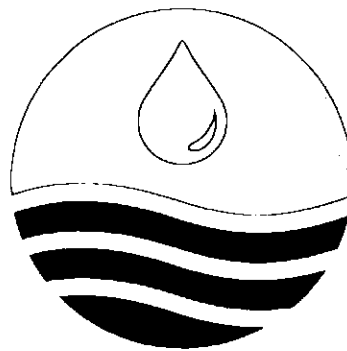


地下水質量傳輸模式之發展與現地 試驗研究(2/3)

Development of Groundwater Mass Transport
Model and In-Situ Experiments (2/3)



經濟部水利署水利規劃試驗所

中華民國九十三年十二月

地下水質量傳輸模式之發展與
現地試驗研究(2/3)

Development of Groundwater Mass
Transport Model and In-Situ Experiments
(2/3)

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行機關：國立交通大學

中華民國九十三年十二月

目 錄

| | |
|-----------------------------|--------|
| 目 錄..... | I |
| 圖 目 錄..... | III |
| 表 目 錄..... | X |
| 摘 要..... | XII |
| Abstract..... | XXXI |
| 結論與建議..... | XXXIII |
| | |
| 第一章 前言..... | 1 |
| 一、計畫緣起與目的..... | 1 |
| 二、工作項目與內容..... | 2 |
| 三、第一年度工作成果概述..... | 4 |
| 四、本年度主要工作項目及內容..... | 6 |
| | |
| 第二章 地下水質量傳輸相關研究文獻回顧..... | 8 |
| 一、地下水流計算..... | 8 |
| 二、地下水質量傳輸計算..... | 10 |
| (一) 不具密度變化..... | 10 |
| (二) 具明顯密度變化界面..... | 12 |
| 三、地下水質量傳輸相關試驗研究..... | 15 |
| (一) 現地水文地質參數測定試驗..... | 15 |
| (二) 地下水質量傳輸現地試驗..... | 18 |
| | |
| 第三章 地下水質量傳輸模式之建立、測試與驗證..... | 20 |
| 一、地下水流模式之選定..... | 20 |
| 二、模式理論基礎..... | 28 |
| (一) 不具密度變化..... | 28 |
| (二) 具明顯密度變化界面..... | 32 |
| 三、模式之建立..... | 49 |

| | |
|----------------------------|-----|
| (一) 不具密度變化..... | 49 |
| (二) 具明顯密度變化交界面..... | 59 |
| 四、 模式之測試與驗證..... | 72 |
| (一) 不具密度變化..... | 72 |
| (二) 具明顯密度變化交界面..... | 89 |
| | |
| 第四章 地下水質量傳輸現地試驗..... | 94 |
| 一、 垂直水力傳導係數試驗..... | 106 |
| 二、 非等向水文參數分析..... | 127 |
| 三、 地電阻 3-D 水文地質影像分析..... | 145 |
| 四、 砂箱試驗..... | 160 |
| 五、 污染傳輸試驗..... | 200 |
| | |
| 第五章 地下水質量傳輸模式之應用..... | 229 |
| 一、 第一年相關水文地質參數試驗資料之分析..... | 229 |
| 二、 國外試驗案例應用模擬..... | 238 |
| | |
| 第六章 現有研究成果檢視與未來工作執行說明..... | 250 |
| 一、 第一年成果研究成果檢視..... | 250 |
| 二、 第二年(本年度)研究成果檢視..... | 251 |
| 三、 第三年工作執行說明..... | 254 |
| | |
| 參考文獻 | |
| 附錄 A 服務建議書審查意見處理情形 | |
| 附錄 B 工作執行計劃書與期初報告審查意見處理情形 | |
| 附錄 C 工作會報審查意見處理情形 | |
| 附錄 D 期中報告審查意見處理情形 | |
| 附錄 E 期末報告審查意見處理情形 | |

圖目錄

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 3-1 | 揭限含水層部分貫穿單井抽水測試案例示意圖 | 21 |
| 圖 3-2 | 座標系統示意圖(a)MODFLOW | 23 |
| 圖 3-3 | 分層三維地下水流模式揭限含水層部分貫穿單井抽水模擬結果 ... | 24 |
| 圖 3-4 | 揭限含水層部分貫穿單井抽水垂直方向水位洩降模擬結果比較 ... | 25 |
| 圖 3-5 | 揭限含水層部分貫穿單井抽水水平方向水位洩降模擬結果比較 ... | 26 |
| 圖 3-6 | 揭限含水層部分貫穿單井抽水水位洩降梯度模擬結果比較 | 27 |
| 圖 3-7 | 具明顯密度變化交界面之示意圖 | 33 |
| 圖 3-8 | 以擾動法處理之明顯密度變化交界面示意圖 | 35 |
| 圖 3-10 | 含水層內存在具明顯密度變化交界面之示意圖 | 41 |
| 圖 3-11 | 垂直變量解析解示意圖 | 52 |
| 圖 3-12 | 三維計算流程圖 | 56 |
| 圖 3-13 | 含水層垂向積分示意圖 | 65 |
| 圖 3-14 | 交界面示意圖 | 70 |
| 圖 3-15 | 具海水、淡水薄層之交界面示意圖 | 70 |
| 圖 3-16 | 流程圖 | 71 |
| 圖 3-17 | 移流延散方程式有限解析法等濃度分布模擬結果 | 73 |
| 圖 3-18 | 移流延散方程式有限解析法等濃度分布模擬結果(沿 $y=2000m$ 線) | 73 |
| 圖 3-19 | 無因次移流擴散方程式有限解析法在 $x=y$ 之模擬結果 | 75 |
| 圖 3-20 | 虛擬分層示意圖 | 76 |
| 圖 3-21 | 虛擬分層聯立計算與單層解析解對照圖(實線為解析解) | 77 |
| 圖 3-22 | 設計案例土層分布圖 | 77 |
| 圖 3-23 | 時間與垂向濃度變化圖 | 78 |
| 圖 3-24 | 濃度在 $x-y$ 方向上的分布圖(實線為解析解) | 79 |
| 圖 3-25 | 濃度在 $x-z$ 方向上的分布圖(實線為解析解) | 80 |
| 圖 3-26 | 濃度在 $y-z$ 方向上的分布圖(實線為解析解) | 81 |
| 圖 3-27 | 水平虛擬分區示意圖 | 82 |
| 圖 3-28 | 水平虛擬分區模擬結果(實線為為分區之結果) | 82 |

| | |
|--|-----|
| 圖 3-29 非均質土層分布測試案例垂直示意圖 | 83 |
| 圖 3-30 模擬區域示意圖..... | 84 |
| 圖 3-31 非均質土層分布測試案例模擬結果(沿 $y=50\text{m}$ 之 $x-y$ 剖面)..... | 85 |
| 圖 3-32 非均質土層分布測試案例模擬結果($T=100\text{days}$)..... | 86 |
| 圖 3-33 非均質土層分布測試案例模擬結果($T=200\text{days}$)..... | 87 |
| 圖 3-34 非均質土層分布測試案例模擬結果($T=300\text{days}$)..... | 88 |
| 圖 3-35 模擬區域示意圖..... | 90 |
| 圖 3-36 數值模擬區域示意圖 | 91 |
| 圖 3-37 考慮與未考慮薄膜層之模擬結果 | 92 |
| 圖 3-38 模擬結果與解析解比較圖 | 93 |
| 圖 4-1 研究廠址監測井分佈圖 | 94 |
| 圖 4-2 校園地質剖面圖..... | 106 |
| 圖 4-3 垂直流試驗示意圖..... | 107 |
| 圖 4-4 1 吋分層監測井俯視圖 | 110 |
| 圖 4-5 1 吋分層監測井俯視圖 A-A 剖面圖 | 111 |
| 圖 4-6 1 吋分層監測井俯視圖 B-B 剖面圖..... | 112 |
| 圖 4-7 1 吋分層監測井俯視圖 C-C 剖面圖..... | 113 |
| 圖 4-8 1 吋分層監測井俯視圖 D-D 剖面圖 | 114 |
| 圖 4-9 手動式水位計示意圖 | 115 |
| 圖 4-10 自記式水位計示意圖 | 115 |
| 圖 4-11 自記式水位計儀器校驗曲線..... | 116 |
| 圖 4-12 流量監測設備示意圖 | 117 |
| 圖 4-13 水錶儀器校驗曲線..... | 118 |
| 圖 4-14 第 1 場試驗累積抽水時間與抽水量關係圖 | 121 |
| 圖 4-15 第 1 場試驗上端柱塞室與下端柱塞室水位洩降量變化圖 | 122 |
| 圖 4-16 垂直水力傳輸係數在不同地表下深度變化圖 | 125 |
| 圖 4-17 相對座標系統示意圖 | 127 |
| 圖 4-18 抽水井與監測井相對關係圖 | 130 |
| 圖 4-19 Groundfos MP1 示意圖..... | 133 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 圖 4-20 | 等向水文參數分析試驗步驟 | 134 |
| 圖 4-21 | 各觀測井洩降關係圖 | 135 |
| 圖 4-22 | 第一次洩降曲線與標準曲線套疊圖 | 136 |
| 圖 4-23 | 第一次洩降曲線與標準曲線套疊圖 | 139 |
| 圖 4-24 | 分析次數與誤差示意圖 | 142 |
| 圖 4-25 | 研究場址非等向主要次要方向 | 143 |
| 圖 4-26 | 地電阻試驗示意圖..... | 145 |
| 圖 4-27 | 溫奈電極排列..... | 147 |
| 圖 4-28 | 許蘭柏吉電極排列..... | 148 |
| 圖 4-29 | pole-pole 電極排列..... | 148 |
| 圖 4-30 | 三維地電探測電極陣列 | 149 |
| 圖 4-31 | 剖面探測 A1A1'， B1B1'， A2A2'與 B2B2'之位置與方向。A 與 A' 點是 A1A1'與 A2A2'上 75 與 95 公尺位置。B 與 B'點是剖面 B1B1' 與 B2B2'上 10 與 30 公尺位置。C 與 C'點在 C2C2'剖面 15 與 30 公尺位置 D 與 D'點在剖面 D2D2'剖面 20 與 30 公尺位置。..... | 151 |
| 圖 4-32 | 剖面 A1A1' 示非抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。..... | 151 |
| 圖 4-33 | 剖面 B1B1' 示非抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。圓圈內的數字示井號。..... | 152 |
| 圖 4-34 | 剖面 A2A2' 示抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。..... | 153 |
| 圖 4-35 | 剖面 B2B2' 示抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。圓圈內的數字示井號。施測於 2003,05,31 以 BH04 井抽水。..... | 154 |
| 圖 4-36 | 雲林科技大學井場 BH05 抽水時東西向之電阻率構造。示 BH05 位置。..... | 155 |

| | |
|--|-----|
| 圖 4-37 雲林科技大學井場 BH05 抽水時南北向之電阻率構造。示 BH05 位置..... | 156 |
| 圖 4-38 地電三維構造之施測電極陣列與井場位置 | 157 |
| 圖 4-39 雲林科技大學井場，2003 年 7 月 21 日非抽水期之電阻率構造 ... | 158 |
| 圖 4-40 雲林科技大學井場以 BH04 連續定量抽水第三日之電阻率構造...159 | |
| 圖 4-41 雲林科技大學井場以 BH05 連續定量抽水第三日之電阻率構造....160 | |
| 圖 4-42 砂相試驗示意圖..... | 164 |
| 圖 4-43 砂相尺寸示意圖..... | 165 |
| 圖 4-44 部分貫穿與全開孔井示意圖..... | 166 |
| 圖 4-45 H 型均流管正面俯視圖與側視圖..... | 167 |
| 圖 4-46 定水頭裝置..... | 170 |
| 圖 4-47 定水頭裝置出水閥..... | 171 |
| 圖 4-48 支撐鐵架..... | 171 |
| 圖 4-49 沉水式泵浦..... | 172 |
| 圖 4-50 自製導電度計外觀圖..... | 172 |
| 圖 4-51 自製電導度計濃度率定曲線..... | 173 |
| 圖 4-52 自製電導度計架設..... | 173 |
| 圖 4-53 自製電導度計編號..... | 174 |
| 圖 4-54 砂箱試驗步驟..... | 175 |
| 圖 4-55 將砂箱注滿 RO 水..... | 177 |
| 圖 4-56 固定電導度計..... | 178 |
| 圖 4-57 監測井編號..... | 178 |
| 圖 4-58 電導度計放置情形..... | 179 |
| 圖 4-59 將供水槽定位..... | 179 |
| 圖 4-60 定水頭裝與流量監測設備連接..... | 180 |
| 圖 4-61 儲水槽..... | 181 |
| 圖 4-62 沉水式泵浦..... | 181 |
| 圖 4-63 試驗開始水閥打開..... | 182 |
| 圖 4-64 7 號觀測井在砂箱試驗期間的水位歷線圖..... | 183 |

| | |
|---|-----|
| 圖 4-65 在砂箱進行污染傳輸期間 1 號觀測井的水位歷線圖..... | 184 |
| 圖 4-66 在砂箱進行污染傳輸期間 2 號觀測井的水位歷線圖..... | 185 |
| 圖 4-67 在砂箱進行污染傳輸期間 3 號觀測井的水位歷線圖..... | 185 |
| 圖 4-68 在砂箱進行污染傳輸期間 4 號觀測井的水位歷線圖..... | 186 |
| 圖 4-69 在砂箱進行污染傳輸期間 5 號觀測井的水位歷線圖..... | 186 |
| 圖 4-70 在砂箱進行污染傳輸期間 6 號觀測井的水位歷線圖..... | 187 |
| 圖 4-71 水錶 1 的累積流量圖..... | 189 |
| 圖 4-72 水錶 1 的瞬間流量圖..... | 189 |
| 圖 4-73 水錶 2 的累積流量圖..... | 190 |
| 圖 4-74 水錶 2 的瞬間流量圖..... | 190 |
| 圖 4-75 水錶 3 的累積流量圖..... | 191 |
| 圖 4-76 水錶 3 的瞬間流量圖..... | 191 |
| 圖 4-77 在砂箱進行污染傳輸試驗期間井 7-1 位置導電度計之無因次濃度與 試驗累積時間關係圖..... | 194 |
| 圖 4-78 在砂箱進行污染傳輸試驗期間井 7-3 位置導電度計之無因次濃度與 試驗累積時間關係圖..... | 194 |
| 圖 4-79 在砂箱進行污染傳輸試驗期間井 7-5 位置導電度計之無因次濃度與 試驗累積時間關係圖..... | 195 |
| 圖 4-80 延散度與延散尺度關係圖..... | 197 |
| 圖 4-81 污染傳輸試驗示意圖..... | 202 |
| 圖 4-82 污染傳輸試驗步驟..... | 204 |
| 圖 4-83 雲林科技大學在 2004 年 11 月 3 日 21 時至 2004 年 11 月 8 日 00 時 期間瞬間流量圖..... | 205 |
| 圖 4-84 雲林科技大學在 2004 年 11 月 3 日 21 時至 2004 年 11 月 8 日 00 時 期間累積流量圖..... | 206 |
| 圖 4-85 在 10-1 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 207 |
| 圖 4-86 在 10-2 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 207 |
| 圖 4-87 在 10-3 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 208 |
| 圖 4-88 在 10-4 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 208 |

| | | |
|---------|------------------------------------|-----|
| 圖 4-89 | 在 10-5 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 209 |
| 圖 4-90 | 在 10-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 210 |
| 圖 4-91 | 在 10-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 210 |
| 圖 4-92 | 在 10-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 211 |
| 圖 4-93 | 在 10-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 211 |
| 圖 4-94 | 在 10-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 212 |
| 圖 4-95 | BH10 觀測井平均濃度之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖.. | 213 |
| 圖 4-96 | 在 4-1 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 214 |
| 圖 4-97 | 在 4-2 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 214 |
| 圖 4-98 | 在 4-3 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 215 |
| 圖 4-99 | 在 4-4 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 215 |
| 圖 4-100 | 在 4-5 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 216 |
| 圖 4-101 | 在 4-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 217 |
| 圖 4-102 | 在 4-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 217 |
| 圖 4-103 | 在 4-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 218 |
| 圖 4-104 | 在 4-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 218 |
| 圖 4-105 | 在 4-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 219 |
| 圖 4-106 | BH04 觀測井平均濃度之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖.. | 220 |
| 圖 4-107 | 在 11-1 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 221 |
| 圖 4-108 | 在 11-2 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 221 |
| 圖 4-109 | 在 11-3 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 222 |
| 圖 4-110 | 在 11-4 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線..... | 222 |
| 圖 4-111 | 在 11-5 位置之導電度計量測之 KCL 濃度變化歷線 | 223 |
| 圖 4-112 | 在 11-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 224 |
| 圖 4-113 | 在 11-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 224 |
| 圖 4-114 | 在 11-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 225 |
| 圖 4-115 | 在 11-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 225 |
| 圖 4-116 | 在 11-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖 | 226 |
| 圖 4-117 | BH11 觀測井平均濃度之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖.. | 227 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 圖 4-118 | 延散度與延散尺度關係圖..... | 227 |
| 圖 5-1 | 雲林科技大學校園監測井位置圖..... | 229 |
| 圖 5-2 | 雲林科技大學校園場址監測井二度分帶座標圖..... | 230 |
| 圖 5-3 | 各次抽水試驗監測井水位洩降圖..... | 230 |
| 圖 5-4 | 試驗場地網格分布..... | 231 |
| 圖 5-5 | 反向推估計算流程..... | 231 |
| 圖 5-6 | 水力傳導係數分布..... | 231 |
| 圖 5-7 | 模式率定與抽水試驗結果(第四次抽水試驗)..... | 232 |
| 圖 5-8 | 模式驗證與抽水試驗結果(第二次抽水試驗)..... | 234 |
| 圖 5-9 | 試驗場地示意圖..... | 235 |
| 圖 5-10 | 試驗場地之三維水力傳導係數分布圖..... | 236 |
| 圖 5-11 | 試驗場地之水頭分布圖..... | 237 |
| 圖 5-12 | 試驗結果(Observed)與 MMOC3 模擬結果及本模式模擬局果(延 y=3.2m)..... | 237 |
| 圖 5-13 | 本模式模擬之各斷面濃度分布..... | 240 |
| 圖 5-14 | 本模式模擬之各斷面濃度分布..... | 241 |

表目錄

| | | |
|--------|--------------------------|-----|
| 表 3-1 | 地下水流計算及質量傳輸計算所需輸入資料..... | 58 |
| 表 3-2 | 程式輸入參數..... | 92 |
| 表 4-1 | 監測警與抽水警之距離..... | 94 |
| 表 4-2 | BH01 監測井構造紀錄表..... | 95 |
| 表 4-3 | BH02 監測井構造紀錄表..... | 96 |
| 表 4-4 | BH03 監測井構造紀錄表..... | 97 |
| 表 4-5 | BH04 監測井構造紀錄表..... | 99 |
| 表 4-6 | BH05 監測井構造紀錄表..... | 99 |
| 表 4-7 | BH06 監測井構造紀錄表..... | 100 |
| 表 4-8 | BH07 監測井構造紀錄表..... | 101 |
| 表 4-9 | BH08 監測井構造紀錄表..... | 102 |
| 表 4-10 | BH09 監測井構造紀錄表..... | 103 |
| 表 4-11 | BH10 監測井構造紀錄表..... | 104 |
| 表 4-12 | BH11 監測井構造紀錄表..... | 105 |
| 表 4-13 | 水位監測頻率..... | 117 |
| 表 4-14 | 流量監測頻率..... | 118 |
| 表 4-15 | 第 2 場至第 9 場試驗統整表..... | 120 |
| 表 4-16 | 第 1 場試驗分析統整表..... | 123 |
| 表 4-17 | 各場次分析結果表..... | 124 |
| 表 4-18 | 不同深度非等向水力傳導係數表..... | 125 |
| 表 4-19 | 第一次分析對數圖比對資料..... | 137 |
| 表 4-20 | 第一次分析結果..... | 138 |
| 表 4-21 | 第二次分析對數圖比對資料..... | 139 |
| 表 4-22 | 第二次分析結果..... | 140 |
| 表 4-23 | 第三次分析對數圖比對資料..... | 141 |
| 表 4-24 | 第三次分析結果..... | 141 |
| 表 4-25 | 延散度相關文獻之延散度比較表..... | 198 |
| 表 5-1 | 抽水試驗結果簡表..... | 232 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 表 5-2 | 監測井洩降排序..... | 233 |
| 表 5-3 | 本研究模式所需輸入值..... | 243 |
| 表 5-4 | 各深度之 $\ln K$ 平均值 (K 之單位為 m/s) | 244 |
| 表 5-5 | 各深度之廣延散係數..... | 245 |
| 表 5-6 | 模擬時各層之流速..... | 246 |

摘 要

一、計畫緣起與目的

台灣近年來由於地下水抽用量激增，遠超過地下水補注量，已造成部份地區地層下陷與地下水鹽化。工廠有機溶劑、地下油管與地下油槽破裂造成農地土壤及地下水污染。有鑑於此，環保署依據「土壤及地下水污染整治法」，開始徵收土壤及地下水污染整治基金，並著手地下水污染場址整治工作。此外，經濟部水利署辦理「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，定期進行地下水水質檢測工作，瞭解地下水水質污染概況。惟目前國內尚無一套由國人自行開發之地下水質量傳輸模式以資應用，因此爰辦理「地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究」計畫。

「地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究」計畫之目的係發展一套由國人自行研發適合大區域及小範圍模擬之多含水層系統地下水質量傳輸模式，並藉由地下水污染傳輸現地試驗，輔以實驗室砂箱試驗，推估地下水及污染物傳輸等相關地質參數。其研究結果可提供經濟部水利署及相關單位作為管制地下水抽取與整治地下水污染之參考工具。

二、計畫預期成果

本計畫分三年逐步實施，其各年度之預期成果分別為：

- 第一年：多含水層系統地下水質量傳輸模式之發展、建立與驗證，並建置一完整地下水流及質量傳輸試驗及監測場址。
- 第二年：模式發展部份，應用第一年發展、建立及驗證完成之多含水層系統地下水質量傳輸模式，進行現地模擬，並進一步研發含地下水密度變化之模式，以加強地下水質量傳輸之模擬功

能。試驗方面，除了進一步執行相關水文地質參數試驗，包括垂直水力傳導係數試驗、非等向水文參數分析、地電阻 3-D 水文地質影像分析，並同時進行現地示蹤劑試驗與砂箱試驗。

第三年：應用具密度變化之多含水層系統地下水質量傳輸模式，模擬海水入侵，並提出地下水流與質量傳輸之相關地質參數模型。辦理教育訓練，將研究中所發展之模式，技術轉移給水利署相關人員。

三、第一年研究成果概述

(一) 第一年工作項目

地下水質量傳輸模式之發展

1. 評估及選用適合模擬大區域及小範圍之多含水層系統地下水流計算模式。
2. 評估及選用能同時準確計算擴散(diffusion)、對流(advection)以及延散(dispersion)等物理現象之數值方法。
3. 完成建立適合大區域及小範圍模擬之多含水層系統地下水質量傳輸數值計算模式。

地下水質量傳輸現地試驗研究

1. 試驗場址之評估：利用國立雲林科技大學校園現地進行實驗場址之建立，以做為未來三年野外試驗的場地。
2. 地下水監測井之設置：於場址選定後，將設置監測井用於水文地質分析及污染地下水傳輸研究之現地監測。
3. 土壤物性分析：以試驗場址含水層的土壤物性為分析對象，確實掌握試驗場址含水層的地質特性。

4. 含水層試驗及水文地質參數檢定：於試驗場址進行抽水試驗、微水試驗，以掌握地下水含水層之地質參數。

(二) 第一年工作成果

地下水質量傳輸模式之發展

研究中首先選用本團隊自行發展之分層三維地下水流模式，以提供地下水質量傳輸模擬時，所需地下水流場分布之用。分層三維地下水流模式所提出之二次多項式函數分布概念，確實優於 MODFLOW 模式的塊體中心網格形式概念。此外，分層三維地下水流模式與 MODFLOW 同樣採用層的概念來建構，所以較 FEMWATER 簡單且有效率。另外，選用有限解析法作為求解地下水質量傳輸模式之數值方法。為了兼顧數值計算之穩定性與有效性，本研究採用有別於傳統常用之概念來建立地下水質量傳輸模式。研究中將污染物濃度量拆解為垂直積分平均值與垂直變量之和，再利用分層垂向積分技巧，將三維地下水質量傳輸方程式，進一步拆解為水平二維的垂直積分平均地下水質量傳輸方程式以及垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式。水平二維的垂直積分平均地下水質量傳輸方程式，利用本研究中所選用求解移流延散作用之數值方法來求解。至於垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，則利用解析解來求解。模式建立後，應用具有解析解之簡單案例，測試與驗證模式之正確性。

地下水質量傳輸現地試驗

完成國立雲林科技大學校園現地實驗場址之建置，並增設兩口監測井。完成本研究場址之土壤物性分析、含水層試驗、水文地質參數檢定(包括抽水試驗 5 次、回水試驗 1 次及微水試驗 3 組)。本研究場址於 15.65 公尺內之土壤結構，大致為砂質壤土所組成。水力傳導係數(k)，介於 $3.33E-6 \sim 9.03E-5$ m/sec 之間；儲水係數(S)，介於 $4.00E-6 \sim 9.80E-3$ 之間。水文地質參數變動大之原因，在於抽水時間加長、

影響半徑加大，表示分析範圍內之土壤複雜性以及非均質性。對於利用分層三維地下水流模式模擬，所需輸入之資料，依本研究試驗可得，土壤密度為 2.1~2.3；初始孔隙率為 30~50%；水力傳導係數為 0.002~0.005 m/min；比貯水係數為 $7E-7 \sim 5.8E-4$ 。

四、本年度研究成果

(一)本年度工作項目

地下水質量傳輸模式之發展

1. 試驗分析:分析雲林科技大學之抽水試驗結果。
2. 模式之驗證:繼續驗證水平分區，垂直分層之質量傳輸計算功能。
3. 模式之應用：將第一年發展之多含水層系統地下水溶質質量傳輸模式，選擇應用地區(國外實測資料或雲林科技大學之實測資料)做現地模擬，以展示模式之正確性與實用性。
4. 模式之發展：進一步建立具明顯交介面(sharp interface)之密度變化多含水層系統地下水質量傳輸模式，作為海水入侵之模擬工具。

地下水質量傳輸現地試驗研究

1. 垂直水力傳導係數試驗：了解場址水文地質參數，在垂直方向(垂直地表方向)的變化。
2. 非等向水文參數分析：試提出試驗場址水文地質參數在三度空間的非等向分佈資料。
3. 地電阻 3-D 水文地質影像分析：嘗試建立 3-D 水文地質影像分析技術，可以應用於大地區水文地質圖建立及水文地質參數分析。
4. 砂箱試驗：利用溶於水之物質，於實驗室中利用砂箱進行污染傳輸試驗，嘗試了解在近似單向流場中污染物傳輸相關參數。
5. 污染傳輸試驗：利用溶於水之物質，進行地下水中污染傳輸試驗，以做為試驗場址污染傳輸延散係數檢定之參考。

(二)本年度工作成果

地下水質量傳輸模式之發展

(1) 第一年度相關水文地質參數試驗資料之分析

本年度地下水質量傳輸模式發展之工作項目，首先進行第一年相關水文地質參數試驗資料之分析。利用上年度建立完成之地下水質量傳輸模式，配合洩降試驗資料，並根據試誤法，進行反向推算(inverse problem)試驗場址之水力傳導係數分佈，以分析上年度試驗資料之合理性。

在進行水力係數反向推估前，需先分析試驗結果之合理性。分別將五次抽水試驗，各監測井之最終水位洩降量大小加以排序，如表 1 所示。由於第五次抽水試驗之抽水量與抽水時間，遠小於其餘四次。為恐影響反向推估之精確度，暫不採用第五次抽水試驗資料。除第三次試驗與第四次試驗之排序極為相似外(僅 BH01 及 BH02 順序相反)，其餘三次試驗之排序差異甚大。因為第二次試驗資料之排序較第一次試驗資料接近第四次試驗資料，而第三次試驗資料之抽水量又與第四次試驗資料太接近，可能區別性不夠。因此，採用第四次試驗資料率定(calibration)試驗場址之水力傳導係數，再應用第二次試驗資料驗證(verification)結果。

表 1 監測井洩降排序

| | 監測井 BH01 序位 | 監測井 BH02 序位 | 監測井 BH03 序位 | 監測井 BH05 序位 | 監測井 BH06 序位 | 監測井 BH07 序位 | 監測井 BH08 序位 | 監測井 BH09 序位 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 第一次抽水試驗 | 6 | 2 | 1 | 2 | 8 | 4 | 5 | 7 |
| 第二次抽水試驗 | 8 | 6 | 3 | 2 | 5 | 1 | 4 | 7 |
| 第三次抽水試驗 | 7 | 8 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 6 |
| 第四次抽水試驗 | 8 | 7 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 6 |
| 第五次抽水試驗 | 7 | 5 | 3 | 4 | 6 | 1 | 8 | 2 |

模擬時，以各監測井之洩降量，利用克力金法(Krigin Method)推求每一時刻邊界之水頭值，作為模擬之邊界條件。結果顯示，本研究所建立之模式可合理地模擬雲林科技大學所執行的抽水試驗，包含模擬監測井隨時間的洩降趨勢與大小。率定所得之水力傳導係數分佈圖如圖 1 所示，水力傳導係數介於 $1 \times 10^{-5} \text{ m/min} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ 之間。

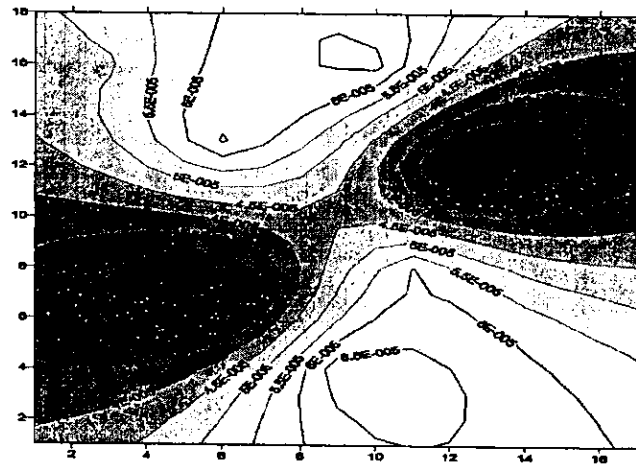


圖 1 水力傳導係數分布

(2) 地下水質量傳輸模式之測試與驗證

地下水質量傳輸模式已於上年度中進行水平二維與垂向一維及三維之計算之初步驗證，本年度模式發展部份將測試地下水質量傳輸模式應用於非連續土層之計算能力。本測試案例之目的在於藉由地質分層在水平方向非均質之案例，展現本模式對於複雜土層分布之計算能力。假設之土層分布與土壤參數如圖 2 及圖 3 所示。

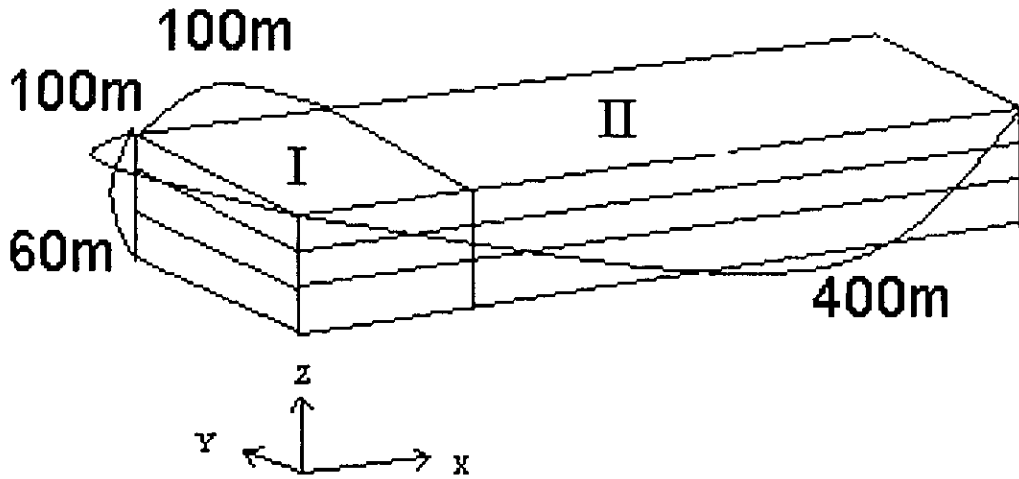


圖 2 模擬區域示意圖

| region I | region II |
|--|--|
| $U_x = 0.4(m/day)$ aquifer Layer I $D_{xx} = 1.0(m^2/day)$ | $U_x = 0(m/day)$ aquitard 20m $D_{xx} = 0.1(m^2/day)$ |
| $U_x = 0.4(m/day)$ aquifer Layer II $D_{xx} = 1.0(m^2/day)$ | $U_x = 1.2(m/day)$ aquifer 20m $D_{xx} = 1.0(m^2/day)$ |
| $U_x = 0.4(m/day)$ aquifer Layer III $D_{xx} = 1.0(m^2/day)$ | $U_x = 0(m/day)$ aquitard 20m $D_{xx} = 0.1(m^2/day)$ |
| domain decomposition | ----- virtual layer |

圖 3 非均質土層分布測試案例垂直示意圖

為了處理土層之非均質性，本研究將模擬區域作垂向虛擬分層與水平區域拆解，計算時將模擬區域拆解為兩個子區域，依據第二個子區域土層分布情況再將第一個子區域在垂向虛擬分為三層。線源污染物濃度 230mg/L 自(x=0m,y=50m)處從 t=0day 時刻起持續注入，模擬時刻於第 100days、200days、300days 在 y=50m 之 x-z 剖面上之模擬結果如圖 4 所示。顯示本模式的確能模擬複雜土層分布之三維傳輸現象。

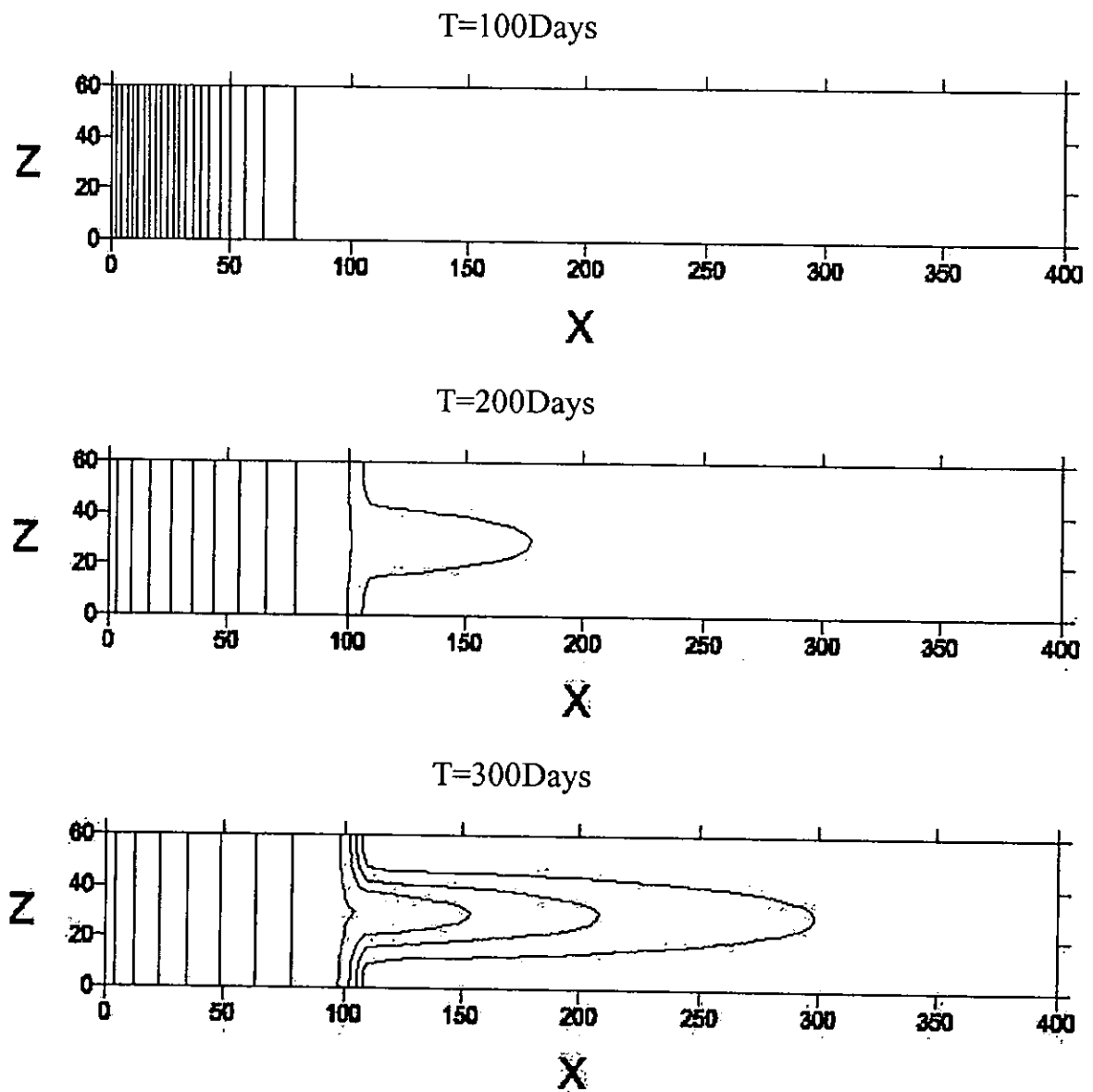


圖 4 非均質土層分布測試案例模擬結果(沿 y=50m 之 x-z 剖面)

(3) 國外地下水質量傳輸試驗案例應用模擬

為了將模式實際應用於現地試驗狀況，在國內現地試驗資料缺乏的前提下，本計畫選用 Yeh et al. (1995) 所提出之試驗。Yeh et al. (1995) 為了瞭解有機及非有機物質在地下水之傳輸機制，於 1992 年在南卡羅萊那(South Carolina)州的喬治城(George Town)試驗場地進行現地試驗以了解有機及非有機物質在地下水之傳輸機制。試驗為雙井強制流動之非有機物質傳輸試驗，試驗場地如圖 5 所示，長 9m、寬 7m，土層厚度 1.5m，場地中共有 28 口觀測井以及一口抽水井及一口注水井，抽水井與注入井的距離 5m，土層之組成為非均質砂質含水層(sandy aquifer)，水力傳導係數係經由 308 微水試驗(slug test)並分別套用 Cooper et al. (1967) 以及 Hvorslev's (1951) 之方法決定。試驗所使用的溶質為氯化鉀(KCl)，地下水之背景濃度為 11 mg/L。試驗開始時注入平均濃度約為 230 mg/L 之氯化鉀溶液，注入速率為 3.78L/min，注入時間為 16 小時，總試驗時間為 12 天。開始試驗後每 2 小時取樣一次。

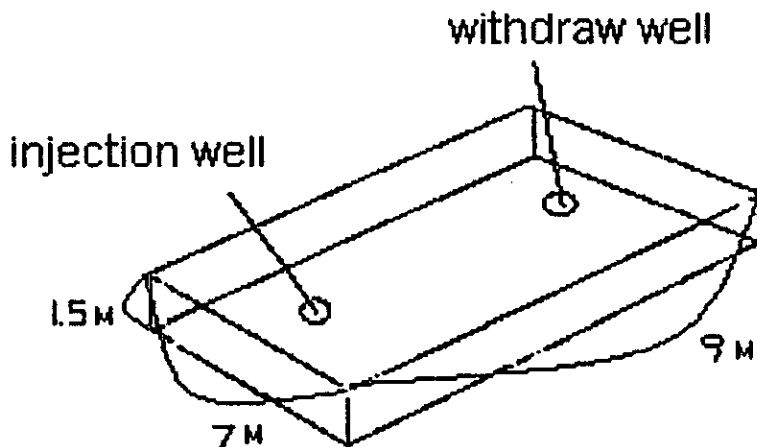


圖 5 試驗場地示意圖

本研究之模擬採用分層近似(layered approach)，將試驗場地共分為 11 層。模式之網格大小為(0.2 × 0.2 × 0.05 m)，土層之頂部與底部所設定之水流邊界為不透水邊界(no flux condition)，側邊之水流邊界採用定水頭(constant head)邊界，水頭值先採用泰斯解(Theis'equation)求取，包含一自然水力洩降 0.023m/m，而後微調至與試驗狀況大致相符時所獲得之抽水井與注水井水頭差為 2.57m，在注入井這半邊的延散邊界為不延散邊界(no-dispersive flux boundary)，靠抽水井之另一半邊界包含抽水井則給定初始濃度，注入井位置之濃度則依時間而改變。背景濃度為 11mg/L，總模擬時間為 50 小時，時間間距為 3 分鐘(0.05 小時)。模式所使用之水流條件為穩定流(steady flow)，各層之水流速度則以水頭差乘以各層之水力傳導係數求得，即 $U = K \times \Delta H_{head}$ ，水力傳導係數採用 Hvorslev's method 之解，即抽水井與注水井之水頭差為 2.57m，延散係數則採用廣延散係數 A_{ij} (macrodispersivity) 乘以流速求得即 $D_{ij} = A_{ij} \times q_i$ ，模擬時垂向延散係數依 Yeh et al.(1995)以水平向延散係數取代，模式輸入值如表 2 所述，由於推估廣延散係數時定下均勻流假設與試驗場地之流況不同，模式之參數亦需以試誤法調整，邊界條間則需以注入井為不透水邊界以得到較佳之模擬結果。模擬之結果與試驗結果如圖 6 所示。

表 2 本研究模式所需輸入值

| | |
|------------------------------------|---|
| 模擬區域 | 7 × 7 × 1.65 (m) |
| 層數 | 11 |
| 各層厚度 | 0.15 (m) |
| 網格大小 | 0.2 × 0.2 × 0.05 (m) |
| 起始濃度 | 11 mg/L |
| 注入濃度 | 230 mg/L |
| 模擬時距 | 0.5hr |
| 總模擬時間 | 50hr |
| 導水係數 K | 詳述於報告中 |
| 抽水井與注入井水頭差 $H_{INJ} - H_{WITH}$ | 2.57m |
| 各層地下水流速 U_i | $U_i = K_i \times \Delta H$ (需再微調) |
| 延散係數 D_i | $D_i = A_i \times U_i$ (Gelhar and Axness, 1983) |
| 邊界條件 | 詳述於報告中 |

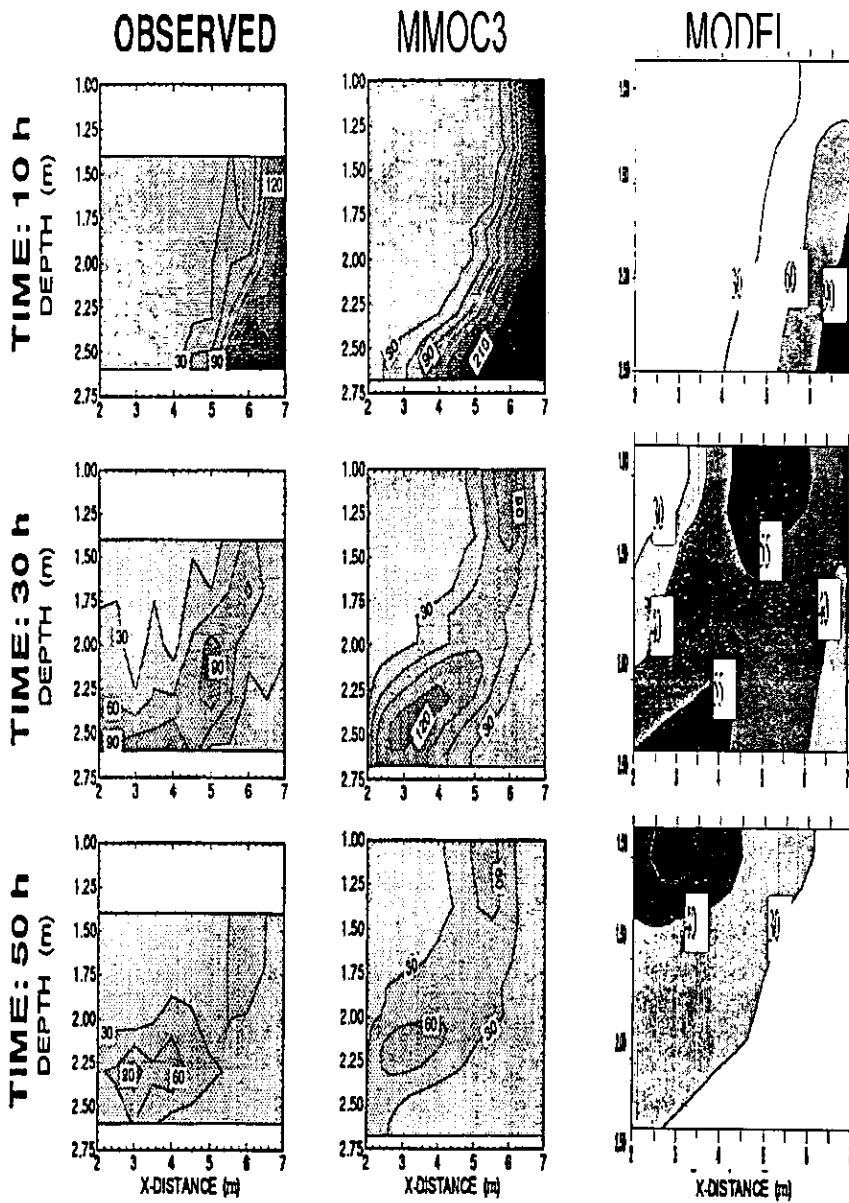


圖 6 試驗結果(OBSERVED)與 MMOC3 模擬結果及本模式模擬結果
(沿 $y=3.2\text{m}$)

(4)具明顯密度變化界面多含水層系統地下水(海水入侵)模式之發展

本年度，地下水質量傳輸模式發展之另一項工作是，再發展一套具明顯密度變化界面之多含水層系統地下水模式，以進行海水入侵模擬。本年度，模式之雛型已完成建立，並利用具解析解之簡單案例，初步驗證模式之正確性。

為了驗證具明顯密度變化模式之計算能力，本研究選擇 Wilson and Sa Da Costa (1982) 文中之一維具明顯密度變化解析解與模式計算結果比對。Wilson and Sa Da Costa(1982)除了以有限元素法 (Finite Element Method) 提出一個變動邊界的趾部追蹤(toe tracking)以模擬兩不同密度且具明顯界面(即海水入侵)之界面之變化外，文中並由連續方程式及動力邊界條件及運動邊界條件，採用 Dupuit approximation，推導出一維均質 (即 $K_f = K_s = \text{constant}$) 拘限含水層之界面暫態解析解。

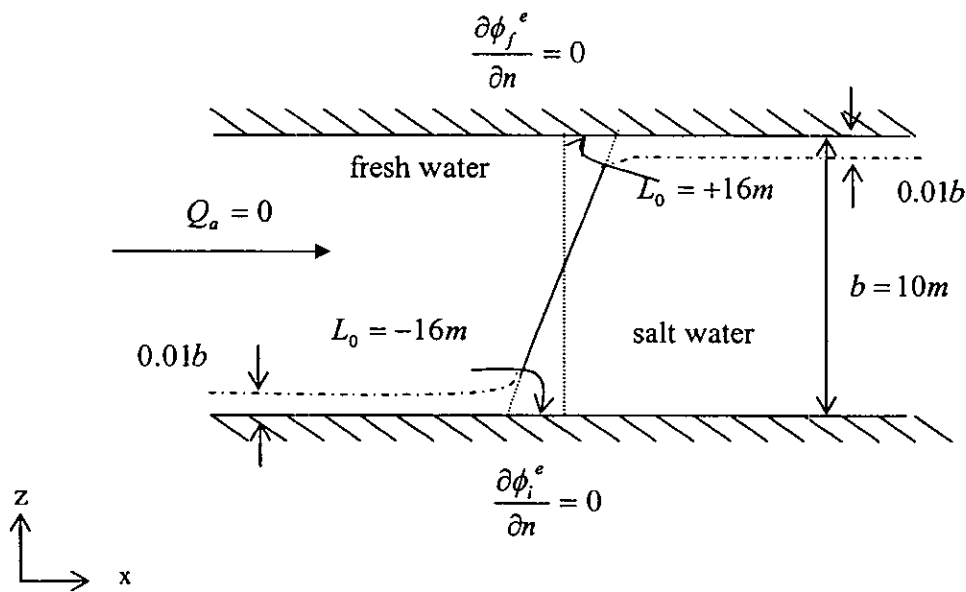


圖 7 數值模擬區域示意圖

在模擬時給定 x 方向網格點大小 $\Delta x = 4m$ ， x 方向網格點數 $m = 25$ (以 $\Delta y = 1m$ ， y 方向網格點數 $n = 3$ 模擬二維問題，邊界以 $\frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} = 0$ 處理之。)，含水層厚度 $b = B = 10m$ ，邊界條件 (boundary condition) 為：左邊界給定水頭條件 $\phi_f = 5.125m$ 、 $\phi_s = 4.875m$ 。至於上下邊界：在模式一(見圖 3-16)、求解淡水水頭，為不透水邊界；在模式二(見圖 3-16)、求解海水部分即海水扣除淡水作用水頭值，上邊界為薄膜層之自由液面邊界條件 (即海水、淡水交界面之邊界條件)，薄膜的厚度如圖 7 所示為 $0.01B = 0.1m$ 。流量值為零($Q_a = 0$)，時距 $\Delta t = 1day$ ，模擬總時間為 20days。圖 8 為含水層進行海水入侵考慮薄膜之數值模擬結果。

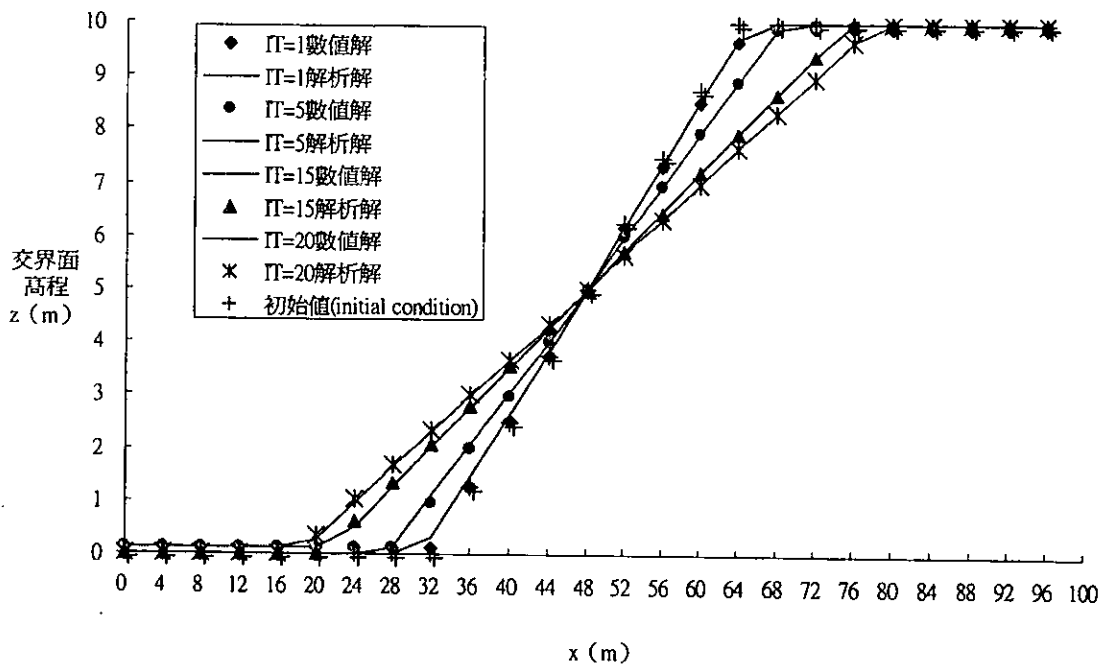


圖 8 模擬結果與解析解比較圖

地下水質量傳輸現地試驗

(1) 垂直水力傳導係數試驗

距離地表不同深度之非等向水力傳導係數值，如表 3 所示。

表 3 非等向水力傳導係數值

| 地表下深度 (m) | Kr (m/s) | Kz (m/s) |
|-----------|----------|----------|
| 6.0 | 6.30E-04 | 5.20E-04 |
| 7.0 | 5.19E-04 | 4.29E-04 |
| 8.0 | 5.94E-04 | 4.91E-04 |
| 9.0 | 4.37E-04 | 3.61E-04 |
| 10.0 | 2.38E-05 | 1.96E-05 |
| 11.0 | 6.85E-05 | 5.66E-05 |
| 12.0 | 8.68E-06 | 7.17E-06 |
| 13.0 | 3.80E-04 | 3.14E-04 |
| 14.0 | 3.09E-04 | 2.55E-04 |

由表 3 可知，在地表下深度 6.0 m 至 9.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 3.61E-04 至 5.20E-04 (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層 (Bear, 1968)。在地表下深度 10.0m 至 12.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 1.96E-05 至 7.17E-06 (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂、粘土混合層。在地表下深度 13.0 m 至 14.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 2.25E-04 至 3.14E-04 (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層。本研究場址地質構造大部分由粉砂、泥砂混合層所組成，在地表下深度 10.0 m 至 12.0 m 中含有質地顆粒較細的土壤材料（如：黏土），所以水力傳導性在這段地層中顯得較小。

(2)非等向水文參數試驗分析

本研究於國立雲林科技大學地下水位監測場址進行抽水試驗，並改良 Neuman 提出的非等向模型 (Neuman et al.,1984)。在現地以多口監測井（多於 4 口井）進行抽水試驗，利用最小二乘法最佳化的結果其所獲得的現地資訊，應較 Neuman (Neuman et al.,1984) 所提

出之 4 口井方式，更能代表現地含水層的水力特性。在 Neuman 提出的模型中 (Neuman et al.,1984)，抽水井的位置不在座標系統的原點，這樣的假設是錯誤的，因為並不符合 Theis' solution 的原始控制方程式邊界條件的特性。因此，本研究是以抽水井為座標原點及其它監測井不在原點處的佈置方式，所組成的座標系統，完全符合 Theis' solution 邊界條件的特性下，進行現地抽水試驗分析。在 Neuman 所提出之 4 口井方式 (Neuman et al.,1984)，利用繪製洩降 (s) ~ 時間 (t) 的半對數曲線圖，求得現地含水層特性，但僅能進行一次分析而無法進行重覆疊代修正偏差；本研究利用繪製洩降 (s) ~ 距離平方與時間 (r^2/t_D) 的雙對數曲線圖，能進行重覆分析以降低計算誤差，提高分析結果精度，獲得較符合現地含水層的特性。本研究得到非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)。非等向主流方向水力傳導係數 (K_α) 與側流方向水力傳導係數 (K_β) 分別為 $2.21E-05$ (m/s) 與 $1.04E-05$ (m/s)，其值介於粉砂、泥沙標準水力傳導係數值 $1E-5 \sim 6E-5$ (m/s) 間。等向流通係數 T_e 為 0.00030 (m^2/s)，儲水係數 S 約為 0.00230 ，含水層非等向主流方向與世界橫麥卡脫方格座標 (UTM 座標) 的 X 軸，所夾的角度為 36 度。由計算分析所得到的偏差平方總和， Δ^2 為 $4.10E-10$ 趨於極小值，可證明本研究所得各項現地水力特性可以信任。

(3)地電阻 3-D 水文地質影像分析

本研究於國立雲林科技大學地下水位監測場址進行地電阻 3-D 水文地質影像分析。由非抽水期之 3-D 探測結果，可知淺部地層的電阻率較不均質，0-3.5m 深之電阻率 $20-70\Omega\cdot m$ 呈局部分離塊狀高區。3.5-7.5m 深之電阻率在 $25-70\Omega\cdot m$ 。7.5-12.2m 深為 $35-70\Omega\cdot m$ 高電阻率區分為二塊東北-西南為電阻率較低的區域。12.2-17.5m 深之電阻

率 20-55 Ω -m，高電阻率塊狀分布在東南與西北二角。17.5-23.6 公尺電阻率 20-50 Ω -m 且大多在 35-50 Ω -m 之間，似較近均質。在抽水期中之 3-D 探測結果，可知淺部地層之不均質更明顯，抽水時之局部電阻率略為升高或降低，都在逆推解釋誤差範圍內，電阻率改變不明顯。以 BH05 持續定量抽水的第三日所測得的電阻率構造水平切面，顯示電阻率大半高於 60 Ω -m。尤其是從 3.5 至 17.5 公尺深。此結果與 2003 年 5 月及 7 月的施測結果完全不同。電阻率變高，構造形貌也完全改變。是否受漏電或其他因素所致需作對照實驗研判。由於施測後數日適逢颱風大雨，整體情況改變，以致不得驗證。

(4)砂箱試驗

在探討砂箱之定水頭方面，因為 7 號觀測井為全開孔水井，所以 7 號觀測井中的水位變化比較接近砂箱中的水位變化。在砂箱試驗第 11500 秒後，7 號觀測井的水位開始穩定在 95.3 cm。1 號至 6 號觀測井的穩定水位分別較 7 號觀測井的穩定水位低了 0.9 公分、1.0 公分、0.5 公分、0.2 公分、0.3 公分及 0.4 公分，可知 1 號觀測井至 6 號觀測井與 7 號觀測井的穩地水位相差不超過 1 公分，因此，可視砂箱進行污染傳輸試驗期間，砂箱中之水位保持定水頭，且 1 號觀測井至 6 號觀測井的水位較 7 號觀測井的水位為低，是因為 1 號觀測井至 6 號觀測井皆不是全開孔的水井，因此會造成一些水頭損失在砂箱中。

經由砂箱試驗的水平衡方程式，可知總輸入砂箱水量與總輸出砂箱水量的差值為 0.194 公升。在砂箱在試驗期間，砂箱中的水量增加了 0.543 公升。以上的結果表示供水槽的累積供水量少了 0.349 公升，（即 0.194 公升減去 0.543 公升），因為放流水閥的水量有利用量筒去量測瞬間流量，因此放流水閥的累積水量比較沒有問題。但是，供水槽所接的水錶 1 及水錶 2 會因為流速太小，產生推不動水錶之讀數計的情況，所以有可能在此造成供水槽的累積水量短少 0.349 公升。亦

因為短少的水量小於 0.5 公升，因此，本次汙染傳輸砂箱試驗可視為達到水平衡。

砂箱底盤上端 10 公分、50 公分及 90 公分位置所設置的導電度計分別在試驗累積時間 65 分鐘 (3900 秒)、315 分鐘 (即 18900 秒) 及 570 分鐘 (即 34200 秒) 所對應的無因次濃度 ($\frac{C-C_0}{C_{MAX}-C_0}$) 為 0.4109、0.5466 及 0.5021，且井 7-1、井 7-3 及井 7-5 導電度計分別設置在注入口以上 10 公分、50 公分及 90 公分處。考慮在試驗期間，水在砂箱裡石英砂之孔隙中的流速為 2.628×10^{-3} (cm/sec)，將以上的條件帶入式 (4.54)，即求得注水口以上 10 公分，50 公分及 90 公分處的延散係數分別為 1.569×10^{-4} (cm²/sec)、 2.114×10^{-4} (cm²/sec) 及 2.365×10^{-4} (cm²/sec)，且以上延散係數除以砂箱石英砂孔隙中的流速 (即 2.628×10^{-3} (cm/sec)) 可分別得到的延散度為 0.06 公分、0.08 公分、0.09 公分，本研究亦可得到 10 公分，50 公分及 90 公分處的遲滯因子皆為 1。

本研究將砂箱注水口以上 10 公分、50 公分及 90 公分的延散度經過線性迴歸，可得砂箱中延散度與延散尺度的關係式為 $\alpha=0.015X+0.0467$ ， $r^2=0.9643$ ，在延散度與延散尺度關係式的截距為 0.0467 公分，可視為石英砂在本次砂箱尺度的延散度。本研究在砂箱試驗所得到的延散度，與蘇苗彬及王智澤 (1992) 提出延散度值經由比較得知，本研究所得之延散度值相當合理。

(5) 汙染傳輸試驗

本研究將距離注射井 BH02 分別為 1.206 公尺、4.228 公尺及 7.100 公尺的 BH10、BH04 及 BH11 觀測井在 5 個距離地表不同深度的延散度平均值進行線性迴歸分析，可得延散度與延散尺度關係式為 $y = 2.6549x - 4.1136$ ，其中 y 表示延散度，單位為公尺，x 表示延散尺度，單位為公尺。經過現地的汙染傳輸試驗，可得觀測井 BH02、BH10、BH04 及 BH11 大部分的遲滯係數都非常接近 1。

五、後續工作

地下水質量傳輸模式之發展

第三年度，地下水質量傳輸模式發展研究子題，擬進行之工作項目如下所述：

1. 完成具明顯密度變化(海水入侵)交介面之多含水層系統地下水模式之發展。
2. 應用濁水溪沖積扇觀測之相關資料，進行海水入侵現地模擬。
3. 利用本團隊發展完成之地下水質量傳輸模式，模擬雲科大相關試驗研究資料，以提供國內未來試驗研究之參考。
4. 完成模式操作使用手冊。
5. 配合主辦單位辦理教育訓練，將本團隊發展之模式，技術轉移給水利相關單位人員使用。

地下水質量傳輸現地試驗

第三年主要持續現地示蹤劑試驗，以驗證第二年之試驗結果之正確性，並持續監測地下水水質變化，避免試驗造成環境污染。且統同三年之結果提出台灣本地性之地下水水流及質量傳輸之地質參數模型。

ABSTRACT

Since recently groundwater pumping discharge has been much greater than recharge in Taiwan, land subsidence and groundwater alkalization in some areas occurred. Besides, industry chemical solution together with the breaking off of underground pipe lines and oil tanks further-more cause groundwater pollution in Taiwan. Because of this, the Environmental Protection Administration (EPA) starts to collect funds and work on groundwater pollution remedy according to “the regulation of soil and groundwater pollutions remedy”. Moreover, through the project of “groundwater observation network in Taiwan”, Water Resources Agency (WRA) tests the groundwater quality constantly. However, there is still no domestically developed groundwater mass transport model for the use of simulation of groundwater pollution in Taiwan. Therefore, WRA initiates the present research project of “the development of groundwater mass transport model and in situ experiment.

The goals of the above mentioned research project are (a) to develop domestic mass transport models which suit for both large and small areas of multi-layer groundwater, (b) to estimate parameters of groundwater mass transport in Taiwan through in situ and sand box experiments. The results of this research project, hopefully, can provide WRA references of groundwater pumping control and pollution remedy.

The categories of this research project are divided into (a) the development of groundwater mass transport models, and (b) the in situ and sand box experiments. This is a three-year project; the content of works for each year are as follows:

1. The first year: (a) the development and test of a multi-layer groundwater mass transport model, (b) the set-up of the test and observation field of groundwater flow and mass transport.
2. The second year: (a) the application of the first-year model for the simulation of field groundwater mass transport, (b) the development and test of another

groundwater mass transport model with sharp interface, (c) the groundwater tracer test, and (d) the preparation of sand box experiment.

3. The third year: (a) the use of the second-year model for the simulation of salt water intrusion, (b) the sand box experiment, (c) parameters of groundwater mass transport in Taiwan.

Keyword: Groundwater, Mass-transport model, Multi-layer groundwater, in situ experiment

結論與建議

一、結論

地下水質量傳輸模式之發展

- (一)為分析第一年相關水文地質參數試驗資料，本研究團隊利用自行發展完成之地下水質量傳輸模式，配合上年度雲科大試驗場址之洩降資料，進行反向推算試驗場址之水力傳導係數(hydraulic conductivity)分佈。結果顯示試驗場址之水力傳導係數具有非均質性，其值介於 1×10^{-5} m/min \sim 7×10^{-5} m/min 之間。
- (二)為了測試與驗證溶質地下水質量傳輸模式，具有水平分區以及垂直分層之計算功能。首先利用單層均質土層案例，測試模式水平分區之計算能力。再利用多層非均質土層案例，進一步測試模式水平分區與垂直分層之計算功能。結果顯示，本研究團隊所發展之地下水質量傳輸模式，可利用水平分區以及垂直分層技巧，模擬污染物在非均質土層之傳輸現象。
- (三)本研究選用 Yeh et al. (1995)於 1992 年在南卡羅萊那(South Carolina)州喬治城(George Town)所進行之氯化鉀(KCl)非有機物傳輸試驗，作為模式現地模擬之測試案例。結果顯示，本研究團隊所發展之地下水質量傳輸模式，可合理地模擬現地污染物之傳輸現象。
- (四)地下水質量傳輸模式之發展研究子題，亦完成具明顯密度變化界面多含水層系統地下水模式之理論推導，以及模式之建立與初步驗證。所發展之具明顯密度變化界面多含水層系統地下水模式，未來可應用於海水入侵模擬。

地下水質量傳輸現地試驗

- (一)在地表下深度 6.0 m 至 9.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $3.61E-04$ 至 $5.20E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層 (Bear, 1968)。在地表下深度 10.0m 至 12.0 m，垂直水力傳導係數範圍

為 $1.96E-05$ 至 $7.17E-06$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂、粘土混合層。在地表下深度 13.0 m 至 14.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $2.25E-04$ 至 $3.14E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層。本研究場址地質構造大部分由粉砂、泥砂混合層所組成，在地表下深度 10.0 m 至 12.0 m 中含有質地顆粒較細的土壤材料（如：黏土），所以水力傳導性在這段地層中顯得較小。

(二)非等向水文參數試驗分析方面，利用 Neuman 分析結果可知，非等向主流方向流通係數 ($T\alpha$) 與側流方向流通係數 ($T\beta$) 分別為 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)，並可以獲得非等向主流方向水力傳導係數 ($K\alpha$) 與側流方向水力傳導係數 ($K\beta$) 分別為 $2.21E-05$ (m/s) 與 $1.04E-05$ (m/s)。

(三)地電阻 3-D 水文地質影像分析方面：

(1) 地電探測結果指出井場之地層之電阻率構造非水平層。電阻率大多在 $20-70\Omega\cdot m$ 之間，具局部塊狀非均質。

(2) 非水平層的電阻率構造，可能意示透水係數構造也非水平層。它將使抽水試驗的洩降錐面為非圓錐狀。實際測出的水位洩降也確是如此。在抽水井(BH04)之 $N28^\circ E$ 方向的 BH07 觀測井所測得洩降較其他方向稍大。而在 3.5-12.2 公尺深的地層電阻率構造在抽水井之對應的東北方向是電阻率較高的地層，二者之關係需進一步探討。

(3) 2004 年 6 月 29 日之地電三維探測資料欠佳，造成分析結果之少許均方根誤差過大，可信度降低。資料欠佳可能因於漏電，也可能是少許電極損壞或是局部電位干擾所致，需作實驗檢查。由於抽水實驗完成後數日連續多日降雨改變井場狀況，使得檢查無法進行。

(四)本研究將砂箱注水口以上 10 公分、50 公分及 90 公分的延散度經過線性迴歸，可得砂箱中延散度與延散尺度的關係式為 $\alpha =$

$0.015X + 0.0467$ ， $r^2 = 0.9643$ ，在延散度與延散尺度關係式的截距為 0.0467 公分，可視為石英砂在本次砂箱尺度的延散度。本研究在砂箱試驗所得到的延散度，與蘇苗彬及王智澤(1992)提出延散度值經由比較得知，本研究所得之延散度值相當合理。

(五)距離地表不同深度的延散度平均值進行線性迴歸分析，可得延散度與延散尺度關係式為 $y = 2.6549x - 4.1136$ ，其中 y 表示延散度，單位為公尺， x 表示延散尺度，單位為公尺。經過現地的污染傳輸試驗，可得遲滯係數都非常接近 1。

二、建議

地下水質量傳輸模式之發展

地下水質量傳輸模式之發展研究子題，建議下年度之工作項目如下所述：

- (一)完成具明顯密度變化(海水入侵)交介面之多含水層系統地下水模式之發展。
- (二)應用濁水溪沖積扇觀測之相關資料，進行海水入侵現地模擬。
- (三)利用本團隊發展完成之地下水質量傳輸模式，模擬雲科大相關試驗研究資料，以提供國內未來試驗研究之參考。
- (四)完成模式操作使用手冊。
- (五)配合主辦單位辦理教育訓練，將本團隊發展之模式，技術轉移給水利相關單位人員使用。

地下水質量傳輸現地試驗

目前針對本研究場址已完成地下水含水層之飽和層水文參數分析。其中，本年度建立非均質非等向水文參數及污染傳輸參數資料，但因本年度工作項目過多且時間有限，因此皆只完成一次試驗分析。可是一次試驗分析往往有被質疑之慮，所以為使資料更具代表性，建議能做重覆試驗，以證明資料的可信度。

地電阻 3-D 技術方面，作對照實驗最好在相同的天氣及水文狀況，以減少各個差異因子，有利於對照比較。

第一章 前言

一、計畫緣起與目的

水資源中有 95% 來自地下水，因此地下水在整個水資源循環中佔有重要的地位，再加上地下水開發成本低及開採不受時間及空間限制，故地下水是一個十分寶貴的水資源。因工商業的發展、生活水準的提升及農牧業的興起，使得部分的地下水遭受污染，且有日趨惡化之勢。當降雨時，落至地表的水分很快滲入土壤中，在土壤中重新分佈向下移動，部分近地表之水分為植物所吸收或因蒸發而損失，部分水分則向土壤之深層移動，在水量多時則有可能進入地下水系統，使得地下水位會逐漸上昇。再者，雨水所挾帶的化學物質或污染物亦會隨著降雨滲入土壤之中，停滯於土壤內或進而滲入地下水，嚴重影響到周遭的水質。

由於地下水在遭受到污染之後會對接觸到該地下水源周遭的居民造成健康上的影響，因此必須進行整治以維護周遭居民的健康福祉。而在進行整治的過程中，所必須考量的因素極廣，包括：場址的地質、水文狀況、污染物特性等。地下水流系統是一個相當複雜的系統，在進行整治時，獲得各個參數相關的資訊越完整越有助於整治的成功率。所以要瞭解地下水流系統複雜的自然現象，以實地觀測最為理想，且對於許多地下水整治所需的參數而言，實地的採樣蒐集可以降低整治計畫中的不確定性。

此外，台灣近年來由於地下水抽用量激增，遠超過地下水補注量，已造成部份地區地層下陷與地下水鹽化。工廠有機溶劑、地下油管與地下油槽破裂造成農地土壤及地下水污染。有鑑於此，環保署依據「土壤及地下水污染整治法」開始徵收土壤及地下水污染整治基金，並著手地下水污染場址整治工作。此外，經濟部水利署辦理「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，定期進行地下水水質檢測工作，瞭解地下水水質污染概

況。惟目前國內尚無一套由國人自行開發之地下水質量傳輸模式以資應用，因此水利署爰辦理「地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究」計畫，除了發展一套由國人自行研發適合大區域及小範圍之地下水質量傳輸模式外，並進行地下水污染現地試驗，輔以實驗室砂箱試驗，提出地下水流及污染物質量傳輸之相關地質參數。

二、工作項目與內容

「地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究」計畫可分為模式發展與現地試驗研究兩大部分。地下水質量傳輸模式之發展部分，主要目的係發展一套由國人自行研發適合大區域及小範圍模擬之多含水層系統地下水質量傳輸模式，並藉由地下水污染傳輸現地試驗，輔以實驗室砂箱試驗，推估地下水及污染物傳輸等相關地質參數，以提供現地模擬使用。本研究所發展之地下水質量傳輸模式除可以作為地下水污染模擬工具外，現地模擬結果亦可以提供 貴署管制地下水抽取與整治地下水污染之參考。

由於工作內容相當龐大，本研究共分三年逐步實施。第一年工作內容著重在地下水質量傳輸數值模式雛型之建立與測試，以及現地水文地質參數試驗；第二年工作重點在於地下水質量傳輸模式之初步應用與功能改進，以及質量傳輸現地實驗(污染傳輸參數檢定)；第三年的工作項目則在於地下水質量傳輸模式的應用，並以現地地下水水質採樣分析資料加以驗證。而地下水質量傳輸現地試驗方面，則將持續第二年現場污染傳輸試驗工作，以確立長時間下受污染的地下含水層其污染物擴散情形。依原招標文件所載，分年之計畫工作項目，如下所述：

第一年計畫工作項目

地下水質量傳輸模式之發展

1. 評估及選用適合模擬大區域及小範圍之多含水層系統地下水流計算模式。
2. 評估及選用能同時準確計算擴散(diffusion)、對流(advection)以及延散(dispersion)等物理現象之數值方法。
3. 發展適合大區域及小範圍模擬之多含水層系統地下水質量傳輸數值計算模式。

地下水質量傳輸現地試驗

1. 試驗場址之評估。
2. 地下水監測井之設置。
3. 土壤物性分析。
4. 含水層試驗及水文地質參數檢定。

第二年計畫工作項目

地下水質量傳輸模式之發展

1. 將第一年發展之多含水層系統地下水溶質質量傳輸模式，選擇一應用地區做現地模擬。
2. 將密度變化效應加入第一年建立之多含水層系統地下水質量傳輸模式，模擬海水入侵問題。

地下水質量傳輸現地試驗

1. 地下水井監測井之增設。
2. 現地示蹤劑試驗。
3. 地下水水質採樣與實驗。
4. 實驗室砂箱試驗及數據分析。

第三年計畫工作項目

地下水質量傳輸模式之發展

應用具密度變化之多含水層系統地下水質量傳輸模式。

地下水質量傳輸現地試驗

1. 繼續現地示蹤劑試驗。
2. 繼續地下水水質採樣與實驗。

三、第一年工作成果概述

第一年計畫，地下水質量傳輸模式發展之工作項目有：(1) 評估及選用適合模擬大區域及小範圍之多含水層系統地下水流計算模式，(2) 評估及選用能同時準確計算擴散(diffusion)、對流(advection)以及延散(dispersion)等物理現象之數值方法，(3) 完成建立適合大區域及小範圍模擬之多含水層系統地下水質量傳輸數值計算模式。地下水質量傳輸現地試驗研究之工作項目有：(1)試驗場址之評估，(2)地下水監測井之設置，(3)土壤物性分析，以及(4)含水層試驗及水文地質參數檢定。以下分別概述工作成果：

地下水質量傳輸模式之發展

1. 地下水質量傳輸模式所需之地下水流模擬，選用本研究團隊所自行開發完成之分層三維地下水流模式。本研究團隊所自行開發之分層三維地下水流模式計算功能的確優於 MODFLOW 模式，不但可以精確地模擬小範圍之複雜地下水流，如部分貫穿抽水井附近以及土層不連續之流況，亦可以模擬大區域之地下水流況，如擬三維地下水流。此外，此分層三維地下水流模式與 MODFLOW 同樣採用層的概念來建構，所以較 FEMWATER 簡單且有效率。

2. 求解移流與延散作用之數值方法，本研究選用有限解析法。有限解析法乃利用局部解析解建構而成，所以具有自動上風法之功能，同時適合移流與延散作用之求解，且不會產生數值震盪，對於複雜問題之計算具有穩定收斂之特性。有限解析法可以在卡式座標(Cartesian coordinates)下處理不規則邊界問題，且有限解析法的精確度較有限差分法佳，建構方式則與有限差分法相同，較有限元素法簡單且容易擴充。
3. 三維地下水質量傳輸模式之建立，研究中將污染物濃度量拆解為水平(垂直積分平均)值與垂直變量之和，再利用分層垂向積分技巧，將三維地下水質量傳輸方程式，進一步拆解為水平二維變量(垂直積分平均)的地下水質量傳輸方程式以及垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式。水平二維變量(垂直積分平均)的地下水質量傳輸方程式，利用本研究中所選用求解移流延散作用之有限解析法求解。至於垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，則利用解析解來求解。
4. 地下水質量傳輸模式完成程式之撰寫與編輯，並利用具有解析解之案例，驗證模式正確性。

地下水質量傳輸現地試驗研究

1. 完成國立雲林科技大學校園現地實驗場址之建立，確定本研究場址於15.65公尺內之土壤結構，大致為砂質壤土所組成。
2. 建立本研究場址之土壤物性分析、含水層試驗、水文地質參數檢定(包括抽水試驗5次、回水試驗1次及微水試驗3組)，水文地質參數檢定方面，水力傳導係數(k)方面，介於 $3.33E-6 \sim 9.03E-5$ m/sec之間；儲水係數(S)方面，介於 $4.00E-6 \sim 9.80E-3$ 之間。而水文地質參數變動大之原因，在於抽水時間加長、影響半徑加大，更表示分析範圍內之土壤特性更加複雜，顯示出土壤之非均質性。

3. 對於交通大學模擬分層三維地下水流模式模擬所需輸入資料，依本研究結論可得，土壤密度為 2.1~2.3；初始孔隙率為 30~50%；水力傳導係數為 0.002~0.005 m/min；比貯水係數為 $7E-7 \sim 5.8E-4$ m⁻¹。
4. 完成增設兩口監測井。

四、本年度主要工作項目及內容

依據原計畫，本年度擬增設兩口地下水觀測井。然而，經計畫審查委員指出，第一年試驗資料仍有疑慮有待進一步分析檢討，且目前試驗場址內已有之十一口地下水觀測井(原有九口觀測井，第一年增設兩口)，應足夠提供本年度試驗使用。經檢討後，本研究團隊同意委員之建議，擬於本年度暫緩增設兩口地下水觀測井，視本年度之試驗結果，再評估是否應於第三年增設地下水觀測井。此外，為使計畫更能符合預期目標，與主辦單位溝通後，並經計畫審查委員認可，本年度之工作項目與原招標文件所載有所變更，其主要工作項目與內容如下所述：

地下水質量傳輸模式之發展

1. 試驗結果分析：分析雲林科技大學第一年完成之相關水文地質參數試驗資料。
2. 模式之驗證：繼續驗證與測試水平分區，垂直分層之質量傳輸計算功能。
3. 模式之應用：將第一年發展之多含水層系統地下水溶質質量傳輸模式，選擇應用地區(國內外實測資料)做現地模擬，以展示模式之正確性與實用性。
4. 模式之發展：進一步建立具明顯交介面(sharp interface)之密度變化多含水層系統地下水質量傳輸模式，以模擬海水入侵。

地下水質量傳輸現地試驗

1. 垂直水力傳導係數試驗：了解場址水文地質參數，在垂直方向(垂直地表方向)的變化。
2. 非等向水文參數分析：試提出試驗場址水文地質參數在三度空間的非等向分佈資料。
3. 地電阻 3-D 水文地質影像分析：嘗試建立 3-D 水文地質影像分析技術，可以應用於大地區水文地質圖建立及水文地質參數分析。
4. 砂箱試驗：利用溶於水之物質，於實驗室中利用砂箱進行污染傳輸試驗，嘗試了解在近似單向流場中污染物傳輸相關參數。
5. 污染傳輸試驗：利用溶於水之物質，進行地下水中污染傳輸試驗，以做為試驗場址污染傳輸延散係數檢定之參考。

第二章 地下水質量傳輸相關研究文獻回顧

本章分別文獻回顧地下水流計算、地下水質量傳輸計算以及地下水質量傳輸相關試驗研究。

一、地下水流計算

由於大自然之沉積作用，使得區域性地下水流域通常由一連串導水性質良好之含水層夾雜導水性質差之阻水層所形成，此種層狀系統稱為多含水層系統(multi-aquifers system)。一般而言，多含水層系統之地下水為三維流動狀況，且現今已有許多三維地下水流模式(three-dimensional groundwater model)可供模擬使用，如FE3DGW(Gupta(1984))、FLOW3D、MODFLOW與FEMWATER等。但是由於區域性地下水流域中，水平方向之延展距離遠大於垂直方向之厚度，且相鄰阻水層與含水層間之導水性質差異甚大，以及考量使用直接三維模擬計算量太大等原因，乃有擬三維水流概念(quasi three-dimensional concept)之提出，也就是將阻水層與含水層中之水流分別假設為垂直流與水平流，而阻水層與含水層再以兩者間之滲流量加以耦合(Hantush(1960))。如此三維水流控制方程式，於含水層中被簡化為水平二維，而阻水層中則被簡化為垂向一維，將大大的減少計算時間。利用擬三維水流概念模擬多含水層系統之地下水流相當多，如 Berdehoft and Pinder(1970)、Chorley and Frind(1978)、Neumann et al.(1982)與已廣泛被使用之地下水模擬軟體 MODFLOW。此外，對於阻水層與含水層間之滲流量推估法共有兩種，第一種方法為藉由求解阻水層一維垂直水流方程式來估計滲流量，即考慮所謂阻水層之貯蓄效應(aquitard storage effect)(見 Hantush(1960))，另一種方法則為假設滲流量與阻水層相鄰上、下含水層之水頭差(hydraulic head)成正

比，也就是忽略阻水層貯蓄效應(Polubarinov-Kochina(1962))。

Neuman and Witherspon(1969)曾以雙含水層單井抽水之案例，對擬三維與三維水流概念之差異加以探討，並指出當相鄰阻水層與含水層間之滲透率(permeability)相差兩個量階以上，其誤差小於 5%。雖然擬三維水流概念對區域性之地下水模擬有不錯之結果，然而對於如抽水井附近以及土層不連續之局部三維水流流況則無法模擬，則必須採用三維水流模式。由上述可知，一套好的地下水流計算方法，需同時適用於區域與局部之地下水模擬。

本研究團隊先後於農委會、水利署、國科會等支助下，進行多年的大區域地下水超抽導致地層下陷計算模式研究，在國立交通大學土木系楊錦釗教授、國立台灣大學土木系黃良雄教授以及國立交通大學防災工程研究中心蔡東霖研究助理教授共同努力下，發展出一套嶄新的地下水流計算模式。模式中提出分層三維水流概念(layered-based three-dimensional concept)，即首先依據土壤之導水性質，將土體作垂直分層或虛擬分層，在假設每個土層之孔隙水壓於垂向深度上皆為二次多項式函數(quadratic polynomial function)分布，引用分層垂向積分(vertical integration)技巧，層與層間之垂直介面邊界，再以孔隙水壓及水流通量連續之條件加以連接，並利用有限解析法(finite analytic method)來建構模式。此外，模式中進一步根據土層導水性質在水平方向之不連續性，對模擬區域作水平區域拆解(domain decomposition)，且區與區間之介面亦以孔隙水壓及水流通量連續之條件加以連接。

本研究團隊所自行研發之地下水流模式，已完成多項測試(蔡東霖，民國 87 年、民國 88 年、民國 90 年)，並應用至屏東平原(黃良雄、楊錦釗，民國 88 年)與濁水溪沖積扇(黃良雄、楊錦釗，民國 87 年、民國 89 年、民國 90 年、民國 91 年)等地之實地模擬。此外，本

研究團隊所自行研發之地下水流模式(此模式亦具有計算地層下陷之功能)已與地理資訊系統相互結合。模擬時所需輸入、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,藉由地理資訊系統之整合,使用者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該模式。

二、地下水質量傳輸計算

(一) 不具密度變化

地下水質量傳輸方程式(mass transport equation)可表示為

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + \frac{q_s}{n} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad i, j = x, y, z \quad (2.1)$$

其中, C 代表污染物之濃度(concentration)。式(2.1)等號右邊第一項表示由濃度梯度產生之分子擴散(molecular diffusion)及流體運動與複雜孔隙結構作用所產生之機械延散(mechanical dispersion) (Freeze and Cherry 1979), D_{ij} 為延散係數張量(dispersion coefficient tensor)。式(2.1)等號右邊第二項表示污染物由流體流速帶動所產生之移流或對流(advection or convection)現象, u_i 為地下水之流速, 可由水流方程式(flow equation)計算水頭(hydraulic head)分布, 再由達西定律(Darcy's law)求得。式(2.1)等號右邊第三項為源流項(sink or source), 表示加入水體之污染量。式(2.1)等號右邊第四項則為化學或生物作用所造成之源流項。

在化學或生物作用所造成之源流項(式(2.1)等號右邊第四項)中, 污染物與土壤間之吸附(sorption)與解附(desorption)以及離子交換(ion exchange)等作用, 可以引用遲滯因子(R_d , retardation factor)來表示 (Zheng and Bennett, 1995); 此外, 污染物之放射性衰減(radioactive

decay)與生物分解(biodegradation)以及水解(hydrolysis)等不可逆程序(irreversible processes)，則可以應用一階不可逆作用(first-order irreversible reaction)概念來表示(Zheng and Bennett, 1995)。綜合上述，式(2.1)可進一步表示為

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + \frac{q_s}{n} C_s - \lambda C \quad i, j = x, y, z \quad (2.2)$$

其中， R_d 為遲滯係數(retardation factor)， λ 為一階比例常數(first-order rate constant)。

式(2.2)所表示之地下水質量傳輸方程式(mass transport equation)僅考慮一種物質種類(species)之傳輸現象，若同時考慮數種物質時則需耦合求解數個地下水質量傳輸方程式(Yeh and Tripathi, 1989)。另外，污染物依溶水特性，可分為可溶性(miscible)與非溶性(immiscible)兩種。其中非溶性污染物又可分為較水重之非溶性液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)與較水輕之非溶性液體(light non-aqueous phase liquid, LNAPL)，模擬非溶性之污染物傳輸則需應用多相流(multi-phase flows)之概念(Parker, 1989)。此外，可溶性污染物傳輸若考慮具密度變化效應時，則可應用於海水入侵等問題，如 Aderson et al. (1988)、Bush(1988)、Voss and Souza(1987)與 Huyakorn et al.(1987)。

一般而言，移流與延散乃是污染物在地下水傳輸中兩種最重要的機制，因此式(2.2)又稱為移流延散方程式(advective-dispersive equation)。式(2.2)可以應用數學解析解(analytic solution)或數值方法(numerical method)求解。因為數學解析解只適用於簡化之問題，所以數值方法已被廣泛地應用於移流延散方程式之求解。移流傳輸機制在數學上屬於雙曲線型(hyperbolic type)偏微分方程式，延散傳輸機制則

屬於拋物線型(parabolic type)偏微分方程式。一般而言，尤拉法(Eulerian methods)較適合求解延散作用，拉格蘭奇法(Lagrangian methods)較適合求解移流作用，結合兩者之長處乃有混合尤拉-拉格蘭奇法(mixed Eulerian-Lagrangian methods)之提出。

有限差分法(finite difference method)、有限元素法(finite element method)以及有限解析法(finite analytic method)等屬於尤拉法。利用有限差分法所建構之地下水質量傳輸模式，有如 VS2DT(Healy, 1990)、FTWORK(Faust et al., 1990)與 MT3D(Zheng, 1990)等，利用有限元素法所建構之地下水質量傳輸模式，則有如 SUTRA(Voss, 1984)、FEMWAST(Yeh and Ward, 1981)與 CFEST(Gupta et al., 1987)等。Tsai et al. (1995)則利用有限解析法求解地下水質量傳輸問題。特性法(method of characteristics)屬於拉格蘭奇法，利用特性法所建構之模式，則有如 MT3D(Zheng, 1990, 1992)。此外，利用混合尤拉-拉格蘭奇法所建構之模式，有如 3DLEWAST(Yeh, 1991)、MOC DENSE(Sanford and Konikow, 1985)與 BIOPLUME II(Rifai et al., 1988)等。

(二)具明顯密度變化交界面

台灣地區四面環海，主要可利用的水資源來自降水、河水及地下水，因為地下水具有取得容易、水溫變化小、水質穩定三大優點；且其開發技術成熟，取用容易，而使用成本僅須負擔抽水機電費遠較使用地面水低廉，成為主要的取水來源之一。近年來沿海地區人口增加，農、工及養殖業蓬勃發展，隨之用水量急劇增加，在地面水供應不足情況下，居民開始長期抽取地下水。而地下水過度抽取，造成地層下陷，使得排水不良、海水倒灌、海水入侵、地下水鹽化、土壤鹽化…等環境問題相繼浮現，居民除飽受淹水之苦外亦危害農漁業環

境。此種情形在雲林沿海及屏東平原一帶較為嚴重。並且，含水層一旦遭到海水入侵，往往無法恢復，即或能以人工補助或其他方法予以恢復，費用所需甚鉅，宜未雨綢繆。

一般海水入侵 (Saltwater intrusion) 方式約可分為兩種：一為海水由海岸線入侵，另一為地面溢淹海水下滲。本研究主要探討海水入侵方式屬於前者，海水由海岸線入侵。

海水入侵為研究在同一含水層區域 (Aquifer domain) 中兩種不同密度液體 (海水與淡水) 相互作用的情形，主要在求出兩種不同密度液體間交界區 (Intersection zone) 的位置，以了解海水入侵範圍。在以往文獻上，探討海水由海岸線入侵之研究方法約可分成兩大類：一為假設海水與淡水為不可相溶混液體，即將海水與淡水間交界區假設成一個傾斜明顯的交界面 (sharp interface)，以地下水流方程式及交界面方程式解出交界面位置，如 Jacobs and Schmorak, (1960); Bear(1979); Essaid (1990) 等。此方法特點為效率高，較易驗證，相當適合實際應用；一為假設海水與淡水可以相混，且由於水力延散影響 (effects of hydrodynamic dispersion) 交界區可以視為一個密度漸變的過度帶 (transition zone)，利用地下水流方程式及污染傳輸方程式以數值方法模擬出地下水中鹽份濃度變化，如 Voss and Souza(1987); Pinder and Cooper(1970); Lee and Cheng(1974); Segol and Pinder(1976); Huyakorn and Taylor(1976)等所採用，此種方式之計算較繁雜，且需額外之地質資料如擴散係數 (diffusion coefficient)。因此本研究採用具明顯交界面之分析方法以模擬海水入侵。

理論分析方面，Badon-Ghyben (1888) 首先提出此假設，在海水為靜止情況下以靜力平衡觀念解得交界面位置位於海平面下約40倍該處地下水水位高出海平面的差距。此一假設經德國 Herzberg (1901) 證實且應用於衛生工程，後稱此為「蓋本-赫茲伯格方程式」

(Ghyben–Herzberg equation)。Hubber (1940) 根據動力原理加以分析，採用上述假設且引入勢能觀念，並忽略地下水緩慢流速之速度水頭條件以交界面上任一點壓力相等，推導出交界面位置與兩種液體勢能有關的「侯伯特方程式」(Hubbert equation)，由此推得之交界面位置較蓋本–赫茲伯格所推得者為深，與實際情況較為相符。

在實驗方面，Rumer and Haleman (1963) 以砂箱模型模擬拘限含水層遭受海水入侵並指出交界面擴散現象與海水入侵長度相比之下可忽略。而 Bear and Dagon (1964) 以拘限含水層黑蕭模型 (Hale–Shaw model) 實驗，改變淡水流量觀察海水與淡水交界面移動情形以驗證其推導之解析解。此外 Jacobs and Schmorak (1960) 及 Schmorak (1967) 曾在以色列海岸進行此試驗，結果顯示明顯交界面的假設是合理且可被接受的。

在解析解方面，幾乎所有的解析解皆採用杜布假設 (Dupuit assumption) (Bear, 1979) 及固定 (Stationary) 明顯交界面假設，也就是假設海水水頭為一固定值，以簡化複雜的問題，Glover (1964)；Fetter (1972)；Henry (1959)；Bear and Dagon (1964)；Strack (1976)；Columbs (1965) 等皆提出相關研究。其中 Bear and Dagon (1964) 利用上述假設推得突然改變淡水流量之均質等向性拘限含水層之一維解析解，此解析解輔以黑蕭模型作驗證。

另外在數值解方面，有限差分法 (Finite–difference)、有限元素法 (Finite element method) 及邊界積分法 (Boundary integral equation method) 為三種常用之數值方法。Bear and Kapular (1981) 利用有限差分法模擬近海岸一維中間具不滲透層之雙層含水層其交界面移動情形；Essaid (1990) 亦利用擬三維水流概念及有限差分法追蹤交界面位置。Huyakorn (1996) 利用有限元素法模擬二維多層非拘限含水層找尋移動的交界面。Liu et al. (1981) 則使用邊界積分法尋找交界

面位置。

三、地下水質量傳輸相關試驗研究

(一) 現地水文地質參數測定試驗

微水試驗(slug test)及抽水試驗(pumping test)為測定地層水平方向水力傳導參數之良好方法，Bouwer 和 Rice(1976)利用西姆方程式(Thiem equation)來修正微水試驗，使微水試驗可應用在部份貫穿含水層的水井或是全部貫穿含水層的水井中。

微水試驗理論基礎係以西姆方程式(Thiem equation)為依據，假設水井周遭的地下水水位洩降是可忽略不計的，與地下水面上無水流，則其含水層的飽和水力傳導係數 K_h 則可以以下式表示：

$$K_h = \frac{r_e^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_e} \times \frac{1}{t} \times \ln \frac{y_0}{y_t} \quad (2.3)$$

其中 R_e 為水頭差異 y 消失之有效半徑， r_w 為水井中心與未受擾動含水層之間距離， L_e 為水井透水層高度， y_0 為時間等於零時之 y ， y_t 為時間等於 t 之 y ， t 為自 y_0 起算之時間。將儀器所量測到的 y_t 值對應 t 值繪製半對數圖，求得直線斜率為 $\ln(y_0/y)$ ，利用式(2.3)即可求得水平方向之水力傳導係數 K_h 。

抽水試驗於非等向性局限含水層，考慮水平流到井。假設 T_α 和 T_β 是主要傳輸率，並且符合主要座標。更進一步假設 (x, y) 來自於 (α, β) 的 \odot 角。在主要座標系統，決定流動公式如下：

$$T_\alpha \frac{\partial^2 s}{\partial \alpha^2} + T_\beta \frac{\partial^2 s}{\partial \beta^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (2.4)$$

其中 s 為水位洩降量， S 為貯蓄率， t 為時間。

上述之微水試驗及抽水試驗均可測定水平向之水力傳導係數，但

卻無法測得垂直方向之水力傳導係數，因此對於現地水文地質參數模型之完整性仍有不足。垂直流試驗 (Vertical Flow Test)，則應用於垂直方向水力傳導係數之測定，其基本理論主要依據 Zlotnik 和 Ledden(1994,1996)提出之流體環流(Flow recirculation)理論。在穩態下，複雜的地下水流遵守下列的方程式：

$$\frac{K_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + K_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = 0 \quad (2.5)$$

經由微水試驗、抽水試驗以及垂直流試驗，即可建立現地試驗場址水文地質參數三維空間模型。上述三項試驗均須鑿設現地監測井，且試驗時間長。然而，地電阻探測試驗則為非侵入性且適合大範圍之現地試驗，近來亦有部份學者嘗試以電探方式評估水文地質參數。一般而言，地層之電阻率與地層之岩石礦物組成、顆粒大小、岩理及地層含水量、鹽度有關，其中以顆粒大小、含水量及鹽度影響較大，因此利用地層電阻率可研判地層之岩性、含水量及鹽度特性。

直流電阻探測法為電探方法中發展較為成熟的一種，由於探測效果良好，可靠度高，經常應用於淺層及中、深層地層水文特性探測。直流電阻法之基本理論主要是將直流或低頻交替直流電，流經一對電極，假設為電流極 A 及 B 通入地層之中，因電流流經地層建立一電場，另於測區地表設置一對電位極，假設為電位極 M 及 N，經由電位極可測得電場於 M 及 N 間之電位差。利用此電位差與通入地層之電流強度、電極間之相對位置及地層之導電性經由理論推導，可推得電流、電位差與電性參數(厚度與電阻率)關係式。於一電性均質半空間之介質電流極 A、B 通入電流，電位極 M、N 量得之電位差值，可由下式表示：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right) \quad (2.6)$$

其中 ΔV 為電位極間之電位差， ρ 為介質的電阻率， I 為通入地下之電流強度， AM 、 BM 、 AN 及 BN 為電流極至電位極間之距離。

式(2.6)可進一步改寫為

$$\rho = K_a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

其中 $K_a = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)}$ 稱為幾何因子，依電極間相對位置

而定。因此如可測得 ΔV 、 I 及電流極與電位極相對位置即可計算此一均質半空間介質之電阻率。

然而地層實際並非均質之半空間介質，因此依上列式子所算得之電阻率稱為視電阻率，通常無法代表地下各地層之實際電阻率，而是代表在此種電極排列情形下所有電性地層之綜和效應，故欲獲得地下各地層之實際電阻率及厚度須經繁複之資料處理方可。

一維逆推法通常應用於地層之測向變化不大之情況，此情形可將地層視為水平層狀構造，因此於年代較新且構造不複雜的沉積岩區，以一維資料處理大多能滿足需要，且一維資料處理之優點為快速簡單，特別於淺層地層探測上可靠度相當高。

電探法之逆推處理屬於非線性問題，一般使用 Marquardt Method 進行逆推演算，可針對視電阻率及半展距之原始模式，配合已知之井下或地質資料，可準確的逆推求得所需之電性參數。

含水層之電導度及水力傳導係數為數學之假設下，導水係數與橫向電阻存在一解析關係，配合少量井之水力傳導係數、土壤物性等資料，可推算測區之含水層導水係數及水力傳導係數。

一般而言，滲透係數(K)及導電度(σ)存在部份共同之影響因子，若兩者存在線性關係，則求得 σ 值，即可推求K值；若無明顯線性相關性，則可嘗試求得 $K\sigma$ 值，並可利用下式：

$$T_r = K_{calc} \times h = (K_{pump} \sigma) \times R \quad (2.8)$$

其中 T_r 為導水係數(Aquifer Transmissivity)， K_{pump} 為含水層水力傳導係數(Aquifer Hydraulic Conductivity)， K_{calc} 為計算之水力傳導係數(Calculated Hydraulic Conductivity)， R 為橫向電阻(Total Transverse Resistance)， σ 為含水層電導率(Layer Conductivity)， h 為含水層厚度(Layer Thickness)。

假設測區之地質機制和水質不變，井附近地表直流電阻測勘獲得含水層之橫向電阻與電導度，結合已開發井透水試驗所得之水力傳導係數(K_{pump})，統計求得導水係數和橫向電阻之關係式，即可利用地電阻測勘透過上式求出全區之導水係數。

(二) 地下水質量傳輸現地試驗

於污染場址中，欲準確地量測污染物之分佈情況，主要需要依靠現地試驗推估，而最為主要且普遍之方法為現地監測井之追蹤劑試驗及土壤採樣(Cohen and Mercer, 1993; Pankow and Cherry, 1996)。

部份追蹤劑試驗已經逐漸被使用於檢定污染物於流場中之剩餘體積，近來污染源區域之非均質性已被重視，水力傳導係數之變異性、含水量及其他水力特性對污染物之空間分佈均有重要之影響(Jin et al. 1995; Nelson and Brasseau, 1996)。

一般污染傳輸試驗係針對延散度 (Dispersion) 進行推測，其推測方法大致可分為實驗室砂箱試驗、野外強制傳輸，及野外自然傳輸試驗，各項試驗法概述如下：

1.實驗室砂箱試驗

藉由控制各種影響因素，觀察追蹤劑在砂箱這個孔隙介質中產生的貫穿曲線，推求延散度及孔隙流速。

2.野外強制傳輸

野外強制傳輸試驗是利用加壓的方式將追蹤劑從主要的注射井注入含水層中，並在注射井加壓或在觀測井抽水使追蹤劑在含水層加速移動，再經由觀察追蹤劑的濃度對時間的變化關係求得延散度。

3.野外自然傳輸試驗

野外自然傳輸試驗是將追蹤劑投入主要的注射井後，在下游端的觀測井使用自動檢錄器或以採水樣的方式觀察在自然狀況下隨地下水移動造成的濃度消減情況。

第三章 地下水質量傳輸模式之建立、測試與驗證

本章首先說明地下水流模式之選定，地下水流模式可計算地下水流之速度分佈，以提供地下水質量傳輸模擬使用。接下來說明本研究地下水質量傳輸模式建立之理論基礎，包括不具密度變化以及具明顯交介面密度變化(海水入侵模擬)兩種類型之地下水質量傳輸。在說明模式如何建立後，利用簡單的測試案例，定量與定性測試並驗證本研究所發展之地下水質量傳輸模式，以展示模式之正確性。

一、地下水流模式之選定

MODFLOW 模式乃是國內外廣泛被使用的地下水流計算模式。MODFLOW 模式中包含兩種計算模組，完全三維水流模組以及擬三維水流模組。由於 MODFLOW 模式之擬三維水流模組，不考慮阻水層貯蓄效應，較無法模擬複雜之地下水流況，所以應使用完全三維水流模組，且完全三維水流模組亦可模擬出擬三維水流之流況。MODFLOW 模式乃是以有限差分法(finite difference method)，且採用塊體中心(block centered)網格形式建構而成，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清楚發現，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。由此可預知，分層三維地下水流模式應較 MODFLOW 準確。本研究利用拘限含水層部分貫穿單井抽水案例，比較兩者之差異性。

均質(homogeneous)且等向(isotropic)之拘限含水層，厚度為 24 公尺，上、下邊界為不透水邊界，有一定抽水量之抽水井部份貫穿此含水層，部份貫穿之情形如圖 3-1 所示。

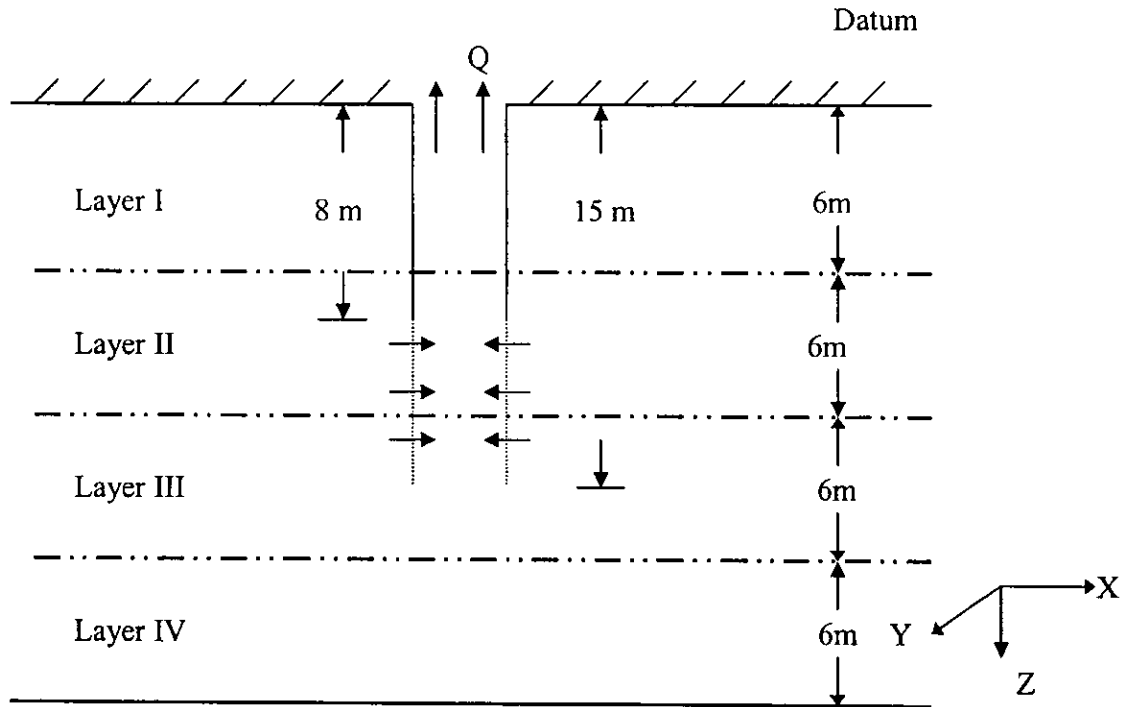


圖 3-1 拘限含水層部份貫穿單井抽水測試案例示意圖

若以土層分為四層為例而言，利用 MODFLOW 模式之概念(即塊體中心(block centered)網格形式概念)，通過第二層上邊界與下邊界之水流通量，如圖 3-2(a)所示，可分別表示為

$$q|_{bi+1} = -\frac{2K}{\Delta z_1 + \Delta z_2}(\Phi_2 - \Phi_1) \quad (3.1)$$

$$q|_{bi} = -\frac{2K}{\Delta z_2 + \Delta z_3}(\Phi_3 - \Phi_2) \quad (3.2)$$

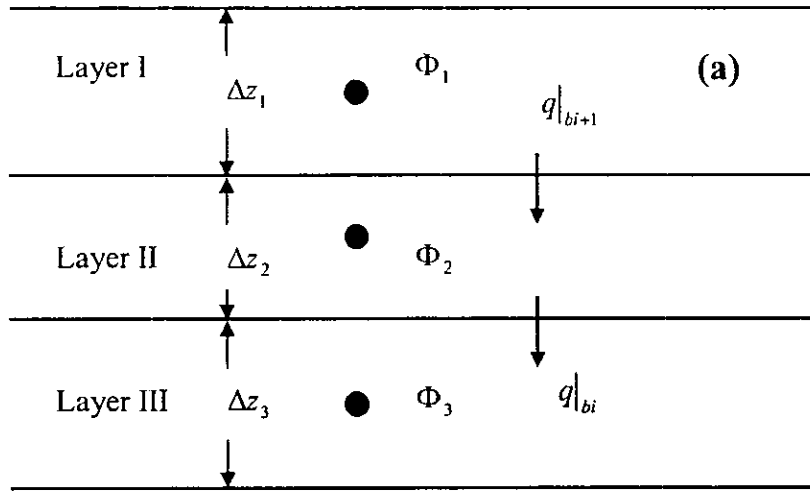


圖 3-2 座標系統示意圖 (a) MODFLOW

其中， K 為水力傳導係數 (hydraulic conductivity)， Φ 為水頭 (hydraulic head)。 Φ_1 、 Φ_2 以及 Φ_3 分別表示距地表下 3 公尺、9 公尺與 15 公尺之水位值。式(3.1)與式(3.2)等號右邊第一項，在 MODFLOW 模式中，稱為滲流項 (leakage term)，即 $VCONT = 2K/(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})$ ， $i=1,2$ 。然而，若使用分層三維地下水流概念，則上、下邊界之水流通量，如圖 3-2(b)所示，可表示為

$$q|_{bi+1} = -K \frac{(4\Phi_2|_{bi+1} + 2\Phi_2|_{bi} - 6\bar{\Phi}_2)}{\Delta z_2} \quad (3.3)$$

$$q|_{bi} = -K \frac{(-2\Phi_2|_{bi+1} - 4\Phi_2|_{bi} + 6\bar{\Phi}_2)}{\Delta z_2} \quad (3.4)$$

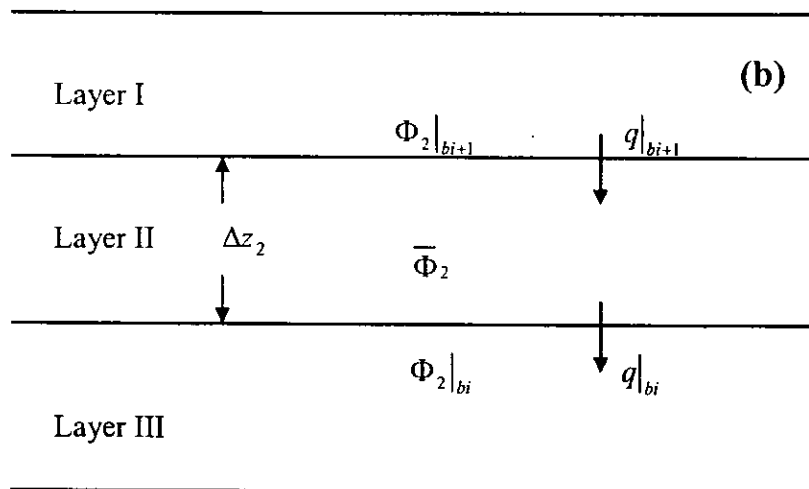


圖 3-2 座標系統示意圖 (b)分層三維水流模式

其中， $\Phi_2|_{bi+1}$ 、 $\Phi_2|_{bi}$ 分別表示第二層土層之上、下邊界水頭值； $\bar{\Phi}_2 = \frac{1}{\Delta z_2} \int_{bi}^{bi+1} \Phi_2 dz$ 表示平均水頭值， Δz_i 表示各層之厚度。相同地，其他三層土層之上、下邊界水流通量亦同理可得，如式(3.3)與式(3.4)所示。此外，模式計算時，層與層間之垂直介面邊界，再以水位與水流通量連續之條件加以連接。式(3.3)與式(3.4)之推導以及介面之連接條件，詳見附錄 A 分層三維地下水流模式概述。

若將土層分別等分為兩層與四層，分層三維水流模式模擬 10 分鐘後在距井位 4.5 公尺與 10 公尺處，垂直方向上之水位洩降(drawdown)分布模擬結果與解析解(Hantush, 1960)之比較，如圖 3-3 所示。

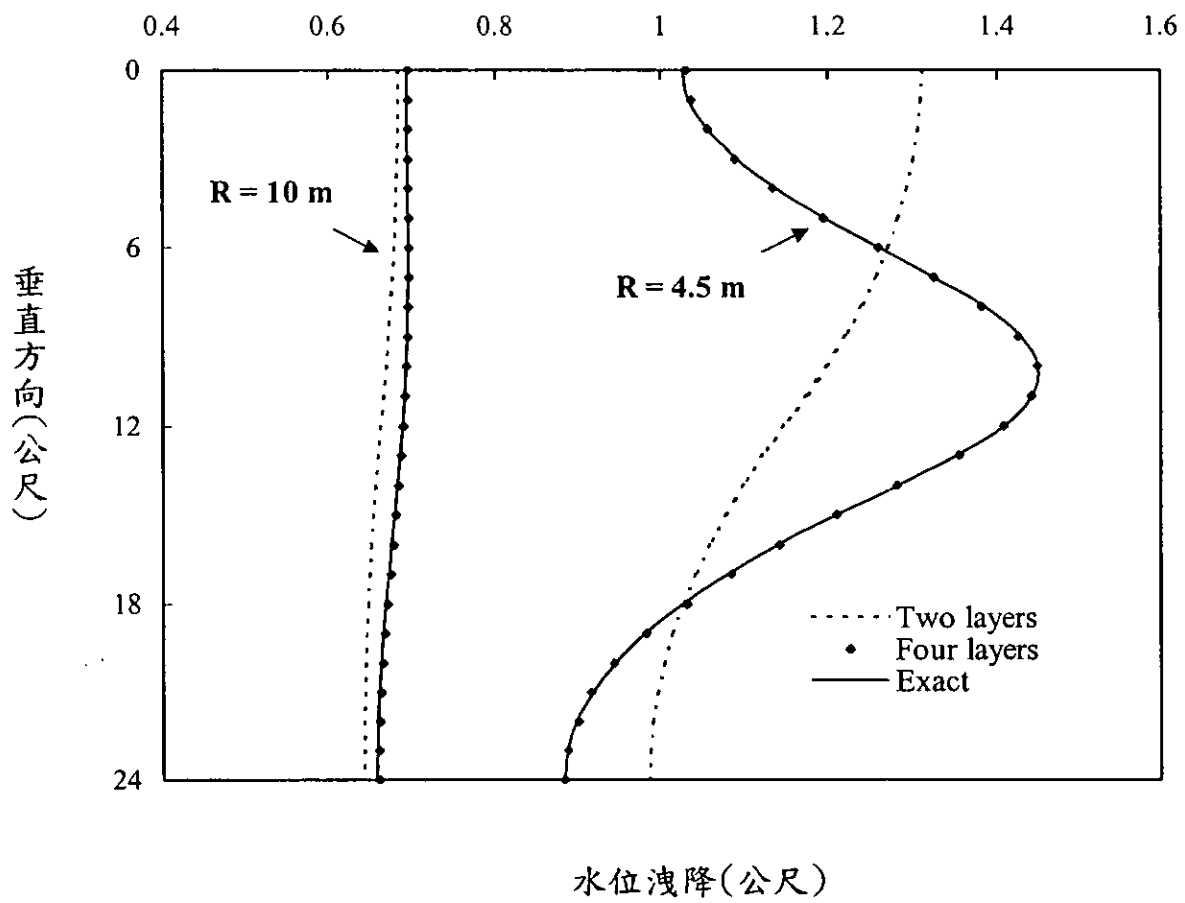


圖 3-3 分層三維地下水流模式拘限含水層部分貫穿單井抽水模擬結果

由圖 3-3 可知，當土層等分為兩層時，距井位 4.5 公尺之模擬結果與解析解有極大之差異，而距井位 10 公尺處之模擬結果則與解析解接近。這是因為距井位 10 公尺處，水位洩降在垂直方向上之變化不大，所以將土層等分為兩層即可得到不錯之模擬結果。然而，由於距井位 4.5 公尺處，水位洩降在垂直方向上之變化極大，所以將土層等分為兩層無法得到正確之結果。但是由圖 3-3 可發現，若土層等分為四層時，分層三維地下水流模式則可完全模擬部分貫穿抽水井所產生之複雜三維水流現象。

若在分層三維地下水流模式中，引用 MODFLOW 模式之塊體中心網格式概念加以簡化計算，即式(3.1)與式(3.2)所示，則土層等分為四層時之模擬結果，如圖 3-4 所示，因為採用塊狀中心網格式概念，所以僅能表示出距地表下 3 公尺、9 公尺、15 公尺與 21 公尺之水位洩降值。

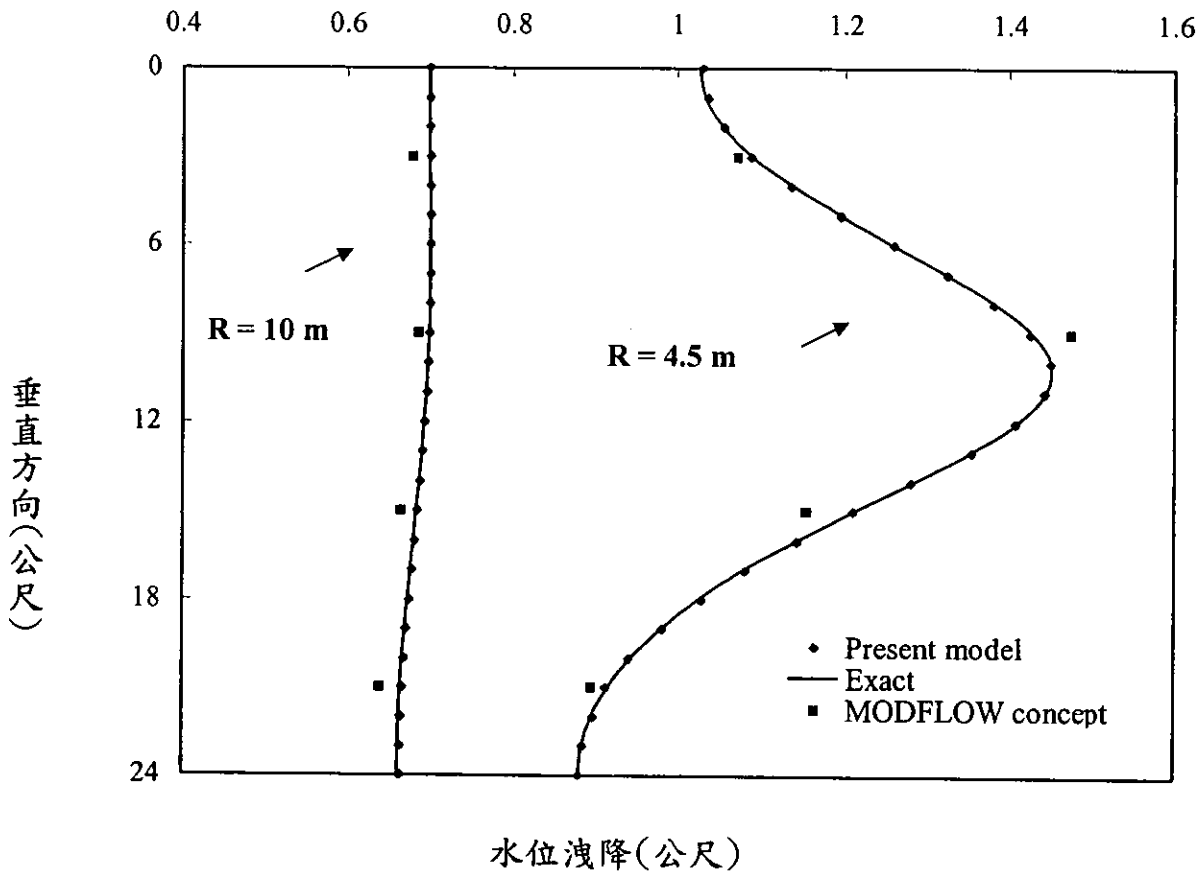


圖 3-4 拘限含水層部分貫穿單井抽水垂直方向水位洩降模擬結果比較

由圖 3-4 可知，模擬結果與解析解有所差異，然而，二次多項式函數分布概念之模擬結果則非常接近解析解。由此可知，分層三維地下水流模式之二次多項式函數分布概念優於 MODFLOW 所使用之塊體中心網格形式概念。為更進一步討論兩者之差異性，圖 3-5 表示垂直距地表下 9 公尺與 15 公尺處下，距不同井位處之水位洩降模擬結果。

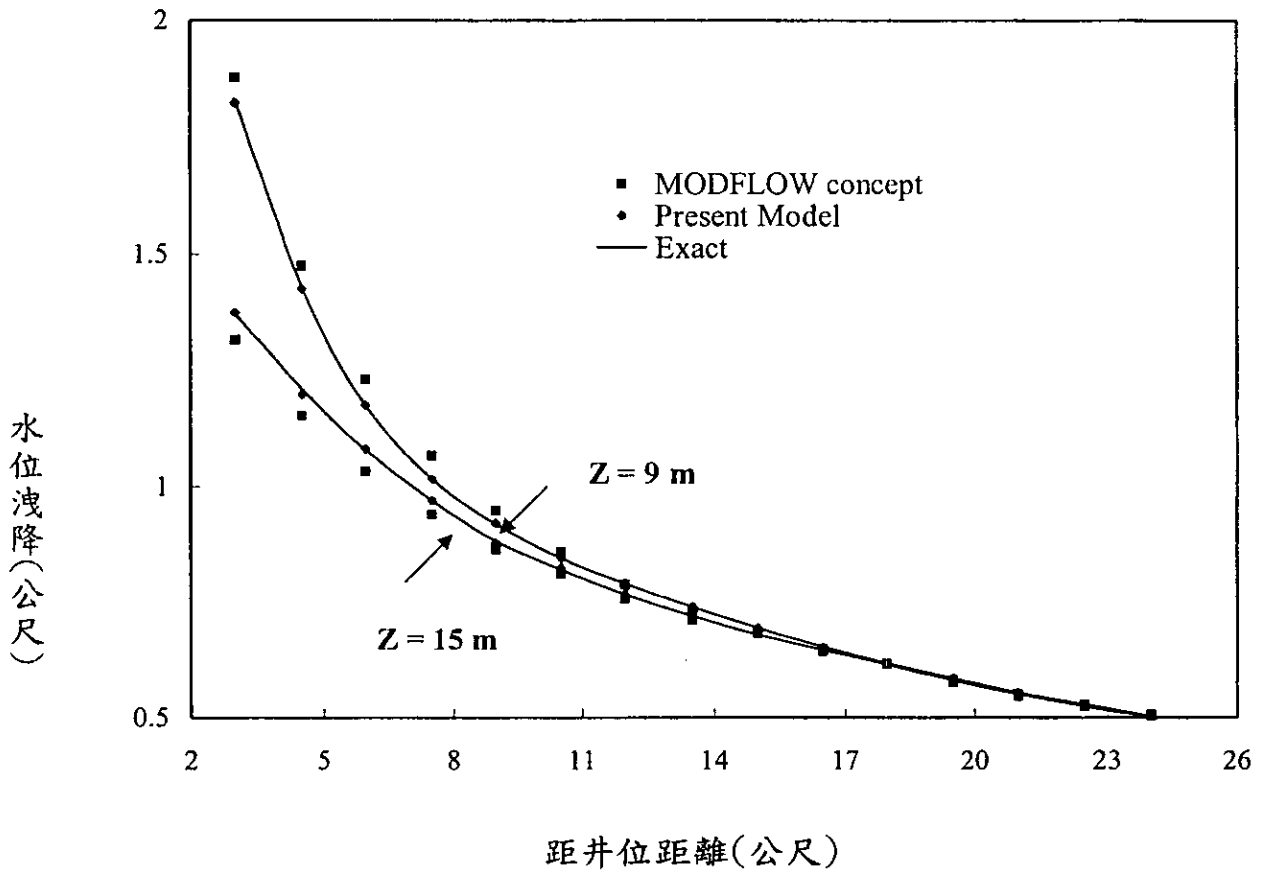


圖 3-5 拘限含水層部分貫穿單井抽水水平方向水位洩降模擬結果比較

另外，垂直距地表下 6 公尺與 18 公尺處，即第一層土層下邊界及第四層土層上邊界，水位洩降梯度模擬結果(可視為地下水流通量)，如圖 3-6 所示。

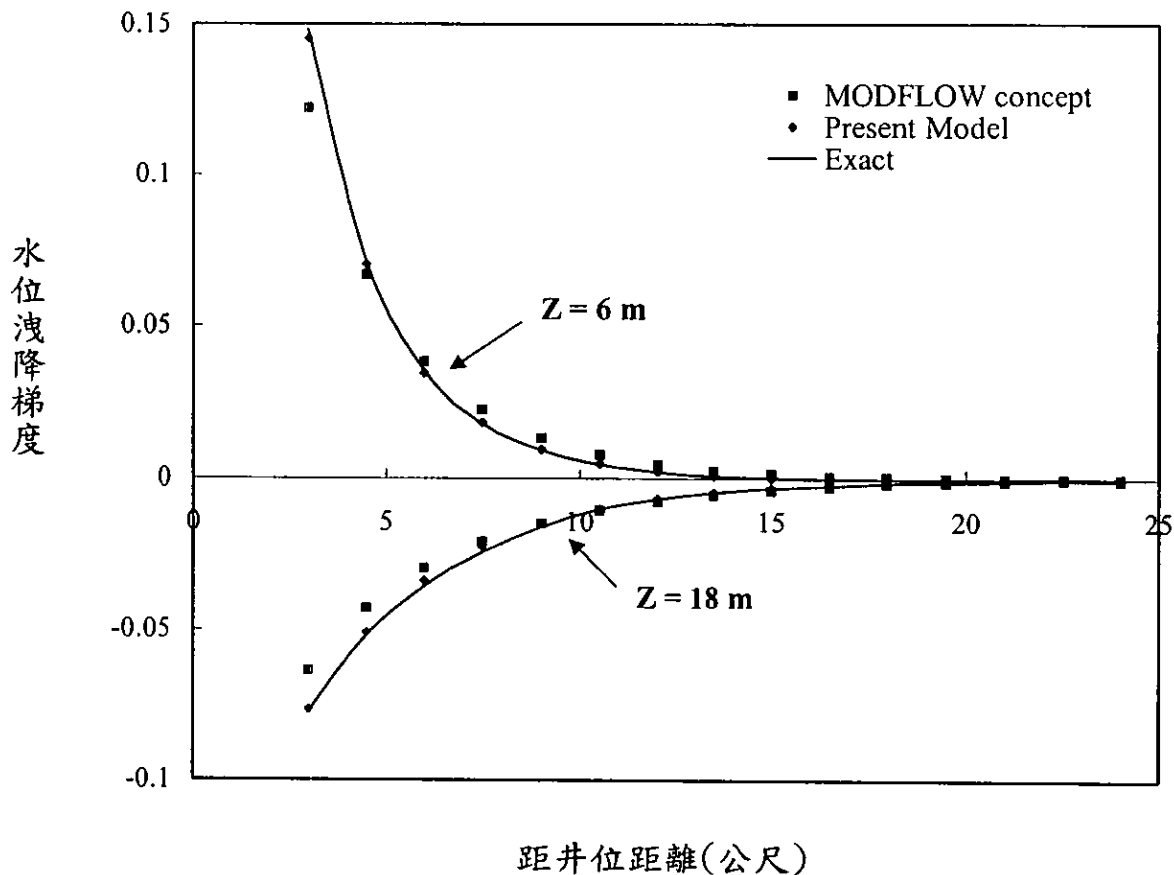


圖 3-6 拘限含水層部分貫穿單井抽水水位洩降梯度模擬結果比較

由圖 3-5 與圖 3-6 可再一次發現，二次多項式函數分布概念之模擬結果與解析解非常近似，塊體中心網格形式概念之模擬結果則與解析解有差異。因此，吾人可清楚知道，分層三維地下水流模式之二次多項式函數分布概念的確優於 MODFLOW 之塊體中心網格形式概念之計算功能。

此外，吾人必須強調，在地下水質量傳輸模擬中，必須先求出地下水流速度，也就是地下水流場狀況，才可進行質量傳輸模擬。上述案例中，若利用 MODFLOW 模式之塊體中心網格形式概念，僅能得到垂直距

地表下 6 公尺、12 公尺及 18 公尺處，即層與層交介面上之水流流速。然而地下水質量傳輸模擬時，為了計算精度與穩定性之考量，常常需要更細的地層分層，也就是分層數大於四層。因此利用四層之水流模擬結果，除僅能得到垂直距地表下 6 公尺、12 公尺及 18 公尺處之地下水流速外，無法推估模擬區域中其他地方之地下水流速。若利用分層三維地下水流模式，由於假設地下水位在垂直方向滿足二次多項式函數分布，則可正確地得到模擬區域各處之地下水流速，已提供質量傳輸模擬使用。

由上述之評估與測試，可清楚知道，分層三維地下水流模式之二次多項式函數分布概念的確優於 MODFLOW 之塊體中心網格形式概念之計算功能。此外，分層三維地下水流模式與 MODFLOW 同樣採用層的概念來建構，所以較 FEMWATER 簡單且有效率。所以，本研究選用本研究團隊所自行研發之分層三維地下水模式，作為發展地下水質量傳輸之用。至於分層三維地下水流模式之進一步測試，請參見第一年期末報告，在此不多贅述。

二、模式理論基礎

(一) 不具密度變化

控制方程式

假設延散係數張量 D_{ij} 為對稱(Scheidegger, 1961)並忽略延散係數在空間之變化，且暫不考慮源流項以及一階不可逆作用，則控制方程式可表示為

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + 2D_{xz} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial z} + 2D_{yz} \frac{\partial^2 C}{\partial y \partial z} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_y \frac{\partial C}{\partial y} - u_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.5)$$

為考慮計算的效率與精確度，本研究將地下水流速與污染物濃度皆拆解為垂向積分平均值與垂直變量之和，即 $u = \bar{u} + u'$ 以及 $C = \bar{C} + C'$ ，其中 $\bar{u} = \frac{1}{B} \int_{b_i}^{b_{i+1}} u dz$ 且 $\bar{C} = \frac{1}{B} \int_{b_i}^{b_{i+1}} \Phi dz$ ， $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 與 $z = b_i(x, y, t)$ 分別表示上、下邊界， $B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 。

含水層

若假設含水層之水流為水平流，也就是 $u = \bar{u}$ ，則可得 $D_{xz} = D_{yz} = 0$ (Bear, 1979)，因此式(3.5)可變為

$$D_x \frac{\partial^2 (\bar{C} + C)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 (\bar{C} + C)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 (\bar{C} + C)}{\partial x \partial y} - (\bar{u}_x) \frac{\partial (\bar{C} + C)}{\partial x} - (\bar{u}_y) \frac{\partial (\bar{C} + C)}{\partial y} - \frac{\partial (\bar{C} + C)}{\partial t} = 0 \quad (3.6)$$

將式(3.6)對垂直方向作深度積分，並利用萊布尼茲法則 (Leibniz rule)，則可得

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{1}{B} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=B} - D_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} \right) \quad (3.7)$$

將式(3.6)式減式(3.7)可以得垂直變量方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \bar{u}_x \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial C}{\partial y} - \left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) \quad (3.8)$$

阻水層

若假設阻水層之水流為垂直流且近似一定值，也就是 $u = u_z^0(x, y, t)$ ，因此 $D_{xz} = D_{yz} = 0$ (Bear, 1979)，式(3.5)可變為

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u_z^0 \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

將污染物濃度拆解為垂向積分平均值與垂直變量之和，即

$C = \bar{C} + C'$ ，其中 $\bar{C} = \frac{1}{B} \int_{b_i}^{b_{i+1}} \Phi dz$ ， $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 與 $z = b_i(x, y, t)$ 分別表示上、下邊界， $B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 。則式(3.9)可變為

$$D_x \frac{\partial^2 (\bar{C} + C')}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 (\bar{C} + C')}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 (\bar{C} + C')}{\partial x \partial y} + D_z \frac{\partial^2 C'}{\partial z^2} - u_z^0 \frac{\partial C'}{\partial z} - \frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

將式(3.10)對 z 作積分得

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} = \frac{1}{B} \left(D_z \frac{\partial C'}{\partial z} \Big|_{z=b_{i+1}} - D_z \frac{\partial C'}{\partial z} \Big|_{z=b_i} \right) - \frac{u_z^0}{B} (C' \Big|_{z=b_{i+1}} - C' \Big|_{z=b_i}) \quad (3.11)$$

將式(3.10)減式(3.11)得垂直變量方程式為

$$\frac{\partial C'}{\partial t} - D_z \frac{\partial^2 C'}{\partial z^2} = D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C'}{\partial x \partial y} - u_z^0 \frac{\partial C'}{\partial z} - \left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.12)$$

由上述推導可知，研究中將污染物濃度量拆解為水平(垂直積分平均)值與垂直變量之和，再利用分層垂向積分技巧，將三維地下水質量傳輸方程式，進一步拆解為水平二維的垂直積分平均地下水質量傳輸方程式以及垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，冀能一方面保存三維之特質，另一方面又能提高大範圍求解的效率。

式(3.7)與式(3.8)為含水層地下水質量傳輸計算所使用之控制方程式，式(3.11)與式(3.12)為阻水層所使用之控制方程式。其中式(3.7)與式(3.11)為水平(垂向積分平均)值控制方程式，式(3.8)與式(3.12)則為垂向變量控制方程式。由於式(3.7)與式(3.11)右側有垂直變量，而式(3.8)與式(3.12)式右側

有垂向積分值，故理論上仍須以疊代法求得最終解。

邊界條件

邊界條件可分為外部邊界條件(external boundary condition)以及內部邊界條件(internal boundary condition)兩種。外部邊界條件乃是指模擬區域最外圍之邊界而言，通常位於海岸線、河川或山嶺線，垂向的岩盤或地下水面線等。而內部邊界條件則是在模擬區域內，所產之介面邊界而言。以下分別敘述外部邊界條件以及內部邊界條件。

外部邊界條件

外部邊界條件可為定濃度、污染物通量或兩者之線性組合，因此垂向積分平均值與垂向變量之外部邊界條件可分表示為

$$\rho_i \bar{C}_i + \beta_i \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial n} = \gamma_i(t) \quad (3.13)$$

$$\rho_i C'_i + \beta_i \frac{\partial C'_i}{\partial n} = \gamma_i(t) \quad (3.14)$$

ρ_i, β_i 為已知係數

內部邊界條件

內部邊界條件須同時滿足質量連續以及通量連續。水平方向之內部邊界條件為

$$\bar{C}_1 = \bar{C}_2 \quad (3.15)$$

$$D_1 \frac{\partial \bar{C}_1}{\partial n} = D_2 \frac{\partial \bar{C}_2}{\partial n} \quad (3.16)$$

其中下標 1 與 2 分別表示相鄰邊界不同分層之介質。垂直方向之內部邊界條件可表示為

$$\bar{C}_1 + C'_1 = \bar{C}_2 + C'_2 \quad (3.17)$$

$$D_1 \frac{\partial C'_1}{\partial n} = D_2 \frac{\partial C'_2}{\partial n} \quad (3.18)$$

起始條件

起始條件為污染物之背景濃度及污染物之起始分布。

(二) 具明顯密度變化交界面(海水入侵模擬)

在具明顯交界面之海水入侵含水層，海水與淡水在各自的區域 (R_s 與 R_f) 如圖 3-7 所示，均須滿足三維地下水流方程式

在 R_f 區域

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_f \frac{\partial \phi_f}{\partial x_j} \right) = S_0 \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + Q_f \delta(x - x_w) \delta(y - y_w) \delta(z - z_w) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.19)$$

在 R_s 區域

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_s \frac{\partial \phi_s}{\partial x_j} \right) = S_0 \frac{\partial \phi_s}{\partial t} \quad (3.20)$$

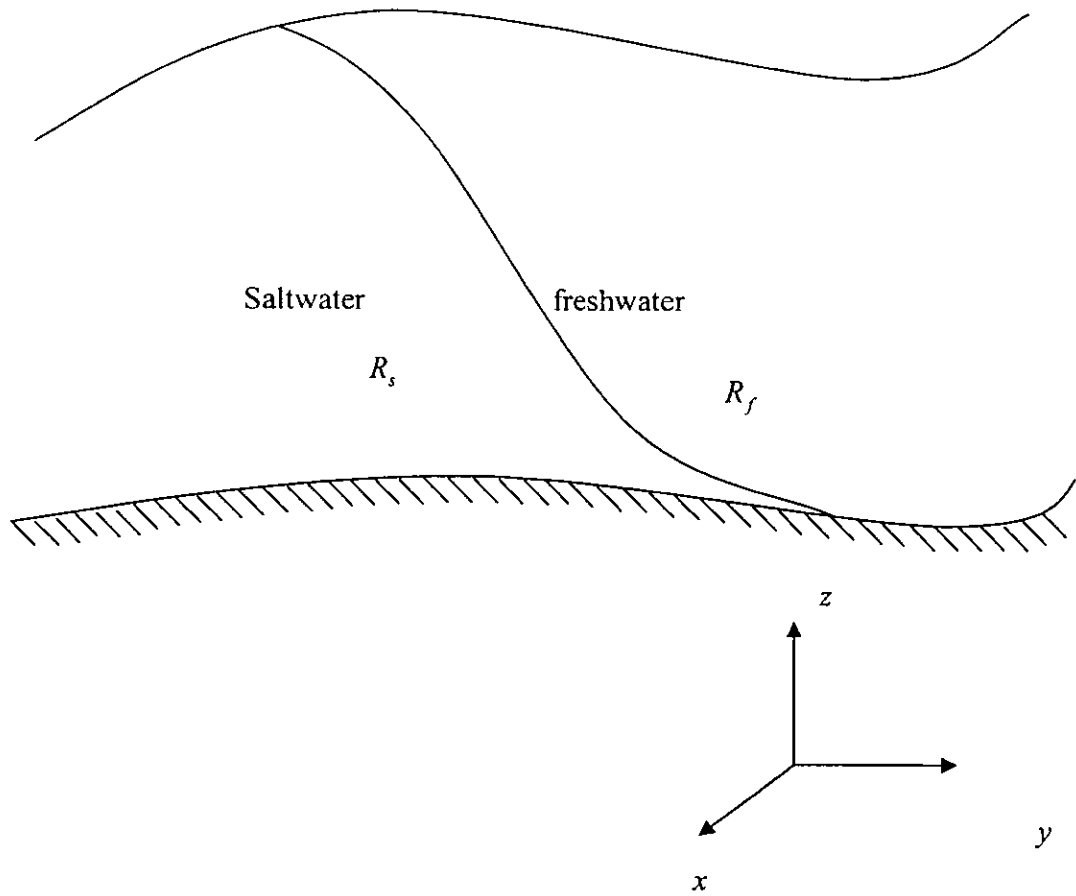


圖 3-7 具明顯密度變化界面之示意圖

其中（下標 s、f 分別代表海水及淡水） K_f 、 K_s 分別為淡水海水之水力傳導係數， S_0 為比貯水係數， Q_f 分別為淡水之流源項（source term）， δ 為 Dirac delta 函數， $\phi_f = z + \frac{P_f}{\rho_f g}$ 為淡水水頭， $\phi_s = z + \frac{P_s}{\rho_s g}$ 為海水水頭， P_s 與 P_f 為海水及淡水孔隙水壓， ρ_f 為淡水密度， ρ_s 為海水密度， g 為重力加速度。

將 $\phi_f, \phi_s, P_f, P_s, Q_f$ 分別表示為初始值（以上標 0 表示）與增加值（以上標 e 表示）的和即

$$\begin{aligned}
 \phi_i(x, y, z, t) &= \phi_i^0(x, y, z) + \phi_i^e(x, y, z, t) \\
 P_i(x, y, z, t) &= P_i^0(x, y, z) + P_i^e(x, y, z, t) \\
 Q_f(x, y, z, t) &= Q_f^e(x, y, z, t)
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

又靜壓水頭可以表示為

$$\phi_i^0(x, y) = z(x, y) + \frac{P_i^0(x, y)}{\rho_i g} \quad (3.22)$$

所以

$$\phi_i^e(x, y, t) = \frac{P_i^e(x, y, t)}{\rho_i g} \quad (3.23)$$

上述下標 i 分別代表 f 與 s

由於海水與淡水的密度差 $\Delta\rho = 0.025 \text{ kg/L}$ 為一相當小的值，且海水與淡水交界面及淡水、海水的自由液面方程式皆具非線性項，輔以擾動法將含有淡水及海水之含水層（如圖 3-8 (A)）拆成整區由淡水組成，即微擾法中之導引項（leading order）（如圖 3-8 (B)）及由密度差造成，即微擾法中之第一項（first order）（如圖 3-8 (C)）兩部分。

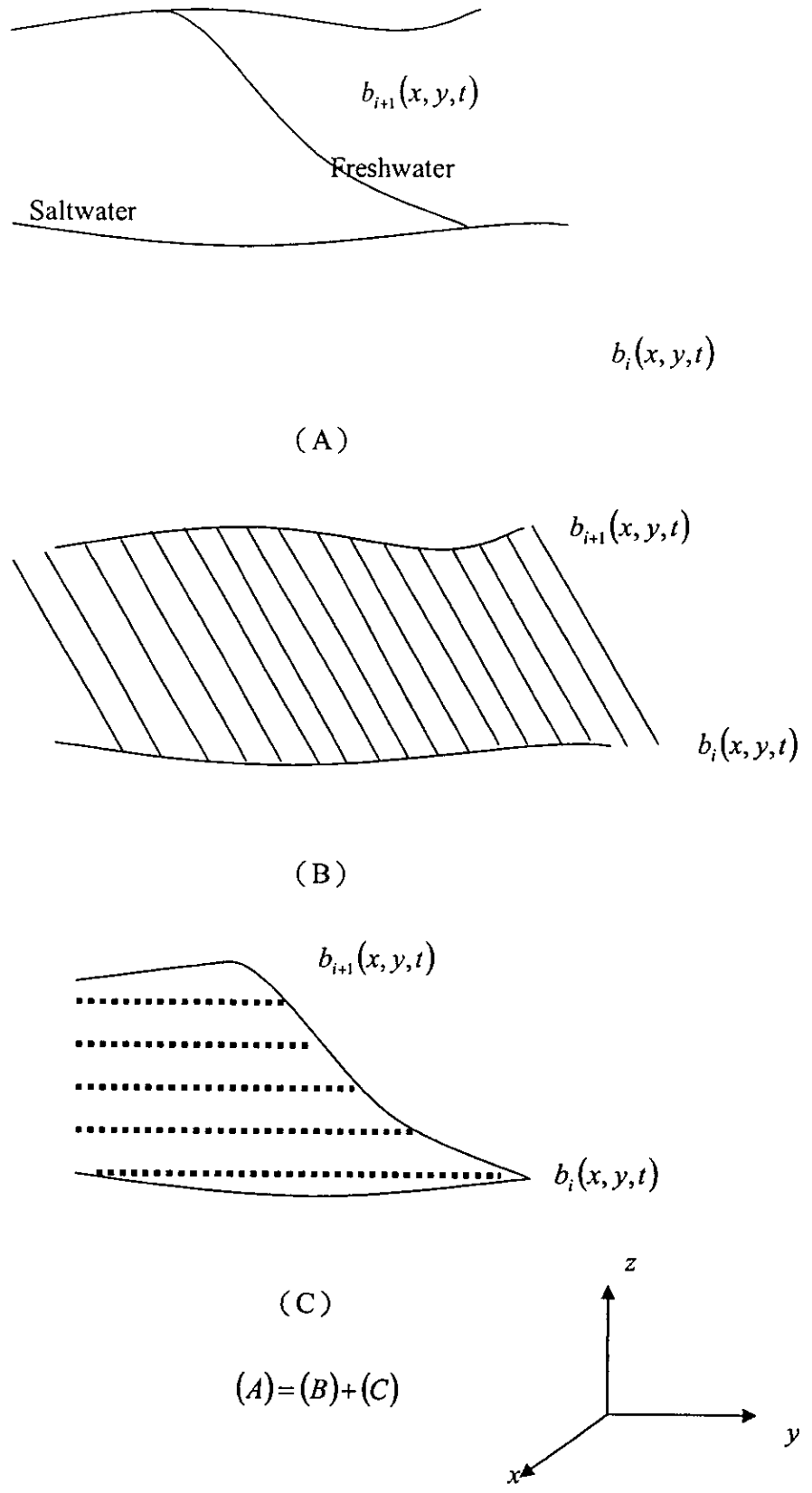


圖 3-8 以擾動法處理之明顯密度變化交界面示意圖

所以

$$\phi_s = \phi_f + \varepsilon \phi_s' \quad (3-24)$$

式 (3.24) 中 $\varepsilon = \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \ll 1$ ， ϕ_s' 為由密度差造成的水頭變化項。另外水力傳導係數亦可藉由流體之黏滯性 μ 、比滲透係數 (Specific permeability) k 及比重 γ 表示成下式

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \left(= \frac{k\rho g}{\mu} \right) \quad (3-25)$$

再者根據 Kozeny-Carman 方程式 (Bear, 1979) 知比滲透係數

$$k = C_0 \frac{n^3}{(1-n)^2 M_s^2} \quad (3.26)$$

式 (3.26) 中 C_0 為一常數 (Carman 建議 $C_0 = 1/5$)， M 孔隙介質之比表面面積 (Specific surface area)， n 為孔隙率 (porosity)。由式 (3.25) 及式 (3.26) 可知水力傳導係數 K 可表示成

$$K = \frac{C_0}{M^2} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{\rho g}{\mu} \quad (3.27)$$

根據式 (3.27) 且令整個含水層具有相同的孔隙率則淡水及海水的水力傳導係數分別表成

$$K_f = \frac{C_0}{M} \frac{n^3}{(1-n)^2} g \frac{\rho_f}{\mu_f} \quad (3.28)$$

$$K_s = \frac{C_0}{M} \frac{n^3}{(1-n)^2} g \frac{\rho_s}{\mu_s} \quad (3.29)$$

因為式 (3.29) 減式 (3.28) 可得

$$K_s - K_f = \frac{C_0}{M} \frac{n^3}{(1-n)^2} g \frac{\rho_f}{\mu_f} \left(\frac{\rho_s/\rho_f}{\mu_s/\mu_f} - 1 \right) = A \frac{\rho_f}{\mu_f} \left(\frac{\rho_s/\rho_f}{\mu_s/\mu_f} - 1 \right) \quad (3.30)$$

由式 (3.30) 知 K_s 與 K_f 差值亦相當小故

$$K_s = K_f + A \frac{\rho_f}{\mu_f} \left(\frac{\rho_s/\rho_f}{\mu_s/\mu_f} - 1 \right) = K_f + \varepsilon K_s' \quad (3.31)$$

式 (3.31) 中 $K_s' = \frac{A}{\mu_s} \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \left(\rho_s - \frac{\mu_s}{\mu_f} \rho_f \right)$ 為由密度及黏滯性造成之海水和淡水水力傳導係數差，將式 (3.26) 代入 (3.23) 可得

$$\phi_s = (\phi_f^0 + \varepsilon \phi_s'^0) + (\phi_f^e + \varepsilon \phi_s'^e) \quad (3.32)$$

式 (3.32) 上標 0 表示靜水壓部分，上標 e 表示經抽水或補注後造成的變動值。

將式 (3.21)、式 (3.31) 及式 (3.32) 分別代入 (3.19)、(3.20) 式去除初始穩定狀態則含水層及阻水層之控制方程式如下：

含水層

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right) = S_0 \frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} + Q_f^e \delta(x - x_w) \delta(y - y_w) \delta(z - z_w) \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varepsilon K_f \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial x_j} + \varepsilon K_s' \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} + \varepsilon^2 K_s \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial x_j} \right] \\ & = S_0 \frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} + \varepsilon S_0 \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.34)$$

又去除第二階 (second order) 則式 (3.34) 可簡化為

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varepsilon K_f \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial x_j} + \varepsilon K_s' \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right] \\ & = S_0 \frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} + \varepsilon S_0 \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.35)$$

阻水層

由於採用擬三維水流概念且考慮明顯交界面問題故僅考慮淡水垂直流過阻水層則控制方程式可簡化為

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right) = S_0 \frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} \quad (3.36)$$

由於此式不影響海水部分，故以下不再討論。

而受壓含水層與非受壓含水層分析方法是將整個含水層分割成全為淡水區域（圖 3-9 (A)）及海水區域扣除淡水作用的區域（圖 3-9 (C)），先求得全淡水域水頭值（ ϕ_f^e ），再將已求得之淡水水頭值視為已知值代入以求海水部分扣除淡水作用的水頭值（ ϕ_s^e ）。因此將式（3.36）中扣除淡水作用的項（即提出導引項）再與式（3.31）相加便可以得到整個探討區域全由淡水所構成，而式（3.33）剩餘項則為海水扣除淡水作用部分（即第一項），再將上述兩部分分層做垂直積分可得圖 3-9 (B) 及 (C) 之控制方程式，以下分別敘述含水層之控制方程式處理方式。

含水層全為淡水部份（見圖 3-9 (B)）

$$\int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right) dz = \int_{b_i(x,y,t)}^{b_{i+1}(x,y,t)} \left[S_0 \frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} + Q_f^e \delta(x-x_w) \delta(y-y_w) \delta(z-z_w) \right] dz \quad (3.37)$$

式中 $z = b_i(x, y, t)$ 、 $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 分別表示含水層上、下邊界高程，而 $B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 為含水層厚度，若含水層為非拘限含水層則式（3.36）中 $b_{i+1}(x, y, t)$ 代表自由液面函數，而含水層厚度為

$B = \eta(x, y, t) = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ ，根據萊布尼茲 (Leibnitz) 法則及連鎖定律，並假設含水層上、下邊界函數在空間的變化遠小於含水層的厚度或水深，則在淡水部分的控制方程式可以以下式表示

$$\begin{aligned} & K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} \\ &= S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial t} + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + \overline{Q_f^e} \delta(x - x_w) \delta(y - y_w) \end{aligned} \quad (3.38)$$

$K_f(x, y)$ 、 $S_0(x, y)$ 、 $\overline{\phi_f^e}$ 分別代表深度積分之平均值即 $\overline{\phi_f^e} = \frac{1}{B} \int_{b_i(x, y, t)}^{b_{i+1}(x, y, t)} \phi_f^e dz$ ，另外 $K_f \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}}$ 、 $K_f \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i}$ 為上下邊界的流量。

含水層海水扣除淡水作用部分 (見圖 3-9 (C))

$$\int_{b_i(x, y, t)}^{b_{i+1}(x, y, t)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_s \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x_j} + K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x_j} \right) dz = \int_{b_i(x, y, t)}^{b_{i+1}(x, y, t)} S_0 \frac{\partial \phi_s^e}{\partial t} dz \quad (3.39)$$

在此部分含水層須分成兩部份討論，一為不包含交界面區域另一為包含交界面區域。不含有交界面部分 (圖 3-9 (B)) 根據萊布尼茲 (Leibnitz) 法則及連鎖定律，並假設含水層上、下邊界函數在空間的變化遠小於含水層的厚度或水深，

控制方程式可表示為

$$\begin{aligned} & B \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} \right] + B \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} \right] \\ &= S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} + K_s \left(\left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

式中 $z = b_i(x, y, t)$ 、 $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 分別表示含水層上、下邊界高程，而 $B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 為含水層厚度，若含水層為非拘限含水層則式 (3.40)

中 $b_{i+1}(x, y, t)$ 代表自由液面函數，而含水層厚度為 $B = \eta(x, y, t) = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ (如圖 3-10)， $K_f(x, y)$ 、 $\overline{\phi}_f^e$ 為式 (3.38) 求得的已知值， $K_f(x, y)$ 、 $K_s(x, y)$ 、 $S_0(x, y)$ 、 $\overline{\phi}_s^e$ 分別代表深度積分之平均值即 $\overline{\phi}_s^e = \frac{1}{B} \int_{b_i(x, y, t)}^{b_{i+1}(x, y, t)} \phi_s^e dz$ ，另外 $K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}}$ 及 $K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{b_i}$ 為上邊界流量， $K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{b_i}$ 及 $K_s \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}}$ 為下邊界流量。式 (3.40) 應用於含有交界面區域則 $b_{i+1}(x, y, t)$ 表示 $\zeta(x, y, t)$ (如圖 3-10)，根據萊布尼茲 (Leibnitz) 法則及連鎖定律，並假設含水層上、下邊界函數在空間的變化遠小於含水層的厚度或水深，控制方程式可表示為

$$\begin{aligned} & \xi \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi}_f^e}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi}_s^e}{\partial x^2} \right] + \xi \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi}_f^e}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi}_s^e}{\partial y^2} \right] \\ & = S_0 \xi \frac{\partial \overline{\phi}_s^e}{\partial t} - S_0 \phi_s^e \Big|_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + K_s \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{b_i} - \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{\zeta} \right) + K_f \left(\frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{b_i} - \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{\zeta} \right) \quad (3.41) \\ & + \left(K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_{\zeta} + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x} \Big|_{\zeta} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \left(K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_{\zeta} + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial y} \Big|_{\zeta} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned}$$

其中 $\xi = \zeta(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ (如圖 3-9) 表示從下邊界到明顯交界面的厚度。

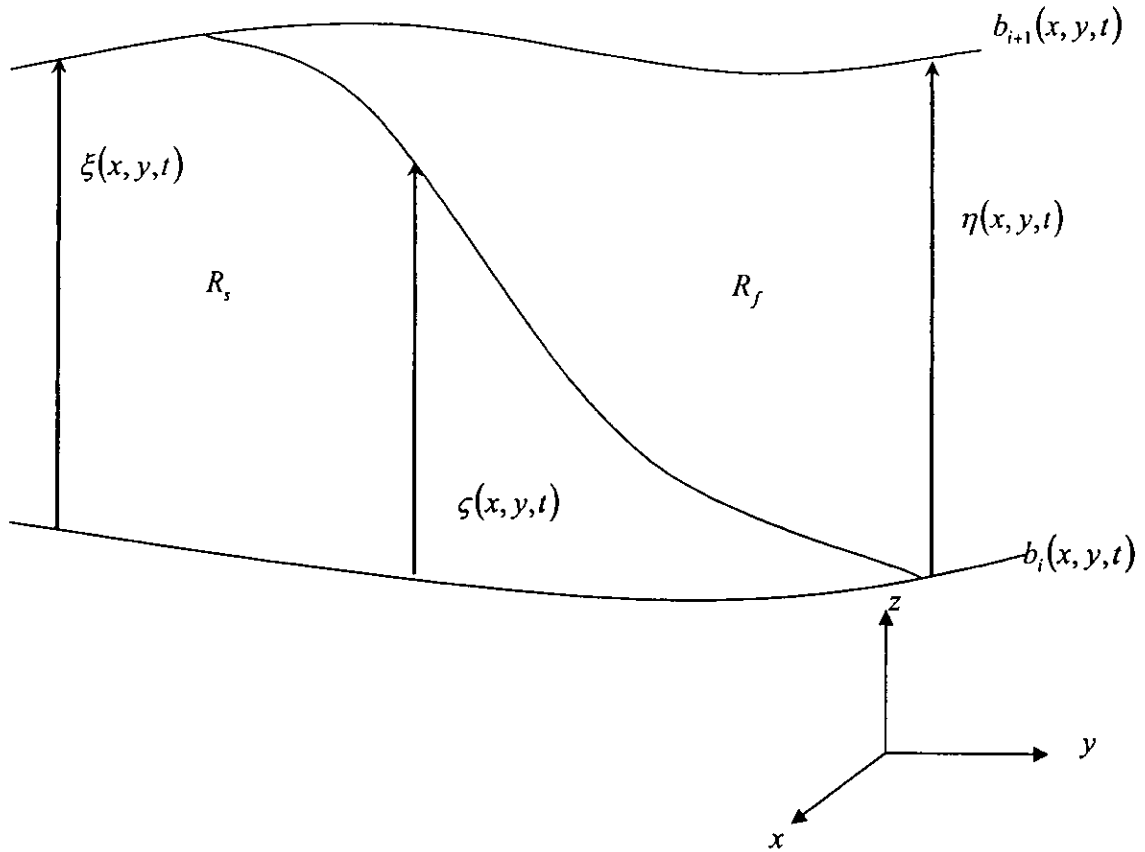


圖 3-10 含水層內存在具明顯密度變化交界面之示意圖

初始條件

因為模式採用增量為變數所以對阻水層的初始條件為

$$\phi_f^e(z, t=0) = 0, \quad z \in \text{求解區域} \quad (3.42)$$

相同的含水層的初始條件為

$$\overline{\phi_f^e}(x, y, t=0) = 0, \quad x, y \in \text{求解區域} \quad (3.43)$$

$$\overline{\phi_s^e}(x, y, t=0) = 0, \quad x, y \in \text{求解區域} \quad (3.44)$$

又因

$$\overline{\phi_s^e}(x, y, t) = \overline{\phi_f^e}(x, y, t) + \varepsilon \overline{\phi_s'^e}(x, y, t) \quad (3.45)$$

將式 (3.45) 扣除式 (3.43) 可得海水區域扣除淡水作用部分之初始條件

$$\overline{\phi_s'^e}(x, y, t=0) = 0, \quad x, y \in \text{求解區域} \quad (3.46)$$

邊界條件

由於研究中採用垂直分層觀念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，皆可分為自然邊界與內部邊界兩種。以下對於自然邊界與內部邊界條件加以闡述。

(a) 垂直邊界條件

對垂直邊界而言，自然邊界是指模擬區域中最上層與最下層的邊界。自然邊界可以給定水頭邊界條件，即 Dirichlet 型態的邊界條件，可表示為

$$(i) \text{ 在全為淡水域} \quad \phi_f^e \Big|_{\text{boundary}} = \phi_f^* \quad (3.47)$$

$$(ii) \text{ 在全為海水域} \quad \phi_s^e \Big|_{\text{boundary}} = \phi_s^* \quad (3.48)$$

$$(iii) \text{ 在海水區域扣除淡水作用區域} \quad \phi_s'^e \Big|_{\text{boundary}} = \frac{\phi_s^* - \phi_f^*}{\varepsilon} \quad (3.49)$$

另外亦可給定流量邊界條件，即 Neumann 型態的邊界條件，可表示為

$$(i) \text{ 在全為淡水域} \quad K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} = -q_{fn} \quad (3.50)$$

$$(ii) \text{ 在全為海水域} \quad K_s \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} = -q_{sn} \quad (3.51)$$

(iii) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$K_f \frac{\partial \phi_s'^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} = \frac{-q_{sn} + q_{fn}}{\varepsilon} \quad (3.52)$$

其中 ϕ_f^* 、 ϕ_s^* 與 q_{sn} 、 q_{fn} 為給定的邊界條件值。而內部界面邊界條件是指分

層後阻水層與含水層或含水層與含水層間之界面邊界。為合理的連接每個層，所以每個內部界面，須同時滿足水流通量連續與孔隙水壓連續之連接條件，令上標 1、2 分別表示相鄰邊界不同分層之介質，層與層間之水流通量連續可以表示為

$$\begin{aligned} q_{fn}^1 &= q_{fn}^2 \\ (q_{sn} - q_{fn}) &= (q_{sn} - q_{fn})^2 \end{aligned} \quad (3.53)$$

也就是

$$\begin{aligned} \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^1 &= \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^2 \\ \left(K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^1 &= \left(K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.54)$$

另外孔隙水壓連續可以表示成

$$\begin{aligned} \phi_f^{e1} &= \phi_f^{e2} \\ \phi_s^{e1} &= \phi_s^{e2} \end{aligned} \quad (3.55)$$

此外如果含水層內部含有阻水層，阻水層僅允許淡水通過至於海水則假設不能通過，即如果交界面遇到阻水層則將阻水層視為邊界來處理。

(b) 水平邊界條件

水平邊界條件指海岸線、河川或山嶺線等模擬區域之最外圍水平邊界而言，而水平內部邊界則是指區域拆解後區與區之介面邊界，如圖所示。若水平自然邊界條件給定水頭或水流通量，則可分別表示為

$$(i) \text{ 在全為淡水區域} \quad \overline{\phi_f^e} = \overline{\phi_c} ; \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} = -q_f \quad (3.56)$$

$$(ii) \text{ 在海水區域} \quad \overline{\phi_s^e} = \overline{\phi_d} ; \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} = -q_s \quad (3.57)$$

(iii) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$\overline{\phi_s^e} = \frac{\overline{\phi_d} - \overline{\phi_c}}{\varepsilon}; K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} = \frac{-q_{sn} + q_{fn}}{\varepsilon} \quad (3.58)$$

其中 $\overline{\phi_c}, \overline{\phi_d}, q_s, q_f$ 為給定值。另外，兩垂直邊界相同，水平內部介面邊界條件亦須同時滿足孔隙水壓連續及水流通量連續，即

$$(i) \text{ 在全為淡水區域} \quad \overline{\phi_f^e}^1 = \overline{\phi_f^e}^2; \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^2 \quad (3.59)$$

$$(ii) \text{ 在海水區域} \quad \left(K_s \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} \right)^1 = \left(K_s \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} \right)^2 \quad (3.60)$$

(iii) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$\left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^2 \quad (3.61)$$

此外如果含水層內部含有阻水層，阻水層僅允許淡水通過至於海水則假設不能通過，即如果交界面遇到阻水層則將阻水層視為邊界來處理。

(c) 移動邊界條件

(I) 明顯密度變化之交界面

由淡水區域及海水區域兩邊逼近明顯交界面，明顯交界面上每一點皆會滿足下列兩式

(i) 交界面上每點壓力皆相等所以

$$z|_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \phi_s - \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \phi_f \quad (3.62)$$

引入微擾法 ($\phi_s = \phi_f + \varepsilon \phi_s'$; $\varepsilon = \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1$) 觀念處理上式則

$$\begin{aligned} z(x, y, t)|_{\zeta} &= \phi_f(x, y, t) + (1 + \varepsilon)\phi_s'(x, y, t) \\ &= [\phi_f^0(x, y) + (1 + \varepsilon)\phi_s'^0(x, y)] + [\phi_f^e(x, y, t) + (1 + \varepsilon)\phi_s'^e(x, y, t)] \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$z(x, y, t)|_{\zeta} = z_0(x, y) + \xi(x, y, t) \quad (3.64)$$

根據式 (3.54) 與式 (3.55) 知

$$z_0(x, y) = \phi_f^0(x, y) + (1 + \varepsilon)\phi_s'^0(x, y) \quad (3.65)$$

$$\xi(x, y, t) = \phi_f^e(x, y, t) + (1 + \varepsilon)\phi_s'^e(x, y, t) \quad (3.66)$$

(ii) 根據流量通量連續條件知

$$K_f \frac{\partial \phi_f}{\partial n} = K_s \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \quad (3.67)$$

因為交界面的方程式為 $F(x, y, z, t) = \zeta(x, y, t) - z$ ，所以垂直交界面的法向量 \underline{n} 為

$$\underline{n} = \frac{\nabla F}{|\nabla F|} = \frac{\partial \zeta}{\partial x} \underline{i} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \underline{j} - \underline{k} \quad (3.68)$$

交界面的運動邊界條件為

$$\begin{cases} S_{ys} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = K_s \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \\ S_{yf} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = K_f \frac{\partial \phi_f}{\partial n} \end{cases} \quad (3.69)$$

根據式 (3.69) 知

$$S_{ys} = S_{yf} = S_y \quad (3.70)$$

(註：因 $S_0 = \rho g[\alpha(1-n) + \beta n]$ ，式中 α 、 β 分別代表土體壓縮係數及流體壓縮係數，且因假設整個含水層具有相同的孔隙率 n 故此部分由 (3.31) 式起，吾人令 S_0 在淡水、海水兩個區域皆相同。)

由式 (3.31)、式 (3.32)、式 (3.67) 及式 (3.69) 並忽略次要項影響則

$$\frac{\partial \phi'_s}{\partial n} = -\frac{K'_s}{(K_f)^2} S_y \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (3.71)$$

將式 (3.63) 代入式 (3.71) 可得交界面的運動邊界條件

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} + (1+\varepsilon) \frac{\partial \phi'_s}{\partial t} = -\frac{1}{S_y} \frac{(K_f)^2}{K'_s} \frac{\partial \phi'_s}{\partial n} \quad (3.72)$$

即

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} + (1+\varepsilon) \frac{\partial \phi'_s}{\partial t} = -\frac{1}{S_y} \frac{(K_f)^2}{K'_s} \left(\frac{\partial \phi'_s}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \phi'_s}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \phi'_s}{\partial z} \right) \quad (3.73)$$

由 (3.63) (3.64) (3.65) (3.66) 知

則

$$\zeta(x, y, t) = \phi_f(x, y, t) + (1+\varepsilon) \phi'_s(x, y, t) \quad (3.74)$$

根據式 (3.64) 並扣除初始條件，則交界面的運動邊界條件 (3.73) 可表成下式

$$\begin{aligned} & (1+\varepsilon) \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial t} + \frac{1}{S_y} \frac{(K_f)^2}{K'_s} \left[\frac{\partial \phi'^e_s}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} + (1+\varepsilon) \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} + (1+\varepsilon) \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial y} \right) - \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial z} \right] \\ & = -\frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.75)$$

忽略第一項則式 (3.75) 可表示成下式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial t} + \frac{1}{S_y} \frac{(K_f)^2}{K'_s} \left[\frac{\partial \phi'^e_s}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} + \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} + \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial y} \right) - \frac{\partial \phi'^e_s}{\partial z} \right] \\ & = -\frac{\partial \phi_f^e}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.76)$$

而

$$\xi(x, y, t) = \xi^0(x, y) + \phi_f^e(x, y, t) + (1+\varepsilon) \phi'^e_s(x, y, t) \quad (3.77)$$

(II) 自由液面

若含水層為非拘限含水層，水深為 $\eta(x, y, t) = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 。自由液面的運動邊界條件為

$$S_y \frac{\partial b_{i+1}}{\partial t} = -K_i \frac{\partial \phi_i^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} + K_i \left(\frac{\partial \phi_i^e}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} \right) \frac{\partial \eta_i}{\partial x} + K_i \left(\frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} \right) \frac{\partial \eta_i}{\partial y} \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} \text{因 } \phi_i(x, y, t) \Big|_{b_{i+1}} &= \phi_i^0(x, y) \Big|_{b_{i+1}} + \phi_i^e(x, y, t) \Big|_{b_{i+1}} \\ &= \left(z_0(x, y) + \frac{P_i^0(x, y)}{\gamma_i} \right) + \eta_i(x, y, t) + \frac{P_i^e}{\gamma_i} \end{aligned} \quad (3.79)$$

將式 (3.79) 去除初始穩定狀態且代入動力邊界條件 ($P_i^e = 0$) 則可得

$$\phi_i^e \Big|_{b_{i+1}} = \eta_i \quad (3.80)$$

由式 (3.78) 與 (3.79) 可得液面的運動邊界條件

$$S_y \frac{\partial \phi_i^e}{\partial t} \Big|_{b_{i+1}} = -K_i \frac{\partial \phi_i^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} + K_i \left(\frac{\partial \phi_i^e}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 + K_i \left(\frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 ; i = f, s \quad (3.81)$$

而 $\eta(x, y, t) = \eta^0(x, y) + \phi_i^e(x, y, t)$

由式 (3.81) 可知海水部分扣除淡水作用之液面運動邊界條件為

$$\begin{aligned} S_y \frac{\partial \phi_s^e}{\partial t} \Big|_{b_{i+1}} &= \left[2K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} + K_s' \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 \right] \\ &+ \left[2K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} \frac{\partial \phi_s^e}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} + K_s' \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 \right] \\ &- \left(K_s' \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} \right) \end{aligned} \quad (3.82)$$

代入上述所用到之條件，則總結各類的控制方程式如下：

(i) 含水層全為淡水

$$\begin{aligned}
 & K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} \\
 & = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial t} + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + \overline{Q^e} \delta(x - x_w) \delta(y - y_w)
 \end{aligned} \tag{3.83}$$

(ii) 含水層為海水扣除淡水作用部分且含界面

$$\begin{aligned}
 & \xi \left[K_s' \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} \right] + \xi \left[K_s' \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} \right] \\
 & = S_0 \xi \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} - S_0 \phi_s^e \Big|_s \frac{\partial \xi}{\partial t} + K_s' \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_s \right) + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_s \right) \\
 & + \left(K_s' \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_s + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x} \Big|_s \right) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \left(K_s' \frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_s + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial y} \Big|_s \right) \frac{\partial \xi}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{3.84}$$

(iii) 含水層為海水扣除淡水作用部分且不含界面

$$\begin{aligned}
 & B \left[K_s' \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} \right] + B \left[K_s' \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} \right] \\
 & = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} + K_s' \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.85}$$

三、模式之建立

(一) 不具密度變化

水平二維(垂直積分平均)的地下水流，及垂向一維的垂直變量地下水流，皆可以利用本研究所選用之分層三維地下水流模式求得；二維的水平變量地下水質量傳輸方程式採用有限解析法求解。為考慮效率及精確度，一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式採用解析方式求解。以下分別說明水平二維(垂直積分平均)的質量傳輸方程式，以及一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式以及三維模式(垂直分層，水平分區)之求解過程。

水平二維變量(垂直積分平均)之求解

含水層與阻水層之水平二維變量(垂直積分平均)質量傳輸方程式，即式(3.3)與式(3.7)，可進一步表示為

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = f_1(C, x, y, t) \quad (3.86)$$

以及

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} - 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} = f_2(C, x, y, t) \quad (3.87)$$

其中， f_1 與 f_2 分別為式(3.7)與式(3.11)等號之右邊項，表示上、下邊界處污染物之流通量。

式(3.21)與式(3.22)，乃分別求解含水層與阻水層之污染物濃度水平(垂直積分平均)值，但是其中包含垂直變量值，所以計算時只要將垂直變量值視為前一時刻之值，即可利用有限解析法求求解移流延散方程式之數值方法來求解。

垂直變量之求解

含水層

含水層之垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，即式(3.8)，可改寫為

$$\frac{\partial C'}{\partial t} - D_z \frac{\partial^2 C'}{\partial z^2} = \psi(x, y, t) \quad (3.88)$$

其中含水層之 $\psi(x, y, t)$ 可表示為

$$\begin{aligned} \psi(x, y, t) = & D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} - \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \\ & + D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C'}{\partial x \partial y} - \bar{u}_x \frac{\partial C'}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial C'}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.89)$$

其中 \bar{C} 項將與水平計算值疊代輸入， C' 項將採用上一個時間之值以簡化計算。

阻水層

阻水層之垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，即式(3.12)，亦可改寫為

$$\frac{\partial C'}{\partial t} - D_z \frac{\partial^2 C'}{\partial z^2} = \zeta(x, y, t) \quad (3.90)$$

其中 $\zeta(x, y, t)$ 可表示為

$$\begin{aligned} \gamma(x, y, t) = & D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \\ & - u_z^0 \frac{\partial C'}{\partial z} + D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C'}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3.91)$$

其中 \bar{C} 項將與水平計算值疊代輸入， C' 項將採用上一個時間之值以簡化計算。

為使多土層問題得以聯立求解，吾人先作以下之變數轉換，即令

$$t = \alpha T \tau \quad (3.92 \text{ a})$$

$$z = w \sqrt{\alpha D_z T} \quad (3.92 \text{ b})$$

$$\Phi_i = C_i / C_0 \quad (3.92 \text{ c})$$

其中 T 代表模擬時間， $\alpha = B^2 / D_z T$ ， B 為土層厚度， C_0 為濃度常數

則可分別將式(3.88)及式(3.90)可以分別得到相同之式(3.93)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial w^2} = P(x, y, \tau) \quad (3.93)$$

其中

在含水層中：

$$\begin{aligned} P(x, y, \tau) = & \alpha T \left(D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} - \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - \frac{1}{\alpha_i T} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau_i} \right) \\ & + \alpha T \left(D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C'}{\partial x \partial y} - \bar{u}_x \frac{\partial C'}{\partial x} - \bar{u}_y \frac{\partial C'}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.94 \text{ a})$$

在阻水層中：

$$\begin{aligned}
 P(x, y, \tau) = & \alpha T \left(D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x \partial y} - \frac{1}{\alpha_i T} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau_i} \right) \\
 & + \alpha T \left(-u_z \frac{\partial C'}{\partial z} + D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} + 2D_{xy} \frac{\partial^2 C'}{\partial x \partial y} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.94b}$$

以下利用多含水層案例，如圖 3-8 所示，說明垂項一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式之解析解求解過程。

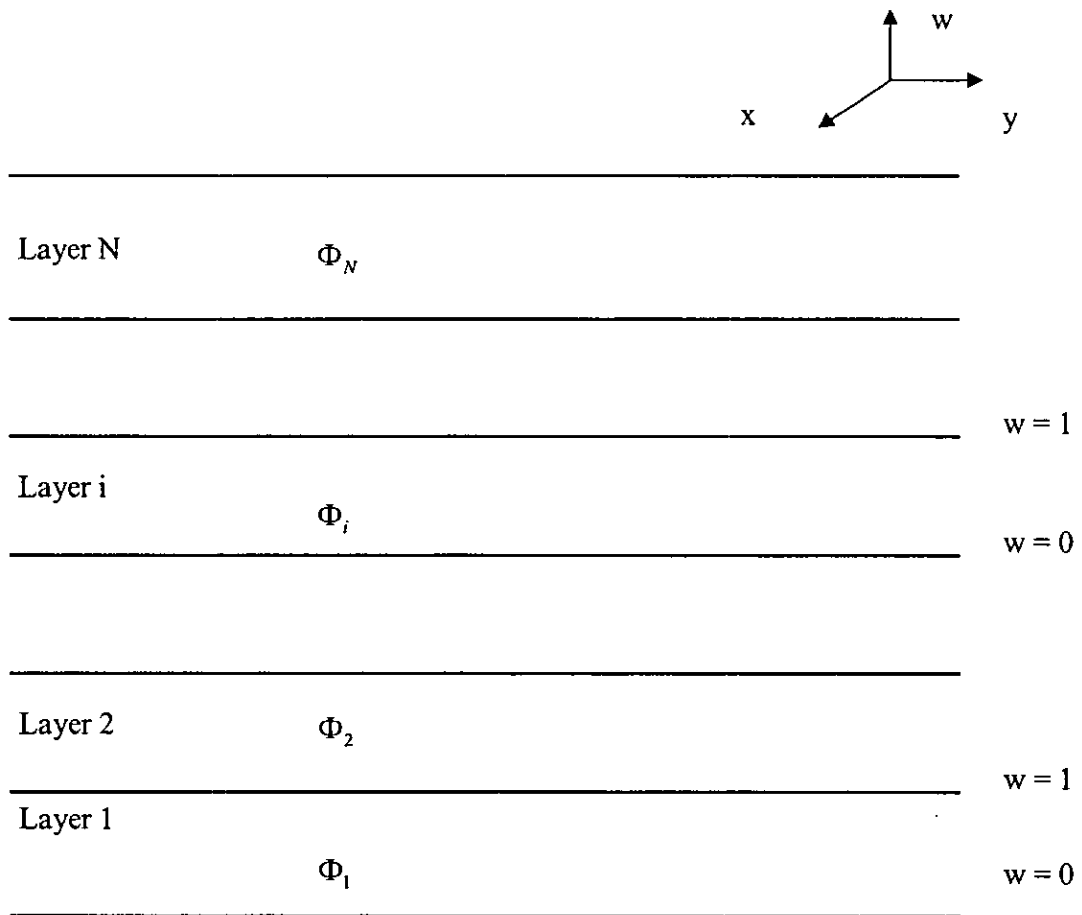


圖 3-11 垂直變量解析解示意圖

第一層

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial w^2} = P_0^{(1)}(x, y, \tau) \quad (3.95a)$$

$$\rho_1 \Phi_1(w=0, \tau) + \beta_1 \frac{\partial \Phi_1(w=0, \tau)}{\partial v} = \gamma_1(\tau) \quad (3.95b)$$

$$\Phi_1(w=1, \tau) = \Phi_2(w=0, \tau) + \bar{C}_2 - \bar{C}_1 \quad (3.95c)$$

$$\Phi_1(w, \tau=0) = f_1(w) \quad (3.95d)$$

第 i 層

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial w^2} = P_0^{(i)}(x, y, \tau) \quad (3.96a)$$

$$\frac{\partial \Phi_i(w=0, \tau)}{\partial w} = \frac{\partial \Phi_{i-1}(w=1, \tau)}{\partial w} \quad (3.96b)$$

$$\Phi_i(w=1, \tau) = \Phi_{i+1}(w=0, \tau) + \bar{C}_{i+1} - \bar{C}_i \quad (3.96c)$$

$$\Phi_i(w, \tau=0) = f_i(w) \quad (3.96d)$$

第 N 層

$$\frac{\partial \Phi_N}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \Phi_N}{\partial w^2} = P_0^{(N)}(x, y, \tau) \quad (3.97a)$$

$$\frac{\partial \Phi_N(w=0, \tau)}{\partial w} = \frac{\partial \Phi_{N-1}(w=1, \tau)}{\partial w} \quad (3.97b)$$

$$\rho_N \Phi_N(w=1, \tau) + \beta_N \frac{\partial \Phi_N(w=1, \tau)}{\partial w} = \gamma_N(\tau) \quad (3.97c)$$

$$\Phi_N(z, t=0) = f_N(z) \quad (3.97d)$$

令 $\Phi = a + v$ 則式(3.95)，式(3.96)，式(3.98)可以表示為

$$\frac{\partial a_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 a_1}{\partial w^2} = P_0^{(1)}(x, y, \tau)$$

$$\frac{\partial a_1(w=0, \tau)}{\partial w} = 0$$

$$a_1(w=1, \tau) = 0$$

$$a_1(w, \tau=0) = f_1(w)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 v_1}{\partial w^2} = 0$$

$$\rho_1 v_1(w=0, \tau) + \beta_1 \frac{\partial v_1(w=0, \tau)}{\partial w} = \gamma_1 - \alpha_1 a_1(w=0, \tau)$$

$$v_1(w=1, \tau) = v_2(w=0, \tau) + a_2(w=0, \tau) + \bar{C}_2 - \bar{C}_1$$

$$v_1(w, \tau=0) = 0$$

$$\frac{\partial a_i}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 a_i}{\partial w^2} = P_0^{(i)}(x, y, \tau)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 v_i}{\partial w^2} = 0$$

$$\frac{\partial a_i(w=0, \tau)}{\partial w} = 0$$

$$a_i(w=1, \tau) = 0$$

$$a_i(w, \tau=0) = f_i(w)$$

$$\frac{\partial v_i(w=0, \tau)}{\partial w} = \frac{\partial v_{i-1}(w=1, \tau)}{\partial w} + \frac{\partial \bar{a}_{i-1}(w=1, \tau)}{\partial w}$$

$$v_i(w=1, \tau) = v_{i+1}(w=0, \tau) + a_{i+1}(w=0, \tau) + \bar{C}_{i+1} - \bar{C}_i$$

$$v_i(w, \tau=0) = 0$$

$$\frac{\partial a_N}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 a_N}{\partial w^2} = P_0^{(N)}(x, y, \tau)$$

$$\frac{\partial a_N(w=0, \tau)}{\partial w} = 0$$

$$a_N(w=1, \tau) = 0$$

$$a_N(w, \tau=0) = f_N(w)$$

$$\frac{\partial v_N}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 v_N}{\partial w^2} = 0$$

$$\frac{\partial v_N(w=0, \tau)}{\partial w} = \frac{\partial v_{N-1}(w=1, \tau)}{\partial w} + \frac{\partial \bar{a}_{N-1}(w=1, \tau)}{\partial w}$$

$$\rho_N v_N(w=1, \tau) + \beta_N \frac{\partial v_N(w=1, \tau)}{\partial w} = \gamma_N - \beta_N \frac{\partial \bar{a}_N(w=1, \tau)}{\partial w}$$

$$v_N(w, \tau=0) = 0$$

在求解的方法上， a_i 可以特徵方程展開法(eigenfunction expansion)求解，詳請參見(Haberman, 1983)。

$$\begin{aligned} a_i(w, \tau) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\tau) E_n(w) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n(0) e^{-\beta_n^2 \tau} + e^{-\beta_n^2 \tau} \int_0^{\tau} 2 \left(\int_0^1 \cos \beta_n w dw \right) P_0^i(\tau') e^{\beta_n^2 \tau'} d\tau' \right) \cos \beta_n w \end{aligned} \quad (3.99)$$

$$A_n(0) = \frac{\int_0^1 f^i(w) \cos \beta_n w dw}{\int_0^1 \cos^2 \beta_n w dw} \quad (3.100)$$

$$A_n(\tau) e^{\lambda \tau} = A_n(0) + \int_0^{\tau} 2 \int_0^1 P_0^i(\tau') \cos \beta_n w dw e^{\lambda \tau'} d\tau' \quad (3.101)$$

v_i 之求解可以 Duhamel's theorem 求解，詳請參見(Ozisik, 1980)

$$\begin{aligned} v_i &= f_1^i(\tau)(w-1) + f_2^i(\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2f_1^i(\tau)}{\beta_n^2} \cos \beta_n w - 2 \cos \beta_n w e^{-\beta_n^2 \tau} \int_0^{\tau} f_1^i(\tau') e^{\beta_n^2 \tau'} d\tau' \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 \sin \beta_n f_2^i(\tau)}{\beta_n} \right) \cos \beta_n w + 2 \beta_n \sin \beta_n \cos \beta_n w e^{-\beta_n^2 \tau} \int_0^{\tau} f_2^i(\tau') e^{\beta_n^2 \tau'} d\tau' \end{aligned} \quad (3.102)$$

$$f_1^i(\tau) = \frac{\partial v_{i-1}(w=1, \tau)}{\partial w} + \frac{\partial a_{i-1}(w=1, \tau)}{\partial w} \quad (3.103)$$

$$f_2^i(\tau) = v_{i+1}(w=0, \tau) + a_{i+1}(w=0, \tau) + \bar{C}_{i+1} - \bar{C}_i \quad (3.104)$$

將 a_i , v_i 之解以式(3.93a)與式(3.93c)轉換回來，可得到垂向變量濃度 C' 。

三維模式(垂直分層、水平分區)之計算步驟

為了計算效率與精確度之考量，本模式將三維計算拆解為水平平均值計算與垂向變量計算，其計算流程圖如圖 3-12 所示

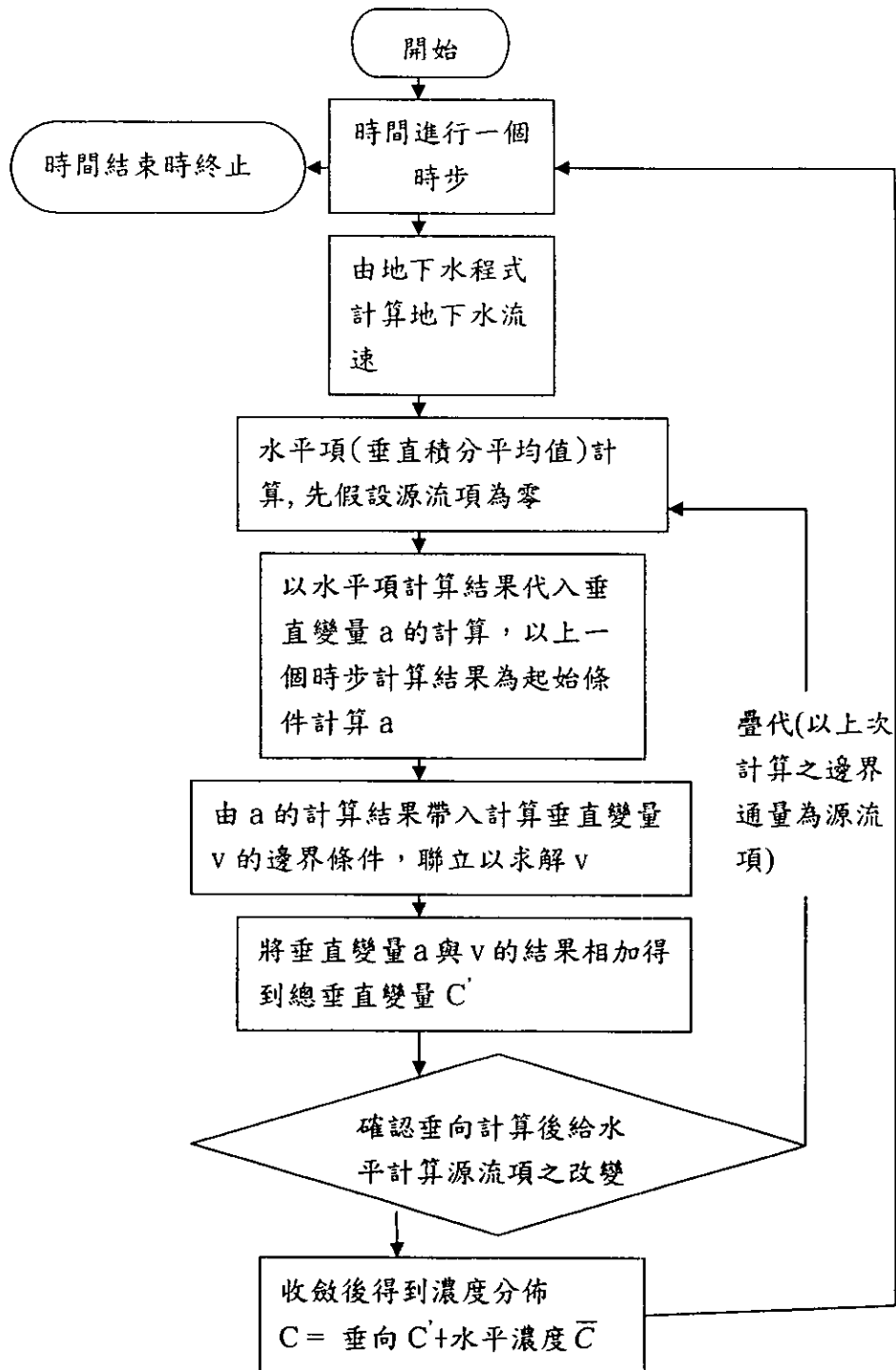


圖 3-12 三維計算流程圖

在計算中，解析解的積分以集合方式取代，集合的項次取到 $N=50$ ， $K=11$ ，其中 K 為每一單層在垂向取的點數(number of node)， N 為模數

(mode), 表示的方法如下:

$$a_i(w, \tau) = \sum_{n=1}^N \left(A_n(0) e^{-\beta_n^2 \tau} + e^{-\beta_n^2 \tau} \int_0^1 2 \left(\int_0^1 \cos \beta_n w dw \right) P_0^i(\tau') e^{\beta_n^2 \tau'} d\tau' \right) \cos \beta_n w \quad (3.105)$$

$$A_n(0) = 2 \sum_{k=1}^K f^i(w) \cos \beta_n w_k \Delta w_k \quad (3.106)$$

$$\left(\int_0^1 \cos \beta_n w P_0^i(\tau') dw \right) = \sum_{k=1}^K 2 \cos \beta_n w_k P_0^i(\tau') \Delta w_k \quad (3.107)$$

$$\int_0^1 2 \left(\int_0^1 \cos \beta_n w dw \right) P_0^i(\tau') e^{\beta_n^2 \tau'} d\tau' \quad (3.108)$$

由於在式(3.107)採用數值積分會因為時步過大而在導致積分指數函數時產生過大誤差，為了避免因為數值積分而產生誤差，在計算式(3.107)時將 $P_0^i(\tau')$ 以常數近似，而以解析解進行計算。如此雖可能造成些許誤差，但卻能避免因為直接採用數值積分造成的誤差過大，且能提供足夠精確之模擬結果。

分層地下水計算及質量傳輸模式之關係除如圖 3-12 所示之外，所需之輸入資料如表 3-1 所示。由圖 3-12 即可知地下水流計算及質量傳輸計算之關係。

表 3-1 地下水流計算及質量傳輸計算所需輸入資料

| 參數 | 項目 |
|--------|-------------------------------|
| 質量傳輸參數 | 源流項 |
| | 初始濃度 (M) |
| | 延散係數 (D_{ij}) |
| | 土層上下邊界條件 |
| | 分區邊界條件 |
| 流體參數 | 流體密度 (ρ_w) |
| | 流體壓縮係數 (β) |
| 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 (Δt) |
| | 地理座標(x,y,z) |
| | 含水層與阻水層厚度 (B) |

(二) 具明顯密度變化界面

原始方程式詳細推導已呈現於第三章第二回之理論分析中，在此不加詳細說明僅列最後結果，式中下標 s、f 分別表示海水與淡水。

式 (3.109) 至式 (3.111) 為各種情況下之控制方程式：

(I) 含水層全為淡水

$$\begin{aligned} & K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} \\ & = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial t} + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + \overline{Q^e} \delta(x-x_w) \delta(y-y_w) \end{aligned} \quad (3.109)$$

(II) 含水層為海水部分且扣除淡水作用

(a) 含界面

$$\begin{aligned} & \xi \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} \right] + \xi \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} \right] \\ & = S_0 \xi \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} - S_0 \phi_s^e \Big|_s \frac{\partial \zeta}{\partial t} + K_s \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_s \right) + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_s \right) \\ & + \left(K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_s + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x} \Big|_s \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \left(K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_s + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial y} \Big|_s \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.110)$$

(b) 不含界面

$$\begin{aligned} & B \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial x^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial x^2} \right] + B \left[K_s \frac{\partial^2 \overline{\phi_f^e}}{\partial y^2} + K_f \frac{\partial^2 \overline{\phi_s^e}}{\partial y^2} \right] \\ & = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} + K_s \left(\left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) + K_f \left(\left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_i} - \left. \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \right|_{b_{i+1}} \right) \end{aligned} \quad (3.111)$$

式 (3.112) 至式 (3.130) 為各種邊界條件之方程式

(I) 垂直邊界

(i) 自然邊界

定水頭邊界條件即 Dirchlet 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水域 } \phi_f^e \Big|_{\text{boundary}} = \phi_f^* \quad (3.112)$$

$$(b) \text{ 在海水區域扣除淡水作用區域 } \phi_s^e \Big|_{\text{boundary}} = \frac{\phi_s^* - \phi_f^*}{\varepsilon} \quad (3.113)$$

流量邊界條件即 Neumann 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水域 } K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} = -q_{fn} \quad (3.114)$$

(b) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} = \frac{-q_{sn} + q_{fn}}{\varepsilon} \quad (3.115)$$

式 (3.112) 至式 (3.115) 中 ϕ_f^* 、 ϕ_s^* 與 q_{sn} 、 q_{fn} 為給定的邊界條件值

(ii) 內部邊界

定水頭邊界條件即 Dirchlet 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水域 } \phi_f^{e1} = \phi_f^{e2} \quad (3.116)$$

$$(b) \text{ 在海水區域扣除淡水作用區域 } \phi_s^{e1} = \phi_s^{e2} \quad (3.117)$$

流量邊界條件即 Neumann 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水域 } \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^2 \quad (3.118)$$

(b) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$\left(K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial n} + K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial n} \right)^2 \quad (3.119)$$

式 (3.116) 至式 (3.119) 中上標 1、2 分別表示相鄰邊界不同分層之介質

(II) 水平邊界

(i) 自然邊界

定水頭邊界條件即 Dirchlet 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水區域 } \overline{\phi_f^e} = \overline{\phi_c} \quad (3.120)$$

$$(b) \text{ 在海水區域扣除淡水作用區域 } \overline{\phi_s^e} = \frac{\overline{\phi_d} - \overline{\phi_c}}{\varepsilon} \quad (3.121)$$

流量邊界條件即 Neumann 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水區域 } \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} = -q_f \quad (3.122)$$

(b) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} = \frac{-q_{sn} + q_{fn}}{\varepsilon} \quad (3.123)$$

式 (3.120) 至式 (3.123) 中 $\overline{\phi_c}, \overline{\phi_d}, q_s, q_f$ 為給定值

(ii) 內部邊界

定水頭邊界條件即 Dirchlet 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水區域 } \overline{\phi_f^e}^1 = \overline{\phi_f^e}^2 \quad (3.124)$$

$$(b) \text{ 在海水區域扣除淡水作用區域 } \overline{\phi_s^e}^1 = \overline{\phi_s^e}^2 \quad (3.125)$$

流量邊界條件即 Neumann 型態的邊界條件

$$(a) \text{ 在全為淡水區域 } \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^2 \quad (3.126)$$

(b) 在海水區域扣除淡水作用區域

$$\left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^1 = \left(K_f \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial n} + K_s \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial n} \right)^2 \quad (3.127)$$

式 (3.124) 至式 (3.127) 中上標 1、2 分別表示相鄰邊界不同分層之介質

(III) 移動邊界

(i) 海水與淡水交界面

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial t} + \frac{1}{S_y} \frac{(K_f)^2}{K_s} \left[\frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial x} \left(\frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial y} \left(\frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial y} \right) - \frac{\partial \overline{\phi_s^e}}{\partial z} \right] \\ & = -\frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.128)$$

(ii) 自由液面

(a) 淡水

$$S_y \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial t} \Big|_{b_{i+1}} = -K_f \frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} + K_f \left(\frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial x} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 + K_f \left(\frac{\partial \overline{\phi_f^e}}{\partial y} \Big|_{b_{i+1}} \right)^2 \quad (3.129)$$

(b) 海水

$$\begin{aligned}
S_y \frac{\partial \phi_s^e}{\partial t} \Big|_{b_{i,1}} &= \left[2K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_{b_{i,1}} \frac{\partial \phi_s^e}{\partial x} \Big|_{b_{i,1}} + K_s \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial x} \Big|_{b_{i,1}} \right)^2 \right] \\
&+ \left[2K_f \frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_{b_{i,1}} \frac{\partial \phi_s^e}{\partial y} \Big|_{b_{i,1}} + K_s \left(\frac{\partial \phi_f^e}{\partial y} \Big|_{b_{i,1}} \right)^2 \right] \\
&- \left(K_s \frac{\partial \phi_f^e}{\partial z} \Big|_{b_{i,1}} + K_f \frac{\partial \phi_s^e}{\partial z} \Big|_{b_{i,1}} \right)
\end{aligned} \tag{3.130}$$

式 (3.109) 至式 (3.130) 中， $\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$ ， $\phi_f^e = \frac{P_f^e}{\rho_f g}$ 為淡水水頭變動值， $\phi_s^e = \frac{P_s^e}{\rho_s g}$ 為海水水頭變動值， P_f^e 為淡水孔隙水壓變動值， P_s^e 為海水孔隙水壓變動值， ρ_f 為淡水密度， ρ_s 為海水密度， g 為重力加速度， K_f 為淡水水力傳導係數， K_s 為海水水力傳導係數， S_0 為比貯水係數， S_y 為比出水係數， $K_s' = \frac{K_f - K_s}{\varepsilon}$ ， $\phi_s^e = \frac{\phi_s^e - \phi_f^e}{\varepsilon}$ ， Q_f 分別為淡水之流源項 (source term)， δ 為 Dirac delta 函數， $z = b_i(x, y, t)$ 、 $z = b_{i+1}(x, y, t)$ 分別表示含水層上、下邊界高程， $B = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 為拘限含水層厚度，非拘限含水層水深為 $B = \eta(x, y, t) = b_{i+1}(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ ， ζ 為明顯交界面的高程， $\xi = \zeta(x, y, t) - b_i(x, y, t)$ 表示自下邊界至明顯交界面的距離。

求解方法

研究中採用分層垂向積分方式建立模式，為了使層與層間之介面邊界能夠同時滿足水流通量以及孔隙水壓連續，故假設每個含水層之孔隙水壓在垂直方向上為二次多項式函數分布，即

$$\begin{aligned}
\phi_i^j(x, y, z, t) &= a(x, y, t) + b(x, y, t)z + c(x, y, t)z^2 \\
\phi_i^j &= \phi_f^e \text{ or } \phi_s^e
\end{aligned} \tag{3.131}$$

由式 (3.131) 中可知，一般常用之 Dupuit assumption 水流為水平流，即假設式 (3.131) 係數 $b(x, y, t)$ 與 $c(x, y, t)$ 為零之特殊例子，所以上式可同時

模擬水平流與垂直流。此外，上式之係數 a ， b 與 c 可根據上下邊界值及平均值之定義求得

$$\phi_i^j \Big|_{b_i} = a \quad (3.132)$$

$$\phi_i^j \Big|_{b_{i+1}} = a + bB + cB^2 \quad (3.133)$$

$$\overline{\phi_i^j} = \frac{1}{B} \int_0^B (a + bz + cz^2) dz \quad (3.134)$$

聯立求解(3.132),(3.133),(3.134) 可得

$$a = \phi_i^j \Big|_{b_i} \quad (3.135)$$

$$b = \frac{1}{B} \left(-2\phi_i^j \Big|_{b_{i+1}} - 4\phi_i^j \Big|_{b_i} + 6\overline{\phi_i^j} \right) \quad (3.136)$$

$$c = \frac{1}{B^2} \left(3\phi_i^j \Big|_{b_{i+1}} + 3\phi_i^j \Big|_{b_i} - 6\overline{\phi_i^j} \right) \quad (3.137)$$

對式(3.131)深度方向微分，可得

$$\frac{\partial \phi_i^j}{\partial z} \Big|_{b_{i+1}} = \frac{1}{B} \left(4\phi_i^j \Big|_{b_{i+1}} + 2\phi_i^j \Big|_{b_i} - 6\overline{\phi_i^j} \right) \quad (3.138)$$

$$\frac{\partial \phi_i^e}{\partial z} \Big|_{b_i} = \frac{1}{B} \left(-2\phi_i^j \Big|_{b_{i+1}} - 4\phi_i^j \Big|_{b_i} + 6\overline{\phi_i^j} \right) \quad (3.139)$$

式 (3.138) 及式 (3.139) 顯示上、下邊界垂直深度方向微分值可用上、下邊界水頭值以及深度積分水頭平均值來表示。垂向積分如圖 3-13 所示。

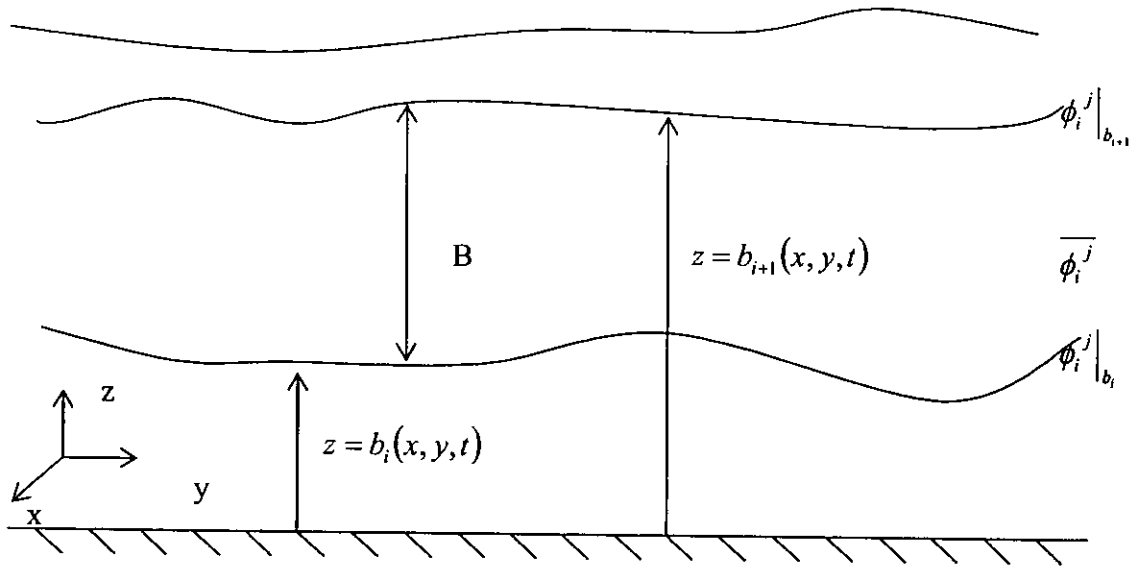


圖 3-13 含水層垂向積分示意圖

在本研究中整個區域的求解所採用的數值方法為佛羅里達大學工學院院長陳景仁教授 (C.J.Chen) (1984) 所提出的有限解析 (Finite Aalytical) 的隱式解析法，因其具有局部解析解與無條件收斂之數值特質，使得吾人得以應用其於複雜不容易收斂之數值計算問題。

根據以上所述的數值離散方式，將主要之控制方程式分別依選用的離散方式即利用有限解析法搭配有限差分法的源項 (source term) 以及代入孔隙水壓為深度的二次函數之關係式後分別將離散後的方程式展現於下：

控制方程式

(I) 含水層全為淡水

$$\begin{aligned}
& K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_{f,(i,j)}^e}}{\partial x^2} + K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi_{f,(i,j)}^e}}{\partial y^2} \\
& = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi_{f,(i,j)}^e}}{\partial t} + \frac{K_f}{B} \left(-6\overline{\phi_{f,(i,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}} + 12\overline{\phi_{f,(i,j)}^e} - 6\overline{\phi_{f,(i,j)}^e} \Big|_{b_i} \right) + \overline{Q_f}
\end{aligned} \tag{3.140}$$

若含水層為拘限含水層則 B 為土層厚度；若含水層為非拘限含水層則 $B = \eta$ 為非拘限含水層水深。上式等號左邊兩項與右邊第一項分別為有限解析法之延散項 (dispersion term) 與非恆定項 (unsteady term) 其餘為流源項 (source term)，凡偏微分方程式不符合有限差分之標準形式，須將不符合項以有限差分處理。由於本模式採用隱式有限分析法，再利用迭代法將未知數求出，此觀念亦應用於以下的方程式。

(II) 含水層為海水部分且扣除淡水作用

(a) 含交界面

$$\begin{aligned}
& K_f \xi \frac{\partial^2 \overline{\phi'_{s,(i,j)}^e}}{\partial x^2} + K_f \xi \frac{\partial^2 \overline{\phi'_{s,(i,j)}^e}}{\partial y^2} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (\xi K_f) \right] \frac{\partial \overline{\phi'_{s,(i,j)}^e}}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (\xi K_f) \right] \frac{\partial \overline{\phi'_{s,(i,j)}^e}}{\partial y} = \\
& S_0 \xi \frac{\partial \overline{\phi'_{s,(i,j)}^e}}{\partial t} + \frac{K_f}{\xi} \left(-6\overline{\phi'_{s,(i,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}} + 12\overline{\phi'_{s,(i,j)}^e} - 6\overline{\phi'_{s,(i,j)}^e} \Big|_{b_i} \right) \\
& + K_f \left[\frac{(1 + \varepsilon) \left(\frac{\overline{\phi'_{s,(i+1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{s,(i-1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right)^2}{2\Delta x} + \right. \\
& \left. \frac{\overline{\phi'_{s,(i+1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{s,(i-1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \frac{\overline{\phi'_{f,(i+1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{f,(i-1,j)}^e} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + K_f \left[(1 + \varepsilon) \left(\frac{\phi'_{s,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right)^2 + \right. \\
& \left. \frac{\phi'_{s,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right] \\
& + \frac{K'_s}{\xi} \left(-6\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} + 12\overline{\phi'_{f,(i,j)}} - 6\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i} \right) \\
& + K'_s \xi \left[\left(\frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - 2\overline{\phi'_{f,(i,j)}} + \phi'_{f,(i-1,j)} \Big|_{b_{i-1}}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - 2\overline{\phi'_{f,(i,j)}} + \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i-1}}}{2\Delta y} \right)^2 \right]
\end{aligned} \tag{3.141}$$

(b) 不含界面

$$\begin{aligned}
& K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi'_{s,(i,j)}}}{\partial x^2} + K_f B \frac{\partial^2 \overline{\phi'_{s,(i,j)}}}{\partial y^2} = S_0 B \frac{\partial \overline{\phi'_{s,(i,j)}}}{\partial t} \\
& + \frac{K_f}{B} \left(-6\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} + 12\overline{\phi'_{s,(i,j)}} - 6\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_i} \right) \\
& - K'_s B \left[\left(\frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - 2\overline{\phi'_{f,(i,j)}} + \phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - 2\overline{\phi'_{f,(i,j)}} + \phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i}}{2\Delta y} \right)^2 \right] \\
& + \frac{K'_s}{B} \left(-6\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} + 12\overline{\phi'_{f,(i,j)}} - 6\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i} \right)
\end{aligned} \tag{3.142}$$

式(3.141)中，等號左手邊第三、四項為移流項 (advection term)，其餘定義如式 (3.140) 所述。

垂直邊界與水平邊界條件為簡單的差分式，在此不另行展開列出。

移動邊界

(i) 海水與淡水界面

$$\begin{aligned}
& S_y \frac{\partial \phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{\partial t} - \frac{(K_f)^2}{K'_s} \frac{1}{\xi} \left(4\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_i}} + 2\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_i} \right) \\
& + \frac{(K_f)^2}{K'_s} \left[\left(\frac{\phi'_{s,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left(\frac{\phi'_{s,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right) \right] \\
& + \frac{(K_f)^2}{K'_s} \left[\left(\frac{\phi'_{s,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right)^2 + \right. \\
& \left. \left(\frac{\phi'_{s,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right) \right] \\
& = -S_y \frac{\partial \phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{\partial t}
\end{aligned} \tag{3.143}$$

(ii) 自由液面

(a) 淡水

$$\begin{aligned}
& S_y \frac{\partial \phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{\partial t} = -K_f \left(4\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i}} + 2\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i} \right) \\
& + K_f \left[\left(\frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i-1,j)} \Big|_{b_i}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right)^2 \right]
\end{aligned} \tag{3.144}$$

(b) 海水

$$S_y \frac{\partial \phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{\partial t} = -\frac{K_f}{\xi} \left(4\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_i}} + 2\phi'_{s,(i,j)} \Big|_{b_i} \right)$$

$$\begin{aligned}
& 2K_f \left(\frac{\phi'_{s,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right) \\
& + 2K_f \left(\frac{\phi'_{s,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{s,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right) \\
& - \frac{K'_s}{\xi} \left(4\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \overline{\phi'_{f,(i,j)}} + 2\phi'_{f,(i,j)} \Big|_{b_i} \right) \\
& + K'_s \left[\left(\frac{\phi'_{f,(i+1,j)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i-1,j)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\phi'_{f,(i,j+1)} \Big|_{b_{i+1}} - \phi'_{f,(i,j-1)} \Big|_{b_{i+1}}}{2\Delta y} \right)^2 \right] \quad (3.145)
\end{aligned}$$

式 (3.143) 至式 (3.145) 偏微分式子，不符合有限解析法之標準形式，故在此三個式子皆以有限差分法處理之。

以上所列為式 (3.109) 至式 (3.111) 及式 (3.128) 至式 (3.130) 各種情況下控制方程式的離散式，其中下標 (i, j) 表示水頭所處位置，但實際應用在數值計算時須考量係數矩陣，若係數矩陣值過小亦或元素值差異過大易造成發散，故在進行數值計算前須先將矩陣整理成 well-posed 的矩陣。即

式 (3.140) 及式 (3.142) 分別在等號左右兩側各乘 $\frac{B}{K_f}$

式 (3.141) 在等號左右兩側各乘 $\frac{\xi}{K_f}$

式 (3.143) 在等號左右兩側各乘 $\frac{S_y K'_s \xi}{(K_f)^2 \Delta t}$

式 (3.144)、(3.145) 在等號左右兩側各乘 $\frac{S_y \eta}{K_f \Delta t}$

此外，計算海水部分由於有含交界面與沒有交界面的區域控制方程式並不一樣，在數值上有交面與沒有交界面的連接點處為一個不連續點（如圖 3-14），模擬結果較不好，如果將無交界面的控制方程式置換成含

有交界面的控制方程式（如圖 3-15），數值模擬結果較佳，故為現階段模擬所採用。求解之運算流程圖如圖 3-16 所示。

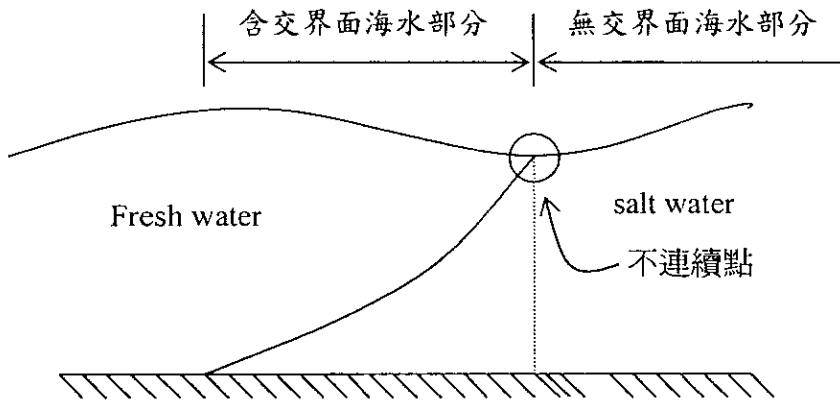


圖 3-14 交界面示意圖

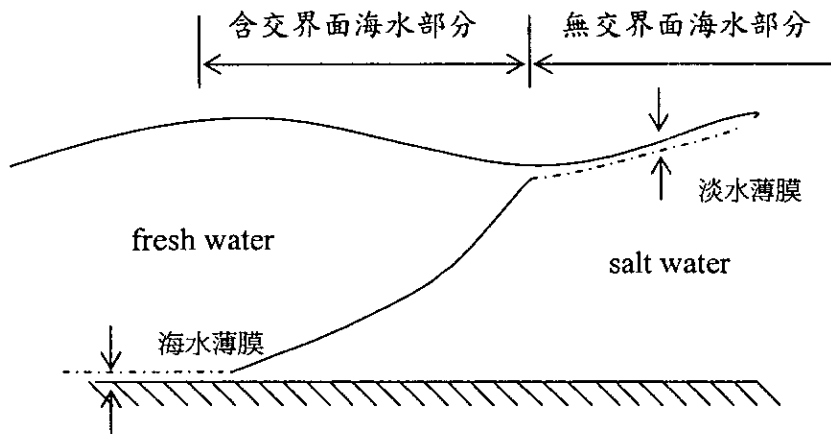


圖 3-15 具海水、淡水薄層之交界面示意圖

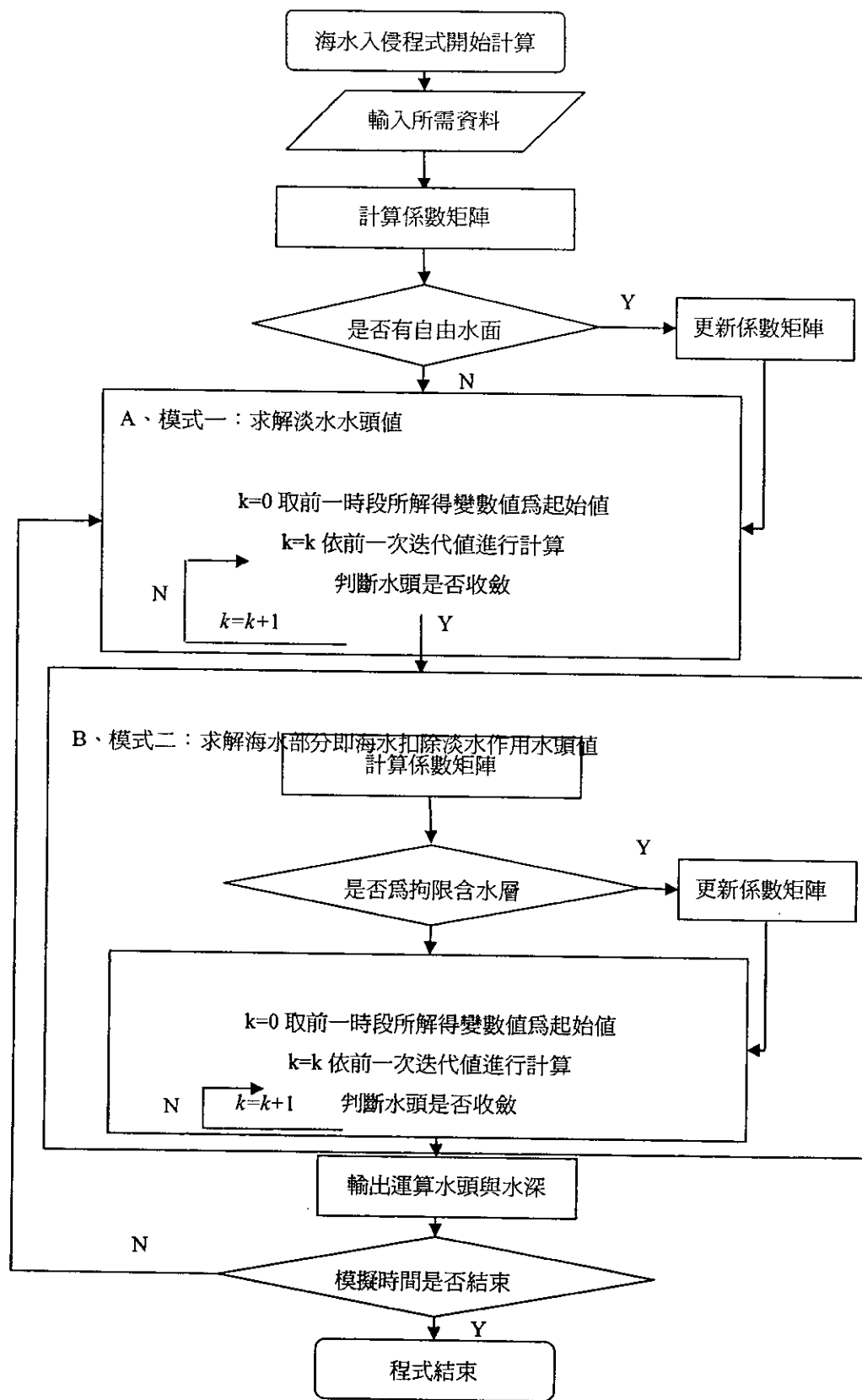


圖 3-16 流程圖

四、模式之測試與驗證

(一) 不具密度變化

水平二維變量(垂向積分平均)計算

式(3.3)中忽略混合延散係數 D_{xy} 、流通量 f_1 以及 y 方向之流速，則可簡化為

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} \quad (3.146)$$

若邊界條件為

$$\bar{C}(x, y, t) \rightarrow 0 \text{ as } |x| \rightarrow \infty \text{ or } |y| \rightarrow \infty \quad (3.147)$$

且時間為零時，即初始條件，在座標 $(x = x_0, y = y_0)$ 有一質量 M 之污染物，則式(3.147)之解析解為

$$\Phi(x, y, t) = \frac{M}{4\pi(D_x D_y)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[(x-x_0)-Ut]^2}{4D_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4D_y t}\right\} \quad (3.148)$$

為了使模擬初始污染物濃度為 1，將模擬起始時間定為 $t = t_0$ ，且質量為 $M = 4\pi(D_x D_y)^{1/2} t_0$ 。模擬所使用之參數為， $t_0 = 1500$ s、 $U = 1$ m/s、 $D_x = 30$ m²/s、 $D_y = 30$ m²/s、 x 方向以及 y 方向之網格大小為 $\Delta x = \Delta y = 40$ m、時間間距為 $\Delta t = 15$ s 以及 $(x_0, y_0) = (4000 \text{ m}, 2000 \text{ m})$ 。

時間 $t = (t_0 + 600)$ s 時，等污染物濃度模擬結果，如圖 3-17 所示。

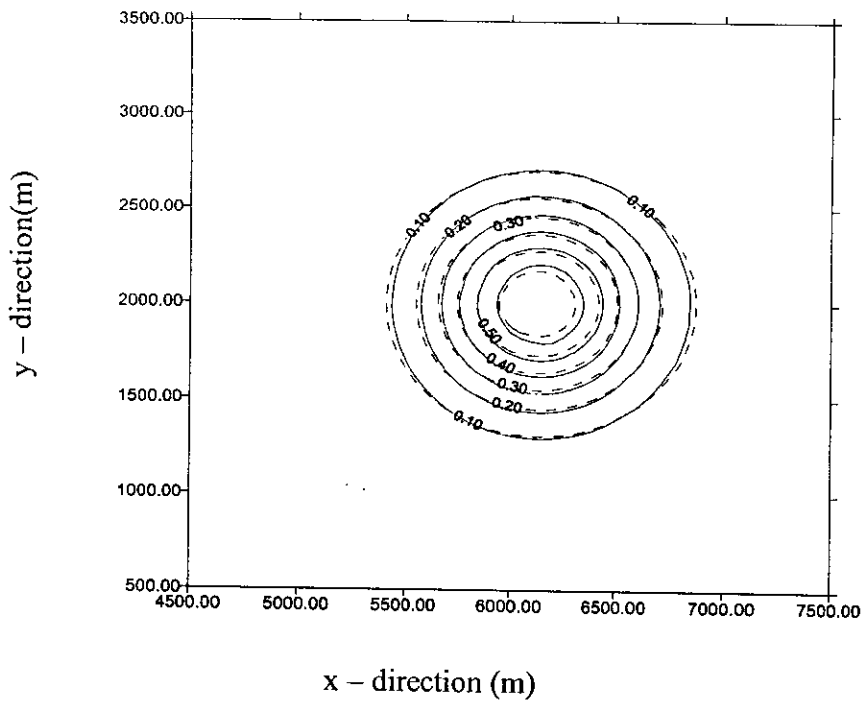


圖 3-17 移流延散方程式有限解析法等濃度分佈模擬結果
(實線為解析解)

沿 $y = 2000$ m 線上不同 x 座標之污染物濃度分布圖，如圖 3.18 所示。

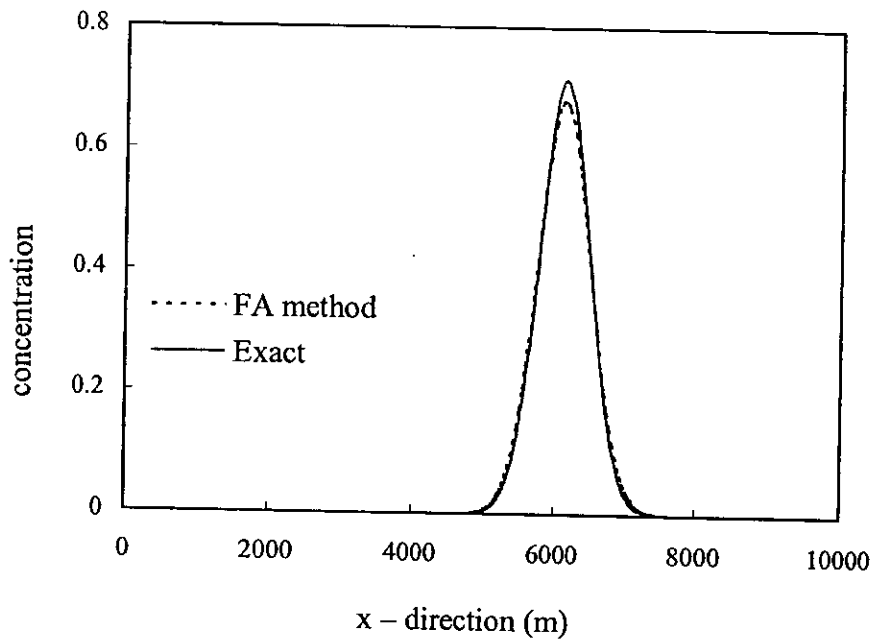


圖 3-18 移流延散方程式有限解析法濃度分佈模擬結果(沿 $y = 2000$ m 線)

由圖 3-17 與圖 3-18 可知，有限解析法可以合理地模擬污染物之傳輸現象。

接下來，進一步應用無因次化移流擴散方程式展示有限解析法。無因次化移流擴散方程式可表示為

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (3.149)$$

其中 D 代表雷諾數(Reynold number)之倒數。在初始條件為

$$\Phi(x, y, 0) = \sin(\pi x) + \sin(\pi y) \quad (3.150)$$

以及邊界條件為

$$\begin{aligned} \Phi(0, y, t) &= (\sin(-\pi t) + \sin \pi(y - t)) \exp(-D\pi^2 t) \\ \Phi(1, y, t) &= (\sin \pi(1 - t) + \sin \pi(y - t)) \exp(-D\pi^2 t) \\ \Phi(x, 0, t) &= (\sin \pi(x - t) + \sin(-\pi t)) \exp(-D\pi^2 t) \\ \Phi(x, 1, t) &= (\sin \pi(x - t) + \sin \pi(1 - t)) \exp(-D\pi^2 t) \end{aligned} \quad (3.151)$$

則式(3.151)之解析解可表示如下

$$\Phi(x, y, t) = (\sin \pi(x - t) + \sin \pi(y - t)) \exp(-D\pi^2 t) \quad (3.152)$$

模擬所使用之參數為， $D = 0.02$ 、 x 方向以及 y 方向之網格小為 $\Delta x = \Delta y = 0.01$ 、時間間距為 $\Delta t = 0.005$ 。模擬時間為 $t = 1$ 與 $t = 2$ 時， Φ 在 $x = y$ 線上之模擬結果，如圖 3-19 所示。由圖 3-19 可再一次發現，有限解析法可以準確地模擬移流擴散方程式。

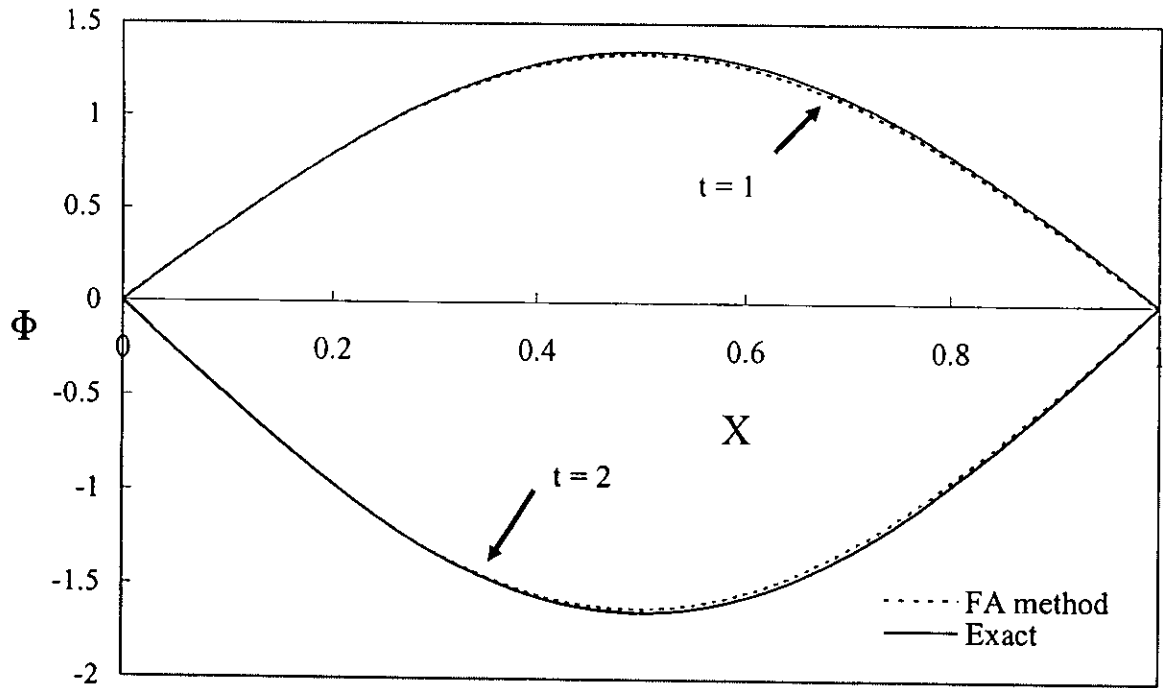


圖 3-19 無因次移流擴散方程式有限解析法在 $x=y$ 之模擬結果

垂向變量傳輸計算

為了驗證含水層之多層垂向一維之變量，即式(3.88)、(3.89)、(3.90)，吾人將以常數邊界常數起始值之一維擴散方程式進行虛擬分層，將單層問題虛擬分為三層，如圖 3-20 所示

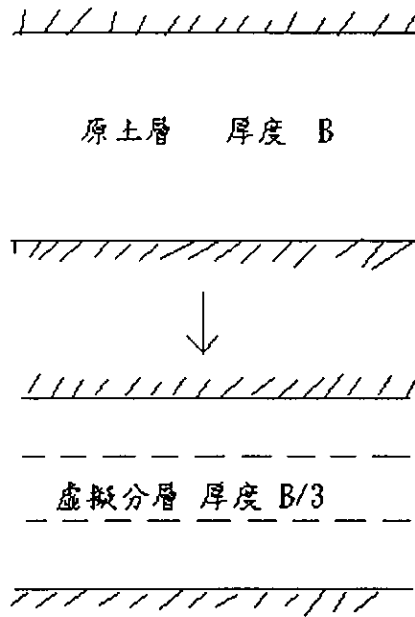


圖 3-20 虛擬分層示意圖

再以得到之多層聯立之一維擴散方程式進行三層聯立計算，最後以單層擴散方程式之解析解予以比對驗證。

單一層之擴散方程式為

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = P_0(x, y, t) \quad (3.153 a)$$

$$\frac{\partial C(z=0, t)}{\partial z} = f_1 \quad (3.153b)$$

$$C(z = B, t) = f_2 \quad (3.153c)$$

$$C(z, t = 0) = f(z) \quad (3.153d)$$

令非均值項 $p_0=0$ ，下邊界 $f_1=0$ ，上邊界 $f_2=90$ ，起始值(背景濃度) $f_w=5$ ，則上式之解析解為(Ozisik, 1980)

$$C = 90 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{170 \times \sin \beta_n}{\beta_n} \right) e^{-\beta_n^2 D_z t} \cos \beta_n w \quad (3.154)$$

令原土層厚度 60 m，擴散係數 $D_z = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$ 。將土層虛擬分為三層，

土層厚度分別為 20 m，非均項 $p_0 = 0$ ，下邊界為不透水邊界，最上層上邊界有濃度 90，起始值(背景濃度) $c_w = 5$ 。

在時間 $t=150s$ 時，污染物濃度在垂向上之模擬結果，如圖 3-21 所示

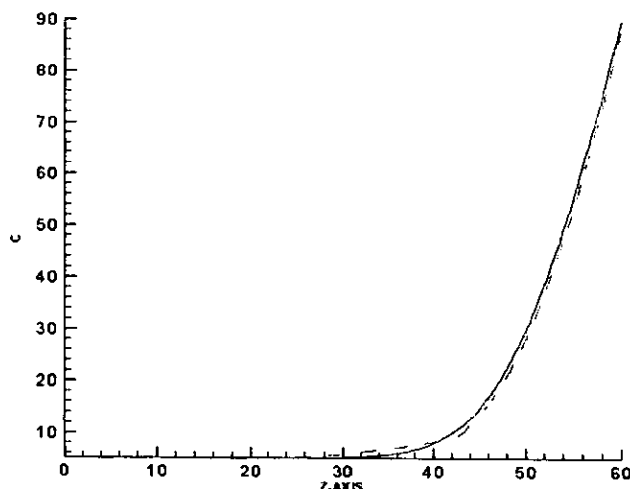


圖 3-21 虛擬分層聯立計算與單層解析解對照圖(實線為解析解)

接下來，探討包含了含水層與阻水層組合的多層非均質問題，如圖 3-22 所示

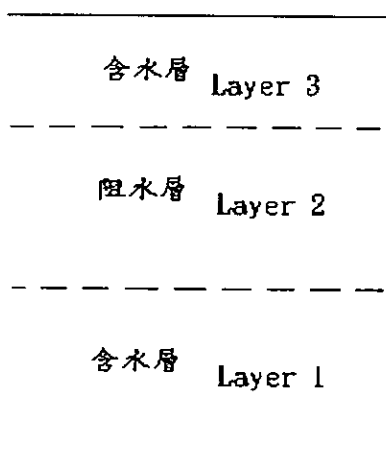


圖 3-22 設計案例土層分佈圖

在設計案例土層厚度分別為 20 m，各層的擴散係數分別為 $D_{z1} = 0.9 \text{ m}^2/\text{s}$ ， $D_{z2} = 0.06 \text{ m}^2/\text{s}$ ， $D_{z3} = 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ ，非均項 $p_0 = 0$ ，下邊界為不透水邊界，最上層上邊界有濃度 90，起始值(背景濃度) $c_w = 5$ ，中間阻水層有 Z

方向流速 $U_z=0.05$ m/s。計算結果如圖 3-23 所示。

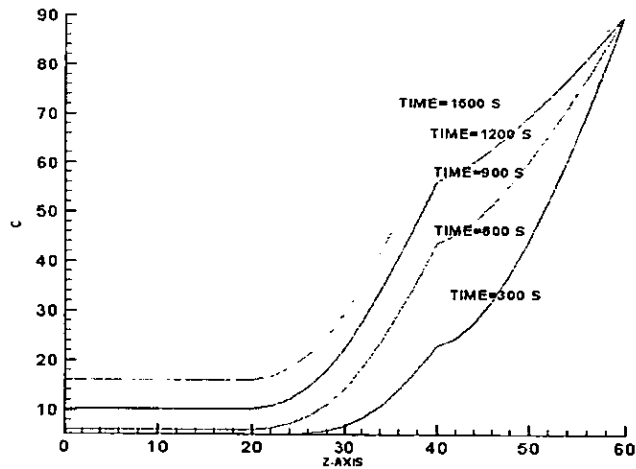


圖 3-23 時間與垂向濃度變化圖

由圖 3-21 與圖 3-23 可知，本模式在垂向變量之計算上可以合理地模擬污染物傳輸之現象。

三維計算之驗證

本模式之目的為進行三維質量傳輸之計算，式(3.5)忽略 D_{xy} 、 D_{xz} 、 D_{yz} 及 u_y 、 u_z ，可表示為

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.155)$$

時間為零時，即初始條件，在座標 $(x = x_0, y = y_0, z = z_0)$ 有一質量 M 之污染物，

水平向邊界條件為

$$\bar{C}(x, y, t) \rightarrow 0 \text{ as } |x| \rightarrow \infty \text{ or } |y| \rightarrow \infty \quad (3.156)$$

垂向邊界條件為

$$\frac{\partial C(z=0, t)}{\partial z} = 0$$

$$\text{as } z=0 \text{ and } z=B \quad (3.157)$$

解析解為

$$C(x, y, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{M}{8(\pi^3 t^3 D_x D_y D_z)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{[(x-x_0)-Ut]^2}{4D_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4D_y t} - \frac{(z-z_0-nB)^2}{4D_z t} \right\} \quad (3.158)$$

其驗證方法與垂向一維的驗證方法相同，均將單層均質層虛擬分層為三層，如圖 3-22 所示，將濃度質點起始位置位於土層中心(200m,500m,30m)的地方。為了使模擬初始污染物濃度為 1，將模擬起始時間定為 $t=t_0$ ，且質量為 $M = 8(\pi^3 t_0^3 D_x D_y D_z)^{1/2}$ 。模擬所使用之參數為， $t_0 = 800$ s, $U = 0.4$ m/s, $D_x = 9.4$ m²/s, $D_y = 4.2$ m²/s, $D_z = 1.0$ m²/s, x 方向以及 y 方向之網格大小為 $\Delta x = \Delta y = 30$ m，水平向模擬距離為 1200m，土層厚度 $B = 60$ m 共分為三層，每一層的厚度 B 為 20m, z 方向之網格大小為 2 m，時間間距為 $\Delta t = 10$ sec, 模擬時間為 100 sec。計算時間 $t = (t_0 + 100s)$ 之演算結果，濃度在 $z = 15$ m, x - y 剖面等濃度線分佈如圖 3-24 所示

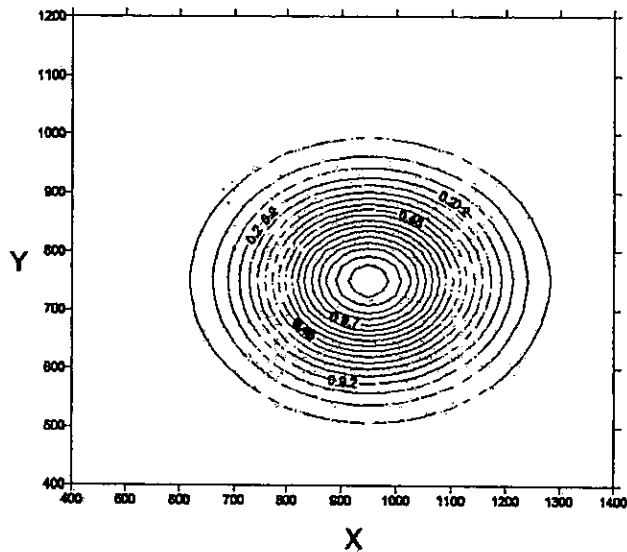


圖 3-24 濃度在 x - y 方向上的分佈圖(實線為解析解)

在同時刻 x-z 剖面上之濃度分佈線如圖 3-25 所示

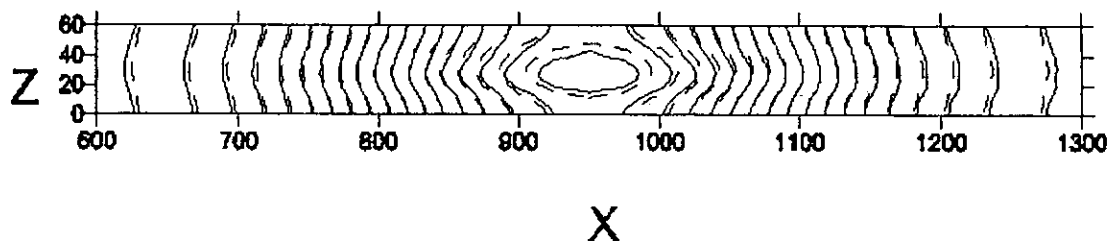


圖 3-25 濃度在 x-z 方向上的分佈圖(實線為解析解)

而濃度在 y-z 剖面上之濃度分佈線如圖 3-26 所示

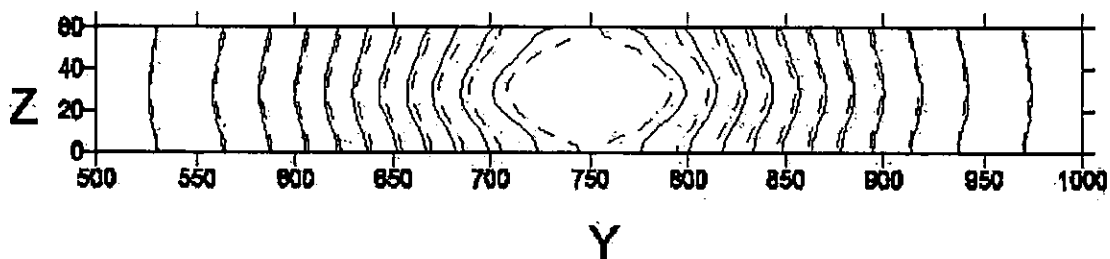


圖 3-26 濃度在 y-z 方向上的分佈圖(實線為解析解)

由圖 3-24、3-25、3-26 可知，本模式可以合理地模擬污染物之三維傳輸現象。

簡單水平分區測試

在本節將利用一簡單案例，測試溶質質量傳輸模式之水平分區計算功能。溶質質量傳輸控制方程式(見上年度期末報告)，若忽略垂直方向之變化，以及混合延散係數、流通量與 y 方向之流速，則可簡化為

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} \quad (3.159)$$

其中 \bar{C} 為垂項積分平均濃度， \bar{u}_x 為垂項積分平均速度， D_x 、 D_y 為 x 及 y 方向之延散係數。

若邊界條件為

$$\bar{C}(x, y, t) \rightarrow 0 \text{ as } |x| \rightarrow \infty \text{ or } |y| \rightarrow \infty \quad (3.160)$$

且時間為零時，即初始條件，在座標 $(x = x_0, y = y_0)$ 有一質量 M 之污染物，則式(3.159)之解析解為

$$\Phi(x, y, t) = \frac{M}{4\pi(D_x D_y)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[(x - x_0) - Ut]^2}{4D_x t} - \frac{(y - y_0)^2}{4D_y t}\right\} \quad (3.161)$$

為使模擬初始污染物濃度為 1，將模擬起始時間定為 $t = t_0$ ，且質量為 $M = 4\pi(D_x D_y)^{1/2} t_0$ 。模擬所使用之參數為， $t_0 = 1000$ s、 $U = 1$ m/s、 $D_y = 5$ m²/s、 $D_x = 4$ m²/s、 x 方向以及 y 方向之網格大小為 $\Delta x = \Delta y = 35$ m、時間間距為 $\Delta t = 10$ s 以及 $(x_0, y_0) = (50 \text{ m}, 1700 \text{ m})$ 。

為測試水平分區之計算能力，先將土層虛擬分成兩區，如圖 3-27 所示。再分別利用虛擬分區與不分區方式模擬，時間 $t = (t_0 + 900)$ s 時，兩者之計算結果，如圖 3-28 所示。由圖 3-28 可知，虛擬分區與不分區所得之結果相當近似，顯示模式具有水平分區計算之功能。

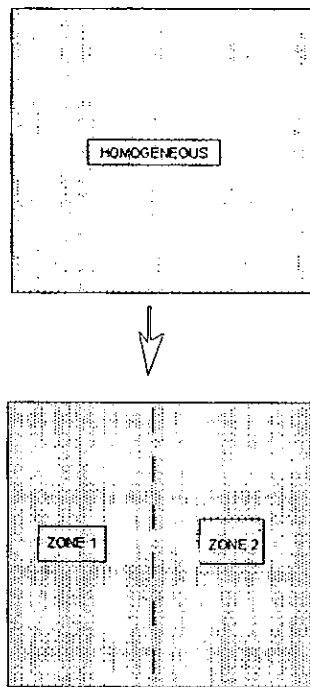


圖 3-27 水平虛擬分區示意圖

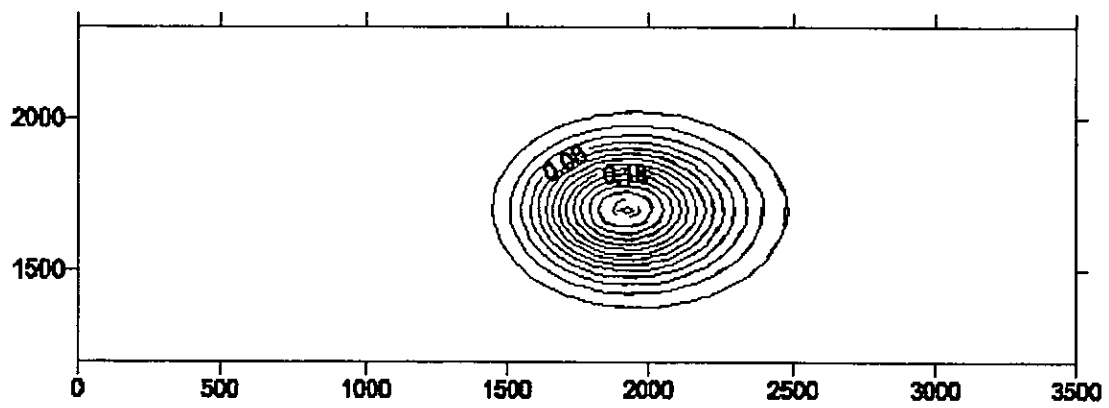


圖 3-28 水平分區模擬結果(實線為未分區之結果)

非均質土層之測試

本測試案例之目的在於藉由地質分層在水平方向非均質之案例，展現本模式對於複雜土層分布之計算能力。為了處理土層之非均質性，將模擬區域作垂向虛擬分層與水平區域拆解，如圖 3-29 所示。

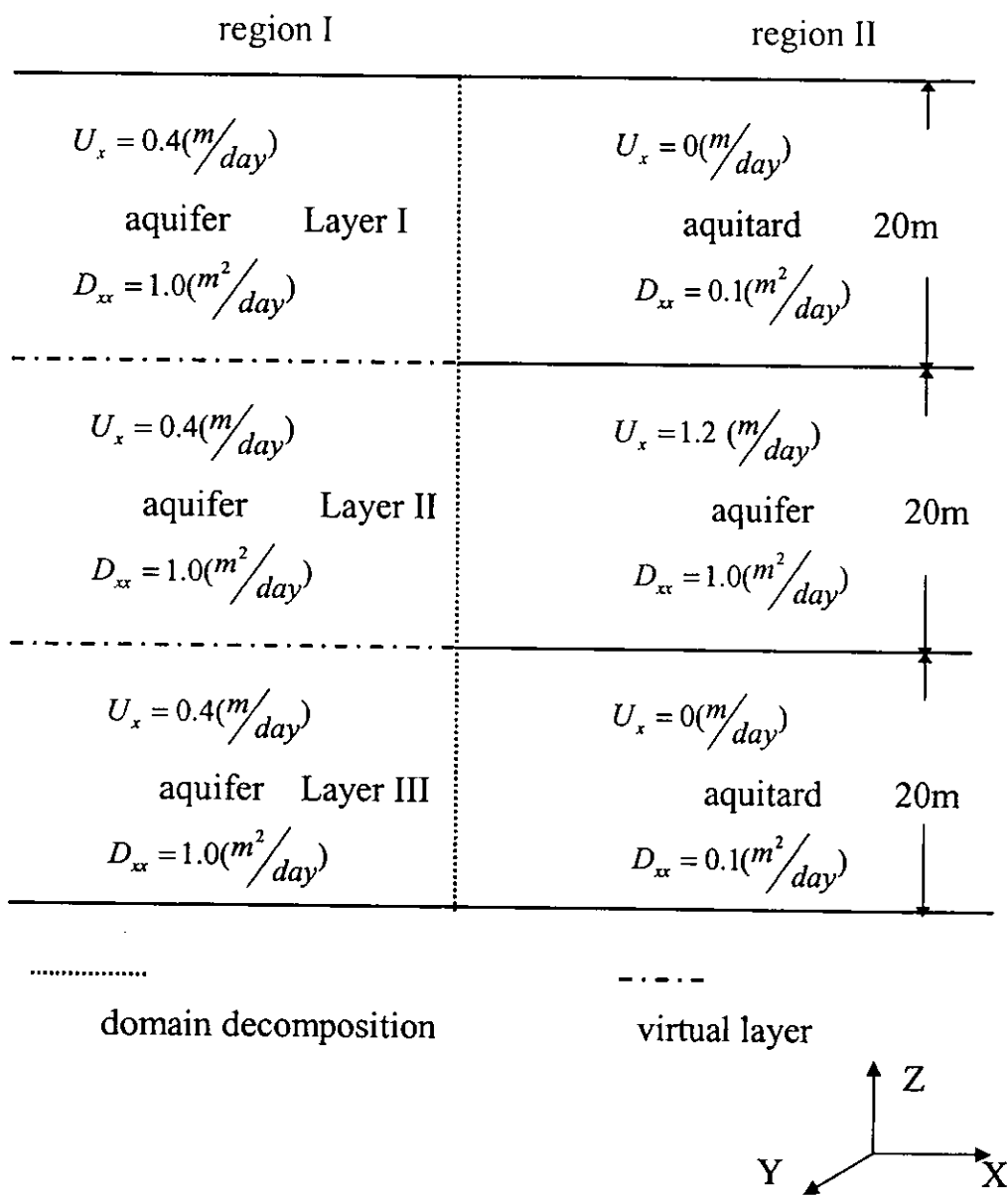


圖 3-29 非均質土層分布測試案例垂直示意圖

圖 3-29 表示計算時將模擬區域拆解為兩個子區域，依據第二個子區域土層分布情況再將第一個子區域在垂向虛擬分為三層。總模擬區域示意圖如圖 3-30 示，總區域大小為 $400\text{m} \times 100\text{m} \times 60\text{m}$ ，污染傳輸邊界為無通量邊界(no flux condition)，分區邊界在 $x = 100\text{m}$ 處，各層之流速及延散係數如圖 3-29 所示。

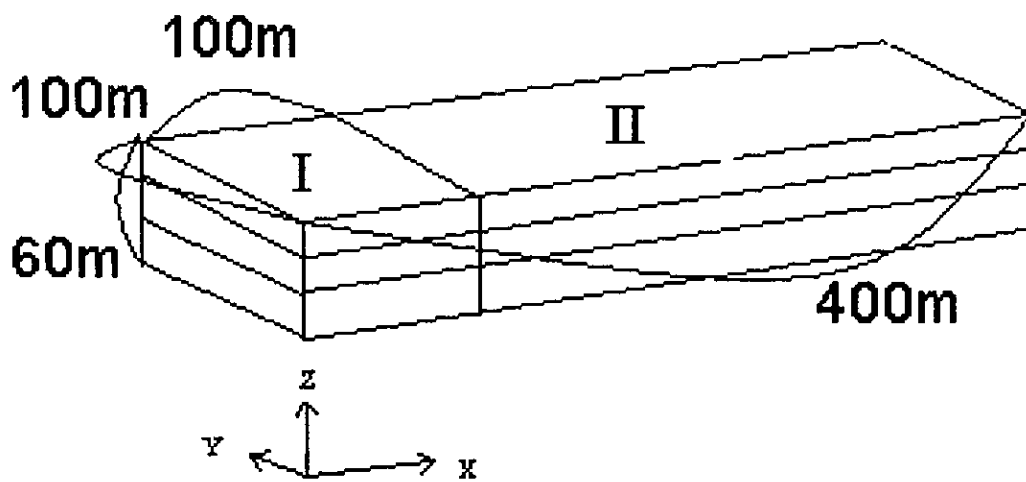


圖 3-30 模擬區域示意圖

在 $t=0$ 時刻，有一線源污染物，其濃度為 230mg/L ，自 $(x=0\text{m}, y=50\text{m})$ 處注入，模擬時刻分別為第 100days、200days、300days 時，在 $y=50\text{m}$ 之 $x-z$ 剖面上之模擬結果如圖 3-31 所示。此外，在 $z=4\text{m}$ 、 $z=24\text{m}$ 及 $z=44\text{m}$ 之 $x-y$ 剖面上之模擬結果，如圖 3-31 至圖 3-34。由圖 3-31 至圖 3-34 顯示，使用水平分區垂向分層技巧確實可模擬出非均質土層之污染傳輸現象。

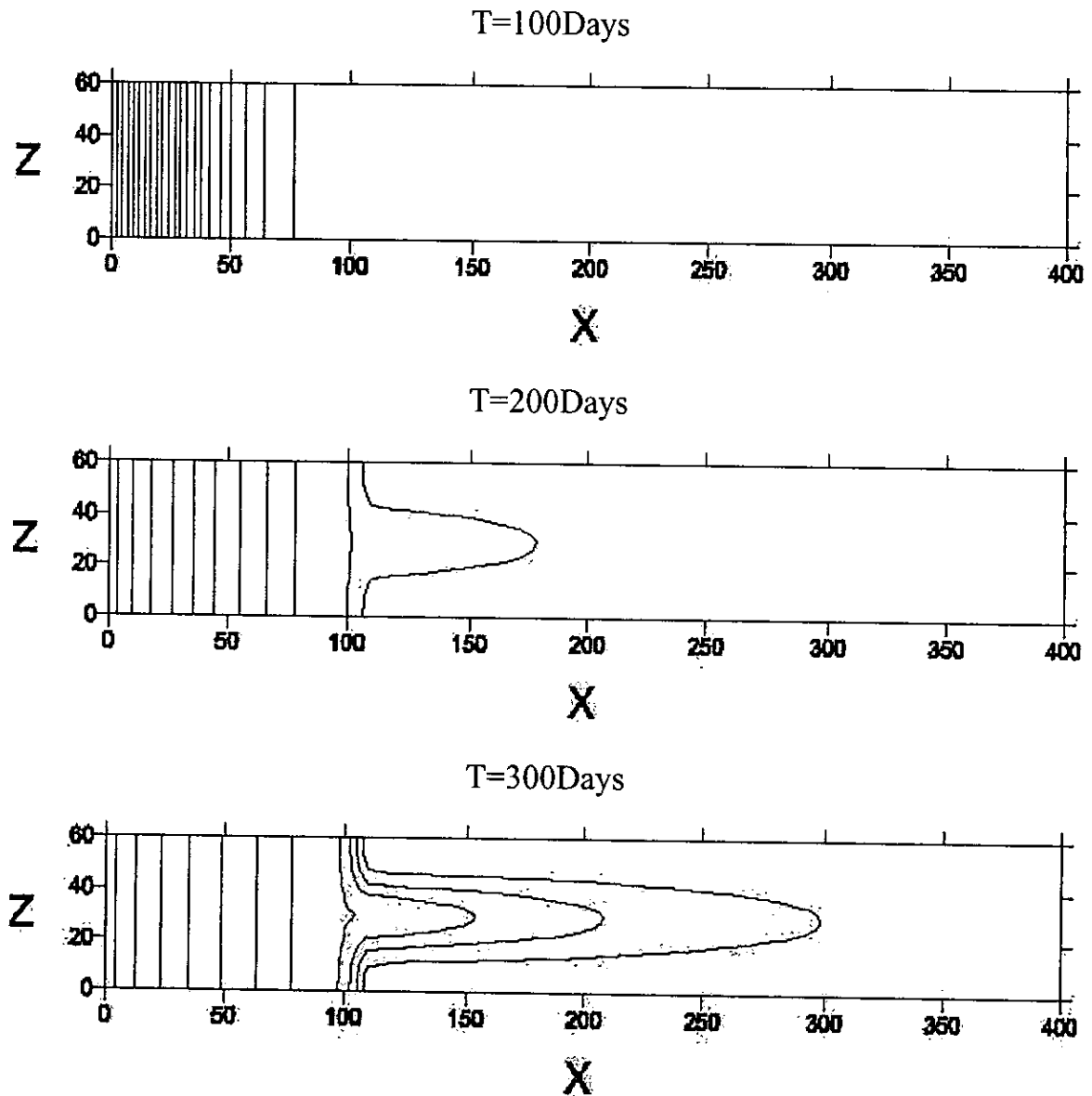


圖 3-31 非均質土層分布測試案例模擬結果(沿 $y=50\text{m}$ 之 $x-z$ 剖面)

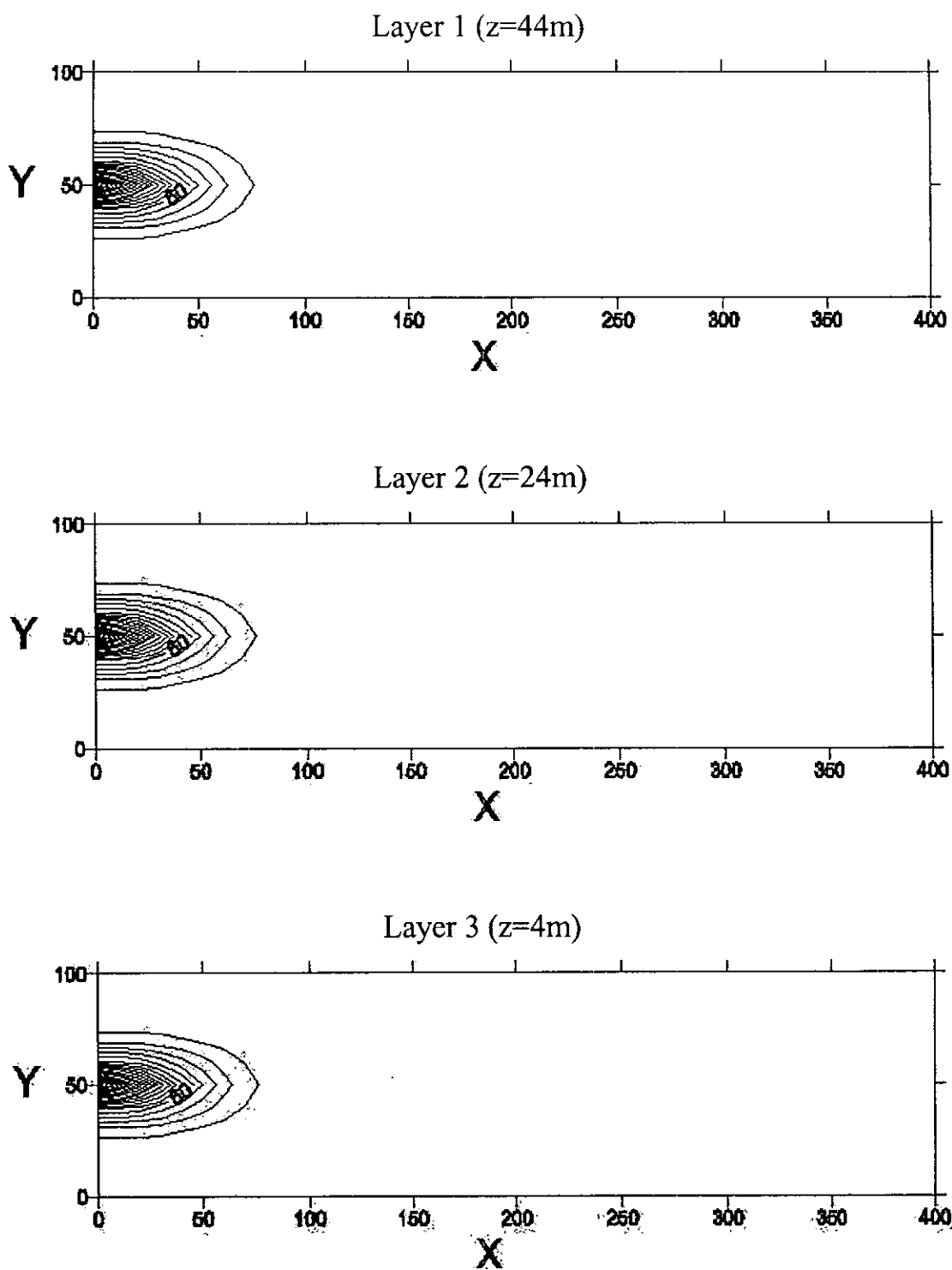


圖 3-32 非均質土層分布測試案例模擬結果($T=100\text{days}$)

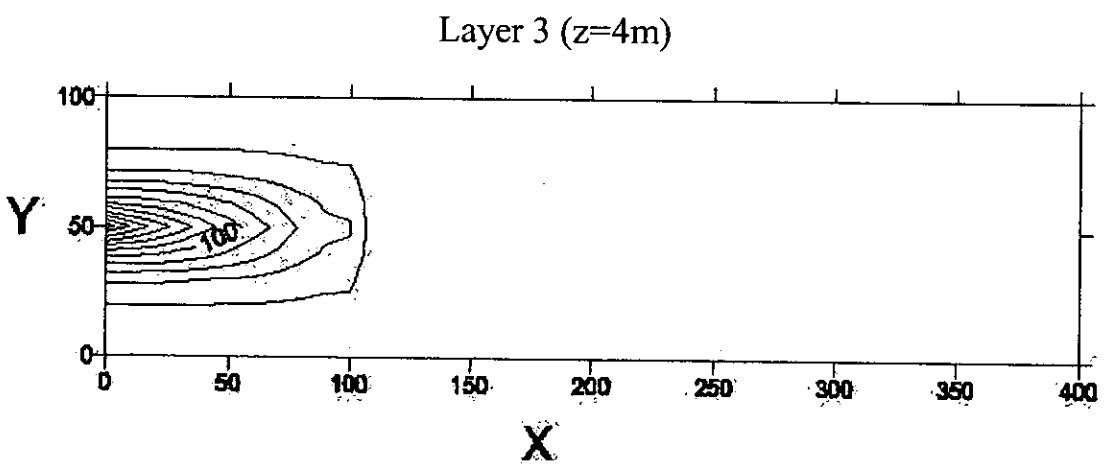
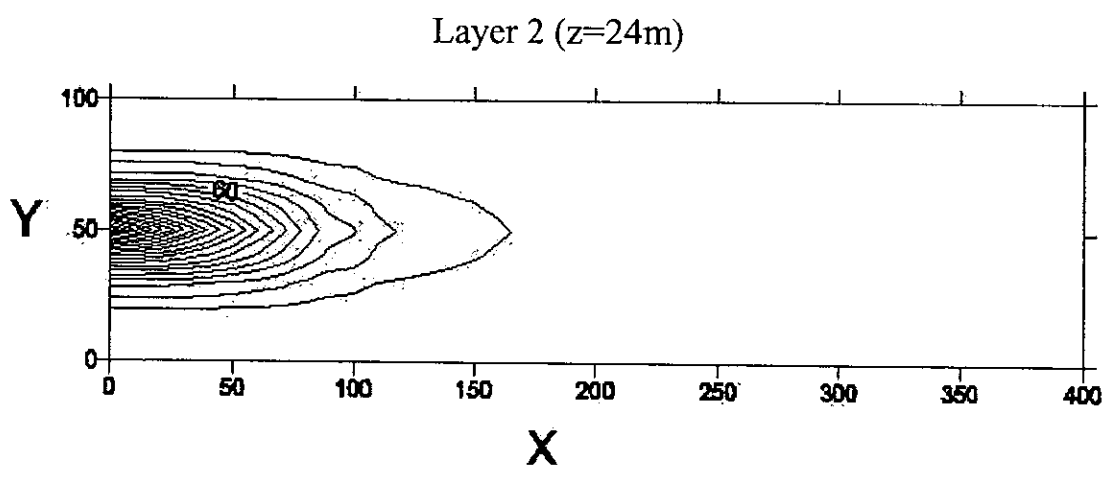
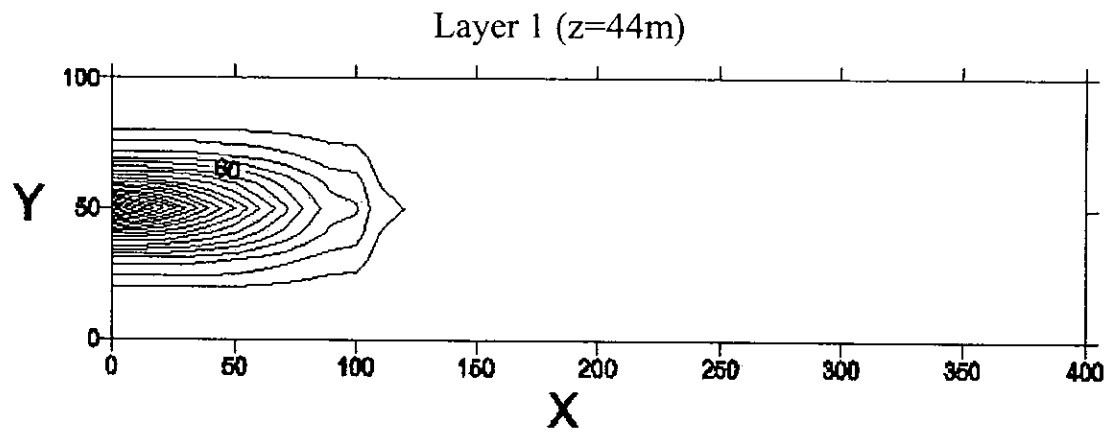


圖 3-33 非均質土層分布測試案例模擬結果(T=200days)

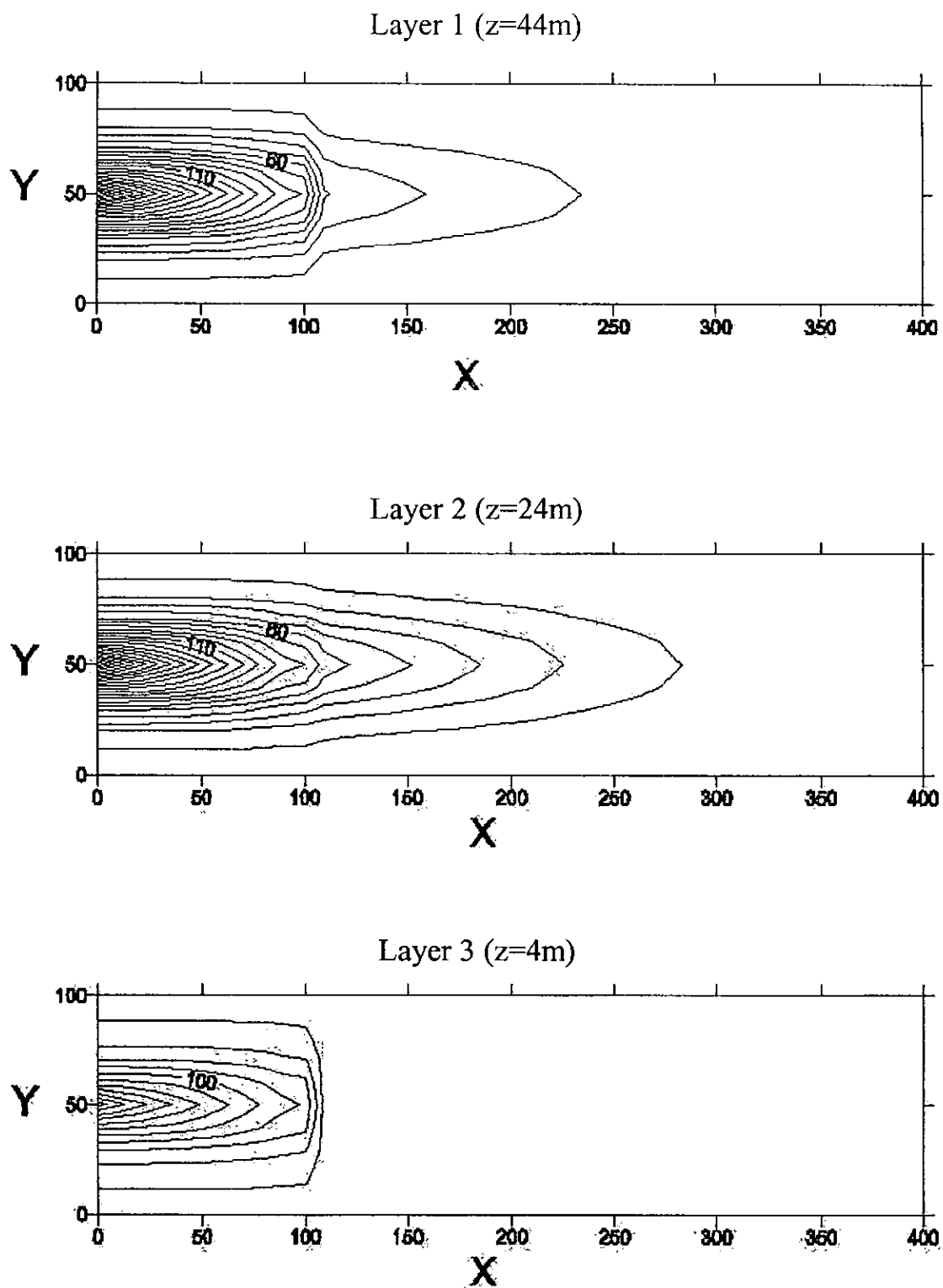


圖 3-34 非均質土層分布測試案例模擬結果(T=300days)

(二) 具明顯密度變化界面(海水入侵模擬)

為了驗證具明顯密度變化模式之計算能力，本研究選擇 Wilson and Sa Da Costa (1982) 文中之一維具明顯密度變化解析解與模式計算結果比對。Wilson and Sa Da Costa(1982)除了以有限元素法 (Finite Element Method) 提出一個變動邊界的趾部追蹤(toe tracking)以模擬兩不同密度且具明顯界面(即海水入侵)之界面之變化外，文中並由連續方程式及動力邊界條件及運動邊界條件，採用 Dupuit approximation，推導出一維均質 (即 $K_f = K_s = \text{constant}$) 拘限含水層之界面暫態解析解

$$L = \pm b\sqrt{\tau} \quad (3.162)$$

$$\tau = \frac{K \Delta\gamma t}{n \gamma b} \quad (3.163)$$

式中 L 為界面端部 (以+表示) 及趾部 (以-表示) 距界面中心的位置， τ 為無因次常數， b 為含水層厚度， K 為水力傳導係數， n 為孔隙率， γ 為比重， t 為模擬時間。解析解示意圖如圖 3-35 所示。該解析解已由 Keulegan (1954)、Gardner et al. (1962)、Gelhar et al., (1972) 等人以實驗驗證。Wilson and Sa Da Costa(1982)分別以數值模式模擬(1) 起始界面經由重力作用已稍微翻轉 (overturning) 而非垂直，無水流作用下之界面變化。(2) 起始界面於近乎垂直，無水流作用下之界面變化。(3) 起始界面於近乎垂直，具水流作用下之界面變化。並將模式之結果與解析解及 Shamir and Dagan (1972) 以 grid regeneration method 所計算之結果比對。

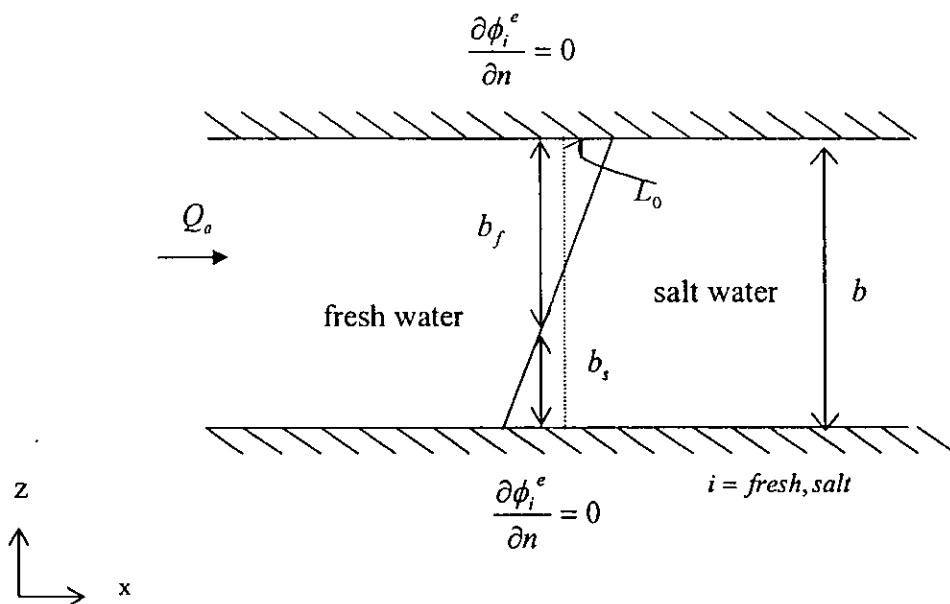


圖 3-35 模擬區域示意圖

由於本研究目前尚屬初步驗證階段，因此暫選上述交界面解析解之第一項模擬(起始值交界面經由重力作用已稍微翻轉 (overturning)而非垂直(即 L_0 不為零)，無水流作用($Q_a=0$)下之交界面變化)以驗證模式之計算能力。此驗證之主要目的在於檢驗模式是否能正確掌握海水、淡水交界面的變動(精度控制在水頭迭代差值為 0.001m 及控制迭代次數在 3000 次以下)。而交界面起始之傾斜由解析解得到。模擬區域中並無水流，因此交界面之變化由液體比重差所驅動。

模擬時假設一拘限含水層為均質等向且在水平方向長度為 96m ，含水層厚度 $b=10\text{m}$ ，海水與淡水的起始交界面傾斜中心位於 $x=50$ 處，起始時間 $t_0=7.87\text{days}$ 即 $\tau_0=2.56$ ， $L_0=\pm 16\text{m}$ ，海水與淡水比重分別為 $\gamma_s=1025\text{kg/m}^3$ 及 $\gamma_f=1000\text{kg/m}^3$ ，因為 $\Delta\gamma=25\text{kg/m}^3$ 遠小於 $\gamma_s=1025\text{kg/m}^3$ 所以令 $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_f} \cong \frac{\Delta\gamma}{\gamma_s} \cong \frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ 。 $K_f=K_s=39.024\text{m/day}$ ，孔隙率 $n=0.3$ ，含水層上下邊界為不透水邊界。模擬範圍如圖 3-36 所示。

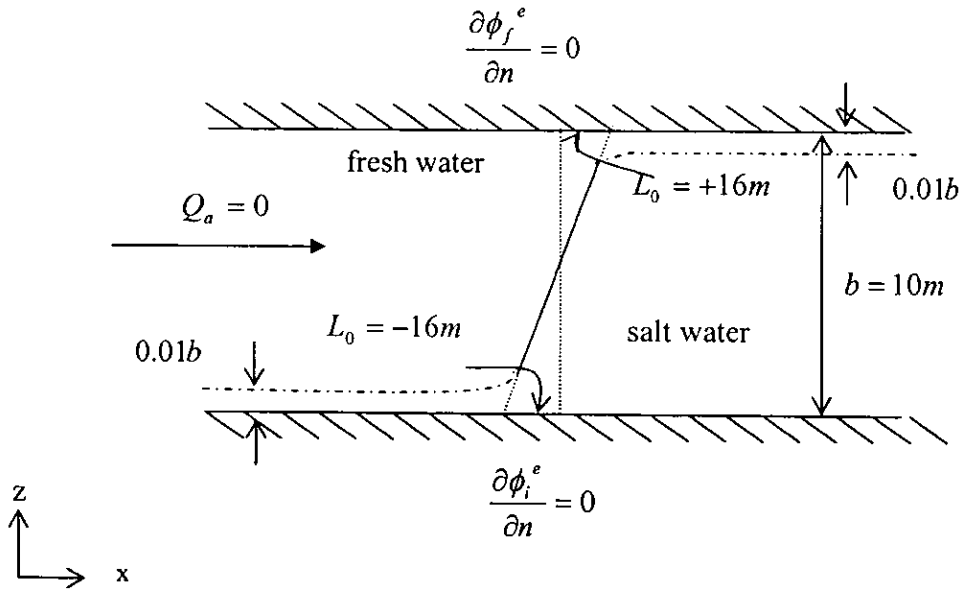


圖 3-36 數值模擬區域示意圖

在模擬時給定 x 方向網格點大小 $\Delta x = 4m$ ， x 方向網格點數 $m = 25$ （以 $\Delta y = 1m$ ， y 方向網格點數 $n = 3$ 模擬二維問題，邊界以 $\frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} = 0$ 處理之。），含水層厚度 $b = B = 10m$ ，邊界條件（boundary condition）為：左邊界給定水頭條件 $\phi_f = 5.125m$ 、 $\phi_s = 4.875m$ 。至於上下邊界：在模式一（見圖 3-16）、求解淡水水頭，為不透水邊界；在模式二（見圖 3-16）、求解海水部分即海水扣除淡水作用水頭值，上邊界為薄膜層之自由液面邊界條件（即海水、淡水交界面之邊界條件），薄膜的厚度如圖 3-36 所示為 $0.01B = 0.1m$ 。流量值為零 ($Q_a = 0$)，時距 $\Delta t = 1day$ ，模擬總時間為 20days，程式所需輸入資料如表 3-2 所示。

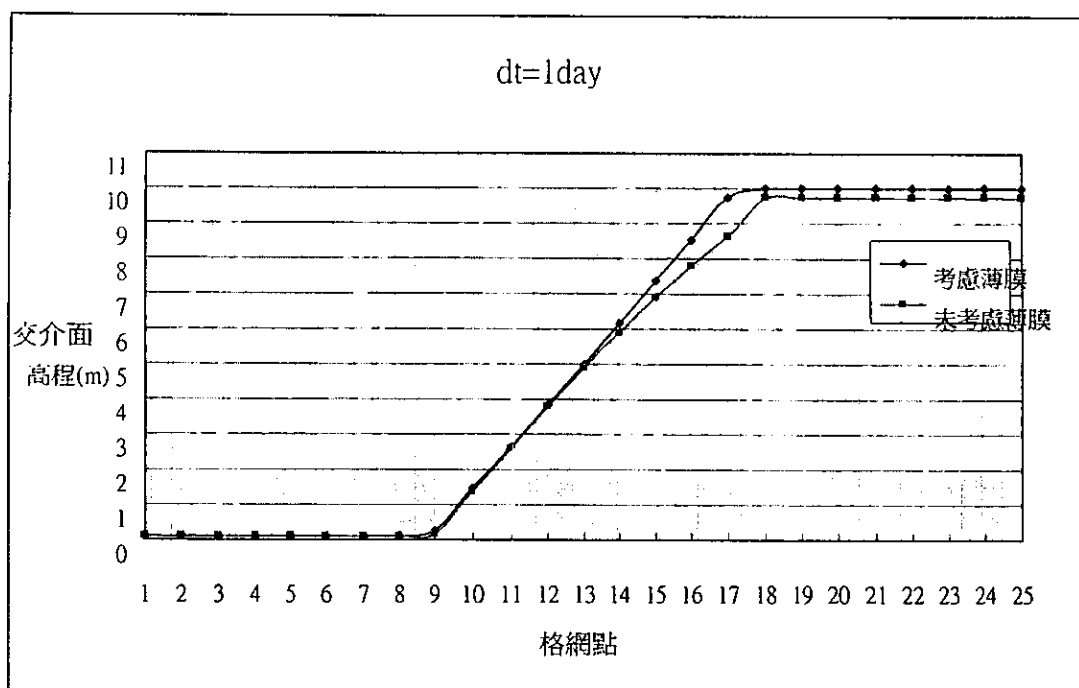


圖 3-37 考慮與未考慮薄膜層之模擬結果

表 3-2、程式輸入參數

| Parameter | Value |
|----------------------------|-------------------------|
| K_f (淡水水力傳導係數) | 39.024 m/day |
| K'_s (海水水力傳導係數) | 39.024 m/day |
| γ_f (淡水比重) | 1 g/cm ³ |
| γ_s (海水比重) | 1.025 g/cm ³ |
| $\Delta\gamma$ (海水與淡水之比重差) | 0.025 g/cm ³ |
| n (孔隙率) | 0.3 |
| S_0 (比貯水係數) | 1×10^{-6} 1/m |
| b (含水層厚度) | 10m |
| L_0 | $\pm 16m$ |
| Δt (模擬時間間距) | 1day |
| total time step | 20 days |

(L_0 為交界面端部 (以 + 表示) 及趾部 (以 - 表示) 距交界面中心的位置)

圖 3-37 與圖 3-38 為含水層進行海水入侵考慮薄膜與未考慮薄膜之數值模擬。由圖 3-37 與圖 3-38 可知，考慮薄膜層模擬之結果較沒有考慮薄膜層效果為佳。

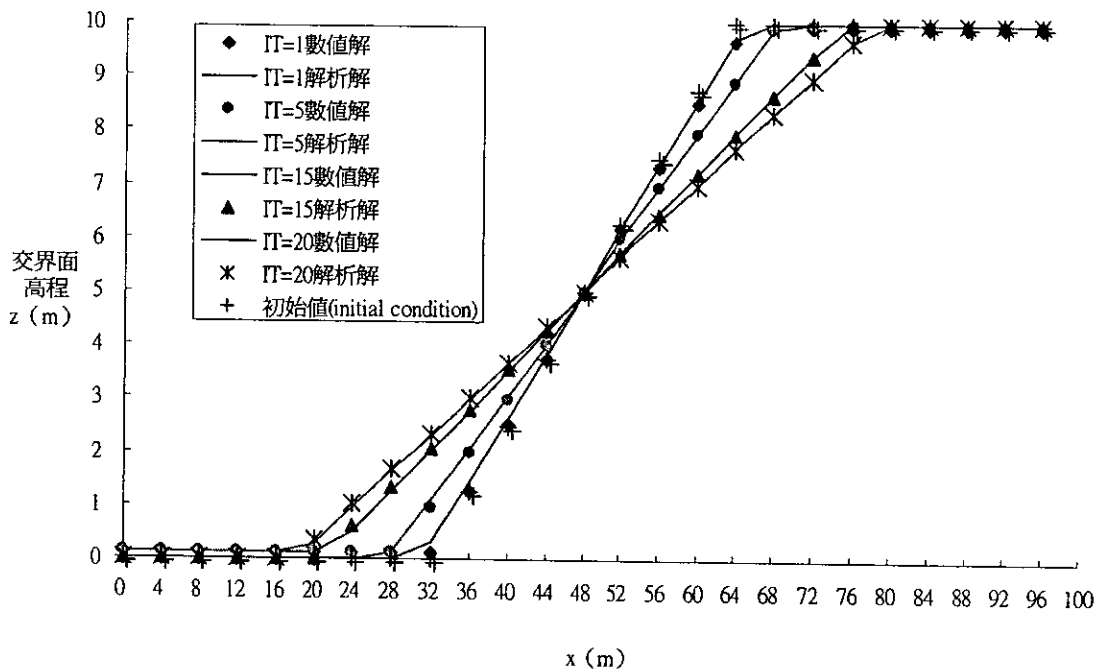


圖 3-38 模擬結果與解析解比較圖

此次成果的呈現擇 Wilson and Sa Da Costa (1982) 文中之一維具明顯密度變化解析解與模式計算結果比對。往後模式目標會朝著驗證此篇論文提到的第二個例子：起始界面於近乎垂直，無水流作用下之界面變化；第三個例子：起始界面於近乎垂直，具水流作用下之界面變化為目的。此外也擬將 (a) 把具有自由水面的非拘限含水層 (b) 含水層根據地質條件垂直分層 (c) 含水層根據地質條件水平分區例子 (d) 圓形島受海水入侵之三維問題加入驗證模擬，使模式功能的驗證更為完整。

第四章 地下水質量傳輸現地試驗研究

本研究場址目前共有 15 個監測井，其分佈如圖 4-1 所示。其中，11 口 4 吋標準監測井及 4 口 1 吋之分層監測井，目前本試驗主要利用 11 口 4 吋之標準監測井。而 4 口 1 吋之分層監測井，則利用於垂直水力傳導係數試驗。其各監測井和抽水井 BH04 之距離如表 4-1 所示。大約距離抽水井在 3 至 7 m 之間。各監測井詳細設置資料如表 4-2 至表 4-12 所示。

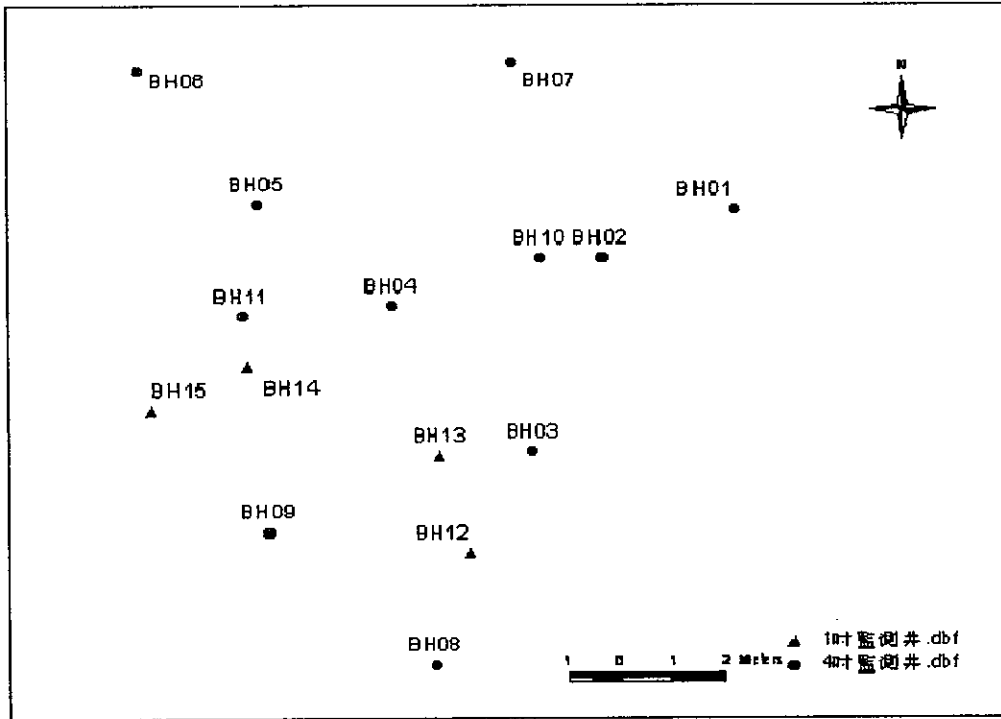


圖 4-1 研究場址監測井分佈圖

表 4-1 監測井與抽水井之距離

| 監測井 | x | y | 距離 |
|------|-----------|------------|------|
| BH01 | 202785.76 | 2621451.04 | 6.92 |
| BH02 | 202783.21 | 2621450.13 | 4.23 |
| BH03 | 202781.85 | 2621446.41 | 3.94 |
| BH04 | 202779.08 | 2621449.21 | 0.00 |
| BH05 | 202776.49 | 2621451.15 | 3.24 |
| BH06 | 202774.21 | 2621453.73 | 6.65 |
| BH07 | 202781.46 | 2621453.87 | 5.23 |
| BH08 | 202779.91 | 2621442.30 | 6.96 |
| BH09 | 202776.68 | 2621444.86 | 4.97 |
| BH10 | 202782.03 | 2621450.13 | 3.09 |
| BH11 | 202776.20 | 2621449.04 | 2.88 |

表 4-2 BH01 監測井構造紀錄表

| | | |
|--------|-----------------|-----------------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 12 日 | |
| 井 號： | BH01 | |
| 井頂高程： | 49.068m | |
| 地表高程： | | |
| 座 標： | X : 202785.755 | Y : 2621451.036 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | |
| 井孔直徑： | 8 | in |
| | 至 | in |
| | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | |
| 井底封型式： | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 8 in |
| 完井方法： | 日期 | |
| | 日期 | |
| | 日期 | |
| 說 明： | | |
| | | |
| | | |

監測井示意圖

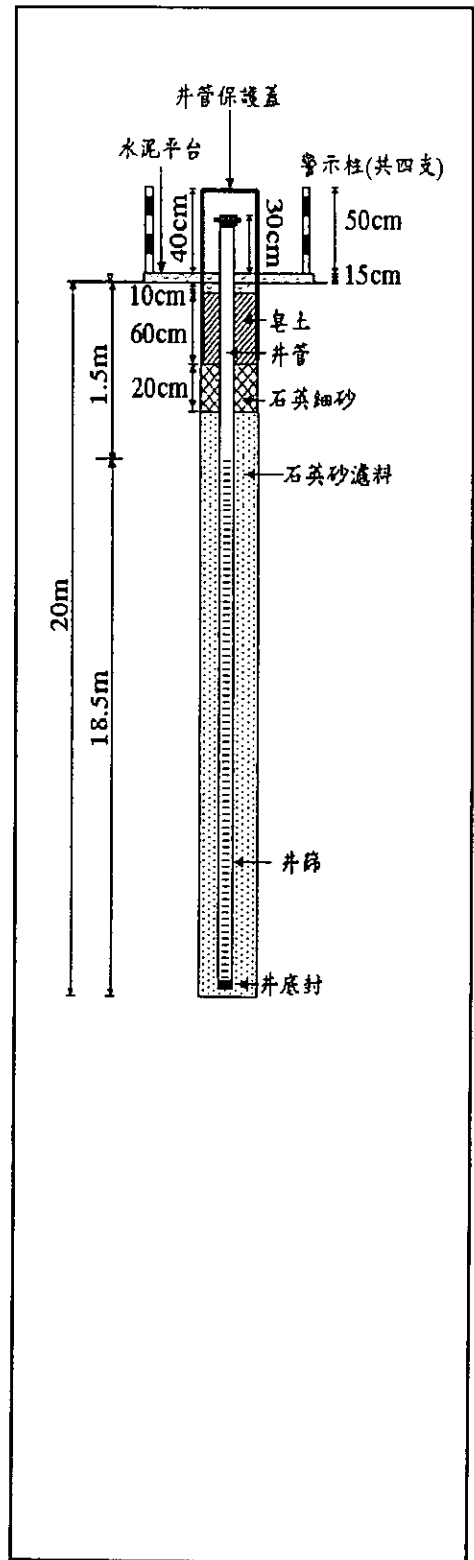


表 4-3 BH02 監測井構造紀錄表

| | | |
|--------|--------------|---------------|
| 設置日期： | 2001年9月15日 | |
| 井 號： | BH02 | |
| 井頂高程： | 49.148m | |
| 地表高程： | | |
| 座 標： | X：202783.206 | Y：2621450.132 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | |
| 井孔直徑： | 8 | in |
| | 至 | in |
| | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | |
| 井底封型式： | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 8 in |
| 完井方法： | 日期 | |
| | 日期 | |
| | 日期 | |
| 說 明： | | |
| | | |

監測井示意圖

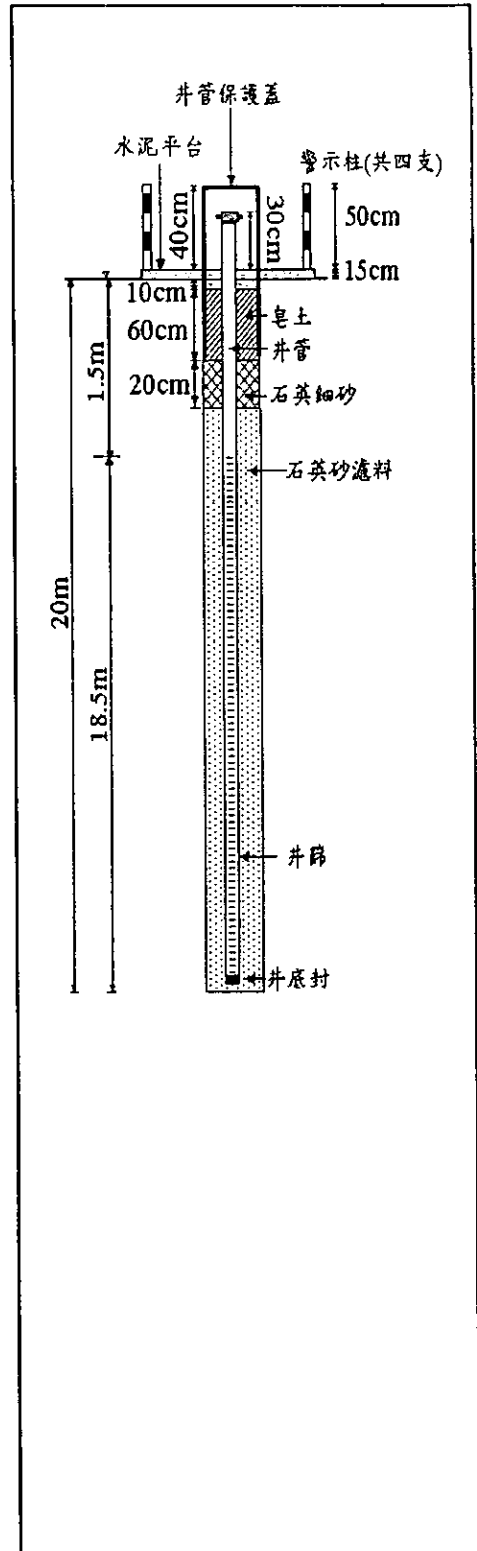


表 4-4 BH03 監測井構造紀錄表

| | | |
|--------|-----------------|-----------------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 20 日 | |
| 井 號： | BH03 | |
| 井頂高程： | 48.988m | |
| 地表高程： | | |
| 座 標： | X : 202781.853 | Y : 2621446.411 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | |
| 井孔直徑： | 8 | in |
| | 至 | in |
| | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | |
| 井底封型式： | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 8 in |
| 完井方法： | 日期 | |
| | 日期 | |
| | 日期 | |
| 說 明： | | |
| | | |

監測井示意圖

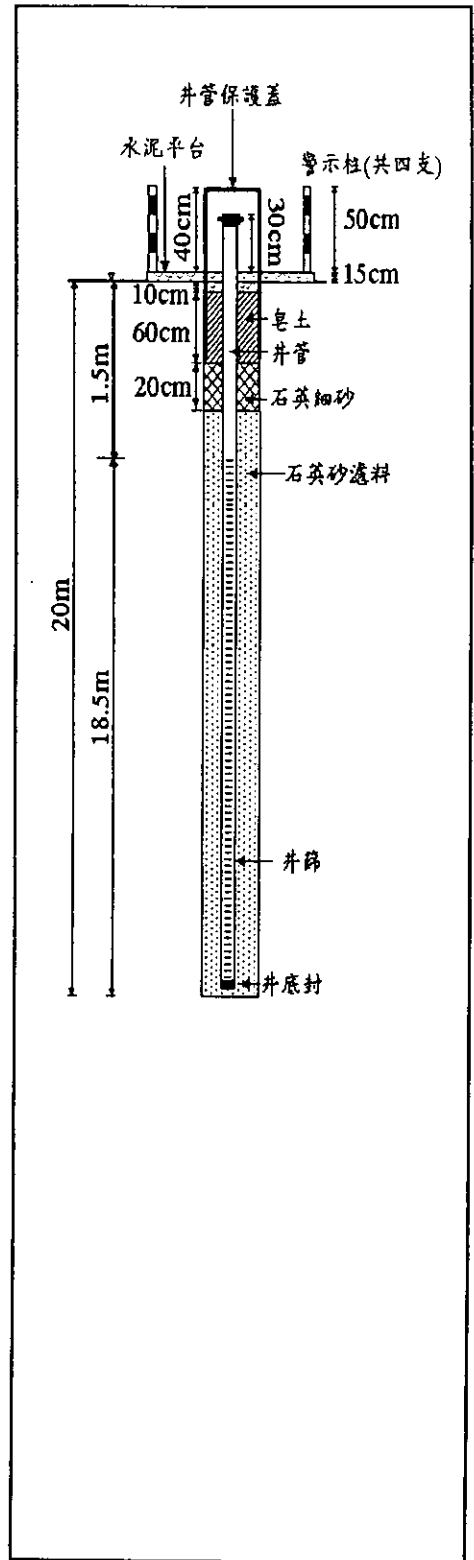


表 4-5 BH04 監測井構造紀錄表

| | | |
|--------|----------------------------|-------------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 23 日 | |
| 井 號： | BH04 | |
| 井頂高程： | 49.039m | |
| 地表高程： | | |
| 座 標： | X：202779.080 Y：2621449.209 | |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | |
| 井孔直徑： | 8 | in |
| | 至 | in |
| | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | |
| 井底封型式： | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 8 in |
| 完井方法： | 日期 | |
| | 日期 | |
| | 日期 | |
| 說 明： | | |
| | | |

監測井示意圖

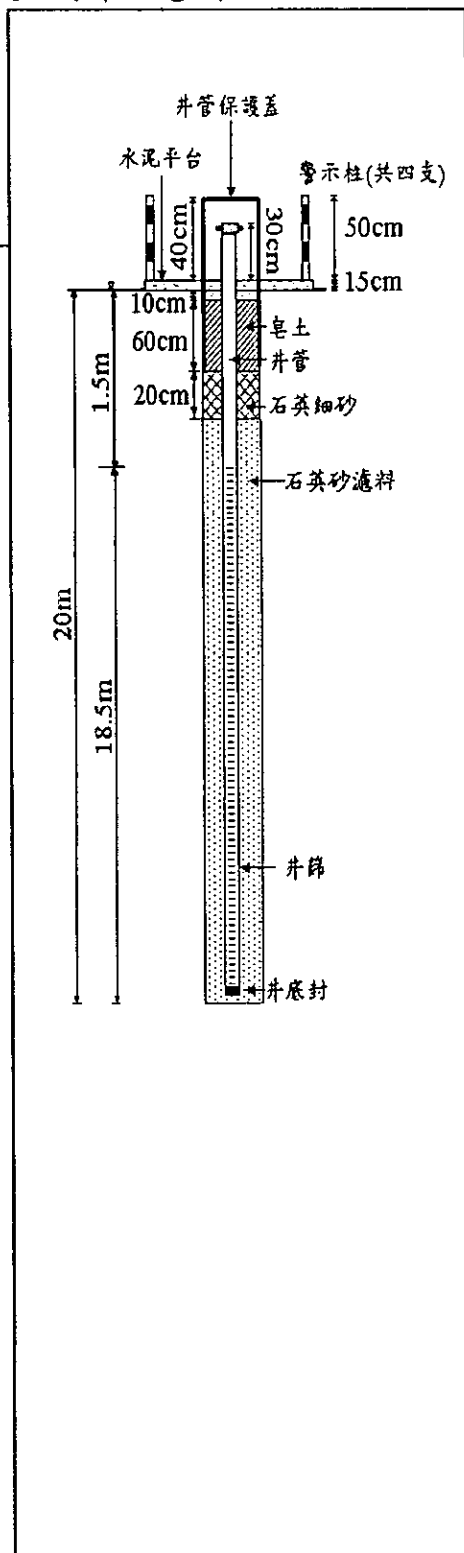


表 4-6 BH05 監測井構造紀錄表

| | | | |
|--------|-----------------|-----------------|--------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 23 日 | | |
| 井 號： | BH05 | | |
| 井頂高程： | 48.914m | | |
| 地表高程： | | | |
| 座 標： | X : 202776.491 | Y : 2621451.150 | |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | | |
| 井孔直徑： | 8 | in | |
| | 至 | | in |
| | 至 | | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 | 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 | 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | | |
| 井底封型式： | | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 | 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 | 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 | 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 | 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 | 8 in |
| 完井方法： | | 日期 | |
| | | 日期 | |
| | | 日期 | |
| 說 明： | | | |
| | | | |

監測井示意圖

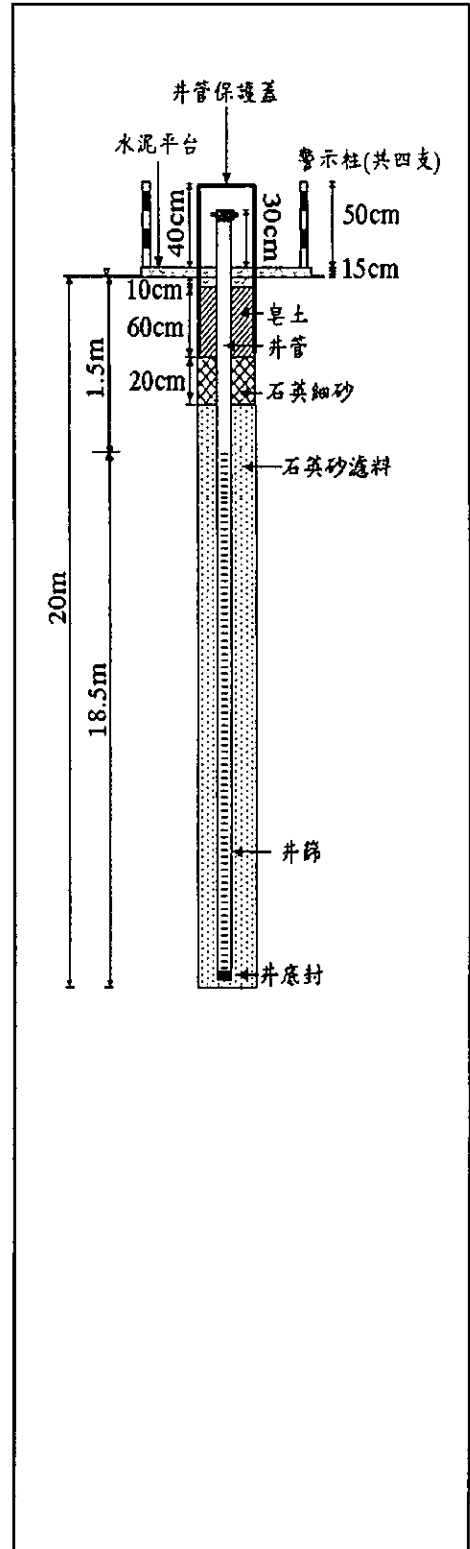


表 4-7 BH06 監測井構造紀錄表

| | | | |
|--------|-----------------|---------------|--------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 23 日 | | |
| 井 號： | BH06 | | |
| 井頂高程： | 48.91m | | |
| 地表高程： | | | |
| 座 標： | X：202774.205 | Y：2621453.725 | |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | | |
| 井孔直徑： | 8 | in | |
| | | 至 | in |
| | | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 | 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 | 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | | |
| 井底封型式： | | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 | 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 | 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 | 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 | 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 | 8 in |
| 完井方法： | | 日期 | |
| | | 日期 | |
| | | 日期 | |
| 說 明： | | | |
| | | | |

監測井示意圖

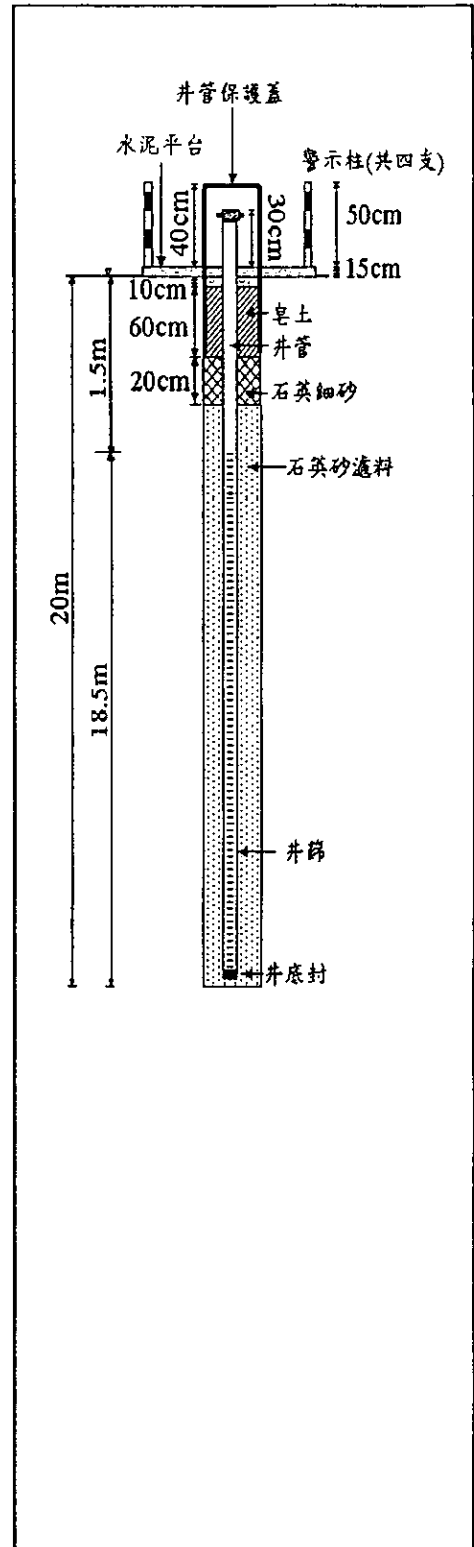


表 4-8 BH07 監測井構造紀錄表

| | | |
|--------|-----------------|---------------|
| 設置日期： | 2001 年 9 月 23 日 | |
| 井 號： | BH07 | |
| 井頂高程： | 49.072m | |
| 地表高程： | | |
| 座 標： | X：202781.455 | Y：2621453.871 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 | |
| 井孔直徑： | 8 | in |
| | 至 | in |
| | 至 | in |
| 井管型式： | HPDE WC110 | |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 | |
| 井篩型式： | HPDE WC110 | 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in | 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 | |
| 井底封型式： | | |
| 濾料型式： | 石英砂 | |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm | |
| 濾料封： | 0.9 | 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 | 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 | 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 | 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 | 直徑 8 in |
| 完井方法： | 日期 | |
| | 日期 | |
| | 日期 | |
| 說 明： | | |
| | | |

監測井示意圖

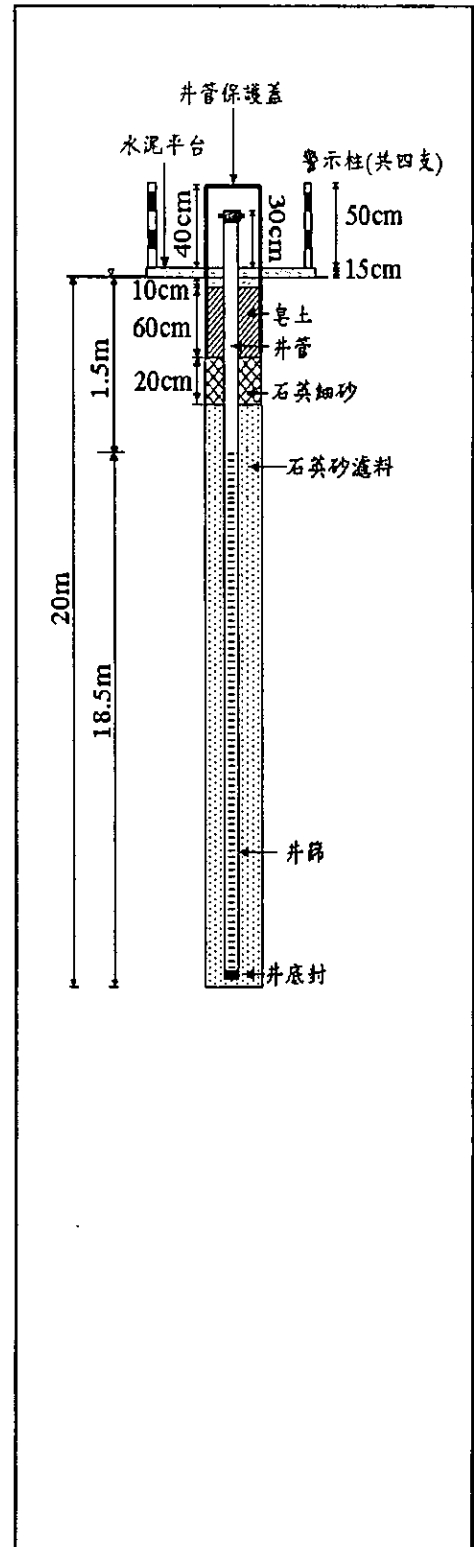


表 4-10 BH09 監測井構造紀錄表

| | |
|--------|----------------------------|
| 設置日期： | _____ |
| 井 號： | BH09 |
| 井頂高程： | 49.366m |
| 地表高程： | _____ |
| 座 標： | X：202776.681 Y：2621444.859 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 |
| 井孔直徑： | 8 in |
| | _____ 至 _____ in |
| | _____ 至 _____ in |
| 井管型式： | HPDE WC110 |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 |
| 井篩型式： | HPDE WC110 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 |
| 井底封型式： | _____ |
| 濾料型式： | 石英砂 |
| 濾料粒徑： | 1mm~3mm |
| 濾料封： | 0.9 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 直徑 8 in |
| 完井方法： | _____ 日期 _____ |
| | _____ 日期 _____ |
| | _____ 日期 _____ |
| 說 明： | _____ |
| | _____ |
| | _____ |

監測井示意圖

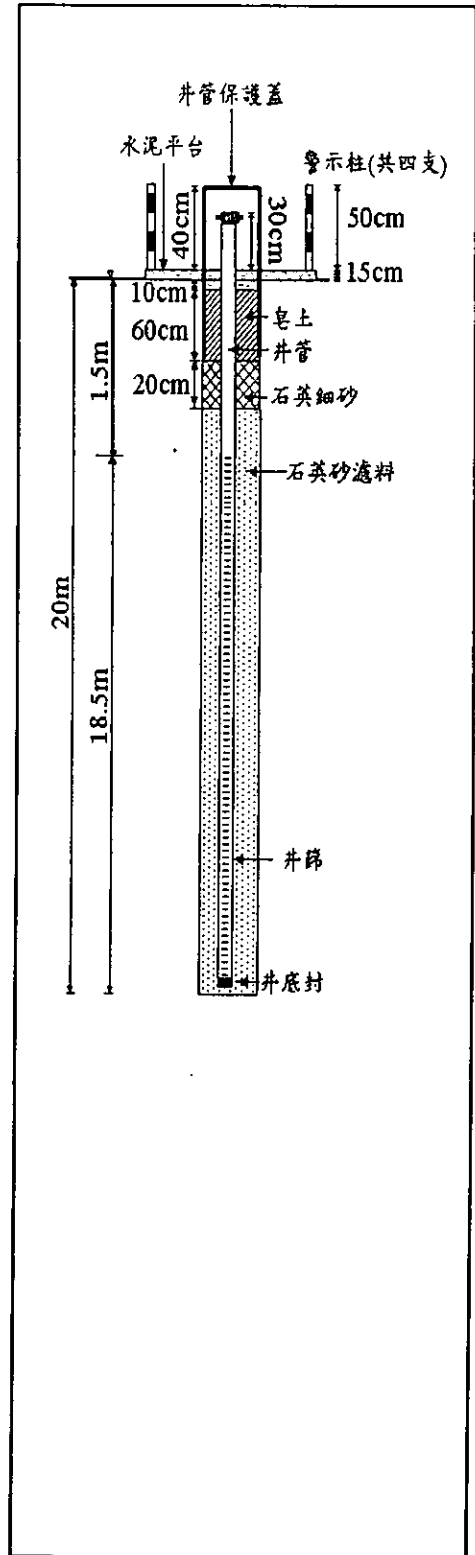


表 4-11 BH10 監測井構造紀錄表

| | |
|--------|----------------------------|
| 設置日期： | _____ |
| 井 號： | BH10 |
| 井頂高程： | 49.341m |
| 地表高程： | _____ |
| 座 標： | X：202782.032 Y：2621450.132 |
| 鑽井方法： | 螺旋鑽法 |
| 井孔直徑： | 8 in |
| | 至 _____ in |
| | 至 _____ in |
| 井管型式： | HPDE WC110 |
| 井管接頭： | 螺紋式接頭 |
| 井篩型式： | HPDE WC110 直徑 4 in |
| 篩孔尺寸： | 0.02in 井篩長度 18.5 m |
| 井頂蓋型式： | MBC 膨脹型 |
| 井底封型式： | _____ |
| 濾料型式： | 石英砂 |
| 濾料粒徑： | 0.414mm~0.833mm |
| 濾料封： | 0.9 至 20 m |
| 細砂封： | 0.7 至 0.9 m |
| 皂土封： | 0.1 至 0.7 m |
| 表層封： | 0 至 0.1 m |
| 保護井管： | 不銹鋼管 直徑 8 in |
| 完井方法： | _____ 日期 _____ |
| | _____ 日期 _____ |
| | _____ 日期 _____ |
| 說 明： | _____ |
| | _____ |
| | _____ |

監測井示意圖

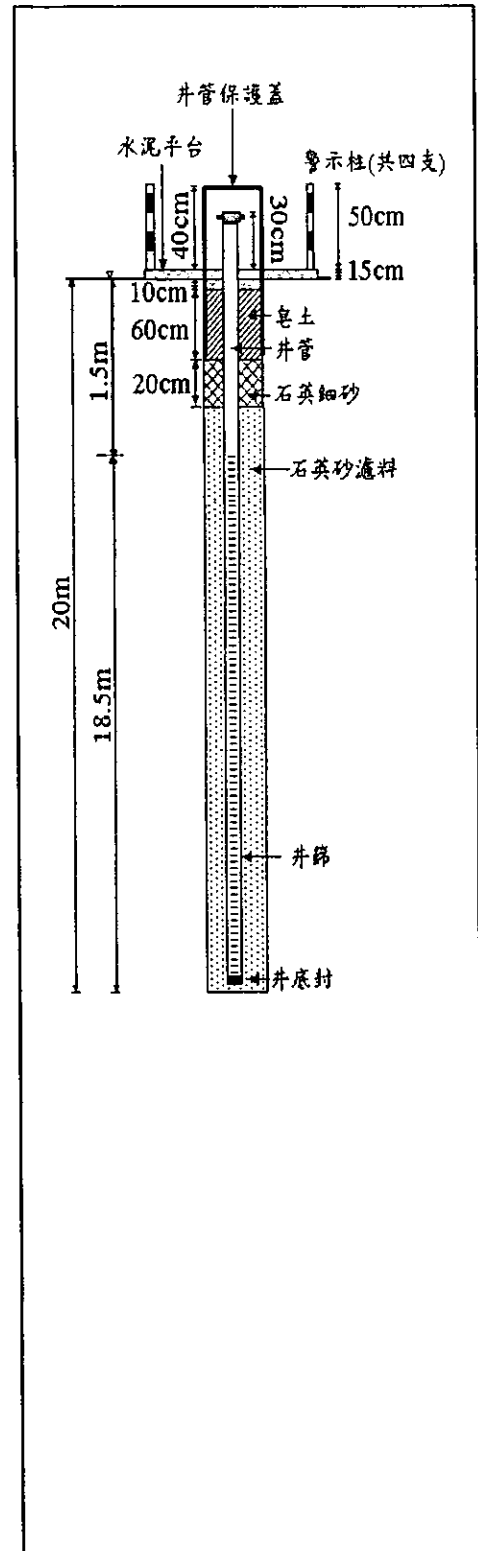


表 4-12 BH11 監測井構造紀錄表

設置日期： _____

井 號： BH11

井頂高程： 49.114m

地表高程： _____

座 標： X：202776.204 Y：2621449.043

鑽井方法： 螺旋鑽法

井孔直徑： _____ 8 _____ in
 _____ 至 _____ in
 _____ 至 _____ in

井管型式： HPDE WC110

井管接頭： 螺紋式接頭

井篩型式： HPDE WC110 直徑 4 in

篩孔尺寸： 0.02in 井篩長度 18.5 m

井頂蓋型式： MBC 膨脹型

井底封型式： _____

濾料型式： 石英砂

濾料粒徑： 0.414mm~0.833mm

濾料封： 0.9 至 20 m

細砂封： 0.7 至 0.9 m

皂土封： 0.1 至 0.7 m

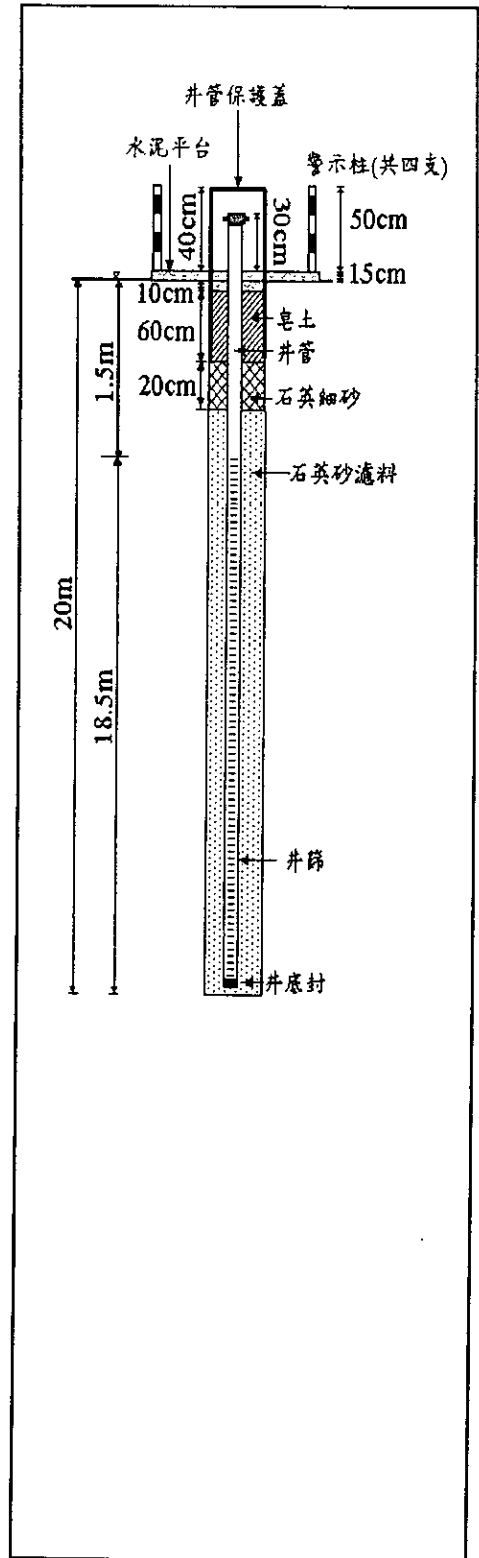
表層封： 0 至 0.1 m

保護井管： 不銹鋼管 直徑 8 in

完井方法： _____ 日期 _____
 _____ 日期 _____
 _____ 日期 _____

說 明： _____

監測井示意圖



校園場址的地質剖面圖，如圖 4-2 所示，顯示校園場址地面下 3~5 公尺為黏土及砂土混雜，地面下 5 公尺~15 公尺為粉土與砂土混雜，地面下 15 公尺以下間斷出現黏土及砂土混雜或純粹為黏土。以內插方式推測本研究監測井場址之不透水層深度，因黏土與砂土混雜仍具有透水性，故僅黏土層可以假設為含水層之不透水層，由剖面圖分析可知，在微觀的角度下，在地表下 15 公尺出現黏土的情形較明顯，故假設不透水層在地表下 20 公尺處，則監測井深 20 公尺為全部貫穿含水層之水井。

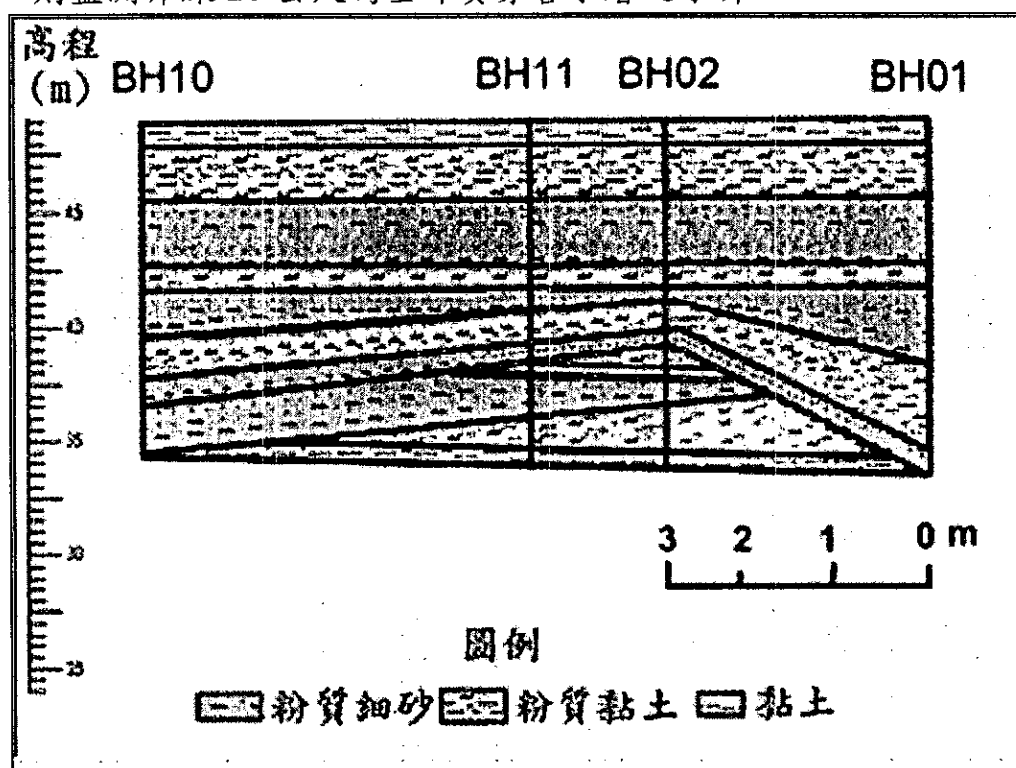


圖 4-2 校園地質剖面圖

本年度主要有五大工作項目，分別為垂直水力傳導係數分析、非等向水文參數分析、地電阻 3-D 水文地質影像分析、砂箱試驗及現地污染傳輸試驗。在介紹這五大試驗時，會依序說明這些試驗的理論介紹、工作方法、成果討論及結論與建議。

一、垂直水力傳導係數試驗

理論介紹

在抽水試驗於穩態洩降中，無窮大含水層地下水流的方

Direction)，單位為 m；

K_r = 徑向水平飽和水力傳導係數 (Horizontal Hydraulic Conductivity)，單位為 m/sec；

K_z = 垂向飽和水力傳導係數 (Vertical Hydraulic Conductivity)，單位為 m/sec；

Δ = 柱塞室的一半長度，單位為 m；

L = 雙極肩 (Dipole Shoulder)，雙極中心至柱塞室的距離，單位為 m；

Q = 抽水馬達之抽水量，單位為 m^3/sec 。

並定義徑向與垂向飽和水力傳導係數的關係，如下式：

$$a^2 = \frac{K_r}{K_z} \quad (4.3)$$

其中 a = 非等向比例 (Anisotropy Ratio)，無因次無窮大含水層的邊界條件，如下式(4.4)所示：

$$s(r, z) = 0, r > 0, z \rightarrow \pm\infty \quad (4.4)$$

Zlotnik 和 Zurbuchen(2001)提出在現地試驗中(參考圖 4-1)，實際含水層邊界條件滿足 $A \gg 2L$ 與 $B \gg 2L$ ，式(4.4)中的無窮含水層的邊界條件即可成立，其中 A 為雙極中心至地下水位面的距離，單位為 m， B 為雙極中心至不透水層的距離，單位為 m。

在缺乏水平方向的邊界下，洩降量可由下式表示：

$$S_U = -S_L = \frac{Q}{K_r \Delta} f_i \quad (4.5)$$

其中， S_U = 上端柱塞室之洩降，單位為 m；

S_L = 下端柱塞室之洩降，單位為 m；

f_i = 形狀因子 (Shape Factor)，無因次。

f_i 值可用下式表示

$$f_i = \frac{\rho_w}{16\pi\Delta} \left[\begin{array}{l} -\phi(p_{++}) + \phi(q_{++}) + \phi(p_{-+}) - \phi(q_{-+}) \\ +\phi(p_{-+}) - \phi(q_{-+}) - \phi(p_{--}) + \phi(q_{--}) \end{array} \right], \rho_w = \frac{r_w}{a} \quad (4.6)$$

其中， r_w =井半徑 (Well Radius)，單位為 m；

ρ_w =校正的非等向井半徑 (Well Radius Corrected for Anisotropy)，單位為 m；

定義：

$$\begin{aligned}\phi(x) &= x \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}) - \sqrt{x^2 + 1} \\ p_{\pm\pm} &= (L + \Delta \pm L \pm \Delta) / \rho_w \\ q_{\pm\pm} &= (L - \Delta \pm L \pm \Delta) / \rho_w\end{aligned}\quad (4.7)$$

其中， $\psi(x)$ =形狀函數 (Shape Function)，無因次；

$p_{\pm\pm}$ 與 $q_{\pm\pm}$ =雙極探針幾何特性產生的自變量 (Arguments are obtained from the dipole probe geometrical characteristics)，無因次。

將所得的 f_i 值利用下式，求得 Kr 值

$$K_{r,\Delta h} = \frac{2Q}{\Delta \times \Delta h} \times f_i \quad (4.8)$$

其中， Δh =上、下端柱塞室的洩降差，單位為 m。

工作方法

在工作方法中，共可分為三大階段，分別為事前規劃、試驗步驟及 QA/QC。

在事前規劃階段，本研究因柱塞器設計不良，因此於今年改以設置之 1 吋分層試驗井利用相同原理做分析。其中，所使用之儀器包括抽水設備、水位監測設備及流量監測設備。且本研究為了提高試驗之成功率及準確性，因此於試驗前針對水位監測設備及流量監測設備做儀器校驗。本研究會使用到的儀器及設備如下所示。

1、1 吋分層井篩試驗井

1 吋分層井篩位置如圖 4-4 至圖 4-8 所示。分別為於地表下深度 5m~6m 為一段，6m~7m 為一段，每間格 1m 為一段至地表下深度 15m。

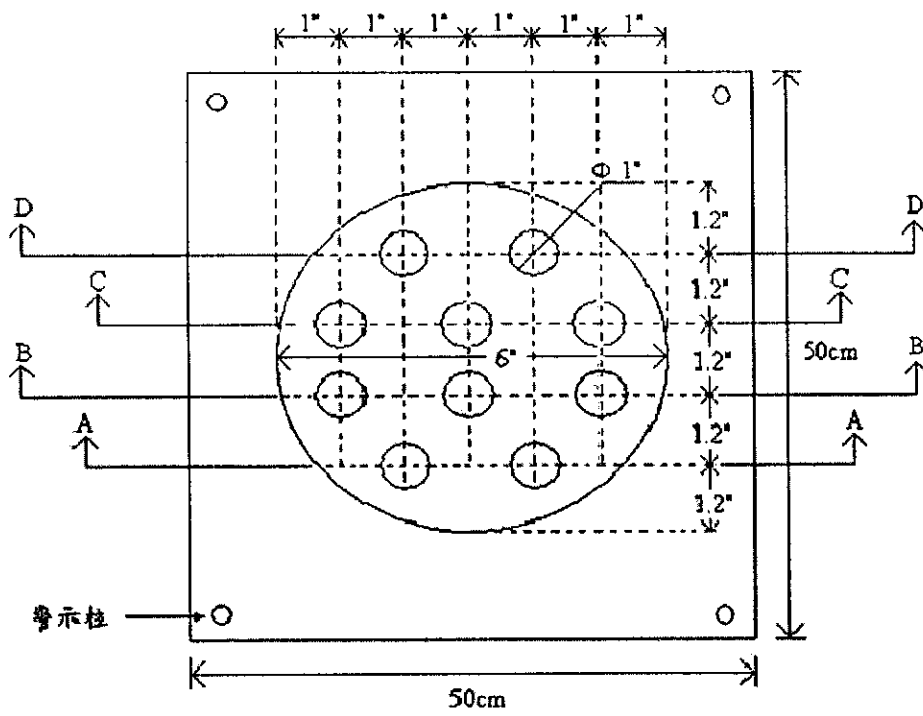


圖 4-4 1 吋分層監測井俯視圖

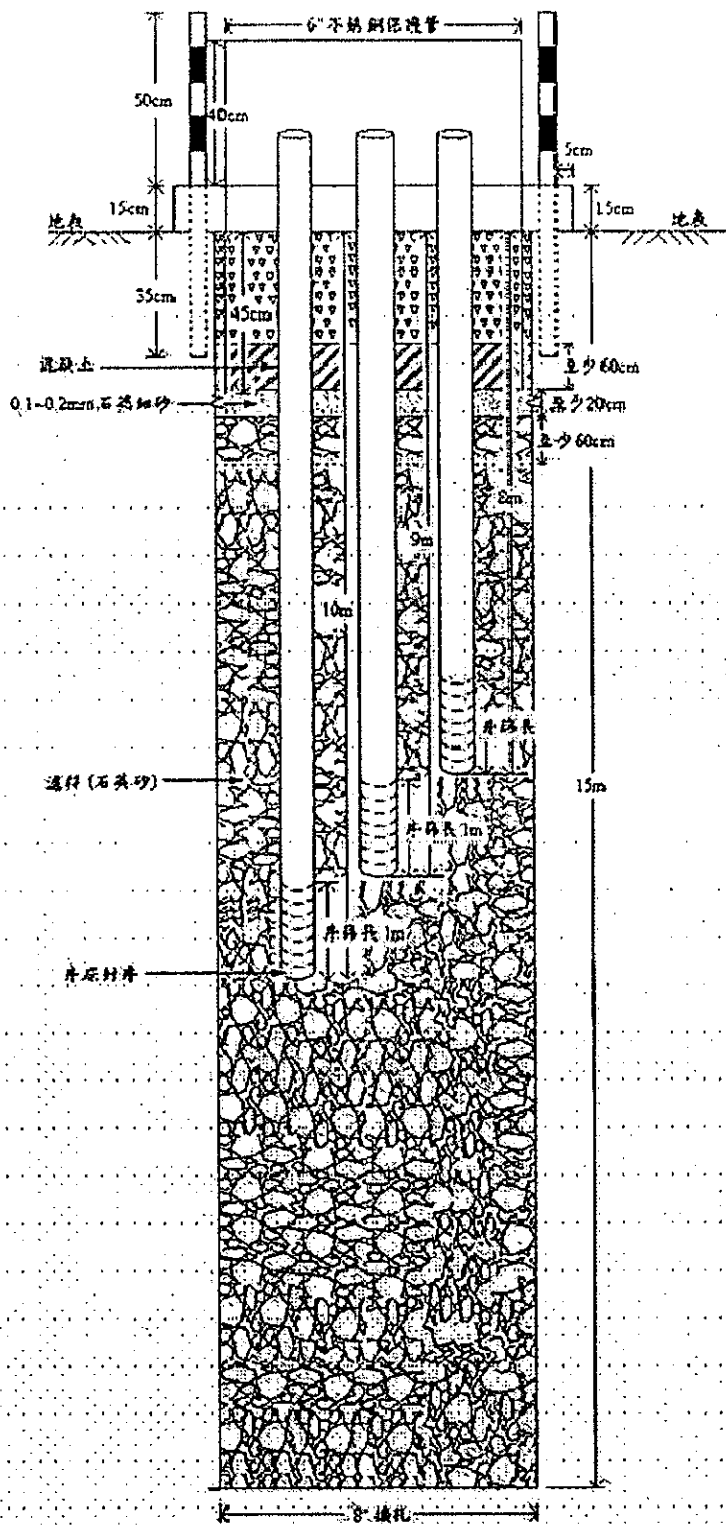


圖 4-6 1 吋分層監測井 B-B 剖面圖

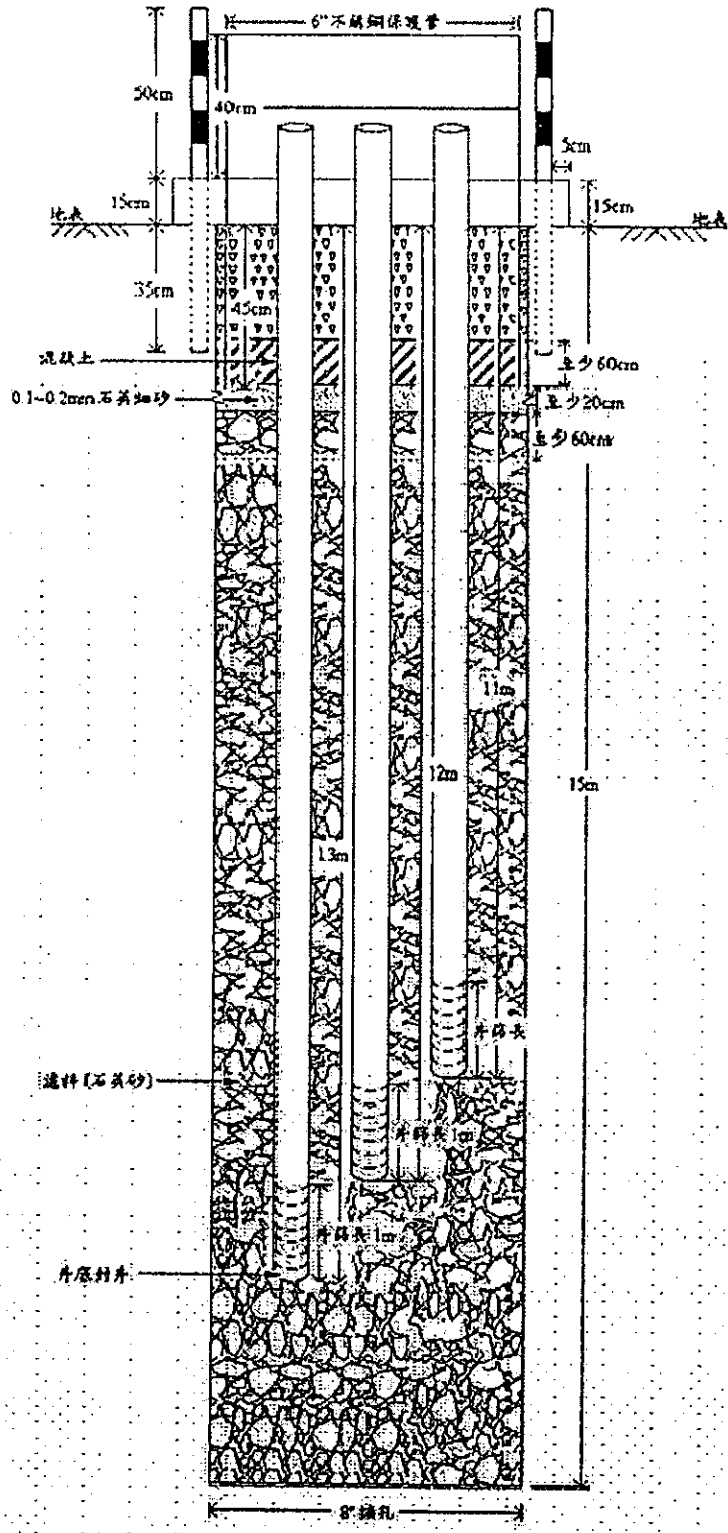


圖 4-7 1 吋分層監測井 C-C 剖面圖

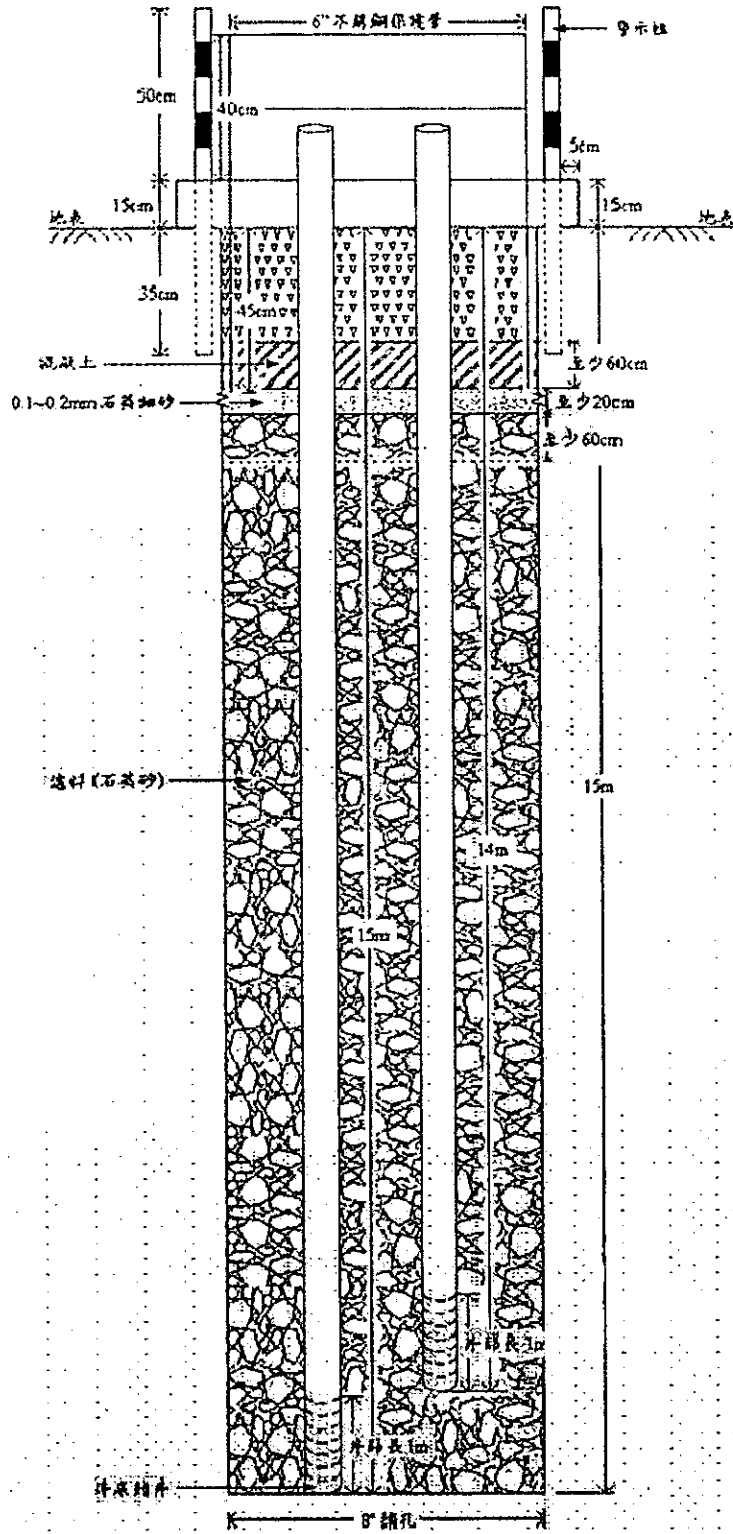


圖 4-8 1 吋分層監測井 D-D 剖面圖

2、抽水設備

抽水設備為符合試驗井的小口徑的特性，主要使用 0.5 馬力的離心式抽水馬達，適用抽水量小且直徑小於 4.5 cm 的監測井。

3、水位監測設備

水位監測設備主要分為手動式水位計及自記式水位計，如圖 4-9 及圖 4-10 所示。其中，自記式水位計又分為美國 Druck 所生產的 PDCR-1830 (model PDCR1830, Druck Inc., New Fairfield Connecticut. 以下簡稱 Druck 水位計)、美國 In-Situ 自記式水位計 TROLL (MP TROLL 9000, Enviro-Equipment, Inc., Downs Road. 以下簡稱 TROLL 水位計) 與 Geoguard 所生產的 Tuber (model tuber, GeoPump, Inc., California. 以下簡稱 Tuber 水位計) 等三種。

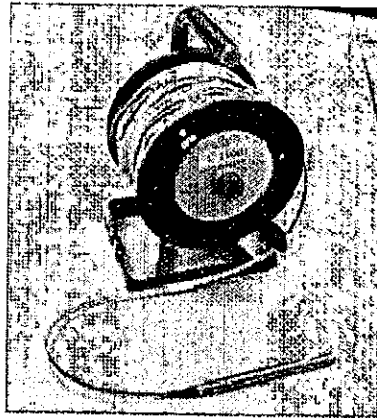


圖 4-9 手動式水位計示意圖

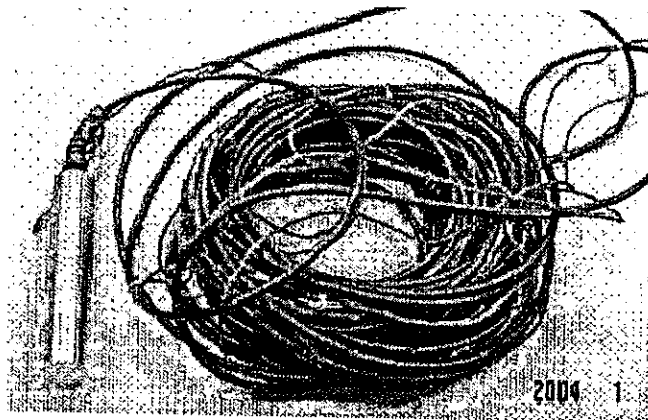


圖 4-10 自記式水位計示意圖

此外，為了確認每組自記式水位計所記錄水位資料的正確性，每組自記式水位計在使用前均於實驗室內進行儀器校驗，建立校驗曲線，如圖 4-11 所示。確定校驗的校驗曲線相關係數在 0.998 以上，才用於實驗量測。

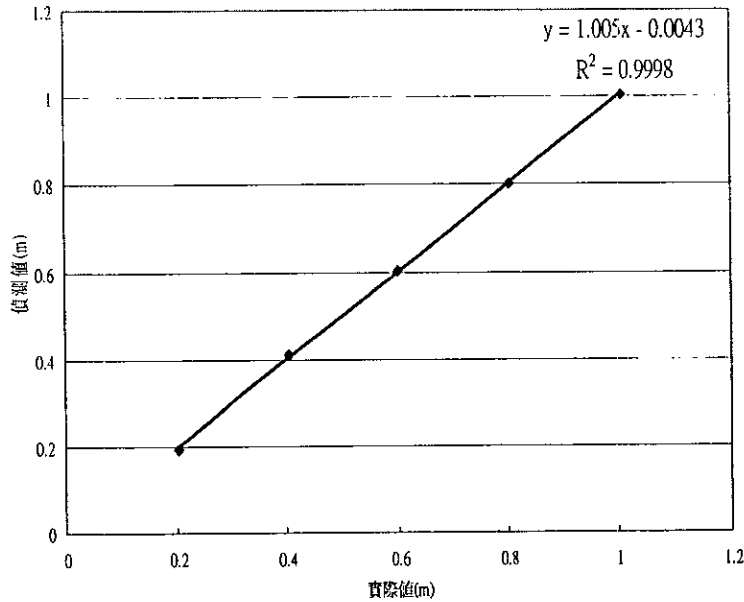


圖 4-11 自記式水位計儀器校驗曲線

其中，監測頻率如表 4-13 所示。前 1800 秒，自記式水位計每 1 秒監測一次，手動式水位計每 10 秒監測一次；1800 秒至 21600 秒，自記式水位計每 30 秒監測一次，手動式水位計每 1800 秒監測一次；21600 秒至 64800 秒，自記式水位計每 60 秒監測一次，手動式水位計每 3600 秒監測一次；64800 秒後，自記式水位計每 1800 秒監測一次，手動式水位計每 7200 秒監測一次。

表 4-13 水位監測頻率

| 記錄時間 (sec) | 自記式 水位計 監測頻 率(sec) | 手動式 水位計 監測頻 率(sec) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0~1800 | 1 | 10 |
| 1800~21600 | 30 | 1800 |
| 21600~64800 | 60 | 3600 |
| 64800~ | 1800 | 7200 |

4、流量監測設備

流量監測設備則使用家庭用水錶搭配碼錶使用，如圖 4-12 所示。其中，為了確認流量監測資料的正確性，每組水錶在使用前均於實驗室內進行儀器校驗，建立校驗曲線，如圖 4-13 所示。確定率定的率定曲線相關係數在 0.998 以上，才用於現地的地下水位量測。

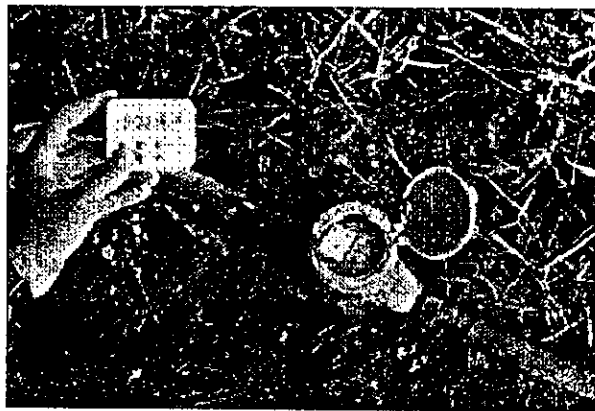


圖 4-12 流量監測設備示意圖

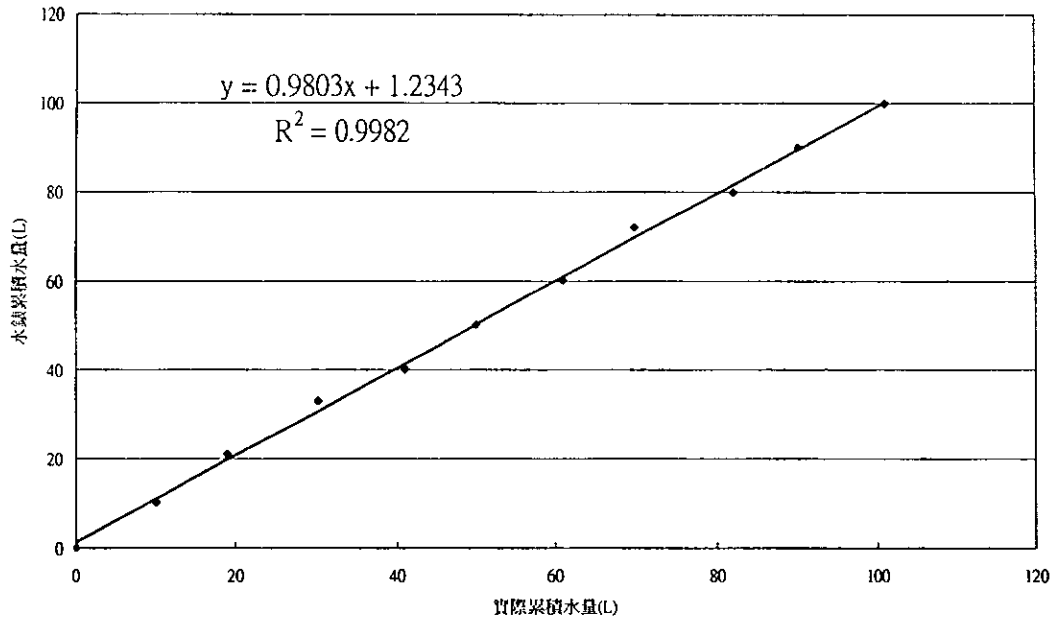


圖 4-13 水錶儀器校驗曲線

監測頻率如表 4-14 所示。前 360 分鐘，水錶為每 30 分鐘監測一次；360 分鐘至 720 分鐘，水錶為每 60 分鐘監測一次；720 分鐘後，水錶為每 120 分鐘監測一次。

表 4-14 流量監測頻率

| 記錄時間 (min) | 水錶監測頻率 (min) |
|---------------|-----------------|
| 0~360 | 30 |
| 360~720 | 60 |
| 720~ | 120 |

在試驗步驟階段，本研究步驟如下：

- 1、 利用手動式水位計，量測現地每口井之初始水位。
- 2、 將事前規劃準備好之儀器帶至試驗場址架設。
- 3、 將抽水馬達置入欲分析之 1 吋分層井中。
- 4、 連接抽水設備之水管串連一個率定過之水錶。

- 5、 用手動式水位計，量測柱塞器內之初始水位。
- 6、 分別在欲試驗的上端柱塞室與下端柱塞室各放置 1 支自記式水位計，將自記式水位計，依事前規劃之監測頻率及現地高程做設定。
- 7、 開啟抽水馬達，並微幅調整抽水頻率，進行抽水試驗。
- 8、 用水位監測設備及流量監測設備進行監測，以監測流量是否穩定及抽水端與注水端之水位是否穩定達到定水頭差？
- 9、 監測流量達到穩定，待率定曲線相關係數值到 0.995 以上，再將上端柱塞室抽出的水放入下端柱塞室中。放置水管的位置，必須在下端柱塞室內地下水水面上，但也不可距離太遠，差距約在 5cm 以內。
- 10、 將水管放入下端柱塞室後，持續監測直到即時監測的水位趨於穩定達到定水頭差後，關閉抽水馬達，試驗結束。
- 11、 換層分析，重複步驟 3 至步驟 10，做階梯式抽水試驗。
- 12、 直到 1 吋分層井全部試驗完畢後，則垂直水力傳導係數試驗全部試驗完成。於試驗結束後，需將所有儀器清潔乾淨，避免雜物堵住影響試驗精確度，且將離心式馬達攜回實驗室，利用清水作抽水動作，洗淨馬達內的雜質。

在 QA/QC 階段，本研究於試驗前必須針對各種設備做儀器校驗，確定校驗的校驗曲線相關係數在 0.995 以上，才能用於試驗量測，以避免儀器誤差產生。且本研究主要依據流體環流理論，必須在流量穩定的狀態下，才能進行循環流動，且必須使 1 吋分層監測井之水頭差到達穩定，即前一小時的水頭差與當時的水頭差之差在 2% 以內，其抽水試驗則可結束。

成果討論

本研究針對現地抽水試驗資料進行數據分析，探討現地的垂直水力係數。本研究共進行 9 場試驗，第 1 場試驗水管放置深度為距抽水端井口下方 4 m 處，第 1 場試驗由地表下深度 5.0~6.0 m 井篩的上端柱塞室內的空間置入抽水設備做為抽水井，將所抽出

的水引入地表下深度 6.0~7.0 m 井篩的下端柱塞器內的空間做為注水井，形成循環流場，以求得的水力傳導係數為抽水端的平均垂直水力傳導係數（地表下深度 6.0m）。依照上述的方式，將第 2 場至第 9 場試驗的資料統整如下表 4-15 所示。

表 4-15 第 2 場至第 9 場試驗統整表

| 試驗場次 | 井篩位於地表下深度 (m) | |
|------|---------------|------------|
| | 上端柱塞室 | 下端柱塞室 |
| 2 | 6.0 ~7.0 | 7.0 ~8.0 |
| 3 | 7.0 ~8.0 | 8.0 ~9.0 |
| 4 | 8.0 ~9.0 | 9.0 ~10.0 |
| 5 | 9.0 ~10.0 | 10.0 ~11.0 |
| 6 | 10.0 ~11.0 | 11.0 ~12.0 |
| 7 | 11.0 ~12.0 | 12.0 ~13.0 |
| 8 | 12.0 ~13.0 | 13.0 ~14.0 |
| 9 | 13.0 ~14.0 | 14.0 ~15.0 |

本研究將第 1 場試驗中所量測之抽水量與相對應的時間繪成累積抽水量與時間變化圖，如圖 4-14 所示，在抽水初期的流量較不穩定，待抽水 6000 sec 後流量趨於穩定，維持在 0.0069 L/sec 至 0.007 L/sec 之間，平均流量約為 0.007 L/sec。

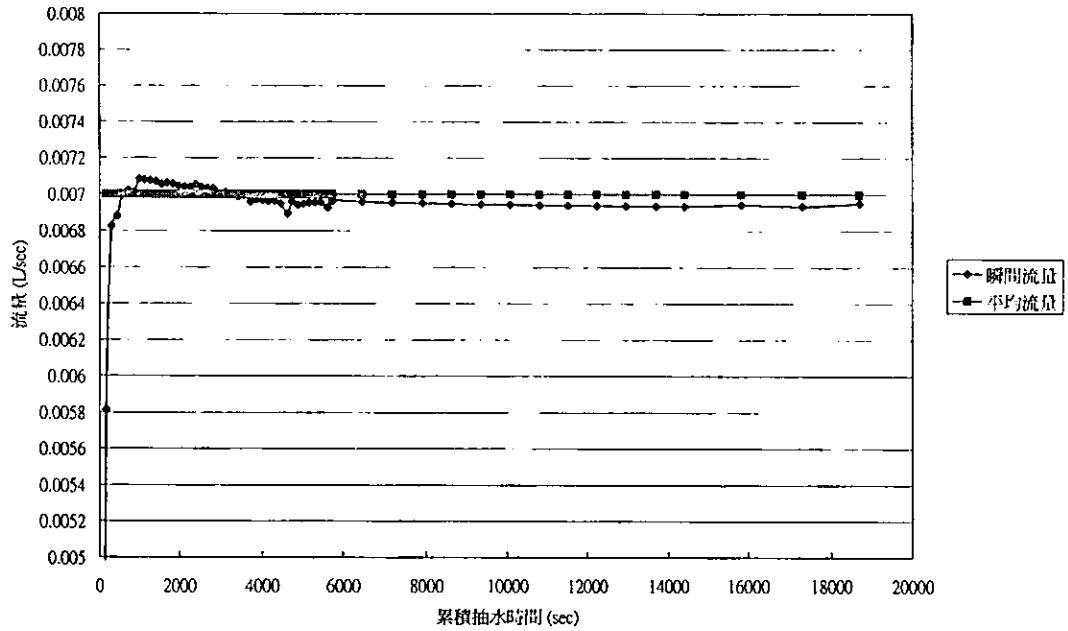


圖 4-14 第 1 場試驗累積抽水時間與抽水量關係圖

根據 Zlotnik and Ledder (1996)在文獻中的資料，認為試驗中抽水時間只需要 300 sec 至 2040 sec 的時間，洩降量即可達到穩態；本研究在注水前的抽水時間為約 18900 sec，與前述的文獻比較下，洩降量應已達到穩態。所以本研究在累積抽水時間在 18900 sec 時，將上端柱塞器所抽出的水引入下端柱塞器中，形成一地下水循環系統，並重新依照試驗步驟監測水位。將隨著時間變化的水位洩降量資料整理後，繪製水位洩降量與時間變化關係圖，如圖 4-15 所示。

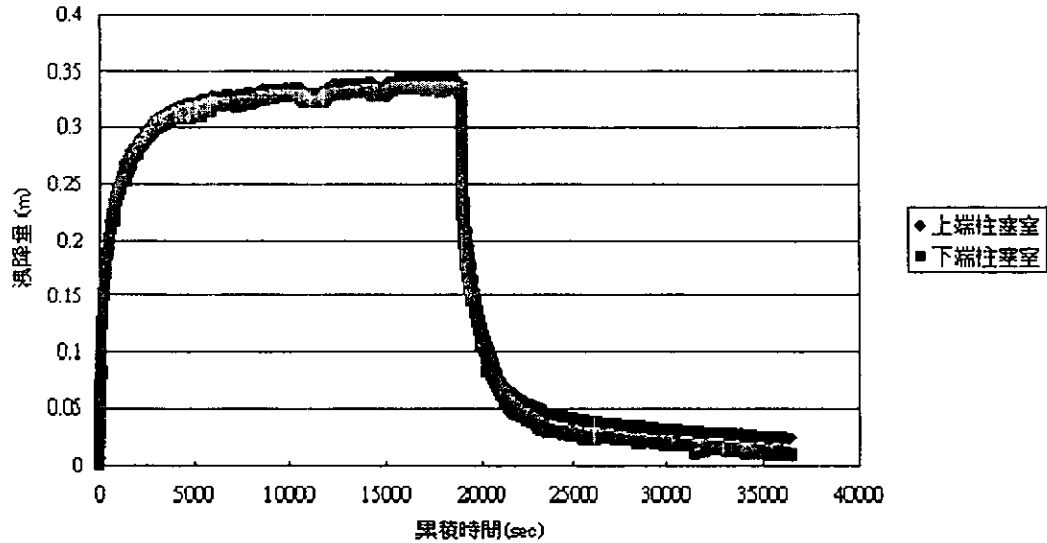


圖 4-15 第 1 場試驗上端柱塞室與下端柱塞室水位洩降量變化圖

在圖 4-15 中，累積抽水時間在 36400 sec 時，上、下端柱塞室內的水位變化趨於穩定，達到定水頭差，兩端柱塞器的水位洩降差約為 0.013 m，如圖 4-15 所示。

本研究所採用 r_w 值為 0.0127 m，第 1 場試驗 L 值為 0.596 m， Δ 值為 0.500 m，根據 Zlotnik and Ledder (1996) 在文獻中的資料， a 值採用的範圍為 1~1.1 之間，所以本研究將 a 值定為 1.1，將上述所得的參數資料代入式(4.6)、式(4.7)，可求得第 1 場試驗 f_i 值為 0.292。

將所得 f_i 值和已知 Q 值為 $7.00 \text{ E-}06 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 Δh 值為 0.013 m，將上述所得的參數資料利用式(4.8)，可求得 K_r 為 $6.30 \text{ E-}04 \text{ m/s}$ 。

將所得到的 a 值為 1.1 與 K_r 值為 0.00063 m/s ，利用式(4.3)求得 K_z 值為 $5.20 \text{ E-}04 \text{ m/s}$ ，此為地表下 6.0 m 的平均 K_z 值，將上述所有參數與分析結果統整為表 4-16 所示。

表 4-16 第 1 場試驗分析統整表

| | |
|-----------------------|-----------|
| Q (m ³ /s) | 7.00E-06 |
| Δh (m) | 0.013 |
| L (m) | 0.596 |
| Δ (m) | 0.500 |
| f _i | 0.292 |
| Kr (m/s) | 6.30 E-04 |
| Kz (m/s) | 5.20 E-04 |

依照上述的第 1 場試驗數據的分析步驟，對於第 2 場至第 9 場試驗資料進行分析，將第 1 場至第 9 場試驗的資料統整如下表 4-17 所示。

表 4-17 各場次分析結果表

| 試驗場次 | 井篩位於地表下深度 (m) | | Q (m ³ /s) | Δh (m) | L (m) | Δ (m) | f _i | Kr (m/s) | Kz (m/s) |
|------|---------------|-----------|-----------------------|--------|-------|-------|----------------|----------|----------|
| | 上端柱塞室 | 下端柱塞室 | | | | | | | |
| 1 | 5.0~6.0 | 6.0~7.0 | 7.00E-06 | 0.013 | 0.596 | 0.500 | 0.292 | 6.30E-04 | 5.20E-04 |
| 2 | 6.0~7.0 | 7.0~8.0 | 1.40E-05 | 0.023 | 0.386 | 0.500 | 0.213 | 5.19E-04 | 4.29E-04 |
| 3 | 7.0~8.0 | 8.0~9.0 | 8.50E-06 | 0.016 | 0.509 | 0.500 | 0.279 | 5.94E-04 | 4.91E-04 |
| 4 | 8.0~9.0 | 9.0~10.0 | 8.00E-06 | 0.020 | 0.491 | 0.500 | 0.273 | 4.37E-04 | 3.61E-04 |
| 5 | 9.0~10.0 | 10.0~11.0 | 8.90E-06 | 0.485 | 0.500 | 0.500 | 0.324 | 2.38E-05 | 1.96E-05 |
| 6 | 10.0~11.0 | 11.0~12.0 | 8.60E-06 | 0.161 | 0.493 | 0.500 | 0.320 | 6.85E-05 | 5.66E-05 |
| 7 | 11.0~12.0 | 12.0~13.0 | 7.90E-06 | 1.186 | 0.506 | 0.500 | 0.326 | 8.68E-06 | 7.17E-06 |
| 8 | 12.0~13.0 | 13.0~14.0 | 7.90E-06 | 0.023 | 0.499 | 0.500 | 0.276 | 3.80E-04 | 3.14E-04 |
| 9 | 13.0~14.0 | 14.0~15.0 | 7.90E-06 | 0.028 | 0.492 | 0.500 | 0.274 | 3.09E-04 | 2.55E-04 |

將表 4-17 所獲得的結果，整合在各不同深度下非等向水力傳導係數值，如下表 4-18 所示。

表 4.18 不同深度非等向水力傳導係數表

| 地表下深度 (m) | Kr (m/s) | Kz (m/s) |
|-----------|----------|----------|
| 6.0 | 6.30E-04 | 5.20E-04 |
| 7.0 | 5.19E-04 | 4.29E-04 |
| 8.0 | 5.94E-04 | 4.91E-04 |
| 9.0 | 4.37E-04 | 3.61E-04 |
| 10.0 | 2.38E-05 | 1.96E-05 |
| 11.0 | 6.85E-05 | 5.66E-05 |
| 12.0 | 8.68E-06 | 7.17E-06 |
| 13.0 | 3.80E-04 | 3.14E-04 |
| 14.0 | 3.09E-04 | 2.55E-04 |

利用上表 4-18 所得到的資料繪製垂直水力傳導係數在各不同地表下深度變化圖，如下圖 4-16 所示。

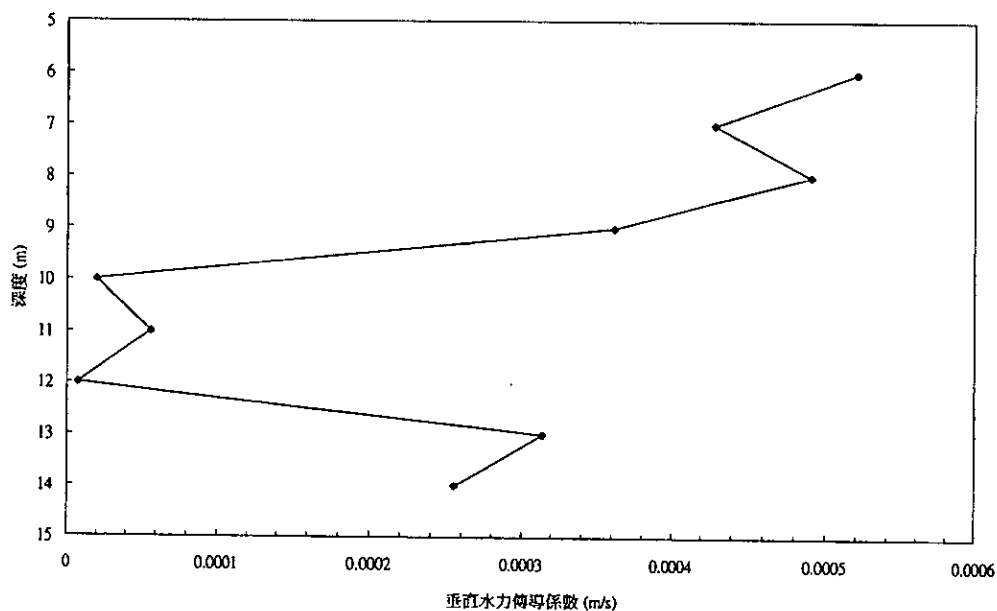


圖 4-16 垂直水力傳導係數在不同地表下深度變化圖

由圖 4-16 得知，在地表下深度 6.0 m 至 9.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $3.61\text{E-}04$ 至 $5.20\text{E-}04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層 (Bear, 1968)。在地表下深度 10.0m 至 12.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $1.96\text{E-}05$ 至 $7.17\text{E-}06$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂、粘土混合層。在地表下深度 13.0 m 至 14.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $2.25\text{E-}04$ 至 $3.14\text{E-}04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層。

由上述結果得知，本研究場址地質構造大部分由粉砂、泥砂混合層所組成，在地表下深度 10.0 m 至 12.0 m 中含有質地顆粒較細的土壤材料（如：黏土），所以水力傳導性在這段地層中顯得較小。

結論

在結論方面，可得以下 2 個結論：

- 1、在垂直水力傳導係數試驗期間，在距離地表不同深度下非等向水力傳導係數值，如下表所示。

| 地表下深度 (m) | Kr (m/s) | Kz (m/s) |
|-----------|-------------------|-------------------|
| 6.0 | $6.30\text{E-}04$ | $5.20\text{E-}04$ |
| 7.0 | $5.19\text{E-}04$ | $4.29\text{E-}04$ |
| 8.0 | $5.94\text{E-}04$ | $4.91\text{E-}04$ |
| 9.0 | $4.37\text{E-}04$ | $3.61\text{E-}04$ |
| 10.0 | $2.38\text{E-}05$ | $1.96\text{E-}05$ |
| 11.0 | $6.85\text{E-}05$ | $5.66\text{E-}05$ |
| 12.0 | $8.68\text{E-}06$ | $7.17\text{E-}06$ |
| 13.0 | $3.80\text{E-}04$ | $3.14\text{E-}04$ |
| 14.0 | $3.09\text{E-}04$ | $2.55\text{E-}04$ |

2、在地表下深度 6.0 m 至 9.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $3.61E-04$ 至 $5.20E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層 (Bear, 1968)。在地表下深度 10.0m 至 12.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $1.96E-05$ 至 $7.17E-06$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂、粘土混合層。在地表下深度 13.0 m 至 14.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $2.25E-04$ 至 $3.14E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層。本研究場址地質構造大部分由粉砂、泥砂混合層所組成，在地表下深度 10.0 m 至 12.0 m 中含有質地顆粒較細的土壤材料 (如：黏土)，所以水力傳導性在這段地層中顯得較小。

二、非等向水文參數試驗分析

理論介紹

本研究利用 Neuman 等人在非等向受壓含水層 (Confined Aquifer) 中所提出的 Neuman 模型 (Neuman et al., 1984)，先假設 T_α 和 T_β 為非等向座標系統的主流方向與側流方向流通係數，進一步假設非等向座標系統 (α, β) 與一般座標系統 (x, y) 所形成的夾角 θ ，相對座標系統如圖 4-17 所示。

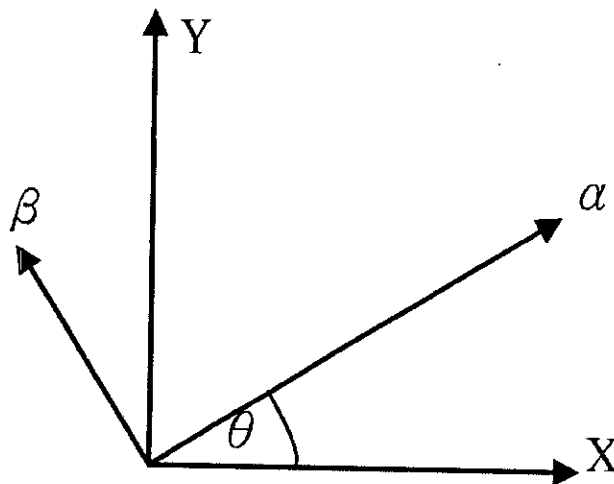


圖 4-17 相對座標系統示意圖

在非等向主要座標系統上，流動方程式 (flow equation) 如下：

$$T_\alpha \frac{\partial^2 s}{\partial \alpha^2} + T_\beta \frac{\partial^2 s}{\partial \beta^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.9)$$

其中 α 與 β 為非等向座標系統的座標軸， s 為洩降量， S 為儲水係數， t 為時間。Neuman 將非等向系統轉換等向系統時，重新定義非等向座標系統 (α, β) ，定義：

$$\alpha_1 = \sqrt{T_\beta} \alpha ; \beta_1 = \sqrt{T_\alpha} \beta \quad (4.10)$$

將公式(4.10)代入式(4.9)，由非等向性轉換為等向性：

$$T_e \left(\frac{\partial^2 s}{\partial \alpha_1^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial \beta_1^2} \right) = S_e \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.11)$$

其中

$$T_e = \sqrt{T_\alpha T_\beta}, \quad S_e = S/T_e \quad (4.12)$$

在極座標系統，利用 $r^2 = \alpha_1^2 + \beta_1^2 = T_\beta \alpha^2 + T_\alpha \beta^2$ ，將式(4.11)轉換成

$$T_e \left(\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} \right) = S_e \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.13)$$

式(4.13)的初始與邊界條件如下：

$$\begin{aligned} s(r, 0) &= 0, \quad r_w \leq r \leq \infty \\ s(\infty, t) &= 0, \quad r \geq 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\lim_{r=r_w \rightarrow 0} 2\pi T \frac{\partial s}{\partial r} = Q_w = \text{const.}$$

其中 r 為抽水井與監測井的徑向距離， r_w 為抽水井的半徑。式(4.13)與在水平均質等向性含水層中的一口抽水井，所造成地下水洩降之流動方程式相同，如式(4.15)所示：

$$T \left(\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} \right) = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.15)$$

所以式(4.13)的解可以 Theis' solution (Theis, 1935) 相同，故式

(4.13)的解可寫成：

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T_e} W(u_e) \quad , \quad u_e = \frac{r^2 S_e}{4T_e t} \quad (4.16)$$

其中 Q 為抽水流量， $W(u_e) = \int_{u_e}^{\infty} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda} d\lambda$ ，並定義非等向座標系統

(α, β) 與一般座標系統 (x, y) 的關係：

$$\begin{aligned} \alpha &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ \beta &= -x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \quad (4.17)$$

並利用 Bear (Bear, 1972) 所提出流通係數 T 的張量構成條件：

$$\begin{aligned} T_{xx} &= T_\alpha \cos^2 \theta + T_\beta \sin^2 \theta \\ T_{yy} &= T_\alpha \sin^2 \theta + T_\beta \cos^2 \theta \\ T_{xy} &= T_{yx} = (T_\alpha - T_\beta) \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (4.18)$$

其中 T_{xx} ， T_{yy} ， T_{xy} 為一般座標系統上，流通係數 T 的分量，所以在一般座標系統中，式(4.9)可轉換成：

$$T_{xx} \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + 2T_{xy} \frac{\partial^2 s}{\partial x \partial y} + T_{yy} \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.19)$$

利用式(4.12)、式(4.17)與式(4.18)的關係，定義：

$$T_e = \sqrt{T_{xx} T_{yy} - (T_{xy})^2} \quad (4.20)$$

$$r^2 = T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} xy \quad (4.21)$$

利用式(4.20)、式(4.21)代入式(4.16)可整理為：

$$T_e = \frac{Q}{4\pi \times s(r,t)} W(u_e) \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} u_e &= \frac{r^2 S_e}{4t T_e} = \frac{S}{4t} \left(\frac{T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} xy}{T_{xx} T_{yy} - (T_{xy})^2} \right) \\ &= \frac{S}{4t} \left(\frac{T_{xx} y^2 + T_{yy} x^2 - 2T_{xy} xy}{(T_e)^2} \right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

在式(4.23)中 x 為抽水井與監測井在 X 軸方向的距離， y 為抽水井與監測井在 Y 軸方向的距離。在 Neuman 提出模型中，抽水井位置不在座標系統的原點，這樣並不符合 Theis' solution 的原始控

制方程式邊界條件的特性，如式(4.14)所示。因此，為符合 Theis' solution 應該以抽水井為座標原點及其它監測井不在原點處的佈置方式，如圖 4-18 所示。

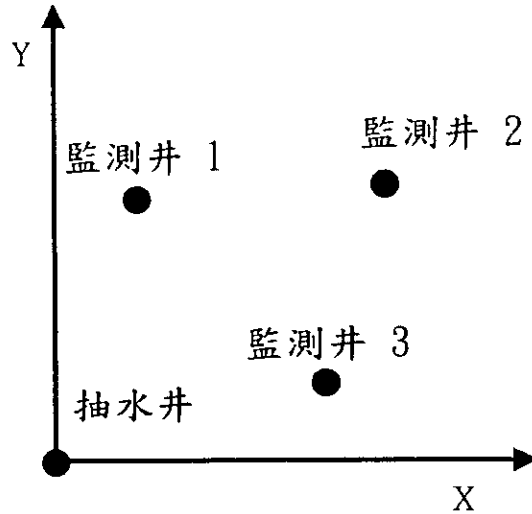


圖 4-18 抽水井與監測井相對關係圖

因為 Theis 標準曲線法 (Theis, 1935) 的初始假設條件是在均質等向的含水層，然而在本研究中的式(4.13)，乃是將式(4.9)的非等向系統轉換成等向系統所得，符合 Theis 標準曲線法的初始條件。所以利用標準曲線法繪製 $W(u) \sim u$ 的雙對數座標圖，與抽水試驗所得到各監測井洩降資料，描繪相同方格大小之洩降(s)與距離平方和時間關係(r^2/t_D)的雙對數座標圖進行平移套疊比對，直到標準曲線與繪製洩降曲線重合，各監測井皆可得 $(s_D, W_D(u_e))$ 與 $(r^2/t_D, (u_e)_D)$ 兩組數據。將 $(s_D, W_D(u_e))$ 代入式(4.22)，可得到每口監測井個別的 T_e 。因為，此時通常每一口井的 T_e 均不一樣，顯示一開始假設含水層為均質等向是不合理的；但是為了簡化計算，將全部監測井的 T_e 取平均，得到 \bar{T}_e 與 $(r^2/t_D, (u_e)_D)$ 值代入式(4.22)，會產生包含未知數 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 的方程式：

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{11} \Delta_j^2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{11} (A_{4j}T'_{xx} + B_{4j}T'_{yy} + C_{4j}T'_{xy} - D_{4j})^2 = \Delta^2 \quad (4.31)$$

Δ^2 為方程式偏差平方的總和，為使 Δ^2 達到最小值，對未知數 T'_{xx} ， T'_{yy} ， T'_{xy} 分別做一階偏微，且令每一偏微方程式均等於 0，如下式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta^2}{\partial T'_{xx}} = 0 &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{11} 2(A_{4j}T'_{xx} + B_{4j}T'_{yy} + C_{4j}T'_{xy} - D_{4j})(A_{4j}) \\ \frac{\partial \Delta^2}{\partial T'_{yy}} = 0 &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{11} 2(A_{4j}T'_{xx} + B_{4j}T'_{yy} + C_{4j}T'_{xy} - D_{4j})(B_{4j}) \\ \frac{\partial \Delta^2}{\partial T'_{xy}} = 0 &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{11} 2(A_{4j}T'_{xx} + B_{4j}T'_{yy} + C_{4j}T'_{xy} - D_{4j})(C_{4j}) \end{aligned} \quad (4.32)$$

利用式(4.20)與式(4.25)可以得到：

$$S = \frac{1}{T_e} \sqrt{T'_{xx}T'_{yy} - (T'_{xy})^2} \quad (4.33)$$

將式(4.32)方程式系統解聯立，可以得到 3 個未知參數 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} ，再將 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 代入式(4.33)，求出含水層的 S 儲水係數，使用式(4.34)和式(4.35)找出實際非等向主流方向與側流方向的流通係數 T_α 和 T_β 。

$$T_\alpha = \frac{1}{2} \left[T_{xx} + T_{yy} + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4(T_{xy})^2} \right] \quad (4.34)$$

$$T_\beta = \frac{1}{2} \left[T_{xx} + T_{yy} - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4(T_{xy})^2} \right] \quad (4.35)$$

利用所得到實際非等向主流方向與側流方向的流通係數 T_α 和 T_β ，求得非等向主流方向與側流方向的水力傳導係數 K_α 和 K_β 。最後利用所得到的水力參數，藉由式(4.36)求得含水層非等向主流方向與世界橫麥卡脫方格座標(UTM 座標)的 X 軸的夾角：

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2T_{xy}}{T_\alpha - T_\beta} \right] \quad (4.36)$$

其中夾角 θ 須滿足：

$$\frac{T_{\alpha}}{T_{\beta}} = \frac{T_{xx} - T_{\beta} \sin^2 \theta}{T_{yy} - T_{\alpha} \sin^2 \theta} \geq 1 \quad (4.37)$$

工作方法

在工作方法中，共可分為三大階段，分別為事前規劃、試驗步驟及 QA/QC。

在事前規劃階段，本研究依目的、背景資料、監測井分佈及地下水等水位圖，決定抽水井及試驗方法。其中，所使用之儀器包括抽水設備、水位監測設備及流量監測設備。且本研究為了提高試驗之成功率及準確性，因此於試驗前針對水位監測設備及流量監測設備做儀器校驗。

1、抽水設備

抽水設備主要使用美國 Grundfos 公司所生產的變頻式沈水式泵(model MP1 Grundfos Pumps Corp., Clovis, California)，如圖 4-19 所示。其中，主要由 MP1 馬達及變頻器組成，適用於直徑大於 4.5 cm 的監測井；最大深度為 90 m，實際操作深度為 60 m。

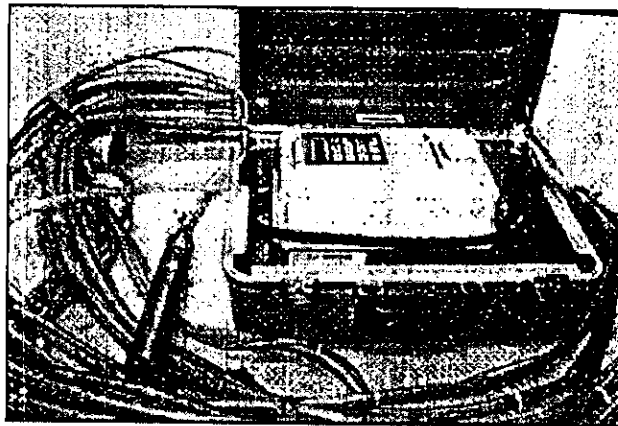


圖 4-19 Grundfos MP1 示意圖

2、水位監測設備

請參考垂直水力傳導係數試驗之水位監測設備。

3、流量監測設備

請參考垂直水力傳導係數試驗之流量監測設備。

在試驗步驟階段期間，本研究依事前規劃之試驗方法做逐步試驗，如圖 4-20 所示。

- 1、手動式水位計，量測現地每口井之初始水位。
- 2、將事前規劃準備好之儀器帶至試驗場址架設。
- 3、啟動抽水馬達，試驗開始。
- 4、利用水位監測設備監測水位變化 Δh ，及流量監測設備監測流量變化 ΔQ 。
- 5、確定流量穩定，如穩定則往第 6 步驟；否則持續監測到穩定。
- 6、水位穩定：當水位洩降量(Δh)小於 2%時，則代表水位穩定，試驗結果；否則持續監測到穩定。

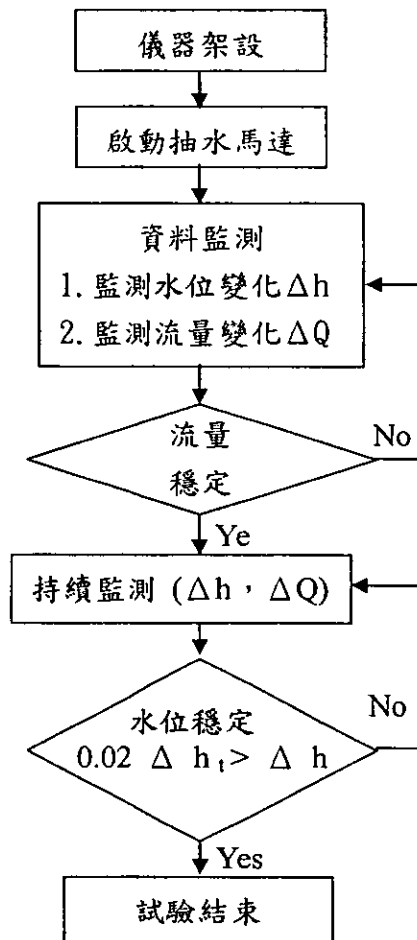


圖 4-20 非等向水文參數分析試驗步驟

在 QA/QC 階段期間，本研究於試驗前，必須針對各種設備做儀器校驗，確定校驗的校驗曲線相關係數在 0.998 以上，才用於實驗量測，以避免儀器誤差產生。且本研究主要抽水試驗(Pump test)之定量抽水理論，因此試驗中流量變化必須穩定，即前一小時的抽水體積與當時的抽水體積之差在 2% 以內，則可以確定水位變化之穩定性；否則必須持續抽水，使流量穩定才能確定水位變化之穩定性。

當流量穩定後，即必須確定水位變化到達穩定，實驗才算完成。因此前一小時的水位洩降量與當時的水位洩降量之差在 2% 以內，即代表水位洩降到達穩定，實驗結束。

成果討論

本研究採用雲林科技大學監測場址中的第 4 口地下水監測井為抽水井，抽水馬達放置深度為井口下 13 米，抽水量為 $Q = 0.000178 \text{ (m}^3\text{/sec)}$ 。在監測水位洩降變化時，發現水位洩降量並非完全隨著抽水井與監測井間距離變化而增加或減少，在均質的地形上，理論假設監測井越靠近抽水井，水位洩降變化越大。但第 10 口監測井距離抽水井較近，水位洩降量卻比其它 9 口監測井小，與前述的理論不符，如圖 4-21 所示，所以推斷試驗場址為非均質性含水層。

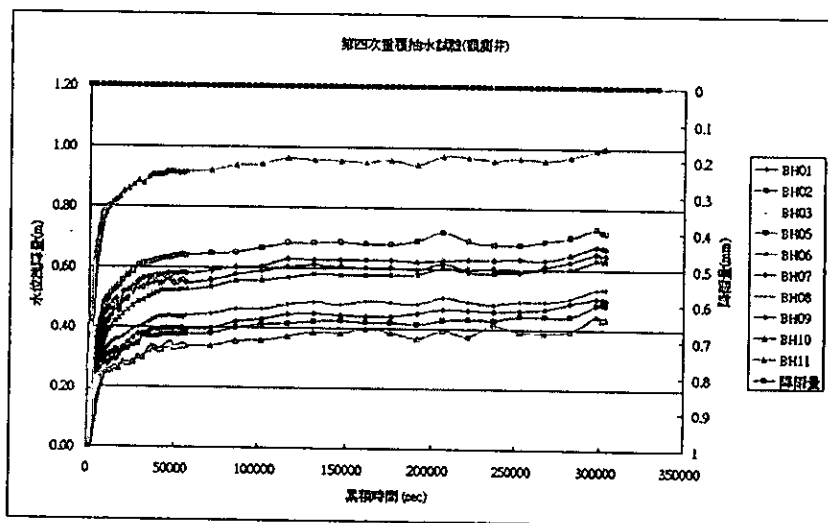


圖 4-21 各觀測井洩降關係圖

將抽水試驗所得到洩降資料，描繪各監測井洩降(s)~距離平方與時間(r^2/t_D)的雙對數曲線圖，並與 Theis 標準曲線法(Theis,1935) $W(u) \sim u$ 的雙對數曲線圖進行平移套疊比對，以第10口監測井為例，如圖4-22所示。

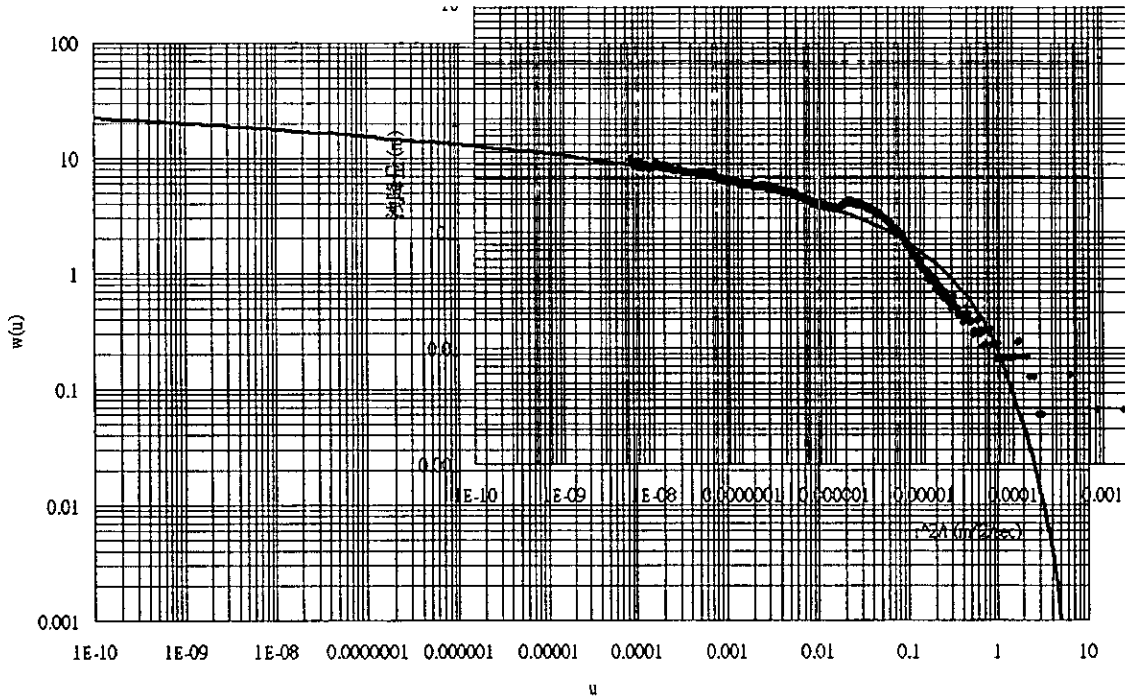


圖 4-22 第一次洩降曲線與標準曲線套疊圖

每口監測井皆會產生 $(s_D, W_D(u_e))$ 與 $(r^2/t_D, (u_e)_D)$ 兩組對數數據。將 $(s_D, W_D(u_e))$ 代入式(4.22)，每口監測井皆有個別的 T_e ，如表4-19所示。

表 4-19 第一次分析對數圖比對資料

| 監測井號 | $W_D(u)$ | s_D (m) | u_D | r^2/t (m ² /s) | T_e (m ² /s) |
|------|----------|-----------|-------|-----------------------------|---------------------------|
| BH01 | 1 | 0.1 | 0.03 | 0.002 | 0.000141 |
| BH02 | 8 | 0.6 | 0.07 | 0.005 | 0.000189 |
| BH03 | 1 | 0.1 | 0.03 | 0.002 | 0.000141 |
| BH05 | 8 | 0.9 | 0.03 | 0.001 | 0.000126 |
| BH06 | 9 | 1 | 0.01 | 0.001 | 0.000127 |
| BH07 | 9 | 0.8 | 0.03 | 0.01 | 0.000159 |
| BH08 | 10 | 0.9 | 0.07 | 0.01 | 0.000157 |
| BH09 | 8 | 1 | 0.2 | 0.01 | 0.000113 |
| BH10 | 10 | 0.9 | 0.09 | 0.01 | 0.000157 |
| BH11 | 7 | 1 | 0.07 | 0.009 | 9.9E-05 |

為了簡化計算，將每口監測井的 T_e 取平均，得到 \bar{T}_e 為 0.00014。將得到的 \bar{T}_e 與各監測井 $(r^2/t_D, (u_e)_D)$ 值代入式(4.23)，會產生 10 個包含未知數 S 、 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 的方程式。利用式(4.25)，將 10 個包含未知數 S 、 T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 的方程式，轉換成 10 個包含未知數 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 的方程式組。因為方程式數目多於未知數，利用式(4.31)與式(4.32)簡化方程式組，可以得到 3 個包含未知數 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 方程式，將方程式求解，可以得到 T'_{xx} 為 3.24 E-06 (m²/s)、 T'_{yy} 為 2.76 E-06 (m²/s)、 T'_{xy} 為 9.70E-07 (m²/s)。將 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 代入式(4.33)，求出含水層的儲水係數 S 為 0.02007。利用所得到儲水係數 S 與 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 值代入式(4.25)，求得流通係數 T 的分量， T_{xx} 為 0.000138 (m²/s)、 T_{yy} 為 0.000162 (m²/s)、 T_{xy} 為 4.83E-05 (m²/s)。利用求出含水層的儲水係數 S 與流通係數 T 的分量 (T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy})，代入式(4.20)、式(4.34)和式(4.35)找出等向流通係數 T_e 及非等向主流方向與側流方向的流通係數 T_α 和 T_β ，分別為 0.00014 (m²/s)、1.99E-04 (m²/s) 與 2.50E-05

(m^2/s)。利用非等向主流方向與側流方向的流通係數 T_α 和 T_β 與流通係數 T 的分量 T_{xy} 值，代入式(4.36)，得到含水層主流方向與 UTM 座標的 X 軸的夾角為 17 度。利用求得的 T'_{xx} 、 T'_{yy} 、 T'_{xy} 、 \bar{T}_e 與各監測井 (r^2/t_D , $(u_e)_D$) 值代入式(4.31)，得到的偏差平方總和 Δ^2 為 $4.03\text{E}-08$ ，計算結果統整如表 4-20 所示。偏差平方總和 Δ^2 在精確度上略顯不足，所以本研究作第二次分析計算。

表 4-20 第一次分析結果

| | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $T'_{xx} (\text{m}^2/\text{s})$ | $T'_{yy} (\text{m}^2/\text{s})$ | $T'_{xy} (\text{m}^2/\text{s})$ | $T_{xx} (\text{m}^2/\text{s})$ | $T_{yy} (\text{m}^2/\text{s})$ | $T_{xy} (\text{m}^2/\text{s})$ |
| 2.76E-06 | 3.24E-06 | 9.70E-07 | 0.000138 | 0.000162 | 4.83E-05 |
| S | $T_e (\text{m}^2/\text{s})$ | $T_\alpha (\text{m}^2/\text{s})$ | $T_\beta (\text{m}^2/\text{s})$ | θ | Δ^2 |
| 0.02007 | 0.00014 | 1.99E-04 | 2.50E-05 | 17 | 4.04E-08 |

利用第一次分析所獲得流通係數 T 的分量 (T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy}) 代入式(4.21)，得到每口監測井的 r 值，將所獲得的 r 值重新繪製每口監測井洩降 (s) ~ 距離平方與時間 (r^2/t_D) 的雙對數曲線圖，並與 Theis 標準曲線法 $W(u) \sim u$ 的雙對數曲線圖進行平移套疊比對，以第 10 口監測井為例，如圖 4-23 所示。第二次套疊所得到的結果與第一次結果 (如圖 4-22 所示) 比較，套疊成果明顯地比第一次更好，繪製的洩降 (s) ~ 距離平方與時間 (r^2/t_D) 的雙對數曲線更接近 Theis 標準曲線。

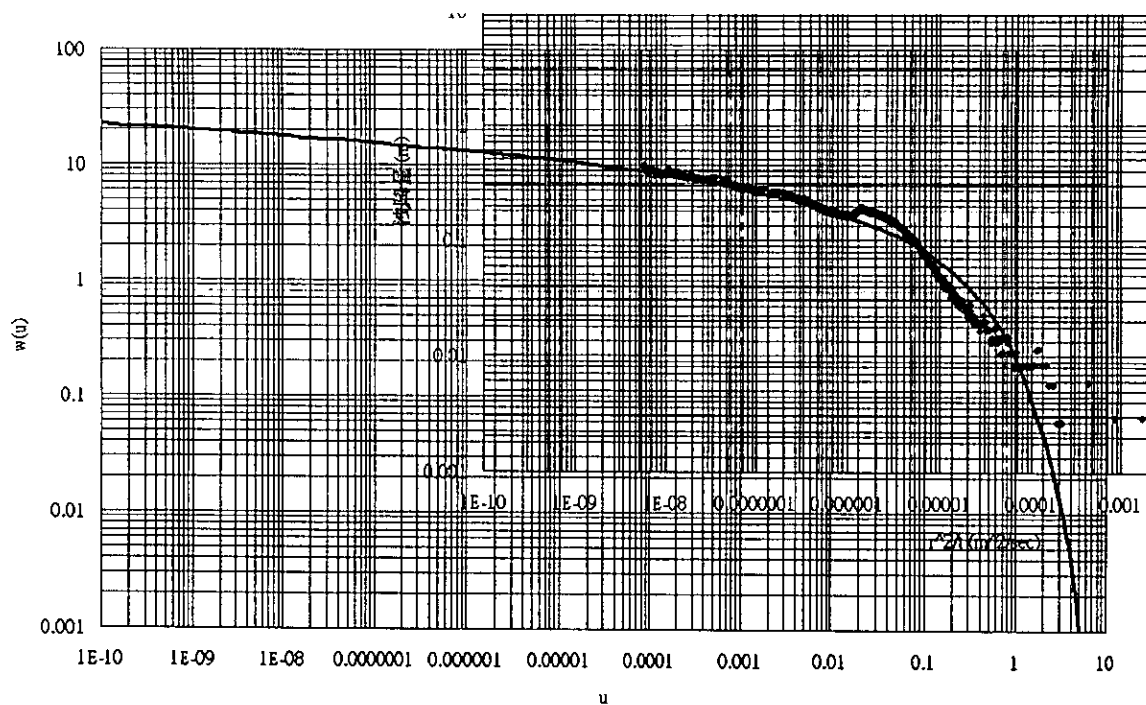


圖 4-23 第二次洩降曲線與標準曲線套疊圖

各監測井($s_D, W_D(u_e)$)與($r^2/t_D, (u_e)_D$)兩組對數數據，與各監測井的 T_e 值，統整如表 4-21 所示。

表 4-21 第二次分析對數圖比對資料

| 監測井號 | $W_D(u)$ | s_D (m) | u_D | r^2/t (m^2/s) | T_e (m^2/s) |
|------|----------|-----------|-------|---------------------|-------------------|
| BH01 | 20 | 0.9 | 0.04 | 0.000003 | 0.000314 |
| BH02 | 20 | 0.9 | 0.02 | 0.000001 | 0.000314 |
| BH03 | 20 | 0.9 | 0.02 | 0.000001 | 0.000314 |
| BH05 | 20 | 0.9 | 0.05 | 0.000002 | 0.000314 |
| BH06 | 20 | 0.9 | 0.01 | 0.000001 | 0.000314 |
| BH07 | 10 | 0.6 | 0.01 | 0.000001 | 0.000236 |
| BH08 | 20 | 0.9 | 0.05 | 0.000004 | 0.000314 |
| BH09 | 20 | 0.9 | 0.02 | 0.000001 | 0.000314 |
| BH10 | 20 | 0.9 | 0.02 | 0.000002 | 0.000314 |
| BH11 | 10 | 0.8 | 0.03 | 0.000004 | 0.000177 |

並且依照第一次分析步驟，可以得到儲水係數 S 約為 0.00569，流通係數 T 的分量， T_{xx} 為 0.00025 (m^2/s)、 T_{yy} 為 0.00018 (m^2/s)、 T_{xy} 為 0.00011 (m^2/s)，等向流通係數 T_e 、非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 0.00029 (m^2/s)、 $4.42E-04$ (m^2/s) 與 $1.94E-04$ (m^2/s)，含水層主流方向與 UTM 座標的 X 軸的夾角為 30 度，偏差平方總和 Δ^2 為 $5.78E-10$ ，計算結果統整如表 4-22 所示。在偏差平方總和 Δ^2 上，與第一次計算比較，偏差有明顯地減少，但為了提升數據的精確度，本研究繼續做重覆計算。

表 4-22 第二次分析結果

| T'_{xx} (m^2/s) | T'_{yy} (m^2/s) | T'_{xy} (m^2/s) | T_{xx} (m^2/s) | T_{yy} (m^2/s) | T_{xy} (m^2/s) |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 5.51E-07 | 8.20E-07 | 2.30E-07 | 0.00025 | 0.00018 | 0.00011 |
| S | T_e (m^2/s) | T_α (m^2/s) | T_β (m^2/s) | θ | Δ^2 |
| 0.00216 | 0.00029 | $4.42E-04$ | $1.94E-04$ | 30 | $5.78E-10$ |

利用第二次分析所獲得流通係數 T 的分量 (T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy}) 代入式(4.21)，得到每口監測井的 r 值，將所獲得的 r 值重新繪製每口監測井洩降 (s) \sim 距離平方與時間 (r^2/t_D) 的雙對數曲線圖，並與 Theis 標準曲線法 $W(u) \sim u$ 的雙對數曲線圖進行平移比對。各監測井 ($s_D, W_D(u_e)$) 與 ($r^2/t_D, (u_e)_D$) 兩組對數數據，與各監測井的 T_e 值，統整如表 4-23 所示。

表 4-23 第三次分析對數圖比對資料

| 監測井號 | $W_D(u)$ | s_D (m) | u_D | r^2/t (m^2/s) | T_e (m^2/s) |
|------|----------|-----------|-------|---------------------|-------------------|
| BH01 | 20 | 0.9 | 0.06 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH02 | 20 | 0.9 | 0.09 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH03 | 20 | 0.9 | 0.1 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH05 | 20 | 0.9 | 0.1 | 0.000007 | 0.000314 |
| BH06 | 20 | 0.9 | 0.06 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH07 | 20 | 1 | 0.1 | 0.00004 | 0.000283 |
| BH08 | 20 | 0.9 | 0.07 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH09 | 20 | 0.9 | 0.08 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH10 | 20 | 0.9 | 0.07 | 0.00001 | 0.000314 |
| BH11 | 10 | 0.6 | 0.02 | 0.00001 | 0.000236 |

依照第一次分析步驟可以得到儲水係數 S 約為 0.00230，流通係數 T 的分量， T_{xx} 為 0.00029 (m^2/s)、 T_{yy} 為 0.00036 (m^2/s)、 T_{xy} 為 0.00011 (m^2/s)，等向流通係數 T_e 、非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 0.000304 (m^2/s)、 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)，含水層非等向主流方向與 UTM 座標的 X 軸的夾角為 36 度，偏差平方總和 Δ^2 為 $4.10E-10$ ，計算結果統整如表 4-24 所示。

表 4-24 第三次分析結果

| | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| T'_{xx} (m^2/s) | T'_{yy} (m^2/s) | T'_{xy} (m^2/s) | T_{xx} (m^2/s) | T_{yy} (m^2/s) | T_{xy} (m^2/s) |
| 6.64E-07 | 8.29E-07 | 2.54E-07 | 0.00029 | 0.00036 | 0.00011 |
| S | T_e (m^2/s) | T_α (m^2/s) | T_β (m^2/s) | θ | Δ^2 |
| 0.00230 | 0.00030 | 4.41E-04 | 2.09E-04 | 36 | 4.10E-10 |

由上述利用三次計算所得到的偏差平方總和 Δ^2 ，可以得知第三次分析結果的偏差比前面兩次分析的偏差要來的小，如圖 4-24 所示。

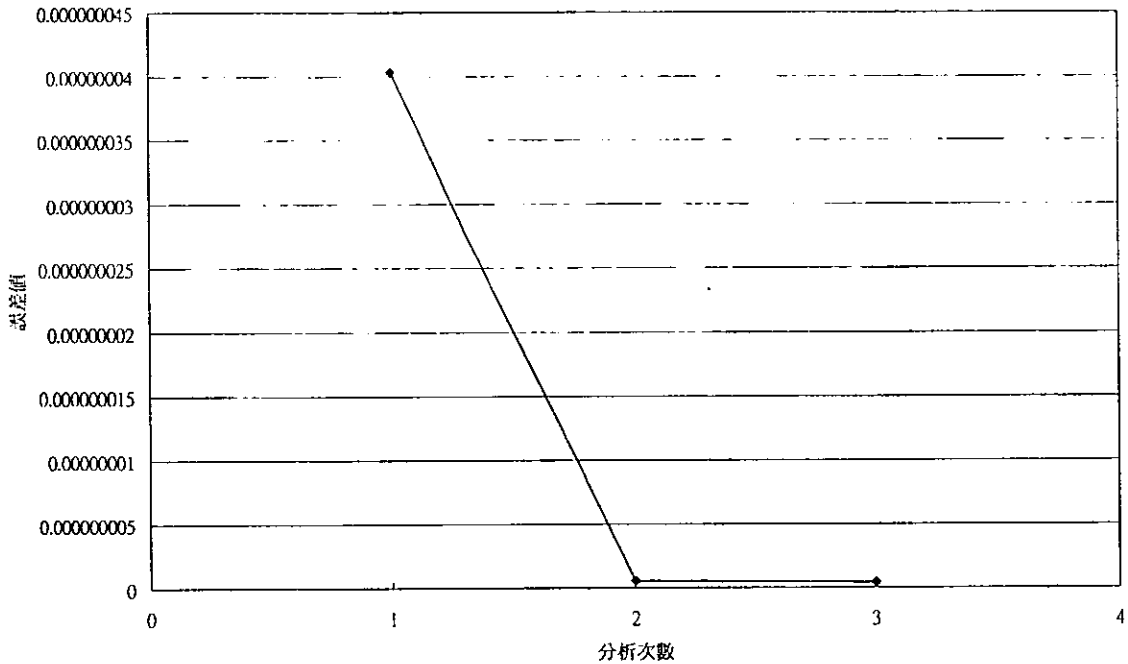


圖 4-24 分析次數與誤差值示意圖

呈現收斂的狀態，且偏差平方總和 Δ^2 為 $4.10E-10$ 趨於極小值。因此，可以信任第三次分析結果的數據，所以在本研究中，我們採用第三次所分析的結果，作為本研究現地非等向含水層的參數。

經由第三次分析結果非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)，並利用 $K=T/D$ ，其中 D 為含水層厚度為 19.95 m。可以獲得非等向主流方向水力傳導係數 (K_α) 與側流方向水力傳導係數 (K_β) 分別為 $2.21E-05$ (m/s) 與 $1.04E-05$ (m/s)。等向流通係數 T_e 為 $3.04E-4$ (m^2/s)，儲水係數 S 約為 0.00230 。其主流方向如圖 4-25 所示，與 X 軸夾角為 36 度。

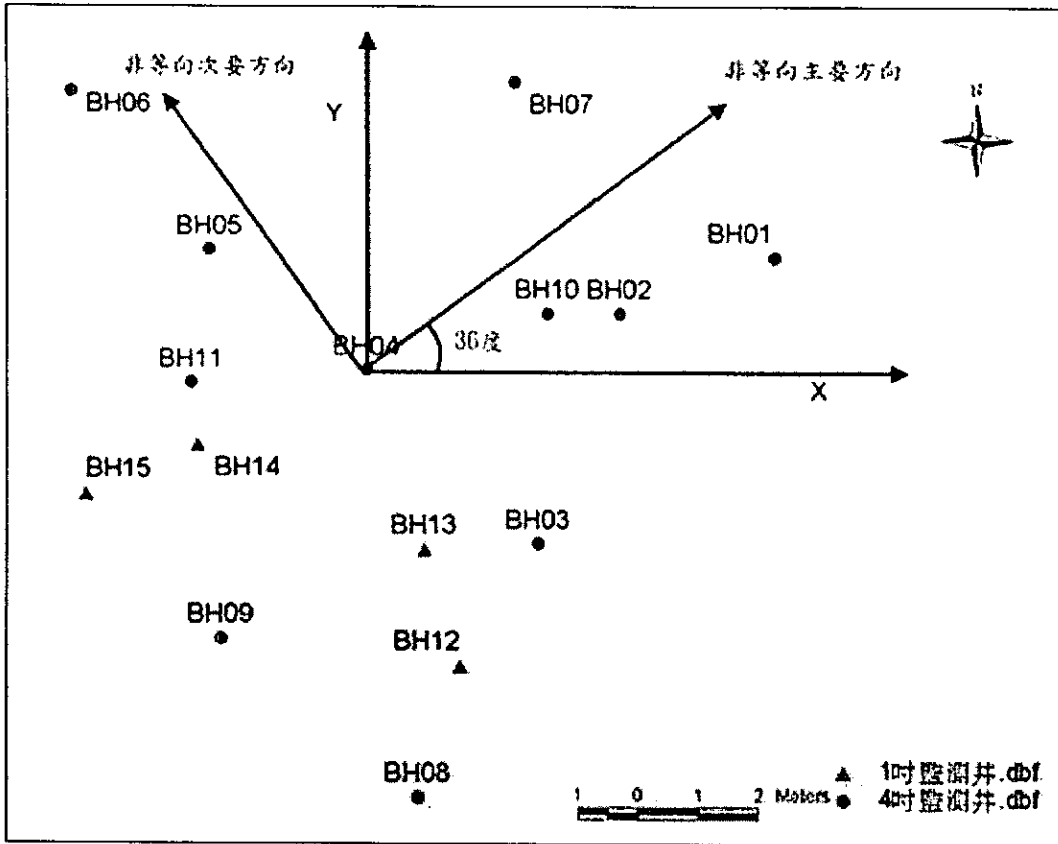


圖 4-25 研究場址非等向主要次要方向

結論與建議

在結論方面，本研究於國立雲林科技大學地下水位監測場址進行抽水試驗，並改良 Neuman 提出的非等向模型 (Neuman et al.,1984)，獲得以下結論：

- 1、在現地以多口監測井（多於 4 口井）進行抽水試驗，利用最小二乘法最佳化的結果其所獲得的現地資訊，應較 Neuman (Neuman et al.,1984) 所提出之 4 口井方式，更能代表現地含水層的水力特性。
- 2、在 Neuman 提出的模型中 (Neuman et al.,1984)，抽水井的位置不在座標系統的原點，這樣的假設是錯誤的，因為並不符合 Theis' solution 的原始控制方程式邊界條件的特性。因此，本研究是以抽水井為座標原點及其它監測井不在原點處的佈置方式，所組成的座標系統，完全符合 Theis' solution 邊

界條件的特性下，進行現地抽水試驗分析。

- 3、在 Neuman 所提出之 4 口井方式 (Neuman et al.,1984)，利用繪製洩降 (s) ~時間 (t) 的半對數曲線圖，求得現地含水層特性，但僅能進行一次分析而無法進行重覆疊代修正偏差；本研究利用繪製洩降 (s) ~距離平方與時間(r^2/t_D) 的雙對數曲線圖，能進行重覆分析以降低計算誤差，提高分析結果精度，獲得較符合現地含水層的特性。
- 4、本研究得到非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)。非等向主流方向水力傳導係數 (K_α) 與側流方向水力傳導係數 (K_β) 分別為 $2.21E-05$ (m/s) 與 $1.04E-05$ (m/s)，其值介於粉砂、泥沙標準水力傳導係數值 $1E-5 \sim 6E-5$ (m/s) 間。等向流通係數 T_e 為 0.00030 (m^2/s)，儲水係數 S 約為 0.00230 ，含水層非等向主流方向與世界橫麥卡脫方格座標 (UTM 座標) 的 X 軸，所夾的角度為 36 度。由計算分析所得到的偏差平方總和， Δ^2 為 $4.10E-10$ 趨於極小值，可證明本研究所得各項現地水力特性可以信任。

在建議方面，在 Neuman 提出的模型中 (Neuman et al.,1984) 所提出之 4 口井方式，可以獲得現地含水層特性；本研究是以多口井 (11 口井) 方式分析、並利用最小二乘法進行最佳化，以獲得現地含水層特性，相對於 Neuman (Neuman et al.,1984) 所提出之 4 口井方式，更能代表現地含水層的水力特性。但本研究並未探討符合現地資訊的分析井數多寡，建議日後以推估最佳適合井數的方向進行研究，找出最合乎真實狀況之分析方法。

三、地電阻 3-D 水文地質影像分析

理論介紹

地電阻探測試驗為非侵入性且適合大範圍之現地試驗，近來亦有部份學者嘗試以電探方式評估水文地質參數。一般而言，地層之電阻率與地層之岩石礦物組成、顆粒大小、岩理及地層含水量、鹽度有關，其中以顆粒大小、含水量及鹽度影響較大，因此利用地層電阻率可研判地層之岩性、含水量及鹽度特性。

直流電阻探測法為電探方法中發展較為成熟的一種，由於探測效果良好，可靠度高，經常應用於淺層及中、深層地層水文特性探測。直流電阻法之基本理論主要是將直流或低頻交替直流電，流經一對電極，假設為電流極 A 及 B 通入地層之中，因電流流經地層建立一人為電場，另於測區地表設置一對電位極，假設為電位極 M 及 N，經由電位極可測得電場於 M 及 N 間之電位差，如圖 4-26 所示。利用此電位差與通入地層之電流強度、電極間之相對位置及地層之導電性經由理論推導，可推得電流、電位差與電性參數(厚度與電阻率)關係式。於一電性均質半空間之介質電流極 A、B 通入電流，電位極 M、N 量得之電位差值，可由下式表示：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right) \quad (4.38)$$

其中 ΔV 為電位極間之電位差， ρ 為介質的電阻率， I 為通入地下之電流強度，AM、BM、AN 及 BN 為電流極至電位極間之距離。

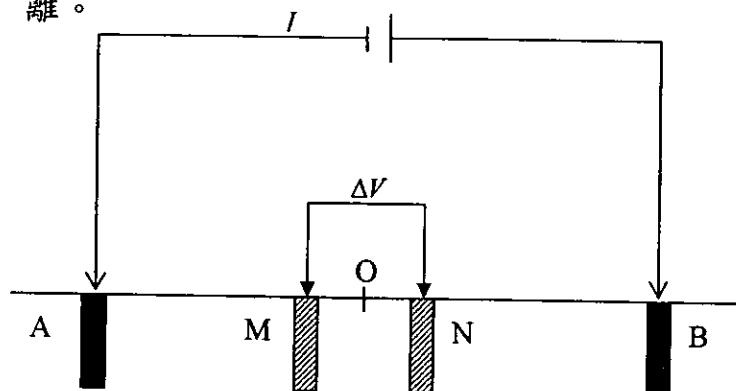


圖 4-26 地電阻試驗示意圖

式(4.38)可進一步改寫為

$$\rho = K_a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.39)$$

其中 $K_a = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)}$ 稱為幾何因子，依電極間相對位

置而定。因此如可測得 ΔV 、 I 及電流極與電位極相對位置即可計算此一均質半空間介質之電阻率。

由於含水層的電阻率主控於其孔隙率、粒度與含泥量等因子。這些因子也主控地層的水理傳導率（或稱透水係數）。將含水層的邊界與電阻率層的邊界假設為一致是合理的。

一厚度 h 的含水層，導水係數 $T = KH$ ， K 是透水係數。而其橫向電阻 $R = \rho H = H/\sigma$ ， ρ 為電阻率， σ 為電導率。得 $T = K\sigma R$ 。

實測資料指出地層之粒度愈小，透水係數愈小，但電導率愈大。在一個水文地質環境變化不大的地區， $K\sigma$ 值大致為一定值（Kelly, 1978; Niwas and singhal, 1985; Kosinski and Kelly, 1981），若由已知 T 與 R 值，則可得 $K\sigma$ 值。由地電探測可得 R 與 σ 值，就可算出地區的 K 值。

多層相連水平層取水時 $T = \sum T_i$ ， $T_i = K_i \sigma_i R_i$ 得 $T = KH = \sum K_i \sigma_i R_i$ ， T 值由抽水試驗獲得。 H 、 σ_i 與 R_i 值由地電探測資料解釋得。就可算出各含水層的 K_i 值及均值 K 。

工作方法

在工作方法中，共可分為三大階段，分別為事前規劃、試驗步驟及 QA/QC。

在事前規劃階段，本研究依目的、背景資料、監測井分佈地質剖面圖及已知點之水力傳導係數，決定試驗方法及地電阻監測點分佈。其中，主要分為一維構造、二維構造及三維構造探測法。

在試驗步驟階段中，本研究主要依一維構造、二維構造及三

維構造地電探測法。監測各距離下，通入不同電流，所產生之電壓。

1、一維構造

對一維構造，可使用垂直電探法 (vertical electric sounding)。垂直電探之電極排列大多使用許蘭柏吉排列 (schlumberger array) 或溫奈排列 (wenner array)。溫奈排列是用四支電極以欲探位址為中心，等間距將四支電極置於一直線上 (圖 4-27)。探測時以 C_1 和 C_2 為電流極 (在外的二支) 將電流進入地層，以 P_1 和 P_2 為電位極測其間電位差，依電極間距，電流，與電位差，算出該電極間距時的視電阻率。理論上，電極間距愈大，電流穿入愈深，測得愈深，因此將電極間距逐次增大，就可測得由淺而深的地層訊號。資料經分析解釋後可得淺至深各層的電阻率與厚度。

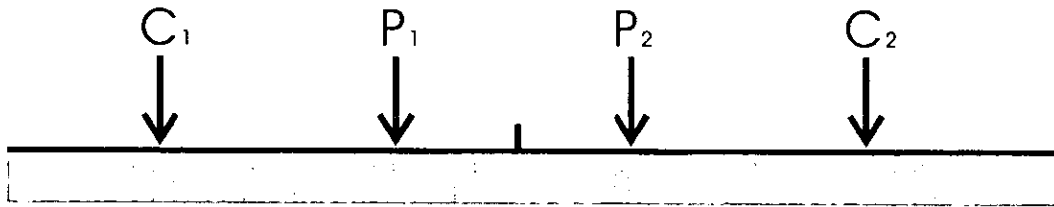


圖 4-27 溫奈電極排列

許蘭柏吉排列 (圖 4-28)，也是使用四支電極，以探測地為對稱中心，將電流極排在外側，電位在內側的一直線上。施測時將電流由 C_1 與 C_2 通經地層中，在 P_1 與 P_2 量其電位差，由電流，電位差及電極間距計算視電阻率。理論上， C_1 與 C_2 之展距愈大，電流通入愈深，即展距愈大測得愈深。將 C_1 與 C_2 之展距由小而大逐次增大，就可測得由淺而深的訊號，資料經分析解釋後，可得淺至深各層的電阻率與厚度。

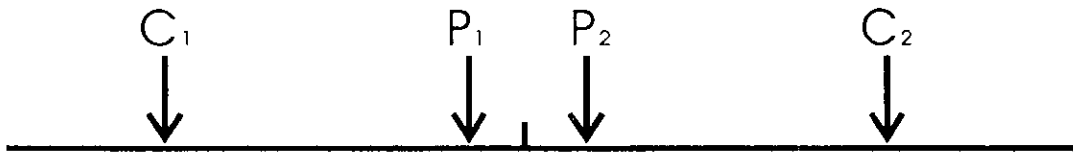


圖 4-28 許蘭柏吉電極排列

2、二維構造

對二維構造，一般使用剖面探測 (electric resistivity profiling, RIP). 電極排列大多採用二極排列 (pole-pole array)，它是在欲探深的位址，布置一垂直於構造走向的測線，多支電極以等間距預置於測線上，這些電極稱為測量極，並另置二支電極置於遠處地面並固定之，稱之為遠電極 (圖 4-29)。施測時，將遠電極一支用為遠電流極 (C_2)，另一支為遠電位極 (P_2)。在探測線上的測量極，先以第一支為電流極 C_1 ，並以第二支、第三支、第四支……依次更替為電位極，測得由淺而深的訊號，其次以第二支為電流極 C_1 ，以第三支、第四支、第五支……依次更替為電位極，測得由淺而深的訊號，再次以第三支為電流極 C_1 ，其後續的電極依次更替為電位極，如此測得一個剖面的訊號，經分析解釋得一剖面的電阻率構造。

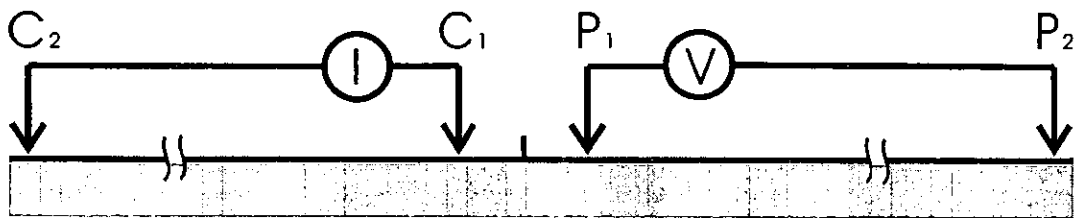


圖 4-29 pole-pole 電極排列

3、三維構造

三維構造使用電極陣列施測。在欲測的位址，以等電極間距布置一方形或矩形陣列 (圖 4-30)。另布置二支電極於遠處，一支用為遠電流極，另一支為遠電位極。陣列中的電極，為測

量極，首先以第一支電流極，其餘為電位極，其次第二支為電流極，其餘為電位極，依此更替完成一陣列區的測量。

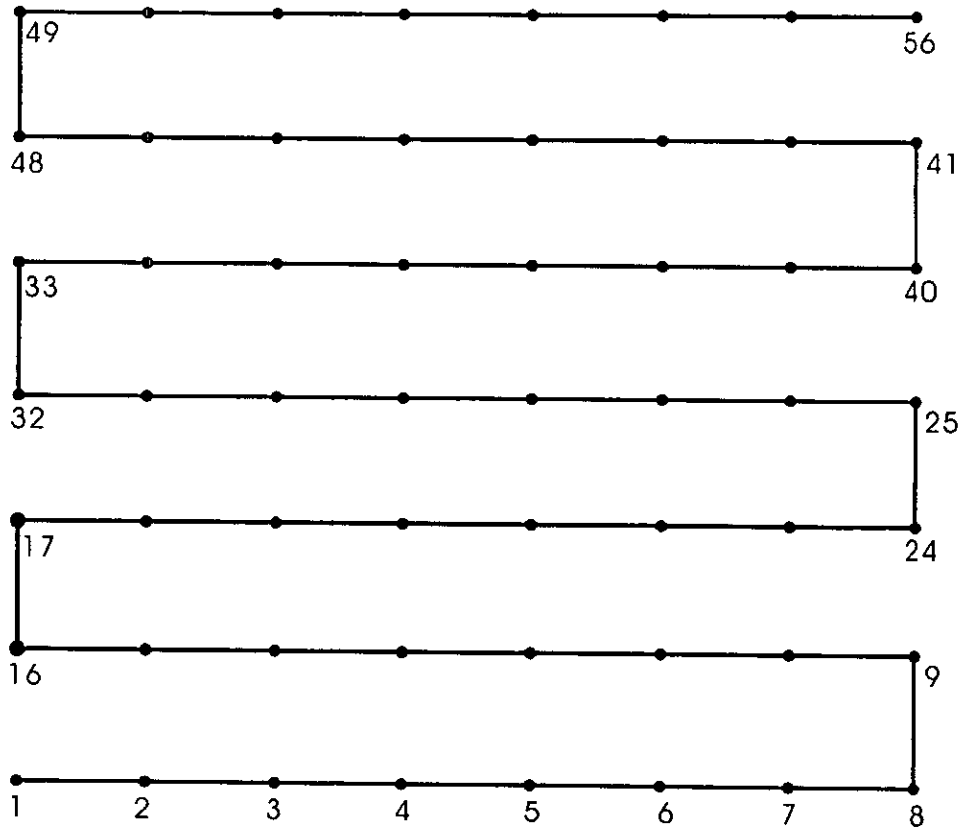


圖 4-30 三維地電探測電極陣列

在 QA/QC 階段中，本研究所監測到各監測點之電流 I 、電位差 ΔV 及電流極至電位極間之距離 M ，主要利用重覆試驗確保資料之 QA/QC。

必須先確保監測值，在其 95% 信賴區間內，如超出則去除。再利用平均值法取平均值。

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \\ \bar{V} &= \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \\ \bar{M} &= \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}\end{aligned}\tag{4.40}$$

成果討論

為探討透水係數與電阻率的相關性，以井場之水文資料與地電探測資料作為分析的基礎。首先需瞭解井場的地層電阻率構造。在 2003 年 5 月 30~31 日、2003 年 7 月 21~22 日與 2004 年 6 月 29~30 日，三次分別在抽水與不抽水情況實施地電探測，目的是要探查井場地層的電阻率構造及抽水造成的改變。

1、剖面探測

在井場施行了六組剖面探測。分別以 A_1A_1' 、 B_1B_1' 、 A_2A_2' 、 B_2B_2' 及 C_2C_2' 與 D_2D_2' 表示。剖面 A_1A_1' 與 B_1B_1' 於 2003 年 7 月 22 日非抽水期間施測，剖面 A_2A_2' 與 B_2B_2' 於 2003 年 5 月 31 日抽水期間施測。 C_2C_2' 與 D_2D_2' 於 2004 年 6 月 30 日抽水期施測。

(1)剖面 A_1A_1'

剖面 A_1A_1' ，方向 $N80^\circ E$ ，電極間距 3 公尺，總長長 165 公尺。自西端起 75m 與 95m 跨井場，在圖 4-31 中之 A 與 A' 點。探測結果示於圖 4-32，圖中有三個剖面，(上)示實測視電阻率，(中)示解釋結果之視電阻率，(下)示解釋結果之電阻率構造。解釋結果指出 0~30 公尺大體上近似水中層，但具局部差異，尤其是在井場之淺部 0-7 公尺深，電阻率大多在 30-40 Ω -m 之間。井場區的電阻率側向變化較大局部電阻率高至 50 Ω -m。

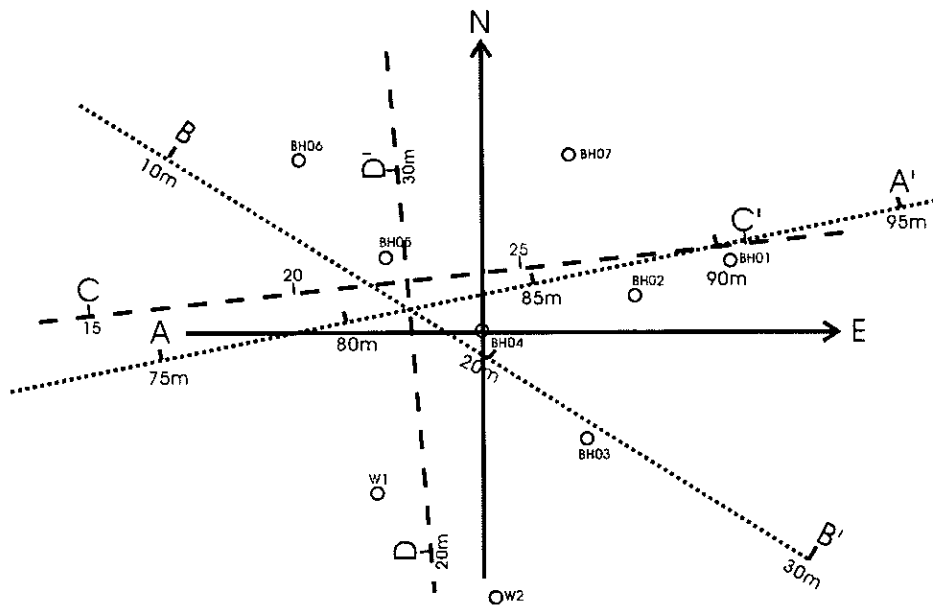


圖 4-31 剖面探測 A_1A_1' ， B_1B_1' ， A_2A_2' 與 B_2B_2' 之位置與方向。A 與 A'點是 A_1A_1' 與 A_2A_2' 上 75 與 95 公尺位置。B 與 B'點是剖面 B_1B_1' 與 B_2B_2' 上 10 與 30 公尺位置。C 與 C'點在 C_2C_2' 剖面 15 與 30 公尺位置 D 與 D'點在剖面 D_2D_2' 剖面 20 與 30 公尺位置。

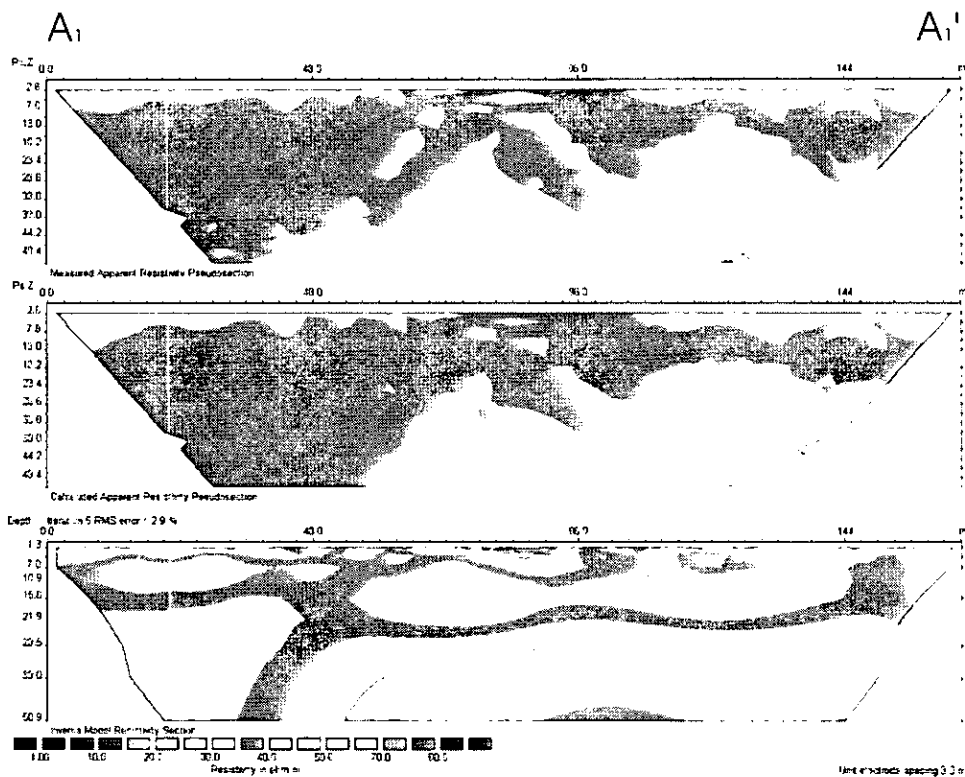


圖 4-32 剖面 A_1A_1' 示非抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。

(2)剖面 B_1B_1'

剖面 B_1B_1' ，方向 $N120^\circ E$ ，長 40 公尺。自西北端起 10m 與 30m 跨井場，示於圖 4-31 中之 B 與 B' 點。本剖面以 1m 電極間距施測。測深大約 17 公尺。電阻率構造示於圖 4-33。圖 4-33 由三剖面組成，如同圖 4-32。圖 4-33(下) 為解釋結果，它指出 0-5 公尺深之地層大致為水平層，但具局部差異，尤其在淺部 0-2 公尺深。在 14 公尺及 31 公尺處之地下變化較大，電阻率大多在 $25-70\Omega\cdot m$ ，5-17 公尺深的地層和 14 至 31 公尺之下方電阻率較高， $45-70\Omega\cdot m$ 。由剖面 A_1A_1' 與 B_1B_1' 之結果得知地層之電阻率構造非水平層，且具方向差異。

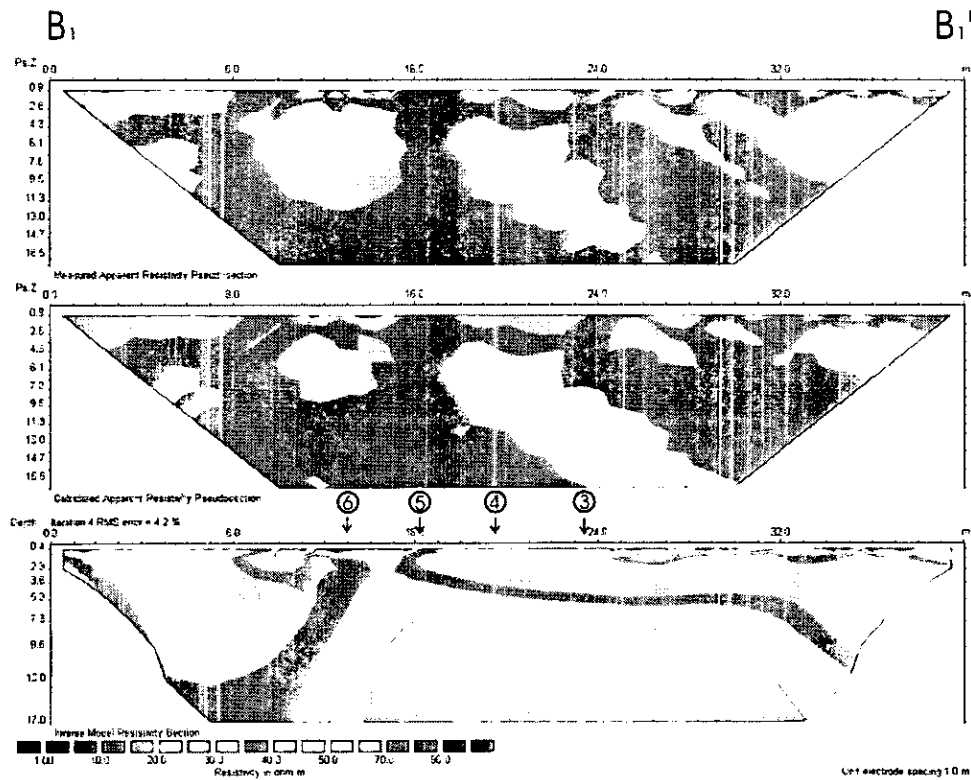


圖 4-33 剖面 B_1B_1' 示非抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。圓圈內的數字示井號。

(3)剖面 A_2A_2'

剖面 A_2A_2' 之位置方向長度與電極間距同 A_1A_1' 。探測結果示於圖 4-34。與圖 4-32 比較，圖 4-34 之視電阻率與解釋結果之電阻率比較高一些，但變化不大。抽水對電阻率造成的影響不明顯。抽水時與非抽水時的電阻率變化不大。意示在抽水時為非飽和帶的土粒仍有相當的吸附水。

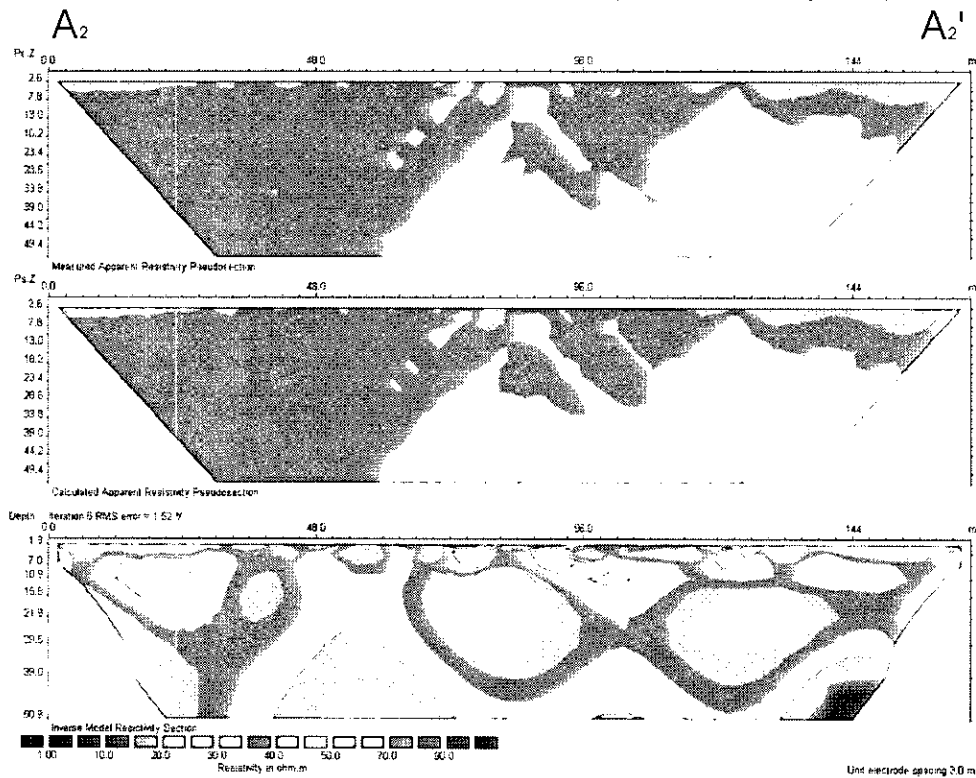


圖 4-34 剖面 A_2A_2' 示抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。

(4)剖面 B_2B_2'

剖面 B_2B_2' 之施測幾何與剖面 B_1B_1' 相同。探測結果示於圖 4-35。圖 4-35 指出地層之電阻率構造為非水平層，尤其是在井場區。比較圖 4-33 與圖 4-35，看出抽水時造成的非水平層現象較明顯。

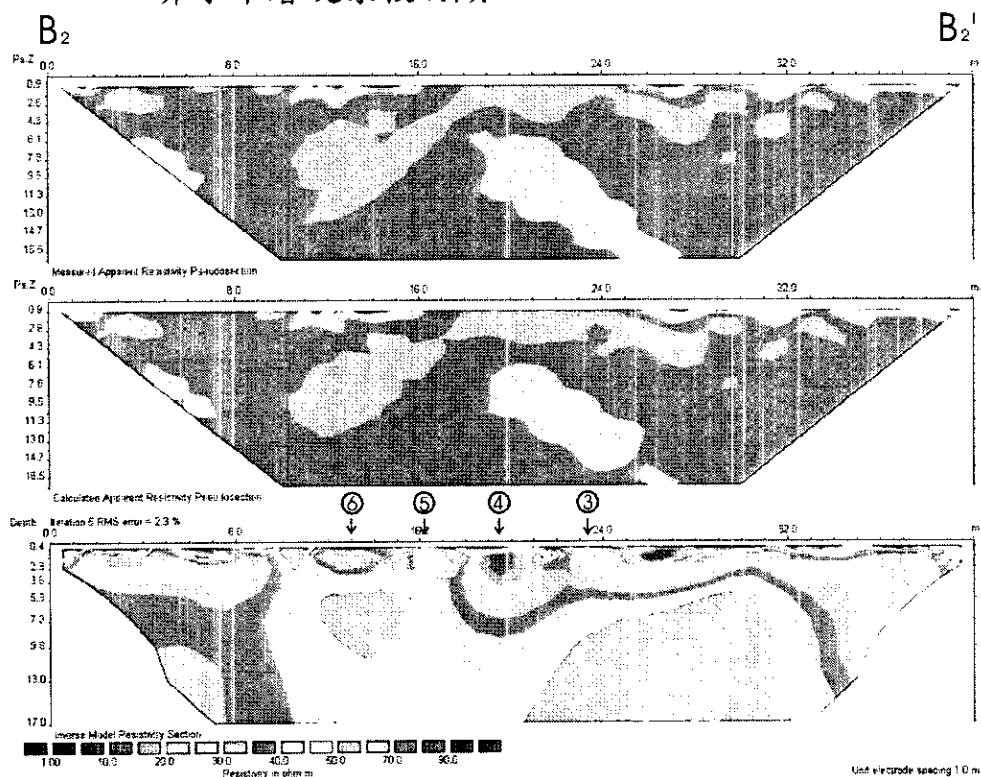


圖 4-35 剖面 B_2B_2' 示抽水期之探測結果。(上)實測視電阻率剖面，(中)計算的視電阻率剖面，(下)解釋結果之電阻率構造剖面。圓圈內的數字示井號。施測於 2003,05,31 以 BH04 井抽水。

(5)剖面 C_2C_2'

剖面 C_2C_2' 之展向為 $N83^\circ E$ 於 2004 年 6 月 30 日抽水期施測。探測結果示於圖 4-36。地層電阻率大多在 $20\sim 60\Omega\cdot m$ 之間。自地表至 5 公尺深局部差異較大，局部塊狀構造明顯。尤其是東端出現的局部高區，深度達 10 公尺深。10 公尺深以下之電阻率自西端的 $60\Omega\cdot m$ 向東漸減至 $20\Omega\cdot m$ 。大體而言，它與同為東西向剖面之 A_2A_2' 淺部對應深度相似。但細部表現則不同。表現地層非理想均質等向性。

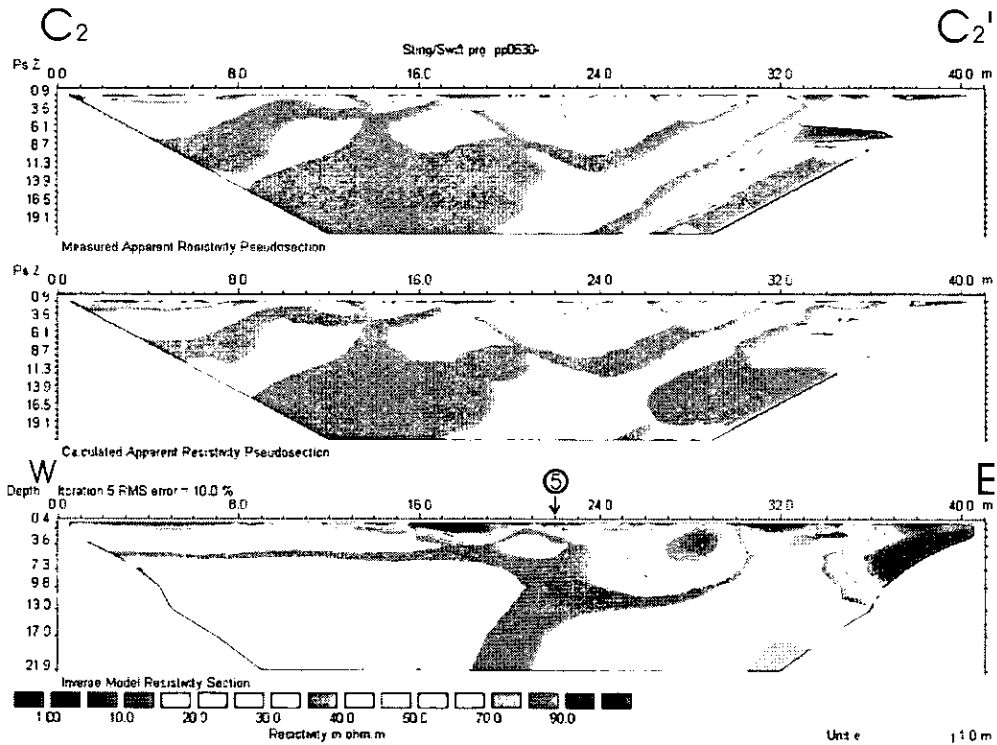


圖 4-36 雲林科技大學井場 BH05 抽水時東西向之電阻率構造。

(6)剖面 D_2D_2'

剖面 D_2D_2' 之展向為 $N7^\circ W$ 。於 2004 年 6 月 30 日抽水期施測。探測結果示於圖 4-37。它指出地層電阻率由南端的 $30\Omega\cdot m$ 向北漸增至 $60\Omega\cdot m$ 。電阻率構造略呈非均質。在抽水井位置之淺部 0~9 公深出現局部高區，它是否與抽水時之水位洩降相關，待進一步分析。

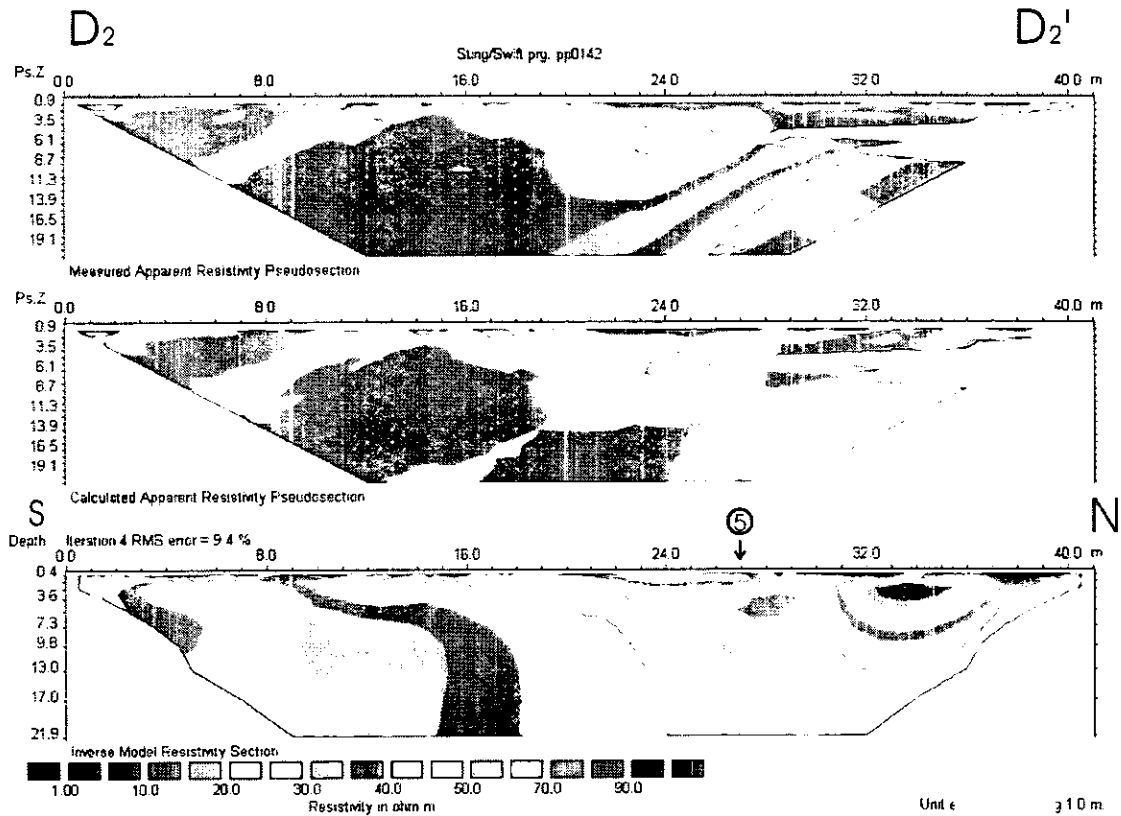


圖 4-37 雲林科技大學井場 BH05 抽水時南北向之電阻率構造。

2、三維探測

三維探測之電極排列如圖 4-38。

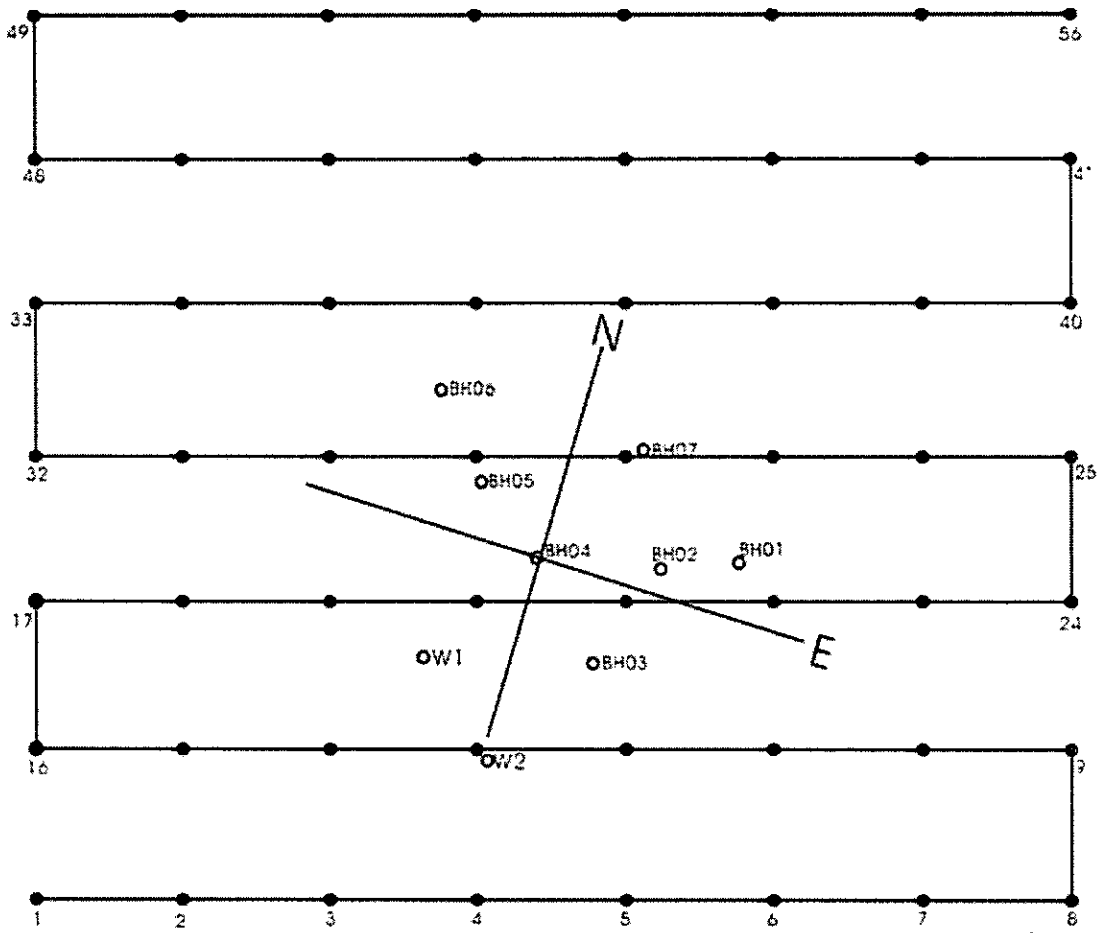


圖 4-38 地電三維構造之施測電極陣列與井場位置

(1)非抽水期之 3-D 探測結果

圖 4-39 示 2003 年 7 月 21 日之探測結果之水平切面。圖 4-39 指出淺部地層的電阻率較不均質，0-3.5m 深之電阻率 20-70 Ω -m 呈局部分離塊狀高區。3.5-7.5m 深之電阻率在 25-70 Ω -m。7.5-12.2m 深為 35-70 Ω -m 高電阻率區分為二塊東北-西南為電阻率較低的區域。12.2-17.5m 深之電阻率 20-55 Ω -m，高電阻率塊狀分布在東南與西北二角。17.5-23.6 公尺電阻率 20-50 Ω -m 且大多在 35-50 Ω -m 之間，似較近均質。

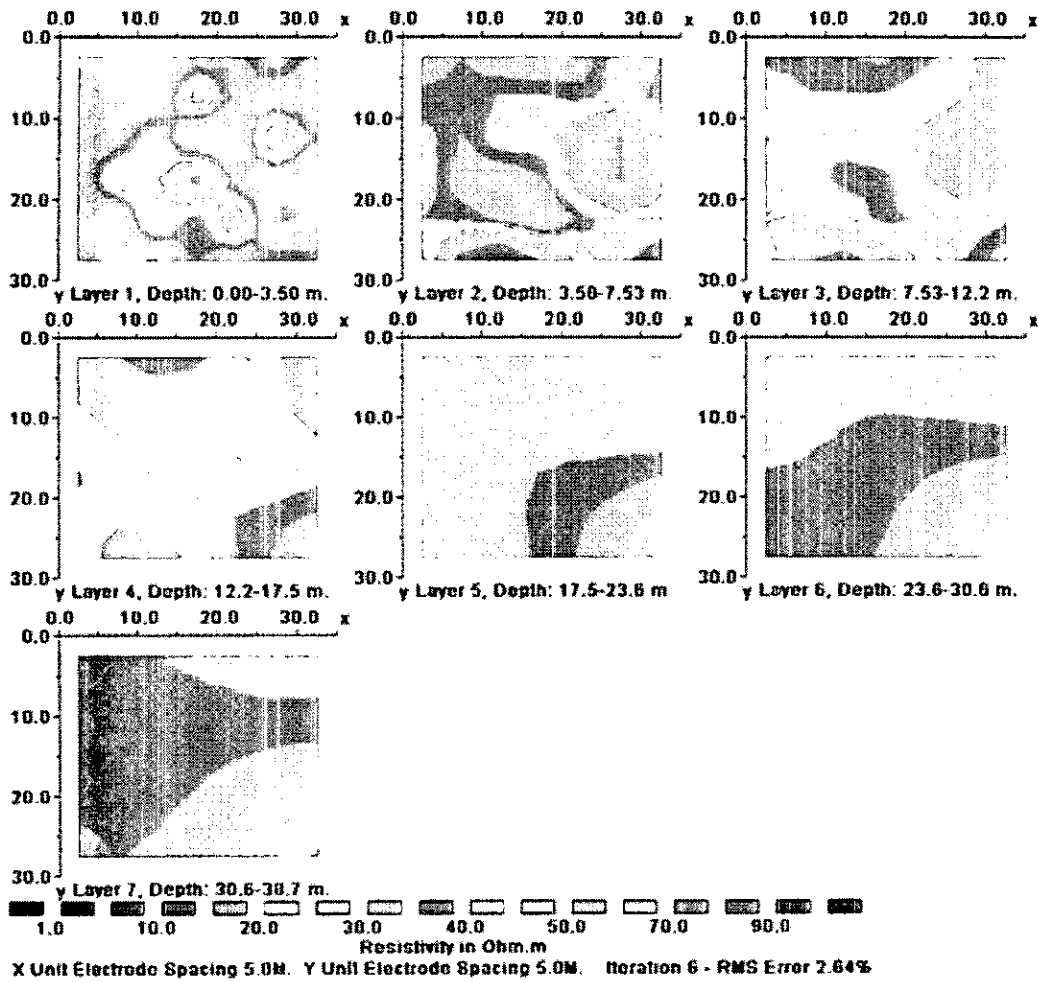


圖 4-39 雲林科技大學井場，2003 年 7 月 21 日非抽水期之電阻率構造。

(2) 抽水期中之 3-D 探測結果

圖 4-40 示 2003 年 5 月 30 日抽水期中之探測結果之水平切面。比較圖 4-40 與 4-39，二者形貌概貌接近，淺部地層之不均質更明顯，抽水時之局部電阻率略為升高或降低，都在逆推解釋誤差範圍內，電阻率改變不明顯。

圖 4-41 示 2004 年 6 月 29 日以 BH05 持續定量抽水的第三日所測得的電阻率構造水平切面。它顯示電阻率大半高於 $60\Omega\cdot\text{m}$ 。尤其是從 3.5 至 17.5 公尺深。此結果與 2003 年 5 月及 7 月的施測結果完全不同。電阻率變高，構造形貌也完全改變。是否受漏電或其他因素所致需作對照實驗

研判。由於施測後數日適逢颱風大雨，整體情況改變，以致不得驗證。

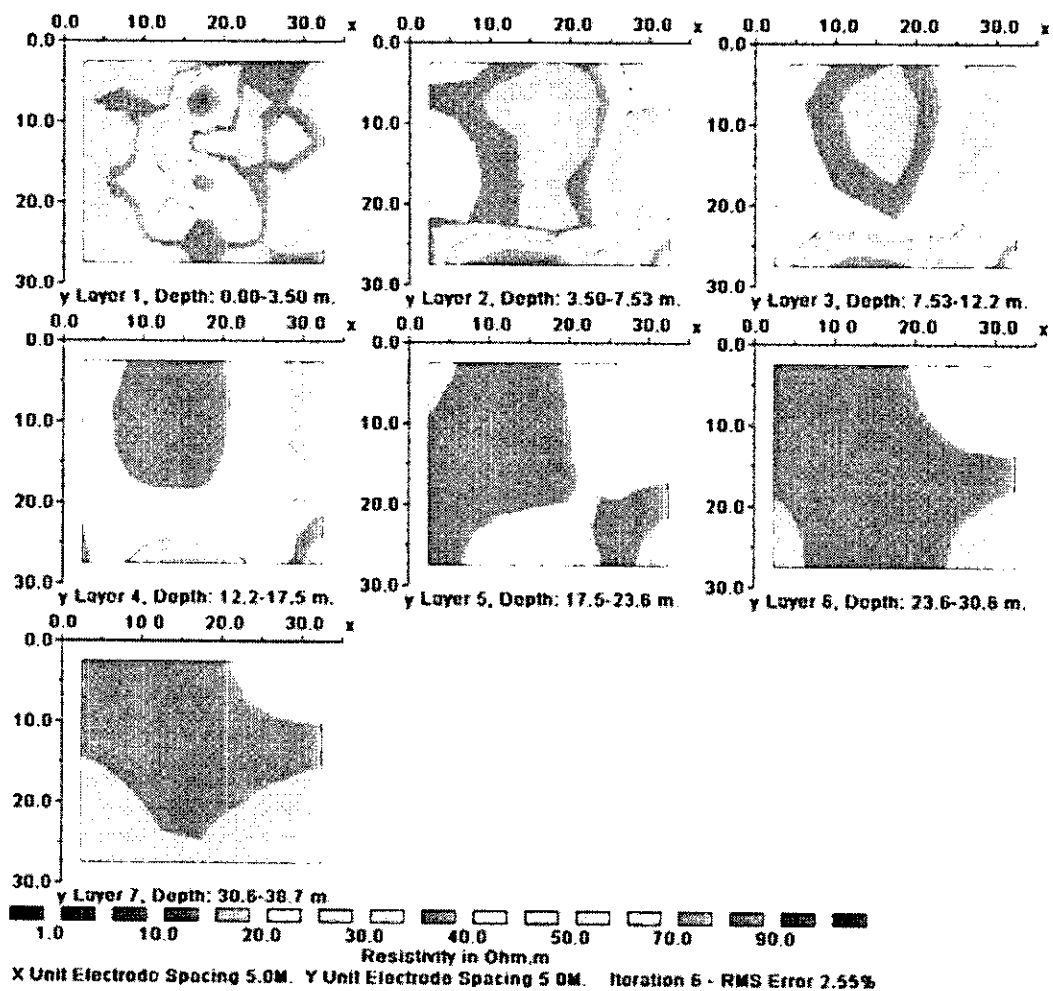


圖 4-40 雲林科技大學井場以 BH04 連續定量抽水第三日之電阻率構造

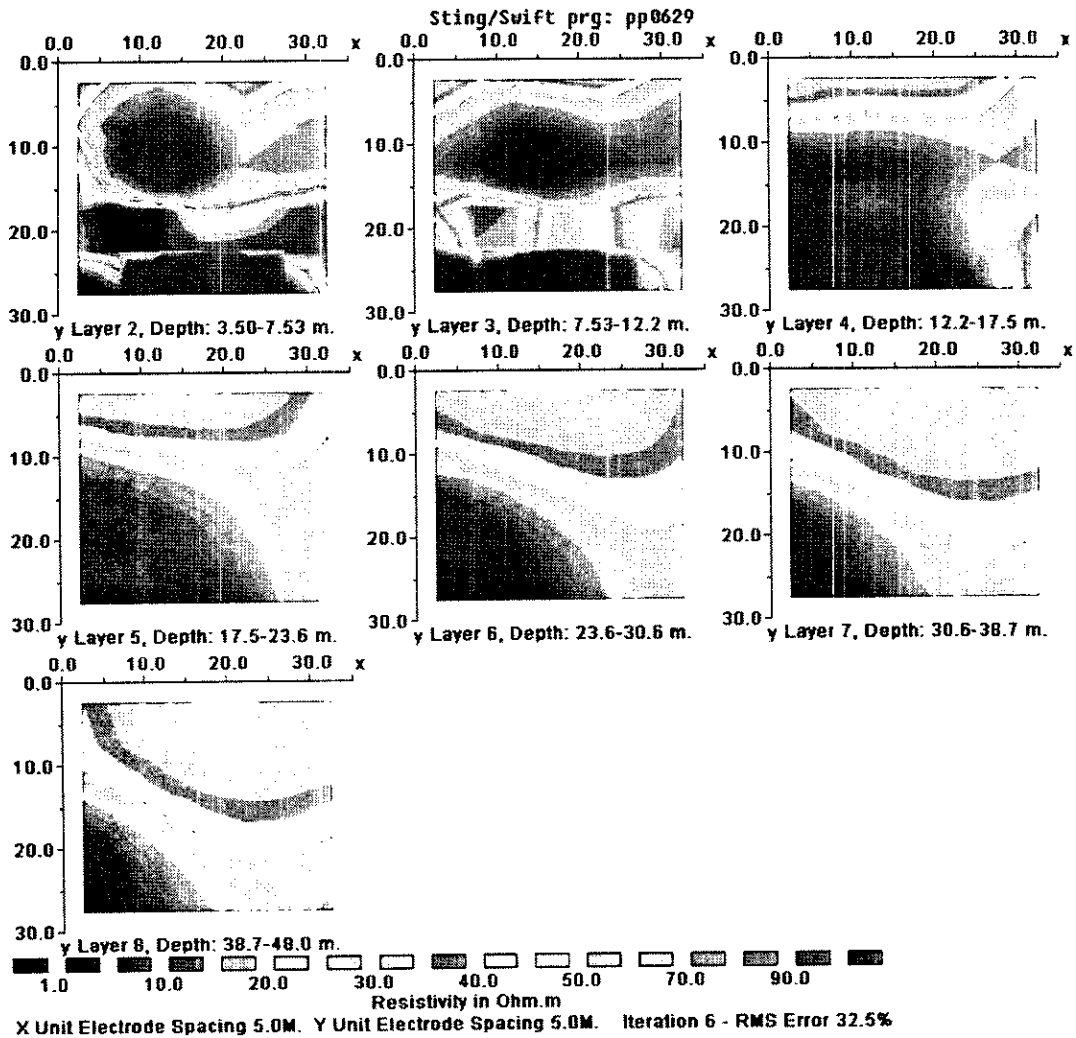


圖 4-41 雲林科技大學井場以 BH05 連續定量抽水第三日之電阻率構造

結論

在結論方面，本研究於國立雲林科技大學地下水位監測場址進行地電阻 3-D 水文地質影像分析，獲得以下結論：

- 1、由非抽水期之 3-D 探測結果，可知淺部地層的電阻率較不均質，0-3.5m 深之電阻率 20-70Ω-m 呈局部分離塊狀高區。3.5-7.5m 深之電阻率在 25-70Ω-m。7.5-12.2m 深為 35-70Ω-m 高電阻率區分為二塊東北-西南為電阻率較低的區域。12.2-17.5m 深之電阻率 20-55Ω-m，高電阻率塊狀分布在東南與西北二角。17.5-23.6 公尺電阻率 20-50Ω-m 且大多在

35-50Ω-m 之間，似較近均質。

- 2、在抽水期中之 3-D 探測結果，可知淺部地層之不均質更明顯，抽水時之局部電阻率略為升高或降低，都在逆推解釋誤差範圍內，電阻率改變不明顯。
- 3、以 BH05 持續定量抽水的第三日所測得的電阻率構造水平切面，顯示電阻率大半高於 60Ω-m。尤其是從 3.5 至 17.5 公尺深。此結果與 2003 年 5 月及 7 月的施測結果完全不同。電阻率變高，構造形貌也完全改變。是否受漏電或其他因素所致需作對照實驗研判。由於施測後數日適逢颱風大雨，整體情況改變，以致不得驗證。

四、砂箱試驗

理論介紹

資料分析方面，以 Bear(1960) 提出之解析解做分析，進而提出分析步驟。

本研究為定水頭穩定狀態下連續注入追蹤劑，以維持污染物濃度模擬連續污染源，再利用砂箱模擬現地單流場一維污染傳輸情形。因此可將單流場內濃度與時間之關式，表示為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{q}{n} \frac{\partial C}{\partial x}, -\infty < x < \infty \quad (4.41)$$

其中

C = 距注水口 x 距離的監測點（電導度計放置點，用於監測水質變化）所得追蹤劑之濃度

t = 監測經過時間

$D_h = \alpha_L |q|/n + D_d^*$ = 污染物延散係數

α_L = 多孔介子的縱向延散度

D_d^* = 分子延散係數

x = 監測點距離注水口之距離

q = 達西流速

n = 孔隙率

邊界條件為：

$$\begin{aligned} t \leq 0, \quad -\infty < x < 0, \quad C = C_1, \quad t > 0, \quad x = \pm\infty \quad \partial C / \partial x = 0 \\ 0 \leq x < \infty, \quad C = C_0, \quad x = -\infty \quad C = C_1 \\ x = +\infty \quad C = C_0 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Bear (1960) 提出利用Laplace轉換法去求解公式(4.41)及公式(4.42)，可得：

$$\frac{C(x,t) - C_0}{C_1 - C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - \int_0^t [q(t)/n] dt}{2 \left[\int_0^t (\alpha_L |q|/n + D_d^*) dt \right]^{1/2}} \right\} \quad (4.43)$$

其中， $q = nV$ 。並且假設 $D_d^* \ll \alpha_L V$ (V = 孔隙流速)，所以可以忽略 D_d^* 。簡化如下：

$$\varepsilon(x,t) \equiv \frac{C(x,t) - C_0}{C_1 - C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{x - Vt}{2\sqrt{D_h t}} \right] \quad (4.44)$$

其中， $\operatorname{erfc} x = (2/\sqrt{\pi}) \int_x^\infty e^{-y^2} dy \Rightarrow \operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x e^{-y^2} dy$ 。

當監測點之濃度到達追蹤劑濃度之50% ($\varepsilon(x,t) = 0.5$) 時，即為水流於石英砂孔隙中之延散係數 (D_h)，所以式(4.44)可寫成：

$$0.5 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{x - Vt_{0.5}}{2\sqrt{D_h t_{0.5}}} \right] \quad (4.45)$$

依據公式(4.45)，帶入到達追蹤劑監測濃度50%之時間 ($t_{0.5}$)，可以求出水流於石英砂孔隙中之延散係數 (D_h)。再代入下式求水流於石英砂孔隙中之延散度 (α)。

$$\alpha = \frac{D_h}{V} \quad (4.46)$$

在地下水傳輸過程中，污染物或追蹤劑有時會有被地層介質吸附的情況，稱為「遲滯現象」，並以「遲滯係數」(Retardation

Coefficient, R)定義之，

$$R = \frac{q}{V_t} = \frac{T_t}{T_w} \quad (4.47)$$

其中R=遲滯係數，

$V_t = x/T_t$ = 追蹤劑在地下水中之平均流速，

T_t = 追蹤劑從注水口移動到監測點之平均時間，

$T_w = x/q$ 地下水從注水口移動到 x 距離監測點之平均時間。

$$T_t = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times t_i \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \times \Delta t_i} \quad (4.48)$$

其中 C_i = 監測點在 t_i 時間之追蹤劑濃度，

t_i = 追蹤劑注入後經過之時間， Δt_i = 監測間隔時間。

工作方法

在工作方法中，共可分為三大階段，分別為事前規劃、試驗步驟及 QA/QC。

在事前規劃階段，本研究依目的、現有設備，決定試驗架構，如圖 4-42 所示。在圖 4-42 中，可知砂箱試驗設備高度的基準線在地面，由地面至供水槽保持定水頭高度之溢流管中央之高度為 126.5 cm，從地面至砂箱底盤下端的高度為 25.5 cm、砂箱底盤的厚度為 1 cm 及砂箱中的水位離砂箱底盤之高度為 95.3 cm。主要利用實驗室砂箱方式建立近似單向流場之地下水含水層，並利用溶於水之追蹤劑進行單向流場污染物傳輸模擬，觀測追蹤劑在砂箱單向流場孔隙介質中產生的貫穿曲線，推求其延散度及遲滯係數。其中，所使用之儀器包括砂箱模型設備、定水頭裝置、水質監測設備及流量監測設備。且本研究為了提高試驗之成功率及準確性，因此於試驗前針對砂箱模型設備做基本物性分析及水質監測設備與流量監測設備做儀器校驗。

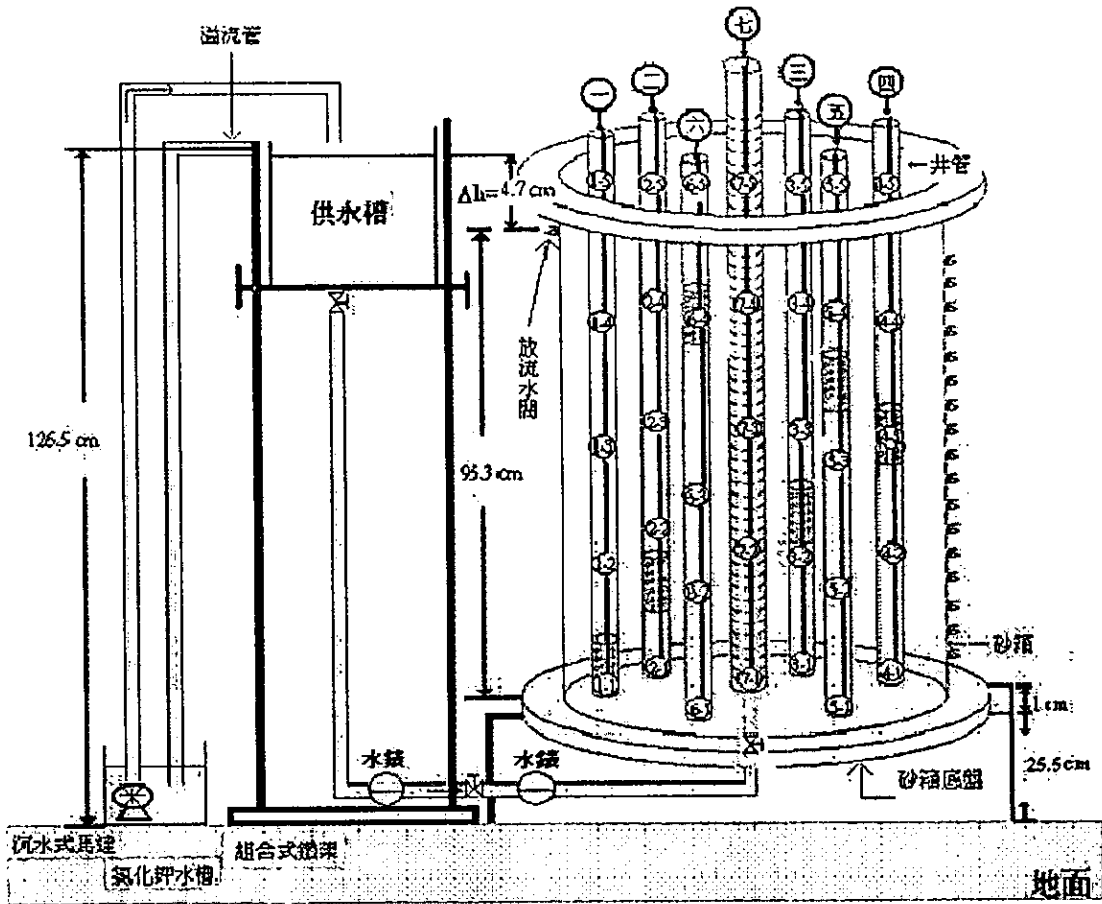


圖 4-42 砂箱試驗示意圖

1、砂箱模型設備

為了可於實驗室模擬地下水含水土層之單向流場，因此利用實驗室砂箱方式建立近似單向流場之地下水含水層。其中，砂箱模型設備主要由砂箱、試驗觀測井、H型均流管及石英砂所組成。且為瞭解模擬含水層之物理特性，因此於試驗前必須先針對模擬含水層做初步之物性分析，如：篩分析、比重試驗、孔隙率試驗。

(1) 砂箱

為了可於實驗室模擬地下水含水土層，砂箱設計使用

壓克力材質之圓柱型砂箱以模擬二維地下水流場，於其內填充石英砂模擬地下水含水土層，砂箱模型示意圖參閱圖 4-43。

圓柱型砂箱直徑 50 公分(即內徑 48 公分加上兩側 1 公分的砂箱壁厚)，內徑 48 公分，高 100 公分，於砂箱底部中心設計直徑 3 公分圓形開口，以利裝置 H 型均流管。砂箱外側由底部 10 公分起每隔 5 公分裝置一個 3/8 吋水閥，至 90 公分，共 17 個水閥，其可於試驗時作為進水閥或出水閥使用。從底部水閥向上由 1~17 依序編號，於第 17 號水閥相對位置增加 5 公分處設置另一水閥為 18 號水閥(又稱放流水閥)，作不同深度水質取樣之用。另外，18 號水閥為離砂箱底 95 公分高之水閥，即可用於砂箱內定水頭試驗之排水閥，同時也可做為水質取樣之用。砂箱底部及頂端有上下托盤，以方便搬運，並可避免砂箱傾倒時，槽體與地面直接碰撞導致砂箱碎裂。

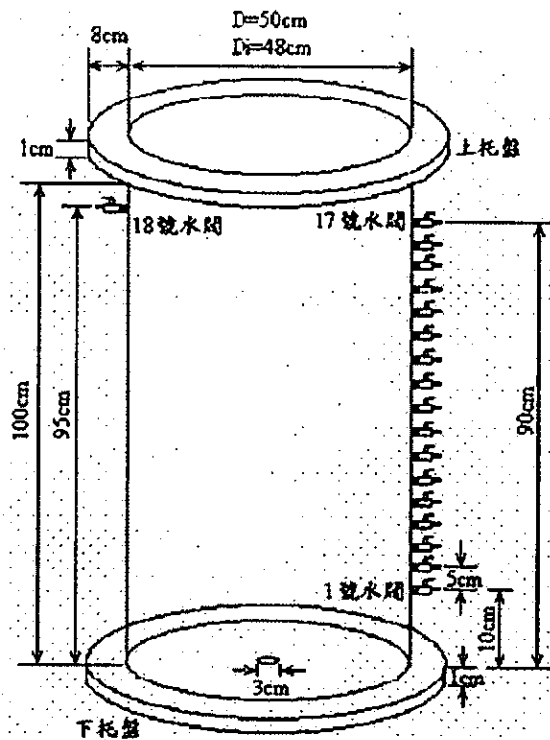


圖 4-43 砂箱尺寸示意圖

(2) 試驗觀測井

試驗觀測井使用 6 支直徑 5 公分，管壁厚 0.5 公分，內徑 4 公分，高 120 公分之壓克力材質圓柱管模擬現地場址之觀測井。分別於各模擬之觀測井管底部算起 0~10、13~17、34~39、44~49、63~68、84~89 公分處，均勻穿鑿直徑 0.5 公分之透水孔以模擬井篩，並於各個觀測井井篩處使用矽膠黏貼不銹鋼網，以防止石英砂阻塞井篩；並於觀測井底部以圓形塑膠墊將其底部黏封，防止試驗時水流及石英砂由井底進入造成試驗誤差，如此即完成模擬含水層部分貫穿之觀測井。

除 6 支部份貫穿觀測井外，另使用一支直徑 6 公分，內徑 4.8 公分，高 160 公分之 PVC 材質圓柱管模擬現地場址之全貫穿井。由底部每隔 0.5 公分高，均勻切割長 4.5 公分，寬 0.1 公分之透水孔以模擬全開孔井井篩，井篩開至 150 公分處，全開孔井亦須以圓形塑膠墊將底部黏封，以防止試驗時水流及石英砂由井底進入，此即為模擬貫穿含水層全開孔之水井。部分貫穿井與全開孔井示意圖，參閱圖 4-44。

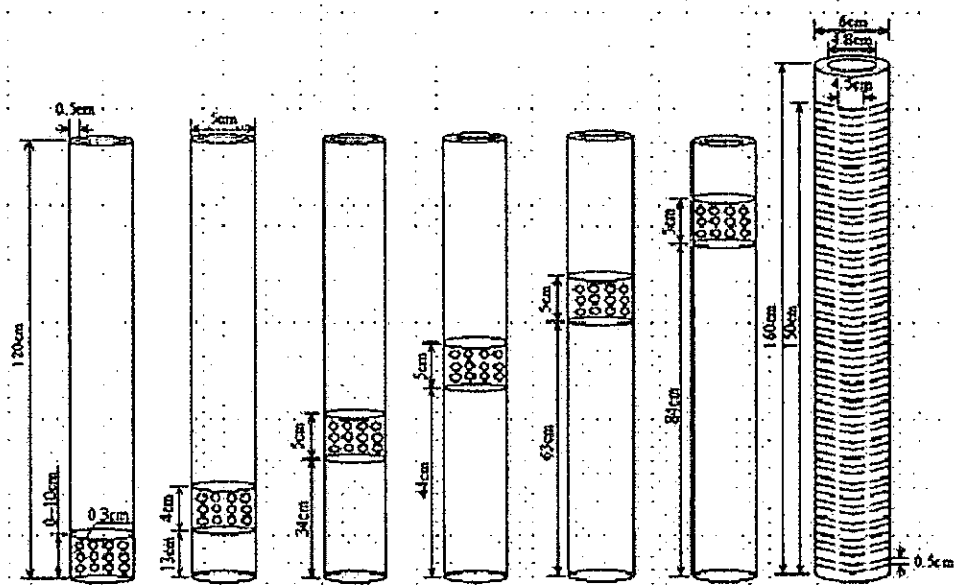


圖 4-44 部分貫穿井與全開孔井示意圖

(3) H 型均流管

實驗室砂箱模擬含水層時，由於無法模擬自然環境中地下水之補注水源，故以重力注水方式作為地下水之補注水源；為避免補注水源擾動砂箱中模擬之含水土層，於砂箱底部裝置 H 型均流管，使進流水均勻流布，以降低注水時水流擾動土體及砂箱內水向上移動時流速儘可能維持均勻流的情形。H 型均流管使用直徑 16mm PVC 材質之水管，將其依據砂箱底面積之大小裁切，並使用直徑 1/2 吋之 PVC 材質之三通管，連接各部份，並於 H 型均流管四個底端以直徑 1/2 吋 PVC 材質盲管封底。H 型均流管與砂箱底部接觸面積處不鑿穿散水孔，而於 H 型均流管之正面與左、右側面水平方向鑿穿直徑 0.5cm 散水孔，其鑿孔位置與 H 型均流管之尺寸參閱圖 4-45 的 H 型均流管正面俯視圖與側視圖。H 型均流管散水孔外須以砂膠黏貼 100 目不銹鋼網，以防止石英砂阻塞散水孔。H 型均流管底部中央三通管進水口處，接裝 1/2 水閥，以控制補注水源量，如此即完成 H 型均流管之裝置。

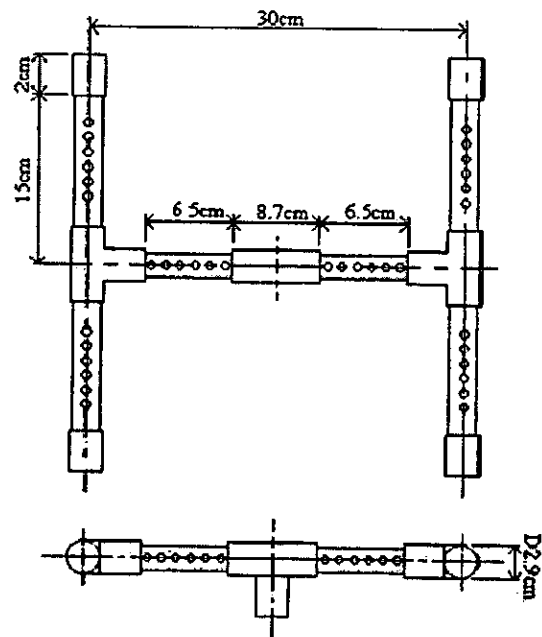


圖 4-45 H 型均流管正面俯視圖與側視圖

(4) 石英砂

本研究之石英砂為購買之均勻分佈標準石英砂，其比重約為 2.63，粒徑約為 1~2 mm。

(5) 物性分析

本試之基本物性分析共有三項，包括：篩分析、比重試驗及孔隙率試驗。

a、篩分析

本研究為瞭解石英砂粒徑分佈特性，使用篩分析試驗分析石英砂，計算各砂層通過累積百分比，並繪製粒徑分佈曲線圖，以瞭解粒徑分佈特性；再由粒徑分佈曲線圖得知石英砂之有效粒徑 D_{10} 代表整體圓柱砂箱石英砂之粒徑。

篩分析試驗為將各 U.S. 標準篩網及底盤秤重，並分別紀錄各篩重量為 W_1 ，將各篩標準篩依底盤、200、100、60、20、10 號篩網依序置於機械式篩分析儀上。以四分法取得約 1000 克石英砂，將石英砂倒入篩分析儀最上層之 10 號篩網內，以 60 rad/sec 的速度篩選石英砂。當每分鐘過篩之砂重小於石英砂總重 1%，即完成石英砂篩選步驟。一般約 15~20 分鐘[7]。完成篩選程序後，靜置 10 分鐘使細顆粒沉降，再將各篩網取出，分別秤各篩重為 W_2 (篩重+石英砂重)。計算各篩網中石英砂淨重 W_s ($W_s=W_2-W_1$)。依實驗所得不同篩網通過石英砂重計算石英砂累積通過百分比，以粒徑為 X 軸，累積通過百分比為 Y 軸，繪製粒徑分佈曲線。

由粒徑分佈曲線圖 Y 軸 10% 之累積通過百分比所對照出之粒徑，即為石英砂有效粒徑 D_{10} 。

b、比重試驗

土粒比重又稱為土壤之絕對比重，其為在大氣環境中，同體積之土體與 4°C 蒸餾水之重量比值，通常以 G_s

表示。本研究使用比重瓶試驗求得石英砂之比重，再依石英砂重量與比重關係計算石英砂於砂箱內所佔的體積，以供後續孔隙率試驗使用。

比重試驗使用之土樣須先以 4 號篩將石英砂過篩，未通過 4 號篩者採用 ASTM C127，通過 4 號篩者則採用 ASTM D854。本研究採用之石英砂顆粒皆通過 4 號篩，故比重試驗方法在此採用 ASTM D854。

ASTM D854 方法步驟為將比重瓶注滿 RO 水後秤重為 W_a ，紀錄水溫 T_1 ，並將 RO 水倒出。依 CNS5090 及 AASHTO T88 規定，取烘乾石英砂約 15 克為 W_s ，置入比重瓶中，加入 RO 水約佔比重瓶容積之半（需視石英砂多寡而定）。將比重瓶至於電熱板隔水加熱，加熱期間將比重瓶緩緩轉動，以幫助石英砂所含空氣排出。待加熱煮沸 10 分鐘後，將比重瓶置於恆溫水槽冷卻至室溫。比重瓶溫度降低後，添補 RO 水至瓶口刻劃處，蓋上比重瓶塞，擦乾比重瓶外之水滴秤重為 W_b ，並紀錄水溫 T_2 。由公式(4.9)計算石英砂比重(G_s)：

$$G_s(T^\circ C/T^\circ C) = \frac{W_s}{W_s + (W_a - W_b)} \quad (4.49)$$

重覆數次比重試驗，數據結果相差少於 0.03，始可將其取平均，以作為整體石英砂比重之代表。一般皆以物質 20°C 狀態時之比重 G_s 表示，故石英砂比重經公式(4.49)轉換為 20°C 時石英砂之比重。

$$G_s(T^\circ C/20^\circ C) = K \times (T^\circ C/T^\circ C) \quad (4.50)$$

c、孔隙率試驗

含水土層中土壤顆粒為不規則形狀，使土壤顆粒與顆粒間產生孔隙，其孔隙為空氣與水所填充。土壤之孔隙大小及其量由土壤顆粒大小、土壤級配分布與壓密程度來決定。

土壤孔隙以孔隙率來表示，其為孔隙體積與土壤總體積之比值；而於本研究土壤總體積為砂箱扣除 7 支觀測井與 H 型均流管所能填裝石英砂之體積 V_s 。孔隙率試驗方法，為由底部 H 型均流管注入 RO 水，使 RO 水水位與石英砂高度齊平，記錄總注水體積並將總注水體積扣除 7 支觀測井與 H 型均流管內 RO 水之體積為 V_w ，則孔隙率 n 為

$$n = \frac{V_w}{V_s} \quad (4.51)$$

2、定水頭裝置

本設備以尺寸 30 (cm) × 30 (cm) × 45 (cm) 之供水槽作為定水頭裝置 (圖 4-46)，且在 30 cm 高處設有溢流裝置，能將過多的溶液排出，以便固定水位高度。在水槽下方設置一水閥 (圖 4-46 及圖 4-47)，能控制溶液的流出。

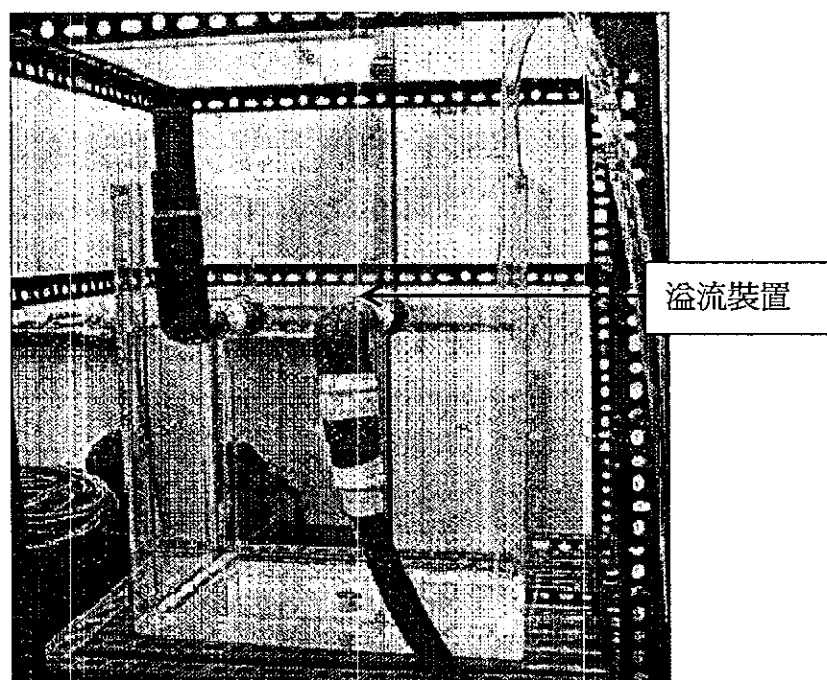


圖 4-46 定水頭裝置

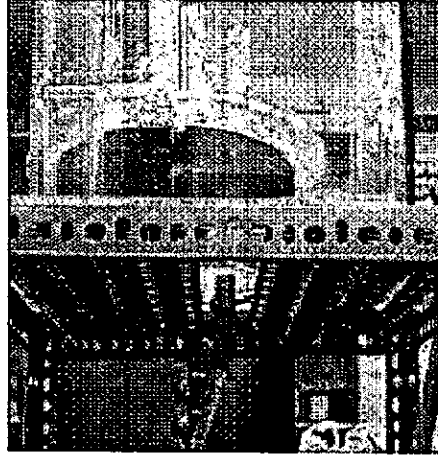


圖 4-47 定水頭裝置出水閥

3、支撐鐵架

以活動式鐵架組裝而成，其功能為置放供水槽並能配合實驗來調整供水槽高度（圖 4-48）。



圖 4-48 支撐鐵架

4、水閥

砂箱本體在進流口及出流口與兩水錶中間各設一只，在供水槽下端亦有一只，共有 3 止水閥，以便控制流入之流量。

5、沈水式泵浦

由於本實驗的流速低，所以選用低流量，高揚程的泵浦 ($H=1.5\text{m}$ 、 $v=10\text{ l/min}$) (圖 4-49)。



圖 4-49 沈水式泵浦

6、水質監測設備

水質監測設備，主要分為自製式電導度計水質監測設備及採樣後實驗室分析二種。其中，自製式電導度計為本研究自行利用鉑金開發而成，如圖 4-50 所示。鉑金為 1cm 的正方形電極，二電極相距 1cm。採樣後實驗室分析，則採用環保署所發佈的水中氯鹽檢測方法。

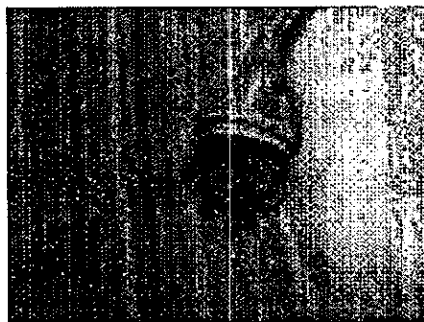


圖4-50 自製電導度計外觀圖

此外，為了確認每組自製電導度計所記錄水質資料的正確性，每組自製電導度計在使用前均於實驗室內進行率定，建立率定曲線。又因電導度計於高濃度及低濃度時之相關性不同，因此利用多項式率定，如圖 4-51 所示。確定率定的率定曲線

相關係數在 0.998 以上，才用於實驗量測。

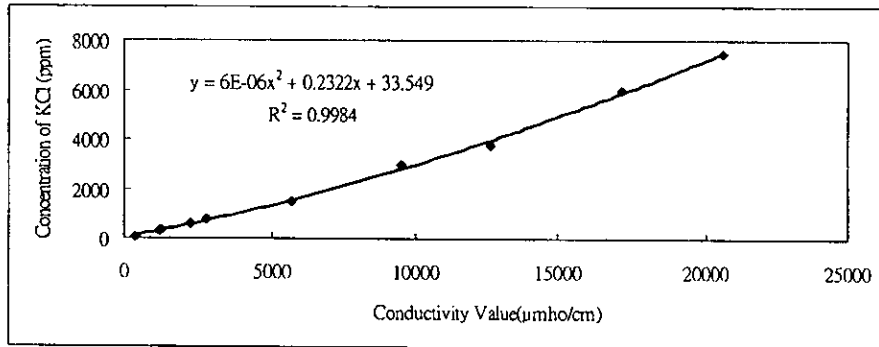


圖 4-51 自製電導度計濃度率定曲線

分別置於各井 0~100cm 處，以間隔 20 公分的方式排列，共 35 支。並將每口觀測井所要置入之導電度計以束帶予以串聯，以便固定間距與高度（圖 4-52）。並在每一條導電度計的尾端予以編號，以便後續的溶液濃度的量測（圖 4-53）。

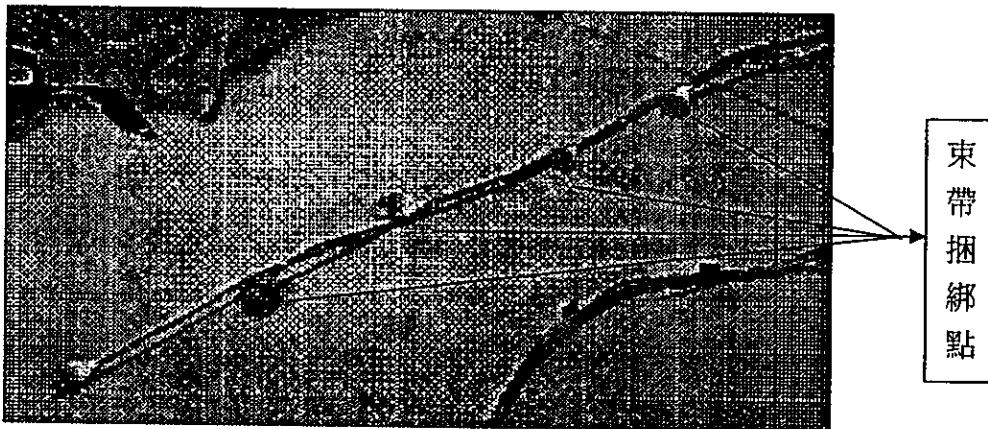
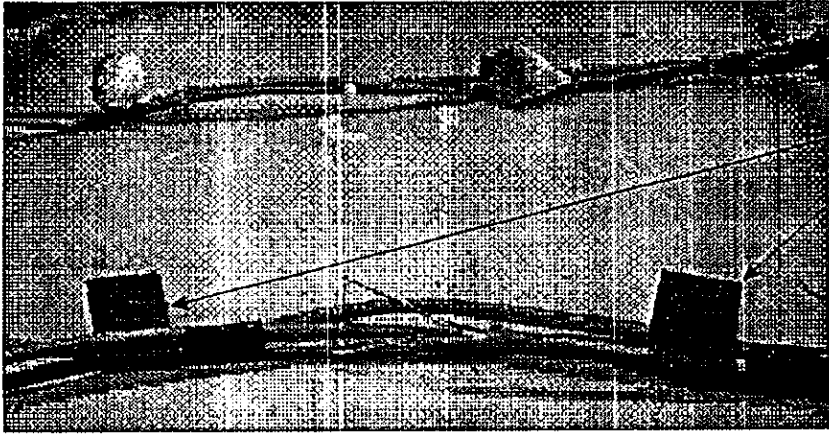


圖4-52 自製電導度計架設



導電度計編號

圖4-53 自製電導度計編號

本研究依事前規劃之試驗方法做逐步試驗，如圖 4-54 所示。

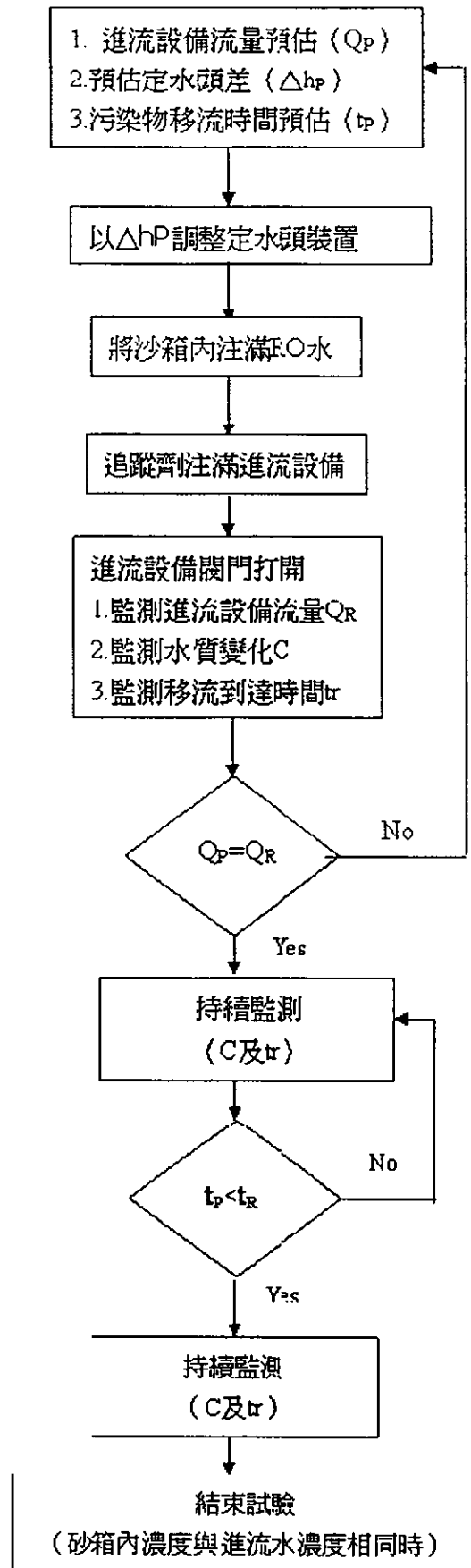


圖 4-54 砂箱試驗步驟

1、利用達西定率，預估進流量(Q_p)、定水頭差 (Δh_p) 及污染物移流時間預估 (t_p)。

$$\text{流量 } Q_p = 1.855 \text{ cm}^3 / \text{sec}$$

$$\text{供水槽水位離地面之高度 } h_1 = 126.5 \text{ cm}$$

$$\text{砂箱水井水離地面之位高度 } h_2 = 121.8 \text{ cm} = 25.5 \text{ cm} + 1 \text{ cm} + 95.3 \text{ cm}$$

$$\text{砂箱直徑 (內徑) } D = 48 \text{ cm}$$

$$\text{孔隙率 } n = 0.39$$

本研究利用達西公式來求取此砂箱的水力傳導係數(K)，如下所示：

$$V_{\text{darcy}} = \frac{Q_{\text{in}}}{A} = K \frac{\Delta h_p}{\Delta y} \quad (4.52)$$

其中， Q_{in} =供水槽的供水平均流量，單位為 cm^3/sec 。在此，本研究設定 $Q_{\text{in}} = 1.855 \times 10^{-3} \text{ (L/sec)} = 1.855 \text{ (cm}^3/\text{sec)}$ ；

A =砂箱的圓面積，單位為 cm^2 。在此，本研究經由沙箱內徑 48 公分，可得圓面積為 $1809.56 \text{ (cm}^2)$ ；

K =砂箱內石英砂的水力傳導係數，單位為 cm/sec

V_{darcy} =達西流速，單位為 cm/sec ；

$\frac{\Delta h_p}{\Delta y}$ =在砂箱中的水力坡降，單位為無因次。在此，本

$$\text{研究設定 } \frac{\Delta h_p}{\Delta y} = \frac{126.5 - 121.8(\text{cm})}{95.3(\text{cm})} = 0.0493$$

本研究將式(4.52)進行重整，可得水力傳導係數(K)為

$$K = \frac{Q_{\text{in}}}{(A) \left(\frac{\Delta h_p}{\Delta y} \right)} = \frac{1.855(\text{cm}^3/\text{sec})}{(1809.56 \text{ cm}^2)(0.0493)} = 0.0208(\text{cm}/\text{sec})$$

利用式(4.52)及以上的水力傳導係數(K)可得達西流速(V_{darcy})為

$$V_{\text{darcy}} = K \frac{\Delta h_p}{\Delta y} = (0.0208 \frac{\text{cm}}{\text{sec}})(0.0493) = 1.0254 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$$

並將達西流速配合砂箱中石英砂的孔隙率(n)為 0.39，可得供

水槽的供水在砂箱石英砂砂孔隙中之流動速度($V_{seepage}$)為

$$V_{seepage} = \frac{V_{darcy}}{n} = \frac{1.0254 \times 10^{-3} (cm/sec)}{0.39} = 2.628 \times 10^{-3} (cm/sec)$$

本研究利用求得孔隙中之流動速度，並考慮追蹤劑(即氯化鉀 KCl)在砂箱中的移流距離(X)，此移流的距離為砂箱注水口至放流水閥的最短距離(X)為 95.3 cm，則可求得追蹤劑的移流時間(t)為

$$t = \frac{X}{V_{seepage}} = \frac{95.3(cm)}{2.628 \times 10^{-3} (cm/sec)} = 10.07(hr)$$

所以預計以 10.7 小時的時間來完成砂箱實驗

- 2、將砂箱注滿RO水：執行完以上各項物性分析與水力傳導係數試驗後，再將砂箱底部進水閥打開，由均流管注入RO水；因18號水閥高度為95cm，且設為放流口，所以將RO水注入至95 cm之高度為止（圖4-55）。

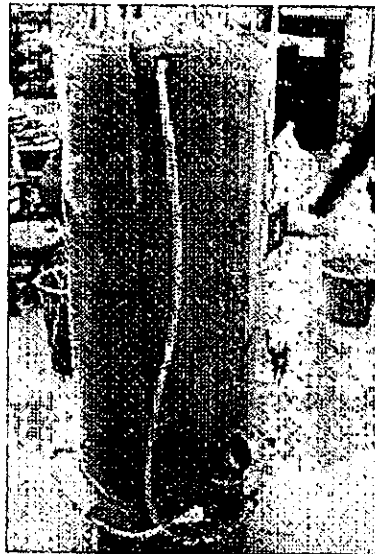


圖4-55 將砂箱注滿RO水

- 3、於各口水井置入固定深度之導電度計

- (1) 選取 35 支導電度計，每支導電度計連同電線長 3 公尺，將 35 支導電度計編號。
- (2) 依照編號分為 7 組，每組 5 個，編號 1~5 之導電度計依序在距離 20 公分處以束線捆綁固定。

(3)將隻支導電度計之延伸電線以束線捆綁固定，編號 1-1，
1-2，1-3，1-4，1-5 分別依照編號 1-1~1-5 方法進行細綁(圖
4-56)

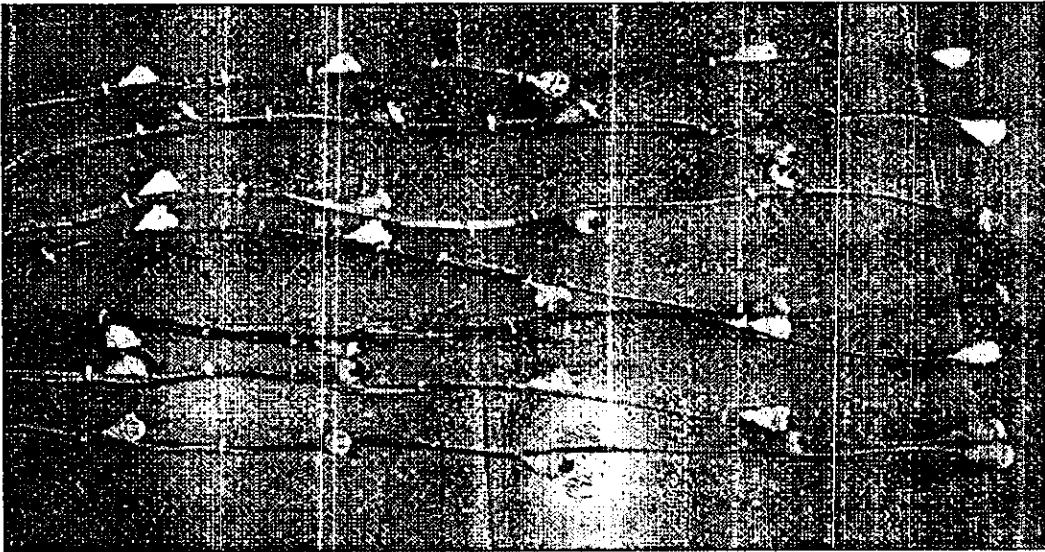


圖 4-56 以束線固定電導度計

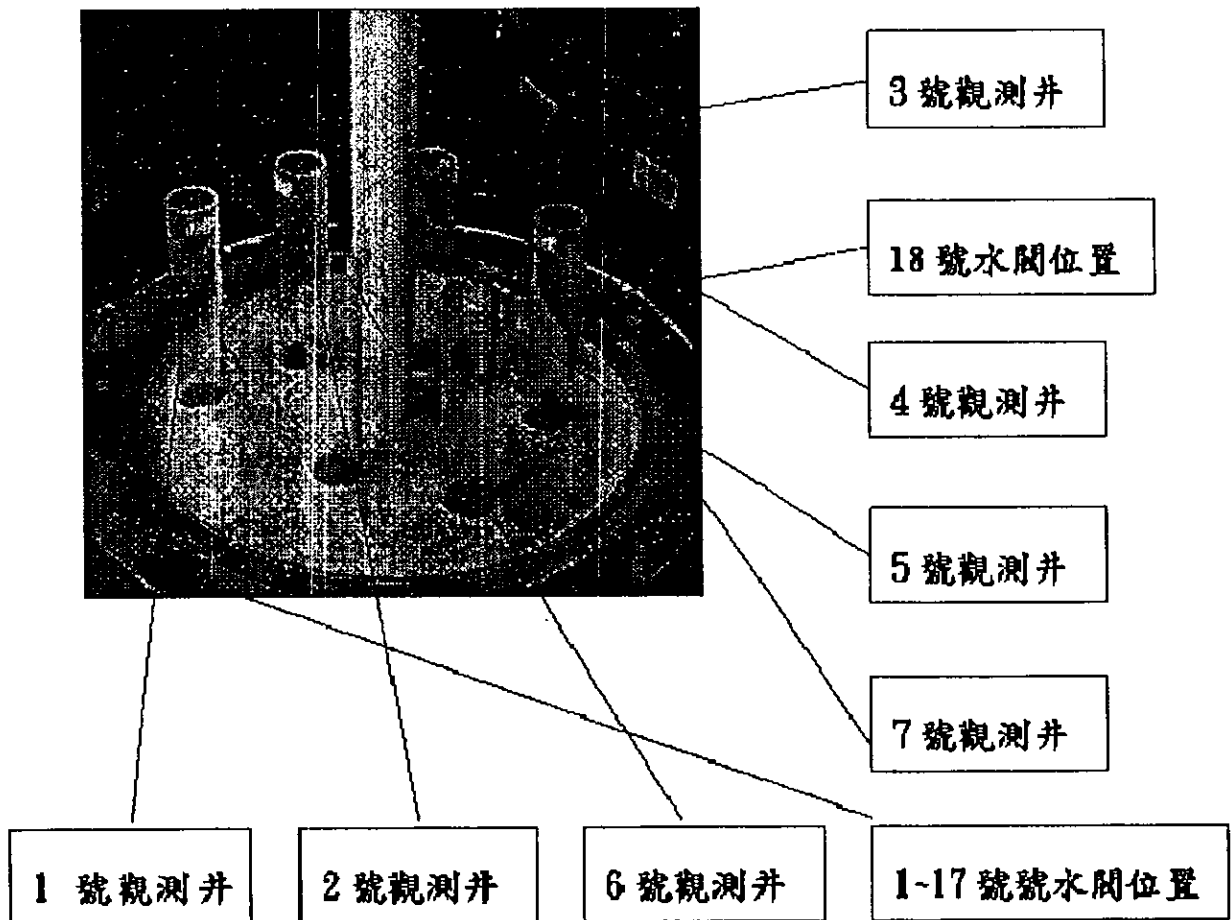


圖 4-57 觀測井編號

(4) 將編號 1-1~1-5 置入編號一之觀測井中，編號 2-1~2-5 置入編號二之觀測井中，編號 3-1~3-5 置入編號三之觀測井中，編號 4-1~4-5 置入編號四之觀測井中，編號 5-1~5-5 置入編號五之觀測井中，編號 6-1~6-5 置入編號六之觀測井中，編號 7-1~7-5 置入編號七之觀測井中，如圖 4-57 及圖 4-58 所示。



圖 4-58 電導度計放置情形

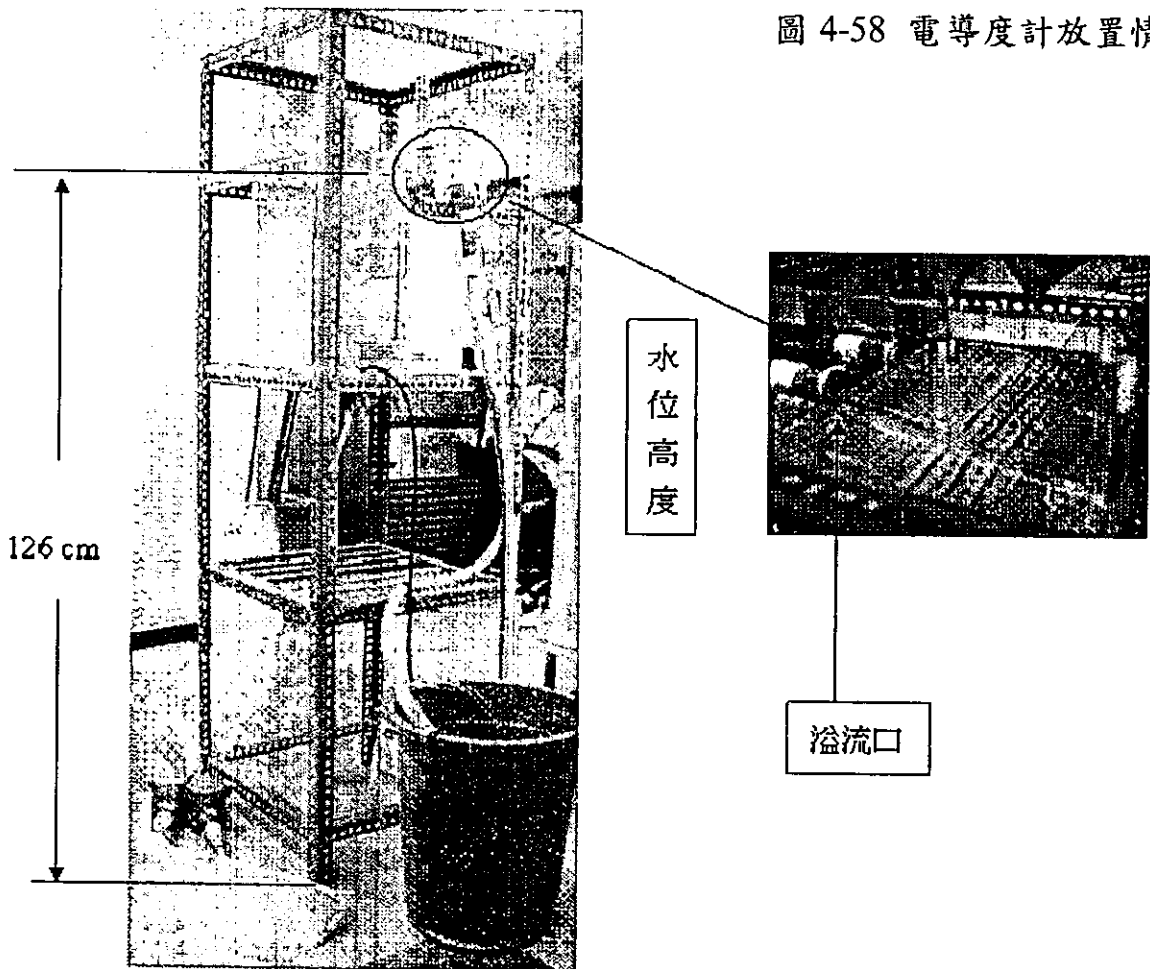


圖 4.59 將供水槽定位

4、將供水槽定位

先組裝可置放供水槽之鐵架，並將供水槽放置鐵架上之固定高度以固定水頭在126.5公分（圖4-59）；且鐵架具有調整供水槽高度位置之功能，以便調整水頭。

5、在供水槽與砂箱底部銜接水管，水管上裝置兩個水錶兩水錶間裝置一個水閥，如圖4-60所示。

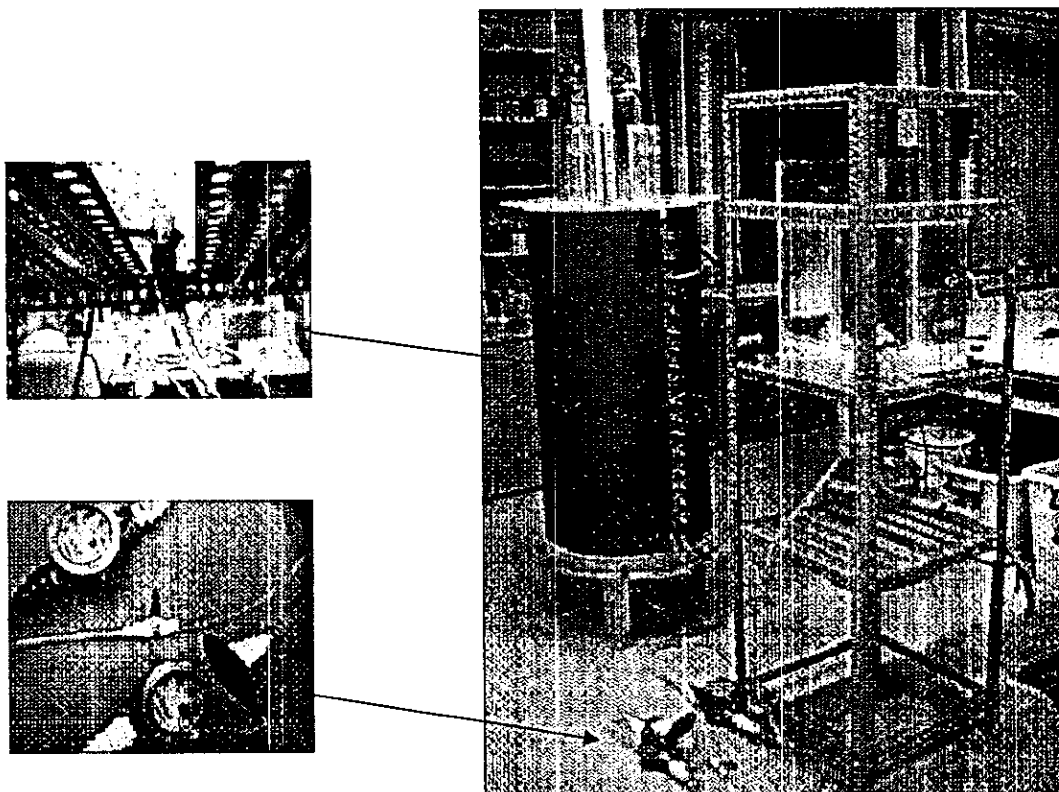


圖 4-60 定水頭裝與流量監測設備連接

6、在試驗之前，先以RO水作一次的循環試驗。

試驗方式：

(1) 開啟供水槽下及兩水錶中間的水閥（圖 4-60）。

(2) 由氯化鉀（KCl）儲水槽內注入 RO 水。

(3) 把沉水式泵浦置入儲水槽，並啟動泵浦將儲水槽內之溶液打至供水槽內。

(4) 當供水槽水位到達溢流口，多餘的水溶液會流入溢流口並

經水管流回儲水槽（圖 4-61）；以此方式固定水位高度。並以沈水式泵浦抽回供水槽（圖 4-62）。

- (5) 打開砂箱底部之水閥，讓溶液流入砂箱（圖 4-63）。
- (6) 紀錄水錶流量（判斷溶液之流速）。
- (7) 紀錄導電度計讀值（紀錄溶液濃度之背景值）。

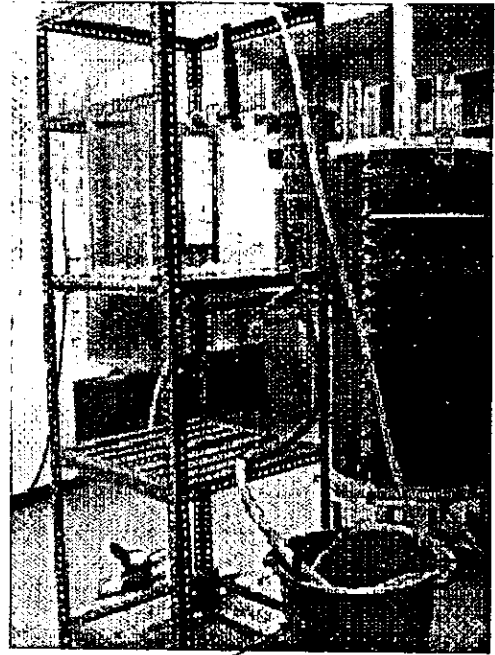
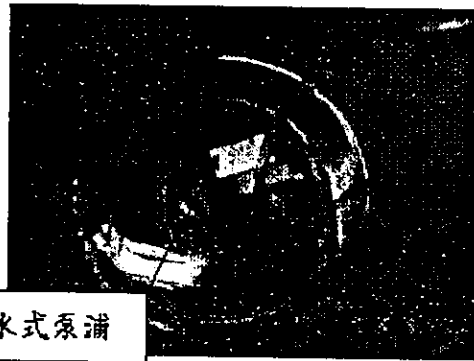


圖 4-61 儲水槽

儲水槽



沉水式泵浦

圖 4-62 沈水式泵浦

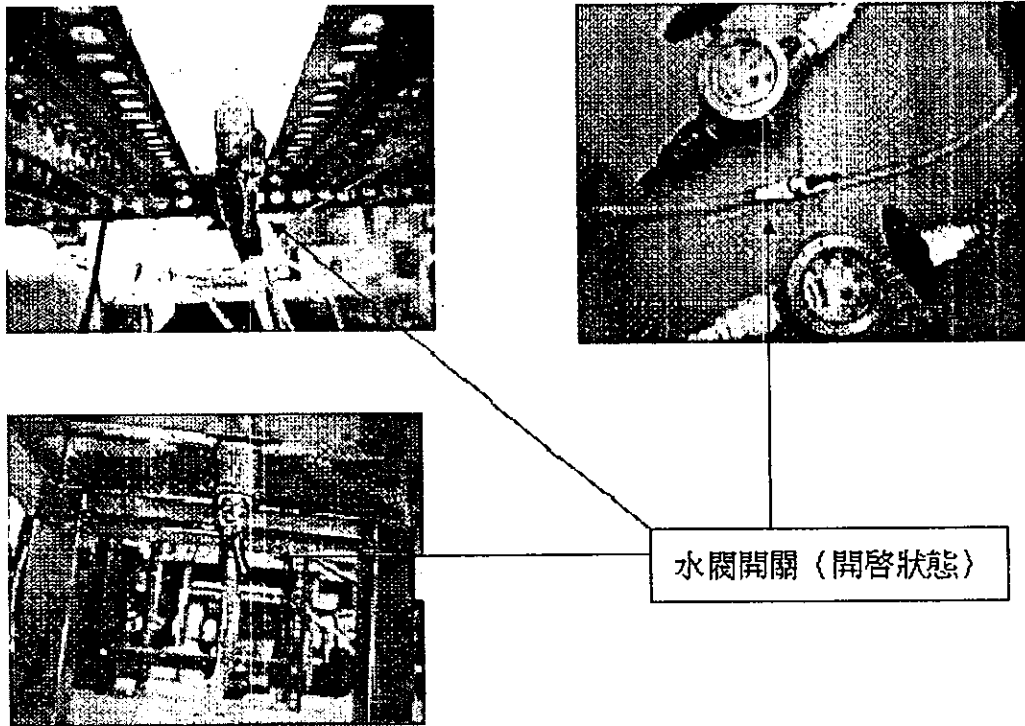


圖4-63 試驗開始水閥打開

- 7、將固定濃度追蹤劑注滿進流設備。
 - (1) 先將水管內注滿氯化鉀溶液
 - a、關閉砂箱及供水槽之水閥。
 - b、把此段水管由水閥上拔起。
 - c、將此段水管注滿氯化鉀溶液。
 - d、再將水管的兩頭接回兩水閥之上。
 - e、使開啟砂箱水閥時第一時間讓氯化鉀溶液流入砂箱中。
 - (2) 將儲水槽內注入氯化鉀溶液，並再次執行步驟7之試驗方式的c、d、e.步驟。
- 8、進流設備閥門打開，持續監測進流設備流量 Q_R 、水質變化 C 及移流到達時間 t_r 。
- 9、判斷實際進流設備流量(Q_R)與預估進流量(Q_P)是否相同？相同則持續監測；否則回到第1步驟重新預估。
- 10、判斷實際污染物移流到達時間(t_r)是否大於污染物移流時間預

估 (t_p)。 t_r 大於 t_p 代表監測到的污染物濃度為本研究之追蹤劑；否則回到第6步驟持續監測。

11、判斷污染物（追蹤劑）濃度是否與進流水濃度相同，當到達相同點則代表污染物到達試驗結束。

在 QA/QC 階段，本研究於試驗前，必須針對各種設備做儀器校驗，確定校驗的校驗曲線相關係數在 0.998 以上，才用於試驗量測，以避免儀器誤差產生。且本研究主要控制好各個參數，如進流量及水頭差，如有誤差將必須重新預估及調整。而追蹤劑到達時間必須比預估時間長；否則代表砂箱填實不完整，必須重新填實分析。

成果討論

本研究會針對砂箱進行污染傳輸試驗(簡稱砂箱試驗)的結果，探討砂箱中的水位是否達到定水頭、砂箱試驗的水量是否達到水平衡及求算砂箱中石英砂的延散係數。

首先，在探討砂箱之定水頭方面，因為在圖 4-57 中的 7 號觀測井為全開孔水井，所以 7 號觀測井中的水位變化比較接近砂箱中的水位變化。7 號觀測井在砂箱試驗期間的水位變化如圖 4-64 所示：

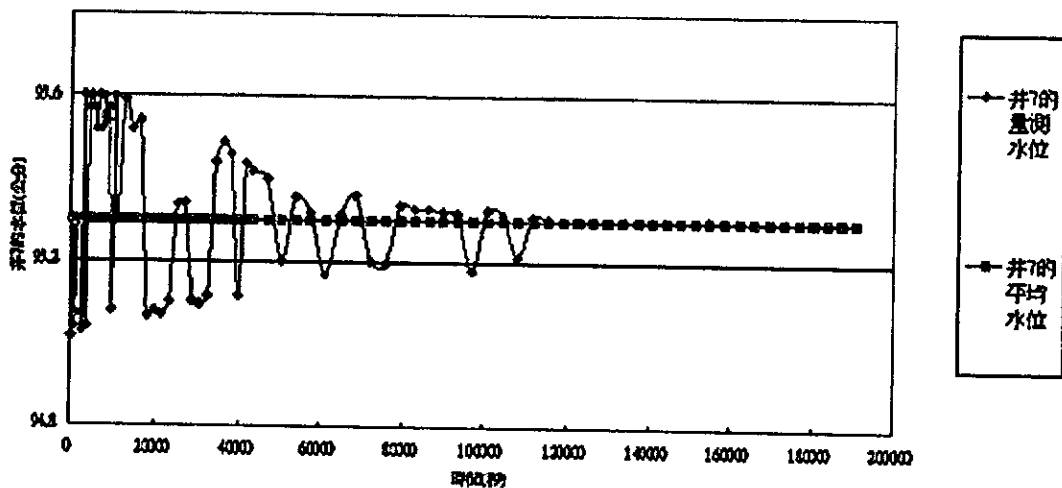


圖 4-64 7 號觀測井在砂箱試驗期間的水位歷線圖

在圖 4-64 中，可知在開始進行砂箱試驗時($t=0$ sec)，7 號觀測井的水位為 95 cm 此水位高度為放流水閘內壁的下緣距離砂箱底盤上端的間距。在圖 4-63 中，可知砂箱試驗開始後至第 11500 秒期間的 7 號觀測井水位並不穩定，在砂箱試驗第 11500 秒後，7 號觀測井的水位開始穩定在 95.3 cm，7 號觀測井的穩定水位較初始水位高出 0.3 公分，是因為放流水閘的內徑為 0.6 公分，砂箱試驗的放流水由砂箱放流水閘的中央流出。因此，砂箱中的水位(即 7 號觀測井的水位)到達穩態時的高度距離地面為 121.8 cm(即 $25.5\text{ cm}+1\text{ cm}+95.3\text{ cm}$)。

在砂箱進行污染傳輸試驗期間，除了要觀察 7 號觀測井的水位變化之外，亦要在 7 號觀測井周圍的 6 口觀測井進行水位的量測，以確保砂箱內的水位確實是定水頭的情況，圖 4-65 至圖 4-70 是 7 號觀測井周圍 6 口觀測井(1 至 6 號觀測井)的水位歷線圖：

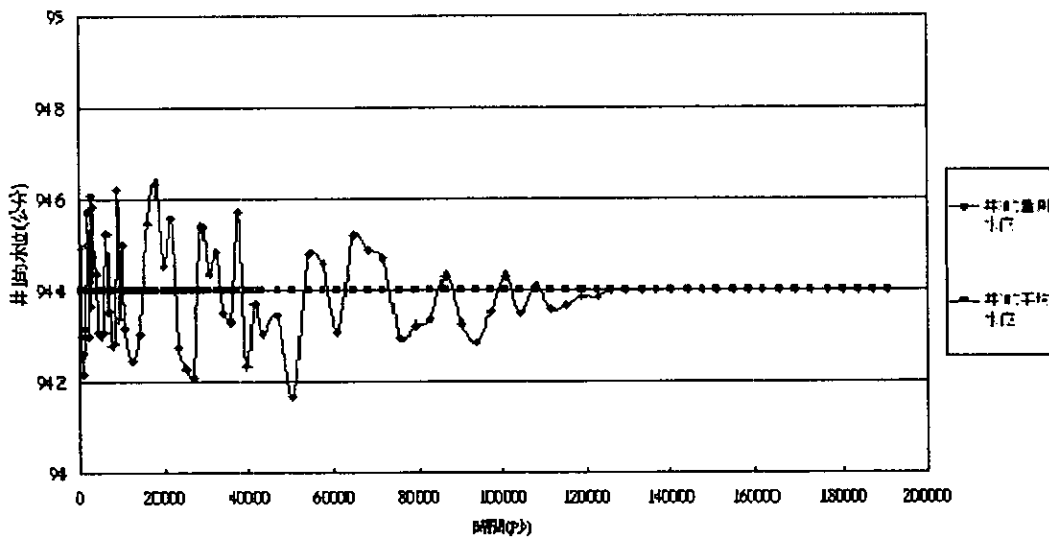


圖 4-65 在砂箱進行污染傳輸期間，1 號觀測井的水位歷線圖

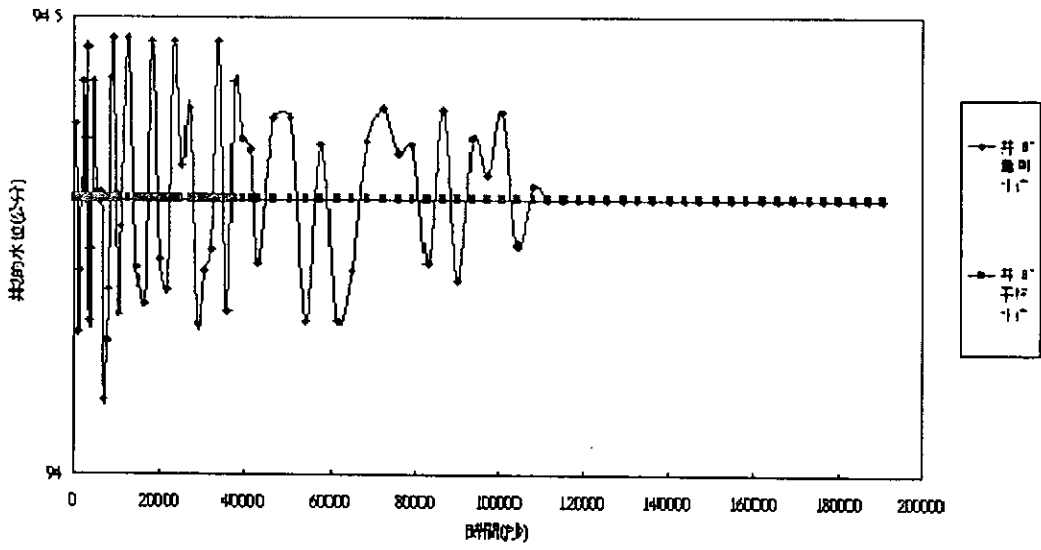


圖 4-66 在砂箱進行污染傳輸期間，2 號觀測井的水位歷線圖

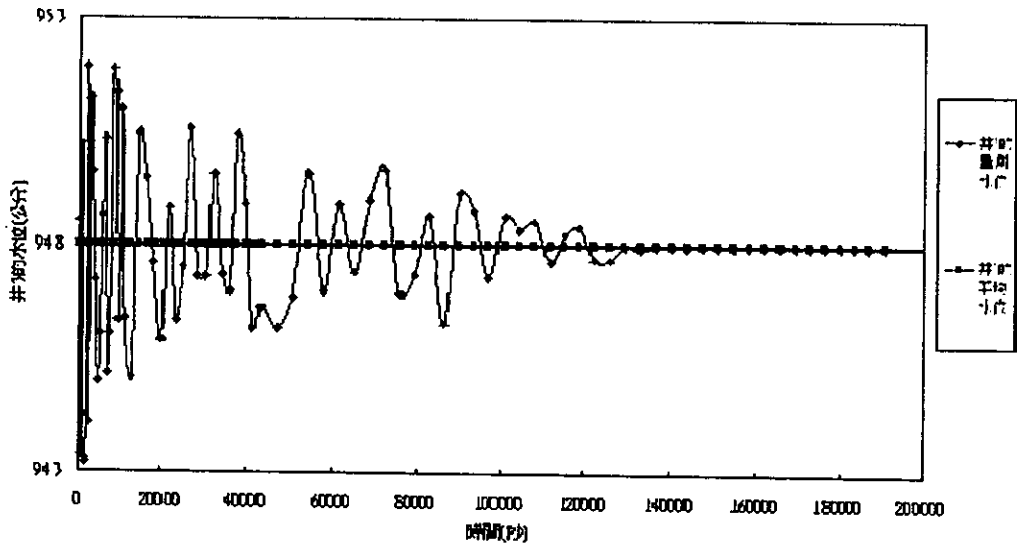


圖 4-67 在砂箱進行污染傳輸期間，3 號觀測井的水位歷線圖

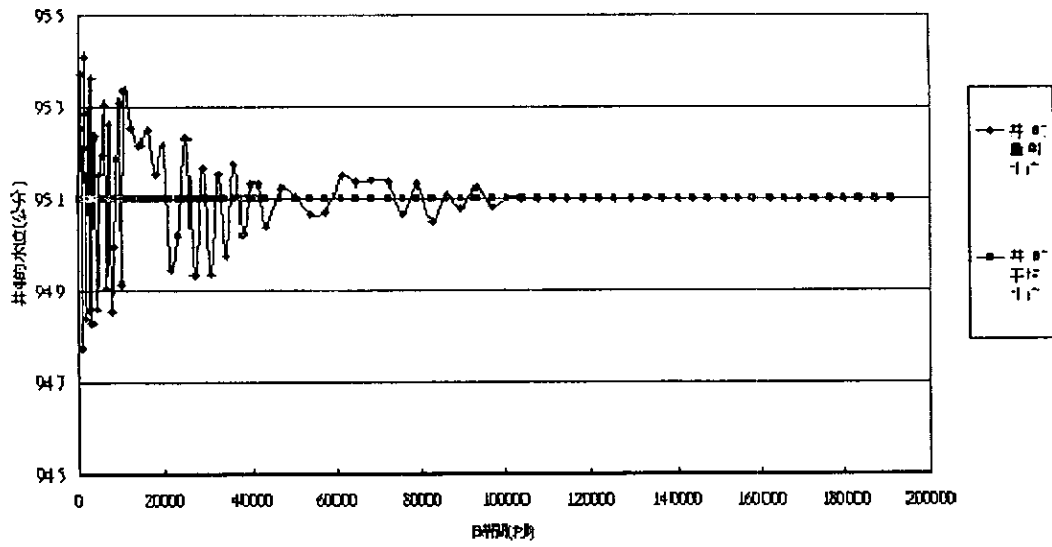


圖 4-68 在砂箱進行污染傳輸期間，4 號觀測井的水位歷線圖

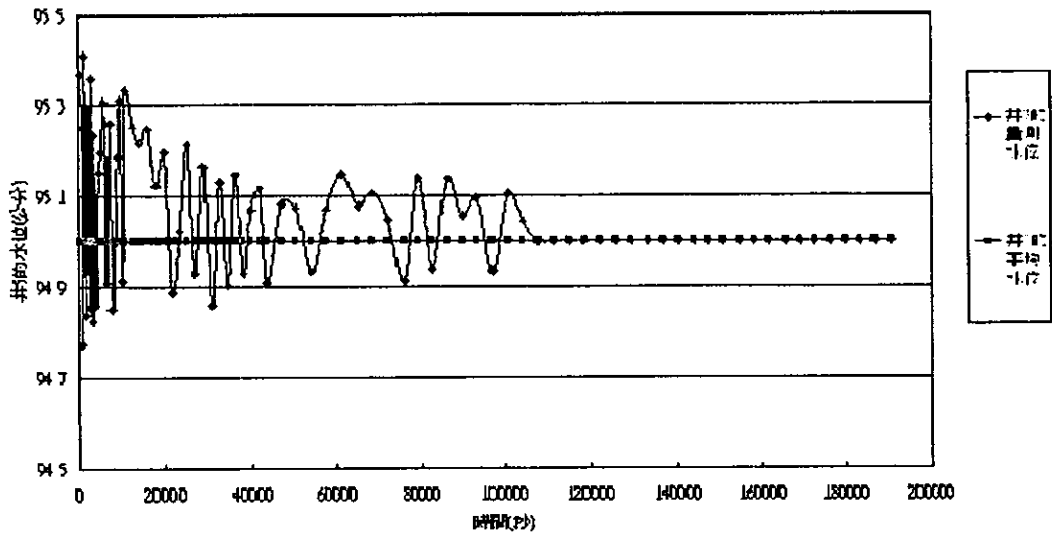


圖 4-69 在砂箱進行污染傳輸期間，5 號觀測井的水位歷線圖

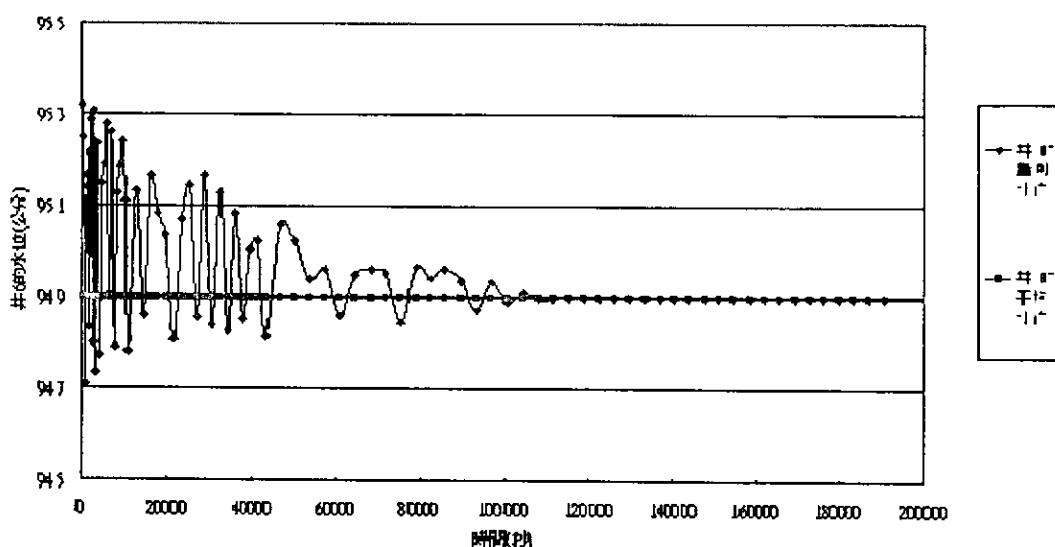


圖 4-70 在砂箱進行污染傳輸期間，6 號觀測井的水位歷線圖

在圖 4-65 至圖 4-70 中，橫軸表示砂箱污染傳輸試驗所花費的時間，單位為秒 (sec)，縱軸表示 1 號觀測井至 6 號觀測井中的水位，單位為公分 (cm)，這此水位值都是每口觀測井的水位與砂箱底盤上端之間的距離。

在圖 4-65 至圖 4-70 中，可知 1 號觀測井、2 號觀測井、3 號觀測井、4 號觀測井、5 號觀測井、6 號觀測井在砂箱進行污染傳輸試驗開始 ($t=0$ 秒) 的第 126000 秒、第 122400 秒、第 129600 秒、第 108000 秒、第 111600 秒及 108000 秒後，井中的穩定水位分別為 94.4 公分、94.3 公分、94.8 公分、95.1 公分、95.0 公分及 94.9 公分，此 6 口井的穩定水位分別較 7 號觀測井的穩定水位低了 0.9 公分、1.0 公分、0.5 公分、0.2 公分、0.3 公分及 0.4 公分，可知 1 號觀測井至 6 號觀測井與 7 號觀測井的穩地水位相差不超過 1 公分，因此，可視砂箱進行污染傳輸試驗期間砂箱中之水位保持定水頭，且 1 號觀測井至 6 號觀測井的水位較 7 號觀測井的水位為低，是因為 1 號觀測井至 6 號觀測井皆不是全開孔的水井，因此會造成一些水頭損失在砂箱中。

在砂箱試驗中，要考慮水量的平衡。本研究利用以下的水平衡方程式來檢視是否達到水量平衡，

$$\left(I + \sum_{i=1}^7 I_i\right) - \left(0 + \sum_{i=1}^7 I_i + \sum_{i=1}^{14} O_i + \sum_{i=1}^{14} r_i\right) = (h_{72} - h_{71}) \frac{A}{1000} \quad (4.53)$$

其中， I = 供水槽的累積供水量，單位為公升(L)；

$\sum_{i=1}^7 I_i$ = 1 號觀測井至 7 號觀測井採樣時的 RO 水滿管總水量，單位為公升 (L)；

O = 放流水閥累積水量，單位為公升 (L)；

$\sum_{i=1}^{14} r_i$ = 採樣水樣時，多餘的總水量，單位為公升 (L)；

h_{71} = 砂箱中的初始水位，單位為公分(cm)；

h_{72} = 砂箱試驗到達穩態時的砂箱水位，單位為公分 (cm)；

A = 砂箱截面積，單位為平方公分 (cm^2)。

在計算 $\sum_{i=1}^7 I_i$ 時，1 號觀測井至 7 號觀測井的滿管水量分別為 30 毫升，38 毫升、32 毫升、30 毫升、26 毫升、30 毫升、20 毫升，且總共採樣的次數為 37 次，所以 1 號觀測井至 7 號觀測井採樣時 RO 水滿管的總量 $\sum_{i=1}^7 I_i$ 為

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^7 I_i &= (30 \text{ mL/次} + 38 \text{ mL/次} + 32 \text{ mL/次} + 30 \text{ mL/次} + 26 \text{ mL/次} + \\ &\quad 30 \text{ mL/次} + 20 \text{ mL/次}) \times 37 \text{ 次} \\ &= 7622 \text{ mL} = 7.622 \text{ mL} \end{aligned}$$

在計算 $\sum_{i=1}^{14} O_i$ ，全部的採樣位置有 14 處，如：1 號至 6 號觀測井井篩之 6 處位置、7 號觀測井距離砂箱注水口 10 公分、50 公分與 90 公分之 3 處位置、及砂箱側邊的 5 個水閥。採樣時，側邊 5 個水閥分別距離砂箱底部 10 cm、30 cm、50 cm、70 cm、90 cm，全部的採樣次數為 37 次，每次採 14 個的水樣，且每個水樣體積為 15 毫升。因此，水樣的總水量 $\sum_{i=1}^{14} O_i$ 為

$$\sum_{i=1}^{14} O_i = 37 \text{ 次} \times 14 \frac{\text{個}}{\text{次}} \times 15 \frac{\text{mL}}{\text{個}} = 7770 \text{ mL} = 7.77 \text{ L}$$

在計算 $\sum_{i=1}^{14} r_i$ 時，全部的採樣位置有 14 處，如上所述。所有的採樣次數為 37 次，每次採 14 處的水樣，且每次採樣會多採

2 毫升，以確保不會抽到採樣管中的 RO 水，則採樣多餘的總水

量 $\sum_{i=1}^{14} r_i$ 為

$$\sum_{i=1}^{14} r_i = 37 \text{ 次} \times 14 \frac{\text{個}}{\text{次}} \times 2 \frac{\text{mL}}{\text{個}} = 1036 \text{ mL} = 1.036 \text{ L}$$

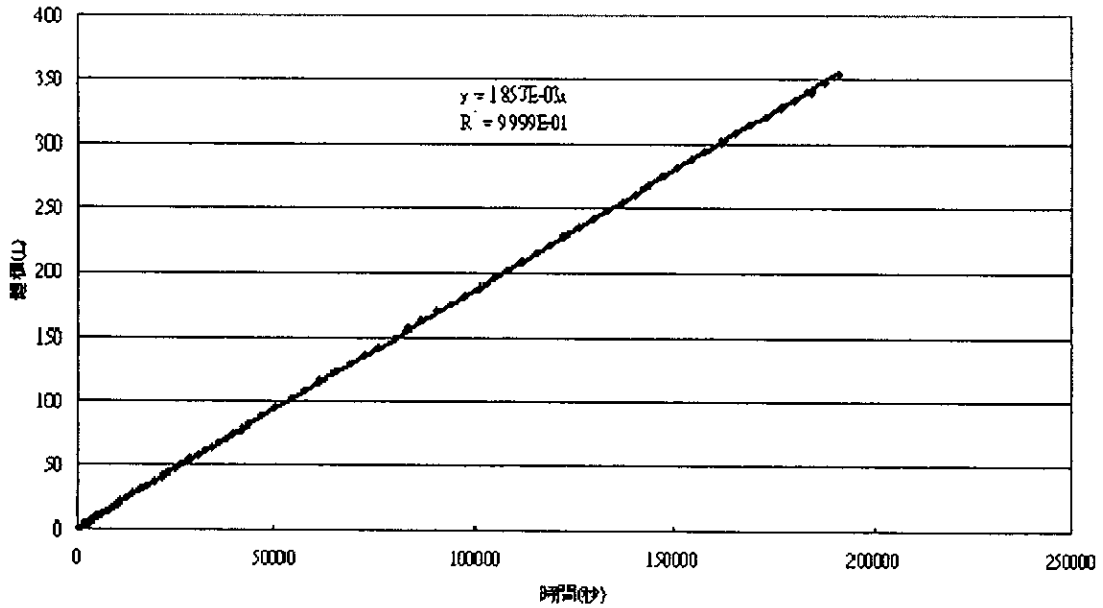


圖 4-71 水錶 1 的累積流量圖

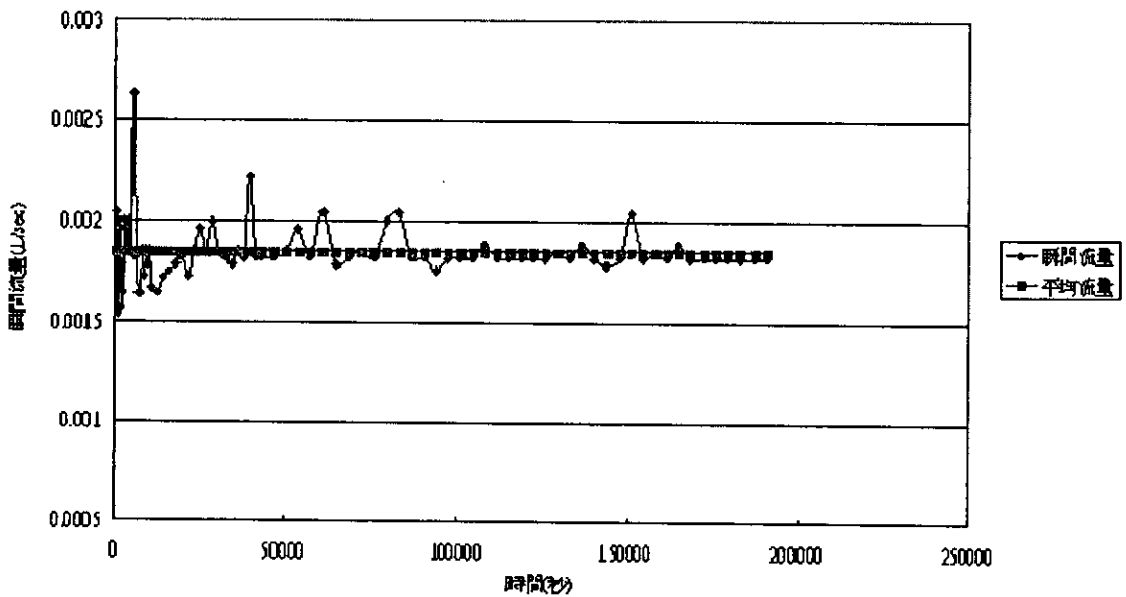


圖 4-72 水錶 1 的瞬間流量圖

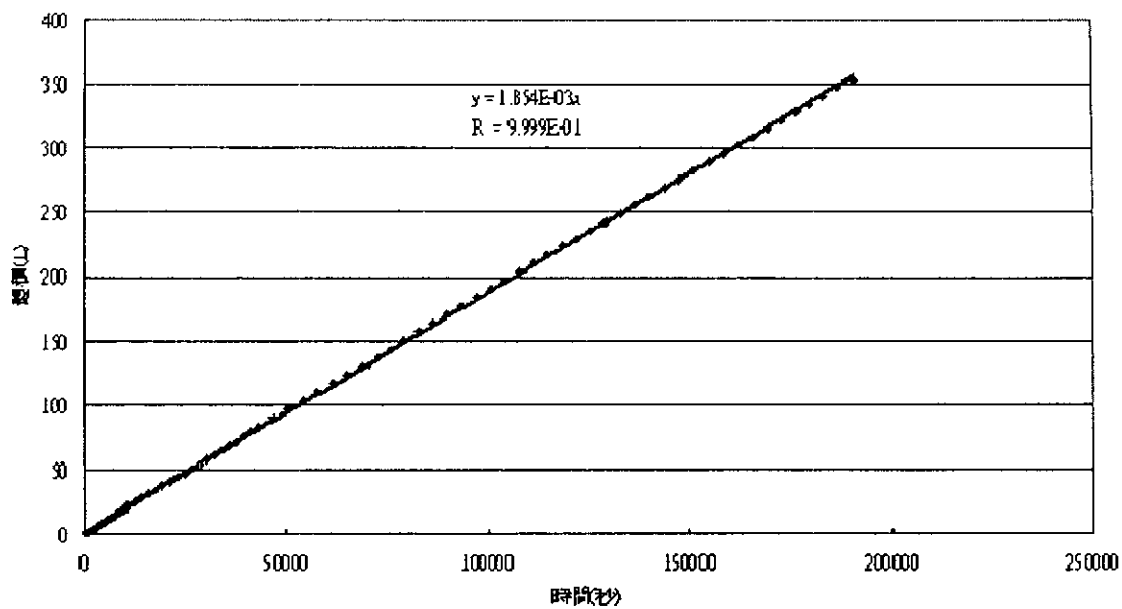


圖 4-73 水錶 2 的累積流量圖

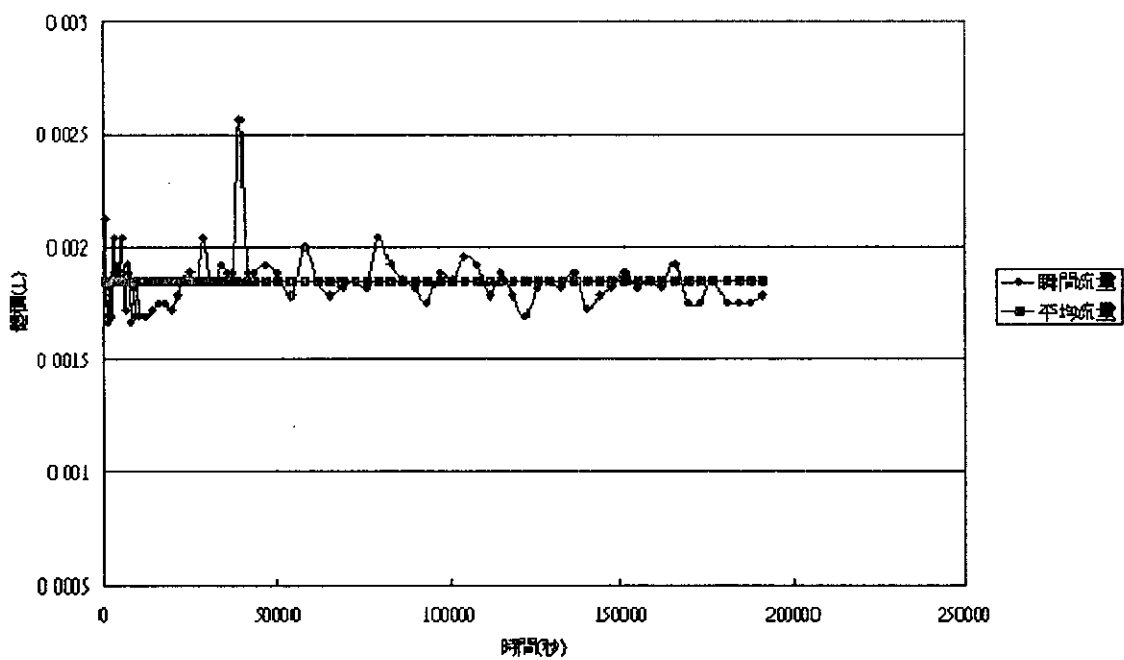


圖 4-74 水錶 2 的瞬間流量圖

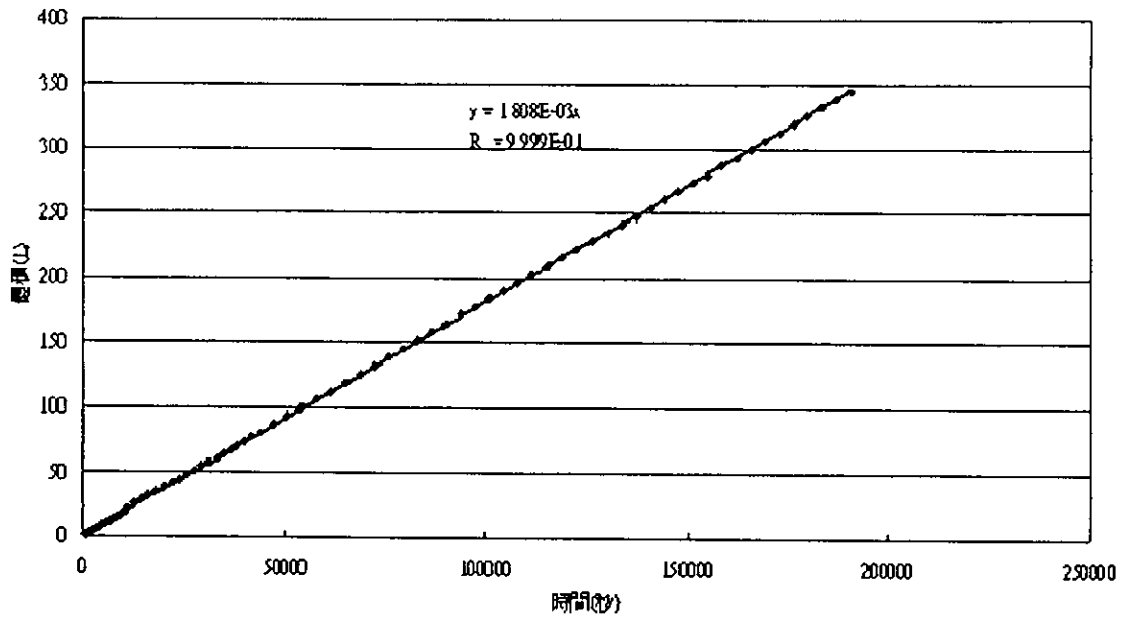


圖 4-75 水錶 3 的累積流量圖

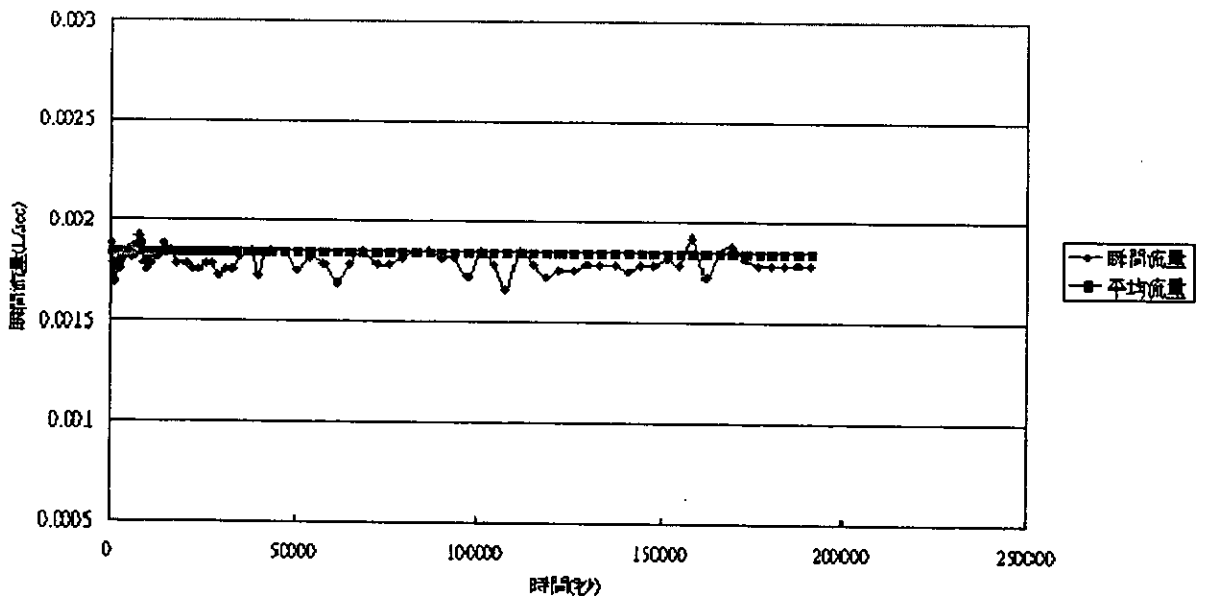


圖 4-76 水錶 3 的瞬間流量圖

在計算供水槽的累積供水量 (I) 時，本研究由圖 4-71 及圖 4-73 可知水錶 1 及水錶 2 在污染傳輸試驗 (190800 秒) 期間的累積供水量分別為 354.25 (L) 及 353.79 (L)，亦可得知供水的平均流量分別為 1.857×10^{-3} 公升/秒 (即 354.25 公升除以 190800 秒) 及 1.854×10^{-3} 公升/秒 (即 353.79 公升除以 190800 秒)，本研究將水錶 1 及水錶 2 的累積供水量進行平均，可得供水槽的平均累積供水量為 354.02 公升 (L)。

在計算污染傳輸試驗期間 (試驗累積時間為 190800 秒)，由圖 4-75 可之水錶 3 的放流水閥累積水量 (O) 為 345.01 (L)，亦可之放流水閥的平均流量為 1.808×10^{-3} 公升/秒 (即 345.01 公升除以 190800 秒)。

本研究將以上求得的 I、 $\sum_{i=1}^7 I_i$ 、O、 $\sum_{i=1}^{14} O_i$ 及 $\sum_{i=1}^{14} r_i$ 代入式(4.53) 可瞭解本次試驗的水量是否達到平衡，如下所示

$$\begin{aligned} & (I + \sum_{i=1}^7 I_i) - (O + \sum_{i=1}^7 I_i + \sum_{i=1}^{14} O_i + \sum_{i=1}^{14} r_i) \\ &= (354.02 \text{ L} + 7.622 \text{ L}) - (345.02 \text{ L} + 7.622 \text{ L} + 7.777 \text{ L} + 1.036 \text{ L}) \\ &= 0.194 \text{ (L)} \end{aligned}$$

由以上的計算結果可知輸入砂箱的總供水量 ($I + \sum_{i=1}^7 I_i$) 較總放流量 ($O + \sum_{i=1}^7 I_i + \sum_{i=1}^{14} O_i + \sum_{i=1}^{14} r_i$) 多出 0.204 公升。

在砂箱試驗期間，7 號觀測井的水位變化如圖 4-64 所示。在圖 4-64 中，可知砂箱試驗開始 (t=0) 及結束 (t=190800) 秒的水位分別為 95 公分及 95.3 公分，表示在砂箱試驗期間，砂箱多出來的儲存水量為

$$(h_{t_2} - h_{t_1}) \frac{A}{1000} = (95.36 \text{ cm} - 95.0 \text{ cm}) \times \frac{\pi (\frac{48}{2} \text{ cm})^2}{1000 (\frac{L}{\text{cm}^3})} = 0.543 \text{ (L)}$$

經由以上的計算可知式 (4.53) 等號左邊所有項的總和為 0.194 公升。式 (4.53) 等號右邊所有項的總和為 0.543 公升，表

示供水槽的累積供水量少了 0.349 公升，(即 0.194 公升減去 0.543 公升)，因為放流水閥的水量有利用量筒去量測瞬間流量，因此放流水閥的累積水量比較沒有問題。但是，供水槽所接的水錶 1 及水錶 2 會因為流速太小，產生推不動水錶之讀數計的情況，所以有可能在此造成供水槽的累積水量短少 0.349 公升。亦因未短少的水量小於 0.5 公升，因此，本次汙染傳輸砂箱試驗可視為達到水平衡，且水樣總水量與累積供水量的比例為 2.19%(即 $\sum_{i=1}^{14} O_i$ 除以 I)。因為砂箱的內徑為 48 公分，且砂箱的穩定水位面距砂箱底盤上端為 95.3 公分，所以砂箱中儲存的體積 (V) 為

$$V = \pi \left(\frac{48}{2} \text{ cm} \right)^2 (95.3 \text{ cm}) = 172450.8172 \text{ (cm}^2\text{)} \doteq 172.45 \text{ (L)}$$

所以累積供水量 (I) 為儲存水體積 (V) 的 205.3%

在求算砂箱試驗延散係數方面，本研究利用 7 號觀測井的 7-1、7-3 及 7-5 導電度計無因次濃度 $((C-C_0)/(C_{\max}-C_0))$ 對應汙染傳輸關係圖來求算延散係數 (Dispersion Coefficient, 簡稱 D 值) 及延散度 (Dispersivity, 簡稱 α 值)，如圖 4-77 至圖 4-79 所示。

在圖 4-77 至圖 4-79 中，為本研究在 7 號井中之 7-1、7-3 及 7-5 導電度計在砂箱試驗期間得到的讀數轉換為水質濃度-時間曲線，以及在 7 號井中之 7-1、7-3 及 7-5 導電度計附近所採水樣試驗之水質濃度值。在圖 4-77 至圖 4-79 中，可知 7-1、7-3 及 7-5 導電度計量測之水質濃度與水質探樣分析之水質濃度曲線相當接近，表示本研究所製造的導電度計相當成功且精準。

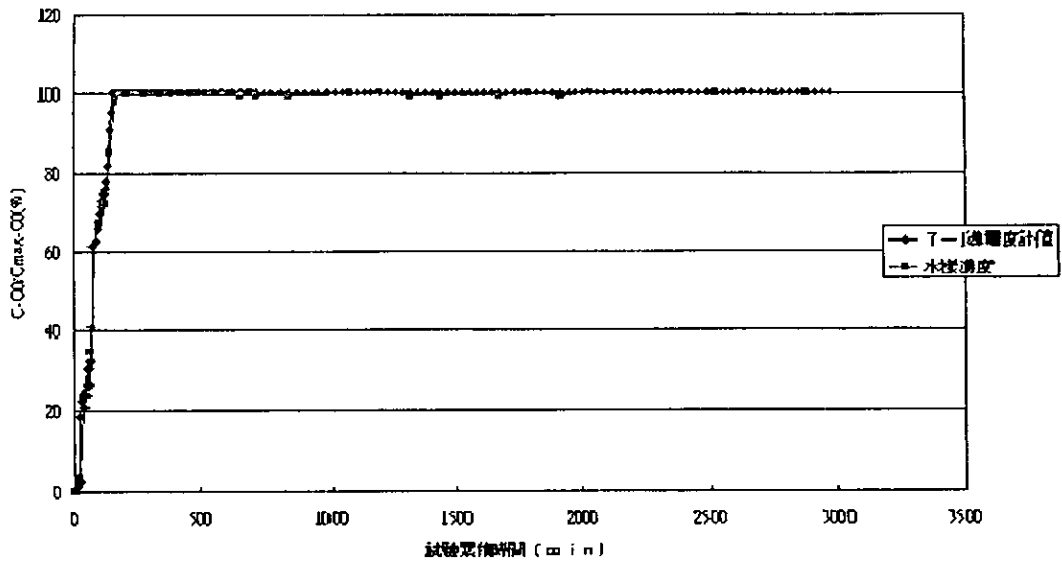


圖 4-77 砂箱進行污染傳輸試驗期間，井 7-1 位置導電度計之無因次濃度與試驗累積時間關係圖

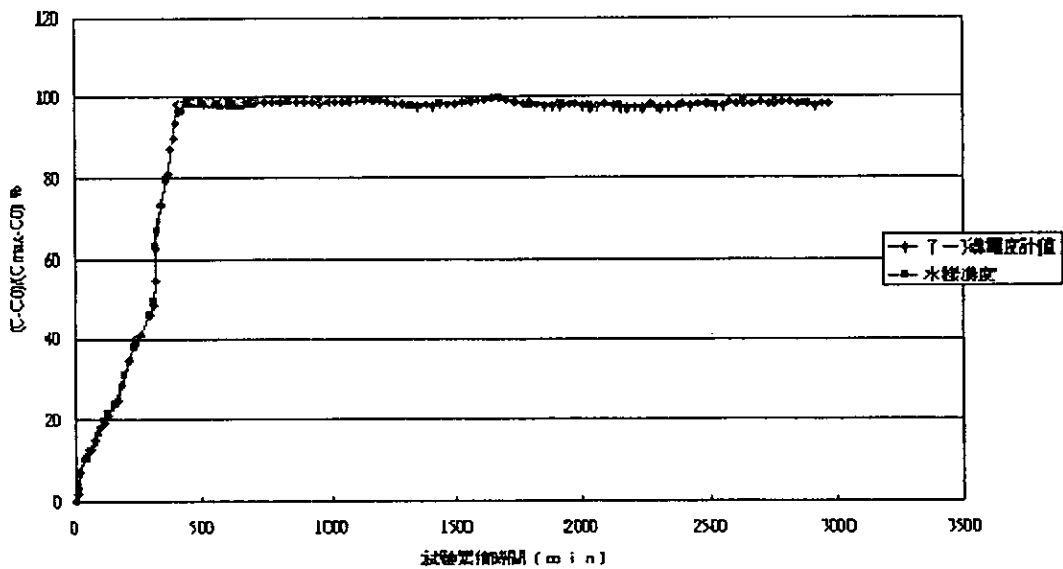


圖 4-78 砂箱進行污染傳輸試驗期間，井 7-3 位置導電度計之無因次濃度與試驗累積時間關係圖

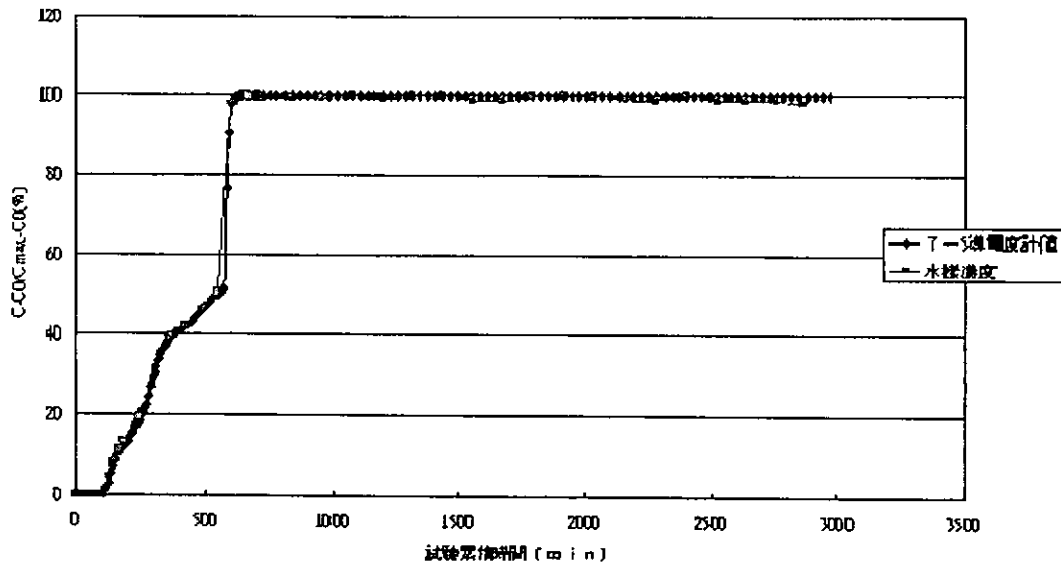


圖 4-79 砂箱進行污染傳輸試驗期間，井 7-5 位置導電度計之無因次濃度與試驗累積時間關係圖

在圖 4-77 至圖 4-79 中，橫軸表示砂箱進行污染傳輸試驗的累積時間，單位為分鐘 (min)，縱軸表示氯化鉀 (KCl) 在砂箱中的無因次濃度，此無因次濃度為氯化鉀在不同試驗累積時間及距離砂箱注水口不同距離的濃度 (C) 與砂箱中導電度的背景濃度 (C_0) 之差值 ($C-C_0$) 及砂箱在進行試驗期間的最大濃度 (C_{max}) 與 C_0 之差值 ($C_{max}-C_0$) 的比值 $(C-C_0)/(C_{max}-C_0)$ 。

本研究求算砂箱之井 7-1、井 7-3 及井 7-5 位置延散係數的公式為 Bear(1960) 提出的

$$\frac{C-C_0}{C_{max}-C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[-\frac{X-V \times t}{2\sqrt{D \times t}} \right] \quad (4.54)$$

其中， C = 污染物在不同試驗累積時間及與污染源相距 X 公尺的濃度，單位為 ppm；

C_0 = 砂箱中的背景濃度，在此是指導電度計量測背景濃度的最小值，單位為 ppm；

C_{\max} = 砂箱中污染物的最大濃度，單位為濃度 ppm；

X = 與污染源相差的距離，單位為公分 (cm)；

t = 砂箱進行汙染傳輸試驗的累積時間，單位為秒(sec)；

D = 延散係數，單位為 $\frac{m^2}{sec}$ 。

在圖 4-77 至圖 4-79 中，可知井 7-1、井 7-3 及井 7-5 位置所設置的導電度計分別在試驗累積時間 65 分鐘 (3900 秒)、315 分鐘 (即 18900 秒) 及 570 分鐘 (即 34200 秒) 所對應的無因次濃度 ($\frac{C-C_0}{C_{\max}-C_0}$) 為 0.4109、0.5466 及 0.5021，且井 7-1、井 7-3 及井 7-5 導電度計分別設置在注入口以上 10 公分、50 公分及 90 公分處，再考慮在試驗期間，水在砂箱裡石英砂之孔隙中的流速為 2.628×10^{-3} (cm/sec)，將以上的條件帶入式 (4.54)，即求得注水口以上 10 公分、50 公分及 90 公分處的延散係數分別為 1.569×10^{-4} (cm²/sec)、 2.114×10^{-4} (cm²/sec) 及 2.365×10^{-4} (cm²/sec)，且以上延散係數除以砂箱石英砂孔隙中的流速 (即 2.628×10^{-3} (cm/sec)) 可分別得到的延散度為 0.06 公分、0.08 公分、0.09 公分。經由式 (4.47) 及式 (4.48) 可知本研究 10 公分、50 公分及 90 公分處的遲滯因子皆為 1。

本研究將砂箱注水口以上 10 公分、50 公分及 90 公分的延散度經過線性迴歸，可得砂箱中延散度與延散尺度的關係式為

$$\alpha = 0.015X + 0.0467, r^2 = 0.9643 \quad (4.55)$$

其中， α = 距離砂箱注水口 X 公分的延散度，單位為公分 (cm)；

X = 與砂箱注水口的距離，亦表示延散尺度，單位為公分 (cm)。

在圖 4-80 中可知延散度與延散尺度關係式的截距為 0.0467 公分，可視為石英砂在本次砂箱尺度的延散度。當注入砂箱的氯化鉀 (KCl) 溶液在石英砂傳輸時，延散度伴隨式 (4.55) 的斜率 0.015 增加。本研究在砂箱試驗所得到的延散度與表 4-25 中蘇苗彬及王智澤 (1992) 提出的延散度值可經由比較得知，本研究所得

之延散度值相當合理。

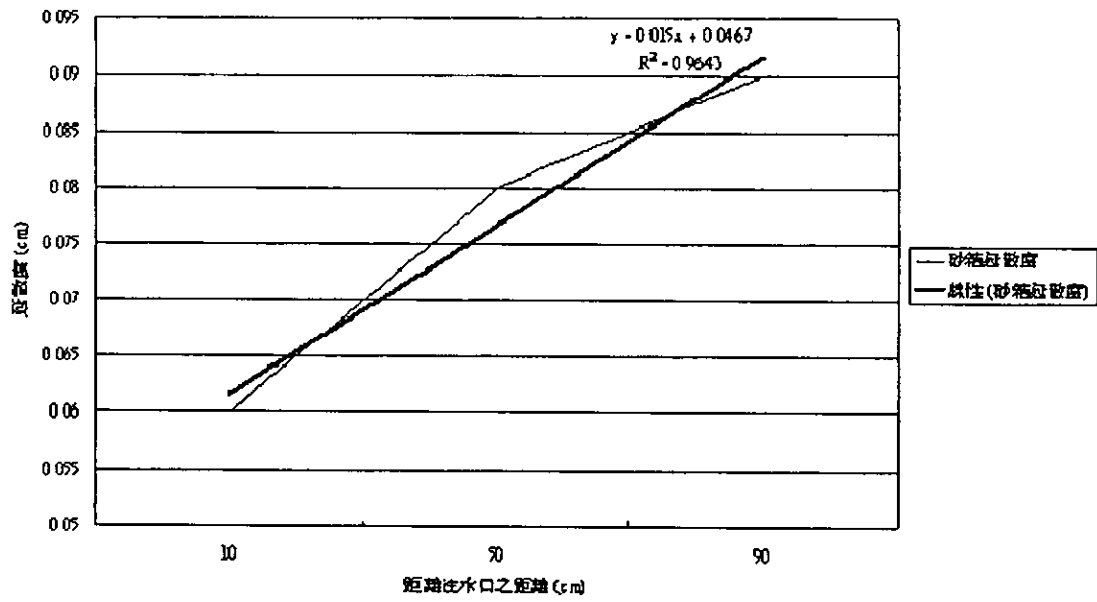


圖 4-80 延散度與延散尺度關係圖

表 4-25 延散度相關文獻之延散度比較表(參考文獻為蘇苗彬及王智澤，1992)

| 相關文獻 | 孔隙介質 | 主流方向延散係數 | 砂箱條件 |
|-----------------------------|--------------------|----------|------|
| Bear (1961) | Ottawa sand | 0.051 cm | 砂柱試驗 |
| Hoopes and Harleman (1967) | New Jersey sand | 0.15 cm | 砂槽試驗 |
| Pickens and Grisak (1981) | Chalk river | 0.035 cm | 砂柱試驗 |
| | | 0.7 cm | 野外試驗 |
| Fujinana (1983) | 河床 | 1.30 cm | 野外試驗 |
| Silliman and Simpson (1987) | Ottawa silica sand | 0.02 m | 砂槽試驗 |
| 張福麟 (1988) | 台灣雲林麻園 | 10.73 m | 野外試驗 |
| 曹以松等人 (1988) | 台灣宜蘭鹽寮 | 0.1057 m | 野外試驗 |
| 蘇苗彬及王智澤 (1992) | 石英砂 | 0.143 cm | 砂箱試驗 |

結論

- 1、在探討砂箱之定水頭方面，因為 7 號觀測井為全開孔水井，所以 7 號觀測井中的水位變化比較接近砂箱中的水位變化。在砂箱試驗第 11500 秒後，7 號觀測井的水位開始穩定在 95.3 cm。1 號至 6 號觀測井的穩定水位分別較 7 號觀測井的穩定水位低了 0.9 公分、1.0 公分、0.5 公分、0.2 公分、0.3 公分及 0.4 公分，可知 1 號觀測井至 6 號觀測井與 7 號觀測井的穩地水位相差不超過 1 公分，因此，可視砂箱進行污染傳輸試驗期間，砂箱中之水位保持定水頭，且 1 號觀測井至 6 號觀測井的水位較 7 號觀測井的水位為低，是因為 1 號觀測井至 6 號觀測井皆不是全開孔的水井，因此會造成一些水頭損失在砂箱中。
- 2、經由砂箱試驗的水平衡方程式，可知總輸入砂箱水量與總輸出砂箱水量的差值為 0.194 公升。在砂箱在試驗期間，砂箱中的水量增加了 0.543 公升。以上的結果表示供水槽的累積供水量少了 0.349 公升，(即 0.194 公升減去 0.543 公升)，因為放流水閥的水量有利用量筒去量測瞬間流量，因此放流水閥的累積水量比較沒有問題。但是，供水槽所接的水錶 1 及水錶 2 會因為流速太小，產生推不動水錶之讀數計的情況，所以有可能在此造成供水槽的累積水量短少 0.349 公升。亦因為短少的水量小於 0.5 公升，因此，本次污染傳輸砂箱試驗可視為達到水平衡。
- 3、砂箱底盤上端 10 公分、50 公分及 90 公分位置所設置的導電度計分別在試驗累積時間 65 分鐘 (3900 秒)、315 分鐘 (即 18900 秒) 及 570 分鐘 (即 34200 秒) 所對應的無因次濃度 $\left(\frac{C-C_0}{C_{MAX}-C_0}\right)$ 為 0.4109、0.5466 及 0.5021，且井 7-1、井 7-3 及井 7-5 導電度計分別設置在注入口以上 10 公分、50 公分及 90 公分處。考慮在試驗期間，水在砂箱裡石英砂之孔隙中的流速為 2.628×10^{-3} (cm/sec)，將以上的條件帶入式 (4.54)，即求得注水口以上 10 公分，50 公分及 90 公分處的延散係數

分別為 1.569×10^{-4} (cm²/sec)、 2.114×10^{-4} (cm²/sec) 及 2.365×10^{-4} (cm²/sec)，且以上延散係數除以砂箱石英砂孔隙中的流速（即 2.628×10^{-3} (cm/sec)）可分別得到的延散度為 0.06 公分、0.08 公分、0.09 公分，本研究亦可得到 10 公分，50 公分及 90 公分處的遲滯因子皆為 1。

- 4、本研究將砂箱注水口以上 10 公分、50 公分及 90 公分的延散度經過線性迴歸，可得砂箱中延散度與延散尺度的關係式為 $\alpha = 0.015X + 0.0467$ ， $r^2 = 0.9643$ ，在延散度與延散尺度關係式的截距為 0.0467 公分，可視為石英砂在本次砂箱尺度的延散度。本研究在砂箱試驗所得到的延散度，與蘇苗彬及王智澤 (1992) 提出延散度值經由比較得知，本研究所得之延散度值相當合理。

五、污染傳輸試驗

理論介紹

資料分析方面，以 1980 年 Sauty 提出之分析理論做分析，進而提出分析步驟。

本研究使用野外強制傳輸試驗，為抽水穩定狀態下瞬間注入 (pulse input) 追蹤劑，根據 Sauty (1980) 之方法指出，強迫水力梯度 (Force Gradient) 追蹤試驗或收斂流向 (Converging Flow) 追蹤試驗，在抽水井與注入井方向之無因次濃度與時間之關係式為：

$$C_r(P, t_r) = K \cdot t_r^{-1} \cdot \exp\left\{-\left[P(1-t_r)^2 / 4t_r\right]\right\} \quad (4.56)$$

$$K = t_{r \max} \cdot \exp\left[P(1-t_{r \max})^2 / 4t_{r \max}\right] \quad (4.57)$$

$$t_{r \max} = (1 + 4P^{-2})^{1/2} - 2P^{-1} \quad (4.58)$$

其中

$C_r = C / C_{\max}$ = 監測井所得之無因次濃度 (dimensionless concentration)

C_{\max} = 監測所得最大濃度

$P = VX/D_h = X/\alpha = \text{Peclet Number}$

α = 延散度, X = 井距, V = 孔隙流速 = q/n = 達西流速/孔隙率,

D_h = 延散係數, $t_r = t/t_c$ = 無因次時間(dimensionless time),

$t_{r \max}$ = 最大濃度出現時之無因次時間 t_r 。

$$t_c = \pi X^2 Dn/Q \quad (4.59)$$

其中 D = 含水層厚度, Q = 抽水量。

依據公式(4.56)至(4.59), 可以計算出不同 P 值(Peclet Number) 時無因次濃度與無因次時間之關係, 作出不同 P 值之標準曲線(type curve)。同樣地, 將試驗結果繪成無因次濃度與無因次時間之穿透曲線圖(breakthrough curve)加以比對, 可得最吻合(match)之標準曲線(type curve)。

在地下水傳輸過程中, 污染物或追蹤劑有時會有被地層介質吸附的情況, 稱為「遲滯現象」, 並以「遲滯係數」(Retardation Coefficient, R)定義之,

$$R = \frac{q}{V_i} = \frac{T_i}{T_w} \quad (4.60)$$

其中 R = 遲滯係數,

$V_i = x/T_i$ = 追蹤劑在地下水中之平均流速,

T_i = 追蹤劑從注入點移動到監測點之平均時間,

$T_w = t_c = x/q$ 地下水從注入點移動到 x 距離監測點之平均時間。

$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times t_i \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \times \Delta t_i} \quad (4.61)$$

其中 C_i = 檢測點在 t_i 時間之追蹤劑濃度,

t_i =追蹤劑注入後經過之時間，

Δt_i =取樣間隔時間。

工作方法

在工作方法中，共可分為三大階段，分別為事前規劃、試驗步驟及 QA/QC。

在事前規劃階段，本研究依目的、背景資料，決定試驗架構，如圖 4-81 所示。主要利用抽水方式，使下游抽水井 (BH09) 地下水水位降低，以形成跟上游地下水水位較大之水力坡降，加速地下水流動速度。等穩定後，將追蹤劑從主要注射井 (BH02) 瞬間注入含水層中，以模擬點污染源，再經由觀察追蹤劑的濃度對時間的變化關係求得延散度。其中，所使用之儀器包括抽水設備、水位監測設備、水質監測設備及流量監測設備。且本研究為了提高試驗之成功率及準確性，因此於試驗前水質監測設備、水位監測設備和流量監測設備做率定。

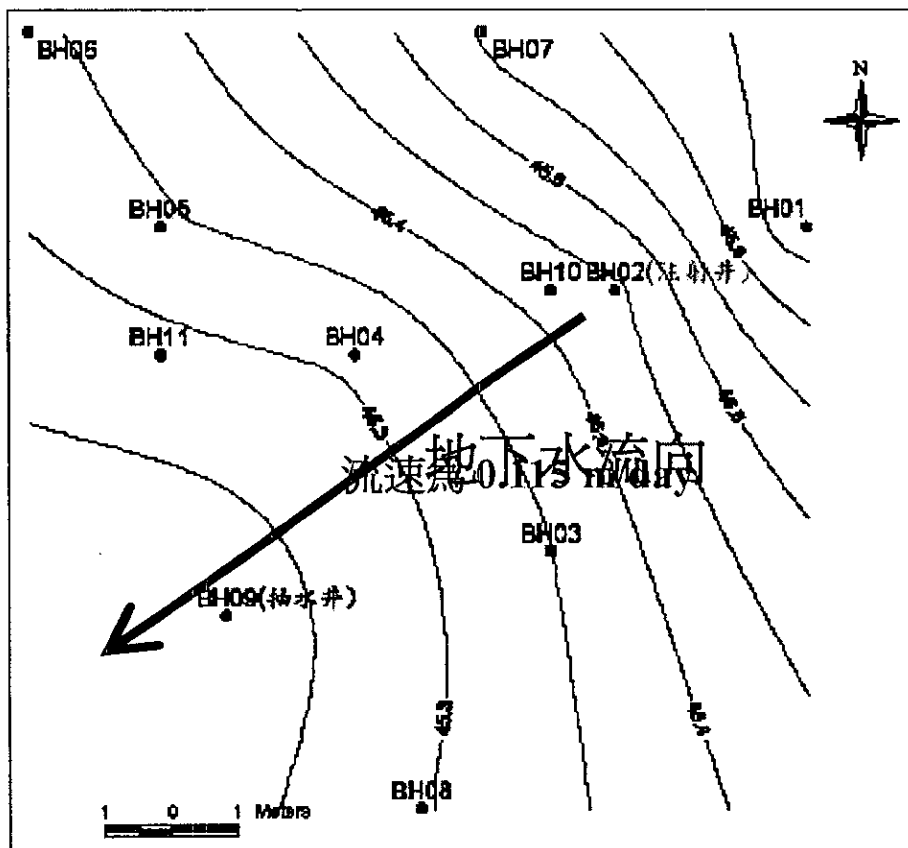


圖 4-81 污染傳輸試驗示意圖

1、抽水設備

與非等向水文參數試驗之抽水設備相同。

2、水位監測設備

與垂直水力傳導係數試驗之水位監測設備相同。

3、水質監測設備

與砂箱試驗之水質監測設備相同。

4、流量監測設備

與垂直水力傳導係數試驗之流量監測設備相同。

在試驗步驟階段，本研究依事前規劃之試驗方法做逐步試驗，如圖 4-82 所示。

- 1、利用 Thiem 及達西定率，預估抽水井抽水流量預估 (Q_P)、抽水井水位洩降量預估 (Δh_P) 及污染物移流時間預估 (t_P)。
- 2、抽水井啟動馬達開始抽水，達到穩定後。監測其抽水井抽水流量 Q_R 及水位洩降量 Δh_R 。
- 3、判斷實際抽水井抽水流量 Q_R 與預估抽水井抽水流量預估 (Q_P) 及實際抽水井水位洩降量 Δh_R 與預估抽水井水位洩降量預估 (Δh_P) 是否相同？相同則持續監測；否則必須回到第 1 步驟，重新預估調整。
- 4、於注射井瞬間注入 5000 ppm 之氯鹽追蹤劑，持續監測水質變化 (C) 及移流時間 (t_R)。
- 5、判斷實際移流時間 (t_R) 是否超過預估移流時間 (t_P)？如是則持續監測其水質變化 (C)；否則代表追蹤劑尚未到達，則必須持續監測。
- 6、持續監測水質追蹤劑濃度，當抽水井之氯鹽濃度小於或等於背景值時，則代表本研究所加入之追蹤劑已完全通過本監測網，試驗可停止結束。

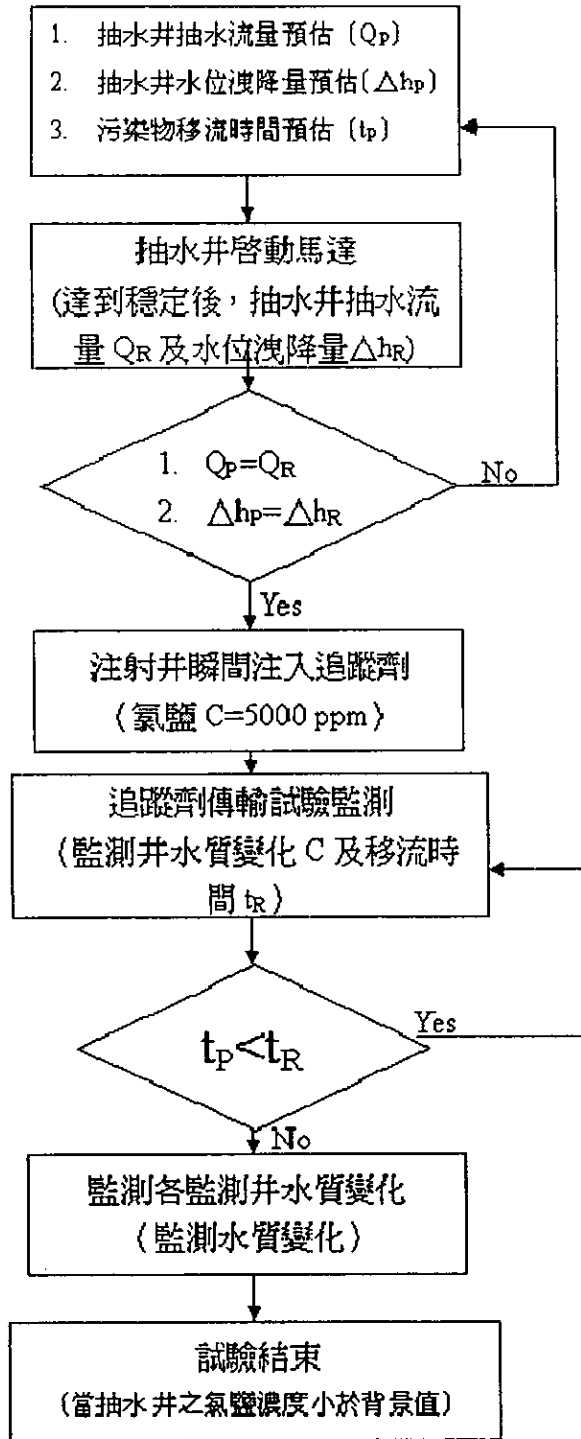


圖 4-82 污染傳輸試驗步驟

在 QA/QC 階段，本研究於試驗前，必須針對各種設備做儀器校驗，確定校驗的校驗曲線相關係數在 0.998 以上，才用於試驗量測，以避免儀器誤差產生。且本研究主要利用抽水方式，以加快污染傳輸速度。因此於追蹤劑加入前，必須使地下水位形成穩定的自然梯度避免污染誤差。故於追蹤劑加入前，必須確定抽水井之抽水流量穩定（流量變化在 2% 之間）及水位沈澱已到達穩定（前小時之水位洩降量與現時水位洩降量差值在 2% 之內）始能加入追蹤劑。

在加入追蹤劑後，則必須確定追蹤劑是否有超過預估移流時間。因預估移流時間為利用達西公式所求出之最短的移流時間，因此如果移流時間小於預估移流時間，可能為別的污染源造成，必須持續監測。

成果討論

在現地污染傳輸試驗前，必須先進行抽水試驗讓抽水井 (BH11) 附近形成較大的水力坡降，以加速地下水流動速度。等到抽水試驗達穩定後，此時本研究可利用瞬間流量圖與累積流量圖 (如圖 4-83 及圖 4-84 所示) 來得之平均流量為 $1.822 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{sec})$ 。

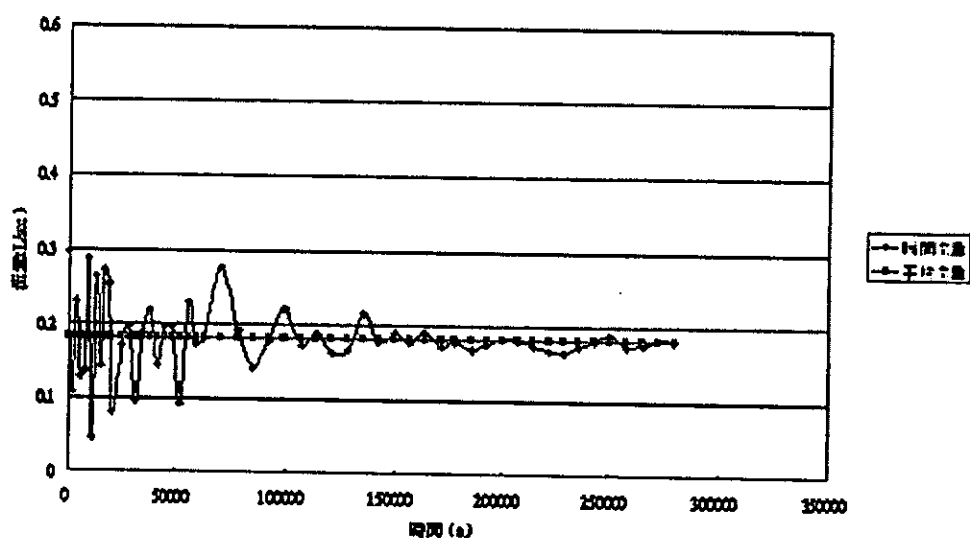


圖 4-83 雲林科技大學在 2004 年 11 月 3 日 21 時至 2004 年 11 月 8 日 00 時期間瞬間流量圖

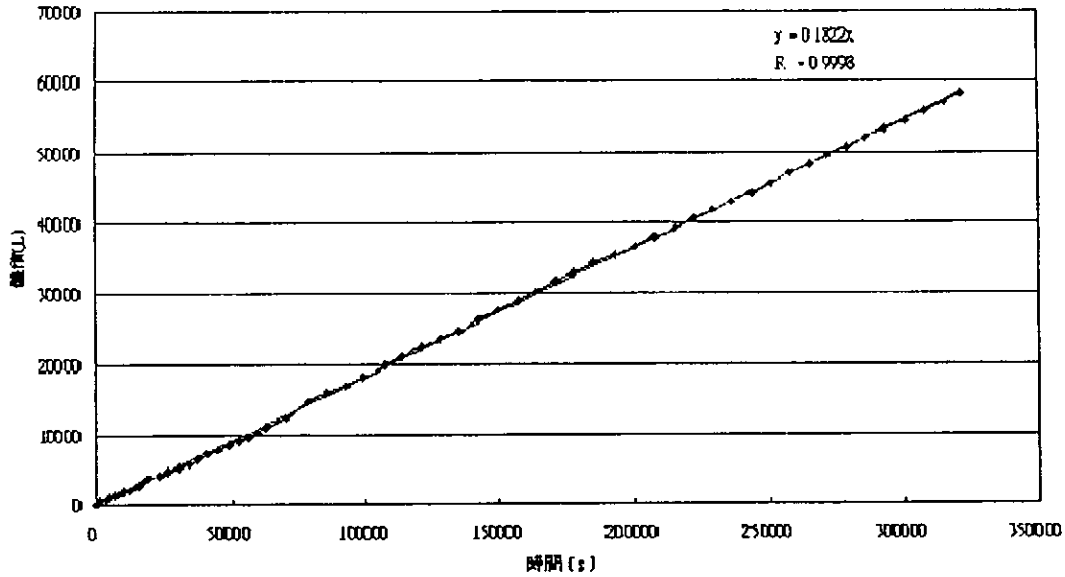


圖 4-84 雲林科技大學在 2004 年 11 月 3 日 21 時至 2004 年 11 月 8 日 00 時期間之累積流量圖

在圖 4-83 及圖 4-84 中，橫軸為抽水試驗累積時間，單位為分鐘(min)；圖 4-84 的縱軸表示流量，單位為公升/秒(L/s)；圖 4-84 的縱軸表示抽水累積體積，單位為公升(L)。在圖 4-84 所得的抽水體積與累積時間的關係斜線之斜率可知本次抽水試驗的平均流量為 0.1822(L/s)，經過單位換算可得 $1.822 \times 10^{-4}(\text{m}^3/\text{sec})$ 。

在 2004 年 11 月 3 日 21 時量測抽水井(BH11)之初始水位為 16.08 公尺，若把抽水井的底部視為此現地含水層的底部，則可得此含水層厚度為 16.08 公尺，經過土壤試驗可知現地的有效孔隙率為 0.2。目前，距離注射井(BH02)最近的觀測井為 BH10，且 BH10 觀測井與 BH02 注射井之間距為 1.206 公尺，將以上這些條件代入式(4.59)可得 t_c 為 1344 min。

若將每個紀錄的時間 t_i 除以 t_c ，可得無因次時間 t_r 為

$$t_r = \frac{t_i}{t_c}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.62)$$

其中，在 BH10 觀測井之 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位

置的導電度計所量測到最大 KCl 污染物濃度所對應的時間分別為 940min、1128min、940min、960min 及 980min。而 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 分別表示為 BH10 地面下 4、8、12、16、20m 處放置自製式導電度計深度之編號。

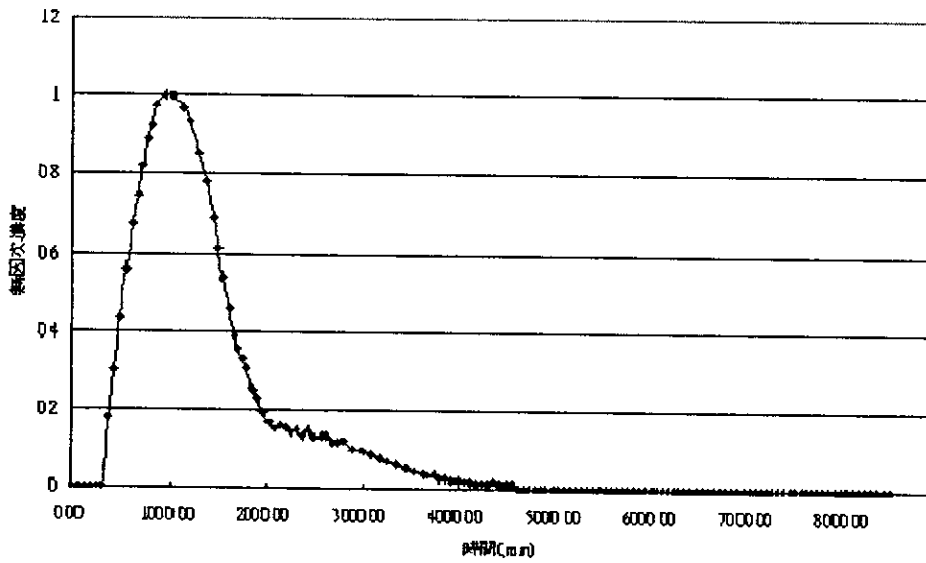


圖 4-85 在 10-1 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

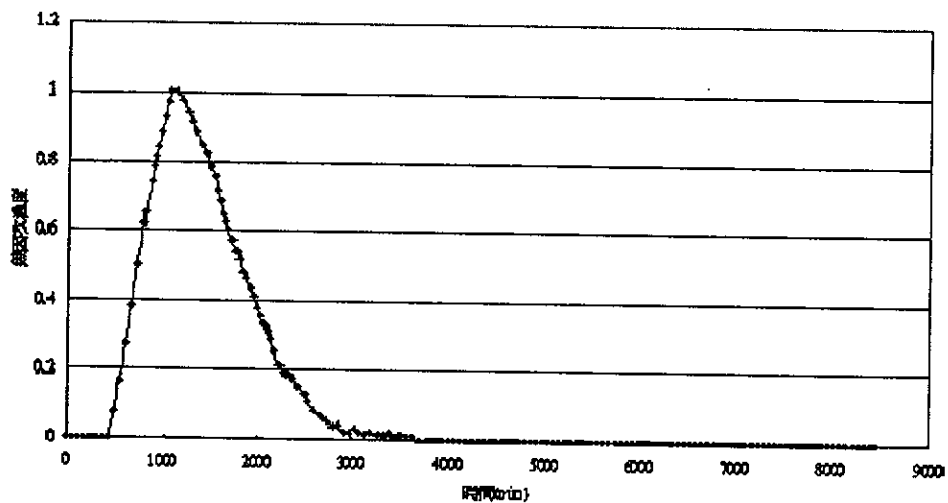


圖 4-86 在 10-2 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

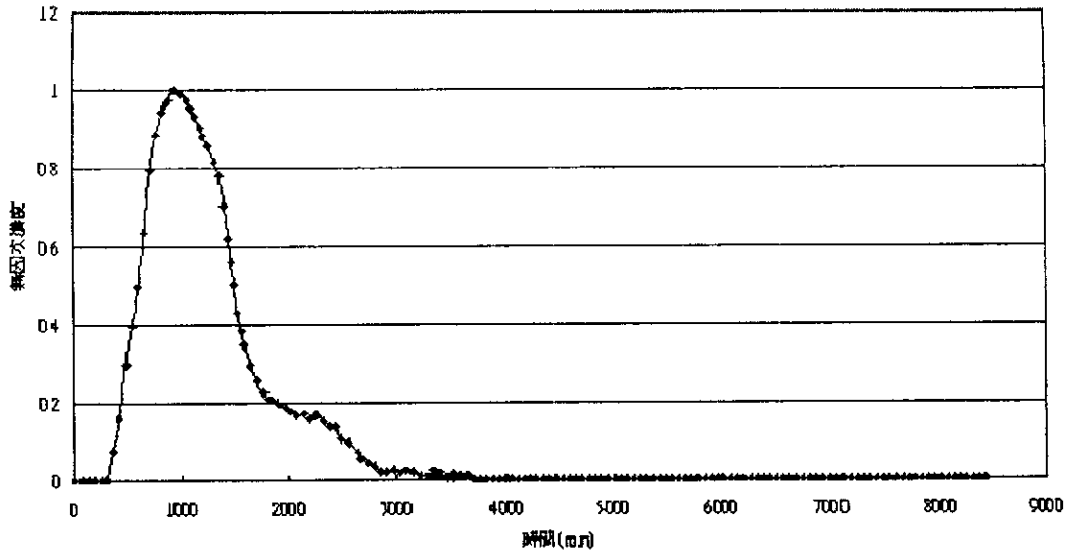


圖 4-87 在 10-3 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

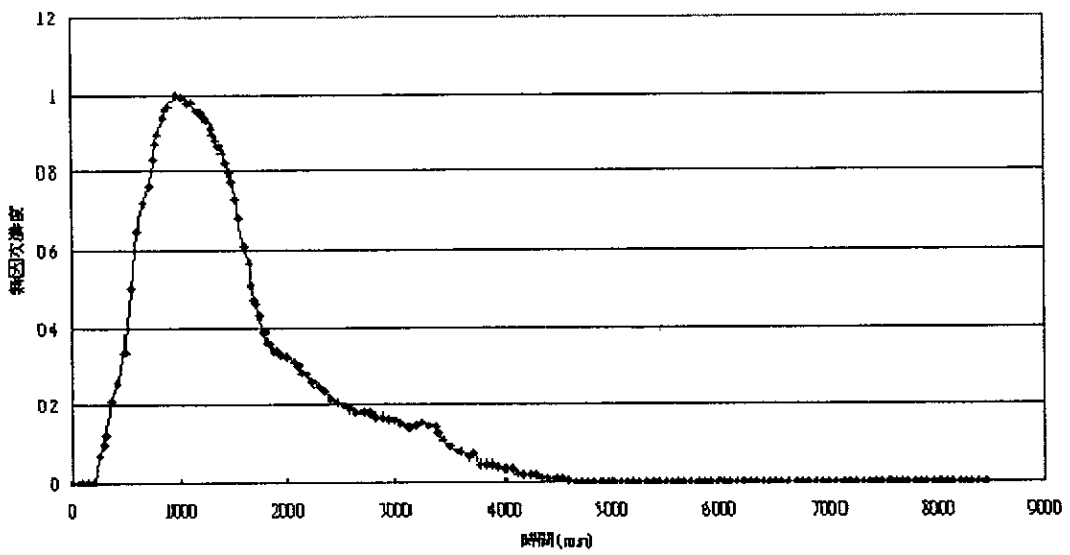


圖 4-88 在 10-4 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

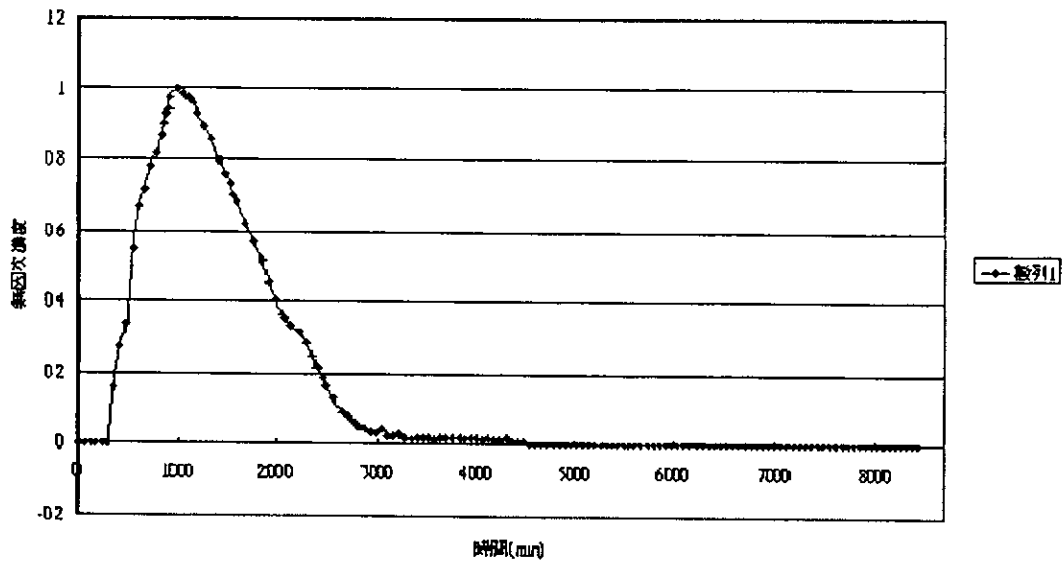


圖 4-89 在 10-5 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

在圖 4-85 至圖 4-89 中，橫軸表示現地污染傳輸試驗後累積的時間，單位為分鐘(min)，縱軸表示導電度計在現地量測的 KCl 濃度值，單位為 ppm。在圖 4-85 至圖 4-89 中，可知 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置的導電度計量測 KCl 最大濃度所對應的時間，分別為 940min、1128min、940min、960min、980min。將以上 5 個最大濃度對應的時間(t_{max})除以 t_c ，可分別得到 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置的最大無因次時間(tr_{max})為 0.7、0.84、0.70、0.714、0.73，並且將以上 5 個位置的 tr_{max} 代入式(4.58)。

可得到這 5 個位置所對應之 P 值分別為 5.49、11.413、5.49、5.83、6.25，在將 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置之 tr_{max} 及 P 值代入式(4.57)。可得這 5 個位置的 K 值分別為 0.835、0.916、0.835、0.84、0.85。本研究將 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置之 K 值、P 值及每個時間 t_i 所對應之 t_r 代入式(5.1)。可分別得到 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置之無因次濃度(C_r)與無因次時間(t_c)關係圖，(如圖 4-90 至圖 4-94 所示)。在式(4.56)中， $C(x,t)$

表示在距離注射井 BH02 為 x 公尺於現地污染傳輸試驗期間的最小背景濃度及導電度計偵測到最大 KCl 濃度值。

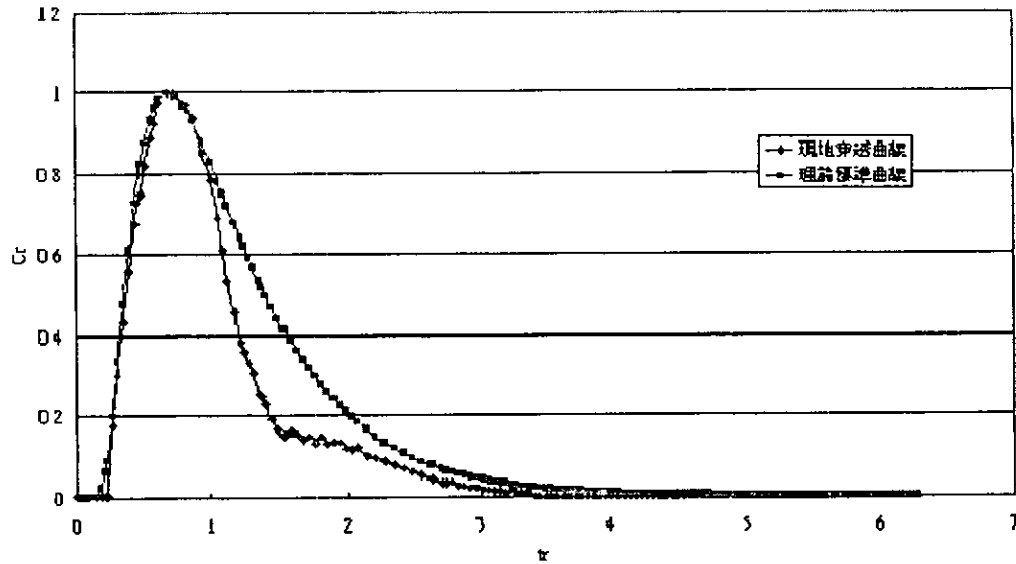


圖 4-90 10-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

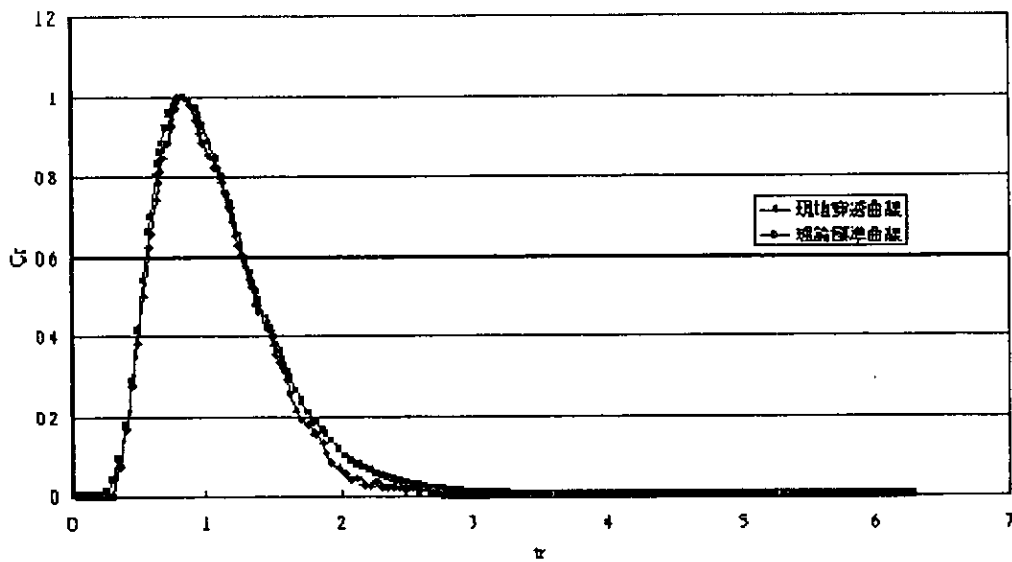


圖 4-91 10-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

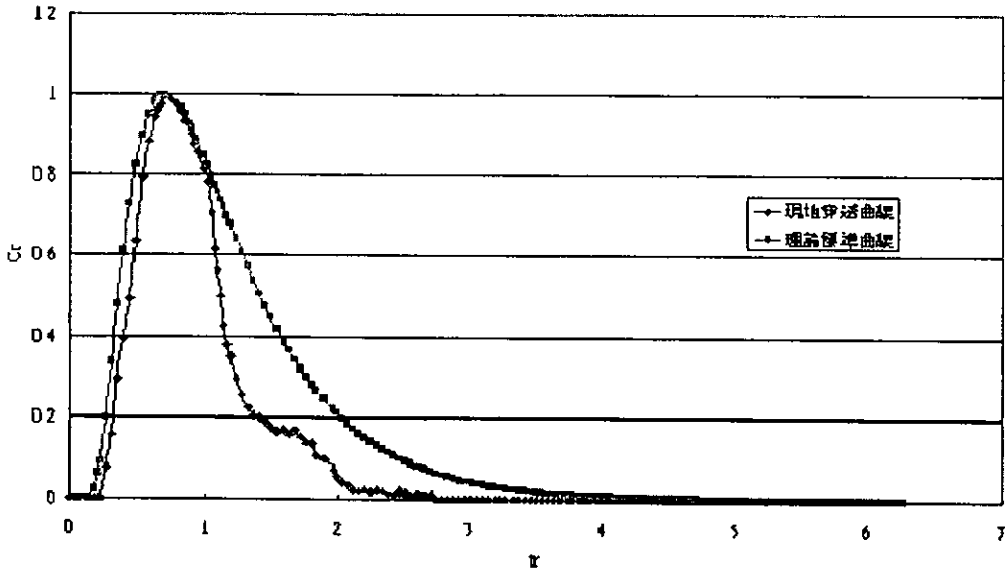


圖 4-92 10-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

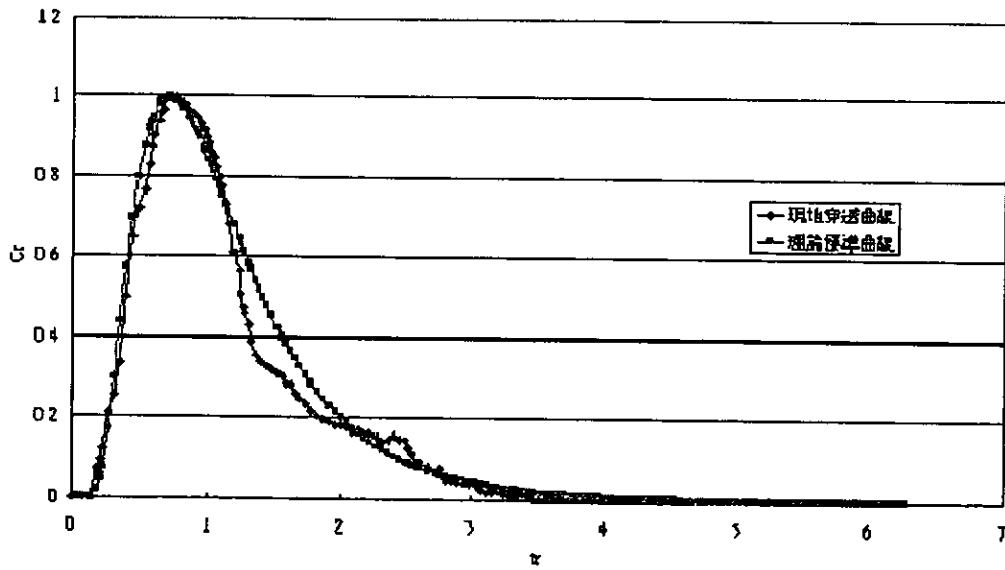


圖 4-93 10-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

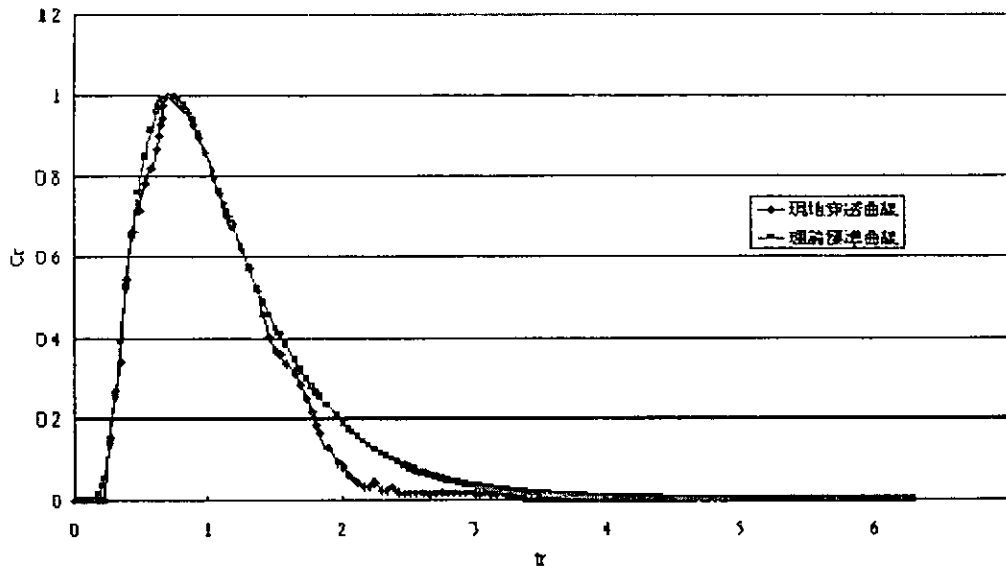


圖 4-94 10-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

在圖 4-90 至圖 4-94 中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。在圖 4-90 至圖 4-94 中，可知現地貫穿曲線與理論標準曲線相當接近。因此，可利用之前得到的 5 個位置之 P 值去推算於 10-1、10-2、10-3、10-4 及 10-5 位置之延散度(dispersivity)分別為 0.22m、0.106m、0.22m、0.207m、0.19m。

總合BH10觀測井中，5個不同深度的自記式導電度計所測出的濃度，取出平均值，繪製成圖4-95。其中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。可知BH10觀測井中由現地實驗數據所得之貫穿曲線與理論求的之標準曲線變化相當接近。因此可利用5個不同深度的自計式導電度計測量之平均濃度，推算此井的延散度(dispersivity)為0.1855m。

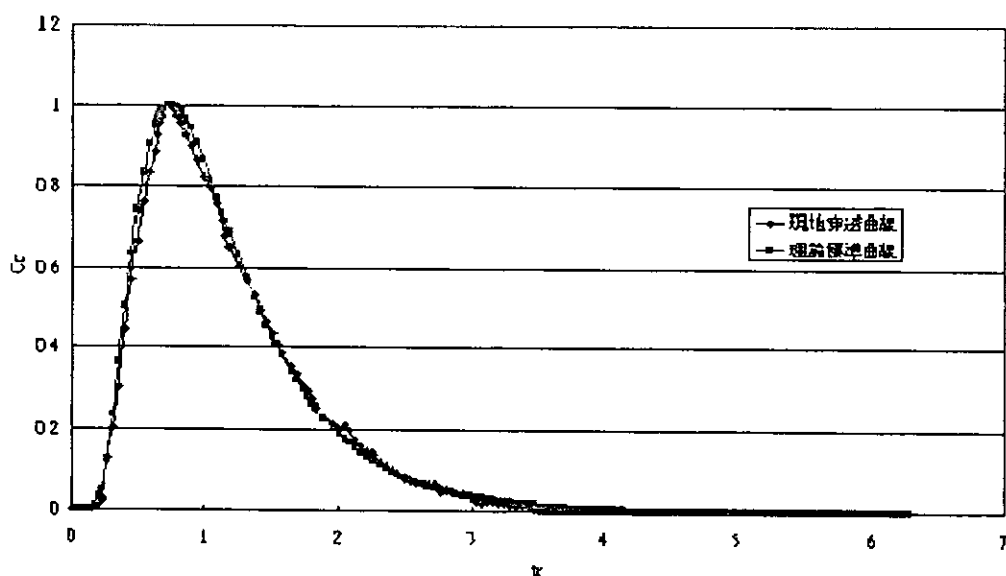


圖4-95 BH10觀測井平均濃度之現地貫透曲線與理論標準曲線比較圖

觀察注射井(BH02)與抽水井(BH11)間的觀測井BH04，BH04觀測井與BH02注射井之間距為4.228公尺，將以上這些條件代入式(4.59)可得 t_c 為16521 min。

若將每個紀錄的時間 t_i 除以 t_c ，可得無因次時間 t_r 。其中，在BH04觀測井之4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置的導電度計所量測到最大KCl污染物濃度所對應的時間分別為3620min、3630min、3620min、3680min及3600min。而4-1、4-2、4-3、4-4及4-5分別表示為觀測井BH04地面下4、8、12、16、20m處放置自製式導電度計深度之編號。

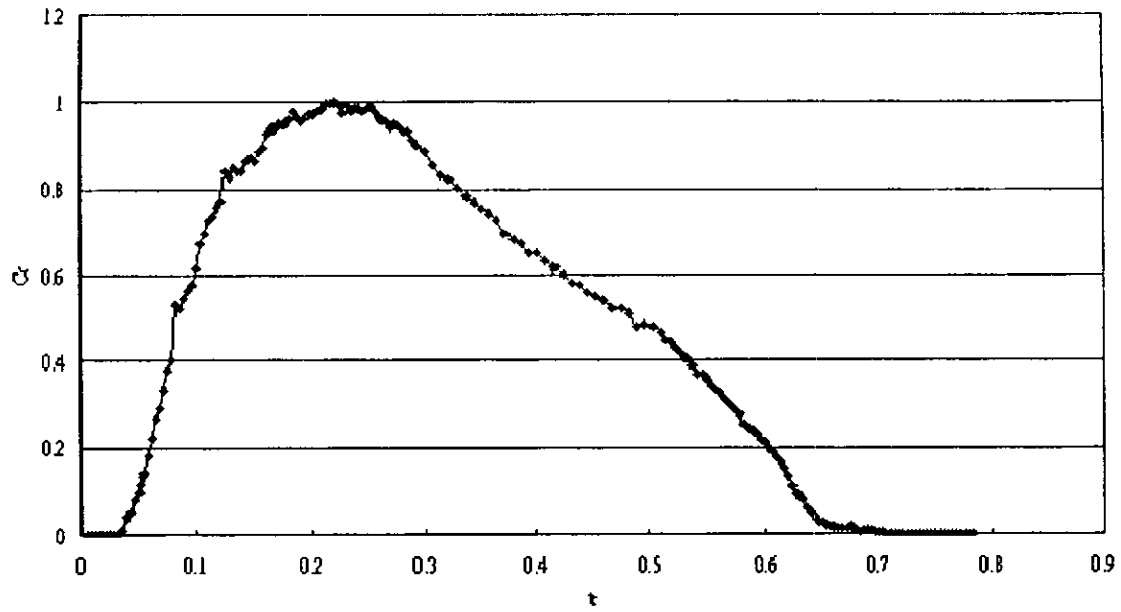


圖 4-96 在 4-1 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

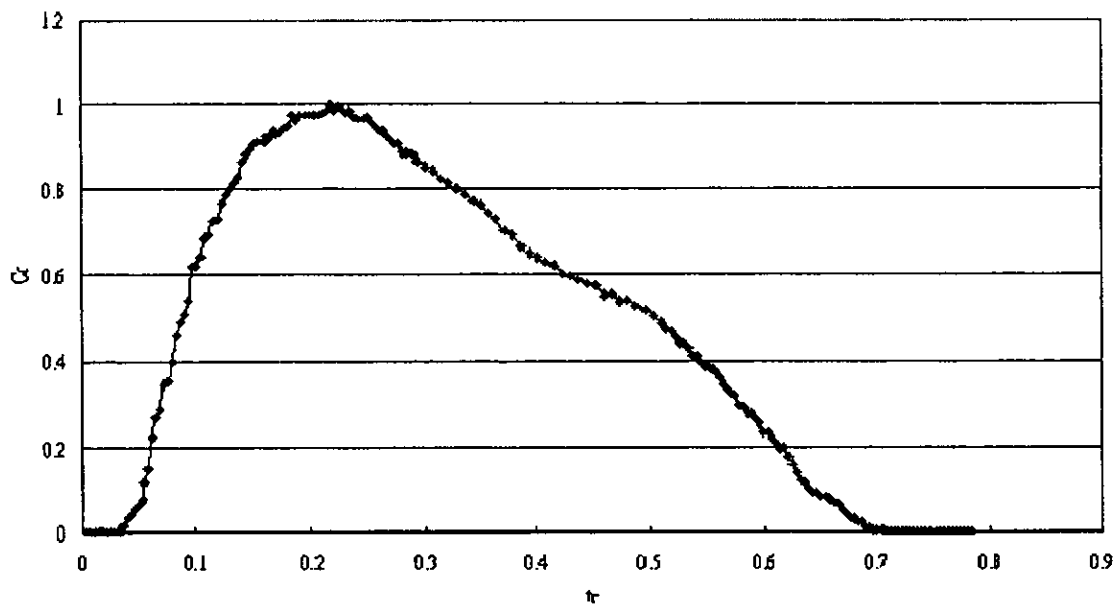


圖 4-97 在 4-2 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

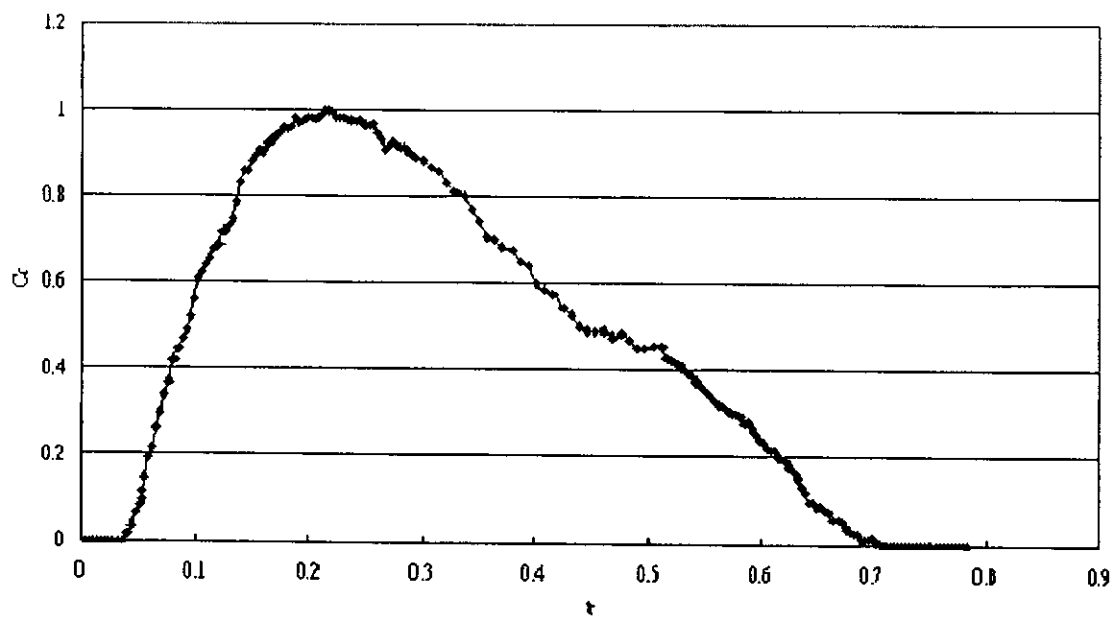


圖 4-98 在 4-3 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

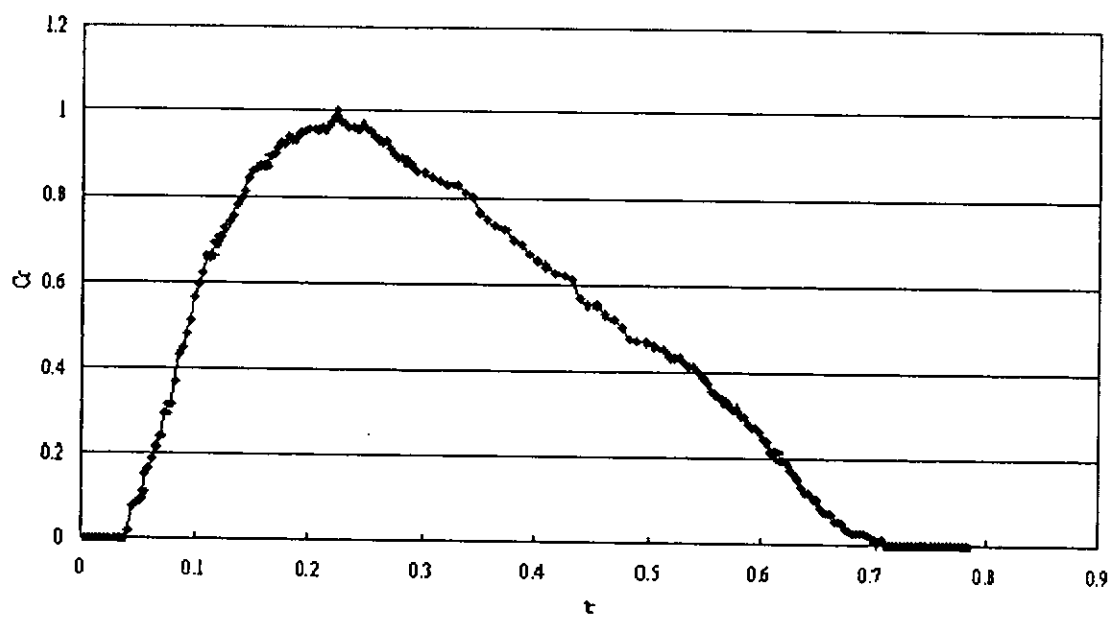


圖 4-99 在 4-4 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

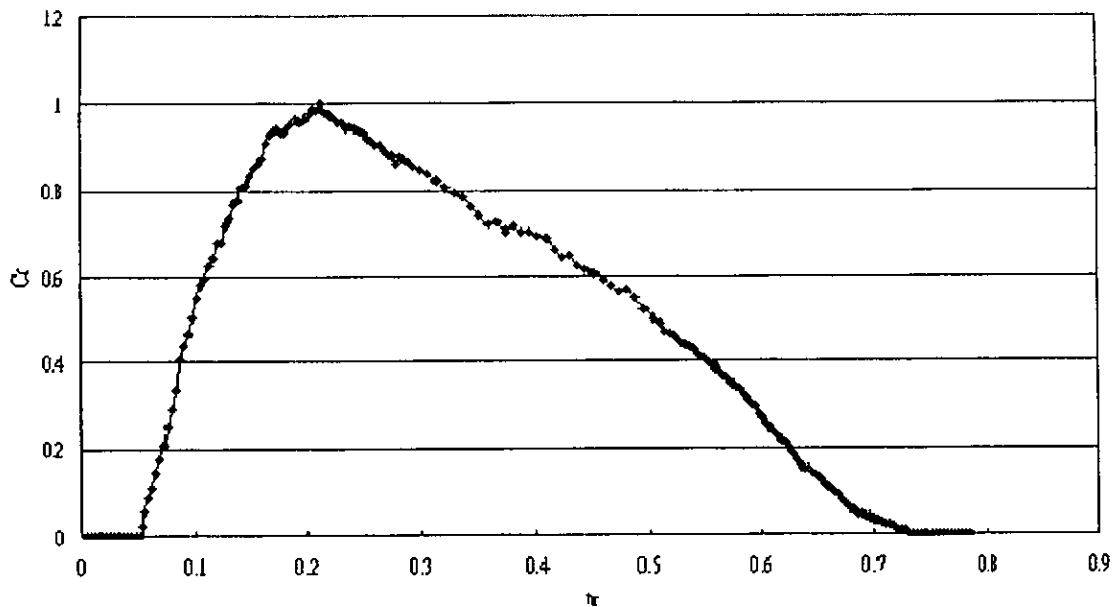


圖 4-100 在 4-5 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

在圖4-96至圖4-100中，橫軸表示現地污染傳輸試驗後累積的時間，單位為分鐘(min)，縱軸表示導電度計在現地量測的KCl濃度值，單位為ppm。在圖4-96至圖4-100中，可知4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置的導電度計量測KCl最大濃度所對應的時間，分別為4700min、3630min、3620min、3680min、3600min。將以上5個最大濃度對應的時間(t_{max})除以 t_c ，可分別得到4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置的最大無因次時間(tr_{max})為0.219、0.22、0.219、0.22、0.2179，並且將以上5個位置的 tr_{max} 代入式(4.58)。可得到這5個位置所對應之P值分別為0.92、0.9247、0.92、0.9375、0.915，再將4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置之 tr_{max} 及P值代入式(4.57)。可得這5個位置的K值分別為0.417、0.4164、0.4158、0.427、0.414。本研究將4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置之K值、P值及每個時間 t_i 所對應之 t_r 代入式(4.56)可分別得到4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置之無因次濃度(Cr)與無因次時間(t_c)關係圖，(如圖4-101至圖4-105

所示)。

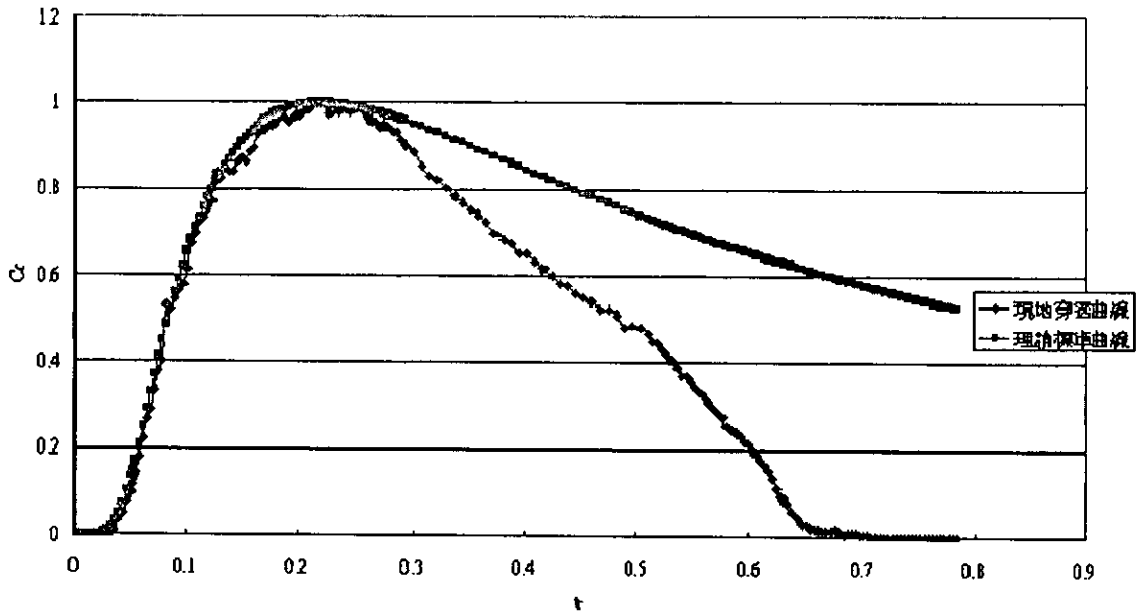


圖 4-101 4-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

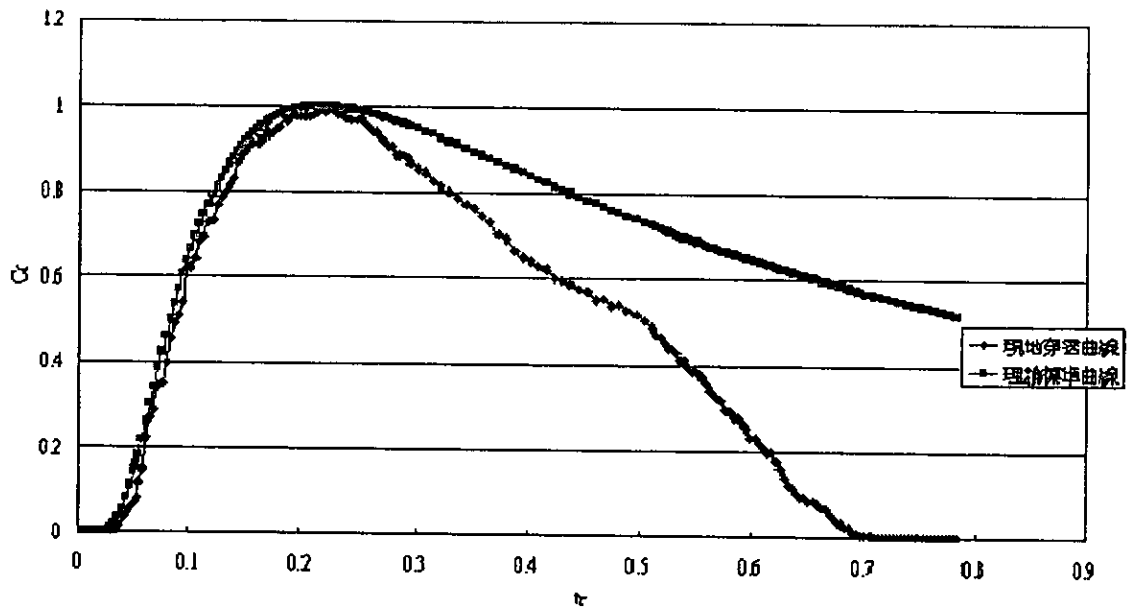


圖 4-102 4-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

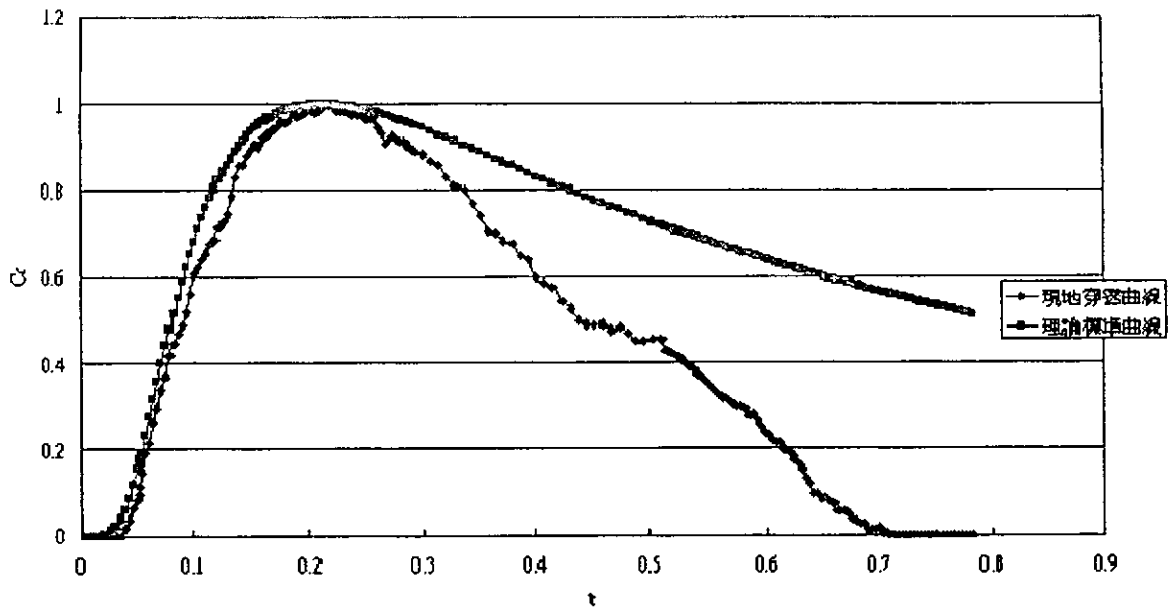


圖 4-103 4-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

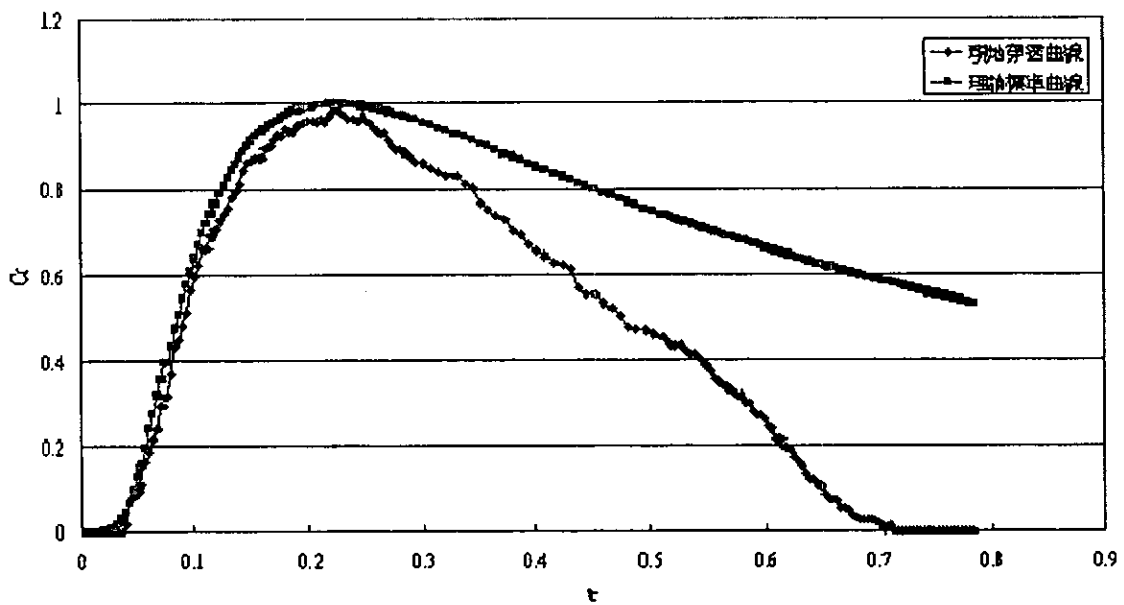


圖 4-104 4-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

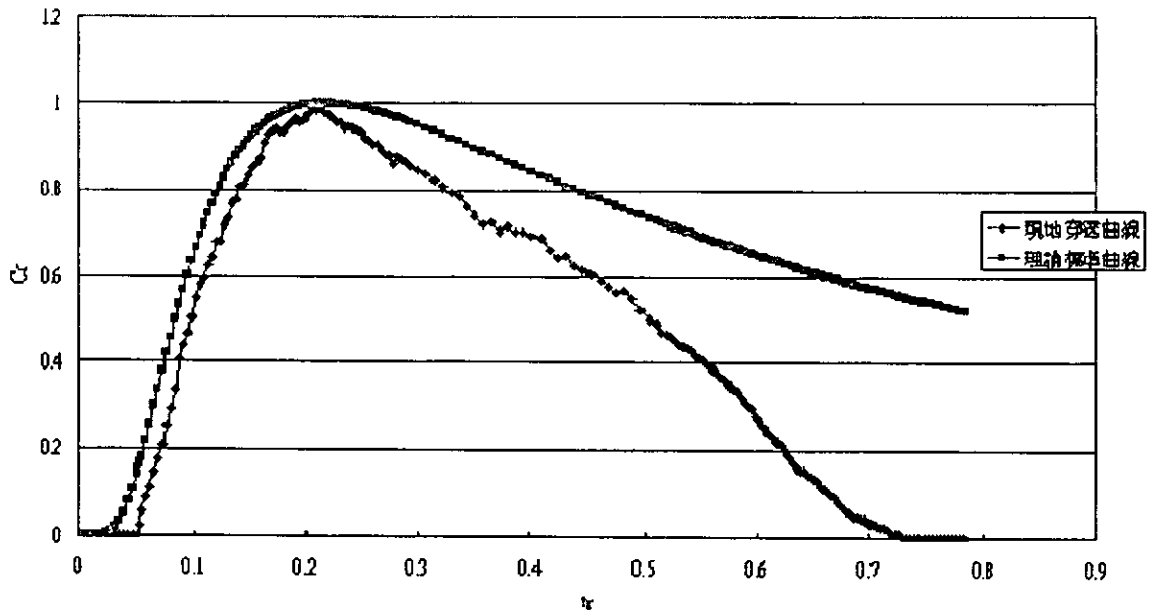


圖 4-105 4-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

在圖4-101至圖4-105中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。在圖4-101至圖4-105中，可知現地貫穿曲線與理論標準曲線相當接近。因此，可利用之前得到的5個位置之P值去推算於4-1、4-2、4-3、4-4及4-5位置之延散度(dispersivity)分別為4.57m、4.58m、4.59m、4.4m、4.62m。

總合BH04觀測井5個不同深度的自記式導電度計所測出的濃度，取出平均值，繪製成圖4-106。其中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。可知BH04觀測井中由現地實驗數據所得之貫穿曲線與理論求的之標準曲線變化相當接近。因此可利用5個不同深度的自計式導電度計測量之平均濃度，推算此井的延散度(dispersivity)為4.86m。

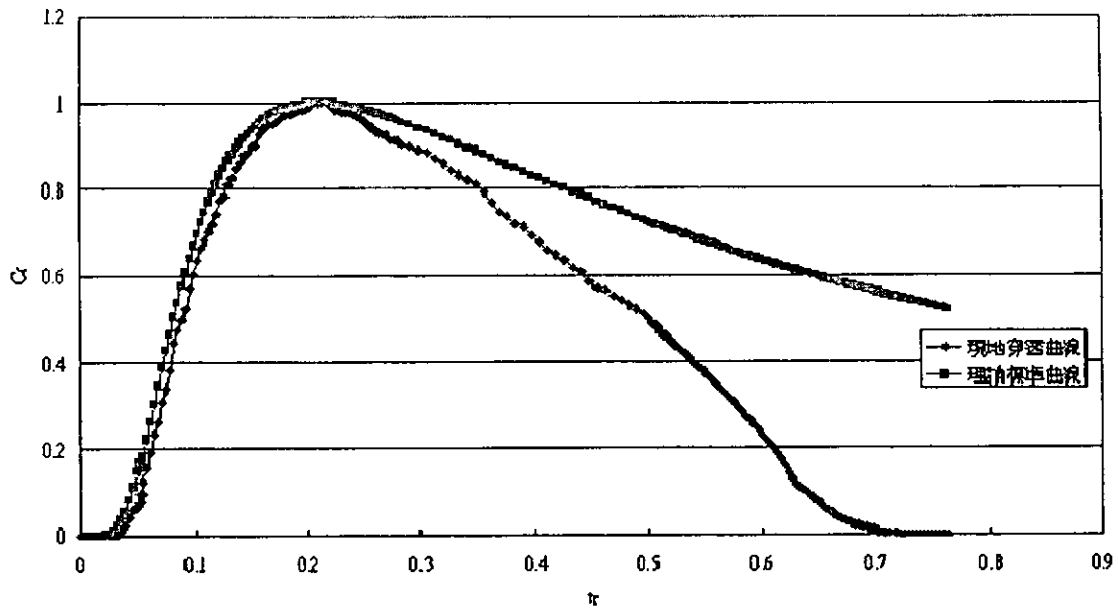


圖4-106 BH04觀測井平均濃度之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

觀察抽水井(BH11)，BH11抽水井與BH02注射井之間距為7.1公尺，代入式(4.59)可得 t_c 為46588 min。

若將每個紀錄的時間 t_i 除以 t_c ，可得無因次時間 τ_i 。其中，在BH11抽水井之11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置的導電度計所量測到最大KCl污染物濃度所對應的時間分別為5200min、5260min、5140min、5260min 及5140min。而11-1、11-2、11-3、11-4及11-5分別表示為BH11地面下9、11、14、17、20m處放置自製式導電度計深度之編號。



圖 4-107 在 11-1 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

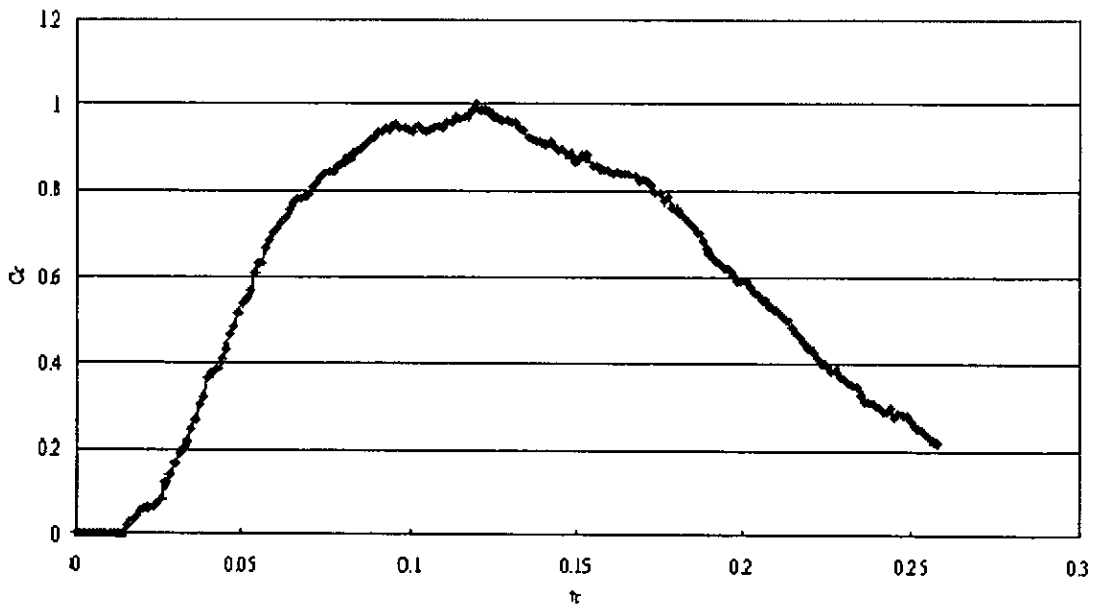


圖 4-108 在 11-2 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

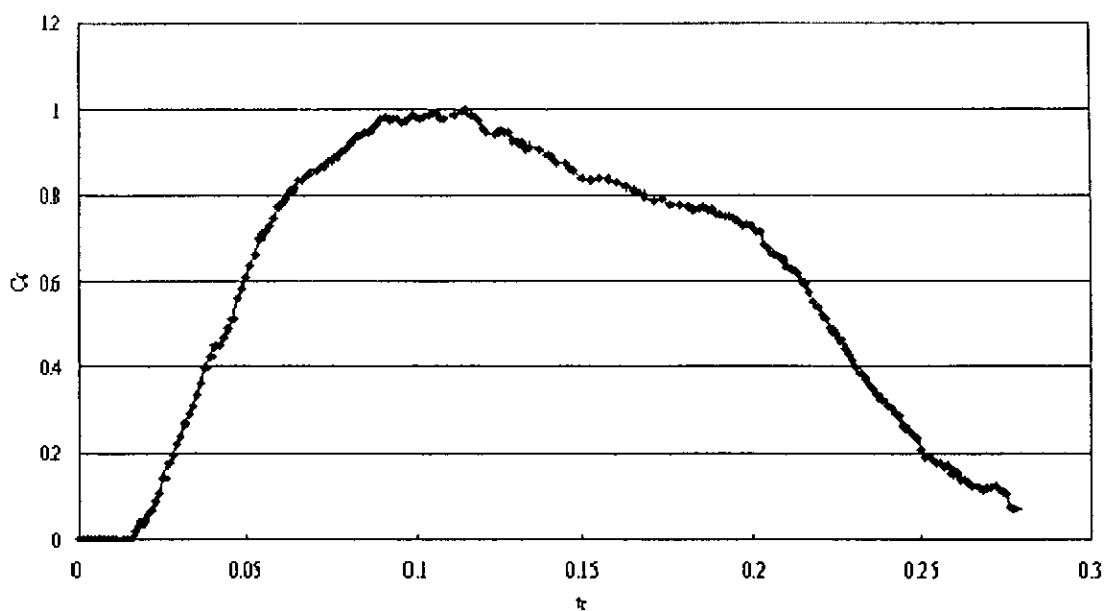


圖 4-109 在 11-3 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

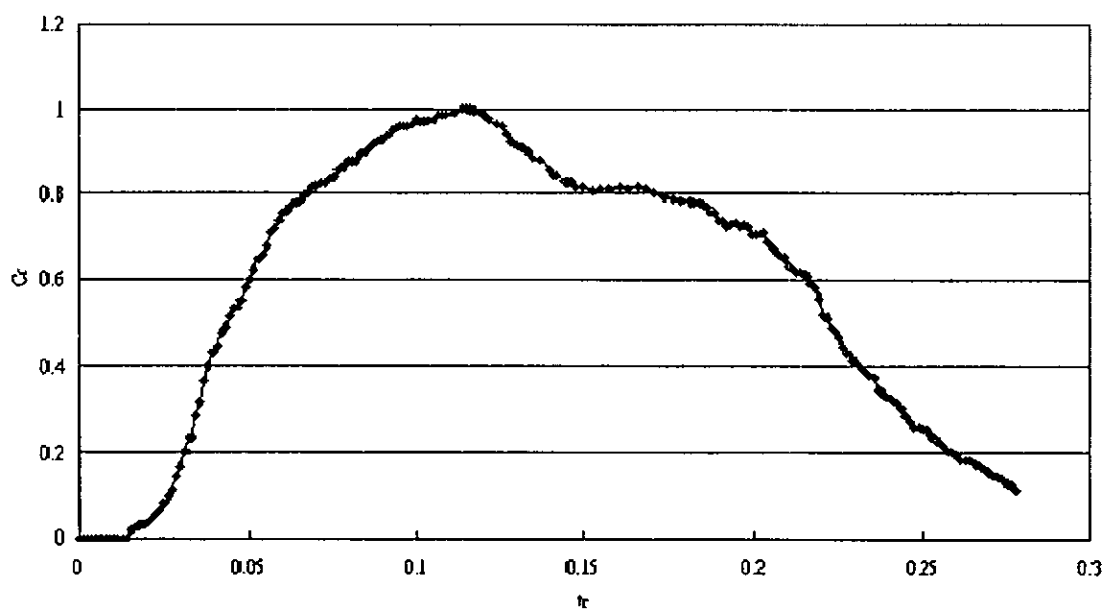


圖 4-110 在 11-4 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

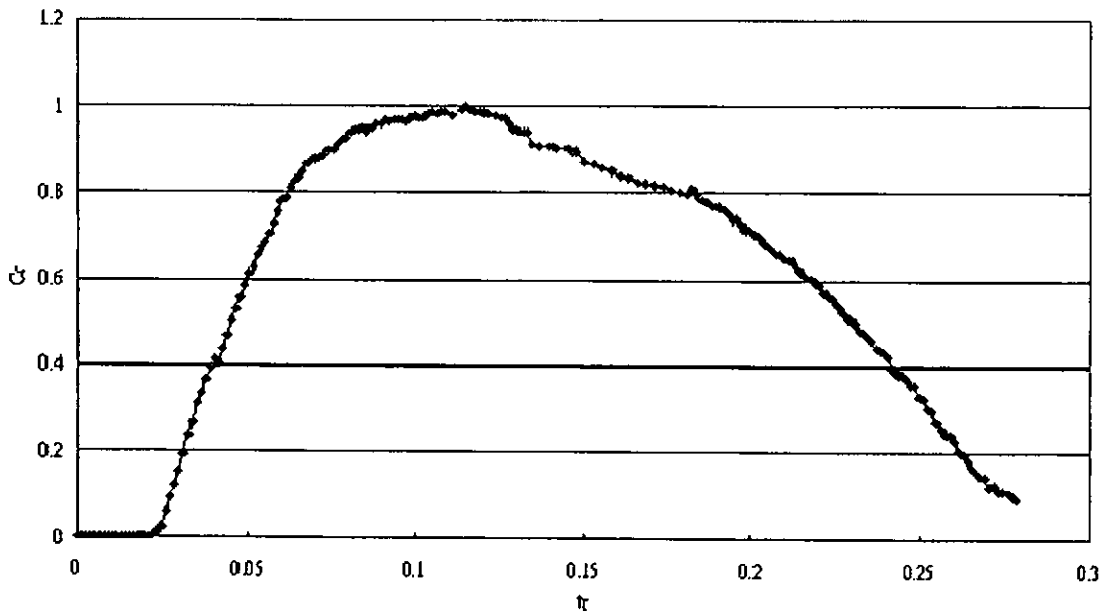


圖 4-111 在 11-5 位置之導電度計量測之 KCl 濃度變化歷線

在圖4-107至圖4-111中，橫軸表示現地污染傳輸試驗後累積的時間，單位為分鐘(min)，縱軸表示導電度計在現地量測的KCl濃度值，單位為ppm。在圖4-107至圖4-111中，可知11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置的導電度計量測KCl最大濃度所對應的時間，分別為5200min、5260min、5140min、5260min、5140min。將以上5個最大濃度對應的時間(t_{max})除以 t_c ，可分別得到11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置的最大無因次時間(tr_{max})為0.1116、0.1129、0.1103、0.1129、0.1103，並且將以上5個位置的 tr_{max} 代入式(4.58)。可得到這5個位置所對應之P值分別為0.452088、0.457431、0.446764、0.457431、0.4467，再將11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置之 tr_{max} 及P值代入式(4.57)。可得這5個位置的K值分別為0.24819、0.25、0.2458、0.25、0.2458。本研究將11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置之K值、P值及每個時間 t_i 所對應之 t_r 代入式(4.56)可分別得到11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置之無因次濃

度(C_r)與無因次時間(t_c)關係圖，(如圖4.112至圖4.111所示)。

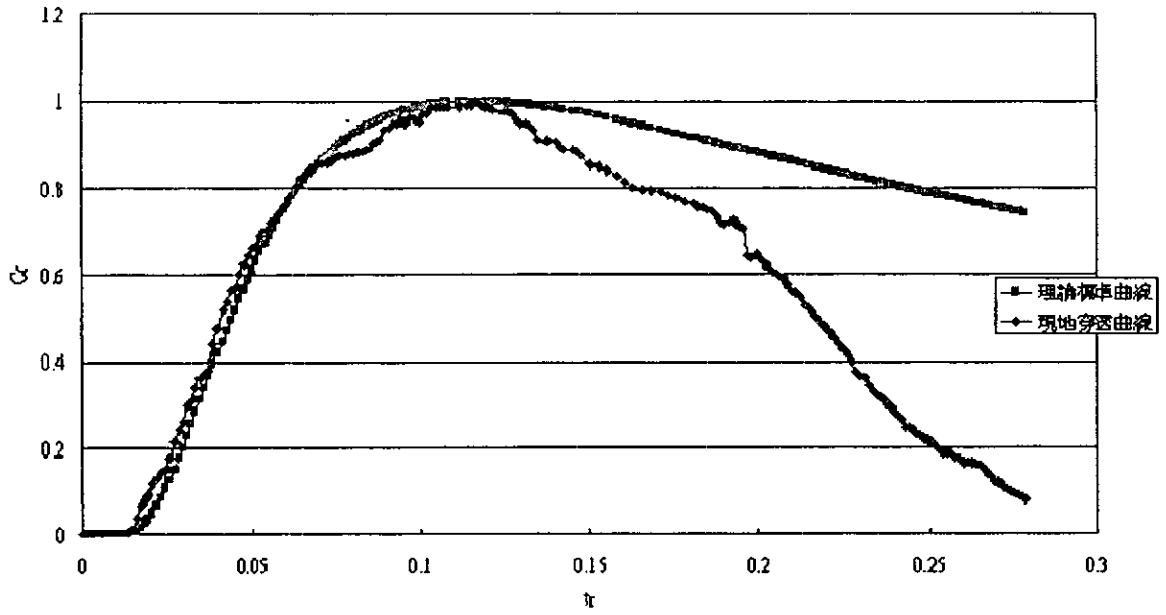


圖 4-112 11-1 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

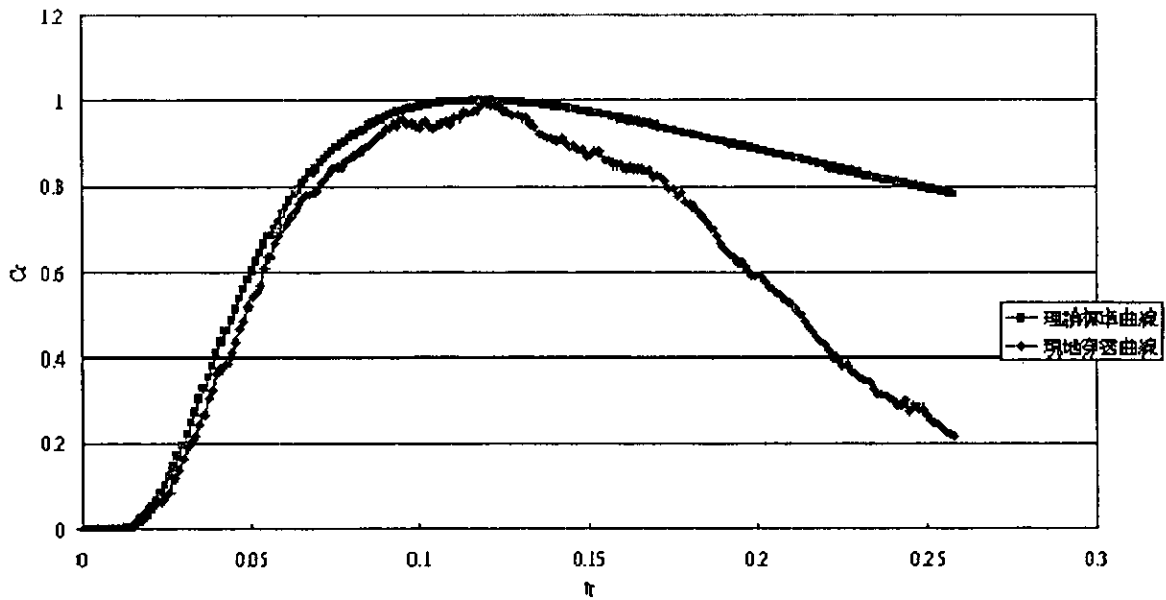


圖 4-113 11-2 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

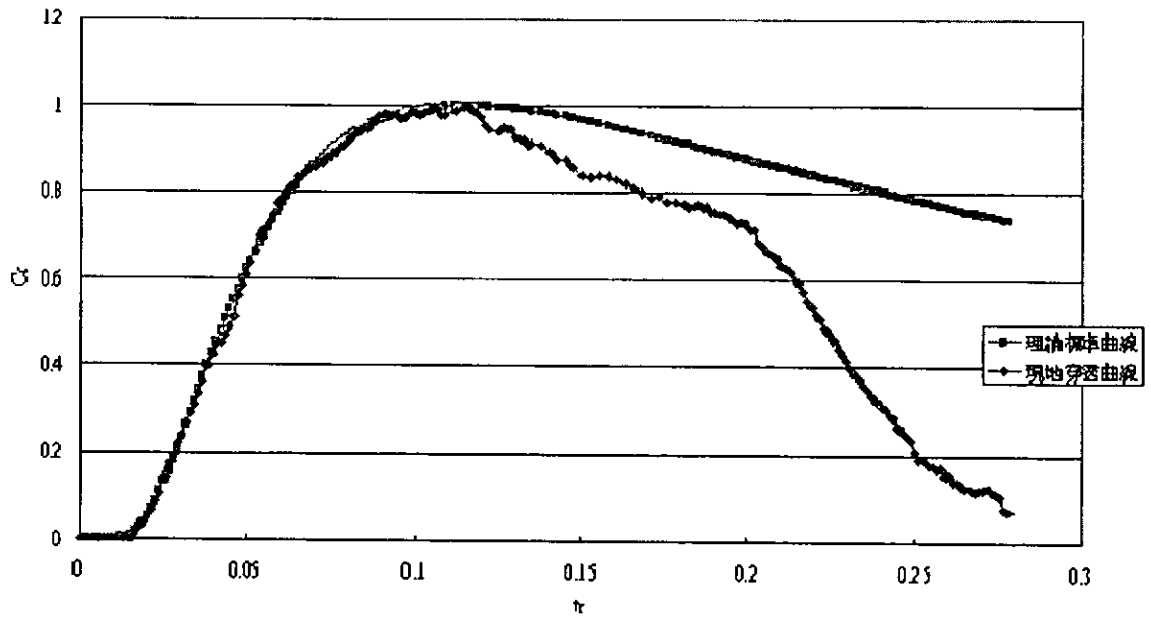


圖 4-114 11-3 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

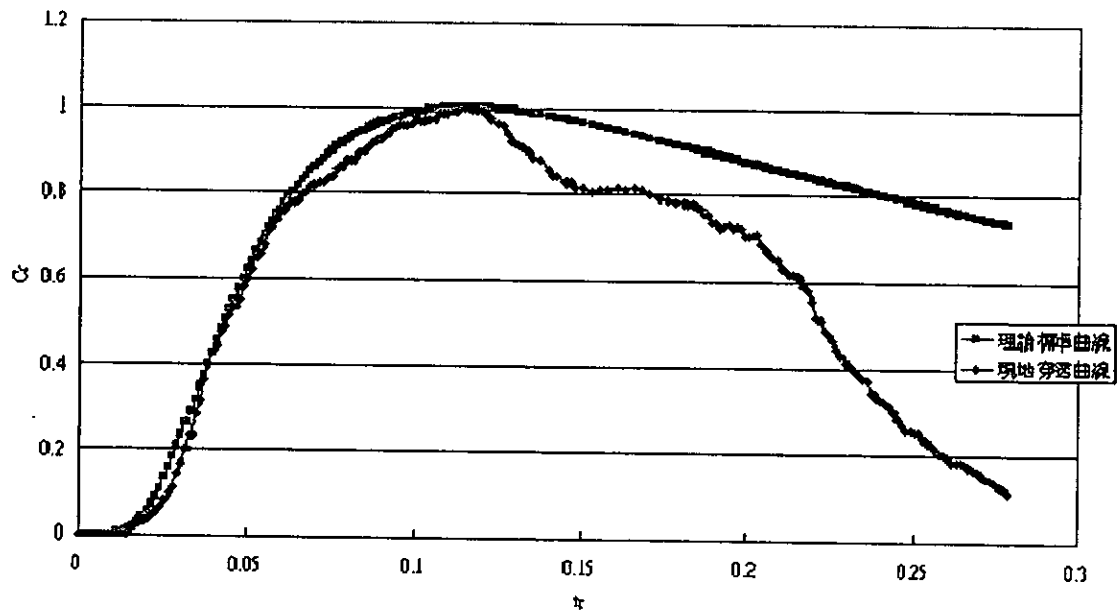


圖 4-115 11-4 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

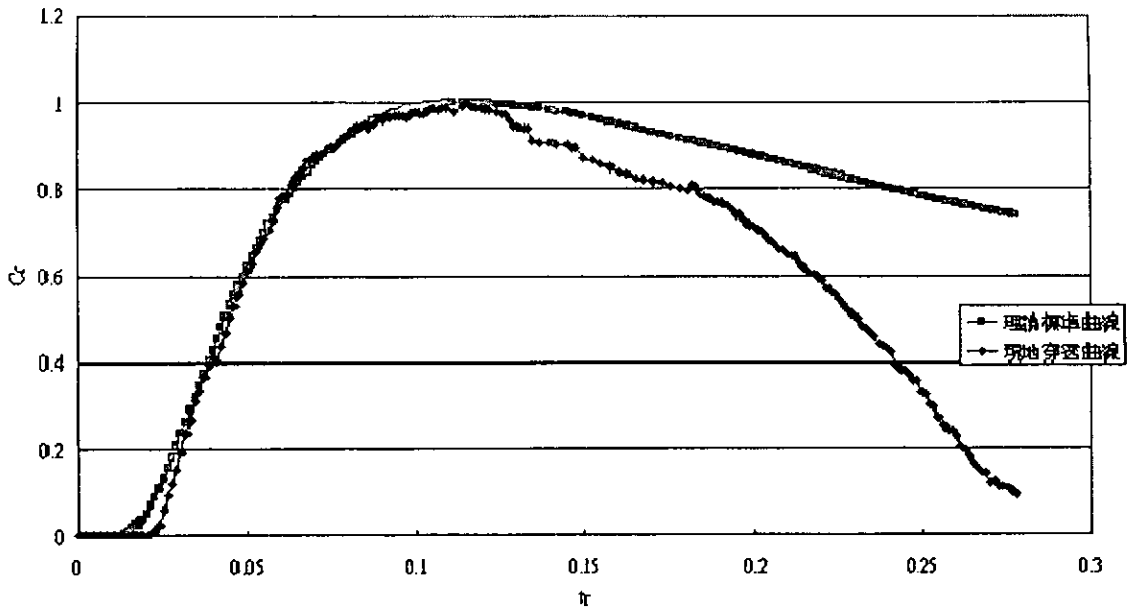


圖 4-116 11-5 位置之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

在圖4-112至圖4-116中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。在圖4-112至圖4-116中，可知現地貫穿曲線與理論標準曲線相當接近。因此，可利用之前得到的5個位置之P值去推算於11-1、11-2、11-3、11-4及11-5位置之延散度(dispersivity)分別為15.704m、15.52m、15.8927m、15.52m、15.8927m。

總合BH04觀測井5個不同深度的自記式導電度計所測出的濃度，取出平均值，繪製成圖4-117。其中，橫軸表示無因次時間(t_c)，縱軸表示無因次濃度 C_r 。可知BH11觀測井中由現地實驗數據所得之貫穿曲線與理論求的之標準曲線變化相當接近。因此可利用5個不同深度的自計式導電度計測量之平均濃度，推算此井的延散度(dispersivity)為15.8927m。

本研究將距離注射井BH02為1.206公尺、4.228公尺及7.100公尺的BH10、BH04及BH11觀測井在5個距離地表不同深度的延散度平均值進行線性迴歸分析，可得圖4-118及延散度與延散尺度關

係式為 $y = 2.6549x - 4.1136$ ，其中 y 表示延散度，單位為公尺， x 表示延散尺度，單位為公尺。

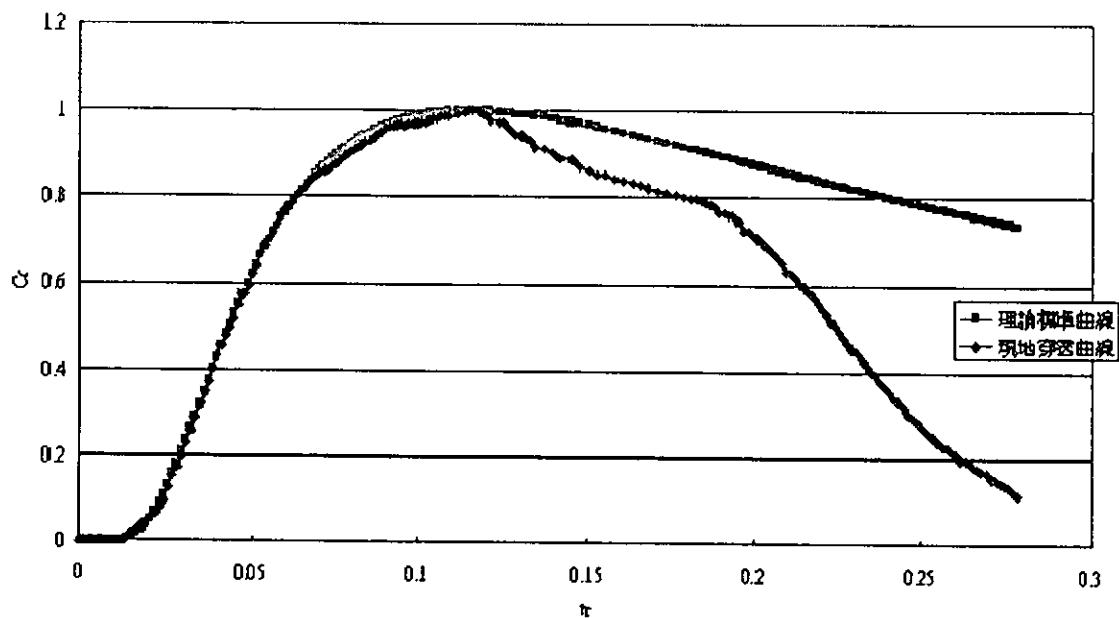


圖4-117 BH11觀測井平均濃度之現地貫穿曲線與理論標準曲線比較圖

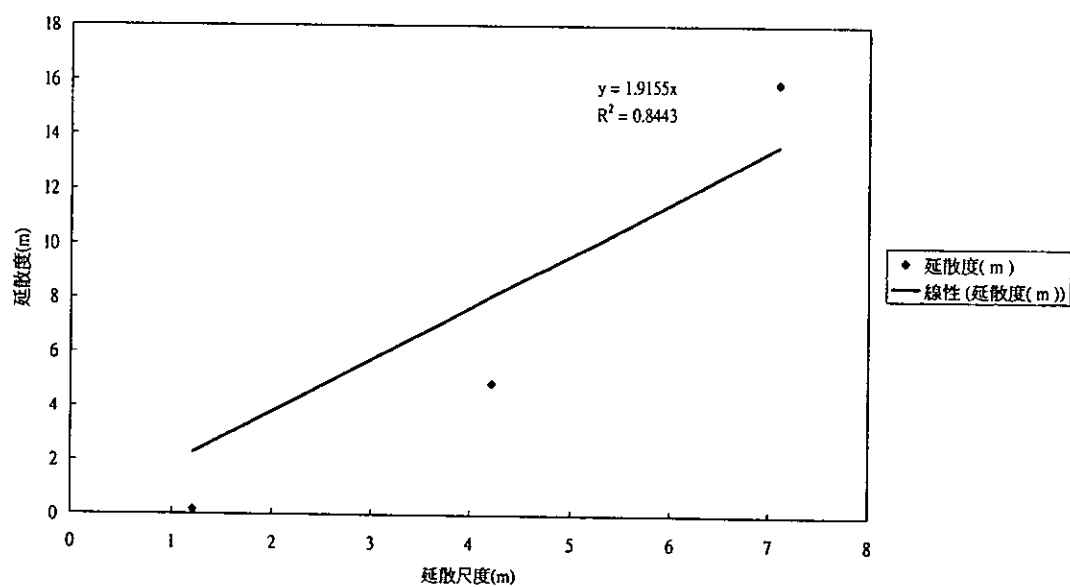


圖 4-118 延散度與延散尺度關係圖

經過式(4.60)及式(4.61)計算可得知，觀測井 BH02、BH10、BH04 及 BH11 大部分的遲滯係數都非常接近 1。

結論

- 1、本研究將距離注射井 BH02 分別為 1.206 公尺、4.228 公尺及 7.100 公尺的 BH10、BH04 及 BH11 觀測井在 5 個距離地表不同深度的延散度平均值進行線性迴歸分析，可得延散度與延散尺度關係式為 $y = 2.6549x - 4.1136$ ，其中 y 表示延散度，單位為公尺， x 表示延散尺度，單位為公尺。
- 2、經過現地的污染傳輸試驗，可得觀測井 BH02、BH10、BH04 及 BH11 大部分的遲滯係數都非常接近 1。

第五章 地下水質量傳輸模式之應用

第參章中，已定量與定性地測試與驗證本研究所建立地下水質量傳輸模式之正確性。本章進一步將模式應用於現地模擬，包括第一年相關水文地質參數試驗資料之分析，以及國外地下水污染傳輸案例。

一、第一年相關水文地質參數試驗資料之分析

為分析第一年相關水文地質參數試驗資料，將本研究所建立地下水質量傳輸模式，配合洩降試驗資料，進行反向推算(inverse problem)試驗場址之水力傳導係數分佈，以分析上年度試驗資料之合理性。

試驗場地與試驗結果概述

雲林科技大學的地下水位監測井場址位於雲林縣斗六市大學路3段123號雲林科技大學校園中。此監測井場址所處地勢略呈東北高西南低走向，場址周圍種植大樹，樹高5~6米，呈不規則排列，場址北邊正對斗六市大學路，南邊為校區，東邊面對台三線，西邊則為校門口，共有八口監測井與一口抽水井，校園監測井位置圖，如圖5-1所示。校園場址監測井二度分帶座標圖，如圖5-2所示。

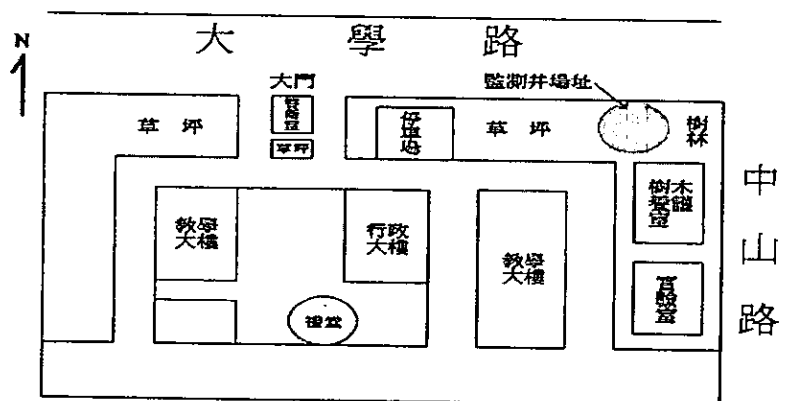


圖 5-1 雲林科技大學校園監測井位置圖

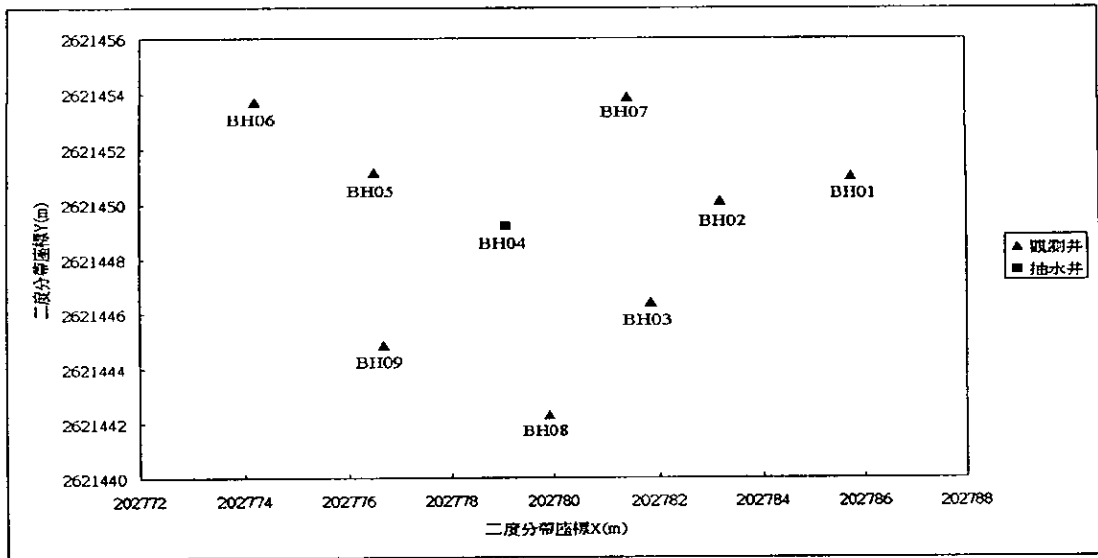
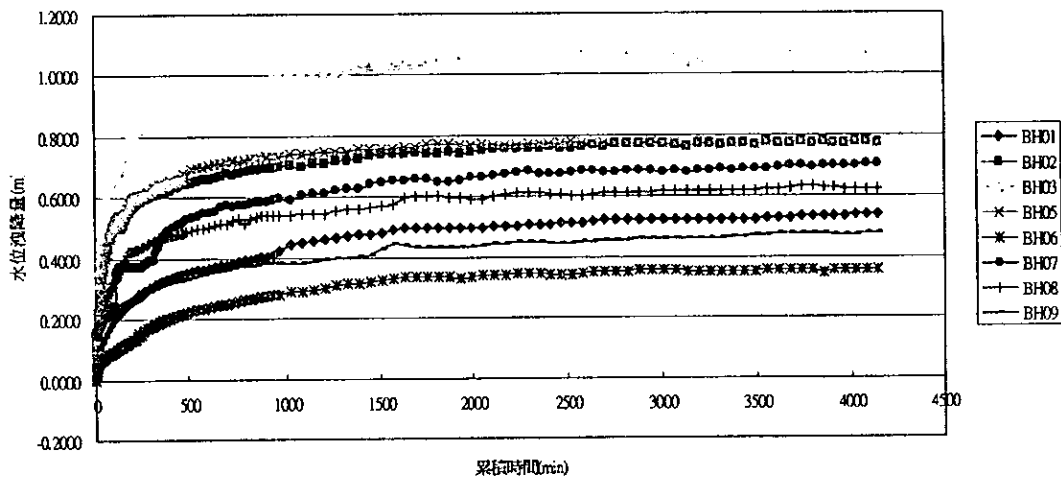


圖 5-2 雲林科技大學校園場址監測井二度分帶座標圖

本計畫上年度在雲林科技大學的試驗場址內，進行五次抽水試驗，一次回水試驗與三次微水試驗。並以最小二乘法，分析穩態及非穩態試驗資料，以建立試驗場址之相關水文地質參數。其中，各次抽水試驗，各監測井之洩降與時間關係圖，如圖 5-3 所示。另外，五次抽水試驗之最終水位洩降，如表 5-1 所示。推求結果顯示，試驗場址之水力傳導係數，介於 $1.6E-6 \sim 8.3E-6$ m/s 之間。

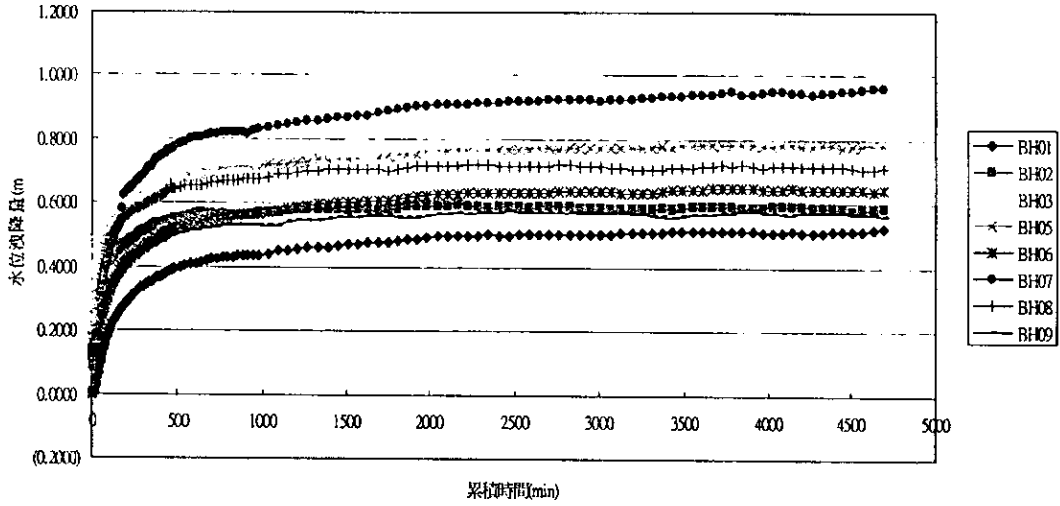
第一次

第一次抽水試驗觀測井水位洩降圖



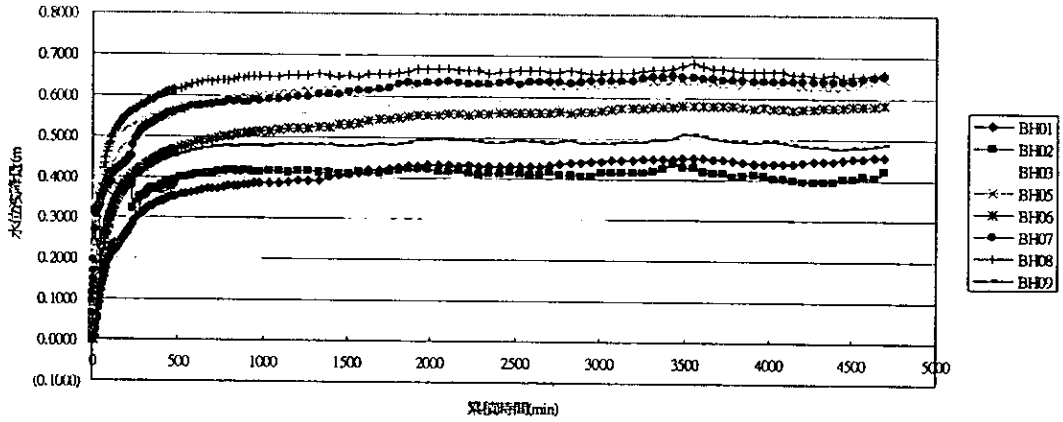
第二次

第二次抽水試驗觀測井水位洩降圖



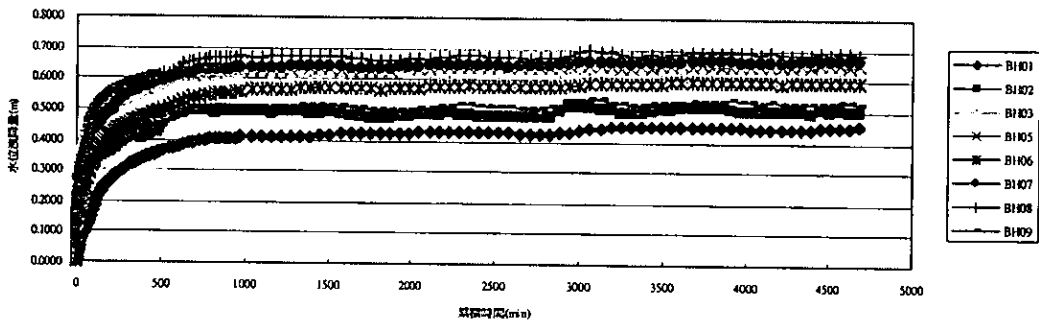
第三次

第三次抽水試驗觀測井水位洩降圖



第四次

第四次抽水試驗觀測井水位洩降圖



第五次

第五次抽水試驗觀測井水位洩降圖

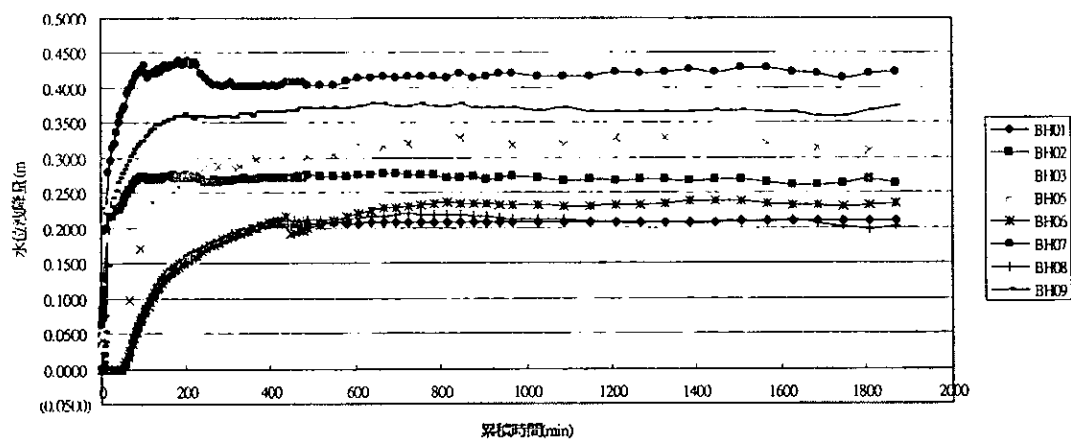


圖 5-3 各次抽水試驗監測井水位洩降圖

表 5-1 抽水試驗結果簡表

| | 平均抽水 水量 (L/s) | 總抽水 時間 (min) | 監測井 BH01 最終洩 降(m) | 監測井 BH02 最終洩 降(m) | 監測井 BH03 最終洩 降(m) | 抽水井 BH04 最終洩 降(m) | 監測井 BH05 最終洩 降(m) | 監測井 BH06 最終洩 降(m) | 監測井 BH07 最終洩 降(m) | 監測井 BH08 最終洩 降(m) | 監測井 BH09 最終洩 降(m) |
|-----------------|---------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 第一次 抽水試 驗 | 0.196 | 4148 | 0.5370 | 0.7712 | 1.0629 | 6.9556 | 0.7712 | 0.3573 | 0.7060 | 0.6235 | 0.4750 |
| 第二次 抽水試 驗 | 0.189 | 4688 | 0.5210 | 0.5843 | 0.7171 | 7.1678 | 0.7845 | 0.6440 | 0.9596 | 0.7090 | 0.5620 |
| 第三次 抽水試 驗 | 0.176 | 4688 | 0.4560 | 0.4210 | 0.5890 | 7.7690 | 0.6460 | 0.5831 | 0.6520 | 0.6598 | 0.4870 |
| 第四次 抽水試 驗 | 0.174 | 4688 | 0.4515 | 0.4990 | 0.6020 | 7.5530 | 0.6520 | 0.5970 | 0.6640 | 0.6867 | 0.5257 |
| 第五次 抽水試 驗 | 0.09 | 1868 | 0.2100 | 0.2620 | 0.3430 | 3.9620 | 0.3090 | 0.2350 | 0.4230 | 0.2010 | 0.3740 |

試誤法分析

在進行水力係數反向推估前，需先分析試驗結果之合理性。首先，根據表 5-1 可得知，第五次抽水試驗之抽水量與抽水時間，遠小於其餘四次。為恐影響反向推估之精確度，暫不採用第五次抽水試驗資料。此外，分別將五次抽水試驗，各監測井之最終水位洩降量大小加以排序，如表 5-2 所示。吾人可發現，除第三次試驗與第四次試驗之排序極為相似外(僅 BH01 及 BH02 順序相反)，其餘三次試驗之排序差異甚大。因為第二次試驗資料之排序較第一次試驗資料接近第四次試驗資料，而第三次試驗資料之抽水量又與第四次試驗資料太接近，可能區別性不夠。因此本研究擬採用第四次試驗資料率定(calibration)試驗場址之水力傳導係數，再應用第二次試驗資料驗證(verification)結果。

表 5-2 監測井洩降排序

| | 監測井 BH01 序位 | 監測井 BH02 序位 | 監測井 BH03 序位 | 監測井 BH05 序位 | 監測井 BH06 序位 | 監測井 BH07 序位 | 監測井 BH08 序位 | 監測井 BH09 序位 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 第一次抽水試驗 | 6 | 2 | 1 | 2 | 8 | 4 | 5 | 7 |
| 第二次抽水試驗 | 8 | 6 | 3 | 2 | 5 | 1 | 4 | 7 |
| 第三次抽水試驗 | 7 | 8 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 6 |
| 第四次抽水試驗 | 8 | 7 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 6 |
| 第五次抽水試驗 | 7 | 5 | 3 | 4 | 6 | 1 | 8 | 2 |

配合試驗場址之相關位置，如圖 5-1 所示。選擇長 17 公尺，寬 18 公尺之區域加以模擬，網格大小為 1 公尺×1 公尺，如圖 5-4 所示。此外，由於試驗中，沒有明確地指出試驗場址之邊界條件型態與相對應之物理量大小，因此模擬時，以各監測井之洩降量，利用克力金法(Krigin Method)推求每一時刻邊界之水頭值，作為模擬之邊界條件。

為避免抽水井附近水位可能之局部異常變化，外插時僅採用除抽水井外之 8 口監測井洩降水位資料。模擬時，時間間距為 300 分鐘，總抽水時間為 4500 分鐘；地質條件如上年度報告所描述，並忽略蒸發散量。在試誤法的過程中，以上年度所推估之水力傳導係數作為首次猜值，再逐步修正直到模式可以合理模擬出抽水試驗，計算流程圖如圖 5-5 所示。率定所得之水力傳導係數分佈圖如圖 5-6 所示，水力傳導係數介於 $1 \times 10^{-5} \text{ m/min} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ 之間，率定所得之洩降量與洩降試驗結果如圖 5-7 所示。將率定之水力傳導係數，帶入第二次抽水試驗中模擬，所得之洩降模擬結果與試驗結果如圖 5-8 所示。

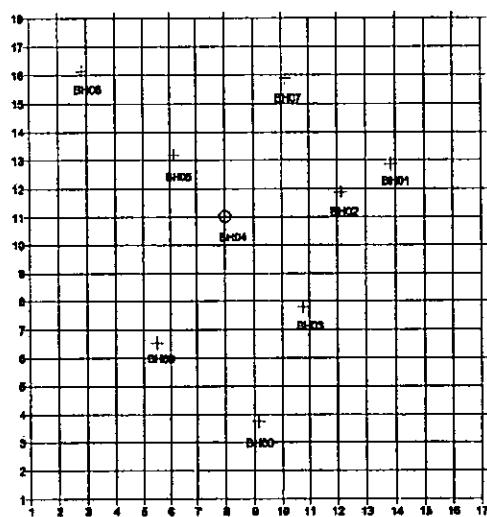


圖 5-4 試驗場地網格分布

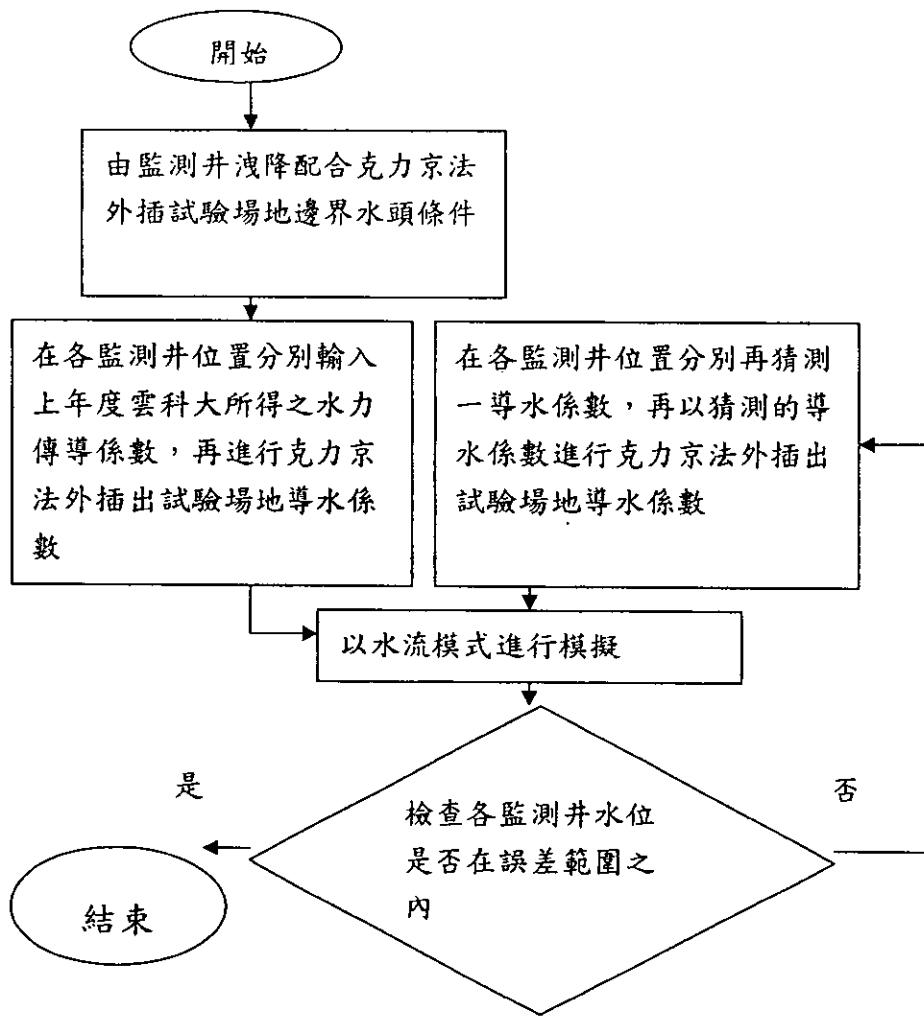


圖 5-5 反向推估計算流程

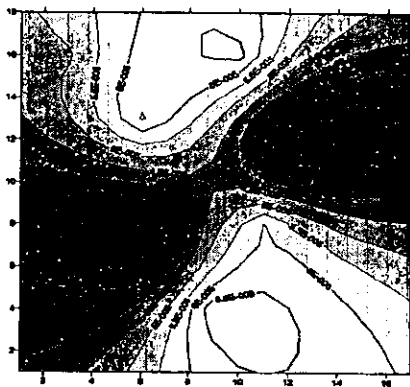
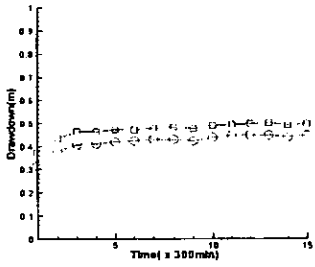


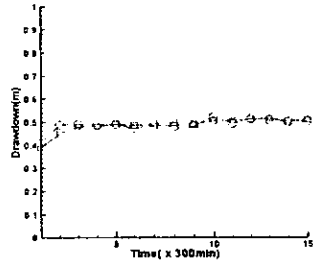
圖 5-6 水力傳導係數分布

□ 模式 ○ 試驗

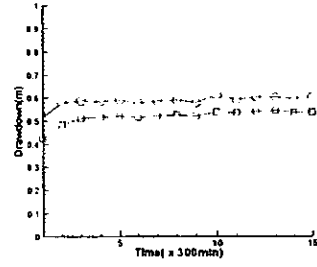
BH01



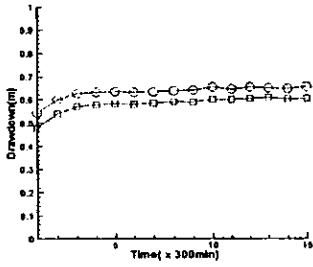
BH02



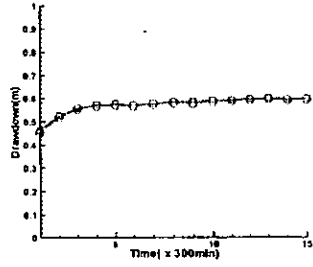
BH03



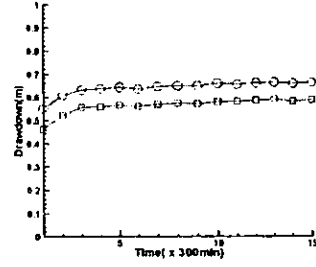
BH05



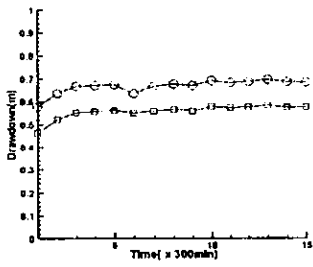
BH06



BH07



BH08



BH09

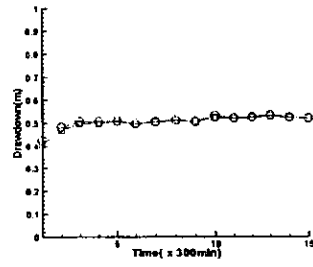


圖 5-7 模式率定與抽水試驗結果 (第四次抽水試驗)

□ 模式 ○ 試驗

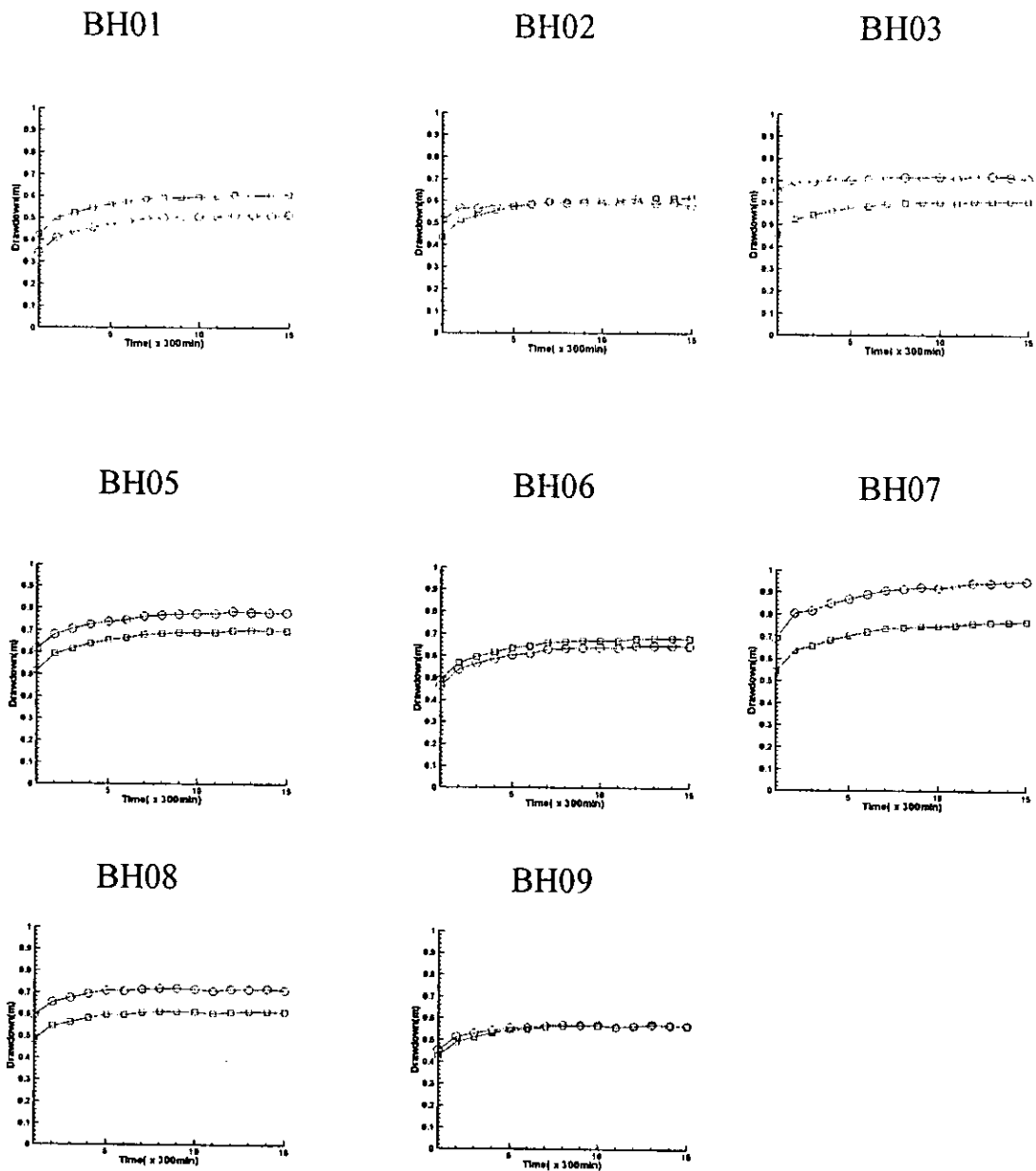


圖 5-8 模式驗證與抽水試驗結果(第四次抽水試驗)

結果彙整

1. 由圖 5-7 及 5-8 可知，水流模式可合理地模擬雲林科技大學所執行的抽水試驗，包含模擬監測井隨時間的洩降趨勢與大小。

2. 試誤法不需做均質，等向性等假設(見圖 5-6，導水係數顯然就不是均質分布)，使用上的彈性較大，且繼續進行試誤法逼近，結果精度亦可提高。
3. 在進行模擬時，發現水流模式對於導水係數的分佈及大小十分敏感，光是以人力很難得到理想之解，如有良好之演算法或程式可使此試誤法有更佳表現。
4. 克利金法外插對於無明確邊界之現地試驗可提供足夠良好的邊界條件。

二、 國外試驗案例應用模擬

為了將模式實際應用於現地地下水質量傳輸試驗狀況，本研究選用 Yeh et al. (1995)所提出之試驗。Yeh et al. (1995)為了瞭解自然有機物(Natural Organic Material, NOM)在地下水之傳輸機制，於 1992 年在南卡羅萊那(South Carolina)州的喬治城(George Town)試驗場地分別於五月及八月共執行了兩場試驗。試驗之目的為了描述有機物質之傳輸機制，因此，第一場試驗選用非有機物(氯化鉀 KCl)，以先瞭解非有機物質之傳輸機制，第二場試驗所選用的則為自然有機物(NOM)。本研究選用第一次試驗之資料與結果及 Yeh et al. (1995)以 MMOC3 模式模擬之結果比對驗證。

現地試驗(1992 May)

此次試驗為雙井強制流動之非有機物質傳輸試驗，試驗場地如圖 5-9 所示，長 9m、寬 7m，土層厚度 1.5m，場地中共有 28 口觀測井以及一口抽水井及一口注水井，抽水井與注入井的距離 5 公尺，土層之組成非均質砂質含水層(sandy aquifer)，水力傳導係數係經由 308 次微水試驗(slug test)並分別套用 Cooper et al. (1967)以及 Hvorslev's (1951) 之方法決定。本次模擬採用 Hvorslev's (1951)所推導出之結果。試驗所使用的溶質為氯化鉀(KCl)，地下水之背景濃度為 11

mg/L。試驗開始時注入平均濃度約為 230 mg/L 之氯化鉀溶液，注入速率為 3.78L/min，注入時間為 16 小時，總試驗時間為 12 天。開始試驗後每 2 小時取樣一次。

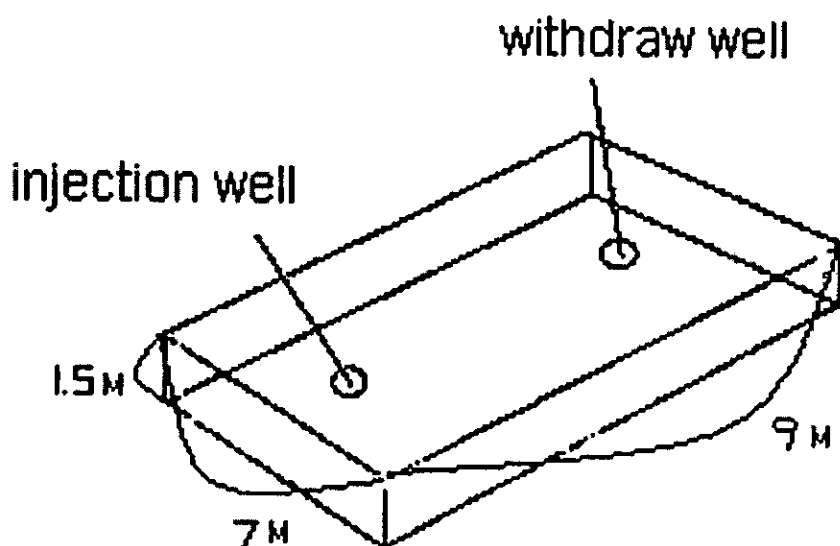


圖 5-9 試驗場地示意圖

MMOC3 模式模擬

Yeh et al. (1995)採用 MMOC3 模式以模擬試驗水流及質量傳輸現象，模擬的區域大小為(9 m× 7m × 1.5 m)，模擬之時距(time step)為 3 分鐘，水流條件為穩定流(steady flow)。土層之頂部與底部所設定之水流邊界為不透水邊界(no flux condition)，側邊之水流邊界採用定水頭(constant head)邊界，水頭值先採用泰斯解(Theis' solution)求取，而後微調至與試驗狀況大致相符時所獲得之抽水井與注水井水頭差為 2.57m(使用 Hvorslev's method)以及 1.95m(使用 Coopers method)。試驗

場地之三維非均質水力傳導係數分布如圖 5-10 所示，推算之水頭分布如圖 5-11 所示，由水頭分布可看出試驗場地之水流狀況為單向流 (unidirection flow)。

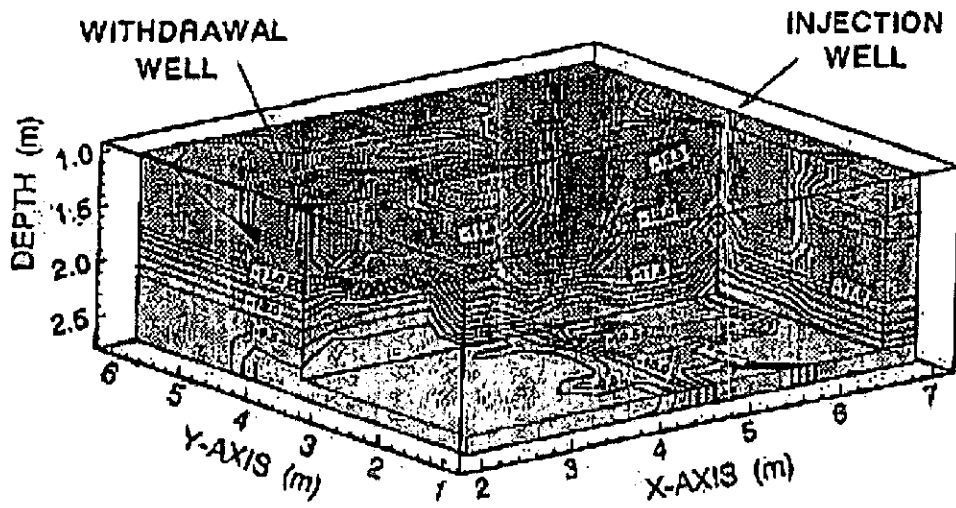


圖 5-10 試驗場地之三維水力傳導係數分布圖

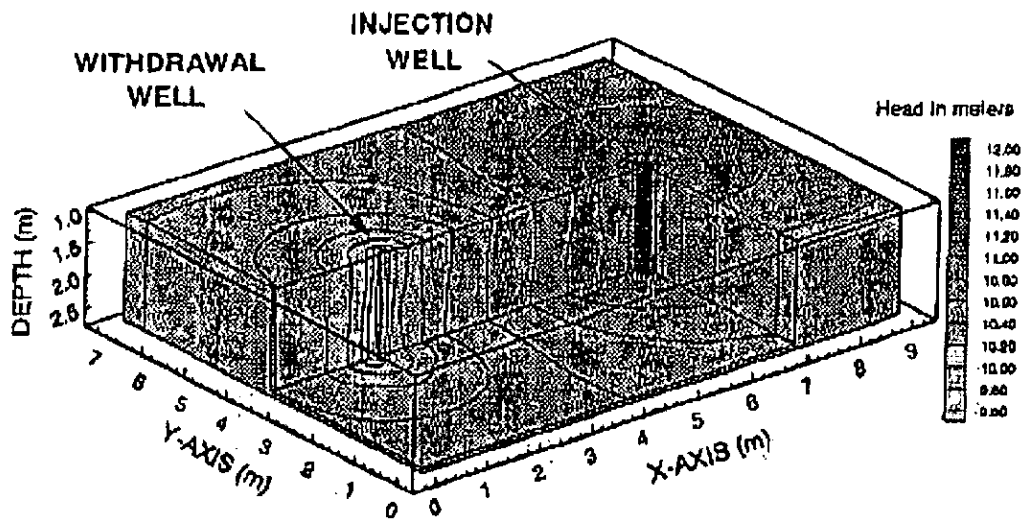


圖 5-11 試驗場地之水頭分布圖

在注入井這半邊三面垂直邊界及上下水平邊界為不延散邊界 (no-dispersive flux boundary)，靠抽水井之半邊三面垂直邊界及上下水平邊界則給定背景濃度，計算時將注入井視為邊界，注入井位置之濃度則依時間不同而給定不同之濃度值以表示試驗物質之注入情況。由於試驗場址之土層為非均質，因此，模擬時分別採用非均質模擬 (heterogeneous approach) 以及分層近似法 (layered approach)。非均質模擬將不同之水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 指定至不同之網格點，再分別以模式模擬試驗區之流場。分層近似法是將原土層虛擬分為十一層，採用分層以近似土層之非均質現象，各層之水力傳導係數採用分別採用 Hvorslev's method 以及 Coopers method 所得之水力傳導係數。各層之擴散現象可分為對流部分 (convective part) 及延散部分 (dispersive part)，前者與土層之平均流速有關，後者則因流速在垂向上之變化而產生。後者即為廣延散現象 (macrodispersion)，延散係數則為廣延散係數 A_j (macrodispersivity) 依 (Gelhar and Axness, 1983)

$A_{11} = \sigma_{\ln K}^2 \lambda / \gamma^2$ 、 $A_{22} = \frac{\sigma_{\ln K}^2 \alpha_L}{8\gamma^2} \left[1 + 3 \frac{\alpha_T}{\alpha_L} \right]$ ， $\sigma_{\ln K}$ 為 $\ln K$ 之變異數、 λ 為 $\ln K$ 之相關尺度(correlation scale)、 α_T 與 α_L 則分別為縱向與橫向之延散係數。廣延散係數 A_{ij} 與延散係數 D_{ij} 之關係 $D_{ij} = A_{ij} \times q_i$ (Gelhar and Axness, 1983)。模擬時垂向延散係數以水平向延散係數取代，即 $A_{22} = A_{11}$ ，以得到較佳之模擬結果。由於廣延散係數係由均勻流假設所推導而出，因此，Yeh et al.(1995)在層狀近似(layered approach)之模擬中需以試誤法(trial-and-error)決定參數，以得到較佳之模擬結果。

本研究模式模擬

本研究之模擬採用分層近似(layered approach)，將試驗場地共分為 11 層。模式之網格大小為(0.2 m× 0.2m × 0.05 m)，水頭與延散邊界條件如 Yeh et al. (1995)分層近似模擬所描述，背景濃度為 11mg/L，總模擬時間為 50 小時，時間間距為 3 分鐘(0.05hr)。延散係數則採用廣延散係數 A_{ij} (macrodispersivity)乘以流速求得即 $D_{ij} = A_{ij} \times q_i$ ，模擬時垂向延散係數依 Yeh et al.(1995)以水平向延散係數取代，模式輸入值如表 5-3 所述，試驗場地之水力傳導係數整理於表 5-4，廣延散係數 A_{ij} 則整理於表 5-5。模式所使用之之水流條件為穩定流(steady flow)，各層之水流速度則先以水頭差乘以各層之水力傳導係數求得，即 $q = K \times \Delta H_{head}$ ，在模擬時亦需以試誤法決定各層水流速度，以得到較合理之模擬結果。本次模擬所推算各層之水流速度如表 5-6 所示。

表 5-3 本研究模式所需輸入值

| | |
|------------------------------------|--|
| 模擬區域 | 7 × 7 × 1.65 (m) |
| 層數 | 11 |
| 各層厚度 | 0.15 (m) |
| 網格大小 | 0.2 × 0.2 × 0.05 (m) |
| 起始濃度 | 11 mg/L |
| 注入濃度 | 230 mg/L |
| 模擬時距 | 0.5hr |
| 總模擬時間 | 50hr |
| 導水係數 K | 如表 5-4 |
| 抽水井與注入井水頭差 $H_{INJ} - H_{WITH}$ | 2.57m |
| 各層地下水流速 q_i | 如表 5-6 所示 |
| 延散係數 D_i | $D_i = A_i \times q_i$ (A 之值如表 5-3) (Gelhar and Axness, 1983) |
| 邊界條件 | 詳述於內文 |

表 5-4 各深度之 $\ln K$ 平均值 (K 之單位為 m/s)

| Layer | Depth (m) | Hvorslev | Cooper et al. |
|-------|-----------|----------|---------------|
| | | Mean | Mean |
| 1 | 1.15 | -11.75 | -12.97 |
| 2 | 1.30 | -11.83 | -12.77 |
| 3 | 1.45 | -11.88 | -13.21 |
| 4 | 1.60 | -11.87 | -13.03 |
| 5 | 1.75 | -11.69 | -12.43 |
| 6 | 1.90 | -11.32 | -11.98 |
| 7 | 2.05 | -11.28 | -12.29 |
| 8 | 2.20 | -10.56 | -10.84 |
| 9 | 2.35 | -10.24 | -10.31 |
| 10 | 2.50 | -9.72 | -9.18 |
| 11 | 2.65 | -9.48 | -8.77 |

表 5-5 各深度之廣延散係數(Macrodispersivity value)

| Depth (m) | A_{11} (m) | A_{22} (m) |
|-----------|--------------|--------------------|
| 1.15 | 0.05 | 4×10^{-3} |
| 1.30 | 0.05 | 4×10^{-3} |
| 1.45 | 0.05 | 6×10^{-3} |
| 1.60 | 0.31 | 7×10^{-3} |
| 1.75 | 0.36 | 8×10^{-3} |
| 1.90 | 0.64 | 7×10^{-3} |
| 2.05 | 0.57 | 8×10^{-3} |
| 2.20 | 0.19 | 8×10^{-3} |
| 2.35 | 0.19 | 6×10^{-3} |
| 2.50 | 0.18 | 3×10^{-3} |
| 2.65 | 0.10 | 4×10^{-3} |

表 5-6 模擬時各層之流速

| Layer no. | Depth(m) | Velocity(m/hr) |
|-----------|----------|----------------|
| 11 | 1.15 | 0.1187 |
| 10 | 1.30 | 0.1123 |
| 9 | 1.45 | 0.1339 |
| 8 | 1.60 | 0.1350 |
| 7 | 1.75 | 0.1535 |
| 6 | 1.90 | 0.1521 |
| 5 | 2.05 | 0.1559 |
| 4 | 2.20 | 0.1804 |
| 3 | 2.35 | 0.2415 |
| 2 | 2.50 | 0.2670 |
| 1 | 2.65 | 0.3099 |

試驗及 MMOC3 模擬結果及本研究所建立模式之模擬結果，在 $y=3.2\text{m}$ 之 $x-z$ 剖面如圖 5-12 所示。本模式所模擬各斷面之結果如圖 5-13 及圖 5-14 所示。由圖 5-12 所示，模式所模擬之結果大致與試驗結果所顯示之污染物濃度與擴散趨勢相符。圖 5-13 及圖 5-14 則顯示出試驗場地分別在第 10、第 30 及第 50 小時之各斷面之污染物分布，本模式可描述污染物於第 10 小時之初始擴散現象，第 30 小時因注入井於第 16 小時後注入清水以平衡試驗場地之水頭分布所造成之稀釋現象以及第 50 小時時污染物已大致遭稀釋之結果。由以上結果可顯示本研究所建立之模式亦能合理模擬現地試驗之擴散趨勢及濃度分布，並可得到合理之模擬結果。

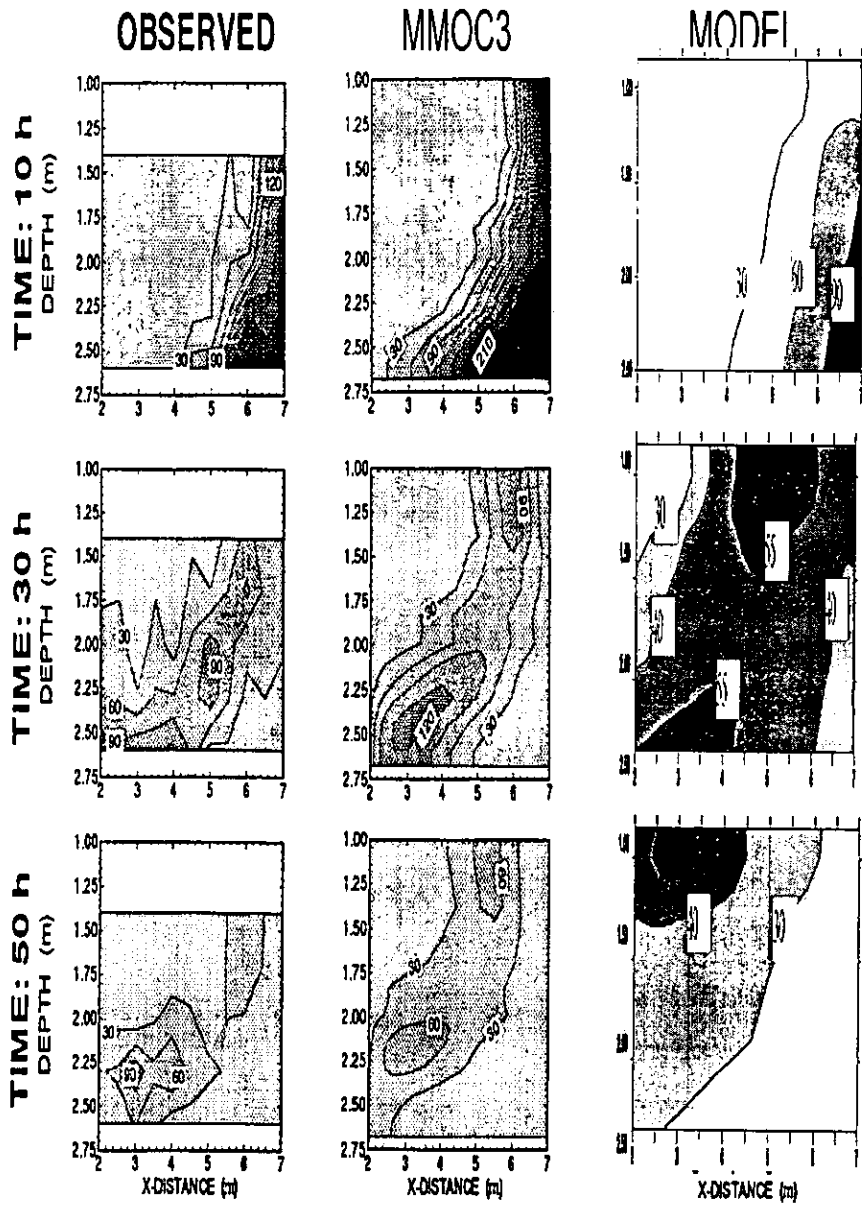


圖 5-12 試驗結果(OBSERVED)與 MMOC3 模擬結果及本模式模

擬結果(沿 $y=3.2\text{m}$)

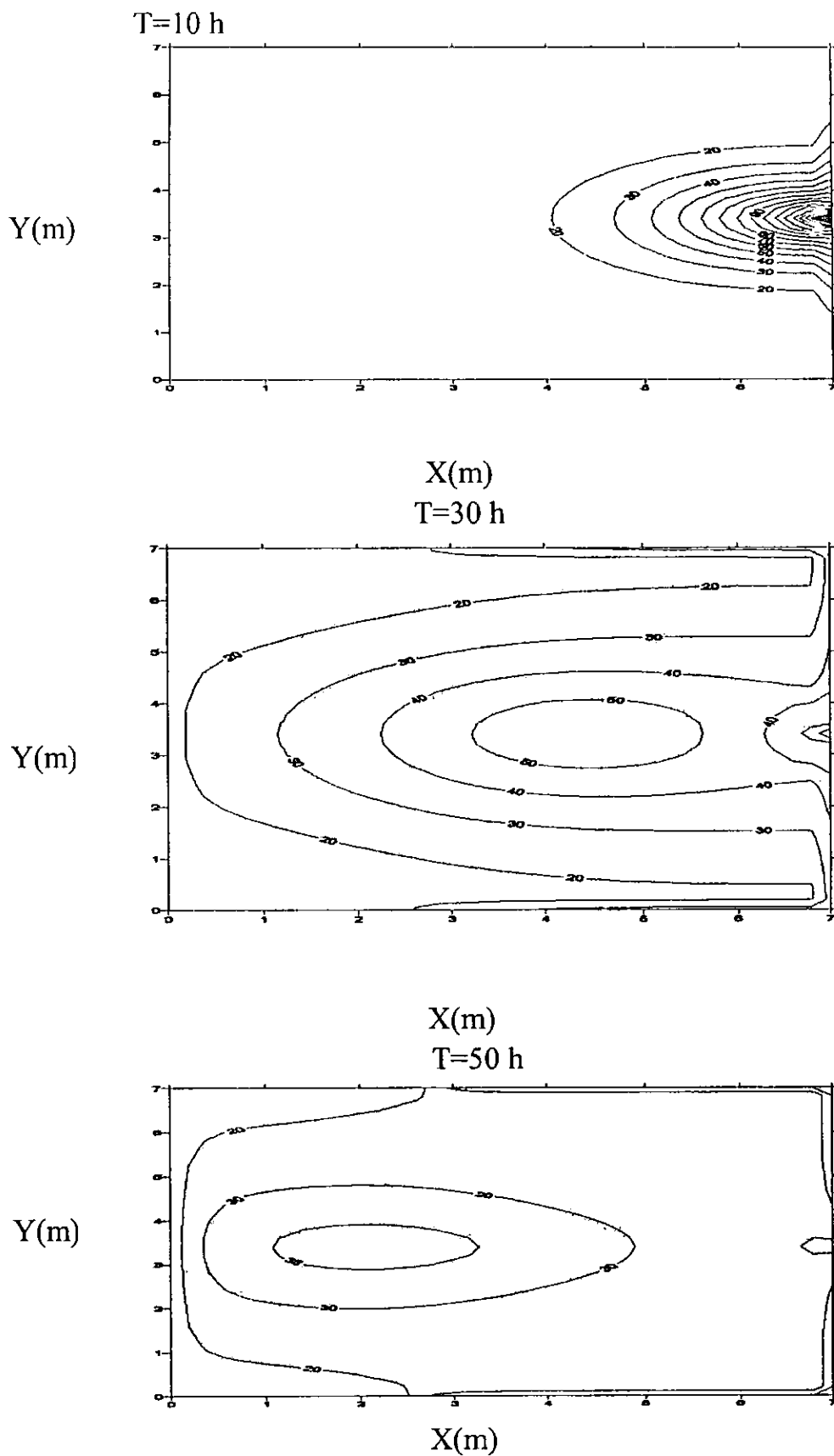


圖 5-13 沿 $z=0.8\text{m}$ 之 $x\text{-}y$ 斷面本模式模擬濃度分布

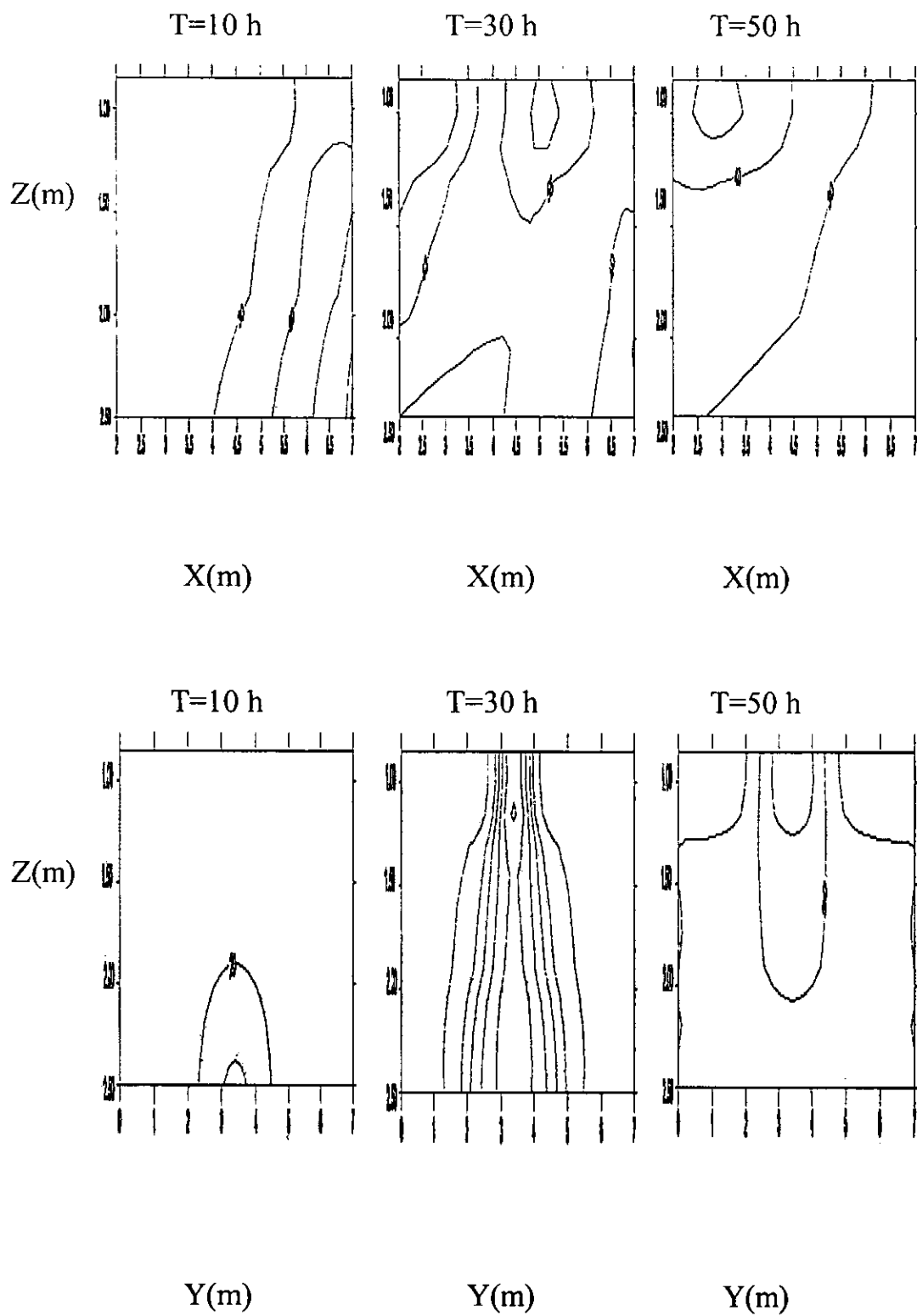


圖 5-14 沿 $y=3.2\text{m}$ 之 $x-z$ 斷面及沿 $x=3.2\text{m}$ 之 $y-z$ 斷面

本模式模擬濃度分布

第六章 現有研究成果檢視與未來工作執行說明

以下分別敘述地下水質量傳輸模式發展以及現地試驗研究兩個研究子題，計畫第一年與第二年之研究成果檢視，並說明未來(計畫第三年)工作執行方向。

一、第一年研究成果檢視

地下水質量傳輸模式之發展

1. 研究中選用本團隊自行發展之分層三維地下水流模式，計算地下水流場分布，以提供地下水質量傳輸模擬之用。分層三維地下水流模式所提出之二次多項式函數分布概念的確優於 MODFLOW 模式的塊體中心網格形式概念。分層三維地下水流模式不但可以精確地模擬小範圍之複雜地下水流，如部分貫穿抽水井附近以及土層不連續之流況，亦可以模擬大區域之地下水流況，如擬三維地下水流。此外，分層三維地下水流模式與 MODFLOW 同樣採用層的概念來建構，所以較 FEMWATER 簡單且有效率。
2. 選用有限解析法作為求解地下水質量傳輸模式之數值方法。有限解析法乃利用局部解析解建構而成，因為具有局部解析解之特性，所以有自動上風法之功能，同時適合移流與延散作用之求解，且不會產生數值震盪，對於複雜問題之計算具有穩定收斂之特性。有限解析法可以在卡式座標(Cartesian coordinates)下處理不規則邊界問題，且有限解析法的精確度較有限差分法佳，建構方式則與有限差分法相同，較有限元素法簡單且容易擴充。
3. 為了兼顧數值計算之穩定性與有效性，本研究採用有別於傳統常用之概念來建立地下水質量傳輸模式。研究中將污染物濃度量拆解為垂直積分平均值與垂直變量之和，再利用分層垂向積分技巧，將三維地下水質量傳輸方程式，進一步拆解為水平二維的垂直積分平均地下水質量傳輸方程式以及垂向一維的垂直變量地下

水質量傳輸方程式。水平二維的垂直積分平均地下水質量傳輸方程式，利用本研究中所選用求解移流延散作用之數值方法來求解。至於垂向一維的垂直變量地下水質量傳輸方程式，則利用解析解來求解。

地下水質量傳輸現地試驗研究

1. 完成國立雲林科技大學校園現地實驗場址之建立，確定本研究場址於 15.65 公尺內之土壤結構，大致為砂質壤土所組成。
2. 建立本研究場址之土壤物性分析、含水層試驗、水文地質參數檢定（包括抽水試驗 5 次、回水試驗 1 次及微水試驗 3 組），水文地質參數介於 $9.03E-5$ m/sec 之間；儲水係數(S)方面，介於 $4.00E-6$ ~ $9.80E-3$ 之間。而水文地質參數變動大之原因，在於抽水時間加長、影響半徑加大，更表示分析範圍內之土壤特性更加複雜，顯示出土壤之非均質性。
3. 對於交通大學模擬分層三維地下水流模式模擬所需輸入資料，依本研究結論可得，土壤密度為 2.1~2.3；初始孔隙率為 30~50%；水力傳導係數為 0.002~0.005 m/min；比貯水係數為 $7E-7$ ~ $5.8E-4$ m^{-1} 。
4. 完成增設兩口監測井。

二、第二年（本年度）研究成果檢視

地下水質量傳輸模式之發展

1. 本年度地下水質量傳輸模式發展之工作項目，首先進行第一年相關水文地質參數試驗資料之分析。利用上年度建立完成之地下水質量傳輸模式，配合洩降試驗資料，並根據試誤法，進行反向推算(inverse problem)試驗場址之水力傳導係數分佈，以分析上年度試驗資料之合理性。結果顯示，本研究所建立之模式可合理地模擬雲林科技大學所執行的抽水試驗，包含模擬監測井隨時間的洩

降趨勢與大小。

2. 地下水質量傳輸模式已於第一年度中建立完成，並利用具解析解之簡單案例驗證模式之正確性。為求慎重，本年度進一步，以定量與定性方式，繼續測試與驗證模式之功能，包括水平分區與垂向分層之計算。結果顯示，模式若具有水平分區與垂向分層之計算功能，將可較精確地模擬複雜地層之地下水質量傳輸現象。
3. 另一方面，為展示所建立地下水質量傳模式之實用性，選擇國外地下水污染案例，進行現地模擬。此案例為 Yeh et al. (1995) 於 1992 年在南卡羅萊那(South Carolina)州喬治城(George Town)，所進行之地下水傳輸試驗。結果顯示，本研究所建立之模式可以合理模擬現地試驗之擴散趨勢及濃度分布。
4. 本年度，地下水質量傳輸模式發展之另一項工作是，再發展一套具明顯密度變化交界面之多含水層系統地下水模式，以進行海水入侵模擬。本年度，模式之雛型已完成建立，並利用具解析解之簡單案例，初步驗證模式之正確性。

地下質量傳輸現地試驗研究

1. 垂直水力傳導係數方面，在地表下深度 6.0 m 至 9.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $3.61E-04$ 至 $5.20E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層 (Bear, 1968)。在地表下深度 10.0m 至 12.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $1.96E-05$ 至 $7.17E-06$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂、粘土混合層。在地表下深度 13.0 m 至 14.0 m，垂直水力傳導係數範圍為 $2.25E-04$ 至 $3.14E-04$ (m/s)，地質結構特性屬於粉砂、泥砂混合層。本研究場址地質構造大部分由粉砂、泥砂混合層所組成，在地表下深度 10.0 m 至 12.0 m 中含有質地顆粒較細的土壤材料（如：黏土），所以水力傳導性在這段地層中顯得較小。

2. 非等向水文參數試驗分析方面，利用 Neuman 分析結果可知，本研究得到非等向主流方向流通係數 (T_α) 與側流方向流通係數 (T_β) 分別為 $4.41E-04$ (m^2/s) 與 $2.09E-04$ (m^2/s)。非等向主流方向水力傳導係數 (K_α) 與側流方向水力傳導係數 (K_β) 分別為 $2.21E-05$ (m/s) 與 $1.04E-05$ (m/s)，其值介於粉砂、泥沙標準水力傳導係數值 $1E-5 \sim 6E-5$ (m/s) 間。等向流通係數 T_e 為 0.00030 (m^2/s)，儲水係數 S 約為 0.00230 ，含水層非等向主流方向與世界橫麥卡脫方格座標 (UTM 座標) 的 X 軸，所夾的角度為 36 度。
3. 地電阻 3-D 水文地質影象分析方面，地電探測結果指出井場之地層之電阻率構造非水平層。電阻率大多在 $20-70\Omega\cdot m$ 之間，具局部塊狀非均質。
4. 砂箱試驗方面，本研究將砂箱注水口以上 10 公分、 50 公分及 90 公分的延散度經過線性迴歸，可得砂箱中延散度與延散尺度的關係式為 $\alpha = 0.015X + 0.0467$ ， $r^2 = 0.9643$ ，在延散度與延散尺度關係式的截距為 0.0467 公分，可視為石英砂在本次砂箱尺度的延散度。本研究在砂箱試驗所得到的延散度，與蘇苗彬及王智澤(1992) 提出延散度值經由比較得知，本研究所得之延散度值相當合理。
5. 污染傳輸試驗方面，本研究將距離注射井 BH02 分別為 1.206 公尺、 4.228 公尺及 7.100 公尺的 BH10、BH04 及 BH11 觀測井在 5 個距離地表不同深度的延散度平均值進行線性迴歸分析，可得延散度與延散尺度關係式為 $y = 2.6549x - 4.1136$ ，其中 y 表示延散度，單位為公尺， x 表示延散尺度，單位為公尺。且觀測井 BH02、BH10、BH04 及 BH11 大部分的遲滯係數都非常接近 1 。

三、第三年工作執行說明

地下水質量傳輸模式之發展

第三年度，地下水質量傳輸模式發展研究子題，擬進行之工作項目如下所述：

1. 完成具明顯密度變化(海水入侵)交介面之多含水層系統地下水模式之發展。
2. 應用濁水溪沖積扇觀測之相關資料，進行海水入侵現地模擬。
3. 利用本團隊發展完成之地下水質量傳輸模式，模擬雲科大相關試驗研究資料，以提供國內未來試驗研究之參考。
4. 完成模式操作使用手冊。
5. 配合主辦單位辦理教育訓練，將本團隊發展之模式，技術轉移給水利相關單位人員使用。

地下水質量傳輸現地試驗研究

1. 持續現地示蹤劑試驗，以驗證第二年之試驗結果之正確性，並持續監測地下水水質變化，避免試驗造成環境污染。
2. 統同三年之結果提出台灣本地性之地下水水流及質量傳輸之地質參數模型。

參考文獻

1. 黃良雄、楊錦釗，“大區域地下水超引致地層下陷分層計算模式應用(二)-屏東平原”，經濟部水資源局，民國 88 年。
2. 黃良雄、楊錦釗，“大區域地下水超引致地層下陷分層計算模式應用(一)-濁水溪沖積扇”，經濟部水資源局，民國 87 年。
3. 黃良雄、楊錦釗，“地下水超抽導致地層下陷(一)”，經濟部水利處水利規劃試驗所，民國 89 年。
4. 黃良雄、楊錦釗，“地下水超抽導致地層下陷(二)”，經濟部水利處水利規劃試驗所，民國 89 年。
5. 楊錦釗、黃良雄，“海岸地區地陷潛能與危險評估技術(一)”，經濟部水資源局，民國 90 年。
6. 楊錦釗、黃良雄，“海岸地區地陷潛能與危險評估技術(二)”，經濟部水利署，民國 91 年。
7. 蔡東霖，黃良雄，楊錦釗，“修正擬三維概念之地下水模擬”，中國土木水利工程學刊，第十一卷，第四期，819-827，民國 88 年。
8. 蔡東霖，吳俊賢，黃良雄，楊錦釗，“分層分區地層下陷模式”，中國土木水利工程學刊，第十卷，第四期，617-626，民國 87 年。
9. 蔡東霖，“大區域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，民國 90 年。
10. 蔡東霖、周文勇、張哲豪，“平行運算於地層下陷模式之應用與研究”，台灣水利，民國 91 年。
11. 張胤隆、蔡東霖、張哲豪，“考慮地層下陷之地下水優化模式之建立”，台灣水利，民國 91 年。
12. 溫志超等、2000.12、濁水溪沖積扇扇頂補注區地下水中硝酸鹽污染調查，經濟部水資源局期末報告。

13. 溫志超，呂鴻光，吳瑞賢，王雯，1998.4，非均質飽和土壤中污染物質傳輸研究及應用期末報告。
14. 溫志超，吳瑞賢，王雯，1996.10，污染場址地質水文參數檢定--序率模式之應用(I)，國科會研究計畫報告。
15. 邱金火，溫志超，1995.10，非均質多孔介質中水理及污染傳輸之分析及水文參數之檢定(I)，國科會研究計畫報告 (NSC 84-2211-E-033-007)。
16. 董倫導，楊潔豪，陳平護，江崇榮，1996，地電阻法應用於濁水溪沖積扇之水文地質調查，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，101-111。
17. Andersen, P.F., J.W. Mercer, and H.O. White, Jr., 1988, Numerical modeling of salt-water intrusion at Hallandale, Florida, *Ground Water* 26(5), pp. 619-630.
18. Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, New York.
19. Bredehoeft, J.D. and G.F. Pinder, "Digital Analysis of Areal Flow in Multiaquifer Groundwater Systems: A Quasi Three-Dimensional Model", *W.R.R.* 6, pp.883-888, 1970。
20. Bush, P.W., 1988, Simulation of saltwater movement in the Foridan aquifer system, Hilton Head Island, South Carolina. USGS, Water Supply Paper 2331, 19 p.
21. Badon-Ghyben, W . , Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam, *Tijdchr . Kon . Inst . Ing .* 8-22, 1888 .
22. Bear, J . , *Hydraulic of Groundwater*, 567pp . , McGraw-Hill International Book Company , New York, 1979 .

23. Bear, J. and G. Dagan, "Some exact solution of interface problem by means of the hydrograph method," *J. Geophys. Res.* 69 (8), pp. 1563–1572, 1964.
24. Bear, J. and I. Kapular, "A numerical solution for the movement of an interface in a layered coastal aquifer," *Jour. of Hydrology*, 50 : 273–298, 1981.
25. Chorley, D. W., and Frind, E. O., "An Iterative Quasi Three Dimensional Finite Model for Heterogeneous Multi-Aquifer Systems", *W.R.R.* 14, pp.943-952, 1978.
26. Cohen, R.M., and Mercer, J.W., 1993. *DNAPL Site Characterization*. Boca Ration, Florida : Smoley.
27. Columbs, N. "Viscous models study of sea water intrusion in water table Aquifers," *Water Resour. Res.* , Vol. 1, No. 2, 313–323, 1965.
28. Cooper, H. H. Jr, J. D. Bredehoeft, and I. S. Papadopulos (1967). "Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water", *Water Resour. Res.*, 3(1), pp.263-269
29. Essaid (1990), *A Multilayered Sharp Interface Model of Coupled Freshwater and Saltwater Flow in Coastal Systems : Model Development and Application*, *Water Resour. Res.* 26 (7), 1431-1454, 1990.
30. Faust, C.R., P.N. Sims, C.P. Spalding, P.F. Andersen, D.E. Stephenson. 1990. *FTWORK: A Three-Dimensional Groundwater Flow and Solute Transport Code*. WRSC-RP-89-1085. Westinghouse Savannah River Company, Aiken, SC.

31. Freeze, R.A., and J.A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hill, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
32. Fetter, C. W. , "Position of the saline water interface beneath oceanic island," *Water Resour . Res .* 8, 1307–1314, 1972 .
33. Glover, R . E . , "The pattern of fresh–water flow in a coastal aquifer," In : *Sea Water in coastal Aquifers*, H . H . Cooper, F . A . Kohout, H . R . Henry and R . E . Glover, eds . , U . S . Geol . Survey Water–Supply Paper 1613C, C32–C35, 1964 .
34. Gupta, S. K., Cole, C. R., and Pinder, G. F., " A Finite-Element Three-Dimensional Groundwater (FE3DGW) Model for a Multiaquifer System", *W.R.R.* 20, PP.553-563, 1984 .
35. Gupta, S.K., C.R. Cole, F.W. Bond, and A.M. Monti. 1987. *Coupled Fluid Energy and Solute Transport (CFEST) Model: Formulation and User's Manual*. BMI/ONWI-660, Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH.
36. Gelhar, L. W., and Axness C. L., (1983),"Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *W.R.R.* 19(1), pp.161-180
37. Gelhar,L.W.,J.L.Wilson,J.S.Miller,and J.M.Hamrick, " Density induced mixing in confined aquifers," *Tech.Rep.145,R.M.Parsons Lab. For Water Resour. And Hydrodyn.,Mass.Inst. of Technol.,Cambridge,Mass.March1972*
38. Gardner,G.H.,J.Downie,and H.A.Kendall, "Gravity segregation of miscible fluids in linear models," *Soc.Pet.Eng.j.*,225,95-104,1962
39. Hantush, M.S., "Modification of the theory of Leaky Aquifer", *J. Geophys. Res.*, 65(11), pp.3713-3725, 1960 .

40. Hantush, M.S. 1966. Analysis of data from pumping test in anisotropic aquifers. *J. Geophys. Res.*. Vol. 71, pp. 421-426.
41. Hantush, M.S. 1966. Analysis of data from pumping test in anisotropic aquifers. *J. Geophys. Res.*. Vol. 71, pp. 421-426.
42. Healy, R.W. 1990. *Simulation of solute Transport in Variably Saturated Porous Media with Supplemental Information of Modifications to the U.S. Geological Survey's Computer Program VS2D*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4025.
43. Herzberg, A. , Die Wasserversorgung Einger Nor-dseebaden, *Z. Gasbeleucht. Wasserversorg.* , 44, pp . 815–819, pp . 824–844, 1901 .
44. Henry, H. R. , "Salt intrusion into freshwater aquifers," *J. Geophys. Res.* , 64, 1911–1919, 1959 .
45. Hubber, M. K. , "The theory of ground–water motion," *J. Geol.* , 48, 785–944, 1940 .
46. Hvorslev, M. J.,(1951) "Time lag and soil permeability in groundwater observations", *Waterw. Exp. Stn. Bull.* 36, 50 pp., U. S. Army Corps of Eng., Vicksburg, Miss.
47. Huyakorn, P.S. , and C. Taylor, "Finite element models for coupled groundwater and convection dispersion," *Proceedings of the 1st International Conference on Finite Elements in Water Resources*, pp . 1 . 131–1 . 151, Pentech Press, London, 1976 .
48. Jacobs, M . and Schmorak, S . "Seawater intrusion and interface determination along the coastal plane of Israel," *state of Israel, hydrological service, hydrological paper No . 6*, 12pp . , 1960 .

49. John L. Wilson and Antonio Sa Da Costa (1982) . "Finite Element Simulation of a Saltwater/Freshwater Interface With Indirect Toe Tracking," Water Resources Research, Vol.18, No.4, 1069-1080
50. Kelly, W. E., 1978. Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. Ground Water, 15, 420-425.
51. Kosinski, W. K., and Kelly, W. E., 1981, Geoelectric sounding for predicting aquifer properties. Ground Water, 19, 163-171.
52. Lee, C . H . , and R . T . Cheng, "On seawater encroachment in coastal aquifers," Water Resour . Res . 10 (5), pp . 1039–1043 , 1974
53. Liu et al . "Boundary integral equation solutions of moving interface between two fluids in porous media ," Water Resour . Res . 17 (5), 1445–1452, 1981 .
54. Neuman, S. P., Preller, C., and Narasimhan, T.N., "Adaptive Explicit-Implicit Quasi Three-Dimensional Finite Element Model of Flow and Subsidence in Multiaquifer Systems", W.R.R.18, pp.1151-1561, 1982 .
55. Neuman, S.P., and Witherspoon, P. A., "theory of flow in a confined two-aquifer system ", W.R.R. 5, pp.803-816, 1969 .
56. Neuman, S.P., G.R. Walter, H.W. Bentley, J.J. Ward. and D.D. Gonzalez. 1984. Determination of horizontal anisotropy with three wells. Ground Water, Vol. 22, PP.66-72.
57. Niwas, S. and Singhal, D. C., 1981, Estimating of aquifer transmissivity from dar-zouck parameters in porous media. Journal of Hydrology, 50, 393-399.

58. Papadopoulos, I.S. 1965. Nonsteady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., Proc. Dubrovnik Symposium on the Hydrology of fractured rocks, pp.21-31.
59. Polubarinova-Kochina, P. Ya., The Theory of Groundwater Movement, 631pp., Princeton University Press, Princeton. N. J. 1962 .
60. Parker, J.C., 1989, Multiphase flow and transport in porous media, Reviews of Geophysics 27(3), pp311-328.
61. Pinder, G . F . , and H . H . Cooper, Jr . , "A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front," Water Resour . Res . , 6 (3), 875-880, 1970 .
62. Rumer, R . R . and D . R . F . Haleman, "Intruded salt water wedge in porous media , " Proceedings American Society of Civil Engineering, 89 (6), pp . 193-220, 1963 .
63. Rifai, J.S., P.B. Bedient, R.C. Borden, and F.F. Haasbeek. 1988. *BIOPLUME II-Computer Model of Two-Dimensional Transport under the Influence of Oxygen Limited Biodegradation in Ground Water*. EPA/600/8-88/093a, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK.
64. Sanford, W.E., and L.F. Konikow. 1985. *A Two-Constituent Solute Transport Model for Ground Water Having Variable Density*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4279.
65. Schmorak, S., "Salt water encroachment in the coastal plain of Israel, " IASH Symp. Artificial recharge and management of aquifer, Haifa, Israel, IASH 72, 305-318., 1967 .

66. Tsai, T. L., Yang, J. C., and Huang, L. H., "An accurate integral-based scheme for advection-diffusion equation", *Communications in numerical methods in engineering*, 2001.
67. Tsai, T. L., Yang, J. C., and Huang, L. H., "A hybrid finite-difference scheme for solving the dispersion equation", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002.
68. Tsai, T. L., Yang, J. C., and Huang, L. H., "Characteristics method using cubic-spline interpolation for advection-diffusion equation", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6), 2004.
69. Tsai, T. L., Tseng, C. M., Yang, J. C., "Fractional step scheme of finite analytic method for advection-diffusion equation", *Journal of Engineering Mechanics*, 131(1), 2005. (in press)
70. Segol, G. and G.F. Pinder, "Transient simulation of saltwater intrusion in Southeastern Florida," *Water Resour. Res.*, 12(1), 65-70, 1976.
71. Strack, O. D. L., "A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifer," *Water Resour. Res.*, 12, 1165-1174, 1976.
72. Voss, C.I., and W.R. Souza, 1987, Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone. *Water Resources Research* 23(10), pp. 1851-1866.
73. Voss, C. I. and Souza, W. R., "Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone," *Water Resour. Res.*, 23(10), 1851-1866, 1987.

74. Voorhees, M. 1990. *INTERTRANS: A Three-Dimensional Solute Transport Model, User's Guide*. ESE/HydroSoft, Inc., Sarasota, FL.
75. Yeh, G.T. 1991. *3DLEWASTE: A Hybrid Lagrangian-Eulerian Finite Element Model of Waste Transport through Saturated-Unsaturated Media*. Technical Report, Department of Civil Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA.
76. Yeh, G.T., and V.S. Tripathi. 1989. A critical evaluation of recent developments of hydrogeochemical transport models of reactive multi-chemical components. *Water Resour. Res.*, vol.25, no. 1, pp.93-108.
77. Yeh, G.T., and D.S. Ward. 1980. *FEMWATER: A Finite-Element Model of Water Flow through Saturated-Unsaturated Media*. ORNL-5567, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tenn.
78. Yeh T.-C. et al., (1995), "Observation and three-dimensional simulation of chloride plumes in a sandy aquifer under forced-gradient conditions" *W.R.R.* Vol 31, No.9 pp.2141-2157
79. Zheng, C. 1990. *MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, 170pp.
80. Zheng, C. 1992. *MT3D version 1.8 Documentation and User's Guide*. S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Bethesda, MD.
81. Zlotnik, V.A., and G. Ledder, 1996, Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers, *Water Resources Research*, 32(4), 1119-1128.
82. Zlotnik, V.A., and Zurbuchen, B.R. 1998. Dipole probe: design and field application of a single-borehole device for measurement of

vertical variation of hydraulic conductivity. *Ground water* 36,
no.6:884-893

83. Zlotnik, V.A., and G. Ledder, 1996, Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers, *Water Resources Research*, 32(4), 1119-1128.

附錄 A 服務建議書審查意見處理情形

| 審查意見 | 辦理情形 |
|--|--|
| <p>成功大學資源工程學系李委員振誥：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請將第一年研究成果摘要列出，以資瞭解其延續情形。 2. 地電阻技術之發展，在國外已有多處成功例子，然如何驗證地電阻之地球物理成果為其重點，目前於計畫仍未詳列如何驗證之流程？ 3. 目前計畫欲利用 Dipole Flow Test 來推估垂直方向 k 值，然而如何與其他模式求得垂直 k 值相比？ 4. 請從各方面(實用性、方便性、使用性、精確度等)來說明本發展模式比其他目前常用軟體有特殊之處，與本模式未來發展性。 5. 請將砂箱試驗與現場試驗之水文地質概念模式，應有相互類比之比較性。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 本研究將利用鑽探所得地質資料及抽水試驗所得之 K 值分佈做驗證。 3. 本年度的服務建議書已無 Diople Flow Test，改為 Vertical Flow Test。本研究將採用 Zlotnik(1998)的理論，分析垂直 K 值分佈。所以，應無 K 值錯誤的問題。 4. 本模式旨在適用於大小範圍的污染擴散情形，彈性較大。計算上是以半解析方式計算，因此，在精確度上較能控制。本模式與其他常用模式各具特色，期待將來能在大區域小範圍的污染問題都能提出精確的預測。 5. 砂箱試驗主要在了解在近似單向流場中污染物傳輸相關參數。而且砂箱試驗的填充材質 |

| | |
|--|---|
| | <p>為石英砂，非現地所採取的地質材料。所以，可能無法與現場試驗有所類似或比較；但是，砂箱試驗結果應可提供數值模式模擬時比較之用。</p> |
| <p>逢甲大學水利系許教授少華：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 模式的發展，應注意其延續性（或永續性），即應集中心力與時間於某一特定模組（Module），並應可與其它現有的模式架構配合（如MODFLOW, IGW 等現有模式），最後的目標應是成為一個package，給其他模式可 call 來執行。 2. 砂箱試驗與現地試驗的成果數據應妥為分析與呈現，使後人也可加以利用這些數據再做其他的探討。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員之指教。 2. 遵照辦理。 |
| <p>成功大學水工試驗所余委員進利：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 砂箱試驗的結果與現地污染傳輸試驗的結果如何取捨？砂箱試驗基本上可由人為來控制，本人建議此項可不作，或是修正試驗目的。再者，現地傳輸試驗應有完整的規劃。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 砂箱試驗之主要目的在於探討吸附作用，與現地試驗之目的不同。現地試驗，將參考以往相關研究成果，先進行完整規劃後再執行試驗。 |
| <p>水利署第一河川局李委員友平：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃包含模式發展與現地試驗等子計畫，為一理論與現場結合之整合計畫，立意甚佳。第一年度分別於模式及試驗已 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 |

| | |
|---|---|
| <p>建立相關技術，成果良好，本年度應進行整合。</p> <p>2. 在模式發展部份，在地下水傳輸方程式中包括擴散、延散、土壤吸(解)附、生物及污染衰減等作用，而本計畫現地試驗並未針對上述每一現象求出係數，故建議針對該方程式中，每一作用執行 order of magnitude analysis，找出主導之作用，以瞭解每一作用之分量如何。</p> <p>3. 在現地試驗方面，本年度主要作 pumping test、tracer test 等，建議撰寫其 SOP，另每一次 pumping test 執行完畢，請務必做回復試驗。另 tracer test 所採用之 tracer 選擇，請符合環保法規。</p> <p>4. 在二子計劃整合部分，為因應未來第三年度試用現場，請及早於本年度選定場址。</p> | <p>2. 目前的研究重點在解決數學上的困難，即延散，擴散及對流問題。其餘即量階上次要的物理作用將可以在主要問題與模式建立後再加入。</p> <p>3. 遵照辦理。</p> <p>4. 遵照辦理。將於期中簡報時，提出第三年試驗現場之地點。</p> |
| <p>結論：</p> <p>1. 經八位出席委員評審結果平均評分達 83.75，且出席委員全數同意國立交通大學繼續辦理本(九十三)年度計畫。</p> <p>2. 將第一年具體成果在期初簡報詳加補充。</p> <p>3. 模式之實用性、優異性亦於其</p> | <p>1. 謝謝委員的肯定。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 遵照辦理。</p> |

| | |
|--|--|
| <p>他模式及延續性、需要性請在服務建議書中詳加補充。</p> <p>4. Tracer Test 請參酌成功大學前試驗成果在檢討。</p> <p>5. 服務建議書中進度表依實際需要修訂。</p> <p>6. 各評審委員及主辦單位意見，請交通大學研議並列入服務建議書，補充修訂送本所三本核備。</p> | <p>4. 遵照辦理。現地試驗，將參考以往相關研究成果，先進行完整規劃後再執行試驗。</p> <p>5. 遵照辦理。</p> <p>6. 遵照辦理。</p> |
|--|--|

附錄 B 工作執行計畫書與期初報告審查意見處理情形

| 審查意見 | 辦理情形 |
|---|---|
| <p>成功大學資源工程學系李委員振誥：(書面資料)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請將第一年成果與本年度計畫之關聯性作一簡介，以資使本年度之延續性。 2. 請說明表 8-5 至表 8-9 內所得值變異之原因，及如何運用於本年度模式之預測。 3. 地電阻 3-D 影像之解析精確性，以及與現場鑽孔之地層剖面兩者之比較及驗證，須於期末報告中提出。 4. Zlotnik (1998)理論之垂直 K，於本年度中如何進行？ 5. 5-1 頁中模式發展含不同密度質量傳輸模式來模擬海水入侵，是否未來有運用於濱海地區之實驗？或僅運用於污染物傳輸？ 6. 建議除本計畫發展模式外，應利用其他已發展成熟之模式軟體來比較其精確度。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 感謝委員意見。主要造成此一變異之原因在於本研究場址之非均質性所造成，已於第十章中說明。 3. 遵照辦理。 4. 感謝委員意見。已於期中報告 9.1 節中說明。 5. 將利用過去蒐集的資料，不擬進行實驗。 6. 礙於時間，目前僅能依照合約進行模式的發展、測試、驗證。將來有機會將會進行進一步之比較。 |

| | |
|---|--|
| <p>逢甲大學水利系許教授少華：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 許多重要文獻並未列出在文末，如文中 8-11 頁 Hantush(1966)等非等向飽和水力傳導係數的論文出處。Sauty(1980)的文獻也未列入工作執行計劃書。 2. 本研究利用 Hantush (1966)的理論來分析，但並未先說明現地條件與此理論之假設條件相去多遠？ 3. 8-12 頁(8.7)式之 u_{xy} 定義似乎不正確？ 4. 是否可利用模式先做 Hantush 理論的 forward problem 檢驗，如在已知 k_x、k_y 條件下，與現地場範圍條件下。 5. 砂箱實驗的遲滯係數 R 的造成原因是否來自吸附效應？若是則所用的溶質物質與孔隙介質間的吸附效應應先做一探討。如是否是線性的？吸附的等溫曲線為何？ 6. 延散度 (Dispersivity) α 乃尺度 (scale) 的函數，已砂箱實驗所求的延散度勢必與現場不符。如何 link 模式、砂箱實驗與現地。 7. 陳家洵教授在中央大學也曾建立相同尺度的現地研究井群， | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員指正。已於期中報告參考文獻中補充。 2. 感謝委員意見。已於期中報告 9.2.4 節中補充說明。 3. 感謝委員指正，已更正為(9.6)式。 4. 感謝委員的指導。本項工作為數值模擬工作，將請本團隊主持人負責此項工作。 5. 本計劃在不考慮輻射衰減及化學反應 ($\lambda=0$)，但考慮固液轉換效應 $R_d=1+\beta$ 的集塊參數 (Lump parameter)。β 為污染物液態及固態間集塊比例常數 (假設平衡為等溫狀態)。 6. 感謝委員意見。本試驗目的在於提供一組可控制條件下之污染傳輸情形，以供數值模擬之用。 7. 感謝委員意見。 |
|---|--|

| | |
|--|---|
| <p>是否也可利用其數據？</p> <p>8. 現地實驗是 3-D 的，故濃度採樣也須再同一點位採不同高程的濃度，是否可做到？</p> <p>9. 應對類似的實驗作代表性的文獻回顧。</p> <p>10. 數值模擬現場的條件設定，也應考慮以背景主流向維 x 軸的方位來模擬不抽水時的自然梯度水力梯度條件，如此可避免 K_{xy}、K_{yx} 非為零的不確定條件。</p> <p>11. 得到圖 8-6 的條件，是在 S 值為多少的條件下，應加以說明。</p> | <p>8. 感謝委員意見。本試驗主要利用自製電導度計及商用電導度計做同一點位不同高程濃度監測。再以水面採樣做採樣分析，以校正商用電導度計。</p> <p>9. 遵照辦理。</p> <p>10. 謝謝指教。本研究模式可計算 K_{xy}、K_{yx} 非為零之情況。</p> <p>11. 推算水力傳導係數時(即圖 8-6)使用穩態之流況，S 值趨近於零。</p> |
| <p>大仁技術學院高教授華聲：</p> <p>1. 根據報告書指出，本年度工作是根據第一年所發展的地下水溶質質量傳輸模式，進行現地應用及發展具明顯交界面之密度變化多含水層系統地下水質量傳輸模式(p.4-1)，但是在第一年所使用的控制方程式(p.2-4 式 2.2)中並未包含密度變項，因此，本年度所發展密度變化模式，是否需要重新描述所採用之控制方程式。</p> <p>2. 在現地試驗研究部分，除了要進</p> | <p>1. 第二章擬發展具明顯交界面之密度變化多含水層系統地下水質量傳輸模式，所用之方程式與第一章完全不同，是一個全新的開始。</p> <p>2. 與逢甲大學許教授少華之第 5</p> |

| | |
|---|---|
| <p>行進行水文地質參數測定之實驗方法並建立水文地質影像分析技術外,同時還要配合地下水溶質傳輸模式校驗及應用所需要之資料。由式 2.2 中顯示,地下水溶質傳輸模數所包含的參數,除了延散係數,還包括遲滯效應(R_d)及一階比例常數 (λ),而這些參數除了受地質條件影響外,污染物本身特性也是影響因素之一,但由本年度之現地研究試驗內容,顯然並不提供這些參數,因此如果要以雲科大試驗場地進行模式應用時,請問要如何推估 R_d 及 λ 參數。</p> <p>3. 在現地試驗研究中,對於質量傳輸之現地試驗佈置、擬推估之參數及採用的分析模式,應可再說明清楚,尤其是如何透過現地試驗求得縱向及橫向的延散係數。</p> <p>4. 對於地電阻 3D 影像分析技術,根據報告指出水質將會影響地電阻試驗結果,因此在本年度工作是否也包含水質採樣及分析(在工作項目中好像未提到相關工作),以確定水質為非時變性。若水質為時變性且會影響地電阻的變化,是否有相關方法可進行修正。</p> | <p>點相同。</p> <p>3. (1)已於 9.5 節中說明。 (2)縱向及橫向分析於目前模式無法求得,如有需要將再參考相關文獻求得。</p> <p>4. 水質採樣分析工作,將在污染傳輸試驗工作中執行。</p> |
| <p>本所張課長耀澤：</p> <p>1. 建請針對試驗場址之地層邊界條件、地下含水層類型及均質性等地文資料加以說明,供作後續非等向水文參數分析時所</p> | <p>1. 遵照辦理。</p> |

| | |
|--|---|
| <p>採用理論分析方法其假設條件滿足與否之佐證參考。</p> <p>2. 砂箱試驗之配置,試材粒徑分布及試驗方法與步驟請加以述明。</p> | <p>2. 已於期中報告 9.4 節中說明。</p> |
| <p>本所大地課徐正工程司世定：</p> <p>1. 現地試驗”註明”完成數量並詳加說明。</p> <p>2. 傳輸試驗中，以微量抽水方式增加水頭，是否與自然傳輸狀態相同，請考慮有否影響因子。</p> <p>3. 請說明本次 Tracer 的種類。</p> <p>4. P8-1 頁，”東北高西北低走向”是否有誤，請查明。</p> <p>5. P8-2 中，去年度試驗所得場址之水力傳導係數介於 1.6×10^{-6}-8.3×10^{-6} m/s，與 P8-4 模式反推之係數介於 1.6×10^{-5}-7.0×10^{-5} m/s，造成不同及兩者間差異之因素為何似乎？</p> <p>6. 請依圖 8-6 說明其顯示的意義，是否合理？</p> | <p>1. 完成數量，為考量時程及工作量之下，於實驗將完成口數。</p> <p>2. 將破壞自然傳輸狀態流網及速度，但因本試驗有時間限制，因此只能以影響最小之微量抽水方式加快自然污染物含水層中傳輸速度。</p> <p>3. 本試驗所使用之追蹤劑為符合環保法規之氯化鹽。</p> <p>4. 該說明摘自上年度期末報告第四章第 57 頁對於試驗現場之描述。</p> <p>5. 模式反推之係數應介於 1.6×10^{-5}-7.0×10^{-5} m/min，報告中所呈現為筆誤。反推之係數介於雲科大所推算之係數之間，尚屬合理範圍內。</p> <p>6. 圖 8-6 為以模式反推所呈現之水力傳導係數分布，該圖顯示該試驗場地之非均質特性。</p> |

| | |
|---|---|
| <p>水利署官彥均先生：</p> <p>1. 請將本計畫所得之執行經驗，提出抽水試驗之 Qa/Qc 原則及方法。</p> | <p>1. 謝謝指教。已於報告中列表(表 8-2)說明。</p> |
| <p>本所大地課廖課長培明：</p> <p>1. 有關模式現地模擬，是否可以考慮利用本所水源課”西螺伏流水調查”計畫所鑽探的多口觀測井，請斟酌。</p> <p>2. 雲科大試驗場地質資料尚嫌不足，本所擬在不影響現場試驗的期程協助處理地質剖面調查。</p> <p>3. 砂箱試驗的目的，試驗重點及執行程度如何明確說明。</p> | <p>1. 謝謝指教。由於邊界條件的獲得並不單純，目前恐只能依合約進行。將來若有機會將斟酌進行模擬。</p> <p>2. 感謝 貴所的協助，此工作將有助於本試驗場地質剖面圖更加完整。</p> <p>3. 已於期中報告 9.4 節中說明。</p> |
| <p>經濟部水利署第一河川局李有平課長：</p> <p>1. 本計畫執行迄今，模式發展部分已利用雲科大現地試驗場址之抽水試驗資料進行驗證，二子計畫之整合成效值得肯定。</p> <p>2. 現地試驗部分，十分可貴的於計畫執行中執行地球物理探測地質剖面，建議於文中增加該成果描述，並與三口井地質柱狀圖比較。</p> <p>3. 於科專計畫中自行研發實驗儀器，立意甚佳，值得嘉許，為使該儀器未來得以推廣，建議</p> | <p>1. 謝謝審查委員之肯定。</p> <p>2. 因為本團隊初次接觸地電阻，因此技術尚未成熟，且因時效問題，因此目前只分析出地阻率分佈及抽水之影響，所以無法跟現有地質柱狀圖比較。</p> <p>3. 感謝委員意見，已於期末報告第四章第 4 節中增加本團隊所研發之導電度計之率定曲線。</p> |

| | |
|---|--|
| <p>將所研發之電導度計設備諸元及測試檢校結果。</p> <p>4. 本試驗之 Tracer 採用 NaCl，請注意現場之背景濃度及於地下水環境中之水化學變化。</p> <p>5. 示蹤試驗之現地佈置等細節，建議再作細部描述，如抽水捕捉區(Capture zone)之分析。</p> <p>模式部分建議將現地試驗示蹤試驗配置先行演算模擬，提供現地試驗參考。</p> | <p>4. 感謝委員意見。本試驗為配合環保署水質分析的標準液配製方法，將 Tracer 改為 KCl。且已開始監測背景濃度；而水化學變化在本研究中並無考慮。</p> <p>5. 感謝委員意見。已於期末報告第四章第 5 節中說明。</p> |
| <p>會議結論:</p> <p>1. 請將九十三年度工作內容之模式發展與現地傳輸污染實驗，配合契約書內容落實完成既定研究工作，並著重團隊嚴密協調組織計劃書中詳加述明整合研究具體之成果。</p> <p>2. 有關尚需進行研討及計畫研究整合所面臨的問題，在六月中旬請辦理現地觀摩及工作進度會報，將本次期初簡報與會人員意見及計畫書預計成果一併納入考量後，提出具體執行構想及可行性方案。</p> <p>3. 模式發展參數需求與現地試驗兩者關聯性，請於六月中旬工作進度會報中一併提出執行時</p> | <p>1. 遵照辦理。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 遵照辦理。</p> |

| | |
|--|--|
| <p>所需配合項目內容。</p> <p>4. 建立砂箱試驗的佈置的觀點與試驗程序的分析方法，每個試驗應明確列出規劃流程圖及進度表。</p> <p>5. 期中報告書改於七月底前送所辦理期中簡報事宜。</p> <p>6. 請依各委員所提供之寶貴意見請參酌並依據計畫期程辦理之。</p> <p>7. 期初簡報原則認可。</p> | <p>4. 遵照辦理。</p> <p>5. 遵照辦理。</p> <p>6. 遵照辦理。</p> <p>7. 謝謝審查委員之肯定。</p> |
|--|--|

附錄 C 工作會報審查意見處理情形

| 審查意見 | 辦理情形 |
|---|---|
| <p>水規所大地課廖課長培明：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫為兩個子計畫之整合，將現場試驗與模式發展結合原執行上就較為困難，但經過兩個研究團隊的努力與密切合作下，相信未來整合成效很值得期許與肯定。 2. 有關模式現場模擬，是否可以考慮利用本所水源課“西螺伏流水調查”計畫所鑽探的多口觀測井，本所已提供相關資料給台大模式發展時參考用。 3. 雲科大試驗場地質剖面調查資料若需要本所提供協助，在不影響現場試驗的期程內本所定全力配合。 4. 『雲科大』負責地下水質量傳輸現地試驗部分，請雲科大將 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝 貴所的肯定。 2. 謝謝委員之意見。經研讀報告後發現，若要利用西螺伏流水調查”計畫所提供之資料，進行污染傳輸現地模擬，由於資料尚不夠完整，可能無法執行。本年度已利用分層三維地下水流模式，探討上年度試驗場址之抽水試驗資料。此外，本年度主要之工作項目為發展具明顯交介面密度變化之地下水流模式。因此，若在不影響工作進度以及計畫時程及人力允許下，本研究團隊擬進行“西螺伏流水調查”計畫抽水試驗現地模擬此項額外工作項目。 3. 感謝 貴所的協助，此工作將有助於本試驗場地質剖面圖更加完整。 4. 遵照辦理。 |

| | |
|---|--|
| <p>各項試驗觀測之基本資料整理成五本附冊及電子檔與期末簡報一併裝訂成冊，且提供較完整試驗數據供模式率定並驗證使用。</p> <p>5. 『台大』負責地下水質量傳輸模式之發展，建議台大將現污染物質量傳輸及模式發展時，所需物理參數及模式所需資料，整理模式使用說明書並辦理兩年之成果教育訓練，以利甲方執行模式分析應用。</p> | <p>5. 遵照辦理。</p> |
| <p>經濟部水利署李榮崇先生：</p> <p>1. 水利署本年度已將本計畫移由水規所續辦，尊重並配合所裡的執行情形及決定。</p> | <p>1. 感謝委員指正。已於期中報告參考文獻中補充。</p> |
| <p>成大水工所余組長進利：</p> <p>1. 針對各個試驗的流程及校正方法已詳細敘述，對於現場試驗的專業把關也顧慮到小細節，提高試驗成果的正確性的說服力。</p> <p>2. 於本年度中試驗場址中如何決定抽水量，以利抽水試驗的進行？</p> | <p>1. 感謝委員的肯定。</p> <p>2. 抽水試驗之抽水量，大致利用以往抽水試驗經驗決定。以避免抽水時，發生抽乾或洩降太小及影響半徑過小之情形發生。</p> |
| <p>主辦課(會議結論)：</p> <p>1. 本計畫為兩個子計畫之整合，將現場試驗與模式發展結合原執行上就較為困難，但經過兩個</p> | <p>1. 謝謝 貴所的肯定。</p> |

| | |
|--|--------------------|
| <p>研究團隊的努力與密切合作下，相信未來整合成效很值得期許與肯定。</p> | |
| <p>2. 『雲科大』負責現地試驗部分，請雲科大將各項試驗觀測之基本資料整理成五本附冊及電子檔與期末簡報一併裝訂成冊，且提供較完整試驗數據供模式率定並驗證使用。</p> | <p>2. 遵照辦理。</p> |
| <p>3. 『台大』負責模式之發展，建議台大將現污染物質傳輸及模式發展時，整理模式使用說明書並辦理兩年之成果教育訓練，以利甲方執行模式分析應用。</p> | <p>3. 遵照辦理。</p> |
| <p>4. 砂箱試驗的佈置與各現場試驗之試驗程序分析及儀器校正等，皆明確列出規劃流程圖及進度表，對於試驗成果亦進行Qa/Qc之原則及方法，肯定『雲科大』對於研究計畫的用心及現場試驗的專業。</p> | <p>4. 感謝委員的肯定。</p> |
| <p>5. 工作會報簡報內容相當充實專業也值得嘉許，兩個研究團隊更展現團隊合作的默契，本次工作會報順利圓滿。</p> | <p>5. 感謝委員的肯定。</p> |

附錄 D 期中報告審查意見處理情形

| 審查意見 | 辦理情形 |
|--|--|
| 國立成功大學資源工程系李教授振誥： | |
| 1. 請將雲科大試驗各井相關距離與位置，列一張表圖示意之於計畫內，並說明水位流向與流速。 | 1. 感謝委員意見，已於圖 4-64 表示。 |
| 2. 異向性水力傳導係數分析，請參考 Neumau (1984)文章取多孔觀測井進行迴歸，以求得整體異向性係數結果。 | 2. 感謝委員意見，已於第四章第二節更正。 |
| 3. 本計畫是否須進行異向性延散係數試驗分析，另外，如何將本計畫異向性K與D，應用於現場場址分析？ | 3. 本試驗於各方向及深度做水質監測，因此可以分析出異向性K與D。 |
| 4. 質量傳輸模式請用解析解來驗證模式之正確性。 | 4. 謝謝委員指教，已遵照辦理。 |
| 5. 請將實驗洩降曲線與標準曲線之擬合圖列出，亦即每一抽水試驗中每口觀測井與抽水井間水位洩降圖與標準曲線擬合圖。 | 5. 已於圖 4-23 與圖 4-24 展示。 |
| 6. 請說明計算的視電阻率剖面與解釋結果之電阻率構造剖面差異如此大。並列出不同顏色之電阻率值。 | 6. 感謝委員意見，已於第四章第三節中說明，並於圖 4-32 至圖 4-41 列出電阻率值。 |
| 7. 請再表示試驗之單位與名詞統一。 | 7. 感謝委員意見，遵照辦理。 |

| | |
|---|---|
| <p>8. Kruseman and De Ridder, 1980 文獻缺。</p> | <p>8. 謝謝委員指正，將補上。</p> |
| <p>逢甲大學水利工程學系許教授少華：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 有關海水入侵模式的發展之文獻回顧部份是否可加提葉高次的 3DFEMFATE？或是否其 3DFEMFATE (已在你的文獻中) 也有海水入侵的驗證例？ 2. 期初報告時，我所提的若干問題，在回覆意見中所做的說明，似乎與期中報告中的頁數、章節、公式號碼有所不符。 3. K值的單位有時用 m/s，有時用 m/min...，可否統一？ 4. 本計畫由水利署台北辦公室轉至水利規劃試驗所，依開會中所提的意見，可反應出水規所大地課與研究團隊之間的溝通需要加強，而研究團隊也應進一步來瞭解大地課對此計畫的期望與真正需求。 5. 報告的撰寫請加強深入淺出，好讓李振誥老師可以看得懂。 6. 針對期初簡報的回答中，指明模式可計算 k_{xy}、k_{yx} 非為零的情況，是否可模擬主流向在 45° 角由右上流向左下時污染物傳輸的污染因變化情形？ 7. 針對大區域小範圍的模擬需求 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員指教，遵照辦理。 2. 謝謝審查委員指正，改正之。 3. 遵照辦理。 4. 謝謝審查委員的意見，研究團隊會與主辦單位繼續溝通。 5. 謝謝委員之建議，遵照辦理。 6. 該驗證已於 Tsai(1995)文獻中驗證，在此不另行驗證。 7. 謝謝委員建議，遵照辦理。 |

| | |
|---|--|
| <p>請滿足大地課的訴求。</p> | |
| <p>大仁技術學院高教授華聲：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告中指出，海水不會穿越阻水層之假設，是否合理？一般應該還會存在擴散現象，因此對於此種地層，建議仍由質量平衡考慮其關係式。 2. 利用 3-D 地電阻，可能解地層變化情況，但可發現，進行抽水時即會有改變。在現場應用時，可能會在民井抽水時進行測試，因此，若要推廣到現場應用，是否會有很大誤差產生？ 3. 對於模擬模式可準確模擬現場結果之合理性的說明，可否以統計的方式加以描述，例如平均誤差及其標準偏差等。 4. 受到非均質影響，因此三口井中，以不同井當抽水井所得的非均向 k 值也不一樣，因此，模式演算應如何處理這些 k 值？ 5. 內文之參考文獻與所列文獻不太一致，請修正。例如 8-2 頁 Zlotnik 和 Ledden (1994, 1996)。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 在阻水層中之變化為長時間之變化，與海水入侵之時間尺度不同，因此在推導時假設海水部會穿透。 2. 因現場應用無法掌握確實的抽水情形，所以確實有誤差產生。 3. 目前並未掌握有詳細的試驗資料，因此，期待雲科大團隊所提供之詳細試驗資料，未來模擬時將遵照辦理。 4. 試驗是配合解析解，整區以一非等向 K 值表示之，而模式則是各網格點的純量 K 值均可不同，兩者邏輯不同，但模式考慮的層面顯然較廣。 5. 謝謝委員指正，已於第四章第一節更正。 |
| <p>經濟部水利署第一河川局 李課長友平（書面報告）：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫執行迄今，在模式發展、現場試驗及整合，均有豐碩成果，水試所主辦同仁及研究團隊 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝審查委員之肯定。 |

| | |
|---|---|
| <p>的用心值得肯定。</p> <p>2. P.7-8~P.7-9 中，圖 7-8、圖 7-9，有部份井位相差較大，建議檢討其原因。</p> <p>3. P.8-6，圖 8-10 及圖 8-12，所表示的應是儀器校驗，而非率定，建議修正。</p> <p>4. P.8-35，圖 8-29、圖 8-30，導電度計率定曲線，如有可能，建議調配 KC1 標準液為之，即調配 KC1 濃度 0.100、200~1000 及 1000、2000~8000 之標準濃度進行率定，以避免非線性（尤其低濃度部份更容易有非線性），目前只以三點進行迴歸，易有偏頗，如有可能建議增加。</p> | <p>2. 因水力傳導係數採用人工試誤法，所推算出之水力傳導係數分佈未盡完美，因此造成模擬誤差。</p> <p>3. 謝謝委員指正，已於圖 4-12 及圖 4-14 更正。</p> <p>4. 感謝委員意見，已於圖 4-51 之十點率定。</p> |
| <p>經濟部水利署李榮崇：</p> <p>1. 模式之發展與應用，必有其邊界條件之限制，本計畫截至目前所得之試驗分析所得參數限於均質非等向性水文參數及初步之地質參數，至於地下水質之污染傳輸參數仍待界定，並建議於期末報告中將各項參數明列其合理範圍。</p> <p>2. 地下水質、量之變異以及現地地質參數之不同，勢必影響傳輸模式運算之成果，如何就實用性之目的界定合理之參數範圍？又檢核此模式之標準如何訂定？（亦即超過此參數之範圍時，模式要</p> | <p>1. 謝謝委員之建議，模式所需輸入之參數已列表於報告中。</p> <p>2. 謝謝委員之意見。</p> |

| | |
|--|---|
| <p>如何修正足以真正讓使用者使用?)</p> | |
| <p>本所張課長耀澤：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 非等向水文參數分析擬以 Hantush 法、Hantush-Thomas's 法及 Papadopulo 法來分析，三法之間假設條件之差異性及分析法之適用性如何？請於報告加以說明。研究場址之含水層為非均質，而以 Hantush 法在均質條件作參數分析，分析結果之影響性如何？ 2. 圖 8-2 之符號意義請加以補充說明，圖 8-3 字體不清晰，請予修飾之。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，因為此三種方法皆為均質非等向分析，所以接受李委員意見，利用 Neuman 法分析。 2. 謝謝委員指正，已於圖 4-2 更正。 |
| <p>本所水資源規劃課趙永楠：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 污染傳輸試驗中，利用抽水方式產生較大水力坡降以加速地下水流速，其中抽水速度之穩定控制很重要，如何克服可能之擾流等問題？ 2. P.8-38，QA /QC 提到當自製電導度計與採樣分析水質相差大時，以採樣分析為主，不清楚為何要用自製電導度計（市面有很多便宜的商用導電度計）？ 3. 預期成果預計完成一次污染傳輸試驗以求取延散係數及遲滯係數，此求出之值能否有適用性及 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本試驗於進行中，將即時監控監測井內之水位洩降量及抽水速度，以避免擾流等問題出現。 2. 因本研究所需之電導度計量非常大，如果購買必需相當經費。而自制不儘能訓練學生，亦可減少支出。 3. 感謝委員意見，因此試驗時程的問題，因此寫至少完成一次污染傳輸試驗。而此次試 |

| | |
|---|---|
| <p>代表性，請考量。</p> | <p>驗為完成分析的次數，且於下年度執行重覆分析，以證明代表性。</p> |
| <p>本所大地課徐正工程司世定：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 摘要格式，請依本所格式編撰。 2. 報告是否分章節，請統一。 3. P.7-6 率定所得 T 與去年度之計算值比為何？ 4. P.7-7 誤差範圍之內？是多少？ 5. P.7-8，請將圖 7-6 放大。 6. P.7-7、P.7-8 為何用這種 scale，而不是半對數時間軸×300 min，是否將短時間略掉。 7. P.7-10 圖 7-9、7-10 是否標示抽水位置，並將真實水位列入作比較。 8. 請解釋 P.7-10 之圖為何出現多個 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 去年之微水試驗所推算之水力傳導係數 K 介於 $2.4-2.6 \times 10^{-5} \text{m/min}$，介於試誤法所推出之水力傳導係數 $1-7 \times 10^{-5} \text{m/min}$。 4. 試誤法再推算水力傳導係數時係採用人力推算，因此推算之結果未盡完美，但已與試驗結果相符。 5. 遵照辦理。 6. 若時間軸以對數(10 為底)表示，則為 $-\infty$ 至 2，以正常值表示則為 0 至 4500，因此以對述表示顯然是要 0 附近之值，以正常值表示則是要看長時間的趨勢。此部分的目的是要看長時間的趨勢，故以正常值表示較妥。 7. 圖 5-7 與圖 5-8 為顯示模擬結果，並非必要，抽水位置因有非線性變化因此未將抽水井位置水位置入。 8. 圖 5-8 未將抽水井位置及抽水 |

| | |
|---|--|
| <p>中心。</p> <p>9. P.7-11 結果第 4 點“粗糙導水係數”請說明。</p> <p>10. P.8-3 圖 8-3 請清稿。</p> | <p>井水位置入，僅為了與圖 5-6 相比較。</p> <p>9. 謝謝委員指教，p.188 文字部分已修正。</p> <p>10. 謝謝委員指正，已於圖 4-3 更正。</p> |
| <p>本所大地課廖課長培明：</p> <p>1. Femwater 已有 2000 年之資料不宜再用 1980 年之模式發展比較。</p> <p>2. 有關解析解之分析標準？</p> <p>3. 大區域、小範圍如何區分？</p> <p>4. 不同含水層（多層含水層）為主，惟試驗並未分層，是否合理？</p> <p>5. 圖 1-1 總體計畫流程圖有誤，請將團隊總體計畫流程圖將現地試驗與模式鏈結完整，才能一目了然工作分工的情形。</p> <p>6. 目錄及章節編列請統一，及文章內容編列細節的部分請重視資料校正的 QC 工作。</p> <p>7. 對於本年度工作方法及步驟請將今年度的工作情形敘明重點。</p> | <p>1. Femwater 過去從未實際應用現地模擬，因此並無從比較起。</p> <p>2. 解析解僅供階段性模式之驗證，未來模式將與現地試驗結果配合驗證。</p> <p>3. 大區域是指實際應用於現地模擬，小範圍則是指模式之精確性可與解析解作驗證比較。</p> <p>4. 模式既可模擬多含水層問題，自然可算單含水層問題。</p> <p>5. 遵照辦理。</p> <p>6. 遵照辦理。</p> <p>7. 遵照辦理。已於第四章中說明。</p> |

| | |
|--|--------------------------------------|
| 8. P.3-1, (一)地下水質量傳模式之發展, 無第 1、2 項, 另 5. 選擇應用地區 (國內外實測資料), 應用地區為何? | 8. 謝謝委員之指正, 改正之。 |
| 9. P.6-1, 將六、預定進度甘梯圖更正期中報告繳交時間, 依會議結論的決議七月底為合約繳交日期。 | 9. 遵照辦理。 |
| 10. P.7-11, 試誤法不需做均質、等向性等假設? 請說明。 | 10. 試誤法並不需作均質、等向性之假設, 僅需猜測水力傳導係數分布。 |
| 11. P.7-13, 圖 7-12 實線為未分區之結果? 線條不明確。 | 11. 因兩圖相似程度過高, 因線條重疊才造成線條不明確。 |
| 12. 於第八章地下水質量傳輸現地試驗研究之試驗流程圖中資料的 QA/QC 是否為試驗主軸, 請修正文字修辭。 | 12. 謝謝委員指正, 已於第四章更正為試驗主軸, 修正為 QA/QC。 |
| 13. 請將圖 8-3 標示文字清楚顯示。 | 13. 謝謝委員指正, 已於圖 4-3 更正。 |
| 14. P.8-13, 8.2 非等向水文“參數分析”, 應改為“參數試驗分析”較為恰當。 | 14. 謝謝委員指正, 已於第四章第三節中更正。 |
| 15. P.8-14, 含水層為均質, 而在水平方向是非等向, 但 P.8-15, 由地質剖面圖可知本研究場址為非均質含水層, 請說明理論假設與真實間無法運用之合理性。 | 15. 感謝委員意見, 已接受李委員之意見利用 Neuman 法分析。 |
| 16. P.附-10, 已於期中報告 9.4 節 | 16. 謝謝審查委員指正, 改正之。 |

| | |
|---|--|
| <p>中說明，並無 9.4 節？請確實將審查意見處理情形內容詳加於報告書內說明清楚。</p> | |
| <p>本所大地課顏工程員鈺靜：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 關於合約期中報告進度，報告書於 7 月 28 日收到，於 5 月 14 日期初簡報會議結論第五點說明：期中報告書已改於七月底前送所辦理，但於 6-1 預定進度甘梯圖卻說明九十三年六月十五日前繳交，但附錄二，期初簡報審查意見卻獨漏李友平委員之意見及會議結論。 2. 關於模式採用分層三維地下水流模式，抽水試驗分層標準為何，P.7-8 及圖 7-6 水力傳導係數分佈是那一土層之水力參數分佈圖。 3. 有關於土層結構具複雜及非均質性，其解析解如何克服邊界的複雜性，且於 P.7-21 說明邊界水頭為定水頭，是否適用當地場址的條件。 4. 關於具明顯密度變化交界面之多含水層系統地下水模式，在解析解方面，皆採用杜布假及固定明顯交界面，並假設海水水頭為一固定值，是否合宜，此解析解輔以黑蕭模式，何謂黑蕭模式？其控制方程為何請說明？ 5. P.8-27 頁結論，說明建立本研究場址之 3-D 水文地質圖，並與已 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝審查委員指正，改正之。 2. 雖然模式具分層模擬之能力，但因雲科大之試驗場地並不大，模擬時可以均質代表。因此模擬時採用單一均質土層模擬。 3. 模擬時並非採用定水頭，而是以八口觀測井之水位外推試驗場地各時刻之水頭邊界。模擬結果與洩降趨勢相符顯示邊界之適當性。 4. 海水受潮汐影響，因此並未假設邊界為定水頭，也可設定為通量邊界。黑蕭模式廣泛描述於各課本，將補充於下次報告中。 5. 感謝委員意見，遵照辦理。 |

| | |
|---|--|
| <p>知地質剖面圖比較，請將結果詳說明於報告書中之頁數。</p> <p>6. 於 P.7-28 圖 7-22 試驗結果於 T=50h, 是何種因素造成與試驗結果 (OBSERVED) 及 MMOC3 模擬結果, 差異性較大的原因。於 P.7-29 圖 7-23 沿 Z=0.8 m 之 x-y 斷面本模式模擬濃度分佈圖為何不是由 X=0 m 向右邊界擴散, 是否可說明擴散現象及原因。</p> <p>7. P.9-1, 關於地下水質量傳輸模式之發展, 第 2 項及第 3 項請詳加說明模式結果之與真實的差異性及無法克服等因素。</p> | <p>6. 葉教授之試驗場地地質條件複雜, 且未提供地下水流速, 在模擬時流速是以試誤法推算, 顯然所推算之流速未盡完美, 因此在較長模擬時間會有較大的差異。注入井位於右側, 因此擴散方向由 x=7m 處向左擴散。</p> <p>7. 謝謝委員的指較, 將修正文字的描述。</p> |
| <p>結論:</p> <p>1. 請所內部檢討本模式之實用性。</p> <p>2. 請將各學者專家審查意見及辦理情形, 於期末報告時交待清楚。</p> <p>3. 期中簡報原則認可。</p> | <p>1. 遵照辦理。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 謝謝審查委員之肯定。</p> |

附錄 E 期末報告審查意見處理情形

| 審查意見 | 辦理情形 |
|--|---|
| <p>成功大學李教授振誥(書面意見)：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃中現場傳輸現地試驗分析過程相當完整，其中包括利用 Zlotink and Ledder (1996) 方法求 Kz 與 Neumau 方法求 Ta 與 Tb 異向性。請於第四章前言部分將各井位置與距離圖列出，並將所有觀測井之洩降曲線與最佳標準曲線套疊列出。 2. 建議未來可用第三章所發展之模式，並配合第四章所求出之異向性，模擬與預測此地層之洩降曲線，並利用觀測井水井資料驗證其誤差值，以資了解水位變化。 3. 電阻測量結果建議與地質鑽探岩心結果相比較以驗證其誤差分佈。 4. 請說明 p127 中 $T\alpha$ 與 $T\beta$ 如何轉入 $K\alpha$ 與 $K\beta$ 之值。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員指教，遵照辦理。各井位置與距離，已於報告第四章中增加；而所有觀測井之洩降曲線與最佳標準曲線套疊列出，則因數量過多，將於技術手冊中增列。 2. 謝謝委員指教。 3. 謝謝委員指教，遵照辦理。 4. $k=T/D$ 所以只要除以含水層厚度，即可求出 k。 |
| <p>成功大學余組長進利(書面意見)：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫為三年度的連續計畫，報告中將去年及本年之研究內容與成果及未來三年的工作計畫，均能加以摘要列出，實有助於計畫目標與全貌之瞭解， | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員鼓勵。 |

| | |
|--|--|
| <p>值得稱許。</p> <p>2. 至於本年度計畫各工作項目執行過程與成果，雖已於報告各章節中有所說明，但難以看出是否已能符合計畫之承諾與合約之要求，應可再加強說明，以利計畫之審查。</p> <p>3. 例如，p97 中曾提及，本年度進行之「垂直水利傳導係數試驗」(packer test)，曾因柱塞器 (packer) 設計不良，而改以研究團隊於今年所設置之 10 口 1 吋分層監測井取代。諸如此類說明，應可再求詳細。</p> <p>4. 本計劃「非等向水文參數試驗分析」，採用 Newman(1984) 所提出的方法加以分析，而分析過程後半段 p123-p127 中，利用第二次及第三次分析，重新套疊 Theis 標準曲線圖，已收斂偏差平方總和之方法，是否為該文獻中之方法？</p> <p>5. 三次結果所得之主軸方向有所明顯差異，代表何意？何以第三次分析結果，即可認為偏差平方總和已趨於極小值？</p> <p>6. 本計劃設置於雲林科技大學之試驗井場，有關監測井及含水層之各項基本資料，例如井徑、井</p> | <p>2. 謝謝委員指教。</p> <p>3. 謝謝委員指教，遵照辦理。已於垂直水力傳導係數試驗中說明。</p> <p>4. 並非本文獻中之方法，而是本研究團隊為了減少其誤差，而加入之最小二乘法，所做之重覆疊代分析。</p> <p>5. 因本研究係利用最小二乘法，求得本研究場址最具代表性之主軸方向。而最小二乘法主要在於求得誤差最小值，因此重覆疊代分析後，第三次之誤差值最小，因此認定第三次之參數值最符合本場址之水文參數。</p> <p>6. 謝謝委員指教，已於報告第四章中增加。</p> |
|--|--|

| | |
|--|-----------------------|
| <p>篩位置及地層柱狀圖等，應於第一年度井場設置時，於報告中已有詳列，因此本年度並未再加以列出。惟此類資料，為現地試驗結果進一步研判的基本，因此建議每年報告中均能以列出</p> | |
| <p>7. 第五章「第一年度相關水文地質參數試驗資料之分析」，由於第一年度5次抽水試驗之結果，除了第三次第四次之結果較為接近外，其餘在排序上有極大之差異，甚為詭異，因此本年度進一步以試誤法加以分析。建議，詳細調查試驗井場附近是否有其他干擾因素（例如，抽水井或補助源）；或者試驗當時是否有自記式水位計錯置或編號誤記之情形；或者加大抽水量重新試驗。</p> | <p>7. 謝謝委員的意見。</p> |
| <p>8. 試驗場址在地表下15.65公尺內之土壤結構，大致為砂質壤土，依抽水試驗結果，儲水係數甚小，屬拘限含水層，能否針對含水層作進一步描述？</p> | <p>8. 如圖4-2所示。</p> |
| <p>9. 報告中部份誤植或模糊不清處，請訂正</p> <p>(1) pXVII，<u>308</u>微水試驗</p> <p>(2) 103 自記是水位記</p> <p>(3) 109KZ</p> <p>(4) p114,.....代表水位穩定，<u>試驗結果</u></p> <p>(5) p125 代入式(4.26)</p> | <p>9. 謝謝委員指正，已更正。</p> |
| <p>大仁技術學院高教授華聲(書面意見)：</p> | |

| | |
|---|---|
| <p>1. 在報告中，第三章之目的為地下水質量傳輸模式之發展、驗證與應用，但在第五章中的地下水質量傳輸模式之應用確是採 MMOC3 的模式，而不採用本研究自行開發之模式，請進一步說明原因？</p> <p>2. 在第四章中的汙染傳輸試驗，對於理論分析(174 頁)說明的似乎不過清楚，例如要如何利用該理論進行分析，分析之後會得到哪些參數？</p> <p>3. 在 190 頁，本研究模擬是採用 yeh et al.(1955)之試驗條件，還是雲科大之試驗成果？若是 yeh et al.(1955)之試驗成果，在 187 頁已提到 yeh et al.(1955)採用 MMOC3 的模式進行模擬，因此報告中為何還要進行一次模擬？若為雲科大之試驗成果，試驗參數採用 yeh et al. 等之試驗參數，是否合理？</p> | <p>1. 本研究乃於第五章採用自行開發之模式模擬，並與 MMOC3 模式之模擬結果及現地試驗結果比較，而非採用 MMOC3 模式模擬。</p> <p>2. 謝謝委員指教，遵照辦理。已於汙染傳輸試驗中加以說明。</p> <p>3. 本研究採用 yeh et al. (1995)論文內之現地試驗結果以驗證模式應用於現地之可行性，yeh et al.(1995)文中已以 MMOC3 模式模擬，因此，在模擬後將本研究模擬之結果與現地試驗結果及 MMOC3 模式結果比對。當時雲林科技大學之現地質量傳輸試驗尚未完成，因此未使用雲林科技大學之試驗成果。</p> |
| <p>第一河川局李課長友平(書面意見)：</p> <p>1. 本計劃執行迄今，模式發展及現地試驗二子計畫成果豐碩，值得肯定。</p> <p>2. 模式發展子計畫中，發展了質量傳輸模式及海水入侵模式二部份，請說明未來如何整合。</p> <p>3. 現地試驗部份，建議將現地試驗場址圖與傳導係數主要次要</p> | <p>1. 謝謝委員的肯定。</p> <p>2. 海水入侵模式目前僅發展具明顯交界面之模式，後續將以具明顯交介面模式配合擴散模式模擬實際之無明顯交界海水入侵。</p> <p>3. 謝謝委員指正，遵照辦理。圖</p> |

| | |
|---|---|
| <p>方向套疊，另結論中缺乏儲水係數 S 之探討。</p> <p>4. 砂箱試驗成果良好，未來如何將技術轉化為標準程序或教學資料，建請參考。</p> <p>5. 本計劃發展了電導度計實用性佳，建議考量推廣之。</p> <p>6. 模式使用上，明年度建議考量人性化操作介面。</p> <p>7. 本計劃為科專計畫，依國科會要求需發表期刊文章，計畫中好的結果建議發表。</p> <p>8. 本計劃未來要走到哪裡去，建議水規所與研究團隊研討之。</p> | <p>4.24 為現地試驗場圖與主要次要方向套置。S 值亦補上。</p> <p>4. 謝謝指導。</p> <p>5. 謝謝指導。</p> <p>6. 模式仍在發展階段。</p> <p>7. 謝謝委員的建議。</p> <p>8. 遵照辦理。</p> |
| <p>逢甲大學許教授少華(書面意見)：</p> <p>1. 本計劃所發展之地下水傳輸模式由驗證結果來看已具雛形，具有繼續發展之價值。</p> <p>2. 第 14 頁中提到，污染物依溶水特性可分為可溶性與非溶性，而非溶性之污染傳輸需應用多項流之概念。但於本計劃之模式似乎僅考慮可溶性污染物所造成之密度變化，並未提及多項流之模擬概念。</p> <p>3. 可否將第 86~89 頁圖 4-32~4-41 可知，現地土壤分佈情況及為不均勻，但目前本計劃所發展</p> | <p>1. 謝謝委員的肯定。</p> <p>2. 謝謝委員指教，本研究著重於可溶於水之溶質傳輸現象，並非非可溶之污染傳輸，因此並未提及。</p> <p>3. 模式問題無法回答，砂箱試驗主要在於探討土壤吸附現象，因此並無考慮現地情形。</p> |

| | |
|---|---|
| <p>之模式似乎未能模擬如此不均勻之情況。本計劃嘗試利用砂箱獲得污染物傳輸參數(延散度與吸附係數)，但由於本計劃之目標為與國內現地資料進行驗證以證明其實用性，故未來如何將砂箱實驗獲得之均勻土壤傳輸參數應用到現地非均勻土壤之模擬上，實為本計劃另一需思考之重點。</p> | |
| <p>水利署水文技術組張科長承宗(書面意見)：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃就自行開發模式與探測技術之提升，工作內容充實，成果豐碩。 2. 第五章有關地下水質量傳輸模式之應用，事實上僅討論野外試驗模擬應用，建議就模式功能性與應用性之考量對照國外模式範例類型，說明本計劃之特色，並請就各種功能應用範疇之起始條件、邊界條件設定提出建議。 3. 有關結論建議中，建議事項似乎均為第三年計畫預定工作項目，而非本模式之應用及資料觀測建議，建議充實。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的肯定。 2. 謝謝委員指教，本工作項目將列入下年度計畫工作內容。 3. 謝謝委員指教，將遵照辦理。 |
| <p>水規所水工試驗課郭助理研究員耀麟(書面意見)：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 海水入侵模式中，理論發展部份，薄層厚度採0.01B，是否進行敏感度分析，以得到較佳結 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究模式尚屬發展階段，將待模式發展成熟後進行敏感度分析。 |

| | |
|---|--|
| <p>果。</p> <p>2. 現地試驗今年之地電阻為何較高，是否是儀器或化性變化所引起的？</p> <p>3. 砂箱試驗採樣點分上中下採樣分析，是否再加二點以利結果之迴歸分析。</p> | <p>2. 謝謝委員指教。主要因打雷效應造成。</p> <p>3. 謝謝委員指導。因本研究砂箱為 50*100 cm 之體積，所以儲水量不大，因此如果採取超過 3 點，容易影響地下水模擬情形。故本研究只採 3 點分析。</p> |
| <p>水規所灌排規劃課李工程員家彰(書面意見)：</p> <p>1. 本計劃採用雲科大作為抽水試驗之場址，請問如何決定其監測井數目及位置。</p> <p>2. 在執行水文地質參數檢定時，其抽水井之水位洩降資料是否須考量潮汐所造成地下水水位波動之影響？</p> <p>3. 砂箱試驗分析時，為何只採 3 個數值結果進行線性迴歸以求出砂箱中延散度與延散尺度的關係式。</p> | <p>1. 謝謝委員指導。並無特定的方式決定其數目及位置，以試驗成果增加其必要性。</p> <p>2. 由抽水試驗結果之水位洩降與時間關係圖所示，並未顯示潮汐所造成之波動，因此未將潮汐波動之影響列入考慮。</p> <p>3. 謝謝委員指導。與水規所郭助理研究員耀麟第三點相同。</p> |
| <p>水規所大地工程試驗課廖課長培明(書面意見)：</p> <p>1. P.IX 請更正計畫緣起與目的文中所提及，主為提供台灣本土性地下水及污染物傳輸等相關地質參數推估方法之依據。</p> <p>2. P.XIII，由於第五次抽水試驗之</p> | <p>1. 遵照辦理。</p> <p>2. 由於水力傳導係數影響模擬結</p> |

| | |
|---|---|
| <p>抽水量與抽水時間，遠小於其餘四次。為恐影響反向推估之精確度，暫不採用五抽水試驗資料，其意義為何?模式之發展於相關水文地質參數試驗資料之分析是以何種標準評估試驗資料之合理性。</p> | <p>果甚鉅，在篩選抽水試驗資料時須謹慎。由於第五次抽水試驗之抽水量遠小於其餘四次，因此，由量階之觀念來看，微小誤差可能造成大的影響，因此先篩除。評估之方法為假設現地具定性行為，即預期洩降順序相同。</p> |
| <p>3. P.XIII，採用第四次試驗資料“率”定，請更正為採用第四次試驗資料“檢”定。</p> | <p>3. 謝謝委員的意見，率定應較檢定常用。</p> |
| <p>4. P.XIX，表 2 本研究模式所需輸入值建議依不同的模式應用上詳列該模式必須輸入執行之物理參數。</p> | <p>4. 謝謝委員指教，將於下年度計畫報告中列出。</p> |
| <p>5. 關於垂直水力傳導係數試驗監測井分層的原則及試驗的原理，請提供更多的資料以利說明。</p> | <p>5. 謝謝委員指教，已於垂直水力傳導係數試驗中說明。</p> |
| <p>6. P.2 地電阻 3-D 水文地質影像分析方面，如何將所得之成果應用於評估水文地質參數，建議將電阻率與水文參數間之列出關係式或兩者間的對照表。</p> | <p>6. 謝謝委員指導。地電阻必須與現有地質柱狀圖結合，分析出水文參數與地電阻之關係式。因時間關係，於技術報告中附上完整結果。</p> |
| <p>7. 請研究團隊於履約期限內完成辦理第二年教育訓練事宜，將教育訓練當日水利署同仁所提出之建議，作為本計畫研擬第三年度後續工作項目及研究方向的參考依據。</p> | <p>7. 將配合辦理。</p> |
| <p>8. 期末報告書中仍需加強結論與建議之撰寫，關於現地試驗於建議第三年度工作計畫略有不</p> | <p>8. 謝謝委員指教，遵照辦理。</p> |

| | |
|----|--|
| 足。 | |
|----|--|

國家圖書館出版品預行編目資料

地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究 (2/3)
= Development of groundwater mass transport
model and in-situ experiment(2/3) / 經濟部
水利署水利規劃試驗所編著, -- 第一版. -- 臺
中縣霧峰鄉 : 水利署水規所, 2004[民 93]
面 : 公分

ISBN 957-01-9679-3 (平裝)

I. 地下水

443.8

93023908

地下水質量傳輸模式之發展與現地試驗研究 (2/3)

發行人：謝勝彥

發行所：經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：台中縣霧峰鄉吉峰村中正路 1340 號

電話：(04)23304788 傳真：(04)23300282

編著：經濟部水利署水利規劃試驗所


出版年月：2004 年 12 月

版次：第一版

GPN 1009304430

ISBN 957-01-9679-3

版權所有，翻印必究

 經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：台中縣霧峰鄉吉峰村中正路1340號

網址：<http://www.wrap.gov.tw/>

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282

ISBN 957-01-9679-3



9 789570 196795

GPN：1009304430

定價：550 元