

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

應用重力模擬與地下水數值模式於比流出量推估
—以濁水溪沖積扇為例

**Integrating a Gravity Simulation and Groundwater
Numerical Modeling on the Calibration of Specific
Yield for Choshui Alluvial Fan**

研究生：姚又瑜

指導教授：張良正 博士

中華民國一百零二年七月

應用重力模擬與地下水數值模式於比流出量推估

— 以濁水溪沖積扇為例

**Integrating a Gravity Simulation and Groundwater
Numerical Modeling on the Calibration of Specific
Yield for Choshui Alluvial Fan**

研 究 生：姚又瑜

Student : Yu-Yu Yao

指導教授：張良正 博士

Advisor : Dr. Liang C. Chang

國 立 交 通 大 學
土 木 工 程 學 系
碩 士 論 文

A Thesis

**Submitted to Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of
Master of Science
in**

Civil Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 百 零 二 年 七 月

應用重力模擬與地下水數值模式於比流出量推估

— 以濁水溪沖積扇為例

學生：姚又瑜

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

地下水補注量為地下水永續管理重要的資訊之一，而比出水量或儲水係數之不確定性則直接影響地下水補注量推估之正確性，然而現地比出水量與儲水係數僅能藉由複井抽水試驗取得，必需在試驗場址鑽鑿兩口水井，一用於抽水，另一則用於觀測，因此鑽探成本較單井試驗高，受到鑽井成本的限制，造成比出水量之現地試驗數量遠低於所需，使區域性地下水補注量之推估具有高度不確定性。

有鑑於此，本研究將以濁水溪沖積扇為研究區域，結合現地重力量測、重力模擬與地下水模擬，重力量測為非侵入式之調查方式，以取代傳統複井抽水試驗，進行比流出量之調查，降低地下水補注量推估之不確定性。本研究分別於溪州國小、土庫國中與客厝國小進行重力調查，量測 2012 年五月、八月與十月豐枯水期間的重力變化，量測重力值須先校正海潮、天文潮、大氣壓力與地層下陷等不同機制之影響，校正後之重力殘差即代表地下水量變化對重力之影響。其次，應用重力積分公式，搭配 MODFLOW 系統水量變化進行重力模擬，比較量測重力殘差與模擬重力變化幅度之比值，再據以調整比出水率參數值，反覆進行上述過程，直至模擬重力變化與重力殘差變化幅度吻合，即完成參數調查。

調查結果如下，由於溪州(1)為溪州國小鄰近之地下水觀測站，其曾進

行複井抽水試驗，如複井試驗之結果如可與重力調查結果吻合，即表示重力量測與抽水試驗之高度關聯性。研究結果顯示，抽水試驗結果與本研究調查結果吻合，充分驗證本研究方法之可行性與正確性。在土庫國中與客厝國小方面，原量測重力殘差變化幅度對模擬重力變化幅度之比值分別為 1.8 與 50 倍，經將原參數值分別調大 1.8 倍與 50 倍後，模擬重力則與量測重力殘差吻合。經參數調整後，土庫國中鄰近區域之年淨抽水量由 5.285(百萬噸)提高至 7.232(百萬噸)，而客厝國小則由 11.827 (百萬噸)改變至-3.584 (百萬噸)。

本研究成果顯示應用重力現地量測，配合地下水模擬與重力模擬，可取代傳統之複井抽水試驗，取得現地比出水量，相對於傳統需鑿設複井，花費大量鑽鑿成本，重力量測屬於非侵入式的地球物理量測方法，可節省大量成本，對於降低地下水參數及相關推估值之不確定，有極大助益。

Integrating a Gravity Simulation and Groundwater Numerical Modeling on the Calibration of Specific Yield for Choshui Alluvial Fan

Student : Yu-Yu Yao

Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

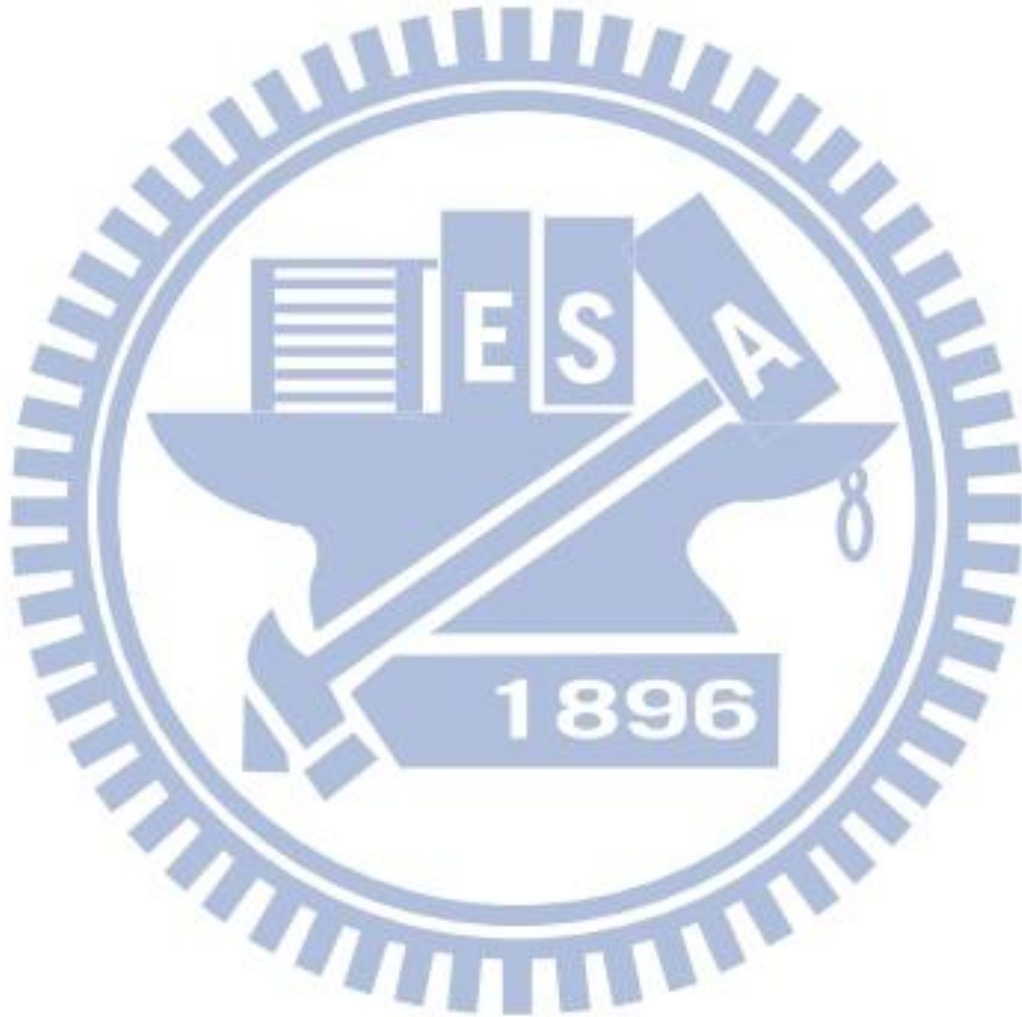
In Taiwan, groundwater resources play a vital role on the regional supply management. Because the groundwater resources have been used without proper management in decades, several kinds of natural hazards, such as land subsidence, have been occurred. The Choshui alluvial fan is one of the hot spots in Taiwan. For sustainable management, accurately estimation of recharge is the most important information. The accuracy is highly related to the uncertainty of specific yield (S_y). Besides, because the value of S_y should be tested via a multi-well pumping test, the installation cost for the multi-well system limits the number of field tests. Therefore, the low spatial density of field test for S_y makes the estimation of recharge contains high uncertainty.

Gravity measurement is a kind of physical geographical approach. Because gravity is a function of the mass of a material and the inverse square of the distance, the gravity measurement has the ability to observe the mass variation of the shallow groundwater system. Using the groundwater level observation and gravity measurement can be used for the calibration of S_y for a numerical model. Because the approach can observe the mass variation of groundwater without well installation, it can overcome the limitation of well construction for the S_y test. Four steps are used in the study. First, gravity

variations of Si-jhou, Tu-ku and Ke-cuo are observed in May, August and November 2012. The measured values are required to remove the effect of other sources, such as ocean tide and land subsidence, and the removed values are called as gravity residual. Second, a numerical model, MODFLOW 2000, has been applied to simulate and calibrate the groundwater variation basing on the four values of S_y obtained from pumping tests. Although the groundwater levels are well-calibrated in the first version of MODFLOW with low spatial density of field test for S_y , the mass variation of groundwater might contain high uncertainty. Third, integrating the Newton gravity integral with the simulated water mass which obtained from the first version of MODFLOW may simulate the gravity variation of the system. Fourth, comparing the ratio between the variation ranges of gravity residual and the one of simulated gravity, the values of S_y can be modified basing on the ratio and assigned in the second version of MODFLOW.

Because a multi-well pumping test has been applied on Si-jhou station, the values of S_y is 0.216. the gravity residual observed from Si-jhou and the measured S_y can be used to verify the proposed approach. Assigning the field test value of S_y in Si-jhou, the simulated gravity can fit the gravity residual well without parameter calibration. The study of Si-jhou is an evidence to verify the ability of the proposed approach. In Tu-ku and Ke-cuo station, the ratios between the variation ranges of gravity residuals and the ones of simulated gravities approximate 1.8 and 50. The values of S_y are modified as 1.8 and 50 times of the values assigned in the first version of MODFLOW. After the parameter re-assignment, the simulated gravities may fit the gravity residuals better in Tu-ku and Ke-cuo. The comparison of water balance between the two versions of MODFLOW indicates that the quantities of recharge for Tu-ku from -5.285 million tons increase to -7.232 million tons, and for Ke-cuo from 11.827 million tons to -3.584 million tons.

The result show that using gravity measurement, groundwater simulation model and the one of simulated gravity, to replace the traditional multi-well pumping test, gravity measurement is a kind of non-intrusion physical geographical approach. Gravity measurement can saving a lot of cost, and also decrease the groundwater parameter uncertainty.



謝誌

耶！我畢業了！首先，感謝我的指導教授 張良正老師，無論是在研究領域上的耐心指導，以及做人處事的諄諄教誨，對於我們都有很大的影響。另外，也要特別感謝 黃金維老師的協助與支持，因為老師的鼓勵使我對於研究更有信心。

當然，一定不會忘記向最敬愛的陳文哥大大致謝，由於你的全力支持與教導，促使我不斷前進，在你的身上我學到『只要有心，就會成功』！你在美國一定會發光發熱的啦！還有我們 419 研究室的夥伴們，彬哥、祐誠、雲直、逸儒、逸美、怡瑄、深惠、小肥瑜、阿布、呱呱、勺勺、國陞、劉鎧、海倫、奕璋、阿文、曉芸、韋炫、又田、誠胤、修緯...從一開始的漆彈大戰、一起修課趕作業、參加教育訓練、被計畫追著跑、去美國研討會大吃大喝灑錢看秀、一起唱歌吃飯...這些點點滴滴都是最美好的回憶，謝謝你們的陪伴，讓研究生生活更加精彩豐盛。在此還要特別感謝黃金維老師團隊的大力幫忙，鄭博、程博、紫猗、冠宏、小光...謝謝你們總是義不容辭的解決我在研究上的困難，讓對於重力方面一竅不通的我，能夠快速吸收理解。

最後，要感謝家人無條件的付出與關愛，無論做任何決定總是在身邊支持鼓勵，每次回家都會補充滿滿的元氣！喔耶～永遠愛你們。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	III
謝誌.....	VI
目錄.....	VII
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 地下水數值模式.....	4
2.1.1 地下水數值模式.....	4
2.1.2 參數檢定.....	6
2.2 重力試驗.....	8
第三章 理論敘述.....	10
3.1 地下水數值模擬與參數檢定.....	10
3.1.1 MODFLOW 控制方程式.....	10
3.1.2 參數檢定.....	10
3.2 重力試驗與重力積分.....	15
3.2.1 重力量測原理、設備.....	15
3.2.2 應用重力積分技術於地下水負載.....	17
第四章 結合重力量測於濁水溪沖積扇比流出率檢定.....	19
4.1 研究區域與相關現地參數概述.....	19
4.2 地下水數值模式初步建置與檢定.....	23

4.2.1	地下水分層架構、邊界條件及網格劃分	23
4.2.2	模式輸入資料	30
4.3	現地重力量測結果	38
4.4	應用重力變化於濁水溪沖積扇比流出率之檢定	45
4.4.1	重力積分半徑影響分析	45
4.4.2	比流出率檢定	47
4.4.3	比出水率檢定成果	58
4.4.4	專家系統參數檢定	64
4.5	水平衡分析	66
第五章	結論與建議	68
5.1	結論	68
5.2	建議	70
參考文獻	71
附錄 A	環境改正	76

表目錄

表 1.3-1 濁水溪沖積扇補注量相關研究比較.....	5
表 4.1-1 濁水溪沖積扇儲水係數或比流出量現地試驗值.....	22
表 4.2-1 濁水溪沖積扇淺層觀測井列表(33 口井).....	35
表 4.3-1 絕對重力儀施測地點.....	42
表 4.3-2 溪州國小量測結果.....	42
表 4.3-3 土庫國中量測結果.....	42
表 4.3-4 客厝國小量測結果.....	42
表 4.5-1 各區域修正前後淨補注量.....	66

圖目錄

圖 1.1-1 研究流程圖	3
圖 3.1-2 參數檢定流程圖	11
圖 3.2-1 FG5 絕對重力儀與各部件明細[Micro-g Lacoste FG5 Manual]	17
圖 4.1-1 濁水溪沖積扇(海園-石榴)水文地質剖面圖	20
圖 4.1-2 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖(繪製於民國 98 年)	21
圖 4.2-1 濁水溪沖積扇概念分層	24
圖 4.2-2 濁水溪沖積扇地下水邊界之概念圖	25
圖 4.2-3 濁水溪沖積扇之模擬範圍	27
圖 4.2-4 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網與邊界條件	28
圖 4.2-5 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網與邊界條件	29
圖 4.2-6 濁水溪沖積扇模式 AA'段剖面圖	30
圖 4.2-7 含水層一徐昇氏分區	31
圖 4.2-8 含水層二徐昇氏分區	32
圖 4.2-9 含水層三徐昇氏分區	32
圖 4.2-10 淺層含水層種類與已知儲水係數之分佈	34
圖 4.3-1 絕對重力儀(FG5)架設於客厝國小	39
圖 4.3-2 GPS 監測站架設於客厝國小	40
圖 4.3-3 重力測站於濁水溪沖積扇分佈位置	41
圖 4.3-4 GPS 連續監測地表高程變化曲線—客厝國小	43
圖 4.3-5 GPS 連續監測地表高程變化曲線—土庫國中	43
圖 4.3-6 GPS 連續監測地表高程變化曲線—溪州國小	44
圖 4.4-1 影響半徑分析圖	46
圖 4.4-2 加入虛擬觀測站之徐昇式網格分區	49

圖 4.4-3 客厝國小內插水位與鄰近三站觀測水位之變化.....	50
圖 4.4-4 土庫國中內插水位與鄰近三站觀測水位之變化.....	50
圖 4.4-5 比流出量或儲水係數分布圖(修改前).....	52
圖 4.4-6 模擬水位振幅分布圖(修改前).....	53
圖 4.4-7 模擬重力振幅分布圖(修改前).....	54
圖 4.4-8 溪州國小實測重力與模擬重力變化圖.....	56
圖 4.4-9 土庫國中實測重力與模擬重力變化圖.....	57
圖 4.4-10 客厝國小實測重力與模擬重力變化圖.....	57
圖 4.4-11 調整範圍示意圖.....	58
圖 4.4-12 土庫國中實測重力與模擬重力變化圖(修正後).....	60
圖 4.4-13 客厝國小實測重力與模擬重力變化圖(修正後).....	60
圖 4.4-14 比流出量或儲水係數分布圖(修改後).....	61
圖 4.4-15 模擬水位振幅分布圖(修改後).....	62
圖 4.4-16 模擬重力振幅分布圖(修改後).....	63
圖 4.4-17 觀測水位與檢定水位檢定關係圖(修改前).....	64
圖 4.4-18 觀測水位與檢定水位檢定關係圖(修改後).....	65
圖 4.5-1 土庫國中修正前後淨補注量比較圖.....	67
圖 4.5-2 客厝國小修正前後淨補注量比較圖.....	67

第一章 前言

1.1 研究動機

台灣地區蘊含豐富的地下水資源，在區域供水上扮演重要的角色，但是許多區域地下水因未經妥善管理，過度抽水導致嚴重之環境衝擊，例如地層下陷或海水入侵等，濁水溪沖積扇為台灣地區最重要的地下水區之一，區域大量使用地下水，且部分區域已因過度抽水，而有嚴重地層下陷問題。

地下水資源之永續利用需基於收支平衡之觀點，因此在進行地下水資源之管理，了解年地下水補注量為地下水管理最重要的資訊。傳統上多以地下水數值模式推估地下水補注量，搭配現地觀測之觀測水位變化，模式藉由模擬地下水水位變化，進一步推估系統之補注量或抽水量，掌握系統之目前收支狀況。水文地質參數的給定為地下水模擬最重要的一環，參數不確定性將影響補注量或抽水量推估之不確定性，其中又以比出水量或儲水係數最為直接。

比出水量或儲水係數可用以描述多孔介質中，地下水水位與系統水量之關係，故如參數數值如具有不確定性，其直接影響後續之補注量與抽水量之推估。由於比出水量與儲水係數僅能藉由複井抽水試驗取得，因此需在鄰近區域鑽鑿兩口水井。以透水係數而言，由於其僅需要單井即可進行試驗，故地下水觀測站網於設置觀測井時，必藉由抽水試驗取得現地透水係數。對於比流出量或儲水係數而言，則受到複井試驗鑽探成本之限制，其現地試驗值數量遠低透水係數。以濁水溪沖積扇為例，合計共建置 203 口觀測井，全數僅有 10 口進行複井抽水試驗，僅有 6 口非侷限水井有比出水率，分別為合興(1)、溪州(1)、柑園(1)、二水、烏塗(2)與東光(1)；僅有 4 口侷限水井有儲水係數，分別為線西(1)、海園(1)、田洋(1)與荊桐(1)觀測井。由於現地試驗值大幅短缺，使得後續補注量與抽水量之推估，具有高度不確定性，進一步影響地下水之永續管理。

重力量測為地球物理的量測方法，現地重力受到地球中各種物體質量變化

之影響，包含海潮、天文潮、大氣壓力、地殼變形與地下水系統等。重力公式為物體質量與距離倒數平方之函數，因此重力現地量測可以呈現一定範圍內地下水系統之質量變化，相對於傳統需藉由侵入式之井體進行複井抽水試驗，重力量測直接以非侵入式的方式進行調查，可有效克服建置成本之限制。

1.2 研究目的

本研究將建置地下水數值模式，推估區域性淨補注量，並藉由時序重力量測資訊，降低比出水率之參數不確定性，以提高濁水溪沖積扇補注量與抽水量推估之精確度。

1.3 研究流程

本研究之研究流程如圖 1.1-1 所示，主要分為四大步驟，首先應用地下水數值模式(MODFLOW 2000)，搭配少量之比出水率(S_y)現地試驗值，初步建置與模擬濁水溪沖積扇地下水系統之水量變化；其次以觀測水位搭配專家系統檢定抽水量，進而模擬地下水系統的蓄水量變化；接著應用重力積分公式，搭配前述 MODFLOW 系統之蓄水量變化進行重力模擬，比較現地重力殘差與模擬重力之變化幅度；最後依據量測重力與模擬重力變化幅度之差異，調整系統參數，完成比出水率之檢定。

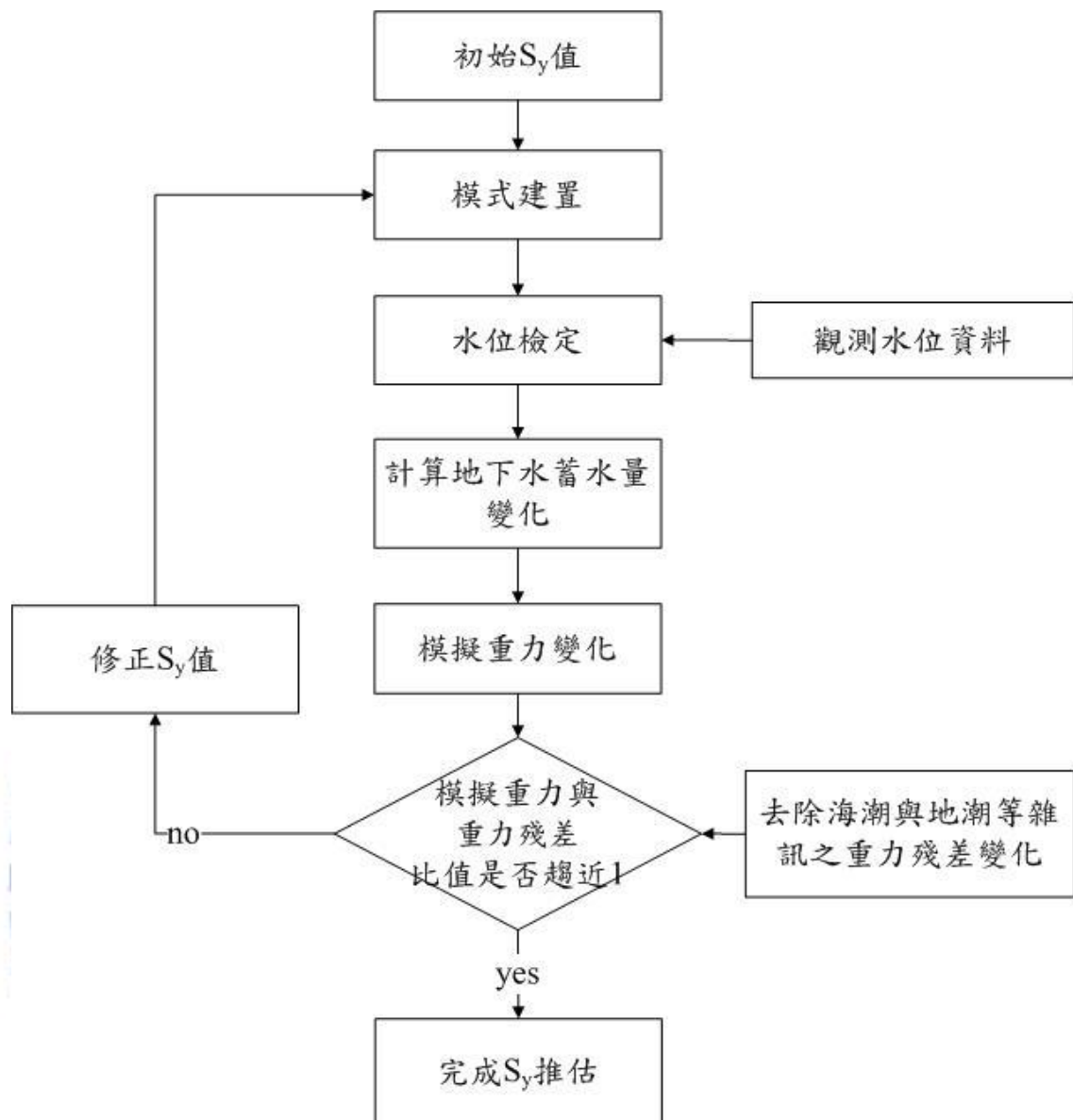


圖 1.1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本研究將結合現地重力量測，其原理為運用重力積分公式，呈現一定範圍內地下水系統之質量變化，藉由非侵入性的方式進行地質參數調查。配合建立地下水數值模式，以數值試驗的方式，推估地下水系統之比出水率。

2.1 地下水數值模式

2.1.1 地下水數值模式

關於濁水溪沖積扇地下水系統之抽補強度研究甚多，如劉聰桂(1996)利用熱核爆氫示蹤方法評估地下水補注量；交通大學(2005)以一維垂向之溼地入滲係數和旱地降雨入滲率，評估地下水補注量；姜儷安、歐陽湘(1997)、葉文工(1998)、林再興(1998)則利用二維多層地下水流數值模式逆推地下水收支；李振誥(1999)利用基流資料估記法推估濁水溪沖積扇地下水補注量；江崇榮等人(2006)、地調所及交通大學(2010)、徐年盛、江崇榮、汪中和等(2012)則以水位歷線法推估地下水補注及抽取；上述利用各種研究方法，推估濁水溪沖積扇歷年來之地下水補注量，約於 0.35 至 1.26(百萬噸/平方公里)之間，而總補注量約在 3.76 至 23.05(億噸/年)不等，上述重要文獻數據整理至表 1.3-1。

表 1.3-1 濁水溪沖積扇補注量相關研究比較

方法	估算人	單位面積補注量 (百萬噸/平方公里)	面積	總補注量 (億噸/年)
碳十四定年與氚示蹤	劉聰桂 (1996)	0.50	濁水溪沖積扇 /約 1800 平方公里	9
3DFEWA 數值模擬	張信誠、劉振宇(1996)	0.44	雲林地區 /約 1120 平方公里	4.88
MODFLOW 數值模擬	姜儷安、歐陽湘 (1997)	0.42	雲林地區 /約 1120 平方公里	4.66
MODFLOW 數值模擬	葉文工 (1998)	0.5	濁水溪沖積扇 /約 1800 平方公里	8.97
非飽和層一維 長期水文模式	劉振宇 (1998)	0.59 至0.61	濁水溪沖積扇 /約 1800 平方公里	10.06 至 10.48
水平衡法	陳進發等 (1998)	0.35 至0.55	彰化地區 /1074平方公里	3.76至 5.91
MODFLOW 數值模擬	林再興(1998)	0.97	彰化地區 /約 830 平方公里	8.07
基流資料估計法	李振誥 (1999)	0.52	濁水溪沖積扇 /約 1800 平方公里	9.3
MODFLOW 數值模擬	張良正、劉振宇(2002)	1.26	雲林地區 /約 1120 平方公里	14.11
地下水歷線分析法 (未考慮未降雨時期 之邊界地下水補注 和地下水灌溉補注)	江崇榮等 (2006)	0.62	濁水溪沖積扇 /2079 平方公里	12.89
地下水歷線分析法	交通大學 (2010)	0.88	濁水溪沖積扇 /2079 平方公里	18.28

地下水歷線分析法 (同時考慮雨水補 注、河水補注、邊界 地下水補注和地下 水灌溉補注)	徐年盛、江崇 榮、汪中和 (2012)	0.90	濁水溪沖積扇 /2562 平方公里	23.05
---	---------------------------	------	----------------------	-------

2.1.2 參數檢定

如前所述，地下水數值模式常應用在許多地下水管理問題中，惟地下水數值模式的建置需大量之水文地質參數，如透水係數(Hydraulic conductivity (K)或儲水係數(Storage coefficient (S)，以及其他抽水量、補注量與邊界條件等資料，這些參數常難以直接現地量測，或因成本之關係其資料密度常遠低於模式所需，因此模式建置過程中，常需以參數檢定方式，逆向推求部分參數數值，此一般稱為參數檢定(Yeh, 1985)。

參數檢定最常用的方式為藉由調整模式參數值而使模式模擬值接近觀測資料值，而參數調整又可分為人工調整或是藉由演算法由電腦程式調整。人工檢定最大的問題為費時費工，為了解決這個問題，許多研究利用優選法進行模式之自動參數檢定(Mazi et al., 2004; Mazi et al., 2000; Hill et al., 1992)。在電腦普及計算速度突飛猛進的現在，自動參數檢定妥善利用此優點，達到相較於人工率定省時省力的目的。然而，應用優選法於參數檢定需先確認並建立目標函數與限制式，亦即需先將如何調整參數的想法結構化成數學方程式，因此相較於人工參數檢定較缺乏彈性。傳統上，採梯度類型優選法之自動化參數檢定工具，如 Ucode 等，由於梯度類型之優選方法需以參數與水位之敏感度矩陣訂定搜尋方向，為使參數檢定模式通用化，在此常以差分方式建立敏感度矩陣。然差分化敏感度矩陣，需藉由反覆呼叫模擬模式方可求得，故其計算量隨著參數維度大幅增加，對於高參數維度問題之計算量將大幅增加。且其梯度型演算法受到初始搜尋位置的影響極劇，若初始解不同常造成不收斂或不一致之結果。

人工參數檢定之優點為模式建立者可藉由參數檢定過程，增加對模式的了

解，修正模式架構上可能的誤差。Boyle (2000)比較了水文模式之人工參數檢定及應用優選法之參數檢定，並且合併兩種參數檢定方法以改善兩者之缺點。他比較人工參數檢定與應用優選法之參數檢定所得到之結果，指出前者較能被水文學家所接受，因為人工參數檢定之過程不僅可以被檢視，而且能幫助水文學家進行結果分析。惟人工參數檢定之缺點為參數推估過程複雜而冗長，費時費力，且其經驗與知識多累積於人，因此如將模式知識傳承轉移給他人，也是應用人工參數檢定上的一大問題(Madsen et al., 2001; Chau and Chen, 2001; Chau, 2004; Chau, 2006)。

有鑑於人工參數檢定的專業知識轉移困難，以往有許多研究應用專家系統協助進行參數檢定(Abbott, 1991; Chau and Chen, 2001; Chau and Albermani, 2002, 2003; Chau, 2004; Kim, 2007)，以求兼顧知識透明度與檢定效率。專家系統是一個仿人類專家之智慧型電腦系統，使用者可以透過與專家系統的互動介面來描述問題，專家系統再藉由其內部已定義好的知識與推理來回答問題。因此專家系統的建置，即是在將專家的知識進行結構化及表達，亦即在將專家知識進行透明化。陳(2008)以專家系統應用於穩態及暫態地下水流模式之參數檢定，其著重於檢定模式之透水係數(K)及儲水係數(S_s 與 S_y)。王(2010)與張(2011)則延續陳(2008)之架構，分別應用專家系統於穩態與暫態淨補注量(net Recharge, Q)之檢定上，兩者除以設計案例驗證系統正確性外，均延伸應用於濁水溪沖積扇上。研究指出，以專家系統為基礎之參數檢定系統，除可克服因差分帶來之大量計算量外，對不同初始解而言，均可有類似之檢定結果，顯現該參數檢定系統之強健性。本研究將延續張(2011)之成果，應用於濁水溪沖積扇之參數檢定上。

2.2 重力試驗

基於牛頓重力理論，萬有引力是為鄰近質量除以距離平方之函數，因此重力場的時空變化受到自然界中許多機制的影響，包含潮汐、大氣壓力、固體潮、地層變形與地下水的水文變化等之影響。

對於地下水而言，當地下水體水量的增減，將影響鄰近區域的重力場。Tapley et al. (2004) 與 Wahr et al. (2004) 指出短期的重力變化，主要受到土壤中蓄水量變化的影響。因此，藉由地下水位之觀測值，可用以推估地下水蓄水量的變化，進而移除飽和含水層與土壤含水量對重力之影響(Rodell and Famiglietti, 2002; Rodell et al., 2007)。前述研究以水文觀測資料為基礎，進而移除地下水等水文變化對重力之影響。Hasan and Troch (2006)應用超導重力儀量測重力場之時序變化，該研究指出重力殘差變化，與飽和水位、未飽和含水量及降雨量均具有高度相關，其中又未飽和含水量相關性最高。

在參數推估方面，國外以重力量測應用於儲水係數或比流出量之推估上，Pool and Eychaner (1995)、Pool(2008)與 Gehman(2009)等研究均以無限延伸之布格平板，來近似模擬現地地下水蓄水質量變化對重力之影響，再以此模型反演系統之比流出量(specific yield, s_y) 等水文地質參數。在布格平板的假設下，計算上可大幅簡化，但由於布格平板係假設一個無限延伸的均質薄平板，對於實際地下水問題而言，地下水系統存在高度異質性，且亦地下水系統亦有其邊界，而非無限延伸之問題，因此在此假設下，可能引入參數檢定上之不確定性。

USGS (1997)亦在美國亞利桑納州進行重力量測，於 1992 年 12 月至 1994 年 1 月共 5 個時間點量測重力值，藉由豐枯水期間水位變化，搭配重力場之變化，探討系統儲水係數。研究指出若岩性屬於河道沉積物，儲水係數將介於 0.15 ~ 0.34 之間；若岩性較為膠結，儲水係數則介於 0.07~0.18 之間。此外，USGS (2003)於美國加州再次進行現地注水試驗，藉由注水行為對於地下水水位之影響，以重力變化與水位變化，研究指出該區域儲水係數約為 0.13，單場注水可使得重

力增加 66(micro-gals)。Christiansen 等人(2011)在研究區域同時量測地下水位與重力場的時空變化，同時藉由兩種觀測資料，建立系統自動參數檢定系統。該研究指出，相對於傳統僅以地下水位進行參數檢定，同時考量重力資訊可使參數檢定結果更敏感與準確。

綜合上述研究，顯示應用重力量測資料推估儲水係數為一可行之方法。因此，本研究將參考前述文獻，建置地下水數值模式，推估區域性淨補注量，並藉由時序重力量測資訊，降低比出水率之參數不確定性，以提高濁水溪沖積扇補注量與抽水量推估之精確度。



第三章 理論敘述

本研究係結合地下水數值模擬與重力量測技術，進行比出水量之檢定，本章理論概述分別討論地下水數值模擬與參數檢定，以及重力試驗與重力積分兩者。

3.1 地下水數值模擬與參數檢定

第 3.1.1 小節主要說明 MODFLOW 之地下水流控制方程式，當使用者完成網格切割、邊界條件與參數設定後，模式即可依控制方程式求得模擬水位。但部分參數缺乏紀錄或無現地調查，因此難以完成正向模擬，因此於第 3.1.2 說明應用逆問題的建置方式，進行系統之參數檢定。

3.1.1 MODFLOW 控制方程式

MODFLOW 核心所考量之，三維飽和地下水流可以下列之偏微分方程式來表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(3.1.1)$$

其中

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ：沿主軸 X,Y,Z 方向的透水係數(Hydraulic Conductivity)(LT^{-1})

h：總水頭(Potentiometric Head)(L)

W：單位體積的體積流率(Volumetric Flux)，代表源匯項 (Sources/Sinks)(T^{-1})

S_s ：孔隙介質的比儲水量(Specific Storage) (L-1)

t：表時間(T)

3.1.2 參數檢定

地下水流模式之正向模擬是指，使用者需先輸入水文地質參數、抽水量或補注量等，數值模式即可求得模擬水位，藉由輸入正確參數，以求得模擬水位

之流程，可稱為正向模擬。然部分參數因為缺乏紀錄、無現地調查或參數不確定性大等原因，如以此殘缺不全或具有高度不確定性之參數值輸入模式，模式求得之模擬水位將與觀測水位有極大之誤差。

為確保數值模式可正確模擬地下水系統，可以觀測水位為目標，反覆迭代調整前述參數。如觀測水位與模擬水位間之誤差可降至可接受之檢定範圍內，該組參數即可視為正確值，此即稱為參數檢定。由於係以觀測水位與模擬水位之誤差最小為目標，藉此逆向推估參數值，亦可稱為逆問題(inverse problem)。

本研究係採用王雲直(2009)與張弼舜(2010)開發之專家系統參數檢定系統，系統是以專家系統為檢定核心，擷取參數檢定專家之知識，搭配系統推論法則進行參數檢定。系統檢定流程如圖 3.1-2 所示，在參數檢定開始後，系統首先初始化參數值，即淨補注量及抽水量，並讀入相關參數的設定資訊，如分區設定、觀測井位置、觀測水位等。

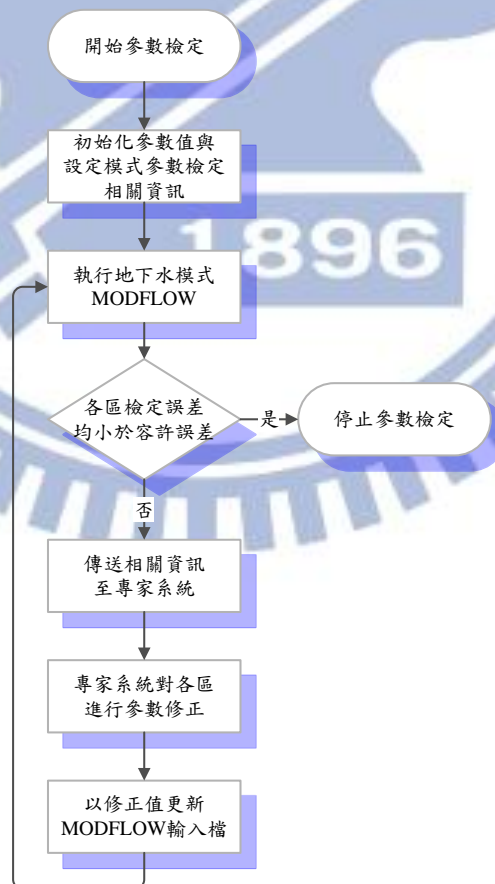


圖 3.1-2 參數檢定流程圖

在完成初始參數設定後，接著執行地下水模式 MODFLOW，MODFLOW 完成地下水流模擬後，將地下水位輸出成 ASCII 格式之檔案。

下一步則為專家系統前處理器判斷各分區之觀測水位與模擬水位之誤差(以下稱為檢定誤差)是否均小於容許誤差。當有一分區之檢定誤差超過容許誤差，專家系統前處理器則會取出各分區的相關資訊，包括水位高、淨補注量或抽水量、模擬水位與觀測水位誤差以及上次參數檢定所得參數修正量，然後傳入專家系統進行推論分析。

將所需資訊傳送至專家系統後，系統接下來會執行專家系統，專家系統依據知識庫中之規則集合(rules)，並搭配推理機(inference engine)之運作，而推論出各區的參數修正量。

當各區待檢定之參數，由專家系統分析出修正量後，專家系統後處理器再將各修正量依據 MODFLOW 輸入檔格式，對 MODFLOW 輸入檔進行更新。

接著再次執行 MODFLOW，計算出更新參數後的地下水位，再由專家系統前處理器判斷各分區檢定誤差是否均小於容許誤差，若是則停止參數檢定，若否則反覆執行上述步驟，直至所有分區檢定誤差均小於容許誤差。

● 參數檢定資訊系統平台

專家系統乃一模仿人類專家且具有決策能力的智慧型電腦系統，本研究採用 CLIPS(C Language Integrated Production System)建立地下水模式參數檢定專家系統，CLIPS 乃一方便採用物件導向概念，用以建立專家系統之工具。在本研究中，地下水模式以分區為概念進行參數檢定，一個分區即為一個物件，在 CLIPS 中則以建立實例(instance)的方式應用物件導向概念。在每個實例(物件)中，則有若干屬性(slot)代表各分區的特性，如 K 值、所在分層、淨補注量或抽水量、模擬水位與觀測水位誤差及各種參數調整依據。研究所建立之專家系統，乃將熟悉地下水模式參數檢定之人類專家所具有之經驗及知識轉換成規則(Rule)並將之存放於知識庫(Knowledge Base)，當專家系統對地下水模式進行參數檢定時，

專家系統依據所輸入之情況並透過推理機(Inference Engine)對知識庫內之規則進行規則推論(Rule Inference)，其推理結果即為所輸入問題之答案。

● 參數檢定規則與推論

在建立專家系統之前，必須先擷取參數檢定之經驗及知識。由於本研究室之研究團隊，在地下水檢定方面已有相當多研究，相關經驗豐富，因此與研究團隊之學長以及指導教授進行訪談及討論，之後再依據討論結果，歸納出以下幾點概念：

一般地下水流模式中，由於受到流線的影響，使得上游進行調整時，會對下游影響較大；而下游進行調整時，對上游影響較小。因此模式大多會從上游開始往下游調整。

1. 在多層地下水模式檢定中，由於表層補注量的大小對於下層含水層抽水量有顯著的影響，因此進行人工檢定時，通常會先進行表層抽水/(補注)量檢定，再依序往下層進行抽水量檢定。

2. 在人工檢定地下水模式時，通常會以迭代方式來回調整各分區參數，使各區之檢定誤差逐漸縮小。

基於上述概念，本研究經由反覆測試，將其歸納成更具體的參數調整原則，詳細說明如下所示：

1. 在進行參數調整前，各分區應先設定初始修正量(進行參，作為參數調整幅度之基準。

2. 開始調整時，需判別修正方向。當觀測水位大於模擬水位時，往正方向調整，即增加水量；當觀測水位小於模擬水位時，往負方向調整，此時應減少水量。

3. 判別修正方向後，接著應判斷修正量，其判斷方法為比較本次檢定與上次檢定時之修正方向。若修正方向相同，表示參數修正持續向同方向進行，則修正量不變；若修正方向相反，表示參數調整震盪，則修正量減半。

4. 經多次調整後，參數修正量會逐漸縮小，然而因多分區同時進行調整，各分區會受相鄰分區影響，可能使得調整量縮小過快，造成檢定速度趨緩，因此當檢定速度過慢時，各分區調整量設定為同時放大一定倍數。

● 參數檢定初始設定

首先，專家系統在進行初次檢定時，會先設定各分區參數調整量 ΔQ 。之後每次參數調整， ΔQ 都會根據規則進行調整，並儲存起來作為下一次參數調整之參考。各分區均有自己的 ΔQ ，根據規則進行調整，不受其它分區影響。此外，每次進行推論會得出一個 ΔQ 之外，還會獲得一個正號或負號。正號即代表該區的實際的水量應比現在要多，因此需增加水量，所以將現在的抽水量(或補注量) Q^n 加上所推論出的 ΔQ^n ，而獲得新的抽水量(或補注量) Q^{n+1} ，如式 3.1-1。反之亦然，負號即代表該區的水量應比現在要少，因此需減少水量，所以將現在的抽水量或補注量 Q^n 減去所推論出的 ΔQ^n ，而獲得新的抽水量或補注量 Q^{n+1} ，如式 3.1-2。

$$Q^{n+1} = Q^n + \Delta Q^n \dots\dots\dots(3.1-1)$$

$$Q^{n+1} = Q^n - \Delta Q^n \dots\dots\dots(3.1-2)$$

3.2 重力試驗與重力積分

本研究藉由絕對重力量測儀器，於研究區域內，分別於豐枯兩季量測地球重力場變化，搭配豐枯水季間水位變化以及隨之而來的重力變化，檢定研究區域含水層之儲水係數(S , Storage coefficient)或比出水量(S_y , Specific yield)。

3.2.1 重力量測原理、設備

重力測量即於某一位置量取其重力加速度的大小。本文所討論的絕對重力測量原理，主要是以自由落體法則來測定。假設有某一物體由一高度 h 自由落下至 h_0 ，則落下距離 $h-h_0$ 與落下時間 t 的關係式為：

$$h-h_0=v_0t+(1/2)gt^2$$

即為

$$h=h_0+v_0t+(1/2)gt^2 \dots\dots\dots(3.2-1)$$

上式(3.2-1)中 g 為重力加速度值， h_0 表示於時間 $t=0$ 物體所在位置， h 則是時間為 t 時刻物體所在位置， v_0 表示 $t=0$ 時物體的速度。根據上式，只要量測不同落下時間 t_i 及與其對應的落下距離 h_i-h_0 ，則可求解出重力加速度值 g 。由於式(3.2-1)中有三個未知數(h_0 、 v_0 與 g)，因此必須測定至少三組的 h_i 及 t_i 值以組成聯立方程式求解出 g 值。本實驗所使用的 FG5 絕對重力儀，即是採用如上觀測原理。

舉例而言，自由落體在三個位置上的落下時間及距離分別為 (t_1, h_1) 、 (t_2, h_2) 及 (t_3, h_3) ，再假設

$$d_1=h_1-h_0$$

$$d_2=h_2-h_0$$

$$d_3=h_3-h_0$$

依據(3.2-1)式，可得：

$$d_1 = v_0 t_1 + (1/2) g t_1^2$$

$$d_2 = v_0 t_2 + (1/2) g t_2^2$$

$$d_3 = v_0 t_3 + (1/2) g t_3^2$$

以上三式中，將第二式及第三式均減去第一式，可得：

$$(d_2 - d_1) = (t_2 - t_1) [v_0 + (1/2) g (t_2 + t_1)]$$

$$(d_3 - d_1) = (t_3 - t_1) [v_0 + (1/2) g (t_3 + t_1)]$$

令 $D_1 = d_2 - d_1$ ， $D_2 = d_3 - d_1$ ， $T_1 = t_2 - t_1$ ， $T_2 = t_3 - t_1$ ，代入上式後，消去 v_0 ，簡化後則可得

$$g = 2 \times [(D_2/T_2) - (D_1/T_1)] / (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(3.2-2)$$

上式中的 g 為重力加速度值，亦即為本計畫欲測定之絕對重力值。以 FG5 絕對重力儀為例，該儀器即是以碘穩頻雷射來測定式(3.2-2)中的落下距離 D ，並以鈷原子鐘測定落下時間 T ，觀測精確度可達 10^{-8}ms^{-2} ，亦即 μgal 等級。

本實驗使用儀器為內政部採購之絕對重力儀 FG5。絕對重力儀的源起為 Hammond 和 Faller 於 1997 年在美國國家標準局合作下，並得到空軍劍橋研究室(Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCEL)的資助，於 Wesleyan 大學成功研製了可移動式的絕對重力儀 FG-5，此乃自十九世紀可移動、可倒擺重力儀之後的第一台可移動式絕對重力儀，如圖 3.2-1 所示。FG5 主要部份是一台極精準的碘穩頻雷射干涉儀，用來監測物體自由落下的直角稜角運動，干涉計所收集到的光學資料就提供了一套非常精確的距離觀測量系統，可以追蹤出絕對重力波長的標準。簡單來說，其原理就式以及精密的測距系統搭配精密計時的原子鐘，精準地測定物體落下的重力加速度值，經由大量地收集落下的數據，最後以電腦軟體程式作業計算得出一平均加速度值，即為絕對重力值。

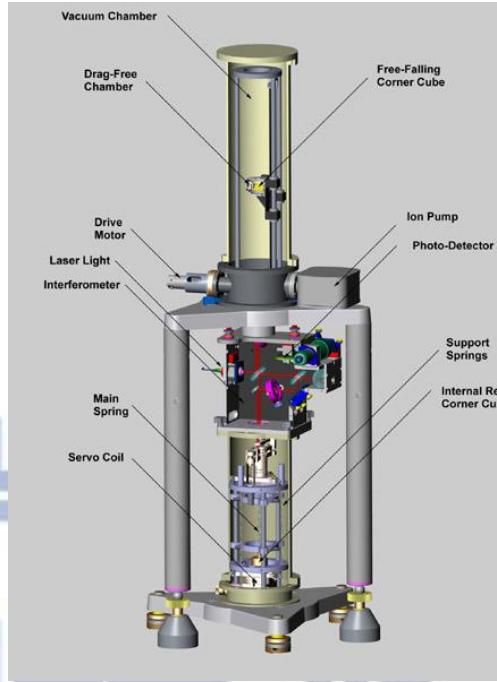
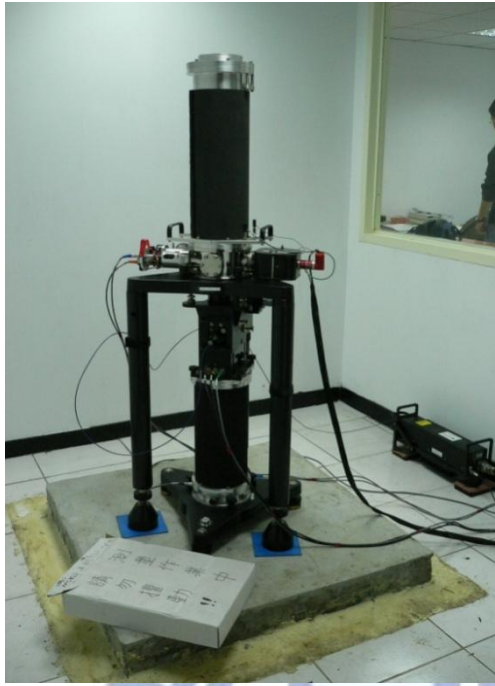


圖 3.2-1 FG5 絕對重力儀與各部件明細[Micro-g Lacoste FG5 Manual]

3.2.2 應用重力積分技術於地下水負載

前述已經說明重力理論與 FG5 絕對重力儀，對於所量測的重力數據，過去常以布格平板來解析重力數據與其他地球物理之間的關係(Heiskanen and Moritz 1993)，布格平板係以均質、無限延伸之有限厚度平板來概念描述與簡化地球對重力量測點之關係，均質且無限延伸之假設，使得此數學問題較易求解分析。在均質且無限延伸平板之假設下，對於具異質且非無限延伸的問題而言，布格平板則不敷使用。

目前由於資訊運算技術大幅興盛，各式數值方法蓬勃發展，應用數值積分技術可無需搭配均質且無限延伸，應用數值積分極適合應用於高度異質性之問題。Sato 與 Hanada (1984)在其海潮重力負載模式(GOTIC)中，除建立海潮之數值模擬外，透過數值網格可呈現海潮之空間異質變化，透過數值積分方式，計算在此海潮變化下之重力負載。

對於地下水系統而言，受到各地沖積條件不同，因此土壤具備高度異質性，各地區之儲水係數或比流出量均有大幅差異，對於地下水數值模擬而言，可藉

由輸入不同之儲水係數或比流出量，可模擬地下水系統之空間異質變化。地下水數值模式，可將地下水系統切割為有限個數的矩形區塊，即為數值模式之網格，重力模擬積分中可採用相同之網格，或是再進一步加密切細。

任一重力積分的矩形區塊均由八個角點所構成，其座標可描述為 (x_i, y_j, z_k) ，其中下標 i 、 j 與 k 等於 1 或 2。另外，重力量測點之座標標示為 (x_0, y_0, z_0) ，以重力公式搭配數值積分，該矩形區塊中的質量對於量測點於 z 方向之重力分量，可寫為式 3.2-3 與 3.2-4 所示。

$$A_z = G\rho \int_{\delta x_1}^{\delta x_2} \int_{\delta y_1}^{\delta y_2} \int_{\delta z_1}^{\delta z_2} \frac{\delta z}{\sqrt{(\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2)^3}} d\delta z d\delta y d\delta x$$

$$= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^i (-1)^j (-1)^k N(\delta x_i, \delta y_j, \delta z_k) \dots (3.2-3)$$

其中

$$N(\delta x_i, \delta y_j, \delta z_k) = G\rho \left\{ \delta x_i \log(\sqrt{D} + \delta y_j) + \delta y_j \log(\sqrt{D} + \delta x_i) + 2|\delta z_k| \tan^{-1} \frac{\sqrt{D} + \delta x_i + \delta z_k}{|\delta z_k|} \right\} \dots (3.2-4)$$

其中，令 $\delta x_i = x_i - x_0$ 、 $\delta y_j = y_j - y_0$ 、 $\delta z_k = z_k - z_0$ 與 $D = \delta x_i^2 + \delta y_j^2 + \delta z_k^2$ 。G 代表重力常數，其數值為 $6.67 \times 10^{-11} (m^3 kg^{-1} s^{-2})$ ； ρ 代表區塊內之密度。式 3.2-3 與 3.2-4 可推估數值模式中的單一網格對於量測點之 z 方向重力分量，因此累計所有網格對於量測點之重力分量，即為整個系統對於量測點的重力分量。

在評估地下水量變化對模擬重力之貢獻時，可以地下水模式之網格為基礎，進一步加密切割積分網格，以增加積分精度。由於模式網格較粗，故加密之積分網格則採模式網格之模擬水位與水量，以此計算網格內之水量密度，再代入式 3.2-3 與 3.2-4 計算重力貢獻值。

第四章 結合重力量測於濁水溪沖積扇比流出率檢定

由於過去儲水係數現地試驗值十分缺乏，參數不確定性將導致地下水補注量評估之不確定性。有鑒於此，本研究先應用目前稀少之儲水係數值，搭配 MODFLOW 2000 地下水數值模式，初步建置、檢定與模擬濁水溪沖積扇之地下水變化。接著，利用重力積分公式，搭配前述 MODFLOW 推估之模擬水量變化進行重力模擬。最後，依據現地重力量測值與模擬重力值之變化幅度比值，檢定研究區域內含水層之儲水係數(S , Storage coefficient)或比流出量(S_y , Specific yield)。

4.1 研究區域與相關現地參數概述

濁水溪沖積扇地下水區位於臺灣西部海岸之中段，北起烏溪，南至北港溪南岸，東以八卦台地及斗六丘陵山脊線為界，並沿兩丘陵間之隘口向東擴及竹山、名間一帶，西臨臺灣海峽，面積約 1,800 平方公里。本沖積扇最主要之溪流為濁水溪，其主流發源自中央山脈西翼、合歡山以南與玉山山脈北側之間地區，向西切穿雪山—玉山帶、麓山帶與八卦—斗六丘陵區，在丘陵區西側形成沖積扇系統，主流流經沖積扇之中央，向西注入臺灣海峽。其他位於沖積扇之河川，自北而南尚有舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪及北港溪等。濁水溪沖積扇地勢平緩，高程約介於海拔 0~100 公尺之間。

一、水文地質架構

中央地調所於民國 88 年完成臺灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告，並以濁水溪沖積扇 72 站之地層柱狀圖，完成水文地質剖面 1 至 12，其深度達 300 公尺左右，以及丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖繪製水文地質剖面 13 至 15，其深度約達 250 公尺左右；並以這些剖面為基礎劃分出濁水溪沖積扇概念分層，包括含水層一($F1$)、阻水層一($T1$)、含水層二($F2$)、阻水層二($T2$)、含水層三($F3$)、阻水層三($T3$)、含水層四($F4$)及阻水層四($T4$)。上

述各分層之垂直示意圖如圖 4.1-1 所示。

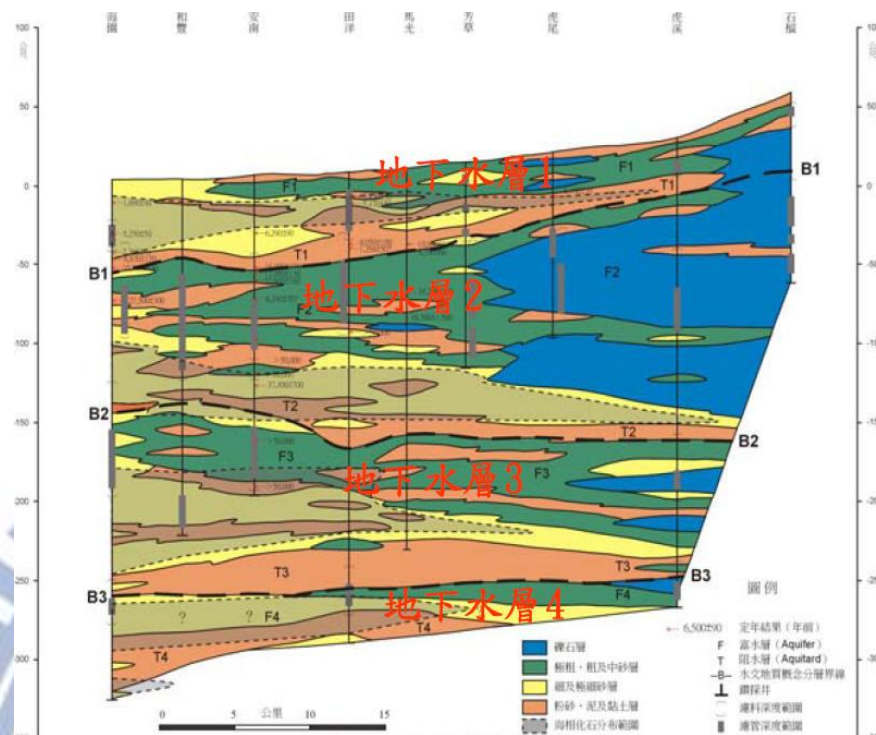
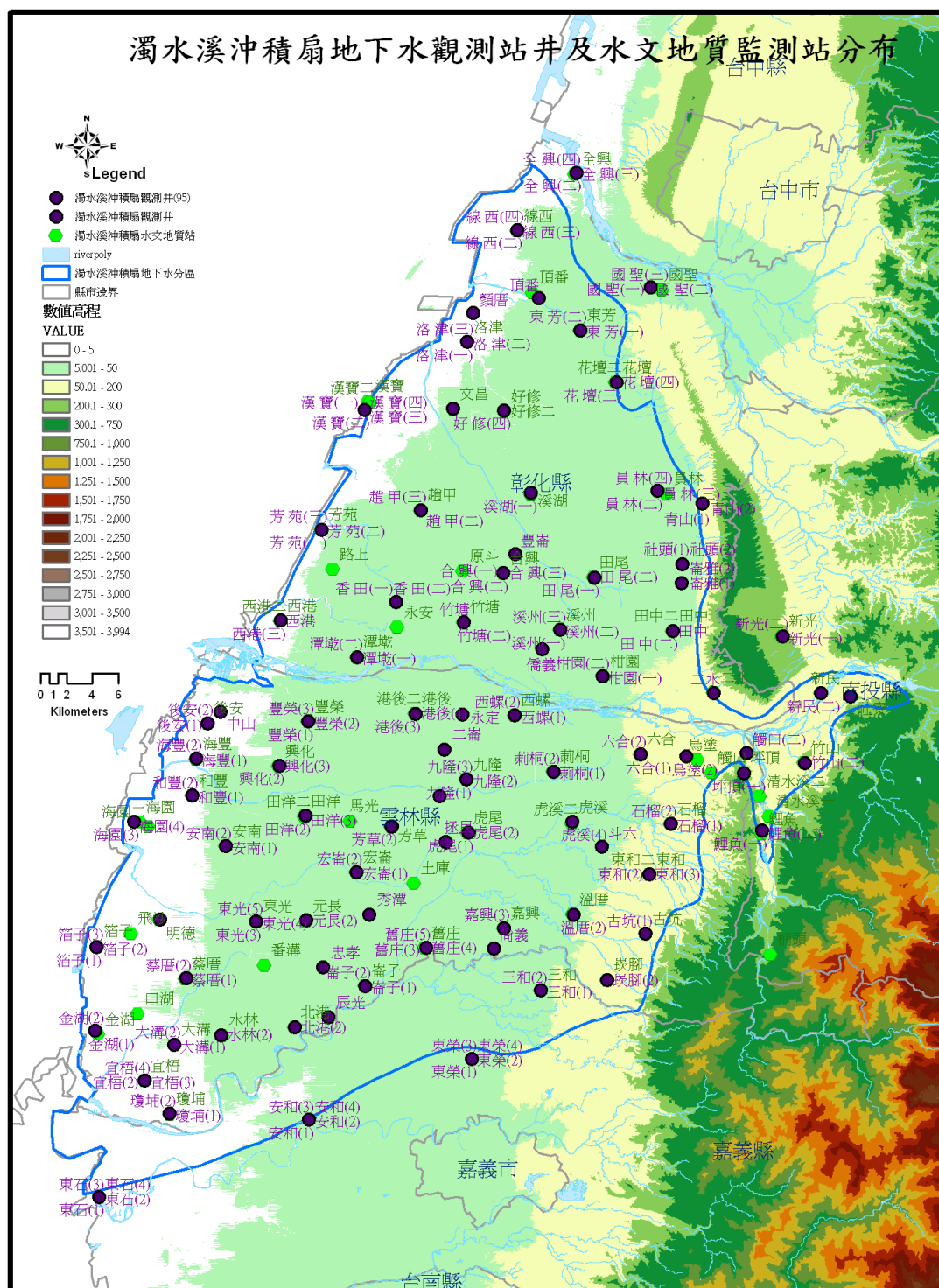


圖 4.1-1 濁水溪沖積扇(海園-石榴)水文地質剖面圖

二、地下水觀測

濁水溪沖積扇地區上游河川與相關之地質條件不利建置水庫，仰賴地下水資源比例偏重，所以於第一階段（81 年度至 87 年度）最先實施。目前計有地下水觀測站 82 站（203 口），抽水試驗站 28 站（55 口），水文地質調查站 88 站。圖 4.1-2 為濁水溪沖積扇地下水觀測網分布圖。



三、水文地質參數

濁水溪沖積扇大致可區分為扇頂、扇央及扇尾區，扇頂區位於員林、溪州、西螺、虎溪、東和連線以東，各含水層間無明顯之阻水層存在，地面水可直接補注至深層，即所謂濁水溪沖積扇扇頂非受壓含水層區；扇央區位於扇頂區以

西，至好修、趙甲、潭墘、田洋、北港聯線以東，阻水層一覆於含水層一之上，各含水層間有明顯之阻水層存在，地面水無法直接補注各含水層，唯以地層材料而言，砂礫材料所佔之比例較大；扇尾區位於扇央區以西至沿海，含水層一以上亦有阻水層覆蓋，各含水層間亦如扇央區皆有明顯阻水層存在，唯其地層材料中，砂礫所佔之比例較小，而粉砂、泥、及粘土所佔之比例較大。透水係數 K 介於 10^{-3} ~ 10^{-5} (公尺/秒)之間，導水係數 T 介於 0.01 ~ 4.19 平方公尺/分鐘之間，比容量 Q/s 介於 0.34 ~ 208.33 立方公尺/小時/公尺，含水層水力特性以扇頂最佳，扇央次之，扇尾最差。

表 4.1-1 為濁水溪沖積扇之儲水係數或比流出量現地試驗值列表，由於儲水係數或比出水率需經由複井抽水試驗取得，受到複井建置成本之限制，其試驗數量遠低於所需，直至目前為止僅有 4 口井擁有儲水係數，分別為線西(1)、海園(1)、田洋(1)與荊桐(1)；僅有 6 口井擁有比出水量，分別為合興(1)、溪洲(1)、柑園(1)、二水(1)、烏塗(2)與東光(1)。

表 4.1-1 濁水溪沖積扇儲水係數或比流出量現地試驗值

井名	X	Y	儲水係數 S	比出水量 Sy
線西(1)	195062	2669966	0.00448	-
合興(1)	194000	2643600	-	0.225
溪洲(1)	199206	2639069	-	0.216
柑園(1)	201662	2635696	-	0.12
二水(1)	210242	2634428	-	0.199
海園(1)	165467	2624551	0.000191	-
田洋(1)	178717	2624989	0.00188	-
荊桐(1)	197896	2628388	0.0007074	-
烏塗(2)	208141	2629528	-	0.152
東光(1)	174905	2616870	-	0.289

4.2 地下水數值模式初步建置與檢定

4.2.1 地下水分層架構、邊界條件及網格劃分

一、水文地質與模式分層架構

MODFLOW 模擬的設定上，可將含水層型態設定為拘限含水層或非拘限含水層，並需輸入各分層之上部和底部之高程值。本研究參考中央地質調查所於民國 88 年出版之「台灣地區地下水觀測網第一期計畫濁水溪沖積扇水文地質調查研究報告」，以濁水溪沖積扇 72 站地層柱狀圖，完成平原地區水文地質剖面一至十二（深度至 300 公尺左右），再依據丘陵及河谷區之 8 站地層柱狀圖，繪製水文地質剖面十三至十五（深度約達 250 公尺左右），劃分出濁水溪沖積扇概念分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三、阻水層三及含水層四，濁水溪沖積扇模式共分為第一至七分層，如圖 4.2-1 所示。本章將含水層一視為表層含水層，含水層二以下含水層視為深層含水層。並由於含水層四之觀測井數量較少，僅有 11 口主要分布於沖積扇扇尾區域，不足以提供建模所需資料，因此本計畫不將含水層四納入模擬範圍。

海岸 ←————→ 山麓



濁水溪水文地質架構 | 模式概念分層

圖 4.2-1 濁水溪沖積扇概念分層

二、模式邊界條件與格網劃分

根據中央地質調查所(1999)對於濁水溪沖積扇地下水邊界分析研判，提出概念性之邊界，如圖 4.2-2 所示。

b. BC 段

本邊界位於濁水溪沖積扇之南側邊緣上，含水層沉積物粒徑及厚度均顯著變小，然而並未尖滅，因此無實體之阻隔為界，然而從地下水流網分布型態，顯示 BC 段與地下水流線大致平行，於本身即可認定為一條流線，故亦屬於零流邊界。海岸附近之洩降錐，其在邊界南北之形狀及大小若相當，則不影響零流邊界之假設。

c. CD 段

此段為含水層尖滅封閉於阻水層之位置，屬於零流邊界。

d. DEF 段

本段與 BC 段相似，含水層可向北延伸而與台中盆地地下水系統相接，缺乏實體之阻隔，惟與地下水流方向大致平行，故認定為零流邊界。EF 段位於和美沖積扇頂上，河水可由河床入滲補注地下水。

e. FG 段

本段邊界大致與地下水等水位線平行，隨時間之不同水位有昇降變化。

f. GA 段

本段位於頭嵙山層之中，為八卦山台地之地下水分水線 (Groundwater divide)。

綜合上述環境特性，本計畫模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，南北方向 85 列與東西方向 75 行，共五層格網。而邊界條件設定於 MODFLOW 模式中，東部之八卦山地區有八卦山背斜，斗六丘陵有內林背斜及斷層經過，以此為東邊邊界，且設為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆為零流量之邊界，模擬區域如圖 4.2-3 所示。西邊含水層一以海岸線向外延伸兩公里設為定水頭邊界，如圖 4.2-4 所示，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為零流量之邊界條件，如圖 4.2-5 所示。圖中藍色網格為定水頭邊界，灰色網格為零流量。圖 4.2-6 所示 AA' 為剖面圖，水平向長度為垂向長度 30 倍。



圖 4.2-3 濁水溪沖積扇之模擬範圍

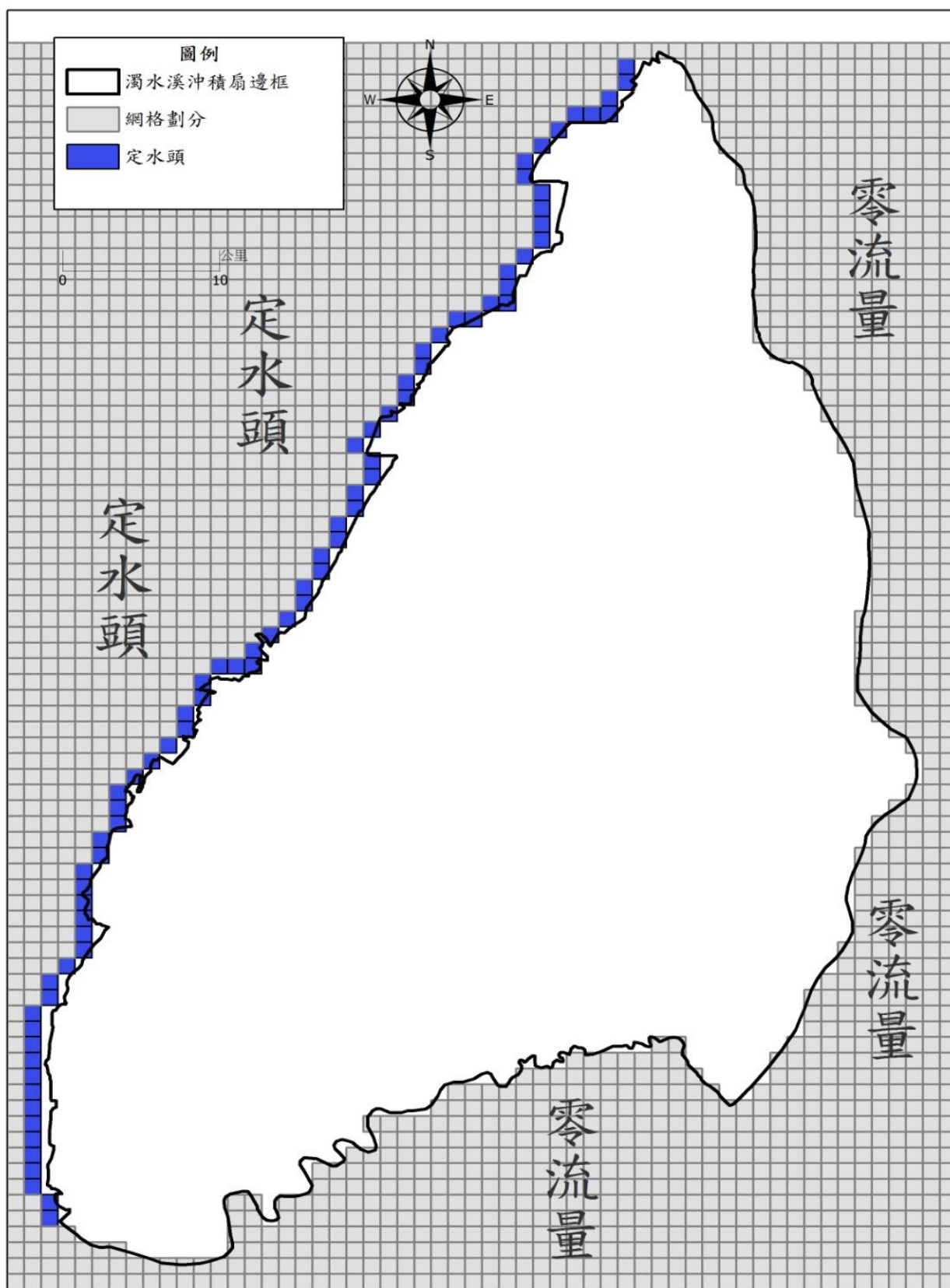


圖 4.2-4 濁水溪沖積扇模式第 1 分層格網與邊界條件

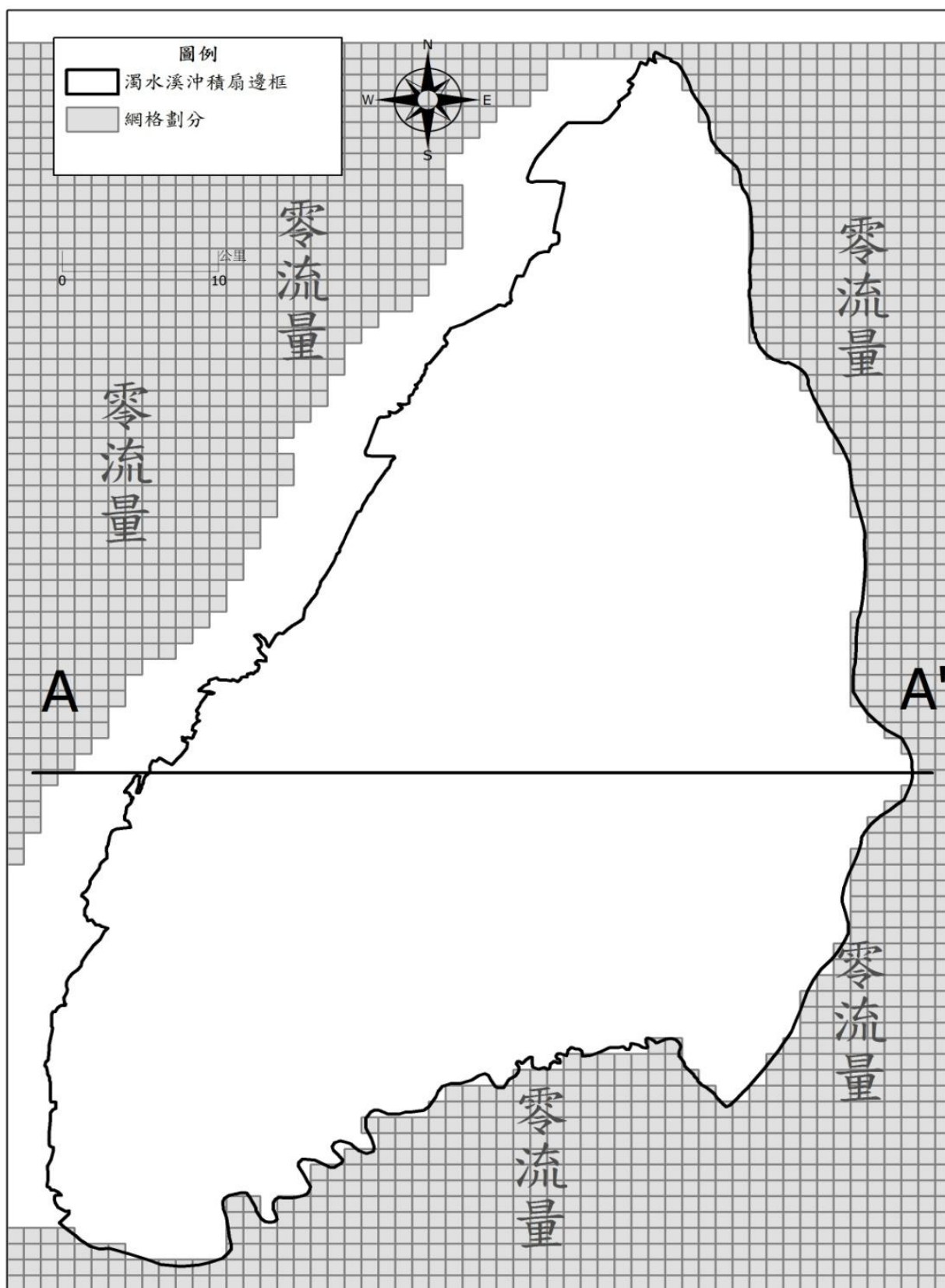


圖 4.2-5 濁水溪沖積扇模式第 2~7 分層格網與邊界條件

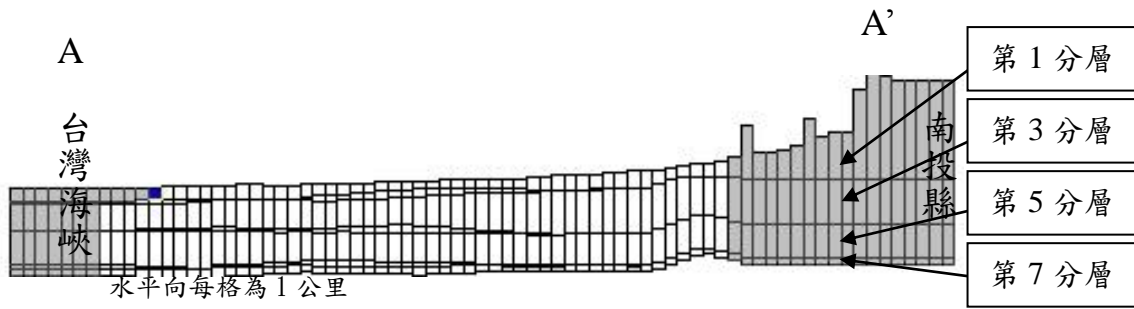


圖 4.2-6 濁水溪沖積扇模式 AA'段剖面圖

4.2.2 模式輸入資料

模式之輸入資料包括儲水係數、透水係數、垂向透水係數、起始地下水水位、補注量及抽水量等。以下將說明建置濁水溪沖積扇地下水模擬模式 (MODFLOW 模式)，其模式架構所需之地下水力學參數及源匯項輸入資料。各輸入資料敘述如下：

一、淨補注量

在暫態模式中，水位會隨著不同時刻而改變，因此各時刻之淨補注量亦隨時間改變。由於台灣地區現地抽水量資料缺乏官方記錄，抽水記錄殘缺，且地下水天然補注亦屬未知，故無法直接輸入地下水數值模式，難以正向模擬，在此以逆問題求推估補注量，本研究應用專家系統參數檢定系統，使得模擬水位與觀測水位吻合，進行淺層淨補注量與深層抽水量之檢定。本研究設定之模擬時刻長度為月，參數檢定之依據為各觀測井之月平均水位，此外，本研究採用徐昇氏法進行參數分區，以降低參數維度。

在此受到模式的限制，檢定補注量時，設定分區的方式為每一徐昇氏網格內需有一個地下水位觀測資料，且進行參數檢定時，每一徐昇氏網格分區內之淨補注量皆需相同。

二、透水係數

觀測站網建置時，各觀測井必進行單井或複井抽水試驗，因此幾乎各觀測井於不同含水層均擁有其導水係數 (Transmissivity, T 值) 現地試驗值，但因

MODFLOW 模式所需參數為透水係數(Hydraulic Conductivity, K 值)，因此本研究以台灣地區地下水觀測網第一期計畫所得之導水係數，再除以含水層厚度(b)求得透水係數，後續再如同淨補注量分區之方法，以徐昇氏網格為分區方式，將各井點之參數值作為其對應徐昇氏分區之參數值，圖 4.2-7 至圖 4.2-9 分別為模式第 1、3 及 5 分層之徐昇氏分區圖。而概念分層中之第 2 及 4 分層為阻水層，其分布範圍位於濁水溪沖積扇中、下游區域，模式於沖積扇中、下游區域阻水層之透水係數乃參考 Fundamentals of Ground Water (Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang, 2003)中建議之值域，在此設定為 4×10^{-3} (公尺/天)。此外，由於抽水試驗所得結果為水平向之透水係數，故在此假設垂向透水係數為水平向之 1/50。



圖 4.2-7 含水層一徐昇氏分區

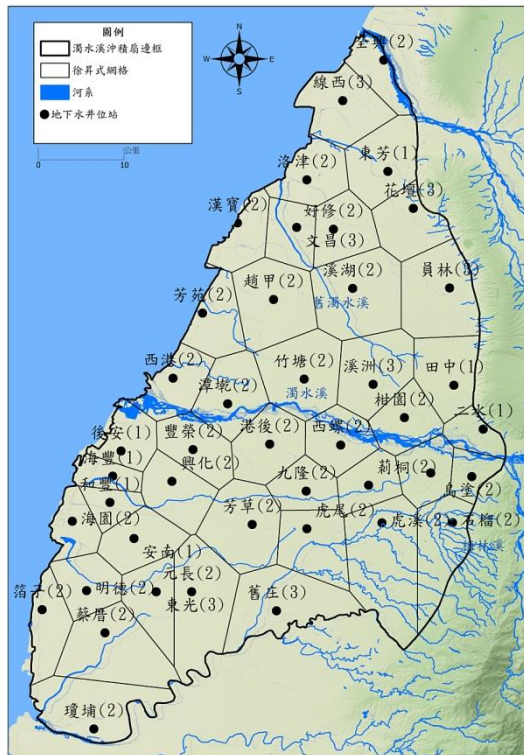


圖 4.2-8 含水層二徐昇氏分區



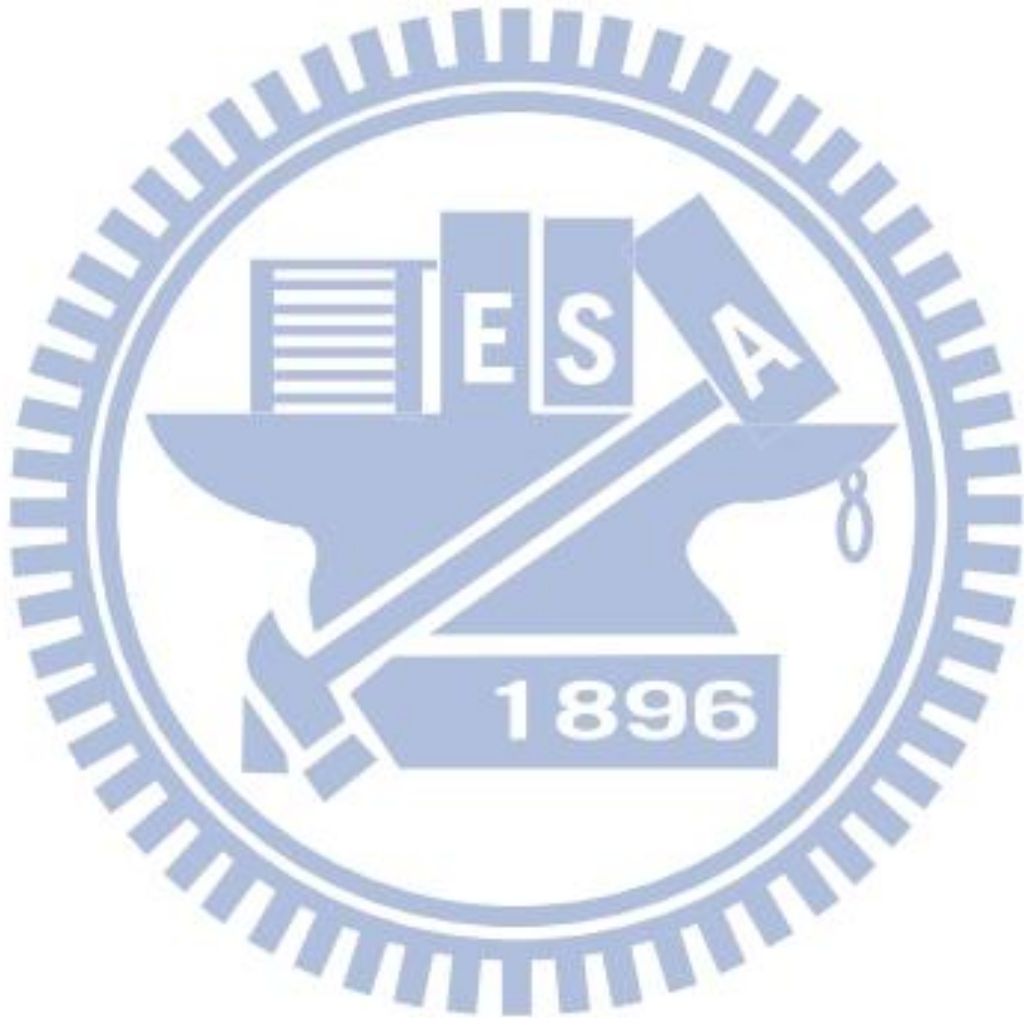
圖 4.2-9 含水層三徐昇氏分區

三、儲水係數

儲水係數輸入方式與淨補注量及透水係數相同，皆採用徐昇式網格分區，將點位型式之資料給定至整個沖積扇。在數值方面，由於儲水係數必須進行複井抽水試驗才能求得，因此儲水係數現地試驗數量，遠低於透水係數現地試驗數量，僅有 10 口觀測井進行複井抽水試驗，如圖 4.2-10 所示，其值列於表 4.2-1(以※符號標註)。

其餘水井之儲水係數必須藉由現有的試驗值，搭配經驗判斷加以補齊。首先，針對其餘水井以拘限與非拘限進行分類。其次，水井之儲水係數以同分類水井之試驗平均值給定，拘限水井包含線西(1)、荊桐(1)、田洋(1)與海園(1)，其試驗值分布於 1.91×10^{-4} 至 4.48×10^{-3} 之間，其平均值為 1.8146×10^{-3} ，其餘水井即直接給予 1.8146×10^{-3} ；非拘限水層也以相同方式推估，但由於東光(1)地處於古河道流經之處，其地質架構較為特殊，比出水率高達 0.289，遠高於其餘 5 口現地試驗值，為避免推估之比出水率偏高，故不予採用於計算平均值。因此比出水率

從 0.152 至 0.225 之間，其餘水井即以平均值 0.1824 給定。



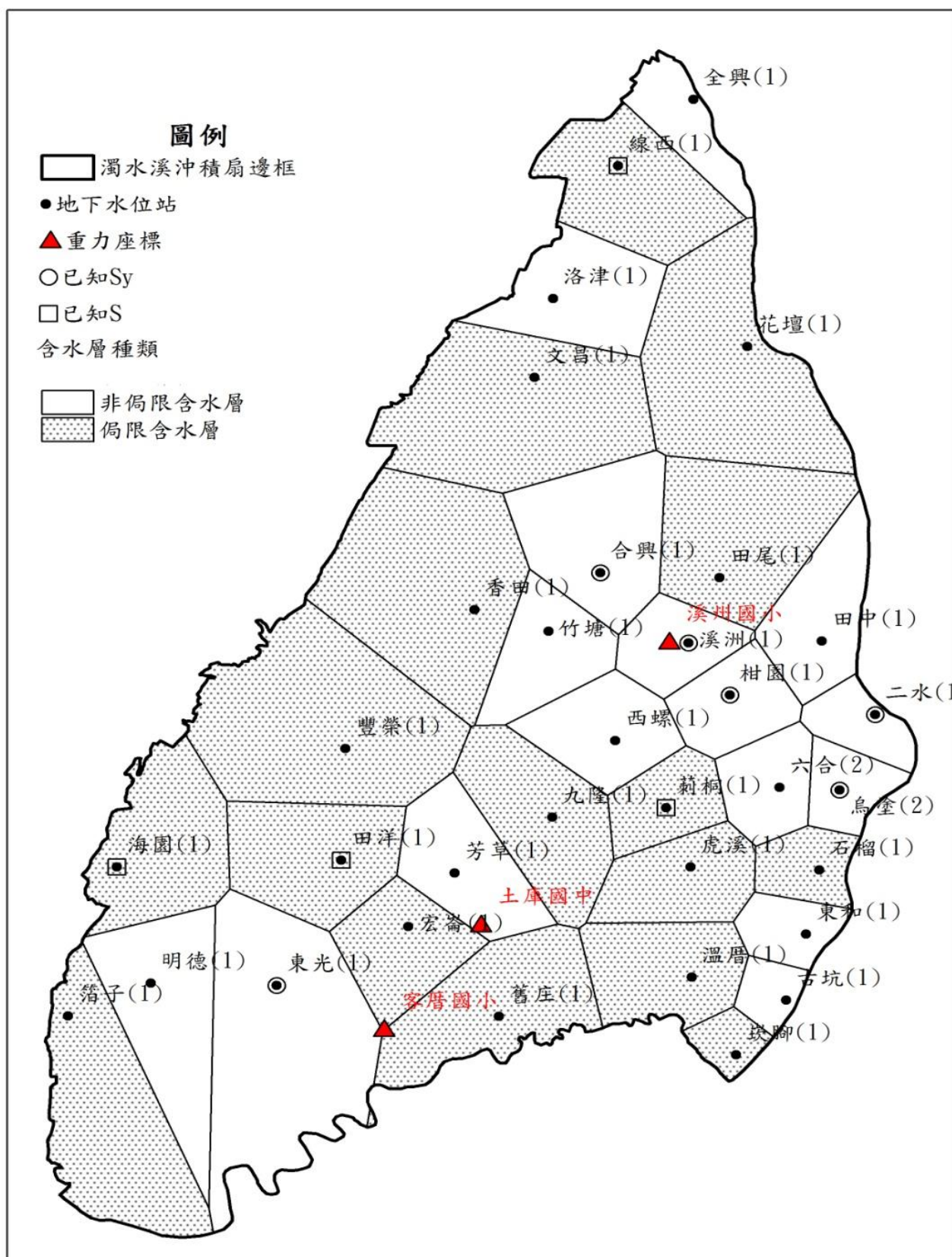


圖 4.2-10 淺層含水層種類與已知儲水係數之分佈

表 4.2-1 濁水溪沖積扇淺層觀測井列表(33 口井)

井名	X	Y	儲水係數 S	比出水率 Sy	控制面積 (m ²)	透水係數 (m/day)	含水層 種類
全興(1)	199514	2674258	-	0.1824	30620061.65	53.1936	0
線西(1)	195062	2669966	※0.00448	-	72130899.48	20.491	1
洛津(1)	191220	2661365	-	0.1824	58184684.19	5.6966	0
文昌(1)	190120	2656250	0.0018146	-	130443980.9	17.856	1
花壇(1)	202695	2658255	0.0018146	-	119661405.5	49.356	1
香田(1)	186573.2	2641218	0.0018146	-	133513202.4	19.872	1
合興(1)	194000	2643600	-	※0.225	74315828.31	189.936	0
田尾(1)	201045	2643280	0.0018146		90079238.16	93.1376	1
竹塘(1)	190948	2639823	-	0.1824	45573810.79	154.368	0
溪洲(1)	199206.3	2639069	-	※0.216	32592225.09	50.22	0
柑園(1)	201662	2635696	-	※0.12	36836767.67	48.89	0
田中(1)	207088	2639188	-	0.1824	51189018.09	46.7856	0
二水(1)	210242	2634428	-	※0.199	23168436.14	65	0
豐榮(1)	178954	2632222	0.0018146	-	146221463.5	24.9984	1
西螺(1)	194891	2632723	-	0.1824	46974992.78	42.4832	0
海園(1)	165467	2624551	※0.000191	-	73753709.91	18.5184	1
田洋(1)	178717	2624989	※0.00188	-	68125351.65	43.6608	1
荊桐(1)	197896	2628388	※0.0007074	-	32659495.23	56.73	1
芳草(1)	185400	2624155	-	0.1824	54256101.22	12.3912	0
九隆(1)	191168	2627781	0.0018146	-	70751253.87	77.544	1
六合(2)	204584	2629706	-	0.1824	32859021.1	133.2	0
烏塗(2)	208141	2629528	-	※0.152	23744105.22	61.92	0
箔子(1)	162598	2614898	0.0018146	-	101778284.1	2.9424	1
明德(1)	167485	2617020	-	0.1824	77871839.26	1.54448	0
東光(1)	174905	2616870	-	※0.289	145352763.2	45.4176	0
東和(1)	206145.3	2620189	-	0.1824	22888692.27	2.87	0
宏崙(1)	182680	2620675	0.0018146	-	48026563.67	33.3504	1
虎溪(1)	199331	2624542	0.0018146	-	47206609.82	16.7088	1
石榴(1)	206944	2624360	0.0018146	-	24621186.95	4.8	1
舊庄(1)	188020	2614870	0.0018146	-	79153871.55	20.088	1
溫厝(1)	199400	2617408	0.0018146	-	56160496.8	8.70336	1
古坑(1)	204980	2615932	-	0.1824	14367240.52	4.70592	0

崁腳(1)	202021	2612378	0.0018146	-	13911958.55	3.89952	1
※表示複井抽水試驗實測值，其餘無實測資料之站以平均值給定 含水層種類 (0:非受壓;1:受壓)							



四、阻水層設定

本研究阻水層設定之依據乃藉由檢視水文地質鑽探柱狀圖、屏狀圖以及同一觀測井之分層觀測水位差，綜合分析後，予以適當之調整。調整方式說明如下所示：

首先檢視水文地質鑽探柱狀圖及屏狀圖後，若含水層內之某一範圍出現厚泥層阻隔，本計畫則設定該範圍內之水力參數為阻水層等級之量值；若含水層間為砂泥互層情形，則再進一步分析該處觀測井之不同分層間的長期地下水位，若分層間之地下水位差異顯著，則代表該分層間有阻水效果，故應視為有阻水層，若分層間之水位相近，則此處將不視為有阻水層。

五、起始地下水水位

對於暫態模式而言，初始地下水位代表模式之初始條件，不同初始條件影響模擬結果極巨，因此應選取適當之初始水位以得到較佳之模擬結果。本研究建置之地下水系統模擬期距為 2012 年，為月模擬，模擬起始時刻為西元 2012 年 1 月，因此以西元 2011 年 12 月之平均水位作為起始水位。

4.3 現地重力量測結果

由於重力值會受到高程變化之影響，因此量測時需在相同位置進行量測，但由於該區域有嚴重之地層下陷問題，故所得之重力值宜藉由觀測下陷量進行校正，為此本研究於溪州國小(彰化縣溪州鄉)、土庫國中(雲林縣土庫鎮)及客厝國小(雲林縣元長鄉)等三站，進行重力調查。此外，重力站亦搭配自行架設之 GPS，藉此觀測各站受地層下陷之狀態，以便後續校正地層下陷施測之影響，地點座標詳見於表 4.3-1，。

重力量測使用絕對重力儀(FG5)進行現地監測(如圖 4.3-1)，並配合連續式 GPS 監測站觀測地表高程之變動(如圖 4.3-2)，各重力量測站分佈及所在之鄉鎮如圖 4.3-3。其中，絕對重力儀器量測值移除及改正海潮、固體潮、極移、大氣壓力及高程變化等影響，如式 4.3-1 表示，在此稱之為重力殘差。重力量測值之改正除了高程變化外，其餘皆為環境影響改正。有關各環境改正內容詳見附錄 A。

$$\begin{aligned} \text{重力殘差} = & \text{SG 觀測量} - \text{海潮負載} - \text{固體潮} - \text{極移改正} - \text{大氣效應} \\ & - \text{高程影響} \dots\dots\dots (4.3-1) \end{aligned}$$

為配合台灣地區豐水期及枯水期地下水位之變化，重力量測時間於 2012 年之 5 月、8 月及 10 月，共計有 8 次重力量測記錄，各監測點分別有 2 至 3 次的量測結果。將取得之 GPS 高程資料以周為單位，但由於資料之不完整性，再加上避免 GPS 量測時所造成的誤差，故取 7 周移動平均，使 GPS 量測高程起伏較為平緩，結果如圖 4.3-4 至 4.3-6，觀測結果節錄自 101 年度重力基準維護及測量整合服務工作之計畫報告。

Hofmann-Wellenhof 與 Moritz(2006)指出，在布格平板之假設下，如重力站高程上升 1(cm)，重力量測值將減少 1.9(μ -Gal)。因此如 GPS 觀測值觀

測到 1(cm)之下陷量，重力值應減少 $1.9(\mu\text{-Gal})$ 作為校正。本研究將五月高程設定為一基準點，結果之重力殘差值如表 4.3-2 至 4.3-4 所示。

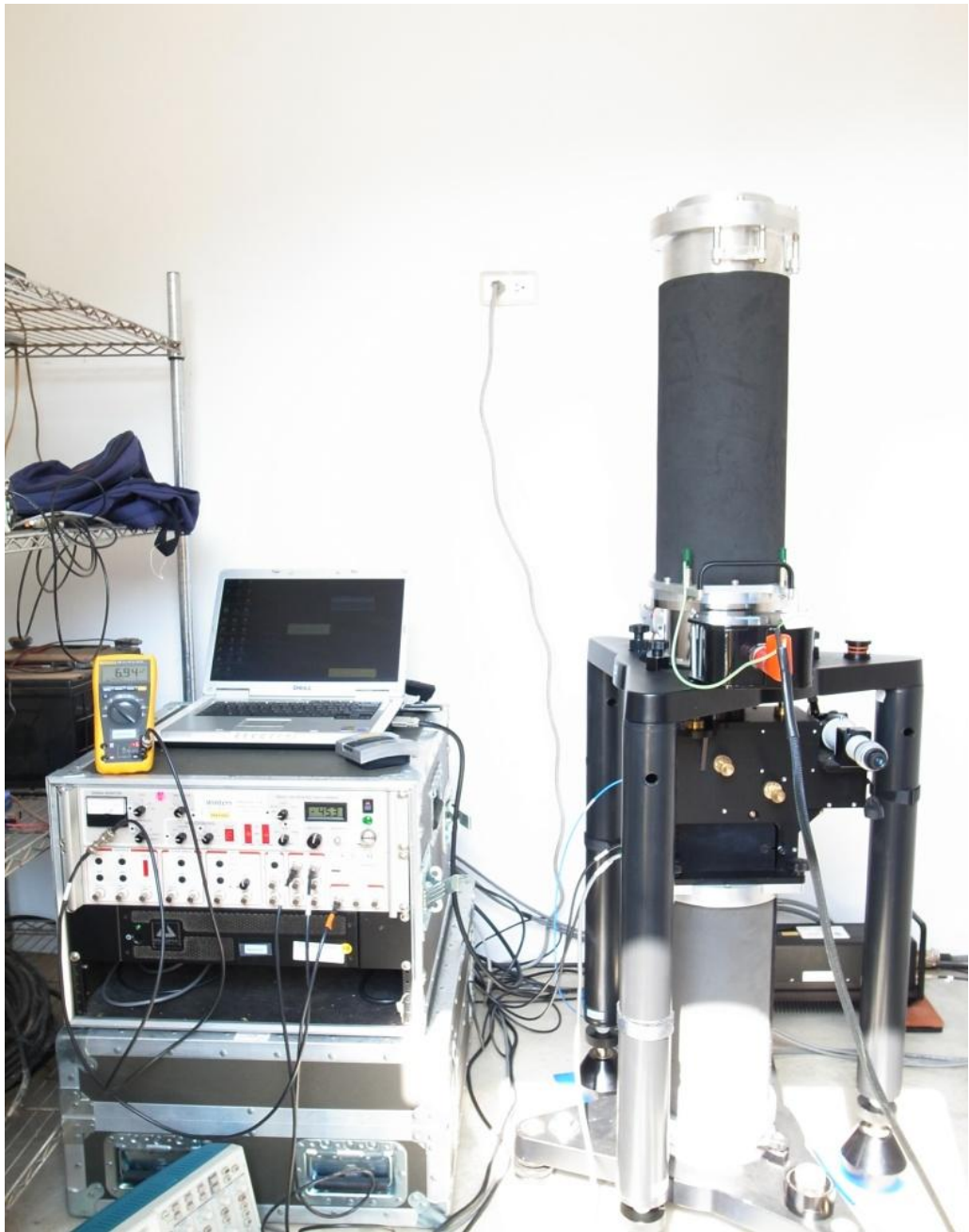


圖 4.3-1 絕對重力儀(FG5)架設於客厝國小



圖 4.3-2 GPS 監測站架設於客厝國小

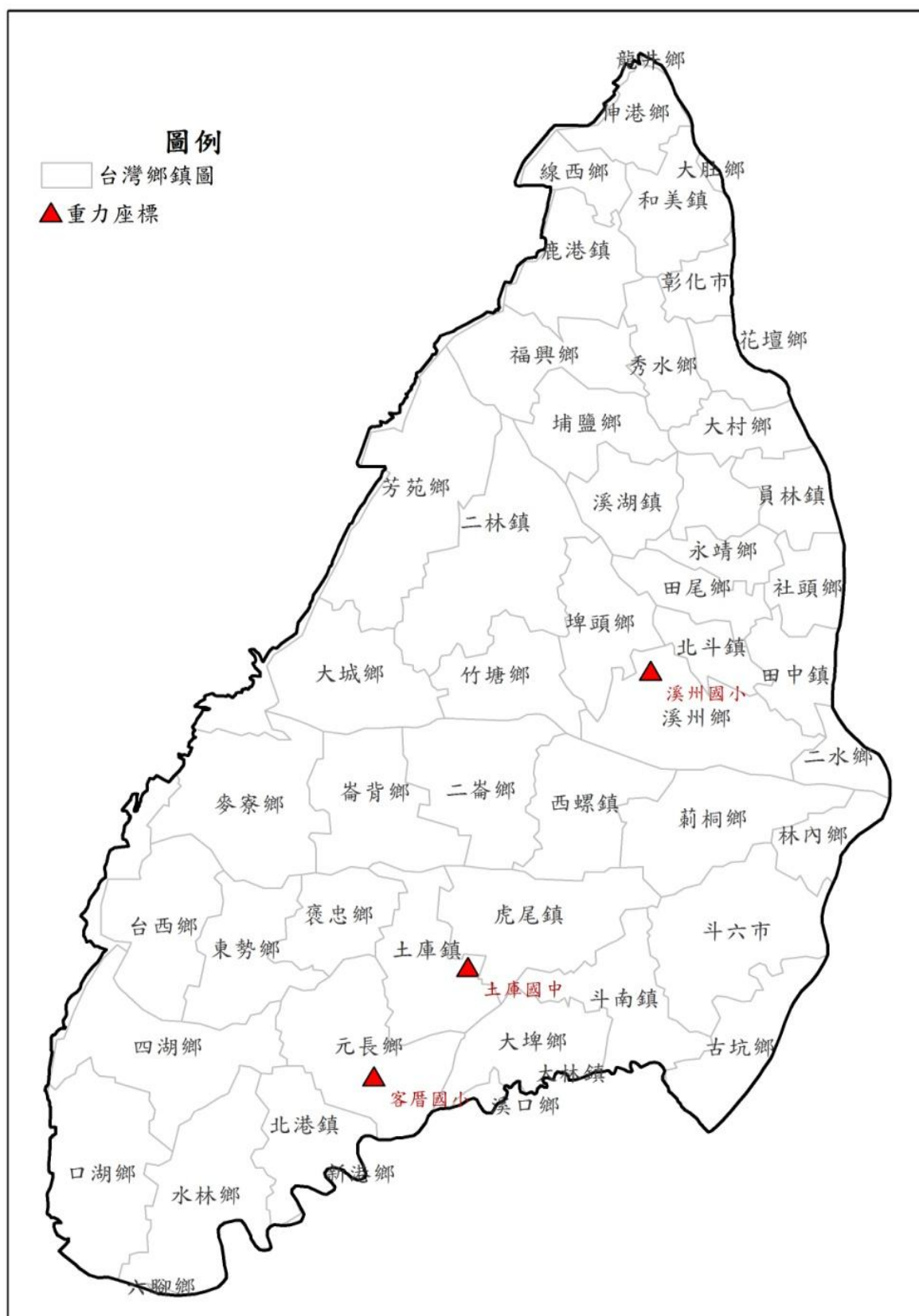


圖 4.3-3 重力測站於濁水溪沖積扇分佈位置

表 4.3-1 絕對重力儀施測地點

重力測站	緯度	經度	行政區
溪州國小 SJES	23.85380	120.49820	彰化縣溪州鄉
土庫國中 TKJH	23.68799	120.38982	雲林縣土庫鎮
客厝國小 KTES	23.62661	120.33428	雲林縣元長鄉

表 4.3-2 溪州國小量測結果

量測日期	標準偏差 (μ -Gal)	GPS 高程 (m)	重力殘差(μ -Gal)
2012/5/23~24	4.7	56.431	978834152
2012/8/16~17	4.8	56.424	978834175
2012/10/24~25	4.8	56.416	978834163

表 4.3-3 土庫國中量測結果

量測日期	標準偏差 (μ -Gal)	GPS 高程 (m)	重力殘差(μ -Gal)
2012/5/22~23	4.8	40.966	978843350
2012/8/17	4.8	40.964	978843372
2012/10/25	4.8	40.947	978843359

表 4.3-4 客厝國小量測結果

量測日期	標準偏差 (μ -Gal)	GPS 高程 (m)	重力殘差(μ -Gal)
2012/5/21~22	5.1	36.147	978850626
2012/10/30~31	4.8	36.136	978850635

資料來源：101 年度重力基準維護及測量整合服務工作一期末報告

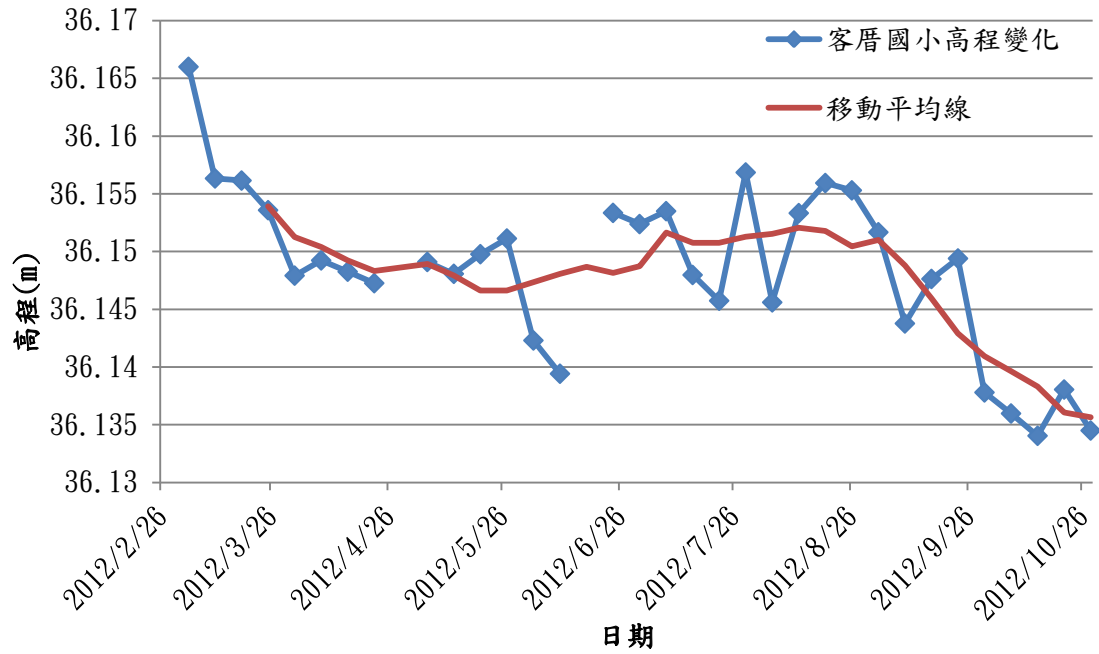


圖 4.3-4 GPS 連續監測地表高程變化曲線－客厝國小

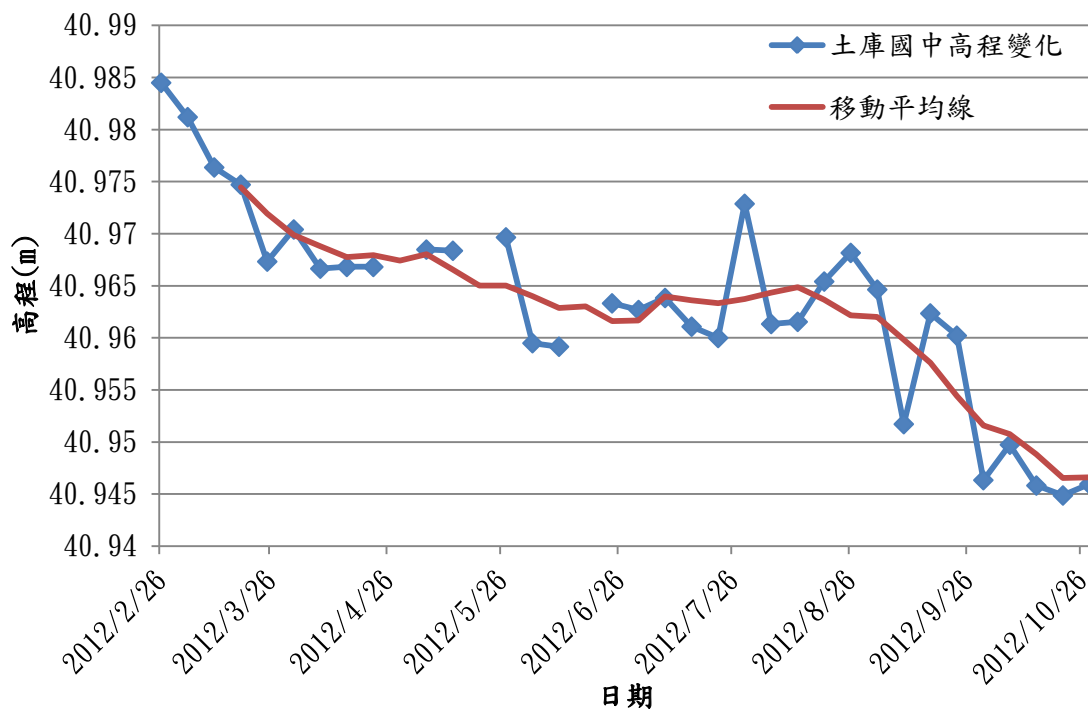


圖 4.3-5 GPS 連續監測地表高程變化曲線－土庫國中

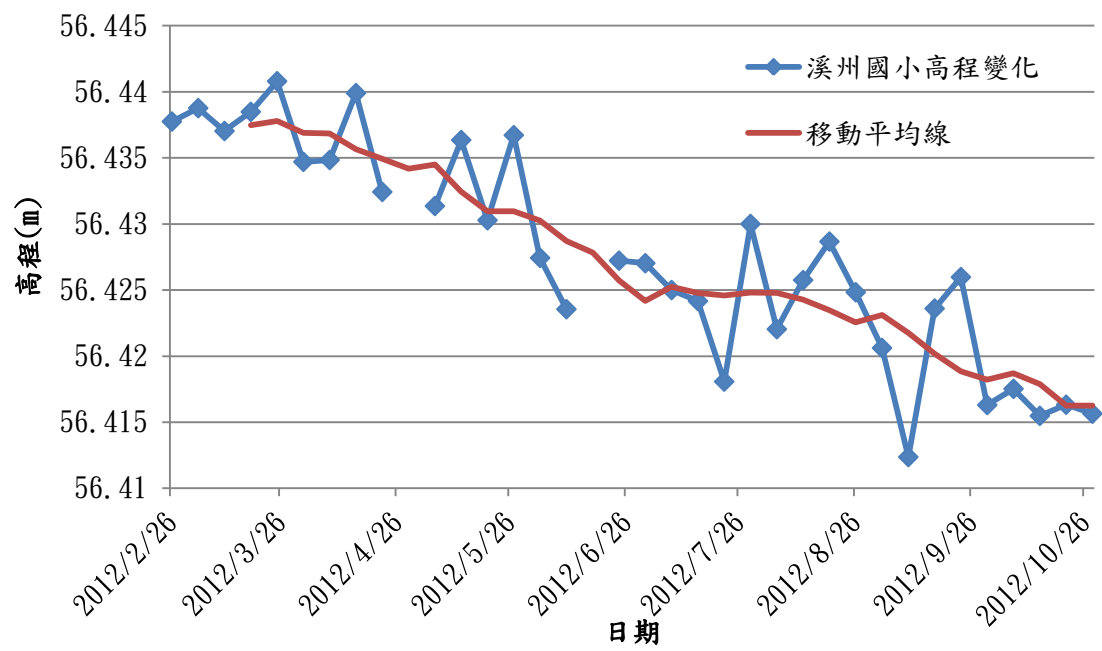


圖 4.3-6 GPS 連續監測地表高程變化曲線—溪州國小



4.4 應用重力變化於濁水溪沖積扇比流出率之檢定

由於地下水數值模式之網格為一公里見方之矩形，厚度則依據含水層厚度而變，約數公尺至數十公尺不等，如直接進行數值積分，過粗之積分網格則可能產生數值積分誤差。一般而言，數值積分精度隨積分網格之尺寸越小而相對提升，但是積分網格越小則計算量越高。

基於牛頓重力理論，物體質量越接近量測站，其重力貢獻量越大，因此較佳之積分網格切割策略應依據重力量測站之位置，逐步往內加密縮小。

為滿足上述原則，本研究以兩階段混合網格進行數值積分，以重力量測站所在之 1 公里乘 1 公里之第一層矩形網格進行加密，兩個維度均進一步加密切割為 20 段，亦即水平方向切割為 50 公尺乘 50 公尺之加密網格，垂直方向則不予切細。加密區域外，則沿用原始地下水數值模式之網格，以節省計算量。

在加密區中，單一地下水模式網格會因為加密積分的緣故，其計算量提升為非加密區之 400 倍，在此採取此兩階段混合網格，可在小幅增加計算量之情況下，有效提升積分精度。

4.4.1 重力積分半徑影響分析

為利用重力觀測值，以檢定系統儲水係數或比流出量，各重力觀測站係受到觀測站附近一定半徑內水量之影響，因此僅需調整該半徑內之參數值，特此應用半徑影響分析決定影響半徑。

由於本系統是以數值方式進行重力積分，因此藉由逐步增加半徑，以確定積分半徑之影響。選定 8 個地下水觀測水位站，各點位散布於扇頂、扇央及扇尾，涵蓋侷限含水層與非侷限含水層，以此 8 站所在位置分別進行重力積分半徑之計算。

接著，逐步增加與調整積分半徑，由 1000 公尺、3000 公尺、4000 公尺增加至 20000 公尺及無限遠等，得到不同影響範圍內之模擬重力值。最後，再利用無限遠之重力模擬值(G_{∞})與各不同範圍內之模擬重力值計算出重力貢獻百分比(R_d)，如式 4.4-1 所示。

$$R_d = \frac{G_{\infty} - G_d}{G_{\infty}} \times 100\% \dots \dots \dots (4.4-1)$$

其中， R_d 代表重力貢獻百分比， G_{∞} 代表無限遠之重力模擬值， G_d 代表 1 範圍內之重力模擬值。由圖可知，無論各區域水文地質參數之差異，重力貢獻百分比(R_d)曲線之趨勢相當一致，且多數重力站於半徑為 5000 公尺時，其重力貢獻百分比多高達 97% 以上，顯現該站重力值多受 5 公里內之參數影響，因此本研究以 5 公里為影響半徑，後續檢定上，則以重力站為中心，以 10 公里見方之網格為檢定分區。

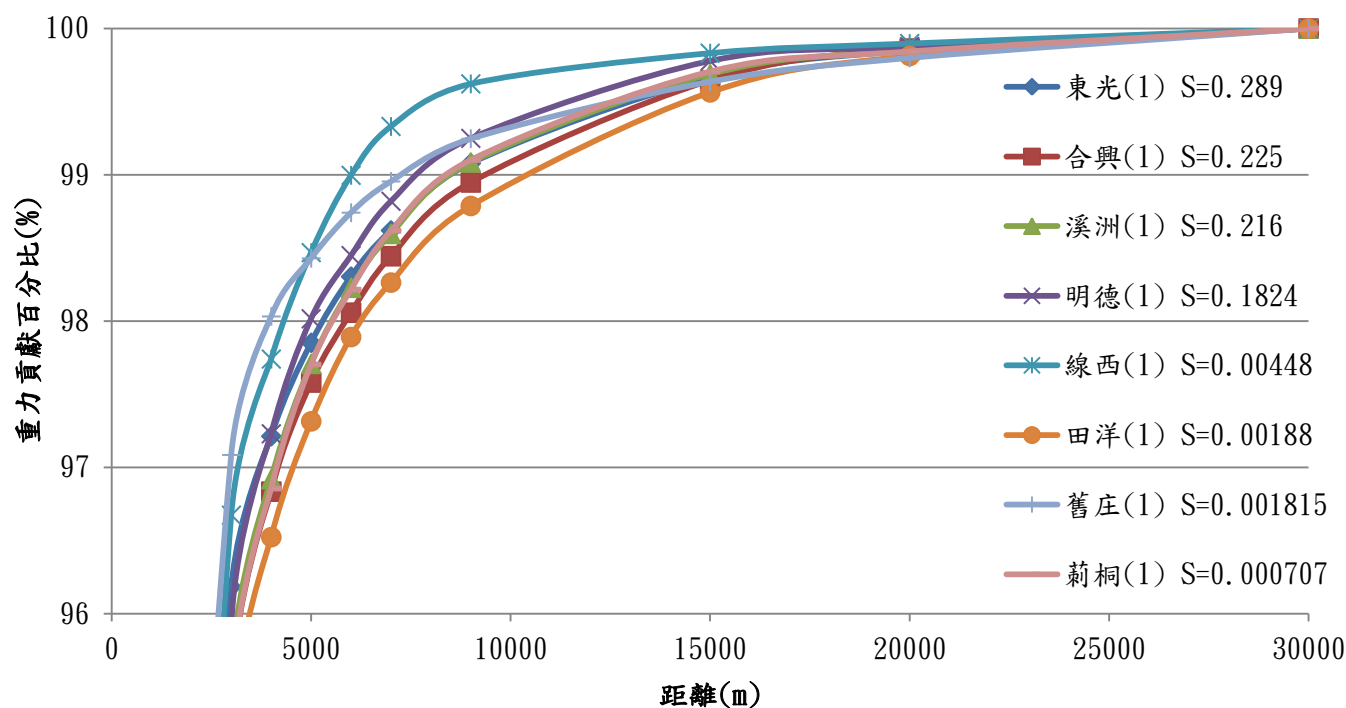


圖 4.4-1 影響半徑分析圖

4.4.2 比流出率檢定

前述本研究已應用極少量之現地試驗，其餘無試驗值者，則以平均值給定，如表 4.2-1 所示，初步建置、檢定與模擬濁水溪沖積扇地下水流水位與水量變化。由模擬之地下水量變化，並利用重力積分程式，計算各重力站地下水之重力貢獻值。

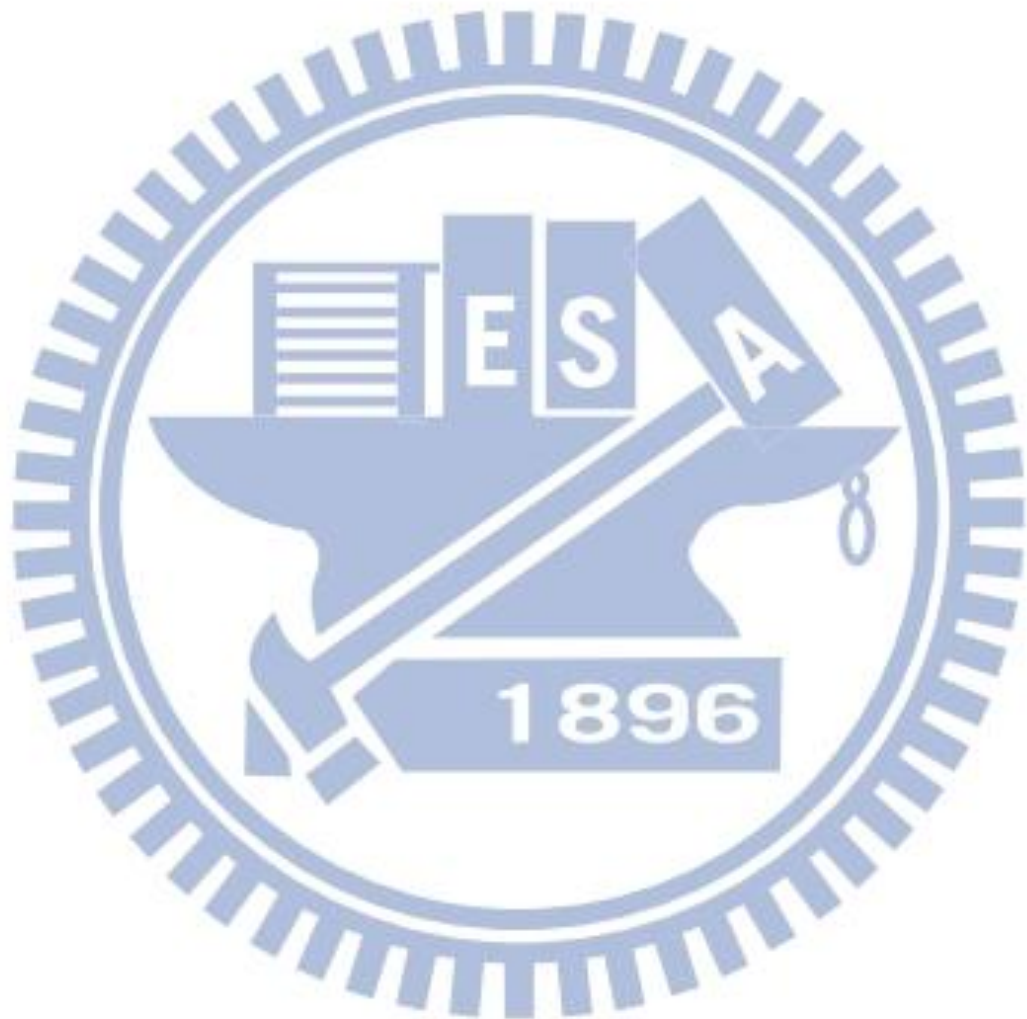
以模擬重力貢獻值變化幅度與量測值變化幅度之比值，作為參數調整之依據，儲水係數與比出水量之參數調整分區則以重力站為中心，則依據前述積分半徑影響分析之結果，於水平方向建立 10 公里見方之區域，垂直方向則侷限於第一層含水層作為該參數調整分區。

政府於民國 100 年底完成，土庫國中與客厝國小地層下陷相關監測，除了地陷井與 GPS 觀測站外，亦於場址建立地下水觀測站，於民國 100 年完工，尚未開始進行地下水之觀測。本研究以重力觀測作為儲水係數或比流出量之參數檢定，需再調整淨補注量使得地下水模擬水位與觀測水位吻合，因此對於參數調整過的區域，需以觀測水位作為淨補注量之檢定目標。

為驗證本研究方法之可行性，在此應用克力金(Kriging)內插演算法推估土庫國中與客厝國小之水位，以內插水位作為該站觀測水位，作為虛擬觀測站，後續如兩觀測站已進行觀測，其可直接採用觀測水位。溪洲國小站雖無建置地下水觀測站，但地下水觀測網已於溪州(1)建置觀測站，兩者距離約距 1 公里遠，由於原有地下水觀測站距離重力站不遠，故無需以前述方式推估重力站位置之觀測水位。在加入土庫國中與客厝國小兩站後，其抽水分區則以新加入虛擬站井，建立徐昇氏網格分區，其分布如圖 4.4-2 所示。

圖 4.4-3 與 4.4-4 分別為客厝國小與土庫國中之內插水位，以及鄰近觀測站之水位變化圖，以客厝國小為例，其鄰近站井為東光(1)、宏崙(1)與舊

庄(1)，由於濁水溪沖積扇以東方為上游，西方為下游，因此三者依據東西方之分布逐步遞減，客厝國小與宏崙(1)之上下游區位較為相近，故內插水位亦與宏崙(1)之水位相類似。以搭配前述徐昇氏分區與內插水位，重新進行濁水溪沖積扇淨補注量之自動檢定，本研究應用專家系統參數檢定系統進行自動檢定。



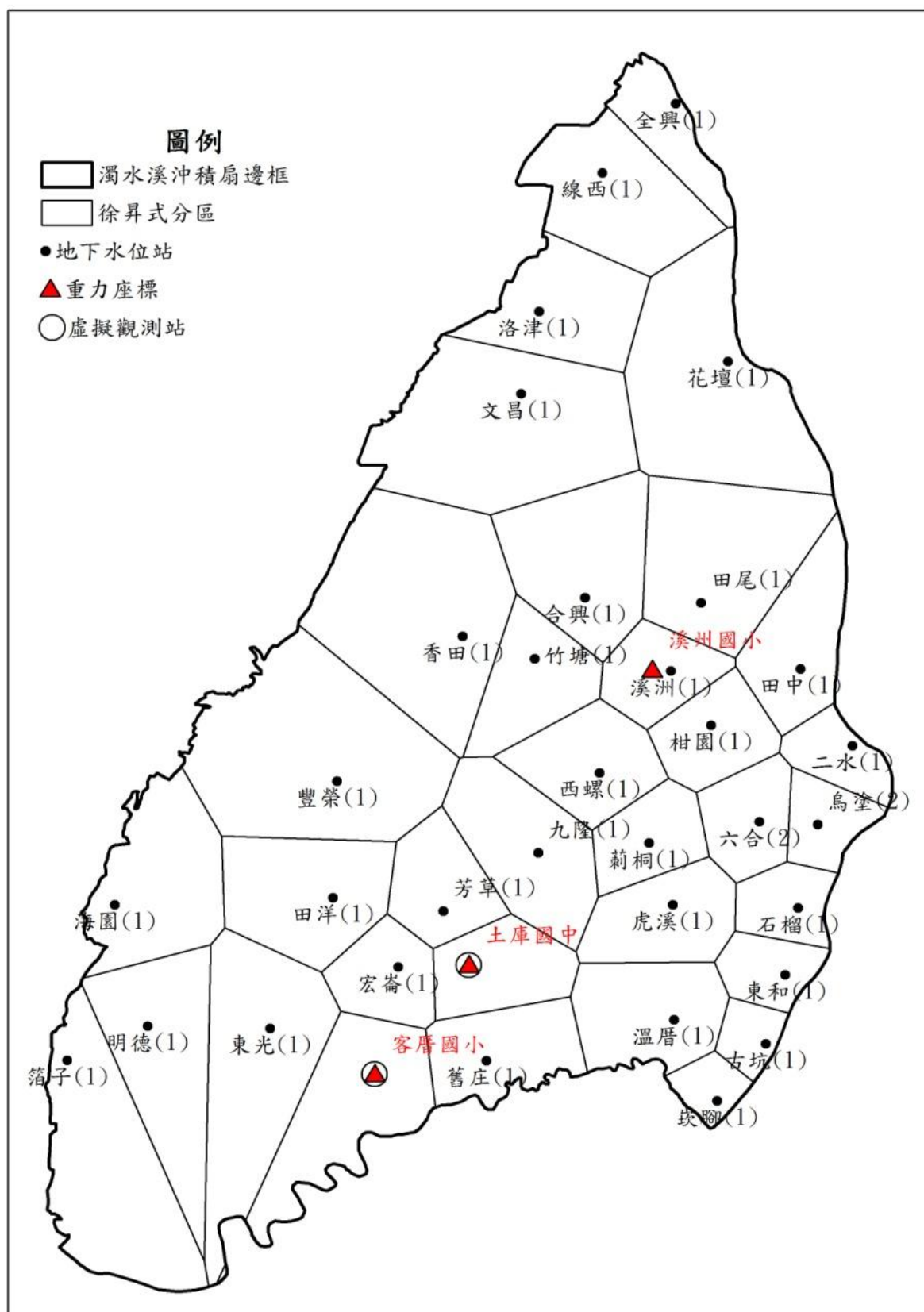


圖 4.4-2 加入虛擬觀測站之徐昇式網格分區

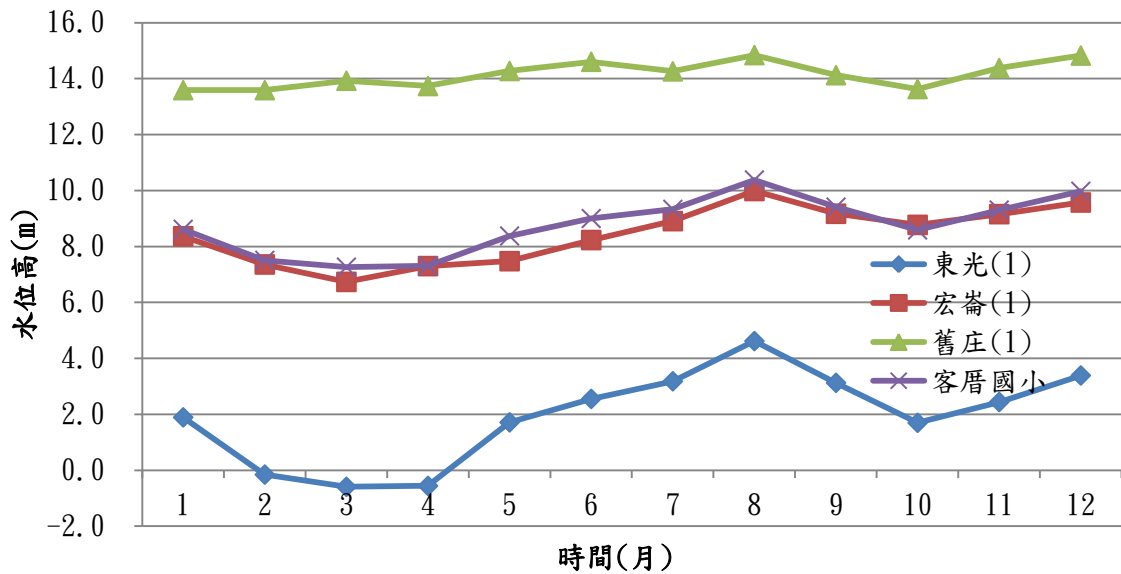


圖 4.4-3 客厝國小內插水位與鄰近三站觀測水位之變化

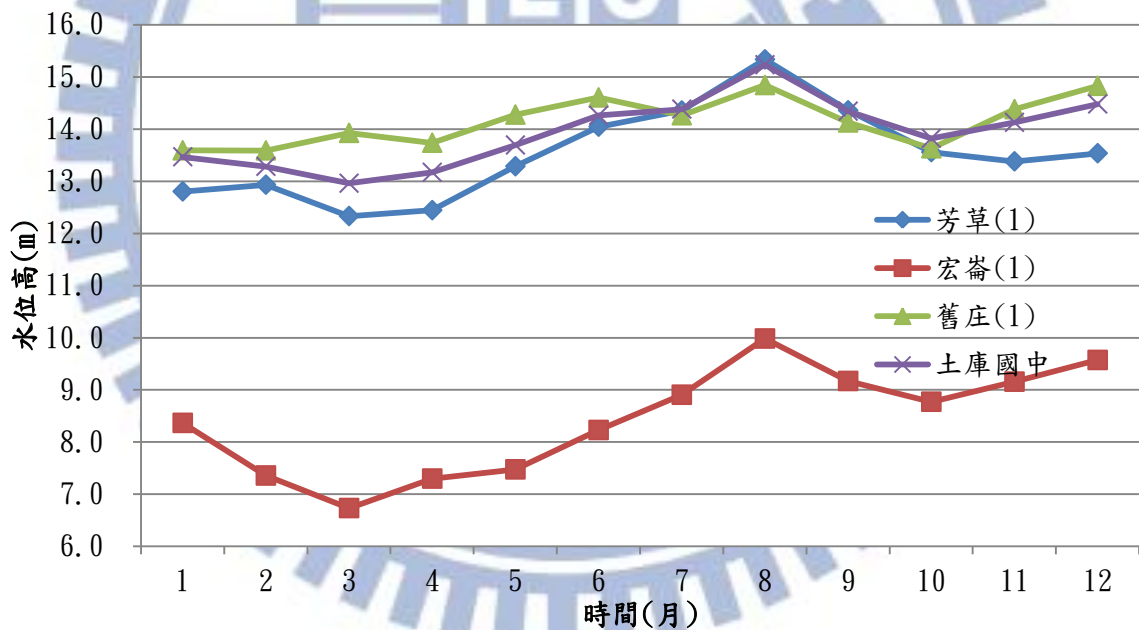


圖 4.4-4 土庫國中內插水位與鄰近三站觀測水位之變化

藉由專家系統參數檢定系統完成自動檢定後，由於參數本身並無調整，且增加之虛擬站井亦以內插方式取得，故系統增加虛擬站井與否，對於系統淨補注量、系統水位與水量並無大幅差異。

將系統水量配合重力積分公式，可以推算地下水水量變化對溪洲國小、土庫國中與客厝國小等三站之重力貢獻值變化，比較實測之重力殘差變化

對模擬重力變化之比值，可做為儲水係數或比出水量檢定之依據。

由少量現地試驗所得之比出水率及儲水係數，透過 MODFLOW 模擬與檢定完成地下水系統，並配合重力積分公式進行演算後，由 33 個觀測水位與 2 站虛擬水位站，分別展示分佈於濁水溪沖積扇之比出水率、水位振幅及重力振幅在空間上的變化，如圖 4.4-5 至 4.4-7 所示。首先，由圖 4.4-5 可看出，扇頂皆為靠近山麓的地區，其地質多為礫石所組成，顆粒較扇央或扇尾大許多，而扇央區域，在合興及竹塘也有較大的儲水係數。此外，扇頂區域分別由田中、二水、烏塗、六合及古坑等站所組成，依照中央地質調查所岩心柱狀圖搭配地質剖面圖判斷可知，該區域為非侷限含水層，故水位的變化相較於扇央及扇尾來得大；而扇尾區域之東光站位於古河道上，該區域有局部且特殊的地質架構，因此雖接近扇尾但其水位振幅也較大，如圖 4.4-6。由圖 4.4-7 可看出，模擬重力變化與模擬水位變化及儲水係數之間具有正相關。

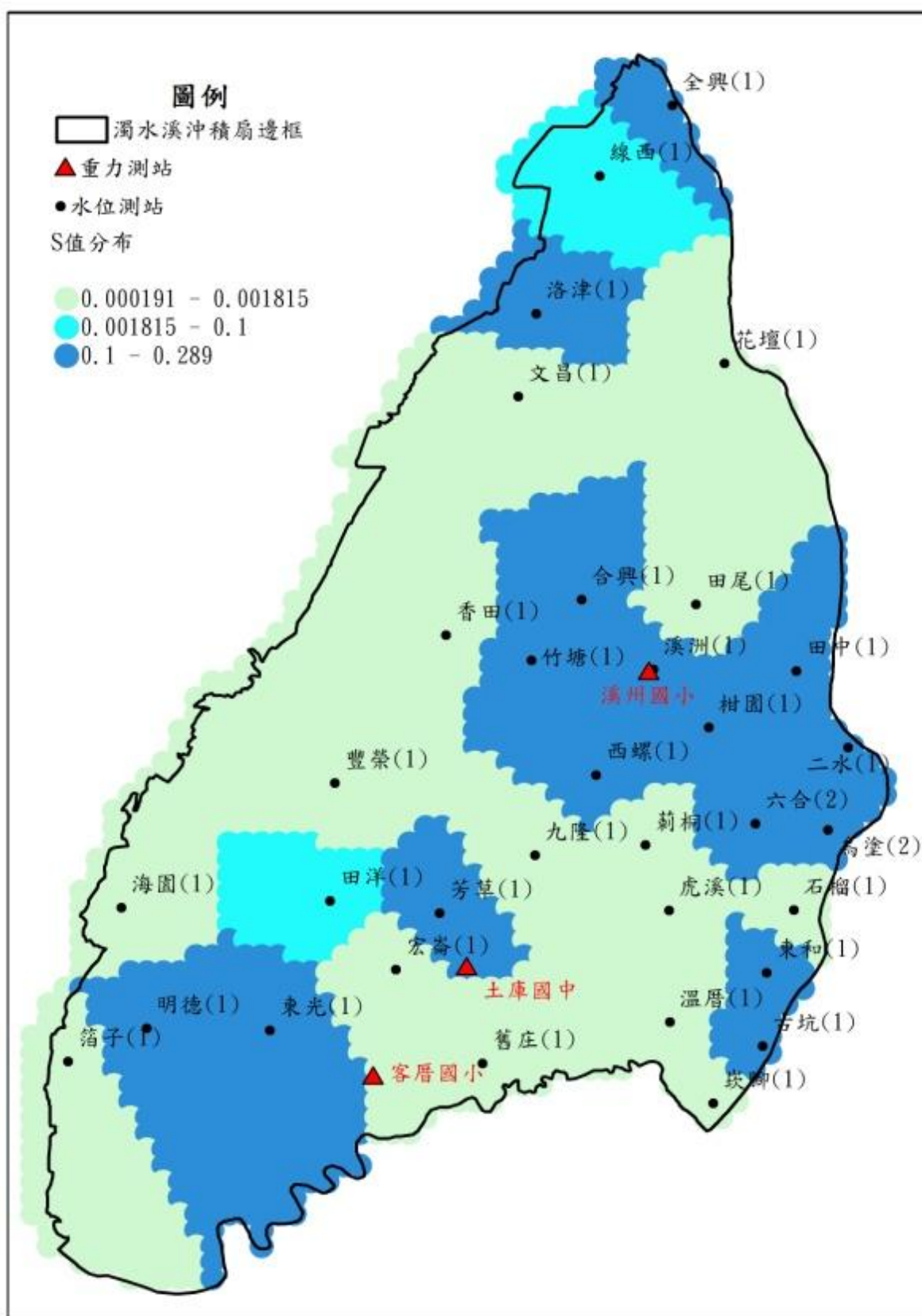


圖 4.4-5 比流出量或儲水係數分布圖(修改前)

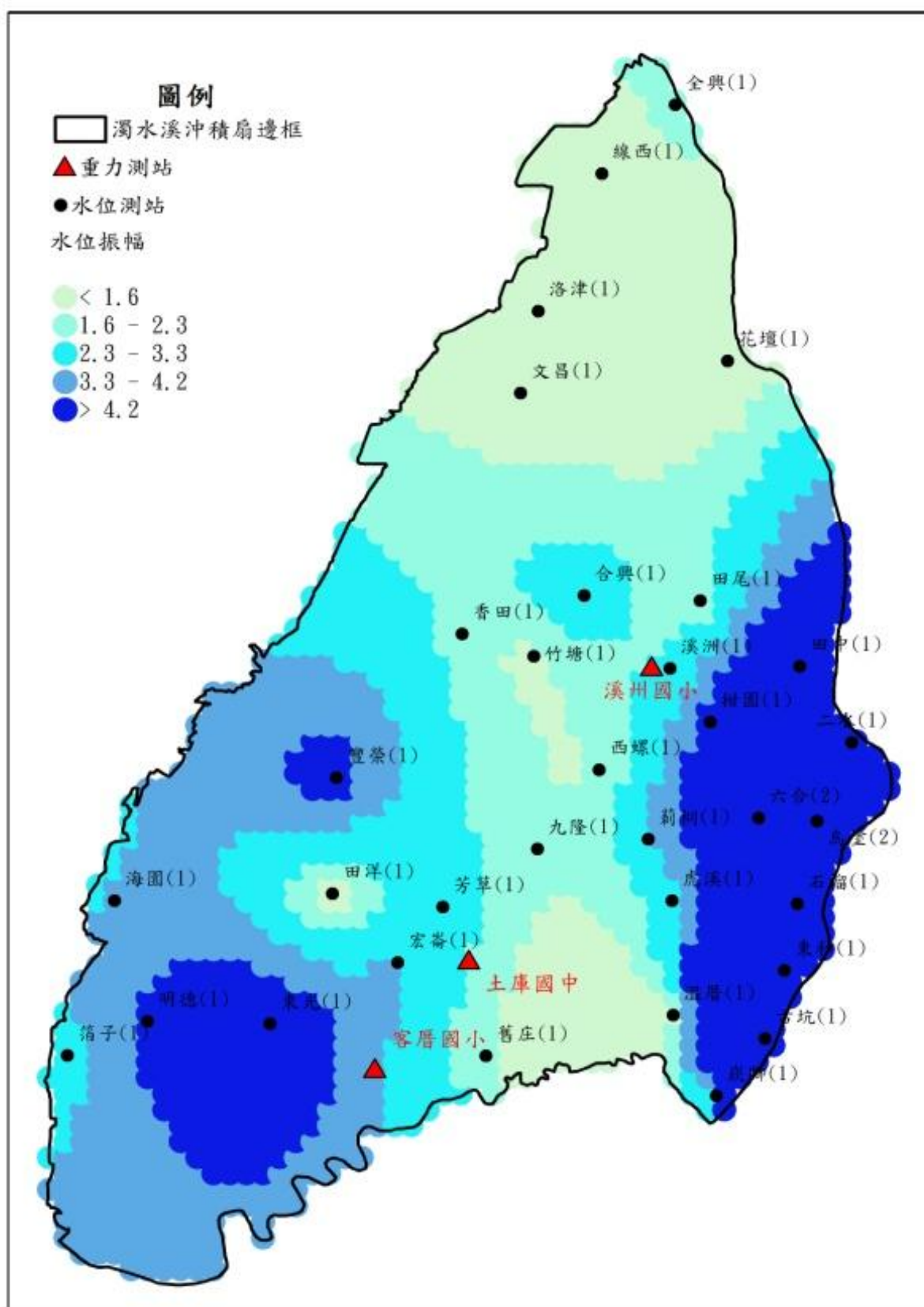


圖 4.4-6 模擬水位振幅分布圖(修改前)

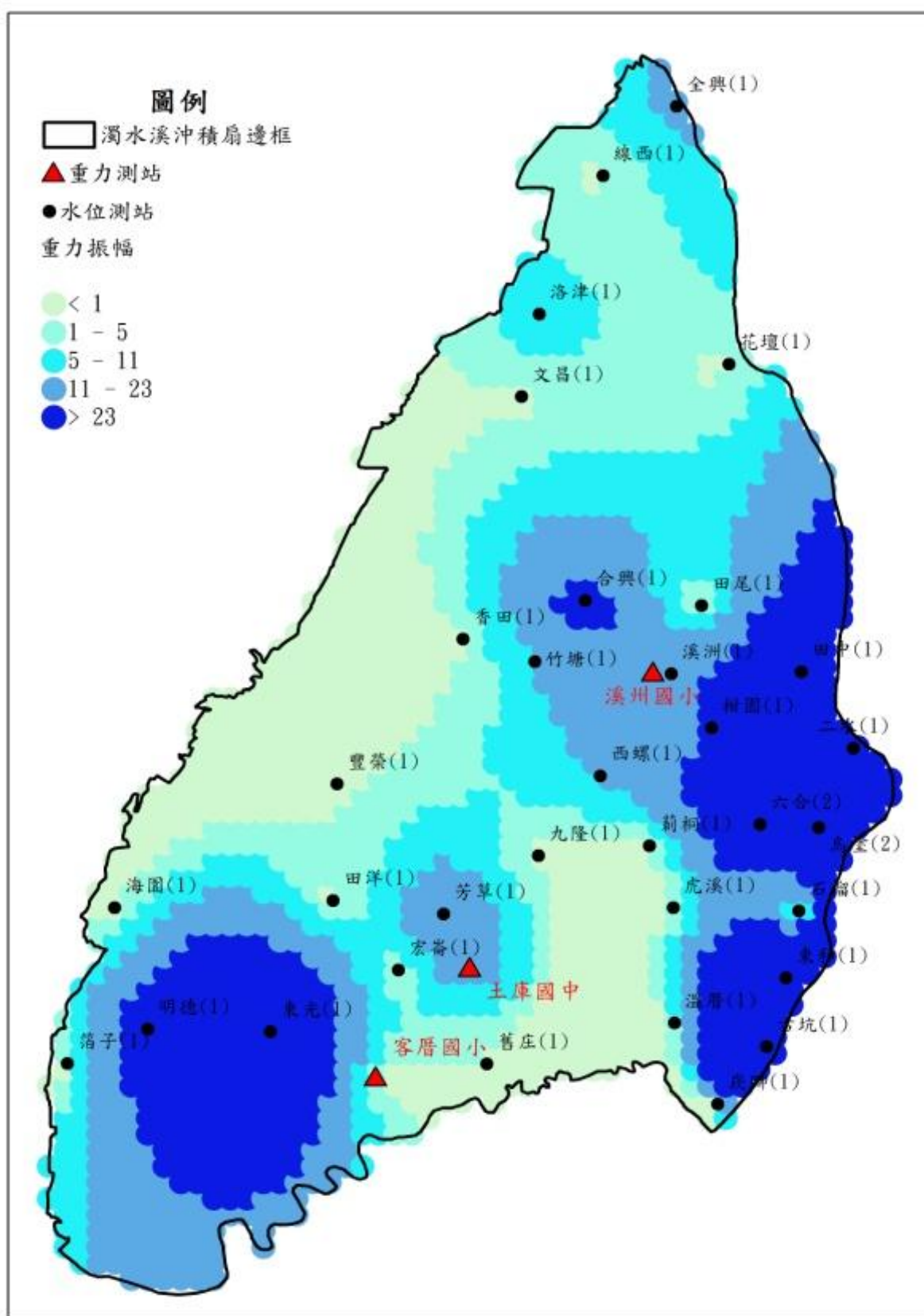


圖 4.4-7 模擬重力振幅分布圖(修改前)

圖 4.4-8 至 4.4-10 分別為溪洲國小、土庫國中與客厝國小之模擬重力與實測之重力殘差變化圖，由於第一次重力量測是在民國 101 年 5 月執行量測，故以 5 月為基準，將該月之模擬重力與重力殘差分別平移為 0，藉此比較不同時間模擬重力與重力殘差之變化。圖上除呈現當次重力殘差之平均值外，亦呈現重力殘差之標準偏差，為該次量測之誤差範圍。

比較溪洲國小之模擬重力與重力殘差，以四月份之重力值最低，從五月開始重力值逐步上升，以八月與九月為頂峰，再逐步下降。重力殘差分別於五月、八月與十月進行量測，其變化亦有相同之趨勢，以八月殘差值最高，其次為十月殘差值，最低則為五月殘差值。比較模擬重力與重力殘差，八月之重力殘差略比模擬重力高約 $5(\mu\text{-Gal})$ ，而十月之重力殘差則約略比模擬重力低約 $5(\mu\text{-Gal})$ 。雖模擬重力未能與重力殘差平均值完全吻合，但已進入誤差幅度約與標準偏差相似，已可接受這樣的數值差異。

由於溪州(1)本身有比出水量之現地試驗，如表 4.1-1 所示，其數值為 0.216，以複井抽水試驗所得之參數，代入地下水數值模式與重力積分，其模擬重力變化與重力殘差相符，本研究應用重力觀測進行地下水儲水係數或比流出量之檢定，溪洲國小之結果可驗證本研究之正確性與可行性。

圖 4.4-9 與 4.4-10 則分別為土庫國中與客厝國小模擬重力與重力殘差之變化圖，由於鄰近站井均無現地試驗值，如芳草(1)、舊庄(1)、宏崙(1)與九隆(1)，其參數分別以 0.1824 、 1.8146×10^{-3} 與 1.8146×10^{-3} 給定，在此參數給定下，其具有高度不確定性，因此所得之模擬重力與重力殘差差異極大，兩者之重力殘差變化幅度對模擬重力變化幅度之比值，分別為 1.8 與 50 倍，顯現模式中水量變化幅度過小，故以此倍數進行調整。

檢定分區原則上以重力站為中心，以水平方向建立 10 公里見方之區域，垂直方向則為該調整範圍內含水層一之厚度，作為該參數調整分區。由於兩重力站距離不遠，因此兩正方形會重疊，為避免互相干擾，則取兩者中

線分隔。土庫國中之參數檢定分區，共涵蓋芳草(1)、舊庄(1)、宏崙(1)與九隆(1)參數分區，檢定方式是以原始參數值，同乘前述之 1.8 倍。其原始參數芳草為 0.1824，其餘皆為 0.0018146，修改後芳草參數則為 0.28，其餘三區為 0.003266。

而客厝國小之參數檢定分區，則會涵蓋東光、宏崙與舊庄三個參數分區，由於東光(1)本身有現地試驗值，其值為 0.289，故不予以調整，而宏崙與舊庄分區值則同乘 50 倍，其原始參數皆為 0.0018146，修改後參數則為 0.09073。參數分區如圖 4.4-11 所示。

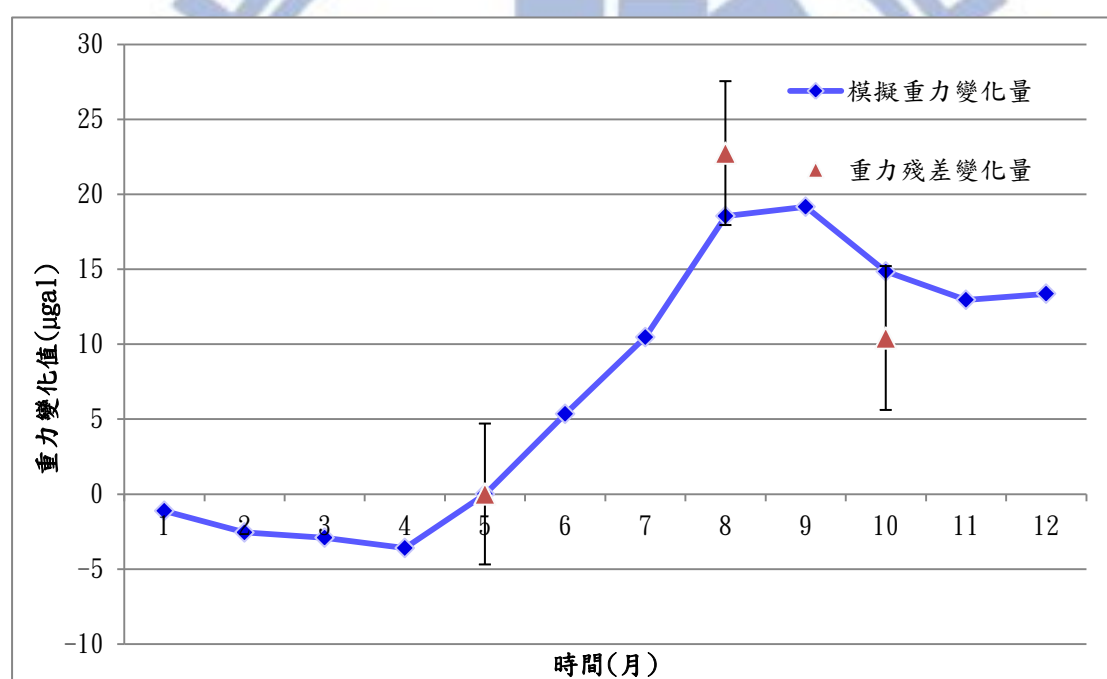


圖 4.4-8 溪州國小實測重力與模擬重力變化圖

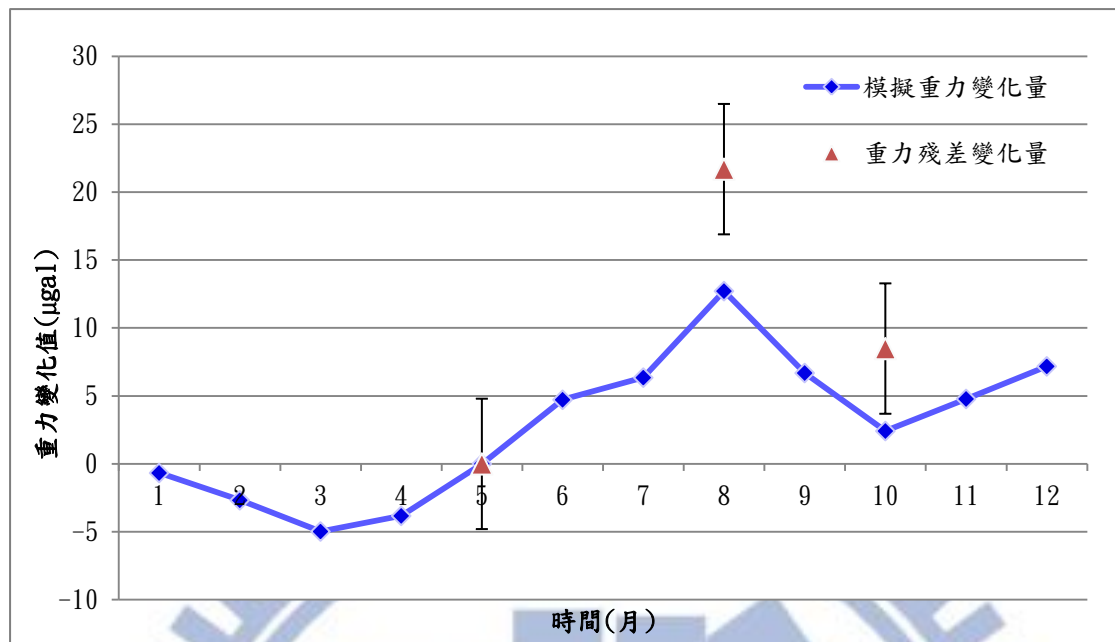


圖 4.4-9 土庫國中實測重力與模擬重力變化圖

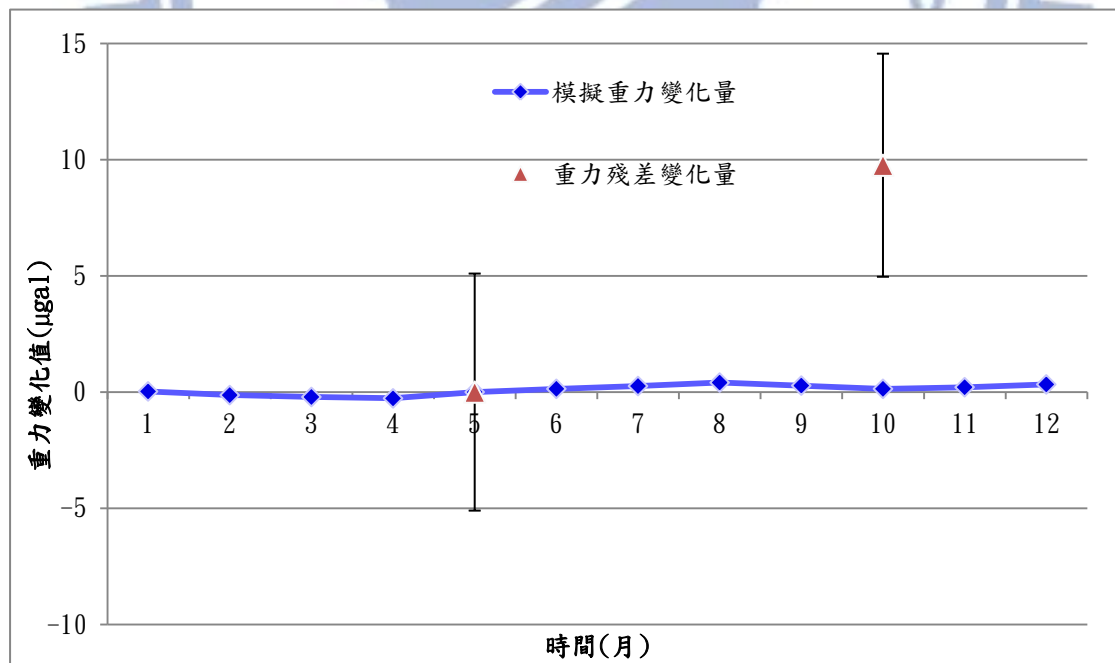


圖 4.4-10 客厝國小實測重力與模擬重力變化圖

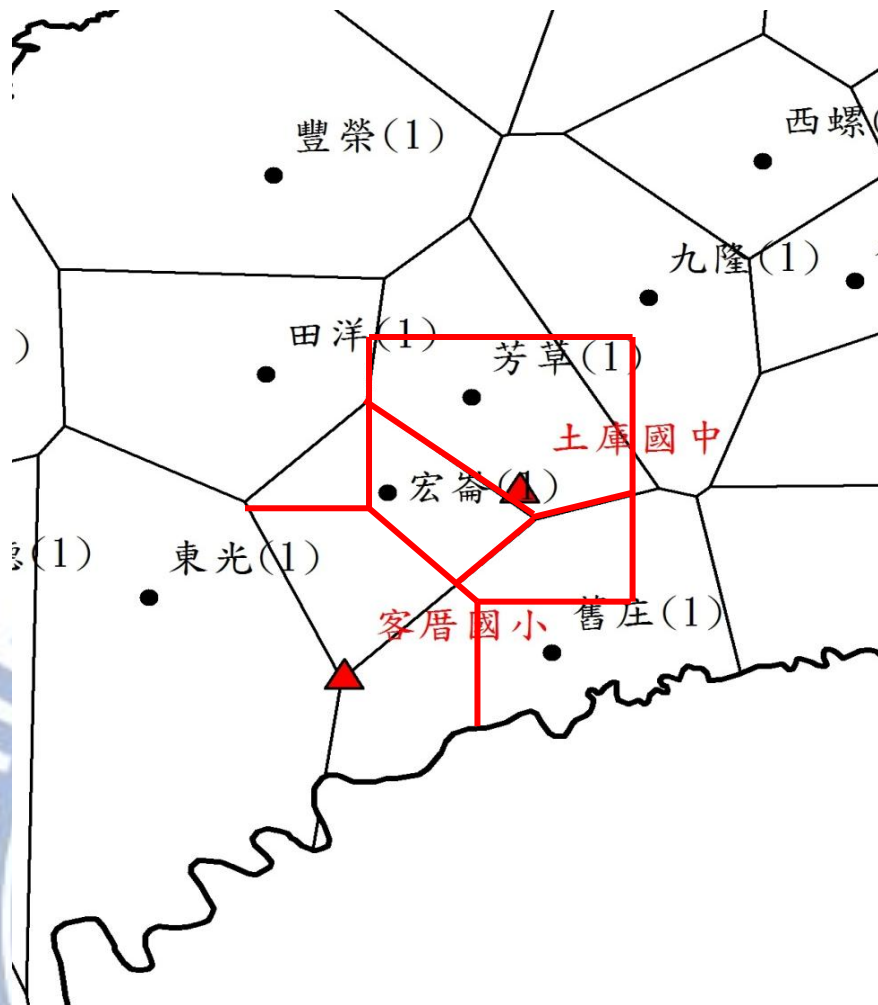


圖 4.4-11 調整範圍示意圖

4.4.3 比出水率檢定成果

依據 4.4.2 所述，將各區域儲水係數及比出水率之分區，以一定倍數修正過後，輸入 MODFLOW 模式重新模擬與建置地下水系統，再利用重力積分公式，計算模擬地下水系統質量對於重力之影響，使重力模擬值與重力實測值之振幅吻合，即完成儲水係數及比出水率之檢定。

土庫國中與客厝國小調整參數後，使其重力殘差與模擬重力變化相符，換句話說，增加儲水係數與比出水率，亦相對加大系統水質量，使模擬之地下水系統質量變化與現地之地下水質量變化趨近一致，即完成此區域儲水係數與比出水量之推估，如圖 4.4-12 至 4.4-13。

首先，比較土庫國中之模擬重力與重力殘差，以三月份之重力值為最

低，而後重力值開始漸漸上升，以八月為最高峰，再逐步下降。重力殘差分別於五月、八月及十月進行量測，其變化亦有相同趨勢，為八月觀測值最高，其次為十月觀測值，最低則為五月觀測值，與溪州國小站之趨勢相同。比較模擬重力與重力殘差，八月之殘差值略比模擬重力高約 $3(\mu\text{-Gal})$ ，而十月之重力殘差則約略比模擬重力高 $1(\mu\text{-Gal})$ 。雖重力殘差與模擬重力未能完全吻合，但相較於溪州國小誤差以減少許多。

再者，比較客厝國小之模擬重力與重力殘差，重力值以一月份至三月份為最低，而後逐漸抬升，至八月份重力值到達最高點，九月份開始漸漸遞減。實測重力僅於五月及十月進行量測，其變化與模擬重力相同。且相較於溪州國小站與土庫國中站，客厝國小僅有兩次殘差值，故調整參數時可將誤差降至最低，在 10 月份誤差僅約 $0.5(\mu\text{-Gal})$ 。

重力殘差與模擬重力趨勢比對完成後，接著分別展示出濁水溪沖積扇修正參數後，其比出水率、水位振幅及重力振幅在空間上的變化分佈，如圖 4.4-14 至 4.4-16。若與未修正之 S 值分佈比較，修正後變化區域僅為土庫國中與客厝國小 10 公里見方範圍內，如圖 4.4-14。由於地下水觀測點點位分佈有限，故修改後水位振幅於與修改前振幅有些微變化，如圖 4.4-15。圖 4.4-16 可看出，增加比出水量及儲水係數後，於土庫國中與客厝國小鄰近之模擬重力有增加的現象。

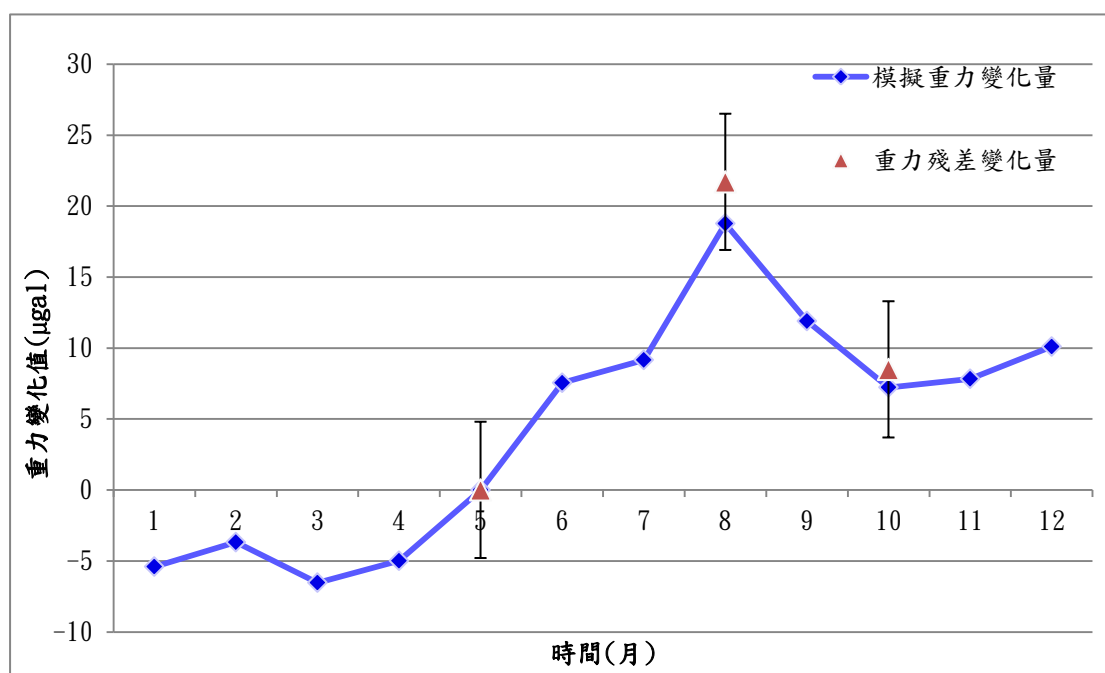


圖 4.4-12 土庫國中實測重力與模擬重力變化圖(修正後)

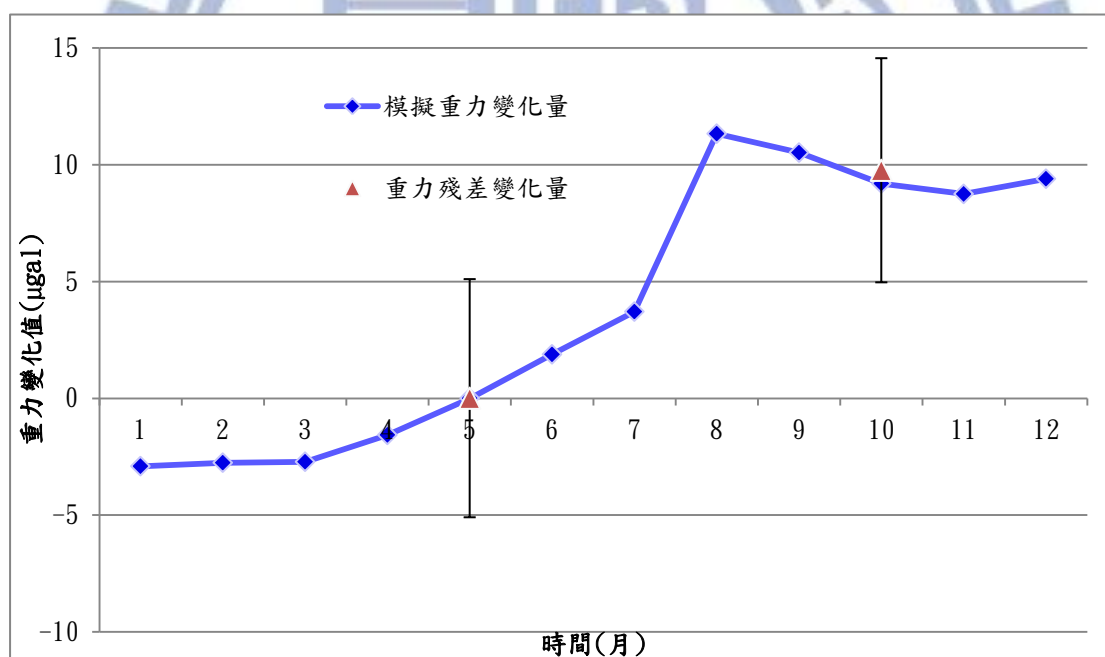


圖 4.4-13 客厝國小實測重力與模擬重力變化圖(修正後)

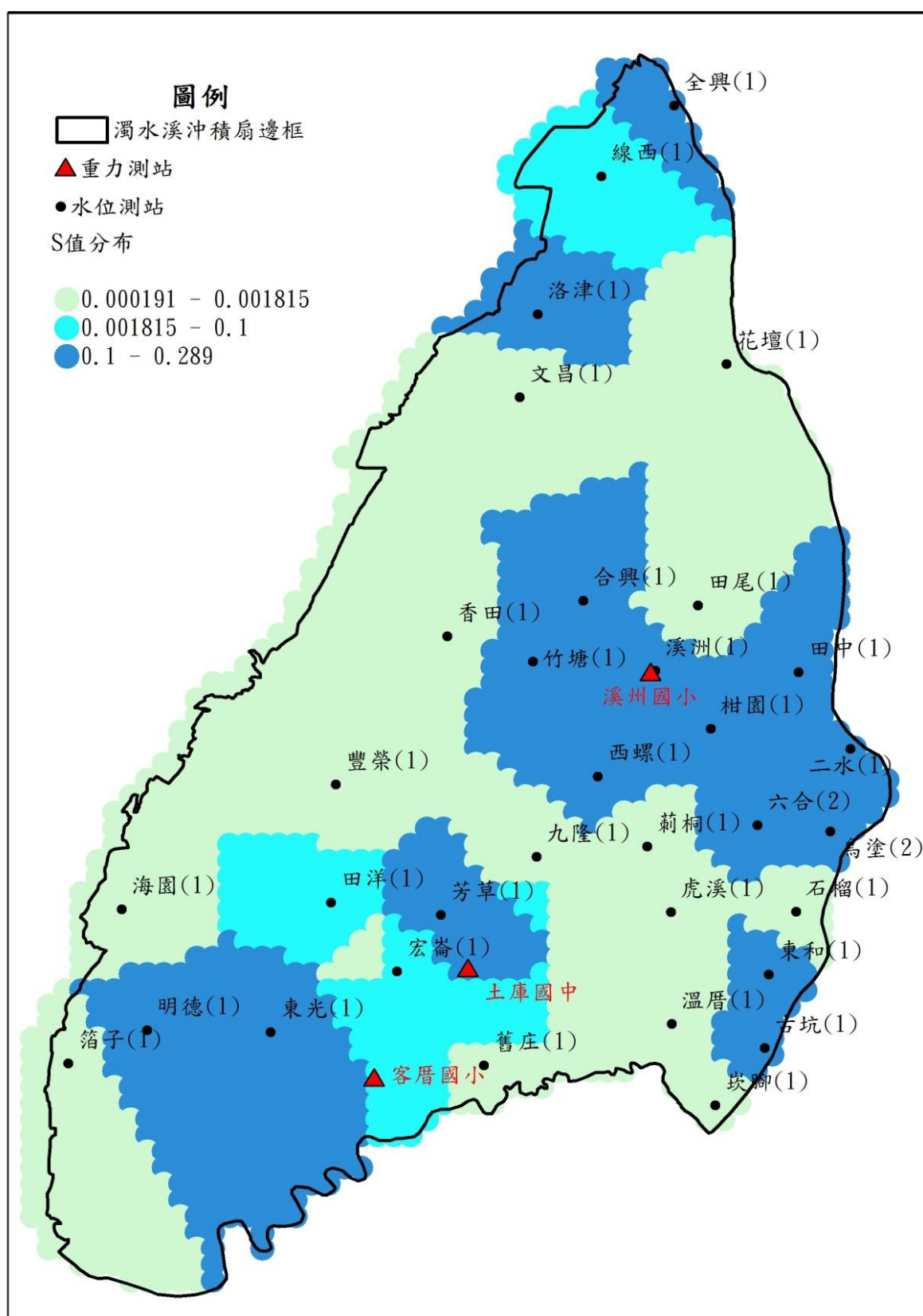


圖 4.4-14 比流出量或儲水係數分布圖(修改後)

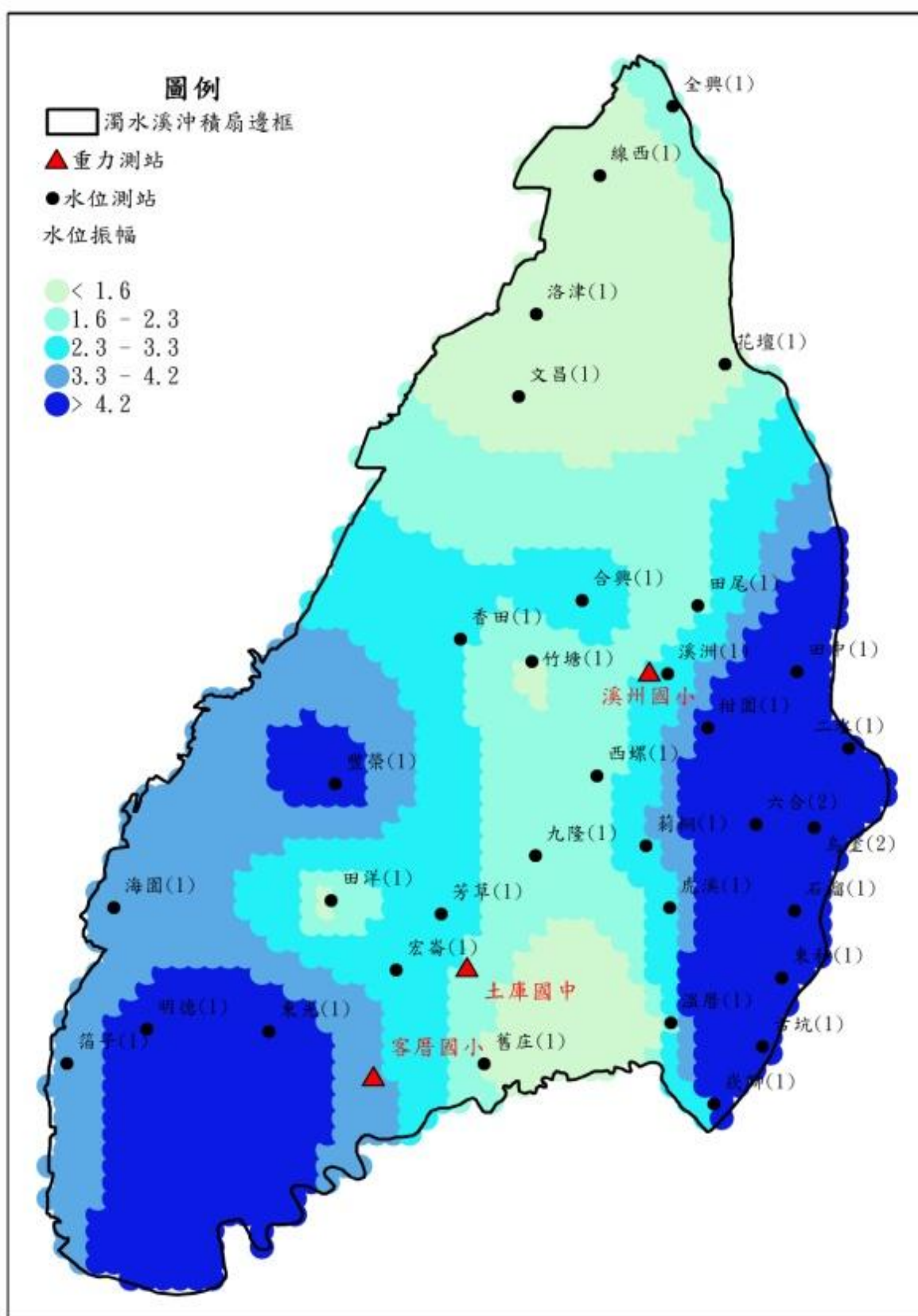


圖 4.4-15 模擬水位振幅分布圖(修改後)

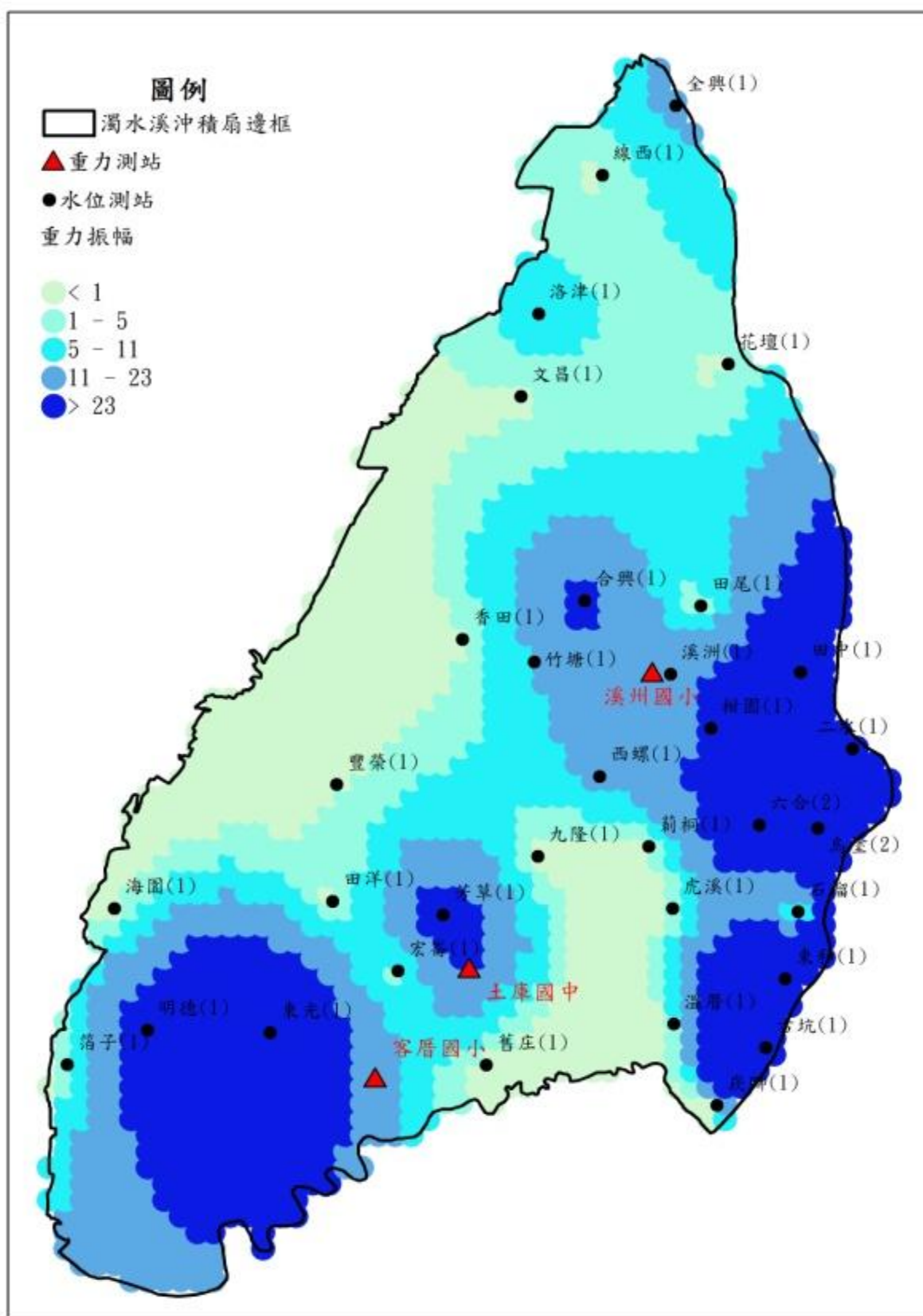


圖 4.4-16 模擬重力振幅分布圖(修改後)

4.4.4 專家系統參數檢定

在地下水模擬中參數檢定是必要的，為使系統模擬水位能與觀測水位吻合，需藉由專家系統參數檢定系統進行檢定。本案例之檢定誤差容忍值(Error Tolerance)為 2 公尺。

本研究中的地下水數值模擬分為參數修改前與參數修改後兩個版本，圖 4.4-17 為原始參數下的參數檢定結果，其為各月各站觀測水位與檢定水位之檢定誤差圖，橫座標為觀測水位，縱座標為模擬水位，各月各站檢定結果均可位於 45 度線上，顯示原始參數下的參數檢定結果良好。

如前述，本研究藉由量測重力與模擬重力的變化振幅差異，來進行 Sy 的參數調整，圖 4.4-18 為參數調整後之檢定結果，與參數調整前一樣，檢定結果亦相當良好。

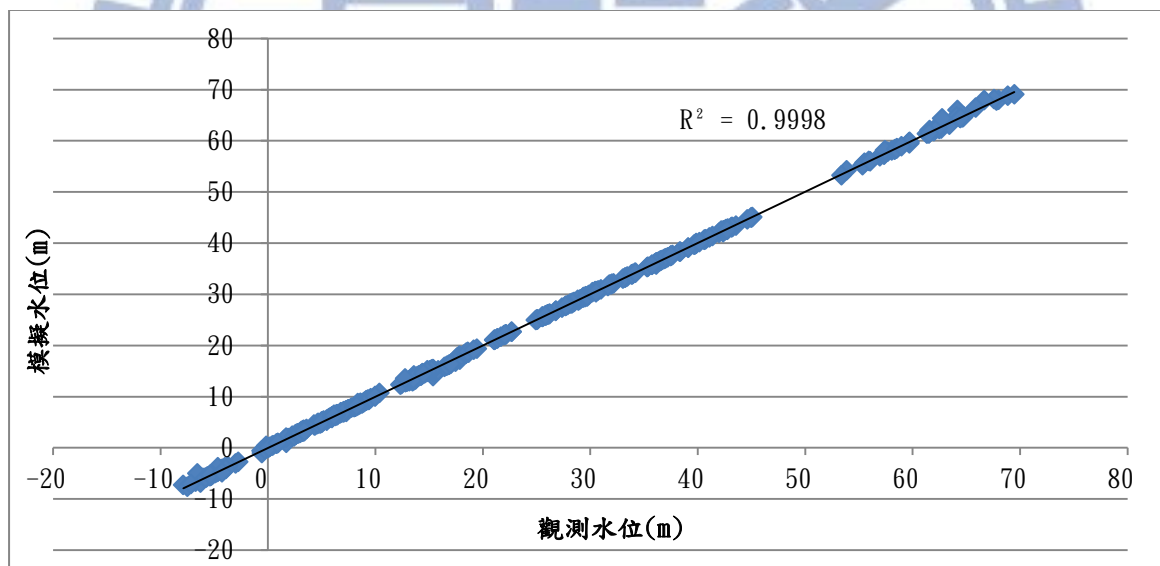


圖 4.4-17 觀測水位與檢定水位檢定關係圖(修改前)

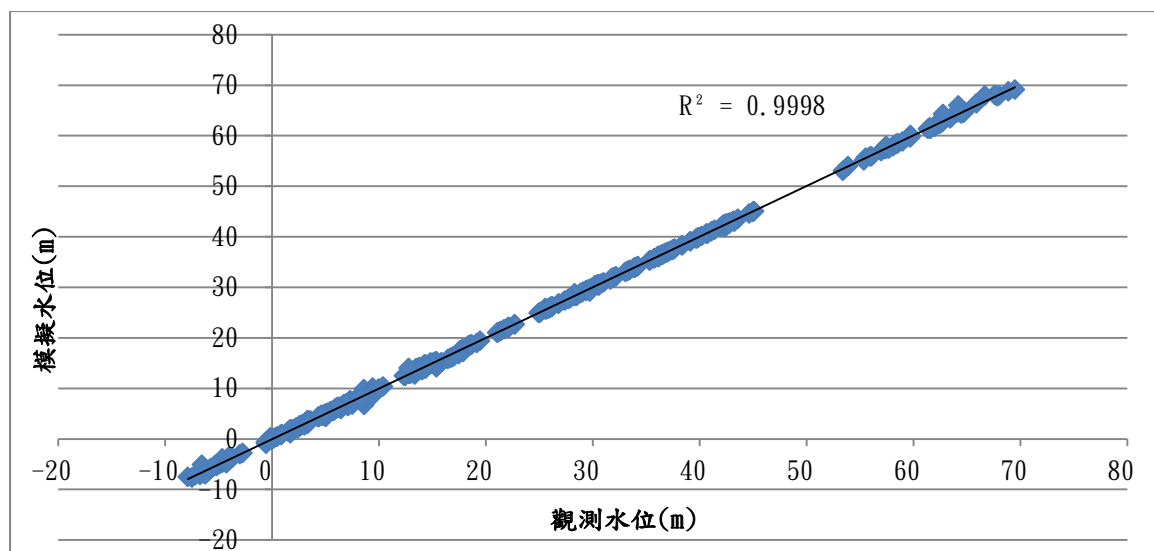


圖 4.4-18 觀測水位與檢定水位檢定關係圖(修改後)



4.5 水平衡分析

本節說明由模式檢定所得之表層淨補注量，如表 4.5.1 所示。

表 4.5-1 各區域修正前後淨補注量

區域	淨補注量 修正前	淨補注量 修正後	改變量
土庫國中	-5.285	-7.232	-1.947
客厝國小	11.827	-3.584	-15.411

(單位：百萬噸/年)

由表可知，依據徐昇氏分區檢定土庫國中與客厝國小兩分區，依序列出參數修正前後之淨補注量資訊。土庫國中分區範圍內，參數修正前之年淨抽水量約 5.285 百萬噸，而在影響半徑內，增加 1.8 倍之比出水率後，其年淨抽水量提高至 7.232 百萬噸，約略為原始淨抽水量之 1.4 倍，兩者改變量約為 1.947 百萬噸。另外，客厝國小鄰近區域之年淨補注量則由 11.827 百萬噸變為 -3.584 百萬噸。

圖 4.5.1 至 4.5.2 為比出水率及儲水係數修正前後各月份淨補注量變化圖。圖中顯示，土庫國中徐昇氏分區內參數修正前後，曲線不但相似，且變化幅度加大，以 1 月份至 4 月份而言，淨抽水量約由 2(百萬噸/月)增加至 4(百萬噸/月)，而 5 月份及 6 月份，淨抽水量由 1.3(百萬噸/月)增加至 3(百萬噸/月)左右，7 月份則維持進出平衡的情況，而後，至八月份淨抽水量也由 2.3(百萬噸/月)提升至約 5(百萬噸/月)，9 月份及 10 月份則由 3(百萬噸/月)至 6(百萬噸/月)左右，而後直至 12 月份其淨補/抽水量也以倍數增加，且數值約為 1.8 倍至 2 倍左右。

而客厝國小修正參數前後較沒有似土庫國中以倍數增減之變化曲線。修正後，其 2 月份淨抽水量為最大，約 30(百萬噸/月)，5 月份淨補注量最

大，也為 30(百萬噸/月)左右。

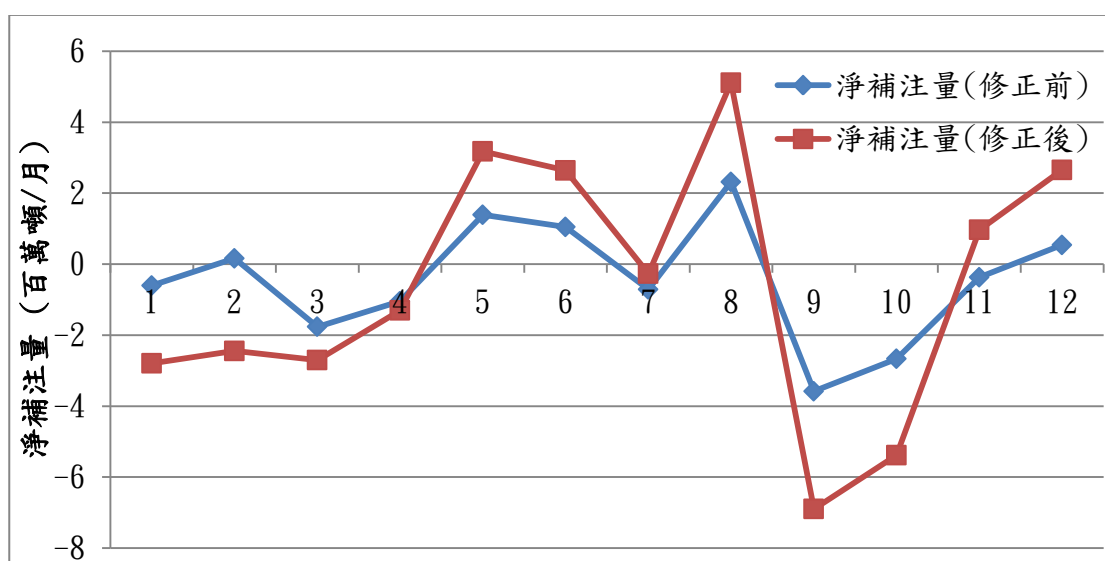


圖 4.5-1 土庫國中修正前後淨補注量比較圖

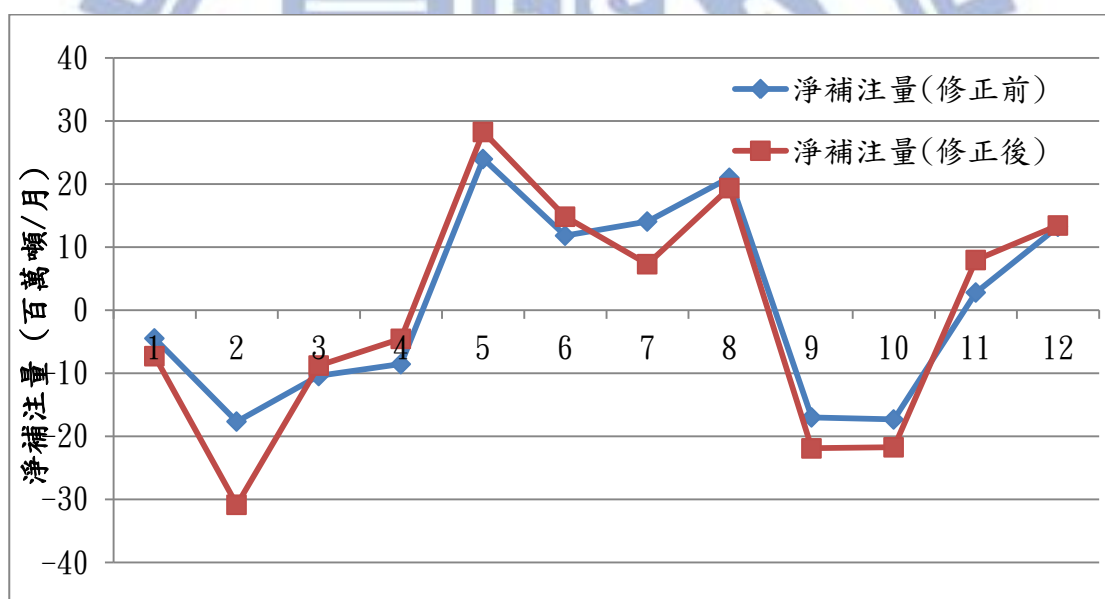


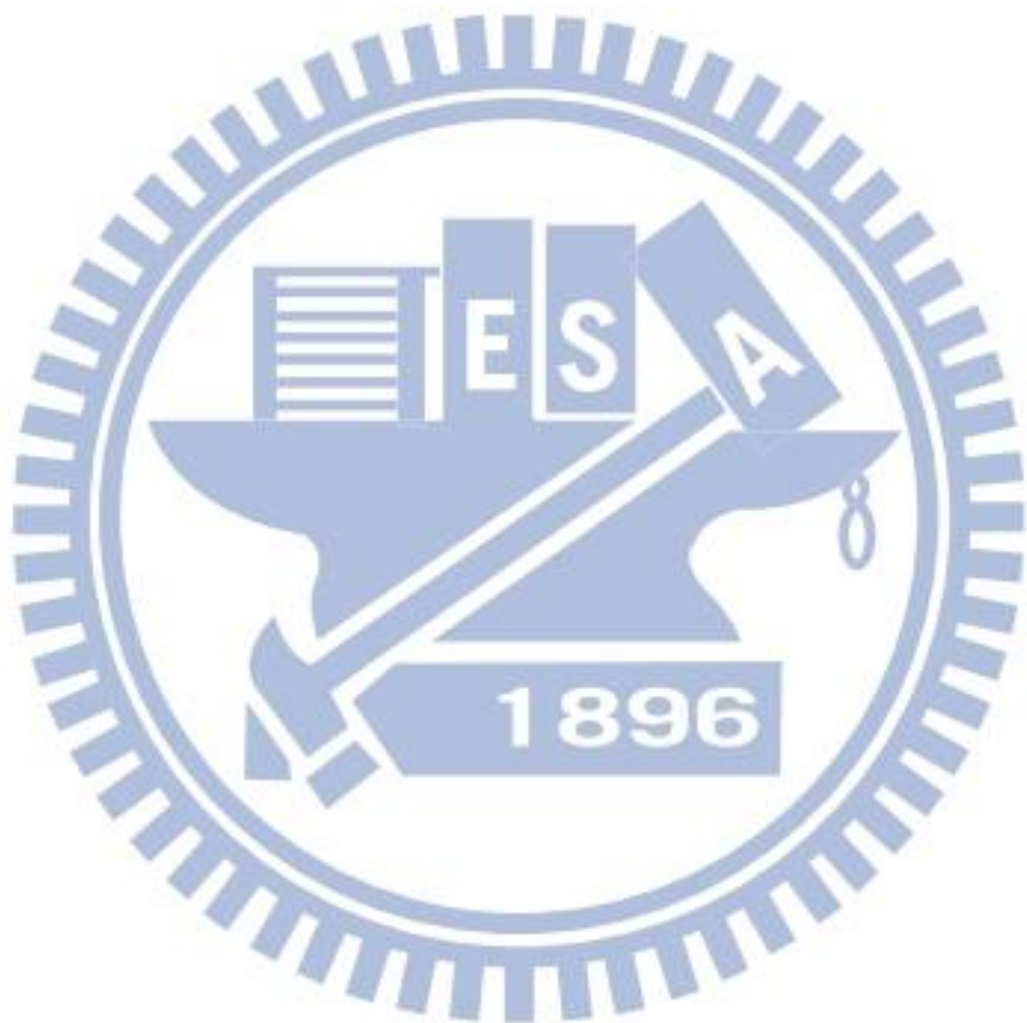
圖 4.5-2 客厝國小修正前後淨補注量比較圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 本研究已成功結合現地重力量測、重力積分程式與地下水數值模擬，進行濁水溪沖積扇儲水係數與比流出量之參數檢定。
2. 藉由重力積分半徑影響分析，由於重力是質量與距離平方倒數之乘積，因此隨著距離之擴大，重力貢獻值則隨之減小。研究結果顯示，如以 5 公里為積分半徑，可貢獻 97% 以上之重力值。
3. 由於溪州(1)本身曾進行比流出量之複井抽水試驗，比出水量為 0.216，以此輸入模式中，溪州國小之模擬重力變化，與現地量測之重力殘差變化相符合，可驗證本研究方法之正確性與可行性。
4. 在土庫國中與客厝國小之案例，由於鄰近水井並無儲水係數或比流出量之現地試驗值，僅能以試驗值之平均值給定輸入，故初始模擬重力變化，與量測重力殘差有大幅差異。對土庫國中與客厝國小而言，量測重力殘差對模擬重力變化之比值分別為 1.8 倍與 50 倍。應用前述 1.8 倍與 50 倍之比值進行參數檢定，檢定後重新進行計算，模擬重力與量測重力殘差吻合。
5. 經參數檢定後，土庫國中鄰近區域之年淨抽水量由 5.285(百萬噸)提高至 7.232(百萬噸)，而客厝國小則由 11.827 (百萬噸)改變至-3.584 (百萬噸)。
6. 相對於傳統複井試驗需要鑽鑿兩口鄰近水井，重力量測屬於一種非侵入式的方法，無須鑽鑿水井，可節省大量之鑽鑿成本，以取得比出水量或儲水係數。應用 FG5 進行現地絕對重力之量測，該儀器具有高度行動性，相對於傳統方法，其成本上與行動性均有其優勢，可大幅增加觀測

密度。



5.2 建議

1. 本研究目前於溪州國小、土庫國中與客厝國小進行現地重力量測，已可呈現本研究方法之可行性與正確性。然上述三點觀測而言，相對於濁水溪沖積扇全區，參數點位仍然偏少，建議後續研究者可進行更大規模之重力量測，以提供全區比流出量之檢定。
2. 目前溪州國小旁有地下水位觀測站可提供淨補注量檢定之用，土庫國中與客厝國小目前尚未進行水位之觀測，需輔以其他處理手續，建議後續調查研究，應以地下水觀測站鄰近區域作為候選區位。
3. 部分地層下陷區亦位於濁水溪沖積扇中，建議後續研究者可探討地層下陷對重力之影響。
4. 建議後續研究者可持續進行觀測，藉由長時期、多個水文循環的觀測，可分離重力訊號在季節豐枯與長時期趨勢之變化，兩者可分別應用於地下水資源之豐枯循環與地層下陷持續沉陷上。

參考文獻

1. Abbott, M.B., 1991. Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment. Avebury Technical, Aldershot
2. Christiansen, L., Binning, P., Rosbjerg, D., Andersen, O., and Bauer-Gottwein, P. (2011). Using time-lapse gravity for groundwater model calibration: An application to alluvial aquifer storage. *Water Resources Research*, 47(6):W06503.
3. Chau, K.W., 2003. Manipulation of numerical coastal flow and water quality models. *Environmental Modelling and Software* 18 (2), 99 – 108.
4. Chau, K.W., Albermani, F., 2002. Expert system application on preliminary design of liquid retaining structures. *Expert Systems with Applications* 22 (2), 169 – 178.
5. Chau, K.W., Albermani, F., 2003. Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 129 (10), 1312 – 1321.
6. Chau, K.W., Chen, W., 2001. An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes. *Advances in Engineering Software* 32 (9), 695 – 703.
7. Heiskanen, W. A., and H. Moritz, 1985: *Physical Geodesy*. Reprint, Institute of Physical Geodesy, TU Graz , p.129-139
8. Hill, M.C., 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, ground-water flow model using nonlinear regression. US Geological Survey, Open File Report 91-484, pp. 3–4 and 15.
9. Chau, K.W., “Intelligent manipulation of calibration parameters in numerical modeling”, *Advances in Environmental Research*, 8, p. 467–476, 2004.
10. Chau, K.W., “Selection and calibration of numerical modeling in flow and water quality”, *Environmental Modeling and Assessment*, 9, p. 169–178, 2004.

11. Chau, K.W., "A review on integration of artificial intelligence into water quality modeling", *Marine Pollution Bulletin*, 52, p. 726–733, 2006.
12. Chau, K.W., "A review on the integration of artificial intelligence into coastal modeling", *Journal of Environmental Management*, 80, p. 47–57, 2006.
13. Madsen, H., 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives.
14. Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J. Hydrol.* 235. p. 276–288.
15. Pool, D. (2008). The utility of gravity and water-level monitoring at alluvial aquifer wells in southern arizona. *Geophysics*, 73(6):WA49–WA59.
16. Pool, D. and Eychaner, J. (1995). Measurements of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys. *Ground Water*, 33(3):425–432.
17. Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J., Nigro, J., and Wilson, C. (2007). Estimating groundwater storage changes in the mississippi river basin (usa) using grace. *Hydrogeology Journal*, 15(1):159–166.
18. Rodell, M. and Famiglietti, J. (2002). The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using grace: the high plains aquifer, central us. *Journal of Hydrology*, 263(1):245–256.
19. Schwartz, F.W., and Zhang, H., 2003, *Fundamentals of ground water*, John Wiley & Sons, New York.
20. Sophocleous, M.A., Koussis, A., Martin, J.L., 1995, Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration, *Ground Water*, vol.33, no.44 ,pp.579-588.
21. Tapley, B., Bettadpur, S., Watkins, M., and Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.*, 31(9):L09607.
22. Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., and Velicogna, I. (2004). Time-variable

gravity from grace: First results. Geophys. Res. Lett, 31(11):L11501.

23. 中興工程顧問公司，濁水溪沖積扇地下水可開發潛能評估。台灣省政府水利處委託計畫報告，第 5-1 至 5-12 頁，第 6-1 至 6-28 頁，第 7-1 至 7-16 頁，1997。
24. 中興工程顧問公司，濁水溪沖積扇地下水人工補注規劃。台灣省政府水利處委託計畫報告，第 4-6 至 4-18 頁，1998。
25. 巨廷工程顧問股份有限公司、國立交通大學，多元化水資源經營管理方案－地下水補注分析。經濟部水利署委託計畫成果報告第 2-1 至 2-24 頁，第 4-1 至 4-18 頁，2005。
26. 台灣大學水工試驗所，濁水溪沖積扇扇央扇尾平原區地表垂直向補注量評估。經濟部水資源局委託計畫報告，1998。
27. 台灣大學土木工程研究所，濁水溪沖積扇扇頂平原地區地表垂向補注量估計，經濟部委託計畫報告，1997。
28. 能邦科技股顧問股份有限公司，台灣地區地下水補注量估算。經濟部水資源局委託計畫報告，第 4-1 至 4-70 頁，第 5-1 至 5-140 頁，2000。
29. 農業工程研究中心，7C 濁水溪平原地下水數學模式之評估與應用。台灣省水利局委託計畫報告，1989。
30. 劉聰桂，濁水溪沖積扇之地下水資源－碳十四與氡定年/示蹤研究。濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，第 145-164 頁，1996。
31. 經濟部中央地質調查所，台灣地區地下水觀測網第一期計畫，濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告，1999。
32. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。
33. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2002，屏東平原之地下水補注區，經濟部中央地

質調查所彙刊，第十五號，第 17-47 頁。

34. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，2004b，屏東平原地下水補注量及抽水量之評估，經濟部中央地質調查所彙刊，第十七號，第 21-51 頁。
35. 江崇榮、陳瑞娥、賴慈華、黃智昭，2005，濁水溪沖積扇地下水區之補注區與補注源探討，經濟部中央地質調查所彙刊，第十八號，第 1-28 頁。
36. 江崇榮、黃智昭、陳瑞娥，以地下水歷線分析法評估濁水溪沖積扇之地下水收支，經濟部中央地質調查所彙刊第十九號，第 61-90 頁，2006。
37. 李振誥、葉信富、謝堯煌，應用河道水位變化評估新虎尾溪地下水補注量之研究，農業工程學報第 53 卷第 2 期，2007。
38. 經濟部中央地質調查所，台灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估，地下水補注潛勢評估與地下水模式建置，2009。
39. 張誠信，1996，雲林地區地下水流三維數值模擬，台灣大學農業工程研究所碩士論文。
40. 張良正、歐國隆、單信瑜，1999a，濁水溪沖積扇及屏東平原之地下水污染潛勢評估分析，八十八年度農業工程研討會，pp.369- 376。
41. 經濟部水利署，地下水資源整體營運規劃與綜合評估，2002。
42. 曾憲雄，人工智慧與專家系統：理論.實務.應用，初版，旗標出版社，台北市，2005。
43. 陳韋圻，應用專家系統於地下水模式自動化參數檢定之研究，國立交通大學，碩士論文，民國 97 年。
44. 王雲直，應用專家系統於地下水模式參數檢定之研究—以濁水溪沖積扇為例，國立交通大學，碩士論文，民國 99 年。
45. 張弼舜，應用專家系統於穩健型地下水參數檢定模式之發展，國立交通大學，

碩士論文，民國 100 年。

46. 楊深惠，應用衛星影像辨識與河道水理演算於濁水溪沖積扇地下水數值模擬，國立交通大學，碩士論文，民國 101 年。
47. 蘇洵頡，利用超導重力儀訊號偵測地震造成的永久性重力變化，國立交通大學，碩士論文，民國 99 年。
48. 國立交通大學、財團法人工業技術研究院，101 年度重力基準維護及測量整合服務工作一期末報告，民國 101 年。
49. 國立交通大學，臺灣地區地下水區水文地質調查及地下水資源評估_地下水補注潛勢評估與地下水模式建置.經濟部中央地質調查所計畫報告，民國 101 年。



附錄 A 環境改正

● 海潮效應改正

資料進行環境改正部分，分別為：潮位分析、極移及大氣壓力改正等。潮位分析，可分為海潮及固體潮部分，固體潮方面參考 Cartwright(1990) 的理論重力潮汐模式：

$$\delta g_w(i) = \sum \delta_i H_i \cos(\omega_i t + x_i - \Delta\phi_i) \quad \text{..... (式 A-1)}$$

其中， g_w 代表分潮重力， $\delta_i H_i$ 為 g_w 中的分潮振幅，而 $\Delta\phi_i$ 表示相移； x_i ：理論相位。 ω_i 則代表各分潮角頻率。 $\Delta\phi_i(M)$ 為觀測相移， $\Delta\phi_i(T)$ 為理論相移。

$$\Delta\phi_i = \Delta\phi_i(M) - \Delta\phi_i(T) \quad \text{..... (式 A-2)}$$

而海潮改正，要計算海潮負載對於重力之影響，可應用格林函數 (Green's function) 及潮高積分，其公式如下 (Farrell, 1972; Lambeck, 1988; Yang et al., 1996)：

$$\Delta g = \frac{g}{M} \iint_s \frac{\sigma(\theta', \lambda')}{4 \sin \frac{\psi}{2}} ds' - \iint_s \sigma(\theta', \lambda') G^E(\psi) ds' \quad \text{..... (式 A-3)}$$

$$G^E(\psi) = \frac{g}{M} \sum_{n=0}^{\infty} (2h_n' - (n+1)k_n') P_n \cos(\psi) \quad \text{..... (式 A-4)}$$

其中

$$\sigma = \rho_0 \times H \quad \text{..... (式 A-5)}$$

式中

σ ：球面單位面積密度；

ρ_0 ：海水密度；

$h_n' k_n'$ ：負載洛夫數值；

H ：海潮高；

$P_n \cos(\psi)$ ：勒戎德多項式 (Legendre's Polynomials)；

M ：地球質量

R ：地球平均半徑

A ：計算點到資料點之方位角

ψ ：計算點到資料點之角距

ds' ：面積微分元素

g ：平均重力值

計算時，全球積分可以數值方法算得，潮高 H 可由一全球海潮模式算得，即以高斯求積法 (Gauss quadrature) (Press et al., 1993) 計算(式 A-3)式之積分。目前國際中常用的海潮模式有 CSR4.0、GOT00.2、FES2004 及 NAO99b 等，考慮新竹地區並經過評估與分析後，採用 NAO99b 模式，進行新竹超導站海潮改正。

NAO.99b 海潮模式 (Matsumoto et al., 2000)，此模式在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 網格上提供主要分潮之振幅及相位角，計算時分內圈及外圈效應。內圈涵蓋以待測點為中心取經、緯度 $3^\circ \times 3^\circ$ 之範圍，且於 $20' \times 20'$ 網格上計算潮高而積分。外圈涵蓋全球 (此時內圈之潮高均設為零)，且於 $3^\circ \times 3^\circ$ 網格上計算潮高而積分。

超導重力儀 SG48 原始觀測相對重力值 g_{48} ，應用處理重力資料軟體 ETERNA，再分析本站週期性訊號，各分潮符號，半日週期包括 M2(主要太陰半日潮)、S2(主要太陽半日潮)、N2(太陰橢率潮)、K2(日月合成潮)，全日週期包括 K1(日月合成潮)，O1(主要太陰全日潮)，P1(主要太陽全日潮)。

● 大氣負載改正

對於重力站而言，測站需進行大氣改正。改正方法即是利用絕對重力儀進行重力施測，並將每次觀測重力值歸算至標準大氣壓狀態，針對每一次自由落體進行氣壓改正，參考 Torge(1989)，公式可寫成：

$$\delta g_B = A(P_0 - P_n) \dots\dots\dots (式 A-6)$$

$$P_n = 1.01325 \times 10^5 - (1 - 0.0065H / 288.15)^{5.2259} \dots\dots\dots (式 A-7)$$

其中， δg_B 為重力大氣改正量； P_n 為本站標準大氣壓；而 H 代表該測站的海拔高程(m)； P_0 為測站的大氣壓觀測值； A 為大氣壓導納因子，其值大約在 0.3~0.42 之間。

就新竹站而言，標準大氣壓(P_n)：1002.77 hPa；大氣壓導納因子(A)：0.35。

● 極移改正

該項改正是由於重力基準站到地球旋轉軸距離的改變而引起的離

心加速度變化所做的補償，而其改正值通常是由測站上最接近觀測時間的極點位置進行計算。參考公式為 Torge(1989)：

$$\delta g_p = -\delta p \omega^2 R \sin 2\phi (x \cos \lambda - y \sin \lambda) \quad \text{..... (式 A-8)}$$

其中， δg_p 為極移改正(Unit： 10^{-8}ms^{-2})； ω ：地球旋轉角速度； R ：大地參考橢球體長半徑(m)， ϕ 和 λ 分別為大地緯度(rad)及大地經度(rad)； x 與 y 分別為測站在 IERS 系統中的極座標。而 δp 通常為定值： 1.164×10^8 。處理時可先用 IERS 所公佈的 x 、 y 座標進行數據處理；後處理時再使用 IERS 實測結果計算極移改正。

● 改正後殘餘重力

經上述結果，可得重力時間觀測序列包含各種訊號分量，如下式：

$$\begin{aligned} &\text{重力殘差} = \text{SG 觀測量} - \text{海潮} - \text{固體潮} - \text{極移改正} - \\ &\text{大氣效應} \quad \text{..... (式 A-9)} \end{aligned}$$

利用上述(A-9)式，使用 T-soft 軟體，先將回饋電壓資料轉換為原始重力資料後，再進行移除環境改正及完成資料前處理，及可獲得殘餘重力。
(資料來源：交通大學土木所蘇洵頡碩士論文__利用超導重力儀訊號偵測地震造成的永久性重力變化)