫尖峰流量超過 900 立方公尺/秒，以及集水區累積降雨量超過 300mm 之颱風事件，評估可供水庫防淤操作水量(包括退水段間斷洩洪量)。分析兩者差異性，以及降雨逕流係數值超過 1 的可能原因，提供後續模擬運轉操作之參考事件。</p>	<p>納入資料選取標準之一。</p>
<p>3. P.18 有關「排洪、排砂防淤設施閘門開度指令自動化」，建議根據觀測異重流通過下層通道排放濃度，訂定啟動防淤操作之標準濃度(初步建議 30kg/m^3)，並結合集水區降雨量推估入庫水量滿足水資源運用，即時掌握防淤操作水量之啟動時機。尤其當水庫低水位情況下，入庫逕流會沿程溯源沖刷，適度提前防淤操作會有效提升過庫泥砂百分比。</p>	<p>感謝委員建議，後續將與承辦單位進行進一步討論與研議，將其納入參考。</p>
<p>4. P.40 表 4.1 颱風事件資料中，建議加入集水區降雨量、降雨水體(萬立方公尺)、總入庫水量(萬立方公尺)及年淤積量等。其中英文名稱考量省略，起迄時間考量延伸至退水段防淤操作時程，尖峰流量取整數表示。</p>	<p>感謝委員建議，此表僅用於颱風路徑分類及流量歷程套配，表格主要資料為颱風事件發生時間及其流量資料為依據。</p>
<p>5. P.66 七、排砂防淤策略分析，表 7.1 歷年颱風事件排砂比中，民國 93 年艾莉颱風之試驗資料，請註明試驗條件(現況、既有設施改善或完成何種方案等)。</p>	<p>謹遵辦理，P.66 之表 7.1 係指現況條件下颱風事件排砂比。</p>
<p>6. P.71~72 表 7.2 各颱風事件之異重流運行速度，與試驗值及觀測值有差異，請再確認。</p>	<p>根據本計畫與石門水庫防淤隧道可行性規劃總報告中之莫拉克與鳳凰颱風之運移速度比較，兩者數值相等，但本團隊將確認兩者</p>

	計算方式之異同。
7. P.74 濁度與濃度關係約為 1PPM=1.35NTU，可能有誤，請再確認。	已修正為 1 NTU=1.35 PPM。
水規所陳委員智佳	
1.石門水庫操作須考慮防洪防淤及供水三個目標應先定位此 3 目標之優先順序及競合關係，再探討水庫之操作。	本計畫之智慧型水庫防洪模式建置時，以同時考量防洪與供水兩目標，因此，經模式提供之放流量後，再對此放流量下之最佳防淤效果，計算各閘門之開度。
2.下游穩定供水分析，建請納入中庄調節池之供水備援功能，單以後池堰濃度為限制條件恐怕會限制防淤功能。	感謝委員建議，中庄調節池之供水備援功能主要影響因素為可排砂時間，在中庄調節池之供水備援操作時期，不需考量排放泥砂濃度限制。
3.水庫之防洪防淤操作除溢洪道外尚有電廠防淤 PRO 及未來的防淤隧道，建請將相關設施一併納入考量較符合實際。	謹遵辦理，已修正請參考(8.1)式。
4.防洪操作部分關於洪峰發生前階段之操作與要點有不符建請再檢視。	已於期中報告中修正。
5.視窗化水庫操作決策支援系統中之排操分析模組是否以 CFX 模式分析，CFX 為商業軟體，未來使用是否有版權問題？	CFX 係執行本計畫執行期間用以模擬各颱風期間異重流運移情況，提供原水條件評估、出流設施原水濁度分析及後池濁度變化情形推估之用，因此並不包含在視窗化水庫操作決策支援系統中之分析模組內。
經管會王委員耀慶	
1. 颱風路徑共分 12 大類，簡報 P.29 有關降雨逕流模式檢定及模擬以路徑 1、2、3 為主，請說明路徑選擇考量。	感謝委員指教，目前可用颱風場次仍很少，報告書提供之颱風路徑驗證以選擇分類較多為主，此外，颱風警報單之路徑預報資料蒐集實屬不易，期末報告會考慮多增加幾場不同路徑之驗證。
寶二水庫管理中心邱委員錦松	

<p>1. P.18 表 2.2 溢洪道閘門開度與洩洪量對照表係指單扇門或全數門流量，煩請註明，同樣情形於 P.22 圖 2.12 溢洪量、排洪隧道等支流量亦請區分。</p>	<p>感謝委員建議，已於期中報告中修正。</p>
<p>1. 本計畫包括提供防洪排砂供水等各分析模式，但各模式結果可能得出不同之閘門開度及排砂量，本系統是否可提供最佳化的建議以利營管單位操作。</p>	<p>本計畫之防洪操作模式以提供最佳水庫放流量為主，在特定放流量考量各閘門之最佳開度以獲得最大之排砂量。</p>
<p>1. P.72 水庫排砂期間操作條件及針對鳶山堰取水濃度應小於 6000ppm 進行模擬，換句話說，後池堰濁度應小於 6742ppm 才能滿足穩定供水操作，此處濁度 6742ppm 選用依據為何？若依濃度折減率 0.84 計算為何不選用 7143ppm？</p>	<p>期初報告文中之濃度折減率 0.84 係誤植，應修正為 0.89，因此後池堰濁度應小於 6742ppm 才能滿足穩定供水操作，已於 8.1 節修正內容。</p>

附錄三、期中審查意見回覆

一、 會議時間：102 年 7 月 5 日（星期四）下午 14 時 30 分

二、 會議地點：本局第二會議室

三、 主持人：簡昭群副局長

四、 審查結果及主席結論：

- (1) 請石管中心與研究團隊研擬資料建置及操作系統於運轉中心設置方式，並於教育訓練辦理作業流程技術移轉，以利於颱風時期業務運用。
- (2) 防洪操作時溢洪道閘門限制水位及超高攔蓄水位，請於開度率定曲線以紅色標示，並於操作策略演算時將各閘門起始操作及關閉時間或時機提出建議策略，並提供洪峰時間預測之推估。
- (3) 防淤操作策略請依水庫既有設施及未來規劃設施，提供各閘門操作次序及時機建議，防淤操作應優先考量水庫防洪及蓄水功能下之最佳方式。
- (4) 防淤策略請參考水規所委由交通大學研究之石門水庫長期監測計畫與防淤操作模擬分析之操作建議，避免有競合之操作模式。
- (5) 颱風路徑與水庫雨量分析結果，請依降雨量強弱建立相對之路徑影響關係。
- (6) 本報告原則認可，請依委員及出席人員意見於契約範圍內修正及補充，並於下次報告說明。

五、 審查委員意見：

意見	意見回覆
李委員鐵民	
<p>1. P.24 自動化查詢介面，電廠排砂道宜修正為排砂隧道。P.43 颱風事件統計之總入流量單位應係逕流總體積而非 cms，該值可能係 cmsH，P.59 亦然,建議再檢核之。</p>	<p>感謝委員指正。已於期末報告 P.8 及 P.15 中修正。</p>
<p>2. 預先調節性放水洩降水位，宜先確認其判斷時機，P.60 指明為海上警報發布時，建議考量於陸上警報發布後，在此之前可視颱風情報及實際降雨，先進行電廠滿載發電放流，至於是否需再加大放流量以洩降水位，除目前本計畫開發之颱風路徑及流量預估方法可供參考外，建議可考量歷史颱風之總逕流體積與集水區總降雨量之相關性，爾後依氣象局之預報雨量折減，預估石門水庫可能之逕流體積，再判斷是否預先洩降水位。</p>	<p>感謝委員建議。本計畫工作項目多與執行時間有限，大多數之模式皆以本研究團隊現有模式置入，建議北水局可規劃後續計畫持續建置不同模式，有助於颱風時期水庫運轉操作之參考資訊。</p>
<p>3. 防洪即時操作模式，已可較精確預估 $t+1\sim t+3$ 之入流量，對水庫之洩放水量決策，可提供重要的參考資訊。惟幾個原則仍可提供水庫操作人員實際上參考：洪峰前唯一應考量大壩安全，洪峰削減不是重點，洪峰後再考量水位回蓄。</p>	<p>感謝委員指教。本計畫所提出之智慧型水庫防洪模糊控制模式兼具大壩安全、洪峰消減與洪峰過後回蓄水位之功能。</p>

<p>4.排淤操作方面，異重流運移至大壩時間及濃度分布預估為重點，水規所目前亦開發類似運移模式，建議可稍述其模式內容，與本計畫所開發者其所需輸入之條件為何？顯然最關鍵輸入應係羅浮及其下游數站之全洪程泥砂濃度即時觀測值，目前該站仍由水規所維護，未來北水局仍宜長期維護管理之。</p>	<p>目前水規所開發之運移模式為水平二維結合三維模式，可較為詳盡模擬異重流沿程運移現象，但仍未能提供即時計算之功能，因此本計畫主要發展一套簡易且可即時計算之方法，並透過介面操作讓水庫操作單位可預先得知異重流到達時間，作為排砂操作之參考，而其所需條件之計算方式可參閱 7-2 節之說明。</p>
<p>陳委員哲俊</p>	
<p>1. p.9 基本資料收集與分析(2)最後一項”逕流係數 C 值”在報告中及簡報都沒有說明，請補充。</p>	<p>感謝委員指正。已補充於報告 2-2 節中。</p>
<p>2. P.17 圖 2.2 至圖 2.4 建議改為表 2.3 至 2.5，後續圖表號一併更正。</p>	<p>遵照辦理。已於期末報告 P.10~P.11 修正。</p>
<p>3. 附錄一期初審查意見回覆 (P.124 至 132)有 7 項意見將於期中報告補充說明，建議在本報告中補充說明對應之章節，以為對照。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>袁委員賢銘</p>	
<p>1. P.15 中有 39 場颱風，P.43 則剩下 38 場，請說明之。</p>	<p>目前本計畫蒐集並設計 EXCEL 檔案標準格式儲存的有 61 場颱風事件，颱風路徑分類模式及水庫最佳操作模式則選取其中有進行水庫操作且洪峰流量大於 600cms 之 38 場颱風場次。</p>
<p>2. P.75 中颱風剩下 16 場？</p>	<p>受限於 QPESUMS 資料僅有 2005</p>

	年後的颱風場次，目前僅蒐集 QPESUMS 雨量資料完整且入流量較明顯的 18 場颱風事件，請參閱 P.68 表 6-1-1。(期中報告誤植為 16 場)
3. P.119 結論 10 與簡報 P.75 中結論 10 不同，請說明？	感謝委員指正。期中簡報中的結論 10 誤植為結論 5，已修正。
4.即時操作中無網路時用手動輸入方式建議是否改成以檔案匯入方式進行之，或是利用 Excel 表手動輸入後再匯入，以避免輸入錯誤時校正不方便的困難。	感謝委員建議。目前程式已將所有模式資訊以文字檔格式儲存，亦可用 Excel 開啟該檔案校正資料。
石管中心主任張委員庭華	
1.請說明本計畫成果建立教材後，實際操作運轉教育訓練之辦理方式。	請參閱期末報告 P.150 第十一章。
2.本計畫資料蒐集分析之選取標準以發布警報且累積降雨量超過 300mm 之颱風事件共 39 場，惟期初報告審查會議時，主席裁示原則有降雨量發生之颱風均予以建檔，建議執行單位依主席裁示辦理。	遵照辦理。已增加為 61 場，請參閱期末報告 P.8 表 2-1-2。
3.建議日後報告中各閘門操作關係曲線圖以彩色印刷，俾利閱讀。	遵照辦理。
4.颱風、豪雨期間協勤作業地點建議於本中心之運轉中心二樓；另請執行單位派駐人員之選定需考量其經驗及專業性。	遵照辦理。
5.排砂隧道開啟時機已訂定於庫	感謝委員指教，由於現階段模擬

<p>區原水濁度達 2000NTU 時，報告中對於各種排洪設施排放的優先順序將排砂隧道列為第三順位並以此方式模擬水庫防洪操作，與實際操作不一定相同，請再考量。</p>	<p>操作模式尚無法考量庫區原水濁度之變化，故先以排砂隧道為第三順位進行模擬操作，於實際操作時可視情況將其放流量改由排洪隧道或溢洪道放流。</p>
<p>6.本報告結論與建議部分內容為說明已完成之工作項目，建議該部分於其他章節表達。</p>	<p>感謝委員建議。期末報告已撰寫具體之結論與建議。</p>
<p>7.參考文獻第 47 及 48 項建議採 2013 年版本。</p>	<p>感謝委員建議，已參考 2013 年 5 月 2 日修訂之最新版本。並修正期末報告參考文獻 P.156。</p>
<p>8.表 4.1 所列蘇拉颱風之 Q_p(有誤 3,726cms)請更正，並請確認其他數據。</p>	<p>感謝委員指正。已於期末報告表中統一。</p>
<p>9. P.24 所述防淤一期工程排砂專用道請以「石門水庫水門操作規定」所用之名詞「排砂隧道」。</p>	<p>感謝委員指正。已於期末報告 P.2 修正。</p>
<p>10.報告中(P.19、P.64 及 P.105 等)對於「石門水庫運轉中心」之敘述請修正為「石門水庫管理中心」。</p>	<p>感謝委員指正。已於期末報告 P.14、P.50 及 P108 修正。</p>
<p>11.期初報告審查會議結論四所述考量下游河道水位，放流量控制在深槽為原則，不影響高灘地安全。請本計畫能協助蒐集石門水庫放水而不高於下游河道高灘地之放流量。</p>	<p>考量下游河道水位及不高於高灘地之放流量，需蒐集河道斷面資料、建置河道斷面及設定相關河道參數，執行水理模式模擬，方能獲得下游河道水位與流量之關係。此工作非本計畫工作範圍，另商請十河局提供下游河道容許流量而不影響高灘地安全之最大流量。</p>

水利規劃試驗所吳正工程司慶現	
<p>1.報告 P.15 表 2.2 石門水庫累積降雨量超過 300mm 之颱風事件，考量納入累計入庫水量並推求降雨逕流係數，增列洩洪量(可提供防淤之操作水量)，以及增列 1963~1970 年資料。</p>	<p>感謝委員建議。已增列總入庫水量，其於數值則整理於颱風事件 EXCEL 檔案中。此外，1963 至 1970 年之颱風資料亦有紀錄，但僅有雨量與水位資料，故不列於期末報告中，</p>
<p>2.報告 P.24 水庫防洪操作規範修訂建議，根據模型試驗操作方式為提升水庫整體防淤功能，試驗過程搭配洩洪量以排放濃度較高的優先開啟，當來不及排放時再開次高濃度之排放口。惟目前既有設施改善包括永久河道放水口、電廠防淤改善一期、石門大圳退水路進水口均有攔污柵，未來全洪防淤操作確實需要監測流木與雜物阻塞情況，以利即時關閉避免瞬間壓差影響結構安全。建議未來水庫中游段(阿姆坪)設置全斷面全水深之攔截網，以及進水口前增設全水深攔截設施確保全洪程防淤功能維持與進水口結構安全。</p>	<p>感謝委員建議。目前現行水庫操作中，河道放水口、石門大圳退水路等設施均列為優先開啟，唯排砂隧道僅有操作兩場颱風事件，故暫時先不針對排砂隧道相關規範進行修訂。</p>
<p>3.報告 P.86 表 7.1 現況條件下歷年颱風事件排砂比，其中民國 93 年現況模型試驗結果，可能誤植請根據本所試驗報告修訂。並彙整模型與現場觀測評估各排放之防淤效率(平均排放濃度)，以提供後續搭配防洪之防淤操作之優先次序參考，</p>	<p>表 7-1-1 中之結果主要為石門水庫尚未進行發電改建排砂道、PRO 改建及防淤隧道之試驗結果，出處為水規所「石門水庫相關設施水工模型試驗九十七年度成果報告」，且表 7-1-1 中之各颱風排砂比亦於上述各水工構造物施作完成前之數值，因此才依</p>

<p>尤其排洪隧道與溢洪道之防淤效率。</p>	<p>此數值進行分析，方有一致性。</p>
<p>4.報告 P.87~89 圖 7.1~7.6 考量納入入庫水量歷線，以利研判變量流情況下，各排放防淤效率與入庫水量關係。</p>	<p>遵照辦理，將納入實測入流量，以利研判變量流情況下，各排放防淤效率與入庫水量關係。</p>
<p>5.報告 P.94 異重流潛入斷面一般流量增大會向下游移，與表 7.3 不一致，其原因為何？</p>	<p>該頁中為莫拉克之模擬結果，其模擬時距為退水段，所以異重流潛入點已開始往上游移動，因此才出現此一現象。</p>
<p>6.石門水庫防洪、排淤及供水運轉系統建置及運轉操作諮詢，其中關鍵是預測降雨量與入庫水量提供防洪操作，另一方面會干擾正常運轉與結構安全之影響因素建議納入控制視窗選單。</p>	<p>感謝委員建議。本計畫在執行期間內無法深入探討其他影響因素，但將水位、庫容、即時防洪操作模式建議之放流量列入，以提供參考。</p>
<p>計畫課周正工程司家培</p>	
<p>1.由報告內容顯示，系統建置及運轉操作係指既有設施，建議由報告前言部分先予以明確敘明，以釐清委辦計畫未包含日後增設防淤隧道設施。</p>	<p>感謝委員建議。已於期末報告 1.2 節 P.2 補充說明。</p>
<p>2. P.39 頁已有初步垂直二維數值模式模擬結果，建議與水規所過去及目前執行中計畫成果進行驗證比較，以提昇成果精確度及實用性。另請補充二維模式網格精確度檢定資料，以確認網格合適性。</p>	<p>水規所所採用之模式為水平二維搭配三維之模擬方式，而本計畫採用之模擬方式為垂直二維模式，主樣考量為能較為迅速與準確地模擬垂向變化之異重流，因此依據實測之辛樂克與蕃蜜颱風進行網格與模式之檢定驗證，由檢定驗證成果可知目前所建立之網格與模式可適切之模擬石門水</p>

	庫泥砂濃度分層現象與其運移。
3. 預先調節性放水分析部分，請審慎考量每場颱風來臨時水庫蓄水、降雨量、颱風路徑...等狀況不同進行模擬，提出相關建議參數，供水庫營運操作單位參考。	感謝委員指教。本計畫所建置之模式已將颱風路徑、降雨量、水庫水位(蓄水量)納入考量，並分析不同起始水位(預先調節性放水所洩降之水位)對水庫操作之影響，參考 10.3 節調節性放水決策分析。
4. P.99 頁圖 7.13 出水工排砂量係指何處排砂量，請明確定義，以避免混淆。	圖 7.13 出水工排砂量係指所有的出水工之總和，已於 7-3 節之文字內容進行陳述。
5. P.103 頁與下游穩定供水風險分析，請考量將本局各既有設施石門大圳、桃園大圳、增設取水工及未來中庄調整池等設施納入，以符實際。	目前本計畫已考量石門大圳、桃園大圳、增設取水工(分層取水工)等設施，惟中庄調整池尚未啟用，暫時無法納入考量。
寶二水庫管理中心蔡工程司家民	
1. 報告書 P.53 利用歷史颱風路徑，對應分類之流量特徵以求得預估入流量歷程，以用來決定預先調節性放水策略，本計畫僅以辛樂克颱風事件為例，是否可增加其他較具代表性颱風事件，以驗證該模式。	感謝委員建議。已於期末報告 4.3 節 P.45 增列 2013 菲特颱風。
石門水庫管理中心孟工程司中杰	
1. P.13 整理颱風事件是以降雨量 I 大於 300mm 選擇計 39 場，P.42 歷史颱風路徑流量歷程模式是以洪峰流量 Q 大於 600CMS 選擇計 38 場，兩者選擇門檻是否均已考量一致。	目前本計畫所蒐集之颱風事件已增加為 61 場，選取依據為有水庫操作資訊之颱風事件。颱風路徑分類所選用之颱風需考量流量資料完整性與氣象局所提供之颱風路徑資料之完整性。
2. P.24 閘門開度之各設施名稱請	感謝委員指正。已將修正後之模

<p>依石門水庫運用要點正式名稱更正之。</p>	<p>組圖更新於期末報 P.140 圖 10-1-3。</p>
<p>3. P.43 蘇拉颱風洪峰流量應為 5385.08cms，請確認表 4.1 各場颱風事件均依石門水庫運轉資料進行統計。</p>	<p>感謝委員指正。期末報告中相關數據已統一。</p>
<p>4. P.44 所訂台灣周圍網路格範圍是否需與中央氣象局颱風路徑預報邊界範圍一致。</p>	<p>該網格係考慮影響石門水庫而訂定，不同於中央氣象局預報路徑預報邊界，但本計畫所訂定之網格範圍在中央氣象局之預報邊界範圍內。</p>
<p>5. P.48 推算未來 72 小時水庫入流量歷程後，後續更新預測及修正方式建請於報告中補充說明。</p>	<p>感謝委員指教，已補充說明於期末報告 P.42~P.48。</p>
<p>6. P.51 颱風路徑比對及流量歷程套配建議加入預報總雨量進行分析，期對流量歷程掌握有所助益。</p>	<p>感謝委員建議。預報總雨量之誤差常遠比流量歷程誤差大，對流量歷程之掌握並無太大幫助，建議未來可考慮氣象局預報總雨量換算總入流量後，再套配於本計畫發展之模式。</p>
<p>7. P.51 颱風路徑比對及流量歷程套配模式，以及 P.78 降雨逕流模式，建議針對洪峰流量及洪峰到達時間進行預測誤差統計分析。</p>	<p>感謝委員建議。已補充於期末報告 P.71。</p>
<p>8. 依據第七章排砂防淤策略分析之異重流模式或經驗公式已可知道壩前泥沙濃度與厚度，但何時以何設施排放可得較大排砂效益，以及分層取水工何時使用，請提出分析建議。</p>	<p>目前並未針對最大排砂效益進行分析，因本計畫之排砂操作主要係以穩定供水為最大考量，因此在鳶山堰可處理濁度之限制條件下，於 8-1 節建立石門水庫可排放砂量之計算方式，可同時達到穩定供水及排砂之操作，而分層</p>

	<p>取水工之採用時間則主要依據水位，因此與排砂操作較無必然關連性，但未來仍值得進一步將其操作進行最佳化分析。</p>
<p>9.石門發電廠因防淤改善工程現在剩 1 號發電機可放水運轉，約至今年 9 月 1 號發電鋼管切關後則無法發電放水，請評估因應操作策略。</p>	<p>若受到施工影響，導致發電引水隧道無法使用時，本計畫所建置之模式可將其放流量值設定為 0 後繼續正常運作，不影響個別模組分析功能。</p>

附錄四、0730 工作會議查意見回覆

一、 會議時間：102 年 7 月 30 日（星期二）上午 10 時 00 分

二、 會議地點：環翠樓會議室

三、 主持人：張主任庭華

四、 主席結論：

- (1) 本次蘇力颱風協勤作業過程中，淡江大學團隊在入流量歷程推估掌握上已提供實質幫助，未來請於協勤作業加強排砂及供水操作之策略建議。
- (2) 石門水庫排砂過程如何穩定供水下游，是水庫未來防洪排砂操作之重要議題，請主辦單位將本次蘇力颱風石門水庫運轉操作資料及簡報資料提供給淡江大學團隊，請淡江大學團隊針對防洪安全、排砂及穩定供水進行分析檢討，並於期末報告提出檢討意見與建議。
- (3) 請淡江大學團隊依與會各單位意見修正補充報告內容，並於期末報告提出說明。

五、出席單位意見：

意見	意見回覆
石門水庫管理中心張主任庭華	
<p>1.今年蘇力颱風期間，石門水庫首次啟用排砂隧道，並且有相當成效，惟中庄調整池尚未完成前，排砂操作對於穩定供水之影響仍有風險。請淡江大學團隊就排淤並兼顧穩定供水能提供操作上之建議。</p>	<p>遵照辦理。相關建議已於 12.2 節詳述。</p>
<p>2.水庫防洪運轉洪水來臨前調節性放水之時機對水庫管理單位而言非常重要，請淡江大學團隊於協勤時能特別就洪水來臨前之水庫入流量及時間加以預測。</p>	<p>遵照辦理。目前協勤作業中，研判颱風有可能影響石門水庫集水區時，將先提供整場颱風入流量趨勢之推估，以供水庫管理單位參考。</p>
<p>3.協勤人員進駐後於生活起居上倘有需本局協助，請不吝提出。</p>	<p>感謝主席關心及主辦單位協助。</p>
經管課	
<p>1.颱風路徑的部分，除使用氣象局預報路徑外，是否有考慮其他國家或其他模式之預報路徑。</p>	<p>目前僅能即時取得氣象局之預測路徑座標資訊，未來可研究是否能取得其他國家或其他模式之預報路徑，並納入預報模式中。</p>
<p>2.依據降雨逕流預測模式結果，預測未來 4 小時(T+4)及未來 5 小時(T+4)入流量在歷線上升段表現較差，但在退水段表現不錯，請教原因為何。</p>	<p>由於長時距(T+4,T+5)模式受集水區集流時間影響，模式無法取得未來雨量資訊，導致上升段預測表現較差，但對於退水段而言，降雨已趨緩，且入流量授予量影響較小，故該模式表現較佳。</p>
三、石門水庫管理中心	

<p>1.調節性放水策略模組之模式與模糊規則庫，在未來操作是否需調整模式參數。</p>	<p>本計畫所研發之智慧型水庫防洪模糊控制模式是依據歷史颱風之最佳操作所建置，在未來操作不需調整模式參數。</p>
<p>2.降雨逕流推估模組之雨量輸入是否有參考本局雨量站資料。</p>	<p>目前降雨-逕流模式建置是以QPESUMS 之雨量資訊為輸入，未來可考慮使用貴局之雨量站，以做為比較。</p>
<p>3.流量歷程套配分析模組建議考量氣象局 24 小時雨量預報及總雨量預報資訊，期能提升預報準確度。</p>	<p>目前僅以颱風路徑分類及歷史颱風入流量進行套配，未來可考慮加入總降雨量資訊進行分類或套配。</p>
<p>4.未來協勤作業希望能在本局防汛整備會議前提出調節性放水策略初步建議，以利整備會議參考討論。</p>	<p>遵照辦理。今年協勤作業中，潭美、康芮、天兔及菲特颱風先提供整場颱風入流量趨勢之推估，以供水庫管理單位參考。</p>
<p>5.建議將水庫防洪、排淤及供水運轉資訊均能建立於即時水庫操作模組之系統展示畫面中。</p>	<p>現階段開發功能以不同畫面展示各模組功能，建議未來可彙整石管中心需求，考慮開發一整合畫面展示各模組資訊。</p>

附錄五、期末審查意見回覆

一、 會議時間：102 年 12 月 6 日（星期五）下午 14 時 0 分

二、 會議地點：本局第二會議室

三、 主持人：簡昭群副局長

四、 審查結果及主席結論：

本報告原則認可，請依委員及與會人員意見修正及補充
報告書，並依契約規定提交正式報告。

五、 審查委員意見：

意見	意見回覆
簡副局長昭群	
1.有關水庫運用要點與操作規定修訂建議事項，涉及水利法之條文規定部分，於水利法未修正前仍應依其規定操作，非屬法規規定及排砂操作部分，請石管中心未來於要點與規定修訂時參考之，其中排砂操作規則請研究團隊提出建議。	遵照辦理。水庫運用要點與操作規定修訂建議事項已於正式報告 p.15 修正。排砂操作規則建議已於 p.153 12.2 節建議第 7 點增補說明。
2.請依異重流模式模擬結果，率定濁度、洪水流量與到達壩前運移時間關係，以利水庫執行最佳排砂操作。	遵照辦理。已於 P.96 新增流量及入流尖峰泥砂濃度與異重流到達壩前時間之相關性，其結果可從新增之圖 7-2-5 及圖 7-2-6 得知。
3.為因應排砂操作對下游板新淨水場影響之含砂量調控操作，應採後池沖刷道出口為濁度控制點，避免受到水庫後池至鳶	根據圖 7-3-3 所繪資料顯示，各出水工混合後之泥砂濃度受到後池沉澱影響，將有約 8% 混合泥沙沉澱於後池中，故本計畫以各

<p>山堰間河道沖刷或側流量影響濁度之不確定性，影響調砂操作。</p>	<p>出水工混合之泥砂濃度作為穩定供水之操作依據，已較為保守，此一作法亦已避免受到後池至鳶山堰間河道沖刷或測流量影響濁度之不確定性影響。</p>
<p>4.請依據第十章決策支援系統建置內容，編擬系統操作作業手冊，列為本報告附件，以利技術交接與系統移轉。</p>	<p>所交付之報告分為計畫正式報告與操作手冊各 30 本。</p>
<p>李委員鐵民</p>	
<p>1.由本年三場颱風豪雨模擬操作結果，雖屬事後分析，惟多有維持較高水位（如 EL.245.52m、EL.246.02m），雖屬安全水位，但水庫防洪操作在洪峰發生前仍宜就降雨預報總量，起始水位等綜合研判，採較保守之放流操作，保持較低水位，以水壩安全為首要考量。</p>	<p>感謝委員指教。本計畫所建置之模式在水壩安全前提下，以考量洪峰消減率為目的，因此，即使事後模擬分析，仍會在水庫安全水位下，達到最佳防洪效果之操作，在操作過程中即有維持較高水位之現象。未來研究可比較有無考量洪峰消減效果之颱風時期水庫操作策略。</p>
<p>2. P.78 圖 7.11 排砂隧道與增加防淤隧道之回歸線，兩線近重疊，有否可能導致防淤隧道功能不大之誤解，建議須詳予說明，避免被誤用。</p>	<p>P.92 圖 7-1-11 (原 P.78 圖 7.11) 係根據水工模型試驗之成果進行繪製，其差異不大原因主要在於排砂操作時之放水順序所造成，已去除增加防淤隧道模擬結果之回歸線，以避免該隧道功能不大之誤解。</p>
<p>3. P.17 有關對水門操作規定及運用要點之修訂建議，其違反水利法規定者似可不納入，排洪隧道最低開啟閘門水位 EL.227m，係水理安全之規定，不宜刪除，另建議可就排</p>	<p>感謝委員建議。水庫運用要點與操作規定修訂建議事項已於正式報告 p.15 修正。針對排砂隧道之操作，本計畫僅就兩場颱風之最佳防洪、排砂防淤操作分析，操作過程中在安全水位範圍內，高</p>

<p>砂隧道之運用，在本年兩次颱風期間之操作時機檢討之，有否可能訂定其啟閉時機。</p>	<p>水位可提供較長得排砂操作時間，因此，排砂隧道之啟閉時機除了考慮異重流到達大壩時間外，還需考慮水庫水位，本計畫並未討論此兩者之關係，建議未來相關計畫需同時考量異重流到達時間與水庫水位，再訂定排砂隧道啟閉時機。</p>
<p>林委員銘崇</p>	
<p>1. 整體研究過程嚴謹，研究成果相當具體，並具實務應用性。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>2. 調節性放水與排砂防淤分析係以水庫區之環境水理條件為主，河川下游甚至河口之可能影響如何？</p>	<p>河川下游甚至河口之可能影響非本計畫之工作範圍，請參閱「石門水庫放淤對下游河道變遷影響分析」計畫之成果說明。</p>
<p>3. 操作放流量歷程圖，顯示退水段時間，入流量小於洩流量是否合理。</p>	<p>水庫於颱風時期操作，上升段放流量不能大於入流量，水庫屬儲蓄洪水階段；退水段則在調降高水位至正常水位，洩放水庫所蓄之洪水，故一般情況水庫放流量大於入流量。</p>
<p>4. 結論指出以 BPNN 建置之降雨-逕流模式預測成效以未來 1 至 3 小時為佳，是否符合實際需求。</p>	<p>感謝委員意見。目前現行法規規定水庫預計洩洪洪量達 200cms 以上三小時前應擬定預定洩洪操作並通報相關單位，故本計畫模式預測成效以未來 1 至 3 小時為佳，已符合實際需求。</p>
<p>曾委員晴賢</p>	
<p>1. 建議報告增加英文摘要，同時要將本研究之成果作扼要的敘述，而非僅說明工作內容。</p>	<p>感謝委員建議。英文摘要已加入正式報告，並扼要說明研究成果。</p>
<p>2. 報告寫作格式，參考文獻不編</p>	<p>感謝委員指正。已於正式報告修</p>

<p>章節，寫作格式宜再校修。</p>	<p>正。</p>
<p>3.排洪、排淤除考量自來水取水等條件之外，應再考量：</p> <ul style="list-style-type: none"> a.排洪初期如何讓河道中的生物有緩衝時間避難。 b.排淤濁度和排放時間對水生生物之影響程度。 c.洪水退水段閘門關閉時間之延遲長度和水量，應足夠使避難於高灘地之水生生物有返回主河道的時間。 d.洪水退水段是溯河迴游生物最重要的利用時機，因此工作項目 7-3 應再納入河川生態保育所需的條件。 	<p>感謝委員意見。水庫操作的確對於河道生物有很大之影響，惟此非本計畫工作範圍，但若能有相關研究數據提供，對未來水庫操作之相關研究將有很大的助益。</p>
<p>4.報告內歷程圖如無法彩色印製，相關線條宜再做清楚的區隔。</p>	<p>相關圖已於正式報告修正，參閱 P.124 圖 9-2-1(b)(c)、P.126 圖 9-2-2 (b)、P.127 圖 9-2-2 (c)、P.129 圖 9-2-3 (a)(b)、P.131 圖 9-2-4 (a)(b)、P.133 圖 9-2-5 (b)(c) 及 P.136 圖 9-2-6 (b)(c)。</p>
<p>石管中心主任張委員庭華</p>	
<p>1.本計畫今年共協勤 5 次，一次比一次更具成效，對於淡江大學團隊表達肯定之意。由於新北市政府高灘地管理所需，常需本局提供較長預估時間之流量，建議將來若有機會辦理類此計畫，對於 t+5 流量預估之精確度能再提昇，另協勤時對於即時提供異重流抵達大壩時間之訊息與實際之差異性略</p>	<p>感謝委員肯定。本團隊將繼續努力如何提升 t+5 入流量預測之精確度，對異重流到達時間之推估也將持續努力，找出誤差之因素。</p>

<p>大，亦建議未來能再予提昇。</p>	
<p>2.建議能歸納不同流量異重流抵達大壩之預估時間，以供水庫管理單位排砂操作參考。</p>	<p>異重流於不同流量情況抵達大壩之時間請參閱 P.98 表 7-2-3。</p>
<p>3. P.93 對於排洪隧道額外增排 440cms 可降低後池堰泥砂濃度至 6742ppm 以下之敘述，建議補充說明增排操作之時間。</p>	<p>目前排洪隧道增排流量對降低後池泥砂濃度之分析，僅依據各實測調配之成果進行分析，尚無法計算出調配所需之時間。</p>
<p>4.結論第 7 點對於溢洪道額外增排流量來降低後池濁度之效果不如排洪隧道之敘述，建議補充說明原因。</p>	<p>感謝委員建議。已於正式報告 p151 補充說明。主要係因為溢洪道放流時，因為電廠、PRO 及石圳也在相同地理位置取水，因此流向均朝溢洪道運行，因而導致某些時段溢洪道出流濃度較大，通常開啟溢洪道時，排洪隧道會關閉，而開啟排洪道時，溢洪道關閉，但電廠、PRO 及石圳也同時取水，導致流向分向，因而使排洪隧道泥砂濃度降低，最後形成溢洪道額外增排流量來降低後池濁度之效果不如排洪隧道之結果。</p>
<p>5.因氣候變遷影響，長延時、強降雨、大流量、高濁度之情形極有可能發生，雖然石門水庫已有排砂隧道及分層取水工來防淤及穩定供水，惟是否有高濁度不及排砂致形成渾水潭而影響供水穩定之情形應予注意。</p>	<p>感謝委員指教。由於目前排砂隧道流量尚無法即時完全排除入庫渾水，因此形成渾水水庫是必然之現象，但由於分層取水工已完成，因此應可抽取上層清水暫時解決水庫渾水潭問題，但渾水潭持續時間則有待進一步研究，方能了解不同濃度渾水潭之影響時間。</p>
<p>水利規劃試驗所吳正工程司慶現</p>	

<p>1.報告 P.4 排砂防淤策略分析中，建議在分析水庫各出流設施排砂比，考量增列平均濃度，以凸顯各排放設施之防淤效率，以利提供後續水庫防淤操作順序之參考。</p>	<p>感謝委員建議。表 7-1-1 已於正式報告 P.87 補充說明。</p>
<p>2.報告 P.8 表 2.2 本計畫建置儲存之颱風事件，其中 1998 年瑞伯颱風之尖峰流量 6643cms 可能誤植，經參考北水局時流量紀錄應為 4643cms。</p>	<p>感謝委員指正。表 2-1-2 與表 4-1-1 錯誤已於正式報告 P.8、P.32 修正。</p>
<p>3.報告 P.16 石門水庫現況防洪運轉水位以 EL.240 公尺(累積容積 17,643 萬立方公尺)為目標，而入庫渾水異重流累積量約 7,000~9,000 萬立方公尺，異重流才能運移至大壩防淤通道時約有 40%~51% 水庫清水被洩洪排出。因此，建議水庫洩洪啟始水位適度提高，其中考量集水區降雨強度可能產生之尖峰流量、即時入庫流量與水庫洩洪增加率限制(1,700cms/小時)等，以降低清水層置換比確保分層取水功能及提升退水段防淤操作水量。</p>	<p>感謝委員指教。本計畫於水庫操作分析於洪峰前主要考量為大壩安全及洪峰消滅，洪峰後考量水庫回蓄，未來研究可再研議探討提高洩洪起始水位對排砂之影響。</p>
<p>4.報告 P.73 表 7.1 及 P.78 圖 7.11，其中民國 93 年現況模型試驗結果，可能誤植請根據本所試驗報告修訂。並彙整模型與現場觀測評估各排放之防淤效率(平均排放濃度)，以提供後續搭配防洪之防淤操作之優先</p>	<p>遵照辦理，將新增各排放口濃度值作為提供後續搭配防洪之防淤操作之優先次序參考，相關數值請參閱 P.87 表 7-1-1。</p>

<p>次序參考，尤其排洪隧道與溢洪道之防淤效率。</p>	
<p>5.簡報 P.25 預先調節性放水策略分析中，2004 艾利颱風模擬結果 242(無預放)249.1m，考量與實測比較。另一方面建議考量集水區降雨強度、水庫防洪能力、清水層置換比及退水段防淤操作水量等，綜合評估水庫防洪安全、穩定供水及較佳防淤操作。</p>	<p>預先調節性放水策略分析中，主要考量不同起始水位對水庫整場颱風防洪操作之評估。在工作項目多與執行時間有限的考量下，大多數之模式皆以本研究團隊過去之研究成果直接應用，建議規劃未來逐年編列相關研究計畫以強化本系統各功能之效能。</p>
<p>6.本計畫具有理論與實用結合參考價值，值得成立後續相關計畫執行。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>台灣自來水公司第二區管理處王工程師興舜</p>	
<p>1. P.133 圖 10.16 下游穩定供水風險分析模組供水風險分析(正常供水)，供水量數據與二區處實際供水量差異甚大，建請調查現況依實際修正。另「水廠」之稱謂已過時，請修正為淨水場。</p>	<p>感謝委員指正。圖 10-6-3 已於正式報告修正，參見 P.148。</p>
<p>2.期末報告整份圖表多數均太小，字體亦太小，清晰度尚可，建請修改放大，以利參閱。</p>	<p>感謝委員建議。部分圖中文字較為重要的圖已於期末報告中修正，如 P.15 圖 2-3-1、P.60 圖 5-2-3 等。</p>
<p>計畫課周正工程司家培</p>	
<p>1.建議第 6 點建議未來於洪峰發生前階段可先與排洪隧道共同操作，其用意為何？另是否有考量未來增加之防淤隧道，建議再詳加說明，以利瞭解其意</p>	<p>排砂隧道於洪峰發生前階段與排洪隧道共同操作，除可能擾動底泥以增加排砂量外，亦能蒐集操作數據，作為規範修訂及最佳化操作之參考。本計畫目的以現有</p>

<p>義。</p>	<p>水庫放水閘門設施為基礎，分析水庫防洪、排淤與供水操作，未涉及增加其他設施之分析。</p>
<p>2. P.118 表 9.6 洪峰削減率為 -27.8% 是否請誤，請再檢討。</p>	<p>因 0831 豪雨事件入流量不大，洪峰消減率非水庫防洪操作之考量因素。為 406.83cms，該事件操作最大放流量為 519.92，表 9-2-5(原為表 9.6)洪峰削減率為 -27.8%無誤。</p>
<p>3.第九章各場模擬之期末水位均較實際水位為高，雖可增加水庫蓄水量，但於汛期時間，是否會增加水庫操作風險，請再考量。</p>	<p>感謝委員建議。由於本計畫工作項目多與執行時間有限，大多數之模式皆以本研究團隊現有模式置入，未來研究可考量納入水壩安全風險為目標函數，以加強模式於搜尋洩放歷程時，能進一步考量水庫安全風險。</p>
<p>4. P.78 圖 7.11 現況文字，建議修正為水庫未整治前，或電廠未改建前之文字較符實際情況，以免造成誤解。另圖電廠改建後及且有防淤隧道之數據是否有誤，請再檢討。</p>	<p>感謝委員建議。P.92 錯誤! 找不到參照來源。依委員建議修改，且圖上電廠改建後及且有防淤隧道之數據並無錯誤，但現況數值已依最新試驗結果進行修改。</p>
<p>5. P.65 測試 7 場事件如表 6.1 是否誤繕，請檢討。</p>	<p>感謝委員指正。已於正式報告 P.68 中修正。</p>
<p>6.第 5.3 節僅進行艾利颱風及柯羅莎颱風兩分析，建議可否將本年度蘇力颱風放水策略納入分析。</p>	<p>蘇力颱風最佳放水策略分析已於 9-2-1 節詳述。</p>
<p>7.第 4.3 節颱風路徑比對及流量歷程套配分析模式，僅有辛樂克及菲特，建議增加蘇力或潭美颱風預測，以利研判其準確度。</p>	<p>遵照辦理。蘇力及潭美颱風分析結果已增列於正式報告 P.45 至 P.51。</p>

8. P.31 歷史颱風事件僅 56 場，經查該期間(1971~2012)侵台之颱風比 56 場多，其他未納入原因為何？請說明。	p.31 原說明係指(蕭,2012)論文蒐集之颱風事件，為避免與歷史颱風事件總數混淆，已於正式報告刪除，僅強調選取事件共 38 場。
9. P.18 徑之分類、。下列．．之文字誤繕，請修正。	感謝委員指正。P.18 已於正式報告修正。
10. P.10、11 表 2.3、2.4 及 2.5 表題，應放於表之上方，請修正。	感謝委員指正。表 2-2-1、表 2-2-2 及表 2-2-3 已於正式報告修正，參閱 p.10 與 p.11。
11. P.8 表 2.2 颱洪事件之洪峰流量資料與其他報告書不同，請再洽本局石管中心檢討之。	感謝委員指正。已於期末報告 P.8 表 2-1-2 及 P.32 表 4-1-1 中修正修正。
石門水庫管理中心徐工程司名顯	
1.本案逕流預測已可針對未來 5 小時之入流量做推估，且獲致不錯之功效，惟建議於退水段可將推估時程更加延長，以利水庫回蓄庫水操作之參考。	感謝委員建議。退水段之流量推估不但實用也是不錯的研究題材，退水段流量推估將不同於降雨-逕流預測，未來研究考慮分段進行且可以較長時距推估。
2.報告中及期末簡報針對排砂分析部分已有相當完整之說明，惟所建置之系統中排砂分析內現有功能僅止於觀測資料展示及特用計算機之功能，建議可將本次較具體之成果一併納入系統，以利參考。	感謝委員建議。礙於工作項目多與執行時間有限，大多數之模式皆以本研究團隊現有模式置入，目前所開發之視窗化水庫運轉操作決策支援系統已將異重流到達時間分析、溢洪道及排洪隧道增排以減少後池泥砂濃度分析等具體成果納入系統，未來研究可研擬是否能夠再加強系統之功能。
3.承前，穩定供水部分亦同。	
4.有關報告 12.2 建議 1.部分，本局正建置「石門水庫及榮華壩水庫多目標運轉系統」，將把水庫資訊以網路系統方式數值化，建議本案系統可預留介接	感謝委員建議。本計畫所研發之視窗化水庫運轉操作決策支援系統已將各功能模組化，資料擷取模組易改寫與替換程式，不影響其他功能。

<p>通路，以利前述系統建置後可自行抓取資料進入本案系統。</p>	
<p>5. 有關評估指標部分，R^2 及 RMSE 兩者間似不一致，請確認。</p>	<p>R^2 與 RMSE 在評估預測結果時，不一定有一致性，例如預報結果有些微線性偏差，則 RMSE 變差，但 R^2 不會受影響。</p>
<p>石門水庫管理中心孟工程司中杰</p>	
<p>1. P.7 本計畫建置 61 場颱風事件資料，P.9、P.136 為 53 場請修正。</p>	<p>感謝委員指正。P.9 及 P151 已於正式報告修正為 61 場。</p>
<p>2. P.47 流量歷程套配累積總流量誤差約 10%，但協勤應用過程有發現於颱風初期流量歷程偏低情形，建議未來能改善提升。</p>	<p>感謝委員建議。未來研究將考慮氣象局總雨量預報，改善颱風初期流量未明顯增加時，累積流量百分比換算時之誤差。</p>
<p>3. P.57 提到水庫操作模擬以「優先順序」為操作原則，建議補充說明所謂「優先順序」。</p>	<p>感謝委員建議。「優先順序」係指閘門開啟依發電、河道放流載滿後，再開啟排砂、排洪隧道及溢洪道等順序關係，為避免與操作目標之優先順序混淆，正式報告書 p.57 已刪除。</p>
<p>4. 第九章協勤作業請補充各場次降雨-逕流模式預報結果。</p>	<p>遵照辦理。本年度協勤各場次颱風預報結果已增補於正式報告 10-2 節。</p>
<p>5. 第九章流量歷線圖示請以不同線型表示各歷線以利判讀。</p>	<p>相關圖表已於正式報告修正，參閱 P.124 (b)(c)、P.126 圖 9-2-2 (b)、P.127 圖 9-2-2 (c)、P.129 圖 9-2-3 (a)(b)、P.131 圖 9-2-4 (a)(b)、P.133 圖 9-2-5 (b)(c) 及 P.136 圖 9-2-6 (b)(c)。</p>
<p>6. 請補充提供本系統操作手冊，包括本系統執行程式如何載入，系統操作需要哪些資料、資料格式及如何擷取或介接，</p>	<p>遵照辦理。本系統操作手冊另編印 30 本交付石門水庫管理中心。</p>

各模組之操作說明等。	
7.請補充英文摘要。	英文摘要已加入正式報告。

經濟部水利署出版品版權頁資料

石門水庫防洪、排淤及供水運轉系統建置及運轉操作諮詢委託專業服務

出版機關：經濟部水利署北區水資源局
地址：桃園縣龍潭鄉佳安村佳安路 2 號
電話：(03)4712001
傳真：(03)4713343
網址：<http://www.wra.gov.tw/>
編著者：淡江大學水資源及環境工程學系
出版年月：2013 年 12 月
版次：初版
定價：新台幣 300 元
EBN：

著作權利管理資訊：經濟部水利署北區水資源局保有所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，需徵求經濟部水利署北區水資源局同意或書面授權。

電子出版：本書製有光碟片
聯絡資訊：經濟部水利署北區水資源局
電話(03)4712001