

台北盆地區域性三維地下水 流動數值模擬

譚志豪* 冀樹勇** 顧承宇*** 林坤霖****

摘要

本文應用三維地下水分析程式 GMS 內建之 MODFLOW 模組建立台北盆地區域性三維水文地質概念模型，並透過水平衡原理及三維地下水流動控制方程式，求得模型內地下水流場之穩態及暫態分布。此外，本文利用台北盆地內多處地下水水位觀測井之監測資料進行模型率定，並藉由捷運深開挖工程之大規模群井抽水試驗案例，驗證本模型之正確性與適用性。本文所建立之區域性三維水文地質概念模型及地下水流動模擬程序可提供工程界處理類似問題時之參考。

關鍵字：地下水流動、水文地質概念模型、群井抽水試驗、台北盆地、MODFLOW

一、前言

近年來由於台北都會區高度開發，民間及公共工程多朝高樓化及地下化之方向發展，故深開挖工法被廣泛地應用在大台北都會區，且有愈挖愈深之趨勢。然台北盆地淺層自由含水層（松山層）土質軟弱且地下水位偏高，而深層又存在一受壓含水層（景美層），故進行深開挖時須降低受壓含水層之水壓力方能符合內政部「建築技術規則」有關上舉力檢核之安全需求，且為確保長期抽水期間周邊建物之安全及避免因抽水所引致之沉陷問題發生，實有必要瞭解工程進行期間抽水影響區域範圍內地下水水壓之分布及流場之變化情形。

過去有關台北盆地大區域範圍之研究多屬地質構造方面之課題，或多是盆地內地下水資源之研究，抑或多為盆地因超抽地下水所引致之沉陷問題研究，較少有將地下水與地質構造結合並考量環境衝擊對水文地質條件所造成影響之議題探討。本文將前人對台北盆地之地理、地層、地質構造及地下水文等研究成果加以結合，實際透過地下水三維分析程式 GMS（Groundwater Modeling System）之 MODFLOW 模組及其相關組件，成功建立出台北盆地區域性三維水文地質模型，並將該模型實際應用於台北都會區大眾捷運系統深開挖降水工程之模擬應用上，獲得豐富的成果，茲將各項內容詳細說明於后。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

**** 中興工程顧問公司大眾運輸工程二部計畫經理

二、台北盆地概述

台北盆地位於台灣北部，盆地東、南兩側為丘陵地所圍繞，北鄰大屯火山區，西接觀音山及林口台地，高程 20 公尺以下之面積約 243 平方公里。台北盆地屬淡水河流域，淡水河主要由基隆河、新店溪與大漢溪匯集而成，自關渡附近流出盆地，再於淡水注入台灣海峽，如圖 1 所示。台北盆地過去 40 萬年以來，由陸地與湖泊循環演變而成為今日的沖積盆地。盆地基盤為第三紀中新世岩盤，其上方為未固結之第四紀沉積土層。盆地沉積物主要源於台灣西部麓山帶，其中基隆河流域之沖積物以較軟弱的黏土為主，新店溪流域以礫石為主，大漢溪流域則以砂土為主。

有關台北盆地地層之研究，自日據時代便已開始（出口雄三，1911；丹桂之助，1937、1938、1939）。丹桂之助（1939）針對台北盆地表層砂、黏土互層與下層紅土礫石層分別命名為「松山層」與「林口層」。吳福泰（1965）根據中油公司「新莊一號」鑽井之鑽探資料，發現松山層之下尚有厚達 200 公尺的礫石及砂、黏土夾層，此層沉積物之岩性與林口台地的性質不同，故提出「新莊層」一詞取代丹桂之助之「林口層」，以涵蓋松山層以下、基盤以上所有的盆地沉積層。王執明（1978）根據「新公園一號」鑽井資料，提出新莊層上部具一獨立、分布廣泛之紅土礫石層，並命名為「景美層」。自此，「松山層」、「景美層」、「新莊層」之三層架構廣為工程界所引用。鄧屬予等人（1994）根據經濟部中央地質調查所之深井資料，將台北盆地沉積層由上至下再細分為松山、景美、五股、板橋等四層，而五股層與板橋層則隸屬於「新莊群」。由於本文之研究範圍僅限於松山、景美兩層，故仍沿用工程界常使用的三層命名法。典型的台北盆地地質柵狀剖面如圖 2 所示（取自中央地質調查所），圖例所示之泥層、砂層及砂泥互層即為松山層，礫石層則泛指景美層及其下方沉積層。

至於地質構造方面，包括盆地西北側之新莊斷層、西側之山腳斷層、中部之崁腳斷層及東南側之台北斷層等。其中，盆地中部崁腳斷層與東南側台北斷層均下伏沒入於台北盆地沉積層之下，而西北側之新莊斷層及西側之山腳斷層則分隔了林口台地及台北盆地沉積層，如圖 3 所示（取自李錫堤，2001）。

台北盆地含水層之地下水主要補注區位於新店溪、大漢溪中游，河水及雨水透過下滲方式進入含水層，至於基隆河則因坡降較緩，且汐止以西地區之基盤上方多為阻水層，故阻滯了河水及雨水之下滲，補注量較少。台北盆地含水層地下水之另一次要補注來源係透過盆地周圍山區、丘陵及台地深層之邊界，以側向流動方式進入含水層（賈儀平等，1999）。能邦科技顧問公司（2000）曾針對台北盆地地下水補注量進行評估，並根據陳尚、李德茲現場試驗之建議值估算台北盆地於降雨豐年、平年及枯年之年垂直入滲補注量分別為 0.66 億、0.51 億及 0.45 億噸。若根據大陸水利電力部之建議值估算，則豐、平、枯年之垂直入滲補注量分別為 0.65 億、0.50 億及 0.44 億噸。李振誥等人（2002）基於河川基流（Base Flow）理論對台北盆地補注量進行研究，求得淡水河流域之地下水補注量，並透過盆地與流域之面積比例推得台北盆地地下水之年補注量約 1.2 億噸。至於地下水水位方面，經濟部水利署於台北盆地內設有 23 個地下水水位觀測站，長年監測盆地之地下水水位，監測井位置及水位分布如圖 4 所示（2003 年資料）。

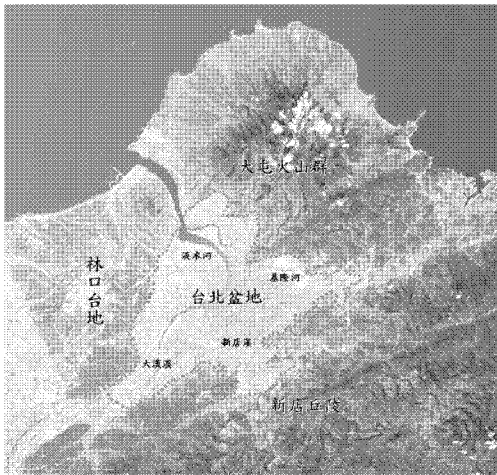


圖 1 台北盆地地理位置

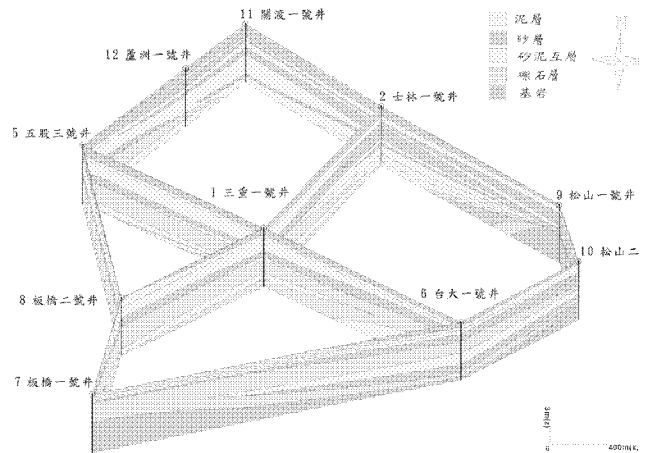


圖 2 台北盆地地質剖面柵狀圖

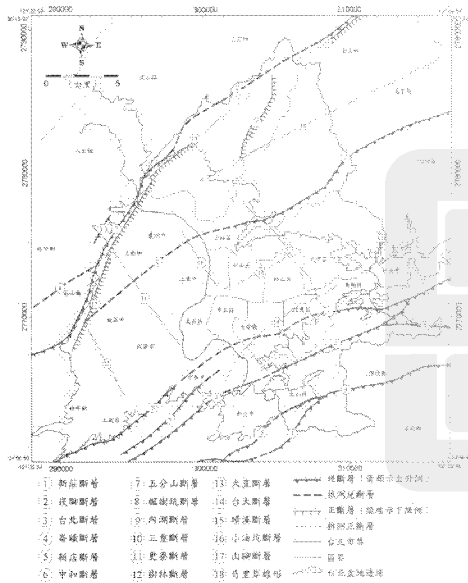


圖 3 台北地區斷層分布圖

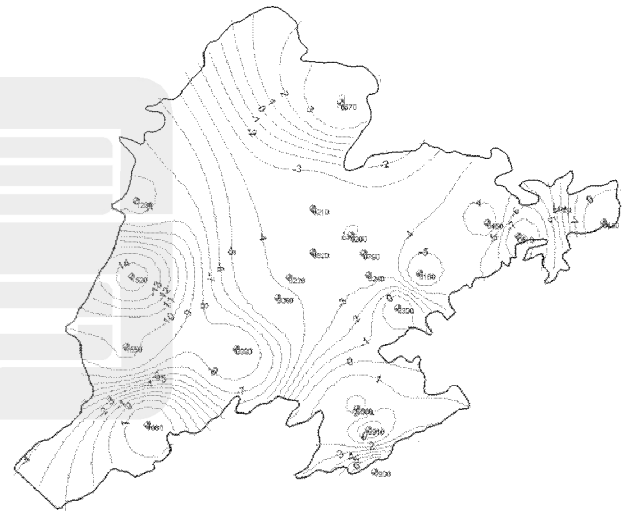


圖 4 台北盆地觀測井位置及水位分布 (2003 年)

三、台北盆地水文地質概念模型

所謂水文地質概念模型 (Hydrogeological Conceptual Model) 係指基於水文地質觀點，透過含水層之分區、分層及地下水流動平衡等手段，將複雜的物理環境簡化為一理想化的概念模型。模型由若干個水文地層單元所組成，模型內地下水之流進與流出係透過水平衡原理達到穩定平衡狀態，地下水流場則可透過三維地下水流動控制方程式代入初始條件、邊界條件及地下水文荷載予以求得。

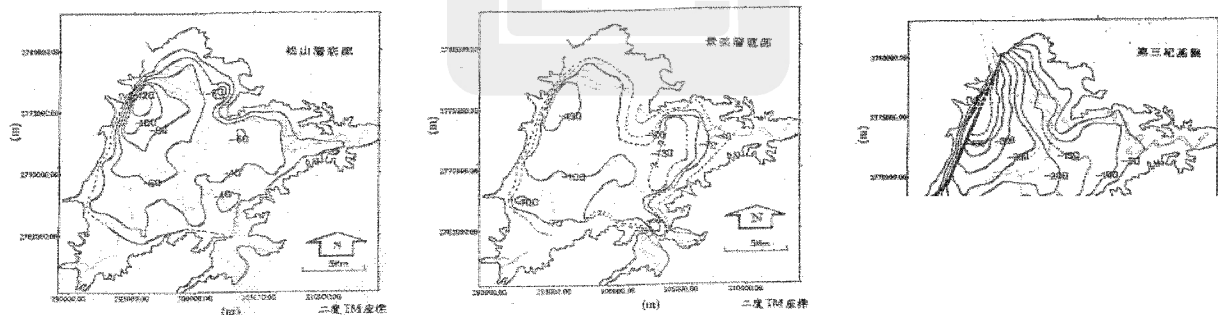
(一) 模型建立

本文根據所蒐集之台北盆地地理、地層、地質及地下水水文等水文地質資料，建立三維區域性水文地質概念模型，模型分為松山層與景美層兩大水文地層單元，其中松山層視為非侷限含水層，而景

美層視為侷限含水層。由於盆地內沉積層厚度之分布差異甚大，非傳統二維或擬三維分析所能處理，故需考慮各水文地層單元於三維空間上之變化，方能使數值模擬更貼近物理環境，進而獲得較正確可靠的分析結果。

本文參考本社地理資訊系統之數值地形資料庫及大地工程作業平台之鑽孔資料庫、經濟部中央地質調查所之台北盆地深孔鑽探資料、及謝昭輝等人（1999）對盆地地層分布之研究成果（如圖 5），訂定盆地之地表高程及松山層與景美層之厚度分布，並透過地下水分析軟體 GMS 建構盆地之三維水文地質數值模型。GMS 軟體係 Environmental Modeling Research Laboratory 根據美國地質調查所（United States Geological Survey, USGS）所發展之 MODFLOW 2000 模組及相關組件研發而成，歷經多國產官學界近 20 年之改良與驗證，已驗證其正確性無虞。本文採 MODFLOW 2000 模組之 LPF（Layer Property Flow）有限差分法求解地下水流動，該法可直接模擬各水文地層，且可獨立計算各內部網格間之流量（Cell-to-cell Flow），不受水文地層單元尺寸之限制。至於數值求解方式則採預置共軛梯度法（Preconditioned Conjugate-Gradient II, PCG2），該法具有穩定性較佳且收斂速度較快之優點。

本文首先建立台北盆地三維數值分析網格，模型初始計有 $50 \times 50 \times 8$ 個網格，水平向各網格邊長約 500 m，垂直向各網格厚度 20 m。第 1 至 6 層設為非侷限含水層（松山層）、第 7 至 8 層設為侷限含水層（景美層）；再匯入數值地形、鑽孔資料及地層分布等資料，透過 GMS 軟體提供之網格編修功能（可針對完整土層、土層尖滅、岩層露頭、基盤等狀況進行修正），運用線性內差（Linear Interpolation）原理，將模型之幾何尺寸自動修正為三維不規則空間分布之數值網格，如圖 6 所示（為便於展示，已將垂直向顯示比例放大）。圖 7 則為本文案例分析所在位置之水文地質柵狀剖面示意圖。



(二) 地下水補注

本文採用李振誥等（2002）以淡水河流域河川流量資料進行低流分析之研究成果，透過盆地與流域面積比例，推估台北盆地地下水之年補注量約 1.2 億噸。該法係基於美國地質調查所（USGS）建議之基流分離法，透過分析河川流量歷線資料，將基流量由河川流量中分離出來，並根據水平衡原理，將此基流量視為地下水之補注量（其原理如圖 8、圖 9 所示）。

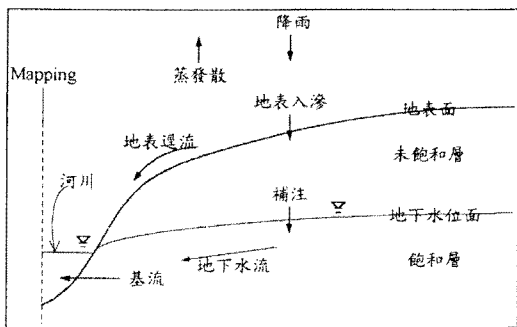


圖 8 地下水水平衡原理（李振誥等，2002）

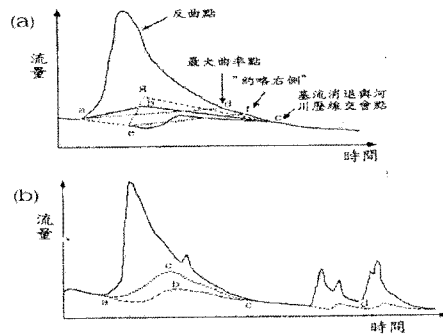


圖 9 基流分析原理（李振誥等，2002）

(三) 邊界條件

由於盆地除淡水河出海口及西側新莊斷層與山腳斷層外，並無其他明顯的自然邊界，故盆地之邊界設定為：（1）定水頭邊界—淡水河口處；（2）變水頭邊界（山區補注）—東側與南側丘陵、北側大屯火山群、西側林口台地；（3）變水頭邊界（集水區補注）—台北盆地基隆河、新店溪與大漢溪中、上游處。上述邊界條件之設定如圖 10 所示。初始水頭值乃根據台北盆地地下水觀測網水位觀測井之水位紀錄，本研究採 2003 年平均地下水位作為模型之初始水頭值，如圖 11 所示。



圖 10 台北盆地廣域水文地質模型之邊界條件

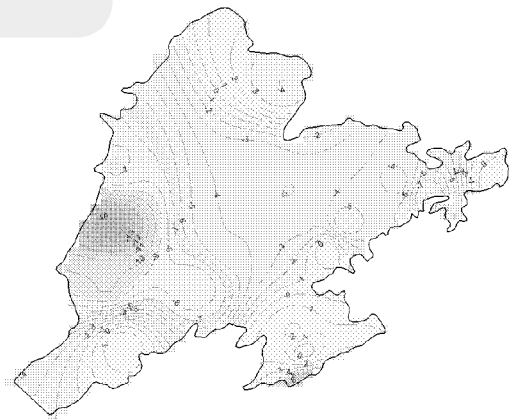


圖 11 台北盆地地下水位分布（2003 年）

本文所建立之三維區域性水文地質模型分為上部非侷限含水層（松山層）與下部侷限含水層（景美層）兩個水文地質單元。非侷限含水層之滲透係數 K 係參考歐晉德等（1983）之研究成果，給定初值為 0.1 m/day，非侷限含水層貯水係數 S 則根據邵明忱（1995）之研究成果，給定初值為 0.1。至於侷限含水層之導水係數 T 及貯水係數 S 則參考楊萬全（1972）、曹以松等（1984）之研究成果，分區給定初值（分區如圖 12，初值給定如表 1 所示）。

表 1 台北盆地侷限含水層各分區之水理參數值

分區編號	導水係數 T (m ² /day)	貯水係數 S	分區編號	導水係數 T (m ² /day)	貯水係數 S	分區編號	導水係數 T (m ² /day)	貯水係數 S
1	220	0.001	10	450	0.002	19	200	0.015
2	400	0.001	11	800	0.001	20	200	0.007
3	800	0.001	12	1,750	0.001	21	150	0.015
4	1,500	0.001	13	700	0.015	22	150	0.015
5	150	0.001	14	200	0.005	23	2,800	0.001
6	1,200	0.002	15	400	0.001	24	4,500	0.001
7	2800	0.002	16	400	0.001	25	2,200	0.005
8	250	0.002	17	400	0.008	26	500	0.010
9	1,000	0.002	18	1,000	0.001	27	270	0.001

(四) 模型率定

模型率定屬逆推問題 (Inverse Problem) 範疇，係透過現地水頭或流量資料之校驗，反推水文地質概念模型之水理參數與地下水文荷載 (如抽水量)。台北盆地過去曾大量抽取地下水，導致地下水位下降最大達 45 公尺。政府自 1968 年明令禁抽地下水，故地下水位得以藉由自然補注逐年回復。由於現今地下水位處於逐漸回升狀態，故數值分析需於盆地多處設置虛擬抽水井，以擬合目前之地下水位分布，擬合結果視為現階段台北盆地地下水之穩態流場。本文採 MODFLOW 2000 PES 模組進行模式率定，以自動參數評估 (Automated Parameter Estimation) 方式率定各虛擬抽水井之抽水量 (或補注量)，透過 2003 年台北盆地之水位監測資料進行模式率定，率定結果如圖 13 所示，圖中黑點為觀測井位置，柱狀校正指標之上、下限表示觀測值正負一個誤差容許值 (設定為 0.5 m)，而實心柱狀體部分則為計算值與觀測值之誤差，若柱狀體為綠色則表示誤差落於容許範圍內。模型率定結果顯示模擬結果與各觀測井監測值之誤差均小於容許誤差 (± 0.5 m)，模型校正結果控制於各觀測井水位正負 0.5 m 內，信心水準為 95%，故本文所建立之台北盆地水文地質模型具相當程度之代表性與準確性。

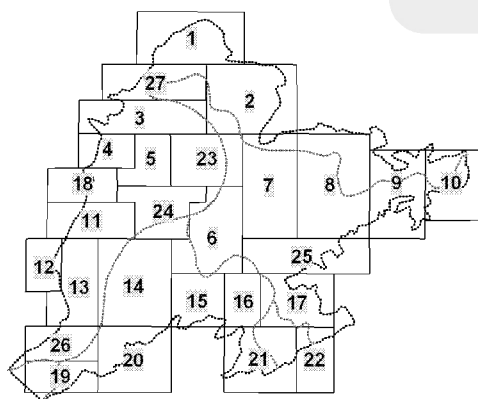


圖 12 台北盆地侷限含水層之水理參數分區

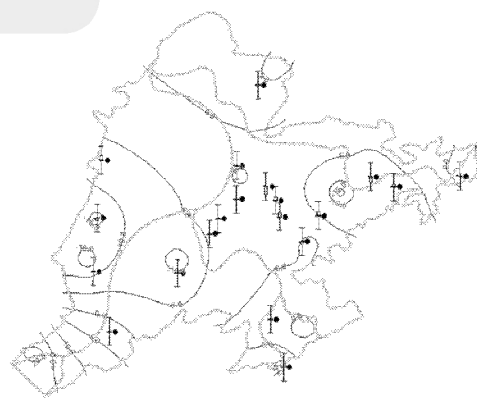


圖 13 穩態分析結果與觀測井監測值之比較

四、台北盆地水文地質概念模型之應用

(一) 案例基本資料

本案例為台北捷運新莊線道岔段之群井抽水試驗，試驗結果作為新莊線各車站後續深開挖降水之設計依據。場區位置及群井平面配置如圖 14 及圖 15 所示。其中抽水井編號 No.8、No.9、No.11、

No.13、No.14、No.16、No.17、No.18、No.19、No.20、No.22 及 No.24 之抽水速率為 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ ；編號 No.12、No.21 及 No.23 之抽水速率為 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ ；編號 No.10 及 No.25 兩口抽水井原以 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 速率抽水，中途因故障而停止抽水。

抽水井之運轉順序為：No.17→No.25→No.16→No.8→No.9→No.14→No.18→No.24→No.19→No.23→No.10→No.13→No.11→No.12→No.20→No.22→No.21。第一階段先運轉 4 口（No.17, No.25, No.16, No.8），待水位穩定後第二階段再加 4 口（No.9, No.14, No.18, No.24），第三階段再加 4 口（No.19, No.23, No.10, No.13），待水位穩定後剩餘抽水井全數開啟（No.11, No.12, No.20, No.22, No.21），共計 17 口抽水井，連續抽水 72 小時。回水試驗時間自 2005 年 5 月 19 日 16 時至 2005 年 5 月 20 日 16 時止，共計 24 小時。

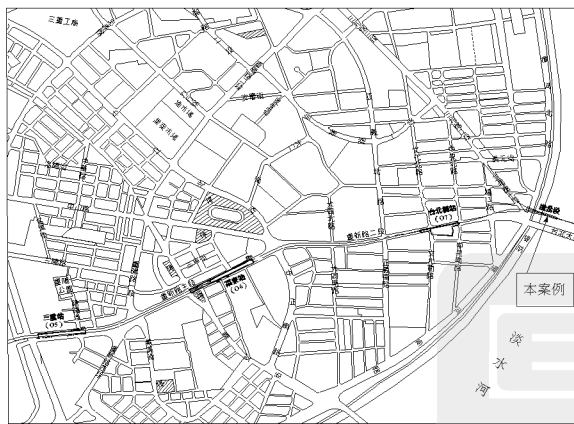


圖 14 捷運新莊線道岔段場址之平面位置

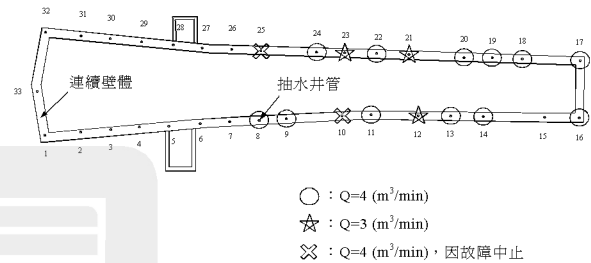


圖 15 群井抽水試驗之平面配置

(二) 試驗量測資料

群井試驗進行期間，抽水井內電子式水壓計所測得之水位洩降約 $25 \text{ m} \sim 43 \text{ m}$ ，如圖 16 所示。開挖區內電子式水壓計所測得景美層之水壓洩降約 $23 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$ ，而松三層之水壓則洩降約 $2 \text{ m} \sim 4 \text{ m}$ ，如圖 17 所示。分別於開挖影響範圍外距離道岔段 50 m 、 100 m 、 200 m 及 400 m 設有水位觀測井，各觀測井分別於松五層（2 處）、松三層（1 處）、景美層（1 處）設有水壓計以量測水壓變化，各水壓計之基本資料如表 2 所示。群井試驗進行期間，所測得之水位變動情形整理如表 3。

(三) 案例分析

首先根據前述所建立之台北盆地區域性三維水文地質模型解得地下水之穩態流場，再於本案例場址處加密分析網格（如圖 18 所示），並根據抽水井之佈置與抽水計畫建立模型之源匯（Source and Sink）條件，透過 MODFLOW 模組進行地下水流動之暫態分析，以模擬群井抽水試驗期間之水壓洩降及回水期間之水壓回復情形，最後利用監測資料予以驗證。

抽水時程如前述，群井抽水試驗之水壓洩降模擬結果如圖 19 所示。模擬結果與觀測資料之比對則整理於表 4，結果顯示除開挖場區內之洩降結果誤差較小外，場區周邊及場區外之洩降量均明顯大於監測值，此部分原因與地盤之不均勻性、水理參數之區域性及松二層之阻水效應等因素有關，且場區外之水位洩降易受附近地區其他工址施工降水作業之影響，故分析誤差較大。群井試驗分析所得之景美層水壓洩降影響半徑（抽水前後水頭差大於誤差設定值 0.5 m 之範圍）約為 $2.5 \sim 3.0$ 公里，如圖 20 所示。

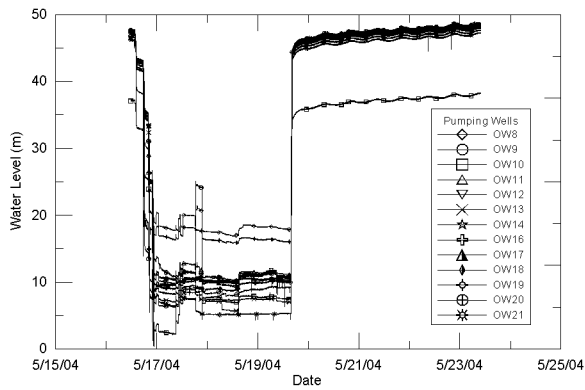


圖 16 群井試驗期間抽水井之水位洩降資料

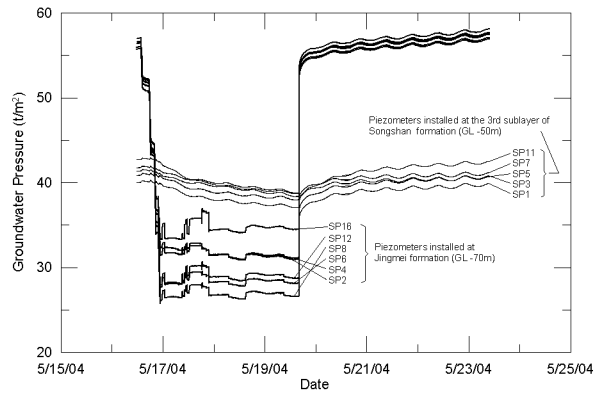


圖 17 群井試驗期間開挖區內之水壓監測資料

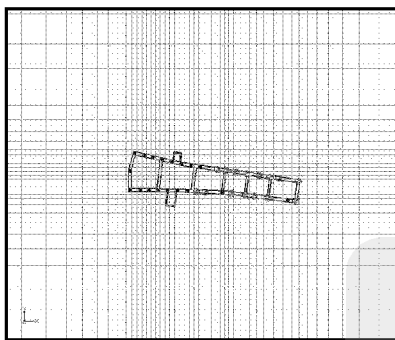


圖 18 道岔段群井試驗之分析網格

表 2 開挖區外佈置之水壓計基本資料

水壓計編號	距離道岔段 (m)	水壓計裝設土層及高程 (m)			
		松五層(1)	松五層(2)	松三層(3)	景美層(4)
OW8-1	50	EL+100.1~98.1	EL+91.6~89.6	EL+66.0~64.0	EL+43.2~41.2
OW8-2	100	EL+100.4~98.4	EL+91.4~89.4	EL+65.9~63.9	EL+43.1~41.1
OW8-3	200	EL+99.9~97.9	EL+91.4~89.4	EL+65.2~63.2	EL+43.1~41.1
OW8-4	400	EL+98.2~96.2	EL+91.4~89.4	EL+65.8~63.8	EL+43.0~41.0

表 3 群井試驗期間開挖區外之水位洩降

水壓計編號	距離道岔段(m)	水位洩降 (m)			
		松五層(1)	松五層(2)	松三層(3)	景美層(4)
OW8-1	50	0.2	0.1	3.8	6.0
OW8-2	100	0.2	0.1	3.2	5.0
OW8-3	200	0.3	0.1	2.2	4.8
OW8-4	400	0.1	0.1	1.0	3.2

表 4 群井試驗模擬結果與監測資料之差異

位置	景美層水位洩降	
	模擬值 (m)	監測值 (m)
開挖場區內	22 ~ 23	23 ~ 30
距離場區 50 m 外	12	6.0
距離場區 100 m 外	10	5.0
距離場區 200 m 外	9	4.8
距離場區 400 m 外	8	3.2

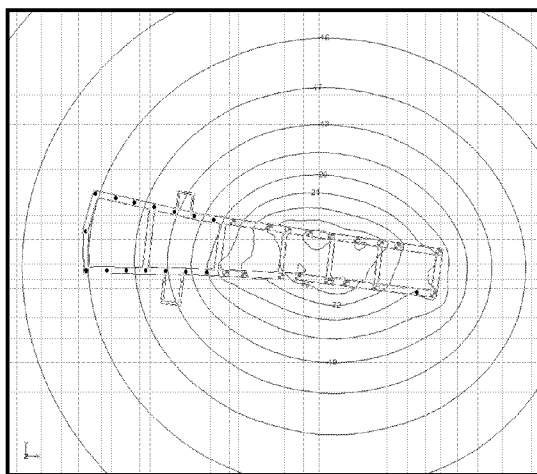


圖 19 群井抽水試驗分析結果

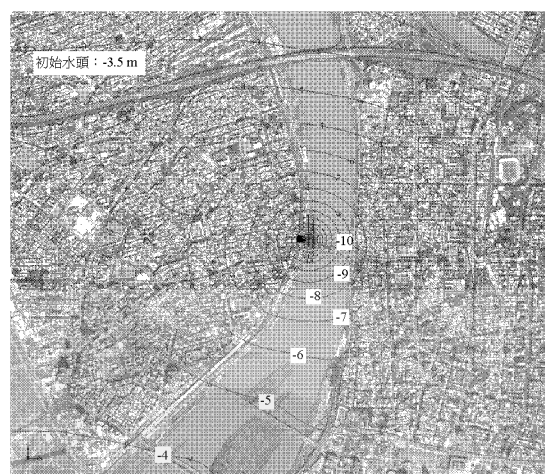


圖 20 群井抽水試驗之洩降範圍分析

五、結論與建議

1. 傳統近域 (Near-field) 模型之邊界條件甚難訂定，且大規模抽水之影響範圍往往超過近域模型之邊界範圍，故使用上有所限制。至於區域性 (Regional) 水文地質模型可將自然邊界納入考量，邊界條件較明確，惟單一網格所涵蓋之範圍相對較大，故求解小區域場址之地下水壓洩降時，須將場址位置之網格加密，方能滿足所需之分析精度。
2. 本文所建立之台北盆地區域性三維水文地質概念模型具有後列之特點，具有較高之正確性及合理性：(1) 根據松山層與景美層之空間分布決定分析網格之三維幾何關係；(2) 根據盆地各分區內景美層抽水試驗之反算結果輸入模型之水理參數值；(3) 根據盆地各主要河流之基流分析結果輸入盆地之地下水補注量；(4) 以河流、斷層及地下分水嶺等天然邊界訂定定水頭或無流量等邊界條件；(5) 於盆地內設置多個虛擬抽水井以擬合盆地目前之地下水位分布；(6) 透過盆地內水位觀測井之監測資料進行模型率定。
3. 本文透過所建立之台北盆地區域性三維水文地質模型，成功地預測了捷運新莊線道岔段群井抽水試驗期間場區內、外之水壓洩降趨勢，惟場區外之分析誤差較大，此部分與地盤之不均勻性、水理參數之區域性、阻水層之阻水效率及其他場址施工干擾等因素有關，須再做進一步探討。本文建議之分析程序及成果，可供後續類似工程於擬定抽水計畫及進行抽水安全評估時採用，極富參考價值。

參考文獻

- 龔樹勇、譚志豪 (2005) 景美礫石層降水工法於大台北都會區深開挖工程之應用，中興工程顧問社工程研究基金專案研究報告 (第一次期中報告)
- 曹以松、許榮庭 (1985, 1986) 台北盆地地下水抽水量反向推求數學模式之研究 (1~3)，國家科學委員會補助計畫
- 李振誥、陳尉平、李如晃 (2002) 應用基流資料估計法推估台灣地下水補注量，台灣水利季刊，第五十卷，第一期，第 69 - 80 頁
- 李振誥、陳景文 (2002, 2003) 台北盆地地下水管制區檢討及土壤液化評估 (1~2)，經濟部水利署
- 能邦科技顧問股份有限公司 (2000) 台灣地區地下水補注量估算，經濟部水資源局計畫
- 日商鹿島營造股份有限公司台灣分公司 (2005) 台北都會區捷運系統新莊線 CK570C 區段標工程—CK240 子標道岔段—道岔段群井試驗報告書，台北市政府捷運工程局北區工程處
- Environmental Modeling Research Laboratory (2003) GMS 5.0 User's Manual, U.S.A.
- McDonald M.G. and Harbaugh A.W. (1988) A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, USGS, U.S.A.

中興工程季刊編審小組啟事

修訂中興工程季刊「徵稿簡則」工程技術性文稿參考文獻之格式，並提供「文稿格式範本」及「中興工程季刊投稿人暨稿件資料表」各一種，敬請自本社網站 <http://www.sinotech.org.tw> 點選【中興工程季刊→徵稿簡則】下載利用。