

# 海岸地區地陷潛能與危險評估技術(3/3)

## Assessment on Risk and Potential of Land-Subsidence in Coastal Area (3/3)



主辦機關：經濟部水利署

執行單位：國立交通大學防災工程研究中心

中華民國九十二年十一月

## 海岸地區地陷潛能與危險評估技術(3/3)

### 參與工作人員

計畫主持人：楊錦釗 交通大學土木工程學系教授

協同主持人：黃良雄 台灣大學土木工程學系教授

專任研究人員：蔡東霖 交通大學防災工程研究中心研究助理教授

兼任研究人員：湯有光 香港科技大學土木工程學系教授

張哲豪 台北科技大學土木工程學系副教授

許榮庭 台南成大水工試驗所副研究員

張胤隆 交通大學土木系博士班研究生

鍾明格 台北科技大學土木工程學系畢業

## 謝 誌

本研究承蒙經濟部水利署專案補助，在此謹致誠摯謝忱。

## 目 錄

謝誌.....	0-1
目錄.....	0-2

## 【總摘要報告】

目錄.....	I
第一章 前言.....	1
1.1 動機與目的.....	1
1.2 方法與步驟.....	1
1.3 成果摘要.....	4
第二章 地層下陷管理模式整合系統.....	10
2.1 簡介.....	10
2.2 單機版.....	11
2.3 網路版.....	36
第三章 結語.....	50

## 【第三年報告】

摘要.....	0-1
---------	-----

## 【 I. 大區域分區分層地層下陷計算研究子題】

目錄.....	I-I
表目錄.....	I-II
圖目錄.....	I-III
第一章 前言.....	I-1



1.1 研究目的.....	I-1
1.2 前兩年研究成果簡述.....	I-2
1.3 本年度工作項目.....	I-2
1.4 完成之工作項目.....	I-3
第二章 一維耦合地層下陷模式簡介.....	I-5
2.1 理論基礎.....	I-5
2.2 地下水流計算.....	I-10
2.3 垂向土體位移計算.....	I-13
2.4 初始條件.....	I-15
2.5 邊界條件.....	I-15
2.6 控制方程式之無因次化.....	I-18
2.7 數值方法.....	I-19
2.8 模擬所需輸入之資料.....	I-22
第三章 一維耦合地層下陷模式之分析與應用.....	I-24
3.1 國內相關地層下陷計算模式功能列表分析.....	I-24
3.2 濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討.....	I-27
3.3 濁水溪沖積扇終極下陷量之探討.....	I-28
3.4 濁水溪沖積扇地陷潛能之探討.....	I-28
第四章 結語.....	I-32
參考文獻.....	I-35
附錄 A 一維非耦合地層下陷模式之建立.....	I-38
附錄 B 體力效應對土體壓密之探討.....	I-48
<b>【 II. 地層下陷及地下水優化模式研究子題】</b>	
目 錄.....	II-I
表目錄.....	II-III
圖目錄.....	II-IV

第一章 前言 .....	II-1
1.1 研究目的 .....	II-1
1.2 前兩年研究成果說明 .....	II-2
1.3 本年度工作項目 .....	II-2
1.4 本年度完成之工作項目 .....	II-2
第二章 文獻回顧與研究方法 .....	II-3
2.1 文獻回顧 .....	II-3
2.1.1 Multiple Realization Method .....	II-3
2.1.2 機率優化模式 .....	II-4
2.2 研究方法 .....	II-5
第三章 機率優化模式架構 .....	II-7
3.1 機率優化模式建立 .....	II-7
3.2 限制式不確定性分析 .....	II-9
3.3 單位響應係數不確定性分析 .....	II-11
3.4 機率優化模式求解方法 .....	II-12
第四章 模式驗證 .....	II-13
4.1 驗證案例區域概述與優化模式設定 .....	II-13
4.2 敏感度分析 .....	II-13
4.3 機率優化模式計算結果驗證與分析 .....	II-14
第五章 濁水溪沖積扇之應用模擬 .....	II-18
5.1 濁水溪沖積扇區域概述 .....	II-18
5.1.1 區域概述 .....	II-18
5.1.2 地質概況與地質分層 .....	II-19
5.1.3 地下水使用與地層下陷概況 .....	II-19
5.1.4 地下水管制區與嚴重地層下陷區 .....	II-20
5.2 地層下陷數值模式設定與資料處理 .....	II-22
5.2.1 地質分層與分區 .....	II-22

5.2.2 水利傳導係數與拉梅常數之給定 .....	II-22
5.2.3 抽水井位置及分層抽水比例 .....	II-23
5.2.4 邊界條件處理 .....	II-23
5.3 機率優化模式設定與資料處理 .....	II-24
5.4 機率優化模式應用結果 .....	II-26
第六章 結論 .....	II-30
參考文獻 .....	II-32

### 【 III. 地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題】

目錄 .....	III-I
表目錄 .....	III-III
圖目錄 .....	III-V
第一章 前言 .....	III-1
1.1 研究目的 .....	III-1
1.2 工作項目 .....	III-3
1.3 工作進度 .....	III-6
第二章 系統架構 .....	III-7
2.1 整體規劃 .....	III-7
2.1.1 專案管理 .....	III-7
2.1.2 地層展示 .....	III-8
2.1.3 平面分區 .....	III-9
2.1.4 模式格網與參數 .....	III-9
2.1.5 網際網路地圖伺服器架構 .....	III-10
2.2 網際網路與單機版本 .....	III-12
2.3 系統移轉需求 .....	III-14
第三章 地陷模式 .....	III-15
3.1 使用說明 .....	III-15

3.2 地陷模式規格修正 .....	III-17
3.3 測試案例說明 .....	III-18
第四章 網際網路與單機版程式說明.....	III-20
4.1 網際網路版 .....	III-20
4.2 單機版 .....	III-22
4.3 使用虛擬實境技術編輯井柱 .....	III-24
4.3.1 虛擬實境技術編輯井柱需求定義 .....	III-24
4.3.2 由井柱資料自動產生井柱 .....	III-25
4.3.3 由井柱資料動態產生等位面並加入虛擬實境場景中 .....	III-25
4.3.4 使用者編輯井柱資料(含水層或阻水層厚度) .....	III-25
4.3.5 編輯後井柱資料傳回伺服器資料庫內 .....	III-25
4.4 使用與維護手冊編寫原則 .....	III-25
第五章 結論 .....	III-27
5.1 年度完成工作項目 .....	III-27
5.2 結論 .....	III-28
參考文獻 .....	III-29
附錄 A 地層下陷管理模式整合系統單機版使用與維護手冊 .....	III-60
附錄 B 地層下陷管理模式整合系統網路版使用與維護手冊 .....	III-71
附錄一 第一年期末報告審查意見處理情形 .....	附-1
附錄二 第二年期末報告審查意見處理情形 .....	附-6
附錄三 第三年期中報告審查意見處理情形 .....	附-10
附錄四 第三年期末報告審查意見處理情形 .....	附-13
附錄五 技術轉移教育訓練講習會 .....	附-17

# 總摘要報告

## 目 錄

目錄 .....	I
第一章 前言 .....	1
1.1 動機與目的 .....	1
1.2 方法與步驟 .....	1
1.3 成果摘要 .....	4
第二章 地層下陷管理模式整合系統 .....	10
2.1 簡介 .....	10
2.2 單機版 .....	11
2.3 網路版 .....	36
第三章 結語 .....	50

# 第一章 前言

## 1.1 動機與目的

台灣地區發生地層下陷之區域大多分布於西南沿海地區，其造成主要原因乃肇於不當之土地利用及水資源無法有效管制使用所致。由於地下水超抽導致台灣海岸地區相繼發生地層下陷現象，並因地勢沉陷衍生暴潮溢淹與水土資源永久性傷害等問題，使社會付出巨大成本。為有效防患地層下陷之潛在危機，除了持續進行長期性的系統性監測工作以掌握地層下陷動態外，對於嚴重地層下陷區與下陷潛勢區，亟需進一步建立地陷潛能與危險評估技術，以提供執行地層下陷區防護管理措施之參考。

本研究之目的，除了發展區域地下水文平衡推估模式、大區域分區分層地層下陷模式與地層下陷及地下水優化模式等相關地層下陷分析所需工具外。另一個目的，係在利用地理資訊決策支援系統，整合上述三個模式，發展一套地層下陷管理模式整合系統。藉由地理資訊決策支援系統之整合，使得地層下陷管理模式具有通用性及容易操作之特點。此外，區域性地下水文平衡最佳推估模式、大區域分區分層地層下陷計算模式與地層下陷及地下水優化模式之結合，不但可以有效且精確地預測地層下陷量及判別地層下陷潛勢區，更可以進行最佳地下水資源調配方案之演練，以作為執行地層下陷區防護管理措施之參考。本研究選擇濁水溪沖積扇為應用模擬地區。

## 1.2 方法與步驟

「海岸地區地陷潛能與危險評估技術」研究計畫包括區域性地下水文平衡最佳推估模式、大區域分區分層地層下陷計算、地層下陷資料之地理資訊決策支援系統、以及地層下陷及地下水優化模式等四個研究子

題。研究之流程圖與各子題相互支援圖，分別如圖 1-1 與圖 1-2 所示。

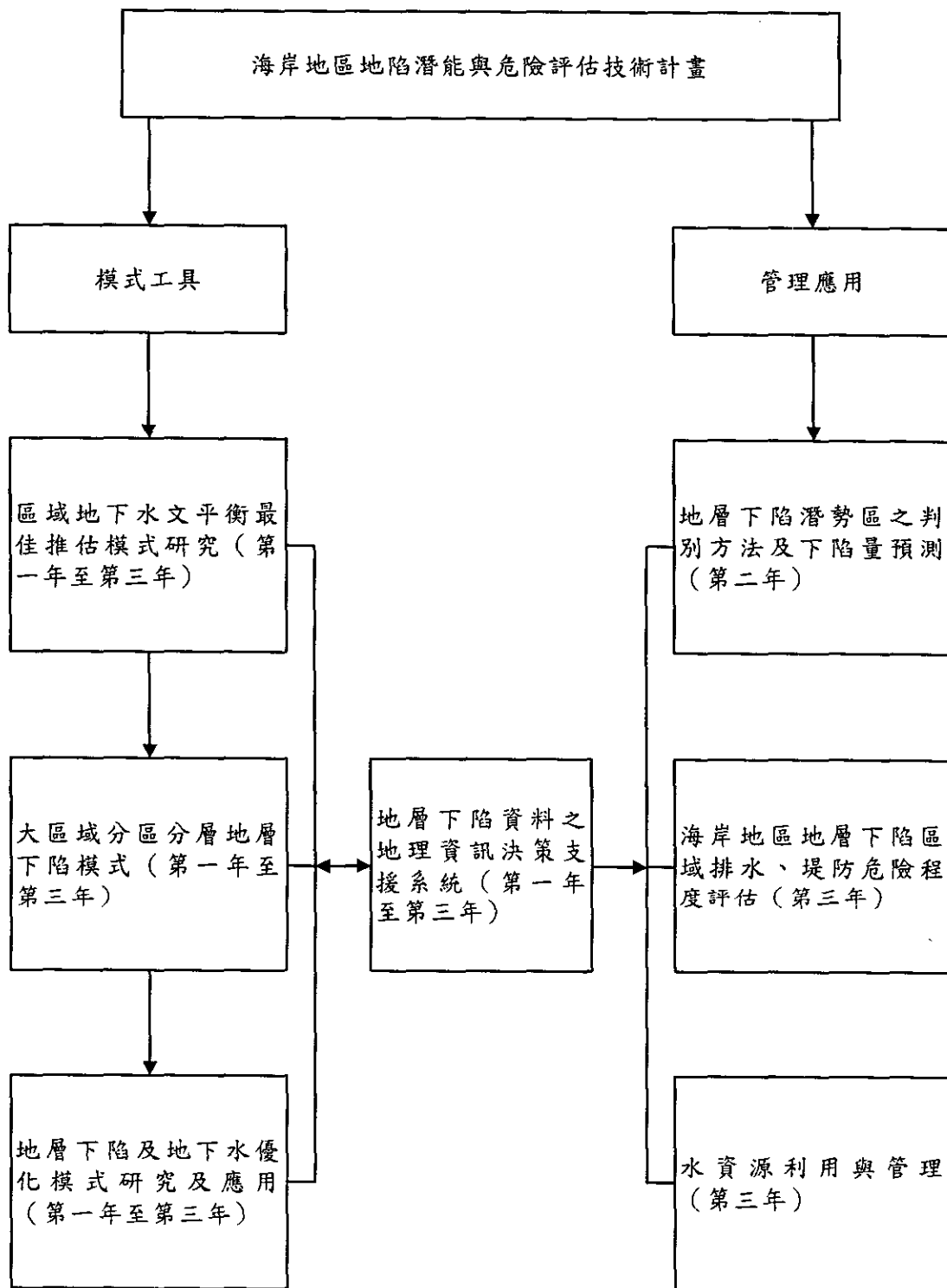


圖 1-1 總體計畫流程圖



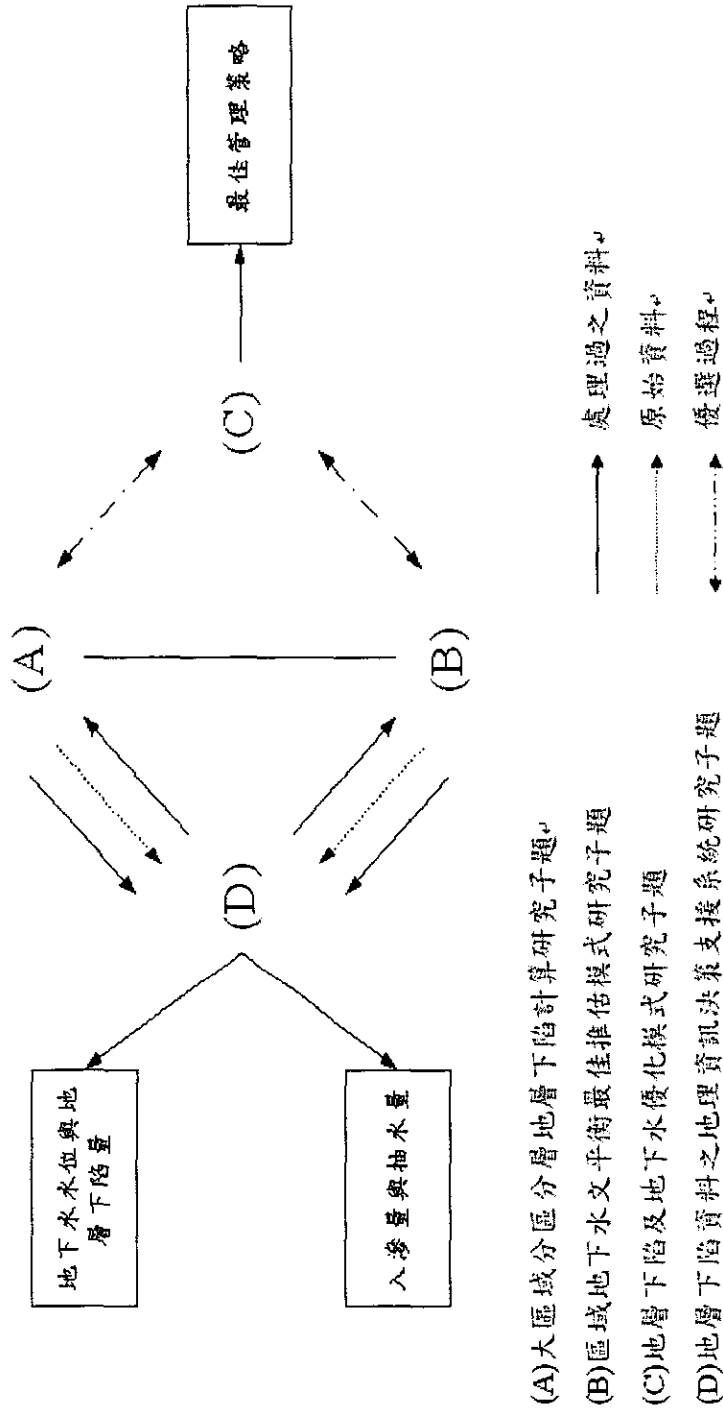


圖 1.2 各研究子題相互支援圖

本研究係利用區域性地下水文平衡最佳推估模式研究子題所推估之入滲量與邊界側流量，以作為大區域分區分層地層下陷計算研究子題發展之含孔隙率時變性一維地下水超抽引致地層下陷模式所需輸入之相關水文平衡參數。地層下陷及地下水優化模式研究子題，則可提供決策者作為地下水資源管理與利用之分析工具，該模式係利用響應矩陣法所建立，而響應係數則由大區域分區分層地層下陷計算研究子題發展之地層下陷模式計算。藉由上述三個研究子題所發展模式之結合，將可完整模擬選定地區地下水之行為，包括入滲量與抽水量之推估、地下水位以及地層下陷之變化等，並且藉由優化模式訂定最佳化之水資源管理與利用方針，以達到充分掌握地下水及地層下陷變化並且合理利用地下水資源之目標。

上述三個研究子題應用時所需輸入、處理與輸出之資料相當龐大，如鑽探岩心、地質分層分區、地下水位資料與地層下陷資料等。藉由地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題之整合，使用者將可經由圖形化以及視覺化之使用介面，非常容易地操作及應用本研究計畫所發展之各種模式。

本研究分三年逐步實施，第一年為相關模式之發展、建立與測試，單機版地層下陷管理模式整合系統架構之開發與測試。第二年主要是應用第一年發展、建立及測試完成之模式，加強模式之功能，並以第一年蒐集較完整之資料予以驗證。加強單機版地層下陷管理模式整合系統之功能，並發展網路版圖資展示系統。第三年為地層下陷及地下水機率優化模式之建立、驗證與應用，以及建立完整地層下陷管理模式整合系統，並辦理人員技術訓練及講習。

### 1.3 成果摘要

以下分別簡述各研究子題所完成之研究成果：

## (一) 區域地下水文平衡最佳推估模式研究

首先收集與整理濁水溪沖積扇相關水文資料，包括地下水補注量研究方法與分析結果，彰化與雲林地區1996年至2000年地下水監測井水位觀測值、降雨量與蒸發量觀測值，以及1996年至1998年農田水利會灌溉用水量統計值等。完成一維垂向未飽和地下水流模式之建立、驗證與現地入滲模擬。結果顯示，彰化地區1997年與1998年之入滲量推估量，分別為5.63億噸與7.19億噸。完成二維垂向飽和與未飽和地下水滲流模式之建立、驗證與河川滲流量之推估。1998年濁水溪沖積扇東側邊界側向流量推估結果顯示，含水層1年側向流量介於0.669億噸至0.7億噸之間，含水層2年側向流量介於0.622億噸至0.645億噸之間，含水層3年側向流量介於0.357億噸至0.383億噸之間，合計三含水層年側向流量約為1.649億噸或1.729億噸，不同含水層之間側向流量之差距在0.3億噸左右。此外，亦協助完成網路版地層下陷管理模式整合系統圖資展示功能，地下水文平衡模式(所需相關資料)與地理資訊決策支援系統之介面連接。

## (二) 大區域分區分層地層下陷計算

大區域分區分層地層下陷計算研究子題，第一年度初步完成一維耦合地層下陷模式控制方程式之推導與求解方法之建立，並提出所需輸入之資料清單。第二年度進一步改良第一年度一維耦合地層下陷模式之建構方式並將控制方程式無因次化，如此不但使模式更通用，亦解決以往為避免數值計算不穩定，時間間距不能太小之缺點，並且具有模擬阻水層貯蓄現象之能力。研究中以兩個簡單案例，深入分析與探討一維非耦合模式以及考慮浮體重力一維耦合模式之差異性，並且提出土體浮體重力相關數學證明。完成簡單案例之分析與探討後，第二年度亦進行濁水溪沖積扇地層下陷現地模擬。模擬時，水田灌溉入滲與旱地降雨入滲兩者之總和入滲量資料資料，乃採用本計畫之區域性地下水文平衡最佳推估模式研究子題所推估之結果，以達到初步整合目的。模擬結果發現，

耦合與非耦合模式之模擬結果相近，顯示濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不顯著。

第三年進一步探討濁水溪沖積扇浮體重力效應之影響，分別由濁水溪沖積扇地層下陷模擬所輸入之土壤參數及土層厚度，以及工研院能資所磁環感應分層式地層下陷監測井土壤柱狀分佈資料，計算浮體重力參數，結果證實濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不明顯。

此外，根據率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數(模擬時間為 84 年元月至 89 年 4 月)，並使用相同之抽水量、入滲量以及邊界條件下，繼續模擬五年，即民國 89 年 4 月至 94 年 4 月，計算可能發生之終極下陷量。此模擬結果，亦可提供河、海岸堤防危險程度評估之用。在現有的計算方式下，即土體之應力應關係為線彈性，濁水溪沖積扇不會發生終極下陷量。但是，若假設土體參數隨孔隙比減少而增加，則可能發生終極下陷量。

最後，亦利用率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數，根據先前所使用之抽水量，即已故嘉義農專沈向白教授所提出之濁水溪沖積扇地下水資源調查資料，分別於各鄉鎮市增加一定抽水量，經由所引發之下陷增加量，評估地層下陷潛能區域。結果顯示，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉乃是地層下陷潛能區。

### (三) 地層下陷資料之地理資訊決策支援系統

第一年完成地層下陷管理模式整合系統雛型架構之建立，然而，在設計上要從單機版轉換到網路版的過程中，許多設計上都必須重新思考更為通用的方式，諸如應用到不同的研究區域，同時多個專案管理的機制，參數輸入形式更為彈性等，都需要相當程度的更新。因此，第二年研究中首先更新單機版使用手冊與維護手冊，同時作為網路版系統文件

的初稿設定，擬透過整體流程文件化方式，以完成系統更新時的整體規劃。配合系統文件更新的同步進行，整合系統介面也因應重新定義配合相關流程，如三維視覺介面的功能擴充，包括井柱地層展示與計算輸出展示等。且為配合地層下陷模式改版，重新設計系統的輸入與輸出，並透過圖形展示功能，示範測試案例。

此外，網際網路版亦進行了相關的整體規劃與建置。研究中已自行開發出網際網路地圖控制的元件，透過系統程式的演練實例，能夠接受多種電子地理圖資格式，達到基本操作的功能要求。網際網路版本的地圖元件也已經開發完成，將原單機版的背景圖資管理系統功能，移植到網際網路版本上。

基於第一年與第二年之基礎，最後一年中，經過反覆之測試與修改，已經完成單機版與網路版之地層下陷管理模式整合系統，並撰寫使用手冊與維護手冊。藉由地層下陷管理模式整合系統，使用者將可經由圖形化以及視覺化之使用介面，非常容易地操作及應用本研究計畫所發展之各種模式。此外，擬定於民國九十二年十一月十七日假國家高速網路與計算中心，舉辦技術轉移教育訓練講習會，見附錄五。

#### (四) 地層下陷及地下水優化模式研究與應用

(因計畫程序問題，本研究子題第二年度之工作項目延至第三年執行)

本研究子題第一年完成地下水優化模式相關研究之文獻蒐集與回顧，並利用響應矩陣法建立考量地層下陷量之定率地下水優化模式。模式藉由三個簡單假設案例驗證後，實際應用於濁水溪沖積扇之模擬。根據水利署所公佈之地下水管制區與嚴重地層下陷區之劃分，藉由不同方案之模擬，以求得滿足彰化雲林地區用水需求下，各方案之最佳抽水策略。初步結果顯示，當增大非地下水管制區內鄉鎮之抽水量上限值至現

行各鄉鎮抽水量上限值之 1.7 倍，且考慮人工補注量為 3.17 億立方公尺/年時(實際執行可能有困難)，最佳抽水量達 7 億立方公尺/年以上，此時非地下水管制區之各鄉鎮地層下陷速率不超過 3 公分/年，而地下水管制區(不包括嚴重地層下陷區)之各鄉鎮地層下陷速率亦介於 0~1 公分/年。第一年執行完成後因計畫執行程序問題，將第二年研究內容延至第三年執行。

第三年進一步建立與應用序率之地下水優化模式。研究中，利用響應矩陣法與一維土體位移代數式建立考量地層下陷量之序率地下水優化模式，進而以一階變異數分析法，推導水頭洩降量與地層下陷量限制式之不確定性。而單位響應係數部分則利用 LHS 統計取樣法與空間變異數分析配合大區域地下水超抽導致地層下陷模式，分析因為水力傳導係數不確定性之影響所造成之不確定性，從而建立以可靠度為考量之機率地下水優化模式。

模式建立後，以一假設之案例驗證模式之合理性與正確性。單因子敏感度分析之結果顯示，機率優化模式中，僅有水力傳導係數與拉梅常數會對限制式造成明顯之不確定性，而土層厚度與比儲水係數則影響甚微。經由以上分析，可大幅降低機率優化模式不確定性分析過程之時間與複雜度。此外，本研究以最佳抽水量配合 LHS 與地層下陷數值模式，證明地層下陷量為常態分布假設之合理性以及一階變異數分析法計算地層下陷量不確定性之正確性。

模式驗證後，將其應用於濁水溪沖積扇地區模擬，結果顯示，在符合地層下陷量限制要求下，提高非地下水管制區內鄉鎮市之抽水量上限值，可適度提高濁水溪沖積扇之最佳抽水量，且不致產生地層下陷危害。

濁水溪沖積扇地下水年需求量約 9.0 億噸，扣除集集共同引水計畫約可供應 2.0 億噸之用水，尚須 7.0 億噸之地下水需求量。然根據應用結果顯示，即使當各觀測點之給定可靠度皆僅設為 50% 時，不考慮人工補注

之行為，在兼顧嚴重地層下陷區不得再下陷，而其餘地區之地層下陷速率減緩之目標下，濁水溪沖積扇之地下水年安全出水量亦僅有 3.5 億噸，與第一年定率優化模式計算結果相近，尚遠低於其需求量，而若提高給定可靠度，亦即要求更低之地層下陷災害發生風險，則安全出水量將降至約 1.0 億噸，然根據秦啟文(2000)之研究，濁水溪沖積扇現況年地下水抽取量約為 7.0 億噸至 10.0 億噸，由此顯示目前濁水溪沖積扇尚面臨地下水超抽之問題。濁水溪沖積扇區域未合法登記之私有抽水井數量非常多，其違法之抽水不僅使相關單位難以規範，更可能增加地層下陷之速率，因此加強相關單位查緝私井之動作並配合地下水優化模式，當可更有效的解決濁水溪沖積扇地下水過度超抽、地層下陷嚴重之問題。

## 第二章地層下陷管理模式整合系統

### 2.1 簡介

海岸地區地陷潛能與危險評估技術計畫之目的，除發展區域地下水文平衡推估模式、大區域分區分層地層下陷模式以及地層下陷及地下水優化模式等相關地層下陷分析工具外，研究中更進一步利用地層下陷資料之地理資訊決策支援系統，整合上述三個地層下陷相關分析工具，發展一套地層下陷管理模式整合系統。如此，使用者即可經由圖形化以及視覺化之使用介面，非常容易地操作所需輸入、處理與輸出之資料，如鑽探岩心、地質分層分區、地下水位資料與地層下陷資料等，並且應用本研究計畫所發展之各種模式。

地層下陷管理模式整合系統分為單機版與網路版等兩種版本。單機版主要功能是提供輔助工具，讓使用者產生大區域分層分區地層下陷模式模擬所需輸入檔案，進而執行模式運算。網路版主要是提供線上查詢功能，讓使用者查詢各類資料，並可上傳地形監測資料與各種模式之模擬結果。吾人必須強調，因為計算尺度與計算時間的問題，單機版中未納入區域地下水文平衡推估之功能，但是已將地層下陷模擬所需輸入之相關地下水文資料格式化，使用者可簡單地將相關地下水文模式所模擬之結果，輸入單機版中供地層下陷模擬使用。譬如，可將 HEC-1 所推估之入滲量結果，輸入單機版中以提供地層下陷計算使用。以下分別敘述單機版與網路版之操作步驟。



## 2.2 單機版

地層下陷管理模式整合系統單機版主要是提供輔助工具，讓使用者產生地陷模式輸入檔案，進而執行地陷模式運算。系統架構如圖 2-1。



圖 2-1

## A 專案管理

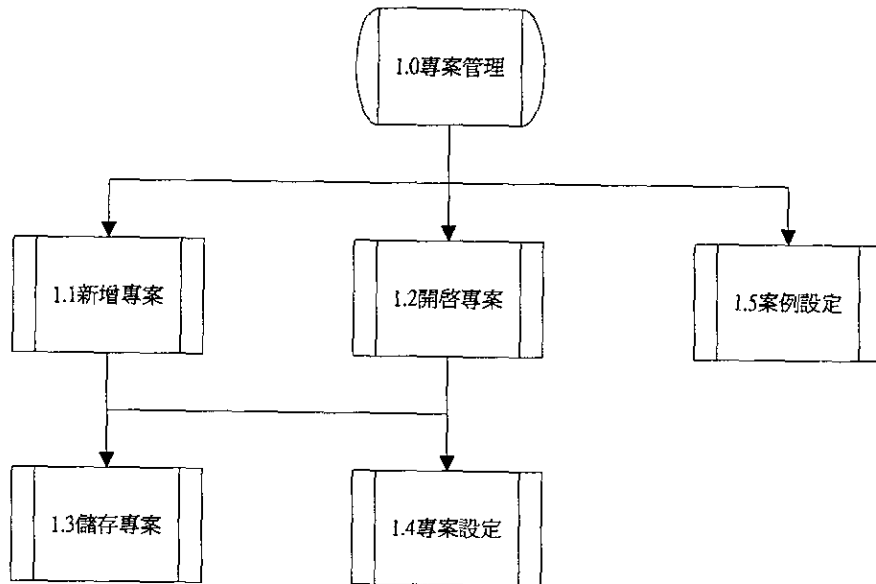
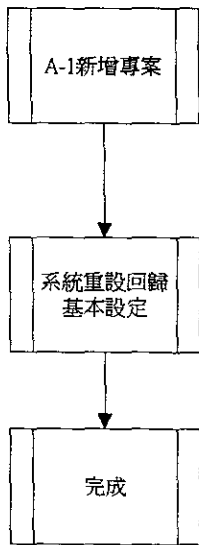


圖 2-2

程序流程如圖 2-2，主要程序分述如下：

1. 新增專案：可以在此新增一個專案，重新設定所有基本資料與參數。
2. 開啟專案：可以載入之前所儲存的專案，繼續工作或修改內容。
3. 儲存專案：儲存已完成或未完成的專案，內容包括基本圖資、參數、地圖等。
4. 專案設定：設定專案的說明、專案目錄及基本圖資等資料。
5. 案例設定：設定案例的名稱，可選取或更名已經存在的案例。

### A-1 新增專案



程序代號：1.1

流程說明：

setp1：若系統已經有其他專案，如圖 2-3。

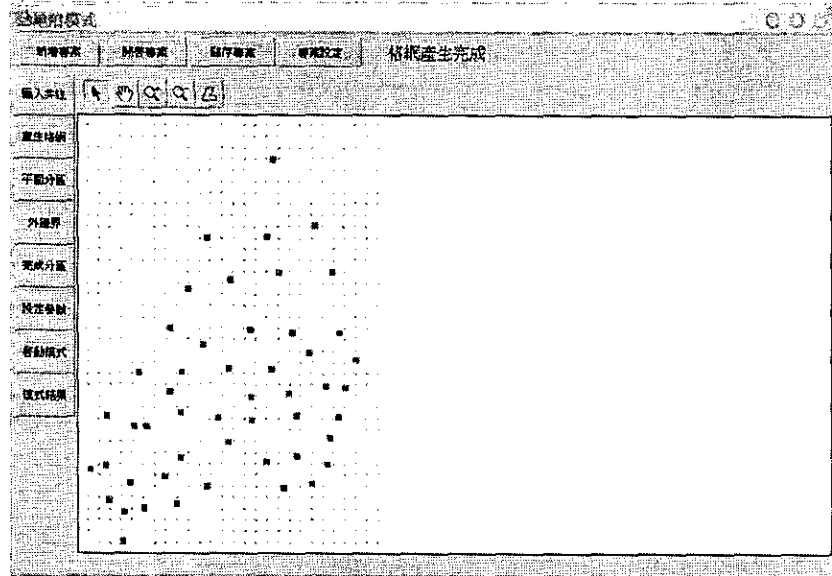


圖 2-3

setp2：點選新增專案後系統重新回歸基本設定。(如圖 2-4)

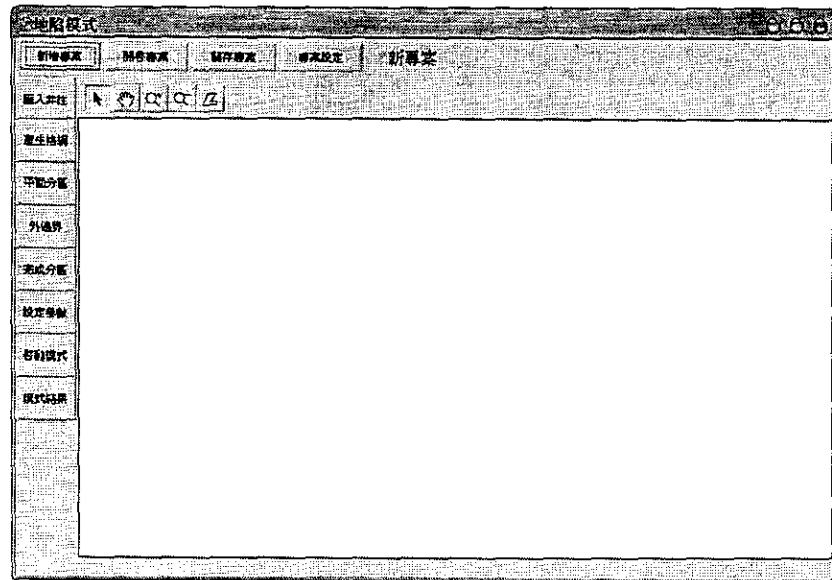
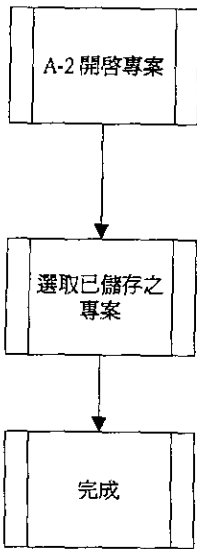


圖 2-4

## A-2 開啟專案



程序代號：1.2

流程說明：

setp1：選擇之前儲存的專案，如圖 2-5。

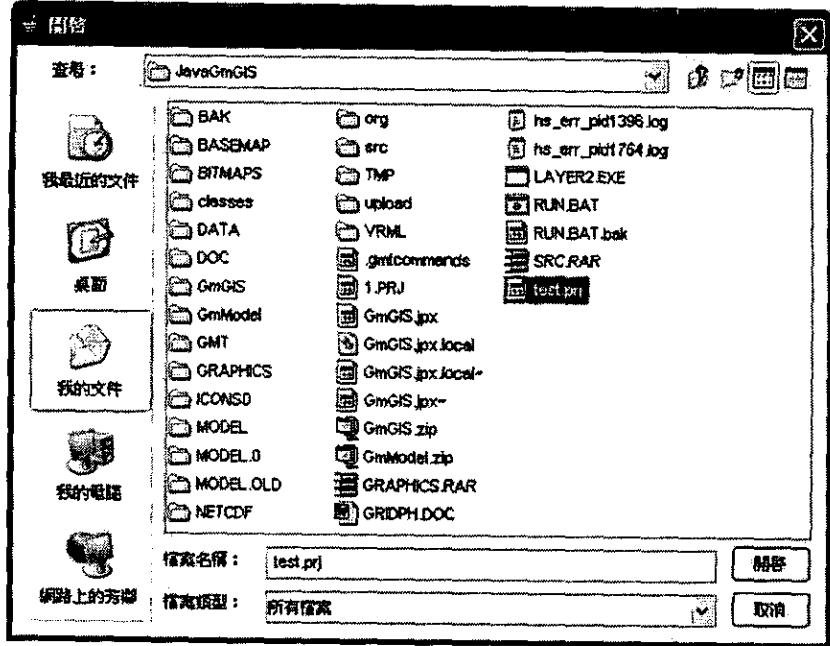


圖 2-5

setp2：點選開啟後系統自動載入儲存之狀態。(如圖 2-6)

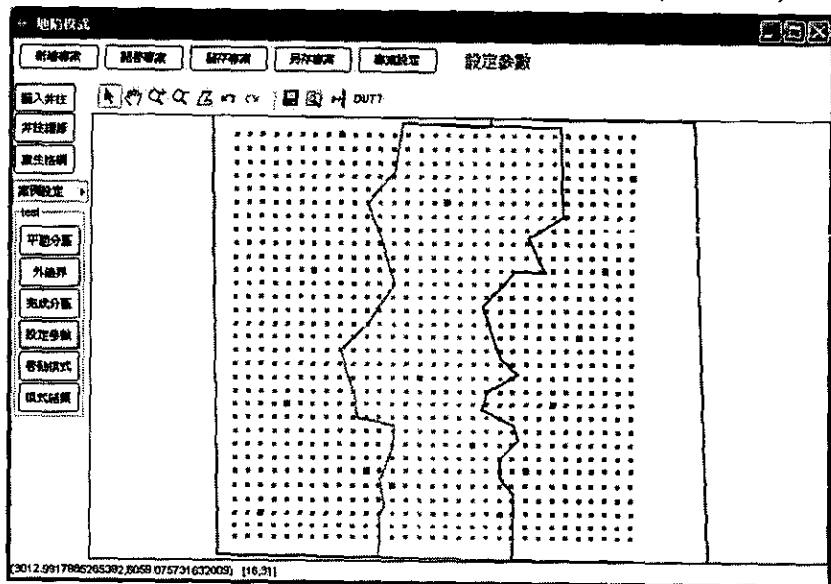
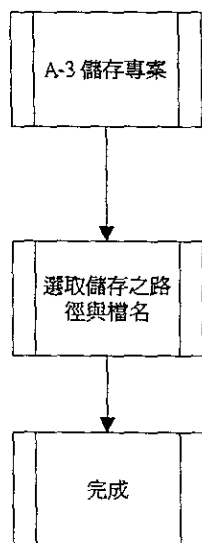


圖 2-6

### A-3 儲存專案



程序代號：1.3

流程說明：

setp1：選擇儲存之路徑與檔名，如圖 2-7。

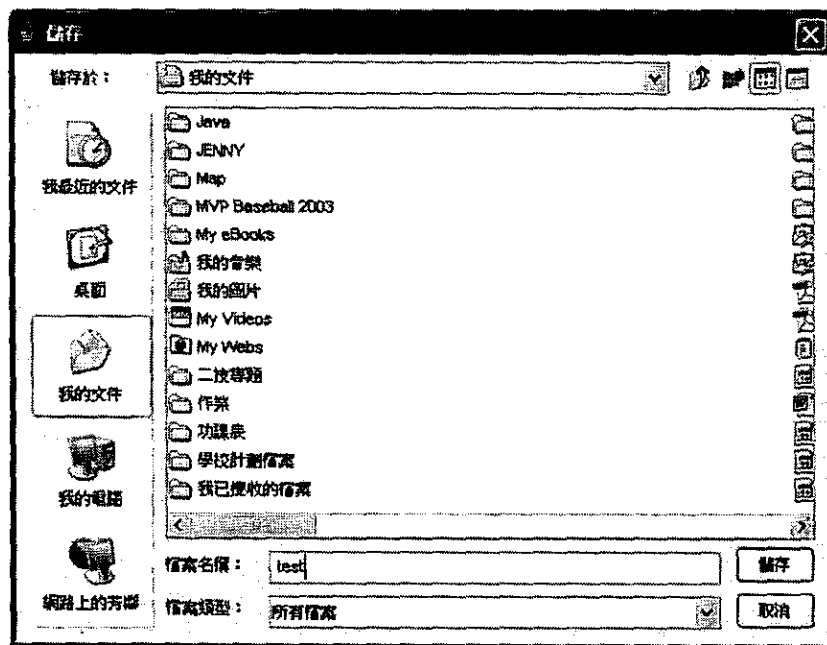


圖 2-7

setp2：點選儲存後系統自動存檔，如圖 2-8。

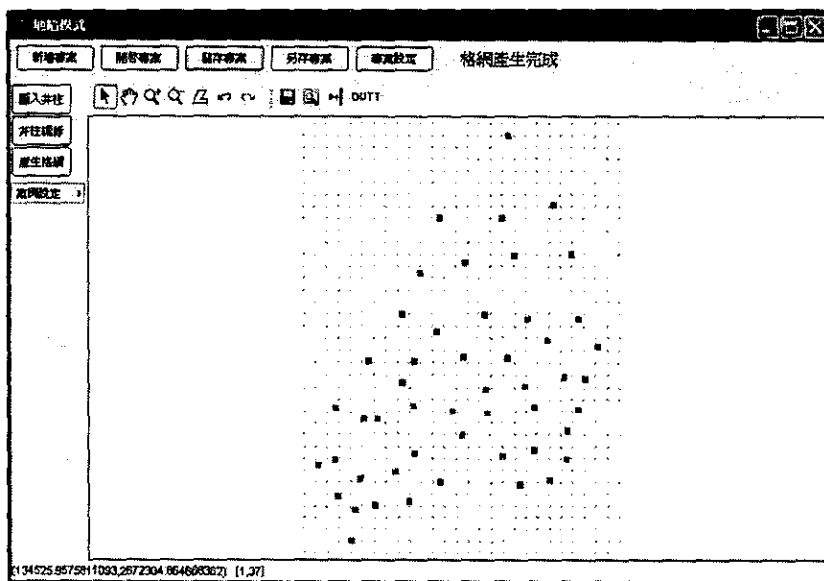
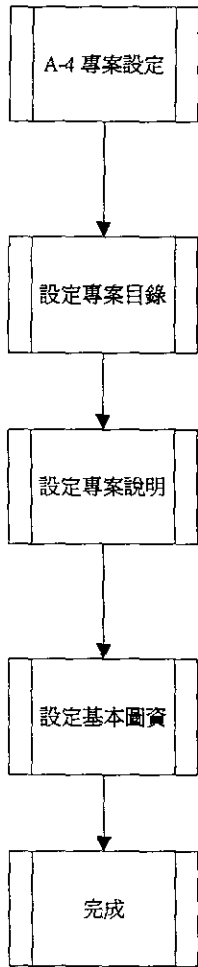


圖 2-8

### A-4 專案設定



程序代號：1.4

#### 流程說明：

setp1：點選專案設定後即可設定專案，如圖 2-9。

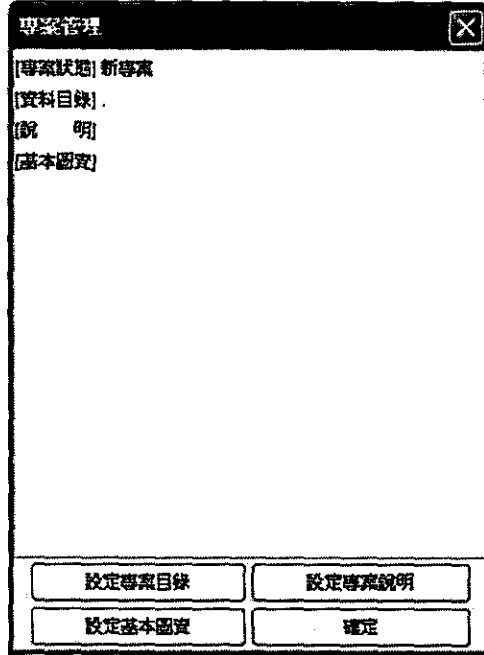


圖 2-9

setp2：點選設定專案目錄即可設定專案目錄，如圖 2-10。

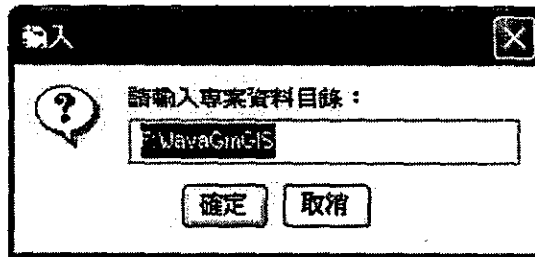


圖 2-10

setp3：點選設定專案說明可設定說明檔，如圖 2-11。

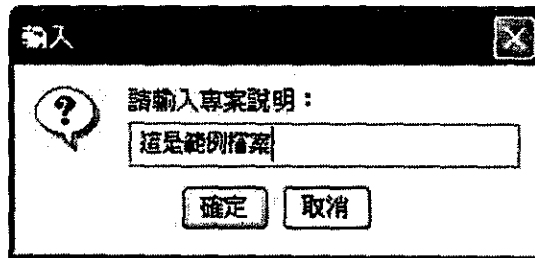


圖 2-11

流程說明：

setp4：點選設定基本圖資即可選取基本圖，如圖 2-12。

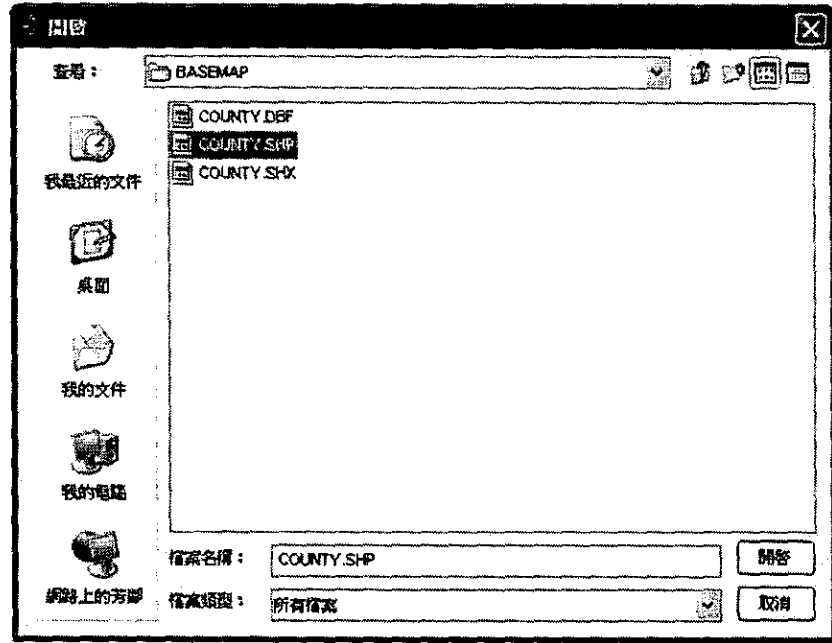


圖 2-12

setp5：完成設定，如圖 2-13。

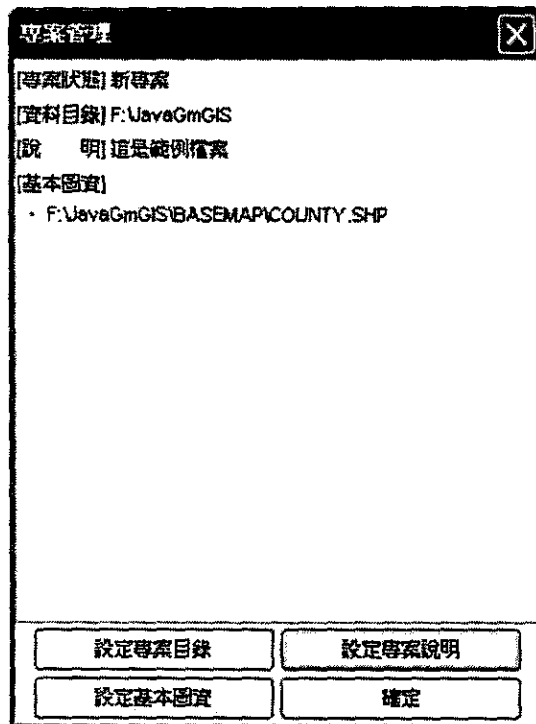
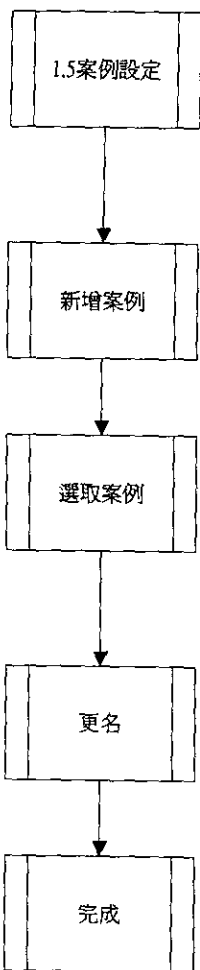


圖 2-13

### A-5 案例設定



程序代號：1.5

流程說明：

setp1：點選新增案例後即可設定案例名稱，如圖 2-14。

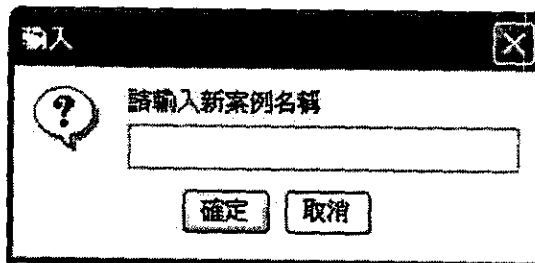


圖 2-14

setp2：在案例設定中可以切換或是更名，如圖 2-15。

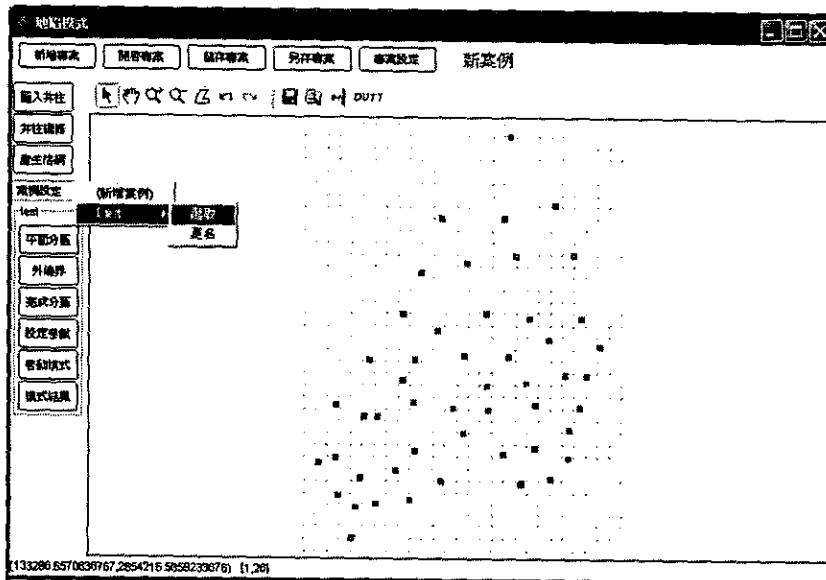


圖 2-15



## B 井柱與格網

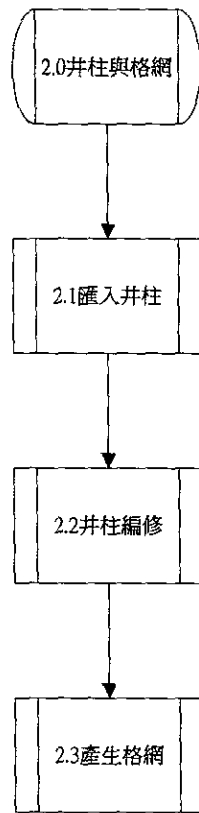
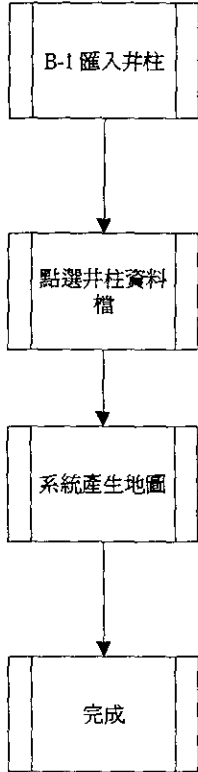


圖 2-16

程序流程如圖 2-16，主要程序分述如下：

1. 匯入井柱：系統可以匯入依照格式所建立之井柱檔案，內容包括分層、分區、座標、地層厚度等資料。
2. 產生格網：系統依照使用者的設定產生格網地圖，以輔助使用者建立地陷模式參數檔。

### B-1 匯入井柱



程序代號：2.1

#### 流程說明：

setp1：點選井柱資料檔案。(如圖 2-17)

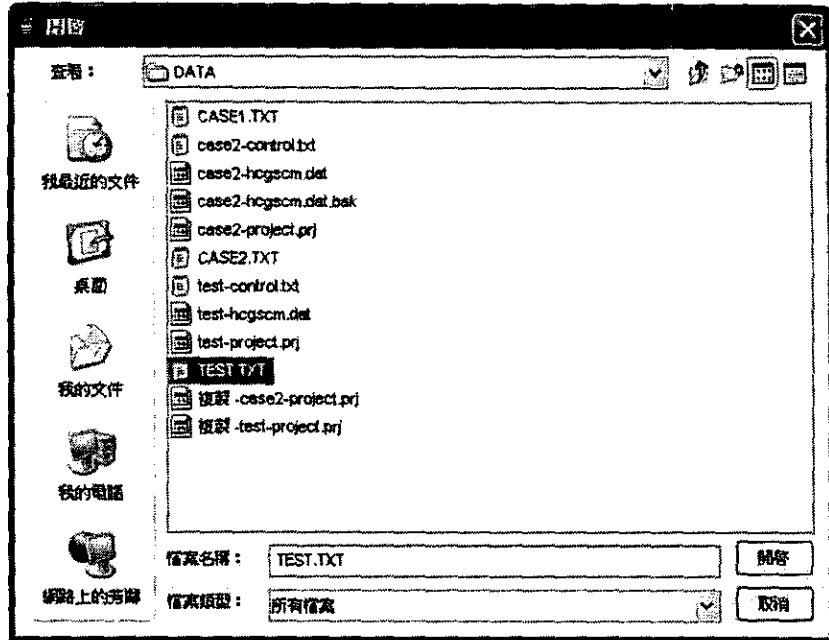


圖 2-17

setp2：開啟後系統自動產生井柱地圖。(如圖 2-18)

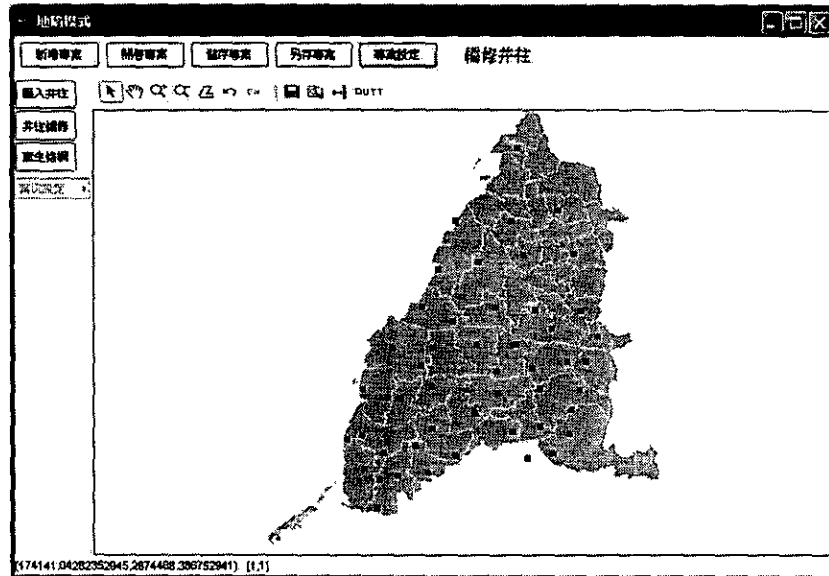
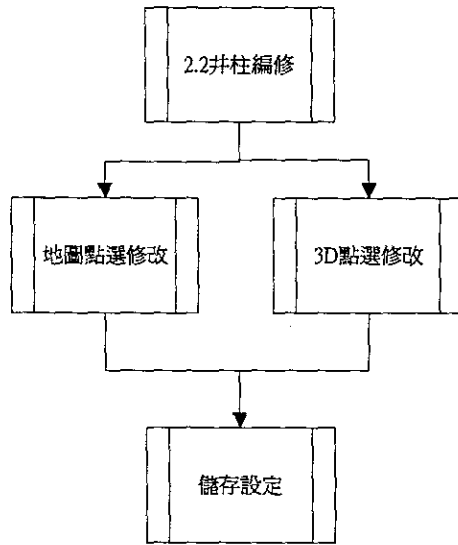


圖 2-18

## B-2 井柱編修



程序代號：2.2

### 流程說明：

setp1：點選地圖上的井柱後會產生修改介面，如圖 2-19。

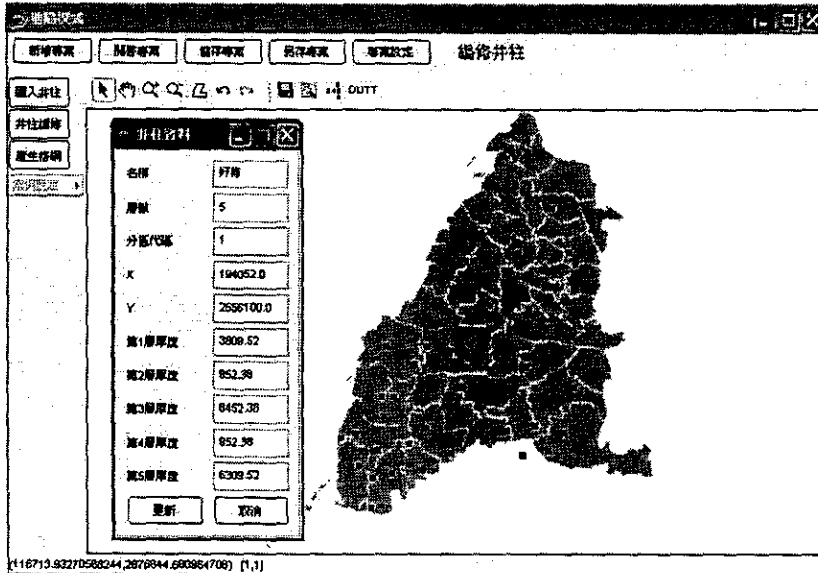


圖 2-19

流程說明：

setp2：利用 3D 介面編修井柱，如圖 2-20。

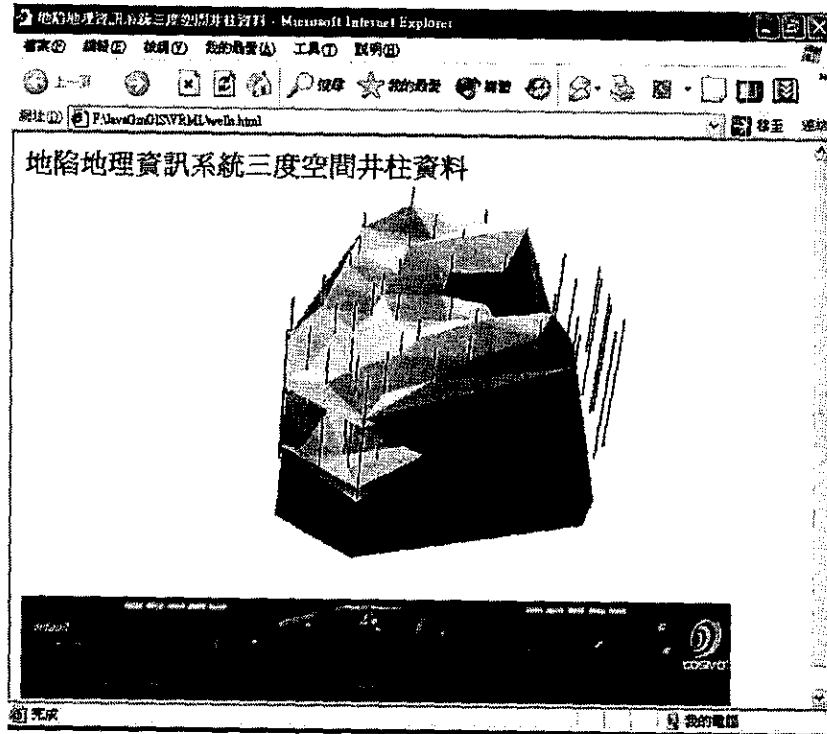


圖 2-20

setp3：點選井柱後出現編修視窗，如圖 2-21。

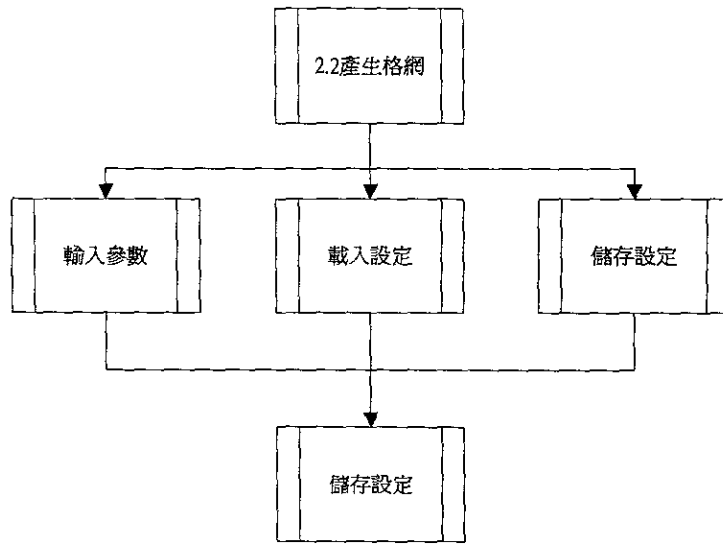
The dialog box, titled "井柱資料", contains the following fields and values:

名稱	崙子
層數	5
分區代碼	1
X	183331.0
Y	2611929.0
第1層厚度	3055.55
第2層厚度	2500.0
第3層厚度	8194.44
第4層厚度	2083.33
第5層厚度	4861.11

At the bottom of the dialog are two buttons: "更新" (Update) and "取消" (Cancel).

圖 2-21

### B-3 產生格網



程序代號：2.3

#### 流程說明：

setp1: 點選產生格網後會產生模式參數控制視窗，如圖 2-22。

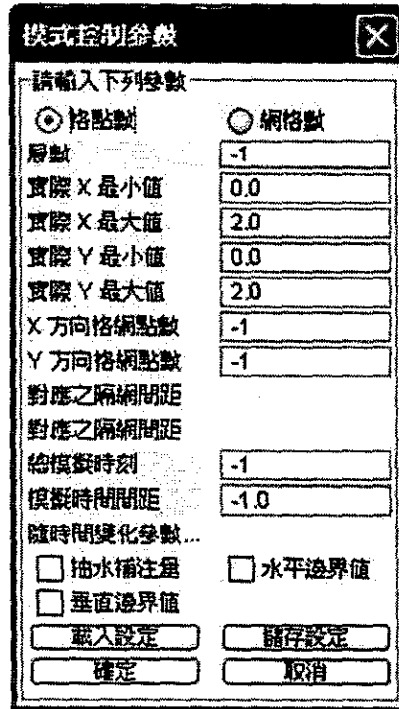


圖 2-22

流程說明：

setp2：可自行輸入參數或載入設定，如圖 2-23。

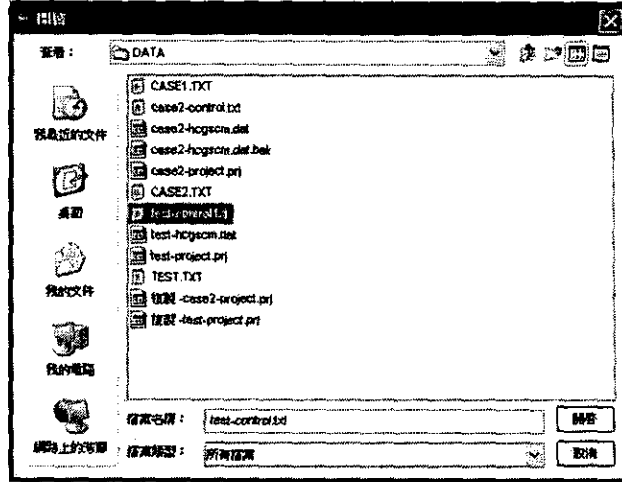


圖 2-23

setp3：可儲存參數，如圖 2-24。

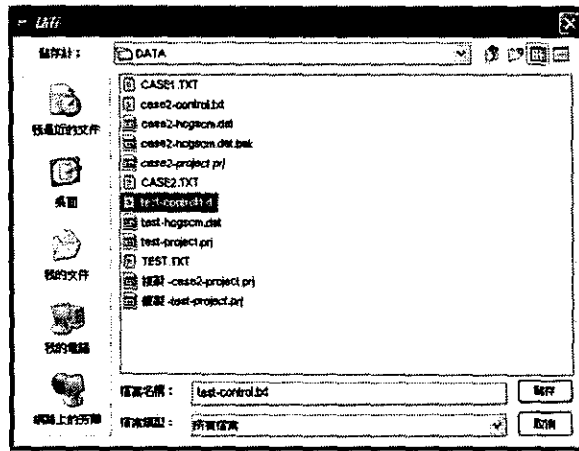


圖 2-24

setp3：完成後如圖 2-25。

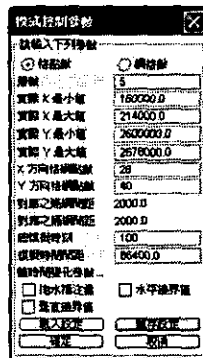


圖 2-25

## C 平面分區

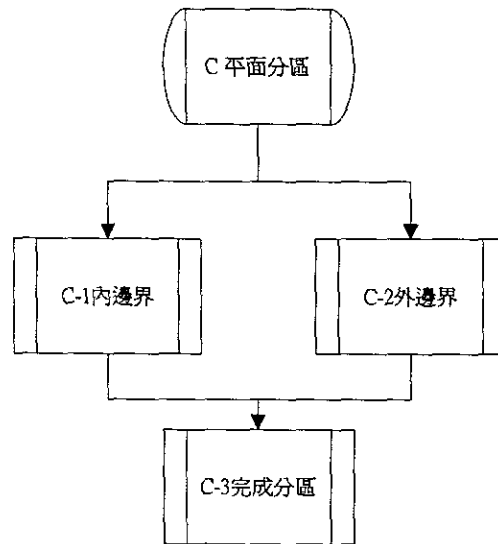
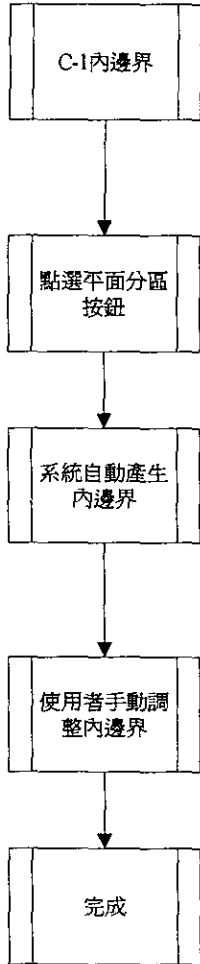


圖 2-26

程序流程如圖 2-26，主要程序分述如下：

1. 內邊界：點選內邊界按鈕後，系統自動產生內邊界，使用者可以利用地圖工具移動內邊界。
2. 外邊界：使用者利用地圖工具在地圖上點選外邊界線，以完成平面分區。
3. 完成分區：系統利用自動產生的內邊界與使用者點選的外邊界線，自動產生分區地圖。

### C-1 內邊界



程序代號：3.1

#### 流程說明：

setp1：點選平面分區按鈕後系統會提醒使用者修改內邊界。  
(如圖 2-27)

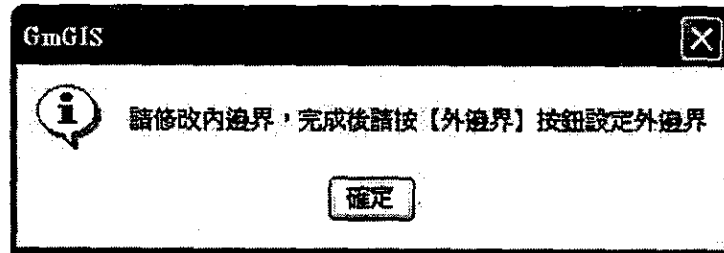


圖 2-27

setp2：系統自動產生內邊界，使用者可以在地圖上移動內邊界線，達到調整的目的。(如圖 2-28)

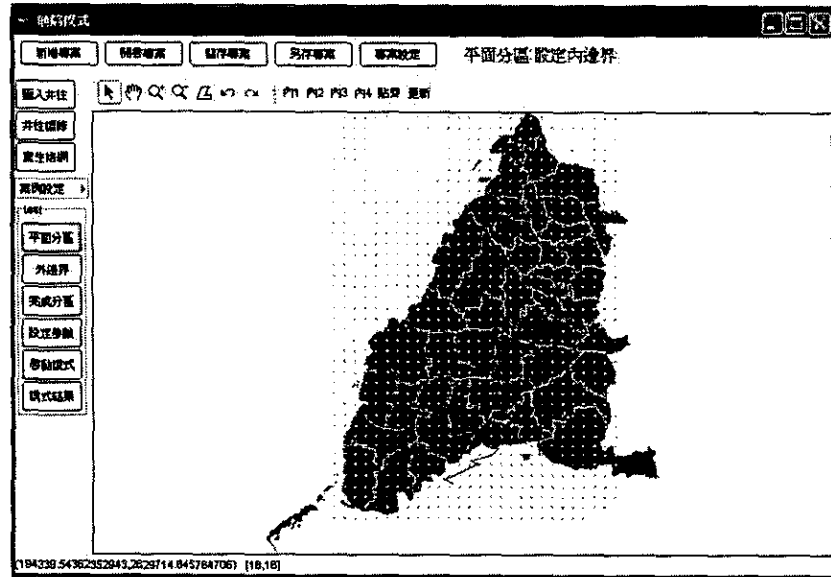
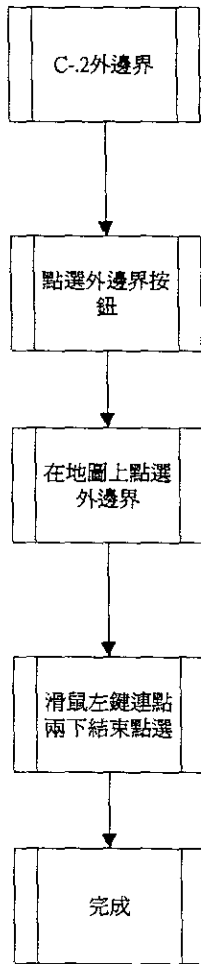


圖 2-28



### C-2 外邊界



程序代號：3.2

#### 流程說明：

setp1：點選外邊界按鈕後系統會提醒使用者完成後的動作。  
(如圖 2-29)

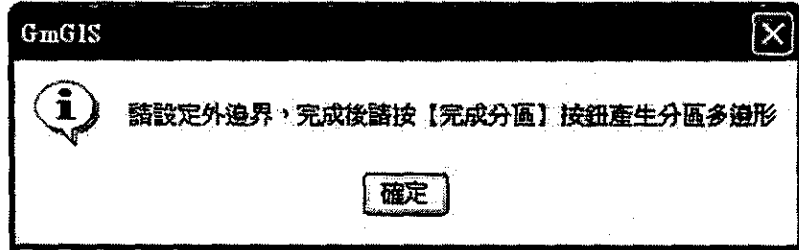


圖 2-29

setp2：在地圖上利用滑鼠左鍵點選外邊界線，結束時滑鼠左鍵連點兩下即閉合。(如圖 2-30)

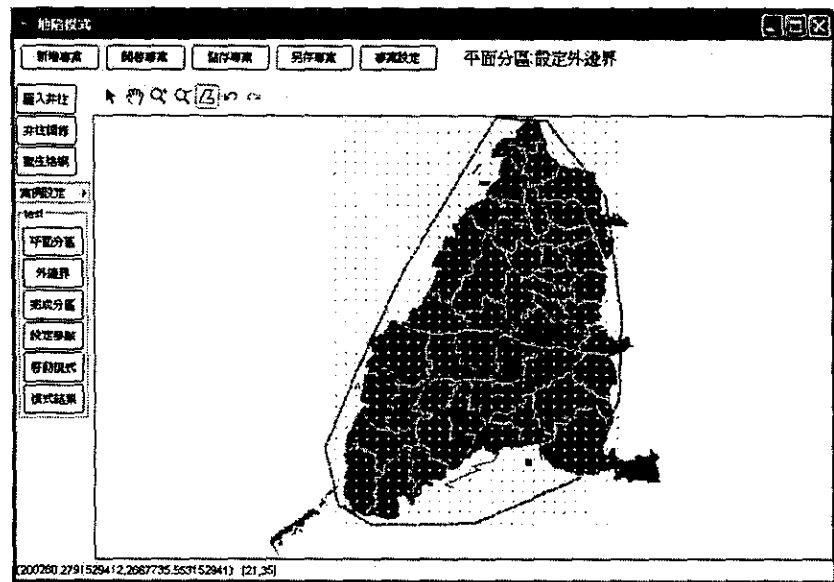
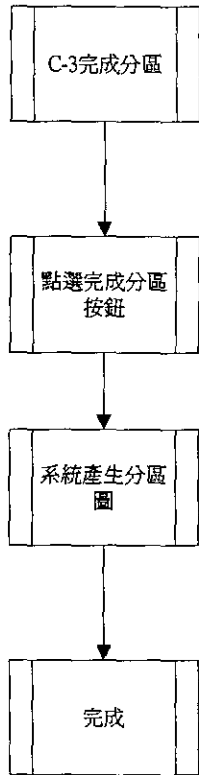


圖 2-30

### C-3 完成分區



程序代號：3.3

#### 流程說明：

setp1：點選完成分區按鈕後系統會自動產生平面分區圖。(如圖 2-31)

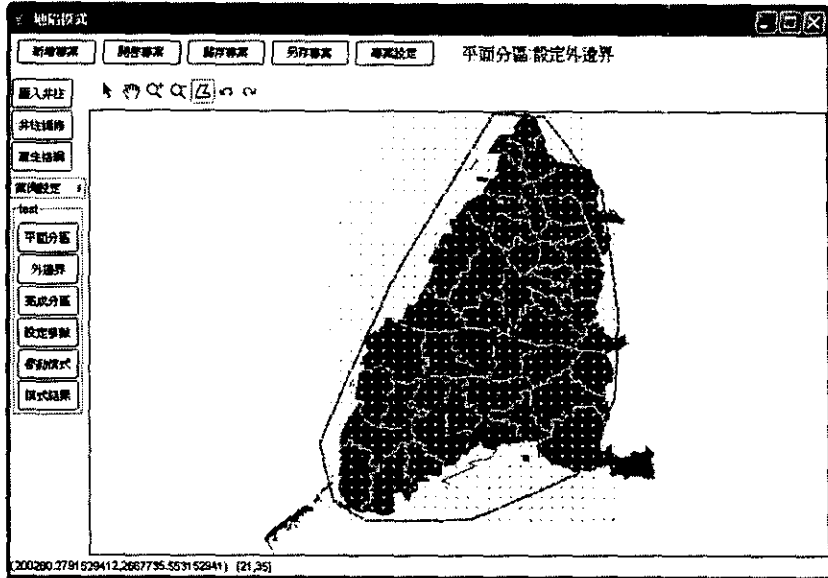


圖 2-31

## D 設定參數

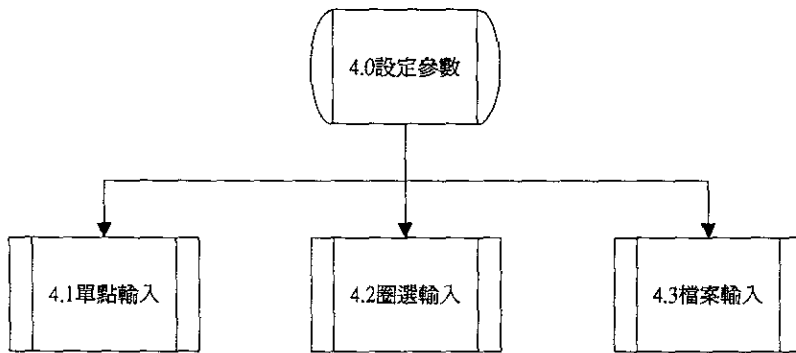
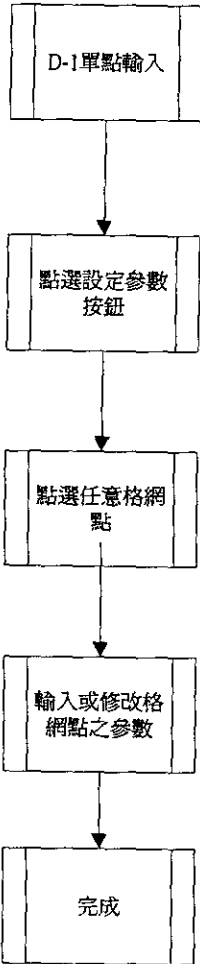


圖 2-32

程序流程如圖 2-32，主要程序分述如下：

1. 單點輸入：使用者可在地圖上點取格網點，系統會顯示該格網點的所有參數，使用者可以任意更改或新增。
2. 圈選輸入：使用者利用地圖工具圈選範圍，系統自動判斷多邊形內的格網點，輸入參數後自動存入選取點的內容。
3. 檔案輸入：使用者利用檔案匯入參數的功能，利用系統提供的匯入視窗選取匯入的對應欄位，即可匯入參數。

D-1 內邊界



程序代號：4.1

流程說明：

setpl：點選設定參數按鈕後系統產生格網參數設定表格，可新增或修改參數。(如圖 2-33)

格網參數設定

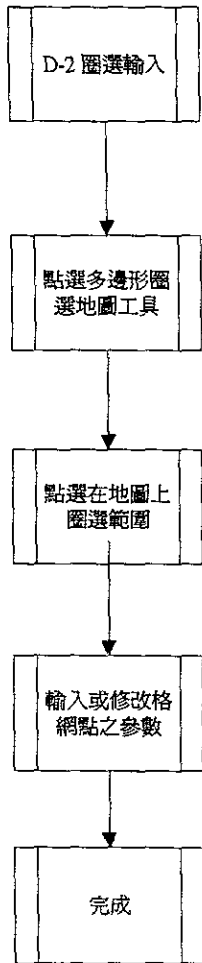
請輸入參數

層數	地質參數-k	地質參數-g	地質參數-l	厚度	滲水係與補注量	含水層初始水位	非滲限合?
第1層	0.0	0.0	0.0	3369.56	0.0	0.0	0.0
第2層	0.0	0.0	0.0	2008.59	0.0	0.0	(不分層)
第3層	0.0	0.0	0.0	8568.45	0.0	0.0	(不分層)
第4層	0.0	0.0	0.0	313.65	0.0	0.0	(不分層)
第5層	0.0	0.0	0.0	7808.57	0.0	0.0	(不分層)

格網：(1,1)  設為觀測點位

圖 2-33

### D-2 圈選輸入



程序代號：4.2

流程說明：

setp1：點選多邊形圈選地圖工具後即可在地圖上圈選範圍。  
(如圖 2-34)

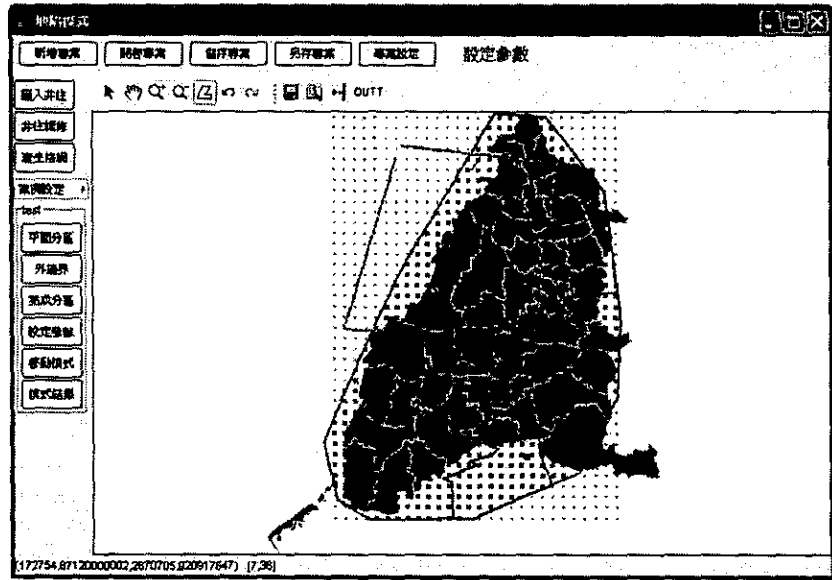


圖 2-34

setp2：圈選完成後可針對選取到的格網點做群組設定。(如圖 2-35)

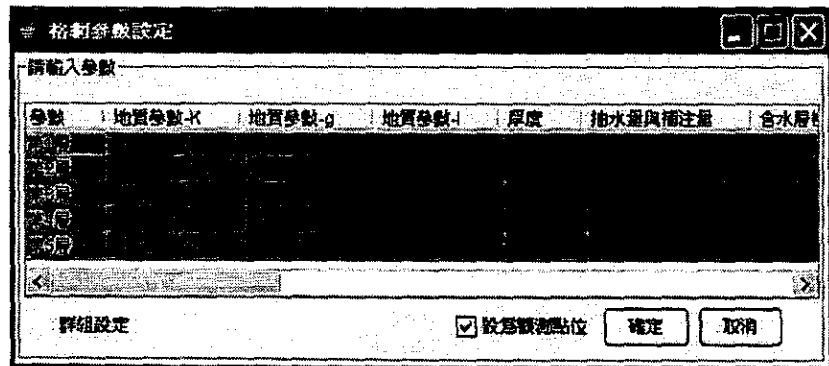
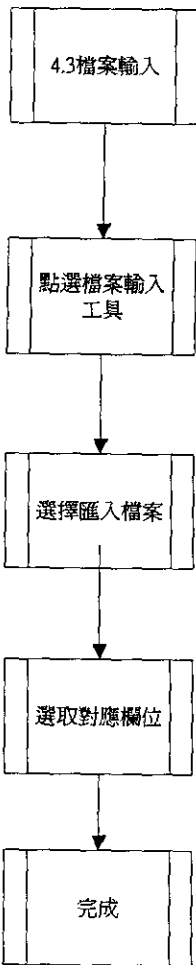


圖 2-35

### D-3 檔案輸入



程序代號：4.3

#### 流程說明：

setp1：點選檔案輸入工具後選擇輸入檔案。(如圖 2-36)

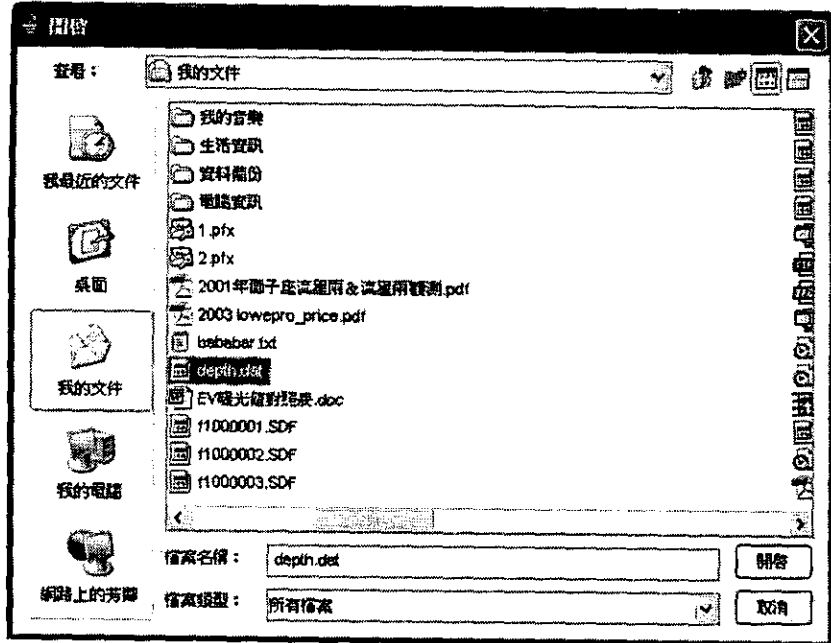


圖 2-36

setp2：選擇輸入檔案對應欄位。(如圖 2-37)

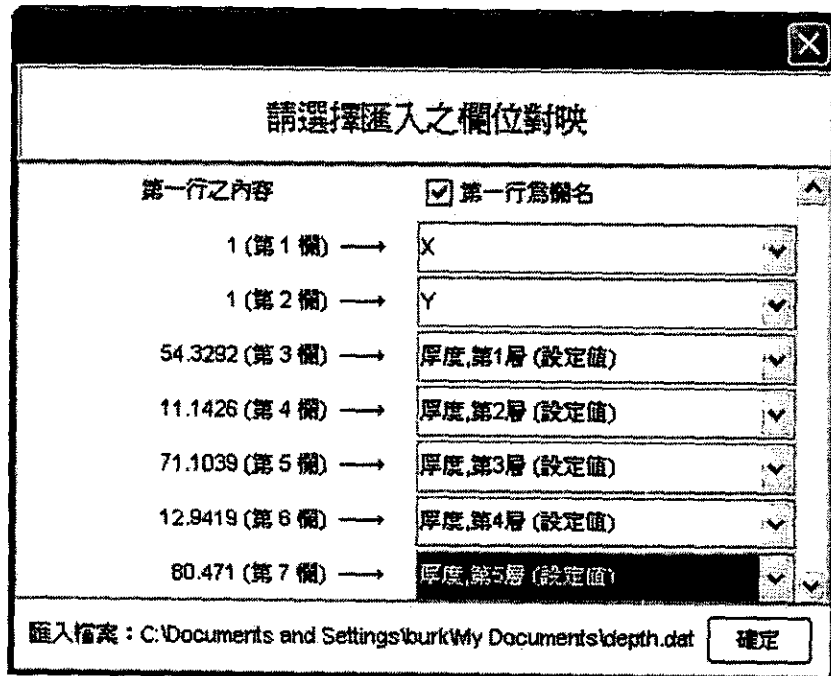


圖 2-37

## E 地陷模式

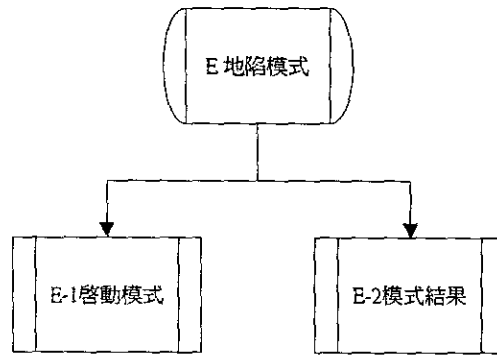
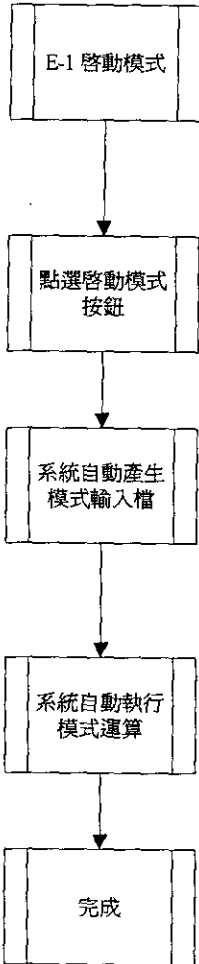


圖 2-38

程序流程如圖 2-38，主要程序分述如下：

1. 啟動模式：使用者可按下啟動模式按鈕，系統自動依照使用者定義的格網參數檔輸出轉換成模式的輸入檔案，並且執行模式運算。
2. 模式結果：使用者按下模式結果按鈕後，系統會顯示模式計算後的成果。

E-1 啟動模式



程序代號：5.1

流程說明：

setp1：使用者按下按鈕，模式執行完畢後會顯示下列視窗。(如圖 2-39)

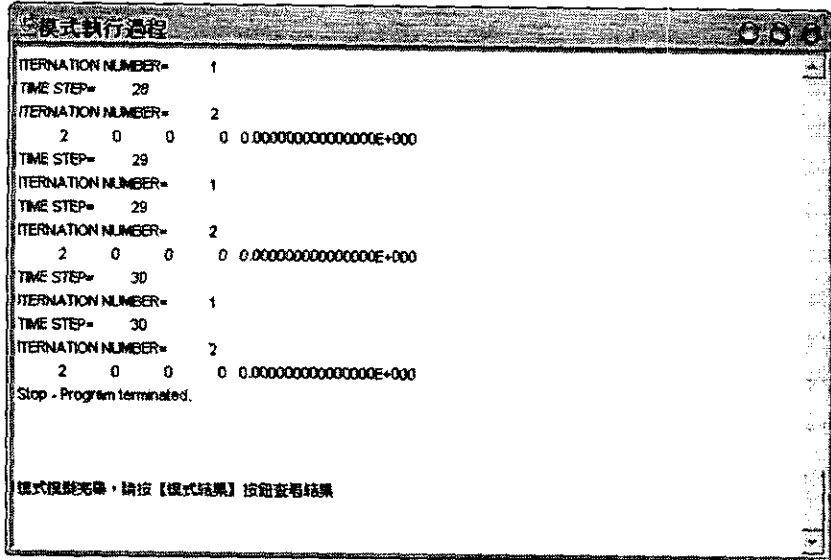


圖 2-39

setp2：系統切換成瀏覽檔案模式，使用者可以點選模式參數檔案察看內容。(如圖 2-40)

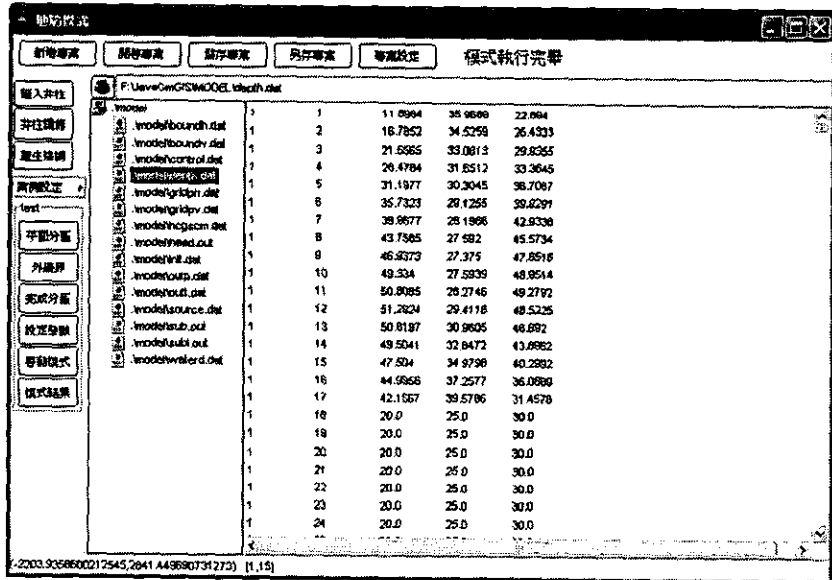
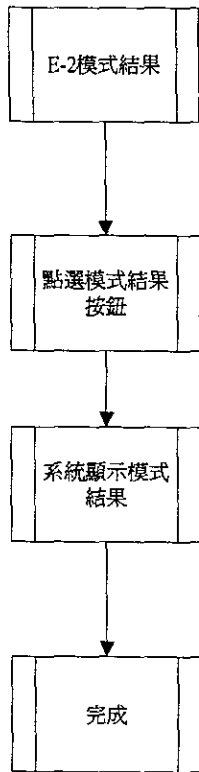


圖 2-40



### E-2 模式結果



程序代號：5.2

#### 流程說明：

setp1：點選模式結果按鈕後，系統顯示模式運算結果。(如圖 2-41)

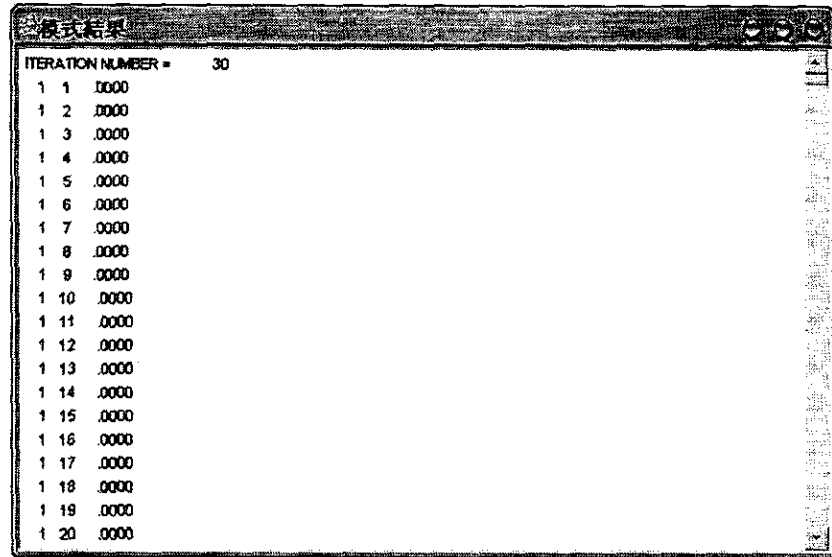


圖 2-41

setp2：點選存檔按鈕，儲存上傳至網路版的結果。(如圖 2-42)

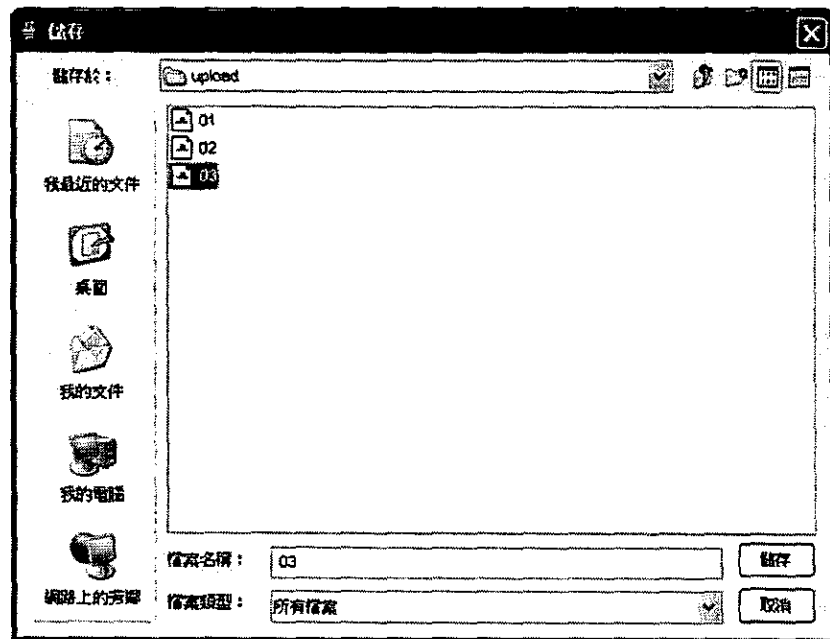


圖 2-42

### 2.3 網路版

地層下陷管理模式整合系統網路版主要是提供線上查詢功能，讓使用者查詢各類資料，並可上傳地形監測資料與地陷模式結果。系統架構如圖 2-43。

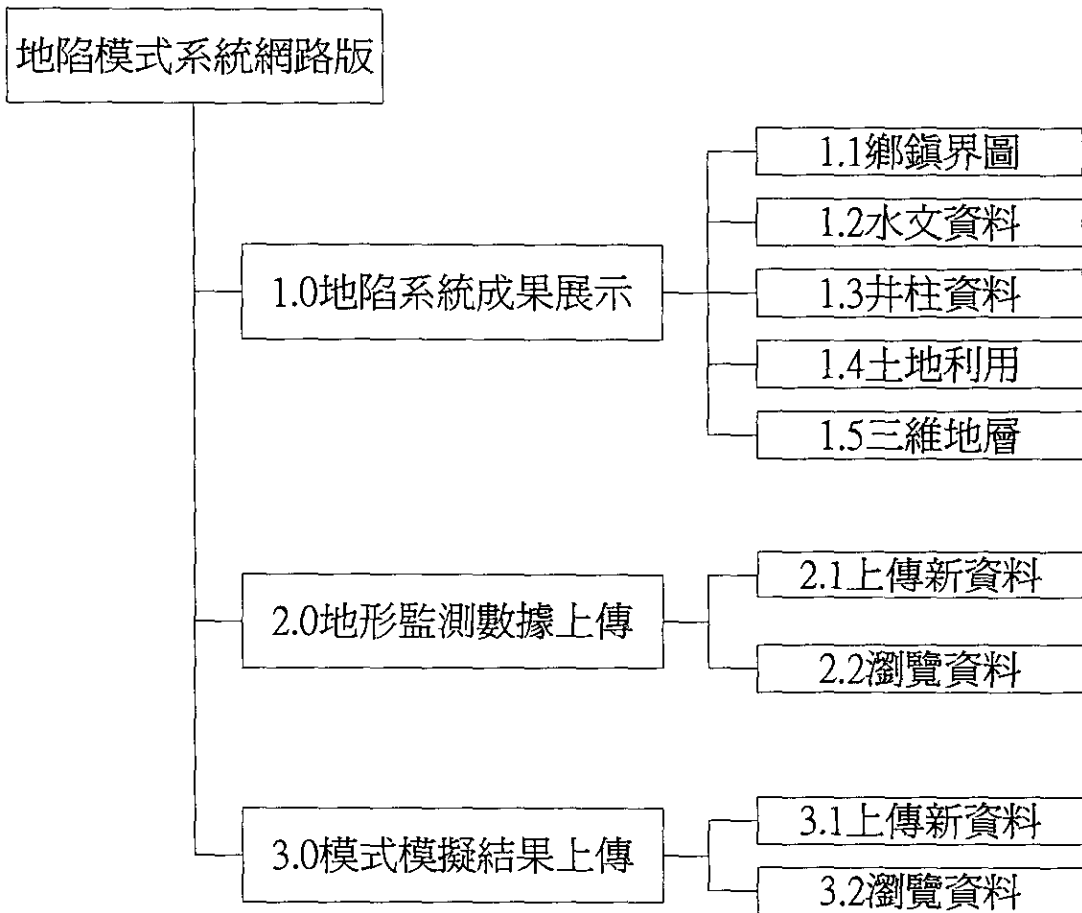


圖 2-43

### a 地陷系統成果展示

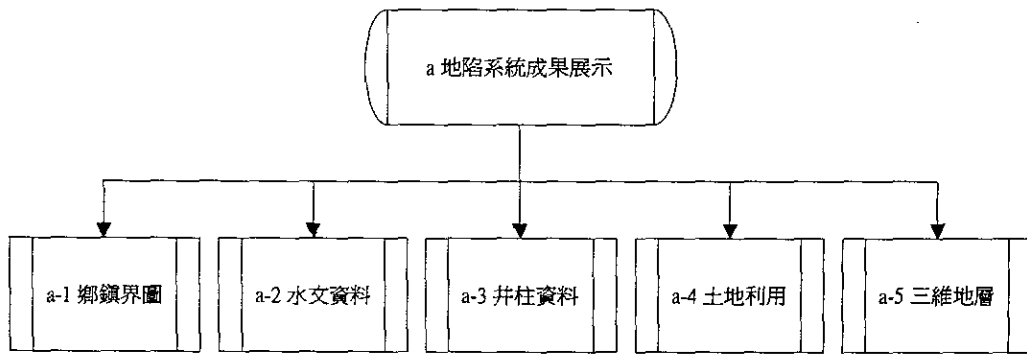
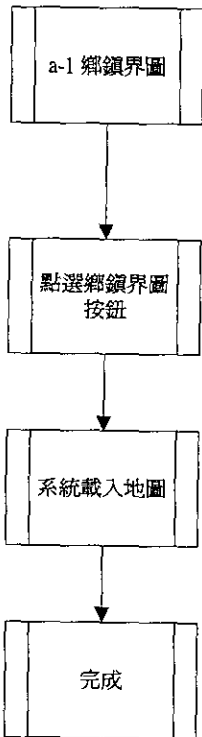


圖 2-44

程序流程如圖 2-44，主要程序分述如下：

1. 鄉鎮界圖：使用者可在此瀏覽鄉鎮基本圖，包括鄉鎮界圖、縣市圖、河川地圖等。
2. 水文資料：可在此瀏覽水文資料，包括雨量資料、流量資料、河川水位等。
3. 井柱資料：可在此檢視鑽探井的基本資料及地圖。
4. 土地利用：提供土地利用的地圖，以顏色分類。
5. 三維地層：可顯示 3D VRML 圖檔，讓使用者瀏覽。

### a-1 鄉鎮界圖



程序代號：1.1

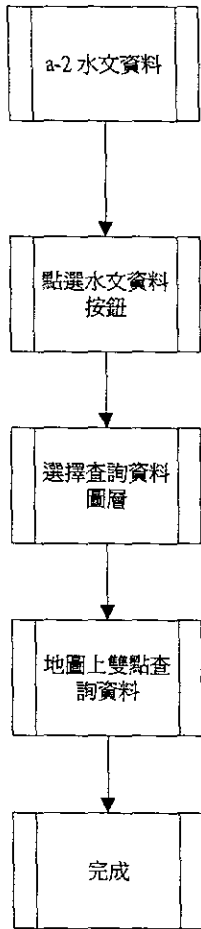
流程說明：

setp1：點選鄉鎮界圖按鈕後，系統自動載入地圖，如圖 2-45。



圖 2-45

a-2 水文資料



程序代號：1.2

流程說明：

setp1：選擇河川断面圖層，系統自動載入河川断面資料，如圖 2-46。

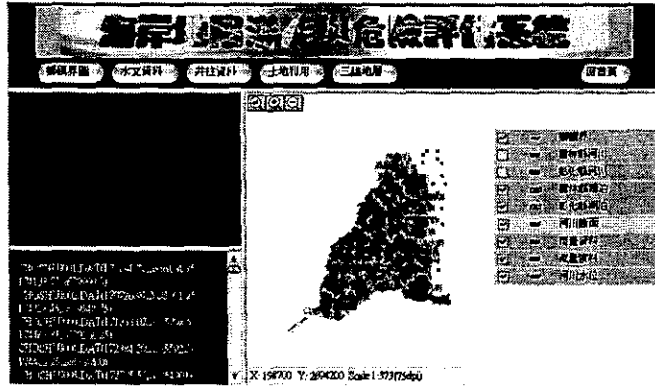
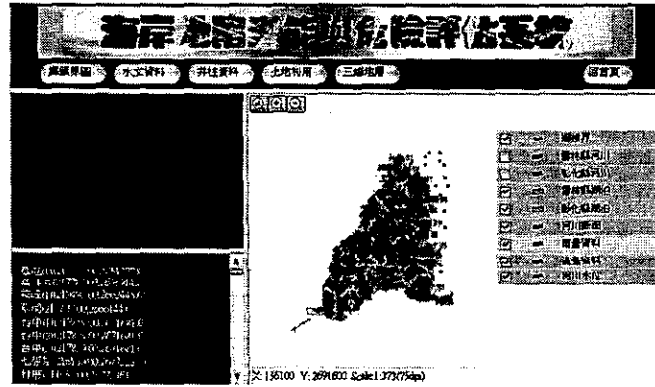


圖 2-46

setp2：點選雨量資料，系統自動載入雨量資料。(如 2-47)



2-47

setp3：查詢河川断面資料，系統顯示河川断面圖。(如圖 2-48)

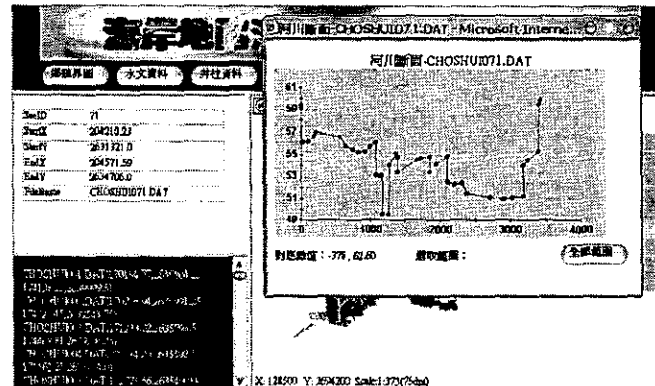


圖 2-48

流程說明：

setp4：查詢雨量資料，顯示雨量資料統計圖，如圖 2-49。

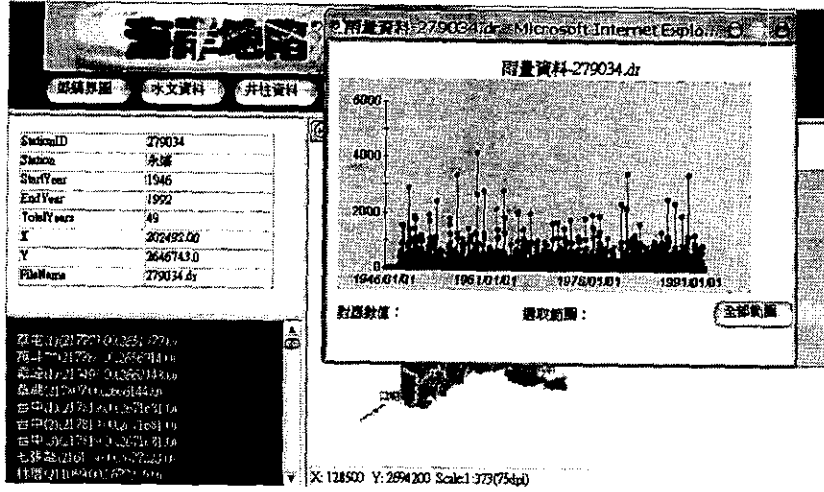


圖 2-49

setp5：點選流量資料，顯示流量資料統計圖。(如圖 2-50)

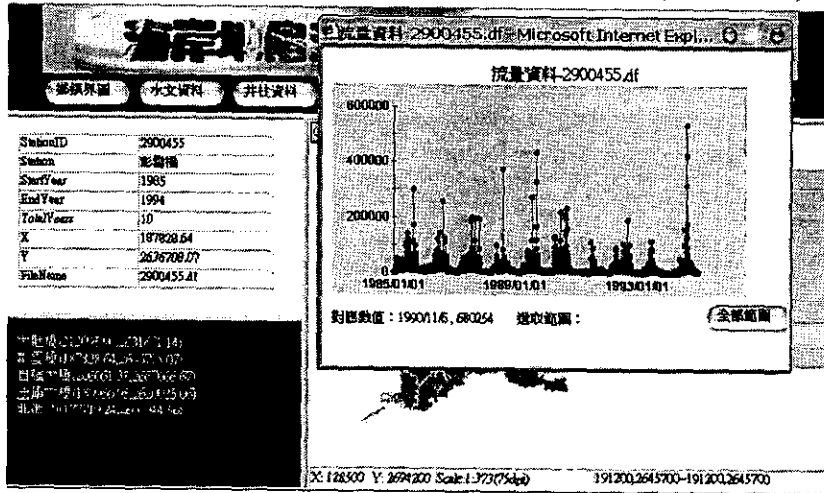


圖 2-50

setp6：查詢河川水位資料，系統顯示河川水位統計圖。(如圖 2-51)

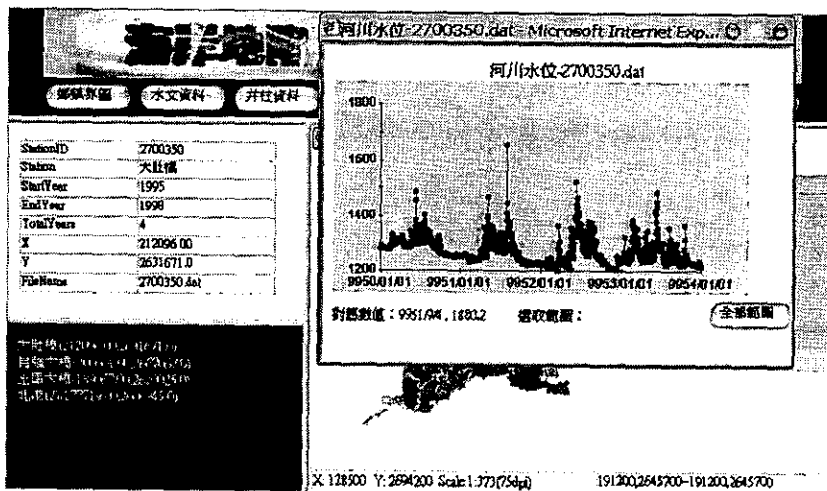
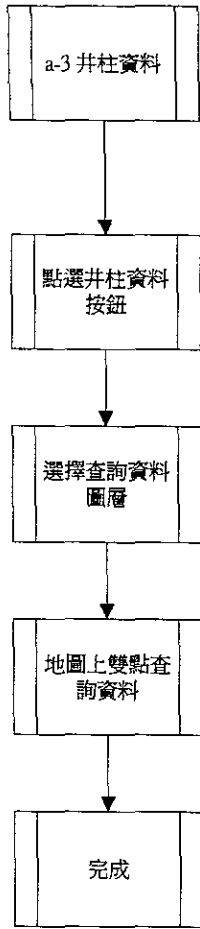


圖 2-51

### a-3 井柱資料

流程說明：



程序代號：1.3

setp1：點選井柱資料，系統載入井柱地圖與資料，如圖 2-52。

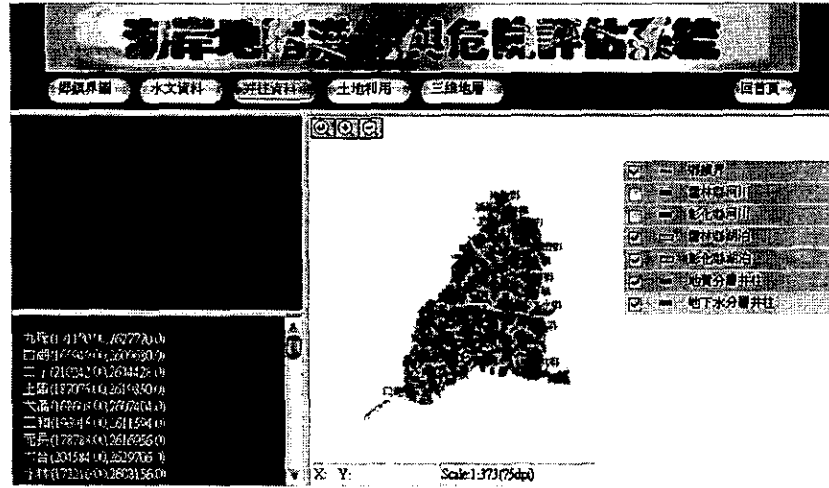


圖 2-52

setp2：查詢地質分層井柱資料，系統顯示剖面圖，如圖 2-53。

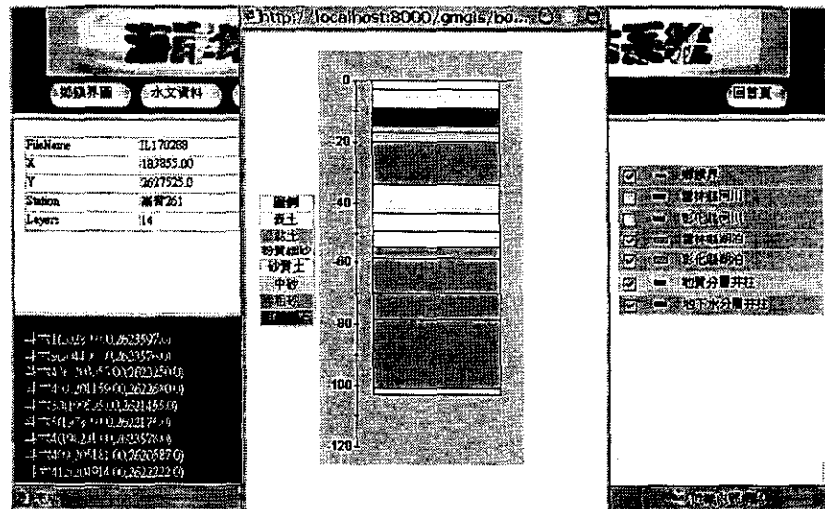
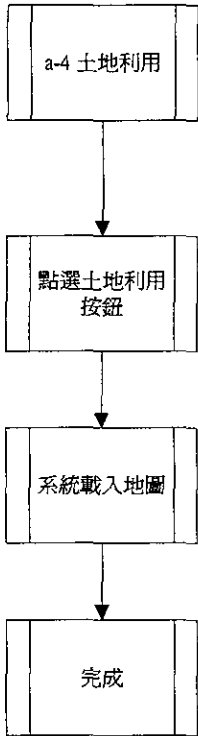


圖 2-53

### a-4 土地利用



流程說明：

setp1：點選土地利用按鈕後，系統自動載入地圖，如圖 2-54。

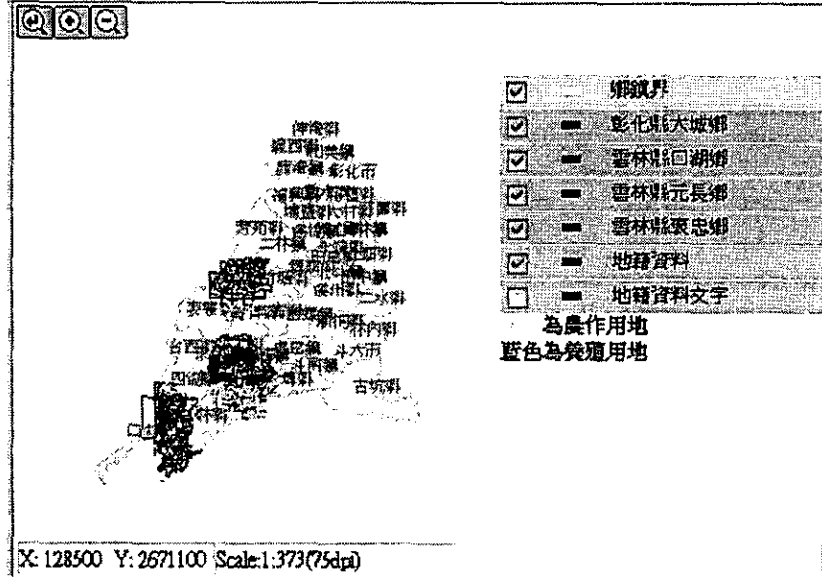
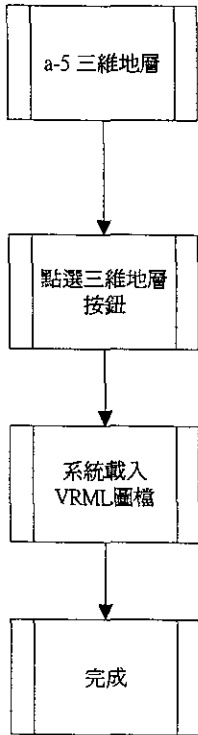


圖 2-54

程序代號：1.4

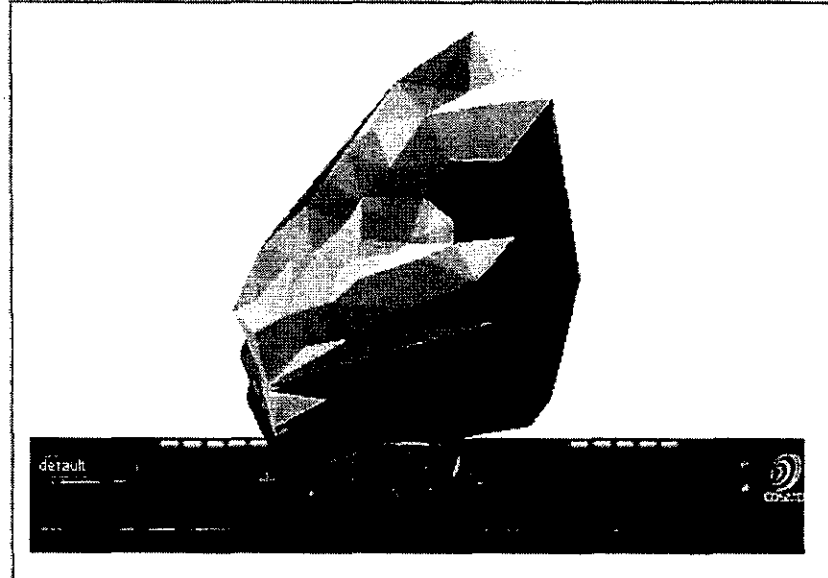


### a-5 三維地層



流程說明：

setp1：點選三維按鈕後，系統自動載入 VRML 圖檔，如圖 2-55。



程序代號：1.5

圖 2-55

## b 地形監測數據上傳

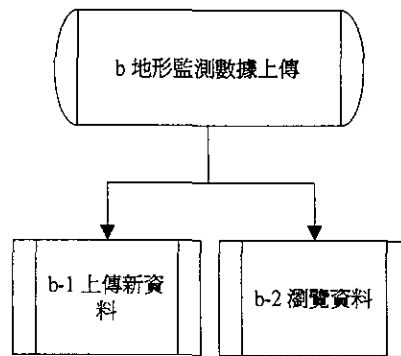
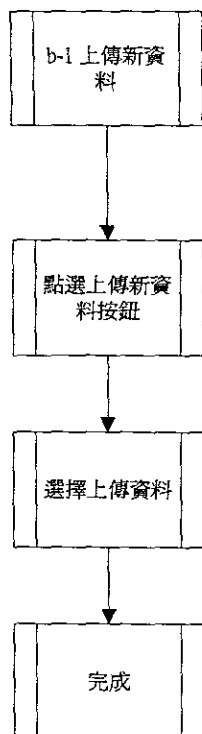


圖 2-56

程序流程如圖 2-56，主要程序分述如下：

1. 上傳新資料：系統容許使用者上傳地形監測資料，並按照日期建檔，方便使用者辨認。
2. 瀏覽資料：使用者可以瀏覽已經上傳的地形監測資料，達到分享資料的目的。

### b-1 上傳新資料



程序代號：2.1

流程說明：

setp1：選擇檔案上傳。(如圖 2-57)

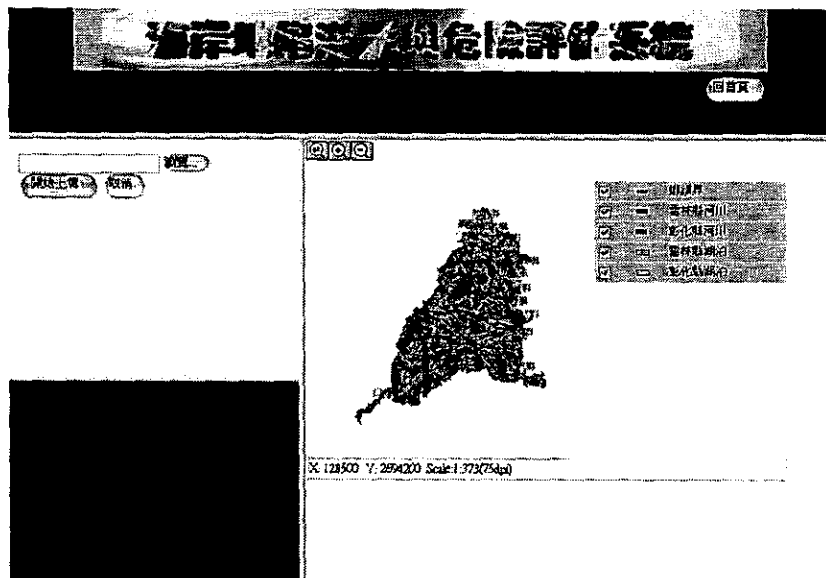
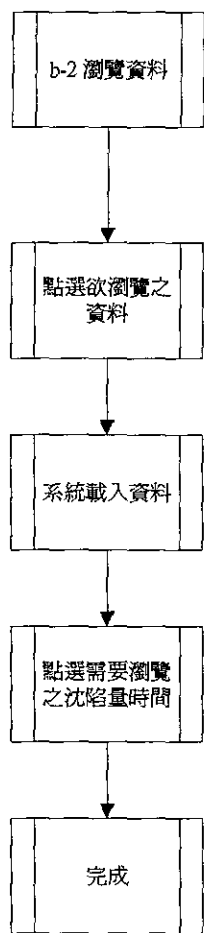


圖 2-57

b-2 瀏覽資料



程序代號：2.2

流程說明：

setp1：點選欲瀏覽之資料，系統自動載入相關資料圖檔。(如圖 2-58)

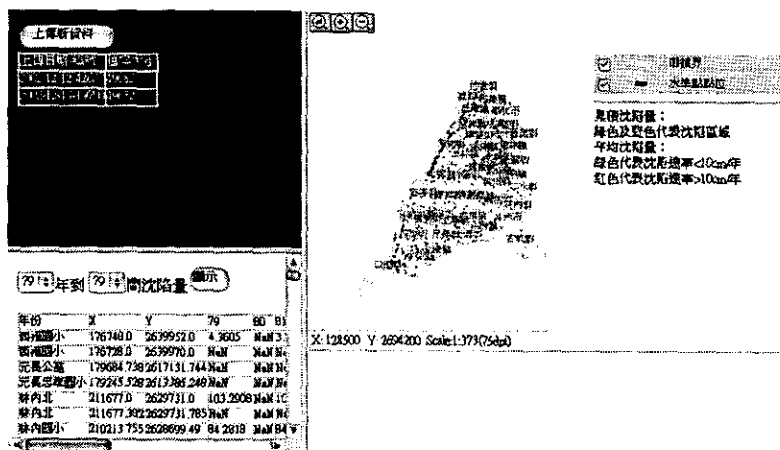


圖 2-58

setp2：選取欲瀏覽沈陷量之時間，系統自動繪圖產生地圖。(如圖 2-59)

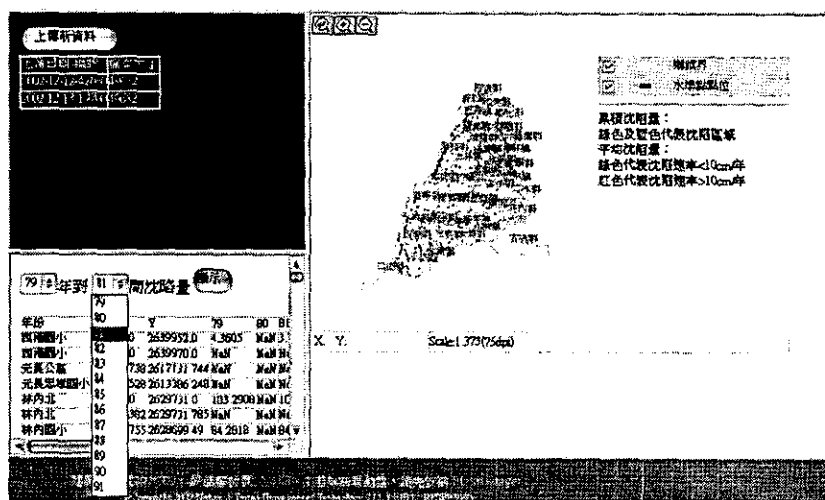


圖 2-59

### c 模式模擬結果上傳

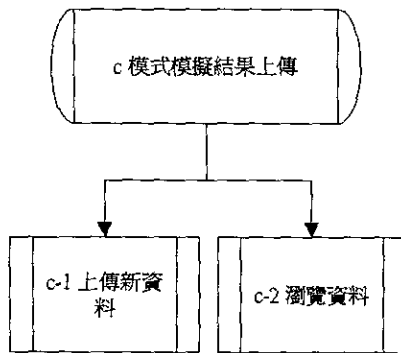
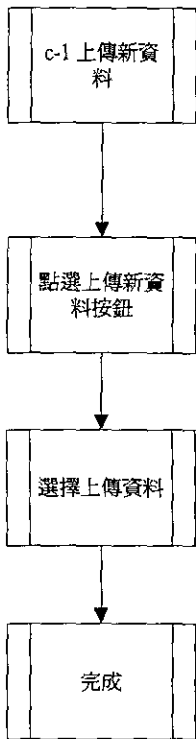


圖 2-60

程序流程如圖 2-60，主要程序分述如下：

1. 上傳新資料：系統容許使用者上傳地陷模式結果資料，並按照日期建檔，方便使用者辨認。
2. 瀏覽資料：使用者可以瀏覽已經上傳的地陷模式結果資料，達到分享資料的目的。

### c-1 上傳新資料



程序代號：3.1

#### 流程說明：

setp1：選擇檔案上傳。(如圖 2-61)

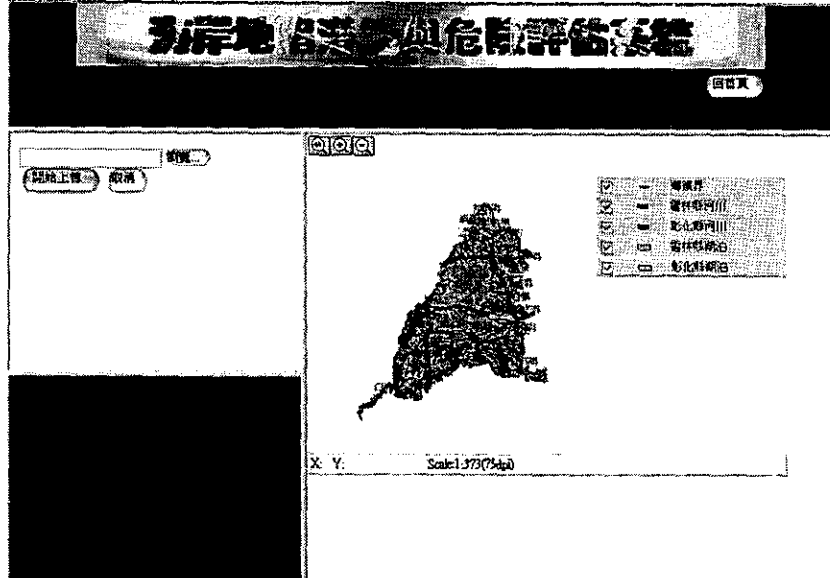
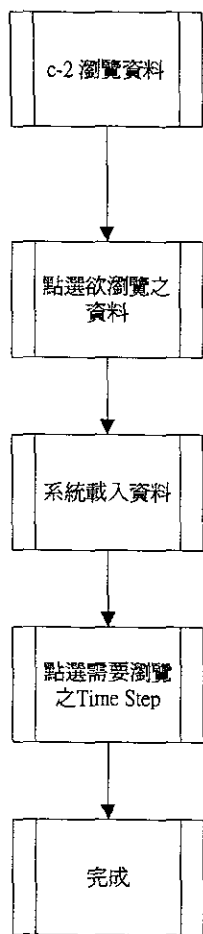


圖 2-61

c-2 瀏覽資料



程序代號：3.2

流程說明：

setp1：點選欲瀏覽之資料，系統自動載入相關資料圖檔。(如圖 2-62)

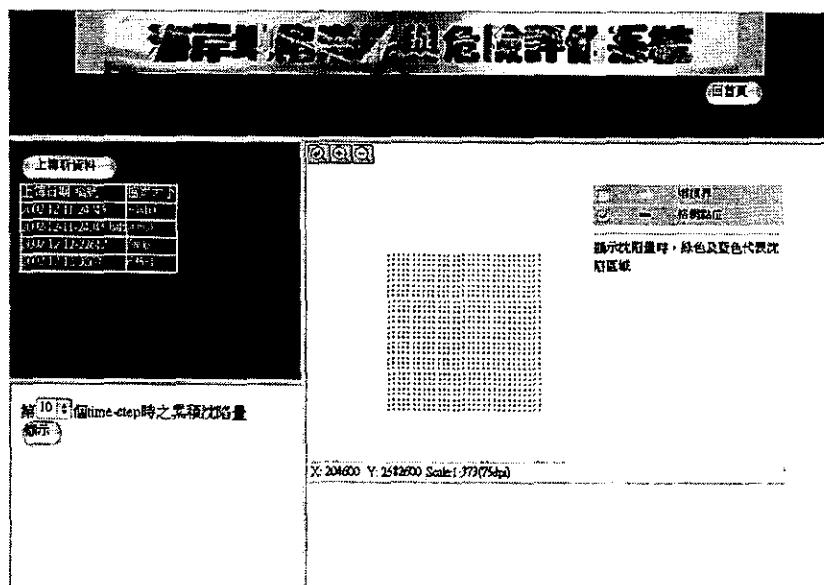


圖 2-62

setp2：選取欲瀏覽 Time Step 之時間，系統自動繪圖產生地圖。(如圖 2-63)

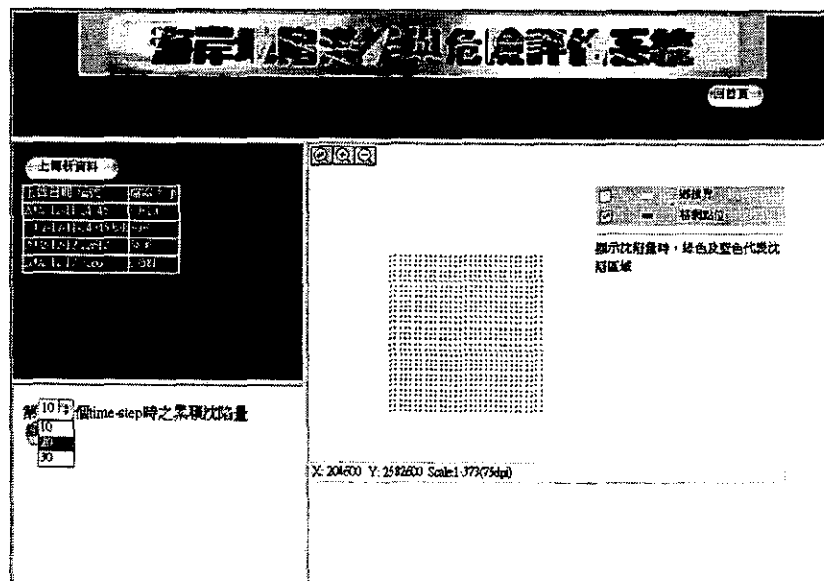


圖 2-63

## 第三章 結語

「海岸地區地陷潛能與危險評估技術」研究計畫之目的，除了發展區域地下水文平衡推估模式、大區域分區分層地層下陷模式以及地層下陷及地下水優化模式等相關地層下陷分析所需工具外。研究中，更進一步利用地層下陷資料之地理資訊決策支援系統，整合上述三個地層下陷相關分析工具，發展一套地層下陷管理模式整合系統。區域性地下水文平衡最佳推估模式、大區域分區分層地層下陷計算模式與地層下陷及地下水優化模式之結合，將可完整模擬選定地區地下水之行為，包括入滲量與抽水量之推估、地下水位以及地層下陷之變化等，並且藉由優化模式訂定最佳化之水資源管理與利用方針，以達到充分掌握地下水及地層下陷變化並且合理利用地下水資源之目標。此外，所發展之地層下陷管理模式整合系統，不但具有簡單容易操作之特點，亦可進行地層下陷量預測、地層下陷潛勢區判別以及最佳地下水資源調配方案演練。其結果可提供作為執行地層下陷區防護管理措施之參考。

本研究計畫分三年逐步實施，區域性地下水文平衡最佳推估模式研究子題，完成地表入滲量、河床滲漏量以及邊界側向流量等推估模式之建立與濁水溪沖積扇現地模擬。大區域分區分層地層下陷計算模式研究子題，完成一維耦合地層下陷模式之建立與濁水溪沖積扇現地模擬，並進行國內相關地層下陷模式之評估以及浮體重力效應與終極下陷量之探討，並分析地陷潛能，結果顯示，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉是地層下陷潛能區。地層下陷及地下水優化模式研究與應用研究子題，完成定率與機率模式之建立與驗證，並將定率與機率優化模式初步應用於濁水溪沖積扇模擬。根據應用結果顯示，即使當各觀測點之給定可靠度皆僅設為 50% 時，不考慮人工補注之行為，在兼顧嚴重地層下陷區不得再下陷，而其餘地區之地層下陷速率減緩之目標下，濁



水溪沖積扇之地下水年安全出水量亦僅有 3.5 億噸，與第一年定率優化模式計算結果相近，然根據秦啟文(2000)之研究，濁水溪沖積扇現況年地下水抽取量約為 7.0 億噸至 10.0 億噸，由此顯示目前濁水溪沖積扇尚面臨地下水超抽之問題。地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題，完成單機版與網路版地層下陷管理模式整合系統，並編寫操作手冊及維護手冊。完成之地層下陷管理模式整合系統已具有通用性，可應用於不同地區之模擬，且具有操作容易之特點。此外，擬定於民國九十二年十一月十七日假國家高速網路與計算中心，舉辦技術轉移教育訓練講習會。

# 第三年報告

## 摘要

「海岸地區地陷潛能與危險評估技術」研究計畫包括區域性地下水文平衡最佳推估模式、大區域分區分層地層下陷計算、地層下陷資料之地理資訊決策支援系統、以及地層下陷及地下水優化模式等四個研究子題。其最終目標係藉由地理資訊決策支援系統，整合其他三個模式，發展一套地層下陷管理模式整合系統，以提供地層下陷潛勢區之判別方法及下陷量預測、水資源利用與管理等技術。

本年度為計畫之第三年，各研究子題之工作項目，分別如下：

### (一) 區域地下水文平衡最佳推估模式研究

協助完成網路版地層下陷管理模式整合系統圖資展示功能，地下水文平衡模式(所需相關資料)與地理資訊決策支援系統之介面連接。

### (二) 大區域分區、分層地層下陷計算

1. 給定代表抽水量及入滲量下，計算終極下陷量。
2. 若有堪用之實測案例(根據浮體重力係數之大小)，則評估有無考慮浮體重力效應對地層下陷之影響。
3. 國內相關地層下陷計算模式功能列表分析。
4. 協助完成單機版地層下陷管理模式整合系統，地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接。

### (三) 地層下陷及地下水優化模式研究與應用

1. 建立地層下陷及地下水機率優化模式。
2. 機率優化模式之編輯測試。

3. 機率優化模式於濁水溪沖積扇之應用。
4. 協助定率優化模式(第一年已完成)與地理資訊決策支援系統之整合。

#### (四) 地層下陷資料之地理資訊決策支援系統

1. 完成單機版地層下陷管理模式整合系統。
2. 完成網路版地層下陷管理模式整合系統圖資展示功能。
3. 地層下陷計算模式所需之資料輸入至計算結果輸出模擬案例編輯與設計。
4. 完成單機版與網路版地層下陷管理模式整合系統使用手冊與維護手冊編寫。
5. 人員技術訓練與講習。

#### (五) 地陷潛能與海岸堤防危險程度評估

1. 繼續評估地陷潛能。
2. 計算河、海岸處終極下陷量，以提供河、海岸堤防危險程度評估之用。

期末報告前，區域性地下水文平衡最佳推估模式研究子題，已完成協助網路版地層下陷管理模式整合系統圖資展示功能。其它三個研究子題完成之工作項目內容摘要如下。

##### (一) 大區域分區分層地層下陷計算

本研究子題已協助地層下陷資料之地理決策支援系統研究子題，完成地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接，建立一套單機版地層下陷管理模式整合系統。亦完成國內相關地層下陷計算模式功能列表分析，根據模式求解方

法、水流維度、土體變形維度、數值方法、使用程式、土壤類別以及是否考慮浮體重力效應等因素進行分析比較。

對於濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討工作項目，分別由濁水溪沖積扇地層下陷模擬所輸入之土壤參數資料以及工研院能資所磁環感應分層式地層下陷監測井土壤柱狀分佈資料，計算浮體重力參數，結果發現濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不明顯。所以耦合與非耦合之模擬結果差異不大。但是，吾人必須強調，耦合模式之理論基礎較非耦合模式嚴謹，且確實可以推估浮體重力效應。

根據上年度濁水溪沖積扇地層下陷模擬所率定之相關參數(上年度模擬時間為 84 年元月至 89 年 4 月)，並使用相同之抽水量、入滲量以及邊界條件下，繼續模擬五年，即民國 89 年 4 月至 94 年 4 月，計算模擬終極下陷量，並提供河、海岸堤防危險程度評估之用。結果發現，濁水溪沖積扇可能不會發生終極下陷量。若假設土體參數隨孔係比之減少而增加，則可能產生終極下陷量。

利用上年度率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數，根據先前所使用之抽水量，即已故嘉義農專沈向白教授所提出之濁水溪沖積扇地下水資源調查資料，分別於各鄉鎮市增加一定抽水量，經由所引發之下陷增加量，評估地層下陷潛能區域。所增加之抽水量訂為濁水溪沖積扇抽水總量之鄉鎮市總數平均值(即抽水總量/鄉鎮市總數)。結果發現，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉乃是地層下陷潛能區。

## (二) 地層下陷及地下水優化模式研究與應用

本研究子題已完成考量地層下陷量之機率地下水優化模式之建立與驗證。研究中利用響應矩陣法與一維土體位移代數式建立考量地層下陷量之地下水優化模式，進而以一階變異數分析法，推導水頭洩降量與地

層下陷量限制式之不確定性。而單位響應係數部分則利用 LHS 統計取樣法與空間變異數分析配合大區域地下水超抽導致地層下陷模式，分析因為水力傳導係數不確定性之影響所造成之不確定性，從而建立以可靠度為考量之機率地下水優化模式。

模式建立後，以一假設案例驗證模式之合理性與正確性。經由單因子敏感度分析結果可知，在機率優化模式中，僅有水力傳導係數與拉梅常數會對限制式造成明顯之不確定性，而土層厚度與比儲水係數則影響甚微。藉由以上分析，可大幅降低機率優化模式不確定性分析過程之時間與複雜度。

於優化模式計算結果驗證部分，本研究以最佳抽水量配合 LHS 與地層下陷數值模式，證明地層下陷量為常態分布假設之合理性以及一階變異數分析法計算地層下陷量不確定性之正確性。模式驗證後，將其應用於濁水溪沖積扇地區進行現地模擬。

### (三) 地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題

單機版已經從原本的 VB 版本演變為 JAVA 版本，而網路版的開發也亦完成。

為配合單機版與網路版的開發與修正，系統文件也必須同步更新，包括系統使用手冊與維護手冊，透過整體流程文件化的方式，讓使用者瞭解整套系統運作的原理與操作方式。配合系統文件更新的同步進行，整合系統介面也因應重新定義配合相關流程，如三維視覺介面的功能擴充，包括井柱地層展示與計算輸出展示等。且為配合地層下陷模式改版，重新設計系統的輸入與輸出，並透過圖形展示功能，示範測試案例。

透過單機版的改版計畫，網際網路版本實際上也進行了相關的整體規劃。研究中已經自行開發出網際網路地圖控制的元件，透過系統程式的演練實例，目前已經能夠接受多種電子地理圖資格式，達到基本操作

的功能要求。網際網路版本的地圖元件也已經開發完成，已經將原單機版的背景圖資管理系統功能，移植到網際網路版本上。此外，擬定於民國九十二年十一月十七日假國家高速網路與計算中心，舉辦技術轉移教育訓練講習會。

由上述可知，本計畫各研究子題皆在計畫執行期限內，完成委辦計畫書預期進度與目標(見表 1-1)。

工作項目	月次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	年份	92 年										
	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
(A)-1 終極下陷量之計算		■	■	■	■	■	■	■	■			
(A)-2 浮體重力效應之評估		■	■	■	■	■						
(A)-3 地層下陷模式功能列表分析		■	■	■	■	■						
(A)-4 協助完成單機版地層下陷管理模式整合系統		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(B)-1 協助完成網路版地層下陷管理模式整合系統		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(C)-1 機率優化模式發展		■	■	■	■	■	■					
(C)-2 機率優化模式驗證與測試						■	■	■				
(C)-3 機率優化模式之應用								■	■	■	■	■
(C)-4 定率優化模式與地層資訊決策支援系統之整合		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(D)-1 改良網路版地層下陷管理模式整合系統		■	■	■	■							
(D)-2 改良單機版地層下陷管理模式整合系統		■	■	■	■	■	■					
(D)-3 網路版使用手冊與維護手冊編寫					■	■	■	■	■			■
(D)-4 單機版使用手冊與維護手冊編寫						■	■	■	■	■	■	
(D)-5 模擬案例編輯與設計		■	■				■	■			■	■
(D)-6 人員技術訓練與講習												■
地陷潛能評估				■	■	■	■	■	■	■	■	
河、海岸處終極下陷量之計算				■	■	■	■	■	■	■	■	
撰寫報告						■	■					■
預定進度累計百分比%		6	12	23	34	46	59	67	75	83	90	100

註：(A)：大區域分區、分層地層下陷計算

(B)：區域地下水文平衡最佳推估模式

(C)：地層下陷及地下水優化模式

(D)：地層下陷資料之地理資訊決策支援系統

表1-1 預定甘梯圖



# I.大區域分區分層地層下陷計算研究子題

## 目 錄

目錄 .....	I-I
表目錄 .....	I-III
圖目錄 .....	I-IV
第一章 前言 .....	I-1
1.1 研究目的.....	I-1
1.2 前兩年研究成果簡述.....	I-2
1.3 本年度工作項目.....	I-2
1.4 完成之工作項目.....	I-3
第二章 一維耦合地層下陷模式簡介.....	I-5
2.1 理論基礎.....	I-5
2.2 地下水流計算.....	I-10
2.3 垂向土體位移計算.....	I-13
2.4 初始條件.....	I-15
2.5 邊界條件.....	I-15
2.6 控制方程式之無因次化.....	I-18
2.7 數值方法.....	I-19
2.8 模擬所需輸入之資料.....	I-22
第三章 一維耦合地層下陷模式之分析與應用.....	I-24
3.1 國內相關地層下陷計算模式功能列表分析.....	I-24
3.2 濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討.....	I-27
3.3 濁水溪沖積扇終極下陷量之探討.....	I-28
3.4 濁水溪沖積扇地陷潛能之探討.....	I-30
第四章 結語 .....	I-32
參考文獻 .....	I-35
附錄 A 一維非耦合地層下陷模式之建立.....	I-38

## 表 目 錄

表 2-1 一維耦合地層下陷模式模擬所需輸入資料.....	I-74
表 3-1 國內相關地層下陷理論法計算模式功能列表分析.....	I-75
表 3-2 地質參數比例表.....	I-76
表 3-3 雲林地區各鄉鎮市年抽水量表.....	I-80
表 3-4 彰化地區地表入滲量表.....	I-81
表 3-5 雲林地區地表入滲量表.....	I-81
表 3-6 彰化地區終極下陷量之探討.....	I-82
表 3-7 雲林地區終極下陷量之探討.....	I-83
表 3-8 TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率....	I-85
表 3-9 彰化地區地層下陷潛能表.....	I-90
表 3-10 雲林地區地層下陷潛能表.....	I-91

## 圖目錄

圖 2-1 拘限含水層分層深度積分示意圖 .....	I-93
圖 2-2 非拘限含水層分層深度積分示意圖 .....	I-93
圖 2-3 垂直方向介面物理連接條件示意圖 .....	I-94
圖 2-4 水平方向介面物理連接條件示意圖 .....	I-94
圖 2-5 有限解析法說明圖 .....	I-95
圖 2-6 一維耦合地層下陷模式計算流程 .....	I-96
圖 3-1 濁水溪沖積扇地質剖面位置圖 .....	I-97
圖 3-2 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖一 .....	I-98
圖 3-3 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖二 .....	I-99
圖 3-4 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖三 .....	I-100
圖 3-5 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖四 .....	I-101
圖 3-6 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖五 .....	I-102
圖 3-7 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖六 .....	I-103
圖 3-8 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖七 .....	I-104
圖 3-9 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖八 .....	I-105
圖 3-10 彰化縣西港國小地層下陷監測 .....	I-106
圖 3-11 彰化縣新街國小地層下陷監測 .....	I-107
圖 3-12 雲林縣豐安國小地層下陷監測 .....	I-108
圖 3-13 雲林縣新興國小地層下陷監測 .....	I-109
圖 3-14 雲林縣海豐分校地層下陷監測 .....	I-110
圖 3-15 雲林縣崙豐國小地層下陷監測 .....	I-111
圖 3-16 雲林縣建陽國小地層下陷監測 .....	I-112
圖 3-17 雲林縣金湖國小地層下陷監測 .....	I-113
圖 3-18 雲林縣宜梧國中地層下陷監測 .....	I-114
圖 3-19 濁水溪沖積扇地層下陷模擬垂直層示意圖 .....	I-115

圖 3-20 濁水溪沖積扇地層下陷模擬水平分區格網示意圖.....	I-116
圖 3-21 濁水溪沖積扇模擬區域邊界示意圖.....	I-117
圖 3-22 模擬終極下陷量速率圖.....	I-118
圖 3-23 彰化地區終極下陷量之探討.....	I-119
圖 3-24 雲林地區終極下陷量之探討.....	I-120
圖 3-25 土體參數與孔隙比之關係.....	I-121
圖 3-26 非線性土體參數對終極下陷量之影響.....	I-122
圖 3-27 使用原抽水量地層下陷模擬結果.....	I-123
圖 3-28 濁水溪沖積扇地陷潛能圖.....	I-124

# 第一章 前言

本章首先說明本研究子題之研究目的以及前兩年研究成果，再列出本年度之工作項目，最後簡述完成之工作項目。

## 1.1 研究目的

「海岸地區地陷潛能與危險評估技術計畫」之大區域分區分層地層下陷計算研究子題，主要目的在於發展與應用一套含孔隙時變性地層下陷數值計算模式，即一維耦合地層下陷模式，並配合區域地下水文平衡最佳推估模式、地層下陷資料之地理資訊決策支援系統以及地層下陷及地下水優化模式等研究子題，建立地層下陷潛勢之判別方法及潛能下陷量之預測技術。並以濁水溪沖積扇為應用地區。

由國立交通大學土木系楊錦釗教授以及國立台灣大學土木系黃良雄教授所組成之地層下陷研究團隊，先後在農委會、水利處、水資源局以及國科會等支助下，進行多年地下水超抽導致地層下陷研究，已初步完成一套大區域地下水超抽導致地層下陷模式之建立(黃良雄、楊錦釗，(1997)、(1998)、(1999)、(2000a)、(2000b)、(2000c))。此模式為一維非耦合(one-dimensional uncouple)地層下陷計算，乃是以 Biot (Biot (1955))多孔彈性介質理論為基礎，配合地質之分區與分層，並引入垂向二次多項式內插函數(quadratic polynomial interpolation function)，先行垂向積分(vertical integration)後，再以有限解析法(finite analytic method)建立。此模式對大區域或小範圍計算皆能有效處理，特別適用於地層下陷計算(因為阻水層計算功能較強)，且地下水流計算能力不輸MODFLOW之功能(見蔡東霖，(2001))。本研究團隊所發展之大區域地下水超抽導致地層下陷模式，雖然已初步應用於屏東平原(黃良雄、楊錦釗，(1999))與濁水溪沖積扇(黃良雄、楊錦釗，(1998))、(2000b))之地層下陷模擬，獲得可接受

的結果，但是由於未考慮阻水層厚且軟時，孔隙率變化所造成之浮體重力效應，因此模式仍有待進一步發展的必要。

本研究子題擬以初步完成之大區域地下水超抽導致地層下陷模式為基礎，進一步發展一套含孔隙率時變性的一維地下水超抽引致地層下陷模式，即考慮浮體重力之一維耦合地層下陷模式，並模擬濁水溪沖積扇之地層下陷。

## 1.2 前兩年研究成果簡述

大區域分區分層地層下陷計算研究子題，第一年度初步完成一維耦合地層下陷模式控制方程式之推導與求解方法之建立，並提出所需輸入之資料清單。第二年度進一步改良第一年度一維耦合地層下陷模式之建構方式並將控制方程式無因次化，如此不但使模式更通用，亦解決以往為避免數值計算不穩定，時間間距不能太小之缺點，並且具有模擬阻水層貯蓄現象之能力。研究中以兩個簡單案例，深入分析與探討一維非耦合模式以及考慮浮體重力一維耦合模式之差異性，並且提出土體浮體重力相關數學證明。

完成簡單案例之分析與探討後，第二年度亦進行濁水溪沖積扇地層下陷現地模擬。模擬時，水田灌溉入滲與旱地降雨入滲兩者之總和入滲量資料資料，乃採用本計畫之區域性地下水文平衡最佳推估模式研究子題所推估之結果，以達到初步整合目的。模擬結果發現，耦合與非耦合模式之地下水位模擬結果相近。另外，非耦合與耦合模式地層下陷模擬結果皆與實測值之趨勢吻合且量階相同。然而，耦合模式所計算之地層下陷量大都略小於非耦合模式，這可能是耦合與非耦合理論上之差異，且耦合模式考慮土體膨脹效應所致。

## 1.3 本年度工作項目

本年度大區域分區分層地層下陷計算研究子題主要目的是進一步分

析與應用已發展完成之一維耦合地層下陷模式，其工作項目為：

1. 國內相關地層下陷計算模式功能列表分析。
2. 若有堪用之實測案例(根據浮體重力係數大小)，則評估有無考慮浮體重力效應對地層下陷之影響。
3. 給定代表抽水量及入滲量下，計算終極下陷量。
4. 協助完成單機版地層下陷管理模式整合系統，地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接。
5. 評估地陷潛能。
6. 計算河、海岸處終極下陷量，以提供河、海岸堤防危險程度評估之用。

#### 1.4 目前完成之工作項目

大區域分區分層地層下陷計算研究子題，期末報告前已完成國內相關地層下陷計算模式功能列表分析，濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討，終極下陷量之模擬以提供河、海岸堤防危險程度評估之用，評估地陷潛能等工作項目，符合預定進度。此外，本研究子題已協助地層下陷資料之地理決策支援系統研究子題，完成地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接，建立一套單機版地層下陷管理模式整合系統。

對於國內相關地層下陷計算模式功能列表分析工作項目，研究中根據模式求解方法、水流維度、土體變形維度、數值方法、使用程式、土壤類別以及是否考慮浮體重力效應等因素進行比較。

對於濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討工作項目，分別由濁水溪沖積扇地層下陷模擬所輸入之土壤參數及土層厚度(見上年度報告表 6-1 及



表 6-8)，以及工研院能資所磁環感應分層式地層下陷監測井土壤柱狀分佈資料，計算浮體重力參數，結果發現濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不明顯。

根據上年度所率定之相關參數(上年度模擬時間為 84 年元月至 89 年 4 月)，並使用相同之抽水量、入滲量以及邊界條件下，繼續模擬五年，即民國 89 年 4 月至 94 年 4 月，計算可能發生之終極下陷量。此模擬結果，亦可提供河、海岸堤防危險程度評估之用。在現有的計算方式下，即土體之應力應關係為線彈性，濁水溪沖積扇不會發生終極下陷量。但是，若假設土體參數隨孔隙比減少而增加，則可能發生終極下陷量。

此外，利用上年度率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數(見第二年報告第六章)，根據先前所使用之抽水量，即已故嘉義農專沈向白教授所提出之濁水溪沖積扇地下水資源調查資料，分別於各鄉鎮市增加一定抽水量，經由所引發之下陷增加量，評估地層下陷潛能區域。結果顯示，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉乃是地層下陷潛能區。

## 第二章 一維耦合地層下陷模式之建立

本研究子題以發展完成之一維非耦合地層下陷模式為基礎(模式之建立參見附錄 A)，建立一套同時耦合求解三維地下水流與垂向土體位移之一維耦合地層下陷模式。以下詳述一維耦合模式之建立過程，包括理論基礎、地下水流計算、垂向土體位移計算、初始條件、邊界條件、控制方程式之無因次化、數值方法與模擬所需輸入之資料等。

### 2.1 理論基礎

在固定座標及固定控制體積下，流體與土體之質量守恆分別可表示為

$$\frac{\partial(n\rho_w S)}{\partial t} + \nabla \cdot (n\rho_w S \vec{V}_w) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n)\rho_s \vec{V}_s] = 0 \quad (2.2)$$

其中  $n$  為孔隙率(porosity)， $\rho_w$  為流體之密度， $\rho_s$  為土體之密度， $\vec{V}_s$  為土體之移動速度(velocity)， $\vec{V}_w$  為流體之速度， $s$  為飽和度(degree of saturation)。根據達西(Darcy)相對流速定律，即

$$\vec{q}_r = Sn(\vec{V}_w - \vec{V}_s) = -\bar{K} \cdot \nabla h = -\bar{K} \cdot \nabla \left( z + \int \frac{dp}{\rho_w g} \right) \quad (2.3)$$

其中  $\vec{q}_r$  為達西相對流速， $\bar{K}$  為水力傳導係數張量(hydraulic conductivity tensor)以及  $p$  為孔隙水壓(pore pressure)。並定義物質導數(material derivative)，即

$$\frac{d_s}{dt} = \frac{d}{dt} + \vec{V}_s \cdot \nabla \quad (2.4)$$

則式(2.1)、式(2.2)與式(2.3)可化簡整理推得三維非飽和流體控制方程式，

即

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{q}_r) + \rho_w S \nabla \cdot \vec{V}_s + nS \frac{d_s \rho_w}{dt} + \rho_w n \frac{d_s S}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

再定義流體壓縮係數為

$$\beta = \frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dp} \quad (2.6)$$

以及假設壓力對時間之變化遠大於對流作用下壓力場梯度，即

$\frac{\partial P}{\partial t} \gg \vec{V}_s \cdot \nabla P$ ，且忽略非飽和效應，即  $S=1$ ，則式(2.5)可變為

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{q}_r) + \rho_w \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{U}_s) + \rho_w n \beta \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

其中  $\vec{U}_s$  表示土體之位移向量(displacements)。將  $\vec{q}_r$ 、 $\vec{U}_s$  與  $p$  分別分解為初始值與變動值之合，即

$$\vec{q}_r = \vec{q}_r^o + \vec{q}_r^e$$

$$\vec{U}_s = \vec{U}_s^o + \vec{U}_s^e$$

$$p = p^o + p^e \quad (2.8)$$

其中上標  $^o$  與上標  $^e$  分別代表初始值與變動值。並假設初始時為平衡狀態，即

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{q}_r^o) = 0 \quad (2.9)$$

則式(2.7)可變為

$$\nabla \cdot (\rho_w \vec{q}_r^e) + \rho_w \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{U}_s^e) + \rho_w n \beta \frac{\partial p^e}{\partial t} = 0 \quad (2.10)$$

假設土體之水力傳導係數為均質(homogenous)且等向(isotropic)，即  $\bar{K} = K\bar{I}$ ，則式(2.10)可簡化為

$$K\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right) = \rho_w g \left(\frac{\partial^2 U_{sx}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sy}}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z \partial t} + n\beta \frac{\partial p}{\partial t}\right) \quad (2.11)$$

其中  $U_{sx}$ 、 $U_{sy}$  與  $U_{sz}$  分別為土體在  $x$ 、 $y$  與  $z$  方向之位移量(displacements)，且  $U_{sx}$ 、 $U_{sy}$ 、 $U_{sz}$  與  $p$  皆為消去上標<sup>o</sup>之變動值。

一般地下水之流速緩慢，故可將慣性之影響忽略，則流體與土體之動量守恆可分別表示為

$$-n\nabla p - Sn^2 \rho_w g \bar{K}^{-1} (\bar{V}_w - \bar{V}_s) + Sn\rho_w \bar{g} = \bar{0} \quad (2.12)$$

$$-(1-n)\nabla p + \nabla \cdot \bar{\sigma}' + Sn^2 \rho_w g \bar{K}^{-1} (\bar{V}_w - \bar{V}_s) + (1-n)\rho_s \bar{g} = \bar{0} \quad (2.13)$$

其中  $\bar{\sigma}'$  為有效應力張量(effective stress tensor)， $\bar{g}$  為重力加速度向量(gravity acceleration vector)。將式(2.12)與式(2.13)相加，並假設土體為飽和狀態，則可得三維土體靜力平衡方程式，即

$$\nabla \cdot \bar{\sigma}' = \nabla p + \bar{f} \quad (2.14)$$

其中  $\bar{f} = [n\rho_w + (1-n)\rho_s] \bar{g}$  表示體力(body force)。分別將  $\bar{\sigma}'$ 、 $p$  與  $\bar{f}$  拆解為初始值與變動值之合，即

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}' &= \bar{\sigma}'^o + \bar{\sigma}'^e \\ p &= p^o + p^e \\ \bar{f} &= \bar{f}^o + \bar{f}^e \end{aligned} \quad (2.15)$$

其中上標<sup>o</sup>與上標<sup>e</sup>分別代表初始值與變動值。並假設初始為平衡靜止

狀態，即

$$\overline{\nabla \cdot \sigma^{io}} = \nabla p^o + \overline{f^o} \quad (2.16)$$

則式(2.14)變為

$$\overline{\nabla \cdot \sigma^e} = \nabla p^e + \overline{f^e} \quad (2.17)$$

根據式(2.2)，並假設 $\rho_s$ 為定值，則浮體重力 $\overline{f^e}$ 可線性化為

$$\overline{f^e} = - \left[ \Delta \rho (1 - n^0) \nabla \cdot \overline{U_s} \right] \overline{g} \quad (2.18)$$

其中 $\Delta \rho = \rho_s - \rho_w$ ， $n^0$ 為初始孔隙率。在假設土體為等向且均質之彈性體(elastic)下，則 $x$ 、 $y$ 與 $z$ 方向之三維土體靜力平衡方程式分量可分別表示為

$$\mu \nabla^2 U_{xx} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \overline{U_s}) = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.19)$$

$$\mu \nabla^2 U_{yy} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial y} (\nabla \cdot \overline{U_s}) = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.20)$$

$$\mu \nabla^2 U_{zz} + (\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla \cdot \overline{U_s}) = \frac{\partial p}{\partial z} - \Delta \rho g (1 - n^0) \nabla \cdot \overline{U_s} \quad (2.21)$$

其中 $\mu$ 、 $\lambda$ 為拉梅(Lame)常數，且 $U_{xx}$ 、 $U_{yy}$ 與 $U_{zz}$ 以及 $p$ 皆為消去上標 $^e$ 之變動值。以下皆以 $U_{xx}$ 、 $U_{yy}$ 與 $U_{zz}$ 以及 $P$ 表示消去上標 $^e$ 之變動值。

令 $L_H$ 為水平方向之特徵長度(characteristic length)， $L_V$ 為垂直之方向特徵長度， $U_H$ 為水平方向之特徵位移量(characteristic displacement)， $U_V$ 為垂直方向之特徵位移量。此外， $P$ 與 $T$ 則分別為特徵孔隙水壓與特徵時間。再定義無因次參數 $x^* = x/L_H$ 、 $y^* = y/L_H$ 、 $z^* = z/L_V$ 、 $U_{xx}^* = U_{xx}/U_H$ 、 $U_{yy}^* = U_{yy}/U_H$ 、 $U_{zz}^* = U_{zz}/U_V$ 、 $p^* = p/P$ 與 $t^* = t/T$ ，則無因次化三維耦合地層下陷方程式(即式(2.11)與式(2.19)至式(2.21))在不考慮浮體重力影響下，可無因

次化為

$$\frac{P}{L_H^2} \frac{\partial^2 p^*}{\partial x^{*2}} + \frac{P}{L_H^2} \frac{\partial^2 p^*}{\partial y^{*2}} + \frac{P}{L_V^2} \frac{\partial^2 p^*}{\partial z^{*2}} = \frac{\rho_w g}{K} \left[ \frac{U_H}{TL_H} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial t^* \partial x^*} + \frac{U_H}{TL_H} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial t^* \partial y^*} + \frac{U_V}{TL_V} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial t^2 \partial z^*} \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial y^{*2}} + \frac{U_H}{L_V^2} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial z^{*2}} + (1 + \frac{\lambda}{\mu}) \left[ \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial x^* \partial y^*} + \frac{U_V}{L_H L_V} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial x^* \partial z^*} \right] = \frac{P}{\mu L_H} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \quad (2.23)$$

$$\frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial y^{*2}} + \frac{U_H}{L_V^2} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial z^{*2}} + (1 + \frac{\lambda}{\mu}) \left[ \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial x^* \partial y^*} + \frac{U_H}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial y^{*2}} + \frac{U_V}{L_H L_V} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial y^* \partial z^*} \right] = \frac{P}{\mu L_H} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \quad (2.24)$$

$$\frac{U_V}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{U_V}{L_H^2} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial y^{*2}} + \frac{U_V}{L_V^2} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial z^{*2}} + (1 + \frac{\lambda}{\mu}) \left[ \frac{U_H}{L_H L_V} \frac{\partial^2 U_{sx}^*}{\partial x^* \partial z^*} + \frac{U_H}{L_H L_V} \frac{\partial^2 U_{sy}^*}{\partial y^* \partial z^*} + \frac{U_V}{L_V^2} \frac{\partial^2 U_{sz}^*}{\partial z^{*2}} \right] = \frac{P}{\mu L_V} \frac{\partial p^*}{\partial z^*} \quad (2.25)$$

由式(2.22)可知，當  $L_H \gg L_V$  表示孔隙水壓梯度在垂直方向遠大於水平方向，即水流為近似垂直流，當  $L_V \gg L_H$  則表示水流為近似水平流，而  $L_V \approx L_H$  表示水流為垂直與水平分量相當之三維水流。此外，一維地層下陷之假設表示土體之垂直位移量遠大於水平位移量，即  $U_V \gg U_H$ 。以下分別對  $L_H$  與  $L_V$  可能之情況分別加以討論。

當  $U_V \gg U_H$  且  $L_H \ll L_V$  時，即表示水流為近似垂直流且土體變形為垂直向一維，分別取式(2.22)與式(2.25)之最大量階項，可分別得

$$K \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \rho_w g \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial t \partial z} \quad (2.26)$$

$$(2\mu + \lambda) \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.27)$$

且可得垂向位移之量階為  $O(PL_V/(2\mu+\lambda))$ ，時間之量階為  $O(\rho_w g L_V^2 / K(2\mu+\lambda))$ 。  
若加入浮體重力之影響，則式(2.27)可變為

$$(2\mu+\lambda)\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z^2} + \Delta\rho g(1-n^0)\frac{\partial U_{sz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.28)$$

此外，當  $U_V \gg U_H$  且  $L_V \gg L_H$  時，即表示水流為近似水平流且土體變形為垂向一維。在假設  $U_V/L_V \gg U_H/L_H$ ，並分別取式(2.22)、式(2.23)與式(2.24)之最大量階項可得

$$K\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right) = \rho_w g \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z \partial t} \quad (2.29)$$

$$(\mu+\lambda)\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.30)$$

$$(\mu+\lambda)\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.31)$$

且垂向位移之量階為  $O(PL_V/(\mu+\lambda))$ ，時間之量階為  $O(\rho_w g L_H^2 / K(\mu+\lambda))$ 。此外，若假設  $\nabla^2 U_{sz} = 0$ ，且取式(2.25)中之最大量階項，並與式(2.30)之量階相比較可得

$$(2\mu+\lambda)\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.32)$$

## 2.2 地下水流計算

考慮土體變形只有  $z$  方向，即  $U_{sz}$ ，並忽略流體壓縮性(即  $\beta$  極小)，且假設土體為等向均質下，若加入源流項影響，則地下水流方程式(式(2.11))可變為

$$K \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial t \partial z} + Q(x-x_w, y-y_w, z-z_w) \quad j = 1, 2, 3 \quad (2.33)$$

其中  $\phi$  為變動水頭，即  $\phi = p / \rho_w g$ ，而  $p$  為變動孔隙水壓， $Q$  為源流項(source term)。(註：畢氏水頭  $h = h_0 + \phi = (z + p^0 / \rho_w g) + p / \rho_w g$ )

本研究中採分層深度積分來建立模式，故將式(2.33)作深度積分得(見圖 2-1 與圖 2-2)

$$\int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} K \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dz = \int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \left( \frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial t \partial z} + Q(x-x_w, y-y_w, z-z_w) \right) dz \quad j = 1, 2, 3 \quad (2.34)$$

其中  $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 、 $z = b_i(x, y, t)$  分別表示含水層上、下邊界函數。(註：若為非拘限含水層，則式(2.34)中之  $z = b_{i+1}(x, y, t)$  代表自由液面函數。)根據萊布尼茲(Leibnitz)法則與連鎖律，並忽略次要項之影響，即假設含水層上、下邊界函數在空間與時間之變化遠小於含水層之厚度或水深。也就是

$$\frac{\partial b_{i+1}(x, y, t)}{\partial x_j}, \frac{\partial b_i(x, y, t)}{\partial x_j}, \frac{\partial B(x, y, t)}{\partial x_j} \ll B \quad j = 1, 2 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial b_{i+1}(x, y, t)}{\partial t}, \frac{\partial b_i(x, y, t)}{\partial t} \ll B \quad (2.36)$$

其中  $B(x, y, t) = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$  代表含水層之厚度或水深。則式(2.34)可變為

$$KB \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial x^2} + KB \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial t} (U_{sz}|_{b_{i+1}} - U_{sz}|_{b_i}) + K \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_i} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \right) + \bar{Q}(x-x_w, y-y_w) \quad (2.37)$$

其中  $\bar{\phi}$  代表深度積分之平均值，即  $\bar{\phi} = \frac{1}{B} \int_{b_i}^{b_{i+1}} \phi dz$ ， $U_{sz}|_{b_{i+1}}$ 、 $U_{sz}|_{b_i}$  為上、下邊界土體位移， $K \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}}$ 、 $K \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_i}$  為上、下邊界之水流通量。

為計算上、下邊界之水流通量，假設每個土層之水頭在垂直深度方向上符合二次形狀函數變化關係，即

$$\phi(x, y, z, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t)z + c(x, y, t)z^2 \quad (2.38)$$

由式(2.38)可知，含水層之水流為水平流僅是假設  $b$  與  $c$  為零之簡化結果，而阻水層垂直流之水頭分布函數，也可以用多段之二次多項式函數加以



趨近，所以式(2.38)可同時模擬水平流與垂直流。由式(2.38)，每一土層上邊界、下邊界與平均值之水頭可分別表示為

$$\phi \Big|_{b_{i+1}} = \phi(x, y, B, t)$$

$$\phi \Big|_{b_i} = \phi(x, y, 0, t)$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{B} \int_0^B \phi(x, y, z, t) dz \quad (2.39)$$

將式(2.39)代入式(2.38)，可求解 $a(x, y, t)$ 、 $b(x, y, t)$ 與 $c(x, y, t)$ ，即

$$a(x, y, t) = \phi \Big|_{b_i}$$

$$b(x, y, t) = \frac{1}{B} (-2\phi \Big|_{b_{i+1}} - 4\phi \Big|_{b_i} + 6\bar{\phi})$$

$$c(x, y, t) = \frac{1}{B^2} (3\phi \Big|_{b_{i+1}} + 3\phi \Big|_{b_i} - 6\bar{\phi}) \quad (2.40)$$

將式(2.38)對深度方向做微分，則可得上、下邊界之微分值分別為

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} = \frac{1}{B} (4\phi \Big|_{b_{i+1}} + 2\phi \Big|_{b_i} - 6\bar{\phi}) \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_i} = \frac{1}{B} (-2\phi \Big|_{b_{i+1}} - 4\phi \Big|_{b_i} + 6\bar{\phi}) \quad (2.42)$$

由式(2.41)與式(2.42)可知，上、下邊界在垂直深度方向之水力梯度，可分別由上、下邊界值及垂直深度積分平均值來表示。

將式(2.41)與式(2.42)代入式(2.37)中，則地下水流控制方程式為

$$KB \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial x^2} + KB \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial t} (U_{sz} \Big|_{b_{i+1}} - U_{sz} \Big|_{b_i}) + \frac{K}{B} (-6\phi \Big|_{b_{i+1}} - 6\phi \Big|_{b_i} + 12\bar{\phi}) + \bar{Q} (x - x_w, y - y_w) \quad (2.43)$$

## 2.3 垂向土體位移計算

根據式(2.30)至式(2.32)，含水層之垂向土體位移控制方程式為

$$\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial x \partial z} = \frac{\rho_w g}{\mu + \lambda} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial y \partial z} = \frac{\rho_w g}{\mu + \lambda} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z^2} = \frac{\rho_w g}{2\mu + \lambda} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2.46)$$

由式(2.44)至式(2.46)可得

$$U_{sz} = \int_0^z \frac{\rho_w g}{\mu + \lambda} \phi \, dz + C_1 z + C_2 \quad (2.47)$$

其中  $C_1$  與  $C_2$  為代定係數。若假設  $C_1$  與  $C_2$  為零並做積分，則可得

$$\Delta z = U_{sz} \Big|_{b_{i+1}} - U_{sz} \Big|_{b_i} = \int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \frac{\rho_w g \Phi}{\mu + \lambda} \, dz = \frac{\rho_w g B \bar{\Phi}}{\mu + \lambda} \quad (2.48)$$

式(2.48)，即一維非耦合地層下陷模式中，計算含水層下陷量之代數方程式。若加入流體之壓縮效應之考慮，則含水層之比出水係數(specific storativity)為  $S_s = \rho_w g [n\beta + 1/(\mu + \lambda)]$ 。另外，由式(2.47)可知，一維非耦合模式中，含水層土體有效應力與孔隙水壓之比值為  $(2\mu + \lambda)/(\mu + \lambda)$ 。而且由式(2.46)可知，一維耦合模式之孔隙水壓與有效應力變化在垂直方向為一定值。

將垂向位移之上、下邊界條件，代入式(2.47)中，則可得一維耦合地層下陷模式之含水層垂向位移表示式為

$$U_{sz} = \int_0^z \frac{\rho_w g}{\mu + \lambda} \phi \, dz + \left[ \frac{1}{B} (U_{sz} \Big|_{b_{i+1}} - U_{sz} \Big|_{b_i}) - \frac{\rho_w g}{\mu + \lambda} \bar{\phi} \right] z + U_{sz} \Big|_{b_i} \quad (2.49)$$

此外，根據式(2.28)，阻水層之垂向土體位移控制方程式為

$$\frac{\partial^2 U_{sz}}{\partial z^2} + \frac{\Delta \rho g (1 - n^0)}{2\mu + \lambda} \frac{\partial U_{sz}}{\partial z} = \frac{\rho_w g}{2\mu + \lambda} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.50)$$

式(2.48)中，等號左邊第二項即為浮體重力之效應。若不考慮浮體重力，由式(2.48)可得

$$U_{sz} = \int_0^z \frac{\rho_w g}{2\mu + \lambda} \phi dz + C_1 z + C_2 \quad (2.51)$$

代入垂向位移之上、下邊界條件可得

$$U_{sz} = \int_0^z \frac{\rho_w g}{2\mu + \lambda} \phi dz + \left[ \frac{1}{B} (U_{sz}|_{bi+1} - U_{sz}|_{bi}) - \frac{\rho_w g}{2\mu + \lambda} \phi \right] z + U_{sz}|_{bi} \quad (2.52)$$

此外，若假設 $C_1$ 與 $C_2$ 為零並做積分，則可得

$$\Delta z = U_{sz}|_{bi+1} - U_{sz}|_{bi} = \int_{bi(x,y,t)}^{bi+1(x,y,t)} \frac{\rho_w g \Phi}{2\mu + \lambda} dz = \frac{\rho_w g B \Phi}{2\mu + \lambda} \quad (2.53)$$

式(2.53)，即一維非耦合地層下陷模式中，計算阻水層下陷量之代數方程式。另外，若加入流體之壓縮效應，則阻水層之比出水係數(specific storativity)為 $S_s = \rho_w g [n\beta + 1 / (2\mu + \lambda)]$ 。由式(2.51)與式(2.53)可知，一維非耦合模式中，阻水層之孔隙水壓變化量即為有效應力之變化量。此外，由式(2.50)可知，一維耦合模式中，若不考慮浮體重力或浮體重力效應太小可乎略時，阻水層孔隙水壓之斜率與有效應力之斜率相同。

式(2.50)，若引用水流計算中，孔隙水壓於垂直方向上為二次多項式分布假設下，則可得阻水層之垂向位移表示式為

$$U_{sz} = C_1 + C_2 (1 - e^{-\Delta z / B}) + A_2 z + A_3 z^2 \quad (2.54)$$

其中

$$\Delta = \frac{\Delta \rho g (1 - n^0) B}{2\mu + \lambda}$$

$$C_1 = U_{sz}|_{bi}$$

$$\begin{aligned}
C_2 &= \frac{1}{1-e^{-\Delta}} (U_{sz}|_{bi+1} - U_{sz}|_{bi} - A_2 B - A_3 B^2) \\
A_2 &= \frac{\rho_w g}{\Delta \rho g (1-n^0) B} (-2\phi|_{bi+1} - 4\phi|_{bi} + 6\bar{\phi}) - \frac{2\rho_w g (2\mu + \lambda)}{\Delta \rho^2 g^2 (1-n^0)^2 B^2} (3\phi|_{bi+1} + 3\phi|_{bi} - 6\bar{\phi}) \\
A_3 &= \frac{\rho_w g}{\Delta \rho g (1-n^0)} (3\phi|_{bi+1} + 3\phi|_{bi} - 6\bar{\phi})
\end{aligned} \tag{2.55}$$

## 2.4 初始條件

模式中採用式(2.8)之變動量為應變數，因此，水位變化與垂向位移之初始條件皆為零，即

$$\phi(x, y, z, 0) = 0$$

$$U_{sz}(x, y, z, 0) = 0 \quad x, y \in \Omega \tag{2.56}$$

其中 $\Omega$ 代表求解之區域。

## 2.5 邊界條件

研究中，採用垂直分層與水平區域拆解之概念建立模式，所以對垂直及水平方向之邊界都可分為自然邊界與內部介面邊界兩種。以下分別對垂直與水平之自然邊界與內部介面邊界條件加以闡述。

對於垂直邊界而言，自然邊界是指求解區域中最上層與最下層之邊界。自然邊界若給定為水頭及位移邊界條件(Dirichlet 型態之邊界條件)，則可表示為

$$\begin{aligned}
\phi|_{boundary} &= \phi^* \\
U_{sz}|_{boundary} &= U_{sz}^*
\end{aligned} \tag{2.57}$$

其中 $\phi^*$ 、 $U_{sz}^*$ 為給定之值。另外，若給定為水力坡降及應變條件(Neumann

型態之邊界條件)，則為

$$K \frac{\partial \phi^e}{\partial n} \Big|_{\text{boundary}} = -q_v^*$$

$$(2\mu + \lambda) \frac{\partial U_{zz}^e}{\partial n} \Big|_{\text{boundary}} = e^* \quad (2.58)$$

其中  $q_v^*$ 、 $e^*$  為給定之值。若為非拘限含水層，最上層之邊界為自由液面，需滿足運動邊界條件與動力邊界條件。非拘限含水層自由液面之運動邊界條件可表示為

$$S_y \frac{\partial b_{i+1}}{\partial t} = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \quad (2.59)$$

其中  $S_y$  為比出水係數(specific yield)， $\eta(x, y, t) = B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$  表示非拘限含水層之水深函數。假設自由液面對時間之變化遠大於下邊界之變化，則式(2.59)可變為

$$S_y \frac{\partial \eta}{\partial t} = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \quad (2.60)$$

另外，非拘限含水層自由液面之動力邊界條件為  $p(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) = 0$ ，則可得

$$\phi(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) = -\frac{p^0(x, y, b_{i+1}(x, y, t), 0)}{\rho_w g} \quad (2.61)$$

若假設  $p^0(x, y, b_{i+1}(x, y, t), 0) = \rho_w g[\eta^0(x, y, 0) - \eta(x, y, t)]$  則式(2.61)可變為

$$\eta(x, y, t) = \eta^0(x, y, 0) + \phi^e(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) \quad (2.62)$$

其中  $\eta^0(x, y, 0)$  表示初始水深函數。將式(2.62)代入式(2.60)可得

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{b_{i+1}} = -\frac{K}{S_y} \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \quad (2.63)$$

式(2.62)與式(2.63)，即為模式中，非拘限含水層自由液面所使用之動力邊

界與運動邊界條件。此外，非拘限含水層自由液面上之土體邊界條件為

$$\sigma' \Big|_{b_{i+1}} = n_0 \rho_w g \phi \Big|_{b_{i+1}} \quad (2.64)$$

式(2.62)表示，有效應力之變化，即為自由液面變動造成之土體體積重量之改變。式(2.62)可進一步表示為

$$\frac{\partial U_{sz}}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} = \frac{n_0 \rho_w g}{2\mu + \lambda} \phi \Big|_{b_{i+1}} \quad (2.65)$$

然而，所謂垂直方向之內部介面邊界，則是指分層或虛擬分層後，層與層間之介面邊界而言。層與層間之介面邊界，除了需滿足流體之孔隙水壓與水流通量連續外，土體亦需滿足位移與有效應力連續。即

$$\begin{aligned} q_n^{(1)} &= q_n^{(2)} \\ \sigma_n'^{(1)} &= \sigma_n'^{(2)} \\ \phi^{(1)} &= \phi^{(2)} \\ U_{sz}^{(1)} &= U_{sz}^{(2)} \end{aligned} \quad (2.66)$$

其中，上標<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>分別表示相鄰邊界不同分層之介質，如圖 2-3 所示， $\bar{n}$ 、 $\bar{i}$ 為邊界面之法線向量與切線向量。此外，水流通量與有效應力連續可進一步表示為

$$\begin{aligned} K^{(1)} \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} &= K^{(2)} \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} \\ (2\mu^{(1)} + \lambda^{(1)}) \frac{\partial U_{sz}^{(1)}}{\partial n} &= (2\mu^{(2)} + \lambda^{(2)}) \frac{\partial U_{sz}^{(2)}}{\partial n} \end{aligned} \quad (2.67)$$

對於水平方向而言，自然邊界是指求解區域最外圍之邊界，而內部介面邊界則是指經區域拆解後區與區之介面邊界，如圖 2-4 所示。因為模式中，假設將土體位移為垂向一維，所不需給定土體之水平邊界條件。

水流之自然邊界條件，若給定為水頭及水力坡降，則可分別表示為

$$\begin{aligned} \overline{\phi} &= \overline{\phi}_H & \Gamma_1 \in \Gamma \\ \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial n} &= -q_H^* & \Gamma_2 \in \Gamma \end{aligned} \quad (2.68)$$

其中 $\Gamma$ 為自然邊界。另外，水平方向之內部介面邊界，則是指經地質分區後，區與區之介面邊界。區與區之介面邊界，需同時滿足孔隙水壓連續及水流通量連續條件，即

$$\begin{aligned} \overline{\phi}^{(1)} &= \overline{\phi}^{(2)} \\ K^{(1)} \frac{\partial \overline{\phi}^{(1)}}{\partial n} &= K^{(2)} \frac{\partial \overline{\phi}^{(2)}}{\partial n} \end{aligned} \quad (2.69)$$

## 2.6 控制方程式之無因次化

一維耦合地層下陷模式需同時求解流體之壓力與土體之垂向位移量，因為土壤參數(即水力傳導係數與拉梅常數)之量階差異甚大，若時間間距太小，求解時可能造成矩陣係數差異甚大，導致計算不穩定現象。所以研究中以無因次化控制方程式來建立數值計算模式。令無因次變數為 $\overline{\phi}^* = \overline{\phi} / L_H$ 、 $x^* = x / L_H$ 、 $y^* = y / L_H$ 、 $B^* = B / L_V$ 、 $K^* = K / K_f$ 、 $\mu^* = \mu / \mu_f$ 、 $\lambda^* = \lambda / \lambda_f$ 、 $U_{sz}^e = \lambda_f U_{sz}^e / \rho_w g L_V L_H$ 與 $t^* = K_f \lambda_f t / \rho_w g L_V^2$ 。其中 $L_H$ 與 $L_V$ 分別為水平與垂直方向之特徵長度。 $K_f$ 、 $\mu_f$ 與 $\lambda_f$ 分別特徵水力傳導係數與特徵拉梅常數。通常水平與垂方向特徵長度選擇為格網之大小與最小土層厚度值，而特徵水力傳導係數與特徵拉梅常數則選擇為土層中之最小參數值。將式(2.37)無因次化，可得無因次化地下水流控制方程式為

$$\frac{\partial^2 \overline{\phi}^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \overline{\phi}^*}{\partial y^{*2}} = \frac{K_f L_H^2}{K B L_V} \left[ \frac{\partial}{\partial t^*} (U_{sz}^*|_{bi+1} - U_{sz}^*|_{bi}) \right] + \frac{L_H^2}{B^2} (12\overline{\phi}^* - 6\overline{\phi}^*|_{bi+1} - 6\overline{\phi}^*|_{bi}) + \frac{\overline{Q} L_H}{K B} \quad (2.70)$$

此外，邊界條件亦需無因次化，在此不多贅述。由式(2.70)可知，欲使數值計算穩定不發生，需滿足矩陣對角線係數最大之限制(diagonal dominant)。於均勻水平格網下，可表示為

$$12 \frac{L_H^2}{B^2} \geq \frac{K_f L_H^2}{K B L_y} \frac{\rho_w g L_y^2}{K_f \lambda_f \Delta t} \quad (2.71)$$

也就是

$$\Delta t \geq \frac{1}{12} \frac{\rho_w g B L_y}{K \lambda_f} \quad (2.72)$$

式(2.72)，即為模式計算時所需滿足之時間間距限制條件，此與 Ghaoussi and Wilson (1973)、Sloan and Abbo (1999)、Vermeer and Verruijt (1981) 以及 Ferronato et al. (2001)所提出之臨界時間間距相似。

## 2.7 數值方法

本研究之數值方法採用具有局部解析解以及無條件穩定收斂，更可以在卡氏座標下處理不規則邊界等特點之有限解析法(Finite Analytic Method)。有限解析法由佛羅里達大學工學院院長陳景仁教授(C.J.Chen)於1980年所提出，已應用於計算流體力學多年且有不錯之結果 Chen and Chen(1984)。有限解析法可分為隱式(implicit)有限解析法與顯式(explicit)有限解析法兩種，本研究採用穩定性較佳的隱式有限解析法。

二維有限解析法，可分為九點法(nine-point method)與五點法(five-point method)。九點法使用於非邊界計算元素中，而五點法則應用於邊界計算元素中，如圖 2-5 所示。此外，九點與五點法又可以分為均勻格網(uniform grid)或非均勻格網(non-uniform grid)。以下將詳述九點二維有限解析法於均勻格網之推導。二維有限解析法之標準形式為

$$D_{xx} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = R \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + F(x, y, t) \quad (2.73)$$



式中等號左項為擴散項(diffusion term)，等號右邊第一項為非恆定項(unsteady term)、第二項為對流項(advection term)、而第三項則為流源項(source term)。若所要求解之偏微分方程式不能符合有限解析法之標準形式(式(2.73))，則必需先將不符合之項先以差分處理後並納入流源項。首先將式(2.73)於每個計算網格中線性化並且非恆定項以後向差分(backward difference)處理，則可得

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + C \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 2A \frac{\partial \Phi}{\partial x} + 2BC \frac{\partial \Phi}{\partial y} + G \quad (2.74)$$

式中  $C = (D_{yy}/D_{xx})_p$ 、 $A = \frac{1}{2}(V_x/D_{xx})_p$ 、 $B = \frac{1}{2}(V_y/D_{yy})_p$ 、 $G = R^*(\Phi_p^n - \Phi_p^{n-1})/\Delta t + f_p$ 、 $R^* = (R/D_{xx})_p$  與  $f_p = (F(x, y, t)/D_{xx})_p$ ，其中，下標  $p$  表示每個計算方格之中心點，如圖 2-5 所示。若假設西邊邊界條件為

$$\Phi_w(y) = \alpha_{0w} + \alpha_{1w}y + \alpha_{2w}(e^{2By} - 1) \quad (2.75)$$

帶入邊界條件帶入，即  $\Phi_{wc} = \Phi_w(0)$ 、 $\Phi_{nw} = \Phi_w(k)$  與  $\Phi_{sw} = \Phi_w(-k)$ ，則可得

$$\alpha_{0w} = \Phi_{wc}$$

$$\alpha_{1w} = \frac{\Phi_{nw} - \Phi_{sw} - \coth Bk(\Phi_{nw} + \Phi_{sw} - 2\Phi_{wc})}{2k}$$

$$\alpha_{2w} = \frac{\Phi_{nw} + \Phi_{sw} - 2\Phi_{wc}}{4 \sinh^2 Bk} \quad (2.76)$$

同理，億假設北邊邊界條件為

$$\Phi_n(x) = \alpha_{0n} + \alpha_{1n}x + \alpha_{2n}(e^{2Ax} - 1) \quad (2.77)$$

與西邊邊界相同帶入邊界條件值，即  $\Phi_{nc} = \Phi_n(0)$ 、 $\Phi_{ne} = \Phi_n(h)$  與  $\Phi_{nw} = \Phi_n(-h)$ ，則  $\alpha_{0n}$ 、 $\alpha_{1n}$  與  $\alpha_{2n}$  可表示為

$$\alpha_{0n} = \Phi_{nc} ,$$

$$\alpha_{1n} = \frac{\Phi_{ne} - \Phi_{nw} - \coth Ah(\Phi_{ne} + \Phi_{nw} - 2\Phi_{nc})}{2h} ,$$

$$\alpha_{2n} = \frac{\Phi_{ne} + \Phi_{nw} - 2\Phi_{nc}}{4 \sinh^2 Ah} \quad (2.78)$$

此外，南邊與東邊之邊界條件也可同理得到。式(2.74)與四個邊界條件，其中，西邊與北邊之邊界條件如式(2.75)至式(2.77)所示，由分離變數法(separation of variable)可求解每個計算元素之解析解(見 Chen and Chen (1984))。將每個計算元素之中心點( $p$ 點)值表示為與鄰近旁邊八點之關係可得

$$\begin{aligned} \Phi_p^{n+1} = & \frac{1}{1 + \frac{R^*}{\Delta t} C_p} (C_{ne} \Phi_{ne}^{n+1} + C_{nw} \Phi_{nw}^{n+1} + C_{se} \Phi_{se}^{n+1} + C_{sw} \Phi_{sw}^{n+1} + C_{wc} \Phi_{wc}^{n+1} + C_{ec} \Phi_{ec}^{n+1} \\ & + C_{nc} \Phi_{nc}^{n+1} + C_{sc} \Phi_{sc}^{n+1} + \frac{R^*}{\Delta t} C_p \Phi_p^{n-1} - C_p f_p) , \end{aligned} \quad (2.79)$$

式中

$$C_{ec} = EB \cdot e^{-Ah} , \quad C_{ne} = E \cdot e^{-Ah-Bk} , \quad C_{wc} = EB \cdot e^{Ah} , \quad C_{nw} = E \cdot e^{Ah-Bk} ,$$

$$C_{sc} = EA \cdot e^{Bk} , \quad C_{se} = E \cdot e^{-Ah+Bk} , \quad C_{nc} = EA \cdot e^{-Bk} , \quad C_{sw} = E \cdot e^{Ah+Bk} ,$$

$$\begin{aligned} C_p = & \frac{1}{2(A^2 + B^2 C)} [(C_{nw} + C_{wc} + C_{sw} - C_{ne} - C_{ec} - C_{se}) Ah + (C_{sw} + C_{se} + C_{se} \\ & - C_{nw} - C_{nc} - C_{ne}) Bk] , \end{aligned}$$

$$E = \frac{1}{4 \cosh(Ah) \cosh(Bk)} - E_2 Ah \coth(Ah) - Bk E_2^* \coth(Bk) ,$$

$$EA = 2Ah \frac{\cosh^2(Ah)}{\sinh(Ah)} E_2 ,$$

$$EB = 2Bk \frac{\cosh^2(Bk)}{\sinh(Bk)} E_2^* ,$$

$$E_2^* = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{-(-1)^m (\lambda_m^* k)}{[(Bk)^2 + (\lambda_m^* k)^2]^2 \cosh \mu_m^* h} ,$$

$$E_2 = \frac{k^2}{Ch^2} E_2^* + \frac{BCh \tanh(Ah) - Ak \tanh(Bk)}{4ABCh^2 \cosh(Ah) \cosh(Bk)} ,$$

$$\mu_m^* = (A^2 + B^2 C + \lambda_m^{*2} C)^{\frac{1}{2}} \quad m = 1, 2, 3, \dots ,$$

$$\lambda_m^* = \frac{(2m-1)\pi}{2k} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.80)$$

式(2.79)，即為均勻格網九點二維有限解析法之離散分程式。此外，對於非均勻格網九點二維有限解析法以及五點二維有限解析法可參考 Tsai et al.(1993)，在此不多贅述。

## 2.8 模擬所需輸入之資料

本研究所發展之一維耦合地層下陷模式，模擬時除了先根據土層分布將模擬區域作垂向分層與水平區域拆解外，所需輸入之資料分別有土壤地質參數、流體參數、水文平衡參數與模擬設定參數等，如表 2-1 所示。其中，土壤地質參數包含有土壤密度( $\rho_s$ )、初始孔隙率( $n_0$ )、水力傳導係數( $K$ )、拉梅常數( $\mu, \lambda$ )，比出水係數( $S_y$ )；流體參數包含流體密度( $\rho_w$ )以及流體壓縮模數( $\beta$ )；水文平衡參數包含抽水量( $Q$ )、分層抽水比例、水田灌溉入滲量、旱地降雨入滲量、河川入滲量、邊界側流量、分層地下水位以及水頭邊界條件等；模擬設定參數包含網格點性質、網格大小( $\Delta x, \Delta y$ )、時間間距( $\Delta t$ )等、地理座標以及含水層與阻水層厚度( $B$ )。

一維耦合地層下陷模式之計算流程如圖 2-6 所示。先選定模擬區域，

再根據地質鑽探資料，將模擬區域作水平區域拆解與垂直分層，輸入模擬所需資料(見表 2-1)，分別疊代計算三維水流控制方程式以及一維垂向土體靜力平衡方程式之解析解，若疊代收斂，則判斷是否模擬完畢，若尚未完畢，則進行下一時刻之計算，最後輸出結果，完成模擬。模擬所需資料之輸入過程與結果展示，可經由本計畫之地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題所開發之視窗介面，簡單且快速地完成。

## 第三章 一維耦合地層下陷模式之分析與應用

本章首先進行國內相關地層下陷計算模式之功能分析，再探討濁水溪沖積扇之浮體重力效應以及終極下陷量，並分析地陷潛能。

### 3.1 國內相關地層下陷計算模式功能分析

國內地層下陷之相關研究至今已有數十年歷史，其研究方法大致可歸納分為經驗法(empirical method)、半經驗法(semi-empirical method)、半理論法(semi-theoretical method)以及理論法(theoretical method)等四類(見第二年報告第二章)。曹以松(民國 58 年)以經驗法直接推求地層下陷與時間之迴歸關係，再利用外插推估下陷量。半經驗法則是進一步考慮地層下陷量及其相關因子之迴歸函數關係，如地下水位、水位洩降量或抽水量等。廖日昇等(民國 79 年)與柳志錫等(民國 81 年)以半經驗法分析北港沿海地區與彰雲地區，結果發現該地區平均地下水位下降 1 公尺，發生 0.1 至 0.8 公分之地層下陷量。半理論法則是以應力應變概念模式，配合現場之實測值，求得模式所需參數後，即可推估地層下陷量，如盛若磐(民國 81 年)。

一般而言，因經驗法、半經驗法以及半理論法較未能完整地考慮地下水超抽導致地層下陷之發生機制，所以預測結果可能較不精確，故應採用學理較完整之理論法。國內以理論法分析地層下陷者分別有，李德河教授等(李德河等，(1996))、張惠文教授等(張惠文等，(1996)))、許澤善教授(許澤善，(1996))、工業技術研究院能資所(杜富麗等，(1996))、施清吉教授等(施清吉，(1998))、劉振宇教授等(劉志純，(1996))、林美聆教授等(鄭美嶺，(1999)；張光仁，(2000))、呂志宗教授等(Tarn and Lu、(1991))以及葉弘德教授等(葉弘德與葉高次，(1994))。上述各研究團隊與本研究團隊所自行開發之地層下陷模式功能列表說明如表 3-1 所示。

由表 3-1 可知，李德河教授、張惠文教授、許澤善教授以及工研院能資所等皆假設地下水流動與土體位移僅為一維垂向，非耦合計算阻水層(即黏土)之地層下陷量，而不考慮含水層之水流與變形。施清吉教授則假設地下水流動為水平二維、土體位移為垂向一維，非耦合模擬含水層之地層下陷。劉振宇教授與本研究團隊假設土體變形為垂向一維，引用擬三維水流概念(即含水層為水平流，阻水層為垂直流)，分別非耦合及耦合模擬含水層及阻水層之下陷量。耦合計算三維地下水及三維土體變形者有林美聆教授、呂志宗教授以及葉弘德教授等，其中，前兩者僅考慮軸對稱問題。對於求解方法而言，呂志宗教授以及施清吉教授應用數學解析解，其它除本研究團隊採用有限解析法外，其餘者分別採用有限差分法或有限元素法。此外，比較國內其它地層下陷模式，僅本研究團隊考慮浮體重力效應之影響。

李德河教授、張惠文教授、許澤善教授以及工研院能資所使用之一維非耦合地層下陷模式，僅考慮阻水層而忽略含水層之水流流況及土體變形計算。因此，模式中並不具有模擬區域性地下水流之功能，即多含水層系統地下水流之計算。所以模擬時需先行輸入已知含水層之分層觀測水位變化，以作為阻水層之水位邊界條件，再進行地層下陷模擬，故此種模式無法直接應用於區域性地下水超抽導致地層下陷之預測模擬。劉振宇教授所使用之一維地層下陷模式，則結合商用軟體 MODFLOW 及 Interbed 非耦合計算地下水流及土體變形，該模式可以模擬多含層系統之地下水流，以及分別計算含水層及阻水層之地層下陷。此種利用地下水流模式先行計算孔隙水壓變化，再將孔隙水壓代入一維垂向土體位移代數式之非耦合計算地層下陷方法，已被廣泛應用於地下水超抽導致區域性地層下陷之預測模擬，但是由於土體之變形僅假設為垂向一維且不考慮土體之力平衡，理論上較三維地層下陷模式不嚴密。三維地層下陷模式，也就是同時耦合求解三維地下水流及三維土體變形，即林美聆教授、

呂志宗教授以及葉弘德教授所使用之模式，雖然理論上較嚴密，但需要大量計算時間，故不適用於區域性地層下陷計算問題，且常常因為缺乏水平位移實測資料而無法率定模式。

本研究所提出之一維耦合地層下陷模式，乃基於地下水流為擬似三維概念，也就是假設阻水層之水流為垂直流及含水層之水流為水平流，耦合求解地下水流與垂向一維土體靜力平衡方程式。因此，一維耦合地層下陷模式不但可以模擬多含水層之地下水流，由於僅考慮較為重要之垂向位移量，而不考慮水平變形，所以較三維耦合模式更簡單且有效率，適合區域性地層下陷之模擬。此外，由於耦合求解地下水流與垂向一維土體靜力平衡方程，所以一維耦合地層下陷模式理論上較一維非耦合模式準確，且可以模擬載重引發之地層下陷，並考慮土層軟且厚所造成之體力效應(body force effect)。本研究所提出之一維耦合地層下陷模式屬於半解析計算模式，配合地質之分區與分層，地下水流計算採分層積分並引入垂向二次多項式內插函數(quadratic polynomial interpolation function)，垂向土體靜力平衡方程式則採用解析解，因此模式對大區域或小範圍計算皆能有效處理。

使用解析解法求解時，常常過度簡化問題，所以此種求解方法無法應用於實際複雜之地層下陷模擬，而必需藉助數值計算。除本研究外，其餘模式皆使用有限差分法或有限元素法。一般而言，有限差分法雖然建構簡單，但其精確度比有限元素法差，且不易處理不規則邊界問題。本研究所使用之有限解析法具有局部解析解以及無條件穩定收斂之特性，並可以在卡氏座標下處理不規則邊界。對於同時模擬土壤物理特性差異甚大之含水層及阻水層，有限解析法應具有較佳之數值穩定性。

吾人必須強調，本研究團隊所發展之分層三維地下水流模式，比國內外廣泛被使用的地下水流計算模式 MODFLOW 更為準確。其原因為 MODFLOW 乃是以有限差分法(finite difference method)，並採用塊體中心

(block centered)網格形式建構模式而成，也就是網格元素(element)中之變數值，僅以中心點之值來代表，亦即每個網格元素之變數值僅以單一值來表示，且選擇網格元素之中心點為此代表值所在位置。此與本研究團隊所發展之分層三維地下水流模式比較可知，分層三維地下水流模式假設變數在垂直方向滿足二次多項式函數分布，而 MODFLOW 模式中，則僅將變數視為一常數，故分層三維水流模式較 MODFLOW 模式準確。

### 3.2 濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討

本研究所發展之一維耦合地層下陷模式，可以考慮土層厚或軟時所造成之浮體重力效應(Mei, 1985)，也就是土體壓密時孔隙率變化所產生之體力(body force)變化對地層下陷之影響。浮體重力效應是否顯著，可由浮體重力參數之大小決定。浮體重力參數可表示為

$$M = \frac{\Delta\rho g(1-n^0)B}{2\mu + \lambda} \quad (3.1)$$

式中， $\Delta\rho = \rho_s - \rho_w$ ， $\rho_w$  為流體之密度， $\rho_s$  為土體之密度， $g$  為重力加速度， $n^0$  為初始孔隙率， $\mu$ 、 $\lambda$  為拉梅(Lame)常數， $B$  為土層厚度。

由濁水溪沖積扇地層下陷模擬所輸入之土壤參數及土層厚度資料(見上年度報告表 6-1 及表 6-8)，根據式(3.1)得最大之浮體重力參數為 0.04。通常浮體重力參數大於 0.1 時，才較可能顯示出浮體重力效應之重要性(例如見附錄 B 之 Fig. 7)，所以濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不顯著。上述之土層厚度資料，乃根據中央地質調查所提出之濁水溪沖積扇水文地質剖面圖，如圖 3-1 至圖 3-9 所示，再利用 surfer 軟體內插而得。

為了進一步分析濁水溪沖積扇浮體重力效應之影響，研究中蒐集工研院能資所磁環感應分層式地層下陷監測井資料，包括彰化縣西港國小、新街國小，雲林縣豐安國小、新興國小、海豐分校、崙豐國小、建陽國小、金湖國小、宜梧國中等測站，分別如圖 3-10 至圖 3-18 所示，其中包含土壤柱狀分佈示意圖、分層地層下陷歷線圖以及月平均地下水位



歷線圖。由較細部之土壤柱狀分佈可發現，彰化縣西港國小站深度 120 公尺至 180 公尺間，有一層厚度達 60 公尺之黏土層，其餘測站之黏土層厚度皆小於 60 公尺，且與中細砂及礫石交錯分佈。若  $2\mu + \lambda = 1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 、 $\Delta\rho g = 1.62 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 、 $n^0 = 0.4$ ，則  $M = 0.06$ ，此浮體重力參數小於 0.1，浮體重力效應並不顯著。

由上述兩種資料，吾人可知濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不明顯，所以耦合與非耦合之模擬結果差異不大(見第二年報告第六章)。但是，吾人必須強調，耦合模式之理論基礎較非耦合模式嚴謹，且確實可以推估浮體重力效應(見附錄二及第一年報告第五章)。期望爾後能有機會將研究中所發展之一維耦合地層下陷模式，進一步應用於台灣其它地區之地層下陷模擬，以展現耦合模式之優點。

此外，由圖 3-10 至圖 3-18 可知，土壤柱狀圖、地層下陷歷線圖以及月平均地下水位歷線圖三者之量測資料未能完全配合，以致無法直接應用於地層下陷之推估。譬如以金湖國小站為例而言，在 210 公尺之土層中，有三層黏土層，卻僅有兩層地下水位觀測資料，所以無法直接進行地層下陷計算，除非依地下水位觀測資料將土層柱狀圖適當簡化，但可能導致誤差產生。因此，應根據土壤柱狀分布進行分層地下水位觀測，再配合分層地層下陷觀測資料，才可較準確地推估地層下陷。

### 3.3 濁水溪沖積扇終極下陷量之探討(計算五年時間內之下陷量)

載重及地下水超抽乃是兩種引發地層下陷的機制。當黏土層(即阻水層)瞬間承受表面載重時，由於瞬間土壤不排水，孔隙水壓隨即上升。當孔隙水壓逐漸消散時，也就是土壤開始排水，有效應力增加導致土壤發生壓密。直到孔隙水壓完全消散時，土體不再壓密，產生終極下陷量，如附錄 B 所示。另外，抽水導致地層下陷乃是因為抽水造成孔隙水壓下降，引發有效應力增加產生土體壓密。然而，除抽水量外，入滲量與邊界條件(邊界入流量)等水文條件亦嚴重影響孔隙水壓變化。所以探討抽水

可能引發之終極下陷量，可能比前述載重案例來的複雜且困難。由附錄 B 吾人可知，當含水層之水位隨時間變化時，不會發生終極下陷量。

為探討濁水溪沖積扇地下水超抽可能引發之終極下陷量，本研究根據上年度所率定之相關參數(上年度模擬時間為 84 年元月至 89 年 4 月)，其中模擬區域分層分區圖如圖 3-19 與圖 3-20 所示，模擬網格圖如圖 3-21 所示，地質參數如表 3-2 所示，並使用相同之抽水量如表 3-3 所示、入滲量如表 3-4 與表 3-5 所示，以及邊界條件下，繼續模擬五年，即民國 89 年 4 月至 94 年 4 月，計算模擬終極下陷量，並提供河、海岸堤防危險程度評估之用。模擬結果，如表 3-6 與表 3-7 所示，此外，模擬五年之等平均下陷速率如圖 3-22 所示。由表 3-6 與表 3-7 可知，下陷量隨時間之增加而增加，下陷量與時間可能呈線性或非線性關係。譬如，彰化縣好修國小、大成國小以及雲林縣中山、元長公墓等地方，下陷量與時間呈線性關係，也就是下陷量隨時間作等倍數之增加，而彰化縣原斗國小、美豐國小以及雲林縣新興國小、建陽國小等地方，下陷量與時間呈非線性關係，下陷增加量隨時間增加而有減緩之趨勢，但是下陷量仍隨時間之增加而變大，如圖 3-23 與圖 3-24 所示。此外，分年終極下陷速率之模擬結果，如表 3-8 所示。利用表 3-8，吾人可內插出河、海岸處之預測下陷速率，以作為河、海岸堤防危險程度評估之用。

由上述結果可知，在未來五年內，濁水溪沖積扇可能不會發生終極下陷量。其原因可能為，所使用之總抽水量大於總入流量(入滲量與邊界入流量之合)，因此孔隙水壓不斷下降，導致土體有效應力不斷增加，且模式中假設土體參數為定值，也就是應力與應變呈線彈性關係，所以土體持續壓密。若能將土體之應力與應變關係視為非線性，也就是土體參數為孔隙比之函數，即

$$\lambda = \lambda(e)$$

$$\mu = \mu(e) \tag{3.2}$$

其中， $\lambda$ 與 $\mu$ 為拉梅常數， $e$ 為孔隙比(void ratio)。且土體參數隨孔隙比之減少而變大，則當孔隙水壓持續下降，有效應力持續增加，可能產生終極下陷量。

為說明上述，將土體參數與孔隙比之關係假設如下

$$\lambda = \left( \frac{e_0 - e_\infty}{e - e_\infty} \right)^w \lambda_0$$

$$\mu = \left( \frac{e_0 - e_\infty}{e - e_\infty} \right)^w \mu_0 \quad (3.3)$$

其中， $e_0$ 為初始孔隙比， $e_\infty$ 為最小孔隙比，也就是土體可壓密最大體積下之孔隙比； $\lambda_0$ 與 $\mu_0$ 為初始拉梅常數； $w$ 為係數。圖 3-25 為式 3.3 之表示，當 $e \rightarrow e_\infty$ 時，拉梅常數比( $\lambda/\lambda_0$ 或 $\mu/\mu_0$ )趨近於無限大，也就是土體無法再變形。此外， $w=0$ 為線彈性假設，也就是土體參數不隨孔隙比變化而變化。然而， $w$ 愈大，則表示拉梅常數比隨孔隙比下降而增加愈顯著。利用式 3.3 之土體參數非線性關係，並取 $e_0 = 0.067$ 與 $e_\infty = 0.175$ 模擬終極下陷量，大成國小、美豐國小、建陽國小與元長公墓之結果如圖 3-26 所示。由圖 3-26 可知，當 $w=500$ 時，發生模擬終極下陷量。由此可說明，若土體參數隨孔隙比減少而增加，可能發生終極下陷量。但是，吾人必須強調，除了終極下陷量的定義有待進一步界定外，對於如何才能正確地建立土體參數與孔隙比之關係，尤其是在區域性複雜地質分布發生終極下陷量情況下，是一個值得有待進一步研究之課題。此外，式 3.3 僅為本研究為說明可能發生終極下陷量，所假設之土體參數與孔隙比關係式，並不是濁水溪沖積扇之真實地質參數函數。

### 3.4 濁水溪沖積扇地層下陷潛能分析

地層下陷潛能分析乃是制定地層下陷區防護管理措施之重要依據。一般而言，下陷總量與下陷速率為評估地層下陷潛能之兩種方法。然而，嚴重地層下陷地區可能已達終極下陷量，且下陷速率與抽水量多寡有密

切關係，所以此兩種方法可能較無法正確地評估地層下陷潛能。本研究利用上年度率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數(見表 3-2、表 3-3、表 3-4、表 3-5、圖 3-19、圖 3-20 與圖 3-21)，根據先前所使用之抽水量，即已故嘉義農專沈向白教授所提出之濁水溪沖積扇地下水資源調查資料，分別於各鄉鎮市增加一定抽水量，模擬時間為 84 年元月至 89 年 4 月，經由所引發之下陷增加量，評估地層下陷潛能區域。所增加之抽水量訂為濁水溪沖積扇抽水總量之鄉鎮市總數平均值(即抽水總量/鄉鎮市總數)。模擬結果，如表 3-9、表 3-10 與圖 3-27、圖 3-28 所示。其中，圖 3-27 使用原抽水量之模擬結果，而圖 3-28 為增加抽水量之下陷增加量模擬結果。

由表 3-9 與表 3-10 可發現，口湖鄉宜梧派出所與青蚶閘門、褒忠鄉田洋東分別增加 100 公分以上之下陷量；大城鄉大成國小與美豐國小，褒忠鄉龍岩農場，口湖鄉拔子腳、成龍村、下崙、湖口村、台子挖、金湖派出所以及青蚶水塔皆有 70 至 100 公分之下陷量；大城鄉西港國小、潭藪國小，元長鄉元長公墓、忠孝國小亦有 40 至 70 公分之下陷量。此外，由圖 3-28 亦可清楚得，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉乃是地層下陷潛能區。另外，與原抽水量之模擬結果如圖 3-27 相比較可發現，彰化縣大城鄉為相對嚴重地層下陷區域。

## 第四章 結語

大區域分區分層地層下陷計算研究子題，其主要目的在於發展與應用一套準確且高效率的地層下陷數值計算模式，並配合區域地下水文平衡最佳推估模式、地層下陷資料之地理資訊決策支援系統以及地層下陷及地下水優化模式等研究子題，建立地層下陷潛勢之判別方法及潛能下陷量之預測技術。

本年度為計畫最後一年，前兩年已完成一維耦合地層下陷模式控制方程式之推導與求解方法之建立，提出所需輸入之資料清單，並進行濁水溪沖積扇地層下陷現地模擬。本年度大區域分區分層地層下陷計算研究子題主要目的是進一步分析與應用已發展完成之一維耦合地層下陷模式，其工作項目為：(1) 國內相關地層下陷計算模式功能列表分析，(2) 若有堪用之實測案例(根據浮體重力係數大小)，則評估有無考慮浮體重力效應對地層下陷之影響，(3) 給定代表抽水量及入滲量下，計算終極下陷量，(4) 協助完成單機版地層下陷管理模式整合系統，地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接，(5) 評估地陷潛能，(6) 計算河、海岸處終極下陷量，以提供河、海岸堤防危險程度評估之用。

本研究子題已協助地層下陷資料之地理決策支援系統研究子題，完成地層下陷計算模式(所需輸入資料、啟動程式、展示計算結果)與地理資訊決策支援系統之介面連接，建立一套單機版地層下陷管理模式整合系統。亦完成國內相關地層下陷計算模式功能列表分析，根據模式求解方法、水流維度、土體變形維度、數值方法、使用程式、土壤類別以及是否考慮浮體重力效應等因素進行分析比較。本研究所提出之一維耦合地層下陷模式，乃基於地下水流為擬似三維概念，也就是假設阻水層之水流為垂直流及含水層之水流為水平流，耦合求解地下水流與垂向一維土

體靜力平衡方程式。因此，一維耦合地層下陷模式除了可以模擬多含水層之地下水流，由於僅考慮較為重要之垂向位移量，而不考慮水平變形，所以較三維耦合模式更簡單且有效率，適合區域性地層下陷之模擬。此外，由於耦合求解地下水流與垂向一維土體靜力平衡方程，所以一維耦合地層下陷模式理論上較一維非耦合模式準確，且可以模擬載重引發之地層下陷，並考慮土層軟且厚所造成之體力效應(body force effect)。本研究提出之一維耦合地層下陷模式屬於半解析計算模式，配合地質之分區與分層，地下水流計算採分層積分並引入垂向二次多項式內插函數(quadratic polynomial interpolation function)，垂向土體靜力平衡方程式則採用解析解，因此模式對大區域或小範圍計算皆能有效處理。

對於濁水溪沖積扇浮體重力效應之探討工作項目，分別由濁水溪沖積扇地層下陷模擬所輸入之土壤參數及土層厚度資料以及工研院能資所磁環感應分層式地層下陷監測井土壤柱狀分佈資料，計算浮體重力參數，結果發現濁水溪沖積扇之浮體重力效應並不明顯。所以耦合與非耦合之模擬結果差異不大。但是，吾人必須強調，耦合模式之理論基礎較非耦合模式嚴謹，且確實可以推估浮體重力效應(見附錄二及第一年報告第五章)。期望爾後能有機會將研究中所發展之一維耦合地層下陷模式，進一步應用於台灣其它地區之地層下陷模擬，以展現一維耦合模式之優點。

根據上年度濁水溪沖積扇地層下陷模擬所率定之相關參數(上年度模擬時間為84年元月至89年4月)，並使用相同之抽水量、入滲量以及邊界條件下，繼續模擬五年，即民國89年4月至94年4月，計算模擬終極下陷量，並提供河、海岸堤防危險程度評估之用。結果發現，濁水溪沖積扇可能不會發生終極下陷量。其原因可能為，所使用之總抽水量大於總入流量(入滲量與邊界入流量之合)，因此孔隙水壓不斷下降，導致土體有效應力不斷增加，且模式中假設土體參數為定值，所以土體持續壓

密。若假設土體參數隨孔係比之減少而增加，則可能產生終極下陷量。但是，對於要如何才能正確地建立土體參數與孔隙比之關係，尤其是在區域性複雜地質分布發生終極下陷量情況下，乃是一個值得進一步研究之課題。

利用上年度率定與驗證完成之濁水溪沖積扇地層下陷模擬相關參數，根據先前所使用之抽水量，即已故嘉義農專沈向白教授所提出之濁水溪沖積扇地下水資源調查資料，分別於各鄉鎮市增加一定抽水量，經由所引發之下陷增加量，評估地層下陷潛能區域。所增加之抽水量訂為濁水溪沖積扇抽水總量之鄉鎮市總數平均值(即抽水總量/鄉鎮市總數)。結果發現，彰化縣大城鄉以及雲林縣口湖鄉、褒忠鄉與元長鄉乃是地層下陷潛能區。

## 參考文獻

1. 柳志錫，林明煌，杜富麗(1992)，”臺灣雲林沿海地區地盤下陷之特性研究”，地下水調察查分析及保育管理研討會，第 569-581 頁。
2. 盛若磐，抽取地下水導致地表下陷之簡便估計法(1989)，行政院農委會，台北。
3. 曹以松(1969)，”台北盆地過度抽取地下水引起之地層沉陷及其補救方法”，台灣水利 17 卷，第一期。
4. 黃良雄，楊錦釗，(1997) ”雲林沿海地區地層下陷預測模式與地理資訊系統之發展與評估(4)”，行政院農委會。
5. 黃良雄，楊錦釗，(1998)”大區域地下水超抽引致地層下陷之分層計算模式應用(一)濁水溪沖積扇”，經濟部水資源局。
6. 黃良雄，楊錦釗，(1999)”大區域地下水超抽引致地層下陷之分層計算模式應用(二)屏東平原”，經濟部水資源局。
7. 黃良雄，楊錦釗，(2000a)”地層下陷數值模式發展(三)”，國科會。
8. 黃良雄，楊錦釗，(2000b)”地下水超抽導致地層下陷模式(一)”，經濟部水例處水利規劃試驗所。
9. 黃良雄，楊錦釗，(2000c)”地下水超抽導致地層下陷模式(二)”，經濟部水例處水利規劃試驗所。
10. 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”，國立交通大學博士論文，新竹。
11. 廖日昇，李林少華，柳志錫，廖建順，林明煌(1990)，”北港沿海地區的地盤下陷及地下水污染之調查及研究”，地盤下陷研討會(III)，第 129-216 頁。



12. 鄭美崙(1999), ” 台西麥寮地區雙向排水引致地層下陷之分層分析”, 國立台灣大學碩士論文, 台北。
13. 張光仁(2000), ” 台西麥寮地區多井抽水引致區域性地層下陷之分層分析”, 國立台灣大學碩士論文, 台北。
14. 劉志純(1996), ” 雲林地區抽水行為對地層下陷的影響”, 國立台灣大學碩士論文, 台北。
15. 李德河、陳景文(1996), ” 地層下陷區土壤物性及力學行為之研究”, 經濟部水利司。
16. 葉弘德、葉高次(1994), ” 地層下陷之有限元素模式 III”, 國科會。
17. 施清吉(1998), ” 屏東縣林邊地區地層下陷之實例預測”, 經濟部水資源局。
18. 張惠文、李顯智(1996), ” 以地下水洩降量及土壤結構評估地層之沉陷行為”, 經濟部水利司。
19. 許澤善(1996), ” 雲林地區地層下陷之預測：一個新模式之驗證與校核”, 經濟部水利司。
20. 杜富麗、歐陽湘、柳志錫、梁綿來(1996), ” 雲林沿海地區地層下陷現況調查與預測”, 濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集。
21. Biot M. A. (1955). “Theory of Elasticity and Consolidation for A Porous Anisotropic Solid”, *Journal of Applied Physics*, 26, 182-185.
22. Chen, C. J., Chen, H. C. (1984). “Finite Analytic Numerical Method for Unsteady Two-Dimensional Navier-Stokes Equation”, *Journal of Computation Physics*, 53, 209-226.
23. Ferronato, M., Gambolati, G., and Teatini, P., (2001). “Ill-Conditioning of Finite Element Poroelasticity Equations”, *International Journal of Solids*

- and Structures, 38, 5995-6014.
24. Ghaboussi, J., and Wilson, E. L., (1973) "Flow of Compressible fluid in Porous elastic Media, Int. J. Numer. Meth. Engng. 5, 419-442.
  25. Mei, C. C. (1985). "Gravity Effect in Consolidation of Layer of Soft Soil", ASCE Journal of Eng. Mech., 1038-1047.
  26. Sloan, S.W., and Abbo, A. J., (1999). "Biot Consolidation Analysis with Automatic Time Stepping and Error Control. Part 1 : Theory and Implementation" Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 23, 467-492.
  27. Tarn, J. Q., and Lu, C. C. (1991). "Analysis of Subsidence due to a Point Sink in an Anisotropic Porous Elastic Half Space", Int. J. Numer. Analysis Mech. Geomech., 15, 573-592.
  28. Vermeer, P. A., and Verruijt, A. (1981). "An Accuracy Condition for Consolidation by Finite Element", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 5, 1-4.

## 附錄 A 一維非耦合地層下陷模式之建立

本附錄內容參考蔡東霖(2001)第三章一維非耦合地層下陷模式之建立。

### A.1 分層三維地下水流計算

#### A.1.1 水流控制方程式

三維地下水流方程式中若假設土體之體積變化量與流體孔隙水壓成一簡單正比關係，即  $P \propto \nabla \cdot \bar{U}_s$ ，以及土體為非均質等向性，並加入源流項 (source term)，則三維地下水流方程式可變為

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) = Ss \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Q(x - x_w, y - y_w, z - z_w) \quad j = 1, 2, 3 \quad (\text{A-1})$$

式中  $K$  為水力傳導係數 (hydraulic conductivity)， $Ss$  為比貯水係數 (specific storage)， $Q$  為流源項， $\Phi = \frac{P^e}{\rho_w g}$  為水頭 (hydraulic head) ( $P^e$  為已扣除初始值之變動孔隙水壓)， $\rho_w$  為流体密度， $g$  為重力加速度。

本研究採分層垂向積分來建立模式，將(A-1)式作垂向積分可得

$$\int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) dz = \int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \left( Ss \frac{\partial \Phi}{\partial t} + Q(x - x_w, y - y_w, z - z_w) \right) dz \quad (\text{A-2})$$

式中  $z = b_{i+1}(x, y, t)$  與  $z = b_i(x, y, t)$  分別表示土層之上、下邊界函數。研究中不考慮非飽合土體之影響，所以若土層為非拘限含水層 (unconfined aquifer) 時，則(A-2)式之上邊界則為自由液面 (free surface)，其示意圖分別

如圖 2.1 與圖 2.2 所示。由萊布尼茲法則(Leibnitz rule)與連鎖律(chain rule)並忽略次要項，即假設土層上、下邊界函數在空間上之變化遠小於土層之厚度或水深，則(A-2)式可變為

$$\begin{aligned} \overline{KB} \frac{\partial^2 \overline{\Phi}}{\partial x^2} + \overline{KB} \frac{\partial^2 \overline{\Phi}}{\partial y^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\overline{KB}) \right] \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial x} + \left[ \frac{\partial}{\partial y} (\overline{KB}) \right] \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial y} \\ = \overline{S_s B} \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial t} + \overline{K} \left( \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial z} \Big|_{b_i} - \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \right) + \overline{Q}(x - x_w, y - y_w) \end{aligned} \quad (A-3)$$

其中  $\overline{K}(x, y)$ 、 $\overline{S_s}(x, y)$ 、 $\overline{\Phi}$  分別表示垂向積分之平均值，譬如  $\overline{\Phi} = \frac{1}{B} \int_{b_i}^{b_{i+1}} \Phi dz$ ，

$B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$  表示土層之厚度或水深。另外， $\overline{K} \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}}$  與  $\overline{K} \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial z} \Big|_{b_i}$

分別為上、下邊界之水流通量。(A-3)式若應用至非拘限含水層時，則上邊界自由液面需引入運動邊界條件(kinematic boundary condition)與動力邊界條件(dynamic boundary condition)作進一步處理。在不考慮地表入滲量下，自由液面之運動邊界條件可表示為

$$S_y \frac{\partial b_{i+1}}{\partial t} = -\overline{K} \frac{\partial \overline{\Phi}}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \quad (A-4)$$

其中  $\eta(x, y, t) = B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$  表示非拘限含水層之水深。若假設自由液面對時間之變化遠大於下邊界之變化，即  $\frac{\partial b_{i+1}}{\partial t} \gg \frac{\partial b_i}{\partial t}$ ，則(A-4)式可變為

$$S_y \frac{\partial \eta}{\partial t} = -K \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \quad (\text{A-5})$$

式中  $s_y$  為比出水係數(specific yield)。此外，由自由液面動力邊界條件，即  $P^o(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) + P^e(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) = 0$ ，在假設初始時為靜水壓分布，即  $P^o(x, y, b_{i+1}(x, y, t)) = \rho_w g(\eta^o(x, y) - \eta(x, y, t))$ ，則可得

$$\eta(x, y, t) = \eta^o(x, y) + \Phi(x, y, b_{i+1}(x, y, t), t) \quad (\text{A-6})$$

式中  $\eta^o$  表示初始時非拘限含水層之水深函數。(A-6)式可用於追蹤自由液面之變化。

### A.1.2 初始條件

模式中採用增加量為因變數，所以初始條件(initial condition)為零，即

$$\bar{\Phi}(x, y, t = 0) = 0 \quad x, y \in \Omega \quad (\text{A-7})$$

式中  $\Omega$  表示求解之區域。

### A.1.3 邊界條件

研究中利用分層垂向積分與水平區域拆解概念建立模式，所以對垂直及水平方向之邊界，皆可再分為自然邊界(natural boundary)與內部介面邊界(interface boundary)兩種。以下分別對垂直與水平之自然邊界條件與

內部介面邊界條件加以闡述。

(a)垂直邊界條件

垂直自然邊界是指模擬區域中最上與最下之邊界而言。若邊界條件給定為定水頭條件(即 Dirichlet type boundary condition)，則可表示為

$$\Phi|_{boundary} = \Phi^* \quad (A-8)$$

另外，若給定為流量邊界條件(即 Neumann type boundary condition)，則可表示為

$$\left. \frac{\partial \Phi^e}{\partial n} \right|_{boundary} = -q_n \quad (A-9)$$

其中  $\Phi^*$  與  $q_n$  為給定之已知值。此外，垂直內部介面邊界則是指層與層間之介面邊界，此種介面邊界需同時滿足水流通量連續與孔隙水壓連續之條件，如圖 2-3 所示，其中上標 1 與 2 分別表示相鄰邊界不同分層之介質，向量  $\bar{n}$  與  $\bar{i}$  為邊界面之法線向量與切線向量。則層與層間之水流通量連續可表示為

$$q_{rn}^{(1)} = q_{rn}^{(2)} \quad (A-10)$$

也就是

$$K^{(1)} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial n} = K^{(2)} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial n} \quad (\text{A-11})$$

另外，孔隙水壓連續可表示為

$$\Phi^{(1)} = \Phi^{(2)} \quad (\text{A-12})$$

### (b) 水平邊界條件

水平自然邊界是指海岸線、河川或山嶺線等模擬區域最外圍之水平邊界而言，而水平內部介面邊界則是指區域經拆解後區與區之介面邊界，如圖 2-4 所示。若水平自然邊界條件給定為定水頭或水流通量，則可分別表示為

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_c \quad (\text{A-13})$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial n} = -q_m \quad (\text{A-14})$$

其中  $\bar{\Phi}_c$  與  $q_m$  為給定值。另外，與垂直內部介面邊界相同，水平內部介面邊界亦需同時滿足孔隙水壓連續及水流通量連續，即

$$K^{(1)} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial n} = K^{(2)} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(2)}}{\partial n} \quad (\text{A-15})$$

$$\bar{\Phi}^{(1)} = \bar{\Phi}^{(2)} \quad (\text{A-16})$$

#### A.1.4 內插形狀函數

研究中引用分層垂向積分技巧建立模式，為了使層與層間之介面邊界能夠同時滿足孔隙水壓連續與水流通量連續，故假設每個土層之孔隙水壓在垂直方向上為二次多項式函數分布，即

$$\Phi(x, y, z, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t)z + c(x, y, t)z^2 \quad (\text{A-17})$$

由(A-17)式可知，傳統擬三維水流概念中，含水層之水流為水平流僅是假設  $b$  與  $c$  為零之簡化結果，而阻水層垂直流之孔隙水壓分布函數，也可以用二次多項式函數加以內插趨近(也就是任何函數分布皆可以用多段之二次多項式函數加以趨近)，所以可同時模擬水平流與垂直流。此外，(A-17)式之係數  $a$ ， $b$  與  $c$ ，可根據上邊界值、下邊界值與分層積分平均值之定義求得，即

$$\Phi|_{b_i} = a \quad (\text{A-18})$$

$$\Phi|_{b_{i+1}} = a + bB + cB^2 \quad (\text{A-19})$$

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{B} \int_0^B (a + bz + cz^2) dz \quad (\text{A-20})$$

聯立求解(A-18)式、(A-19)式與(A-20)式可得



$$a = \Phi|_{bi} \quad (A-21)$$

$$b = \frac{1}{B}(-2\Phi|_{bi+1} - 4\Phi|_{bi} + 6\bar{\Phi}) \quad (A-22)$$

$$c = \frac{1}{B^2}(3\Phi|_{bi+1} + 3\Phi|_{bi} - 6\bar{\Phi}) \quad (A-23)$$

對(A-17)式做垂向微分，則可得上、下邊界之垂方向微分值分別為

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{bi+1} = \frac{1}{B}(4\Phi|_{bi+1} + 2\Phi|_{bi} - 6\bar{\Phi}) \quad (A-24)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{bi} = \frac{1}{B}(-2\Phi|_{bi+1} - 4\Phi|_{bi} + 6\bar{\Phi}) \quad (A-25)$$

(A-24)式與(A-25)式分別表示含水層上、下邊界之垂方向微分值，可由上、下邊界值以及垂向分層平均值來表示。

## A.2 土體位移代數式

根據由完整三維地層下陷方程式出發，經由量階分析方法，吾人得到垂向一維地層下陷理論僅在地下水流為近似垂直流或水平流之流況才適用的重要結論(見蔡東霖，2001)。水流為水平流之含水層時，每層土層之垂向一維土體位移代數方程式為

$$\Delta z = U_{sz}|_{bi+1} - U_{sz}|_{bi} = \int_{bi(x,y,t)}^{bi+1(x,y,t)} \frac{\rho_w g \Phi}{\mu + \lambda} dz = \frac{\rho_w g B \bar{\Phi}}{\mu + \lambda} \quad (A-26)$$

而水流為垂直流之阻水層，垂向一維土體位移代數方程式則為

$$\Delta z = U_{sz}|_{bi+1} - U_{sz}|_{bi} = \int_{bi(x,y,t)}^{bi+1(x,y,t)} \frac{\rho_w g \Phi}{2\mu + \lambda} dz = \frac{\rho_w g B \bar{\Phi}}{2\mu + \lambda} \quad (A-27)$$

式中  $\mu$  與  $\lambda$  為土體之拉梅(Lame)常數， $U_{sz}|_{bi+1}$  與  $U_{sz}|_{bi}$  分別為上、下邊界之位移量。(A-26)式與(A-27)式中皆假設土體為理想彈性體，但實際地層下陷計算時，將不考慮因孔隙水壓升高(有效應減少)所造成之土體膨脹現象。

### A-3 總結一維非耦合地層下陷控制方程式

A.1 節之水流控制方程式與邊界條件以及初始條件，結合 A.2 節的土體位移代數式，可建立一維非耦合地層下陷計算方法。以下分別將拘限含水層與阻水層以及非拘限含水層，所使用之水流控制方程式與土體位移代數式以及初始條件與邊界條件歸納如下。

#### (a) 拘限含水層與阻水層

結合(A-3)式以及(A-24)式與(A-25)式，可得分層三維水流方程式為

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial y^2} + \left[ \frac{1}{KB} \frac{\partial}{\partial x} (KB) \right] \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} + \left[ \frac{1}{KB} \frac{\partial}{\partial y} (KB) \right] \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y} \\ & = \frac{\bar{S}_s}{K} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} + \frac{1}{B^2} (-6\bar{\Phi}|_{bi+1} - 6\bar{\Phi}|_{bi} + 12\bar{\Phi}) + \frac{\bar{Q}}{KB} (x - x_w, y - y_w) \end{aligned} \quad (A-28)$$

假設土層上、下邊界函數在空間上之變化很小，由(A-24)式與(A-25)式土層上、下邊界之水流通量可分別表示為

$$q_l|_{bi+1} = \frac{\bar{K}}{B}(4\Phi|_{bi+1} + 2\Phi|_{bi} - 6\bar{\Phi}) \quad (\text{A-29})$$

$$q_l|_{bi} = \frac{\bar{K}}{B}(-2\Phi^e|_{bi+1} - 4\Phi^e|_{bi} + 6\bar{\Phi}^e) \quad (\text{A-30})$$

式中  $q_l|_{bi+1}$  與  $q_l|_{bi}$  分別表示流入與流出含水層上、下邊界之流量。另外，一維垂向土體位移代數式，若為含水層與阻水層則分別如(A-26)式與(A-27)式所示。

(b)非拘限含水層

由(A-3)式以及(A-24)式與(A-25)式水流方程式可表示為

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial y^2} + \left[ \frac{1}{K\eta} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{K}\eta) \right] \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} + \left[ \frac{1}{K\eta} \frac{\partial}{\partial y} (\bar{K}\eta) \right] \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y} \\ & = \frac{\bar{S}_s}{K} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} + \frac{1}{\eta^2} (-6\Phi|_{bi+1} - 6\Phi|_{bi} + 12\bar{\Phi}) + \frac{\bar{Q}}{K\eta} (x - x_w, y - y_w) \end{aligned} \quad (\text{A-31})$$

上邊界自由液面運動邊界條件由式(A-5)與式(A-29)可得

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{-\bar{K}}{Ss\eta} (4\Phi|_{bi+1} + 2\Phi|_{bi} - 6\bar{\Phi}) \quad (\text{A-32})$$

下邊界水流量可表示為

$$q_l|_{bi} = \frac{\bar{K}}{\eta} (-2\Phi|_{bi+1} - 4\Phi|_{bi} + 6\bar{\Phi}) \quad (\text{A-33})$$

水深  $\eta$  可由(A-6)式表示為

$$\eta = \eta^o + \Phi|_{bi+1} \quad (\text{A-34})$$

土體一維垂向位移代數式為

$$\Delta z = \frac{\rho_w g \eta \bar{\Phi}}{\mu + \lambda} \quad (\text{A-35})$$

另外，拘限含水層與阻水層以及非拘限含水層之初始條件、垂直與水平方向之自然邊界條件與內部介面邊界條件則分別如(A-7)式至(A-16)式所示。

## 附錄 B 體力效應對土體壓密之探討

### Demonstrations of Body Force Effect on Soil Consolidation

Natural Hazard Mitigation Research Center

National Chiao Tung University

#### ABSTRACT

Biot's theory of linear poro-elasticity is employed to investigate the effect of body force on soil consolidation. The steady-state solutions of displacements, settlements, and incremental effective stress are analytically given for two typical types of soil consolidation. The causes of these two typical types of soil consolidation are surface loading and water table depression. The result of this study shows that the soil consolidation is significantly affected by the body force when the soil is soft or thick, or both. The neglect of body force will severely underestimate the settlements and incremental effective stress of soil, and this might lead to potential damage in engineering practice.

***Keywords: soil consolidation, body force, Biot's theory of poro-elasticity***

#### Introduction

The conventional one-dimensional Terzaghi's consolidation theory of elastic media (Terzaghi, 1954) has been widely used to estimate the soil consolidation in geotechnical engineering (Das, 1990; Lambe and Whitman, 1979). However, the effect of body force (i.e., self weight) is not embedded in Terzaghi's theory due to the assumption that the incremental effective stress is

identical to the dissipative pore pressure (i.e., the invariance of total stress) as consolidation proceeds.

Gibson et al. (1967, 1981) used Lagrangian coordinates and allowed body force in their formulation by introducing an equation of state. Mei (1986) employed Eulerian approach to formulate the consolidation of elastic media with the effect of body force for single soil layer. The results show that the conventional Terzaghi's consolidation theory is only available for thin or stiff soil layers.

In this study, by applying Biot's theory of linear poro-elasticity (Biot, 1941), the governing equations of soil consolidation with the body force effect is derived first. Two typical types of steady, one-dimensional soil consolidation are then solved analytically. The causes of these two typical types of soil consolidation are surface loading and water table depression. The former appears in the filling or building construction, and the latter happens in groundwater overpumping. The comparisons of displacements, settlements, and incremental effective stress with and without body force effect are finally conducted.

### **Governing Equations**

The mass conservation of fluid and solid in saturated porous media (e.g. see Bear and Corapcioglu, 1981) can be written as

$$\frac{\partial(n\rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (n\rho_w \vec{V}_w) = 0 \quad (\text{B-1})$$

and

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n)\rho_s \vec{V}_s] = 0 \quad (\text{B-2})$$

respectively.  $n$  is porosity,  $\rho_w$  and  $\rho_s$  are densities of fluid and solid.  $\vec{V}_w$

and  $\vec{V}_s$  are velocities of fluid and solid.

The deformation of porous media is attributed to the rolling and slipping of grains with respect to each other. Hence  $\rho_s$  in (B-2) remains unchanged in consolidation process. Denoting  $\vec{u}$  as the solid displacement and assuming  $\vec{V}_s = \partial\vec{u}/\partial t$  and  $|\partial P/\partial t| \gg \vec{V}_s \cdot \nabla P$ , flow equation of deforming porous media without the compressibility of fluid (e.g. see Bear and Corapcioglu, 1981) is yielded by combing (B-1) and (B-2) as

$$\nabla \cdot \vec{q}_r + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{B-3})$$

where  $\vec{q}_r = n(\vec{V}_w - \vec{V}_s)$  is Darcy's flux velocity,  $P$  is pore pressure.

In the absence of inertial force, the equilibrium of forces for saturated porous media (e.g. see Biot, 1941; Verruijt, 1969; Bear and Corapcioglu, 1981) can be expressed as

$$\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}} + \vec{f} = \nabla P \quad (\text{B-4})$$

where  $\overline{\overline{\sigma}}$  is the effective stress tensor,  $\vec{f} = [\rho_w n + (1-n)\rho_s] \vec{g}$  is the body force, and  $\vec{g}$  is the gravitational acceleration.

Denoting  $\overline{\overline{\sigma}}$ ,  $P$ ,  $\vec{f}$ , and  $n$  as the sum of initial steady values  $\overline{\overline{\sigma}}^0$ ,  $P^0$ ,  $\vec{f}^0$ ,  $n^0$  and consolidation-producing incremental values  $\overline{\overline{\sigma}}^e$ ,  $P^e$ ,  $\vec{f}^e$ ,  $n^e$ , the equations for equilibrium of forces shown in (B-4) can be divided into initial steady-state equations

$$\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}}^0 + \vec{f}^0 = \nabla P^0 \quad (\text{B-5})$$

and incremental equations

$$\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}}^e + \vec{f}^e = \nabla P^e \quad (\text{B-6})$$

where  $\vec{f}^e = -(\rho_s - \rho_w)n^e \vec{g}$  represents the perturbation of body force due to the variation of porosity as the porous media deforms.

Similarly, the flow equation given by (B-3) can also be decomposed into initial steady-state equation

$$\nabla \cdot \vec{q}_r^0 = 0 \quad (\text{B-7})$$

and incremental equation

$$\nabla \cdot \vec{q}_r^e + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{B-8})$$

The deformation of porous media takes place as a result of the change in the effective stress. The constitutive relationship between the effective stress and displacement for linear poro-elastic media with small deformation is

$$\sigma_{ij}^{\prime e} = G \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (\text{B-9})$$

where  $G$  and  $\lambda$  are the well-known Lamé's constants.

From (B-2), the consolidation-producing incremental porosity,  $n^e$ , can be represented as

$$n^e = (1 - n^0) \nabla \cdot \vec{u} \quad (\text{B-10})$$

The detailed derivation of (B-10) is shown in the Appendix.

Substituting (B-9) and (B-10) into (B-6) yields the equilibrium of forces in incremental state as

$$G \nabla^2 \vec{u} + (G + \lambda) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) - \Delta \rho (1 - n^0) (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{g} = \nabla P^e \quad (\text{B-11})$$

where  $\Delta \rho = \rho_s - \rho_w$ .

Using Darcy's law,

$$\vec{q}_r^e = - \frac{\overline{\overline{K}} \cdot \nabla P^e}{\rho_w g} \quad (\text{B-12})$$

the flow equation of deforming porous media given by (B-3) becomes

$$\nabla \cdot \left( \overline{\overline{K}} \cdot \nabla P^e \right) + \rho_w g \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{B-13})$$



where  $\overline{K}$  is the hydraulic conductivity tensor.

Governing equations (B-1), (B-2), (B-4) with constitutive relation (B-9) now are rewritten as (B-13), (B-10), and (B-11) for incremental equations. And equations (B-11) and (B-13) are governing equations of consolidation.

### One-Dimensional Consolidation

Two typical types of soil consolidation such as surface loading and water table depression shown in Figs. 1 and 2 will be adopted to examine the body force effect on soil consolidation. The surface loading often appears in the filling and building construction, whereas water table depression frequently takes place in the groundwater overpumping. In both cases, we let a stratum of clay be sandwiched between sandy strata that are highly permeable and much stiffer than the clay. Thus, excessive pore pressures only exist in the clay as consolidation proceeds. And nearly all of the consolidation arises due to the volume changes within the clay, while the sandy strata may be considered as rigid media when comparing them to the clay. In both cases, the horizontal dimension is much larger than the thickness of the consolidation stratum. Hence, one-dimensional consolidation is assumed in this study. This leads the flow and the strain only in vertical direction. In this study, only the steady-state solutions, which are usually applied to engineering practices such as the estimation of settlements, will be considered.

Due to that we are dealing with steady, one-dimensional consolidation, the flow equation of deforming porous media shown in (B-13) for an isotropic and homogeneous clay can be simplified as

$$K \frac{\partial^2 P^e}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{B-14})$$

The equations for equilibrium of forces given by (B-11) can also be reduced

to

$$(2G + \lambda) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \Delta \rho g (1 - n^0) \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial P^e}{\partial z} \quad (\text{B-15})$$

One can find that these two equations can be solved decouply. The incremental pore pressure of flow equation is yielded first. The displacements are then obtained by solving the equation for equilibrium of forces with the known incremental pore pressure.

### **Case 1 : surface loading**

For the case shown in Fig. 1, the ground surface is subjected to a loading  $\Delta \sigma$  at time  $t = 0$ . The incremental pore pressure in sandy strata could be instantly all dissipated due to the very large difference in permeability between sand and clay. Applying the continuity of pore pressure at interfaces between sand and clay, the incremental pore pressures at the bottom and top boundaries of clay are

$$P^e(z = 0) = 0, \text{ and } P^e(z = B) = 0. \quad (\text{B-16})$$

Form (B-14) and (B-16), the incremental pore pressure of clay is

$$P^e = 0 \quad (\text{B-17})$$

Equation (B-17) shows that the incremental pore pressure in the clay stratum inducing by surface loading is all dissipated as a result of drainage into the sandy strata at time  $t \rightarrow \infty$ .

Therefore, the equation for equilibrium of forces (B-15) can be expressed as

$$(2G + \lambda) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \Delta \rho g (1 - n^0) \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{B-18})$$

The top boundary of clay  $z = B$  is subjected to an incremental effective stress that is in agreement with the loading

$$(2G + \lambda) \left. \frac{\partial u_z}{\partial z} \right|_{z=B} = -\Delta\sigma \quad (\text{B-19})$$

The displacement of clay at bottom boundary  $z = 0$  is given by

$$u_z \Big|_{z=0} = 0 \quad (\text{B-20})$$

The exact solution for (B-18) to (B-20) is

$$u_z = \frac{-\Delta\sigma B}{(2G + \lambda)M} \left[ e^M - e^{M(1-z')} \right] \quad (\text{B-21})$$

where

$$M = \Delta\rho g(1 - n^0)B / (2G + \lambda) \quad (\text{B-22})$$

in which  $z' = z/B$  is nondimensional coordinate in  $z$  direction and  $M$  represents the body force parameter. It is larger for larger  $B$  and smaller  $(2G + \lambda)$ . In other words, the body force parameter becomes large when the soil is soft or thick, or both. For example, taking  $\Delta\rho g = 1.62 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ ,  $n^0 = 0.3$ ,  $(2G + \lambda) = 3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  for a soft clay, and a relatively thick clay stratum with  $B = 100 \text{ m}$  yields  $M = 0.378$ , which is not small. Therefore, it is quite safe to let  $0 \leq M \leq 1$ .

Using L'Hopital's rule for  $M \rightarrow 0$  and setting  $z' = 1$  in (B-21), the settlement without the body force effect,  $(\Delta z)_{nb} = -u_z \Big|_{z'=1}^{M \rightarrow 0}$ , is

$$(\Delta z)_{nb} = \frac{\Delta\sigma B}{(2G + \lambda)} \quad (\text{B-23})$$

The nondimensional displacements of clay could be yielded by introducing

$u_z^* = u_z / [-(\Delta z)_{nb}]$  as

$$u_z^* = \frac{1}{M} \left[ e^M - e^{M(1-z')} \right] \quad (\text{B-24})$$

Setting  $z' = 1$  in (B-24), the nondimensional settlement,  $(\Delta z)^* = u_z^* \Big|_{z'=1}$ , is

$$(\Delta z)^* = \frac{1}{M} \left[ e^M - 1 \right] \quad (\text{B-25})$$

From (B-9) and (B-21), the incremental effective stress in the clay stratum can be written as

$$\sigma'_{zz}{}^e = (-\Delta\sigma)e^{M(1-z')} \quad (\text{B-26})$$

Setting  $M = 0$  in (B-25) yields the incremental effective stress without the body force effect,  $(\sigma'_{zz}{}^e)_{nb} = \sigma'_{zz}{}^e \Big|_{M \rightarrow 0}$ , as

$$(\sigma'_{zz}{}^e)_{nb} = (-\Delta\sigma) \quad (\text{B-27})$$

Equation (B-27) shows that the surface loading is entirely carried by the soil skeleton of the clay rather than the pore water in steady state.

The incremental effective stress can be nondimensionalized with introduction of  $(\sigma'_{zz}{}^e)^* = \sigma'_{zz}{}^e / (\sigma'_{zz}{}^e)_{nb}$  as

$$(\sigma'_{zz}{}^e)^* = e^{M(1-z')} \quad (\text{B-28})$$

### **Case 2 : water table depression**

For the case shown in Fig. 2, water table depression  $h_1$  and  $h_2$  take place in sandy strata above and below the clay. Applying the continuity of pore pressure, the incremental pore pressures at the bottom and top boundaries of clay are

$$P^e \Big|_{z=0} = -\rho_w g h_2, \text{ and } P^e \Big|_{z=B} = -\rho_w g h_1 \quad (\text{B-29})$$

From (B-14) and (B-29), the incremental pore pressure in the clay stratum is

$$P^e = -\rho_w g \left( h_2 + \frac{h_1 - h_2}{B} z \right) \quad (\text{B-30})$$

Thus, the equation for equilibrium of forces (B-15) becomes

$$(2G + \lambda) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \Delta\rho g (1 - n^0) \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{-\rho_w g (h_1 - h_2)}{B} \quad (\text{B-31})$$

The bottom boundary of clay is connected to nearly rigid sandy stratum. The displacement of clay at  $z = 0$  can be expressed as

$$u_z \Big|_{z=0} = 0 \quad (\text{B-32})$$

If the overlaying sandy stratum shown in Fig. 2(a) is confined, the top boundary of clay  $z = B$  is subjected to an incremental effective stress  $-\rho_w g h_1$  due to water table depression, i.e.

$$(2G + \lambda) \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_{z=B} = -\rho_w g h_1 \quad (\text{B-33})$$

For the unconfined overlaying stratum (i.e., the existence of free water surface) shown in Fig. 2(b), considering the decrease in weight by dewatering pore water (Corapcioglu, and Bear, 1983), the incremental effective stress applying to the top boundary of clay becomes

$$(2G + \lambda) \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\rho_w g h_1^* \quad (\text{B-34})$$

where  $h_1^* = (1 - n)h_1$  represents effective water table depression,  $n$  is porosity in the overlaying sandy stratum. The unconfined case could easily be conducted by replacing  $h_1$  of (B-33) with  $h_1^*$ , hence only considering the confined case is enough.

The exact solution for (B-31) to (B-33) is

$$u_z = \frac{-\rho_w g B}{2G + \lambda} \left\{ h_2 z' + (h_1 - h_2) \frac{z'^2}{2} + h_1 \left[ \frac{z'}{M} - \frac{z'^2}{2} + \frac{(M-1)}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] \right. \\ \left. + h_2 \left[ \frac{-z'}{M} - z' + \frac{z'^2}{2} + \frac{1}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] \right\} \quad (\text{B-35})$$

Using L'Hopital's rule for  $M \rightarrow 0$  and setting  $z' = 1$  in (B-35), the settlement without body force effect can be represented as

$$(\Delta z)_{nb} = \frac{\rho_w g B (h_1 + h_2)}{2(2G + \lambda)} \quad (\text{B-36})$$

The nondimensional displacement in the clay can be given by introducing

$u_z^* = u_z / [-(\Delta z)_{nb}]$  as

$$u_z^* = \frac{r}{1+r} z'^2 + \frac{1}{1+r} (2z' - z'^2) + \frac{2r}{1+r} \left[ \frac{z'}{M} - \frac{z'^2}{2} + \frac{M-1}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] + \frac{2}{1+r} \left[ -\frac{z'}{M} - z' + \frac{z'^2}{2} + \frac{1}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] \quad (\text{B-37})$$

where  $r = h_1/h_2$  represents the ratio between the water table depression in upper and lower strata.

Taking  $z' = 1$  in (B-36), the nondimensional settlement is

$$(\Delta z)^* = 1 + \frac{2r}{1+r} \left[ \frac{1}{M} - \frac{1}{2} + \frac{M-1}{M^2} (e^M - 1) \right] + \frac{2}{1+r} \left[ -\frac{1}{M} - \frac{1}{2} + \frac{1}{M^2} (e^M - 1) \right] \quad (\text{B-38})$$

From (B-9) and (B-35), the incremental effective stress in the clay stratum can be written as

$$\sigma_{zz}^{\prime e} = -\rho_w g \left\{ h_1 z' + h_2 (1 - z') + h_1 \left[ e^{M(1-z')} - \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - z' \right] + h_2 \left[ \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - 1 + z' \right] \right\} \quad (\text{B-39})$$

Applying L'Hoptial's rule for  $M \rightarrow 0$  in (B-39) yields the incremental effective stress without the body force effect

$$(\sigma_{zz}^{\prime e})_{nb} = -\rho_w g [h_1 z' + h_2 (1 - z')] \quad (\text{B-40})$$

One can observe that the incremental effective stress given by (B-40) agrees with the incremental pore pressure shown in (B-30) due to the ignorance of body force effect (i.e., the invariance of total stress).

If  $h_1$  is larger than  $h_2$  the nondimensional incremental effective stress can be obtained by introducing  $(\sigma_{zz}^{\prime e})^* = \sigma_{zz}^{\prime e} / (-\rho_w g h_1)$  as follows:

$$(\sigma_{zz}^{\prime e})^* = z' + \frac{1-z'}{r} + \left[ e^{M(1-z')} - \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - z' \right] + \frac{1}{r} \left[ \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - 1 + z' \right] \quad (\text{B-41})$$

On the contrary, when  $h_2$  is larger than  $h_1$  the nondimensional

incremental effective stress can be yielded with introduction of  $(\sigma'_{zz})^{**} = \sigma'_{zz} / (-\rho_w g h_2)$  as

$$(\sigma'_{zz})^{**} = rz' + (1-z') + r \left[ e^{M(1-z')} - \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - z' \right] + \left[ \frac{1}{M} (e^{M(1-z')} - 1) - 1 + z' \right] \quad (B-42)$$

## Discussions

### Case 1 : surface loading

The nondimensional displacements and nondimensional settlement of clay stratum given by (B-24) and (B-25) are shown in Figs. 3 and 4, respectively. Without body force effect, i.e.,  $M \rightarrow 0$ , the nondimensional displacements and nondimensional settlement are

$$u_z^* \Big|_{M \rightarrow 0} = z' \quad (B-43)$$

and

$$(\Delta z)^* \Big|_{M \rightarrow 0} = 1 \quad (B-44)$$

Equation (B-43) shows that the displacements in the clay stratum are linearly distributed when the body force effect is neglected. However, from Fig. 3 one can find that the displacements are nonlinearly distributed if the effect of body force is considered. In addition, it could be found from Figs. 3 and 4 that the soil consolidation is heavily related to the body force parameter. In other words, the body force severely affects soil consolidation when the soil is soft or thick, or both. For example, when  $M = 0.4$ , the nondimensional settlement is 1.23, that is, the settlement with the effect of body force increases 23 percent as compared to that without the body force effect when the body force parameter is 0.4. This underestimation on settlement may lead to potential damage in engineering practice.

Fig. 5 illustrates the nondimensional incremental effective stress in the

clay stratum represented by (B-28) with variable body force parameters. Neglecting the effect of body force, the nondimensional incremental effective stress is

$$(\sigma_{zz}^e)^* \Big|_{M \rightarrow 0} = 1 \quad (\text{B-45})$$

Equation (B-45) demonstrates that the incremental effective stress in the clay stratum is uniform and agrees with the surface loading shown in (B-27) if the effect of body force is neglected. However, it can be found from Fig. 5 that the incremental effective stress of clay is larger than that without the body force effect as long as the body force parameter is different from zero.

### **Case 2 : water table depression**

The nondimensional displacements of clay stratum given by (B-37) for the body force parameters of 0, 0.2, and 0.6 are displayed in Figs. 6(a)-(c), respectively. The nondimensional settlement shown in (B-38) is demonstrated in Fig. 7. One can find from Figs. 6 and 7 that the soil consolidation is significantly related not only to the body force parameter but also to the ratio of water table depression. Without the body force effect, the nondimensional displacements are quadratic polynomial distribution

$$u_z^* \Big|_{M \rightarrow 0} = \frac{r}{1+r} z'^2 + \frac{1}{1+r} (2z' - z'^2) \quad (\text{B-46})$$

If water table depression only appears in the upper stratum, i.e.,  $r \rightarrow 0$ , the nondimensional displacements are

$$u_z^* \Big|_{r \rightarrow 0} = (2z' - z'^2) + 2 \left[ -\frac{z'}{M} - z' + \frac{z'^2}{2} + \frac{1}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] \quad (\text{B-47})$$

On the contrary, when water table depression only exists in the lower stratum, i.e.,  $r \rightarrow \infty$ , the nondimensional displacements become



$$u_z^* \Big|_{r \rightarrow \infty} = z'^2 + 2 \left[ \frac{z'}{M} - \frac{z'^2}{2} + \frac{M-1}{M^2} (e^M - e^{M(1-z')}) \right] \quad (\text{B-48})$$

It is interesting to see from Figs. 6 and 7 that the nondimensional displacements are larger for smaller  $r$ .

The nondimensional incremental effective stress in the clay stratum for  $h_1 \geq h_2$  shown in (B-41) is depicted in Fig. 8 when the body force parameters are 0, 0.2, and 0.6. And it becomes

$$\left( \sigma_{zz}^{\cdot e} \right)^* \Big|_{M \rightarrow 0} = z' + \frac{1-z'}{r} \quad (\text{B-49})$$

without the body force effect. In addition, Fig. 9 shows the nondimensional incremental effective stress in the clay stratum for  $h_2 \geq h_1$  given by (B-42). The nondimensional incremental effective stress in the clay without body force effect is

$$\left( \sigma_{zz}^{\cdot e} \right)^{**} \Big|_{M \rightarrow 0} = rz' + (1-z') \quad (\text{B-50})$$

It can be seen from Figs. 8 and 9 that the soil consolidation is strongly dependent on the effect of body force. In addition, one can clearly find that the incremental effective stress in the clay stratum is linearly distributed shown by (B-48) and (B-49) when the effect of body force is neglected. However, because of the effect of body forces, the incremental effective stress, in general, is distributed nonlinearly.

### Conclusions

Unlike the conventional Terzaghi's consolidation theory, which does not include the body force effect, Biot's theory of linear poro-elasticity is applied to examine the soil consolidation with the effect of body force under the assumption of small deformation in the present study. Closed-form solutions

have been found for the one-dimensional, steady-state distributions of displacements, settlement, and incremental effective stress in the surface loading and water table depression with the body force parameter. The body force parameter, a function of Lamé's constants, initial porosity, and the thickness of clay stratum, could be the representation of the effect of body force on the soil consolidation. The magnitude of the displacements, settlement, and incremental effective stress depend significantly on the effect of body force when the soil is soft or thick, or both.

### Appendix : Derivation of Consolidation-producing Incremental Porosity

The mass conservation of solid in saturated porous media can be written as

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n)\rho_s \vec{V}_s] = 0 \quad (\text{B-51})$$

where  $n$  is porosity,  $\rho_s$  is the density of solid,  $\vec{V}_s$  represents velocity of solid.

The deformation of porous media is manifested by variation of porosity due to the rolling and slipping of the grains with respect to each other. Therefore,  $\rho_s$  remains unchanged in the consolidation process. Hence (B-51) becomes

$$\frac{d_s(1-n)}{dt} = -(1-n)\nabla \cdot \vec{V}_s \quad (\text{B-52})$$

where  $d_s/dt$  represents the material derivative  $\partial/\partial t + \vec{V}_s \cdot \nabla$ . Assuming linear variation, i.e.  $|\partial(1-n)/\partial t| \gg |\vec{V}_s \cdot \nabla(1-n)|$ , we have

$$\frac{\partial(1-n)}{\partial t} = -(1-n)\nabla \cdot \vec{V}_s \quad (\text{B-53})$$

Dividing  $n$  into steady initial values  $n^0$  and consolidation-producing incremental values  $n^e$ , (B-53) can be linearized as

$$-\frac{\partial n^e}{\partial t} = -(1 - n^0) \nabla \cdot \vec{V}_s \quad (\text{B-54})$$

Denoting  $\vec{u}$  as the solid displacement and letting  $\vec{V}_s = \partial \vec{u} / \partial t$ , again, due to linear variation (B-54) becomes

$$n^e = (1 - n^0) \nabla \cdot \vec{u}_s \quad (\text{B-55})$$

### Notation

*The following symbols are used in this paper:*

$B$  = thickness of clay

$f$  = body force

$G$  = Lamé constant

$h$  = lowering of water table

$K$  = hydraulic conductivity

$M$  = body force parameter

$n$  = porosity

$P$  = pore pressure

$q_r$  = Darcy's velocity

$r$  = ratio of lowering of water tables

$u$  = displacement of solid

$V_w$  = velocity of fluid

$V_s$  = velocity of solid

$\rho_w$  = density of fluid

$\rho_s$  = density of solid

$\beta$  = compressibility of fluid

$\sigma'_{i,j}$  = effective stress tensor

$\lambda$  = Lamé constant

$\Delta z$  = settlement

### Subscripts

$i, j, k$  = x, y, and z directions

$w$  = phase of fluid

$s$  = phase of solid

### Superscripts

0 = initial steady-state values

$e$  = consolidation-producing values

\* = nondimensional value

$nb$  = values without the effect of body force

### References

1. Bear, J., and Corapcioglu, M. Y., "Mathematical Model for Regional Land Subsidence due to Pumping, 2. Integrated Aquifer Subsidence Equations for Vertical and Horizontal Displacements", *Water Resour. Res.*, Vol. 17, 1981, pp. 947-958.
2. Biot, M. A., "General Theory of Three-Dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.*, Vol. 12, 1941, pp. 155-164.
3. Corapcioglu, M. A., and Bear, J., "A Mathematical Model for Regional Land Subsidence due to Pumping, 3. Integrated Equations for a Phreatic Aquifer", *Water Resour. Res.*, Vol. 19, 1983, pp. 895-908.

4. Das, B. M., *Principles of Geotechnical engineering*, PWS-KENT, 1990.
5. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L., “The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays, I. Finite Non-linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers,” *Geotechnique*, Vol. 17, 1967, pp. 1-273.
6. Gibson, R. E., Schiffman, R. L., and Cargill K. W., “The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, II. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, 1981, pp. 280-293.
7. Lambe, T.W., and Whitman R. V., *Soil Mechanics*, Wiley, 1979. Mei, C. C., “Gravity Effects in Consolidation of Layer of Soft soil”, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 118, 1984, pp. 1038-1047.
8. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, 1954.
9. Verrujit, A., “Elastic Storage of Aquifers”, *Flow Through Porous Media*, Academic Press, 1969, pp. 331-376.

### List of Figures

- Figure 1. The sketch of soil consolidation due to surface loading
- Figure 2. The sketch of soil consolidation due to water table depression: (a) confined case, (b) unconfined case
- Figure 3. The nondimensional displacement of clay for surface loading
- Figure 4. The nondimensional settlement for surface loading
- Figure 5. The nondimensional incremental effective stress of clay for surface loading
- Figure 6. The nondimensional displacement of clay for water table depression
- Figure 7. The nondimensional settlement for water table depression
- Figure 8. The nondimensional incremental effective stress of clay for water table depression ( $h_1 \geq h_2$ )
- Figure 9. The nondimensional incremental effective stress of clay for water table depression ( $h_2 \geq h_1$ )

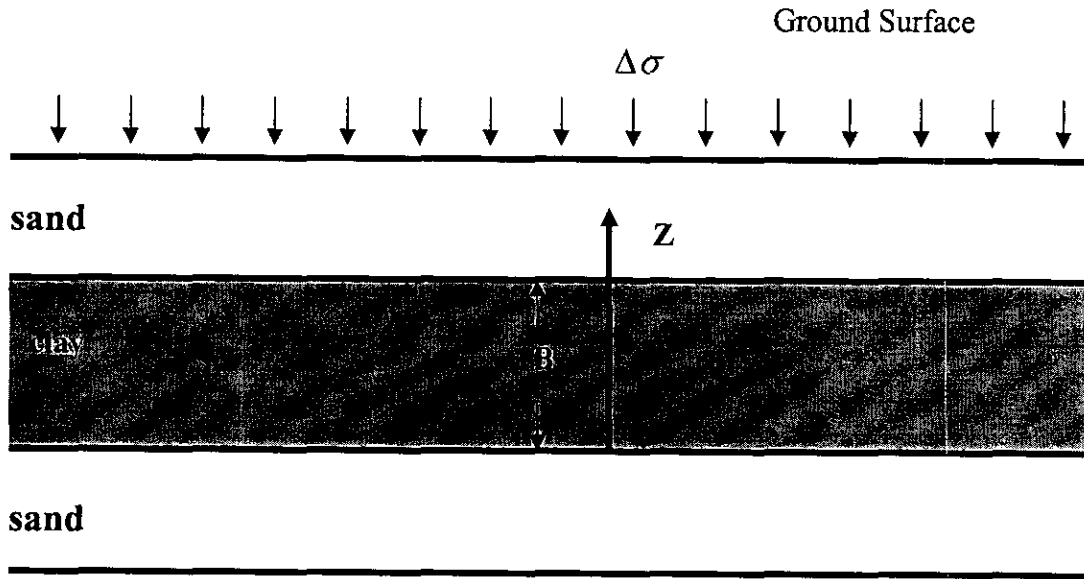


Fig. 1. The sketch of soil consolidation due to surface loading

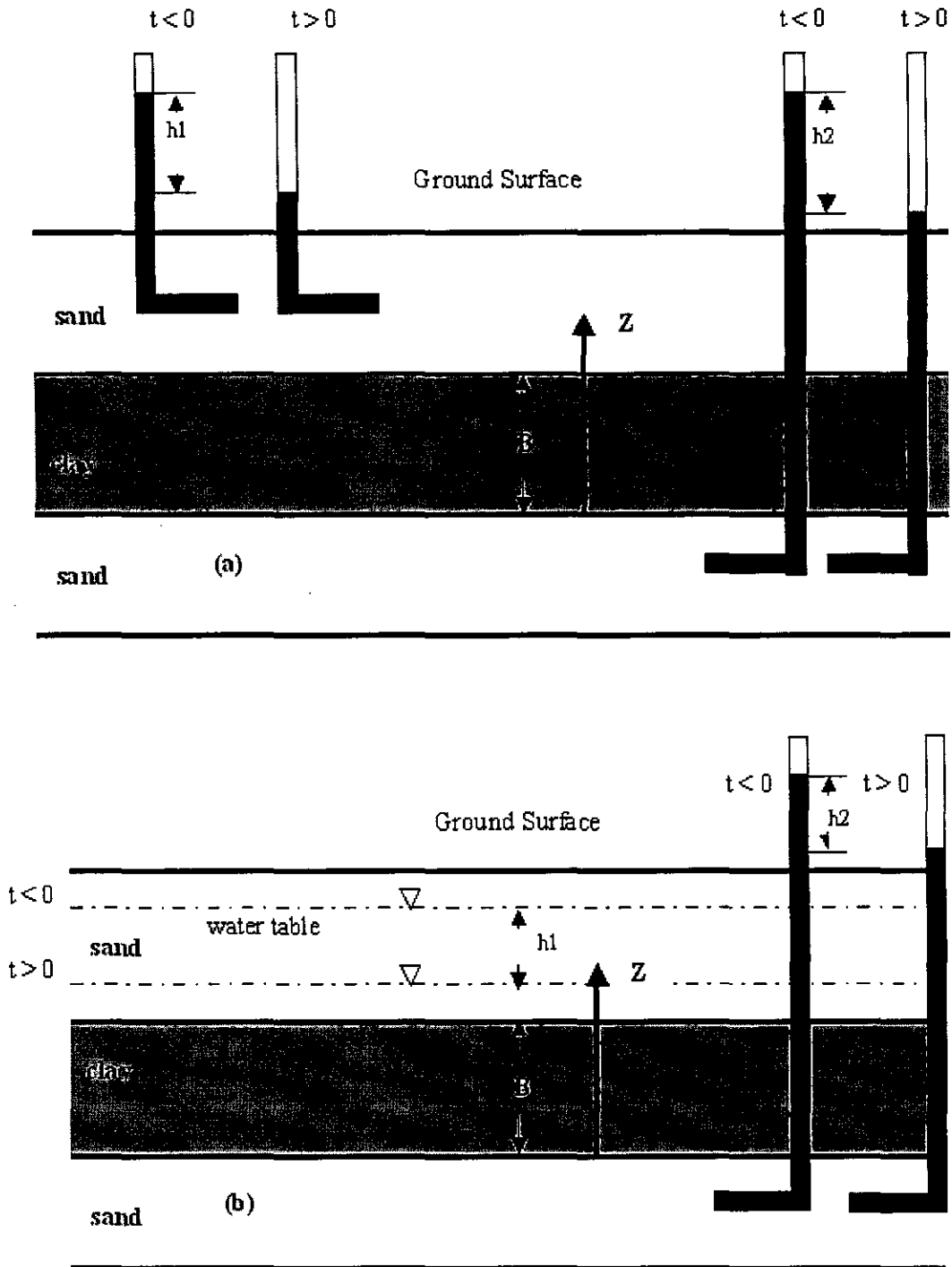


Fig. 2. The sketch of soil consolidation due to water table depression:  
 (a) confined case, (b) unconfined case



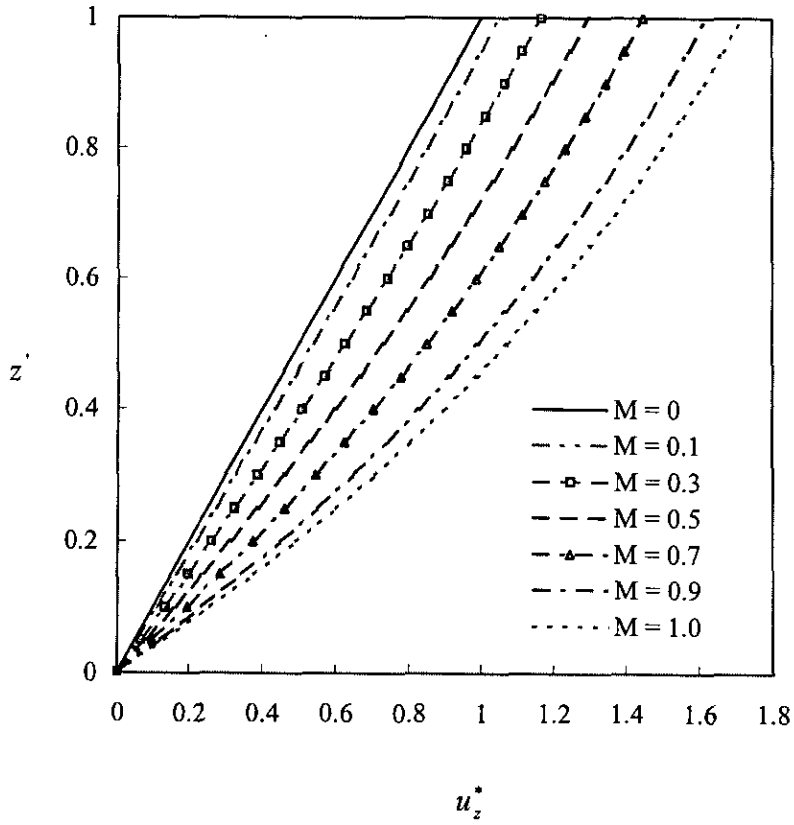


Fig. 3 The nondimensional displacement of clay for surface loading

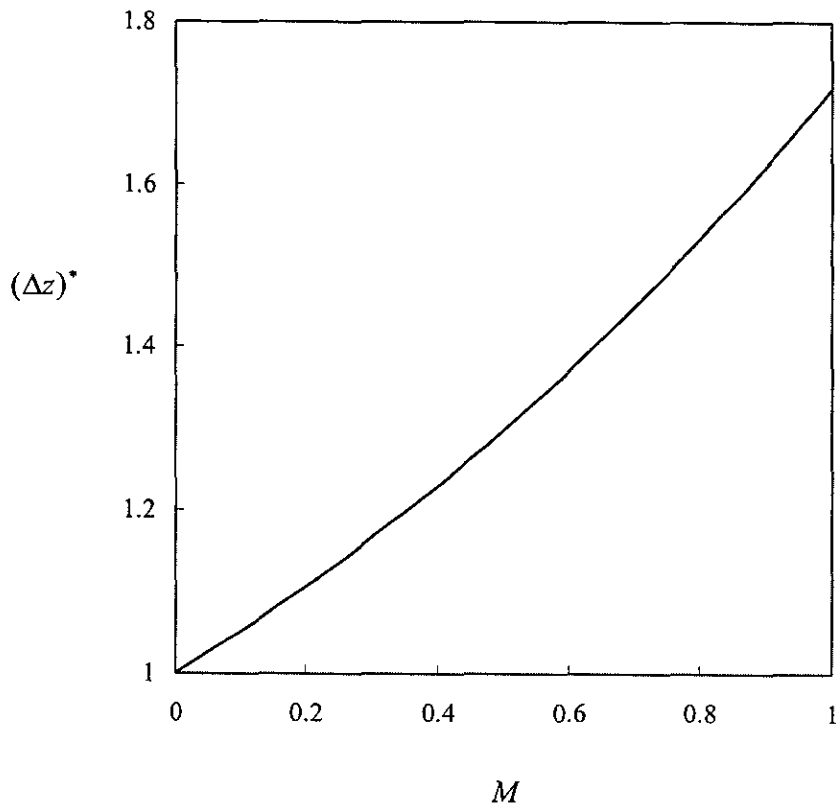


Fig. 4 The nondimensional settlement for surface loading

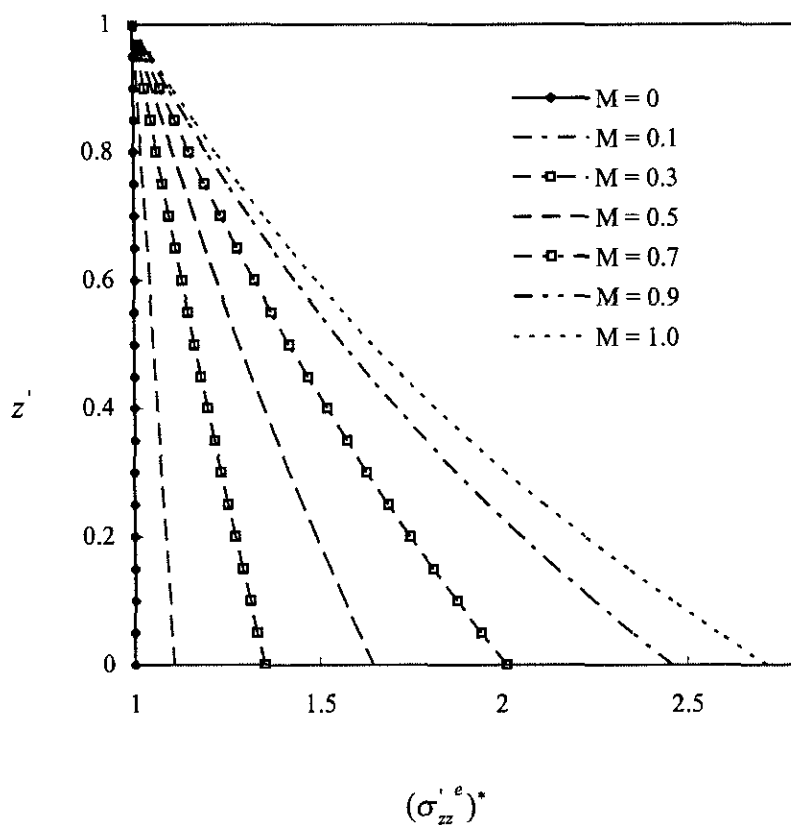


Fig. 5 The nondimensional incremental effective stress of clay for surface loading

$z'$

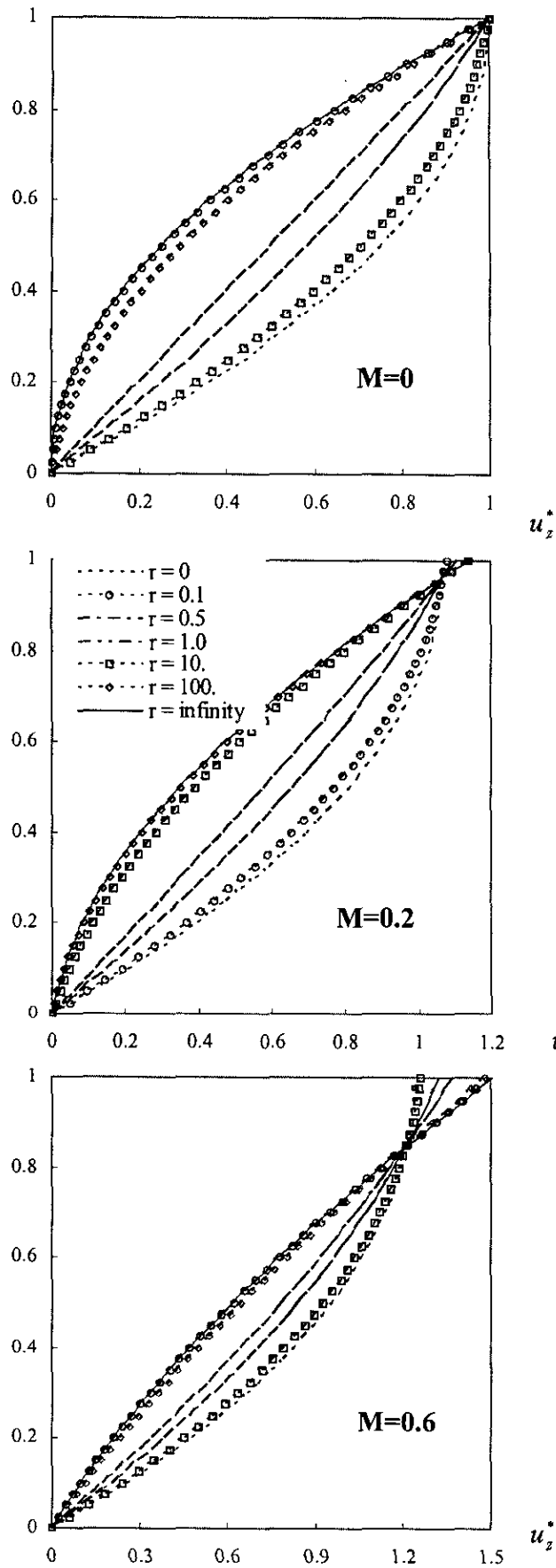


Fig. 6 The nondimensional displacement of clay for water table depression

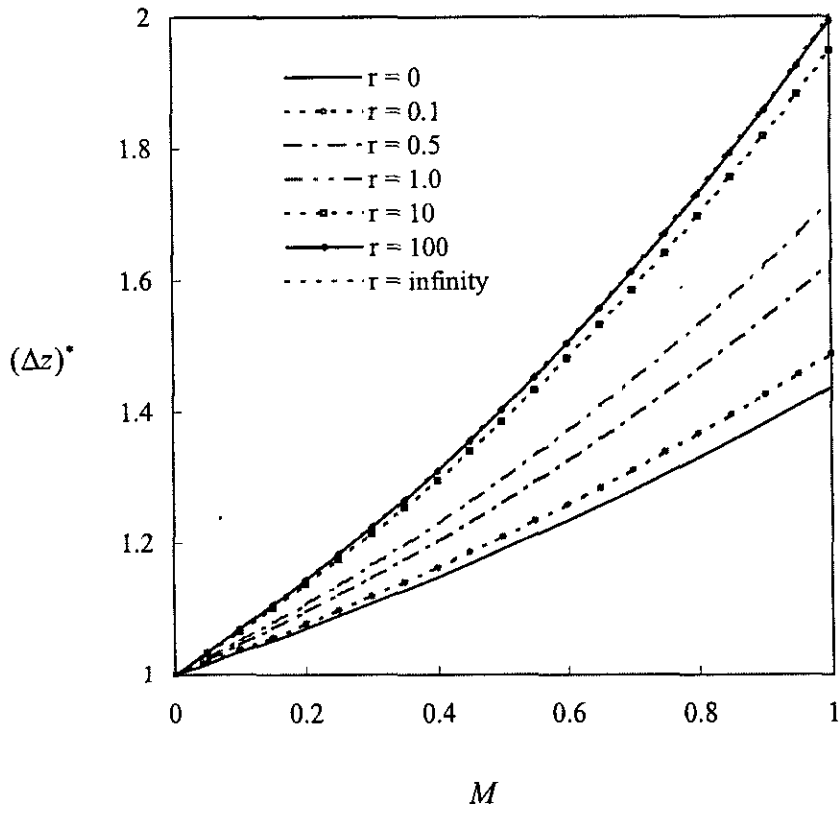


Fig. 7 The nondimensional settlement for water table depression

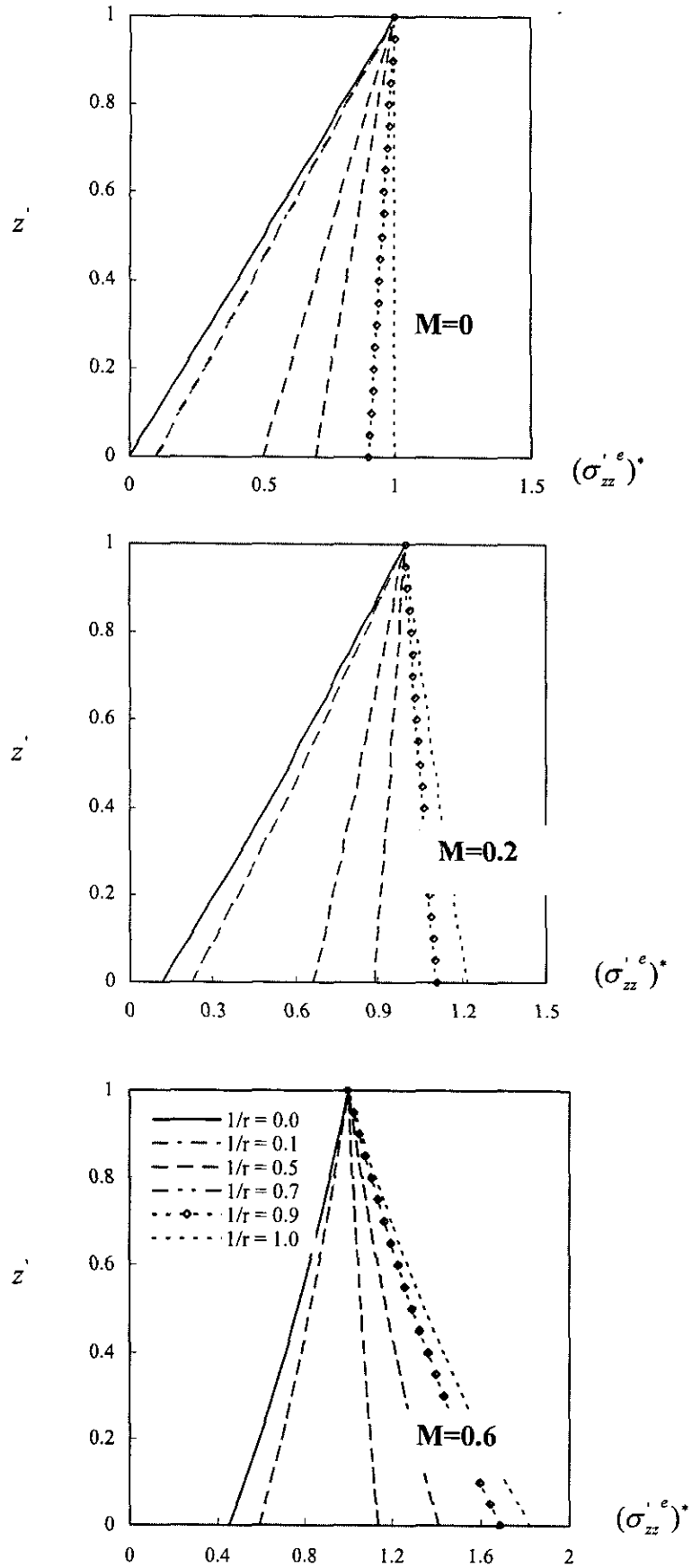


Fig. 8 The nondimensional incremental effective stress of clay for water table depression ( $h_1 \geq h_2$ )

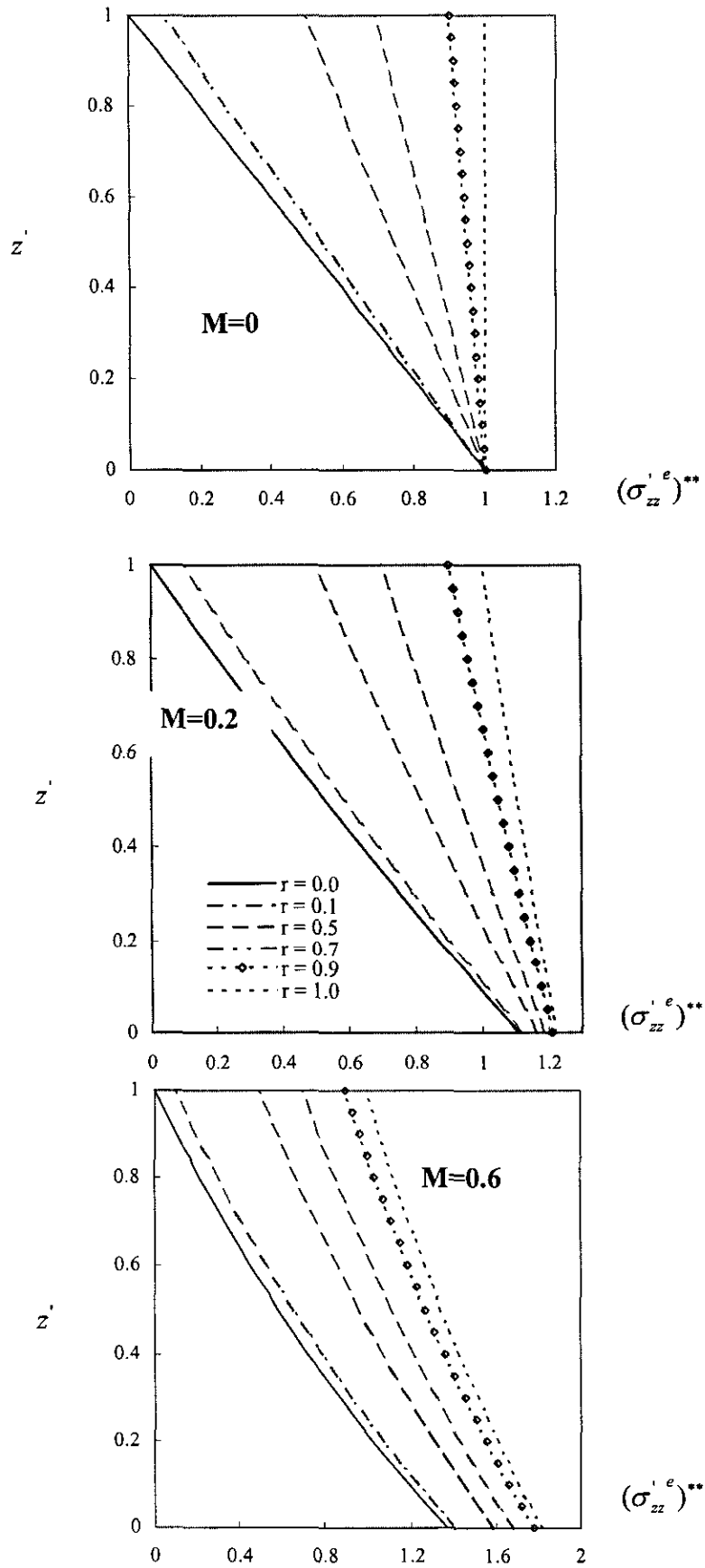


Fig. 9 The nondimensional incremental effective stress of clay for water table depression ( $h_2 \geq h_1$ )

表 2-1 一維耦合地層下陷模式模擬所需輸入資料

參數	項目
土壤地質參數	土壤密度 ( $\rho_s$ )
	初始孔隙率 ( $n_0$ )
	水力傳導係數 (K)
	拉梅常數 ( $\mu, \lambda$ ) *
	比出水係數 ( $S_y$ )
流體參數	流體密度 ( $\rho_w$ )
	流體壓縮係數 ( $\beta$ )
水文平衡參數	抽水量 (Q)
	分層抽水比例
	水田灌溉入滲量
	旱地降雨入滲量
	河川入滲量
	邊界側流量
	分層地下水位(初始條件)
	水頭邊界條件
模擬設定參數	網格點性質(邊界點、內部點或區與區交界點)
	網格大小 ( $\Delta x, \Delta y$ )
	時間間距 ( $\Delta t$ )
	地理座標(x, y, z)
	含水層與阻水層厚度 (B)

$$* \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

E 為楊氏模數(Young's Modulus)、 $\nu$  為柏松比(Poisson's ratio)

表 3-1 國內相關地層下陷理論法計算模式功能列表分析

求解方法	李德河教授等 (民國 85 年)	張惠文教授等 (民國 85 年)	許澤善教授等 (民國 85 年)	工研院能資所 (民國 85 年)	施清吉教授等 (民國 87 年)	劉振宇教授等 (民國 85 年)	林美聆教授等 (民國 89、90 年)	葉弘德教授等 (民國 83 年)	呂志宗教授等 (民國 80 年)	本研究
浮體重力	非耦合 無考慮	非耦合 無考慮	非耦合 無考慮	非耦合 無考慮	非耦合 無考慮	非耦合 無考慮	耦合 無考慮	耦合 無考慮	耦合 無考慮	耦合 考慮
土壤類別	阻水層	阻水層	阻水層	阻水層	含水層	阻水層 含水層	阻水層 含水層	阻水層 含水層	含水層	阻水層 含水層
水流維度	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	2D 水平	1D 垂向 2D 水平	3D 軸對稱	3D	3D 軸對稱	1D 垂向 2D 水平
土體變形 維度	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	1D 垂向	3D 軸對稱	3D	3D 軸對稱	1D 垂向
數值方法	有限差分法	有限差分法	有限差分法	有限差分法	解析解	有限差分法	有限元法	有限元法	解析解	有限解析法
使用程式	自行研發	自行研發	自行研發	COMPAC	解析解	MODFLOW Interbed	ABAQUS	3DFEMWATER	解析解	自行研發



表 3-2 地質參數比例表

		含水層一	阻水層一 或虛擬分層	含水層二	阻水層二 或虛擬分層	含水層三
麥寮鄉	K/K*	1.0	1.0	10.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
	$\lambda/\lambda^*$	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
崙背鄉	K/K*	0.1	1.0	6.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2
	$\lambda/\lambda^*$	1.2	0.8	1.2	0.8	1.2
二崙鄉	K/K*	0.1	1.0	0.9	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
西螺鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	$\lambda/\lambda^*$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
荊桐鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
林內鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
斗六市	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
虎尾鎮	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
土庫鎮	K/K*	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.3	0.35	0.3	0.35	0.3
	$\lambda/\lambda^*$	0.3	0.35	0.3	0.35	0.3

註：K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)； $\mu$ 、 $\lambda$  為拉梅常數(Lame constant)

註：若為含水層： $K^* = 1.0 \times 10^{-4}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^8$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^9$  (Nt/m<sup>2</sup>)

若為阻水層： $K = 1.0 \times 10^{-8}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^6$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^7$  (Nt/m<sup>2</sup>)

表 3-2 (續 1) 地質參數比例表

		含水層一	阻水層一 或虛擬分層	含水層二	阻水層二 或虛擬分層	含水層三
褒忠鄉	K/K*	0.1	1.0	0.1	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1
	$\lambda/\lambda^*$	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1
東勢鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
	$\lambda/\lambda^*$	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
台西鄉	K/K*	0.6	1.0	1.0	1.0	10.0
	$\mu/\mu^*$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	$\lambda/\lambda^*$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
四湖鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	$\lambda/\lambda^*$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
元長鄉	K/K*	1.0	1.0	0.8	1.0	0.2
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.2	1.0	0.1	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.2	1.0	0.2	1.0
大埤鄉	K/K*	1.0	1.0	0.1	1.0	0.1
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
斗南鎮	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
古坑鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
北港鎮	K/K*	1.0	1.0	10.0	1.0	30.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.17	1.0	0.17	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.17	1.0	0.17	1.0

註：K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)； $\mu$ 、 $\lambda$  為拉梅常數(Lame constant)

註：若為含水層：K\* =  $1.0 \times 10^{-4}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^8$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^9$  (Nt/m<sup>2</sup>)

若為阻水層：K =  $1.0 \times 10^{-8}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^6$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^7$  (Nt/m<sup>2</sup>)

表 3-2 (續 2) 地質參數比例表

		含水層一	阻水層一 或虛擬分層	含水層二	阻水層二 或虛擬分層	含水層三
水林鄉	K/K*	1.0	1.0	3.0	1.0	0.6
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
口湖鄉	K/K*	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	0.3
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0
彰化市	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.15
鹿港鄉	K/K*	1.0	1.0	5.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
和美鎮	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
線西鄉	K/K*	0.88	1.0	1.5	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
伸港鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
福興鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0
秀水鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

註：K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)； $\mu$ 、 $\lambda$  為拉梅常數(Lame constant)

註：若為含水層： $K^* = 1.0 \times 10^{-4}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^8$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^9$  (Nt/m<sup>2</sup>)

若為阻水層： $K = 1.0 \times 10^{-8}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^6$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^7$  (Nt/m<sup>2</sup>)

表 3-2 (續 3) 地質參數比例表

		含水層一	阻水層一 或虛擬分層	含水層二	阻水層二 或虛擬分層	含水層三
花壇鄉	K/K*	1.0	1.0	3.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
芬園鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
員林鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
溪湖鄉	K/K*	1.0	1.0	2.0	1.0	0.5
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
田中鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
大村鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
埔鹽鄉	K/K*	1.0	1.0	1.5	1.0	0.5
	$\mu/\mu^*$	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0
永靖鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
社頭鄉	K/K*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\mu/\mu^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\lambda/\lambda^*$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

註：K 為水力傳導係數(hydraulic conductivity)； $\mu$ 、 $\lambda$  為拉梅常數(Lame constant)

註：若為含水層： $K^* = 1.0 \times 10^{-4}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^8$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^9$  (Nt/m<sup>2</sup>)

若為阻水層： $K = 1.0 \times 10^{-8}$  (m/s)、 $\mu^* = 5.0 \times 10^6$  (Nt/m<sup>2</sup>)、 $\lambda^* = 1.0 \times 10^7$  (Nt/m<sup>2</sup>)

表 3-3 雲林地區各鄉鎮市年抽水量表

資料來源：沈向白教授

鄉鎮	灌溉用水	養殖用水	公共用水	工業用水	畜牧用水	總計
斗六市	1,693,099	25,818	0	0	0	1,718,917
斗南鎮	18,356,715	53,914	1,003,194	388,664	82,028	19,884,515
古坑鄉	2,491,719	5,267	3,270	102,195	1,363	2,603,814
大埤鄉	18,344,623	141,813	221,301	460,000	12,695	19,180,431
莿桐鄉	6,835,265	0	207,117	17,610	0	7,059,992
林內鄉	581,948	0	238,158	210,313	10,220	1,040,638
虎尾鎮	88,189,723	218,337	4,600,384	77,668	358,184	93,444,296
西螺鎮	42,884,668	181,408	602,508	873,586	449,347	44,991,516
土庫鎮	52,342,628	1,084,993	51,405	19,985	1,448,998	54,948,008
二崙鄉	65,008,783	424,745	59,228	10,628	998,536	66,501,920
崙背鄉	67,792,584	1,534,347	287,304	3,275,458	1,142,549	74,032,243
麥寮鄉	204,825,645	169,246,223	8,754,353	12,263	1,660,031	384,498,515
褒中鄉	4,884,179	276,732	8,754,353	0	0	13,915,264
東勢鄉	37,007,458	1,109,926	19,440	0	434,488	38,571,312
台西鄉	41,905,236	19,083,047	297,592	0	55,775	61,341,650
北港鎮	23,130,834	81,390	2,971,750	521,802	61,288	26,767,063
元長鄉	4,404,980	1,727,163	72,990	296,559	452,904	6,954,596
水林鄉	12,070,585	984,509	129,586	0	159,764	13,344,444
四湖鄉	8,329,552	472,328	105,451	2,544	0	8,909,874
口湖鄉	4,670,132	3,863,865	79,212	0	128,739	8,741,949
總計	705,750,355	200,515,823	28,458,595	6,269,274	7,456,907	948,450,954

單位：立方公尺/年

表3-4 彰化地區地表入滲量推估結果

單位：10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

鄉鎮市	入滲量	鄉鎮市	入滲量	鄉鎮市	入滲量
彰化市	31.61	溪湖鎮	23.62	二林鎮	89.64
鹿港鎮	43.35	田中鎮	23.58	田尾鄉	21.60
和美鎮	35.62	大村鄉	24.05	埤頭鄉	40.09
線西鄉	18.88	埔鹽鄉	40.88	芳苑鄉	75.21
伸港鄉	26.38	埔心鄉	19.40	大城鄉	32.52
福興鄉	36.49	永靖鄉	19.13	竹塘鄉	26.65
秀水鄉	22.77	社頭鄉	15.07	溪州鄉	40.71
花壇鄉	9.86	二水鄉	14.91	北斗鎮	20.28
員林鎮	20.16				

表3-5 雲林地區地表入滲量推估結果

單位：10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>

鄉鎮市	入滲量	鄉鎮市	入滲量	鄉鎮市	入滲量
麥寮鄉	58.41	虎尾鎮	23.56	大埤鄉	14.14
崙背鄉	18.04	土庫鎮	15.15	斗南鎮	15.36
二崙鄉	27.29	褒忠鄉	22.32	古坑鄉	48.74
西螺鎮	24.21	東勢鄉	27.13	北港鎮	10.67
莿桐鄉	35.85	台西鄉	49.82	水林鄉	26.37
林內鄉	49.56	四湖鄉	36.90	口湖鄉	61.79
斗六市	56.95	元長鄉	35.71		

表 3-6 彰化地區終極下陷量之探討

(單位：公分)

鄉鎮市	站名	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
鹿港鎮	絡津國小	1.48	2.97	4.46	5.95	7.43
福興鄉	管嶼國小	1.36	2.73	4.09	5.45	6.70
埔鹽鄉	好修國小	2.92	5.85	8.74	11.66	14.58
二林鎮	二林國小	5.56	9.32	11.80	13.48	14.64
	原斗國中	1.08	1.73	2.13	2.41	2.61
埤頭鄉	合興國小	1.16	1.77	2.11	2.38	2.49
芳苑鄉	草湖西南	3.60	6.42	8.60	10.32	11.72
	草湖	2.09	3.51	4.53	5.32	5.97
	路上派出所	2.34	4.10	5.42	6.40	7.12
	新街國小	1.86	3.24	4.29	5.10	5.84
大城鄉	大成國小	13.65	26.69	38.96	50.40	60.97
	西港國小	6.19	11.14	14.94	17.69	19.49
	中西	3.47	6.12	8.08	9.54	10.59
	美豐國小	4.24	6.87	8.25	8.78	9.18
	潭漚國小	8.70	16.42	23.13	28.86	33.71
竹塘鄉	竹塘工作站	1.59	2.60	3.22	3.62	3.90
	永安派出所	3.44	5.69	7.13	8.09	8.74

表 3-7 雲林地區終極下陷量之探討

(單位：公分)

鄉鎮市	站名	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
麥寮鄉	橋頭國小	1.53	3.06	4.60	6.13	7.66
	麥寮鄉公所	2.12	4.25	6.37	8.49	10.62
	蚊港橋北	1.67	3.23	4.85	6.47	8.03
	中山	2.22	4.44	6.66	8.88	11.10
	六輕工業區	2.10	4.21	6.32	8.43	10.53
	崙背鄉	崙背工作站	1.52	2.42	3.02	3.46
豐榮派出所		0.74	1.17	1.43	1.60	1.71
大有國小		1.33	2.32	3.03	3.58	4.01
二崙鄉	油車村	0.74	1.18	1.47	1.67	1.82
西螺鎮	西螺工作站	0.14	0.22	0.27	0.30	0.32
斗六鎮	雲林縣政府	0.04	0.09	0.15	0.20	0.26
虎尾鎮	虎尾國小	4.35	7.82	10.53	12.75	14.53
土庫鎮	埤腳國小	3.17	5.05	6.22	7.10	7.75
褒忠鄉	田洋東	6.32	11.44	15.35	18.37	20.66
	龍岩農場	3.55	6.31	8.37	9.95	11.15
東勢鎮	安南國小	1.23	2.46	3.69	4.92	6.14
台西鄉	台西工作站	1.70	2.89	3.75	4.42	4.97
	海園	1.02	1.76	2.30	2.72	3.08
	蚊港村	0.22	0.44	0.66	0.88	1.09
	新興國小	1.75	3.49	5.18	5.52	5.68
	昭安府	2.15	3.59	4.60	5.40	6.07



表 3-7(續 1) 雲林地區終極下陷量之探討

(單位：公分)

鄉鎮市	站名	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
四湖鄉	東羊橋	1.91	3.14	4.03	4.73	5.32
	四湖台糖	1.93	3.12	3.95	4.59	5.13
	飛沙國小	0.87	1.49	1.97	2.36	2.70
	飛沙工作站	1.57	2.75	3.67	4.47	5.16
	建陽國小	2.26	4.00	5.40	6.61	7.67
元長鄉	元長公墓	5.01	10.02	15.04	20.05	25.06
	元長忠孝國	5.65	11.30	16.96	22.62	28.27
北港鎮	好收國小	4.50	9.01	13.52	18.02	22.53
	番子溝	2.75	5.50	8.25	11.00	13.76
	北港國中	3.10	6.20	9.30	12.40	15.51
水林鄉	大溝	3.26	6.13	8.71	11.12	13.37
	塭底村	5.83	11.58	17.08	22.45	27.67
	水林工作站	3.45	6.35	8.79	10.90	12.75
	正東堂	1.50	2.80	4.00	5.20	6.39
	正義公廟	2.81	5.36	7.62	9.87	11.94
口湖鄉	拔子腳	2.66	5.37	8.04	10.66	13.21
	成龍村	1.88	3.90	6.00	8.14	10.31
	下崙	3.72	7.33	10.68	13.77	16.61
	湖口村	1.76	3.63	5.56	7.54	9.56
	台子挖	1.75	3.63	5.57	7.59	9.66
	金湖派出所	2.02	4.16	6.37	8.64	10.92
	青蚶水塔	2.81	5.76	8.70	11.60	14.40
宜梧派出所	3.32	6.87	10.50	14.20	17.80	
	青蚶閘門	3.83	7.93	12.11	16.31	20.44

表 3-8 TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率

(單位：公分/年)

TM2 度 x 座標(公尺)	TM2 度 y 座標(公尺)	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
160000	2602000	2.42	2.53	2.57	2.63	2.66
160000	2604000	2.09	2.21	2.27	2.34	2.38
160000	2606000	2.05	2.17	2.25	2.31	2.35
160000	2608000	2.44	2.58	2.65	2.7	2.71
160000	2610000	3.12	3.26	3.29	3.29	3.25
160000	2612000	3.21	3.21	3.13	3.06	2.96
160000	2614000	2.86	2.65	2.46	2.34	2.21
160000	2616000	2.44	2.06	1.79	1.65	1.52
160000	2618000	2.1	1.66	1.38	1.25	1.13
162000	2602000	2.49	2.59	2.62	2.66	2.68
162000	2604000	1.88	1.99	2.06	2.13	2.17
162000	2606000	1.76	1.87	1.95	2.02	2.07
162000	2608000	2.02	2.15	2.22	2.27	2.28
162000	2610000	3.83	4.1	4.19	4.2	4.14
162000	2612000	3.53	3.53	3.42	3.29	3.14
162000	2614000	2.87	2.62	2.38	2.21	2.05
162000	2616000	2.26	1.75	1.4	1.21	1.06
162000	2618000	1.92	1.41	1.09	0.93	0.81
162000	2620000	1.78	1.27	0.97	0.84	0.73
162000	2622000	1.58	1.14	0.88	0.77	0.68
162000	2624000	1.36	1.02	0.8	0.72	0.66
162000	2626000	1.22	0.97	0.81	0.72	0.69
162000	2628000	1.2	1.02	0.89	0.82	0.81
164000	2602000	2.99	3.07	3.06	3.07	3.06
164000	2604000	1.76	1.87	1.93	1.98	2.02
164000	2606000	1.88	2.02	2.1	2.15	2.17
164000	2608000	2.34	2.5	2.56	2.57	2.55
164000	2610000	2.81	2.95	2.95	2.9	2.81
164000	2612000	3.71	3.62	3.36	3.09	2.85
164000	2614000	2.55	2.29	2.03	1.84	1.67

表 3-8(續 1) TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率

(單位：公分/年)

TM2 度 x 座標(公尺)	TM2 度 y 座標(公尺)	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
164000	2616000	1.57	1.18	0.93	0.79	0.69
164000	2618000	1.65	1.13	0.82	0.67	0.56
164000	2620000	1.8	1.22	0.88	0.72	0.6
164000	2622000	1.57	1.08	0.79	0.66	0.56
164000	2624000	1.23	0.88	0.67	0.57	0.5
164000	2626000	1.07	0.84	0.68	0.56	0.54
164000	2628000	1.07	0.92	0.8	0.69	0.69
166000	2602000	4.26	4.28	4.19	4.13	4.06
166000	2604000	3.4	3.48	3.47	3.45	3.41
166000	2606000	3.32	3.55	3.64	3.66	3.65
166000	2608000	2.66	2.71	2.68	2.62	2.55
166000	2610000	2.81	2.69	2.54	2.4	2.26
166000	2612000	2.79	2.53	2.28	2.07	1.89
166000	2614000	2.06	1.72	1.47	1.29	1.15
166000	2616000	0.87	0.62	0.48	0.4	0.34
166000	2618000	1.56	1.02	0.72	0.57	0.47
166000	2620000	2.16	1.44	1.03	0.81	0.67
166000	2622000	1.64	1.11	0.79	0.64	0.53
166000	2624000	1.03	0.74	0.55	0.44	0.37
166000	2626000	0.97	0.79	0.62	0.38	0.37
166000	2628000	0.95	0.85	0.74	0.55	0.57
168000	2624000	1.35	1.1	0.83	0.39	0.36
168000	2626000	1.09	0.99	0.76	0.19	0.21
168000	2628000	0.8	0.76	0.66	0.4	0.39
168000	2630000	1.17	1.15	1.12	1.06	1.08
168000	2632000	1.59	1.58	1.57	1.55	1.59
168000	2634000	2	1.97	1.94	1.92	1.93
170000	2624000	1.56	1.44	1.18	0.55	0.53
170000	2626000	1.75	1.75	1.38	0.14	0.22
170000	2628000	0.23	0.23	0.23	0.22	0.03

表 3-8(續 2) TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率

(單位：公分/年)

TM2 度 x 座標(公尺)	TM2 度 y 座標(公尺)	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
170000	2630000	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
170000	2632000	1.89	1.9	1.91	1.93	1.95
170000	2634000	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
170000	2636000	3.19	3.08	2.97	2.85	2.74
170000	2638000	3.98	3.76	3.53	3.3	3.09
172000	2634000	2.93	2.87	2.81	2.74	2.68
172000	2636000	4.17	4	3.8	3.6	3.4
172000	2638000	5.22	4.9	4.56	4.22	3.88
174000	2634000	3.4	3.28	3.16	3.02	2.9
174000	2636000	5.4	5.14	4.84	4.52	4.22
174000	2638000	6.94	6.5	6.01	5.51	5.01
174000	2640000	7.34	6.67	6.01	5.37	4.75
174000	2642000	6.21	5.38	4.64	3.99	3.41
176000	2634000	3.92	3.69	3.48	3.27	3.07
176000	2636000	6.85	6.47	6.07	5.64	5.21
176000	2638000	9.1	8.46	7.79	7.11	6.44
176000	2640000	9.87	8.95	8.02	7.11	6.22
176000	2642000	7.57	6.09	4.87	3.87	3.03
178000	2640000	11.61	9.95	8.48	7.22	6.12
178000	2642000	9.64	6.58	4.21	2.44	1.09
178000	2644000	2.37	1.92	1.58	1.33	1.14
178000	2646000	1.86	1.51	1.24	1.06	0.91
178000	2648000	1.82	1.48	1.22	1.04	0.88
178000	2650000	1.93	1.59	1.32	1.12	0.95
180000	2640000	12.4	10.93	9.56	8.33	7.23
180000	2642000	9.51	7.74	6.24	5.01	3.97
180000	2644000	4.17	3.28	2.56	1.99	1.53
180000	2646000	2.06	1.59	1.22	0.97	0.77
180000	2648000	2.04	1.59	1.24	1	0.82
180000	2650000	2.24	1.8	1.44	1.19	0.98

表 3-8 (續 3) TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率

(單位：公分/年)

TM2 度 x 座標(公尺)	TM2 度 y 座標(公尺)	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
180000	2652000	2.24	1.84	1.51	1.28	1.05
180000	2654000	2.08	1.75	1.47	1.27	1.05
180000	2656000	1.88	1.62	1.4	1.24	1.02
180000	2658000	1.7	1.51	1.34	1.21	1
182000	2640000	10.92	9.6	8.34	7.19	6.16
182000	2642000	11.34	9.93	8.57	7.33	6.21
182000	2644000	2.67	2.08	1.6	1.22	0.93
182000	2646000	2.44	1.78	1.29	0.94	0.7
182000	2648000	2.64	1.99	1.5	1.15	0.9
182000	2650000	2.9	2.29	1.8	1.44	1.17
182000	2652000	2.65	2.14	1.74	1.44	1.17
182000	2654000	2.26	1.88	1.57	1.34	1.09
182000	2656000	1.95	1.67	1.44	1.27	1.03
182000	2658000	1.72	1.52	1.35	1.23	1
184000	2656000	1.94	1.66	1.44	1.29	1.03
184000	2658000	1.69	1.5	1.35	1.24	0.99
184000	2660000	1.51	1.39	1.29	1.21	0.98
184000	2662000	1.4	1.32	1.25	1.2	1.01
186000	2658000	1.6	1.45	1.33	1.25	0.98
186000	2660000	1.44	1.36	1.28	1.23	0.99
186000	2662000	1.36	1.31	1.26	1.22	1.03
188000	2658000	1.48	1.4	1.33	1.29	0.99
188000	2660000	1.38	1.33	1.3	1.27	1.02
188000	2662000	1.34	1.31	1.29	1.27	1.1
190000	2662000	1.38	1.37	1.37	1.36	1.25
190000	2664000	1.34	1.35	1.35	1.35	1.29
190000	2666000	1.3	1.33	1.34	1.35	1.32
190000	2670000	1.22	1.28	1.31	1.34	1.33
190000	2672000	1.18	1.25	1.3	1.33	1.33
192000	2662000	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49

表 3-8(續 4) TM2 度 x、TM2 度 y 座標上之分年模擬終極下陷速率

(單位：公分/年)

TM2 度 x 座 標(公尺)	TM2 度 y 座 標(公尺)	第一年	第二年	第三年	第四年	第五年
192000	2664000	1.42	1.44	1.45	1.46	1.47
192000	2666000	1.36	1.4	1.42	1.44	1.45
192000	2668000	1.3	1.35	1.39	1.42	1.43
192000	2670000	1.25	1.32	1.36	1.4	1.42
192000	2672000	1.2	1.28	1.34	1.37	1.4
194000	2662000	1.68	1.72	1.74	1.76	1.78
194000	2664000	1.53	1.57	1.6	1.62	1.66
194000	2666000	1.42	1.48	1.52	1.55	1.59
194000	2668000	1.34	1.41	1.46	1.49	1.54
194000	2670000	1.27	1.36	1.41	1.45	1.5
194000	2672000	1.21	1.31	1.37	1.42	1.47
196000	2672000	1.22	1.33	1.41	1.46	1.53
196000	2674000	1.17	1.28	1.37	1.43	1.49
196000	2676000	1.12	1.24	1.33	1.4	1.46
196000	2678000	1.07	1.21	1.3	1.37	1.44
198000	2672000	1.23	1.35	1.43	1.5	1.58
198000	2674000	1.17	1.29	1.39	1.45	1.53
198000	2676000	1.11	1.25	1.35	1.42	1.5
198000	2678000	1.07	1.21	1.31	1.39	1.47
200000	2672000	1.22	1.35	1.45	1.52	1.61
200000	2674000	1.16	1.29	1.4	1.47	1.56
200000	2676000	1.1	1.25	1.36	1.43	1.53
200000	2678000	1.05	1.21	1.32	1.4	1.49

表 3-9 彰化地區地層下陷潛能表

(單位：公分)

鄉鎮市	點名	原抽水量之 下陷量	增加抽水量之 下陷量	下陷增加量
鹿港鎮	絡津國小	-6.21	-10.87	-4.66
福興鄉	管嶼國小	-6.94	-13.92	-6.98
埔鹽鄉	好修國小	-7.69	-40.07	-32.38
二林鎮	二林國小	-44.48	-52.49	-8.01
	原斗國中	-12.39	-13.63	-1.24
埤頭鄉	合興國小	-7.25	-13.66	-6.41
芳苑鄉	草湖西南	-16.51	-56.86	-40.35
	草湖	-18.42	-39.8	-21.38
	路上派出所	-20.77	-42.1	-21.33
	新街國小	-22.44	-50.66	-28.22
大城鄉	大成國小	-61.18	-133.47	-72.29
	西港國小	-41.65	-87.23	-45.58
	中西	-33.92	-61.49	-27.57
	美豐國小	-55.02	-141.58	-86.56
	潭漚國小	-48.11	-89.92	-41.81
竹塘鄉	竹塘工作站	-15.54	-30.2	-14.66
	永安派出所	-24.92	-50.68	-25.76

表 3-10 雲林地區地層下陷潛能表

(單位：公分)

鄉鎮市	點名	原抽水量之 下陷量	增加抽水量之 下陷量	下陷增加量
麥寮鄉	橋頭國小	-17.14	-29.46	-12.32
	麥寮鄉公所	-17.28	-21.16	-3.88
	蚊港橋北	-13.19	-14.62	-1.43
	中山	-22.54	-28.65	-6.11
	六輕工業區	-22.14	-28.97	-6.83
崙背鄉	崙背工作站	-20.45	-38.93	-18.48
	豐榮派出所	-18.63	-39.92	-21.29
	大有國小	-9.38	-16.77	-7.39
二崙鄉	油車村	-5.32	-19.12	-13.8
西螺鎮	西螺工作站	-3.93	-4.06	-0.23
斗六鎮	雲林縣政府	-2.69	-3.69	-1
虎尾鎮	虎尾國小	-13.08	-25.51	-12.43
土庫鎮	埤腳國小	-32.07	-52.87	-20.8
褒忠鄉	田洋東	-27.27	-149.29	-122.02
	龍岩農場	-14.84	-101.35	-86.51
東勢鎮	安南國小	-10.37	-42.11	-31.74
台西鄉	台西工作站	-17.16	-58.23	-41.07
	海園	-13.42	-45.57	-32.15
	蚊港村	-7.05	-19.8	-12.75
	新興國小	-12.37	-45.15	-32.78
	昭安府	-19.55	-41.21	-21.66



表 3-10(續 1) 雲林地區地層下陷潛能表

(單位：公分)

鄉鎮市	點名	原抽水量之 下陷量	增加抽水量之 下陷量	下陷增加量
四湖鄉	東羊橋	-18.18	-39.87	-21.69
	四湖台糖	-18.12	-44.57	-26.45
	飛沙國小	-9.92	-19.13	-9.21
	飛沙工作站	-12.67	-30.57	-17.9
	建陽國小	-14.93	-40.14	-25.21
元長鄉	元長公墓	-32.61	-79.55	-46.94
	元長忠孝園	-28.07	-80.88	-52.81
北港鎮	好收國小	-27.19	-32.35	-5.16
	番子溝	-18.97	-25.24	-6.27
	北港國中	-19.87	-23.64	-3.77
水林鄉	大溝	-17.88	-41.31	-23.43
	塭底村	-19.59	-92.59	-73
	水林工作站	-23.45	-61.47	-38.02
	正東堂	-21.75	-36.05	-14.3
	正義公廟	-11.83	-49.84	-38.01
口湖鄉	拔子腳	-11.58	-91.94	-80.36
	成龍村	-11.72	-98.91	-87.19
	下崙	-14.87	-98.02	-83.15
	湖口村	-10.83	-94.23	-83.4
	台子挖	-12.22	-103.41	-91.19
	金湖派出所	-12.13	-102.2	-90.07
	青蚶水塔	-13.92	-104.55	-90.63
	宜梧派出所	-14.65	-123.5	-108.85
	青蚶閘門	-18.01	-148.42	-130.41

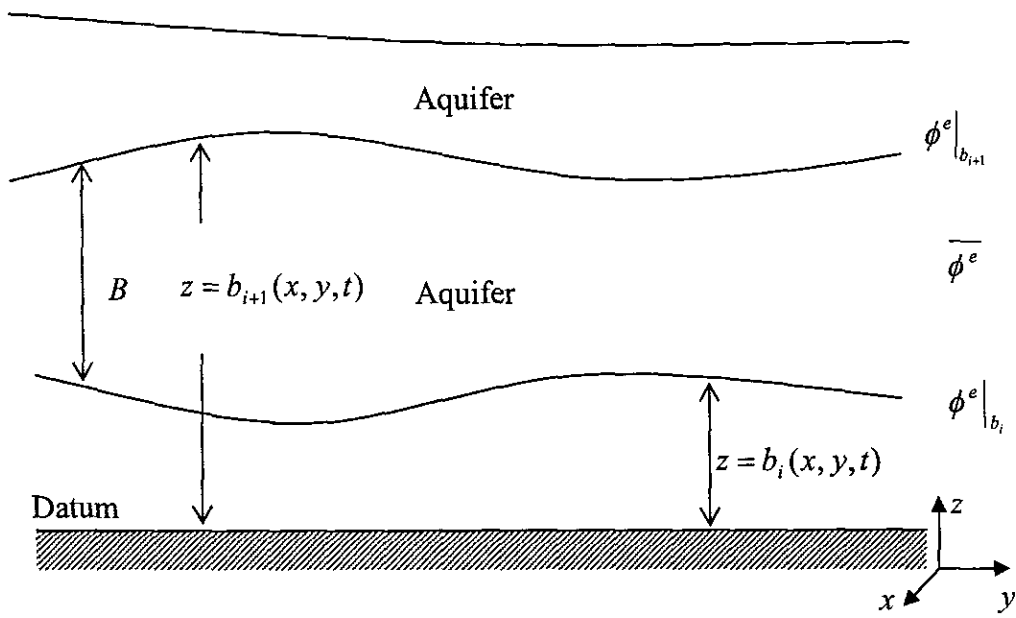


圖 2-1 拘限含水層分層深度積分示意圖

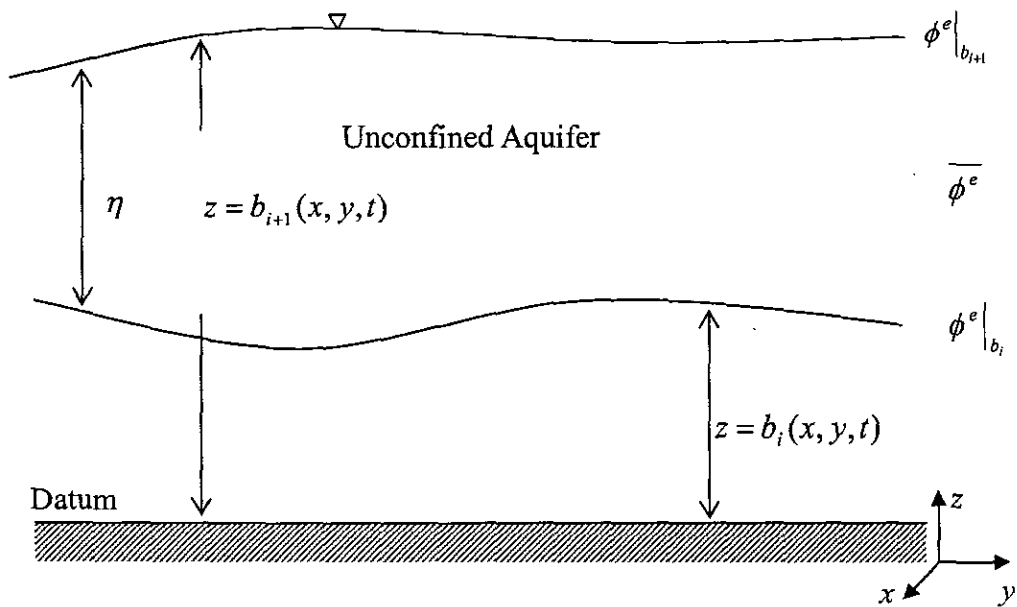


圖 2-2 非拘限含水層分層深度積分示意圖

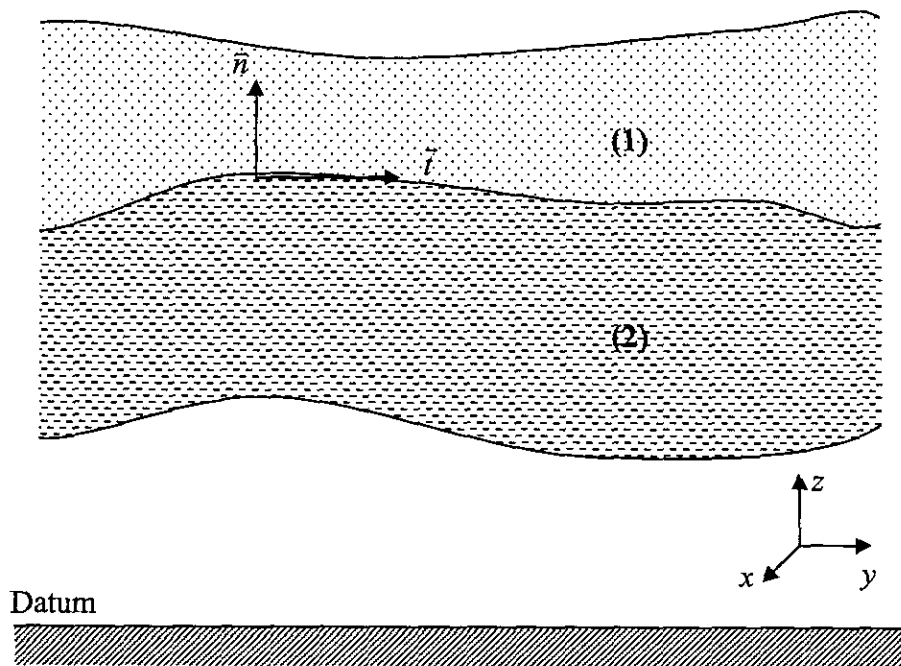


圖 2-3 垂直方向介面物理連接條件示意圖

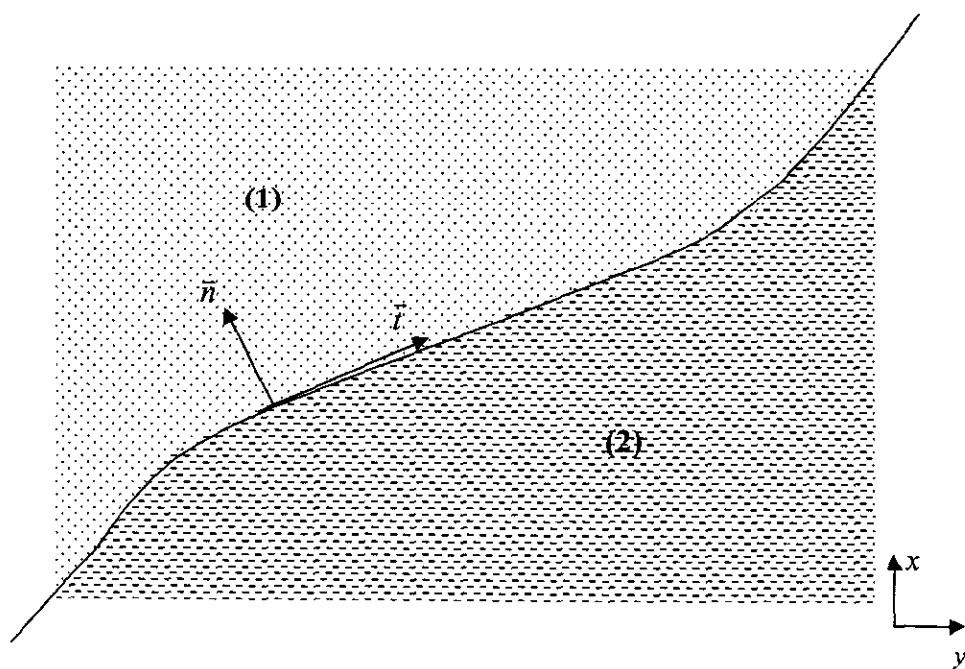
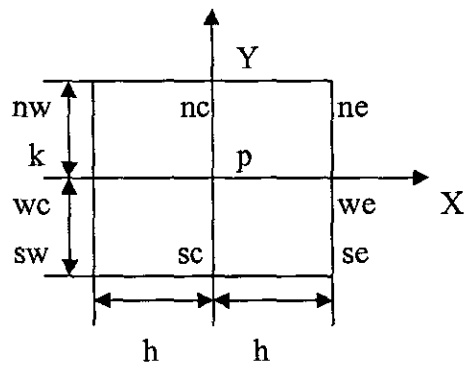
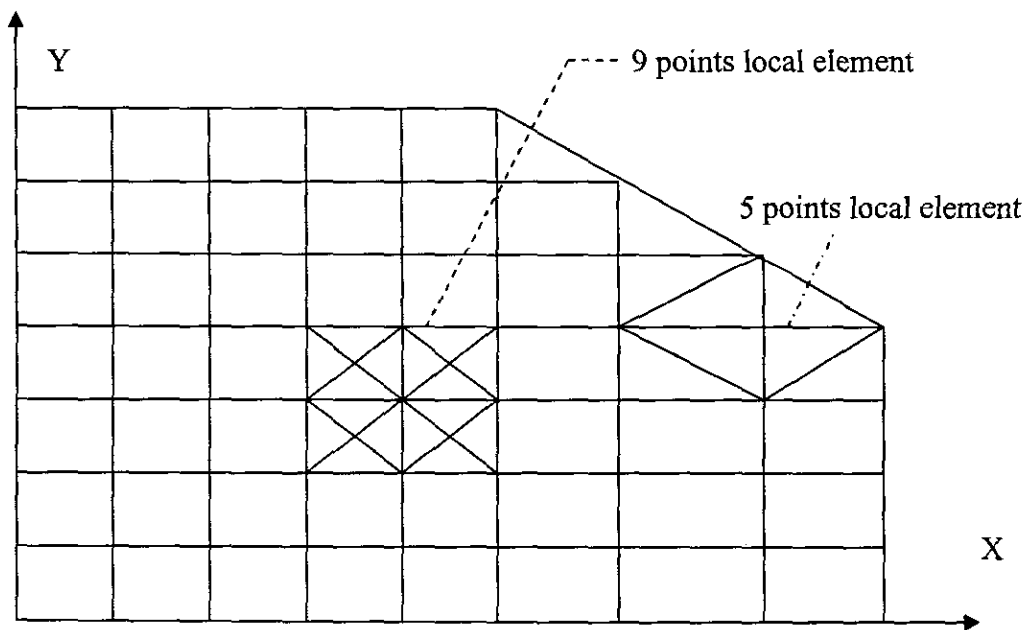


圖 2-4 水平方向介面物理連接條件示意圖



(a)九點局部元素圖



(b)模擬區域示意圖

圖 2-5 有限解析法說明圖

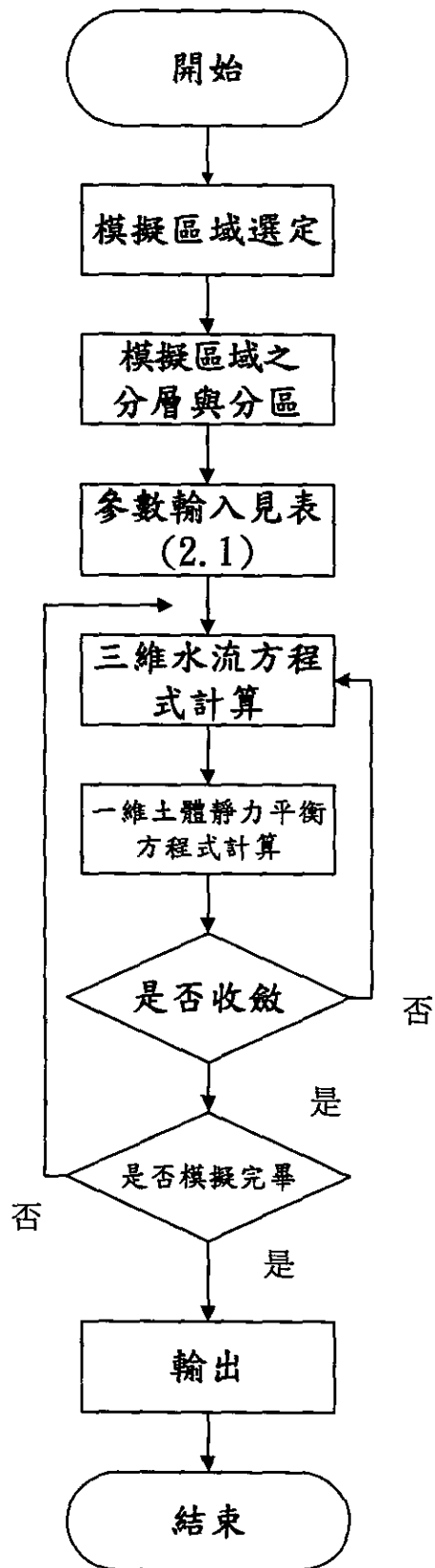


圖 2-6 一維耦合地層下陷模式計算流程

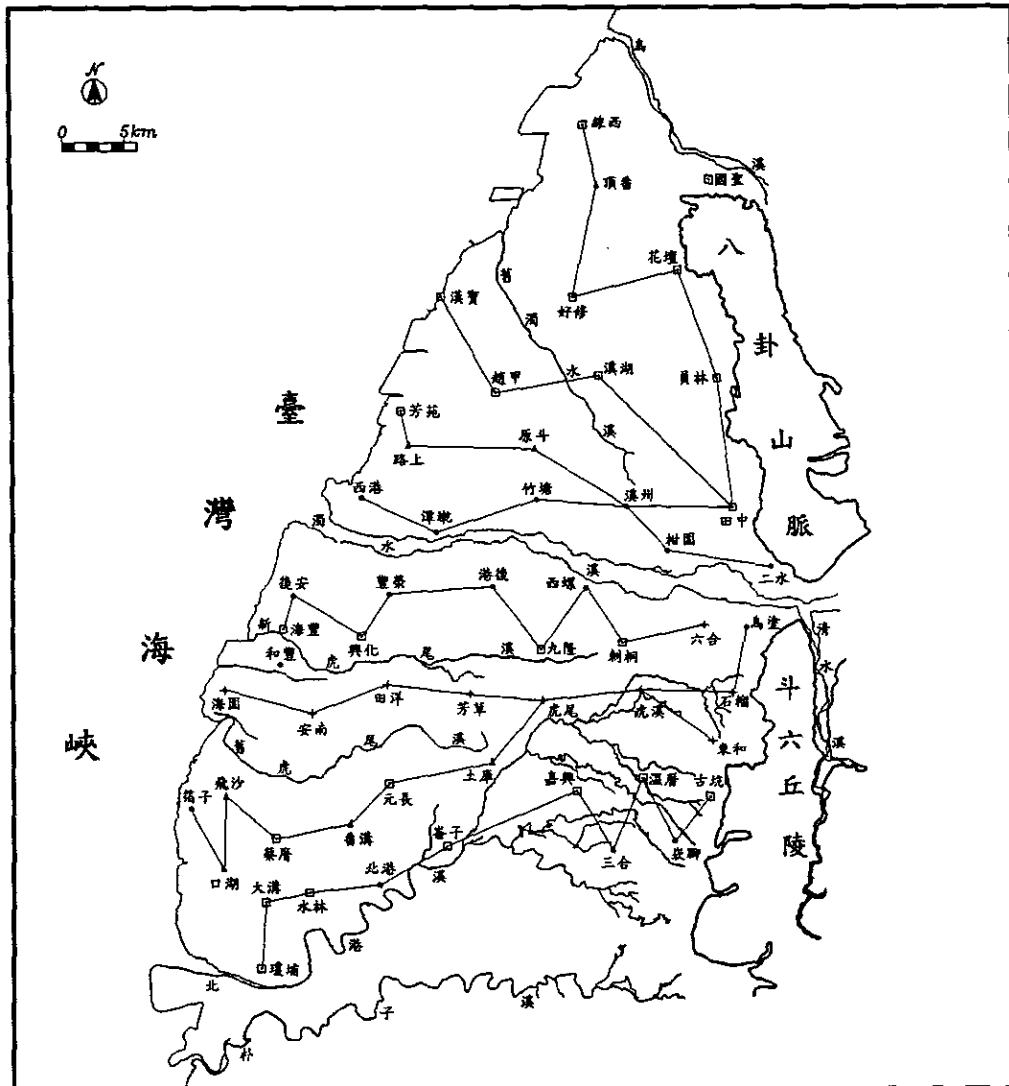


圖 3-1 濁水溪沖積扇地質剖面位置圖

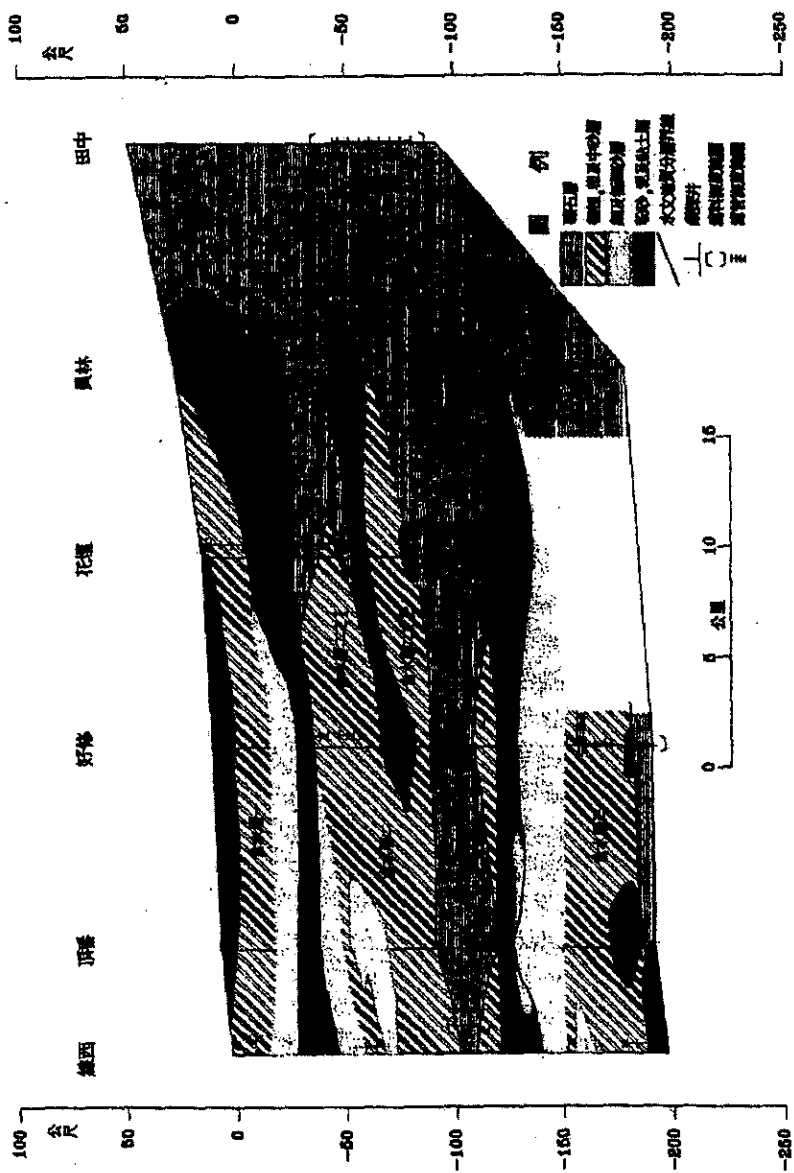


圖 3-2 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖一(資料來源：中央地質調查所)

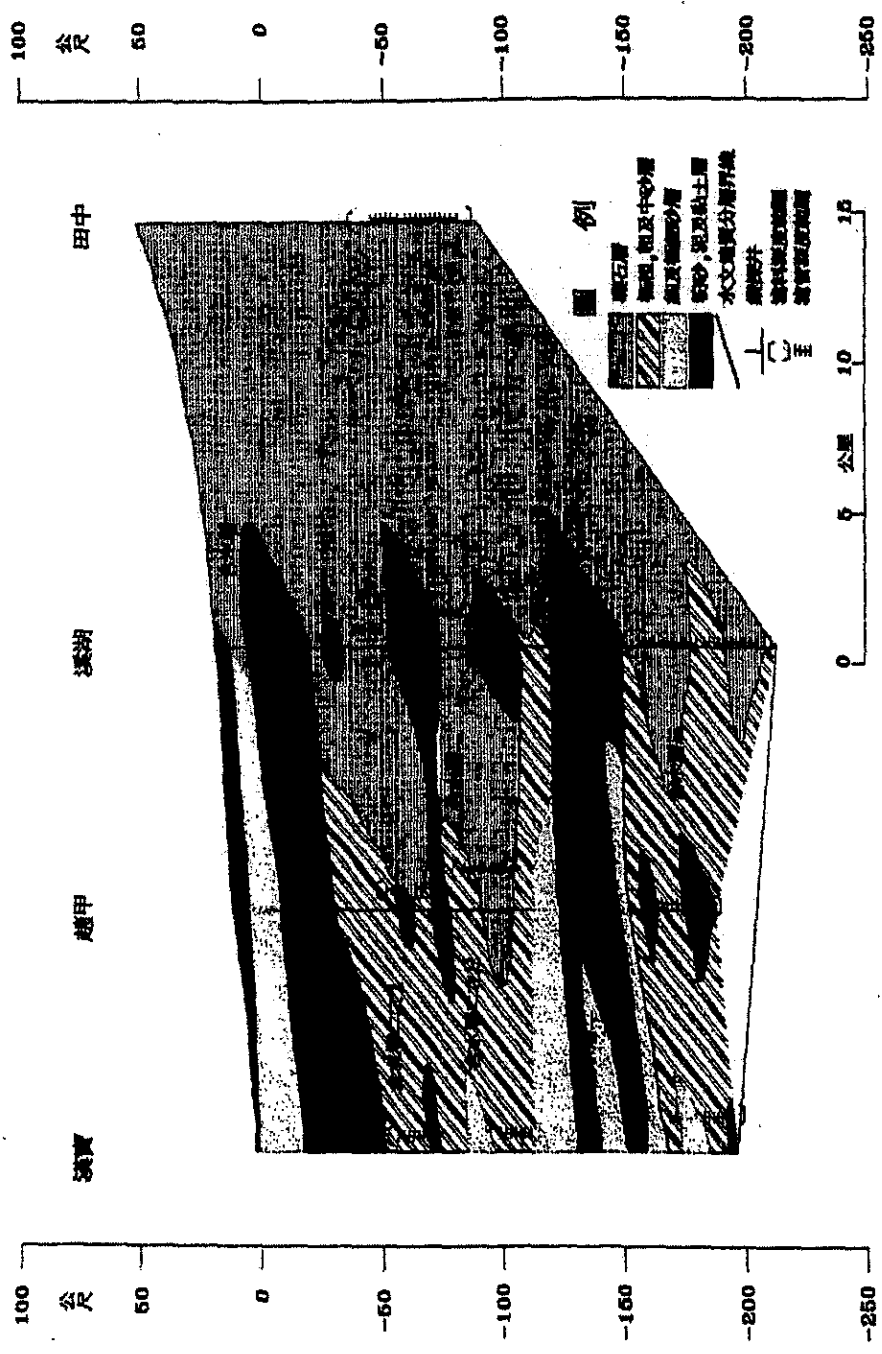


圖 3-3 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖二(資料來源：中央地質調查所)



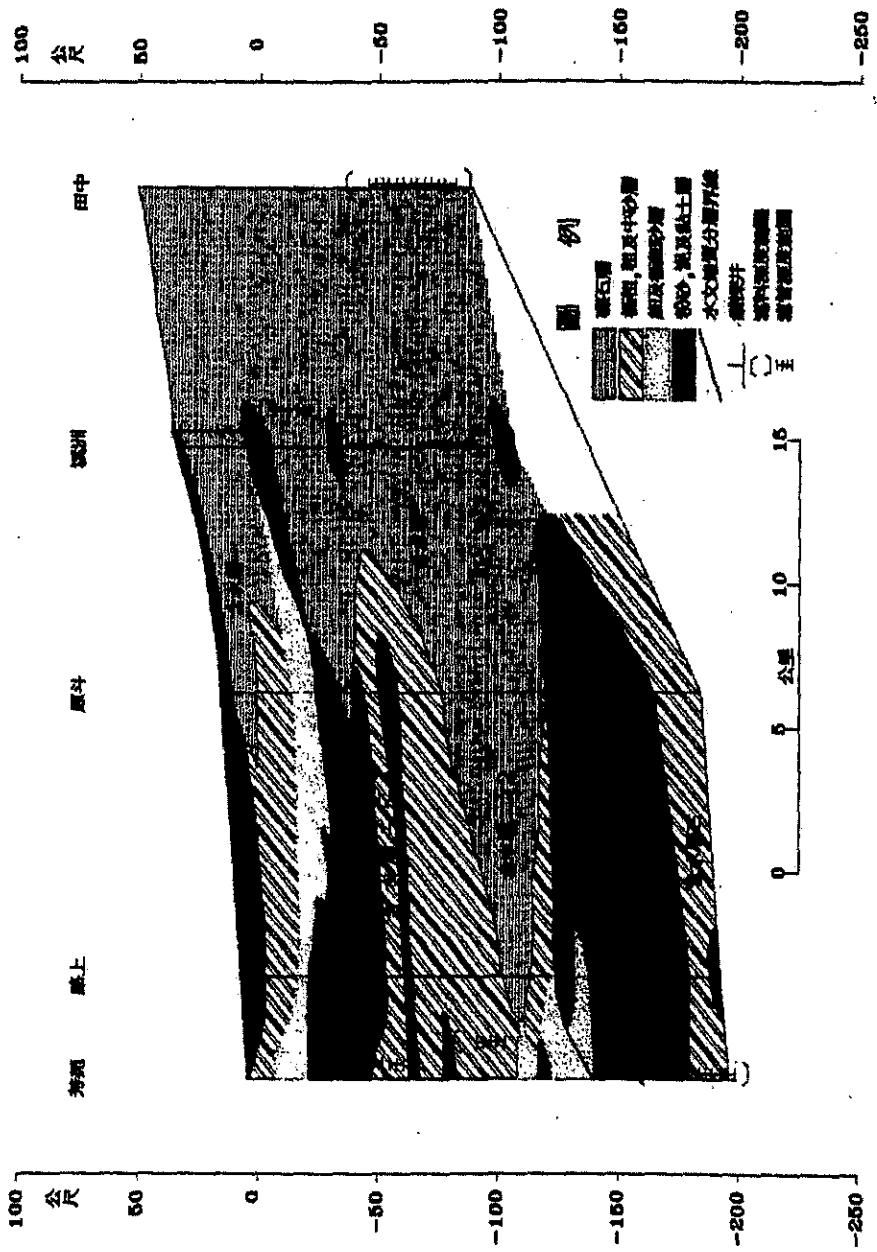


圖 3-4 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖三(資料來源：中央地質調查所)

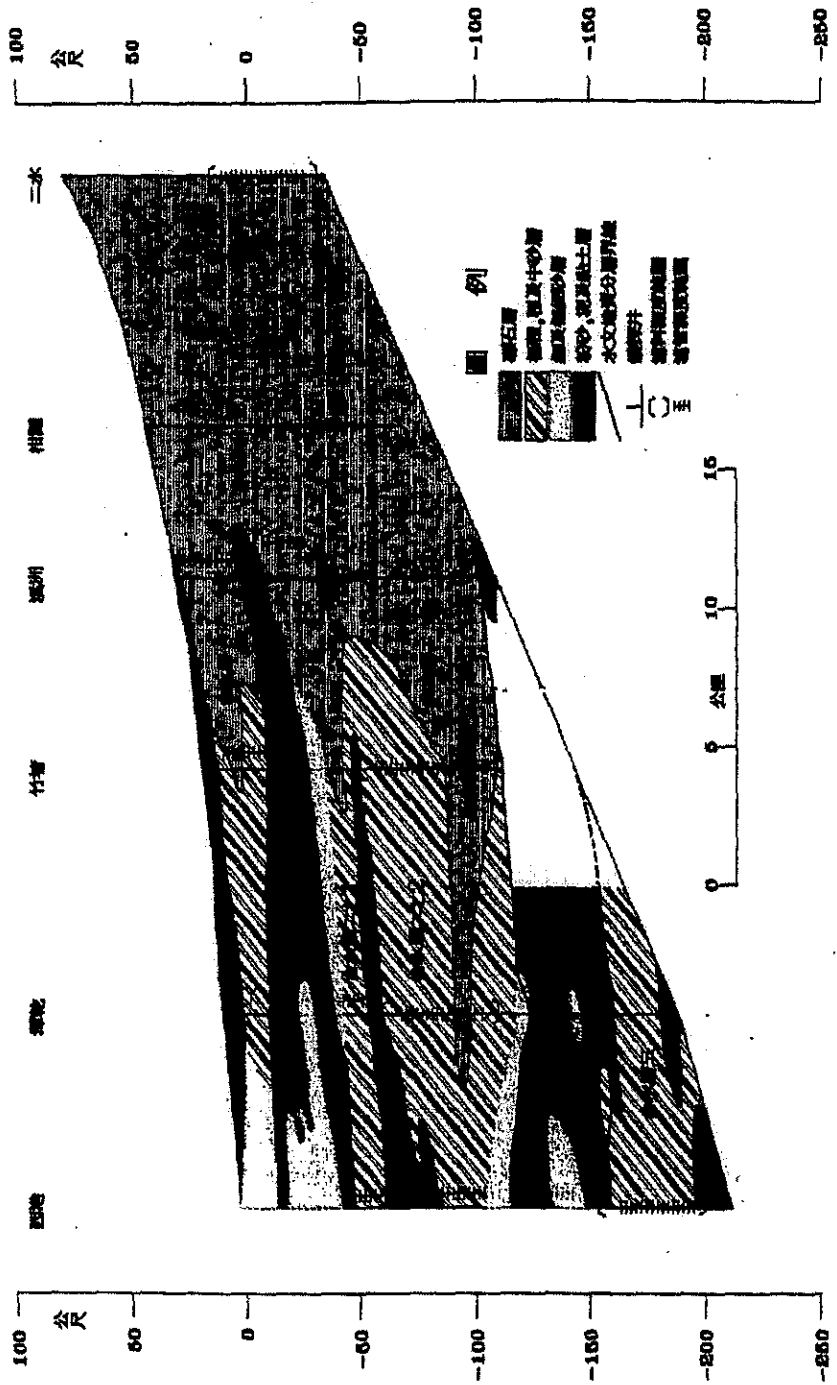


圖 3-5 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖四(資料來源：中央地質調查所)

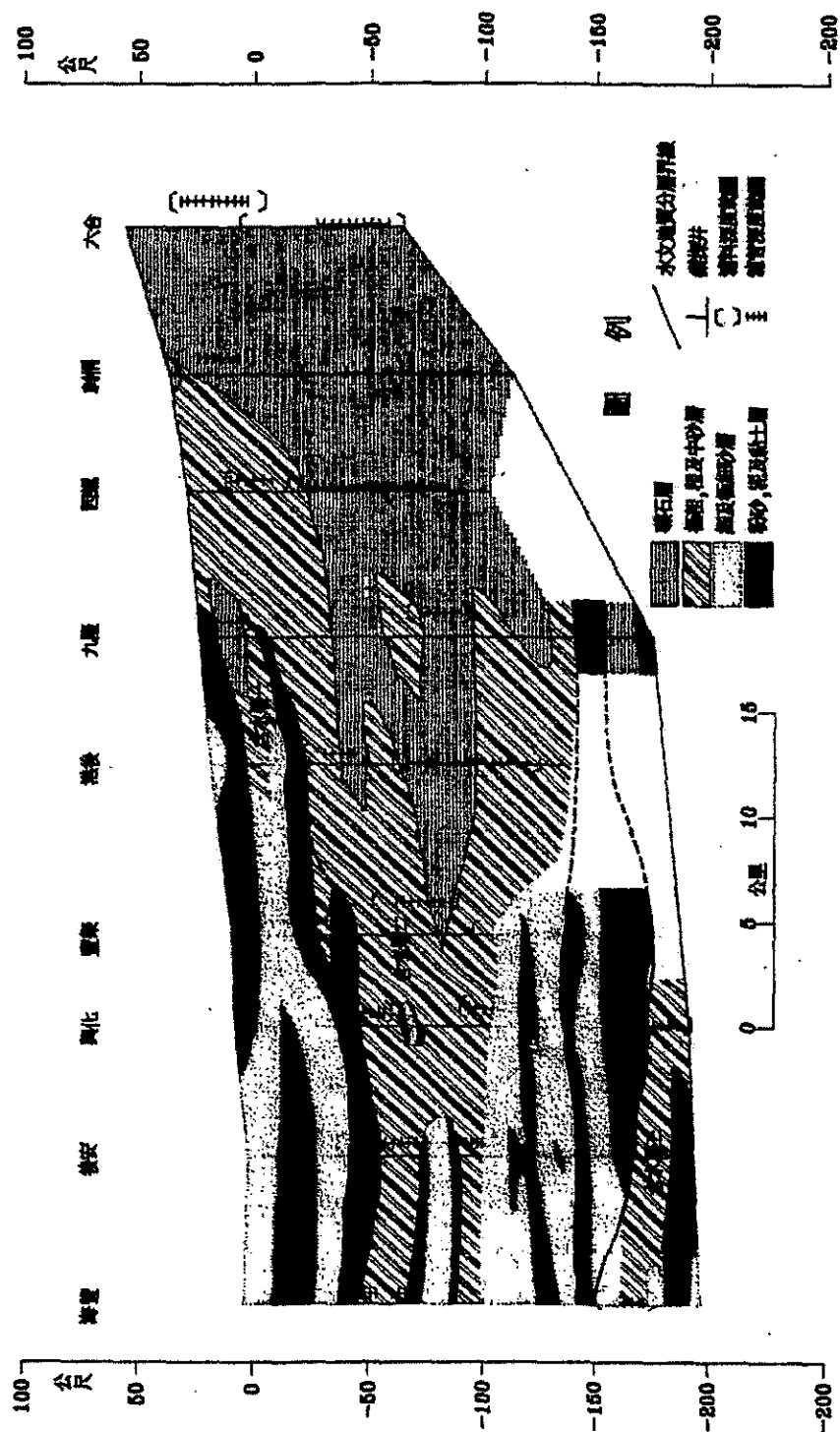


圖 3-6 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖五(資料來源：中央地質調查所)

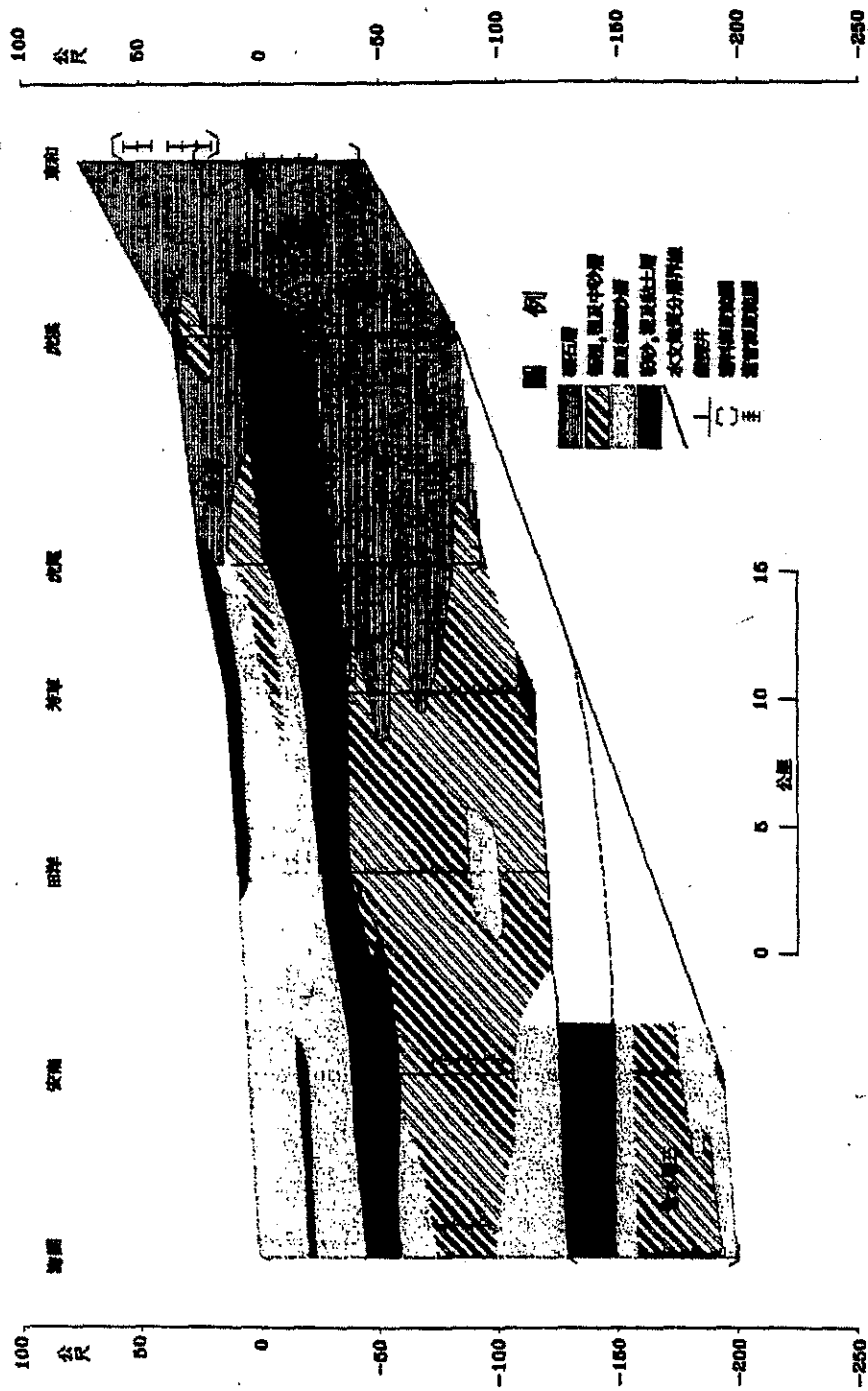


圖 3-7 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖六(資料來源：中央地質調查所)

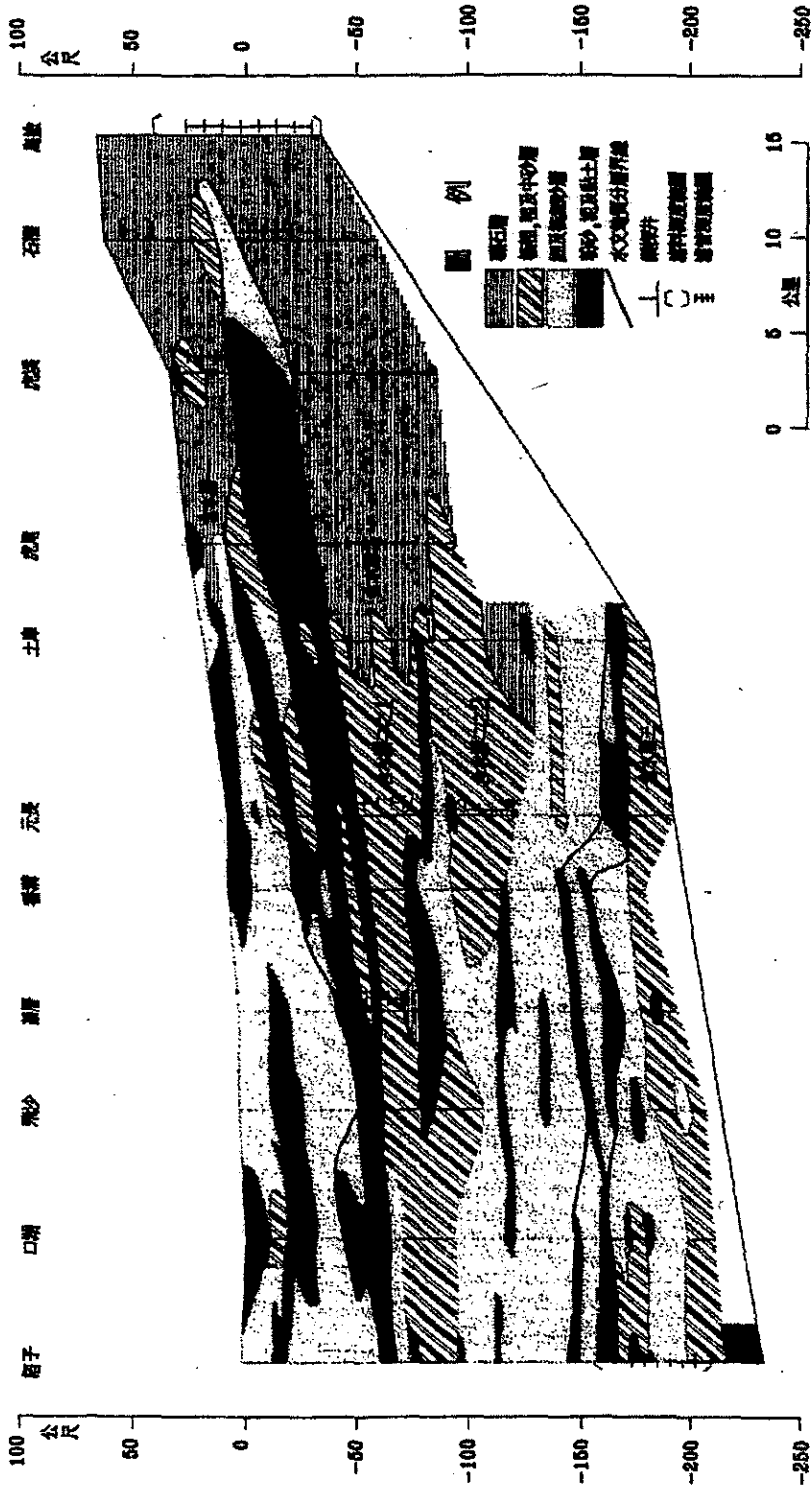


圖 3-8 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖七(資料來源：中央地質調查所)

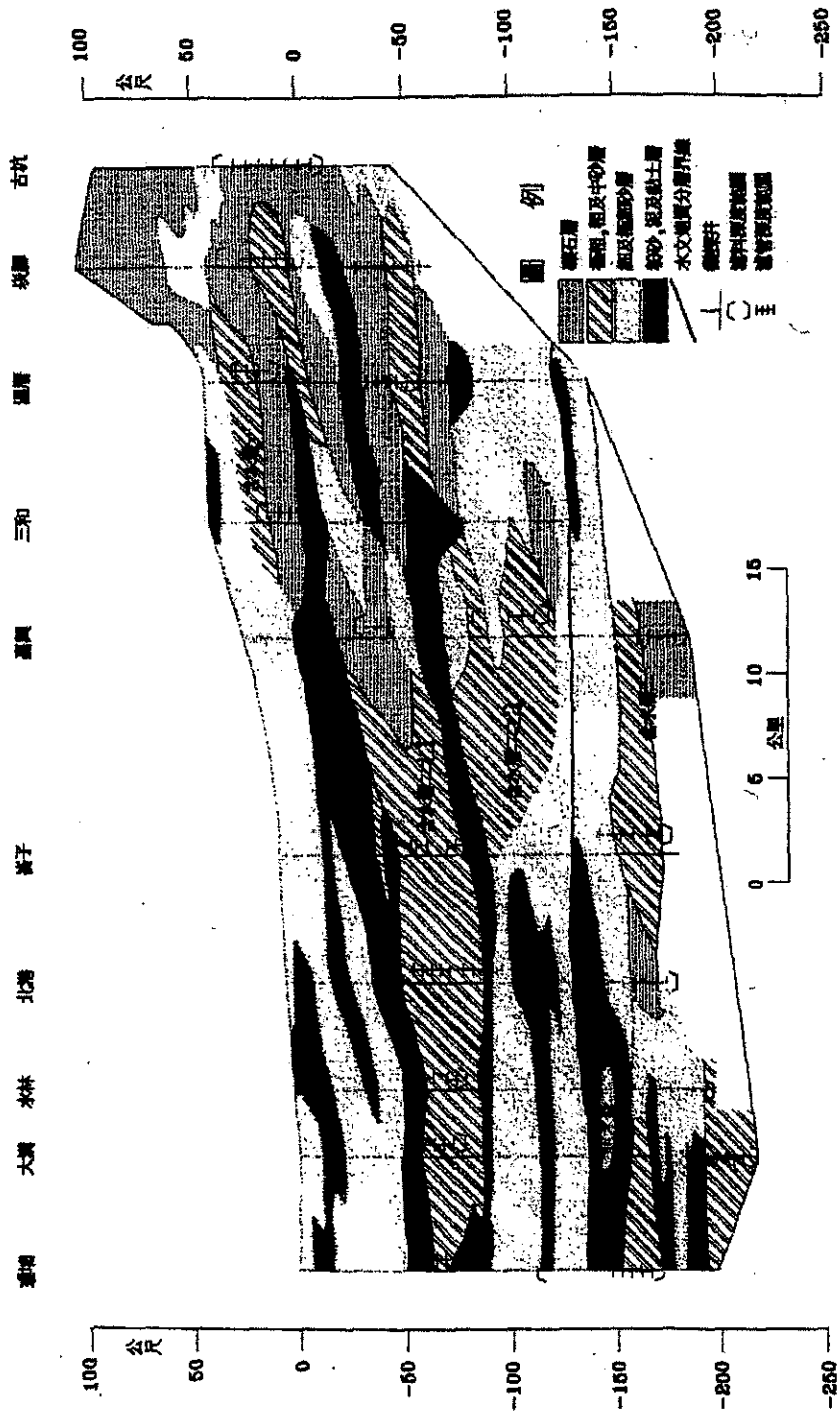


圖 3-9 濁水溪沖積扇水文地質剖面圖八(資料來源：中央地質調查所)

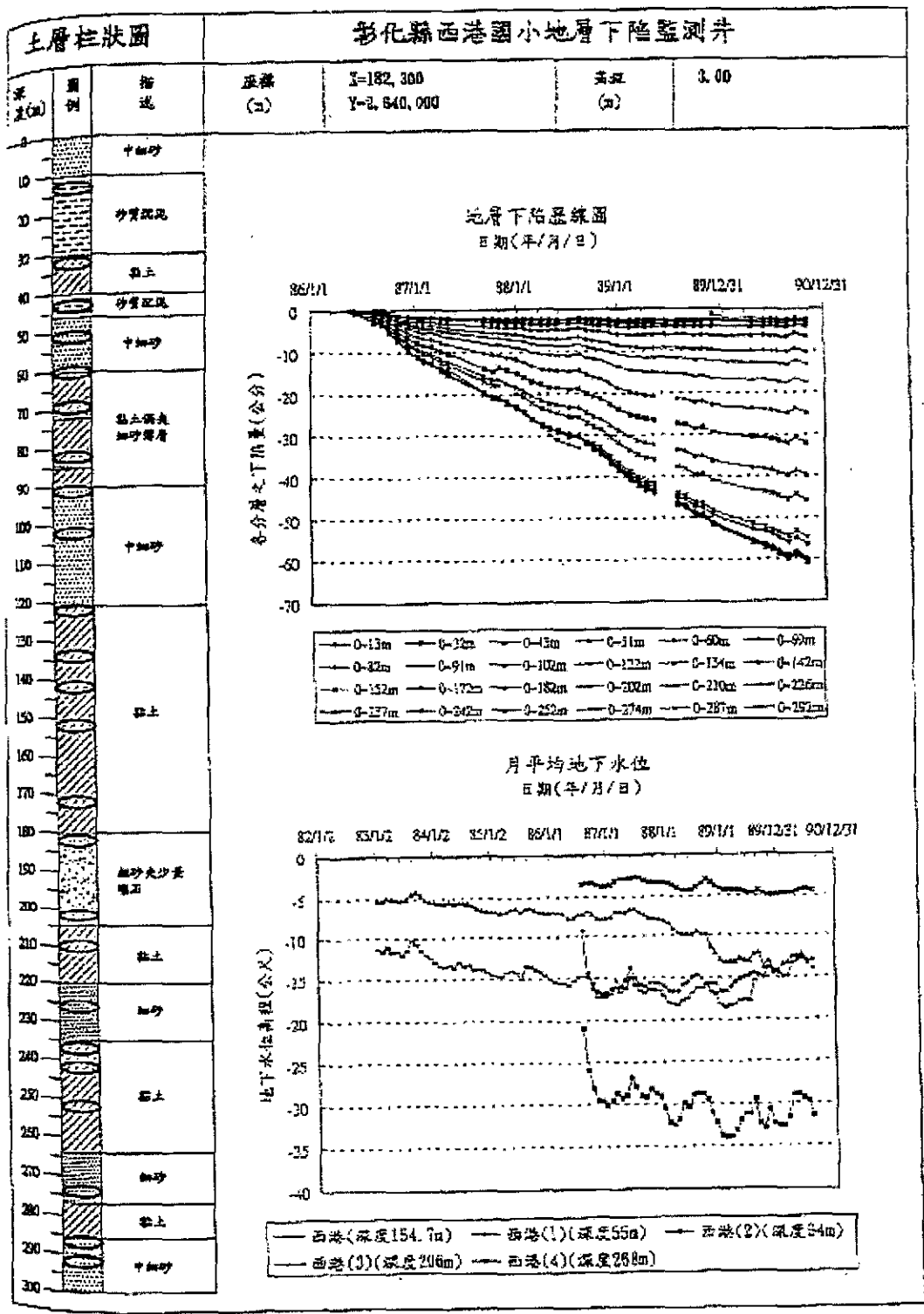


圖 3-10 彰化縣西港國小地層下陷監測

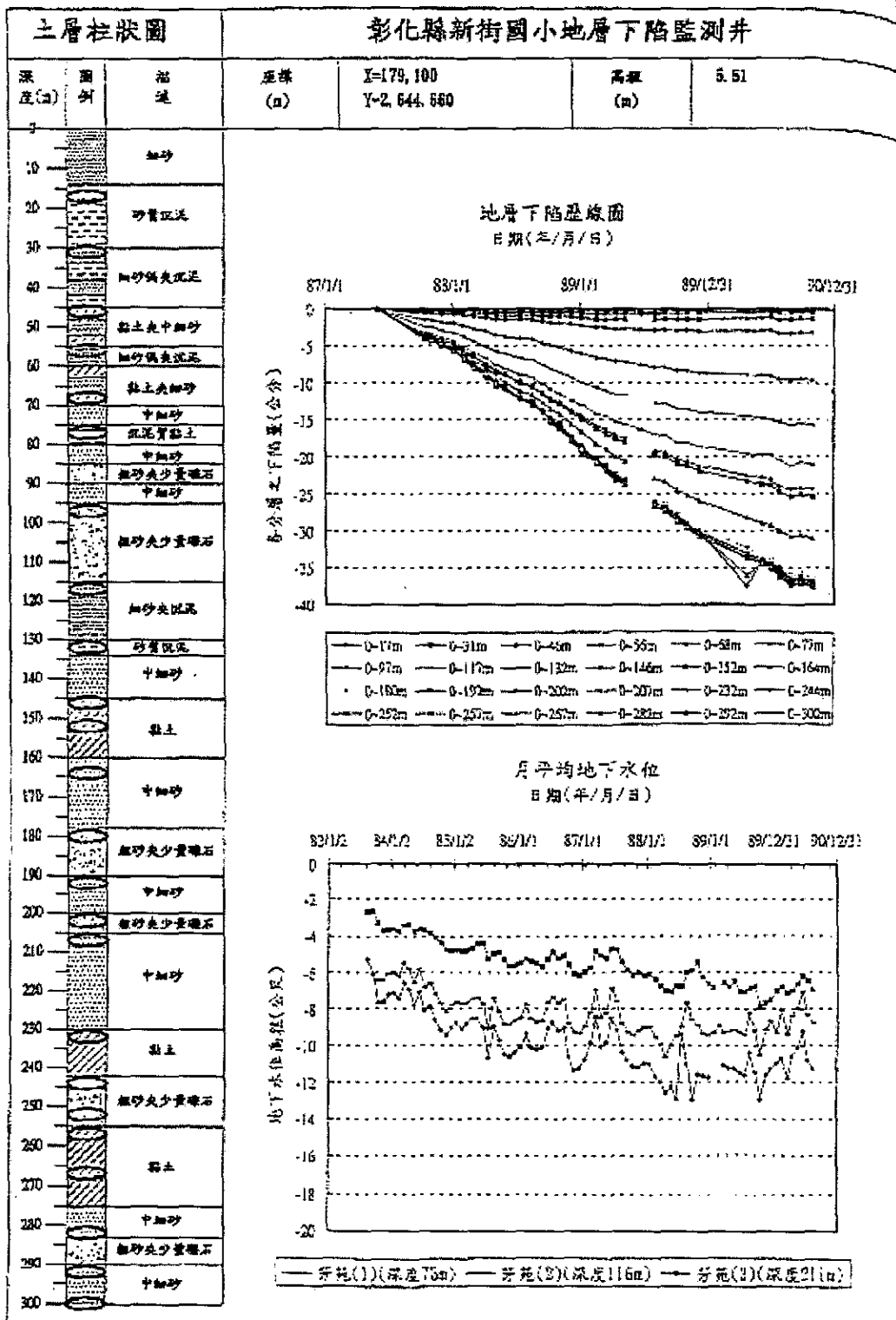


圖 3-11 彰化縣新街國小地層下陷監測



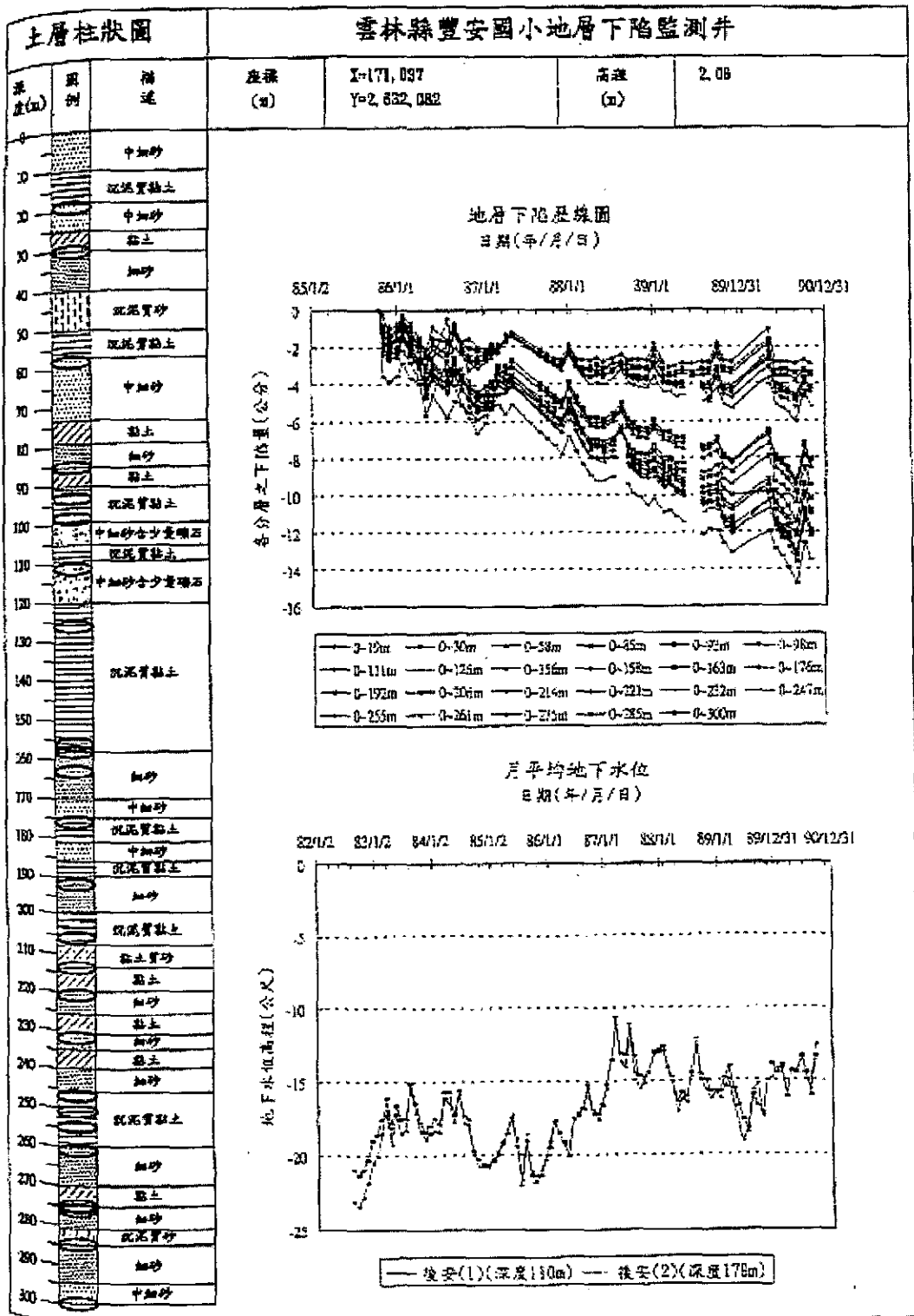


圖 3-12 雲林縣安豐國小地層下陷監測

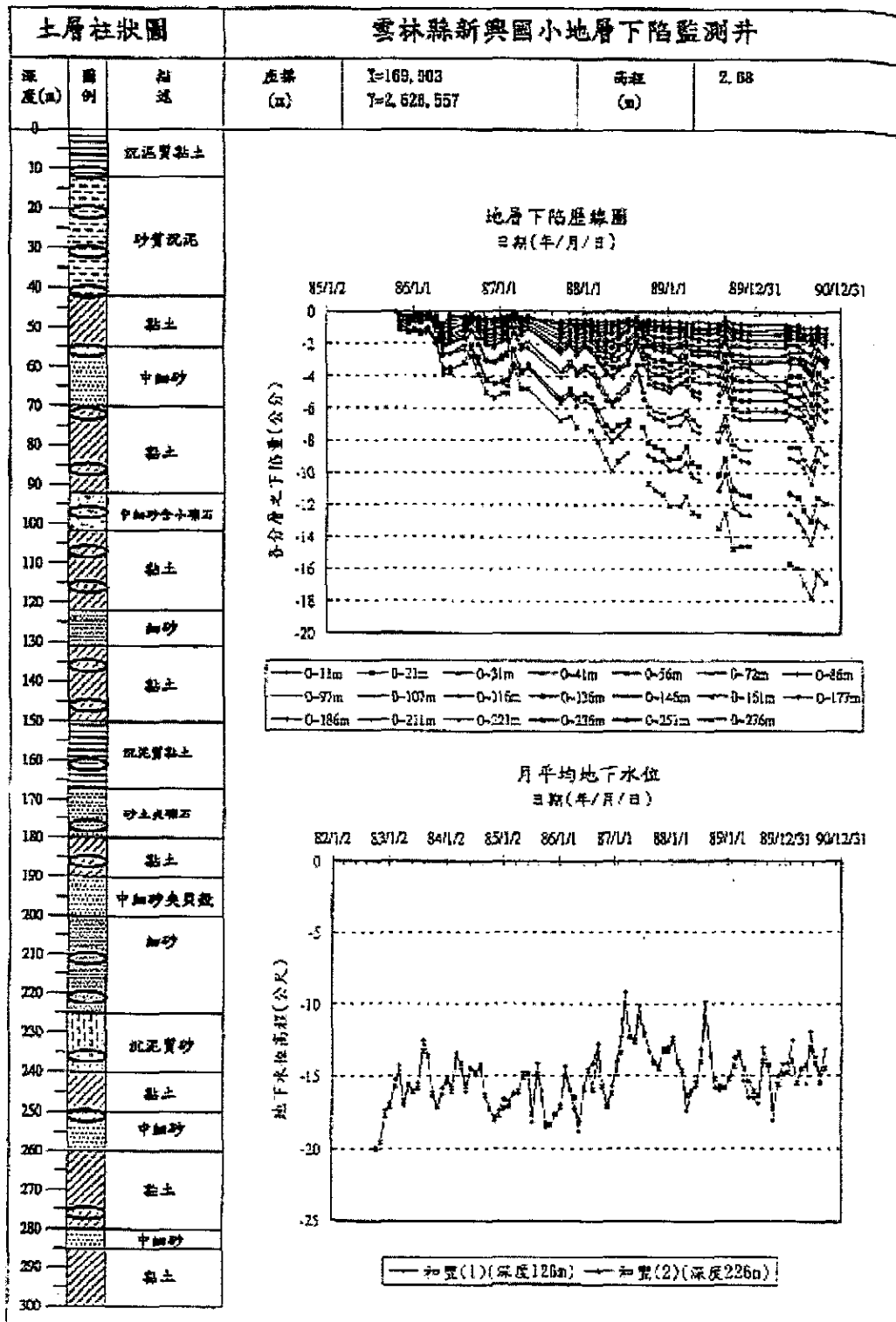


圖 3-13 雲林縣新興國小地層下陷監測

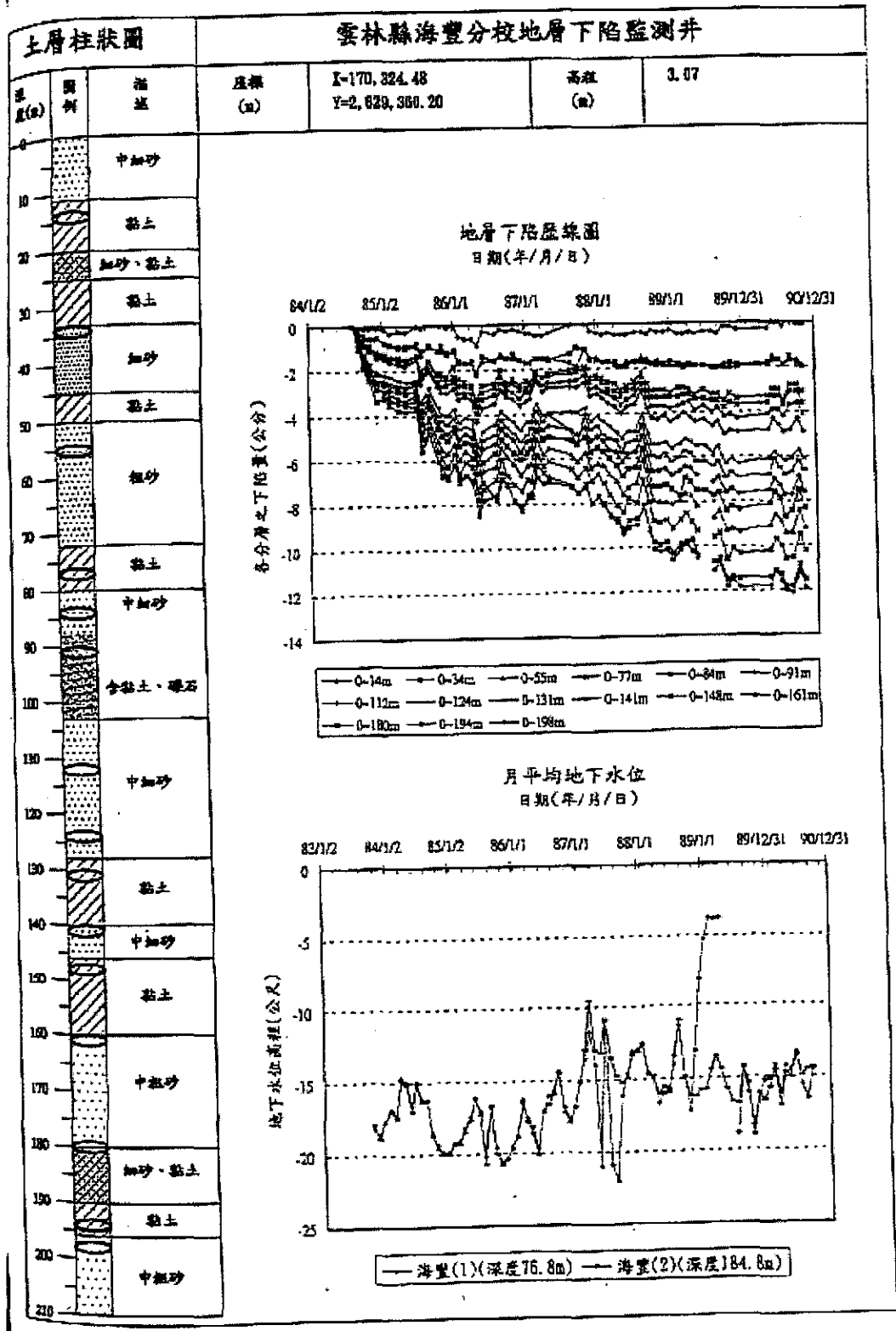


圖 3-14 雲林縣海豐分校地層下陷監測井

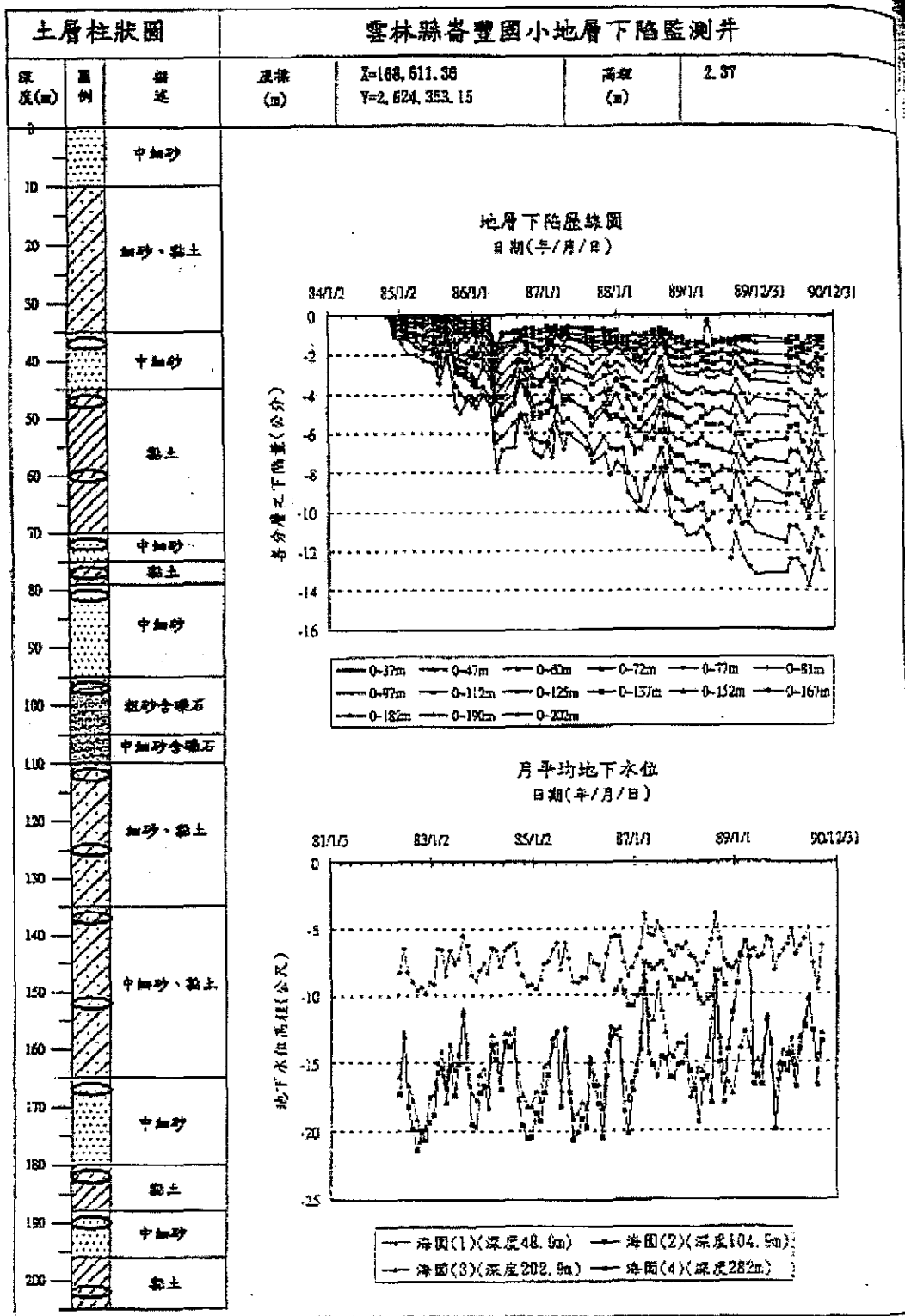


圖 3-15 雲林縣崙豐國小地層下陷監測

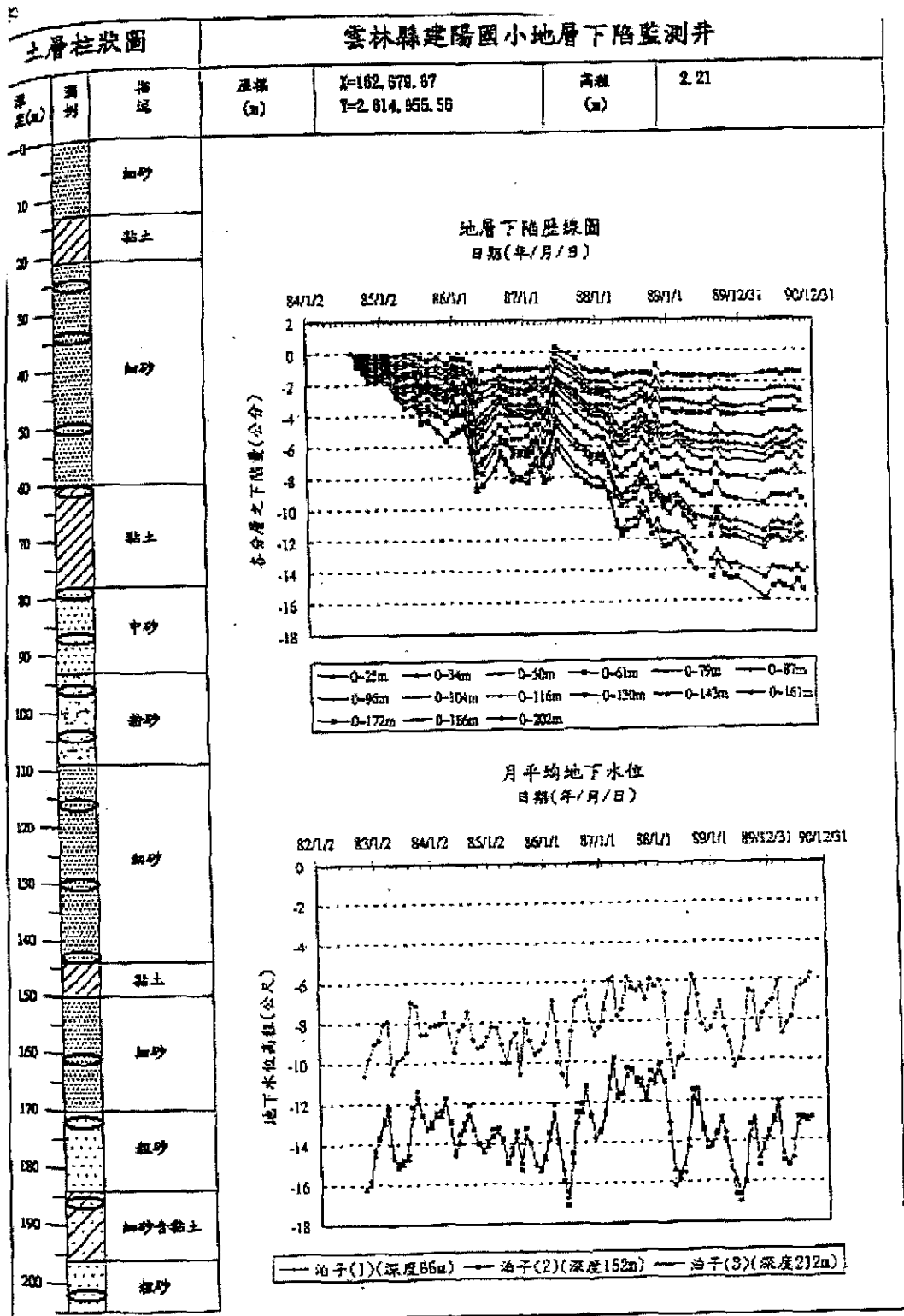


圖 3-16 雲林縣建陽國小地層下陷監測

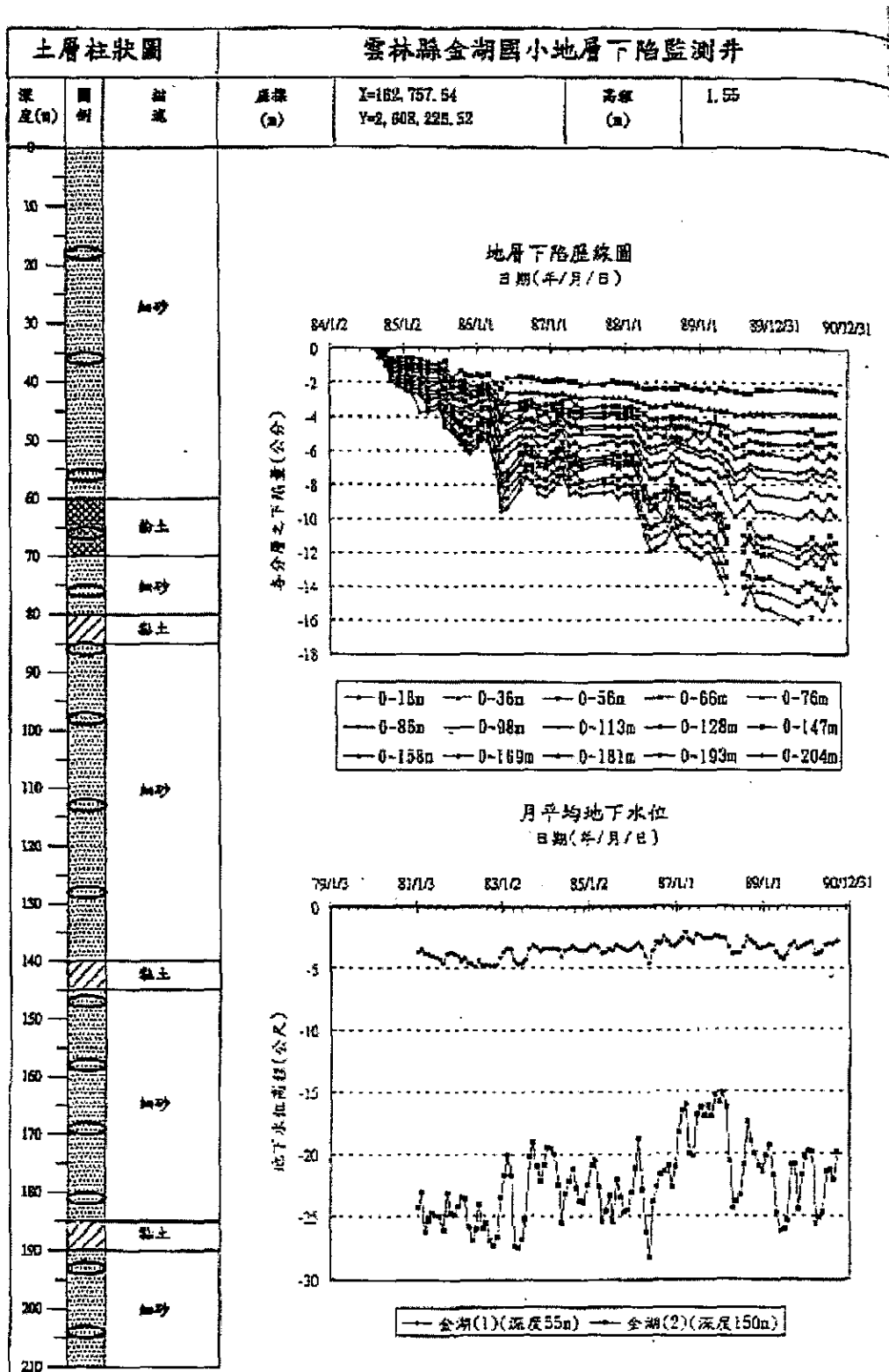


圖 3-17 雲林縣金湖國小地層下陷監測

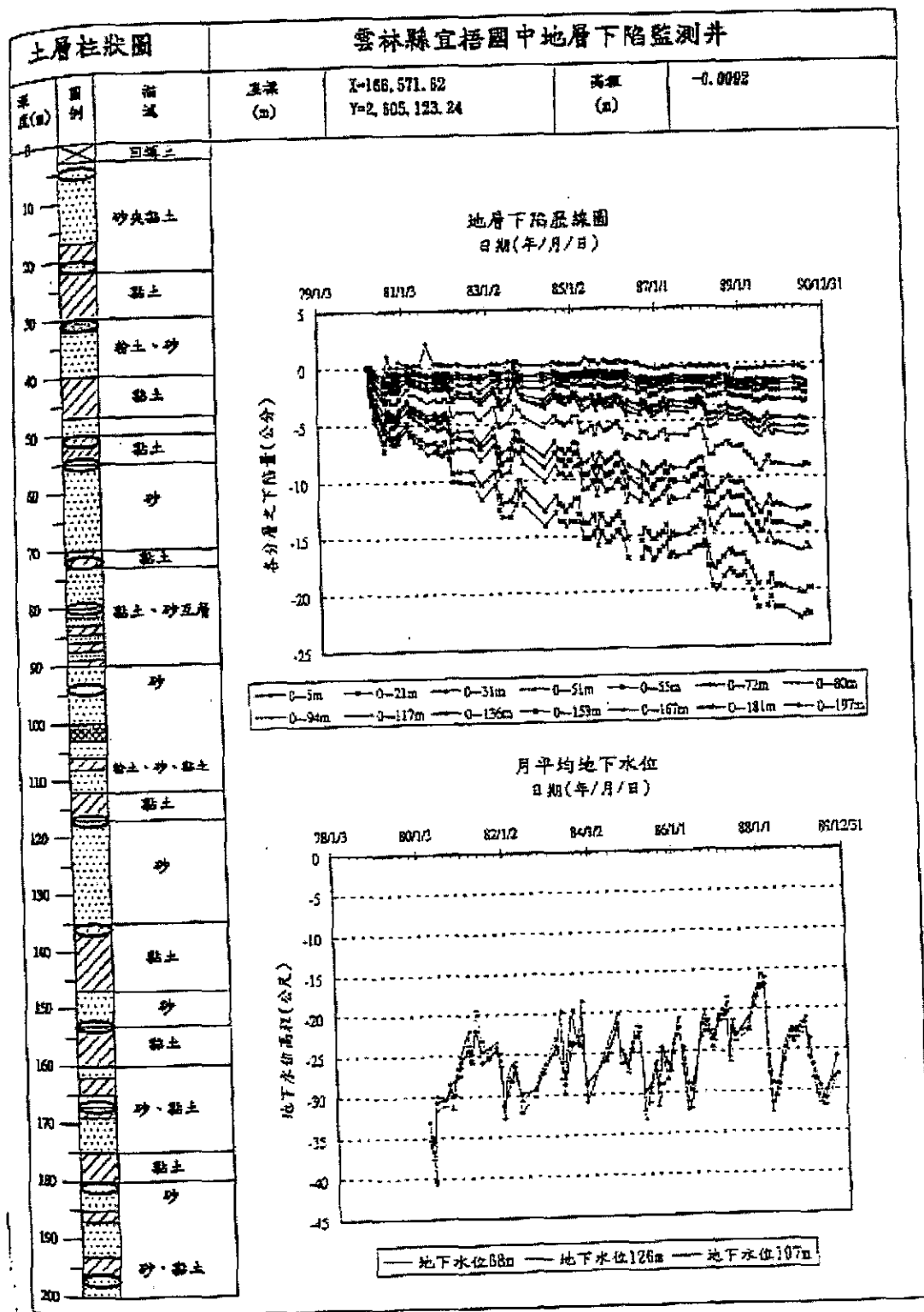


圖 3-18 雲林縣宜梧國中地層下陷監測

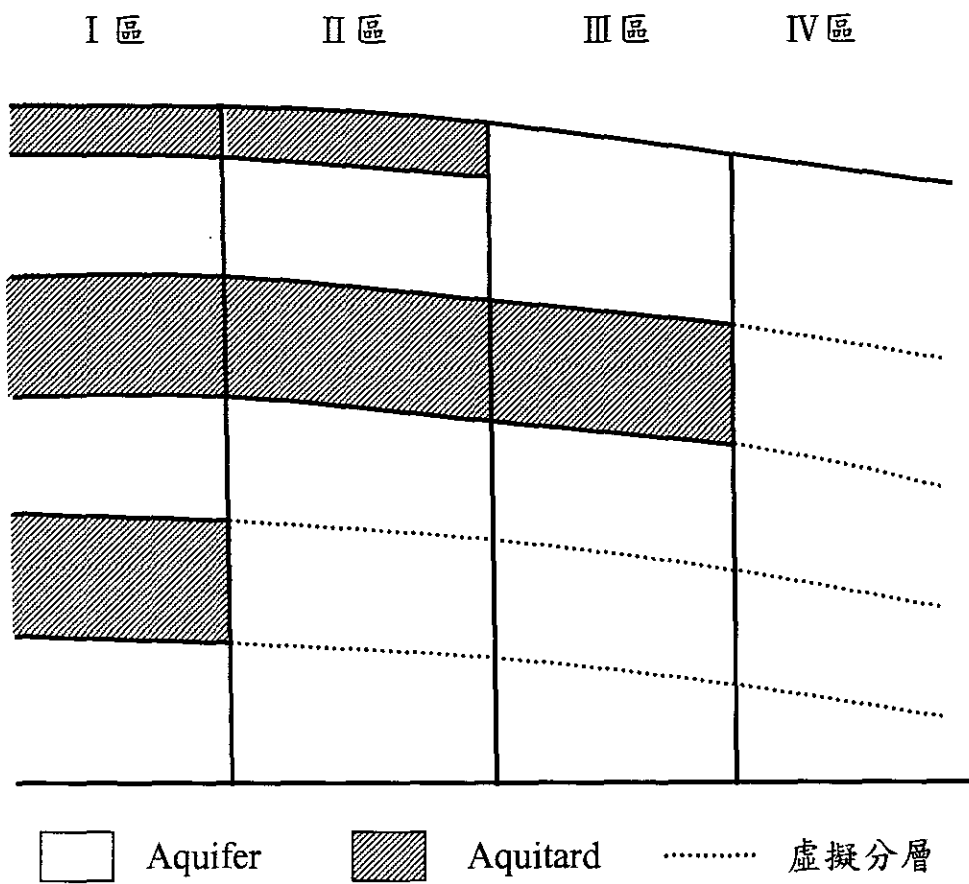


圖 3-19 濁水溪沖積扇地層下陷模擬垂直分層示意圖



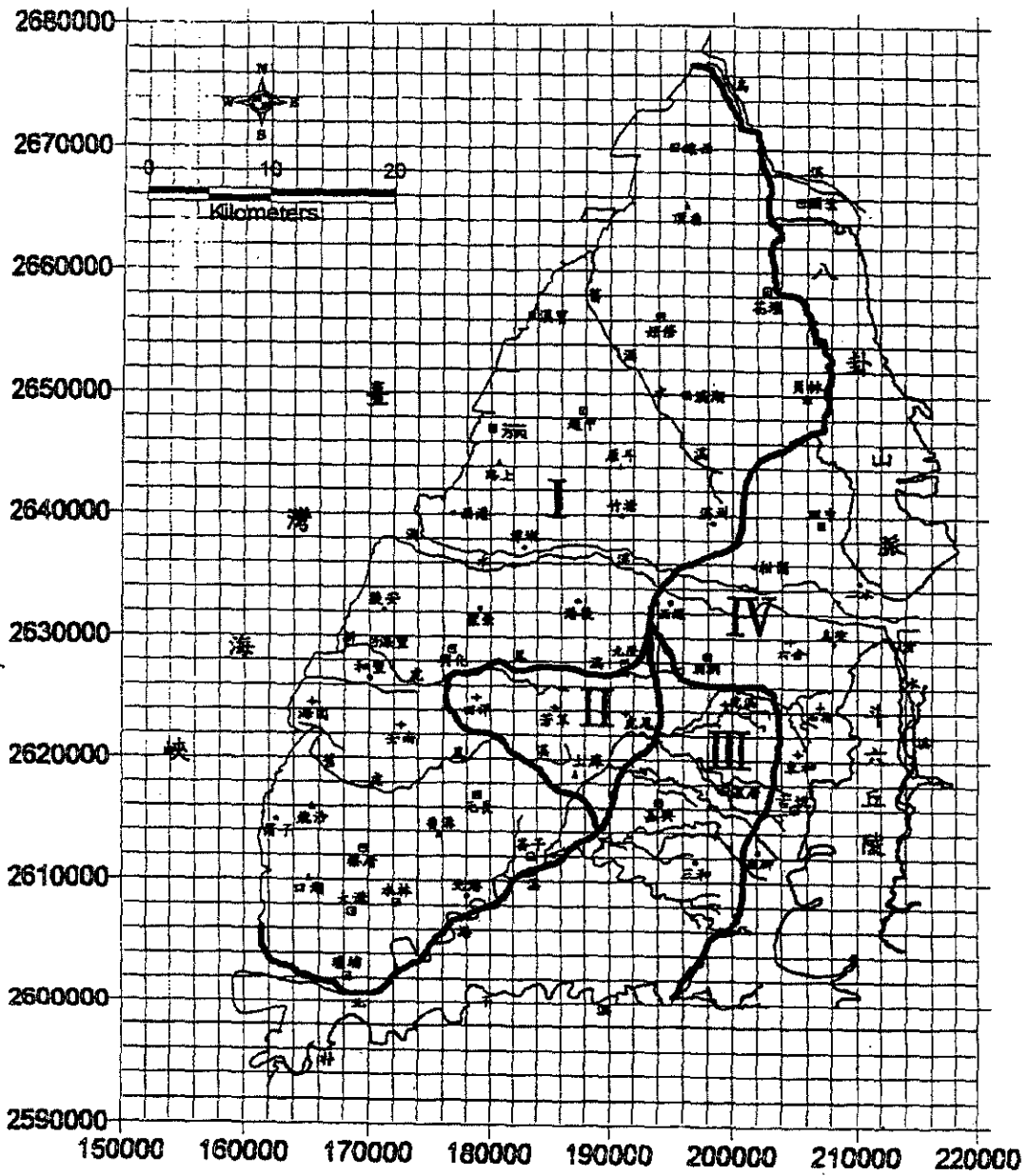


圖 3-20 濁水溪沖積扇地層下陷模擬水平分區網格示意圖

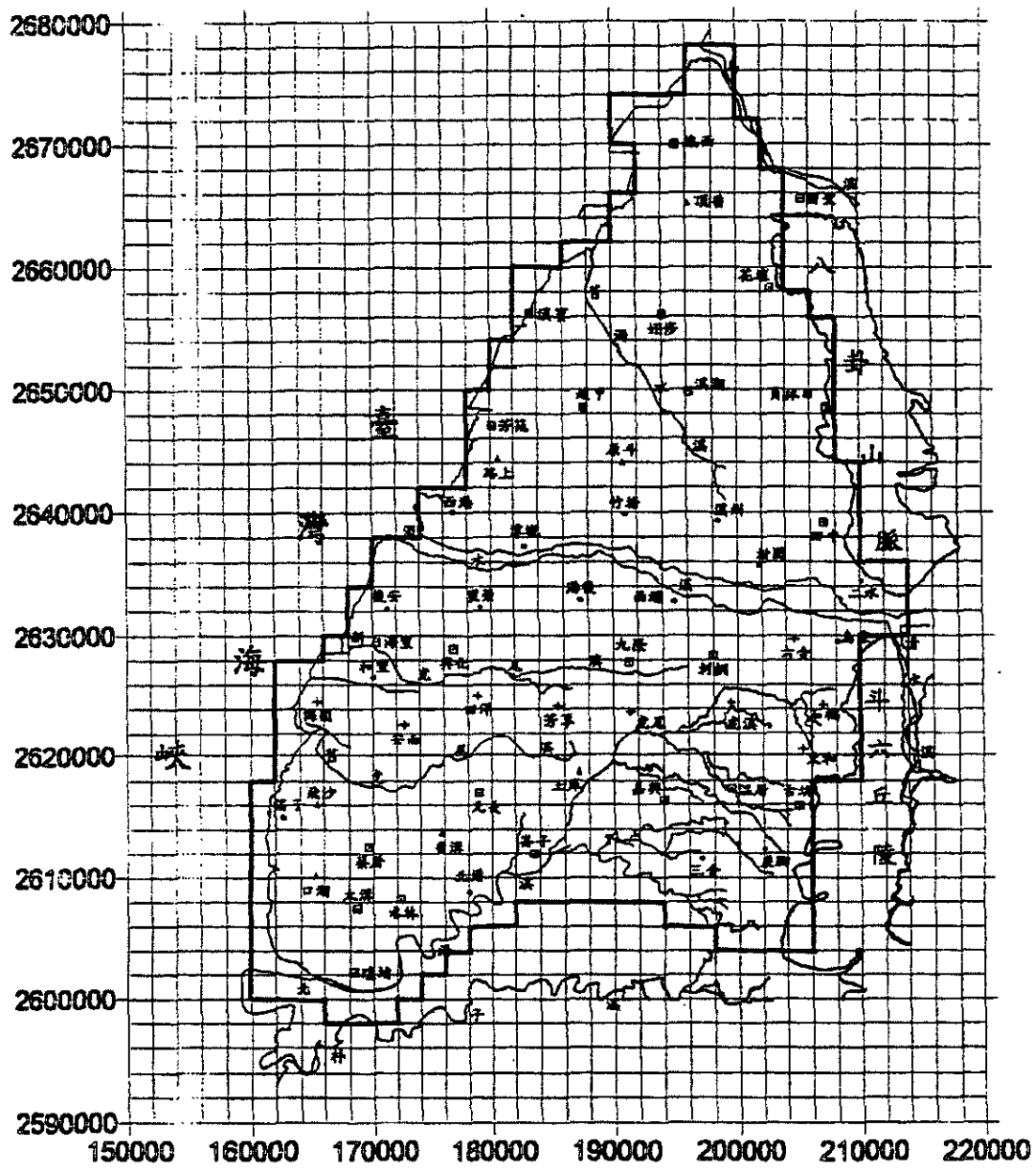


圖 3-21 濁水溪沖積扇模擬區域邊界示意圖

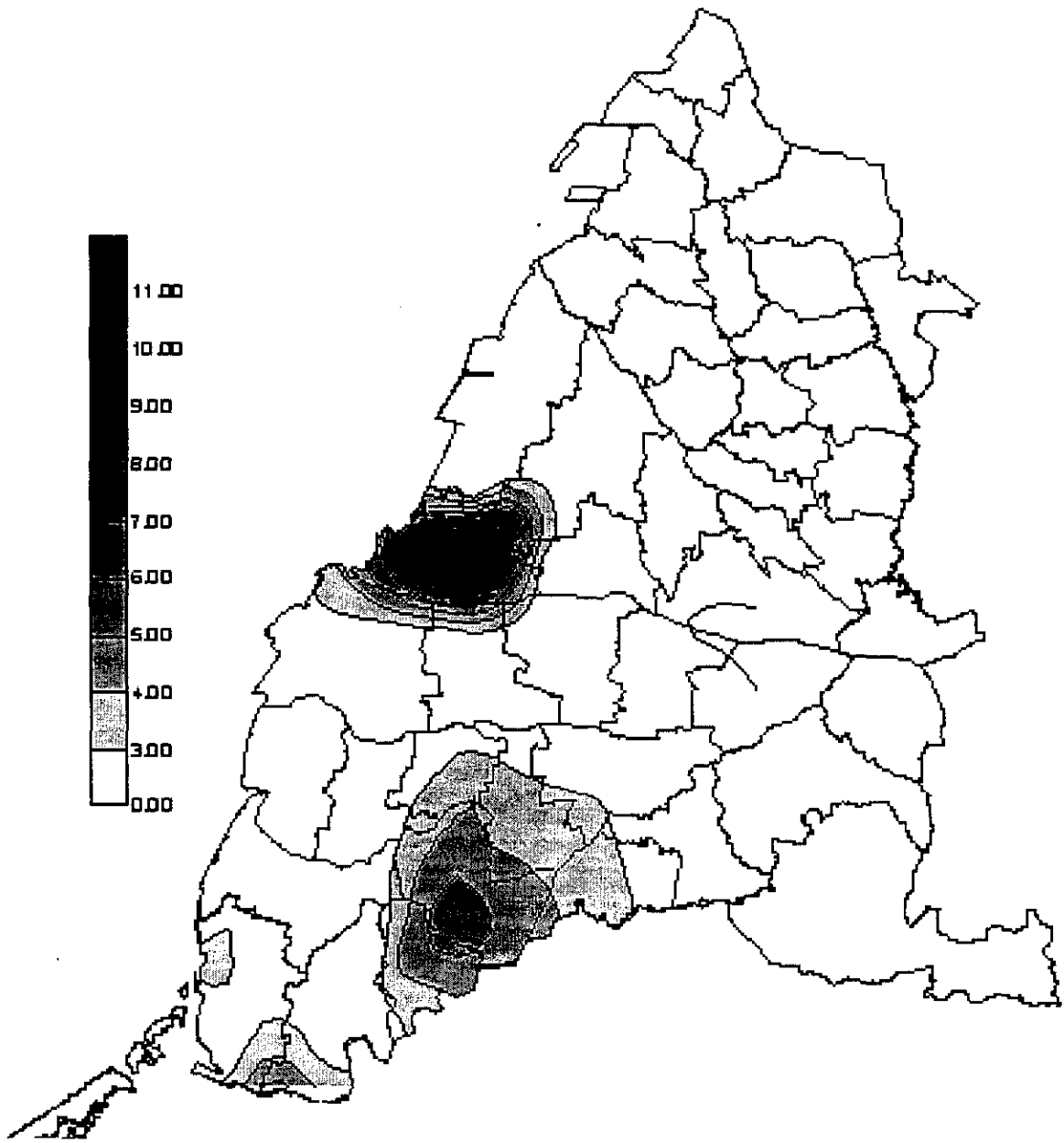


圖 3-22 模擬終極下陷量速率圖

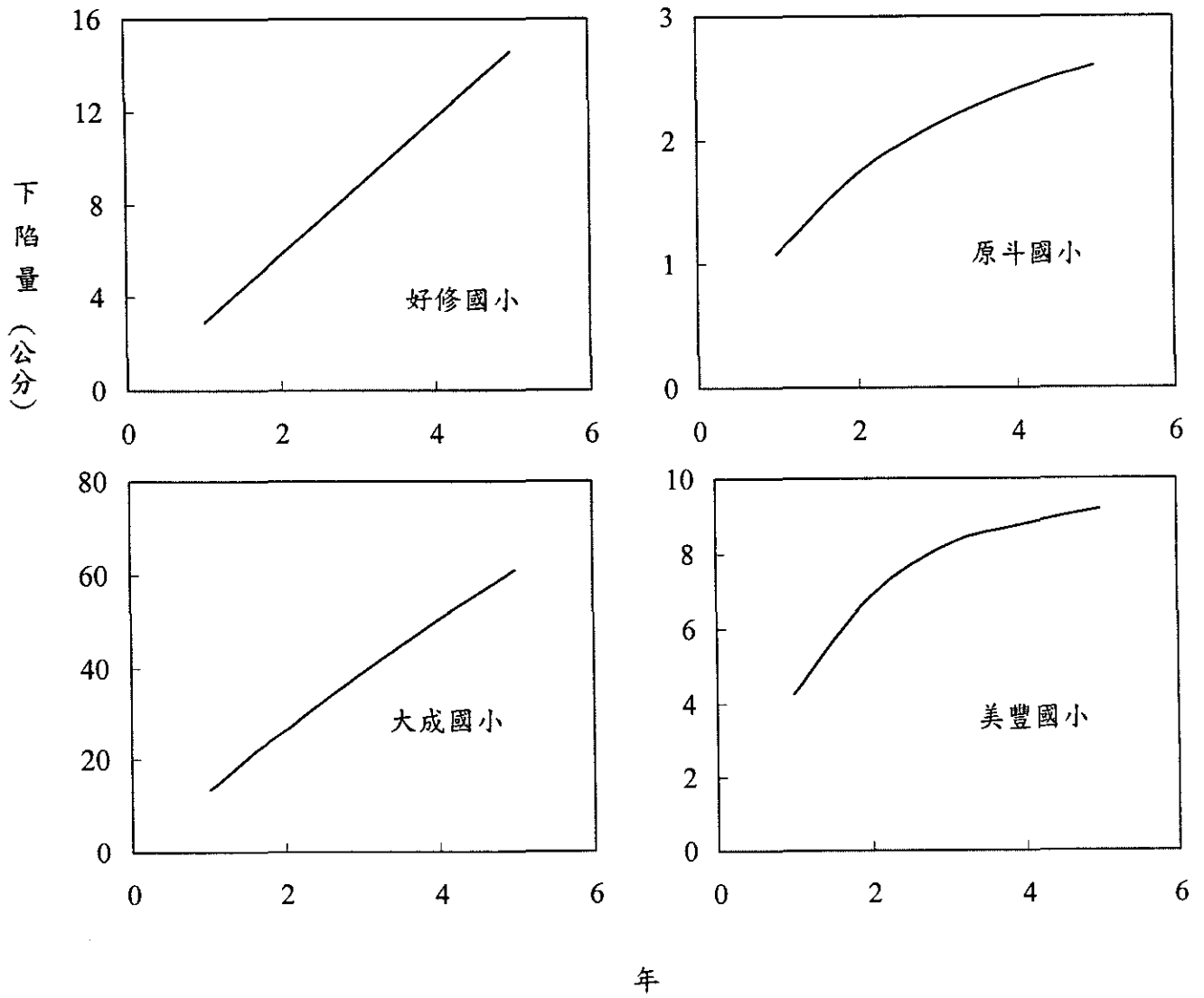


圖 3-23 彰化地區終極下陷量之探討

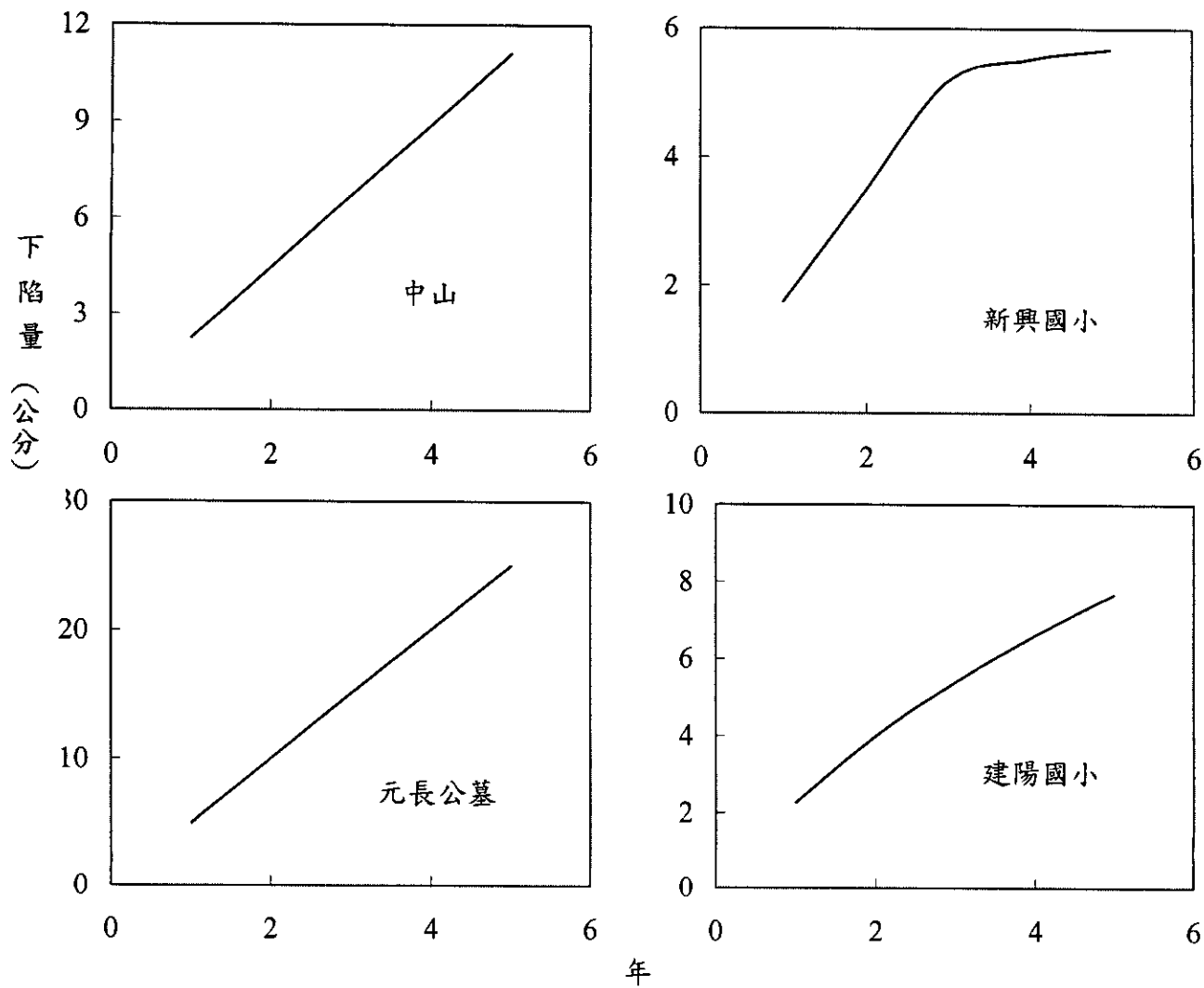


圖 3-24 雲林地區終極下陷量之探討

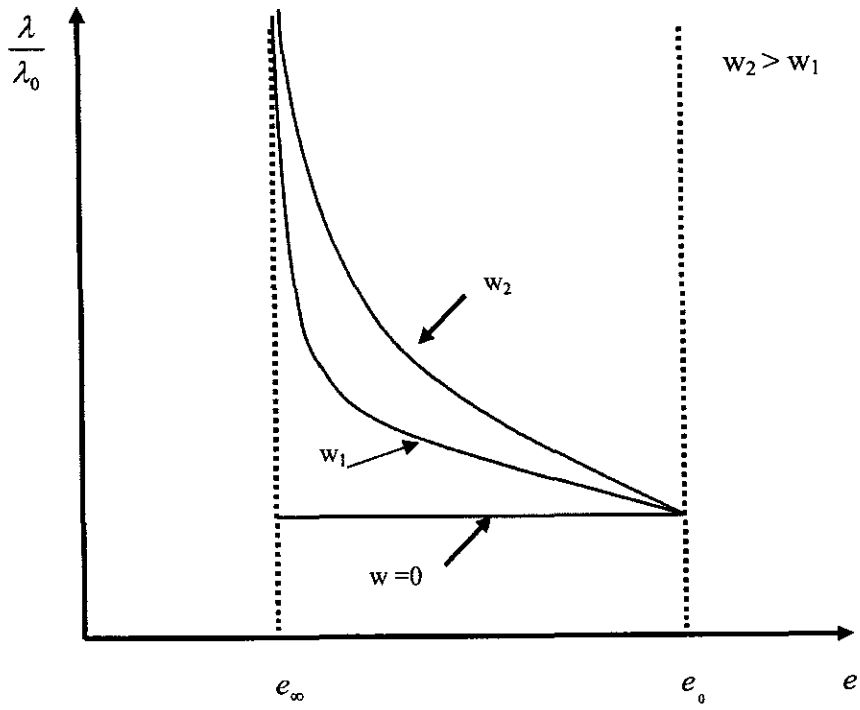


圖 3-25 土體參數與孔隙比之關係

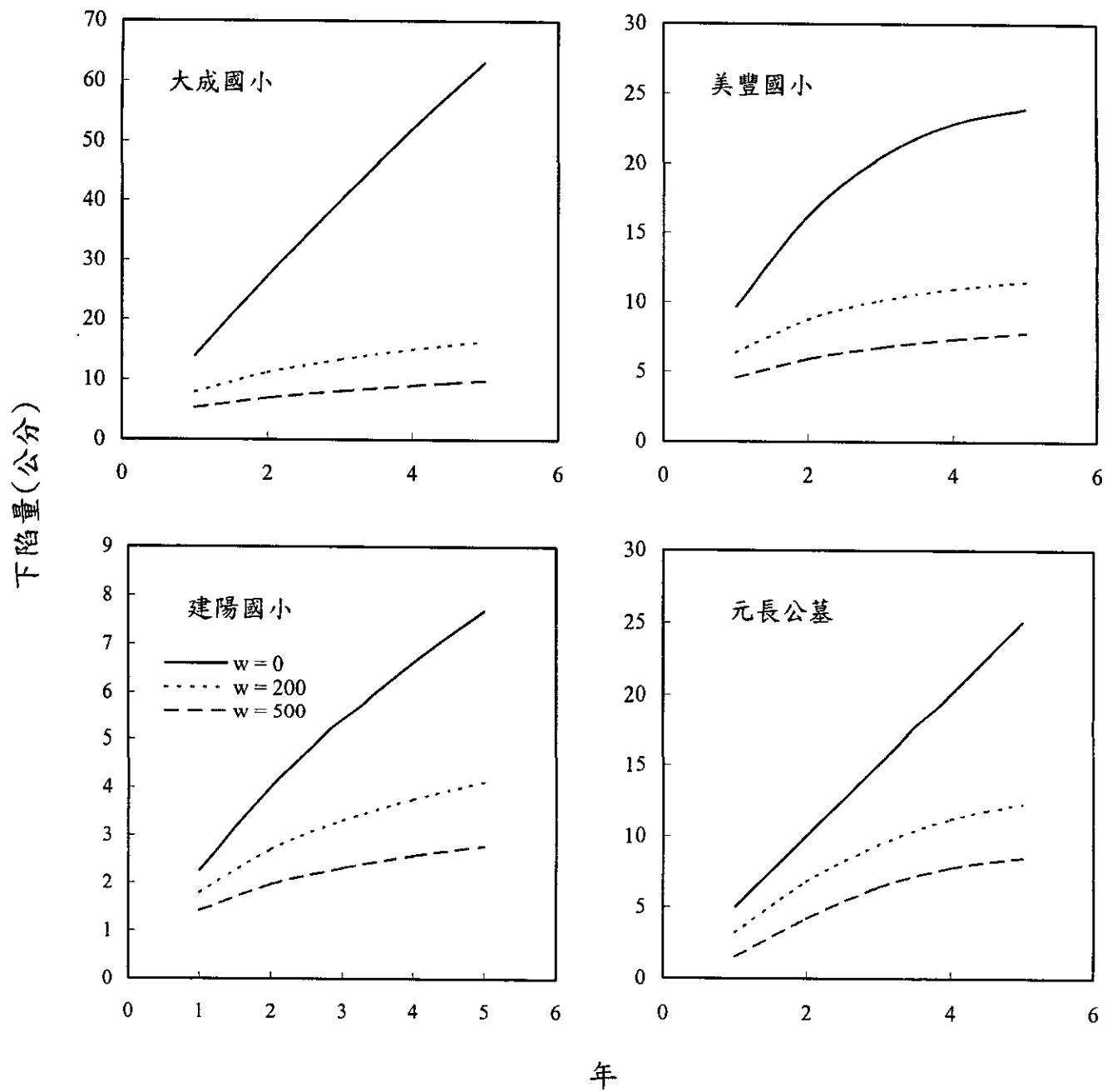


圖 3-26 非線性土體參數對終極下陷量之影響

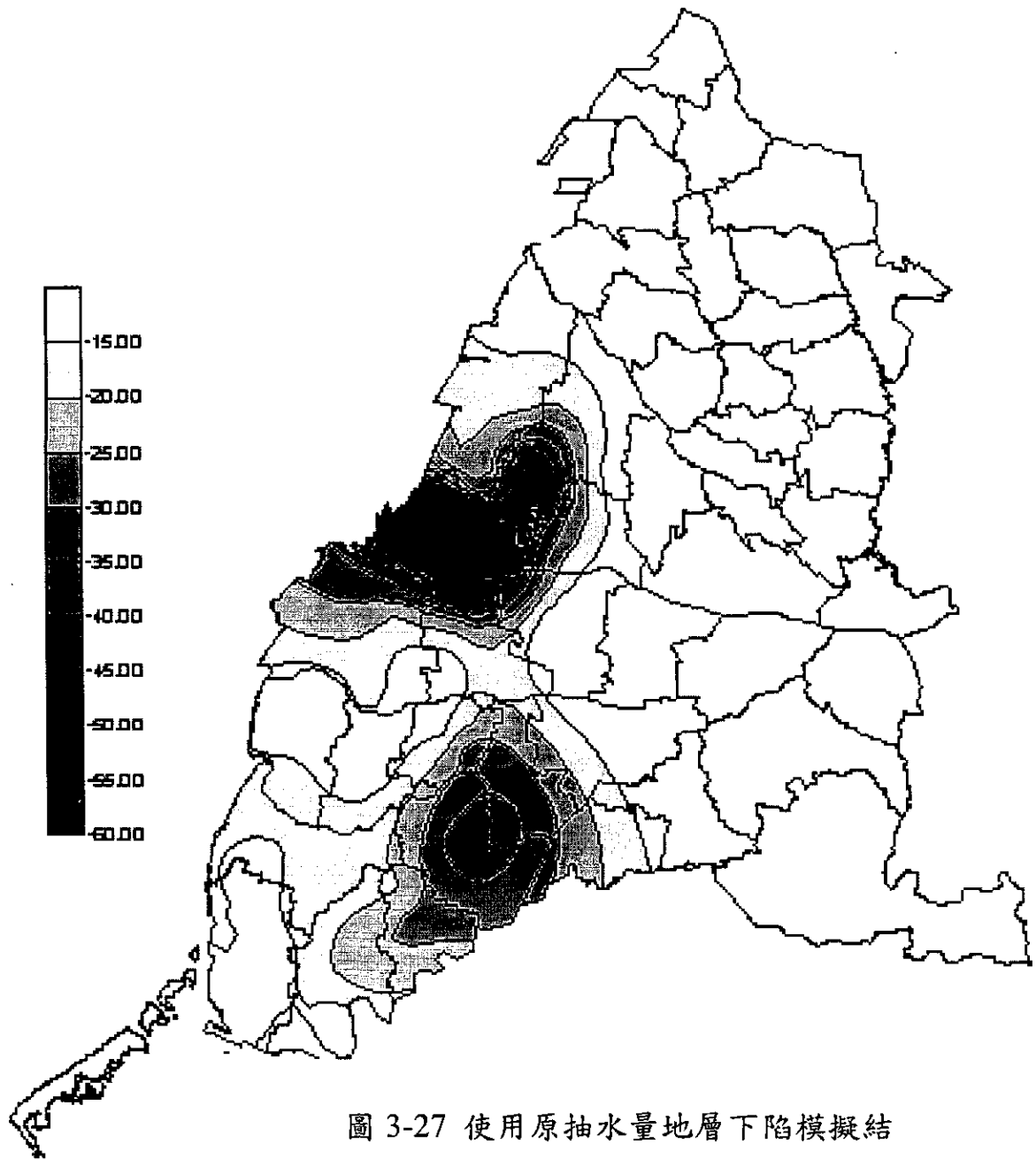


圖 3-27 使用原抽水量地層下陷模擬結



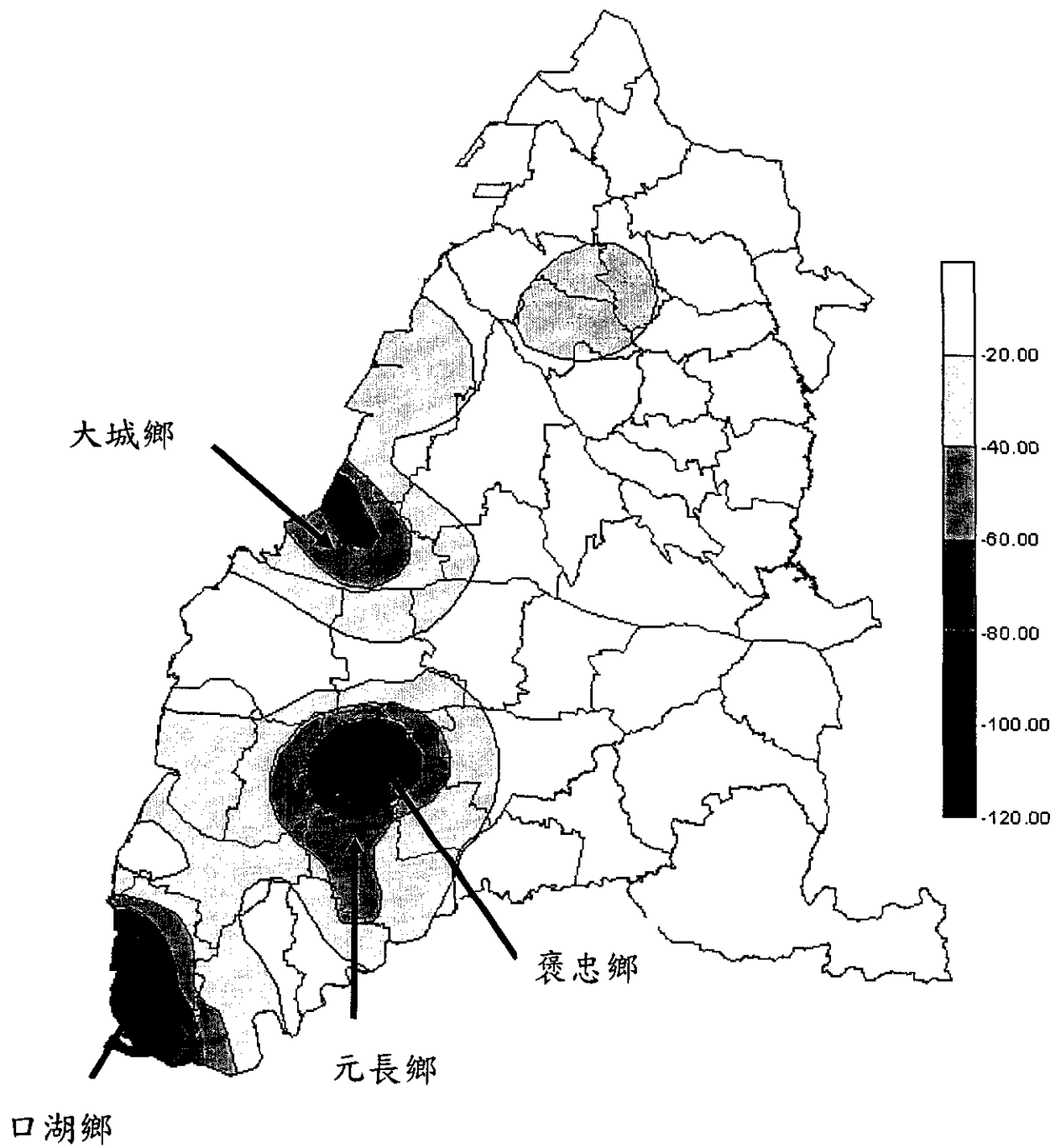


圖 3-28 濁水溪沖積扇地陷潛能圖

## II.地層下陷及地下水優化模式研究子題

## 目 錄

目 錄 .....	II-I
表目錄 .....	II-III
圖目錄 .....	II-IV
第一章 前言 .....	II-1
1.1 研究目的 .....	II-1
1.2 前兩年研究成果說明 .....	II-2
1.3 本年度工作項目 .....	II-2
1.4 本年度完成之工作項目 .....	II-2
第二章 文獻回顧與研究方法 .....	II-3
2.1 文獻回顧 .....	II-3
2.1.1 Multiple Realization Method .....	II-3
2.1.2 機率優化模式 .....	II-4
2.2 研究方法 .....	II-5
第三章 機率優化模式架構 .....	II-7
3.1 機率優化模式建立 .....	II-7
3.2 限制式不確定性分析 .....	II-9
3.3 單位響應係數不確定性分析 .....	II-11
3.4 機率優化模式求解方法 .....	II-12
第四章 模式驗證 .....	II-13
4.1 驗證案例區域概述與優化模式設定 .....	II-13
4.2 敏感度分析 .....	II-13
4.3 機率優化模式計算結果驗證與分析 .....	II-14
第五章 濁水溪沖積扇之應用模擬 .....	II-18
5.1 濁水溪沖積扇區域概述 .....	II-18

5.1.1 區域概述.....	II-18
5.1.2 地質概況與地質分層 .....	II-19
5.1.3 地下水使用與地層下陷概況 .....	II-19
5.1.4 地下水管制區與嚴重地層下陷區 .....	II-20
5.2 地層下陷數值模式設定與資料處理 .....	II-22
5.2.1 地質分層與分區 .....	II-22
5.2.2 水力傳導係數與拉梅常數之給定 .....	II-22
5.2.3 抽水井位置及分層抽水比例 .....	II-23
5.2.4 邊界條件處理.....	II-23
5.3 機率優化模式設定與資料處理 .....	II-24
5.4 機率優化模式應用結果 .....	II-26
第六章 結論 .....	II-30
參考文獻 .....	II-32

# 表 目 錄

表 4-1 機率優化模式驗證案例參數設定表.....	II-34
表 4-2 參數敏感度分析變化範圍.....	II-34
表 4-3 機率優化模式驗證案例最佳抽水量計算結果.....	II-35
表 4-4 取樣 1000 組資料驗證機率優化模式結果表.....	II-35
表 4-5 Actual Reliability for Active Constraints under Specified Reliability, 90%.....	II-36
表 4-6 Actual Reliability for Active Constraints under Specified Reliability, 99%.....	II-36
表 5-1 彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表.....	II-37
表 5-2 彰化雲林地區各鄉鎮市年入滲量表.....	II-38
表 5-3 彰化雲林地區現有抽水井數目及抽水能力表.....	II-39
表 5-4 濁水溪沖積扇含水層水力傳導係數變化範圍表.....	II-39
表 5-5 濁水溪沖積扇地質參數表.....	II-40
表 5-6 濁水溪沖積扇分層抽水比例表.....	II-41
表 5-7 各觀測點地層下陷量於一年管理期末之允許上限值.....	II-42
表 5-8 方案(1)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%時 之各鄉鎮最佳抽水分布.....	II-43
表 5-9 方案(2)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%時 之各鄉鎮最佳抽水分布.....	II-44
表 5-10 方案(3)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%時 之各鄉鎮最佳抽水分布.....	II-45
表 5-11 各觀測點給定可靠度皆為 50%時不同方案各鄉鎮最佳抽水分布 .....	II-46

## 圖 目 錄

圖 1-1	預定進度甘梯圖 .....	II-47
圖 4-1	驗證案例模擬區域圖 .....	II-47
圖 4-2	敏感度分析龍捲風圖 .....	II-48
圖 4-3	驗證案例最佳解與給定可靠度關係圖 .....	II-48
圖 4-4	常態分布驗證井 C 處地層下陷量直方圖(90%可靠度)	II-49
圖 4-5	常態分布驗證井 C 處地層下陷量直方圖(99%可靠度)	II-49
圖 4-6	井 C 處理論累積常態分布曲線與實際累積機率分布曲線(90%可靠度) .....	II-50
圖 4-7	井 C 處理論累積常態分布曲線與實際累積機率分布曲線(95%可靠度) .....	II-50
圖 5-1	濁水溪沖積扇區域圖 .....	II-51
圖 5-2	彰化線地下水管制區區域圖 .....	II-52
圖 5-3	雲林縣地下水管制區區域圖 .....	II-52
圖 5-4	濁水溪沖積扇地質分層示意圖 .....	II-53
圖 5-5	濁水溪沖積扇水平分區示意圖 .....	II-54
圖 5-6	濁水溪沖積扇數值模擬邊界示意圖 .....	II-55
圖 5-7	模擬區域觀測點位置分布圖 .....	II-56
圖 5-8	非地下水管制區觀測點可靠度與最佳抽水量關係圖 ....	II-57
圖 6-1	地下水優化模式建置與驗證流程圖 .....	II-57

# 第一章 前言

## 1.1 研究目的

台灣西南沿海地區近年來，由於地下水不當使用，造成嚴重地層下陷。地下水超抽所產生之地層下陷，不但會引發海水入侵，導致地下水鹹化，破壞地下水資源，更可能衍生暴潮溢淹，造成水土資源永久性傷害等問題，使社會付出巨大成本。故為有效防杜地層下陷之潛在危機，除了持續進行長期系統性監測工作以掌握地層下陷動態外，對於嚴重地層下陷區與下陷潛勢區，更需進一步制定合宜之地下水抽取與管理策略，以達到合理運用地下水資源並避免地層下陷等相關危害之發生。

合宜之地下水抽取與管理策略必須藉由地層下陷數值模式與優化模式兩者相輔相成才可達到。數值模式必須能準確的模擬或預測管理地區地下水位與地層下陷量之變化與潛勢，而優化模式則可在給定之規劃目標以及限制條件下，計算管理地區最佳之抽水策略。本研究計畫中，研究子題二即在開發上述之地層下陷數值模式，而本研究子題之主要目的即在發展一套考量地層下陷量之地下水優化模式，以提供管理者制定合宜地下水開發管理策略之工具。

然而肇因於地質條件之複雜性以及實測資料之缺乏，吾人對於地質參數之掌握實屬有限，因此地質參數將具有高度之不確定性存在，從而導致以定率(deterministic)觀點建立之優化模式其計算之結果亦具有不確定性，本研究將進一步考慮地質參數之不確定性，建立序率(stochastic)之優化模式，以使優化模式能更適切於實際問題之模擬。傳統上以序率之觀點建立優化模式主要有兩種方法，分別為 Multiple Realization Method 以及機率優化模式(chance-constrained programming, CCP)，其中機率優化模式具有限制式數目較少以及可直接計算可靠度之優點，因此本研究將採用機率優化模式之方法建立以序率觀點考量之地下水優化模式。

## 1.2 前兩年研究成果說明

本研究子題於第一年對以往地下水優化模式之相關研究做一文獻蒐集，並利用響應矩陣法建立考量地層下陷量之定率地下水優化模式，藉由三個簡單之假設案例以驗證模式發展之正確性，並實際應用於濁水溪沖積扇地區。

本研究子題第二年則因為計畫執行程序問題，研究內容順延至今年(第三年)。

## 1.3 本年度工作項目

本研究子題於前二年已完成定率地下水優化模式之建置、驗證，並已實際應用於濁水溪沖積扇地區以評估最佳抽水量，本年度之工作項目則包括：

1. 建立以地層下陷量為考量之機率地下水優化模式
2. 優化模式之編輯測試。
3. 應用所發展之機率優化模式於選定區域之模擬，目前擬以地層下陷情形嚴重之濁水溪沖積扇為模擬區域。
4. 以第一年所發展定率地下水優化模式之輸出檔案與子計畫(三)之地理資訊決策支援系統整合，以建立圖形化與資訊化之模式輸出介面。

由以上所述之本年度工作項目，其預定進度甘梯圖如圖 1-1 所示。

## 1.4 本年度完成之工作項目

本研究子題於本年度已完成考量地層下陷量之機率地下水優化模式之建置與驗證，並實際應用所發展之機率優化模式於濁水溪沖積扇之模擬，符合圖 1-1 之預定進度。



## 第二章 文獻回顧與研究方法

### 2.1 文獻回顧

在應用地下水優化模式於實際案例時，由於實測地質資料往往極為有限，不足以推斷整個模擬地區之實際地質參數，使得這些參數的數值在使用上具有很高的不確定性，從而導致模式計算結果也具有相當程度之不確定性，因此必須將參數的不確定性納入優化模式中加以考慮，以避免因為不確定性的影響使模式計算結果不具意義，而其方法則可概分為 Multiple Realization Method 與機率優化模式兩種。

#### 2.1.1 Multiple Realization Method

Wagner and Gorelick (1989)以定率之地下水污染整治優化模式出發，假設水力傳導係數(hydraulic conductivity)為唯一具不確定性之空間變異數，依據實測之有限資料以最大概似法(maximum likelihood)推估水力傳導係數之統計特性，並利用蒙地卡羅(monte carlo)法產生 30 組可能之水力傳導係數，將其同時全部放入優化模式之限制式中，以求得在符合污染物濃度限制下之最佳解(此問題中為最小抽水量)，接著再利用蒙地卡羅產生 1000 組可能之水力傳導係數，配合優化模式求出之最佳解與地下水污染物傳輸模式，計算是否有超過污染物濃度限制之情況發生。經由以上步驟其發現優化模式計算之最佳解具有 90%之可靠度，亦即利用最佳解進行污染物整治時，僅有 10%的機率污染物濃度無法降低到給定的要求。

Mylopoulos et al. (1999)利用響應矩陣法建立地下水污染整治優化模式，而含不確定性之參數亦僅為水力傳導係數，其利用蒙地卡羅法產生 200 組可能之水力傳導係數值，並使用地下水模式計算相對應之響應係數，分別利用此 200 組響應係數計算 200 個符合限制條件時之最佳解(此問題中為最小抽水成本)，再將此 200 組響應係數同時全部放入優化模式

中之限制式求解在最嚴苛條件下之最小抽水成本。

上述之方法最大的困難點在於同時將所有取樣的參數納入限制式中，會造成優化模式過於龐大的現象，而可能造成計算時間過長甚或求解無法收斂的現象，且並無法直接將可靠度的觀念融入模式中，而須待解出最佳值後，再配合蒙地卡羅模擬術模擬足夠多之次數後分析最佳解之可靠度。而此方法的好處則為僅需知道含不確定參數之統計特性，而限制條件(如水頭洩降量、污染物濃度等)之統計特性，包含其機率密度函數(probability density function, PDF)型態並不需要分析，而推導限制條件之機率密度函數型態卻也往往是最困難的，通常僅能藉由先行假設並於事後驗證之方式進行。

### 2.1.2 機率優化模式

有別於前小節介紹之方法，Tung (1986)首先將機率優化模式應用於地下水管理問題中。其優化模式之目標為在給定之水頭洩降限制下，求取最大之可抽水量，模式中水力傳導係數為唯一具不確定性之變數，其從 Cooper-Jacob 方程式出發，配合一階變異數分析(first order variance estimation, FOVE)，推導響應係數及水頭洩降量之統計特性，並限制水頭洩降量小於給定限制值之機率必須大於可靠度 $\alpha$ 。於優化模式求解部分，Tung 利用線性化的方法將原本的非線性規劃問題轉變為線性規劃以利求解。其亦指出當含不確定性參數之變異性不大時，水頭洩降量可根據中央極限定理(central limit theorem)假設為常態分布。

Wagner and Gorelick (1987) 應用機率優化模式於地下水水質管理上，其假設污染物濃度為常態分布，且並未對優化模式做線性化的過程而是直接求解非線性規劃，待最佳解求出後，再利用地下水污染傳輸模式與蒙地卡羅法驗證污染物濃度的機率密度函數型態。

Morgan et al. (1993) 提出了新的機率優化模式概念，不同於以往以機

率的型態表現限制式，其利用蒙地卡羅法對水力傳導係數取樣  $n$  組資料，計算相對應之單位響應係數，將  $n$  組單位響應係數全部納入限制條件中，並增加二進位變數(binary variables)於限制式中，依據給定之可靠度以控制該條限制式是否須被滿足。其優點為並不需事先知道水頭洩降量或污染物濃度之機率密度函數型態，但缺點為增加整數變數，形成混合整數規劃(mixed integer programming)，增加求解困難度。

Datta and Dhiman (1996)應用響應矩陣法與機率優化模式於污染物觀測井網之建置上，有別於以往的研究，其單位響應係數之不確定性定義為定率分析之單位響應係數加上一亂數項，而此一亂數為常態分布，如此的假設導致每一單位響應係數間並不存在相關性，而實際上由於單位響應係數是水力傳導係數之函數，而水力傳導係數又具空間變異性，因此藉由直接增加亂數項於單位響應係數以分析其不確定性之方法將可能低估了其變異性。

Sawyer and Lin (1998)應用響應矩陣法與機率優化模式於地下水污染整治之問題，有別於以往機率優化模式僅考慮限制式之不確定性，其亦同時考慮了目標函數中係數值之不確定性，在此研究中目標函數之係數代表抽水操作成本，經由同時考慮目標函數與限制式之不確定性後，最終之最佳化模式為混合整數非線性規劃求解問題，且更能符合實際應用上之情形。

其他應用機率優化模式於實際案例之研究尚有 Tiedeman and Gorelick (1993)，其應用機率優化模式於地下水污染整治方案中。

## 2.2 研究方法

如前節所述，將參數不確定性納入優化模式中，從而建立以序率觀點考量之優化模式主要有兩種方法，由於 Tung (1986)所發展之機率優化模式具有限制式數目較少，且可由模式直接計算可靠度之優點，因此本

研究將採用機率優化模式之方法建立以序率觀點考量之地下水優化模式。本研究中具有不確定性因素之參數為僅具空間變異性地質參數，在假設其相關統計特性已知之前提下，可藉由統計取樣法以分析參數之不確定性對模式之影響。傳統上大多數研究皆使用蒙地卡羅模擬術作為參數取樣之工具，而在最近十年，LHS (Latin Hypercube Sampling) 已成功應用於水利工程上之問題(Chang, et. al, 1993；Yeh and Tung, 1993)，其與蒙地卡羅方法比較，具有以較少取樣樣本達到收斂目的之優點，故本研究採用 LHS 作為參數取樣之方法。

## 第三章 機率優化模式架構

### 3.1 機率優化模式建立

本研究於第一年所建立之優化模式，其考慮之限制條件為水頭洩降量與地層下陷量。然而於實際之案例中，肇因於地質參數之異質性 (heterogeneity) 以及完整實測資料之缺乏，吾人往往無法獲得真實之完整地質參數資料而須輔以假設或其他推測參數方法之技巧，因此地質參數將可視為具有不確定性之隨機變數 (random variable)，而水頭洩降量與地層下陷量為地質參數之函數，從而導致以此計算出之水頭洩降量與地層下陷量亦為隨機變數，具有不確定性並存在其機率分布型態。因此若考慮其不確定性，應用機率優化模式之觀念，則優化模式可表示為：

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^n Q(i, j) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \Pr[\Delta h(l, k, n) \leq \Delta h^*(l, k, n)] \geq \alpha^H(l, k, n) \quad (2)$$

$$\Pr[\Delta s(k, t) \leq \Delta s^*(k, t)] \geq \alpha^S(k, t) \quad (3)$$

$$Q^{Lower}(i, j) \leq Q(i, j) \leq Q^{Upper}(i, j) \quad (4)$$

其中， $j$  為第  $j$  口抽水井， $NP$  為總抽水井數， $i$  為第  $i$  個模擬時刻， $n$  為總模擬時刻， $k$  為模擬區域中給定限制條件之第  $k$  點， $K$  為總限制點數， $l$  為第  $l$  地質分層， $L$  為總分層數， $\Delta h(l, k, n)$  為  $n$  時刻後於第  $k$  點第  $l$  層之水頭洩降量， $\Delta h^*(l, k, n)$  為  $n$  時刻後於第  $k$  點第  $l$  層之水頭洩降量限制值， $\Delta s(k, t)$  為  $t$  時刻於第  $k$  點之地層下陷量， $\Delta s^*(k, t)$  為  $t$  時刻於第  $k$  點之地層下陷量限制值， $Q^{Lower}(i, j)$  與  $Q^{Upper}(i, j)$  分別為第  $j$  口井於第  $i$  時刻之抽水量下限值與上限值， $\Pr$  代表水頭洩降量與地層下陷量之累積機率密度函數 (cumulative distribution function, CDF)， $\alpha^H$  與  $\alpha^S$  分別代表水頭洩降量與地

層下陷量不超過給定限制值之給定可靠度(specified reliability)，其值介於 0~1 間。

上述機率優化模式中，式(1)稱為目標函數(objective function)，於本研究中定義為最佳抽水量，亦即在符合給定之限制條件下(式(2)至式(4))，求取各抽水井之抽水量以使全部抽水井抽水量之和為最大。

根據 Tung (1986)之研究，若含不確定性參數之變異性不大時，水頭洩降量可根據中央極限定理假設為常態分布，而本研究中亦假設地層下陷量為常態分布(後續驗證案例中將說明此假設之合理性)，因此式(2)與式(3)可轉換為：

$$\Pr\left\{Z \leq \frac{\Delta h^*(l,k,n) - E[\Delta h(l,k,n)]}{\sqrt{\text{Var}[\Delta h(l,k,n)]}}\right\} \geq \alpha^H(l,k,n) \quad (5)$$

$$\Pr\left\{Z \leq \frac{\Delta s^*(k,t) - E[\Delta s(k,t)]}{\sqrt{\text{Var}[\Delta s(k,t)]}}\right\} \geq \alpha^S(k,t) \quad (6)$$

其中， $Z$  為具有標準常態分布之隨機變數， $E[\cdot]$ 表示期望值(expected value)， $\text{Var}[\cdot]$ 表示變異數(variance)。上述二式並無法直接用於計算，因此需將其展開以得到可用以計算之方程式，其步驟如下：由式(5)將其展開可得

$$\sqrt{\text{Var}[\Delta h(l,k,n)]} \times F^{-1}[\alpha^H(l,k,n)] \leq \Delta h^*(l,k,n) - E[\Delta h(l,k,n)] \quad (7)$$

其中  $F^{-1}$  代表標準常態累積函數之反函數。藉由等號兩邊平方之技巧將可把根號去掉，簡化函數之複雜度，但必須等號兩邊之數值皆大於零才可確保平方後之方程式正確，觀察等號左邊可發現，變異數恆為正值，然而當可靠度小於 50% 時， $F^{-1}$  之值將小於 0，因此爾後將只能適用於可靠度大於 50% 時之規劃，而於實際案例中，可靠度之要求鮮少低於 50%。再觀察等號右邊之式子，為了避免最佳化求解過程中，不可行之解因為

平方後滿足式(10)，因此必須在模式中增加限制式如下所示：

$$\Delta h^*(l, k, n) - E[\Delta h(l, k, n)] \geq 0 \quad (8)$$

經由以上步驟，式(5)最終可表示成：

$$Var[\Delta h(l, k, n)] \times F^{-1^2} [\alpha^h(l, k, n)] \leq \{\Delta h^*(l, k, n) - E[\Delta h(l, k, n)]\}^2 \quad (9)$$

同理，式(6)則可表示為：

$$Var[\Delta s(k, t)] \times F^{-1^2} [\alpha^s(k, t)] \leq \{\Delta s^*(k, t) - E[\Delta s(k, t)]\}^2 \quad (10)$$

由以上之推導，若吾人能推導式(9)與式(10)中，水頭洩降量與地層下陷量之期望值與變異數，則將可求解此一機率優化模式。

### 3.2 限制式不確定性分析

根據響應矩陣法之原理，水頭洩降量可以下式(11)表示：

$$\Delta h(l, k, n) = \sum_{j=1}^{NPW} \sum_{i=1}^n \beta(l, k, j, n-i+1) Q(i, j) \quad (11)$$

其中， $\beta(l, k, j, n-i+1)$ 代表單位響應係數。假設單位響應係數間為線性獨立(linear independent)，則水頭洩降量之期望值與變異數可以如下式子表示：

$$E[\Delta h(l, k, n)] = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^n E[\beta(l, k, j, n-i+1)] Q(i, j) \quad (12)$$

$$Var[\Delta h(l, k, n)] = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^n Var[\beta(l, k, j, n-i+1)] Q^2(i, j) \quad (13)$$

根據 Tsai(2001)之研究，地層下陷量可表示為：

$$\Delta s(k, t) = \sum_{l=1}^L \Delta s(l, k, t) = \sum_{l=1}^L \frac{\rho_w \times g \times B(l, k) \times G(l, k, t)}{2 \times \mu(l, k) + \lambda(l, k)} \quad (14)$$

其中，

$$G(l, k, t) = \begin{cases} h(l, k, t-1) - h(l, k, t) & \text{if } h(l, k, t-1) - h(l, k, t) \geq 0 \\ 0 & \text{if } h(l, k, t-1) - h(l, k, t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$\rho_w$  表示水之密度， $g$  表示重力加速度， $B(l,k)$  表示點  $k$  第  $l$  層之厚度， $\mu(l,k)$  與  $\lambda(l,k)$  表示點  $k$  第  $l$  層之土體拉梅常數(Lame Constant)， $h(l,k,t)$  表示點  $k$  第  $l$  層於  $t$  時刻之水位值。

式(14)中可能具有不確定性存在而導致地層下陷量亦具有不確定性之變數包括  $B$ 、 $G$ 、 $\mu$  與  $\lambda$ ，本研究中將不考慮地層厚度( $B$ )之不確定性，後續驗證案例之敏感度分析亦將證明在僅改變抽水量之情況下，土層厚度並不影響地層下陷量之變化。

假設各地層間之地層下陷量為線性獨立，利用一階變異數分析，並假設  $G$ 、 $\mu$  與  $\lambda$  間互為線性獨立，則分層地層下陷量之期望值可以下式表示：

$$E[\Delta s(l,k,t)] = \frac{\rho_w \times g \times B(l,k) \times \bar{G}(l,k,t)}{2 \times \bar{\mu}(l,k) + \bar{\lambda}(l,k)} \quad (16)$$

其中， $\bar{\bullet}$  代表該變數之平均值。而分層地層下陷量之變異數則可以下式表示：

$$\begin{aligned} Var[\Delta s(l,k,t)] = & \left[ \frac{\rho_w \times g \times B}{2\bar{\mu}(l,k) + \bar{\lambda}(l,k)} \right]^2 \times Var[G(l,k,t)] + \\ & \left\{ \frac{2 \times \rho_w \times g \times B \times \bar{G}(l,k,t)}{[2\bar{\mu}(l,k) + \bar{\lambda}(l,k)]^2} \right\}^2 \times Var[\mu(l,k)] + \\ & \left\{ \frac{\rho_w \times g \times B \times \bar{G}(l,k,t)}{[2\bar{\mu}(l,k) + \bar{\lambda}(l,k)]^2} \right\}^2 \times Var[\lambda(l,k)] \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $G$  之平均值與變異數依據式(15)，可以如下型態表示：



$$\overline{G}(l, k, t) \left\{ \begin{array}{l} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t E[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} E[\beta(l, k, j, t-i)]Q(i, j) \\ \text{if } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t E[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} E[\beta(l, k, j, t-i)]Q(i, j) \geq 0 \\ = 0 \\ \text{if } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t E[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} E[\beta(l, k, j, t-i)]Q(i, j) < 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\text{Var}[G(l, k, t)] \left\{ \begin{array}{l} = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t \text{Var}[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q^2(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} \text{Var}[\beta(l, k, j, t-i)]Q^2(i, j) \\ \text{if } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t E[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} E[\beta(l, k, j, t-i)]Q(i, j) \geq 0 \\ = 0 \\ \text{if } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t E[\beta(l, k, j, t-i+1)]Q(i, j) - \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^{t-1} E[\beta(l, k, j, t-i)]Q(i, j) < 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

### 3.3 單位響應係數不確定性分析

本研究利用響應矩陣法建構地下水優化模式，而單位響應係數可視為當抽水量為一單位時之水頭洩降量，因此其亦為含不確定性地質參數之函數，故亦具有相當程度之不確定性存在。本研究中用以計算單位響應係數之大區域地下水超抽導致地層下陷模式(Tsai, 2001)中，單位響應係數與水力傳導係數及比儲水係數有關，根據 Tung (1986)之研究，比儲水係數的改變對水頭洩降量之影響很小而幾可忽略，因此本研究假設單位響應係數之不確定性僅來自於水力傳導係數之不確定性。本研究中分析單位響應係數不確定性之步驟為：

- (1) 利用二階定常性(second-order stationarity)(Wagner and Gorelick (1989), Mylopoulos et al. (1999))理論分析水力傳導係數之空間變異性。
- (2) 利用特徵拆解法(spectral decomposition)配合步驟(1)所求得之參數空間變異性，將 m 個模擬區域格網點上含空間關聯性之水力傳導係數轉換為不具關聯性之 m 個隨機變數，該隨機變數並為標準常態分布。

- (3) 採用 LHS 統計取樣法，對該  $m$  個隨機變數取樣  $n$  組，藉由反轉換將該隨機變數轉換回水力傳導係數。
- (4) 利用大區域地下水超抽導致地層下陷模式，配合步驟(3)所取樣之  $n$  組資料，計算  $n$  組之單位響應係數，繼而利用此  $n$  組資料推估單位響應係數之樣本平均值(sample mean)與樣本變異數(sample variance)，即式(12)與式(13)中之  $E[\beta(l,k,j,n-i+1)]$  與  $Var[\beta(l,k,j,n-i+1)]$ 。

### 3.4 機率優化模式求解方法

本章所推導之機率優化模式由於地層下陷量之計算式為一在原點不連續之函數，因此此優化模式為一不連續最佳化問題(nonsmooth optimization)，儘管已有很多種解此類最佳化問題之演算法發展出來，然而其計算相當費時，具有不易收斂之現象，因此可藉由增加二進位變數之方法，將原本之不連續最佳化模式轉變為混合整數非線性規劃(mixed integer nonlinear programming, MINLP)。

本研究中採用 branch and bound 方法(Floudas, 1995)來求解機率優化模式，而為了避免求得之最佳解並非是絕對最佳值(global optimal)，必須更改不同的起始猜值重複求解 MINLP，再比較何者為最佳值。

## 第四章 模式驗證

### 4.1 驗證案例區域概述與優化模式設定

考慮一如圖 4-1 所示，具有三個抽水井 A、B 與 C 之地下水系統。根據其水文地質參數之差異，該地下水系統又可概分為三個子區域 I、II 與 III，且每一子區域皆為等向(isotropic)且均質(homogeneous)。該地下水系統之格網點分布以及邊界條件之設定如圖 4-1 所示，而每一子區域相關地質參數之平均值與變異數則如表 4-1 所示。其中比儲水係數與含水層厚度之變異數為零，概因為本研究所建立之機率優化模式中將此二參數視為不具變異性之參數，此假設之合理性將於下一節敏感度分析中加以驗證。

今考慮一個管理期而其時間為一年，在不違背給定之限制條件下，目標函數為求取最佳抽水量，亦即三口井抽水量之和為最大。而限制條件則限制於一年之管理期末刻時，模擬區域內抽水井 A、B 與 C 處之水位洩降量與地層下陷量不得超過 10 公尺與 2 公分。

### 4.2 敏感度分析

利用單因子敏感度分析，吾人可以評估影響地層下陷量之各參數其影響程度，繼而忽略影響程度很小的參數其不確定性因素。本研究中可能影響地層下陷量之參數包括水力傳導係數、比儲水係數、拉梅常數以及地層厚度，於本案例在固定抽水量之情形下，各參數先假設為基值(base value)並計算地層下陷量後，再逐次改變其中一參數之值，其餘參數則維持基值，並利用地層下陷模式計算相對應之地層下陷量。表 4-2 所示為敏感度分析所用之參數值，其中參數基值之意義為其平均值，上邊界與下邊界分別代表基值增加 50%與減少 50%之值。假設此地下水系統中井 A 與井 C 之抽水量皆為零，而抽水井 B 則為 1.0 CMS，利用地層下陷模式計算一年後井 B 處之地層下陷量，圖 4-2 所示為敏感度分析結果，此圖

又稱為龍捲風圖(tornado diagram)，由圖中可看出，當全部之參數皆為基值時，地層下陷量為 2.2 公分，而水力傳導係數與拉梅常數之改變對地層下陷量之影響較大，尤其是水力傳導係數，當其值由上邊界值(基值增加 50%)改變至下邊界值(基值減少 50%)時所造成之地層下陷量相差達 2.9 公分，而比儲水係數與地層厚度對地層下陷量之影響則非常微弱而幾可忽略。

本研究僅將水力傳導係數與拉梅常數視為具有不確定性因素參數之假設，可藉由本驗證案例之敏感度分析得到驗證。

### 4.3 機率優化模式計算結果驗證與分析

根據 4.1 節之模擬區域概述與優化模式設定，吾人可利用機率優化模式算出在此案例中，最佳抽水量與給定可靠度間之關係，詳細之計算結果如表 4-3 與圖 4-3 所示。由計算結果可看出，隨著給定可靠度之增加，最佳抽水量亦隨之減少，圖 4-3 中兩點間之數值代表其斜率之絕對值，亦即每增加 1%可靠度所造成最佳抽水量之減少量。由圖 4-3 中可明顯看出，當給定可靠度超過 95%時，其斜率變化較大，因此當應用機率優化模式於實際案例之模擬，若規劃目標要求極高之可靠度時，給定可靠度必須審慎且仔細的訂定，因為在高可靠度之規劃下，增加一點點之可靠度即會造成最佳抽水量之大量減少，從而導致可利用之水資源大幅降低。

機率優化模式計算結果之驗證，並無法和定率優化模式之驗證流程一樣採用試誤法來進行，本研究中利用 post-optimality 之觀念配合 LHS 取樣法(post-optimality LHS simulation based)以驗證模式之正確性，其步驟如下所述：

- (1) 利用 LHS，針對水力傳導係數與拉梅常數進行取樣，取樣方法則如同 3.3 節中之步驟(3)，在此對其各取樣 1000 組資料。
- (2) 將前述 1000 組資料以亂數排序後，配合機率優化模式求出之最佳抽水

量(表 4-3)，執行地層下陷數值模式 1000 次，如此將可得到井 A、井 B 與井 C 處於一年後之水頭洩降量與地層下陷量各 1000 組。

步驟(2)中本研究採用當給定可靠度為 90%與 99%時之最佳抽水量。利用上述二步驟求出 1000 組之水頭洩降量與地層下陷量後，吾人即可以此對機率優化模式作驗證之行為，而本研究所建立之機率優化模式共有三部分需作驗證，分別詳述如下：

- (1)水頭洩降量與地層下陷量統計特性之驗證：本研究所發展之機率優化模式係利用一階變異數分析法計算水頭洩降量與地層下陷量之平均值與標準差(詳見 3.2 節)，表 4-4 所示為在最佳抽水量之下(90%與 99%可靠度)，水頭洩降量與地層下陷量之平均值與標準差，其中 FOVE 代表利用一階變異數分析法，而 LHS 則為前述 post-optimality 驗證步驟所得 1000 組資料之平均值與標準差。由表 4-4 可發現，一階變異數分析法計算之平均值與標準差與驗證資料極為接近，亦即本研究使用一階變異數分析法計算水頭洩降量與地層下陷量之平均值與標準差是合理的。
- (2)可靠度之驗證：在決定了給定可靠度與允許之水頭洩降量和地層下陷量後，吾人可以利用所發展之機率優化模式計算最佳抽水量，然在最佳抽水之情況下，水頭洩降量與地層下陷量不超過允許值之實際可靠度(actual reliability)是否不低於給定可靠度則必須加以驗證。考慮等號成立時之限制條件(active constraint)，於此案例中為井 A 與井 B 處之水頭洩降量限制條件以及井 C 處之地層下陷量限制條件，則吾人可以利用前述 post-optimality 驗證步驟所得 1000 組資料分析實際可靠度。表 4-5 與表 4-6 所示分別為當給定可靠度為 90%與 99%時，井 A 與井 B 處超過允許水頭洩降量(10 公尺)之資料組數以及井 C 處超過允許地層下陷量(2 公分)之資料組數。由表中可看出，實際可靠度非常接近給定可靠度，兩者差最多時為表 4-6 中井 A 處之可靠度，而其亦僅差 2.2

%，由以上結果可驗證本研究所發展之機率優化模式可確實反應因為地質參數之變異性所造成水頭洩降量與地層下陷量之不確定性，並提供可信賴之最佳抽水量。

### (3) 地層下陷量為常態分布假設之驗證：

如 3.1 節所述，由於地質參數完整實際資料之缺乏，其可視為一具有不確定性之隨機變數，而地層下陷量為地質參數之函數，故地層下陷量亦為隨機變數且具有其機率分布型態。而在 3.1 節中，吾人假設地層下陷量之機率分布型態為常態分布藉以完成機率優化模式之建構，此假設之合理性將在此加以驗證。

地層下陷量限制條件等號成立之情況僅發生在井 C 處，故吾人將針對井 C 處之地層下陷量機率分布作一驗證。利用前述 post-optimality 驗證步驟於井 C 處所得 1000 組地層下陷量資料配合 Kolmogorov-Smirnov 常態分布檢定(K-S test)，在給定可靠度為 90%與 99%下其  $p$ -value 分別為 0.15 及 0.118，一般而言， $p$ -value 大於 1 代表虛無假設(null hypothesis)是可以接受的，而此處之虛無假設即代表地層下陷量為常態分布之假設。圖 4-4 與圖 4-5 所示分別為當給定可靠度為 90%與 99%時，井 C 處 1000 組地層下陷量資料之直方圖(histogram)，圖中之實線代表常態分布曲線(normal curve)，而由圖 4-4 與圖 4-5 亦可驗證地層下陷量之機率分布確實可以常態分布假設。儘管藉由 K-S 檢定以及直方圖之繪製，吾人可以驗證地層下陷量為常態分布假設之合理性，然越接近常態分布曲線之兩端(tail)，常態分布之假設則可能變為不太合理，若給定可靠度接近 100%，則此情形將不可忽略。圖 4-6 與圖 4-7 所示分別為當給定可靠度為 90%與 99%時，井 C 處地層下陷量之理論累積常態分布曲線(theoretical CDF)，其中理論累積常態分布曲線為圖中之實線，乃利用由 1000 組地層下陷量資料所計算之平均值與標準差所繪製而成，其兩側之虛線則代表 95%之信賴區間，而由 1000 組地層下陷量資料則可構成實際累積機率分

布函數，即為圖中由 1000 個資料點組成之線條。由圖 4-6 與圖 4-7 可知，在地層下陷量之累積機率小於 99% 時，實際曲線皆位於 95% 之信賴區間內，甚或與理論曲線重合，然累積機率超過 99% 時，其資料點落於理論累積常態分布曲線 95% 之信賴區間外，亦即當給定可靠度超過 99% 時，地層下陷量為常態分布之假設可能並不適用，然根據前述本案例之計算結果可知，當給定可靠度超過 95% 時，再增加一點點之可靠度將會造成最佳抽水量之大幅降低，於實際應用上，鮮少會考慮超過 99% 之可靠度，概因為以大幅降低之最佳解以換取些微之可靠度增加並不值得。藉由以上之分析，吾人可以驗證，當給定可靠度小於 99% 時，地層下陷量之機率密度函數假設為常態分布是合理的。

## 第五章 濁水溪沖積扇之應用模擬

本研究所建構考量地層下陷之機率地下水優化模式，其模式之正確性以及應用方式，已於前章中利用驗證案例加以說明，本章將利用所建構之優化模式應用於濁水溪沖積扇地區，並針對研擬之抽水方案進行最佳化分析，以顯示本研究所發展之優化模式應用於實際案例之可行性，其結果亦可初步作為該區域地下水抽取管制策略研擬之參考。

### 5.1 濁水溪沖積扇區域概述

#### 5.1.1 區域概述

濁水溪沖積扇位於臺灣西部海岸之中部地區，涵蓋彰化縣與雲林縣，是臺灣本島最大之沖積扇，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，面積約為 1700 平方公里，約佔濁水溪流流域面積的百分之六十。地勢呈東高西低之平緩地形，除東邊斗六丘陵與八卦山脈外，地表平均高程介於 10 公尺至 55 公尺間。

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。雨量相當充沛，但在時間和空間分布上非常不平均。一年中乾、濕季分明，雨量集中在五月至九月，降雨量約佔年雨量之八成，十月至翌年四月為明顯的乾季。年平均雨量從扇頂的 2000 公釐向海岸地區遞減至 1000 公釐至 1200 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 條細流均發源於台地或平原地帶。圖 5-1 所示為濁水溪沖積扇區域圖。



### 5.1.2 地質概況與地質分層

濁水溪沖積扇之上游多為礫石層，而下游多為砂層或泥層，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。中下游丘陵及平地區域在地表為現代沖積層，次為台地礫岩層，下為頭嵙山礫石層，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。更深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。各含水層在上游段岩性均屬礫石，並且合而為一，愈往下游分層則愈明顯，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。

### 5.1.3 地下水使用與地層下陷概況

由於濁水河流域河川含砂量太大，使得興建水庫在經濟上及實際上均不可行，因此水源供應上不免偏重於地下水開發。自民國六十年代後期起，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，今後對於地下水的依賴，可能有增無減。根據嘉義農業技術學院沈向白教授之普查結果顯示，雲林縣全縣民井達近十萬口，地下水開採量約 8 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)，而地下水入滲補注量約只有 4 億噸。表 5-1 所示為彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表，表 5-2 所示則為各鄉鎮市之年入滲表。表 5-3 所示則為彰雲地區有登記之抽水井數及其現況抽水能力。

根據水利處民國 87 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，自民國 64 起至 84 年止，最大累積下陷量達 155 公分，而民國 84 年至 86 年間之下陷量亦有 32 公分。另外，大城地區自民國 64 年至 86 年止，最大累積下陷量也達 108 公分之多，且民國 84 年至 86 年間也有 40 多公分之下陷量產生。對於雲林地區地層下陷量，根據經濟部水資源局民國 87 年「地層下陷水準檢測—雲林縣沿海地區」報告中指出，由民國 85 年至 87 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，若分析民國 81 年 8 月至 87 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。

#### 5.1.4 地下水管制區與嚴重地層下陷區

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：

A、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。

B、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尺以上。

(4)地面標高在五公尺以下。

C、零分以下者列入管制區。

D、以鄉鎮(區)為管制單位。

彰雲地區共有 45 個鄉鎮市，而根據上述之劃分原則，目前彰化地區計有六個鄉鎮被列入地下水管制區，分別是伸港鄉、線西鄉、鹿港鎮、福興鄉、芳苑鄉以及大城鄉。而雲林地區則十個鄉鎮被列入地下水管制區，分別是麥寮鄉、臺西鄉、四湖鄉、口湖鄉、東勢鄉、崙背鄉、褒忠鄉、元長鄉、北港鄉以及水林鄉。圖 5-2 及圖 5-3 所示分別為彰化及雲林地區地下水管制區位置圖。

經濟部水資源局曾於民國 87 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：

1. 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裡條件。
2. 地層下陷累積總量：鄉鎮內地層下陷累積總量大於五十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。
3. 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。根據上述標準，目前彰雲地區被列入嚴重地層下陷區之鄉鎮市計有彰化縣大城鄉以及雲林縣之麥寮鄉、台西鄉、四湖鄉及口湖鄉。

## 5.2 地層下陷數值模式設定與資料處理

如同第三章所述，單位響應係數之不確定性分析係利用 LHS 統計取樣技巧配合已開發完成之大區域地下水超抽導致地層下陷模式計算結果。有關數值模式之設定與資料處理說明如下。

### 5.2.1 地質分層與分區

根據 5.1 節所述之濁水溪沖積扇之地質概況與地質分層，再配合各阻水層在空間分佈情形，將該區域作分層(或虛擬分層)與分區，如圖 5-4 與圖 5-5 所示。其中由於實測資料之缺乏，分層之地層厚度隱含不確定性於其中，然根據前章模式驗證之敏感度分析，地層厚度之不確定性並不會對地層下陷量之計算有顯著之影響，因此本研究於濁水溪沖積扇之應用上，將視分層地層厚度為已知且不具不確定性之參數，而其值則依據本研究於第一年度中，以定率地下水優化模式應用於濁水溪沖積扇時所採用之分層地層厚度。

### 5.2.2 水力傳導係數與拉梅常數之給定

利用 LHS 對水力傳導係數與拉梅常數進行取樣時，必須知道其統計特性，包含平均值與標準差，嚴謹的地質參數平均值與標準差之推估，必須藉由實測資料配合最大概似法求得，然實測之水力傳導係數非常缺乏，並無法以嚴謹之推估方式推求其平均值與標準差。本研究假設位於同一地質分區分層內之格網點，其地質參數之平均值與標準差皆相等(二階定常性假設)，水力傳導係數與拉梅常數之平均值則如同地層分層厚

度，採用本研究於第一年應用定率優化模式於濁水溪沖積扇時所設定之值，而參數標準差之推估則採以下方法，以使 LHS 取樣時能涵蓋參數可能之變化範圍。

根據秦啟文等(2000)之研究指出，濁水溪沖積扇含水層水力傳導係數之變化範圍如表 5-4 所示，其中扇頂代表地質分區之第四區，扇央代表地質分區之第二與第三區，而扇尾則代表地質分區之第一區。將各地質分區不同含水層水力傳導係數變化範圍之兩端邊界數值取自然對數(水力傳導係數為對數常態分布)，則此二數值即為對數水力傳導係數(log-hydraulic conductivity)之邊界，由於對數水力傳導係數為常態分布，則本研究假設對數水力傳導係數之標準差即為此兩端邊界數值之差除以六，亦即有 99.74%之機率 LHS 取樣之資料會涵蓋水力傳導係數變化範圍。

根據以上所述，本研究中各分層與分區地質參數之給定如表 5-5 所示。其中拉梅常數與阻水層水力傳導係數之標準差則為假設之數值。

### 5.2.3 抽水井位置及分層抽水比例

由於濁水溪沖積扇地區抽水井數量非常多，而其詳細之個別抽水井位置亦未於文獻中記載，且相關研究報告及文獻中對於抽水量之探討皆以鄉鎮市為單元，因此模式於抽水井之處理上亦以鄉鎮市為單元，平均分配該鄉鎮市之抽水量於該鄉鎮市之所有格網點上，例如若某一鄉鎮抽水量為 10 CMS，而該鄉鎮包含 10 個格網點，則每一格網點均抽水 1 CMS。而各鄉鎮之分層抽水比例則如表 5-6 所示。

### 5.2.4 邊界條件處理

模擬區域之邊界條件設定，將北邊邊界(烏溪)、西邊邊界(海岸線)、東邊邊界(斗六丘陵與八卦山脈)以及南邊邊界(北港溪)皆給定為零流邊界。計算網格之大小為 2 公里之正方形，其模擬區域邊界與網格圖如圖

5-6 所示。另外，假設含水層三之下邊界為一不透水且固定之岩盤。

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。

### 5.3 機率優化模式設定與資料處理

在應用機率優化模式於濁水溪沖積扇前，吾人必須決定管理期之長度、觀測點之數量與位置以及各觀測點允許之地層下陷量上限值(即 3.1 節式(3)中之 $\Delta s^*$ )。本研究係考慮穩定狀態，模擬時間為 1 年(管理期距為 1 年)之情形。

而在觀測點之選取上，濁水溪沖積扇模擬範圍約 4480 平方公里，格網大小為 2 公里×2 公里，共有 28×40 個格網點，扣除不位於濁水溪沖積扇內之外部點後，尚約有 600 個格網點，若全部約 600 個格網點皆設為觀測點，不僅對結果分析增加其繁瑣度，亦會造成優化模式限制式過多，導致計算困難的缺點。在觀測點之選取上本研究採以下流程進行之：

- (1) 依據表 5-5 之參數設定，利用 LHS 對水力傳導係數與拉梅常數取樣 100 組資料。
- (2) 令一個鄉鎮市之抽水量為 1 CMS，其餘鄉鎮市為零，利用步驟(1)所得之 100 組地質參數資料配合執行地層下陷數值模式 100 次，模擬時間為 1 年，計算模擬區域內每一格網點之地層下陷量。
- (3) 將各格網點之 100 組地層下陷量取平均後，找出下陷量最大之點，即為一個觀測點。
- (4) 重複步驟(2)與步驟(3)45 次直到 45 個鄉鎮市皆抽過 1CMS 地下水，找出因為各鄉鎮市抽 1 CMS 地下水而造成地層下陷量最大之格網點。

重複執行步驟(2)與步驟(3)於不同之鄉鎮市可能會找出相同之格網點，經由以上步驟後，本研究所決定之觀測點數目為 41 個，皆為地層下陷量最受各鄉鎮市抽水所影響之點，圖 5-7 所示為 41 個觀測點於模擬區域之分布圖。

各觀測點於一年之管理期末時之允許地層下陷量依據觀測點所在位置有所不同，而其制定標準亦因不同之決策方案而有所不同。本研究對允許地層下陷量之制定則依照以下步驟為之：

- (1) 入滲之考量：由於地表水之入滲會對地下水系統產生補注之效用，導致地下水位的回升，進而減緩地層下陷發生之情形，因此合宜之地層允許下陷量必須兼顧入滲之考量。根據表 5-2 所列之各鄉鎮市年入滲量，配合前述經由 LHS 取樣所得之 100 組地質參數，吾人可以利用地層下陷數值模式得到 100 組各觀測點於一年後因為入滲之影響所減少之地層下陷量，取此 100 組中最小前 10 組之資料並加以平均，吾人可得各觀測點在考慮入滲之影響下，合宜之地層下陷允許值。
- (2) 觀測點位置不同之考量：經由前述步驟(1)，吾人可初步得到各觀測點在考慮入滲之影響下，合宜之地層下陷允許值，然根據各觀測點所在位置之不同，則可進行適度之增加，以使能運用的地下水資源增加。本研究依據各觀測點所在位置是否屬於地下水管制區或嚴重地層下陷區，來決定允許地層下陷量之調整方式。依據 5.1.3 節中濁水溪沖積扇現況地層下陷資料之分析，非地下水管制區之下陷速率已逼近每年 5 公分，為了減緩其下陷速率，非地下水管制區於 1 年管理期末之允許下陷量必需小於 5 公分，再根據第一年報告中 5.5 節驗證結果，優化模式與地層下陷數值模式應用於濁水溪沖積扇地區時，兩者間計算之誤差約在 $\pm 1-2$ 公分左右，因此位於非地下水管制區之觀測點，其允許地層下陷量為步驟(1)所得之允許值再加 3 公分，亦即允許位於非地下水管制區之觀測點於一年之管理期末時地層下陷量最多可以達到 3 公

分。再根據 5.1.3 節之資料，地下水管制區過去幾年之下陷速率與累積下陷量皆較非地下水管制區為大，但該區水力傳導係數較低，地下水位回升不易，且因濱海的特性而較易因地層下陷而帶來地下水體之破壞，故位於地下水管制區之觀測點其允許地層下陷量為步驟(1)所得之允許值再加 1 公分。至於位於嚴重地層下陷區之觀測點，則維持步驟(1)所得之允許值不再調整，亦即該區之觀測點不允許地層下陷之情形發生。表 5-7 所示為 41 個觀測點其所在位置、分區、考慮入滲之允許地層下陷量以及經由步驟(2)所調整最終之允許地層下陷量。

#### 5.4 機率優化模式應用結果

根據民國八十八年六月三十日發布之台灣省地下水管制辦法，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，而由於各抽水井實際之現行抽水量上限值並無詳細資料記載，因此本研究中假設各鄉鎮市之抽水量上限值(即 3.1 節式(4)中之  $Q^{Upper}$ )等於現行之各鄉鎮年抽水量，如表 5-1 所示。

依據前節優化模式之設定，在管理期為一年，41 個觀測點於一年管理期末時，地層下陷量不超過表 5-7 所給允許值之可靠度必須大於或等於給定可靠度下，本研究考慮三個不同之方案以求取濁水溪沖積扇之最佳抽水量，亦即最大化 45 個鄉鎮市抽水量之和。而此三個方案則分述如下：

- (1) 為了避免地下水資源過度開採之可能性，本方案亦限定非位於地下水管制區之鄉鎮市，其抽水量亦不得超過該鄉鎮現行之抽水量。
- (2) 適度的增加非位於地下水管制區之鄉鎮市其抽水量上限，以探討是否有多餘之地下水資源可供開採。本方案令非位於地下水管制區之鄉鎮



市其抽水量上限為現行抽水量之 150%。

- (3) 此方案如同前一個方案，旨在探討開放非地下水管制區鄉鎮市抽水量上限，是否可合宜的開採更多之地下水資源，於此方案中抽水量上限由前一方案之增加 150% 調高至 200%，惟位於地下水管制區內之鄉鎮市其抽水量上限還是不得超過其現行抽水量。

前述三個方案中，各觀測點地層下陷量不超過允許上限值(表 5-7)之給定可靠度依據觀測點所在位置而有所不同。本研究中位於嚴重地層下陷區之觀測點，其給定可靠度要求為 95%，而位於地下水管制區內但不屬於嚴重地層下陷區之觀測點其給定可靠度則要求為 90%，如此之差別肇因於已面臨嚴重地層下陷災害之地區，必須要求較高之可靠度，以避免因為不確定性影響而造成不預期地層下陷災害之發生。至於非位於地下水管制區之觀測點，由於其並未面臨嚴重之地層下陷災害，或其地表高於海平面較不容易因為地層下陷災害而影響地下水體，故其可靠度之要求可小於前二者(95%與 90%)。

根據以上所述，圖 5-8 所示為此三個方案其最佳抽水量與非地下水管制區觀測點給定可靠度之關係圖。表 5-8 至表 5-10 所示分別為方案(1)、方案(2)與方案(3)中，非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%，在最佳抽水量下各鄉鎮市之詳細抽水量。觀察圖 5-8 可知，隨著非地下水管制區觀測點給定可靠度之提高，最佳抽水量亦隨之減少，如前所述，非地下水管制區較無面臨嚴重地層下陷災害之危險，因此在其給定可靠度已達 80%之情形下，藉由本研究之分析，可提供相關單位決策者評估是否值得犧牲約 0.5 CMS(0.158 億噸/年)之最佳抽水量來換取非地下水管制區增加 10%之可靠度。而圖 5-8 中在同一給定可靠度標準下，方案(3)之最佳抽水量大於方案(2)，而方案(2)則大於方案(1)，由此顯示提高非地下水管制區內鄉鎮市抽水量上限，可適度提高濁水溪沖積扇之最佳抽水量，且不致產生地層下陷危害。

根據秦啟文等(2000)之研究，濁水溪沖積扇現況年用水量為31億立方公尺，而地下水源供應了9億立方公尺。考量集集共同引水計劃完工後，可供應濁水溪沖積扇地區每日20萬噸公共用水量，豐水期可供應工業用水每日86萬噸(資料來源：經濟部水利處中區水資源局)，豐水期以5月至9月計算，則集集共同引水計劃約可供應濁水溪沖積扇地區每年2.0億立方公尺之用水。在不考慮規劃中而尚未完成之水資源工程(湖山水庫、麥寮人工湖與濁水溪西螺河段伏流水工程)之情形下，濁水溪沖積扇地區每年尚需7.0億噸之地下水需求量。觀察圖5-8以及表5-8至表5-10可發現，依據表5-7所設定之允許地層下陷量，即使開放非地下水管制區之鄉鎮市其抽水上限可提高200%，且非地下水管制區給定可靠度為80%，其最佳抽水量亦僅有1.35億噸/年，遠低於7.0億噸之年需求量，此現象主要為兩個原因所造成，分別為(1)水力傳導係數之變化範圍大，因此所推求之標準差亦大，導致最佳抽水量因為地質參數不確定性過高而有所降低。(2)嚴格要求嚴重地層下陷區與地下水管制區之給定可靠度，如此較為保守之設定亦導致最佳抽水量之降低。

提高最佳抽水量主要有兩種途徑，其一為調高允許地層下陷量，然而濁水溪沖積扇地區目前已面臨地層下陷災害之危機，提高允許地層下陷量將無助於減緩地層下陷之勢態。第二種途徑即為降低給定可靠度之標準，亦即地層下陷量將會有較高之風險超過允許地層下陷量。

根據第三章式(7)之推導，當給定可靠度為50%時代表忽略地質參數變異性之影響，而僅以平均值作計算，如此則與定率優化模式類似。表5-11所示為不同方案下，當每一觀測點之給定可靠度皆為50%時之最佳抽水量。觀察表5-11可知，隨著非地下水管制區之鄉鎮市其抽水量上限由100%現行抽水量開放至200%，最佳抽水量由3.193億噸/年增加到3.741億噸/每年。本研究於第一年度應用定率優化模式於濁水溪沖積扇之模擬上，曾計算出在不考慮入滲之影響下，當開放非地下水管制區鄉鎮

市抽水量上限至現行抽水量之 150% 時，最佳抽水量為 6.59 億噸/年，惟亦須補注 2.94 億噸/年之水於地下水系統中(淨抽水量 =  $6.59 - 2.94 = 3.65$  億噸/年)，以保持嚴重地層下陷區不發生地層下陷、地下水管制區以及非地下水管制區年地層下陷量不超過 1 公分及 3 公分之限制條件(詳見第一年度報告之第五章)。而本例中由於允許地層下陷量已考慮入滲之影響，並不須對地下水系統進行補注，其最佳解 3.55 億噸/年相當接近前述以定率優化模式計算所得之淨抽水量。

藉由以上之分析，吾人可以歸納出，當給定可靠度皆為 50%，亦即不考慮地質參數變異性時，機率優化模式計算結果與定率優化模式接近，而在此情形下，若以嚴重地層下陷區不得再下陷，而其餘地區之地層下陷速率減緩為目標，則濁水溪沖積扇之年安全出水量約為 3.5 億噸，尚遠低於 7.0 億噸之需求量。

## 第六章 結論

本研究子題之主要目標在發展一套考量地層下陷量之地下水優化模式，藉由所發展之模式，將可在已發生地層下陷之地區建立有效的機制及程序來管理地下水之使用，及在尚未有地層下陷的地區，發展有效之地下水資源開發策略，以提供決策者對地下水資源開發與地下水抽取等相關管理策略制定之參考與依據，達到水資源永續利用、經營及發展之目的。

本研究子題今年度之工作項目在建立機率地下水優化模式，而模式建立與驗證之流程圖如圖 6-1 所示，利用響應矩陣法與一維土體位移代數式建立考量地層下陷量之地下水優化模式，進而以一階變異數分析法，推導水頭洩降量與地層下陷量之不確定性。而單位響應係數部分則利用 LHS 統計取樣法與空間變異數分析配合大區域地下水超抽導致地層下陷模式，分析因為水力傳導係數不確定性之影響所造成之不確定性，從而建立以可靠度為考量之機率地下水優化模式。

待模式建立後，本研究以一假設之案例驗證模式之合理性與正確性。藉由單因子敏感度分析之結果，吾人可歸納出，在機率優化模式中，僅有水力傳導係數與拉梅常數會對限制式造成明顯之不確定性，而土層厚度與比儲水係數則影響甚微。經由以上分析，可大幅降低機率優化模式不確定性分析過程之時間與複雜度。

於優化模式計算結果驗證部分，本研究以最佳抽水量配合 LHS 與地層下陷數值模式，證明地層下陷量為常態分布假設之合理性以及一階變異數分析法計算地層下陷量不確定性之正確性。

待模式驗證後，本研究應用機率優化模式於濁水溪沖積扇地區進行實際之模擬，而依據應用結果可歸納下列幾點結論：

1. 藉由三個方案之比較，在符合地層下陷量限制要求下，提高非地下水

管制區內鄉鎮市之抽水量上限值，可適度提高濁水溪沖積扇之最佳抽水量，顯示非地下水管制區內之地下水資源雖不能全然滿足濁水溪沖積扇地下水需求量，但可能尚有資源可供開採。

2. 非地下水管制區較無面臨嚴重地層下陷災害之危險，因此在其給定可靠度已達 80% 之情形下，藉由本研究之分析，可提供相關單位決策者評估是否值得犧牲約 0.5 CMS(0.158 億噸/年) 之最佳抽水量來換取非地下水管制區增加 10% 之可靠度。
3. 濁水溪沖積扇地下水年需求量約 9.0 億噸，扣除集集共同引水計畫約可供應 2.0 億噸之用水，尚須 7.0 億噸之地下水需求量。然根據應用結果顯示，即使當各觀測點之給定可靠度皆僅設為 50% 時，在兼顧嚴重地層下陷區不得再下陷，而其餘地區之地層下陷速率減緩之目標下，濁水溪沖積扇之地下水年安全出水量亦僅有 3.5 億噸，遠低於其需求量，而若提高給定可靠度，亦即要求更低之地層下陷災害發生風險，則安全出水量將降至約 1.0 億噸(圖 5-8 方案(1))，然根據秦啟文(2000) 之研究，濁水溪沖積扇現況年地下水抽取量約為 7.0 億噸至 10.0 億噸，由此顯示目前濁水溪沖積扇尚面臨地下水超抽之問題。
4. 本研究藉由優化模式合理的規劃地下水之抽取原則，以減緩或防杜地層下陷嚴重之情形。惟濁水溪沖積扇區域，未合法登記之私有抽水井數量非常多，其違法之抽水不僅使相關單位難以規範，更可能增加地層下陷之速率，因此加強相關單位查緝私井之動作並配合地下水優化模式，當可更有效的解決濁水溪沖積扇地下水過度超抽、地層下陷嚴重之問題。

## 參考文獻

1. 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。
2. 蔡東霖，「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，2001。
3. Chang C. H. et al., “Sensitivity and Uncertainty Analysis of a Sediment Transport Model: A Global Approach”, *Journal of Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7, pp. 299-314, 1993.
4. Danskin W. R., “A Policy Evaluation Tool: Management of a Multiaquifer System Using Controlled Stream Recharge”, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 11, pp.1731-1747, 1985.
5. Datta B., Dhiman S. D., “Chance-Constrained Optimal Monitoring Network Design for Pollutants in Ground Water”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp.180-188, 1996.
6. Floudas C. A., “Nonlinear and Mixed-Integer Optimization”, Oxford University Press, 1995.
7. Morgan D. R. et al., “Aquifer Remediation Design Under Uncertainty Using a New Chance Constrained Programming Technique”, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 551-561, 1993.
8. Mylopoulos Y. A. et al., “A Stochastic Optimization Approach in the Design of an Aquifer Remediation Under Hydrogeologic Uncertainty”, *Water Resources Management*, Vol. 13, pp. 335-351, 1999.
9. Sawyer C. S., “Mixed-Integer Chance-Constrained Models for Ground-Water Remediation”, *Journal of Water Resources Planning and*

- Management, Vol. 124, No. 5, pp. 285-294, 1998.
10. Tiedeman C., Gorelick S. M., "Analysis of Uncertainty in Optimal Groundwater Contaminant Capture Design", *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 7 pp.2139-2153, 1993.
  11. Tung Y. K., "Groundwater Management by Chance-Constrained Model", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 112, No. 1, pp. 1-19, 1986.
  12. Wagner B. J., Gorelick S. M., "Optimal Groundwater Quality Management Under Parameter Uncertainty", *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 7, pp. 1162-1174, 1987.
  13. Wagner B. J., Gorelick S. M., "Reliable Aquifer Remediation in the Presence of Spatially Variable Hydraulic Conductivity: From Data to Design", *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 10, pp. 2211-2225, 1989.
  14. Yeh K. C., Tung Y. K., "Uncertainty and Sensitivity Analysis of Pit-Migration Model", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 262-283, 1991.

表 4-1 機率優化模式驗證案例參數設定表

Parameters		Region I	Region II	Region III
水力傳導係數, $K$ (m/s)	Mean	$1.5 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$
	Variance	$2.5 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$
比儲水係數, $Ss$ ( $m^{-1}$ )	Mean	$5.3 \times 10^{-6}$	$7.0 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-5}$
	Variance	0	0	0
含水層厚度, $B$ (m)	Mean	200	200	200
	Variance	0	0	0
拉梅常數, $\mu$ ( $Nt/m^2$ )	Mean	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$
	Variance	$2.5 \times 10^{15}$	$2.5 \times 10^{15}$	$2.5 \times 10^{15}$
拉梅常數, $\lambda$ ( $Nt/m^2$ )	Mean	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$
	Variance	$2.5 \times 10^{15}$	$2.5 \times 10^{15}$	$2.5 \times 10^{15}$

表 4-2 參數敏感度分析變化範圍

	區域	水力傳導係數 $K$ (m/sec)	比儲水係數 $Ss$ (1/m)	拉梅常數 $\mu$ ( $N/m^2$ )	拉梅常數 $\lambda$ ( $N/m^2$ )	含水層厚度 $B$ (m)
下邊界	I	$0.75 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^8$	$0.5 \times 10^9$	100.0
	II	$1.0 \times 10^{-4}$	$3.5 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	100.0
	III	$2.5 \times 10^{-4}$	$0.7 \times 10^{-5}$	$0.5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^8$	100.0
基值	I	$1.5 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^9$	200.0
	II	$2.0 \times 10^{-4}$	$7.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$	200.0
	III	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$	200.0
上邊界	I	$2.25 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-6}$	$7.5 \times 10^8$	$1.5 \times 10^9$	300.0
	II	$3.0 \times 10^{-4}$	$10.5 \times 10^{-6}$	$7.5 \times 10^8$	$7.5 \times 10^8$	300.0
	III	$7.5 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^8$	$7.5 \times 10^8$	300.0



表 4-3 機率優化模式驗證案例最佳抽水量計算結果

給定可靠度 (%)	$Q_A$	$Q_B$	$Q_C$	最佳抽水量 ( $Q_A + Q_B + Q_C$ )
50	0.39	0.4	0.89	1.68
60	0.36	0.38	0.86	1.6
70	0.35	0.36	0.82	1.53
80	0.31	0.35	0.79	1.45
90	0.28	0.33	0.74	1.35
95	0.27	0.31	0.7	1.28
99	0.24	0.28	0.64	1.16

表 4-4 取樣 1000 組資料驗證機率優化模式結果表

Reliability		Statistical Property	Method	Well A	Well B	Well C
90%	Drawdown (m)	Mean	FOVE	7.5	8.06	5.79
			LHS	7.52	8.03	5.78
		Standard Deviation	FOVE	1.95	1.52	0.51
			LHS	2.08	1.43	0.53
	Land Subsidence (cm)	Mean	FOVE	0.7	1.1	1.6
			LHS	0.74	1.05	1.7
		Standard Deviation	FOVE	0.2	0.2	0.3
			LHS	0.2	0.2	0.28
99%	Drawdown (m)	Mean	FOVE	6.25	6.95	5.01
			LHS	6.27	6.93	5.01
		Standard Deviation	FOVE	1.61	1.31	0.44
			LHS	1.72	1.23	0.46
	Land Subsidence (cm)	Mean	FOVE	0.6	0.9	1.4
			LHS	0.62	0.91	1.4
		Standard Deviation	FOVE	0.16	0.18	0.26
			LHS	0.17	0.18	0.25

表 4-5 Actual Reliability for Active Constraints under Specified Reliability,  
90%

Active Constraint	Drawdown		Land Subsidence
	Well A	Well B	Well C
No. of Data	1,000	1,000	1,000
No. of Data exceed maximum allowable value	120	92	118
Reliability	88%	90.8%	88.2%

表 4-6 Actual Reliability for Active Constraints under Specified Reliability,  
99%

Active Constraint	Drawdown		Land Subsidence
	Well A	Well B	Well C
No. of Data	1,000	1,000	1,000
No. of Data exceed maximum allowable value	32	13	16
Reliability	96.8%	98.7%	98.4%

表 5-1 彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表

資料來源：沈向白教授

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		

表 5-2 彰化雲林地區各鄉鎮市年入滲量表

資料來源：張良正教授

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		

表 5-3 彰化雲林地區現有抽水井數目及抽水能力表

抽水能力 (CMS)	<20	20-50	50-100	100-150	150-200	200-300	300-400	400-500	合計
彰化	8 口	2 口	9 口	8 口	5 口	40 口	3 口	0 口	75 口
雲林	41 口	22 口	65 口	147 口	183 口	114 口	9 口	3 口	584 口

表 5-4 濁水溪沖積扇含水層水力傳導係數變化範圍表

	扇頂( $10^{-3}$ m/sec)	扇央( $10^{-3}$ m/sec)	扇尾( $10^{-3}$ m/sec)
含水層一	0.03-1.94	0.01-1.79	0.04-0.44
含水層二之一	0.09-1.94	0.04-1.43	0.01-0.98
含水層二之二	0.01-1.94	0.02-1.76	0.01-0.76
含水層三	0.01-1.94	0.01-0.83	0.08-1.12

表 5-5 濁水溪沖積扇地質參數表

區	層	K (m/s)		$\mu$ (Nt/m <sup>2</sup> )		$\lambda$ (N/m <sup>2</sup> )	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
一	1	$1.5 \times 10^{-4}$	$6.24 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	2	$1.0 \times 10^{-08}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$5.0 \times 10^7$
	3	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.34 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	4	$1.0 \times 10^{-08}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$5.0 \times 10^7$
	5	$1.5 \times 10^{-4}$	$7.13 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
二	1	$2.0 \times 10^{-04}$	$2.11 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	2	$1.0 \times 10^{-08}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$5.0 \times 10^7$
	3	$2.0 \times 10^{-04}$	$1.31 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	4	$2.0 \times 10^{-04}$	$1.73 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	5	$2.0 \times 10^{-04}$	$7.28 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
三	1	$2.0 \times 10^{-04}$	$2.11 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	2	$1.0 \times 10^{-08}$	$5.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$5.0 \times 10^7$
	3	$2.0 \times 10^{-04}$	$1.31 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	4	$2.0 \times 10^{-04}$	$1.73 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	5	$2.0 \times 10^{-04}$	$7.28 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
四	1	$5.0 \times 10^{-04}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	2	$5.0 \times 10^{-04}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	3	$5.0 \times 10^{-04}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	4	$5.0 \times 10^{-04}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$
	5	$5.0 \times 10^{-04}$	$5.39 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^9$	$5.0 \times 10^7$

表 5-6 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
彰化市	.1428	.5233	.3338	麥寮鄉	.2501	.5560	.1940
鹿港鎮	.1870	.4750	.3379	崙背鄉	.2090	.6242	.1668
和美鎮	.1684	.4857	.3458	二崙鄉	.1769	.6761	.1470
線西鄉	.1840	.4647	.3514	西螺鎮	.1545	.7271	.1183
伸港鄉	.1768	.4700	.3532	莿桐鄉	.2006	.6819	.1176
福興鄉	.1864	.4978	.3158	林內鄉	.2460	.6720	.0820
秀水鄉	.1514	.5108	.3378	斗六市	.2545	.6307	.1148
花壇鄉	.1141	.5541	.3318	虎尾鎮	.1373	.7582	.1045
員林鎮	.0708	.5950	.3341	土庫鎮	.1602	.6476	.1922
溪湖鎮	.0864	.5563	.3572	褒忠鄉	.2123	.5349	.2528
田中鎮	.2408	.4429	.3163	東勢鄉	.2352	.5100	.2548
大村鄉	.0767	.5751	.3482	台西鄉	.2565	.4701	.2734
埔鹽鄉	.1586	.4989	.3425	四湖鄉	.2500	.4819	.2682
埔心鄉	.0566	.5770	.3664	元長鄉	.1683	.6166	.2151
永靖鄉	.0732	.5546	.3722	大埤鄉	.1301	.6967	.1732
社頭鄉	.1636	.4875	.3490	斗南鎮	.1780	.6847	.1373
二水鄉	.2626	.5724	.1650	古坑鄉	.3504	.5277	.1219
北斗鎮	.1648	.4884	.3469	北港鎮	.2249	.4804	.2947
二林鄉	.1390	.5749	.2861	水林鄉	.2564	.4219	.3217
田尾鄉	.1242	.5136	.3622	口湖鄉	.2501	.3868	.3631
埤頭鄉	.1365	.5543	.3092	竹塘鄉	.1778	.6134	.2088
芳苑鄉	.1571	.6006	.2423	溪州鄉	.1913	.5531	.2556
大城鄉	.1500	.5732	.2768				

表 5-7 各觀測點地層下陷量於一年管理期末之允許上限值

x	y	鄉鎮市	類別 <sup>註</sup>	考慮入滲 允許下陷量	調整後 允許下陷量	x	y	鄉鎮市	類別 <sup>註</sup>	考慮入滲 允許下陷量	調整後 允許下陷量
3	6	口湖鄉	1	4.24	4.24	17	11	斗南鎮	3	4.06	7.06
10	22	大城鄉	1	2.86	2.86	23	10	古坑鄉	3	0.09	3.09
4	15	台西鄉	1	3.47	3.47	22	25	永靖鄉	3	10.53	13.53
5	9	四湖鄉	1	5.93	5.93	17	21	竹塘鄉	3	13.34	16.34
6	19	麥寮鄉	1	1.84	1.84	22	36	和美鎮	3	3.68	6.68
13	11	土庫鎮	2	2.82	3.82	11	26	芳苑鄉	3	2.07	5.07
13	7	元長鄉	2	3.25	4.25	23	30	花壇鄉	3	4.87	7.87
4	2	水林鄉	2	3.43	4.43	23	31	花壇鄉	3	4.23	7.23
10	5	北港鎮	2	3.69	4.69	17	12	虎尾鎮	3	3.41	6.41
19	39	伸港鄉	2	3.44	4.44	19	14	虎尾鎮	3	0.10	3.10
9	14	東勢鄉	2	5.30	6.30	25	25	員林鎮	3	0.11	3.11
11	15	崙背鄉	2	6.22	7.22	25	27	員林鎮	3	1.89	4.89
16	33	鹿港鎮	2	4.24	5.24	22	26	埔心鄉	3	9.79	12.79
15	31	福興鄉	2	13.08	14.08	18	28	埔鹽鄉	3	9.88	12.88
16	36	線西鄉	2	2.86	3.86	19	22	埤頭鄉	3	10.42	13.42
26	18	二水鄉	3	0.00	3.00	20	20	溪州鄉	3	0.15	3.15
16	24	二林鄉	3	11.65	14.65	21	20	溪州鄉	3	0.08	3.08
15	18	二崙鄉	3	8.22	11.22	19	26	溪湖鎮	3	15.27	18.27
25	29	大村鄉	3	2.51	5.51	23	32	彰化市	3	3.51	6.51
17	8	大埤鄉	3	1.63	4.63	10	13	褒忠鄉	3	6.90	9.90
21	12	斗六市	3	2.91	5.91						

註：1 代表位於嚴重地層下陷區  
 2 代表位於地下水管制區  
 3 代表不屬於前兩者



表 5-8 方案(1)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%

時之各鄉鎮最佳抽水分布

彰化縣				雲林縣			
鄉鎮市	抽水量 (CMS)			鄉鎮市	抽水量 (CMS)		
	80%	85%	90%		80%	85%	90%
彰化市	0.109	0.060	0.044	麥寮鄉	0.000	0.003	0.000
鹿港鎮	0.000	0.000	0.000	崙背鄉	0.020	0.000	0.024
和美鎮	0.000	0.000	0.000	二崙鄉	0.000	0.000	0.000
線西鄉	0.008	0.010	0.008	西螺鎮	0.521	0.442	0.364
伸港鄉	0.012	0.005	0.012	莿桐鄉	0.224	0.224	0.224
福興鄉	0.050	0.009	0.022	林內鄉	0.033	0.033	0.033
秀水鄉	0.000	0.000	0.000	斗六市	0.055	0.055	0.055
花壇鄉	0.012	0.017	0.015	虎尾鎮	0.000	0.000	0.000
員林鎮	0.001	0.012	0.004	土庫鎮	0.023	0.029	0.037
溪湖鎮	0.108	0.038	0.009	褒忠鄉	0.028	0.044	0.020
田中鎮	0.121	0.121	0.121	東勢鄉	0.033	0.036	0.034
大村鄉	0.000	0.000	0.000	台西鄉	0.000	0.000	0.000
埔鹽鄉	0.008	0.128	0.110	四湖鄉	0.033	0.020	0.033
埔心鄉	0.000	0.000	0.000	元長鄉	0.000	0.000	0.000
永靖鄉	0.130	0.058	0.104	大埤鄉	0.025	0.050	0.023
社頭鄉	0.034	0.031	0.033	斗南鎮	0.137	0.072	0.079
二水鄉	0.007	0.007	0.007	古坑鄉	0.083	0.083	0.083
北斗鎮	0.272	0.218	0.171	北港鎮	0.006	0.008	0.006
二林鄉	0.062	0.070	0.062	水林鄉	0.042	0.041	0.042
田尾鄉	0.126	0.122	0.088	口湖鄉	0.003	0.008	0.003
埤頭鄉	0.129	0.109	0.095	最佳抽水量			
芳苑鄉	0.000	0.000	0.000	CMS	3.242	2.949	2.751
大城鄉	0.000	0.000	0.000				
竹塘鄉	0.000	0.000	0.000	億噸/年	1.022	0.93	0.868
溪州鄉	0.788	0.788	0.788				

表 5-9 方案(2)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%

時之各鄉鎮最佳抽水分布

彰化縣				雲林縣			
鄉鎮市	抽水量 (CMS)			鄉鎮市	抽水量 (CMS)		
	80%	85%	90%		80%	85%	90%
彰化市	0.115	0.098	0.040	麥寮鄉	0.000	0.003	0.003
鹿港鎮	0.000	0.000	0.000	崙背鄉	0.020	0.000	0.000
和美鎮	0.000	0.000	0.000	二崙鄉	0.000	0.000	0.000
線西鄉	0.008	0.008	0.008	西螺鎮	0.521	0.447	0.366
伸港鄉	0.012	0.012	0.013	莿桐鄉	0.336	0.336	0.336
福興鄉	0.051	0.065	0.025	林內鄉	0.050	0.050	0.050
秀水鄉	0.000	0.000	0.000	斗六市	0.082	0.082	0.082
花壇鄉	0.015	0.014	0.020	虎尾鎮	0.000	0.000	0.000
員林鎮	0.029	0.000	0.000	土庫鎮	0.022	0.027	0.033
溪湖鎮	0.013	0.006	0.043	褒忠鄉	0.037	0.043	0.043
田中鎮	0.182	0.182	0.182	東勢鄉	0.031	0.036	0.036
大村鄉	0.000	0.000	0.004	台西鄉	0.000	0.000	0.000
埔鹽鄉	0.022	0.000	0.094	四湖鄉	0.033	0.019	0.019
埔心鄉	0.000	0.000	0.000	元長鄉	0.000	0.000	0.000
永靖鄉	0.131	0.069	0.084	大埤鄉	0.046	0.023	0.021
社頭鄉	0.033	0.033	0.030	斗南鎮	0.109	0.108	0.082
二水鄉	0.011	0.011	0.011	古坑鄉	0.124	0.124	0.124
北斗鎮	0.231	0.177	0.127	北港鎮	0.004	0.008	0.008
二林鄉	0.064	0.076	0.072	水林鄉	0.042	0.041	0.041
田尾鄉	0.128	0.135	0.081	口湖鄉	0.003	0.008	0.009
埤頭鄉	0.143	0.076	0.090	最佳抽水量			
芳苑鄉	0.000	0.000	0.000	CMS	3.826	3.497	3.356
大城鄉	0.000	0.000	0.000				
竹塘鄉	0.000	0.000	0.000	億噸/年	1.207	1.103	1.058
溪州鄉	1.183	1.183	1.183				

表 5-10 方案(3)非地下水管制區觀測點給定可靠度為 80%、85%與 90%

時之各鄉鎮最佳抽水分布

彰化縣				雲林縣			
鄉鎮市	抽水量 (CMS)			鄉鎮市	抽水量 (CMS)		
	80%	85%	90%		80%	85%	90%
彰化市	0.116	0.066	0.091	麥寮鄉	0.000	0.000	0.000
鹿港鎮	0.000	0.000	0.025	崙背鄉	0.019	0.020	0.024
和美鎮	0.000	0.000	0.000	二崙鄉	0.000	0.000	0.000
線西鄉	0.008	0.008	0.006	西螺鎮	0.536	0.438	0.371
伸港鄉	0.012	0.012	0.011	莿桐鄉	0.448	0.448	0.448
福興鄉	0.031	0.000	0.004	林內鄉	0.066	0.066	0.066
秀水鄉	0.000	0.000	0.000	斗六市	0.109	0.109	0.109
花壇鄉	0.015	0.015	0.014	虎尾鎮	0.000	0.000	0.000
員林鎮	0.034	0.015	0.001	土庫鎮	0.023	0.028	0.037
溪湖鎮	0.037	0.062	0.000	褒忠鄉	0.037	0.036	0.020
田中鎮	0.242	0.242	0.242	東勢鄉	0.031	0.031	0.035
大村鄉	0.000	0.000	0.000	台西鄉	0.000	0.000	0.000
埔鹽鄉	0.038	0.118	0.000	四湖鄉	0.033	0.033	0.031
埔心鄉	0.000	0.000	0.000	元長鄉	0.000	0.000	0.000
永靖鄉	0.080	0.001	0.000	大埤鄉	0.073	0.048	0.021
社頭鄉	0.033	0.033	0.033	斗南鎮	0.072	0.073	0.079
二水鄉	0.014	0.014	0.014	古坑鄉	0.165	0.165	0.165
北斗鎮	0.211	0.130	0.101	北港鎮	0.005	0.005	0.006
二林鄉	0.068	0.062	0.002	水林鄉	0.042	0.042	0.042
田尾鄉	0.064	0.121	0.025	口湖鄉	0.003	0.003	0.004
埤頭鄉	0.048	0.108	0.124	最佳抽水量			
芳苑鄉	0.000	0.000	0.041	CMS	4.293	4.132	3.77
大城鄉	0.000	0.000	0.000				
竹塘鄉	0.000	0.000	0.000	億噸/年	1.354	1.303	1.189
溪州鄉	1.577	1.577	1.577				

表 5-11 各觀測點給定可靠度皆為 50%時不同方案各鄉鎮最佳抽水分布

彰化縣				雲林縣			
鄉鎮市	抽水量 (CMS)			鄉鎮市	抽水量 (CMS)		
	方案(1)	方案(2)	方案(3)		方案(1)	方案(2)	方案(3)
彰化市	0.280	0.291	0.291	麥寮鄉	0.000	0.034	0.034
鹿港鎮	0.000	0.000	0.000	崙背鄉	0.162	0.000	0.000
和美鎮	0.000	0.000	0.000	二崙鄉	0.114	0.000	0.000
線西鄉	0.047	0.047	0.047	西螺鎮	1.427	2.129	2.129
伸港鄉	0.073	0.073	0.073	莿桐鄉	0.224	0.336	0.448
福興鄉	0.149	0.154	0.154	林內鄉	0.033	0.050	0.066
秀水鄉	0.000	0.000	0.000	斗六市	0.055	0.082	0.109
花壇鄉	0.035	0.035	0.035	虎尾鎮	0.020	0.000	0.000
員林鎮	0.028	0.034	0.034	土庫鎮	0.287	0.318	0.318
溪湖鎮	0.281	0.228	0.226	褒忠鄉	0.141	0.252	0.252
田中鎮	0.121	0.182	0.242	東勢鄉	0.236	0.167	0.167
大村鄉	0.000	0.000	0.000	台西鄉	0.006	0.020	0.020
埔鹽鄉	0.564	0.522	0.523	四湖鄉	0.251	0.264	0.264
埔心鄉	0.000	0.000	0.000	元長鄉	0.000	0.000	0.000
永靖鄉	0.518	0.528	0.530	大埤鄉	0.143	0.103	0.104
社頭鄉	0.078	0.079	0.079	斗南鎮	0.631	0.693	0.691
二水鄉	0.007	0.011	0.014	古坑鄉	0.083	0.124	0.165
北斗鎮	1.251	1.350	1.306	北港鎮	0.044	0.045	0.045
二林鄉	0.178	0.550	0.550	水林鄉	0.197	0.197	0.197
田尾鄉	0.665	0.619	0.612	口湖鄉	0.055	0.052	0.052
埤頭鄉	0.356	0.505	0.506	最佳抽水量			
芳苑鄉	0.000	0.000	0.000	CMS	10.124	11.258	11.863
大城鄉	0.000	0.000	0.000				
竹塘鄉	0.598	0.000	0.000	億噸/年	3.193	3.550	3.741
溪州鄉	0.788	1.183	1.577				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
機率優化模式發展	■	■	■	■	■	■						
機率優化模式驗證與測試					■	■	■					
定率優化模式與 GIS 系統整合				■	■	■	■	■	■	■		
應用模式於實際地區之模擬							■	■	■	■	■	■

圖 1-1 預定進度甘梯圖

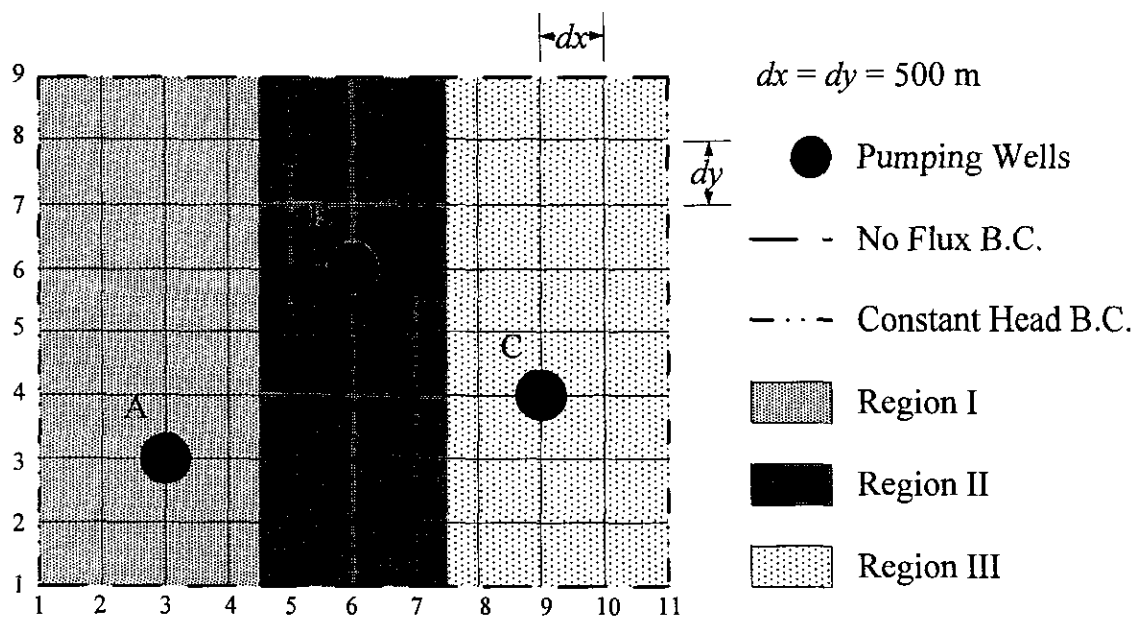


圖 4-1 驗證案例模擬區域圖

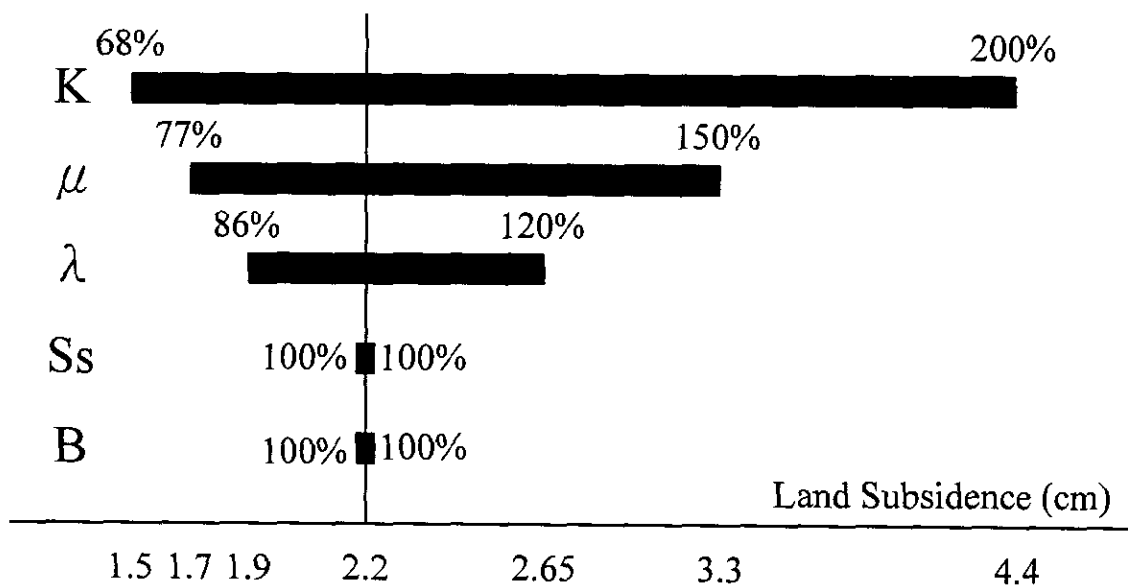


圖 4-2 敏感度分析龍捲風圖

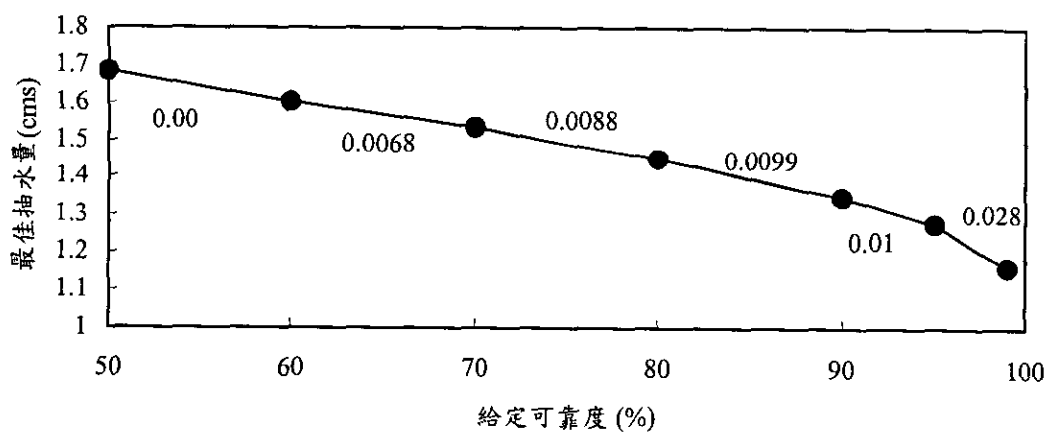


圖 4-3 驗證案例最佳解與給定可靠度關係圖

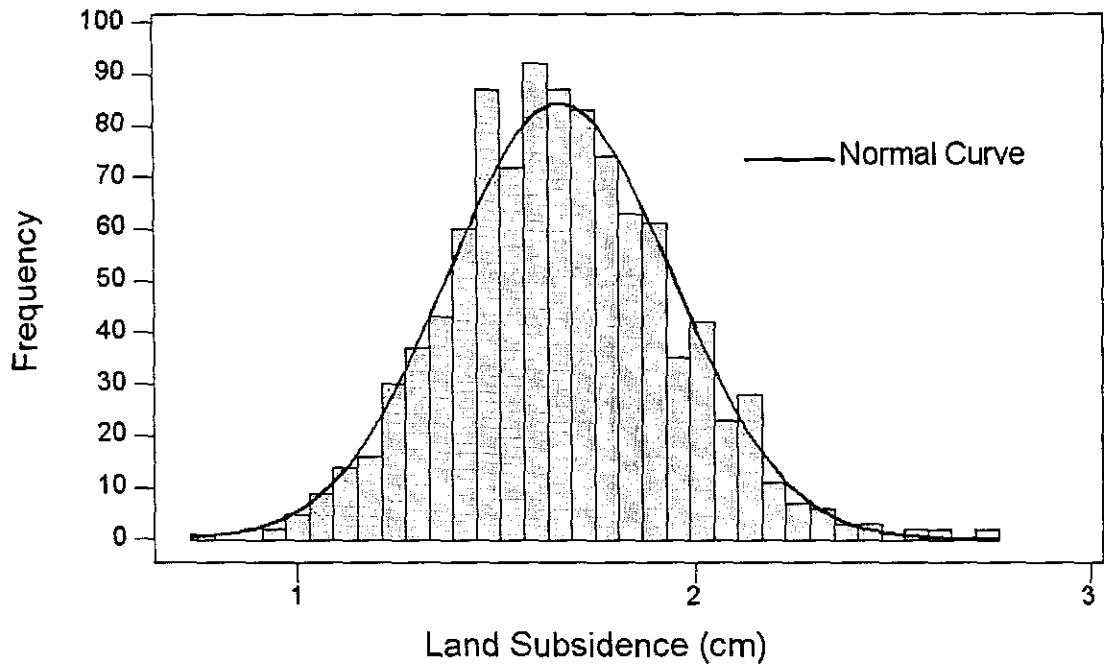


圖 4-4 常態分布驗證井 C 處地層下陷量直方圖(90%可靠度)

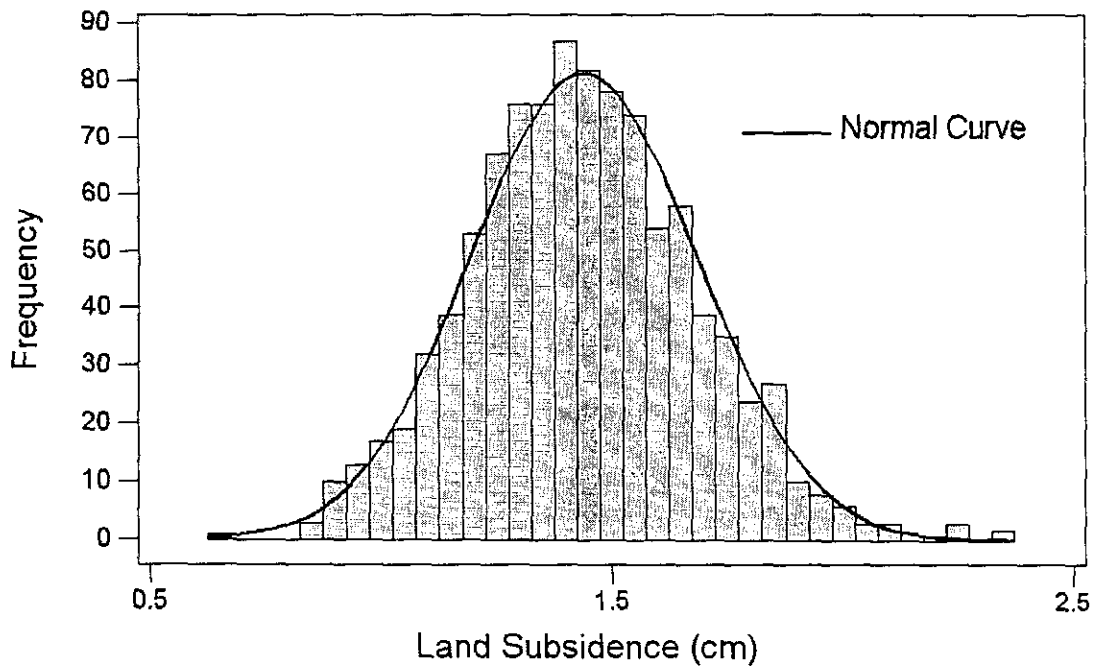


圖 4-5 常態分布驗證井 C 處地層下陷量直方圖(99%可靠度)

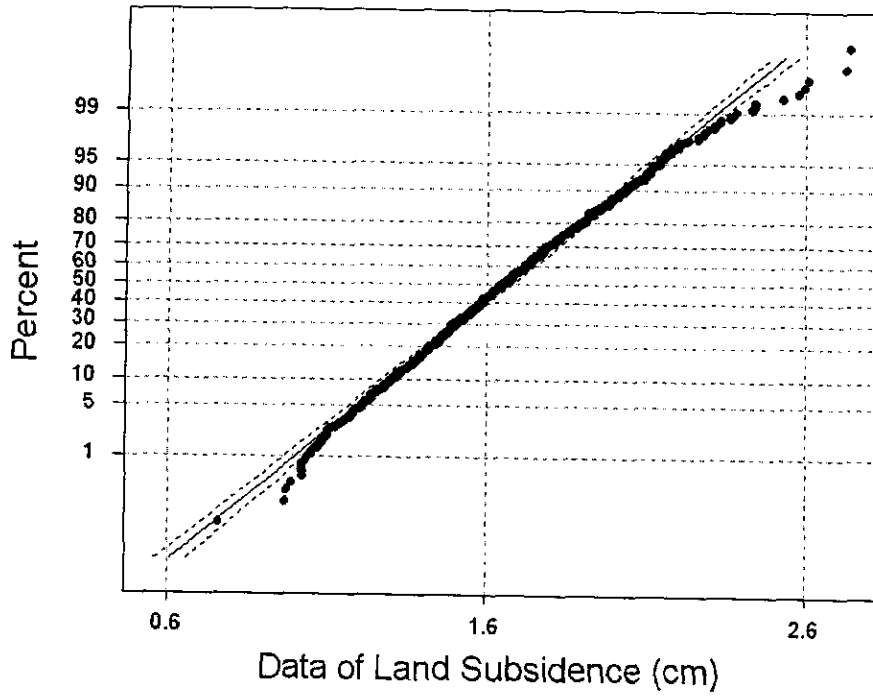


圖 4-6 井 C 處理論累積常態分布曲線與實際累積機率分布曲線(90%可靠度)

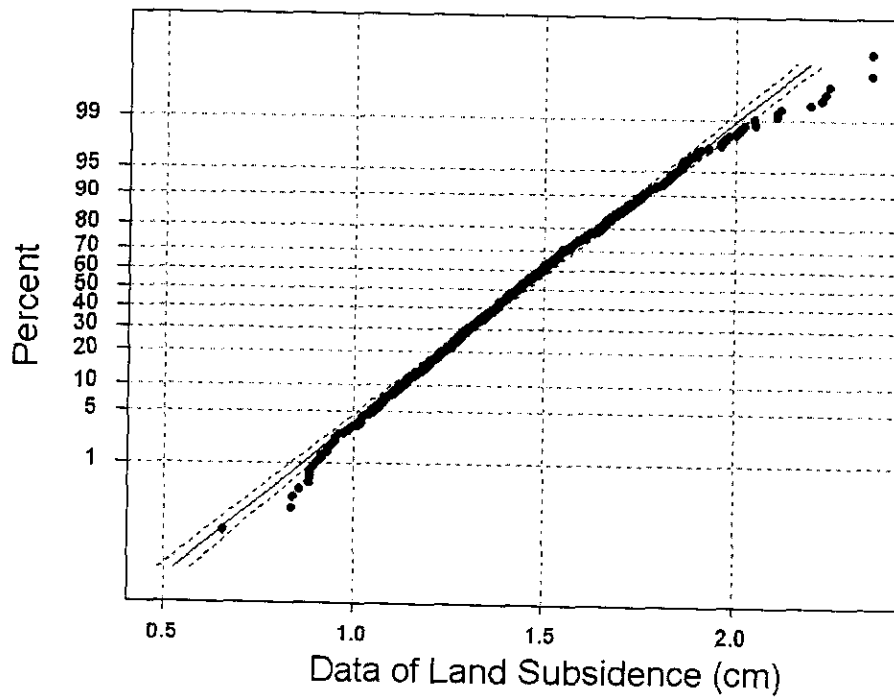


圖 4-7 井 C 處理論累積常態分布曲線與實際累積機率分布曲線(99%可靠度)



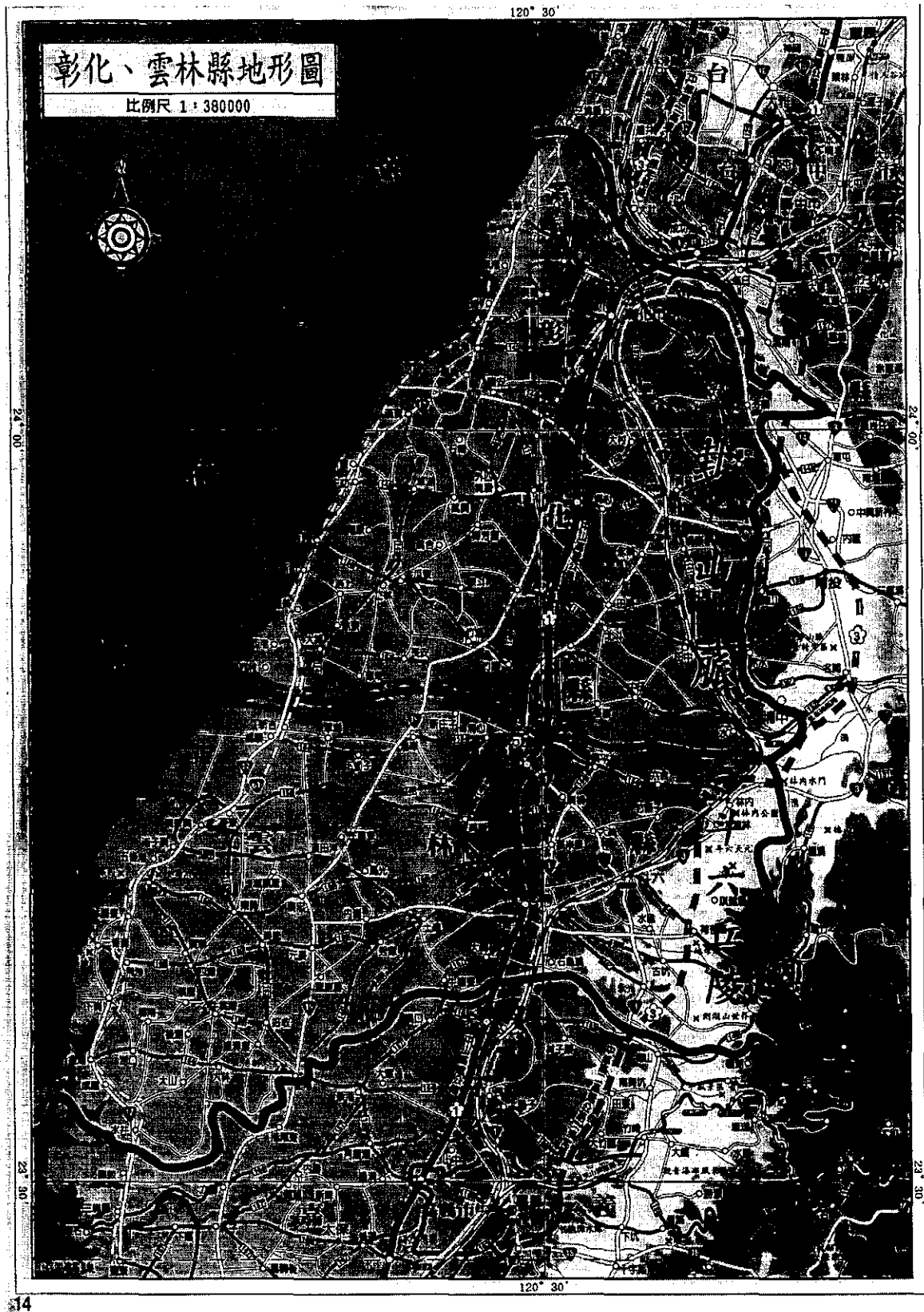


圖 5-1 濁水溪沖積扇區域圖

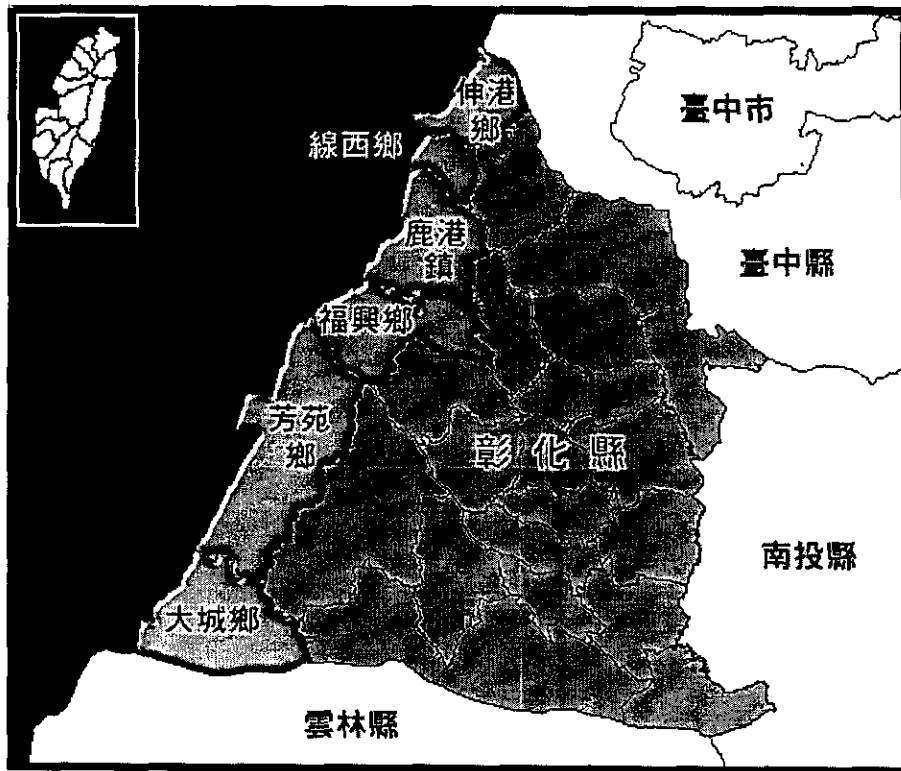


圖 5-2 彰化線地下水管制區區域圖

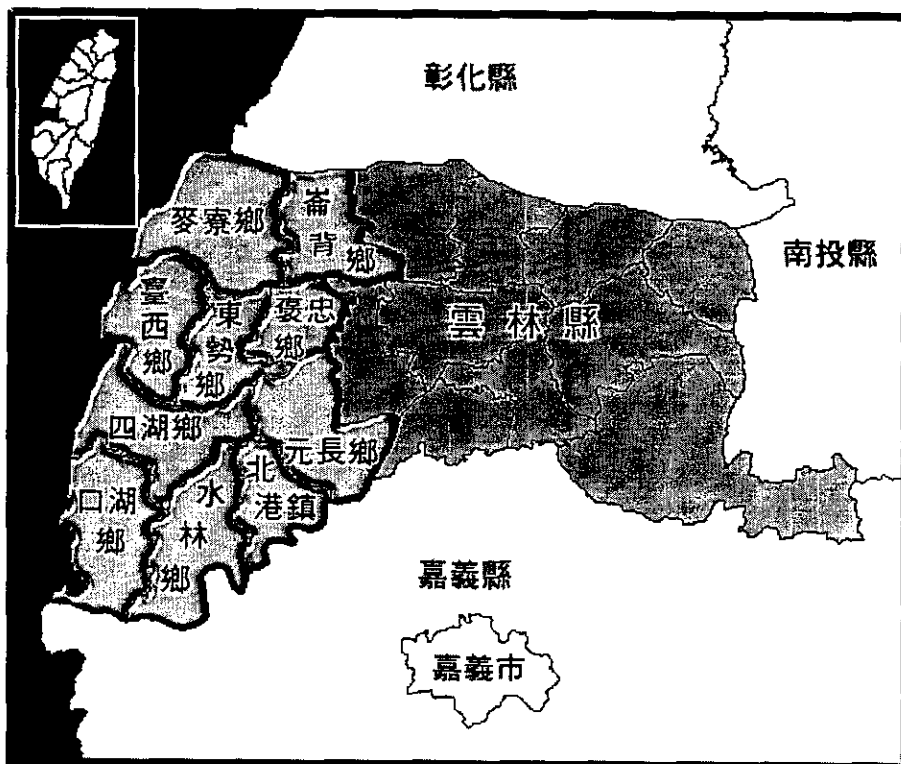


圖 5-3 雲林縣地下水管制區區域圖

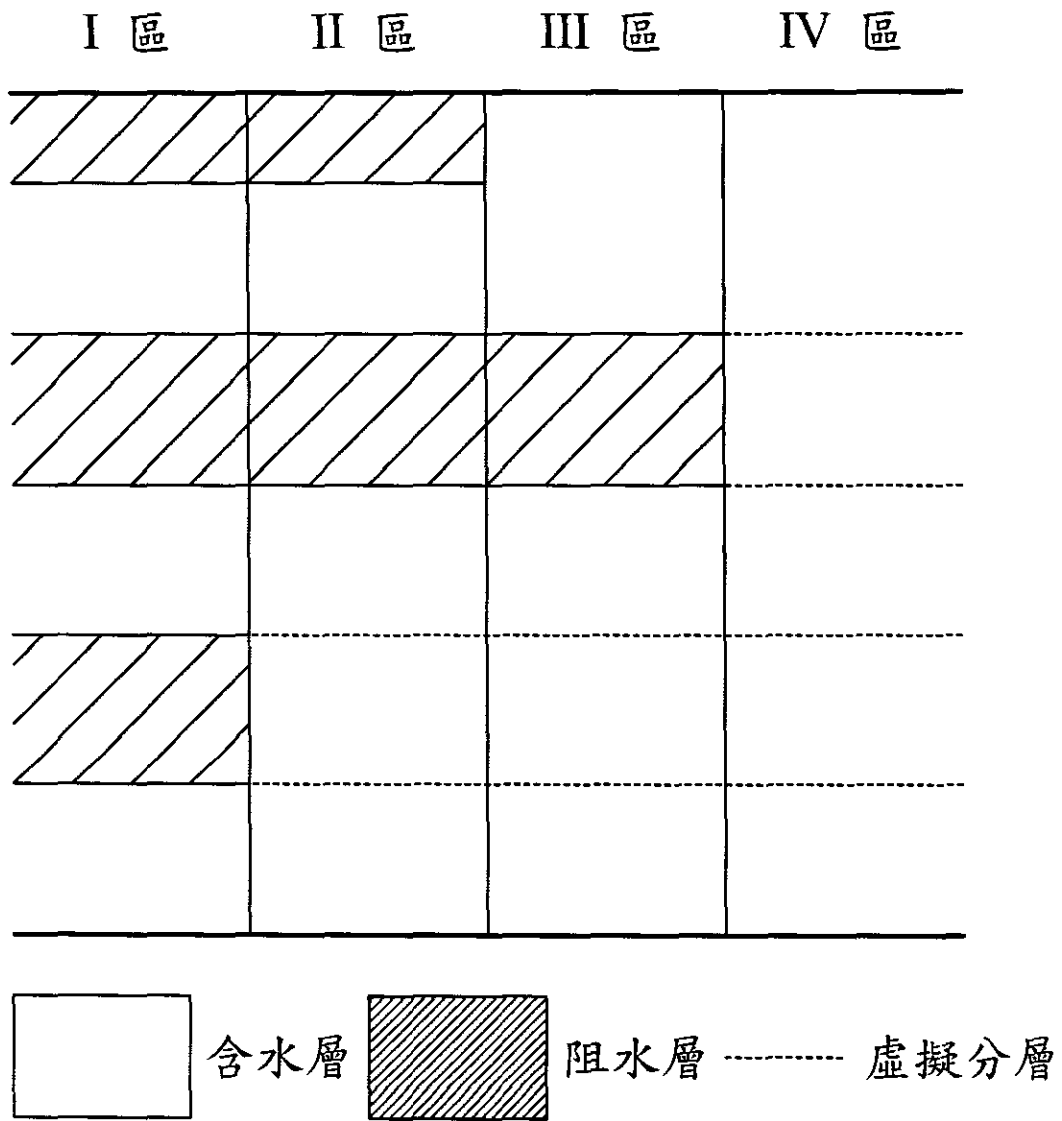


圖 5-4 濁水溪沖積扇地質分層示意圖

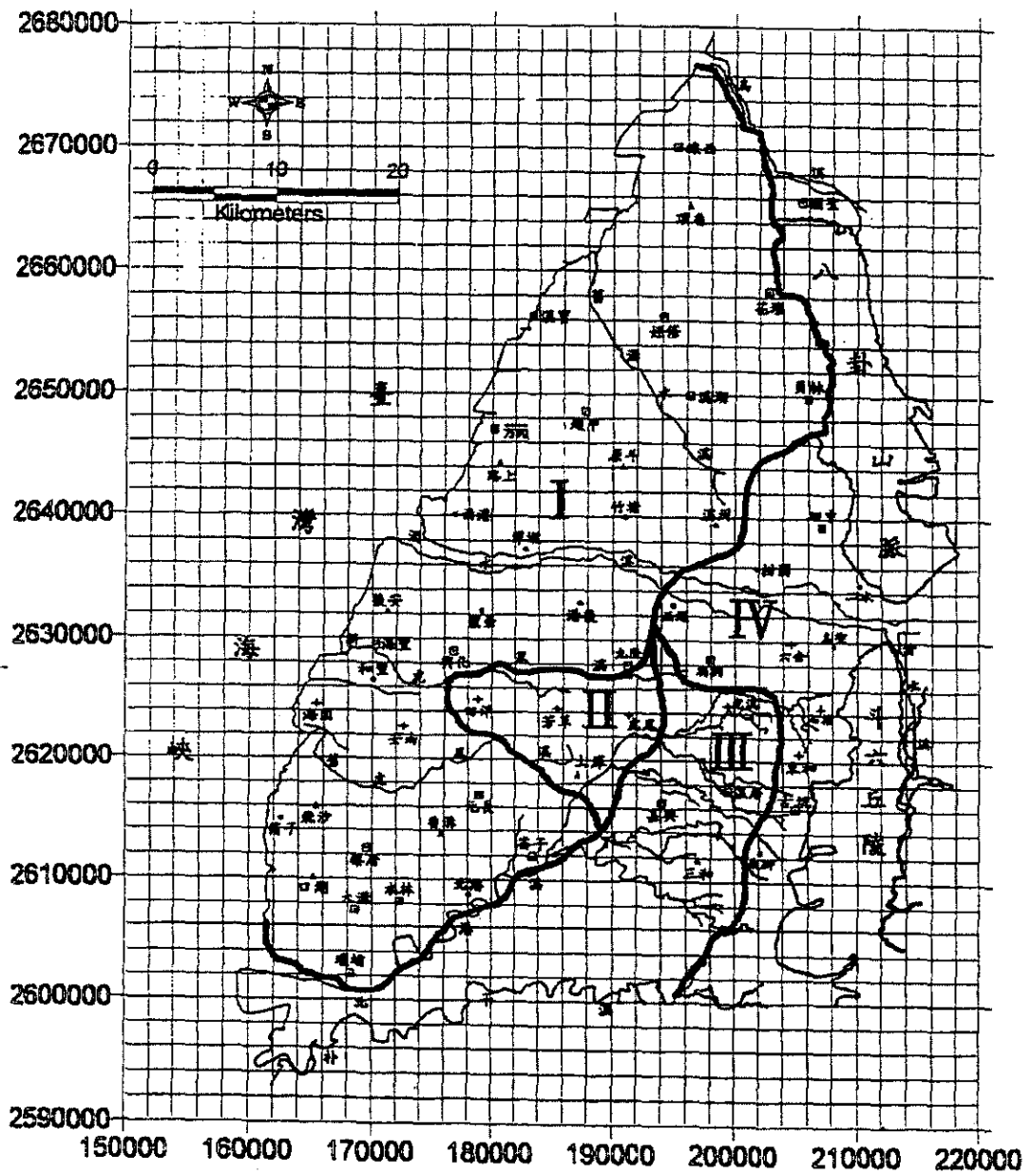


圖 5-5 濁水溪沖積扇水平分區示意圖

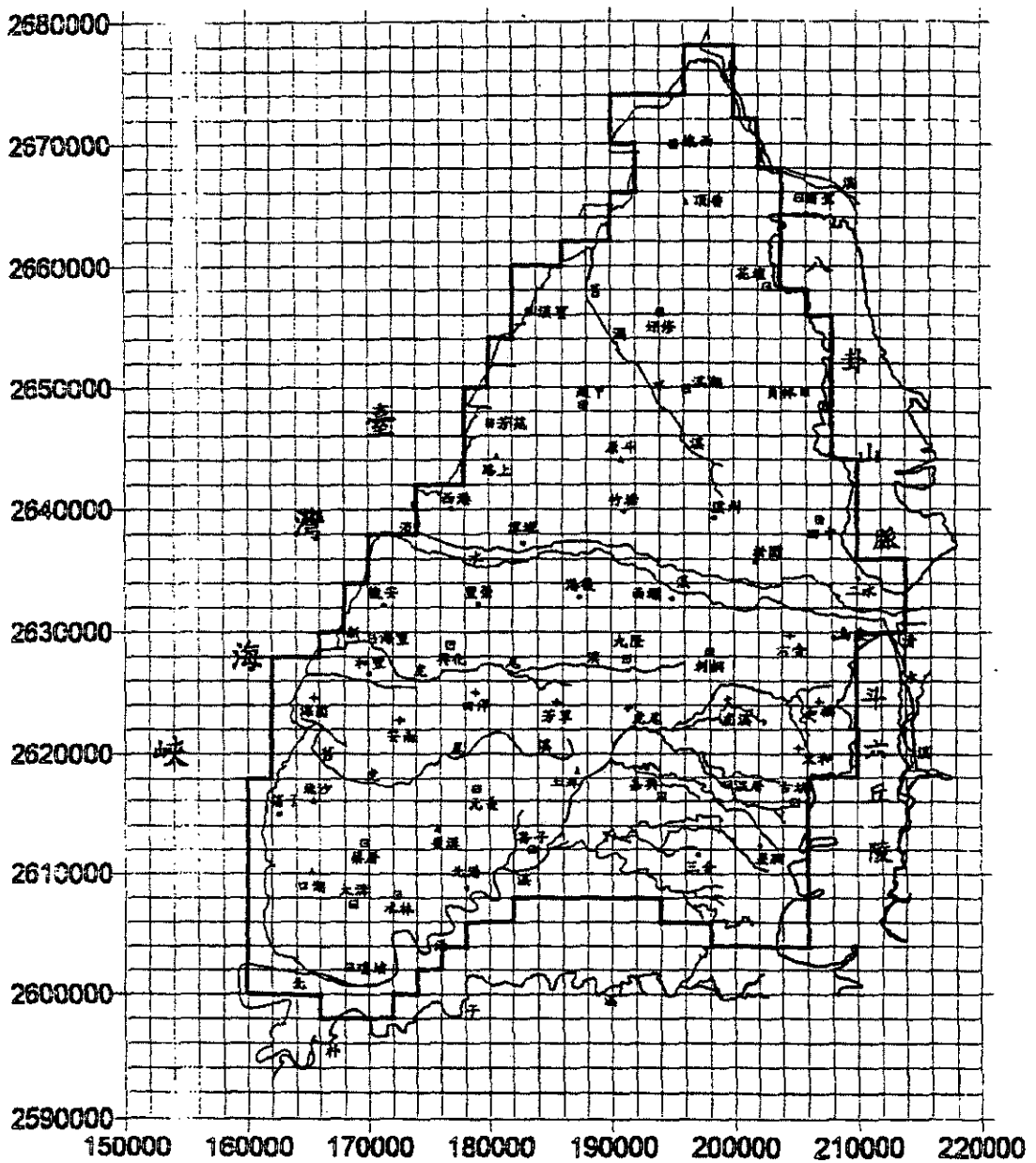


圖 5-6 濁水溪沖積扇數值模擬邊界示意圖

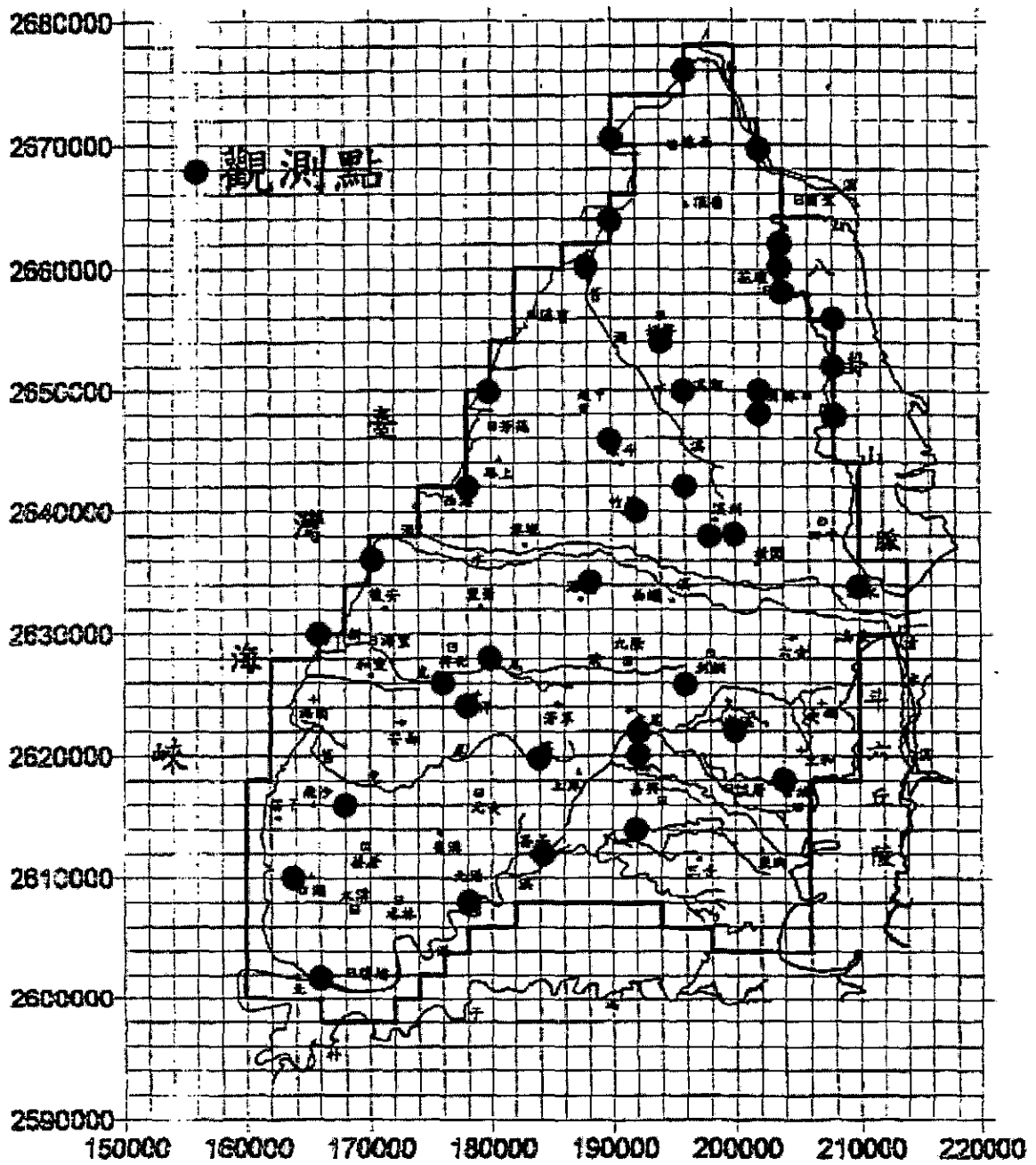


圖 5-7 模擬區域觀測點位置分布圖

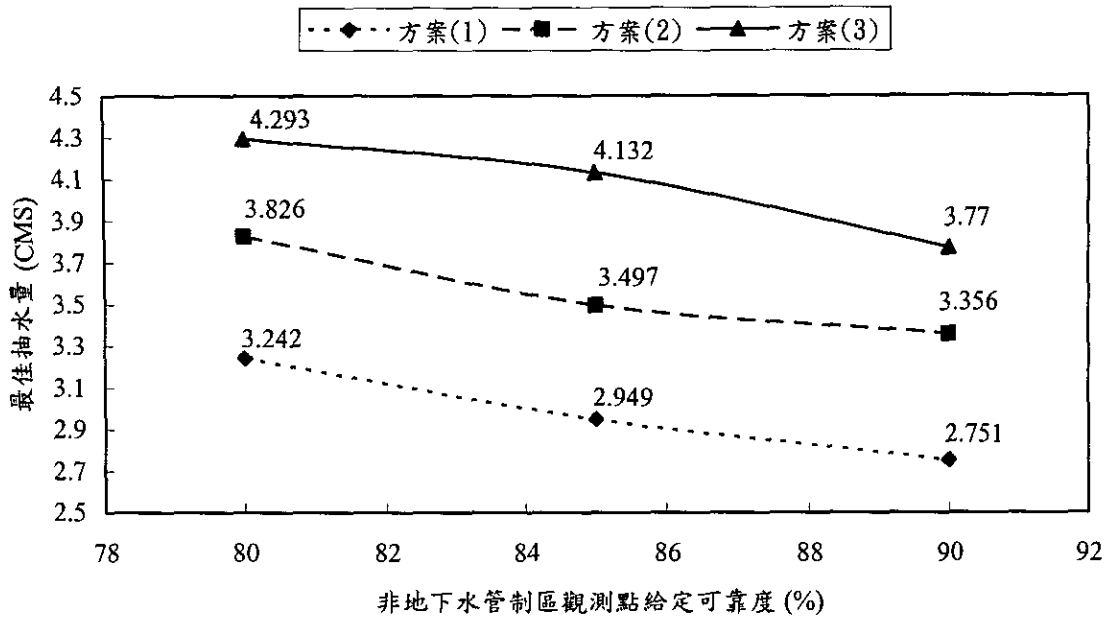


圖 5-8 非地下水管制區觀測點可靠度與最佳抽水量關係圖

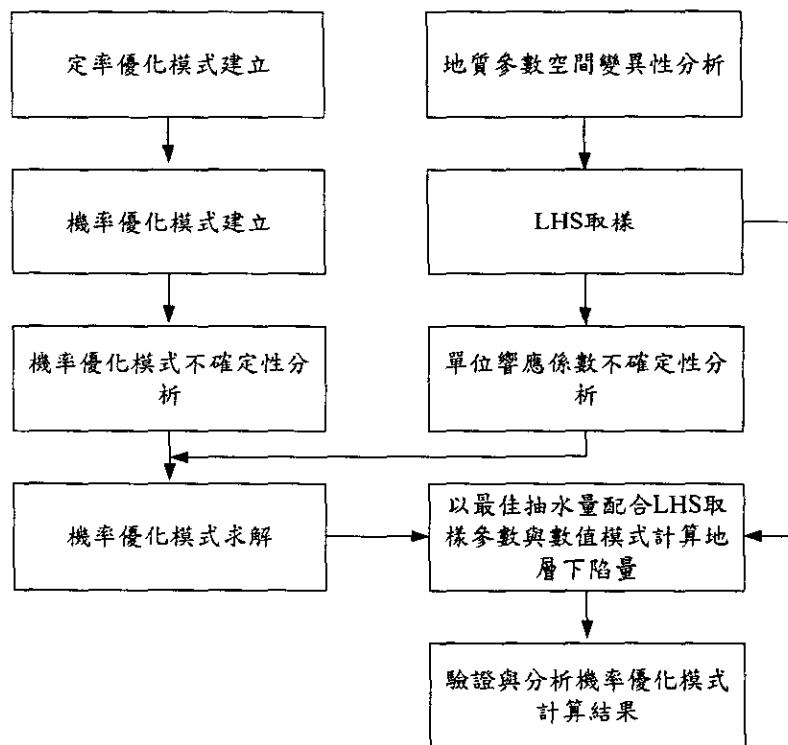


圖 6-1 機率地下水優化模式建置與驗證流程圖

### III. 地層下陷資料之地理資訊決策支援系統研究子題



## 目 錄

目 錄.....	III-I
表目錄.....	III-III
圖目錄.....	III-V
第一章 前言.....	III-1
1.1 研究目的.....	III-1
1.2 工作項目.....	III-3
1.3 工作進度.....	III-6
第二章 系統架構.....	III-7
2.1 整體規劃.....	III-7
2.1.1 專案管理.....	III-7
2.1.2 地層展示.....	III-8
2.1.3 平面分區.....	III-9
2.1.4 模式格網與參數.....	III-9
2.1.5 網際網路地圖伺服器架構.....	III-10
2.2 網際網路與單機版本.....	III-12
2.3 系統移轉需求.....	III-14
第三章 地陷模式.....	III-15
3.1 使用說明.....	III-15
3.2 地陷模式規格修正.....	III-17
3.3 測試案例說明.....	III-18
第四章 網際網路與單機版程式說明.....	III-20
4.1 網際網路版.....	III-20
4.2 單機版.....	III-22
4.3 使用虛擬實境技術編輯井柱.....	III-24
4.3.1 虛擬實境技術編輯井柱需求定義.....	III-24

4.3.2 由井柱資料自動產生井柱 .....	III-24
4.3.3 由井柱資料動態產生等位面並加入虛擬實境場景中 .....	III-25
4.3.4 使用者編輯井柱資料(含水層或阻水層厚度).....	III-25
4.3.5 編輯後井柱資料傳回伺服器資料庫內 .....	III-25
4.4 使用與維護手冊編寫原則 .....	III-25
第五章 結論 .....	III-27
5.1 年度完成工作項目 .....	III-27
5.2 結論.....	III-28
第六章 參考文獻 .....	III-29
附錄 A 地層下陷管理模式整合系統單機版使用與維護手冊 .....	III-60
附錄 B 地層下陷管理模式整合系統網路版使用與維護手冊 .....	III-70

## 表目錄

表 1-1	全程計畫進度表.....	III-32
表 3-1	Control.dat 檔案格式列表.....	III-33
表 3-2	Hcghcm.dat 檔案格式列表.....	III-33
表 3-3	GridpH.dat 檔案格式列表.....	III-33
表 3-4	GridpV.dat 檔案格式列表.....	III-34
表 3-5	Soruce.dat 檔案格式列表.....	III-34
表 3-6	BoundH.dat 檔案格式列表.....	III-34
表 3-7	BoundV.dat 檔案格式列表.....	III-34
表 3-8	Depth.dat 檔案格式列表.....	III-34
表 3-9	Waterd.dat 檔案格式列表.....	III-35
表 3-10	Init.dat 檔案格式列表.....	III-35
表 3-11	Outp.dat 檔案格式列表.....	III-35
表 3-12	Outt.dat 檔案格式列表.....	III-35
表 3-13	Soruce.dat 檔案當 FLSSO=0 之格式.....	III-36
表 3-14	BoundH.dat 檔案當 FLHB=0 時之格式.....	III-36
表 3-15	BoundV.dat 檔案當 FLUB=0 時之格式.....	III-36
表 3-1	Control.dat 檔案格式列表.....	III-66
表 3-2	Hcghcm.dat 檔案格式列表.....	III-66
表 3-3	GridpH.dat 檔案格式列表.....	III-66
表 3-4	GridpV.dat 檔案格式列表.....	III-67
表 3-5	Soruce.dat 檔案格式列表.....	III-67
表 3-6	BoundH.dat 檔案格式列表.....	III-67
表 3-7	BoundV.dat 檔案格式列表.....	III-67
表 3-8	Depth.dat 檔案格式列表.....	III-67
表 3-9	Waterd.dat 檔案格式列表.....	III-68

表 3-10	Init.dat 檔案格式列表 .....	III-68
表 3-11	Outp.dat 檔案格式列表 .....	III-68
表 3-12	Outt.dat 檔案格式列表 .....	III-68
表 3-13	Soruce.dat 檔案當 FL <sub>SO</sub> =0 之格式 .....	III-69
表 3-14	BoundH.dat 檔案當 FL <sub>HB</sub> =0 時之格式 .....	III-69
表 3-15	BoundV.dat 檔案當 FL <sub>UB</sub> =0 時之格式 .....	III-69

## 圖目錄

圖 1-1	整合計算概念架構.....	III-37
圖 1-2	整體計算工作流程.....	III-38
圖 1-3	ArcView 與 3D Spatial Analysis 製作三維空間虛擬實境示意圖 .....	III-39
圖 1-4	整合系統規劃.....	III-40
圖 2-1	三維地層查詢資料展示。.....	III-41
圖 2-2	井柱資料平面分佈圖。.....	III-41
圖 2-3	地陷系統架構圖。.....	III-42
圖 2-3	測量人員流程圖。.....	III-42
圖 2-4	學者專家流程圖。.....	III-43
圖 2-5	管理人員流程圖。.....	III-44
圖 3-1	測試案例抽水點示意圖。.....	III-44
圖 3-2	地陷模式執行畫面。.....	III-45
圖 3-3	測試案例計算結果 2D 繪圖。.....	III-45
圖 3-4	測試案例計算結果 3D 繪圖。.....	III-46
圖 4-1	地陷模式地理資訊系統網際網路版系統畫面.....	III-47
圖 4-2	井柱資料之查詢結果視窗.....	III-48
圖 4-3	井柱資料剖面圖.....	III-49
圖 4-4	河川斷面圖.....	III-49
圖 4-5	雨量資料圖.....	III-50
圖 4-6	河川水位圖.....	III-50
圖 4-7	專案管理功能.....	III-51
圖 4-8	匯入井柱後產生地圖.....	III-51
圖 4-9	編修井柱資料。.....	III-52
圖 4-10	利用 3D 點選井柱後編修資料。.....	III-52

圖 4-11	定義格網參數。.....	III-53
圖 4-12	平面分區產生內邊界。.....	III-53
圖 4-13	完成平面分區。.....	III-54
圖 4-14	參數檔案匯入功能。.....	III-54
圖 4-15	格網參數設定。.....	III-55
圖 4-16	顏色漸層表達沈陷量。.....	III-55
圖 4-17	視覺化井柱編輯作業流程。.....	III-56
圖 4-18	使用 Script 節點動態加入物件到虛擬實境場景中的程式碼。 .....	III-57
圖 4-19	以 Java 與 MySQL 資料庫抓取井柱資料庫內資料 .....	III-58
圖 4-20	使用者呼叫編輯井柱資料畫面.....	III-59

# 第一章 前言

## 1.1 研究目的

台灣地區面臨地層下陷問題中，尤以地下水超抽使用之管制最為棘手；無論在防治方法的研究或決策執行的技術面上，均缺少足夠的量化數據以確定具體的防治措施。因此，本子研究提出模擬地層下陷整體環境的計算能力，擬整合水平衡模式及地陷模式二項子研究主要計算功能。配合各防治方案之參數化，可演練各方案所造成的環境變化或成效評估，並結合參數優化子研究的成果，進而達到決策之支援；整合系統的概念架構可以表示如圖 1-1。

然而，進行整體計算時，對於研究區之多項資料包括各式圖籍、表格、文件等都有必要整理或數化成共同的電子資料檔案，甚至以資訊系統的方式來加以管理，以確保資料流通的一致性及其共同性，同時增加整體計算功能開發、模式驗證之大量資料需求、多元方案評估整理等相關工作的效率。

各計算功能間對於大量的空間資料均有各自獨特不同的需求，如水平衡模式對於各水文站降雨資料，地質分層統計對於各鑽井之地質資料，地陷模式之計算格網點的產生等，這些資料的來源、型態、空間分布均有明顯不同，其間的格式訂定、匯出匯入、交換方式、成果圖說繪製等，都要在研究過程中分別加以訂定及規劃，配合圖資之電腦處理，以建立整體模式運作的完整流程，如圖 1-2。

傳統三維地層處理，受限於資訊介面的開發困難，對於地層下陷模式的使用者而言，相當不容易上手。如判定地質構造時，均須以各鑽井地質資料經專業人員判斷後，繪製柵狀圖，或稱籬笆圖(Fence Diagram)而建立概念之地層模型。又如計算產出的地層下陷量，往往只能用數字方式，配合坐標格點展示，以提供決策上的參考環境模擬數據。上述流

程中對於地層判斷及圖形繪製，需要相當投入之專業人力，且隨著資料增多或更新時，均需重頭建立。本研究為能快速建立一適當的地層模型，有必要以資訊介面，配合專業人力判斷的互動，來推出合理的地層分佈情況。以立體視覺資訊技術中之虛擬實境(Virtual Reality)為例，隨著計算機功能提昇與價格降低的因素，在個人電腦的作業平台亦能發揮相當良好的輔助視覺效果。如圖 1-3，研究中擬以鑽井資料為依據，基於初步的地層分區與分層判斷，進而以動態的立體視覺資訊介面展示，讓使用者能以三維空間的輔助視覺效果，幫助判斷地層分區與分層。

網際網路的發展，在近幾年內已經深入各個階層，以科技革命的方式來看待它也不為過。對於本研究而言，於網際網路上開發地層下陷整合模式，可以連結各使用人員與整合模式，直接減少各項人員訓練與使用成本。此外，由於資料與程式均於一處管理與維護，使用者也無需負擔沉重的軟硬體費用，對於整體地層下陷防治管理業務推動，尤其具有實務上的效益。

根據前述討論可知，以地層下陷防治的多元考量，各項決策實在有必要以科學方法進一步加以評估。尤其在地下水觀測網建立並彙整多年資料後的現在，除了直接觀測資料的經驗判讀外，特別須要藉助可靠的模式計算，量化推論各項決策所引起的環境變化。因此，將各地陷防治對策以較迅速而合理的方式參數化，進而推求評估其環境效應並展現成果，可縮短方案擬定與決策過程時間。本計畫之最終目標係建立區域地水平衡最佳推估模式及大區域分區分層下陷模式，故本子研究主要目的即在於配合其它子計畫執行，整合水平衡模式及地陷模式二項主要計算功能的電腦輸出入資料，分別以單機與網際網路的二種使用方式加以整合。

本子研究中的主要目標有二：

1. 發展完整的輔助系統：本研究發展的系統包括地陷模式整合系統



網路版與單機版，為了達到預定的系統目標，必須經過縝密的系統分析與規劃，再透過程式語言將各項規劃功能實現，同時令系統發揮最大的功效。

2. 建立完善的技術手冊：在整合系統的發展工作中，是經過不斷的溝通與規劃而完成系統規劃，也依靠程式設計師與系統規劃者概念的貫通才能完成系統開發，而經過龐大且分工的過程之後，最後所必須建立的，就是完整的使用手冊，且為了讓程式能夠延續發展，更應該有完善的維護手冊，如此不論是教學或是系統移轉，才能達到預定的目標。

## 1.2 工作項目

研究中擬完成之地陷模擬整合系統，系統規劃如圖 1-4，其系統目標即是輔助使用者能夠在系統提供的環境下，容易的操作地層下陷模擬程式。為了兼顧容易操作與完整功能雙重考量因素下，整套系統的整體設計概念採用以地理資訊系統及程式介面為輔助，透過兩者交叉的應用，讓使用者能擺脫傳統的模式計算方式，增加工作效率。

在單機版本部分，採用 JAVA 程式語言為開發核心，與網路版本相同，因為 JAVA 程式語言可利用共通的元件，不必再重複撰寫，省去開發與維護兩套程式的時間。單機版主要的目的在於輔助使用者操作地層下陷模式，從井柱資料的建立、參數的建立與格網的定義到啟動模式，提供完整的輔助工具，讓以往需要數套工具與花費許多人力時間才能完成的工作，能夠在使用者獨立的工作下快速完成。且透過與網路版的結合應用，能夠將計算的成果與其他研究人員分享，建立快速而完整的地理資料庫。

在網路版本的開發方面，主要目的除了讓系統管理者便於維護系統，也增加了使用者操作上的便利性。在本計畫當中，龐大的基本資料

與基本圖籍，未來在維護與更新上勢必耗費許多的人力與時間，而前端的使用者越多，便需要更多的成本來提供使用者的資料更新。若採用網路版系統，因為所有的資料都是存放在伺服器端，而單機版本是隨著系統安裝在使用者的電腦中，管理者只需要隨時更新伺服器端上的資料，便能確保使用者所使用的資料便是最新最完整的部分。在以往單機版的使用上，若程式有新增的功能或是修正程式錯誤，使用者必須定期的檢查有無更新的程式需要下載修正，常常造成使用者的不便或是使用了舊版的程式。而網路版本只需要更新伺服器端的程式，使用者便可透過瀏覽器使用更新後的程式，故網路版本的採用，對於管理者與使用者都有著其便利性。以上述系統規劃方向，本研究所擬定之研究方法與工作項目展開如下說明：

### 1. 整合系統規劃

由各子計畫的目標訂定開始，以計畫成果與訪談的補強，再參考各子計畫報告等資訊，研究中可依企業系統規劃(Business system planning, 簡稱 BSP)方式，分別訂出各資訊系統對應的目標綱領，定義系統所支援的相關業務，確認處理執行時所須輸入及輸出的資料，而建立業務處理與業務資料之間的關係，將使用相近資料的業務處理集成一個系統功能，進而產生資訊系統架構。主要的系統規劃方法可主要分為下列二項：

(1) 子計畫訪談與意見會整：由於須配合其它子計畫進行成果而設計相關介面，因此，研究中對於其它子計畫的產出必須有經常性的討論與掌握。透過會議與訪談的彙整意見，可增加研究團隊對於各配合子計畫的理解度，以避免對於整體系統設計誤差的風險。

(2) 撰寫系統文件：由於整合系統的複雜度，有必要撰寫各項文件，以書面方式作為溝通的主要媒介，也較能避免口頭討論的誤差，同時亦可累積建立系統完成所須的各項維護手冊。

本項研究方法所展開的工作項目包括：「資訊系統整合分析」、「相關資料庫與基本圖籍建置」兩項。

## 2. 研選開發工具

由於整合系統對於空間資料展示與查詢的圖形需求，特別是各種平面主題之地理圖形管理、地質分層三維展示、計算成果等值線自動繪製等重要系統功能規格，需要結合如地理資訊系統、虛擬實境、空間分析等相關軟體。其中，又因應網際網路版本的開發，各種軟體工具也需要配合評估。本項研究方法所展開的工作項目為「軟體工具評估」。

## 3. 系統雛形設計

系統開發過程經常以 Water Fall 生命週期為典型的思考方式，其對於資訊需求與業務流程可清楚描述的系統。這種從上而下 (Top Down) 的規劃可相當完善的控制開發時程，常用的系統開發方式與其優劣比較可如表 1 所示。然而，本計畫除了必須考慮有限開發時效外，對於各子計畫之專門性與不確定性，其系統資訊設計也須與使用者密切互動而非一蹴可及。因此，必須在系統發展過程中，對於可能變動頻繁的系統目標與設計，本計畫擬採 Evolutionary Prototyping 的生命週期方式進行，選取代表性之測試案例，作為支援系統雛形與流程分析基礎，反覆與使用者協商而完成修正。此種系統開發方式，從起始構想 (Initial Concept) 到完整雛型 (Complete Prototype) 間，反覆以雛型系統作為使用者與系統開發二者間的溝通媒介，可得到充分的使用者需求確認，避免建置過程的誤導，開發初期雖較耗費人力，但可降低系統發展之風險。本項研究方法所展開的工作項目為「整合系統設計與開發」。

## 4. 研擬人員訓練計畫

人力資源是推動資訊整合的最根本要素，唯有願意使用資訊的承辦人員，資訊系統才有存在的價值。然而，無論是模擬計算、地理資訊、

三維地層處理等方面的功能，對一般未接受過訓練的使用者，仍存有一定的困難度。因此，研究中將配合其它子計畫，研擬整體系統概念為主題之訓練課程。期能透過相關的教育訓練，能夠推廣資訊的使用，建立基礎人力；並以雛型整合系統的轉移工作，培養資訊系統開發與維護方面的人力。本項研究方法所展開的工作項目為「使用手冊與維護手冊撰寫」、「模擬案例設計合系統設計與開發」與「技術移轉與相關訓練」三項。

總合上述研究方法之說明，研究計畫全程之主要工作項目分別為資訊系統整合分析、相關資料庫與基本圖籍建置、軟體工具評估、整合系統設計與開發、使用手冊與維護手冊撰寫、模擬案例設計、與技術移轉及相關訓練等七項。

### 1.3 工作進度

本研究預定在三年期程內規畫與開發網際網路上互動式的資訊分析環境，整合地下水平衡模式、地陷模式兩項主要計算功能的電腦輸出入資料，以克服兩者模式間複雜的圖資處理與格式交換等技術問題；並同時配合兩者子計畫相關基本資料收集，建立研究區基本背景的資料庫，以協助使用者能夠以此二者技術的整合應用。計畫進度表如表 1-1。

第三年預期成果為：

1. 完成網路版地層下陷管理模式整合系統圖資展示功能；
2. 完成單機版地層下陷管理模式整合系統；
3. 完成地層下陷計算所需之資料輸入至計算結果輸出模擬案例編輯與設計；
4. 完成網路版與單機版整合系統使用手冊與維護手冊；
5. 人員技術訓練與講習。

## 第二章 系統架構

### 2.1 整體規劃

本研究規畫與開發互動式的資訊分析環境，整合地下水平衡模式及地陷模式兩項主要計算功能的電腦輸出入資料，以克服兩者模式間複雜的圖資處理與格式交換等技術問題；並同時配合兩者子計畫相關基本資料收集，建立研究區基本背景的资料庫。以協助使用者能夠以此二者技術的整合應用，將各地陷防治對策以較迅速而合理的方式參數化，進而推求評估其環境效應並展現成果，縮短方案擬定與決策過程時間。整個功能需求可以概分如下：

#### 2.1.1 專案管理

在地陷模式整合系統中，為方便使用者模擬不同的研究區域，根據研究區域的屬性資料進行各項系統功能運算，並且可輕易地將完成或未完成的資料轉移使用，地陷模式整合系統便引入的專案管理的觀念，讓使用者依研究區域或原始資料，執行不同的專案，達到管理之目的。

同時基於研究人員對於相同的研究區域，可能採用不同的模式參數進行計算等工作，在專案管理的架構之下，還包含了案例管理的功能。案例管理的概念，是基於使用相同研究區域的基本資料，但可以使用多組不同的邊界條件在同一個專案中進行模擬，如此可讓研究人員輕易比較各個研究案例的不同。

系統中最主要的資料包括：

1. 井柱資料：每一個站的資料儲存成一個文字檔，內含井柱的分區代碼、站名、座標、含水層及阻水層厚度。
2. 基本圖：針對不同的研究區域，可匯入 Shape File 格式的圖層，做為基本圖。

3. 井柱地圖：主要為系統依據使用者所建立的井柱資料，可標示所有井柱在地圖上的位置，透過與基本圖套疊，讓使用者便於判斷。
4. 三維地層：顯示 VRML 格式的資料檔案。
5. 平面分區圖：包括了在進行鄰域分析功能時所產生的地圖，及完成分區時所存的分區圖。
6. 格網資料：系統會透過表單，要求使用者建立格網定義參數檔，系統則依據使用者的輸入，建立不同大小的格網點地圖，做為給定各項參數的依據。
7. 地陷模式：主要為各項模式參數輸入檔案，及地陷模式程式，也包括執行模式後產生的結果。
8. 背景圖資：在地下水平衡模式中的資料都存放於此，如水文、雨量等，資料格式主要分為文字檔，及系統跟據資料所產生的地圖。

由上述可知，系統中的資料主要分為三大項，即文字資料、地圖資料及模式程式，故專案管理的主要功能便是管理這三大項資料。依據使用者所定義的專案檔案名稱，在專案檔案中包含了井柱資料、格網控制資料、案例資料、格網參數資料與模式成果資料，即是使用者從操作地陷系統開始到結束後所需的一切資料，如此使用者便可以隨時恢復專案進行的狀態。並且藉著專案檔案的轉移，將工作移至到其他裝有地陷系統單機版的電腦。

### 2.1.2 地層展示

為能讓使用者瞭解並分析各岩心資料的詳細資訊，以便於能正確製作出各地層三維平面圖與分區、分層的岩心柱狀圖，並作適當的編輯處理，使用者可以透過 3D VRML 功能來查詢或編輯系統內部儲存的岩心資料，如圖 2-1，並且依據岩心資料的位置來繪製岩心資料分佈地圖，如圖 2-2。

三維地層子系統的功能為以三度空間的立體化視覺模擬出地層的實際情況。三維地層等位面功能在運用岩心井柱資料各垂直分層特性分析與分區結果，配合完成岩心位置地圖繪製之岩心井柱資料，以三角網方式建構每個透水層與阻水層的等位面，取得建立三維地層所需要的檔案。

三維地層是以三度空間的方式展現各層分布，並運用虛擬實境技術提供三度空間瀏覽，讓使用者可以自由在畫面上觀看各種角度的地層情況，此種表現方式可以突破地下水位因無法目視而難以想像的問題，提供使用者最接近真實世界的方式，來觀察岩心井柱與地下水位分層。

### 2.1.3 平面分區

模擬地層下陷程式中，對於模擬區內不同的地層分層處，需要定義出不同的平面分區。因應使用者在分區上需配合前述三維的岩心資料研判，工作中需結合三維想像與平面分佈，十分不易。系統設計以鄰接區的自動畫分，提供使用者直接區隔出平面區與區間的界線，並提供使用者輔助工具以進行平面分區編輯步驟。

### 2.1.4 模式格網與參數

地層下陷模擬程式的計算架構為計算格網的設定與產生，許多輸入參數如地質參數、抽水量、入滲量、水位等，都必需以計算格網的點位置來產生輸入檔案。以往的使用過程中，需要大量人力與紙上作業：在底圖上繪製格網，並將不同來源與比例尺之圖籍資料，轉繪於相同底圖上，再逐一判斷，將參數依照設定位置輸入為電腦檔案，非常耗費人力與時間。而且，一旦模擬案例變動，所設定的計算格網參數，也不易對照修改。

地陷系統利用 GIS 介面輔助輸入參數，加上格網控制檔可隨時定義格網大小、模擬時間、模擬間隔等，加上案例管理的功能，可在短時間完成地陷模式的參數檔案，進而執行地陷模式計算。

### 2.1.5 網際網路地圖伺服器架構

目前的應用系統，多朝運用企業網路(IntraNet)或網際網路(InterNet)發展。運用網路技術，進行伺服器－使用者端架構 (Server-Client) 設計的優點，包含了下列數項：

1. 資料共享：將資料集中於伺服器端，所有的使用者端可以不用個別儲存大量的資料；有任何資料更新時，亦只需更新伺服器端一份的資料，而無需像過去單機式的應用系統，需要逐一更新，若有些使用者並未加以更新，亦可能有資料不同步的問題。此項特點在地理資訊系統相關應用中，由於地圖的資料量極大，且常有更新上的問題，特別顯著。
2. 跨平台開發維護：一般單機版的系統，開發時最大的問題是面對不同的硬體規格，甚或是不同的作業系統時，常會出現因系統環境差異，而出現原開發者難以處理的問題。而在伺服器－使用者端架構時，由於使用者端的程式較單純，較不易產生問題。目前的發展更傾向於使用 HTML 網頁瀏覽器直接作為使用者端的使用者介面程式，如 IE 或 NetScape 等。由於網頁瀏覽器已成為各系統中標準的應用程式，除了不易產生程式執行上問題外，更無需另行開發使用者端的專屬程式（指應用程式，application，但仍可能需要開發如 JavaScript 等巨集程式達成特殊的功能）。
3. 權限管理：單機版一旦安裝，所有的程式及資料便直接曝露在使用者面前，僅能用編碼加密等方式加以處理，但仍難以防止大量複製使用。而採用伺服器－使用者端架構時，可以在網路連線階段，便加以管制，未應授權的人無法接觸到任何資料，不同權限者所能瀏覽或下載的資料也可加以管制，在資料安全性上可大幅提高。



因此，在網路上建置地圖伺服器系統及進行地理資訊上的應用，有其優勢及必要性。然而，如果真正應用在網際網路上，也有其限制性，包括了頻寬限制、使用瀏覽器時的功能限制等。

而在地理資訊系統上的應用，地圖伺服器應該包含下列基本的功能：

1. 地圖資訊：包含了經緯度、範圍、比例尺等基本資訊的提供。
2. 縮放功能：主要為比例尺的調整，並可由直接在地圖上框選範圍調整。
3. 圖層管理：地理資訊系統最重要的功能之一便是圖層的管理，如果地圖伺服器僅能提供固定形式的地圖，而無法選擇圖層的話，和理想的地理資訊系統將會有一段落差。
4. 其他資訊查詢：可以透過在地圖上點選或其他方式查詢附屬的地理資訊。
5. 擴充性：可以透過加掛模式或其他方式，增加其他與地理資訊相關的功能。

因此，在本計畫中，依據前述的優點、限制，採取下列的架構開發之地圖伺服器：

1. 以 HTML 網頁瀏覽器為客戶端之使用者界面程式，初期以 Microsoft Internet Explorer 5.0 以上版本為主，未來將以所有支援 JavaScript 的瀏覽器皆能正常瀏覽為考量。
2. 使用者端以 HTTP 之 POST/GET 功能及 JavaScript 與伺服器端進行資料傳輸，配合透明圖等格式達成比例尺縮放、圖層管理等功能。
3. 伺服器端以 Java 為主要程式開發環境。Java 具有高度跨平台相容性，開發完成後可在不同之作業系統執行，且 Java 內建網路、資

料庫等套件，Graph2D 元件更支援了如 shape、transform 等可作為地理資訊系統開發基礎之功能，可大幅縮短開發時間及成本。

4. 伺服器端之地圖及其他資料格式，以既有之通行格式為優先考量。

伺服器端應包含專案管理或以模組式架構開發，以便搭配不同之使用需求改變操作介面之畫面顯示或增加特殊之功能模組。

## 2.2 網際網路與單機版本

在研究計劃第一年所開發的 VB 版本系統，主要可分為地陷模式系統與背景圖資系統，地陷模式系統主要是進行執行地陷模式的工作，包括井柱資料、平面分區、格網參數等；背景圖資系統則主要是提供背景資料的檢視、歷線圖等。該 VB 版本順暢地整合了資料處理流程，提供直觀的使用介面，可以具體呈現研究成果，並促進各個子計劃工作團隊交流討論，達到相當的整合效果。也因為針對這個 VB 版本的測試過程中，研究團隊因應使用者對於地層下陷方面各種研究成果的彙整需求，必須研擬更為理想的系統規劃方案。考慮系統整合與軟體授權兩項目前系統的主要限制，研究團隊在系統使用環境上，定義出網際網路與跨平台發展的主要兩個重點。所使用的主要開發工具，將以 JAVA 語言為主，自行開發圖形處理元件，作為系統整合的核心。

而在更新成 JAVA 版後，依照著原 VB 版本兩個系統所設定服務性質的區別，分劃為單機版與網路版。單機版主要執行地陷模式系統的功能，提供各種輔助工具讓使用者產生地陷模式的輸入檔案，進而啟動模式計算，得到地層下陷模擬結果；網路版則主要是承續原先 VB 版本中背景圖資系統的功能，提供各種資料、圖資、歷線圖展示，並配合網路使用環境，開發相關研究中，各種成果檔案上下載功能。

目前規劃的概念是使用者利用單機版，單機版的目的是提供使用者文字與圖形之整合介面，利用已分類的井柱資料配合背景資料進行地陷

模式之計算。使用者利用已經分類的井柱資料，透過 GIS 與圖形計算工具，經過平面分區與格網參數設定等步驟，產生地陷模式所需要的參數檔案，進而啟動地陷模式，得到計算成果，且可透過圖形介面觀看計算成果，並可計算成果資料利用網路傳輸的方式，將檔案上傳至網路版，讓其他使用者得以利用，Server 端可以依照不同的研究人員或單位所計算的資料做分類，可以讓使用者檢視其他人的成果，進而比較研究成果的不同，達到分享資訊的目的，整體規劃圖如圖 2-3。

網路版提供了許多地理、水文資料的瀏覽，並且採取資料與地圖連結的方式，即點選資料則在地圖上顯示該資料的位置，或是在地圖上點選點位顯示該點位的資料。而一些具有統計圖形的資料，也用資料與統計圖形連結的方式，只要在地圖上點選這些資料，便會顯示出統計圖形。且網路版在 Client 端的使用，也只需要 Web Browser 介面就可以完成，在使用上更顯得便利。目前規劃使用網路版的人員有三類，茲說明如下：

1. 測量人員：執行外業測量的人員，可利用網路將所得到的最新測量數據上傳。例如水準點高程，若有足夠的數據，網路版便可利用圖形動畫的功能，展示水準點位上的高程變化，而這個變化就是地層沈陷過程，可供學者專家與地陷模式計算的成果比對，或是提供參考依據，流程如圖 2-4。
2. 學者專家：透過新的單機版，學者專家在個人的研究地點，可以很方便地執行地陷模式的計算，並可將計算的成果上傳至網路版，便可透過網路版中的圖資系統，比對查詢計算的成果是否符合現況，或是與他人的研究結果是否相符。另可利用 GIS 的功能疊上土地利用現況地圖，可以很迅速地判斷沈陷位置與土地利用狀況的相對關係，流程如圖 2-5。
3. 管理人員：負責維護網路版正常運作的人員，同時整理更新資料庫，讓使用者可以迅速觀看最新的資料，並應依照現況隨時更新

背景圖資，流程如圖 2-6。

## 2.3 系統移轉需求

地陷模式整合系統的發展進程是由 VB 單機版到 JAVA 網路版，目前則進展到 JAVA 單機版，最主要的理由是免除外掛軟體的授權問題。因為不論單機版或是網路版，在進行系統移轉時，都是把整套軟體交付給使用者或是系統管理者，若其中有使用到向商業公司購買的軟體元件，便需要購買需要授權的軟體，造成經費上的浪費。故 JAVA 網路版與單機版在設計規劃時，便傾向所有使用到的元件自行開發，從此免除軟體授權的麻煩，也增加對於程式的掌握度，隨時可以針對臭蟲進行修正，抑或是進行新功能的開發，百分之百擁有程式的自由度。

使用 JAVA 開發系統的理由，是因為 JAVA 的跨平台特性與物件導向程式設計的概念。因為目前我們常用的兩種作業系統是 Unix Like 或是 Microsoft Windows 系列，兩種作業系統是不相容的，甚至在各自不同的版本也有軟體相容的問題，若針對某一平台做開發，很可能之後系統的發展只能侷限在單一平台上，而無法隨著作業系統的優劣進行改變。但 JAVA 語言目前可以使用在任何一種作業系統上，只要安裝 JAVA 語言的套件即可，換句話說，若我們要將地陷系統從 Windows98 移轉到 Linux 中，只要將相關資料夾複製到另一台電腦中，安裝 JAVA 套件後就可以開始執行，不用改變任何的設定，這點是其他程式語言無法做到的便利性。

此外，從過去系統開發與移轉的經驗可知，使用者最感困難部分，多半在於後續系統的維護，例如修改與取得既有資料、增加新的圖層與屬性、多位與多處使用者的資料交換等。在更新的系統方案中，網際網路的使用環境設計，正提供了可能的解決之道。由於伺服器的管理方式，使得資料可以集中一處，管理者透過權限管理，也可處理資料分享與交換的機制。因此，目前的系統規劃對於使用者的教育訓練要求，確實減輕了不少負擔。

## 第三章 地陷模式

### 3.1 使用說明

地層下陷模式為整合系統的主要計算核心，開發工具為 Fortran 應用程式。主要的計算介面，是以編輯文字檔案內容，來控制地層下陷模式的各個輸入參數。由於文字介面的限制，為了讓使用者進行有效率的工作，設計系統轉換原始資料成為地層下陷模式的輸入，就成了相當繁瑣的工作。在整合系統的設計過程中，主要的目標之一，即是提出適當資訊解決方案，以簡化這個轉換介面的困難。目前已經完成將輸入參數全部統一成以格網點為基本單元的資料格式，可以減少系統轉換計算的過程，且讓使用者在格網點上輸入參數的思考更為流暢。

因此單機版的功能便是為了讓文字、地圖間，甚至於三維的地層表現，都可以相互配合，讓使用者能夠很直覺地處理相關輸入參數。接著搭配半自動化的邊界劃設、格網定義、以及自動化的空間內插功能，整合系統引導使用者將各項原始資料逐一轉換為計算格網的輸入。為了讓使用者方便編修地圖中的屬性資料，我們將所有的屬性資料以格網點的方式表達，並將格網圖與地圖套疊。透過圖形界面與查詢工具的輔助，使用者便可以清楚地看到格網點在地圖中的地理位置分佈，與各個格網點的屬性。此時無論是查詢或是修正屬性資料，皆可以直觀快速的進行，這是以往在文字介面時所無法做到的功能，因而使用者可以簡單而有效率地操作整個地層下陷模式。

要正確執行地層下陷模式運算的關鍵，就是如何產生正確的模式參數檔案，這個工作目前我們是利用單機版所提供的各式輔助工具完成。一旦到了執行模式運算時，所有的資料都必須存成符合地陷模式輸入參數的格式，方能啟動模式運算。換言之，只要能夠產生正確的輸入參數檔案就可以啟動模式，所以當然可以直接利用文字編輯器修改參數檔

案，而要去修改參數檔案前，最重要的工作就是瞭解所有參數檔案的格式與內容，故我們將參數檔案的格式列出：

1. Control.dat：主要的控制檔案，控制地陷模式的層數、格網數、格網大小、時間參數等。其中 FLSO 為控制 Source.dat 檔案中 Time 欄位的參數，FLHB 控制 Boundh.dat 的 Time 欄位，FLUB 控制 Boundv.dat 的 Time 欄位。0 為沒有 Time 欄位，1 則有。如表 3-1。
2. Hcghcm.dat：地質參數，主要記載每一區每一層的地質參數，每一行皆以格網點的位置 X、Y 開頭，後面以地質參數三個為一組，以層數所排列。如表 3-2。
3. Gridph.dat：水平方向格網點性質，主要記載每個格網點在地理上的性質，如是座落於研究區的區域之外，或是落於邊界之上，也包括了格網點的受壓性質。如表 3-3。
4. Gridpv.dat：垂直方向邊界條件，其中 GPU 及 GPB 要 unConf=1 時才有作用。如表 3-4。
5. Source.dat：抽水量與補注量，抽水為正值，補注為負值單位是 CMS。若在 Control.dat 中的 FLSO=1 時，Time 欄位才有作用，Time 欄位代表某個 Time Step 時，某個格網點的入滲量或補注量，將所有欄位填上 0 則代表資料結束。如表 3-5。
6. Boundh.dat：水平邊界條件，即是輸入每層觀測水位的高度，單位為公尺，且只需要輸入不為 0 的點。若在 Control.dat 中的 FLSB=1 時，Time 欄位才需要輸入 Time Step，將所有欄位填上 0 則代表資料結束。如表 3-6。
7. Boundv.dat：垂直邊界條件，即是輸入上邊界與下邊界的入滲量，單位為 CMS。若在 Control.dat 中的 FLUB=1，Time 欄位才需要輸入 Time Step，將所有欄位填上 0 則代表資料結束。如表 3-7。

8. Depth.dat：各層厚度，只需輸入每個格網點中，各層的厚度資料即可，以公尺為單位。如表 3-8。
9. Waterd.dat：非侷限含水層水深，當 gridpv.dat 中的格網點為 unConf=1 時才需要輸入。如表 3-9。
10. Init.dat：各層初始水位，以公尺為單位，若遇到阻水層，則以上下含水層的平均值為其輸入資料。如表 3-10。
11. Outp.dat：需要輸出資料之格網點，GWO 為水位，GSO 為下陷量，輸入 1 代表輸出資料。資料結尾輸入 0 則代表資料結束。如表 3-11。
12. Outt.dat：需要輸出之模擬時刻，GWOT 為水位，GSOT 代表下陷量，輸入 1 代表輸出資料。資料結尾輸入 0 則代表資料結束。如表 3-12。

不論是使用單機版或是直接編修參數檔案，只要符合以上的參數格式就可以順利啟動地陷模式，但是透過單機版的專案管理、平面分區等功能，可以將部分繁瑣的工作省去，增加工作的效率。

### 3.2 地陷模式規格修正

今年度地陷模式再度改版，因為考量實際的情況後，部分邊界條件是會隨著時間而變動的，如抽水量、入滲量等。為了讓地陷模式的計算結果更接近實際情況，故針對抽水量、入滲量、邊界入滲等參數，增加時間序列輸入的功能。但同時考量操作上的便利性，也保留之前無時間變動參數的輸入方式，而所謂操作上的便利性，是指一旦參數隨時間變動，則所有參數數量便和模擬時刻及變動次數成正比，若讓使用者依次輸入，所花費的時間將是倍數成長，故讓使用者依照本身的需求，採取適當的計算模式。

此次修正的檔案有四個，分別說明如下：

1. Control.dat：這是地陷模式的主要控制檔案，內容記載研究區域的地層數目、要計算的格網範圍、及模擬時刻等。此次修正增加三個參數，分別是FLSO、FLHB與FLUB，目的皆是控制部分可能隨時間而變動的參數，決定是否這些參數內容隨時間而改變。而三個參數分別控制Source.dat、Boundh.dat及Boundv.dat的Time欄位，0代表使用固定參數，1則是啟動時間序列參數。
2. Source.dat：記載抽水量或是補注量，由Control.dat的FLSO參數所控制，如果FLSO=0，則格式如表3-13，代表模擬時刻間，只有一套抽水量或補注量；若FLSO=1，則格式如表3-5，使用者填入所需要的不同時間抽水量或補注量。
3. Boundh.dat：記載每層觀測水位的高度，由Control.dat的FLHB參數控制，如果FLHB=0，則格式如表3-14，代表模擬時刻間，只有一套觀測水位的高度；若FLHB=1，則格式如表3-6，使用者需要填入所需要的不同時間觀測水位高度。
4. Boundv.dat：記載上邊界與下邊界的入滲量，由Control.dat的FLUB參數控制，如果FLUB=0，則格式如表3-15，代表模擬時刻間，只有一套的邊界入滲量；若FLUB=1，則格式如表3-7，使用者必須填入不同時間的邊界入滲量，才能順利啟動模式。

修正模式的主要目的是為了讓模式模擬結果能夠更接近真實情況，因為若模擬結果愈能反應真實情況，專業人員愈能藉著模式判斷較正確的變化，進而決定適當的決策，達到真正有效的評估。

### 3.3 測試案例說明

地陷模式更新版本之後，為了驗證與測試模式是否能夠依照設計的流程和格式啟動，所以便設計一個簡單的測試案例。實際案例與測試案例的不同，在於測試案例的目的是檢測地陷模式啟動時，各項參數的輸



入格式與程式計算無誤，故在設計測試案例時便以單純化的控制條件為主，減少因為過多的控制條件而導致無法檢查程式的錯誤點。測試案例的控制條件如下：

1. 格網大小：21 x 21，間隔 1000m x 1000m。
2. 總模擬時間：20 天，模擬間隔 86400 秒(一天)。
3. 模擬層數：3 層。
4. 水頭邊界高度：10m，且上下邊界無入滲。
5. 地質參數已知。
6. 抽水點：設定在格網(11,11)處抽水，如圖 3-1。

將所有的控制條件依照模式所需要的參數檔案格式建立後，便可以啟動模式的執行檔，若所有的模式參數檔案都是符合規定格式的，地陷模式便讀取所有的參數檔案後進行運算，並同時在畫面上呈現計算的過程，如圖 3-2。若其中有參數檔案的格式不正確，在啟動模式後，模式會顯示錯誤的參數檔案檔名，使用者必須回頭檢查檔案格式，確定問題的所在，並且更正，但錯誤有時並不一定存在一個檔案中，尤其地陷模式經過多次的修改，需要控制的項目日益增多，可能因為在某個參數檔案中誤設參數，造成連鎖的錯誤，故在建立檔案時，便要時時刻刻注意參數的正確性。

地陷模式所產生的輸出檔案是依照使用者的需求經過參數設定後的結果，包括控制任意格網點輸出的內容，也可以關閉任意格網點的輸出結果，還有控制輸出 Time Step 數量，這些功能都是經由之前的參數所設定的，故模式輸出結果是符合使用者需求的。經過繪圖後，便可以清楚看出地層下陷的趨勢，以預設抽水點下陷的最為嚴重，如圖 3-3、3-4。

## 第四章 網際網路與單機版程式說明

### 4.1 網際網路版

在網際網路版本部份，地圖伺服器的功能已經開發完成，包含地圖縮放、圖層管理及資料查詢功能。系統安裝於伺服器後，可透過網際網路(Internet)，以微軟 IE 5.0 以上之版本進入，執行作業。系統畫面如圖 4-1

畫面左方為系統功能表，可選取不同的功能，右方則為圖例及圖層管理，地圖上方有一簡單之工具列，包含了「預設地圖範圍」、「放大」、「縮小」三項功能，在基本地圖操作部份，各功能之使用方式如下：

1. 預設地圖範圍：任何時候按下此工具按鈕，將重設顯示之地圖範圍為系統預設之範圍，目前的設定為將整個計畫區完整的顯示出來。
2. 放大：先在地圖上以滑鼠拖曳的方式框選想要放大顯示的範圍後，按下此工具按鈕，便會將地圖顯示範圍框設定為所框選的範圍。實際顯示的範圍則可能會和框選的範圍有所出入，主要是由於框選的長寬比例和顯示視窗的長寬比例有所不同，程式會自動調整顯示範圍以配合視窗之長寬比例。
3. 縮小：直接按下此工具按鈕，地圖會以現有顯示範圍為中心，將比例尺縮小 1/2，以顯示更多的區域。
4. 圖層控制：直接勾選右方各圖層前的控制方塊，即可決定是否顯示該圖層。
5. 資料查詢：在地圖上雙擊滑鼠左鍵 (double-click)，會顯示所查詢位置的資料，如圖 4-2。若是選取如河川斷面等資料項目則會有另一視窗顯示圖形。如井柱 2D 剖面圖(圖 4-3)、河川斷面圖(圖 4-4)、

雨量資料圖(圖 4-5)、河川水位圖(圖 4-6)。且使用者可以任意選取需要的範圍放大，檢視所需要的資料區段。

6. 背景圖資查詢功能：目前可針對井柱資料、水文資料、土地利用資料做查詢，除了顯示所查詢資料的資訊外，也以圖形等多樣方式進行資料呈現。
7. 資料上傳功能：目前可接受兩種資料的上傳，包括地形監測數據與地陷模式模擬結果。資料上傳後，系統會自動記錄時間與大小，並顯示在瀏覽器中，使用者可以依照需求點選以查看資料。

地陷模式地理資訊系統方面，網際網路版本將以提供一般情況使用為主。透過伺服器提供基本背景圖資，讓使用者得以進行資料上傳，達到資料分享的目的。當使用者需要較複雜之邊界設定或其他需求時，則由於目前網頁瀏覽器其功能仍有所限制，如全數操作皆要在瀏覽器中完成，精確度及操作方便性皆有所限制，目前規劃考量仍建議以功能完整之地陷模式地理資訊系統單機版進行模式推算。

完成上述之功能之後，網際網路版本之主要優點如下：

1. 節省一般地理資訊系統元件之昂貴授權費用：以前單機版使用之 MapObject，每安裝一台機器便需要一份授權，會造系統大量推廣時沈重的負擔。而目前以 Java 為開發環境之伺服器程式，部份元件亦需要購置，即使單價較高，但只需一次或少量授權（視元件之授權規定及架設之伺服器總數而定），成本遠低於單機版。
2. 使用網頁瀏覽器作為操作介面，使用者端完全無需額外安裝任何軟體，在系統運作推廣時僅需簡單之教育訓練及賦與連線權限，更無後續可能需至各使用單位進行系統維護之問題。
3. 模式結果可直接呈現於網際網路上，提供供學術界甚至一般民眾參考使用，將整套系統之實值效益充份發揮。

## 4.2 單機版

單機版已經全面以 JAVA 程式語言撰寫，早期的版本是以 VB 程式語言開發而成，且為了採取地理資訊系統為輔助工具，必須購買額外的程式元件，不僅造成開發成本的增加，爾後進行系統移轉與散發使用時，亦會產生軟體授權的問題。故在規劃單機版改版時，便需要構思如何避免軟體授權之問題，也因此選擇有跨平台特性與支援度佳的 JAVA 程式語言。以下說明目前單機版移植後之功能。

1. 專案管理功能：目前已有基本之專案管理的功能，包括可以新增專案、儲存專案及開啟舊專案，且可依照專案需求設定基本圖資與專案目錄，基本圖資是指研究區域的地圖，使用者可以透過疊圖的方式讓各項工作更具效率；專案目錄則是儲存專案的資料夾，包括基本圖資、井柱資料及地圖等資訊。另外使用者可以針對專案撰寫專案說明，簡單說明此專案的基本資料，作為註解。且程式也會自動紀錄操作的歷程，如井柱與控制檔資訊等，如圖 4-7。
2. 匯入井柱：使用者可以利用此功能匯入經過整理的井柱資料檔案，檔案內容包括層數、分區、站名、座標位置、各層厚度等資料，只要依照規定的格式建立檔案，系統便會自動產生符合匯入檔案的地圖，並自動顯示於畫面上。如圖 4-8。
3. 井柱編修：完成井柱匯入後，系統提供兩種修改井柱資料的功能，一是直接在地圖上點選井柱，則會出現井柱資料的視窗，使用者可以編修其內容，如圖 4-9。二是利用 3D VRML 的方式，讓使用者在 VRML 環境中，觀察依照匯入檔案所產生的 3D 井柱，且可點選井柱後編修，如圖 4-10。
4. 產生格網：使用者必須在此定義格網與部分模式輸入檔案的參

數，系統會自動依照定義的參數產生格網與計算部分參數，如自動內差地層厚度。此外使用者可以儲存所設定的參數，並可以再次選取載入，以減少輸入資料所浪費的時間。如圖 4-11。

5. 案例管理：在專案管理的架構下，系統提供管理在同一個研究區中，根據相同井柱與格網設定，但不同的分區或格網參數所產生的案例，使用者可以根據自身需求設定多個案例，可在操作地陷系統時切換，作為比較或是除錯之用。
6. 平面分區：系統會自動以徐昇氏多邊形法計算內邊界，並且提供在地圖上調整內邊界線位置的功能，當利用工具列的圖示按鈕選擇任一內邊界線時，系統會即時在地圖中顯示其位置，並且在移動時即時顯示，方便使用者進行調整。如圖 4-12。
7. 外邊界：當完成內邊界的調整之後，便要進行外邊界的劃設，使用者利用滑鼠在地圖上點選外邊界點的位置，當結束時滑鼠左鍵連點兩下即自動閉合，點選完成分區則自動連結內邊界與外邊界，如圖 4-13。
8. 設定參數：地陷模式主要的參數都在此輸入，由於格網數目可能非常多，故系統提供單點輸入、多邊形圈選輸入與檔案匯入功能。單點選取是指使用者直接在地圖上點選格網，並於畫面上輸入參數；多邊形圈選輸入則是選取地圖上方的功能按鍵後，於地圖上點選多邊形，系統自動判斷多邊形內的格網點，使用者輸入參數時便會同時寫入這些格網點參數中；而檔案匯入則是指利用和模式輸入檔案相同格式的檔案進行匯入，即是 X、Y、參數的組合，如圖 4-14。而參數設定功能如圖 4-15。
9. 啟動模式與模式結果：當完成所有的參數輸入後，按下啟動模式鍵，系統便自動輸出所有參數變成地陷模式的輸入檔案，進而啟

動模式計算，並且輸出模式結果。而模式結果則提供儲存檔案的功能，可以將在單機版所執行的成果存檔後，利用網路版的檔案上傳功能傳至網路版。且目前單機版提供將模式結果利用顏色漸層繪圖的功能，可以利用顏色表現簡單的成果圖，使用者可以利用其判斷結果是否符合預期，如圖 4-16。

### 4.3 使用虛擬實境技術編輯井柱

#### 4.3.1 虛擬實境技術編輯井柱需求定義

本計畫在視覺化井柱編輯功能的虛擬實境技術採用虛擬實境模型語言(VRML: Virtual Reality Modeling Language)。視覺化井柱編輯預計開發的功能分為下列五大部分：

1. 井柱資料載入虛擬實境場景。
2. 由井柱資料動態產生等位面。
3. 等位面資料載入虛擬實境場景。
4. 使用者編輯井柱資料(含水層或阻水層厚度)。
5. 編輯後井柱資料傳回伺服器資料庫內。

上述視覺化井柱編輯的作業流程簡述如圖 4-17。

#### 4.3.2 由井柱資料自動產生井柱

本計畫去年度採用離線方式產生井柱的虛擬實境場景，並將編輯每個井柱資料的網頁預先以 VRML 語言的 Anchor 節點安置在每個井柱上。本年度使用 Java 與 MySQL 資料庫搭配，將井柱文字資料匯入 MySQL 資料庫中，配合 VRML97 語言中的 Script 節點，將資料載入 VRML 虛擬實境場景中。其概念說明如下：

1. 使用 VRML 語言 Script 節點動態產生物件之功能

此項功能分為三部分：

- (1) 將井柱物件以字串方式產生
- (2) 將井柱物件以暫存物件儲存
- (3) 將此暫存物件加入場景中

程式碼如圖 4-18 所示

2. 以 Java 與 MySQL 資料庫抓取井柱資料庫內資料，動態將井柱資料以字串流方式，即可加入虛擬實境場景中。如圖 4-19。

#### 4.3.3 由井柱資料動態產生等位面並加入虛擬實境場景中

由井柱資料產生等位面程式，預計以 Java 改寫原有不規則三角網的 C 語言程式，以便與本計畫系統作緊密結合。這部分將於期末完成。

#### 4.3.4 使用者編輯井柱資料(含水層或阻水層厚度)

本年度將井柱資料以 MySQL 資料庫儲存，使用者可以在虛擬實境場景中點選任意一個井柱，系統會直接與資料庫連線編輯其含水層或阻水層厚度。修改資料畫面如圖 4-20。

#### 4.3.5 編輯後井柱資料傳回伺服器資料庫內

所有透過 Java 程式編輯的井柱資料，傳回伺服器資料庫後，即可呼叫第三項功能重新產生等位面。

### 4.4 使用與維護手冊編寫原則

系統開發最重要的工作除了程式的編寫之外，就屬文件的撰寫最為重要，因為若沒有透過文件將使用及維護程式的方法留下記錄，則懂得操作系統的便只有開發者與少數的測試人員。但開發系統的目的就是盡可能讓最多的使用者操作，發揮最高的效率，且系統的維護與後續開發也是相當重要，故使用與維護手冊是系統開發後不可或缺的文件。

在地陷模式系統單機版與網路版的文件中，分別有各自的使用與維護手冊，使用手冊部分主要是描述操作系統的流程，透過文字與畫面的配合，再輔以系統流程圖的幫助，讓使用者能夠 Step by Step 操作學習使用系統，在編寫使用手冊的同時，可以進行除錯與確定流程的工作，對系統的開發也有莫大的幫助。而維護手冊著重於管理者如何去維護整套系統，而系統中重要的資料主要分為：

1. 資料字典：描述系統中所有資料的格式、單位、屬性等資料，因為這是系統的最基本資料。
2. 系統設定：紀錄系統中可讓管理者變更的檔案、目錄，讓管理者在更新或是設計新功能時更有效率。
3. 安裝系統：教導管理者如何安裝系統與外掛軟體。

單機版與網路版的使用維護手冊的編寫原則都基於以上幾點，一套文件的撰寫最重要的除了事前良好的規劃，便是不斷的去更新文件，保持文件的正確性，方可發揮文件的最大效益。



## 第五章 結論

### 5.1 年度完成工作項目

在本年度的工作中，單機版已經從原本的 VB 版本演變為 JAVA 版本，而網路版也開發完成，為了讓兩者結合更為緊密的修正工作也已經在下半年度完成。

地陷模式今年也進行了更新工作，故為了讓系統能正確操作新的地陷模式，程式必須同時進行重整與開發，也思索各種較佳的參數輸入方式，目的都是為了讓使用者更便捷使用地陷系統。

為配合單機版與網路版的開發與修正，系統文件也必須同步更新，包括系統使用手冊與維護手冊。透過整體流程文件化的方式，可讓使用者容易掌握整套系統運作的原理與操作方式。在系統文件更新同時，整合系統介面也因應重新定義配合相關流程，如三維視覺介面的功能擴充，包括井柱地層展示與計算輸出展示等。且為配合地層下陷模式改版，重新設計系統的輸入與輸出，並透過圖形展示功能，示範測試案例。

透過單機版的改版計畫，網際網路版本實際上也進行了相關的整體規劃。研究中已經自行開發出網際網路地圖控制的元件，透過系統程式的演練實例，目前已經能夠接受多種電子地理圖資格式，達到基本操作的功能要求。網際網路版本的地圖元件也已經開發完成，已經將原單機版的背景圖資管理系統功能，移植到網際網路版本上。

由於今年度重新開發單機版與修正網路版的功能，且將單機版以 JAVA 程式語言進行開發，故今年度的工作成果，重點在於完成各種計算功能及圖形元件，且配合開發的過程，撰寫單機版與網路版的使用手冊及維護手冊，以利於技術的移轉與人員的訓練。

## 5.2 結論

在本計畫進行的三年中，為了讓地陷模式與地陷模式系統單機版能夠緊密配合，兩者都經過數次的改版與更新的討論，因而完成地陷模式計算系統的主要成果。同時，而為了讓更多的使用者或是研究人員能分享資源，網路版的開發亦隨著單機版而進行。不同於單機版的計算功能，網路版本強調的是其便利的圖資整合性。在以往的經驗中，要使用 GIS 進行查詢、操作的功能都避免不了安裝使用軟體，所以網路版最大的特色在於只要利用瀏覽器 Browser 介面就可以操作，不需要另外購買版權軟體。且在網路版中考慮了現場監測、計算模擬、與多元的背景資料展示，藉助資料分享平台，提供各式不同需求的使用者介面，發揮網路無遠弗屆的特性。

## 參考文獻

1. 江崇榮、賴典章、黃智昭、賴慈華、陳利貞，"濁水溪沖積扇之水文地質與地下水系統概念模式"，濁水溪沖積扇之地下水與水文地質研討會論文集， pp127-144，民國85年。
2. 經濟部水資源局，"大區域地下水超抽引致地層下陷之分層計算模式應用（一）：濁水溪沖積扇"，民國87年6月。
3. 經濟部水資源局，"大區域地下水超抽引致地層下陷之分層計算模式應用（二）：屏東平原"，民國88年6月。
4. 經濟部水資源局，"區域性地下水觀測站網檢討(II)-濁水溪沖積觀測站網佈井及觀測頻率檢討"，民國85年。
5. 廖日昇、李林少華、柳志錫、廖建順、林明煌，"北港沿海地區的地盤下陷及地下水污染之調查及研究"，工研院能資所地層下陷研討會論文集， pp129-216，民國79年6月。
6. 蕭慶章，"台灣地區地下水位變化與地層下陷概況"，工研院能資所地層下陷研討會論文集， pp135-159，民國79年。
7. 簡俊彥、蔡正男、陳尚、林季麟，"分層地層下陷觀測研究"，工研院能資所地層下陷研討會論文集， pp217-235，民國79年。
8. 2D OCX Programmer's Guide & Reference Manual Ver 5.0, KL Group, March 1997, Canada
9. Abernathy, M. and Shaw, S. (1998). "Integrating Geographic Information in VRML Models". In Proceedings of the Third Symposium on the Virtual Reality Modeling Language, Monterey, CA. February 16-19, pp. 107-114.
10. Building Applications with MapObjects, ESRI, 1998, Redlands, CA.
11. California Science Center (CSC), Los Angeles, CA. 31 January 1998.
12. DeLeon, V. J. (1999). "VRND: Notre-Dame Cathedral: A Globally

- Accessible Multi-User Real-Time Virtual
13. DIS-Java-VRML Working Group web page, <http://www.web3d.org/WorkingGroups/vrtp/dis-vrml-java/>
  14. Dykes, J. A., Moore, K. M. and Fairbairn, D. (1999). "From Chernoff to Imhof and Beyond: VRML & Cartography". In Proceedings of the Fourth Symposium on the Virtual Reality Modeling Language, Paderborn, Germany. pp. 99-104.
  15. Gore, A. (1998). "The Digital Earth: Understanding Our Planet in the 21st Century". Speech delivered at the
  16. IEEE 754-1985 (1985). "IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic". IEEE Standards Publication.
  17. ISO/IEC 14772-1:1997 (1997). "The Virtual Reality Modeling Language". December 1997. <http://www.vrml.org/Specifications>.
  18. MapObjects Programmer's Reference, ESRI, 1998, Redlands, CA.
  19. McConnell, S. Rapid Development, Microsoft Press, 1996.
  20. Reconstruction". In Proceedings of the 5th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM99), Dundee, Scotland. September 1-3, pp. 484-491.
  21. Reddy, M., Leclerc, Y. G., Iverson, L. and Bletter, N. (1999) "TerraVision II: Visualizing Massive Terrain Databases using VRML". IEEE Computer Graphics and Applications, 19(2): 30-38.
  22. Reddy, M., Leclerc, Y. G., Iverson, L., Bletter, N. and Vidimce, K. (1999). "Modeling the Digital Earth in VRML". In Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, vol. 3905.
  23. Rhyne, T. M. (1997). "Going Virtual with Geographic Information and Scientific Visualization". Computers and Geosciences, 23(4): 489-491.
  24. Snyder, J. P. (1987). "Map Projections – A Working Manual". U.S.

- Geological Survey Professional Paper 1395, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
25. Teach Yourself Object-Oriented Programming with Visual Basic in 21 Days, John D Conley III, June 1998, Sams Publishing, Indiana, USA
  26. USGS (1990). "Digital Elevation Models". Data Users Guide 5. United States Department of Interior U.S. Geological Survey. Reston, VA.
  27. Using ArcView 3d Analyst, ESRI, 1998, Redlands, CA.
  28. Using ArcView GIS, ESRI, 1998, Redlands, CA.
  29. Using Avenue - Customization and Application Development for ArcView GIS, ESRI, 1998, Redlands, CA.
  30. Using the ArcView Spatial Analyst, ESRI, 1998, Redlands, CA.
  31. Visual Basic 6 Business Objects - Enterprise Design and Implementation, Rockford Lhotka, 1998, Wrox Press, Birmingham, Canada

表 1-1 全程計畫進度表

工作項目		時間進度					
		第0.5年	第1年	第1.5年	第2年	第2.5年	第3年
單機版	資訊系統整合分析	■		■			
	建置相關資料庫與基本圖籍	■					
	軟體工具評估	■					
	整合系統設計與開發		■				
	使用手冊與維護手冊撰寫		■				
	模擬案例設計		■				
網路版 地下水 平衡模 式與地 層下陷 模式整 合	資訊系統整合分析	■					
	建置相關資料庫與基本圖籍	■					
	軟體工具評估			■			
	整合系統設計與開發			■			
	使用手冊與維護手冊撰寫			■			
	模擬案例設計				■		
人員訓練	技術移轉與相關訓練		■		■		■

表 3-1 Control.dat 檔案格式列表

層數	X 方向網 格數	Y 方向網 格數	X 方向網格間距(m)	Y 方向網格間距(m)
總模擬時刻 (sec)		模擬時間間距 (sec)		
FLSO		FLHB		FLUB

表 3-2 Hcghcm.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	水力傳導係數 (LayerI)	Lmae constant(G) (LayerI)	Lmae constant (LayerI)

表 3-3 GridpH.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	格網點位置 (GP)	Layer1 邊界形 式(GPH)	Layer2 邊界形 式(GPH)	.....
--------	--------	---------------	----------------------	----------------------	-------

表 3-4 GridpV.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	unConF	GPU	GPB
		0(ConF)	0(Dirichelet)	0(Dirichelet)
		1(unConF)	1(Neumann)	1(Neumann)

表 3-5 Soruce.dat 檔案格式列表

(Time)	x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	.....
0	0	0	.00	.00	.00	.00	stop

表 3-6 BoundH.dat 檔案格式列表

(Time)	X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	
0	0	0	.00	.00	.00	.00	Stop

表 3-7 BoundV.dat 檔案格式列表

(Time)	x-grid	y-grid	UB(上邊界)	BB(下邊界)	
0	0	0	0	0	stop

表 3-8 Depth.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII
--------	--------	--------	---------	----------



表 3-9 Waterd.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	LayerI
--------	--------	--------

表 3-10 Init.dat 檔案格式列表

X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII

表 3-11 Outp.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	GWO(水位)	GSO(下陷量)
		0	0
		1(output)	1(output)
0(結束)	0	0	0

表 3-12 Outt.dat 檔案格式列表

模擬時刻	GWOT(水位)	GSOT(下陷量)
	1(output)	1(output)
0(結束)	0(結束)	0(結束)

表 3-13 Soruce.dat 檔案當 FL50=0 之格式

x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	.....
0	0	.00	.00	.00	.00	stop

表 3-14 BoundH.dat 檔案當 FLHB=0 時之格式

X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	
0	0	.00	.00	.00	.00	Stop

表 3-15 BoundV.dat 檔案當 FLUB=0 時之格式

x-grid	y-grid	UB(上邊界)	BB(下邊界)	
0	0	0	0	stop

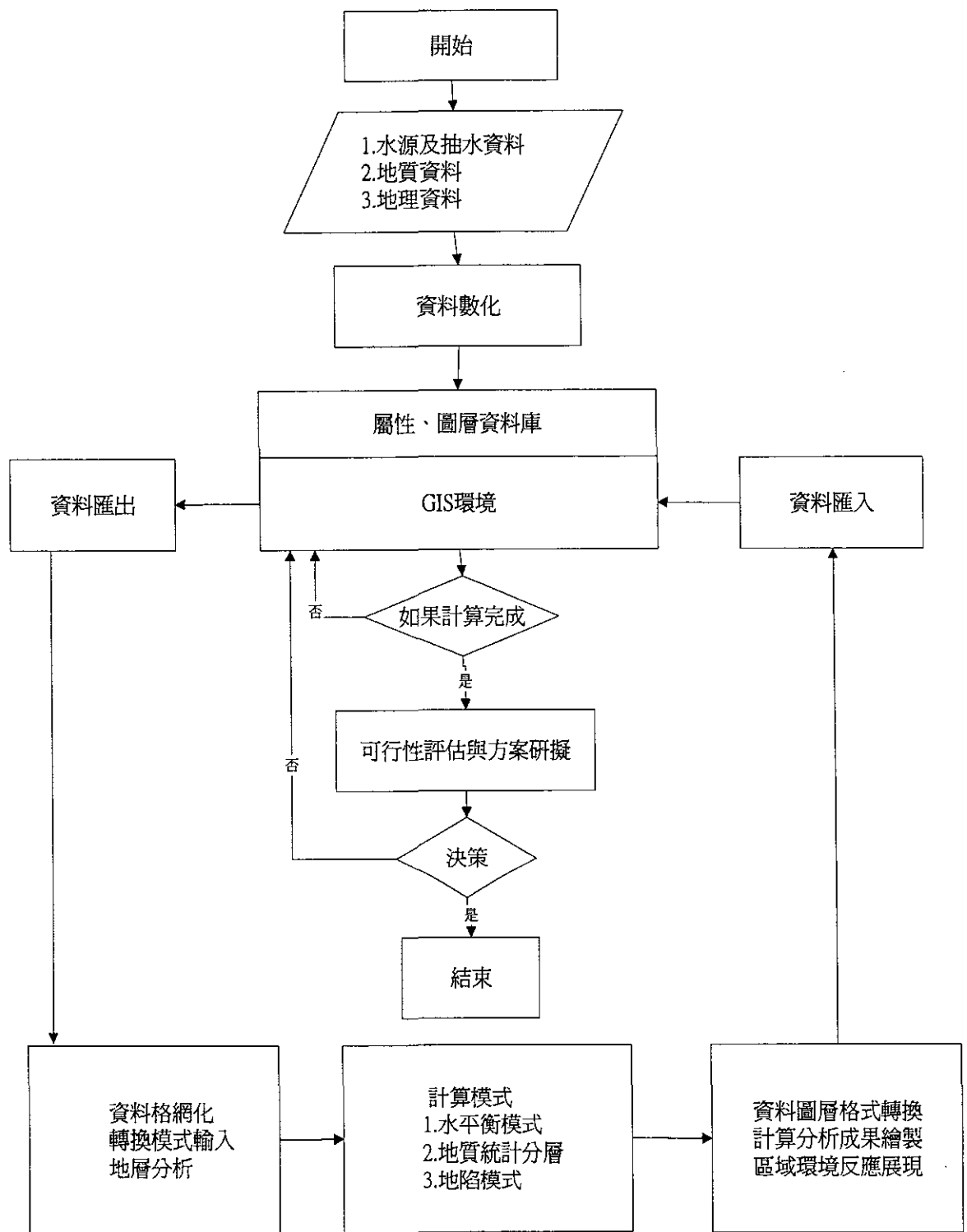


圖 1-1 整合計算概念架構

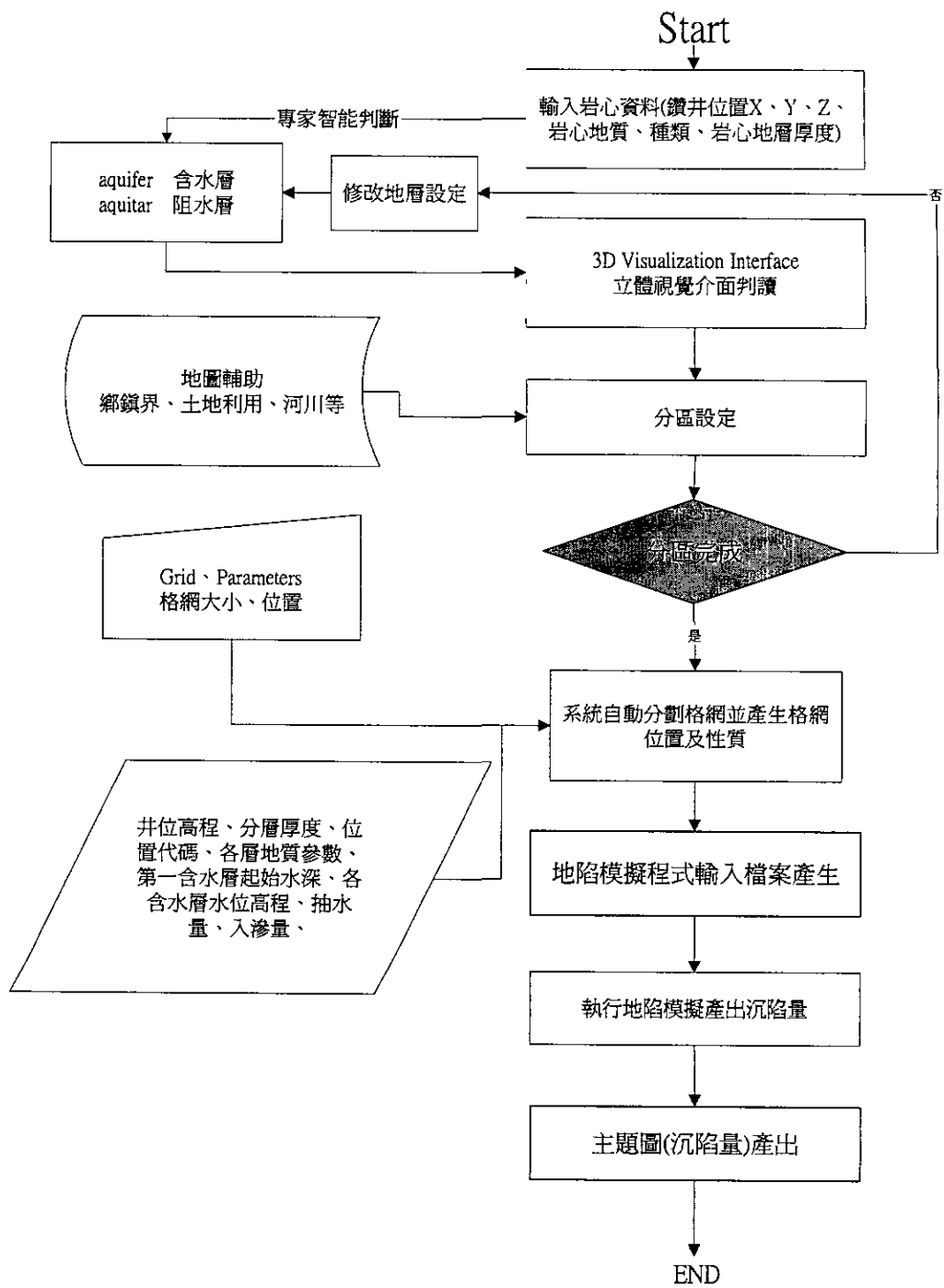


圖 1-2 整體計算工作流程

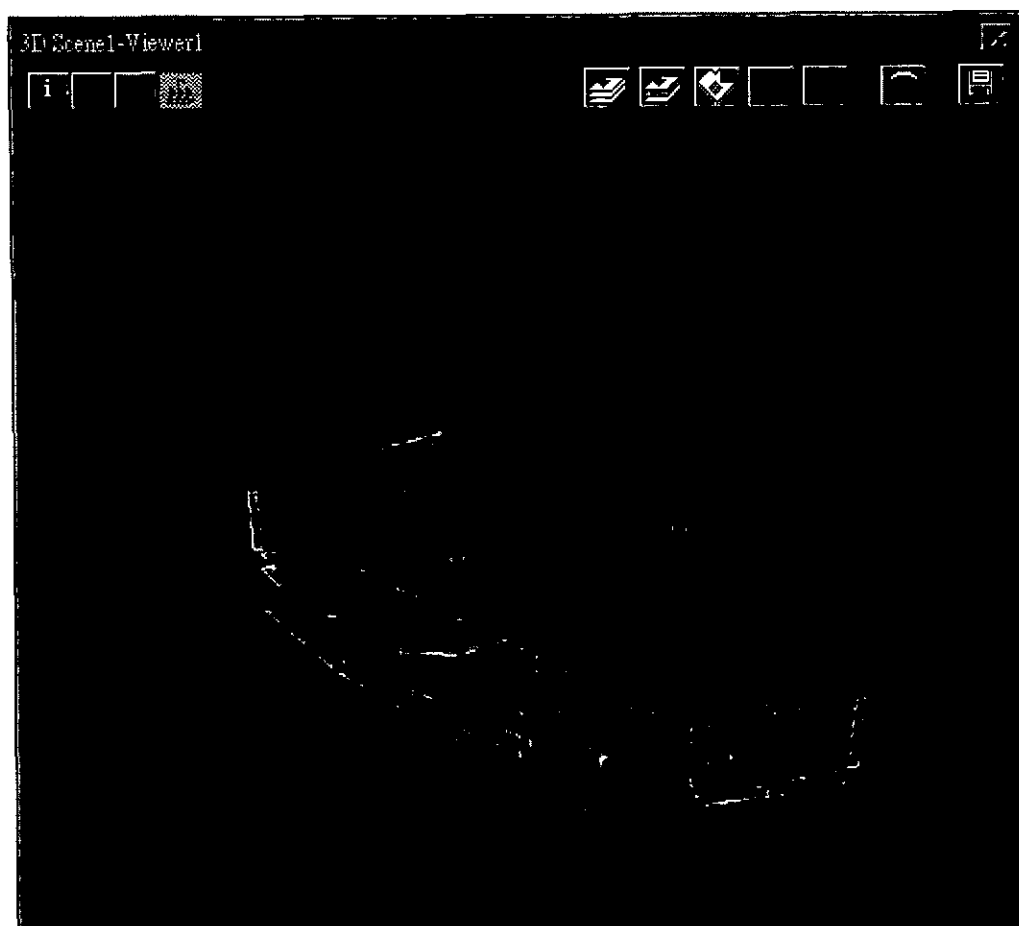


圖 1-3 ArcView 與 3D Spatial Analysis 製作三維空間虛擬實境示意圖

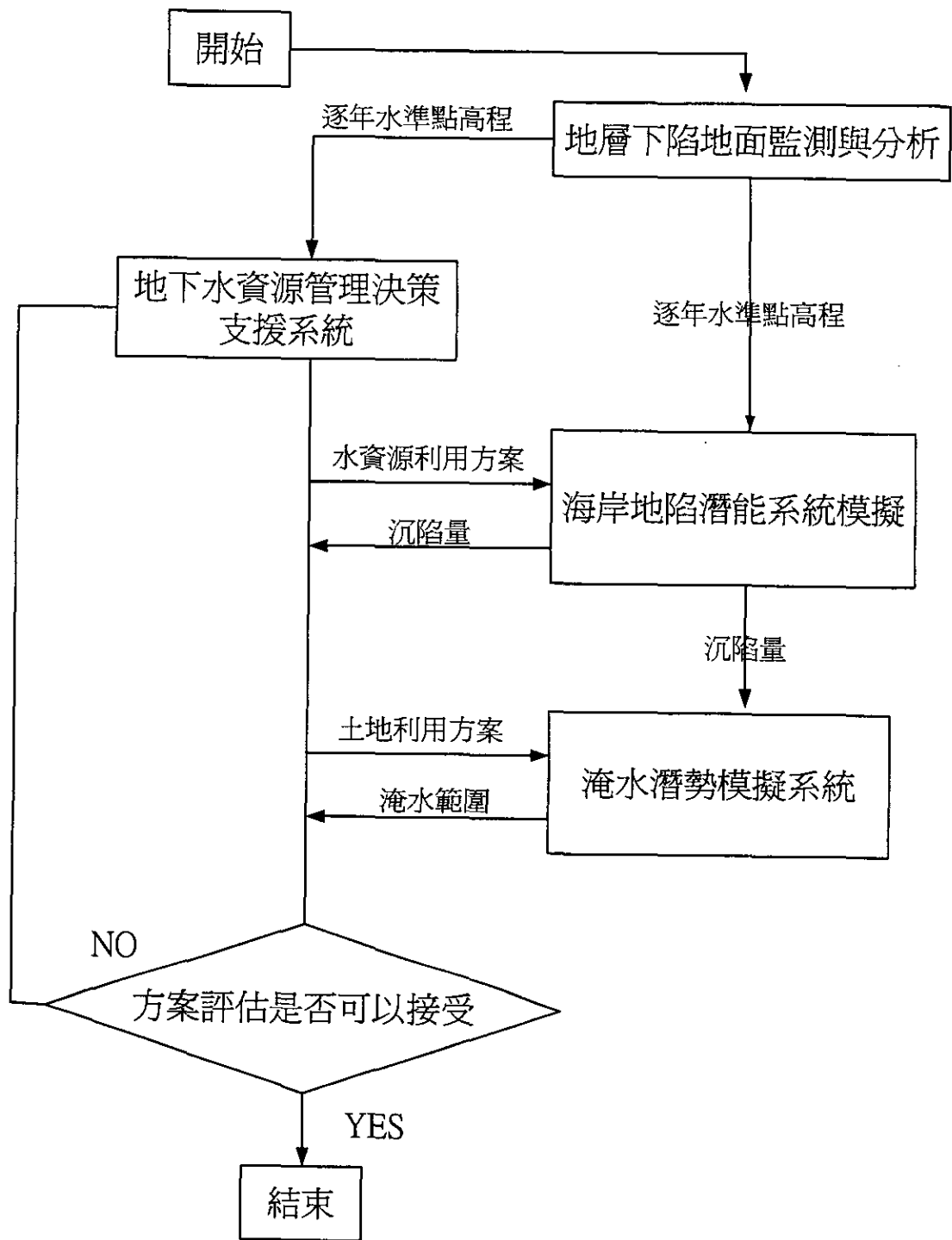


圖 1-4 整合系統規劃



圖 2-1 三維地層查詢資料展示。

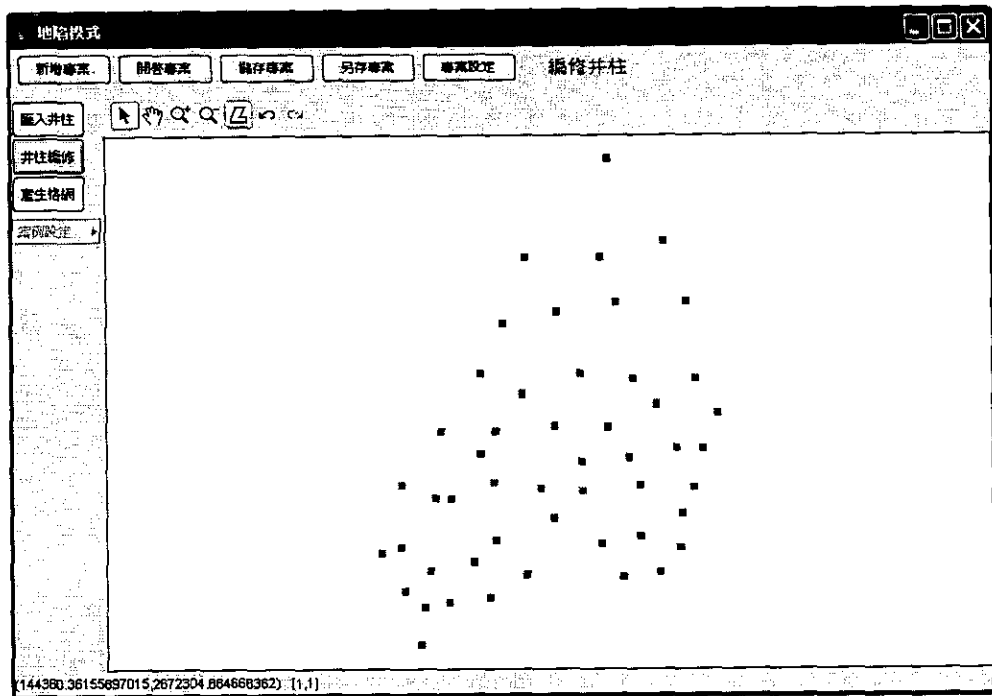


圖 2-2 井柱資料平面分佈圖。

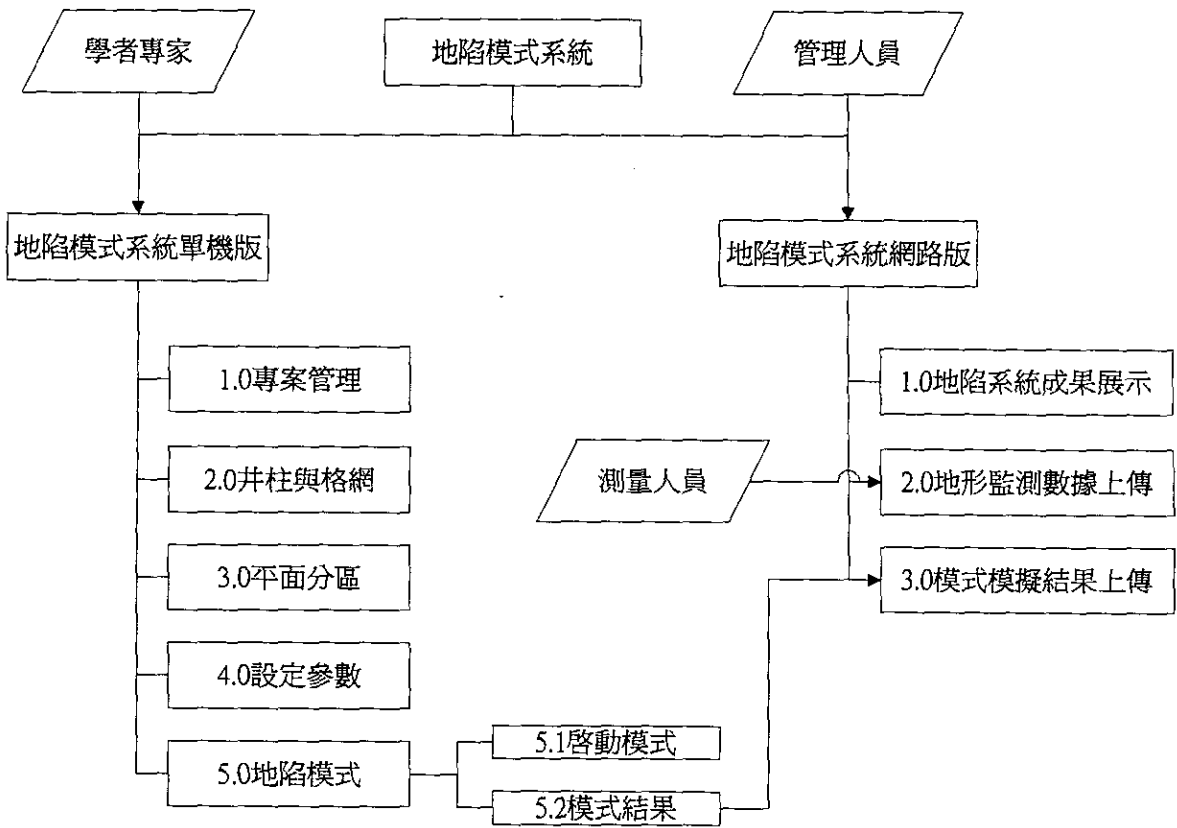


圖 2-3 地陷系統架構圖。

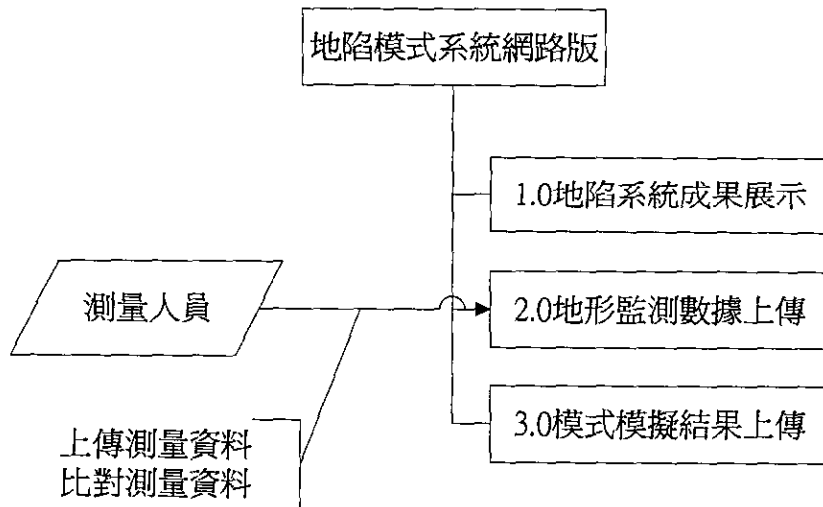


圖 2-3 測量人員流程圖。



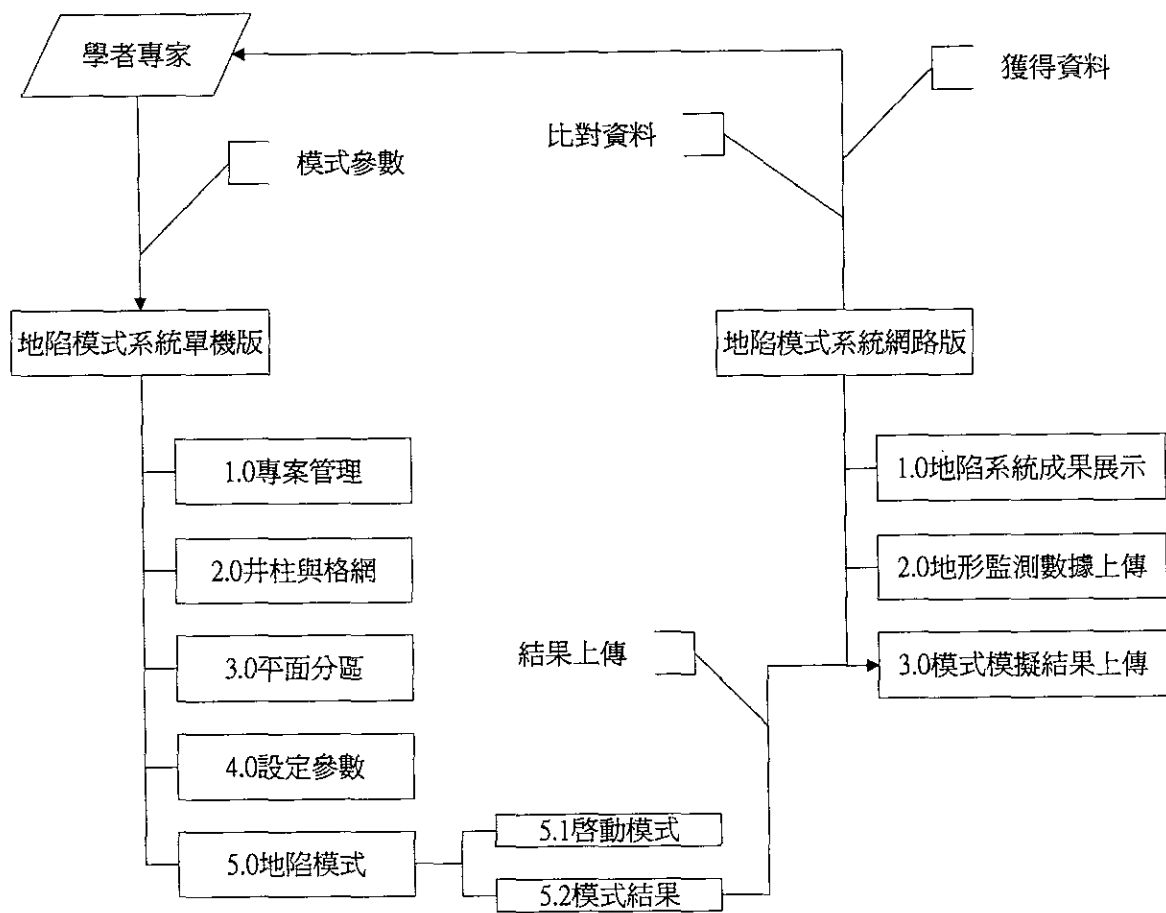


圖 2-4 學者專家流程圖。

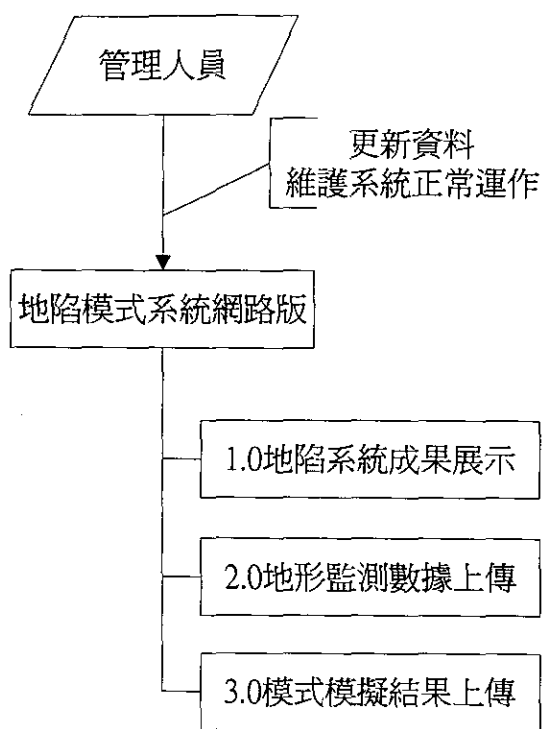


圖 2-5 管理人員流程圖。

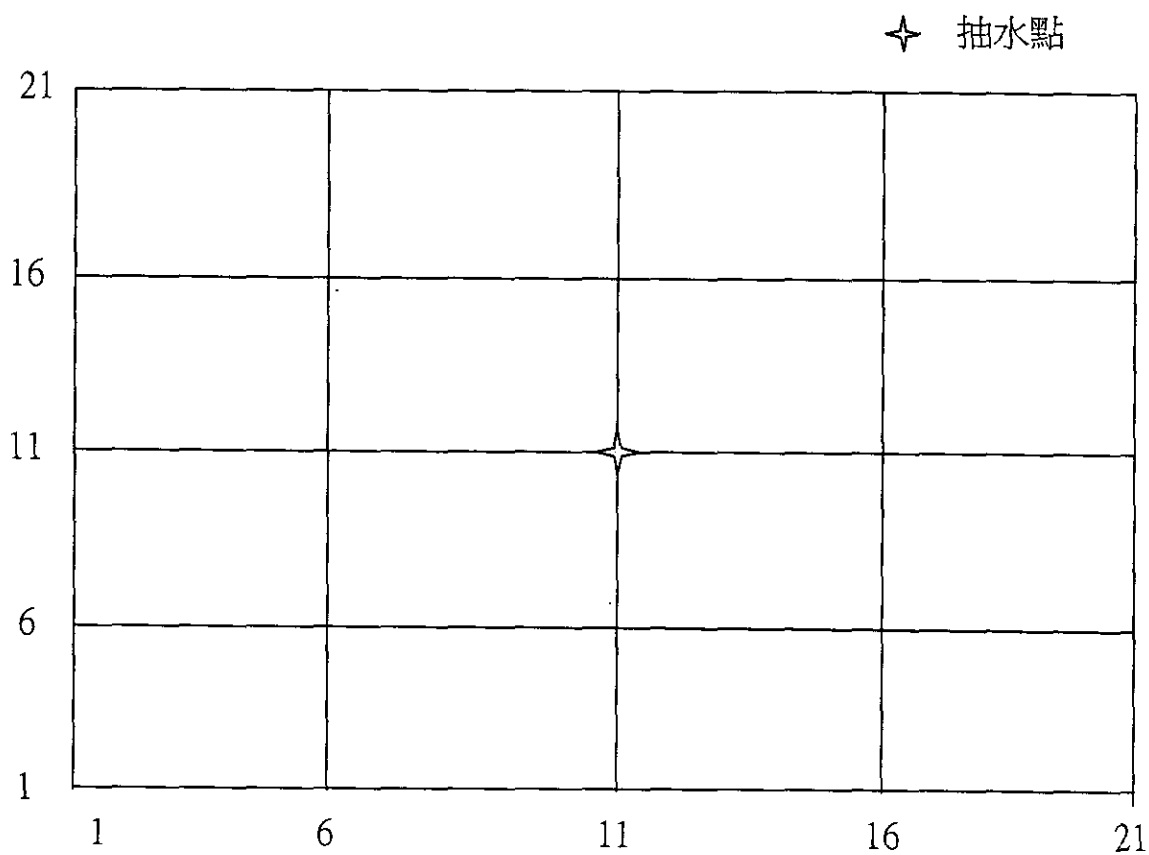


圖 3-1 測試案例抽水點示意圖。

ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	ITERATION NUMBER=	TIME STEP=	
28	1	28	8	8	2.794265705432509E-003																							
	2																											
29	1	29	11	13	2.346038703400673E-003																							
	2																											
30	1	30	10	10	2.784728962410555E-003																							
	2																											
31	1	31	8	13	2.212524381093318E-003																							
	2																											
32	1	32	7	10	2.212524381093318E-003																							
	2																											
33	1	33	10	11	2.794265705432509E-003																							
	2																											
34	2	34	13	12	2.193450895049410E-003																							
	2																											
35	1	35	7	10	2.202987638071364E-003																							
	2																											
36																												

圖 3-2 地陷模式執行畫面。

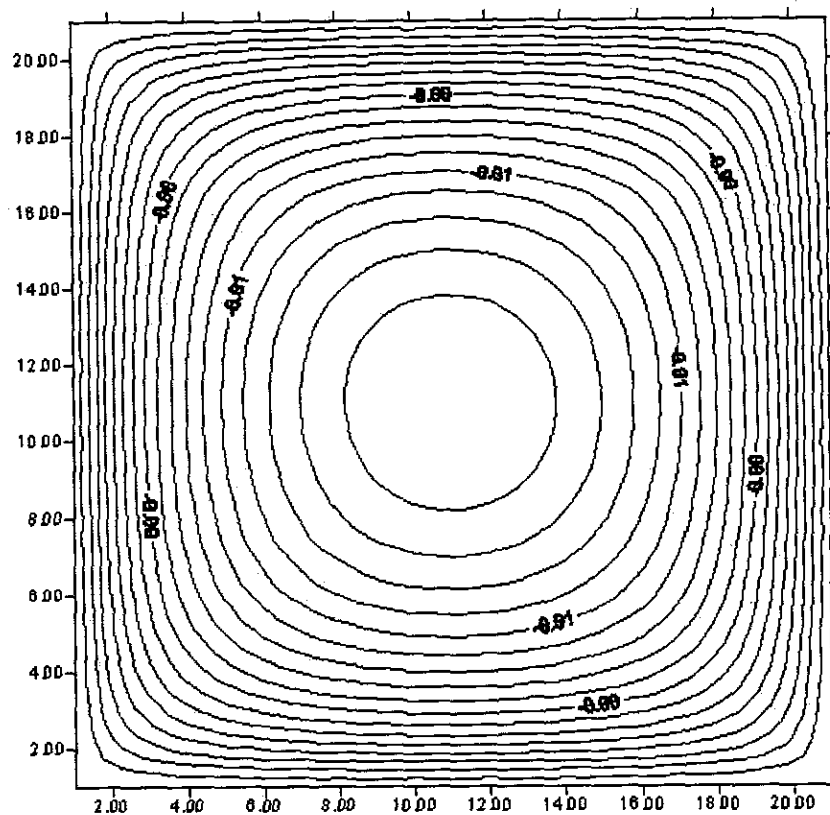


圖 3-3 測試案例計算結果 2D 繪圖。

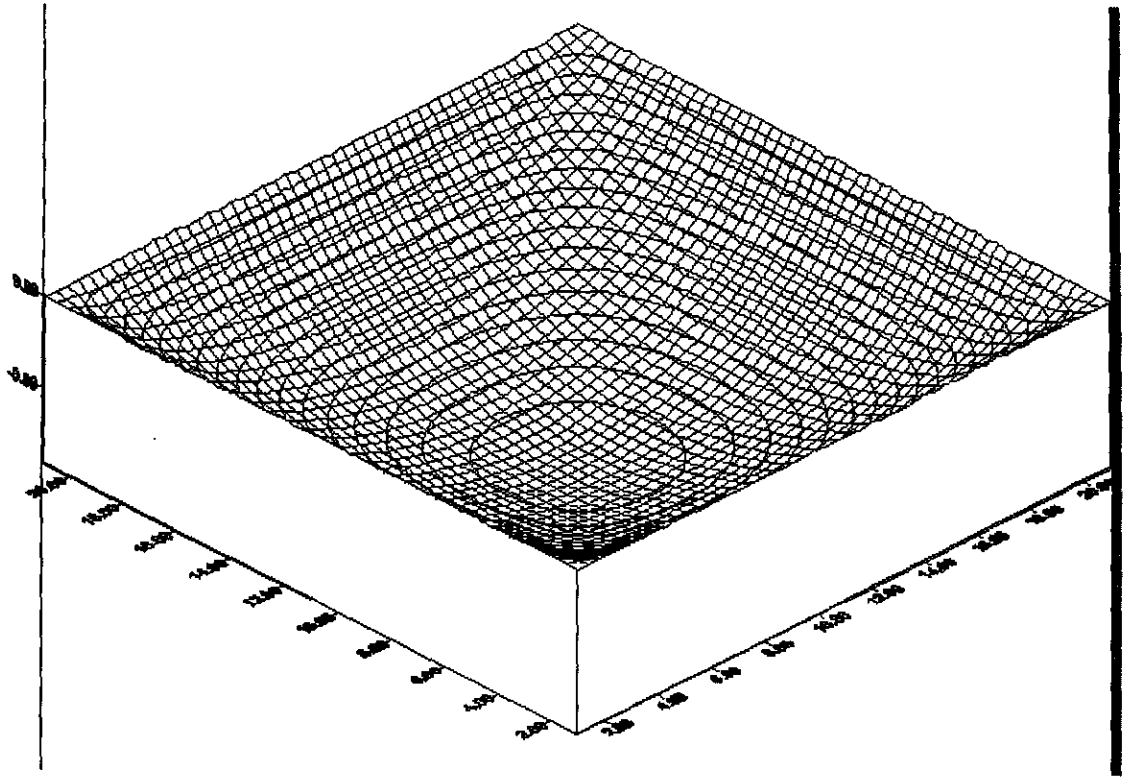


圖 3-4 測試案例計算結果 3D 繪圖。



圖 4-1 地陷模式地理資訊系統網際網路版系統畫面

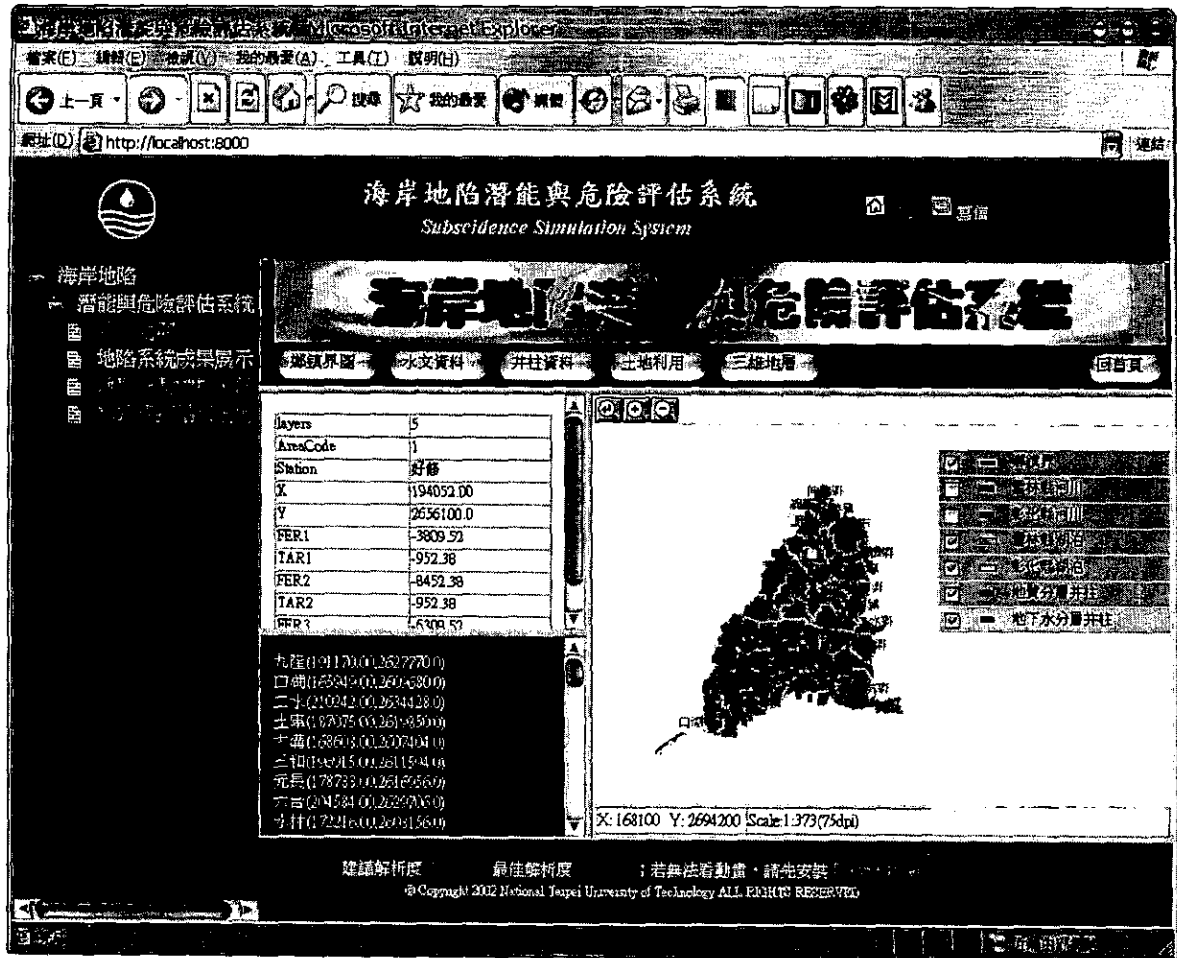


圖 4-2 井柱資料之查詢結果視窗

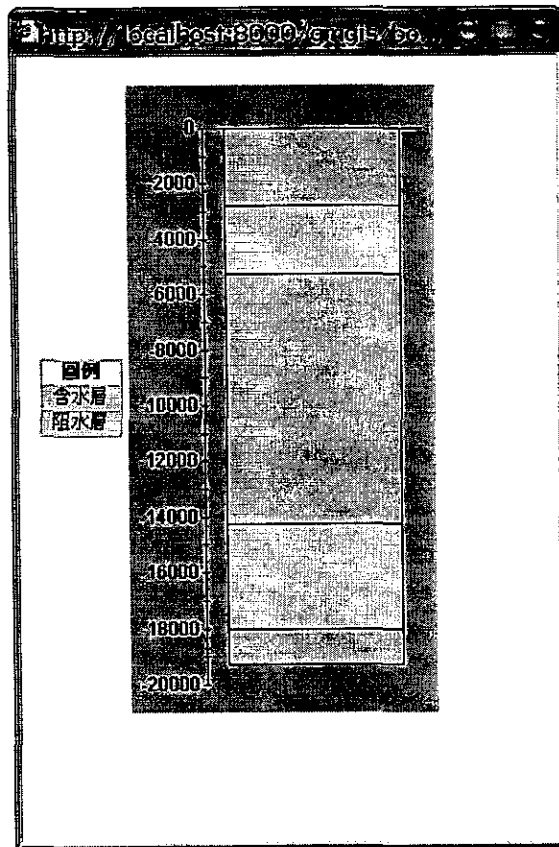


圖 4-3 井柱資料剖面圖



圖 4-4 河川断面圖

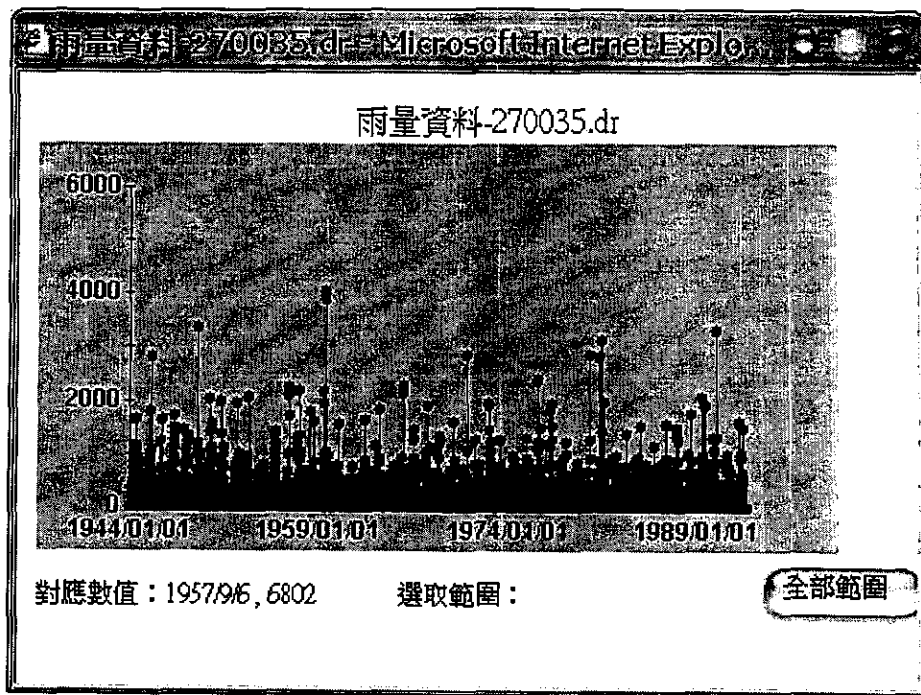


圖 4-5 雨量資料圖

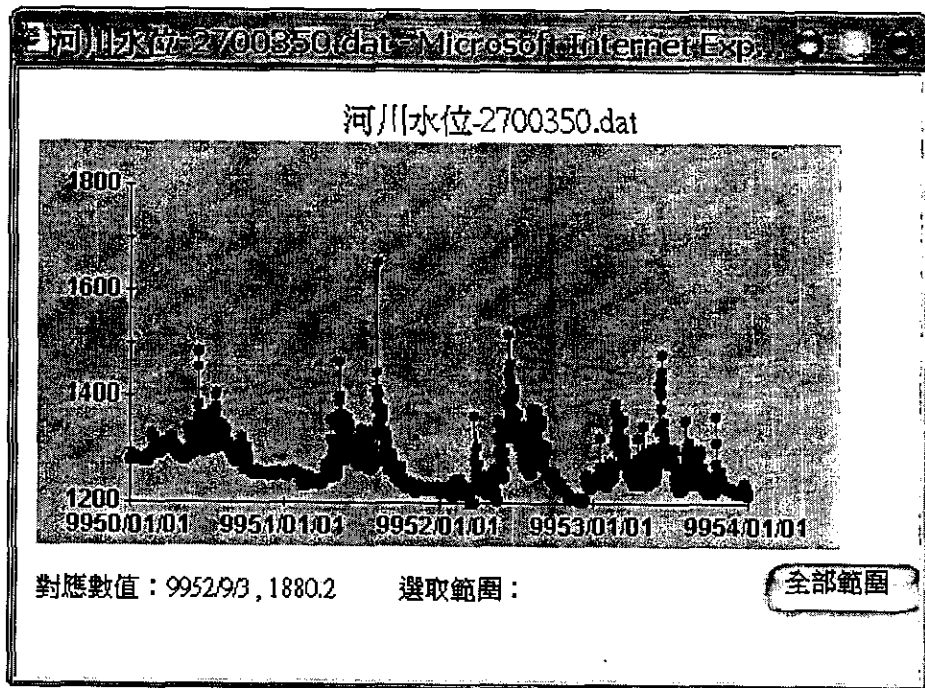


圖 4-6 河川水位圖



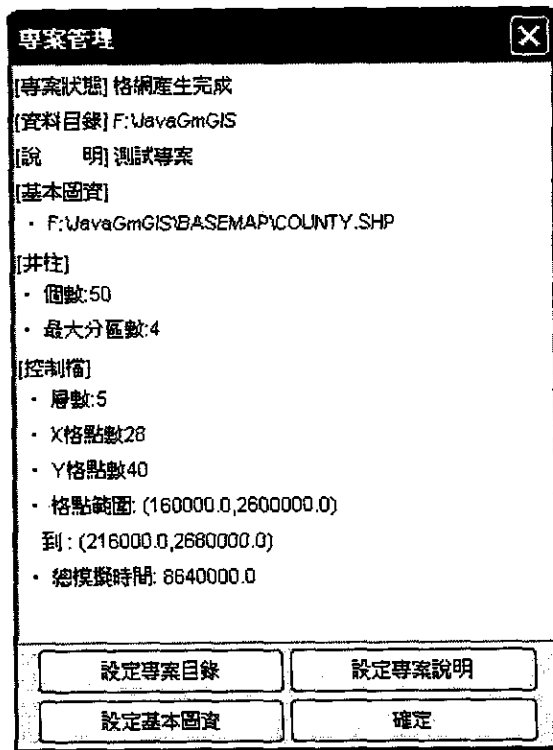


圖 4-7 專案管理功能

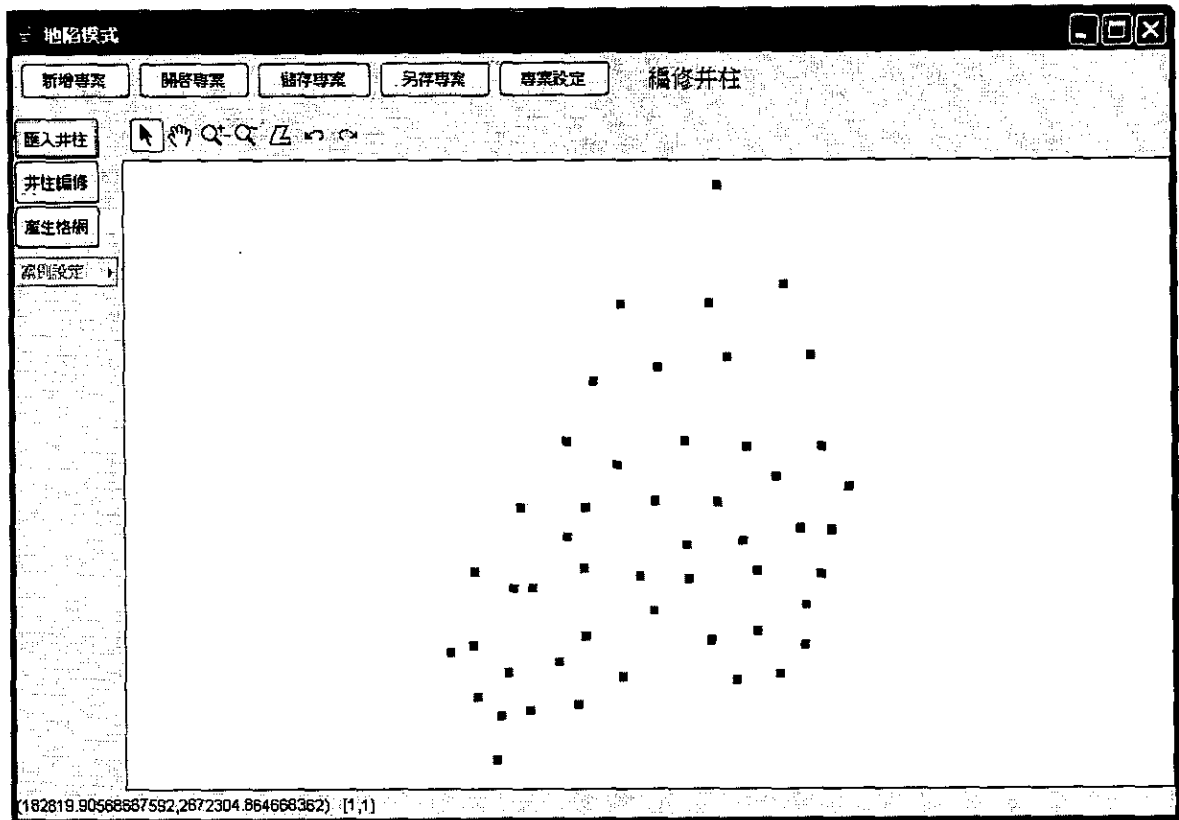


圖 4-8 匯入井柱後產生地圖

井柱資料	
名稱	隨甲
層數	5
分區代碼	1
X	187624.0
Y	2648441.0
第1層厚度	2000.0
第2層厚度	2250.0
第3層厚度	9375.0
第4層厚度	2875.0
第5層厚度	5125.0
<input type="button" value="更新"/> <input type="button" value="取消"/>	

圖 4-9 編修井柱資料。

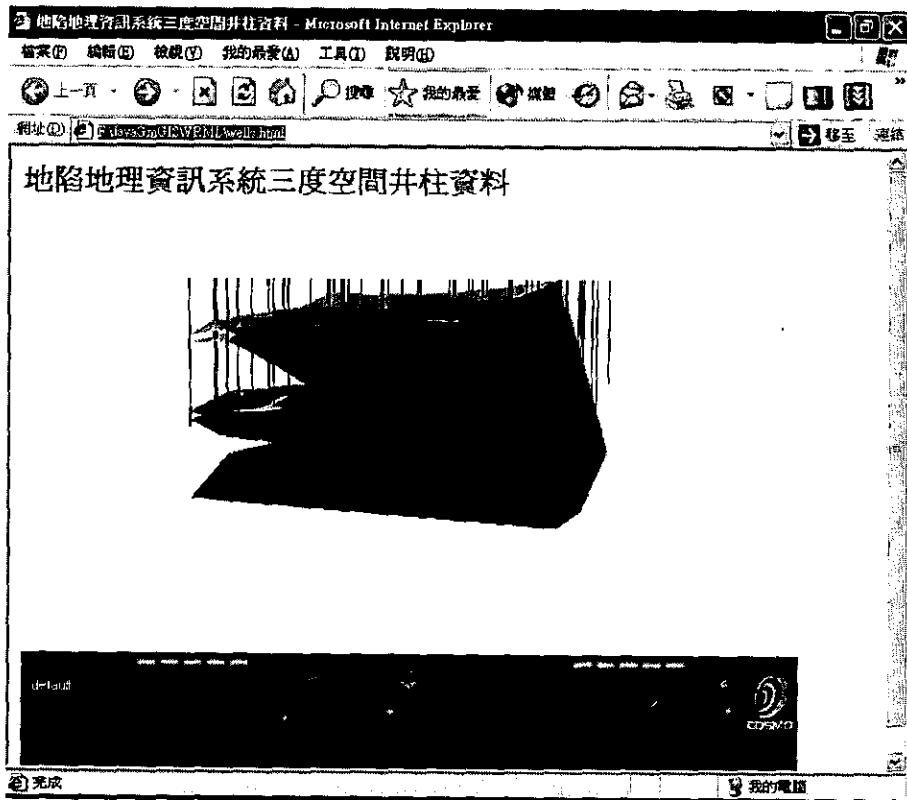


圖 4-10 利用 3D 點選井柱後編修資料。

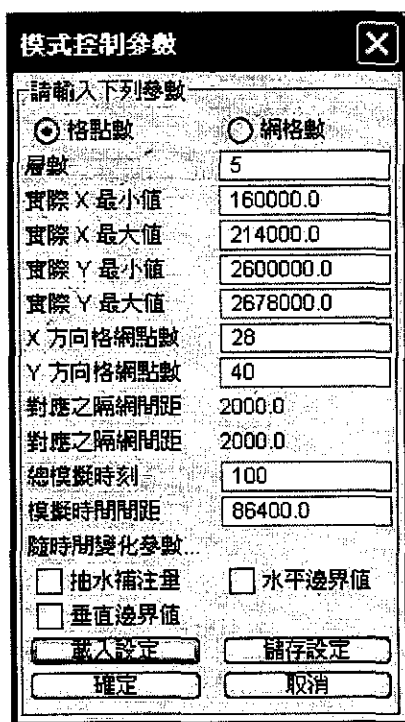


圖 4-11 定義格網參數。

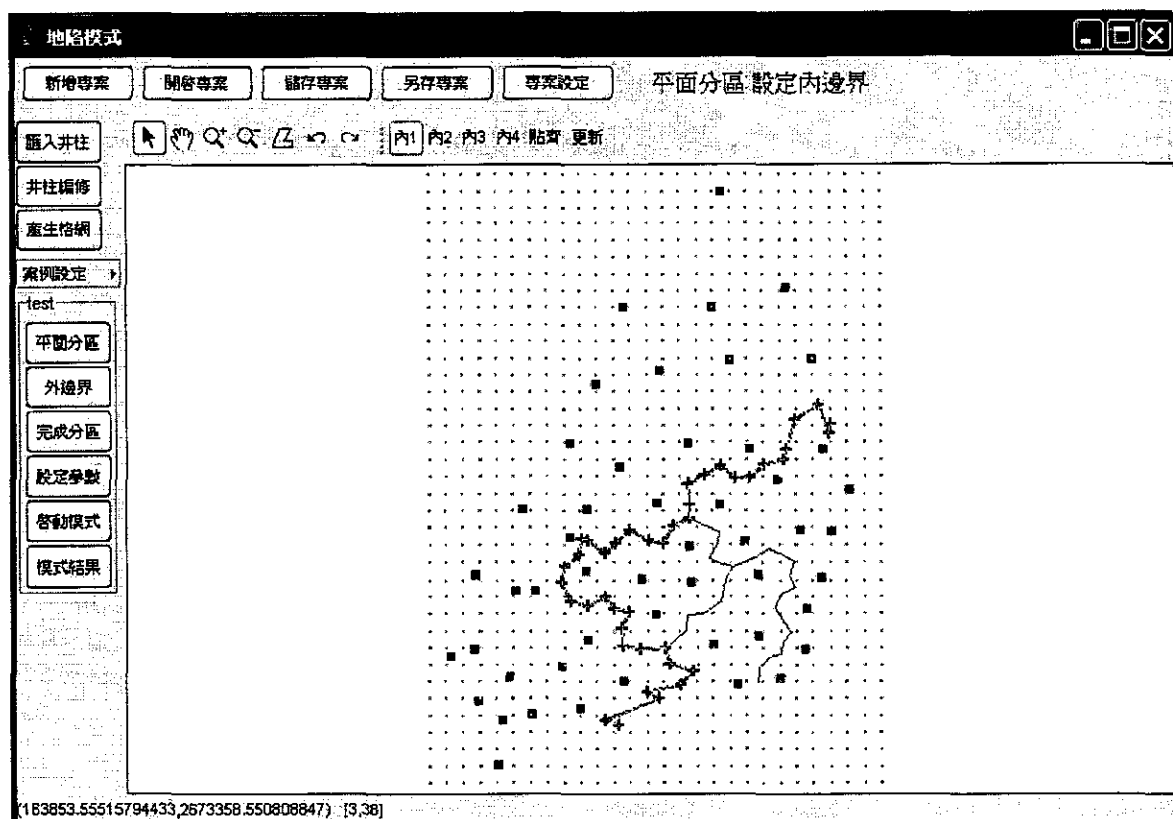


圖 4-12 平面分區產生內邊界。

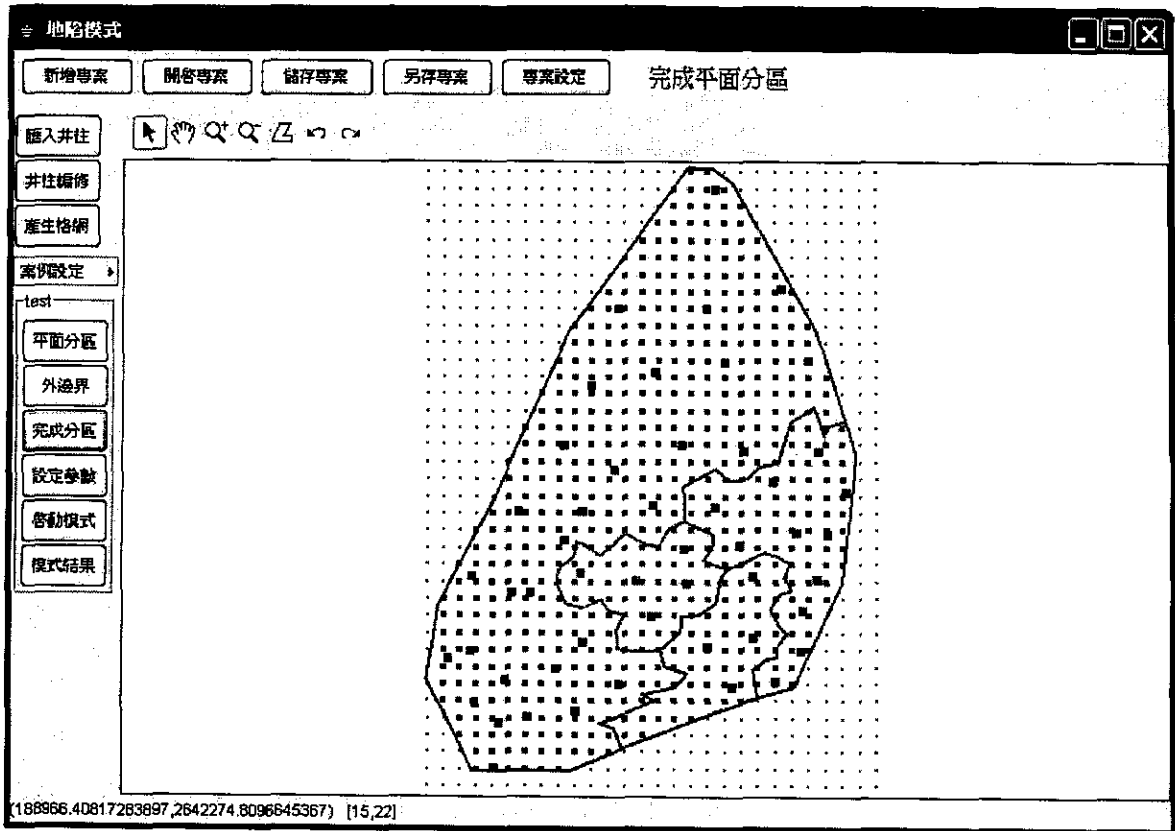


圖 4-13 完成平面分區。

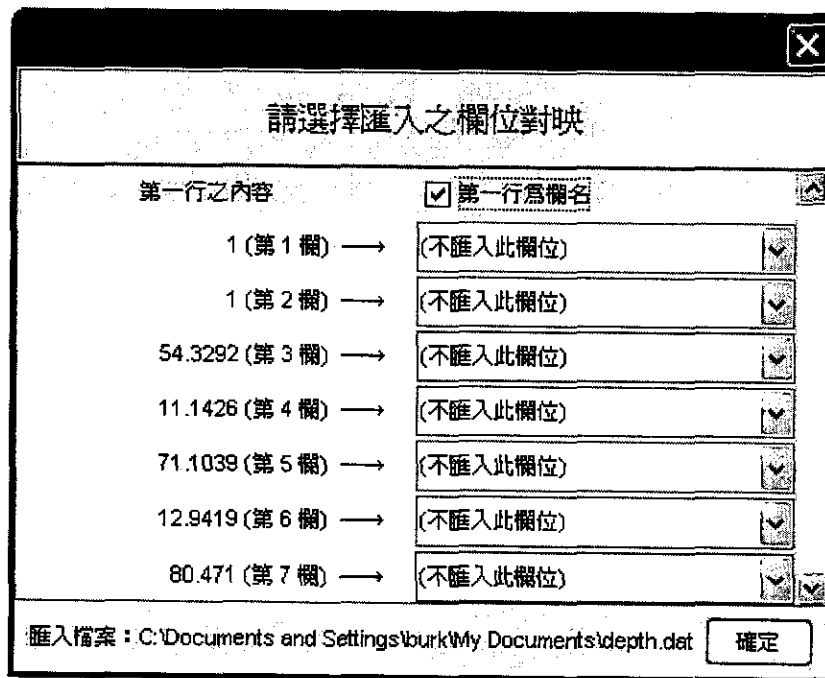


圖 4-14 參數檔案匯入功能。

格網參數設定

請輸入參數

層數	地質參數-K	地質參數-g	地質參數-l	厚度	抽水率與補注率	含水層初始水位	非同層含
第1層	0.0	0.0	0.0	3369.56	0.0	0.0	0.0
第2層	0.0	0.0	0.0	2006.59	0.0	0.0	(不分層)
第3層	0.0	0.0	0.0	8568.45	0.0	0.0	(不分層)
第4層	0.0	0.0	0.0	313.65	0.0	0.0	(不分層)
第5層	0.0	0.0	0.0	7608.57	0.0	0.0	(不分層)

格網：(1,1)  設為觀測點位

圖 4-15 格網參數設定。

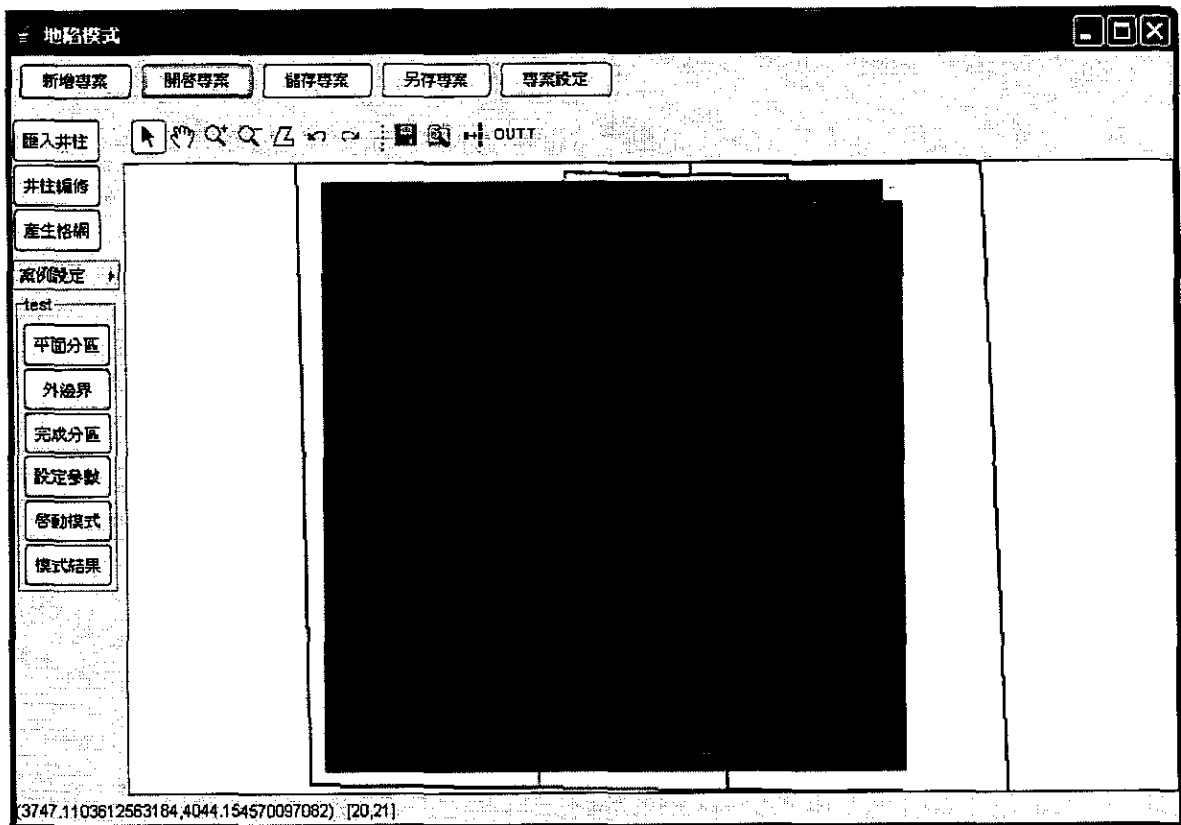


圖 4-16 顏色漸層表達沈陷量。

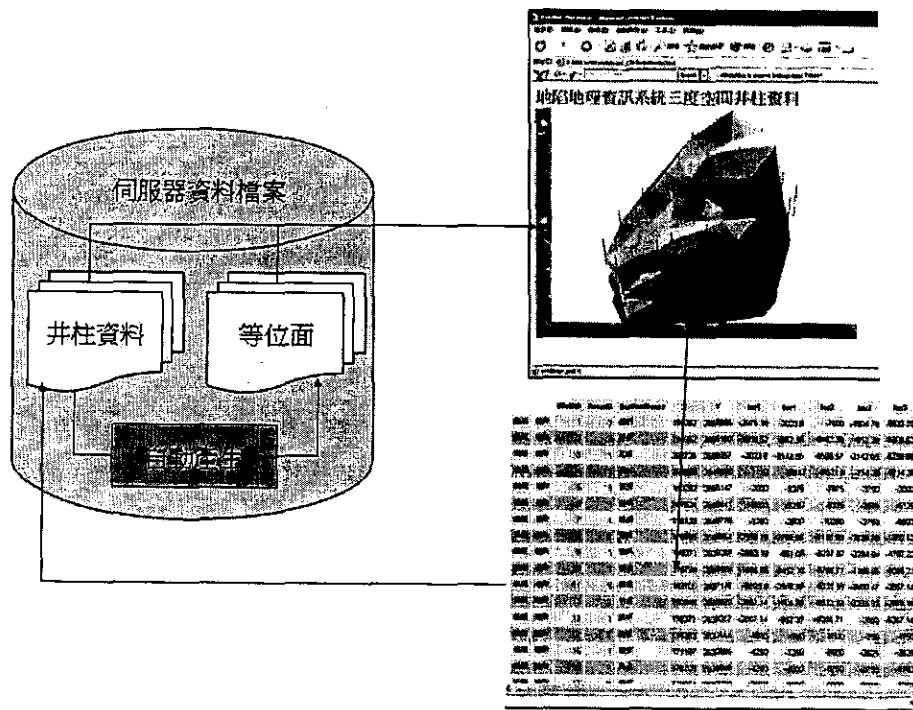


圖 4-17 視覺化井柱編輯作業流程。

```

// Create new object as a string
str+='Transform { ';
str+=' translation -2 0 0 ';
str+=' children [ ';
str+='  Shape { ';
str+='   geometry Slinder { ';
str+='    radius 1 ';
str+='    height 2 ';
str+='  }';
str+=' }';
str+=' ]';
str+='}';
// convert string to VRML and store in temporary node.
tempNode=Browser.createVrmlFromString(str);
// add the object to the scene
addedObject.addChildren=tempNode;
Browser.addRoute(timer, 'fraction_changed',
tempNode[0].children[0].appearance.material, 'transparency');
}

```

圖 4-18 使用 Script 節點動態加入物件到虛擬實境場景中的程式碼。

```

# When the box is clicked on the 'Generate' Script
# adds the content in an external php file to the world

DEF Scene Group {
  children [
    DEF Sensor TouchSensor {}
    Shape {
      appearance Appearance {
        material Material {
          diffuseColor .1 .44 .22
          shininess .1
          specularColor .15 .15 .02
          ambientIntensity 0
          emissiveColor .04 .18 .09
        }
      }
      geometry Cylinder {
        radius 2.0

        Height 2.0
      }
    ]
  ]
}

# The new Object will be a child of this Group Node
DEF AddedObject Group {
  children [
  ]
}

DEF Generate Script {
  eventIn SFTime touchTime
  field SFNode addedObject USE AddedObject
  field MFString fetchURL "http://www.example.com/index.jsp?object="
  directOutput TRUE
  url "javascript:
  function touchTime (val,ts) {
    // add the object to the scene
    fetchURL[0]+='sphere';
    Browser.createVrmlFromURL(fetchURL, addedObject, 'addChildren');
  }
  "
}

```

圖 4-19 以 Java 與 MySQL 資料庫抓取井柱資料庫內資料



欄位	型態	圖號	Null	值
WellID	int(11)		<input checked="" type="checkbox"/>	11
AreaID	int(4)		<input checked="" type="checkbox"/>	1
StationName	varchar(255)		<input type="checkbox"/>	環礁
X	int(14)		<input checked="" type="checkbox"/>	182705
Y	int(11)		<input type="checkbox"/>	2637176
tar1	double		<input checked="" type="checkbox"/>	2023.8
tar1	double		<input type="checkbox"/>	2976.19
tar2	double		<input checked="" type="checkbox"/>	8333.33
tar2	double		<input type="checkbox"/>	3690.47
tar3	double		<input checked="" type="checkbox"/>	2657.14

圖 4-20 使用者呼叫編輯井柱資料畫面

## 附錄 A 地層下陷管理模式整合系統單機版使用與維護手冊

地層下陷管理模式整合系統單機版之使用手冊，如總摘要報告之第二章所示，在此不多贅述。維護手冊之說明如下。

### 1.0 單機版開發設備設置

單機版主要以 Java 為開發環境，建立 GIS 與地陷模式配合的輔助工具，配以彈性的使用者介面，提供使用者操作。由於在工作進行前必須先行安裝軟體及設定系統，故本系統維護人員務必瞭解安裝之程序與注意事項。

#### 1.1 安裝軟體

使用本系統所必需之軟體為：

1. Java Run-time Environment
2. GMT
3. COSMO Player

Java 相關程式可至 <http://java.sun.com/> 下載，除了 Java Run-time Environment 外，尚可下載 Java 相關的 API，若對程式進行修正或開發，可依照 API 作為使用手冊。

GMT 已經包含在系統目錄中，故不需要另外下載，而 COSMO Player 主要是作為 3D VRML 瀏覽之用，可用其他相同用途的軟體取代之。

#### 1.2 安裝地陷系統單機版

維護人員在拿到程式碼光碟片後，請將光碟片中的資料夾直接複

製於磁碟機，請注意複製完成後必須將資料的唯讀屬性取消，方能正常作業。

啟動單機版只需要執行目錄下的 run.bat，其內容如圖 1-1，在正確安裝 Java Run-time Environmet 後應可正常執行，若無法執行請將 java 換成系統中的 java 路徑，如”C:\Program Files\Java1.4.2\java”。

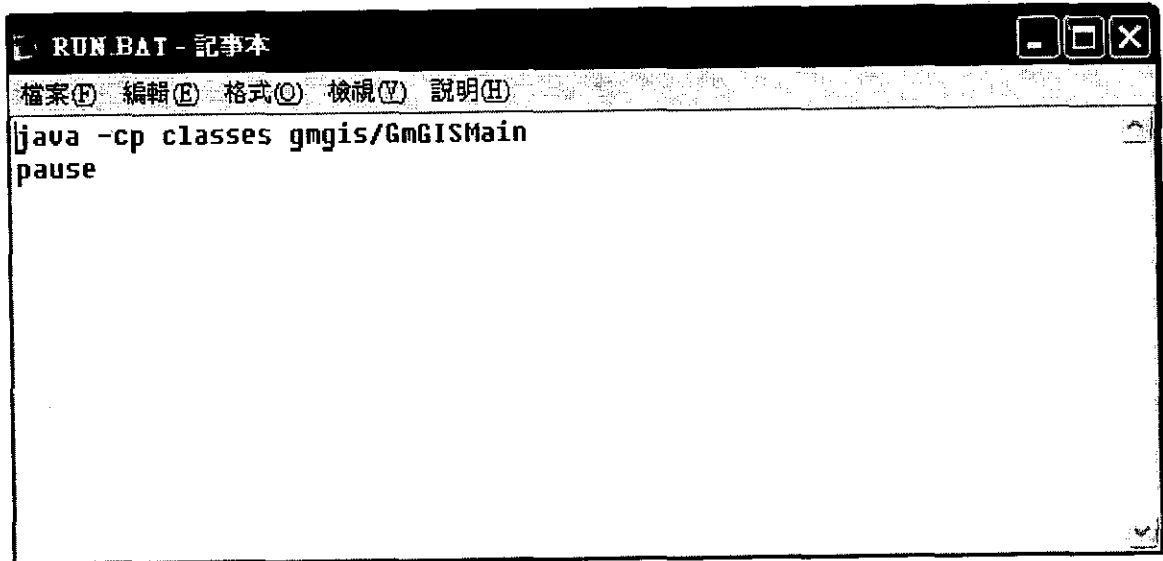


圖 1-1、Run.bat 內容

## 2.0 系統內部設定

在地陷系統單機版中，主要的架構是目錄的設定，只要保持數個目錄的正確性，系統便可以正常運作，而各目錄的功能如下所述：

1. Basemap：擺放基本圖資的目錄，此目錄僅是方便使用者分類資料，並不限定使用此資料夾儲存基本圖資。
2. Bitmap：儲存單機版中所用的工具列圖示 icon，故此資料夾是不可變更的，但若欲更換圖示，可直接替換相關檔案。
3. Classes：儲存 Java 程式的目錄，請勿變更目錄中的任何資料，否則可能造成程式無法執行。
4. Data：儲存輸入井柱資料與控制檔的目錄，和 Basemap 一樣，可隨使用者需求變更名稱。
5. Doc：Java 所產生的 API 都擺放在此處，若對程式內容有疑問可在此查詢。
6. Gmt：在單機版中部分的數學運算函式儲存在此，請勿任意變更。
7. Graphics：儲存單機版中所用的圖片，故此資料夾是不可變更的，但若欲更換圖示，可直接替換相關檔案。
8. Model：單機版中模式運算結果與輸入參數檔案擺放的目錄，由於是系統預設，所以無法變更。
9. Netcdf：和 gmt 有關的函式庫，也請勿變更。
10. org：儲存 Java 程式的目錄，請勿變更。
11. src：儲存 Java 程式的目錄，請勿變更。
12. tmp：儲存執行單機版時所產生的暫存檔案，故此目錄必須存在。

13. upload：儲存模式上傳檔案的目錄，可由使用者自訂。
14. VRML：儲存 3D VRML 檔案的目錄，請勿變更。

### 3.0 地陷模式檔案

操作單機版最重要的就是瞭解地陷模式參數檔案的格式，因為單機版的工作就是讓使用者利用 GIS 輔助工具，將參數填入正確的格式之中，故瞭解地陷模式參數檔案是維護單機版的最基本工作，下列便是各參數檔案的格式：

13. Control.dat：主要的控制檔案，控制地陷模式的層數、格網數、格網大小、時間參數等。其中 FLSO 為控制 Source.dat 檔案中 Time 欄位的參數，FLHB 控制 Boundh.dat 的 Time 欄位，FLUB 控制 Boundv.dat 的 Time 欄位。0 為沒有 Time 欄位，1 則有。如表 3-1。
14. Hcghcm.dat：地質參數，主要記載每一區每一層的地質參數，每一行皆以格網點的位置 X、Y 開頭，後面以地質參數三個為一組，以層數所排列。如表 3-2。
15. Gridph.dat：水平方向格網點性質，主要記載每個格網點在地理上的性質，如是座落於研究區的區域之外，或是落於邊界之上，也包括了格網點的受壓性質。如表 3-3。
16. Gridpv.dat：垂直方向邊界條件，其中 GPU 及 GPB 要 unConf=1 時才有作用。如表 3-4。
17. Source.dat：抽水量與補注量，抽水為正值，補注為負值單位是 CMS。若在 Control.dat 中的 FLSO=1 時，Time 欄位才有作用，Time 欄位代表某個 Time Step 時，某個格網點的入滲量或補注量，將所有欄位填上 0 則代表資料結束。如表 3-5。
18. Boundh.dat：水平邊界條件，即是輸入每層觀測水位的高度，單位為公尺，且只需要輸入不為 0 的點。若在 Control.dat 中的 FLSEB=1 時，Time 欄位才需要輸入 Time Step，將所有欄

位填上 0 則代表資料結束。如表 3-6。

19. Boundv.dat：垂直邊界條件，即是輸入上邊界與下邊界的入滲量，單位為 CMS。若在 Control.dat 中的 FLUB=1，Time 欄位才需要輸入 Time Step，將所有欄位填上 0 則代表資料結束。如表 3-7。
20. Depth.dat：各層厚度，只需輸入每個格網點中，各層的厚度資料即可，以公尺為單位。如表 3-8。
21. Waterd.dat：非侷限含水層水深，當 gridpv.dat 中的格網點為 unConf=1 時才需要輸入。如表 3-9。
22. Init.dat：各層初始水位，以公尺為單位，若遇到阻水層，則以上下含水層的平均值為其輸入資料。如表 3-10。
23. Outpv.dat：需要輸出資料之格網點，GWO 為水位，GSO 為下陷量，輸入 1 代表輸出資料。資料結尾輸入 0 則代表資料結束。如表 3-11。
24. Outt.dat：需要輸出之模擬時刻，GWOT 為水位，GSOT 代表下陷量，輸入 1 代表輸出資料。資料結尾輸入 0 則代表資料結束。如表 3-12。

表 3-1 Control.dat 檔案格式列表

層數	X 方向網 格數	Y 方向網 格數	X 方向網格間距(m)	Y 方向網格間距(m)
總模擬時刻 (sec)		模擬時間間距 (sec)		
FLSO		FLHB		FLUB

表 3-2 Hcghcm.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	水力傳導係數 (LayerI)	Lmae constant(G) (LayerI)	Lmae constant (LayerI)

表 3-3 GridpH.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	格網點位置 (GP)	Layer1 邊界形 式(GPH)	Layer2 邊界形 式(GPH)	.....
--------	--------	---------------	----------------------	----------------------	-------



表 3-4 GridpV.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	unConF	GPU	GPB
		0(ConF)	0(Dirichelet)	0(Dirichelet)
		1(unConF)	1(Neumann)	1(Neumann)

表 3-5 Soruce.dat 檔案格式列表

(Time)	x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	.....
0	0	0	.00	.00	.00	.00	stop

表 3-6 BoundH.dat 檔案格式列表

(Time)	X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	
0	0	0	.00	.00	.00	.00	Stop

表 3-7 BoundV.dat 檔案格式列表

(Time)	x-grid	y-grid	UB(上邊界)	BB(下邊界)	
0	0	0	0	0	stop

表 3-8 Depth.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII
--------	--------	--------	---------	----------

表 3-9 Waterd.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	LayerI
--------	--------	--------

表 3-10 Init.dat 檔案格式列表

X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII

表 3-11 Outp.dat 檔案格式列表

x-grid	y-grid	GWO(水位)	GSO(下陷量)
		0	0
		1(output)	1(output)
0(結束)	0	0	0

表 3-12 Outt.dat 檔案格式列表

模擬時刻	GWOT(水位)	GSOT(下陷量)
	1(output)	1(output)
0(結束)	0(結束)	0(結束)

表 3-13 Soruce.dat 檔案當 FLSS=0 之格式

x-grid	y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	.....
0	0	.00	.00	.00	.00	stop

表 3-14 BoundH.dat 檔案當 FLHB=0 時之格式

X-grid	Y-grid	LayerI	LayerII	LayerIII	LayerIV	
0	0	.00	.00	.00	.00	Stop

表 3-15 BoundV.dat 檔案當 FLUB=0 時之格式

x-grid	y-grid	UB(上邊界)	BB(下邊界)	
0	0	0	0	stop

## 附錄 B 地層下陷管理模式整合系統網路版使用與維護手冊

地層下陷管理模式整合系統網路版之使用手冊，如總摘要報告之第二章所示，在此不多贅述。維護手冊之說明如下。

### 1.0 地陷系統網路版開發設備設置

地陷模式系統網路版主要以 Java 為開發環境，建立 Server-Client 的各項傳輸，配以 Java-Script 與 Html 設計使用者介面。由於在工作進行前必須先行安裝軟體及設定系統，故本系統維護人員務必瞭解安裝之程序與注意事項。

#### 1.1 安裝軟體

使用本系統所必需之軟體為：

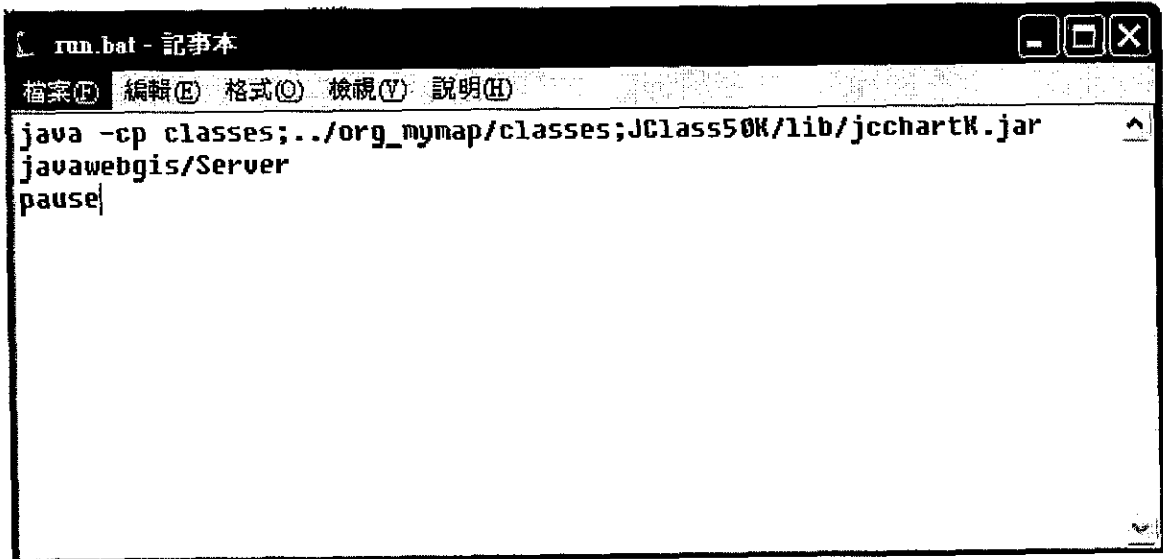
1. Java Run-time Environment
2. ImageMagick
3. Ghostscript
4. Internet Explorer 6.0 以上

Java 相關程式可至 <http://java.sun.com/> 下載，除了 Java Run-time Environment 外，尚可下載 Java 相關的 API，若對程式進行修正或開發，可依照 API 作為使用手冊。

#### 1.2 安裝地陷系統網路版

維護人員在拿到程式碼光碟片後，請將光碟片中的資料夾直接複製於磁碟機，請注意務必將所有資料夾的唯讀屬性取消，程式才能正常使用。

啟動單機版只需要執行目錄下的 run.bat，其內容如圖 1-1，在正確安裝 Java Run-time Environmet 後應可正常執行，若無法執行請將 java 換成系統中的 java 路徑，如”C:\Program Files\Java1.4.2\java”。



```
run.bat - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
java -cp classes;../org_mymp/classes;JClass50K/lib/jcchartK.jar
javawebgis/Server
pause
```

圖 1-1、Run.bat

## 2.0 系統內部設定

在地陷系統網路版中，主要變更的設定是 gis.ini 與 template.html，而 gis.ini 便牽涉到檔案與資料夾的位置，且在系統中，所有的資料都是以資料夾作為區別分類的方法。

### 2.1 gis.ini

所謂 gis.ini 即是地圖的設定檔案，因為本系統所包含的資料相當複雜，有水文資料、測量資料等，而各種資料的基本屬性不一致，故不能利用同樣的設定執行。因此系統提供 gis.ini 設定檔案的功能，透過本檔案所規定的關鍵字與格式，管理者可以針對所要顯示資料的屬性、單位等不同做設定。

任何改變表單大小的動作都會引發 Resize 事件，此程序是為正確地使元件大小隨著表單大小改變，給予使用者正確的使用環境，gis.ini 的格式如下：

```

gis.ini - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
[Layer]
LAYER0=../../basemap/county.shp,鄉鎮界,false,00FF00,FFFFFF
LAYER1=../../basemap/YunLin_River.shp,雲林縣河川,false,0000FF
LAYER2=../../basemap/ChanWha_River.shp,彰化縣河川,false,0000FF
LAYER3=../../basemap/YunLin_Lake.shp,雲林縣湖泊,false,00FFFF,00
LAYER4=../../basemap/ChanWha_Lake.shp,彰化縣湖泊,false,00FFFF,00
LAYER5=geobore/geobore.shp,地質分層井柱,true,FF00FF,2
LAYER6=bore/bore.shp,地下水分層井柱,true,C00000,3
zoom=128562.08,2610000.31~240512.57,2694240.73
map_width=300
map_height=300
activelayer=6
defaultvisible=0,3,4,5,6

```

基本上 gis.ini 控制的功能有：

1. 圖層：如 LAYER0~LAYER6，而後面的數字代表順序，數字愈小表示在愈下層，故 LAYER0 就是底圖；後面接的圖檔路徑為相對路徑，只要指向到正確的擺放位置即可；第三項設

定是顯示的名稱，如鄉鎮界圖；false 或 true 代表可否成為 active layer；最後的設定則是該圖層的颜色。

2. 顯示範圍：zoom=X,Y~X,Y，即設定顯示畫面的大小範圍，由左下角定義至左上角。
3. 地圖高度與寬度：map\_width 與 map\_height，預設地圖在畫面上所顯示的大小。
4. 使用圖層：activelayer 即是設定目前所使用的圖層，只要是在 gis.ini 定義可以成為 activelayer 的圖層都可以設定。
5. 預設可見圖層：defaultvisible，同樣是在 gis.ini 中設定過的圖檔皆可設定為 visible。

## 2.2 template.html

template 的概念主要是將地圖／地理資訊或其他資料，依據設定檔(如 gis.ini)或程式內建的方式，轉換成 HTML/圖檔，嵌入預先以 HTML 語法編好，具有特定格式的 templates 檔案中。

目前系統內所有的版面都是依照預先編好的 template 所設計的，只要使用系統預設的關鍵字，即可任意改變版面設計，讓網頁設計更具彈性，為讓使用者瞭解 template、gis.ini 與網頁的關係，將資料整理如下：

```

gis.ini - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)

[layer]
LAYER0=../../basemap/county.shp,鄉鎮界,false,00FF00,FFFFFF
LAYER1=../../basemap/YunLin_River.shp,雲林縣河川,false,0000FF
LAYER2=../../basemap/ChanWha_River.shp,彰化縣河川,false,0000FF
LAYER3=../../basemap/YunLin_Lake.shp,雲林縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
LAYER4=../../basemap/ChanWha_Lake.shp,彰化縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
LAYER5=geobore/geobore.shp,地質分層井柱,true,FF00FF,2
LAYER6=bore/bore.shp,地下水分層井柱,true,C00000,3
zoom=128562.08,2610080.31~240512.57,2694240.73
map_width=300
map_height=300
activelayer=6
defaultvisible=0,3,4,5,6
    
```

```

地陷模式地理資訊系統 - Microsoft Internet Explorer
檔案(F) 編輯(E) 檢視(V) 我的最愛(A) 工具(T) 說明(H)
    上一頁  搜尋  我的最愛  媒體
    網址(F) F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\bore\map-template.html 移至 連結
    ***SCRIPT
    ***TOOLBAR
    ***LAYER                                     ***LEGEND
    ***STATUSBAR
    完成  我的電腦
    
```

圖 1-1-1、\JavaWebGis\htdocs\gmgis\bore\



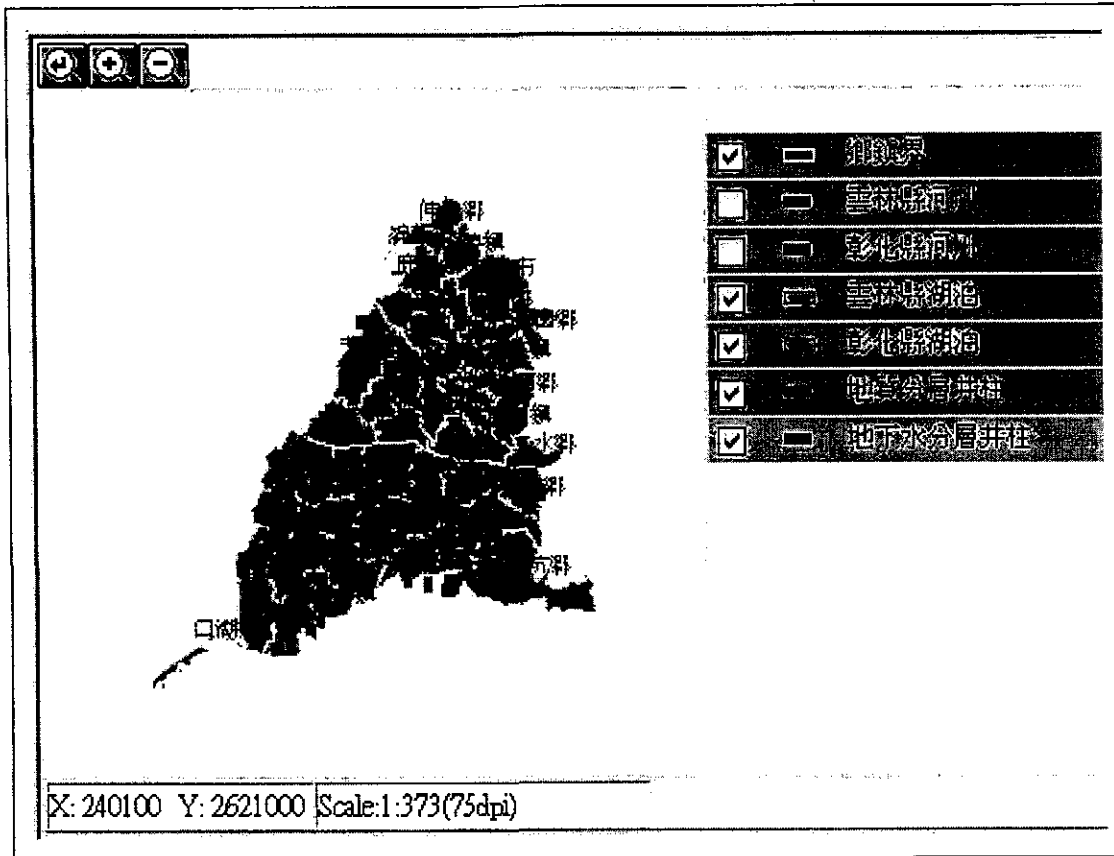


圖 1-1-2、\JavaWebGis\htdocs\gmgis\bore\

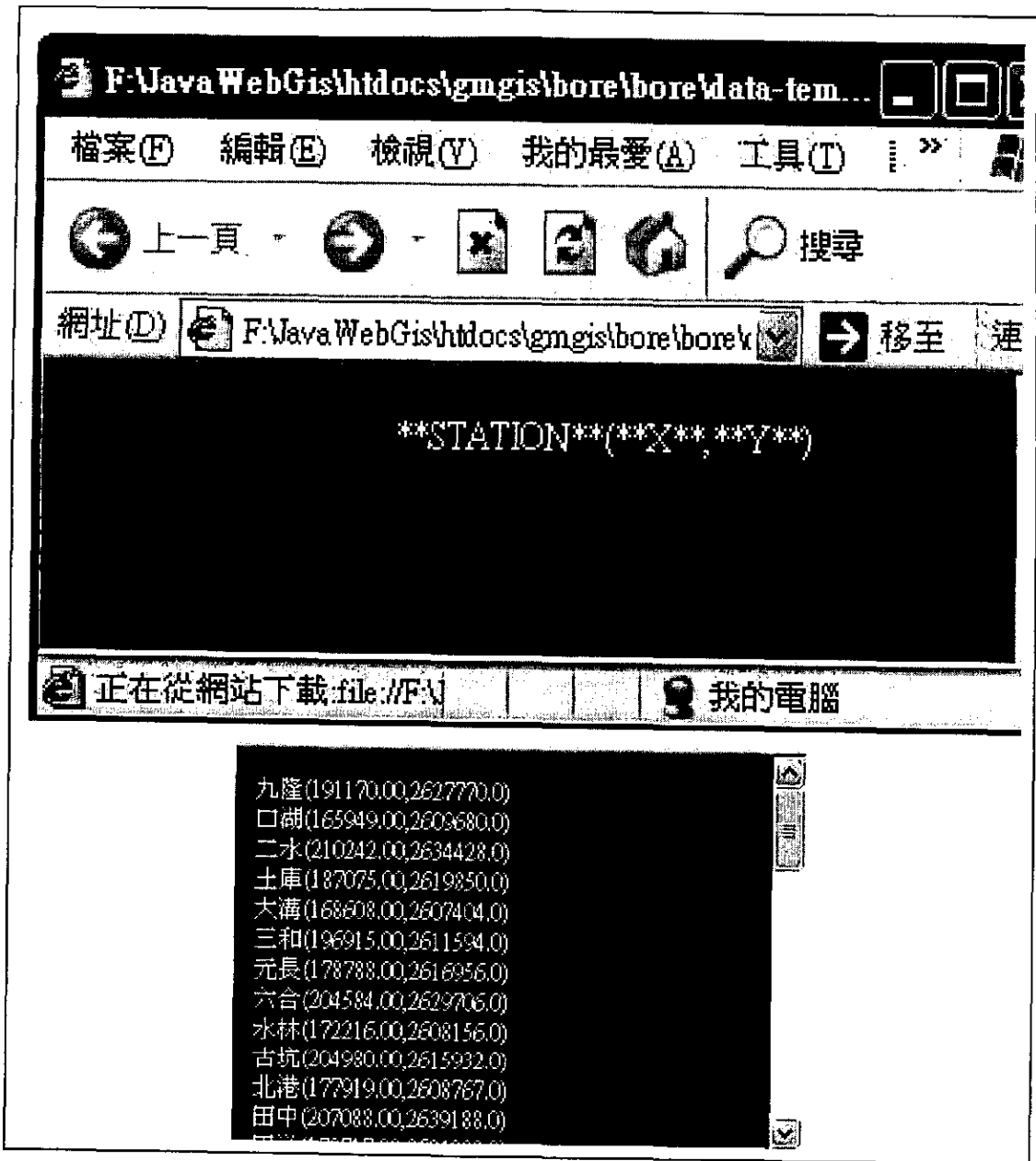


圖 1-2、\JavaWebGis\htdocs\gmgis\bore\bore\data-template.html

```

L gis.ini - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
[[layer]■
LAYER0=../../basemap/county.shp,鄉鎮界,false,00FF00,FFFFFF
LAYER1=../../basemap/YunLin_River.shp,雲林縣河川,false,0000FF,1
LAYER2=../../basemap/ChanWha_River.shp,彰化縣河川,false,0000FF,1
LAYER3=../../basemap/YunLin_Lake.shp,雲林縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
LAYER4=../../basemap/ChanWha_Lake.shp,彰化縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
LAYER5=riversec/riversec.shp,河川斷面,true,FF0000,1
LAYER6=rain/rain.shp,雨量資料,true,FF00FF,2
LAYER7=riverflow/riverflow.shp,流量資料,true,000080,3
LAYER8=riverlevel/riverlevel.shp,河川水位,true,FF4500,2
zoom=128562.08,2610080.31~240512.57,2694240.73
map_width=300
map_height=300
    
```

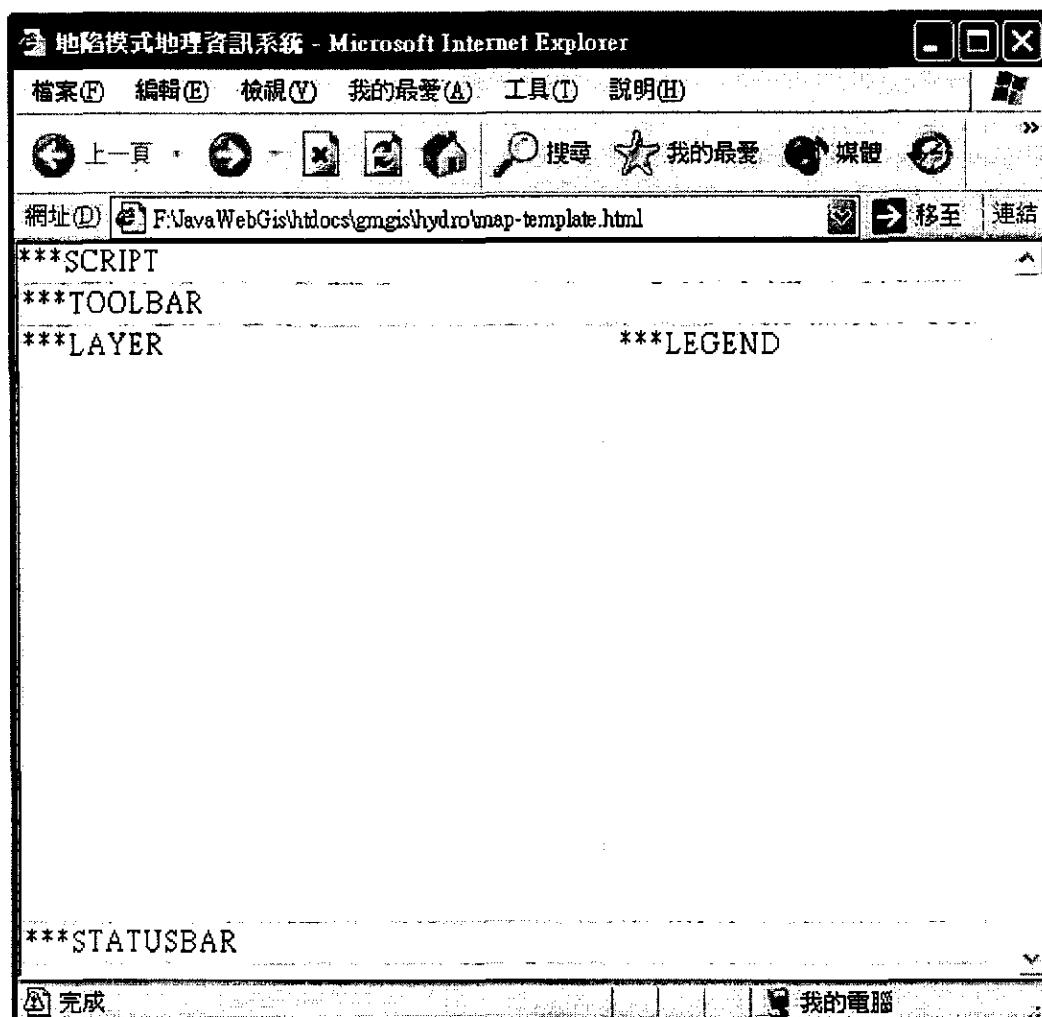


圖 1-3-1、F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\

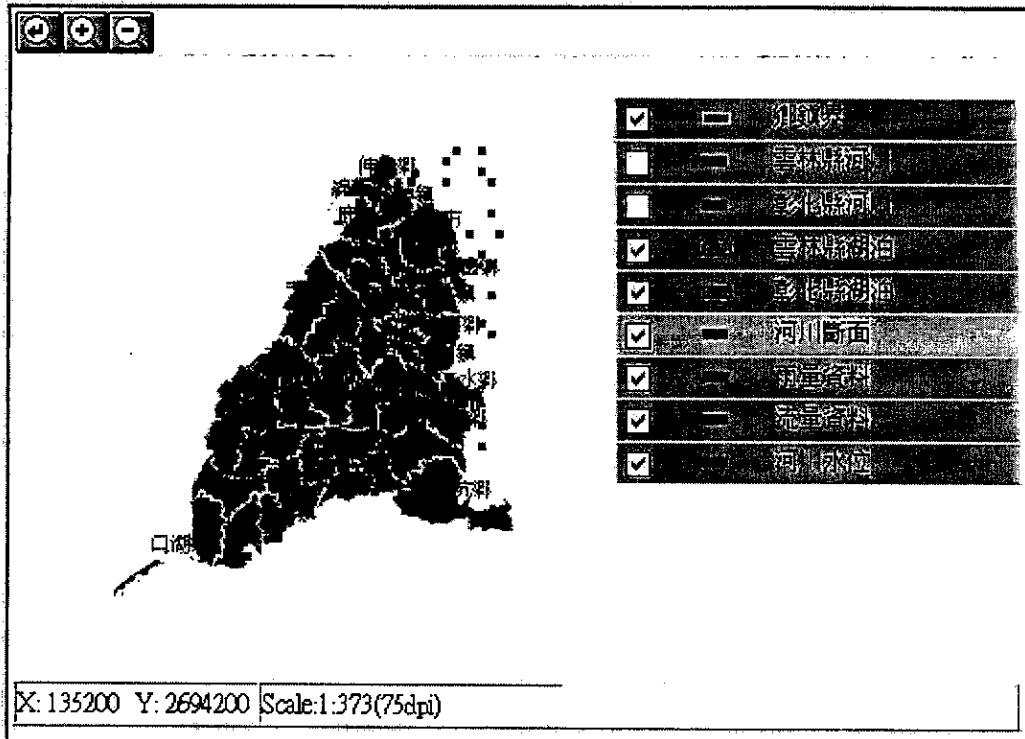


圖 1-3-2、F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\



```
草屯(1)(217773.00,2651377.0)
高斗六(217786.00,2656914.0)
霧峰(1)(219493.00,2662448.0)
草湖(217807.00,2666144.0)
台中(1)(217819.00,2671681.0)
台中(2)(217819.00,2671681.0)
台中(3)(217819.00,2671681.0)
七張犁(216139.00,2677223.0)
林厝(211059.00,2677236.0)
水堀頭(209361.00,2675394.0)
山子腳(209350.00,2671703.0)
大肚(1)(208145.00,2673260.0)
```

圖 1-4 · F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\rain\data-template.html

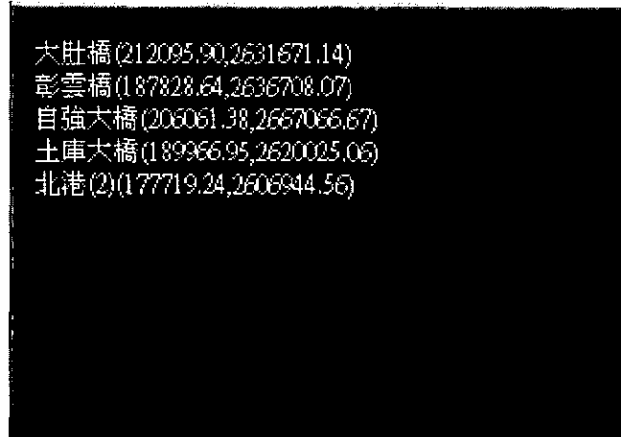
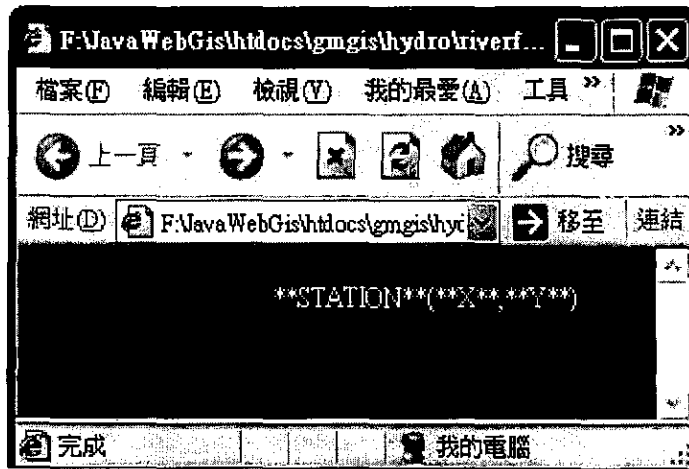


圖 1-5、

F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\riverflow\data-template.html

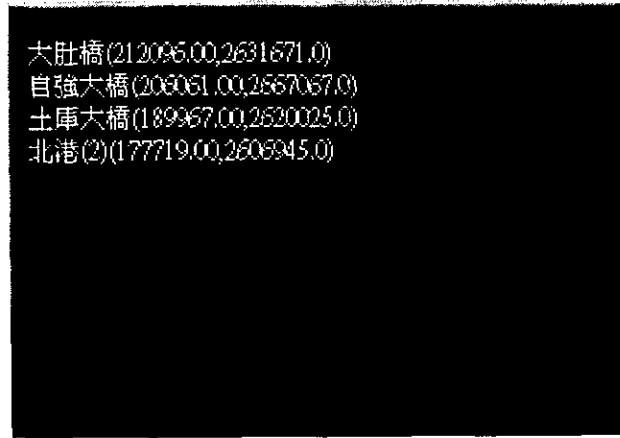
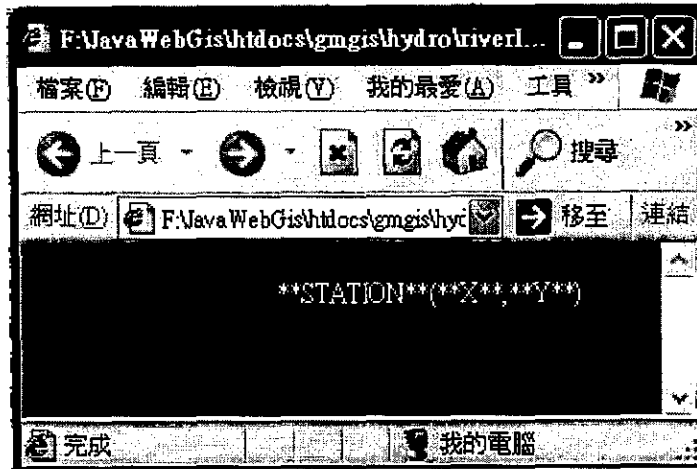


圖 1-6、

F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\riverlevel\data-template.html

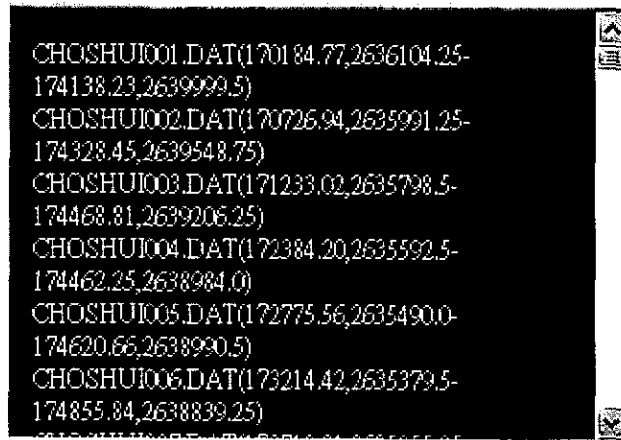
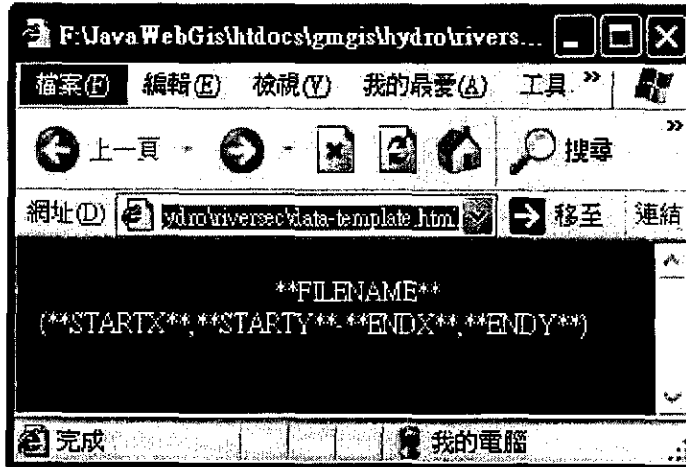


圖 1-7、

F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro\riversec\data-template.html



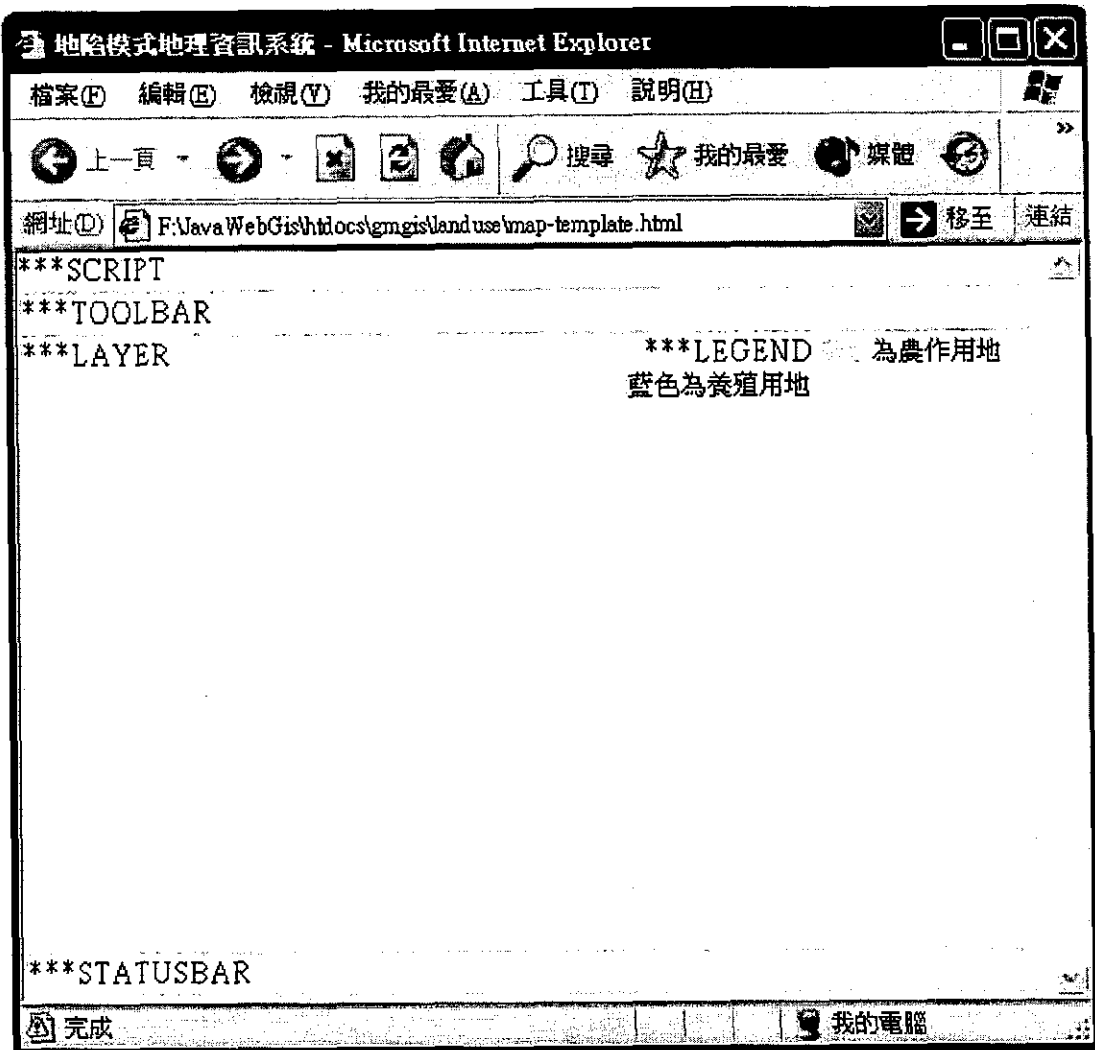
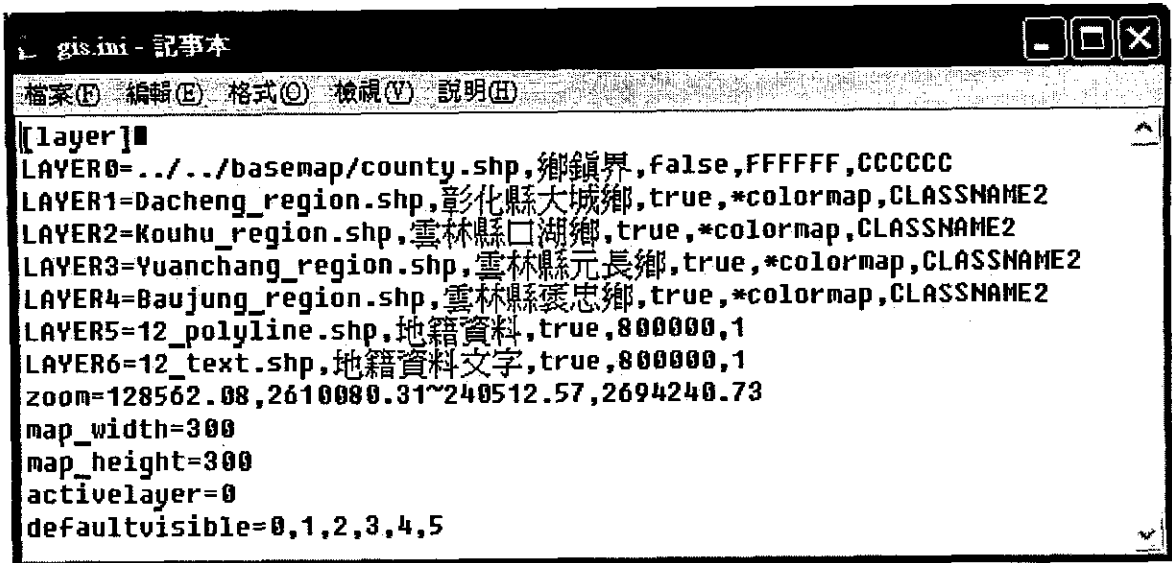


圖 1-8-1、F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\landuse

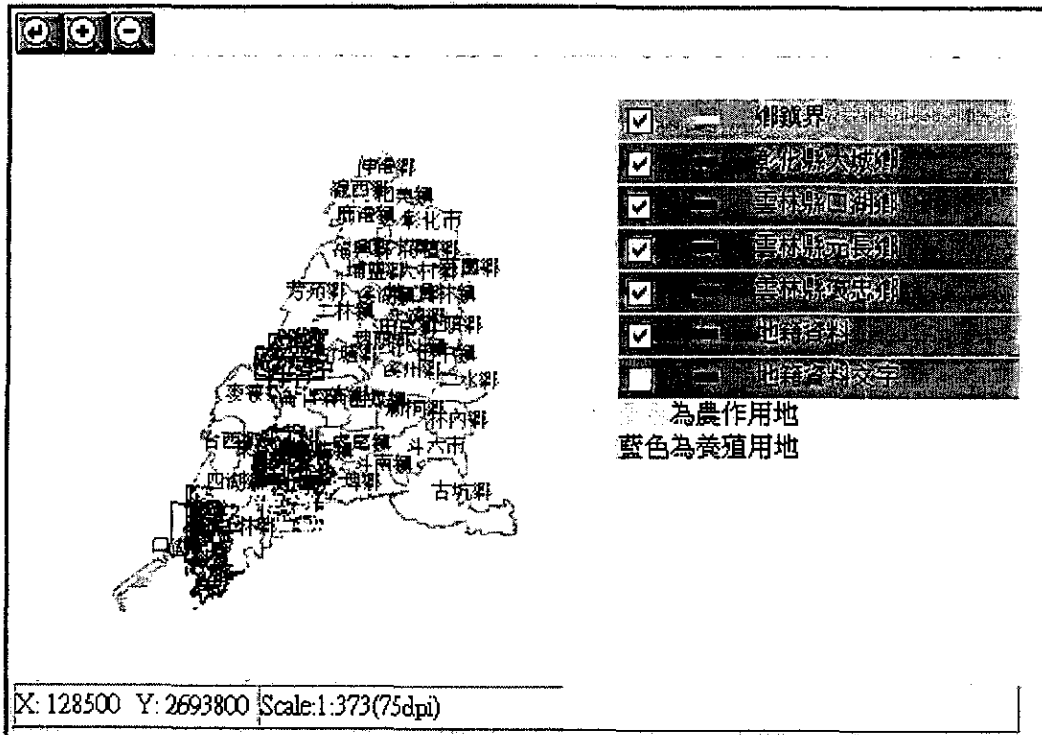


圖 1-8-2、F:\JavaWebGis\htdocs\gmgis\landuse

```
gis.ini - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
[[layer]
LAYER0=../../../../basemap/county.shp,鄉鎮界,false,00FF00,FFFFFF
LAYER1=../../../../basemap/YunLin_River.shp,雲林縣河川,false,0000FF
LAYER2=../../../../basemap/ChanWha_River.shp,彰化縣河川,false,0000FF
LAYER3=../../../../basemap/YunLin_Lake.shp,雲林縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
LAYER4=../../../../basemap/ChanWha_Lake.shp,彰化縣湖泊,false,00FFFF,0000FF
zoom=128562.08,2610080.31~240512.57,2694240.73
map_width=300
map_height=300
```

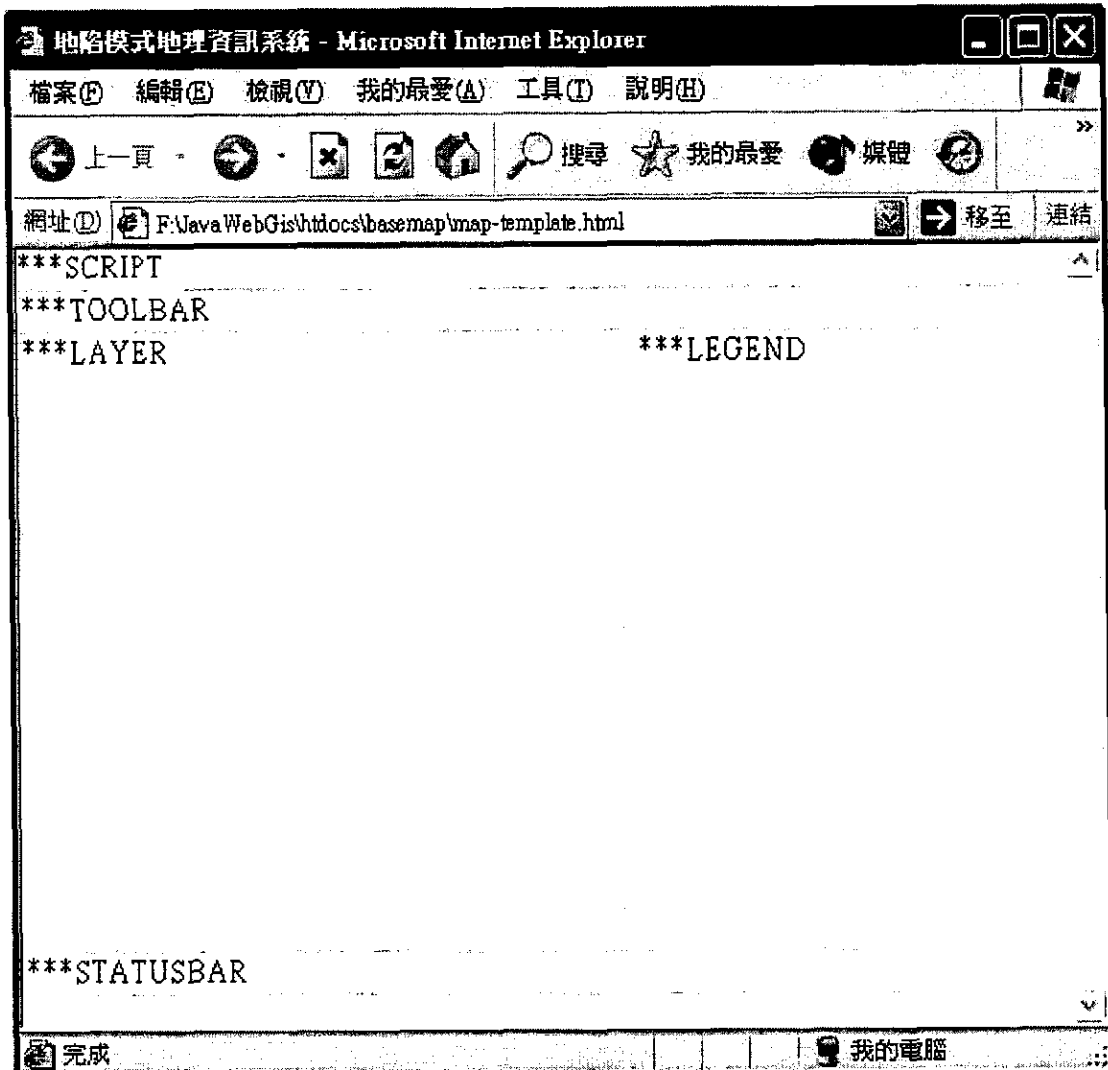


圖 1-9-1、F:\JavaWebGis\htdocs\basemap

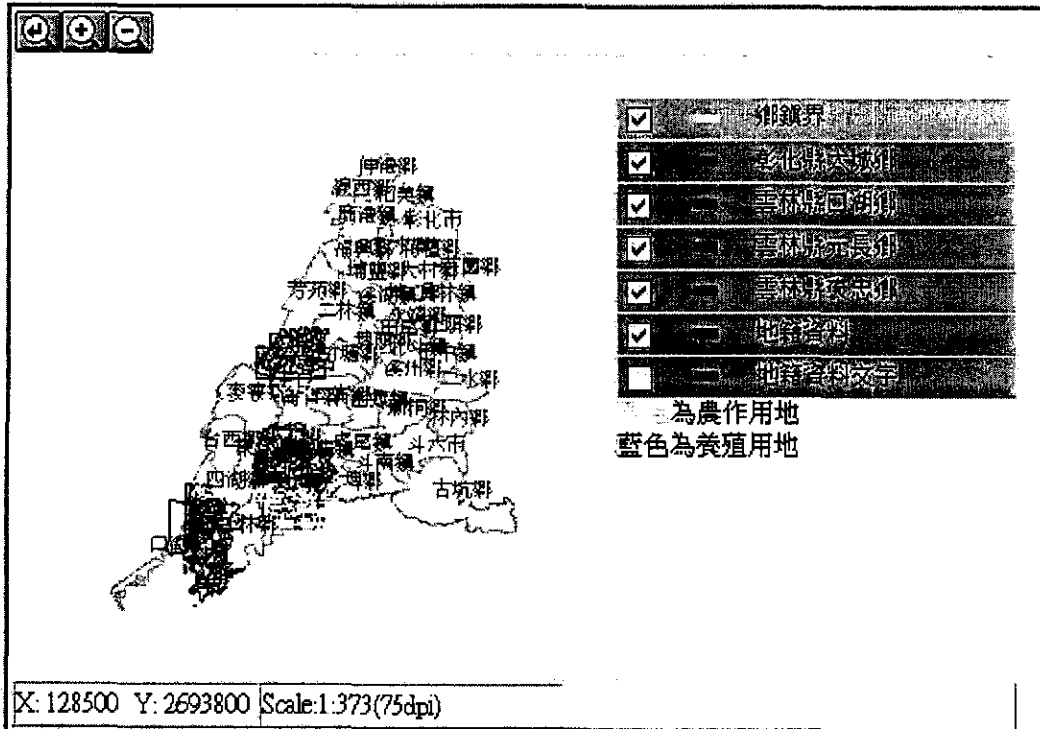


圖 1-9-2、F:\JavaWebGis\htdocs\basemap

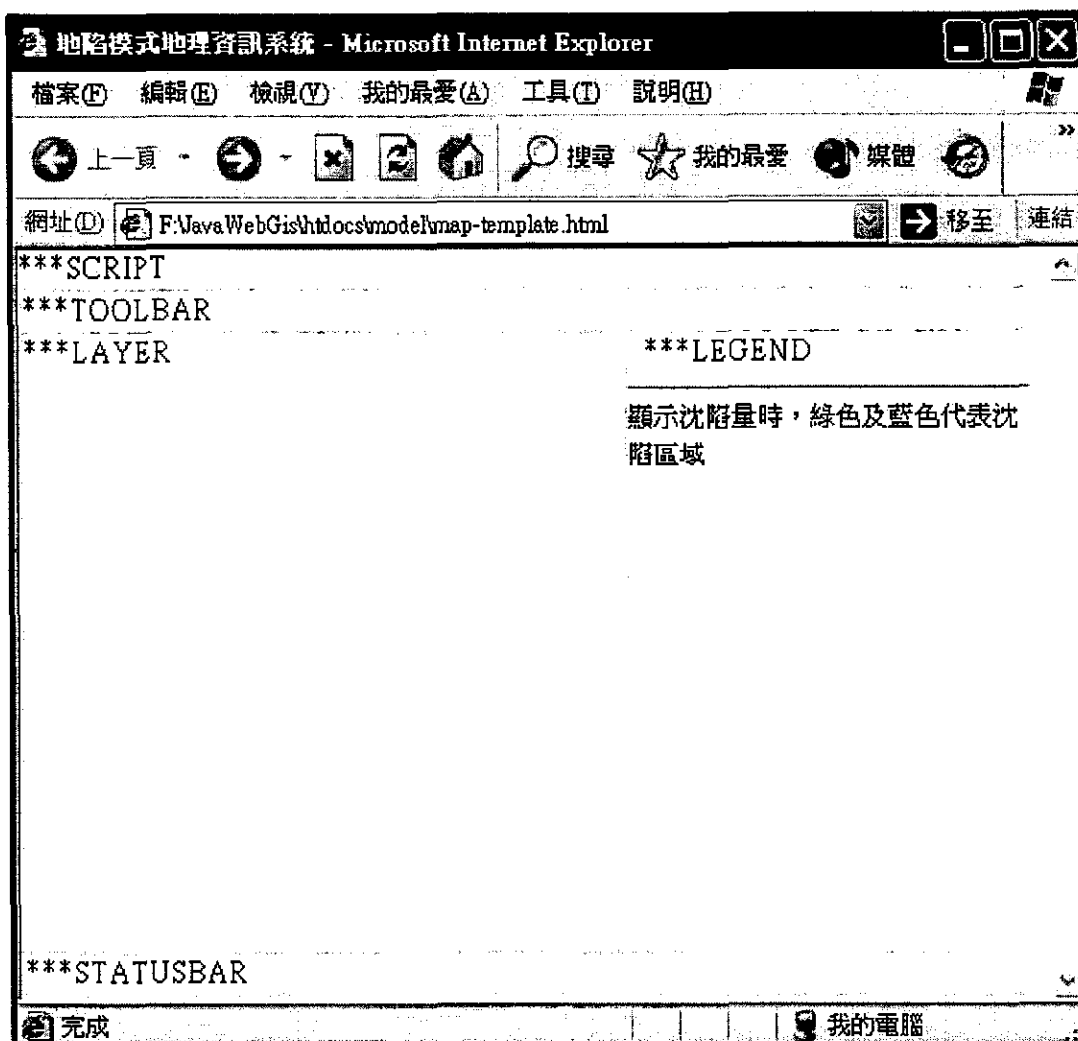
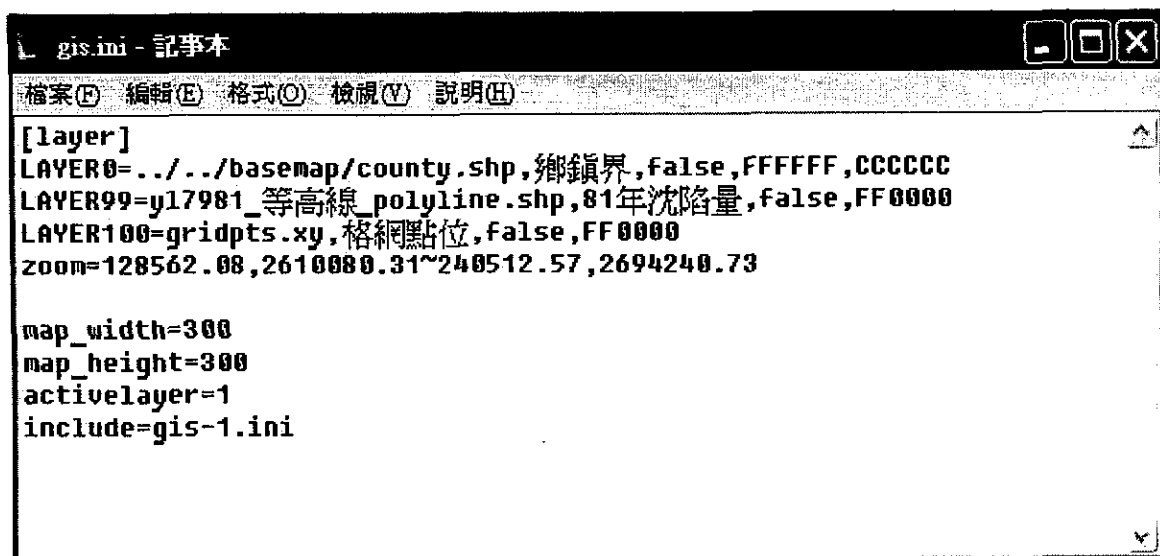


圖 1-10-1、F:\JavaWebGis\htdocs\model

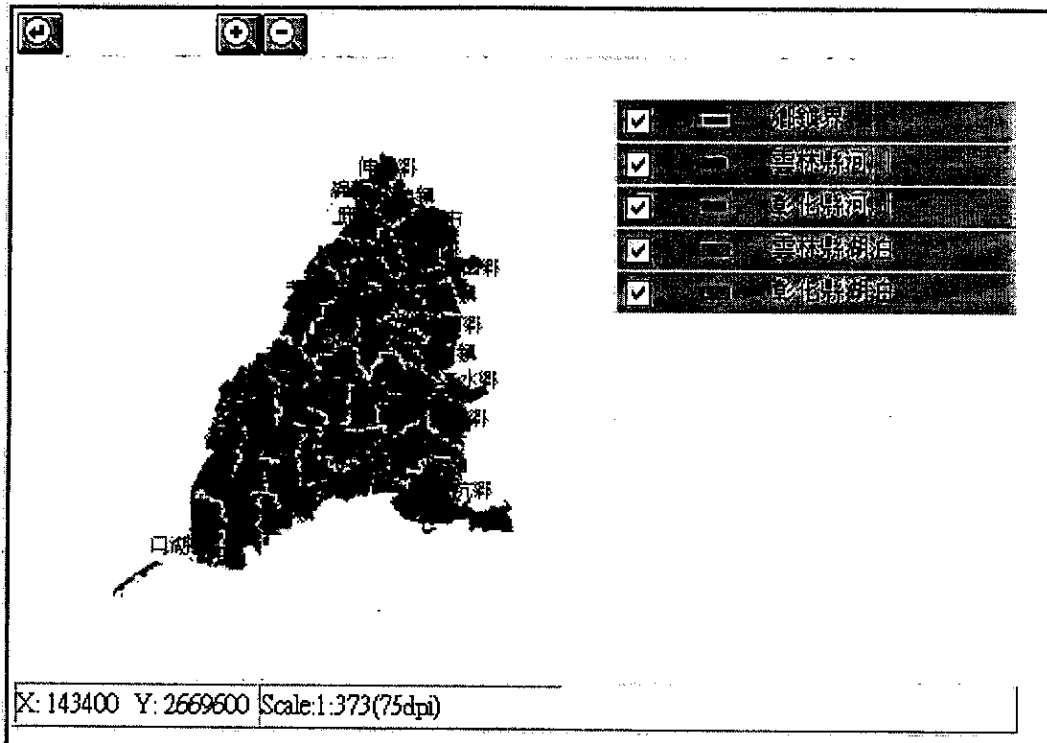


圖 1-10-2、F:\JavaWebGis\htdocs\model

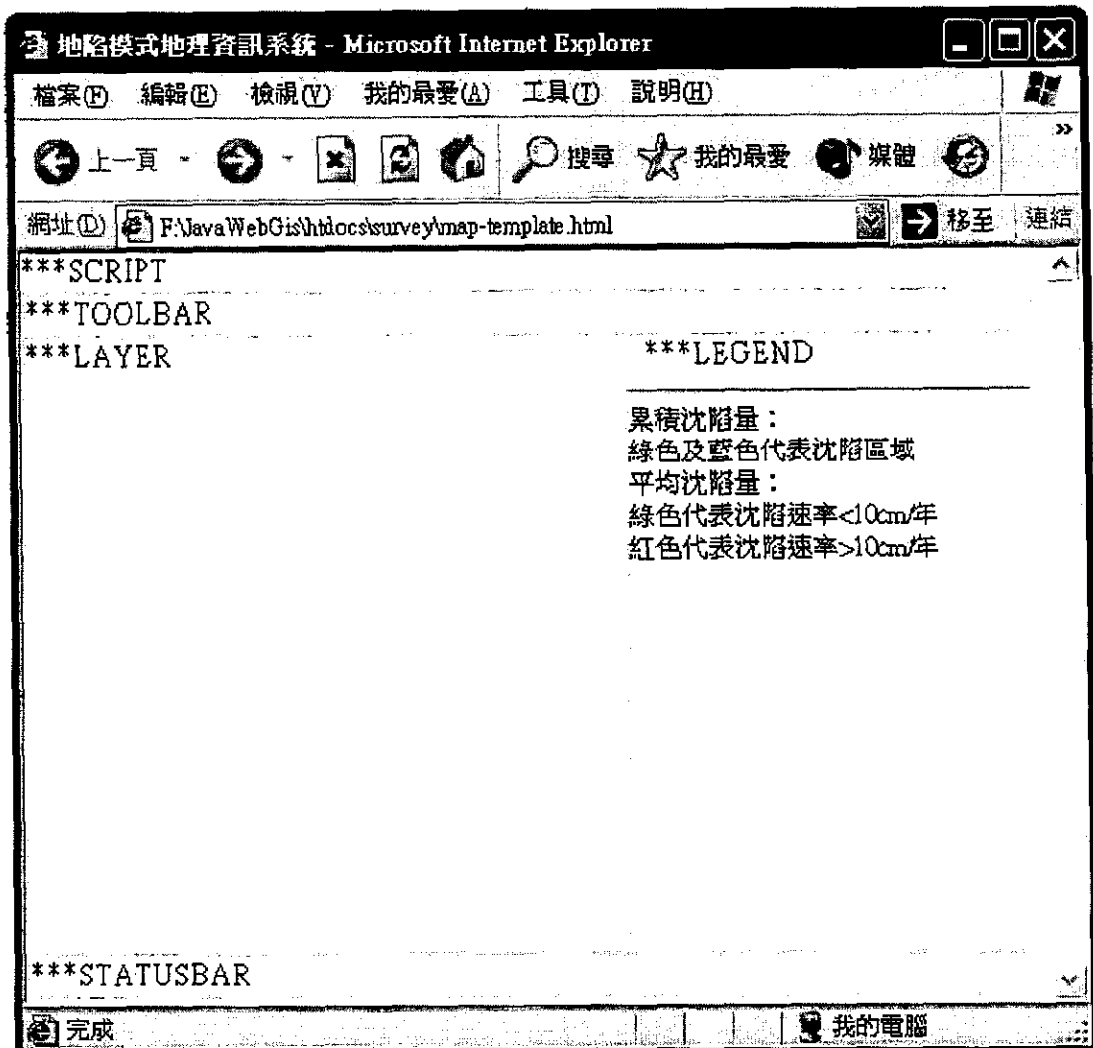
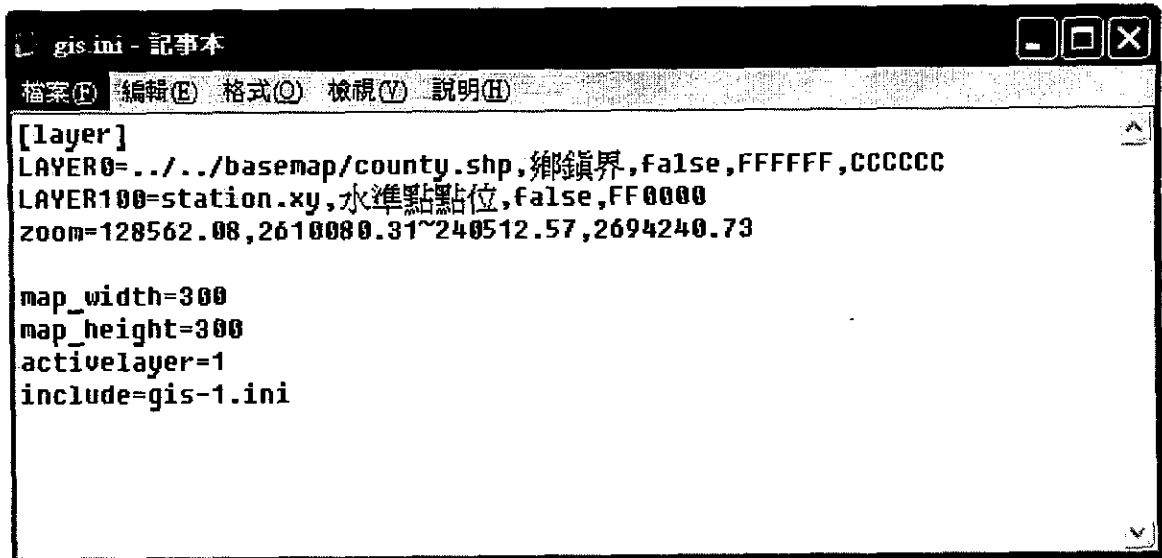


圖 1-11-1、F:\JavaWebGis\htdocs\survey

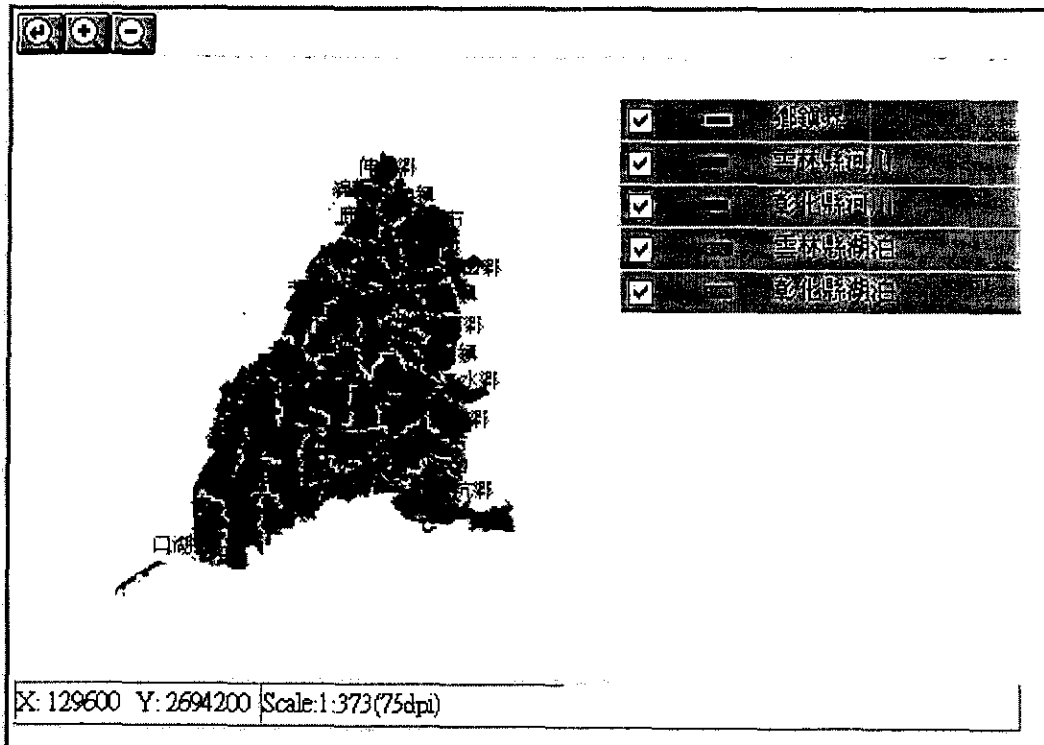


圖 1-11-2、F:\JavaWebGis\htdocs\survey



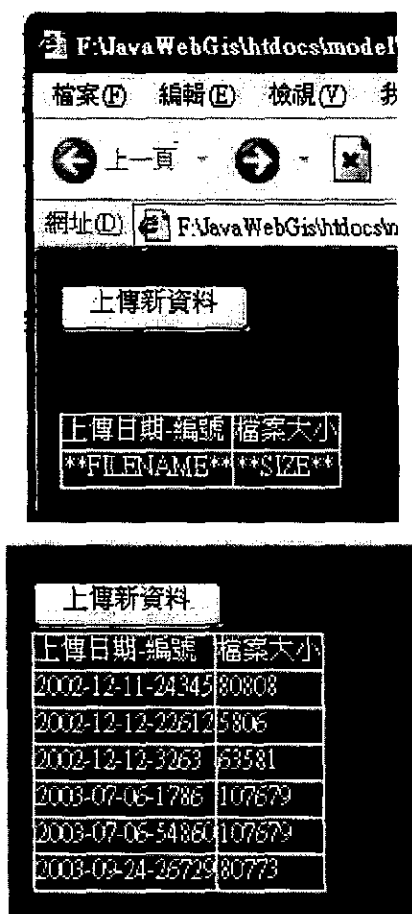


圖 1-12、F:\JavaWebGis\htdocs\model\data\filelist-template.html

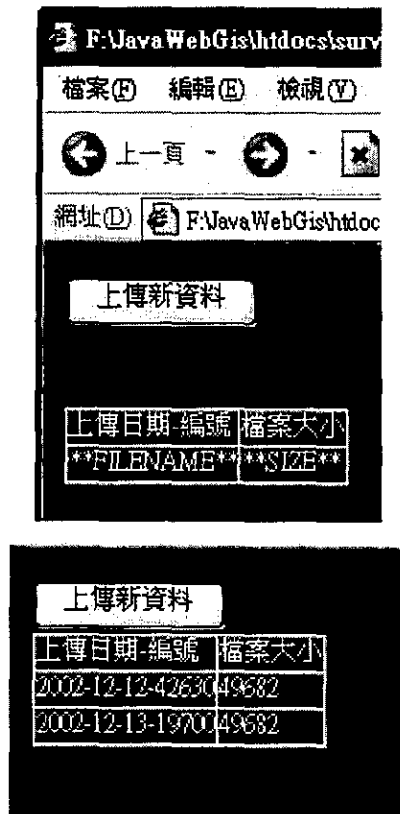


圖 1-13、F:\JavaWebGis\htdocs\survey\data\filelist-template.html

### 3.0 資料系統

地陷系統網路版所提供的背景資料非常繁複，項目包括土壤、河川水位、雨量、流量、地下水井柱與河川斷面等資料項目。

使用者在面對龐大而複雜的資料檔案往往不知道該如何管理資料，故網路版設計一背景資料檢視系統，可以讓使用者以在很有條理的情形下，同時檢視各種原始資料、說明文件、圖形與地圖，以省卻進出不同應用系統的程序，並有助於龐大的背景資料管理。除了資料管理功能外，使用者最常需要的功能就是將資料與地圖連結在一起，本系統亦利用 GIS 提供了各式各樣的地圖功能，管理者可以依照自身的需求，提供使用者研究區內相關的圖層資料，作為輔助之用。

許多背景資料，如果僅僅從檔案內含的文數字資料本身，無法看出其特性，因此，本系統除了檢視資料檔案功能外，亦提供資料自動繪圖功能，可依據資料特性之不同，繪製各種時序圖、長條圖或井柱圖，以便於使用者更瞭解資料特性。

#### 3.1 圖表展示

在水文背景資料方面，雖然河川水位、雨量、流量與蒸發量等各種測站資料格式各不相同，然因其具有時間序列之特性，故均可採用時序圖表示其在時間上的變化情形，當使用者開啟顯示時間序列圖開關時，在圖元資料夾中點選測站時，系統會依據不同的資料來源格式，讀出其檔案內之時序資料。

井柱資料則採用堆疊式方塊圖(Stack Bar)繪製，其製作製作流程先統計所有井柱資料檔案中的土壤性質，並且建立一個土壤性質基本型態編號對照表(如表 3-1)，表中列舉每種土壤性質編號與名稱，並賦予每種基本型態色碼代號，以作為繪圖參考之用。

當使用者打開繪製井柱圖開關後，在檔案總管點選井柱資料時，

系統會先將檔案內厚度資料轉為深度(向下為負直)，並將每層土壤性質轉換為分類代號，例如：IL010012 井柱資料分析後結果如表 3-2，系統將採用堆疊柱狀圖(Stack Bar)繪製，因此，必須賦予各分類一個色碼，以利繪圖程式使用。表格左半部為井柱資料檔內容，右半部為系統分析後結果，分析後分類代號可與表 3-1 互相參考。系統計算出表 3-2 右半部資料後，就可繪製出井柱圖。

### 3.2 水文資料

在此項功能中，提供了四大資訊查詢功能，包括河川水位、流量、雨量與河川斷面的資料部份與測站地圖部份。所有資料皆存放於 \JavaWebGis\htdocs\gmgis\hydro 中，資料格式說明如下：

#### 1. 河川水位:

2700350199501	1282	1281	1281	1283	1282	1284	1288			
1285	1284	1284	1283	1283	1282	1282	1282	1282	1284	
1284	1285	1284	1284	1283	1282	1280	1279	1279	1279	
1282	1281	1280	1280							

上述數字為水位資料版段之一，27000350 為此一測站之流域編號以及站號之組合，1995 為觀測之年份，01 為月份，基本上每一個月是設定為 31 日，遇到不存在的日期，則以-5555 替代。

#### 2. 雨量:

2700421897	2	-3	204	113	24	99	130	3	
0	-3	61	634	5	-3	-3	-3	-3	7
1	6	5	209	233	113	107	-3	7	13
0	0	-3	-5	-5	-5	240	1107		

270042 為此一測站之流域編號以及站號之組合，1897 為年份，2 為月份，如果當天為晴天就以-3 代表，儀器故障以-10 表示，空白以

-5 表示，若是有雨無量則以 0 表現，每一旬會做一次雨量之小計，在最後一個欄位則為本月份雨量之總計。

3. 流量:

2700350196409	24500	19000	13500	11300	9100	7800
7890	6300	4100	5900	13300	9800	7300
5400	6950	9800	8400	9350	8800	10100
7100	5750	3550	3780	4350	7300	5400

-50

2700350 為此一測站之流域編號以及站號之組合，1964 表觀測之年份，09 表月份，如果日期不存在則以-50 表示。

4. 河川斷面：

170104	77	2636104	25	174138	23	2639999	50
0.00		4.50					
2290.00		4.50					
2340.00		2.66					
2360.00		1.65					
2370.00		0.85					
2373.40		0.70					
2451.30		0.63					
2546.30		0.49					
2591.50		0.19					
2770.20		0.25					
3064.30		0.42					
3213.50		-0.33					
3393.30		-0.37					
3449.10		-0.17					
3552.70		-0.03					
3751.40		-0.08					
3943.20		-0.03					
4111.20		0.43					
4262.50		0.42					
4419.70		0.36					
4538.50		0.37					
4770.20		0.37					
4963.70		0.06					
5166.20		0.02					
5441.50		-0.33					
5443.60		0.05					
5508.30		0.15					
5532.50		0.10					
5538.10		2.50					
5550.00		2.50					

總共有 96 個檔案，每一個都是一段河川的斷面值，裡頭包括河岸兩邊的兩個點之座標，接著就是數目不一的斷面高程點之數值。

3.3 井柱資料

在此項功能中提供了查詢地質分層井柱的功能，所有的資料皆存放於\JavaWebGis\htdocs\gmgis\bore。

資料格式說明如下：

1. 地質分層井柱：495 個檔案，其中僅有 Nomatch.dat 此一檔案

較為特殊，其餘皆為存放岩心資料之檔案。

```

IL050116 203386 2618297 古坑 411
14
2.00 表土
9.00 砂質土
8.00 粗砂礫石
17.00 黏土
16.00 粗砂礫石
3.00 黏土
5.00 粗砂礫石
5.00 黏土
11.00 粗砂礫石
3.00 砂質土
7.00 粗砂礫石
2.00 砂質土
10.00 粗砂礫石
14.00 黏土
    
```

上圖為檔案 IL050116.dat 之內容

IL050116:鑽探井之編號，亦為檔案名稱。

203386:X 座標

2618297:Y 座標

古坑:測區名稱

411:井號

14:層數

```

IL000000 000000 0000000 000000 224
14
18.00 表土
3.00 黏土
44.00 砂質土
15.00 粗砂
12.00 黏土
50.00 粉質細砂
10.00 黏土
9.20 粉質細砂
11.00 黏土
3.80 砂質土
4.00 黏土
24.00 粉質細砂
21.00 粗砂礫石
19.00 黏土

IL000000 000000 0000000 000000 230
9
2.50 表土
3.50 粉質細砂
    
```

上圖為 Nomatch.dat 部份內容擷取畫面。

鑽探井之編號皆為無法判斷之值，XY 值也現示為零無法使用，在測區的欄位亦無資料可使用，唯有一個不知名的井號存在。

表 3-1、經由程式分析所有土壤性質分類表。

分類代號	土壤性質	顏色碼(RGB)			顏色名
1	表土	204	255	255	粉淺藍色
2	黏土	255	153	204	玫瑰色
3	粉質細砂	204	255	204	淺綠色
4	砂質土	255	255	153	淺黃色
5	中砂	255	204	153	黃褐色
6	粗砂	204	153	255	薰衣草色
7	粗砂礫石	51	153	102	海綠色



表 3-2. IL010012 井柱資料分析結果。

厚度(m)	土壤性質	深度(m)	分類代號
5.00	表土	-5	1
15.00	砂質土	-20	4
5.00	粉質細砂	-25	3
10.00	黏土	-35	2
10.00	粉質細砂	-45	3
8.00	黏土	-53	2
4.00	粗砂礫石	-57	7
3.00	中砂	-60	5
17.00	黏土	-77	2
6.00	粉質細砂	-83	3
3.00	粗砂礫石	-86	7
7.00	黏土	-93	2
3.00	粉質細砂	-96	3
3.50	砂質土	-99.5	4
7.50	粗砂礫石	-107	7
20.00	砂質土	-127	4
5.00	粗砂礫石	-132	7
9.00	砂質土	-141	4
20.00	粗砂礫石	-161	7
19.00	砂質土	-180	4

## 附 錄

## 附錄一 第一年期末審查意見處理情形

期末報告審查意見	辦理情形
<p>成功大學水利系許教授泰文：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫包含四個子題，研究團隊陣容堅強，內容文獻回顧等收集相當完整，研究成果對於地層下陷之防治策略很有助益。</li> <li>2. 入滲量模式為一維，故分析區域必須較小才有較高空間解析度，報告中計畫所劃分之區域，其數值精度是否符合需求？如何推估大區域的入滲量請補充說明。</li> <li>3. 水文平衡模式中土壤參數與水文參數資料之選用影響模式之計算結果，大區域範圍的計算在每一鄉鎮取一代表性參數，是否具有代表性？有沒有足夠的觀測數據來驗證數值模式之成果。</li> <li>4. 地層下陷模式實際運用時，因區域內地層存在異質性，如何選擇較具代表性參數使模式模擬成果具說服力？</li> <li>5. 建議報告能將四項子計畫執行成果</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝評審委員之肯定。</li> <li>2. 本計劃所發展之地表入滲模式於第一年度所完成之主要工作內容為：(1)模式計算結果與解析解比較，以確定數值過程之正確性，(2)應用於雲林與彰化地區，並確定與其他研究計劃所推算結果具有合理差距。至於更精確之推算值必須結合 GIS 考慮地表覆蓋土壤、地表利用形態以調整計算上之邊界條件，如此才能得到更合理之結果。至於空間解析度可以依據實際需求與計算機時間而決定，基本上本文模式屬於單點入滲模式，大區域之入滲量可以依據單點計算結果積分後而獲得。</li> <li>3. 大區域計算上每一鄉鎮僅取一點絕對無法滿足代表性，但是僅取一點而獲得之結果與其他研究計劃結果比較後，兩者之間差距僅有 1 至 2 倍差距，此顯示本報告於尚未考慮空間解析度條件下仍有合理結果。下一年度地表入滲模式與 GIS 結合後，將可以任意調整空間解析度，此情況下將有更合理之結果。</li> <li>4. 垂直層間與水平區域間的參數異質性已能考慮。至於代表性參數乃參考實例及經驗值，將來亦計畫進行進一步的探討。謝謝指教！</li> <li>5. 謝謝指教，綜合性的結論附於報告之總論</li> </ol>

<p>作綜合性的結論與建議。子計畫三頁碼編號應與其他子計畫一致。另建議各子計畫之橫向聯繫。</p>	<p>中，惟本年度因時間關係各子計畫間之整合尚不完整，未來第二年度將加強其間之整合與聯繫。</p>
<p>成功大學資源工程系李教授振誥：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫為三年期計畫之第一年，工作內容繁多，工作項目與計畫相符，內容完整，值得嘉許。目前除期中報告中補充資料之說明，皆在期末報告已完整答覆與完成各子題外，其內容相當充實，甚是難得之計畫。</li> <li>2. 地表入滲補注總量請與如 PI-73 頁之能邦公司之報告相比較，並說明其差異性！</li> <li>3. 地層下陷量為屬動態行為，其與地下水位有關，請說明如何於動態地下水位下，地層下陷量如何於本計畫估計之執行流程與結合方式。</li> <li>4. 未來下陷模式如何應用於實際地區（如濁水溪沖積扇沿海地區），請說明其原則，並與地陷潛能評估結合。</li> <li>5. 最優模式中有關限制式之給定值，請未來依各鄉鎮之限制而定，再重新模</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝評審委員之肯定。</li> <li>2. 能邦公司採用兩種飽和水力傳導係數，得到濁水溪沖積扇地表入滲量分別是：13.81 億噸/年與 5.97 億噸/年。本文推估地表入滲量結果分別為：彰化地區 12.5 億噸/年，雲林地區 9 億噸/年，濁水溪河床補注量 1.2 億噸/年，全區合計約為 22.7 億噸。本計劃執行地表入滲量推估工作時，發現砂土層或是滲透性較佳之礫石層，其飽和水力傳導係數對於入滲量推估結果之影響較不敏感，而滲透性較差之粉土、泥與黏土層之飽和水力傳導係數對於推估結果影響較顯著，足見推估結果之差異性在於水力傳導係數之設定。於後續工作中，本計劃將收集更多。</li> <li>3. 地層下陷與地下水流乃是互相結合的模擬，因此是動態的。至於其執行流程請見報告中第二部分圖 4-5。</li> <li>4. 模式應用於實際地區過去已有經驗，應不致造成困難。地陷潛能將以地陷速度評估之。</li> <li>5. 謝謝委員之指教。未來將更詳細探討各鄉鎮市目前之下陷情形，以訂定更合理之限</li> </ol>

<p>擬。另外，須進行分段分時(如半年、每季)抽水加以分析，亦先確定管理時期(如一年)在進行分段管理。</p> <p>6. 本計畫本年度由於目前執行時期較短，在整合上稍有不完整，建議將來在整合性方向加強。</p>	<p>制條件；另受限於響應矩陣過大之問題，目前本研究並未考慮分段分時之優化模擬，未來將進一步考慮響應矩陣過大以及分段分時的問題。</p> <p>6. 本計畫第二年度將加強各研究子題間研究成果之整合，謝謝指教。</p>
<p>工業技術研究院能資所柳研究員志錫：</p> <p>1. 本計畫所開發之地層下陷預測模式，應用有限解析法於區域性三維地下水之模擬與固體介質三維變形計算是不錯的嘗試，另考慮阻水層之浮體重力效應，對於模擬結果亦有正面之效果，但模擬仍以探討穩定狀態為主，對於較接近實地狀況之暫態行為建議未來加以考慮。</p> <p>2. 利用一維耦合地層下陷模式同時評估地表荷重及抽水所引起之地層壓密現象時，應注意兩者對於地層所造成之超額有效壓力之差異，以避免模擬結果在壓密量及時間歷程與實際狀況相差太大。報告II-45頁提及之模式應用，以所假設地層模型而言，阻水層之透水係數設為 <math>10^{-8}</math> cm/sec，屬於透水性甚低之黏土，在物理現象上代表排水甚慢，因此超額孔隙水壓之消散不致太快，建議可再討論。</p> <p>3. 本研究將地層簡化為含水層與阻水層，確可較有效率進行模擬預測，但是地層中之沙土與黏土，受力變形特性迥異，且疏鬆或緊密之變化亦不同，建議未來多加考慮。</p> <p>4. 台灣之坡地與海岸地區之質地差異</p>	<p>1. 謝謝肯定與指教。由於水流與土體變形的時間尺度差距大，因此下陷在水流時間尺度下為穩態，換言之，結果仍是暫態的。</p> <p>2. 謝謝指教。委員的意見完全正確，但在雙時間尺度計算未發展前，很遺憾本模式目前還無法如此細緻。不過，拋開耦合的困難，本模式的地下水計算確實在以往已展現過計算阻水層貯蓄效應的能力。</p> <p>3. 將來計畫進一步進行土壤參數物理特性的單獨探討。謝謝指教！</p> <p>4. 謝謝委員之指教，但本研究工作項目並未</p>

<p>甚大，應用本研究之模式時，應先進行地質之適用性評估。</p>	<p>包含坡地之應用，因此模式應用於台灣坡地之研究目前暫不考慮。</p>
<p>中興工程顧問公司龔協理誠山：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. IV-25 之案例使用井 A · 5cms，約為 43 萬噸/日，以台灣地區單口水井之出水量達每日一萬噸即屬非常良好之水井，建議使用井群 A 較符合實際。</li> <li>2. 土壤參數建議可收集相關工程單位之資料，加以運用。</li> <li>3. 表 5-1 使用沈向白教授之資料，其資料年代為 78 年~79 年間，距今已達十年以上，目前濁水溪沖積扇抽水量已有改變，建議後續工作結合區域性水文平衡計畫及參考水資源局相關計畫成果，以反映近年來之狀況。</li> <li>4. 重力浮體效應顯著，建議後續工作以一實測之地層下陷井之資料進行研究以論證浮體效應。</li> <li>5. 彰雲大橋至中沙大橋間之河道補注量推估與河槽地形及地下水水位相關，建議後續工作使用較新之資料再行複核並與其他研究成果相互比較。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 遵照辦理，謝謝委員之指教。</li> <li>2. 工程單位之鑽探資料一般均無水力滲透試驗值，且資料收集上較不容易，但是為了增加基本資料之可靠性，本計劃將儘量項相關單位索取鑽探資料。</li> <li>3. 謝謝委員之指教，未來第二年度應用優化模式時，將蒐集較新之抽水量資料並配合水文平衡計畫之研究成果，以確實反映近年來之狀況。</li> <li>4. 謝謝指教！固吾等所願。</li> <li>5. 已經向水利處洽取民國 88 年與民國 90 年濁水溪河道測量斷面數據，將於下一年度後續工作中進行覆核工作。</li> </ol>
<p>主辦科意見：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫執行至九十年十月三十日止，進度符合計畫契約書之規定。</li> <li>2. 本計畫依第一年計畫工作項目有完整之報告，惟本報告最後並無綜合性之結論與建議，建議請補充。</li> <li>3. 建議將報告書研究子題三「地層下陷資料之地理資訊決策系統」內容中之</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝指教。</li> <li>2. 遵照辦理，綜合性之結論將附於報告中之總論部分。</li> <li>3. 該項目於期中審查時已提出，並於期末報告時已修正，謝謝委員之指教。</li> </ol>

<p>次要資料，如系統在使用上的介紹，移至系統技術手冊，有助於技術移轉工作事宜，並請將手冊編入期末報告附錄中。</p> <p>4. 報告書中欠缺中文摘要及總目錄，建議請補充。</p> <p>5. 子題IV，地層下陷及地下水優化模式中是否可將濁水溪沖積扇地區區分成彰化及雲林地區，分別模擬？</p>	<p>4. 遵照辦理。</p> <p>5. 謝謝委員之指教，未來第二年度應用優化模式於濁水溪沖積扇地區時，將考慮彰化及雲林地區水資源利用情形作分別之考量。</p>
--	---

## 附錄二 第二年期末報告審查意見處理情形

期末報告審查意見	辦理情形
成大資源工程系李教授振誥：	
1. 本計畫內容合乎工作項目，內容豐碩，深具主辦單位參考價值。	1. 謝謝審查委員之肯定。
2. 區域地下水文平衡為一動態平衡，建議能朝分年度推估其抽水量、入滲量與地層下陷之間關聯性。	2. 本計劃執行順序為：(1)建立推估區域地下水文平衡流程與方法，(2)評估與改良推估流程與方法，(3)推估長期區域地下水文平衡量，(4)將推估流程與模式匯入地理資訊系統中。由於第一年工作成果中，審查委員希望對於地表入滲量計算結果多方面比較與驗證，經第二年工作修正後計算結果已經相當合理，因此第三年將配合地陷模式推估長期入滲量。
3. 報告內容之撰寫建議依正規格式來撰寫。	3. 遵照主辦單位意見辦理。
4. 請說明輸入水文地質參數值之合理性（亦即是否有進行驗證）。	4. 含水層之水力傳導係數與儲水係數係依據地下水監測井網之分層抽水試驗結果，並依據空間插值模式展延至計算點位，因此本計劃中對於此一數值並無特別進行驗證。
5. 分層地層下陷所推估出來之現場沉陷值，應與過去所利用其他模式例如拋物線模式等所推估之值比較。	5. 研究中，已將地層下陷計算結果與實測值相比較。是否需與其它模式比較，遵照主辦單位意見辦理。
6. 在推估出來之地陷值中，所輸入參數之率定是否應與地下水模式之率定相一致。	6. 由於地陷模式所採用之數值方法與水平衡方法不同，空間解析度亦不同，因此所採用之水文參數數值大小將有



<p>7.整合計畫應以地下水可用量或水位等水資源量來為整合之目標，地層下陷量可列入參考值，與水量對比之資料。</p>	<p>些微差異，然而對於空間分布趨勢必須一致。</p> <p>7.在地下水管理方案中，的確需要整合地下水潛能量、地層沉陷量、與其範圍，作為基本管理的環境指標。謝謝審查委員的意見，將配合署內地下水資源整合方案執行，提出作為參考。</p>
<p>成大水利及海洋工程系許教授泰文：</p> <p>1.本計畫為三年計畫中第二年計畫，工作執行內容和成果豐碩，值得肯定。</p> <p>2.三維多層地下水流數值模式中，含水層結構與地質水文參數對推估有重要影響，對於濁水溪沖積扇入滲補注量模擬，往昔學者專家曾從事這方面研究，應參考這些研究所應用的水文參數和預測結果，以便瞭解這些參數敏感度，而本計畫結果僅與能邦公司比較，應和其他學者專家比較。</p> <p>3.地層下陷潛能與危險評估，報告中以濁水溪沖積扇為計算範例，計算成果顯示耦合模式並沒有優於非耦合模式，原因在於此一區域浮體重力效應並不顯著，能否在下年度實例應用時，找出能發揮耦合模式功能之範例。</p>	<p>1.謝謝審查委員之肯定。</p> <p>2.三維多層地下水流數值模式目前只進行至解析解驗證工作，本計劃已經收集往昔學者專家於濁水溪沖積扇研究結果，將來實際應用上會與往昔研究結果進行比較。</p> <p>3.研究中所發展之一維耦合地層下陷模式，確實可以表現出浮體重力效應之物理行為。謝謝審查委員之建議。</p>
<p>工研院能資所柳研究員志錫：</p> <p>1.本計畫建立之地陷預測數學模型及理論基礎相當完整且深入，但因實際地層性質相當複雜，預測結果與實地行為難免有差距，建議未來可考慮以試驗室物理模型驗證部份成果。</p> <p>2.一維耦合下陷預測模式會較適用於沉積層很厚之均勻下陷預測，對於地層</p>	<p>1.謝謝審查委員之建議。</p> <p>2.謝謝審查委員之建議。本研究暫不考慮山坡地之地層下陷計算。</p>

<p>性質變異大，如多層含水層系統之黏土凸鏡體及山坡地，水平位移影響較明顯，建議考量一維模式之適用性。</p> <p>3.對於地層下陷潛能之評估，所謂終極沉陷量應指相對條件而言，在不同之抽水狀態下，其量亦會有不同，建議未來可先評估地層最多可抽多少水，再分析其對地層之影響性。</p> <p>4.濁水溪沖積扇部份鄉鎮之抽水井及量之調查已有較新之資料，建議加以參考。</p>	<p>3.本研究採用給定抽水量及入滲量下，計算終極下陷量。</p> <p>4. 謝謝審查委員之建議。</p>
<p>本署主辦科：</p> <p>1.請承辦單位針對報告 II-142 頁中圖 6-22 中高鐵經過之雲林縣土庫及元長鄉地層下陷潛勢圖，補充相關背景資料、模式起始條件及模擬之歷程，提送本科，俾轉送本署水利行政組參考。</p> <p>2.目前本計畫以濁水溪沖積扇為研究區域，但台灣地區有地層下陷問題之區域更包含宜蘭、嘉南平原及屏東平原，未來如何將本計畫研發之技術應用於濁水溪沖積扇以外之地區，請提出具體建議。</p>	<p>1.遵照辦理。</p> <p>2.本計畫結合地理資訊系統所發展之地層下陷模式已具通用性，可以使用於任何地區之地層下陷模擬，只需藉由電腦視窗即可清楚且容易地輸入模擬所需資料，並啟動模式及展示模擬結果。</p>

## 附錄三 第三年期中報告審查意見處理情形

期中報告審查意見	辦理情形
<p>成大資源工程系李教授振誥：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.本期中報告內容應合乎進度，未來應朝實務展示、實際應用量化與運用方式進行並結合，另探討實際案例。</li> <li>2.請定義終極下陷量、最佳抽水量、序率優化模式及機率優化模式。</li> <li>3.建議未來能展示一地區地層下陷潛能模擬，並與實際預測觀測相比較。</li> <li>4.地下水模式中單位響應係數應作不確定性分析，如何獲得資料與分析請於文中說明，並說明其於優化模式中所扮演之角色，並說明水頭洩降及地層下陷設定為常態分布之理由。</li> <li>5.請說明圖 3-10~圖 3-11 中，下陷量與時間（年）呈線性關係之理由，是否代表仍有可能繼續下陷。</li> <li>6.報告 I-27 頁中 <math>n=0.4</math> 是否太大，並確定 <math>M=0.06</math> 之正確性。另報告 I-75 頁中終極下陷量與現有資料相比較。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.謝謝審查委員之肯定與建議。</li> <li>2.遵照辦理。最佳抽水量定義請參照期末報告第二部分之 3.1 節內文；序率與機率優化模式定義則請參照期末報告第二部分之 1.1 節內文。</li> <li>3.遵照主辦單位意見辦理。</li> <li>4.常態分布之說明請參照期末報告第二部分之 3.1 節內文；單位響應係數不確定性分析方法則請參照期末報告第二部分之 3.3 節內文。</li> <li>5.是的。</li> <li>6. <math>n=0.4</math> 應屬合理範圍，若有完整資料則可進一步比較之。</li> </ol>
<p>成大水利及海洋工程系許教授泰文：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.報告建議以章節統一串聯，報告請附期中、期末審查委員意見及修改情形，在總論建議增加本報告組織架構。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.謝謝審查委員之肯定。</li> </ol>

<p>2.地層下陷模式考慮浮體重力效應，進行耦合下陷計算，模式雖能符合實際地層下陷現象，但在濁水溪沖積扇實例演算並未能展現浮體重力效應，在台灣環島沿海地區從實測資料能否找出一維耦合模式適用地點。</p> <p>3.彰化及雲林地層下陷量推估，建議能將所使用的參數在表 2-1 中詳細說明。潛能下陷量分析空間分布圖建議能在報告展現。</p> <p>4.優化模式最佳抽水量算出負值是否代表補注量，較難和地層下陷聯想。另請加強說明地層下陷何以假設常態分布。</p>	<p>2.謝謝委員之建議，儘量尋找相關合適地點。</p> <p>3.遵照辦理。</p> <p>4.負值代表補注，即在符合地層下陷量限制條件下，於適當之地點進行補注將可提高整體之最佳抽水量；常態分布之說明請參照期末報告第二部分之 3.1 節內文。</p>
<p>工研院能資所柳研究員志錫：</p> <p>1. 國外相關研究經驗顯示，複雜之地層下陷預測模式常需配合適當之水文地質模型及地質參數，方可得出合理的預測成果，濁水溪沖積扇範圍廣大、地層多變，本研究進行預測時，是否有簡化，建議適當說明研究區域之水文地質背景。</p> <p>2. 根據土壤力學原理，在載重固定之條件下，地層會有終極壓縮量，但因現場地下水水位之變異性高，實務上很難評估終極下陷量，因此建議先選定一合理之最大抽水量，再以模式預測該固定條件下之最大下陷量。</p> <p>3. 期中報告第一部分圖 3-10 及圖 3-11 之下陷量曲線不同是否與地層條件有關，另表 3-2 及表 3-3 大城鄉各點</p>	<p>1.濁水溪沖積扇之水文地質分布情況，採用中央地質調查所所提出之資料。</p> <p>2.謝謝委員之建議。</p> <p>3.與地質條件及水文條件皆有關係，下陷量預測差距較大之測站，將改正之。</p>

<p>之下陷量預測差距頗大，及土庫鎮埤腳國小之下陷預測量與現況差異大，是否與預測之設定條件有關。</p>	
<p>中央地質調查所黃技正智昭：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 區域地下水文平衡最佳推估模式所推估之入滲量是否與能邦公司等研究成果相比較。</li> <li>2. 本計畫名稱是否應加註「濁水溪沖積扇為例」。</li> <li>3. 文中所提終極下陷量之理論、定義要說明清楚，以免誤解。</li> <li>4. 請加列彰化、雲林地區水文地質剖面圖，以呈現濁水溪沖積扇之地下地層分布情形。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 去年報告中已作詳細之討論。</li> <li>2. 遵照辦理。</li> <li>3. 遵照辦理。</li> <li>4. 遵照辦理。</li> </ol>
<p>水利署水利規劃試驗所徐正工程司世定：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 表 3-2、表 3-3 中所採用之各井點位，請圖示以資明確。</li> <li>2. 報告中彰化縣二林「鄉」應為二林「鎮」之誤植，請予更正。</li> <li>3. 有關終極下陷量之研究方向，個人同意工研院能資所柳研究員志錫所提之方向。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已標示其 TM2 度之 x 與 y 座標值。</li> <li>2. 謝謝委員之指正，修改之。</li> <li>3. 謝謝委員之建議。</li> </ol>
<p>本署主辦科：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫為三年延續計畫之第三年計畫，必須於本年十一月底前結案。</li> <li>2. 本計畫於本年度必須辦理技術移轉教</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 遵照辦理。</li> <li>2. 遵照辦理。</li> </ol>

<p>育訓賃講習會，本署建議於本年九月底至十月初辦理，故請承辦單位於八月底前提出講習會計畫書，確定方式、課程、時程、講師及訓練對象等細節。</p>	
<p>3.建議本計畫前二年計畫之審查意見及辦理情形對照表，併同本年度計畫一起放入本年度期末報告中。</p>	<p>3.遵照辦理。</p>
<p>4. 本計畫開發系統之使用手冊，請儘速提報本署相關同仁嘗試操作以提供操作端之回覆意見。</p>	<p>4.遵照辦理。</p>
<p>5. 本計畫網路版及單機板之系統如何上掛本署伺服器中，請承辦單位擇期與本署資訊室同仁溝通確定。</p>	<p>5.遵照辦理。</p>
<p>6. 有關本計畫網路版展示系統所展示之內容，建議以本計畫模擬推算之成果呈現。</p>	<p>6.遵照辦理。</p>

## 附錄四 第三年期末報告審查意見處理情形

期中報告審查意見	辦理情形
<p>成大資源工程系李教授振誥（王教授建力代）：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫執行成果豐富，值得肯定。</li> <li>2. 本計畫之模式分析部分強調浮體重力效應的重要性，但是是否有評估其他因素造成的影響，例如土壤之滲透性高低，軟土層所表現的塑性行為（非彈性）及荷重大小及速率的快慢，均是重要的評估因素，建議水利署規劃作為將來研究的方向。</li> <li>3. I-116~I-124、II-54~II-56 各頁之單位標記請注意，並請註明代表符號。</li> <li>4. 終極沈陷量是指時間趨向無窮大，在一定荷重下的沈陷量，而非短期作用下之沈陷量。</li> <li>5. 建議優選研究部分之常態分佈可改為對數常態分佈。</li> <li>6. 本模式開發之系統另人印象深刻。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝審查委員之肯定與建議。</li> <li>2. 謝謝審查委員之建議，土壤物理之後續研究確實很重要。</li> <li>3. 遵照辦理。</li> <li>4. 謝謝審查委員之意見，但抽水引致土層沉陷的物理機制確實比荷重沉陷者複雜許多。</li> <li>5. 研究中使用的是對數常態分佈。</li> <li>6. 謝謝審查委員之肯定。</li> </ol>
<p>工研院能資所柳研究員志錫（劉智超博士代）：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 請說明地層下陷模擬相關參數之率定方法或技巧。</li> <li>2. 工研院能資所使用之地陷模擬程式</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已於上年度報告中詳述，詳見第二年報告第二部分第六章。</li> <li>2. 謝謝委員之指正，已予改正。</li> </ol>

<p>有考慮砂土層之變形量(即砂土層之壓縮係數)。</p> <p>3. p19 程序 2 與 3 重複。</p> <p>4. p20 圖 2-15 以後之圖號都要加 2。</p> <p>5. p30 程序代號 3.1 改為 4.1。</p> <p>6. p23 程序代號 2.2 改為 2.3。</p> <p>7. p41 圖 2-51 與圖 2-52 之內容完全相同是否有誤。</p> <p>8. pII-34 表 4-2 之 K 值的上標有誤。</p> <p>9. pII-40 表 5-5 第四區的 K 值標準差可能有誤。</p>	<p>3. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>4. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>5. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>6. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>7. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>8. 謝謝委員之指正，已予改正。</p> <p>9. 謝謝委員之指正，已予改正。</p>
<p>中央地質調查所費組長立沅：</p> <p>1. 本計畫在短短三年內，對於計畫所要求完成之複雜工作項目都已有不錯的成果，值得給予肯定。</p> <p>2. 本計畫使用之抽水量資料，係由前嘉義農專沈故教授所調查之結果，近年水利署辦理之水井調查已有部分較新成果，建議比較兩者在水井數與抽水量之差異情形，以瞭解各鄉鎮近年之抽水趨勢變化究竟是增加或減少，做為定性上調整本計畫成果之依據。</p> <p>3. 是否能夠依據理論及已有的數據，評估濁水溪地區在扇頂、扇央、扇尾等不同區域之土體參數與孔隙比究竟是正關係或負關係，以探討在此地最後是否會發生終極沉陷的情況？另</p>	<p>1. 謝謝審查委員之肯定。</p> <p>2. 謝謝審查委員之建議。</p> <p>3. 謝謝審查委員之建議。不過，對於抽水引致地層終極沉陷之定義，仍待國內學者集思廣義。</p>



<p>外，建議在本報告中嘗試對於終極沉陷之可能合理定義做一討論。</p>	
<p>水利署水利規劃試驗所徐正工程司世定：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地層下陷潛能區圖可否探討原因。</li> <li>2. 請補充說明模式執行上要如何分層。</li> <li>3. 請補充說明使用者對資料適用是否需有條件限制。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已於報告中敘述。</li> <li>2. 由使用者自行根據相關水文地質資料加以分層。</li> <li>3. 請參見表 2-1 之輸入資料需求。凡完整者皆可適用</li> </ol>
<p>本署水文技術組張國強科長：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建議終極沈陷量計算之描述改為「在所計算五年時間內之地層下陷量」。</li> <li>2. 模式優選研究中有關參數正常分佈之假設已列於限制條件，再執行正常分布之檢核，此檢核流程宜再詳加探討。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 遵照辦理。</li> <li>2. 遵照辦理。</li> </ol>
<p>本署主辦科：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 請補充說明「地層下陷潛能區」評選之方法及原則，以作為未來系統使用者作決策之依據。</li> <li>2. 本計畫所開發之模式係以濁水溪沖積扇為研究區域，故請承辦單位將濁水溪沖積扇之地質架構、計算格網、經率定校核後之格網參數等，內建於單機板系統中，俾利本署等單位同仁之使用。</li> <li>3. 請承辦單位擇期與本署資訊室同仁溝通將本計畫網路版系統上掛本署伺服器中。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 遵照辦理。</li> <li>2. 遵照辦理。</li> <li>3. 遵照辦理。</li> </ol>

<p>4. 請將本計畫模擬推算之成果，置於網路版展示系統及單機板光碟中，俾利使用者參考。</p>	<p>4.遵照辦理。</p>
--	----------------

## 附錄五 技術轉移教育訓練講習會

- 時間：中華民國九十二年十一月十七日(星期一)
- 地點：國家高速網路與計算中心
- 主辦單位：經濟部水利署、國立交通大學防災工程研究中心
- 協辦單位：國家高速網路與計算中心

### 課程內容

9:30~10:00	報到及領取資料
10:00~10:20	簡介 曾鈞敏 科長與楊錦釗 教授
10:20~12:00	地層下陷管理模式整合系統相關原理及成果展示 蔡東霖 博士
12:00~13:00	午餐
13:00~13:40	國家高速網路與計算中心簡介 連和政 博士
13:40~15:00	地層下陷管理模式整合系統操作(一) 張哲豪 教授
15:00~15:30	休息
15:30~17:00	地層下陷管理模式整合系統操作(二) 張哲豪 教授

