



# 中華民國自來水協會 108 年度研究計畫

## 臺北自來水管網水理分析應用 之規劃發展

### The Development and Application of Hydraulic Analysis in Taipei Area

委託單位:中華民國自來水協會

研究單位:中華民國自來水協會管理研究委員會

計畫主持人:陳明州

研究人員: 鄭答振、黃欽稜、陳韋嘉

張瑛興、李鴻利、謝連達

執行期間: 108 年 3 月 1 日至 108 年 11 月 30 日

中華民國108年11月



# 目錄

摘要 .....	1
Abstract .....	3
第一章 前言 .....	6
1.1 研究動機 .....	6
1.2 研究目的 .....	6
1.3 研究方法與架構 .....	7
第二章 文獻探討 .....	10
2.1 水理分析的歷史演進 .....	10
2.1.1 經驗法則時期 .....	11
2.1.2 基本理論發現期 .....	13
2.1.3 手算與模擬期 .....	16
2.1.4 電腦分析期 .....	19
2.2 國內外水理分析應用案例 .....	33
2.2.1 管網配水耗能優化 .....	33
2.2.2 加氯消毒策略 .....	38
2.2.3 水中多種反應物質交互作用 .....	43
2.2.4 配水管水泥內襯溶出與擴散 .....	51
第三章 圖資系統問題分析與對策 .....	60
3.1 圖資建置歷程 .....	60
3.2 現行圖資系統架構 .....	65
3.3 圖資系統問題分析 .....	67
3.3.1 問題分析 .....	67
3.3.2 水理模型資料與管線設備圖資相關性探討 .....	70
3.4 圖資系統解決對策 .....	79

3.4.1 管線資料重製.....	82
3.4.2 空間資料檢核及重製成果.....	87
<b>第四章 水理模型自動化建置及校正.....</b>	<b>97</b>
4.1 自動化建置流程.....	97
4.1.1 INP 檔案內容與管線設備空間資料關係.....	99
4.1.2 管網水理模型資料預處理程序.....	103
4.1.3 Web GIS 匯出管網模型檔案.....	110
4.1.4 內湖供水分區管網模型建立.....	113
4.2 水理模型校正.....	117
4.2.1 現場量測水壓作業.....	117
4.2.2 校正成果.....	119
4.3 後續各供水分區水理模型建置規劃.....	125
4.4 台水公司水理模型建置規劃.....	127
<b>第五章 相關面向加值應用.....</b>	<b>134</b>
5.1 評估管網承載能力及可能供水瓶頸.....	134
5.1.1 最大時需水量分析.....	135
5.1.2 最大日需水量分析.....	137
5.1.3 平均日需水量分析.....	139
5.1.4 最小時需水量分析.....	141
5.2 五年與二十年後之管網乘載能力.....	143
5.2.1 未來需水量推估.....	143
5.2.2 五年後管網分析結果.....	144
5.2.3 二十年後管網分析結果.....	149
5.2.4 民生南港線新設潛盾管支援東湖地區.....	152
5.3 送水幹管停止供水後之影響範圍.....	156

5.3.1 大同大直線出水分支管停水.....	156
5.3.2 大同大直線出水本管停水.....	158
5.3.3 松山內湖線出水分支管停水.....	161
5.3.4 幹管停水影響範圍評估.....	164
5.4 水齡分析 .....	166
5.4.1 多時段分析設定.....	166
5.4.2 水齡分析結果.....	168
5.5 污染擴散預測 .....	173
5.5.1 擴散預測.....	173
5.5.2 不降解污染物質投入分析.....	175
5.5.3 餘氯分析.....	176
5.6 三重地區增設三重二號配水池暨加壓站規劃及供水方式.....	180
5.6.1 三重供水分區現況.....	180
5.6.2 三重供水分區水理模型建置及校正.....	182
5.6.3 增設三重二號配水池暨加壓站供水方式之水理分析.....	184
5.6.4 三重二號配水池暨加壓站設備設置計畫.....	192
<b>第六章 後續實務應用模組規劃方向.....</b>	<b>194</b>
6.1 即時動態水理分析模型-監控中心.....	194
6.2 計畫性或突發性事件施工停水影響範圍 .....	195
6.3 小區封閉可行性評估 .....	196
6.4 突發性不明幹管漏水之位置分析 .....	200
6.5 管線損壞風險分析 .....	205
6.6 供水設施規劃設計 .....	206
6.7 台水公司 WADA 智慧水網系統發展 .....	209
<b>第七章 執行成果與建議.....</b>	<b>215</b>

7.1 執行成果 .....	215
7.2 建議 .....	219
7.3 未來展望 .....	223
<b>參考文獻 .....</b>	<b>225</b>

## 圖目錄

圖 1 本研究基本架構.....	9
圖 2 羅馬帝國時期的加爾水道橋，遺跡於現今法國南部.....	11
圖 3 發現於義大利波爾賽納的古羅馬水泵及運作原理.....	12
圖 4 對水理分析理論有貢獻的數學家及工程師.....	14
圖 5 伯努利 1730 年代發表的論文以能量方程解釋了水頭與流動.....	14
圖 6 Hazen Williams 的 C 值與 Colebrook-White 的 Ks 值之關聯.....	16
圖 7 美國結構工程教授發表以其姓氏為名的 Hardy Cross 算法 .....	17
圖 8 康乃爾大學 McIlroy 教授以電阻及電流模擬管網流動的設備 .....	18
圖 9 手算填表的 Hardy Cross 法以 Excel 演示流程，軟體現幾乎絕跡 ..	19
圖 10 普遍應用於水理求解的 Newton-Raphson 為一種迭代數值法 .....	21
圖 11 常見的水理分析軟體以及其支援的功能.....	22
圖 12 麻省理工土木系 1969 年針對自來水管網導入線性規劃分析 .....	24
圖 13 紐約 2 條既有輸水幹線的簡化水理模型(經曼哈頓為 1 號幹線)...	25
圖 14 阿德雷德大學所採兩種 GA 演算法收斂的造價與演算世代數.....	26
圖 15 學術界常用的公版模型－紐約輸水隧道及河內棋盤幹線.....	27
圖 16 紐約管網水齡分析，偏紅區域水齡高 DBP 濃度也較大.....	28
圖 17 紐澤西州多佛鎮兒童癌症事件-用 EPANET 辨識管網污染源.....	31
圖 18 密西根州 Flint 的管網模型 .....	32
圖 19 多倫多優化運作之軟件系統架構圖.....	33
圖 20 多倫多的管網主幹線圖（左）及常見的重力供水水塔（右） .....	34
圖 21 配水量及耗能在優化前（紅線）及優化後（綠線）的趨勢.....	35
圖 22 米蘭 EPANET 模型（左），過去採人工經驗操控水泵（右） .....	36
圖 23 米蘭的配水趨勢線，優化後節省配水量也節省電力.....	37
圖 24 大阪咲洲為獨立供水區，與管網分離，水源為遠方的淨水場 .....	38

圖 25 杯瓶試驗求 $k_b$ (左)、管網四點預測值及實測值 (右)	39
圖 26 水質模型找出咲洲供水區餘氯偏低的「水質敏感區」	40
圖 27 首爾兩供水區，日間用水略高於夜間，為住商混合區	41
圖 28 杯瓶試驗求取三鹵甲烷之一級增長反應係數	42
圖 29 加氯較濃致水廠 THMs 及餘氯偏高，但管網內生成 TMHs 少	43
圖 30 恩霍芬以 EPANET 模擬的水齡 (左) 與水溫 (右)	43
圖 31 於恩霍芬 A.B 區設置的兩種生物膜量測儀	44
圖 32 恩霍芬 72 小時細菌增生率，B 區管末缺乏流動，增生最多	46
圖 33 管網兩區 3 種虛擬細菌與水溫趨勢圖，以 I 型細菌最為興旺	46
圖 34 水體 (bulk)、管壁 (wall) 與整個系統 (system) 的關係	48
圖 35 雪梨經適用於不同溫度之 2RA 方程式擬合出杯瓶試驗 $k_b$	49
圖 36 以適用於內襯配水管的 EXPBIO 方程式擬合出管壁 $k_w$	49
圖 37 臺北以 4 種不同管壁 TDS 溶出實測擬合 K 及 $C_L$	52
圖 38 EPANET 的參數設定方式	53
圖 39 以實際三重中區模擬流動狀態下管壁溶出到水中的 TDS 擴散	54
圖 40 區域入口埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析	55
圖 41 區域入口埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析	56
圖 42 區域末端埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析	57
圖 43 區域末端埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析	58
圖 44 區域末端埋管(未磨水泥乳)之 TDS 擴散分析局部放大	59
圖 45 傳統圖資	61
圖 46 管線數值系統	62
圖 47 圖文流程管理系統	63
圖 48 設備管理系統功能圖	63
圖 49 Web GIS 系統	64

圖 50 自來水管線資訊管理系統架構圖 .....	66
圖 51 竣工原圖 (Visio 檔, 未具座標) .....	66
圖 52 管線設備數值圖 (向量圖, 具平面座標) .....	67
圖 53 消防栓現地位置不正確範例圖 .....	69
圖 54 竣工原圖 (管件圖) .....	70
圖 55 管線數值圖 (跳線) .....	79
圖 56 自來水管線設備空間料庫結構圖 .....	82
圖 57 管線設備數化重置作業流程圖 .....	83
圖 58 設備移動示意圖 .....	84
圖 59 無測量設施代入高程範例圖 .....	84
圖 60 管線資料轉置成三維作業圖 .....	85
圖 61 跳管管線圖元修訂範例圖 .....	85
圖 62 管線移動範例示意圖 .....	86
圖 63 依竣工圖輸入埋深示意圖 .....	86
圖 64 修正管線 Z 值成果圖 .....	87
圖 65 平面檢核項目作業程序圖 .....	88
圖 66 設備重疊檢核範例圖 .....	88
圖 67 建立拓撲關係規則圖 .....	89
圖 68 拓撲關係檢查結果匯出範例圖 .....	89
圖 69 拓撲關係檢查結果修訂範例圖 .....	90
圖 70 建立管線端點確認範例圖 .....	90
圖 71 比對管線端點與設備點位範例圖 .....	91
圖 72 修正不符管線端點範例作業程序圖 .....	91
圖 73 套疊航照圖比對設備位置圖 .....	92
圖 74 管線轉成節點範例圖 .....	93

圖 75 檢核 Z 值為 0 範例圖 .....	93
圖 76 檢核 Z 值異常範例圖 .....	94
圖 77 檢核完成作業成果範例圖 .....	95
圖 78 檢核完成作業成果管線範例圖 .....	95
圖 79 自動化產製 INP 檔流程圖 .....	98
圖 80 檢核完成作業成果範例圖 .....	99
圖 81 管網製作示意圖 .....	103
圖 82 管網建置流程示意圖 .....	104
圖 83 管網模型資料庫預處理流程示意圖 .....	105
圖 84 水理模型 ER-DIAGRAM .....	105
圖 85 內湖供水分區範圍圖 .....	110
圖 86 管網節點水量追蹤分配示意圖 .....	111
圖 87 管網節點水量距離分配示意圖 .....	111
圖 88 內湖供水分各加壓站及配水池基本資料 .....	112
圖 89 內湖供水分區模型圖（不顯示標籤） .....	112
圖 90 小加壓站管網刪除示意圖 .....	114
圖 91 加壓站設置示意圖 .....	114
圖 92 水量修正比例設定示意圖 .....	115
圖 93 內湖管網節點壓力分析結果示意圖 .....	116
圖 94 內湖管網節點流量分析結果示意圖 .....	116
圖 95 報表檔內容示意圖 .....	117
圖 96 水壓量測消防栓點位示意圖 .....	118
圖 97 現場實際水壓量測 .....	118
圖 98 校正前壓差分佈點位圖 .....	120
圖 99 輸入量測水壓值示意圖 .....	122

圖 100	建立 C 值群組校正示意圖 .....	123
圖 101	校正前後模擬與實測壓差變化圖 .....	124
圖 102	校正後壓差分布點位圖 .....	124
圖 103	北水處至台水公司交流參訪 .....	128
圖 104	台水公司委託計畫總顧問技術服務整體工作流程 .....	129
圖 105	模式建置流程 .....	129
圖 106	不同用戶類別之用水 pattern .....	131
圖 107	H <sub>2</sub> OMAP Water 檢核 GIS .....	131
圖 108	H <sub>2</sub> OMAP Water 檢核 GIS .....	132
圖 109	H <sub>2</sub> OMAP Water 將 GIS 資料匯入以產製水理模型 .....	132
圖 110	最大時流量流速大於 2m/s 位置示意圖 .....	135
圖 111	最大時流量流速小於 0.3m/s 示意圖 .....	137
圖 112	最大時需水量流速與管線長度分布圖 .....	137
圖 113	最大日流量流速小於 0.3m/s 示意圖 .....	139
圖 114	最大日需水量流速與管線長度分布圖 .....	139
圖 115	平均日流量流速小於 0.3m/s 示意圖 .....	141
圖 116	平均日需水量流速與管線長度分布圖 .....	141
圖 117	最小時流量流速小於 0.3m/s 示意圖 .....	142
圖 118	最小時需水量流速與管線長度分布圖 .....	143
圖 119	五年後平均日需水量流速與管線長度分布圖 .....	146
圖 120	五年後平均日需水量壓力分布圖 .....	146
圖 121	五年後最大時需水量流速與管線長度分布圖 .....	148
圖 122	五年後最大時松山內湖線出水端流速示意圖 .....	148
圖 123	五年後最大時需水量壓力分布圖 .....	148
圖 124	二十年後平均日需水量流速與管線長度分布圖 .....	150

圖 125	二十年後平均日需水量壓力分布圖.....	150
圖 126	二十年後最大時需水量流速與管線長度分布圖.....	152
圖 127	二十年後最大時需水量壓力分布圖.....	152
圖 128	東湖新增潛盾管工程位置圖.....	153
圖 129	五年後最大時需水量+潛盾管壓力分布圖.....	154
圖 130	二十年後最大時需水量+潛盾管壓力分布圖.....	155
圖 131	模擬幹管停水位置示意圖.....	156
圖 132	大同大直線出水分支管停水壓力分布圖.....	157
圖 133	大同大直線出水分支管停水管線流向改變位置圖.....	158
圖 134	大同大直線出水本管停水壓力分布圖.....	160
圖 135	大同大直線出水本管停水管線流向改變位置圖.....	160
圖 136	松山內湖線出水分支管停水壓力分布圖.....	163
圖 137	松山內湖線出水分支管停水管線流向改變位置圖.....	163
圖 138	內湖配水池每日水位變化圖.....	167
圖 139	多時段模擬節點需水量變化模式顯示圖.....	167
圖 140	東湖加壓站代表節點需水量變化模式顯示圖.....	167
圖 141	多時段模擬大同大直線出壓變化模式顯示圖.....	168
圖 142	多時段模擬松山內湖線出壓變化模式顯示圖.....	168
圖 143	水齡分析第 96 hours 時管網水齡分布圖.....	170
圖 144	不同距離節點與水齡隨時間週期變化關係圖.....	171
圖 145	內湖配水池釋放老水示意圖.....	171
圖 146	內湖配水池釋放老水示意圖.....	172
圖 147	松山內湖線汙染擴散分析結果圖.....	174
圖 148	大同大直線汙染擴散分析結果圖.....	175
圖 149	不降解污染物質濃度分布隨時間變化圖.....	176

圖 150 餘氯分析 96 hours 時管網餘氯濃度分布 .....	178
圖 151 不同距離節點與餘氯隨時間變化關係.....	178
圖 152 第 96 小時餘氯分析實際值與模擬值比較圖.....	179
圖 153 管網餘氯分布隨時間變化示意圖.....	179
圖 154 內湖配水池吐水影響示意圖.....	180
圖 155 三重供水分區供水系統.....	181
圖 156 忠孝橋新設 $\phi$ 1,500 mm 輸水幹管示意圖 .....	182
圖 157 三重供水分區管網水理模型.....	183
圖 158 既有三重加壓站停止營運平均日需水量模擬結果.....	186
圖 159 既有三重加壓站停止營運尖峰需水量模擬結果.....	187
圖 160 既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合營運之模擬結果 .....	188
圖 161 平均日需水量提升供水服務水準之模擬結果.....	190
圖 162 尖峰需水量提升供水服務水準之模擬結果.....	191
圖 163 監控中心即時動態水理分析示意圖.....	195
圖 164 Web GIS 系統計畫性或突發性事件施工停水影響範圍示意圖	196
圖 165 國際自來水協會建議漏水管理四大主軸.....	197
圖 166 「小區計量」工法.....	198
圖 167 流量計示意圖（早期部分流量計採用插入式流量計）.....	199
圖 168 Web GIS 系統評估小區封閉可行性示意圖 .....	199
圖 169 智慧小區流量計.....	200
圖 170 三重供水分區及加壓站暨監視點分佈圖.....	201
圖 171 三重供水分區監視點漏水期間壓力趨勢圖.....	201
圖 172 三重供水分區監視點漏水期間壓力趨勢圖.....	202
圖 173 三重供水分區試關水作業.....	202
圖 174 三重供水分區試關水期間監視點壓力趨勢圖.....	203

圖 175 漏水前後水壓變化.....	204
圖 176 管線損壞風險分析結果示意圖.....	206
圖 177 新增加壓站方式以加速東湖地區復水時程.....	208
圖 178 新增加壓站方式水理分析結果.....	208
圖 179 新增 $\phi$ 1000mm 管線水理分析結果.....	209
圖 180 透過水理分析進行供水設施規劃設計.....	209
圖 181 WADA 系統架構及資料流程圖.....	210
圖 182 WISE 整合平臺系統架構圖.....	211
圖 183 大數據之定義.....	212
圖 184 機器學習(管網漏水)作業流程圖.....	213
圖 185 漏水潛能分析圖.....	213
圖 186 分階段建立其他 10 個供水分區水理模型.....	224

## 表目錄

表 1 切分不同時段數的運算結果，S 為節省電力百分比 .....	34
表 2 輸入 EPANET-MSX 描述檔的水質參數 .....	45
表 3 雪梨使用七種擬合用方程式 .....	50
表 4 節點 (JUNCTIONS) 畫面屬性資料表 .....	72
表 5 水源 (RESERVOIRS) 畫面屬性資料表 .....	73
表 6 配水池 (TANKS) 畫面屬性資料表 .....	74
表 7 管線 (PIPES) 畫面屬性資料表 .....	75
表 8 抽水機/水泵 (PUMPS) 畫面屬性資料表 .....	76
表 9 閥 (VALVE) 畫面屬性資料表 .....	77
表 10 標籤 (TAG) 屬性資料表 .....	78
表 11 管線空間資料結構比較表 .....	80
表 12 空間資料庫與圖幅檔案式架構比較表 .....	81
表 13 內湖供水分區空間資料整理數量成果統計表 .....	96
表 14 INP 檔案結構分類表 .....	99
表 15 管線 C 值與空間資料庫管材對應表 .....	102
表 16 節點定義表 .....	106
表 17 輸配水管節點關係表 .....	106
表 18 輸配水管與給水管關係表 (大管對小管) .....	107
表 19 給水管關係表 (小管對小管) .....	107
表 20 輸配水管與水表關係表 (大管對表) .....	108
表 21 給水管與水表關係表 (小管對表) .....	108
表 22 原給水管空間資料對應管網水理模型給水管資料表 .....	109
表 23 原輸配水管空間資料對應管網水理模型輸配水管資料表 .....	109
表 24 校正前壓差統計表 .....	120

表 25	內湖分區模型校正管線分組統計表.....	121
表 26	校正後壓差統計表.....	124
表 27	水理模型所需資料條列清單.....	130
表 28	最大時流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	136
表 29	最大日流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	138
表 30	平均日流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	140
表 31	最小時流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	142
表 32	內湖分區未來需水量推估表.....	143
表 33	支援台水水量推估表.....	144
表 34	五年後平均日需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	145
表 35	五年後最大時需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	147
表 36	二十年後平均日需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	149
表 37	五年後至二十年後節點壓力變化統計表.....	150
表 38	二十年後最大時需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表.....	151
表 39	因潛盾管加入供水而流向改變路段統計表.....	155
表 40	大同大直線出水分支管停水後壓力變化量統計表.....	157
表 41	大同大直線出水分支管停水管線流向改變長度統計表.....	158
表 42	大同大直線出水本管停水後壓力變化量統計表.....	159
表 43	大同大直線出水本管停水管線流向改變長度統計表.....	161
表 44	松山內湖線出水分支管停水後壓力變化量統計表.....	162
表 45	松山內湖線出水分支管停水管線流向改變長度統計表.....	164
表 46	幹管停水流向改變路段統計表.....	165
表 47	水齡分析第 96 hours 時管網水齡統計表.....	170
表 48	水中氯擴散及反應速率設定值.....	179
表 49	餘氯分析第 96 hours 管網餘氯濃度統計.....	180

表 50 三重供水分區管網水理模型校正結果.....	184
表 51 既有三重加壓站停止營運之模擬結果.....	187
表 52 既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合營運之模擬結果.....	189
表 53 提升供水服務水準之模擬結果.....	192
表 54 三重二號配水池暨加壓站抽水機配置.....	193
表 55 計畫性或突發性事件施工停水影響範圍一覽表.....	196



## 摘要

臺北自來水事業處供給臺北市及部分新北市地區用水，供水轄區內自來水管網綿延超過6千公里，惟受限於市民觀感及道路施工等因素，所建置之水壓流量監視點數量有限，無法完整呈現轄區內水壓及流量等水理狀況，致使在供水調配上產生盲點。有鑒於水理分析可即時提供供水分區內特定時間各管段之水壓、流量，可作為供水調配及研判管網內漏水管段之重要參考資訊，有助於提升管網操作及維護效率。因此，冀由本研究透過精進現行管線數值系統及建置完整空間資料庫架構，運用該平台建置自動化水理分析模型及完成智慧水網圖資建置，以提升供水調控精確度。

本研究首先由水理分析的歷史引入介紹，並蒐羅國內外數則實務應用實例，以體現出水理分析解決管網問題的廣度與深度，讓自來水事業跳脫「有水、有壓」即可的供水服務思維。

為使 Web GIS 系統提供正確且快速自動化產製管網水理模型檔，本研究先從北水處基礎圖資建置歷程脈絡，以剖析地理資訊系統內之管線設備向量圖檔。另從過去採用 CAD-based 的 GIS 轉正為空間資料庫的 Spatial GIS，將拓撲斷點全數接上，並修正彼此銜接關聯、座標重新測量補正等，為使系統自動匯出可供水理分析軟體檔案。

本研究為模擬供水區管網內水壓、流量及水質變化，將採用 EPANET 及 Bentley WaterGems 軟體進行模擬分析。為可自動建置水理模型，首先需將空間資料庫轉換為分析軟體可支援之檔案格式，並設計自動化建置流程，以利產製出符合水理分析需求的管網水理模型，如此可大量縮減前置建模作業時間，再採用壓力校正方式，依現場量測水壓資料經由 Bentley WaterGems 軟體進行模型校正，最後完成內湖供水分區水理模型示範區，後續依該水理模型進行相關面向加值應用。

在相關面向加值應用方向，本研究利用與現地水壓完成校正相符的內湖示範區水理模型成果，進行不同情境分析應用，分別進行管網承載能力及可能供水瓶頸(以現有供水統計資料之最大時、最大日、平均日、最小時等情境進行分析)、五年及二十年後的管網承載能力、送水幹管停止供水後之影響範圍、水齡分析及汙染擴散預測等相關面向加值應用。另依系統自動產製管網水理模型套用至三重供水分區進行三重第二加壓站規劃設計，並在新增三重第二加壓站後，針對既有三重加壓站進行整備停止營運、既有三重加壓站及三重二加聯合營運、兩加壓站未來若有餘裕再提升供水服務水準等三種供水情境進行分析，依分析結果規劃設計加壓站抽水機型式、台數等資訊。

本研究團隊為使建置水理模型方式更為周全完備及瞭解自來水事業單位在水理分析相關應用，故前往台灣自來水公司進行交流參訪。透過本次參訪瞭解台水公司為降低 NRW 刻正推動相關作業，在水理模型建置流程部分，與本研究產製方式大致相同，惟仍有可參考部分以供北水處精進建置流程。另台水公司自行所開發 WADA 系統，已具備智慧水網管理解決方案，其自主研發精神和組成工作團隊之運作模式，可作為北水處未來 WISE 平臺納入管網水理模型動態分析和建立大數據分析作業團隊參考模式，建立協同平台，並將統計數據輔以視覺化呈現，以供同仁隨時掌控管網水理模型最新資訊、推演和輔以支援決策參考。

最後，對系統擴充應用模組擬定相關規劃方向，共分成監控中心即時動態水理分析模型、計畫性或突發性事件施工停水影響範圍、小區封閉可行性評估、突發性不明幹管漏水之位置分析、管線損壞風險分析及供水設施規劃設計等六種新增應用模組提供建議事項，期能讓水理分析變成管理上的好工具，甚至是設施整備改造工作上不可或缺的利器，並發展多元化的管理系統自動化模組，以達到自來水管網智慧化管理的目標。

## **Abstract**

Taipei Water Department (TWD) supplies water to Taipei City and some parts of New Taipei City. The total length of water supply network in the area extends over 6,000 kilometers. Due to factors such as public acceptance and road construction, the number of water pressure monitoring points is limited, so it is hard to fully monitor water pressure and flow conditions in the entire area, resulting in blind spots in water supply adjustments. Hydraulic analysis can instantly provide data of water pressure and flow of all pipes in a specific time frame, providing important reference information for water supply allocation and identification of pipe leakage area and helping to improve the operation and maintenance efficiency of the pipe network. Therefore, this study hopes to improve accuracy of water supply and control by upgrading the existing pipeline numerical value system and building a complete spatial database structure, the platform of which will be used to build an automated hydraulic analysis model and completing the smart water network map construction.

This study first introduces the history of hydraulic analysis and collects several practical application examples at home and abroad to present the breadth and depth of hydraulic analysis to solve pipe network problem, which may alter the simplistic “water with pressure” water supply philosophy.

In order to enable the Web GIS system to provide a correct and rapid automated production of the pipe network hydraulic model file, this study first established the history of TWD’s basic map to analyze the pipeline equipment vector file in the geographic information system. In addition, the CAD-based GIS used in the past was changed to spatial database of Spatial GIS to reconnect all the gaps in topographic map. Other modifications included relations of connecting junctions and coordinate re-measurement correction so that the system can automatically output software files available for hydraulic analysis.

This study uses EPANET and Bentley WaterGems software to simulate water pressure, flow and water quality changes in the water supply network. In order to automatically build a hydraulic model, it is necessary first to convert the spatial database into a file format that the analysis software supports and design an automated construction process to facilitate the production of a pipe network hydraulic model that meets the requirements of hydraulic analysis. This way, the time spent on pre-modeling operation can be greatly reduced. Then the pressure correction method is used for model correction by the Bentley WaterGems software according to site-measured water pressure data. Finally, the hydraulic model demonstration zone of Neihu water supply zone is finalized, and subsequent related aspect value-added applications will be carried out according to that hydraulic model.

As to related aspects of value-added applications, this study uses the results of the hydraulic model of the Neihu demonstration zone that are consistent with completed site water pressure corrections to perform different scenario analysis applications to carry out the following analysis: pipe network load capacity and possible water supply bottlenecks (analysis based on existing water supply statistics: maximum time, maximum day, the average day, and the minimum time, etc.); load capacity of the pipe network in 5 and 20 years; the impact area after the water supply main pipe stops supply; water age analysis and pollution spread prediction, etc. In addition, the system's automatically produced pipe network hydraulic model was applied to the planning and design of Sanchong water supply zone's second pump station. Moreover, scenario analysis on three possible developments after the second pump station is added was conducted: shutting down the first Sanchong pump station for maintenance; joint operation by two Sanchong pump stations; two pump stations upgrading water supply service in the future in case of extra capacity. The results of the analysis will help decide the pump models used in the station and number of pumps needed in

the station.

To make the construction of the hydraulic model more well-rounded and to understand the related application of hydraulic analysis by Taiwan Water Corporation (TWC), the research team went to the TWD for field study. During the visit, it was understood that TWC was working on NRW reduction-related operations. Its construction process of hydraulic model was roughly the same as that by the research team. Still, there is worthy information obtained for TWD to upgrade its development process. TWC's self-developed WADA system already has a smart water network management solution. Its independent R&D spirit and mode of building work teams can be used as reference for TWD in its future integration of WISE platform into dynamic analysis of hydraulic model of the pipe network and the building of big data analysis operation teams. The establishment of a collaborative platform and visualization of statistical data will help TWD officials on controlling the latest information of pipe network hydraulic model, scenario prediction and support of decision-making.

Finally, six newly added application module were suggested on relevant planning directions formulated for system expansion: monitoring center instant dynamic hydraulic analysis model, planned or accidental construction-related water outage impact range, feasibility assessment for small area closure, location analysis of accidental leak for unknown reasons, pipeline damage risk analysis, and water supply facility planning and design. It is expected hydraulic analysis becomes a good tool for management or even indispensable for the renovation of facilities. Also, the development of diversified management system automation module can help achieve the goal of intelligent management of water pipe networks.

# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

臺北自來水事業處（以下簡稱北水處）供水轄區以臺北市為中心，另包括新北市中和區、永和區、新區店、三重區（二重疏洪道以東）及汐止區北山里、橫科里、宜興里、福山里、東勢里、忠山里及環河里等7個里，供水轄區內自來水管網綿延逾6千公里，形成北臺灣最大的都會區域公共給水系統，由於受限於環境、市民觀感及道路施工等因素，北水處目前建置水壓、流量監視點數量有限，無法完整呈現轄區內水壓及流量等水理狀況，致使部分區域在供水調配上產生盲點，無法完全掌控，在遇到計畫性施工停水案件或爆管等緊急事件，可能因無法深入、細緻掌握管網水壓及管段流量狀況，而無法進行有效調配並將影響或損害降低。

有鑒於自來水管網水理分析可提供即時掌握供水分區內特定管段在特定時間之水壓、流量，遭遇突發狀況或需進行供水調配調整作業時，可作為現場或監控中心供水調配重要參考資訊，另準確的水理分析模型亦可提供管網內漏水管段之研判，有助於提升管網維護效率，因此，冀由本研究透過精進現行管線數值系統內附屬設備精度及建置完整空間資料庫架構，透過該平台使水理分析模型建置自動化並完成智慧水網圖資建置，除可提供供水精確調控依循外，更可藉此加值自來水管網智慧化管理與後續推廣應用。

## 1.2 研究目的

鑑於北水處長年以來已建置有管線數值系統，惟現有圖資系統未能有效供水理分析引用，且隨時代遷移，已無法滿足各式應用發展；由於現行圖資作業流程中以DGN 圖檔截圖製作竣工圖，而駐點圖資數化人員再依據

竣工圖繪製各項竣工圖至DGN 檔案，故可能發生如圖層放置錯誤、接點不合等缺點，且由於現有數化採用圖檔管理方式，資料連結採用資料表關聯方式管理，而非從設備間空間關係進行記錄，因此在過去進行水理分析時，人員需耗費時日以人工方式另行建置水理模型，無法進行批次匯出自動化分析作業，成為有效整合運用現有資源之瓶頸；本研究目的在於突破該瓶頸，提升管線數值系統內附屬設備精度及建置完整空間資料庫架構，藉由水理模型建置自動化，使校正完成之水理模型則可供其他面向如管網承載能力、未來年期管網規劃、計畫性案件或突發事件影響分析及調配方案、管網水質分析等增值模擬應用，最後將規劃後續相關應用模組發展方向，以達到自來水管網智慧化管理之目的。

### 1.3 研究方法與架構

本研究以針對自來水管網水理分析之國內外研究文獻廣泛蒐羅，解析各種應用案例，作為應用發展後端之借鏡，著眼於此，故本研究於文獻應用案例上概分為以下四類，並援引相關實際案例說明水理分析目前之實質應用發展：

- (1) 管網配水耗能優化
- (2) 加氯消毒策略
- (3) 水中多種反應物質交互作用
- (4) 配水管水泥內襯溶出與擴散

為使北水處管網空間資料庫能完整且正確的建置，以利水理分析模型建置自動化，本研究另針對目前發展所遇到之各項問題及現有圖資系統架構於精化與轉化建置過程可能面對之挑戰予以一一解析，從而尋求研討解決方案，並以北水處內湖供水分區為示範區，將現有管線數值系統圖資內

未能連結之管線及各種錯誤予以更正及優化精進作業，並將原圖幅管理資料庫轉換為空間資料庫，藉由該精進後之空間資料庫，確保可自該空間資料庫獲取正確管線設備資料，其後以程式進行分區水理模型INP檔匯出，完成水理模型建置自動化，再將INP檔匯入水理分析軟體執行分析，並藉由量測消防栓現場壓力與水理分析值比對校正，驗證模型正確性，另亦可以水質監測點實測數據與水理模型水質分析值比對校正，驗證分析合理性，並可將分析成果匯回WEBGIS進行展示。

圖1為本研究之基本架構，為達到智慧水網運用需求，本研究首先需提升管線數值系統內附屬設備精度，亦即使空間位相關係完整，內容涵括供水管網之連結關係、設備分層管理及圖元位置等之優化精進，其次建置完整空間資料庫架構，內容包含支援資料庫查詢、空間索引及資料庫管理架構之建置；後續為達成支援水理加值應用，將提供系統介接及支援水理分析使資料易於轉出應用。在相關面向加值應用部分，本研究將以下列課題進行應用分析：

- (1) 評估管網承載能力及可供水瓶頸
- (2) 5年與 20 年後之管網乘載能力
- (3) 送水幹管停止供後之影響範圍
- (4) 水齡分析
- (5) 汙染擴散預測
- (6) 三重地區增設三重二號配水池暨加壓站規劃及供水方式

由於完整且正確之水理分析模型可供作多面向的加值應用，本研究為規劃後續相關應用模組發展方向，另以下列課題進行分析：

- (1) 即時動態水理分析模型

- (2) 計畫性或突發事件施工停水影響範圍
- (3) 小區封閉可行性評估
- (4) 突發性不明幹管漏水之位置分析
- (5) 管線損壞風險分析
- (6) 供水設施規劃設計

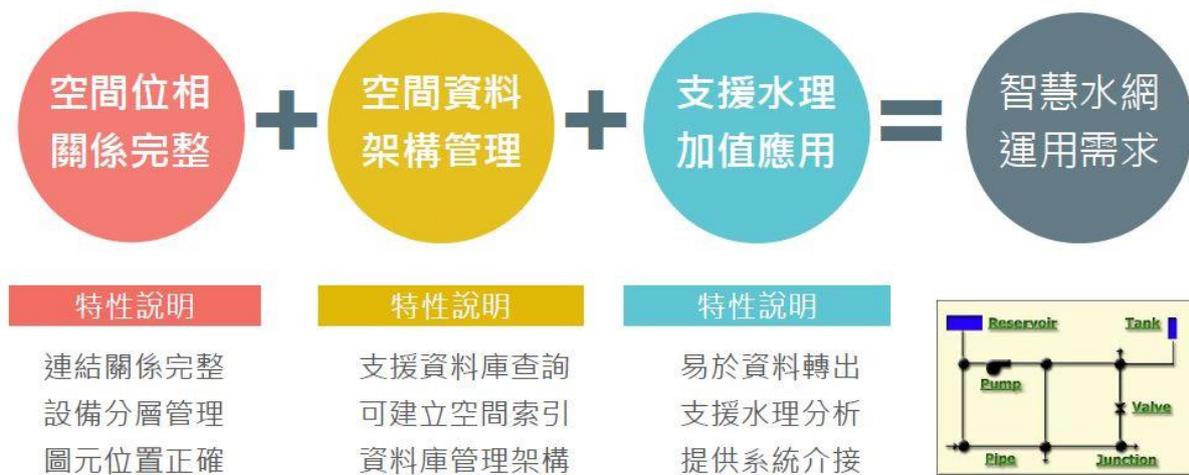


圖 1 本研究基本架構

本研究除提升管線數值系統內附屬設備精度及建置完整空間資料庫架構外，更使相關水理分析資料易於轉出應用，因此水理分析在未來自來水管網各種分析、漏損、規劃、設計及調配方案等加值模擬應用，將不再需要耗費冗長時間重新建置模型。本研究除應用水理模型作多面向加值應用外，並規劃後續實務應用模組工作方向，可作為自來水事業單位在水理分析應用發展之參考。

## 第二章 文獻探討

### 2.1 水理分析的歷史演進

本章由水理分析的歷史引入介紹，貫穿整個發展過程，自古代人類打造水利設施就開始有水理分析的需求，然而引水、導水與配送用水的實務總是在知其然而不知所以然的情況下，沒有水理分析就先進行運用，然後大約四百年前，開始陸續由西方數學家、工程師發現水理相關科學原理，為現代水理分析奠基，但對於已逐漸成型的都市管網，欲分析水理、預測行為，人們仍一籌莫展。直到二十世紀中期水理分析技術才邁入大躍昇，期間陸續發展出手算法則、類比模擬，然後隨著計算機技術發展，繁瑣計算交由電腦，水理分析由過去遙不可及的事情，轉變成為可探索的學門，各家商用軟件如雨後春筍，美國環保署EPANET的免費開放，更使得人人都負擔的起。相關應用分析、案例分享、經驗傳承陸續大量發表，水理分析不再把持於大型顧問公司、大學院校等少數菁英，真正穿透全球自來水事業體，每個工程師都是潛在水理分析師。

本章蒐羅國內外數則有趣應用實例，由這些案例，體現出水理分析解決管網問題的廣度與深度，某些由水公司主導的應用，並不遜於大學或專業機構，因為他們是真正埋設並使用管網的人，對於管網行為的瞭解更深，結合水理模型後如虎添翼，甚至進一步探索減少泵送耗能、二次加氯等優化營運的做法。讓全球自來水事業跳脫「有水、有壓」即可的供水服務思維，從前難以顧及全面管網水質，有時消毒水味過重、難以入喉，相反的有時完全沒有消毒水味，則可能水齡過大、細菌孳生，喝水都會生病；過去加壓憑經驗，水泵耗能甚鉅、壓力大管網到處漏水，但有時壓力卻過低，服務性不及格；過去管網總是為了水量充足而過度設計，流速過低、稀釋性不良，管網本身就是水質劣化的元凶。現在透過便宜好用的水理分析，

水公司達到「質優量足、省水減碳、口感提升」等營運目標不再是個夢了。

## 2.1.1 經驗法則時期

### 1.最早的輸水道

2000年前古羅馬人為公共給水的創始者，每建造一座新城市，古羅馬人都建造水渠，引水供應城市。在羅馬奧古斯都全盛時期，法蘭西南部普羅旺斯地區尼姆（Nimes）的供水系統已不能滿足古羅馬人的需要。於是羅馬工程師於西元前20年修建了一條水道，把50公里外的泉水引到城裡，水道由源頭至城內一路緩坡而降，全程重力流動、引水入城。當水道遇到河流，唯一的辦法就是橫越它，因此羅馬人打造了水管橋：加爾水道橋，是一座三層的石材拱橋。它是古羅馬帝國眾多渡河水道橋樑之一。加爾橋跨越加爾登河，將水引至尼姆，再分至公共澡堂、噴泉和私人住宅。加爾水道橋長269米，高出河面49米。為現存最高的羅馬水道橋（如圖2）。



圖 2 羅馬帝國時期的加爾水道橋，遺跡於現今法國南部

當時羅馬人建造的輸水渠道，最重要的設計參數就是高程差，只要找到的水源海拔相較城市更高，基本上就足以流動供應。當水流進入城市，透過分水井將水分配給都市配水管，再以鉛管配送到公共浴室、公共廁所、噴水池、豪宅...等地，最後由青銅鑄造的龍頭出水，是人類史上最早供應龍頭水的管網（如圖3）。然而因缺乏水理分析的關鍵知識，羅馬人的供水管網，不易設計出令人完全滿意的水量、水壓，僅憑靠經驗法則進行管網設計及維運，這樣的狀況持續了1700多年。當時的人們比較重視實用性，對是否能夠應用於生活中，比對理論探索更感興趣。

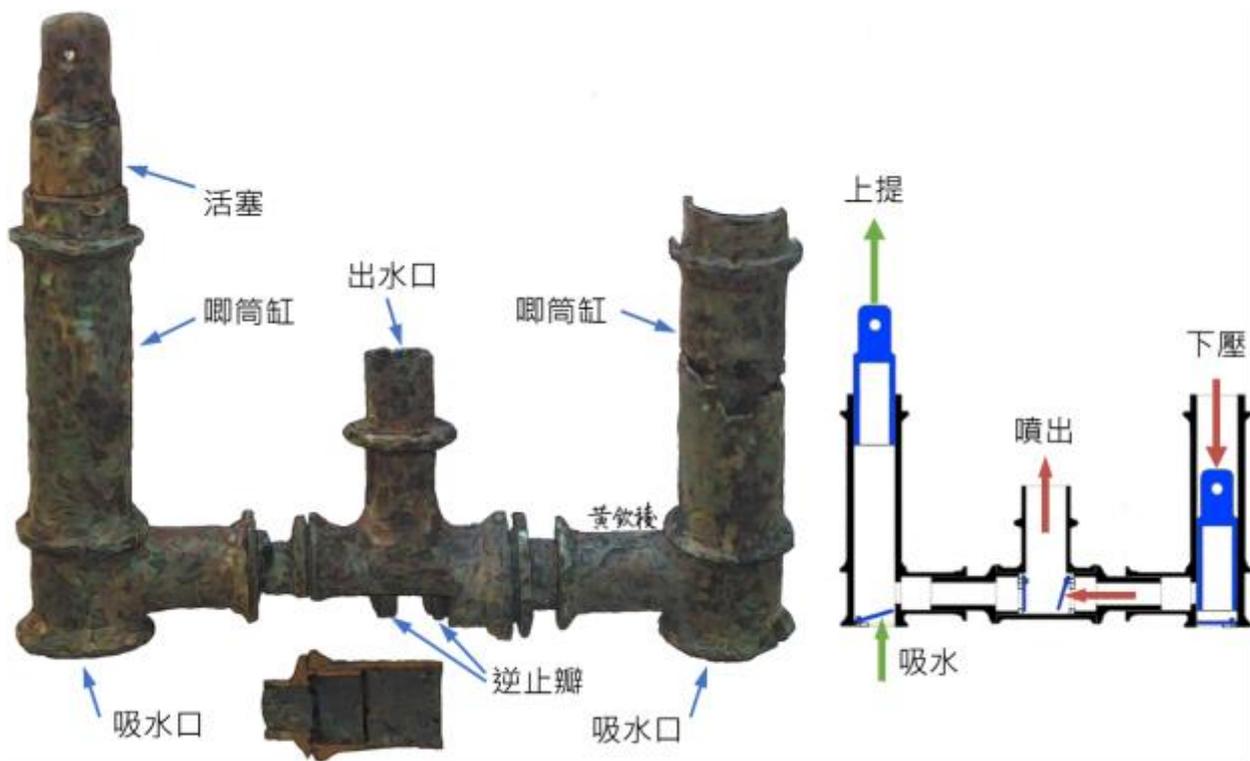


圖 3 發現於義大利波爾賽納的古羅馬水泵及運作原理

## 2.最早的加壓設備

水泵是現代管網加壓提升水頭的重要流體機械，早在西元前200年左右，埃及亞歷山大的克特西比烏斯（Ctesibius）就發明了一種水泵，為青銅金屬鑄造的唧筒缸，在缸筒中裝有可上下往復移動的活塞，靠人力操作泵水。這種唧筒式水泵傳遍古希臘、古羅馬等地廣為使用，但由於後來中世紀宗

教迷信盛行，阻礙了新技術的誕生與傳播，而曾經短暫失傳。直到16世紀，歐洲人翻譯古希臘人維特羅維斯（Vitruvius）和黑路（Hero）的著作時，這種古代泵浦原理才重見光明，於17世紀中葉又再次興起一股唧筒式人力驅動水泵的製造與應用。這類水泵構造屬於現代的「容積式復往泵」，雖然輸送流量比不上龍骨水車與阿基米德螺旋泵（阿基米德泵類似現在的軸流泵，比轉速高，大流量但低揚程），但唧筒泵經過活塞與唧筒缸的擠壓後，能夠產生極大的水壓，液體噴出速度很高，以現代的術語為「小流量、高揚程」形式水泵（類似現代供水管網使用的離心式水泵，比轉速低），換言之，可以將低處的水噴到很高的地方，輕易完成其他水泵辦不到的功能。當時人們並沒有試圖理解流體運動的規律與發展水理相關理論，但能夠想到這些運用的好點子，並將水泵製造出來已經很不容易了。

### 2.1.2 基本理論發現期

中古世紀期間，水理分析沒有任何進展，直到文藝復興時期，達文西（Da Vinci）等人開始研究流體，提出了關於質量守恆（流動連續性）的想法以及摩擦阻力等重要概念。托里切利（Torricelli）等人則觀察了「射流」的行為，並與彈道軌跡進行了比較，得出了射流速度與水壓的平方根成正比的結論。Guglielmini則發表了河流流量的觀測結果，為未來明渠流量的研究開了一扇門。但在整個16世紀，上述的研究多屬於定性討論，並未發展出較實用的數學理論，尚無法定量計算。

### 1. 數學工具的開發

在17世紀，歐洲人笛卡爾、帕斯卡、牛頓、波義爾、胡克和萊布尼茨奠定了現代數學和物理學的基礎，包含微積分這類數學工具也被發明出來。研究人員便得以運用新的數學以研究並解析流體力學，在此基礎上幾位偉大的先驅：伯努利、尤拉、達朗貝爾發展了流體動力學。18世紀時，義大

利Poleni首先研究「流出係數」(Discharge Coefficient)。法國人皮托 (Pitot) 構建了一種可以測量流速的裝置，「皮托管」就是以其姓氏所命名。法國人謝才 (Chezy) 及奧多曼 (Woltmann)，等人提出了一個方程來描述溪流中的流動。奧多曼和文圖里 (Venturi) 使用伯努利方程式分析流量，現今的奧多曼水表、文氏管就是他們的姓氏 (如圖4、5)。

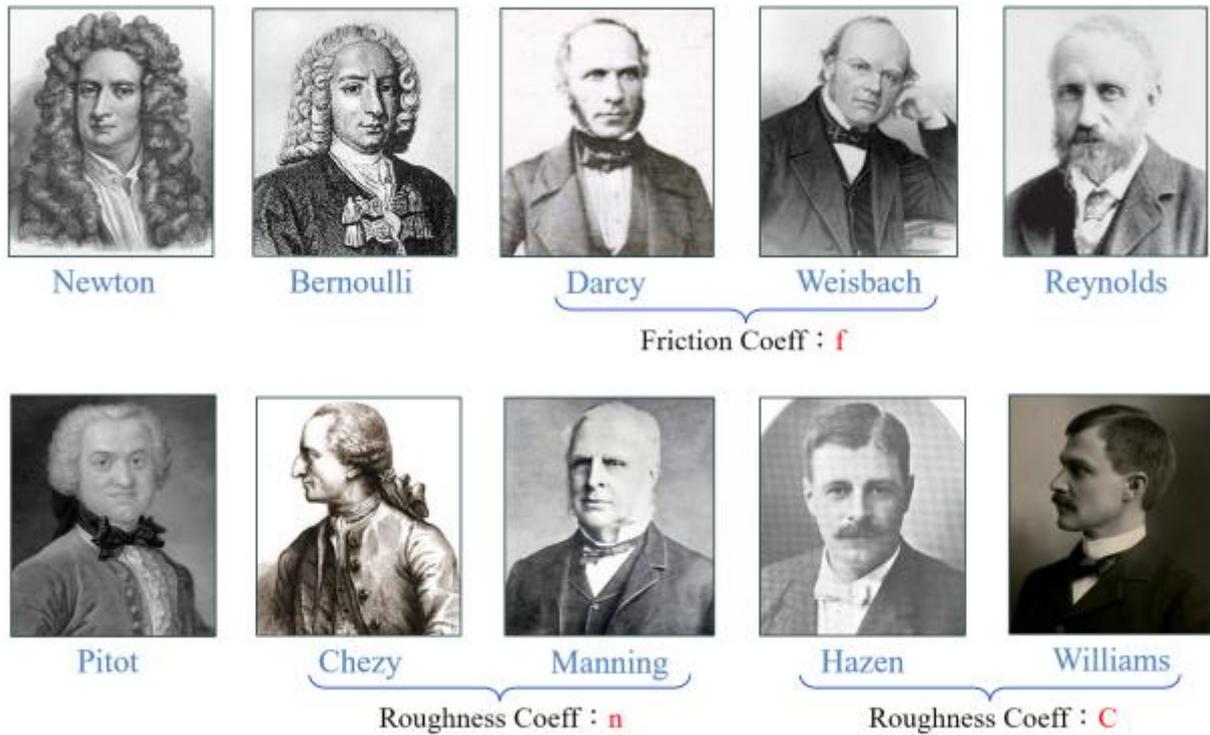


圖 4 對水理分析理論有貢獻的數學家及工程師 (照片來源：維基)

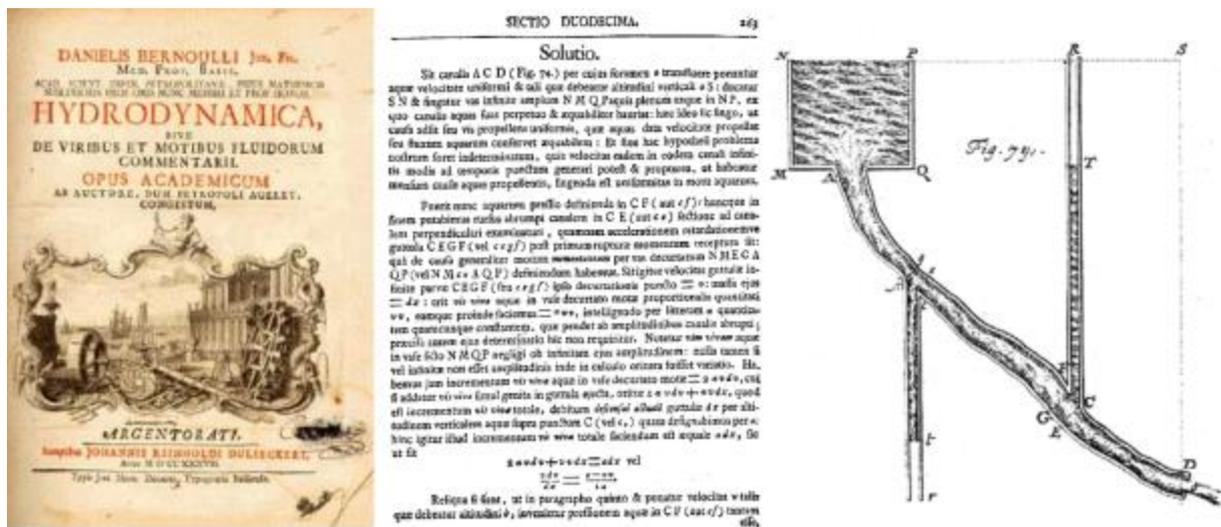


圖 5 伯努利 1730 年代發表的論文以能量方程解釋了水頭與流動<sup>1</sup>

## 2.封閉滿管流的研究

19世紀發展更快，Hagen研究溫度對管道流動的影響，觀察流體粘度的改變，其精密量測的不確定度僅有1%，他將木頭鋸末注入液體進行一些實驗，觀察木屑運動軌跡，可能是第一個發現紊流現象的人。同一時期，法國醫生泊氏（Poiseuille）試圖了解血管中血液流動，透過觀察管道水流，因此發現了管道中層流的控制方程式。威氏（Weisbach）及達西（Darcy）等人做出了進一步的貢獻，他們發現了管道和流動摩擦阻力的關係，也就是後來的Darcy-Weisbach摩擦阻力方程式。曼寧（Manning）也改良了謝才的公式，成為我們常用的Chezy-Manning粗糙公式。

19世紀後半葉，實驗流體力學開始蓬勃發展。第一個實用的風洞，第一個用於船舶模型的試驗渠道、和第一個模擬潮汐河口（由雷諾建造）。這些技術至今仍在使用。雷諾還成功地利用流體慣性力與黏滯力的無因次比值定義了不同流動態樣（「雷諾數」便以其姓氏命名）、觀察了穴蝕（Cavitation）、並闡釋了達西的摩擦公式。在這個階段，對流體流動的研究又細分為「古典流體動力學」（Classical Hydrodynamics）這是一種純粹的數學方法，和實驗為主的「水力學」（Hydraulics）。Navier、Stokes、Schwarz、Christoffel和其他流體動力學家發展出一系列令人驚艷的數學方程式，並開創了研究流體的方法，例如十分著名的Navier-Stokes方程式。

19、20世紀工業的快速增長，理解流體流動現象的需求也愈來愈深，普朗特（Prandtl）他在1901年提出流體流動分為兩個部分：一方面存在可以作為無粘性處理的自由流體（即遵循流體動力學定律），另一方面，也存在著固定邊界處的邊界層（摩擦力占主導地位的薄層流體）。普朗特有效地將兩種不同的思想流派融合在一起，為流體力學統一科學的發展奠定了基礎。20世紀流體力學理解和應用方面均有的巨大進步。普朗特和卡曼（von Karman）在20世紀20~30年代發表了一系列論文，涵蓋了邊界層理論和紊

流的各個方面，對工程流體力學產生了重要影響。在20世紀初，德國人Nikuradse，美國人Moody、Hazen、Williams，英國人Colebrook和其他人的努力使我們更清楚地了解管道流動，例如影響管道摩擦的影響因子，尤其是應用於估算封閉管道和開放渠道流量的現代方法，現今我們常用於自來水管線分析的Hazen-Williams公式就是其中之一（如圖6）。

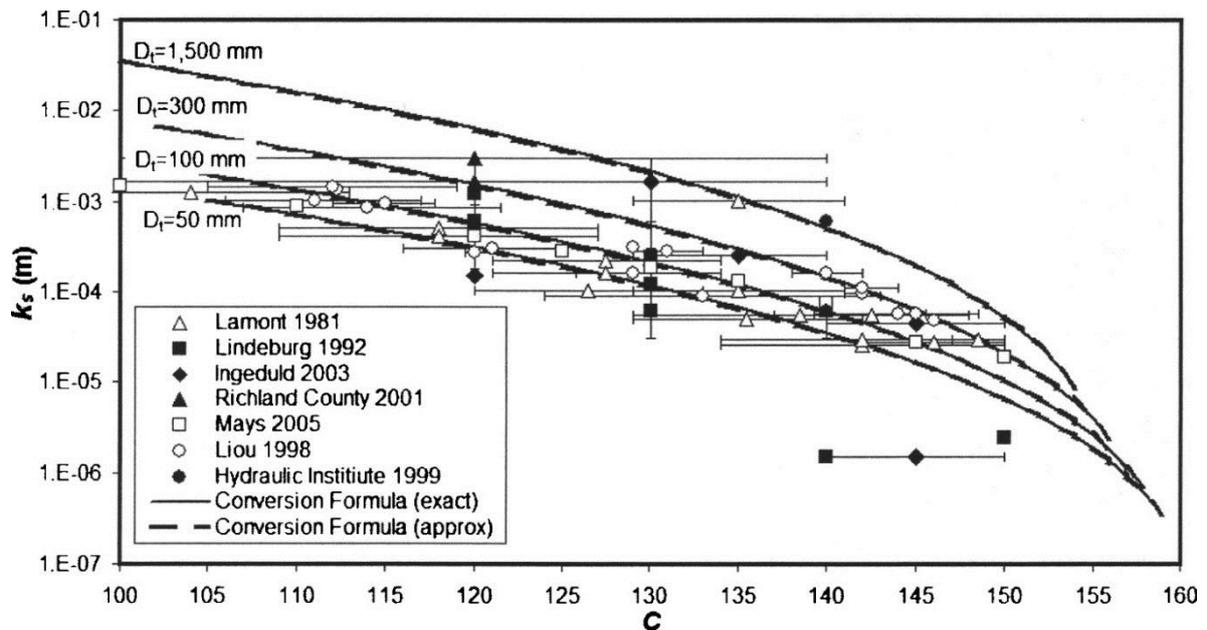


圖 6 Hazen Williams 的 C 值與 Colebrook-White 的 Ks 值之關聯<sup>2</sup>

### 2.1.3 手算與模擬期

#### 1.手算法的經典

1936年，伊利諾大學厄巴納香檳分校的結構工程教授哈迪克羅斯（Hardy Cross）開發了一種數學演算方法，可計算建築結構受載重之下，每個梁柱接頭處的彎矩，簡稱為「彎矩分配法」，是一種手算法。克羅斯隨後發現，他所開發的方法也可用於閉環管網系統中，計算出每個節點的壓力或管段的流量。克羅斯提出了兩種不同迭代的方法：一種是使用管網中「環路」求解每個管道中的流量，另一種方法則是求解管網中「節點」水頭。在第一種方法中，透過調整管段流量，代入Hazen-Williams方程式計算

出管段水頭損失，起始節點就減去管道水頭損失得出下一個節點水頭。第二種方法中，藉由調整各個節點水頭，得到各管段水力坡降後，再代入 Hazen-Williams 方程式計算管道流量。在使用「環路」法時，必須為每個管道假設流量的初始估計值，並滿足每個交叉節點處的质量守恒。使用「節點」法時，則必須為每個節點指定水頭的初始估計值。由於「節點」法的收斂較為緩慢，更適合手算的「環路」法在工程界大受歡迎，並被稱之為 Hardy Cross Method (如圖7)，雖然這兩種方法最初是開發給工程師拉計算尺、填表格的手算法則，但管段水力坡降、節點質量守恒的迭代平衡計算程序也適合寫程式丟給電腦算，然而還要等數十年電腦軟硬體才會誕生。

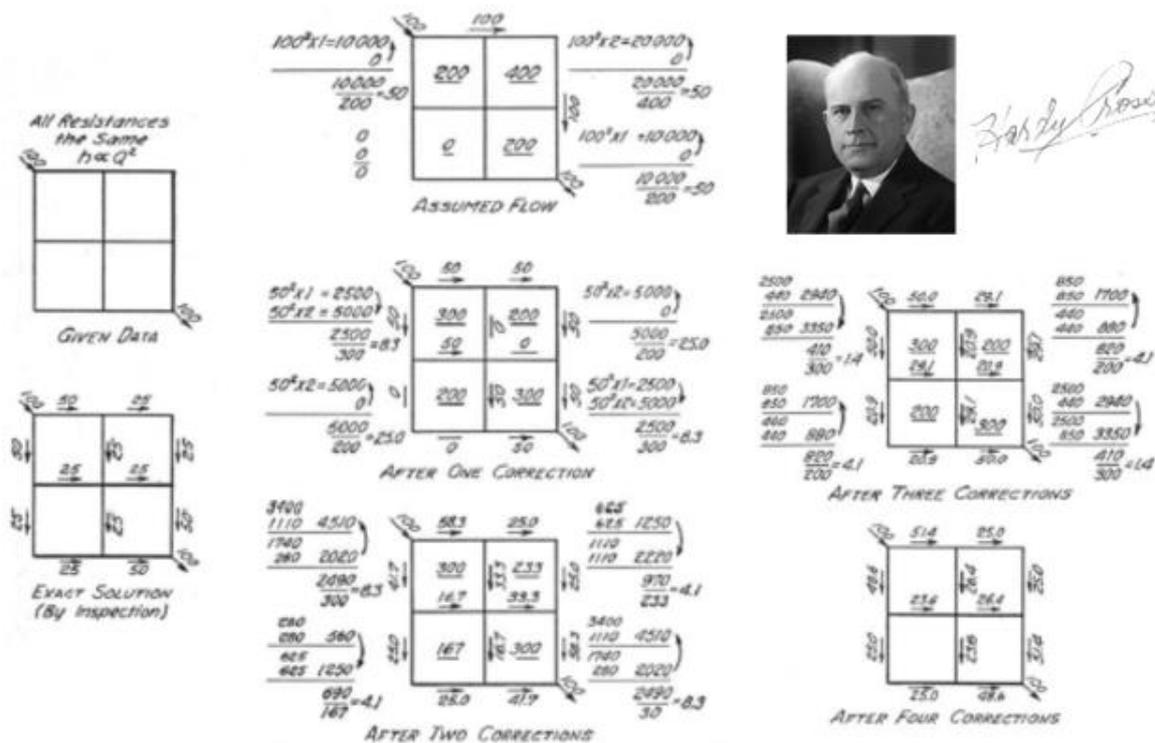


圖 7 美國結構工程教授發表以其姓氏為名的 Hardy Cross 算法<sup>3</sup>

## 2. 類比模擬器

1950年美國康乃爾大學的電子工程教授Malcolm McIlroy，發展了一套「直讀式電路分析儀」可以模擬管網的水理行為。McIlroy認為管網的複雜度如果太高，手算法幾乎沒辦法計算出來。但是他的電路分析儀克服了這

一點，只需透過電路類比的方法，電路線網就可模擬供水管網，得到差不多的水壓、流量及管段水頭損失，而且觀察出大約的趨勢（如圖8）。如果管網調整環路或變動口徑，分析儀能夠很快比較調整前後的水理趨勢變化，手算法則要從頭一個個計算環路平衡，兩者勝負立判。

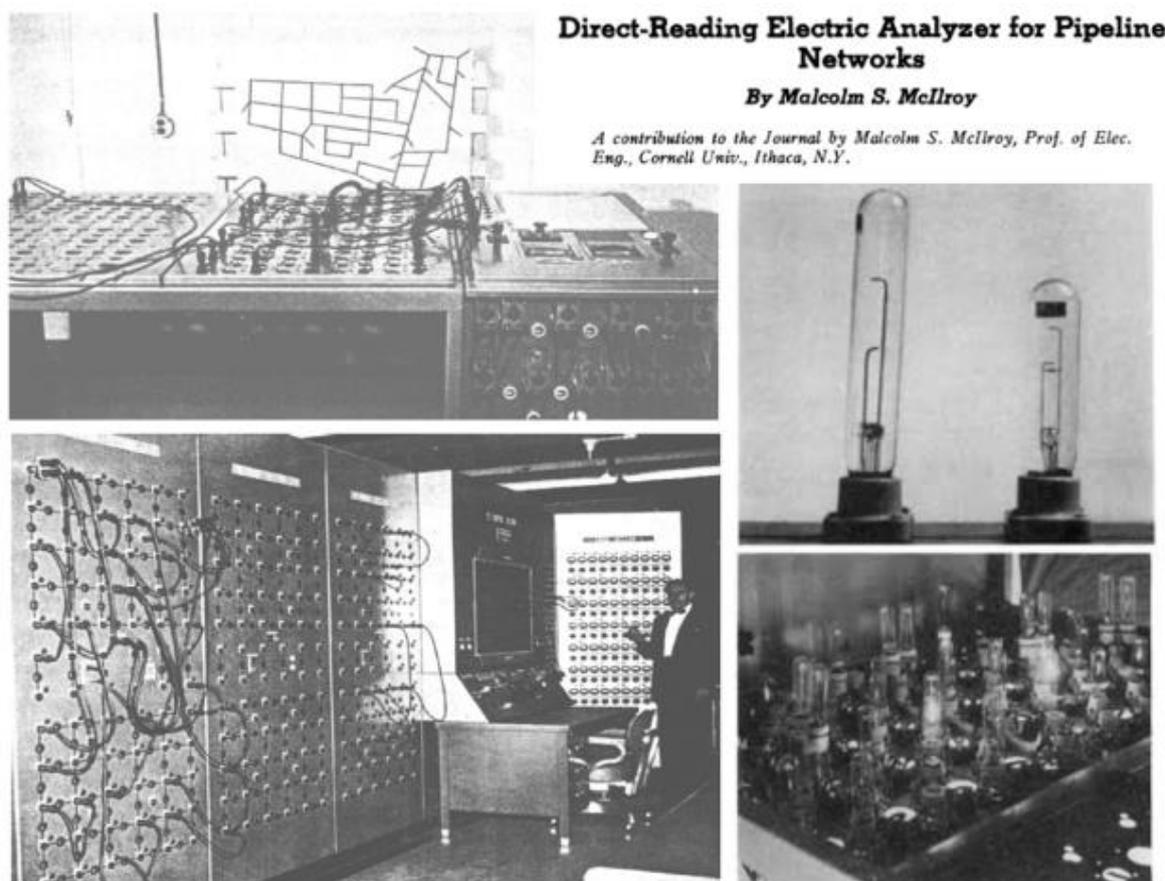


圖 8 康乃爾大學 McIlroy 教授以電阻及電流模擬管網流動的設備<sup>4,5</sup>

然而電路分析儀最後並未受到自來水界的青睞，主要在於電流與水流仍有很大的差異，模擬不是插電後就立刻完成，還要進行試誤或調校才能得到正確的趨勢，程序沒那麼簡便。McIlroy以電路的〔電阻、電流、電壓〕等效於水管的〔摩擦、流量、壓力〕，看似很完美，但能量損耗與電流-電壓在電阻中的特性是個完美的線性關係，而水頭損失與流量-壓力在管段中的表現卻是非線性的關係，流體在低雷諾數為層流、當流動速度加快後進入過渡區、最後高雷諾數變成紊流，水頭損耗的特性完全不同。就因為水頭

損失非線性的問題太過複雜，電路分析法為了克服這個致命的不等效性，採用了校正程序：首次插電之後的〔電阻、電流、電壓〕初始值必須逐一抄下來，電流換算成水流後，帶入Hazen-Williams公式計算非線性的管段水頭損失，之後據此改變電阻，再通電，第二次的結果才比較接近正確的水理行為。校正仍需埋頭苦算，沒有想像中輕鬆，因此隨著電腦的發展，速度更快的節點平衡程式問世後，這種類比技術就漸漸淡出水理分析界了。

### 2.1.4 電腦分析期

自1945年以來，電子計算機的出現以及傳感和數據記錄設備的進步、軟件的快速發展，水理分析的計算速度有了跳躍式的提升（如圖9）。今天的工程師使用的個人電腦強過數十年前大型工作站，水理分析工具發生了急遽的轉型，過去拉計算尺爬格子耗費數小時甚至驗算數日的管網分析，現今只要按下按鈕，電光火石之間就算出來。這個時期科學家的突破不在於水理的理论公式，因為那些比較重要的學理差不多都被發現了，而是在於如何運用電腦程式快速把問題解出來，這段期間著重於開發程式技術中的數學演算法則，當然仍是站在前人發現的理論基礎上，向前邁進。

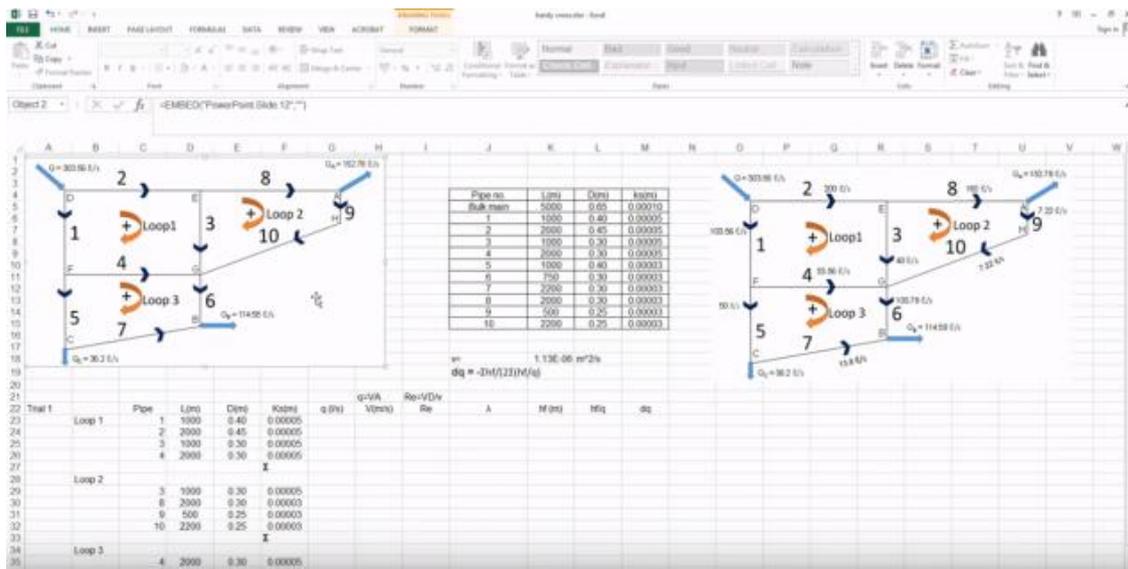


圖9 手算填表的 Hardy Cross 法以 Excel 演示流程，軟體現幾乎絕跡<sup>6</sup>

## 1. Hardy Cross程式化

1957年，Hoag和Weinberg將Hardy Cross法程式化後在電腦上運算管網水理，並將該方法應用於加州舊金山灣區帕羅奧圖(Palo Alto)的配水管網。電腦計算比手算更快更準，隨後兩家工程顧問公司，邁阿密的Rader & Associates和舊金山的Brown & Caldwell成為使用計算機為其客戶分析配水系統的早期先驅。同年，一家位於德州沃思堡的Datics公司成為首批向其客戶銷售管網分析軟體的公司之一，開啟了商用水理軟體的濫觴。越來越多的工程師開始利用電腦與Hardy Cross法來分析管網中的流量和壓力，然而隨著套用的管網愈複雜，工程師發現了Hardy Cross法的許多瓶頸與限制：首先，Hardy Cross法有時需要很長時間才能收斂，甚至根本不會收斂。而且Hardy Cross法是開發給「環路」管網，也就是棋盤式的管網拓撲比較適用。最後管網的特殊設備如水泵、閘閥、減壓閥、持壓閥...，並不能在Hardy Cross中給予不同屬性，因為Hardy Cross只有管段及節點。為了克服這些限制，研究人員開始研究新的演算法，主要是希望一次列完平衡方程式，然後「同時」解出節點水頭或管段流量，不用Hardy Cross的迭代步驟。列方程式的方法包含節點法、循環法、混和法，說明如下：

## 2. 節點法

Martin和Peters於1963年發表了將所有節點水頭同時解出的演算法，為「節點法」。該方法揚棄了Hardy Cross演算法逐一調整環路流量，然後於節點平衡的迭代步驟。而是將每個管道的水頭損失方程式（如Hazen Williams方程式），按照每個管道中的流量寫出，並寫成管道上下游端水頭的函數，然後在每個節點滿足質量守恆，這樣就產生一組N個維度的非線性方程式，其中N是節點的總數，再使用泰勒級數展開法，將方程式線性化，便可使用Newton-Raphson法（或簡稱Newton法）迭代求解。以色列的Uri Shamir和加拿大的Chuck Howard（1968年）發現該方法也可適用於水泵、閘閥的管網

系統，只要把上述物件的水頭損失列出方程式即可，還展示了該方法如何用於管網的水理分析。1969年，加拿大哥倫比亞大學的Alvin Flower和Robert Epp發表的新方法也是透過Newton-Raphson迭代法，一次性把Hardy Cross環路法的流量調整因素算出來，解決了Hardy Cross在某些管網收斂性不良的問題。雖然同樣名為迭代法，但這裡的Newton-Raphson法是用來解方程式的迭代數值法，與Hardy Cross對實質環路調整流量的迭代法不同（如圖10）。

### 3.環路法

1972年，Wood及Charles引入了求解管網平衡方程式的另一種線性方法，屬於「環路法」，可同時解出每個環路上節點質量守恆和能量守恆方程式，得到每個管段中的流量，然後另外執行水頭損失程式，就可計算節點水頭。由於方程式組已經服膺質量守恆和能量守恆方程，計算過程不再需要再去平衡節點流量。該方法具有額外的優點，除了解出管段流量之外，還可解出其他管網參數。Wood和Charles提出的方法本質上是將非線性的平衡方程式組，以線性的解法最小化誤差，而且很快收斂，演算法非常具有原創性。隨後一些商業軟體（例如WOODNET、KYPIPE、PIPE2000）便採用這個演算法為核心計算引擎，或稱為求解器（Hydraulic Solver）。

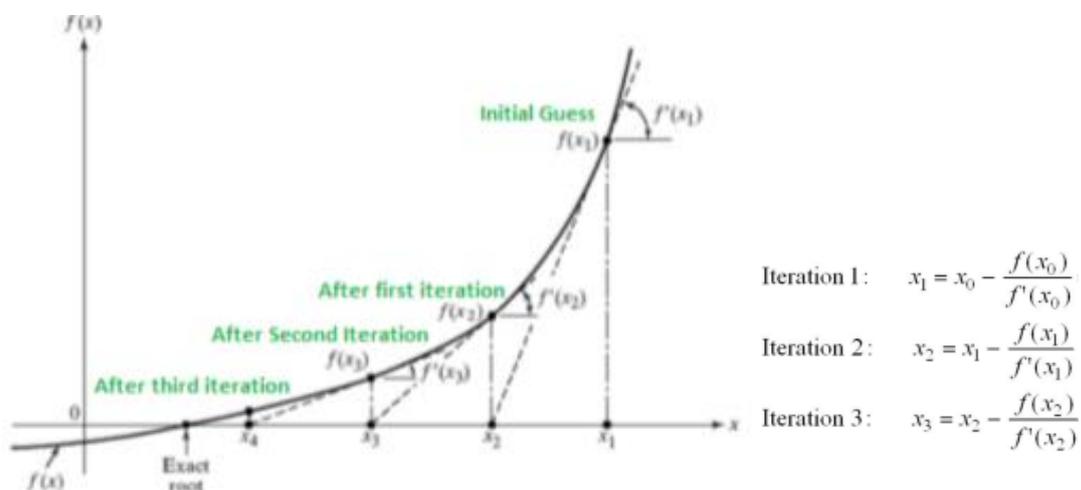


圖 10 普遍應用於水理求解的 Newton-Raphson 為一種迭代數值法<sup>7</sup>

1976年，猶他州州立大學的Roland Jeppson與CH2M Hill公司合作開發了一套水理分析商業軟體，也屬於「環路法」。每個環路的非線性能量方程式都寫成流量調整因子的形式。與「節點法」一樣使用泰勒級數展開，把非線性方程式組線性化，然後以Newton-Raphson迭代求出調整因子，接著就可將原始管道流量估計值乘上調整因子，獲得各個管道流量。這個方法類似Hardy Cross法，需要假設管段上的初始流量，之後再將流量帶入Hazen Williams公式得到每個管段水頭損失，接著再算出每個節點的水頭。常見的水理分析軟體以及其支援的功能詳如圖11。

PROGRAM	PURPOSE	ADDITIONAL FEATURES <sup>1</sup>				LIMITATION max. nodes
		Simulation	WQA <sup>2</sup>	GUI <sup>3</sup>	GIS/CAD/DB	
<a href="#">Aqunet</a>	"Simulation and modeling for pressurised pipe systems"	X	X	X	GIS linkable	unlimited
<a href="#">Archimede</a>	"Simulation and verification of fluid pressurised distribution networks in steady state flow conditions"	X	-	X	DXF files	100 to unlimited
<a href="#">Branch / Loop</a>	"Least-cost design and calculation of branched / looped water distribution networks"	-	-	-	-	125 750
<a href="#">Cross</a>	"Hydraulic calculation for water supply pipes"	X	-	X	CAD module GIS linkable	10'000
<a href="#">Epanet 2.0</a>	"Extended period simulation of hydraulic and water-quality behaviour within pressurised networks"	X	X	X	-	unlimited
<a href="#">Eraslite</a>	"Modular system for the management of fluid underpressure networks and open channel systems"	X	-	X	GIS module DB module	200 to unlimited
<a href="#">H2Onet/ H2Omap</a>	"A comprehensive GIS-based water distribution analysis, design and optimisation software"	X	X	X	DB-driven GIS-enabled	1'000 to unlimited
<a href="#">Helix delta-Q</a>	"Designs & optimises pipe networks quickly & easily for compressible & incompressible fluids"	-	-	X	DXF files	unlimited
<a href="#">Mike Net</a>	"Advanced EPANET based water distribution modelling software"	X	X	X	DB-linked GIS-enabled	250 to unlimited
<a href="#">Netis</a>	"Design and analysis of intermittent water distribution systems"	X	X	-	Exp - Imp DB	unlimited
<a href="#">OptiDesigner</a>	"Optimal design of water distribution systems" (EPANET based)	-	-	-	-	unlimited
<a href="#">Pipe2000</a>	"Hydraulic modelling software for simple or complex pipe systems"	X	X	X	AutoCAD files GIS-enabled	250 to 20'000
<a href="#">Stanet</a>	"Simulation and analysis of distribution networks"	X	-	X	Exp - Imp CAD/GIS/DB	200 to unlimited
<a href="#">Wadiso SA</a>	"Comprehensive computer program for the analysis and design of potable water distribution systems"	X	X	X	Integr. CAD Exp - Imp GIS	1'000 to 16'000
<a href="#">WaterCAD 5.0</a>	"Complete water distribution analysis and design tool"	X	X	X	CAD interface GIS integrated	10 to unlimited

<sup>1</sup> Features additional to "network design and optimisation"  
<sup>2</sup> Water Quality Analysis  
<sup>3</sup> Graphical User Interface

圖 11 常見的水理分析軟體以及其支援的功能<sup>3</sup>

#### 4.混和法

1987年，Todini和Pilati提出了Gradient程序，屬於「混和法」。把每個「管道」的能量方程與每個「節點」的質量方程組合起來，兩種兼具，故名為混和法，可同時解出所有節點水頭和管段流量。列出方程式的過程類似環

路法，並以「線性化」的做法，先使用泰勒級數展開，把非線性能量方程式通通線性化。不過，解方程式的手段與前面幾種方法不同，這裡使用方程式組之係數矩陣的反矩陣，以及遞迴程序求解方程式組，收斂速度更快。美國環保署Lew Rossman於1993年公布的EPANET1.0，其運算核心的求解器Hydraulic Solver就是採用本方法。EPANET的後續版本及擴充插件如EPANET-MSX（多物種水質延伸分析插件），採用的數值方法除了Newton-Raphson法，還有求解顯性線性微分方程的Euler法、求解隱性非線性微分方程式的五階Runge-Kutta法、適用於非束制非線性系統的Resenbrock法，並能自動評估多種數值法的計算速度、判斷是否能夠收斂...的功能，其計算引擎吸收各家較優演算法，算是集大成的一套軟體。

1960~70年代為國際間水理分析演算法的爆發期，好的演算法陸續在1980年代商業軟體化，並通過大學或私人公司銷售，例如WATSYS、WRc的WATNET，具備基本水理分析功能。到了1990年代，則出現了Haestad的WaterCAD和WHM的H2O Map...等專業的水理模型軟體，除了基本的分析功能，更內建許多應用插件，但售價不菲並非個人可負擔的起，大多由水公司設計規劃部門添購一兩套。真正最重要的軟體，則是2000年美國環保署Lew Rossman公布的EPANET2.0，完全免費，人人可安裝，連筆電都可執行，速度快，隨時進行分析，不用像過去守在工作站等數據跑完；而且完全開放原始碼，使用者可自行二次開發，寫出插件輔助分析，甚至包裝後拿去販售，EPA都允許的，此時水理模型分析才真正普及到全世界。

## 5. 優化演算法

60年代隨著電腦化的加速與水理分析軟體的普及，水理軟體最基本的兩大目標：計算節點水頭、管段流量已經愈來愈容易了。原本工程師設計的理念為提高安全係數、加碼評估、超量設計，這是在管網行為無法計算出來之前的普遍做法，也就是保守至上，憑藉工程師經驗法則給予足夠的

安全係數，不確定性較高的情況，就放大安全係數因應之。60年代以後，透過水理分析，所有的水壓流量數據都可攤出來檢視，當水公司確定了安全用量無虞之下，就會思索如何進行「經濟設計」，試圖降低無用的餘冗設計量，畢竟自來水系統投資的初置成本很高，所賣的產品-自來水又很便宜，投資報酬率ROI更是公司經營的KPI之一。但管網構件很多，調整了一條管線，卻連動到其他地方，壓力整個跑掉，若以手動試誤，即便有水理分析軟體與電腦的輔助，設計的效率仍然不佳，因為這是個「多變數優化」的數學問題，必須用數學解決。

麻省理工學院於1969年首度將多變數優化的「線性規劃」導入自來水管網系統（如圖12），並以紐約兩條幹線為例。紐約的1號、2號隧道幹線分別為1917年、1936埋設，由北方的水池重力供水導入市區。隨著人口增長及幹線備援之需，1954年起就有人提出興建3號隧道，但究竟要第3條口徑要多大才能滿足用水卻又經濟。MIT預估2010年大紐約區域900萬人日需水量550萬CMD，幹線上各節點需水量也估算後，計算出最優方案：第3條隧道直徑為4.2米，能自1970年服務至2010年供水無虞，且成本最低(如圖13)。

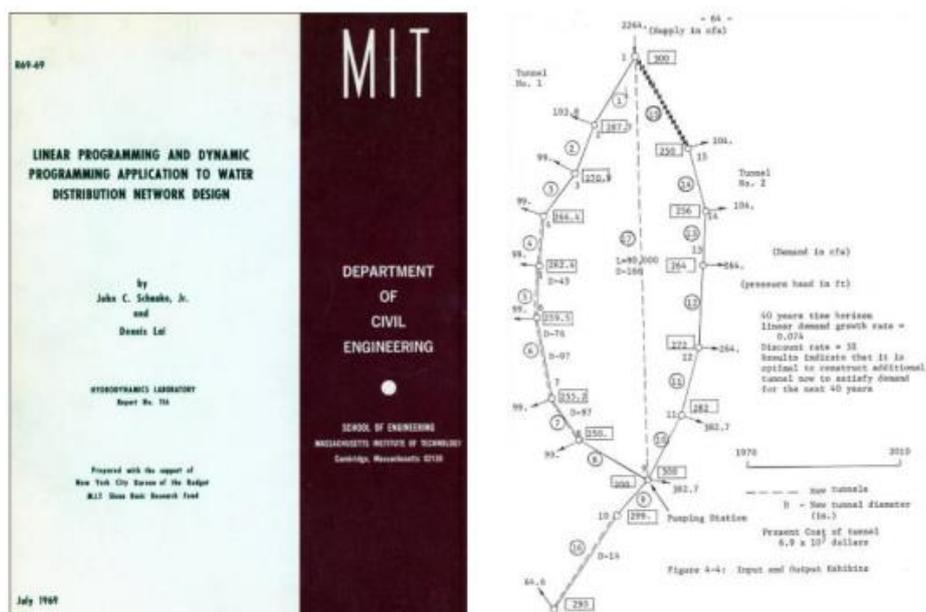


圖 12 麻省理工土木系 1969 年針對自來水管網導入線性規劃分析<sup>3</sup>

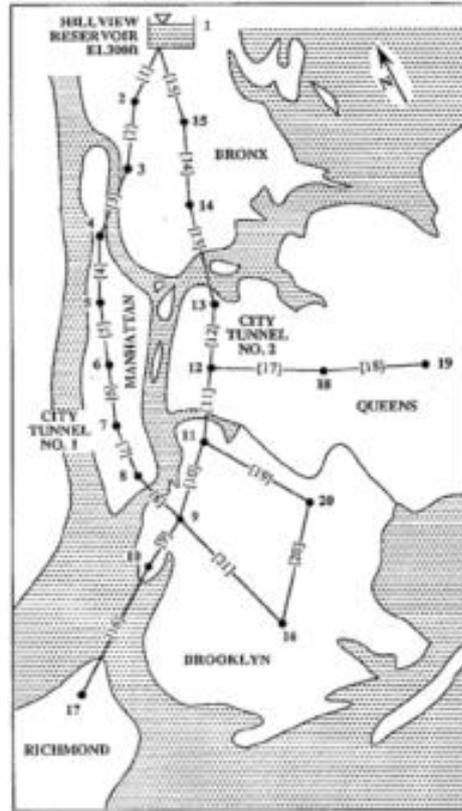


圖 13 紐約 2 條既有輸水幹線的簡化水理模型(經曼哈頓為 1 號幹線)<sup>9</sup>

MIT的Schaaake及Lai於1969年使用的優化演算法為線性規劃 (Linear Programming)，簡稱LP演算法，針對紐約兩條輸水隧道進行改造分析，無意間興起了供水管網優化的學門。一直到今天，「紐約輸水隧道」已經變成標準模型，任何新的優化演算法，都會把這個管網拿出來做比較。當時MIT的優化方案有很多個，其中一個是重頭到尾另外設置第三條幹線，也有不新設一條，但在某些管段旁邊再埋管段，增加某段輸送量的方法。MIT後者的方案需7809萬美金（1969年的幣值），後人運用其他多種技術，改造費用最低甚至只要3610萬美金，但水壓水量均滿足的方案需4018萬美金。

澳洲阿德雷德大學1996年則採用遺傳演算法Genetic Algorithm (GA)，包含簡易版GA及改良版GA，改造費用只要分別4193萬、3880萬，顯然改良版GA跑出的結果最優，而且收斂更快（詳圖14）。除了GA演算法之外，2012年比利時安特衛普(Antwerp)大學的研究報告更羅列了二十多種演算法，由

早期的線性規劃：LP、LPG、CEn、SEn、NLP、MINOS。後來的基因群體演算：GA、iGA、RCGA、SA、TS、DE、MA、CE、SS、IA、mIA、SFLA、ASs、PSO、HS、PSHS。計算出來的改造成本大約在3600~4000萬美金。

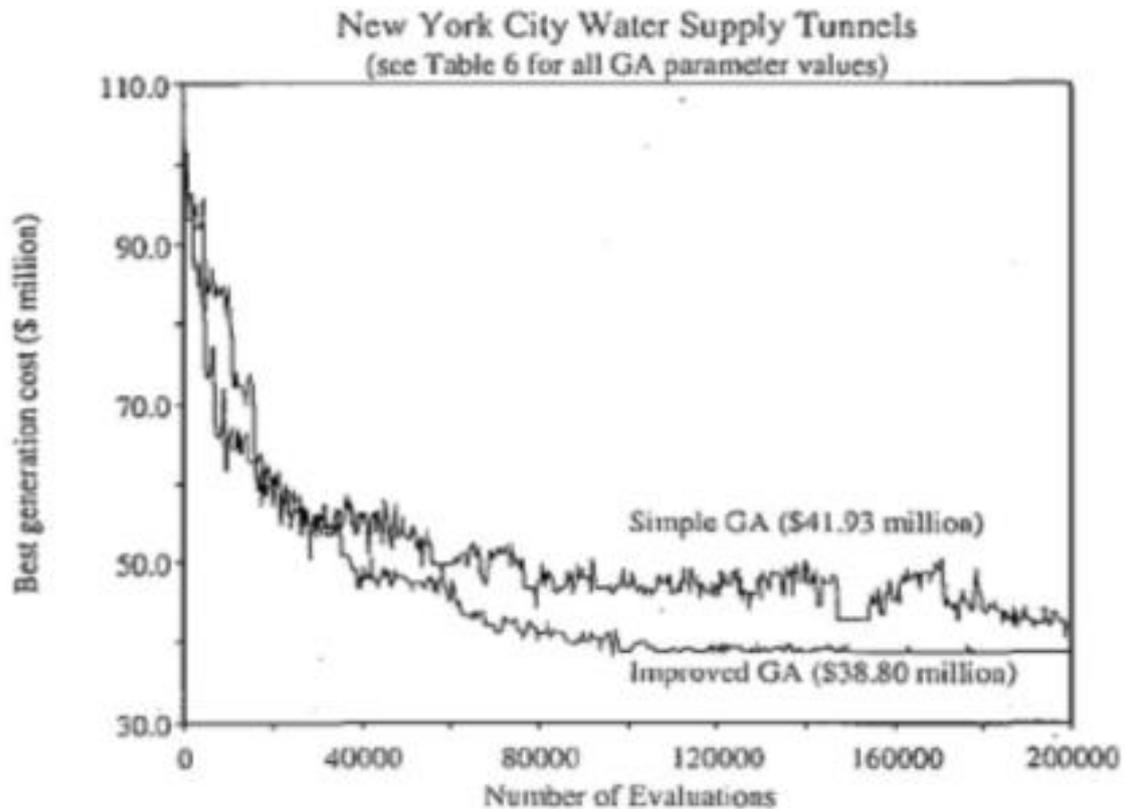


圖 14 阿德雷德大學所採兩種 GA 演算法收斂的造價與演算世代數<sup>9</sup>

除了「紐約輸水隧道」，後來又有另一個模型「河內棋盤幹線」，成為優化演算法的比對對象，這兩個公版模型都是重力供水，問題的複雜度適當，可能的變數組合：紐約為 $1.9 \times 10^{25}$ 、河內為 $2.9 \times 10^{26}$ ，均比宇宙恆星數量 $3 \times 10^{23}$ 顆，多了大約60~1000倍（詳圖15）。即便後來紐約的輸水隧道另有考量，歷經多年逐段施工逐段通水，新隧道計畫仍在施工中，均未按照各國學者研究的方案，但想必未來這兩個公版模型仍會一再出現，繼續提供比對之用。

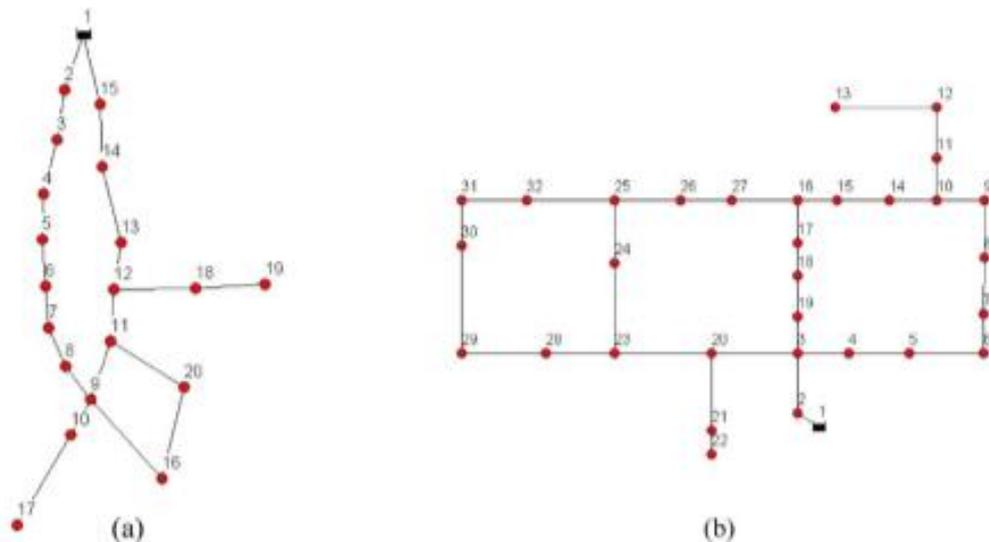


圖 15 學術界常用的公版模型－紐約輸水隧道及河內棋盤幹線<sup>10</sup>

## 6. 水質分析引擎

電腦分析時期最後登場的是水質分析 (Water Quality Analysis)，遲至大約 1980 年代才開始發展起來，因為水質分析必須建構在水力求解器 Hydraulic Solver 的基礎之上，隨著單時段 (Steady State)、多時段 (Extended Period Simulation, EPS) 水力求解器陸續在 60~70 年代開發完成，許多成熟的商用軟體在此時變得容易取得，學者開發研究的水質模型便可順勢套用到軟體中進行驗證及模擬，主要的研究集中在美國。第一個穩態水質模型 (Steady State modeling of water quality) 為肯塔基大學的 Wood 教授提出，他當時為了分析泥漿管道系統的水質問題，推導出一組非線性聯立方程，透過 KY-PIPE 計算流速和濃度 (KY-PIPE 的運算核心為多時段水力求解器，也是他開發的演算法-屬於環路法的一種)。

1980 年代，原本幾乎空白的水質模型開發史，在此時開始萌芽，多個投稿一一冒出，學界產生大量的個案型研究。1985 年，Metzger 開發了兩種水源混合的演算法，Chun 和 Selznick 則開發了軟體 WADSY-Q 計算多種水源的水質模式，Males 等人開發了通用演算法，用於解決管網系統中的混合問題，並能進行濃度追蹤 (Tracing)，行程時間 (Travel Times) 以及系統不同

部分的輸送成本。Shah和Sinai推導了溶解物質運輸過程的理論模型，並應用於以色列農村某個多源供水系統。Murphy開發了一種模型來預測管網中穩態流動下餘氯濃度的空間分佈。1986年，Murphy使用模型分析麻薩諸塞州Woburn管網內的水源混合，以釐清兩個受污染的水井供應到管網的那些區域。當年AWWA管網專題討論會上，Clark、Hart、Liou及Kroon分別提出了三篇論文，描述動態水質模型，其中Liou及Kroon使用LIQVARS軟體分析管網流量，並應用了一階衰減函數來模擬餘氯的消耗。此外Grayman、Clark、Males等人的研究與濃度追蹤有關，並透過人工取樣與線上連續監測器的水質數據進行校正，其研究也包含了水池內的混合評估、移動時間、水齡分析和餘氯衰退模式，最後把分析結果以AutoCAD及圖形介面顯示出來（如圖16）。



圖 16 紐約管網水齡分析，偏紅區域水齡高 DBP 濃度也較大<sup>11</sup>

1990年代迄今，美國環保署Rossman主導下發表了EPANET，因為其開放架構，吸引了全球水質模型研究者的採用，其Hydraulic Solver變成了一種通用性載體，進展更是蓬勃發展，許多研究回饋給EPANET，良性循環下，EPA進而打造出多套Water Quality Solver，同樣是免費開放的，此時的發現已經由點轉換成線，研究開始深化成為多條主軸線，並從美國擴展到全世界，由於研究發表論文過多，以下分為六大類別整理說明：

#### (1)配水池與管網聯合運用的水質模型

美國環保署EPA贊助的一系列管網研究確定了配水池對水質的潛在影響（Grayman等，1991年），配水池的存在其吞吐會使得整體管網水齡大增，這促使配水池的混合及和水齡模型的開發（Grayman及Clark，1993年；Kennedy等，1993年；Boulos等，1996年；Grayman等，1996年），包括數學及物理的新模型。例如將水池內部視為完全混合、等流速剖面流(Plug Flow)注入混合或分區混合等模型，以及使用流動方程式的計算流體動力學(CFD)模型，上述的研究結果許多轉化為EPANET的內建水質引擎。

#### (2)消毒劑與消毒動力模型

為了抑制自來水輸送過程微生物的孳生，添加消毒劑是必要的，然而國際間經常使用的氯消毒法，卻會產生致癌的消毒副產物(DBPs)。Rossman等人於1994年導入了質量傳遞的輸送模型，並將餘氯消耗分為水體反應( $k_b$ )、管壁反應( $k_w$ )兩部分，建構出EPANET的餘氯消耗演算模型，Vasconcelos等人於1996年發表管網中三鹵甲烷(THMs)的生成動力學，同樣可套入EPANET的參數進行演算，這時在EPANET內的兩個反應係數 $k_b$ 、 $k_w$ 必須設定為正值，與餘氯消耗反應係數均為負值恰恰相反。此外美國逐漸流行的氯胺(Chloramine)消毒劑的反應機制及消毒副產物研究也由Valentine等人、Clark及Sivaganesan陸續展開。

### (3)微生物行為之建模

美國1989年頒布了總大腸菌群規則（TCR），試圖控制大腸菌群改善飲用水安全，這促使了管網系統中微生物數學模型的研究。1990年代陸續開發各種數學及統計模型，例如細菌生長、生物膜和HPC/大腸桿菌的應用分析，多位學者均有貢獻，如LeChevallier等人；Volk和Joret、Gatel等人；Lu等人；Servais等人；Gale等人。但微生物的行為極為複雜，這些研究僅是個起頭而已，未來仍有很長的路要走。

### (4)水齡與二次消毒模型

最早的水齡研究為1985年Males等人所提出，但近年來水齡模型及其應用已有很大的進步。美國水研究基金會贊助的研究發現，減少管網的水齡可大幅提升自來水品質，如果管網太大、用水量過小或流動性不佳，導致管網中的水齡偏高，就必須提出二次消毒對策，基金會出版的指導手冊（Brandt, 2006），建議水齡建模除了應考慮管網系統的拓撲以及水力行為，更要納入配水池的影響，並滿足EPA頒定的二次消毒和消毒副產物規定，如此模型才能協助選擇較佳的二次消毒投入點，以及適當的DBP取樣點。

### (5)事件模擬與水安全評估

隨著技術的進步，運用水質模型重建污染事件，分析用戶暴露於污染物的情況，成為一項重要的應用，有時甚至幾十年後才進行重建模擬。幾個經典案例，如1990年密西根州吉迪恩爆發沙門氏菌事件、2000年倫敦沃克頓大腸桿菌污染事件、紐澤西州多佛鎮地下水污染導致兒童罹癌（如圖17）、加州雷德蘭茲的地下水污染事件。EPA開發了許多應用工具，而且全部免費，包括TEVA-SPOT（威脅與弱點評估-傳感器選址優化）、CANARY、EPANET-MSX（多物種水質分析插件）、WST（水安全工具包）、EPANET-RTX（線上訊號插件）、RTX-LINK、WNTR（水網韌性分析工具），例如當新興

的氯胺消毒與傳統的氯消毒並存使用，如欲模擬各種DBP生成反應以及餘氯衰減情況，EPANET-MSX能夠考量多種物質在自來水間的交互作用，分析出各種化學物質的濃度。

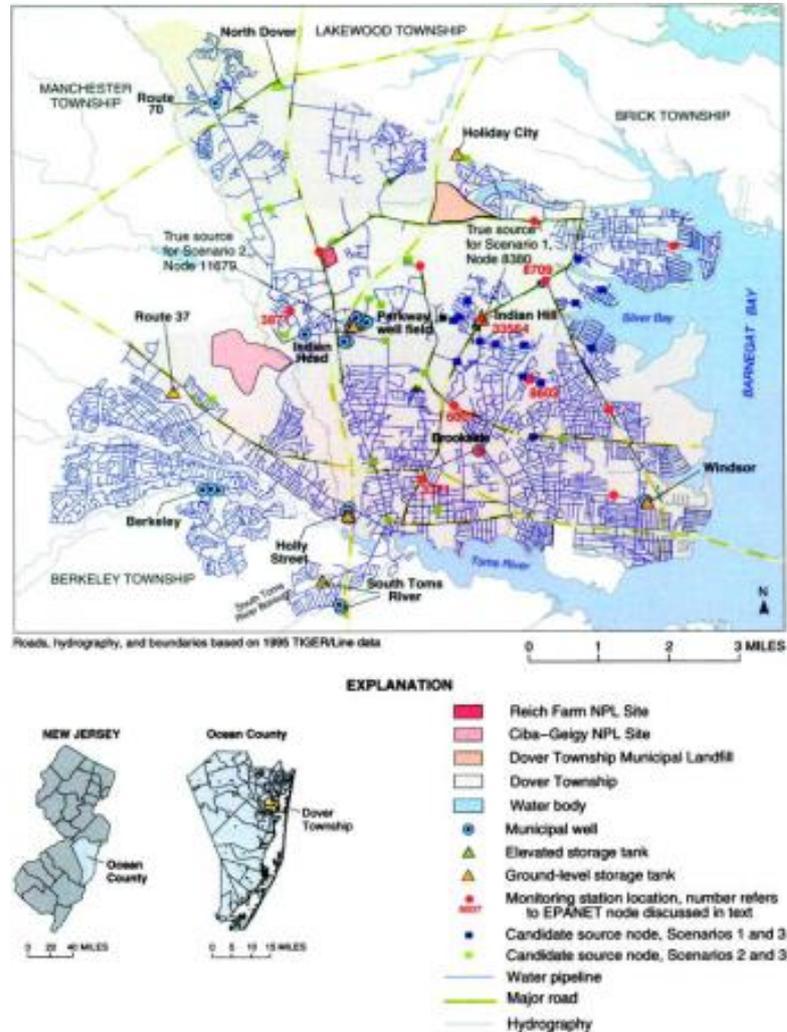


圖17 紐澤西州多佛鎮兒童癌症事件-用EPANET辨識管網污染源<sup>12</sup>

#### (6)即時水質模型

如果模型僅能算出水量及水壓，已不能滿足近年來水公司對於即時訊息的需求，水公司為了充分掌握自來水輸送品質，十分渴望了解管網各處即時水質訊息，然而線上水質儀器比起水壓計更為昂貴，不可能大量設置水質監視點，因此搭配SCADA即時出水壓及出水量演算出整個管網的即時

水質模型，為最近的發展趨勢。拉斯維加斯Valley Water使用「近即時」(Near Real-time)的水質模型已超過10年，密西根州Flint鉛水事件爆發後，水公司也透過EPANET-RTX套件建置即時水質模型，可優化管網腐蝕控制的投藥量並即時了解餘氯偏低區域（如圖18）。

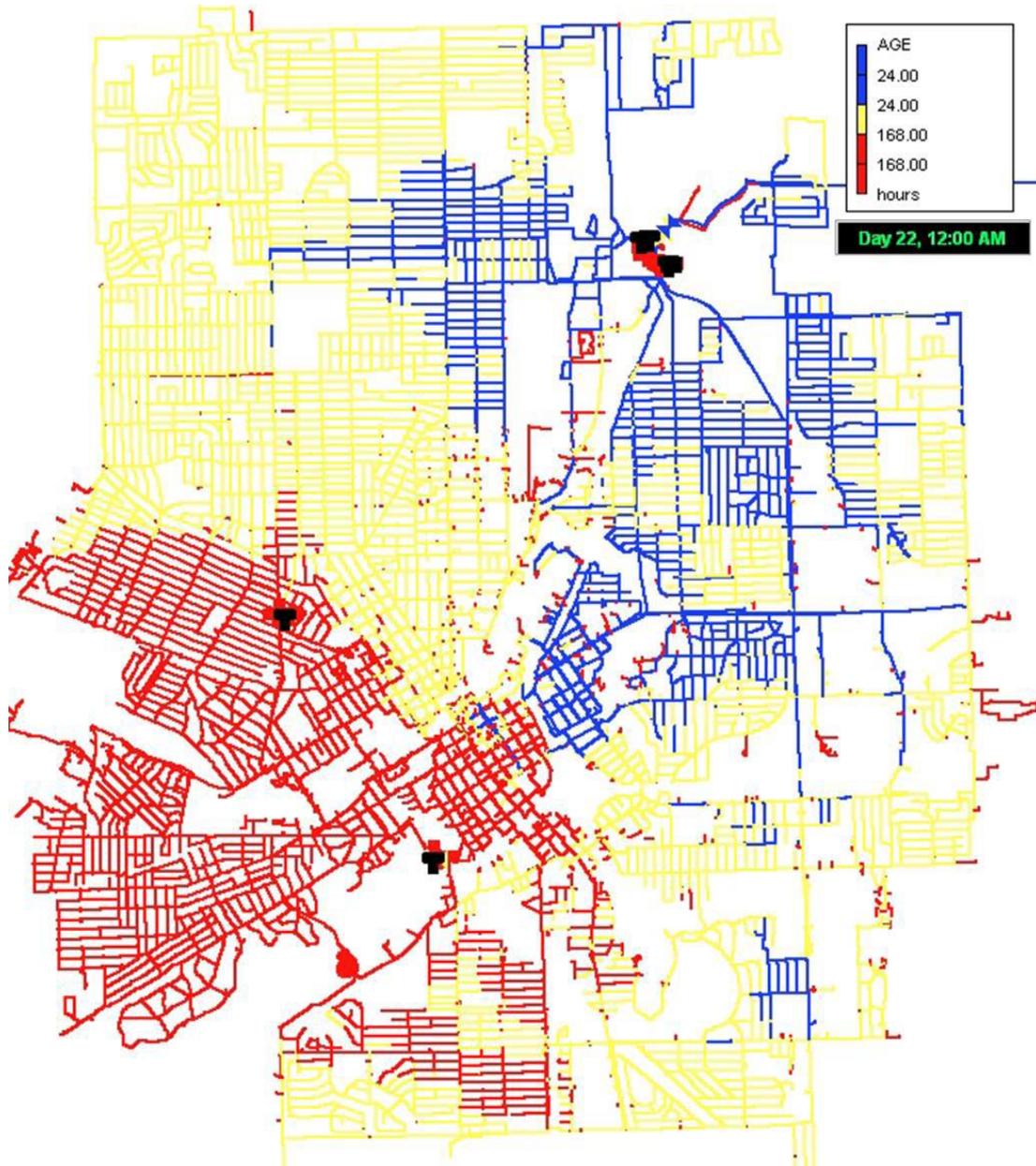


圖18 密西根州Flint的管網模型<sup>13</sup>

## 2.2 國內外水理分析應用案例

### 2.2.1 管網配水耗能優化

#### 1.大型管網泵送供水的非線性優化：以多倫多為例

過去優化管網供水，多以小區域或簡單管網為之。多倫多發展了對於整個管網的複雜非線性（NLP）優化作法，係以EPANET為水力求解器，外掛NLP求解器。

多倫多市的管網包含520 km配水管、29個加壓站、153個水泵、19個配水池、9個高架水塔，由水泵打到不同高架水塔所在的壓力區，重力供水，多以人為操作，有很大的優化空間。多倫多並不是直接對整個管網用優化求解器(NLP Solvers)反覆迭代求取優化解，而是由「簡化器」(HM Simplifier)把管網簡化成「最佳簡易模型」(FM及FMBM)，然後再以5種NLP Solvers對簡易模型求得優化解，左邊的虛線框內就是執行優化的程式架構流程，水力求解器採用EPANET，為其核心，右邊則是其他支援數據(詳圖19、20)。

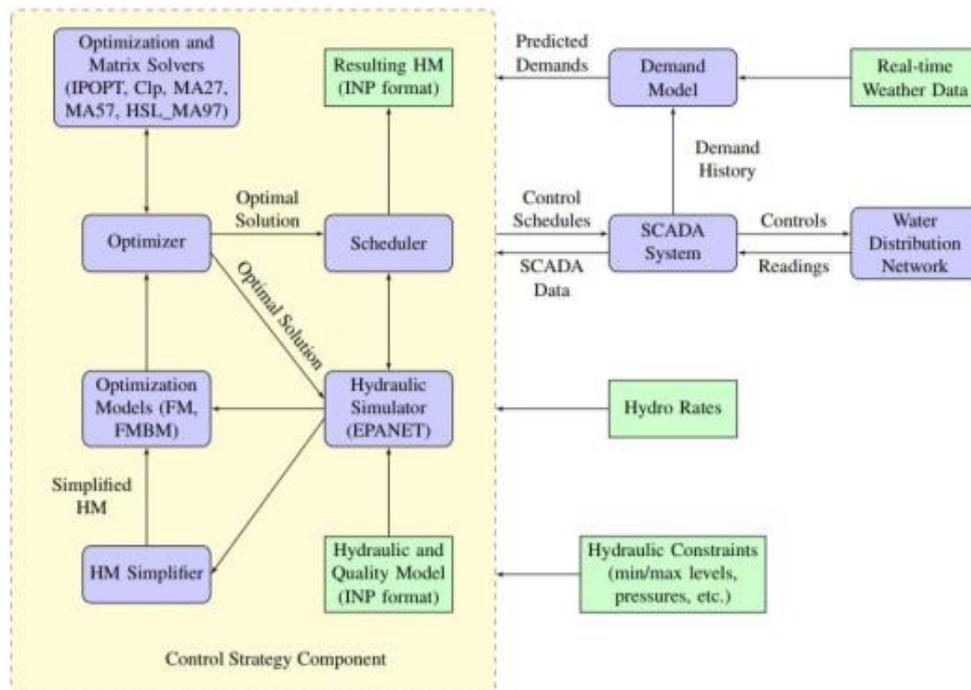


圖 19 多倫多優化運作之軟件系統架構圖<sup>14</sup>

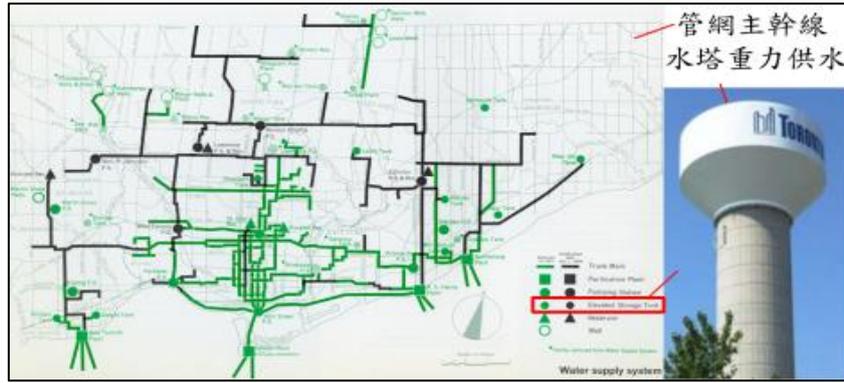


圖 20 多倫多的管網主幹線圖（左）及常見的重力供水水塔（右）<sup>14</sup>

套用Solver時，必須先給定「目標函數」（如：耗電最小、或配水量最少）、列出「限制條件」（如：某處水壓不能低於何值、某時配水量不得低於何值...），並輸入時段電價、水泵特性與組態，然後Solver就會以其演算法，嘗試簡易模型內水泵操作的組合，得出耗能最小的水泵操作時程表。

透過簡易模型得到的最佳解，仍要帶回完整模型內，以EPANET檢視其可行性，確認最佳解的操作下水壓及水量都能滿足，才可叫水泵操作員照表操課。隨著預測時段數 $N$ 、變數數量 $n$ 、限制條件數 $m$ 的增加，Solver求解時間 $T$ 、迭代次數 $I$ 也快速增加，但大約在 $N=12$ 以後，所節省的耗能 $S$ 就趨於穩定，如表1所示。節省約15%的電力，十分可觀。（ $N=12$ 代表將一天切成12個時段分析）。

表 1 切分不同時段數的運算結果， $S$  為節省電力百分比<sup>14</sup>

$N$	$n$	$m$	$T$	$I$	$S$
1	4093	4164	4.44	223	5.36
2	7910	8213	1.62	51	5.92
3	11727	12262	2.61	63	6.27
6	23178	24409	5.01	62	7.43
12	46080	48703	29.55	166	15.61
18	68982	72997	61.45	209	15.36
24	91884	97291	104.62	225	14.80
36	137688	145879	336.14	430	16.56
48	183492	194467	1249.67	673	15.01
72	275100	291643	1748.46	573	15.65
96	366708	388819	2698.49	584	16.50
120	458316	485995	2675.75	710	15.89
144	549924	582707	2519.70	633	15.52
168	641532	679419	4538.85	1172	15.99

最後得出的結果，如圖21所示，為一週的配水量與耗電量。紅線是未優化的配水量及耗能，綠線則是在簡易模型（FM）優化出來的結果（代入完整模型以EPANET檢視的結果則是藍色虛線，與綠線幾乎重疊）。藍色實線則是輸入的時段電價，可發現優化結果會避開高電價時段，但也不是絕對，主要是限制條件不允許水壓或水量不足，所以某些高電價時段仍要打水。但優化求解器取得了平衡，在滿足限制條件下找出最低耗能操作方案。

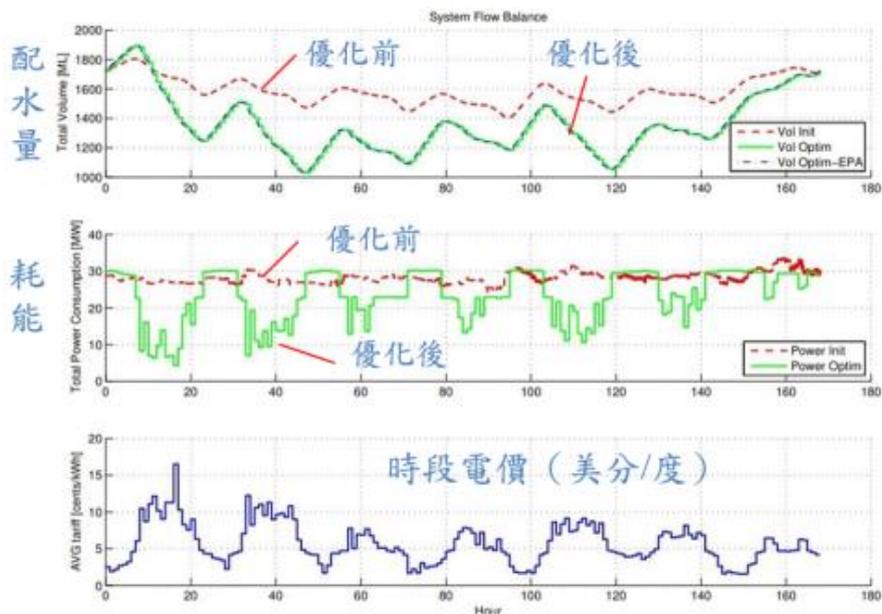


圖 21 配水量及耗能在優化前（紅線）及優化後（綠線）的趨勢<sup>14</sup>

註：某些商業套中軟體內建優化插件，例如Bentley公司WaterGEMs的Solver稱為Darwin，採用遺傳演算法GA。而這些優化插件有很多免費版本，例如R語言、Python等程式語言就有免費下載包可安裝使用，辦公室每台電腦幾乎都安裝的微軟Office2010年版Excel，就內建的三種Solver：GRG Nonlinear、Evolutionary、Simplex LP，其中Evolutionary就是遺傳演算法GA，使用前先到增益集（Add-in）把「規劃求解」打勾，就可載入Solver.xlam。

## 2.遺傳演算法優化水泵耗能：以義大利米蘭為例

義大利米蘭管網與臺北相似，系統主要埋設在平原，都缺乏高架水塔

或高位配水池，採用直接泵送到管網的「直接加壓」方式供水為主。臺北起碼還有直潭重力餘壓可使用，米蘭則無。故加壓電費有很大的程度取決於操作員的人為調度方式。

全米蘭市有26個加壓站，共96個水泵，有些是定速，有些是變頻。但不像臺北還有遠端回授或出口壓回授控制，以PID控制器調整水泵轉速，米蘭的監控人員都是憑經驗調速、或調整出口閥開度。本案例透過Baggio泵站的SCADA數據發現水泵過大（Oversized）的問題嚴重，全速運轉能量轉換效率多低於六成。全米蘭水車站整年用電3820萬度，十分驚人，以經驗法則操作，未優化所導致的耗能也很可觀（如圖22）。

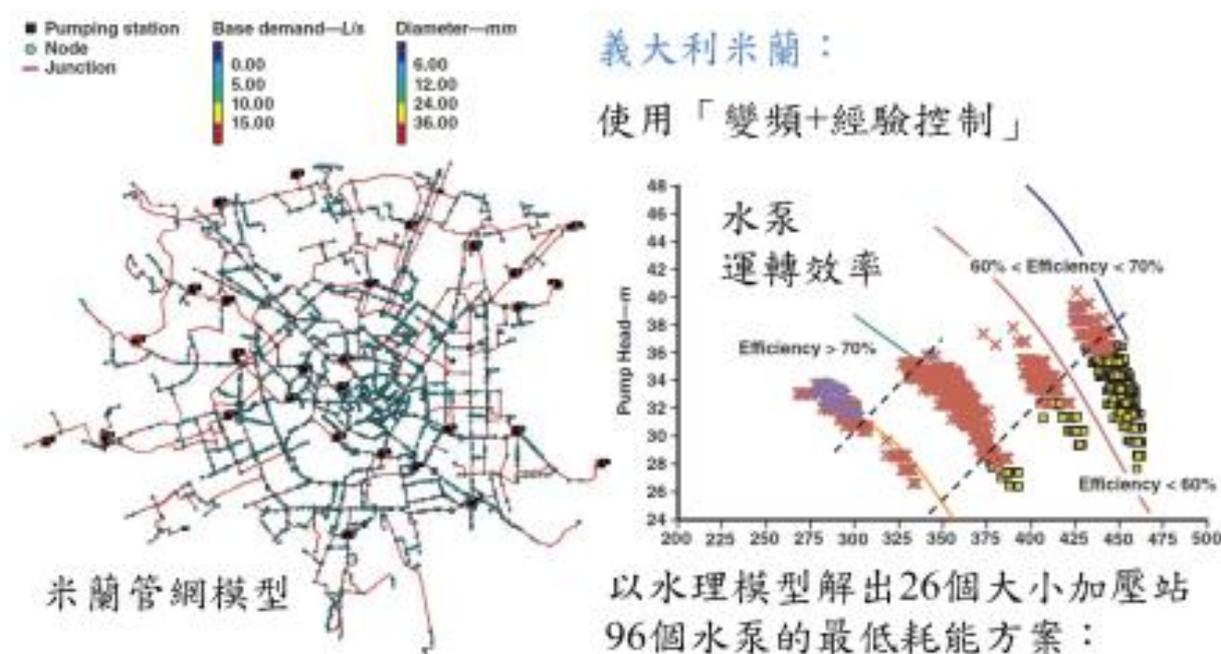


圖 22 米蘭 EPANET 模型（左），過去採人工經驗操控水泵（右）<sup>15</sup>

如何調整96台水泵的狀態（包含定速的啟、閉，變頻的轉速），確保24小時內、每個管網節點水壓都超過25m，並使得總耗能最低？這是數學上的極值問題：「目標函數」=耗能最低、「條件函數」=水壓超過25m、「變數」=96個水泵狀態。由於不可能有數學解析解，且水泵狀態過多（變數太多），如果用蒙地卡羅法Try每個水泵狀態，將會Try到天荒地老，故採用遺傳演算

法 (Genetic Algorithms, GA)，可很快收斂到極值，得到最優化的水泵狀態。

本案例採用EPANET Toolkit撰寫程式，帶入GA套件，先Try500個水泵狀態組合 (Populations)，挑出耗能較小的幾個組合，保留其部分水泵狀態 (基因)、並隨機改變一些狀態 (突變, Mutation)，然後混和出新組合 (交配, Crossover)，再Try...重複步驟，遺傳演算法能夠很快求解，讓目標函數-能量收斂到最小值，此時的組合就是最優水泵狀態 (詳圖23)。

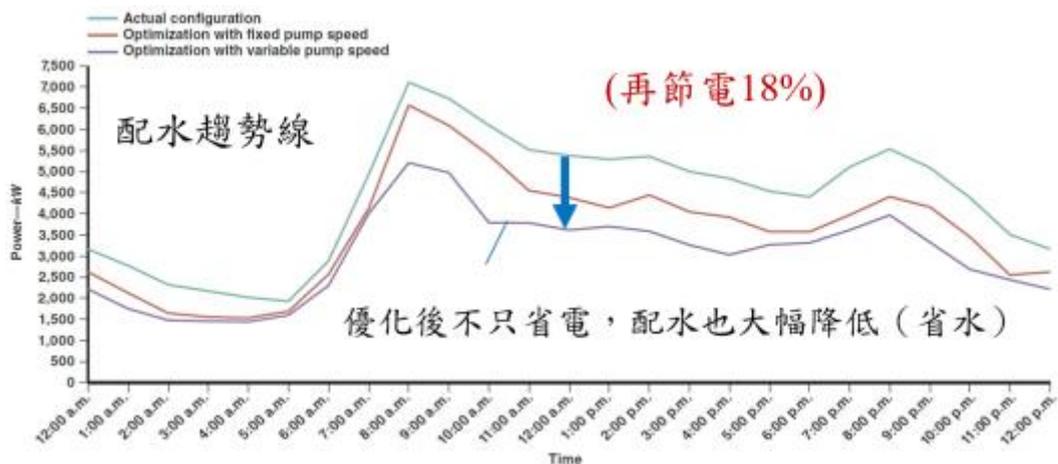


圖 23 米蘭的配水趨勢線，優化後節省配水量也節省電力<sup>15</sup>

節能效果估算：以GA的最優解去運轉，不但管網水壓都在25m以上，而且變頻水泵最高可省18.9%電力、定速泵最高省30.2%電力，優化後，全年米蘭水公司可省下684萬度的電力，約為126萬美元。

註：雖然米蘭採用變頻器調整水泵轉速，優化後大幅節省電費，看似先進，卻未使用遠端Real-time的水壓回饋自動調整，米蘭僅按照歷史操作數據，找出一個最好的操作模式，交給操作員「照表操課」，然而每分鐘管網的流量與水壓總是稍有波動，肯定不能在細節之處充份優化。最好的解決方案，透過Real-time的管網訊號進行回授控制 (Feedback Control)，讓水泵依管網當下的水壓自動微調轉速，因此米蘭仍有再優化的空間。

## 2.2.2 加氯消毒策略

### 1. 水質敏感區之辨識與二次加氯：以日本大阪為例

大阪市水道局利用實測餘氯數據與EPANET模型，得出管壁餘氯衰退反應係數 $k_w$ ，並找出餘氯偏低的「水質敏感區」，據以擬定末端管網中二次加氯的操作模式。

大阪的咲洲（Sakishima）供水區（「咲」發音為「笑」），其原水來自北方的淀川（Yodo River），經過庭窪（Niwakubo）淨水場處理後加壓輸送到30km遠的咲洲配水池，進入配水池前二次加氯，再由咲洲加壓站就近供應該供水區。咲洲加壓站出水餘氯約0.47~0.5mg/L。大阪參考文獻設定餘氯消散的「水體反應係數」 $k_b$ 為一級反應（First-order reaction），大阪透過「杯瓶試驗」（Bottle Test，或Jar Test）改變水溫得出庭窪淨水場生產的自來水，其反應係數 $k_b$ 與溫度T的關係為溫度的指數函數 $k_b = -0.0398 \exp(0.0742T)$ ，在大阪夏季管網水溫26度C之下，則 $k_b = -0.274$ （單位：1/day）（詳圖24）。



圖 24 大阪咲洲為獨立供水區，與管網分離，水源為遠方的淨水場<sup>16</sup>

由於咲洲供水區為海埔新生地，約1970~1980埋設DIP，全部為水泥內襯，管齡相近，因此EPANET的模型除了可將每一根管段C值設為相同，餘氯消耗之「管壁反應係數」 $k_w$ 值設定也相同。大阪水道局以EPANET主程式核心，外掛丹麥水利研究所DHI開發的MIKE URBAN套件，執行多時段水質餘氯濃度分析，進行Try & Error得到在26度C時，管壁反應係數 $k_w=-4.0$ (單位 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )。此外，大阪按文獻設定 $k_w$ 為零級反應(Zero-order reaction) (如圖25)。

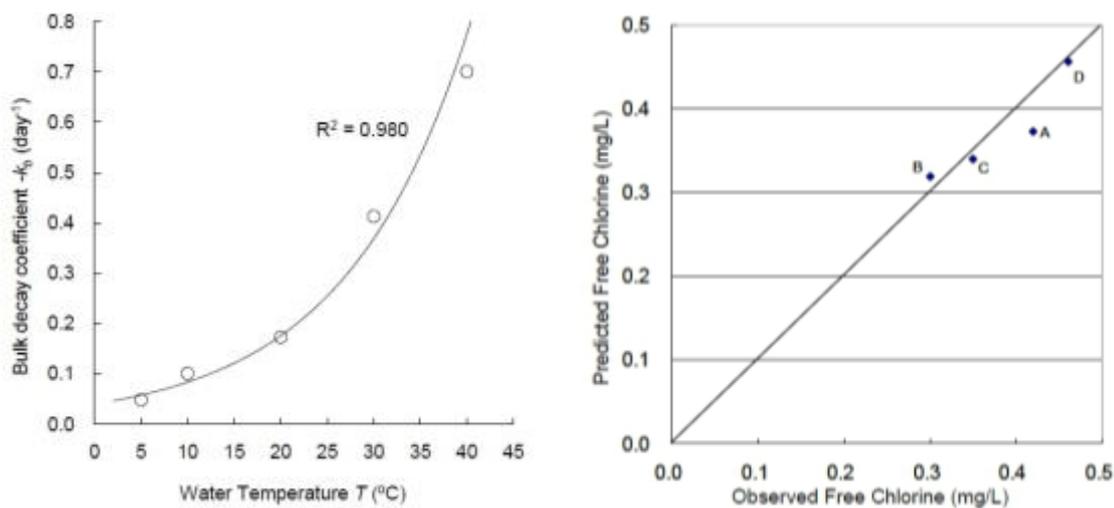


圖 25 杯瓶試驗求  $k_b$  (左)、管網四點預測值及實測值 (右) <sup>16</sup>

將所得之 $k_b$ 及 $k_w$ 套入模型，可預測咲洲供水區在26度下，管網A.B.C.D點的餘氯，模擬值與實際值很接近。其中C點的餘氯模擬值在上午6~8點居然跌到0.2mg/L以下，判斷該處管網發生滯留、水齡偏高所致，雖然仍符合日本自來水水質法規有但書「不存在微生物汙染風險下，餘氯0.1mg/L以上即可」，但水理分析找出的「水質敏感地區」，水道局仍應警惕並加以改善 (如圖26)。

後續可在不同季節 (水溫不同) 量測管網餘氯，利用同樣模型求得 $k_w$ ，但本研究在夏季，26度C水溫的餘氯消耗較快，算是最不利狀況，其他季節的餘氯不會這麼低。 $k_b$ 為實驗室杯瓶揮發試驗所求得，與現場無關，只要是

庭窪淨水場生產的自來水，原水及製程相同，自來水有機化學性質也相同，都有一樣的水體餘氯自消耗特性，因此 $k_b$ 曲線可套用到庭窪淨水場供水轄區內任一材質的管網。但 $k_w$ 則與現場管材管壁息息相關，各管段的 $k_w$ 可能都不同，受影響的因素包含內襯材質（ $k_w$ 絕對值排序：無內襯>水泥內襯>環氧樹脂）、內襯粗糙度（管齡愈大C值愈小， $k_w$ 絕對值愈大）、水溫（溫度T愈高， $k_w$ 絕對值愈大）。也就是管齡較大、管壁愈粗糙、住在管壁的「微生物」愈多，當溫度較高時，微生物吃掉餘氯的速度就愈快， $k_w$ 絕對值就變大。

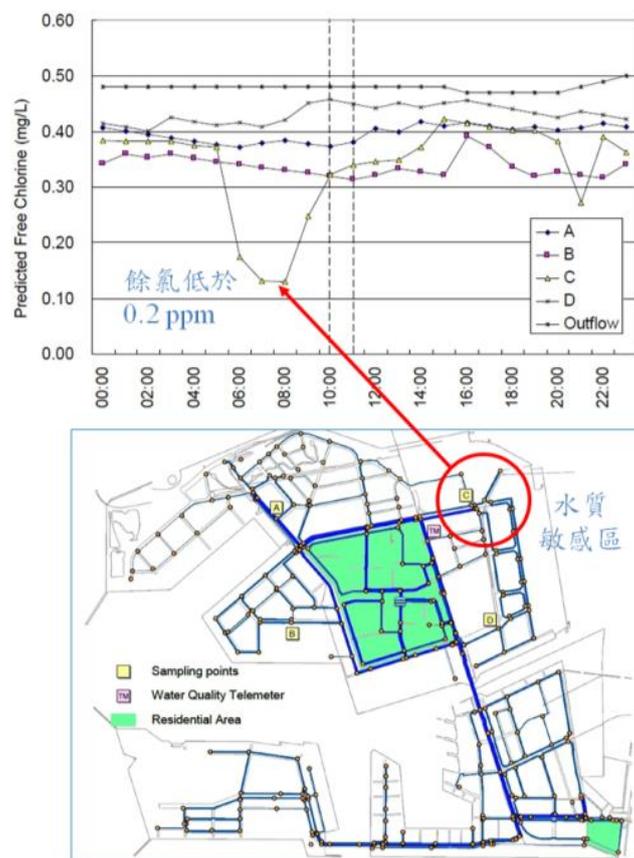


圖 26 水質模型找出咲洲供水區餘氯偏低的「水質敏感區」<sup>16</sup>

註：北水處2015年底於興隆公宅安裝水質儀器，發現隔年1月居民全數入住後，即便正常用水，總表常於清晨～中午不進水約10個小時，此時表前自來水滯留於配水管內，有餘氯衰退現象，curve fitting得 $K=-0.54$  (1/day)，曲線為一級反應，故興隆K值融合了 $k_b$ 及 $k_w$ 兩者，屬於「等效K值」。

## 2.分析管網餘氯提出淨水場加氯對策：以韓國首爾為例

首爾水道研究所與首爾大學以實測數據結合EPANET模型，建議首爾出水餘氯要調低0.05~0.15 mg/L，才能滿足首爾管網各點餘氯介於0.1~0.4mg/L之規定。本研究指出三鹵甲烷（THMs）的生成主要在於淨水場消毒過程，而於管網內部THM濃度增長有限（註：這點與他國案例稍有差異，某些國家管網內THM增加量較多，且水齡愈大增加愈多，可能與不同水源、製程、管壁狀況有關）。

本研究選定首爾的UM、CD區兩個供水區，由區內的Demand Multiplier曲線可得知9~16時用水量最大，判斷應為商業用水為主，少許住宅用水。餘氯消散「水體反應係數」 $k_b$ 採用複雜的三參數公式，由11個實測樣本之水溫 $T$ 、初始餘氯 $C_0$ 、總有機碳TOC，進行「瓶杯試驗」（Bottle tests）後迴歸求取公式係數。水體反應 $k_b$ 為一級反應（First-order reaction）。管壁反應係數 $k_w$ 則引用作者先前研究結果，分為冬季、夏季、春秋三種水溫，也分為水泥內襯DCIP、更生內襯CIP、PE.銅管.鋼管三種管壁，但 $k_w$ 使用「一級反應」，並非其他研究常用的零級反應（如圖27）。

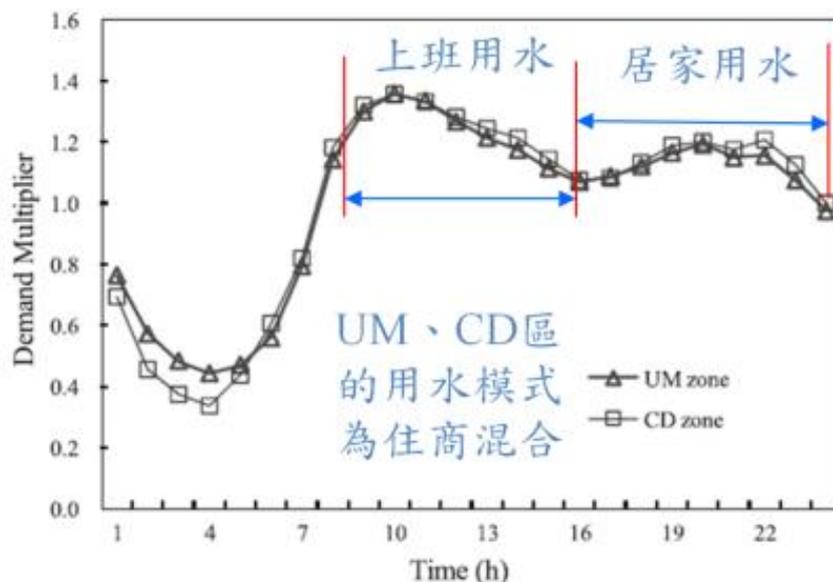


圖 27 首爾兩供水區，日間用水略高於夜間，為住商混合區<sup>17</sup>

執行EPANET多時段分析後，發現管網各節點的餘氯濃度有偏高之趨勢，大約九成的餘氯高於0.4mg/L，僅有一成符合首爾水道規定(0.1~0.4mg/L)。代表淨水場加氯太重（出水餘氯為0.63mg/L），民眾也因此經常抱怨自來水口感不佳。因此本研究建議水廠要調降出水餘氯0.05~0.15mg/L。

以淨水廠出水樣本進行杯瓶試驗，得出三鹵甲烷THMs在23度C的增長趨勢為一級反應，反應係數 $K'=0.18$  (1/day)，而且淨水廠加氯消毒當下就產生43.5 ug/L的初始濃度。將杯瓶試驗所得THMs的反應係數 $K'$ 帶入EPANET的水體反應 $k_b$ ，初始濃度、飽和濃度也一併帶入後執行模擬，發現即便流動到管網最遠端，THM生成仍然很有限，最高不會超過52ug/L，整個管網有九成九的濃度都低於50ug/L，顯示三鹵甲烷主要在淨水廠內生成，於管網內生成量很少（如圖28、29）。

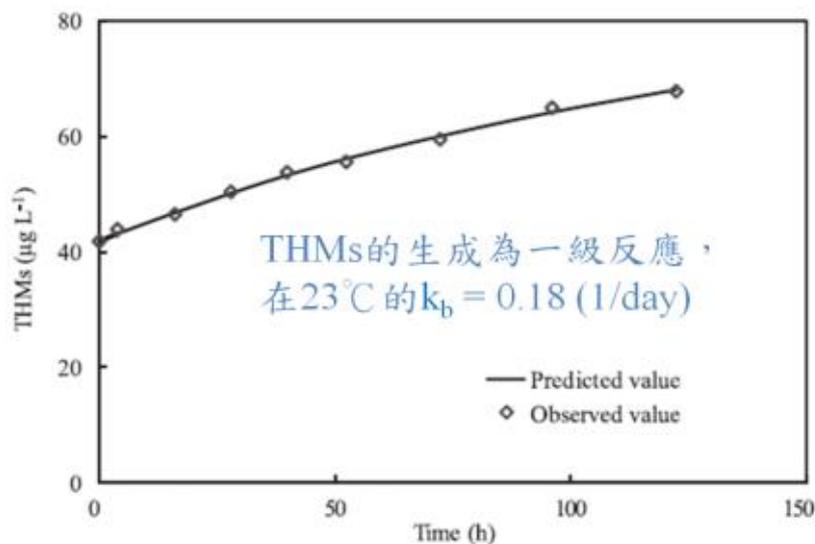


圖 28 杯瓶試驗求取三鹵甲烷之一級增長反應係數<sup>17</sup>

註：本研究為2006~2007兩年的數據，2012發布，代表首爾水理模型十多年前就已經完成建模，水量、水壓均已校正完畢（Hydraulic部分），才能接著分析多時段的餘氯、三鹵甲烷（Water Quality部分），進一步優化淨水加藥量，將供水服務品質由最基本的「供應充足」，提升到更進階的「飲用口感」。

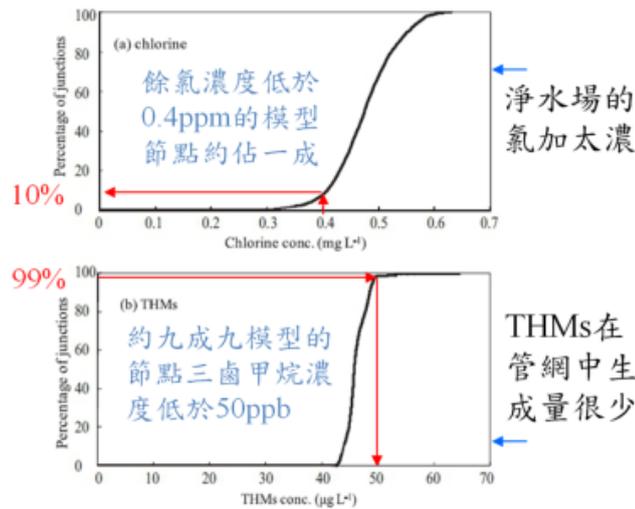


圖 29 加氯較濃致水廠 THMs 及餘氯偏高，但管網內生成 THMs 少<sup>17</sup>

### 2.2.3 水中多種反應物質交互作用

#### 1. 管網微生物孳生模型：以荷蘭恩霍芬（Eindhoven）為例

荷蘭飲用水法規定自來水輸送不得添加消毒劑，微生物可能會在輸送過程孳生，產生健康風險，因此研究機構PREPARED、KWR、Brabant水公司合作建立管網三種虛擬細菌與溫度之生長關聯、以EPANET-MSX考量管壁及水中多個物質及細菌之間的交互作用，構建微生物孳生模型作為供水水質預警系統（如圖30）。

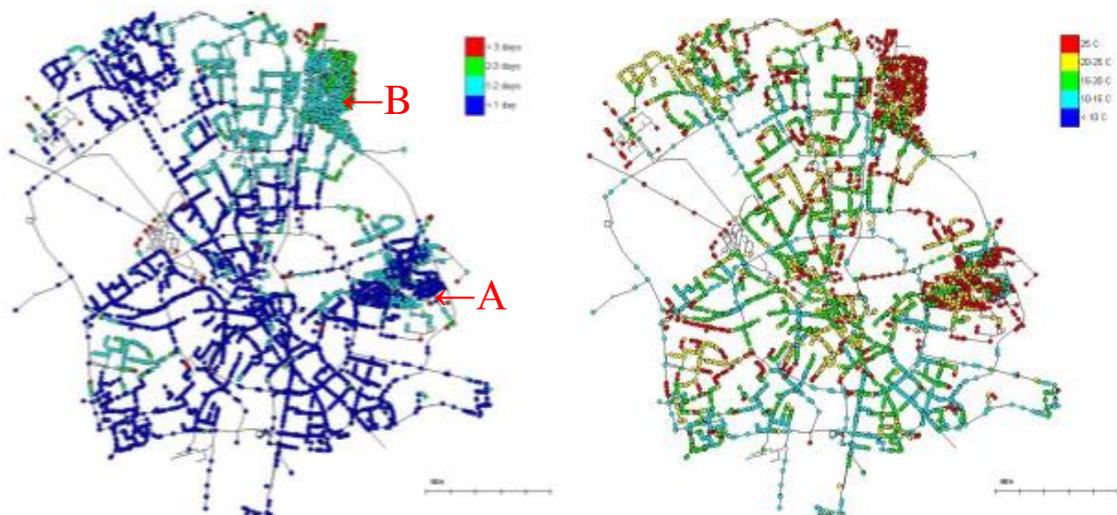


圖 30 恩霍芬以 EPANET 模擬的水齡（左）與水溫（右）<sup>18</sup>

WHO建議自來水的水溫不高於攝氏25度，其他文獻也指出引起退伍軍人症的嗜肺軍團菌超過25度開始快速生長，30度以上更是一發不可收拾。荷蘭法令不能加氯消毒，因此細菌缺乏餘氯抑制，管網水溫成為生長模型重要的參數，本研究由氣象資料推估管壁週邊土壤溫度，再利用Blokker等人由土壤溫度計算管網水溫的模式，並設計了三種虛擬細菌，個別的生長速度均與水溫有關，並透過現地量測Aeromonas菌的總數量，藉以校正模型參數。因此整個模型巧妙運用水理模型計算每個節點的水溫，並將自來水輸送過程與細菌生長結合，藉以預測每個節點微生物再生情況。

Eindhoven的管網約400公里，150mm管線佔36.1%最長，管材以PVC佔51.5%、AC佔20.5%、CIP佔19.7%三大類為主，少部分混凝土管，管齡21-64年佔62.5%、65年以上佔16%，管齡偏高，共有7.5萬根給水管，98%為住宅用水戶。取樣校正區域A、B兩區為純住宅區，這兩區管網模型未骨架化（Skeletonized），保留所有給水管，其餘區域則經縮減骨架化（如圖31）。

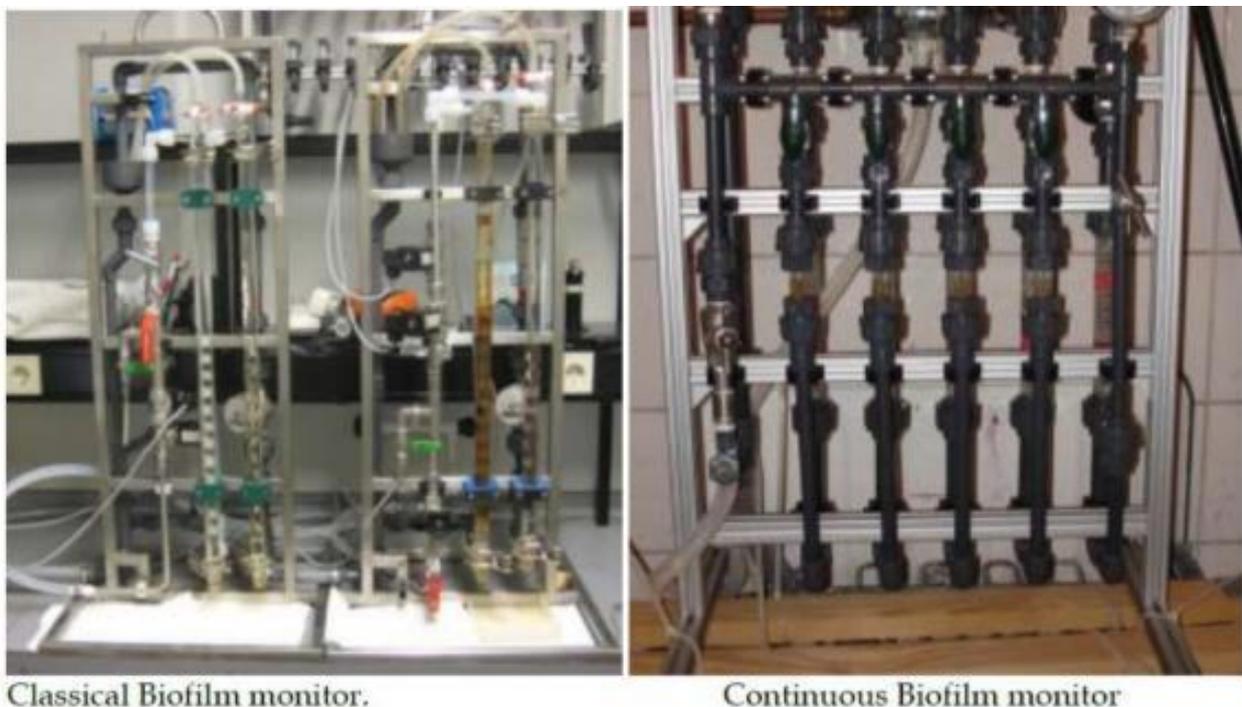


圖 31 於恩霍芬 A.B 區設置的兩種生物膜量測儀<sup>18</sup>

細菌在管網內包含水中游離細菌及管壁生物膜，設定不同的剝離反應速率、死亡率、沉積反應速率，均設定為一級反應，據此推導水中細菌生長速率，皆與水溫有關。也考量不同管徑、壁厚、材質的導熱性，計算由土壤傳導到水中的水溫。上述17種水質參數輸入EPANET-MSX描述檔，最後執行EPANET，便可模擬管網各處細菌生長率，如表2。

表 2 輸入 EPANET-MSX 描述檔的水質參數<sup>18</sup>

parameter	unit	applied value	remarks
$\alpha_{water}$	[ $10^{-6} m^2 s^{-1}$ ]	0.136	for still water at 20 °C
$\lambda_{water}$	[ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	0.6	for still water at 20 °C
$\lambda_{pipe, PVC}$	[ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	0.16	PVC
$\lambda_{pipe, AC}$	[ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	0.43	AC
$\lambda_{pipe, CI}$	[ $W m^{-1} K^{-1}$ ]	8.9	Cement lined CI
$\lambda_s$	[-]	0.1	
Pr		7	
$\mu_{opt}$	[1/s]	$4.0 \cdot 10^{-5}$	This means a growth from 1 to 1000 in 48 hours Average from several literature sources.
$T_{min,I}$	[°C]	0	choice for virtual microorganism
$T_{opt,I}$	[°C]	15	
$T_{min,II}$	[°C]	5	choice for virtual microorganism
$T_{opt,II}$	[°C]	25	
$T_{min,III}$	[°C]	10	choice for virtual microorganism
$T_{opt,III}$	[°C]	30	
$T_{outer soil}$	[°C]	25	
$T_{water}$	[°C]	10	initial value
X	[ $1/cm^3$ ] = [1/ml]	1	initial value

多時段分析採用每5分鐘間距平衡一次，總分析延時為72小時，執行後還必須校正參數，於A、B兩區域各5處量測水中細菌，校正時，土壤溫度為19.2度，進入管網的初始水溫為14.2度。水中細菌透過生物膜監測儀量測，每兩週取出儀器中的玻璃環量測累積生物量，據以校正模型。經多次模擬，發現AB兩區位於管網後端，水溫已經接近土壤溫度，而且B區的細菌量高於A區，甚至是整個模型最高的，最佳的生長溫度為25度。此外，細菌的數量與用戶用水多寡有很大的關聯性，節點用水量減少水流停滯時，細菌便開始孳生，甚至差距10倍之多，水溫反而變成次要因素（如圖32、33）。

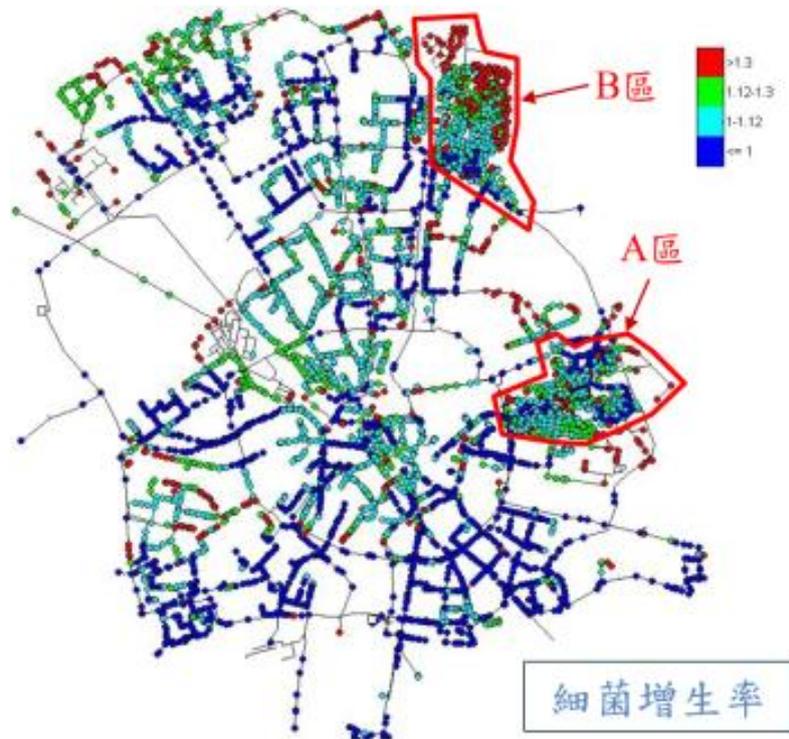


圖 32 恩霍芬 72 小時細菌增生率，B 區管末缺乏流動，增生最多<sup>18</sup>

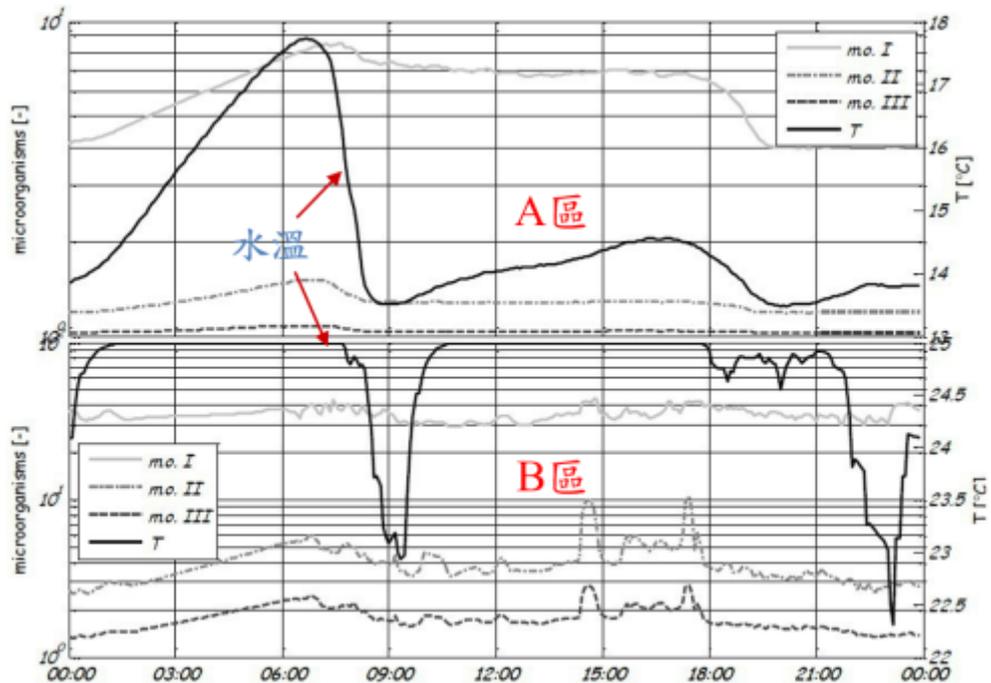


圖 33 管網兩區 3 種虛擬細菌與水溫趨勢圖，以 I 型細菌最為興旺<sup>18</sup>

註1：法令允許加氯消毒者，管網微生物孳生的行為更為複雜，主要的控制因素不只是溫度一項了，但因為餘氯可抑制微生物，通常視為不增生，

導致水公司經常忽略了這一部分，總以為在管網系統中驗出餘氯就可放心。美國上世紀80年代以後陸續爆發退伍軍人症，後來發現是水中細菌在用戶水池滯留太久，大量孳生，美國民眾又習慣生飲龍頭水，導致抵抗力差的老人肺部感染，水媒菌在管網及水池水塔系統內孳生的模型才被關注。

註2：臺北用戶的水池水塔儲藏量十分驚人，「藏水於民」量可以取代高架配水池，水池如果缺乏清洗，餘氯將很快耗盡，成為細菌孳生的溫床。目前北水處仍欠缺水池細菌增生的模型，只有粗淺的經驗法則，根據水質單位多年的檢驗結果，如果定期清洗的水池，且每日用水量達 $1/3 \sim 1/4$ 的水池體積，循環量足以維持新鮮，餘氯皆可超過 $0.2\text{ppm}$ ，水質可生飲無虞。

註3：以安裝智慧表及水質儀器的北市「興隆公宅」為例，用水量較小的A棟，每日用水量/蓄水池體積 $=0.62$ ，超過上述 $1/3 \sim 1/4$ 比例，餘氯應當充足。儀器顯示，進水端新鮮自來水的餘氯介於 $0.34 \sim 0.57\text{ppm}$ ，水送到頂樓水塔混合老水後，餘氯仍高達 $0.3 \sim 0.4\text{ppm}$ 。但新大樓水池是乾淨的，池壁尚無沾附生物膜， $0.04 \sim 0.17\text{ppm}$ 的餘氯消耗量，應當是水體自然耗損量（Bulk Decay），若定期清洗，才能減少壁體及底泥的Wall Decay耗損餘氯。

## 2.消毒劑與多種化學物質交互作用：以澳洲雪梨為例

水公司投藥消毒都希望能一次滿足三個願望：保有最低餘氯抑制細菌、減少消毒副產物（DBPs）的產生、控制餘氯維持飲水口感。但消毒及配送管網涉及的變數複雜，參與反應的化學物質眾多，彼此相互作用，因此過往水公司大多仰賴經驗，直到上世紀末才開始運用模型分析。

但面對多化學物質（Multi-Species），一次只能處理一個化學物質的

EPANET仍束手無策，例如餘氯、三鹵甲烷、鹵乙酸三種化學物質，若又搭配不同水源化學特性，更是複雜，甚至有些水公司為了降低消毒副產物，索性改用溫和的「氯胺」，不用氯消毒了。後來美國環保署開發EPANET-MSX (Multi-Species eXtension)，終於可以解決這個問題了。

餘氯的衰退分為「水體」(bulk)、「管壁」(wall) 兩類 (如圖34)，其中水體bulk的衰退可用杯瓶試驗，套用數學模式擬合曲線，雪梨自來水推薦2R、2RA方程式，而管壁wall的衰退則推薦EXPBIO方程式，適用於有內襯保護的管材。但必須至實際管網端量測現場餘氯含量 (system)，扣掉實驗室杯瓶所得到的bulk，才能得到wall的消耗量，此時才用EXPBIO去迴歸，取得參數。而這些參數隨溫度而變，在不同溫度都要做試驗 (如圖35、36)。

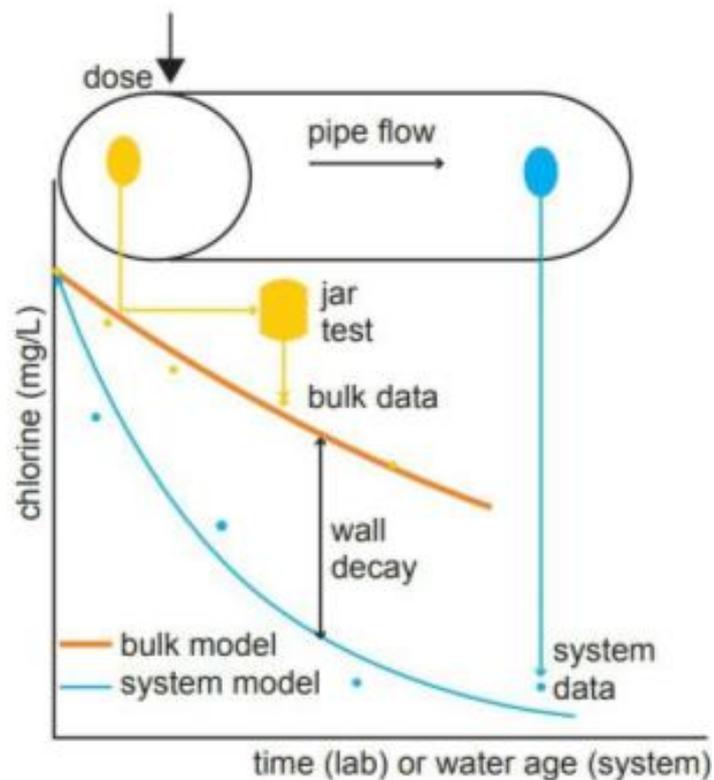


圖 34 水體 (bulk)、管壁 (wall) 與整個系統 (system) 的關係<sup>19</sup>

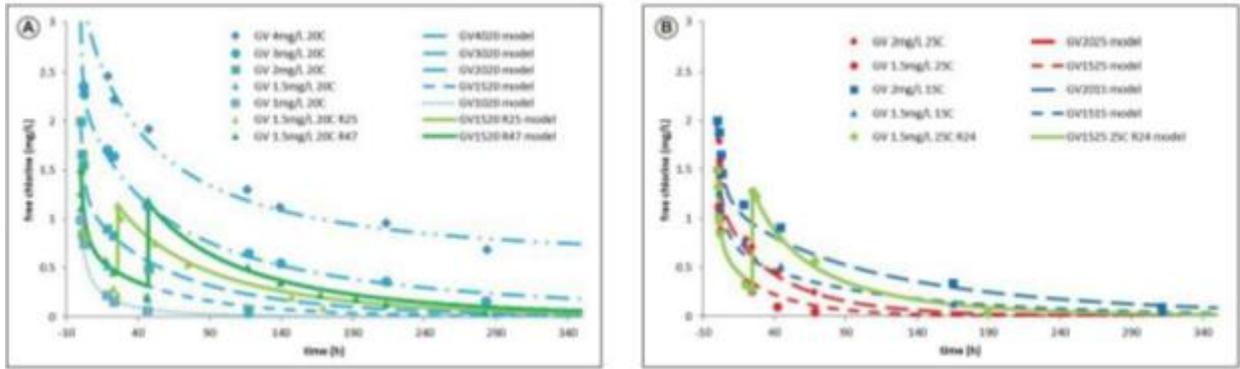


圖 35 雪梨經適用於不同溫度之 2RA 方程式擬合出杯瓶試驗  $k_b$ <sup>19</sup>

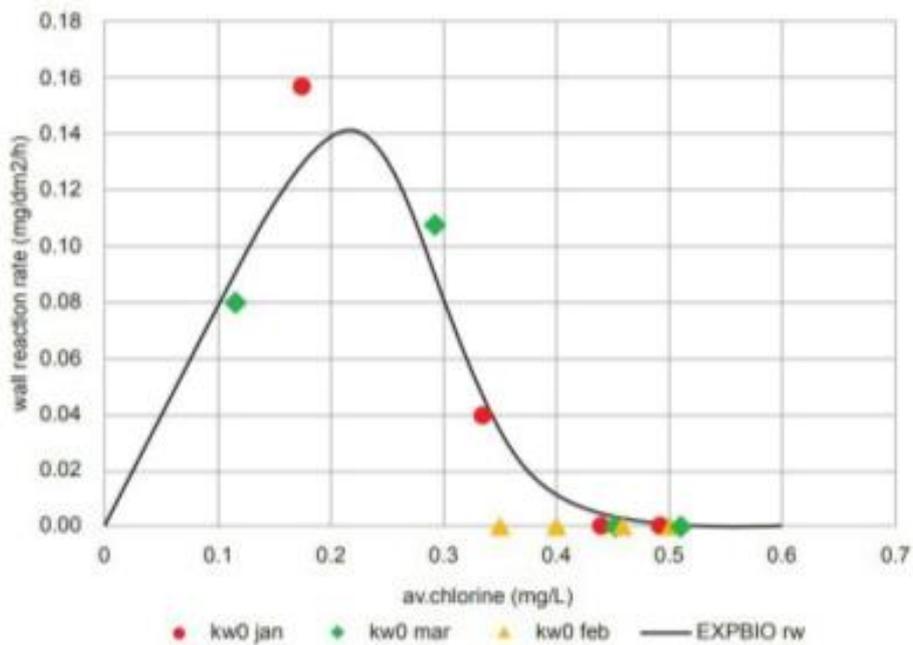


圖 36 以適用於內襯配水管的 EXPBIO 方程式擬合出管壁  $k_w$ <sup>19</sup>

消毒副產物的生成一樣有bulk及wall兩類，參數取得方式如同餘氯，必須做試驗、現地量取。然而消毒副產物有兩類：三鹵甲烷(THMs)、鹵乙酸(HAAs)，就必須重複做兩套試驗，不同溫度下也要分別進行。而且HAAs生成後可能還被生物膜消耗掉，有點複雜，但因THMs的致癌性，法規比較重視，雪梨的研究比較深入。

使用EPANET-MSX，需先將各類化學物質參數打好存成文檔，才讓EPANET執行。但許多商用軟體WaterGEMS、Innovyze等都已將MSX納入主

程式，變成下拉式視窗，登打參數執行上比較方便。

雪梨建議依照不同情境（Scenario）進行模擬，例如夏季溫度高、用戶用水最少的管末，為管網最糟情境，很容易餘氯不足。執行上也可把不同後氯添加的量、想要達成的餘氯濃度、口感濃度目標值，甚至管網中二次加氯的成本...都考量進來，最後每個方案都能夠評比CP值（如表3）。

表 3 雪梨使用七種擬合用方程式<sup>19</sup>

Model	Equation	No.
Chlorine decay (total)	$-dC_{Cl}/dt = R_b + R_w = R_b + (4/D)r_w$	1
Chlorine bulk decay		
Two reactant (2R)	$-dC_{Cl}/dt = k_f \times C_f \times C_{Cl} + k_s \times C_s \times C_{Cl}$	2
	$-dC_f/dt = k_f \times C_f \times C_{Cl}$	3
	$-dC_s/dt = k_s \times C_s \times C_{Cl}$	4
- augmented (2RA)	$k_f = k_{f20} \times \exp[-E/R \times (20 - T)/(273 + 20)] / (273 + T)$	5
Chlorine wall decay		
EXPBIO	$r_w = A \times \exp(-B \times C_{Cl}) \times C_{Cl} / (1 + A \times \exp(-B \times C_{Cl}) / k_m)$	6
THM formation	$dC_{THM}/dt = y \times dC_{Cl}/dt$	7

All equations have been written so that variables and coefficients have non-negative values.

$C_{Cl}$  is the bulk chlorine concentration [mg/L]

$R_b$  is the chlorine bulk decay rate [mg/L/h]

$R_w$  is the chlorine wall decay rate [mg/L/h]

$r_w$  [mg/dm<sup>2</sup>/h] is the apparent wall-surface decay rate [mg/dm<sup>2</sup>/h] and

$D$  [dm] is pipe diameter;

$C_f$  and  $C_s$  are respectively the fast- and slow-reactant concentrations [mgCl-equiv/L] and

$k_f$  and  $k_s$  are the corresponding second-order decay-rate coefficients [L/mgCl/h];

$k_T$  is the value of  $k_f$  or  $k_s$  at  $T^\circ\text{C}$

$E$  is the activation energy [J/mol] and  $R$  the universal gas constant [J/K/mol];

$k_m$  is the mass transfer coefficient [dm/h];

$A$  is an amplification factor [dm/h] and

$B$  is the rate-coefficient [L/mg] for the effect of chlorine on biofilm growth;

$C_{THM}$  is the bulk THM concentration [mg/L] and

$y$  is the yield of THMs [mgTHM/mgCl reacted]

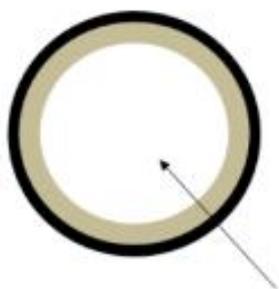
文中也提到，有時候不管如何調整加藥，消毒副產物就是壓不下來，作者建議，這時不要執著於後加氯的優化了，應該要改良前端淨水處理的程序，例如溶解有機碳(DOC)，如果不強化膠羽去除DOC能力，後氯接觸時，就會產生較高濃度消毒副產物，根本沒辦法降下去。但這些處理程序每個淨水場都有差異，必須因地制宜，沒有統一的標準答案。

## 2.2.4 DIP配水管水泥內襯溶出與擴散分析

北水處以水泥內襯鑄鐵管泡水靜置試驗的結果求得吐鹼參數，並套用管網水理模型，模擬溶出物質擴散行為，並據以提出改善建議，最終形成臺北的政策：逐步減用水泥內襯、改用粉體塗裝(Fusion Bonded Epoxy, FBE)、於2024年全面採用。

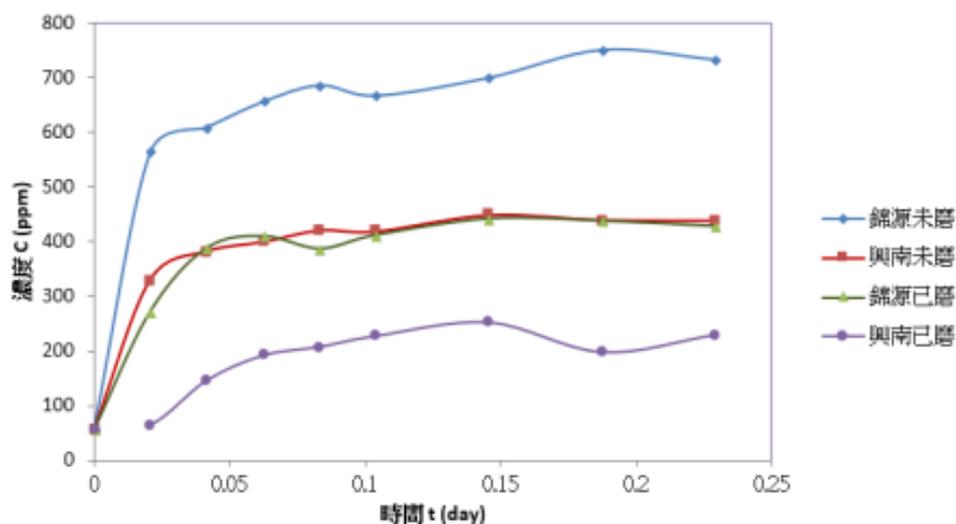
北水處為了解水泥內襯吐鹼的特性，先進行了靜置浸泡試驗，求取內襯吐鹼的速率（反應係數 $K$ ），以及吐鹼平衡量（飽和濃度 $C_L$ ），這兩項重要參數將控制水理模型內襯吐鹼的快慢多寡（詳圖37）。黃欽稜等人2014年的研究，顯示內襯吐鹼的反應為一級反應(First Order Reaction)，擬合線段之斜率= $K$ ，截距/斜率= $C_L$ 。北水處以總溶解固體TDS作為吐鹼量測對象，並選擇兩家國內大廠牌水泥內襯直管，以未磨/磨掉表層水泥乳的處理方式，共4組管線進行泡水靜置試驗，靜置泡水約6小時，全部達到飽和，擬合的4條線直線 $R^2$ 相關性很高，均超過0.93以上。經過上述試驗求取參數，便可對EPANET的管段輸入 $K$ 及 $C_L$ ，分別輸入對應的「水體反應係數」Bulk Coefficient及「極限濃度」Limiting Concentration。EPANET有兩種 $K$ 值，一個為 $k_b$ ，另一個為 $k_w$ ，由於 $k_w$ 無法模擬水體靜置狀態的反應，僅適用於有水流過壁面的接觸反應，因此以靜置溶出試驗所擬合的 $K$ 值透過EPANET的 $k_b$ 輸入模型（圖38）。

由靜置管溶出試驗求取參數  $\rightarrow$  反應係數K  
飽和濃度 $C_L$

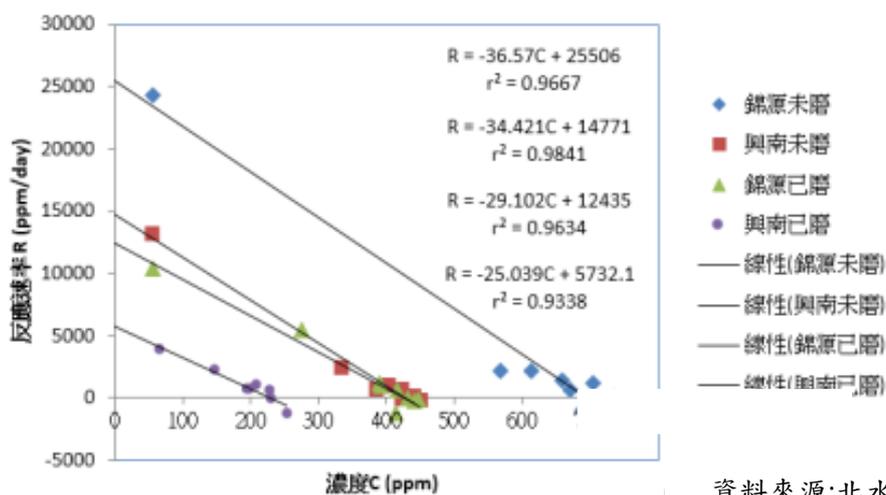


靜置，按時量測溶出濃度 (TDS、pH、鋁...)

實測溶出濃度 (TDS)



曲線擬合



資料來源:北水處

圖 37 臺北以 4 種不同管壁 TDS 溶出實測擬合 K 及  $C_L$

# EPANET操作與設定

設定濃度單位

輸入TDS  
單位選mg/L (ppm)

設定反應級數與飽和上限濃度

1級反應  
輸入實驗所得之飽和濃度 $C_L$

設定反應總時間

至少24小時

請按照口徑進行尺度修正K值

$$K_{150} = K_{200} \left( \frac{A/V}{A/V} \right)^{150}$$

濃度增長K值為正  
濃度衰減K值為負

設定管線K值

點選水池設定背景濃度

輸入背景濃度值

圖38 EPANET的參數設定方式

黃欽稜等人2015年以北水處三重某個區塊進行分析，配水管長度為20.24公里，約為4~5個小區合併起來的一個中區，區內制水閥全開、邊界制水閥全閉，為單一進水，與管網直接相連的水表共有1136栓（如圖39）。本區的EPANET水理模型係經過現場量測消防栓水壓，比對模型運算出來的

水壓，完成管壁粗糙係數、節點高程之校正。為了解「入口端/管末端」埋新管，以及水泥內襯「未磨/磨掉」的內襯吐鹼對整個區塊的影響，分為以下四個情境，均埋設160m新管線，口徑200mm，為臺灣首個水泥吐鹼的管網分析（詳圖40~44）：

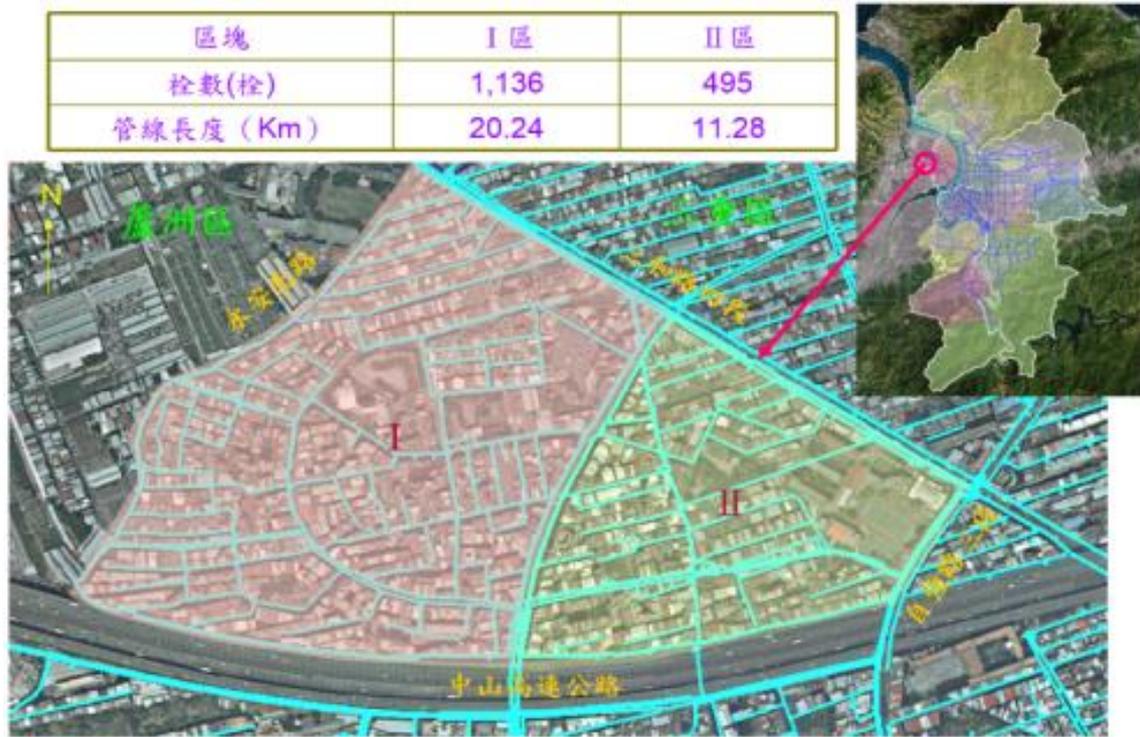
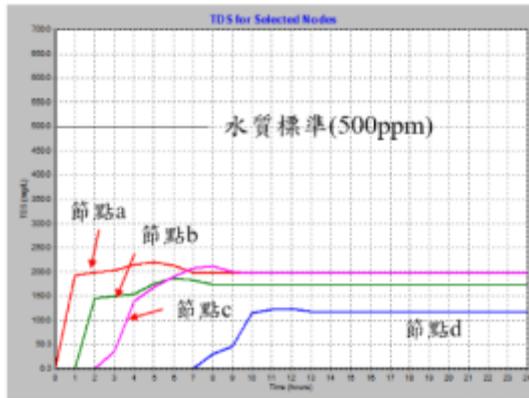
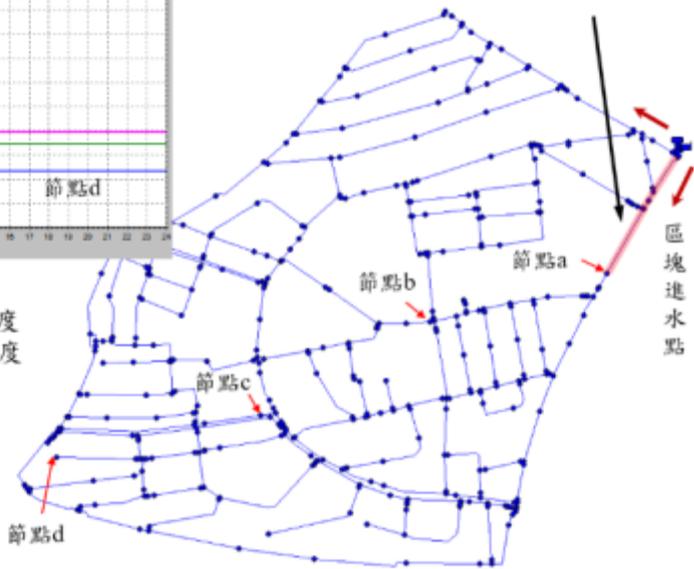


圖 39 以實際三重中區模擬流動狀態下管壁溶出到水中的 TDS 擴散



更換160米新管線，未磨內襯  
 反應係數 $K_{200}=36.57$   
 飽和濃度 $C_L=697$  ppm



因為水流沖洗稀釋，TDS濃度不會累積，進水點與末端濃度差異不大。  
 凌晨5點流速最低為0.27 m/s，流量為1659 CMD，仍然全部未超標

### TDS散佈面積擴張情形

因為新管於上游側，TDS很快地擴散到下游，但濃度不高

雖然內部閥門全開，但TDS只影響區塊下半部，區塊上半部因由另一幹管供水，不受影響

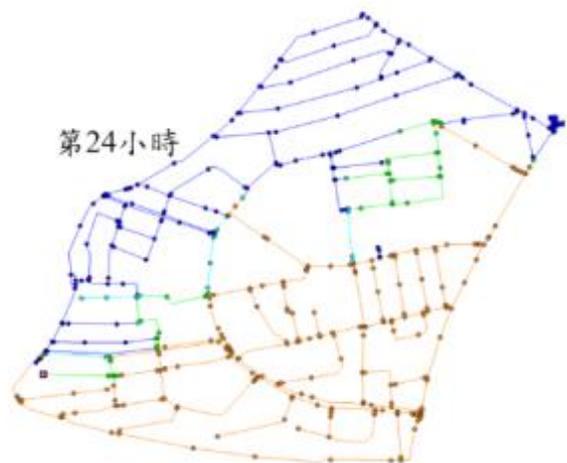
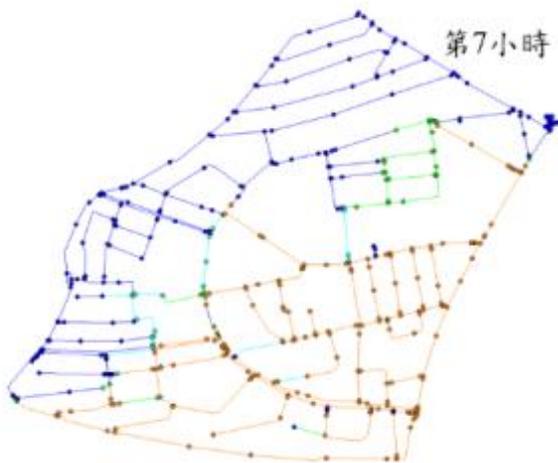
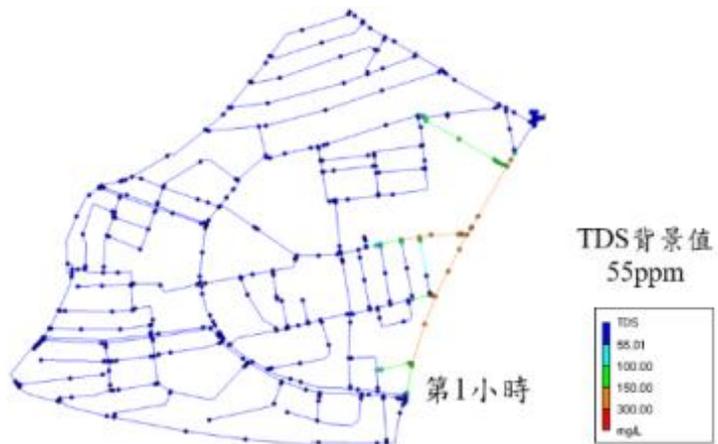


圖 40 區域入口埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析

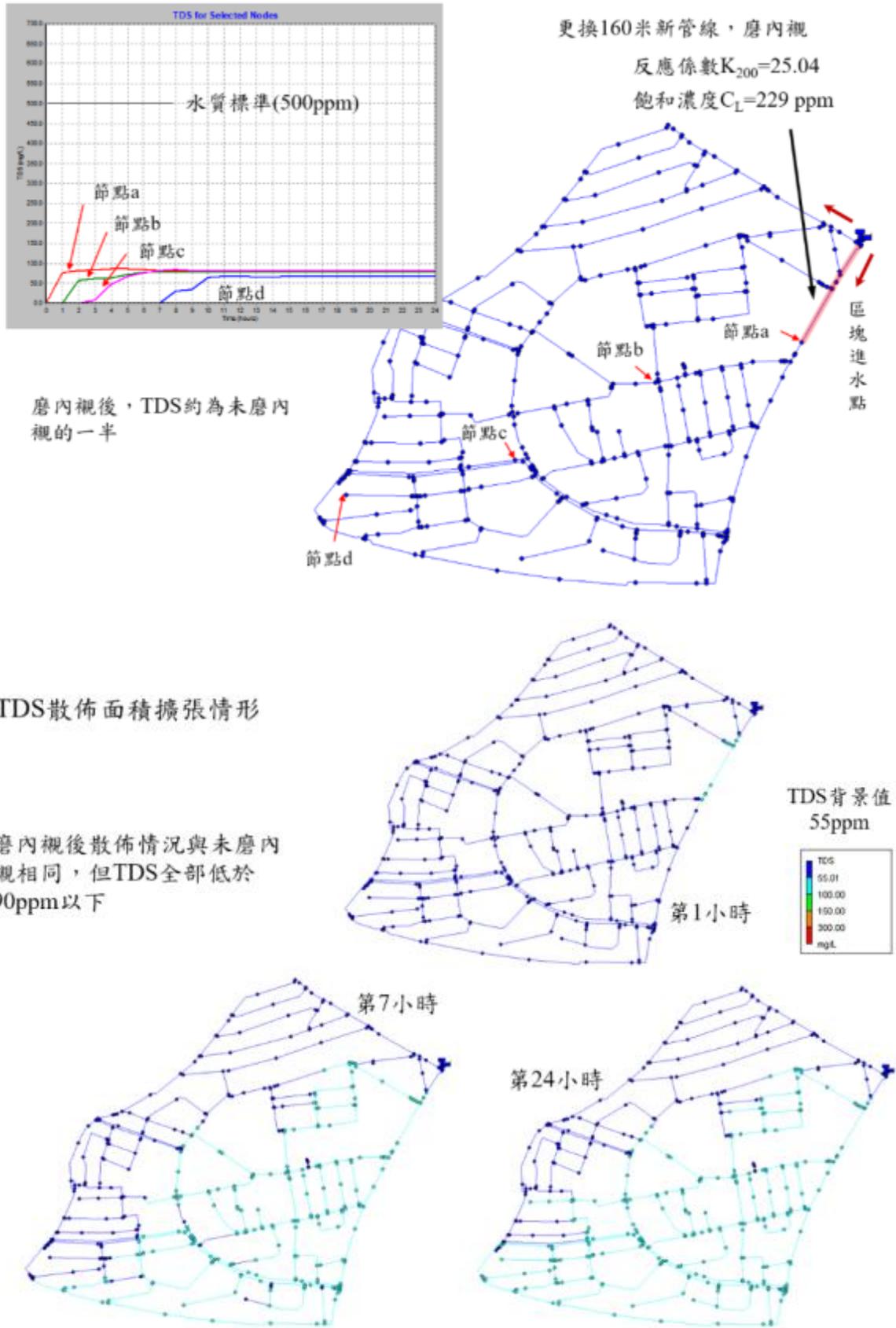


圖 41 區域入口埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析

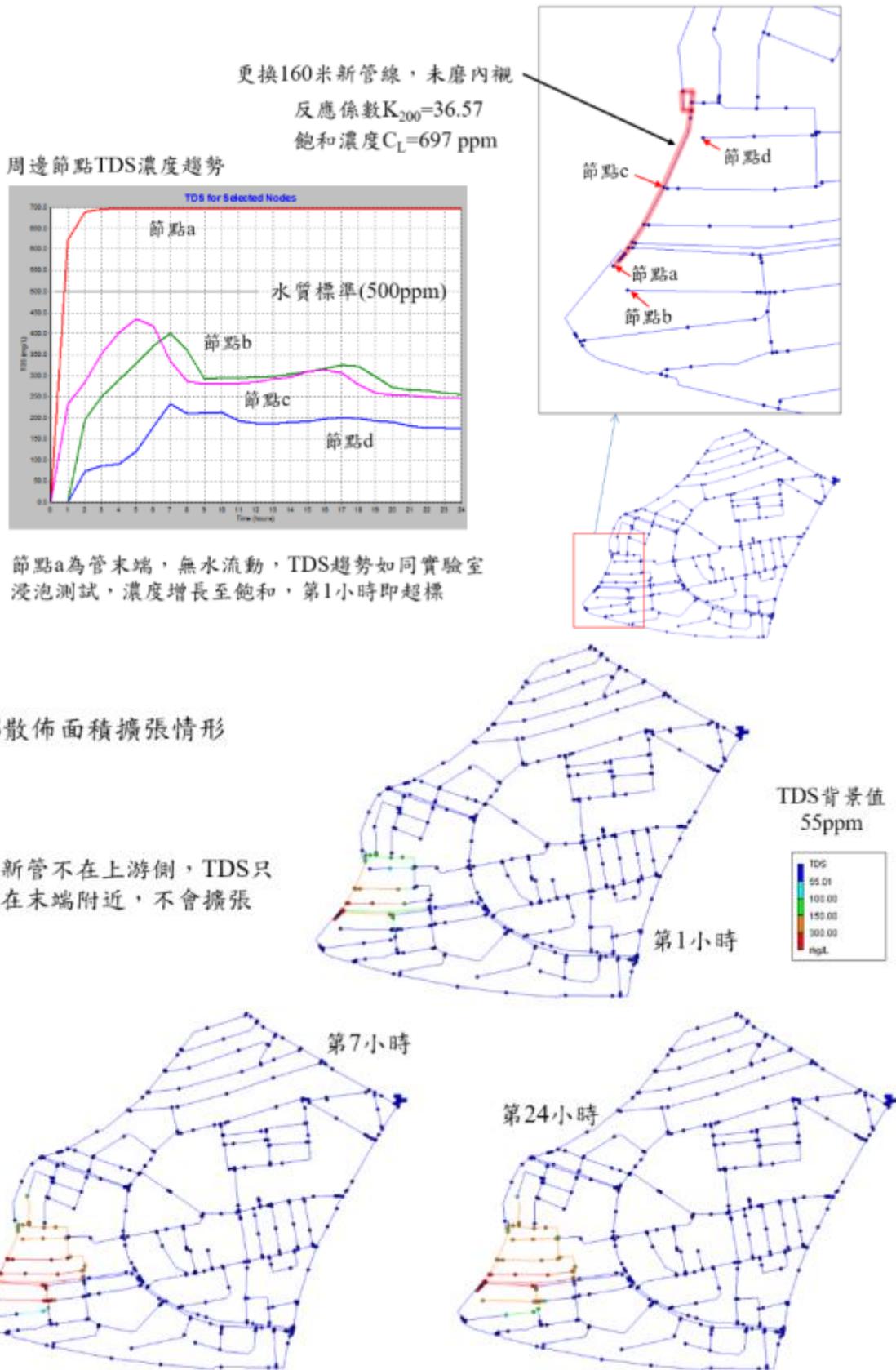
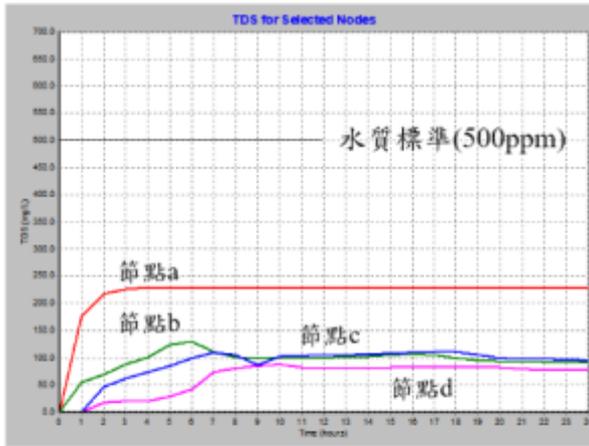
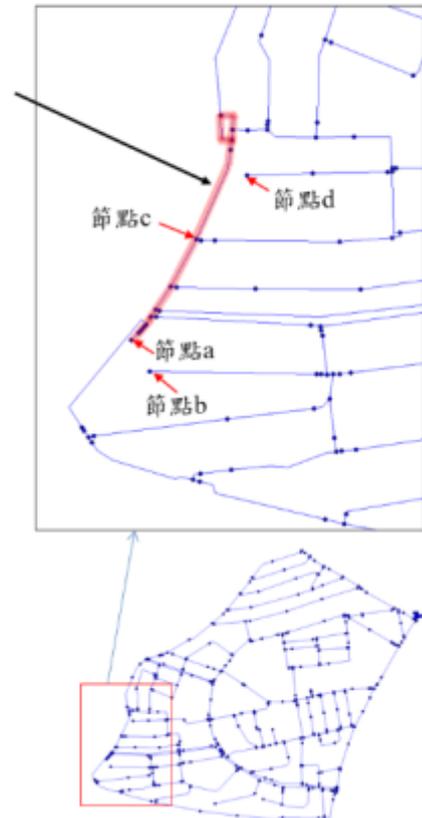


圖 42 區域末端埋管(未磨內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析

更換160米新管線，磨內襯  
 反應係數 $K_{200}=25.04$   
 飽和濃度 $C_L=229$  ppm  
 周邊節點TDS濃度趨勢



磨內襯後，隨然管末端無水流動，TDS濃度增長至飽和也不會超標



### TDS散佈面積擴張情形

除末端TDS達229飽和濃度，其餘附近TDS濃度最高僅約150ppm，遠低於容許標準

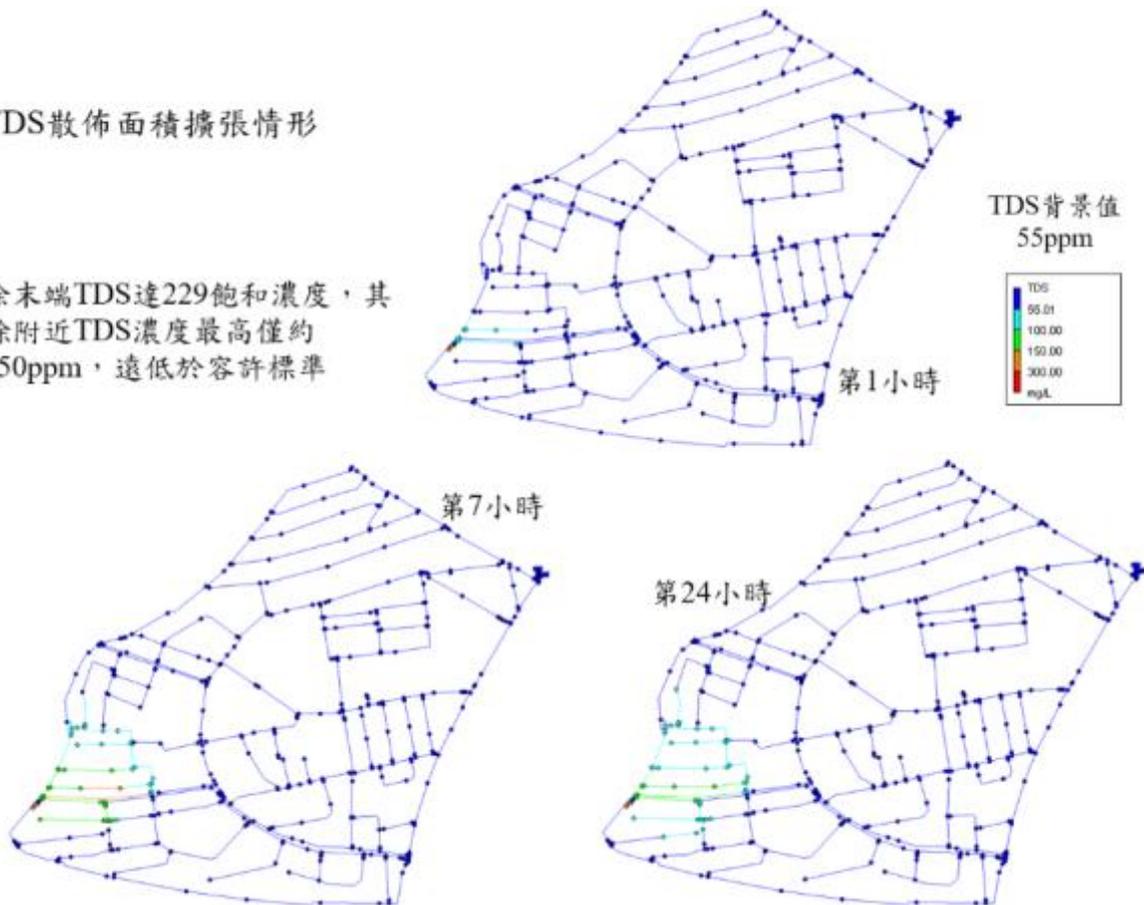


圖 43 區域末端埋管(磨掉內襯水泥乳)：TDS 濃度變化及擴散分析

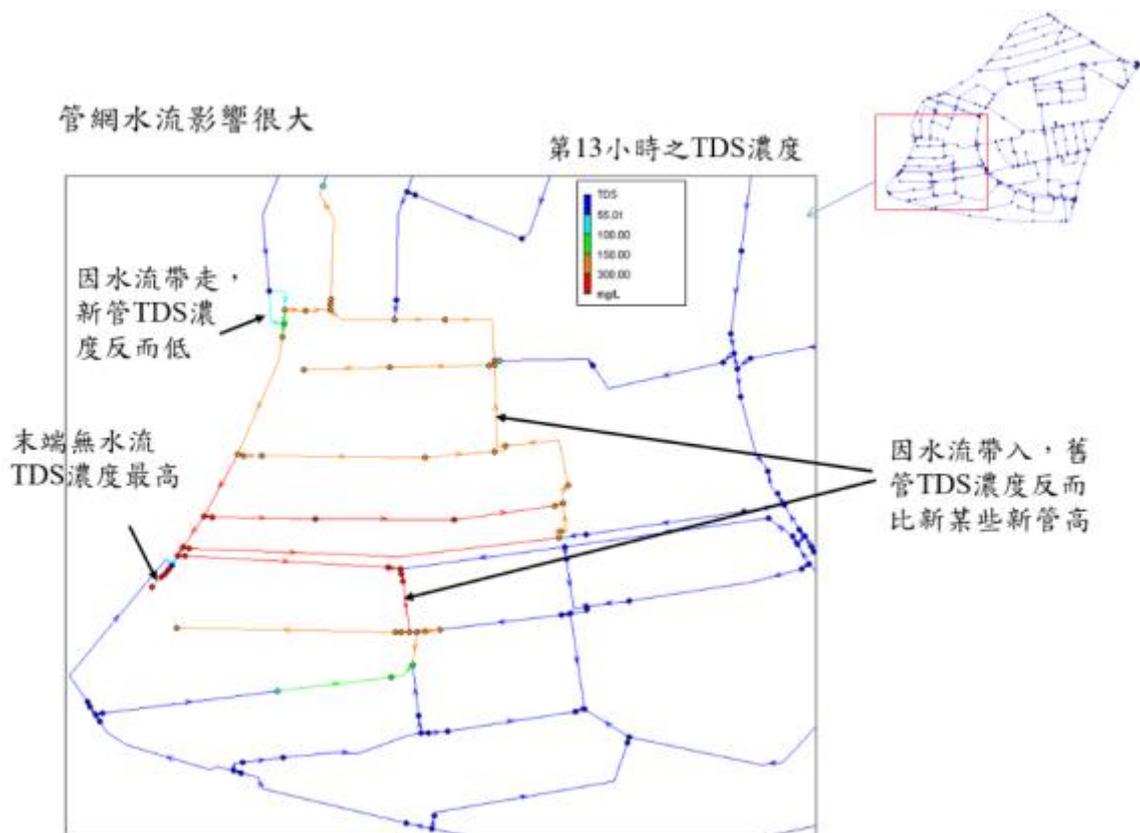


圖 44 區域末端埋管(未磨水泥乳)之 TDS 擴散分析局部放大

由上述四種新管線設置位置、搭配兩種內襯狀態，發現最主要的控制因素為內襯狀態，只要磨掉內襯表層薄薄的水泥乳，不管設置在哪裡都不會超標，但設置於管末仍有吐鹼濃度達飽和的問題，雖然TDS未超標，但用戶仍可能反映自來水口感不好，或者水質有滑膩感。因此管線末端、流量小的管段、或者高地系統，應改採非水泥砂漿內襯的粉體塗裝，才是一勞永逸的作法，而位於平地管網中，流量較大的配水管段，由於水量充沛足以稀釋，仍可採用水泥砂漿內襯。然而臺北管網普遍Over-designed，口徑偏大，流速較慢，許多地方稀釋能力不足，採用粉體塗裝仍是較佳選擇。

為改善可能的水質隱患，北水處基於浸泡溶出試驗、EPANET數值模擬結果，2019年決議，DIP粉體內襯管之推動。分為三個階段，2020~2021年每年採用10%粉體內襯管。2022年提升到50%、2023年為75%；2024年以後100%全面採用。循序漸進，讓本土鑄鐵管製造商逐步轉移製程。

## 第三章 圖資系統問題分析與對策

管網水理分析可模擬任一時段供水區管網任一節點水壓與任一管段流量的變化，可完整呈現轄區管網水理狀態，惟其前提須建立正確可信賴的水理模型。隨著電腦軟硬體的進步，水理模型已由早期文字檔方式建置或視窗圖形化逐管段建置，進展至從圖資系統直接批次將管線及節點資料匯出成水理分析軟體所需輸入檔，已可大幅節省人力。

北水處現行圖資作業流程中以DGN圖檔截圖製作竣工圖，而駐點圖資數化人員再依據竣工圖繪製各項竣工圖至DGN檔案，故可能發生如圖層放置錯誤、接點不合等缺點。另由於現有數化採用圖檔管理方式，資料連結採用資料表關聯方式管理，而非從設備間空間關係進行紀錄，因此在過去進行水理分析時，人員需人工方式進行水理模型建置作業，不利批次匯出自動化分析作業進行。

本章將說明北水處從基礎圖資建置歷程脈絡，以剖析地理資訊系統內之管線設備向量圖檔，研究如何將以往採用圖檔結合資料庫關聯式架構，轉變至未來空間資料庫架構模式，進而快速提供各項管網圖資分析及現地查詢圖資服務，來滿足同仁各項作業需求，並透過Web GIS系統提供快速自動化產製所需使用管網水理模型檔，輔以管網水理模型分析軟體加值運用。

### 3.1 圖資建置歷程

北水處在工程圖資未數值化前，原有2種管線平面圖資，一種是1/1,000輸配水管線圖，另一種是1/500給水管線圖（圖45）。因各單位業務之特性，配有管線圖之藍曬一份，並由供水科負責輸配水管線圖原圖（透明膠片）之修繪<sup>21</sup>；各分處負責轄區範圍1/500給水管線圖之修繪，其各地區製作年

度可追溯到民國73年8月至82年12月期間，地形資料已因都市發展的變更，早已不符現況；用戶的增加或變更其接水位置，其給水外線的修繪，權責單位有少部分在藍曬圖或原圖上作修繪的動作，但常因地形圖尚未更新，使得管線圖套繪無所適從；即使套繪完成，其位置準確性仍有待商榷。

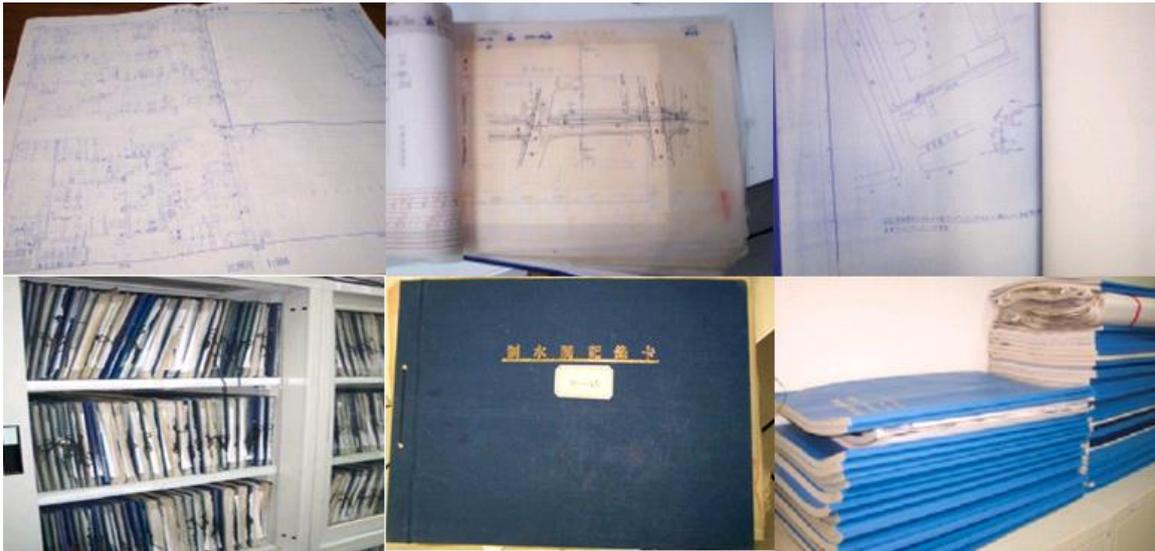


圖 45 傳統圖資<sup>20</sup>

88年至92年，北水處為能有效率地掌握自來水管線埋設位置，開始採用臺北市政府所提供Bentely地形圖圖檔規格（採用Twd67座標CAD圖檔，dgn檔案格式）做為繪製管線設備參考依據，並全面建置基礎圖資建設，將原存放於各單位之輸配水管線圖（638張）、給水管線圖（1,981張）、竣工圖（1萬6千多張）、閘栓圖卡及台帳資料（用戶用水設計書約168萬份）進行全面圖資盤點蒐納（統計資料:民國52年至92年），將圖檔從新歸納定義、建立、核對及校對，並將設備重新律定編號後，進行圖紙掃描建檔作業，並提供圖文管理系統輔助同仁查詢調閱工程圖檔。為使管線工程設計及施工階段之圖資規格一致，且易於更新與保存，進而發展第一套以圖面管理為初始目標之數值系統（圖46）。

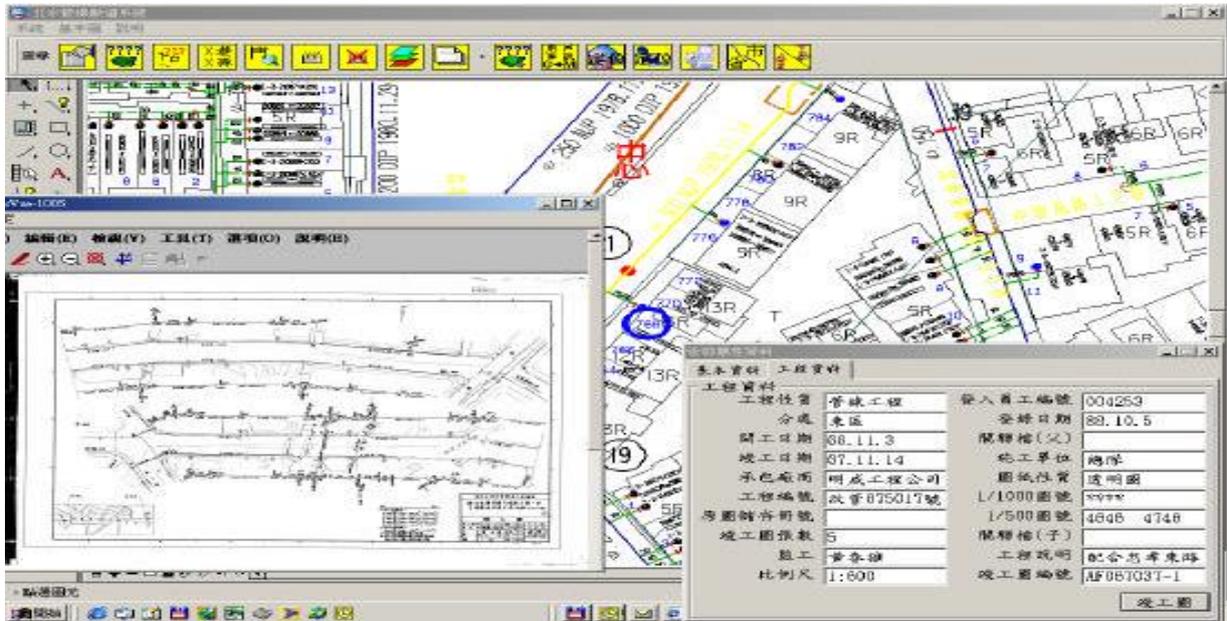


圖 46 管線數值系統

經圖解及比對所掃描各項圖資後，進行管線設備數值化作業，作業順序是先完成1/1000 輸配水管線圖建置，再辦理1/500 給水管線圖繪製作業。期間對於管線實際位置並未再予以重新測量，僅以圖面標示的相對位置為繪圖依據，故建置「管線平面圖」僅提供示意性的相對參考位置。另於數值化管線及設備時，建立其所屬影像關聯，以利整體設計及施工作業參考使用，並於民國92年完成大量基礎圖資建置作業。

北水處為管控新設工程圖資，陸續建立各項工程圖資管制、繪製及入庫收納等各項作業標準，並以圖文流程管理系統（圖47）從預計施工源頭開始管制至工程竣工圖檔入庫，讓工程人員有其依循標準，並從中獲得大量使用需求訊息後，為因應各單位圖資及業務使用需求延伸，進而整合及介接內外部單位資料庫及系統（MIS、工程管理系統、物料系統、財產系統、水費資料庫等），民國93起陸續改版，終而演化為服務導向之供水設備管理系統（提供Client/Server及Web GIS架構服務皆採用Twd97座標，圖48及49）。



圖 47 圖文流程管理系統

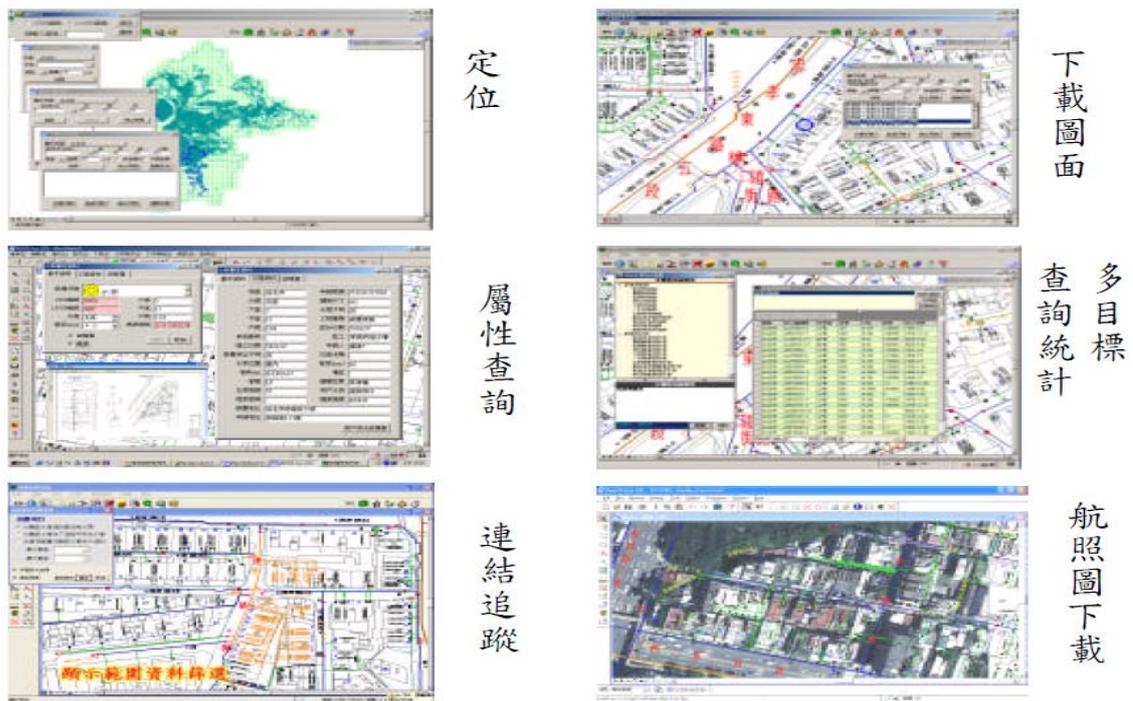


圖 48 設備管理系統功能圖

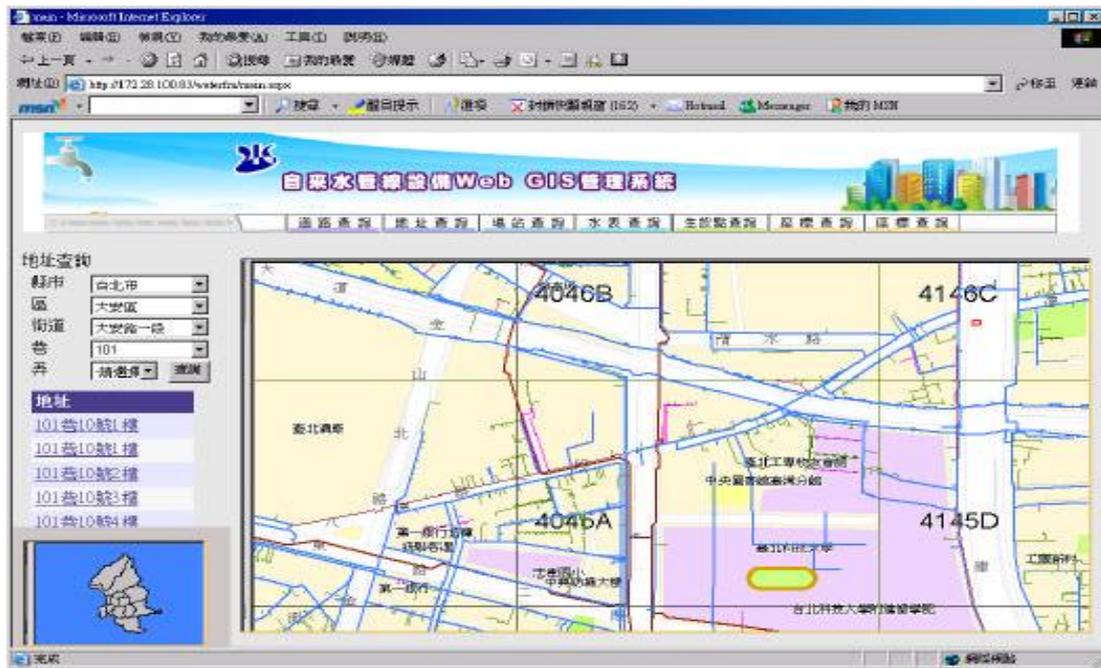


圖 49 Web GIS 系統

然而將原始管線由紙圖轉為數值圖檔存在著許多與現況落差原因，包括原圖遺失、套繪錯誤、竣工圖有落差、地形地貌改變、新施工未繪入...等，均影響數值資料建立的正確性，北水處為降低漏水率，自民國95年起推動「供水管網改善及管理計畫（民國105至114年）」，截至107年底已汰換2,017公里管線，隨著民國92年開始建立各項圖資標準繪製作業制度後，原管線設備數值圖檔位置與實際有所誤差的問題，將隨著管線汰換計畫執行後大幅降低，惟管線工程竣工後，管溝已回填，路面也恢復通行，完工圖檔繪製仍參考地形圖檔之相對位置進行繪製作業，若未現場就源管理進行紀錄，很多剛施作閘栓孔蓋，仍會遭其他管線單位施工所覆蓋，且因監工的敬業程度，繪製完工圖資的專業品質不一，當地形地貌改變時，仍會使同仁對所取得竣工圖資現場位置可靠度產生困惑。

民國103年8月1日凌晨，高雄發生多起石化氣爆事件，造成多人死亡受傷，地下管線管理問題引發社會高度關注，然而大部分地下管線單位因竣工圖資老舊，現場存在未汰換管線年代久遠，多未能充份掌握埋設位置，

且無專責部門負責圖資管理；另既往大多數單位所提供管線平面向量資訊無法充份表達空間上下關係，且均無實地測量。為此內政部營建署於105年8月頒訂最新公共設施管線資料標準，要求全國各管線單位施工後，均須遵循該制度製作GML檔案格式交換完工圖資成果(內含管線設備屬性及其3維絕對座標)，北水處所轄供水區域之臺北市及新北市政府，均依其地方自治條例將其標準制訂納入道路挖掘管理辦法中，律定各管線單位於民國106年起均須配合辦理，因其標準需現地測量(絕對座標)，故將測量工作納入道路挖掘工程施工規定要項中，並將其最新圖資檔案交換格式納入規定辦理，且以道路挖掘管理系統進行圖資管理及工程資訊輔以管控道路施工情形。北水處亦依其規定於管線工程契約中，要求廠商配合將現地測量作業，納入施工環節中；圖資管理人員亦將現地所測繪內容，納入竣工圖資繪製作業準則中辦理。

### 3.2 現行圖資系統架構

臺北市政府早期地理資訊系統整體發展以Bentley Microstation 圖形軟體為主，由都發局於80年度開始重新測製臺北市1/1,000地形圖，採用航空測量數值法方式辦理，並於84年度全部辦理完成；而工務局所發展門牌系統亦建構在其整體框架下，並由市府提供不同檔案格式(DGN、DXF及SEF)，滿足各單位地理資訊系統與繪圖軟體之應用需求，在圖例編碼採用Microstation 格式，圖檔分層以63層為限。北水處所發展地理資訊系統，為了圖資使用及參考標準一致性，並配合當時市府地理資訊系統指定Microstation 平台之需要，因此從早期數值系統(輸配水系統、給水系統)，至現今供水設備管理系統皆採用Bentely軟體，因此延用其格式及架構逐漸發展成迄今所使用之地理資訊系統。

北水處地理資訊系統主要由「供水設備管理系統」、「VisioCAD繪圖系



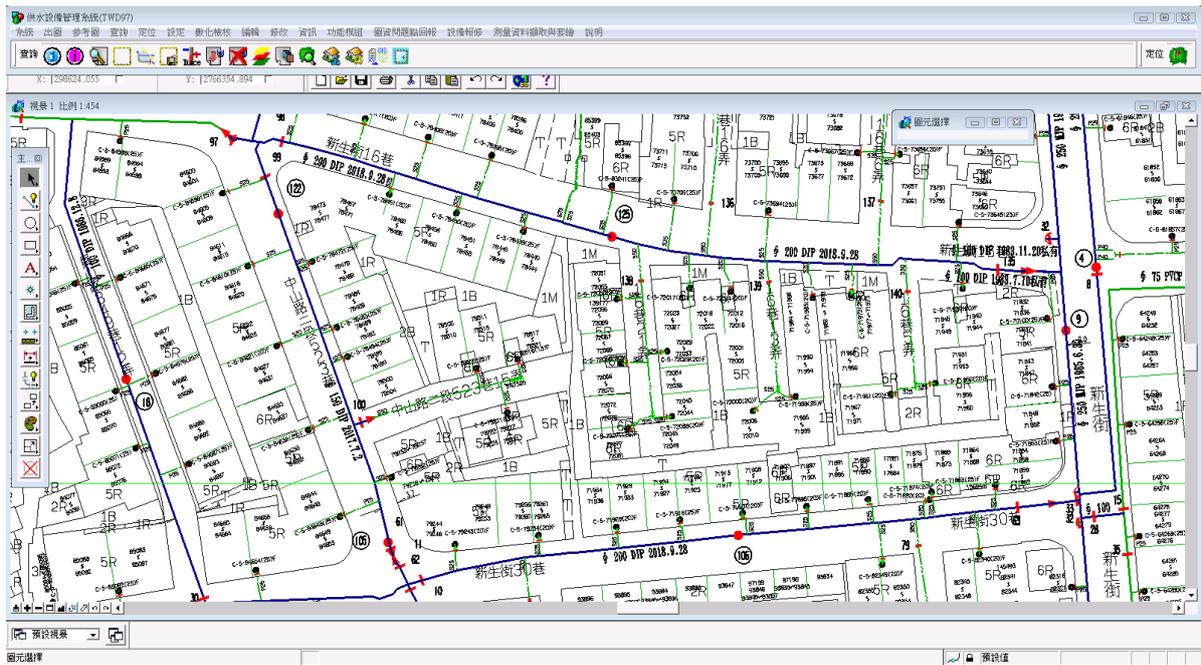


圖 52 管線設備數值圖（向量圖，具平面座標）

### 3.3 圖資系統問題分析

#### 3.3.1 問題分析

北水處現行所使用供水設備管理系統已有相當時日，在管線汰換、修漏及停水等各項業務過程中，1/1,000 地形圖、1/1,000 航照圖等圖資皆是主要規劃設計及圖面管理基礎且重要參考依據，該系統現架構於 Bentley 繪圖平台中，現有 DGN 檔分為 4 類，其圖檔編碼原則為英文字母加上 1/1000 圖號，G、H、P 及 T 英文字母代表不同圖檔類型，G 代碼表示檔案為都市發展局提供原始檔及向新北市政府所購置地形圖，H 代碼為帶有門牌及分戶線之圖檔，P 代碼為管線設備數值圖，T 代碼為臨時地形圖，因各檔案切分資料，故檔案大多不超過 20M，在檔案傳輸效能上非常快，管線設備數值圖（MicroStation dgn V7 檔案格式，屬開放式結構）乃依北市府定期提供最新地形圖檔進行參考所繪製，因此在繪製時是採 CAD 模式架構進行 2 維平面編修，圖層分類 63 層，所參考使用檔案皆採分幅及分層方式管理，並

透過圖元識別碼連接關聯式資料庫架構模式運作 (Client/Server)，圖資分離管理優點為檔案下載速度快，但有下列工作瓶頸，如跨圖幅的編修整合、文字註記安排、編修的時序安排及新參考圖檔的抽換等問題。

而既有 Web GIS (MapGuide Open Source) 所使用空間資料，係每日晚上經由預儲程式，將管線設備數值圖檔轉換至 SQL Spatial 資料庫中。由 DGN 轉換到 SQL Spatial 供 Web GIS 使用之檔案，仍有下列的問題：

1. 圖元仍依 CAD 方式截分，導致圖元數目增加。
2. Non-Simple Geometry 問題：經測試在 DGN 與 SQL Spatial 下可以看見的管線，在轉換為 ESRI Geodatabase 時，發現有圖元遺失情形，經查發現在 CAD 繪圖中如果採用複合式元件，或是成交疊圖元，或是空值等圖元，會造成圖元無法在符合 OGC 規範之資料庫存取。

為利產製竣工平面圖，管線設備數值圖重點著重於圖面的美觀配置、相對關係正確、資訊完整呈現，然而許多繪製細節會因本處圖資管理人員於 Bentley 繪圖平台中，對管線及設備圖徵自行建立、複製或移動而導致產生圖資不符情形，如新增文字註記、管線接點不合、圖層自行修改後與屬性不符等錯誤，加上跨圖幅管線未銜接及管線交錯未正確連接等為人為因素，皆因不易被檢核出而易產生永久錯植，且因圖檔與資料屬性內容（資料庫）分開存放，資料不易被程式所檢核及比對出來，故會發生有圖無資和有資無圖情形，加上歷史圖資所產生位置不正確性因素（圖 53），將影響設備管線圖資可靠度。



圖 53 消防栓現地位置不正確範例圖

為各管線單位能通盤掌控地下管線埋設位置，內政部營建署要求各縣市政府於 109 年度前，針對所轄各管線單位，依其公共設施管線資料標準格式，將未測量管線設備圖資進行分年分期補齊及補正圖資(3 維絕對座標)，並透過 GML 圖資交換格式，上傳至道路挖掘管理系統中。臺北市政府工務局新建工程處 99 至 104 年雖已針對道路上各人手孔進行圖資比對、全面普查及測量作業，惟係採各行政區分年度辦理。然而臺北市政府律定各管線單位 106 年 4 月 1 日起，新設管線設備工程圖資皆需測量作業，因此北水處圖資若僅引用臺北市政府測量資料，將原 2 維管線設備數值圖轉為 3 維圖檔時，則會有 99 年後已施作人手孔未曾被測量情形發生。另雙北市政府對 3 維圖檔管線 Z 值有不同要求，如臺北市政府管線要求是管頂高，新北市管線要求是地表高程，對北水處在圖資處理面向時有很大之挑戰，且原既有管線設備數值圖中，管線向量圖元並未記載 Z 值，而是另外存在屬性表中，且每點埋設深度資訊是繪製在竣工原圖之管件圖中(圖 54)，因此管

線設備地表高程資訊是後續管網模型資料中必需取得的重要資訊。

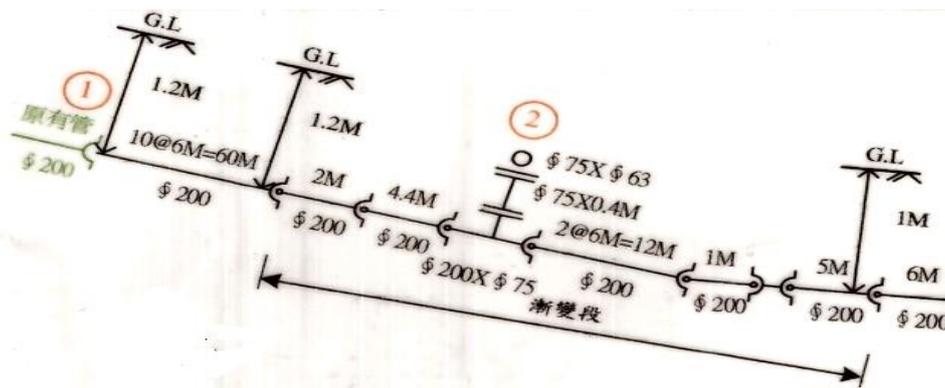


圖 54 竣工原圖（管件圖）

### 3.3.2 水理模型資料與管線設備圖資相關性探討

管網水理模型軟體在市場上有許多商業軟體可供選擇，北水處現所使用軟體為美國環保署 Lew Rossman 公布的 EPANET2.0（完全免費）及商業軟體 Bentley WaterGEMS（unlimited 版本），而在上述軟體功能比較上，EPANET 是一款供水管網平差計算軟體，功能較陽春，因屬 Open Source 軟體，故可依使用者需求自行開發套件加值運用，而 WaterGEMS 因屬商業型軟體，故大多使用者所需功能皆已提供（亦能自行開發套件使用），例如現已提供供水管網運行分析功能，能優化管網模型設計、提供管網建模器（資料對應及自動轉換模型功能）、提供節點需水量分配功能（用水量，水表水量特定方式自動載入功能）、可根據實測資料（Field Data）進行模型自動校正、優化漏損探測、管網水錘分析計算（Hammer）、水泵自動優化運行、能結合即時監控資訊，並能支援各項向量圖檔及連結空間資料庫，且能模擬各項情境，其功能非常強大，惟費用非常昂貴。

因北水處 Bentley WaterGEMS 軟體套數有限，同仁普遍使用 EPANET 軟體進行管網水理模型分析使用，為確認管線設備圖檔及資料庫結構是否能讓上述軟體皆能使用，故需瞭解其雙方資料屬性資料結構差異後，強化

北水處空間資料屬性及架構，並於 Web GIS 系統提供能從空間資料庫匯出上述軟體所能支援之檔案格式（INP 檔）功能，以大幅減輕同仁以往使用管網水理分析軟體重新建置模型所耗費大量人力及時間。

為利後續能將空間資料轉換為 INP 檔案，須先瞭解其檔案結構，經開啟 EPANET2.0 軟體於管網組件所需各屬性輸入畫面，並經比對如 INP 輸入檔要能執行管網分析的基本要求，在管網組件類型至少需有下列屬性<sup>22</sup>，如節點（JUNCTIONS，表 4）、水源（RESERVOIRS，表 5）、配水池（TANKS，表 6）、管線（PIPES，表 7）、抽水機/水泵（PUMPS，表 8）、閘（VALVES，表 9）及標籤（TAGS，表 10）。

表 4 節點 (JUNCTIONS) 畫面屬性資料表

英文名稱：JUNCTIONS 中文名稱：節點			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Junction ID*	節點編號	
2	X-Coordinate	X 座標	
3	Y-Coordinate	Y 座標	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Elevation*	高程	
7	Base Demand	基準需水量	
8	Demand Pattern	需水量型式	
9	Demand Categories	需水量種類	1.基準需求量 2.時間型式 3.分類
10	Emitter Coefficient	灑水係數	
11	Initial Quality	起始水質	
12	Source Quality	源頭水質	1.源頭水質 2.時間型式 3.源頭類型：濃度型、質量定增型、水流步增型及單點定增型
13	Actual Demand	即時需水量	
14	Total Head	總水頭	
15	Pressure	壓力	
16	Quality	水質	

表 5 水源 (RESERVOIRS) 畫面屬性資料表

英文名稱： RESERVOIRS 中文名稱：水源/加壓站			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Reservoir ID*	水源編號	
2	X-Coordinate	X 座標	
3	Y-Coordinate	Y 座標	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Total Head*	總水頭	
7	Head Pattern	水頭型式	
8	Initial Quality	起始水質	
9	Source Quality	源頭水質	1.源頭水質 2.時間型式 3.源頭類型：濃度型、質量定增型、水流步增型及單點定增型。
10	Net Inflow	淨流入量	
11	Elevation	高程	
12	Pressure	壓力	
13	Quality	水質	

表 6 配水池 (TANKS) 畫面屬性資料表

英文名稱：TANKS 中文名稱：配水池			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Tank ID*	配水池編號	
2	X-Coordinate	X 座標	
3	Y-Coordinate	Y 座標	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Elevation*	池內底高程	
7	Initial Level*	起始水位	
8	Minimum Level*	最低水位	
9	Maximum Level*	最高水位	
10	Diameter	內徑	
11	Minimum Volume	最小容積	
12	Volume Curve	容積曲線	
13	Mixing Model	混合模式	1.Mixed 完全混合 2.2Comp 2 室混合 3.FIFO 先進先出 4.LIFO 後進先出
14	Mixing Fraction	混合分量	
15	Reaction Coeff.	反應係數	
16	Initial Quality	起始水質	
17	Source Quality	源頭水質	
18	Net Inflow	淨流入量	
19	Elevation	高程	
20	Pressure	壓力	
21	Quality	水質	

表 7 管線 (PIPES) 畫面屬性資料表

英文名稱：PIPES 中文名稱：管線			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Pipe ID*	管線編號	
2	Start Node*	起始節點	
3	End Node	末端節點	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Length*	長度	
7	Diameter*	管徑	
8	Roughness*	粗糙係數	
9	Loss Coeff	管件水頭損失係數	
10	Initial Status	起始狀態	
11	Bulk Coeff	主體係數	
12	Wall Coeff	管壁係數	
13	Flow	流量	
14	Velocity	流速	
15	Unit Headloss	單位水頭損失	
16	Friction Factor	摩擦因數	
17	Reaction Rate	反應速率	
18	Quality	水質	
19	Status	狀態	

表 8 抽水機/水泵 (PUMPS) 畫面屬性資料表

英文名稱：PUMPS 中文名稱：抽水機			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Pump ID*	抽水機編號	
2	Start Node*	起始節點	
3	End Node*	末端節點	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Pump Curve	抽水機特性曲線	
7	Power	馬力數	
8	Speed	速度比	
9	Pattern	操作型式	
10	Initial Status	起始狀態	
11	Efficiency. Curve	效率曲線	
12	Energy Price	電費費率	
13	Price Pattern	費率型式	
14	Flow	流量	
15	Headloss	水頭損失	
16	Quality	水質	
17	Status	狀態	

表 9 閥 ( VALVE ) 畫面屬性資料表

英文名稱：VALVE 中文名稱：閥			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	ID Label*	閥編號	
2	Start Node*	起始節點	
3	End Node*	末端節點	
4	Description	描述	
5	Tag	標籤	
6	Diameter*	管徑	
7	Type*	種類	1.PRV ( 減壓閥) 2.PSV ( 持壓閥) 3.PBV ( 降壓閥) 4.FCV( 流量控制閥) 5.TCV( 節流控制閥) 6.GPV ( 通用閥)
8	Setting	設定	1.NONE 2.OPEN 3.CLOSED
9	Loss Coefficient	水頭損失係數	
10	Fixed Status	固定狀態	
11	Flow	流量	
12	Velocity	流速	
13	Headloss	水頭損失	
14	Quality	水質	
15	Status	狀態	

表 10 標籤 (TAG) 屬性資料表

英文名稱： 中文名稱： 標籤			
序號	英文欄位名稱	中文欄位名稱	備註(*為必要欄位)
1	Text	標記文字	
2	X-Coordinate	X 座標	
3	Y-Coordinate	Y 座標	
4	Anchor Node	定位於節點	
5	Meter Type	定距型式	
6	Meter ID	定距編號	1.NODE (節點) 2.LINK (標註)
7	Font	字型	

經由解析上述管網水理模型 INP 輸入檔案基本結構，可瞭解其運作模式乃透過拓樸結構關係（節點）行成管網運作，經比對現行北水處管線設備數值圖檔及資料庫中各項管線設備屬性關聯後，為將其雙方資料結構差異最小化，經確認在原管線設備拓樸關係勢必需重新建立連結關係，並增加相關設備屬性欄位及資料。然而節點屬性需水量部分，後續在資料產出時可經水表資訊串連水費資料庫取得最新一期抄表度數或平均用水度數後，作為計算節點需水量依據，經綜整管線設備需增修屬性及變更數化作業原則如下：

1. 原連接管線上地下式消防栓並非節點，為利後續監測比對現場水壓值，故在原管線上必須截斷，並將地下式消防栓作為節點。
2. 管線及各項設備皆需有高程值欄位。
3. 配水池屬性資料需增加池內底部高程、起始水位、最低水位及最高水位。
4. 加壓站屬性需增加抽水機資訊如抽水機台數、額定揚程及流量。

### 3.4 圖資系統解決對策

北水處發展地理資訊系統已近 20 年，在圖資蒐集、數化及應用系統開發已有深厚基礎，系統可擷取、分析資訊，供業務查詢、管理及規劃使用；但隨著資訊技術及應用層面與時俱進，在面臨資料共享、地理資訊倉儲、雲端服務、即時便民、業務與資訊整合等不同課題上，均面臨很大挑戰。雖然技術發展可日新月異，但提供補齊及補正工程圖資資料乃北水處發展新一代地理資訊系統的根本。上節已說明北水處現行系統及圖資歷程，經綜整歷史圖資待解決問題如下：

1. 圖層錯放、有圖無資和有資無圖問題。
2. 為清楚表達管線相對關係，以跳線表示管線上下錯開未相接狀態（圖 55），惟其與現場管線埋設情形不符，因此原有跳線繪製原則需改變。

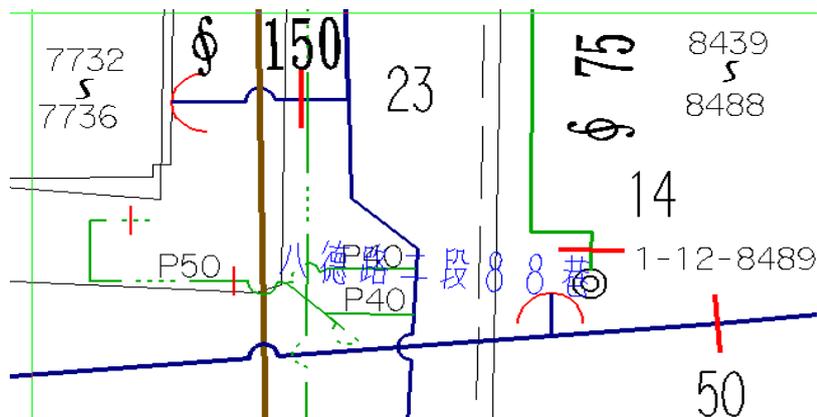


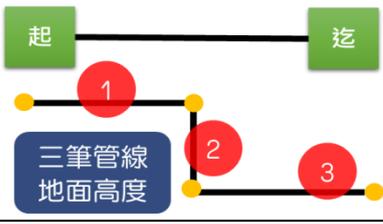
圖 55 管線數值圖（跳線）

3. 106 年前管線設備圖向量圖檔全採相對位置進行繪製，未經現地測量。
4. 向量資料未記載地表高程及埋深（記載在竣工原圖中），以及各管線設備間未正確連接，須重新產生拓樸關係。
5. 既有圖資架構未能支援建置水理模型。

因此為提供同仁辦理圖資建置及製圖原則有一致性的作業方式可參考，

及能支援管網水理模型檔案運用等需求，北水處依據營建署所頒定「公共設施管線資料庫標準」為基礎，建立「自來水管線資訊數化及空間資料庫建置規範」，以作為建立自來水管線設備空間資料庫及系統改版時，對其測量作業、竣工圖作業、數化作業、品質檢核、圖層定義、圖例線型及註記、各項欄位內容及圖資更新作業方式等內容有所參考運用。另經綜整內政部營建署、雙北市政府在公共管線資料交換標準空間資料結構上對 3 維管線高程值需求不同(表 11)，因此北水處在管線資料三維 Z 值部分將依循臺北市規定直接記載管頂高，並另記錄各管線單點埋設深度。

表 11 管線空間資料結構比較表

單位	內政部營建署及新北市政府	臺北市政府
交換標準	GML	GML
三維 Z 值	地面高	管頂高
管線架構	遇空間位置 Z 值變化即需要將管線資料分段	同一線段可分別紀錄空間 Z 值變化
資料量	龐大	精簡
水理應用	無法支援需人工額外處理	可支援不需人工額外處理
資料儲存架構		
三維運用	需換算(扣除埋深)	可直接由三維軟體讀取
GML 筆數	3 筆	1 筆

由於空間資料庫具有空間尺度性和時間尺度性、大量資料儲存、強大資訊檢索和分析能力、空間關係和屬性資料統一儲存管理以及物件概念等優勢，可模擬呈現真實世界，故引入地理空間資料庫作為空間資料存儲和

管理引擎，已成為發展新一代地理資訊系統的趨勢。同時採用空間資料庫其資料具備獨立性 (Data Independence)，資料獨立性是指當資料結構或存取型態改變時，應用程式不會因內層結構的改變而跟著修改。北水處現行 CAD/GIS 圖台有多層次發展的複雜性，故研究將其管線設備數值圖之「圖幅檔案」架構管理方式，直接改成「空間資料庫」管理，以北水處現所採用的 MS SQL Spatial 為例，可以為 ESRI ArcGIS Server 所讀取，亦可直接提供 Bentley WaterGEMS 管網水理模型軟體連接使用，若不在前端圖資管理人員改變 CAD 繪圖操作習慣下，也可以為 Microstation 地理資訊繪圖平台 Bentley MAP 或 AutoDesk AutoCAD Map 3D 所使用，而其它 GIS 軟體或具空間分析能力之 GIS 軟體亦能讀取 (如 QGIS 等)，因此採用空間資料庫為規劃核心，空間資訊整合平台亦將前端資料提供與地圖服務端區隔；可以減少過往點對點傳輸之網路複雜度，並增進資通訊安全，其詳細比較如表 12 所示。

表 12 空間資料庫與圖幅檔案式架構比較表

功能說明	空間資料庫	圖幅檔案式架構
查詢方式	支援 SQL Query	不支援 SQL Query
圖元結構	圖元完整	圖幅切割，交界需合併處理
查詢效能	整合佳 (支援空間索引)	整合性差 (先查圖再查資資料庫)
加值運用	可直接被讀取使用	需重新組合圖元位相關係
管理方式	分層管理	分幅管理
轉檔	無	另需寫轉換程式
水理分析	可直接支援	無法支援
比較結果	☑	☒

經確認圖幅檔案式架構轉換至空間資料庫是可行方案，適必需針對原 Web GIS 及供水設備管理系統進行改版工作，未來圖資管理人員透過供水設備管理系統(Bentley Map V8i 軟體平台)，即可進行圖資建置及更新作業，系統自動完成圖資檢核後，即上傳至「管線設備空間資料庫」中，其空間

資料庫架構如圖 56，空間資料庫可提供內、外部 Web GIS 查詢使用，同時透過圖資介接方式，將各單位圖資介接至 Web GIS 平台進行圖資套疊，另 Web GIS 亦將整合其它本處其他單位應用系統（如水費系統、監控系統、水質系統、客服系統、財產系統）等相關資訊以提供相關業務人員整合資訊運用。

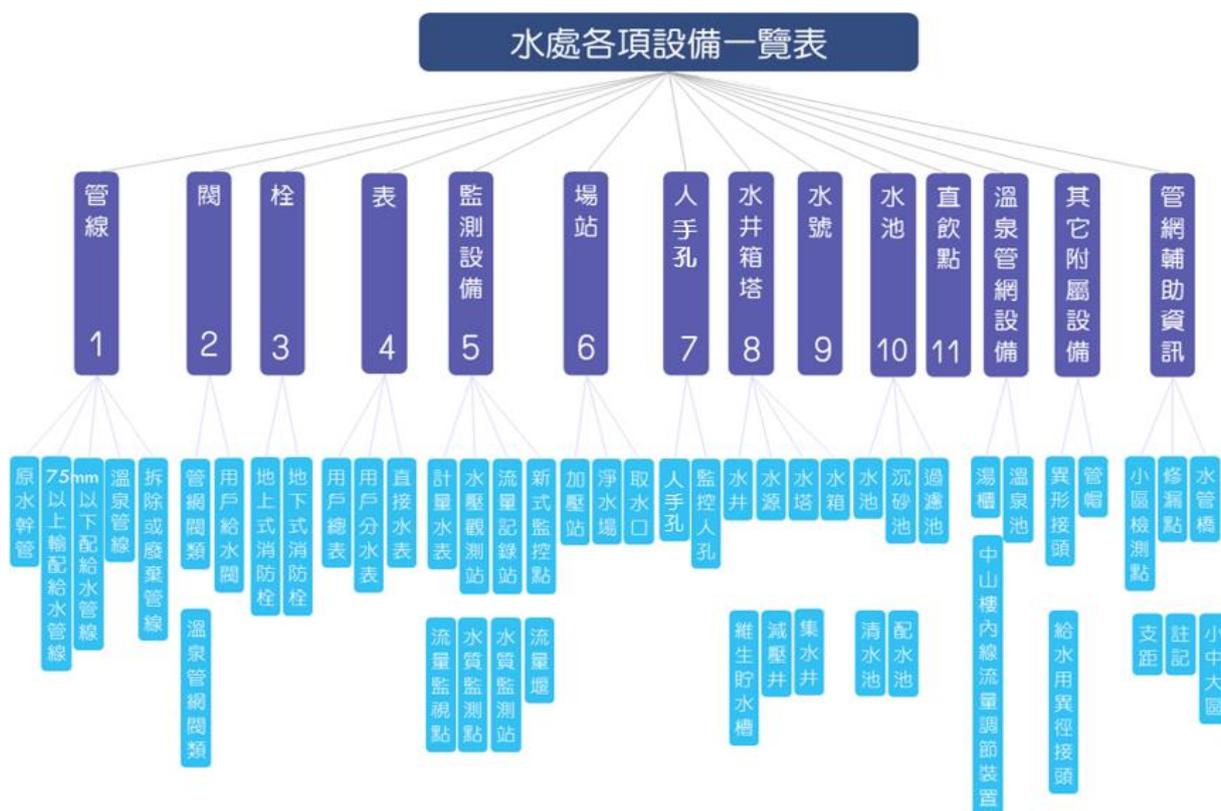


圖 56 自來水管線設備空間資料庫結構圖

### 3.4.1 管線資料重製

為確認原管線設備圖檔能從圖幅檔案格式架構轉換至空間資料庫結構，並解決現地管線設備位置不夠準確問題，其屬性資料建置及分類原則需依「管線資訊數化及空間資料庫建置規範」所訂定準則建置，並擬定管線設備資料結合現場測量重製數化作業流程如圖 57。

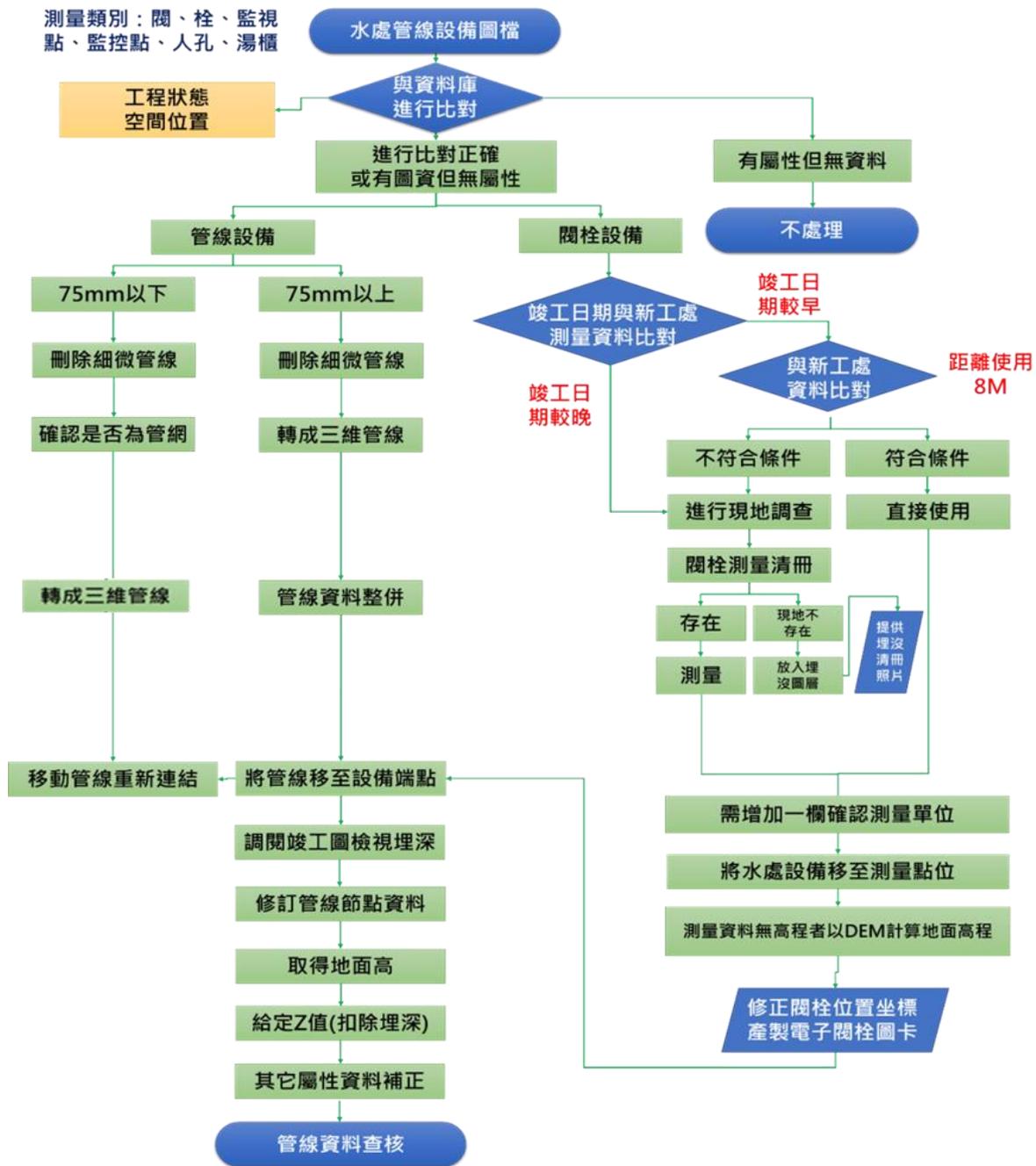


圖 57 管線設備數化重置作業流程圖

管線設備圖檔轉置成空間資料及修繪主要程序如下：

1. 依空間資料庫建置規範定義各管線設備類型所分類圖層，先將管線設備圖檔中各管線類型及設備萃取至空間資料庫各管線及設備表中，首先將設備移到測量點位，如閘、栓、監視點、監控點、人孔、湯櫃，而在進行管線數化之前，依已測量之孔蓋為基準點，將設備原圖之孔

蓋位置移至測量位置上，詳圖 58 所示。



圖 58 設備移動示意圖

2. 空間資料庫各管線設備屬性欄位亦需增加圖資來源欄位，以利判讀資料準確性，並將現有設備依據三種態樣進行設備搬移作業，分別為新工處測量、本處測量及圖資（原圖）轉繪。
3. 設備遭柏油鋪覆無測量時，高程則以 DTM 資料庫計算地表高程（圖 59）。

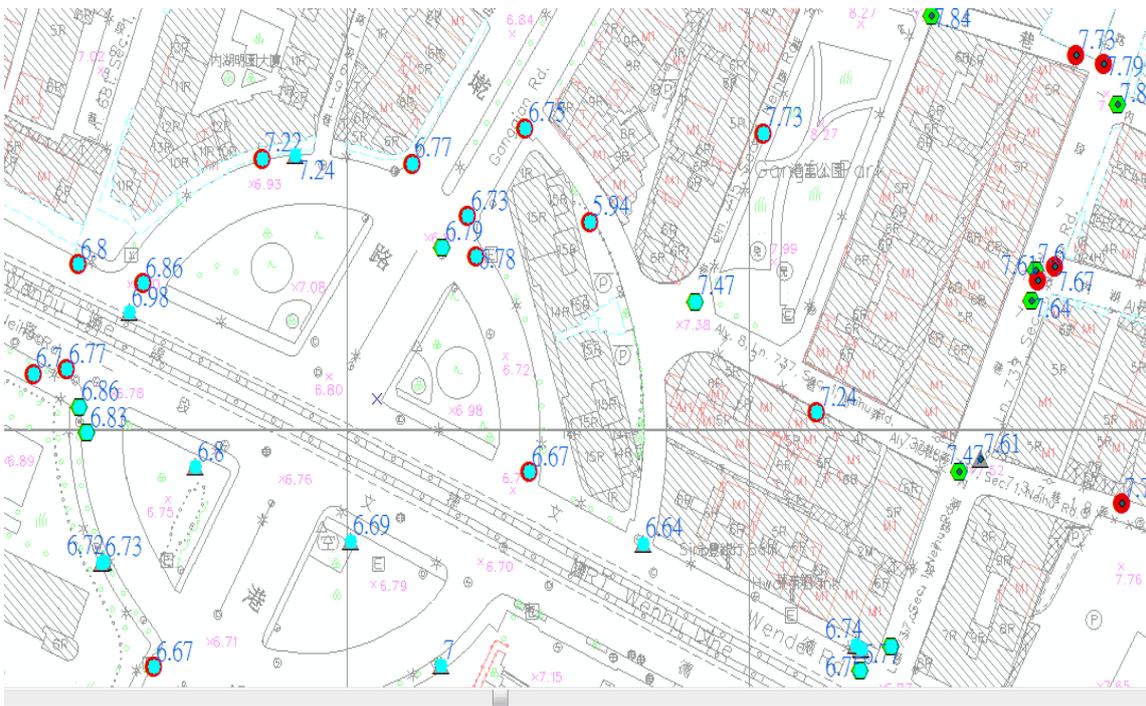


圖 59 無測量設施代入高程範例圖

4. 將原 2 維管線轉至 3 維管線空間資料庫中，以利後續在管線資料中加入空間轉折節點及高程資訊，透過 ArcGIS MAP 作業步驟如圖 60，在

匯入資料庫時，必須選擇 Z 值，匯入後 Z 值會預設為 0。

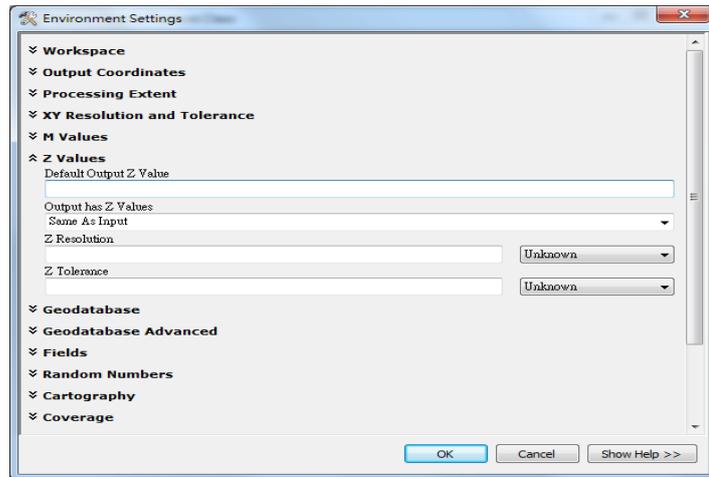


圖 60 管線資料轉置成三維作業圖

5. 管線資料修訂整併分為 3 大項：

- (1) 原經圖幅所切斷管線及同口徑之管段重新整併、刪除及節點連結，原管線設備節點未正確連結者需同步修正。
- (2) 管線埋設有上下位關係情形時，原資料為能分辨出係非相通管線，在繪製時會以跳線方式來呈現，這與現地裝設情形不符，若要以 2 維平面方式來看，須另以其他圖例來表達，因此需將有跳管資料位置進行修正（圖 61）。

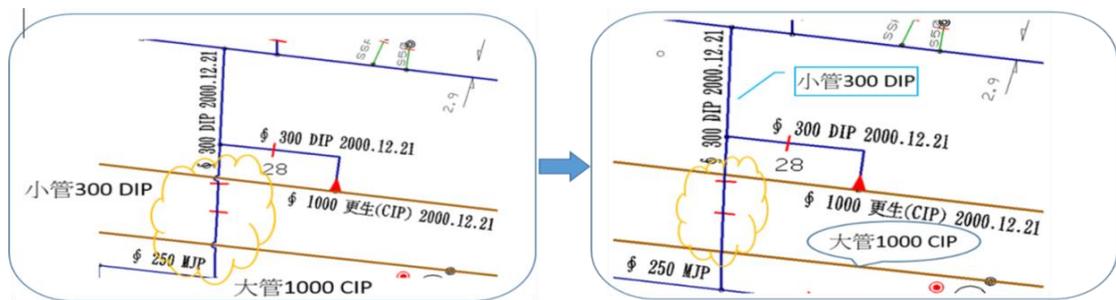


圖 61 跳管管線圖元修訂範例圖

- (3) 地下式消防栓在原管線未斷點，惟為因應管網水理模型比對水壓資訊所需須截斷，並將地下式消防栓納入拓樸節點。

6. 前面第 1 步驟已取得閘栓等設備的地面高程，因此將原管線資料移至已施測設備端點（圖 62），並調閱竣工圖檢視埋深變化後，依竣工圖各轉折點位置進行輸入埋深（圖 63），而竣工圖未標註部分則統一輸入 1.199 以作為識別。

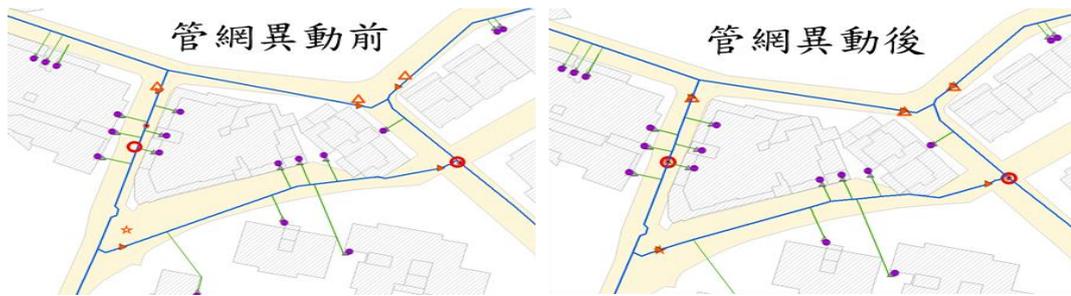


圖 62 管線移動範例示意圖



圖 63 依竣工圖輸入埋深示意圖

7. 修正 Z 值(扣除埋深): 將 Z 值給定於管線資料端點後，配合管線竣工圖，逐步修正管線的三維資料，順序依照「由左至右」、「由上至下」的作業原則，給定每筆管線節點的 Z 值高程資料(採絕對高程，地表高程扣除埋深)，如圖 64。

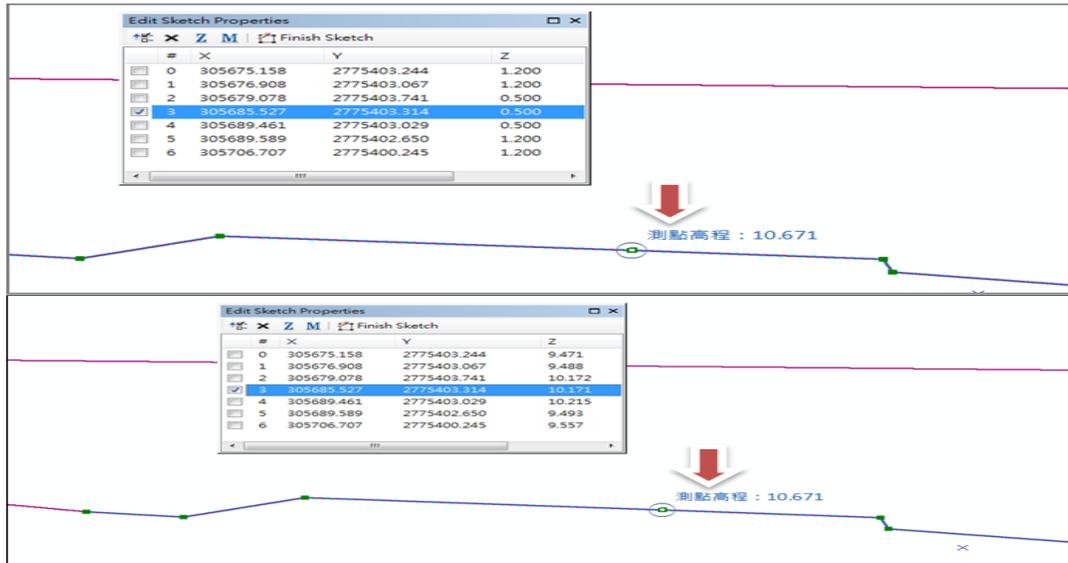


圖 64 修正管線 Z 值成果圖

### 3.4.2 空間資料檢核及重製成果

為檢核管線設備數值圖檔所重新產製成果匯入至空間資料庫是否正確，其檢核順序為先檢核圖層分層是否已依管線資訊數化及空間資料庫建置規範辦理，檢核圖元匯入數量是否前後一致，後續再針對空間位相關係、合理性以及屬性之值域和正確性進行檢核。

空間檢核部分最主要檢查各線段接合是否未連結確實，或有互相交錯之銜接誤差現象，在資料建置過程中，是無法由資料直接發現其位相關係錯誤，原因在於資料皆採分層建置，也就是人孔為單一圖層節點，管線為另一圖層（線），彼此之間是無法進行驗證，僅能由建置人員目視判斷人孔位於管線之上，無法進行全面性檢核。因此利用 ESRI 軟體所提供多種相互關係拓撲法則（Topology Rules），所謂拓撲法則是指用來定義空間關聯性的數學方法（ESRI，2006），位相關係檢核項目的多寡與檢核的結果，可以反應出圖資的正確性及是否可供後續運用，因此將重製後之管線及相關附屬設備進行檢核，其程序如下：

1. 二維平面資料檢查項目程序如圖 65，透過 ESRI ArcGIS MAP 軟體進行空間資料主要檢核程序說明如下。



圖 65 平面檢核項目作業程序圖

(1) 為檢查設備是否有重疊，利用 spatial join 工具取得空間位置一致之圖徵，若取得在同位置有 2 筆以上資料欄位 (Join\_count>=2)，需確認重覆點位資料，並將沒問題點位刪除 (圖 66)，後續再檢查測量點位是否與設備是否有重疊，並將沒問題點位刪除。

Table

OBJECTID *	Shape *	Join_Count
576	Point ZM	1
577	Point ZM	1
578	Point ZM	1
579	Point ZM	1
580	Point ZM	1
581	Point ZM	1
582	Point ZM	1
583	Point ZM	1
584	Point ZM	1
585	Point ZM	1
586	Point ZM	1
587	Point ZM	1
588	Point ZM	1

Table

OBJECTID *	Shape *	Join_Count
31	Point ZM	2
64	Point ZM	2

圖 66 設備重疊檢核範例圖

(2) 為檢查管線是否重疊，將管線圖層匯入 ESRI Geodatabase，建立 Topology Rule (圖 67)，並將拓撲關係檢查結果匯出 (圖 68)，將檢查重疊錯誤管線進行修正 (圖 69)。

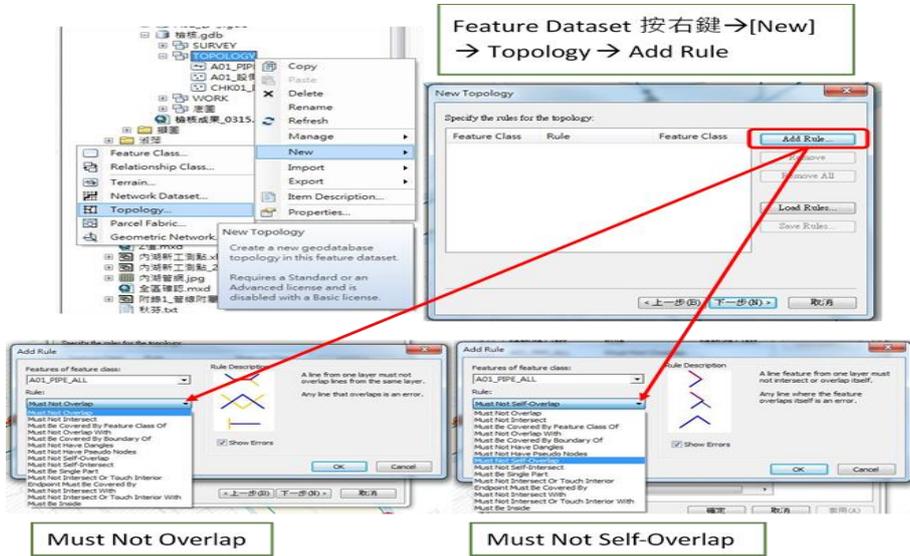


圖 67 建立拓撲關係規則圖

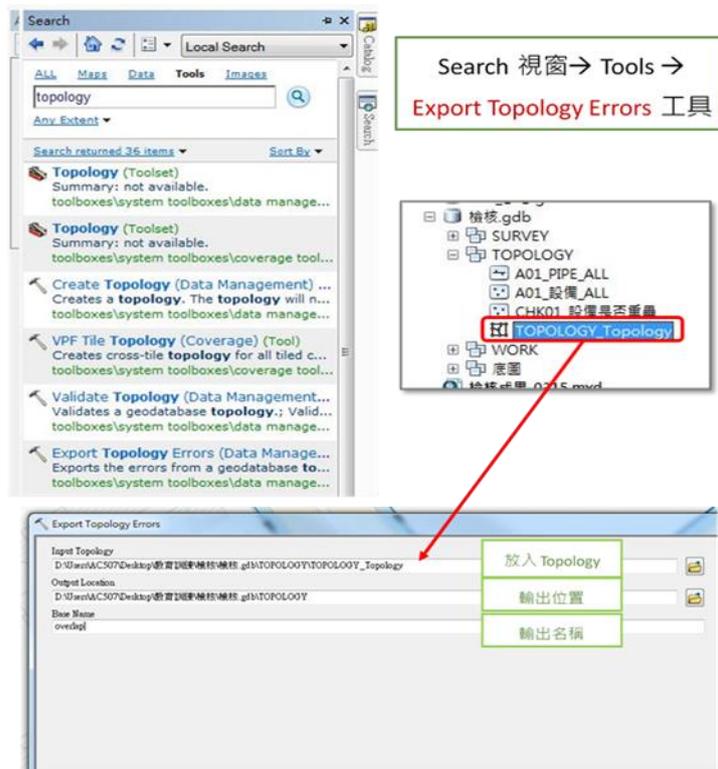


圖 68 拓撲關係檢查結果匯出範例圖

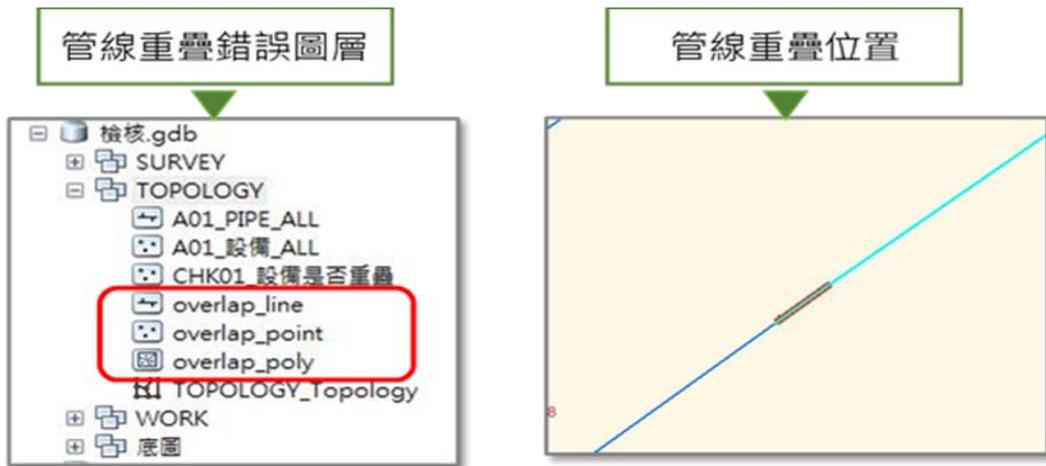


圖 69 拓撲關係檢查結果修訂範例圖

- (3) 為檢核管線端點是否接在節點或設備上，需先產出管線端點至無銜接端點之點位作業[Feature vertices to points-Dangle] (圖 70)，將所產生管線點位 (Dangle)比對所有設備 (圖 71)後，顯示管線端點與設備點位相接部分，刪除已比對到點位，最後則剩需人工檢核部分 (圖 72)。

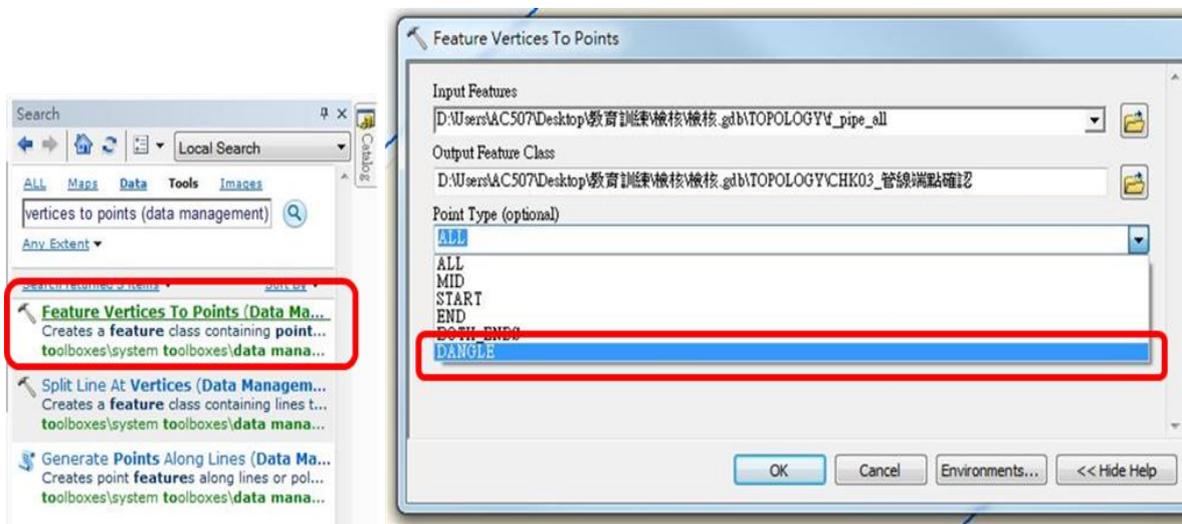


圖 70 建立管線端點確認範例圖



圖 71 比對管線端點與設備點位範例圖

OBJECTID *	Shape *	APPLY_NO	BUILD_I
1	Point ZM		<Null>
2	Point ZM		2008/4/9
3	Point ZM		1998/9/22
4	Point ZM		2004/12/31
5	Point ZM		2010/5/26
6	Point ZM		<Null>
7	Point ZM		<Null>
8	Point ZM		<Null>
9	Point ZM		<Null>
10	Point ZM		2011/8/2
11	Point ZM		<Null>
12	Point ZM		<Null>

OBJECTID *	Shape *	APPLY_NO	BUILD_I
3	Point ZM		1998/9/22
6	Point ZM		<Null>
16	Point ZM		<Null>
19	Point ZM		<Null>
23	Point ZM		1998/9/22
88	Point ZM		2001/4/3
102	Point ZM		1998/9/22
108	Point ZM		1998/9/22
104	Point ZM		1998/9/22
105	Point ZM		1998/9/22
106	Point ZM		1998/9/22
107	Point ZM		1998/9/22

圖 72 修正不符管線端點範例作業程序圖

- (4) 檢核 75 口徑以下管線檢查是否形成管網。
- (5) 檢核管網資料是否有未連結至端點情形。
- (6) 管線相交部分是否有未斷點情形，並同步檢核是否為跳管。
- (7) 套疊航照圖比對地上式消防栓是否有落於道路面（圖 73），以及管線或設備座落在建物內，若有情形則調閱竣工圖判讀合理性。



圖 73 套疊航照圖比對設備位置圖

2. 三維資訊檢核，係為檢核管線節點 Z 值（高程）是否為 0，並進行已施測設備與 DTM 值進行交叉比對以確認設備所測量高程值是否可納入使用，其作業程序如下：

- (1) 將管線轉成節點，並將節點匯出，檢核各節點是否有 Z 值=0（圖 74），若有 0 值則需修正（圖 75），並接續檢核管線端點是否與設備端點是否相連。

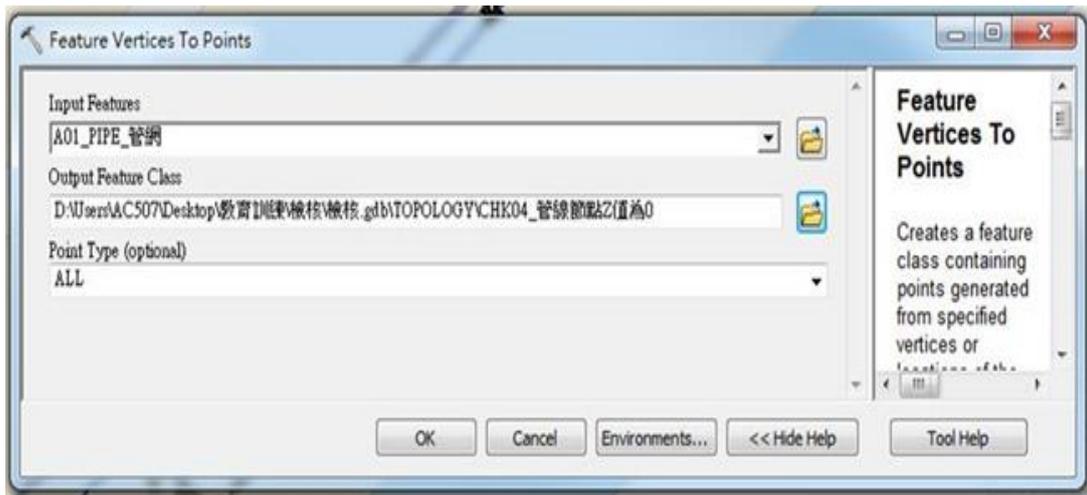


圖 74 管線轉成節點範例圖

LEN_CHK	ISNETWORK	ORIG_FID	Z
<Null>	<Null>	285	0
<Null>	<Null>	97	4.2847
<Null>	<Null>	620	4.82995
<Null>	<Null>	544	4.0612
<Null>	<Null>	620	5.0183
<Null>	<Null>	620	5.02815
<Null>	<Null>	213	5.024
<Null>	<Null>	284	5.024
<Null>	<Null>	512	5.0837

圖 75 檢核 Z 值為 0 範例圖

- (2) 檢核設備測點高程值與 DTM 是否有差異過大情形，乃利用 DTM 資料庫與設備測點高程欄位計算相減，濾出高程差異  $\geq 3m$  並於欄位中註記，這些高程值後續將不納入使用（圖 76）。

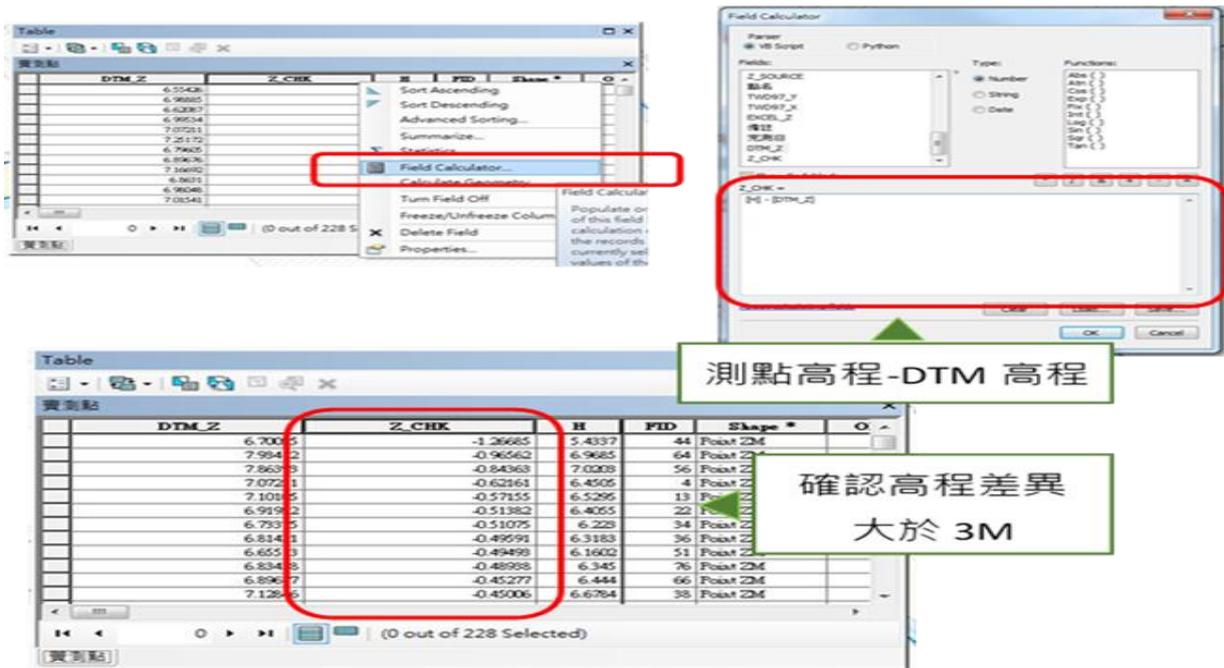


圖 76 檢核 Z 值異常範例圖

3. 針對各管線設備屬性表內容進行檢核，檢核內容說明如下：

- (1) 每一種自來水設施類別需有正式的名稱與代號。
- (2) 設備編碼為唯一值，需檢查是否有重複之現象。
- (3) 屬性表中之各欄位名稱是否有固定之型態與長度。

4. 內湖供水分區經重新整理 74 張 (1/1000 比例) 圖幅後，圖面檢核完成作業成果詳圖 77 及 78，空間資料整理數量成果詳表 13。

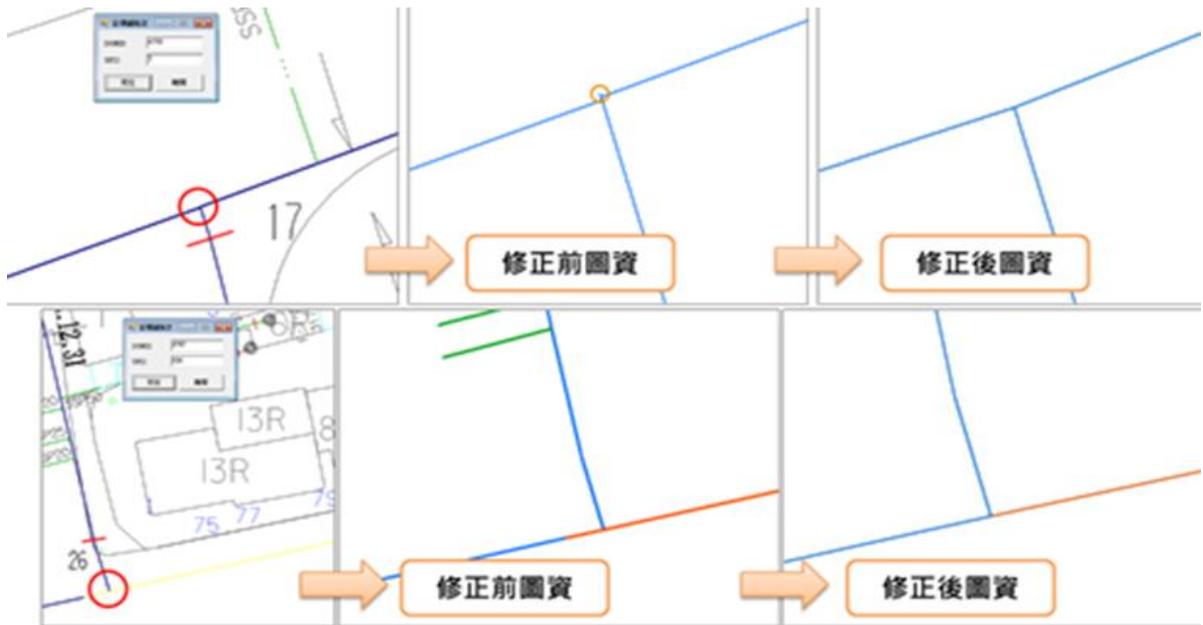


圖 77 檢核完成作業成果範例圖

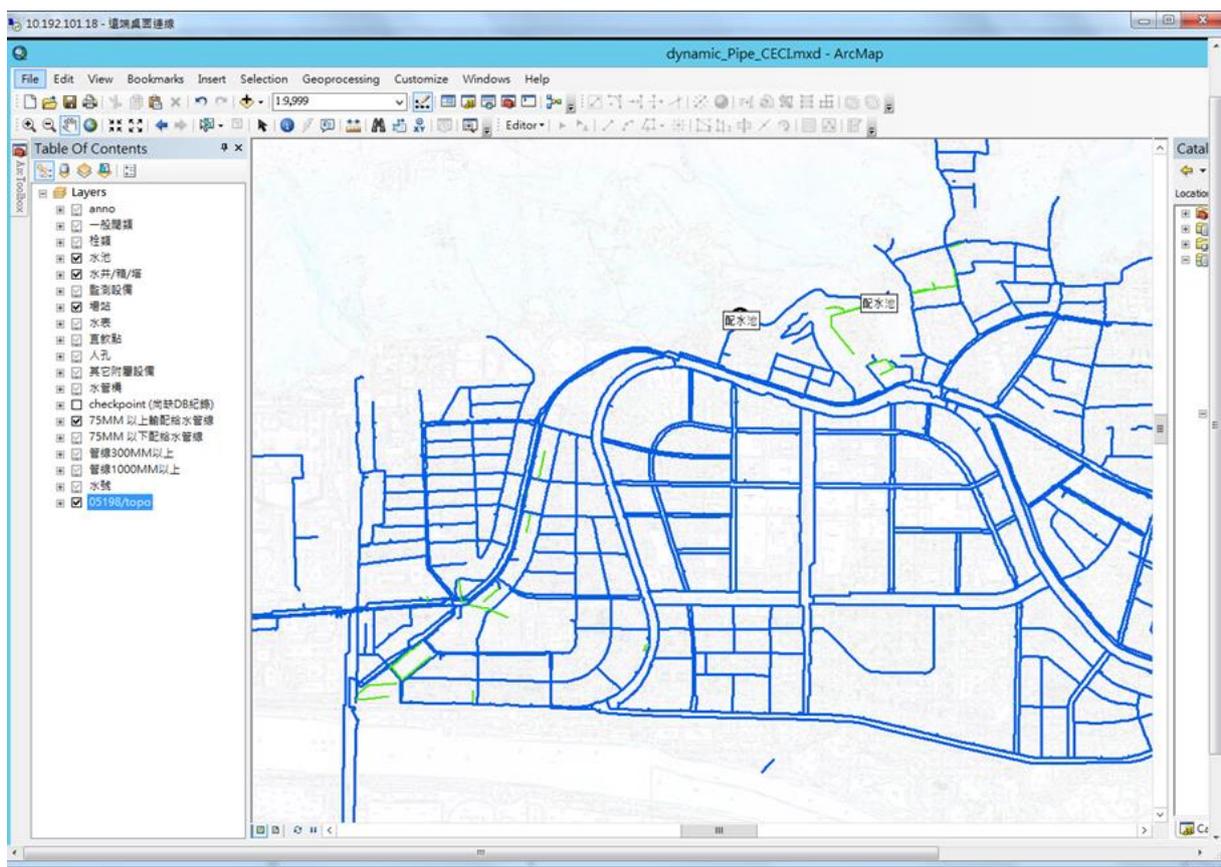


圖 78 檢核完成作業成果管線範例圖

表 13 內湖供水分區空間資料整理數量成果統計表

項目	新設	拆廢	總計
輸配水管 [管徑 75mm(含)以上]	19,012	4,836	23,848
給水管 [管徑 75mm(不含)以下]	47,929	15,376	63,305
閘	23,643	9,551	33,194
水錶	20,882	2,220	23,102
消防栓	3,127	1,284	4,411
其它附屬設備	4,383	2,010	6,393
水號	17,278	0	17,278
直飲點	20	0	20
人孔	39	0	39
場站	18	0	18
水池	35	1	36
水井／箱／塔	2	0	2
監測設備	23	0	23
圖面註記	55,469	16,868	72,337
總計	191,860	52,146	244,006

## 第四章 水理模型自動化建置及校正

管網水理分析目的在模擬供水區管網的水壓與流量及水質變化的預測，做為輸配水管線管理與維護之輔助，應用於分區計量漏水管理之預期成效，可透過建立封閉式管網以掌握水理分析之必要條件（進出區域的水量、管線屬性功能等），並於小區（封閉式管網）內建置即時監測系統，選用適當模式來搜尋可能漏水點分佈，以做為未來應用於檢測漏水、水壓及水質管理之研究工具。

本研究案水理模型分析將採用EPANET及Bentley WaterGems軟體為主要分析工具，因此於自動化產生模型的過程中，係採取將空間資料庫轉換為上述軟體皆可支援檔案格式(INP)，故必須先針對EPANET所能讀取的資料結構進行瞭解，才能設計自動化轉製流程，進一步產製出符合水理分析需求的管網模型，後續再依據現場量測水壓資料透過Bentley WaterGems軟體進行模型校正，以下將針對水理模型自動化建置進行說明。

### 4.1 自動化建置流程

以往北水處執行管網水理分析業務人員取得管線圖資檔案後，無法直接轉製成INP檔案，供EPANET軟體進行水理分析運用，而是必須經過多個查詢步驟後（如在設備管理系統查詢地形圖中之獨立標高點及等高線，以取得節點高程，查詢用戶所使用需水量以分配需水量至水理模型各節點中，並配置水源或場站基礎資訊），在EPANET軟體重新繪製管線設備、配置節點資訊及建置所需屬性資料，因此過去要產製水理模型耗時費工，要產製一個供水分區的模型幾乎是不可能達成的任務。若要進一步針對其它模擬分析進行實質探討（如爆管影響範圍或擴散分析等），更是無法實質推動。現在透過系統自動化產製管網模型後，大量縮減前置作業時間，使用者僅需配置水源環境基礎資訊後，即可開始水理分析配置工作，並可延伸

出其它加值應用。

北水處目前轄管長度為 6,316 公里，管線密度非常高，若要以全部管線進行分析，易產生效率不彰及且實用性不高，因此必須針對管線資料進行預處理，經由自動化骨架萃取功能，將管網概括化，但概括化結果仍是一個完整的管網，空間資料處理平台（WISE）提供預處理的功能，以現行自來水管網為基礎，依據水理分析的需求，來進行自來水管網的優化設計及管網拓撲關係重構作業，可由系統自動轉出智慧管網，產製水理分析所需要的管網結構及匯出 INP 檔案。

由於管網圖資架構已從原有的檔案式架構轉變成空間資料庫架構，對於原來需要大量人力的圖資重製及資料查詢作業，改由電腦依據管線空間關係進行自動化配置作業，減少大量人力作業，可較原作業流程節省約 90% 的工作量，朝自動化的方式邁進，使用者可於 Web GIS 平台上繪製範圍，並選擇水量分配方式，Web GIS 平台會自動依據所繪製的範圍產製出 INP（EPANET Input File）檔案，使用者可直接下載於 EPANET 平臺開啟，接續進行配置水源及加壓站的基礎資訊後，即可完成初步模型建置作業，主要作業流程如下圖 79 所示。

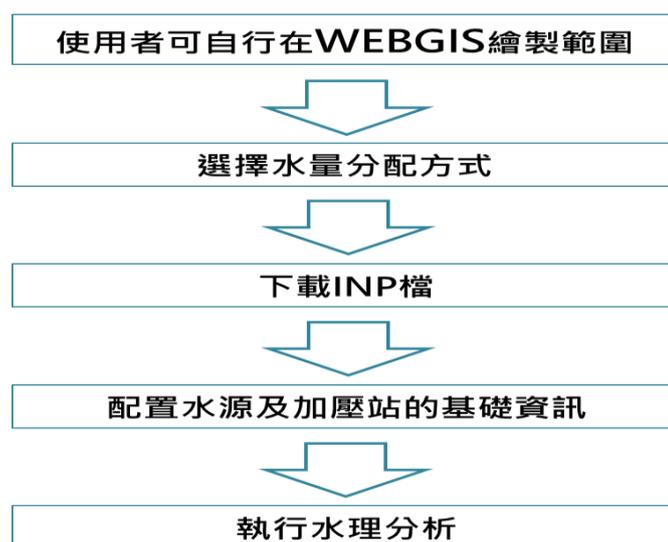


圖 79 自動化產製 INP 檔流程圖

### 4.1.1 INP檔案內容與管線設備空間資料關係

INP檔案結構共分為5大類27種屬性，以文字檔方式進行結構儲存（圖80），5大類結構分述如下，管網組件代表構成模型的基本元件；系統運行參數則是用來控制管網組件在模型中的操作情形；水質相關參數是在做水質分析時才會需要設定的；選項/報表是定義不同的模擬項目，如單時段或多時段模擬時的設定參數，以及分析結果的報表產出；地圖/標籤則是顯示節點座標、標籤座標與內容以及背景底圖（如表14）。

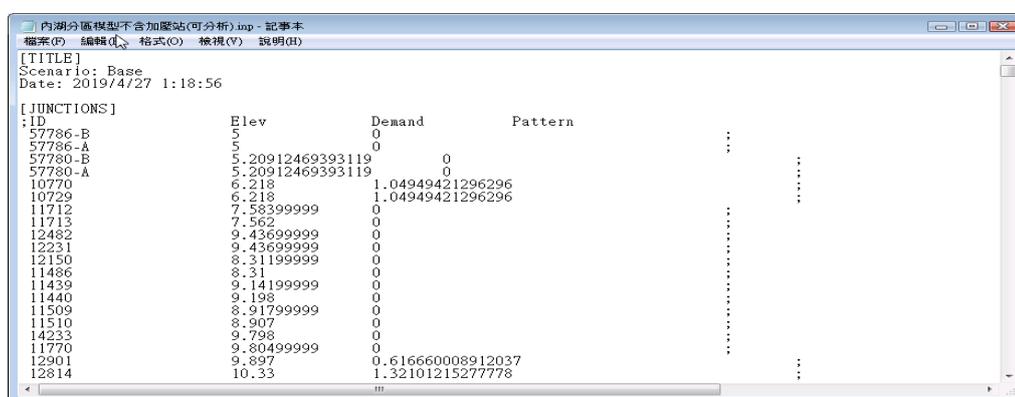


圖 80 檢核完成作業成果範例圖

表 14 INP 檔案結構分類表<sup>22</sup>

管網組件	系統運算	水質	選項/報表	管網地圖/標籤
[TITLE]	[CURVES]	[QUALITY]	[OPTIONS]	[COORDINATES]
[JUCTIONS]	[PATTERNS]	[REACTIONS]	[TIMES]	[VERTICES]
[RESERVOIRS]	[ENERGY]	[SOURCE]	[REPORT]	[LABELS]
[TANKS]	[STATUS]	[MIXING]		[BACKDROP]
[PIPES]	[CONTROLS]			[TAGS]
[PUMPS]	[RELES]			
[VALVES]	[DEMANDS]			
[EMITTERS]				

為將空間資料轉換產生INP檔，其管網組件構成水理模型的基本元件屬性內容詳3.3.2節表1至表7，而在檔案資料結構資料中各個屬性簡要內容說

明如下<sup>22</sup>：

1. [TITLE]：用以描述管網的標籤及建立時間。
2. [JUNCTIONS]：定義管網中的連接節點。
3. [RESERVOIRS]：定義管網中的水源/加壓站節點。
4. [TANKS]：定義管網中的配水池/水池節點。
5. [PIPES]：定義管網中的管段，如長度、管徑、粗糙係數及局部損失係數等。
6. [PUMPS]：定義管網中的水泵（抽水機）節點。
7. [VALVES]：定義管網中的控制閥門。
8. [EMITTERS]：將節點定義為噴嘴或孔口。
9. [CURVES]：定義數據曲線，如水泵揚程與流量、水池容積與水深。
10. [PATTERNS]：定義時間模式，每一時段參數需調整的倍數。
11. [ENERGY]：定義水泵提升能量和成本的參數。
12. [STATUS]：定義管段的初始狀態，開啟或關閉。
13. [CONTROLS]：定義簡單的控制，可根據簡單條件修改管段屬性。
14. [RULES]：定義不同的控制規則，每一規則為一系列的語句。
15. [DEMANDS]：定義節點的需水模式。
16. [QUALITY]：定義節點的初始水質。
17. [REACTIONS]：定義管網中化學成份的反應參數。
18. [SOURCES]：定義水質源頭的位置。
19. [MIXING]：控制水池的混合模式。

20. [OPTIONS]：定義不同的模擬項目，如水量單位、水頭損失公式、需水量倍數等。
21. [TIMES]：定義模擬各種時間的分段參數。
22. [REPORT]：描述模擬結果的輸出報表內容。
23. [COORDINATES]：給節點賦予在管網地圖座標。
24. [VERTICES]：描述非直線的管段之折線座標。
25. [LABELS]：具有座標值的地圖標籤，可對應在節點上。
26. [BACKDROP]：標示管網地圖背景圖像及其尺寸的。
27. [TAGS]：將標籤與特定節點或管段相連。

而在INP檔案中，共計有8個屬性是經由Web GIS直接從空間資料庫轉置出來，內容綜整如下：

1. JUNCTIONS (節點)：
  - (1) Elev (高程)：直接由DTM取出節點高程。
  - (2) Demand (需水量)：由水費資料庫撈取，計算方式詳下小節。
2. RESERVOIRS (加壓站)，屬性 Head (高程) 值直接由DTM取出節點高程。
3. TANKS (配水池)：屬性 Elevation (高程) 值可直接由DTM取出節點高程，並代入配水池空間資料如起始水位、最低水位及最高水位。
4. PIPES (輸配水管網)：
  - (1) Length (管長)：由管線幾何所算出之管長。
  - (2) Diameter(管徑)：由管線空間資料屬性帶入。

(3) Roughness(粗糙係數)：由於水理分析是依照 Hazen-Williams formula 作為基礎，其各類管材理論 C 值與管線資料對應如表 15，相關數值轉換原則如下：

- A. 鑄鐵管：全新鑄鐵管之粗糙係數為 130，使用過 20 年之鑄鐵管粗糙係數為 95，30 年之鑄鐵管管粗糙係數為 82.5，使用 1 年到 20 年之鑄鐵管粗糙係數以 130 與 95 進行內插計算；20 到 30 年間的粗糙係數以 95 與 82.5 進行內插計算，30 年以上鑄鐵管之粗糙係數皆為 82.5。
- B. 塑膠管：與管齡無關，粗糙係數皆為 150。
- C. 混凝土管：與管齡無關，粗糙係數皆為 130。
- D. 鋼管：採用「新鉚接鋼管」之粗糙係數，皆為 110。
- E. 其餘管線粗糙係數皆為 100。

表 15 管線 C 值與空間資料庫管材對應表<sup>23</sup>

項次	自來水管材料	已使用年	理論 C 值	對應資料庫管材
1	混凝土	N/A	130	PCCP、PSCP
2	鑄鐵管	<5	130	CIP、DIP、MJP
		>=5 ~ <10	120	
		>=10 ~ <20	110	
		>=20 ~ <30	90~100	
		>=30	75~90	
3	新焊接鋼管	N/A	120	N/A
4	釉陶管	N/A	110	N/A
5	新鉚接鋼管	N/A	110	GIP、SP、SSP、STP、SUS
6	磚製管	N/A	100	N/A
7	石棉水泥管	N/A	140	N/A
8	塑膠管	N/A	150	ABS、HDPE、HIP、PB、PP、PVC、PVCP

5. VALVES (閥)：Diameter (管徑) 由閥空間屬性資料帶入口徑。
6. COORDINATES (座標)：記載各 JUNCTIONS 的座標。
7. VERTICES (輸配水管路徑座標)：由管線空間資料屬性代入。
8. LABELS (文字註記)：由栓、監控點、加壓站及配水池空間資料輸入代入編號。

#### 4.1.2 管網水理模型資料預處理程序

##### 1. 管網預處理作業原則

為管線圖資空間執行效率考量，北水處在管線設備空間資料庫中，將自來水管線圖層中分為輸配水管（75mm口徑以上）及給水管（75mm口徑以下）圖層，本案水理分析採用75mm以上之管線進行分析，然而部分管網於2端點可能採用75mm以下的管線進行連結，因此必須將管網進行重置連結作業（圖81），圖中藍色線段為75mm以上的管線，綠色線段為75mm以下的管線，因此需將部份給水管管線提升到輸配水管資料表當中。

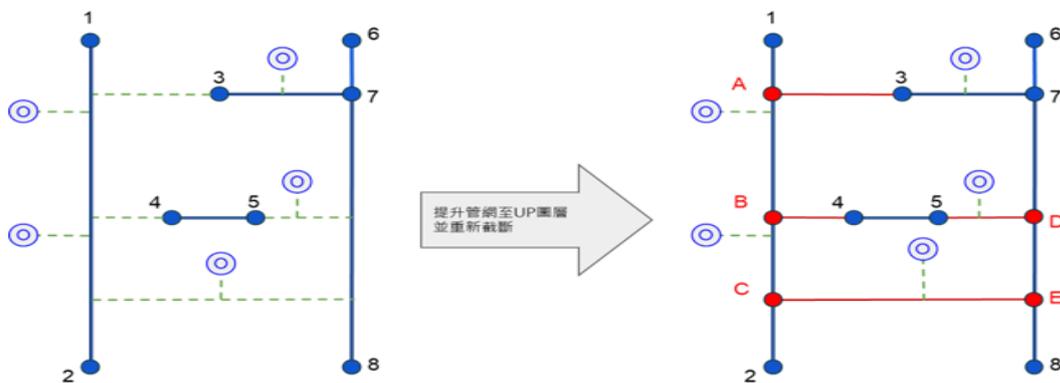


圖 81 管網製作示意圖

整體作業流程如圖82所示，因此會先將管網給水管與輸配水管進行交點計算，並利用所計算出的交點，將原始輸配水管進行分段的動作，以利匯出正確的JUNCTIONS(節點)。而在圖81當中，程式會將紅色線段 $\overline{A3}$ 、 $\overline{B4}$ 、

$\overline{D5}$ 、 $\overline{CE}$ 提升到輸配水管管線資料庫， $\overline{12}$ 、 $\overline{78}$ 分別截斷成 $\overline{1A}$ 、 $\overline{AB}$ 、 $\overline{BC}$ 、 $\overline{C2}$ 與 $\overline{7D}$ 、 $\overline{DE}$ 、 $\overline{E8}$ 等7條管線，接下來將資料庫中 $\overline{12}$ 、 $\overline{78}$ 的資料刪除，並在資料庫中加入 $\overline{1A}$ 、 $\overline{AB}$ 、 $\overline{BC}$ 、 $\overline{C2}$ 、 $\overline{7D}$ 、 $\overline{DE}$ 、 $\overline{E8}$ 的管線資料，以利產生出符合實際INP檔案資料結構。

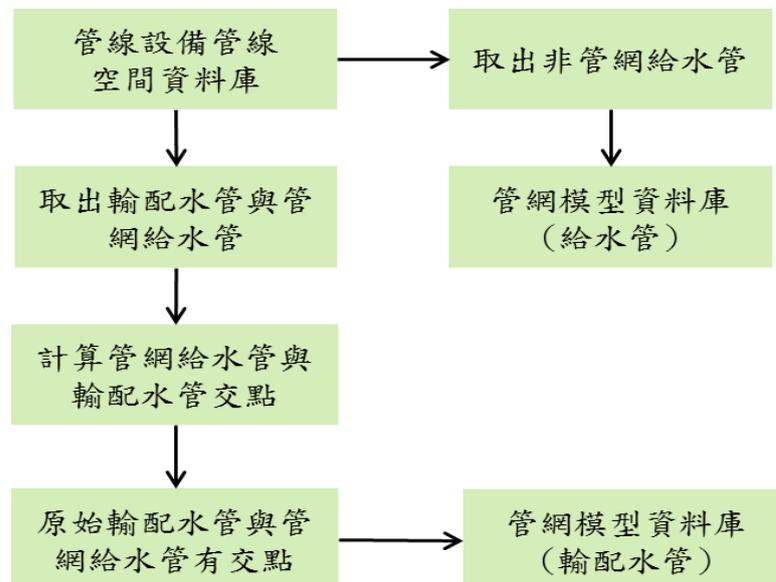


圖 82 管網建置流程示意圖

## 2. 管網預處理程式說明

管線設備空間資料庫原設計為供同仁透過地理資訊系統查詢圖資及分析使用，因建立管網模型資料需大量使用到空間關係運算及萃取相關屬性資料，非常佔據伺服器資源及效能，為避免影響地理資訊系統運作及有所區隔，因此建立專屬管網水理模型使用之資料庫，其背後邏輯為透過伺服器排程服務執行管網預處理程式，將原管線設備空間資料轉至管網模型資料庫中，並連結至管線設備空間資料庫及DTM資料庫，將INP檔中有關管網組件所需屬性資料及座標高程值萃取及運算後，放入管網模型資料庫各資料表中。程式在執行過程中，首先將找出管徑在75mm以下（給水管），但屬於管網管線資料，將其資料放入輸配水管資料表中，接著利用給水管去取出和輸配水管的交點，並裁斷75mm以上（輸配水管）的管線，完成分段

及建立節點的空間位置，接著再將75mm以上輸配水管線放入管網模型資料庫，接續再放入75mm以下給水管線，其預處理作業流程如圖83所示。

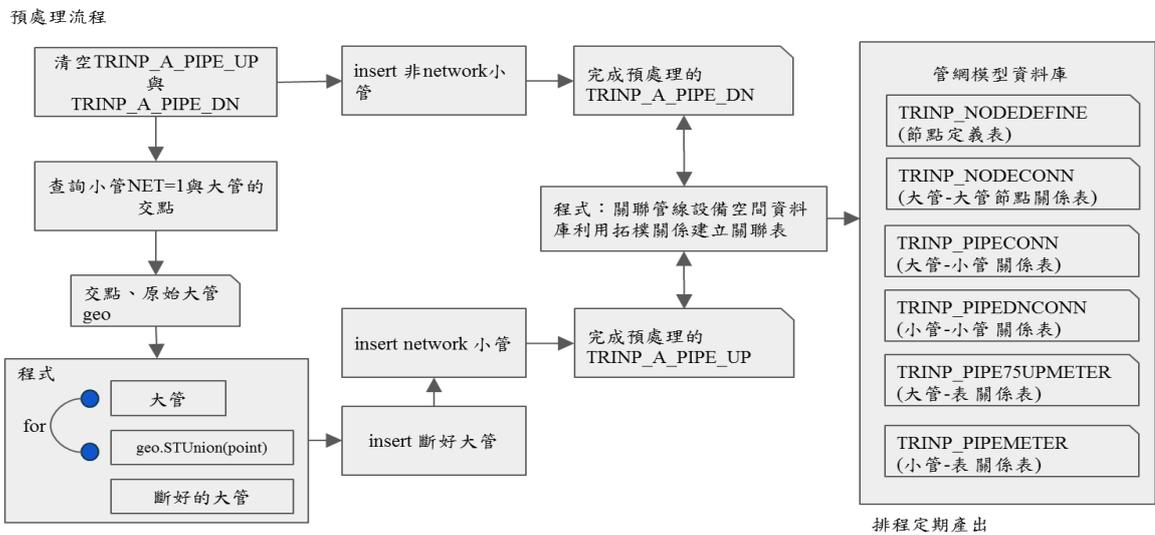


圖 83 管網模型資料庫預處理流程示意圖

利用管線設備的拓樸關係建立管網模型資料庫，其與管線設備空間資料庫實體關聯圖詳圖84。

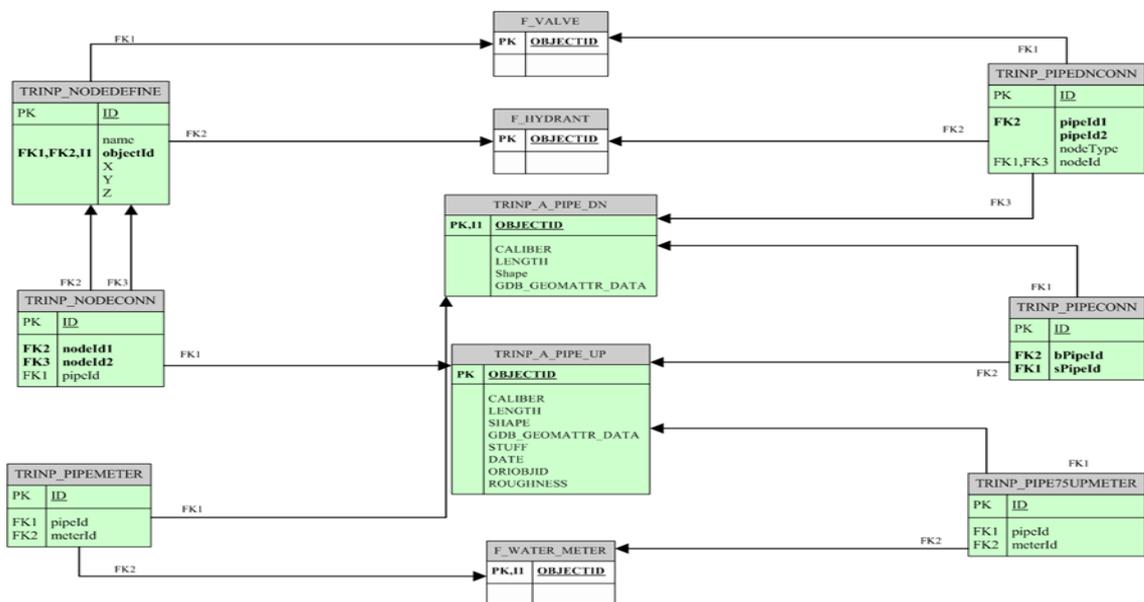


圖 84 水力模型 ER-DIAGRAM

而在管網模型資料庫中各資料表定義如下：

(1) 節點定義表(TRINP\_NODEDEFINE):記錄各節點基本資訊內容(表 16)。

表 16 節點定義表

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB01			節點定義表		TRINP_NODEDEFI NE
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2		NAME	NVARCHAR(10)	設備名稱	閘：VALVE，栓： HYDRANT，若為註 記則為虛擬節點
3	NOT NULL	OBJECTID	NVARCHAR(10)	設備編號	FK VALVE(OBJIECTID CTID)
4		X	FLOAT	節點 X	
5		Y	FLOAT	節點 Y	
6		Z	FLOAT	點位高程	

(2) 輸配水管節點關聯表 (TRINP\_NODECONN):記錄輸配水管線前後結點關係資訊(表 17)。

表 17 輸配水管節點關係表

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB02			輸配水管節點關係表(大管對大管)		TRINP_NODECO NN
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2	NOT NULL	NODEID1	INTEGER	節點編號	FK TRACE_NODED EFINE(ID)
3	NOT NULL	NODEID2	INTEGER	節點編號	FK TRACE_NODED EFINE(ID)
4	NOT NULL	PIPEID	NVARCHAR(10)	管線 OBJ	FK PIPE_75up(OBJI ECTID)

(3) 輸配水管與給水管關係表 (TRINP\_PIPECONN)：記錄輸配水管與給水管連結關係資訊 (表 18)。

表 18 輸配水管與給水管關係表 (大管對小管)

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB03			輸配水管與給水管關係表 (大管對小管)		TRINP_PIPECONN
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2	NOT NULL	BPIPEID	INTEGER	大管 OBJ	FK PIPE_75UP(OBJECTID)
3	NOT NULL	SPIPEID	INTEGER	小管 OBJ	FK PIPE_75DN(OBJECTID)

(4) 給水管線關係表 (TRINP\_PIPEDNCONN)：記錄給水管與給水管連結關係資訊 (表 19)。

表 19 給水管關係表 (小管對小管)

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB04			給水管線關係表 (小管對小管)		TRINP_PIPEDNCONN
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2	NOT NULL	PIPEID1	NVARCHAR(10)	小管 OBJ	FK PIPE_75DN(OBJECTID)
3	NOT NULL	PIPEID2	NVARCHAR(10)	小管 OBJ	FK PIPE_75DN(OBJECTID)
4		NODETYPE	NVARCHAR(10)	連接設備種類	閘：VALVE 栓：HYDRANT
5		NODEID	NVARCHAR(10)	設備 OBJ	FK VALVE(OBJECTID)/HYDRANT(OBJECTID)

(5) 輸配水管與水表關係表 (TRINP\_PIPE75UPMETER)：記錄輸配水管線與水表關係資訊 (表 20)。

表 20 輸配水管與水表關係表 (大管對表)

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB05			輸配水管與表關係表 (大管對表)		TRINP_PIPE75UPMETE R
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2	NOT NULL	PIPEID	NVARCHAR(10)	大管 OBJ	FK PIPE_75UP(OBJECTID)
3	NOT NULL	METERID	NVARCHAR(10)	表 OBJ	FK WATER_METER (OBJECTID)

(6) 給水管與水表關係表 (TRINP\_PIPEMETER)：記錄輸給水管線與水表關係資訊 (表 21)。

表 21 給水管與水表關係表 (小管對表)

資料庫編號			資料表中文名稱		資料表英文名稱
DB06			給水管與表關係表 (小管對表)		TRINP_PIPEMETER
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1	NOT NULL	ID	INTEGER	流水編號	PK
2	NOT NULL	PIPEID	NVARCHAR(10)	小管 OBJ	FK PIPE_75DN(OBJECTID)
3	NOT NULL	METERID	NVARCHAR(10)	表 OBJ	FK WATER_METER (OBJECTID)

(7) 原給水管空間資料表對應管網水理模型給水管資料表 (TRINP\_A\_PIPE\_DN)：重新處理原給水管線空間資訊 (表 22)。

表 22 原給水管空間資料對應管網水理模型給水管資料表

資料庫編號		資料表中文名稱			資料表英文名稱
DB07		原給水管空間資料對應管網水理模型給水管資料表			TRINP_A_PIPE_DN
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1		OBJECTID	INT	編號	
2		CALIBER	INT	管徑	
3		LENGTH	NUMERIC(38, 8)	管長	
4		SHAPE	GEOMETRY	空間資料	
5		GDB_GEOMATTR_DATA	VARBINARY(MAX)		

(8) 原輸配水管空間資料表對應管網水理模型給水管資料表 (TRINP\_A\_PIPE\_DN): 重新處理原輸配水管線空間資訊，並給與粗糙係數 (表 23)。

表 23 原輸配水管空間資料對應管網水理模型輸配水管資料表

資料庫編號		資料表中文名稱			資料表英文名稱
DB08		原輸配水管空間資料對應管網水理給水管資料表			TRINP_A_PIPE_UP
編號	屬性	欄位名稱	型別大小	欄位說明	詳細內容
1		OBJECTID	int	編號	
2		CALIBER	int	管徑	
3		LENGTH	numeric(38, 8)	管長	
4		SHAPE	geometry	空間資料	
5		GDB_GEOMATTR_DATA	varbinary(MAX)		
6		STUFF	nvarchar(50)	管材	
7		DATE	datetime	建置時間	
8		ORIOBJID	int	原始編號	
9		ROUGHNESS	numeric(38, 8)	粗糙係數	

#### 4.1.3 Web GIS匯出管網模型檔案

使用者進入 Web GIS 系統後，可透過分析模組中之水理模型匯出功能，下載所需管網模型 inp 檔案。本研究係以內湖供水分區（示範區）為範圍，其操作程序如下：

1. 依據系統已提供供水範圍或自行繪製範圍功能，框選所需下載管網模型範圍，如圖 85 所示所選擇的範圍即為內湖供水分區範圍。

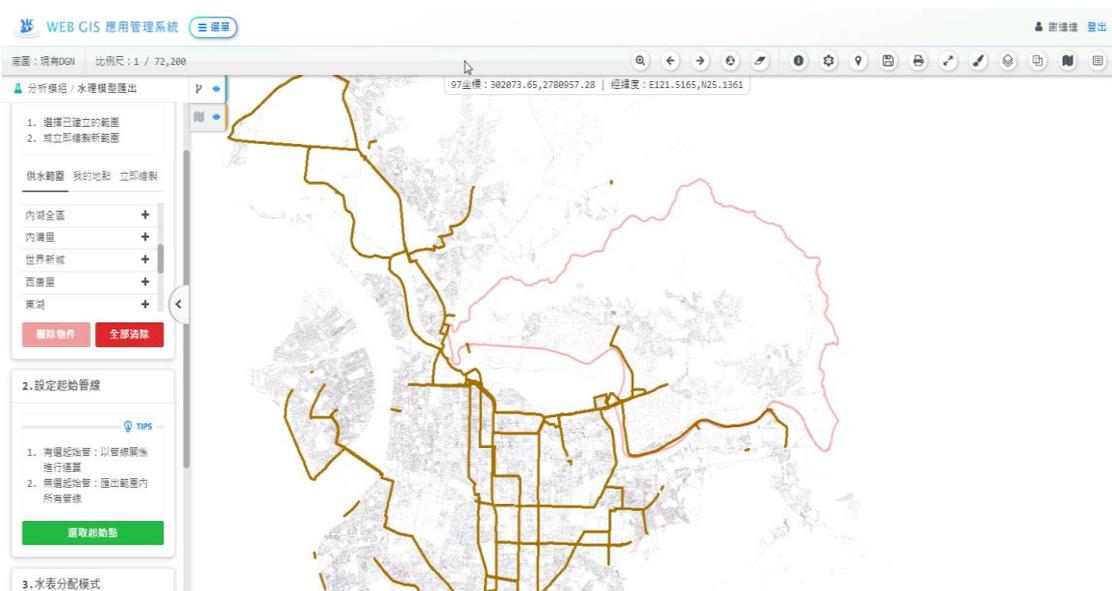


圖 85 內湖供水分區範圍圖

2. 選擇範圍後，使用者可點選管線追蹤，程式會由依照管網連結關係追蹤，將範圍內相關的管網設備資訊匯出，使用者亦可不選擇進行追蹤，而程式將把範圍內所有管網設備資訊下載。
3. 系統將依使用者所選擇條件進行水量分配，節點之需水量是由程式依照使用者在 Web GIS 系統所框選的範圍，自動由水費資料庫中所對應水號，並將其最新一期的抄表資料帶入進行分配，方法如下：

- (1) 若使用者有點選管網追蹤，則以給水管追蹤水表並分配水量，程式追蹤輸配水管下連接的給水管，並以爬蟲的方式，搜尋出所有連結

的給水管與水表，如圖 86 中藍色的水表，會依據水表至給水管至輸配水管的連結關係進行水量分配。。

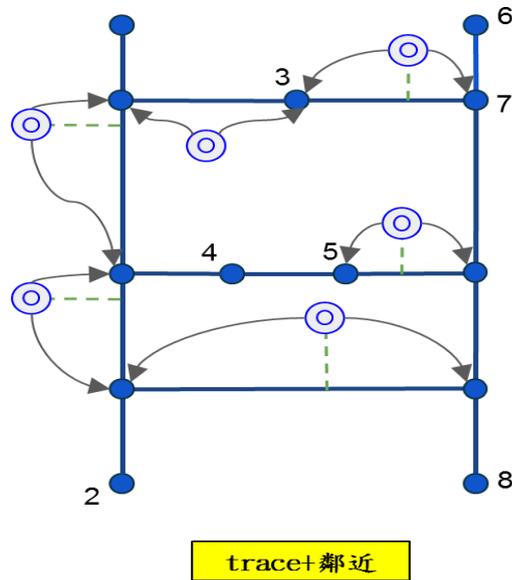


圖 86 管網節點水量追蹤分配示意圖

(2) 使用者若不選擇管網追蹤，所有水表將以最鄰近方式分配，程式會計算所有水表與各個輸配水管的距離，如圖 87 所示，並將水表分配到距離最近的輸配水管管線上。

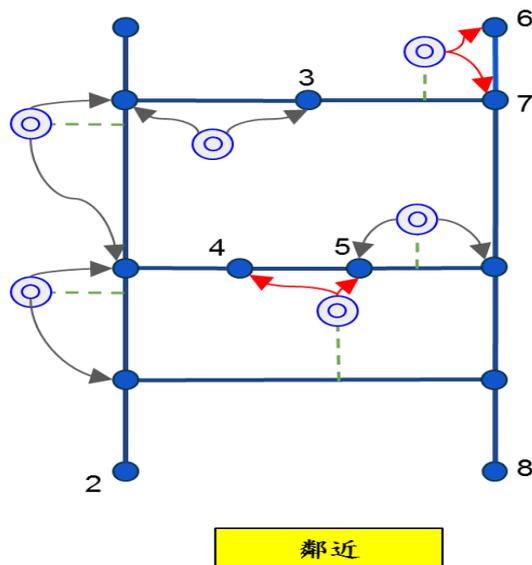


圖 87 管網節點水量距離分配示意圖

(3) 在經過方法 1 或方法 2 的水表分配後，水表水量將分配到各個輸配水管，各輸配水管再以二分之一的分配方式，將水量平均分配給輸配水管兩側之節點 (JUNCTION)，即完成水量分配。

4. 經由處理與計算，系統會打包產出壓縮檔供使用者下載，其中包含框選區域範圍內管網的水理模型 INP 檔案，以及場站資料文字檔。場站資料為管線設備空間資料庫中之加壓站及配水池屬性等基本資訊，在被框選到後，便會以文字檔方式產出 (圖 88)，提供使用者進行後續管網參數的設定，圖 89 即為由 Web GIS 所產出內湖供水分區管網 INP 檔案匯入 EPANET 後之管網水理模型。

[RESERVOIRS]						
ID	名稱	管線口徑(mm)	配水池容量(m <sup>3</sup> )	抽水機台數	額定揚程	流量(CMD)
R-113	碧湖加壓站	150	100	10HP*2	30	1050
R-114	碧湖里2加壓站	150	520	30HP*2	32	1200
R-115	碧湖里3加壓站	150	189	40HP*2	100	1120
R-116	內湖一場加壓站	150	600	60HP*2	55	4200
R-117	碧湖里1加壓站	300	500	75HP*3	75	4060
R-119	大湖公園加壓站(維生)	150	1034	15HP*3	40	1500
R-120	大湖加壓站	300	150	20HP*2	35	2000
R-121	東湖加壓站	250	500	100HP*2	62	7000
R-122	內湖里加壓站	100	35	5HP*2	35	425
R-123	湖北加壓站	200	0	20HP*3	40	2000
R-124	西康里加壓站	75	30	10HP*2	35	900
R-125	世界新城加壓站	150	140	30HP*2	65	1600
R-126	麟山加壓站	100	100	10HP*2	45	700
R-127	內湖二期加壓站	400	0	75HP*2	30	10000
R-128	內湖三期加壓站	300	1000	75HP*2	30	10000
R-129	大湖加壓站第二座	800	30000	600HP*2	45	62500
R-130	松山加壓站配水池	1200	20000	700HP*3	45	72000

[TANK]						
ID	名稱	面積(m <sup>2</sup> )	容量(m <sup>3</sup> )	水位上限	水位下限	水池高程
T-342	煙波庭社區配水池	40	80	1.5	0.5	32.43
T-343	碧湖加壓站配水池(下)	40.7	100	2	0.5	11.38
T-344	碧湖里配水池(4)	72.4	145	2	0.35	224.08
T-345	水池	0	0	0	0	52.78
T-346	內湖一期配水池	153.9	600	3.5	0.5	63.34
T-347	大湖配水池	96	150	2.5	0.5	49.86

圖 88 內湖供水分各加壓站及配水池基本資料

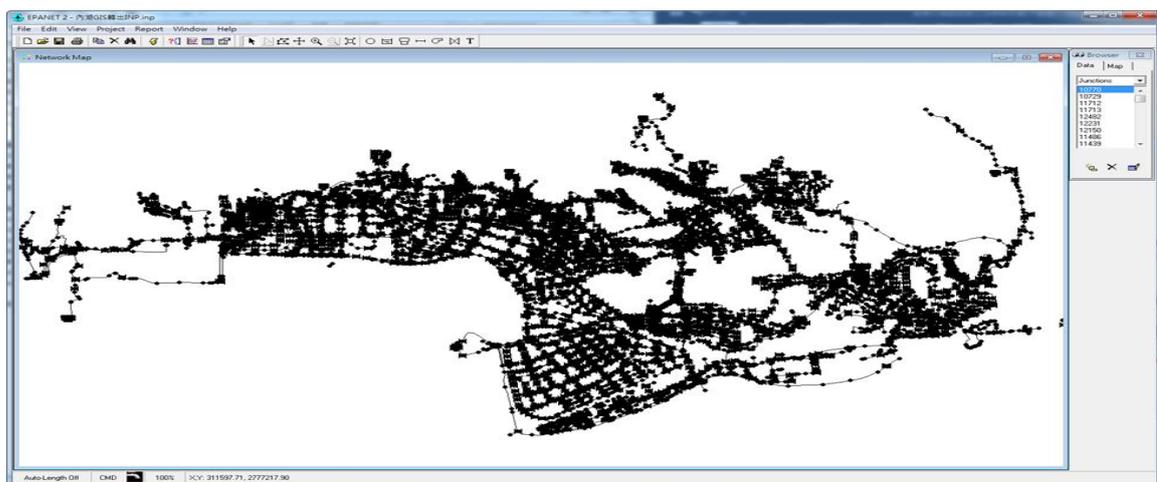


圖 89 內湖供水分區模型圖 (不顯示標籤)

#### 4.1.4 內湖供水分區管網模型建立

內湖供水分區主要由松山加壓站內湖線及大同加壓站大直線供水，管網中包含眾多小型加壓站(配水池)，自來水由松山或大同加壓站加壓送出，再經由管網流入小型加壓站(配水池)後再加壓供應至其各自供水範圍內管線。但是若於管網模型中建立太多水源(Reservoir 或 Tank)，在進行水力分析時，難以控制各水源供水方向，將導致管網供水流況混亂，與現實情形有所差異。所以針對整個內湖的大型管網所採取的模型建立模式，乃是先將各小型加壓站的管線、節點、配水池及泵等從模型中刪除，並將小加壓站供水範圍內所有節點的需水量加總，設定於配水池進水端位置之節點上。如此，可將內湖模型之水源固定為大同加壓站大直線以及松山加壓站內湖線所供應，於執行分析時較能模擬實際供水情形，並與現地水壓做比較。藉由 Web GIS 系統匯出內湖供水分區管網水力模型 INP 檔案已可節省大多人力，惟仍需透過 EPANET 軟體進行部分管網模型微調工作，其操作步驟說明如下：

##### 1. 刪除小型加壓站(配水池)管網

由於刪除內湖供水分區內之各小型加壓站(配水池)之管網必須以手動的方式操作，因此在刪除前使用者須先詳細瞭解各加壓站供水範圍，才能確實將管網簡化，避免造成整體管網管線拓撲錯誤。要在 EPANET 軟體中將管網刪除，可以利用 Select Region 功能，選擇一定範圍內之元件，再將其一起刪除(圖 90)，並將小加壓站供水範圍內所有節點的需水量加總，設定於配水池進水端位置之節點上。

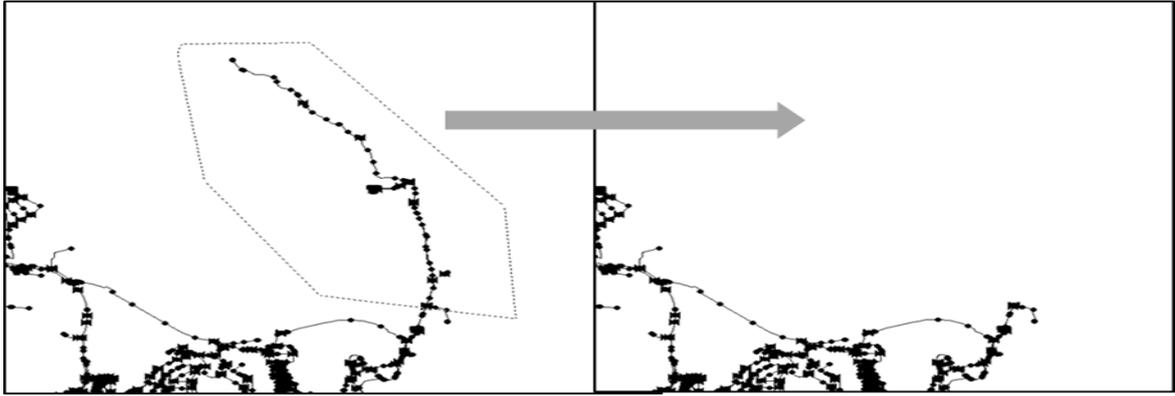


圖 90 小加壓站管網刪除示意圖

## 2. 設定加壓站資訊

由於松山和大同加壓站為內湖供水分區的供水來源，為便利設定，在此步驟將其配水池以 Reservoir（加壓站）表示，因此只需將 INP 檔案中的 Tank（配水池）刪除，並繪製 Pump（水泵/抽水機）取代即可。而 Pump 必要的參數設定為其特性曲線，故需於 Curve 選項中輸入加壓站之額定揚程以及流量，並在 Pump 的參數欄中輸入對應的 Curve 名稱（圖 91）。

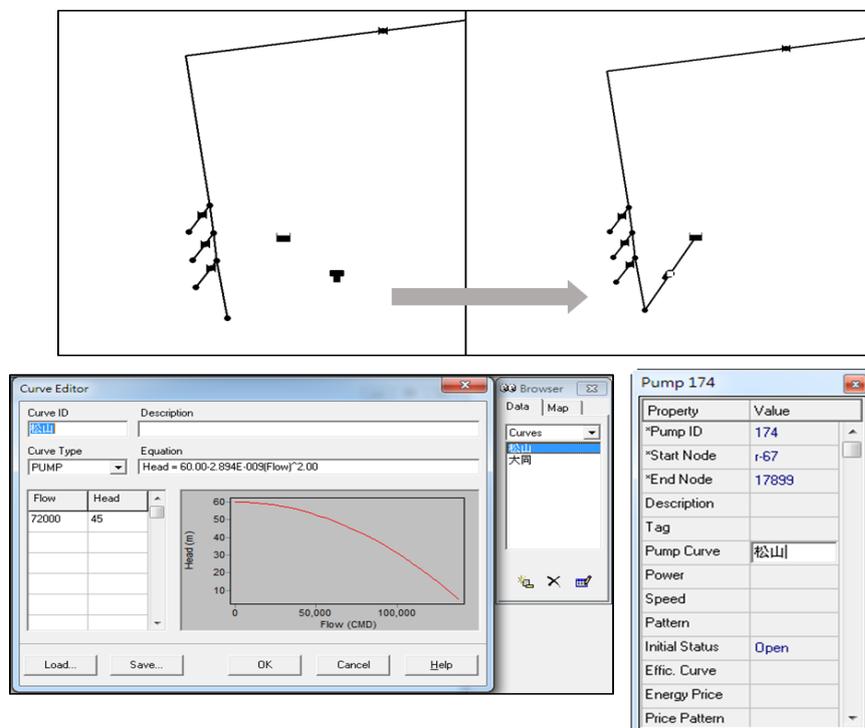


圖 91 加壓站設置示意圖

### 3. 修正水量

由於節點需水量是由水費資料庫撈取用戶水表用水度數帶入，並未考慮管線漏水、無收益水量等因素，造成整個管網的需水量與實際加壓站所送出的水量將會有所差異。因此，在模擬分析前應先利用加壓站所測得的出水量，來修正管網各節點之需水量，才能取得合理的水壓、流量分析結果。內湖供水分區修正水量所採取的方式，是利用松山內湖線與大同大直線的實際監測出水量與管網總需水量之比值做為修正依據。而由於模型已刪去各小型加壓站之管網，因此水量修正亦需去除各小型加壓站之水量，故管網水量修正所採用的修正比例可參考下列公式。

$$\text{水量修正比例} = \frac{(\text{松山內湖\&大同大直出水流量}) - (\text{小型加壓站出水流量總合})}{(\text{內湖模型節點水量總合}) - (\text{小型加壓站範圍節點水量總合})}$$

而後將非屬於小型加壓站的節點需水量乘上此修正比例，此時管網修正後總需水量便可符合松山與大同加壓站在該監測時間點的總出水量（圖 92）。

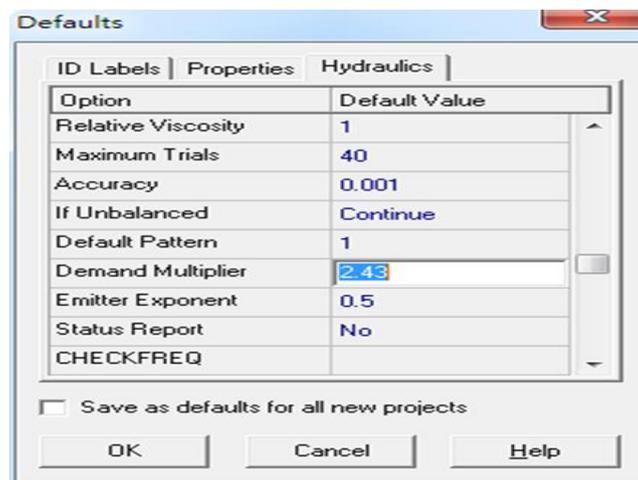


圖 92 水量修正比例設定示意圖

### 4. 執行分析

上述管網處理步驟完成後，便可執行分析，並利用水理分析結果，觀

察節點壓力（圖 93）、管線流量等數據（圖 94），判斷管網模型之合理性。



圖 93 內湖管網節點壓力分析結果示意圖

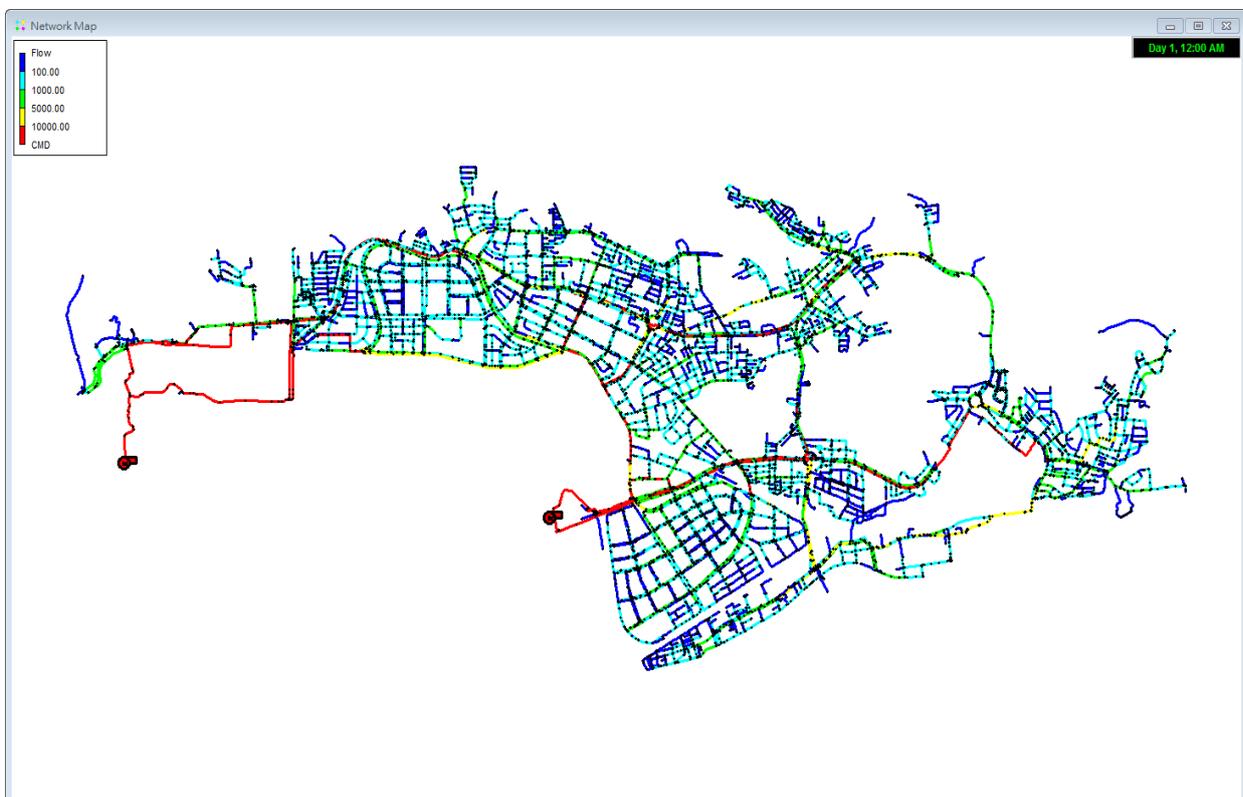


圖 94 內湖管網節點流量分析結果示意圖

## 5. 輸出結果檔

執行分析完後，EPANET 可將分析結果輸出成報告格式檔案 (RPT)，檔案內容包含節點的需水量、水頭、水壓、水質分析結果，以及管線流量、流速、水頭損失和啟閉狀態 (圖 95)。

Node ID	Demand CMD	Head m	Pressure m	Quality
17917	37.90	24.21	13.51	0.00
17977	0.00	24.21	13.49	0.00
17914	22.85	24.20	16.09	0.00
14564-1	22.85	24.22	16.07	0.00
19761	0.00	24.20	16.03	0.00
17939	2.61	24.20	16.06	0.00
19760	0.00	24.23	15.76	0.00

Link ID	Flow CMD	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
WPU63010012792	89.45	0.06	0.06	Open
WPU63010018569	784.66	0.29	0.80	Open
WPU63010018556	0.00	0.00	0.00	Open
WPU63010018530	0.00	0.00	0.00	Open
WPU63010018508	27.44	0.02	0.01	Open
WPU63010018456	-925.55	0.09	0.03	Open
WPU63010012209	160.63	0.06	0.06	Open

圖 95 報表檔內容示意圖

## 4.2 水理模型校正

現場水壓量測結果係為針對前節所產製內湖供水分區管網水理模型，進行管網水理模型C值校正，原C值內容為Web GIS系統經由表15係數所換算得來，透過C值的校正，將使管網模型所分析所得壓力值更加趨近實測水壓值，以確保管網模型用於後續模擬分析時之可靠性。

### 4.2.1 現場量測水壓作業

為求模型校正效能及廣度最大化，消防栓水壓量測點盡量平均分布於管網中，本研究安排120個點位進行現場消防栓水壓量測作業，分10批次，每次安裝12個數位水壓計 (使用LoLog450數位水壓記錄器)，量測期間設定

為2天，每1分鐘記錄1筆數據（圖96及圖97）。

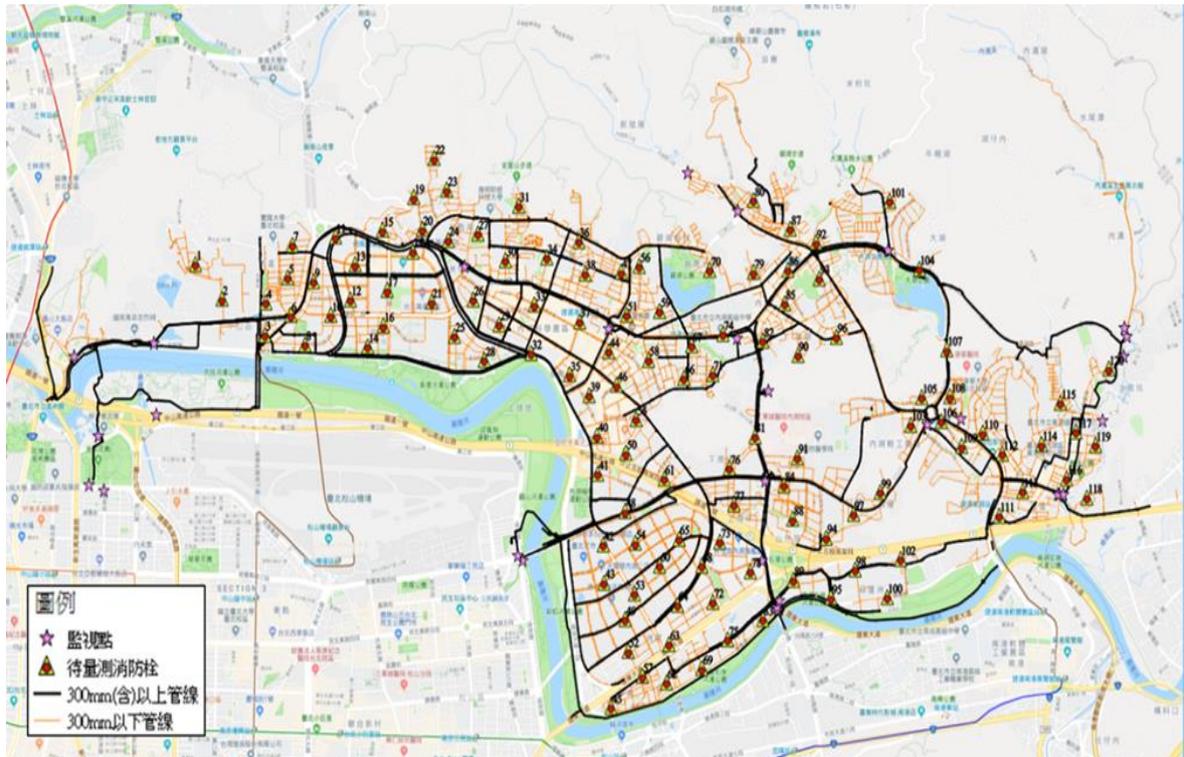


圖 96 水壓量測消防栓點位示意圖



圖 97 現場實際水壓量測

#### 4.2.2 校正成果

本研究案水理模型校正是利用 Bentley WaterGEMS 軟體內建之模型校正功能，給定 120 點實際量測數值，讓軟體利用基因演算法修正管線之 C 值，改變模型的水頭損失分布，使得模擬結果趨近於實際量測的數值。由於在各批次水壓量測時，松山加壓站內湖線與大同加壓站大直線出水壓力、水量等監控數據具有相似的狀態數列。雖然現場水壓量測是採每批次 12 點位（10 次）量測，然而在各批次量測期間整體管網供水情況接近，可類比成在相同情況下量測 120 點消防栓水壓。因此根據松山、大同加壓站監控資料，挑選各批次水壓量測期間內，尖峰出水量之時間點。結果顯示 10 批次中有 5 批次之最大出水量在晚間 8 點，故選擇晚間 8 點時的 120 點消防栓量測值作為校正依據。

由於模型管線之管長、管徑、C 值以及節點之高程、需水量等基礎參數已於自動化產製之模型中設定完成，並如前 4.1.4 節進行各節點需水量修正，故在校正模型之前，僅需針對加壓站配水池、泵浦等進行設定。其設定係參考監控系統之松山及大同加壓站出水量及出水壓資料，係挑選各批次水壓量測期間內，尖峰出水量之時間點，利用尖峰流量下的加壓站出水壓及出水量進行設定。

管網水理模型校正前，將原模型中代表各量測消防栓之節點，其分析水壓值與實際量測的水壓值進行比較。由下表 24 分析結果可得知，在利用 WaterGEMS 校正模型前，120 點水壓量測點中有 35 點壓差在  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  以下，54 點在  $0.1\sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$  之間，22 點在  $0.2\sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$  之間，9 點在  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  以上。而誤差在 20% 內的點位共有 100 點，佔 120 點測量點之 83.3%，另由壓差分佈點位（圖 98）可看出，壓差較大之區域，主要分布在內湖供水區東南側及安康路與新明路附近。

表 24 校正前壓差統計表

壓差(kg/cm <sup>2</sup> )	數量	佔比(%)	誤差(%)	數量	佔比(%)
<0.1	35	29.2	<10%	66	55.0
0.1 ~ 0.2	54	45.0	10% ~ 20%	34	28.3
0.2 ~0.3	22	18.3	>20%	20	16.7
0.3 ~0.4	6	5.0			
>0.4	3	2.5			

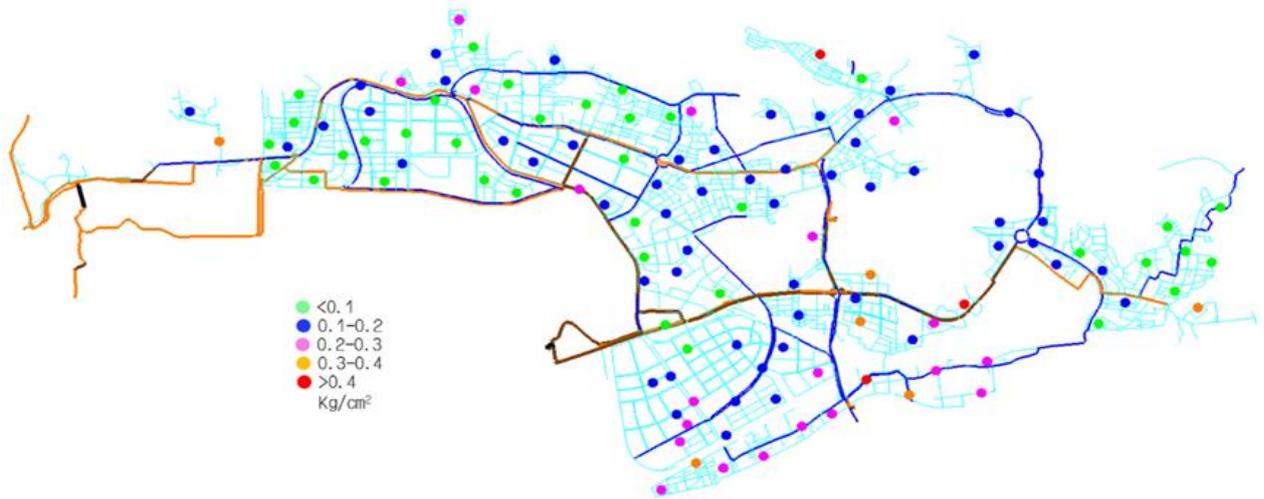


圖 98 校正前壓差分佈點位圖

Bentley WaterGEMS 自動校正原理是透過將管線依照不同類型進行分組，例如管材、年份（C 值代替），並輸入特定節點的實際量測值，軟體分析後會給予各分組一個 C 值的乘積係數，並將同一分組的管線 C 值同時乘上該分組的係數，得到新的 C 值，因此本案選定以管徑加上管線 C 值的方式將內湖供水分區之管線進行分組，以利軟體能有效地執行管網校正工作。經將內湖供水分區共約 17,537 根管線依相同管徑與 C 值進行分類，共計分成 300 組（表 25）。

表 25 內湖分區模型校正管線分組統計表

管徑	對應管線 C 值										組數
40	100	110	150								3
50	100	110	150								3
75	82.5	83.75	86.25	95	98.5	100	100.25	102	103.75	105.5	23
	107.25	109	110	110.75	114.25	116	117.75	119.5	121.25	123	
	124.75	128.25	150								
100	82.5	85	86.25	88.75	90	91.25	92.5	93.75	95	96.75	31
	98.5	100	100.25	102	103.75	105.5	107.25	109	110	110.75	
	112.5	114.25	116	117.75	119.5	121.25	123	124.75	126.5	128.25	
	150										
110	114.25									1	
150	82.5	83.75	85	86.25	87.5	88.75	90	91.25	92.5	93.75	33
	95	96.75	98.5	100	100.25	102	103.75	105.5	107.25	109	
	110	110.75	112.5	114.25	116	117.75	119.5	121.25	123	124.75	
	126.5	128.25	150								
200	82.5	83.75	85	86.25	87.5	88.75	90	91.25	92.5	93.75	33
	95	96.75	98.5	100	100.25	102	103.75	105.5	107.25	109	
	110	110.75	112.5	114.25	116	117.75	119.5	121.25	123	124.75	
	126.5	128.25	150								
250	82.5	85	86.25	90	91.25	92.5	93.75	95	96.75	98.5	25
	100	100.25	102	103.75	109	110.75	112.5	114.25	116	117.75	
	119.5	121.25	123	124.75	126.5						
300	82.5	85	86.25	87.5	88.75	90	91.25	92.5	93.75	95	29
	96.75	100	102	103.75	105.5	107.25	109	110	110.75	112.5	
	114.25	116	117.75	119.5	121.25	123	124.75	126.5	128.25		
350	82.5	86.25	92.5	100	114.25						5
400	82.5	83.75	85	86.25	88.75	90	91.25	92.5	93.75	95	27
	96.75	100	100.25	102	103.75	107.25	109	110	110.75	112.5	
	114.25	116	119.5	121.25	123	124.75	126.5				
500	82.5	83.75	85	86.25	88.75	90	92.5	95	96.75	98.5	23
	100	103.75	105.5	107.25	109	110.75	112.5	114.25	116	121.25	
	124.75	126.5	128.25								
600	82.5	85	86.25	88.75	90	91.25	93.75	98.5	100	107.25	18
	110.75	112.5	114.25	116	119.5	121.25	123	124.75			
700	82.5	100	114.25	121.25	123	126.5					6
750	100										1
800	82.5	85	86.25	88.75	90	91.25	92.5	100	102	105.5	18
	107.25	109	110.75	112.5	114.25	116	124.75	126.5			
900	82.5	90	91.25	98.5	100	112.5	114.25	126.5			8

管徑	對應管線 C 值										組數
	82.5	85	87.5	90	91.25	93.75	102	116	124.75		
1000	82.5	85	87.5	90	91.25	93.75	102	116	124.75		9
1200	86.25	86.3	100								3
1350	124.75										1
總計											300

經由 Bentley WaterGEMS 軟體讀入內湖供水分區 INP 檔後，使用模型校正功能，建立校正方案，選擇目標節點並輸入實測水壓值（圖 99），並依序給定 120 點實際量測數值。

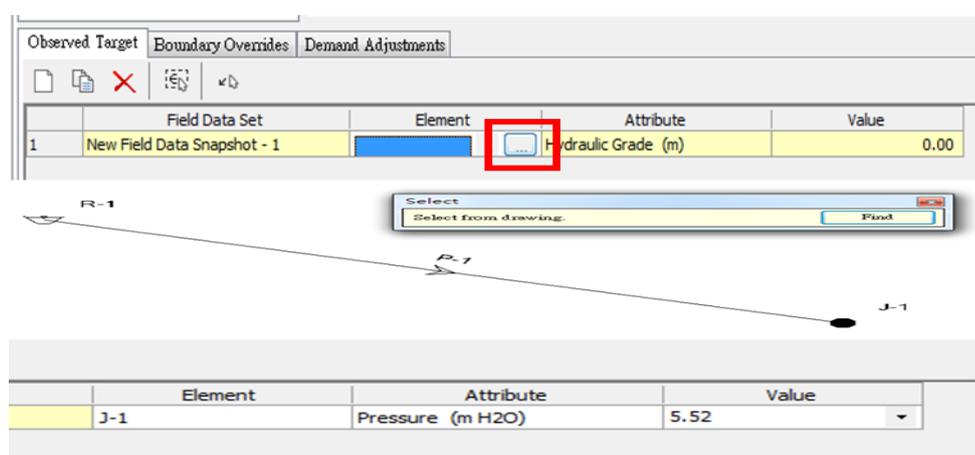


圖 99 輸入量測水壓值示意圖

建立欲修正 C 值之管線清單（圖 100），單一清單可包含多條管線，另可依照使用需求設定各組別，本研究案依表 25 內湖分區模型校正管線分組表內容，依相同口徑及 C 值共 300 組分別進行設定作業。

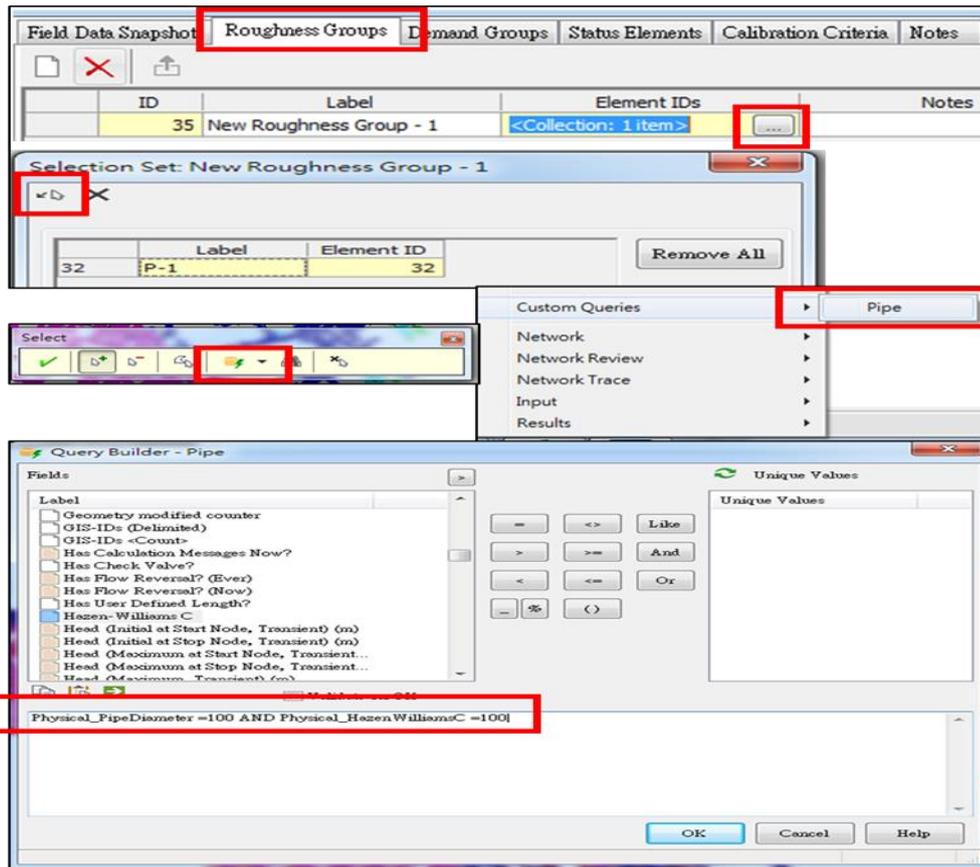


圖 100 建立 C 值群組校正示意圖

使用者亦可自行於各群組設定修正係數之最小值、最大值及變化量，若不設定則 Bentley WaterGEMS 軟體將利用基因演算法修正管線之粗糙係數，經執行校正分析後，由下表 26 校正後之壓差統計結果可發現，在經過模型校正後，有 79 點壓差在  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  以下，28 點在  $0.1\sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$  之間，6 點在  $0.2\sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$  之間，6 點在  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  以上。而誤差在 20% 內的點位共有 104 點，佔 120 點測量點之 86.7%。雖然誤差在 20% 以內的點位沒有明顯的增加，仍滿足 80% 以上準確度，但由圖 101 可看出壓差在  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  以下的點位大幅上升。圖 102 為校正後壓差分布點位圖。

表 26 校正後壓差統計表

壓差(kg/cm <sup>2</sup> )	數量	佔比(%)	誤差(%)	數量	佔比(%)
<0.1	79	65.8	<10%	92	76.7
0.1 ~ 0.2	28	23.3	10% ~ 20%	12	10.0
0.2 ~ 0.3	6	5.0	>20%	16	13.3
0.3 ~ 0.4	3	2.5			
>0.4	3	2.5			

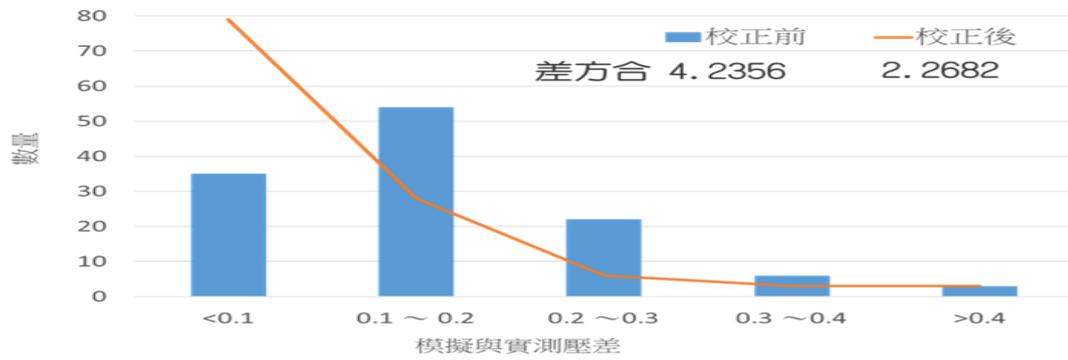


圖 101 校正前後模擬與實測壓差變化圖

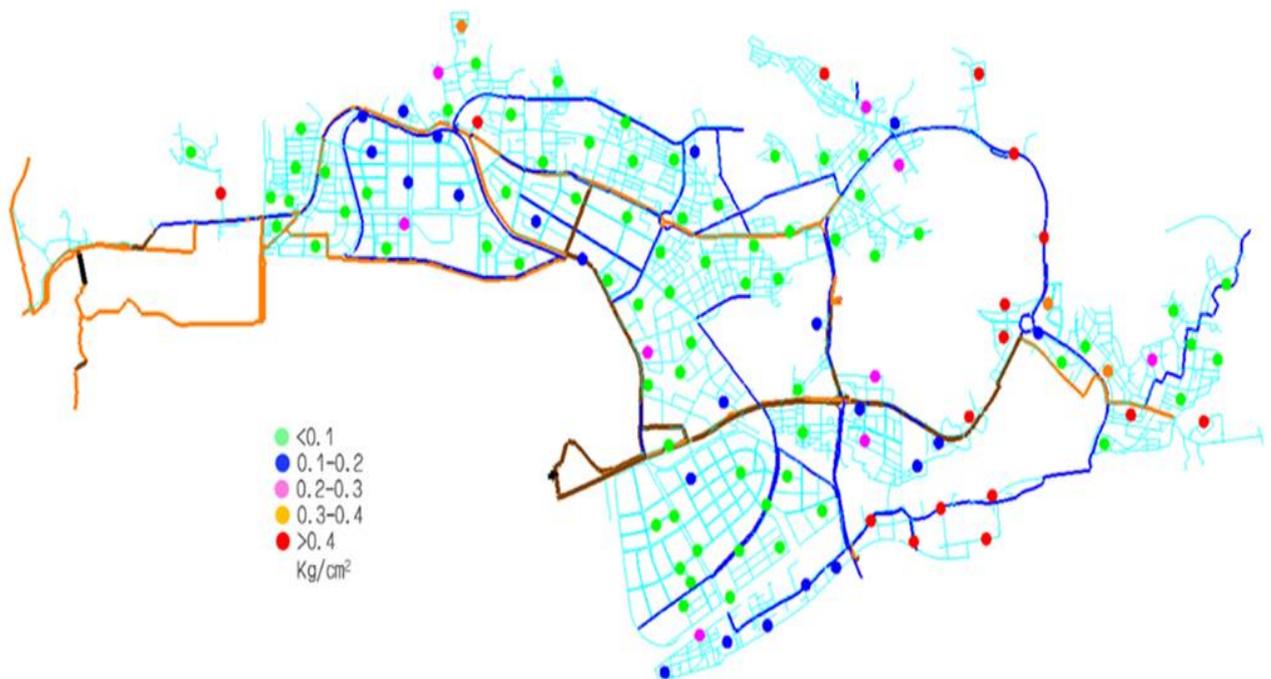


圖 102 校正後壓差分布點位圖

### 4.3 後續各供水分區水理模型建置規劃

北水處供水人口約389人，供水範圍遼闊、供水系統複雜，早期僅由操作人員依經驗操作淨水場及加壓站運轉，供水轄區可能有水壓不均之情況，且供水轄區內有狀況發生時，無法立即獲知與處理，但隨電子資訊工業發展及參考世界先國家自來水供水管理案例，北水處成立臺灣第一座自來水監控系統之監控中心，提供管理人員即時資訊，以便立即判讀各場站及監視點之運轉狀況、水壓及水量狀況。惟受限於目前周遭環境、市民觀感及道路施工等因素，北水處所建置之水壓、流量監視點數量有限，並無法完整呈現轄區內水壓及流量等狀況。有鑑於此，尚可建立各供水分區之水理模型，並經校正與現況接近，再結合目前監控系統之水壓、水量監測數據，即可分析模擬在任一時段淨水場或加壓站出水壓及流量情形下，該供水區管網內任一節點水壓與任一管段流量流速的變化。為深入且細緻化掌握各供水分區內管網各管段之水壓及管段流量狀況，需經一系列程序方得以完成，各階段內容詳述如下。

#### 1. Web GIS系統自動產製水理模型

北水處考量水源調配、供水加壓系統、供水管網、需水量、分處轄區、行政區域、地形地勢等各層因素下，將供水轄區劃分為安康分區、新店分區、中永和分區、大同分區、民生分區、長興分區、公館分區、三重分區、內湖分區、南港分區、士林北投分區等11個供水分區。因此，為瞭解各供水分區內任一管段之水壓、水量，首先需確認各供水分區之邊界，然後在Web GIS系統內框選欲產製各供水分區之範圍，再透過北水處所研發之系統進行水理模型建立與節點需水量分配，並自動產製各供水分區之水理模型INP檔。

## 2.各供水分區水理模型簡化修正

透過Web GIS系統自動化產製各供水分區水理模型INP檔，接續利用水理分析軟體進行模型修正、簡化與水量分配修正等相關作業。有關模型修正、簡化部分，係刪除各供水分區內之小型加壓站供水範圍，並將各小型加壓站視為一個節點，且依據水理分析模擬之時間點自實際監測數據取得相匹配數據，再配置各小型加壓站之需水量。另水量分配修正部分，由於現階段所產製水理模型內之需水量係採抄表員定期抄表度數之日均值，非單一時段之用水量，且未納入管線漏水、施工挖損流失水量、消防用水、突發事件水量等無收益水量，因此造成系統所擷取之需水量與實際加壓站出水量有差異。有鑑於此，在水理分析時，以加壓站分析時段之出水量與日均量之比值修正水理模型內之需水量，惟該比值內之出水量與日均量需扣除各小型加壓站之水量及台水支援量。最後，建立水理模型內水源及加壓站之基礎資訊，並進行節點水量修正後，再將原扣除各小型加壓站之水量及台水支援量套入所在位置之節點，如此即完成建置水理模型作業。

## 3.各供水分區水理模型校正

由於既有之水壓、流量監視點數量有限，校正之精確度將受限，為求模型校正效能及廣度最大化，應於各供水分區內均勻擇定水壓記錄器量測位置，以獲取更多現場水壓資訊，可有效校正及提升水理模型正確性。以本研究內湖供水分區即安排120個點位進行現場消防栓水壓量測作業，共分10批次，每次安裝12個數位水壓計，量測期間設定為2天，每1分鐘記錄1筆數據，而其餘供水分區可從該供水分區之配水管、輸水管長度與內湖供水分區之配水管、輸水管長度作比較，再依比例換算現場需安裝水壓記錄器之數量；另同期間安裝之水壓記錄器數量可再增加至40個一批次，以減少因量測基準點不同而影響水理分析之正確性。監測點之監測數據及水壓記

錄器皆記錄全天各時段之數值，故可分別在不同日之尖離峰時段進行分析以驗證水理模型之可靠度。

#### 4. 監控SCADA數據與水理模型資料介接

經Web GIS系統自動建立各供水分區之水理模型，再透過人工修正及校正水理模型以盡可能符合管網之現況，惟用戶用水量並非固定不變，故前揭所建立各供水分區之水理模型尚需藉由監控中心之監測數據修正各水理模型內各時段之出水壓及需水量，以呈現各供水分區不同時段任一節點之水壓與任一管段之流量。其修正方式為固定時段（如每2小時），系統自動從監控中心擷取各供水分區水源之出水壓、出水量及供水分區內之小型加壓站出水量及台水支援量，再重新修正節點水量及置換小型壓站及支援點節之水量後，重新進行水理分析，以供監控中心值班人員供水調配參考及相關現況判斷。

#### 4.4 台水公司水理模型建置規劃

早期資訊不發達年代，自來水事業單位採用傳統方式繪製竣工圖圖紙以充分掌握瞭解埋設地下之管線及相關供水設備（閘、栓及加壓站等）之空間資訊，惟圖紙保存不易且無法資源共享，隨著科技進步，因而將圖紙掃描數位化、圖解管線設備數值圖至導入使用空間資料庫，進而發展至地理資訊系統，以方便輔助自來水管線工程管理及運用。北水處由於早期由圖紙轉為數值圖檔存在著許多與現況落差原因，諸如原圖遺失、套繪錯誤、未通盤考量建置空間資料庫、竣工圖有落差、地形地貌改變等因素，因而造成由系統所匯出之水理模型 INP 檔無法於水理分析軟體進行執行。本研究強化空間資料屬性及架構，並於 Web GIS 系統提供能從空間資料庫匯出 EPANET 軟體所能支援之檔案格式（INP 檔）功能，可大幅減輕以往使用管網水理分析軟體重新建置模型所耗費大量人力及時間。

為使建置水理模型方式更為周全完備，本次前往台灣自來水公司（以下簡稱為台水公司）交流參訪（如圖 103），台水公司目前委託美商傑明工程顧問股份有限公司及日商東京水道服務股份有限公司辦理「基隆、台中及高雄供水系統降低無收益水量(NRW)計畫總顧問技術服務」，該計畫在分析評估階段需建置現況管網水力分析模式（如圖 104），其水理模型模式建置流程為資料取得、資料檢核、建置模式、模式校驗、模式完成等步驟（如圖 105），為利順利執行水理分析，針對水理模型所需資料條列清單及進行相關資料收集（如表 27），由於台水公司目前正推動小區計量 DMA，該資訊亦作為建置水理模型之一環以符合現況。



圖103 北水處至台水公司交流參訪

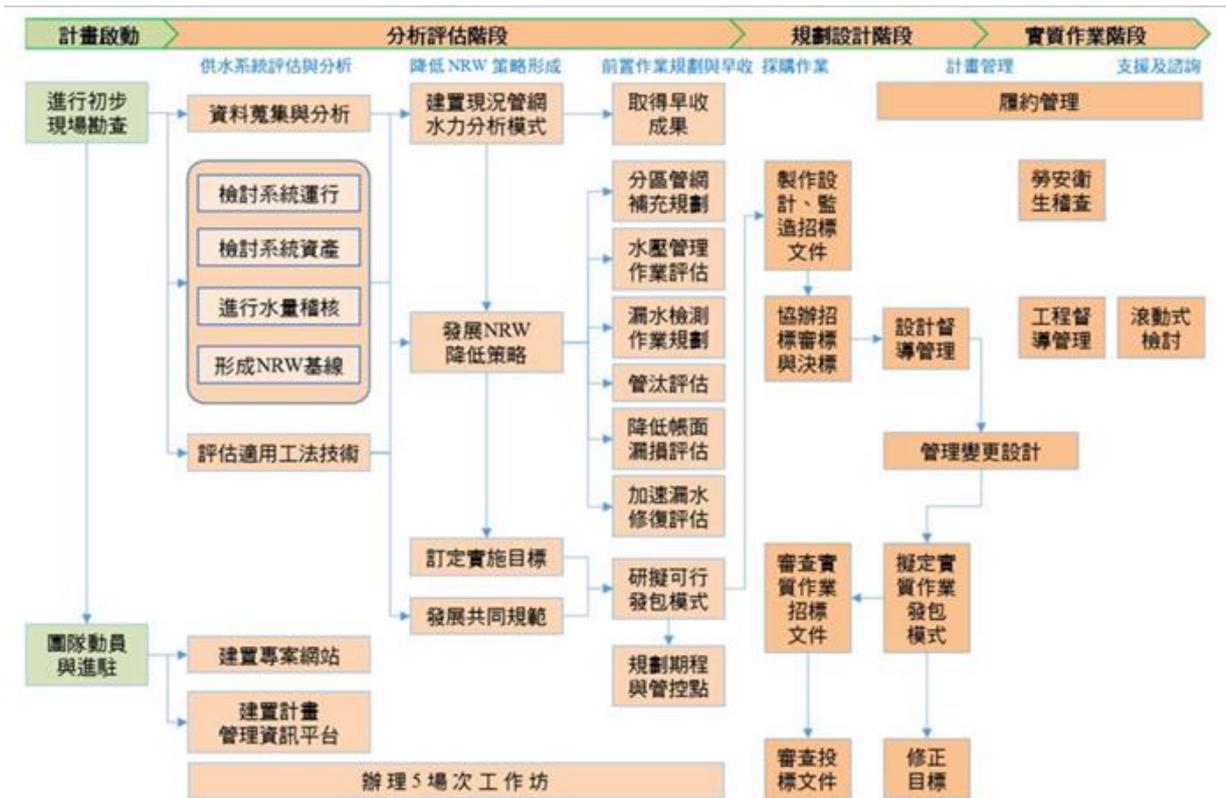


圖104 台水公司委託計畫總顧問技術服務整體工作流程<sup>24</sup>

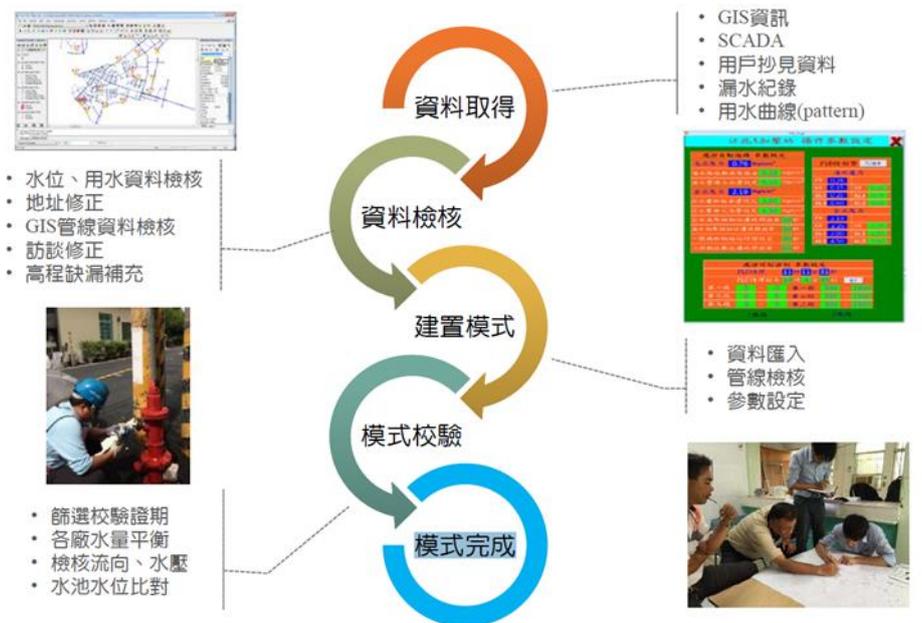


圖105 模式建置流程<sup>24</sup>

表27 水理模型所需資料條列清單<sup>24</sup>

資料項目		說明	
1 2 3 4	配水模式、支/受援情形	<ul style="list-style-type: none"> <li>各淨水場之間調配水模式</li> <li>供水系統圖、各所供水範圍、各所支援/受支援情形</li> </ul>	
	既有DMA/加壓區	<ul style="list-style-type: none"> <li>已建置/設計之分區範圍</li> <li>加壓供水區域</li> </ul>	
	加壓站、淨水場設計資訊	<ul style="list-style-type: none"> <li>加壓站(抽水機數量、揚程、出水量、馬力、口徑)</li> <li>設計出水量、水池尺寸</li> </ul>	
	1/1000管線及1/500用戶明細	<ul style="list-style-type: none"> <li>管線、1/500用戶外線、跨管</li> <li>1/500用戶水表(總表、分表、獨立表)、閘栓(含X、Y、Z)、總水量計、加壓站、配水池、淨水場、消防栓</li> <li>抄表工作區</li> <li>縣市界、鄉村鎮界、重要地標、建物圖層、道路街廓、線條(含路名)、河川溪流、鐵路、門牌、高程</li> </ul>	
5 6	SCADA資料	水壓紀錄	水壓點紀錄(SQL)、人工手抄水壓紀錄(excel)
		自動讀表系統	水量計紀錄(SQL)、各場所逐日配水紀錄(excel)
7	用戶抄見資料		用戶用水資料(SQL) (營運單位、場所代碼、場所名稱、工作檔次、工作區號、用戶水號、用戶名稱、用戶地址、口徑、水表號碼、總分表、本期指針、上期指針、本期水量、上期水量、前2期水量、前3期水量、去年水量、去年指針、用戶動態、水表情況、期別、用水總別)
8	漏水紀錄	修漏管理系統	漏水點紀錄

另為彌補早期竣工圖圖紙遺失致管線資訊不足，該計畫團隊藉由台水公司之修漏系統於修漏過程中所瞭解該處之水壓、管種、口徑、位置等資訊回饋至建模系統。此外，由於用戶用水設備資訊因圖紙遺失而無法建置於GIS系統，此時透過用戶地址於GIS系統定位以利後續分配水量。計畫團隊對於該供水系統內前50大用水戶直接建立節點，其餘用戶點分配至最近節點，另裝設48只用戶水表記錄器，連續記錄一個月以取得用水pattern（如圖106），而在模式中建立不同用水pattern，並對應到不同需水量，而同一節點之需水量共有10個欄位可供設定，故同一節點有分配到不同類型的用戶時，可對應到不同用水pattern。

類別	水表口徑	數量
1 普通	100	4
	150	3
	200	5
	250	2
2 商業	75	2
	150	3
3 工業	50	2
	75	5
	100	4
4 機關	100	5
	150	2
	200	2
	250	1
51 軍機	75	1
	100	1
	150	2
6 市政	50	1
7 船舶	100	1
8 優惠	75	1
	100	1

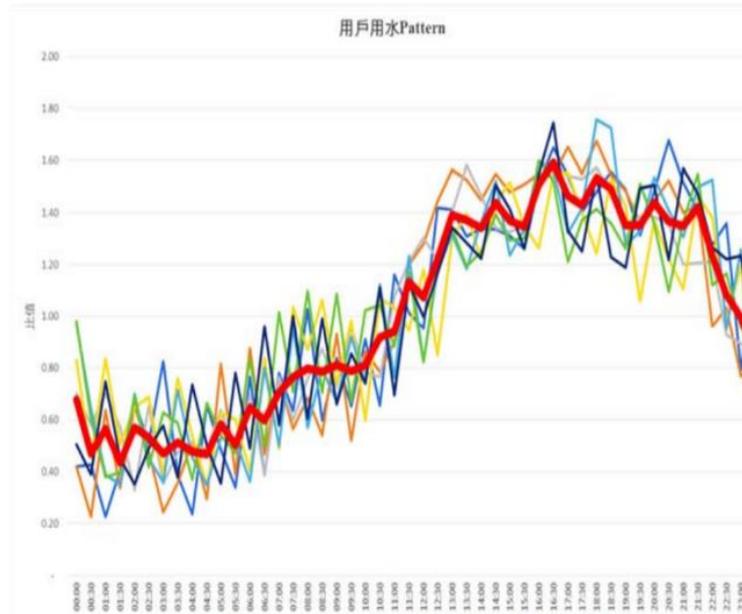


圖106 不同用戶類別之用水pattern<sup>24</sup>

在管線資訊異常部分，係以H<sub>2</sub>OMAP Water進行GIS檢核（節點相近或重複、非跨管之十字管未連接、T字管相近未連接、異常口徑銜接等，如圖107及108）。另以人工方式檢核管線是否重疊、資料表比對方式檢核資料屬性是否正確、以訪談方式瞭解管線銜接是否異常。

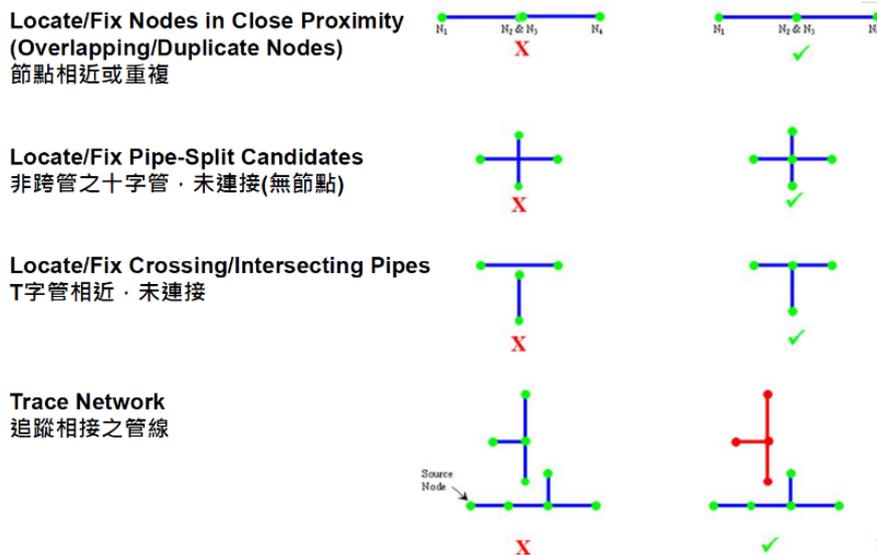
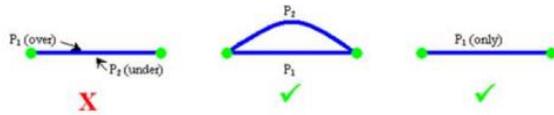


圖107 H<sub>2</sub>OMAP Water檢核GIS<sup>24</sup>

**Locate Parallel Pipes**  
定位平行管



**Identify Diameter Discrepancy**  
檢查異常口徑銜接

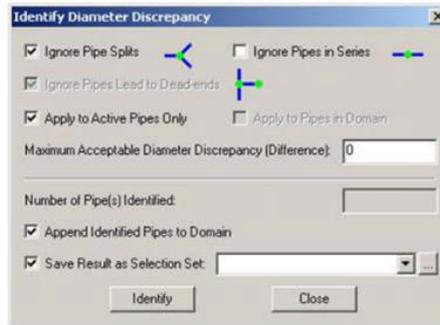


圖108 H<sub>2</sub>OMAP Water檢核GIS<sup>24</sup>

當GIS系統具備水理模型相關資訊（如管材、管齡、管徑等）後，透過H<sub>2</sub>OMAP Water之「GIS Exchange」工具將GIS資料匯入以產製水理模型（如圖109），後續台水公司計畫團隊依訪談操作人員供水系統之操作模式，再於水理模型內設定加壓站、配水池運作方式。

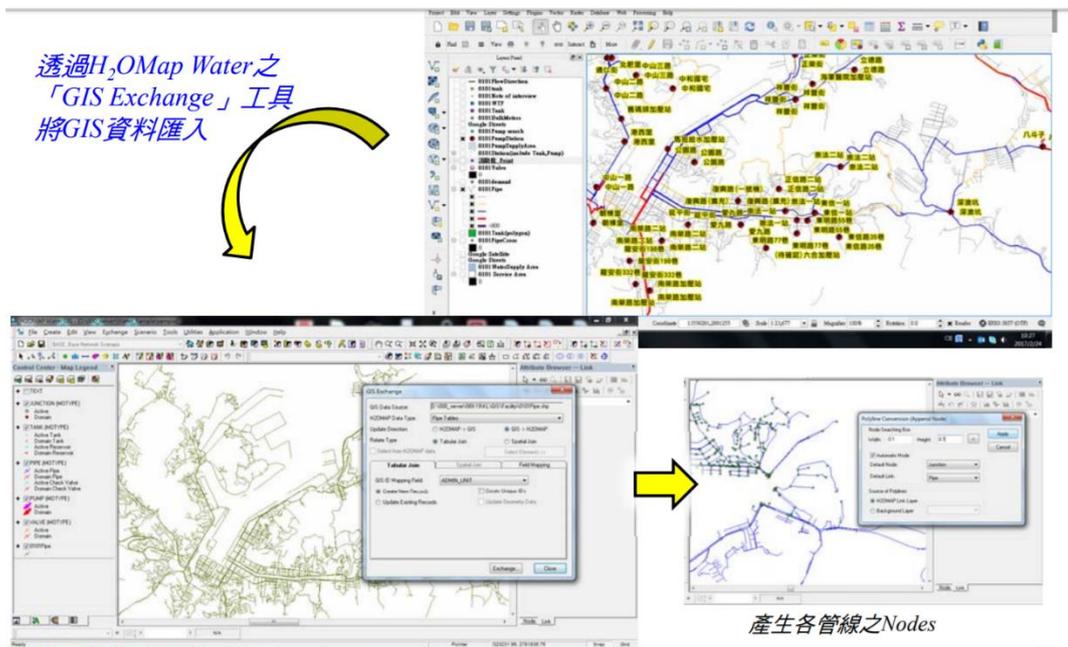


圖109 H<sub>2</sub>OMAP Water將GIS資料匯入以產製水理模型<sup>24</sup>

本次與台水公司交流參訪瞭解台水公司為降低NRW如火如荼推動相關作業，其中一部分係透過分析軟體將GIS資訊轉換成水理模型檔案，以利後續分析之參考依據，其建置流程與北水處產製過程大致相同，但有可參考部分以供北水處精進建置流程，約可分為3點說明，茲述如下：

1. 用戶用水特性隨用戶類型而有所不同，在未來進行多時段水理分析時，依用戶類別而給予用戶相對應之用水pattern，使分析結果更貼近現況。
2. 台水公司將用水量前50大之用戶位置直接在水理模型建立節點，北水處目前已建置完成1,800只大用水戶智慧水表，可連續記錄用戶用水情形，在後續產製水理模型時，可將前揭之大用水戶位置直接建立節點，增加水理模型之精確度。
3. 在供水系統中，為使供水穩定而對特定位置閥類進行控制，調控結果將使控制閥前後產生壓差，該壓差需由實際量測獲得，且若未於水理模型反應現況將降低水理分析結果之可靠性。因此，台水公司委託之計畫團隊由SCADA取得多噴孔閥之開度值，並依此數據求得閥在不同開度的K值，再將該數據套用於系統內，相關監控系統監測及調控之閥類在水理模型中則依現場開度設定K值。北水處目前水理模型並未考量閥開度，即設定為全開狀態，惟閥開度所產生之壓損可能會影響分析結果，故後續可針對閥開度所造成之壓差進行相關研究，以利後續建置水理模型內對於閥開度未全開情形設定相關參數，以提升水理分析結果之可靠度。

綜上，本次北水處與台水公司交流參訪，其實都有著共同之願景，即是未來將自來水系統朝向智慧化管理，而管理背後需有健全且正確之設備資訊，另輔以科學分析及人工智慧學習，以降低人為錯誤及提升管理效能。

## 第五章 相關面向加值應用

依據前章與現地水壓完成校正相符的內湖示範區水理模型成果，進行不同情境分析應用，期能透過本次研究，對於內湖示範區內管網水理行為有進一步的瞭解及掌握，另外對北水處所規劃增設三重第二加壓站亦一併進行供水模式的模擬。

本案將針對內湖示範區進行管網承載能力及可能供水瓶頸(以現有供水統計資料之最大時、最大日、平均日、最小時等情境進行分析)、五年及二十年後的管網承載能力、送水幹管停止供水後之影響範圍、水齡分析及汙染擴散預測等相關面向加值應用。

### 5.1 評估管網承載能力及可能供水瓶頸

管網承載能力係考量如何在品質(水壓、水質)穩定下，滿足供水區域內用戶的需求。不同管徑的輸配水管所能承載的輸送水量也不同，而管中流量等於流速與管段截面積的乘積，因此輸配水管的流速為判斷管線輸送水狀況是否良好的重要依據。

若管網流速太低，會使水中雜質沉降形成積垢及生物膜增生，進而影響水質。依據荷蘭 KWR 水循環研究機構的研究指出，管段流速必需至少  $0.2\sim 0.25\text{ m/s}$ ，方具有「自潔淨」能力。東英格蘭地區的盎格魯水公司(Anghian Water)的供水管網設計手冊中也提到普通配水管之自潔淨最低流速為  $0.3\text{ m/s}$ ；而若是管網流速過快，則會增加管段水頭損失，使供水壓力急速下降，造成供水瓶頸。本項分析即針對內湖供水分區現況最大時、最大日、平均日以及最小時等四種情境，以管線流速  $2\text{ m/s}$  以上做為可能遭遇瓶頸管段，以及流速  $0.3\text{ m/s}$  作為自潔淨需求，並利用管徑與管長分類統計。

本研究分析所參考之各項情境用水量，係以北水處監控中心所提供之

松山內湖線與大同大直線出水流量資料為依據，時段與模型校正相同為 107 年 9 月 25 日至 10 月 21 日。經統計內湖供水分區最大時需水量為 237,462 CMD、最大日為 189,151 CMD、平均日為 181,343 CMD、最小時為 105,106 CMD。另外，台水支援點之水量則比照小型加壓站的設定方式，依據監視點流量計所測得之數據，納入單一節點中，作為代表。其支援水量為最大時 8,362 CMD、最大日 6,206 CMD、平均日 3,756 CMD、最小時 1,895 CMD。

### 5.1.1 最大時需水量分析

內湖供水分區最大時需水量約發生在晚間 10 點到 11 點之間，於最大時需水量分析條件下，內湖全區管線僅有兩處流速大於 2m/s，如圖 110 所示。

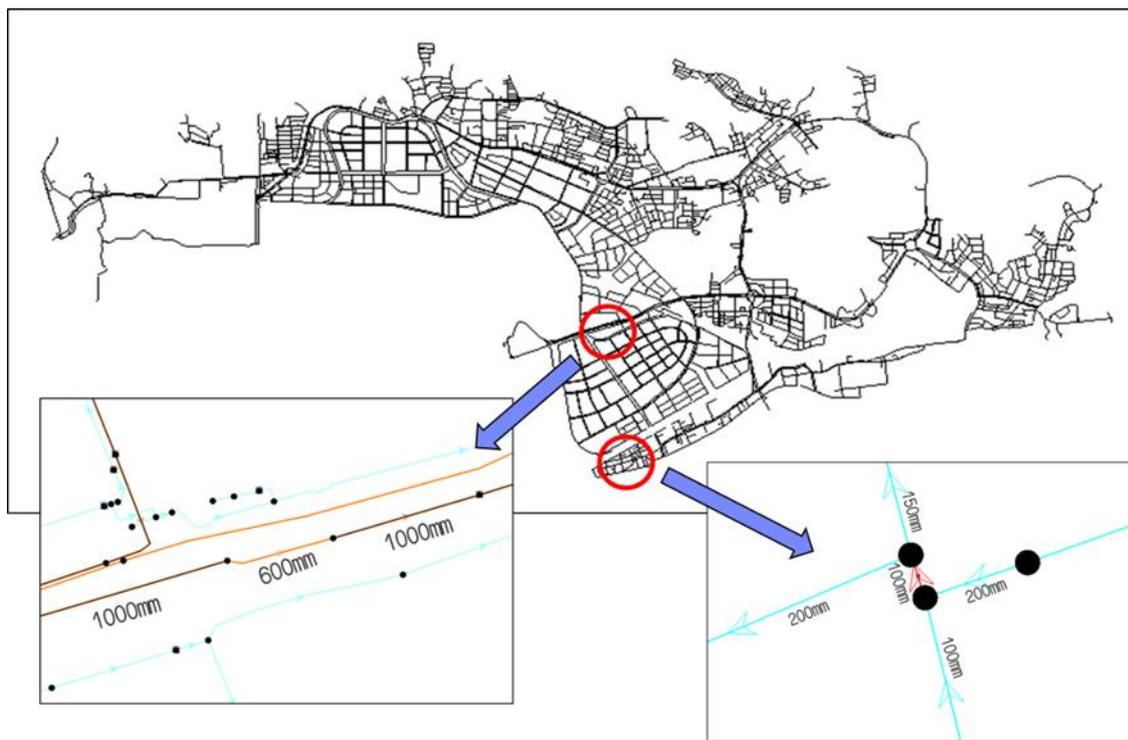


圖 110 最大時流量流速大於 2m/s 位置示意圖

其中一處位於民權東路六段 26 號附近，為 1,000mm 輸水管中間銜接了一段約 26m 之 600mm 管線，造成流速瞬間變大；而另一處則位於新明路與新明路 451 巷交叉口，由於路口十字交錯部分僅以長度約 3m 之 100mm 管

線銜接左右 200mm 管線，且該 200mm 管線是潭美街一帶主要供水管線，流量較大，導致銜接處 100mm 管線流速偏大。

另一方面，經最大時需水量分析，統計各管徑流速在 0.3m/s 以下之管線長度如表 28，結果顯示內湖供水分區有超過 76% 之管線流速是低於 0.3 m/s，其中管徑在 150 mm 以下的管線更是幾乎 90% 以上流速是低於 0.3 m/s 的。由圖 111 可觀察流速較低的管線主要分布在配水管，容易使水中雜質沉降、產生積垢，一旦管線流速、流向發生改變，可能使水質遭受污染。其中又以流速低於 0.1 m/s 之管線最容易成為水質敏感區，約佔總管線長度之 42%，詳圖 112。

表28 最大時流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速0.3以下長度	比例	流速2以上長度	比例
40	935	913	97.65	0	0.00
50	2,536	2,241	88.37	0	0.00
75	6,598	6,066	91.94	0	0.00
100	15,493	14,242	91.93	3	0.02
150	58,967	53,384	90.53	0	0.00
200	110,144	94,535	85.83	0	0.00
250	14,503	10,497	72.38	0	0.00
300	33,898	26,439	78.00	0	0.00
350	19	9	47.37	0	0.00
400	21,584	17,186	79.62	0	0.00
500	15,969	5,657	35.42	0	0.00
600	9,047	2,374	26.24	26	0.29
700	571	181	31.70	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,770	16.18	0	0.00
900	3,545	948	26.74	0	0.00
1,000	5,650	610	10.80	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	0	0.00	0	0.00
總計	<b>311,731</b>	<b>238,048</b>	<b>76.36</b>	<b>29</b>	<b>0.01</b>

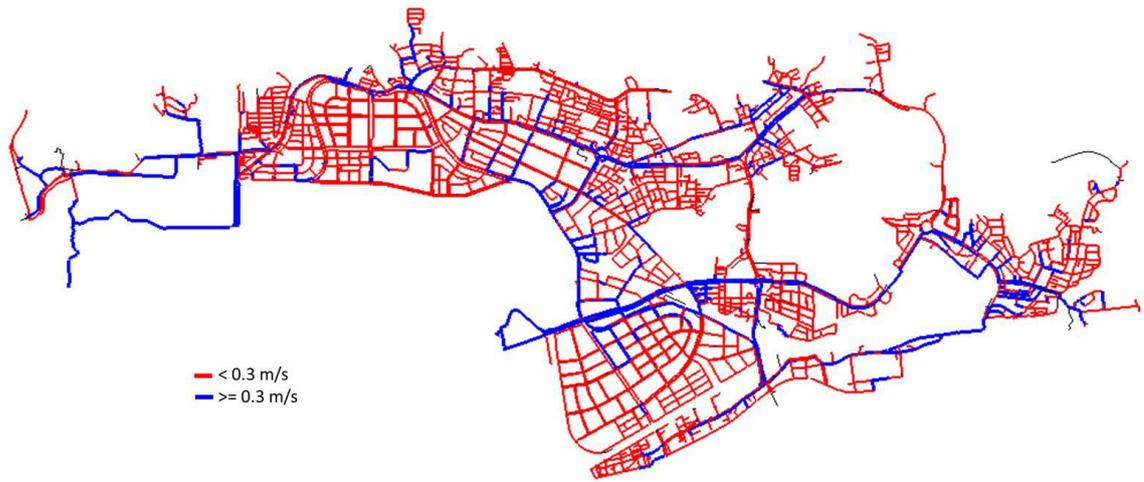


圖111 最大時流量流速小於0.3m/s示意圖

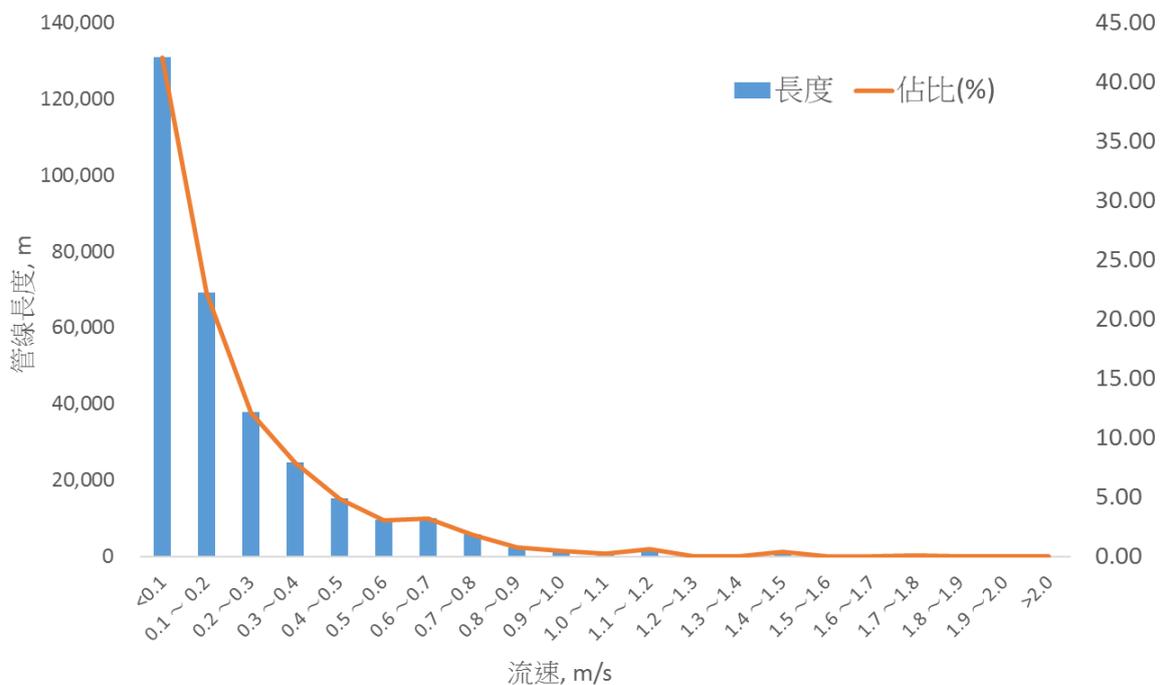


圖112 最大時需水量流速與管線長度分布圖

### 5.1.2 最大日需水量分析

在最大日需水量分析條件下，內湖全區管線僅剩民權東路六段26號附近之600mm管線流速大於2m/s，其流速由最大時流量之2.82 m/s下降至2.26 m/s。而新明路與新明路451巷路口之100mm管線流速則由2.08 m/s下降至

1.66 m/s。

統計各管徑流速在0.3m/s以下之管線長度如表29，結果顯示最大日需水量下低於0.3 m/s以下之管線增加至約82.89%，而管徑在200 mm以下的管線則90%以上流速是低於0.3 m/s的。由圖113可觀察流速較低的管線仍主要分布在配水管，而流速低於0.1 m/s易成為水質敏感區之管線，佔總管線長度之比例由42%上升至49%，詳圖114。

表29 最大日流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速0.3以下長度	比例	流速2以上長度	比例
40	935	915	97.86	0	0.00
50	2,536	2,468	97.32	0	0.00
75	6,598	6,247	94.68	0	0.00
100	15,493	14,852	95.86	0	0.00
150	58,967	55,477	94.08	0	0.00
200	110,144	100,749	91.47	0	0.00
250	14,503	12,018	82.87	0	0.00
300	33,898	28,214	83.23	0	0.00
350	19	9	47.37	0	0.00
400	21,584	18,790	87.06	0	0.00
500	15,969	9,377	58.72	0	0.00
600	9,047	4,465	49.35	26	0.29
700	571	245	42.91	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,779	16.26	0	0.00
900	3,545	962	27.14	0	0.00
1,000	5,650	611	10.81	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	206	100.00	0	0.00
總計	<b>311,731</b>	<b>258,380</b>	<b>82.89</b>	<b>26</b>	<b>0.01</b>

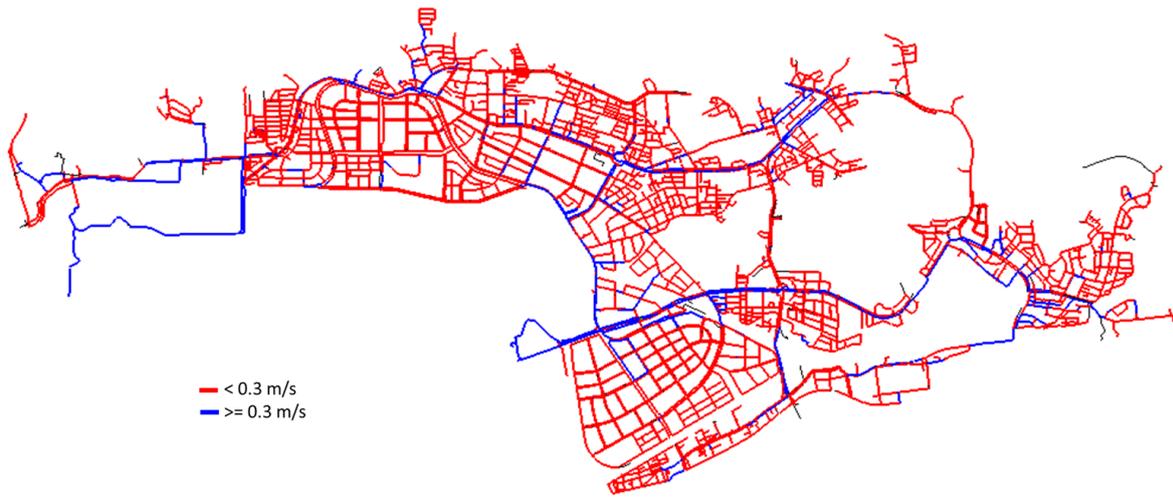


圖113 最大日流量流速小於0.3m/s示意圖

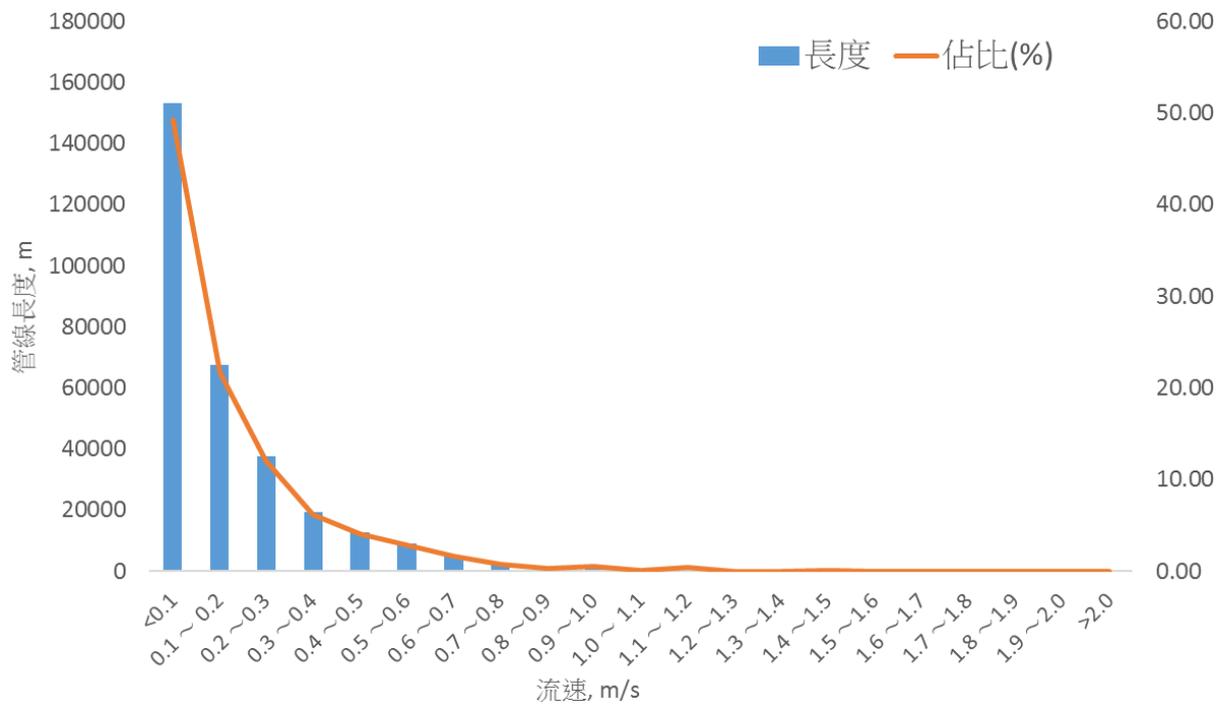


圖114 最大日需水量流速與管線長度分布圖

### 5.1.3 平均日需水量分析

在平均日需水量分析條件下，民權東路六段 26 號附近之 600mm 管線流速仍大於 2m/s，約 2.11 m/s。顯示該管段具有長時間流速大於 2 m/s 之特性，屬於較明顯之瓶頸管段。

另統計各管徑流速在 0.3m/s 以下之管線長度如表 30，結果顯示平均日需水量下低於 0.3 m/s 以下之管線些微增加至約 83.69%，而管徑在 200 mm 以下的管線流速仍維持 90% 以上低於 0.3 m/s。由圖 115 可觀察流速較低的管線仍主要分布在配水管，而流速低於 0.1 m/s 易成為水質敏感區之管線，佔總管線長度之比例則超過了 50%，詳圖 116。

表30 平均日流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速0.3以下長度	比例	流速2以上長度	比例
40	935	915	97.86	0	0.00
50	2,536	2,483	97.91	0	0.00
75	6,598	6,252	94.76	0	0.00
100	15,493	14,910	96.24	0	0.00
150	58,967	56,008	94.98	0	0.00
200	110,144	102,255	92.84	0	0.00
250	14,503	12,368	85.28	0	0.00
300	33,898	28,236	83.30	0	0.00
350	19	9	47.37	0	0.00
400	21,584	18,788	87.05	0	0.00
500	15,969	9,404	58.89	0	0.00
600	9,047	4,465	49.35	26	0.29
700	571	246	43.08	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,779	16.26	0	0.00
900	3,545	962	27.14	0	0.00
1,000	5,650	611	10.81	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	206	100.00	0	0.00
總計	311,731	260,893	83.69	26	0.01

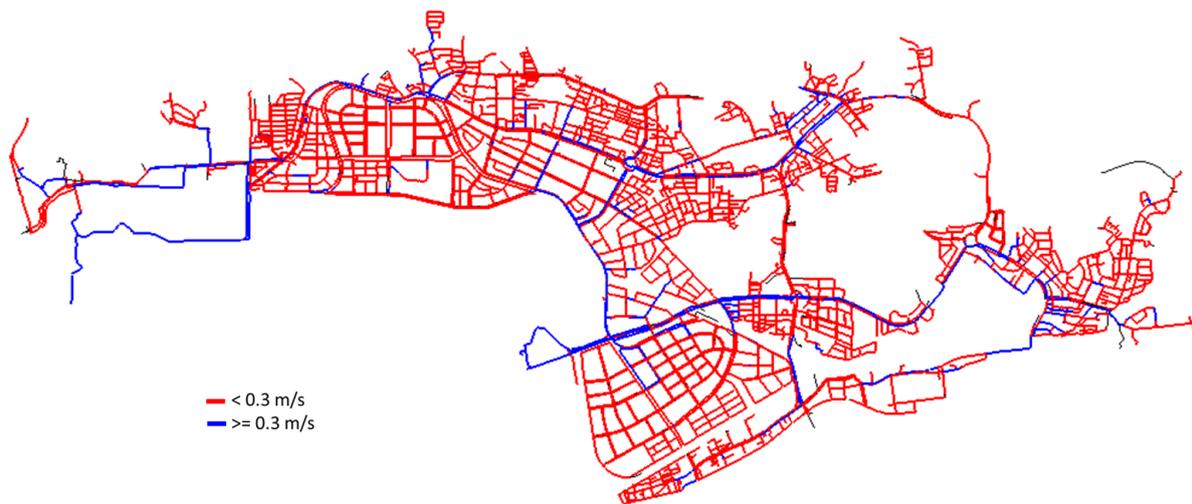


圖115 平均日流量流速小於0.3m/s示意圖

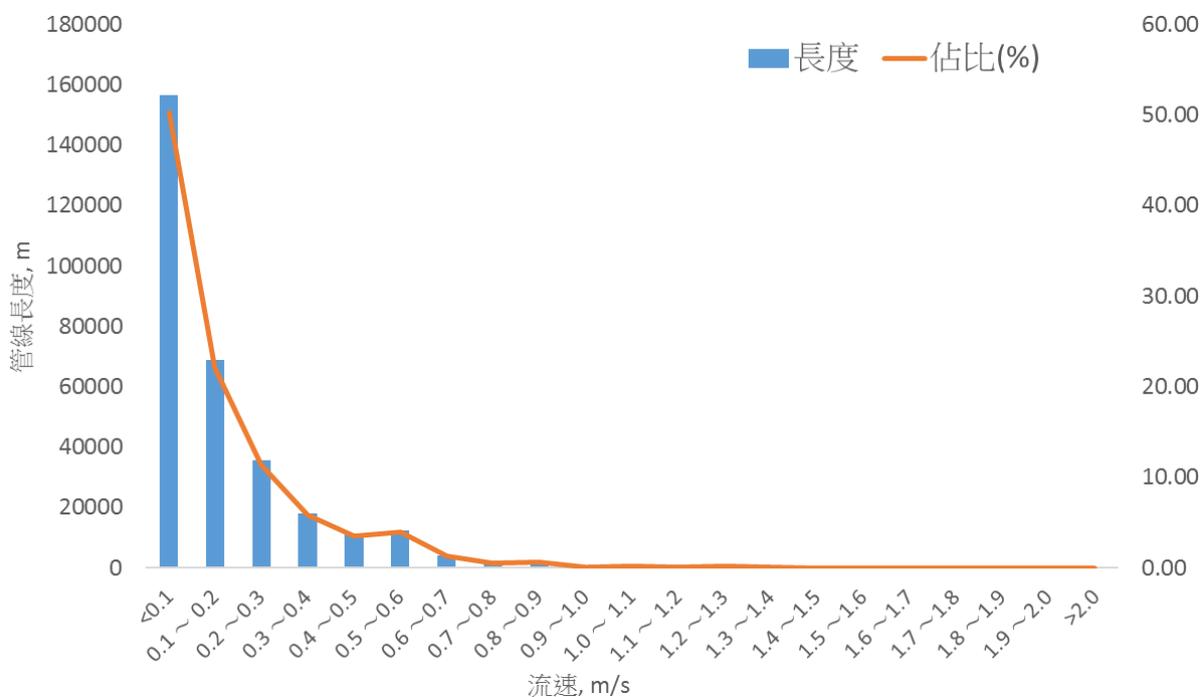


圖116 平均日需水量流速與管線長度分布圖

### 5.1.4 最小時需水量分析

內湖供水分區最小時需水量約發生在凌晨 4 點至 5 點間，於此分析條件下，民權東路六段 26 號附近之 600mm 管線流速下降至 1.47 m/s，全區無流速大於 2 m/s 之管段。

管徑流速在 0.3m/s 以下之管線長度如表 31，結果顯示最小時需水量下

低於 0.3 m/s 以下之管線增加至約 88.16%，而管徑在 400 mm 以下的管線 90% 以上流速低於 0.3 m/s。由圖 117 可觀察到一些主要道路上之管線流速明顯降低至 0.3 m/s 以下，如內湖路、成功路等。而全區將近 60% 的管段是屬於流速低於 0.1 m/s 易成為水質敏感區之管線，詳圖 118。

表31 最小時流量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速 <b>0.3</b> 以下長度	比例	流速 <b>2</b> 以上長度	比例
40	935	935	100.00	0	0.00
50	2,536	2,529	99.72	0	0.00
75	6,598	6,373	96.59	0	0.00
100	15,493	15,226	98.28	0	0.00
150	58,967	58,452	99.13	0	0.00
200	110,144	106,027	96.26	0	0.00
250	14,503	13,531	93.30	0	0.00
300	33,898	31,317	92.39	0	0.00
350	19	19	100.00	0	0.00
400	21,584	19,518	90.43	0	0.00
500	15,969	11,536	72.24	0	0.00
600	9,047	2,577	28.48	0	0.00
700	571	246	43.08	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	2,742	25.06	0	0.00
900	3,545	962	27.14	0	0.00
1,000	5,650	1,631	28.87	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	206	100.00	0	0.00
總計	<b>311,731</b>	<b>274,823</b>	<b>88.16</b>	<b>0</b>	<b>0.00</b>

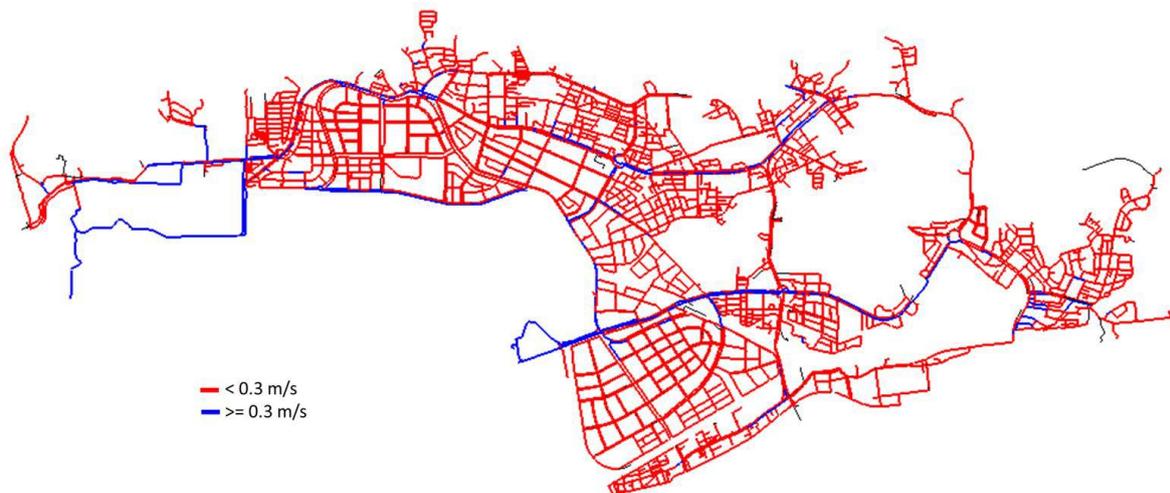


圖117 最小時流量流速小於0.3m/s示意圖

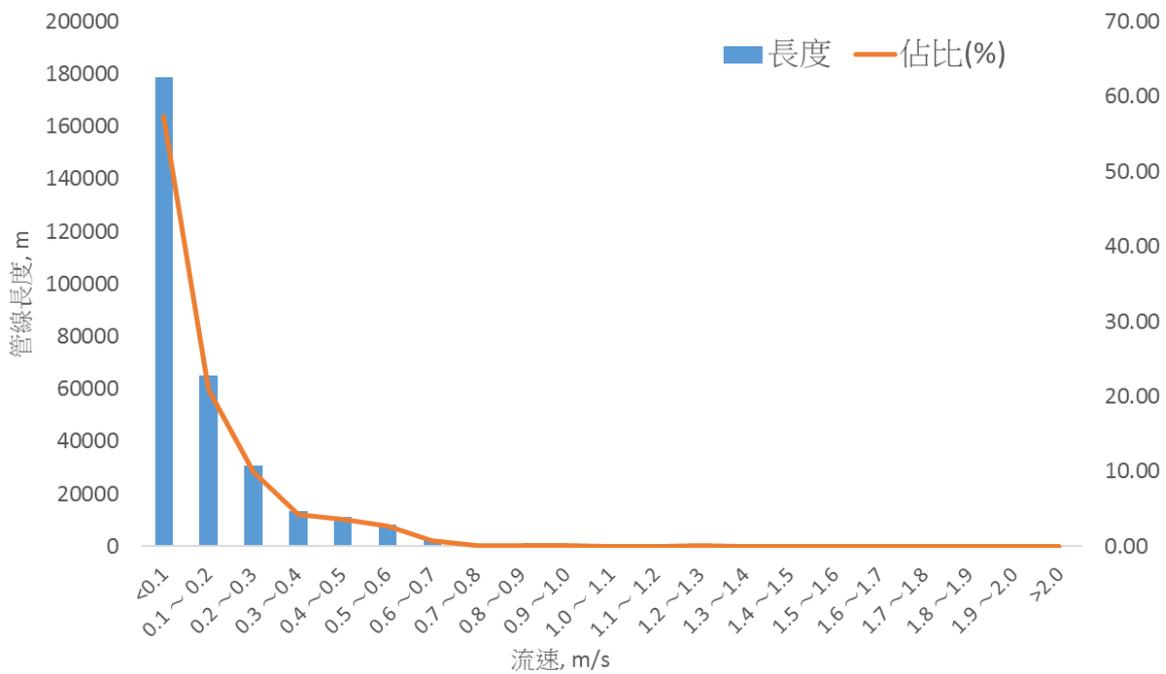


圖118 最小時需水量流速與管線長度分布圖

## 5.2 五年與二十年後之管網乘載能力

### 5.2.1 未來需水量推估

5年與20年後需水量推估係引用本處工程總隊設施整備計畫核定的人口推估、每人每日用水量以及供水轄區需水量推估資料，推估結果內湖供水分區民國110年需水量167,504 CMD、120年需水量159,420 CMD、130年需水量154,468 CMD。經以內差法推算，五年後(民國113年)平均日需水量為165,079 CMD，二十年後(民國128年)為155,458 CMD。而最大時需水量則參考該報告中計算公式：最大日需水量=平均日需水量\*1.2；最大時(尖峰)需水量=最大日需水量\*1.3，計算結果如表32所示。

表 32 內湖分區未來需水量推估表

年份	平均日需水量(CMD)	最大時需水量(CMD)
110	167,504	261,306
113	165,079	257,523
120	159,420	248,695
128	155,458	242,515
130	154,468	240,970

支援台水水量部分，因應台水公司水源短缺及用水需求，北水處持續支援自來水至汐止地區供台水公司調度使用，未來需求可能達每日 10 萬噸，其供應來源包含內湖供水分區及南港供水分區。依照目前支援量之監控數據，107 年度內湖分區支援量最大日約 3.1 萬 CMD，最大日當日尖峰量約 4 萬 CMD；南港分區支援量最大日約 4.8 萬 CMD，最大日當日尖峰量約 5.8 萬 CMD。而以尖峰量計算內湖與南港支援量之比例，內湖約佔 41%，南港佔 59%，故推算未來內湖供水分區由東湖地區支援台水平平均日約 4.1 萬 CMD，最大時需水量則採「臺北自來水設施整備計畫」相同方式推算，最大日需水量=平均日需水量\*1.2；最大時(尖峰)需水量=最大日需水量\*1.3，約 6.4 萬 CMD，如表 33 所示。

由於推估之內湖分區未來用水需求逐年下降，對於未來管網承載能力之模擬以平均日需水量+平均日支援量(4.1萬CMD)以及最大時需水量+最大時支援量(6.4萬CMD)兩種模擬方案。

表 33 支援台水水量推估表

供水分區	現況尖峰量 (CMD)	比例	未來平均日供應量 (CMD)	未來最大時供應量 (CMD)
內湖	4 萬	41%	4.1 萬	6.4 萬
南港	5.8 萬	59%	5.9 萬	9.2 萬

## 5.2.2 五年後管網分析結果

### 1. 平均日需水量+平均日支援量

分析五年後平均日需水量及支援量情境，總水量約 20.6 萬 CMD，管網整體流速與現況 18.1 萬 CMD 比較略微上升，流速小於 0.3 m/s 之管段約減少 5%，流速小於 0.1 m/s 之管段約減少 4%，見表 34 及圖 119；而流速大於 2 m/s 之管段同樣為民權東路六段 26 號附近之 600 mm 管線，約 2.68 m/s。

除了探討流速變化外，由於支援點取水量遠大於周遭節點之需水量，

在以現況平均日供水壓力，松山內湖線 2.38 kg/cm<sup>2</sup>、大同大直線 2.37 kg/cm<sup>2</sup> 的條件下，是否會對支援點周遭節點的供水壓力造成影響，亦為分析重點。由圖 120 可發現，在平均日需水量+支援量時，東湖地區供水壓力普遍低於 0.5 kg/cm<sup>2</sup>。而局部地勢較高地區，如成功路四段、康寧路三段 99 巷、東湖路 113 巷等，有呈現負壓的節點出現。

表 34 五年後平均日需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速 0.3 以下長度	比例	流速 2 以上長度	比例
40	935	903	96.58	0	0.00
50	2,536	2,466	97.24	0	0.00
75	6,598	6,297	95.44	0	0.00
100	15,493	14,926	96.34	0	0.00
150	58,967	56,087	95.12	0	0.00
200	110,144	98,228	89.18	0	0.00
250	14,503	10,659	73.50	0	0.00
300	33,898	27,164	80.13	0	0.00
350	19	19	100.00	0	0.00
400	21,584	15,950	73.90	0	0.00
500	15,969	5,688	35.62	0	0.00
600	9,047	2,596	28.69	26	0.29
700	571	181	31.70	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,504	13.75	0	0.00
900	3,545	962	27.14	0	0.00
1,000	5,650	611	10.81	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	206	100.00	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>245,443</b>	<b>78.74</b>	<b>26</b>	<b>0.01</b>

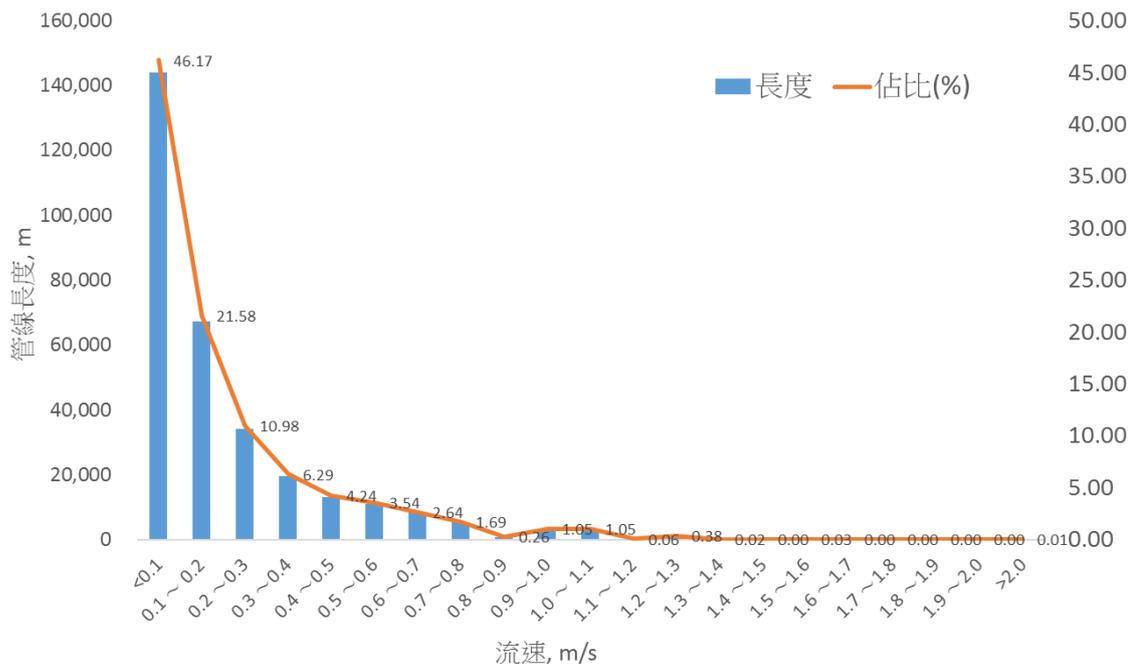


圖119 五年後平均日需水量流速與管線長度分布圖



圖120 五年後平均日需水量壓力分布圖

## 2. 最大時需水量+最大時支援量

分析五年後最大時需水量及支援量情境，總水量約 32.1 萬 CMD，管網整體流速小於 0.3 m/s 之長度下降到 67%，流速小於 0.1 m/s 之管段約佔 35%，

見表 35 及圖 121；而由於支援量主要是由松山內湖線供應，民權東路六段 26 號附近之 600 mm 管線流速大幅上升至約 4.2 m/s，松山內湖線出水端之 1,200 mm 管線流速亦上升至 2.47m/s，詳圖 122。

而由圖 123 壓力分布可明顯看出，在五年後最大時需水量+支援量條件下，東湖地區北至成功路四段附近、南至吉林街、西至民權東路六段 153 巷等地區呈現大範圍的負壓情形。顯示依現況最大時供水壓力並不足以滿足未來支援量增加時之供水需求。

表 35 五年後最大時需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速 0.3 以下長度	比例	流速 2 以上長度	比例
40	935	891	95.29	0	0.00
50	2,536	2,165	85.37	0	0.00
75	6,598	6,026	91.33	0	0.00
100	15,493	13,649	88.10	3	0.02
150	58,967	50,250	85.22	0	0.00
200	110,144	84,545	76.76	0	0.00
250	14,503	8,717	60.10	0	0.00
300	33,892	22,156	65.36	0	0.00
350	36	19	100.00	0	0.00
400	21,573	11,190	51.85	16	0.07
500	15,969	4,929	30.87	0	0.00
600	9,047	2,374	26.24	29	0.32
700	571	181	31.70	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	569	5.20	0	0.00
900	3,545	690	19.46	0	0.00
1,000	5,650	9	0.16	0	0.00
1,200	130	0	0.00	102	78.46
1,350	206	0	0.00	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>209,356</b>	<b>67.16</b>	<b>150</b>	<b>0.05</b>

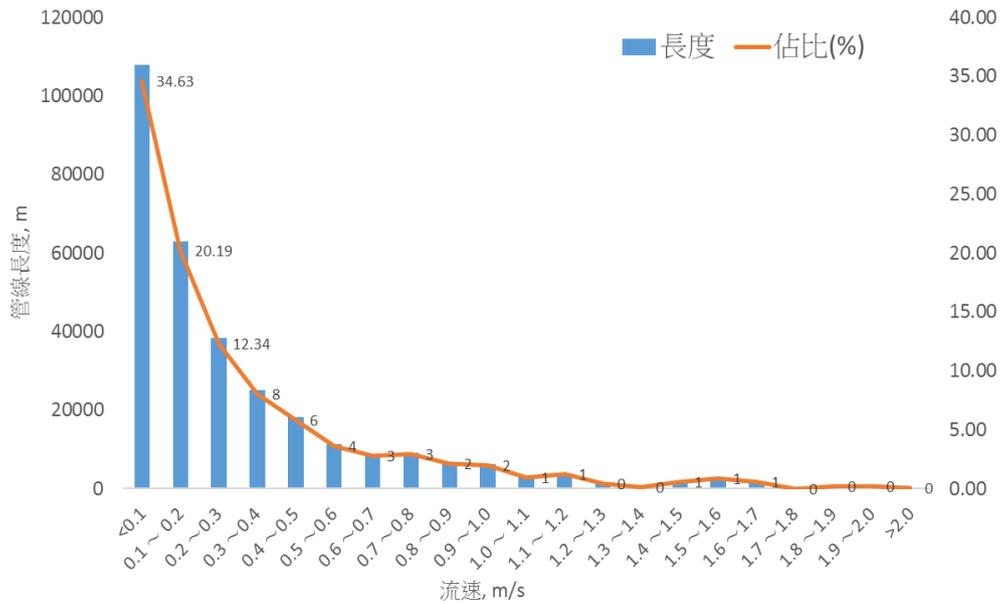


圖121 五年後最大時需水量流速與管線長度分布圖

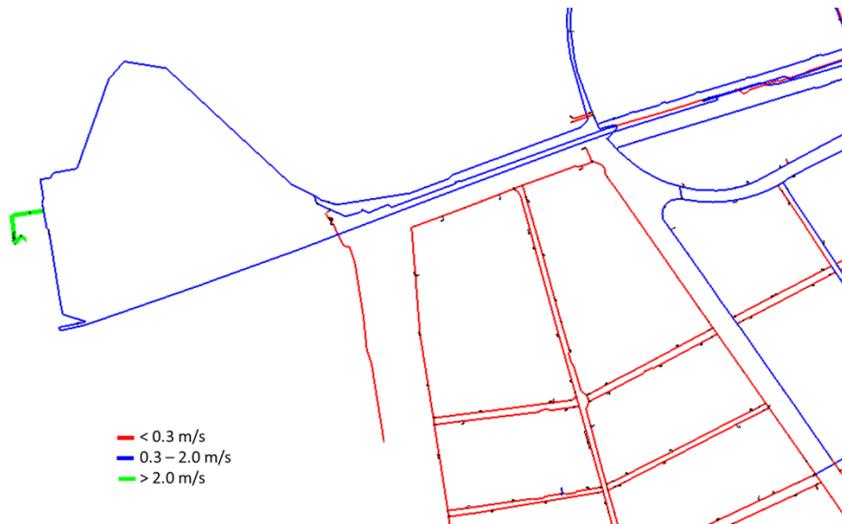


圖122 五年後最大時松山內湖線出水端流速示意圖



圖123 五年後最大時需水量壓力分布圖

### 5.2.3 二十年後管網分析結果

#### 1. 平均日需水量+平均日支援量

分析二十年後平均日需水量及支援量情境，總水量約 19.4 萬 CMD，管網整體流速與五年後平均日比較略微下降，流速小於 0.3 m/s 之管段約 81.2%，流速小於 0.1 m/s 之管段約 49%，見表 36 及圖 124；而流速大於 2 m/s 之管段同樣為民權東路六段 26 號附近之 600 mm 管線，約 2.6 m/s。

在壓力分布方面，比較五年後平均日與二十年後平均日之差別，由表 37 可發現，壓力變化的差距皆在正負 0.1 kg/cm<sup>2</sup> 以內，而壓力的分布情況與負壓點位置非常相似，東湖地區供水壓力普遍低於 0.5 kg/cm<sup>2</sup>。而局部地區如成功路四段、康寧路三段 99 巷、東湖路 113 巷等地區節點則呈現負壓的情形，詳圖 125。

表 36 二十年後平均日需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速 0.3 以下長度	比例	流速 2 以上長度	比例
40	935	907	97.01	0	0.00
50	2,536	2,493	98.30	0	0.00
75	6,598	6,331	95.95	0	0.00
100	15,493	15,042	97.09	0	0.00
150	58,967	56,493	95.80	0	0.00
200	110,144	100,302	91.06	0	0.00
250	14,503	11,454	78.98	0	0.00
300	33,892	28,320	83.56	0	0.00
350	36	36	100.00	0	0.00
400	21,573	15,909	73.74	0	0.00
500	15,969	6,799	42.58	0	0.00
600	9,047	4,465	49.35	26	0.29
700	571	245	42.91	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,513	13.83	0	0.00
900	3,545	962	27.14	0	0.00
1,000	5,650	611	10.81	0	0.00
1,200	130	0	0.00	0	0.00
1,350	206	206	100.00	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>253,084</b>	<b>81.19</b>	<b>26</b>	<b>0.01</b>

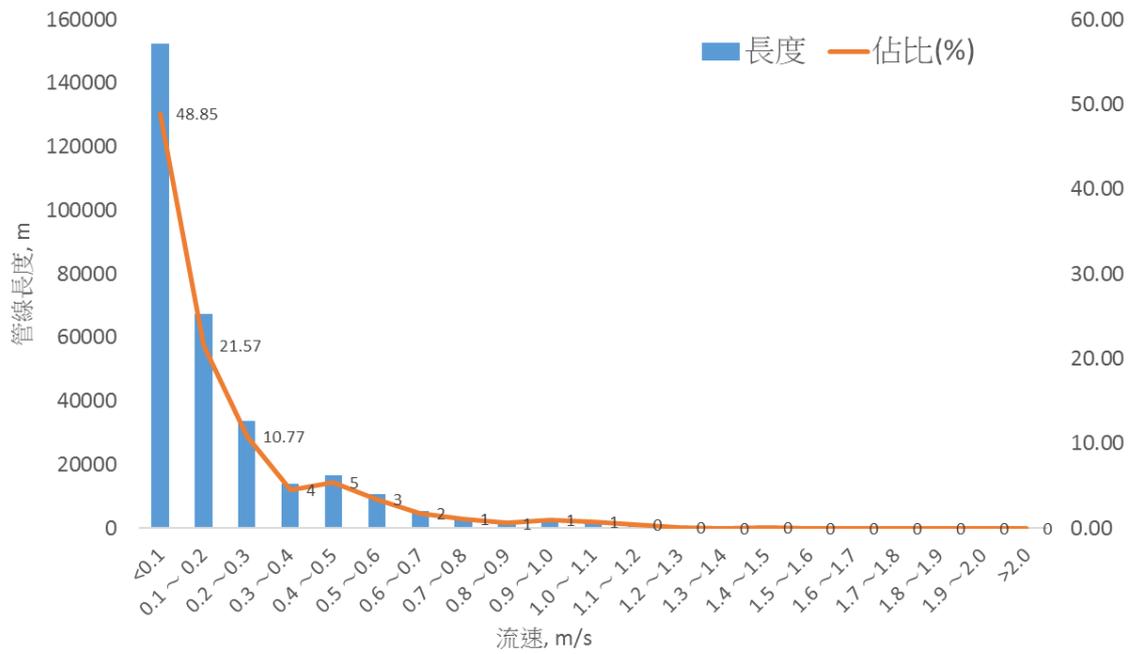


圖124 二十年後平均日需水量流速與管線長度分布圖

表 37 五年後至二十年後節點壓力變化統計表

壓力變化(kg/cm <sup>2</sup> )	數量	佔比(%)
降低 0~0.1	551	2.79%
無變化	1,305	6.61%
增加 0~0.1	17,897	90.60%
<b>總計</b>	<b>19,753</b>	<b>100.00%</b>



圖125 二十年後平均日需水量壓力分布圖

## 2. 最大時需水量+最大時支援量

二十年後最大時需水量及支援量情境，總水量約 30.6 萬 CMD，管網整體流速小於 0.3 m/s 之管線長度約 74.2%，流速小於 0.1 m/s 之管段佔約 36.8%，見表 38 及圖 126；而由於支援量主要是由松山內湖線供應，民權東路六段 26 號附近之 600 mm 管線流速約 4.1 m/s。

而由圖 127 壓力分布可明顯看出，與五年後分析結果相似，在二十年後最大時需水量+支援量條件下，東湖地區北側至成功路四段附近亦呈現大範圍的負壓情形，顯示依現況最大時供水壓力，並不足以滿足未來支援量增加時之供水需求。

表 38 二十年後最大時需水量不同管徑下流速(m/s)與長度(M)統計表

管徑	總長度	流速 0.3 以下長度	比例	流速 2 以上長度	比例
40	935	896	95.83	0	0.00
50	2,536	2,186	86.20	0	0.00
75	6,598	5,991	90.80	0	0.00
100	15,493	14,033	90.58	3	0.02
150	58,967	51,274	86.95	0	0.00
200	110,144	86,739	78.75	2	0.00
250	14,503	8,790	60.61	0	0.00
300	33,892	22,989	67.83	0	0.00
350	36	36	100.00	0	0.00
400	21,573	12,011	55.68	0	0.00
500	15,969	4,938	30.92	0	0.00
600	9,047	2,374	26.24	29	0.32
700	571	181	31.70	0	0.00
750	996	996	100.00	0	0.00
800	10,940	1,504	13.75	0	0.00
900	3,545	948	26.74	0	0.00
1,00	5,650	610	10.80	0	0.00
1,200	130	0	0.00	102	78.46
1,350	206	0	0.00	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>216,496</b>	<b>74.18</b>	<b>136</b>	<b>0.04</b>

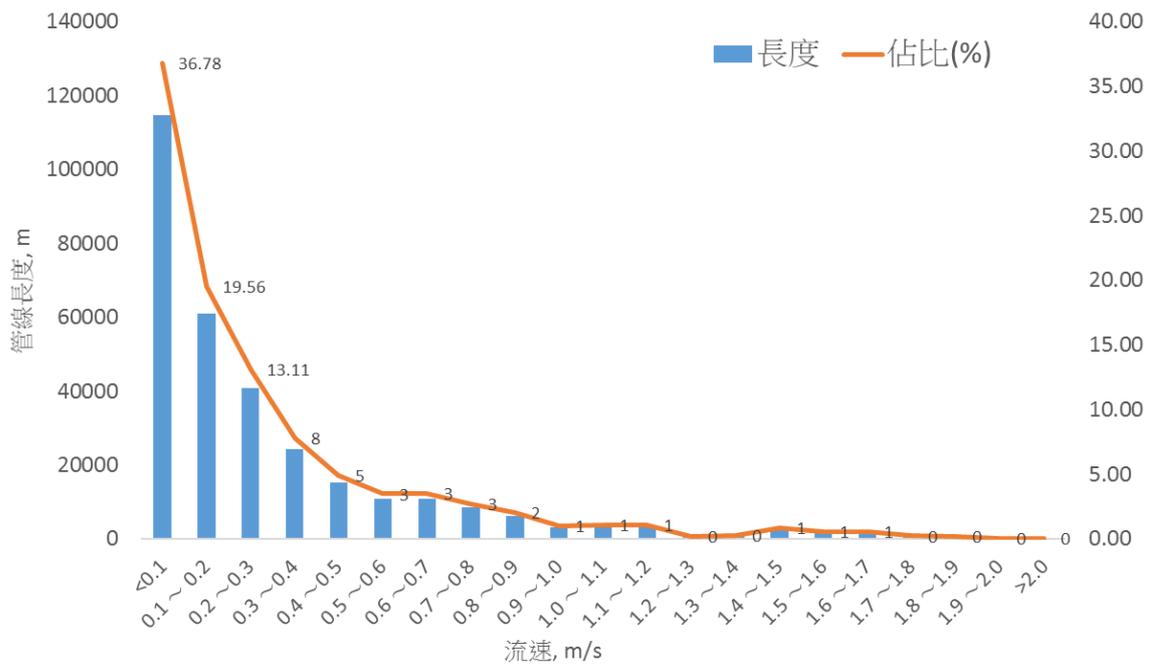


圖126 二十年後最大時需水量流速與管線長度分布圖



圖127 二十年後最大時需水量壓力分布圖

#### 5.2.4 民生南港線新設潛盾管支援東湖地區

由於新興水資源開發不易，且新北市雙溪水庫開發計畫未定，未來北水處由東湖及南港支援台水汐止、基隆等地區之每日 10 萬噸用水量將有持續增加之可能性。加上東湖地區屬管網末端，於颱風等緊急情況停水後，所需復水時程較久，為確保東湖地區長期供水穩定，水處規劃銜接清二幹

線民生支線送往民生加壓站之水源，支援供應本地區。計畫增設 1,000 mm 輸水幹管，聯通民生南港線於基隆河右岸高灘地之 1,500 mm 預留管與東湖路既有 800mm 幹管，預定施工起點自潭美街堤防外(1,000mm 銜接預留點)，沿基隆河右岸高灘地往東至內溝溪舊道處，向北穿越中山高速公路，沿東湖路 160 巷，到達東湖路本線，與既有 800mm 管線銜接連絡，工程位置如圖 128，預計 110 年完工啟用後可建立內湖地區供水備援系統，提升供水品質，大幅改善東湖地區水壓。目前民生南港線之出水壓力約  $1.8\text{kg}/\text{cm}^2$ ，經初步計算在潛盾管銜接點剩餘水頭約 14 m，故模擬在未來五年及二十年最大時供水條件下，新增加之潛盾管線是否能滿足東湖地區因支援水量增加而產生的供水壓力需求。



圖128 東湖新增潛盾管工程位置圖

### 1. 五年後最大時+潛盾管

由圖 129 可發現，當潛盾管線由基隆河右岸銜接點以約  $1.4\text{kg}/\text{cm}^2$  壓力供水進入內湖供水分區，整個東湖地區到成功路二段以西管網壓力大幅提升，僅局部高點仍有負壓的情形。其中東湖路及康寧路三段周遭水壓提升至  $0.5\sim 1.0\text{kg}/\text{cm}^2$  之間，成功路五段及民權東路六段等地區水壓約在  $0.5$

kg/cm<sup>2</sup> 以下。經模擬潛盾管約供應 5.43 萬 CMD，並皆供應至支援點 6.4 萬 CMD 需水量中。

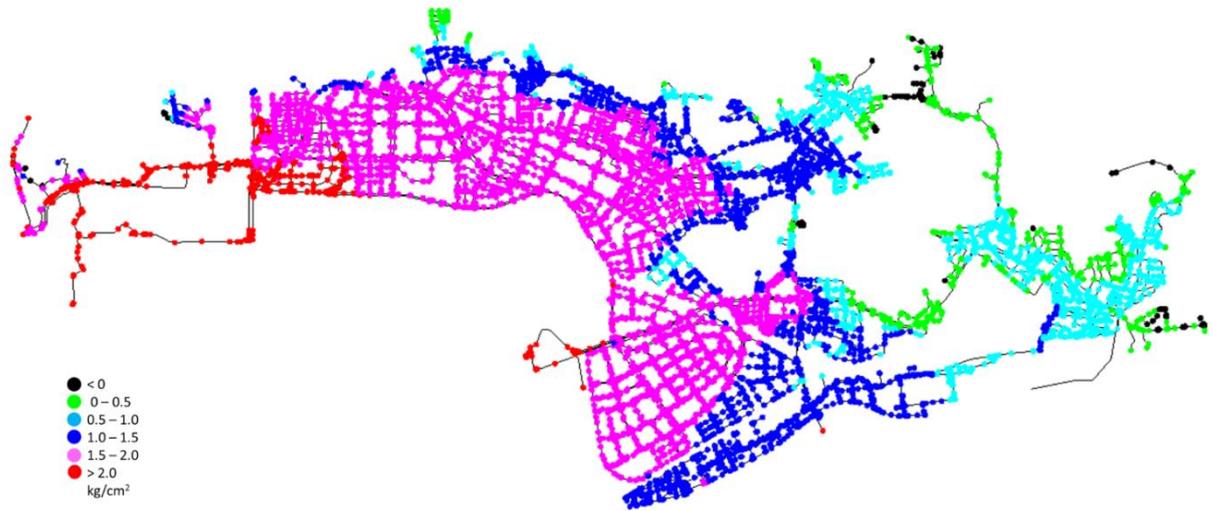


圖 129 五年後最大時需水量+潛盾管壓力分布圖

## 2. 二十年後最大時+潛盾管

由圖 130 可發現，當潛盾管線由基隆河右岸銜接點以約 1.4 kg/cm<sup>2</sup> 壓力供水進入內湖供水分區，與五年後相似，整個東湖地區到成功路二段以西管網壓力大幅提升，僅局部高點仍有負壓的情形。其中東湖路及康寧路三段周遭水壓提升至 0.5~1.0 kg/cm<sup>2</sup> 之間，成功路五段及民權東路六段等地區水壓約在 0.5 kg/cm<sup>2</sup> 以下。經模擬潛盾管約供應 5.28 萬 CMD，並皆供應至支援點 6.4 萬 CMD 需水量中。

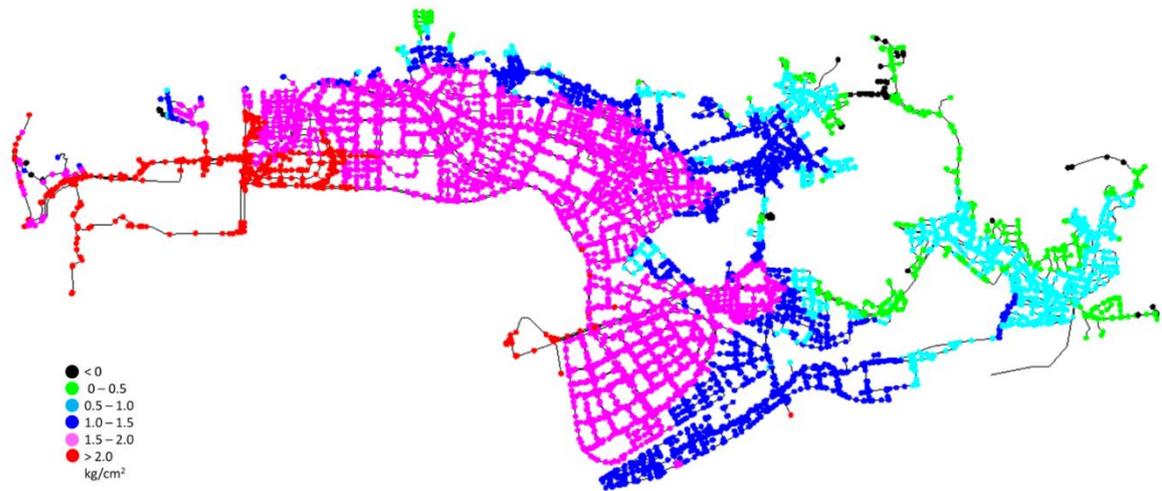


圖 130 二十年後最大時需水量+潛盾管壓力分布圖

### 3. 潛盾管通水後管線流向改變路段

雖然由前述分析可得知，潛盾管所支援的水量皆直接流入台水支援點，並無進入內湖供水分區管網中。但隨著松山內湖線、大同大直線供水負荷減輕的情況下，管網內部流況亦有所改變，使得部分路段流向改變，如此便可能造成管垢被沖刷起來，產生水濁現象。經統計因潛盾管加入供應支援水量而使流向改變的路段如表 39。

由模擬結果可知，北水處潛盾管連通後，整個東湖地區到成功路二段以西管網壓力可大幅提升，惟仍有部分流向改變路段資料，可提供權管單位後續因應並加強排水作業，以降低水濁風險。

表 39 因潛盾管加入供水而流向改變路段統計表

情境	流向改變路段
潛盾管加入供水	北安路 676 號前、敬業一路、敬業二路 69 巷、樂群二路 93 號前、樂群二路 30 巷及 116 巷、植福路 189 號前、堤頂大道二段、內湖路一段 285 巷及 288 巷附近、基湖路 166 巷附近、瑞光路 258-316 巷、港華街、麗山街 46 巷、內湖路一段 373 巷、內湖路二段、江南街、陽光街 68 號到成功路、成功路三段、成功路三段 174 巷、舊宗路一段 150 巷、新湖二路、南京東路六段 451 巷、康寧路三段 189 巷、東湖路 113 巷、康樂街 150 號到 191 巷

### 5.3 送水幹管停止供水後之影響範圍

內湖供水分區由松山內湖線及大同大直線泵送自來水進入供水管網中，其中松山內湖線由 1,200 mm 管線出水後，分成 2 支 1,000 mm 管徑管線跨越基隆河接至民權東路六段；大同加壓站由 800 mm 管線出水後，分成 2 支 800 mm 管銜接至大直地區。

為模擬輸水幹管因地震或開挖不慎，導致破裂需停水修復時內湖供水管網受影響情形，本項模擬針對大同大直線、松山內湖線出水管線進行停水後的分析模擬，位置如圖 131。在加壓站維持現況最大時出水壓力的條件下，探討停水後之管網壓力變化情形，以及管線流向變化分布。



圖 131 模擬幹管停水位置示意圖

#### 5.3.1 大同大直線出水分支管停水

由表 40 及圖 132 可看出，關閉大同大直線其中一條出水幹管，各節點壓力變化幾乎在  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  以內，約佔 99.5%，無明顯差別。推測原因是大同大直線本身供應內湖供水分區之水量較松山內湖線來的少，大同大直線約 6.2 萬 CMD、松山內湖線約 17.6 萬 CMD，斷管後松山內湖線 18.4 萬 CMD、大同大直線 5.3 萬 CMD。單一支 800 mm 管線已足夠滿足供水需求，故壓

力無明顯變化。而流向有改變的管線僅佔全部管線長度之 1.24%，位置約在大直橋、明水路、北安路 608~770 巷、植福路、內湖路一段 93~248 號、瑞光路 618~397 號、江南街 127 巷、文德路 220 巷等地區，其分布及管長管徑統計如圖 133 及表 41。

表 40 大同大直線出水分支管停水後壓力變化量統計表

壓力變化 (kg/cm <sup>2</sup> )	數量	佔比(%)
降低 0.1~0.2	79	0.40
降低 0~0.1	19,245	97.42
無變化	185	0.94
增加 0~0.1	232	1.17
增加 0.1~0.2	13	0.07
<b>總計</b>	<b>19,754</b>	<b>100</b>

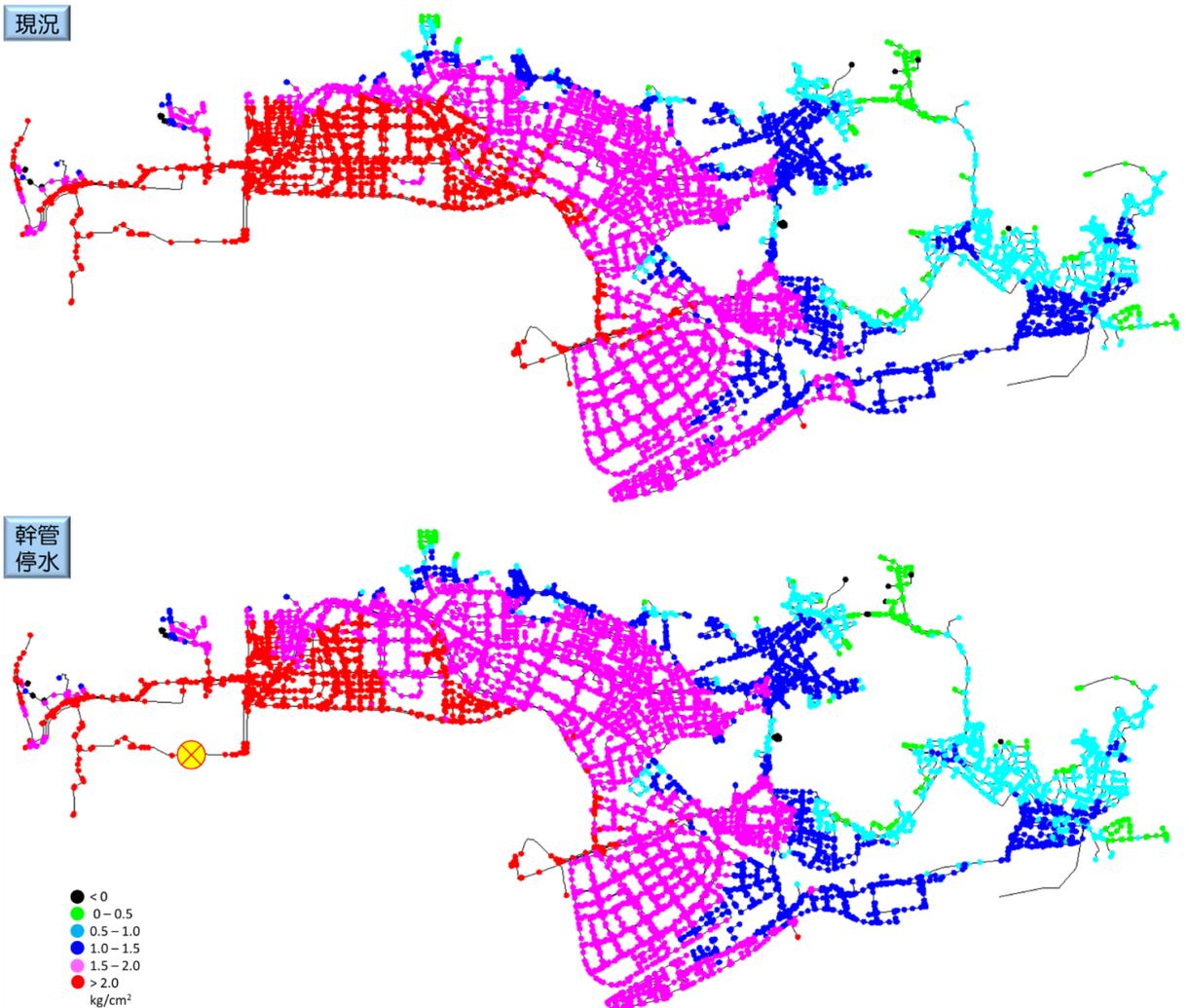


圖 132 大同大直線出水分支管停水壓力分布圖

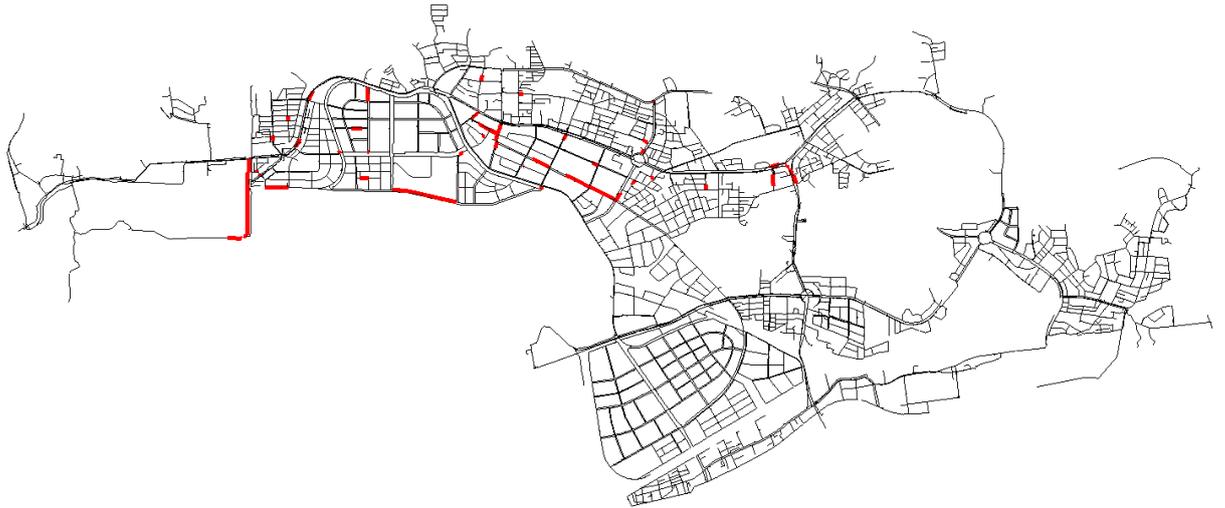


圖 133 大同大直線出水分支管停水管線流向改變位置圖

表 41 大同大直線出水分支管停水管線流向改變長度統計表

管徑 mm	總長度 m	流向改變長度 m	比例%
40	935	0	0.00
50	2,536	0	0.00
75	6,598	0	0.00
100	15,493	0	0.00
150	58,967	385	0.65
200	110,144	1,040	0.94
250	14,503	94	0.65
300	33,898	648	1.91
350	19	0	0.00
400	21,584	1,184	5.49
500	15,969	81	0.51
600	9,047	708	7.82
700	571	0	0.00
750	996	0	0.00
800	10,940	296	2.70
900	3,545	0	0.00
1,000	5,650	0	0.00
1,200	130	0	0.00
1,350	206	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>4,435</b>	<b>1.42</b>

### 5.3.2 大同大直線出水本管停水

由前段可知大同大直線單支出水管停水時，尚不至於造成整個管網明顯的影響。因此，再將其出水本管線設定為關閉，使內湖供水分區 23.7 萬

CMD 供水量全由松山內湖線供應，觀察壓力分布與流向變化如下。

由表 42 及圖 134 可看出，將大同加壓站出水本管關閉後，管網壓力分布有相當大幅度的改變，約 97 % 壓力降低  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  以上，35 % 降低超過  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 。局部高地文湖街 21 巷、成功路四段大湖山莊區域則呈現負壓，無法供水。

而流向有改變的管線佔全部管線長度之比例提高到 9.3%，包含北安路、明水路、大直橋、樂群一路、樂群三路、敬業一路、敬業二路、敬業三路、內湖路一段、植福路、基湖路、瑞光路、環山路二段、港墘路、文德路、成功路四段、民權東路六段 11 巷、新湖三路、新湖一路、石潭路、成功路五段、康寧路三段等地區。其分布位置及管長管徑統計如圖 135 及表 43。

表 42 大同大直線出水本管停水後壓力變化量統計表

壓力變化 ( $\text{kg/cm}^2$ )	數量	佔比(%)
降低 0.9 以上	8	0.04
降低 0.8~0.9	315	1.59
降低 0.7~0.8	368	1.86
降低 0.6~0.7	2,088	10.57
降低 0.5~0.6	4,105	20.78
降低 0.4~0.5	3,843	19.45
降低 0.3~0.4	8,483	42.94
降低 0.2~0.3	420	2.13
降低 0.1~0.2	38	0.19
降低 0~0.1	32	0.16
無變化	49	0.25
增加 0~0.1	3	0.02
增加 0.1~0.2	2	0.01
增加 0.2~0.3	0	0.00
<b>總計</b>	<b>19,754</b>	<b>100</b>

現況



幹管  
停水



圖 134 大同大直線出水本管停水壓力分布圖

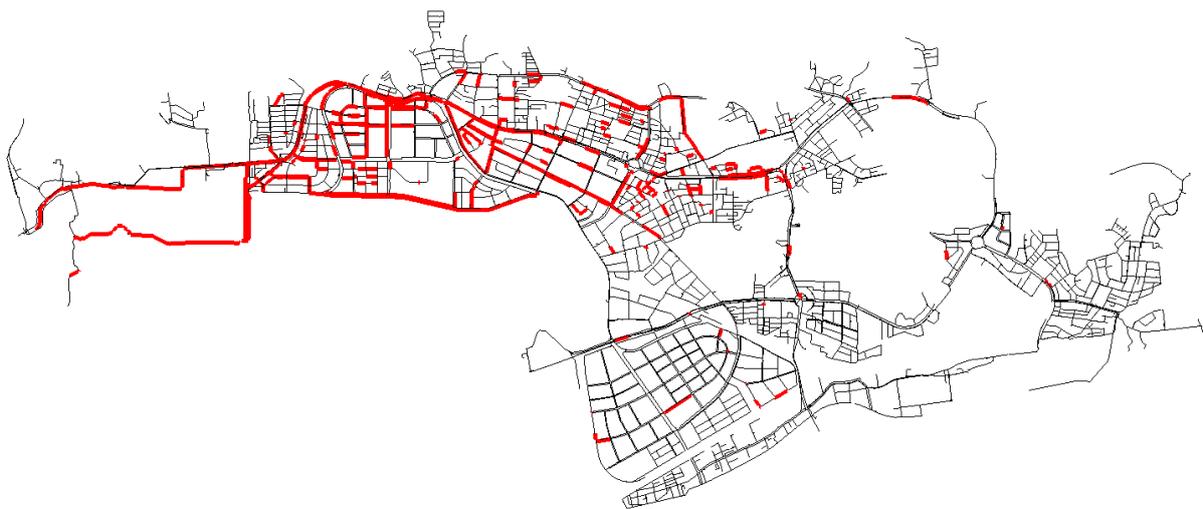


圖 135 大同大直線出水本管停水管線流向改變位置圖

表 43 大同大直線出水本管停水管線流向改變長度統計表

管徑 mm	總長度 m	流向改變長度 m	比例%
40	935	26	2.78
50	2,536	90	3.55
75	6,598	0	0.00
100	15,493	424	2.74
150	58,967	3,050	5.17
200	110,144	10,899	9.89
250	14,503	2,370	16.34
300	33,898	4,002	11.81
350	19	0	0.00
400	21,584	4,778	22.14
500	15,969	1,659	10.39
600	9,047	4,671	51.63
700	571	93	16.29
750	996	0	0.00
800	10,940	6,483	59.26
900	3,545	0	0.00
1,000	5,650	96	1.70
1,200	130	0	0.00
1,350	206	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>38,641</b>	<b>12.40</b>

### 5.3.3 松山內湖線出水分支管停水

由表 44 及圖 136 可看出，將松山內湖線出水分支管關閉後，大同大直線之出水量由平時的 6.2 萬 CMD 提高到 8.9 萬 CMD，松山內湖線由平時的 17.6 萬 CMD 出水量下降到 14.9 萬 CMD，且全部集中在南側分支管，使得該分支管流量由平時 7.69 萬 CMD 成長將近 2 倍，導致管網壓力有更大幅度的下降，約 90 % 壓力降低  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  以上，大部分集中在降低  $0.5\sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$  之間，造成成功路二段以東、行善路以南以及管網後端東湖地區等區域壓力偏低，甚至在成功路四段、大湖山莊街、康寧街等區域產生負壓，

故可看出松山內湖線對整體內湖供水分區之重要性。

然而因為大同大直線有持續供水，使得流向有改變的管線長度，佔全部管線長度之比例，不如關閉大同加壓站出水總管多，約佔 3.9%。其分布位置大多在大直地區，且多為 200~600 mm 之管線，包括北安路 665-763 號、明水路 501 巷、敬業二路、樂群二路 116 巷、樂群一路、堤頂大道二段、基湖路、瑞光路 306-397 號、內湖路二段 103 巷、民權東路六段 11 巷、成功路三段 8-131 號、石潭路等路段。如圖 137 及表 45 所示。

表 44 松山內湖線出水分支管停水後壓力變化量統計表

壓力變化 (kg/cm <sup>2</sup> )	數量	佔比(%)
降低 0.9 以上	0	0.00
降低 0.8~0.9	0	0.00
降低 0.7~0.8	37	0.19
降低 0.6~0.7	12,689	64.24
降低 0.5~0.6	5,179	26.22
降低 0.4~0.5	1,154	5.84
降低 0.3~0.4	515	2.61
降低 0.2~0.3	87	0.44
降低 0.1~0.2	9	0.05
降低 0~0.1	9	0.05
無變化	60	0.30
增加 0~0.1	15	0.08
增加 0.1~0.2	0	0.00
<b>總計</b>	<b>19,754</b>	<b>100</b>

現況



幹管  
停水



圖 136 松山內湖線出水分支管停水壓力分布圖

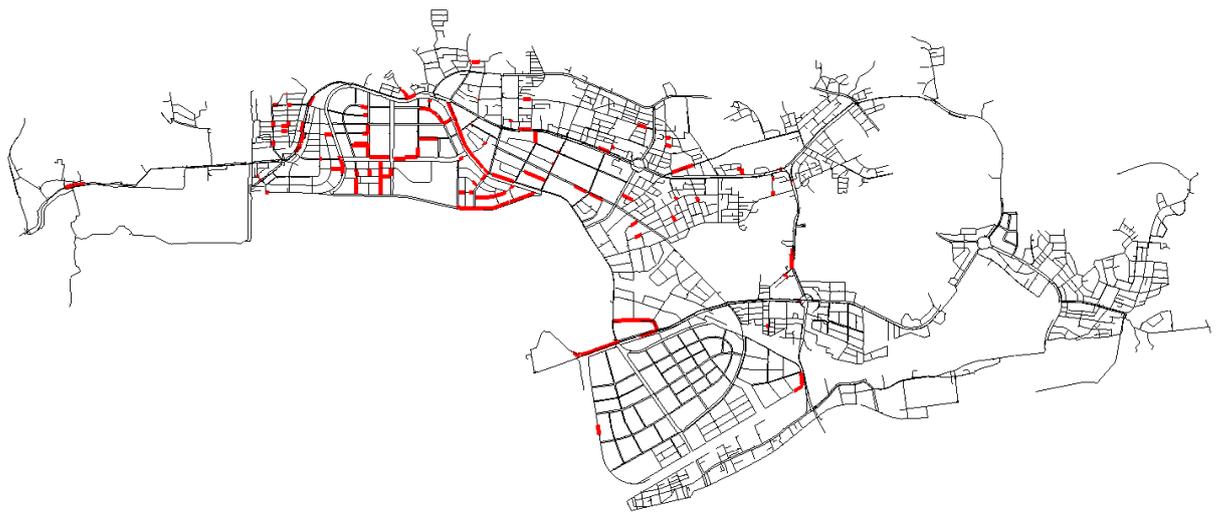


圖 137 松山內湖線出水分支管停水管線流向改變位置圖

表 45 松山內湖線出水分支管停水管線流向改變長度統計表

管徑 mm	總長度 m	流向改變長度 m	比例%
40	935	2	0.21
50	2,536	5	0.20
75	6,598	0	0.00
100	15,493	92	0.60
150	58,967	1,683	2.85
200	110,144	4,559	4.14
250	14,503	989	6.82
300	33,898	1,057	3.12
350	19	0	0.00
400	21,584	702	3.25
500	15,969	134	0.84
600	9,047	1,143	12.63
700	571	0	0.00
750	996	0	0.00
800	10,940	0	0.00
900	3,545	0	0.00
1,000	5,650	603	10.67
1,200	130	0	0.00
1,350	206	0	0.00
<b>總計</b>	<b>311,731</b>	<b>10,969</b>	<b>3.52</b>

### 5.3.4 幹管停水影響範圍評估

由 5.1 節管網承載能力分析結果可得知，無論在何種供水需求情境下，整體管網流速皆偏慢，導致水中雜質易沉降於管底形成積泥。故當幹管停止供水後，流向突然地變換可能使底部積泥揚起，污染水質。經本項模擬結果統計，約有 2~12% 不等之管段流向改變，其影響路段如表 46 所示。而未來藉由 WebGIS 系統功能模組開發，預估將可利用管網拓樸與連接關係，統計流向改變的管線所連接到的水表，於系統上更明確地顯示受到影響的路段、戶數以及停水範圍，作為緊急停水施工時的判斷依據。

另一方面，當某一加壓站出水幹管停水後，將對另一加壓站造成龐大

的供水負荷，若是維持現況供水壓力，將使內湖供水分區大部份的管網處於較低供水壓力的情況之中，尤其是文湖街 21 巷、成功路四段、大湖山莊街、管網末端康寧街等地區，極有可能會產生負壓，造成無法供水至該區域。

表 46 幹管停水流向改變路段統計表

幹管停水情境	流向改變路段
大同出水分支管	大直橋、明水路、北安路 608~770 巷、植福路、內湖路一段 93~248 號、瑞光路 618~397 號、江南街 127 巷、文德路 207 巷、環山路二段 139 號、新湖三路
大同出水本管	北安路、明水路、大直橋、樂群一路、樂群三路、敬業一路、敬業二路、敬業三路、內湖路一段、植福路、基湖路、瑞光路、環山路二段、港墘路、文德路、成功路四段、民權東路六段 11 巷、石潭路、成功路五段、康寧路三段
松山出水分支管	北安路 665-763 號、明水路 501 巷、敬業二路、樂群二路 116 巷、樂群一路、堤頂大道二段、基湖路、瑞光路 306-397 號、內湖路二段 103 巷、民權東路六段 11 巷、成功路三段 8-131 號、石潭路

## 5.4 水齡分析

自來水在供水管網內的停留時間、流速變化等管網水力特性是影響管網水質的主要因素，水在管網中的停留時間是指水從水源節點流至各節點的流經時間，也稱為該節點的「水齡」。水齡的長短表示各節點取水的新鮮程度，是該節點水質安全的重要參數。具體而言，如果水齡過長，自來水在管網中停留太久，將使得水中餘氯下降，便無法確保水質。但相反而言，若水齡過短，又會引起水中餘氯濃度過高的情形，產生刺鼻的味道，影響自來水用戶的適飲性。因此，水齡可作為評價管網水質安全可靠性的重要依據。本研究計畫利用水理軟體進行多時段動態模型模擬，用以判斷內湖供水分區管網水齡。

### 5.4.1 多時段分析設定

水齡分析屬於多時段模擬(Extended Period Simulation)項目，其主要受到各節點需水量變化曲線，以及管網供水設施的設定所影響，故需針對節點需水量及加壓站出水條件進行各時段變化曲線(Pattern)的設定。而因內湖配水池平時操作約在凌晨 1：30 點至 7 點進水，並在晚間 20 點至 24 點放水至管網中，如圖 138。所以在考量節點需水量變化曲線時，除了以加壓站的出水量變化來評估外，亦需加入內湖配水池之進出流情況。經計算結果節點需水量 Pattern 如圖 139 所示，最大比例約平均量 1.43 倍，發生在晚間 23 點，最小用水比例發生在凌晨 5 點約平均量 0.58 倍。另外，內湖供水分區內各個小型加壓站節點需水量變化，則以各小型加壓站監控數據作設定，先計算各小加壓站之平均出水水量，並計算其於各時間點的倍數，帶入到該節點的需水量 pattern 中，以東湖加壓站為例如下圖 140。

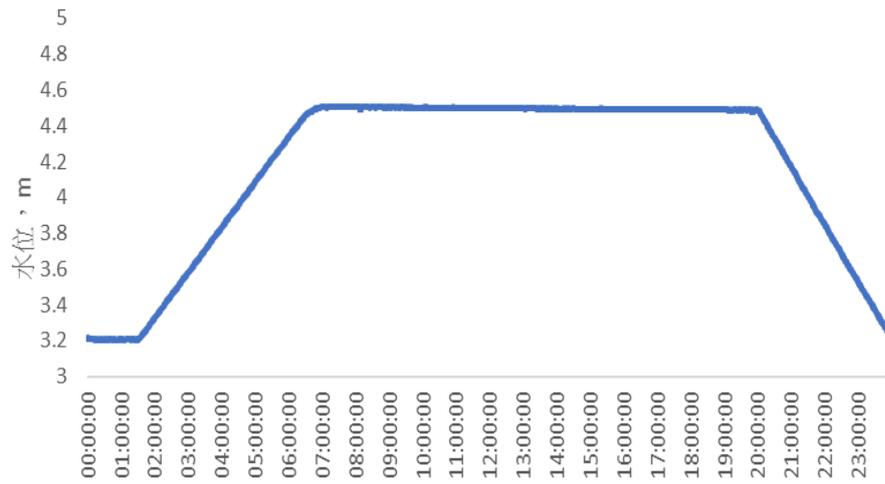


圖 138 內湖配水池每日水位變化圖

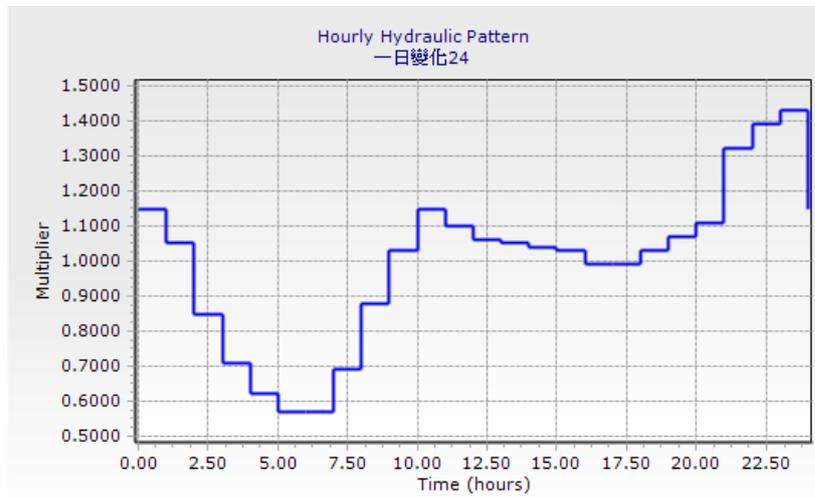


圖 139 多時段模擬節點需水量變化模式顯示圖

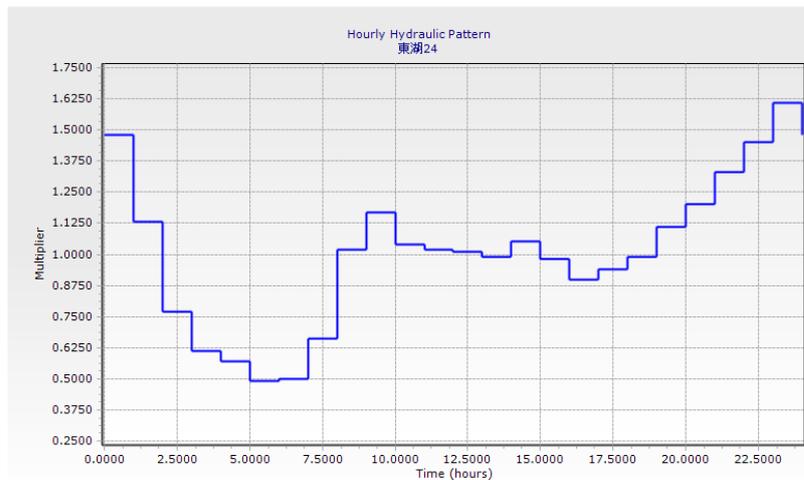


圖 140 東湖加壓站代表節點需水量變化模式顯示圖

除了節點的需水量會隨著每日用水尖離峰變化改變外，加壓站出水壓力亦會針對出水量的變化去作調節。經統計大同大直線及松山內湖線監控資料，其出水壓力變化模式如圖 141 及 142。

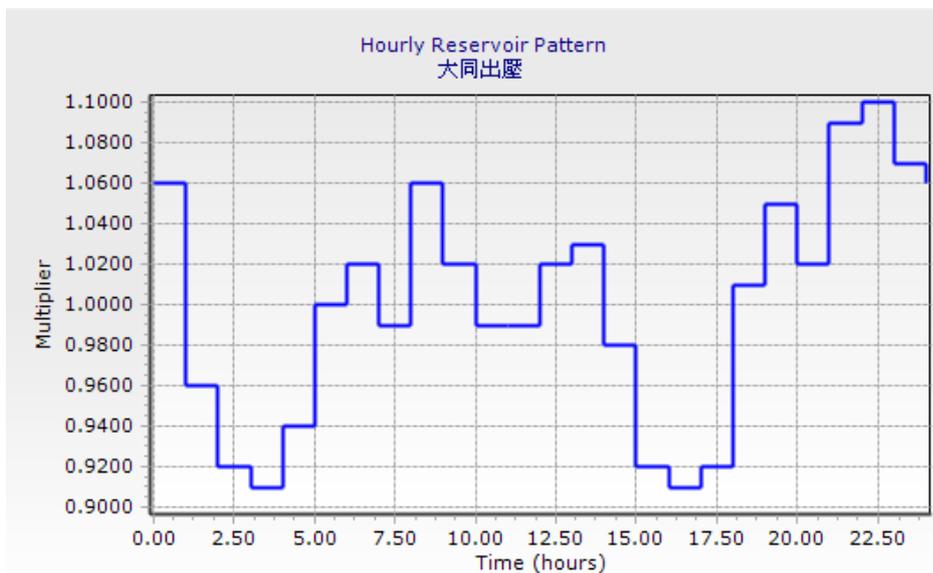


圖 141 多時段模擬大同大直線出壓變化模式顯示圖

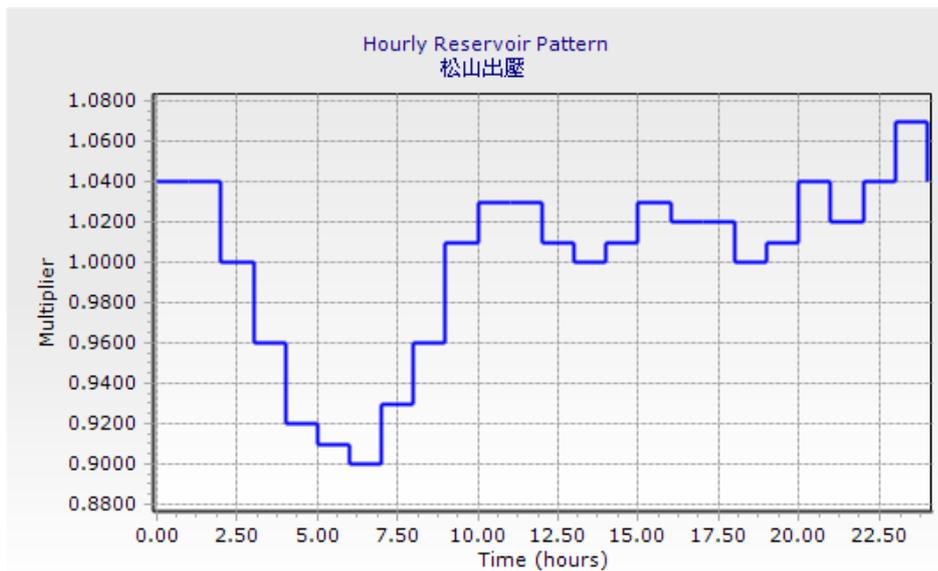


圖 142 多時段模擬松山內湖線出壓變化模式顯示圖

#### 5.4.2 水齡分析結果

水齡表示「水從水源流至各節點的流經時間」，隨著模擬時間的增加，

各節點的水齡會逐漸依照需水量的 Pattern 呈現週期性的變化。本次模擬時程經討論後設定為 96 hours，分析結果整理如表 47。在第 96 小時，有約 96% 的節點水齡在 30 小時內，顯示內湖分區整體水質相當不錯，如圖 143。而因為離水源越遠的節點受到其他節點的影響較多，所以會較晚呈現週期性變化，如圖 144，編號 1 之節點在約 8 小時即開始產生週期性變化，而編號 4 之節點則至 32 小時才開始產生週期性變化。

而分析少數水齡大於 60 小時之節點，其水齡偏高之原因乃是內湖配水池於夜間 20:00 到 24:00 放水所導致。如前圖 138 內湖配水池水位變化可得之，內湖配水池在未進水或放水的時間，仍保持約 3.2 公尺高度的蓄水量，而進水後水位升高至 4.5 公尺，即表示內湖配水池在不進水或放水時，約有 71% 的水量儲存在池內，這些儲存的水，其水齡會隨著時間增加，在放水的時候便會釋放老水到管網中。可由圖 145 觀察內湖配水池釋放老水的情形，其在晚間八點(68 小時)開始放水，第 69 小時便出現水齡大於 60 小時之節點，並逐漸擴大範圍。至第 73 小時達到最大範圍後，水齡大於 60 小時的節點逐漸減少。

除了觀察水齡大於 60 小時之節點，內湖配水池的放水亦造成了周遭地區水齡的上升，由圖 146 可發現，內湖全區約在 63 小時達到穩定的水齡週期性變化，第 69 小時老水出現後，到 74 小時達到最大的影響範圍，之後範圍逐漸減少，並持續至第 85 小時完全消失，總計內湖配水池的放水影響周遭水齡約 17 小時。

表 47 水齡分析第 96 hours 時管網水齡統計表

水齡(hours)	數量	佔比(%)	備註
<5	395	2.55	水齡較低 96.59%
5 ~ 10	2,722	17.59	
10 ~15	5,981	38.65	
15 ~20	4,143	26.77	
20 ~25	1,320	8.53	
25 ~30	388	2.51	
30 ~40	284	1.84	水質普通 2.92%
40 ~50	56	0.36	
50 ~60	112	0.72	
60 ~70	20	0.13	水齡較高 0.48%
70 ~80	55	0.36	
80 ~96	0	0.00	
<b>總計</b>	<b>15,476</b>	<b>100.0</b>	

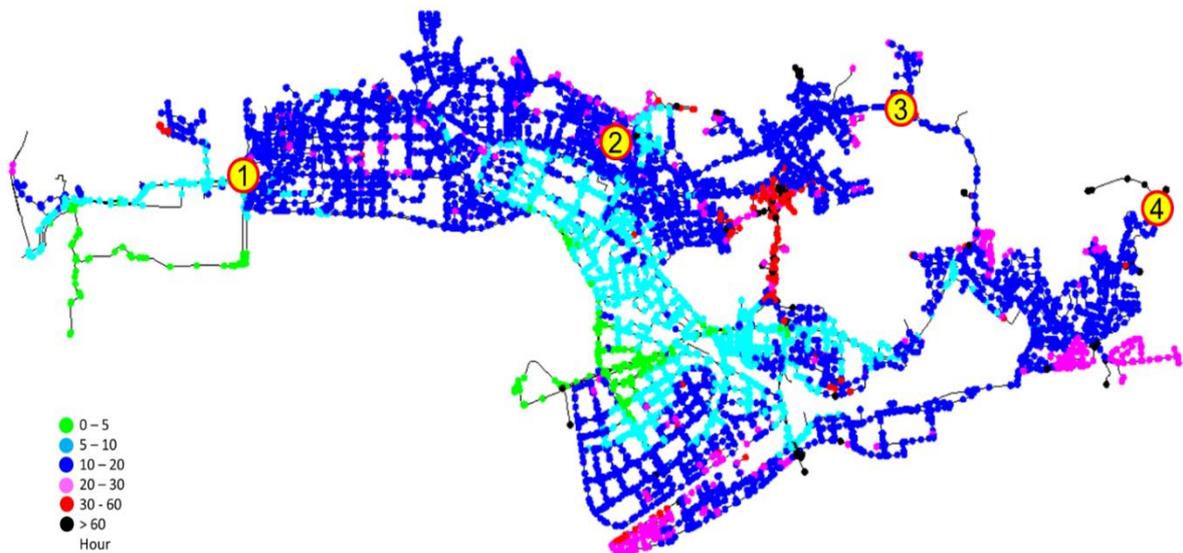


圖 143 水齡分析第 96 hours 時管網水齡分布圖

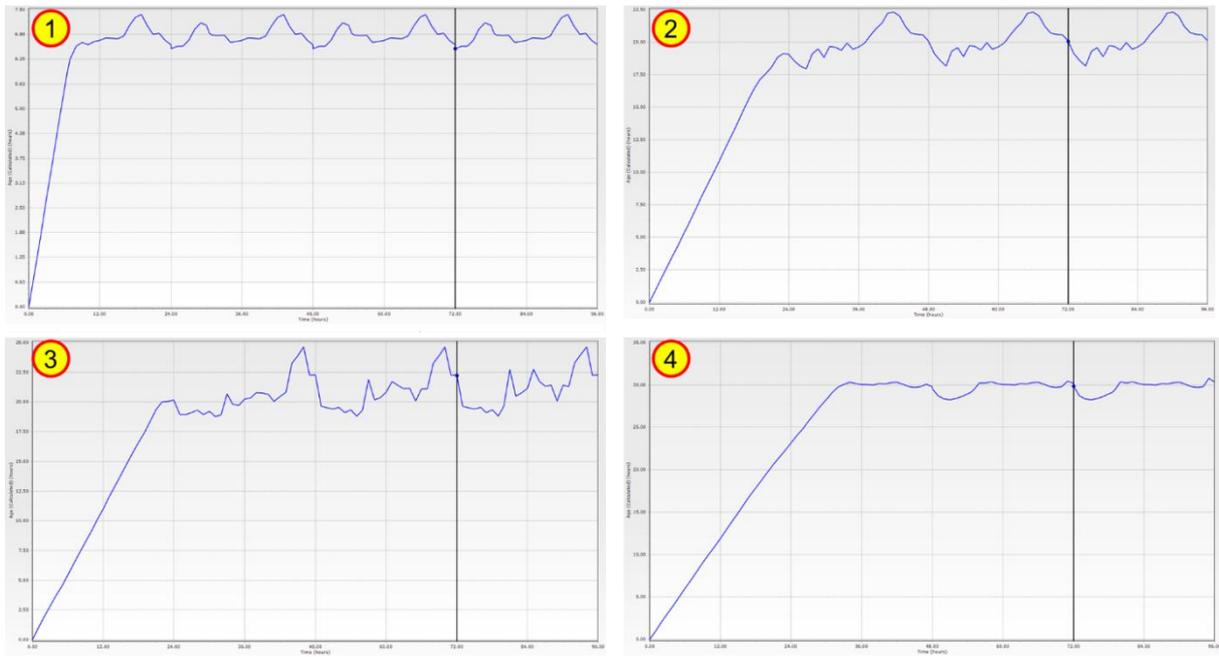


圖 144 不同距離節點與水齡隨時間週期變化關係圖

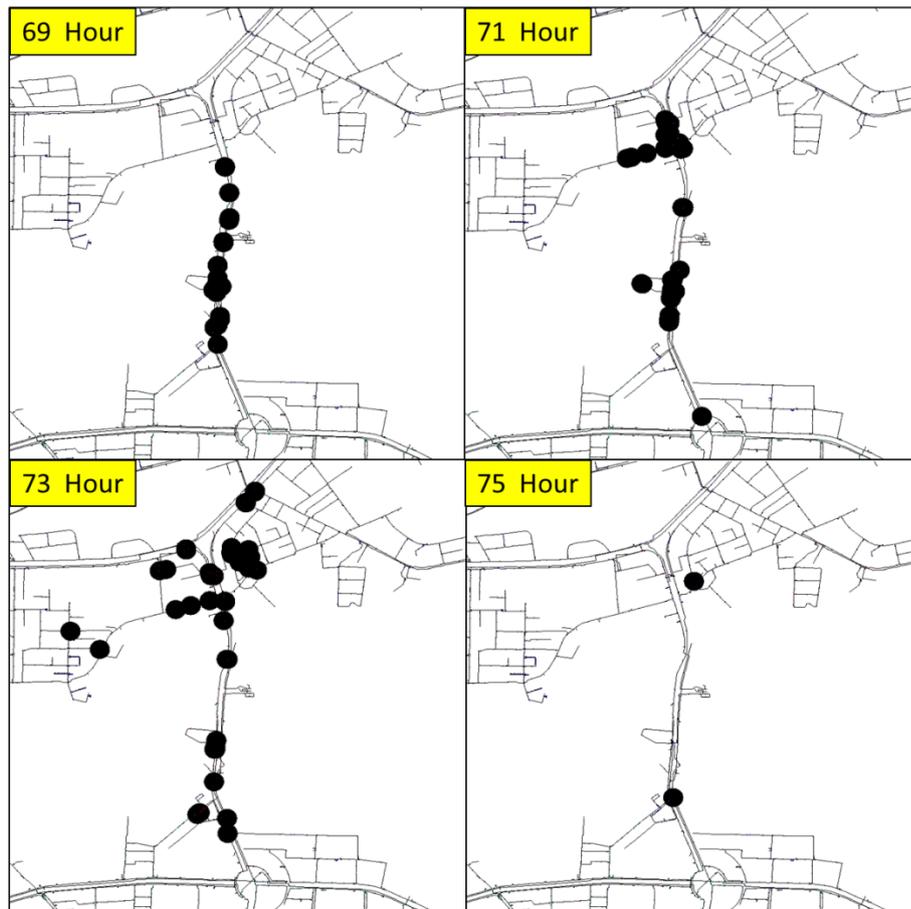
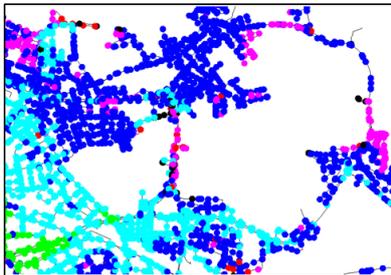


圖 145 內湖配水池釋放老水示意圖

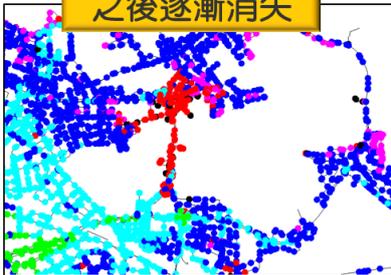
約63hr全區達週期性變化



68hr (20:00) 開始放水  
69hr 老水出現



74hr (02:00)  
影響範圍最大  
之後逐漸消失



85hr (13:00)  
影響範圍消失

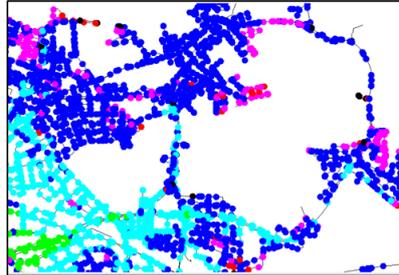


圖 146 內湖配水池釋放老水示意圖

## 5.5 污染擴散預測

本章節為污染擴散預測分析，共分為三個部份，第一部份為擴散預測常使用之 trace 分析，觀察物質擴散百分比及範圍，來源設定在松山內湖線與大同大直線供水端；第二部份為分析不降解污染物質投入管網中後，其隨著管網移動之濃度和範圍；第三則是為了確保供水水質之穩定，加入餘氯的分析，探討管網各處節點在不同時間點下的餘氯濃度。

### 5.5.1 擴散預測

本項模擬是針對供水源頭釋放污染物質時，分析其在各時段的擴散情形以及最大的擴散範圍，源頭的污染物質是持續投入的，也就是說源頭的物質比例一直維持在百分之百。源頭分別設定在松山內湖線與大同大直線供水端。

由圖 147 松山內湖線分析結果可看出，污染物質隨著水流由民權東路六段進入內湖供水分區，在 15 個小時左右內科區域已幾乎擴散達到百分之百，南京東路以南、東湖地區、成功路四段等地區開始出現百分之二十到百分之八十不等的物質擴散比例。而到第 30 小時，污染擴散達到穩定狀態，堤頂大道以東皆是松山內湖線的物質擴散範圍，且其中約 82% 為百分之八十至百分之百，僅內湖路一段西湖國小附近，因屬於松山內湖線與大同大直線供水邊界範圍，受到大同大直線供水的影響，擴散百分比濃度較低。

而由圖 148 大同大直線分析結果便可相互呼應，物質隨著水流由大直橋及北安路進入大直地區，在 15 小時左右擴散到文湖街文湖國小一帶，並在約 30 小時達到最大擴散範圍，堤頂大道以西及文湖街以北物質擴散比例達百分之八十至百分之百，而到內湖路一段西湖國小附近，則呈現較低的百分比。

5 Hour



15 Hour



30 Hour



- 0-20%
- 20-40%
- 40-60%
- 60-80%
- 80-100%

圖 147 松山內湖線汙染擴散分析結果圖

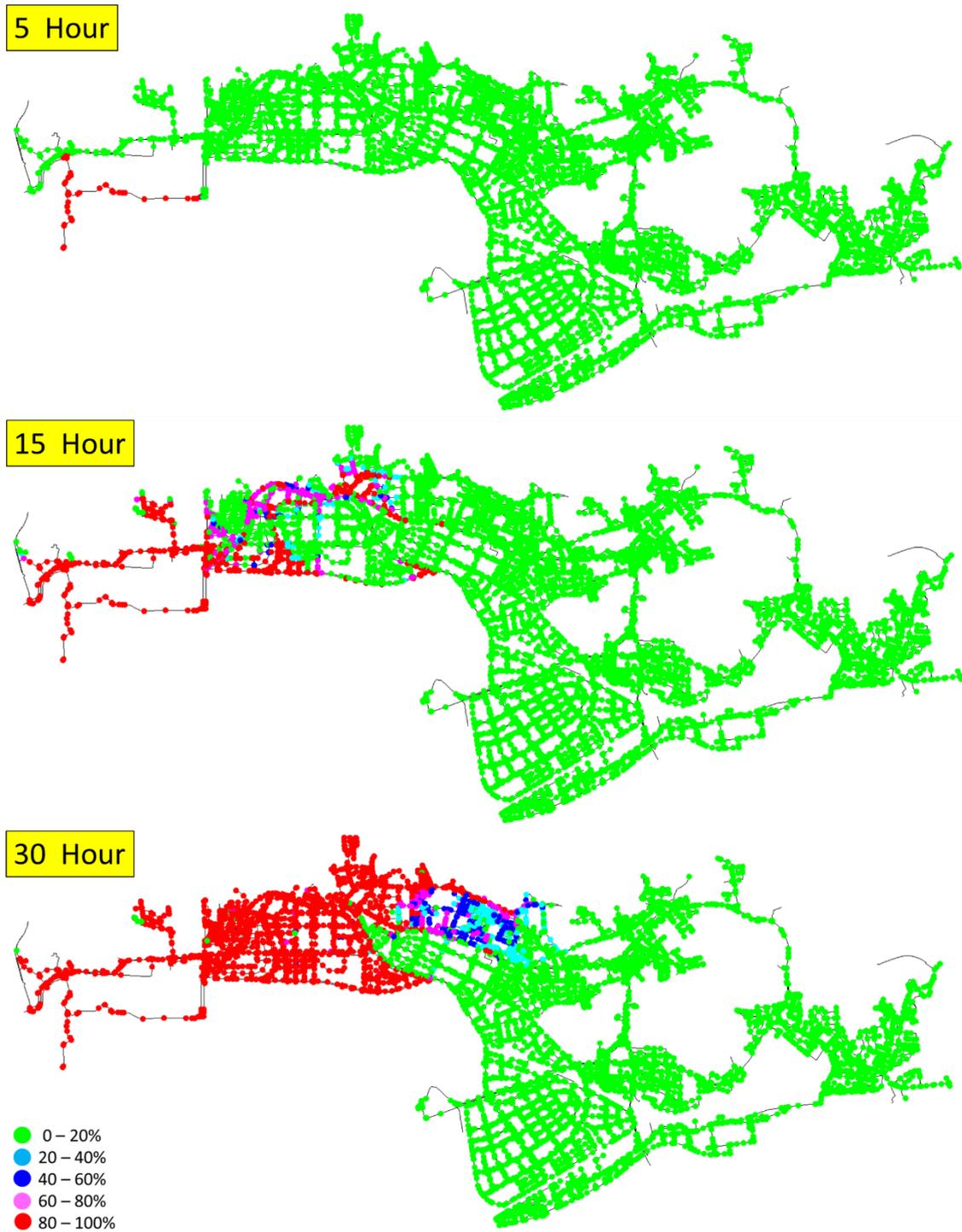


圖 148 大同大直線汙染擴散分析結果圖

### 5.5.2 不降解污染物質投入分析

本項模擬則是針對不會降解的物質，給定一特定的投入時間，進行管網中隨時間擴散，其濃度分佈變化的分析設定。投入位置設定為松山加壓

站，投入濃度設為 2 mg/L，投入時間 1 小時。分析結果管網物質濃度分布變化如圖 149，可發現整體而言，物質可擴散的範圍與前項汙染擴散分析相同，即以堤頂大道以東為主。其濃度大致隨著擴散的距離增加而減少，其中 1 mg/L 以上的區域僅出現在瑞光路與行善路以西，內湖科學園區周遭。

由於 5.1 節有提到，內湖供水分區管網流速普遍偏慢，大部分甚至不到 0.1 m/s，因此在污染物質傳遞緩慢的情況下，有些管網末端的節點會較晚產生高濃度的反應。

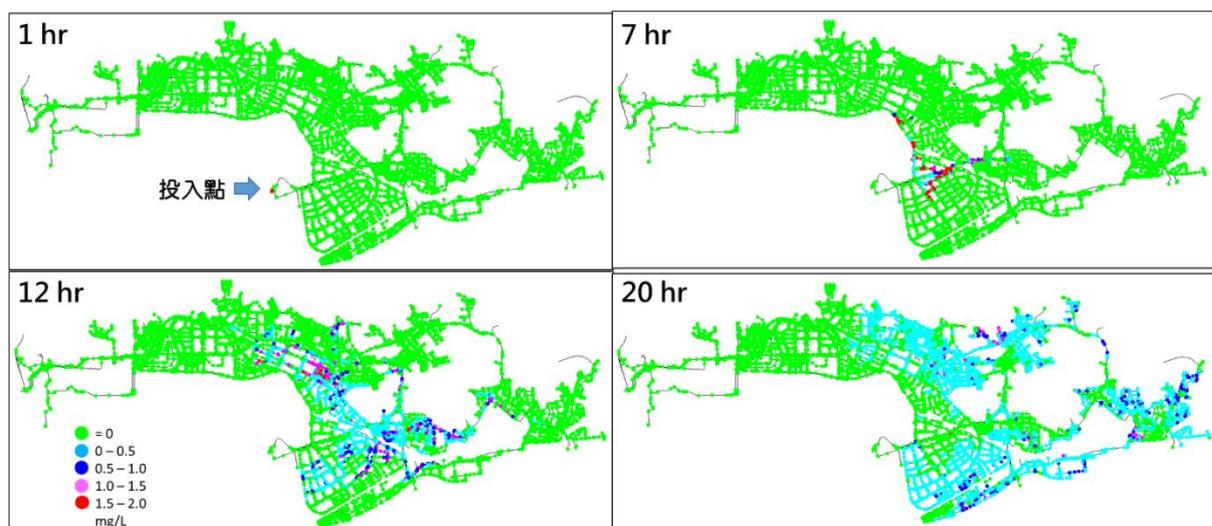


圖 149 不降解污染物質濃度分布隨時間變化圖

### 5.5.3 餘氯分析

自來水多以氯氣消毒，當氯氣溶於水中會變成次氯酸或次氯酸根離子，即俗稱有效餘氯，因次氯酸具有極高的氧化能力，如自來水含有效餘氯，它在配水管中停留時可預防細菌（病原菌）的滋生，因此有效餘氯在自來水的安全衛生上扮演極重要的角色。「飲用水水質標準」之自由有效餘氯的含量是 0.2~1.0 mg/L，為了衛生，自來水含有效餘氯是必要的。

在配水系統中，使水質(餘氯濃度)產生變化的原因相當複雜，包含各種物理性與化學性因子。其中物理性因子有接觸時間、水溫、管材、流速、

管壁形狀等；化學性因子則有加氯量、氯、pH 值、有機物質等，皆會影響餘氯衰減的反應速率，目前管網分析模式最常用來模擬計算餘氯濃度隨時間變化的方程式為一階反應方程式。

在一階反應迴歸方程式中，反應常數  $k$  值被分為兩部份來探討，分別是水流(bulk flow)中化合物所引起的餘氯消耗之常數  $k_b$ ，以及管壁上物質或管材腐蝕所引起的餘氯消耗之常數  $k_w$ 。因為影響  $k_w$  值大小的因素主要與流速、水壓和管壁腐蝕有關，需進行實際的管線實驗才能得到。故本計畫所使用的餘氯消耗速率常數，將  $k_b$  與  $k_w$  結合，包含了所有可能影響餘氯的因素所造成的餘氯消耗，在模型中僅設定在  $k_b$  值的欄位，並且將參考水質監視點在松山加壓站、大同加壓站及管網中所測得的數據資料，反推回模型中，得到反應速率常數。

我們依 5.4 節水齡分析結果可知內湖供水分區的水齡不超過 96 小時，故以開始供水 96 小時餘氯分析的情境來模擬，各節點的餘氯濃度分布如圖 150，依離加壓站距離不同，餘氯隨時間變化關係如圖 151。

根據內湖供水分區水質監視點，包含麗山國中、潭美國小、內湖四場加壓站、東湖國中及內溝里加壓站的數據資料，設定松山內湖線及大同大直線的初始濃度為 0.6 mg/L。經將分析結果與實際水質監測點資料反覆比對，回推出一階反應速率常數為-0.1，如下表 48。

由圖 152 比對結果可發現，麗山國中、潭美國小、內湖四場加壓站等模擬值與實測值幾乎相同，東湖國中及內溝里加壓站因屬管網後端區域，受實際水流狀況影響較多，但是差距仍然相當小，顯示管網具有一定的水質污染擴散模擬準確性。管網餘氯濃度擴散情形可參考圖 153 所示，而在經過 96 小時之模擬後，管網約 99.7 % 之節點餘氯濃度在 0.2 mg/L 以上，如表 49。

另一方面，分析內湖配水池供水對餘氯造成的影響，如同5.4節所提到，內湖配水池在吐水時，會使周遭一定範圍內的水齡明顯上升，故需探討在相對應的時間點，周遭餘氯濃度是否會因此受到影響。經分析結果如圖 154 顯示，內湖配水池放水時，會使水齡較高的水進入到管網中，而造成周遭節點的餘氯濃度下降。然而，水齡並非造成水池劣化的唯一因素，因此，可發現雖然餘氯濃度隨著水齡增加而下降，但仍可維持飲用水標準(>0.2 mg/L)。



圖 150 餘氯分析 96 hours 時管網餘氯濃度分布

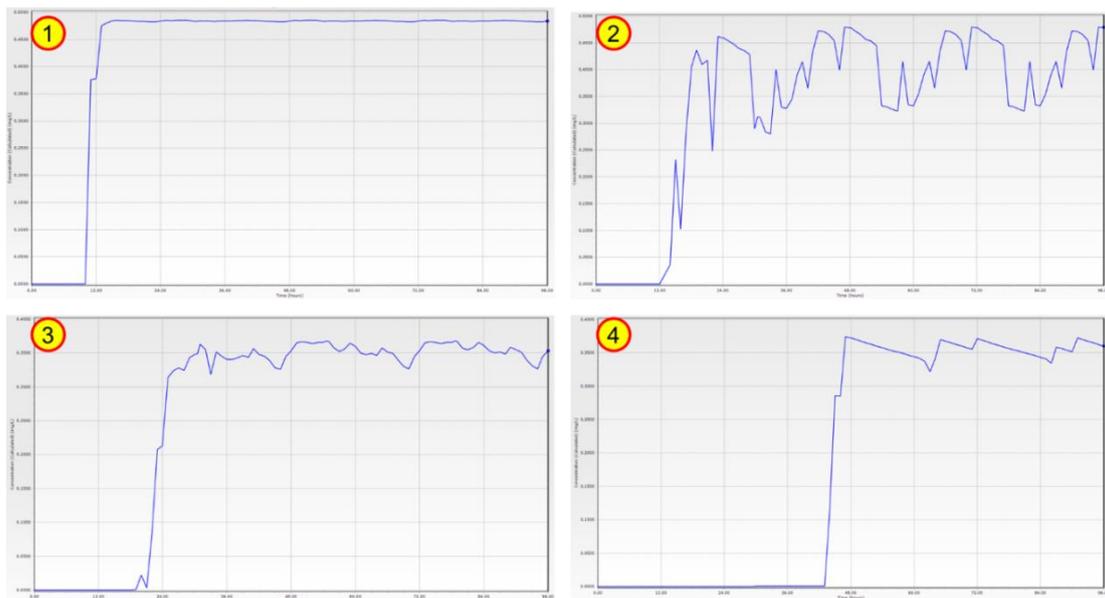


圖 151 不同距離節點與餘氯隨時間變化關係

表 48 水中氯擴散及反應速率設定值

擴散速率	$1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
反應速率	-0.1 1/day



圖 152 第 96 小時餘氯分析實際值與模擬值比較圖

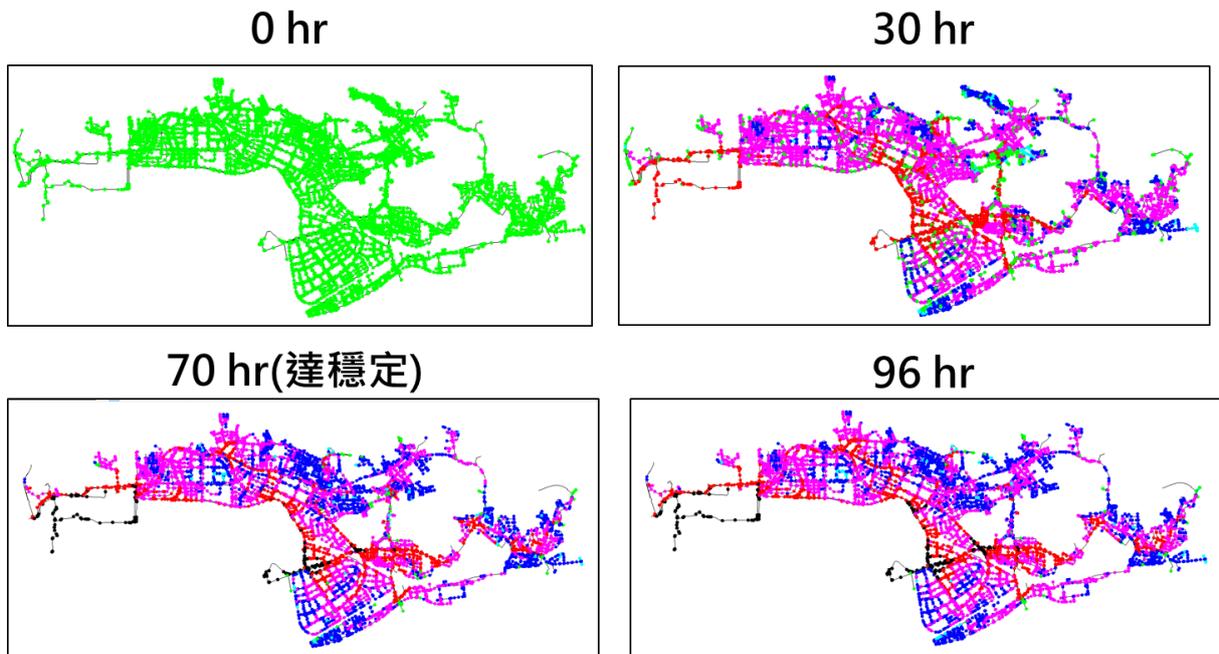


圖 153 管網餘氯分布隨時間變化示意圖

表 49 餘氯分析第 96 hours 管網餘氯濃度統計

餘氯(mg/L)	節點數量	佔比(%)
< 0.1	28	0.17
0.1 - 0.2	15	0.09
0.2 - 0.3	581	3.58
0.3 - 0.4	5240	32.29
0.4 - 0.5	8585	52.90
0.5 - 0.6	1780	10.97
<b>總計</b>	<b>16229</b>	<b>100.0</b>

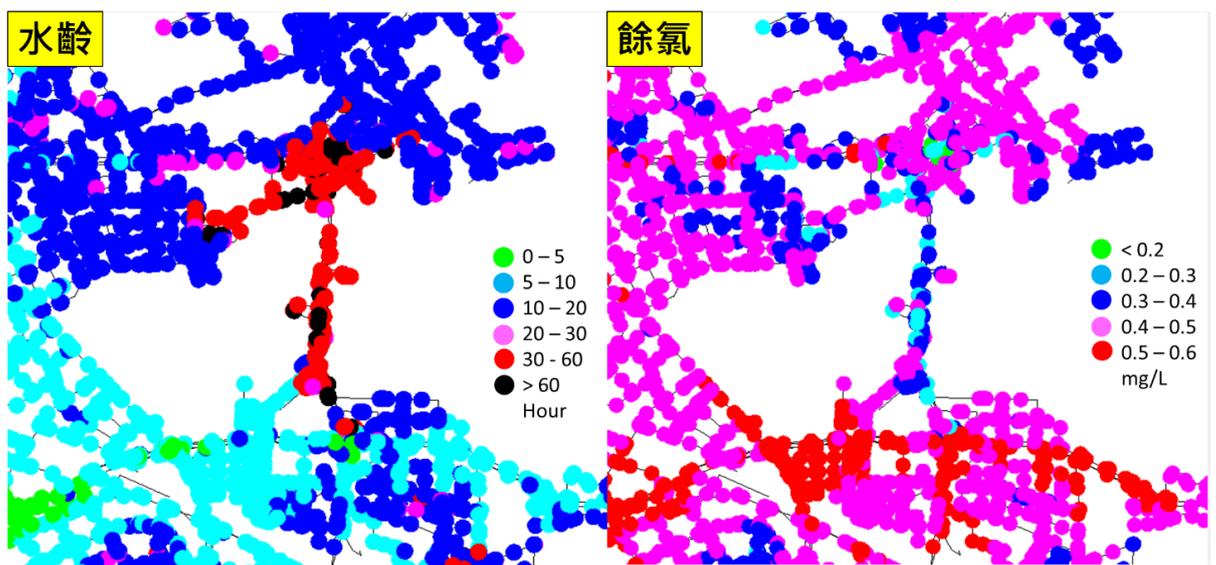


圖 154 內湖配水池吐水影響示意圖

## 5.6 三重地區增設三重二號配水池暨加壓站規劃及供水方式

### 5.6.1 三重供水分區現況

三重供水分區水源主要由公館加壓站以加壓或重力餘壓方式供水，經三重支線並在忠孝橋以 2 支  $\phi$  1,000mm 跨越淡水河輸送至三重配水池暨加壓站，供給三重地區及支援台水公司供水轄區（如圖 155），其平均供水量約為 21 萬 CMD（含支援台水公司水量）。供水模式為用水離峰時段以重力旁通直接供水，而在尖峰用水時段，再搭配既有三重配水池暨加壓站以加壓方式聯合供水，如此可充分運用進水餘壓，以達到供水節能操作。三重

供水分區水源尚有與大同供水分區之臺北橋 2 條  $\phi 600\text{mm}$  管線及公館供水分區中興橋 2 條  $\phi 500\text{mm}$  管線，惟為利各供水分區之操作管理，此兩部分之聯外管線平時操作時並無開啟通水。



圖 155 三重供水分區供水系統

北水處考量忠孝橋 2 支  $\phi 1,000\text{mm}$  管線若發生損壞無法供水時，受限於臺北橋 2 支  $\phi 600\text{mm}$  管線及中興橋 2 支  $\phi 500\text{mm}$  管線管徑供水容量，無法滿足三重供水分區用水，故北水處已另案辦理新設  $\phi 1,500\text{mm}$  輸水幹管（示意圖如圖 156），連通忠孝橋於臺北市端之 2 支  $\phi 1,000\text{mm}$  與新北市三重區環河路（近中興橋）之既有  $\phi 1,350\text{mm}$  幹管，並再配合本案新建三重二號配水池暨加壓站（以下簡稱三重二加），建立雙系統供水，提升三重供水分區備援能力，以達供水穩定及用水安全。

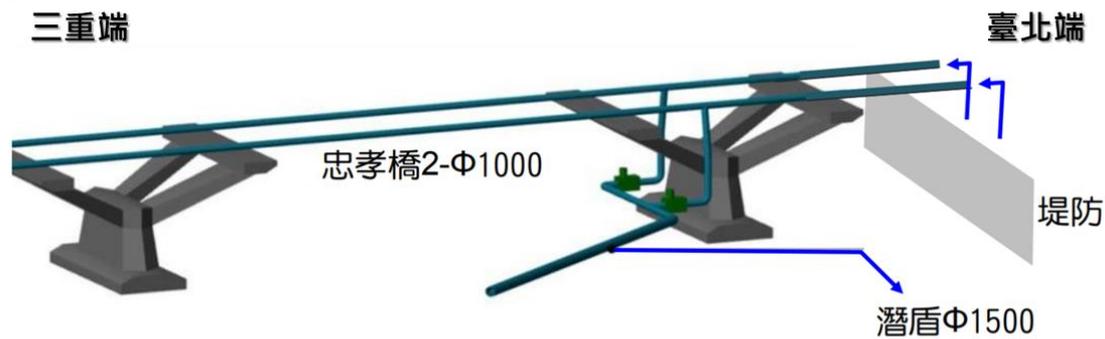


圖 156 忠孝橋新設  $\phi 1,500$  mm 輸水幹管示意圖

三重供水分區所面臨困境為供水壓力分布不均，其北部部分區域供水壓力偏低，雖可藉由既有三重配水池暨加壓站不斷提高出水壓力以改善三重供水分區北部區域供水壓力，惟進而造成南部區域水壓偏高而使漏水機率上升，提高供水風險及造成浪費水資源等問題，故本研究期望透過新建三重二號配水池暨加壓站，並配合其他增設相關管線，使三重供水分區整體管網系統更趨完善，更進一步提升整體供水壓力及穩定性。

本研究規劃新設三重二號配水池暨加壓站，其配水池採地下式，考量日後維護管理需求，需採2池以上規劃設計，配水池總容量需在 24,000 噸以上。另加壓站設備能量應能滿足以三重二加供應三重全區用水及與既有三重配水池暨加壓站聯合供水等模式，並規劃抽水機容量及其揚程、臺數。

### 5.6.2 三重供水分區水理模型建置及校正

供水管網水理分析之準確性，取決於水理模型正確性及模擬結果與實測值之相關性等，故本研究篩選 107 年全年度忠孝橋幹管、既有三重配水池暨加壓站及三重供水分區 13 處監測點 (S511~S523) 等流量及壓力每小時監測數據，經排除資料異常點後，採用 107 年 10 月 2 日 23:00 之監測值作為管網水理模型校驗正使用。依據該時段之監測值，既有三重配水池暨加壓站出水量為 88,305 CMD (出水壓  $1.45 \text{ kg/cm}^2$ )，忠孝水管橋水量分別

為 95,355 CMD 及 118,690 CMD (壓 1.15 及 1.17 kg/cm<sup>2</sup>)，合計約為 30.2 萬 CMD。

有關三重供水分區水理模型，則自 Web GIS 系統中，透過分析模組中之水理模型匯出功能，框選三重供水分區範圍後再下載該供水分區管網水理模型 INP 檔案 (如圖 157)，另需設定既有三重配水池暨加壓站及水源水頭相關資訊，並修正水量依比例調整各節點之需水量，最後與三重供水分區既有監測數據比對，針對模擬差異較大之監測點，藉由調整周邊管線 C 值，以獲得較佳的管網模型及較高之相關性，其校正後之水理分析結果與監測值如表 50。



圖 157 三重供水分區管網水理模型

表 50 三重供水分區管網水理模型校正結果

監測點	監測值		模擬值	
	水量(CMD)	壓力(kg/cm <sup>2</sup> )	水量(CMD)	壓力(kg/cm <sup>2</sup> )
三重加壓站	88,305	1.45	88,429	1.39
忠孝水管橋 1	95,355	1.15	95,209	1.1
忠孝水管橋 2	118,69	1.17	118,712	1.1
S511	-	0.95	-	0.93
S512	-	1.13	-	1.06
S513	-	0.66	-	0.74
S514	-	0.69	-	0.72
S515	-	1.16	-	1.04
S516(五谷王北街)	11,760	1.34	11,760	1.28
S517(徐匯中學)	48,625	0.80	48,625	0.76
S518	-	1.02	-	0.84
S519	-	1.06	-	0.96
S520	-	0.62	-	0.80
S521	-	0.85	-	0.99
S522	-	0.50	-	0.58
S523(中正北路)	18,495	0.60	18,495	0.61

### 5.6.3 增設三重二號配水池暨加壓站供水方式之水理分析

三重供水分區需水量之推估，其涉及層面相當廣，除未來人口數推估外，尚需考量每人每日生活用水量、售水率、供水普及率、需水量變化、用水因素及台水支援水量等因素，另為免設計過量並貼近於實況，故將取推估所得 110 年三重區平均日需水量及最大時需水量（加計台水支援點最大日需水量），並分別取整數為 25 萬 CMD 及 35 萬 CMD 作為水理模型分析之基礎，進行供水模式之探討。

北水處為增加備援系統及健全管網系統，故目前正在忠孝橋辦理新設潛盾  $\phi$  1,500mm 輸水幹管，另在三重二加出水管與忠孝路  $\phi$  1,000mm 幹管銜接後，延伸至自強路與  $\phi$  900 mm 幹管銜接，供應至北側管網，本研究將此兩段幹管亦納入模擬分析，並以三重供水分區管網末端之遠端回授點壓力作為檢核點，其檢核壓力值設定為前述水理模型校正結果之壓力 0.759 kg/cm<sup>2</sup>，而未來仍有餘裕時可考量提升供水服務水準。

考量由忠孝橋 2- $\phi$  1,000mm 幹管及新設潛盾  $\phi$  1,500mm 幹管輸水至三重供水分區時，需跨越過堤防瓶頸始能供水至三重供水分區（如圖 149 所示），且為充分利用重力餘壓供水之節能操作方式，其需補壓或增量部分則由既有三重加壓站或三重二加來負擔，故經查 107 年監測資料，分析公館加壓站以重力供水至三重區，最大水量約 27 萬 CMD，總水頭約 18 m。

有關新增三重二加後，其供水方式共可分成既有三重加壓站進行整備停止營運、既有三重加壓站及三重二加聯合營運、兩加壓站未來若有餘裕再提升供水服務水準等三種情境，分述如下：

#### 1. 既有三重配水池暨加壓站進行整備停止營運，滿足現況服務水準

既有三重配水池暨加壓站營運至今已 30 餘年，為三重供水分區重要且唯一之配水池及加壓站，有進行相關整備作業之需，故此情境將模擬當既有三重配水池暨加壓站停止營運時，在平均日及尖峰需水量時，三重二加加入營運之供水情形。

依上述前提及條件設定，為充分運用重力餘壓之節能供水模式，在平均日需水量 25 萬 CMD 時，可採重力供水，當忠孝橋總水頭 18m 時，遠端回授點之模擬壓力為  $1.137 \text{ kg/cm}^2$ ，優於現況供水服務水準；而於尖峰需水量 35 萬 CMD 時，由於公館加壓站重力供水之最大水量約 27 萬 CMD，故不足水量由三重二加之配水池以加壓方式供應，模擬結果為三重二加供水量 8 萬 CMD，總水頭為 16.6 m，遠端回授點檢核點壓力為  $0.927 \text{ kg/cm}^2$ ，優於現況供水服務水準，模擬結果如圖 158 及 159 與表 51 所示。

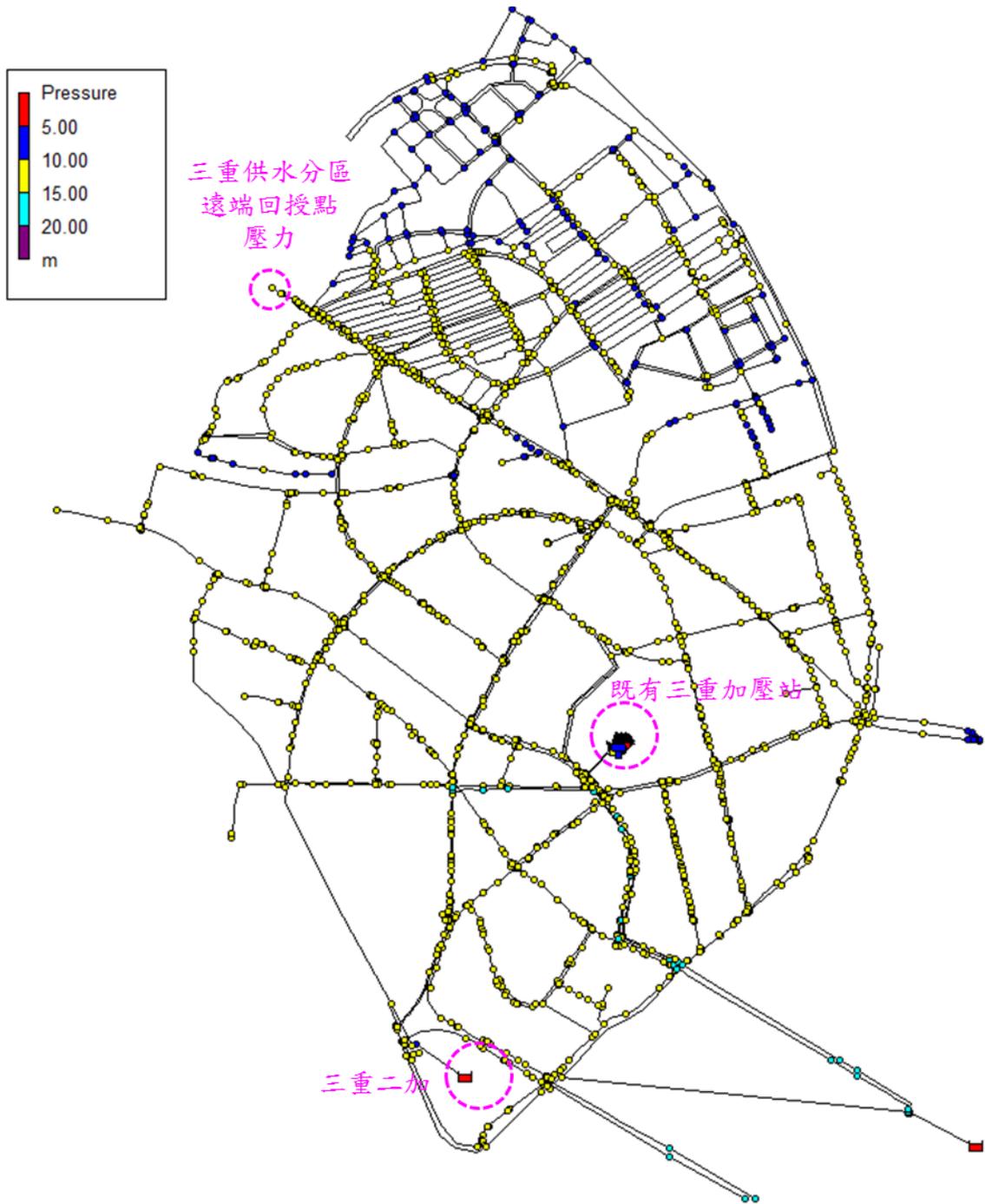


圖 158 既有三重加壓站停止營運平均日需水量模擬結果

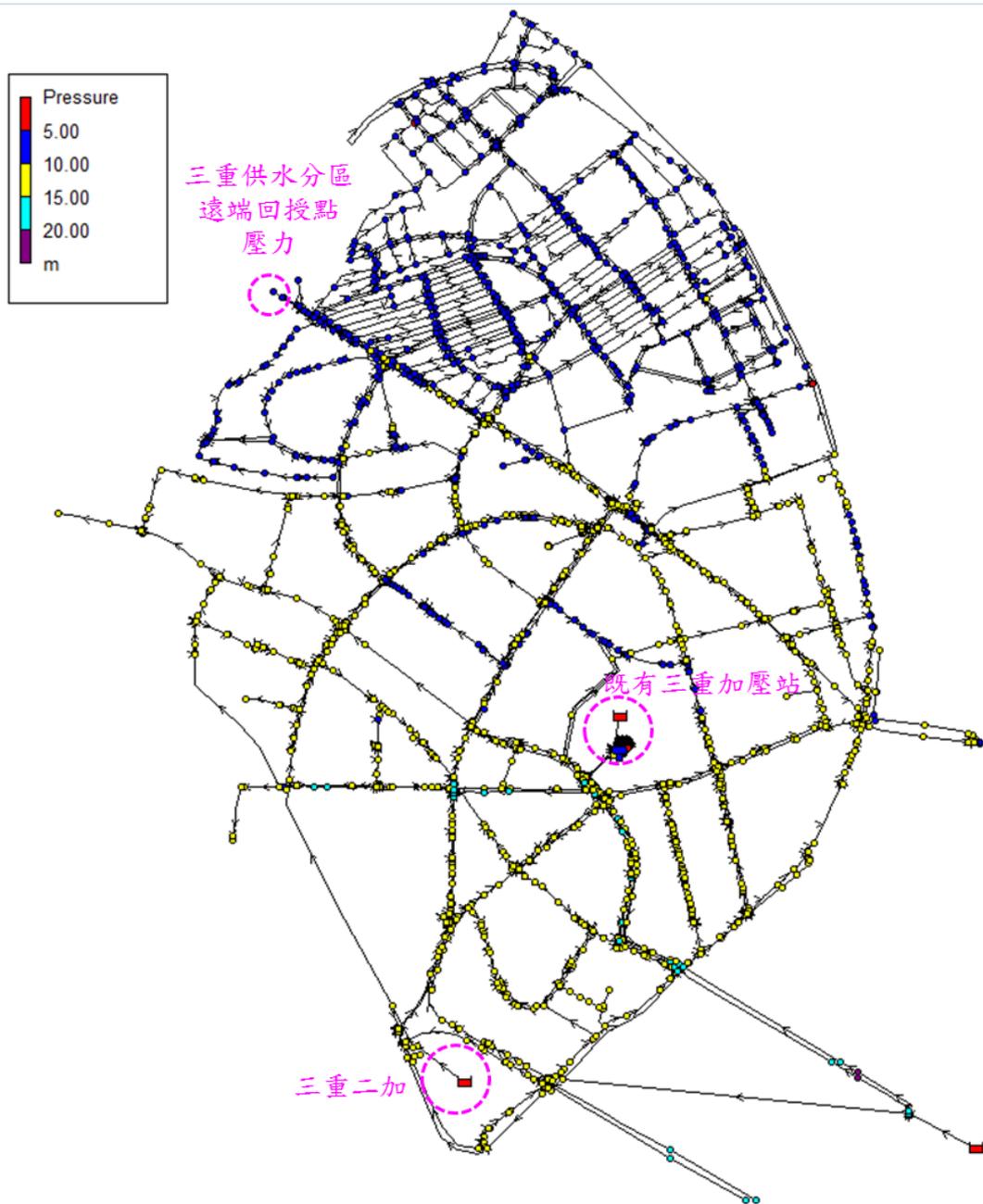


圖 159 既有三重加壓站停止營運尖峰需水量模擬結果

表 51 既有三重加壓站停止營運之模擬結果

流量	重力供水	三重二加	既有三重加壓站	遠端回授點壓力
平均量 25萬CMD	Q=25萬CMD H=18m	—	—	1.137 kg/cm <sup>2</sup>
尖峰量 35萬CMD	Q=27萬CMD H=18 m	Q=8萬CMD H=16.6m 水池加壓	—	0.927 kg/cm <sup>2</sup>

2. 既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合營運，滿足現況服務水準

當既有三重配水池暨加壓站整備完畢加入營運時，於尖峰需水量 35 萬 CMD 時，重力供水 27 萬 CMD，剩餘供水量 8 萬 CMD 則由既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合供應，模擬結果若三重一加供水量 4 萬 CMD，總水頭為 16.4 m，三重二加供水量 4 萬 CMD，總水頭為 15.7 m，遠端回授點壓力為 0.947 kg/cm<sup>2</sup>，優於現況供水服務水準，模擬結果如圖 160 及表 52 所示。

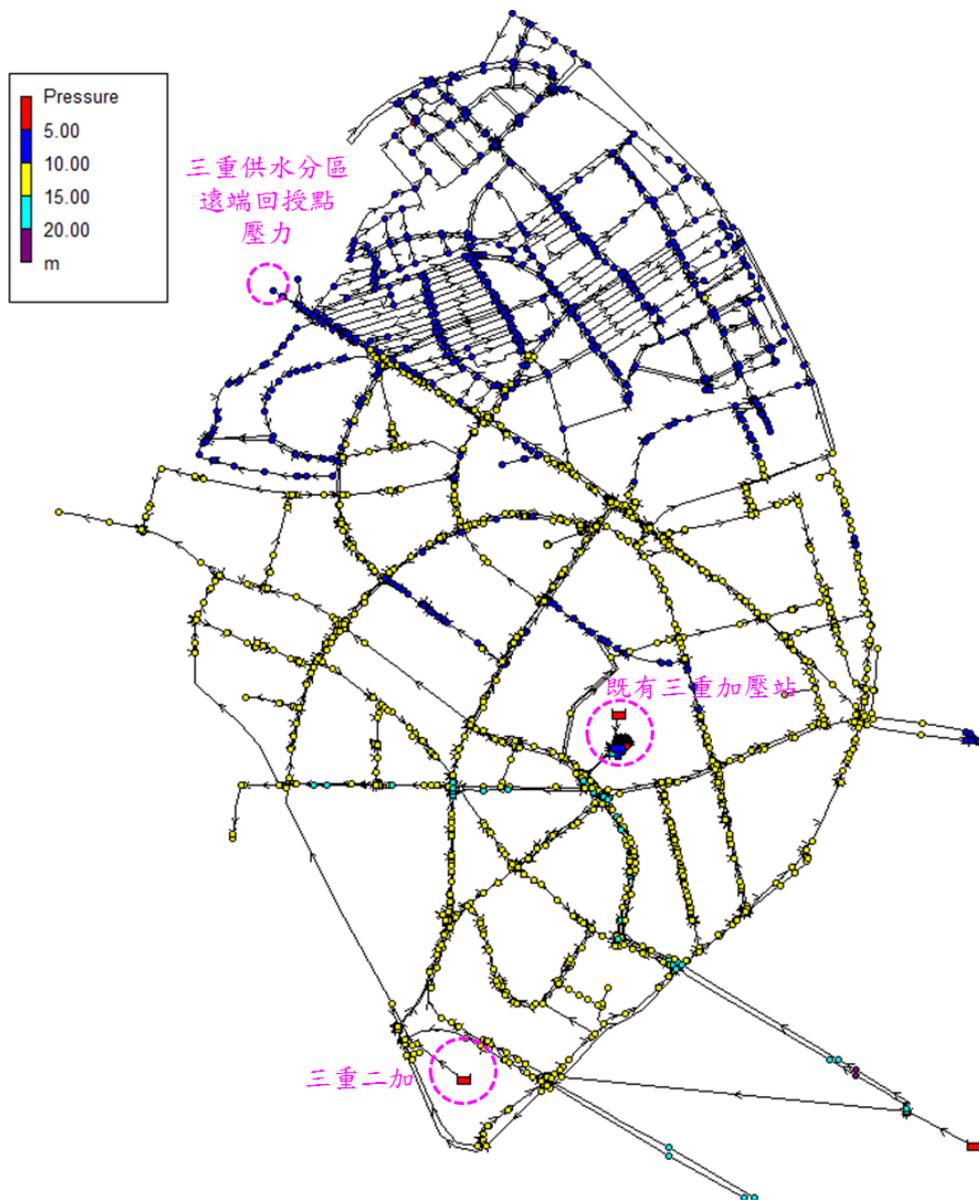


圖 160 既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合營運之模擬結果

表 52 既有三重配水池暨加壓站及三重二加聯合營運之模擬結果

流量	重力供水	三重二加	既有三重加壓站	遠端回授點壓力
尖峰量 35萬CMD	Q=27萬CMD H=18 m	Q=4萬CMD H=15.7m 水池加壓	Q=4萬CMD H=16.6m 水池加壓	0.947 kg/cm <sup>2</sup>

### 3. 兩加壓站未來若有餘裕再提升供水服務水準

當滿足現況服務水準後，若未來營運上仍有餘裕，則可評估是否可提升供水服務水準，以遠端回授點壓力達 1.5 kg/cm<sup>2</sup> 為目標，而於平均日需水量 25 萬 CMD 時，由重力供水已可滿足水量需求，惟受限於總水頭之限制，且於管網前端水頭已消耗大部分，造成管網末端供水壓力較低，故基於充分利用重力餘壓之節能供水模式，可藉由操作相關制水閥，區分為管網前端部分重力直接供水，而部分藉由管中加壓模式輸送至管網後端，提升整體服務水準。透過管網水理模型，關閉三重二加出水管與重陽路  $\phi$  700 mm 幹管銜接處、忠孝路  $\phi$  1,000mm 與中山路  $\phi$  700mm 接處、忠孝路  $\phi$  1,000mm 與自強路  $\phi$  900 mm 銜接處及自強路  $\phi$  900 mm 與三和路  $\phi$  400 mm 銜接處等 4 處制水閥，藉由三重二加之管中加壓，輸送至三重供水分區之西北側，重力則就近供應東部區域。

依據模擬結果，於平均需水量 25 萬 CMD 時，重力供水為 12 萬 CMD，而三重二加管中加壓水量為 13 萬 CMD，管中加壓只要再提供水頭 8.4 m 之壓力，遠端回授點壓力則可達 1.5 kg/cm<sup>2</sup>。於尖峰需水量 35 萬 CMD 時，不足水量將由既有三重配水池暨加壓站供應，依據模擬結果，重力供水為 10 萬 CMD，既有三重配水池暨加壓站供水量 9.5 萬 CMD，總水頭為 16.8 m，三重二加管中加壓水量 15.5 萬 CMD，提供水頭為 15 m，遠端回授點壓力可達 1.5 kg/cm<sup>2</sup>，模擬結果如圖 161 及 162 與表 53 所示。

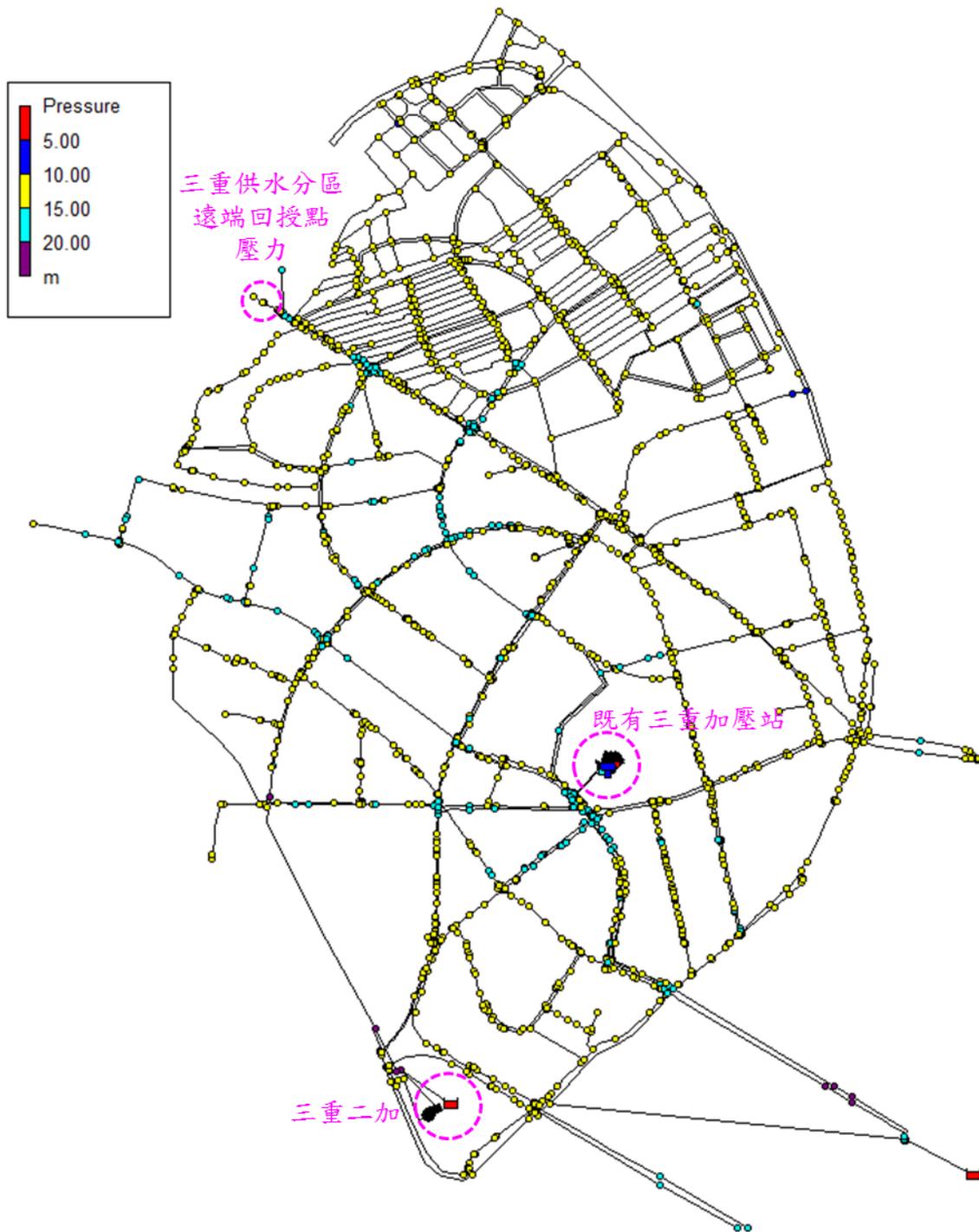


圖 161 平均日需水量提升供水服務水準之模擬結果

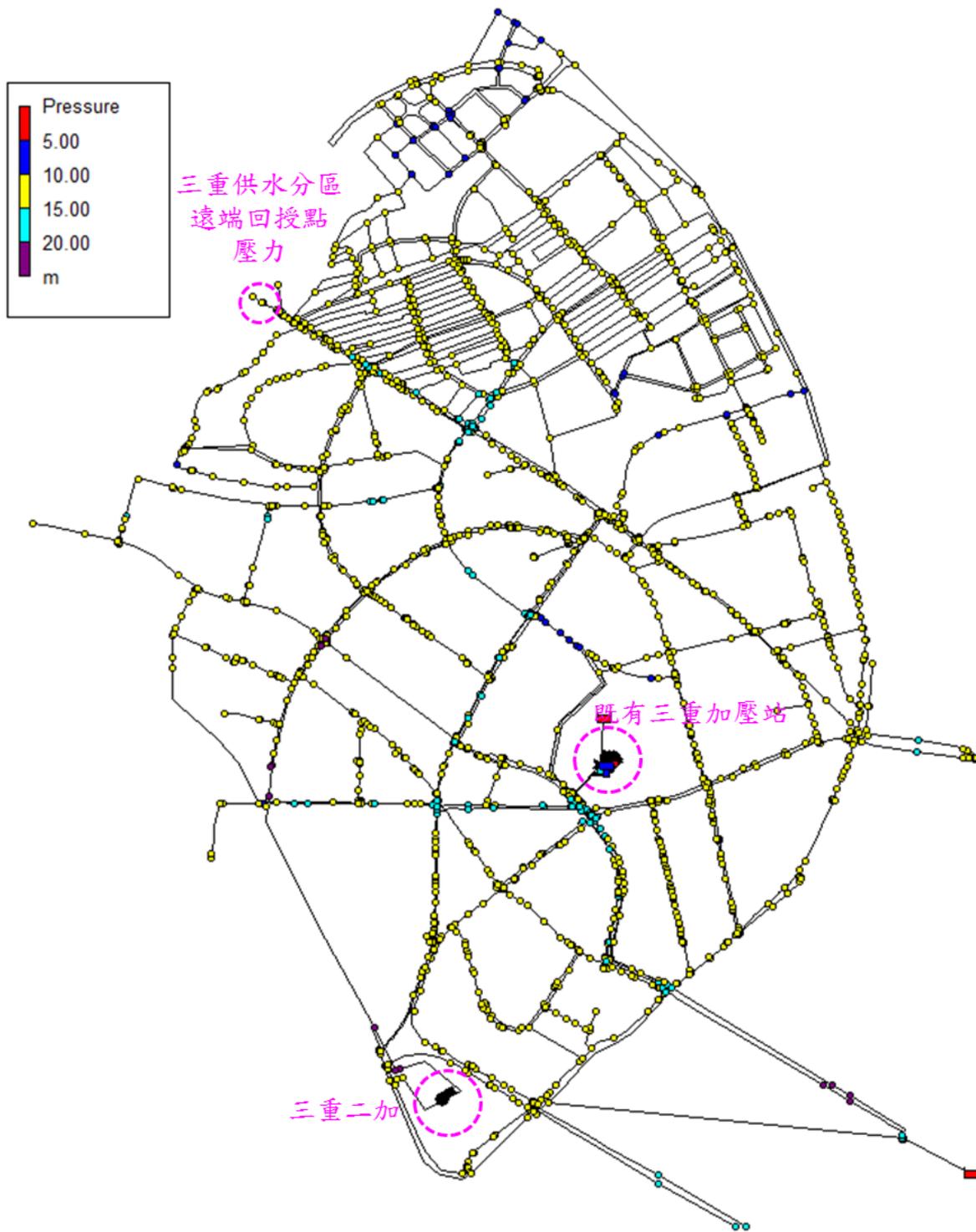


圖 162 尖峰需水量提升供水服務水準之模擬結果

表 53 提升供水服務水準之模擬結果

流量	重力供水	三重二加	既有 三重加壓站	遠端回授點 壓力
平均量 25萬CMD	Q=12萬CMD H=18m	Q=13萬CMD H=8.4m 管中加壓	—	1.5 kg/cm <sup>2</sup>
尖峰量 35萬CMD	Q=10萬CMD H=18 m	Q=15.5萬CMD H=15.0m 管中加壓	Q=9.5萬CMD H=16.8m 水池加壓	1.5 kg/cm <sup>2</sup>

綜整前述，隨著潛盾  $\phi 1,500\text{mm}$  幹管、忠孝路  $\phi 1,000\text{mm}$  幹管及三重二加加入營運後，為達充分運用重力餘壓之節能供水模式，規劃以公館加壓站重力供水，若需補壓或增量時，則由既有三重加壓站及三重二加負擔。依水理分析模擬結果，於平均日需水量時，可直接由公館加壓站採重力供水，當尖峰需水量時，則可採重力搭配既有三重加壓站及三重二加水池加壓供水，同時可互為備援亦可聯合營運，且皆可優於現況供水服務水準，故於短期內，三重二加僅有水池加壓之需求，而當未來營運上有餘裕考量提升服務水準時，則才有設置管中加壓之需求。

#### 5.6.4 三重二號配水池暨加壓站設備設置計畫

依前章節三重供水分區之需水量及水理分析結果，於維持三重供水區現況供水服務水準之狀態下（即三重供水區遠端回授點壓力值達  $0.759\text{ kg/cm}^2$ ），當需水量為平均日需水量時，由公館加壓站以重力方式供水，當需水量為尖峰需水量時，除以公館加壓站重力供水外，再搭配既有三重加壓站及三重二加水池加壓供水，在此情境下，三重二加所需水池加壓抽水機總流量約為 8 萬 CMD，所需加壓站出水端揚程為 17 m，再加計水池深約 16 m，則水池加壓抽水機所需揚程合計為 33 m，另再考量 107 年既有三重加壓站歷史紀錄資料，其水池加壓最高出水量約為 11 萬 CMD，故建議三重二加水池加壓抽水機總流量設定為 11 萬 CMD 及揚程為 35 m，規劃分為 2 組設置，並設置 1 組備用機組，故每組水池加壓抽水機流量為 55,000

CMD，經計算得抽水機馬力為 550 hp，而北水處為統一抽水機規格以利後抽水機支援調度使用，故選擇抽水機馬力數為 600 hp，另考量蘆洲、新莊等鄰近地區未來需求，水池加壓抽水機應增為 4 組，故再預留 1 組水池加壓抽水機機坑及搭配之附屬設施如管線、閥件及基座等，以因應未來使用需求。

另未來若需提升供水服務水準（即三重供水區遠端回授點壓力值達 1.5 kg/cm<sup>2</sup> 以上），三重二加所需管中加壓抽水機總流量約為 16 萬 CMD，揚程為 16.5 m（出水端揚程 15 m×1.1），規劃同樣分為 2 組設置，並設置 1 組備用機組，故每組管中加壓抽水機流量為 80,000 CMD，經計算得抽水機馬力為 350 hp，而北水處為統一抽水機規格以利後抽水機支援調度使用，選擇抽水機馬力數為 400hp，因目前尚無提升供水服務水準之需求，故預留 3 組管中加壓抽水機機坑、抽水桶及搭配之附屬設施，待未來有需求時再行裝設。本研究三重二加之抽水機型式及規格彙整如表 54。抽水機應採低吸沉水式，可有效降低加壓站之噪音及振動對附近環境衝擊，抽水機可視需求變頻控制操作並交替運轉，以增加操作彈性，穩定供水壓力。

表 54 三重二號配水池暨加壓站抽水機配置

抽水機型式	數量(組)		流量 (CMD)	揚程(m)	馬力數 (hp)
水池加壓抽水機	現期	3 (其中1組備用)	55,000	35	600
	未來	4 (其中1組備用)			
管中加壓抽水機	現期	0	80,000	16.5	400
	未來	3 (其中1組備用)			

## 第六章 後續實務應用模組規劃方向

本研究除提升管線數值系統內附屬設備精度及建置完整空間資料庫架構外，更使相關水理分析資料易於轉出應用，因此水理分析在未來自來水管網各種分析、漏損、規劃、設計及調配方案等加值模擬應用，將不再需要耗費冗長時間重新建置模型。本章節將針對監控中心即時動態水理分析模型、計畫性或突發性事件施工停水影響範圍、計量小區封閉可行性評估、突發性不明幹管漏水之位置分析、管線損壞風險分析及供水設施規劃設計等實務應用模組工作方向進行探討。

### 6.1 即時動態水理分析模型-監控中心

目前北水處供水人口約389萬人，含轄區外行政支援供水達550萬人，供水範圍遼闊、供水系統複雜，早期僅由操作人員依經驗操作淨水場及加壓站運轉，供水轄區可能有水壓不均之情況，且供水轄區內有狀況發生時，無法立即獲知與處理，但隨電子資訊工業發展及參考世界先進國家自來水供水管理案例，自民國80年成立臺灣第一座自來水監控系統之監控中心，提供管理人員即時資訊，以便立即判讀各場站及監視點之運轉狀況、水壓及水量狀況，迄今仍陸續擴增監視點。惟受限於目前周遭環境、市民觀感及道路施工等因素，北水處所建置之水壓、流量監視點數量有限，並無法完整呈現轄區內水壓及流量等狀況。有鑑於此，尚可建立各供水分區之水理模型，並經校正與現況接近，再結合目前監控系統之水壓、水量監測數據，即可分析模擬在任一時段淨水場或加壓站出水壓及流量情形下，該供水區管網內任一節點水壓與任一管段流量流速的變化。後續Web GIS系統建立相關應用模組，依所選擇之供水分區自動比對監測值與分析值，藉此作為評估供水是否異常之參考依據，如圖163，另監控中心操作人員點選供水分區內任一段管線亦可顯示該管段之流量、流速及節點之水頭數值。

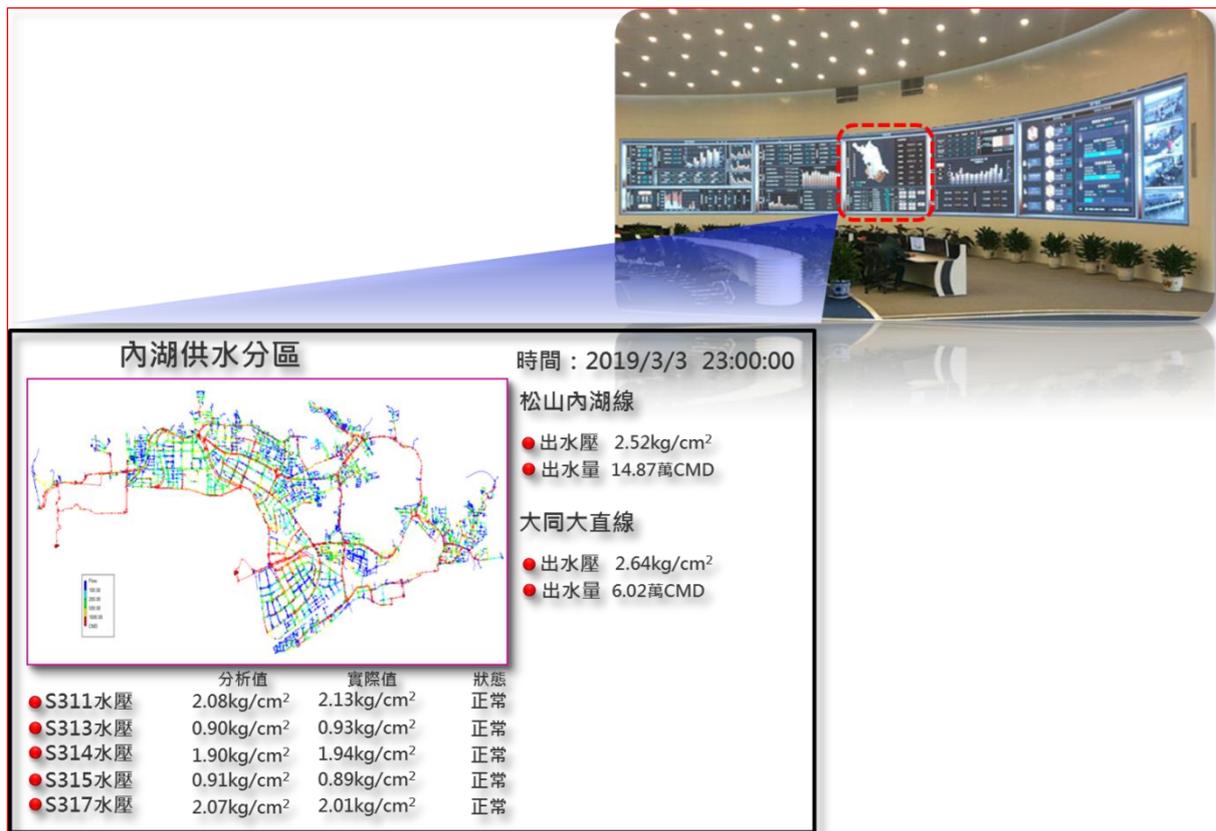


圖163 監控中心即時動態水力分析示意圖

## 6.2 計畫性或突發性事件施工停水影響範圍

當管線老舊需進行汰換管線、配合其他管線單位辦理臨、永遷管線或施工挖損進行漏水搶修時，需辦理停水作業以利後續施工，惟除影響關水範圍內用戶外，是否會影響關水區域外用戶用水？影響程度為何？是一個重要的課題。特別在突發性事件（如施工挖損、管線老舊或地震等外力因素導致管線漏水）發生後，需立即判斷影響範圍（包含停水、供水減壓之路段及用戶數）時，更顯重要。有關關水區域停水部分通常在確認關閉之制水閥後即可確定，目前北水處所開發之Web GIS系統可在選取欲停水之管段後，自動追蹤所需關閉之閥類及關水區域停水之用戶數。惟關水區域外水壓降低或停水之受影響範圍則無法立即掌握。未來完成北水處所有供水分區水力模型及監控系統SCADA資料介接後，可將前揭之關水區域套入該

系統後，程式自動運算關閉相關閥類後之節點壓力變化，當壓力變化值超過容許範圍，即可對應搜尋受影響之Web GIS系統內路段及用戶。後續在Web GIS系統建立相關應用模組，人員在辦理計畫性施工案件或突發性事件時，僅需點選欲施工或搶修之管段後，系統自動分析產出影響範圍，如表55及圖164。

表55 計畫性或突發性事件施工停水影響範圍一覽表

案由				
類別	影響範圍	用戶數		
		直接戶	間接戶	總戶數
停水區域				
水壓降低區域				

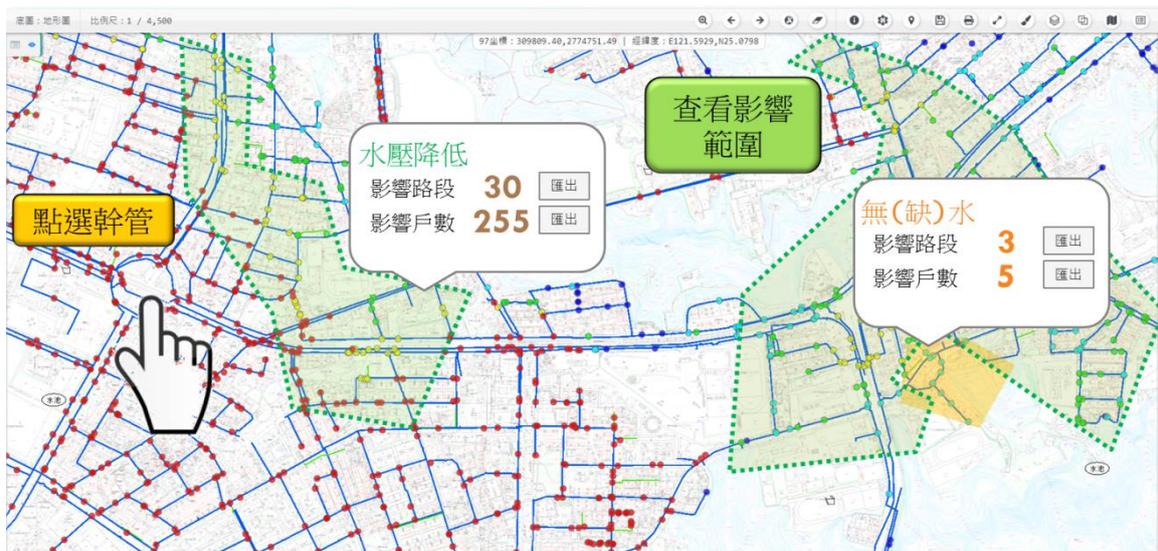


圖164 Web GIS系統計畫性或突發性事件施工停水影響範圍示意圖

### 6.3 計量小區封閉可行性評估

臺北地區地狹人稠，廣布地下的供水管網，肩負著輸送自來水的重任，然而部分管線老舊，漏水率偏高，一直為大眾所關注。為降低漏水損失，

確保珍貴的水資源，北水處依國際自來水協會建議漏水管理四大主軸（漏水檢測、管線汰換、修漏品質、水壓管理）分別擬訂相關策略（如圖165）。因此，為有效減少漏水及提升供水效能，北水處自民國92年起導入在地化「小區計量」觀念，透過「小區計量」工法逐步進行改善，主要作法是以街廓畫分成小型獨立供水區塊，並於安裝計量表後核算該區塊之售水率，再透過檢測、修漏、抽換管線、換表等改善方法循環追蹤成果（如圖166）。另自民國95年起開始運用前揭手法執行20年「管網改善長程計畫」，截至民國107年底，每年管線汰換比率皆高於1.86%，超越國際自來水協會標準1.5%甚多，漏水率自民國95年之25.77%降至民國107年之13.52%，由此可見管線汰換對於降低漏水損失之重要性。

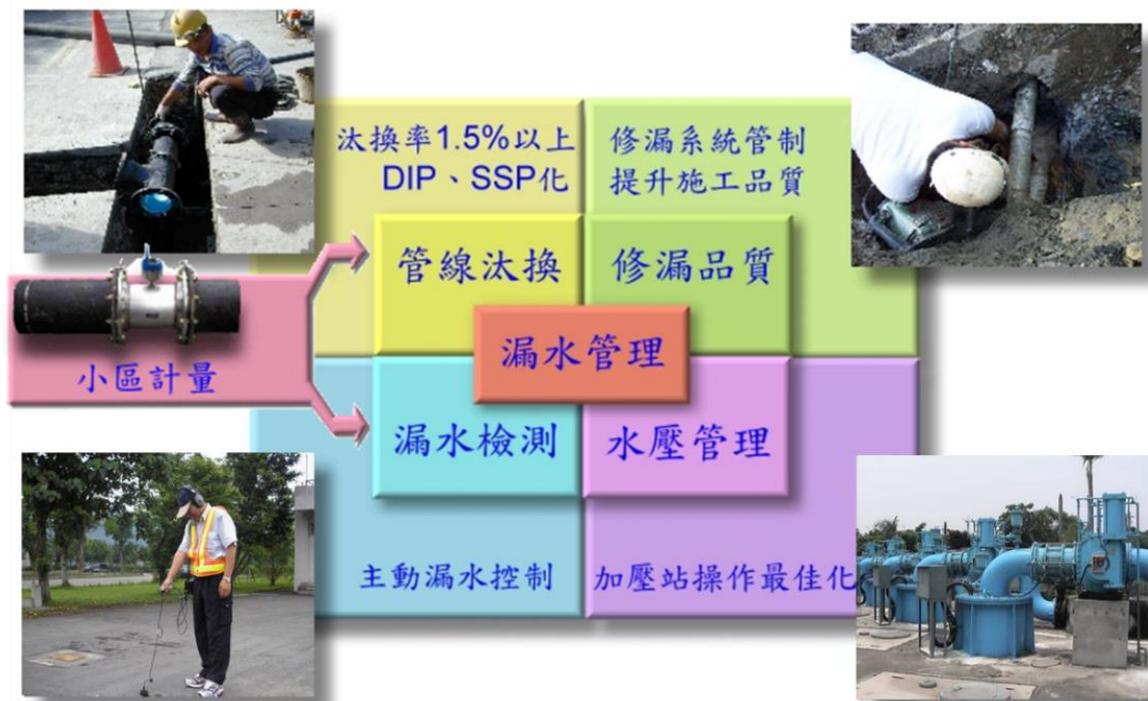


圖 165 國際自來水協會建議漏水管理四大主軸

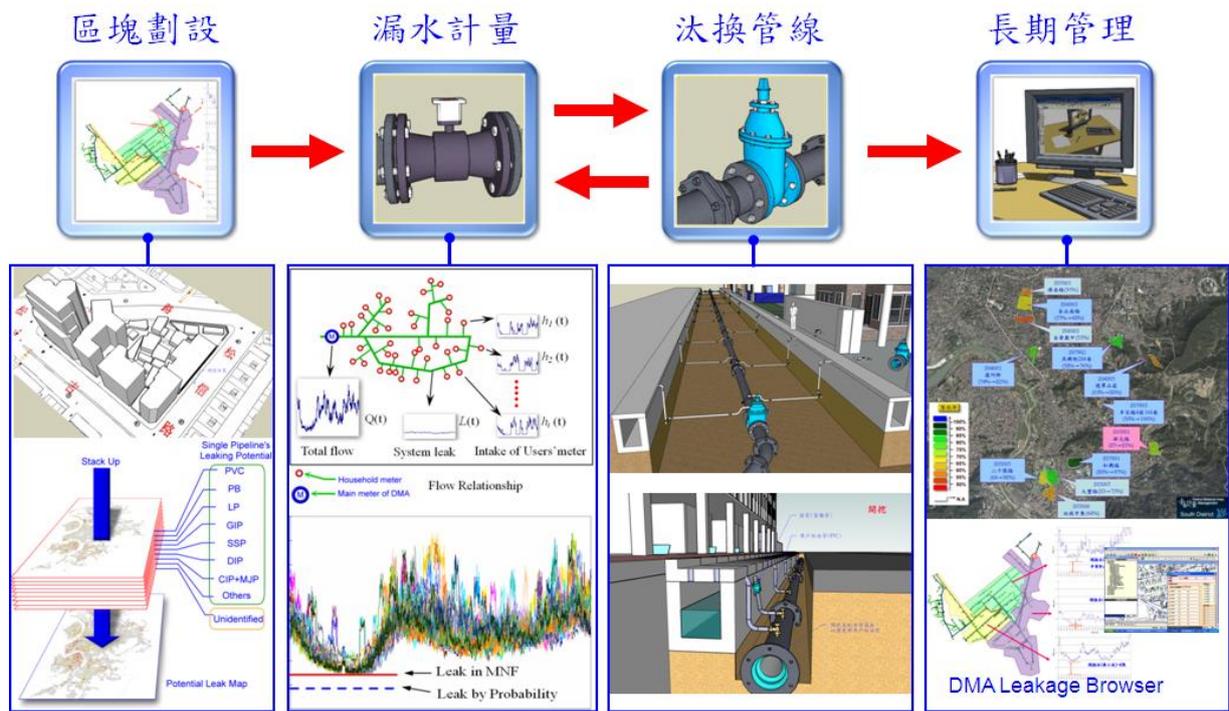


圖 166 「小區計量」工法

為了稽核管網改善之成效，北水處採用「小區計量」作為評核的工具，將供水管網分割為獨立供水區塊，裝表計算漏水率，再挑選漏水最嚴重的小區優先抽換管線，並經常檢視漏水率是否因管線抽換而下降。

以往無法採用水理分析方式規劃小區係因無法獲知欲規劃之小區周邊水壓、水量，尤其是水量，在考量設置成本及現場環境等因素，無法僅為瞭解周遭之水量而廣設流量計（如圖 167）。尚可依本研究方式建立各供水分區水理模型且經校驗證以符合現況，即可依欲規劃之區域所在之供水分區水理模型下進行小區規劃設計作業，規劃人員可針對不同小區範圍及進水點進行多種組合，經由水理分析結果判斷小區劃設之可行性及設定進水點位置；或當一個進水點無法滿足供水時，可在所規劃小區之水理模型內增加進水點模擬分析以提升供水能力。另北水處至民國 108 年 10 月止，已規劃完成 827 個小區，並已建設完成 150 個智慧小區流量計（DSM, District Smart Meter，如圖 169），可利用該智慧小區流量計所讀取之流量及壓力數值，作為後續各供水分區水理模型流量及壓力校正使用，增加水理模型之

正確性。

後續在 Web GIS 系統建立「小區封閉可行性評估」應用模組，在該應用模組內選取小區範圍及進水點位置後，系統自動分析小區範圍內、外壓力變化，藉此判斷小區封閉可行性，降低小區封閉失敗機率，提升工作效率，如圖 168。

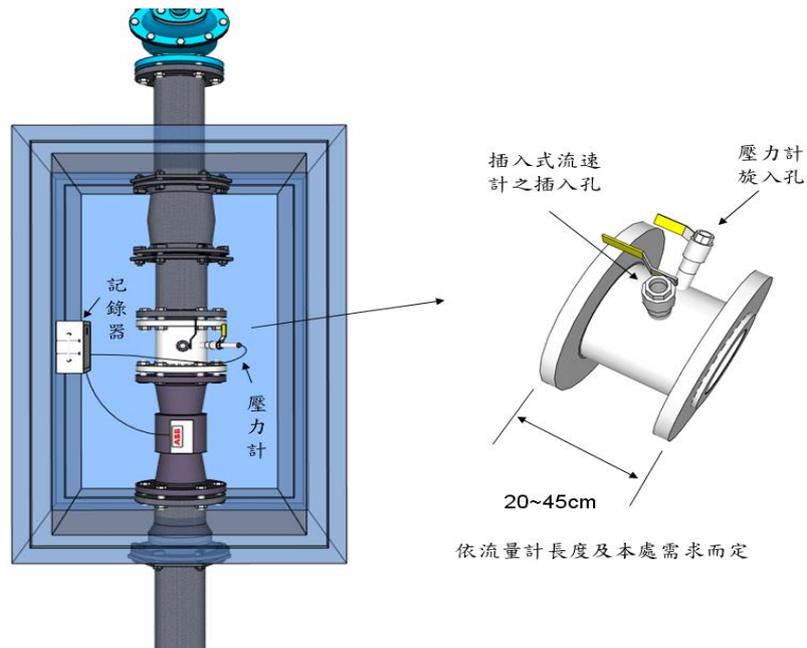


圖 167 流量計示意圖（早期部分流量計採用插入式流量計）



圖 168 Web GIS 系統評估小區封閉可行性示意圖

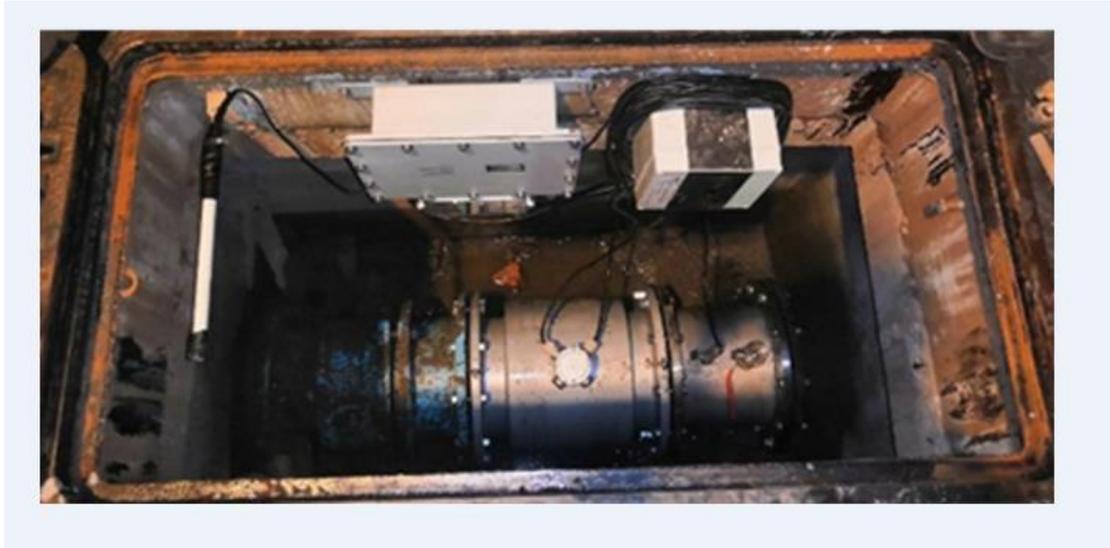


圖 169 智慧小區流量計

#### 6.4 突發性不明幹管漏水之位置分析

供水管網內由於早期管材不佳或管齡較長，而發生管線突然性漏水，漏水若直接排入雨水污水箱涵或經水路流至他處而未漏至路面時，極可能被忽略，當漏水點位於幹管時，可能導致周遭管網水壓受影響，甚至加重加壓站供水負荷，故如何快速且有效找出漏水點，則成為北水處當前防治漏水之重要課題。

民國 100 年 9 月 13 日北水處所轄之三重地區監視點水壓突降，三重加壓站出水量突增約 6 萬 CMD，監控中心發現出水量異常後並經資料分析初判為幹管漏水後，隨即通報北區分處針對幹管進行管線巡查，惟現場巡查結果並未發現漏水，因此研判漏水應已直接排至箱涵。為解決此一嚴重漏水問題，北水處利用既有監控資料進行評估分析，三重地區既有水壓監視點共有 13 處（如圖 170），各監視點漏水前後之水壓變化如圖 171、172 所示，其中以監視點 S511、S520 及 S522 壓力變化最為明顯，故針對前述現象擬訂試關水作業計畫以確認漏水區域。首先關閉圖 173 蝶閥 1 時，除監視點 S511、S520 外，其餘監視點壓力皆已揚升，因此研判漏水點應位於下

游側，經再關閉圖 173 蝶閥 2 時，監視點 S520 有揚升趨勢，惟監視點 S511 壓力並未提升，故可研判漏水應在蝶閥 1 至蝶閥 2 之間。最後在關閉圖 173 蝶閥 3 後，監視點 S511 壓力因漏水點已被隔離而明顯提升，如圖 174。透過此方式縮小供水分區之漏水範圍後，再針對局部區域進行檢測及修漏作業後，三重供水分區恢復至原供水狀態。



圖 170 三重供水分區及加壓站暨監視點分佈圖

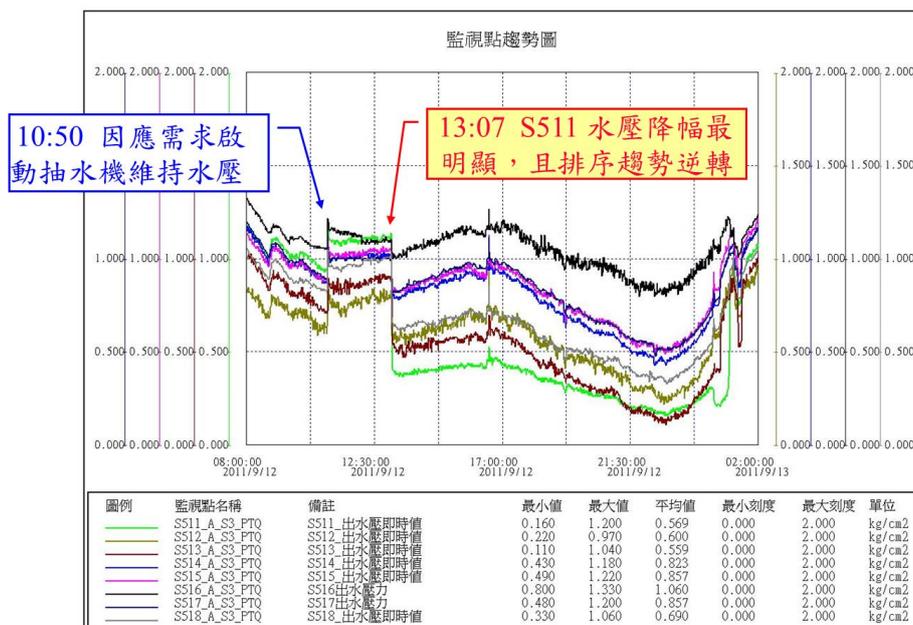


圖 171 三重供水分區監視點漏水期間壓力趨勢圖

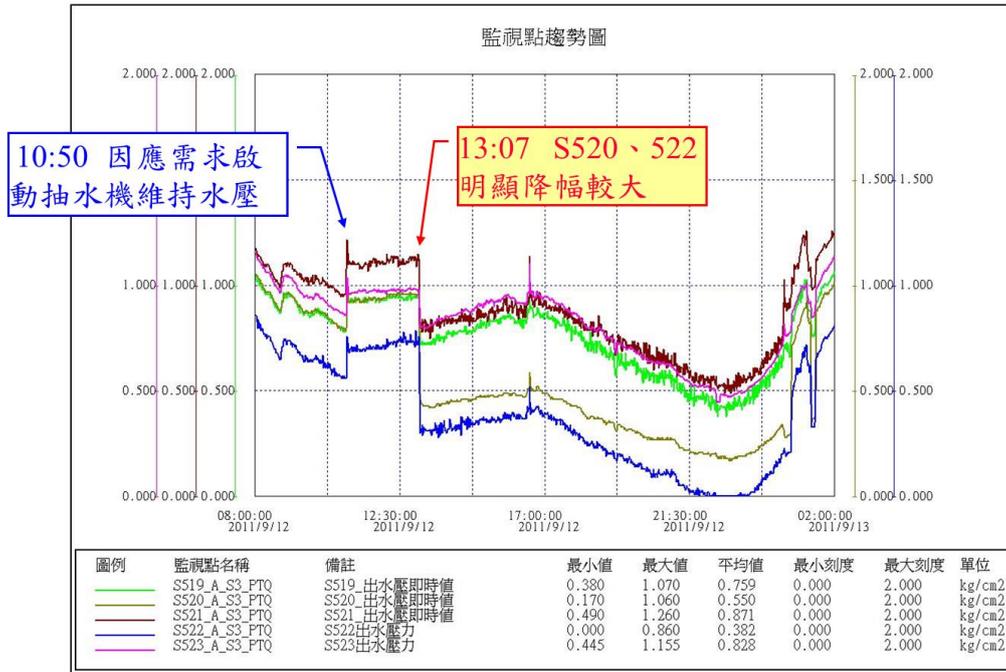


圖 172 三重供水分區監視點漏水期間壓力趨勢圖



圖 173 三重供水分區試關水作業

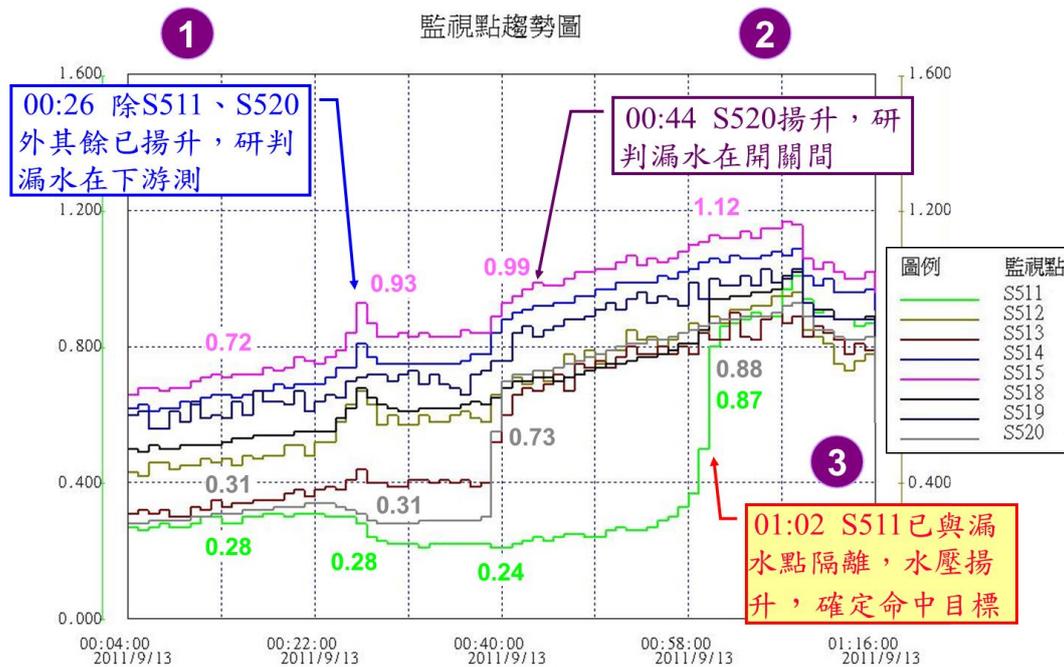
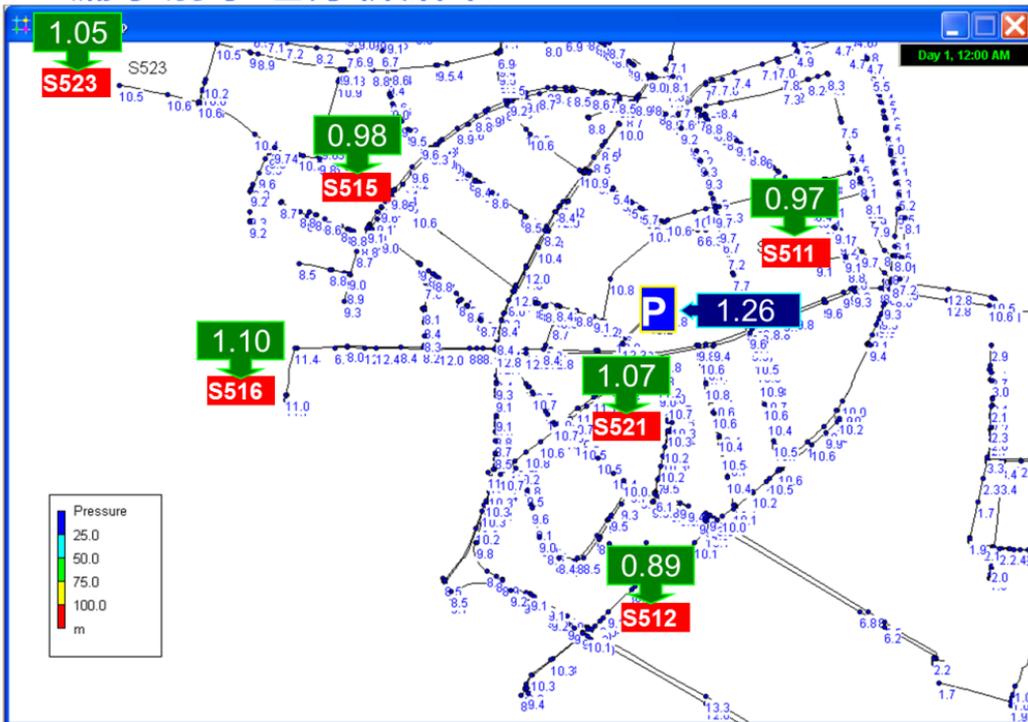


圖 174 三重供水分區試關水期間監視點壓力趨勢圖

北水處當時嘗試以科學方法找尋漏水點，故採用此案例以水理分析方式模擬本案情境，並用「臺北區自來水第五期建設給水工程計畫第二階段計畫」建置之三重供水分區管網水理模型進行水理分析。經在水理模型近漏水位置之節點新增本案漏水量 6 萬 CMD，分析漏水前後水壓變化，經分析結果可驗證漏水後以監視點 S511 水壓降幅遠大於其他監視點水，如圖 175。因此，在水理模型建置完備，且經校正後之水壓、水量與現況相符後，倘發生管線老舊或其他原因導致突發性不明幹管漏水時，可採用水理分析方式，輪流將水理模型內之每一個節點分別代入已知之漏水量進行水理分析，並分別獲得每一模擬狀況下供水區域內每個節點之壓力變化。透過供水分區之監視點數據或現地量測局部點位之消防栓壓力，將前揭水壓資訊與水理分析結果進行比對，以誤差最小所對應模擬狀況下之漏水節點周遭即為可能漏水區域，藉此縮短查察漏水點之作業時間、降低漏水量及減少供水風險。未來可依前述分析方式建立應用模組，以利緊急狀況決策參考。

### □ 漏水前水力分析結果



### □ 漏水後水力分析結果

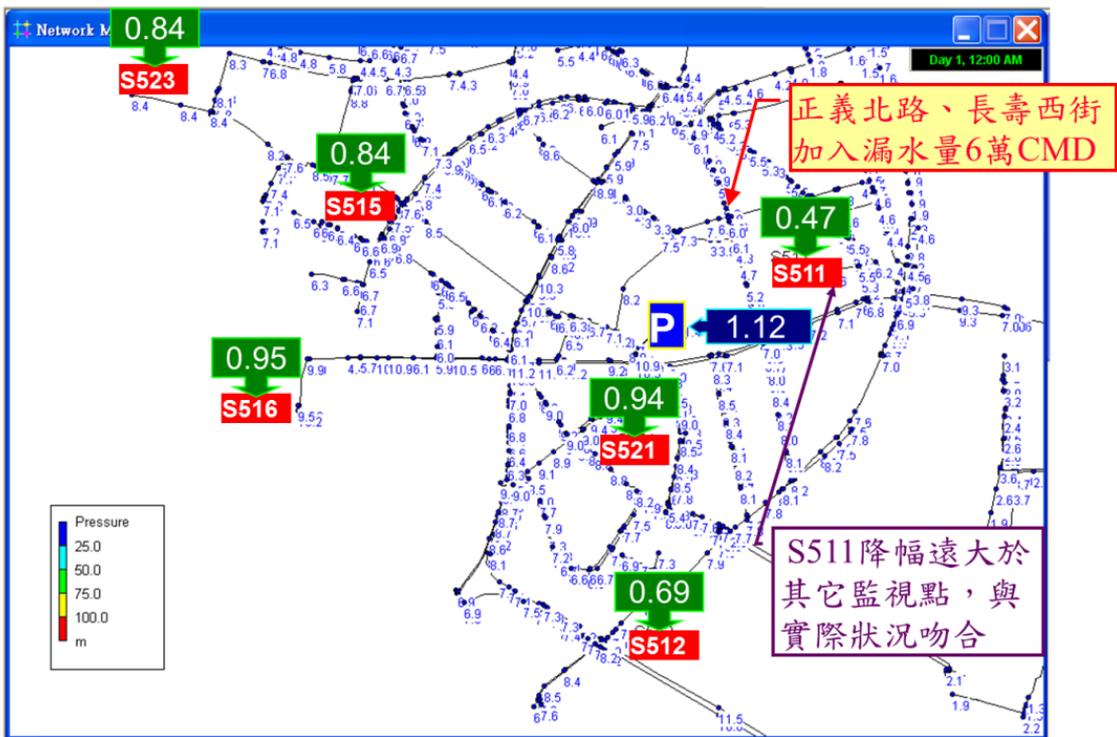


圖 175 漏水前後水壓變化

## 6.5 管線損壞風險分析

北水處目前係以小區售水率偏低之區域作為優先進場汰換管線之依據，小區管網改善汰換管線係集中性方式，惟部分管線雖非落於售水率偏低之小區或尚未規劃之小區，其重要性卻不亞於售水率偏低之小區，因其管線老舊易生損壞，且一旦發生損壞則會影響大區域用戶用水，至於影響程輕重可從實際操作關閉相關閥類獲知，惟前述方法勞師動眾、耗時費工，倘可依水理分析獲得相關資訊，雖不如實際操作精確，但仍有一定程度之參考價值，更重要的是可節省大量人力及時間，且分析過程中並不影響供水穩定。

在北水處所轄供水分區之水理模型建置完成，並於監控 SCADA 資料介接後，於系統中新增「管線損壞風險分析」應用模組，該模組自動分別針對各管段進行分析，模擬該管段發生損壞時，自動追蹤所需關閉之閥類、關水區域及分析關水後影響之用戶數（包含停水戶數及水壓降低戶數），當影響用戶數越多，表示該管段風險越高，再依各管段之影響用戶數對應風險等級於 Web GIS 系統管線圖標示所對應之顏色，如圖 176。水理分析各管段影響用戶數可再搭配其他因子（如管材、管齡、漏水次數等）進行風險分析，作為非落於小區之管線優先汰換順序，另亦可作為管線巡查頻率之依據。

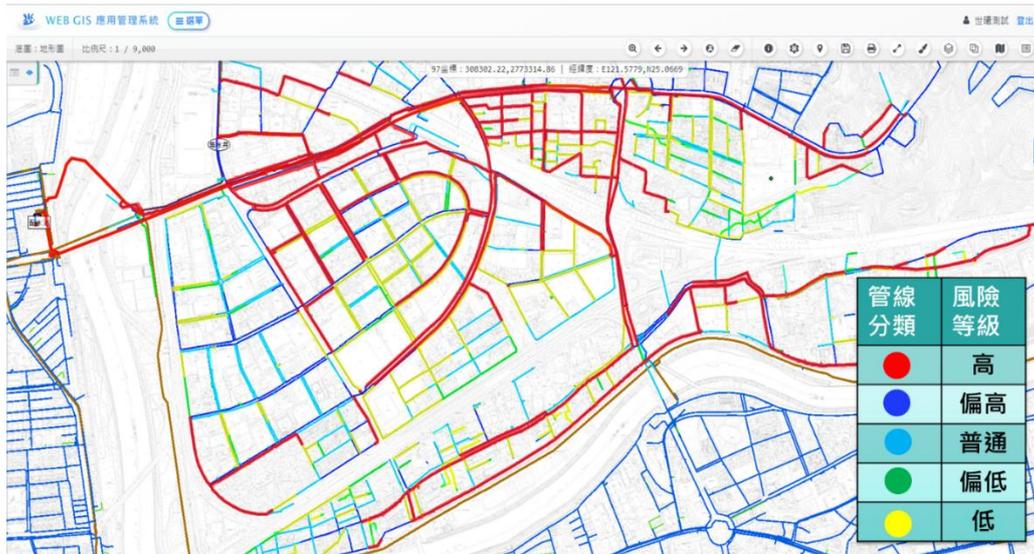


圖 176 管線損壞風險分析結果示意圖

## 6.6 供水設施規劃設計

由於過去建置水理模型耗時費工，且設備管理系統內之用戶用水資訊不完整、部分閘栓位置及管線連接狀態標示有誤，增加建置水理模型之困難度，因此在進行供水設施規劃設計時，常因無水理分析結果可供參考致缺乏整體性考量。尤其北水處民國 95 年起推動 20 年「供水管網改善長程計畫」，積極進行老舊管線之汰換及漏水改善工作，惟在設計汰換老舊管線時，因無相關評估分析資訊供設計人員參考，在考量管汰口徑設計過小恐有管網流速過快，增加管段水頭損失，使供水壓力急速下降，造成供水瓶頸，故多以放大管徑或維持原管徑方式辦理，但管徑過大易造成管線流速較低，而流速低之管線則容易使水中雜質沉降、產生積垢，可能使水質遭受汙染，影響供水管網水質安全。

以前面章節所提內湖供水分區最大時需水量條件下之水理分析結果，全區有超過 76% 之管線流速是低於 0.3 m/s，其中管徑在 150 mm 以下的管線更是幾乎 90% 以上流速是低於 0.3 m/s 的，因此該供水分區大多數管線自潔淨功能不佳，而可能影響水質安全。因此，設計人員在供水設施規劃設

計時，可透過水理分析結果，設計適當管徑以達到管線自潔效果。

另規劃新設加壓站或管線時，其設置位置或路徑，除考量設置空間大小及取得土地所有權人同意等因素外，更重要的是可否滿足供水需求及達效益最大化。

以 104 年杜鵑颱風為例，在南勢溪上游降下豪雨，造成烏來多處土石崩塌，原水濁度升高到淨水場無法負荷，北水處首次進行全面停水作業，在恢復供水後，因東湖地區位於供水管網末端與高地地區，在前端用戶大量進水時，即造成末端東湖地區復水困難與延遲，原規劃新增加壓站方式以加速東湖地區復水時程（如圖 177），惟經水理分析評估該方案並無法有效獲得改善（如圖 178），另改採新增  $\phi 1000\text{mm}$  管線自東湖地區末端供水戶方案進行水理分析（如圖 179），分析結果顯示該方案不僅可加速東湖地區復水時程，且可全面且有效提升東湖地區整體水壓。北水處依該規劃設計辦理東湖  $\phi 1000\text{mm}$  輸水幹管潛盾統包工程，並於民國 107 年 10 月開始施工，預計民國 110 年 1 月 19 日完工。目前諸如此類供水設施規劃設計，若無採用水理分析方式進行評估分析，單憑工程經驗難以具體說明設置加壓站或新增管線之成效。

未來可新增「供水設施規劃設計」應用模組，模組內分管線規劃設計與加壓站規劃設計兩部分。在管線規劃設計部分，設計人員可透過該模組，在 Web GIS 系統管線圖資上點選所需規劃設計之管線，經由系統自行運算分析不同口徑管線水理變化，以設計管線汰換最適口徑，如圖 180。另在加壓站規劃設計部分，設計人員透過該模組，在 Web GIS 系統管線圖資上劃定加壓站之供水範圍及選擇加壓站設立位置後，系統自動進行水理分析，藉由模型分析管網系統阻抗，以設計加壓站抽水機最適揚程流量。

因此，設計人員可透過新增模組自動計算分析以規劃最佳之加壓站抽

水機揚程流量及最適管線口徑，不僅節省規劃設計時間，且可滿足供水需求及效益最佳化之供水設施。



圖 177 新增加壓站方式以加速東湖地區復水時程



圖 178 新增加壓站方式水理分析結果

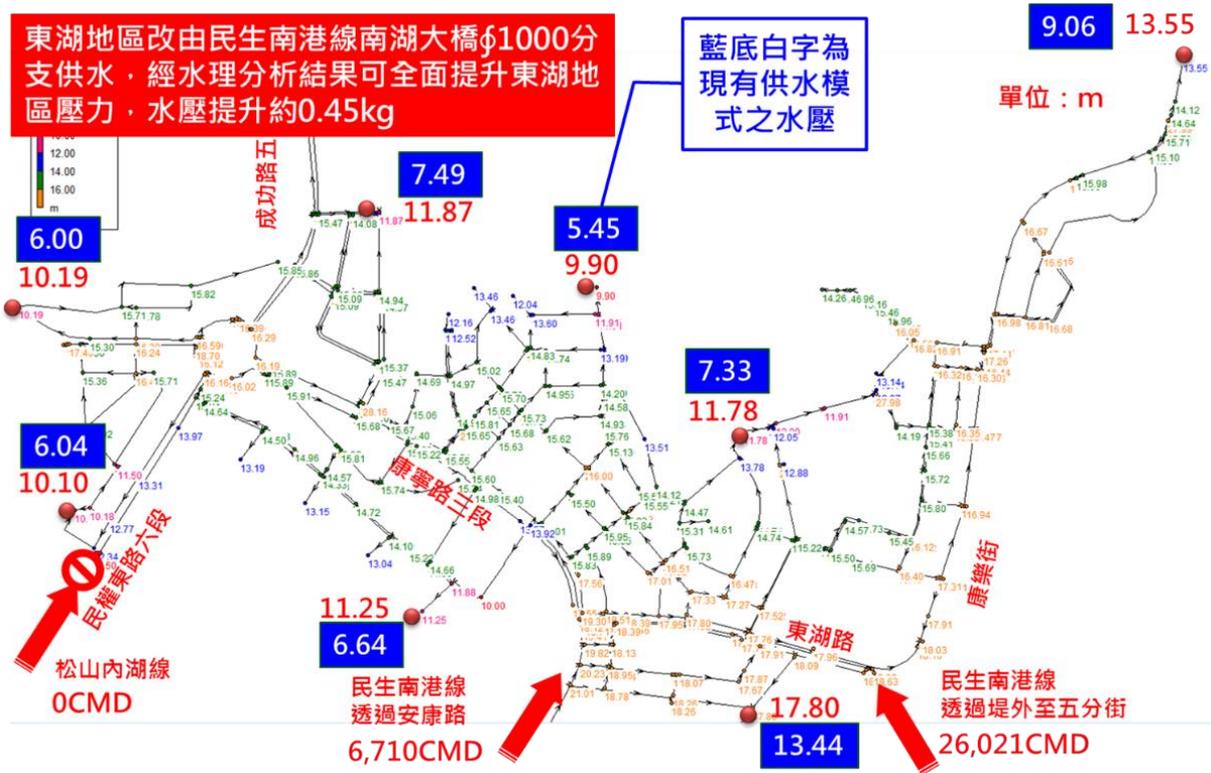


圖179 新增  $\phi$  1000mm管線水理分析結果

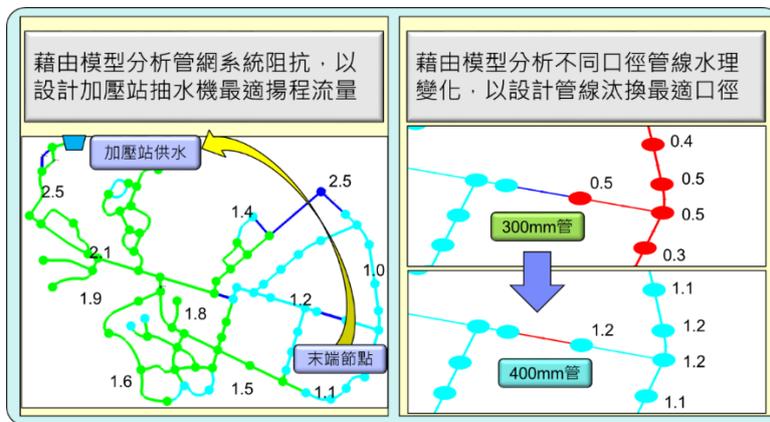


圖180 透過水理分析進行供水設施規劃設計

## 6.7 台水公司WADA智慧水網系統發展

為解決漏水問題，台水公司借鏡以色列 Takadu 雲端智慧水網軟體，106 年責成內部具資訊技術和偵漏專業的同仁，成立大數據團隊，結合水網自動監控系統（SCADA），自行研發臺灣第一個智慧水網大數據分析系統（WADA），利用過去資料及科學方法，以機器學習演算法處理智慧水網

回傳資料，運算出各時段監測值（如供水量、壓力）所應該要有的正常值，若偏離正常值的時間及數量超過一定的值時，系統則會通知使用者可能有異常，事件通知包含流量異常，水壓異常，設備故障及夜間流量異常等，透過 E-MAIL 主動提出異常事件警示<sup>24</sup>（如圖 181）。



圖 181 WADA 系統架構及資料流程圖<sup>24</sup>

WADA 系統是由台水公司大數據團隊自行使用開放原始碼軟體（open sourcesoftware）開發完成，是專門針對漏水進行偵測的系統，將管網資料處理層範疇劃分為三種，首先以計量管網（DMA 小區）為基礎，所提供的警報乃針對於特定分區，得到警報之後，同仁得知可能漏水區域訊息後，進行訊息 SOP 研判，若要再找漏水點則需要再移請測漏人員，以檢漏方式尋找。此方法可大幅增加檢漏的效率，並在一個大範圍中，經由計算縮小檢測漏的範圍，掌握更有可能的漏水區域，以提升檢測漏的效率。第二種則為刻正研發部分，希望藉由機器學習演算法結合EPANET水力分析工具，將檢漏範圍縮小到次小區（ED），最後目標則將分析各管網所屬管段漏水潛能，以達管線最佳汰換目標。

本次參訪台水公司，瞭解其所自行所開發 WADA 系統，已具備智慧水網管理解決方案，其發展歷程乃依據使用者所需核心價值服務（解決漏水問題），群策眾人專業知識所建置，運用及整合既有監控系統所採集供水

網路的壓力、流量、水質等原始資料，並結合內外部資訊如管線地理資訊系統（GIS）、自然條件（溫度及雨量）、地質條件（地形坡度、地質、土壤、荷重等）以及人文條件（人口、節日等）等資料後，先將其資料分層架構化，經由各資料層所需運用數學演算法，統計歸納出水網絡異常處，再把資料轉化為解決漏水問題所需要的知識，以利決策管理與資源配置，而其自主研發精神和組成工作團隊之運作模式，可作為北水處未來 WISE 平臺（Water Intelligent System of eTaipei）納入管網水理模型動態分析和建立大數據分析作業團隊參考模式（如圖 182），建立協同平台，並將統計數據輔以視覺化呈現，以供同仁隨時掌控管網水理模型最新資訊、推演和輔以支援決策參考。



圖 182 WISE 整合平臺系統架構圖

因時空背景和有限的資本投資等等眾多因素考量，台水公司與北水處針對無計費水量（NRW）所執行策略方針有所不同，由於台水公司供水轄區幅員廣闊、管線複雜，考量投資成本因素，故以點的方式進行改善，而北水處則由面的角度來執行小區管網汰換計畫，目標皆為降低漏水率及營運成本，進而提高售水率。然而面對「巨量資料」的時代（如圖 183），有愈來愈多元且龐大的結構化資料及非結構化資料，尤其在水資源管理永續發展方面，在過去往往僅考慮水文情形，如今不只水文條件（流量、水壓



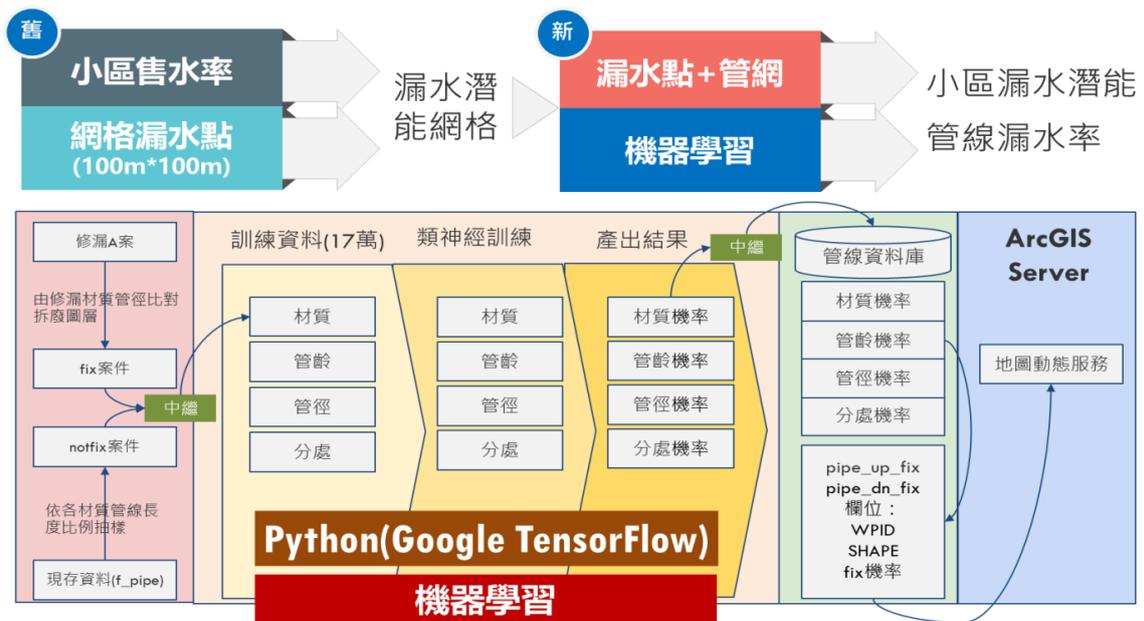


圖 184 機器學習(管網漏水)作業流程圖

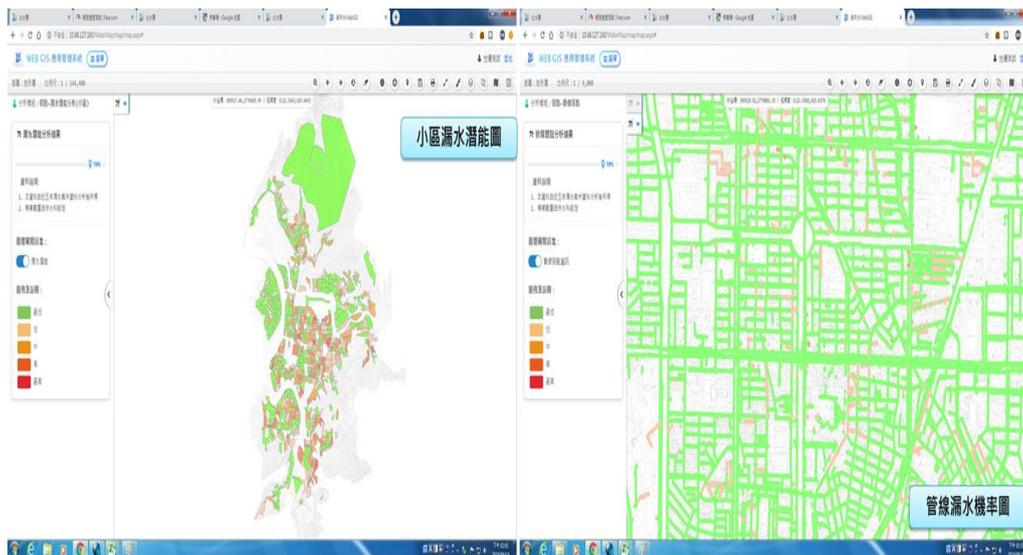


圖185 漏水潛能分析圖

智慧城市營運，主要由「數據收集、儲存、分析」等環節所組成，北水處短期目標可參考台水公司建立資料運算中心或成立大數據小組，將各廣度及深度資料（氣象、水文、地質土壤、地理資訊系統數據、家庭數據等社會經濟相關資料）納入巨量資料庫，並將各單位執行小區管網汰換成效指標與漏水潛能分析進行交叉比對驗證，並作為後續管網工程汰換所需經費參考依據，中期目標為建立全供水轄區管網水理動態模型資料庫，並

同時建立管網監測預警系統和協同運作平台，提供業務關聯同仁進行事件處理、追蹤及管控使用，長期目標則為持續透過機器學習演算法、時間序列群聚分析（Time Series Clustering）和支援向量迴歸（Support Vector Regression）演算法，將本來需要人力不斷監控，以及依賴多年訓練培育出來之豐富經驗，轉換為演算法參數，進而達到節省人力及最佳操作的效果。在某些情境下可由資料的輸入及機器學習的分析，讓經驗變成專家系統，可統計出各供水分區每日需水模式，並進行短期、中期及長期需水預報，並依據此預報來調整各加壓站和配水池之最佳操作模式和供水量，以達降低營運成本之目標。

## 第七章 執行成果與建議

### 7.1 執行成果

本研究為突破現有圖資系統未能有效供水理分析引用之瓶頸，克服種種困難及逐一解析問題尋求解決方案，最後有效整合運用現有資源，提升管線數值系統內附屬設備精度及建置完整空間資料庫架構，並自動化建置水理模型及進行校正以符合現況，相關執行成果詳述如下：

#### 1. 建立正確且完整之圖資，以作為後續自動化建置水理模型、精準分析與正確應用之基礎。

水理模型的自動化建模，均有賴完善作為基礎，除了屬性數值的正確性，拓撲的連結性也很重要。北水處過去採用圖幅型(CAD-based)的GIS，以圖幅切割管網成為數百幅圖面，產生許多拓撲斷點，現在北水處轉正為空間資料庫(Spatial)的GIS，將拓撲斷點全數接上，並修正彼此銜接關聯、座標重新測量補正...，因此自動匯出INP檔案的功能才能實踐。

另本處現行管線圖資維護機制已從源頭進行控管，施工後由測量廠商交付具有數值座標描述之公共設施管線資料(GML檔)，並經監工檢核位置正確性及圖資管理人員透過系統確認屬性和檢核拓撲連結性後，再將圖資轉入空間資料庫，並將成果轉匯出GML檔交付雙北市政府路權管理單位進行路證結案作業(雙重圖資校核)。

#### 2. 開發自動建模功能及分配節點水量，並匯出INP檔案，大量節省人工建模時間。

綜觀國際間商用軟體，如WaterGEMS、H<sub>2</sub>O Map雖提供了建模工具，仍需使用者自備管網Shp圖檔、水表點位座標、用水量、DTM高程，逐一匯入建置拓撲、水量分配、高程內插...，過程仍然繁瑣。北水處WebGIS

參考商用軟體建模步驟，直接由空間資料庫取得所需資料，依演算法自動建模分配節點水量，並匯出 INP 檔案。讓過去手工建模耗費數個月的時間，縮短到數分鐘內完成。

### 3. 透過簡化水理模型及佈設水壓計量取現場壓力進行壓力校正，以提升校正效率及水理模型準確度。

英國水研究中心（Water Research Center，WRc）的模型校正規範及建議標準包含流量校正、壓力校正兩大項，然而英國水研究中心要求壓力校正誤差極小，僅適用於高水壓管網，而且管網流量不易取得，除非廣布流量計才能取得各管段流量。校正時，可調整之參數包含管壁粗糙度、閘開度、管段口徑、高程、節點水量...。由於北水處管網屬性正確匯出，僅管壁粗糙度預設值為推估，因此調整參數僅採用管壁粗糙度 C 值，而且水壓計佈設量取現場壓力較簡便，故採用壓力校正。為了化繁為簡，北水處執行校正時，將大區域內的眾多小型加壓站濃縮為一個節點，先校正以外的管網。

### 4. 透過自動建置之水理模型，即可進行後續水力、水質相關加值應用。

水理模型提供兩類型分析應用：水力(Hydraulic)、水質(Water Quality)，以下各以四個物理量描述各自的應用細項，

#### (1)水力 (Hydraulic)

**a. 壓力 (Pressure)：**尖峰用水壓降明顯區域、水壓偏高管段、水壓變化標準差較大區域之辨識。由於水壓為自來水服務水準的重要體現指標，幾乎每個分析輸出都必定先檢視節點壓力。有時還以總水頭分析水力坡降。

**b. 流速 (Velocity)：**流速大於2m/s之瓶頸管段（流速過快，能量損失大）、流速小於0.3m/s之沉降區（流速過慢，無法自潔淨）。由於流速影響管

網摩擦耗能及雜質堆積特性，過高過低都不理想，必須透過調整管徑解決。

**c.流量 (Flow)：**流量過大使管網承載能力不足、流量太小使內襯吐鹼無法稀釋。流量與管網擴建與否、與最經濟管線配置拓撲有關係。設置的水泵或配水池高程是否能將水源源不絕送入特定區域，需參考流量分析。

**d.供水耗能 (Energy)：**管網系統的單位配水耗能計算、水泵運作優化減少電力使用、管網阻抗與最適水泵流量匹配。雖然配水泵送用電很花錢，但仍需先滿足水量及水壓之後，再考慮耗能的降低與系統優化。

## (2)水質 (Water Quality)

**a.水齡 (Age)：**水齡偏高區域之標定、配水池液位設定與調蓄控制。水齡為最簡易的零階水體反應分析，新水混老水以體積比例換算水齡，演算法直觀易懂，各國自來水界均致力降低系統水齡，避免劣化危及適飲性。

**b.餘氯消耗 (Decay)：**消毒劑濃度之降解消散，涉及水體 (Bulk) 及管壁 (Wall) 反應係數，同一淨水場送出的水體化學性質相同，Bulk反應係數相同，然而管壁則與各管段的管齡、材質、生物膜有複雜關係，不易求得。

**c.副產物生成 (Growth)：**消毒副產物之生成、水中微生物之孳生，同樣涉及水體Bulk及管壁Wall兩個反應係數，消毒劑消散通常為一階反應，而副產物生成反應有一階級二階的模型，最難的也是管壁反應係數之求取。

**d.污染物擴散 (Trace)：**不降解物質的擴散、流動趨勢，例如濁水擴散分析，就是水中不會分解的泥質物體，隨著水流擴散，分析濁水抵達與

結束時間。

本研究利用前述自動建模且與現地水壓完成校正相符的內湖示範區水理模型，進行不同情境分析應用，執行成果條列如下：

**5. 檢視內湖示範區目前各時段管網承載能力，以作為後續供水管網設施整備之重要參考依據。**

依據本研究管網模擬結果顯示，在最大時供水量及加壓站出水壓力下，內湖示範區管網平均流速僅 0.18 m/s，其中 76% 在 0.3 m/s 以下，42 % 在 0.1 m/s 以下。表示由於過去經濟發展快速，當時在設計與建造供水系統時，考量未來人口快速成長，用水量需求提升，往往會將管線的口徑設計的較大。然而，如今人口成長不如當初所預期，用水需求逐漸減少，反而使得管網整體流速偏慢。

**6. 分析內湖示範區未來年期供水管網系統承載能力，瞭解供水壓力瓶頸及解析改善對策。**

在未來五年及二十年後供水系統模擬分析結果中可發現，隨著未來支援台水的水量可能增加，將可能造成管網後端大範圍的供水壓力瓶頸。除了提高松山內湖線與大同大直線的供水效率之外，民生南港線支援東湖地區的  $\phi 1,000$  mm 輸水管亦佔有舉足輕重的地位，可有效地舒緩松山內湖線與大同大直線的供水壓力，甚至節省相當的動力消耗費用。

**7. 針對內湖示範區主要水源幹管進行停止供水後水理分析，藉此掌握壓力或水質受影響範圍。**

在松山內湖線與大同大直線輸水幹管停止供水的緊急情形發生時，由模擬結果可發現，因松山內湖線為內湖供水分區主要供水來源，兩支供水幹管其中一支停水時，將造成大範圍的水壓變化，整體壓力下降約  $0.5 \text{ kg/cm}^2$ ，對高程較高的地區造成相當不利的影響。且會有多處路段管線流向

發生改變，很有可能將管垢揚起，影響周遭系統水質。

## 8. 模擬內湖示範區多時段管網水齡及污染擴散預測、管網餘氯濃度，瞭解水質敏感區域，作為後續提升水質安全之改善依據。

經由多時段模型分析管網水齡及污染擴散預測、管網餘氯濃度分析等水質模擬項目，可發現整體而言，內湖供水分區之水質相當良好，絕大部分的水齡及餘氯濃度都在標準以內。然而，局部地區受到內湖配水池於晚間八點到十二點放水的影響，可能會造成短時間的水質問題，包含水齡偏高或餘氯濃度降低的現象。

## 7.2 建議

本研究已可自動建置水理模型，更研擬自動化建置流程，以加速產製管網水理模型，大量縮減前置建模時間，並採壓力校正方式完成與現況相符之內湖供水分區水理模型，且依該水理模型進行相關面向加值應用。本研究已有不錯執行成果，惟受限時間及經費緣故，後續仍有相關面向可再精進，建議事項說明如下：

### 1. 供水管網複雜度高，可利用相關套件工具進行優化分析，以達到規劃設計最佳化。

管網的複雜度高，變數很多，究竟調整那些管段口徑、水泵設定值、閘類開度等，會降低耗能，還能維持水量水壓，這是「多變數最優解」的數學問題。國際間的水理分析軟體，通常使用遺傳演算法 GA (Genetic Algorithm) 解決這個問題，例如 WaterGEMS 的 Darwin 套件、也有許多免費軟體如 SolveXL、GAWUP、R-GA，用途很廣，除了最低營運成本、最小建造成本，還可用來調整 C 值做校正。

### 2. EPANET 為免費水理分析軟體，可藉助該平台開發適合自來水事業使用

之分析模組，以提供相關從業人員供水調配或規劃設計之參考。

讓免費的軟體功能全開，甚至可比擬商用軟體。例如設定水流釋放元件 (Emitter) 參數模擬管網壓力高漏水多的現象，或者運用 EPANET 的控制描述 (Control Statement) 就可設定變頻回授控制，出口壓控制、遠端回授控制均可模擬、也可設定水池系統的液位控制，何時啟動揚水泵，何時停泵。或者使用二次開發套件 Toolkits 與其他工具如 R 語言開啟 EPANET 分析結果 RPT 檔案，繪製出定速泵特性曲線，或者管網阻抗曲線。

EPANET-MSX 的實作應用，這個套件是比較新的水質分析插件，可以把過去 EPANET 只能做單水源水質特性的分析，延伸到多水源混合反應，甚至不同消毒劑與細菌滋生互制行為。由於涉及諸多水質參數，包含水體 Bulk、管壁 Wall 的反應係數，有些必須另外做「杯瓶試驗」(Bottle Test)、現地水質量測、以及參數校正才能使用，超出本研究範疇，建議應另案研究。

### **3. 結合動態模型與智慧水表AMR、監控SCADA數據，自動比對監測值與分析值，作為評估供水是否異常之參考依據。**

下一階段應能夠導入即時數據，例如 SCADA、AMR 等資料。由於目前北水的自動建模僅採用抄表度數匯入進行節點水量分配，兩個月一抄的數據，對於單時段分析精度尚可，然而如果要提升模型在多時段分析 (Extended Period Simulation, EPS) 的準確性，則必須有更即時的數據，才能精準分析水泵尖峰耗能、瞬間大戶進水影響、局部壓力洩降等區域，甚至正確疊加出區域夜間最小流，以分析管網漏水。

承上建議，當模型擴充到具有即時數據匯入功能之後，就可將多時段分析數據拿來比對監督控制與資料擷取 (SCADA) 數據，並由兩者的微小差異或者變動趨勢，找出管網系統逐漸劣化的地方。例如 SCADA 實測數據

漸漸與模型數據發生偏離，並非發生爆管的水量水壓瞬間大偏移，或者水泵特性由 SCADA 監控的耗電與輸出效率，與模型分析有微小偏移時，代表系統發生逐漸劣化情況，俾提早因應。

**4. 後續新增施工停水影響範圍分析模組，在辦理計畫性施工案件或突發性事件時，點選欲施工或搶修之管段後，可由系統自動分析產出影響範圍。**

在一個龐大的供水系統中，輸水幹管因長時間處於高流量與高流速，一旦發生損傷，無論是大量漏水或停水施工，皆會對區域供水造成大範圍的影響。本計畫初步以松山內湖線和大同大直線出水管線，模擬停水之後管網壓力分布變化、流向改變等受影響範圍及路段。然而現階段尚未進入系統化的統計流程，建議未來透過供水管理系統，以及管線資料庫、水費系統等結合，利用水理軟體分析結果，透過管網連接關係建立自動化的供水影響範圍、路段與戶數統計資料。如此便可成為緊急事故時的決策依據，並建立管網危害度資料庫，做為管線汰換、漏水管理、供水操作等資料來源。

**5. 新增小區封閉可行性分析模組，以判斷小區封閉可行性，提升小區封閉成功機率。**

封閉小區的管網管理已是多年來供水系統的管理趨勢，水處已建立供水轄區內的小區管網，建議未來在大範圍的水理模型分析時，可將小區管網的資訊帶入，搭配閘栓管理系統，自動介接相關設備啟閉狀態，更能有效的進行模型分析，評估小區封閉可行性，找出更細部的管網供水瓶頸管段。

**6. 新增管線損壞風險分析模組，以作為管線優先汰換順序與管線巡查頻率之依據。**

為建立評估管線損害風險及危害度的流程，建議可將管線年份、材質、

供水分區所推測出的管線弱點資訊，與經水理模型分析管線停水後之影響範圍、路段與戶數的分析結果做搭配。透過兩者的結合，便可判定管網危害風險等級，找出危害風險最高的區域，預先做好相關防範措施。

**7. 新增供水設施規劃設計模組，藉由水理分析自動運算以設計管線汰換最適口徑及最適揚程流量抽水機。**

建議未來在管線規劃設計部分，可由系統自行運算分析不同口徑管線水理變化，以設計管線汰換最適口徑。另在加壓站規劃設計部分，則藉由水理模型分析管網系統阻抗，以設計加壓站抽水機最適揚程流量，或作為水泵樣式、特性之汰換依據。預期透過讓模組可節省規劃設計時間，且可滿足供水需求及效益最佳化之供水設施。

**8. 建議自來水從業人員應接觸水理分析工具，使該工具普及應用與推廣，透過跨領域之整合應用，使水理分析成為管理工具及作為設施整備所上不可或缺之利器。**

方便的水理分析工具，應提供給所有工程師使用，而非少數菁英運用而已。不只是從事設計、調度、操控、規劃等單位才需要水理模型，其他第一線的工程師也派得上用場，因為第一線同仁具有 Local Knowledge，才能運用這些知識與經驗自行解決問題。例如北水處的管汰，過去分處都是依循「原管徑」汰換的設計原則，隨著漏水減少、用戶節水，導致管徑過大、流速過慢，產生廣大的沉降區，未來可結合水理分析設計出「自潔淨」管網，減少沉降區域面積。

建議自來水事業內部的各種專業人員都應接觸水理分析工具，例如管線工程師、機電工程師、調控主任、水質研究員、軟體工程師、圖資管理人、AMR 管理者...。上述同仁工作上或多或少都與水理有關連，只是平常不曾使用水理工具。唯有共同使用後才能迸發想法，讓後續插件開發、系

統升級的工作符合各方所需。更能讓水理分析變成管理上的好工具，甚至是老舊設施整備改造工作上不可或缺的利器。

### 7.3 未來展望

未來北水處可依本研究成果分階段加速建立其他 10 個供水分區水理模型（如圖 186），並與監控 SCADA 結合及發展自動化模組，以達自來水管網智慧化管理的目標。

本研究建置規劃自動化流程，在研發過程中雖遭遇瓶頸但仍逐一解析克服困難，並記錄寶貴經驗規劃作業流程，以作為後續工作人員之借鏡。透過自動化建模流程，可縮短人力時間及降低錯誤發生機率；另為驗證該自動化流程之可行性及正確性，針對北水處所轄之內湖及三重供水分區進行實務應用，經證實可獲得不錯成果，是本研究實務應用的成功案例。

未來針對北水處其餘 10 個供水分區應分階段加速進行建模及校正作業，首先可從轄區周邊獨立供水分區優先辦理，而複雜度高之市區則後續再行規劃進行。此外，可考慮評估模型骨架化，降低電腦作業負荷，以加速工作推動。另可搭配智慧水表及監測設備的建置，以提供精準且即時的水理模型分析。已校正模型將規劃轉入水理模型資料庫，並定期與管網空間資料庫進行資料差異比對及更新維護作業機制，以因應管線圖資及現地設備狀態改變時，能即時維持水理模型有效性。

在系統部分可發展監控中心即時動態水理分析模型、計畫性或突發性事件施工停水影響範圍分析、小區封閉可行性評估、突發性不明幹管漏水之位置分析、管線損壞風險分析及供水設施規劃設計等多元化自動應用模組，以達到自來水管網智慧化管理的目標。



圖 186 分階段建立其他 10 個供水分區水理模型

## 參考文獻

1. <https://plus.maths.org/content/daniel-bernoulli-and-making-fluid-equation>
2. Quentin B. Travis. “Relationship between Hazen–William and Colebrook–White Roughness Values.” *Journal of Hydraulic Engineering* Volume 133 Issue 11, November 2007.
3. Introduction, Theory, History and Basics of Water Distribution System Modeling. EWRI World Environmental and Water Resources Congress. Minneapolis, June 5, 2018
4. <http://hydraulika.f.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HyaE/> .pdf.
5. Malcolm S. McIlroy. “Direct-Reading Electric Analyzer for Pipeline Networks.” *Journal (American Water Works Association)*, Vol. 42, No. 4, pp. 347-366. April, 1950.
6. Lindell Ormsbee. “The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age.” 8<sup>th</sup> Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio. May, 2014.
7. <https://www.geeksforgeeks.org/program-for-newton-raphson-method/>
8. <https://www.youtube.com/watch?v=M8f1FNgeq7o>
9. Dandy, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L.J. (1996). “An improved genetic algorithm for pipe network optimisation.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 2, Feb., 449–458.
10. H. Monsef, M. Naghashzadegan, A. Jamali, R. Farmani. “Comparison of evolutionary multi objective optimization algorithms in optimum design of water distribution network.” *Ain Shams Engineering Journal*. 10 (2019) 103-111.
11. <https://www.hazenandsawyer.com/work/projects/dbp-for-nyc/>
12. <https://ascelibrary.org/cms/attachment/e951abc5-ab90-4b02-ac19-20085a2a1e1e/2.jpg>
13. U.S Environmental Protection Agency. (2018). “Deployment of Real-Time

- Analytics and Modeling at the City of Flint, Michigan Water System.” (Technical Brief), EPA/600/S-18/353.
14. Jacek Błaszczyk, Krzysztof Malinowski, Alnoor Allidina. (2014). “Optimal Pump Scheduling by NLP for Large Scale Water Transmission System.” Proceedings 28th European Conference on Modelling and Simulation. Brescia, Italy.
  15. Stefano Mambretti, Enrico Orsi. (2016). “Optimizing Pump Operations in Water Supply Networks Through Genetic Algorithms.” Journal AWWA, February 2016 108:2. American Water Works Association.
  16. Toru Nagatani, Koji Yasuhara, Kouichi Murata, Mariko Takeda, Toshiko Nakamura, Tomohiro Fuchigami, Katsuhiko Terashima. (2006). “Residual Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System.” The 7<sup>th</sup> International Symposium on Water Supply Technology, Yokohama.
  17. Jae Chan Ahn, Su Won Lee, Kevin Y. Choi, Ja Yong Koo. “Application of EPANET for the Determination of Chlorine Dose and Prediction of THMs in Water Distribution System.” Sustain. Environ. Res. 22(1), 31-38 (2012).
  18. PREPARED. (2014). “Bacterial growth model in the drinking water distribution system- an early warning system.” Report number: PREPARED 2014.023. Deliverable number: D4.4.1~D4.4.4.
  19. I Fisher, G Kastl, A Sathasivan. (2019). “Cost-Effective Chlorination Strategies for Drinking Water – Meeting chlorination disinfection goals in drinking water distribution systems.” Water e-journal ISSN 2206-1991. Volume 4 No 1.
  20. 鄭錦澤，臺北自來水事業處地理資訊整合多元應用服務簡報，臺北市政府101年度地理資訊系統應用發展研討會。
  21. 王銘水、時佳麟等，自來水管線基礎圖資整合建置之最佳化研究，臺北市政府九十四年度員工平時自行研究報告。
  22. <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>

23. 駱尚廉、楊萬發編著，環境工程(一)自來水工程1995。
24. 108年10月4日台灣自來水公司參訪簡報。
25. 因應氣候變遷應用大數據推估水資源供需情勢研究 (1/2)期末報告，經濟部水利署106年12月。

## 108年度專題研究計畫

### 「臺北自來水管網水理分析應用之規劃發展」期中報告

#### 審查會委員審查意見及辦理情形回覆

委員審查意見	辦理情形
<b>李丁來委員</b>	
1	<p>期中報告應補充說明，依季別期程各工作事項之完成百分比情形。</p> <p>感謝委員建議，本研究皆依季別期程完成各工作事項。</p>
2	<p>依目前水理分析模型校正，主要是針對物理水力部分，未來是否納入水質部分之模擬（例如餘氯模擬）。</p> <p>謝謝委員建議，有關水質部分之模擬於期末報告第五章「相關面向加值應用」中補充。</p>
3	<p>為減少新設D2P內襯水泥砂漿之“吐鹼”問題，可否評估在D2P管材檢驗時，增到相關浸泡試驗，避免埋設後再發生pH升高問題。</p> <p>由於鑄鐵管水泥內襯浸泡試驗沒有“標準”可依循，如果請廠商磨掉內襯水泥乳浮水層，也同樣沒有相關檢驗標準，因此北水處比照日本NS管線使用FBE塗層（粉體塗裝），轉而推廣使用粉體塗裝鑄鐵管，解決內襯吐鹼問題。</p>
4	<p>一般管線之控制閥可能不是全開，其對水理分析之影響應納入考量。</p> <p>感謝委員的建議，由於目前水理分析軟體並無法模擬制水閥未全開之狀態，故無法納入考量。後續若有相關研究探討制水閥開啟狀態與水壓流量關係，再嘗試於水理分析中納入考量。</p>
<b>范煥英委員</b>	
1	<p>建議將3.5章節“國內外水理分析應用案例”移至第三章文獻探討。</p> <p>感謝委員建議，已調整至本報告之2.5章節。</p>
2	<p>第三章修改為圖資學說課題與對策。</p> <p>感謝委員建議，已修正章節標題符合研究內文。</p>
3	<p>後續第五、六章之內容有所關連，其因果關係與分章節之邏輯應妥適處理。</p> <p>感謝委員指導與建議。</p>
<b>王藝峰委員</b>	
1	<p>研究應用潛力高，值得肯定。</p> <p>感謝委員的肯定。</p>
2	<p>多數的應用均需“優化”，目前使用的套裝軟體“優化”程序是有</p> <p>本案所使用軟體其中之一「商業套裝軟體Bentley WaterGEMS」，即提供專</p>

	內建程式？還是採用情境程式模擬？	案管理方式，可設定及儲存各項參數設定，並內建情境管理功能(各次分析結果)，且有Darwin遺傳演算優化套件，雖另一EPANET軟體未內建此功能，但有插件可使用（如SolveXL），使用者亦可自行二次開發。
3	管網多有漏水現象，水理模式是否已有考慮？還是反映於C值。	謝謝委員建議，由於管網漏水量及位置無法預測，故水理模型係透過C值修正以校正模型接近現況。
<b>張順莉委員</b>		
1	本研究以內湖供水分區為主要分析及應用標的建議補充選擇考慮因素(例如該供水分區之獨特性或代表性)，以及後續應用於全供水區之規劃策略。	對本處現行所劃分11個供水分區而言，該區管齡較低，且老舊管線多已完成改善，相對其他舊市區，該區管網複雜度較低，管網模型較易與現況進行驗證，後續全供水區之規劃策略，將依各供水分區之獨立性、用水需求、管網複雜性以及備援備載四個需求面向進行建置。
<b>董書炎委員</b>		
1	有關P108修正水量，修正水量部分現行係照水量修正比例公式修正，建議可採最佳化演算法（如基因演算法等）計算各節點最佳修正水量（各節點修正量應不同），換句話說，可在模型校正步驟將各點分配水量作為變數之一，將可使水理模型更貼近現實。	水量資訊乃採直接取得用戶實際用水量（本處水費資料庫），並與加壓站出水量進行比較，並未考慮管線漏水、無收益水量、表差等各項因素，造成管網的需水量與實際加壓站所送出的水量將會有所差異。校正時若變數種類太多則將難以演算，因此一次校正一種變數，本團隊依國際慣例先校正C值，經與現場所量測水壓值比對，83.3%在誤差範圍內，不須再校正節點水量，感謝委員建議。
2	採現行照比例分配修正水量，建議修正水量可直接建置於轉換工具之內，可使步驟自動化程度更高。	謝謝委員建議，有關修正水量可直接建置於轉換工具之內，由於目前水源水量資料來源係來自於監控中心所提供之數據，後續會朝資料介接方向邁進以提高自動化程度。
3	長遠來看，若能快速而準確的產生水理模型，配合各系統所產生的大量資料，在前揭作業完備的情形下，可使用大數據及機器學習之方法，將現有大量資料中隱藏的訊息找出，以協助本來無法做到的事情或現有人工作業的	謝謝委員的建議。當克服了建模的不便，可快速得到模型之後，分析與應用就是下一個重要課題，北水處刻正進行GIS的躍昇改造，未來平台可結合SCADA、MIS、AMR等數據，讓水理分析更為精準，面對海量的數據除了目前所使用的GA（遺傳演算法）、未

<p>改進。如在自動化供水操作系統建構中，使用機器學習中的 reinforcement learning 演算法，水理模型可扮演環境的角色，配合其他資料，訓練自動化供水操作模型，在對實務應用上或能產生極大效益。</p>	<p>來還可結合各項機器學習及AI的工具，進行訓練與模型預測。</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------

## 108年度專題研究計畫

### 「臺北自來水管網水理分析應用之規劃發展」期末報告

#### 審查會委員審查意見及辦理情形回覆

委員審查意見	辦理情形
<b>李丁來委員</b>	
1	P.5~P.15圖及表錄之附註，建議刪除，於文中該圖或表附註即可。
2	P.47~P.55文及圖之位置，建議重新研討修正，俾利研讀。
3	P.50水泥內襯有”研磨/不研磨”，”未磨/磨掉”不一，且”研磨”或”磨掉”如何作業？宜有明確工作方法說明。
4	P.56~P.91第三章圖資系統問題分析與對策，與本案研究主旨之關連性？建請修正或補述。
5	P.7~P.55第二章之章節標題排序宜再檢討。P.48之資料來源為”技術科”宜修正。
<b>范煥英委員</b>	
1	本計畫投注心力將管線圖檔檢核重製、修正錯誤，應建立或說明現有防錯機制，避免未來新發生之錯誤。
2	管網水理模型建立後，可供各相關人員有效率使用，惟應建立模型之維護機制，因應管線新設、加壓站新設及重要制水閘啟用

	狀態改變等，以維水理模型之有效性。	業機制，以因應管線圖資及現地設備狀態改變時，能即時維持水理模型有效性。
<b>王藝峰委員</b>		
1	本研究成功提出快速建模之方法，並運用EPANET成功測試內湖區之管網分析，本人同意通過。	感謝委員的肯定。
2	由於本研究已成功結合WebGIS，快速提供EPANET的INP檔，未來可考慮結合優選模式，可將目前情境式分析方式提升為最佳化分析，有利於決策與規劃。	謝謝委員的意見，將納入未來工作方向。
3	未來應用除目前提出之項目外，建議增加風險管理；以及結合智慧管理水表監控資訊後之模擬能力。	謝謝委員建議，未來將納入下階段功能擴充，後續並將結合動態模型與智慧水表AMR、監控SCADA等數據，以提升單時段分析精度及多時段分析準確性，並增加風險管理探討。
<b>武經文委員</b>		
1	建議在整體水理模型及監控點位（水壓、水量）完整下，系統可朝向自動化判定及劃設水壓降低或停水區域來立即顯示停水（或水壓降低）區域，方便民眾查詢。	謝謝委員建議，本研究在後續實務應用模組規劃方向中預計納入計畫性或突發性事件施工停水影響範圍功能項目。意即在確認施工管段後，由Web GIS系統自動追蹤所需關閉之閥類及關水區域停水之用戶區域及用戶數。另在未來完成北水處所轄之供水分區水理模型及監控系統SCADA資料介接後，由程式自動運算關閉相關閥類後之節點壓力變化，當壓力變化值超過容許範圍，即可對應搜尋受影響之Web GIS系統內路段及用戶。最後，將前揭資訊供民眾查詢。
<b>張順莉委員</b>		
1	本報告對於水理分析演進與國內外應用案例文獻回顧，以及圖資系統現況內容，十分清楚完整，值得肯定。	感謝委員的肯定。
2	第三章圖資系統問題分析與對策，問題陳述與解決對策互有穿	本章節為充分說明北水處從基礎圖資建置歷程脈絡，穿插各時空背景圖資

	插，或可更清晰依分解問題，對應解決對策。	需求及解決對策，本案為解決以往CAD圖檔架構限制及圖資精度等問題(分解問題)，將管線數值資料重新整理及校核後，轉換為空間資料庫架構存取模式(解決對策)，並透過自動轉換流程方式，建立管網水理模型(解決對策)。
3	第五章相關面相加值應用中，5.1評估管網承載能力及可供水瓶頸，文字修正為~及可能供水瓶頸。另5.2五年與二十年後支管網承載能力，其中5.2.4係分析新設潛盾管對東湖地區供水之影響，採分列分析代替整合之考量或可再補充說明。	文字部分已依委員意見修正。 另於5.2.4章節補充說明如下：由模擬結果可知，本處工程總隊潛盾管連通後，整個東湖地區到成功路二段以西管網壓力可大幅提升，惟部分流向改變路段資料，可提供業管單位後續因應並加強排水作業，以降低水濁風險。
4	本研究相關面向加值應用甚為詳細，其各項模擬預測結果運用於日後分析，能比較模擬參數(歷程存儲)和測量參數，並自動執行異常檢測之關鍵為何？特別是難以追蹤之水齡或污染源。另加值應用如何延伸至供水耗能等分析，以利提升系統效能。又後續實務應用規劃將建立各供水分析區之水理模型，中期再整合為全面模型，由於本案供水分區複雜度較低，相關經驗推展至全供水區之限制與挑戰如何有效因應。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究案依模擬結果，參考相關文獻，依水壓(是否負壓)、流速(2m/s以上(水頭損失)；0.3m/s以下(管網自潔淨)、水流向改變(水濁)及餘氯濃度(水質標準0.2 mg/L)，作為異常檢測之關鍵。</li> <li>2. 由模擬參數經演算而得之數值與現地實際數值比對後得到內湖區的管網相對應參數(耗能為管網阻抗係數、餘氯則是以整體(<math>K_b+K_w</math>)反應速率常數K)。</li> <li>3. 本研究案後續針對北水處其餘10個供水分區，首先從轄區周邊獨立供水分區優先辦理，而複雜度高之市區則後續再行規劃進行，並考慮評估模型骨架化，降低電腦作業負荷，以加速工作推動。</li> </ol>
<b>李嘉榮委員</b>		
1	都會區管網是較複雜，管線施工往往無法按設計路段埋設，甚至有很多另件、船型管或推進及潛盾去改變流向及管損增加，致實際管網壓力與水理分析數值有落差，研究團隊有否去探討及做調整修正。	本研究案管線設備空間資料是以管段加節點方式來表示，並以C值來調校模型，透過監控設備及現地量測消防栓壓力值資料進行模型修正。相關管件所產生管損效應，皆已納入管段綜合評估校正。
<b>王根樹委員</b>		

1	<p>本案使用EPANET為基礎進行研究，如欲將本法更有效的應用到行政管理及工程實務上，所需有之工具套件有那些？是否有具體之建議？</p>	<p>EPANET為開源碼（Open source）的免費程式，因此可自行開發套件，目前已經可在各種平台上進行二次開發，包含VB、ExcelVBA、C...，也可以Python、R語言呼叫EPANET核心dll檔案，不開啟EPANET主程式的情況下，執行水理計算，因此未來北水處將視需求開發EPANET插件及工具。</p>
2	<p>針對北水處曾使用之三種軟體，在實際應用上有何優缺點？可提供建議供其他相關單位參考？</p>	<p>1. EPANET：優點為完全免費、每個人都可使用、更可二次開發。缺點為操作介面陽春、進階工具缺乏。</p> <p>2. Mike Net：優點為費用較低廉，功能比EPANET多。缺點為增加管段數及套數都要額外付費，除了操作手冊，坊間少有使用參考資料。</p> <p>3. WaterGEMS：優點為功能完整且強大，內建眾多套件，使用手冊完整，更有網路討論區，彼此交流。缺點為價格十分昂貴，難以採購多套分發同仁使用。</p> <p>建議：北水採用混搭使用，採購1~3套WaterGEMS，由幾個幕僚科室使用，其餘近3百位分處基層同仁則使用免費EPANET，如有無法解決的課題，再送到WaterGEMS處理分析。</p>
3	<p>圖資正確性對未來軟體應用有重大之影響，由實際應用層面來看，所應準備之圖資有那些要求？可依本次經驗提出建議。</p>	<p>管線設備空間資料在位置「精度」及「屬性」部分需補齊及補正，且需取得現地設備最新運轉狀態以回饋模型，以確保模擬成果與現地相符。</p>