

國立台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

利用地震後地下水位變化推求侷限含水層之

水文地質參數

Estimation of the Hydrogeological Parameters in Confined
Aquifer Using Groundwater Variations after Earthquake

張毓玲

Yu-Ling Chang

指導教授：徐年盛 博士

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

中華民國101年7月

July, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

利用地震後地下水位變化推求侷限含水層之水文地質參數
Estimation of the hydrogeological parameters in confined aquifer
using groundwater variations after earthquake

本論文係張毓玲君 (R99521312) 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 101 年 07 月 20 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)

江崇榮

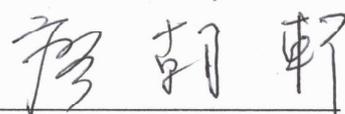
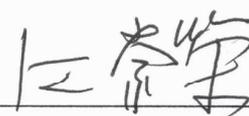
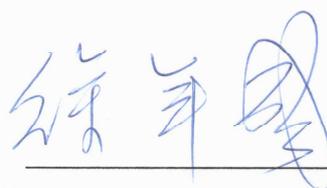
廖朝軒

張德鑫

王逸民

系主任

呂良正



(簽名)

致謝

承蒙恩師徐年盛教授指導，使本論文得以完成，萬分感謝。在學業上，老師認真教導學生知識；在待人接物上，分享豐富經驗；在學生迷惑時，給予學生指引迷津，使學生在念研究所時，獲得許多專業上的知識與作研究的經驗，和處事的態度上更多深刻的體悟。

除了徐老師外，於論文口試期間，感謝地調所江崇榮副所長、海大廖朝軒教授、中原大學張德鑫教授，以及逸奇科技公司總經理王逸民博士於百忙之中撥空前來，細心審查，提供寶貴意見與建議，使本文更加完整，在此學生對各位委員獻上最誠摯之感謝。

再來感謝宏仁學長、小明學長指導學生在論文上寫作技巧，專業知識之加強，耐心指導學生補強論文內容，並給學生莫大的鼓勵與幫助，深表謝意；還有同研究室的學長姐敬文學長、建霖學長、綺蓁學姐、承宗學長、仁甫學長、怡安學姐與文晞學長給予課業與專業知識上的指導；在求學過程中一起努力同窗的聖婷、韋勳大家互助互勵，不論在課業上、在研究上、甚至在生活上，都有很大的幫助，還有同研究室的學弟妹冠緯、筱玫、偉峻、希軍也都給予我精神上的鼓勵。

最後感謝我的家人，在求學過程中不斷給予我支持與鼓勵，使我能夠心無旁騖專心學業並能順利完成本文，藉此機會獻上無限的感謝。

摘要

本研究之目的在於提出新的方法論與研究分析步驟，以推估侷限含水層之導水係數及儲水係數。研究蒐集地下水位歷線資料，時間點的選取以集集地震發生後48小時，觀察地震造成地下水位變化與抽水試驗水位洩降之曲線相似，將此現象解釋為地震造成全域地下水位抬升，以自然界執行全域均勻抽水使水位洩降，藉由此現象建立概念模式，從模式推導過程中設定抽水量與抽水距離，同時以虛擬案例證明概念模式之可行性。本研究分為兩種概念模式，其抽水量設定皆以複合井流場概念，將全域抽水量線性疊加作為抽水量之給定，但抽水量資訊取得有限，所以參考現地水井清查各鄉鎮每層之抽水量作為本研究抽水量之設定；影響半徑之判識為當地下水位變化小於一公分時，視為抽水井影響觀測井之最遠距離，在此從地下水位資料判識，影響半徑為1.4公里；第一種概念模式之抽水距離，以等間距均勻抽水之抽水距離為影響半徑0.36788倍，而第二種概念模式之抽水距離，以空間均勻抽水之抽水距離為影響半徑0.60650倍。兩概念模式之抽水量與抽水距離設定，以不同的概念想法呈現，合理推導過程設定的抽水量與抽水距離具有物理意義，推求的水文地質參數具有參考之價值，而非粗估地質所判識給定之參數值。從本研究針對濁水溪沖積扇區域推估之參數其成果顯示數值合理，並補充未試驗觀測井之水文地質初步評估，對於各含水層之局部水文地質特性、水流快慢與儲蓄涵養水源能力皆有參考依據，並發現增加觀測井數，含水層特性有顯著的變化，同時也可解釋該研究區域特性不應該僅由數口現地試驗得到之參數，就簡單說明含水層特性，因此對於濁水溪沖積扇含水層整體特性應該深入探討，使往後進行水資源管理時，才會能做出更明確的決策。

關鍵字： 侷限含水層、導水係數、儲水係數、地震、抽水試驗

Abstract

This study proposes a new methodology to estimate transmissivity and storage coefficient of confined aquifer. The hourly groundwater level observations after Chi-Chi earthquake in 48 hours are collected. It is found out the groundwater variations after earthquake acts as that of pumping test. Such phenomenon explains the earthquake is like a regional uniform pumping test, and the drawdown can be used to identify the hydrogeological parameters of aquifer.

Two conceptual models are established to simulate the uniform pumping test within the radius of influence (R) of monitoring well, one is radial uniform pumping; the other is spatial uniform pumping. Moreover, the pumping wells clusters are simplified by linear superposition as an equivalent single well with the same drawdown observed at monitoring well. The equivalent quantity of pumping is both equal to summation of all pumping rate; while the equivalent distance from monitoring well to pumping well is $0.36788R$ for radial uniform pumping and $0.60650R$ for spatial uniform pumping, respectively. The simplification is verified by a virtual case and shows success in identifying transmissivity and storage coefficient.

Lastly, the proposed parameter estimation method is applied to Jhuoshuei River alluvial fan for identifying transmissivity and storage coefficient of confined aquifer. The identified value of parameters falls in a reasonable range of typical sand-deposited aquifer, which shows the proposed method is suitable for a preliminary assessment of hydrogeological characteristic. Additionally, the identified parameters varies significantly from different locations, which supposes further investigate of the groundwater

system to clarify the hydrogeological distribution is suggested.

Furthermore, compare the results of viewing earthquake as a pumping test with that of in-situ pumping test, the identified parameters are generally smaller. This may infer the scale effect of hydrogeological characteristics, that is, the analysis of earthquake provides a larger-scale character of aquifer and is more close to the scale of groundwater flow simulation of a groundwater district.

Keywords: Confined aquifer, Transmissivity, Storage coefficient, Earthquake, Pumping test.



目錄

口試委員會審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	vi
圖錄.....	vii
表錄.....	viii
符號說明.....	ix
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	3
1.4 論文架構及步驟.....	4
第二章 研究方法建立.....	6
2.1 抽水試驗介紹.....	6
2.2 概念建立.....	12
2.2.1 現象觀察與概念建立.....	12
2.2.2 概念模式推導.....	16
2.3 概念流程建立.....	29
第三章 方法應用.....	30
3.1 濁水溪沖積扇區域概述.....	30
3.1.1 研究區域之水文地文特性.....	31
3.1.2 含水層之地質資料.....	38
3.2 方法應用結果.....	42
3.2.2 抽水試驗推估參數之結果.....	44
3.3 敏感度分析.....	51
第四章 結論與建議.....	57
4.1 結論.....	57
4.2 建議.....	58
參考文獻.....	59

圖錄

圖 1.1 研究流程圖.....	5
圖 2.1 水力梯度示意圖(資料來源:經濟部水利署).....	7
圖 2.2 侷限含水層之水井示意圖(改自李光敦, 2007).....	8
圖 2.3 THEIS圖解法.....	11
圖 2.4 COOPER-JACOB圖解法.....	12
圖 2.5 觀測井之地下水位歷線.....	13
圖 2.6 等間距均勻抽水示意圖一.....	16
圖 2.7 等間距均勻抽水示意圖二.....	17
圖 2.8 等間距均勻抽水示意圖三.....	17
圖 2.9 複合井流場示意圖(改自李光敦, 2007).....	18
圖 2.10 等間距均勻抽水之虛擬案例觀測水位與計算水位比較圖.....	21
圖 2.11 空間均勻抽水示意圖一.....	22
圖 2.12 空間均勻抽水示意圖二.....	23
圖 2.13 空間均勻抽水示意圖三.....	23
圖 2.14 井群與單井抽水距離之關係示意圖.....	27
圖 2.15 空間均勻抽水之虛擬案例觀測水位與計算水位比較圖.....	28
圖 2.16 概念模式流程圖.....	29
圖 3.1 濁水溪沖積扇區域位置圖.....	31
圖 3.2 濁水溪沖積扇之扇頂、扇央、扇尾區分布圖.....	33
圖 3.3 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖.....	35
圖 3.4 濁水溪沖積扇地下含水層分布剖面示意圖.....	38
圖 3.5 漢寶至田中之地質剖面圖.....	39
圖 3.6 概念模式推估參數比較圖.....	49
圖 3.10 溪州(2)地下水位歷線.....	53
圖 3.11 第二含水層觀測井代表-溪州(2).....	53
圖 3.12 港後(3)地下水位歷線.....	54
圖 3.13 第三層含水層觀測井代表-港後(3).....	54
圖 3.14 東光(5)地下水位歷線.....	55
圖 3.15 第四含水層觀測井代表-東光(5).....	55

表錄

表2.1 虛擬案例之設計	14
表2.2 井函數之參數 U 隨時間變化之情形	15
表2.3 等間距均勻抽水之虛擬案例觀測值與計算值比較表	21
表2.4 井群個數與單井抽水距離和影響半徑比之關係	26
表2.5 空間均勻抽水之虛擬案例觀測值與計算值比較表	28
表3.1 濁水溪沖積扇現地試驗詳細資料表	37
表3.2 現地調查各層抽水量	43
表3.3 模式一水文地質參數推估表	48
表3.4 模式二水文地質參數推估表	48
表3.5 未執行試驗之水文地質參數推估	50
表3.6 敏感度分析各參數之比較	56



符號說明

代號	定義
v	地下水流速 (L/T)
K	水力傳導度 (L/T)
K_x	x 方向之水力傳導度 (L/T)
h	水頭高度 (L)
L	兩水頭間之流經長度 (L)
S	儲水係數 (無因次)
T	導水係數 (L^2/T)
n	抽水井個數
Q	抽水量 (L^3/T)
Q_i	第 i 個抽水井之抽水量 (L^3/T)
q	單位寬度流量 (L^2/T)
b	侷限含水層之厚度 (L)
$s(t)$	隨時間變化之洩降量 (L)
H	靜水壓位面 (L)
$W(u)$	井函數
r	徑向抽水距離 (L)

r_i	第 i 個抽水井與觀測井之距離 (L)
r_{av}	井群視為單井之徑向抽水距離 (L)
R	影響半徑 (L)



第一章 前言

1.1 研究動機

台灣地區生活用水、工業用水以及農業生產用水，主要由河川、水庫及地下水供給，受到季風與地形位置的影響，降雨型態在時空分布不均，枯水期與豐水期的雨量差異甚遠，影響地面水資源之開發進而造成缺水危機。在水資源先天不足的情況下，加上地面水之汙染日趨嚴重，部分地區無水庫或穿流水可供利用，可利用之地面水源不易取得，現階段水資源之開發與利用則更加地困難，因此地下水資源之取用已日漸受重視。

為掌握區域地下水資源之分佈狀況，首先要瞭解該地區之地形、地質與地層之組成型態，並更進一步的瞭解地下水含水層中可滲透土壤所形成之地質構造；由於土壤特性之不同，含水層中所蘊涵之水量與水分傳輸特性有很大的差異，為瞭解土壤的特性，必須分析含水層之地下水流場變化與水文地質特性，其中地下水流場係指含水層中水流速度、流量、流動的方向之空間分布及時間變化；而水文地質特徵則是指含水層之水文地質特性造成地下水流場變化，可以利用參數形式作為評估含水層特性之指標(如導水係數、水力傳導係數、儲水係數...等)。

在地下水文系統的研究調查工作中，水文地質參數之取得是地下水研究調查的重要工作內容，可藉由水文地質參數推測地下水流動之型態、含水層之儲蓄涵養水源的能力以及地層分佈的狀況，以不同岩性地下水層之導水係數(Transmissivity)和儲水係數(Storage coefficient)之分析，探討含水層之透水能力和儲蓄能力及其相關性，其中含水層之儲蓄能力可利用儲水係數決定，蓄水量的變化可以當作該區域中地下水流入

或流出之指標；而透水能力則是以導水係數作為含水層單位寬度水流方向所通過之水量判斷的依據。大部分水文地質參數都是由現地試驗取得，抽水試驗是目前最常被使用推估現地水文地質參數的試驗，在抽水過程中以恆定的抽水速率抽水，並同時監測觀測井地下水位洩降之情形，利用Theis法以圖形法套疊並同時找出疊合點，以推估含水層之水文地質特性，試驗方法簡單且易執行，故經常被使用，但其缺點為試驗規模較大且費用昂貴，進行試驗時容易受外在效應影響，可能無法確切瞭解含水層之水文地質特性。

因此水文地質參數之取得，對於推估區域含水層水資源分布情形是非常重要的，但取得方式大部分是藉由傳統水文地質調查工作得到，其調查過程中需耗費大量人力與經費，且在執行試驗過程中，也有可能因為人為的誤差或是試驗過程中有困難的情況發生，因此本研究希望能夠利用現有濁水溪沖積扇觀測站網水位記錄資料，在不需要執行現地抽水試驗情況下，適切評估水文地質參數。

1.2 研究目的

本研究主要的概念，從地下水位資料現象觀察發現，地震造成水位變化與抽水試驗水位洩降曲線相似，希望能夠藉由這樣的想法，建立一套方法推求水文地質參數。而且地震在台灣是屬於發生頻繁的國家，如果能將這套方法建立完成，那麼就能夠有效利用震後的地下水位資料，即便在未來有大地震的發生，那麼可以藉由這套方法，推估水文地質參數並分析是否造成含水層特性之變異情況。

1.3 文獻回顧

國內外關於水文地質參數推估方法之研究相當豐富，利用本研究動機與目的蒐集並研讀相關的論文報告，但對於均勻抽水概念想法之相關研究甚少，因此僅能針對部分地震造成水位變化之因與抽水試驗相關文獻進行文獻回顧，詳細介紹如后。

在估計侷限含水層之水力特性方法中，以抽水試驗最為廣泛的使用，抽水試驗可利用簡單的方法求取水文地質參數，其中Theis(1935)依據熱流理論為基礎，地下水流由達西定律(Darcy's Law)描述，假設在無限延伸之均質且等向之侷限含水層中，以恆定的抽水速率抽水，並同時監測觀測井地下水位洩降之情形，以圖形法套疊同時找出疊合點，作為描述含水層水力特性之依據，如：水力傳導係數(Hydraulic conductivity)、導水係數(Transmissibility)與儲水係數(Storage Coefficient)，瞭解地下水流系統的現象，獲取更詳盡的資料，進而建立完善的地下水資訊資料庫，如此更能反映及掌握完整的含水層特性。

Cooper and Jacob(1946)以泰斯公式所發展之理論作為基礎，假設在觀測井距離抽水井之徑向半徑很小，或抽水時間夠長之情況下(即 $u < 0.02$)，以洩降量為縱軸，抽水時間曲半對數為橫軸繪製成圖，以建立Cooper-Jacob公式，即為設置抽水井附近之觀測點所蒐集資料作為分析來源，利用晚期抽水資料推求導水係數與儲水係數。

Roeloffs(1996)歸納地震造成地下水位變化情形，有一種情形為瞬間造成水位上升或下降之變化，大都是因為孔隙彈性介質組成含水層在地震斷層滑動引致體積變化的情形，如果含水層位於地殼收縮區，則地下水位上升；反之，含水層位於伸張區，則地下水位下降。

林圃如，賈儀平(2001)研究分析彰雲地區所設置之地下水觀測井實施抽水試驗之資料與結果，建立數值模擬與單井之水位回復試驗資料推求儲水係數，探討所模擬之儲水係數與現地雙井抽水試驗所得之結果比較與分析評估。

Lee et al.(2002)利用斷層錯位模式計算同震地殼變形，與水井之同震水位比對，發現濁水溪沖積扇地下水位變化可以孔隙介質瞬間受到彈性體應變，因此使水位瞬間上升或下降情形作為解釋。

陳有慶，劉振宇(2005)研究集集地震引致同震地下水位變化視為自然界執行水文試驗，藉此分析地下水位之變化，進而推衍求得水文地質參數，以瞭解地震後所造成濁水溪沖積扇之地下水水文地質環境之變化。首先以評估同震水位距離震央之距離、以及同震地下水位歷線與水文地質參數之關係，但卻未獲得具體之相關性。爾後利用MODFLOW模式模擬地震後地下水位之回復，探討震後之水文地質之變化與邊界條件之改變。

簡單回顧地震造成水位變化之因與抽水試驗相關的文章，本研究之目的提出一方法論，利用地震發生後造成地下水位之變化視為自然界執行抽水試驗(或注水試驗)，藉由這樣的類比，建立概念模式推求觀測井之水文地質參數，作為未來建立地下水流模式設定參數之依據。

1.4 論文架構及步驟

本研究之論文架構分為第一章緒論，說明研究動機、目的、文獻回顧與本研究流程建立；第二章介紹目前最常使用之現地抽水試驗，利用類比的概念引用抽水試驗方法以推求導水係數和儲水係數，對於概念模

式詳細解釋與推導，最後再利用虛擬案例證明，概念模式類比之可行性；第三章介紹研究區域與本研究所發展之方法推算水文地質參數，並同時與現地抽水試驗之參數比較並探討其差異性，估算未試驗觀測井之導水係數與儲水係數，對於增加觀測井之參數，說明含水層特性整體趨勢變化之情形；第四章對於整個研究結果總結，與後續之研究發展及建議之方向。

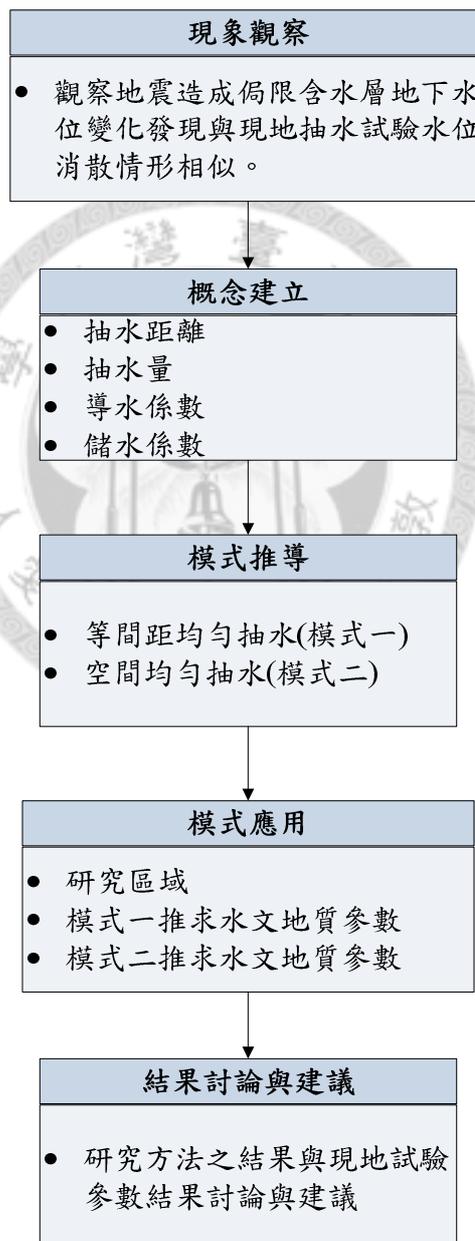


圖 1.1 研究流程圖

第二章 研究方法建立

本研究針對在侷限含水層所觀測到地震發生後地下水位變化之現象，類似現地抽水試驗造成水位變化的曲線，因此在本章中先對於抽水試驗作詳細介紹，並針對水位記錄資料所呈現的現象建立概念想法，再將概念想法建立成概念模式，對於概念模式進行推導並作說明，最後將建立方法之流程作為總結本章內容。

2.1 抽水試驗介紹

針對本研究抽水試驗之介紹，皆是對於確定侷限含水層的導水係數、儲水係數、影響半徑、抽水距離及抽水量與水位洩降之關係。其方法係利用抽水設備，將地下水汲取到井外，使井內水位下降，井壁外含水層中的地下水位形成洩降錐，記錄抽水量與洩降量之時間關係，利用水井力學之理論，推求現地之水文地質參數。

實施抽水試驗之目的為二，其一為測定水井功能或井體特性，包含水井效率、安全出水量(well safety yield)、井體單位或洩降出水量(Specific capacity)等，其二為推估含水層的特性，包含儲水係數(Storage coefficient)、導水係數(Transmissivity)以及水力傳導係數(Hydraulic conductivity)等，獲取含水層之水力特性，可提供將來地下水觀測網之維護管理之參考，更可進一步結合地質鑽探資料，推估地下水觀測地區含水層之分層特性及分佈情形，以建立區域性地下水概念及數學模式，推估地下水潛能，作為未來地下水資源開發、調配、運作管理之依據。

傳統水文地質參數分析方法中，基本上是假設含水層為均質且等向性，目前大部分研究依靠著Theis(1935)或是Cooper-Jacob(1946)近似解分

析試驗資料，獲得含水層水文地質參數，因此選取觀測水位資料時，以曾執行過現地抽水試驗所得水文地質參數作為比較依據，最後再與本研究推求之參數比較並討論。

一、Theis法

Theis(1935)依據熱流理論為基礎，假設如圖2.2所示在無限延伸均勻且等向侷限含水層中，地下水流動機制可由達西定律(Darcy's Law)描述，此定律建立是在1856年，法國工程師達西(Darcy)為瞭解地下水流特性，以水力學原理建立地下水流動機制，當水流經飽和土壤的流率為土壤特性與單位距離水頭差之比如式(2.1)，示意圖以圖2.1表示

$$v = -K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (2.1)$$

其中， v 為地下水流速 $[L/T]$ ， K 為水力傳導度 $[L/T]$ ， Δh 為兩點間之水頭差 $[L]$ ， ΔL 為兩點間之流經長度 $[L]$ ，式中負號表示水流由水頭較高處往水頭較低處方向流動，其理論即為達西定律。

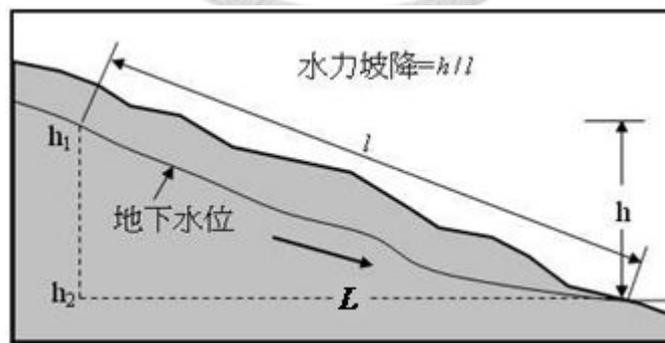


圖2.1 水力梯度示意圖(資料來源:經濟部水利署)

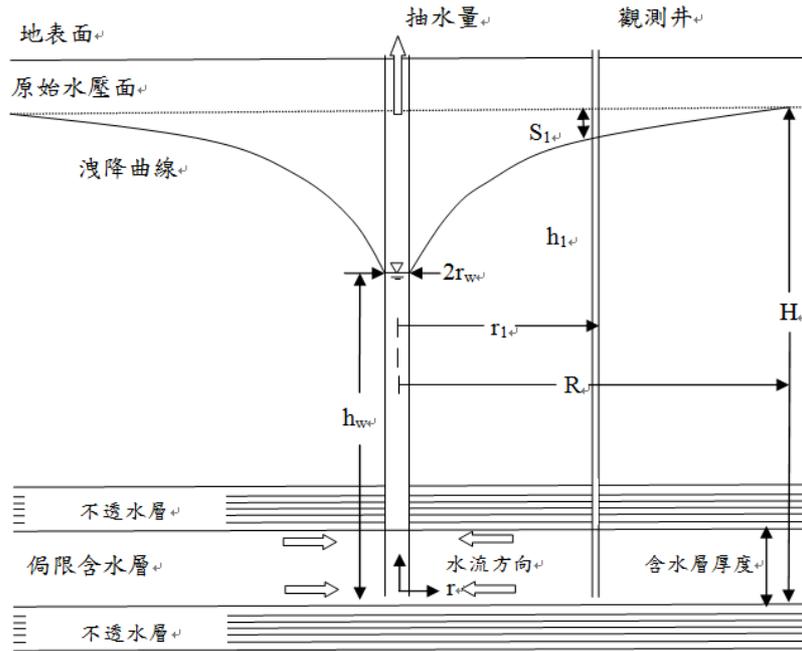


圖2.2 侷限含水層之水井示意圖(改自李光敦，2007)

飽和土壤水分之動量方程式為式(2.1)，將水流連續方程式併入可完整地描述水在飽和土壤之流動情形。則水流連續方程式可由式(2.2)表示

$$S \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

其中， S 為儲水係數(無因次)， h 為水位 $[L]$ ， q 為單位寬度流量 $[L^2/T]$ ， t 為時間 $[T]$ 。應用式(2.1)表示單位寬度流量 q 為式(2.3)

$$q = bv = -bK_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.3)$$

式(2.3)中， K_x 為 x 方向之水力傳導度 $[L/T]$ ， b 為侷限含水層厚度 $[L]$ 。合併式(2.2)和式(2.3)，可得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(bK_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

若侷限含水層厚度 b 沿 x 方向為定值 (即 $\partial b/\partial x=0$)，且 x 、 y 、 z 三方向皆有水流入，並假設含水層之水力傳導度具均質性 ($\partial/\partial x=\partial/\partial y=\partial/\partial z=0$) 與等向性 ($k_x=k_y=k_z$)，將式(2.4)推衍為

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{bk} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5)$$

式(2.5)表示含水層中地下水輸送能力，定義 $T=bK$ 稱之為導水係數 [L^2/T]，再將其整理為式(2.6)

$$\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6)$$

由於抽水井附近之水位呈輻射狀形式洩降，所以式(2.6)以極座標表示為

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.7)$$

其中， r 為抽水井中心之徑向距離 [L]。

Theis 針對抽水井及含水層須滿足地下水之條件，作為基本假設如下所示：

- (1) 可適用達西定律。
- (2) 含水層為均質等向性，滲透係數為常數。
- (3) 含水層面積水平無限度延伸。
- (4) 水井完全貫穿含水層取水，水井之直徑為無窮小。

(5) 含水層之厚度為一定值，且洩降與含水層厚度之比值很小。

Theis方程式假設水井為固定強度的匯流點，並配合邊界條件：(1) 當 $t=0$ 時， $h=H$ ；(2) 當 $t \geq 0$ 時，若 $r \rightarrow \infty$ 則 $h \rightarrow H$ ；則可獲得解析解如下所示

$$s(t) = H - h(t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_t^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2.8)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.9)$$

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (2.10)$$

式中 $s(t)$ 為觀測井中 t 時間之水位洩降量； H 為抽水前之初始水位； Q 為抽水量； T 為含水層之導水係數； r 為觀測井距抽水井之距離； S 為含水層之儲水係數； t 為時間； $W(u)$ 為Theis公式中之井函數，或稱為指數積分之近似級數展開式。

將井函數 $W(u)$ 和 u 參數之關係繪圖，稱為標準曲線(type curve)，以實際抽水試驗之 s 與 r^2/t 繪圖與標準曲線套疊，尋找兩曲線任一重合點(match point)，如圖2.3所示，即可推求含水層之導水係數與儲水數。

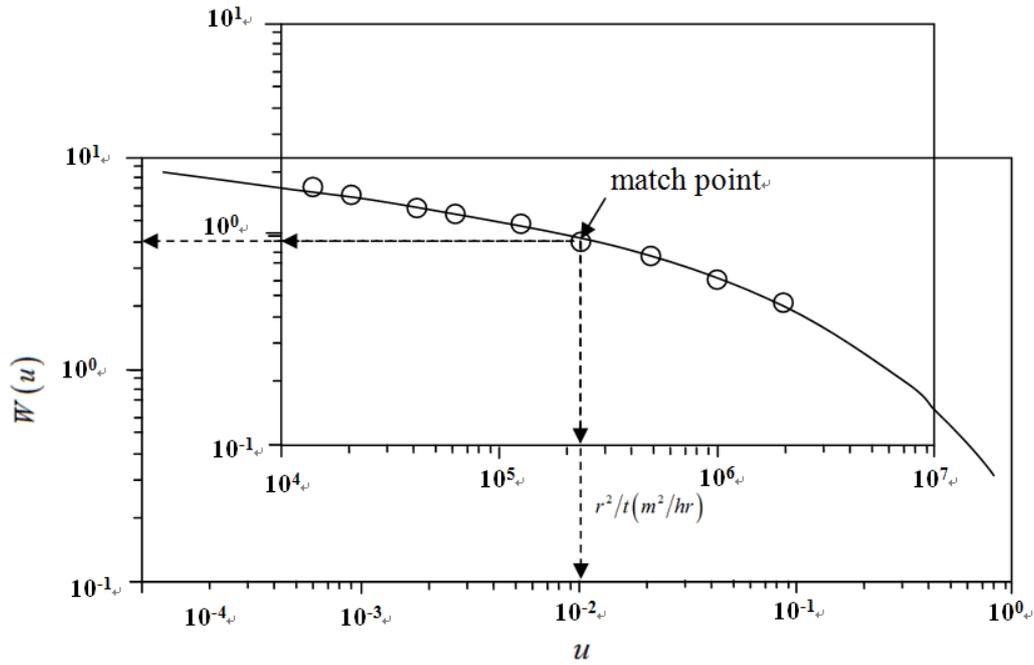


圖 2.3 Theis 圖解法

二、Cooper-Jacob 法

Cooper and Jacob(1946)以Theis理論發展作為基礎，假設在觀測點距離抽水井之徑向半徑很小或抽水時間夠長之情況下(即 $u < 0.02$)，由式(2.10)可知，對應之 u 值會變得很小，此時可以洩降量為縱軸，抽水時間取半對數為橫軸繪製成圖，以建立Cooper-Jacob公式。Cooper and Jacob建議將Theis井函數公式簡化如式(2.13)，即為設置抽水井附近之觀測點所蒐集資料作為分析來源，利用晚期抽水資料推求導水係數與儲水係數。

$$W(u) = -0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.11)$$

將式(2.11)代入式(2.8)，將Theis法可簡化成式(2.13)如下所示：

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad (2.12)$$

或

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (2.13)$$

將洩降 s 與時間 t 之關係，在半對數紙上成一直線，如圖2.4所示。

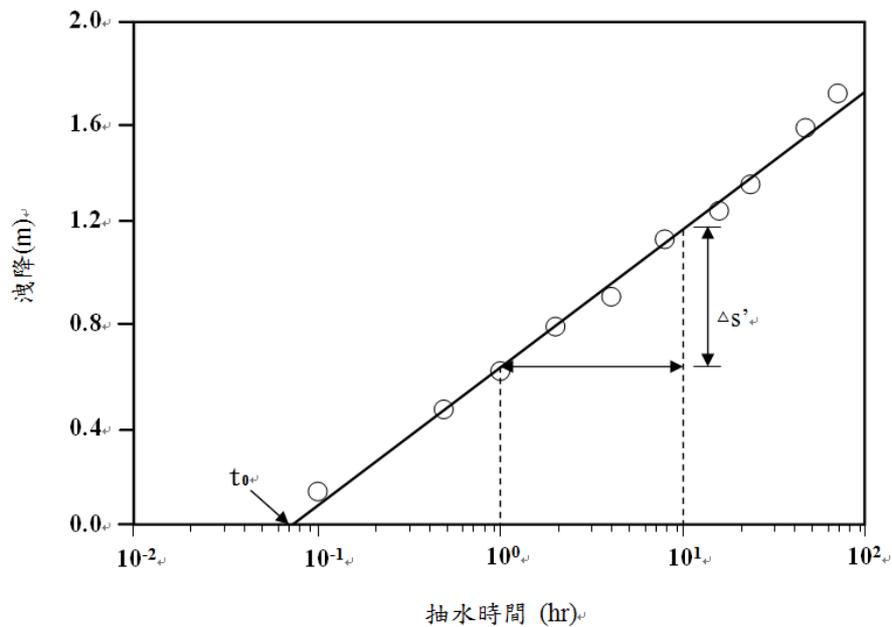


圖 2.4 Cooper-Jacob 圖解法

2.2 概念建立

本節針對所蒐集的資料分析探討，並對於觀察到的現象解釋，將此現象解釋作概念形式之建立與詳細推導如后所述。

2.2.1 現象觀察與概念建立

從經濟部水利署觀測站網針對濁水溪沖積扇區域，選定任一觀測井之地下水位記錄資料觀察並分析，在此選擇溪湖(3)作為現象觀察的代表，選取記錄資料之時間以1999年9月21日1點至1999年10月21日2點，地下水位之變化情形如圖2.5所示。1999年9月21日1點47分發生集集大地

震，因此可從圖中觀察約凌晨2點時，水位受外力刺激造成抬升，爾後水位才慢慢消散，發現地下水位變化情形，與抽水試驗造成水位洩降曲線相似，故將地下水位之變化，視為自然界均勻抽水，解釋原本地震造成水位抬升，因為抽水之關係而使水位下降，將水位變化類比為抽水試驗。

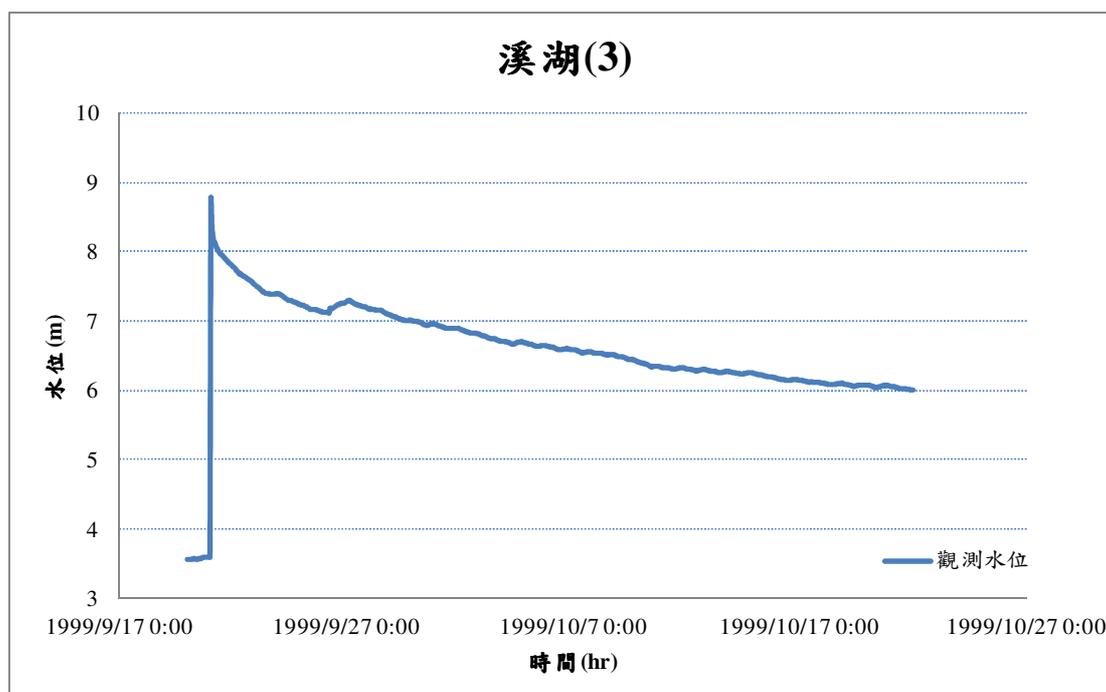


圖2.5 觀測井之地下水位歷線

概念模式之建立以抽水試驗作為理論基礎，所需要之條件為水位洩降量、抽水量、抽水距離、導水係數與儲水係數五種參數條件，以目前現有之條件僅只有水位洩降量即觀測水位記錄資料，為建立完整之概念模式，須給定足夠條件才可推求水文地質參數。針對給定足夠條件，可以從抽水試驗理論解釋，當只有一條表示洩降量方程式和四個未知參數時，結果會以多解形式呈現，因此只有當未知數與方程式數量相等之情況，才會有一組結果。以本研究之目的為瞭解含水層之水文地質特性，因此須給定抽水距離與抽水量，以滿足方程式與未知數量相等之情況下，推求得到導水係數與儲水係數。

本研究選用之方法以Cooper-Jacob理論，從雙井試驗之抽水距離(r)、抽水量(Q)、儲水係數(S)與導水係數(T)之合理範圍是參考81年度至86年度濁水溪沖積扇地下水觀測井網建置及相關試驗報告(資料來源:經濟部台灣省水利局，「台灣地區地下水觀測網第一期計畫，濁水溪沖積扇觀測網建立及運作關理工作總報告」，1999)如下所示：

$$1 < r(m) < 50 \quad (2.14)$$

$$5 < Q(m^3/hr) < 90 \quad (2.15)$$

$$1 < T(m^2/hr) < 190 \quad (2.16)$$

$$10^{-3} < S < 10^{-5} \quad (2.17)$$

為確立在抽水試驗之各參數範圍內，證明井函數之參數值 u 小於 0.01，便以沿用Cooper-Jacob理論，其案例如表2.1所述，假設有三口抽水井分別在 $r_1=10(m)$, $r_2=20(m)$, $r_3=30(m)$ 三個位置抽水，其抽水量為 $20(m^3/hr)$ ，該地區之導水係數為 $47(m^2/hr)$ ，儲水係數為 0.0035，以計算各抽水井的井函數之參數值 u 隨時間變化下之情形如表2.2所示。

表2.1 虛擬案例之設計

	$r_i(m)$	$Q(m^3/hr)$	$T(m^2/hr)$	S
punping well_1	10	20	47	0.0035
punping well_2	20	20	47	0.0035
punping well_3	30	20	47	0.0035

表2.2 井函數之參數u隨時間變化之情形

t(hr)	1	2	3	4	5	6	7	8
u1	1.86E-03	9.31E-04	6.21E-04	4.65E-04	3.72E-04	3.10E-04	2.66E-04	2.33E-04
u2	7.45E-03	3.72E-03	2.48E-03	1.86E-03	1.49E-03	1.24E-03	1.06E-03	9.31E-04
u3	1.38E-02	8.38E-03	5.59E-03	4.19E-03	3.35E-03	2.79E-03	2.39E-03	2.09E-03
t(hr)	9	10	11	12	13	14	15	16
u1	2.07E-04	1.86E-04	1.69E-04	1.55E-04	1.43E-04	1.33E-04	1.24E-04	1.16E-04
u2	8.27E-04	7.45E-04	6.77E-04	6.21E-04	5.73E-04	5.32E-04	4.96E-04	4.65E-04
u3	1.86E-03	1.68E-03	1.52E-03	1.40E-03	1.29E-03	1.20E-03	1.12E-03	1.05E-03
t(hr)	17	18	19	20	21	22	23	24
u1	1.10E-04	1.03E-04	9.80E-05	9.31E-05	8.87E-05	8.46E-05	8.09E-05	7.76E-05
u2	4.38E-04	4.14E-04	3.92E-04	3.72E-04	3.55E-04	3.38E-04	3.24E-04	3.10E-04
u3	9.86E-04	9.31E-04	8.82E-04	8.38E-04	7.98E-04	7.62E-04	7.28E-04	6.98E-04
t(hr)	25	26	27	28	29	30	31	32
u1	7.45E-05	7.16E-05	6.90E-05	6.65E-05	6.42E-05	6.21E-05	6.01E-05	5.82E-05
u2	2.98E-04	2.86E-04	2.76E-04	2.66E-04	2.57E-04	2.48E-04	2.40E-04	2.33E-04
u3	6.70E-04	6.44E-04	6.21E-04	5.98E-04	5.78E-04	5.59E-04	5.40E-04	5.24E-04
t(hr)	33	34	35	36	37	38	39	40
u1	5.64E-05	5.48E-05	5.32E-05	5.17E-05	5.03E-05	4.90E-05	4.77E-05	4.65E-05
u2	2.26E-04	2.19E-04	2.13E-04	2.07E-04	2.01E-04	1.96E-04	1.91E-04	1.86E-04
u3	5.08E-04	4.93E-04	4.79E-04	4.65E-04	4.53E-04	4.41E-04	4.30E-04	4.19E-04
t(hr)	41	42	43	44	45	46	47	48
u1	4.54E-05	4.43E-05	4.33E-05	4.23E-05	4.14E-05	4.05E-05	3.96E-05	3.88E-05
u2	1.82E-04	1.77E-04	1.73E-04	1.69E-04	1.65E-04	1.62E-04	1.58E-04	1.55E-04
u3	4.09E-04	3.99E-04	3.90E-04	3.81E-04	3.72E-04	3.64E-04	3.56E-04	3.49E-04

從雙井試驗給定抽水量、抽水距離與水文地質參數設定之範圍，計算 u 參數可以從表2.2得知，雙井試驗井函數之 u 參數為小於 0.02，證明符合 Cooper-Jacob 理論，因此選用該理論作為本研究概念模式之依據。

2.2.2 概念模式推導

本研究給定抽水距離與抽水量求得水文地質參數，以兩種概念模式解釋地震發生後造成水位變化之現象，分別為等間距均勻抽水與空間均勻抽水兩種其敘述如后。

一、等間距均勻抽水

概念模式第一種想法為全域等間距均勻抽水，以等間距均勻設置抽水井，在影響範圍之中心點設定為觀測井，如圖2.6所表示等間距均勻抽水，以觀測井距離抽水井之遠近，以設定同樣的抽水量，對於觀測井受影響變化為抽水距離越近，抽水井影響越大，反之，抽水距離越遠，則抽水井影響就越小，因此以顏色深淺作為影響程度之表示，由內而外，單位面積抽水量由大到小，而相同間距環形面積內之抽水量則相同；將圖2.6環狀面積抽水量疊加成一抽水井，則可簡化成圖2.7（圈：觀測井；叉：抽水井），表示等間距之各抽水井抽水量均相同；再將圖2.7井群抽水簡化為單井抽水時之情形以圖2.8表示。

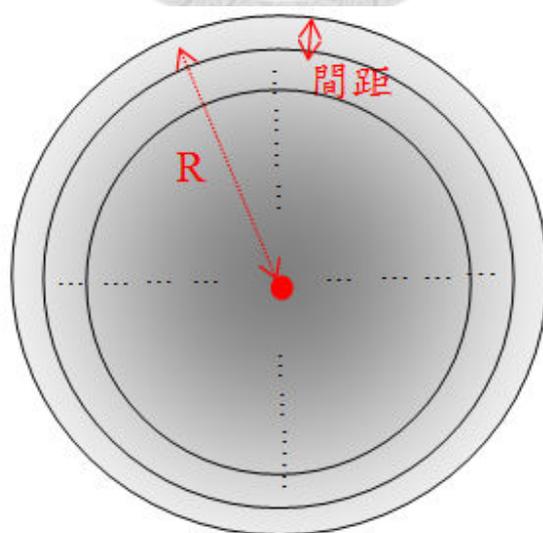


圖2.6 等間距均勻抽水示意圖一

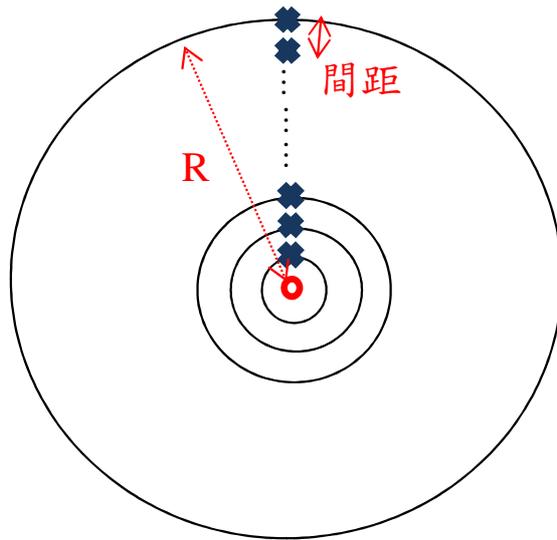


圖2.7 等間距均勻抽水示意圖二

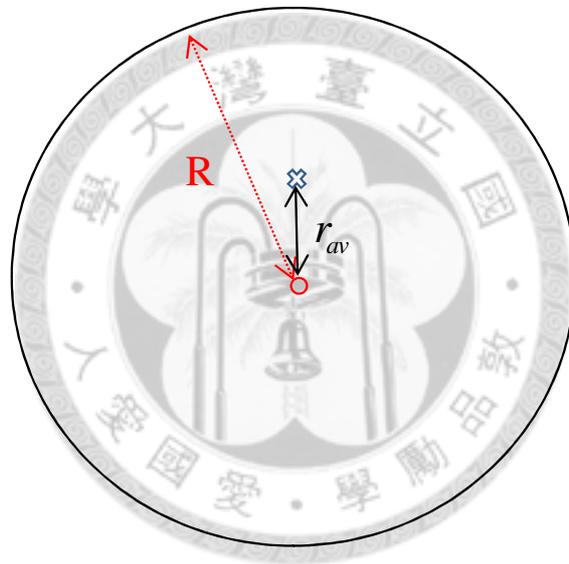


圖2.8 等間距均勻抽水示意圖三

1. 抽水量之給定

第一種概念模式是假設全域等間距均勻抽水(或注水)，則全域等間距均勻抽水(或注水)指在研究區域影響範圍內，有多口抽水井同時進行抽水，從地震發生後水位變化之現象，以等間距均勻抽水方式解釋其水位洩降(或抬升)之因。多口抽水井同時抽水(或注水)可以將其視成單井抽水之現象，由此抽水量可以線性疊加方式作為單井所抽的水量。

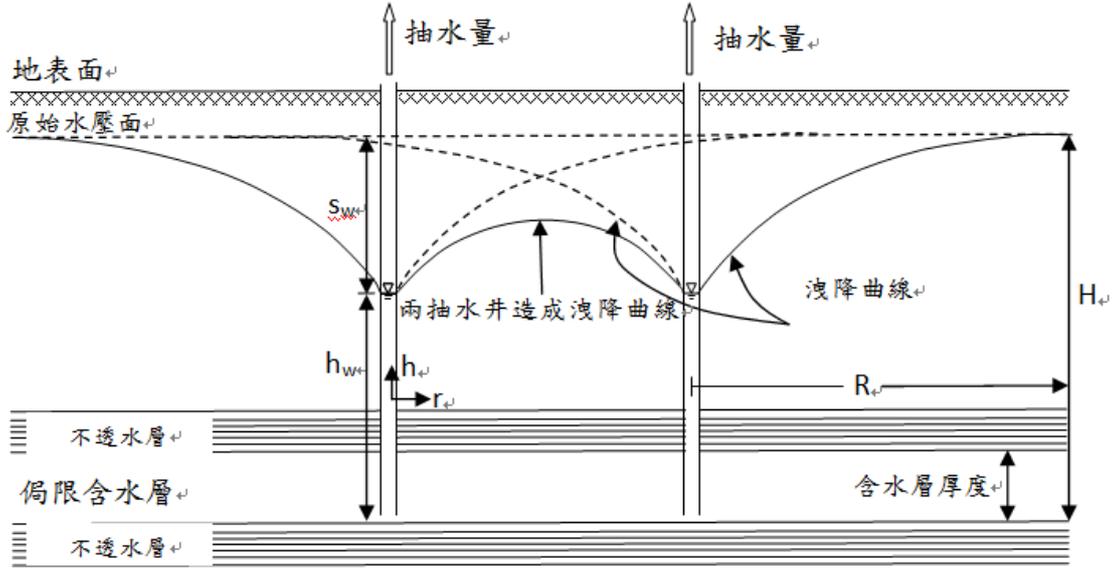


圖2.9 複合井流場示意圖(改自李光敦，2007)

等間距均勻抽水之各抽水井所抽之水量皆相同以式(2.18)表示，當井群之抽水量視為單井抽水時，以線性疊加方式表示如式(2.19)，其井群造成之洩降依複合井流場概念如圖2.9表示，將洩降線性疊加表示為單井抽水造成之洩降以式(2.20)表示，而式(2.20)等號兩邊分別為單井抽水量造成之洩降為式(2.21)，與井群抽水造成之洩降則為式(2.22)。

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n \quad (2.18)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.19)$$

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t) \quad (2.20)$$

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt} \right) \right] \quad (2.21)$$

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_i^2 S}{4Tt} \right) \right] \quad (2.22)$$

其中， n 表示抽水井個數； s 單井抽水(或注水)造成水位洩降； s_i 為

第 i 口井抽水(或注水)造成水位洩降； r_{av} 視為單井抽水距離； r_i 為第 i 個抽水井與觀測井之距離； Q 為視為單一抽水井之抽水量，即為井群總抽水量； Q_i 為第 i 個抽水井之抽水量。

2. 抽水距離之給定

抽水位置定義為在影響範圍內以每個區域之抽水量相同情形，將井群抽水(或注水)視為單井之抽水(或注水)兩者間抽水距離的關係以幾何平均形式呈現，其詳細推導如后。

首先利用式(2.20)所表示井群對於觀測井之洩降影響可以複合井流場概念線性疊加呈現，假設有 n 口抽水井均勻分布，當視為單一抽水井抽水時可以由結合式(2.21)和式(2.22)，得觀測井之洩降量如下式所示：

$$\begin{aligned} \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt} \right) \right] &= \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_i^2 S}{4Tt} \right) \right] \\ &= \frac{1}{4\pi T} \left[Q_1 \left(-0.5772 - \ln \left(\frac{r_1^2 S}{4Tt} \right) \right) + \dots + Q_n \left(-0.5772 - \ln \left(\frac{r_n^2 S}{4Tt} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.23)$$

整理式(2.23)可得下式：

$$-\frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt} \right) \right] = -\frac{1}{n} \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \left(\frac{r_1^2 S}{4Tt} \right) + \ln \left(\frac{r_2^2 S}{4Tt} \right) + \dots + \ln \left(\frac{r_n^2 S}{4Tt} \right) \right] \quad (2.24)$$

式(2.24)兩邊同時除以 $\frac{Q}{4\pi T}$ 並乘以 n 後，可得下式：

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt} \right)^n &= \ln \left(\frac{r_1^2 S}{4Tt} \right) + \ln \left(\frac{r_2^2 S}{4Tt} \right) + \dots + \ln \left(\frac{r_n^2 S}{4Tt} \right) \\ &= \ln \left[\left(\frac{S}{4Tt} \right)^n (r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot \dots \cdot r_n^2) \right] \end{aligned} \quad (2.25)$$

比較式(2.25)等號兩邊可得下式：

$$\left(r_{av}^2\right)^n = r_1^2 r_2^2 \cdots r_n^2 \quad (2.26)$$

或

$$r_{av} = \sqrt[n]{r_1 r_2 \cdots r_n} \quad (2.27)$$

由式(2.27)可知，抽水井群與單一抽水井間之抽水距離可以幾何平均表示。

因 $r_1 = \frac{R}{n}$, $r_2 = 2r_1$, \cdots , $r_n = nr_1$ ，則當 n 趨近無窮大時，式(2.27)可改寫如下：

下：

$$r_{av} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{R}{n} \sqrt[n]{1 \cdot 2 \cdots n} \quad (2.28)$$

利用 mathematica 軟體計算，式(2.28)之等式左邊項如下：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sqrt[n]{1 \cdot 2 \cdots n} = \frac{1}{e} \cong 0.36788 \quad (2.29)$$

故式(2.28)可改寫如下：

$$r_{av} = \frac{R}{e} \quad (2.30)$$

式(2.30)說明因此當無窮多口抽水井簡化為單一抽水井抽水時，後者之抽水距離為 R/e 。

本研究設計一虛擬案例以證實等間距均勻抽水所建立概念想法之可行性，案例中假設影響半徑 R 為一公里，每隔一公尺設置一口抽水井，因此在案例中共有1000口抽水井(如圖2.7表示)，每一口抽水井之抽水量為 $0.008277 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，而井群以線性疊加總抽水量為 $8.277 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，其區域之導水係數和儲水係數分別為 $15.41 \text{ m}^2/\text{hr}$ 與 0.00001 ，則利用線性疊加即可求得觀測井之48小時洩降作為觀測值。

當井群抽水視為單一抽水井時，則以概念模式計算抽水距離為 $R/e=367.88\text{ m}$ 。將抽水量與抽水距離之觀測值代入式(2.13)並利用MLU套裝軟體(2.25.38版本)，求得導水係數與儲水係數分別為 $15.45\text{ m}^2/\text{hr}$ 和 0.00001 ，此結果證實此概念模式在給定之抽水距離與抽水量下，可求得原先設定的水文地質參數(如表2.3所示)。表2.3中導水係數之真值與計算值有些微差異，其原因可能在於本模式推導過程中假設抽水井遼近無窮多口，而在設計需擬案例中抽水井不可能有無限多口情形。圖2.10為虛擬案例之觀測水位與計算水位比較圖。

表2.3 等間距均勻抽水之虛擬案例觀測值與計算值比較表

	$T(\text{m}^2/\text{hr})$	S
真值	15.41	1.00E-05
計算值	15.45	1.00E-05

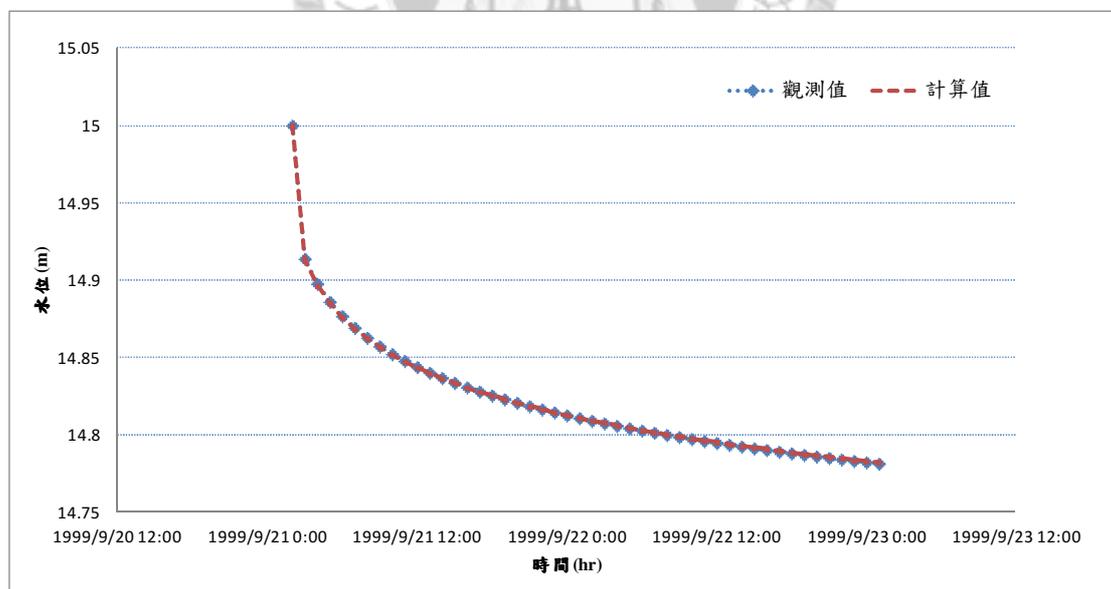


圖2.10 等間距均勻抽水之虛擬案例觀測水位與計算水位比較圖

二、空間均勻抽水

概念模式第二種想法為全域空間均勻散布抽水井，以空間均勻設置抽水井，以影響範圍中心設定觀測井，如圖2.11表示空間均勻抽水，意指單位面積抽水量相同，抽水井影響觀測井程度皆相同，由顏色表示為單一色；圖2.12所表示(圈：觀測井；叉：抽水井)以觀測井距離抽水井之遠近，其抽水距離越遠表示抽水量越大，反之，抽水距離越近，抽水量則越小，顯示多口抽水井以徑向距離同時抽水；圖2.13表示當井群個數視為單一抽水井之抽水距離表示。

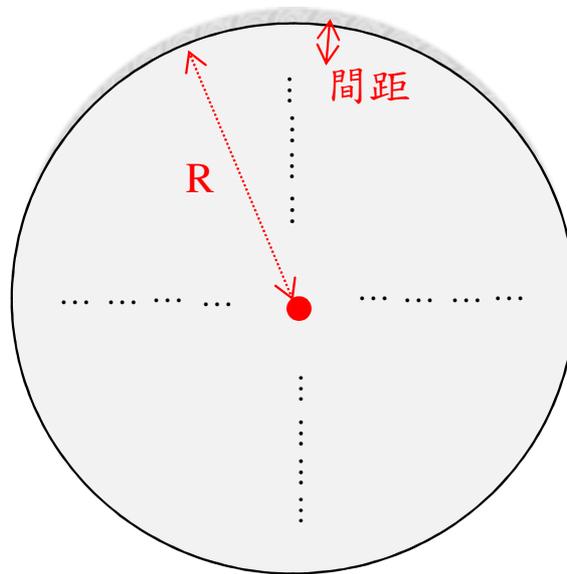


圖2.11 空間均勻抽水示意圖一

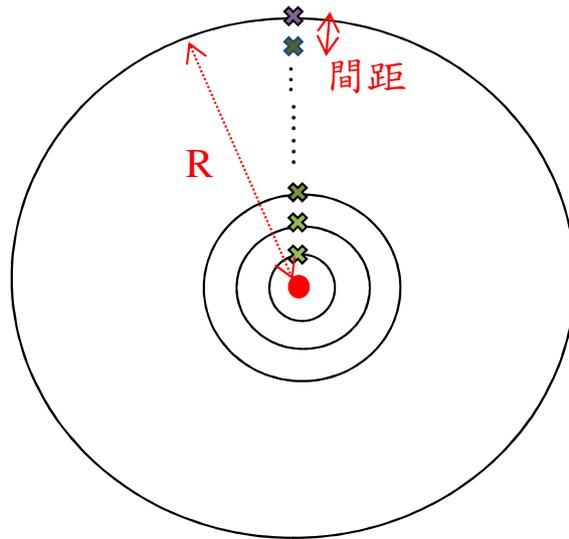


圖2.12 空間均勻抽水示意圖二

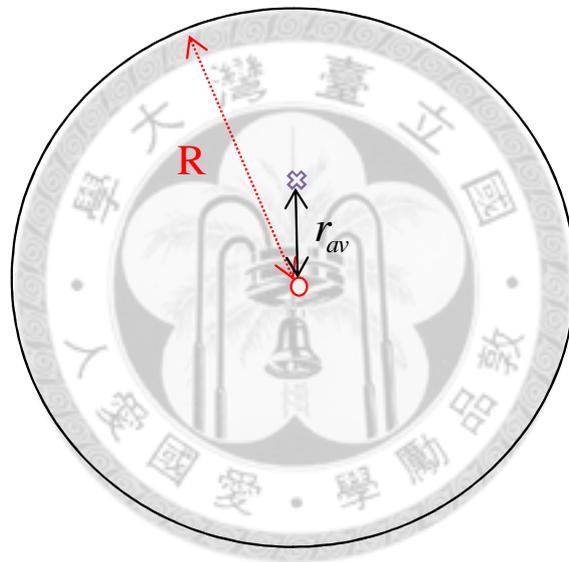


圖2.13 空間均勻抽水示意圖三

1. 抽水量之給定

概念模示第二種想法是假設為空間均勻抽水，則全域空間均勻抽水同樣指在研究區域影響範圍內，多口抽水井同時進行抽水，從地震發生後水位變化之現象，以空間均勻抽水解釋水位洩降之因。多口抽水井同時抽水(或注水)可以將其視成單井抽水之現象，由此抽水量可依複合併流

場概念如圖表示，分析地下水位之洩降量與流量之關係呈線性，可以線性疊加方式作為單井所抽的水量。

空間均勻抽水之各抽水井所抽之水量，以抽水距離之遠近給與單位面積權重分配抽水量式(2.31)，而總抽水量是以複合井流場概念以線性疊加方式，將每一口抽水井之抽水量加總，如式(2.32)表示。

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \pi r_1^2 q \\
 Q_2 &= \pi (r_2^2 - r_1^2) q \\
 &\vdots \\
 Q_i &= \pi (r_i^2 - r_{i-1}^2) q
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \tag{2.32}$$

其中， n 表示水井個數； r_{av} 視為單井抽水距離； r_i 為第 i 個抽水井與觀測井之距離； q 為單位面積抽水量； Q_i 為第 i 口抽水井抽水量； Q 視為單一口抽水井抽水量，即為井群總抽水量。

井群造成之洩降與單井抽水造成洩降相同以式(2.33)表示，將式(2.33)分為單井抽水量造成之洩降為式(2.34)與井群抽水造成之洩降則為式(2.36)。

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t) \tag{2.33}$$

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt} \right) \right] \tag{2.34}$$

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\pi (r_i^2 - r_{i-1}^2) q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln \left(\frac{r_i^2 S}{4Tt} \right) \right] \tag{2.35}$$

s 視為單井抽水(或注水)造成水位洩降； s_i 為第 i 口井抽水(或注水)造成水位洩降。

2. 抽水距離之給定

利用式(2.20)所表示井群對於觀測井之洩降影響可以複合井流場概念線性疊加呈現，假設有 n 口抽水井均勻分布，當井群抽水視為單井抽水時，所造成之洩降相同以式(2.33)表示，因此將式(2.36)展開以式(2.37)表示。

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r_i^2 S}{4Tt}\right) \right] \quad (2.36)$$

或

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = \frac{\pi r_1^2 q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r_1^2 S}{4Tt}\right) \right] + \dots + \frac{\pi(r_n^2 - r_{n-1}^2)q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r_n^2 S}{4Tt}\right) \right] \quad (2.37)$$

將式(2.37)整理後以式(2.38)表示井群抽水造成之洩降，等於視為單井抽水造成之洩降以式(2.39)表示。

$$\frac{\pi r_1^2 q}{4\pi T} \left[-0.5772 \times (1+3+\dots+n) - \ln\left(\frac{(2^2)^3 \cdot (3^2)^5 \dots (r_1^2)^{(1+3+\dots+n)} \cdot S^{(1+3+\dots+n)}}{(4Tt)^{(1+3+\dots+n)}}\right) \right] \quad (2.38)$$

$$= \frac{\pi R^2 q}{4\pi T} \left[-0.5772 - \ln\left(\frac{r_{av}^2 S}{4Tt}\right) \right] \quad (2.39)$$

將式(2.38)與式(2.39)整理後，以單井與井群之抽水距離可以式(2.40)表示。

$$r_{av}^2 = 2^{\frac{2 \cdot (2 \cdot 2 - 1)}{(1+3+\dots+n)}} \cdot 3^{\frac{2 \cdot (2 \cdot 3 - 1)}{(1+3+\dots+n)}} \cdot \dots \cdot n^{\frac{2 \cdot (2n - 1)}{(1+3+\dots+n)}} \cdot r_1^2 \quad (2.40)$$

式(2.40)可經整理成通式如下所示：

$$r_{av} = \left(\prod_{j=1}^n j^{\left(\frac{2(2j-1)}{\sum_{i=1}^n (2i-1)} \right)} \cdot r_1^2 = \prod_{j=1}^n j^{\left(\frac{2(2j-1)}{\sum_{i=1}^n (2i-1)} \right)} \cdot \left(\frac{R}{n} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.41)$$

當抽水井趨近於無窮多口抽水井時單井抽水與觀測井之距離可以式(2.42)表示。

$$r_{av} = R \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\prod_{j=1}^n j^{\left(\frac{2(2j-1)}{\sum_{i=1}^n (2i-1)} \right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{n} \right) \quad (2.42)$$

但由於式(2.42)計算之結果太過複雜，因此需以數值方式求得井群與單井之抽水距離關係。表2.4為井群各數與單井抽水距離和影響半徑比之關係，從表中可知當抽水井越多，單井抽水距離與影響半徑比，其關係值會趨於一定值，利用表2.4繪製成圖以圖2.14，也從圖得知其關係趨於定值。

表2.4 井群個數與單井抽水距離和影響半徑比之關係

n	r_{av}/R
100	0.61251
1000	0.60713
10000	0.60659
20000	0.60656
30000	0.60655
40000	0.60654
50000	0.60654
100000	0.60653
150000	0.60653
200000	0.60653

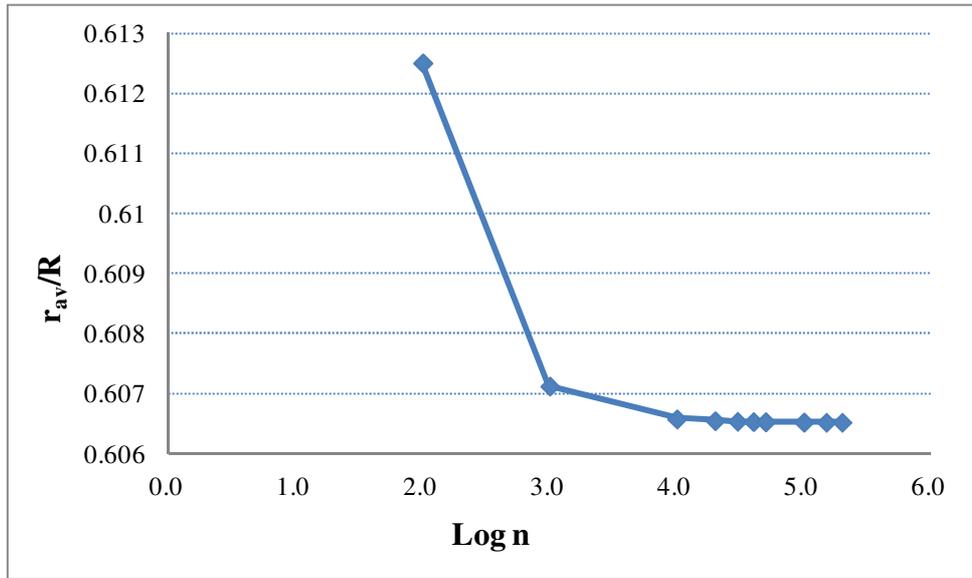


圖2.14 井群與單井抽水距離之關係示意圖

從表2.4與圖2.14可以得知，井群與單井兩者間抽水距離之關係，以式(2.43)表示。

$$r_{av} \cong 0.6065 \cdot R \quad (2.43)$$

本研究設計一虛擬案例，以證實空間均勻抽水所建立概念想法之可行性，案例中假設影響半徑 R 為一公里，每隔一公尺設置一口抽水井，因此在案例中共有1000口抽水井(如圖2.12表示)，每一口抽水井之抽水量以單位面積之抽水量相同，針對抽水距離之遠近以面積權重分配抽水量為 $((r_i^2 - r_{i-1}^2)/R^2)Q$ ，而井群以線性疊加抽水量為 $8.277 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，其區域之導水係數和儲水係數分別為 $15.41 \text{ m}^2/\text{hr}$ 和 0.00001 ，則利用線性疊加即可求的觀測井之48小時洩降作為觀測值。

當井群抽水視為單一抽水井時，則以概念模式計算抽水距離為 $0.6065R = 606.50\text{ m}$ 。將抽水量與抽水距離之觀測值代入式(2.13)並利用 MLU 套裝軟體(2.25.38 版本)，求得導水係數與儲水係數分別為 $15.47\text{ m}^2/\text{hr}$ 和 0.00001 ，此結果證實本研究之概念模式所給定抽水距離與抽水量，可求得原先案例中所設定的導水係數與儲水係數(如表 2.5 所示)，表 2.5 中導水係數之真值與計算值有些微差異，其原因可能在於本模式推導過程中假設抽水井趨近無窮多口，而在設計虛擬案例中抽水井不可能有無窮多口情形。圖 2.15 為虛擬案例之觀測水位與計算水位比較圖。

表 2.5 空間均勻抽水之虛擬案例觀測值與計算值比較表

	$T(\text{m}^2/\text{hr})$	S
真值	15.41	1.00E-05
計算值	15.47	1.00E-05

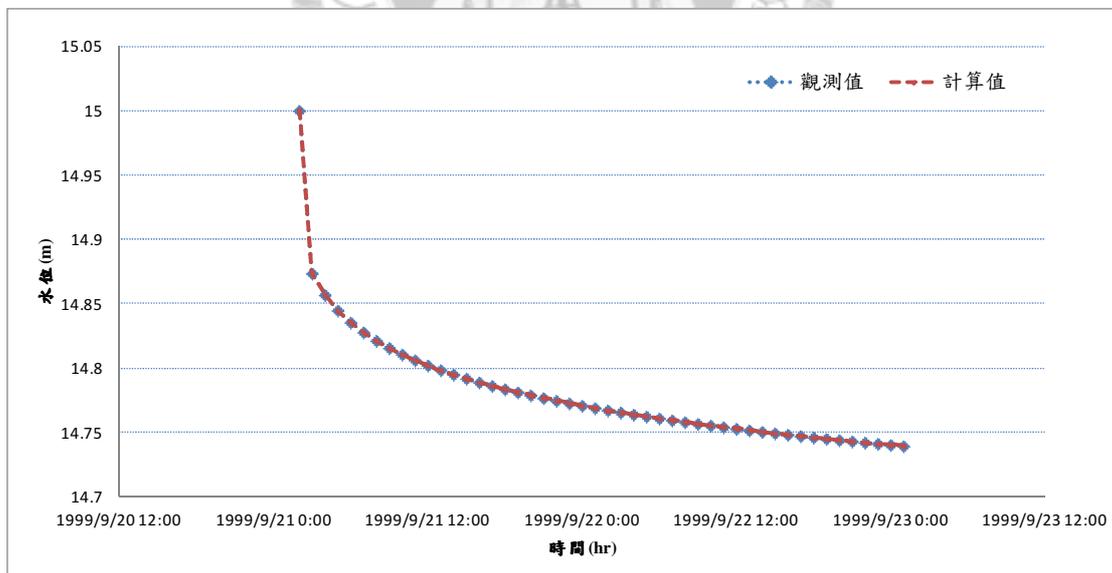


圖 2.15 空間均勻抽水之虛擬案例觀測水位與計算水位比較圖

2.3 概念流程建立

本研究所建立概念流程如圖2.16所示，第一步驟先蒐集研究區域之觀測水井地下水位、現地試驗之抽水量、抽水距離、導水係數、儲水係數等水文地質資料，第二步驟針對蒐集地下水位資料觀察，從觀察中發現地震發生後地下水位之變化形式與抽水試驗之水位洩降曲線相似，因此將水位變化類比為抽水試驗之概念形式，第三步驟所建立之概念形式分為兩種，第一種概念模式為等間距均勻抽水，第二種概念模式為空間均勻抽水，分別針對這兩種概念模式作虛擬案例證明本研究方法之可行性，最後將模式應用於研究區域，推估區域水文地質參數。

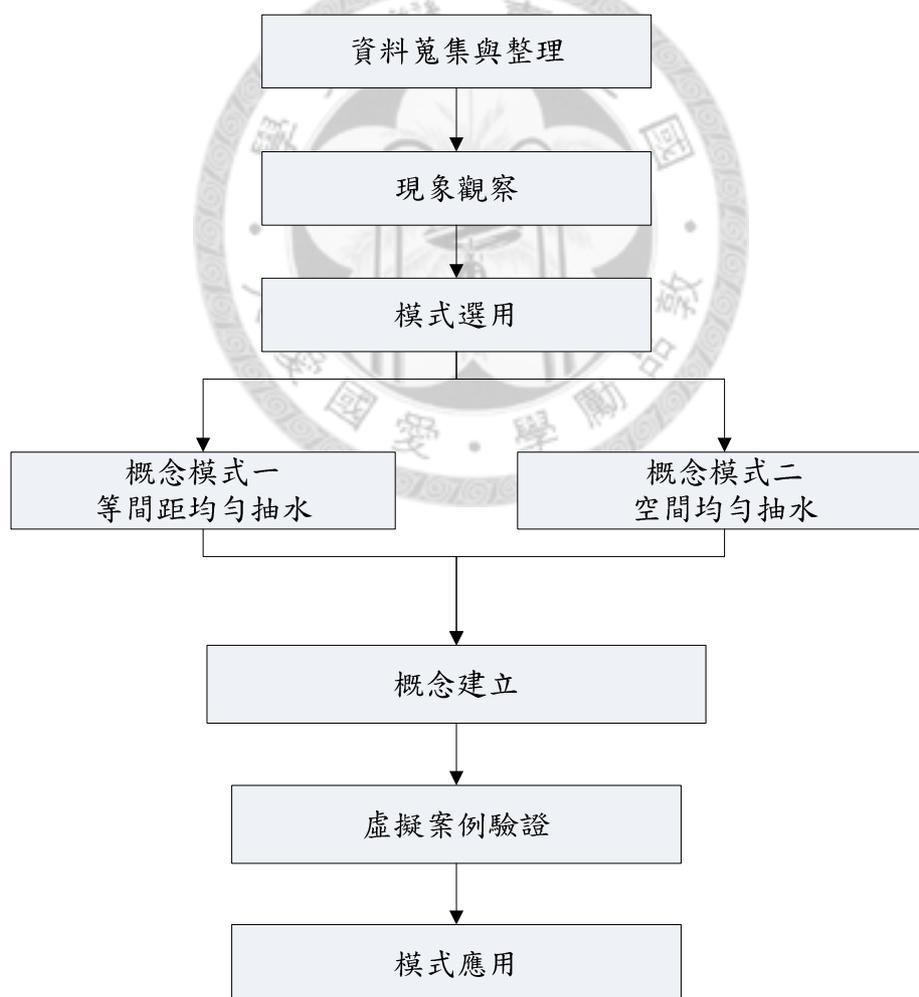


圖2.16 概念模式流程圖

第三章 方法應用

本研究針對濁水溪沖積扇進行分析，在區域研究之前，針對濁水溪沖積扇之地理環境、水文地文特性、地下水觀測站網之地下水位資料以及含水層之地質資料蒐集進而分析。詳細敘述如后。

3.1 濁水溪沖積扇區域概述

本研究區域範圍為濁水溪沖積扇，濁水溪沖積扇地下水區位於台灣西海岸中部，以濁水河流域為主，範圍東起八卦山台地及斗六丘陵，西至台灣海峽，北與台中地區相接，南至朴子溪，以彰化縣二水附近之鼻子頭為扇軸向海岸延伸，其扇形半徑約40公里，面積約2562平方公里，其上之主要河川包括有濁水溪及北港溪，濁水溪沖積扇地下水區及主要河川如圖3.1所示。

濁水溪沖積扇地下水區內包含彰化縣、雲林縣及嘉義縣三個行政區域，其中彰化縣26個鄉鎮市皆位於沖積扇範圍內，雲林縣除古坑鄉東半部未納入沖積扇範圍內，其餘19個鄉鎮市皆包含於濁水溪沖積扇，而嘉義縣部分僅東石鄉、六腳鄉、新港鄉、溪口鄉及大林鎮等5個鄉鎮市位於沖積扇範圍內。

一、地文特性資料

本研究完整蒐集濁水溪沖積扇之地文資料，包括地表地形、地表土層分布與主要河川流域等，扇面上有濁水溪、舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪與北港溪等五條主要河道，原均為濁水溪入海之放射入流，經民國初年整治後始成獨立溪系。平原西側海岸地帶早年沙丘遍佈，現今大部分已開墾為旱地，每年十月至翌年三月間為東北季風時節，有飛沙為害。

濁水溪位於台灣省中西部，因其流水挾帶泥砂特多，溪水四季混濁而得名。其發源於合歡山主峰與東峰之「佐久間鞍部」，源頭海拔標高約2880公尺，最上游為霧社溪，沿北北東間之縱谷而下，至廬山附近與塔羅灣溪匯流，至萬大與萬大溪合流後始稱濁水溪。再併丹大溪、郡大溪、巒大溪、陳有蘭溪、水里溪等支流，經集集盆地匯納清水溝溪、東埔蚋溪、清水溪後流入彰雲平原，於麥寮鄉許厝寮流入台灣海峽，全長186.4公里，河床平均比降為1/55，流域面積為3155平方公里。濁水溪流域東以中央山脈為界，西為擴大之沖積扇平原而臨台灣海峽，北鄰烏溪流域，南接台灣第一高峰玉山，山脈與地形帶皆略呈南北走向。

根據地形、地質及地層材料狀況，濁水溪沖積扇可略分為扇頂區、扇央區以及扇尾區，如圖3.2所示，圖中虛線為三區之分隔線。扇頂區位於員林、溪州、西螺、虎溪、溫厝聯線以東，各含水層間無明顯之阻水層存在，露布於地表的區域即為主要之地下水補注區，河水、雨水及灌溉水等地面水源可直接入滲補注至深層地下水，並分別流入下游扇央及扇尾區之各含水層。扇央區位於扇頂自由含水層(或非侷限含水層)以西，至好修、趙甲、潭墘、田洋、北港聯線以東，阻水層覆於含水層之上，

各含水層間有明顯之阻水層存在，雨水與地面水僅能入滲補注第一含水層，無法直接補注更深層之含水層，以地層材料而言，砂礫材料所佔之比例較大。扇尾區乃扇央區以西至沿海，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，砂礫所佔之比例變得更少，而粉砂、泥、及粘土所佔之比例較大，依此地層材料分布趨勢推測，各含水層最終均於臺灣海峽中尖滅於增厚之阻水層中，亦即濁水溪沖積扇含水層下游端近似封閉，未出露於海床。

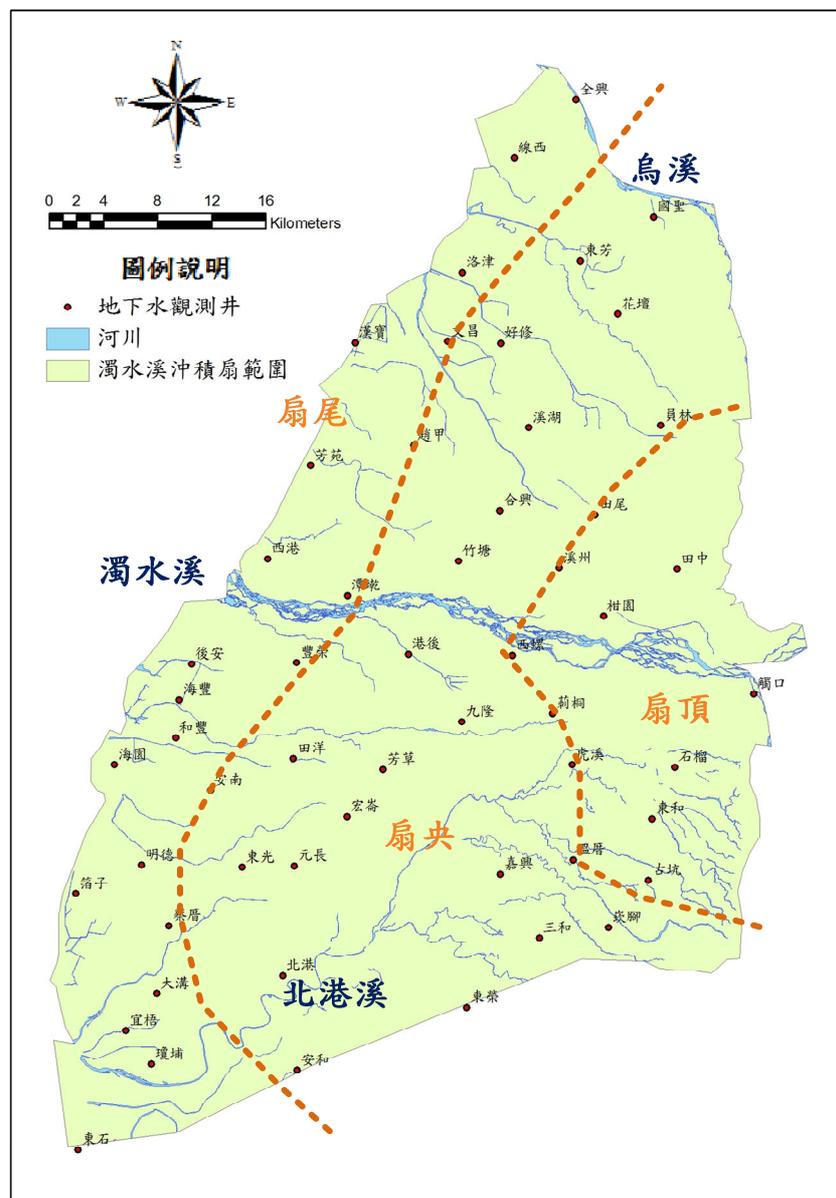


圖3.2 濁水溪沖積扇之扇頂、扇央、扇尾區分布圖

二、水文特性資料

本研究完整蒐集濁水溪沖積扇之水文地質資料，包括地下水位與現地試驗之導水係數與儲水係數，並針對蒐集所得資料之正確性與完整性進行初步檢核，選擇合適者作為後續分析之用。

濁水溪沖積扇之觀測井水位資料從民國57年已有記錄，但卻無定期與分層記錄之程序，自民國83年後，政府陸續在濁水溪沖積扇62個地點建立觀測井，各點之觀測井數目依分層數而定，以期能適當管理豐富的地下水資源。本研究採用水利署「水文水資源管理供應系統」所提供之地下水觀測井水位資料，選定921地震造成地下水位變化觀測站之水位較齊全的資料，作為後續研究分析之實際觀測資料。

(1) 降雨量資料

濁水溪沖積扇各區地面水文及入滲特性皆不一致，降雨量空間分不與多寡會影響入滲情形，同時也會對地表逕流造成顯著的變化，整體而言，降雨量會從沿海致內陸逐漸增加，在時間分布上，豐水期則是介於每年5月至10月之間，而本研究所觀測時間為為1999年9月21日凌晨一點至1999年9月23日凌晨一點，在該時間內並無明顯降雨，因此可以忽略降雨量對地下水位之影響。

(2) 地下水觀測站網之地下水位概況

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，仰賴地下水水資源比例偏重，所以於第一階段（民國81年度至87年度）最先實施。目前計有地下水觀測站86站（210口），抽水試驗站28站（55口），水文地質調查站88站，普通井仍運作中者有6口，如圖3.3所示。

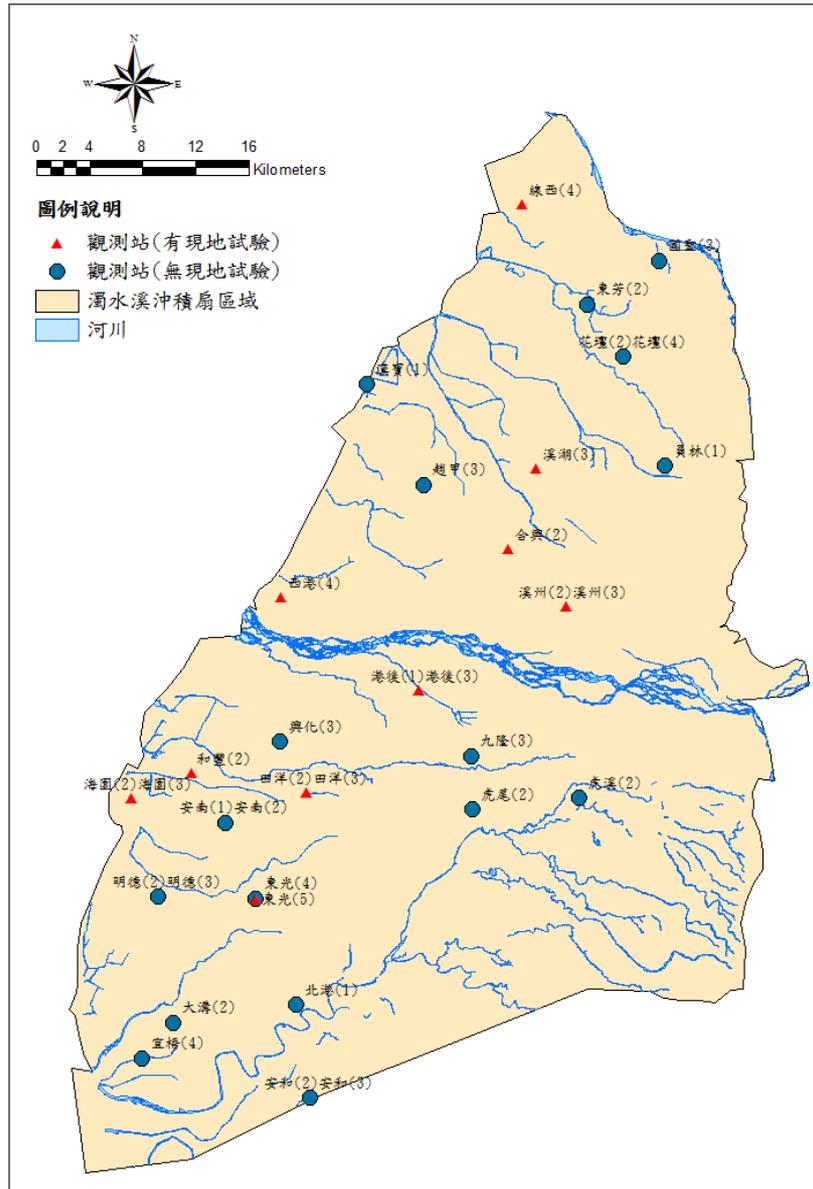


圖3.3 濁水溪沖積扇地下水觀測網站井分布圖

集集地震引致濁水溪沖積扇區域地下水位變化分析之資料取自「水文水資源管理供應系統」中經濟部水利署所提供之地下水觀測網地下水位歷時資料，其時間之選取為集集地震主震發生後時間為1999年9月21日凌晨一點四十七分，地下水位之時間間距以每小時記錄一次。地下水位資料分析前須滿足兩個條件，第一個條件選取之記錄資料以地震發生後造成地下水位變化與現地試驗抽水(或注水)使得地下水位造成水位洩降

曲線相似，類比為現地試驗執行之情況，同時滿足兩條件便可分析觀測井水文地質參數並可以與現地試驗之水文地質參數值比較探討；第二個條件必須選定侷限含水層同時觀測站井執行過現地抽水試驗，符合兩個條件後便利用本研究之方法擬合地下水位以推估水文地質參數。

符合上述兩個條件之觀測井，以含水層之層別分為第二含水層的田洋(2)、海園(2)、港後(1)、溪州(2)、溪州(3)，共有五口觀測井符合；第三含水層合興(2)、西港(4)、和豐(2)、海園(3)、港後(3)、溪湖(3)、線西(4)，共有七口觀測井符合；第四含水層東光(5)、田洋(3)，共有兩口觀測井符合。以上共計14口觀測井之地下水位觀測資料同時滿足兩個條件，因此便將濁水溪沖積扇之觀測井之井深度、位置資料、水文地質資料...等，現地雙井與單井試驗詳細資料記錄如表3.1表示。

以未執行試驗之觀測井符合第一個條件者，第二含水層的北港(1)、安和(2)、安和(3)、安南(1)、明德(2)、明德(3)、花壇(2)、虎尾(2)、虎溪(2)、員林(1)，共有十口觀測井符合；第三含水層有九隆(3)、大溝(2)、安南(2)、東光(4)、東芳(2)、國聖(3)、趙甲(3)、興化(3)，共有八口觀測井符合；第四含水層有宜梧(4)、花壇(4)，共有兩口觀測井符合。以上未執行現地試驗但符合記錄資料以地震發生後造成地下水位變化與現地試驗抽水(或注水)使得地下水位造成水位洩降曲線相似之觀測井共計20口觀測井符合，因此在2.2.2節所建立概念模式，分別對於各含水層之觀測井進行水文地質參數推估，包含上述提到的符合兩個條件的14口觀測井與僅符合與現地試驗執行時水位洩降之曲線相似的20口觀測井，共有34口觀測井以圖3.3觀測站井分布圖，結果應用與討論在3.2節做詳細敘述如后。

表3.1 濁水溪沖積扇現地試驗詳細資料表

井名稱	含水層	含水層種類	含水層井號	儲水係數 S	導水係數 T (m ² /hr)	總洩降量(m)	靜水位 (m)	抽水位 (m)	出水量 (cmh)	透水係數 K(m/hr)	含水層厚度 (m)	含水層位置	TM2 度 Y	TM2 度 X	井篩頂	井篩底	雙井試驗
田洋(2)	F2	侷限	9150121	6.20E-04	106.17	1.91	9.55	11.45	60.40	1.07	50	47-97	2624989	178717	55	97	※
海園(2)	F2	侷限	9160121	3.40E-03	27.78	3.11	13.90	17.01	39.50	0.90	31	68-99	2624551	165467	68	98	
港後(1)	F2	侷限	9110111	5.70E-05	65.33	3.92	6.60	10.52	49.90	1.64	13	52-65	2632820	187220	52	64	※
溪州(2)	F2	侷限	7260221	1.27E-03	115.46	1.21	5.01	6.22	70.50	4.02	20	18-38	2639267	198371	40	58	※
溪州(3)	F2	侷限	7260231	1.53E-03	178.90	1.26	4.10	5.36	70.50	1.60	58	68-126	2639267	198371	72	90	※
合興(2)	F3	侷限	7220221	1.04E-03	56.06	1.15	13.29	14.44	26.70	1.15	35	92-227	2643600	194000	197	227	※
西港(4)	F3	侷限	7240241	5.51E-05	16.55	6.54	7.90	14.44	51.50	0.81	16	263-275	2639978	176799	263	275	※
和豐(2)	F3	侷限	9160221	1.70E-03	28.67	4.43	20.41	24.84	49.90	0.97	20	200-220	2626544	169999	202	220	※
海園(3)	F3	侷限	9160131	3.40E-03	20.03	3.75	18.06	21.81	34.10	0.41	49	147-196	2624551	165467	160	196	
港後(3)	F3	侷限	9110131	1.49E-04	28.80	3.18	13.35	16.53	45.30	1.31	22	90-212	2632820	187220	195	210	
溪湖(3)	F3	侷限	7110131	1.14E-03	91.25	2.22	13.09	15.31	70.50	1.87	56	176-224	2649778	196133	176	200	※
線西(4)	F3	侷限	7040141	1.40E-04	24.13	2.33	7.69	14.09	54.60	0.38	45	158-194	2669966	195062	158	170	※
東光(5)	F4	侷限	9180451	1.37E-04	28.92	4.98	17.51	22.49	58.20	1.32	16	42-258	2616870	174905	243	258	※
田洋(3)	F4	侷限	9150131	6.27E-04	5.78	24.85	15.71	40.02	43.10	0.48	12	61-264	2624989	178717	262	274	

備註：※表示為雙井試驗紀錄資料；空格處為單井試驗紀錄資料

(資料來源:經濟部水利署)

3.1.2 含水層之地質資料

濁水溪沖積扇地下水區兼具沖積扇及三角洲環境特性，沉積物主要源自上游濁水溪集水區，在地層沉積過程中，由於古氣候冷暖變遷導致海水位升降，因而經歷了多次的海進與海退，陸相及海相地層因海岸線變遷而呈犬牙交錯沉積。陸相沉積環境包括礫石質辮狀河、砂質辮狀河及曲流等環境；海相沉積環境則包括沿岸沼澤、濱岸至淺海等環境。其中辮狀河道沉積之礫石和粗中砂層及濱岸沉積之細砂層構成本區之含水層(又稱富水層)；渠流、沿岸沼澤或淺海環境沉積之泥層為主要之阻水層，圖3.4 濁水溪沖積扇地下含水層分布剖面示意圖 (中央地質調查所，1999)。

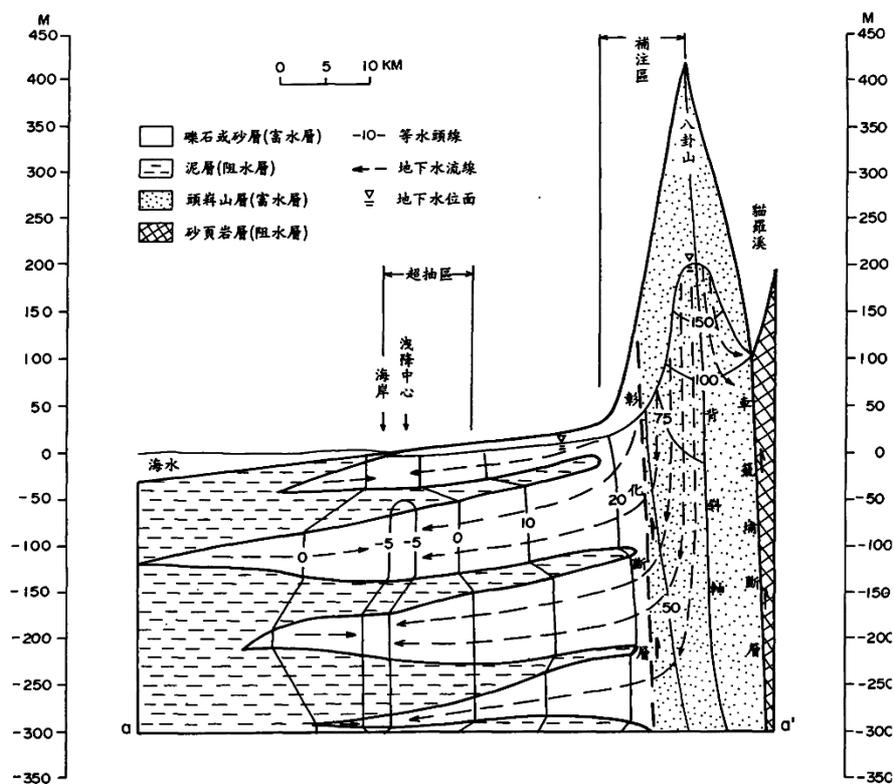


圖3.4 濁水溪沖積扇地下含水層分布剖面示意圖

臺灣地區地下水觀測網第一期自八十一至八十七年度中央地調所於濁水溪沖積扇共陸續完成88站水文地質鑽探，鑽探總深度為17,051.5公尺。地調所將岩性歸併礫、粗砂及細砂層為含水層，利用沖積扇區72站及丘陵與河谷區8站之地層柱狀圖，完成十五條水文地質剖面，取漢寶至田中之地質剖面圖為代表，如圖3.5 漢寶至田中之地質剖面圖所示。

濁水溪沖積扇地下水層深度達到330公尺左右，在此範圍內由上而下，可劃分為四個主要含水層及三個阻水層。其中以第二含水層之厚度最大，內夾有二至三層延展範圍大之泥層，此等泥層對含水層有局部分割的作用。而上層之礫石層範圍為濁水溪沖積扇之天然補注區，在邊界之東側為沙與泥混合而成之土壤，因此該區可被歸類為半透水區或不透水區。

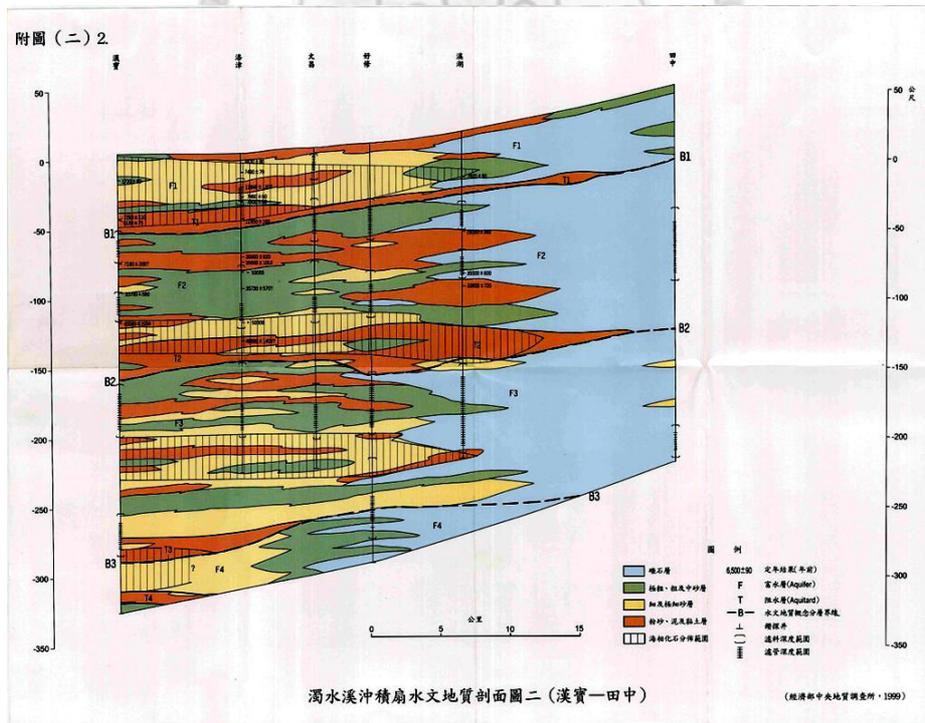


圖3.5 漢寶至田中之地質剖面圖

1. 含水層一(F1)

含水層一為濁水溪沖積扇分區水文地質系統之表層，其分布範圍涵蓋全區，從地表起最深約103公尺，厚度從19~103公尺不等，平均厚度約42公尺。本層於沖積扇頂附近以礫石層和粗砂層為主，地層厚度較大；經扇央及扇尾其岩性漸次變相為細砂層和泥層，含水層一的表面及內部常有延展良好之厚泥層分布，造成地下水局部受壓或分段之現象。儲水係數S(storage coefficient)或比出水量(specific yield)在扇頂非侷限含水層部分在0.137至0.237之間，其他侷限含水層區則在 10^{-4} 至 10^{-3} 之間。水力傳導係數K(hydraulic conductivity)，在自由含水層處約為0.18~4.38(m/hr)，在侷限含水層則為6.6~115.8(m/hr)。

2. 阻水層一(T1)

阻水層一位於含水層一之下，廣泛分布於沖積扇央及扇尾，其西側延展入海，東側則在離彰雲大橋十數公里處尖減，平均厚度為14公尺，深度在35~129公尺不等。本層主要為由黏土、泥或粉砂所組成之泥層，局部夾雜細砂層及少數粗砂層。

3. 含水層二(F2)

含水層二深度介於在地表下35~217公尺之間，厚度從76~145公尺不等，平均厚度約95公尺，為各含水層中厚度最大者。沖積扇頂附近以礫石和粗砂層為主，與含水層一之間並無明顯之阻水層分隔。扇央及扇尾地層材料粒徑變細，惟仍有粗砂或礫石層之存在，顯示含水層二在蓄水及供水上之重要性。含水層二內夾有二至三層延展範圍較大之泥層，可以次區域性之阻水層界細部劃分為含水層二之一及含水層二之二。含水

層二之一儲水係數S在扇頂非侷限含水層與含水層一相同，惟溪州站之含水層二之一為侷限含水層，S降至 1.07×10^{-3} ，其他除港後為 5.7×10^{-5} 外，亦均在 10^{-4} 至 10^{-3} 之間。含水層二之二的S約為 1.15×10^{-4} 至 2.98×10^{-3} 之間。水力傳導係數K在扇頂自由含水層區域為 $1.98(m/hr)$ ，其他區域則介於 0.3 至 $4.44(m/hr)$ 之間。

4. 阻水層二(T2)

阻水層二位於含水層二之下，廣泛分布於沖積扇央及扇尾，其西側延伸入海，於濁水溪以北之阻水層二尖滅於扇頂附近，以南之阻水層二較為發達且涵蓋全區。阻水層二平均厚度約23公尺，主要為泥層夾細砂層，局部夾有粗砂層，其深度介於140~223公尺之間。

5. 含水層三(F3)

含水層三位於阻水層二以下，其分布範圍涵蓋全區，深度在140~275公尺之間，厚度介於42~122公尺之間，變異頗大，主要因濁水溪以北含水層遠比以南發達所致，全區平均厚約86公尺，規模略小於含水層二。S約為 5.56×10^{-5} 至 1.07×10^{-3} 之間，K則約為 $0.18 \sim 3.6(m/hr)$ 。

6. 阻水層三(T3)

阻水層三位於含水層三之下，在濁水溪以北的區域厚度較小，分布範圍亦較小；於濁水溪以南則較為發達分布完整，對含水層形成有效的分隔。平均厚度約11公尺，由泥層夾雜細砂層所組成，深度介於238~293公尺不等。

7. 含水層四(F4)

含水層四位於阻水層三以下，由於其平均深度大於271公尺，全區只有14口井超過此一深度，其中9口貫穿本層，5口則未達本層底部，以此少量資料難以對含水層四及其下之阻水層四作一明確之描述。基本上扇頂附近仍以礫石層及粗砂層分布為主，往扇央及扇尾則變相為細砂為主。其分布深度約介於238~313公尺間，厚度介於6~51公尺間，平均厚約24公尺，是各含水層中厚度最小者。S約為 5.50×10^{-5} 至 3.40×10^{-3} 之間，K約為0.3~1.98(m/hr)之間。

3.2 方法應用結果

本研究利用 Hemker and Post (2011)所提出MLU套裝軟體，其軟體是解決含水層系統數值模式，該套裝軟體已發展到2.25.38版本(其操作步驟即原理詳見Well flow modeling in multilayer aquifer systems)，只須給定抽水量與抽水距離，即能推得可信賴之導水係數與儲水係數，因此選定MLU軟體作為本研究推算水文地質參數工具之用。

因此利用第二章所建立之方法，以井群均勻抽水視為單井抽水時對於觀測井之水位變化，並利用現地試驗最常使用之抽水試驗解釋，給定合理抽水量與抽水距離之概念模式分為兩種，第一種概念模式為等間距均勻抽水，第二種概念模式為空間均勻抽水，在本節會對於影響半徑、抽水距離與抽水量之設定給予合理說明。

符合地震發生後造成地下水位之變化曲線與抽水(或注水)後的水位消散形式相似之濁水溪沖積扇觀測井水位變化小於一公分時，便視為抽水所影響最遠之距離，而在本研究分析當觀測水位幾乎不再變化時，判

斷影響最遠之距離約為1.4公里。

抽水距離之設定以第一種概念模式敘述等間距均勻抽水，其以井群視為單井之抽水距離為 $0.36788R=515.03$ 公尺，而第二種概念模式之抽水距離給定則以 $0.60650R=849.10$ 公尺表示。

影響範圍可以從現地試驗觀測水位資料判識，當地下水水位變化小於一公分時，即可表示影響範圍最遠距離，因此只要知道影響半徑，便可利用本研究建立概念模式之方法推算抽水距離，但抽水量資料之取得則是毫無頭緒，因此在本節給定抽水量之方法是以現地調查各鄉鎮每一含水層之抽水量(資料來源:經濟部水利署，每一年會針對不同鄉鎮進行各層水井清查所記錄之資料)，所以抽水量之設定如表3.2所述，是以濁水溪沖積扇面積與影響範圍之面積比，等於每一含水層每小時所抽之水量與影響範圍內所抽之水量依據，以式(3.1)所示。

$$\frac{\text{影響半徑1.4公里}}{\text{濁水溪沖積扇面積}} = \frac{1.4\text{公里範圍內抽水量}}{\text{每一含水層每小時之抽水量}} \quad (3.1)$$

表3.2 現地調查各層抽水量

抽水量	抽水量(噸/小時)
第二層	36.65
第三層	16.22
第四層	2.50

3.2.2 抽水試驗推估參數之結果

由本研究所建立之方法應用於濁水溪沖積扇區域，將概念想法類比為抽水試驗，利用兩種概念模式(等間距均勻抽水與空間均勻抽水)推估水文地質參數，分別以表3.3和表3.4將推估之導水係數與儲水係數與現地雙井試驗之水文地質參數列表比較，並繪製試驗參數與優選所得參數圖以圖3.6表示。

首先對於第一種概念模式-等間距均勻抽水，所求得參數與現地試驗參數之探討以表3.3呈現，發現第二含水層之導水係數最大值為溪州(3)之值為27.24 m²/hr，最小值為海園(2)之值為1.9 m²/hr，平均值為10.43 m²/hr，儲水係數最大值是溪州(3)之值為0.00153，最小值則是溪州(2)之值為0.000011，其平均值為0.000323與現地試驗之導水係數最大值為溪州(3)之值178.90 m²/hr，最小值為海園(2)之值為27.78 m²/hr，平均值98.73 m²/hr，儲水係數最大值為海園(2)之值為0.0034，最小值為港後(1)其值為0.000057，平均值為0.00138兩參數相比，推估之水文地質參數比現地試驗參數值還小，推測可能是因為概念模式抽水距離是以大範圍均勻抽水之設定，而與現地試驗的實際抽水距離相比，概念模式中設定抽水距離尺度相較現地試驗尺度大，影響抽水井造成觀測井水位變化相對較緩慢，因而計算所得之參數偏小；第三含水層之導水係數最大值為線西(4)之值為27.29 m²/hr，最小值為海園(3)之值為0.33 m²/hr，平均值為13.95 m²/hr，儲水係數最大值是和豐(2)之值為0.000331，最小值則是合興(2)之值為0.00000275，平均值為0.0000873和現地試驗導水係數最大值為溪湖(3)之值為91.25 m²/hr，最小值為西港(4)之值為16.55 m²/hr，平均值37.93 m²/hr，儲水係數最大值是海園(3)之值為0.0034，最小值則是西港(4)之值為0.0000551，平均值為0.00109，參數相比後其值為幾乎為低估，判斷與

第二含水層推估所得參數之原因相同；最後，以第四含水層之導水係數最大值為田洋(3)之值為 $12.17 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值為東光(5)之值為 $2.36 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值為 $7.27 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，儲水係數最大值是東光(5)之值為 0.000111 ，最小值則是田洋(3)之值為 0.000029 ，平均值為 0.00007 ，現地試驗之導水係數最大值是東光(5)之值為 $28.92 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值則是田洋(3)之值為 $5.78 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值為 $17.35 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，儲水係數最大值是田洋(3)之值為 0.000627 ，最小值則是東光(5)之值為 0.000137 ，平均值為 0.000382 ，優選推求參數與現地試驗參數兩者相比較其優選推估之參數也同樣低估，判識原因與第二、三含水層之情況類似。

再針對於概念模式二由表3.4所求得參數與現地試驗參數之探討，第二含水層之導水係數最大值為溪州(3)之值為 $27.23 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值為海園(2)之值為 $1.9 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值為 $10.43 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，儲水係數最大值是溪州(3)之值為 0.000387 ，最小值則是溪州(2)之值為 0.00000407 ，其平均值為 0.000119 與現地試驗之導水係數最大值為溪州(3)之值 $178.90 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值為海園(2)之值為 $27.78 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值 $98.73 \text{ m}^2/\text{hr}$ 和儲水係數最大值為海園(2)之值為 0.0034 ，最小值為港後(1)其值為 0.000057 ，平均值為 0.00138 兩參數相比，則推估之參數比現地試驗參數值小，可能是因為概念模式抽水距離是以大區域均勻抽水設定，而與現地試驗之抽水距離相比，概念模式中設定尺度相較現地試驗尺度大，影響抽水井造成觀測井水位變化相對較緩慢，因而計算所得之參數偏小；第三含水層之導水係數最大值為線西(4)之值為 $27.29 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值為海園(3)之值為 $0.33 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值為 $13.95 \text{ m}^2/\text{hr}$ 、儲水係數最大值是和豐(2)之值為 0.000122 ，最小值則是合興(2)之值為 0.00000101 ，平均值為 0.0000321 和現地試驗第三含水層之導水係數最大值為溪湖(3)之值為 $91.25 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，最小值為西港(4)之值為 $16.55 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值 $37.93 \text{ m}^2/\text{hr}$ 、儲水係數最大值是海園(3)之值為 0.0034 ，最

小值則是西港(4)之值為0.0000551，平均值為0.00109，參數相比後其值為低估，判斷與第二含水層推估所得參數之原因相同；最後，以第四含水層之導水係數最大值為田洋(3)之值為12.14 m²/hr，最小值為東光(5)之值為2.36 m²/hr，平均值為7.25 m²/hr，儲水係數最大值是東光(5)之值為0.000041，最小值則是田洋(3)之值為0.000011，平均值為0.000026，現地試驗之導水係數最大值是東光(5)之值為28.92 m²/hr，最小值則是田洋(3)之值為5.78 m²/hr，平均值為17.35 m²/hr，儲水係數最大值是田洋(3)之值為0.000627，最小值則是東光(5)之值為0.000137，平均值為0.000382，優選推求參數與現地試驗參數兩者相比較其優選推估之參數為低估，原因與第二、三含水層之情況類似。

從圖3.6中發現可以得知兩模式推求水文地質參數值對於現地試驗參數相比，推估之參數幾乎都比現地試驗參數小，先從圖3.6(a)來看，對於兩模式推求的導水係數互相比較後發現兩參數值幾乎重疊，其因為抽水量之設定皆以複合井流場概念線性疊加，因此對於導水係數之變化較不明顯，而儲水係數較有明顯的差異之因，對於概念模式所設定抽水距離遠近會造成地下水位洩降影響快慢，因此在模式一抽水距離比模式二抽水距離小，影響觀測井較大，所以可以從此得知兩者儲水係數之差異，但兩概念模式推估出之水文地質參數在45度斜線下方，僅可以區域範圍平均參數值解釋。

雖僅能以區域範圍平均參數值解釋，但仍可以對於未執行試驗之觀測井水文地質參數進行推估，以表3.5中包含各含水層分別利用模式一與模式二之推估求得導水係數與儲水係數，三個含水層之平均導水係數值分別為12.65 m²/hr、17.91 m²/hr、1.37m²/hr，平均儲水係數為0.000613、0.0000333與0.000024，現地試驗各含水層之平均導水係數為98.73 m²/hr、

37.93 m²/hr、17.35 m²/hr，平均儲水係數為0.00138、0.00109與0.000382，以概念模式所推估之水文地質參數與現地試驗參數值比較，顯示各層之導水係數與儲水係數平均值計算之結果與現地試驗之參數比幾乎偏小，顯示整個含水層系統受外力源驅動地下水流場流速對於現地試驗慢。

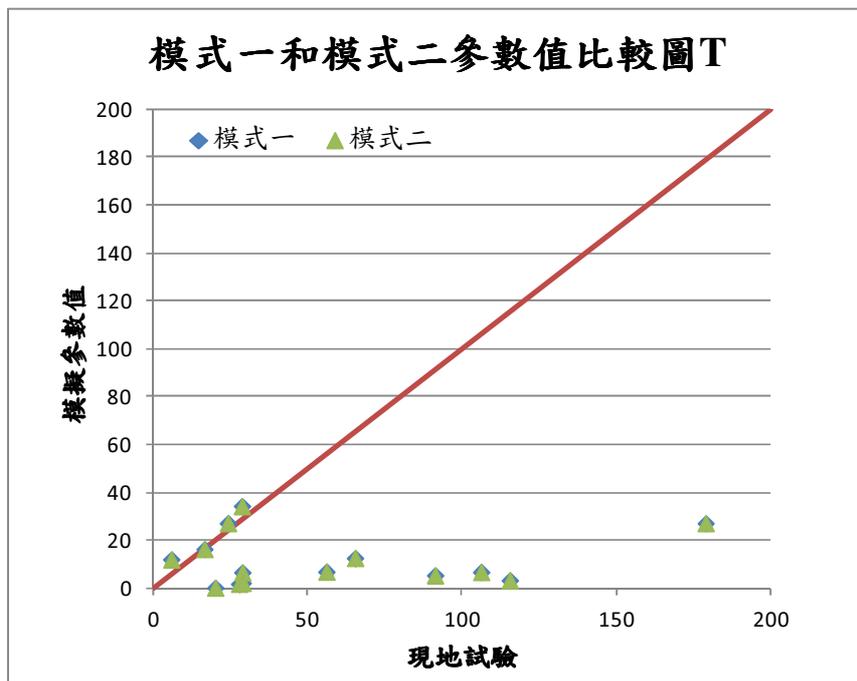


表3.3 模式一水文地質參數推估表

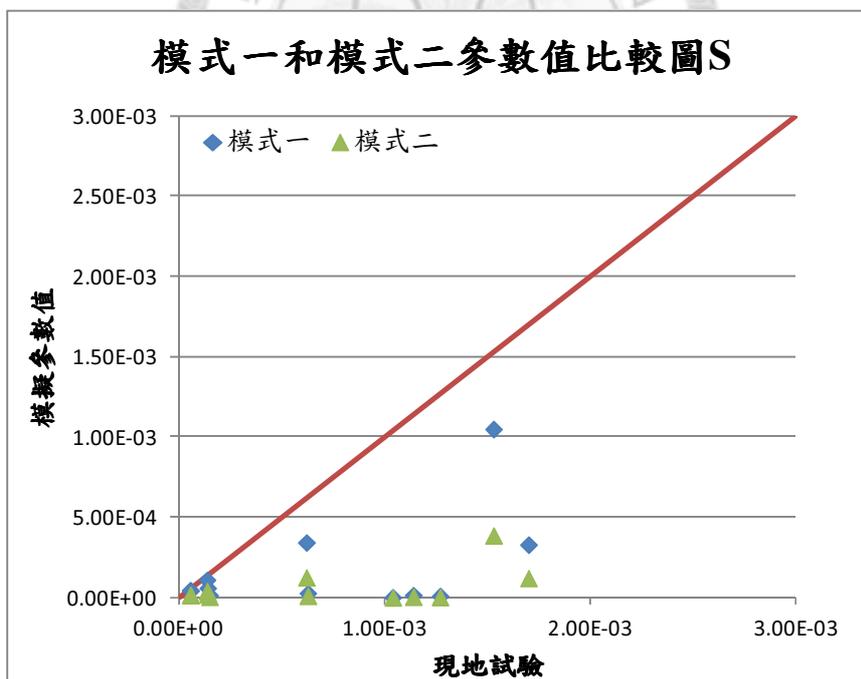
觀測站名	含水層	推估 T	現地試驗 T	推估 S	現地試驗 S
田洋(2)	F2	6.88	106.17	3.44E-04	6.20E-04
海園(2)	F2	1.90	27.78	1.68E-04	3.40E-03
港後(1)	F2	12.69	65.33	4.40E-05	5.70E-05
溪州(2)	F2	3.44	115.46	1.10E-05	1.27E-03
溪州(3)	F2	27.24	178.90	1.05E-03	1.53E-03
合興(2)	F3	7.01	56.06	2.75E-06	1.04E-03
西港(4)	F3	16.45	16.55	4.60E-05	5.51E-05
和豐(2)	F3	34.40	28.67	3.31E-04	1.70E-03
海園(3)	F3	0.33	20.03	1.38E-04	3.40E-03
港後(3)	F3	6.72	28.80	1.60E-05	1.49E-04
溪湖(3)	F3	5.48	91.25	1.60E-05	1.14E-03
線西(4)	F3	27.29	24.13	6.10E-05	1.40E-04
東光(5)	F4	2.36	28.92	1.11E-04	1.37E-04
田洋(3)	F4	12.17	5.78	2.90E-05	6.27E-04

表3.4 模式二水文地質參數推估表

觀測站名	含水層	推估 T	現地試驗 T	推估 S	現地試驗 S
田洋(2)	F2	6.89	106.17	1.26E-04	6.20E-04
海園(2)	F2	1.90	27.78	6.20E-05	3.40E-03
港後(1)	F2	12.70	65.33	1.60E-05	5.70E-05
溪州(2)	F2	3.44	115.46	4.07E-06	1.27E-03
溪州(3)	F2	27.23	178.90	3.87E-04	1.53E-03
合興(2)	F3	7.02	56.06	1.01E-06	1.04E-03
西港(4)	F3	16.46	16.55	1.70E-05	5.51E-05
和豐(2)	F3	34.37	28.67	1.22E-04	1.70E-03
海園(3)	F3	0.33	20.03	5.10E-05	3.40E-03
港後(3)	F3	6.72	28.80	5.89E-06	1.49E-04
溪湖(3)	F3	5.48	91.25	5.79E-06	1.14E-03
線西(4)	F3	27.29	24.13	2.20E-05	1.40E-04
東光(5)	F4	2.36	28.92	4.10E-04	1.37E-04
田洋(3)	F4	12.14	5.78	1.10E-05	6.27E-04



(a) 導水係數比較圖



(b) 儲水係數比較圖

圖3.6 概念模式推估參數比較圖

表3.5 未執行試驗之水文地質參數推估

觀測站名	含水層	模式一(T)	模式二(T)	模式一(S)	模式二(S)
北港(1)	F2	8.25	8.26	2.02E-03	7.43E-04
安和(2)	F2	1.83	1.83	1.50E-03	5.53E-04
安和(3)	F2	7.62	7.59	1.15E-03	4.24E-04
安南(1)	F2	13.38	13.48	1.17E-03	4.29E-04
明德(2)	F2	39.45	39.46	7.73E-04	2.84E-04
明德(3)	F2	23.44	23.46	5.41E-04	1.99E-04
花壇(2)	F2	30.54	30.55	2.04E-04	7.50E-05
虎尾(2)	F2	4.04	4.04	1.20E-05	4.27E-06
虎溪(2)	F2	3.77	3.77	1.65E-04	6.10E-05
員林(1)	F2	5.32	5.32	4.70E-05	1.70E-05
九隆(3)	F3	7.07	7.06	1.80E-05	6.69E-06
大溝(2)	F3	107.9	107.89	3.14E-04	1.16E-04
安南(2)	F3	14.94	14.95	7.80E-05	2.90E-05
東光(4)	F3	8.91	8.91	1.80E-05	6.53E-06
東芳(2)	F3	11.22	11.23	6.80E-06	2.50E-06
國聖(3)	F3	8.65	8.65	2.04E-04	7.50E-05
趙甲(3)	F3	4.54	4.54	6.71E-06	2.46E-06
興化(3)	F3	7.76	7.76	9.90E-05	3.60E-05
宜梧(4)	F4	2.53	2.53	1.60E-05	5.84E-06
花壇(4)	F4	0.20	0.20	3.20E-05	1.20E-05

3.3 敏感度分析

為瞭解抽水距離(r)、抽水量(Q)、導水係數(T)、儲水係數(S)四種參數，對於各參數變動量大小與擬合觀測地下水位均方根誤差所呈現之敏感度大小，利用優選法模擬水位與觀測水位之均方根誤差當作敏感度分析中比較的依據，探討當各參數變動與均方根誤差判識各參數之敏感度，作為瞭解各參數對於每層含水層間的影響程度，以式(3.2)表示，選取觀測井作為各含水層之代表，進行分析並繪製圖探討，其敏感度分析示意圖以橫軸所表示優選所得參數作為與其他變動量比較之依據，縱軸為擬合水位與觀測水位的均方根誤差，因此可以直觀的判斷四種參數之變動量對於均方根誤差大小之關係，以移動同樣的步幅，判斷四種參數之均方根誤差，當誤差越大表示其參數越敏感。

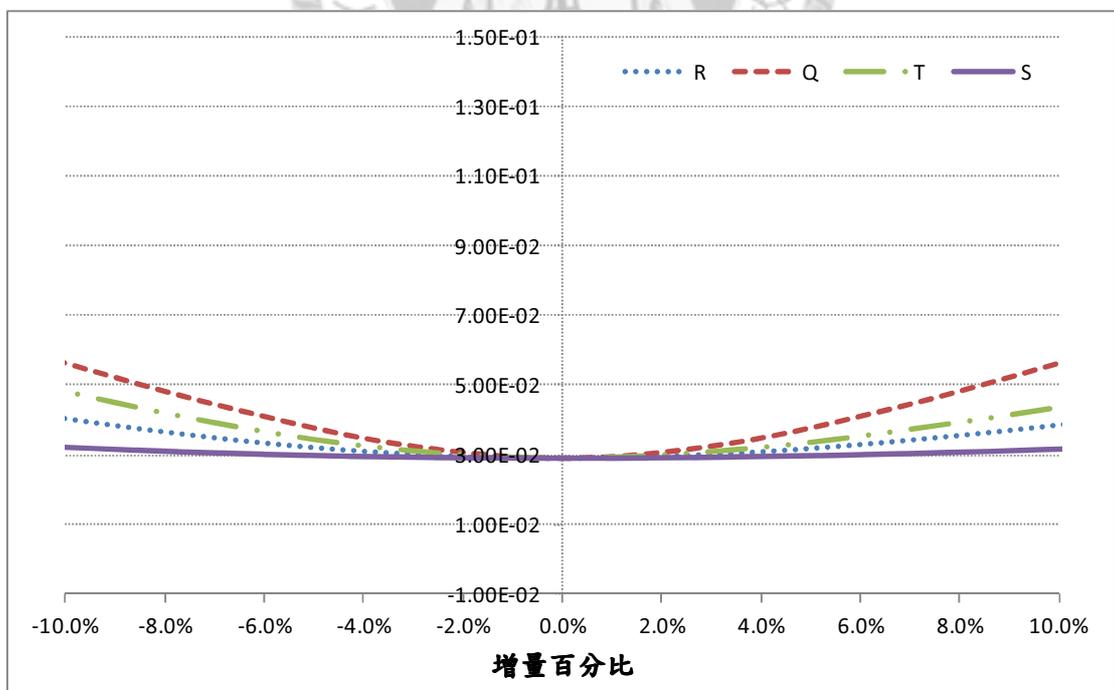
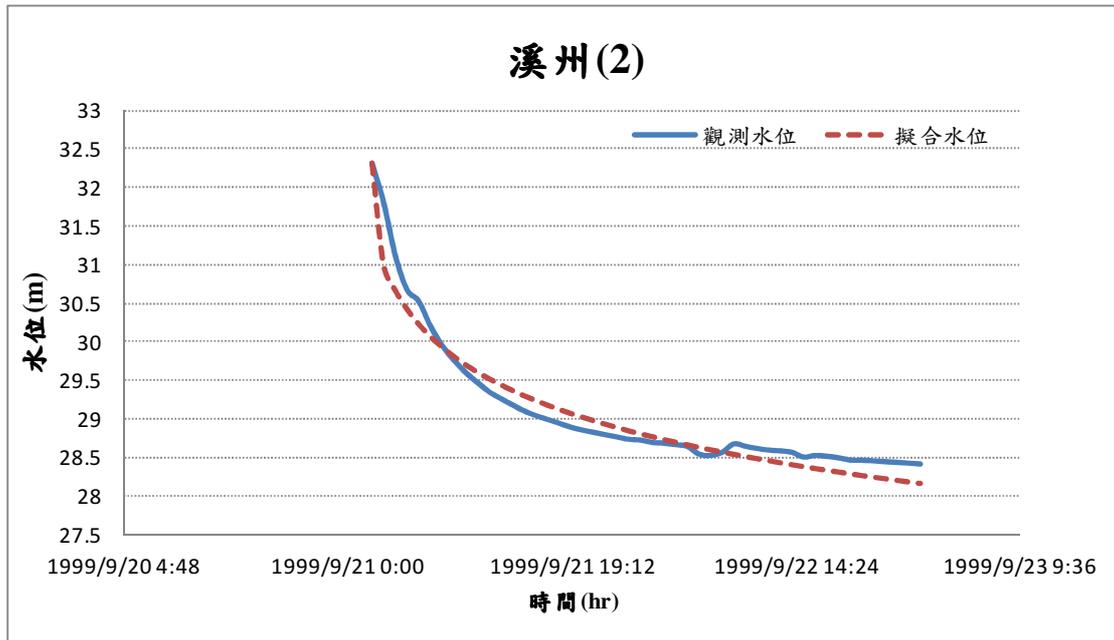
$$\text{敏感度} = \frac{RMSE}{\text{各參數之變動量}} \quad (3.2)$$

在各含水層中選定一代表觀測井作敏感度分析，選定觀測井之依據需有雙井現地試驗之各項參數資料，同時921集集地震引致地下水位之變化如同現地試驗抽水(或注水)所造成水位變化之情況，須符合這兩個條件才可以做為含水層所選定觀測井的代表。

首先針對第二含水層以溪州(2)作為觀測井之代表由圖3.10所表示參數優選後擬合最佳地下水位曲線與觀測水位示意圖，圖3.11表示為第二含水層以溪州(2)作敏感度分析視為第二含水層的代表；第三含水層是以港後(3)為觀測井代表參數優選後擬合最佳地下水位曲線，圖3.12表示港後(3)參數優選後擬合最佳地下水位曲線與觀測水位示意圖，圖3.13則代表第三含水層之代表觀測井-港後(3)以作敏感度分析之各參數影響變化大小表

示圖；第四含水層是以東光(5)為觀測井代表，圖3.14為東光(5)參數優選後擬合最佳地下水位曲線與觀測水位示意圖，圖3.15表示則代表第四含水層之代表觀測井-東光(5)作敏感度分析之各參數影響變化大小表示圖。





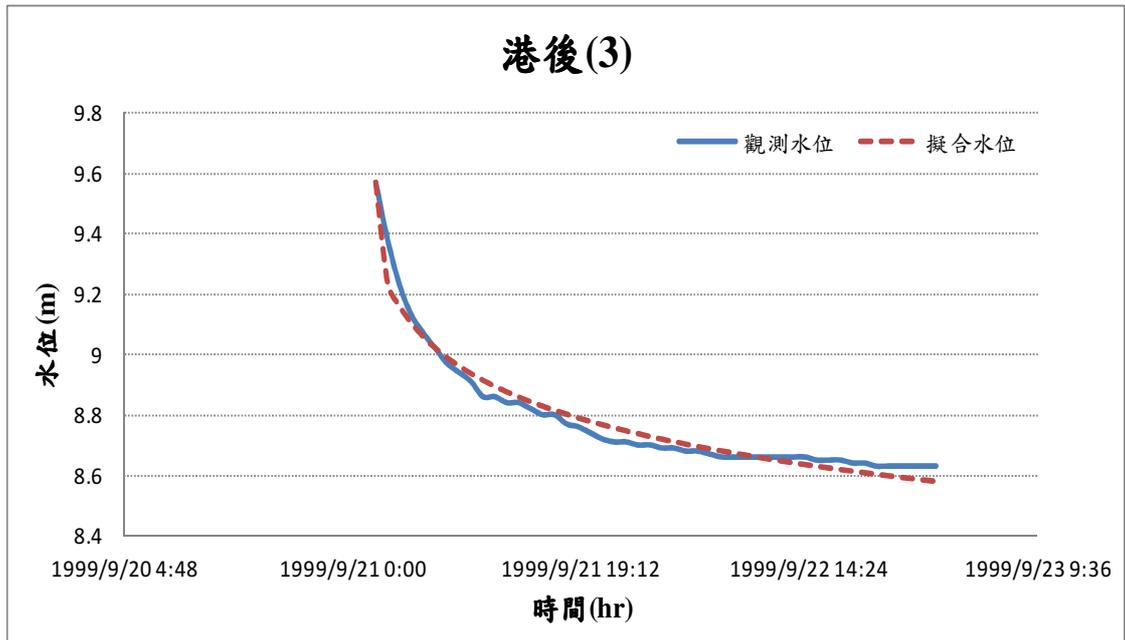


圖3.12 港後(3)地下水位歷線

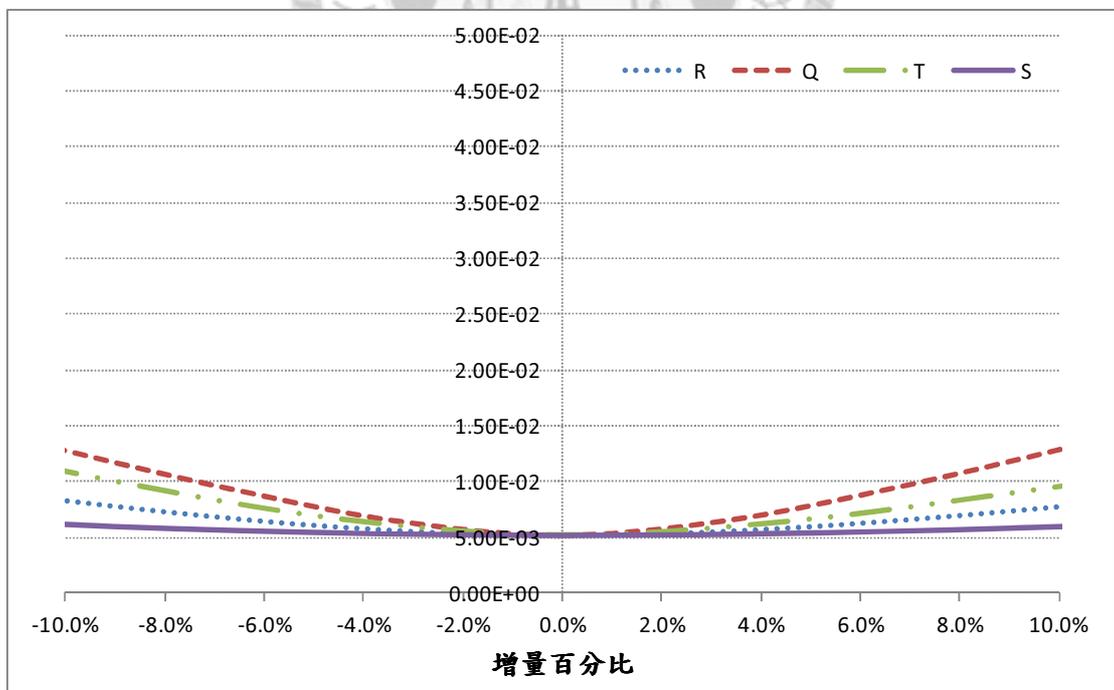


圖3.13 第三層含水層觀測井代表-港後(3)

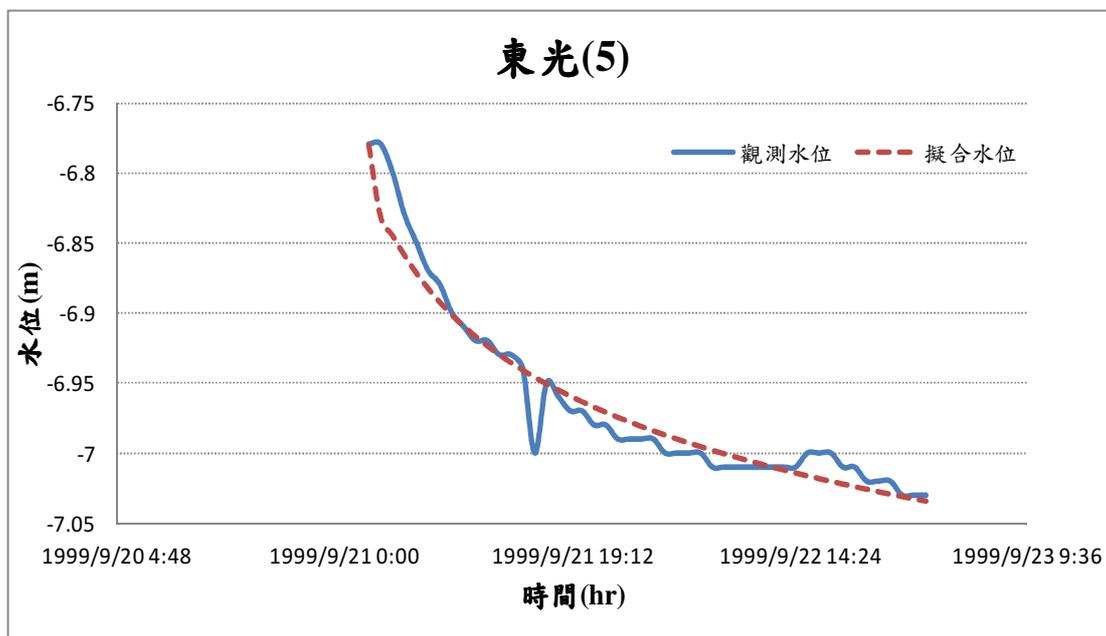


圖3.14 東光(5)地下水位歷線

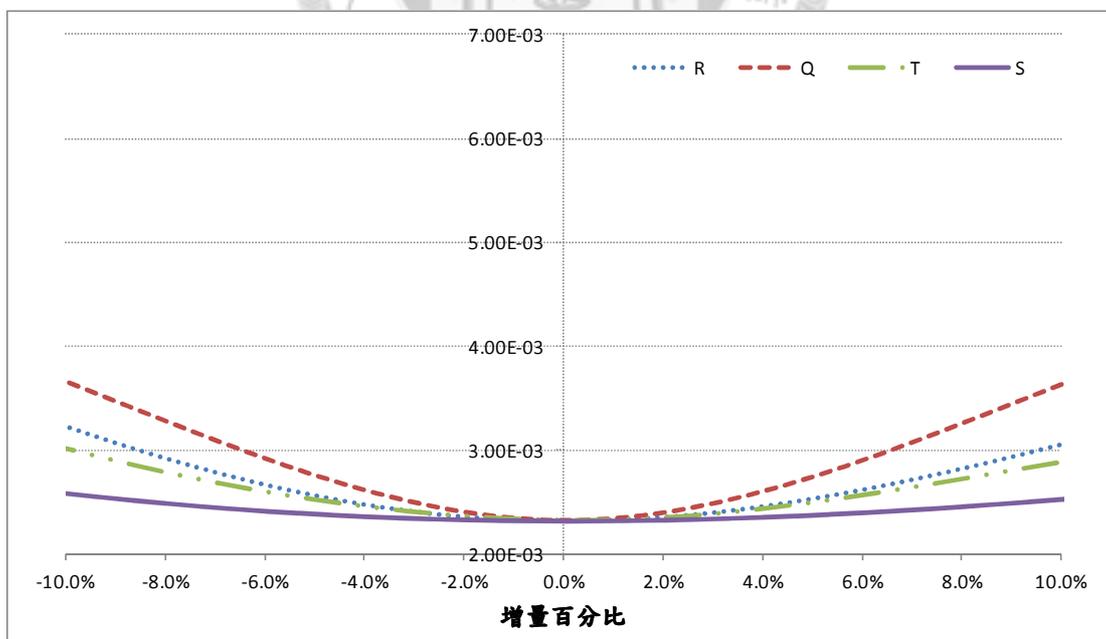


圖3.15 第四含水層觀測井代表-東光(5)

為瞭解各含水層參數間之相關性，從表3.6中可以得知每一含水層之各參數包含抽水距離(r)、抽水量(Q)、導水係數(T)與儲水係數(S)敏感度分析，第二含水層以抽水量(Q)變化影響其他參數最多，其次為導水係數(T)，接下來為抽水距離(r)，最後為儲水係數(S)；則第三含水層之敏感度分析與第二含水層敏感度分析結果一樣，而第四含水層同樣以抽水量(Q)之敏感度最高，其次為抽水距離(r)，導水係數(T)，最後才是儲水係數(S)，其中四層含水層之間共同點對於抽水量(Q)之敏感度分析結果中為最敏感之參數，因此抽水量合理之給定極為重要。

表3.6 敏感度分析各參數之比較

含水層	敏感度(大→小)
第二層	$Q>T>r>S$
第三層	$Q>T>r>S$
第四層	$Q>r>T>S$

從上述探討之結論以抽水量的敏感度對於各含水層敏感度最高的，再從3.2.1節利用概念模式所設定的抽水量，發現推估之水文地質參數與現地試驗參數相比有低估之情形發生，造成此一現象之可能原因為，研究中利用現地水井清查資料做為抽水量之設定值，由於抽水量資訊有限，使得研究結果與現地抽水試驗之水文地質參數相比仍有所差異，但推估所得之各含水層導水係數與儲水係數之平均值皆在合理範圍內，故本研究所建立之概念模式尚屬合理。

第四章 結論與建議

4.1 結論

本研究蒐集集集地震後水位歷線資料，經現象觀察發現地震後水位變化與抽水試驗造成水位洩降曲線相似，因此將地下水位變化類比為自然界執行全域均勻抽水試驗，建立此概念想法，接著對於概念模式之建立分為兩種解釋說法，第一種等間距均勻抽水，第二種為空間均勻抽水，並對於這兩種概念模式進行推導與驗證，該方法之可行性，最後對於有執行雙井試驗之觀測井，推估水文地質參數與現地抽水試驗之參數比較，並針對未試驗之觀測井利用概念模式推估導水係數與儲水係數，繪製成圖並將其解釋，增加觀測井之參數，各含水層水文地質特性整體變化趨勢說明。茲將本研究結論條列如下。

- 一、本研究將地震發生後造成地下水位變化類比為自然界執行全域均勻抽水，解釋記錄水位的變化與抽水試驗水位洩降形式相似，因此建立概念模式。
- 二、本研究以兩種概念模式解釋水位變化情形，第一種概念模式為等間距均勻抽水，在影響範圍內每口抽水井之抽水量皆相同，當井群視為單井抽水時，抽水距離以 $0.36788R=515.03$ 公尺表示；第二種概念模式為空間均勻抽水，假設單位面積抽水量相同情形下，距離觀測井越遠抽水量越大，反之，抽水距離越近抽水量則越小，當井群視為單井抽水時，抽水距離以 $0.6065R=849.10$ 公尺表示。
- 三、兩概念模式之抽水量與抽水距離設定，以不同的概念想法呈現，合理推導過程使抽水量與抽水距離具有物理意義，因此在推求的水文地質參數具有參考之價值，而非粗估地質所辨識給定之參數值。

- 四、本研究結果顯示數值合理，且對於未試驗觀測井之水文地質初步評估，其導水係數與儲水係數皆在合理範圍內，利用具物理意義之分析方法，相較前人研究震後水位過度簡化描述，本研究推估之參數值，更為合理。
- 五、本研究所建立之方法優勢，對於只需要選擇地震後造成地下水位變化曲線與抽水試驗之水位洩降曲線相似之觀測井，便可推算導水係數與儲水係數，不僅可以對於各含水層整體水流通能力與儲蓄涵養水源趨勢分析，還可以更加瞭解水資源分布概況與含水層水文地質特性，此方便性比執行抽水試驗快速，同時可作為地下水資源管理之參考依據。

4.2 建議

本研究依上述結論提出未來研究方向之建議：

- 一、本研究對於概念模式所推估之導水係數，與抽水試驗之導水係數相比有部分出入，建議在現地資料蒐集過程時，除考量現地調查之抽水量外，同時應該掌握各含水層之雨水、河川補注量、土壤特性等現地資料，推算更為符合現地情況之水文地質參數。
- 二、從敏感度分析得知，抽水量為各含水層參數中敏感度最高者，因此抽水量資料選取變得很重要，不僅會影響推估之導水係數與儲水係數，對於後續分析也會造成問題，建議提高現場抽水資訊掌握的程度。
- 三、本研究建立之概念模式利用九二一地震進行地下水位推估水文地質參數，建議可對其他地震後水位推估觀測井之參數，探討不同的地震造成含水層特性變異情形。

參考文獻

1. Cooper, H.H., and C.E. Jacob, 1946. A generalized graphical method for evaluation formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American Geophysical Union, v. 27, pp. 243-256.
2. Fetter, C.W., 1994. Applied Hydrogeology (4th Ed.). Prentice Hall, New Jersey.
3. Hemker, Kick, and Vincent Post, 2009. MLU for Windows: well flow modeling in multilayer aquifer systems. MLU User's guide.
4. Roeloffs, E.A., 1996. Poiseuille techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena. Adv. Geophys. 37, pp. 135-195.
5. Lee, M., T.K. Liu, K.F. Ma and Y.M. Chang, 2002. Coseismic hydrological changes with dislocation of the September 21, 1999 chi-chi earthquake, Taiwan. Geophysical Research Letters, 29(17):10.1029/2002GL015116.
6. Theis, C. V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage, Trans. Amer. Geophysical Union, v. 16, pp. 519-524.
7. 水利局，地下水觀測網之建立及運作管理八十一年度報告，濁水溪沖積扇地下水觀測井開鑿及相關試驗，1993a。

8. 水利局，地下水觀測網之建立及運作管理八十二年度報告，濁水溪沖積扇地下水觀測井開鑿及相關試驗，1993b。
9. 水利局，地下水觀測網之建立及運作管理八十三年度報告，濁水溪沖積扇地下水觀測井開鑿及相關試驗，1994。
10. 水利處，地下水觀測網之建立及運作管理八十六年度報告，濁水溪沖積扇地質水文分析及抽水試驗，1997a。
11. 水利處，地下水觀測網之建立及運作管理八十六年度報告，濁水溪沖積扇地下水觀測井建置及相關試驗，1997b。
12. 水利處，濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用，第一階段濁水溪沖積扇地下水可開發潛能評估報告，1997c。
13. 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。
14. 中央地調所，濁水溪沖積扇主要地下水層之水力參數評估，2000。
15. 林圃如，利用單井抽水試驗求取儲水係數之數值模擬方法及其影響因素，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，2001。
16. 李光敦，水文學，2005。
17. 陳有慶，集集地震對濁水溪沖積扇水文地質特性之影響，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2005。