

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

考量預壓密之地下水管理模式之建立與應用

The Development and Application of Groundwater Management
Model Considering Preconsolidation



研究生：黃全謐

指導教授：楊錦釗 博士

張胤隆 博士

中華民國九十八年六月

考量預壓密之地下水管理模式之建立與應用

The Development and Application of Groundwater Management
Model Considering Preconsolidation

研究生：黃全謚
指導教授：楊錦釗
張胤隆

Student : Chuan-Yi Huang
Advisor : Jinn-Chuang Yang
Yin-Lung Chang

國立交通大學
土木工程研究所



A Thesis Submitted to Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Civil Engineering
June 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

考量預壓密之地下水管理模式之建立與應用

學生：黃全謚

指導教授：楊錦釗 博士

張胤隆 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘 要

地下水超抽將直接導致地層下陷災害之發生，然一般地下水管理模式常僅以水頭洩降為考量因子以推求最佳抽水量，而少數研究雖有考慮地層下陷之影響並納入地下水管理模式之限制式中，但亦未定量分析土層因預壓密狀態之不同而對地下水管理造成之影響。

本研究首先依據土壤預壓密之概念，結合可同時考量彈性(elastic)與非彈性(inelastic)壓密行為之一維土體壓密方程式以及響應矩陣法，建立以最大抽水量為目標，以地層下陷量為限制條件並可考慮土壤預壓密影響之地下水管理模式。此外本研究進一步藉由導入二進位變數之技巧，將原屬於nonsmooth規劃問題之管理模式轉換為混合整數線性規劃(MILP)之型態，以增加管理模式求解之效率。

待模式建立後，本研究首先利用測試案例說明所建立模式之正確性，再利用虛擬之應用案例分析土壤預壓密對地下水管理之影響。應用結果顯示若地下水管理模式僅間接以預壓密水頭做為限制條件以控制地層下陷，則優選之最佳抽水量僅能避免土層發生非彈性壓密，仍可能會有高估抽水量之情形進而發生預期外之地層下陷災害；另外若直接以地層下陷量做為限制條件但忽略土壤預壓密之狀態，則所優選之最佳抽水量將可能有過於低估之情形，且當初始地下水位與預壓密水頭之差值越大時，最佳抽水量低估之情形將越顯著。

於模式測試後，本研究亦將所發展之管理模式應用於台灣西部之

濁水溪沖積扇地區，並依據現行政策、地層下陷概況與高鐵路線分布等擬定不同之地下水管理方案，以推求不同方案下濁水溪沖積扇之最大可抽水量。應用結果顯示，本研究所設定之任何方案皆無法使最大可抽水量滿足濁水溪沖積扇地區現行之地下水需求量，由此顯示濁水溪沖積扇目前仍面臨地下水超抽之問題，而濁水溪沖積扇案例之分析成果亦顯示本研究所發展模式於實務應用之價值。

關鍵詞：地下水管理、地層下陷、預壓密、最佳化



The Development and Application of Groundwater Management Model Considering Preconsolidation

Student : Chuan-Yi Huang

Advisor: : Dr. Jinn-Chuang Yang

Dr. Yin-Lung Chang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Groundwater overpumping will cause the serious hazards of land subsidence. Although the groundwater management models have been widely applied to obtain optimal pumping strategies, only a few studies explicitly incorporated the land subsidence into model's constraints. However, the presence of preconsolidation and its influence on groundwater management had not been considered yet.

In this study, to quantify the relationship between land subsidence and drawdown, the one dimensional consolidation equation is adopted which accounts for the elastic and inelastic soil consolidation simultaneously according to the preconsolidation head and drawdown. From the simulation-optimization approach, based on the response matrix technique along with one dimensional consolidation equation, a groundwater quantity management model is developed which enables the determination of maximum total pumpage subject that the land subsidence do not exceed the allowable value. The nature of developed management model belongs to non-smooth optimization problem. In order to improve the efficiency of solution technique, the non-smooth optimization is transferred into mixed-integer linear programming (MILP) by introducing the binary variables.

Hypothetical examples are utilized to demonstrate the influence of preconsolidation on groundwater management after the developed

management model is verified. The results indicate that the land subsidence should be explicitly incorporated into model's constraints, otherwise the optimal total pumpage might be over-estimated. Moreover, if the presence of preconsolidation is ignored, the optimal total pumpage might be under-estimated, especially when the differences in heads between initial and preconsolidation become significantly.

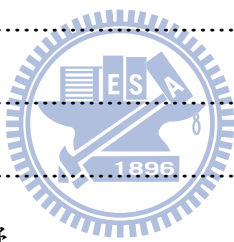
The proposed management model being verified is applied to Choshui alluvial fan located in mid-west Taiwan which is facing serious land subsidence hazard due to groundwater over-pumping. Several management scenarios have been considered based on the policy, groundwater demand, locations of high speed rails, and profile of land subsidence. The application results show that the maximum total pumpage to all management scenarios considered could not achieve the annual groundwater demands while reducing the land subsidence simultaneously, which indicate that the Chuoshui River alluvial fan is still facing serious problem for groundwater overpumping.

Keywords: Groundwater Management 、 Land Subsidence 、 Preconsolidation 、 Optimization

目錄

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目錄.....	V
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
符號表.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究方法與步驟.....	5
1.4 章節介紹.....	6
第二章 理論基礎與模式建置.....	7
2.1 地層下陷數值模式簡介.....	7
2.2 地下水管理模式架構.....	13
2.2.1 模式建立.....	13
2.2.2 求解方法.....	17
2.3 小結.....	20
第三章 模式測試與虛擬案例模擬.....	21
3.1 模式測試與敏感度分析.....	21
3.1.1 模式測試.....	21
3.1.2 預壓密水頭敏感度分析.....	23
3.2 虛擬案例.....	24
3.2.1 虛擬案例一：多層地下水系統.....	24

3.2.2 虛擬案例二：單井設計最大抽水能力	26
第四章 濁水溪沖積扇地下水管理策略研擬與模式應用	28
4.1 濁水溪沖積扇區域概述.....	28
4.1.1 地理位置暨水文狀況.....	28
4.1.2 地質概況與地質分層.....	28
4.1.3 地下水使用與地層下陷概況.....	29
4.1.4 地下水管制區.....	30
4.1.5 嚴重地層下陷區.....	34
4.2 地層下陷數值模式設定與資料處理	35
4.2.1 邊界與網格設定.....	35
4.2.2 地質條件.....	36
4.2.3 抽水井設定.....	36
4.3 管理模式應用.....	37
4.3.1 模式設定.....	37
4.3.2 管理方案研擬.....	39
4.3.3 應用結果與討論.....	40
第五章 結論與建議	43
5.1 結論.....	43
5.2 建議.....	45
參考文獻.....	47



表目錄

表 3.1. 管理模式測試案例設定.....	51
表 3.2. 測試案例試誤過程計算表.....	51
表 3.3. 虛擬案例一模式設定.....	52
表 3.4. 虛擬案例一計算結果.....	53
表 3.5. 虛擬案例二模式設定(單井設計最大抽水能力).....	54
表 4.1 彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表.....	55
表 4.2 彰化雲林地區各鄉鎮市年入滲表.....	56
表 4.3 濁水溪沖積扇地質參數表.....	57
表 4.4 濁水溪沖積扇分層抽水比例表.....	58
表 4.5 濁水溪沖積扇模式設定表.....	59



圖目錄

圖 1.1.	試誤法演算概念圖.....	60
圖 1.2.	數值模式結合最佳化模式演算概念圖.....	60
圖 1.3.	本研究管理模式建置流程圖.....	61
圖 2.1	土壤有效應力與孔隙率關係圖.....	61
圖 2.2	一維土體壓密方程式計算示意圖.....	62
圖 2.3	阻水層水壓沿深度方向隨時間變化圖.....	63
圖 3.1	管理模式驗證流程示意圖.....	63
圖 3.2	測試案例地下水系統圖.....	64
圖 3.3	驗證案例井 A 第二管理期抽水量試誤過程圖.....	65
圖 3.4	驗證案例最佳抽水量時地層下陷量模擬圖.....	66
圖 3.5	濁水溪沖積扇之初始預壓密水頭組體圖.....	67
圖 3.6	預壓密水頭對最佳抽水量之影響.....	67
圖 3.7	虛擬案例一多層地下水系統水平分區示意圖.....	68
圖 3.8	虛擬案例一多層地下水系統垂直分層與地質參數分布圖.....	68
圖 3.9	虛擬案例二水平分區示意圖.....	69
圖 3.10	單井最大能力與最大可抽水量關係圖.....	69
圖 4.1	濁水溪沖積扇區域圖.....	70
圖 4.2	濁水溪沖積扇地下水管制區與嚴重地層下陷區分布圖.....	71
圖 4.3	濁水溪沖積扇數值模擬邊界示意圖.....	72
圖 4.4	濁水溪沖積扇地層下陷模擬水平分區網格示意圖.....	73
圖 4.5	濁水溪沖積扇地質垂直分層示意圖.....	74
圖 4.6	濁水溪沖積扇各鑽探點位置圖.....	75
圖 4.7	濁水溪沖積扇(扇頂)土壤 C_s/C_c 隨深度變化圖.....	76
圖 4.8	濁水溪沖積扇(扇央)土壤 C_s/C_c 隨深度變化圖.....	76

圖 4.9 濁水溪沖積扇(扇尾)土壤 Cs/Cc 隨深度變化圖	77
圖 4.10 濁水溪沖積扇各鑽探站 Cs/Cc 變異係數分布圖	77
圖 4.11 地下水觀測井網分布圖	78
圖 4.12 濁水溪沖積扇現況地下水位與預壓密水頭差值分布圖	79
圖 4.13 方案(a)最大可抽水量與控制點地層下陷最大允許值關係圖	80
圖 4.14 方案(b)最大可抽水量與其他區抽水量上限關係圖	80

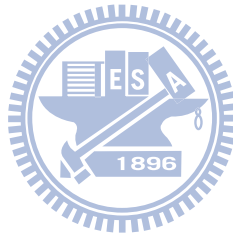


符號表

B	: 土層厚度；
C_C	: 土壤壓縮指數(Compression Index)；
C_S	: 土壤回漲指數(Swelling Index)；
E	: Young's Modules；
G	: 土壤進行初次壓密時，水頭洩降與預壓密水頭之差；
g	: 重力加速度；
i	: 管理期指標；
j	: 抽水井指標；
K	: 水力傳導係數；
k	: 控制點指標；
L	: 地下水系統總分層數；
l	: 土層分層指標；
m	: 二進位變數，其值僅為 0 或 1；
NC	: 總控制點數；
NP	: 總抽水井數；
NT	: 總管理期數；
n	: 孔隙率；
P	: 孔隙水壓變動量；
Δh^P	: 預壓密水頭與初始水頭差值；
Q	: 抽水量；
Q^D	: 地下水需求量；
Q^*	: 抽水井最大抽水能力(Maximal Pumping Capacity)；
S	: 源流項；
\bar{S}	: 深度平均抽水量；



S_S	: 比儲水係數;
t^*	: 無因次時間;
UP	: 極大之正數;
\vec{U}_s	: 土體位移量;
U_{sx}	: 土體在 x 方向之位移量;
U_{sy}	: 土體在 y 方向之位移量;
U_{sz}	: 土體在 z 方向之位移量;
Δh	: 水頭洩降量;
$\overline{\Delta h}$: 深度平均之水頭洩降量;
Δs	: 地層下陷量;
Δs^*	: 地層下陷量最大允許值;
α	: C_s 與 C_c 之比值;
β	: 單位響應係數;
ε	: 應變張量;
γ	: 流體壓縮係數;
λ	: 拉梅常數;
μ	: 拉梅常數;
ν	: Poisson Modules;
τ	: 應力張量;



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣位處亞熱地帶幅員不廣且地勢陡峭，逢颱洪季節時水流湍急，河川流量隨降雨而迅速漲落，除春季時因流量小幾乎全部引用外，常年約80%藉由逕流入海，致使台灣面臨水資源如何有效利用之難題。

水資源之開發近年來受環保意識高漲影響，興建水庫於經濟上及實務上均較不可行，而攔河堰之構築亦可能影響河川生態系統之平衡，在工商及經濟持續發展而可利用水資源有限之情形下，地下水之開發不免成為重要之水資源來源，然而地下水若過度開採則可能引發地層下陷之危害。根據經濟部統計資料，台灣地下水年超抽量達33億噸，造成約1,170平方公里之土地發生地層下陷，其中尤以彰化與雲林地區最為嚴重，年下陷量高達11公分。地層下陷對環境會造成許多負面之影響，例如土壤壓密降低地下水系統之儲水容量、地表高程降低造成局部地區洪患之發生，而沿海地區更可能因此發生海水入侵而產生地下水鹽化之現象，進而破壞可利用之水資源，其所造成之影響非常深遠且難以恢復，因此如何在避免地層下陷危害以及滿足水資源需求間進行合理且適當之地下水管理，實為當前國家重要之研究課題。

為了達到合理運用地下水資源，兼且避免或降低相關災害發生之目標，地下水管理模式(groundwater management model)廣泛的被應用於各種研究中。地下水管理模式之精神在研訂一或多個目標函數(object function)，運用適當之搜尋技巧尋找符合所有限制條件下之最佳目標函數值，以水量管理而言最佳函數可為最大可抽水量(maximal total pumpage)。儘管地下水管理模式之相關研究不勝枚舉，然絕大多數地下水管理模式皆僅考慮含水層中之水頭洩降量為限制條件來推

求最大可抽水量，並未將地層下陷的影響納入地下水管理模式中加以考量，如此可能導致抽水量被高估之現象，使得決策者在利用地下水管理模式進行地下水資源之調配管理時，發生預期外之地層下陷災害。此外不同含水層因其預壓密(preconsolidation)狀態之不同，亦可能因抽水而產生彈性(elastic)與非彈性(inelastic)等兩種不同之壓密行為，如此亦將對地下水管理造成困擾。

綜上所述，本研究之主要目的在建立一以地層下陷量為限制條件，並且同時可考量預壓密影響之地下水量管理模式，以作為合理運用地下水資源兼且達到防杜地層下陷危害發生的決策工具

1.2 文獻回顧

管理模式主要由目標函數、決策變量、以及限制條件三個部分組成，其運算是在滿足限制條件下，反覆改變系統中的決策變量，使系統的目標達到最佳化(即由限制條件所組成之可行解(feasible solution)區域內，尋求最佳之目標函數值)，因此因應不同之管理目的、建立方法以及模式架構，管理模式可展現多樣之變化。

一般而言，試誤法(trial-and-error)為求解地下水管理模式最簡單之方法。試誤法之應用流程如圖1.1所示，首先擬定好(或以亂數選取)數個不同之管理策略，再利用數值模式模擬地下水系統在不同策略下之反應，以評估何種策略既可符合管理者設定之限制條件(例如水頭洩降量或地下水需求量)，又可達到最佳之目標函數值。Onta and Gupta (1995)以三維地下水流(MODFLOW)與垂向一維土體壓密方程式耦合之觀念，配合試誤法建立以地層下陷為主要考量因子之地下水管理模式，其在抽水量管理上則依據公用水井、私用水井、水資源需求量與季節變化等條件，研擬了5個不同之管理策略，模擬在不同策略下，1990年至2010年間地層下陷量之變化，以評估泰國中部平原合宜之地

下水抽取策略。試誤法之優點在於觀念直接簡單，僅需要一套可模擬地下水系統變化之公式或數值模式，而缺點則為試誤的過程相當繁瑣及耗費時間，尤其當決策變數眾多時更為明顯，且求得之最佳策略並無法保證其接近全域(global)或局部(local)最佳解。

為了克服上述試誤法在搜尋最佳策略上之缺點，以地下水流模擬結合最佳化模式(simulation-optimization)來建立地下水管理模式之觀點被廣泛的應用在水資源管理問題上，其應用流程如圖1.2所示。一般而言，以此觀點建構地下水管理模式之方法可概分為嵌入法(embedding method) (Aguado and Remson, 1974, 1980 ; Alley et al. ,1976))以及響應矩陣法(response matrix method) (Gorelick, 1983)兩大類，其差別僅在於圖1.2中，兩者以不同方式將管理策略表示為最佳化模式。以管理目的為地下水量而言，嵌入法係將地下水流控制方程式(ground water flow equation)以數值方法離散化後，直接將離散方程式做為最佳化模式中之限制式，水頭與抽水量之關係以差分式表示，因此限制式所組成之矩陣可視為具有模擬地下水流功能之數值模式，接著再以線性規劃或非線性規劃等(linear and nonlinear programming)演算法來搜尋最佳目標函數值，故以嵌入法建立之地下水管理模式不僅具有直觀之物理意義，且理論上可適用於各種水量或水質之管理問題。然嵌入法處理動態的問題時，管理區域內之每一數值格網點於每一時刻之狀態變數，不管其是否為管理者所感興趣之點(即控制點，control point)，皆必須納入限制式中考量，因此當模擬區域過大，造成限制式組成之矩陣異常龐大時，將產生計算耗時甚至蒐尋過程無法收斂之現象。為了避免矩陣過於龐大之問題，Alley et al. (1976)利用嵌入法建立地下水非穩定流的管理模式中，提出以時間拆解的概念，分別循序求解每一時刻之最佳化模式，但其亦指出以此方法求得之最

佳解僅能代表該時刻，而無法計算全時之最佳操作策略。

以simulation-optimization建構地下水管理模式之另一種方法為響應矩陣法。根據陳愛光等(1991)研究顯示嵌入法和響應矩陣法的計算結果基本式一致的，其數值的差異是由於計算誤差所引起的，然而響應矩陣法相較於嵌入法不同之處在於求解時，管理者僅需針對所感興趣之點，先以數值模式求出單位響應係數(unit response coefficients)，即管理區域內某一控制點因某一口井抽取一單位地下水造成之水頭洩降量，再根據疊加法(superposition)與線性系統理論(linear system theory)來建構抽水量與水頭洩降量之線性關係式，以作為最佳化模式之限制式矩陣即響應矩陣，該矩陣為反應地下水系統本身特徵的一系列係數所組成，其意義在表示地下水系統中水位與抽水量(或補注量)間的關係式。由於響應矩陣法引用線性疊加概念，僅需要先行計算控制點之單位響應係數，最佳化模式中僅包含控制點之限制條件，因此其限制式所組成之矩陣較小，較適合應用於大區域且動態之優選問題。利用響應矩陣法求解地下水管理問題者，國外方面如Maddock and、Haines and Dreizin et al. (1977)、Reichard et al. (1987)、Peralta et al. (1987, 1990)、Larson et al. (2001)，在國內方面，李振誥(2000)針對濁水溪沖積扇進行多層含水層之地下水調配管理之研究、劉志文(2000)針對屏東平原進行地下水資源調配及管理最佳化分析。

無論是嵌入法或是響應矩陣法，此數值模擬結合最佳化模式之觀念，不僅克服了試誤法最佳解求得不易之缺點，且已廣泛地應用於地下水管理模式之建置與發展上，相關研究可參考Gorelick (1983)所做之完整回顧，然在眾多之研究中，僅極少數有將地層下陷之影響納入考量。Larson et al. (2001)利用響應矩陣法建立以最大可抽水量為目標函數，地下水位為限制條件之地下水管理模式，並應用於美國加州聖

喬昆谷(The San Joaquin Valley)。不同於以往之研究，其在地下水位之限制條件中加入了地層下陷之考量，即限制水頭在地下水抽取過程中，不可低於預壓密水頭(preconsolidation head)，以避免土體發生非彈性壓密之現象。然Larson et al. (2001)僅將地層下陷之影響以定性之方式間接納入水位之限制條件中考量，並非真正地以定量之方式將地層下陷量作為狀態變數納入管理模式中考量。Chang et al. (2007)以地下水量管理為目的，利用響應矩陣法結合一維土體壓密方程式，建立以地層下陷量為限制條件之地下水管理模式，然其研究中忽略預壓密行為之影響，亦即假設土層因抽水而產生之下陷屬於非彈性壓密，並未考慮當地下水水位高於預壓密水頭時可能產生之土層過壓密(over consolidation)或回漲之現象。

1.3 研究方法與步驟

如前節所提及，多數之地下水管理模式並未完整或直接地考慮地層下陷之影響，即使如Onta and Gupta (1995)、Larson (2001)以及Chang et al. (2007)等之研究，但前者採用試誤法，並未能有效率的尋得最佳解，且求得之最佳策略並無法保證其接近全域(global)或局部(local)最佳解。Larson (2001)在模式計算前先行評估可能造成地層下陷的水頭洩降量，其管理模式還是以水頭作為限制條件，並未真正定量地將地層下陷量也納入模式中，Chang et al. (2007)則僅考慮土體於非彈性壓密現象所造成之影響。

因應前段之敘述，本研究不同於Chang et al. (2007)所發展之模式，在管理模式中將考量土壤因預壓密行為產生之彈性與非彈性壓密，研究中以蔡東霖(2001)所發展之「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」，作為計算地下水位與地層下陷變化之工具，並進一步將土壤受預壓密行為之影響納入數值模式以及管理模式中，而後再配合響應矩陣法之

線性關係完成管理模式之建立，於管理模式建立後首先進行測試及應用案例來說明模式之合理性，最後再將所發展管理模式應用於濁水溪沖積扇，以展示其在地下水管理之實用價值。研究流程如圖1.3所示，其模式相關之理論及推導過程詳述於第二章。

1.4 章節介紹

本論文共分五章，其內容架構簡述如下：

第一章為緒論，說明本研究之主要目的，同時針對過往地下水管理模式相關之研究做一回顧，以說明本研究之重要性以及所採用之方法。

第二章為理論基礎與模式建置，詳細說明本研究模式建置所採用之方法、假設與流程。

第三章為管理模式之測試及考量預壓密水頭對最佳抽水量之影響評估與虛擬案例模擬，首先利用試誤法配合地下水數值模式測試模式之合理性以及程式撰寫之正確性，接著探討考量預壓密水頭對最佳抽水量之影響評估，而虛擬案例部分則將探討地下水量管理問題中，土壤彈性與非彈性壓密行為必須同時考慮之必要性。

第四章為濁水溪沖積扇地下水管理策略研擬與模式應用，首先介紹濁水溪沖積扇之現況及其地層下陷問題之嚴重性，依據政策、地理條件及水資源需求等，研擬管理方案，最後則透過LINGO(商業套裝軟體)求解本研究所建立之模式，探討在不同方案規劃下，濁水溪沖積扇最佳抽水策略之可行性。

第五章為結論與建議，除了對本研究之研究過程與成果做綜合性之說明外，並對未來可加以改進之方向提出建議。

第二章 理論基礎與模式建置

2.1 地層下陷數值模式簡介

管理模式之建立其首要工作為必須具備一套可靠且有效率之數值模式。本研究將採用蔡東霖(2001)所發展之「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」，作為計算地下水位與地層下陷變化之工具。本節將針對該模式之理論架構、建立方法以及適用條件等作一簡介。

地下水之抽取會造成土體孔隙水壓(pore water pressure)下降，而在土體總應力不變之情況下，其有效應力(effective stress)將會增加，進而導致土體發生壓密之現象。考慮飽和且等向(isotropic)均值(homogeneous)之含水層，若忽略浮體重力之效應並假設土體為彈性體(elastic body)，則孔隙水壓變化與土體位移量之關係可以式(2.1)至(2.4)之三維耦合控制方程式表示。

$$K\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right) = \rho_w g \left(\frac{\partial^2 U_{sx}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sy}}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z \partial t} + n\gamma \frac{\partial P}{\partial t}\right) \quad (2.1)$$

$$\mu \nabla^2 U_{sx} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \bar{U}_s) = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$\mu \nabla^2 U_{sy} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial y} (\nabla \cdot \bar{U}_s) = \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2.3)$$

$$\mu \nabla^2 U_{sz} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla \cdot \bar{U}_s) = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.4)$$

式中 K 為水力傳導係數(LT^{-1})； P 為孔隙水壓變動量量($ML^{-1}T^{-2}$)； ρ_w 為水之密度(ML^{-3})； g 為重力加速度(LT^{-2})； \bar{U}_s 為土體位移向量(L)； U_{sx} 、 U_{sy} 及 U_{sz} 分別為土體在 x 、 y 和 z 方向之位移量(L)； n 為土壤孔隙率； t 為時間(T)； μ 與 λ 為拉梅常數(Lame constants, $ML^{-1}T^{-2}$)以及 γ 為流體壓縮係數($ML^{-1}T^{-2}$)。

式(2.1)至(2.4)之三維耦合方程式雖可同時計算土體孔隙水壓以及垂直與水平方向之位移量，但對於模擬大區域且為動態(transient state)之問題仍可能有使用上之困難度。在土體垂向位移量遠大於水平位移量之假設下，蔡東霖(2001)利用量階分析(order of magnitude)之技巧，推導出當孔隙水壓垂直方向與水平方向之梯度變化差異極大時(即地下水流近似為水平流或垂直流)，式(2.1)至(2.4)之三維耦合控制方程式可簡化為非耦合之地下水流方程式與垂向一維土體壓密方程式，亦即可先單獨計算地下水流之變化，再據以推估垂向之地層下陷量。以下將分別說明地下水流與垂向地層下陷量之計算方法。

2.1.1 擬三維地下水流計算

考慮一多層之地下水系統，假設土壤為飽和且土體體積之變化與孔隙水壓呈正比關係，則三維地下水流方程式可以下式表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Delta h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Delta h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \Delta h}{\partial z} \right) - S_s \frac{\partial \Delta h}{\partial t} - S(x, y, z) \quad (2.5)$$

式中 Δh 為水頭洩降量(初始水頭與模擬時刻水頭之差值)，正值代表地下水位降低(L)； S_s 為比儲水係數(L⁻¹)； S 則為流源項。對任一層之含水層，將式(2.5)沿深度進行垂向積分可得：

$$\int_b \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Delta h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Delta h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \Delta h}{\partial z} \right) \right] dz = \int_b \left[-S_s \frac{\partial \Delta h}{\partial t} - S \right] dz \quad (2.6)$$

式中 b 為含水層之上下邊界。利用萊布尼茲法則(Leibnitz rule)與連鎖律(chain rule)，並進一步假設土體參數在垂直向為常數，則式(2.6)可變為：

$$\begin{aligned}
& KB \frac{\partial^2 \bar{\Delta h}}{\partial x^2} + KB \frac{\partial^2 \bar{\Delta h}}{\partial y^2} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (KB) \right] \frac{\partial \bar{\Delta h}}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial y} (KB) \right] \frac{\partial \bar{\Delta h}}{\partial y} \\
& = -S_s B \frac{\partial \bar{\Delta h}}{\partial t} + K \left(\frac{\partial \bar{\Delta h}}{\partial z} \Big|_b \right) - \bar{S}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

式中 B 為含水層厚度； $\bar{\Delta h}$ 和 \bar{S} 分別為水頭洩降量與流源項之深度平均值(depth-averaged)。蔡東霖(2001)利用有限解析法(finite analytic, FA)求解式(2.7)之控制方程式，另外在層與層間垂直內部邊界條件之處理上，蔡東霖(2001)假設孔隙水壓在垂直方向為 z 之二次多項式函數，不僅滿足層與層間孔隙水壓與水流通量連續之邊界條件，更可自動計算水流為水平流或垂直流，達到分層三維水流模擬之功能。

2.1.2 垂向一維地層下陷量計算

假設土體為彈性體，則其應力與應變可以如下式之正比關係表示：

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \tag{2.8}$$



其中 τ 與 ε 分別代表應力與應變之張量； C 為常數。Reismann and Pawlik (1980)指出，當土體具有等向性時， C 則為拉梅常數 $\mu = E/2(1+\nu)$ 以及 $\lambda = \nu E/[(1-2\nu)(1+\nu)]$ 之函數，其中 E 與 ν 分別為Young's and Poisson modules，而 μ 與 λ 分別代表土體受剪應力(shear Stress)以及正向應力(normal Stress)作用而產生之變形率。Bear and Verruijt (1987)在進一步假設土體之位移僅為垂向一維後，提出土體之位移量與孔隙水壓變化 Δp 可以下式表示：

$$\frac{\partial U_{sz}}{\partial z} = \frac{\Delta P}{2\mu + \lambda} \tag{2.9}$$

將式(2.9)沿土層深度方向積分，並忽略土體因孔隙水壓增加而產生之回漲(rebound)現象，則一維土體壓密方程式可以下式表示：

$$\Delta s(l, k, t) = \frac{\rho_w g B(l, k) [\Delta h(l, k, t) - \Delta h(l, k, t-1)]}{2\mu(l, k) + \lambda(l, k)} \quad \text{if } \Delta h(l, k, t) > \Delta h(l, k, t-1) \quad (2.10)$$

$$= 0 \quad \text{if } \Delta h(l, k, t) \leq \Delta h(l, k, t-1)$$

式中 $\Delta s(l, k, t)$ 代表 k 點第 l 層於 $t-1$ 至 t 時刻內之地層下陷量(L)。

綜整2.1.1節與本小節所述，蔡東霖(2001)所發展之「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」首先利用有限解析法求解式(2.7)，待計算出各格網點於每一層及每一時刻之水頭洩降量後，再以式(2.10)推估其所造成之地層下陷量，完成擬似三維地下水流模擬以及一維地層下陷量計算之非耦合數值模式。然由式(2.10)可知，蔡東霖(2001)因未考慮預壓密水頭之狀況並假設土體不因孔隙水壓增加而產生回漲現象，因此較適用於地下水層屬於初次壓密(非彈性壓密)之階段，且無法模擬地下水位反覆升降時之土層變化。有鑑於此，本研究將參考 Jorgensen (1980) 以及 Leake (1990)，對式(2.10)進行修改，以使其能考慮因預壓密水頭之不同，土體分別在初次壓密(virgin compaction)與過壓密(over consolidated)狀態下所造成之地層下陷量(或回漲)。

依據 Jorgensen (1980)，土壤因有效應力改變而產生之孔隙率變化可以圖2.1表示，圖中之粗黑實線代表土壤有效應力由A增加至C，再由C遞減至D之過程。當土壤孔隙水壓降低致使有效應力由A增加至B時，由於降低後之孔隙水壓尚未低於預壓密水頭，因此土壤尚處於過壓密之階段，亦即孔隙率沿著斜率較緩之AB線段變化；然而當孔隙水壓持續下降且低於預壓密水頭時，土壤將進入初次壓密階段，在此階段下土壤因增加一單位有效應力而減少之孔隙率將遠大於過壓密階段，因此有效應力與孔隙率之關係可以圖中斜率較陡之BC線段表示，且預壓密水頭亦隨著有效應力之增加而遞減，其值則可利用「孔隙水壓 = 總應力 - 有效應力」之關係式加以推求。當有效應力增加至C後，若此時孔隙水壓復又增加，有效應力將隨之降低，則孔隙率

將沿著CD線段遞增，亦即土體發生回漲之現象。圖2.1中BC線段之斜率可定義為壓縮指數 C_c (compression index)，而CD線段之斜率則可定義為回漲指數 C_s (swelling index)，若橫坐標為對數有效應力($\log\sigma$)，則 C_c 與 C_s 之意義分別為當對數有效應力增加或減少一單位時，所導致之孔隙率降低或增加量，而Jorgensen (1980)亦指出，線段AB (過壓密階段)之斜率近似於 C_s 。

綜上所述，吾人可歸納土壤因預壓密水頭之狀態而可區分為兩種不同之壓密行為：(1)當水頭減少但不低於預壓密水頭時，土壤發生過壓密且孔隙率緩慢減少，而若水頭回復到初始狀態，則土壤產生回漲現象，且孔隙率亦會回復到初始之狀態，因此亦稱為彈性壓密；(2)當水頭減少且低於預壓密水頭時，土壤將發生初次壓密且孔隙率將快速減少，然即使水頭復又增加時，孔隙率亦無法回復到初始狀態，因此亦稱為非彈性壓密。

Leake (1990)指出，土壤有效應力與孔隙率間應具有非線性之關係，亦即 C_c 與 C_s 應為有效應力之函數，若假設 C_c 與 C_s 為常數(constant)且有效應力與孔隙率間具有線性之關係，則孔隙率之減少量將有過度估計(over-estimated)之情況發生，且過度估計之孔隙率減少量約為有效應力增加比例之50%，例如當有效應力增加10%時，孔隙率之減少量將過度估計5%；然Leake (1990)亦指出，當土壤有效應力之變化量遠小於總應力時，可合理地假設 C_c 與 C_s 為常數且有效應力與孔隙率間具有線性之關係。綜上所述，若考慮 C_c 與 C_s 為有效應力之函數，除將增加實際案例模擬時參數給定之困難度外，亦將使本研究後續擬建立之管理模式存在非線性之目標函數或限制式，因此本研究依據Leake (1990)之研究，採用較保守之觀點，亦即假設 C_c 與 C_s 為常數且有效應力與孔隙率間具有線性之關係，並進一步假設含水層因地下水抽取所

導致之下陷量遠小於含水層厚度，則依據圖2.1與式(2.10)，吾人可進一步推導可同時考慮土壤非彈性與彈性壓密行為之一維土體壓密方程組如下所列：

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta h(l,k,t) \geq \Delta h_p(l,k,t-1) \Rightarrow \\ \Delta s(l,k,t) = C_s \times [\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h(l,k,t-1)] + \\ C_c \times [\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1)] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta h(l,k,t) < \Delta h_p(l,k,t-1) \Rightarrow \\ \Delta s(l,k,t) = C_s \times [\Delta h(l,k,t) - \Delta h(l,k,t-1)] \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\Delta h_p(l,k,t) = \text{Max}[\Delta h(l,k,t), \Delta h_p(l,k,t-1)] \quad (2.13)$$

其中 $\Delta h_p(l,k,t-1)$ 與 $\Delta h_p(l,k,t)$ 分別代表 k 點第 l 層之初始水頭與 $t-1$ 以及 t 時刻末預壓密水頭之差值，正值代表預壓密水頭低於初始水頭； C_c 與 C_s 則可依據式(2.10)表示為：

$$C_c = \frac{\rho_w g B(l,k)}{2\mu(l,k) + \lambda(l,k)} \quad (2.14)$$

$$C_s = \alpha \times C_c = \alpha \times \frac{\rho_w g B(l,k)}{2\mu(l,k) + \lambda(l,k)} \quad (2.15)$$

其中 α 為 C_s 與 C_c 之比值。

依據預壓密水頭之定義，吾人可知 $\Delta h(l,k,t-1) \leq \Delta h_p(l,k,t-1)$ ，若 $\Delta h(l,k,t) \geq \Delta h_p(l,k,t-1)$ ，則 $\Delta h(l,k,t)$ 必 $\geq \Delta h(l,k,t-1)$ ，因此式(2.11)之目的在計算當 $\Delta h(l,k,t) \geq \Delta h_p(l,k,t-1)$ 時，含水層可能因過壓密或正常壓密所產生之地層下陷量，其示意如圖2.2所示；式(2.12)之目的係計算含水層在彈性壓密狀態下可能產生之下陷量或回漲量；而式(2.13)之目的即在更新 t 時刻之預壓密水頭狀態，以供 $t+1$ 時刻中數值模式判斷含水層係屬於彈性或非彈性壓密之依據。

2.2 地下水管理模式架構

2.2.1 模式建立

對於複雜系統之規劃或操作而言，由於變數(或子系統)眾多且彼此互相影響，因此工程上常會將問題以最佳化模式之形態表示，用以分析最佳系統成效(performance)與系統變數間之關係。一般而言，最佳化模式可以如下之通式表示：

$$\text{Optimize} \quad f(\mathbf{x}) \quad (2.16)$$

$$\text{Subject to} \quad g_j(\mathbf{x}) \leq b_j ; \forall j \quad (2.17)$$

$$\mathbf{a}_L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{a}_U \quad (2.18)$$

其中 \mathbf{x} 為決策變數組成之向量； $f(\bullet)$ 為目標函數； $g(\bullet)$ 為狀態函數； b 為常數，代表狀態變數之限制值；而 \mathbf{a}_L 與 \mathbf{a}_U 則分別代表決策變數上下邊界所組成之向量。式(2.17)與式(2.18)所形成之區域稱為 \mathbf{x} 之可行解(feasible solution)，因此最佳化模式之意義即為在可行解區域內，尋找能使目標函數為最佳之決策變數。

在地下水量管理問題中，若以最大地下水資源開採為目標，並且同時考量地層下陷之影響，則管理模式可以如下之最佳化模式表示：

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j=1}^{NP} \sum_{t=1}^{NT} Q(j,t) \quad (2.19)$$

$$\text{Subject to} \quad \Delta s(k) = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{NT} \Delta s(l,k,t) \leq \Delta s^*(k) \quad (2.20)$$

$$0 \leq Q(j,t) \leq Q^*(j,t) \quad \forall t ; \forall j \quad (2.21)$$

其中 j 為第 j 口抽水井； NP 為總抽水井數； t 為第 t 個管理期； NT 為總管理期數； k 為模擬區域內第 k 個控制點； NC 為總控制點數； l 為第 l 個地層； L 為地層總分層數； $\Delta s(l,k,t)$ 代表 $t-1$ 至 t 個管理期內控制點 k 第 l 層之

實際地層下陷量； $\Delta s(k)$ 與 $\Delta s^*(k)$ 分別為總管理期末控制點 k 之實際與允許地層下陷量； $Q(j,t)$ 與 $Q^*(j,t)$ 分別為第 j 口井於第 t 管理期之抽水量及抽水井抽水能力(pumping capacity)。式(2.19)至式(2.21)所組成之最佳化模式中，各抽水井之抽水量 $Q(j,t)$ 為決策變數，而地層下陷量則為狀態變數，其意義為在各控制點於總管理期末之地層下陷量皆不超過最大允許值之情況下，尋找各抽水井抽水量於時空上之分布，以使管理期末管理區域內之總抽水量為最大。

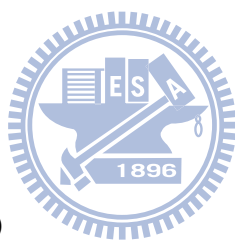
式(2.19)至(2.21)之管理模式係以地下水資源利用最大化為目標，另外若以最小化環境衝擊為目標，則地下水量管理問題亦可採行最小化地層下陷量之概念，據此本研究將其最佳化模式表示為：

$$\text{Minimize } \text{Max}[\Delta s(k)] \quad (2.22)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^{NP} Q(j,t) \geq Q_t^D \quad t=1 \dots NT \quad (2.23)$$

$$0 \leq Q(j,t) \leq Q^*(j,t) \quad \forall t; \forall j \quad (2.21)$$



其中 $\Delta s(k)$ 為由 k 個控制點之地層下陷量所組成之向量； Q_t^D 為第 t 個管理期時之地下水需求量。式(2.22)之目標函數為MiniMax之優選問題，屬於多目標規劃之一種型式，式(2.21)至(2.23)所組成之管理模式其意義為在滿足地下水需求量之限制條件下，找尋最佳之抽水分布(即各井抽水量)，以盡可能地使具最高地層下陷潛勢控制點之地層下陷量為最小。依據式(2.22)，若令 $Z = \text{Max}[\Delta s(k)]$ ，則式(2.21)至(2.23)所組成之管理模式可進一步轉換為：

$$\text{Minimize } Z \quad (2.24)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^{NP} Q(j,t) \geq Q_t^D \quad \forall t \quad (2.23)$$

$$0 \leq Q(j,t) \leq Q^*(j,t) \quad \forall t ; \forall j \quad (2.21)$$

$$Z \geq \Delta s(k) \quad \forall k \quad (2.25)$$

式(2.19)至(2.21)以及式(2.21)至(2.25)為本研究依據不同考量目標所分別提出之概念性地下水管理模式，若欲進一步加以求解，則必須建立抽水量與水頭洩降量以及地層下陷量間之關係。本研究首先將利用響應矩陣法推導抽水量與水頭洩降量之關係式，接著再依據2.1.2節之一維土體壓密方程式，建立抽水量與地層下陷量之關係式。

考慮多層之地下水系統，假設含水層與阻水層中之地下水流分別為水平流及垂直流(Anderson and Woessner, 1992)，且在非侷限含水層中，因抽水而導致之水位洩降遠小於飽和含水層厚度，則根據響應矩陣法之理論，各層之水頭洩降量 $\Delta h(l,k,t)$ 與抽水量 $Q(j,t)$ 間之關係可以如下之線性方程式表示：

$$\Delta h(l,k,t) = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t \beta(l,k,j,t-i+1) Q(j,i) \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.26)$$

其中， $\beta(l,k,j,t-i+1)$ 代表單位響應係數，其意義為於 t 管理期末，第 k 個控制點之第 l 層，因為抽水井 j 於 i 管理期內抽一單位水所造成之水頭洩降量。本研究中推求單位響應係數之方法為(1)令第 j 口井於第1個管理期之抽水量為1 CMS，其餘抽水井之抽水量為0；(2)利用「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」計算第1至第 NT 個管理期末第 k 個控制點第 l 層之水頭洩降量，則此 NT 個水頭洩降量即為第 k 個控制點第 l 層對抽水井 j 之單位響應係數 $\beta(l,k,j,t-i+1)$ ； $t=1, \dots, NT$ ；(3)重複步驟(1)與(2)求出每一抽水井對每一控制點每一層於各管理期之單位響應係數。由式(2.26)吾人可進一步推導第 $t-1$ 與第 t 個管理期末之水頭差為：

$$\Delta h(l,k,j,t) - \Delta h(l,k,j,t-1) = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t [\beta(l,k,j,t-i+1) - \beta(l,k,j,t-i)] Q(j,i) \quad (2.27)$$

依據式(2.11)至(2.15)之一維土體壓密方程組，第 k 個控制點第 l 層於第 t 個管理期內之地層下陷量可改寫為如下之型式：

$$G(l,k,t) = \begin{cases} \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) & \text{if } \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) \leq 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\Delta s(l,k,t) = C_s [\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h(l,k,t-1)] + (C_c - C_s) G(l,k,t) \quad (2.29)$$

$$\Delta h_p(l,k,t) = G(l,k,t) + \Delta h_p(l,k,t-1) \quad (2.30)$$

上列方程組中，式(2.28)之目的在判斷第 t 個管理期時含水層之壓密行為(彈性或非彈性)，式(2.29)與(2.30)則依據式(2.28)之判斷結果，分別計算第 t 個管理期內之地層下陷量(或回漲量)以及進行第 t 個管理期末預壓密水頭之更新。

藉由式(2.26)至(2.30)所推導抽水量與水頭洩降量以及地層下陷量之關係式，茲將本研究所發展可適用於多層地下水系統、考慮土壤預壓密特性並以地層下陷量為限制條件之地下水量管理模式，依據目標函數之不同分別整理如下：

(1) 以最大地下水資源開採為目標

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j=1}^{NP} \sum_{t=1}^{NT} Q(j,t) \quad (2.19)$$

$$\text{Subject to} \quad \Delta s_k = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{NT} \frac{\rho_w g B_{l,k}}{2\mu_{l,k} + \lambda_{l,k}} \times \left\{ \alpha_{l,k} [\Delta h_{l,k,t} - \Delta h_{l,k,t-1}] + [1 - \alpha_{l,k}] G_{l,k,t} \right\} \leq \Delta s_k^* \quad (2.31)$$

$$0 \leq Q(j,t) \leq Q^*(j,t) \quad \forall t ; \forall j \quad (2.21)$$

(2)以最小地層下陷量為目標

$$\text{Minimize } Z \quad (2.24)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^{NP} Q(j,t) \geq Q_i^D \quad \forall t \quad (2.23)$$

$$0 \leq Q(j,t) \leq Q^*(j,t) \quad \forall t ; \forall j \quad (2.21)$$

$$Z \geq \Delta s(k) = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{NT} \frac{\rho_w g B_{l,k}}{2\mu_{l,k} + \lambda_{l,k}} \times \{ \alpha_{l,k} [\Delta h_{l,k,t} - \Delta h_{l,k,t-1}] + [1 - \alpha_{l,k}] G_{l,k,t} \} \quad (2.32)$$

2.2.2 求解方法

依據本研究於前小節所發展之地下水量管理模式，由於 G 為在原點不可微分之函數，導致式(2.31)與(2.32)亦為局部不可微分之限制條件，因此所發展之管理模式成為不連續之最佳化問題(non-smooth optimization)。儘管已有很多種解non-smooth optimization之演算法發展出來，然Uryas'ev (1991)以及Yang (2001)皆指出，non-smooth optimization之計算相當費時，且其演算法具有不易收斂以及無法評估最佳解是否為局部或全域最佳值之缺點。有鑑於此，本研究將藉由導入二進位變數並增加限制式之技巧，將原本non-smooth optimization之問題轉變為混合整數線性規劃(mixed integer linear programming, MILP)之型態，其新增之限制式可表示如下：

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.33)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - UP \times m(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.34)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - G(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.35)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - G(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.36)$$

$$G(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.37)$$

$$G(l,k,t) \geq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.38)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.39)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.40)$$

$$\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h_p(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.41)$$

$$\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h_p(l,k,t) - UP \times [1 - m(l,k,t)] \geq -UP \quad \forall l ; \forall k ; \forall t \quad (2.42)$$

其中 UP 為足夠大之正數； $m(l,k,t)$ 為第 t 管理期中， k 點第 l 層之二進位變數，其值僅為0或1。茲依據式(2.28)分別就以下二種情況加以探討：

(1) $\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) \geq 0$ ：由式(2.34)可知 $m(l,k,t)$ 必為1，而當 $m(l,k,t)$ 等於1時，由式(2.36)以及式(2.36)可推論 $G(l,k,t)$ 必等於 $\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1)$ ，符合式(2.28)之設定；另外在 $m(l,k,t)$ 等於1之情況下，藉由式(2.39)與(2.40)可歸納出 t 時刻末預壓密水頭與初始水頭之差值 $\Delta h_p(l,k,t)$ 將更新為 $\Delta h(l,k,t)$ ，亦符合式(2.30)之設定。

(2) $\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) < 0$ ：由式(2.33)可知 $m(l,k,t)$ 必為0，而當 $m(l,k,t)$ 等於0時，由式(2.37)以及式(2.38)可推論 $G(l,k,t)$ 必等於0，符合式(2.28)之設定；另外在 $m(l,k,t)$ 等於0之情況下，藉由式(2.41)與(2.42)可歸納出 t 時刻末預壓密水頭與初始水頭之差值 $\Delta h_p(l,k,t)$ 仍將維持為 $\Delta h_p(l,k,t-1)$ ，亦符合式(2.30)之設定。

由上述兩種情況之討論可知，轉換後之MILP問題與轉換前之non-smooth optimization具有完全相同之意義。本研究採用Branch and Bound (B&B Method)方法用以求解此MILP問題，由於該方法在每一演算分支將MILP轉換為線性規劃，因此較易獲得全域最佳解。B&B方法之詳細理論與步驟可參考Hillier and Lieberman (1974)以及Sierksma (1996)。

透過以上MILP轉換後，再將優選模式之線性規畫數學式利用Lingo(商業套裝軟體)進行線性規劃求解，求取滿足目標式以及限制條件之最佳抽水量。

2.2.3 模式限制

依據本研究管理模式建立過程所採用之方法或假設，茲簡述模式於實際應用時之限制或需注意條件如下所列：

1. 管理模式中係採用非耦合之方法計算地層下陷量，亦即先計算擬似三維之地下水流變化，再據以推估垂向一維之地層下陷量，因此管理模式較適合應用於地下水流近似於水平流或垂直流之地下水系統。
2. 本研究利用響應矩陣法推估因抽水所造成之水頭洩降量，若管理區域內包含有非侷限含水層，則在非侷限含水層中抽水量與地下水位變化間將不具備線性之關係，然依據Maddock (1974)，當地下水位洩降遠小於飽和含水層厚度時，響應矩陣法仍有其適用性。
3. 由於阻水層水力傳導係數較低以及貯蓄效應之影響，阻水層內孔隙水壓消散之速率相當緩慢，根據Terzaghi (1925)，阻水層因受相鄰含水層水壓改變而產生水壓沿深度方向隨時間之變化可以圖2.3表示，Bredehoeft and Pinder (1970)提出當無因次化時間 $t^* = Kt/S_s B^2$ 大於0.5時，阻水層貯蓄效應之影響可加以忽略(即圖2.3中水壓分布曲線趨近於直線)，因此當應用式(2.26)計算阻水層內之水頭洩降變化時，必須注意所給定之管理期距 Δt 必須大於 $0.5 S_s B^2 / K$ ，以使孔隙水壓之消散達到平衡狀態，避免發生地層下陷量低估之狀況。而若因管理策略上之需求而無法滿足 $\Delta t > 0.5 S_s B^2 / K$ 之條件時，可將阻水層以虛擬分層之概念將其水平切割為數個子阻水層，以使管理期距滿足達到平衡狀態所需時間之要求。

2.3 小結

藉由本章所建立之地下水管理模式，吾人可藉此評估區域性地下水使用策略，以下整理模式使用所需之設定條件及執行步驟：

1. 模擬網格點建立及地形地文資料之設定，包含邊界條件、地層厚度、水文地質參數(K , μ , λ , and α)、地層預壓密狀態、抽水量與入滲量等。
2. 選定管理區域內之控制點，並利用「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」建立響應矩陣。
3. 依據管理區域特性擬定管理策略。
4. 依據管理策略給定管理模式之限制條件。
5. 利用線性規劃軟體Lingo將以上之管理模式建立數學模型以進行求解。

由於地下水管理問題之多樣性，管理模式亦可因應需求而有多樣之變化，例如式(2.23)即可依據管理區域內各子分區需水程度或重要性之不同，而加以變化為限制同一管理期內各子分區之各別地下水需求量；或是當考慮成本效益時，目標函數可變換為最小化抽水操作成本。然無論變化為何，皆可利用本章所介紹管理模式之架構與建立方法，將決策者因應各別需求而擬訂之管理模式擴充為可定量考量地層下陷影響以及土壤彈性與非彈性壓密行為之管理模式，以期能在獲得最佳管理策略時兼且達到防杜或減緩地層下陷發生之效益。

第三章 模式測試與虛擬案例模擬

本章將針對本研究所發展之地下水量管理模式進行測試與案例模擬。在測試部分主要為模式建立程序之檢查(examination)，包含採用方法(響應矩陣法與一維土體壓密方程式結合二進位變數)之合理性以及程式撰寫之正確性，並利用敏感度分析探討不同預壓密水頭對最佳抽水量之影響；而在案例模擬部分，首先將藉由虛擬案例說明考慮土壤預壓密狀態對地下水管理之重要性，接著再展示模式於地下水管理之功能。

3.1 模式測試與敏感度分析

3.1.1 模式測試

管理模試驗證過程如圖3.1所示，可大致分為三個步驟：(1)首先根據測試案例之設定，利用所發展之管理模式求取最大可抽水量與各抽水井抽水量在時空上之分布；(2)接著利用試誤法配合「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」，逐步調整各抽水井之抽水量，直到求出符合限制條件下之最大可抽水量；(3)待上述兩步驟完成後，比較兩步驟所求出之最大可抽水量以及各抽水井之抽水量是否相同，藉以測試管理模式之正確性。

考慮如圖3.2所示之等向均質，全區由砂土構成之侷限含水層管理區域，區域面積為 $20 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ ，厚度 B 為80公尺，水力傳導係數 K 為 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ ，土體拉梅常數 $\mu=5.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 以及 $\lambda=1.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。另外在土壤之預壓密特性方面，本案例假設含水層之預壓密水頭低於初始水頭15 m，亦即初始狀態時含水層屬於彈性壓密階段；而砂土 C_s 與 C_c 之比值則參考單信瑜(1997)針對彰化縣境內取樣砂土所進行之室內壓密試驗結果，設定為0.1。管理區域之東西邊界條件為定水頭，

而南北兩邊則為零流量邊界(no flux)，將管理區域分成 11×9 個網格點，點與點之間距為2 km，在管理區域正中心點(6,5)處設置一完全貫穿抽水井A。今總管理期間為12個月，並分為兩個管理期，每個管理期距為六個月，欲求總管理期間內之最大可抽水量，且各格網點之總地層下陷量(第一與第二管理期下陷量之和)不得超過3公分，此管理問題之相關設定如表3.1所示。

藉由管理模式之計算，其結果顯示在不超出地層下陷之限制條件下，抽水井A於二個管理期之抽水量分別為 $Q(A,1) = 2.24 \text{ cms}$ 與 $Q(A,2) = 2.17 \text{ cms}$ ，最大可抽水量為4.41 cms，而最大地層下陷量發生於抽水井A處，二個管理期內之下陷量分別為3 cm與0 cm，總下陷量則為3.0 cm。

接著利用地層下陷數值模式配合試誤法以證明管理模式計算結果之正確性，由案例設定可知，試誤過程必須藉由調整抽水井A於二管理期之抽水量 $Q(A,1)$ 與 $Q(A,2)$ ，使其達到最大可抽水量兼且符合地層下陷量之限制。首先固定抽水井A第一個管理期之抽水量 $Q(A,1)$ 為 $1.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，再由小到大調整井A於第二個管理期之抽水量 $Q(A,2)$ ，直到任一格網點之總地層下陷量超過最大允許值3.0公分，其試誤結果如圖3.3(a)所示。待完成此步驟後，變更 $Q(A,1)$ 為 $2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，再由小到大調整 $Q(A,2)$ 直到任一格網點之總地層下陷量超過最大允許值3.0公分，其試誤結果如圖3.3(b)所示。如此逐步增加 $1.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 於 $Q(A,1)$ ，並重複由小到大調整 $Q(A,2)$ 之步驟，可發現隨著 $Q(A,1)$ 之增加，在符合地層下陷限制之情形下最大可抽水量亦隨之增加，唯當 $Q(A,1)$ 增加到 $3.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 時，管理模式已無法求得可行解，故吾人可歸納在限制條件範圍內， $Q(A,1)$ 必界於 $2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 至 $3.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 間。

接著重複前段之試誤過程，即固定 $Q(A,1)$ 並由小到大調整 $Q(A,2)$ ，

直到任一格網點之總地層下陷量超過最大允許值3.0公分，唯 $Q(A,1)$ 逐步增加之幅度由 $1.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 降低為 $0.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，並由 $2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 開始，如此試誤可知 $Q(A,1)$ 將界於 $2.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 至 $2.3 \text{ m}^3/\text{sec}$ 間。重複以上步驟並將 $Q(A,1)$ 逐步增加幅度改為 $0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，最後可得到在符合地層下陷量限制條件下，當 $Q(A,1)$ 與 $Q(A,2)$ 分別為 $2.24 \text{ m}^3/\text{sec}$ 及 $2.17 \text{ m}^3/\text{sec}$ 時，可使總抽水量達到最大，其值為4.41 cms，圖3.4所示為在此抽水量下，利用數值模式所模擬之各格網點地層下陷量，由圖可知最大地層下陷量發生於井A處，其值等於案例所設定之允許值3.0公分。

表3.2所列為前述試誤過程之結果摘要，藉由以上分析可知，管理模式以及試誤法配合地層下陷數值模式兩者所求得之最大可抽水量皆相等，可加以驗證本研究所發展管理模式之正確性。

3.1.2 預壓密水頭敏感度分析

本小節將採用與3.1.1節相同之案例設定，藉由敏感度分析探討不同預壓密水頭對地下水最佳抽水量之影響。依據濁水溪沖積扇於地下水觀測網中有較詳細記錄之74口水井資料，圖3.5顯示預壓密水頭可合理假設為對數常態分佈(log-normal)，本研究將依據圖3.5利用Latin Hypercube Sampling (LHS)對預壓密水頭取樣100組數值，再利用此100組預壓密水頭配合所發展之管理模式計算相對應之最佳抽水量，以評估其對預壓密水頭變化之敏感度。

在未考量預壓密之情形下，亦即假設地層屬於初次壓密階段，則管理模式計算之最佳抽水量為1.18 億立方公尺/年；另外若考慮預壓密之影響，則依據100組預壓密水頭所分別計算之最佳抽水量分布將如圖3.6所示，平均之最佳抽水量則為1.36 億立方公尺/年。觀察圖3.6可知以本案例而言，相對於未考量預壓密之情形，納入預壓密水頭考量後所推求之最佳抽水量平均可增加約14.98 %，且隨者預壓密水頭

與初始水頭之差越大，最佳抽水量增加之比率也越大，亦即未考量預壓密影響所推求之最佳抽水量將愈趨於保守。此外，預壓密與初始水頭差以及最佳抽水量間約呈線性之正比關係，然增加比例則可能因不同管理區域條件(如抽水井分布與土壤壓密係數等)而有所不同。

3.2 虛擬案例

3.2.1 虛擬案例一：多層地下水系統

本應用案例將探討僅以預壓密水頭為限制條件(Larson et al., 2001)、以地層下陷量為限制條件但忽略彈性壓密影響(Chang et al., 2007)以及以地層下陷量為限制條件且考慮預壓密特性(本研究)等三種地下水管理模式於優選結果之差異性。

考慮一有五口井之多層地下水系統，其地質分布情形由上而下共分三層，分別為第一侷限含水層、阻水層以及第二侷限含水層。此外在水平方向由左至右依地質參數之不同將其分成三個子區域(區域I、區域II與區域III)，五口井之分層抽水比例由上而下依序為 0.5、0.0 與0.5，該地下水系統之水平分區、垂直分區與地質參數條件設定如圖3.7與圖3.8所示；砂土 C_s 與 C_c 之比值則參考單信瑜(1997)針對彰化縣境內取樣砂土所進行之室內壓密試驗結果，設定為0.1，而黏土 C_s 與 C_c 之比值則參考經濟部水利署自民國83年度至96年度期間「彰雲地區地層下陷監測及分析計畫」等研究報告中，對濁水溪沖積扇14處地質鑽探點所進行黏土之室內壓密試驗分析所得到之平均數據設定為0.15。對此多含水層系統進行一年共四個管理期(每期三個月)之地下水抽取管理，並針對模擬區域制定二個地下水管理方案，於兩種初始條件下進行優選，如表3.3所示。由表3.3所示之兩個方案可知，方案一為模擬區域中三個子區域具有不同程度之地層下陷危害，因此不同子區域地層下陷量之限制條件設定皆不相同，而方案二則代表三個子

區域皆面臨嚴重地層下陷危害之情形，因此地層下陷量之限制條件設定較方案一嚴苛。表3.4所示為二個方案在不同初始條件(a)與(b)下，分別根據三種不同地下水管理模式所優選出之最大可抽水量，而表中各控制點之地層下陷量則係利用地層下陷數值模式配合優選出之最大可抽水量加以計算。依據表3.4吾人可歸納以下結論：

1. 對於僅考慮預壓密水頭為限制條件之管理模式(Larson, 2001)而言，當初始條件為(a)時，無論是方案一或方案二，其優選出之最大可抽水量皆有高估之情形，故若以此高估之抽水量進行抽水，所造成之地層下陷量將會超過管理者所允許之上限值，亦即發生預期外之地層下陷危害；反之當初始條件為(b)，優選出之最大可抽水量則有低估之情形，以此低估之抽水量進行抽水，所造成之地層下陷量尚小於管理者所允許之上限值，亦即抽水策略有過於保守之情形。綜上所述，僅考慮預壓密水頭為限制條件之管理模式雖然可避免土體發生非彈性壓密之行為，但對於地層下陷之定量分析則僅能藉由預壓密水頭間接地予以考量，因此並不能真正依據管理者所允許之下陷量進行優選，從而可能發生抽水量低估或高估之情形。
2. 對於僅考量土體非彈性壓密之管理模式(Chang et al., 2007)而言，由於其無法反應土體分別在彈性與非彈性壓密階段，受同一有效應力作用而產生不同沉陷量之現象，因此在同一方案下，不同初始條件(a)與(b)所計算之最大可抽水量皆相同，而亦因此限制，其所計算之最大可抽水量皆有過於低估之現象，且低估之趨勢隨著初始水位與預壓密水頭差值之增加而增加。以此低估之抽水量進行抽水所造成之地層下陷量皆遠小於管理者所允許之上限值，亦即抽水策略有過於保守之情形，因此較無法有效並充分地利用地

下水資源。

藉由應用案例一之分析可知，對於地下水量管理之問題，除了必須定量地以地層下陷量做為優選條件外，亦有必要同時考量土體預壓密之狀態與影響，以避免高估或者低估最大可抽水水量。

3.2.2 虛擬案例二：單井設計最大抽水能力

藉由本小節所介紹之應用案例，將說明如何在以最大地下水開採為目標下，求取抽水井設計最大抽水能力(pumping capacity)。考慮一如圖3.9之地下水系統，垂直方向僅包含單層之侷限含水層，模擬區域面積為 $20\text{ km} \times 16\text{ km}$ ，含水層厚度 B 為200公尺，依據水力傳導係數之不同，模擬區域在水平向可分為三個子區域I、II與III，水力傳導係數分別為 $1.5 \times 10^{-4}\text{ m/sec}$ 、 $2.0 \times 10^{-4}\text{ m/sec}$ 以及 $5.0 \times 10^{-4}\text{ m/sec}$ ，而三個子區域之土體拉梅常數則皆相同，分別為 $\mu = 5.0 \times 10^8\text{ N/m}^2$ 以及 $\lambda = 1.0 \times 10^9\text{ N/m}^2$ ，模擬區域東西南北四邊之邊界條件皆為不透水邊界條件。今欲於此模擬區域開發地下水資源，而可設井之位置共計有35處(即圖3.9中之粗黑圓點)。

(1) 單井設計最大抽水能力決定

一般而言，水井之最大抽水能力與井之幾何以及抽水機能力有關，若水井之最大抽水能力提高時，則理論上最大可抽水水量亦可能相對提高。實際應用上若欲提高抽水井之抽水能力，則可加寬水井之直徑或選用較大且效率較好之抽水機，唯此舉亦將迫使工程費用的提高，因此如何合理的取捨實為重要之關鍵。表3.5所示為本案例之管理模式設定，圖3.10則為在符合地層下陷量限制條件下，單井最大抽水能力與最大可抽水水量之關係圖。由圖3.10可看出，兩者間之關係為非線性，而圖中曲線上任一點之斜率即代表最大可抽水水量因為單井最大抽水能力增加1單位而造成之增加量。最大可抽水水量雖然隨著單井最大抽

水能力之增加而增加，但隨者抽水能力之不斷提升，增加率則逐步遞減，以本案例而言，當單井最大抽水能力達到0.2 cms時，最大可抽水量為1.823cms，曲線上之斜率已趨近於零，因此在此案例下，水井之最大抽水能力可考慮設計為0.2cms。



第四章 濁水溪沖積扇地下水管理策略研擬與 模式應用

4.1 濁水溪沖積扇區域概述

4.1.1 地理位置暨水文狀況

濁水溪沖積扇位於臺灣西部海岸之中部地區，東起八卦山台地及斗六丘陵，西至臺灣海峽，北起烏溪，南至北港溪，其範圍涵蓋彰化縣與雲林縣，面積約為1,700平方公里，佔濁水溪流域面積的百分之六十，是臺灣本島最大之沖積扇。區域內地形雖呈東高西低之勢態，但除東邊斗六丘陵與八卦山脈外，地表平均高程僅介於10公尺至55公尺間，整體地型相當平緩。濁水溪沖積扇屬亞熱帶季風氣候，月平均溫度以一月最低，約為13度，七月最高約為32度，年平均溫度為攝氏23度。每年十月至翌年三月，東北季風盛行，三月以後東北季風漸止，四、五月份便開始進入西南季風期，並持續至九月。濁水溪沖積扇年雨量相當充沛，但在時間和空間分布上則非常不平均，以時間分布而言，八成之年降雨量集中在五月至九月間，十月至翌年四月則為明顯的乾季；而在空間分布方面，年平均雨量從東邊扇頂的2,000公釐往西遞減，在沿海岸地區僅為1,000公釐至1,200公釐之間。濁水溪沖積扇之河川除濁水溪與北港溪為主要河流外，較重要且獨流入海之河流尚有12條，總計為14條。其中發源於中央山脈者僅有濁水溪，而北港溪乃發源於斗六丘陵之低山性平地河川，其餘12條河川均發源於台地或平原地帶。圖4.1所示為濁水溪沖積扇區域圖。

4.1.2 地質概況與地質分層

濁水溪沖積扇之上游(扇頂)多為礫石層，而下游(扇尾)多為砂層或泥層，除斗六丘陵及其西側為更新世半固結之砂岩、泥岩、礫岩及

紅土外，本區地表均為全新世以來未固結的礫石、砂土及黏土所覆蓋。而在地層垂向分布方面，中下游丘陵及平地區域之地層分布由上而下依序為現代沖積層、台地礫岩層以及頭嵙山礫石層，三層總厚度在數百公尺以上，由於砂、礫層孔隙發達，含水性能佳，構成主要的含水層。垂向更深處則為上新世或更老之地層，主要由較緻密之砂頁岩組成，導水及含水性不佳。上游山脈大部分屬第三紀亞變質岩系板岩，含有許多複雜之褶曲與斷層，且風化侵蝕顯著，以致溪水終年混濁。板岩、變質砂岩與石英之碎屑在上游受侵蝕搬運至下游地區堆積，形成本沖積扇。

中央地質調查所將濁水溪沖積扇地表下200公尺深範圍內之水文地質，由上而下概念性劃分為含水層一、阻水層一、含水層二(可再細分為含水層二之1與含水層二之2)、阻水層二及含水層三等共五層之地下水系統。各含水層在上游段岩性均屬礫石，並且合而為一，愈往下游分層愈趨明顯，粒徑愈細且含水層厚度漸小。於臺灣海峽中，阻水層一、二應合而為一，含水層一、二、三均尖滅於阻水層中，亦即各含水層末端應是封閉的，並未與海連通，形同自然地下水庫。含水層二厚度最大，沈積物粒徑最粗，含水及透水性能較佳，是最重要之地下水層。

4.1.3 地下水使用與地層下陷概況

由於濁水溪流域河川含砂量太大，使得興建水庫有其難度，因此長期以來水資源來源皆偏重於地下水開發。自1970年代後期起，沿海地區之養殖漁業逐漸興盛，使得地下水抽取量大幅增加。此外近年來離島工業區的開發，亦將增加對於抽取地下水之需求。根據嘉義農業技術學院(2000年已與國立嘉義師範學院整合為國立嘉義大學)沈向白教授於民國79年之普查結果顯示，雲林縣全縣民井達近十萬口，地下

水開採量約8.0億噸(其中農田灌溉用水約為6億多噸，養殖用水也約1億多噸)(如表4.1所列)，而地下水入滲補注量約只有4.0億噸。張良正與龔誠山(1996)在「區域性地下水觀測站網檢討III」中亦曾對濁水溪沖積扇地下水補注量做全面之探討，其分析資料如表4.2所列。

根據水利署1998年「彰化沿海地區地盤下陷檢測計畫報告」中指出，彰化地區自和美、頂番婆、溪湖與北斗一線以西均有地層下陷情形發生，總面積約581平方公里，佔彰化平原之百分之七十四。此外又發現下陷率雖較以前減緩，但下陷範圍有向東漸為擴大之趨勢，其中西港地區由新街至濁水溪口沿海一帶，自1975起至1995年止，最大累積下陷量達155公分，而1995年至1997年間之下陷量亦有32公分。另外大城地區自1975年至1997年止，最大累積下陷量也達108公分之多，且1995年至1997年間也有40多公分之下陷量產生，其中以大城國小與王厝寮下陷情形最為嚴重，累積下陷量分別達139與133公分。對於雲林地區地層下陷量，根據經濟部水利署1998年「地層下陷水準檢測—雲林縣沿海地區」報告中指出，由1996年至1998年下陷量超過5公分的範圍面積約420.6平方公里，而累積下陷量超過7公分的地區有橋頭至豐榮地區、崙背至龍岩地區、麥寮地區、台西地區與元長地區，且下陷量變化趨勢有向內陸擴增情況。另外，若分析1992年8月至1998年2月的檢測結果亦可發現，五年多以來累積下陷量超過30公分以上的區域，幾乎接近台十九線以西之範圍，而主要下陷中心為中山與台西地區。至於年下陷速率，口湖鄉，金湖鄉，有緩和趨勢，而豐榮地區有微量增加。

4.1.4 地下水管制區

依據「水利法」規定「省(市)主管機關為防止某一地區地下水之超抽所引起之海水入侵或地盤沈陷，得劃定地下水管制區，限制或

禁止地下水之開發。而其劃設評分原則包括：

一、 有下列二項者為正分，每項給十分。

1. 地盤高於標高十五公尺以上。
2. 地盤非為礫石層與黏土層之互層。

二、 有下列四項者為負分，每項扣十分。

1. 地盤已下陷地區。
2. 地下水位已低於海平面。
3. 近十八年來，年最低水位下降三公寸以上。
4. 地面標高在五公尺以下。

三、 零分以下者列入管制區。

四、 以鄉鎮（區）為管制單位。

經濟部於2004年12月修正上述地下水管制區訂定辦法，改為分別對本島1公里x1公里、離島0.5公里x0.5公里所畫設之網格點進行評分，其評分原則如下：



一、 地層下陷變化之評分

1. 累積下陷量，以該鄉(鎮、市、區)內所有檢測資料之最大累積下陷量為評分依據，累積下陷量每增加1公分，該鄉(鎮、市、區)內所有網格加給二分。
2. 地層下陷速率，以該網格近五年之地層下陷年平均速率為評分依據，其平均年下陷量每增加0.01公分，該網格加給三分之一分。

二、 地下水位變化之評分：

1. 地下水位下降幅度，以該網格近五年之地下水位下降幅度為評分依據，地下水位下降量每增加1公分該網格加給一分。
2. 地下水位低於零水位線面積，以該網格近五年之最低月平均地

下水位低於零水位線面積比例為評分依據，該比例每增加百分之一，該網格加給一分。

3. 地下水位絕對高程，以該鄉(鎮、市)內所有監測資料之最低月平均地下水位高程，低於零水位之高程差為評分依據，其高程差每增加1.4公尺，該鄉(鎮、市)內所有網格加給一分。

三、地質之評分，以該網格地層之地質種類所佔比例乘以其配賦評分權重之總和為其評分依據，各地質種類配賦之評分權重如下：

1. 固結岩：零分。
2. 礫層：二十五分。
3. 砂層：五十分。
4. 泥層：一百分。

四、地面高程之評分，以距離該網格最近驗潮站歷年之大潮平均高潮位加100公分減去該網格地面高程所得之差值為評分依據，其差值每增加1公分加給該網格一分。

五、水質之評分，以該網格近五年之氯鹽平均值大於250 mg/L之差值為評分依據，其差值每增加3.75 mg/L，該網格加給一分。

按照上述標準計算各網格之總分後，再依下列各檢討項目按其權重，加總計算之；總分在四十五分以上者列為管制網格：

一、臺灣本島地區：

1. 地層下陷變化：

- (1) 累積下陷量：百分之十五。
- (2) 地層下陷速率：百分之二十五。

2. 地下水水位變化：

- (1) 地下水位下降幅度：百分之二十五。

(2) 地下水位低於零水位線面積：百分之十五。

3. 地質條件：百分之十。

4. 地面高程：百分之十。

二、離島地區：

1. 地下水位絕對高程：百分之四十。

2. 地質條件：百分之十。

3. 水質條件：百分之五十。

待各鄉鎮市全部網格之加總分數獲得後，管制區域之劃設與解除則依下列原則辦理：

一、經檢討管制網格範圍達全鄉(鎮、區、市)檢討範圍面積百分之八十以上者，該鄉(鎮、市、區)檢討範圍全區域均予管制。

二、經檢討管制網格範圍未達全鄉(鎮、市、區)檢討範圍面積百分之二十時，該鄉(鎮、市、區)檢討範圍全區域不予管制。

三、經檢討管制網格範圍達全鄉(鎮、市、區)檢討範圍面積百分之二十以上，未達百分之八十時，得依應予管制範圍周邊之明顯地形、地貌、排水、道路或地段分界劃設管制範圍，惟管制範圍不得小於管制網格之範圍。

四、原已劃定為地下水管制區，經檢討位於地下水管制區劃設邊界外者，得解除管制。

濁水溪沖積扇共有45個鄉鎮市，根據上述之劃分原則，彰化地區計有十三個鄉鎮被列入地下水管制區，分別是伸港、線西、鹿港、福興、芳苑、大城、二林、秀水、埔鹽、竹塘等鄉(鎮)全區域以及和美、埤頭與溪湖等鄉(鎮)部分地段；而雲林地區則有十六個鄉鎮被列入地下水管制區，分別是北港、口湖、水林、四湖、麥寮、臺西、東勢、褒忠、元長、崙背、二崙、土庫、虎尾、斗南、大埤等鄉(鎮)全區域

以及西螺鎮部分地段。圖4.2所示為彰化及雲林地區地下水管制區位置圖。

4.1.5 嚴重地層下陷區

經濟部水資源局(現已改制為水利署)曾於1998年公告台灣地區符合嚴重地層下陷標準之鄉鎮市，而其認定標準則有以下三項，分別為：

- 一、 暴潮溢淹區：低於該縣市最高高潮位以下，經常發生海水倒灌並導致嚴重災害之海岸低窪土地所在之鄉鎮。可反映地層下陷區所在地理條件。
- 二、 地層下陷累積總量：鄉鎮內地層下陷累積總量大於50公分之沈陷面積佔其行政轄區面積超過百分之七十者。可反映地層下陷歷史。
- 三、 近年地層下陷年平均速率：鄉鎮內水準樁測量在近五年內之地層下陷年平均速率大於十公分以上者。可反映地層下陷近年來之趨勢。

嚴重地層下陷區劃定時以鄉鎮為單位，凡是達到「地層下陷累積總量」或「近年地層下陷年平均速率」認定標準，且達到「暴潮溢淹區」認定標準之鄉鎮，則該鄉鎮被劃定為嚴重地層下陷區。

經濟部於2005年10月修正嚴重地層下陷區劃設評分方式，與地下水管制區相同，同樣改以1公里x1公里之網格點作為評分之單位，若網格符合累積下陷量達50公分或年下陷速率10公分以上，且位於易淹水範圍內，則判定為嚴重地層下陷網格。待網格屬性決定後，則依據下述原則劃設嚴重地層下陷區：

- 一、 經檢討嚴重地層下陷網格範圍達全鄉(鎮、市、區)面積百分之七十以上者，以全鄉(鎮、市、區)列為嚴重地層下陷地區。

二、經檢討嚴重地層下陷網格範圍達全鄉(鎮、市、區)面積百分之三十以上，未達百分之七十者，得依應列入嚴重地層下陷地區範圍周邊之明顯地形、地貌、排水、道路或地段分界劃設為嚴重地層下陷地區範圍。但該劃設為嚴重地層下陷範圍不得小於應列入之嚴重地層下陷網格範圍。

三、經檢討嚴重地層下陷網格範圍未達全鄉(鎮、市、區)面積百分之三十者，該鄉(鎮、市、區)不予列入嚴重地層下陷地區。

根據前述之劃分原則，彰化縣已劃為嚴重地層下陷區者為大城鄉全鄉以及芳苑鄉之部分地段；而雲林縣則為口湖鄉、四湖鄉、台西鄉、水林鄉、東勢鄉、褒忠鄉、北港鎮、麥寮鄉、崙背鄉、元長鄉、大埤鄉、土庫鎮與虎尾鎮等，其分布位置如圖4.2圖4.2所示。

4.2 地層下陷數值模式設定與資料處理

本節將詳述地層下陷數值模式應用於濁水溪沖積扇之設定，共分為邊界與網格設定、地質條件以及抽水井設定等，其設定係依據蔡東霖(2001)中之率定成果。

4.2.1 邊界與網格設定

濁水溪沖積扇西抵台灣海峽且以不透水之黏土層與其阻隔，東邊則以斗六丘陵與八卦山脈為界，因此東西兩邊之邊界條件可設定為零流量；而南北兩邊由於分別以北港溪與烏溪為界，因此理論上其地下水體與河川水體間應有雙向之交流，然由於河川入滲之資料極為有限，故假設南北兩邊亦為零流量邊界。另外在計算網格設定上，設定每一網格為2公里×2公里之正方形，其模擬區域邊界與網格如圖4.33所示。彰化縣與雲林縣合計共有46個鄉鎮市，然由於本研究中東邊邊界位於八卦山脈，而彰化縣之芬園鄉為濁水溪沖積扇中唯一位於八卦山東麓之鄉鎮，因此本研究將不納入芬園鄉之考量，亦即僅有45個鄉鎮市納

入模擬之範圍內。

4.2.2 地質條件

根據4.1節所述之濁水溪沖積扇地質概況與地質分層，再配合各阻水層在空間分佈情形(張良正與龔誠山，1996)可將濁水溪沖積扇作水平分區與垂直分層之處理如圖4.4圖4.4與圖4.5所示。其中垂直方向共分為五層，分別為第一含水層(侷限或非侷限)、阻水層、第二含水層、阻水層與第三含水層，最底部則視為不透水之岩盤。由於部分區域垂向上具有相同地質條件，並沒有明顯之分界處，數值模式中則以虛擬之分層處理。在地質參數設定方面，地層下陷數值模式共需要水力傳導係數、拉梅常數、土層厚度與比儲水係數等資料，根據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—八十一，八十二，八十三年濁水溪沖積扇水文地質調查」的研究報告指出，含水層水力傳導係數在含水層一之扇頂自由層約為 $1.93\sim 0.4\times 10^{-3}$ m/s，扇尾減至 $0.1\sim 0.2\times 10^{-3}$ m/s，而含水層二之扇頂約為 $1.93\sim 0.4\times 10^{-3}$ m/s，扇央與扇尾約為 $0.3\sim 1.4\times 10^{-3}$ m/s，含水層三之資料則付之闕如。研究中各分層與分區地質參數之設定係依據蔡東霖(2001)之率定成果，如表4.3 所示。

4.2.3 抽水井設定

由於濁水溪沖積扇地區抽水井數量繁多，而其詳細之個別抽水井位置亦難以標定，且相關研究報告及文獻中對於抽水量之分析皆以鄉鎮市為單元，因此數值模式於抽水井之處理上係將一個鄉鎮市視為一口虛擬之抽水井，並將該鄉鎮市之總抽水量平均分配於該鄉鎮市之所有格網點上，例如若某一鄉鎮抽水量為10.0 cms，而該鄉鎮包含10個格網點，則每一格網點均抽水1.0 cms。而每一虛擬抽水井(即各鄉鎮市)於不同含水層之分層抽水比例則同樣依據蔡東霖(2001)之率定成

果，詳如表4.4所示。

4.3 管理模式應用

4.3.1 模式設定

在管理模式設定方面，總共必須考量目標函數、決策變數、狀態變數、管理期距、控制點、不同分層土壤回漲指數 C_s 與壓縮指數 C_c 之比值 α 以及控制點初始預壓密水頭等，以下詳述各項目之設定方式。

目標函數

設定為最大可抽水量，即最大化濁水溪沖積扇所有抽水井抽水量之和。

決策變數

設定為各抽水井之抽水量。管理模式中抽水井之考量與地層下陷數值模式相同，即視單一鄉鎮市為一口虛擬抽水井，並在計算單位響應係數時，將單位抽水量平均分配於虛擬抽水井所在鄉鎮市之全部網格點。

狀態變數

設定為各控制點之總地層下陷量(管理期末各分層下陷量總和)。

管理期距

設定為穩態之一年管理期。

控制點

本研究網格劃設共有 28×40 個格點，扣除不位於濁水溪沖積扇之外部點後，尚約有600個格網點，吾人並不需要將全部約600個格網點皆設為控制點，因其中可能包含狀況良好並不需特別管理之格點，且亦會造成響應矩陣過大以及限制式過多計算困難等缺點。本研究對於控制點數之選取係以每一鄉鎮市選取一點為原則，而控制點位置則選

擇各鄉鎮市中地層下陷潛勢最高之格點，其方法為令每一鄉鎮之抽水量皆為1.0 cms 並以「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」模擬各網格點於1年後之地層下陷量，再依據模擬結果於每一鄉鎮市內選取下陷量最大之網格點做為控制點。

控制點位置之選擇除須考慮具高地層下陷潛勢地點外，亦須顧及重要建物所在之鄰近區域，以濁水溪沖積扇為言，目前較受關注而可能因地層下陷產生危害之重要建物為高速鐵路之墩柱，因此對於有高鐵通過之鄉鎮市，本研究將選擇高鐵沿線三公里範圍內，模擬地層下陷量最大之網格點做為該鄉鎮市之控制點。經由上述控制點選取之原則與步驟後，共獲得45個控制點，而各控制點之位置則如圖4.2圖4.2所示。

土壤壓縮與回漲指數

1. 黏土(阻水層)：根據經濟部水利署自民國83年度至96年度期間「彰雲地區地層下陷監測及分析計畫」等研究報告中，對濁水溪沖積扇14處地質鑽探點所進行之室內壓密試驗分析，該14處鑽探點之分布位置如圖4.6所示，圖4.7至圖4.9所示分別為濁水溪扇頂至扇尾之14處鑽探點由室內壓密試驗得到之不同深度 C_s 與 C_c 之比值。圖4.10則為各鑽探站中，依據土壤 C_s 與 C_c 比值試驗資料所求出之變異係數(coefficient of variation, COV)，由圖4.7至4.10可發現各鑽探站之實驗結果並不具明顯之差異，且多數鑽探站 C_s 與 C_c 比值之變異係數皆小於0.2，故本研究中黏土 C_s 與 C_c 之比值將採用所有實驗數據之平均值0.15。
2. 砂土(含水層)：單信瑜(1997)曾針對彰化縣境內取樣之砂土進行室內壓密試驗，其試驗結果顯示所取樣砂土 C_s 與 C_c 之比值約為0.1，故本研究中砂土 C_s 與 C_c 之比值將採用0.1。

初始預壓密水頭

本研究中預壓密水頭之設定包含以下步驟：

1. 選定記錄年限較長且資料較完整之地下水觀測網站資料，包含189口井，其分布位置如圖4.11所示。
2. 依據選定地下水觀測網站所記錄之歷年月平均地下水位，選擇歷史記錄中之最低水位做為該地下水觀測網站所在網格點之預壓密水頭。
3. 利用距離倒數法(inverse distance weighted, IDW)分別對預壓密水頭以及現況地下水位進行空間內插，得到管理區域內各網格點之現況地下水位與預壓密水頭，而兩者相減差值之分布如圖4.12所示。
4. 由於缺乏詳細各分層之地下水觀測資料，因此本研究將步驟(3)所獲得各控制點之預壓密水頭依據分層之厚度，將其等比例地分配至每一分層中。

4.3.2 管理方案研擬

前小節中已定義管理模式各項目之意義，吾人尚須決定決策變數(各井抽水量)與狀態變數(各控制點地層下陷量)之限制值始能進行求解。依據過去地下水使用以及地層下陷之概況，本研究將濁水溪沖積扇劃分為特定區(高鐵沿線3公里範圍內與嚴重地層下陷區)、管制區(公告之地下水管制區但不含前述之特定區)以及其他區(非屬特定區與管制區者)等三區域，並研擬以下不同之管理方案：

(a) 各井抽水量上限固定方案

根據地下水管制辦法，位於地下水管制區之鄉鎮市，其鄉鎮內抽水井之抽水量，除了主管機關因應上級政府輔導各目的事業之政策需要，而對於原合法取得水權重新調配引水者外，不得申請增加抽水量。

上述規定僅適用於地下水管制區內，然為了避免地下水資源過度開採之可能性，本方案限定濁水溪沖積扇之所有鄉鎮市其抽水量均不得超過該鄉鎮市現行之抽水量，然由於各鄉鎮市現行實際之抽水量並無詳細資料記載，因此本研究假設各鄉鎮市之抽水量上限值如表4.1所示，亦即各鄉鎮市抽水量不可超過民國79年之調查結果。在各鄉鎮市抽水量上限決定後，根據各控制點所在位置不同，地層下陷量允許上限值則有以下之考量：

1. 特定區：位於特定區之控制點代表已有嚴重地層下陷之情形發生或鄰近高鐵行經路線，故此區域之控制點於1年管理期末之地層下陷最大允許值為零。
2. 管制區：控制點於管理期末之地層下陷最大允許值為1公分。
3. 其他區：位於其他區控制點之地層下陷最大允許值由1公分開始逐步增加至5公分，以探討其與最大可抽水量之關係。

(b)其他區抽水井抽水量可增加方案

本方案目的在探討當位於非特定區與管制區之鄉鎮市其抽水量上限可提高時，是否能對最大可抽水量帶來顯著之變化。在此方案下，位於其他區之各鄉鎮市其抽水量上限值將由表4.1民國79年所調查之值開始，由110%逐步增加至200%。另外在控制點允許地層下陷量方面，位於特定區與管制區之控制點其1年管理期末之地層下陷最大允許值設定為與方案(a)相同，而其他區控制點於1年管理期末之地層下陷最大允許值則設為3公分。

上述兩方案之設定詳如表4.5所列。

4.3.3 應用結果與討論

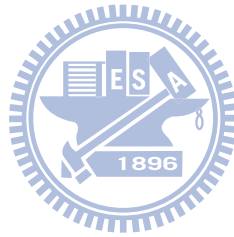
依據前節之模式設定，本節將分別利用Chang et al. (2007)所發展僅考慮非彈性壓密之管理模式以及本研究所發展之管理模式計算濁

水溪沖積扇之最大可抽水量。圖4.13所示為方案(a)最大可抽水量與其他區控制點最大地層下陷量允許值之關係，觀察圖4.13可發現，隨著其他區地層下陷量最大允許值之提高，最大可抽水量亦相對提高；另外在不同管理模式之計算結果方面，圖4.13顯示考慮土壤預壓密狀態下之最大可抽水量較僅考慮非彈性壓密者約增加0.25億立方公尺/年，兩者間並未有非常明顯之差異，其原因在於濁水溪沖積扇過去長年地下水超抽，僅近年來始逐漸加強地下水管制，因此地下水位回升之幅度尚屬有限。然根據秦啟文等(2000)之研究，濁水溪沖積扇年用水量為31億立方公尺，而地下水源供應了9億立方公尺。依據水利署「集集攔河堰運用要點」，其可供應濁水溪沖積扇地區豐水期(6月至9月)每日20萬噸、枯水期(10月至翌年5月)每日10萬噸公共用水量，豐水期可供應工業用水每日86萬噸，則集集共同引水計劃約可供應濁水溪沖積扇地區每年1.5億立方公尺之用水。以方案(a)而言，在抽水量不可超過民國79年調查資料之條件下，其他區在允許下陷量為5公分時，本研究所發展管理模式之計算結果為年可用水量 $=4.66+1.5=6.16$ 億立方公尺，而Chang et al. (2007)所發展管理模式之計算結果則為 $4.4+1.5=5.9$ 億立方公尺，兩者皆無法滿足9億立方公尺之需求量。

圖4.14所示為方案(b)最大可抽水量與其它區各鄉鎮市抽水量上限增加百分率之關係圖，由圖4.14可知當增大方案(a)所設定之抽水量至200%時，本研究所發展管理模式之計算結果為4.75億立方公尺/年，較方案(a)增加約3%，顯示在本應用案例所設定之地層下陷限制條件下，增加其他區鄉鎮市抽水井之抽水上限尚能小幅度地增加最大可抽水量，因此方案(b)相較於方案(a)具有控制點地層下陷量小且最大可抽水量稍高之優點。依據方案(b)中增大抽水量至200%時之計算結果，若再加入集集共同引水計畫每年約1.5億立方公尺之供水量，則濁水

溪沖積扇年可用水量約為 $4.75+1.5=6.25$ 億立方公尺，仍無法滿足地下水之需求量。

綜整(a) (b)兩方案之分析結果以及近年來濁水溪沖積扇之地下水需求量與地層下陷量調查資料可發現，即使將其他區鄉鎮市之抽水量上限增加至民國79年調查值之200%，在符合所設定之允許下陷量條件下，最佳之總抽水量仍無法滿足實際之需求量，顯示近年來部分鄉鎮市實際之抽水量可能已遠大於民國79年調查值，亦凸顯濁水溪沖積扇地下水超抽以及嚴重地層下陷之問題。基於減緩(或防止)地層下陷危害持續發生以及水資源永續利用之考量，相關管理單位或決策者更應思考如何以其他水資源替代方案或非工程措施等管理策略來降低濁水溪沖積扇之地下水需求量。



第五章 結論與建議

在第一章至第四章中，本研究已分別針對地下水管理模式過去之相關研究成果、本研究所發展管理模式之架構與建立方法、以及模式測試與案例模擬等做詳細之敘述，並將發展之模式應用於濁水溪沖積扇地區以展現其實用性，本章將對本研究之成果做一總結，並提出建議以為後續相關研究之參考。

5.1 結論

模式架構與建立

- (1) 依據過去相關文獻回顧，多數以simulation-optimization觀點所建立之管理模式多以水頭作為限制條件，然若無定量控制地層下陷量對於管理區域可能導致不預期地層下陷災害之發生。
- (2) 本研究採用simulation-optimization之觀點，並分別利用響應矩陣法與一維土體壓密方程式建立以地層下陷量為限制條件，並同時可考慮土體預壓密特性影響之地下水量管理模式。
- (3) 模式建立後，本研究藉由導入二進位變數之技巧，除了將non-smooth optimization之問題轉換為混合整數規劃，同時也增加求解之效率。
- (4) 基於模式建立所依據之方法，本研究所發展之管理模式仍具有下述之限制：
 1. 數值模式中水頭洩降量與地層下陷量係採非耦合方式計算，根據蔡東霖(2001)量階分析結果，僅適用於地下水流近似於水平流或垂直流之狀態，並無法應用於三維地下水流現象明顯之地區。然在大區域之尺度下，地下水系統可合理的假設含水層與阻水層分別為水平流與垂直流(Anderson and Woessner,

1992)。

2. 研究中採用響應矩陣法計算水頭洩降量，然阻水層內孔隙水壓消散極為緩慢，因此當模式應用於水力傳導係數極低之阻水層時為避免下陷量低估，模擬時間(管理期距)之設定必須大於 $0.5S_s B^2 / K$ 或以虛擬分層方式將土層虛擬等分為數層，如此才能確保阻水層內孔隙水壓之分布已達平衡狀態。

管理模式測試與案例模擬

- (1) 本研究以試誤法配合地層下陷數值模式以測試管理模式之正確性。結果顯示管理模式之計算結果皆與試誤法相同，顯示其正確性。
- (2) 由模式測試過程之繁複亦可發現，若僅以試誤法配合數值模式做為地下水管理之工具，則當地下水系統或管理方案趨於複雜時，將非常難尋找出最佳之管理策略。
- (3) 由預壓密水頭敏感度分析結果可知，對同一限制條件及管理區域下進行地下水管理時，管理模式中若加入土壤預壓密之考量，相較於未考量預壓密之地下水管理模式將能較充分且合宜的利用地下水資源。
- (4) 由模式之案例應用成果，吾人可歸納以下三點結論：
 1. 在僅考慮水頭洩降量之情況下，最大可抽水量有可能被過於高估，導致管理區域發生不預期之地層下陷危害。
 2. 在僅考慮土體為非彈性壓密之情況下，最大可抽水量推估可能過於保守，無法充分地利用地下水資源。
 3. 除了決定最大可抽水量與各抽水井抽水量之最佳時空分布外，當管理問題為穩態時，管理模式亦提供決定單井最大抽水能力之功能。

本研究中採用蔡東霖(2001)所發展之「區域性地下水超抽導致地

層下陷模式」做為管理模式中建立單位響應係數之工具，未來應用時也可採用其它數值模式配合本研究所發展之管理模式進行地下水管理。

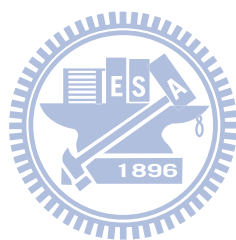
濁水溪沖積扇地下水管理方案研擬與模式應用

- (1) 管理模式計算之最大可抽水量尚遠低於濁水溪沖積扇現況之地下水需求量，由此顯示濁水溪沖積扇正面臨地下水嚴重超抽之現象，為避免地層下陷持續發生，應將本研究發展之地下水管理模式結合地表水管理模式以及其他工程或非工程方案，以進行更完善之水資源管理。

5.2 建議

- (1) 實測地質資料往往極為有限而不足以描述地下水系統完整之地質分布狀況，因此管理模式計算之結果將存在不確定性，建議未來可嘗試將參數之不確定性納入本研究所發展模式中，進一步建立序率之地下水管理模式，亦可增加模式之實用性。
- (2) 目前本研究係假設在非侷限含水層中，水頭洩降量遠小於飽和含水層之厚度，然此假設並不一定符合抽水井附近水頭洩降之實際現象，因此未來在應用時，可考慮以Maddock (1974)之研究修正單位響應係數之數值以符合實際情形。
- (3) 本研究濁水溪沖積扇應用案例係以民國79年之抽水量調查資料為基礎進行最佳抽水量之分析，建議後續可詳細調查濁水溪沖積扇現行之實際抽水資料，再重新輔以所發展模式進行地下水抽取方案之優選，以使管理策略能更符合現況。
- (4) 地層下陷之控制除須從地下水管制著手外，亦須藉由地表水聯合支援或適當補注於地下水系統，建議未來可將本研究所發展之地下水管理模式與地表水管理模式加以結合，始能達到最佳之水資

源供應。



參考文獻

- 陳愛光、李慈君、曹劍鋒，(1991)，「地下水資源管理」，地質出版社，北京市。
- 經濟部水利司，(1994)，「雲林與屏東沿海地區地層下陷之調查研究計畫」。
- 經濟部中央地調所，(1995)，「台灣地區地下水觀測網第一期計畫-八十一，八十二，八十三年濁水溪沖積扇水文地質調查」。
- 張良正，龔誠山，(1996)，「區域性地下水觀測站網檢討(II)—濁水溪沖積扇觀測站網佈井及觀測頻率檢討」，經濟部水資源局。
- 經濟部水利司，(1996)，「台灣地區地下水觀測網第一期計畫-地層下陷監測調查研究」。
- 單信瑜，(1997)，"台灣西部地層下陷地區淺層土壤變形之研究"，第二屆地下水資源及水質保護研討會。
- 經濟部水資源局，(1997)，「台灣沿海地區之地層下陷監測調查研究」。
- 李振誥，許清荃，林俶寬，(2000)，"濁水溪沖積扇多層地下水調配與管理之研究"，台灣水利季刊，48(4)，41-52。
- 秦啟文，劉振宇，鄭立新，(2000)，"台灣地區地下水—濁水溪沖積扇篇"，第十一屆水利工程研討會論文集。
- 劉志文，(2000)，「屏東沖積扇平原地下水資源調配與管理之研究」，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 經濟部水資源局，(2001)，「台灣地區地層下陷監測井新建及規畫」。
- 蔡東霖，(2001)，「區域性地下水超抽導致地層下陷模式之發展與應用」，國立交通大學土木工程研究所博士論文。
- 經濟部水利署，(2003)，「台灣地區地層下陷監測井施設及其試驗分析」。

經濟部水利署，(2005)，「台灣地區 94 年度地層下陷監測井新建及其
相關試驗分析」。

經濟部中央地質調查所全球資訊網站。

<http://www.moeacgs.gov.tw/main.jsp>

經濟部水利署全球資訊網站。

<http://www.wra.gov.tw/default.asp>

經濟部水利署地下水觀測網站。

<http://pc183.hy.ntu.edu.tw/index.php>

Aguado, E., and Remson, I. (1980). "Ground-Water Management with
Fixed Charges." *Journal of Water Resources Planning and
Management Division-ASCE*, 106(WR2), 375-382.

Aguado, E., Remson, I., Pikul, M. F., and Thomas, W. A. (1974).
"Optimal Pumping for Aquifer Dewatering." *Journal of the
Hydraulics Division-ASCE*, 100(Nhy7), 869-877.

Alley, W. M., Aguado E., and Remson I. (1976). "Aquifer Management
Under Transient and Steady-State Conditions." *Water Resour. Bull.*,
12(5), 963-972.

Bear, J., and Verruijt, A. (1987). *Modeling groundwater flow and
pollution : with computer programs for sample cases*. D. Reidel Pul.
Co.

Bredehoe. Jd, a. P., G. F. (1970). "Digital Analysis of Areal Flow in
Multiaquifer Groundwater System - a Quasi 3-Dimensional Model."
Water Resources Research, 6(3), 883-888.

Chang, Y. L., Tsai, T. L., Yang, J. C., and Tung, Y. K. (2007).
"Stochastically optimal considering groundwater management land
subsidence." *Journal of Water Resources Planning and
Management-Asce*, 133(6), 486-498.

Gorelick, S. M. (1983). "A Review of Distributed Parameter

- Groundwater-Management Modeling Methods." *Water Resources Research*, 19(2), 305-319.
- Haines, Y. Y., and Dreizin, Y. C. (1977). "Management of Groundwater and Surface-Water Via Decomposition." *Water Resources Research*, 13(1), 69-77.
- Hillier, F. S., and Lieberman, G. J. (1974). *Operations research*, Holden-Day, San Francisco.
- Jorgensen, D. G. (1980). "Relationships between basic soils-engineering equations and basic ground-water flow equations." *US Geological Survey Water Supply Paper 2064*. US Geological Survey, Washington, USA.
- Larson, K. J., Basagaoglu, H., and Marino, M. A. (2001). "Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model." *Journal of Hydrology*, 242(1-2), 79-102.
- Leake, S. A. (1990). "Interbed Storage Changes and Compaction in Models of Regional Groundwater-Flow." *Water Resources Research*, 26(9), 1939-1950.
- Maddock, T. (1974). "Nonlinear Technological Functions for Aquifers Whose Transmissivities Vary with Drawdown." *Water Resources Research*, 10(4), 877-881.
- Maddock, T., and Haines, Y. Y. (1975). "Tax System for Groundwater Management." *Water Resources Research*, 11(1), 7-14.
- Onta, P. R., and Gupta, A. D. (1995). "Regional Management Modeling of a Complex Groundwater System for Land Subsidence Control." *Water Resources Management*, 9(1), 1-25.
- Peralta, R. C., and Datta, B. (1990). "Reconnaissance-Level Alternative Optimal Groundwater Use Strategies." *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 116(5), 676-692.

- Peralta, R. C., Azarmnia, H., and Takahashi, S. (1991). "Embedding and Response Matrix Techniques for Maximizing Steady-State Groundwater Extraction - Computational Comparison." *Ground Water*, 29(3), 357-364.
- Peralta, R. C., Kowalski, K. G., and Morelseytoux, H. J. (1987). "Groundwater Recharge Planning Using Resolvent Discrete Kernels." *Transactions of the Asae*, 30(6), 1694-1699.
- Reichard, E. C., Lefkoff, L. J. (1987). "The Optimal Steady-State in Groundwater-Management - Discussion." *Water Resources Bulletin*, 23(4), 717-721.
- Reismann, H., and Pawlik, P. S. (1980). *Elasticity, theory and applications*, Wiley, New York.
- Sierlsma, G. (1996). *Linear and integer program : theory and practice*, Dekker, New York.
- Terzaghi, K. (1925). "Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage." *F. Deuticke*.
- Uryasev, S. P. (1991). "New Variable-Metric Algorithms for Nondifferentiable Optimization Problems." *Journal of Optimization Theory and Applications*, 71(2), 359-388.
- Yang, Y. F., and Li, D. H. (2001). "A trust region algorithm for constrained nonsmooth optimization problems." *Journal of Computational Mathematics*, 19(4), 357-364.



表3.1. 管理模式測試案例設定

管理模式設定	
目標函數	Maximize $\sum_{j=1}^1 \sum_{i=1}^2 Q(j,i)$, i 為管理期數、 j 為井數
決策變數	抽水井 A 在各管理期之抽水量 $Q(A,1)$ 與 $Q(A,2)$ (CMS)
狀態變數	管理區域各格網點之地層下陷量 $\Delta s(k)$, k 為格網點數
限制條件	狀態變數 $\Delta s(k) \leq 3$ 公分
	決策變數 $Q(A,1) \geq 0$ 、 $Q(A,2) \geq 0$
初始條件	預壓密水頭低於初始水位 15 m

表3.2. 測試案例試誤過程計算表

$Q(A,1)$ 固定為	符合限制條件下達最大可抽水量時之 $Q(A,2)$	最大可抽水量
1.0	2.21	3.21
2.0	2.17	4.17
2.1	2.17	4.27
2.2	2.17	4.37
2.21	2.17	4.38
2.22	2.17	4.39
2.23	2.17	4.4
2.24	2.17	4.41
2.25	2.1	4.35
2.3	1.63	3.93
3.0	N/A	N/A

註：抽水量單位均為CMS，N/A表示於此情況下無法滿足限制條件，即無可行解

表3.3. 虛擬案例一模式設定

管理模式設定									
目標函數		Maximize $\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^4 Q(j,i)$, i 為管理期數、 j 為井數							
決策變數		5 口抽水井在各管理期之抽水量 Q (CMS)							
		方案一				方案二			
管理模式		Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)	Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)		
狀態變數		控制點於各管理期末之水頭洩降量或總管理期末之總地層下陷量				控制點於各管理期末之水頭洩降量或總管理期末之總地層下陷量			
限制條件	狀態變數	水頭洩降	子區域 I	同預壓密水頭	None	None	同預壓密水頭	None	None
			子區域 II	同預壓密水頭	None	None	同預壓密水頭	None	None
			子區域 III	同預壓密水頭	None	None	同預壓密水頭	None	None
		地層下陷	子區域 I	None	1cm	1cm	None	1cm	1cm
			子區域 II	None	2cm	2cm	None	1cm	1cm
			子區域 III	None	3cm	3cm	None	1cm	1cm
	抽水井抽水能力		0.09 cms						
初始條件(a)		預壓密水頭低於初始水位 5 m							
初始條件(b)		預壓密水頭低於初始水位 1 m							

註：None 表示該管理模式因模式功能限制故不考慮此限制條件

表3.4. 虛擬案例一計算結果

		方案一			方案一			方案二			方案二		
初始條件		(a)預壓密水頭差為 5 m			(b)預壓密水頭差為 1 m			(a)預壓密水頭差為 5 m			(b)預壓密水頭差為 1 m		
管理模式		Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)	Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)	Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)	Larson(2001)	本研究	Chang et al. (2007)
最大抽水 量(cms)		1.8	1.69	0.42	0.77	1.33	0.42	1.8	1.68	0.21	0.77	1.03	0.21
控制 點總 地層 下陷 量	A	1.23	1	0.137	0.38	1	0.137	1.23	1	0.14	0.38	1	0.14
	B	1.23	1	0.137	0.38	1	0.137	1.23	1	0.14	0.38	1	0.14
	C	1.06	1.03	0.26	0.35	2	0.30	1.06	1	0.14	0.35	1	0.14
	D	0.87	0.86	0.3	0.38	2.48	0.34	0.87	0.85	0.14	0.38	1	0.14
	E	0.87	0.86	0.3	0.38	2.48	0.34	0.87	0.85	0.14	0.38	1	0.14

表3.5. 虛擬案例二模式設定(單井設計最大抽水能力)

	管理模式設定	
目標函數	Maximize $\sum_{j=1}^{35} Q_j$	
決策變數	35 口抽水井之抽水量(CMS)	
限制條件	狀態變數	地層下陷量：各控制點下陷不得超過 10 公分
	決策變數	各抽水井下限為 0cms、上限由 0.05 逐步提升至 0.35 CMS
初始條件	預壓密水頭低於初始水位 5 m	

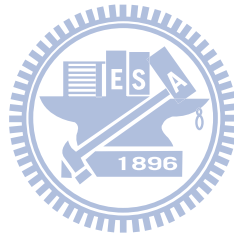


表4.1 彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表

彰化縣		雲林縣	
鄉鎮市	抽水量(立方公尺/年)	鄉鎮市	抽水量(立方公尺/年)
彰化市	59276080	麥寮鄉	87000000
鹿港鎮	311000000	崙背鄉	74032242
和美鎮	2067544	二崙鄉	66501920
線西鄉	87396402	西螺鎮	44991517
伸港鄉	32333955	莿桐鄉	7059992
福興鄉	104000000	林內鄉	1040639
秀水鄉	27021093	斗六市	1718917
花壇鄉	2559806	虎尾鎮	77946183
員林鎮	21438638	土庫鎮	54948009
溪湖鎮	30737279	褒忠鄉	13865264
田中鎮	3821098	東勢鄉	20587854
大村鄉	3952847	台西鄉	45405618
埔鹽鄉	61142774	四湖鄉	42757338
埔心鄉	9161208	元長鄉	46599415
永靖鄉	18519868	大埤鄉	19180432
社頭鄉	6217525	斗南鎮	19884515
二水鄉	222929	古坑鄉	2603814
北斗鎮	39439722	北港鎮	26767062
二林鄉	111000000	水林鄉	48554009
田尾鄉	64728013	口湖鄉	25346093
埤頭鄉	53878076		
芳苑鄉	176000000		
大城鄉	12334983		
竹塘鄉	38689496		
溪州鄉	24862801		

資料來源：沈向白教授

表4.2 彰化雲林地區各鄉鎮市年入滲表

彰化縣		雲林縣	
鄉鎮市	入滲量(立方公尺/年)	鄉鎮市	入滲量(立方公尺/年)
彰化市	3510942.899	麥寮鄉	10343200.47
鹿港鎮	22589086.06	崙背鄉	30845840.55
和美鎮	20449690.52	二崙鄉	37218986.15
線西鄉	8519232.208	西螺鎮	30333942.83
伸港鄉	14380864.32	莿桐鄉	30451535.91
福興鄉	29777188.8	林內鄉	2339853.408
秀水鄉	20065661.58	斗六市	31180743.38
花壇鄉	5586218.085	虎尾鎮	26334196.82
員林鎮	7319132.841	土庫鎮	15942835.57
溪湖鎮	21603891.72	褒忠鄉	22097331.65
田中鎮	11134720.1	東勢鄉	19489810.29
大村鄉	13023998.2	台西鄉	12449723.24
埔鹽鄉	27765368.02	四湖鄉	27885965.12
埔心鄉	13237957.52	元長鄉	35047885.88
永靖鄉	14758473.73	大埤鄉	25396771.87
社頭鄉	5266015.994	斗南鎮	32360822.35
二水鄉	1445707.049	古坑鄉	10084457.63
北斗鎮	12749055.56	北港鎮	17599131.45
二林鄉	54895123.15	水林鄉	33323036.64
田尾鄉	16684620.36	口湖鄉	18855392.07
埤頭鄉	29118696.04		
芳苑鄉	35328345.14		
大城鄉	31875387.05		
竹塘鄉	25226211.18		
溪州鄉	39081717.47		

資料來源：張良正與鞏誠山(1996年)

表4.3 濁水溪沖積扇地質參數表

水平分區	垂直分層	K (m/s)	μ (Nt/m ²)	λ (N/m ²)
I	1	1.50×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	2	1.00×10^{-08}	5.00×10^{06}	1.00×10^{07}
	3	1.50×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	4	1.00×10^{-08}	5.00×10^{06}	1.00×10^{07}
	5	1.50×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
II	1	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	2	1.00×10^{-08}	5.00×10^{06}	1.00×10^{07}
	3	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	4	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	5	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
III	1	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	2	1.00×10^{-08}	5.00×10^{06}	1.00×10^{07}
	3	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	4	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	5	2.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
IV	1	5.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	2	5.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	3	5.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	4	5.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}
	5	5.00×10^{-04}	5.00×10^{08}	1.00×10^{09}

資料來源：蔡東霖(2001)

表4.4 濁水溪沖積扇分層抽水比例表

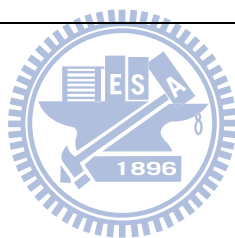
鄉鎮市	含水層一	含水層二	含水層三	鄉鎮市	含水層一	含水層二	含水層三
崙背鄉	0.53	0	0.47	線西鄉	1	0	0
二崙鄉	0.5	0.16	0.34	伸港鄉	0.3	0.5	0.2
西螺鎮	0.5	0.4	0.1	福興鄉	0.3	0.5	0.2
荊桐鄉	0.3	0.5	0.2	秀水鄉	0.3	0.5	0.2
林內鄉	0.3	0.5	0.2	花壇鄉	0.82	0	0.18
斗六市	0.3	0.5	0.2	員林鎮	0.3	0.5	0.2
虎尾鎮	0.86	0.07	0.07	溪湖鎮	0.3	0.5	0.2
土庫鎮	0.3	0.5	0.2	田中鎮	0.3	0.5	0.2
褒忠鄉	0.68	0	0.32	大村鄉	0.3	0.5	0.2
東勢鄉	0.5	0	0.5	埔鹽鄉	1	0	0
台西鄉	0.9	0.1	0	埔心鄉	0.3	0.5	0.2
四湖鄉	0.3	0.5	0.2	永靖鄉	0.3	0.5	0.2
元長鄉	0.5	0.3	0.2	社頭鄉	0.3	0.5	0.2
大埤鄉	0.3	0.5	0.2	二水鄉	0.3	0.5	0.2
斗南鎮	1	0	0	北斗鎮	0.3	0.5	0.2
古坑鄉	0.3	0.5	0.2	二林鄉	0.3	0.5	0.2
北港鎮	0.3	0.5	0.2	田尾鄉	0.3	0.5	0.2
水林鄉	0.3	0.5	0.2	埤頭鄉	0.2	0.3	0.5
口湖鄉	1	0	0	芳苑鄉	0.5	0.3	0.2
彰化市	0.3	0.5	0.2	大城鄉	1	0	0
鹿港鎮	0.3	0.5	0.2	竹塘鄉	0.3	0.5	0.2
和美鎮	0.3	0.5	0.2	溪州鄉	0.3	0.5	0.2
麥寮鄉	1	0	0				

資料來源：蔡東霖(2001)

表4.5 濁水溪沖積扇模式設定表

目標函數	最大可抽水量，即 45 個鄉鎮市抽水量之和	
決策變數	45 個鄉鎮市之抽水量(每一鄉鎮市為一虛擬抽水井)	
狀態變數	各控制點總地層下陷量	
控制點	45 個，如圖 4.2	
管理期	穩態，管理期距為 1 年	
限制條件	決策變數	(a) 上限均不得超過表 4.1，下限為零。 (b) 位於特定區與管制區之鄉鎮市上限不得超過表 4.1，下限為零，其餘鄉鎮市上限由表 4.1 所載之 110% 增加至 200%。
	狀態變數	(a) 特定區控制點最大允許值為零；管制區最大允許值為 1 公分；其他區最大允許值由 1 公分逐步增加至 5 公分。 (b) 特定區控制點最大允許值為零；管制區最大允許值為 1 公分；其他區最大允許值為 3 公分。

註：括號內為方案編號



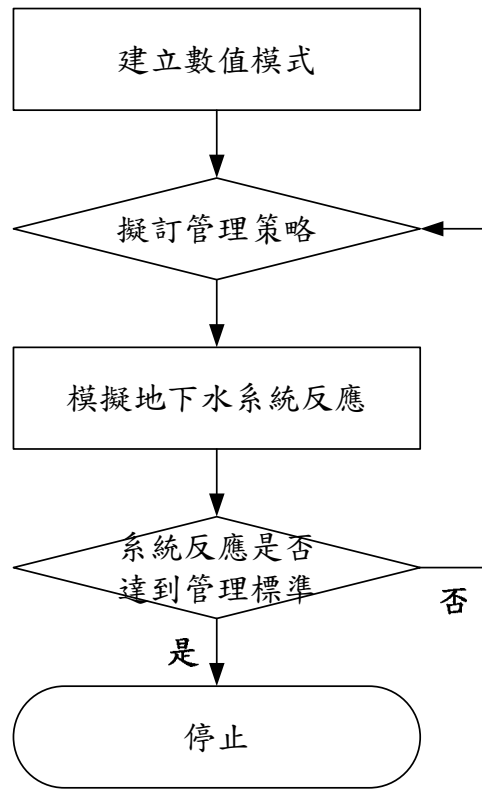


圖1.1 試誤法演算概念圖

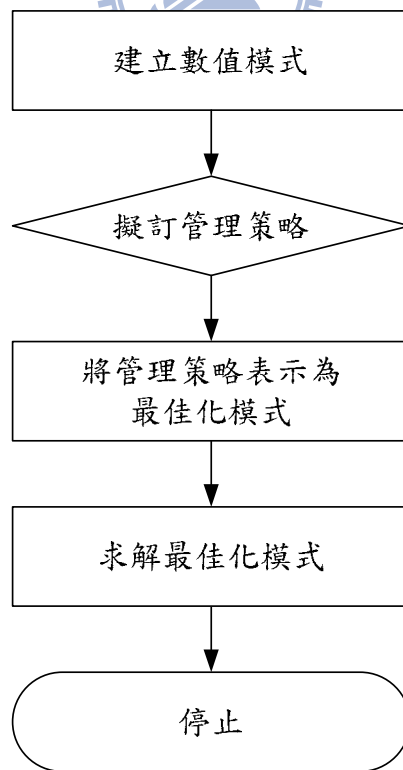


圖1.2. 數值模式結合最佳化模式演算概念圖

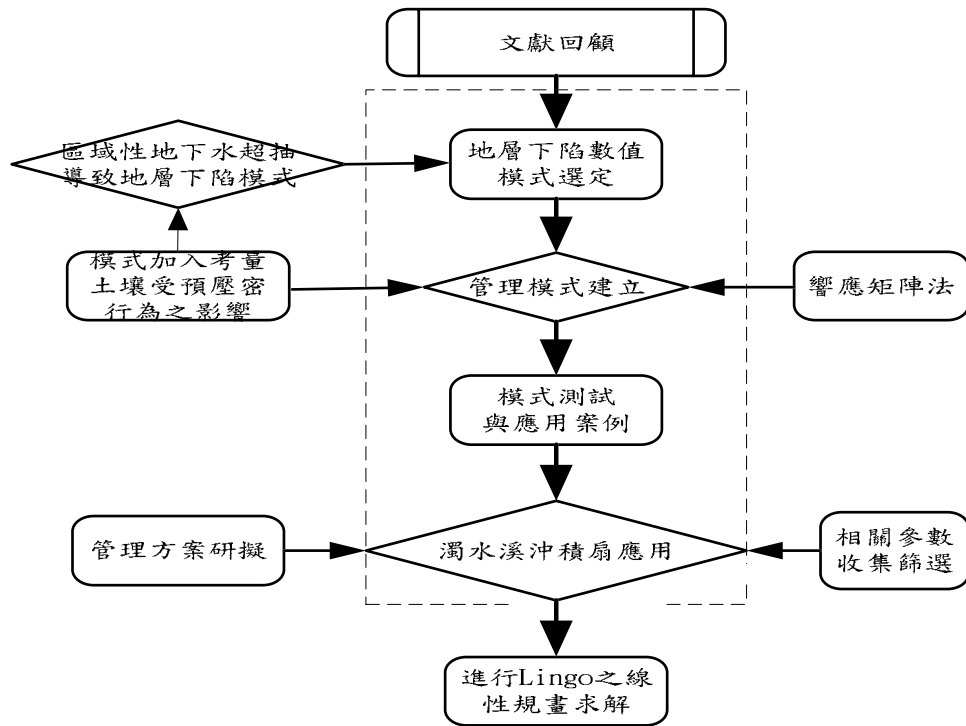
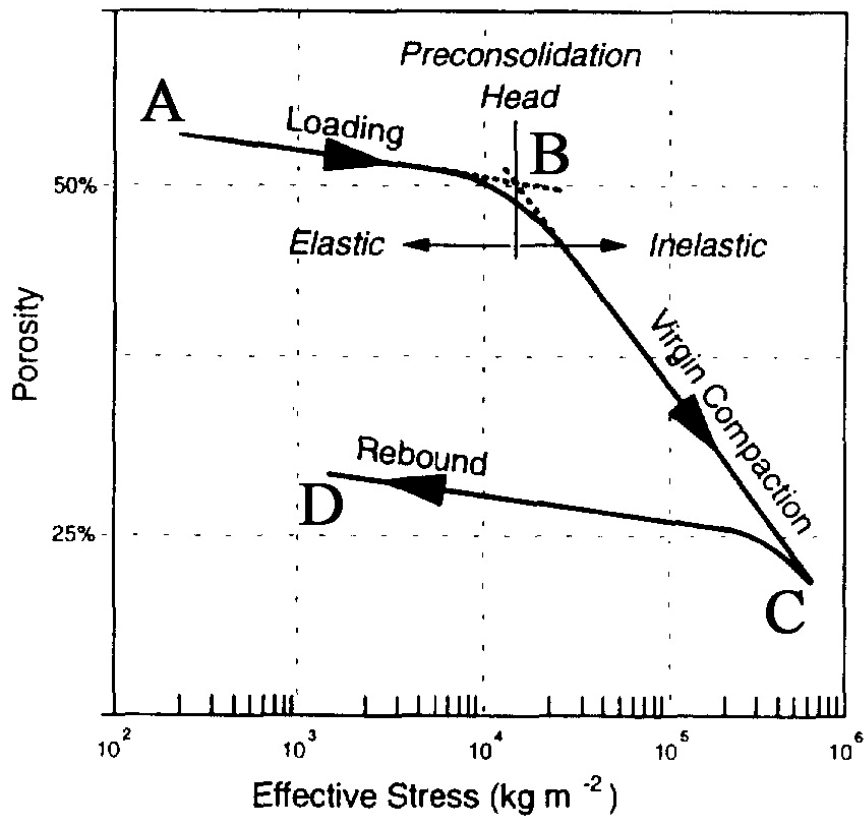
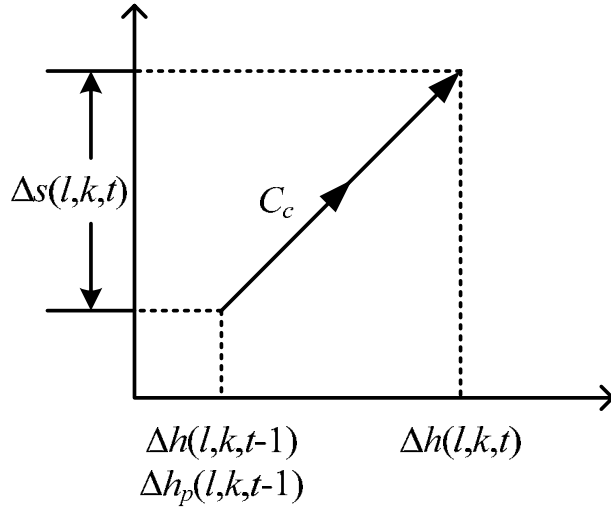


圖1.3. 本研究管理模式建置流程圖

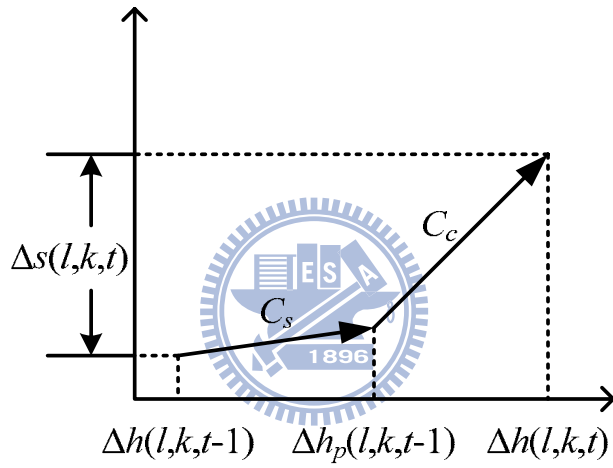


圖片來源：修改自 Jorgensen (1980)

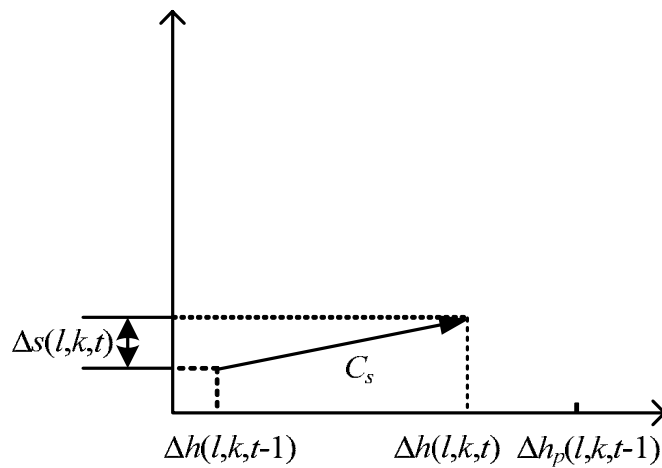
圖2.1 土壤有效應力與孔隙率關係圖



(a) $\Delta h(l,k,t-1) = \Delta h_p(l,k,t-1) < \Delta h(l,k,t)$



(b) $\Delta h(l,k,t-1) < \Delta h_p(l,k,t-1) < \Delta h(l,k,t)$



(c) $\Delta h(l,k,t-1) < \Delta h(l,k,t) < \Delta h_p(l,k,t-1)$

圖2.2 一維土體壓密方程式計算示意圖

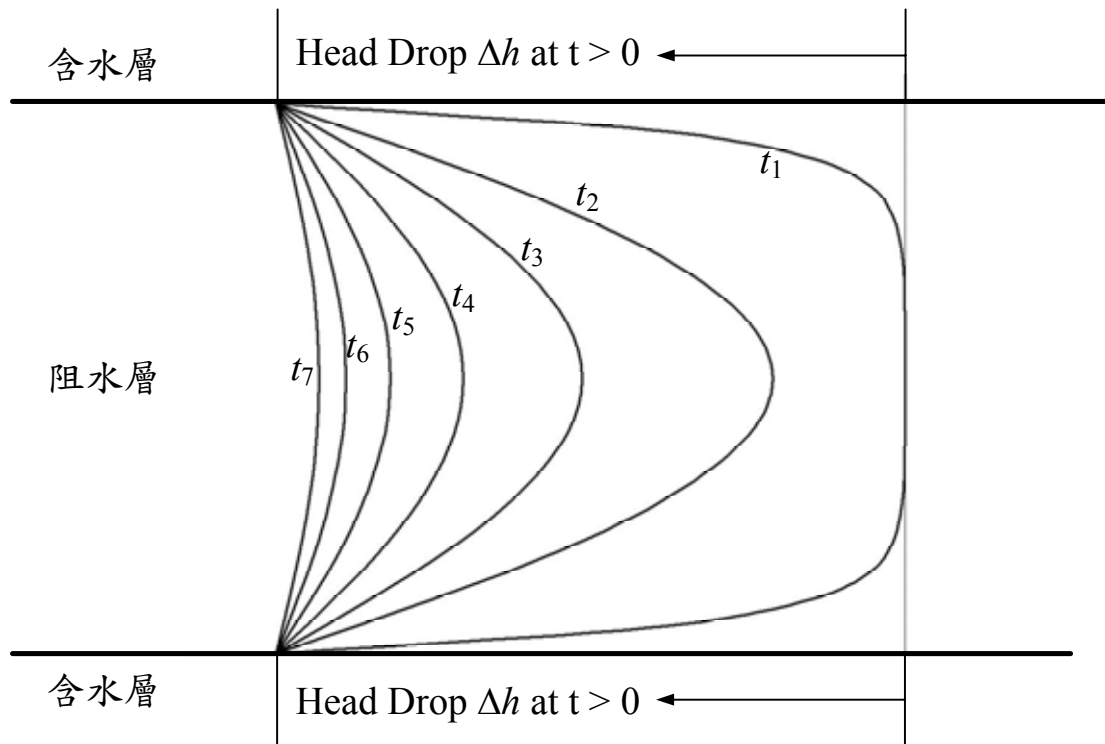


圖2.3 阻水層水壓沿深度方向隨時間變化圖

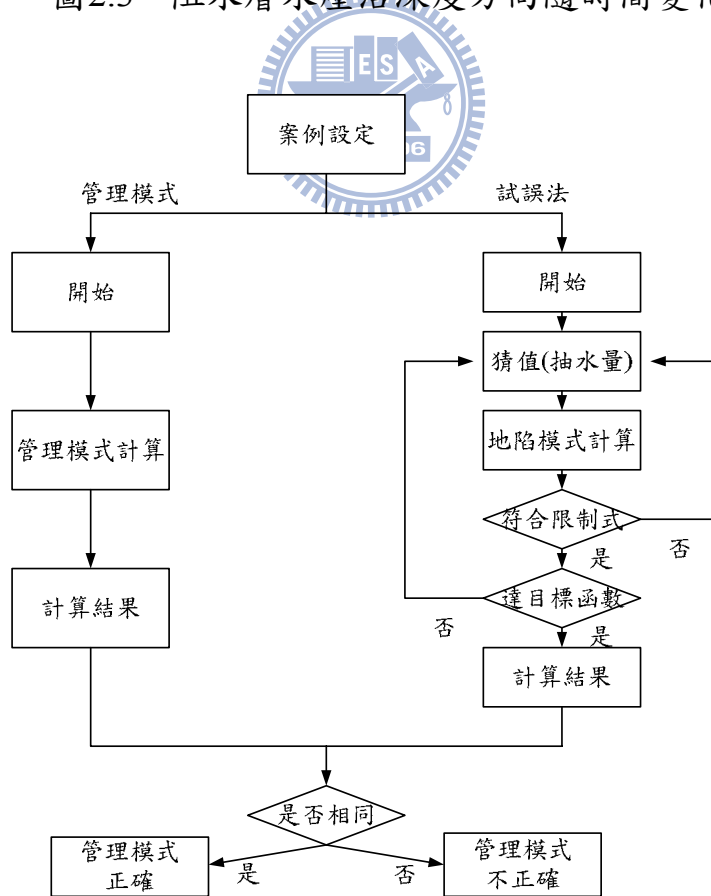


圖3.1 管理模式驗證流程示意圖

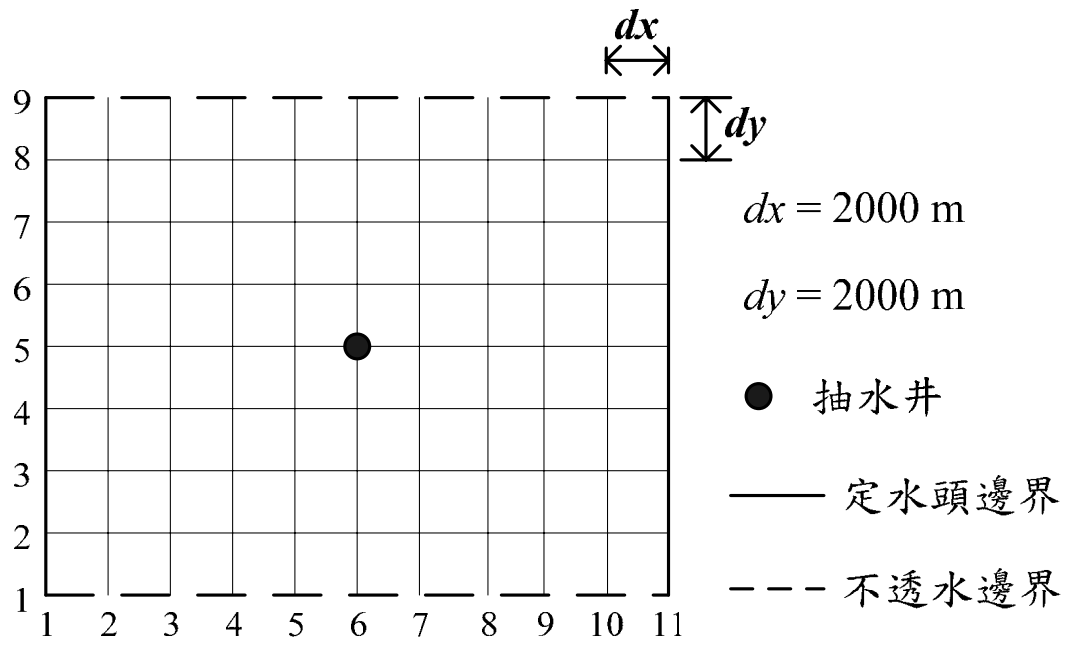
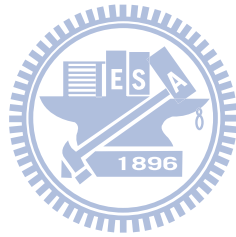
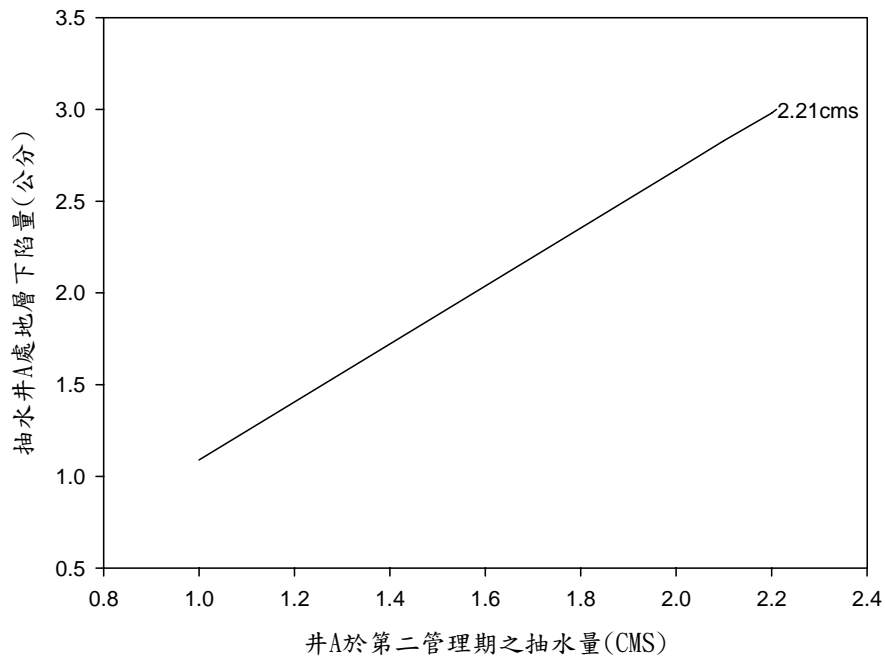
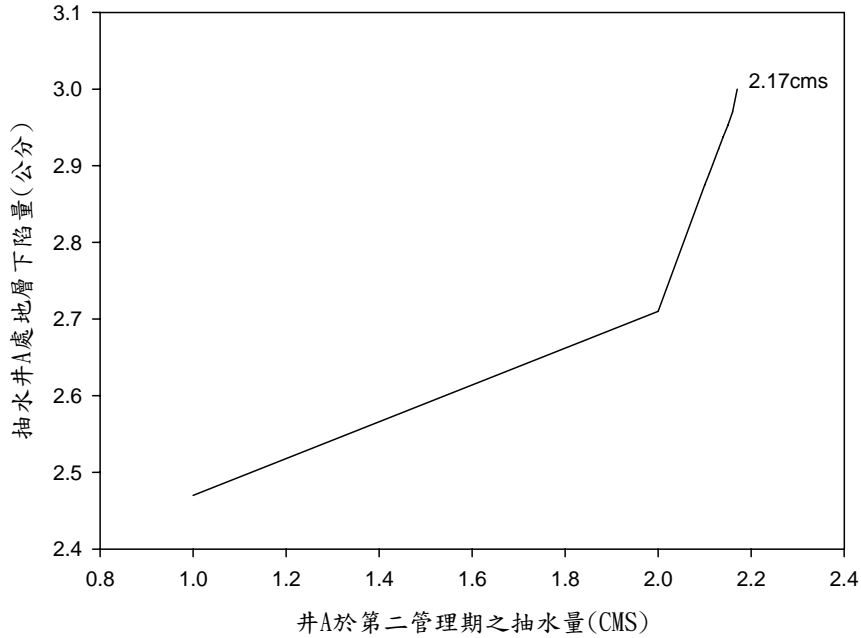


圖3.2 測試案例地下水系統圖





(a) 井A第一管理期抽水量固定為1.0 cms



(b) 井A第一管理期抽水量固定為2.0 cms

圖3.3 驗證案例井A第二管理期抽水量試誤過程圖

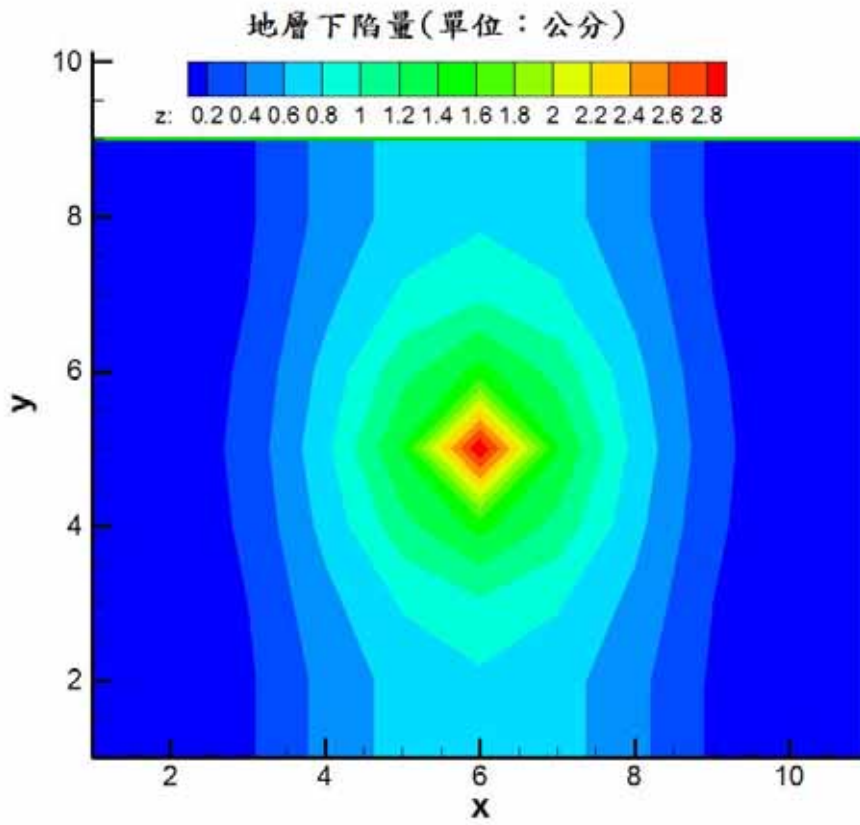


圖3.4 驗證案例最佳抽水量時地層下陷量模擬圖

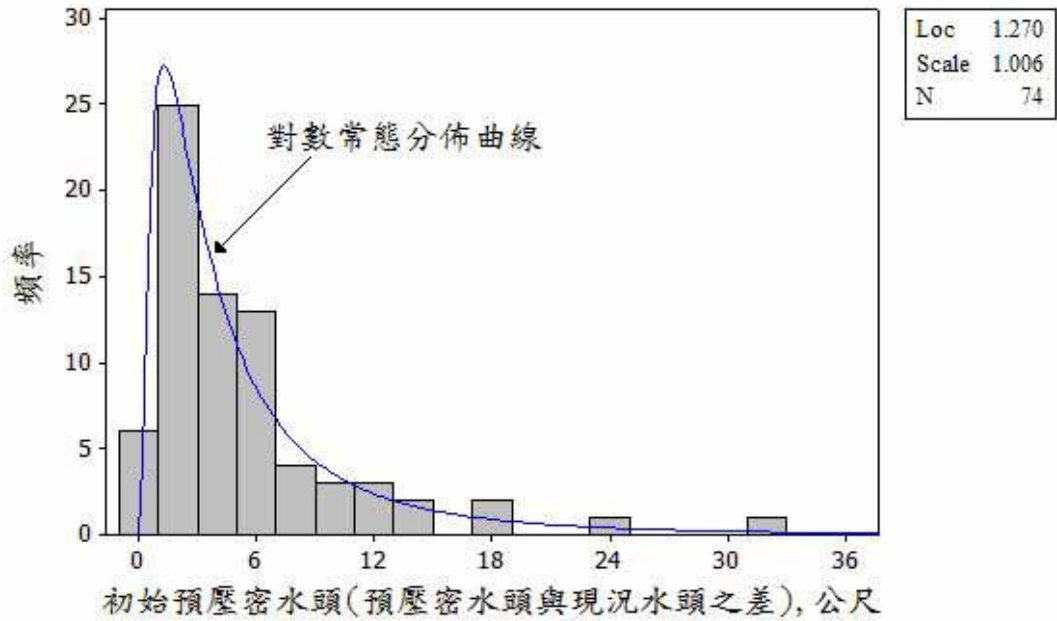


圖3.5 濁水溪沖積扇之初始預壓密水頭組體圖

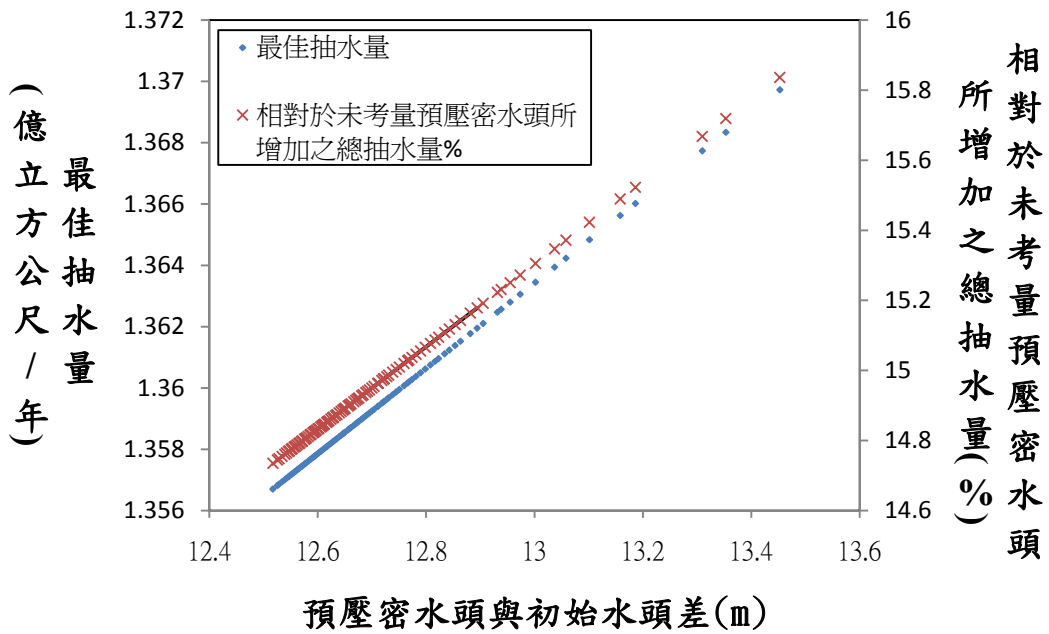


圖3.6 預壓密水頭對最佳抽水量之影響

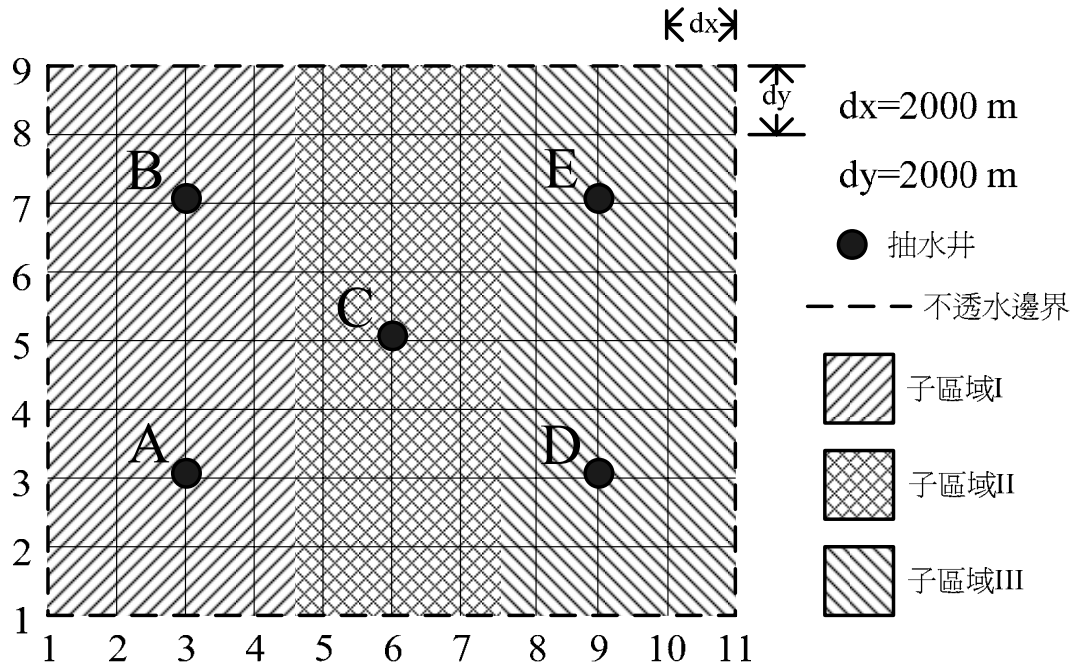


圖3.7 虛擬案例一多層地下水系統水平分區示意圖



圖3.8 虛擬案例一多層地下水系統垂直分層與地質參數分布圖

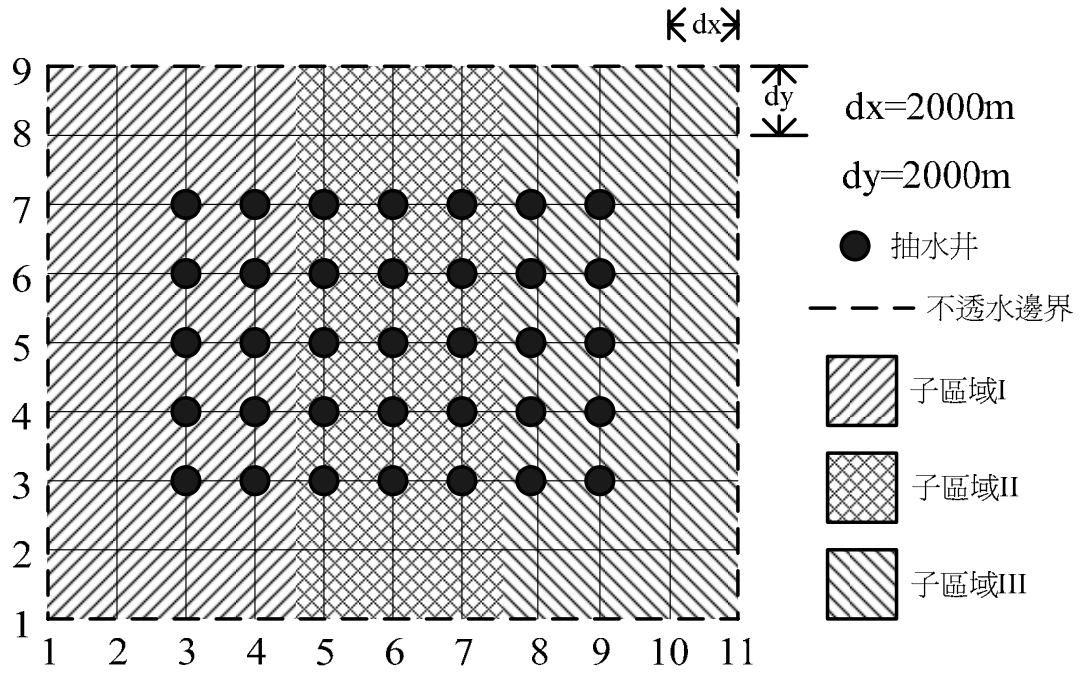
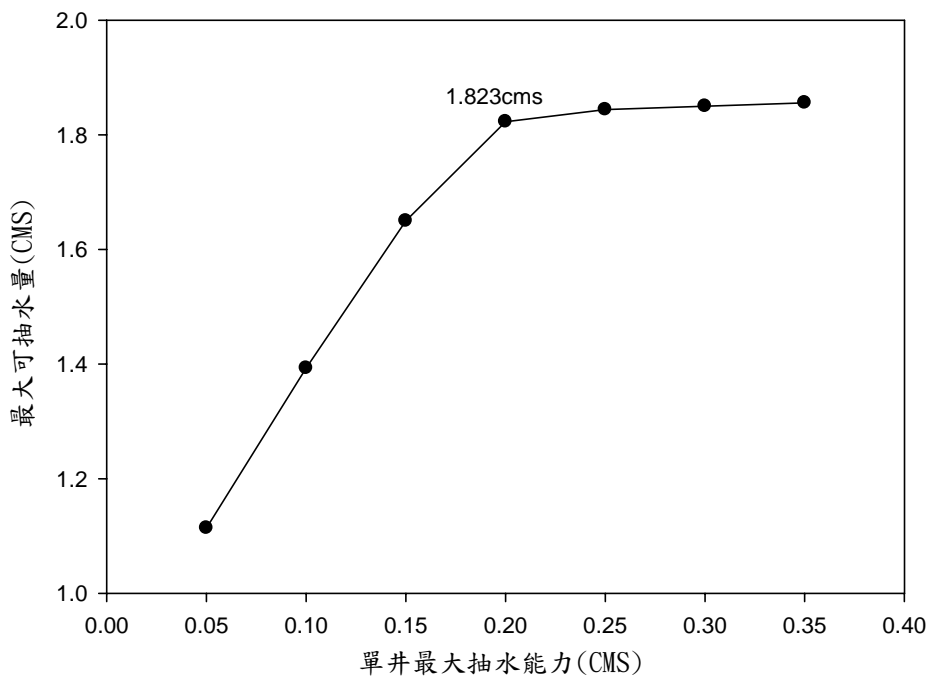
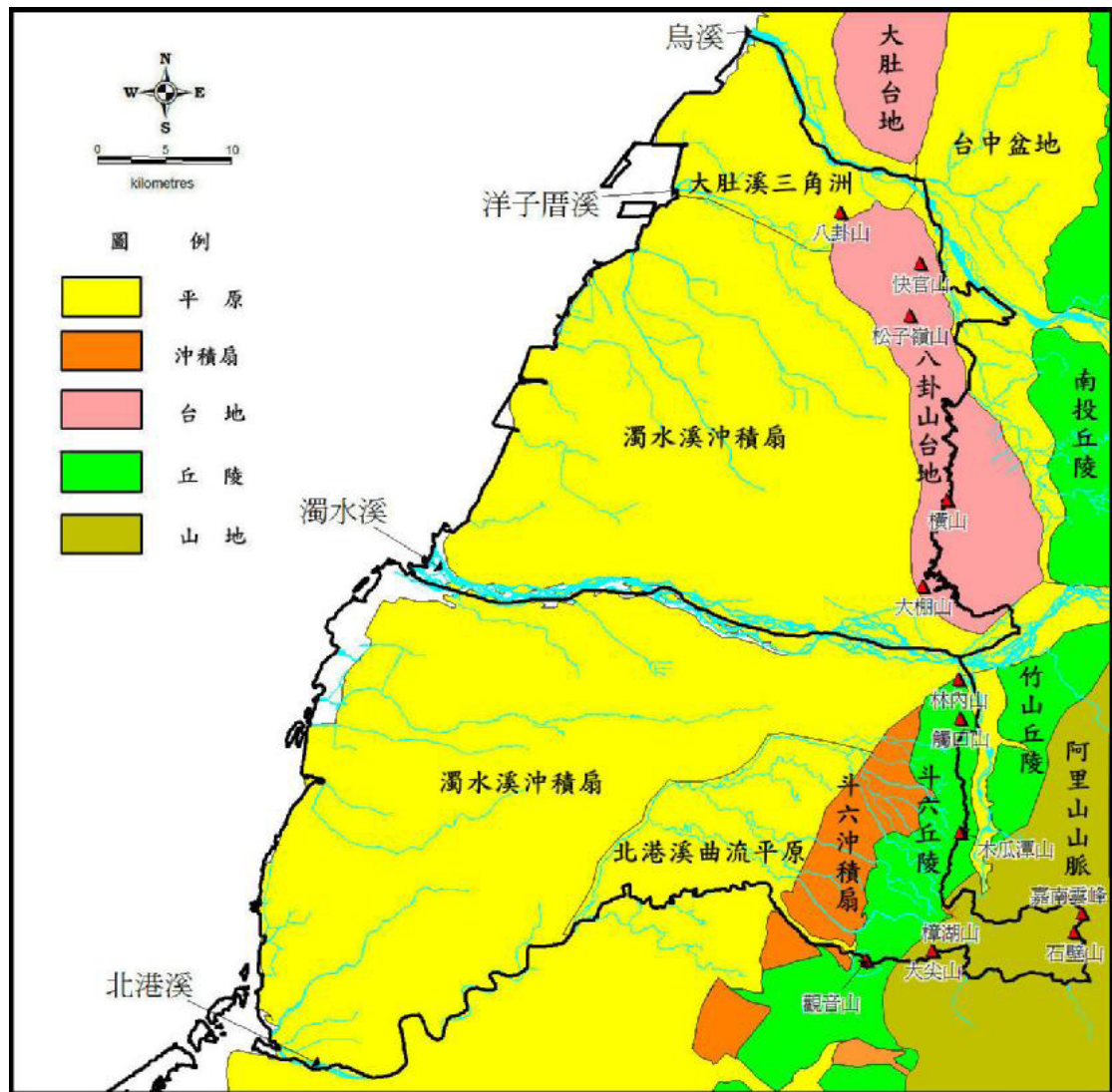


圖3.9 虛擬案例二水平分區示意圖



單井最大能力與最大可抽水量關係圖

圖3.10 單井最大能力與最大可抽水量關係圖



圖片來源：陳肇夏等(2000)

圖4.1 濁水溪沖積扇區域圖

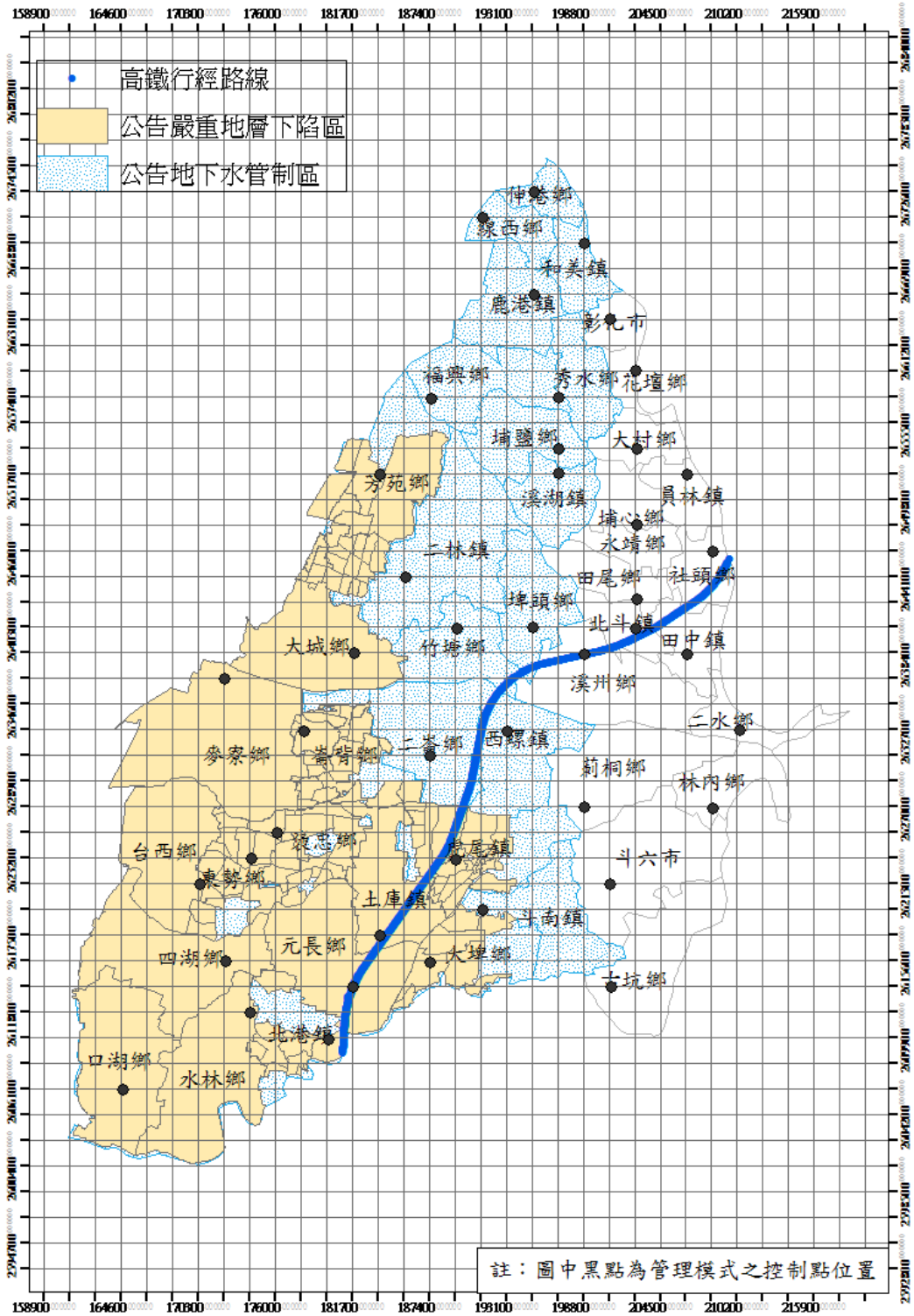
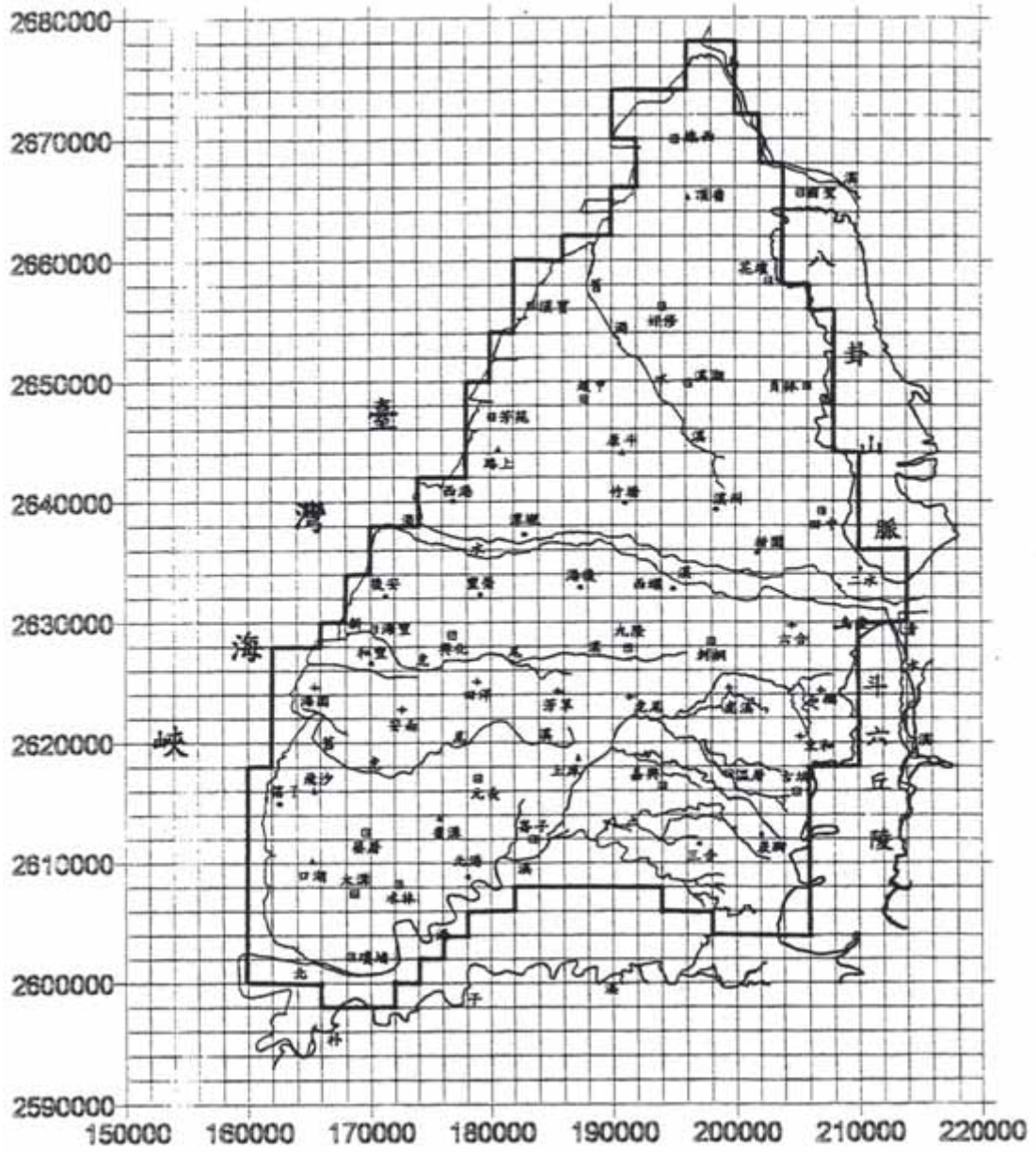
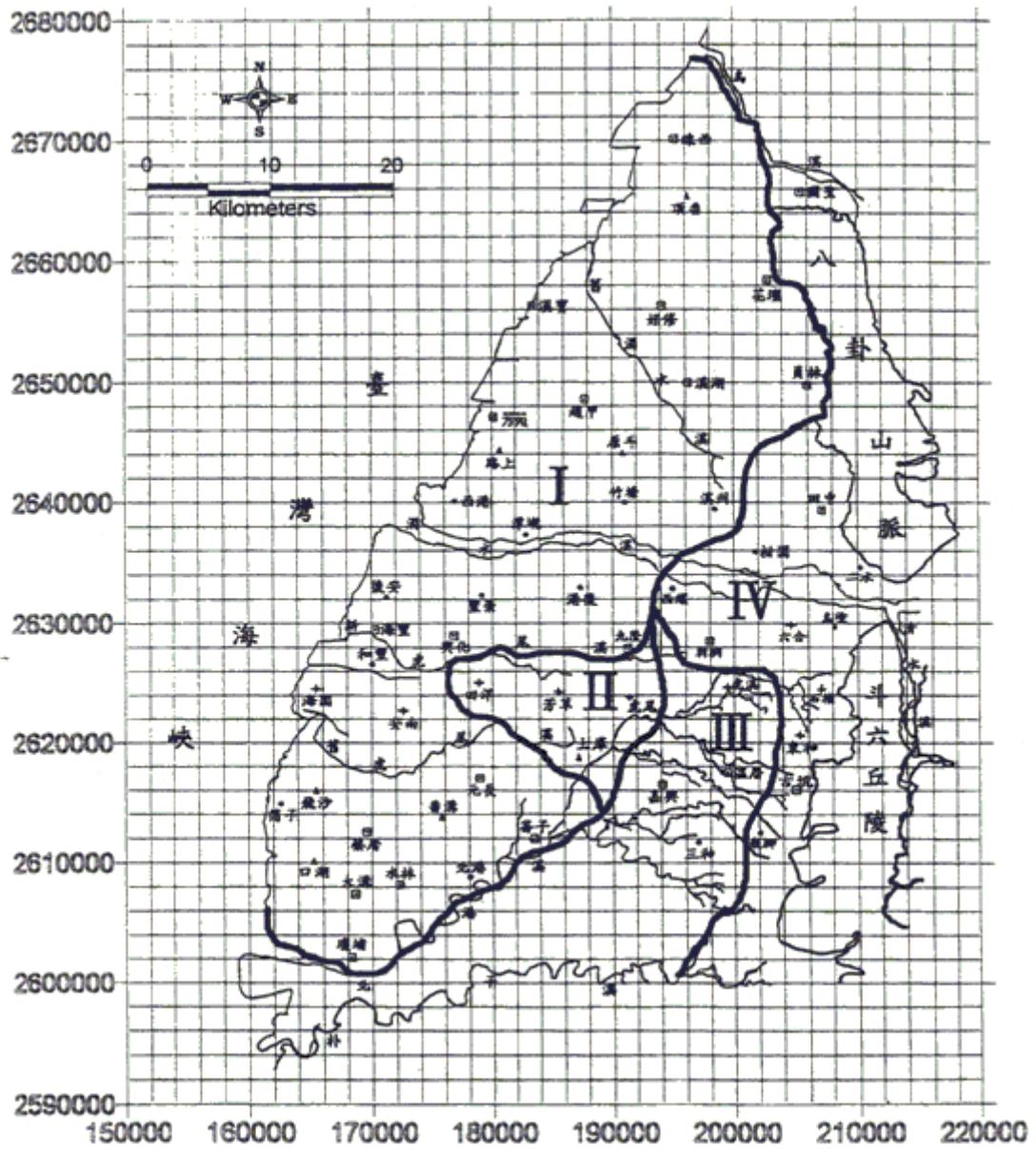


圖4.2 濁水溪沖積扇地下水管制區與嚴重地層下陷區分布圖



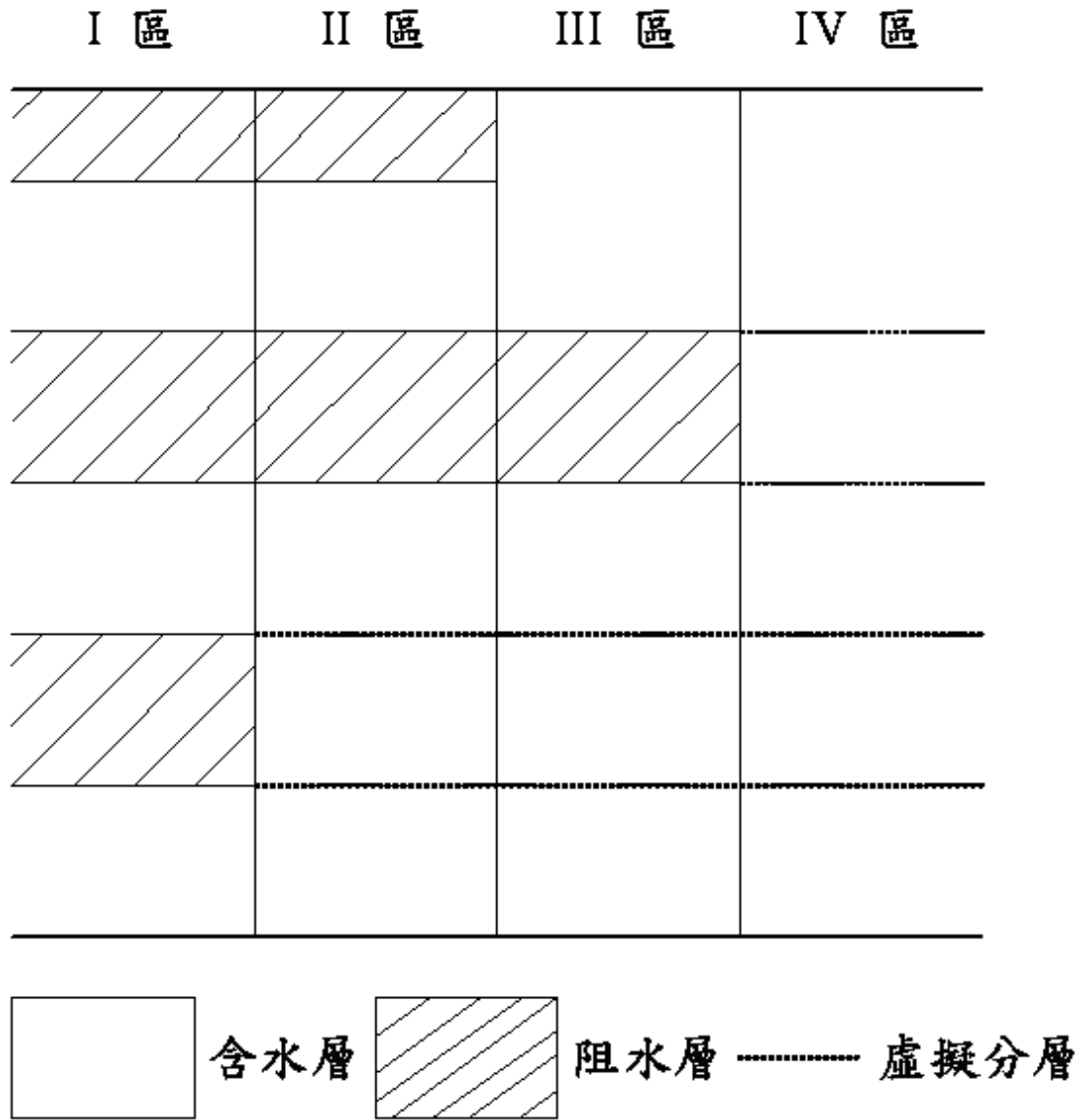
圖片來源：蔡東霖(2001)

圖4.3 濁水溪沖積扇數值模擬邊界示意圖



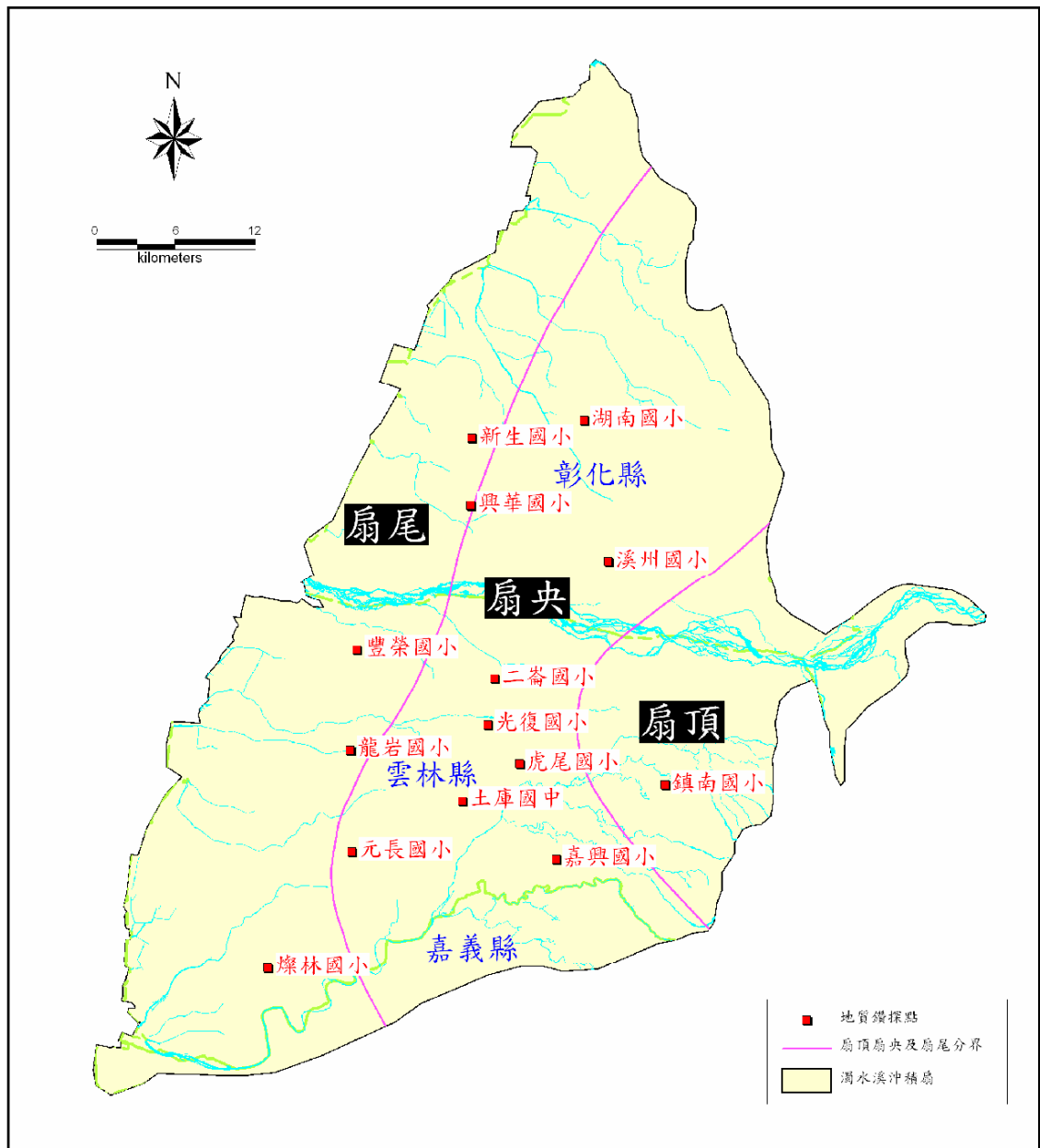
圖片來源：蔡東霖(2001)

圖4.4 濁水溪沖積扇地層下陷模擬水平分區網格示意圖



圖片來源：蔡東霖(2001)

圖4.5 濁水溪沖積扇地質垂直分層示意圖



資料出處：經濟部水利署

圖4.6 濁水溪沖積扇各鑽探點位置圖

濁水溪扇頂

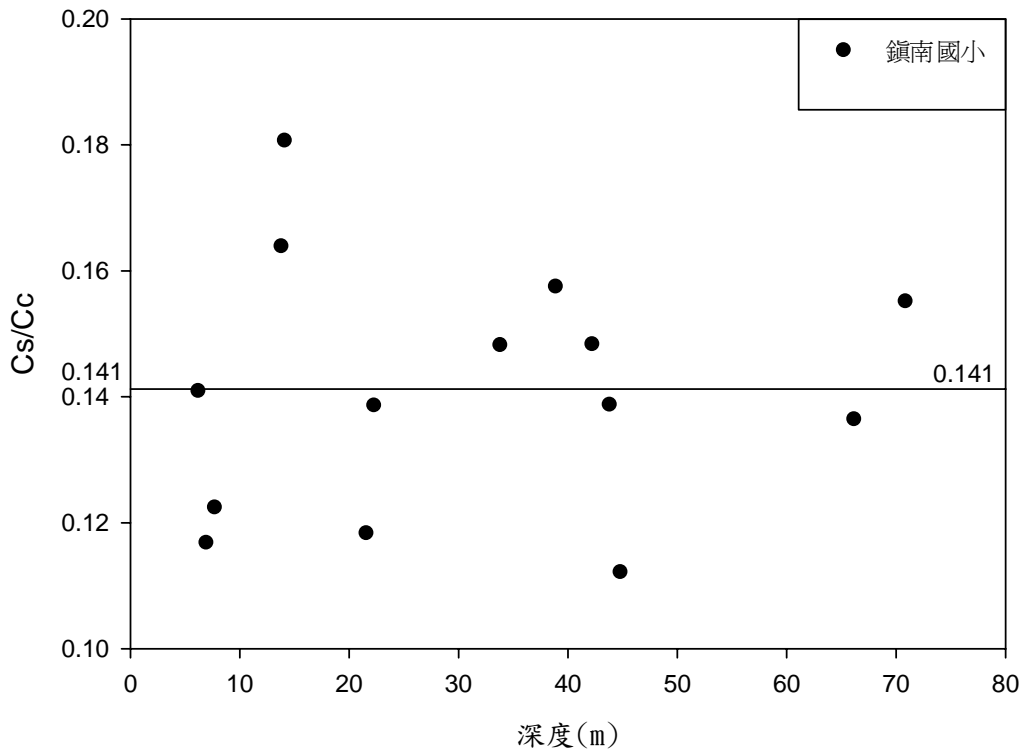


圖4.7 濁水溪沖積扇(扇頂)土壤 C_s/C_c 隨深度變化圖

濁水溪扇央

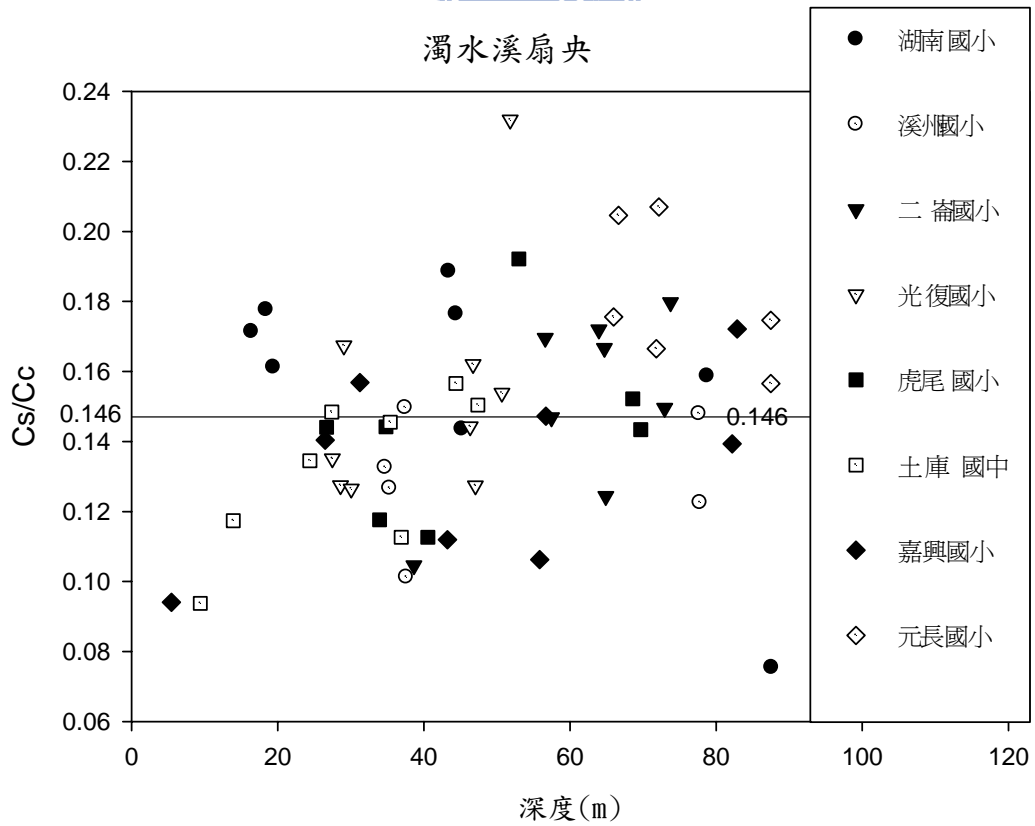


圖4.8 濁水溪沖積扇(扇央)土壤 C_s/C_c 隨深度變化圖

濁水溪扇尾

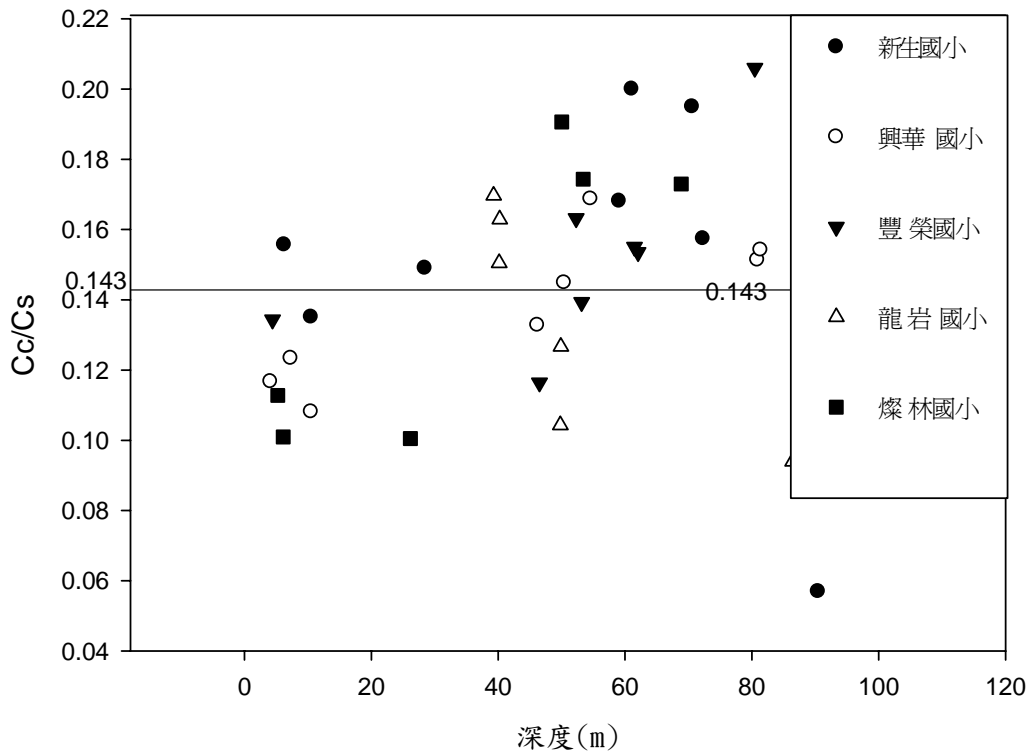


圖4.9 濁水溪沖積扇(扇尾)土壤 C_s/C_c 隨深度變化圖

變異係數 C_v

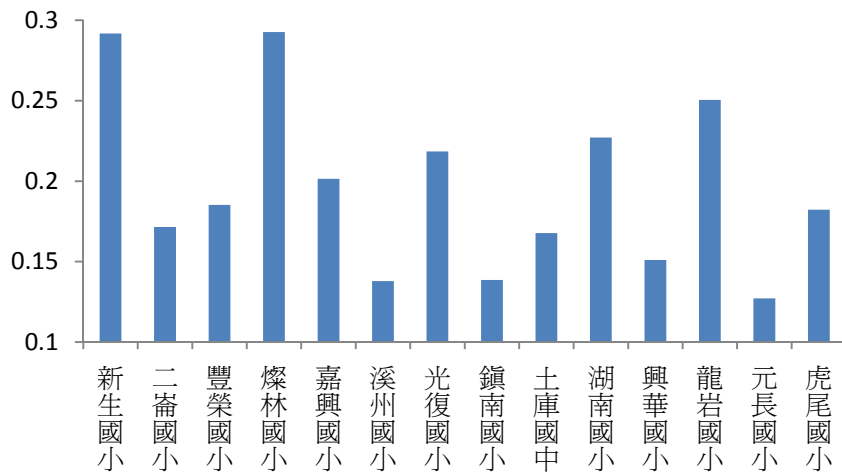


圖4.10 濁水溪沖積扇各鑽探站 C_s/C_c 變異係數分布圖

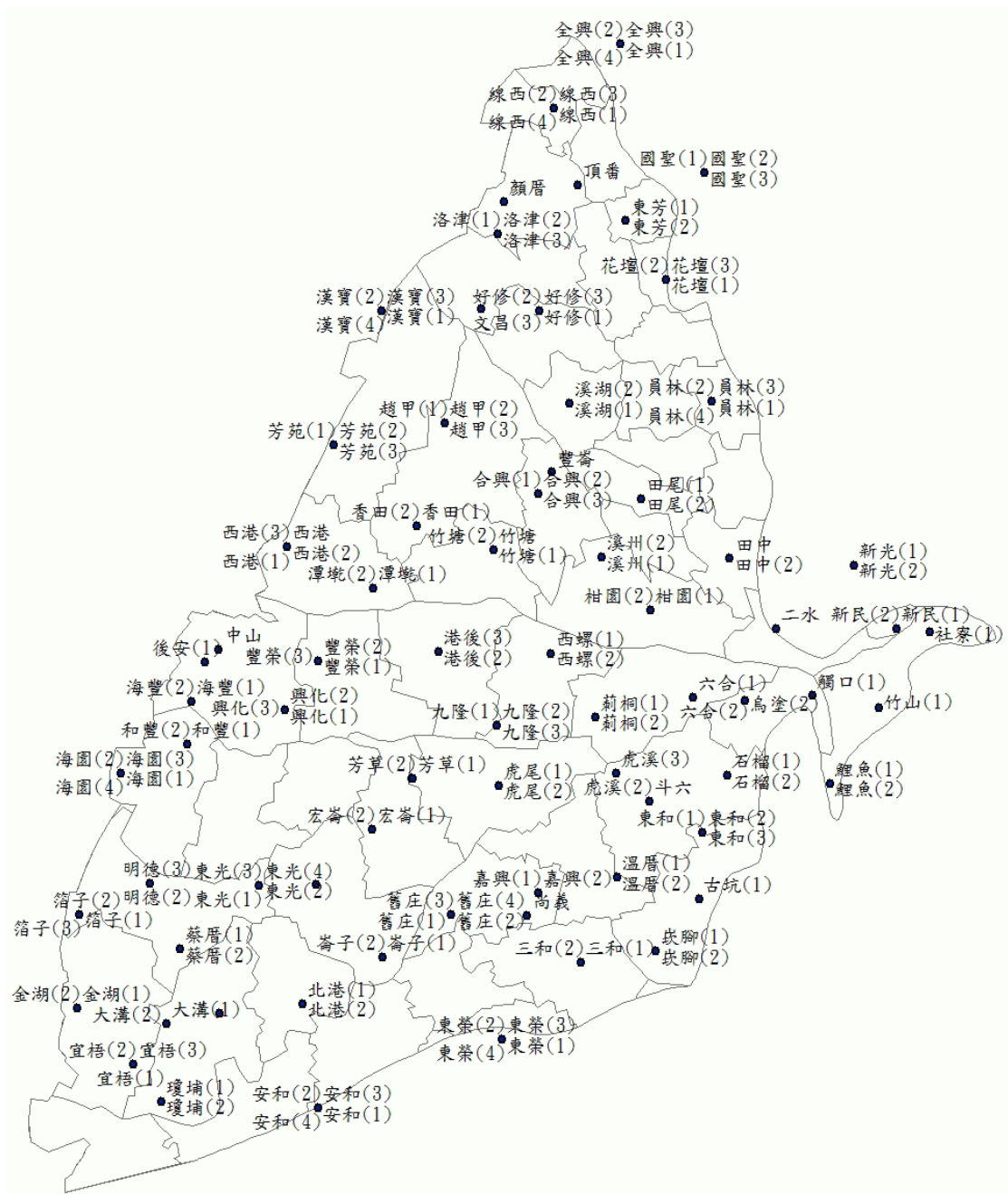


圖4.11 地下水觀測井網分布圖

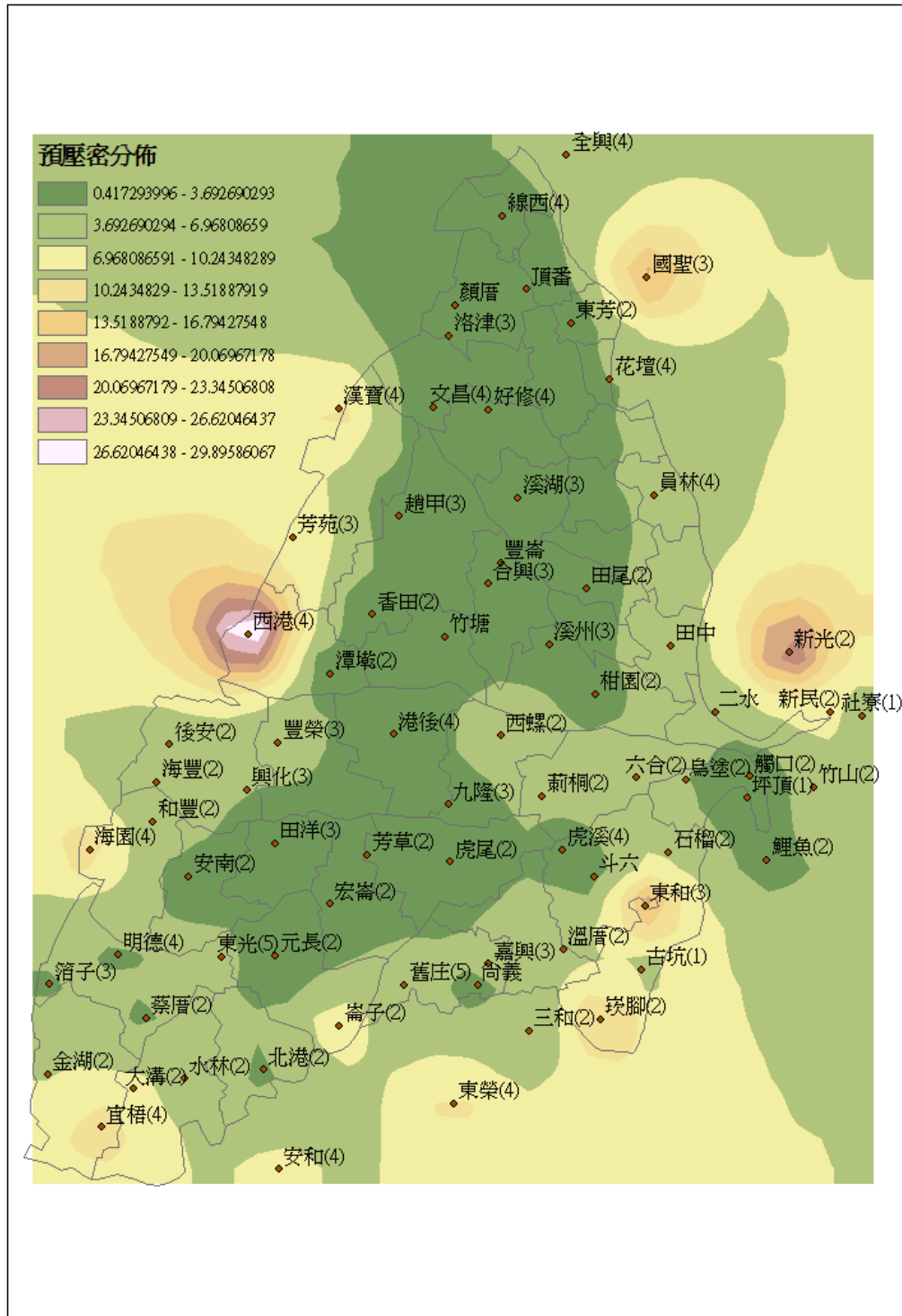


圖4.12 濁水溪沖積扇現況地下水位與預壓密水頭差值分布圖

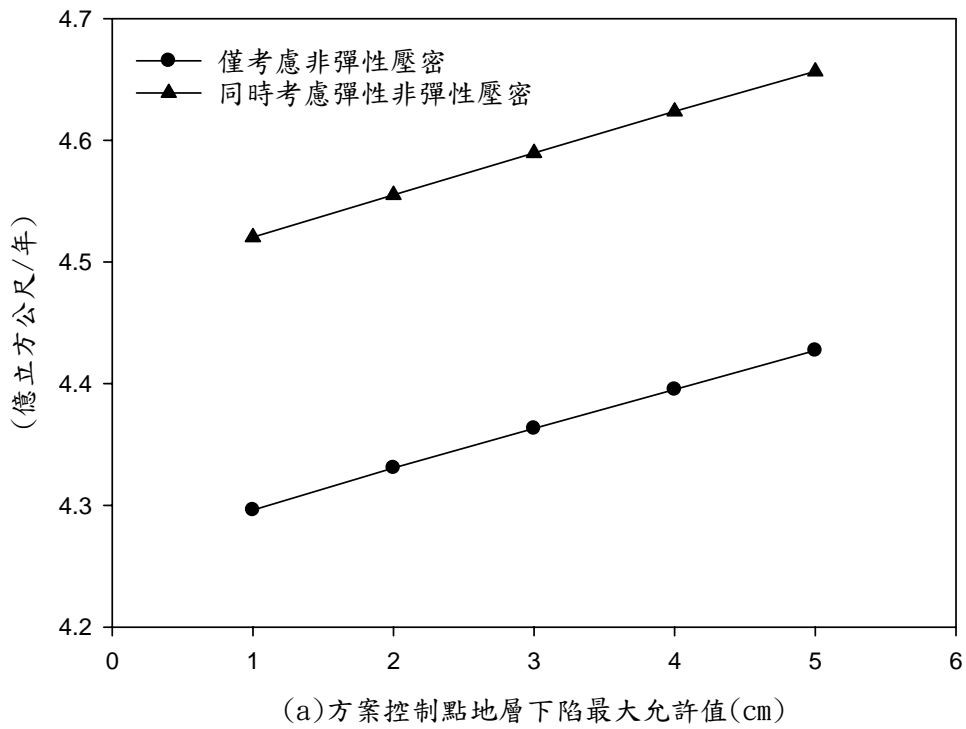


圖4.13 方案(a)最大可抽水量與控制點地層下陷最大允許值關係圖

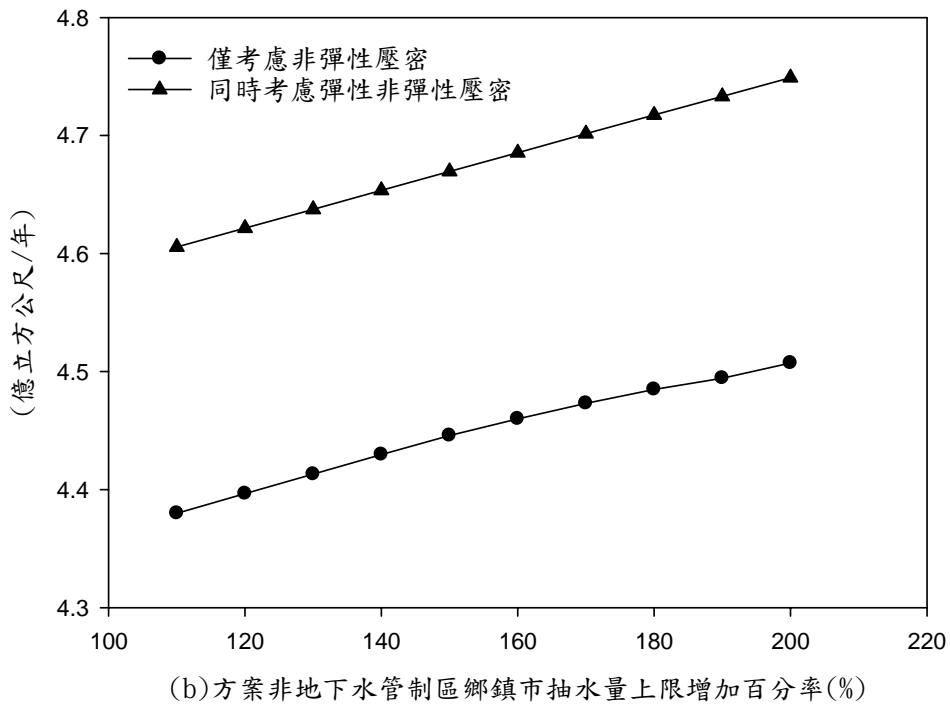


圖4.14 方案(b)最大可抽水量與其他區抽水量上限關係圖