

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

地下水水流與傳輸模擬技術之研究
Investigations of Modeling Technologies for Groundwater Flow
and Contaminant Transport

計畫編號：1002001INER016

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：倪春發

聯絡電話：03-4227151

E-mail address：nichuenf@gmail.com

核研所聯絡人員：施清芳、莊怡芳

報告日期：100年11月15日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
貳、研究方法與過程.....	6
一、模型一：假設模型.....	6
(一) MODFLOW 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸.....	7
(二) FEMWATER 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸.....	10
二、模型二：模擬電廠模型.....	15
(一) MODFLOW 模擬模擬電廠模型地下水水流與污染傳輸....	16
三、模型三：金門島模型.....	19
(一) FEMWATER 模擬金門地下水水流與污染傳輸.....	19
參、主要發現與結論.....	24
一、模型一：假設模型.....	24
(一) MODFLOW 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸.....	24
(二) FEMWATER 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸.....	28
二、模型二：模擬電廠模型.....	31
(一) MODFLOW 模擬模擬電廠模型地下水水流與污染傳輸....	31
三、模型三：金門島模型.....	37
肆、參考文獻.....	44

中文摘要

地下水水流與傳輸模擬為評估潛在污染場址的關鍵技術；其中，模式的數學理論、求解方法、假設條件、以及現地尺度的模式應用與參數率定分析等，為左右評估準確性的重要條件。本研究將以廣泛使用的數值模式如 FEMWATER(Three-Dimensional Finite Element Model of Water Flow Through Saturated-Unsaturated Media)、MODFLOW(Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model)配合 MT3DMS(A Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model)，以及 IGW (Interactive Groundwater)等為主要模擬輔助工具，進行地下水水流與傳輸相關模擬技術研究。主要研究重點包括(1)水流與污染傳輸數學理論與數值模擬技術，(2)物理模型轉換概念模型之必要假設及簡化分析技術，(3)常見水文地質邊界之數學與數值處理技術，以及(4)數值模式介面使用與潛在場址案例分析技術。研究成果將建立一涵蓋數學理論、數值模式以及案例分析等重要地下水污染傳輸分析流程，於研究期間同時辦理相關教育訓練與技術轉移研討會，透過理論及模式應用的深入評析，可提供未來地下水污染傳輸相關研究上技術層面的提升。

Abstract

The numerical simulations of groundwater flow and transport are key technologies to investigate potential contaminated sites. To obtain accurate and reliable solutions for site investigations, the derivations of mathematical theories, developments of numerical models, formulations of conceptual models and the associated assumptions, applications of field-scale problems, and the parameter estimations and calibrations are recognized to be the important procedures. Motivated by the requirements to obtain the reliable assessments on groundwater flow and transport on sites, this study employ well developed numerical models such as FEMWATER(Three-Dimensional Finite Element Model of Water Flow Through Saturated-Unsaturated Media), MODFLOW (Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model) associated with MT3DMS (A Modular Three-dimensional Multispecies Transport Model) , and IGW (Interactive Groundwater) to investigate in deep the simulation technologies for groundwater flow and contaminant transport. The main topics of the study will include (1) mathematical theories and numerical algorithm for

groundwater flow and transport, (2) general concept on creating conceptual models from existing physical models (or in situ conditions), (3) mathematical and numerical algorithms for handling common hydrogeological boundary conditions, and (4) synthetic and realistic case studies by using interactive software environment for groundwater flow and transport modeling. The objective of the study is to develop a rigorous procedure to conduct groundwater flow and transport simulations, especially for assessments on potential sites for nuclear geologic repositories. Additionally, a series of internal workshops and short courses will be held to provide platforms for discussing key technologies for site specific.

壹、計畫緣起與目的

近年來一些重要的含水層水流及汙染傳輸議題，如隧道開挖、山區地下水資源評估、核廢料儲存場址選定與評估、二氧化碳地質封存與深層地熱替代能源等，在汙染團的移動路徑預測及地下水流方向判定問題上，數值模擬均扮演一項重要的分析工具(例如 Anderson and Woessner, 1992; Segol, 1993; Gümach, 1999; Yeh, 2004; Zheng and Bennett, 2002; Hill and Tiedeman, 2007)。然而，在面對各式各樣的汙染議題時，合適的數值模式選定以及各項邊界條件的選定往往對於模擬結果有重大的影響。特別像是高放射性與低放射性核廢料場址選定，由於現實狀況下，無法進行長時間的存放實驗，因此善用數值模擬工具可以大大降低實驗成本，更可以達成為期數百、數千年的狀態預測(例如 Ahearne, 1997; Dyer and Peters, 2004; Rempe, 2007; Marpeaul and Saad, 2010)。

實際地下水水文地質物理模式(或物理系統)相當複雜，若要完全使用數值模式去詳細描述所有的物理機制，則會消耗太多電腦運算資源；同時，技術層面上亦因觀測儀器及人力有限，無法滿足觀測數據質與量上的需求。因此，由地下水流流動與汙染傳輸理論為基礎，透過適當假設及水文地質條件輸入，可以有效率地對特定的地下水水流或傳輸問題，所關心的議題也可做較深入的剖析(Anderson and Woessnr, 1991)。

地下水相關的數值模式近三十年來已發展相當成熟，隨著計算工具的快速發展，使得數值模擬方法變成工程上規劃設計的必要工具(Helton, 1993; Pollock, 1986)。由於相關的數值模式相

當多，可以查得到的通用模式至少上百個，未知或個人開發的模式更是不計其數。各模式所考慮的條件亦不盡然相同，舉例來說，求解地下水水流控制方程式可以是適用於完全飽和的含水層條件如 MODFLOW(Harbaugh, et al., 2000; Harbaugh, et al., 1996; Hill et al., 2000; Mehl et al., 2006)，或者可以透過解 Richards 方程式(Richards, 1931)如 FEMWATER(Yeh, et al., 1979; Ng, et al., 2001)，可以處理變動飽和層的水流問題(van Genuchten, 1980)。由於模式形成的基礎方程式不同，其所能處理的問題也隨之不同，若分析的問題位於變動飽和層且飽和度變化對關注的問題相當重要，使用 FEMWATER 可解決相關問題，反之若關注的問題位於飽和含水層中，利用 MODFLOW 即可涵蓋飽和含水層的大部分流動問題。

因數值模式的選擇與使用是依據問題的特性決定，研究分析者除了對關心的問題必須深入瞭解外，模式的限制、使用方法及實際問題應用將決定數值模式解釋物理現象的準確度與可靠性(McLaughlin, 1988)。為提升地下水水流與傳輸模擬技術，深入剖析水流與污染傳輸數學理論、數值概念模式建立及水文地質邊界條件之數學與數值處理方法等，為必要的關鍵步驟。因此，本研究之目的為建立一涵蓋數學理論、數值模式以及案例分析等重要地下水污染傳輸分析流程，有效地加速地下水數值模擬研究時程；同時辦理相關教育訓練與技術轉移研討會，透過數學理論及數值模式應用的深入分析，提供未來地下水污染傳輸相關研究上技術層面的提升。

貳、研究方法與過程

本研究選定數個不同特性含水層作為研究分析的模型，依據模擬區域及含水層特性，分別使用一個假想的非飽含水層水流及污染傳輸模型、岩盤及沖積層混和的海島型含水層模型，沿海陡坡含水層以及台地區域無明顯水力邊界的含水層模型。透過模擬區域的含水層及問題特性，本研究分別使用 MODFLOW 與 FEMWATER 模式進行地下水數值模擬。將由數值概念模式建立及水文地質邊界條件之數學與數值處理方法等為基礎，依據各模型特性，分別建立地下水污染傳輸分析流程，目的為有效加速未來地下水相關數值模擬的建模及分析時程。。

一、模型一：假設模型

本研究考慮一假設井場，井場位於鄰近河岸的邊坡上，佔地範圍約為 1.5km X 1.5km。井場內共假設有觀測井 55 處隨機分布於井場內部，觀測井的分布情形如圖 2-1-1 所示，觀測井之水位亦為隨機產生。在模型中假設由於邊界條件不明顯的關係，本研究將首先考慮大於井場的範圍進行水流模擬，接著再利用此大範圍的模擬結果已決定井場周遭較小範圍的邊界範圍。最後，比較小的模擬範圍將用來進行污染傳輸之模擬。

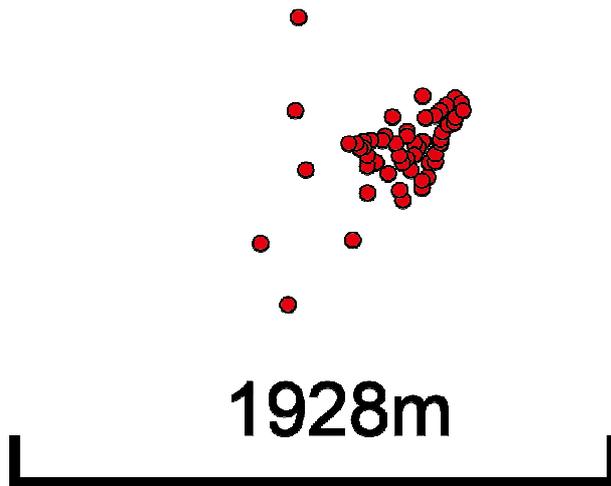


圖 2-1-1、井場內部觀測井之分布概況

(一) MODFLOW 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸

1. 範圍設定

在 MODFLOW 模式中分別以三種不同尺度來研究，模擬範圍大尺度〔16.5 x 14 Km²〕、中尺度〔2.84 x 2.5 Km²〕及小尺度〔0.988 x 0.834 Km²〕，如圖 2-1-2 所示。因大、中尺度研究區域除了西側有大漢溪可作為邊界範圍外，其餘均無可判釋為邊界的地形條件，因此取一合適的距離來決定模擬區域。小尺度則是以觀測井的分布區域來決定。

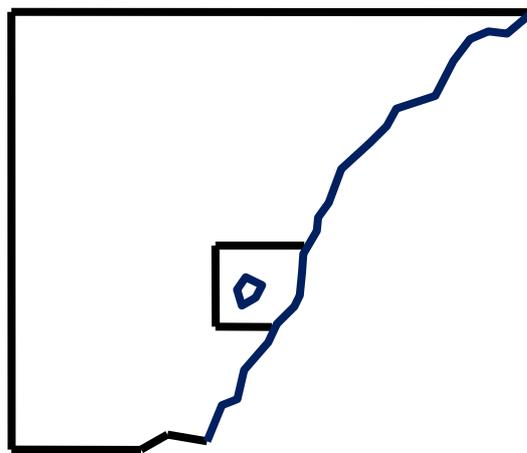


圖 2-1-2. 模擬區域範圍示意

2. 網格設定

三種尺度的網格面積分別是 $40 \times 40 \text{ m}^2$ 、 $5 \times 5 \text{ m}^2$ 、 $2 \times 2 \text{ m}^2$ ，有效網格數 177362 格、2580574 格、117130 格。已知小尺度區域的沖積層約 10~20 公尺厚，其下為底岩層，而地下水位大致都維持在沖積層的深度，因此在小、中尺度將網格分層設為一層，在大尺度則為兩層。

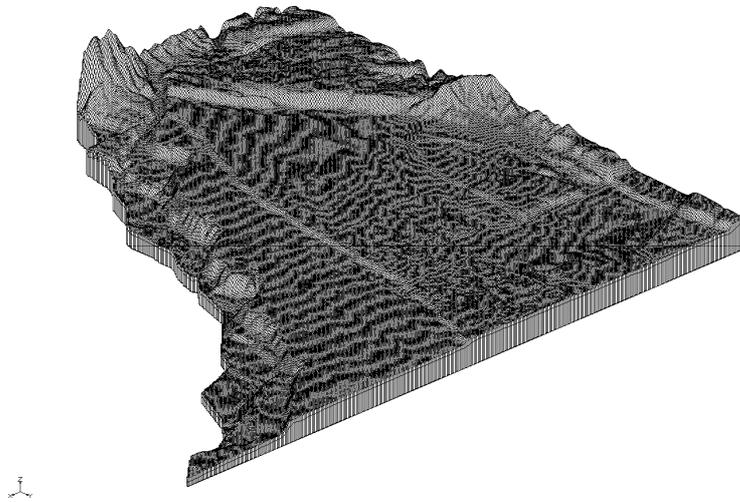


圖 2-1-3. 大尺度網格及地形

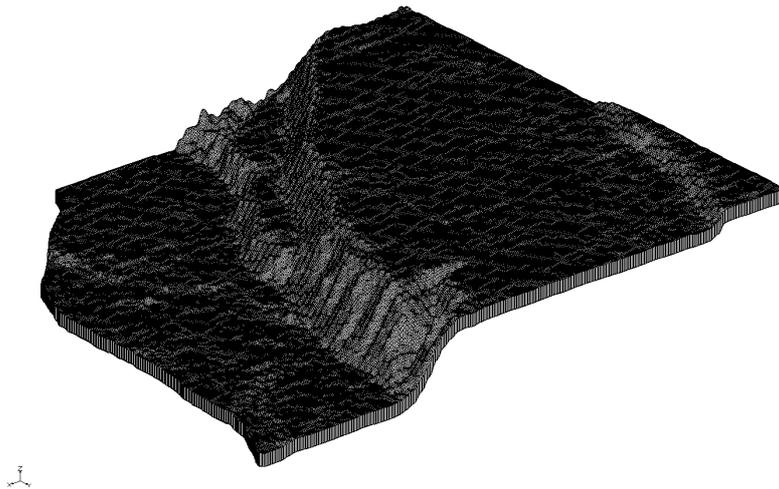


圖 2-1-4. 中尺度網格及地形

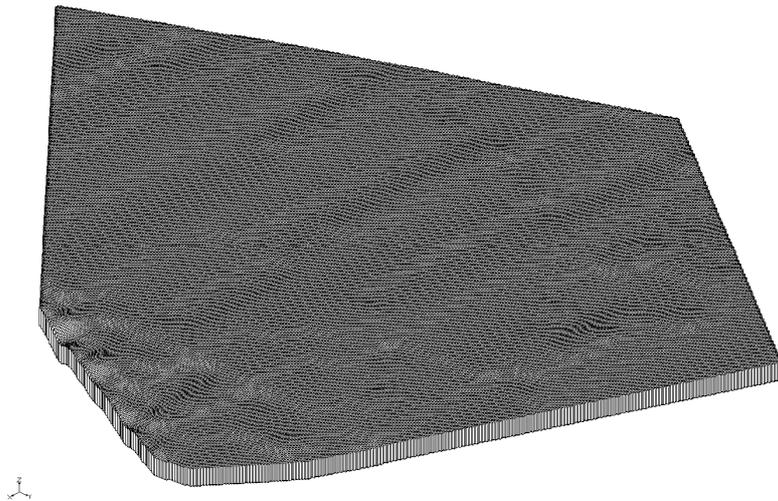


圖 2-1-5. 小尺度網格及地形

3. 初始條件、邊界條件及源匯項

大尺度及中尺度定西側之大漢溪為邊界，其餘為不透水邊界；小尺度則以已知的水位資料，將邊界均設為定水頭。初始條件在三種尺度裡均假設初始水位與地表等高。大、中尺度因為並無確切的水源，所以設定入滲為地下水來源，入滲率分別為 0.00096 m/day、0.00056m/day，而小尺度則因四周均為已知的定水頭邊界，所以不另設源匯項。

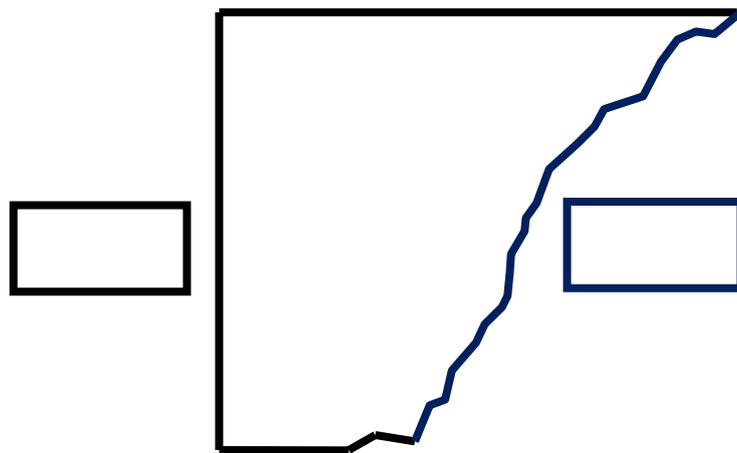


圖 2-1-6. 邊界範圍設定

(二) FEMWATER 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸

由於研究區域內無明顯之水流邊界，因此本工作首先考慮進行較大範圍的水流模擬，並利用模擬之水位分布作為小範圍模擬區域之定水頭邊界，依工作內容可區分為大範圍水流模擬與小範圍汙染模擬兩部分。

1. 大範圍水流模擬

本工作所使用模擬範圍如圖 2-1-7 所示，模擬範圍以觀測井分布區域為中心，向西方向延伸 1 公里遠；考慮右側有一河流位於井場東方約 1.5 公里遠，模擬範圍在東西方向上總長度約為 2.5 公里，而在南北方向上則各延伸 1.25 公里，總長為 2.5 公里。模擬區域涵蓋面積約為 7 公頃。場址區域內由 20,370 個節點與 33,738 個三角網格所組成。場址區域內跨有邊坡，邊坡的高度差約為 120 公尺，地形與網格分布如圖 2-1-8 所示。

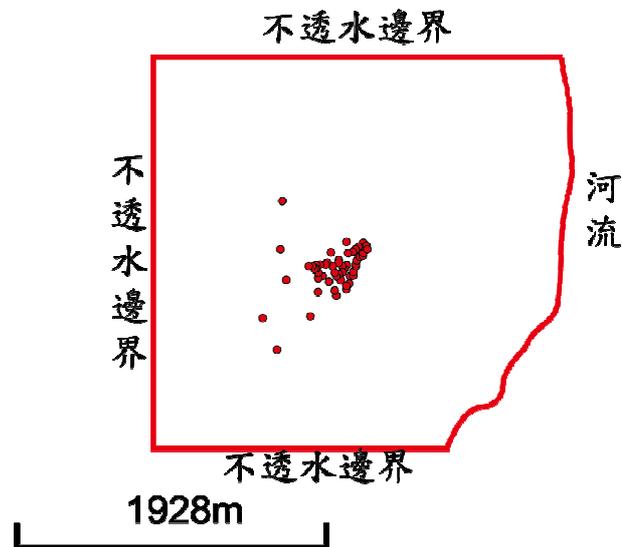


圖 2-1-7. 假設條件下之模擬範圍、模擬邊界與井場之相對分布

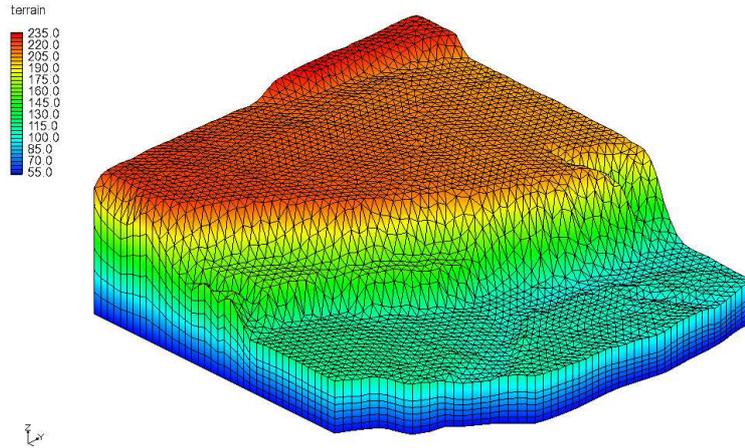


圖 2-1-8. 模擬範圍之地形分布

(1) 邊界條件

模擬範圍內之邊界條件設定如圖 2-1-7 所示，假設邊界條件距離井場周遭足夠遠，也就是排除邊界影響的情況下，除河流外的邊界皆設為不透水邊界，而沿河道行進的邊界則設為與水位等高的定水頭邊界。

(2) 材質分布

考慮現地材質分布，模擬分為沖積層與底岩層兩層，材質分布狀況如圖 2-1-10 所示。兩層 K 值與模擬範圍之入滲量使用與井場模擬水位率定之結果，率定結果如圖 2-1-11 所示，由表層至底層分別為 10 m/d、0.5 m/d，而場址內部之入滲量為 0.00157m/d。

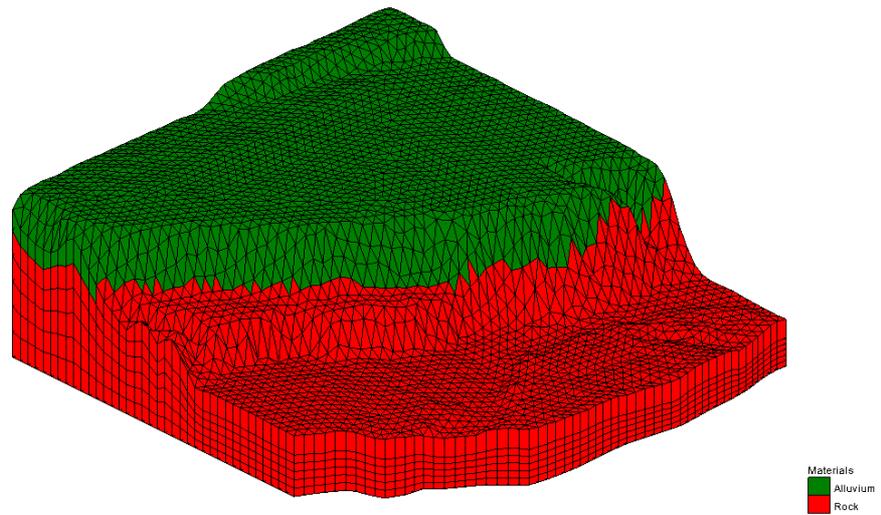


圖 2-1-9. 模擬範圍中的材質分布

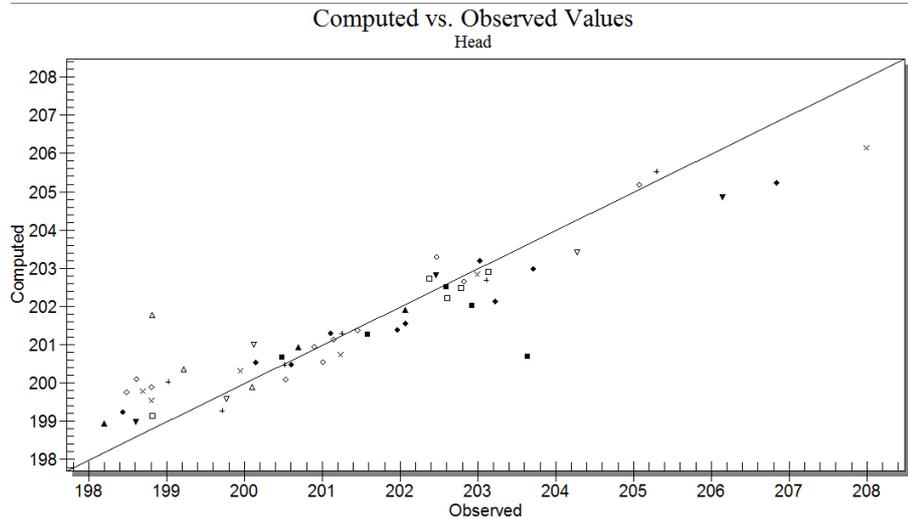


圖 2-1-10. 水位與入滲量之率定成果

(3) 初始條件

考慮自然狀態，本工作之初始條件使用重力排水後的水位分布。

2. 小範圍汙染傳輸模擬

本工作將利用大範圍水流模擬與質點傳輸模擬結果(模擬結果見下一節內圖 3-1-1 與圖 3-1-2)以決定小模擬之範圍與邊界狀況。

(1) 邊界條件

模擬範圍內之邊界條件設定如圖 2-1-11 所示，考慮圖 3-1-2 之質點傳輸結果，邊界方向與質點路徑平行者設定為不透水邊界，而與邊界條件垂直者設定為定水頭邊界。

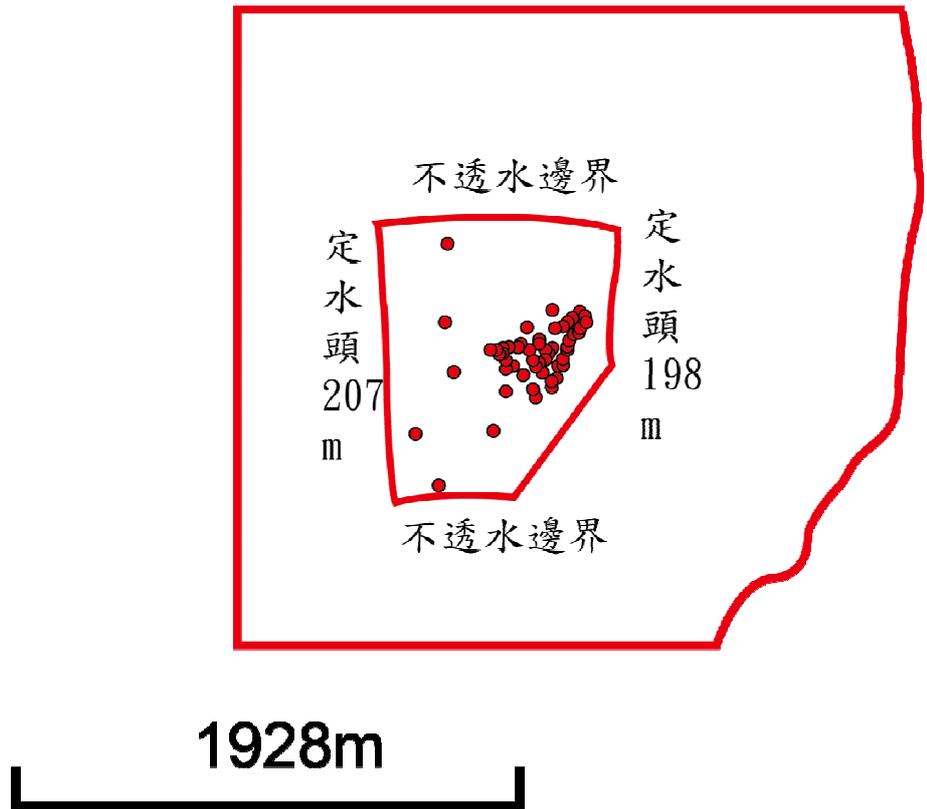


圖 2-1-11. 小範圍之邊界條件設定

(2) 材質分布

小範圍之材質分布情形與大範圍分布情形相同，分布情形如 2-1-12 所示。模擬範圍內的 K 質與入滲量均為率定所得，率定結果與大範圍者同，而率定成效則如圖 2-1-13 所示。

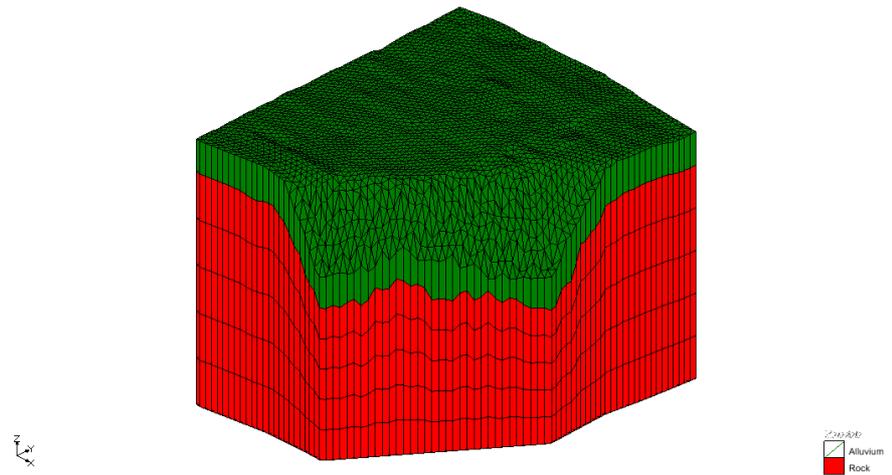


圖 2-1-12. 模擬範圍中的材質分布

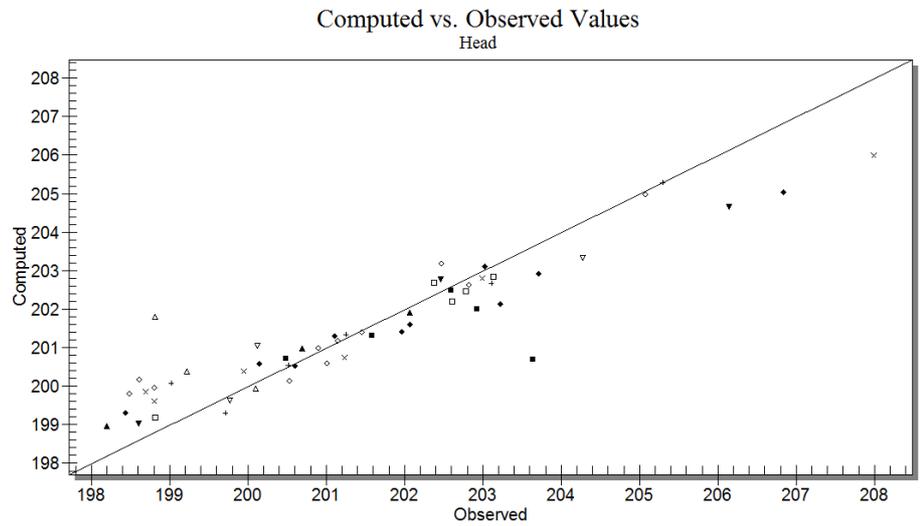


圖 2-1-13. 水位與入滲量之率定成果

(3) 初始條件

考慮自然狀態，本工作之初始條件使用重力排水後的水位分布。在汙染傳輸方面，本工作假設初始狀態下模擬區域內無任何汙染物的存在。

(4) 汙染傳輸參數

本工作考慮一濃度為 100mg/l 的汙染團自井場正中

央，於沖積層與底岩層交界處以 $10\text{m}^3/\text{d}$ 的速率注入，注入位置於井場的相對位置如圖 2-1-14 所示。而模擬區域內兩種材質的傳輸參數分別列於表 2-1-1 中。

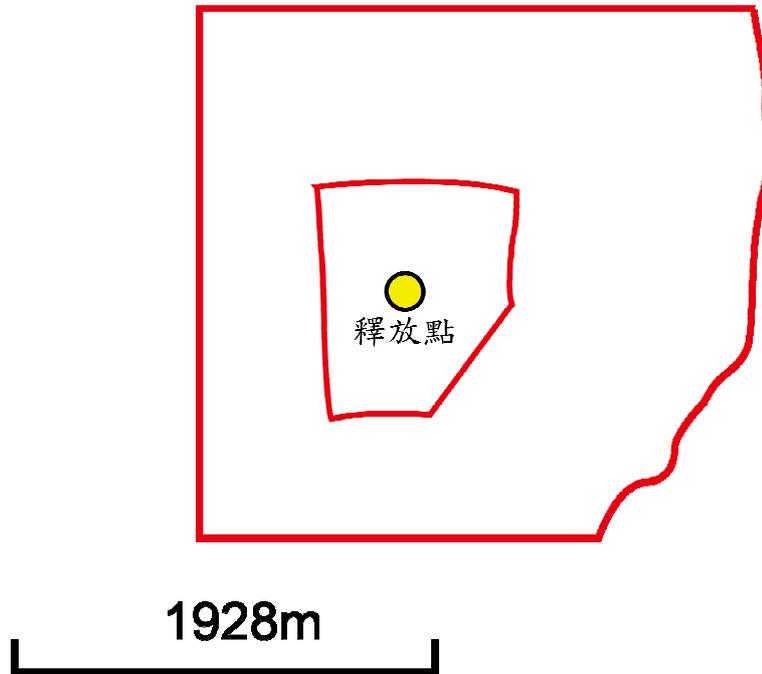


圖 2-1-14 污染團注入位至於井場的相對位置圖

表 2-1-1 本工作於污染傳輸模擬時使用之傳輸參數

參數	沖積層	底岩層
體密度(kg/m^3)	2,500	2,600
縱向延散係數(m)	10	10
橫向延散係數(m)	1	1
模擬天數(d)		1000

二、模型二：模擬電廠模型

本研究假定一模擬電廠，設定模擬區域為一個狹長型，且鄰近海岸。

(一) MODFLOW 模擬模擬電廠模型地下水水流與污染傳輸

1. 模擬區域

本研究利用 MODFLOW 模式模擬地下水流，目標為率定地下水流及區域參數條件，其概念模式模擬範圍如圖 2-2-1 與圖 2-2-2，為天然峽谷地形，區域為狹長帶狀，地表高程由 DEM 資料進行線性內插獲得，模擬範圍北邊邊界為出海口，設置定水頭，其值為零(上方紅色部分)，南部邊界則以橫跨廠址內的便橋為界，設置定水頭，由西至東其值為 25 公尺到 35 公尺(下方紅色部分)，東、西邊界則以峽谷地形，設置為不透水邊界，研究區域劃分為 340 個格(東西向)、410 格(南北向)，1 網格單位為 5 公尺，總共有 139400 個網格，其中 20116 格網格是有效網格，119284 個網格為無效網格，垂向層數設定為 2 層，第一含水層厚度為 5m，第二含水層底部高程圍地表下 20m。

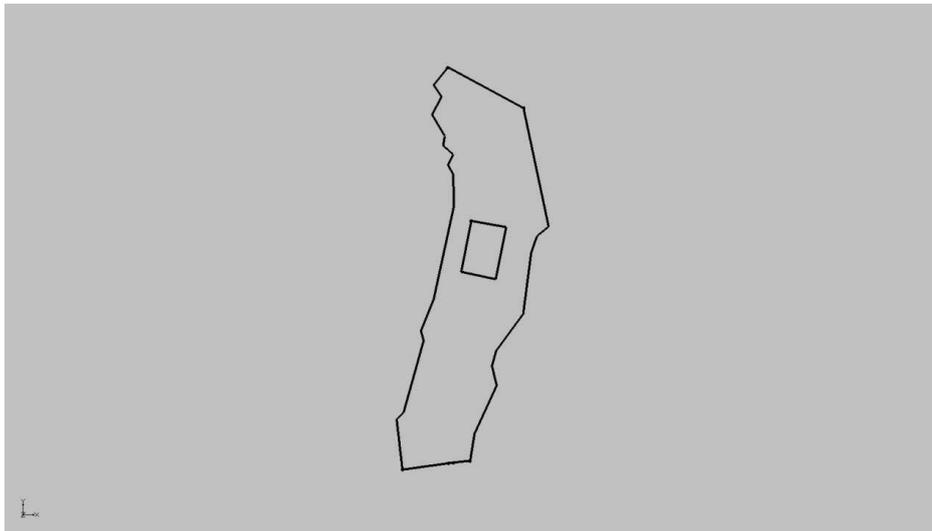


圖 2-2-1 研究區域範圍

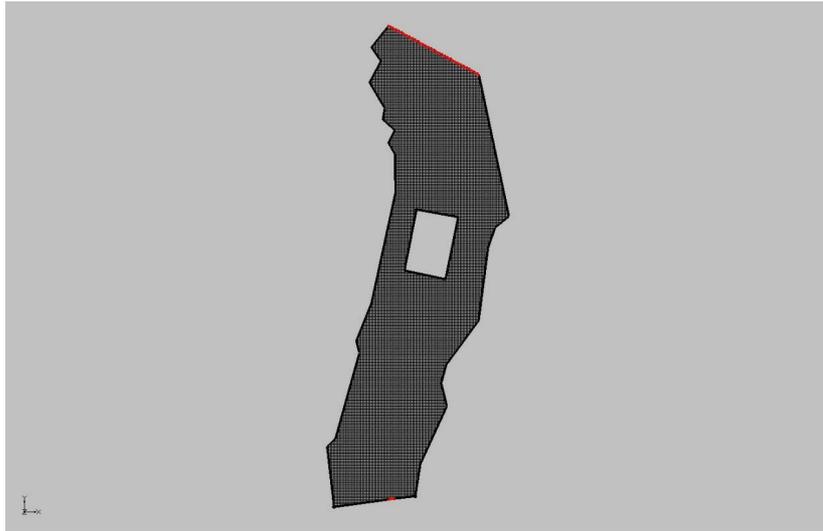


圖 2-2-2 地下水模式模擬範圍

2. 參數設定

而模式初始水頭與地表高程一致。第一層水力傳導係數 K 值選取為 30 (m/d) ，第二層水利傳導係數 K 值隨區域改變，如圖 2-2-3，廠區範圍設定 K 值為 0.3 (m/d) ，其餘部分設定水力傳導係數 K 值為 10 (m/d) ，此區主要地下水補注來源為降雨，設定為 0.00007 (m/d) 。

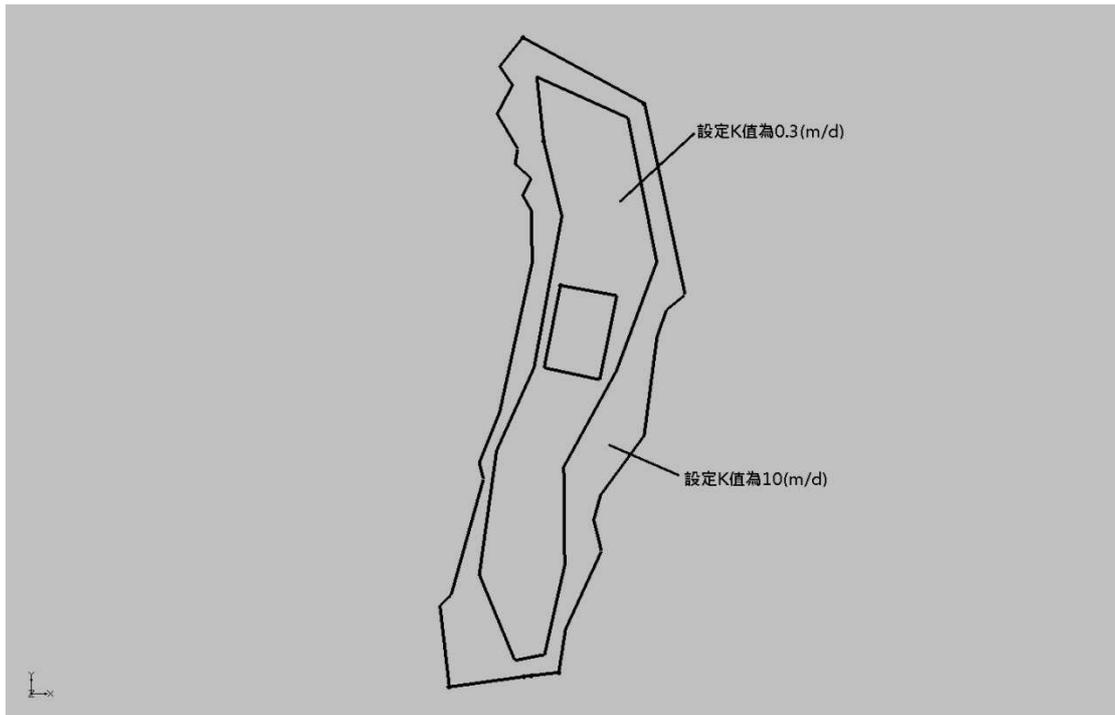


圖 2-2-3 模擬範圍第二層水力傳導係數設定

3. MODPATH 分析設定

利用 MODFLOW 分析之地下水流場結果，分析場址地表污染物傳輸時間與流向，觀測點標示如圖 2-2-4。上游設置 3 個點，中央不模擬廠區則設定 4 個點，分別在東、南、西、北 4 個方向，下游則設定 1 個點

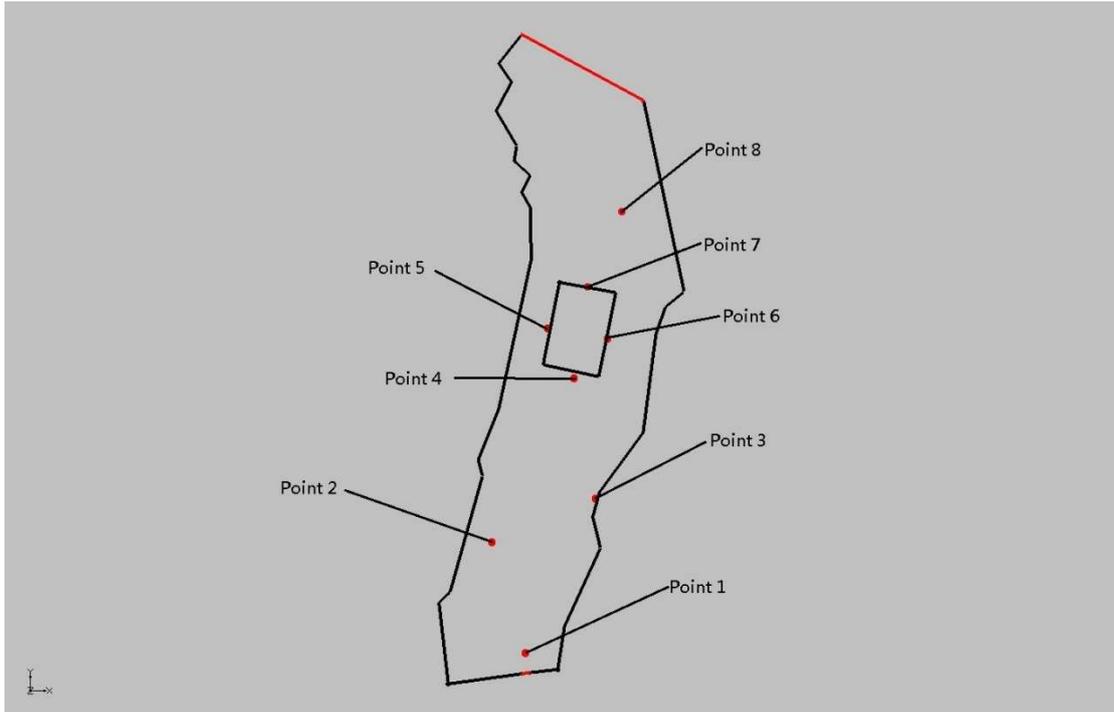


圖 2-2-5 MODPATH 觀測點

三、模型三：金門島模型

本計畫分析建立金門地區水文地質剖面圖，區分含水層與阻水層，為瞭解未來金門地區地下水層可能鹽化之課題，本計畫採用 FEMWATER 三維數值模式，該模式結合了地下水流動及傳輸方程式，模擬不同時間金門地區地下水層受抽水量增加導致地下水水位下降，進而發生海水入侵之問題。

(一) FEMWATER 模擬金門地下水水流與污染傳輸

1. 模擬區域範圍

本研究利用 FEMWATER 模式模擬地下水流，目標為模擬不同時間金門地區地下水層受抽水量增加導致地下水水位下降，進而發生海水入侵之問題及區域參數條件，其概念模式模擬範圍如圖 2-3-1 與

圖 2-3-2，模式格網是以 250 公尺*250 公尺格網建構，總網格數共 12097。

金門地區為四面環海之島嶼，因此金門地區地下水邊界都與海岸有關，並且金門海岸線有許多岩石與岩盤裸露。由於過去缺乏有關金門地區地下水邊界分析研究，且金門地區海岸地形地質鑽探資料十分缺乏，本計畫將根據陳培源（1970）如圖 2-3-3 所繪製金門地區岩盤出露圖提出概念性之邊界，研判岩盤出露之海岸地區設為零流量邊界(No flow boundary)，其餘海岸地區，假設海水與地下水在海岸外側延伸一公里處交會，該處設為定水頭邊界（Constant head boundary）邊界條件本參照陳培源(1970) 所繪製金門地區岩盤出露圖提出概念性之邊界，研判岩盤出露之海岸地區設為零流量邊界(No flow boundary)，其餘海岸地區，假設海水與地下水在海岸外側延伸一公里處交會。

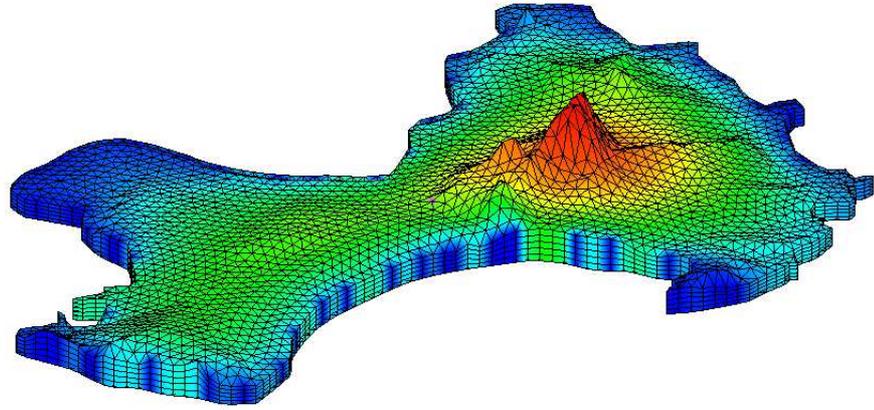
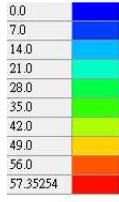


圖 2-3-1 研究區域範圍

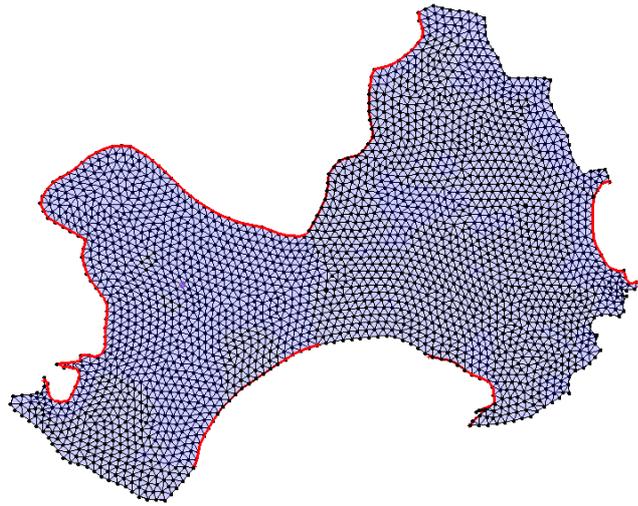


圖 2-3-2 地下水模式模擬範圍

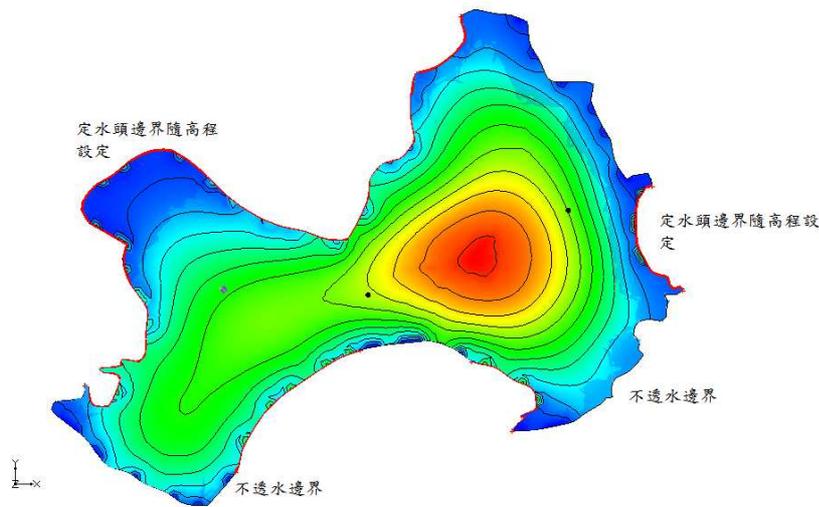


圖 2-3-3 邊界條件設定

2. 參數設定

模式初始水頭與地表高程一致。模擬區域內兩層水力傳導係數 K 值皆假設為 2 (m/d) ，此區主要地下水補注來源為降雨，假定為 0.00008 (m/d) ，其期抽水率分別為 $6000\text{m}^3/\text{d}$ 和 $3000\text{m}^3/\text{d}$ ，時間設定為連續抽水 1 年，時間之間隔為 1 天，第一含水層厚度為 5m ，第二含水層底部高程圍地表下 80m 。

3. FEMWATER 分析設定

利用 FEMWATER 分析之地下水流場結果，依據過去資料顯示以下分析測站曾進行地下水抽水試驗，故選取以下站點模擬抽水與水位之變化，其觀測點標示如圖 2-3-4。分別在金門島地區選取 3 個測站點進行模擬，依序為金鼎國小 (KM-002)、農試所 (KM-008)、開瑄國小 (KM-009)。

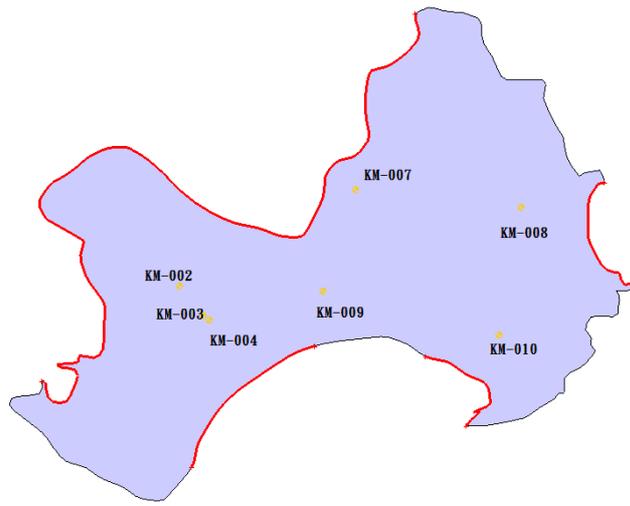


圖 2-3-4 地下水測站點

參、主要發現與結論

一、模型一：假設模型

(一) MODFLOW 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸

在三種尺度下的 MODFLOW 模擬出來的地下水位均為由西向東遞減，但模擬水位的結果三者並不完全一致，除了小尺度是以已知的邊界條件來設定，所以得到的結果最接近每一口井的實際觀測值；而大、中尺度的模擬結果都與實際有所差距。在大尺度中模擬誤差主要分為兩種，在西側為模擬值大於觀測值，東側為模擬值較小於觀測值；中尺度則是呈現線性變化趨勢，西側模擬值大於觀測值由西向東逐漸遞減為模擬值較小於觀測值。

由於在大尺度中，觀測井的分布相對密集，所以在 40 x 40 公尺的網格中，會有數口不等的觀測井，因此同一網格的數值會與數口觀測井比較，而此數口觀測井之間也有 0.5~2 公尺不等的水位差距，造成比對結果不甚理想，然此情況隨著網格變小而改善。

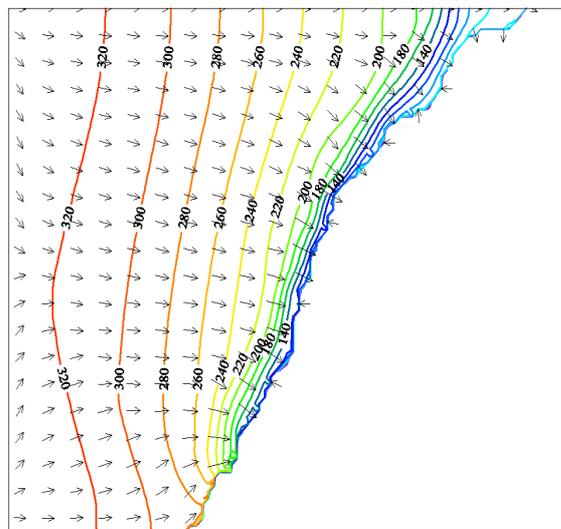


圖 3-1-1 大尺度區域模擬水位及流向

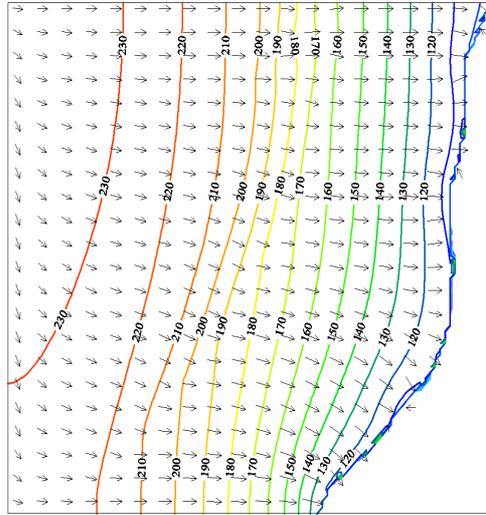


圖 3-1-2 中尺度區域模擬水位及流向

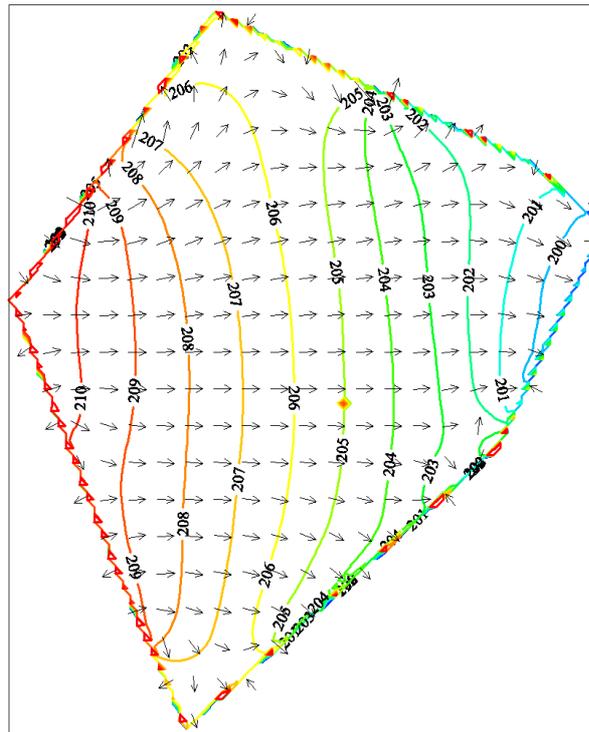


圖 3-1-3 小尺度區域模擬水位及流向

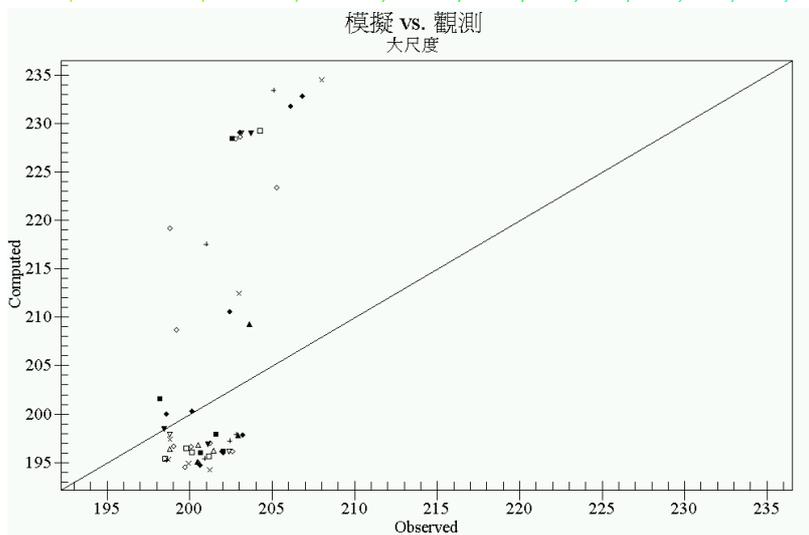
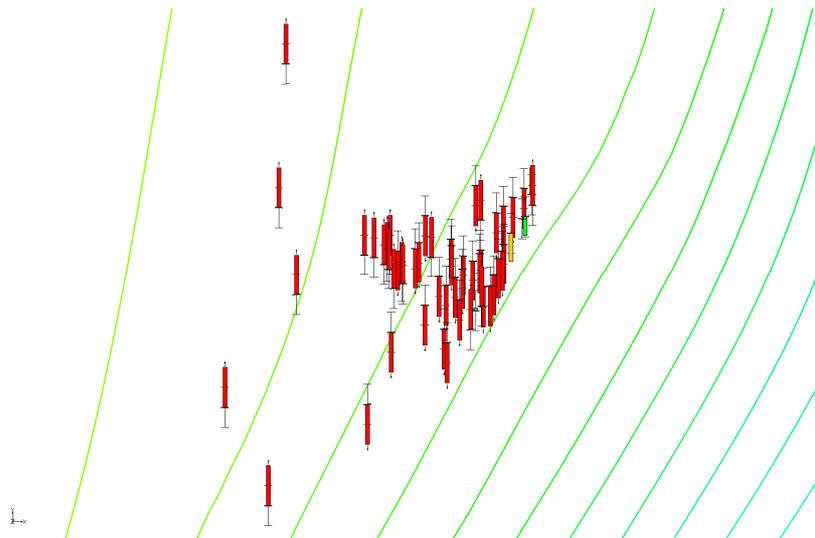


圖 3-1-4 大尺度模擬與觀測值誤差

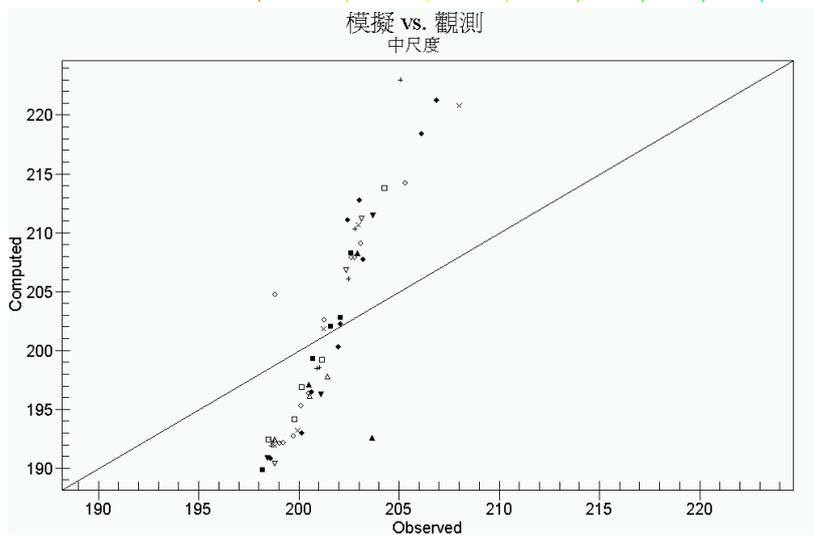
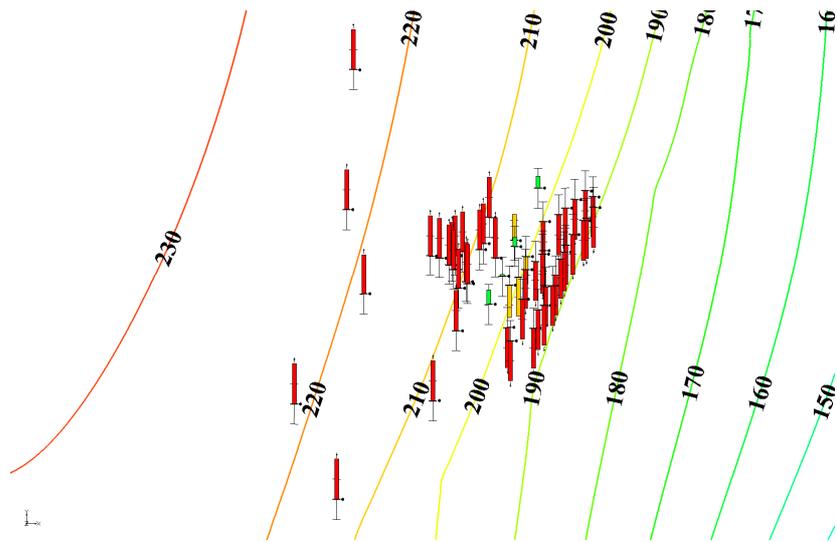


圖 3-1-5 中尺度模擬與觀測值誤差

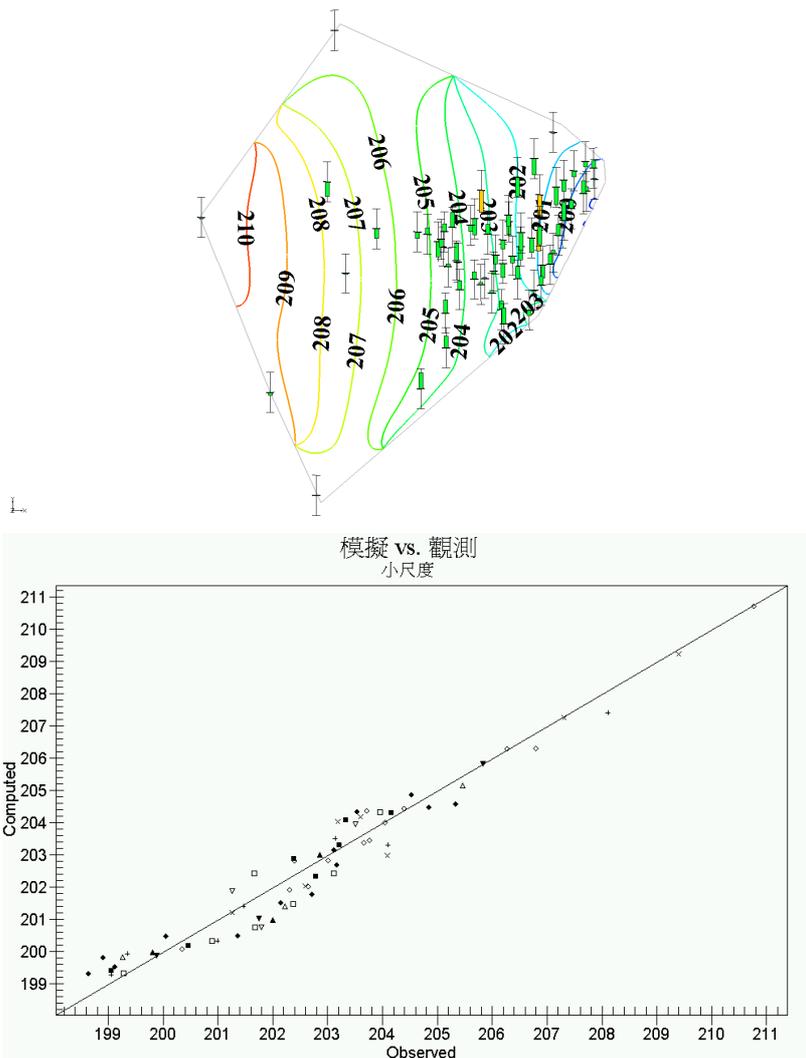


圖 3-1-6 小尺度模擬與觀測值誤差

(二) FEMWATER 模擬假設模型地下水水流與污染傳輸

本工作利用 FEMWATER 進行假設場址的水流模擬與污染模擬，考慮邊界條件的設定，本工作結果將可區分為大範圍水流模擬與小範圍污染傳輸模擬兩部分。

1. 大範圍水流模擬

(1) 模擬結果

本工作之模擬結果如圖 3-1-7 示，場區內之水流大致由西往東方流動；而圖 3-1-8 質點傳輸路徑模擬結果

更可看出場區內之水流之詳細流動路徑大致朝向東南方向。

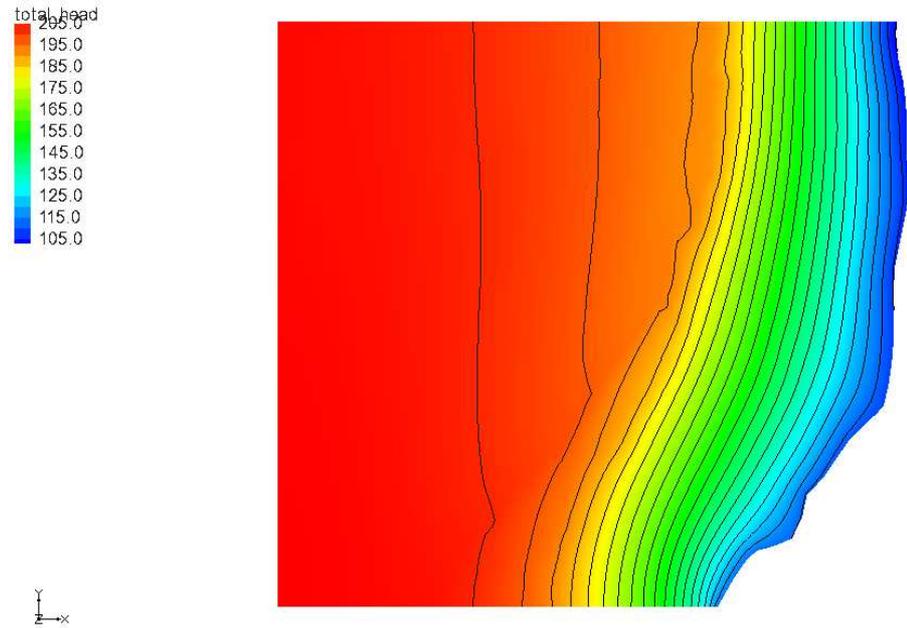


圖 3-1-7 大範圍之總水頭分布模擬結果

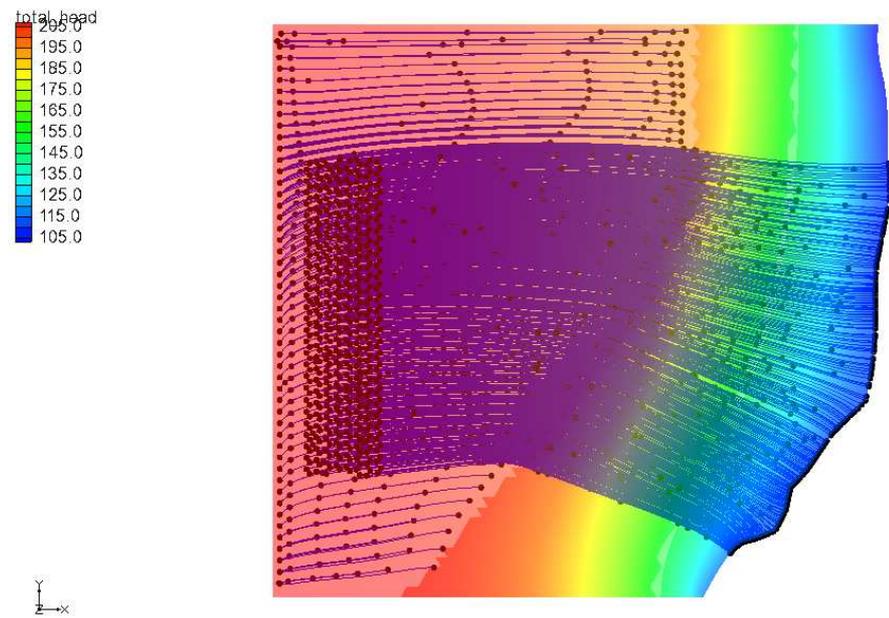


圖 3-1-8 大範圍之質點路徑模擬結果

2. 小範圍汙染模擬

(1) 模擬結果

3-1-9 為小範圍模擬 1000 天後之汙染團分布情形，可

見到污染團以移動至懸崖附近；若將圖 3-1-9 中 AA' 剖面線之污染物垂直分布狀況繪出，如圖 3-1-10。圖 3-1-10 可發現由於模式內假設 K 值為等向性，因此污染物大致呈現圓形分布；而由於表層 K 值較高的關係，污染團前進距離較遠。若場址現地 K 值非等向性分布為類似沖積層，也就是水平方向 K 值較大的狀況下，污染團將有可能會移動到懸崖附近。

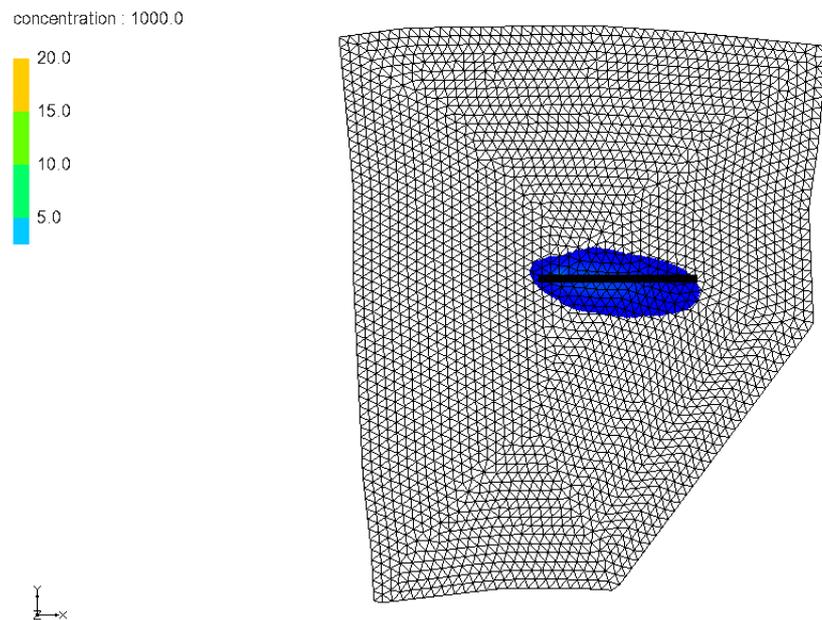


圖 3-1-9. 污染團於模擬時間 1000 天後之位置分布

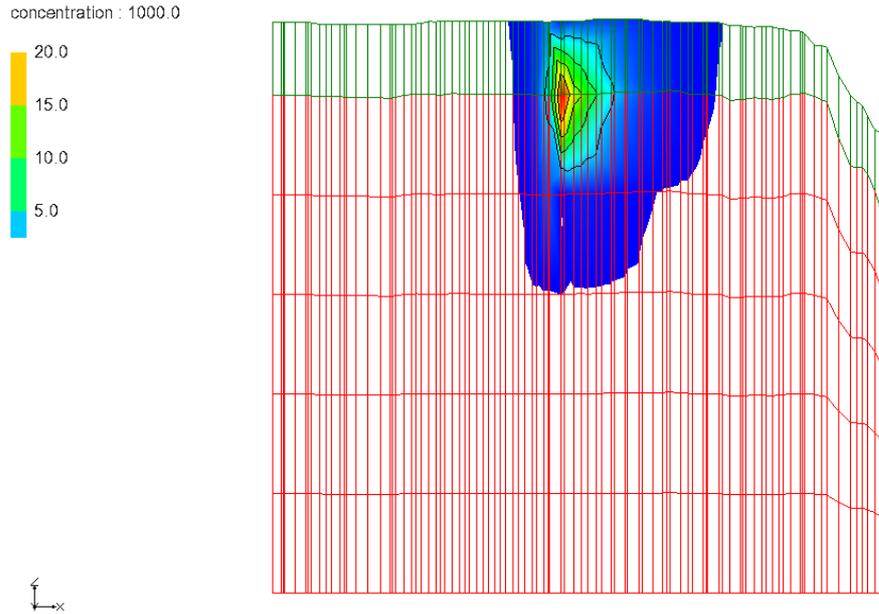


圖 3-1-10. 剖面線 AA' 上於模擬時間 1000 天之污染團垂直分布狀況

二、模型二：模擬電廠模型

本研究設定模擬區域為計算層兩層，兩層水利傳導係數分別為 0.3(m/d)與 10(m/d)，模式南北兩側設定為定水頭，東西兩側為不透水邊界，經由此設定模擬電廠地下水水位分布情形。

(一) MODFLOW 模擬模擬電廠模型地下水水流與污染傳輸

假定北邊界定水頭為高層 0m，而南邊界設定為 35m，東西兩側為不透水邊界，初始水位依據地理高程，模擬穩態地下水水位分布情形。

1. 模擬電廠地下水水位分析

由圖 3-2-1 中可以發現地下水依據高程位置呈現，地下水以南高北低分布，並且在中央模擬電廠位置地下水最高 15m，最低 10m。

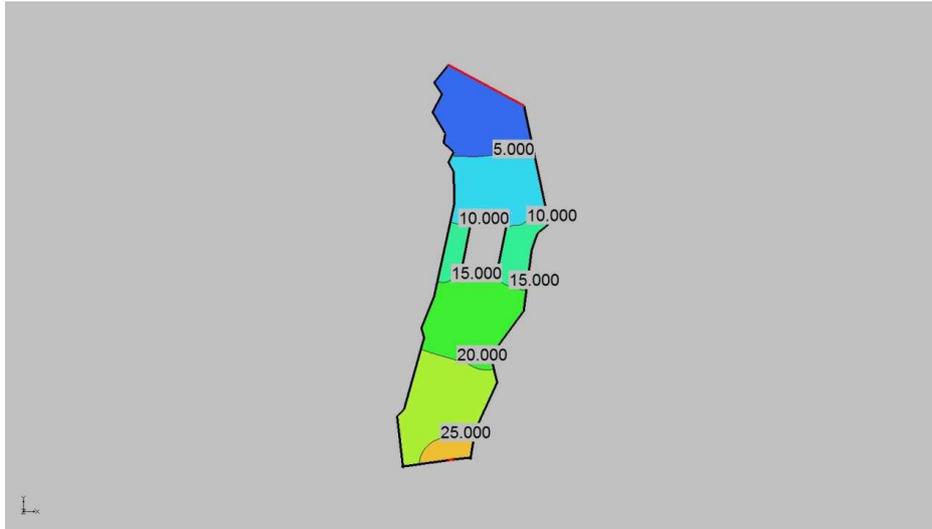


圖 3-2-1 模擬結果之地下水水位分佈

2. 質點傳輸模擬

由最南方點(Point 1)至距離出海口最近的點(Point 8)，其模擬結果為圖 3-2-3 至圖 3-2-9。表 3-2-1 為各點至出海口的時間。其中最慢為 1062 天(最南點、最快為 157 天(最北點)，中央廠區部分以南觀測點最高，為 802 天，其次為 483 天(東觀測點)、443 天(北觀測點)、415 天(西觀測點)。

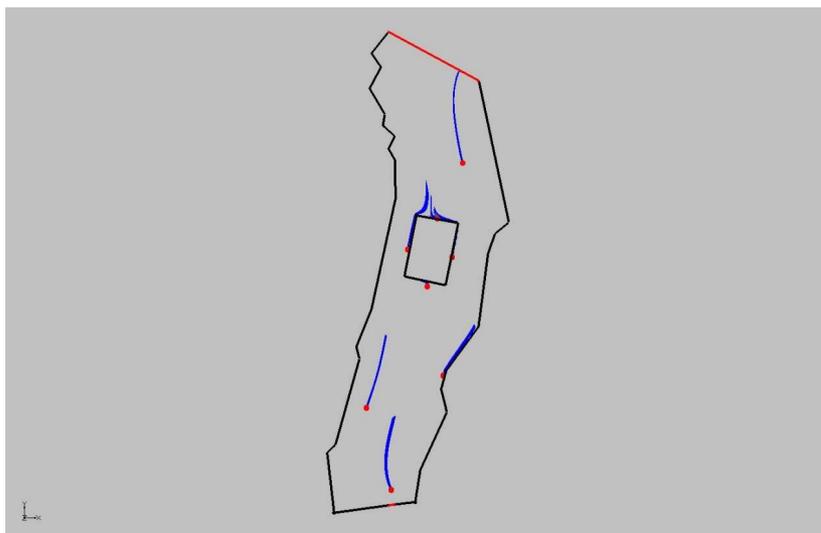


圖 3-2-2 MODPATH 模擬結果之質點 Point 8 -路徑 A Duration

157 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

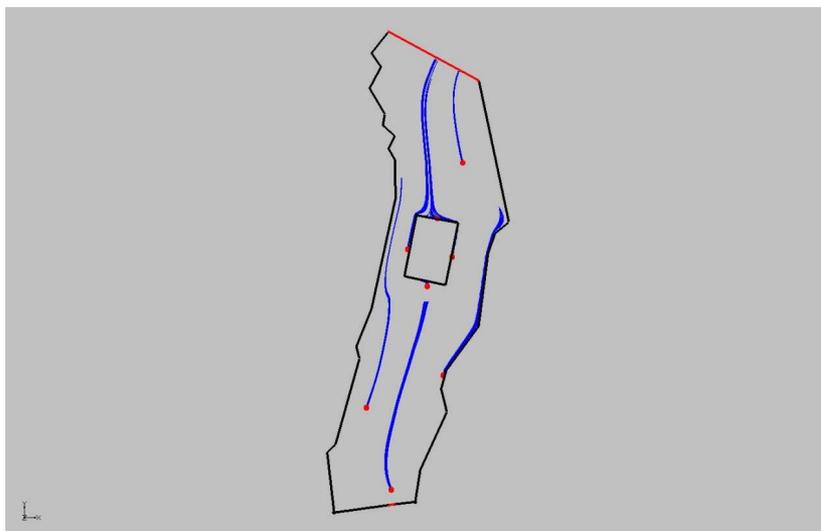


圖 3-2-3 MODPATH 模擬結果之質點 Point 7 -路徑 B Duration

443 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

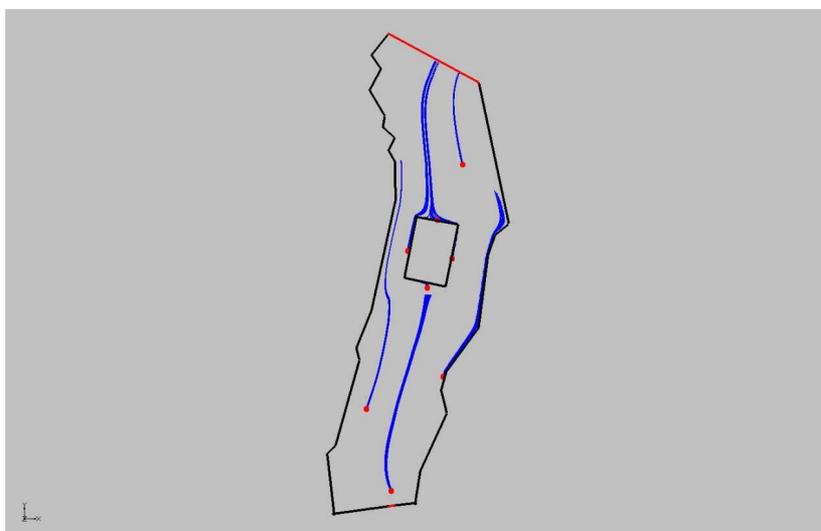


圖 3-2-4 MODPATH 模擬結果之質點 Point 6 -路徑 C Duration

483 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

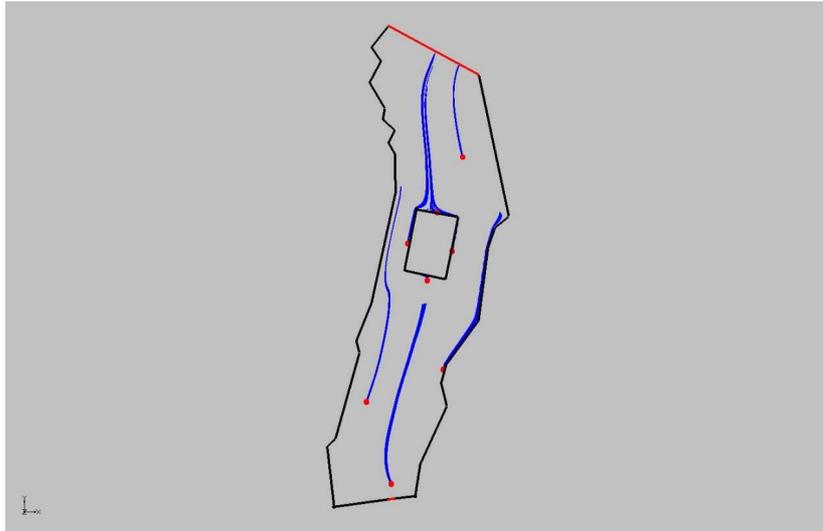


圖 3-2-5 MODPATH 模擬結果之質點 Point 5 -路徑 D Duration
415 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

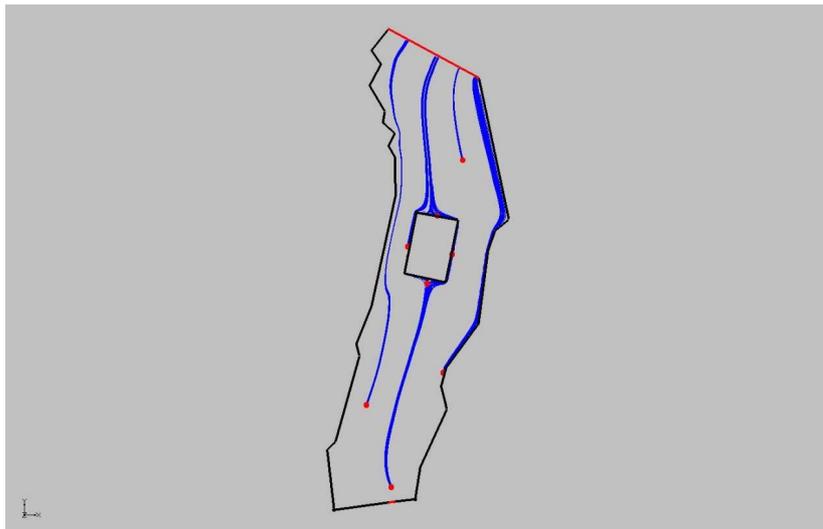


圖 3-2-6 MODPATH 模擬結果之質點 Point 4 -路徑 E Duration
802 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

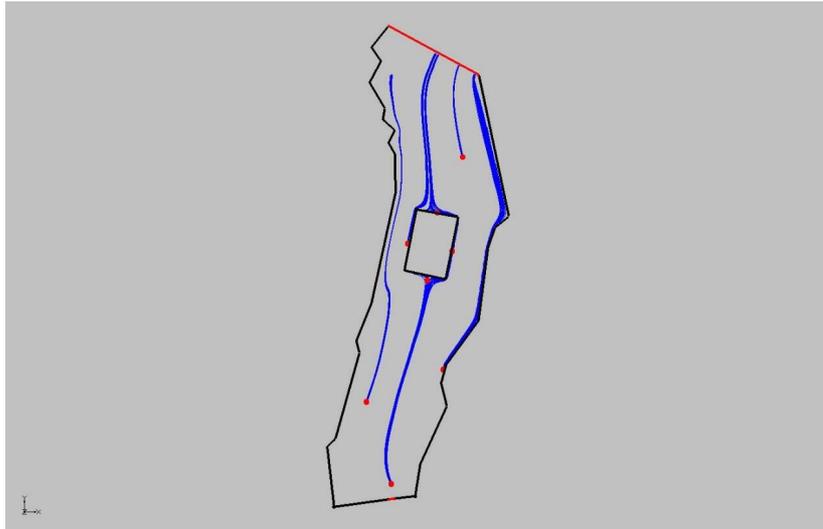


圖 3-2-7 MODPATH 模擬結果之質點 Point 3 -路徑 F Duration
672 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

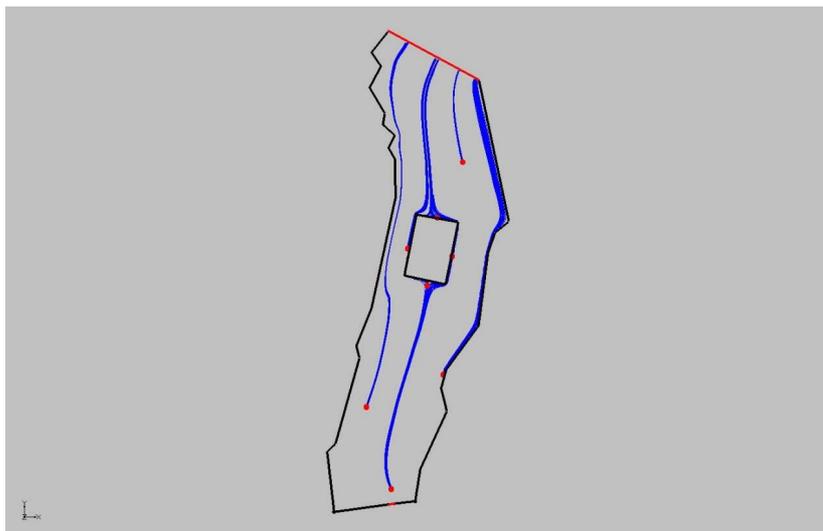


圖 3-2-8 MODPATH 模擬結果之質點 Point 2 -路徑 G Duration
778 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

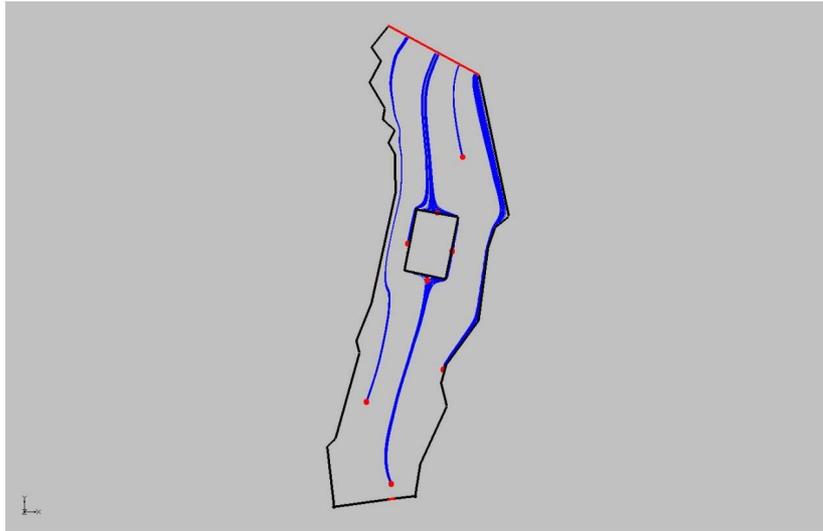


圖 3-2-9 MODPATH 模擬結果之質點 Point 1 -路徑 H Duration
1062 天(Google Earth 圖像日期 2006/03/18)

表 3-2-1 MODPATH 模擬結果之質點至出海口時間

Point	延時(天)
1	1062
2	778
3	672
4	802
5	415
6	483
7	443
8	157

三、模型三：金門島模型

為瞭解未來金門地區地下水層可能鹽化之課題，本計畫採用 FEMWATER 三維數值模式，該模式結合了地下水流動及傳輸方程式，模擬不同時間金門地區地下水層受抽水量增加導致地下水水位下降，進而發生海水入侵之問題。

由金門島地區進行抽水模擬在農試所抽水率為 $6000\text{m}^3/\text{d}$ 及金鼎國小、開瑄國小抽水率為 $3000\text{m}^3/\text{d}$ ，時間為連續抽水 1 年之並由模擬結果作分析。

其結果可以明顯看到在不同抽水率之下各測站點皆有明顯水位下降之情形，根據資料得知金門島地區平均一年抽水量為 300 萬噸，其補注來源為降雨，但該地區之蒸發量大於降雨量，所以一旦抽水量過大，將會導致金門地區有海水入侵之可能。

地下水位模擬分別為未抽水及連續抽水 100、200、300 天之模擬結果

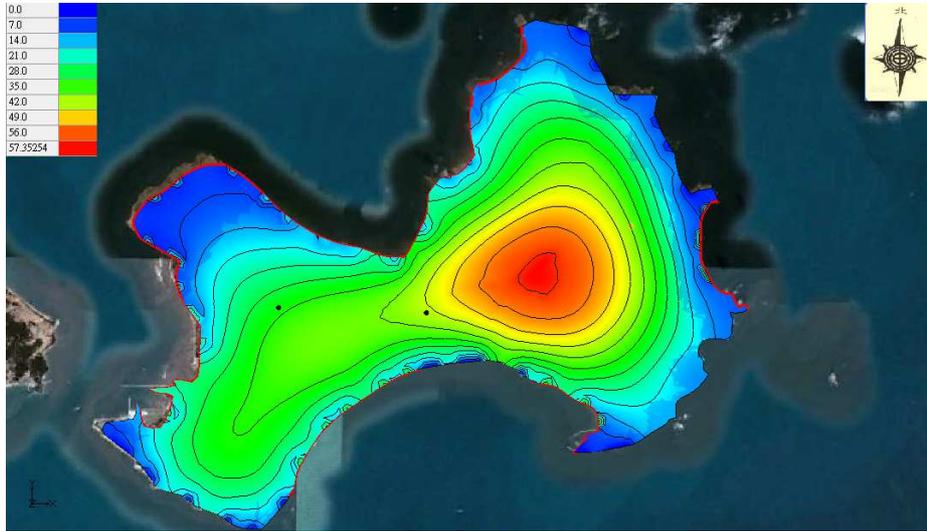


圖 3-3-1 FEMWATER 模擬未抽水之地下水為分布情形

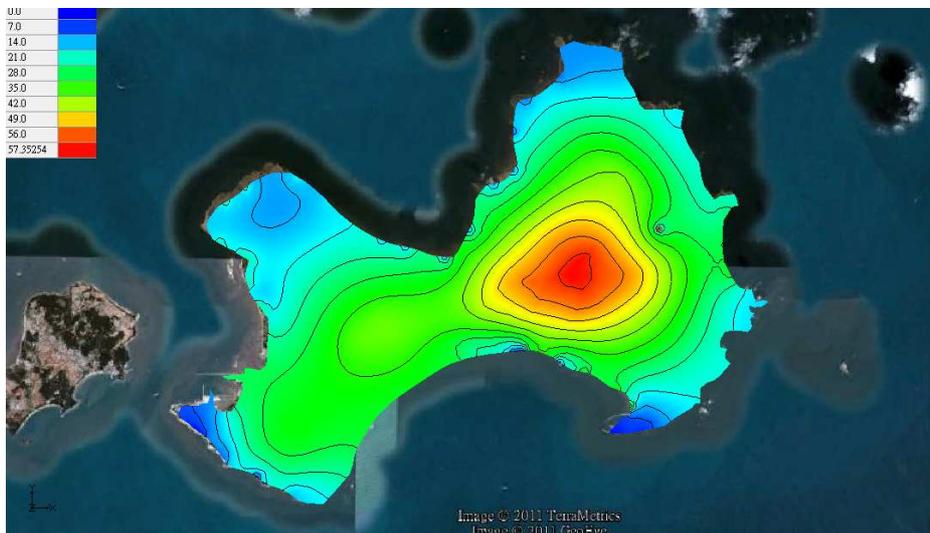


圖 3-3-2 FEMWATER 農試所模擬連續抽水 100 天之結果

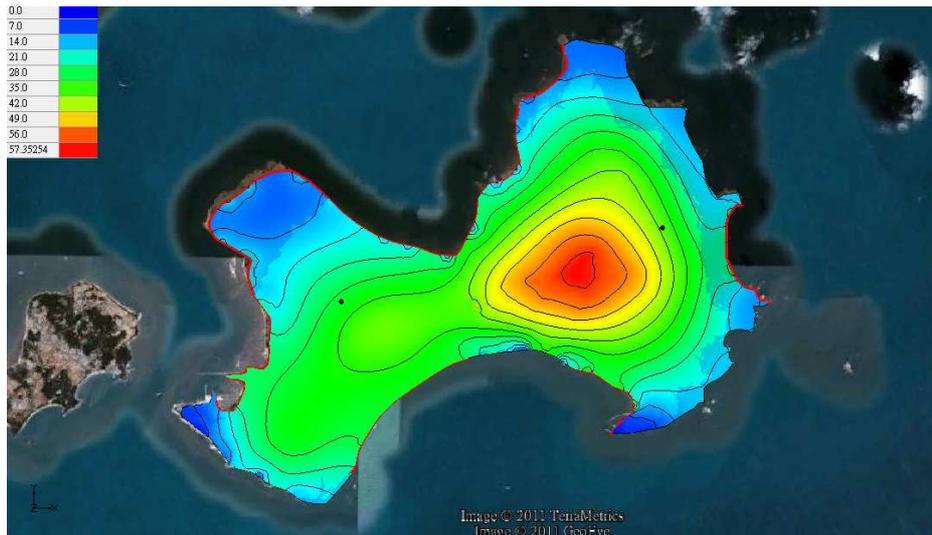


圖 3-3-3 FEMWATER 開瑄國小模擬連續抽水 100 天之結果

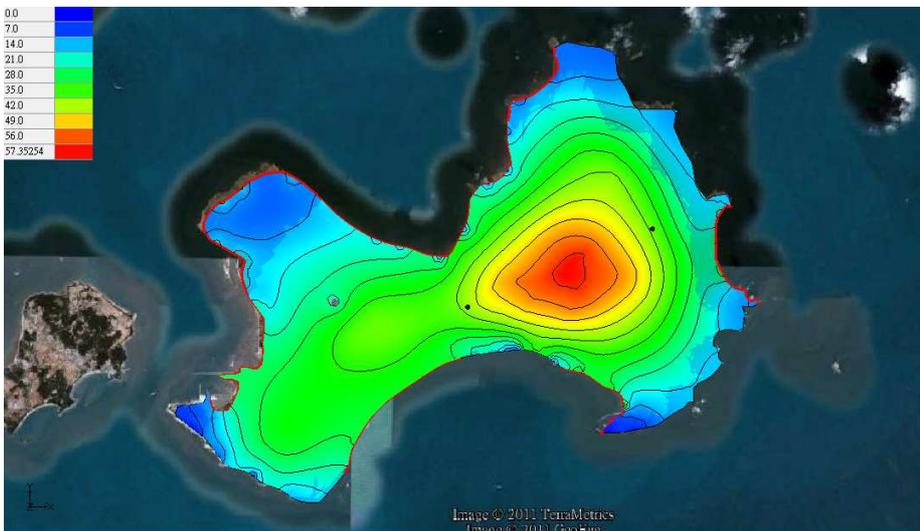


圖 3-3-4 FEMWATER 金鼎國小模擬連續抽水 100 天之結果

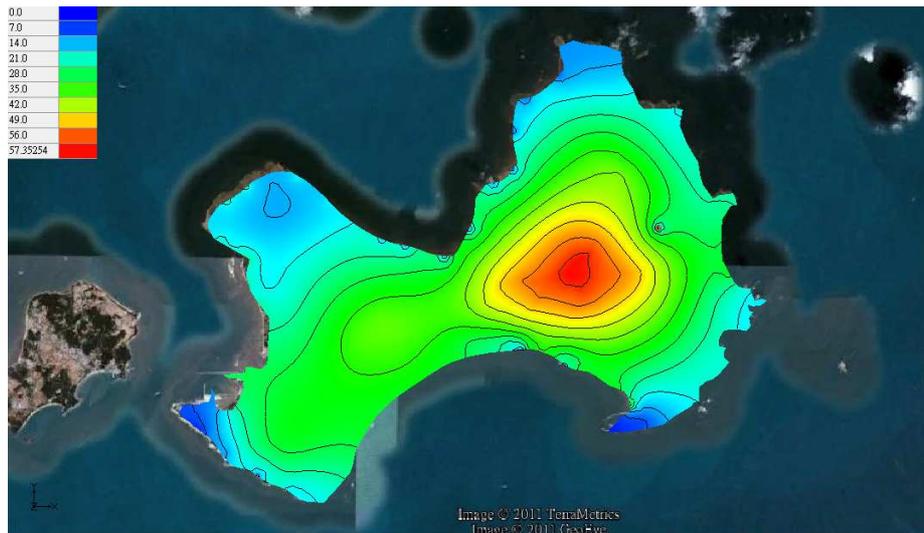


圖 3-3-5 FEMWATER 農試所模擬連續抽水 200 天之結果

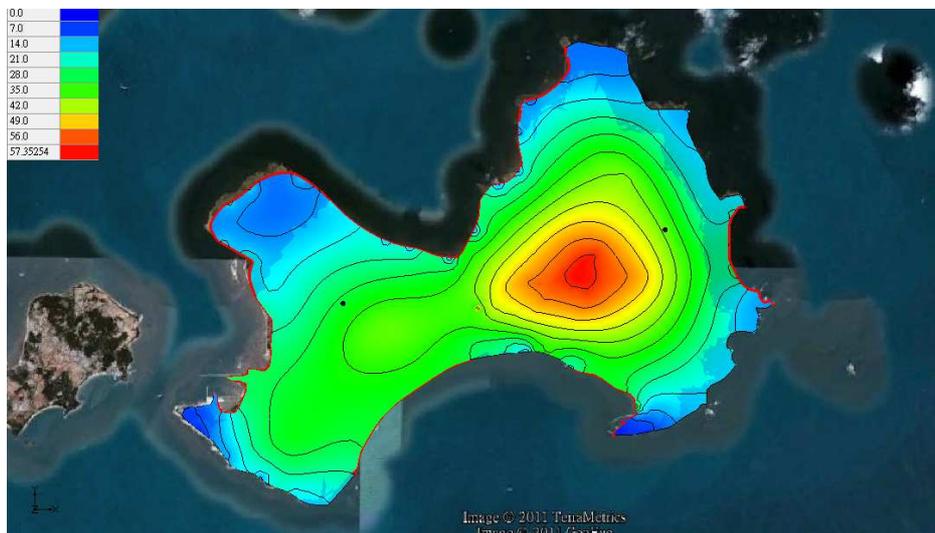


圖 3-3-6 FEMWATER 開瑄國小模擬連續抽水 200 天之結果

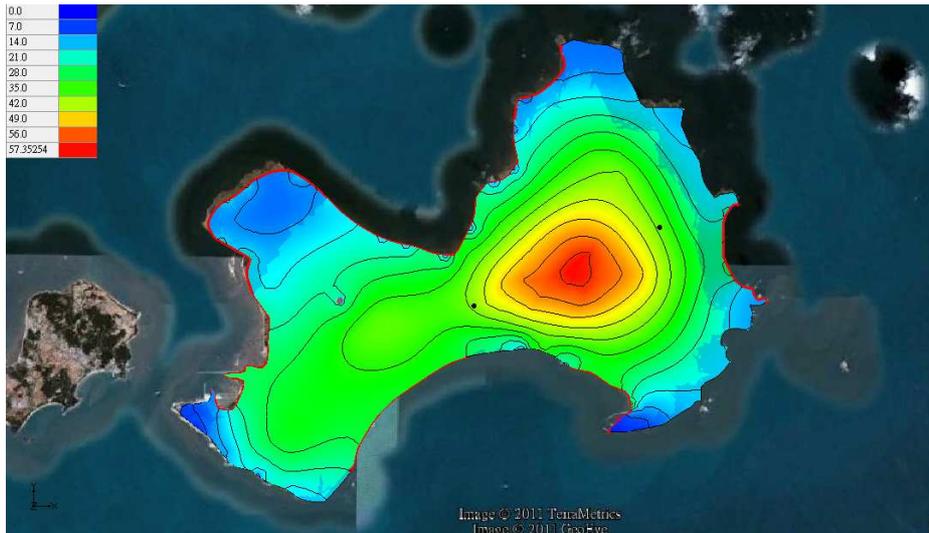


圖 3-3-7 FEMWATER 金鼎國小模擬連續抽水 200 天之結果

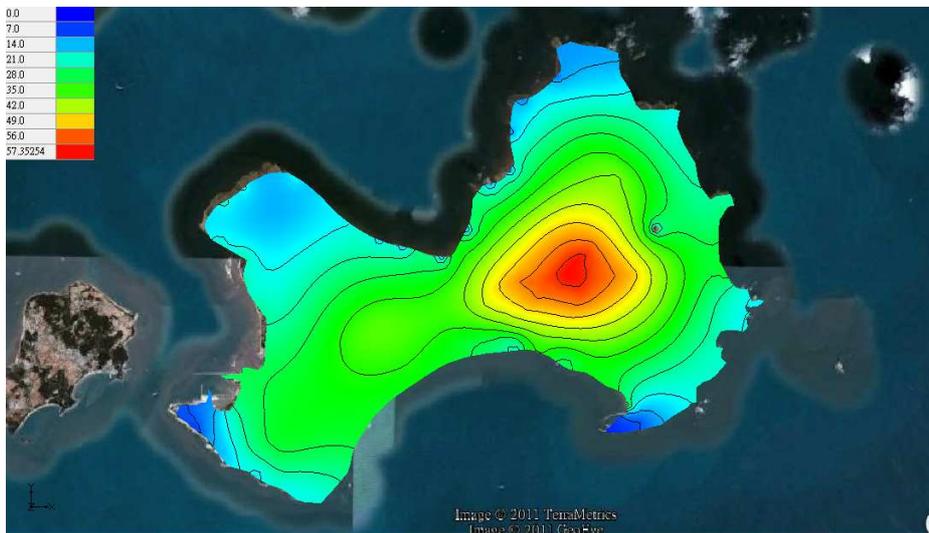


圖 3-3-8 FEMWATER 農試所模擬連續抽水 300 天之結果

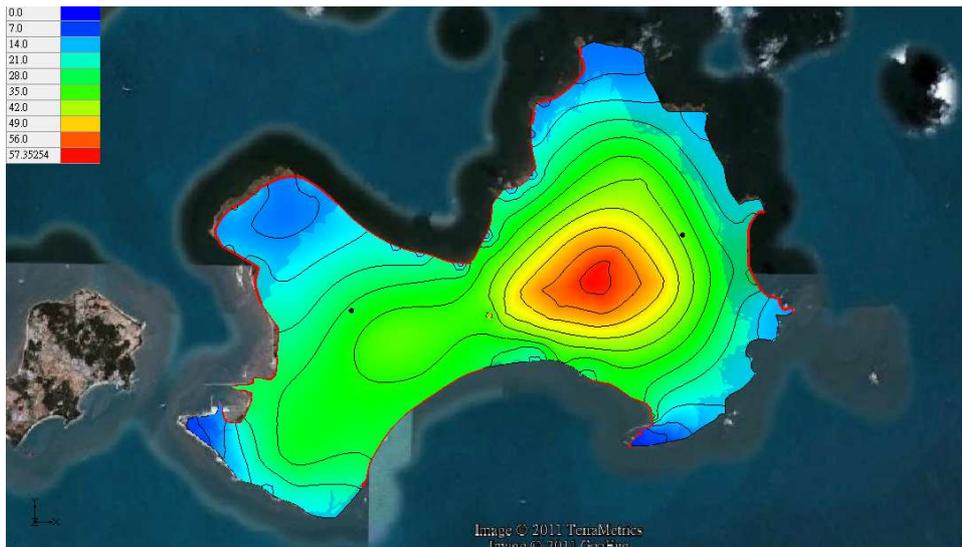


圖 3-3-9 FEMWATER 開瑄國小模擬連續抽水 300 天之結果

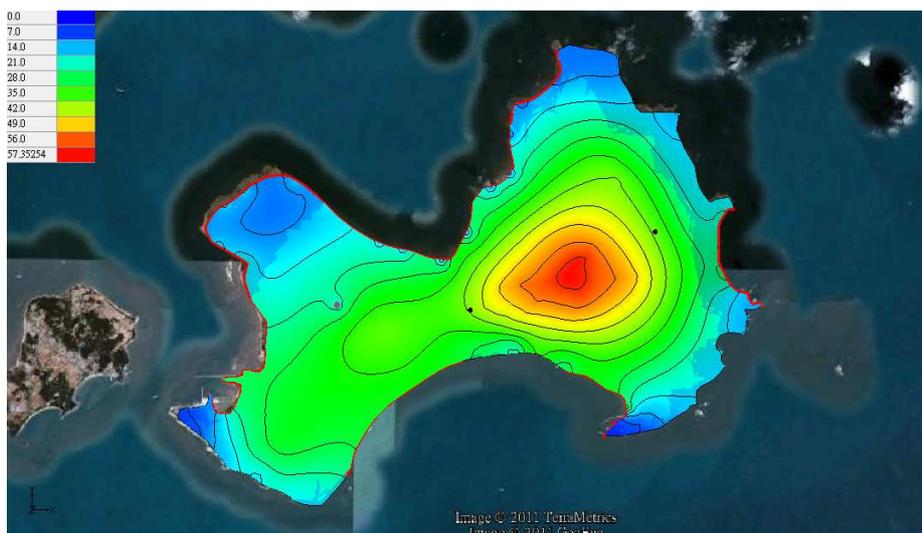


圖 3-3-10 FEMWATER 金鼎國小模擬連續抽水 300 天之結果

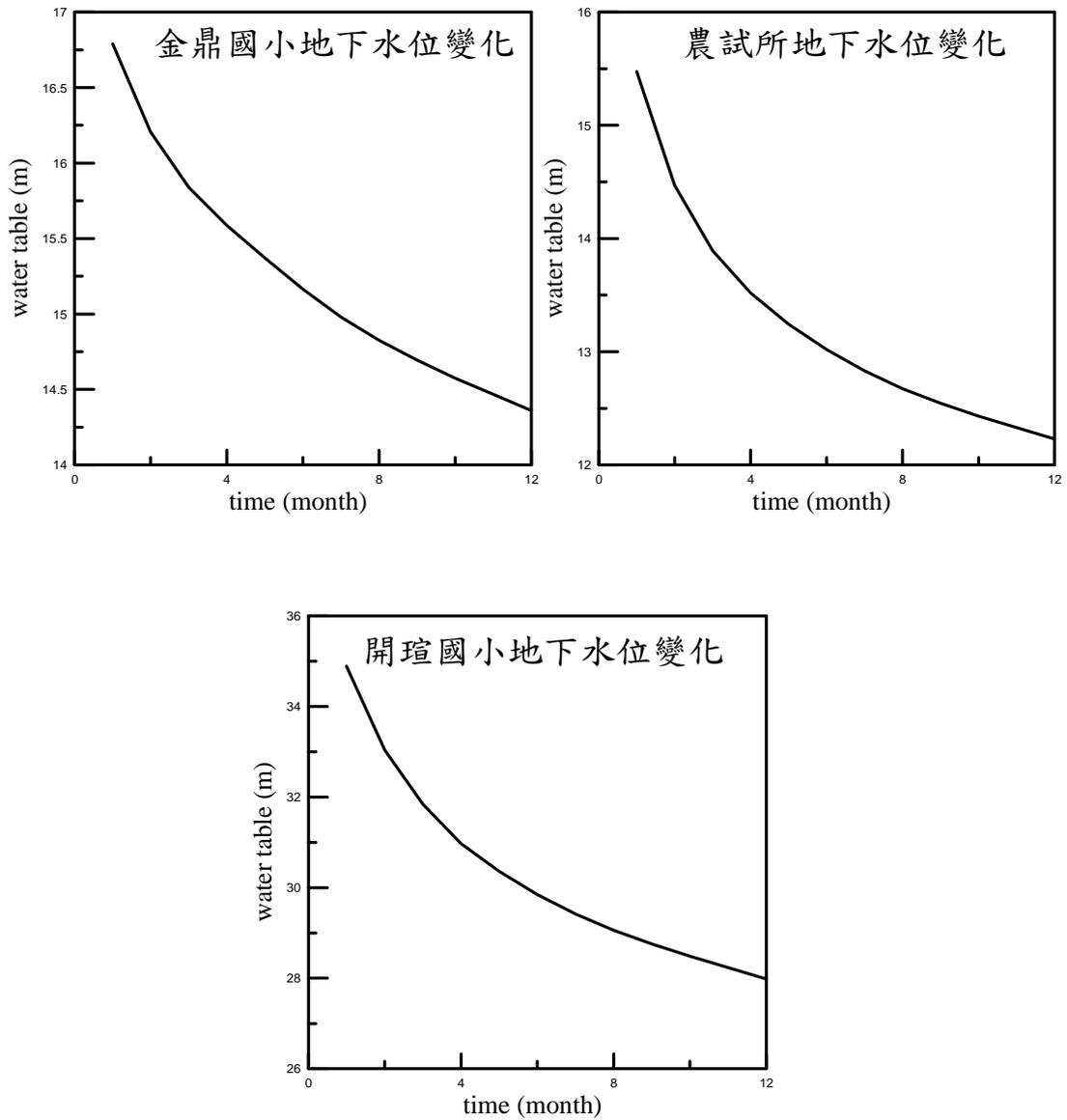


圖 2-3-11 FEMWATER 模擬結果之地下水水位高程變化(單位:m)

肆、參考文獻

1. Ahearne, J.F., 1997. Radioactive waste: The size of the problem, *Physics Today*, 50(6): 24-29.
2. Dyer, J.R., and Peters, M.T. , 2004. Progress in permanent geologic disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste in the United States, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power And Energy*, 218(A5): 319-334.
3. Marpeaul, F., and Saad, M., 2010. 3D simulation of radionuclide transport in porous media, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 70: 64:44.
4. Yeh, G.T., Shan, H., and Hu, G., 2006. A model to simulate hydrodynamics and thermal and salinity transport in three dimensional bays and estuaries, *Advances In Hydro-Science And -Engineering*, Volume VI, 1-15.
5. Lin, H.C., Richards, D.R., Talbot, C.A., Yeh, G.T., Cheng, J.R., Cheng, H.P., and Jones, N.L. 1997. FEMWATER: a three-dimensional finite element computer model for simulation of density-dependent flow and transport in variably saturated media. United States Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Miss., Technical Report CHL-97-12.
6. Aquaveo, L. L. C., 2007. Groundwater Modeling System Version 6.5. 6, build date, May 27, 2009, UT, USA.