

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



集水廊道附近地下水水流數值模式率定方法建立與應用

—以林邊溪為例

Establishment and Application of Numerical Model Calibration

Method for Groundwater Flow Near Infiltration Gallery

– A Case Study of Lin-Bien River

羅振優

Chen-Yu Lo

指導教授：徐年盛 博士

Advisor : Prof. Nien-Sheng Hsu, Ph.D.

中華民國 104 年 6 月

June 2015

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

集水廊道附近地下水水流數值模式率定方法

建立與應用—以林邊溪為例

Establishment and Application of Numerical Model Calibration
Method for Groundwater Flow Near Infiltration Gallery – A
Case Study of Lin-Bien River

本論文係羅振優君(R02521322)在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 104 年 6 月 26 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

徐 年 盛

(指導教授)

劉 振 宇

江 崇 榮

張 良 正

張 德 鑑

系主任

呂 良 正

徐 年 盛
劉 振 宇
江 崇 榮
張 良 正
張 德 鑑
呂 良 正

(簽名)

誌謝



本論文能夠順利完成，首先感謝指導教授徐年盛老師將畢生所學傾囊相授，無論是在論文寫作過程中的各種寶貴意見，或是特別開設一學期課程仔細教授的有限元素法，亦或是在口試前夕每日一會的論文校稿，當然還有每個禮拜四早上七點準時開始，讓人永生難忘的太極拳，每樣都讓我獲益良多，也讓論文寫作這條路上增添了許多難忘的回憶。此外，亦要感謝張德鑫教授和張誠信教授在 GMS 及 FEMWATER 應用上不厭其煩的指導，以及劉振宇教授、江崇榮所長以及張良性教授費心審閱論文並給予許多寶貴意見，補足論文中的不足之處。

兩年的研究生生涯中，接受過許多貴人的幫助，尤其感謝宏仁學長和聖婷學姐在論文寫作及計劃執行期間的細心指導，讓我不僅學到了做研究的思考方法，更重要的是待人處事以及認真做好一件事應有的態度；亦要感謝琦蓁學姐、嘉訓學長、敬文學長、建霖學長、筱玟學姐、旻希學姐、為翔學長、子裕學姐還有助理彩萱在各方面的鼓勵與指導，使研究所的求學過程更加順利，還有總是能夠互相照應與學習的同學善元、瑜萱與耀賢，以及在口試期間及日常生活給予許多協助的學弟富建、哲廷與晨堃，有你們才能讓漫長的研究人生變得如此多采多姿。

最後將本論文獻給我親愛的家人們，爸爸、媽媽、哥哥和女友芃芃，研究所求學期間雖然遭遇無數挫折，每當對自己產生懷疑的時候，因為你們的支持與陪伴，我才能有勇氣繼續接受挑戰，謝謝你們一直以來無條件地支持以及包容，讓我能夠奮戰不懈，並且無後顧之憂的完成學業，僅以此篇謝誌表達最誠摯的感激。

摘要



本研究旨在建立一有系統之集水廊道附近地下水水流數值模式率定方法，並將此一模式率定方法應用於林邊溪集水廊道之實際案例中，以彰顯所建立方法之可用性。

本研究建立之集水廊道附近地下水水流數值模式率定方法，包含地下水系統之水平衡計算、建立數值模式及其參數檢定優選模式三部份。首先，透過地下水系統之水平衡計算，可充分瞭解其河床垂向入滲補注、上游流入及流出量以及集水廊道之集水量，該方法首先透過地下水系統之觀測水位及河床沖積層辨識成果，計算邊界入流或出流量以及蓄水量變化率，並代入連續方程式反推河床垂向入滲量；其次，建立數值模式及其參數檢定優選模式，求解地下水系統最佳之土壤參數組合、河道入滲強度以及降雨入滲強度佔總降雨強度之比例。上述之參數檢定優選模式，係經較有效率之試誤方法迭代求解，直至達到目標函數值最小為止。集水廊道處理方面則以刪除網格的方式，將集水廊道概念化為一明渠之型式，刪除的網格即表示其中空部份，左右兩面及底面給定為混凝土之材質，頂面則視濾層種類及阻塞程度而有所不同，並在混凝土材質內側邊界上之節點以給定水頭邊界條件以模擬集水廊道受重力驅動之水力特性，在模擬完成後，將這些節點上之流量進行加總，即得集水廊道之集水量。

本研究將所建立之方法實際應用於林邊溪集水廊道附近之地下水系統，其地下水水平衡分析計算結果顯示 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日間，總補注量為 4.19 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 98.9%，上游邊界補注佔 1.1%；總流出量為 4.13 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 35.6%，集水廊道集水量則佔 64.4%。

林邊溪集水廊道附近地下水水流數值模式率定結果顯示，地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日觀測井 C 旱季與雨季均分根誤差(RMSE)分別為 0.17 公尺及 0.08 公尺、效率係數(CE)分別為 0.93 及 0.98、相關係數(CC)分別為 0.97 及



0.99；觀測井 D 旱季與雨季 RMSE 分別為 0.27 公尺及 0.14 公尺、CE 分別為 0.67 及 0.87、CC 分別為 0.93 及 0.94；觀測井 E 旱季與雨季 RMSE 分別為 0.33 公尺及 0.41 公尺、CE 分別為 0.83 及 0.92、CC 分別為 0.97 及 0.99；集水廊道集水量旱季與雨季誤差分別為 RMSE 分別為 15,827(噸/日)及 8,971(噸/日)、CE 分別為 0.83 及 0.72、CC 分別為 0.96 及 0.85。總補注量 4.28 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 99.2%，上游邊界補注佔 0.8%；總流出量為 4.29 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 41%，集水廊道集水量則佔 59%。

關鍵詞：林邊溪、集水廊道、水平集水管、水平衡、有限元素法、不飽和土壤、穩態、暫態

Abstract

This thesis aims to establish a numerical model calibration method for groundwater flow near infiltration gallery, and apply this method to an in-situ case of infiltration gallery in Lin-Bien River; in order to highlight the usage of the method had built.

The numerical model calibrating method established by this thesis includes calculating groundwater balance near infiltration gallery, building numerical model and formulating optimization model for parameter verification. First, by calculating system groundwater balance, we will realize the ground surface boundary recharge, upstream inflow quantity, downstream outflow quantity and water intake of infiltration gallery. The method computes the quantity of recharge through every system boundary, the rate of change of system water storage and calculates river and rainfall recharge by continuity equation. Second, build a numerical model and its optimization model for parameter verification; solve the best combination of soil parameter, depth/infiltration recharge of river and rainfall infiltration proportion. Above-mentioned optimization model for parameter verification will solve by iterative method with a more efficient trial and error method, until objective function is minimum. On the other hand, delete the mesh to simulate the space in the infiltration gallery, and conceptualize it into a form of open channel, the right, left hand and bottom side are concrete material, and top side is decide as different filter layer. Given head condition are set up in the concrete region to simulate the gravity controlled condition, after the simulation is finished, summation the flux on each node to get the infiltration gallery discharge.

This thesis was applied to the process to groundwater system near infiltration gallery of Lin-Bien River. According to calculating system groundwater balance result, during 2010/01/01~2010/09/05, the total recharge is 41.9 million tons, river and rainfall



infiltration recharge are 98.9% among them, upstream boundary recharge are 1.1% among them. Total out flow is 41.3 million tons, downstream outflow are 35.6% among them, water intake of infiltration gallery are 64.4% among them.

According to the result of calibrating groundwater flow model near infiltration gallery of Lin-Bien River, during dry and rainy season in 2010/01/01~2010/09/05, RMSE of observing well C are 0.17 m and 0.08m respectively, CE are 0.98 and 0.998 respectively, CC are 0.99 and 0.999 respectively. RMSE of observing well D are 0.27 m and 0.14m respectively, CE are 0.89 and 0.98 respectively, CC are 0.98 and 0.99 respectively. RMSE of observing well E are 0.112 m and 0.114m respectively, CE are 0.98 and 0.99 respectively, CC are 0.98 and 0.996 respectively. RMSE of observing water intake of infiltration gallery are 5,465(cmd) and 2,958(cmd) respectively, CE are 0.94 and 0.99 respectively, CC are 0.97 and 0.995 respectively. The total recharge is 4.28 million tons, river and rainfall infiltration recharge are 99.2% among them, upstream boundary recharge are 0.8% among them. Total out flow is 42.9 million tons, downstream outflow are 41% among them, water intake of infiltration gallery are 59% among them.

Keywords: Lin-Bien river, Infiltration gallery, Horizontal pipe, Water balance, Finite element method, Unsaturated soil, Steady state, Transient.

目錄



論文口試委員會審定書	i
誌謝	ii
摘要	iii
Abstract	v
目錄	vii
圖目錄	ix
表目錄	xii
第一章 前言	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究流程圖	3
1.4 論文內容	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 集水廊道相關研究	5
2.2 不飽和土壤之研究	8
2.3 有限元素法於地下水水流模擬問題之實際應用	8
2.4 文獻回顧總結	10
第三章 數值模式率定方法之建立	11
3.1 水文地質概念模型建立	12
3.1.1 河床沖積層辨識	12
3.1.2 地下水系統邊界辨識	13
3.2 地下水系統水平衡分析	13
3.2.1 蓄水量及蓄水變化率	14
3.2.2 上游邊界入流量、下游邊界出流量以及不透水邊界	15
3.2.3 河床垂向入滲量推估	16
3.3 數值模式建立	17



3.3.1 數學模式	18
3.3.2 數值模式推導	29
3.3.3 模式程式碼設計	36
3.4 參數檢定優選模式建立	37
3.4.1 參數檢定優選模式公式化	37
3.4.2 參數檢定優選模式求解	45
第四章 數值模式率定方法應用	50
4.1 研究區域概述	50
4.1.1 雨量站概述	52
4.1.2 河川水位及流量站概述	54
4.1.3 地下水位觀測井概述	55
4.2 林邊溪二峰圳集水廊道附近水文地質概念模型建立	57
4.2.1 河床沖積層辨識	57
4.2.2 地下水系統邊界辨識	59
4.2.3 集水廊道佈設位置及尺寸	60
4.2.4 水文地質概念模型建立結果	62
4.3 林邊溪二峰圳集水廊道附近地下水水流數值模式率定	62
4.3.1 地下水系統水平衡分析	63
4.3.2 數值模式網格建立與初始參數輸入	68
4.3.3 模式參數上下限設定	73
4.3.4 數值模式率定結果	75
第五章 結論與建議	90
5.1 結論	90
5.2 建議	92
參考文獻	95

圖目錄



圖 1-1 研究流程圖	3
圖 3-1 集水廊道地下水水流數值模式率定方法建立流程圖	11
圖 3-2 山區河谷出口處之河床沖積層示意圖	12
圖 3-3 地下水系統之水平衡概念模型及出入水量分佈示意圖	14
圖 3-4 蓄水體積計算示意圖	15
圖 3-5 河床沖積層地下水分佈示意圖	17
圖 3-6 河道斷面示意圖	22
圖 3-7 變動邊界條件用於河道入滲示意圖	25
圖 3-8 地表劃分為河道與非河道區域之示意圖	26
圖 3-9 集水廊道概念化三維示意圖	27
圖 3-10 集水廊道邊界條件概念化示意圖	28
圖 3-11 各種形式的元素及其節點編號之指定順序	30
圖 3-12 楔形元素座標轉換示意圖	33
圖 3-13 計算狀態變數之限制模式示意圖	41
圖 3-14 不同土壤之水力傳導係數參考值及其合理範圍	42
圖 3-15 各類型土壤之孔隙率參考值	43
圖 3-16 下游邊界之給定水頭平均值限制式示意圖	44
圖 3-17 參數檢定優選模式之求解流程圖	46
圖 4-1 研究區域位於林邊溪流域之相對位置	50
圖 4-2 林邊溪流域河系與山區位置圖	51
圖 4-3 林邊溪流域主要子集水區分佈圖	52
圖 4-4 研究區域附近雨量站分佈圖	52
圖 4-5 林邊溪子集水區徐昇氏網格劃分結果	53
圖 4-6 研究區域之平均降雨量之降雨組體圖	53
圖 4-7 研究區域附近河川流量站分佈圖	54
圖 4-8 以水筒模式法推估得 2010 年林邊溪上游河道流量	55

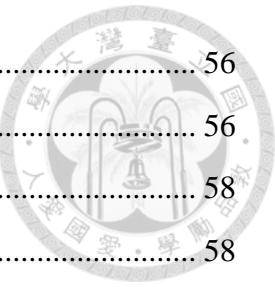


圖 4-9 研究區域地下水位觀測井分佈圖	56
圖 4-10 各觀測井之觀測水位	56
圖 4-11 二峰圳 RIP 測線佈置	58
圖 4-12 二峰圳 RIP 測線探測結果圖	58
圖 4-13 林邊溪上游地質分佈圖	60
圖 4-14 地下水系統邊界辨識結果圖	60
圖 4-15 集水廊道埋設位置示意圖	61
圖 4-16 集水廊道構造尺寸及埋深示意圖	61
圖 4-17 林邊溪二峰圳集水廊道附近水文地質概念模型	62
圖 4-18 地下水系統邊界劃分之徐昇氏網格	63
圖 4-19 外插所得下游邊界 F 之地下水位	64
圖 4-20 地下水系統之蓄水量歷線	64
圖 4-21 上游邊界 A 之入流量歷線	65
圖 4-22 上游邊界 B 之補注量歷線	66
圖 4-23 下游邊界 F 之出流量歷線	66
圖 4-24 以觀測井 C 地下水位推估之集水廊道集水量歷線	67
圖 4-25 河床垂向入滲量	68
圖 4-26 模式範圍與邊界條件設定	69
圖 4-27 林邊溪二峰圳集水廊道三維網格分割圖	70
圖 4-28 三維網格之水文地質分區	70
圖 4-29 河道底泥層於河床之分佈	71
圖 4-30 旱季時 A 河段之給定河道入滲強度	78
圖 4-31 旱季時 B 河段之給定河道入滲強度	78
圖 4-32 旱季時 C 河段之給定河道入滲強度	78
圖 4-33 雨季時 C 河段之給定河道入滲強度	78
圖 4-34 雨季時 A 河段之給定河川水位	79
圖 4-35 雨季時 B 河段之給定河川水位	79
圖 4-36 觀測井 C 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖	79
圖 4-37 觀測井 C 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖	80



圖 4-38 觀測井 D 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖	81
圖 4-39 觀測井 D 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖	81
圖 4-40 觀測井 E 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖	82
圖 4-41 觀測井 E 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖	82
圖 4-42 集水廊道之暫態模擬集水量與觀測集水量之比較圖	83
圖 4-43 集水廊道之暫態模擬集水量與觀測集水量所繪散佈圖	83
圖 4-44 林邊溪集水廊道地下水水流模式旱季平均補注量與出流量	85
圖 4-45 林邊溪集水廊道地下水水流模式雨季平均補注量與出流量	86
圖 4-46 河床垂向入滲量模擬與水平衡計算結果比較圖	87
圖 4-47 模式推估之河道補注量	88
圖 4-48 模式推估之降雨補注量	88

表目錄



表 3-1 不同類型土壤之土水保持曲線參數.....	20
表 3-2 曼寧糙度係數表.....	23
表 3-3 楔形元素之基底函數.....	33
表 3-4 各決策變數與模擬水位及集水廊道集水量之正比反比關係.....	40
表 3-5 各種土壤介質之壓縮係數合理範圍.....	42
表 4-1 恒春氣象站月平均蒸發量.....	54
表 4-2 研究區域內地下水位觀測井基本資料.....	55
表 4-3 各點位之河床沖積層厚度與水力傳導係數.....	59
表 4-4 地下水系統邊界所劃分徐昇氏網格及其初始數據.....	63
表 4-5 各河段河川水位起始猜測值.....	72
表 4-6 各河段入滲補注量之起始猜測值.....	72
表 4-7 各河段之給定河道入滲強度上限.....	75
表 4-8 紿定河川水位長期趨勢.....	76
表 4-9 紿定河道入滲強度長期趨勢.....	76
表 4-10 參數檢定前各分區之土壤參數.....	77
表 4-11 穩態模式參數檢定後各分區之土壤參數.....	77
表 4-12 觀測與模擬平均值以及各誤差評估指標.....	84
表 4-13 林邊溪集水廊道暫態數值模式率定之旱季平均補注量與出流量.....	85
表 4-14 林邊溪集水廊道暫態數值模式率定之雨季平均補注量與出流量.....	86

第一章 前言



本章首先藉由臺灣之水資源利用現況介紹本研究之緣起，並依集水廊道相關文獻回顧據以確立研究目的，接著繪製流程圖以說明本研究之研究流程，最後概述本論文各章節所包含之內容。

1.1 研究緣起

隨著臺灣人口日漸增加且生活品質提高，各行各業快速發展，水資源需求量亦大幅上升；然近年氣候變遷加劇，乾濕季雨量落差明顯，造成旱澇交替，世界各地災情時有所聞。臺灣先天條件坡陡流急、降雨時空分佈不均，雨季時河床沖刷加劇，河水挾帶大量泥砂進入水庫，使其蓄水變得混濁難以利用；旱季又由於雨量降低，常有水源不足的狀況發生。2015 年的臺灣即面臨了旱季水庫乾涸，無水可用之苦，由此可見水資源的缺乏對於各行各業都造成諸多不便，著實影響人民生活甚鉅。

加之近年來環保意識高漲，傳統的水資源開發方式如水庫和抽水井所面臨的風險及對環境的影響得到更多的關注，興建阻力與日俱增。台灣山區地下水主要蘊藏於河谷出口處之礫石層孔隙中，蓄水量極為豐富，在此一區域以集水廊道 (Infiltration gallery) 或水平集水管 (Horizontal pipe) 取用地下水具有用地小、興建成本低和四季皆能取用豐沛水量等優點，對環境衝擊小且效益極高，較能符合現今社會對於公共工程能兼具環保與效益的期待，故以集水廊道取用河床沖積層中之地下水可說是未來開發新水源的重要選項之一。

在興建集水廊道前，須決定集水廊道之埋深位置、截面尺寸及長度評估其對於下游地下水及河水流況之影響，應事先建立一可描述當地集水廊道存在條件下地下水流況之評估工具，並應用此工具進行興建集水廊道前建議所需調查事項或集水廊道之埋深長度及大小，然而，根據第二章文獻回顧總結可知，目前尚無一套完整且有系統的方法可供集水廊道附近地下水水流數值模式率定 (Calibration) 之用，故

建立此一率定方法實為目前水資源開發計劃中之重要課題。

1.2 研究目的

本研究旨在建立一有系統之集水廊道附近地下水數值模式率定方法，並將此一模式率定方法應用於林邊溪二峰圳集水廊道之實際案例中，以彰顯所建立方法之可用性，最後依模擬結果建議未來集水廊道興建前所需調查與評估事項。本研究所建立之方法首先進行集水廊道附近地下水系統之水平衡(Water balance)計算以瞭解該地下水系統之河床垂向入滲補注量、上下游流入與流出量以及集水廊道集水量；而後建立一飽和-不飽和之地下水流數值模式並將集水廊道概念化(Conceptualization)為模式之邊界條件，以模擬集水廊道周圍地下水之流況；最後建立一參數檢定之優選模式(Optimization model)，將數值模式之相關參數公式化，並以試誤法(Trial and error)求解之。





1.3 研究流程圖

本研究之流程圖可繪如圖 1-1。本研究首先回顧國內外文獻瞭解目前對於集水廊道之研究尚缺乏一完整之模式率定方法，故據以確立研究目的；其次，建立一模擬集水廊道附近地下水水流況數值模式率定方法；最後，收集實際案例之資料並將該方法應用於實際案例中以彰顯其可用性。

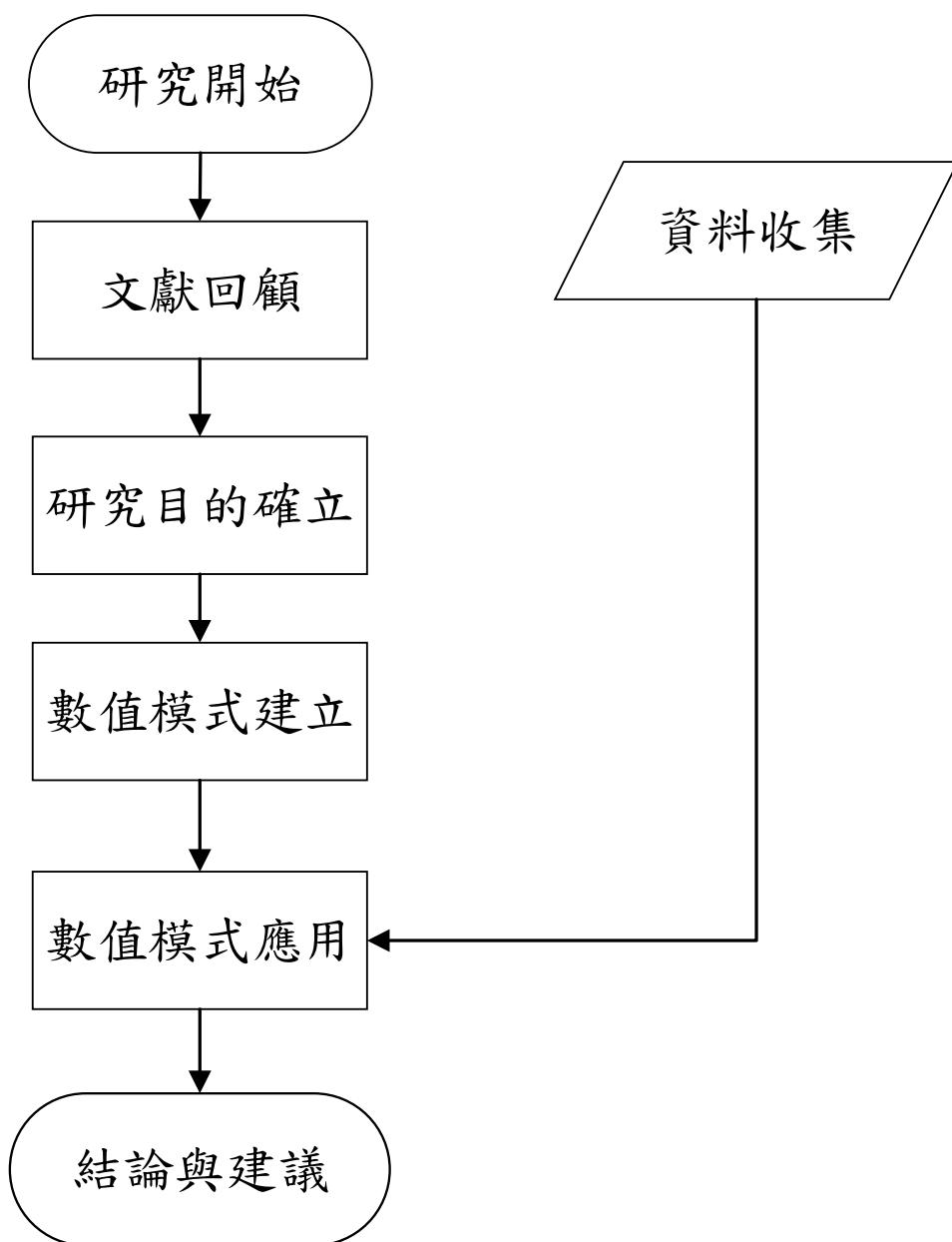


圖 1-1 研究流程圖



1.4 論文內容

本研究第二章回顧國內外文獻，內容包含不飽和土壤之水力特性、有限元素法於地下水水流模擬之應用以及集水廊道相關之研究等。第三章建立數值模式之率定方法，內容包含水文地質概念模型建立、地下水系統水平衡分析、數值模式建立以及模式參數檢定優選模式建立等四個小節。第四章則將本研究建立之數值模式率定方法應用在林邊溪二峰圳集水廊道之實際案例中，內容包含研究區域概述、水文地質概念模型建立、數值模式率定及其模擬結果討論。第五章則為本研究之結論並建議後續可行之研究方向以及模式應用上所遇到之困難及可能之解決方法。

第二章 文獻回顧



由於集水廊道取水時可能造成地表土壤產生飽和-不飽和之流動，而本研究為尺度較小之三維問題，受不飽和土壤之水力特性影響明顯，故決定以有限元素法(Finite element method, FEM)，建立一考慮飽和-不飽和流動之三維集水廊道附近地下水數值模式。綜上所述，本研究分別回顧國內外前人對於集水廊道研究與模擬、不飽和土壤之研究及相關試驗與有限元素法之實際應用之相關文獻。

2.1 集水廊道相關研究

江崇榮(1997)回顧林邊溪二峰圳集水廊道之地下堰堤設計、觀測以及維護之相關文獻，確立集水廊道選址之水文及地質條件，並選出屏東平原和濁水溪沖積扇周圍之集水廊道設置潛能場址，供後續興建計劃之參考。

徐年盛與江盛匡(2000)利用 3DFEMWATER 模式，配合台糖公司於林邊溪二峰圳之實測資料，建立模擬集水廊道附近地下水水流況之三維地下水水流數值模式，並推估集水廊道月平均集水量及與地下水位每日的變化關係。由於該計畫所發展之模式在觀測水位與模擬水位之比較方面僅考慮旱季之狀況，且可供參數檢定之資料較為缺乏；對於集水廊道之處理亦未有明確的描述，上游邊界條件給定流量值均為推估值，不確定性較高，且當時在集水廊道下游無觀測資料可供後續評估新建其他取水設施對下游地下水位之影響。

許少華等(2002)將 SEEP2D 模式之數值模擬與砂箱試驗相互驗證，找出影響水平集水管取水之敏感參數。該研究處理集水管邊界條件之方式為給定其內邊界為零壓力邊界(即大氣壓力)。結果顯示，河川水力坡降對於集水量影響較小；有效埋深則有相當大的影響；且河床沖積層水平水力傳導係數比垂直水力傳導係數大愈多，則集水量愈小；若在垂直水力傳導係數相同情況下，水平水力傳導係數愈大，集水量亦會隨之線性增大。

江盛匡(2002)參考徐年盛與江盛匡(2000)之集水廊道附近地下水水流況之三維地下水水流數值模式研究成果，建立一優選模式以集水廊道最佳大小及位置為決策變數，尋求能滿足最小需水量及最小總設置成本等目標的最佳條件，並利用林邊溪上游集水廊道進行該優選模式的實際應用。結果顯示集水廊道之集水面積加大至2倍且埋深位置加深2公尺為林邊溪上游集水廊道之最佳大小及位置。

Dongmin (2005)以 Stehfest (1970)發展之模式求解水平集水管(Horizontal pipe)置於底部為阻水層(Aquitard)之蓄水槽(Reservoir)下方之三維拉普拉斯方程式(Laplace equation)，並計算其地下水位洩降以及蓄水槽入滲量。該研究以蓄水槽之水位為給定水頭邊界條件，下方有一阻水層將其與含水層隔開，阻水層之水力傳導係數須至少小於含水層兩個數量級(Order)以上，水平集水管則置於含水層中，以線匯(Line sink)表示，即給定一固定之抽水量平均分佈於集水管上。模擬結果顯示蓄水槽之入滲量與垂直水力傳導係數、含水層之儲水係數及水平集水管之位置與深度息息相關，若在暫態條件且含水層儲水係數較大情況時，蓄水槽之最大入滲量為儲水係數之函數。

Mohamed and Rushton (2005)以有限差分法(Finite difference method)模擬淺含水層(4公尺)中之水平集水管。該含水層所在位置鄰近海岸線，其他三邊及其下方皆為黏土層，分別設為給定水頭邊界及不透水邊界，集水管則埋於含水層下方，集水管集水量隨地下水位及集水管內水深而變化，亦即考慮其排水效應，集水管內水深越大，集水量就越少。研究結果顯示，此給定方法模擬成果較直接給定集水管抽水量為佳。

黃乾育(2007)應用 FEMWATER 模式假設一河道，模擬當設置滲透牆和集水廊道後地下水位之變化，並推估集水廊道之集水量，研究結果顯示，當滲透牆 K 值越大，集水廊道集水量亦越大；河川流量大於集水廊道集水量，且廊道為非滿管狀態，故可推知廊道之設置對地下水與地面水的影響僅為局部現象。

經濟部水利署水力規劃試驗所(2010)進行林邊溪流域兩座集水廊道調查評估，



藉由地質鑽探瞭解河床沖積層厚度及其水力傳導係數、地下水位觀測井觀測地下水位與集水廊道集水量觀測，並計算估算地下水系統之水源量，以瞭解其之水量收支，最後概估既有水源量供給鄰近地區水資源需求之經濟效益，並建議未來集水廊道較佳開發方案。

洪智勇等(2010)利用 MODFLOW 模擬各種水平集水管之設置與取水方式，探討以水平集水管進行河畔取水對河川滲漏與地下水位洩降之影響。結果顯示水平集水管最適合位置為地下水位以下 15 公尺位置；集水管抽水量則與地下水位洩降成正相關；若與河川距離接近，則可增加河川滲漏量，減少水位洩降，該距離則視現場狀況而定；集水管長度建議則為由抽水井向外 10 公尺，管徑 2 公尺，可減少約 8% 水位洩降。

劉怡安(2011)先利用 MODFLOW 建立一集水廊道附近地下水水流數值模式，再將該模式建構完成產生之資料用以訓練地下水水流類神經網路，模擬抽水補注對地下水位的影響。建立一優選模式以集水廊道之尺寸與取水量為決策變數，尋求能滿足集水廊道營運之淨效益最大化之目標方案，並利用濁水溪流域彰雲橋上游研究區域，進行該優選模式的實際應用。得到該研究區域埋設深度 24 公尺、管面寬度為 1 公尺、管長為 439 公尺，集水廊道營運於 20 年之總供水淨效益為 29.6 億元，平均每年取水量可達 1,360 萬噸。

李昭順與劉振宇(2012)說明集水廊道興建前應執行之探查試驗分析、選址條件及過去取用之成敗事例，並詳加說明集水廊道集水量估算方法與施工應注意事項，最後提出台灣西部主要河川初步研擬適合取用伏流水之地段，作為後續開發之參考。

Rushton and Brassington (2013)以現地試驗及數值模式觀察淺含水層中不同長度之水平集水管取水量，並說明抽水端水力梯度對於集水管取水量之重要性。研究結果指出，水平集水管抽水端之取水量約為非抽水端的四倍，可作為後續減少水平集水管長度之參考依據。

經濟部中央地質調查所(2015)進行臺灣南段山區地下水資源調查，針對林邊溪二峰圳集水廊道的歷史、佈設與結構做了詳盡的介紹，並在周圍進行了許多水文地質調查，包含鑽探、含水層水力試驗、地下水與地面水的交換量評估等，並在現地佈設了兩條地電阻剖面測線，探測該地之地質分佈與地下水儲存量。試驗結果顯示，2000 年~2009 年間二峰圳場址附近之地面水補注地下水達 4.31 億噸，地下水補注地面水僅 1.53 億噸，表示該處尚有 2.78 億噸的開發潛能量，未來若增加地下堰之埋設深度，應可獲得更多水資源供應量。

2.2 不飽和土壤之研究

van Genuchten (1980) 將 Mualem (1976) 依統計方法推導之不飽和土壤中壓力水頭與水力傳導係數、土壤含水量及土壤水份當量之積分關係式，配合前人研究數據，進一步將這些關係式寫成能以一般函數(Closed-form)表示的形式，最後以實驗數據證明其於實際使用上模擬表現相當良好。本研究即採用該表示式描述不同質地土壤之不飽和之水力特性。

郭哲昆(1995)選用 FEMWATER 模式程式碼為主體發展土壤滲流數值模式，在給定土壤之上下游邊界水頭下，研究其飽和-不飽和之滲流現象。該研究發現拉普拉斯方程式若忽略不飽和條件，求出之穩態自由液面位置，必僅與上下游水位及壩型之幾何條件有關；但在實際上考慮飽和-不飽和層之滲流情況時，模擬出的結果尺度越小時不飽和特性則愈明顯，且求出之自由液面亦不為流線(Streamline)。

Thoma et al (2013)利用 19 小時固定入滲量(0.84 cm/hr)現地入滲試驗量測砂土-礫石-鵝卵石之土水保持曲線(Soil-water retention curve)參數，以供後續不飽和土壤之模擬及研究使用。

2.3 有限元素法於地下水水流模擬問題之實際應用

張誠信(1996)利用 3DFEWA 模式建立雲林地區三維之地下水水流數值模式，並



確立其率定方法，在經過水力傳導係數、儲水係數、邊界條件及抽水量、補注量之檢定與驗證後，推估地下水邊界補注量、抽水量、流速、流向及地下水年代，並由該模式預測雲林地區未來地下水受不同抽水量之地下水位變化。

曾琮愷(2002)利用 FEMWATER 模式模擬隧道上方豎井開挖時所需進行之地下水降水措施，並推估隧道開挖時的滲流量，該研究對其在三維網格分割、土壤材質設定以及邊界條件處理等細節有相當詳盡的描述，並以刪除地層中網格的方式，建立隧道在地層中之空間，並將隧道周圍節點上之通量(Flux)加總，得到隧道沿線地下水滲入總量。

劉鐙蔚(2008)利用 FEMWATER 模式模擬及分析擋土牆背面排水管之排水行為，假設擋土牆背填土為均質、均向且其自由水面維持於地表，排水管之處理方面，則將其所在位置之壓力水頭設為 0(即大氣壓力)，如此周圍之水壓將由外向排水管遞減，符合其物理特性。該研究將模擬背填土初始條件設為全區飽和，計算穩態模擬之排水管周圍等水壓線，並觀察整個土體之排水現象。

林子喬(2013)以 FEMWATER 模式配合彰化田中實驗田之現地資料，驗證建立水田淺層地下水補注模式。該研究於地表給定兩種不同的邊界條件，觀察水田區之湛水深變化、以及不同灌溉期距對水分之影響及牛踏層之通量變化。其中一種為給定水頭邊界條件模擬續灌(湛水灌溉)中的湛水深，並改變不同的湛水深度，評估水田入滲量的變化；另一種則以變動邊界條件模擬輪灌制度與水稻強化栽培系體系(SRI 法)之用水方式，並扣除蒸發量後給定之。



2.4 文獻回顧總結

目前對於不飽和土壤水力特性之描述已發展出完整且能夠實際狀況的方法，此理論用於不同性質土壤所需之特性參數亦累積了許多現地及室內試驗成果，近年更陸續針對礫石之性質有更多的研究，對於飽和-不飽和地下水水流數值模式的建立有相當大的幫助。

在有限元素法在地下水問題的模擬應用上，前人亦累積了許多經驗，如補注量之給定、初始及邊界條件之處理以及模擬結果之判讀等，皆能作為建立模式過程中之參考。

集水廊道或水平集水管在數值模擬上之處理已發展出許多方法，包括給定抽水量、給定固定水頭或是隨著集水管內之水深與周圍壓力水頭之差值而給定不同的抽水量；而在集水廊道數值模式率定方面，前人雖有零星研究，卻仍無一套完整而有系統之方法可供使用。本研究即要建立這樣一套完整而有系統之集水廊道數值模式率定方法，並加以評估興建前建議所需調查事項或集水廊道之埋深長度及大小。

第三章 數值模式率定方法之建立



本研究數值模式率定方法之建立流程可繪如圖 3-1 所示，主要分為四部份：

第一部份為收集研究區域相關資料並辨識地下水系統邊界，以建立水文地質概念模型供建立數值模式使用。第二部份進行地下水系統水平衡分析，藉由計算蓄水量、上下游流入與流出量以及集水廊道集水量反推河床垂向入滲補注量。第三部份為數值模式之建立，包括模式推導與程式碼設計。第四部份則建立一參數檢定優選模式以增加參數檢定之效率，如圖 3-1 所示。

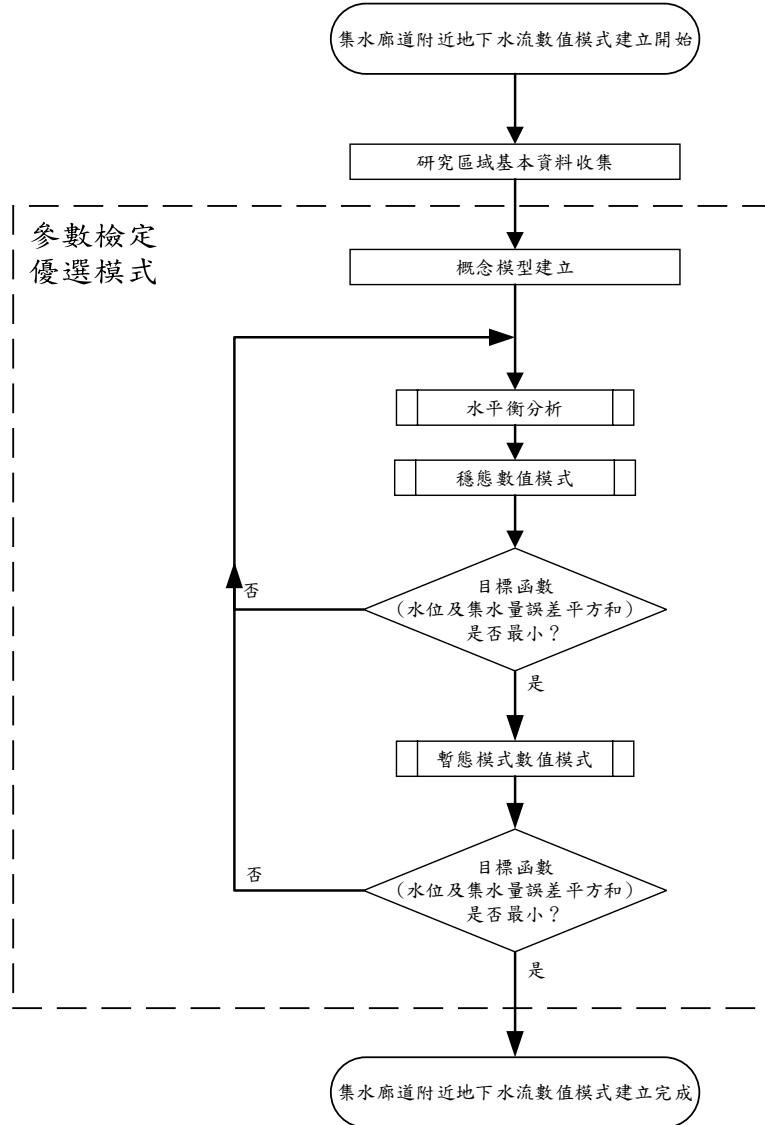


圖 3-1 集水廊道地下水流數值模式率定方法建立流程圖



3.1 水文地質概念模型建立

如 1.1 所述，集水廊道一般埋設於山區河谷出口處之河床沖積層中，如圖 3-2 所示，在開始建立集水廊道附近地下水流況之地下水流數值模式之前，首先須進行資料的收集，並以此瞭解地質分層、水文地質型態以及可做為地下水系統邊界之物理條件，才可進行後續的水平衡計算以及數值模式建立。

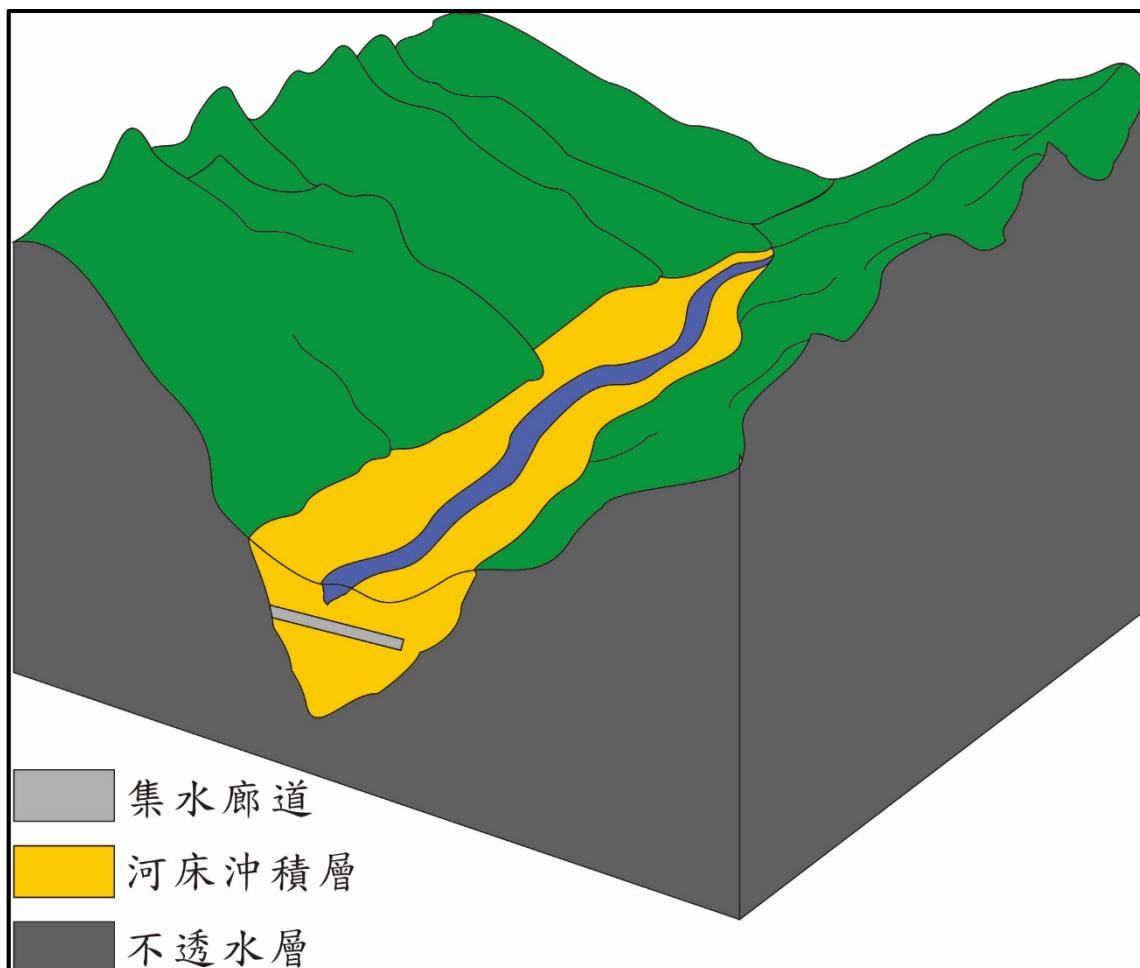


圖 3-2 山區河谷出口處之河床沖積層示意圖

3.1.1 河床沖積層辨識

一般來說，集水廊道集水量皆來自於儲藏於河床沖積層中之地下水，故在建置集水廊道地下水數值模式前，須先收集研究區域之地質鑽探報告、河床斷面高程、觀測井水位資料以及現地試驗數據等資料，以確定河床沖積層厚度及其水文地質



特性。

河道底泥層分佈於河床表面，其透水性通常小於河床沖積層，且與河川水流流速息息相關，雨季水量較大時，由於河川之搬運能力較強，細粒的泥砂較不易淤積，此時河道底泥層之水力傳導係數較高，入滲快又多；旱季水量較小時，河川流速緩慢使泥砂之淤積較雨季更為明顯，而形成水力傳導係數較低的河道底泥層，入滲慢又少。

3.1.2 地下水系統邊界辨識

邊界條件對數值模式模擬結果的影響至關重要，卻又非常複雜，須正確的判斷其時空分佈，才可能得到合理的模擬結果。邊界條件通常分為已知水頭、已知流量和無流量三種狀況：1. 已知水頭，在進行模擬前，需先由航照圖、地質分佈圖或現地實測等方式確認研究區域內是否有河川或地下水位觀測井可提供已知水頭條件。2. 已知流量，由位於上下游之兩口觀測井，計算地下水系統邊界之流入或流出量。3. 若存在不透水邊界，則可視為無流量。

3.2 地下水系統水平衡分析

集水廊道附近地下水系統之水平衡分析在數值模式建置中扮演了重要的角色，若是有一合理之方法能夠概估地下水系統之蓄水變化率以及各邊界入流或出流量，建置模式的過程中便能有一明確方向，對於不確定性眾多的地下水流模擬問題有相當大的幫助。

本研究參酌 Bear (1979)之水平衡分析方法以及經濟部水利規劃試驗所(2010)發展之水源量分析分法以建立本研究地下水系統水平衡分析方法，首先計算蓄水變化率、上游邊界流入量及下游邊界流出量，接著實測取得集水廊道集水量，最後代入連續方程式，可推估河床垂向入滲量。地下水系統之連續方程式如(3-1)式所示；各邊界之入流及出流量分佈如圖 3-3 所示：

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_U - Q_D + Q_R - Q_G \quad (3-1)$$



上式中， V 為蓄水量； $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ 為蓄水量隨時間之變化量； Q_U 為上游邊界流入量； Q_D 為下游邊界流出量； Q_R 為河床垂向入滲量； Q_G 為集水廊道集水量。

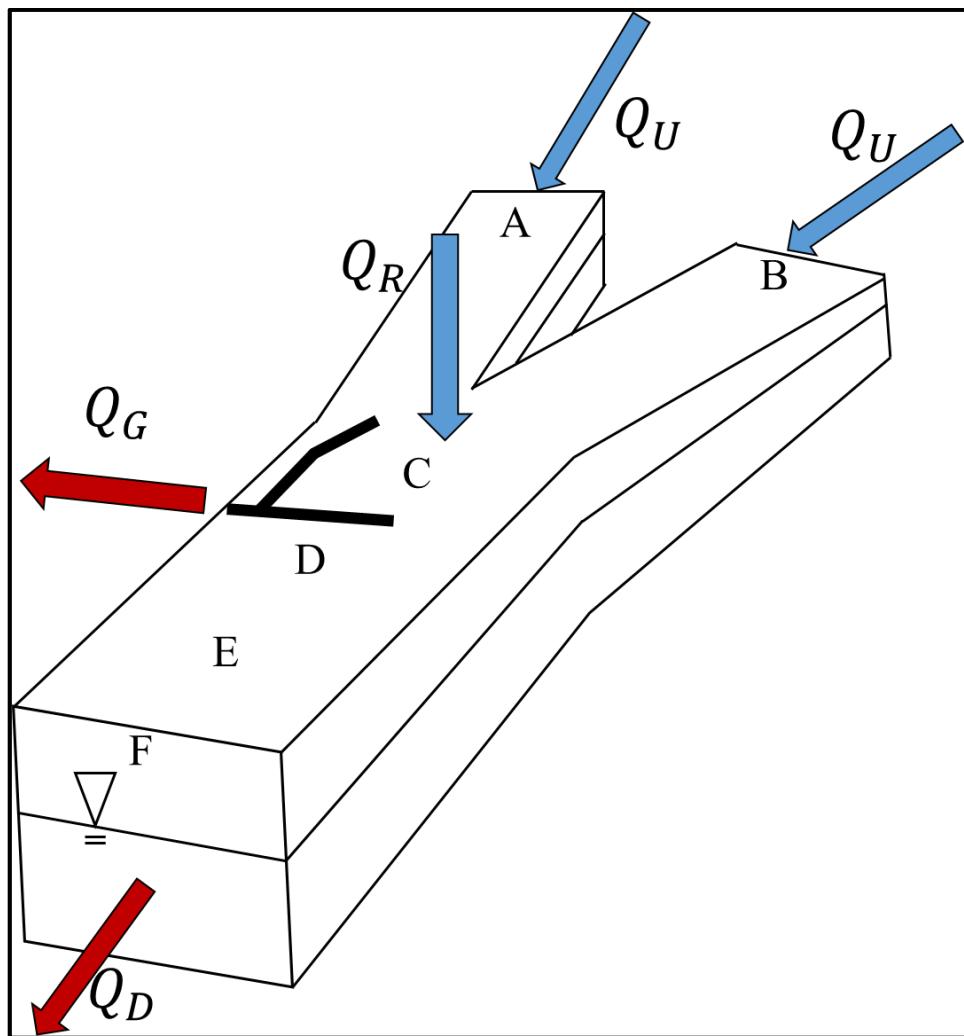


圖 3-3 地下水系統之水平衡概念模型及出入水量分佈示意圖

3.2.1 蓄水量及蓄水變化率

本研究採用徐昇氏法(易任與王如意，1985)劃分各地下水位觀測站於研究區域內之控制面積如圖 3-4 所示，並配合實測之孔隙率及各時間之地下水位觀測資料，蓄水量可表示如(3-2)式：



$$V(t) = \sum_{i=A}^F n A_i h_i(t) \quad (3-2)$$

上式中， $V(t)$ 為蓄水量； n 為孔隙率； A_i 為任一區域之徐昇氏面積； $h_i(t)$ 為任一時間之飽和層厚度。

求得 $V(t)$ 後，即可求得 Δt 時間內蓄水量變化率如(3-3)式所示：

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} \quad (3-3)$$

上式中， $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ 為 Δt 時間內蓄水變化率； $V(t + \Delta t)$ 為 $t + \Delta t$ 時刻之蓄水量。

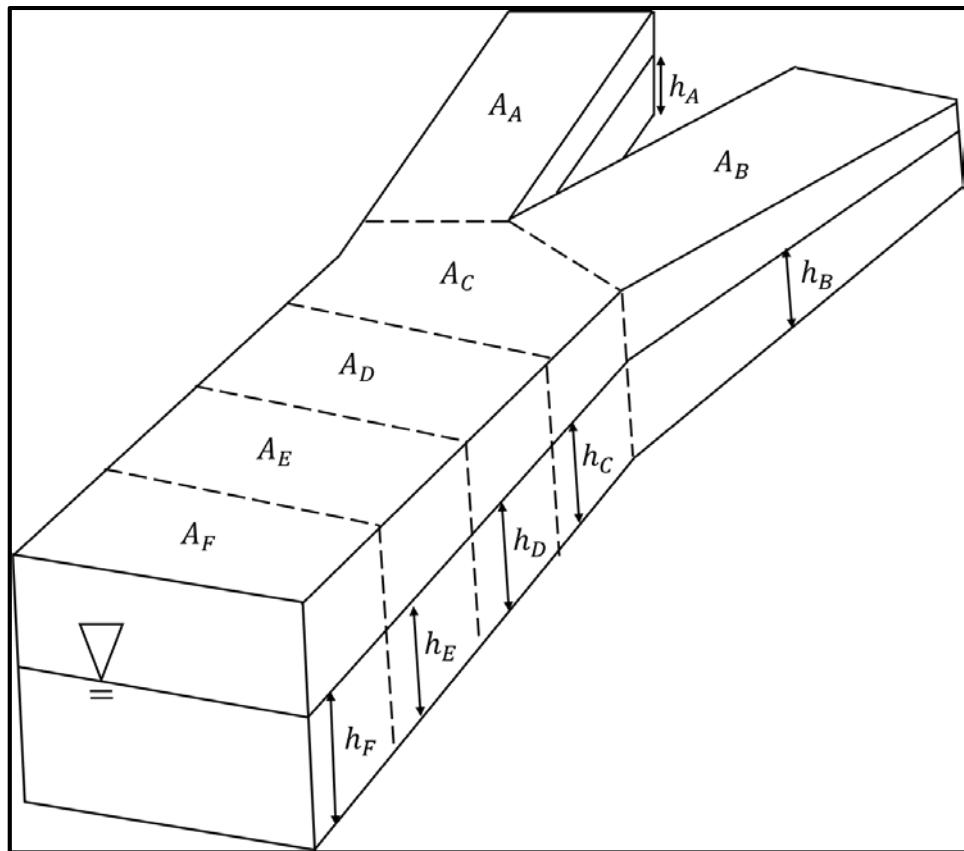


圖 3-4 蓄水體積計算示意圖

3.2.2 上游邊界入流量、下游邊界出流量以及不透水邊界

以達西定律計算兩點間的地下水流通量如(3-4)式所示：

$$Q = Ki(Bh) \quad (3-4)$$



上式中， Q 為兩點間之流量； K 水力傳導係數； i 為兩點間之水力梯度； B 為河床沖積層斷面寬度。

如圖 3-3 所示，若欲求取集水廊道附近地下水系統上游邊界 A 之流通量，須將 A 區域之水力傳導係數、A 點和 C 點間之水力梯度 $i_{AC} = \frac{H_A - H_C}{x_{AC}}$ 、上游邊界 A 之河床沖積層斷面寬以及飽和層厚度相乘如(3-5)式所示：

$$Q_A = K_A (B_A h_A) \frac{H_A - H_C}{x_{AC}} \quad (3-5)$$

上式中， Q_A 上游邊界 A 之流通量； K_A 為 A 區域之水力傳導係數； h_A 為觀測井 A 位置之飽和層厚度； H_A 為觀測井 A 之地下水位； H_C 為觀測井 C 之地下水位； x_{AC} 為觀測井 A 與 C 之距離。

同理，可求得上游邊界 B 補注量 Q_B 及下游邊界 F 出流量 Q_F 分別如(3-6)式及(3-7)式所示：

$$Q_B = K_B (B_B h_B) \frac{H_B - H_C}{x_{BC}} \quad (3-6)$$

$$Q_F = K_F (B_F h_F) \frac{H_E - H_F}{x_{EF}} \quad (3-7)$$

除了上述之邊界外，若為圖 3-2 所示之不透水邊界，則邊界條件可設為無流量邊界。

3.2.3 河床垂向入滲量推估

將(3-3)式、(3-5)式、(3-6)式、(3-7)式及集水廊道集水量代入(3-1)式，即可推得河床垂向入滲量，如(3-8)式所示：

$$Q_R = \frac{\Delta V}{\Delta t} - Q_A - Q_B + Q_F + Q_G \quad (3-8)$$

上式中， Q_R 為河床垂向入滲量； Q_G 為實測之集水廊道集水量。



3.3 數值模式建立

Bear (1979)提到達西定律之適用範圍為雷諾數小於 10 之流況，雷諾數之計算如(3-9)式所示：

$$Re = \frac{\rho V d_{10}}{\mu} \quad (3-9)$$

上式中， Re 為雷諾數； ρ 為水之密度 $[M / L^3]$ ； V 為地下水之流速 $[L / T]$ ，取； d_{10} 為粒徑累積百分比曲線 10% 所對應之粒徑 $[L]$ ； μ 為水之動力黏滯係數 $[M / LT]$ 。

由經濟部水利規劃試驗所(2010)現場量測結果可推知 V 約等於 2.6(m/d)；根據水利署(2011)之研究屏東平原河床質之 d_{10} 最大約可取 0.178(m)； ρ 之值於 25°C 時約 997.08 (kg/m³)； μ 之值約 76.896 (kg/m·d)，將以上所有數值代入(3-9)式，求得河床沖積層之雷諾數約等於 3.38，符合 $Re \leq 10$ 之條件，均可採用達西定律以建立地下水水流控制方程式；又河床沖積層同時包含飽和與不飽和帶，如圖 3-5 所示，故本研究首先須推導一可同時描述飽和及不飽和土壤之地下水控制方程式。

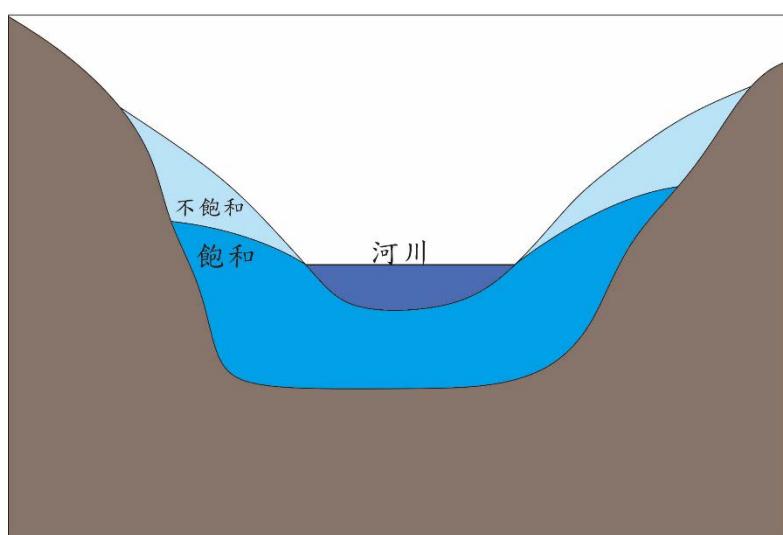


圖 3-5 河床沖積層地下水分佈示意圖



3.3.1 數學模式

本節將依序說明控制方程式、未飽和土壤之水力特性、初始條件、邊界條件以及集水廊道作為邊界條件之概念化過程。

一、控制方程式

假設流經集水廊道附近河床沖積層之地下水水流體質量守恆、符合達西定律、水力傳導係數與土壤之孔隙率不隨時間改變且研究範圍內受抽水井影響極小，參考 Bear(1979)之推導，可得飽和-不飽和控制方程式如(3-10)式所示：

$$L(h) = S \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot \nabla (h + z)] \quad (3-10)$$

$$S = \rho g \left(\alpha \frac{\theta}{n} + \beta \theta \right) + \frac{d\theta}{dh} \quad (3-11)$$

上式中， L 為微分運算分子(Differential operator)； S 為儲水係數(Storage coefficient) $[1/L]$ ； ρ 為水之密度 $[M/L^3]$ ； h 為壓力水頭 $[L]$ ； t 為時間 $[T]$ ； \mathbf{K} 為水力傳導係數張量 $[L/T]$ ； z 為位置水頭 $[L]$ ； g 為重力加速度 $[L/T^2]$ ，約等於 $7.32 \times 10^7 (\text{m}/\text{d}^2)$ ； α 為土壤介質之壓縮係數(Medium compressibility) $[LT^2/M]$ ； β 為水之壓縮係數(Water compressibility) $[LT^2/M]$ ； θ 為土壤之含水量(Water content)； n 為孔隙率(Effective porosity)。

(3-10)式配合地下水系統之邊界條件(Boundary condition)及初始條件(Initial condition)，即可組成一地下水系統的數學表示式，然而，該控制方程式為一非線性偏微分方程式，難以求得解析解，故須以數值方法求解之。在求解(3-10)式時，本研究於空間域採用葛爾金有限元素法(Galerkin finite element methods)進行離散，在時間域則利用有限差分法(Finite difference methods)進行離散。



二、不飽和土壤之水力特性

在考慮不飽和土壤之影響時，須定義地下水位面以下之土壤為飽和土壤，壓力水頭為正值；地下水位面以上則為不飽和土壤，壓力水頭為負值，該區土壤含水量與水力傳導係數都會隨著壓力水頭之改變而改變，如(3-12)式所示

$$K(h) = K_r K_s \quad (3-12)$$

上式中， K 為有效水力傳導係數(Effective hydraulic conductivity)； K_r 為相對傳導係數(Relative conductivity)； K_s 為飽和土壤之水力傳導係數(Saturated hydraulic conductivity)。

在求解(3-10)式時，若為非穩態，則必須決定儲水係數 S 之值，由(3-11)式可知， S 會隨著土壤含水量之改變而改變，因此，若能決定土壤含水量與壓力水頭之關係式，就能得到不飽和土壤中不同位置的儲水係數 S 。

Mualem (1976)推導出相對傳導係數 K_r 及土壤含水量 θ 與壓力水頭 h 之關係，分別如(3-13)式及(3-15)式所示：

$$K_r = \Theta \left[\int_0^\Theta \frac{1}{h(x)} dx \Big/ \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2 \quad (3-13)$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3-14)$$

上式中， θ 為土壤之體積含水量； θ_r 為殘餘含水量(Residual water content)； θ_s 為飽和含水量(Saturated water content)； Θ 為相對含水量(Relative water content)。

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a|h|)^n} \right]^m \quad (3-15)$$

上式中， a 、 n 及 m 為未定係數； h 為壓力水頭。

van Genuchten(1980)將(3-13)、(3-14)及(3-15)式進一步推導，並表示為一般函



數之型式，如(3-16)式、(3-17)式及(3-18)式所示。其中(3-17)稱為土水保持曲線(Soil-water retention curve)

$$\begin{aligned}
 K_r &= \Theta^2 \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \\
 &= \frac{\left\{ 1 - (a|h|)^{n-1} \left[1 + (a|h|)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (a|h|)^n \right]^{m/2}}
 \end{aligned} \tag{3-16}$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a|h|)^n \right]^m}, m = 1 - \frac{1}{n} \tag{3-17}$$

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{-\alpha m (\theta_s - \theta_r)}{1-m} \Theta^{\frac{1}{m}} \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \tag{3-18}$$

不同類型土壤之 θ_s 、 θ_r 、 a 及 m 之參考值可列如表 3-1 (Lin et al. 1979, Thoma et al. 2014) 所示。

表 3-1 不同類型土壤之土水保持曲線參數

土壤類型	θ_s	θ_r	$a(m^{-1})$	m
黏土(Clay)	0.38	0.068	0.00008	1.09
壤土(Loam)	0.43	0.078	0.00036	1.56
坋土(Silt)	0.46	0.034	0.00106	1.37
砂土(Sand)	0.43	0.045	0.00145	2.68
礫石(Gravel)	0.14	0.03	0.0028	1.51

三、初始條件

在求解非線性方程式(3-10)式前，需提供一組壓力水頭來作為迭代過程之初始解，稱為模式之初始條件，數學表示式如(3-19)式所示：

$$h = h_0(x, y, z) \text{ in } R \tag{3-19}$$

上式中， R 表示所要模擬的範圍； h_0 為已知之初始水頭，一般可由現場觀測的第一



筆資料、平均值或穩態模擬之結果等方式給定之。

四、邊界條件

相同的控制方程式若要模擬不同的物理現象，除了正確的推導過程，還必須配合適當的邊界條件，即將邊界上之自然現象化為數學表示式，並且併入(3-46)式之矩陣方程式中，方可加以求解，茲將本研究建立集水廊道數值模式所給定之邊界條件介紹如下。

(一) 細定水頭邊界條件

給定水頭邊界條件 (Dirichlet boundary conditions)，能在特定節點(Node)上給定已知的總水頭(Total head)，常用在水土的交界面像是河流、人工蓄水構造物、湖泊以及海岸線等，數學表示式如(3-20)式所示：

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_d \quad (3-20)$$

上式中， (x_b, y_b, z_b) 為邊界上特定點 b 之空間座標； t 為時間； h_d 為一已知總水頭 $[L]$ ； B_d 為給定水頭邊界。

本研究於河川之地表節點處(即地勢低窪處)，由柏努利定理計算該節點之總水頭如(3-21)式所示：

$$h_d = h_R + z_R \quad (3-21)$$

上式中， h_R 為特定地表節點上之河川水深； z_R 為特定地表節點之高程。

河川之水深 h_R 可由曼寧公式求解，如(3-22)式所示，假設河道為三角形斷面如圖 3-6 所示。

$$Q = AV = \frac{A}{n_R} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3-22)$$



$$A = sy^2 \quad (3-23)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{s \cdot h_R}{2\sqrt{1+s^2}} \quad (3-24)$$

上式中， Q 為河川之流量； s 為河道斷面側坡斜率； A 為河道斷面積； V 為河川之流速； n_R 為曼寧糙度係數，不同狀況之參考值如表 3-2(王如意，1992)所示； R 為水力半徑； P 為濕周； S_0 為床底坡度。

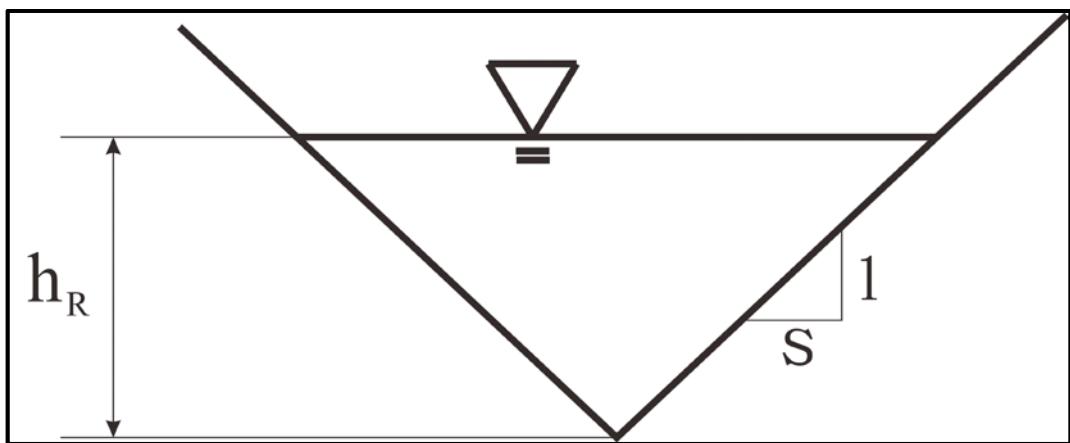


圖 3-6 河道斷面示意圖

表 3-2 曼寧糙度係數表

計算公式： $n_R = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$			
水道條件		數值	
水道材料	土質	n_0	0.02
	岩石		0.025
	細卵石		0.024
	粗卵石		0.028
不規則程度	平滑	n_1	0.00
	微		0.005
	普通		0.01
	極不規則		0.02
斷面變化	無	n_2	0.00
	偶有變化		0.005
	經常變化		0.010~0.015
障礙作用	可忽略	n_3	0.00
	微		0.010~0.015
	顯著		0.020~0.030
	急劇		0.040~0.060
植物	低短	n_4	0.005~0.010
	普通		0.010~0.025
	高大		0.025~0.050
	極高大		0.050~0.100
蜿蜒程度	微	m_5	1.00
	顯著		1.15
	急劇		1.30

(二) 紿定通量邊界條件

給定通量邊界條件(Flux boundary conditions)，能在特定元素(Element)邊界上給定已知流通量(Flux)，常用於已知地表河水入滲至河道底泥(Bottom sediments)或滲漏至地表下介質比例的情況，本研究則以此邊界條件模擬降雨入滲至地表之現象，數學表示式如(3-25)式所示：

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla(h + z) = q_c(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_c \quad (3-25)$$

上式中， (x_b, y_b, z_b) 為邊界上特定點 b 之空間座標；t 為時間； \mathbf{n} 為垂直於邊界向外之向量； \mathbf{K} 為水力傳導度張量；h 為壓力水頭；z 為高程； q_c 為流量 [L/T]； B_c 為



定流量邊界。

(三) 變動邊界條件

變動邊界條件(Variable boundary condition)之「變動」非指隨著時間，而是指在給定一入滲強度時造成地表壓力水頭上升時，給定一特定壓力水頭為上限或下限，由模式自行判定該邊界為給定水頭邊界條件或給定流量邊界條件。

在水份入滲期間土壤漸趨飽和，壓力水頭亦隨之上升，直到地表土壤完全飽和之後，會產生一積水深度(Ponding depth)，理論上，大部份的積水會以地表逕流向下游移動，積水深度不可能無限上升，若以一般給定流量邊界條件來模擬，可能會出現不合理的現象，故變動邊界條件提供使用者在邊界上給定入滲強度如(3-26)式的同时，設定一合理的最大積水深度，若該邊界上節點之壓力水頭大於此一積水深度，則會自動將該節點轉為給定水頭邊界如(3-27)式所示，直到其達西流通量(Darcy flux)小於入滲量，則繼續使用原本的邊界條件，其示意圖如圖 3-7 所示：

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla(h + z) = q_R(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_R \quad (3-26)$$

或

$$h = h_p(x_b, y_b, z_b, t) \text{ on } B_R \quad (3-27)$$

上式中， (x_b, y_b, z_b) 為邊界上特定點 b 之空間座標；t 為時間； \mathbf{n} 為垂直於邊界向外之向量； \mathbf{K} 為水力傳導度張量 $[L/T]$ ；h 為壓力水頭；z 為高程； q_R 為入滲強度 $[L/T]$ ； h_p 為最大積水深度； B_R 為變動邊界。

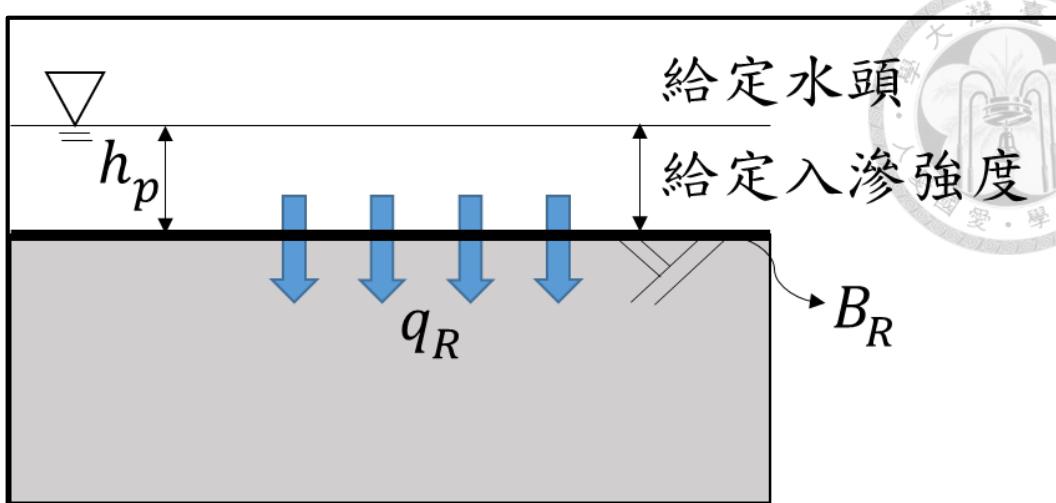


圖 3-7 變動邊界條件用於河道入滲示意圖

本研究將此邊界條件用於旱季時之河道入滲強度之給定，並將期距內河川之最大流量代入(3-22)式，計算河川之最高水位作為其最大積水深度，避免出現過高之河川水位。

綜合以上所述，本研究將河床沖積層表面分為兩區，分別為河道及非河道區域，如圖 3-8 所示，分別為深色之「R」區域與淺色之「G」區域，並將該兩區之補注量分別定義為河道入滲補注量與降雨入滲補注量，兩者相加即為河床垂向入滲量。

本研究採用人工判斷的方式介定河道與非河道區域，參考圖 3-8 之示意圖，在以數值高程模型產生河床沖積層地表面高程，並建構有限元素法三維網格後，可找到一相對於兩岸較低窪之區域，設定該區域為河道，且其表面有一厚約 0.5 公尺之河道底泥層，其水力傳導係數因旱雨季河川流速不同而改變。

河道區域介定完成後，利用上述之邊界條件來給定其河道入滲補注量，旱季時以變動邊界條件給定其河道入滲強度，雨季時則以給定水頭邊界給定之；河道區域以外之非河道區域則以給定通量邊界條件來給定其降雨入滲強度。

河道入滲補注總量及降雨入滲補注總量則須在模擬完成後，將各方向之流速分別乘上其在元素邊界上之投影面積並取其向量長度，並以 Mass and Stiffness Matrix 重新分配至各節點，最後分別將兩區域節點上之流量加總取得。

其中，達西流速向量 \mathbf{V} 之求法為：將 h_i 代入達西公式得到元素邊界各方向之達



西流速如(3-28)式所示(Yeh, 1979)：

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n^e} (\nabla N_i) h_i + \nabla z \right) \quad (3-28)$$

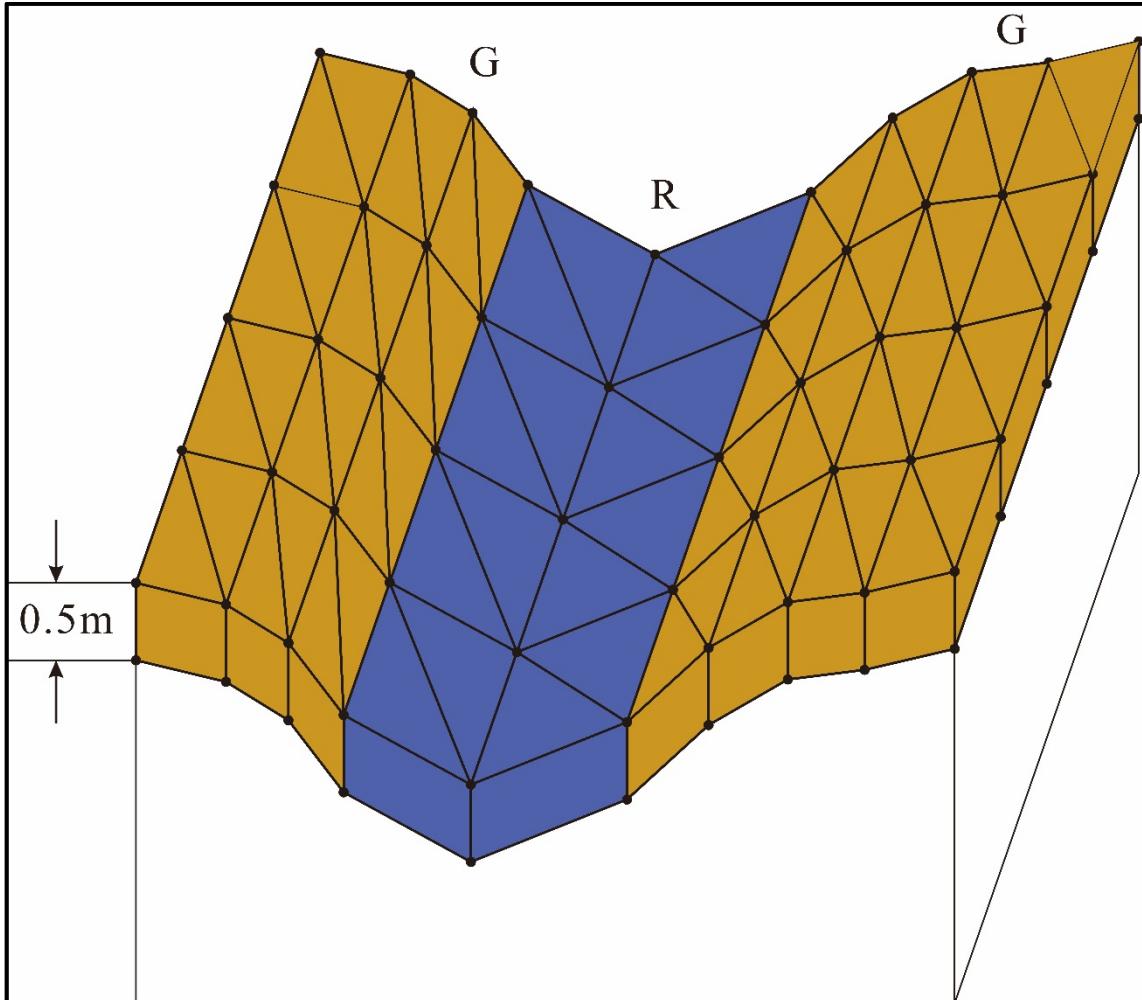


圖 3-8 地表劃分為河道與非河道區域之示意圖

五、集水廊道作為邊界條件之概念化

為了在未知集水廊道集水量情況下，本研究將集水廊道概念化為一矩形斷面之明渠，並配合現有的邊界條件模擬集水廊道造成地下水之流動。

為了在河床沖積層中製造一類似於集水廊道之空間，須在如圖 3-9 所示集水廊道埋深之位置以刪除網格的方式將集水廊道中空部份之元素刪除，並且重新編號(Renumber)所有節點及元素，並配合集水廊道的實際尺寸，在產生網格時將其排

列成如圖 3-9 之形狀且寬度及深度分別等於集水廊道之實際寬度及實際深度。

土壤材質設定方面，如圖 3-9 中灰色之「C」區域，左右兩面及底面之元素為混凝土材質，並令其為均向(Isotropy)，水力傳導係數為一極小值約 0.03(公尺/日)，幾乎不透水；頂面材質則因濾層種類及阻塞程度而有相異於河床沖積層之性質，如圖 3-9 中橘色之「L」區域，本研究亦令其為均向，其水力傳導係數通常小於河床沖積層。

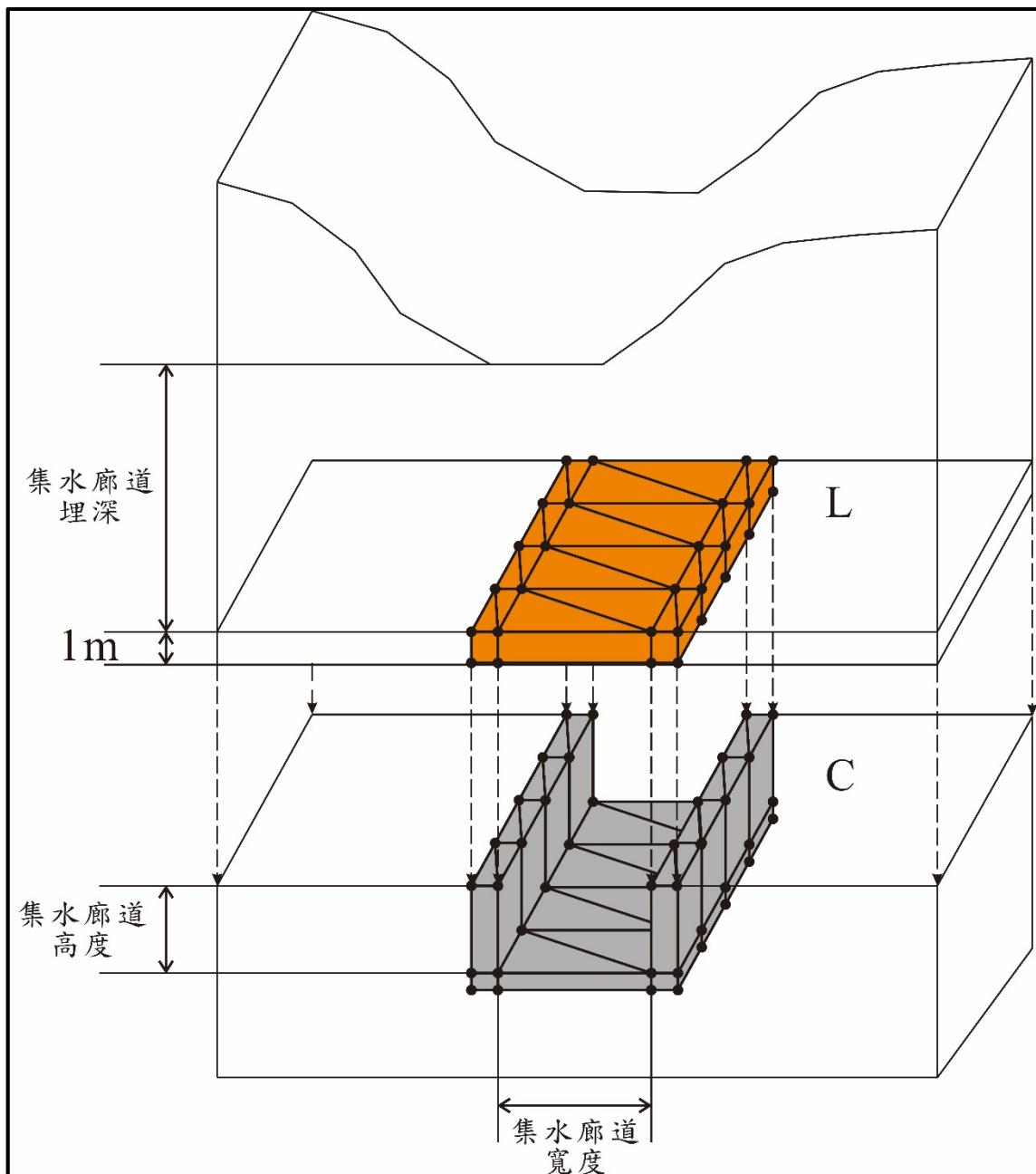


圖 3-9 集水廊道概念化三維示意圖



由於集水廊道集水量未知，且河床沖積層中儲藏之地下水流入集水廊道主要為受重力驅動，故本研究在圖 3-9 中「C」區域混凝土材質元素之內部邊界節點上以給定水頭邊界條件進行集水廊道概念化，如圖 3-10 所示，如此，地下水便藉由位能差進入集水廊道，符合其實際水力特性。

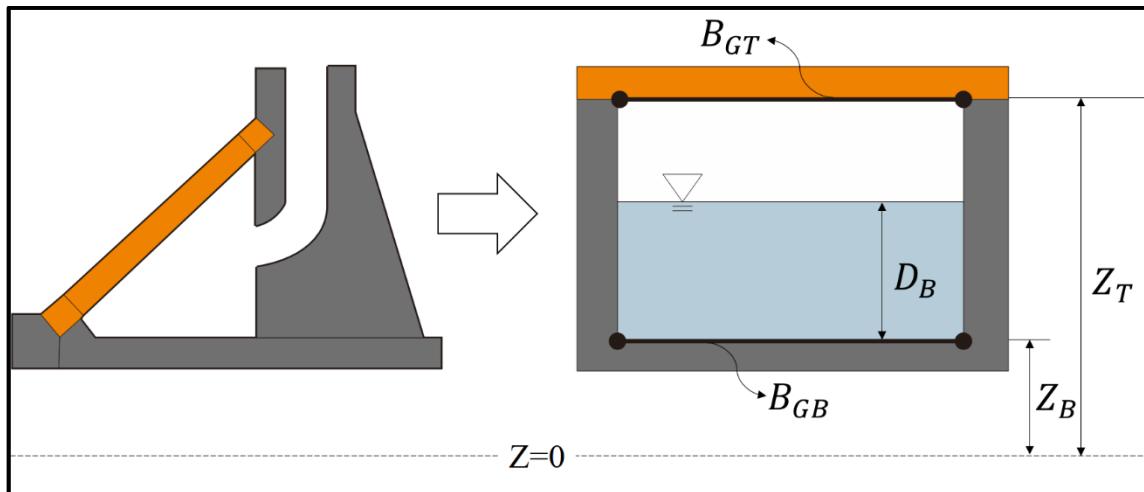


圖 3-10 集水廊道邊界條件概念化示意圖

集水廊道頂部與空氣接觸(即 $P_T = 0$)，可由柏努利方程式(Bernoulli equation)求得其總水頭如(3-29)式所示：

$$h = h_T(x_b, y_b, z_b) = z_T(x_b, y_b, z_b) \text{ on } B_{GT} \quad (3-29)$$

上式中， (x_b, y_b, z_b) 為邊界上 b 點空間座標； h_T 為集水廊道頂部之總水頭； P_T 為集水廊道頂部之壓力水頭(Pressure head)； z_T 為集水廊道頂部之位置水頭(Elevation head)； B_{GT} 為集水廊道頂部邊界。

假設集水廊道內水流流速極緩且各點水深相同，則集水廊道底部總水頭如(3-30)式所示：

$$h = h_B(x_b, y_b, z_b, t) = D_B(t) + z_B(x_b, y_b, z_b) \text{ on } B_{GB} \quad (3-30)$$

上式中， (x_b, y_b, z_b) 為邊界上 b 點空間座標； t 為時間； h_B 為集水廊道底部之總水頭； D_B 為集水廊道底部水深； z_B 為集水廊道底部之位置水頭； B_{GB} 為集水廊道底



部邊界。

集水廊道底部水深則須由迭代的方式，先給定一初始水深，在此條件下由數值模式模擬之集水量代入(3-22)式，可再解得一水深，並重覆上述動作，如此反覆迭代直到收斂，該水深即為 D_B 。

在模擬完成後，將混凝土區域 C 內側邊界上所有節點之計算流量加總，即可得到集水廊道之集水量。

3.3.2 數值模式推導

數值模式之推導共分為以有限元素法進行空間域的離散、以有限差分法進行時間域的離散以及矩陣方程式之求解等三部份，分述如下：

一、有限元素法-空間域的離散

有限元素法的推導主要有變分法(Variational approach)及權重殘差法(Weighted residual approach)兩種，其中變分法雖然數學上的推導較為嚴謹，但因計算繁複，不常應用在實際狀況中；而廣泛應用在工程問題中的權重殘差法又依權重函數(Weighting function)選取方法的不同分為數種，本研究即採用其中的葛爾金有限元素法(徐年盛，2015)。

要利用有限元素法求解地下水水流問題，須將模擬範圍分割成若干元素(Element)及節點(Node)組成之格網(Mesh)，並為每個元素及節點指定適當的編號，以進行後續計算。Lin (1997)將三維之元素形式分為六面體 (Hexahedron)、五面體 (Prism or Wedge) 及四面體 (Tetrahedron)；節點編號則以順時針且由下而上之原則指定，如圖 3-11 所示。

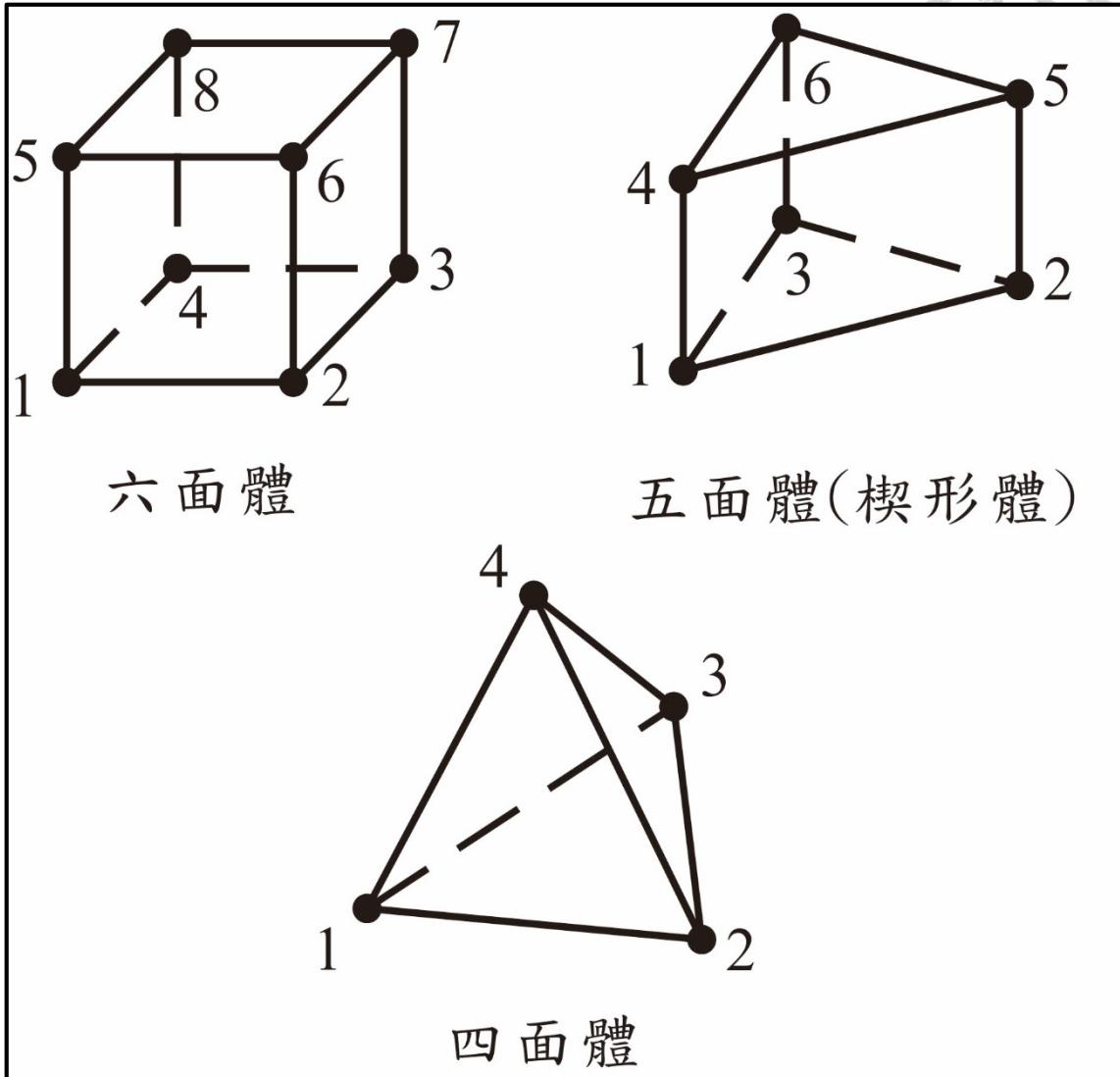


圖 3-11 各種形式的元素及其節點編號之指定順序

假設地下水系統水頭真值 $h(x, y, z, t)$ 之試函數(Trial function) $\hat{h}(x, y, z, t)$ 可表為定義域內的每一個節點水頭值 $h_i(t)$ 與基底函數(Basis function) $N_i(x, y, z)$ 乘積的加總，如(3-31)式所示：

$$h(x, y, z, t) \approx \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) N_i(x, y, z) \quad (3-31)$$

上式中， n 為定義域內之總節點數。

將(3-31)式代入(3-10)式可得其離散式如(3-32)式：



$$L(\hat{h}) = \varepsilon \neq 0 \quad (3-32)$$

上式中， ε 為殘差(Residual)。

當 \hat{h} 為正確解時殘差 ε 為零，故在權重殘差法中，為了得到殘差之最小值，須選定一適當之權重函數 W_i ，迫使殘差之積分值為零：

$$\int_R W_i L(\hat{h}) dR = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3-33)$$

若令權重函數 W_i 等於前述之基底函數 N_i ，即為葛爾金有限元素法。

將(3-10)式代入(3-33)式並利用格林定理 (Green's theorem) 展開，可得：

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \left[\int_R N_i S N_j dR \right] \frac{dh_j}{dt} + \sum_{j=1}^n \left[\int_R (\nabla N_i) \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla N_j) dR \right] h_j \\ &= - \int_R (\nabla N_i) \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla z) dR + \int_B \mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla (h + z) N_i dB, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3-34)$$

首先考慮單一元素水頭真值 $h^e(x, y, z, t)$ 之試函數(Trial function)可表為(3-35)

式：

$$h^e(x, y, z, t) \approx \hat{h}^e(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^{n^e} h_j^e(t) N_j^e(x, y, z) \quad (3-35)$$

上式中， $h_j^e(t)$ 為該元素各節點之水頭； n^e 為該元素包含的總節點數； $N_j^e(x, y, z)$ 為基底函數。

若定義域所分割元素，具有連續性(Continuity)及完整性(Completeness)，可先分別計算每一元素之單位矩陣方程式，再組合(Assemble)成一代表整個定義域的總體矩陣方程式(Global matrix function)，即可將(3-34)式表為所有元素總和之型式如下：

$$\left. \begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^{n^e} \left(\int_{R^e} N_i^e S N_j^e dR \right) \frac{dh_j^e}{dt} \\
 & + \sum_{j=1}^{n^e} \left[\int_{R^e} (\nabla N_i^e) \cdot \mathbf{K}^e \cdot (\nabla N_j^e) dR \right] h_j^e \\
 & + \int_{R^e} (\nabla N_i^e) \cdot \mathbf{K}^e \cdot (\nabla z) dR \\
 & - \int_{B^e} \mathbf{n} \cdot \mathbf{K}^e \cdot \nabla (h + z) N_i^e dB = Q_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, n^e
 \end{aligned} \right\} = 0 \quad (3-36)$$



上式中， m 為定義域中之元素總數，(3-36)式亦可表示為單一元素之單位矩陣方程式可表如(3-37)式：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=1}^{n^e} \left(\int_{R^e} N_i^e S N_j^e dR \right) \frac{dh_j^e}{dt} \\
 & + \sum_{j=1}^{n^e} \left[\int_{R^e} (\nabla N_i^e) \cdot \mathbf{K}^e \cdot (\nabla N_j^e) dR \right] h_j^e \\
 & + \int_{R^e} (\nabla N_i^e) \cdot \mathbf{K}^e \cdot (\nabla z) dR \\
 & - \int_{B^e} \mathbf{n} \cdot \mathbf{K}^e \cdot \nabla (h + z) N_i^e dB = Q_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, n^e
 \end{aligned} \quad (3-37)$$

上式中， Q_i^e 為特定元素 e 之邊界流量。

本研究選用楔形元素建構三維網格，且為了方便後續積分之計算，須進行座標轉換將以 $x - y - z$ 座標表示元素之基底函數 $N_j^e(x, y, z)$ 轉換為以 $\xi - \eta - \zeta$ 座標表示，如圖 3-12 所示，楔形元素 e 之基底函數 $N_j^e(\xi, \eta, \zeta)$ 如表 3-3 所示。

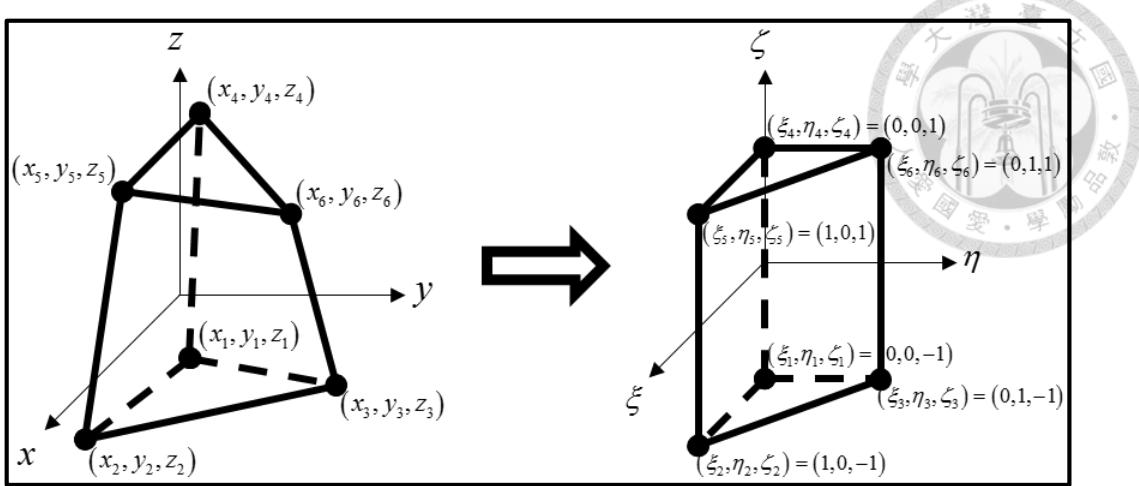


圖 3-12 楔形元素座標轉換示意圖

表 3-3 楔形元素之基底函數

N_1^e	N_2^e	N_3^e
$(1-\xi-\eta)(1-\zeta)$	$\xi(1-\zeta)$	$\eta(1-\zeta)$
N_4^e	N_5^e	N_6^e
$(1-\xi-\eta)(1+\zeta)$	$\xi(1+\zeta)$	$\eta(1+\zeta)$

將(3-37)式寫成矩陣型式可得(3-38)式：

$$[M^e] \left\{ \frac{dh^e}{dt} \right\} + [K^e] \{h^e\} = \{G^e\} + \{B^e\} + \{Q^e\} \quad (3-38)$$

上式中， $\left\{ \frac{dh^e}{dt} \right\}$ 和 $\{h^e\}$ 分別為該元素各節點 j 上壓力水頭時間導數 $\frac{dh}{dt}$ 和壓力水頭 h 之行向量； $[M^e]$ 為元素儲水矩陣(Element capacitance matrix)； $[K^e]$ 為元素傳導矩陣(Element conductance matrix)； $\{G^e\}$ 表示元素重力向量； $\{B^e\}$ 為元素外邊界向量； $\{Q^e\}$ 為元素內邊界流量向量。

將全部元素矩陣方程式進行組合，可得到總體矩陣方程式如(3-39)式：



$$[M] \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + [K] \{h\} = \{F\} \quad (3-39)$$

上式中， $\left\{ \frac{dh}{dt} \right\}$ 和 $\{h\}$ 為各節點 j 上壓力水頭時間導數 $\frac{dh}{dt}$ 和壓力水頭 h 之行向量； $[M]$ 為總體儲水矩陣 (Global capacitance matrix)； $[K]$ 為總體傳導矩陣 (Global conductance matrix)； $\{F\}$ 為載重向量 (Load vector)。

二、有限差分法-時間域的離散

(3-39)式為具有壓力水頭時間導數向量 $\left\{ \frac{dh}{dt} \right\}$ 之常微分方程組，採用有限差分法進行時間域之離散，由微積分均值定理 (Istok, 1989)，可將 $\left\{ \frac{dh}{dt} \right\}$ 改寫如(3-40)式：

$$\left\{ \frac{dh}{dt} \right\}_\xi = \frac{\{h\}_\xi - \{h\}_t}{\xi - t} = \frac{\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t}{\Delta t} \quad (3-40)$$

上式中， ξ 為 t 與 $t + \Delta t$ 之間某一時刻。

若令 $\omega = \frac{\xi - t}{\Delta t}$ ， ξ 時刻之壓力水頭向量 $\{h\}_\xi$ 亦可改寫如(3-41)式：

$$\{h\}_\xi = (1 - \omega) \{h\}_t + \omega \{h\}_{t+\Delta t} \quad (3-41)$$

同理，載重向量亦可表示如(3-42)式：

$$\{F\}_\xi = (1 - \omega) \{F\}_t + \omega \{F\}_{t+\Delta t} \quad (3-42)$$

上式中， ω 為內插因子 (Interpolation factor)，本研究採用 $\omega = 1$ ，即後差分法 (Backward difference method)； ξ 為 t 與 $t + \Delta t$ 之間某一時刻

將(3-40)式、(3-41)式及(3-42)式代入(3-39)式即可將該式化簡為(3-43)式：

$$([M] + \Delta t [K]) \{h\}_{t+\Delta t} = [M] \{h\}_t + \Delta t \{F\}_{t+\Delta t} \quad (3-43)$$

令

$$[C(h)] = [M] + \Delta t [K] \quad (3-44)$$



$$\{A\} = [M]\{h\}_t + \Delta t \{F\}_{t+\Delta t} \quad (3-45)$$

最後將已知水頭邊界條件併入 $\{A\}$ 即可得到非線性系統方程式如下式(3-46)：

$$[C(h)]\{h\} = \{A\} \quad (3-46)$$

上式中， $[C(h)]$ 為已知係數矩陣； $\{h\}$ 為未知向量； $\{A\}$ 為已知向量。

三、矩陣方程式之求解

(3-46)式之矩陣方程式，由於其中之 $[C(h)]$ 為壓力水頭 h 之函數，故為一非線性矩陣方程式。為了求解此非線性矩陣方程式，本研究採用 Picard 迭代法，先將初始猜值 $\{h^0\}_t$ 代入(3-44)式，使(3-46)式簡化為可求解之線性方程式，如(3-47)式所示：

$$[C(h^{k-1})]_{t+\Delta t} \{h^k\}_{t+\Delta t} = [M]_{t+\Delta t} \{h\}_t + \Delta t \{F\}_{t+\Delta t} \quad (3-47)$$

上式中， k 為迭代次數。

本研究採用逐點迭代(Pointwise iteration)之方法求解(3-47)式產生之線性矩陣方程式。在求解出 $\{h^k\}_{t+\Delta t}$ 後，若與 $\{h^{k-1}\}_{t+\Delta t}$ 之誤差在可接受範圍內，則停止迭代；若誤差較大，則引入一鬆弛係數 ω (Relaxation factor)得到新的猜測值 $\{h^{k+1}\}_{t+\Delta t}$ ，如(3-48)式所示，將新的猜測值代回(3-47)直至收斂，即為該非線性矩陣方程式正確之數值解 $\{h\}_{t+\Delta t}$ 。



$$\{h^{k+1}\}_{t+\Delta t} = \omega \{h^k\}_{t+\Delta t} + (1-\omega) \{h^{k-1}\}_{t+\Delta t} \quad (3-48)$$

有限差分法在空間域上僅能求解不連續的節點，而有限元素法不僅可提供空間上連續的解，且可用於異向性(Anisotropy)、異質性(Heterogeneity)的界面，不受複雜邊界的影響，並可在模擬範圍的不同區塊依研究需求建立不同密度的網格，增加模擬結果之精確度及減少電腦程式大量運算之時間。

3.3.3 模式程式碼設計

Yeh(1987)發展出包含了模擬地下水水流的 3DFEMWATER 及模擬水溶性汙染物傳輸的 3DLEWASTE 之地下水水流數值模式 FEMWATER，其控制方程式如(3-49)式所示：

$$\frac{\rho}{\rho_0} S \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\mathbf{K} \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right] + \frac{\rho^*}{\rho_0} W \quad (3-49)$$

上式中， S 為儲水係數(Storage coefficient)； ρ 為汙染物濃度不為 0 時之液體密度； ρ_0 為汙染物濃度為 0 時之液體密度； ρ^* 為注入或抽出之液體密度； W 為內部的點源(Point source)或點匯(Point sink)。

若不考慮汙染物濃度造成之液體密度變化且無抽水井之影響，則可將(3-49)簡化為本研究之控制方程式(3-10)式，此即表示本研究之控制方程式為 FEMWATER 控制方程式之特例，因此本研究乃採用 FEMWATER 數值模式之程式碼作為本研究數值模式之程式碼，並採用 GMS 作為前處理與後處理之視覺化平台，另外，本研究採用 MATLAB 程式語言以產生 FEMWATER 之輸入檔或處理 FEMWATER 之輸出檔，以進行數值模式之參數檢定。



3.4 參數檢定優選模式建立

在數值模式建置完成後，須進行模式之參數檢定，以各輸入參數為決策變數(Decision variable)、輸出之地下水位及集水廊道集水量為狀態變數(State variable)，將參數檢定之過程公式化(Formulation)，寫成一優選模式(Optimization model)之形式，其中以模擬值與實測值之誤差平方和最小為目標函數(Objective function)；各輸入參數合理範圍則視為優選模式之限制式(Constraints)。

3.4.1 參數檢定優選模式公式化

一個完整的優選模式須包含決策變數、目標函數以及限制式三部份，故本研究將集水廊道附近地下水水流數值模式之輸入參數及輸出參數公式化，寫成優選模式之型式，茲將其過程分述如下：

一、決策變數

本研究之參數檢定優選模式選定七項決策變數，包括水力傳導係數、土壤介質之壓縮係數、土壤之不飽和參數、下游邊界給定水頭平均值、河川水位、河道入滲強度以及降雨入滲比例，分別詳述如下：

(一) 水力傳導係數

本研究假設河床沖積層中之地下水僅有水平和垂直之移動，故水力傳導係數矩陣可化簡如(3-50)式所示：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}' & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy}' & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}' \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

上式中， K_{xx} 、 K_{yy} 及 K_{zz} 分別為 x 、 y 及 z 方向之水力傳導係數； K_{xy} 、 K_{xz} 及



K_{yz} 則分別為 xy 、 xz 及 yz 方向之水力傳導係數； K_{xx}' 、 K_{yy}' 及 K_{zz}' 分別為旋轉至主軸方向後 x 、 y 及 z 方向之水力傳導係數。

水力傳導係數影響了地下水位之長期趨勢，在各個位置的大小設定亦對於集水量以及周圍地下水位有不同的影響，河床沖積層為之水力傳導係數設定為水平及垂直具有異向性， K_{xx} 及 K_{yy} 決定了地下水在其間水平移動之速度，其值約為 K_{zz} 之三倍， K_{zz} 則決定了垂直向下移動的速度，若為集水廊道所在之地層， K_{zz} 越大則集水廊道集水量越大，周圍之地下水位則會越低；河道底泥層之水力傳導係數則設定為各方向有等向性，主要影響水由地表入滲至河床沖積層中之速度，若該值越大則由地表進入河床沖積層水量越多，與集水量與地下水位皆成正比；集水廊道入口濾層阻塞之水力傳導係數亦設為具有等向性，若其值越大，則進入集水廊道水量越大，集水量亦隨之增大，附近之地下水位則隨之降低。綜上所述，任何一處之水力傳導係數都對模擬結果之長期趨勢有相當大的影響，故將其選定為決策變數。

(二) 土壤介質之壓縮係數

由 3.3.2 之推導過程所示，儲水係數 S 越大，邊界條件對於地下水系統內部之影響愈小，反之則愈大。儲水係數 S 之表示方法如(3-11)式所示，其中 n 、 θ 及 $\frac{d\theta}{dh}$ 由不飽和之土壤參數決定，水之壓縮係數 β 可設為定值，約等於 $5.89 \times 10^{-20} (\text{m} \cdot \text{day}^2 / \text{kg})$ ，故須以土壤介質之壓縮係數 α 作為決策變數進行調整，以決定邊界條件隨時間的變動量影響整個地下水系統之程度。

(三) 不飽和土壤之土水保持曲線參數

如 3.3 所述不飽和土壤之土水保持曲線參數包含未定係數 a 及 m 、飽和含水量 θ_s 以及殘餘含水量 θ_r ，隨著這些參數的不同，不飽和層中之水力傳導係數 K 及儲水係數 S 亦會隨之變化，故將其選為決策變數進行調整。



(四) 下游邊界給定水頭平均值

由於下游邊界無觀測井，故為一未知邊界，但下游給定水頭邊界之平均值 $\overline{h_D^{given}}$ 與觀測井 E 周圍之水力傳導係數為主要影響觀測井 E 之模擬水位長期趨勢之因素，故須以觀測井 E 之觀測水位與模擬水位長期趨勢之差異作為依據，將下游邊界給定水頭平均值作為決策變數在穩態模式中調整之。在取得 $\overline{h_D^{given}}$ 後，便能由與其他觀測井平均水位之比例關係，求得下游邊界給定水頭之水位歷線，將其作為暫態模式之下游邊界給定水頭條件。

(五) 河川水位

由於區域內無河川流量站，故本研究於雨季時，直接於地表節點給定該點總水頭，故將河川水位作為決策變數，在穩態模擬中確定河川水位之長期趨勢；接著在暫態模擬中調整河川水位隨時間之細部變化以擬合觀測水位歷線。

(六) 河道入滲強度

由於區域內無河川流量站，故本研究於旱季時，將河道入滲強度以變動邊界條件設定於河道範圍之地表元素邊界上，故其亦為一決策變數，在穩態模擬中確定河道入滲強度之長期趨勢；接著在暫態模擬中調整河道入滲強度隨時間之變化以擬合觀測水位歷線。

(七) 降雨入滲比例

一般而言，大部份的降雨會在落至地表後轉為地表逕流之型式，故入滲至河床沖積層中之總量為一介於 0 至 1 間之固定比例，調整此一入滲比例 i 主要影響降雨量入滲至河床沖積層中之總量，故須作為決策變數調整之。

綜上所述，將各決策變數與模擬水位及集水廊道集水量之正比反比關係整理如所示。

表 3-4 各決策變數與模擬水位及集水廊道集水量之正比反比關係

決策變數		對目標函數之影響		
		地下水位	集水量	模擬結果 隨時間變化
水力傳導係數	河床沖積層	反比	正比	-
	河道底泥層	正比	正比	-
	集水廊道入口	反比	正比	-
土壤介質壓縮係數		-	-	反比
不飽和土壤參數		視土壤種類而定		
下游邊界給定水頭平均值		正比	-	-
河川入滲	河川水位	正比	正比	正比
	河道入滲強度	正比	正比	正比
降雨入滲比例		正比	正比	-

二、目標函數

本研究參數檢定優選模式之目標函數設定為實際觀測值與模式模擬值之誤差平方和為最小，由於地下水位與集水廊道集水量之單位不同，故需分別除以其平均值的平方，亦即將其無因次化(Dimensionless)，並分別乘上一加權因子(Weighting factor)，如(3-51)式所示：

$$\text{Min } Z = (1 - \alpha) \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^T \frac{(h_{i,j}^{obs} - h_{i,j}^{sim})^2}{h_j^{obs^2}} \right] + \alpha \sum_{i=1}^T \frac{(Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{Q^{obs^2}} \quad (3-51)$$

上式中， T 為研究總時距； $h_{i,j}^{obs}$ 為觀測井 j 於時間 i 時之觀測水位； $h_{i,j}^{sim}$ 為時間 i 時模式於觀測井 j 之位置模擬所得之地下水位； Q_i^{obs} 為集水廊道之集水量觀測值； Q_i^{sim} 為模式模擬之集水廊道集水量； α 為一權重值，介於 0 與 1 之間，表示目標函數對各項模擬結果的偏重程度，本研究取 $\alpha = 0.5$ ，即不偏重任何一項。

三、限制式

本研究參數檢定優選模式之限制式除了計算狀態變數之限制外，各決策變數



亦有其合理範圍，包括水力傳導係數、土壤之不飽和參數、土壤介質之壓縮係數、下游邊界給定水頭平均值、河川水位、河道入滲強度以及降雨入滲比例，茲分述如下：

(一) 計算狀態變數之限制模式

目標函數中之狀態變數 h_i^{sim} 須由求解(3-46)式才可得到，如圖 3-13 之示意圖所示，亦即本研究所建立之數值模式為限制式之一。

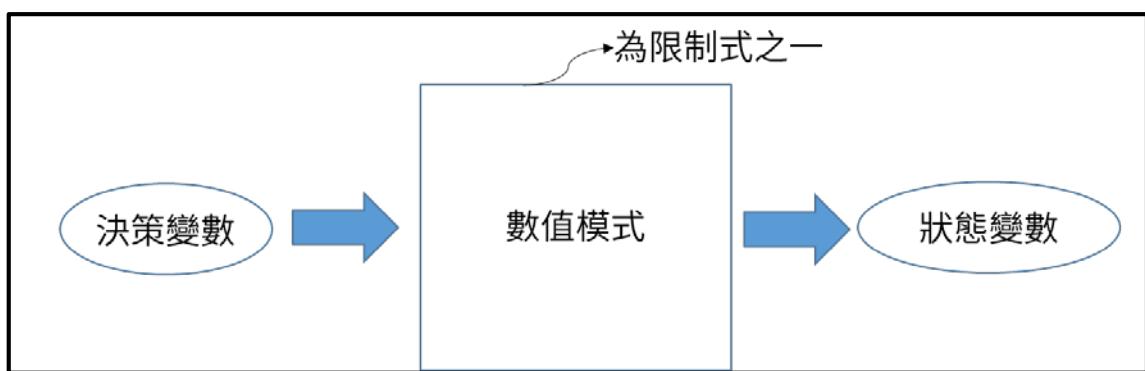


圖 3-13 計算狀態變數之限制模式示意圖

目標函數中之集水廊道集水量 Q_i^{sim} 則須將各方向之流速分別乘上其在元素邊界上之投影面積並取其向量長度，並以 Mass and Stiffness Matrix 重新分配至各節點，最後加總取得，故此計算過程亦為限制式之一。

其中，達西流速向量 \mathbf{V} 之求法為：將 h_i^{sim} 代入達西公式得到元素邊界各方向之達西流速如(3-52)式所示(Yeh, 1979)：

$$\mathbf{V} = -\mathbf{K} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n^e} (\nabla N_i) h_i^{sim} + \nabla z \right) \quad (3-52)$$

(二) 水力傳導係數

一般而言， K_{xx} 及 K_{yy} 為 K_{zz} 之三倍。而無論為何種方向之水力傳導係數，在特定土壤中都有一定的合理範圍，如(3-53)式所示：

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (3-53)$$

上式中， K 為特定土壤之水力傳導係數 $[L/T]$ ； K_{\min} 為特定土壤之水力傳導係數下限 $[L/T]$ ； K_{\max} 為特定土壤之水力傳導係數上限 $[L/T]$ 。不同土壤之水力傳導係數參考值及其合理範圍如圖 3-14 (Bear, 1979) 所繪。

$K(m/s)$	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}		
滲透性	能通透			半通透			無法通透									
含水層	佳			差			無									
砂 磨	礫石	淨砂、砂及礫石		極細砂、淤泥、黃土、壤土												
黏土及 有機質				泥煤	層狀黏土		富黏土、未風化黏土									
岩 石	破碎岩體			儲油岩			砂岩	石灰岩、白雲石		角礫岩、	花崗岩					

圖 3-14 不同土壤之水力傳導係數參考值及其合理範圍

(三) 土壤介質之壓縮係數

Fisher (2008) 將各種土壤介質之壓縮係數 α 合理範圍列如表 3-5 所示，代入 (3-11) 即得儲水係數 S 。

表 3-5 各種土壤介質之壓縮係數合理範圍

土壤介質之壓縮係數 $\alpha (m \cdot day^2/kg)$	黏土	$1.34 \times 10^{-16} \sim 1.34 \times 10^{-18}$
	砂土	$1.34 \times 10^{-17} \sim 1.34 \times 10^{-19}$
	礫石	$1.34 \times 10^{-18} \sim 1.34 \times 10^{-20}$

由表 3-5 可知土壤介質之壓縮係數 α 因土壤種類之不同而有不同的合理範圍，可表示如 (3-55) 式。

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \quad (3-54)$$

上式中， α 為特定土壤介質之壓縮係數 $[LT^2/M]$ ； α_{\min} 為特定土壤介質之壓縮係數下限 $[LT^2/M]$ ； α_{\max} 為特定土壤介質之壓縮係數上限 $[LT^2/M]$ 。

(四) 不飽和層之土水保持曲線參數

一般而言，飽和含水量 θ_s 之值等於孔隙率 n ，其參考值如圖 3-15 (Bear, 1979) 所示，可寫成限制式如 (3-54) 式：

$$\theta_s = n$$

$$(3-55)$$

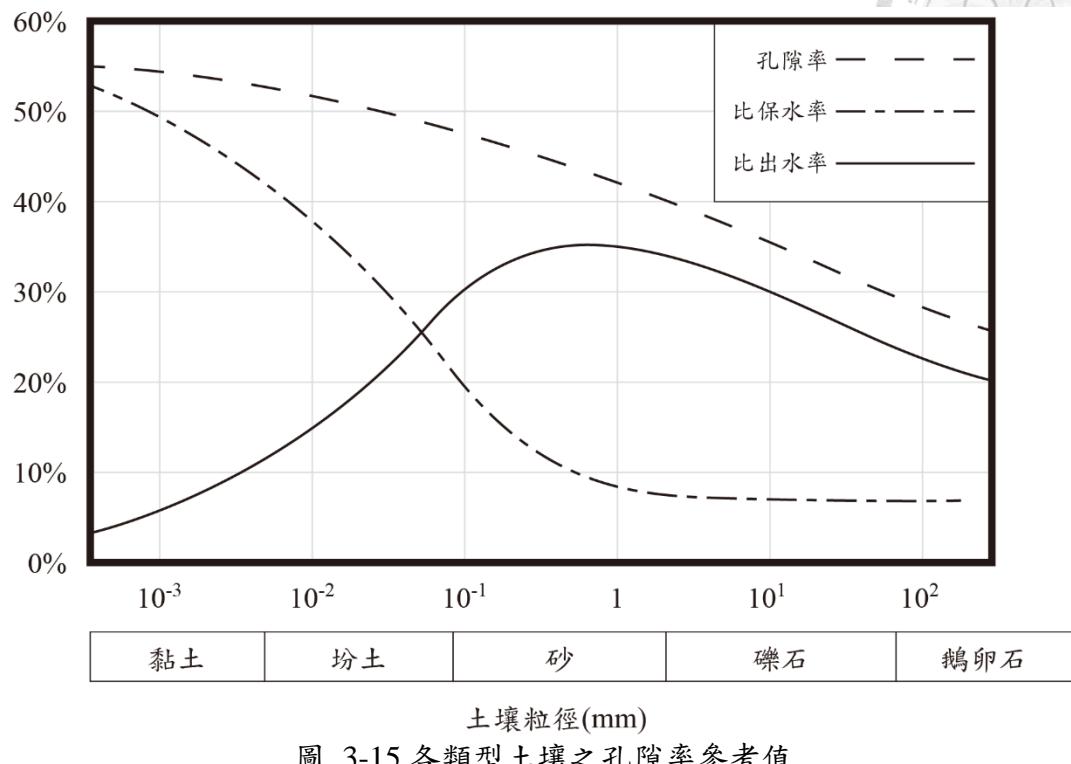


圖 3-15 各類型土壤之孔隙率參考值

(五) 下游邊界之給定水頭平均值

一般而言，地下水位面需限制於岩盤高程 Z_B 與地表高程 Z_G 之間，如(3-56)式及圖 3-16 所示：

$$Z_B < \overline{h_D^{given}} < Z_G \quad (3-56)$$

上式中， $\overline{h_D^{given}}$ 為下游邊界之給定水頭平均值 $[L]$ 。

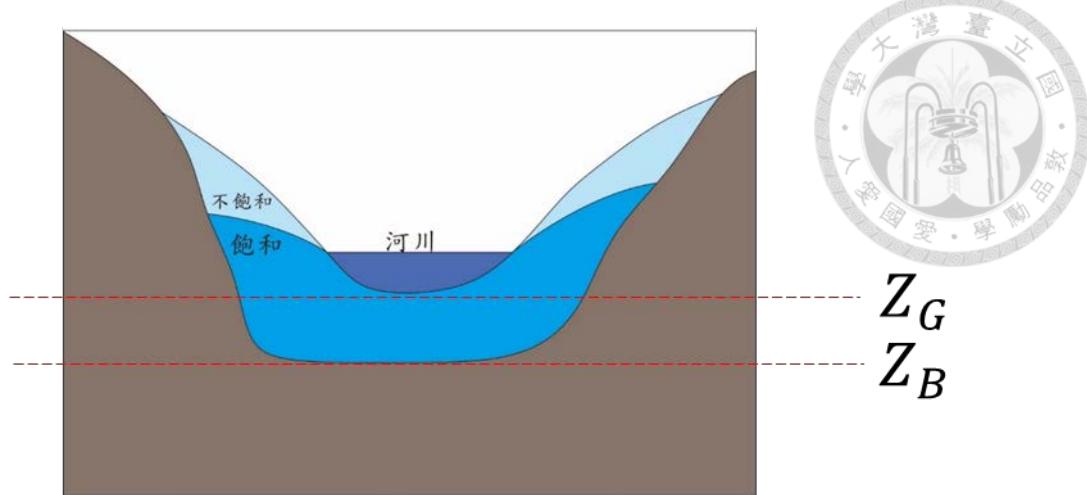


圖 3-16 下游邊界之給定水頭平均值限制式示意圖

(六) 河川水位

將圖 4-8 中之最大河川流量代入(3-22)式可解得之最大河川水位 $h_{R,\max}$ ，可寫為限制條件如(3-57)式所示：

$$0 \leq h_R \leq h_{R,\max} \quad (3-57)$$

上式中， h_R 為給定之河川水位 [L]。

(七) 河道入滲補注強度

假設模擬範圍內地下水不會滲出地表，河道入滲補注強度之下限可設為 0；令某河段河床底泥層之面積為 A ，故上限可設為 $q_{R,\max} = Q_{R,\max}/A$ ，寫成限制式可表示如(3-58)式：

$$0 \leq q_R \leq q_{R,\max} \quad (3-58)$$

上式中， q_R 為給定之河道入滲補注強度 [L/T]。

(八) 降雨量之入滲比例

本研究參考郭振泰(1992)之研究，假設有一特定比例 i 之雨水入滲至地表下，

另一部份則變成地表逕流，如(3-59)式所示：

$$I_p = i(P - 0.7E) \quad (3-59)$$

上式中， I_p 為降雨之入滲強度 [L/T]； i 為降雨入滲比例； P 為雨量站所測得之降雨強度 [L/T]； E 為氣象局所得測之蒸發強度 [L/T]。

3.4.2 參數檢定優選模式求解

本小節將介紹參數檢定優選模式之求解方法以及本研究用以量化率定完成後數值模式模擬準確度之評估指標，如下所述：

一、求解方法

求解優選模式之方法有簡化複雜優選問題為較簡單子問題進行求解的動態規劃法(Dynamic programming, DP)、模仿動物自然界生物進化機制求解最優解的遺傳演算法(Genetic algorithm, GA)、以固體原子加熱及冷卻隨內能變化移動的原理在固定時間內找到搜尋空間內最優解的模擬退火法(Simulated annealing, SA)以及適合用於任何優選問題求解的試誤法(Trial and error)。由於本研究數值模式之輸入參數眾多而複雜，且最難以掌握之河川水位或河道補注強度歷線，仍需由人工判釋較為理想，故本研究選用試誤法進行求解。

試誤法求解參數檢定優選模式之流程如圖 3-17 所示，主要分為兩階段，第一階段包含調整土壤參數(水力傳導係數以及不飽和土壤參數)、集水廊道附近地下水系統水平衡分析、調整邊界條件(河川水位或入滲強度之長期趨勢、下游邊界給定水頭平均值以及降雨入滲之比例)以及建立集水廊道附近地下水水流穩態數值模式；第二階段則包括調整土壤介質之壓縮係數和河川水位或入滲強度隨時間之變化量以及建立集水廊道附近地下水水流暫態模式。茲將各階段迭代過程詳述如下：



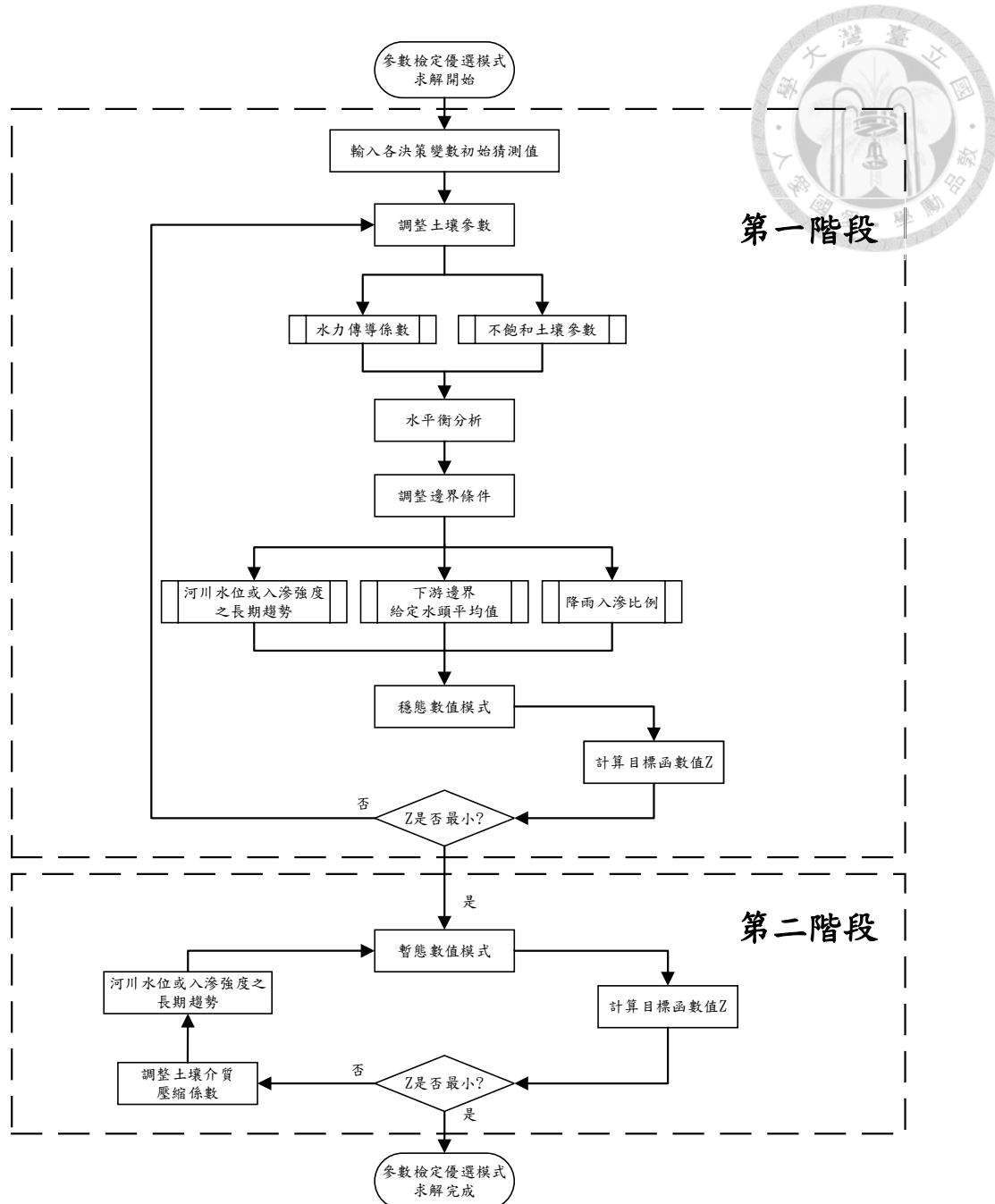


圖 3-17 參數檢定優選模式之求解流程圖

(一) 第一階段

首先，第一次迭代直接代入各決策變數初始猜測值進行集水廊道附近地下水系統水平衡分析，接著建立集水廊道附近地下水之穩態模式，比較其與地下水系統水平衡分析所得之結果，計算目標函數值 Z ，並進行水力傳導係數以及不飽和土壤參數等決策變數之調整，調整後之土壤參數則重新用以進行地下水系統水平衡分



析，接著調整河川水位或入滲強度之長期趨勢、下游邊界給定水頭平均值以及降雨量之入滲比例，再度輸入穩態數值模式，比較地下水系統水平衡之結果並計算 Z 值，並再回到調整土壤參數之步驟，如此反覆迭代，直到 Z 值不再下降，則繼續進行第二階段。

上述之流程在調整土壤參數時主要調整河床沖積層以及河道底泥層之水力傳導係數，並優先調整集水廊道所在區域之水力傳導係數，以擬合集水廊道周圍觀測井之平均觀測水位與模擬水位；接著調整集水廊道所在河段之河川水位或入滲強度之長期趨勢，以擬合集水廊道之平均集水量；最後調整下游邊界之給定水頭平均值、其他觀測井區域及其河道底泥層之水力傳導係數，擬合該區域觀測井之平均觀測水位與模擬水位。不飽和土壤參數則參考表 3-1 之內容，找出各區最適合之土壤種類。

(二) 第二階段

在完成第一階段後，已得到最佳之土壤參數組合，第一次迭代直接計算目標函數值 Z ，接著調整土壤介質之壓縮係數以及河川水位或入滲強度隨時間之變化量，重新輸入暫態數值模式，再次計算目標函數值 Z ，如此反覆迭代直至目標函數值 Z 不再下降，則完成參數檢定優選模式之求解。

該階段主要調整河川水位或入滲強度隨時間之變動量及土壤介質之壓縮係數，此時通常有大量之歷線資料需要輸入在每一個節點或面上，若以手動方式逐一修改，必會耗費大量時間，且錯誤率高。故本研究配合 MATLAB 程式語言進行程式設計直接將所需邊界條件資料一次寫入模式之輸入檔中；模擬完成後，再直接由 MATLAB 程式語言讀取模式之輸出檔所記錄之計算結果，同時計算模擬水位、模擬集水量、邊界入流或出流量與目標函數值 Z 並進行繪圖，方便與地下水水平衡結果進行比較。

本研究建立之集水廊道附近地下水流數值模式之率定方法為耗費人力之試誤



法提供一較有效率之流程，可大幅縮短人工以試誤法進行該數值模式之參數檢定時設定邊界條件及繪製模擬結果圖所花費之時間，及減少輸入之錯誤率，同時提升優選模式結果之精確度。

二、誤差評估指標

在評估一個模式之模擬結果是否準確時，常會以評估指標來量化其準確度，本研究在率定完成後，以均方根誤差(Root mean square error, RMSE)、相關係數(Correlation coefficient, CC)以及效率係數(Coefficeint of efficiency, CE)呈現數值模式模擬結果之準確度，茲將此三種評估指標分別介紹如下：

(一) 均方根誤差

均方根誤差值愈小則表示模式的準確度愈高，其特性為與實際數據具有相同的單位，並平方放大誤差，適合用以突顯較高的誤差值或中高數值間的誤差(張斐章與張麗秋，2009)，其公式如(3-60)式所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (O_t - S_t)^2} \quad (3-60)$$

上式中， $RMSE$ 為均方根誤差； N 為資料總筆數； O_t 為 t 時間之觀測值； S_t 為 t 時間之推估值。

(二) 相關係數

由(3-61)式可知，相關係數常用於表示兩組數列間之相關程度，其值介於-1 與 1 之間，故可由此瞭解觀測值與推估值間之相關性，相關係數愈接近 1 則代表模式準確性愈高，本研究以該係數表示推估值反應觀測值趨勢之準確度。



$$CC = \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})(S_t - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (S_t - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})^2}} \quad (3-61)$$

上式中， CC 為相關係數； \bar{O} 為觀測值之平均； \bar{S} 為推估值之平均。

(三) 效率係數

由(3-62)式可知，當效率係數之值愈接近 1 時，推估值與觀測值之誤差相對於觀測值之變異量愈小，模式模擬的精確度愈高，故本研究以該係數表示推估值之誤差相對觀測值之變異量是否明顯。

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3-62)$$

上式中， CE 為效率係數。

第四章 數值模式率定方法應用



本章首先概述研究區域之相對位置及其水文觀測站，接著依所收集之地質相關資料建立模擬範圍之水文地質概念模型，最後利用該水文地質模型進行本研究建立之數值模式率定方法之實際應用，並針對模擬結果進行討論。

4.1 研究區域概述

二峰圳集水廊道位於林邊溪上游之瓦魯斯溪與來社溪匯流處至來義大橋段，由鳥居信平於民國 12 年興建完成，迄今已持續營運九十餘年，為臺灣第一條集水廊道，雖因濾層阻塞而需進行定期保養及維護，但每年仍有十分豐沛的集水量供應附近居民作為日常或灌溉用水，貢獻卓著。由於二峰圳集水廊道歷史悠久，前人之研究及實測資料亦相當豐富，可供模式之輸入及參數檢定使用，衡酌資料之充份性以對區域水文地質瞭解的完整性，本研究選定該區域進行集水廊道地下水數值模式之實際應用。二峰圳集水廊道位於林邊溪流域中之相對位置如圖 4-1 所示。



圖 4-1 研究區域位於林邊溪流域之相對位置



林邊溪主要支流包括瓦魯斯溪、大後溪、來社溪、尖刀尾溪、七佳溪及力力溪等。林邊溪與支流力力溪均發源於中央山脈大武山稜線，其中林邊溪發源於海拔 2,841 公尺之南大武山西南麓，由瓦魯斯溪及來社溪匯集成林邊溪上游，二峰圳集水廊道即埋設於此處，後於來義鄉出谷流入屏東平原；力力溪上游則自海拔 1,629 公尺的姑子崙山西坡流下，兩條溪流在新埤鄉獅頭區段匯流成林邊溪下游之起點。林邊溪主流長度約 29 公里，河床平均坡度約 1/88，集水區面積約 314 平方公里。

圖 4-2 為林邊溪流域河系與山區位置圖。



圖 4-2 林邊溪流域河系與山區位置圖

分析山脈嶺線走向與地形分佈，可將林邊溪流域分為林邊溪與力力溪兩個主要的子集水區(Sub-catchment)，其中林邊溪子集水區集水面積約 123 平方公里；力力溪子集水區集水面積亦約 123 平方公里，兩者皆約佔整個流域的 39%，二峰圳集水廊道則埋設於林邊溪子集水區範圍內。兩個子集水區涵蓋之範圍如圖 4-3 所示。



圖 4-3 林邊溪流域主要子集水區分佈圖

4.1.1 雨量站概述

研究區域附近包含新來義與泰武(1)兩座雨量站，新來義雨量站位於來社溪上游標高 250 公尺處，平均年雨量約為 3,636 毫米，年降雨日數 120 日；泰武(1)雨量站則位於瓦魯斯溪上游標高 950 公尺處，平均年雨量約為 4,233 毫米，年降雨日數 166 日，其位置分佈如圖 4-4 所示。



圖 4-4 研究區域附近雨量站分佈圖

以徐昇氏法劃分新來義及泰武(1)兩個雨量站於圖 4-3 林邊溪子集水區所控制之面積。新來義雨量站所控制之面積為 74 平方公里，約佔整個子集水區的 60.2%；泰武(1)雨量站控制面積則為 49 平方公里，約佔 39.8%，該範圍之劃分結果如圖 4-5 所示。

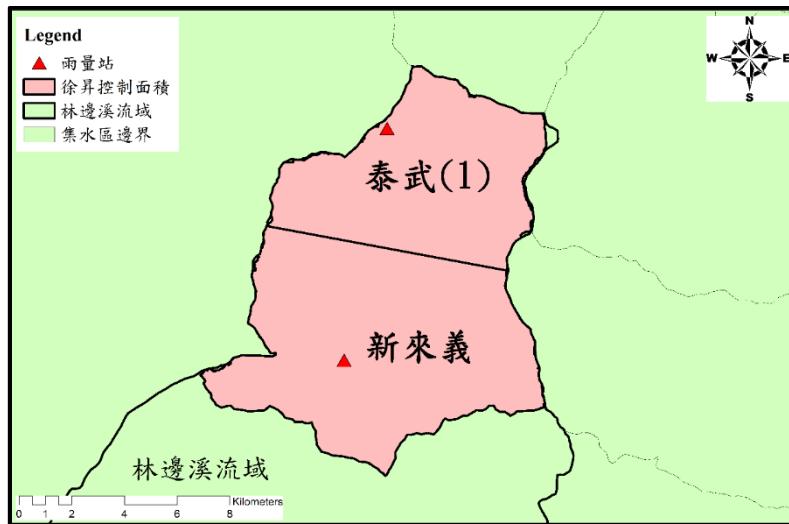


圖 4-5 林邊溪子集水區徐昇氏網格劃分結果

將上述兩座雨量站之控制面積所佔比例分別乘其降雨量資料加總後所得之結果作為研究區域之平均降雨量，其降雨組體圖如圖 4-6 所示。

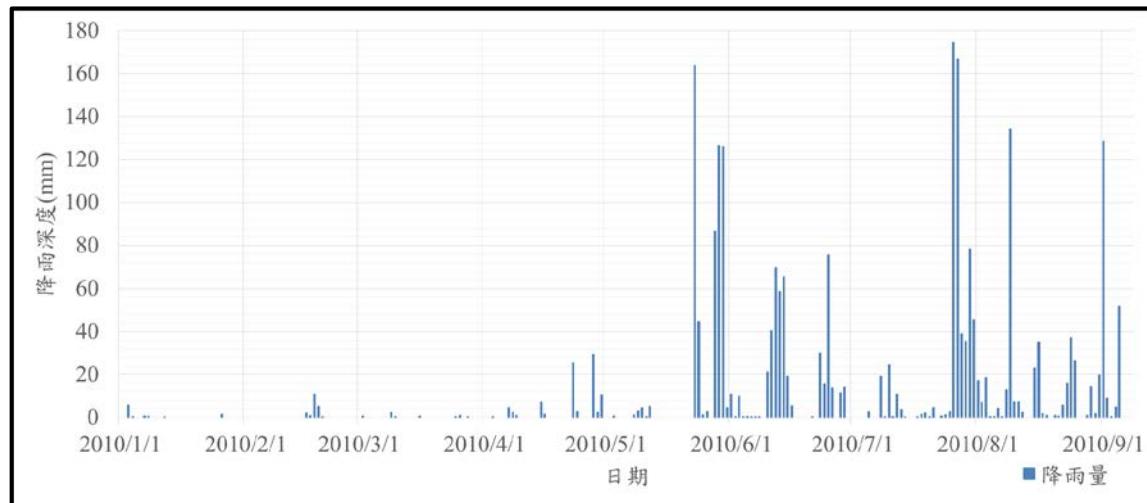


圖 4-6 研究區域之平均降雨量之降雨組體圖

由圖 4-6 可知，研究區域內之降雨量於 2010/5/22 後明顯大量增加，在 2010/5/22 前則為零星的降雨事件。

如式(3-59)式所示，降雨入滲補注在給定時須先扣除蒸發散量，本研究採用恆春氣象站於民國 60 年至民國 98 年統計之月平均蒸發量如表 4-1 所示，由該表可知，一年中最大蒸發量發生在十月，約 164(毫米/月)；一年最蒸發量則發生在 2 月，約 124(毫米/月)。

表 4-1 恒春氣象站月平均蒸發量

月份	蒸發量(mm/month)	月份	蒸發量(mm/month)
1	123	7	153
2	123	8	143
3	154	9	141
4	160	10	164
5	165	11	153
6	141	12	135

4.1.2 河川水位及流量站概述

林邊溪流域範圍內僅有新埤站一座河川水位及流量觀測站，且其位置位於屏東平原接近出水口處，如圖 4-7 所示，故其觀測資料無法直接用於上游子集水區作為其河川之流量，須由新埤站之流量以間接方式推估。經濟部水利規劃試驗所(2010)以水筒模式法(Tank model)推估得 2010 年林邊溪上游河川每月平均流量如圖 4-8 所示。



圖 4-7 研究區域附近河川流量站分佈圖

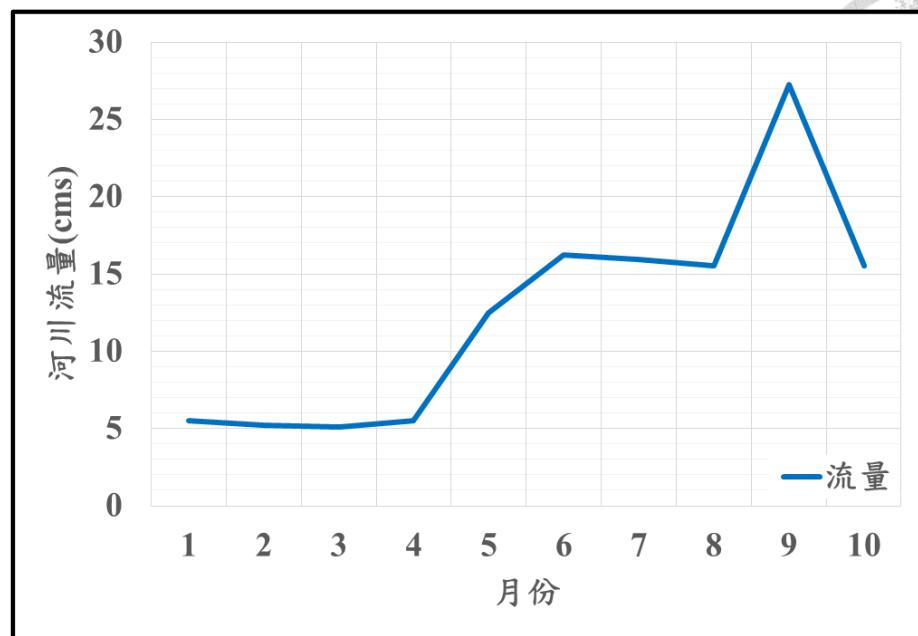


圖 4-8 以水筒模式法推估得 2010 年林邊溪上游河道流量

4.1.3 地下水位觀測井概述

由於研究區域位於林邊溪上游之山區，而水利署之地下水位觀測網主要佈設於平原區，故無官方之地下水位觀測井可供模式使用。經濟部水利規劃試驗所(2010)於該區域進行鑽探作業且設置五口地下水位觀測井，其觀測期間由民國 98 年 12 月起至隔年的 9 月初，為相當完整的觀測資料，該五口觀測井之基本資料列於表 4-2 (經濟部水利規劃試驗所，2010)。

表 4-2 研究區域內地下水位觀測井基本資料

名稱	座標(67TM2)		井頂高程 (m)	井底高程 (m)	量測方式	觀測時距
	X	Y				
A	214,242	2,492,911	133	118	連續自記	98/12~99/08
B	214,581	2,492,353	136	123	連續自記	98/12~99/08
C	213,928	2,492,149	124	110	連續自記	98/12~99/12
D	213,783	2,491,941	120	106	連續自記	98/12~99/08
E	213,219	2,491,939	111	99	不定期	98/12~99/08

表 4-2 中，觀測井 A 與觀測井 B 分別設於上游支流瓦魯斯溪與來社溪之河床沖積層中；觀測井 C 與觀測井 D 則位於兩支流匯流處至來義大橋段，且分別位於集水廊道之上游與下游處；觀測井 E 則位於來義大橋下游 594 公尺處，其分佈如圖 4-9 所示；各觀測井之觀測水位如圖 4-10 所示。

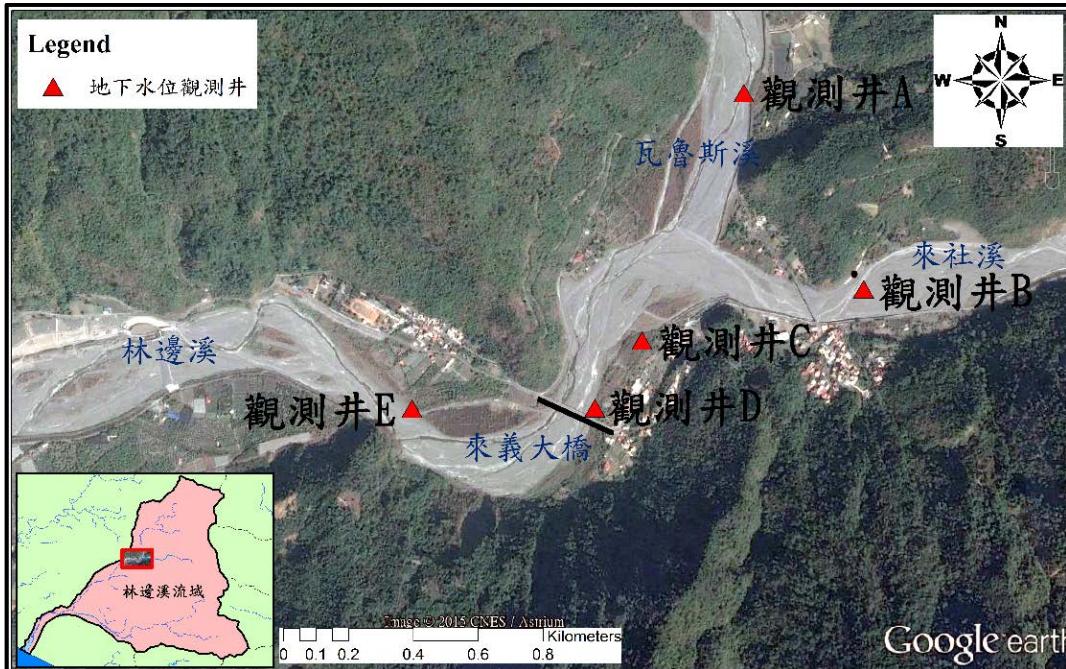


圖 4-9 研究區域地下水位觀測井分佈圖

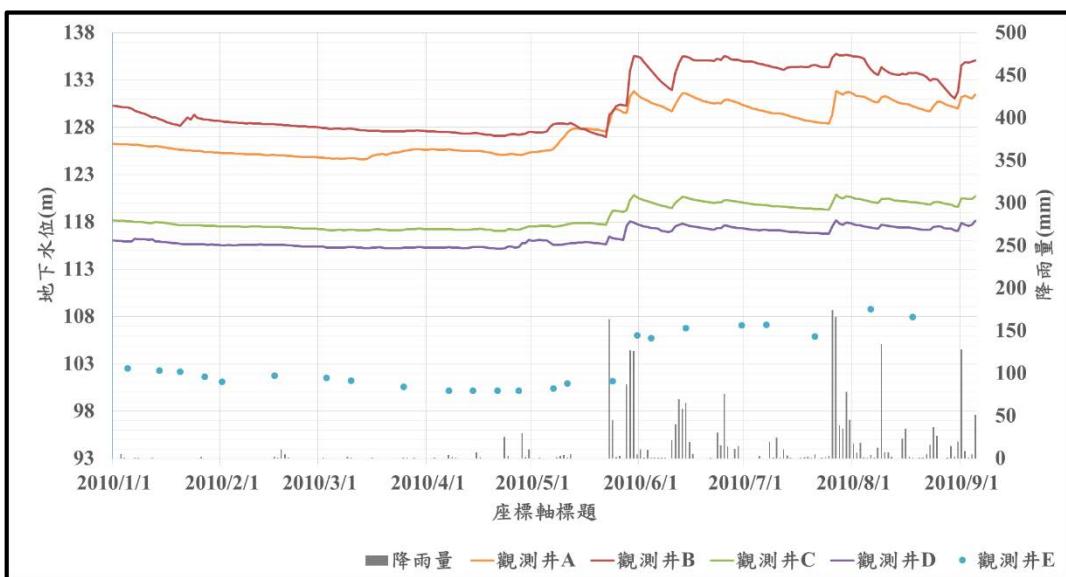


圖 4-10 各觀測井之觀測水位

觀察圖 4-6 及圖 4-10 可知，研究區域之地下水位由 2010/1/1 至 2010/5/22 期



間地下水至維持在較低的狀態，觀測井 A 約 126 公尺、觀測井 B 約 128 公尺、觀測井 C 約 118 公尺、觀測井 D 約 116 公尺、觀測井 E 則為 101 公尺；直至 2010/5/22 降下大量雨水後，開始快速上升，直至 2010/5/31 之後，維持在較高的狀態，觀測井 A 約 130 公尺、觀測井 B 約 134 公尺、觀測井 C 約 120 公尺、觀測井 D 約 117 公尺、觀測井 E 則為 107 公尺。故本研究依據地下水位之高低及圖 4-6 所繪之降雨組體圖，將研究時距中 2010/1/1 至 2010/5/21 期間定義為旱季，2010/5/22 至 2010/9/5 期間則定義為雨季。

4.2 林邊溪二峰圳集水廊道附近水文地質概念模型建立

林邊溪上游集水區地質分佈雖多以由硬頁岩、板岩、千枚岩和硬砂岩互層組成之中新世廬山層為主，透水性不佳，但其地層實際上可分為兩層，下層雖為透水性極差之硬頁岩夾變質砂岩，河谷出口卻覆蓋了經河水淘選作用而形成之河床沖積層，特徵為徑粒較大、孔隙較多，有極佳的透水性及蓄水能力，對於集水廊道之開發極具潛力。

4.2.1 河床沖積層辨識

集水廊道集水量與其埋設深度與埋設地層之水文地質特性息息相關，需有足夠精確的埋深及水力傳導係數實測值，才能使模式得到最佳的模擬結果。

經濟部水利規劃試驗所(2010)於二峰圳集水廊道附近進行鑽探作業並配合台糖公司(1996)進行之地電阻探測成果、河道斷面測量成果以及 1/15000 航照地形圖推得五處河床沖積層之厚度，約介於 20 公尺至 50 公尺之間。

經濟部中央地質調查所(2015)在二峰圳集水廊道附近佈設橫向與縱向的 RIP 測線進行河床沖積層探測，期能測得更為精確的河床沖積層厚度，該探測之測線配置與成果分別如圖 4-11 及圖 4-12 所示。本研究參酌上述兩者所量測之成果，在考慮資料豐富度的情況下，選定 A、B、C、D 及 E 五處地點，取其河床沖積層厚



度以建立水文地質概念模型。



圖 4-11 二峰圳 RIP 測線佈置

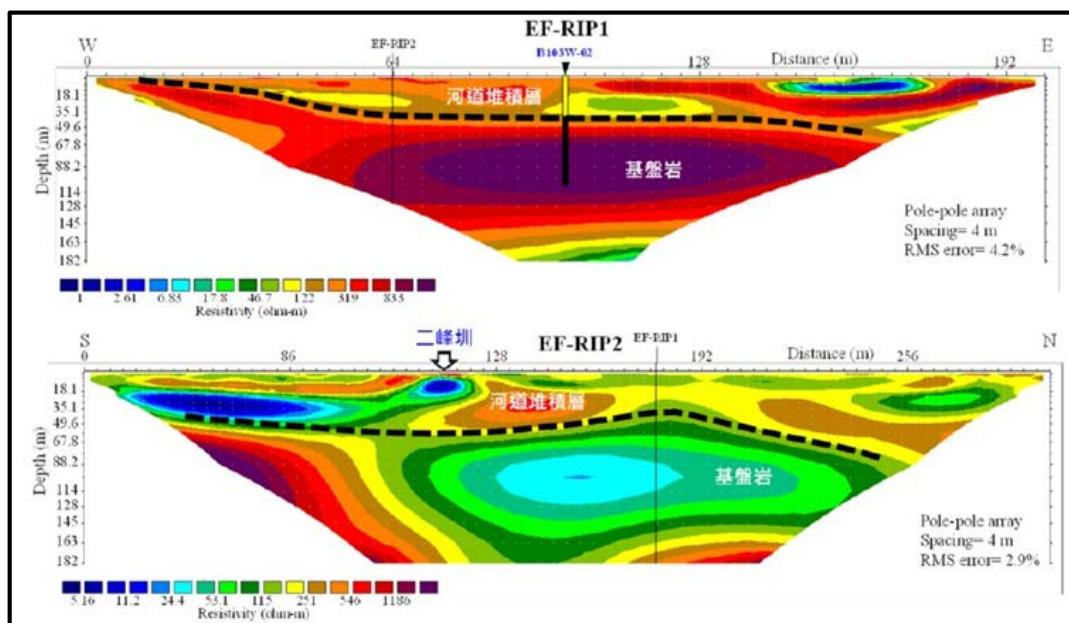


圖 4-12 二峰圳 RIP 測線探測結果圖

A、B、C、D 及 E 之座標、河床沖積層厚度與水力傳導係數資料如表 4-3 所示(經濟部水利規劃試驗所, 2010)。

表 4-3 各點位之河床沖積層厚度與水力傳導係數

分區	座標(67TM2)		厚度(m)	土壤材料	水力傳導係數 (m/d)
	X	Y			
A	214,242	2,492,911	25	礫石夾中粗砂	4.2
B	214,581	2,492,353	7	礫石夾中粗砂	30.5
C	213,928	2,492,149	35	礫石夾中粗砂	8.8
D	213,783	2,491,941	50	礫石夾中粗砂	6.4
E	213,219	2,491,939	40	礫石夾中粗砂	21.2

4.2.2 地下水系統邊界辨識

在所有的觀測資料中，能夠最直接幫助研究者瞭解地下水系統變化者莫過於直接量測出之地下水位資料，在數值模式的模擬中亦是如此，若能直接以給定水頭之方式處理邊界條件，不僅能夠反映實際的地下水系統變化，更能降低問題之自由度，使其能夠更快達到收斂，圖 4-10 中之觀測井 A 及觀測井 B 所在位置即可作為給定水頭邊界條件，故選定通過觀測井 A 及觀測井 B 垂直河道之斷面做為模式的上游邊界。

同理，亦可在模擬範圍最下游處取一已知水頭處作為模式之下游邊界，然而，集水廊道之取水須評估對下游地下水位造成之洩降及其影響範圍，觀測井 E 為一良好的評估位置，故無法做為模式之下邊界。本研究取觀測 E 下游約 800 公尺處之垂直河道斷面為模式之下邊界，並計算模擬範圍內之平均水力坡降，以外插法概估其初始給定水頭值。

由於該區域之岩盤屬硬頁岩夾變質砂岩，透水性及孔隙率極小，其蓄水量及流入河床沖積層之流量皆可忽略，可將此邊界及岩盤視為數值模式之零流量邊界，降低問題的複雜度。本研究利用該區域之地表高程資料(Digital elevation model, DEM)

轉化為等高線地形圖並配合以經濟部中央地質調查所地質資訊整合地下水系統中地質分佈圖圖資套疊 Google Earth 立體地形圖之圖 4-13，判釋不透水邊界之分佈。

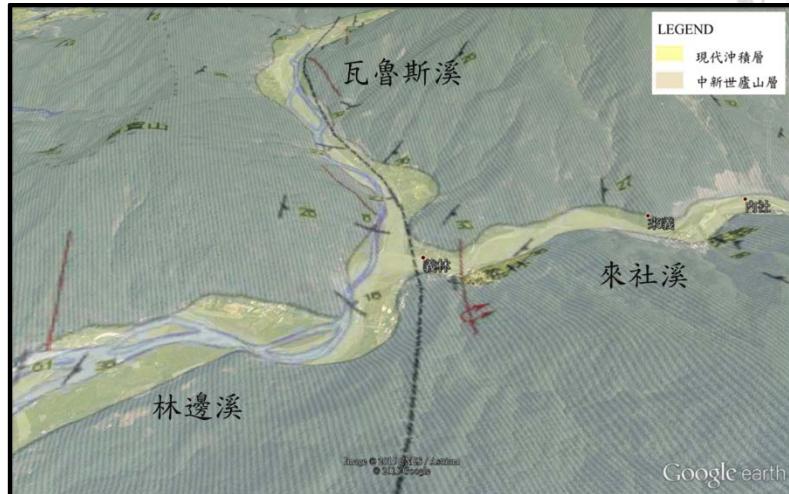


圖 4-13 林邊溪上游地質分佈圖

綜合以上所述，邊界辨識結果如圖 4-14 所示，其中 ab 及 cd 線段為地下水系統之上游邊界，ef 段為地下水系統之下游邊界，可作為模式之給定水頭之邊界條件；bc、de 及 fa 線段則為地下水系統之不透水邊界，可作為模式之零流量邊界條件。



圖 4-14 地下水系統邊界辨識結果圖

4.2.3 集水廊道佈設位置及尺寸

江崇榮(1997)、經濟部水利規劃試驗所(2010)及經濟部中央地質調查所(2014)



之調查報告皆指出，林邊溪二峰圳集水廊道埋設位置位於瓦魯斯溪與來社溪匯流處下游、來義大橋上游約 100 公尺處。其佈設位置如圖 4-15 所示。



圖 4-15 集水廊道佈設位置示意圖

江崇榮(1997)指出二峰圳集水廊道之實際埋設深度約為地表下方 2.7~9.1 公尺，其構造包含一垂直河道長約 328 公尺的梯形堰堤(頂寬 0.91 公尺、底寬 3.94 公尺、堤高 2.2 公尺)與一平行河道總長約 455 公尺的半圓形集水暗渠 (直徑約 1.9 公尺)，其尺寸及埋深示意圖如圖 4-16 所示。

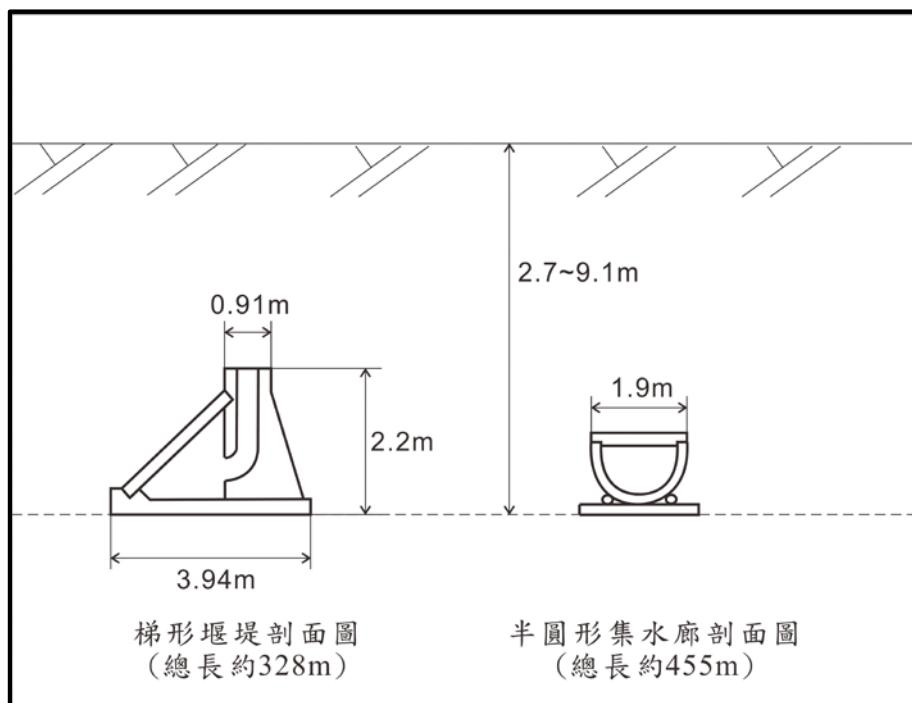


圖 4-16 集水廊道構造尺寸及埋深示意圖



4.2.4 水文地質概念模型建立結果

綜合先前章節所述之林邊溪二峰圳集水廊道附近河床沖積層辨識、地下水系統邊界辨識以及集水廊道之佈設位置及尺寸之調查等結果，可將水文地質概念模型繪如圖 4-17 所示。

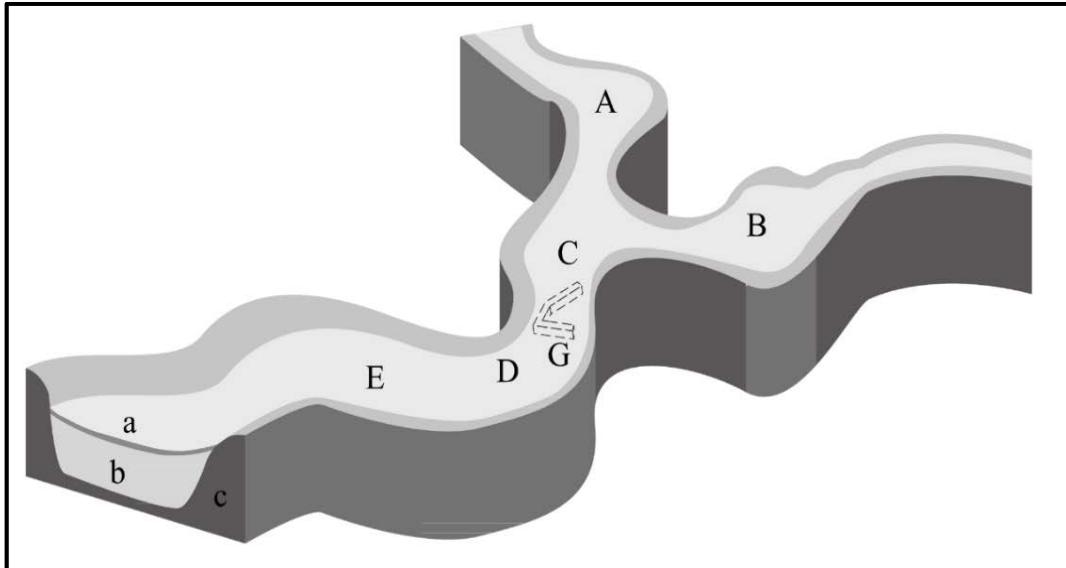


圖 4-17 林邊溪二峰圳集水廊道附近水文地質概念模型

圖 4-17 中，a 部份為河道底泥層，b 部份為河床沖積層，c 部份為不透水岩盤；A、B、C、D 及 E 位置之岩盤深度分別為 25 公尺、7 公尺、35 公尺、50 公尺及 40 公尺；集水廊道埋設於 G 處，且其底部約位於地表下 2.7~9.1 公尺。

4.3 林邊溪二峰圳集水廊道附近地下水水流數值模式率定

本研究將所建立數值模式率定方法應用於林邊溪二峰圳集水廊道附近之地下水系統，以下將分別呈現地下水系統水平衡分析之計算過程與結果、數值模式網格建立與初始參數輸入、優選模式之參數上下限設定以及數值模式率定結果。



4.3.1 地下水系統水平衡分析

本節依序呈現地下水系統水平衡分析各部份之計算過程與結果，包括地下水系統之蓄水量、上游邊界入流量、下游邊界出流量、集水廊道集水量及河床垂向入滲量四部份。

一、地下水系統之蓄水量

將圖 4-14 之地下水系統邊界範圍以徐昇式法劃分各觀測井之控制面積，並給定各區之孔隙率 n 皆為 0.14，劃分之徐昇氏網格及其相關數據分別如圖 4-18 及表 4-4 所示。

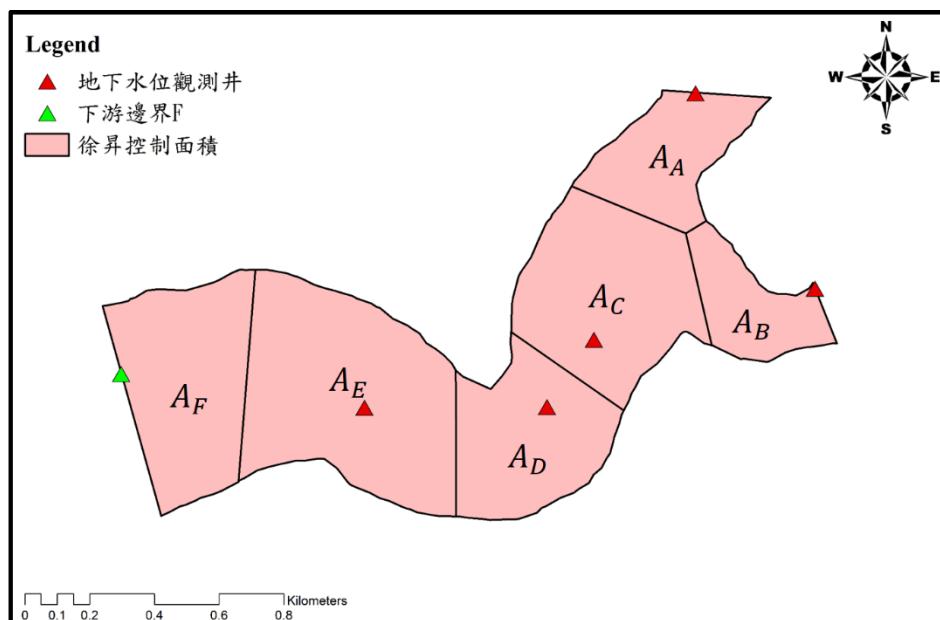


圖 4-18 地下水系統邊界劃分之徐昇氏網格

表 4-4 地下水系統邊界所劃分徐昇氏網格及其初始數據

代號	K(m/d)	控制面積(km^2)	孔隙率	頂部高程(m)	底部高程(m)
A _A	4.2	136,936	0.14	128	103
A _B	30.5	101,080	0.14	131	124
A _C	8.8	262,186	0.14	120	70
A _D	6.4	199,282	0.14	115	65
A _E	21.2	364,186	0.14	106	66
A _F	21.2	238,930	0.14	103	61



各控制面積內之地下水位如圖 4-10 所示；以範圍內之平均水力梯度外插下游斷面 F 之地下水位，如圖 4-19 所示。

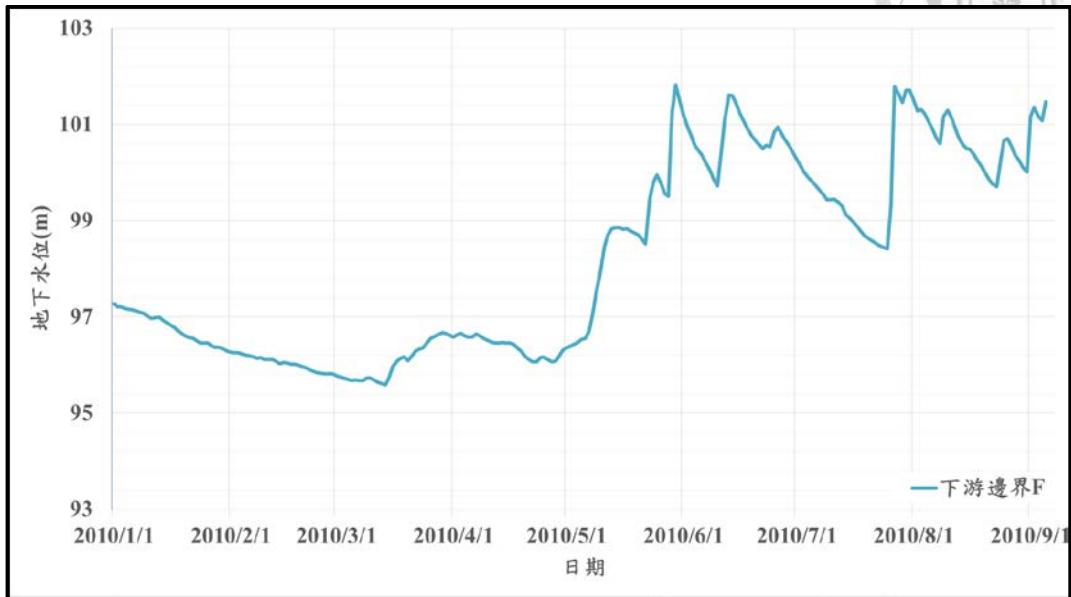


圖 4-19 外插所得下游邊界 F 之地下水位

將上述所得結果代入(3-2)式中，可得地下水系統蓄水量歷線 V 如圖 4-20 所示；再將 V 代入(3-3)式即可得地下水系統之蓄水量變化率 $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ 。

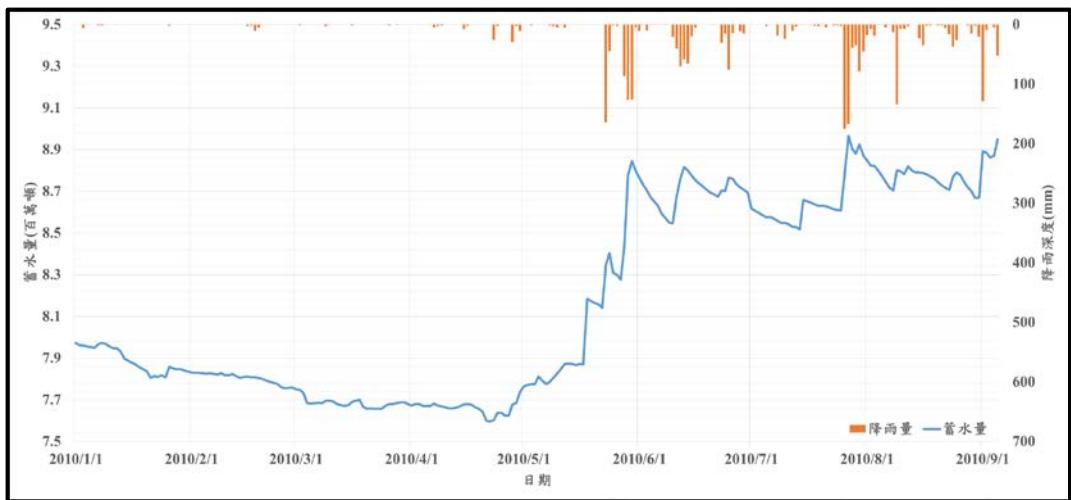


圖 4-20 地下水系統之蓄水量歷線

由圖 4-20 可知，旱季之蓄水量平均約 778 萬噸；雨季時之蓄水量則約 869 萬噸，相差約 91 萬噸。



二、上游邊界入流量與下游邊界出流量

觀測井 A 與觀測井 C 間之距離 x_{AC} 約 824 公尺，觀測井 B 與觀測井 C 間之距離 x_{BC} 約 684 公尺，觀測井 E 與下游邊界 F 間之距離 x_{EF} 約為 739 公尺，將上述各觀測井之觀測水位配合兩兩觀測井間之距離以及該區段之水力傳導係數，分別代入(3-5)式至(3-7)式，可求得上下游各邊界之入流量 Q_A 、 Q_B 及出流量 Q_F ，如圖 4-21 至圖 4-23 所示。

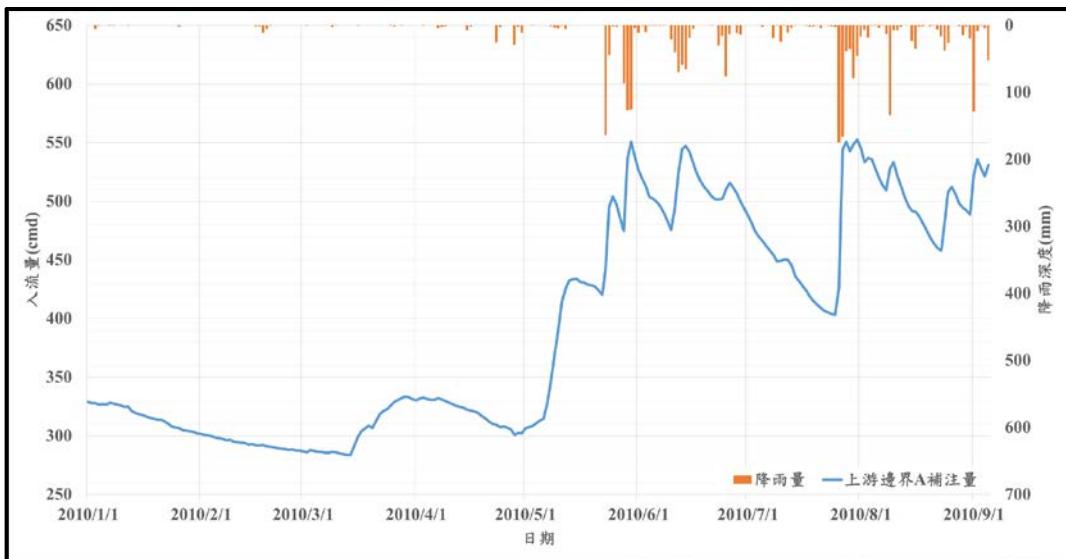


圖 4-21 上游邊界 A 之入流量歷線

由圖 4-21 可知，上游邊界 A 於旱季時每日流入地下水系統之水量約 319 噸；雨季時每日流入地下水系統之水量則增加至 491 噸，相差約 172 噸。

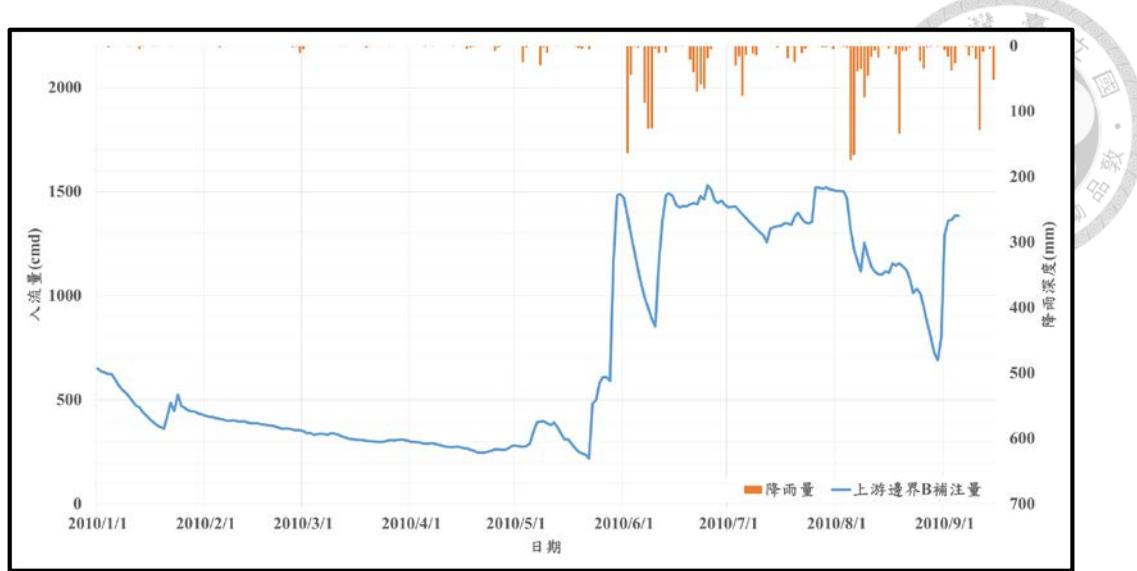


圖 4-22 上游邊界 B 之補注量歷線

由圖 4-22 可知，上游邊界 B 於旱季時每日流入地下水系統之水量約 361 噸；雨季時每日流入地下水系統之水量則增加至 1,226 噸，相差 865 噸。

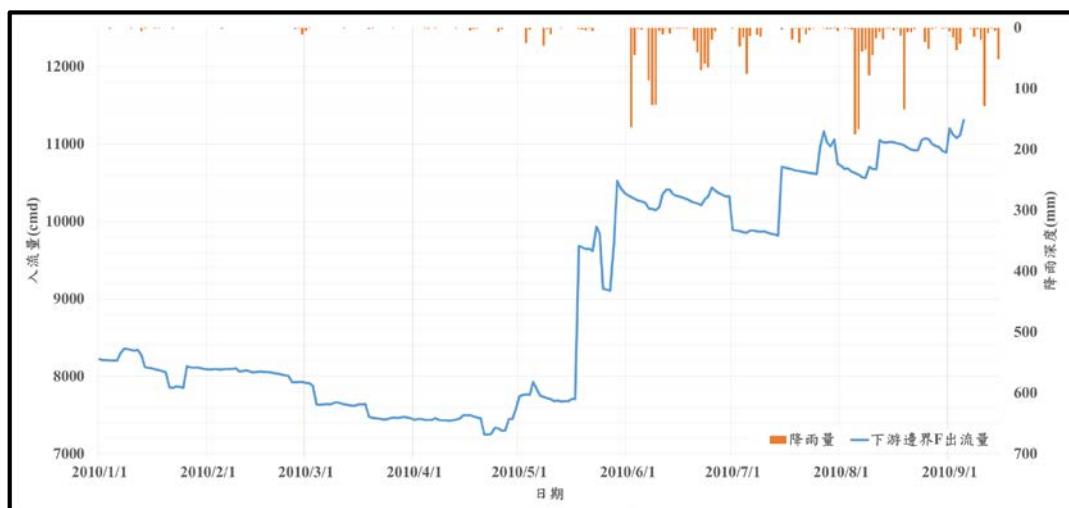


圖 4-23 下游邊界 F 之出流量歷線

由圖 4-23 可知，下游邊界 F 於旱季時每日流出地下水系統之水量約 7,828 噸；雨季時每日流出地下水系統之水量則增加至 10,466 噸，約相差 2,638 噸。



三、集水廊道集水量

由於目前尚無直接的方法可供量測集水廊道集水量，僅能藉由量測輸水渠道之流量當作集水廊道之集水量，此法須假設在量測點前無額外的流量流入輸水渠道，且損失量極少。經濟部水利規劃試驗所(2010)以線性迴歸的方式建立一觀測井C之地下水位與實測集水廊道集水量 Q_G 間之關係式如(4-1)式所示：

$$Q_G = \frac{(h_C^{obs} - 116.79)}{1.4665} \quad (4-1)$$

利用(4-1)式可求得集水廊道之集水量歷線 Q_G ，該關係式所求出之集水廊道集水量歷線如圖 4-24 所示。

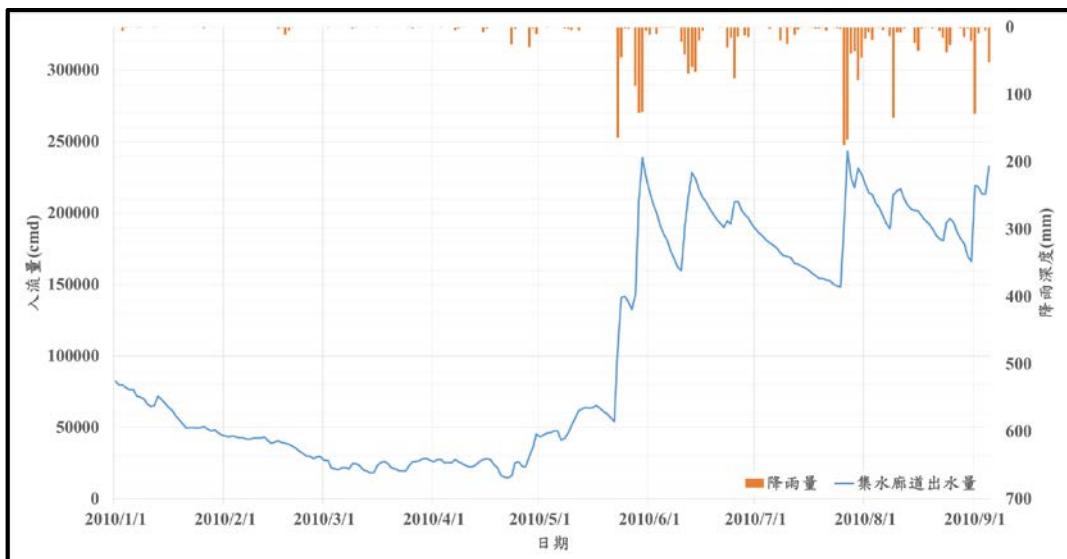


圖 4-24 以觀測井 C 地下水位推估之集水廊道集水量歷線

由圖 4-24 可知，集水廊道於旱季時推估之每日之集水量約 39,679 噸；雨季時推估之每日流出地下水系統之水量則增加至 186,674 噸，約相差 146,994 噸。

四、河床垂向入滲量

將前述章節所得之 $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ 、 Q_A 、 Q_B 、 Q_F 以及 Q_G 代入(3-8)，可求得河床垂向入滲量 Q_R 如圖 4-25 所示。

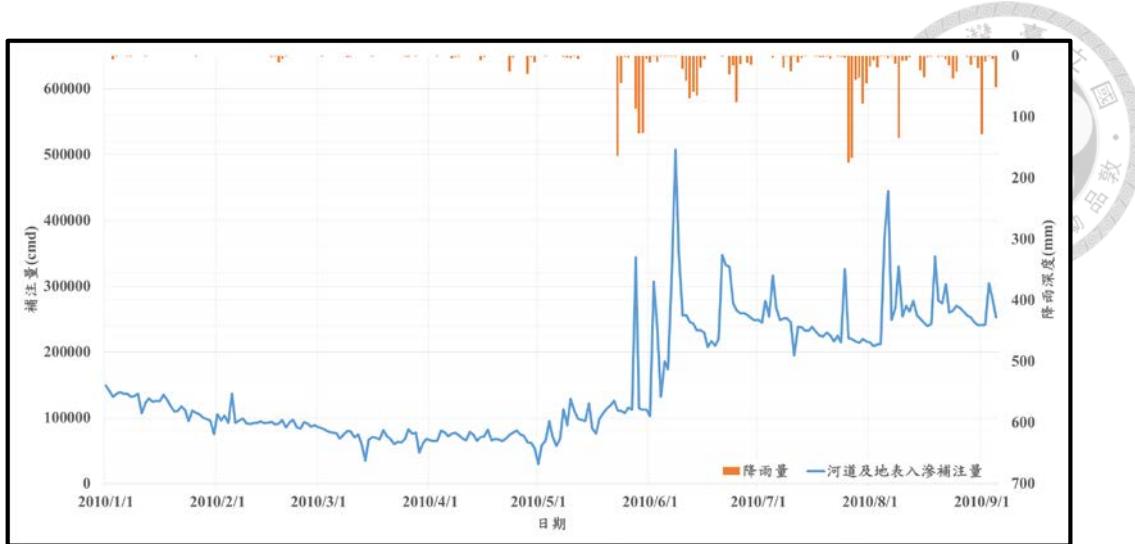


圖 4-25 河床垂向入滲量

由圖 4-25 可知，旱季時每日河床垂向入滲量約 47,939 噸；雨季時每日河床垂向入滲量增加至 202,701 噸，相差約 154,762 噸，約為旱季補注量的三倍。

綜合以上結果，林邊溪二峰圳集水廊道附近地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日間，總補注量約為 2.98 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 99.0%，上游邊界補注佔 1%；總流出量約為 2.89 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 8%，集水廊道集水量則佔 92%。由此結果可知，河床沖積層之地下水補注量絕大多數來自於河床垂向入滲量。

4.3.2 數值模式網格建立與初始參數輸入

本節將詳細介紹數值模式之網格建立及其初始參數輸入，分為五部份包括模式範圍與網格建立、水文地質參數設定、初始條件設定、邊界條件設定與集水廊道作為邊界條件之概念化等。

一、模式範圍與網格建立

依據圖 4-14 地下水系統邊界辨識成果，選定模擬範圍與邊界條件如圖 4-26 所示。上游邊界以井 A 及井 B 為界，下游邊界以井 E 向下游約 800 公尺垂直河道之斷面為界，南北向距離約 1,237 公尺，東西向距離約 2,283 公尺，其中上游邊界

ab、cd 線段分別以圖 4-10 觀測井 A 及觀測井 B 之地下水位觀測資料為給定水頭邊界；下游邊界 ef 則依外插所得之圖 4-19 為初始給定水頭邊界，其平均值將於後續的穩態模式參數檢定中藉由比對觀測井 E 之長期趨勢地下水位調整至合理範圍內；據圖 4-14 所繪，bc、de 及 fa 線段皆屬不透水邊界，可設為零流量邊界。

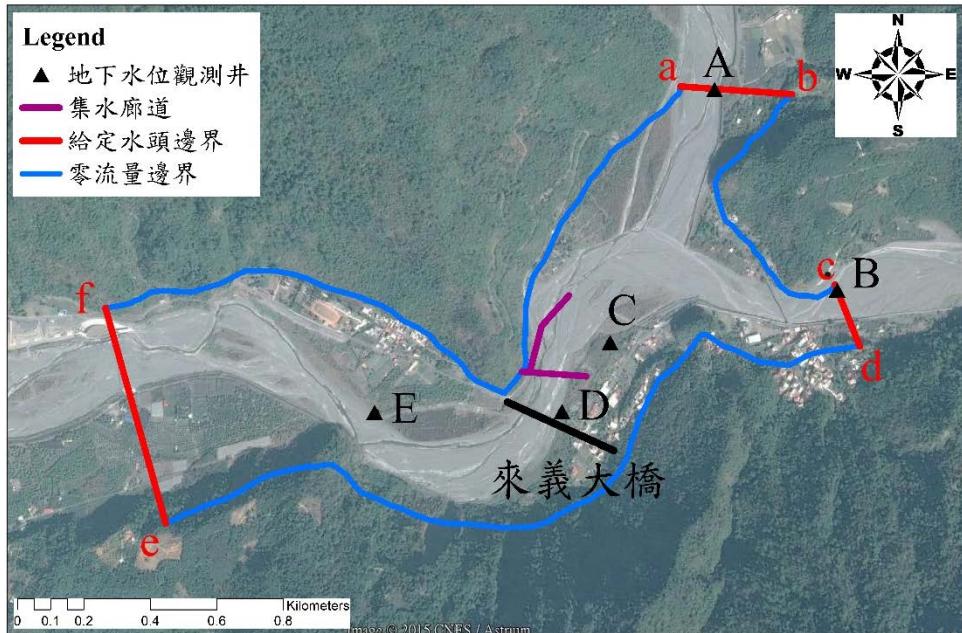


圖 4-26 模式範圍與邊界條件設定

本研究以楔形體元素進行模擬範圍之網格建構，其中共有為 3,730 個節點、5,916 個元素，且所有元素形狀大小皆不規則，在集水廊道位置附近則將元素細化 (Refine)，並且調整網格形狀以符合集水廊道之需求。

首先確立數值模式之垂直空間範圍，其垂向分層以數值高程模式 (Digital elevation model, DEM) 內插所有地表網格之高程後，配合 4.2.1 所推估得之岩盤深度，將河床沖積層等分為 9 層，即完成數值模式之概念模型。而後參考圖 4-16 之集水廊道及埋設深度將其概念化為邊界條件後之集水廊道埋設於模式分層之第 3 層，其頂面約在地表下 5 公尺處。

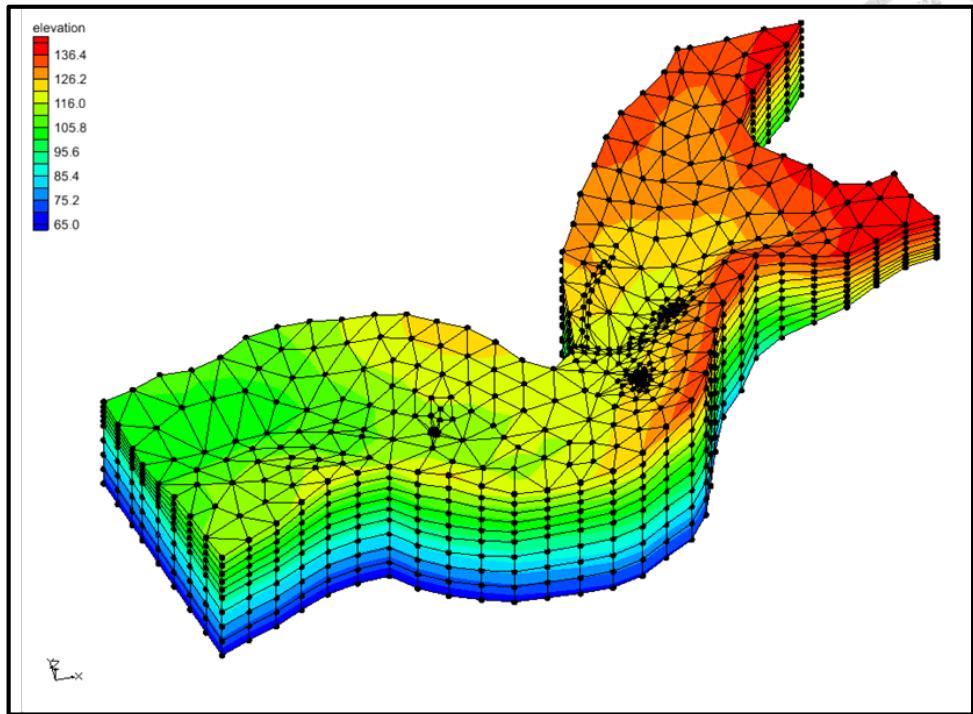


圖 4-27 林邊溪二峰圳集水廊道三維網格分割圖

二、水文地質參數設定

本研究以徐昇氏法劃分各鑽探點所控制之面積，如圖 4-18 所示，且令各控制面積之平均土壤性質即為鑽探點所實測得之資料，故可將三維網格分割如圖 4-28。

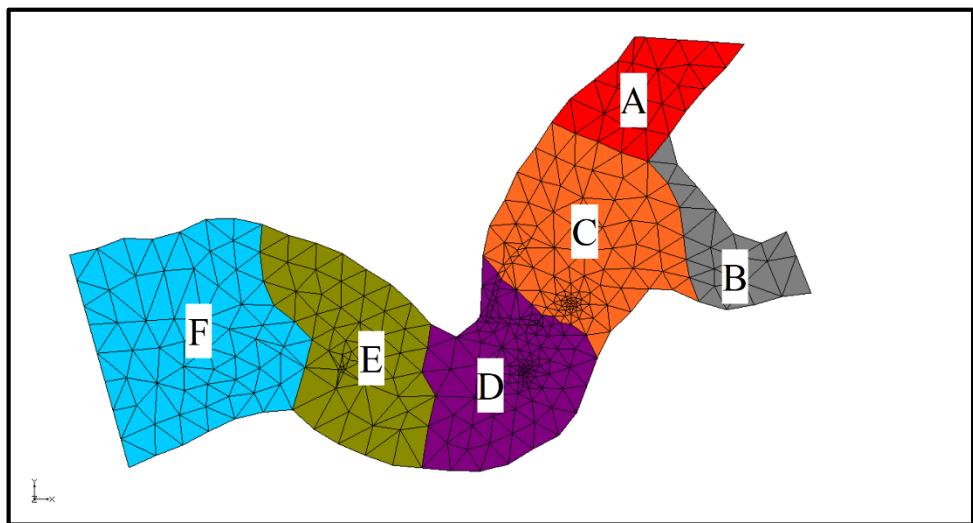


圖 4-28 三維網格之水文地質分區

本研究給定河道底泥層之範圍不隨時間變化且分為三段(中間區域)，該範圍包括地勢相對兩岸較低之區域如圖 4-29 所示，其中 A 段之平均河床坡度約 0.021，

面積約 204,688 平方公尺；B 段之平均河床坡度約 0.031，面積約 80,897 平方公尺；C 段之平均河床坡度約 0.015，面積約 257,853 平方公尺。故由各河段之坡度應可推斷 B 段之河道底泥層之透水性較 A 段為佳，而 A 段又比 C 段為佳。

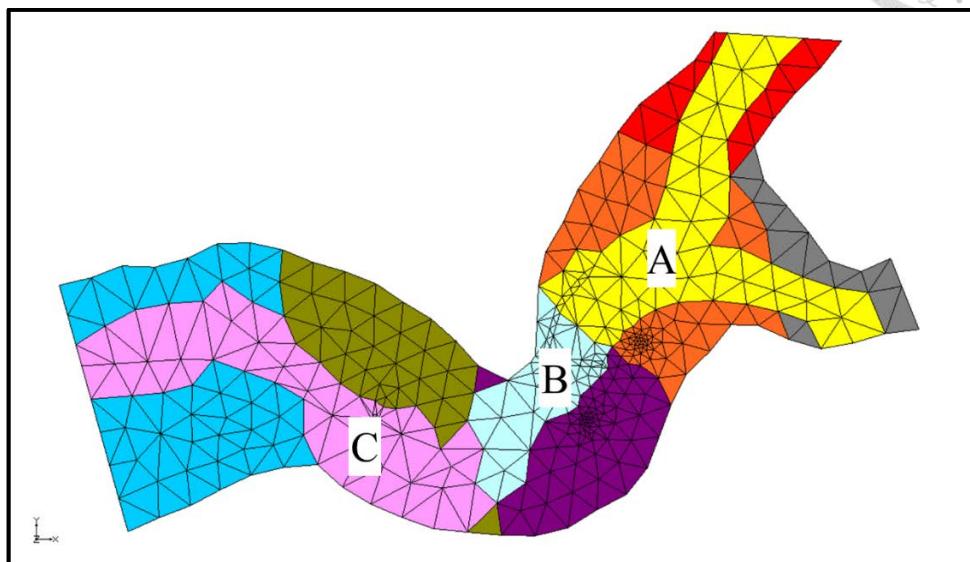


圖 4-29 河道底泥層於河床之分佈

三、初始條件設定

若要求解(3-46)式之非線性方程式，須選定一起始值作為迭代之初始條件，由於本研究將模擬時距分為旱季及雨季兩個階段，分別選定此兩階段之首日各觀測井之觀測水位作為暫態模式之初始條件，以距離反比權重法(Inverse Distance Weighted Method)內插至模擬範圍各節點上，並減去節點之高程，換算為壓力水頭之形式。

四、邊界條件設定

模擬範圍之補注量主要分為河道入滲補注量與降雨入滲補注量兩部份，其中河道入滲補注量又分為旱季及雨季兩種狀況。

本研究在雨季時之 A 河段與 B 河段，以給定水頭邊界將河川水位設定在前述所決定之河道底泥層範圍內之地表節點上，並將各河段平均坡度及圖 4-8 中河川流量之平均值代入(3-22)式，解得之各河川水位之起始猜測值如表 4-5 所示。

表 4-5 各河段河川水位起始猜測值

	河川水位(m)	
	旱季	雨季
A	-	2.48
B	-	2.32
C	-	-

在旱季時之 A、B、C 河段與雨季時之 C 河段，則以變動邊界條件將河道入滲補注強度設定在前述所決定之河道底泥層範圍內之元素邊界上，並將圖 4-8 中河川流量之平均值分別除以圖 4-29 各河道底泥層之面積後，作為河道入滲補注強度之起始猜測值，計算結果如表 4-6 所示。

表 4-6 各河段入滲補注量之起始猜測值

	河道入滲補注強度(m/d)	
	旱季	雨季
A	2.89	-
B	7.32	-
C	2.30	6.17

取河岸側坡斜率 $S = 1$ ；取最小之 C 段河床坡度 $S_0 = 0.015$ ；取 $n_R = 0.043$ ；並配合圖 4-8 中河川流量之平均值，代入(3-22)式可求得最大積水深度 h_p 等於 2.62 公尺。

降雨入滲補注主要以給定流量邊界之形式設定於河床以外的地表邊界，在輸入前須先乘上一入滲比例 i ，如(3-59)式所示，本研究假設 i 之初始猜測值為 0.3，降雨量及蒸發量則分別以圖 4-6 及表 4-1 中所繪資料給定。

五、集水廊道作為邊界條件之概念化

依 3.3.1 所述之原則，以刪除網格並於其四周給定水頭邊界條件的方式，將集水廊道概念化為一矩型明渠的型式，集水廊道內水深則給定混凝土曼寧糙度係數 $n_c = 0.0155$ ，集水廊道底部坡 $S_0 = 0.001$ ，渠寬則給定 $B = 4$ 公尺，旱季之平均集水量約 0.55(噸/秒)，反覆迭代後可得集水廊道底部水深約 0.38 公尺；雨季之平均集水量約 2.14(噸/秒)，則可解得水深約 0.7 公尺，兩者皆小於集水廊道之高度為 2.2



公尺，屬合理之水深。

由圖 3-9 可知，集水廊道概念化後，左、右及底面皆設為混凝土材質水力傳導係數 $K_{xx} = K_{zz} = 0.03$ (公尺/日)；而集水廊道入口因使用濾料以及阻塞程度之不同，亦會有不同大小的水力傳導係數值，其初始值給定為表 4-3 中 D 區之值， $K_{xx} = 8.8$ (公尺/日)， $K_{zz} = 2.92$ (公尺/日)。

4.3.3 模式參數上下限設定

以下依據 3.4.1 所述，將分別決定林邊溪集水廊道附近地下水系統各參數上下限，依序為水力傳導係數、不飽和層之土水保持曲線參數、土壤介質之壓縮係數、下游邊界之給定水頭平均值、河川水位、河道入滲強度以及降雨入滲之比例等七項。

一、水力傳導係數

由表 4-3 之資料可知河床沖積層屬礫石夾中粗砂之材質，查圖 3-14 可知其合理範圍介於 0.864(公尺/日)至 864(公尺/日)之間，可寫成限制式(4-2)式。

$$0.864 \leq K \leq 864 \quad (4-2)$$

二、不飽和層之土水保持曲線參數

查圖 3-15 可知，河床沖積層飽和含水量 θ_s 之值約介於 25%~40% 之間；殘餘含水量 θ_r 之值則根據 Michael J. Thoma et al. (2013) 研究結果指出，不論何種土壤皆介於 0.03 至 0.05 之間，故可寫成以限制式如(4-4)式：

$$0.25 \leq \theta_s \leq 0.4 \quad (4-3)$$

$$0.03 \leq \theta_r \leq 0.05 \quad (4-4)$$

三、土壤介質之壓縮係數

本研究之地層主要由砂及礫石組成，查表 3-5 可知其 α 值之合理範圍，並寫成限制式如(4-5)式。

$$1.34 \times 10^{-17} < \alpha < 1.34 \times 10^{-20} \quad (4-5)$$

四、下游邊界之給定水頭平均值

由模式之三維網格可知，下游邊界 F 之地表最底點之高程約為 102 公尺；岩盤之高程約為 66 公尺，故可寫成限制式(4-6)式：

$$66 < h_D^{given} < 102 \quad (4-6)$$

五、河川水位

由圖 4-8 所繪之資料可知河川流量之最大值 $Q_{R,max}$ ，代入(3-22)式可求得河川之最大水位 $h_{R,max}$ ，故可將限制式寫成(4-7)式，各河段之 $h_{R,max}$ 則列如表 4-5 所示。

$$0 \leq h_R \leq h_{R,max} \quad (4-7)$$

表 4-5 各河段之給定河川水位上限

	給定河川水位上限 $h_{R,max}$ (m)	
	旱季	雨季
A	-	2.83
B	-	2.66
C	-	-

六、河道入滲強度

由圖 4-8 所繪之資料可知河川流量之最大值 $Q_{R,max}$ ，分別除以圖 4-29 中各河段之河道底泥層面積 A ，可得各河段之給定河道入滲強度上限 $q_{R,max}$ ，故可將限制式寫成(4-8)式，各河段之 $q_{R,max}$ 值則列如表 4-7 所示：

$$0 \leq q_R \leq q_{R,max} \quad (4-8)$$

表 4-7 各河段之給定河道入滲強度上限

	給定河道入滲強度上限 $q_{R,\max}$ (m/d)	
	旱季	雨季
A	5.46	-
B	13.80	-
C	4.33	9.14

七、降雨入滲之比例

張良正 (1997) 研究屏東平原之降雨入滲比例約介於 0.07 至 0.37 之間，故降雨入滲比例 i 之限制式可設為(4-9)式：

$$0.07 \leq i \leq 0.37 \quad (4-9)$$

4.3.4 數值模式率定結果

數值模式率定結果包含穩態模式率定結果及暫態模式率定結果兩部份，其中，暫態模式率定結果又分為三部份進行討論，分別為觀測水位與觀測集水量率定結果、模式所推估之地下水系統平均補注量以及河道入滲補注量與降雨入滲補注量結果討論。

一、穩態模式率定結果

穩態參數檢定優選模式之主要目的為得到合理之土壤參數及河川水位或河道補注強度之長期趨勢，能使目標函數 Z 為最小，供後續暫態參數檢定優選模式使用。

經率定之後得到 C 區及 D 區之水力傳導係數分別為 90(公尺/日)及 30(公尺/日)；集水廊道入口旱季則因阻塞而使得透水能力降至雨季時的 1/4，其值約分別為 6(公尺/日)及 25(公尺/日)左右；E 區及 F 區之水力傳導係數則由 21.2(公尺/日)上調至 135(公尺/日)；河道底泥層 A、B 與 C 河道在旱季或雨季皆為 $K_{xx} = K_{zz}$ ，旱季之值分別為 10(公尺/日)、12(公尺/日)以及 3(公尺/日)，雨季之值則分別為 24(公尺/日)、30(公尺/日)以及 12(公尺/日)，皆符合因 B 河段坡度>A 河段>C 河段所造成 B

河段透水性>A 河段>C 河段之現象。由上述結果可知集水廊道埋設區域之地層透水性較其他區域為佳，且原量測之 K_{xx} 值皆偏小，A 區與 B 區之水力傳導係數值應也有向上調整之空間，但因觀測井用於設定給定水頭邊界條件，故附近無其他觀測資料可供參數檢定。參數檢定前各分區之土壤參數如表 4-10、穩態模式參數檢定後各分區之土壤參數如表 4-11 所示。不飽和土壤參數方面，河床沖積層各分區仍然維持礫石材質之參數組合；河道底泥層則由原礫石材質調整成較細之砂土材質。

下游邊界 F 之已知水頭平均水位旱季與雨季則分別由初始之 97 公尺與 100 公尺調降至 82 公尺與 85 公尺；河床補注長期趨勢則如表 4-8 及表 4-9 所示；降雨入滲比例 i 則維持在 0.3。

表 4-8 紿定河川水位長期趨勢

	給定河川水位長期趨勢 h_R (m)	
	旱季	雨季
A	-	1.08
B	-	1.48
C	-	-

表 4-9 紿定河道入滲強度長期趨勢

	給定河道入滲強度長期趨勢 q_R (m/d)	
	旱季	雨季
A	0.22	-
B	0.82	-
C	0.23	0.058

表 4-10 參數檢定前各分區之土壤參數

分區	K_{xx} (m/d)	K_{zz} (m/d)	土壤介質 壓縮係數 α ($m \cdot d^2/kg$)	孔隙率 n	初始不飽和土壤參數				
					材質	θ_s	θ_r	a	m
A	4.2	1.26	0	0.14	礫石	0.14	0.045	0.0028	1.51
B	30.5	10.15	0	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51
C	8.8	2.64	0	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51
D	6.4	1.92	0	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51
E	21.2	6.36	0	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51
F	21.2	6.36	0	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51

表 4-11 穩態模式參數檢定後各分區之土壤參數

分區			K_{xx} (m/d)	K_{zz} (m/d)	土壤介質 壓縮係數 α ($m \cdot d^2/kg$)	孔隙率 n	不飽和土壤參數					
							材質	θ_s	θ_r	a	m	
A		4.2	1.26	10^{-18}	0.14	礫石	0.14	0.045	0.0028	1.51		
B		30.5	10.15	10^{-18}	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51		
C		90.0	30.0	10^{-18}	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51		
D		30.0	10.0	10^{-18}	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51		
E		135.0	27.0	10^{-18}	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51		
F		135.0	27.0	10^{-18}	0.14		0.14	0.045	0.0028	1.51		
河道 底 泥 層 分 段	A	旱	10.0	0.43	10^{-18}	0.43	砂	0.43	0.045	0.145	2.68	
		雨	24.0	0.43	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
	B	旱	12.0	0.43	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
		雨	30.0	0.43	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
	C	旱	3.0	0.43	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
		雨	12.0	0.43	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
廊道 入口		旱	6.0	6.0	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
		雨	25.0	25.0	10^{-18}	0.43		0.43	0.045	0.145	2.68	
混凝土		0.03	0.03	-	0.38	-	0.38	0.03	0.008	1.09		

二、暫態模式率定結果

暫態模式參數檢定優選模式以土壤介質之壓縮係數 α 及河道區域之補注強度



變動量為決策變數，求解優選模式可得旱季之目標函數 Z 之最小值為 1.12；雨季之目標函數 Z 之最小值則為 0.93。

由率定結果可知，土壤介質之壓縮係數 α 為 10^{-18} ；旱季時 A、B、C 河段與雨季時 C 河段之河道入滲強度繪如圖 4-30 至圖 4-33 所示；雨季時 A、B 河段之河川水位則繪如圖 4-34 及圖 4-35 所示：



圖 4-30 旱季時 A 河段之給定河道入滲強度



圖 4-31 旱季時 B 河段之給定河道入滲強度



圖 4-32 旱季時 C 河段之給定河道入滲強度



圖 4-33 雨季時 C 河段之給定河道入滲強度



圖 4-34 雨季時 A 河段之給定河川水位



圖 4-35 雨季時 B 河段之給定河川水位

(一) 觀測水位與觀測集水量率定結果

暫態模式率定後觀測井 C、D 及 E 之觀測水位與模擬水位比較圖分別如圖 4-36、圖 4-38 以及圖 4-40，散佈圖則可繪如圖 4-37、圖 4-39 及圖 4-41；集水廊道之觀測集水量與模擬集水量比較圖如圖 4-42 所示，散佈圖則如圖 4-43 所示。

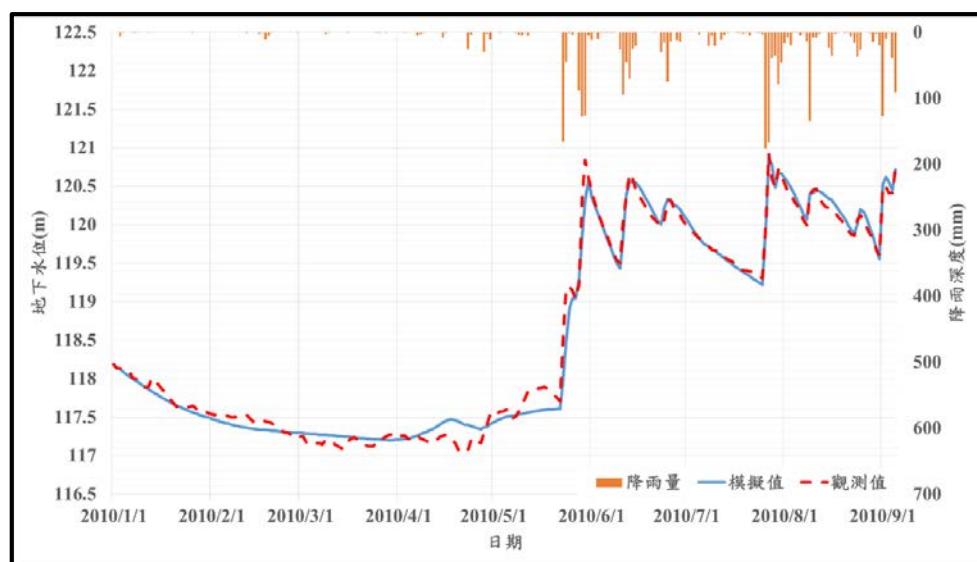


圖 4-36 觀測井 C 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖

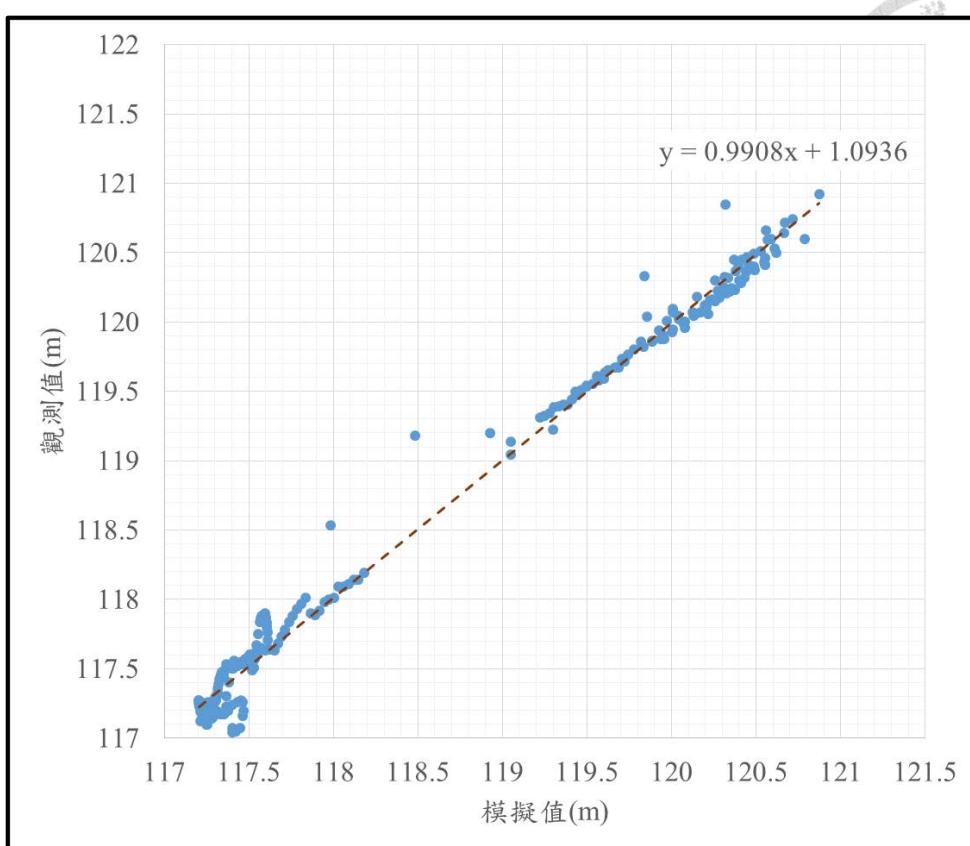


圖 4-37 觀測井 C 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖

由圖 4-36 可知，觀測井 C 旱季暫態模擬水位與觀測水位之平均值分別為 117.56 公尺及 117.59 公尺；雨季暫態模擬水位與觀測水位之平均值則分別為 120.06 公尺及 120.05 公尺。旱季與雨季 RMSE 分別為 0.17 公尺及 0.08 公尺、CE 分別為 0.9 及 0.98、CC 分別為 0.97 及 0.99，均屬於可接受之誤差範圍。圖 4-37 中，散佈圖上之點可繪成迴歸線斜率約 0.99，截距約 1.09。



圖 4-38 觀測井 D 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖

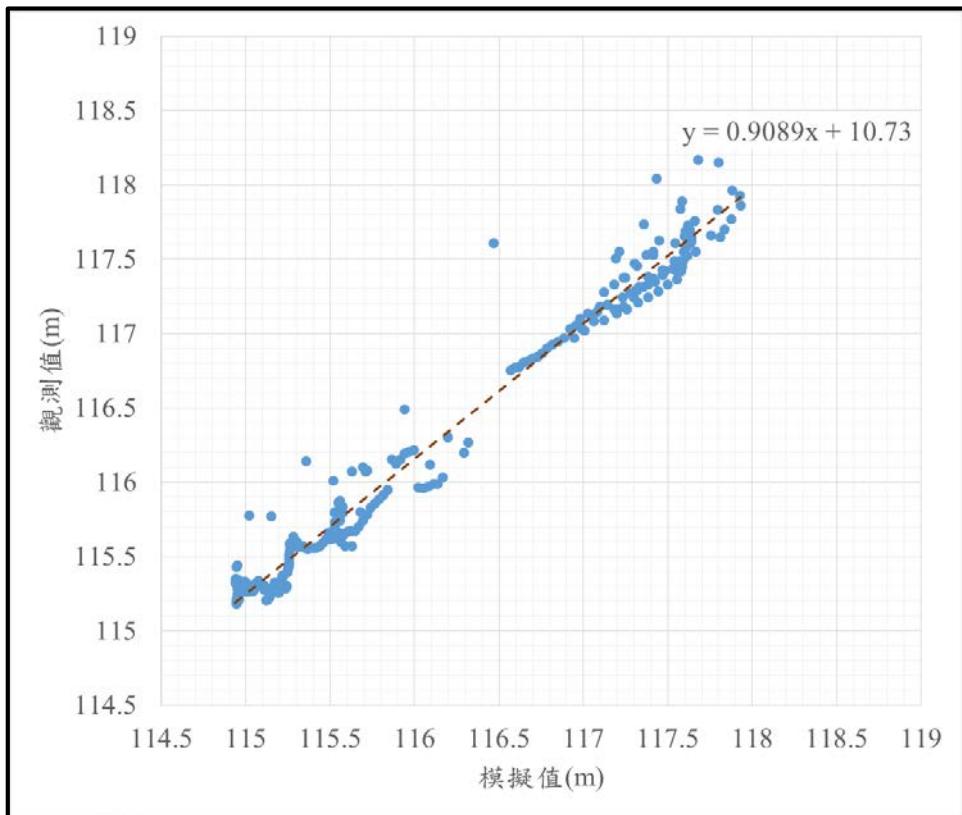


圖 4-39 觀測井 D 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖

由圖 4-38 可知，觀測井 D 旱季暫態模擬水位與觀測水位之平均值分別為 115.43 公尺及 115.64 公尺；雨季暫態模擬水位與觀測水位之平均值則分別為 117.32 公尺及 117.35 公尺。旱季與雨季 RMSE 分別為 0.27 公尺及 0.14 公尺、CE 分別為 0.67 及 0.87、CC 分別為 0.93 及 0.94，除旱季誤差稍大外，其他均屬於可接受之誤

差範圍。圖 4-39 中散佈圖上之點可繪成迴歸線斜率約 0.91，截距則約 10.73。

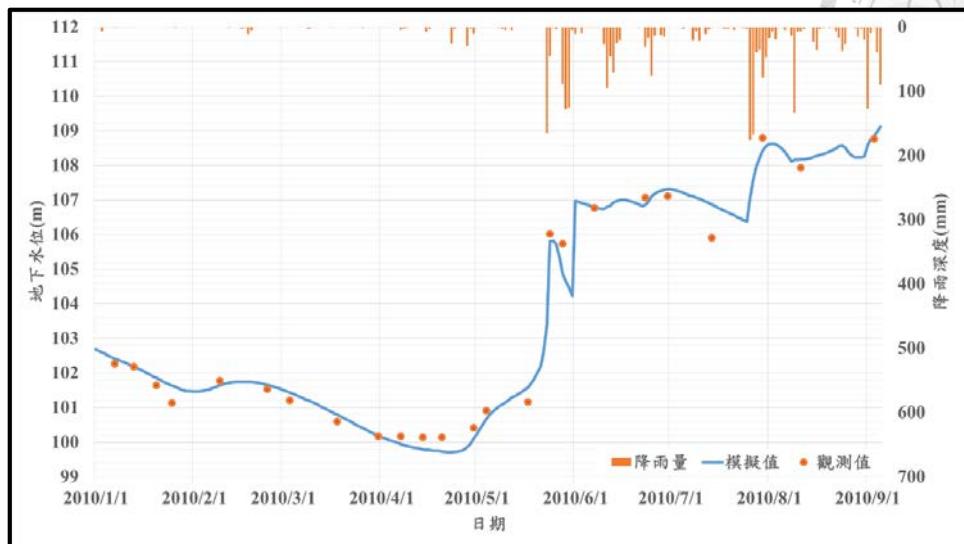


圖 4-40 觀測井 E 之暫態模擬水位與觀測水位比較圖

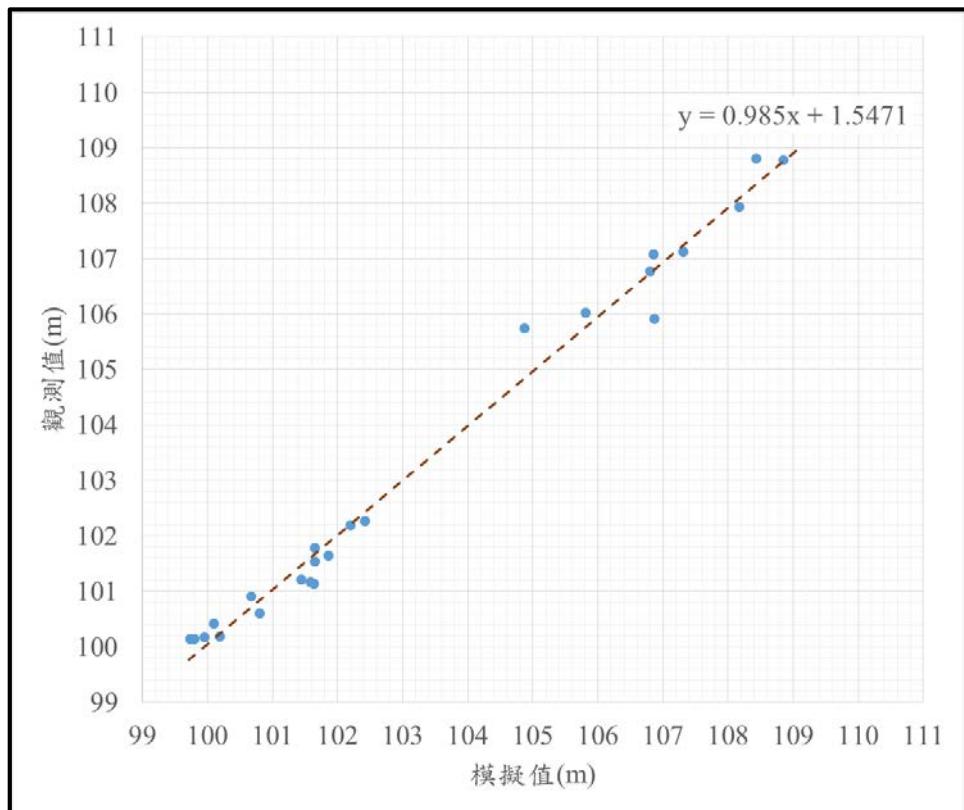


圖 4-41 觀測井 E 之暫態模擬水位與觀測水位所繪散佈圖

由圖 4-40 可知，觀測井 E 旱季暫態模擬水位與觀測水位之平均值分別為 101.35 公尺及 101.60 公尺；雨季暫態模擬水位與觀測水位之平均值則分別為 107.55 公尺及 107.48 公尺。旱季與雨季 RMSE 分別為 0.33 公尺及 0.41 公尺、CE 分別為

0.83 及 0.92、CC 分別為 0.97 及 0.99，均屬於可接受之誤差範圍。圖 4-41 中散佈圖上之點可繪成迴歸線斜率約 0.99，截距則約 1.55。

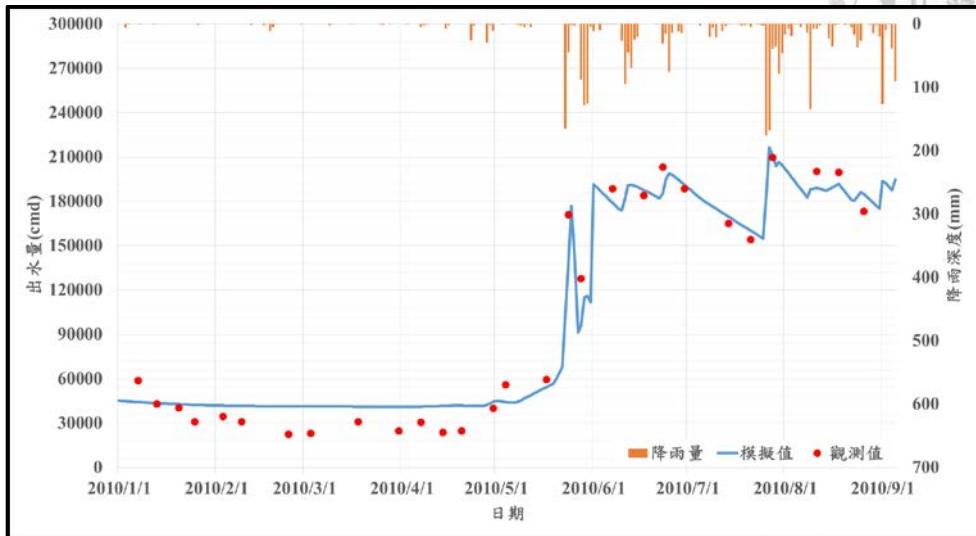


圖 4-42 集水廊道之暫態模擬集水量與觀測集水量之比較圖

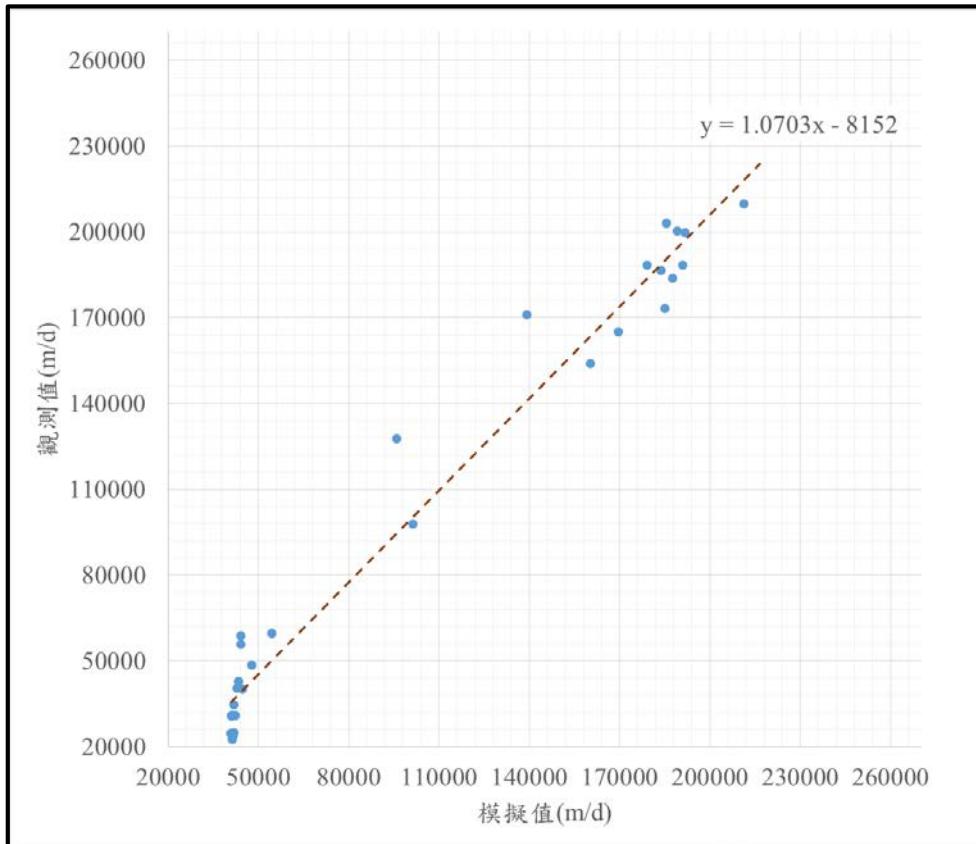


圖 4-43 集水廊道之暫態模擬集水量與觀測集水量所繪散佈圖

由圖 4-42 可知，集水廊道旱季模擬集水量與觀測集水量之平均值分別為

47,865(噸/日)及 48,552(噸/日)；雨季模擬集水量與觀測集水量之平均值分別為 184,369(噸/日)及 186,598(噸/日)。旱季與雨季誤差分別為 RMSE 分別為 15,827(噸/日)及 8,971(噸/日)、CE 分別為 0.83 及 0.72、CC 分別為 0.96 及 0.85，除旱季誤差較大外，其他均屬於可接受之誤差範圍。圖 4-43 中散佈圖上之點可繪成迴歸線斜率約 1.07，截距則約 -8,152。

觀察圖 4-37、圖 4-39、圖 4-41 及圖 4-43 可得知，觀測井 C、D、E 之觀測水位與集水廊道集水量觀測值所繪之散佈圖迴歸線斜率皆與十分接近 1，代表本研究建立之模式對於觀測值隨時間之變化趨勢有一定的掌握度。

綜合以上敘述，分別將旱、雨季時 C、D 和 E 三口觀測井地下水位、集水廊道集水量之觀測與模擬平均值以及各誤差評估指標之值整理如表 4-12。

表 4-12 觀測與模擬平均值以及各誤差評估指標

		觀測平均值	模擬平均值	RMSE	CC	CE
觀測井 C 地下水位	旱	117.56(m)	117.59(m)	0.17(m)	0.97	0.93
	雨	120.06(m)	120.05(m)	0.08(m)	0.99	0.98
觀測井 D 地下水位	旱	115.43(m)	115.64(m)	0.27(m)	0.93	0.67
	雨	117.32(m)	117.35(m)	0.14(m)	0.94	0.87
觀測井 E 地下水位	旱	101.35(m)	101.60(m)	0.33(m)	0.97	0.83
	雨	107.55(m)	107.48(m)	0.41(m)	0.99	0.92
集水廊道 集水量	旱	47,865(cmd)	48,552(cmd)	15,827(cmd)	0.96	0.83
	雨	184,369(cmd)	186,598(cmd)	8,971(cmd)	0.85	0.72

(二) 模式所推估之地下水系統平均補注量

1. 旱季地下水系統邊界平均補注量

林邊溪集水廊道地下水模式所推估之地下水系統旱季平均補注量與出流量可繪如圖 4-44 及列如表 4-13 所示。

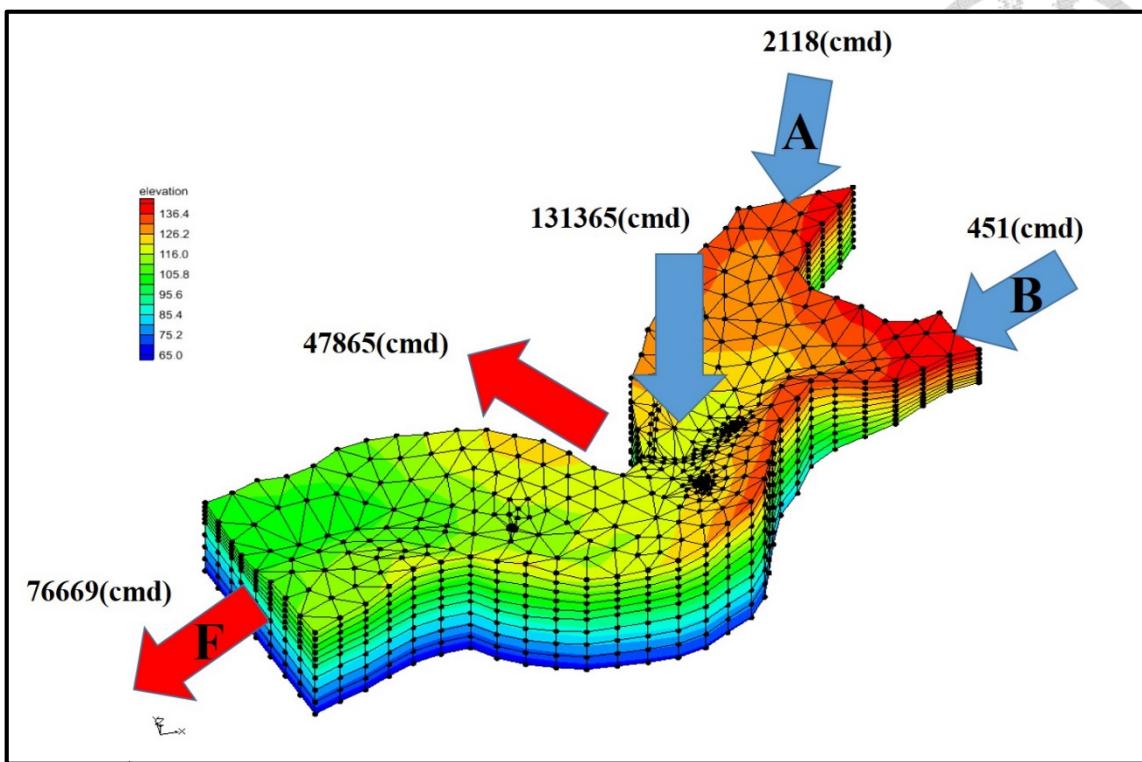


圖 4-44 林邊溪集水廊道地下水水流模式旱季平均補注量與出流量

表 4-13 林邊溪集水廊道暫態數值模式率定之旱季平均補注量與出流量

補注量(cmd)		出流量(cmd)	
上游邊界 A	2,118	下游邊界 F	76,669
上游邊界 B	451		
河床垂向入滲量	131,365	集水廊道	47,864

由圖 4-44 及表 4-13 可知，模式推估之研究區域旱季上游邊界 A 及 B 之補注量分別為 2,118(噸/日)及 451(噸/日)，河床垂向入滲量約 131,365(噸/日)；下游邊界 E 之出流量為 76,669(噸/日)，集水廊道之出流量則為 47,864(噸/日)，與經濟部水利規劃試驗所(2010)實際量測出之 48,552(噸/日)相去不遠。



2. 雨季地下水系統邊界平均補注量

模式所推估之研究區域雨季補注量與出流量可繪如圖 4-45 及列如表 4-14 所示。

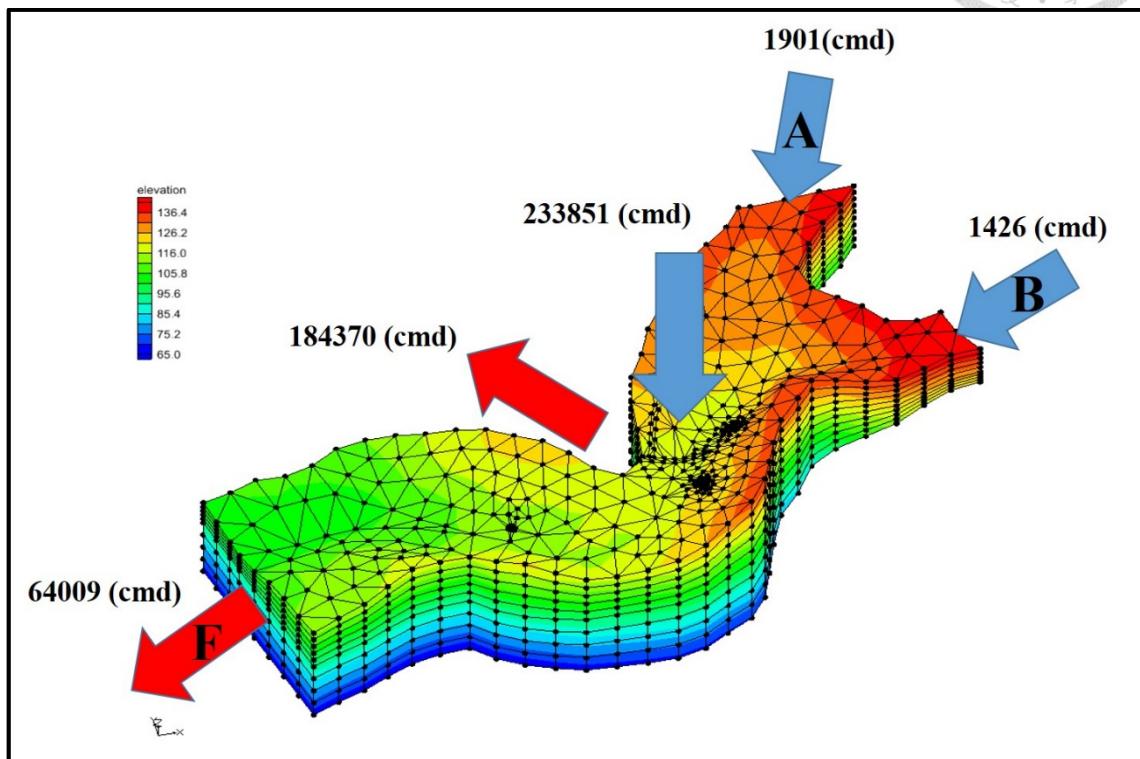


圖 4-45 林邊溪集水廊道地下水水流模式雨季平均補注量與出流量

表 4-14 林邊溪集水廊道暫態數值模式率定之雨季平均補注量與出流量

補注量(cmd)		出流量(cmd)	
上游邊界 A	1,900	下游邊界 F	64,009
上游邊界 B	1,426		
河床垂向入滲量	233,851	集水廊道	184,370

由圖 4-45 與表 4-14 可知，模式推估之研究區域雨季上游邊界 A 及 B 之流量分別為 1,900(噸/日)及 1,426(噸/日)，河床垂向入滲量約 233,851(噸/日)；下游邊界 F 之出流量為 64,009(噸/日)，集水廊道之出流量則為 184,370(噸/日)，與經濟部水利規劃試驗所(2010)所實際量測出之 186,598.08(噸/日)相去不遠。



(三) 河床垂向入滲量結果討論

模式推估與水平衡計算之河床垂向入滲量隨時間變化之比較可繪如圖 4-46 所示。

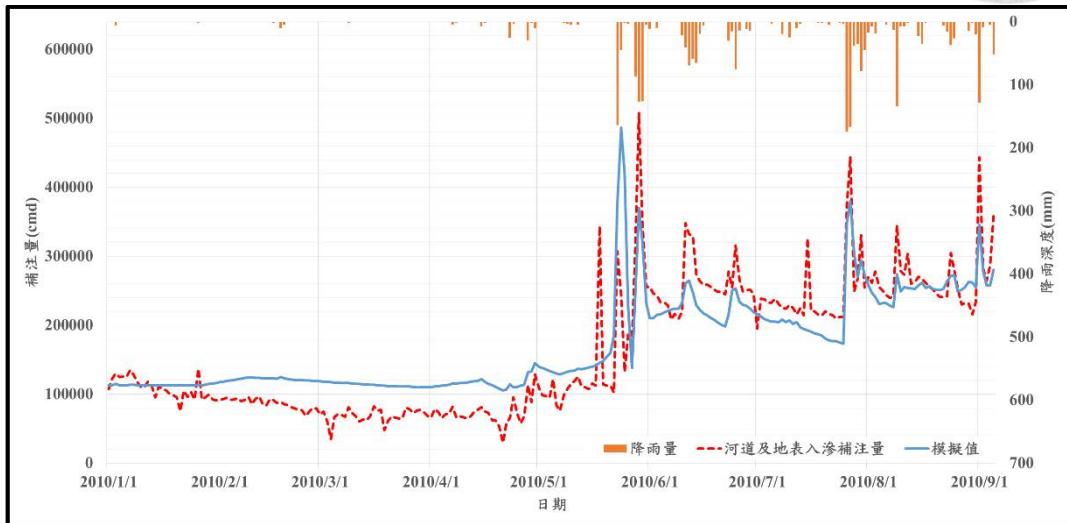


圖 4-46 河床垂向入滲量模擬與水平衡計算結果比較圖

由圖 4-46 可知，於 5 月底至 6 月初期間有一較大之入滲量，推測原因為旱季土壤為持續乾燥狀態，故能在雨季初期有足夠的孔隙使雨水大量滲入，然而幾日後土壤漸呈現濕潤狀態，入滲能力降低，故使入滲量之大小回到一平衡的狀態。模式推估之地下水系統旱季平均河床垂向入滲量為 131,365 (噸/日)，地下水水平衡計算所得之結果則約為 89,633 (噸/日)；雨季之平均河床垂向入滲量約為 233,851 (噸/日)，地下水水平衡計算所得之結果則約為 256,721(噸/日)，兩者之趨勢相近，由此一結果可驗證本模式之模擬結果為合理。模式推估之河道補注量之結果可繪如圖 4-47 所示；模式推估之降雨補注量之結果可繪如圖 4-48 所示。

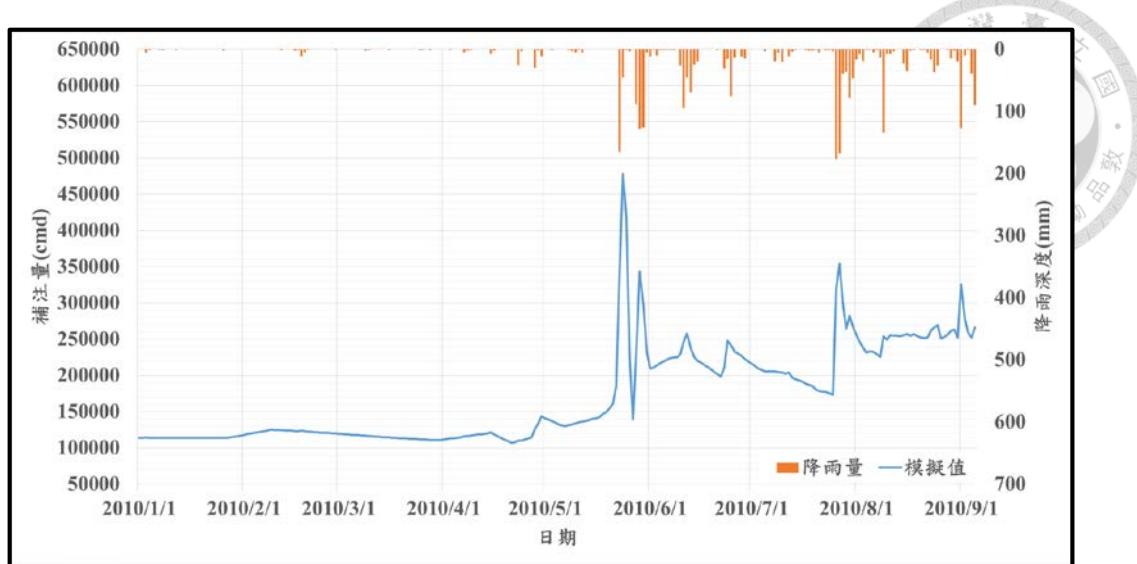


圖 4-47 模式推估之河道補注量

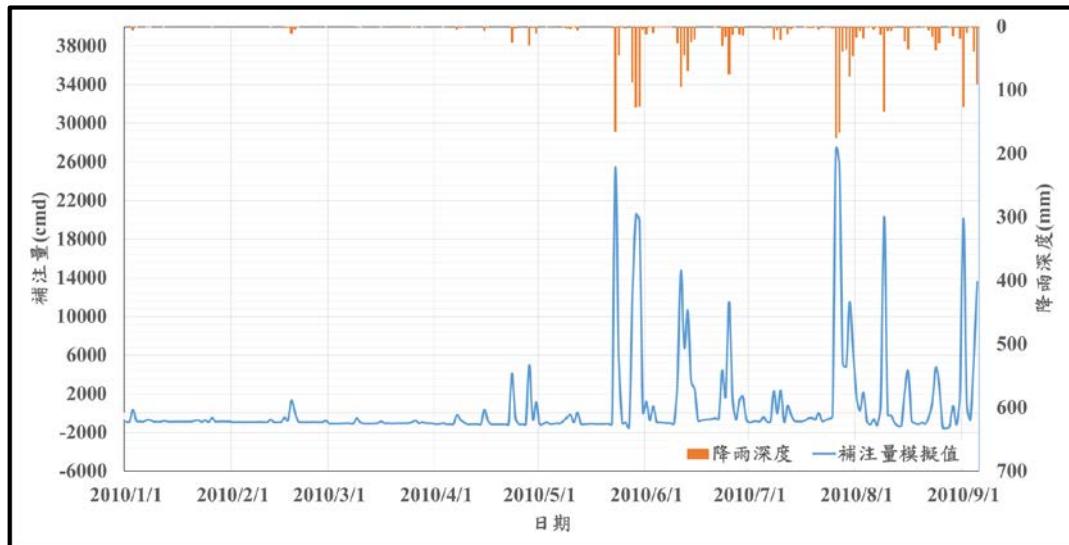


圖 4-48 模式推估之降雨補注量

由圖 4-47 及圖 4-48 可知，旱季之河道補注量約 131,380(噸/日)，蒸發量則約-207(噸/日)，故可知旱季所有地下水補注來源皆為河道補注量；雨季之河道補注量約 232,117(噸/日)，降雨補注量約 1,960(噸/日)分別各佔總量的 99.2% 與 0.8%，由此一結果可以推斷集水廊道主要取水來源為河道入滲補注量。

綜合以上結果，模式推估地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日總補注量 4.28 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 99.2%，上游邊界補注佔 0.8%；總流出量為 4.29 萬噸，其中下游邊界流出量佔 41%，集水廊道集水量則佔 59%。

由率定結果重新進行水平衡計算，知該地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日間，總補注量為 4.19 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 98.9%，上游邊界補注佔 1.1%；總流出量為 4.13 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 35.6%，集水廊道集水量則佔 64.4%。

比較雨季和旱季模式推估之入流和出流量則可發現雨季之河床垂向入滲量約 233,851(噸/日)，集水廊道取水則為 184,370(噸/日)，約佔 80%，每日約僅有 49,481 噸之盈餘，約佔 20%；旱季之河床垂向入滲量約 131,365(噸/日)，集水廊道取水則為 47,864(噸/日)，約佔 36%，每日盈餘卻高達 83,500 噸，佔約 64%，由上述現象可發現雨季入滲量較大、取水量較大且盈餘水量較少，下游邊界 F 之出流量 64,009(噸/日)則小於盈餘水量較大的旱季出流量 76,669(噸/日)。由雨季集水量高達河床垂向入滲量 80%，但旱季卻僅佔 36% 之模擬結果可推論目前集水廊道之埋設位置過淺，地下水位時常低於集水廊道，造成旱季儲存在河床沖積層的水無法像雨季一般被集水廊道順利取得，直接由下游邊界流出，故若能將其加深或新設埋深較深之集水廊道，應能於旱季得到更穩定的集水量，若再進行更深入的評估，則可進一步瞭解該方案對於下游地下水位之影響。

第五章 結論與建議



本研究於數值模式率定方法之建立與數值模式率定方法之應用上均獲致許多結論與經驗，茲分別於 5.1 及 0 中敘述兩者之結論並針對後續研究須注意之處給予數點建議。

5.1 結論

本研究於數值模式率定方法建立與數值模式率定方法應用方面，各得到數項結論，臚列如下：

一、數值模式率定方法建立

本研究於數值模式率定方法建立方面獲得之結論分述如以下二點：

- (一) 本研究之率定方法，首先利用研究區域內之鑽探資料、河床沖積層探測結果以及地下水位觀測井之觀測資料計算其邊界補注以及蓄水量，並配合集水廊道之集水量實測資料進行地下水平衡計算，反推得河床垂向入滲量；其次，分別建立旱季(2010 年 1 月 1 日至 2010 年 5 月 21 日)、雨季(2010 年 5 月 22 日至 2010 年 9 月 5 日)數值模式；其三，建立參數檢定優選模式，以試誤法求得最佳之土壤參數組合、降雨入滲比例、最佳土壤介質之壓縮係數以及河川水位或河道入滲補注強度；最後則針對模擬結果進行討論。
- (二) 本研究在參數檢定之過程中，配合 MATLAB 程式語言進行程式寫作產生數值模式所需之輸入檔，並整理模擬結果輸出檔之數據加以計算觀測水位以及邊界入流或出流量，同時繪圖呈現並且計算誤差，建立一較為簡便且省時之參數檢定流程。



二、數值模式率定方法應用

數值模式率定方法應用方面，將其結論分述如以下五點：

- (一) 本研究將所建立之率定方法應用於林邊溪二峰圳集水廊道，由模擬結果可知，觀測井 C 旱季與雨季 RMSE 分別為 0.17 公尺及 0.08 公尺、CE 分別為 0.93 及 0.98、CC 分別為 0.97 及 0.99；觀測井 D 旱季與雨季 RMSE 分別為 0.27 公尺及 0.14 公尺、CE 分別為 0.67 及 0.87、CC 分別為 0.93 及 0.94；觀測井 E 旱季與雨季 RMSE 分別為 0.33 公尺及 0.41 公尺、CE 分別為 0.83 及 0.92、CC 分別為 0.97 及 0.99；集水廊道集水量旱季與雨季誤差分別為 RMSE 分別為 15,827(噸/日)及 8,971(噸/日)、CE 分別為 0.83 及 0.72、CC 分別為 0.96 及 0.85。
- (二) 林邊溪集水廊道附近地下水平衡之計算結果顯示，該地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日間，總補注量為 4.19 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 98.9%，上游邊界補注佔 1.1%；總流出量為 4.13 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 35.6%，集水廊道集水量則佔 64.4%。
- (三) 林邊溪集水廊道附近地下水流數值模式率定結果顯示，地下水系統於 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 9 月 5 日總補注量 4.28 千萬噸，其中河床垂向入滲量佔 99.2%，上游邊界補注佔 0.8%；總流出量為 4.29 千萬噸，其中下游邊界流出量佔 41%，集水廊道集水量則佔 59%。
- (四) 由率定完成之數值模式推估之旱季平均河道補注量約 131,380(噸/日)，蒸發量則約-207(噸/日)，表示該地下水系統河床垂向入滲補注皆為河道補注；雨季之河道補注量約 232,117(噸/日)，降雨補注量約 1,960(噸/日)，分別各佔總量的 99.2% 與 0.8%，由此一結果可推知該地下水系統之地下水補注量以河道入滲補注量為主。
- (五) 模擬結果顯示，目前集水廊道之埋設位置過淺，造成旱季儲存在河床沖積層的水無法像雨季一般被集水廊道順利取得，直接由下游邊界流出，故若能將其加

深或新設埋深較深之集水廊道，應能於旱季得到更穩定的集水量，日後可再進行更深入的評估，進一步瞭解該方案對於下游地下水位之影響。

三、集水廊道之模擬

集水廊道之處理方面，本研究比較前人之方法，配合多次模擬失敗經驗，確立目前在未知集水量情況下，本研究採用之方法為目前最佳集水廊道概念化方法，如下所述：

- (一) 以刪除網格的方式模擬集水廊道之內部空間。
- (二) 集水廊道周圍材質為左右兩面及底面為混凝土材質，頂面材質則依濾層種類及阻塞程度而有變化。
- (三) 混凝土材質內部邊界節點以給定水頭邊界條件來模擬地下水受重力驅動流入集水廊道之水力特性，頂面因與大氣接觸而可設為壓力水頭為 0；底面則考慮集水廊道底部積水深度，壓力水頭即等於該水深。
- (四) 集水廊道之集水量則在模擬完成後，以將前述之節點流量加總方式取得。

5.2 建議

本研究於數值模式率定方法建立與數值模式率定方法應用之過程中之不足及可能使其更加完善之方式，分述其建議如下：

一、數值模式率定方法建立

數值模式率定方法建立方面，將本研究未臻完美之處及其建議改善方案列於以下四點中：

- (一) 由於河床沖刷或堆積現象使得集水廊道埋深時常改變，建議後續之研究可繼續深入瞭解三維網格之生成及編排，並設計程式以自動由輸入檔修改集水廊道之埋深或位置，而不須經由 GMS 之介面手動修改，如此便可將集水廊道之

埋深或位置作為參數檢定優選模式之決策變數之一，應能提高此參數檢定優選模式於現地利用之完整性。

(二) 本研究已建立一套完整之集水廊道附近地下水數值模數率定流程與參數檢定過程中所需之邊界條件輸入、結果輸出及誤差計算程式碼，建議後續研究可配合 EOF 等方法分析補注量之空間分佈，以減少決策變數，並以其他方法求解優選模式以取代本研究所使用之試誤法，應可建立一完全自動化之參數檢定優選模式。

(三) 本研究之河道分佈由地形條件加以判釋，未詳加考慮地面水流動之物理機制，建議後續之研究可利用地面地下水整合之數值模式，同時演算地面及地下水及其交互關係，應能更符合實際之狀況。

(四) 本研究在旱季時直接給定河道入滲強度來模擬河水滲入河床的現象，但由於該區域河床於旱季時常有完全乾枯的現象，給定滲入強度在某些水量較少的時期可能不甚合理，建議進行現地勘查或以增設流量或水位站觀測河水水位的實際消長現象，以利河道入滲量模擬之合理性。

二、數值模式建立方法應用

本研究已完成現有之集水廊道附近地下水水流數值模式之率定，而前人之調查研究結果顯示，研究區域仍有新設集水廊道設施之開發潛力，故建議未來可在其他位置加入不同埋深與尺寸之集水廊道，並以類神經網路(Artificial Neural Network, ANN)取代數值模式並以本研究模擬所得之結果為初始解，考量興建成本與供水效益之平衡，建立一集水廊道最佳設計之優選模式，並評估其對附近及下游地下水水流況之影響，以供未來集水廊道新建計劃之參考。

三、集水廊道之模擬

本研究依模擬過程遭遇困難以及模擬結果，總結最理想之集水廊道數值模擬



所須具備之資料：

(一) 現地調查

1. 土壤參數：包括水力傳導係數及土壤之不飽和參數。
2. 河床沖積層深度：本研究所使用之鑽探資料僅有一處鑽達岩盤位置，故其他位置仍由概估的方法取得，故未來之集水廊道相關調查若經費有限且要以鑽探方法取得河床沖積層深度時，其深度至少應達岩盤之位置。
3. 數值高程模型測定：由於集水量對集水廊道埋深極為敏感，故須進行數值高程模型的測定，可以光線法或自由測站法等測量方法，繪製集水廊道附近地表之數值高程模型以利於增加集水量模擬結果之準確度。

(二) 水文觀測站

1. 觀測井至少四口：上游、集水廊道周圍及下游各一口用以率定集水廊道附近地下水位及其集水量；下游遠處一口用以作為模擬範圍之下游邊界條件，以利未來評估新設集水廊道對下游地下水位所造成之影響。
2. 河川流量觀測站：由於河水補注影響對於集水廊道影響至關重大，故至少需一座河川流量觀測站用來當作模式建置的依據。
3. 雨量站：雖對模擬結果影響不大，仍須至少建立一座以保持資料之完整性。

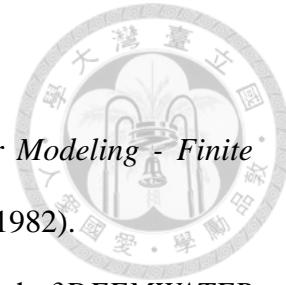
參考文獻



1. Fisher, J., *Hydrology and Climate Class handouts*. University of California. (2008)
https://eng.ucmerced.edu/people/jfisher/files/Courses/Hydrology_and_Climate/20081110/EnveEss110_20081110.pdf
2. Istok, J.D. *Groundwater modeling by the finite element method*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. (1989).
3. Lin, H.C. J., D. R. Richards, C.A. Talbot, G.T. Yeh, J.R. Cheng, H.P. Cheng and N. L. Jones. *FEMWATER - A Finite Element Model of WATER Flow Through Saturated Porous Media*. Oak Ridge National Laboratory. (1997).
4. Mohamed, A. and K. Rushton. "Horizontal wells in shallow aquifer: Field experiment and numerical model." *Journal of Hydrology* 329:98-109 (2006).
5. Mualem, Y. "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resour. Res.* 12:513-522 (1976).
6. Rushton, K.R. and F.C. Brassington. "Significance of hydraulic head gradients within horizontal wells in unconfined aquifers of limited saturated thickness." *Journal of Hydrology* 492:281-289 (2013).
7. Sun, D. and H. Zan. "Flow to horizontal well in an aquitard-aquifer system." *Journal of Hydrology* 321:364-376 (2006).
8. Stehfest, H. "Numerical inversion of Laplace transforms." *ACM* 13(1):47-49 (1970)
9. Thoma, M.J., W. Barrash, M. Cardiff, J. Bradford and J. Mead. "Estimating Unsaturated Hydraulic Functions for Coarse Sediment from a Field-Scale Infiltration Experiment." *Vadose Zone Journal* 13(3):1-17 (2014).
10. van Genuchten, M.Th. "A Closed - form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science Society of America Journal*

44(5):892-897(1980).

11. Wang, H.F. and M.P. Anderson. *Introduction to Groundwater Modeling - Finite Difference and Finite Element Method*. Academic Press, INC. (1982).
12. Yeh, G.T., S. Sharp-Hansen, B. Lester, R. Strobl and J. Scarbrough. *3DFEMWATER & 3DLEWASTE - Numerical Codes for Delineating Wellhead Protection Areas in Agricultural Regions Based on the Assimilative Capacity Criterion*. U.S. Environmental Protection Agency. (1992).
13. Yeh, G.T. and D.S. Ward. *FEMWATER - A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density - Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media*. U.S. Army Corps of Engineers (1979).
14. Zhan, H. and E. Park. "Horizontal well hydraulic in leaky aquifers." *Journal of Hydrology* 281:129-146 (2003).
15. 徐年盛，地下水特論上課講義，臺灣大學土木工程學系(2015)。
16. 許少華、黃文忻、林時猷，"以河底集流管開採河川伏流水量之評估方法探討"，農業工程學報，48(1):39-51 (2002)。
17. 洪智勇、陳忠偉、梁勝淵、謝壠煌、李振誥、丁澈士、杜永昌，"水平集水管河畔取水對河川滲漏及地下水位影響之研究"，農業工程學報，56(2):72-82 (2010)。
18. 李昭順、劉振宇，"台灣西部河川上游經濟穩定的伏流水開發"，臺灣水利，60(1):29-36 (2012)。
19. 郭振泰，放射性廢料設施及其附近地區地下水水流及水質傳輸模擬之研究(二)，行政院原子能委員會成果報告(1992)
20. 張良正，區域性地下水觀測站網檢討 (III) - 屏東平原觀測站網佈井觀測頻率檢討，經濟部水資源局(1996)。
21. 江崇榮、黃智昭、賴典章，以集水廊道開發水資源之可行性研究，經濟部(1997)。





22. 徐年盛、江盛匡，地下集水廊道集水量估算數值模式之建立，經濟部水資源局(2000)。
23. 易任、王如意，應用水文學，國立編譯館(2005)。
24. 張斐章、張麗秋，類神經網路導論原理與應用，滄海書局(2009)。
25. 經濟部水利規劃試驗所，林邊溪、力力溪現有集水廊道剩餘水資源開發潛能與經濟效益概估(2010)。
26. 經濟部水利署，臺灣西部河川河槽作為地下水補注區可行性分析(2011)
27. 經濟部中央地質調查所，臺灣南段山區地下水資源調查總報告(2014)。
28. 郭哲昆，土壤中飽和-未飽和滲流之水限元素法分析-以直接法求解滲流面，臺灣大學土木工程學系碩士論文(1995)。
29. 張誠信，雲林地區地下水水流之三維數值模擬，臺灣大學農業工程學系碩士論文(1996)。
30. 江盛匡，決定集水廊道最佳大小及位置優選模式對建立應用，臺灣大學土木工程系碩士論文(2002)。
31. 曾琮愷，隧道開挖滲流現象之模擬，中原大學土木工程學系碩士論文(2002)。
32. 黃乾育，以集水廊道及滲透牆開發水資源與供水潛能評估之數值模擬，中原大學土木工程學系碩士論文(2007)。
33. 劉怡安，集水廊道最佳設計之研究，臺灣大學土木工程學系碩士論文(2011)。
34. 林子喬，不同灌溉制度對地下水之影響評估，臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文(2013)。