

國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

博士論文

基於制水閥分區之自來水管網損壞與維護決策支援系統

Segment-based Decision Support System for
Vulnerability Analysis and Maintenance of Water
Distribution Network



研 究 生：李沛濠

指 導 教 授：高正忠

中華民國九十七年七月

基於制水閘分區之自來水管網損壞與維護決策支援系統

Segment-based Decision Support System for Vulnerability Analysis and
Maintenance of Water Distribution Network

研究生：李沛濠

Student : Pei-Hao Li

指導教授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao

國立交通大學



Submitted to Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Philosophy

in

Environmental Engineering

June 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校環境工程研究所博士班 李沛濠 君

所提論文(中文) 基於制水閥分區之自來水管網損壞與維護決策支援系統
(英文) Segment-based Decision Support System for Vulnerability Analysis and Maintenance of Water Distribution Network

合於博士資格標準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

溫清光

溫清光 教授

盧重興

盧重興 教授

林明德

林明德 教授

廖述良

廖述良 教授

葉弘德

葉弘德 教授

高正忠

高正忠 教授

(口試委員簽名)

(口試委員簽名)

指導教授：高正忠 教授



所長：蔡春進 教授

中華民國九十七年七月九日

摘要

供應安全、穩定與適飲的自來水，是維持現代社會民生需求的重要議題。然而自來水管網可能因管線破裂、漏水而影響用水端的供水品質，因而需要參考可靠的損壞影響分析，執行合理的管線更新、停水維護與設置有效的損壞污染監測網等工作，以確保管網的供水品質。

本研究因而以制水閥分區為維護管理分析的最小基本單位，簡化管網分析的複雜度，發展維護影響分析工具，應用管網的連通關係，判別直接影響及被關閉的下游分區，評估對其他區域的供水影響。亦採用考量水壓變化的水力損壞演算程序，發展用戶缺水影響模擬程序，以合理分析管線維護管理的影響。並將所發展損壞分析法應用到以往所發展的換管模式中，決策更恰當的換管策略。

制水閥損壞將擴大管網損壞維護的影響，本研究因而以制水閥分區為單位，發展受制水閥影響的損壞路徑演算程序，分析個別損壞可及路徑之損壞機率與損壞缺水影響量，以制水閥損壞可能擴大影響的期望值為其關鍵性量值，辨識個別制水閥的關鍵性，供研擬制水閥維護策略之參考。

管網系統埋藏在地底，不易有效掌握水質變化，因此需建立有效的水質監測站網。過往雖有利用管網傳布關係決定水質站址，然需透過多次試誤程序才能決定具最佳水質保護效能的解。一整數規劃優選模式因而被提出，以最小化偵測前總污染水量為目標決策監測站址，並建立另兩個替代線性規劃模式提供更多的決策資訊，以有效監測管網可能產生的損壞污染。

管網損壞分析決策支援系統整合各項損壞分析、停水分析與制水閥損壞擴張樹分析模組，以判別較不可靠的管網區位，提升損壞維修效率。亦發展整合一基於連通性的制水閥關鍵性分析模組，根據鄰接制水閥分區的損壞擴張影響平均量，決定制水閥的連通關鍵性，以更快速提供初步的決策資訊。

所發展的各项優選決策模式與分析管理系統，已以一些管網案例確認其合理性與適用性，可在合理的時間內得到較佳的決策結果。所發展的各项模式與工具亦有助於研擬適當的維護管理策略，相信可供國內自來水管網管理參考及用以提升供水品質。

關鍵字：自來水管網、制水閥、損壞分析、污染監測、決策支援系統、線性規劃模式

Abstract

Water distribution networks (WDNs) should supply safe, stable, and high quality water to consumers. During the distribution, pipeline breaks in a WDN could deteriorate the water quality, cause insufficient water pressure at demand nodes, and subsequently reduce its ability to deliver water. Therefore, vulnerability analysis should be implemented to determine proper maintenance strategies, such as pipeline replacement, remedial actions for a pipe break, and installation of a water quality monitoring network, to improve the performance of a WDN.

This study used the valve-enclosed segment as the basic unit to simplify a complex WDN and proposed two depth-first search based algorithms to efficiently identify segments and the critical segments that can shut off water supply to downstream segments when closed. Two failure analysis procedures based on the connectivity among segments and the hydraulic simulation procedure with consideration of insufficient pressure at demand nodes were implemented to evaluate the impact of a failure event for determining proper maintenance strategies. The failure analysis procedures were then applied to simulate the shortage impact caused by shutting off one or more segments, and the results were used to determine effective pipe replacement decisions by a previously developed optimization model.

The valve-enclosed segment was also treated as a basic unit for developing the analysis procedure to evaluate the valve criticality, with consideration of the potential shortage impact expansion caused by a failed valve. A search algorithm was developed to identify all possible failure paths which might reach the failed valve. The criticality of a valve is determined based on the summation of potential shortage impacts multiplied by their failure probabilities for all possible failure paths. The valve criticality information can be used to develop an efficient valve maintenance plan.

A monitoring network is essential to ensure the quality of water in a WDN. To avoid the tedious trial-and-error procedure proposed in a previous study, a mixed-integer programming model was developed in this study to determine an optimal monitoring network directly. Two additional alternative models were also proposed to provide extra information for making a good decision.

A web-based decision support system was developed based on the proposed WDN vulnerability and maintenance analysis procedure and models. Vulnerability analysis related modules, a shut-off analysis module, and a valve failure impact expansion tree analysis module were developed and integrated into the system to facilitate related decision analyses. A connectivity based method was also proposed to define the criticality of a valve according to the potential impact expansion of a valve failure.

The proposed vulnerability analysis procedure and maintenance models were applied to several WDNs for evaluating and demonstrating their applicability. The results show that the proposed procedures and models could effectively facilitate related decision analyses.

Keywords: water distribution network, valve, failure analysis, monitoring, decision support system, linear programming.

誌 謝

我相信，培養一個博士研究人才需要莫大的勇氣與精力。很感謝指導教授高正忠教授從我就讀碩士以來，這麼多年來不辭辛勞的指導教誨，不論是在研究上或是計畫執行上，給予我許多學習的資源與機會，更難能可貴的是，容忍我在研究、做事上曾犯下的錯誤，讓我有機會可以在這些經驗中學習成長。作為一位老師，高教授總是願意在我研究遇到瓶頸時，給予其可貴的研究創見，花費寶貴的時間與我進行深入的研討。雖然常常追不上高教授敏捷的思緒，但經過這些腦力激盪，才日漸打通研究的思路，終究可以稍微窺探到學術研究的一點堂奧。作為一位長者，高教授給予學生自己最難得的身教、言教，高教授是一個待己甚嚴的人，不僅將自己做人做事的原則毫無保留的分享給做為學生的我們，並自己身體力行，包括如已經知道的要做的事情要趕快做、抓重點、切割法、稱重論、CPM 等等，很可惜的，目前還僅學到一些皮毛，希望在往後的人生中，真的可以將這些心法練到爐火純青，像高教授說的做一個時間的主人。近年高教授所成功推動的公益活動，更是我日後工作回饋社會的一個標竿。我很幸運，可以在難得的人生中，有機會在高教授的指導下完成博士論文。我要再次感謝高教授的指導與成就。

我也要感謝紐約哥倫比亞大學的 Upmanu Lall 教授，在我出國研究期間的照顧與指導，讓我有機會可以在一流的研究環境中，開拓研究的視野與更多的可能性。也感謝葉弘德教授開設的專業課程，與細心認真的教學，讓我在課程中學習到很多有趣的專業知識，並充實一些花草樹木及蝴蝶的常識，讓生命更為充實。

我同樣感謝林宏嶽學長常常給予過來人的經驗，毫不吝惜的教導如何面對研究的困境，讓我可以有更充分的準備處理這些困難。計畫執行時的指導，亦令我獲益良多。在這段期間，同樣也受到林碧亮學長的照顧，不時的聯絡關懷，讓研究生涯不顯得那麼孤寂。一同執行的計畫，雖然辛苦，但同樣學習到許多寶貴的實務經驗。

研究室的伙伴們，更是這段日子來最重要的一部份。患難與共的子欽，難得研究室有一個這麼好的領導與潤滑，是我學習的對象。其他所有一同歡笑過辛苦過的同伴們，我也感謝你們帶來的歡樂與體驗，包括同期的阿輝學長、逸群學長、長祺學長、淑婷、金蓮、曾大哥、隆懋、世輝，與許多的學弟妹，包括坤興、冠華、親民、志軍、立夫、彥超、立偉、仕強等族繁不及備載。

研究過程中，遇到的許多貴人在此也一併感謝，如北水處的朱健行先生、省水一區處的蕭宏民副處長。哥大的李尚修學長夫婦，研究室的 Han, Tobi, Abed，以及在紐約時的房東。

而口試期間，承蒙溫清光教授、廖述良教授，盧重興教授、林明德教授、葉弘德教授的細心指正與建議，精闢的見解使學生受益良多，特此表達由衷感謝之意。

最後，我要感謝華芳這麼多年來陪伴與指導，讓我的生命如此精彩，並時時提醒我往好的方向學習成長，沒有你的支持，博士論文不可能完成。希望在往後的人生中，都可以與你如此歡愉的扶持成長。我也要感謝我的家人與華芳的家人的支持與協助，你們是讓我無後顧之憂的原動力，謝謝你們的疼惜。僅將此論文，獻給華芳以及我的家人與華芳的家人。

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi
符號說明.....	xii
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究工作程序.....	4
1.4 論文內容.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2.1 制水閥分區.....	7
2.2 管網損壞分析.....	9
2.3 制水閥關鍵性分析.....	10
2.4 監測站選址規劃.....	11
2.5 管網決策支援系統.....	13
2.6 小結.....	14
第三章 管網損壞分析程序與方法.....	16
3.1 制水閥分區.....	17
3.1.1 制水閥分區判識.....	17
3.1.2 關鍵制水閥分區判識.....	19

3.2 停水區域判識程序	24
3.3 管線損壞缺水模擬	28
3.4 制水閥分區損壞機率	31
3.5 缺水量潛勢	32
3.6 制水閥關鍵性分析	33
3.6.1 制水閥關鍵性分析程序	35
3.6.2 制水閥使用機率	37
3.6.3 損壞可及路徑影響衝擊	44
3.6.4 制水閥關鍵性	46
3.6.5 案例研討	46
3.7 小結	54
第四章 管網維護管理模式	56
4.1 管線損壞缺水模擬於換管之應用	56
4.1.1 換管規劃模式	56
4.1.2 案例研討	58
4.1.3 討論與小結	63
4.2 損壞污染監測選址模式	65
4.2.1 偵測污染水量水準值	65
4.2.2 Kessler et al. 方法	66
4.2.3 監測站網優選模式	68
4.2.4 案例研討	72
4.2.5 結果與討論	75
4.2.6 小結	81
第五章 管網損壞分析決策支援系統	83
5.1 系統發展運作架構	83
5.2 管網核心資料庫模組	88

5.3 管網結構分析模組	88
5.3.1 制水閥設置調整分析模組	89
5.4 管網損壞分析模組	89
5.5 管網停水分析模組	89
5.5.1 停水分析	89
5.5.2 制水閥損壞擴張樹分析	92
5.5.3 制水閥連通關鍵性分析	92
5.6 網路地理資訊分析介面模組	95
5.7 管網決策支援伺服系統	96
5.8 案例研討	97
5.8.1 停水分析	112
5.8.2 制水閥損壞擴張樹分析	116
5.8.3 制水閥連通關鍵性分析	119
5.9 小結	130
第六章 結論與建議	132
6.1 結論	132
6.2 建議	134
參考文獻	137
附錄 A 管網供水分區劃分模式	142
附錄 B 簡歷	151

圖 目 錄

圖 1.1 研究工作程序圖.....	6
圖 3.1 制水閥分區判識程序.....	18
圖 3.2 制水閥分區判識假想示範案例.....	20
圖 3.3 關鍵制水閥分區判識程序.....	21
圖 3.4 關鍵制水閥分區判識假想示範案例.....	23
圖 3.5 停水區域與周圍制水閥判識演算程序.....	25
圖 3.6 關鍵制水閥分區下游關閉區域判識演算程序.....	27
圖 3.7 損壞維修衝擊水力模擬程序.....	30
圖 3.8 制水閥關鍵性分析程序.....	36
圖 3.9 可及損壞路徑判識演算程序.....	39
圖 3.10 分析制水閥連線 I3 之所有可及損壞路徑判識範例	40
圖 3.11 非預期關閉損壞區域判識演算程序.....	45
圖 3.12 案例管網.....	48
圖 3.13 制水閥 v14787 關鍵性分析.....	51
圖 3.14 制水閥 v11781 關鍵性分析.....	51
圖 3.15 制水閥 v14780 關鍵性分析.....	53
圖 3.16 制水閥 v17883 關鍵性分析.....	53
圖 4.1 案例管網.....	59
圖 4.2 案例管網之制水閥分區輔助網路.....	60
圖 4.3 案例管網之各分區損壞缺水模擬結果.....	62
圖 4.4 基於管線與基於制水閥分區模式之決策隨總換管成本變化之改善 影響缺水量.....	64
圖 4.5 監測站網假想測試管網案例.....	73
圖 4.6 管流時間輔助管網案例.....	74

圖 4.7 決策監測站數隨偵測污染水準要求值變化趨勢.....	76
圖 4.8 不同偵測污染水量要求值下所得合適可行解總數變化圖.....	79
圖 4.9 經最大覆蓋縮減後之合適解總數分布圖.....	80
圖 5.1 管網損壞分析決策支援系統架構圖.....	84
圖 5.2 管網損壞維護決策輔助架構圖.....	86
圖 5.3 管網損壞分析決策支援系統介面與案例管網圖.....	87
圖 5.4 管網損壞停水分析管理程序.....	91
圖 5.5 基於連通性之制水閥連通關鍵性分析程序.....	94
圖 5.6 (a) 小型假想管網案例；(b) 經判識轉換之制水閥分區輔助網路， 其中制水閥分區旁的數字為 level numbers；(c) 經判識出的關鍵制水 閥分區，以雙圓形標示之，各制水閥分區旁的數字為 connection numbers。圖中以箭頭標示演算搜尋的路徑。.....	98
圖 5.7 假想管網案例之(a) 各制水閥分區之損壞缺水衝擊模擬結果， 與其損壞衝擊排序報表；(b) 損壞缺水衝擊部分統計長條圖與統計 報表。.....	101
圖 5.8 調整節點屬性以建構較可靠的網路系統。(a)原始輔助網路判識結 果；(b)在節點 n48 新增制水閥；(c)新輔助網路判識結果。.....	103
圖 5.9 (a) 大型測試管網合理案例之部分管網；(b) 同部位管網經判識轉 換之部分制水閥分區輔助網路系統，其中關鍵分區以雙同心圓標示。	105
圖 5.10 關鍵制水閥分區 S151 損壞關閉分析，判斷受影響的下游制水閥 分區，以具虛線邊界的較大圓形標示之。.....	106
圖 5.11 (a) 損壞事件關閉維修的直接損壞影響區域，以較大的斜線填滿 的圓形標示，及其所影響的關閉擴張下游制水閥分區，以具虛線邊界 斜線填滿的較大圓形標示之；(b) 損壞影響資訊(由左到右)，損壞維 修管線、關閉區域包含管線與周圍制水閥。.....	108

圖 5.12 損壞事件所造成管網所有需水節點的供水滿足模擬比例結果。	.109
圖 5.13 (a) 管網系統中個別制水閥分區損壞關閉的影響缺水量，與(b) 影響缺水量的統計直條圖與報表。	.....111
圖 5.14 管網停水分析管理系統畫面	.....113
圖 5.15 管網停水分析示範範例部分管網	.....114
圖 5.16 (a) 管線 22697_1 損壞停水關閉造成之各類影響制水閥分區與(b) 停水分析資訊報表。	.....115
圖 5.17 應用管線損壞擴張樹分析管線損壞之範例畫面。箭頭所指為直接停水維修分區。	.....117
圖 5.18 (a)單一邊界制水閥 v16805 損壞擴張之損壞擴張樹結果，與(b)多層制水閥接續損壞擴張之損壞擴張樹分析結果畫面。箭頭所指為直接停水維修分區。	.....118
圖 5.19 制水閥連通關鍵性分析結果之損壞影響分佈統計長條圖。	.....120
圖 5.20 (a) 制水閥連通關鍵性分析之損壞影響分佈統計報表，與(b)具較大連通關鍵性之制水閥列表。	.....121
圖 5.21 制水閥連通關鍵性分析結果之制水閥排序報表。	.....122
圖 5.22 具較大連通關鍵性制水閥 v14901 之空間定位結果。	.....123
圖 5.23 具較大連通關鍵性之制水閥 v13922 空間定位分析結果。	.....126
圖 5.24 (a)制水閥 v13922 比鄰區域之損壞擴張樹分析結果，圖中的箭頭指向制水閥 v13922；(b)制水閥 v13922 損壞之擴張損壞擴張樹分析結果。	.....127
圖 5.25 (a)制水閥分區 S12 包含管線範圍畫面；(b)該分區停水分析結果。	.....128
圖 5.26 (a)制水閥 v10559 比鄰區域 S3533 之損壞擴張樹分析結果；(b)制水閥 v10559 損壞之損壞擴張樹分析，及制水閥分區 S3566 之管線區域範圍。	.....129

表 目 錄

表 3.1 制水閥損壞機率經驗值.....	42
表 3.2 案例管網之制水閥關鍵性分析結果.....	49
表 3.3 案例管網中較關鍵之部分制水閥列表.....	50
表 4.1 損壞污染監測站網優選結果.....	77



符 號 說 明

- SL_n : 制水閥分區之分區階層數
- C_n : 制水閥分區之連通序數
- Q : 節點可得需水量
- H : 節點模擬水壓
- H_m : 節點最小供水壓力
- H_s : 節點可完全供水壓力值
- c : 節點需水量
- $N(t)$: 年度 t 管線預估每年每英哩可能產生的壞管次數
- b : 反應不同管徑大小對損壞率影響的校正因子
- k : 管線裝設年度
- P_j : 管線 j 的損壞機率
- β_j : 管線 j 每年可能發生的損壞次數
- γ_j : 管線 j 預期每年每單位長度所會發生的損壞次數
- Ln_j : 管線 j 的長度
- R_k : 分區 k 的損壞機率
- LR_j : 管線 j 的缺水量潛勢
- SS_i : 制水閥分區 i 之損壞影響缺水量
- SR_i : 制水閥分區 i 的缺水量潛勢
- VD_i : 制水閥 i 損壞關閉所影響的用戶數
- C_{Tot} : 管網中的總用戶數
- VII : 制水閥重要性指標
- Ps : 預設損壞路徑最小允許機率值
- VF_i : 制水閥 i 損壞事件
- $P(VF_i)$: 制水閥 i 損壞機率
- FP_i : 損壞路徑 i 損壞事件
- $P(FP_i)$: 損壞路徑 i 之損壞機率
- FS_i : 損壞路徑 i 最遠端的制水閥分區損壞事件
- VL_{ij} : 損壞路徑 i 所經過第 j 個制水閥連線
- SIF_{FP_i} : 制水閥損壞，可及損壞路徑 i 關閉的影響缺水衝擊量
- SIN_{FP_i} : 制水閥正常運作，可及損壞路徑 i 關閉的影響缺水衝擊量

- ΔSI_{FP_i} : 制水閥正常與損壞，損壞路徑 i 影響衝擊差異量
- VC_k : 制水閥 k 的關鍵性指標值
- F_i^{old} : 換管前制水閥分區 i 的損壞機率
- f_i^{new} : 經過換管後制水閥分區 i 的損壞機率
- P_j^{old} : 管線 j 未換管前的壞管機率
- P_j^{new} : 管線 j 經換管後的壞管機率
- z_j : 決策換管與否的[0,1] 整數變數
- U_i : 制水閥分區 i 所包含管線的集合
- C_j : 更換管線 j 的成本
- TC : 換管總經費的上限值
- SP_j : 管線 j 損壞所可能造成的缺水量
- NS : 制水閥分區總數
- MP : 管線總數
- L_{ji} : 可能污染節點 j 到可能監測站點 i 之最短傳輸時間
- D_n : 節點 n 取水量
- $Diff_{jn}$: L_{jn} 與 L_{ji} 的差異量
- S_{ji} : 偵測污染水量
- q_j : 節點 j 發生的損壞污染在被監測前的總損壞污染水量
- y_i : 節點 i 是否被選為監測站點的[0,1]整數變數
- NQ : 可能發生損壞污染的節點數
- K : 可被選為監測站點的總候選站點數
- M : 欲設置的總站點數
- h_{ji} : 虛擬變數表示節點 j 是否被節點 i 站點所監測
- G_i : 設在節點 i 監測站點負責監測的所有節點集合
- D_j : 可在偵測污染水量要求值內監測到節點 j 所發生損壞污染的所有監測站點集合
- V_{ji} : 監測站點 i 監測到損壞污染節點 j 污染前的總損壞污染水量
- l : 偵測污染水準要求值
- L : 預設監測站網需滿足的偵測污染監測值
- m : 總設置監測站點數
- $VCCI$: 制水閥的連通關鍵指標值
- E_T : 制水閥及鄰接制水閥分區均關閉時的衝擊量

- e_i : 鄰接制水閥分區 i 關閉的衝擊量
- n : 直接鄰接制水閥的制水閥分區總數



第一章 前言

1.1 研究緣起

台灣的水資源有限且隨著多年來的開發，已無法再大幅增加自來水水源，因此自來水事業應進入加強維護管理的階段(朱氏，1994)。隨著自來水管線的逐漸老舊，將因管線腐蝕、劣化等因素，進而引發管線爆裂等事件，造成損壞污染，降低供水品質與穩定性等問題(Boulos et al., 1994; Rossman et al., 1993)。然而隨著台灣地區產業型態的升級與民眾生活水準的改善，不僅提升自來水供水量的需求，更重視供水品質的要求，管網因而需要經常性的進行管線更新、停水維修與制水閥維護等工作，並設置有效的損壞污染監測系統，監測管線因損壞導致受污染所造成的供水品質劣化，以改善損壞維護作業效率，確保管網系統的供水品質。

管網系統為一個複雜的連通系統，包含許多管件節點，隨著管網內部管線條件的改變，比如管線關閉維修、換管等，皆會影響到管網內部飲用水的供水路徑，進而影響管網內部的壓力分佈，造成用戶可得水量的變化。因此，在進行自來水管網系統換管維修規劃或者停水維護操作時，應該對管網系統執行合理的損壞維護評估，然而過往的管網相關研究在進行各類管網模擬評估時，多將管線當作最基本的分析單位(Dandy et al., 2001; Fujiwara et al., 1998; Shamir et al., 1979)。然而管網操作維護必須關閉管線周圍的制水閥，才能進行。一般在實際的管網系統中，因為設置預算有限，不是每條管線的兩端點皆會設有制水閥，因此將會擴大換管施工或維護操作時的影響衝擊。另一方面，若以管線當作分析的單位，在分析實際的管網系統時，將可能因為龐大的管線數造成分析的困難。因此，在分析評估管網系統時，宜採用制水閥分區(Walski, 1987)當作管網分析的基本單位，以更合理的評估維護操作所造成的影響，並可簡化原始管網分析的複雜度。

而管線維護不僅造成管線連通性上的影響，亦會影響管網水力特性，因此管網維護分析除應考量管網連通關係外，亦應透過水力影響模擬，以期合理評估對管網系統的影響。

自來水管網的各項損壞維修、換管更新或者分區停水操作，都必須要操作恰當的制水閥，停止維修區域供水，以利工作進行。然而制水閥與其他自來水管網中的管件一樣，皆會隨著設置時間而漸漸增加損壞機率，不可能完全可靠。根據 KIWA and AWWARF (2001)的報告指出制水閥有 4% 的損壞機率，Boston Water and Sewer Commission (Shea, 1991)也提到制水閥可靠度大概為 95.8%。所以實際關閉制水閥時，不免有無法正常操作的制水閥，必須關閉其他下游制水閥才能成功關閉損壞維修區域，造成關閉範圍擴大而增加停水衝擊。因此，為確保自來水管網的供水品質，必須有效辨識較關鍵的制水閥，執行維護管理工作，以避免增加過大的停水衝擊。以往雖然已有一些研究針對制水閥的關鍵性分析提出一些分析演算方法，但僅考量制水閥損壞影響的總關閉用水戶與用水量(Jun et al., 2007a; Jun et al., 2007b; Casey et al., 2006; Trietsch and Mesman, 2006; Walski et al., 2006)。然停水區域的擴張，將會增加對整體管網供水的影響，特別是當擴張到重要供水管線時。因此制水閥關鍵性分析，應該要考量關閉擴張對於關閉區域之外的供水影響。此外，管網中個別管線的損壞機率各有不同，對於某些有較大損壞機率的區域，其周圍的制水閥將更有機會需要被使用到，因此該類制水閥的關鍵性應該要比其他制水閥更為重要，然過往的研究並未考量到制水閥周圍管線損壞機率的影響。因此，本研究發展一個考量制水閥周圍管線損壞機率，結合其損壞影響衝擊的評估指標與分析程序，以更有效的辨識管網制水閥的關鍵性，輔助研擬合理的制水閥維護工作。

管網系統埋藏在地底，不易監控管線損壞所造成的污染衝擊，因此自來水事業單位必須設置有效的損壞污染監測站點，即時監控自來水管網內

部的水質變化，以有效偵測管線損壞污染，確保供水品質(Kessler *et al.*, 1998; Kumar *et al.*, 1997; Lee and Deininger, 1992)。雖然現行自來水管網系統都設置有水質監測站點，並要求根據經驗判斷選取具代表性的位置設置監測站點，但為了便於監測，多將站點設置在公共設施等容易進入的場所，且缺乏一個合理可靠的決策方法，指出系統何處為較具代表性或敏感性的節點位置(Lee *et al.*, 1991)，以有效監控管網水質變化與劣化水質所造成的污染影響。本研究因而探討發展一個以偵測到污染事件前污染水量最小為目標的監測站點選址模式，以期改善自來水水質監控效率。

適當的損壞分析可改善自來水損壞維護或停水操作品質，然而管網通常包含數量龐大的管件，加上國內管網系統通常連通性較為複雜，因此難以透過人工的程序執行各項合理的損壞分析，除耗費大量的人力之外，亦難以避免可能的人為錯誤。雖然本研究所發展的各项損壞分析工具，以及各項模式可協助劃分供水分區與維護操作自來水管網系統，然而在實務上，自來水事業人員不易直接應用在實際管網系統中。因此，需要一個便利的決策輔助工具，改善自來水管網龐雜管件資訊的管理與分析，並將損壞分析與各項管網管理規劃決策自動化，便利自來水管網系統的損壞維護管理(Goulter, 1992)。因而發展一管網損壞分析決策支援系統，結合本研究所發展的各项分析工具與各項規劃優選模式，以改善管網損壞分析，提升自來水管網的損壞管理效率並確保管網供水品質。本研究更進一步結合地理資訊介面發展決策分析模組，便利管網損壞空間分析(Makropoulos *et al.*, 2003; Taher and Labadie, 1996; Huang *et al.*, 1995)。由於管網決策支援系統進行各項損壞分析及水力模擬時，必須耗費相當運算資源，造成決策系統的負擔，因此以決策分析用戶模組與損壞管理分析伺服器模組的分散式架構，發展基於網路的決策系統，運算需求較高的分析由伺服器執行，減輕決策用戶端的運算需求，以提升決策效率。

1.2 研究目的

自來水管網為提升供水的穩定度與供水品質，必須執行各項損壞管理與停水維護工作，本研究因此發展合理的管網損壞分析，制水閥關鍵性分析程序，停水區域規劃模式，損壞污染監測站點選址模式，並發展管網損壞維護決策支援系統，以利各項程序與模式之實務應用。本研究研究目的如下：

1. 改善管網損壞維護操作品質：改善管網損壞分析程序之效率與合理性，結合發展合理的制水閥關鍵性分析程序，以輔助研擬合理的制水閥維護策略，減少損壞操作的可能影響衝擊。
2. 降低損壞污染衝擊：發展最小化損壞偵測污染量之損壞污染監測站點選址模式，有效監測損壞污染事件，確保管網供水品質。
3. 提升管網損壞維護決策效能：發展管網損壞維護決策支援系統，整合各項所發展之損壞分析工具與決策模式，提升管網損壞分析效率，減少自來水管網損壞維護與停水操作的衝擊。

1.3 研究工作程序

本研究之工作程序如圖 1.1 所示。首先收集過往與管網損壞維護相關的研究文獻，探討以往研究的可能缺失與可改善方向，接續建立以制水閥分區為最小單位之判識演算程序，輔助轉換原始複雜的管網系統為以制水閥分區為單位的輔助網路，並利用 EPANET2 水力模擬功能，發展以制水閥分區為單位之損壞分析模擬程序，協助後續各項損壞維護策略之分析應用。為避免制水閥損壞造成管件損壞衝擊的擴大，接續發展制水閥關鍵性分析程序，以利研擬合理的制水閥維護策略。亦提出合理的損壞污染監測站網優選模式，建立有效的監測站網以在容許的損壞污染影響下，有效監測損壞污染事件。另針對因嚴重缺水或重大的損壞事件，提出一供水分區劃分優選模式，以盡可能減少關閉供水分區所可能造成的影響缺水量。最

後建立一個線上管網損壞分析決策支援系統，整合所發展的各项損壞分析程序與決策模式，並以大型的管網案例測試所發展損壞維護分析程序的可行性與適用性。上述各項研究工作將在後續章節中詳細說明之。

1.4 論文內容

在後續的章節中，第二章首先回顧與自來水管網損壞分析與管理相關研究文獻，接著第三章將逐一說明本研究所發展採用的各項管網損壞分析方法、程序以及原理，第四章則說明根據各項損壞分析程序所建立之制水閥關鍵性分析程序以及損壞污染監測選址模式，第五章則說明本研究根據物件化架構發展的管網損壞維護分析決策支援系統，含各項模組之運作架構與原理，最後第六章則說明所發展之各項方法、模式與系統的案例應用結果與討論，最後總結本研究在管網維護上的各項成果與結論，以及對未來研究的建議。



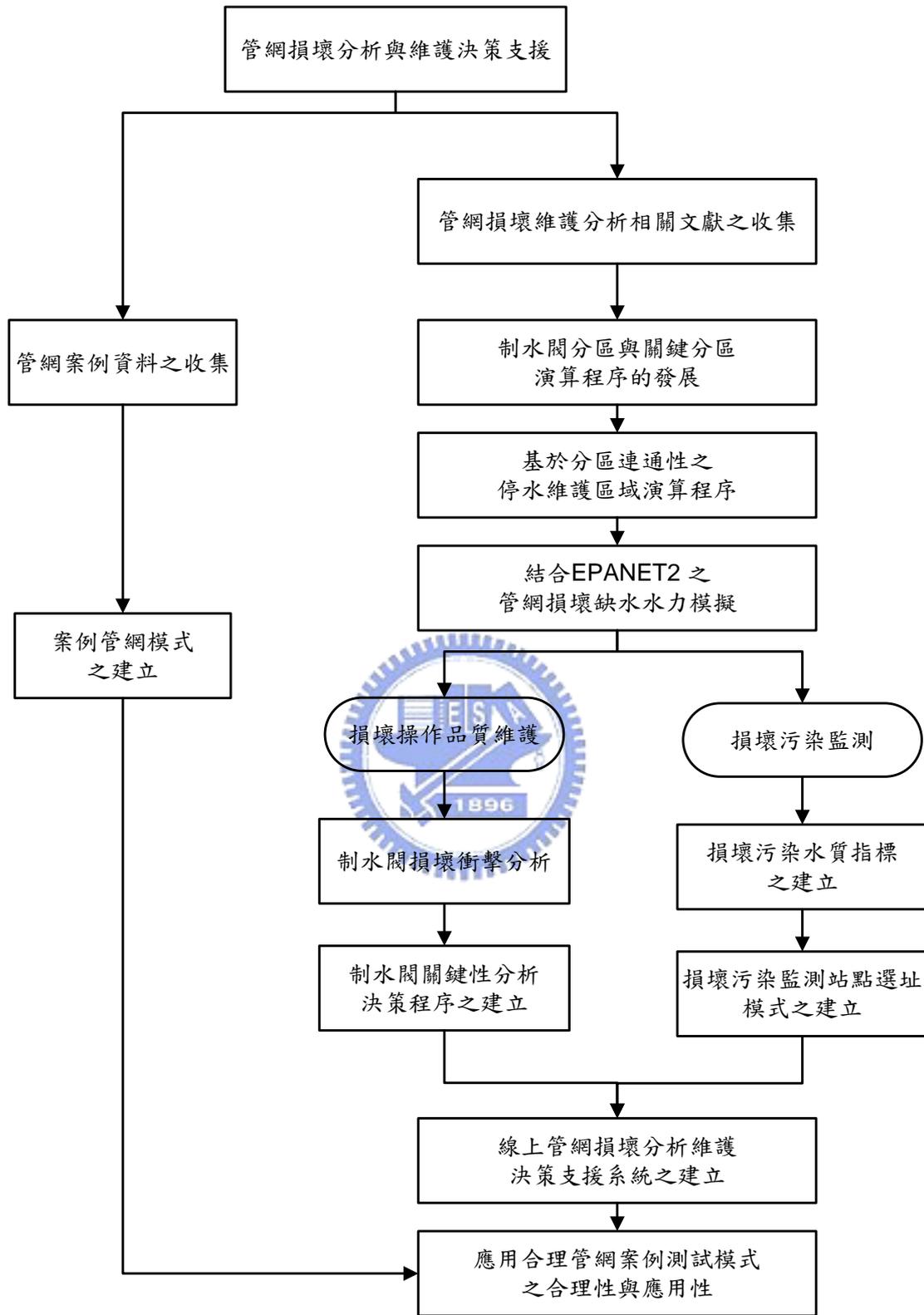


圖 1.1 研究工作程序圖

第二章 文獻回顧

本章首先收集並回顧與本研究所採用理論的相關研究文獻，以及與所發展研究內容相關的過往研究，說明與本研究之相關性，並探討其可能的改善方向，作為本研究各項發展研究的基礎。以下逐一說明探討各相關研究文獻。

2.1 制水閥分區

過往管網的設計規劃的相關研究，往往都將管線當作一個獨立的單位，假定當管線損壞時，可以單獨關閉該損壞管線以執行停水維修工作，而不致影響到管網的其他部分，然而 Walski (1987) 指出當管線發生損壞時，必須先能完全截斷該損壞管線的供水，從整個管網獨立起來才能執行維修工作，該損壞管線的截斷供水一般為透過關閉該管線最近的邊界制水閥來達成。因此，當在進行管網損壞停水分析時便不應該只單就管線的影響來進行考量，而應該根據關閉損壞管線周圍的制水閥所造成的影響衝擊來執行決策分析。而管網中關閉制水閥所能形成的最小管線範圍則定義為制水閥分區(segment) (Walski, 1987)。Bouchart and Goulter (1991) 因而根據 Walski 所提出的制水閥分區進行管網可靠度改善設計的研究，然而卻假設每條管線的兩端都已裝置制水閥，在管線損壞的時候便可以直接進行管線的修繕工作，進而決策如何新增管線間的制水閥，使管線損壞時的影響水量得以減小。Walski (1993) 接著對 Bouchart and Goulter(1991)的研究提出質疑，並指出在實際的管網系統中，僅有大約 16%的管線在其兩端都裝設有制水閥，而可在不影響其他管線裝置的情況下進行更新修繕，然一般管網的管線損壞，還是應該考量關閉損壞管線週遭的制水閥後所影響供水的部分管網範圍來分析。Walski (1987) 除定義制水閥關閉所獨立出的管線與

節點的最小範圍為制水閥分區(segment)外，若該制水閥分區為供應管網某些部分的唯一路徑，則定義此類制水閥分區為關鍵制水閥分區(critical segment)，並建議可以使用 breadth-first search (BFS)的演算程序判識該類影響較大的關鍵制水閥分區。雖然 Walski 初步對於制水閥分區進行介紹探討，然而並沒有提出一個分區判識的演算程序，而是以人工的方式進行實作，若是只以人工判識的方式進行分區的界定轉換，便較容易在判識的過程中產生錯誤，並且隨管網越來越複雜或加大而形成人工判識上的沒有效率或錯誤，故發展一個判識分區的演算程序，為應用制水閥分區實用化的首要工作。另外，雖然 Walski 提出以 BFS 的演算程序進行關鍵分區的判識工作，但是並沒有對於所使用的演算程序，進行詳細的說明，而 BFS 是以就節點周圍的连接點一層層進行判斷，需要較多的運算資源，因此演算程序效率較不佳。

雖然 Deb *et al.* (2007), Jun *et al.* (2007a), and Jun and Loganathan (2007) 後續利用矩陣來表示管網中各管線與節點間的連接關係，提出以depth-first search 為基礎的制水閥分區判識演算程序。並提出一判識關鍵分區的演算程序，該程序逐一關閉管網中的制水閥分區，並從包含供水節點的制水閥分區開始搜尋，直到遇到該損壞關閉的制水閥分區則停止往下搜尋，在搜尋停止後，如果有除了該關閉制水閥分區之外，還有其他區域沒有被尋訪到，則表示該制水閥分區為關鍵制水閥分區。其所提出的演算程序，必須要建構維持一個矩陣，當在處理龐大複雜的實際管網系統時，將耗費相當的記憶體資源，且演算效率亦將較差。而在關鍵制水閥分區的判識上，則因必須關閉每一個管網中的制水閥分區，並從包含供水節點的制水閥分區重複執行，亦需花費較多的演算時間。

針對過往在制水閥分區與關鍵制水閥分區判識演算上的缺失，本研究因而提出以depth-first search為基礎經改善的制水閥分區判識演算程序，與

另一個僅需執行一次即可判斷管網中關鍵制水閥分區的演算程序，以提升制水閥分區的判識轉換效率。

2.2 管網損壞分析

管網因損壞而停水維修關閉管線，除將影響到管網的連通特性之外，亦將改變管網整體的水力特性。因此，管網停水損壞維修，除應分析所影響的管網連通關係，如截斷的下游供水制水閥分區等，亦應執行管網損壞狀態下的管網水力模擬，以更合理的分析管網損壞停水影響衝擊。由於管網損壞的狀況下，將可能改變管網各節點的壓力變化，造成某些節點因壓力不足而無法完全滿足供水需求。然過往的水力模擬，多會假設滿足管網各節點的需水量(Bhave, 1991; Bhave, 1981)，以推求管網中的壓力分佈與水流狀態，如應用很廣的管網水力模擬模式 EPANET2 (Rossman, 2000)。然而以上述程序所推求出來的結果，可能某些節點的壓力已不足以充足供應節點的需水量。因此，Goulter and Coals (1986) and Su *et al.* (1987) 考量節點的可得壓力，提出若分析得之節點壓力大於某一最小需求壓力，則可完全滿足，反之則沒有供水。不過在實際的系統中，節點的供水可能隨可得壓力的變化，而有滿足部分需水量的狀況。因此，Bhave (1981), Germanopoulos (1985), Wagner *et al.* (1988) 以及 Chandapillai (1991)提出節點損壞可得水量的推求應有一個部分滿足的變化範圍，如果模擬所得之節點可得壓力小於某一最小需求壓力，則應沒有供水，大於較大的滿足壓力，則可完全供水，而在這兩者之間的可得壓力狀態下，節點供水則應該是部分滿足。Gupta and Bhave (1996)並提出一演算程序，可同時反應部分需水量與節點壓力變化的關係，以決定最後管網在損壞狀態下各節點的合理壓力分佈與可得供水量。然其演算程序必須自行建構完整的管網水力模擬程序，發展過程較為繁複，因此本研究直接應用 EPANET2 TOOLKIT 所

提供水力模擬函式，結合 Gupta and Bhawe (1996)的提出的模擬程序，發展管網損壞水力模擬工具，以有效輔助本研究執行各項管網損壞分析決策。

2.3 制水閥關鍵性分析

自來水管網在進行各項損壞維修、執行換管更新或者分區停水操作時，都必須要藉由關閉邊界的制水閥，以截斷維修區域的供水，利於進行維修工作。然而制水閥與其他自來水管網中的管件一樣，皆會隨著設置時間而漸漸增加其損壞的機率。因此，必須執行制水閥關鍵性的分析，據以規劃合理的制水閥維護策略，以確保自來水管網的供水品質。

因此 Jun *et al.* (2007a, b)提出 Valve Importance Index (VII) 與 Valve Failure Impact Index (VFII)二個指標，定義制水閥損壞所影響的用戶數量與總用戶數的比例為指標值。然其所提出的制水閥關鍵性指標，並未考量到因管網損壞關閉而可能一併關閉的下游區域連接供水節點的管網連通關係。在 Jun *et al.* (2007a, b)所提出的演算程序忽略了這個現象，而僅分析制水閥為共同邊界的兩個制水閥分區內所包含用戶數加總為該制水閥的損壞衝擊或重要性。

雖然 Jun and Loganathan (2007)提出一判斷因制水閥損壞擴張所造成的非預期性關閉區域的演算程序，然而其並未被應用到制水閥關鍵性分析上，且其所提出的演算程序，以矩陣儲存管網連通特性，並以此判識管網中的制水閥分區與判斷非預期關閉區域，且其搜尋機制仍然以管線、節點為基本單位，在處理實際的管網系統時，需要較大的記憶體空間與頻繁的矩陣運算，因此需要較大量的運算工作。

若某制水閥可能因為周圍區域損壞維修而使用的機率較高時，則該制水閥的關鍵性應該較高，因此制水閥關鍵性分析亦應考量使用機率。Jun *et al.* (2007a) 與 Trietsch and Mesman (2006)在分析制水閥損壞可能對於管網系統損壞所造成的影響時，提出以個別管線為分析的基本單位，執行多次

的管線隨機損壞事件，根據制水閥損壞機率，模擬關閉損壞管線周圍的邊界制水閥無法正常運作的隨機過程，以決定系統的制水閥損壞衝擊量。此程序主要在判別個別管線的損壞衝擊，而無法直接決定出個別制水閥關鍵性，且需要執行相當大量的損壞模擬程序，直到最後的結果穩定為止，甚至於要上萬次模擬 (Trietsch and Mesman, 2006)。因此，若要將所提出的上述分析程序應用到管網制水閥影響分析與設計上，將需要花費相當的運算時間，較不適用於應用到管網規劃管理的相關研究上。因此本研究針對過往相關研究的缺失，提出以制水閥分區為分析單位的非預期關閉區域演算程序，應用發展的損壞缺水模擬以更合理的評估制水閥損壞衝擊量，結合管線與制水閥的損壞機率與可及損壞路徑分析，提出制水閥關鍵性分析程序。

2.4 監測站選址規劃



管網水質監測站點的選址原則，根據 Lee and Deininger(1991)等學者所做的調查研究，USEPA 要求監測站點的採樣頻率必須以管網供給的用水戶數量為準，而測站點的設置則是以在管網中平均的分布且具代表性為其原則，然而經 American Water Works Association 的調查，管網中最常被設置的地點為商業或是公共建築，而私人的住家則是第三選擇。決定的主要因素是以站點的可使用權(access)為準，因為商業以及公共建築可以提供 24 小時使用權，而消防栓有時候也會被選擇作為測站點(Lee and Deininger, 1991)。至於國內的監測站點的設立原則為(a) 需水量變動時相對的壓力變動較高處，(b) 系統中，設置閥與 pump 在變動較大的地方，(c) 主幹線流量大，足以代表地區性的地點。而測站的實際設置地點主要在重要道路的交叉點上的消防栓，主要的考量也是在維護及操作的便利性因素(朱氏，79 年)。因此我們得知，雖然國內外對於監測站點的設置規範原則相當的明確，但是在實際設置時卻往往以站點的使用權或是便利性為主要的決定因

素。然最主要的還是並沒有一個非常客觀而可靠的站點決策方式被率定出來，所以現時由站點所建立的監測警報系統，便無法有效監控以維護管網水質的安全無虞。因此，發展一個可靠而客觀合理的站點決策模式，以決定具有代表性的站點便成為現代自來水事業管理維護上的要務。

過往所發展之管網水質監測站網模式，有如 Lee and Deininger (1992) 曾針對非保存性(non-conservative)物質之衰減(decay)特性，分析自來水水流動方向，將管網節點區分為上游節點與下游節點，假設下游端之水質劣於上游端。因此若下游端之水質未受到污染，則可推斷其上游節點的水質亦未受到污染。並利用自來水在管網中的傳布分析，提出可以提供最大管網水質資訊的監測站點組合為其目標的整數優選模式，進行決策分析。唯 Kumar *et al.*(1997)認為 Lee and Deininger (1992)所提出的模式，可能在求解大型管網系統時造成過大的計算負擔，耗費過多的時間，因此提出利用水流路徑的分析(pathway)發展出以水量分率矩陣 (water fraction matrix) 進行監測站點決策求解的技巧，以大量縮短求解所需的時間。然而，有些污染物質並不必然隨著傳布時間而更為劣化，並且上述研究據以分析管網流動的方法，無法充分表現出管網水力動態改變特性(Minocha and Prasad, 1999)。因而，上述研究並無法保證所決策出之監測站網能有效監控水質。

Kessler *et al.*(1998)則針對管網意外性污染進行測站設置的研究。其提出對於每個可能污染節點，計算被另一可能監測節點的監測到之前所造成的總污染水量。根據這些數據形成污染矩陣(pollution matrix)，以此求取出具最小覆蓋集合(minimum covering set)之監測站點。此方式雖可求得某偵測污染量要求值下之可行監測站點，但站數相同時，可能滿足不同的偵測污染水量，且必須以試誤法求得最佳偵測污染水量。Ostfeld *et al.* (2004)進一步考量污染在管流中傳送而濃度遞減的特性以改善 Kessler *et al.* (1998)所提出的方法，並提出一個簡單的整數規劃模式，決策具有最小偵測前總污染水量的管網水質監測站網，不過當處理大型管網系統時，其眾多的決

策站點整數變數將非常龐大，造成求解上的困難，且無法求解特定測站總數限制下的最佳解。Ostfeld and Saolomons (2004)在後續的研究中，發展出一個考量污染隨機特性的規劃決策程序，並應用基因演算法來求解最佳的監測站點位置，然以基因演算的過程並不能確保得到全域最佳解，因此所規劃的監測站網可能其對於損壞污染的監測可能並不是最佳。雖然 Berry *et al.* (2004)與 Berry *et al.* (2006)所提出的監測站網優選模式可解決整數決策變數過多的問題，然無法求解在特定偵測前污染容許量限制下的最佳監測站網設計。因此，本研究即針對上述過往模式的問題，提出幾個改良模式，以改善求解的效率以直接求取最佳解方案，輔助決策者能得到更明確合理的設站方案以供分析參考。

2.5 管網決策支援系統

雖然過往管網相關研究已針對各類問題提出許多可行的優選模式或演算程序，然一般使用者或決策者不易直接應用於研究管網上。且管網之決策管理應盡可能作各類考量，因此應發展可整合各類模式的決策支援系統，以供決策者有效應用(Goulter, 1992)。過往雖然也有學者發展整合管網模擬模式與地理資訊系統的圖形化介面系統，以輔助自來水管網的規劃設計工作。譬如 Huang *et al.*(1995)與 Taher and Labadie (1996) 即整合管網水力模擬模式、地理資訊系統以及管網設計優選模式，提供便利的決策分析的便利介面。Makropoulos *et al.* (2003) 則整合 Fuzzy 優選演算模式與管網地理資訊系統，發展管網供水管理輔助系統，並將分析結果呈現在管網圖形上，然由於其並未結合管網水力模擬模式，因此無法進一步應用在其他優選模式上。雖亦有一些研究發展考量管網損壞影響來決策換管策略的決策支援系統(Berardi *et al.*, 2008; Giustolisi, 2006)，然並未考量關閉周圍的制水閥而形成的損壞關閉制水閥分區的影響，所輔助決策得的結果可能有低估管網損壞事件的影響程度。且過往所發展的各项管網決策支援系統，多

為單機系統，對於運算資源的要求較高，無法有效分散管網決策分析的運算負擔，而其系統架構亦通常較少應用物件導向式的架構發展，較不易結合擴充其他管網決策所需的決策模式。因此，本研究結合所發展的各項損壞分析與模擬程序，應用物件導向的技術設計管網損壞分析決策支援系統架構，以增加系統的擴充性。發展主從式的網路分散式運作系統，有效分散決策模擬的負擔，有效降低決策支援用戶端的運算需求，以提升決策效能。

2.6 小結

經由回顧過往相關研究文獻，可得到以下各項結論：

- (1) 制水閥分區：管網損壞分析應考量制水閥分區的影響，雖然日漸受到重視，並有相應的演算程序被提出，但通常需要耗費較多的系統資源，與花費較多的計算時間，特別是在關鍵制水閥分區的判識上，需要重複性的執行全系統的搜尋演算，亦較沒有效率。因此，應發展有效率的演算程序來輔助判識管網系統中的制水閥分區與關鍵制水閥分區，以便利管網損壞分析之應用。
- (2) 管網損壞分析：雖然過往在損壞分析的演算程序上已有許多的研究提出，且被應用在管網損壞決策分析上，但卻通常需要自行發展演算程序與模式來進行，需耗費較長的發展時程，且較可能與通用的模擬結果有所差異，較不利於進行複雜而可靠的管網損壞相關決策分析。因此，若可結合通用的 EPANET2 水力模擬模式，發展管網損壞分析工具，將有利於執行更合理可靠的決策分析。
- (3) 制水閥關鍵性分析：過往在制水閥關鍵性分析上應用較為複雜而不穩定的分析程序，需耗費較多的演算時間，且不容易檢定出個別制水閥的關鍵性，因此為有效分析制水閥之關鍵性，應發展可靠的分析程序，以提升制水閥關鍵性分析的效率與合理性。

- (4) 監測站選址規劃：過往在決策損壞污染監測站網時，通常需要多次的試誤才能決定較佳的測站位置，且不能決定特定可容許污染偵測量限制下的較佳監測站網，因此需要發展一個有效的優選模式，輔助建立合理的損壞污染監測站網，以有效確保管網系統的供水品質。
- (5) 管網決策支援系統：過往所發展的管網決策支援系統，通常僅針對單一的決策需求而發展，缺乏有彈性可擴充的系統架構，且缺乏制水閘分區的相關判識演算功能，無法合理有效的執行各項管網損壞分析。因此，針對這些過往缺失，本研究發展一個物件導向式架構的管網決策支援系統，並結合所提出的各項分析決策工具，以有效輔助水公司進行各項管網損壞分析與維護工作。



第三章 管網損壞分析程序與方法

管網為一複雜的系統，通常包含龐大的自來水管線以及其他管件如制水閥等資訊，因此以自來水管線為基礎分析管網系統時，常需處理大量的管網資訊，演算量大，另一方面，管線本身較不易表示與分析管網的連通特性。而台灣地區的自來水管網分佈通常因為住宅居住密度較高與不規則分佈，亦增加管網連通的複雜度，造成管網分析困難。本研究因而採用過往所發展的制水閥分區與關鍵制水閥分區辨識演算程序，以制水閥關閉範圍當作管網的分析單位，以有效簡化管網分析的複雜度，利於分析管網的連通特性。並將所發展的演算程序應用到損壞維修停水區域辨識以及制水閥關鍵性分析上，提升管網損壞維修效率。

管網損壞維修除了會影響直接關閉區域內的用戶之外，也會因為截斷某些管網內部的供水通道，而影響關閉區域外的用戶，此類對管網整體的分析需要透過水力模擬較能合理推估影響程度，因此本章亦將介紹結合EPANET2所提供的水力模擬模組，發展停水損壞影響分析程序，並定義缺水量潛勢以合理評估管網損壞停水衝擊。

由於管網損壞維修或停水維修，皆需要關閉制水閥形成一個封閉的停水區域才能進行管網維修工作，因此制水閥的可靠度將明顯影響管網損壞維護所可能造成的停水衝擊，因此亦根據制水閥損壞可能造成的缺水衝擊，以分析制水閥的關鍵性及對停水的加成影響。

以下針對本研究所採用或發展的各项管網損壞維護分析程序與方法逐一說明之。

3.1 制水閥分區

Walski (1987) 指出自來水管網損壞維護需關閉周圍制水閥以停止維護區域的供水才能執行損壞維修，因此管網分析應考量以制水閥所關閉的區域為基本分析單位，並稱之為制水閥分區。若制水閥分區損壞會關閉其他制水閥分區的供水，擴大因損壞所關閉的區域，則此種分區稱為關鍵制水閥分區。雖然Walski (1993) 曾建議以breath-first search (Horowitz *et al.*, 1993)的方法判斷制水閥分區與關鍵分區，但以breath-first search需要儲存某一搜尋階段的連通關係，需要較多的計算資源，且其並未實際發展相關演算法。Deb *et al.* (2007), Jun and Loganathan (2007)與 Jun *et al.* (2007) 利用矩陣建立管網基本圖資資訊，以breath-first search法(Horowitz *et al.*, 1993)判識，然而由於以矩陣儲存管網資訊將耗費較大的計算機資源，且該關鍵分區的判識演算，將需要對所有分區不斷的重複從供水源的搜尋演算，將花費相當的計算時間，無法有效率的判定出損壞影響較大的關鍵分區。本研究因而採用李(2002)提出以depth-first search (Horowitz *et al.*, 1993) 為基礎的演算程序，簡化其演算流程，發展更模組化的電腦演算函式，提升制水閥分區判識演算效率 (Kao and Li, 2007; Li and Kao, 2008)，將原始管網轉換為以制水閥分區為單位的輔助網路，以簡化管網分析的複雜度。

3.1.1 制水閥分區判識

本研究應用depth-first search演算程序所發展之制水閥分區判識電腦演算程序如圖 3.1 所示。演算程序從任一個沒有搜尋過的管網節點(通常從管網的供水節點)開始搜尋，並呼叫 *TraverseANode* 函式判識制水閥分區。該函式搜尋目前節點所連接的所有管線，如果管線所連結的另一端為制水閥，則停止搜尋，否則再遞迴 (recursively) 呼叫 *TraverseANode*，並以管線另一端的節點為新的搜尋起點開始往下搜尋。這個搜尋程序將持續

Algorithm: Depth-first search identification for valve-enclosed segment

Select an arbitrary node, s , that is not traversed.

Create an empty stack to store nodes in the new segment to be identified.

Call *TraverseANode* (node s).

All nodes stored in the stack form a newly identified segment.

Repeat the above procedure until all nodes are traversed, i.e. all segments are identified.

Function *TraverseANode* (node c)

mark node c being traversed;

store node c into the stack for the current segment to be identified;

for each pipe connected to node c

if the object connected to the other side of the pipe is a valve **then**
the valve is marked as the boundary of the current segment;

else if the object is an end node **then**

mark the end node being traversed;

store the end node into the stack;

else (the object is an unvisited node, v)

Call *TraverseANode*(node v) recursively;

endfor

endFunction



圖 3.1 制水閥分區辨識程序

到所有所呼叫的 *TraverseANode* 停止搜尋為止，則此時所儲存的所有搜尋到的管件則為一個制水閥分區。接著則從停止的制水閥節點開始，重複上述的制水閥分區判識程序，直到所有管網中的管件都被劃分到某一制水閥分區中為止，則原始的管網系統即可轉換為以制水閥分區為單位的輔助網路。

圖3.2 以一個小型假想案例示範上述演算程序。假設從節點n1開始搜尋，並沿著管線p1往下搜尋，由於另一端節點為制水閥v1，因此停止搜尋，並沿著連接n1的另一管線p4往下搜尋，由於另一端亦為制水閥v2，因此停止搜尋，並判識出制水閥分區A。接著開始判識制水閥分區B，從上次停止搜尋的制水閥v1開始，並沿著管線p2遇到制水閥v3而停止。以類似的程序繼續判斷制水閥分區所包含的管件，可判識出制水閥分區C。如果制水閥分區間有共同的邊界制水閥，則以一個連接線來表示制水閥分區之間的連接關係，並以制水閥分區為節點，最後即可將原始的管網系統轉換如圖3.2右邊的輔助網路圖形。



3.1.2 關鍵制水閥分區判識

關鍵制水閥分區為損壞關閉將一併關閉下游供水區域的制水閥分區，故關鍵制水閥分區重要性比一般制水閥分區重要，有必要判識出這些關鍵制水閥分區。若將前一小節所轉換出的制水閥分區當作節點，制水閥分區間的連接關係以線段表示，則可建立以制水閥分區為單位的輔助網路，並以此判斷關鍵制水閥分區。經改善的關鍵制水閥分區判識演算電腦程序如圖3.3所示。該演算從根節點開始搜尋，即包含供水節點的那個制水閥分區。並對每個制水閥分區設定兩個數：分區階層數(Segment level, SL_n)以及連通序數(connection, C_n)，其中分區階層數表示演算的搜尋順序，而連通序數則表示制水閥分區間的連通關係，一開始所有的制水閥分區節點皆先設定這兩個值為-1。

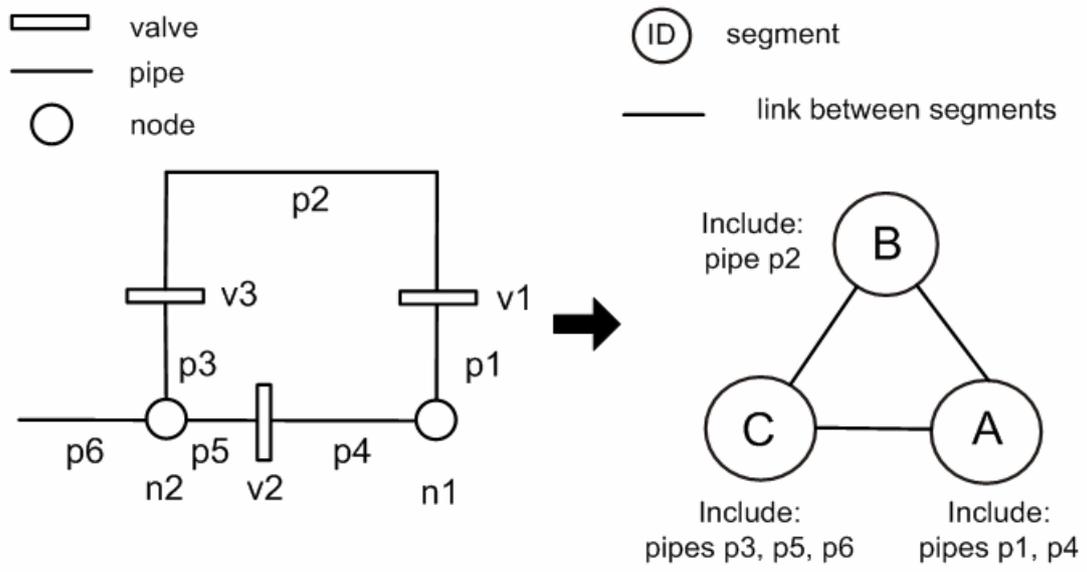


圖 3.2 制水閥分區判識假想示範案例



Algorithm: Identification of critical segments

Start from the root segment with the water supply source node.

Set a global level number (GLnum) to be initially 0.

Assign two numbers to each segment: Segment level number (SLn) and Connection number (Cn) and both are initially set to be -1 (not traversed).

Call *TraverseAndAssignNumber* (the root segment, null).

Any segment whose SLn less than or equal to the Cn of any child segment, traversed immediately after the segment in the depth-first searching sequence, then it is a critical segment.

Function *TraverseAndAssignNumber* (segment u, parent segment v)

set both SLn(u) and Cn(u) to be GLnum; and

increase GLnum by one;

for each segment w adjacent to segment u and is not the parent segment v

if segment w has not been visited **then**

call *TraverseAndAssignNumber*(segment w, segment u) recursively;

set Cn(u) to be the minimum of current Cn(u) and Cn(w);

else

set Cn(u) to be the minimum of Cn(u) and SLn(w);

endfor

endFunction

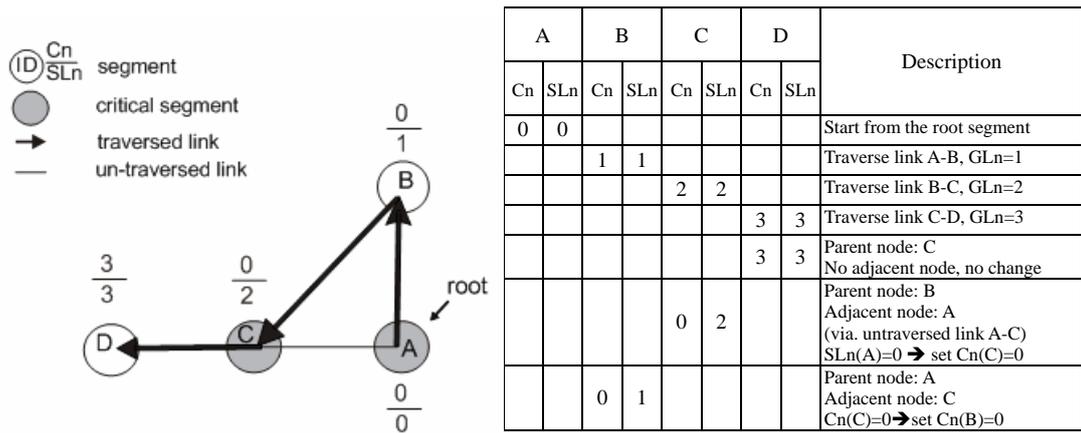


圖 3.3 關鍵制水閥分區判識程序

接續呼叫 *TraverseAndAssignNumber* 函式以設定 SLn and Cn 為 $GLnum$ 值， $GLnum$ 在每次 *TraverseAndAssignNumber* 函式被執行時都會增加 1，此搜尋程序會遞迴執行該函式，以搜尋目前訪問分區節點相鄰未被搜尋過的分區節點，一直到所有制水閥分區節點都被搜尋過之後。接著從最後被遞迴呼叫搜尋到的分區節點開始判斷，如果分區節點的所有向下遞迴搜尋的分區節點都被搜尋過了，則該分區節點的 Cn 會被重設其值為目前分區節點與周圍分區節點所有最小的 Cn 值。如果目前分區的周圍分區節點已經被搜尋過，則設定該分區節點的 Cn 為該分區節點目前 Cn 值與周圍分區節點 SLn 值的最小值。上述的演算程序持續搜尋直到所有的制水閥分區節點都被搜尋過，且所有的 Cn 與 SLn 值都被設定為止。

完成上述程序後，關鍵分區則為網路中的任何分區之 SLn 值，小於等於該分區節點的下游分區的 Cn 值。因當 SLn 值大於等於 Cn 值時，表示該制水閥分區下游的分區節點，有另外的連線可連通到上游的制水閥分區，因此當該分區損壞時並不會關閉其下游的制水閥分區節點，因此不是關鍵制水閥分區，反之則是關鍵制水閥分區。

圖3.4 為以一個假想案例示範上述的關鍵分區辨識程序。其中因制水閥分區A與C的 $SLn(A)$ 與 $SLn(C)$ 值皆小於下游分區B與D的 $Cn(B)$ 與 $Cn(D)$ ，因此制水閥分區A與B皆為關鍵制水閥分區。另外，制水閥分區B不為關鍵分區是因其 $SLn(B)$ 大於下游分區C的其 $Cn(C)$ ，表示有至少兩個以上的連線可以連通到分區B的上游分區A。



$SLn(A) (=0) \leq Cn(B) (=0) \rightarrow A$ is a critical segment
 $SLn(B) (=1) > Cn(C) (=0) \rightarrow B$ is **not** a critical segment
 $SLn(C) (=2) < Cn(D) (=3) \rightarrow C$ is a critical segment

圖 3.4 關鍵制水閥分區判識假想示範案例



3.2 停水區域判識程序

管網系統可能因為管線損壞或維護，必需關閉維護區域停水，才能執行維修工程，因此須判斷可關閉損壞管線的周圍制水閥，然管網系統連通關係複雜，且當維修範圍較大時，需關閉制水閥數目將較大，人工判識容易失誤，且較為費時繁複。因此為有效輔助判斷停水維修可能對管網系統造成的供水衝擊，並有效判識可有效封閉停水維護區域的制水閥，便利後續發展各項管網損壞評估程序，本研究以制水閥分區判識演算函式為基礎，發展損壞停水區域判斷程序，如圖 3.5 所示。演算程序與制水閥分區判識演算不同的地方以粗字斜體顯示。

當損壞維修管線不只一個時，則對每一個需要停水維護的管線執行停水區域判識演算，判識程序基本上與制水閥分區判識相同，為從損壞管線的端點開始搜尋，往外擴張搜尋直到遇到尾端節點或者制水閥為止，則被搜尋到的節點即為停水區域，而搜尋停止的制水閥即為邊界關閉制水閥。

若是損壞停水區域為一個關鍵制水閥分區，則該區域的關閉將會影響到其他供水區域，而擴張停水關閉區域，此類受影響的區域稱為非預期關閉區域(unintended isolation)(Jun and Loganathan, 2007)。雖然 Jun and Loganathan (2007)曾提出以 breath-first search 為基礎演算程序，然而其演算對於每個停水關閉區域皆需要從供水節點從頭開始搜尋，沒有被搜尋到的區域才判定為非預期關閉區域。若要分析管網整體停水影響損壞分析時，應用上述的演算流程，將隨著制水閥分區數量的增加而明顯增加其運算時間，不利於與其他損壞分析或者管網評估優選規劃工具共同使用。

Algorithm: Depth-first search identification for shut-off areas and valves

Create an empty stack $stack_n$ to store nodes

Create an empty stack $stack_v$ to store valves

for each failed pipe, p

Select an end node of p , s , which is not a valve.

if node s is not traversed,

Call *TraverseToValves* (node s)

endfor

All nodes stored in the $stack_n$ form shut-off areas.

All valves stored in the $stack_v$ are boundary valves required to be closed.

Function *TraverseToValves* (node c)

mark node c being traversed;

store node c into the $stack_n$ for the shut-off areas to be identified;

for each pipe connected to node c

if the object connected to the other side of the pipe is a valve **then**

store the valve into the stack v ;

else if the object is an end node **then**

mark the end node being traversed;

store the end node into the $stack_n$;

else (the object is an unvisited node, v)

Call *TraverseToValves*(node v) recursively;

endfor

endFunction

圖 3.5 停水區域與周圍制水閥判識演算程序

根據關鍵制水閥分區演算程序的說明，如果有鄰接制水閥分區的 C_n 值大於該制水閥分區的 SL_n 值，則代表該鄰接的制水閥分區沒有其他連通的路線可以連接比該制水閥分區更上游的制水閥分區，因此該制水閥分區為鄰接分區到其他區域的唯一通道。由於 C_n 與 SL_n 值的搜尋演算從包含供水點的制水閥分區開始，所以當 C_n 值較小時，表示可連通到更接近供水點的區域。因此，對於任一關鍵分區，若下游分區具較大連通序數 C_n ，表示除通過關鍵分區外，無法連通到其他區域，即為非預期關閉區域。

根據上述的概念，本研究所發展的非預期關閉區域演算流程如圖 3.6。對於每一個包含損壞管線的關鍵分區，逐一判斷其鄰接制水閥分區，如果下游分區之 C_n 大於或者等於該關鍵分區之 SL_n ，則執行 *Traverse(segment ds, segment cs)*，往下搜尋未被尋訪過且不為該關鍵制水閥分區的供水區域並儲存之，搜尋演算後所記錄下來的所有制水閥分區即為非預期關閉區域。由於此演算程序僅需針對關鍵分區的相鄰分區開始搜尋，可有效縮減搜尋範圍與次數，而改善判識效率。

以圖 3.4 的小型案例示範，其中關鍵分區 C 鄰接區域制水閥分區 D 具有較分區 C 之 $SL_n(C)$ 大的 $C_n(D)$ ，表示制水閥分區將因為關鍵分區 C 關閉而關閉。

Algorithm: Identification of unintended isolation for each critical segment

for each critical segment, cs , identified in the auxiliary network
 Create a new stack to store unintended isolated downstream segments of cs
 for each immediate children segment of cs , ds ,
 if connection number (Cn) of ds larger than or equal to segment level number (SLn)
 of cs ,
 Call *Traverse*(segment ds , segment cs).
 endfor
 All segments stored in the stack are the unintended isolation of cs .
endfor

Function *Traverse* (segment ds , segment cs)

 mark segment ds being traversed;
 store segment ds into the stack for the unintended isolation to be identified;
 for each segment ns connected to segment ds
 if the segment ns is unvisited and is not cs
 Call *Traverse*(segment ns , segment cs) recursively.
 endfor
endFunction

圖 3.6 關鍵制水閘分區下游關閉區域辨識演算程序



3.3 管線損壞缺水模擬

當管網因損壞維修或者停水維護而關閉部分供水區域時，不僅會影響到關閉區域內用水戶的供水，也可能關閉某些供水通道，影響管網水力特性，而影響到管網其他區域用水戶的可得水量。因此結合水力模擬模式，以更合理評估損壞停水造成的影響衝擊。雖然過往作者(李，2002)曾針對管網損壞模擬提出利用 EPANET2 管網水力模擬模式的評估演算程序，然而其模擬過程以不同的演算程序處理一般分區與關鍵分區，因其重複產生新的 EPANET2 模擬輸入檔，將損壞關閉分區內的管線從模擬檔中移除，而必須根據兩種不同制水閥分區類型個別處理，否則 EPANET2 將因為關鍵制水閥分區內的管線移除，形成下游供水區域產生獨立於供水點之外的區域，無法執行模擬。上述的演算程序，除需寫入寫出大量管網檔案資訊，且因為將 EPANET2 當作獨立模式直接叫用，造成模擬效率較低。

本研究針對上述的缺失進行改善，直接結合 EPANET2 的 TOOLKIT (Rossman, 2000)發展管網停水損壞模擬程序，以提升模擬效率。另一方面，由於 EPANET2 模式預設會滿足各取水點的預設需水量，因此所求取出來的模擬結果，並不能合理代表因停水關閉造成水壓降低的影響衝擊，本研究亦針對這個問題採用 Gupta and Bhave (1996)的演算程序，應用 EPANET2 TOOLKIT 發展水力模擬程序，以合理推估管網損壞的衝擊。

由於用戶可供水量受供水壓力所影響，如果小於某一最小水壓值將完全無法取得供水，若是大於足夠供水水壓則可以完全供水，在這兩個水壓之間的供水將隨著壓力的變化而改變，因而採用 Wagner et al. (1988)所提出的簡化公式來推算：

$$Q = \left(\frac{H - H_m}{H_s - H_m} \right)^{1/2} \cdot c \quad (3-1)$$

其中 Q 為節點可取得的供水量； H 為關閉損壞制水閥分區後由模擬模式所推估的節點水壓； H_m 為節點的最小供水壓力，假設小於此壓力無法供水； H_s 則為該節點可完全供水的壓力值，若 $H > H_s$ 時則用 H_s ； c 則為節點的取水量值。

由於取水量改變，壓力亦會隨之改變，故本研究採用 Gupta and Bhave (1996) 所建議的疊代法估算取水量，第一次的 c 值採用正常情形下的取水量，求得 Q 之後代入模擬模式重新估算壓力值，並以前一次估算出的供水量 Q 為下一次的取水量 c ，然後再重複上述步驟，直到供水量與上次估算值相當接近值為止。應用上述程序可估算出各節點的取水量，並計算其與需求水量的差異，加總之後即為整體管網之缺水影響量。

所發展的損壞維修衝擊水力模擬程序如圖 3.7 所示。對於每一個辨識出的制水閥分區，設定所包含的管線屬性為關閉，經上述演算程序所模擬推得之各取水節點壓力值在代入可得水量估算公式(3-1)之後，再整合估算其管網的總缺水量，即為個別制水閥分區損壞關閉，造成的缺水衝擊量。



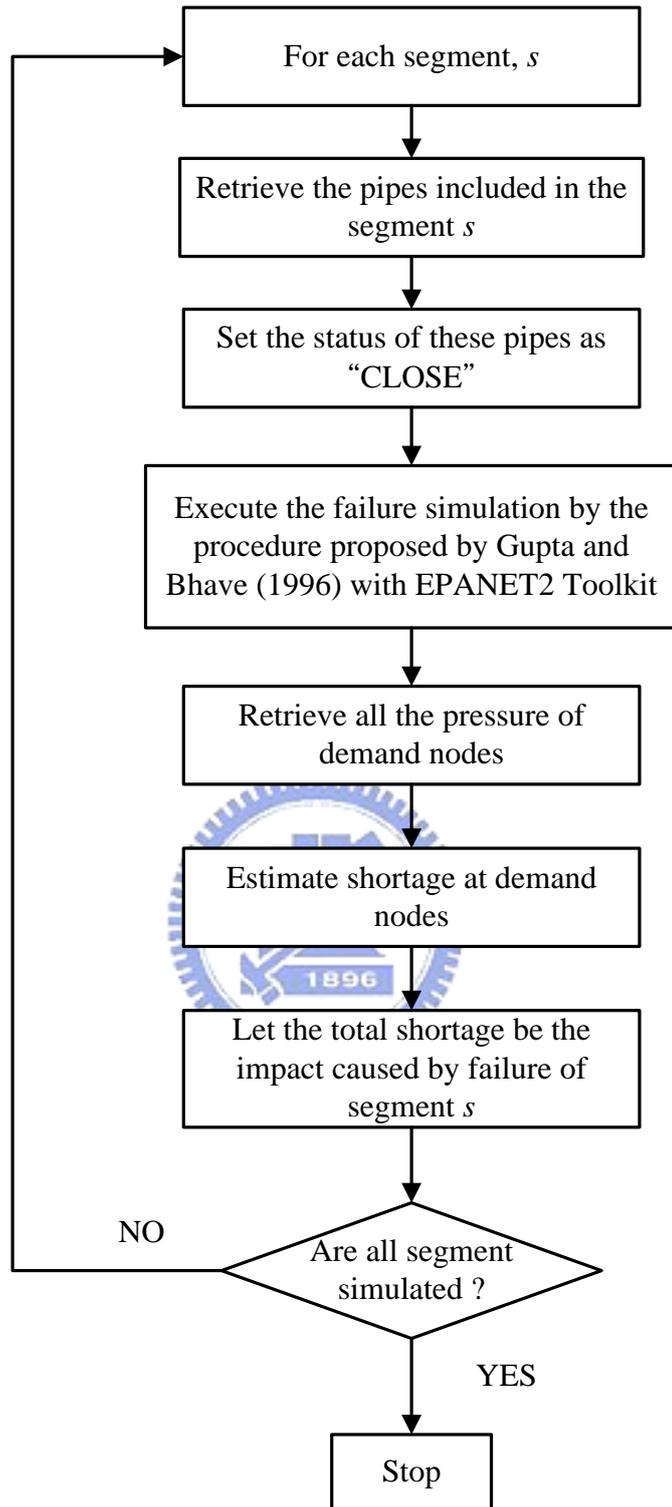


圖 3.7 損壞維修衝擊水力模擬程序

3.4 制水閘分區損壞機率

管線可能因管齡增加，增加腐蝕或意外性侵入損壞事件發生的機率，且其損壞發生率與管徑大小、所在位置及管材相關 (Su *et al.*, 1987)。因此，管線的損壞影響重要性，除了與停水維修所關閉的制水閘分區造成的損壞衝擊相關，亦應考量損壞機率的影響。因此如同過去研究(李，2002)，同樣採用 Walski *et al.* (1982) 針對實際維修紀錄所建議的迴歸損壞率預估式，估算管線某年度可能損壞次數。由於台灣的溫度變化不如國外大，且缺乏維修資料，故忽略迴歸式中溫度以及過往損壞影響的校正係數。所採用的管線損壞次數推估公式如下：

$$N(t) = 0.02577b e^{0.0207(t-k)} \quad (3-2)$$

其中 $N(t)$ 則為在年度 t 管線預估每年每英哩可能產生的壞管次數， b 為反應不同管徑大小對損壞率影響的校正因子，而 k 為管線裝設年度。另因為管線損壞為一隨機分佈，假設單位時間內的損壞次數相近，因此可以 Poisson distribution 來描述其損壞的機率，因此可應用其分布特性估算管線之損壞機率 (Su *et al.*, 1987)，其轉換公式如下：

$$P_j = 1 - e^{-\beta_j} \quad (3-3A)$$

$$\beta_j = \gamma_j L_n_j \quad (3-3B)$$

其中， P_j 為管線 j 的損壞機率； β_j 管線 j 每年可能發生的損壞次數； γ_j 為管線 j 預期每年每單位長度所會發生的損壞次數，即為(3-2)之 $N(t)$ ； L_n_j 為管線 j 的長度。

制水閥分區由內部所包含的管線所組成，因此其損壞機率推估公式可由下式估算(Wu *et al.*, 1993)：

$$R_k = \sum_{j=1}^m P_j - \sum_{i < j} [P_i \cap P_j] + \dots + (-1)^{m-1} [P_1 \cap \dots \cap P_m] \quad (3-4)$$

其中， R_k 為分區 k 的損壞機率， P_j 為包含在制水閥分區 k 中的管線 j 之損壞機率。為簡化分析程序便利本研究後續各項模式之發展，根據 the principle of inclusion and exclusion (Ross, 1985) 忽略制水閥分區中管線同時損壞機率的影響，而以制水閥分區包含管線的失敗率總合 ($\sum_{j=1}^m P_j$) 表示制水閥分區失敗率的上限值，主要是因為管線同時損壞的機率相當小，可以忽略之。

3.5 缺水量潛勢



為合理評估管網損壞維修與停水維護的關閉衝擊，除了本身關閉所造成的缺水衝擊量之外，亦應該考量其損壞的機率，因此定義缺水量潛勢，為個別管線與制水閥分區損壞維修的可能衝擊程度。該缺水量潛勢之定義如下：

$$LR_j = P_j \cdot SS_i \quad (3-5)$$

其中， LR_j 為管線 j 的缺水量潛勢， P_j 為管線 j 的損壞機率， SS_i 為管線 j 所在之制水閥分區 i 損壞之影響缺水量，由於管線損壞將一併關閉所在的制水閥分區，因此以所在制水閥分區關閉來評估該管線之影響缺水量。當 LR_j 值愈大時，表示該管線愈不可靠，愈可能對管網系統造成較大的損壞影響。反之，若愈小則表示愈可靠。由於當管線損壞的時候，必需關閉其所在的制水閥分區，因此其影響衝擊必需以該制水閥分區損壞維修所造成的損壞衝擊缺水量來評估。

相對的，對制水閥分區亦可定義如下：

$$SR_i = R_i \cdot SS_i \quad (3-6)$$

其中， SR_i 為制水閥分區 i 的缺水量潛勢， R_i 為制水閥分區 i 的損壞機率， SS_i 為制水閥分區 i 之損壞影響缺水量。當 SR_i 值愈大時，表示該制水閥分區愈不可靠，愈可能對管網系統造成較大的損壞影響。反之，若愈小則表示愈可靠。

3.6 制水閥關鍵性分析

管網損壞維修或停水維護工作必需關閉制水閥方能執行，若制水閥無法正常運作，將擴張損壞維修對於管網系統的影響，根據國外的實作經驗 Shea (1991) 大約有 5% 的制水閥無法正常運作，因此水公司為降低管網損壞維護所造成的停水衝擊，應合理分析制水閥的關鍵性，規劃有效的制水閥維護工作，降低因制水閥損壞所造成的衝擊。

雖然以往已有相關研究針對制水閥的損壞關鍵性進行研究，如 Jun et al. (2007a) 與 Jun et al. (2007b) 提出 Valve Importance Index (VII) 與 Valve Failure Impact Index (VFII) 二個指標。其中 VII 指標如下式所示：

$$VII(\text{Valve}_i) = \frac{VD_i}{C_{Tot}} \quad (3-7)$$

其中 VD_i 為因制水閥 i 損壞關閉所影響的用戶數； C_{Tot} 為管網中的總用戶數。然如前所述，管網損壞關閉除影響關閉區域的供水外，亦可能為關鍵制水閥分區，而一併關閉下游供水區域。即使鄰接的制水閥分區，不為關鍵分區，亦可能因為同時關閉而阻斷較多的供水通道，造成原本兩個都是一般性的制水閥分區，在制水閥損壞而同時關閉時，會阻斷某些區域的供水通道，一併關閉下游區域的用戶供水而擴張影響範圍。不過 Jun et al. (2007a, b) 所提出的演算程序忽略了這個現象，只分析制水閥為共同邊界的兩個制水閥分區所包含用戶數，加總為該制水閥的損壞衝擊重要性。

雖然 Jun and Loganathan (2007)提出的非預期性關閉區域的判斷演算程序，然而並未被應用到制水閥關鍵性分析上，且該演算程序，以矩陣儲存管網連通特性，並以此判識管網中的制水閥分區與判斷非預期關閉區域，且以管線、節點為基本單位，在處理實際的管網系統時，需要較大的記憶體空間與頻繁的矩陣運算工作。

若制水閥的周圍區域損壞維修機率較高，而有較高的使用機率時，則該制水閥的關鍵性應該較高，因此制水閥關鍵性分析，除應考量上述的損壞擴張衝擊外，亦應考量使用機率。Jun *et al.* (2007a) 與 Trietsch and Mesman (2006)在分析制水閥損壞可能對於管網系統損壞所造成的影響時，曾提出如下的管線與制水閥損壞機率分析程序：

Step 1: 針對個別管線損壞。找出該管線所在的制水閥分區，及維修該管線須關閉的周邊制水閥。

Step 2: 產生隨機變數，決定其周邊制水閥是否損壞。

Step 3: 如果某一周邊制水閥損壞，則往外擴張損壞關閉區域，增加應關閉制水閥，回到 Step 2，直到損壞區域可以被成功關閉為止。

Step 4: 若還有管線未分析，則回到 Step 1 直到每個管線皆被分析為止。

上述的損壞分析程序，仍以個別管線為分析的基本單位，且上述的程序所演算出的損壞衝擊，主要代表個別管線的損壞衝擊，而不易直接決定出個別制水閥關鍵性指標值。該程序以隨機程序模擬決定周圍制水閥損壞與否，因此每次損壞分析的結果皆會不同，因此決定的結果較不穩定，為得到統計上可信的結果，需要執行大量的模擬程序，甚至於要上萬次模擬以得到足夠的數據(Trietsch and Mesman, 2006)。因此，若要將所提出的上述分析程序應用到管網制水閥影響分析與設計上，將需要花費相當的運算時間，較不適於應用到管網規劃管理的相關研究上。且上述的各項分析，

皆僅以影響用戶數當作分析的基準，而並未考量到關閉區域造成其他非關閉區域供水的影響程度。

針對過往相關研究的缺失，提出以制水閥分區為分析單位的非預期關閉區域演算程序，應用發展的損壞缺水模擬以更合理的評估制水閥損壞衝擊量，結合管線與制水閥的損壞機率與可及損壞路徑分析，提出制水閥關鍵性分析程序，詳細的分析程序如下各節所述。

3.6.1 制水閥關鍵性分析程序

本研究所提出的制水閥關鍵性分析程序如圖 3.8 所示。其分析步驟說明如下：

- Step1. 對於管網中的每一個制水閥，首先找出所有因制水閥分區損壞關閉而擴張到該制水閥的所有可能影響路徑，
 - Step2. 如果所判斷出路徑的損壞機率小於預設的最小機率值 P_s ，則不考量之。反之，若影響路徑之發生機率大於 P_s 則需考量之。
 - Step3. 模擬各影響路徑維修關閉的損壞影響，分別考量該制水閥損壞與正常運作情況下，個別損壞路徑擴張關閉所造成缺水衝擊的差異量。
 - Step4. 個別制水閥之關鍵性即可以個別路徑損壞機率與其對應之損壞衝擊差異量之乘積累加值表示，亦即該制水閥損壞所造成的預期缺水影響增加量。
 - Step5. 如果還有未分析到的制水閥，則針對任一還未分析的制水閥重複執行 Step1 的分析程序，直到所有制水閥的關鍵性皆被分析過為止。
- 後續幾節將針對個別步驟詳加說明之。

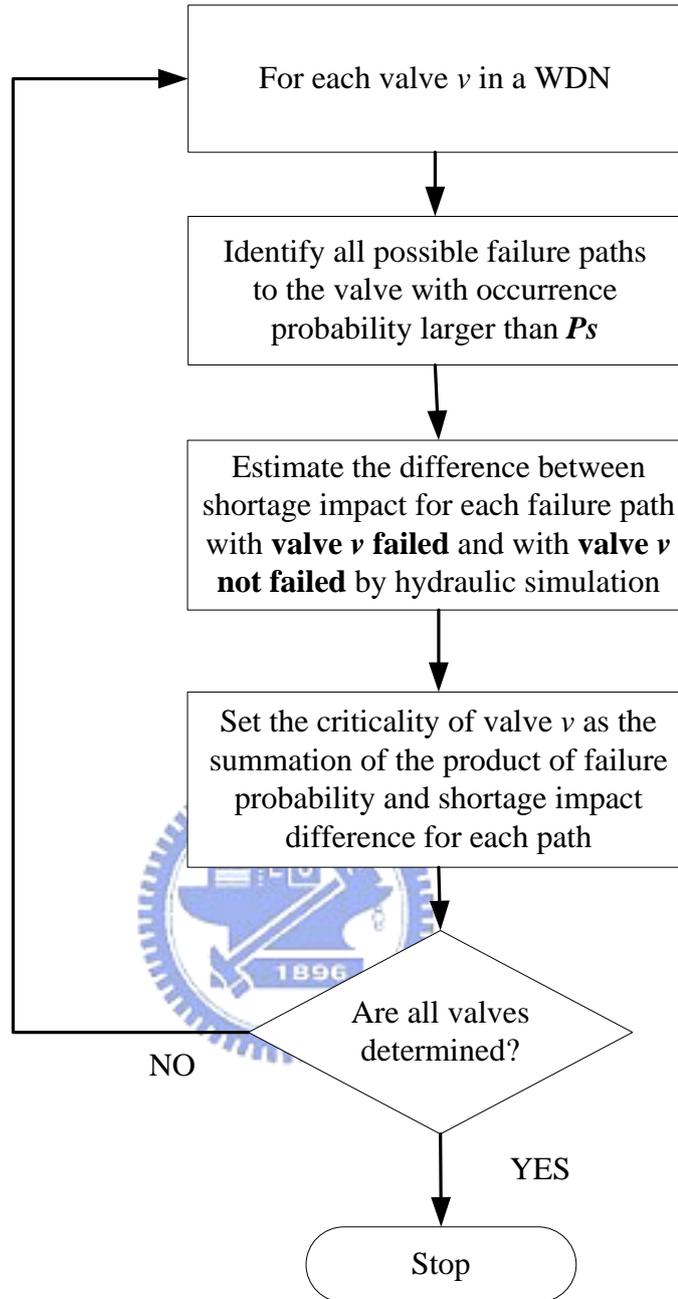


圖 3.8 制水閥關鍵性分析程序

3.6.2 制水閥使用機率

若在管網中某一制水閥操作的機率較高，則其損壞與否對於管網系統的損壞維修的影響衝擊將會較明顯，因此制水閥關鍵性分析應該考量制水閥本身被使用到的機率。

除了直接相鄰的兩個制水閥分區損壞時，會使用到欲分析的制水閥。當遠端的制水閥分區損壞，若與相鄰制水閥分區間的所有制水閥亦損壞，也會因損壞擴張到相鄰制水閥分區，而使用到該制水閥。因此，制水閥的使用機率除與相鄰兩制水閥分區的損壞機率相關外，亦與遠端制水閥分區與相鄰分區間的損壞擴張路徑之損壞機率相關。

為有效估算制水閥使用機率，本研究提出一可判識出所有可連通達欲分析制水閥連通路徑的演算程序，並提出損壞分區與連通制水閥損壞路徑的損壞機率之估算方法，接續說明如何根據這些可及連通損壞路徑與路徑上之管件損壞機率推估制水閥之使用機率。

A. 可及損壞路徑演算程序

對於可到達分析制水閥的損壞擴張路徑，當路徑中最遠端分區損壞，而其上的所有應關閉之制水閥連線亦損壞，即有機會操作到該制水閥。因此分析某制水閥的使用機率，首先需要找出所有可能因損壞而擴張到直接鄰接之制水閥分區之損壞路徑。若任一此種路徑發生損壞且路徑所包含的分區間制水閥連線皆無法正常運作，則會使用到分析制水閥，因此該類路徑的損壞機率即可反應出該特定制水閥的使用機率。

本研究以 depth-first search 為基礎，提出搜尋判識可及管網中特定制水閥所有損壞路徑之演算程序，如圖 3.9 所示。對於每一個在管網中的制水閥，從其直接鄰接的所有制水閥分區為起使搜尋分區節點執行 *SearchFailurePaths* 開始搜尋，將該分區與連通到該分區的制水閥連線儲

存在目前搜尋路徑 cp 中，並將目前在 cp 中記錄經過的分區與連線儲存為一辨識出的可能損壞路徑。若該路徑的損壞機率已經小於某個事先設定的發生機率值 Ps ，則表示該路徑因損壞到達該特定制水閥的機率已非常低，因損壞擴張而到達欲分析制水閥的機率已不太可能，則停止往下搜尋，以減少判斷出的損壞路徑避免後續分析上的負擔。若路徑之損壞機率仍高，則接著對於每一個連接該制水閥分區的所有連線往下搜尋，如果下一個分區節點並不在目前的損壞路徑中，且不為直接鄰接該分析制水閥之相接分區，則重複上述的程序遞迴呼叫(recursively) *SearchFailurePaths* 繼續往下搜尋其他路徑，直到所有管網中的分區節點皆被包含在搜尋路徑中，即回到遞迴搜尋上一層搜尋經過之分區節點的另一個連接下游分區往下搜尋，並重複上述步驟，直到所有經過的上層分區的所有直接下游分區皆被當作搜尋起點搜尋過為止。而紀錄在 *allpaths* 中的所有路徑即為可能損壞擴張到該制水閥的路徑。接著再針對管網中其他制水閥執行上述搜尋程序。

在演算程序的實作函式傳值必須以 **pass-by-value** 的機制進行，以記錄到達搜尋到的制水閥分區之前所經過的路徑，避免錯誤紀錄到達其他制水閥分區的搜尋路徑。

若以圖 3.10 的小型制水閥分區輔助網路為例，當欲分析所有到達 13 制水閥連線的所有可及路徑，從其直接鄰接分區 C 開始搜尋，接續往下經過 14 到達 B 分區，與經過 11 到達 A 分區，其間所經過的所有路徑皆為可能的損壞路徑，由於經過 12 將到達另外一個直接連接制水閥連線 13 的分區 D，因此停止搜尋。接著從 C 分區的另外一個鄰接分區 E 往下搜尋，以同樣的程序搜尋判斷其可及損壞路徑。接著從分區 D 以同樣程序執行路徑搜尋，最後辨識出的可及損壞路徑如圖 3.10 右邊所示。

Algorithm: Identification of all possible failure paths for each valve

Convert the original water distribution network into a segment-node auxiliary network

for each valve v in the WDN

 Create an empty stack $allpaths$ to store all possible failure paths to be identified.

for each segment s directly connected by v

 Create an empty stack cp to store current failure path

$SearchFailurePaths$ (segment s , link $null$, current path cp)

endfor

 All paths stored in the $allpaths$ are the all possible failure paths which might reach valve v for a series of malfunctions of valves in the paths

endfor

Function $SearchFailurePaths$ (segment s , link l , current path cp)

 Store l into cp

 Store s into cp

if the failure probability of cp is smaller than an **predefined minimum probability P_s**

Stop:

 Store current path cp into the stack $allpaths$ for all possible failure paths to be identified

for each link l connected to s

if the next segment ns through l is not in cp and

ns is not one of the segments directly connected to valve v

$SearchFailurePaths$ (ns , l , cp)

endfor

endFunction

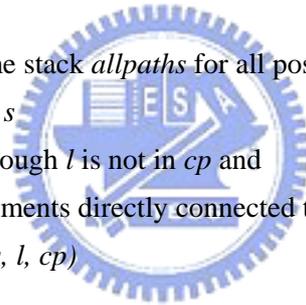
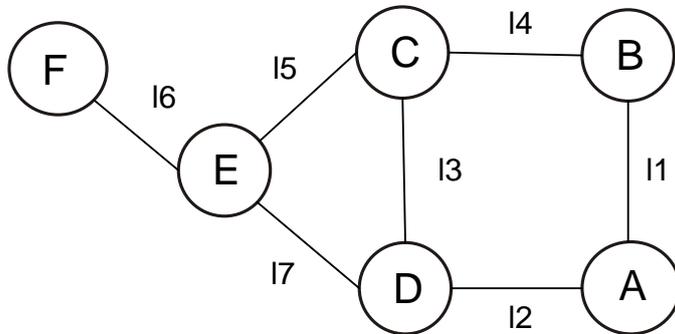


圖 3.9 可及損壞路徑判識演算程序

Ⓜ ID segment

— ID link between segments



All possible failure paths

C
C-I4-B
C-I4-B-I1-A
C-I5-E
C-I5-E-I6-F
D
D-I2-A
D-I2-A-I1-B
D-I7-E
D-I7-E-I6-F

圖 3.10 分析制水閥連線 I3 之所有可及損壞路徑判識範例



B. 制水閥分區損壞機率

本研究提出的演算程序，以制水閥分區為基本演算單位，而非以個別管線為單位，如此可有效簡化管網的分析複雜度。制水閥分區的損壞機率估算程序可如 3.4 節所示初步推估之，以利後續分析個別制水閥使用機率的推估使用。

C. 制水閥分區間連線損壞機率

經過制水閥分區辨識演算所產生以制水閥分區為節點的輔助網路，若是制水閥分區間有共同的連接制水閥，則以一條連接線表示分區間的連通關係，如圖 3.2 中右圖所示。由於相鄰制水閥分區間可能存在不止一個的制水閥，因此制水閥分區間連線的損壞機率，必需要考量多制水閥損壞機率的狀況，當個別制水閥損壞皆會使得該分區連線無法正常關閉，因此該連線損壞機率為個別組成制水閥之損壞機率的聯集，則損壞機率的估算方式如下所示(Ross, 2006)：

$$P(\bigcup_{i=1}^n VF_i) = \sum_i P(VF_i) - \sum_{i<j} P(VF_i \cap VF_j) + \sum_{i<j<k} P(VF_i \cap VF_j \cap VF_k) - \dots (3-8)$$

其中 VF_i 為制水閥 i 損壞事件， $P(VF_i)$ 為制水閥 i 損壞機率。若制水閥分區間連線由兩個制水閥組成，假設制水閥損壞為彼此獨立的事件，則該連線的損壞機率可以下式推求之：

$$\begin{aligned} P(VF_1 \cup VF_2) &= P(VF_1) + P(VF_2) - P(VF_1 \cap VF_2) \\ &= P(VF_1) + P(VF_2) - P(VF_1)P(VF_2) \end{aligned} (3-9)$$

其中 VF_1 與 VF_2 為制水閥 1 與 2 之損壞事件。

由於尚未取得國內一般制水閥完整的損壞紀錄。故本研究採用國外相關文獻所提出的損壞機率值。表 3.1 為整理國外相關文獻提及之制水閥損壞機率經驗或建議機率值。

表 3.1 制水閥損壞機率經驗值

文獻	制水閥損壞經驗或建議值
Shea (1991)	4.3%
Rosenthal and de Koning (2001)	0.09 failures/km/year
Trietsch and Mesman (2006)	$\leq 15\%$



D. 可及損壞路徑之損壞機率

由於各損壞擴張到分析制水閥的可及損壞路徑，為由最遠端的制水閥分區發生損壞事件開始，且路徑上的制水閥連線皆須損壞才會到達分析制水閥。因此該可及損壞路徑擴張到分析制水閥的損壞可及機率，由最遠端制水閥分區損壞機率以及路徑上經過的制水閥連線的損壞機率決定。假設各制水閥分區與制水閥連線的損壞事件各自獨立，則該損壞路徑可及該制水閥的機率可由下式決定之：

$$\begin{aligned} P(FP_i) &= P(FS_i \cap VL_{i1} \cap \dots \cap VL_{iM}) \\ &= P(FS_i)P(VL_{i1})\dots P(VL_{iM}) \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中 FP_i 為損壞路徑 i 的損壞事件， $P(FP_i)$ 為該路徑之損壞機率； FS_i 為損壞路徑 i 最遠端的制水閥分區損壞事件， $P(FS_i)$ 為該分區之損壞機率； VL_{ij} 為損壞路徑 i 所經過的第 j 個制水閥連線， $P(VL_{ij})$ 為該制水閥連線之損壞機率； M 為該路徑所經過制水閥連線的總數。如以圖 3.10 的制水閥分區網路為例，若其中的損壞路徑 C-14-B 要擴張到 C，必需考量 B 分區的損壞機率，以及 14 的損壞機率，因此該可及損壞路徑的可及機率為：

$$\begin{aligned} P(FP_1) &= P(FS_B \cap VL_{1\ 14}) \\ &= P(FS_B)P(VL_{1\ 14}) \end{aligned} \quad (3-11)$$

因此欲分析制水閥的使用機率，需考量可及路徑損壞機率的機率連集，可由下式估算之：

$$P(\cup_{i=1}^n FP_i) = \sum_i P(FP_i) - \sum_{i < j} P(FP_i \cap FP_j) + \sum_{i < j < k} P(FP_i \cap FP_j \cap FP_k) - \dots \quad (3-12)$$

其中 n 為可及損壞路徑的總數。由於損壞路徑的擴張需所經過的分區間連線皆損壞的情況下，才可能到達，因此其損壞機率將隨著經過的連線數增加而可及制水閥之機率明顯將相當的小，因此(3-12)式的第二項之後可忽略之以簡化分析程序。

3.6.3 損壞可及路徑影響衝擊

當可及損壞路徑因其上的所有制水閥連線皆損壞，而關閉路徑經過的所有分區時，除將關閉影響在路徑上的所有制水閥分區外，亦可能截斷下游區域供水，而擴張損壞影響區域。為合理分析此類影響，需要有一有效的分析程序，判斷制水閥損壞擴張關閉區域造成的非預期關閉影響區域。

A. 非預期關閉影響區域

經過制水閥分區判識演算所判識轉換出來的輔助網路，制水閥分區間的連線表示分區間是否有共同的邊界制水閥，因此制水閥分區的連通關係，仍然與原始管網以節點為基本單位的管網系統相同，若制水閥分區間存在連通路徑，則其內所包含的管線或者節點亦存在連通路徑。因此，非預期關閉損壞影響區域的判識，可直接以制水閥分區為分析單位。根據此概念，提出損壞擴張區域的非預期關閉區域判識演算程序如圖 3.11 所示。該演算程序將所有損壞路徑所包含的分區皆標示為”CLOSED”，接著呼叫 *TraverseConnectedSegments* 從包含管網供水節點的個別起使分區開始搜尋，並標示該分區為已經過，對每一個鄰接分區，若下一個分區非關閉且並未訪問過，則當作新的搜尋起點遞迴呼叫 *TraverseConnectedSegments* 直到所有的分區節點皆被訪問過為止。

B. 損壞缺水水力模擬

制水閥損壞擴張關閉除了影響管網的連通特性外，亦影響到管網水力狀況，進而影響供水能力。因此，為更合理的評估損壞路徑關閉所造成的影響衝擊，採用 3.3 節所發展的缺水損壞模擬程序，分析因制水閥擴張關閉的所有制水閥分區造成的影響缺水衝擊。對於直接關閉與下游關閉非預期供水區域內的用戶，將會完全缺水，此部分的影響缺水量為供水關閉區域內的總用戶需水量。而管網其他區域的缺水量則藉由設定直接關閉區域

Algorithm: Identification of unintended isolation for shut-off failed segments

Convert the original water distribution network into a segment-node auxiliary network

Mark the status of all shut-off segments as “**CLOSED**”

for each source segment, *ss*, which contains supply node

TraverseConnectedSegments(segment *ss*, null)

endfor

All unvisited segments in the segment-node auxiliary network are unintended isolation caused by shutting off failed segments

Function *TraverseConnectedSegments* (current segment *us*, parent segment *vs*)

 Mark segment *us* being visited;

for each segment *ws* connected to segment *us*

if the status of segment *ws* is not “**CLOSED**”

if segment *ws* is unvisited and is not *vs*

 Call *TraverseConnectedSegments*(segment *ws*, segment *us*) recursively.

endfor

endFunction

圖 3.11 非預期關閉損壞區域辨識演算程序



內包含的所有管線狀態為”CLOSE”，執行損壞缺水模擬程序以估算之。加總上述兩部分之總水量，即為制水閥損壞擴張的總影響缺水衝擊量。

3.6.4 制水閥關鍵性

為評估管網中個別制水閥的損壞影響程度，分別假設當該制水閥損壞無法關閉以及制水閥正常的情況，執行個別可及損壞路徑損壞關閉所造成的用戶總缺水衝擊量，如下式所示：

$$\Delta SI_{FP_i} = SI_{FP_i} - SIN_{FP_i} \quad (3-13)$$

其中 SI_{FP_i} 為該制水閥損壞時，可及損壞路徑 i 關閉所造成的影響缺水衝擊量， SIN_{FP_i} 為該制水閥正常運作時，可及損壞路徑 i 關閉所造成的影響缺水衝擊量， ΔSI_{FP_i} 為上述兩衝擊量的差異量，表示該制水閥在損壞路徑 i 上因其損壞所增加的影響衝擊量。當該欲分析的制水閥損壞的時候，個別可及損壞路徑達到該制水閥時，因無法正常關閉將會擴張到所有其他該制水閥所直接鄰接的制水閥分區而增加影響衝擊量。

個別制水閥關鍵性指標值的定義則可定義如下：

$$VC_k = \sum_i \Delta SI_{FP_i} \times P(FP_i) \quad (3-14)$$

其中 VC_k 為制水閥 k 的關鍵性指標值，而 ΔSI_{FP_i} 、 $P(FP_i)$ 則同上述各節所述。其關鍵性為所有損壞路徑的損壞衝擊差異量，乘上該路徑損壞到達該制水閥機率的累加值，表示該制水閥損壞所可能造成的預期增加缺水影響衝擊量，因此可用以代表個別制水閥的關鍵性。

3.6.5 案例研討

用於測試制水閥關鍵性分析程序的案例管網如圖 3.12 所示。該管網為參考實際系統而建，總管長為 307,344 m，總供水量為 36,558 CMD，總管

線數量為 19,283 條，制水閥總數為 7,974 個，其他種類的節點為 10,306 個。

首先執行制水閥分區辨識演算，將原始的管網系統轉換為制水閥分區網路。接續則依據上述各節所述之程序逐一針對 7,974 個制水閥執行關鍵性分析，而損壞可及路徑之可接受最小損壞機率為 0.0001。制水閥關鍵性分析執行結果之關鍵性分佈如表 3.2 所示。而前 20 個較關鍵之制水閥則如表 3.3 所示，其位置則標示如圖 3.12 中的黑色圓形。

由表 3.2 可以發現，部分制水閥的關鍵性明顯大於其他制水閥。大部分制水閥關鍵性指標值在 0.0~0.2 之間。其中較為關鍵的制水閥 v14787 附近管網系統如圖 3.13 所示。由圖中可以發現，雖然 v14787 所直接相鄰的制水閥分區 S28 與 S33 皆不為關鍵性制水閥分區，也就是個別關閉的情況之下，並不會截斷下游制水閥分區的供水，不過當制水閥分區 S28 損壞，而制水閥 v14787 也無法正常運作時，則需一併關閉制水閥分區 S33，而 S33 為整個管網系統兩條輸送水源往外的主要供水管線通道之一，如圖中以虛線箭頭所示的路徑。因此，當制水閥 v14787 損壞而擴張影響，將使得管網系統的整體供水能力大為降低，而影響到整個系統的水力特性，因此造成制水閥 v14787 具有較大的關鍵性。

另一較關鍵之制水閥 v11781 的附近管網系統如圖 3.14 所示。制水閥 v11781 所直接相鄰的制水閥分區為 S38 及 S46，其中雖然 S46 為關鍵制水閥分區，然其損壞時僅多關閉一個下游的制水閥分區，因此制水閥 v11781 具有較高的關鍵性並不是因為直接截斷所造成。制水閥分區 S46 所包含的管線如圖 3.14 左下角較粗的線條所示，由圖中可以發現，其所包含的管線為案例管網中主要的南北向供水幹管，當損壞擴張到該制水閥分區的時候，將截斷管網中一條重要的供水通道，將影響管網整體性的供水，因而具有較大損壞缺水影響量。另一方面，雖然制水閥分區 S38 也不是關鍵制水閥分區，且該制水閥分區所包含管線亦較短少，然而管網系統的供水

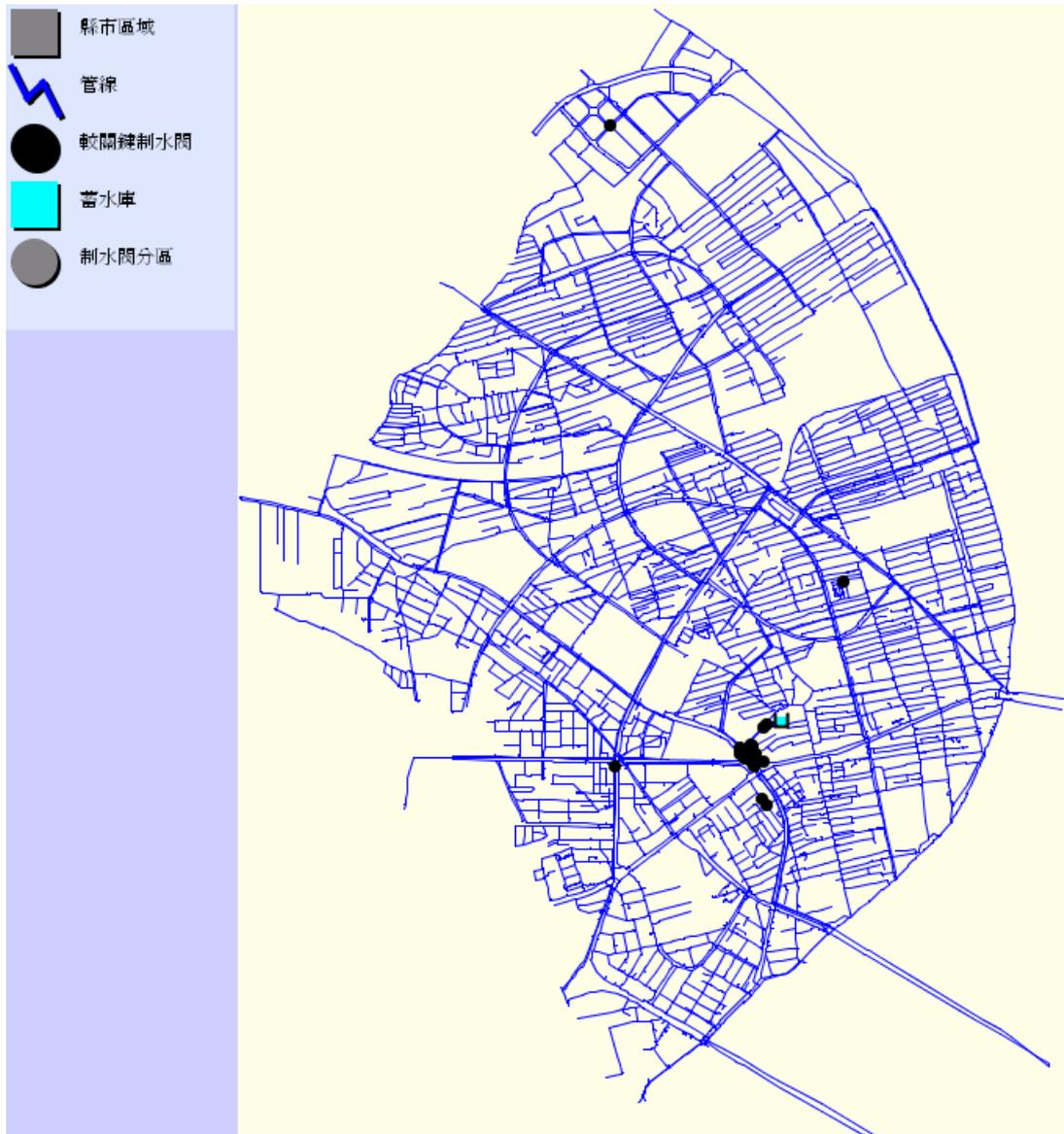


圖 3.12 案例管網

表 3.2 案例管網之制水閥關鍵性分析結果

制水閥關鍵性指標值範圍	制水閥數
0.0~0.2	7962
0.2~0.4	3
0.4~0.6	3
0.6~0.8	1
0.8~1.0	0
1.0~1.2	3
1.2~1.4	0
1.4~1.6	0
1.6~1.8	0
1.8~2.0	0
2.0~2.2	0
2.2~2.4	0
2.4~2.6	0
2.6~2.8	0
2.8~3.0	0
3.0~3.2	0
3.2~3.4	1
3.4~3.6	1

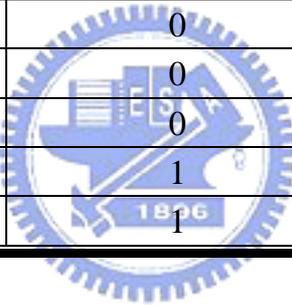


表 3.3 案例管網中較關鍵之部分制水閥列表

關鍵性排序	制水閥關鍵性指標值	制水閥 ID
1	3.507298	v14787
2	3.293601	v15128
3	1.132361	v13922
4	1.120376	v13755
5	1.089105	v14786
6	0.645653	v13754
7	0.574182	v11781
8	0.452713	v14782
9	0.424607	v14781
10	0.306817	v15016
11	0.247428	v14780
12	0.214417	v13936
13	0.184192	v13890
14	0.176398	v15127
15	0.138159	v13893
16	0.114646	v14033
17	0.083231	v13878
18	0.022886	v17883
19	0.022774	v13766
20	0.022538	v10967

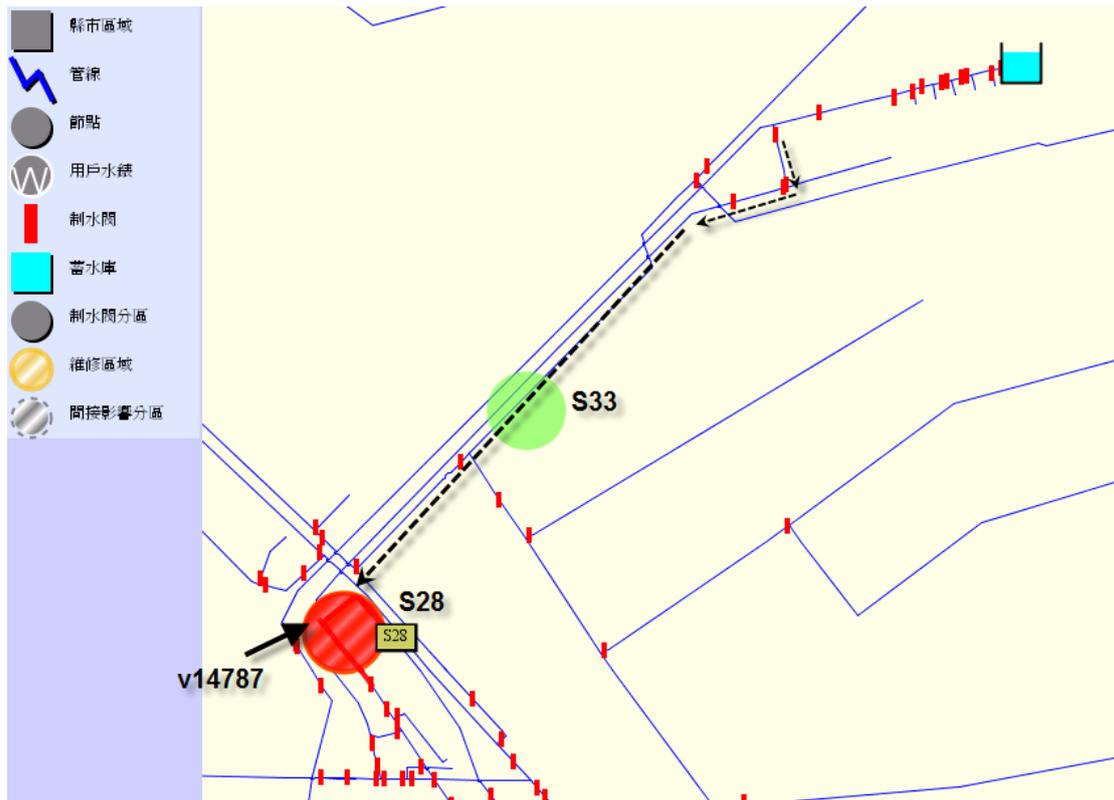


圖 3.13 制水閥 v14787 關鍵性分析



圖 3.14 制水閥 v11781 關鍵性分析

流向為從圖 3.14 的右上角蓄水庫，沿著圖中的虛線箭頭方向傳遞，經過制水閥分區 S26 與 S32 到達該制水閥分區 S38，之後再經由南北向的主要幹管輸送至管網其他區域，因此當制水閥分區 S46 損壞，而制水閥 v11781 不能正常運作的情況下，將截斷管網中重要的輸水通道，造成較大的缺水影響量。因此，制水閥 v11781 亦具有較高的關鍵性。

同樣的，如圖 3.15 所示，雖然制水閥 v14780 所直接相接的制水閥分區 S126 與 S157，當損壞關閉皆未有明顯大量的直接截斷下游制水閥分區。且雖然其所在的位置靠近供水的蓄水庫，但並未直接與蓄水庫連接，其供水的流向由左下角的虛線箭頭處進入，需通過制水閥分區 S126 之後，才經由制水閥分區 S156 所在的管線，沿著虛線箭頭的方向，分別供應管網右上以及左下的區域。由於制水閥分區 S156 位在相當靠近供水來源的主要通道上，且直接控制往管網上方供水的重要供水路徑，因此雖然擴張損壞關閉時並未直接關閉下游供水制水閥分區，但仍將影響管網整體的供水能力，造成較大的損壞缺水影響。該制水閥亦因而有較高的關鍵性。

制水閥 v17883 的附近部分管網系統則如圖 3.16 所示，該制水閥所直接相接的制水閥分區為 S6828 與 S6822，這兩個制水閥分區皆位在遠離供水節點的管網末端區域，且亦不為關鍵制水閥分區。然而，當制水閥 v17883 不能正常運作時，則個別制水閥分區損壞事件發生時，將必須同時關閉制水閥分區 S6828 與 S6822，則將使得該地區兩個供水的通道皆被截斷，因此增加許多被截斷的制水閥分區，如圖中左下角的數個制水閥分區亦因而比其他制水閥的有較高關鍵性。

依上述討論可以發現明顯較高關鍵性的制水閥通常所鄰接的制水閥分區皆位在較重要的管網供水通道上，雖然本身可能不是關鍵制水閥分區，不過當制水閥無法正常運作而擴張影響範圍時，將造成較大的缺水影響量。而關鍵程度較低的制水閥，則通常僅造成附近供水區域的擴充損壞

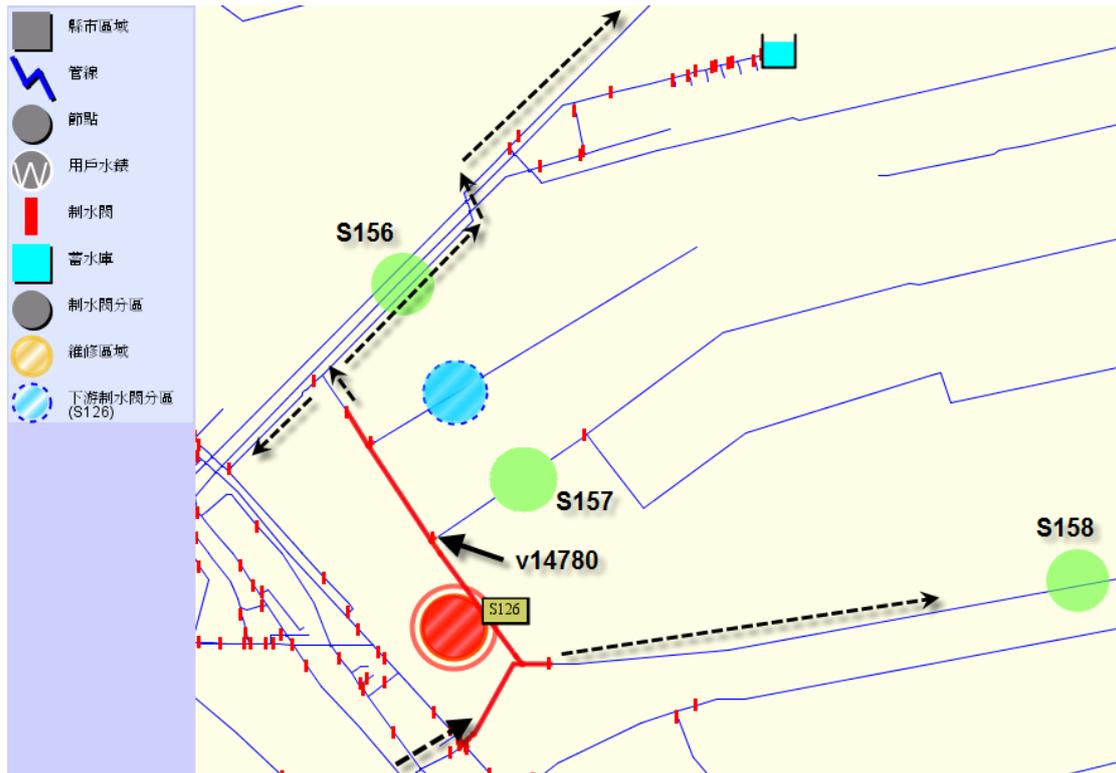


圖 3.15 制水閥 v14780 關鍵性分析

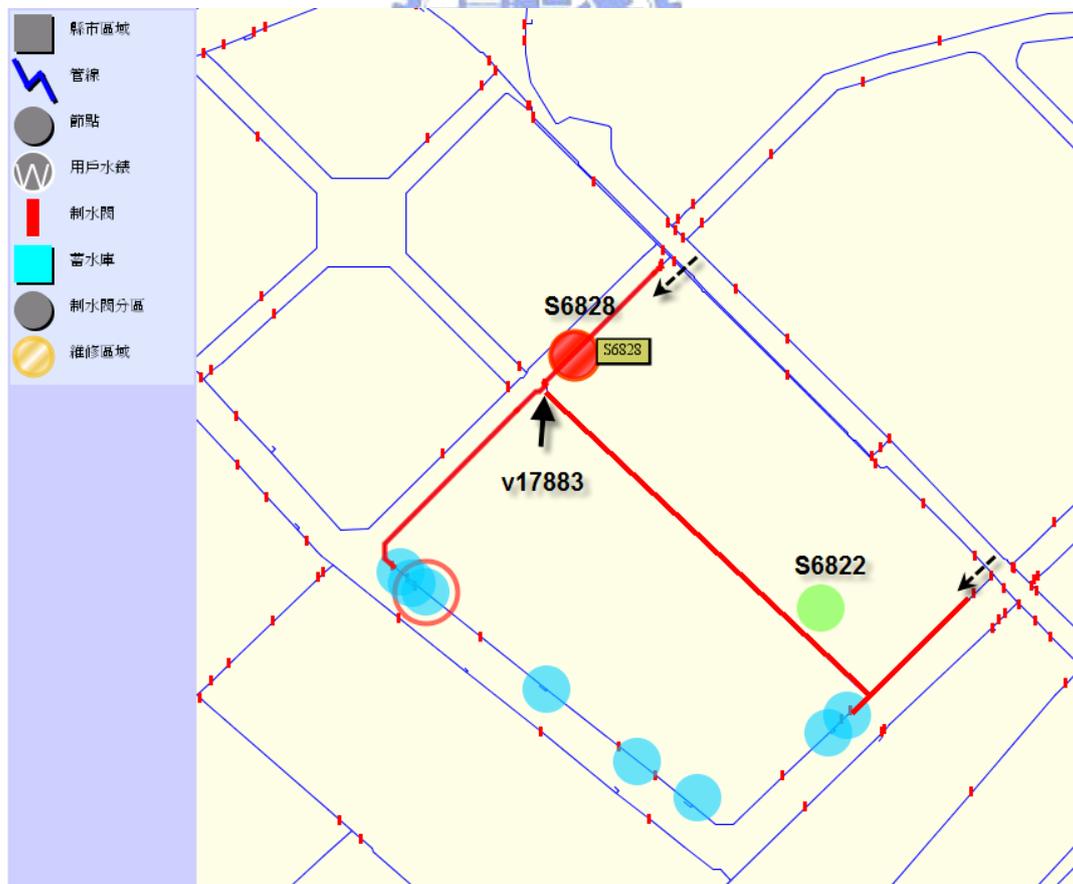


圖 3.16 制水閥 v17883 關鍵性分析

影響，而非系統性的影響。而不論對於具有何種關鍵性的制水閥而言，在人工執行制水閥關鍵性分析時，若缺乏制水閥分區輔助網路的協助分析，單以管線連通關係來判別將相當的困難而容易出錯，且不易判別出具有較大擴增水力影響的制水閥，本研究所發展的制水閥關鍵性分析程序則可有效決定制水閥的關鍵性。

對於會造成系統性影響的制水閥由於損壞擴增的影響缺水量較大，或者該制水閥具有較高的使用機率，因而具有較高的關鍵性指標值。所分析出之制水閥關鍵性指標值可有效判識出對於系統整體供水水力影響較大的關鍵制水閥，除了反應出其對系統影響的程度，亦可作為規劃制水閥維護優先順序的依據。

3.7 小結

本研究提出修正改良的制水閥分區與關鍵制水閥分區判識演算程序，可改善過往相關研究所提出的制水閥分區判識演算程序，且不必執行大量的水力模擬演算程序即可判識，有效提升將原始管網系統轉換為制水閥分區輔助網路的轉換效率，便於進行後續各項管網損壞分析。而以制水閥分區為單位的停水區域判識演算程序，則因所判識出來的制水閥分區輔助網路可有效簡化原始複雜連通的管網系統，將原始管網系統的連通關係以制水閥分區間的連通關係來表示，因而簡化管網損壞停水維修在判識損壞停水影響衝擊的複雜度。應用 EPANET2 TOOLKIT 的水力模擬程序所發展的損壞影響缺水模擬，則可更合理的分析管網的損壞影響衝擊，結合制水閥分區損壞機率所建構的缺水量潛勢，因而可合理分析管網各部位的可靠度，以利於分析損壞影響的相關決策。

所發展的制水閥關鍵性分析程序，結合管網損壞機率分析與管網損壞影響分析，可有效判識個別制水閥的關鍵性。並根據系統損壞發生機率，反應制水閥對系統影響的可能優先順序，有利於應用在管網水力與結構設

計上的檢查與改善規劃，並可據以規劃合理的制水閥維護策略，以降低制水閥的損壞衝擊。



第四章 管網維護管理模式

為有效降低管網損壞事件發生機率，提升自來水管網供水品質，降低管網因管線損壞或者損壞污染事件造成用戶的影響，本研究將所發展的損壞停水影響分析工具應用到過往所發展的基於制水閘分區之換管規劃模式，以提升自來水管網換管規劃的合理性。並發展一損壞污染監測站址優選模式，輔助建立有效的水質污染監測站網，快速偵測管網損壞污染，以確保管網供水水質。以下一一說明本研究所發展的各項管網維護管理模式。

4.1 管網損壞缺水模擬於換管之應用

為確認本研究所發展改善之各項管網損壞分析程序與方法的適用性與可行性，首先以一接近實際管網的假想案例執行各項管網損壞分析，並應用過往所提出換管規劃模式中，以改善管網換管決策的合理性。

4.1.1 換管規劃模式

本研究所採用的換管優選模式(Kao and Li, 2007; 李, 2002)主要分為二個，第一個是以制水閘分區為單位，第二個是以管線為單位，以下一一說明之。

模式一：基於制水閘分區

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^{NS} (F_i^{old} - f_i^{new}) SS_i \quad (4-1a)$$

S.T.

$$p_j = P_j^{new} z_j + P_j^{old} (1 - z_j) \quad \forall j \quad (4-1b)$$

$$f_i^{new} = \sum_{j \in U_i} p_j \quad \forall i, \forall j \quad (4-1c)$$

$$\sum_{j=1}^{MP} C_j z_j \leq TC \quad (4-1d)$$

$$z_j \in [0,1] \quad \text{integer variables} \quad (4-1e)$$

其中 F_i^{old} 為換管前制水閥分區 i 的損壞機率; f_i^{new} 為經過換管後制水閥分區 i 的損壞機率; SS_i 為制水閥分區 i 損壞所可能造成的缺水量; NS 為制水閥分區的總數; p_j 為管線 j 的壞管機率; P_j^{old} 為管線 j 未換管前的壞管機率; P_j^{new} 為管線 j 經換管後的壞管機率; MP 為管線總數; z_j 為 $[0,1]$ 整數變數, 如果其值為 1 表示管線 j 需替換, 若為 0 則表示未被選為需換掉的管線; U_i 為制水閥分區 i 所包含管線的集合。 C_j 為更換管線 j 的成本, 而 TC 為換管總經費的上限值。

目標式 (4-1a) 期使所決策換管規劃可以改善最多的缺水量潛勢, 其中缺水量潛勢改善量為所有制水閥分區缺水衝擊量乘以失敗率改善值之總合; 限制式 (4-1b) 決定個別管線的損壞機率, 若換掉, 則設為全新管線的損壞機率, 否則維持舊管的失敗機率; 限制式 (4-1c) 決定個別制水閥分區 i 的損壞機率, 為其所包含所有管線損壞機率總和; 限制式 (4-1d) 限制決策換管總成本小於預算金額。

模式二：基於個別管線

為瞭解基於制水閥分區為基本損壞分析單位與可較過往傳統以管線為分析單位的換管規劃的改善程度, 亦同樣採用基於個別管線之換管規劃模式, 以比較“基於制水閥分區”與“基於個別管線影響”優選模式的差異。基於個別管線之優選模式如下所示：

$$\text{Max } \sum_{j=1}^{MP} (P_j^{old} - p_j) SP_j \quad (4-2a)$$

S.T.

$$p_j = P_j^{new} z_j + P_j^{old} (1 - z_j) \quad \forall j \quad (4-2b)$$

$$\sum_{j=1}^{MP} C_j z_j \leq TC \quad (4-2c)$$

$$z_j \in [0,1] \quad \text{integer variable} \quad (4-2d)$$

其中 SP_j 為管線 j 損壞所可能造成的缺水量，其損壞缺水量為以損壞缺水模擬模組所估算； P_j^{old} 為管線 j 未換管前的壞管機率； P_j^{new} 為管線 j 經換管後的壞管機率；其餘變數與模式一相同。

目標式 (4-2a) 期使換管可以改善最多的缺水量潛勢；限制式 (4-2b) 決定個別管線 j 之損壞機率；限制式 (4-2c) 限制更換管線的最大總成本需小於預算金額。最後並將此模式結果，換算成實際執行停水維護關閉制水閘分區的損壞衝擊，以在相同的基礎下，比較兩模式之差異。

4.1.2 案例研討

管網案例為台北自來水管網的一部分，如圖 4.1 所示，管網總長 5834,572 公尺，供給 384,618 人計 124,712 戶的用水，日平均用水量為 128,850 CMD，包含 6,040 條管線以及 8,550 個節點，其中閘類節點計有 2,766 個。

由於實際管網系統所包含的管件過於龐雜且連通關係複雜，以前一章所說明的演算程序有效判制水閘分區與關鍵制水閘分區，直接將原始管網系統轉換成以制水閘分區為單位的輔助網路系統，且其中較重要的關鍵分區亦直接判識出，其判識結果如圖 4.2 所示。

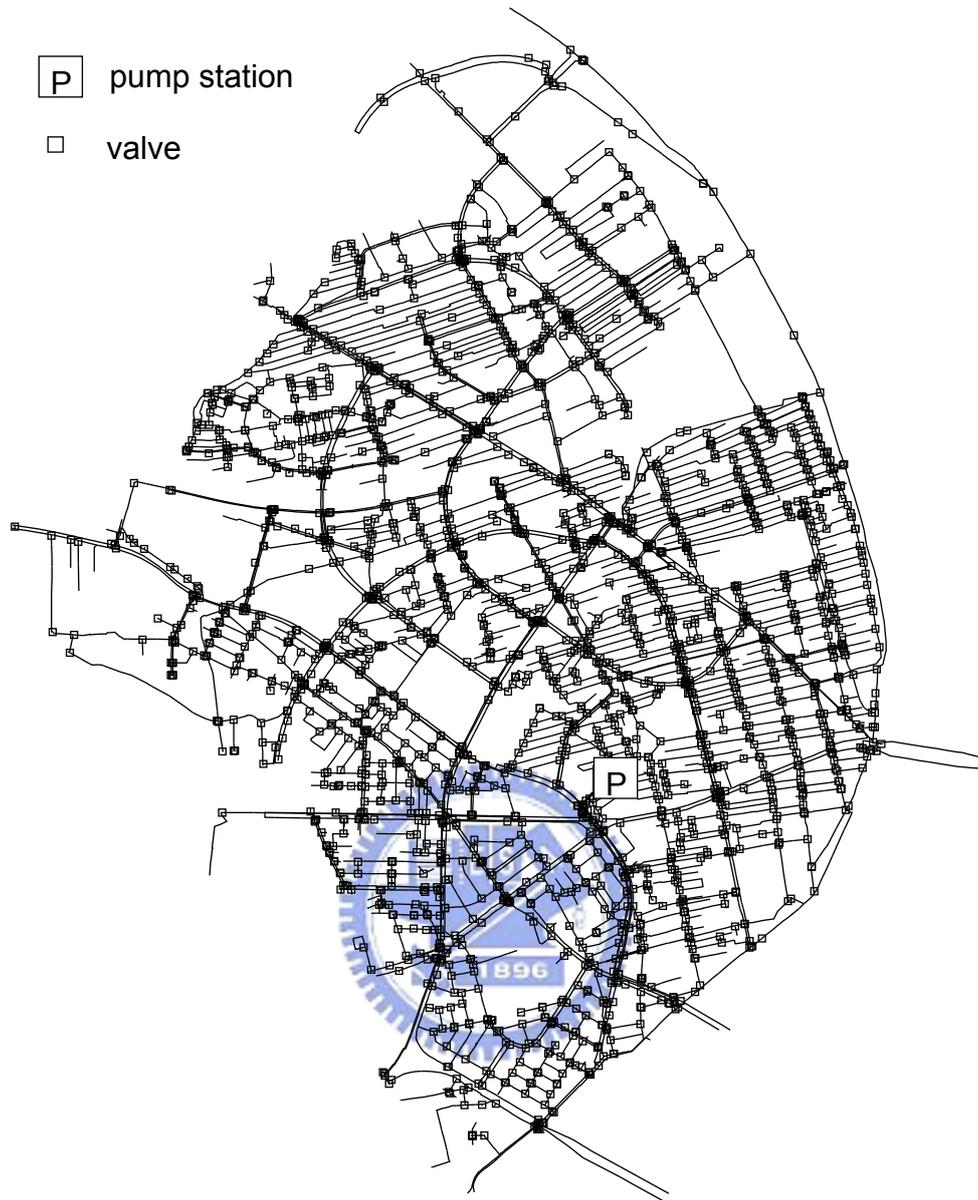


圖 4.1 案例管網

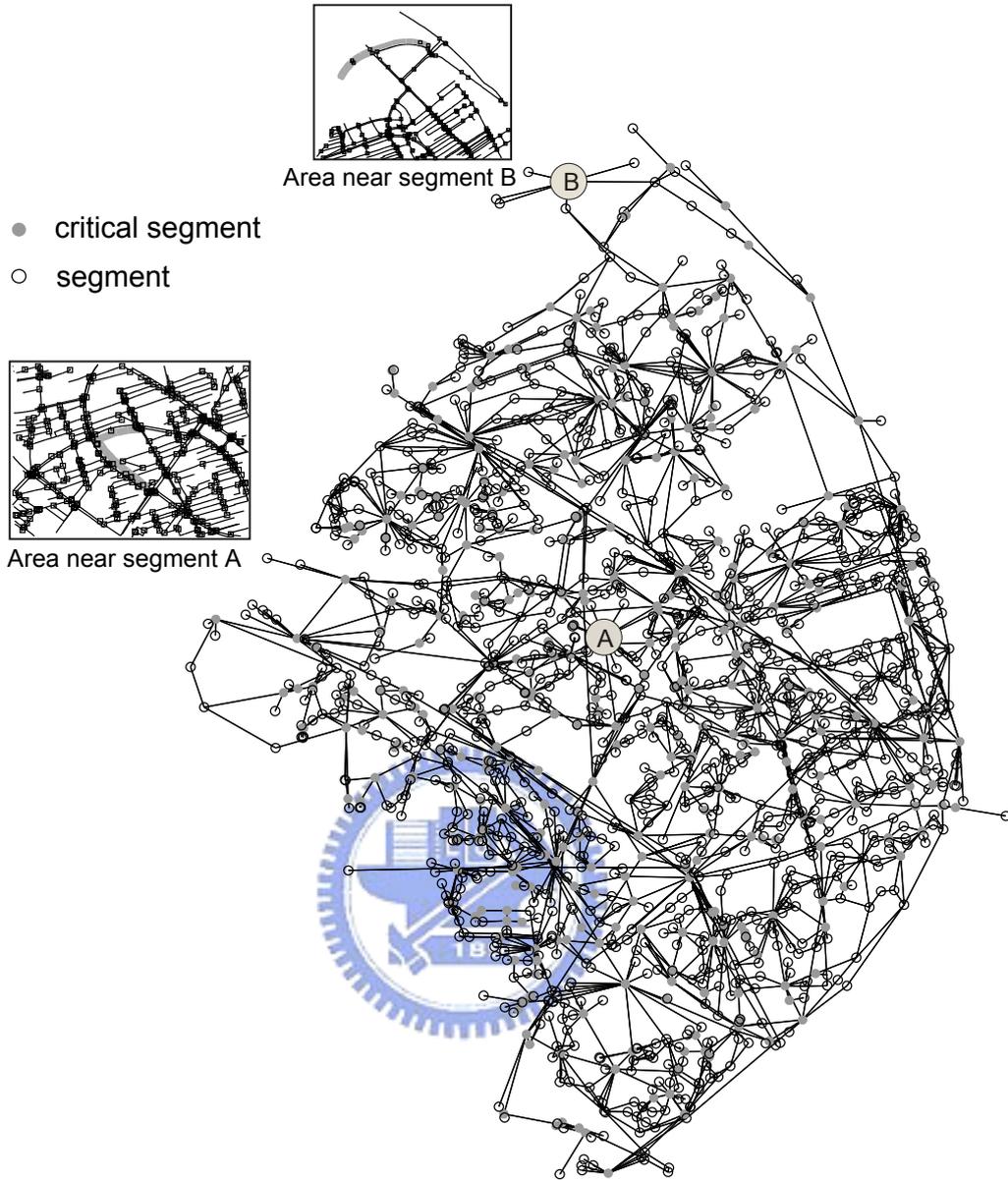


圖 4.2 案例管網之制水閥分區輔助網路

其中各制水閥分區以中空圓形表示制水閥分區並以灰色圓形表示關鍵分區，總計有 1,598 個制水閥分區及 348 個關鍵分區，而制水閥分區間若存在共同的邊界制水閥，則以一條線段連接兩分區節點以表示其間的連接關係。制水閥分區為由周圍制水閥關閉所構成的區域，通常由多條管線組成，由制水閥分區所構建的網路稱之為輔助網路，如圖 4.2 所示，可以發現輔助網路可有效簡化原始管網系統。且管網系統中各區域的連通關係亦較易從制水閥分區輔助網路判識。而根據圖 4.2 所判別出的關鍵分區主要可分為二類。其中第一類為在管網中間，一般難以直接人工判別出，比如圖 4.2 中的分區 A 即是。此類分區與管網其他部分的連接狀態複雜，故不易以人工判識。另一種分區則是位在管網的末端，如圖 4.2 中的分區 B，此類分區僅以少數的管線或甚至於一個管線與其他部分連結，雖較易判識，但以人工方式仍頗沒有效率。

各制水閥分區的停水損壞維修影響，以所發展之管網損壞模擬模組分析，總計共執行 1,598 次的損壞模擬，隨著制水閥分區所在位置以及其本身的取水狀態不同，其損壞影響缺水量值在 9,243~125,900 CMD 之間，大部分在 9,400 CMD 左右，其中最大缺水量值為因關閉包含出水廠站節點的制水閥分區造成全管網系統無法供水的總系統需水量。如圖 4.3 所示，有三個分區的損壞缺水量在 100,000CMD 以上(以三角形代表)。此三個制水閥分區為包含或是鄰近供水節點的區域，因此這些分區的損壞，將造成整個管網供水嚴重影響。在分區損壞影響中，亦有 19 個分區的損壞缺水量在 10,000CMD 以上(以鑽石形表示)。除了分區 C 之外都是管網中的關鍵分區。此類分區的損壞，不只影響到本身供水區域的供水，並將影響到周圍或是下游端的供水能力。雖然在原始的管網中，很難直接由水公司人員根據經驗法則直接判斷出各區域損壞所造成的影響程度，但是藉由制水閥分區管網與分區損壞模擬模組的輔助，可分析出不同分區因損壞所造成的缺水量。

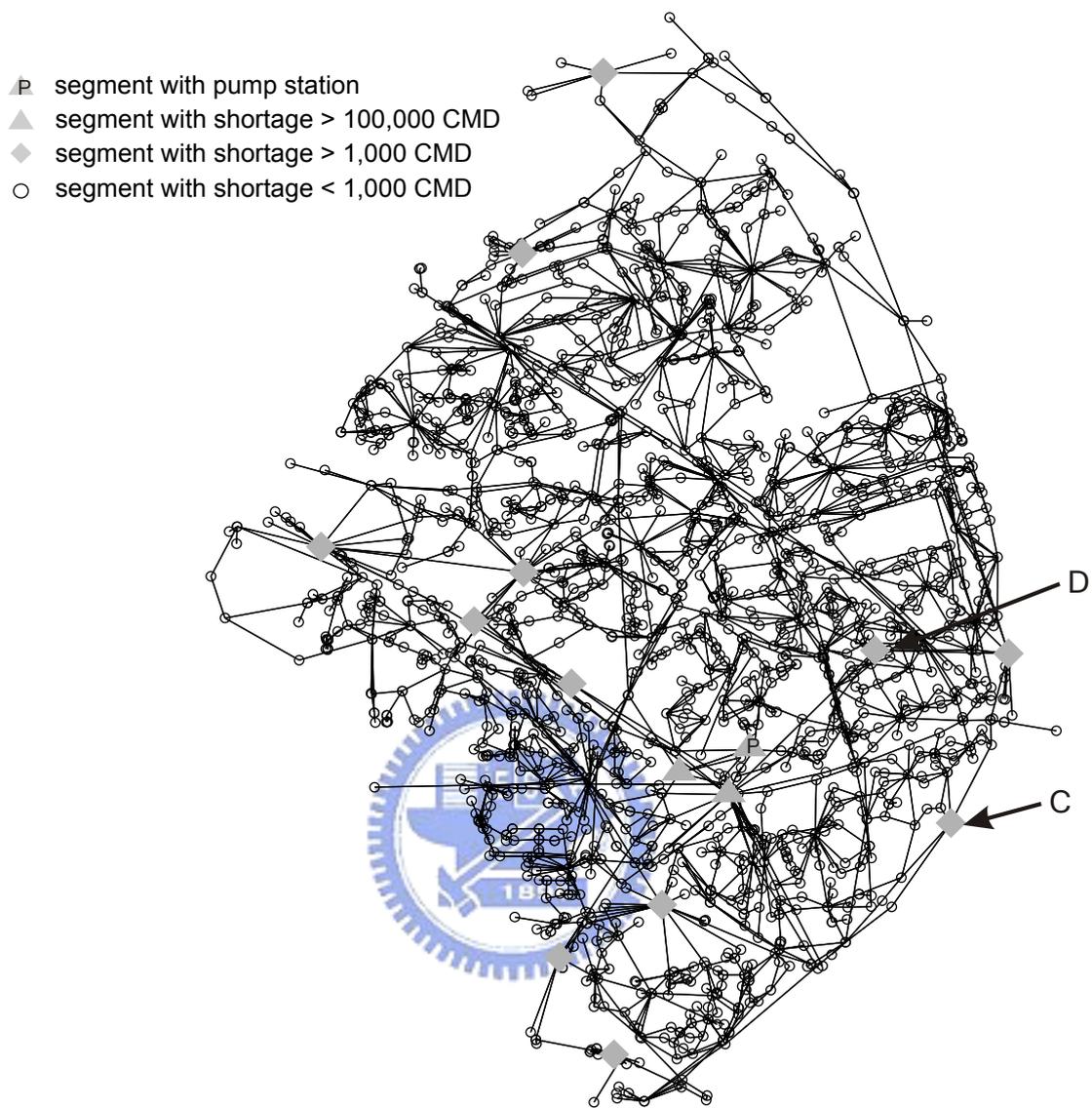


圖 4.3 案例管網之各分區損壞缺水模擬結果

各管線及個別制水閥分區之損壞機率以(3-2)~(3-4)式計算而得，配合前述個別制水閥分區與關鍵分區因損壞所造成缺水量，分別代入基於制水閥分區與基於管線分區的兩個換管模式中，並以 CPLEX8.1 求解換管優選模式在不同的預算成本限制下進行各 51 次模擬分析，這兩個模式所求得之換管改善缺水量結果如圖 4.4 所示，由圖中可以發現基於制水閥分區模式的方案所改善缺水量潛勢明顯隨著更新成本增加而穩定增加，其改善缺水量潛勢在 606-637 CMD-% 之間，CMD-% 為根據 3-5 節定義而來。而基於管線模式其缺水改善量則在 488-524 CMD-% 之間，且由於其主要考量單一管線的損壞影響，因此所得方案之替換管線主要集中在單一較長較大的幹管，而忽略制水閥分區關閉維修所造成較大影響的管線，其換管達成的總計改善維修影響量有些反而有隨著成本增加而下降的情形。基於制水閥分區模式在此案例中可較基於管線模式明顯改善多達 24% 的缺水量潛勢，此乃因基於制水閥分區的換管規劃較能掌握實際操作時的影響，可有效選擇換管效益較高的管線，而不是只集中在較大幹管，故改善的缺水量潛勢較高。

4.1.3 小結

經制水閥分區辨識演算程序轉換後之制水閥分區輔助網路，明顯較原始管網簡略，且管網中各區域的連接關係經制水閥分區節點間的連線表示後，使得管網中的連通關係更清楚，可有效輔助判斷那些制水閥分區為影響較大的關鍵分區，而應用本研究所發展的損壞缺水模擬模組推估的個別制水閥分區關閉影響缺水量，則較過往單以 EPANET2 模式執行結果更為合理，且更易協助水公司判定在水力上影響較大的制水閥分區。

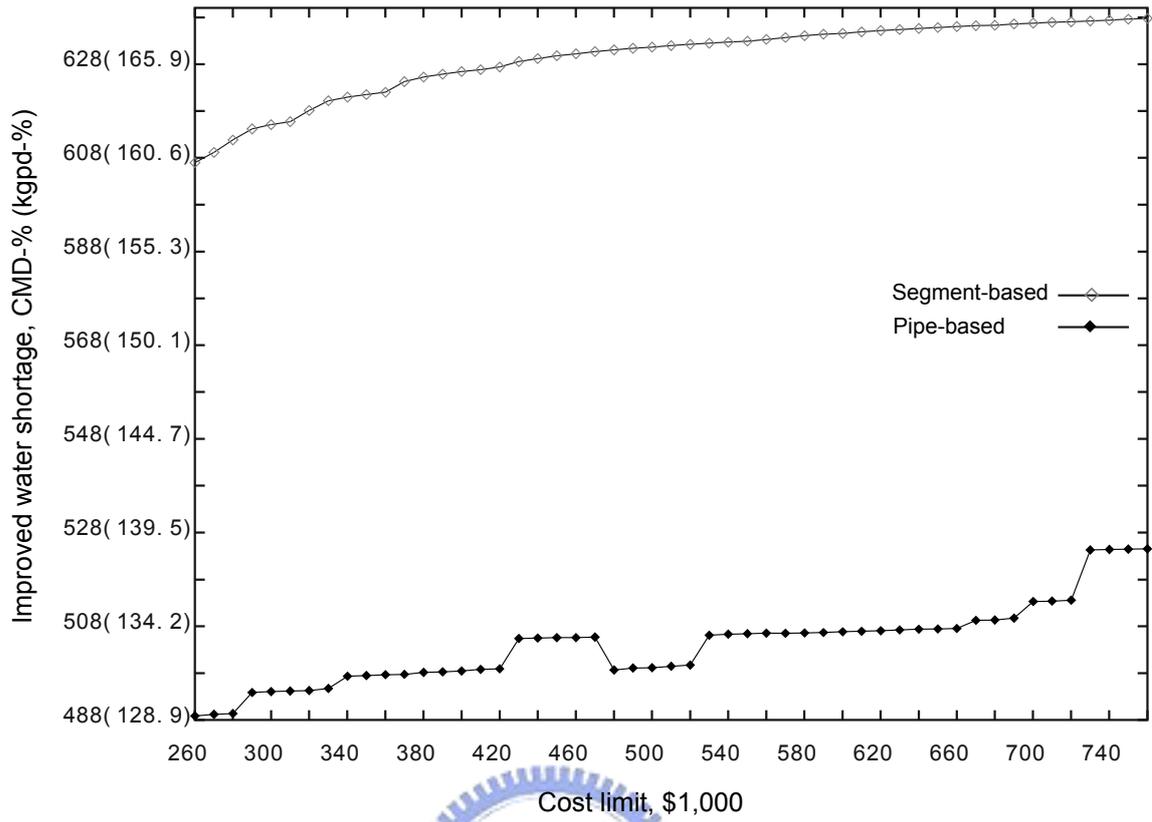


圖 4.4 基於管線與基於制水閥分區模式之決策隨總換管成本變化之改善影響缺水量

基於制水閘分區之換管優選模式明顯較以往基於管線之換管優選模式更能合理反應實際的管線損壞影響，進而決策出較佳的換管規劃。此模式在應用本研究所發展的損壞缺水模擬模組推估個別管線與制水閘分區的關閉缺水影響量後，可更合理的反應管網各管件損壞所造成的損壞衝擊，使得所決策的結果更合理反應實際狀況，以提升換管規劃決策的可靠度。此外，本研究所採用的換管規劃模式可明顯改善管網中因管線可能發生的損壞造成的停水維修影響，因此將可有效提升管網供水穩定度，改善管網品質。

4.2 損壞污染監測選址模式

由於管網系統埋藏在地底，通常無法即時發現管線的損壞事件，使得管線損壞造成供水水質劣化，進而威脅用水戶的飲水安全性與健康。因此為有效控制管網損壞，提升自來水公司對於管線損壞事件的偵測管理能力，本研究因而提出一損壞污染監測選址模式輔助水公司設置有效的損壞污染監測站網，有效確保供水品質。

以下，首先定義偵測污染水量水準值以為監測站網水質確保的評估基準，並接續說明模式發展步驟與所發展的損壞污染監測選址優選模式。

4.2.1 偵測污染水量水準值

由於損壞污染的傳遞過程為一複雜的擴散過程，為了建立選址優選模式，首先建立一個合理的損壞污染指標，以反應損壞事件的污染擴張現象與損壞污染影響程度。

本研究採用 Kessler 等(1998)所提出的偵測污染水量及要求值作為監測站評選基準，其定義摘要說明如下。

- (a) 偵測污染水量：為污染節點傳布到某特定監測節點之時間，所污染的總水量。例如當節點 a 至節點 b 間的偵測污染水量為 c 立方公尺，則意指受污染水從節點 a 傳布至節點 b，之間將造成 c 立方公尺的自來水被污染。
- (b) 偵測污染水量要求值 (level of service)：此為損壞污染造成污染被監測站點偵測到前，所允許之最大污染總水量。比如 d 立方公尺的偵測污染水量要求，指的就是任一可能污染節點損壞污染後，在被管網系統所設置的監測站點監測前最多只污染達 d 立方公尺的自來水水量。而此數值愈小，則表示其偵測要求愈高。

同時為簡化損壞污染監測站網決策，亦採用 Kessler et al.(1998)的基本假設：

- 
- (a) 外部損壞污染可能在任意時間與地點發生。所有在管網中的節點皆可能是損壞來源。
- (b) 只要經過損壞污染的節點都當作已經受到污染，不管污染的濃度。
- (c) 損壞污染傳布的速度假設跟管線截面平均速度相同。
- (d) 一旦污染產生則假設持續進行。
- (e) 監測系統可即時性的執行監測工作。
- (f) 所有節點發生損壞的機率相同，且每次僅考慮最多一個損壞污染來源。

4.2.2 Kessler et al. (1998)方法

本研究首先應用與 Kessler *et al.*(1998)所使用相同的方法，先取得自來水管網的一些水力特性以進一步輔助估算偵測污染水量，並同時以他們提出的監測站網決策程序決策出監測站網，以便與後續本研究所提出的模式進行比較分析。Kessler *et al.*(1998)方法的步驟簡述如下：

步驟一：管網水力模擬

首先利用 EPANET2(Rossman, 2000)執行自來水管網的水力模擬。求取管網在不同需水量形式(demand pattern)下，自來水水流在各管線中的水流流速變化情形。

步驟二：輔助管網

由於自來水管網為一複雜動態的系統，為方便進一步的研究分析，Kessler *et al.*(1998)對自來水在管網系統中的傳布現象進行合理簡化。以具有方向性的管線代表自來水的流動方向，若水流只能以某一特定方向進行傳輸，則以單方向之管線代表之，若水流取水樣式的變化而造成雙向流動的情形，則以不同方向之平行管線表示。並以水流在管線間的傳布時間為管線之代表管長，進而取得一個有管線方向性的輔助管網。以利於輔助後續選址分析。



步驟三：全最短路徑 (All shortest path) (Sedgewick, 1990)

假設在管網中傳布的污染水流，是以最短路徑進行傳布，因此利用全最短路徑的演算程序，對於輔助管網中的每個可能污染節點，求取其到其他節點所需花費的最短時間。雖然水流不見得以最短路徑傳送，但最短路徑提供警示所需的最短時間，若水流不是以最短路徑傳送，則必然會花更長的時間傳送，故以最短路徑求得的時間，在實務上是一個較保守值。

步驟四：偵測污染水量

利用以上各步驟所得到之管網基本水力特性，即可求取各節點之偵測污染水量。其求取方式如下說明，針對管網中每個可能的污染節點 j ，對於管網中的可能監測站點 i ，取得其間之最短傳輸花費時間 L_{ji} ，以此為基準，逐一針對管網中的所有節點 n 進行計算。如果 j 傳布到其節點所花費

的時間大於 L_{ji} 則略過不計，否則取得其值，計算與 L_{ji} 間的差值 $Diff_{jn}$ ，並累加 $D_n \times Diff_{jn}$ ，最後加總而得的量值即為污染節點 j 被可能之監測站點 i 監測到時，所污染的總水量，也就是節點 j 到節點 i 之間的偵測污染水量 S_{ji} 。

4.2.3 監測站網優選模式

模式一：

由於 Kessler et al. 方法在相同條件下會有多組解，且必須以試誤法求得最佳解，故本研究依前述所求得之偵測污染水量資料，提出以偵測污染水量最小為目標的整數規劃模式，以改善求解最佳解的效率。該模式的如下列所示：

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad \sum_{j=1}^{NQ} q_j && (4-3a) \\
 \text{S.T.} & && \\
 & \sum_{i=1}^K y_i < M && y_i \in [0,1] && (4-3b) \\
 & h_{ji} < y_i && \forall i, \forall j \in G_i && (4-3c) \\
 & \sum_{i \in D_j} h_{ji} = 1 && \forall j && (4-3d) \\
 & \sum_{i \in D_j} h_{ji} V_{ji} < t_j && \forall j && (4-3e) \\
 & y_i \in [0,1] && \text{integer variable} &&
 \end{aligned}$$

其中 q_j 為在節點 j 發生的損壞污染在被任一監測站點監測到之前的總損壞污染水量； NQ 為所有可能發生損壞污染的節點數； y_i 為表示節點 i 是否被選為監測站點的 $[0, 1]$ 整數變數； K 為可被選為監測站點的總候選站點數； M 為事先決定的欲設置的總站點數； h_{ji} 為一虛擬變數(dummy variable)表示節點 j 是否被設在節點 i 的監測站點所負責監測； G_i 為設在節

點 i 監測站點負責監測的所有節點集合； D_j 為可在偵測污染水量要求值內監測到節點 j 所發生損壞污染的所有監測站點集合； V_{ji} 為監測站點 i 監測到損壞污染節點 j 的污染時所造成的總損壞污染水量。

目標式(4-3a)在最小化所有可能損壞污染節點在污染被監測到前所污染的總污染水量，這個目標式可以提供決策模式一個 driving force 以找到一個最適的監測站網設置站點，以降低可能的損壞污染衝擊。(4-3b)式則限制總選取監測站點的組數不可超過事前設定的數量以滿足設站預算考量；(4-3c)式則設定虛擬變數 h_{ji} 必需小於相對應的監測站選取變數 y_i 。如果 y_i 為零，則所有的可能損壞污染節點 j 皆不為相對應的監測站點 i 所監測，亦即相對應的 h_{ji} 皆為零。(4-3d)式則限制對於每一個可能污染節點 j 可由一個監測站點 i 負責監測；(4-3e)式則用以計算可能損壞污染節點 j 的損壞事件被監測到之前所可能造成的總污染水量；其中虛擬變數 h_{ji} 在目標式的驅動力影響下，以及限制式(4-3c)到(4-3e)的限制下，僅可為 0 或 1，因此不需要將 h_{ji} 設定為 $[0, 1]$ 整數變數以有效減少求解大量整數變數規劃問題所需的計算時間。

決策者可以先找出根據經費預算所決定出的最大設站總數，輸入上述模式，限定總選取測站數。並在目標式的驅動力之下，使得能覆蓋所有節點的監測站網的可能污染水量能夠盡可能縮小。因此此模式不需要試誤法的方式，即可決定出在某總測站數之下的監測要求水準值，並決策出的較佳監測站網。

模式二：

上面的模式並沒有直接計算決策出之監測站網之偵測污染水準要求值，該數值由所有可能損壞污染節點被偵測到前的偵測污染水準 q_j 來決定。為決策便利起見，可使用下列所提出的決策模式來決定損壞污染監測站網，並同時決定出該站網損壞污染水準最大值，以表示該監測站網之監測表現水準。

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^{NQ} q_j + l \quad (4-4a)$$

S.T.

$$q_j < l \quad \forall j \quad (4-4b)$$

其他限制式與(4-3b)~(4-3e)相同

上述的替代性監測站網優選模式，為前一模式加入一個額外表示偵測污染水準要求值 l 的變數。除了 l 變數之外，亦多加入(4-4b)限制式，與目標式求取最小總目標值的驅動下，則 l 會盡可能小，然而因為 l 必需要大於所有可能損壞污染節點 j 的偵測污染水準量，因此兩相作用之下，此模式即會在決策選取最佳損壞污染監測站網的同時，求取該決策站網的偵測污染水準要求量。

模式三：

上述兩個模式，僅能在事先決定的總監測站點數限制下，找到最小最佳偵測污染水準要求值的監測站網。然在比較重要而必需保護用水戶的用水安全性在某一個特定水準下時，則上述兩個模式將無法直接決策出，滿足特定偵測污染水準要求值下的最佳監測站網，而必需嘗試多次不同總站點數限制下的優選結果，及比對其偵測污染水準要求值是否滿足事先設定的損壞污染保護水準，需耗費較多的決策時間。因此本研究進一步延伸上述監測優選模式，以直接決定出可滿足事先設定的特定偵測污染水準要求

值的監測站網。本研究提出的第三個監測站網優選模式如下所示，主要差異在加入一個新的變數 m 到目標式中。

$$\text{Min } \sum_{j=1}^{NQ} q_j + l + B m \quad (4-5a)$$

S.T.

$$l < L \quad (4-5b)$$

$$\sum_{i=1}^K y_i < m \quad (4-5c)$$

$$y_i \in [0,1] \quad (4-5d)$$

其他限制式與(4-3c)~(4-3e)與(4-4b)相同

其中 m 為總設置監測站點數； L 為事先決定希望決策出監測站網要滿足的偵測污染監測值；而 B 為一個很大的常數，且必需要設定為大於 $L \times (N+1)$ 的值，以提供足夠的驅動力，使所決策監測站網系統總選取設置站點數盡可能小。

限制式(4-5b)限制所決策出的監測站網的偵測污染水準要求值，必需要小於事先設定的量值；而在目標式中 Bm 與限制式(4-5c)的驅動力下，則限制監測站網的監測站點總數可由 m 表示，且會盡可能小。因此在此模式的各項驅動力與限制式作用下，則所決策出的監測站點數會盡可能小，且將直接符合事先設定的偵測污染水準要求值。

上述所提出的三個模式，可以直接決策出在某限制監測站點總數下具有最小偵測污染水準要求值的監測站網系統，或者可滿足某特定最小偵測污染水準要求值為限制條件下的最佳監測站網系統，而不需要執行其他的決策程序。因此，使用這些提出的監測站網選址優選模式，將可有效改善監測站網設置的決策效率。後續則以一個假想示範案例來測試所提出模式的可行性與適用性。

4.2.4 案例研討

本研究採用與 Kessler et al. (1993)同樣的 Anytown (Walski et al., 1987) 測試假想管網示範案例來測試所發展的各项優選模式。該案例管網如圖 4.5 所示，包含 34 條管線，16 個節點與其他水力管件包含在節點 20 的加壓站。利用 EPANET2 (Rossman, 2000)執行 24 小時的管網水力模擬，並利用 Kessler et al. (1988)程序建立如圖 4.6 的管網水力分析輔助管網系統。接著則執行全最短路徑(all-shortest-paths)的演算程序，以任兩節點間的最短路徑估算輔助管網網路中其間的最短傳布時間。而任一可能污染節點被其他任一候選監測站點所偵測到前所造成的總污染水量值亦由 Kessler 所提程序估算之。其中若發生污染的節點與候選監測站點為同一節點則將總污染水量設為"0"，因污染將會被即時監測到。

本研究所提出的監測站網選址模式利用 CPLEX8.1(ILOG, 2002)在 Linux 系統的個人電腦上執行求解。選址模式一在不同總監測站點總數的限制下的選取站網結果與其相對應的偵測污染水準要求值則如表 4.1 所示，其中黑色的點表示被選取的站點，最右邊的一行為相對應的偵測污染水準要求值。由決策結果表可以發現監測站點數愈多，其對應的偵測污染水準要求值則將因平均到達監測站點的距離降低而降低。

本研究亦應用 Kessler et al. (1998) 所提出的站網決策程序選取監測站網以與所提出模式的結果作比較。該程序用來求取在偵測水準要求值 0~100,000 (ft³)間的決策監測站網結果皆如表 4.1 所示。上述程序重複 282 次後得到與 Kessler et al. (1998) Fig. 6 同樣的決策結果。

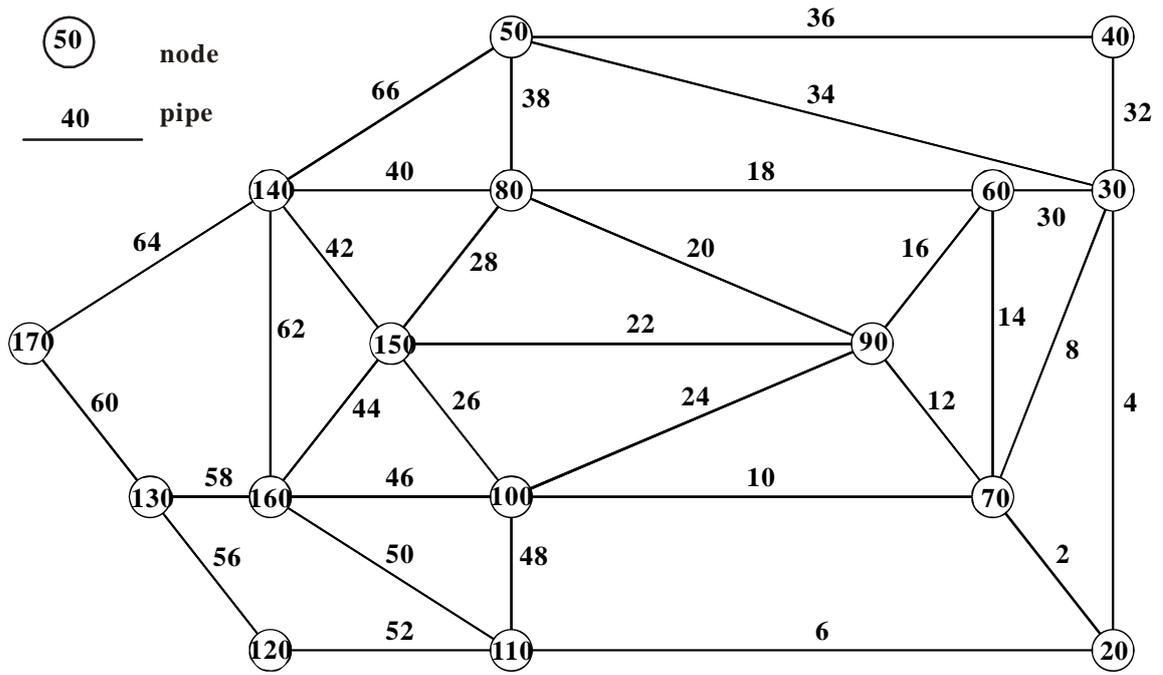


圖 4.5 監測站網假想測試管網案例 (Walski et al., 1987)



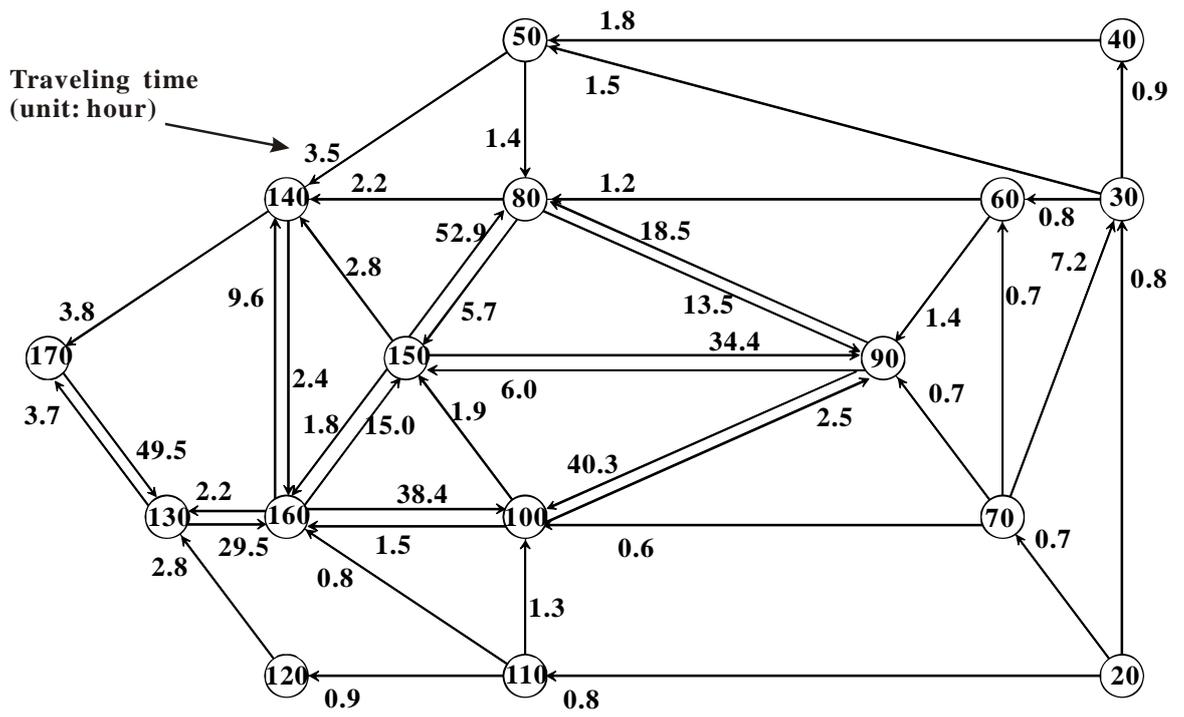


圖 4.6 管流時間輔助管網案例



4.2.5 結果與討論

各特定監測站點數所得到的相對應最小可得偵測污染水準要求值與 Kessler 程序所得到的結果相同。由於 Kessler 程序需要先決定偵測污染水準要求值再決策符合該條件的監測站網。因此如圖 4.7 所示，以 Kessler 程序執行監測站網決策時，有相當大的偵測水準要求值範圍皆具有相同的監測站點總數。以 4 個總監測站點數為例， $16,362 \text{ ft}^3$ 到 $43,712 \text{ ft}^3$ 偵測污染水準要求值下以 Kessler 程序所決策出來的監測站點總數皆為 4 個，因此若要以 Kessler 程序規劃在同樣監測站點數下具最小偵測水準要求值則需要執行多次的決策才能夠確認最後的結果。

由表 4.1 所示，某些監測站點如節點 90、160、與 170 較其他節點為常被選取為監測站點。這些站點因為可以在較少偵測污染水準值之下就監測到其他上游站點的污染事件。當監測站點數較少的時候，多增加一個額外的監測站點則可以明顯的改善偵測污染要求值。比如監測站點數從 8 增加到 9 時，其改善的偵測污染水準僅 321 ft^3 則明顯小於由監測站點數由 2 增加到 3 的改善值。因此，監測站網總數必需要仔細考量增加站點總數所增加的成本與改善偵測污染水準的成效以做出最後最合適的決定。

由於應用 Kessler 程序決定監測站網前，必需要先決定預期的偵測污染水準值。偵測水準要求值應該要盡可能小以避免損壞污染事件在被監測到之前造成過大的損壞污染水量。然而，合理的偵測污染水量則不容易決策出來。雖然 Kessler 程序可以用來決定在特定偵測污染水準要求值限制下的最小監測站點數最適解，然而該程序所決策出來的偵測污染水準值的結果可能接近某一限制值，但並不是在該最小監測站點數下具有最小偵測污染水準要求值的監測站網解，而甚至於可能大於實際的最佳偵測污染水準要求值甚多。比如以 Kessler 程序求解滿足 $29,363 \text{ ft}^3$ 偵測污染水準要求值下，所決策出來包含四個監測站點總數的監測站網，

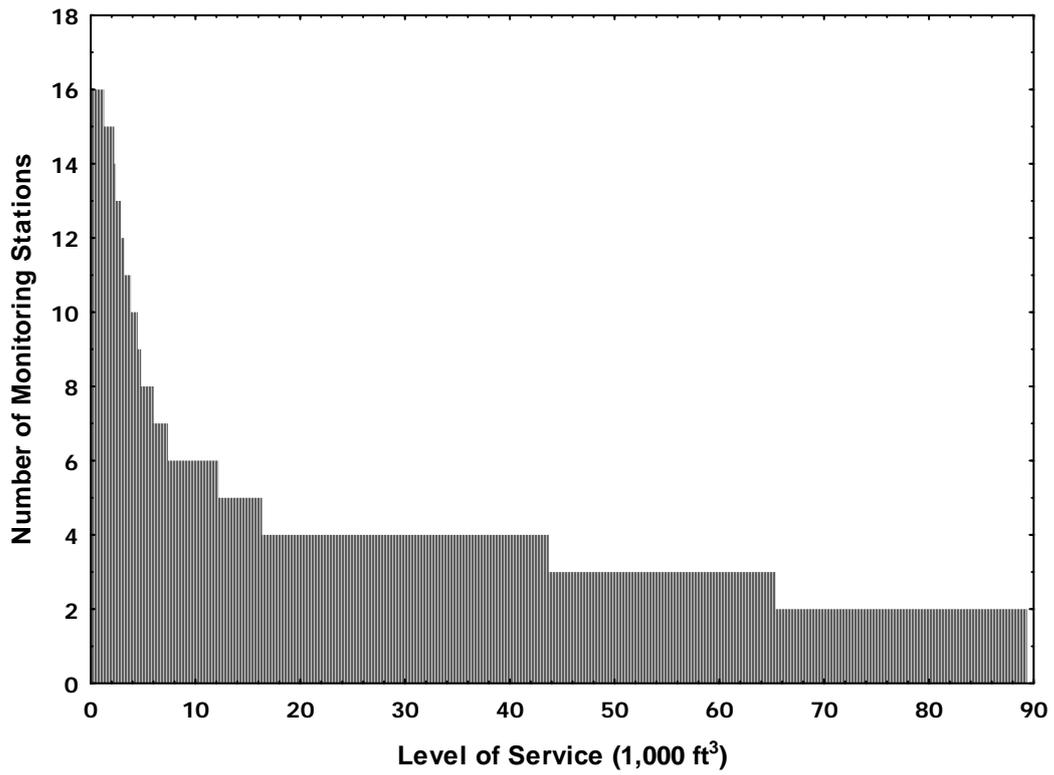


圖 4.7 決策監測站數隨偵測污染水準要求值變化趨勢(Kessler et al., 1998)



表 4.1 損壞污染監測站網優選結果

Number of monitoring stations	Selected locations for placing monitoring stations															Level-of-service(ft ³)		
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		170	
1																●	174,051	
2								●									●	65,369
3								●								●	●	43,713
4							●	●								●	●	16,362
5		●					●	●								●	●	12,192
6		●					●	●				●				●	●	7,379
7			●			●	●	●				●				●	●	6,015
8	●		●				●	●	●			●				●	●	4,812
9	●		●		●		●	●	●			●				●	●	4,491
10	●		●		●		●	●	●		●	●				●	●	3,849
11	●		●		●		●	●	●		●	●	●			●	●	3,208
12	●		●		●		●	●	●	●	●	●	●			●	●	2,887
13	●		●		●		●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	2,406
14	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2,245
15	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1,283
16	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0

● : selected location

然而在四個監測站點總數限制下，其最佳的監測站網解應為偵測污染水準要求值為 $16,363 \text{ ft}^3$ 明顯較 Kessler 程序要求值為小。如果當水公司想要決策具有較小監測站點總數的監測站網規劃結果，則必需再執行 Kessler 程序以求得一個新的規劃監測站網，然而該較小偵測污染水準要求值仍可能明顯大於該特定監測站點數下可行的最小偵測污染水準要求值。因此，若以 Kessler 程序求取特定監測站點數下具最佳偵測污染水準要求值的監測站網規劃結果，則必需執行相當多次的規劃程序。相對而言，本研究提出的監測站網選址優選模式，則可以直接規劃在特定監測站點總數下具最小偵測污染水準要求值的監測站網決策結果，而不需要另外執行額外的決策程序，而改善監測站網決策效率。

且 Kessler 程序在同一個偵測污染水準要求下，常會有多組合適之監測站點系統組合。故此以 $1,000 \text{ ft}^3$ 為間距，對於 $0\sim 100,000 \text{ ft}^3$ 偵測污染水量之間進行總計 100 次的模擬，取得對於不同偵測污染水準下之符合監測站點組合總數之變化，其結果如圖 4.8 所示。為進一步縮減適合組合總數，根據 Kessler *et al.* (1998) 之建議，另以最大覆蓋程度為縮減標準，逐一篩選合適站點組合，其結果如圖 4.9 所示。

根據合適解總數分析圖 4.8、圖 4.9 可以發現，以 Kessler 程序進行監測站決策分析，在相同的偵測需求下，會得到多組合適解的情形，比如在偵測污染水量為 $7,000 \text{ ft}^3$ 的情形下，有高達 16 組監測站點總數為 7 的合適解。雖然經由 Kessler *et al.* (1998) 建議可以多考量選取站點之重複覆蓋程度進一步篩選，卻發現如圖 4.9 所示，雖然大部分情形都可以得到單一組解，但仍存在多組解的情形，比如偵測污染水量為 $7,000 \text{ ft}^3$ 的情形下，仍然有高達 5 組合適的解。必須重新計算每一組站網的實際偵測污染水量，才能決定最佳解，手續上較為繁瑣。相對而言，本研究之選址模式，可以直接得到一組最佳解，可簡化決策過程。

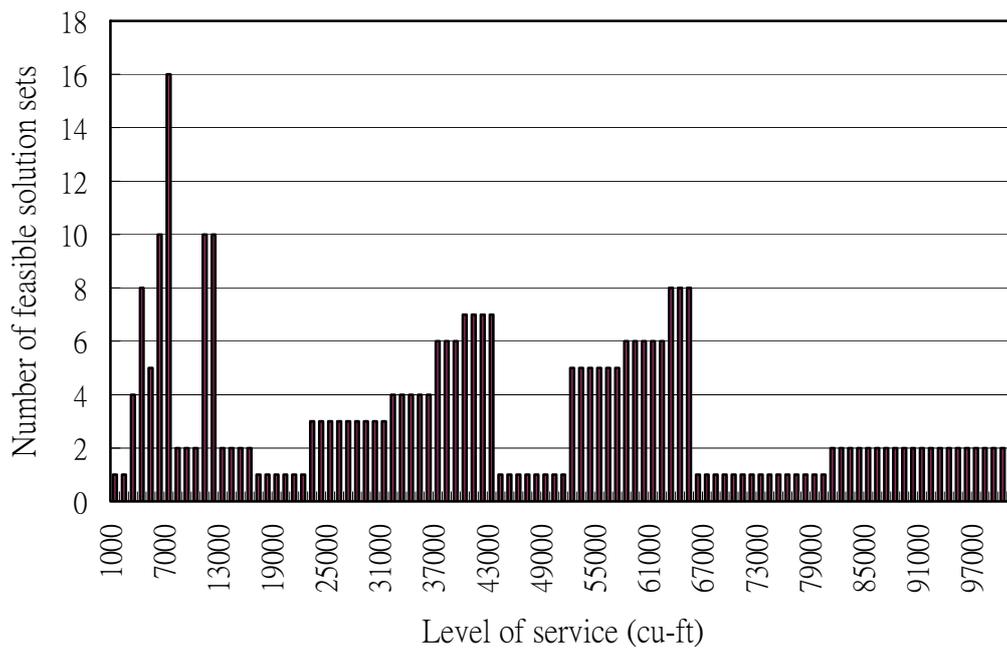


圖 4.8 不同偵測污染水量要求值下所得合適可行解總數變化圖



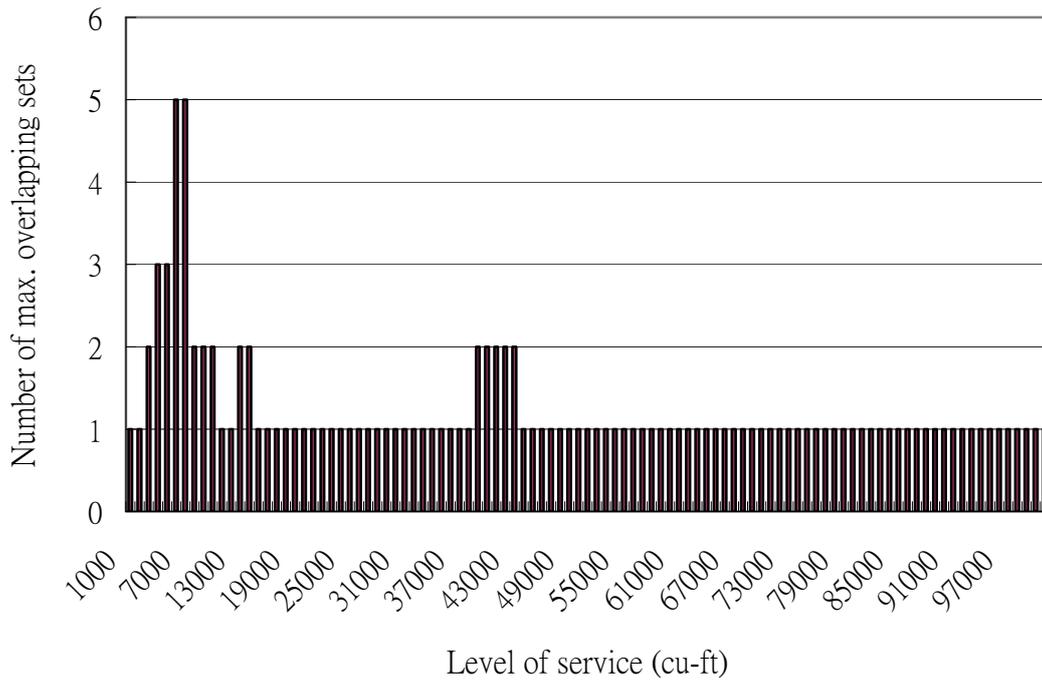


圖 4.9 經最大覆蓋縮減後之合適解總數分布圖



而 Kessler *et al.*(1998)之方法必須採用試誤法，且在逼近最佳解時，必須縮小搜尋間距才能求得較精確的最佳解，較耗時且繁複。相對而言本研究之選址模式，則可以直接進行監測站點系統的決策，無須反覆的搜尋端點偵測污染水量，可直接決策出偵測污染水量最小之監測站網。

另一方面，根據模式分析結果表 4.1，亦可以發現雖然隨著監測站點的增加而偵測污染水量水準值隨著降低，其改善程度亦隨著監測站點的增加而有明顯下降的趨勢，因此藉由此項分析，可了解每增設一個監測站點的效益，以作為決策的重要依據。

4.2.6 小結

本研究提出一個整數規劃模式可直接規劃有效的監測站網，以輔助在盡可能小的偵測污染水準要求值下即可偵測到可能的損壞污染事件。模式一並不直接求取出偵測污染水準值，而可由所選取的損壞污染監測站點負責監測的可能污染節點之偵測污染水準，其最大值即為偵測污染水準要求值，以評估所規劃監測站網的損壞污染監測保護水準。然因其要求後續分析決策才能決定出該監測站網的偵測污染水準要求值，因此需花費較多的決策時間。而本研究所提出的延伸模式二則可以直接將決策出監測站網的偵測污染水準要求值同步估算出，因此可以簡化整體規劃流程。另一延伸模式三則可以在滿足事先決定的偵測污染水準要求值下，具有最少監測站點總數的最佳監測站網解。然而 Kessler 程序需要額外的決策程序，才能夠決定出在特定總監測站點數下具最佳偵測污染水準要求值的規劃監測站網。

相對於在應用 Kessler 程序之前必需先選取難以決定的偵測污染水準要求值，本研究所提出的各項選址優選模式，可直接以任意的總監測站點數或偵測污染水準要求值來執行決策。因此，若是以監測站點數來執行決策，則不需要事先決定偵測污染水準要求值。若以特定的偵測污染水準要

求值應用延伸模式三決定最佳的監測站網，則可以直接決策出具有最小監測站點數的監測站網結果。利用所提出的選址優選模式，則可以快速產生如圖 4.7 偵測污染水準要求值對應決策優選總監測站點數的決策輔助圖。因此，監測站網規劃決策者則可以利用此決策輔助圖，研討可承受的損壞污染影響與可得的監測站網設置成本，來探討決定最適的監測站網以最有效的監測管網系統可能發生的損壞污染事件，減少損壞污染可能對用戶造成的負面影響。



第五章 管網損壞分析決策支援系統

當實際管網系統應用所發展的各项損壞停水維修管理分析程序與管理決策模式時，由於龐大的管網資訊與複雜的連通關係，一般工程師不容易直接應用這些程序與模式，本研究因而發展一個線上管網損壞分析決策支援系統，以輔助自來水事業人員有效的執行管網損壞分析與管理工作，降低管網的損壞衝擊。以下逐一說明管網損壞分析決策支援系統的運作架構與各個分析及決策模組。

5.1 系統發展運作架構

管網損壞分析與管理決策支援系統的運作架構設計如圖 5.1 所示。整個系統分為用戶端與伺服器端兩個部分，不同運算需求的主要模組根據其特性分別在客戶端與伺服器端執行，以合理配置運算需求提升系統整體的決策效能。決策支援系統主要的管網決策支援模組包含：

- (1) 管網核心資料庫模組：儲存與管理管網系統相關管件資訊。
- (2) 管網結構分析模組：輔助分析管網系統的結構及連通關係。
- (3) 管網損壞分析模組：輔助分析管網系統各制水閘分區損壞所可能造成的損壞衝擊。
- (4) 管網停水分析模組：輔助分析管網損壞事件。
- (5) 網路地理資訊分析介面模組：提供視覺化分析、呈現與操作介面。
- (6) 管網決策支援伺服器系統：協助執行複雜的各项管網水力模擬。

由於一般實際的自來水管網系統通常包含相當大量的管件資訊，各項損壞分析與管理模組的運算分析過程又較為繁複，需要建立一個較具效率的管網資料結構，以提升管網資訊在決策分析時的運算效率，本研究應用物件導向的技術發展管網損壞分析決策支援系統，使得所發展的決策支援系統更為系統化、模組化，以便利分析繁雜的管網系統。

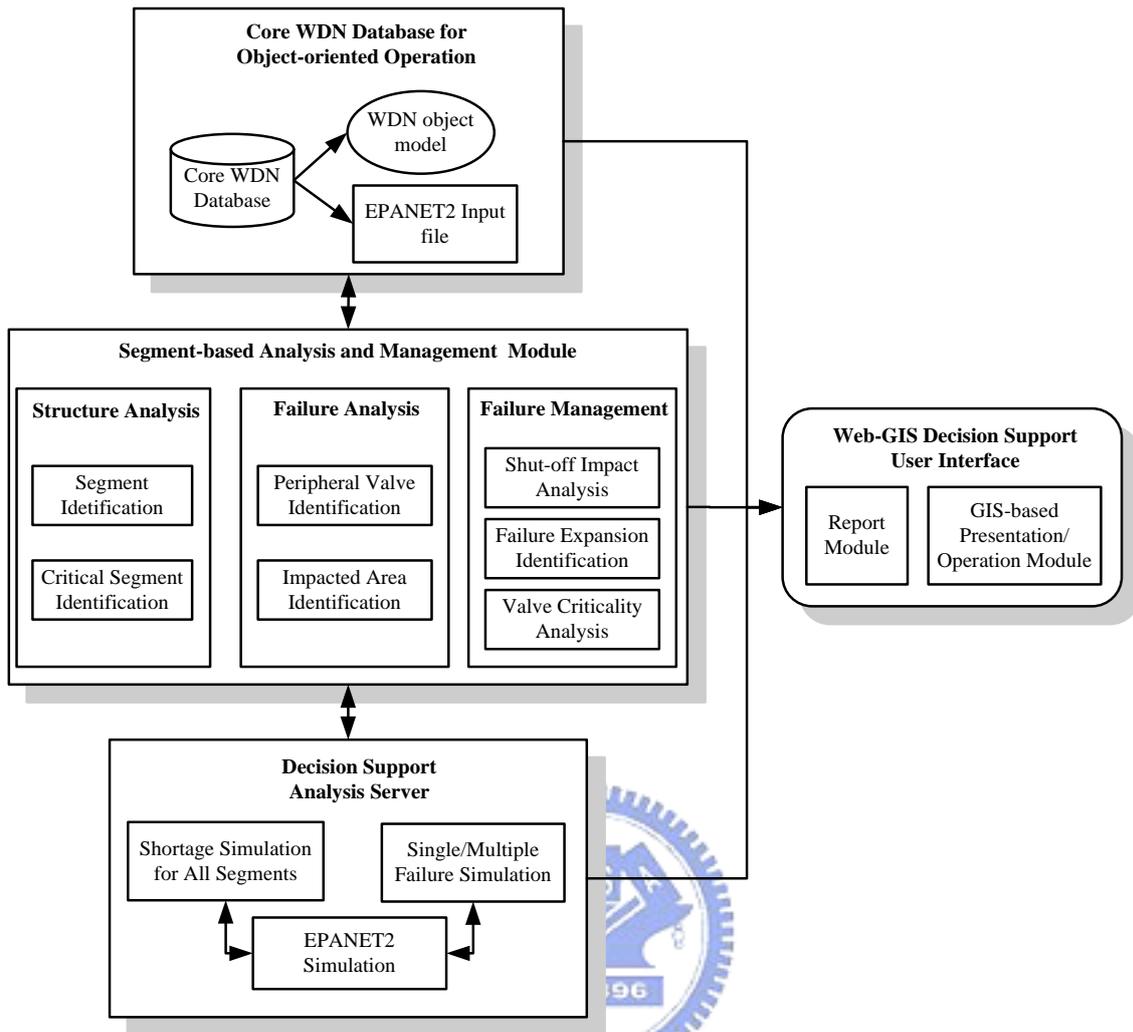


圖 5.1 管網損壞分析決策支援系統架構圖

由於物件導向式的設計架構，將各項管網實體管件、屬性甚至於運作特性等皆可設計為一模組化的運作單位，不僅可更直覺的方式發展運作分析架構，亦將因為個別管網運作模組化之後的獨立性，更提升所發展決策支援系統的可擴充性，後續擬發展擴充的各類決策支援模組只要能依循系統所規範模組化的管網物件架構，即可直接連結至決策支援系統中。採用 JAVA (Sun, 2008)物件導向程式語言發展，參考改善以往研究的管網物件架構(Morley et al., 2001; Solomatine, 1996)，設計發展損壞分析系統。

為有效降低管網損壞影響，系統發展之管網損壞維護決策輔助架構如圖 5.2 所示。針對平時管網改善策略研擬的需求，結合發展管網損壞分析與制水閥連通關鍵性分析，找出管網中損壞影響較大的區位，判識制水閥設置架構的可能缺失，以輔助恰當的制水閥設置架構改善策略。亦針對損壞維修執行的需求，發展停水分析與制水閥損壞擴張樹分析，動態輔助損壞維修影響分析，提升管網損壞維修執行效能。並發展制水閥設置調整分析功能，輔助改善損壞影響策略之研擬。

根據上述管網物件架構為核心所發展出來的管網損壞分析決策支援系統如圖 5.3 所示。並結合地理資訊介面模組，將管網系統包含的所有管件，如節點、管線、水槽、蓄水池與加壓站的空間關係建置呈現，提供簡便的操作分析介面。

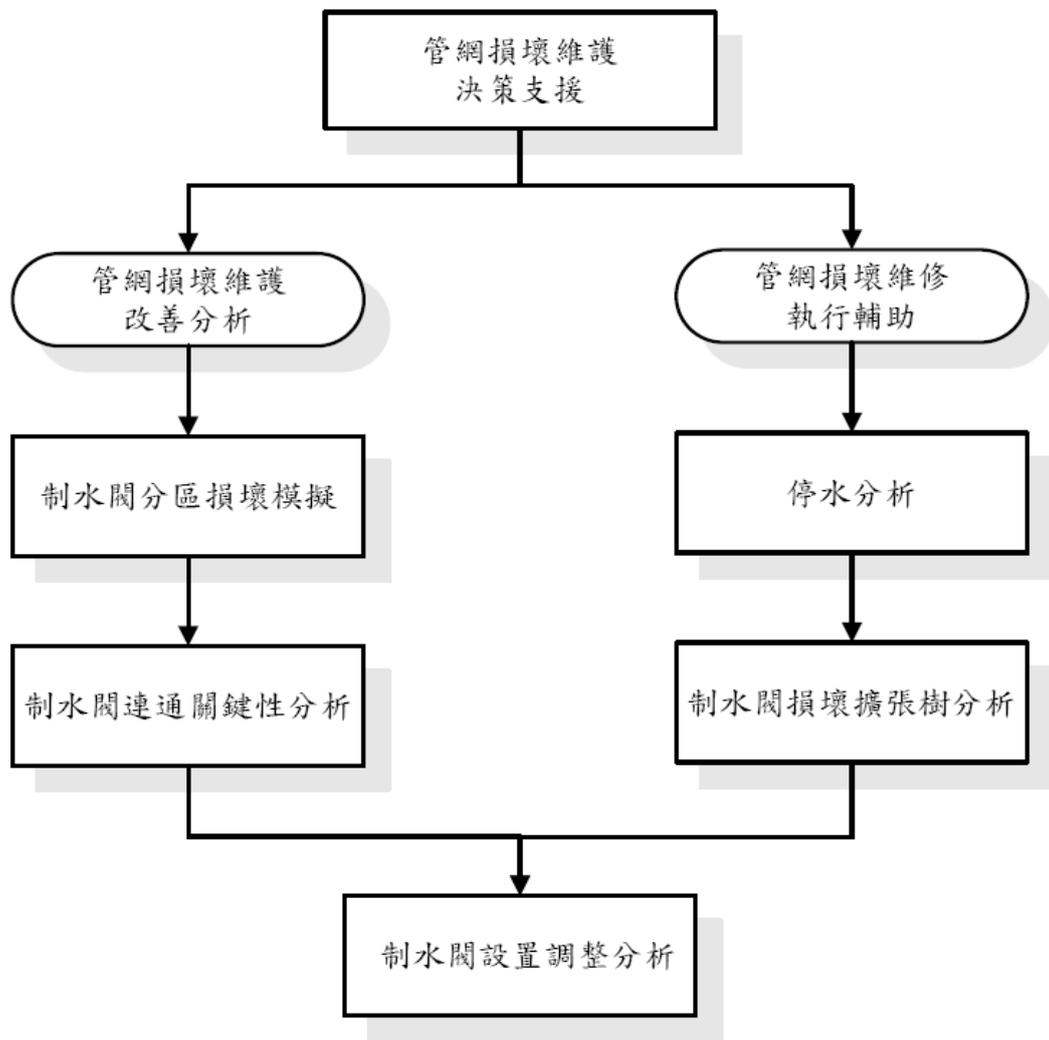


圖 5.2 管網損壞維護決策輔助架構圖

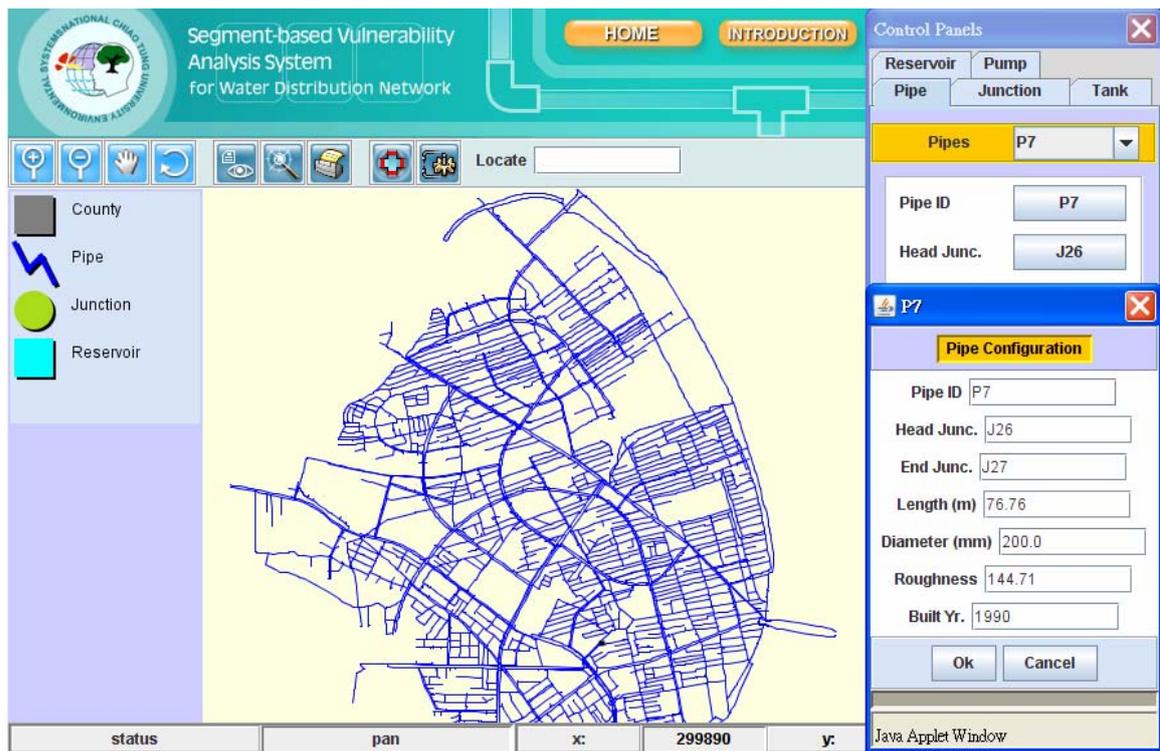


圖 5.3 管網損壞分析決策支援系統介面與案例管網圖



5.2 管網核心資料庫模組

由於自來水管網系統為一個複雜且龐大的系統，因此本研究設計一個自來水管網核心資料庫模組，輔助管理自來水管網資訊。採用關連式資料庫系統 MySQL (MySQL AB, 2008)設計發展管網核心資料庫，並以 phpMyAdmin (phpMyAdmin Devel Team, 2008)輔助管網核心資料庫之管理。管網核心資料庫中的各管網資料表，則根據上節所規範設計出的各管網管件的屬性來設計，比如節點、制水閥、水槽、管線、加壓泵等皆設計出相對應的資料表，分類管理儲存這些龐大的管件資訊，以有效管理分析這些管網資訊。由於管網系統中的龐大管件與其屬性皆以文字方式直接儲存，因此在執行管網損壞分析決策支援系統必須先轉換成相對應的管網物件架構，以便利後續的各項決策分析。在管網核心資料庫模組中亦包含一管網物件轉換建構介面，透過 JAVA JDBC (Sun, 2008) 的資料庫共通存取介面，以系統化的方式與資料庫系統連結存取相關資訊，快速選取管網個別管件建構所需的物件資訊，以有效建構管網大量複雜的各項物件。

5.3 管網結構分析模組

為便利執行實際管網系統的損壞影響分析，並提升管網其他決策分析效率，管網系統可先轉換成以制水閥分區為基本單位的輔助網路系統，以簡化原先複雜的管網系統。因此，在管網損壞分析決策支援系統中，亦發展一基於制水閥分區的管網分析模組，結合第三章所發展的制水閥分區判識演算程序與關鍵制水閥分區判識演算程序，根據原始的管網系統資訊，快速轉換為相對應的制水閥分區輔助網路，並初步分析出管網各基本制水閥分區單位間的連通關係，以及其個別制水閥分區損壞停水維修所將造成的直接關閉影響管網用戶範圍，以作為水公司人員在初步檢視系統整體時的一個初步的分析參考。

5.3.1 制水閥設置調整分析模組

對於管網損壞影響過大的區位，應該透過增設管線或調整制水閥設置位置來調整管網連通性，以降低損壞影響。因此，系統亦發展制水閥設置調整模組，藉由改變節點屬性，調整管網的制水閥分區輔助網路之連通特性，便利制水閥設置調整策略之分析探討。

5.4 管網損壞分析模組

當管網損壞時，需將損壞管線周圍的制水閥關閉停止損壞管線的供水之後，才得以執行維修工作，因此單一管線的損壞將擴張至包含該管線所在的制水閥分區範圍中。管網各部位的損壞影響，應該要考量到個別制水閥分區所在的位置與其在管網中的連通關係，然若以人工方式執行此類分析判斷，一方面較易發生誤差，另一方面亦無法執行制水閥分區的水力損壞模擬。因此，管網決策支援系統結合第三章所改善發展的停水區域周圍制水閥判識演算程序以及關鍵分區下游關閉區域判識演算等程序，與管線損壞缺水模擬，發展管網損壞分析模組，輔助分析管網系統中個別制水閥分區所可能造成的損壞衝擊。其中關鍵性制水閥分區關閉區域判識功能，可直接判斷出當該制水閥分區中的管線損壞停水維修時，將可能造成下游哪些區域亦隨之關閉，以此而可判斷出管網連通結構上，可能需要改進設計的區位，由於只以制水閥分區連通性來判斷，因此可快速的提供自來水事業人員初步的管網分析結果。而制水閥分區的損壞水力模擬則可更合理的反應損壞區域對管網系統整體所可能造成的停水衝擊。藉由這兩個模組功能，自來水事業人員可以合理的檢驗管網系統結構上較脆弱的區位，以利於作為改善損壞影響設計上的參考。

5.5 管網停水分析模組

5.5.1 停水分析

當管網系統發生損壞事件時，自來水事業人員通常必須先經由人工判定可能區位，檢視管線竣工圖，判定周圍關閉制水閥，並到現場實際執行

停水維修工作，然而若遭遇無法順利關閉的周圍制水閥時，則必須重新重複上述的繁複過程，直到最後損壞的管線可以被封閉為止。上述過程在過往通常都以人工方式執行，除了過程繁複容易發生錯誤，並且需要較長的維修計畫時間，因此造成損壞影響的擴大。另一方面，以人工執行判識分析，亦較不容易有效的判別出停水維修工作可能造成的損壞影響，特別是當某些周圍制水閥無法正常運作而擴張停水影響區域時，該擴張損壞區域所造成的影響範圍將更難以判識。因此本研究發展一個管網停水分析模組，以輔助管理管網所發生的各類損壞事件，提供損壞停水維修的必要資訊，並執行擴張影響衝擊分析，輔助自來水事業人員研擬損壞維護與管理計畫。

管網停水分析模組的停水輔助分析程序如圖 5.4 所示，首先經由空間定位或者直接選取損壞的管線，之後結合第三章發展的停水區域判斷程序，判斷該損壞事件所在的制水閥分區，為必須關閉的直接影響區域，再以第三章所發展的非預期關閉損壞區域判識演算程序執行損壞影響區域的判識，若有任何其他邊界制水閥無法正常運作，則接續判斷所擴張影響的制水閥分區，並將判識出的擴張影響制水閥分區加入損壞區域中，重複執行上述的停水分析程序，直到損壞區域得以關閉進行維修為止。

由於上述停水分析程序，可以動態即時根據實際的管網損壞停水操作事件執行必要分析管理，因此可以提升自來水公司在停水分析上的效能。另一方面，該模組亦可進一步應用在個別制水閥分區損壞擴張，分析可能造成的損壞衝擊，評估系統對於損壞事件的抵抗能力，進而研擬必要的改善管理策略。

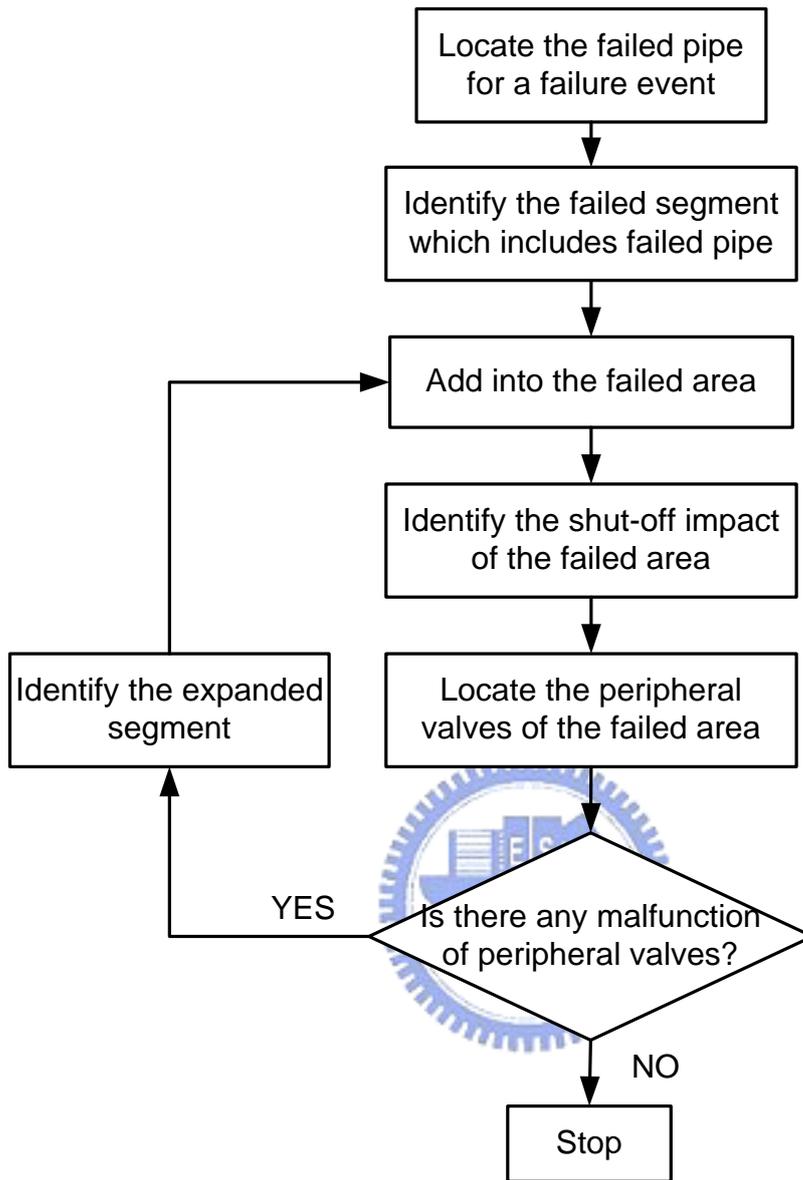


圖 5.4 管網損壞停水分析管理程序

5.5.2 制水閥損壞擴張樹分析

上述停水分析雖可有效分析損壞停水事件所造成的影響衝擊，然在實務執行停水操作時，埋藏在地底的制水閥，可能因長年侵蝕而無法正常運作，擴張損壞影響衝擊，因此需要一個有效的分析程序，輔助分析制水閥損壞的擴張損壞影響，並根據實際狀況提供停水操作資訊，以提升停水維修效能。管網損壞分析決策支援系統進一步應用上述的停水分析程序，根據邊界制水閥的可操作狀態，動態分析制水閥損壞的擴張影響衝擊。

當損壞擴張範圍較大，管網較為複雜時，將因連通關係的混雜而較不易辨識損壞影響，分析不恰當的設計架構。因而發展一制水閥損壞擴張樹分析程序，將停水分析中的制水閥損壞擴張分析架構，以損壞影響管件為節點，建構損壞擴張樹狀結構，直接呈現連通損壞關係，提供更直覺的制水閥損壞擴張影響資訊。並因應制水閥損壞狀態的改變，動態建構新的損壞樹狀結構，提升損壞維護操作決策的效率。

5.5.3 制水閥連通關鍵性

管網停水維修必須經常性的操作適當的制水閥才能夠執行，若制水閥損壞將擴張停水維修區域，擴大損壞影響。因此自來水公司宜辨識管網制水閥的關鍵性，執行有效的維護工作。然而管網系統中制水閥數量眾多，且管線的連通特性複雜，造成制水閥關鍵性分析的困難，本研究因而在第三章提出制水閥關鍵性的分析程序。由於制水閥的損壞機率較低，多個制水閥同時損壞的狀況較不可能發生，且損壞擴張以第一層的影響最大，為有效分析管網連通結構對制水閥設置損壞影響關鍵性的影響，提出一僅基於管網制水閥分區連通性的制水閥連通關鍵性分析程序。由於此基於制水閥分區連通性的分析程序，不需考量損壞可及路徑與其損壞機率，所以執行效率較高，即使分析具近萬個制水閥的複雜管網系統，亦可在合理的時間內完成，因此可整合在所發展的管網損壞分析決策支援系統中，輔助水公司分析管網連通結構與制水閥的關鍵性。在此提出根據制水閥分區間的

連通特性，以制水閥損壞情況下所造成的平均停水損壞擴張影響量為制水閥的連通關鍵指標(Valve Connectivity Criticality Index, VCCI)，個別制水閥的連通關鍵指標可以下式估算之：

$$VCCI = \frac{\sum_{i=1}^n (E_T - e_i)}{n} \quad (5-1)$$

其中，VCCI 為制水閥的連通關鍵指標值； n 為直接鄰接制水閥的制水閥分區總數； E_T 為制水閥及所有鄰接制水閥分區均關閉時所造成的用水衝擊量； e_i 為鄰接制水閥分區 i 個別關閉所造成的用水衝擊量。

當制水閥損壞時，將擴張其相鄰分區的損壞關閉影響，其擴張影響量為 $E_T - e_i$ ，因此該制水閥損壞造成的平均損壞影響量可以式(5-1)計算之。計算程序則如圖 5.5 所示，對管網中任一個制水閥，首先找出所有與該制水閥鄰接的制水閥分區，並先估算當制水閥損壞情況下，所有鄰接制水閥分區一併關閉所造成的損壞影響量 E_T （即當分析制水閥損壞時的總影響量），接著計算每一個鄰接制水閥分區個別關閉的損壞影響量（即分析制水閥正常運作下的影響量），最後則以式(5-1)計算制水閥平均損壞擴張影響量。針對每一個制水閥，均以上述程序計算平均損壞擴張影響量，以決定個別制水閥的連通關鍵性。

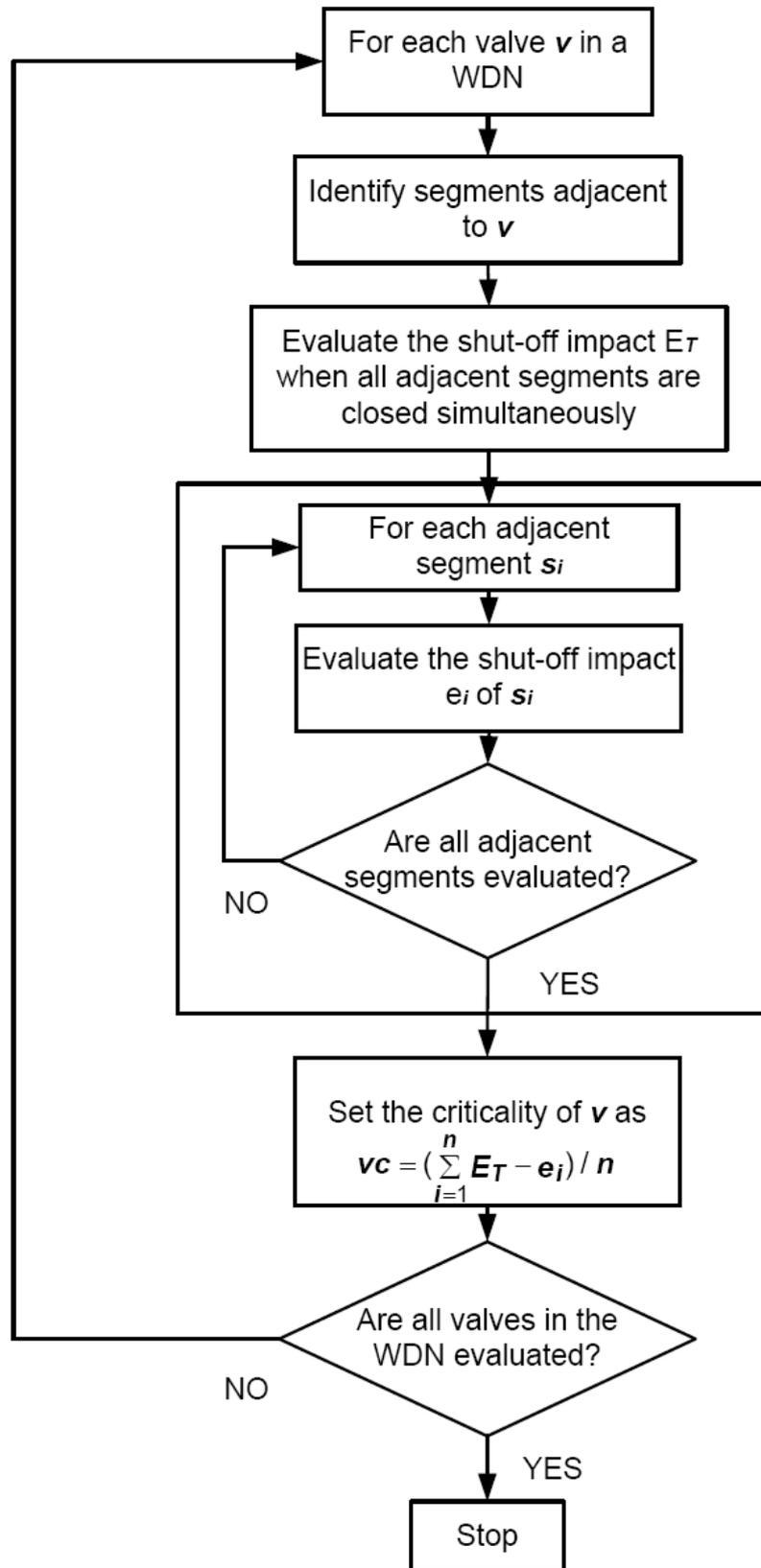


圖 5.5 基於連通性之制水閥連通關鍵性分析程序

5.6 網路地理資訊分析介面模組

在一般的管網決策分析過程中，必須相當頻繁的分析管網連通等具有空間屬性的大量資訊，而所分析出的影響衝擊也具有空間屬性，比如管網取水節點的損壞影響衝擊可能隨著空間位置的不同，而有不同的影響分佈，此類具有空間屬性的決策資訊，應該藉由地理資訊系統來有效的呈現其空間位置與相對關係。

管網損壞分析管理決策系統發展一以地理資訊系統為基礎的管網空間資訊呈現分析與操作模組，以圖形介面呈現複雜的管網系統，便利各類管網決策分析，提升管網決策效率，而其他相關的地理資訊圖層，如道路或建築物圖層，亦可直接呈現在所發展的介面模組中，而使決策資訊更為完整。

以往的線上地理資訊系統多透過 CGI(common gate interface) (W3C, 2008)來溝通傳遞地理圖像資訊，除了較沒有效率外，亦較不易發展直覺化的管網操作功能，因此本研究採用以 JAVA 所發展的公用的線上地理資訊系統自由軟體 GeoTools (Geotools PMC, 2006)來發展地理資訊模組，該以物件架構為基礎的地理資訊套件，可提供各類地理資訊分析所需的各項功能，使得決策支援系統在接收到儲存在伺服端的管網系統資訊，並轉換為各類管網物件之後，在使用者端執行管網地理資訊的各類分析演算，避免與伺服端經常性的連結互動，以提升決策效能。除了具有空間屬性的管網資訊與分析結果可透過管網地理資訊系統介面的呈現操作，對於不具空間屬性的各類分析資訊，則應用以 JAVA 發展的 JFreeChart (Gilbert and Morgner, 2008)圖形報表產生公用程式套件，發展統計分析報表模組，便利各類綜合性的決策資訊的呈現分析。該套件與上述的公用地理資訊套件具有同樣的特性，可在客戶端直接執行，分析各類必須的決策資訊，提升決策輔助效能。

5.7 管網決策支援伺服器系統

管網損壞分析決策支援系統的各類損壞水力模擬，皆以 Rossman (2000) 所發展的管網水力模擬模式 EPANET2 模擬分析。由於水力模擬通常需要較大量的計算資源，容易對一般決策支援系統用戶端造成系統負擔，因此為減輕用戶端的決策運算負擔，提升系統輔助運作效率，管網決策支援系統中亦發展整合一個在伺服器端運作的管網決策支援伺服器系統，以負責執行各類較為複雜或者需要較多運算資源的決策分析。所有由決策支援用戶端傳送過來的決策分析需求，將會啟動伺服器端的各類決策分析程序，如管網損壞水力影響模擬等。其中管網損壞水力影響模擬等需大量計算的分析程序，皆以 C 語言為基礎，結合 EPANET2 所提供的管網水力模擬工具發展分析模組，以提升決策模擬效能。

伺服器端分析出的各類結果，則轉換為固定的格式資訊回傳決策用戶端，並將各類決策結果透過上節所述的管網地理資訊介面模組，呈現在管網空間介面上與各類統計報表中。且由於同時間，可能會有多於一個的管網決策支援用戶端與管網決策支援伺服器端連結以執行決策模擬，因此管網決策支援伺服器端，需有足夠的能力執行同時多個決策模擬程序，以服務大量的決策輔助需求。因此，決策伺服器端結合 JAVA 程式語言的多執行緒 (multi-thread) 的運作機制，接受來自多用戶端的多個決策模擬需求，對個別的決策模擬需求皆產生一個相對應的個別執行緒，負責其間所需執行的決策分析程序與保留相對應的決策結果資訊，並在分析結果傳遞給用戶端之後結束該執行緒。管網決策分析伺服器端即可有效的輔助遠端同時的眾多決策需求，以提升決策伺服器端的輔助決策彈性與能力。

管網決策分析用戶端與伺服器端間的連結透過 JAVA SOCKET (Sun, 2008) 所建構的網路通道來完成。藉由這個客戶端-伺服器端的運作架構，較簡單或運算需求較低的決策分析可在客戶端直接執行，而較複雜或運算需求較大的決策模擬分析則可分配到伺服器端執行，以此架構可有效配置調整決策演算資源，提升決策支援系統的輔助決策效能。

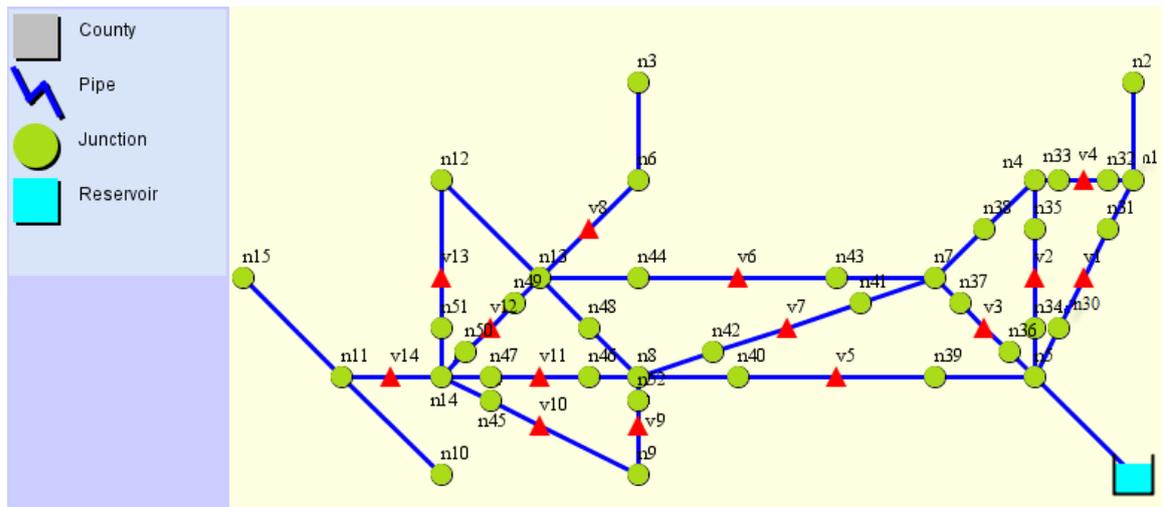
5.8 案例研討

為測試所發展的管網損壞分析決策支援系統，是否可有效的輔助分析管理實際管網系統的損壞事件，因而採用兩個假想案例執行測試，包含一個小型的假想案例，與另一個從實際管網系統資訊建構出近似實際管網狀態的合理管網案例，該案例如圖 3.12 所示，其詳細資訊則如 3.6.5 節中所述。伺服器端在具有 Pentium-IV 2.4G CPU, 1000MB RAM 的 LINUX 作業系統下運作，而用戶端則在具有 Intel Centrino Core Duo 2 T5500, 1000MB RAM 的 WINDOWS XP 系統下，以 Internet Explore 6 執行。

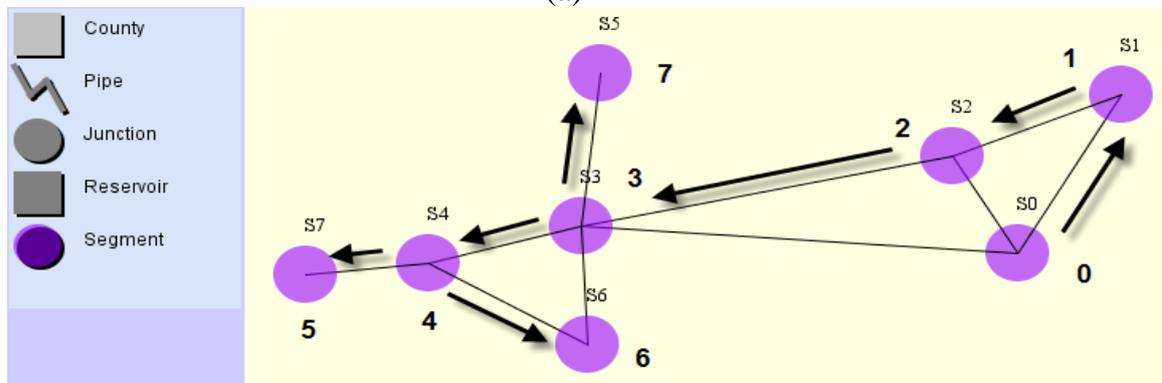
小型假想案例

首先以小型的假想案例測試管網決策支援系統的分析功能，該假想案例如圖 5.6(a)所示。其中圓形的部分表示管網的節點，三角形的部分表示制水閥所在的位置，最右下角的方形則為蓄水槽。經過系統的管網結構分析模組的判識演算後，可轉換成如圖 5.6(b)所示的制水閥分區輔助網路，判別管網中的所有制水閥分區，該演算判識過程從蓄水槽開始擴張搜尋，一直擴張到遇到制水閥節點則停止，直到無法擴張為止，比如從蓄水槽開始的搜尋會在遇到制水閥 v1, v2, v3, 以及 v5 而停止，則第一個制水閥分區 S0 即被判識出來。這個過程則從停止搜尋的制水閥節點開始重複上述的擴張搜尋演算，直到管網中的所有管線與節點都被劃分到所屬的制水閥分區為止。

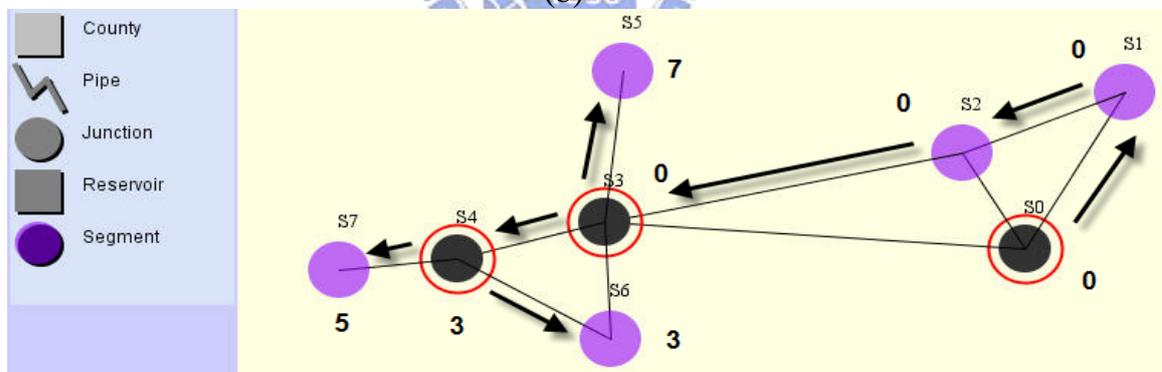
一旦制水閥分區輔助網路被判識建構之後，則決策系統即可判別該網路中的關鍵制水閥分區。判斷演算過程需要決定每個制水閥分區的層數 (level number, Ln) 與連接數(connection number, Cn)，以決定制水閥分區之間的連通關係，該模組根據第三章所改善發展的關鍵制水閥分區判識演算程序來判識決定。其中 Ln 為從包含蓄水槽的制水閥分區 S0 開始搜尋，優先尋訪連接目前制水閥分區的第一個連接的下游制水閥分區，並重複該程序直到網路中不再有其他尚未尋訪過的制水閥分區節點為止，其搜尋的次



(a)



(b)



(c)

圖 5.6 (a) 小型假想管網案例；(b) 經辨識轉換之制水閥分區輔助網路，其中制水閥分區旁的數字為 level numbers；(c) 經辨識出的關鍵制水閥分區，以雙圓形標示之，各制水閥分區旁的數字為 connection numbers。圖中以箭頭標示演算搜尋的路徑。

序為 L_n ，如圖 5.6(b) 中各制水閥分區節點旁所標示的數字，並以具有箭頭的線段標示該演算搜尋程序。遵循上述的程序，從 S_0 開始，往下尋訪所連接的第一個制水閥分區，直到遇到 S_7 ，由於該制水閥分區已經沒有下游的制水閥分區。因此，下一階段所搜尋的為跟 S_7 具有同樣的上游制水閥分區在同一階層的旁支制水閥分區 S_6 。由於該制水閥分區同樣的沒有其他下游制水閥分區可以往下尋訪，因此在往上游追溯更上游的制水閥分區 S_3 ，並確認其是否仍有其他可以尋訪的下游制水閥分區，因此接續尋訪到 S_5 。同樣該制水閥分區沒有其他下游制水閥分區，因此在重複上述的往上游回溯的機制，直到回到最上層一開始搜尋的制水閥分區 S_0 。由於已經沒有其他可以再尋訪的其他制水閥分區了，因此結束該搜尋程序。

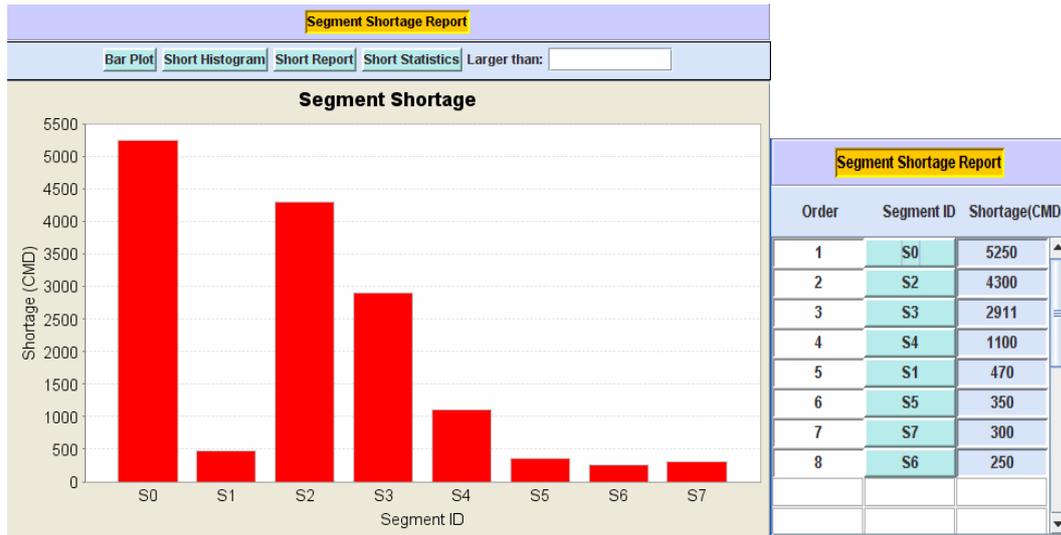
C_n 的判識過程，一開始先設定所有的 C_n 的數值與所對應的 L_n 相同，接著從上述搜尋程序中最後尋訪到的制水閥分區開始，依照搜尋程序的順序往前溯，以這個順序決定個別制水閥分區的 C_n ，並將上述搜尋程序經過路徑所建立的搜尋樹上的制水閥分區建立其間的連接順序關係，並以上下游制水閥分區來表示該搜尋樹中間的搜尋順序與連接關係。而若制水閥分區間的連通關係存在於原本的輔助網路中，而並未存在上述的搜尋樹中，則以鄰接制水閥分區稱呼之。

該演算程序從最後尋訪的制水閥分區 S_5 開始，除了該制水閥分區的直接連接上游制水閥分區 S_3 外，並沒有其他的鄰接制水閥分區，因此該制水閥分區的 C_n 與 L_n 相同為 7。決定好 S_5 的 C_n 之後，依照上述說明的程序，下一個決定 C_n 的制水閥分區為 S_6 ，該制水閥分區有一個除了上游制水閥分區 S_4 之外的鄰接制水閥分區 S_3 ，因此比對現在 S_6 的 C_n (6) 與鄰接制水閥分區 S_3 的 L_n (3)，以其最小值為 S_6 的 C_n ，因此重設為 3。接著則回溯到 S_7 ，由於該制水閥分區也沒有其他鄰接的制水閥分區，因此其 C_n 維持不變為 5。下一個則回溯到 S_4 ，由於其有兩個非上游制水閥分區的下流制水閥分區 S_6 與 S_7 ，因此其 C_n 被重設為 3，其為 S_6 與 S_7 的 C_n 中最小的。同樣的，對於制水閥分區 S_3 ，有兩個搜尋過程中的下游制水閥

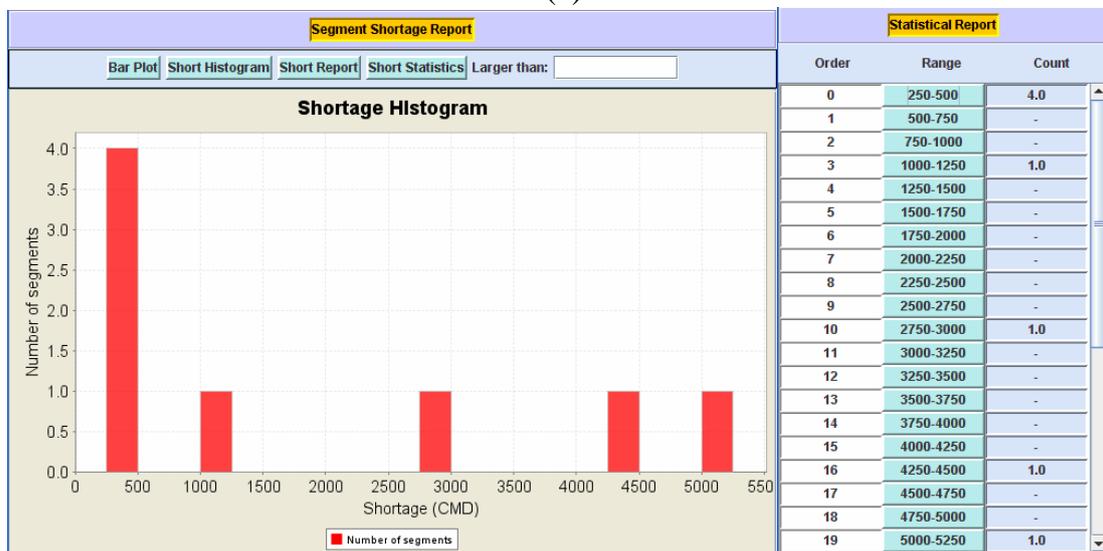
分區 S4 與 S5，以及兩個其他鄰接制水閥分區 S0 與 S6。因此比較 S6 與 S6 的 Cn 以及 S0 與 S6 的 Ln，並以其最小值為 S3 的 Cn，因此設定為 0。上述演算程序重複執行，直到所有制水閥分區的 Cn 都被決定為止

當所有的制水閥分區的 Ln 與 Cn 都被決定後，則若任一制水閥分區的 Ln 小於或者等於該制水閥分區任意連接制水閥分區的 Cn，則該制水閥分區即為關鍵制水閥分區。以制水閥分區 S3 為例，其 Ln 為 3，等於該制水閥分區所連接的制水閥分區 S6 的 Cn，因此該制水閥分區 S3 為關鍵制水閥分區。制水閥分區 S0 也是同樣的狀況，因此也是關鍵制水閥分區。另外，S4 的 Ln 為 4，其小於 S7 的 Cn 6，因此 S4 也是關鍵制水閥分區。至於其他制水閥分區則因為並沒有其所連接的制水閥分區的 Cn 比該制水閥分區的 Ln 大，因此皆不為關鍵制水閥分區。

因此，個別制水閥分區的停水損壞分析與關閉缺水影響模擬，即可根據初步轉換出的制水閥分區輔助網路與其中的關鍵制水閥分區來執行，其損壞關閉衝擊模擬結果如圖 5.7(a)所示。對於位在網路尾端的制水閥分區如 S1,S5,S7 與 S7，由於這類制水閥分區損壞關閉僅能影響到該區域內部的用戶需水量，因此其損壞模擬衝擊量通常較小。但是相對的，對於關鍵制水閥分區而言，如 S1,S3 與 S4，當關閉這些制水閥分區時，不僅會影響到本身區域內的用戶需水量，且會擴張到下游被一同關閉的區域用水量，因此而增加其個別的損壞關閉影響衝擊量。比如關鍵制水閥分區 S4 損壞關閉之後，將會造成 1,100CMD 的缺水影響衝擊量，其包含下游一併關閉的 S4 與 S7 內的用戶用水量。因為這類一併關閉的擴張影響區域，所以通常關鍵制水閥分區的關閉損壞影響量，較一般制水閥分區的損壞影響為大。然而，有時候非關鍵制水閥分區的制水閥分區也有可能較大的關閉損壞衝擊量，特別是那些較為接近供水制水閥分區的制水閥分區。以圖 5.6(b)中的制水閥分區 S2 為例，雖然該制水閥分區不是關鍵制水閥分區，但是在圖 5.7(a)所顯示的損壞影響衝擊量則相當的大，因為關閉制水閥分區 S2 後，許多從供水節點到其他下游制水閥分區的供水路徑被截斷，



(a)



(b)

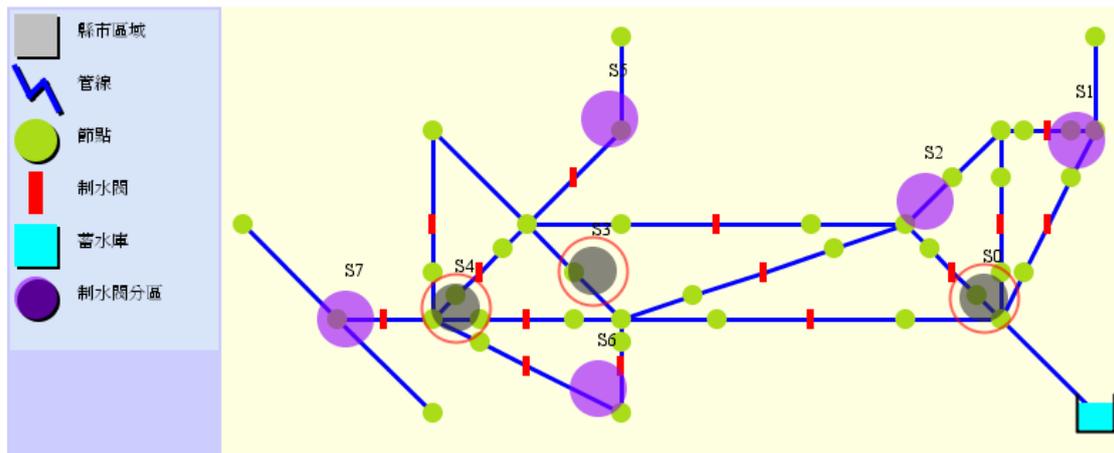
圖 5.7 假想管網案例之(a) 各制水閥分區之損壞缺水衝擊模擬結果，與其損壞衝擊排序報表；(b) 損壞缺水衝擊部分統計長條圖與統計報表。

因此雖然關閉 S2 並沒有直接關閉其他區域的供水量，但因可行供水路徑數量的減少，而影響管網系統的供水能力，造成較大的關閉影響缺水量。而圖 5.7(b)則顯示出關閉損壞影響缺水量的統計分佈圖，以便利自來水事業人員，快速判識出在該管網系統具有較大損壞影響衝擊的制水閥分區，以利後續之管理改善。

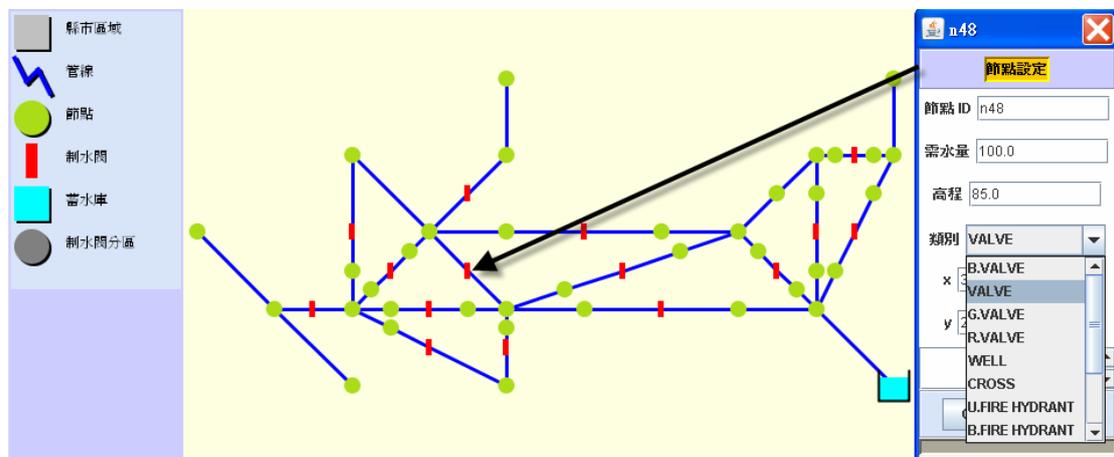
制水閥設置調整分析

為有效決策恰當的管網連通性改善策略，所發展系統亦允許改變各節點的屬性，以輔助改善原始的管網可靠度。如圖 5.8 所示，為降低關鍵制水閥分區 S3 的損壞影響，必須改變原始制水閥分區輔助網路的連通特性，減少 S3 所包含的管件。因此在 n48 新增制水閥，改變原始的輔助網路，將原本損壞影響過大的關鍵制水閥分區 S3，切割為兩個較小的制水閥分區 S11 與 S12。如此可以避免 S3 損壞，而關閉過多下游供水分區(包含 S4,S5,S6,S7)，造成過大的損壞影響衝擊。

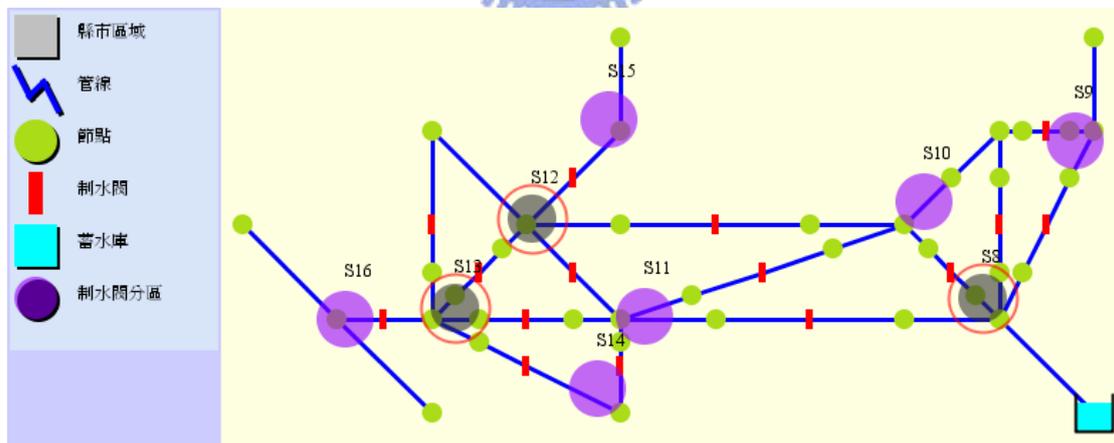




(a)



(b)



(c)

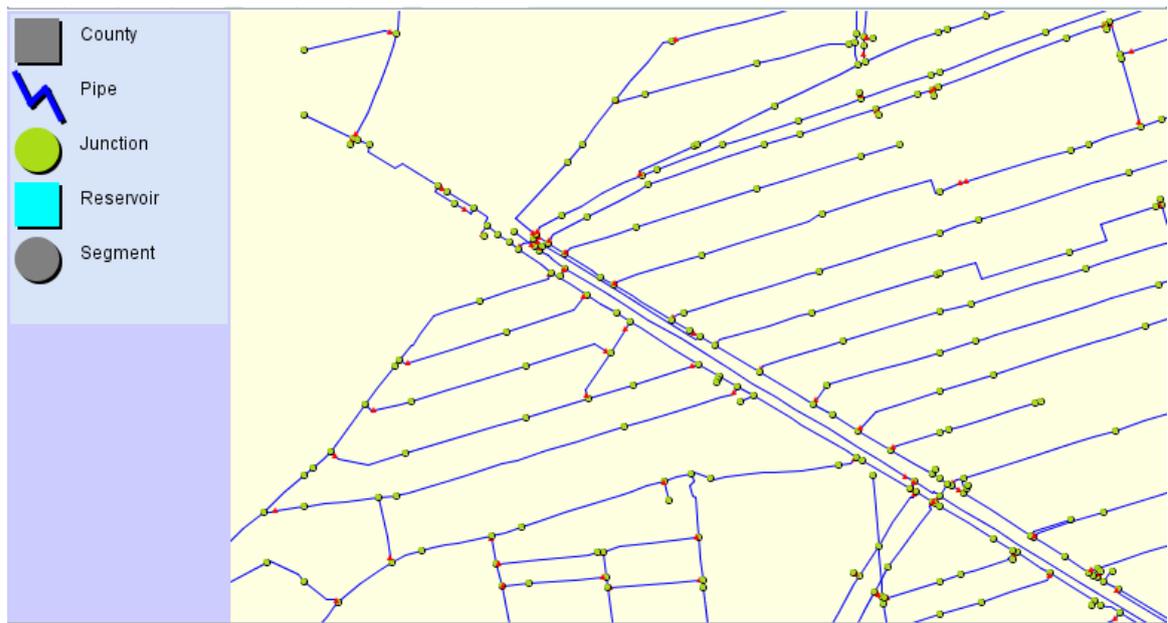
圖 5.8 調整節點屬性以建構較可靠的網路系統。(a)原始輔助網路判識結果；(b)在節點 n48 新增制水閥；(c)新輔助網路判識結果。

大型管網案例

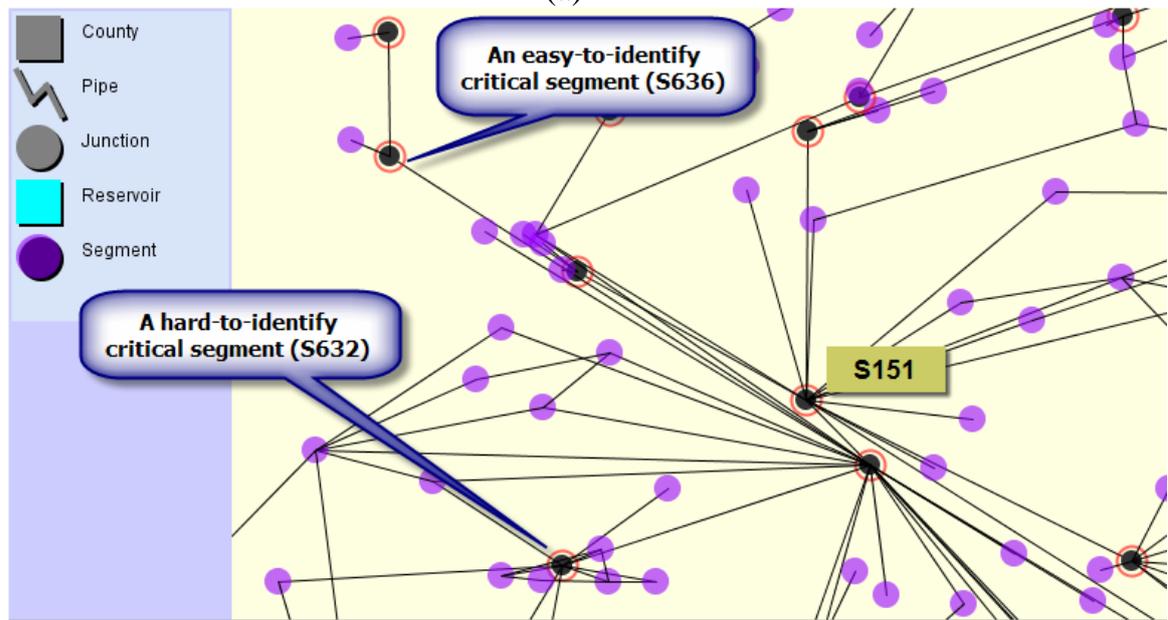
進一步則以系統分析評估較大型的管網案例。同樣為便利後續的各項損壞分析與模擬，原始的管網系統亦利用系統內部的管網結構分析模組判識轉換為制水閥分區輔助網路系統，其結果如圖 5.9(b)所示。經判識出的制水閥分區以圓形標示之，其中關鍵分區的部分則以雙同心圓來表示，比如在圖 5.9(b)中的制水閥分區 S632 與 S636 即為之。而制水閥分區間的連通關係則以黑色實線表示。

由這些連接制水閥分區的連線，可以初步判斷該制水閥分區的關鍵程度。如果所連接的連線數量較多，則表示該關鍵分區與許多其他區域皆有連通，可能為一個較重要的供水路徑，或者包含重要的主要管線等，因此其損壞關閉時，將會造成比較大的損壞影響。而通常此類關鍵制水閥分區在原始的管網系統中，通常較難以人工的方式判斷，主要是因為管網系統的管線數量眾多，其連接關係通常又很複雜，而制水閥所在的位置亦非常不規則。即使是從經過系統轉換建立的制水閥分區輔助網路來判斷，除了如圖 5.9 中位在尾端的關鍵制水閥分區 S636 較好判斷之外，其他如關鍵制水閥分區 S632，則很難從轉換出的制水閥分區輔助網路中判斷出。而所發展的管網結構分析模組則可以自動化的執行判斷，進而加快管網損壞影響的分析效率。

案例管網系統則可以根據上述所轉換建立出的制水閥分區間的連通拓撲關係(topology)，來初步判斷個別制水閥分區損壞關閉所可能造成損壞衝擊，決定個別制水閥分區損壞可能一併關閉的下游制水閥分區，因此管網決策支援系統可協助執行此類判斷，對於如圖 5.10 中的制水閥分區 S151 而言，其關閉損壞影響的擴張下游區域則可有效的判斷出來，如圖中以具有虛線邊界較大的圓形所標示的，即為因為關鍵制水閥分區 S151 損壞關閉所影響的下游區域。若要以人工判別的方式執行此類損壞影響擴張程序，將非常繁複且容易發生錯誤，而藉由所發展的管網結構分析模組可以很有效率的處理任何複雜的實際管網案例。此類個別制水閥分區損壞關閉



(a)



(b)

圖 5.9 (a) 大型測試管網合理案例之部分管網；(b) 同部位管網經判識轉換之部分制水閥分區輔助網路系統，其中關鍵分區以雙同心圓標示。

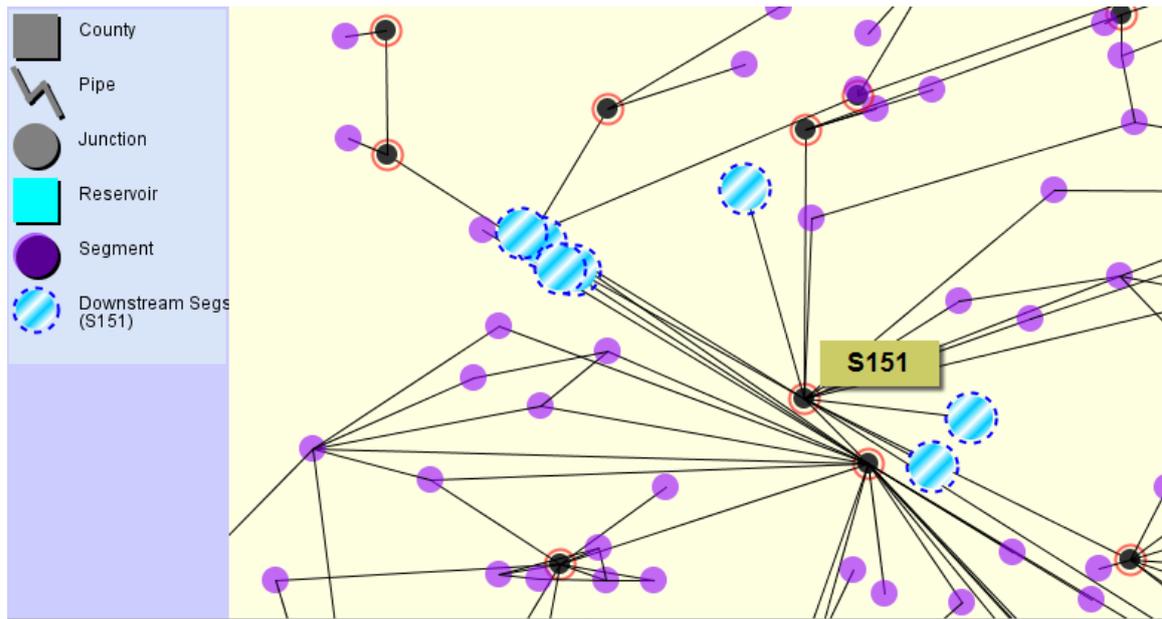


圖 5.10 關鍵制水閥分區 S151 損壞關閉分析，判斷受影響的下游制水閥分區，以具虛線邊界的較大圓形標示之。

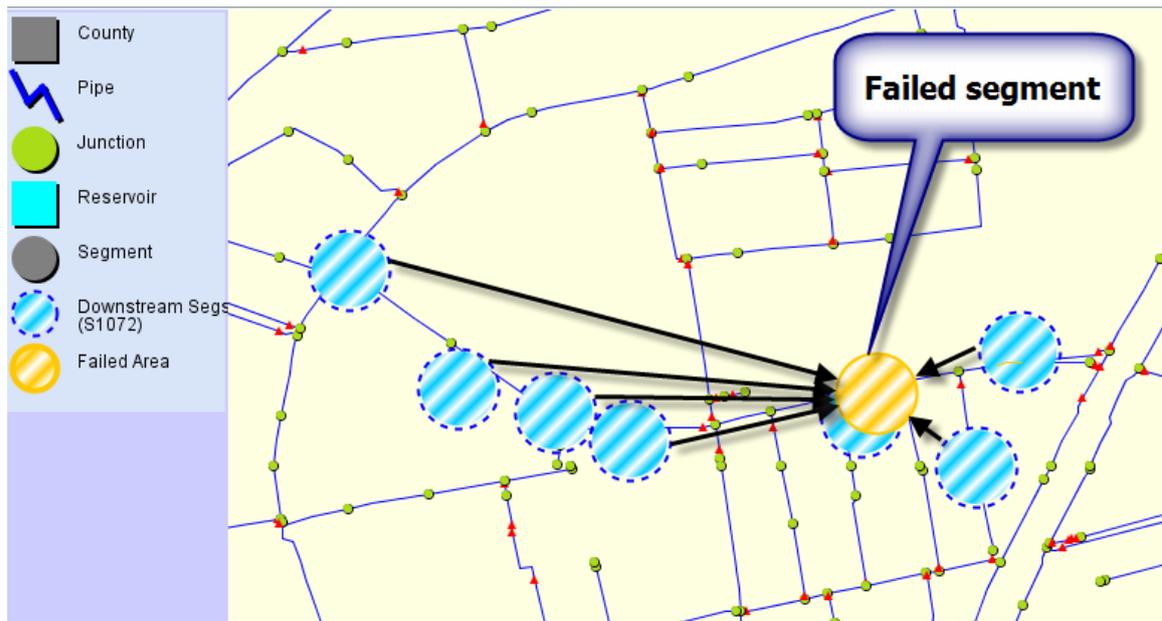


影響判識結果，可供管網可靠度分析與改善上的應用。比如，如果要增設一個新的管線以減少關鍵分區的數量或影響，則上述的判識結果將是一個很好的決策參考指標，以輔助找出具有較大損壞衝擊的關鍵制水閥分區，當作適當的管線增設的候選制水閥分區區位，以利於提升管網供水的可靠度。

系統輔助分析個別損壞事件，以管線 P1637 損壞事件為例，其結果如圖 5.11 所示。損壞關閉維護所影響的影響管線，則如圖 5.11(b)中間的報表所示。損壞分析結果如圖 5.11(a)所示。損壞管線直接關閉的制水閥分區以斜線填滿的較大圓形標示，而因其關閉所造成的損壞擴張下游制水閥區域則以虛線邊界斜線填滿的較大圓形表示之。圖中的箭頭用來表示損壞擴張下游制水閥區域，受該損壞制水閥分區關閉影響。以圖 5.11 所分析的損壞事件為例，由於其所在的管網連通關係較為複雜，且其擴張影響範圍較大，因此在實際損壞影響評估過程中亦較難以人工方式判識。

該損壞事件，經以伺服器端的管網決策支援伺服系統連接，執行管網損壞水力影響模擬，以更合理的評估個別制水閥分區的損壞影響衝擊，其分析模擬結果如圖 5.12 所示。其中個別的取水節點皆以漸層的颜色表示該節點的損壞缺水比例，如果為全黑色表示完全缺水，若為白色則表示並沒有任何的影響缺水。其中在關閉維修的損壞制水閥分區與下游損壞擴張的制水閥分區中的取水節點為全部缺水，因其供水來源被完全截斷。管網中的其他節點雖然沒有完全缺水，但因某些供水通道被關閉而受到影響。比如那些在損壞區域旁邊而距離供水節底較遠的區域，或者距離供水加壓站較遠的取水節點，都有受到比較明顯的損壞影響，表示管網供水能力明顯受損壞事件發生而有顯著影響，因此管網損壞評估應藉由合理的水力模擬，才可有效評估。

管網損壞分析決策支援系統可快速分析較複雜的水力影響，且以管網地理資訊介面呈現，可提供決策者有用的損壞分析空間資訊，輔助檢視系統的較脆弱的區位，便利建立有效的維護改善策略。



(a)

Failed Pipes		Disabled Pipes			Peripheral Valves		
Number	ID	Number	Segment ID	Pipe ID	Number	Segment ID	Valve ID
1	P1637	1	S1613	P1632	1	S1613	J1258
		2	S1613	P1631	2	S1613	J1256
		3	S1613	P1635	3	S1613	J1246
		4	S1613	P1637	4	S1613	J1441
		5	S1613	P1638	5	S1613	J1440
		6	S1613	P1639	6	S1613	J1443
		7	S1613	P1640	7	S1613	J1444
		8	S1613	P1641	8	S1613	J1235
		9	S1613	P1642	9	S1613	J1445
		10	S1613	P1643	10	S1613	J1446
		11	S1613	P1644			
		12	S1613	P1646			

(b)

圖 5.11 (a) 損壞事件關閉維修的直接損壞影響區域，以較大的斜線填滿的圓形標示，及其所影響的關閉擴張下游制水閥分區，以具虛線邊界斜線填滿的較大圓形標示之；(b) 損壞影響資訊(由左到右)，損壞維修管線、關閉區域包含管線與周圍制水閥。

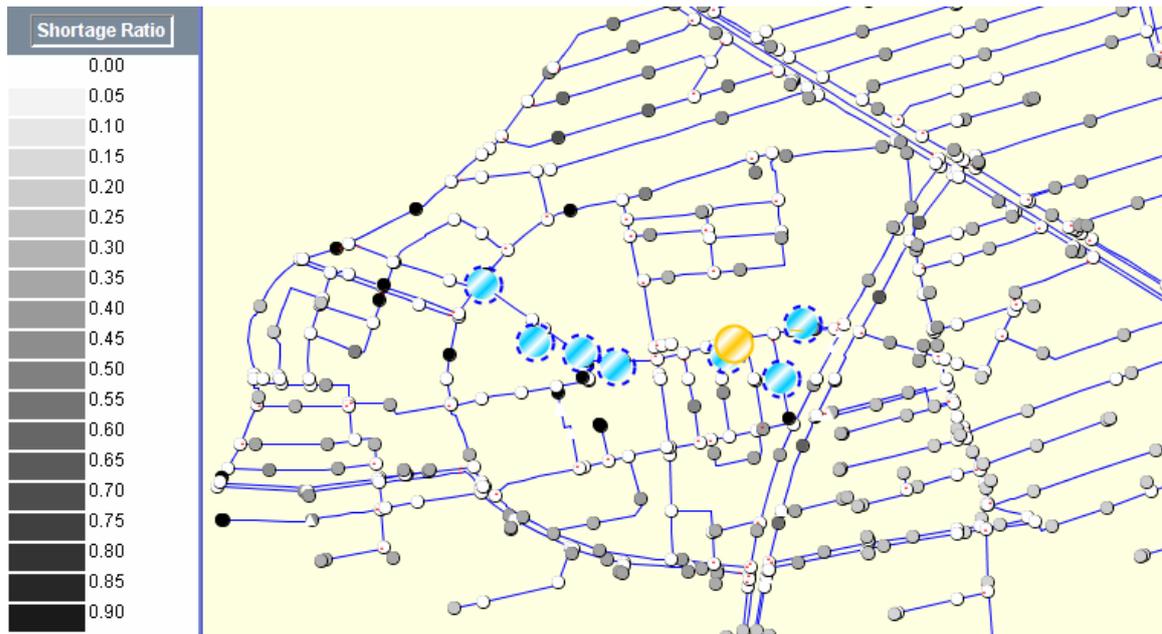


圖 5.12 損壞事件所造成管網所有需水節點的供水滿足模擬比例結果。



為研擬管網合理的損壞改善策略，應執行管網整體性的損壞影響分析，其結果如圖 5.13 所示。實際管網系統的制水閥分區數量較大，因此以統計報表模組將分析結果轉換成有意義的圖表，如圖 5.13(a)所示，由制水閥分區的影響衝擊直條圖，可以大略瞭解制水閥分區損壞影響衝擊的分佈情形。大部分的制水閥分區關閉所造成的損壞影響皆不是很大，不過某些制水閥分區的損壞則明顯較其他區域為大。

其中制水閥分區 S0, S1 與 S7 的損壞關閉都將造成大於 100,000CMD 以上的損壞影響缺水量。這些重要的制水閥分區，包含輸送供水節點的水到其他區域的重要主要管線或包含供水節點，因此造成較大的損壞缺水影響。而圖 5.13(b)所示的直條圖呈現在不同損壞影響缺水量區間的制水閥分區數量。由該圖可以發現，損壞影響缺水量的分佈有兩個主要集中的量值，其較大者可能為關鍵制水閥分區所造成，而較小的部分可能為其他類型的制水閥分區損壞所造成。

另外具有較大損壞影響的制水閥分區，為包含主要幹管的關鍵制水閥分區，如制水閥分區 S32，其損壞影響缺水量為 8,448CMD。其他亦有些非關鍵分區，但有較大的損壞影響缺水衝擊，如制水閥分區 S33，其損壞影響缺水衝擊量為 4,884CMD，這類重要的制水閥分區通常較不容易從原始的管網系統中辨識出來，但在轉換建立的制水閥分區輔助網路中，則可以根據其連通關係執行損壞模擬，而快速有效的判別出來。這些損壞分析模擬的結果，將可以輔助管網管理維護者決定有效的管網改善與維護策略，提升自來水管網系統的可靠度。

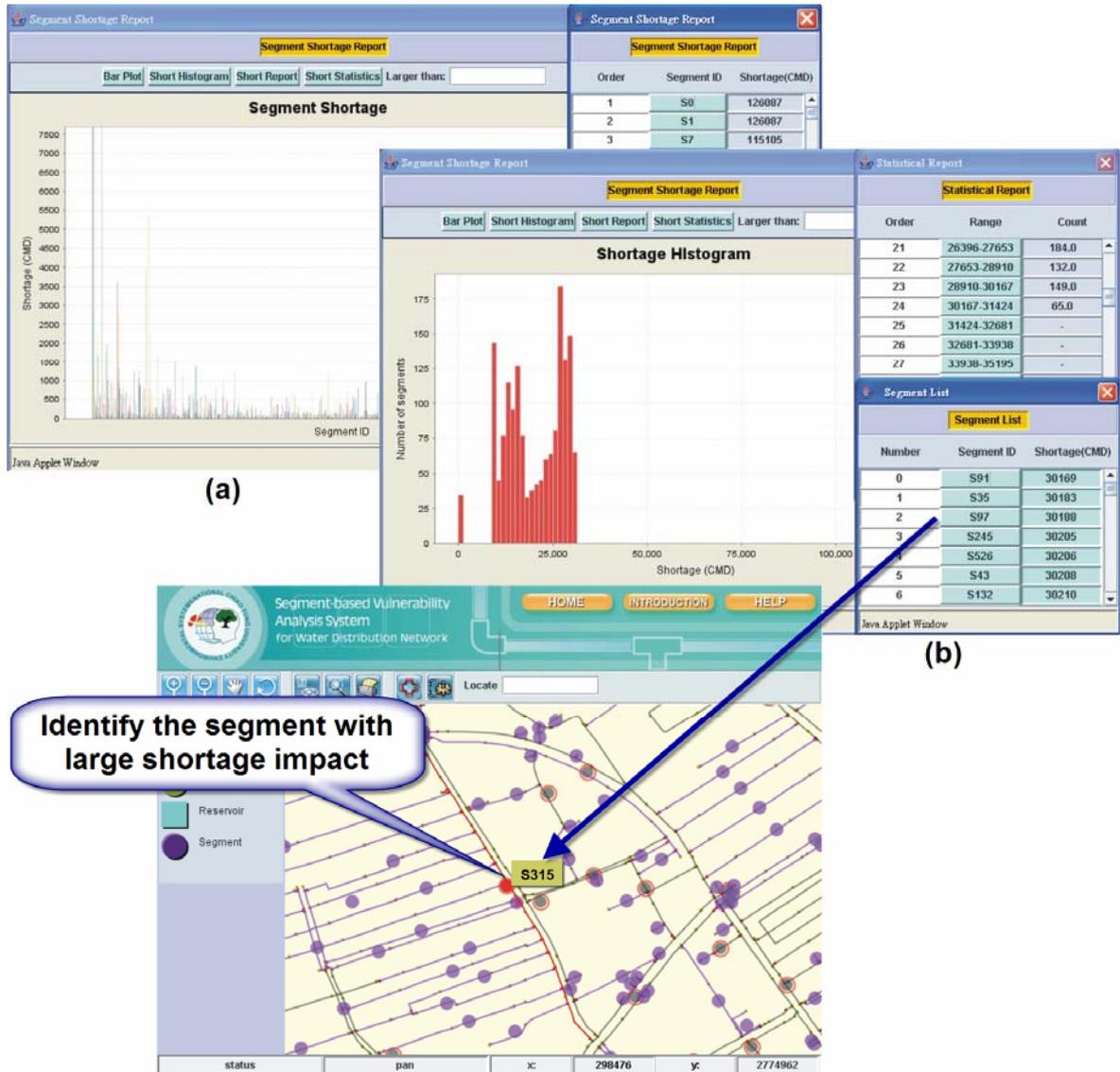


圖 5.13 (a) 管網系統中個別制水閥分區損壞關閉的影響缺水量，與(b) 影響缺水量的統計直條圖與報表。

5.8.1 停水分析

執行管網停水維護，可以所發展管網停水分析模組協助管理案例管網的管線損壞事件，其運作畫面如圖 5.14 所示。為便利停水分析判識，將不同的節點類型以不同地理資訊圖層顯示，節點樣式則如圖左所示。由於管網停水分析與後續的制水閥連通關鍵性分析皆以制水閥分區為分析單位，因此原始管網系統所對應的制水閥分區輔助網路亦在啟動停水分析系統時一併判識產生，以作為後續分析的基礎。經制水閥分區判識演算後的部分管網如圖 5.15 所示。

管線 22697_1 停水維修工作，經執行停水影響分析，其結果如圖 5.16 所示。停水分析模組首先將包含該損壞管線的直接停水維修制水閥分區判識出，如圖 5.16(a)箭頭所指的分區，並利用制水閥分區輔助網路的連通關係，判斷是否有因維修分區停水維修，而關閉下游供水分區，並以虛線較大圓形表示之，如圖 5.16(a)所示，直接停水分區為的右上方的那些制水閥分區。另外制水閥分區關閉將影響到相鄰的制水閥分區，這些相鄰分區不會直接被截斷供水，如圖 5.16(a)中具虛線顏色較淺的較大圓形所示。而執行停水作業所需關閉的周圍制水閥，與停水作業將造成的直接維修分區影響用水量、下游被關閉的影響用水量以及間接影響分區用水量，與這些受影響制水閥分區所包含管線等資訊，如圖 5.16(b)所示，可以停水分析報表功能模組列出，輔助評估損壞維修事件對於供水用戶的影響。

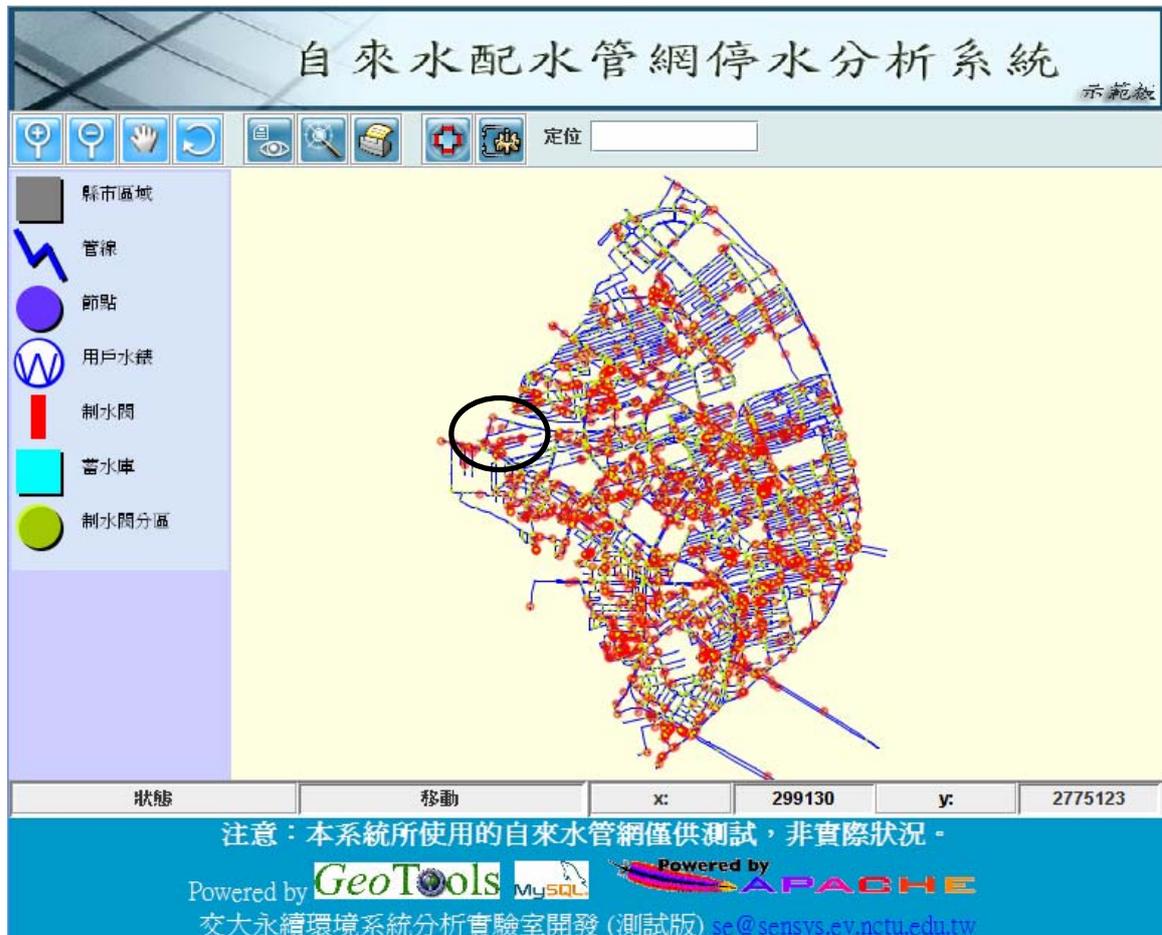


圖 5.14 管網停水分析管理系統畫面



圖 5.15 管網停水分析示範範例部分管網





(a)



(b)

圖 5.16 (a) 管線 22697_1 損壞停水關閉造成之各類影響制水閘分區與(b) 停水分析資訊報表。

5.8.2 制水閥損壞擴張樹分析

當系統執行停水分析時，亦會因制水閥損壞而有擴張影響，故以擴張樹進行分析，在以前述管線 22697_1 損壞的制水閥損壞擴張影響，其分析結果畫面如圖 5.17 所示，其中左邊為制水閥損壞擴張樹的分析結果，右邊為相對應的損壞分析結果呈現在管網地理資訊介面的結果，其中關鍵制水閥分區仍以雙層圓圈圓形標示之。損壞擴張樹分析直接判識出該損壞管線所在的關鍵制水閥分區 S3980，並將因關閉損壞制水閥分區所造成的下游影響制水閥分區一併判識出，且以階層式的架構呈現管件損壞的影響關係，如圖 5.17 所示，S3980 的損壞將一併造成下游 S4324 等 9 個制水閥分區的關閉。另由於管網損壞維修需關閉邊界制水閥才能執行，因此損壞制水閥分區的邊界制水閥易直接在損壞擴張樹中判識顯示出，如圖所示的制水閥 v16711、v16777 及 v16805。

制水閥在實務操作上可能有無法正常運作情形，進而擴張損壞操作的影響範圍，雖然可以人工方式判斷下游應進一步關閉的制水閥，不過過程較為繁瑣而容易出錯，而擴張損壞的連通關係亦不易顯現。因此，損壞擴張樹分析模組亦發展制水閥損壞的動態分析程序。根據邊界制水閥的損壞情形，分析應進一步關閉的下游邊界制水閥與其所造成的損壞擴張影響制水閥分區。如圖 5.18(a)所示，制水閥 v16805 的損壞，將造成下游制水閥分區 S4325 的關閉，而為截斷整個損壞維修區域的供水，必須關閉進一步關閉另外的制水閥 v16781 與 v16782，而根據管網的連通性，下游的 S4668 與 S4966 亦將一併截斷供水。同樣的制水閥損壞動態分析程序可持續執行，一直到所有邊界制水閥可正常操作而成功截斷維修區域為止，如圖 5.18(b)所示。制水閥損壞擴張樹分析，可簡化管網的連通關係，直接判識呈現制水閥的損壞擴張影響，以輔助自來水公司評估管線損壞所可能造成的停水影響，提升管網損壞維修效率。



圖 5.17 應用管線損壞擴張樹分析管線損壞之範例畫面。箭頭所指為直接停水維修分區。





(a)



(b)

圖 5.18 (a)單一邊界制水閥 v16805 損壞擴張之損壞擴張樹結果，與(b)多層

5.8.3 制水閥連通關鍵性分析

所發展的 DSS 亦應用圖 5.5 的程序發展了制水閥連通關鍵性分析模組，案例中的制水閥節點雖多達 7840 個，但制水閥連通關鍵性分析仍可在數分鐘內完成分析，並以統計圖表顯示個別制水閥損壞的平均損壞擴張影響量分佈狀況，其統計直條圖如圖 5.19 所示，由圖可以發現損壞影響量分佈範圍相當廣，少數制水閥損壞有較大的連通關鍵性，特別大為極少數，因此圖形右邊的直條較不易辨識出來。為便利水公司人員檢視這些較關鍵的制水閥，以報表視窗顯示詳細資訊，如圖 5.20 所示。所有管網中制水閥的詳細清單與其相對應的損壞影響量值，並根據其連通關鍵性的重要次序依序從最關鍵的制水閥排列出來，結果如圖 5.21 所示，其中最關鍵的 7 個制水閥以方塊標示強調出來。

較關鍵的制水閥 v14901 空間輔助定位結果圖 5.22 所示，該類較關鍵的制水閥位在自來水淨水廠廠區內，並與從供水蓄水槽供應所有管網區域的唯一主要通道直接相鄰，該制水閥另外一邊相鄰的為範圍較小的分支管線，若是該管線損壞，需要關閉制水閥 v14901，當該制水閥損壞無法正常運作的情況之下，則將擴張損壞區域到蓄水槽的唯一供水通道上，因此將截斷所有管網用戶的用水量，所以該制水閥具有較大的損壞擴張影響量。相對而言，在供水唯一通道上的制水閥，則因為該鄰接區域的管線損壞將直接截斷所有其餘管網區域的供水，無論該制水閥是否損壞，皆已對管網系統產生極大的影響，因此該類制水閥的損壞並不會明顯擴增損壞影響量，其連通關鍵性反而不如 v14901 這類制水閥的重要。

除了上述在廠區而較關鍵的制水閥之外，其他與重要供水通道相鄰的制水閥可能因為損壞而擴張到重要的供水通道，因此造成明顯的損壞影響衝擊量，此類制水閥比如制水閥 v13922，其空間定位結果如圖 5.23 所示，若僅由原始管網管線配置圖很難判斷出此類連通關鍵性的制水閥，因此分析以該制水閥為邊界制水閥的損壞事件，透過制水閥損壞擴張樹分析，結果如圖 5.24(a)所示，箭頭指出制水閥 v13922 所在的位置，與該制水閥相

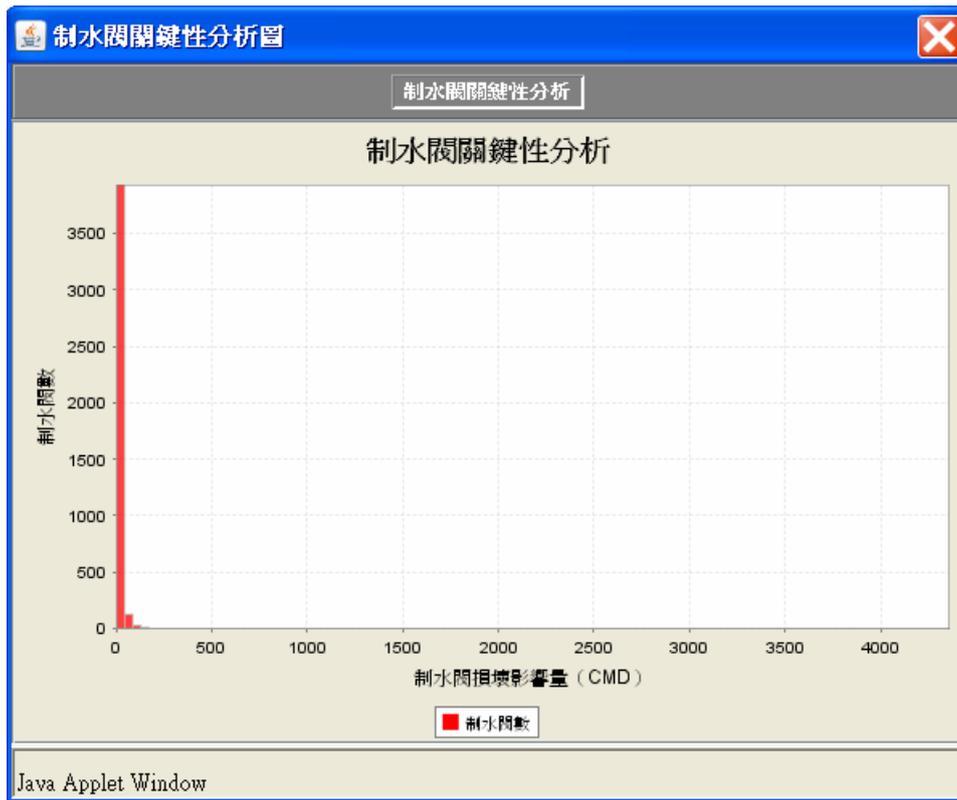


圖 5.19 制水閥連通關鍵性分析結果之損壞影響分佈統計長條圖。



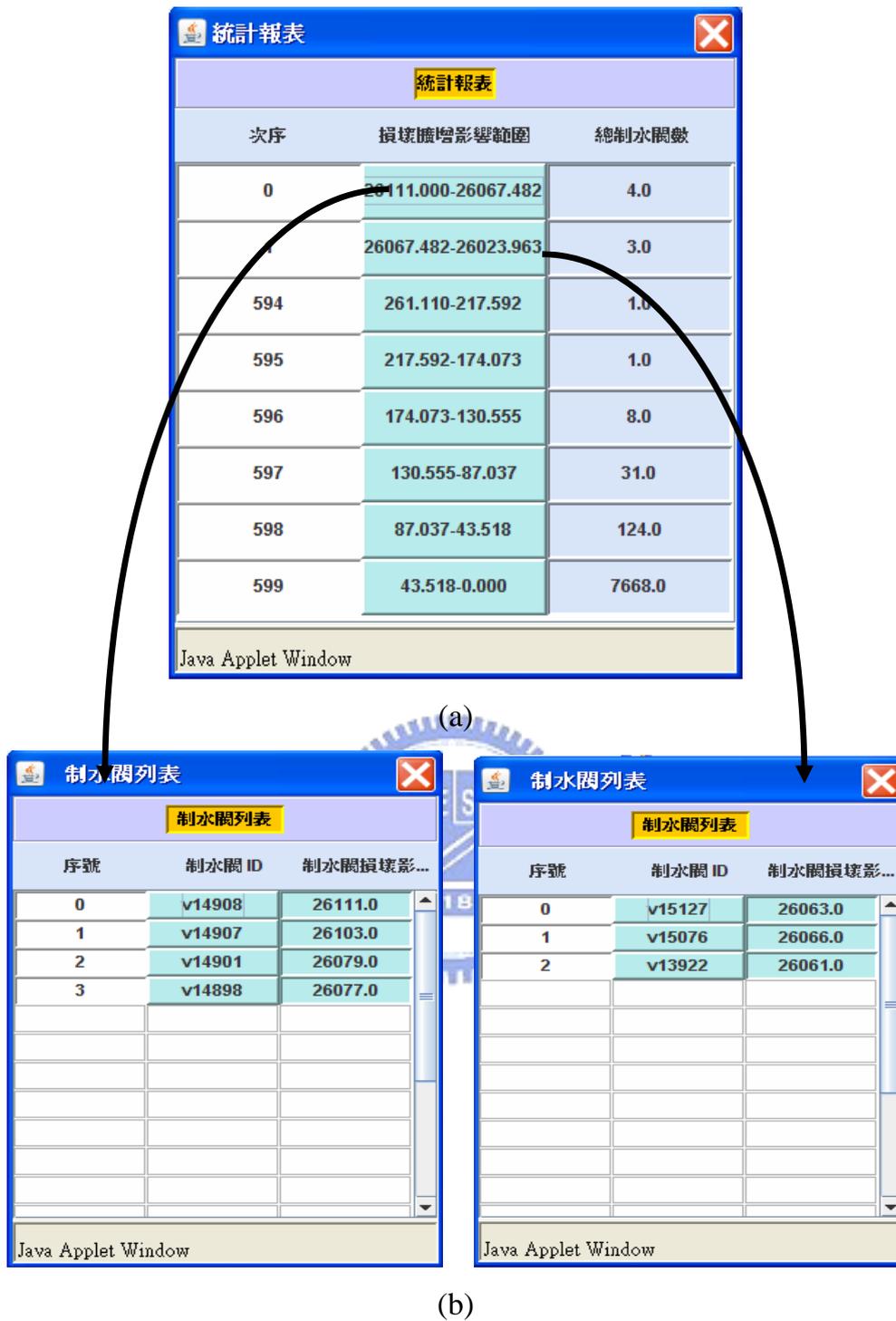


圖 5.20 (a) 制水閥連通關鍵性分析之損壞影響分佈統計報表，與(b)具較大連通關鍵性之制水閥列表。

制水閥列表		
制水閥列表		
序號	制水閥 ID	制水閥損壞影響量 (C...
0	v14908	26111.0
1	v14907	26103.0
2	v14901	26079.0
3	v14898	26077.0
4	v15076	26066.0
5	v15127	26063.0
6	v13922	26061.0
7	v10967	251.0
8	v10672	213.0
9	v10559	156.0
10	v10874	141.0
11	v10860	138.0
12	v10980	137.0
13	v10686	135.0
14	v10574	134.0
15	v10753	134.0
16	v10751	132.0
17	v10469	129.0
18	v10540	129.0
19	v11159	128.0
20	v11053	126.0

Java Applet Window

圖 5.21 制水閥連通關鍵性分析結果之制水閥排序報表。



圖 5.22 具較大連通關鍵性制水閥 v14901 之空間定位結果。



鄰的制水閥分區為 S15。制水閥 v13922 損壞擴張影響分析結果如圖 5.24(b) 所示，由圖可發現該制水閥損壞時，擴張損壞區域將影響到制水閥分區 S12，當 S12 執行停水關閉維修時，將幾乎一併關閉管網所有其他區域的供水，因此在制水閥損壞擴張樹視窗可以發現其截斷供水下游制水閥分區的數量相當龐大，而相對的在管網地理資訊系統介面亦顯示出所新增截斷的供水制水閥分區，非常明顯的大量分佈在所顯示的管網地理資訊介面中。該損壞擴張明顯是因為制水閥分區 S12 的損壞關閉所引起，

進一步利用停水分析模組分析制水閥分區 S12 的損壞連通關係，其結果如圖 5.25(a)所示，箭頭標示出制水閥分區 S12，較粗的線條表示該制水閥分區所包含的管線，由圖可以發現制水閥分區 S12 位在供水蓄水槽的連通管網其他區域的唯一通道上面，因此當其損壞時，將截斷管網大部分區域的供水，如圖 5.25(b)所示，畫面新增的具有虛線邊界的較大圓形即關閉損壞下游制水閥分區，可以明確顯示出該制水閥分區損壞截斷供水區域的分佈狀況。由於上述的管網連通關係，在制水閥分區 S12 周圍的制水閥皆具有較大的損壞擴張影響量，其連通關鍵性亦較高，包括有制水閥 v13922、v15076、v15127，而因為制水閥 v15126 所相鄰的兩個制水閥分區，皆位在蓄水槽的唯一供水通道上，因此該制水閥的損壞並不會明顯擴張損壞影響量，則該制水閥的連通關鍵性就不如其他制水閥那麼高。

除了直接位在主要供水通道旁的制水閥具有較大的損壞影響擴張量之外，其餘較關鍵的制水閥則位在管網系統中，該類制水閥的關鍵性可能是因為管網的連通特性所造成，以具有平均損壞擴張量 156 CMD 的制水閥 v10559 為例，同樣利用制水閥損壞擴張樹定位分析其相鄰接的制水閥分區損壞的情形，其結果如圖 5.26(a)所示，制水閥分區 S3533 所包含的管線以較粗線條表示之，該制水閥分區損壞停水時，將一併截斷下游許多的供水制水閥分區，如圖 5.26(a)所示的緊鄰的許多制水閥分區，而擴張其損壞影響量，若制水閥 v10559 損壞時，則將進一步擴張損壞影響到制水閥分區 S3566，並同時將一併截斷下游制水閥分區 S3929 的供水，而制水閥分區

S3566 所包含的管線範圍則如圖 5.26(b)較粗線條標示的部分，所包含的影響範圍較大，因此相對應的在制水閥損壞擴張樹的分析結果中，新增應關閉的邊界制水閥數量多達 14 個，該制水閥損壞將造成在該供水範圍內的許多用戶截斷供水，因此制水閥 v10559 具有較大的平均損壞衝擊量，以其分析結果來看，此類具有較大連通關鍵性的制水閥周圍相鄰的制水閥分區，明顯是因為制水閥設置較不適當，造成具有較大關閉影響範圍的制水閥分區，當制水閥分區 S3566 內的管線損壞時，將會一併關閉相當範圍的供水範圍，為數眾多的邊界制水閥亦容易增加遇到無法正常操作的損壞制水閥，進一步造成停水損壞的影響擴張。因此，藉由本研究的制水閥連通關鍵性分析，則可以找出此類設計不良的管網部位，輔助改善策略的評估與研擬。



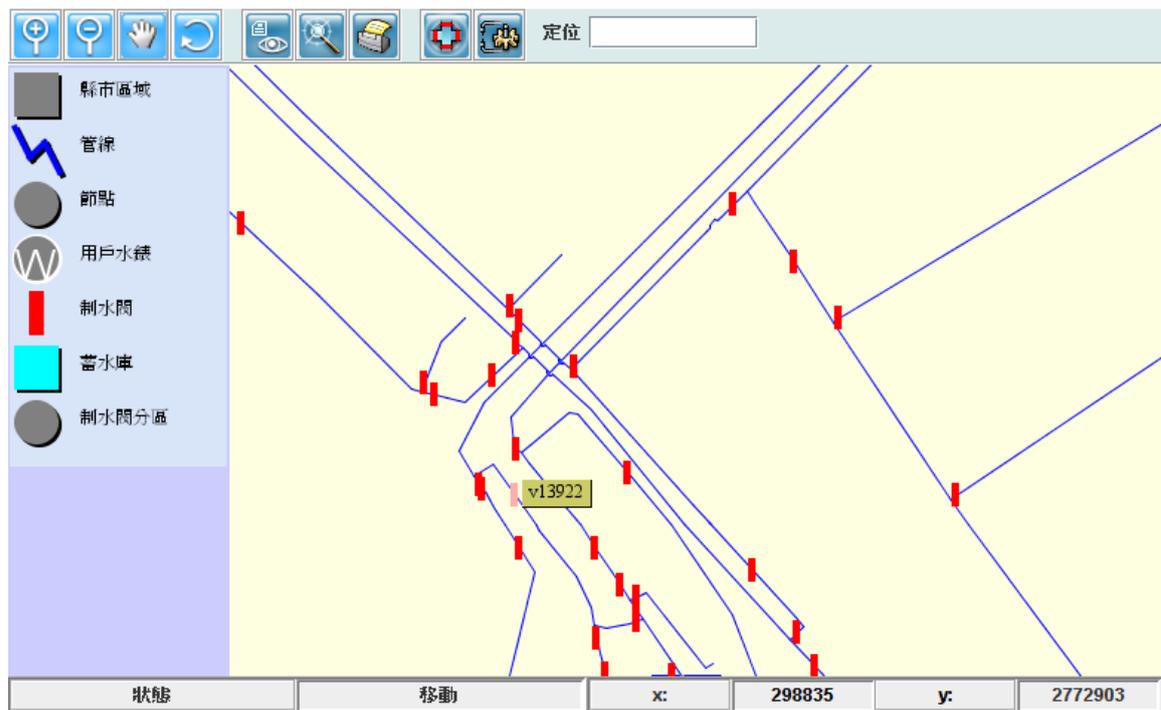
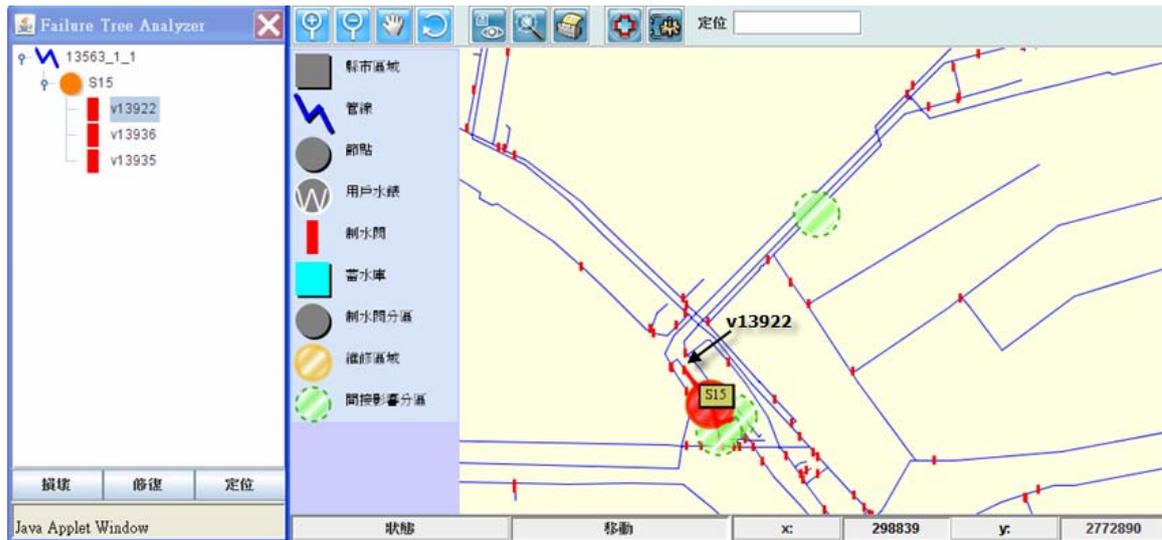
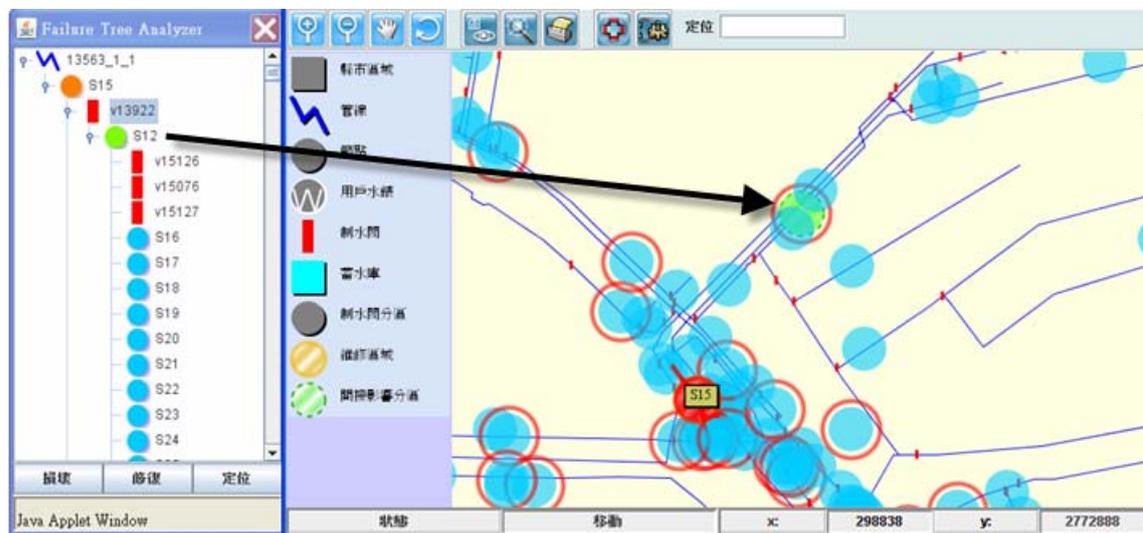


圖 5.23 具較大連通關鍵性之制水閘 v13922 空間定位分析結果。



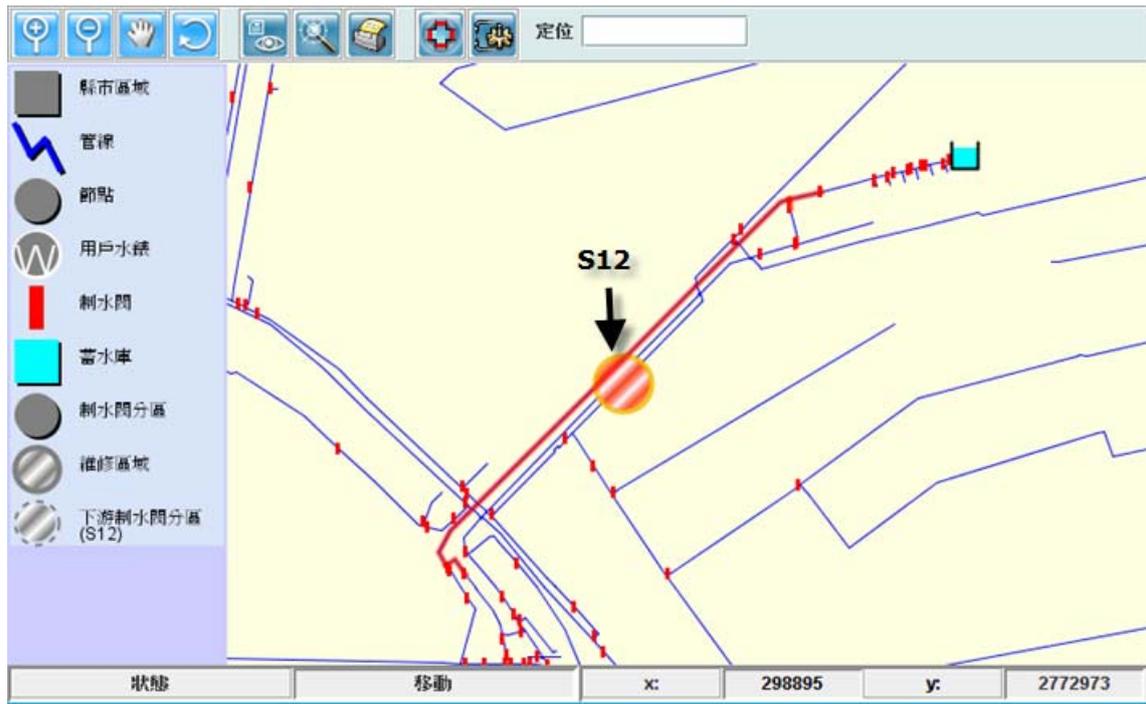


(a)

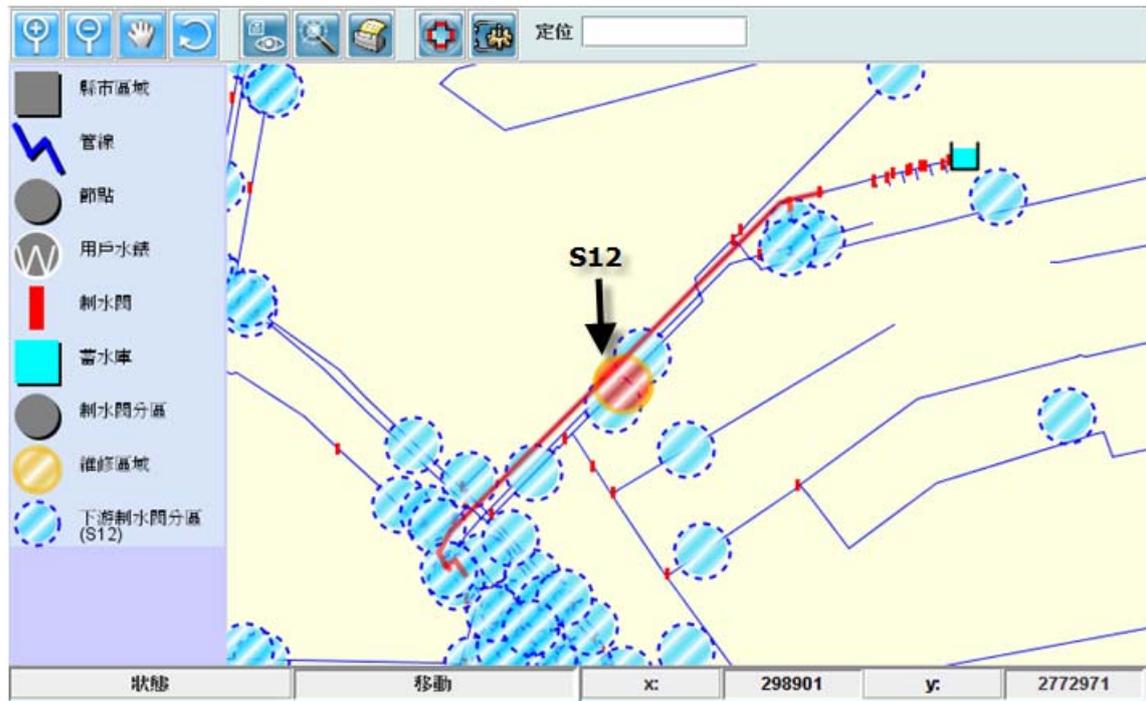


(b)

圖 5.24 (a)制水閥 v13922 比鄰區域之損壞擴張樹分析結果，圖中的箭頭指向制水閥 v13922;(b)制水閥 v13922 損壞之擴張損壞擴張樹分析結果。



(a)



(b)

圖 5.25 (a)制水閥分區 S12 包含管線範圍畫面；(b)該分區停水分析結果。



(a)



(b)

圖 5.26 (a)制水閥 v10559 比鄰區域 S3533 之損壞擴張樹分析結果；(b)制水閥 v10559 損壞之損壞擴張樹分析，及制水閥分區 S3566 之管線區域範圍。

5.9 小結

本研究設計發展一個基於網路的管網損壞分析決策支援系統，以輔助管網系統的管理與工程人員分析管網系統在結構上不可靠的區域，並輔助在損壞事件發生時，提供必要的損壞分析資訊，與停水維護管理所需的必要資訊，以提升管網損壞分析管理的效能，降低損壞所可能造成的影響。由於損壞管件必須關閉周圍制水閥封閉才能夠執行損壞維修，因此所發展的決策支援系統以制水閥分區為管網的損壞分析管理的基本單位，而非以個別管線為單位。而第三章所發展的管網制水閥分區與關鍵制水閥分區判識演算程序皆被實作在本系統中，協助自來水事業人員轉換管網為制水閥分區輔助網路。轉換出輔助網路，可有效的簡化原始的管網系統，且使得管網各部位間的連通關係更易判別。系統中的關鍵制水閥分區損壞影響分析與損壞影響缺水模擬程序，則可更合理的分析評估各制水閥分區在損壞停水維修時可能造成的缺水衝擊。各類型的損壞分析分佈圖與報表，亦以較組織化系統化的方式整合呈現這些分析結果，以提升決策輔助的效率。所有具有空間分佈特性的管網基本屬性與分析結果亦以管網地理資訊介面模組呈現，可更簡便的判讀各類決策資訊。節點屬性設定功能，則可進一步輔助自來水事業人員探討決策恰當的制水閥設置位置，以降低關鍵制水閥分區的影響衝擊。

停水分析模組的管線損壞停水衝擊分析功能可輔助自來水公司規劃如何進行停水維修，評估停水作業所可能造成的影響衝擊，並判識應操作的制水閥，以利研擬較佳的停水維修策略。而制水閥損壞擴張樹分析模組，則可以在停水維修階段直接根據實際的制水閥操作狀況，即時提供自來水公司操作人員必要的損壞維修資訊，當制水閥無法正常運作時，判識出關閉擴張影響區所需操作的制水閥，並執行制水閥損壞影響分析，便於預估與掌握損壞區域，提升停水維修的效率及減少用戶非預期停水的抱怨。而制水閥連通關鍵性分析則可以有效的判識出管網中制水閥的連通關鍵性，可有效的分析管網制水閥結構設計的缺陷，結合上述之停水分析模組

與制水閥損壞擴張樹分析模組，可提供自來水公司研擬管網結構與制水閥設置改善方案所需的資訊。

由於制水閥連通關鍵性分析僅基於制水閥損壞所直接截斷的供水區域，無法有效的反應制水閥損壞擴張對於管網系統水力特性的影響程度，因而建議執行第三章所提出的制水閥關鍵性分析，以得到更明確的損壞影響資訊。

雖然系統亦提供節點屬性設定功能，以輔助制水閥設置改善策略之研擬。然管網整體的損壞影響改善，需要更系統性的決策模式，結合考量所發展的各项損壞分析結果，研擬恰當的改善策略。此部分，仍待後續延續性的研究持續探討發展。

本研究所發展的管網損壞決策支援系統，其中包含了各類管網損壞維修與水力模擬所需的各類模組，因此可有效輔助管網在結構分析、系統改善與操作上的進一步應用。除此之外，由於其基礎架構的模組化系統化特性，使得其可有效的擴充各類的決策模式，使得不同來源的決策程序或模式在同一管網分析平台上進行整合比較或者連通，結合目前已有的管網基礎分析決策功能，進一步提升管網決策支援與管理的便利性與完整性。

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究主要目的是發展適當的程序與模式，改善自來水管網的供水品質，且發展一個線上管網決策支援系統，輔助自來水公司執行損壞管理與分析工作，以提升自來水管網損壞維修效率。並經管網案例測試檢測各項工具的適用性與合理性。以下逐一說明本研究的重要研究成果：

- (1) 制水閥分區輔助網路之判識演算可提升分析效率與合理性：為改善以往在執行自來水管網損壞管理或改善相關研究時，多以自來水管線當作基本分析單位的缺失。本研究改善以往提出的制水閥分區與關鍵性制水閥分區判識演算程序，轉換原始複雜的管網系統，為制水閥分區輔助網路，有效簡化原始的管網系統。並以制水閥分區為基本單位所提出的各項損壞分析程序，不必考量複雜的管線，而以制水閥分區輔助網路進行分析，可提升分析效率，且使得分析結果更符合實際損壞操作情形，因此較以管線為單位的分析方式合理。
- (2) 管網損壞缺水模擬可提升換管決策合理性：以制水閥分區為基本單位的管網損壞模擬程序，應用到換管決策模式，估算各類制水閥分區受損壞影響的缺水量，發現有三類制水閥分區的影響較大：

- 一、 包含供水節點的關鍵制水閥分區。
- 二、 為分佈在管網系統內部的在主要通道上的關鍵制水閥分區。
- 三、 為非關鍵制水閥分區，但因其重要的供水通道上。

原始的管網系統相當複雜，不易以人工的方式判識出各類制水閥分區，利用所發展的模擬演算程序，可快速較重要的制水閥分區。根據制水閥分區為單位的損壞分析結果所優選的換管決策，較以管線為

單位的換管優選模式改善達 24% 的缺水量潛勢，可反應出管線損壞停水維修的合理影響缺水量，基於制水閥分區的換管模式亦因而較為合理。

- (3) 制水閥關鍵性分析可有效判識損壞擴張影響較大的制水閥：制水閥損壞，將造成損壞影響擴張。本研究所提出根據制水閥分區輔助網路的連通關係，分析損壞可及路徑的損壞機率及該路徑的損壞影響缺水量，提出合理的制水閥關鍵性分析程序，可有效辨識出損壞影響較大的制水閥，並避免過往分析制水閥關鍵性需執行大量的隨機模擬演算，以提升分析效率。

較關鍵的制水閥不見得是鄰接關鍵制水閥分區，而可能為因損壞擴張而會截斷重要供水通道，造成整個管網系統供水能力明顯降低的制水閥。而次重要的制水閥則可能為因系統結構連通特性，損壞時一併關閉較多下游區域的制水閥。雖然管網系統的連通性通常頗複雜，所提出的分析程序，可有效判識出管網系統損壞擴張影響趨勢較大的制水閥，供研擬較適當的制水閥維護策略，降低制水閥的損壞影響衝擊。

- (4) 制水閥連通關鍵性分析可快速檢測制水閥設計連通合理性：上述的制水閥關鍵性分析程序，可以有效的判識出管網中損壞擴張較大的制水閥，然其分析程序需要耗費較多的演算時間，且決定制水閥關鍵性的同常為直接鄰接制水閥的第一層分區，因此若水公司僅需初步針對制水閥設計結構上執行初步評估分析，則上述的程序將較沒有效率，較不利於整合至線上決策支援系統中。本研究利用制水閥分區間的連通特性，分析制水閥損壞的平均損壞擴張衝擊量，以管網案例測試發現較關鍵的制水閥主要為鄰接供水來源唯一主要通道的制水閥，或是直接鄰接的制水閥分區具有較大的損壞關閉影響量，通常造成這類關鍵性制水閥的原因在於制水閥設計不良或管線連通特性不佳，造成單一管線損壞而必須關閉過大的影響區域。案例的制水閥數量雖多達 7840 個，但以上述程序

分析，可在數分鐘內即完成所有的制水閥的關鍵性分析，因此可在合理的執行時間內，有效判識出關鍵的制水閥，便於自來水公司研擬恰當的制水閥維護或者管網改善計畫。

(5) 損壞污染監測站網設置可有效控制損壞污染程度：本研究發展損壞污染監測選址優選模式，可直接決策出特定測站數下具有最小偵測污染水量水準值的優選結果，以避免繁複的決策過程。且另發展兩個替代優選模式，其一可直接計算決策站網的偵測污染水量水準值，便利規劃參考，另一替代優選模式，則可在預先設定可接受的損壞污染水量水準值內，優選出最少測站數的監測站網，以滿足損壞污染監測的規劃要求。在小型示範管網案例的測試，可避免 Kessler *et al.*(1998)程序需要試誤才能得到優選解的缺失，直接求得結果以提升決策效率。

(6) 管網損壞分析決策支援系統可提升管網決策分析效能：本研究應用物件導向技術發展管網決策支援系統架構，並設計管網決策支援用戶端與伺服網路架構，以多執行緒技術提升伺服系統的運作彈性，降低決策用戶端的運算需求，有效提升決策效能。經管網案例應用測試，可有效的判識管網中較重要的制水閥分區，提供管網架構改善策略研擬的必要資訊。停水分析與損壞擴張樹分析模組可有效評估損壞擴張影響，分析必要的決策資訊，提升實務維修工作的效率。本研究進一步應用損壞擴張樹分析模組探討制水閥關鍵性的分析結果，可有效分析較關鍵制水閥的構成要因，以輔助後續的管網系統管理分析。

6.2 建議

本研究為有效提升管網損壞分析與管理決策效益，而提出許多分析程序、優選模式並發展一可有效輔助決策的管網決策支援系統。以下說明本研究已進行的各項管網分析與管理相關課題中，仍待克服或改善之處，以供後續研究參考：

- (1) 本研究所提出的制水閥關鍵性分析程序，可在複雜的管網系統中有效的判別出具有較大關鍵性的制水閥，後續則可以進一步考量制水閥維護更新的操作成本，規劃合理的制水閥維護程序與決策模式，以有效降低管網損壞操作可能造成的損壞衝擊。
- (2) 當管網損壞事件或制水閥損壞擴張的影響衝擊量較大時，通常為該制水閥分區或者制水閥附近的管網架構或水力特性所造成，後續則可結合本研究所提出的各類管網損壞分析程序與制水閥關鍵性分析程序，發展可有效改善此類損壞影響衝擊的管網加管或新增制水閥的管網連通性改善優選模式，以有效降低管網此類結構與水力特性在制水閥關鍵性上的影響。
- (3) 制水閥關鍵性分析程序可進一步應用到管線損壞分析上，改善過往管線損壞模擬假設周圍關閉制水閥皆可正常運作，而忽略實務操作可能因制水閥損壞的擴張影響，以作為後續發展更合理換管程序的參考基礎。
- (4) 本研究所應用的管網換管優選模式，僅考量目前管網的管線狀態，包括管線損壞機率、用戶需水量等，進行管網改善決策，然管線可能隨管齡增加而增加損壞機率，且未來人口變化也會影響管網供水的效能，因此未來可考量提升未來計畫年限內管網供水能力的換管優選決策，以有效確保自來水管網未來一段長時間的供水穩定度。
- (5) 本研究所提出的監測站網優選模式，假設損壞污染事件在每個地方的發生機率皆相同，且忽略污染擴散與稀釋的效應，因此未來可考量根據管網中管線的損壞污染機率特性，以更合理的損壞污染傳布模擬，規劃優選出可更合乎實際需求的管網損壞污染監測站網系統
- (6) 本研究所發展的線上管網損壞分析決策支援系統，提供一個模組化的運作架構，並已整合管網結構與損壞分析功能模組，而在伺服系統亦發展整合各類管網水力模擬模組，後續可考量以此管網決策支援系統

為基礎架構，發展各類決策程序與優選管理模組，便利自來水公司執行各類複雜的管網分析工作，與應用事業人員較難實作的優選決策模式，以有效提升自來水管網系統的管理效能。



參考文獻

- 中國時報，(2002/05/12)，”明天起 5 區供水；市中心區明天凌晨四點起停水一天，市府籲民眾做好準備”。
- 朱健行，(1990)，”自來水配水管理系統監控之探討”，自來水會刊雜誌，第 34 期，pp. 80~99。
- 李沛濠，(2002)，基於制水閘區可靠度之自來水管網換管規劃模式，國立交通大學環境工程研究所，碩士論文。
- 朱健行，(1994)，”自來水管線設施之診斷與更新論”，自來水會刊雜誌，第五十期，pp. 56。
- Batish, R. (2003). "A New Approach to the Design of Intermittent Water Supply Networks." *World Water Congress 2003*, 118-123.
- Berardi, L., Kapelan, Z., Giustolisi, O., and Savic, D.A. (2008). "Development of Pipe deterioration models for Water Distribution Systems using EPR." *Journal of Hydroinformatics*, 10(2), 113-126.
- Berry, J., Hart, W. E., Phillips, C. A., and Uber, J. (2004). "A general integer-programming-based framework for sensor placement in municipal water networks." *Proc., World Water and Environment Resources Conf.*, ACSE, Reston, Va.
- Berry, J., Hart, W. E., Phillips, C. A., Uber, J., and Watson, J. P. (2006). "Sensor Placement in Municipal Water Networks with Temporal Integer Programming Models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(4), 218-224.
- Bhave, P. R. (1981). "Node Flow Analysis of Water Distribution Systems." *Journal of Transportation Engineering*, 107(4), 457-467.
- Bhave, P. R. (1991). *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*, Technomic Publishing Co., Lancaster, Pa.
- Bouchart, F., and Goulter, I. (1991). "Reliability Improvements in Design of Water Distribution Networks Recognizing Valve Location." *Water Resources Research*, 27(12), 3029-3040.
- Boulos, P. F., Altman, T., Jarrige, P.-A., and Collevati, F. (1994). "An Event-driven Method for Modeling Contaminant Propagation in Water Networks." *Applied Mathematical Modeling*, 18(February), 84-92.
- Casey, R., Boulos, P. F., Orr, C. H., and Bros, C. M. (2006). "Valve Criticality Modeling." *8th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA 2006)*, Cincinnati, Ohio, August 27-30.
- Chandapillai, J. (1991). "Realistic Simulation of Water Distribution System." *Journal*

- of Transportation Engineering*, 117(2), 258-263.
- Dandy, G. C., and Engelhardt, M. (2001). "Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement using Genetic Algorithms." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4), 214-223.
- Deb, A. K., Snyder, J. K., Hammell, J. O., McCammon, S. B., Jun, H., Loganathan, G. V., and Grayman, W. M. (2007). *Criteria for Valve Location and System Reliability*, AWWA RF: Denver, Colorado.
- Fujiwara, O., and Li, J. (1998). "Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-dependent Demand." *Water Resources Research*, 34(7), 1834-1850.
- Geotools Project Management Committee (Geotools PMC). (2006). Getting started. Available online at [http://www.geotools.org/display/GEOTOOLS/Getting+ Started](http://www.geotools.org/display/GEOTOOLS/Getting+Started).
- Germanopoulos, G. (1985). "A Technical Note on the Inclusion of Pressure Dependent Demand and Leakage Terms in Water Supply Network Models." *Civil Engineering System*, 2(3), 171-179.
- Goulter, I. C., and Coals, A. V. (1986). "Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks." *Journal of Transportation Engineering*, 112(3), 287-301.
- Giustolisi, R., Laucelli, D. and Savic, D. A. (2006). "Development of Rehabilitation Plans for Water Mains Replacement Considering Risk and Cost-Benefit Assesment." *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23(3), 175-190.
- Goulter, I. C. (1992). "Systems Analysis in Water-Distribution Network Design: From Theory to Practice." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(3), 238-248.
- Gupta, R., and Bhave, P. R. (1996). "Comparison of methods for predicting deficient-network performance." *Journal Water Resources Planning and Management*, 122(3), 214–217.
- Huang, P.-Y., Diekmann, J. E., and Fenis, S. M. (1995). "Pipeline Planning System." *Journaln of Computing in Civil Engineering*, 9(2), 134-140.
- Horowitz, E., Sahni, S., and Anderson-Freed, S. (1993). Biconnected components and articulation points, in *Fundamentals of Data Structures in C*, pp. 278-283, Computer Science Press, New York.
- ILOG (1999). *Ilog Cplex6.5 User's Manual*, Ilog, France.
- Ingeduld, P., Pradhan, A., Svitak, Z., and Tarai, A. (2006). "Modeling Intermittent Water Supply Systems with EPANET," *8th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA 2006)*, Cincinnati, Ohio, August 27-30.
- Jun, H., and Loganathan, G. V. (2007). Valve-Controlled Segments in Water Distribution Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*,

- 133(2), 145-155.
- Jun, H., Loganathan, G. V., Deb, A. K., Grayman, W., and Snyder, J. (2007a). "Valve Distribution and Impact Analysis in Water Distribution Systems." *Journal of Environmental Engineering*, 133(8), 790-799.
- Jun, H., Loganathan, G. V., Kim, J. H., and Park, S. (2007b). "Identifying Pipes and Valves of Hight Importance for Efficient Operation and Maintenance of Water Distribution Systems." *Water Resources Management*, (published online)
- Kao, J.-J. and Li, P.-H. (2007). "A Segment-based Optimization Model for Water Pipeline Replacement." *Journal of the American Water Works Association*, 99(7), 83-95.
- Kessler, A., Ostfeld, A., and Sinai, G. (1998). "Detecting Accidental Contaminations in Municipal Water Networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 24(4), 192-198.
- Kim, J. H., and Mays, L.W. (1994). "Optimal rehabilitation model for water-distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 674-692.
- Kumar, A., Kansal, M. L., and Arora, G. (1997). "Identification of Monitoring Stations in Water Distribution System." *Journal of Environmental Engineering*, 123(8), 746-752.
- Lee, B. H., Deininger, R. A., and Clark, R. M. (1991). "Locating Monitoring Stations in Water Distribution Systems." *Journal of American Water Works Association*, 83(7), 60-66.
- Lee, B. H., and Deininger, R. A. (1992). "Optimal Locations of Monitoring Stations in Water Distribution System." *Journal of Environmental Engineering*, 118(1), 4-16.
- Li, P.-H. and Kao, J.-J. (2008). "Segment-based Vulnerability Analysis System for a Water Distribution Network." *Civil Engineering and Environmental Systems*, 25(1), 41-58.
- Minocha V. K., and Prasad, B. M. (1999). Discussion of "Identification of Monitoring Stations in Water Distribution System." *Journal of Environmental Engineering*. 125(2), 202-204.
- Mays, L. M. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw Hill, NY.
- Markropoulos, C. K., Butler, D., and Maksimovic, C. (2003). "Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(1), 69-77.
- Morley, M. S., Atkinson, R. M., Savic D. A., and Walters, G. A. (2001). "GANet: Genetic Algorithm Platform for Pipe Network Optimization." *Advances in Engineering Software*, 32(6), 467-475.
- MySQL AB. (2008). Why MySQL? Available online at <http://www.mysql.com/>

why-mysql/

- Ostfeld, A., and Saolomons, E. (2004). "Optimal Layout of Early Warning Detection Stations for Water Distribution Systems Security." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 377-385.
- Ostfeld, A., Kessler, A., and Goldberg, I. (2004). "A Contaminant Detection System for Early Warning in Water Distribution Networks." *Engineering Optimization*, 35(5), 525-538.
- phpMyAdmin Devel Team. (2008). phpMyAdmin. Available online at <http://www.phpmyadmin.net/>
- Rosenthal, L. P. M. and Koning, M. de (2001). *Requirements for Valves from a Customer's Point of View*, Kiwa Water Research, Nieuwegein.
- Ross, S. M. (1985). *Introduction to Probability Models*, Academic Press Inc., Orlando, FL.
- Ross, S. M. (2006). *Introduction to Probability Models*, Academic Press Inc., San Diego, CA,
- Rossmann, L. A., Boulos, P. A., and Altman, T. (1993). "Discrete volume-element method for network water-quality models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(5), 505-517.
- Rossmann, L.A. (2000). *EPANET2 users manual*, Risk Reduction Engineering laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Sedgewick, R. (1990). *Algorithms in C*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 476-478, 198-200.
- Shamir, U., and Howard, C. D. D. (1979). "An analysis approach to scheduling pipe replacement." *Journal of the American Water Works Association*, 71(5), 249-258.
- Shea, S. (1991). "Valve Maintenance in Boston." *Proc. Resources Engineering and Operations for the New Decades*. Annual Conf., AWWA, Denver, 561-566.
- Solomatine, D. P. (1996). "Object Orientation in Hydraulic Modeling Architectures." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 10(2), 125-135.
- Su, Y.C., Mays, L. W., Duan, N., and Lansey, K. E. (1987). "Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(12), 1539-1556.
- Sun Microsystems, Inc. (2008). *Java Technology*. Available online at <http://java.sun.com/>.
- Taher, S. A., and Labadie, J. W. (1996). "Optimal Design of Water Distribution Networks with GIS." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), 301-311.
- Trietsch, E. A., and Mesman, G. A. M. (2006) "Effect of Valve Failures on Network Reliability," *8th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA 2006)*,

- Cincinnati, Ohio, August 27-30.
- W3C. (2008). CGI: Common Gateway Interface. <http://www.w3.org/CGI/>
- Gilbert, D. and Morgner, T., (2008). JfreeChart. Available online at <http://www.jfree.org/jfreechart>.
- Wagner, J. M., Shamir, U., and Marks, D. H. (1988). "Water Distribution Reliability: Simulation Methods." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(3), 276-294.
- Walski, T. M., Weiler, J. S., and Culver, T. (2006). "Using Criticality Analysis to Identify Impact of Valve Location," *8th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA 2006)*, Cincinnati, Ohio, August 27-30.
- Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, I. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee, H.-L., Liebman, J. C., Mays, L., Morgan, D. R., and Ormsbee, L. (1987). "Battle of the Network Models: Epilogue." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.
- Walski, T. M. (1987). Discussion of "Quantitative Approaches of Reliability Assessment in Pipe Networks." by Goulter and Coals, *Journal of Transportation Engineering*, 113(5), 585-587.
- Walski, T. M. (1993). "Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis." *Reliability Engineering and System Safety*, 42, 21-27.
- Walski, T. M., and Pelliccia, A. (1982). "Economic analysis of water main breaks." *Journal of the American Water Works Association*, 74(3), 140-147.
- Wu, S. J., Yoon, J. H., and Quimpo, R. G. (1993). "Capacity-weighted Water Distribution System Reliability." *Reliability Engineering and System Safety*, 42, 39-45.

附錄 A 管網供水分區劃分模式

當管網損壞發生在主要供水幹管損壞而執行停水維護，將因供水幹管為管網中重要的供水管線，而影響管網整體的供水能力，造成管壓不足或出水量不夠等影響可供用戶使用的用水量(Mays, 2000; Gupta and Bhawe, 1996)，或者因應幹管執行維護更新操作需要，進行重大的供水系統維護工程，亦將無法完全供應用戶需水量。且台灣受到季風氣候的影響，而有明顯的季節變化，水庫集水區集水量有豐枯兩個明顯的供水季節性。當極端氣候發生時，甚至可能發生乾旱等水資源缺乏的狀況，而無法充足供應供水區域內的需求水量，比如九十一年時翡翠水庫因為長時間的乾旱，造成蓄水量不足，而必須在大台北地區執行分區供水(中國時報, 2002/5/12)。因此水公司面對各種操作需求與供水狀態，必須以分區供水或者分區停水的方式因應無法充足供水的狀況，以節省出水量。此外，在某些發展中國家如印度，因其氣候條件造成水資源匱乏或經費限制，無法連續供水，而執行間歇性供水措施(intermittent water supply) (Ingelduld *et al.*, 2006; Batish, 2003)，亦需將整個管網系統劃分為幾個適當的供水區域，以利節省可供水量。因此水公司必須彈性的根據維護工程的狀況評估可能缺水狀態，規劃合理的供水分區，便利在此非常狀況時，有效的調配有限的供水量。然而，水公司一般在進行供水分區的劃分時，因缺乏一個合理的規劃模式，僅多依賴操作人員的經驗，依據行政區域或道路等來劃分供水區域，然而管網連通關係並不盡然會與這些劃分邊界吻合，並可能因為忽略管網連通關係，造成無法預期的關閉區域，所劃分區域可能比規劃停水量更大，而擴大影響用戶範圍。且不同的缺水狀態其應停水的量亦會不同，因此有必要發展一個停水供水分區劃分模式，以提升水公司在缺水調配與操作維護上的彈性，盡可能減少用水戶的影響衝擊。本研究因而以制水閥分區為單

位，根據其連通關係，發展停水量與規劃缺水量差異最小，且關閉制水閘數最少的停水區域劃分模式，並以發展恰當的啟發式演算程序，以供後續相關研究決策盡可能減少缺水分區調配影響的參考。

本研究提出的管網供水分區劃分決策流程如圖 A.1 所示，包括先估算管網系統供水需要節省的每日供水量、轉換為制水閘分區輔助網路以及利用基因演算法(Genetic Algorithm)求解管網供水分區優選模式，以下則針對各項程序詳細說明之。

1 缺水量估算

在執行管網供水分區之前應該要先估算出管網的減供水量，以作為後續決策供水分區的合理依據。以乾旱缺水來說，減供水量應該要考量目前可得水資源、近期可得水資源以及預估乾早期等眾多複雜因素來決定。本研究假設管理者已依據這些因素決定了擬減供水量值以作為後續分析的依據。



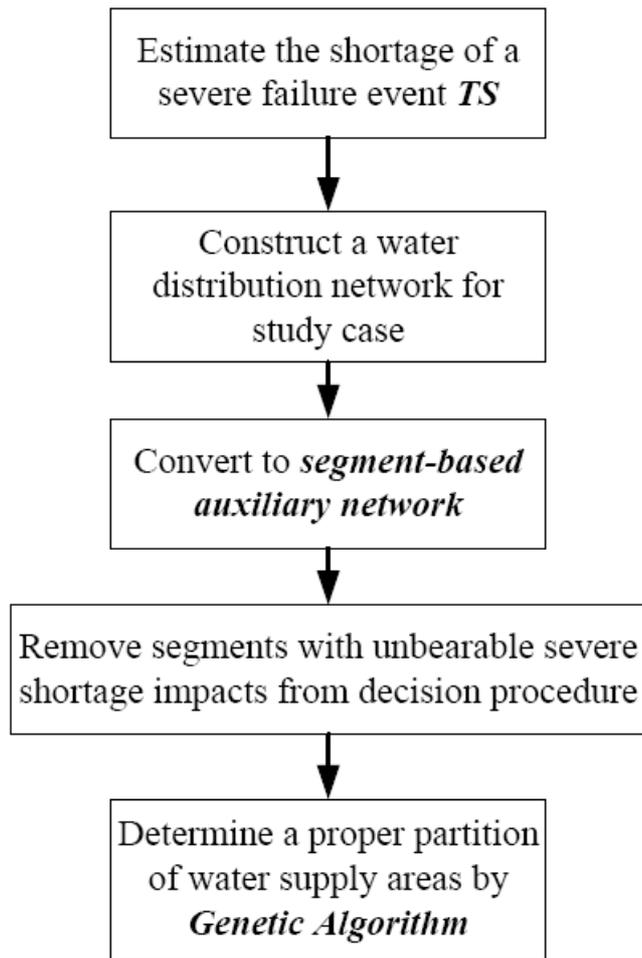


圖 A.1 管網供水分區劃分決策流程圖

2 制水閥分區輔助網路

供水分區的操作主要為透過關閉在分區劃分邊界的制水閥使得某些供水分區停止供水，以達到大量節省水資源的目的，因而供水分區劃分主要的工作即在尋找恰當的關閉制水閥邊界，以定義劃分出可完全封閉的供水分區，且同時盡可能使其內的總供水需求與推估缺水量相近。而本研究第三章所提及的制水閥分區輔助網路，以所判識出來的制水閥分區為網路之節點，由於制水閥分區為以制水閥可以封閉的最小範圍為一個基本單位，且各制水閥分區節點間的連線即代表分區間的共通制水閥。因此，供水分區規劃在原始管網系統中尋找最適當的邊界制水閥的問題，亦即是在經轉換過後的制水閥分區輔助網路中，尋找最恰當的相對應制水閥連線。若直接以制水閥分區為供水分區劃分規劃的最基本單位，則將可以有效的簡化原始大量複雜的原始管網系統，且因決策選取的邊界制水閥連線皆直接對應在原始管網系統中的某些制水閥，可確保供水區域劃分邊界可完全關閉供水，而有效提升決策效率。因此，在建立好原始的自來水管網供水系統後，即應用第三章所發展改善的制水閥分區判識演算程序與關鍵分區判識演算程序，轉換原始的管網系統為以制水閥分區為節點單位的輔助網路系統，以便利後續劃分模式的發展。

3 移除不適劃分之制水閥分區

經上述程序轉換出之制水閥分區輔助網路中，某些制水閥分區可能包含供水節點，或在管網供水的重要通道上，若此類制水閥分區被劃分到某些供水分區中，當執行分區供水操作而將此類制水閥分區關閉時，將可能造成管網系統完全缺水或者嚴重影響系統的供水能力，因此此類制水閥分區並不適於被劃分在任何將被關閉的制水閥分區中，以維持管網系統的正常供水能力。

本研究先根據制水閥分區的連通關係，直接判斷該制水閥分區關閉可能直接關閉本身與下游關閉的供水區域的總影響關閉區域之總需水量，以

初步找出此類制水閥分區，由於目前僅以連通關閉判斷供水影響程度，因此此類供水分區將大部分為包含供水節點的制水閥分區，或者接近供水節點在重要供水路徑上的制水閥分區，因此將從包含供水節點的制水閥分區到這些影響較重大的供水分區通過的主要連通區域（以最短距離判斷），從劃分候選制水閥分區中移除，以確保此類制水閥分區不會受到分區供水操作關閉的影響，並避免劃分出不恰當的供水分區。

4 管網供水分區劃分優選模式

管網供水分區規劃的主要目標在於劃分出一個可以經由關閉周圍制水閥而完全關閉供水的區域，且關閉供水區域將直接停止關閉區域的供水而影響到該區域的用戶，因此應盡可能減少分區供水操作對管網系統造成的停水衝擊，且劃分出來的區域總需水量應盡可能接近所擬減供的缺水量，避免關閉過大區域擴大缺水損壞影響。另一方面，供水區域需要關閉邊界制水閥以執行分區供水，因此邊界制水閥的數目應該要盡可能少，以縮減分區供水關閉開啟區域所需花費的時間，以提升分區供水效率。因此本研究擬的供水分區劃分決策目標式如下所示：

$$\text{Min} \quad B_1 \sum_i |d_i - TS| + B_2 \sum_j V_j I_j \quad (\text{A-1})$$

其中 d_i 為所劃分出供水分區 i 區域內的用戶總需水量； TS 則為預期管網要減供的預估缺水量； I_j 表示制水閥分區連線 j 是否被選取為供水分區的邊界，1 表示被選取為分區邊界，0 則反之； V_j 則為制水閥分區連線 j 所包含的兩制水閥分區間共同制水閥總數； B_1 、 B_2 則為權重值，調整兩個目標的相對重要性，使得決策動力著重在第一個決策目標。

供水分區決策目標式的第一個項目為經過分區劃分決策後得到的所有供水分區與目標減供估算缺水量的差異量絕對值的總和，而第二個項則為總選取為供水分區邊界的供水分區供水關閉操作的總邊界制水閥總數，決策目標主要在最小化這兩個決策目標，旨在使得每一個劃分供水分區的總需

水量盡可能接近事先設定的減供水水量，且同時盡可能使需要操作關閉的分區邊界制水閥數量盡可能少，以降低分區供水的影響，並提升操作效率。

5 基因演算法

雖然實際管網系統經制水閥分區辨識轉換之後可有效簡化原始系統的複雜度，不過由於實際系統的管件數量龐大，所轉換建立的制水閥分區輔助網路系統中的制水閥分區節點數與制水閥連線數量仍然相當可觀。因此，在求解供水分區決策目標式(A-1)時，將因其決策變數選取的邊界制水閥連線的組合數量過大，造成較不易以簡易的線性規劃模式求解，另一方面在選取邊界制水閥連線之後，必需要判斷劃分出的供水分區以及其內所包含的總用戶需水量，以利判斷與設定減供目標的差異量，然而在供水分區判斷過程中需考量所劃分供水分區內組成制水閥分區間的連接性，若是關閉分區周圍制水閥之後，使得某些其他下游供水區的用水一併關閉，則此時應同時將該區域歸入該關閉供水分區內。然而此類制水閥分區間的連通關係很難以一般的優選模式來表示求解。因此，本研究採用基因演算法來協助求解，並在基因演算的 fitness function 中結合本研究前章所發展改善的非預期關閉區域演算程序，判斷供水分區關閉所造成的總減供用戶用水量，以計算目標函數值提供基因演算所需的搜尋驅動力。

基因演算所設計的決策基因如下式所示：



K links between segments

(A-2)

其中 l_i 為一 0,1 整數變數，表示制水閥分區間的連線 i 是否被選擇為供水分區的邊界連線，若為 1 則該連線被選取為邊界連線，反之則未被選擇。

其中 K 為制水閥分區間連線的總數。

本研究所應用的基因演算程序如圖 A.2 所示，各程序說明如下：

- STEP 1: 首先以隨機的方式產生一組足夠數量的基因組，以提供基因演算組合足夠的求解搜尋空間。
- STEP 2: 而對於每一個在群組中的基因，必需根據其對應目標值的優劣結果判斷後續的該基因存續的機率，因此接續則對於每一個基因計算其 fitness value。
- STEP 3: 首先將所產生的基因解讀轉換為決策過程所判斷選取的供水分區間的劃分邊界連線，並將這些選取的連線標示為分區邊界。
- STEP 4: 判斷所劃分出的所有供水分區。對於每一個制水閥分區節點，逐一執行擴張搜尋，如果周圍的分區連線不為邊界，則向下擴張到下一個制水閥分區節點，並標示為已經搜尋過，否則若為分區連線則停止往下擴張，一直到無法擴張為止，此時被擴張搜尋到的所有制水閥分區節點即組成一供水分區。接著再以所有制水閥分區中尚未被搜尋過的制水閥分區節點當作下一個供水分區的辨識搜尋起點，重複上述供水分區擴張辨識，直到所有制水閥分區節點皆被搜尋過為止。
- STEP 5: 以供水分區為基本單位，建立供水分區連接輔助網路。由於上述程序劃分出的供水分區關閉的時候，有可能會造成其下游某些區域一併被關閉的狀況，因此必需將這類因某供水分區關閉而一併關閉的下游區域整併到該供水區域，以避免決策出的供水分區，在分區供水操作的時候，關閉非預期的區域而擴張停水衝擊。
- STEP 6: 計算該基因的 fitness value。將上述程序所劃分出的供水分區及其對應停供水量，與選取邊界制水閥連線所包含的總制水閥數，代入決策目標式(A-1)中，計算出該基因的 fitness value。
- STEP 7: 判斷是否所有的基因皆已估算過其 fitness value，若否則繼續重複上述程序，若已全部判斷過，則繼續執行基因優選搜尋程序。

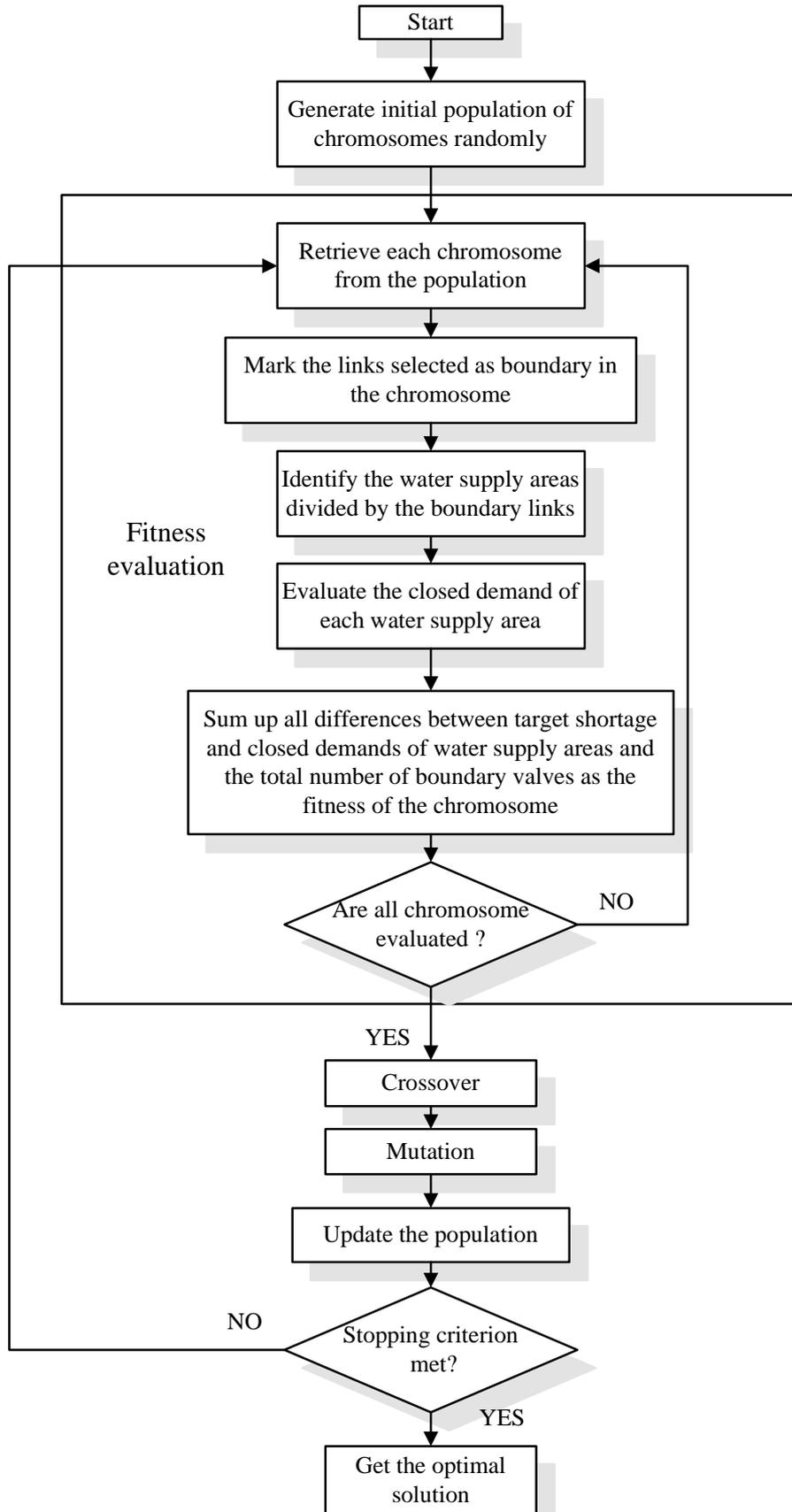


圖 A.2 管網供水分區劃分模式之基因演算優選程序

STEP 8: 若滿足事先設定的交配機率值，則針對具較佳 fitness value 的基因組執行基因組配，以產生具有較佳 fitness value 的子代基因，亦即將較佳的劃分決策保留在基因搜尋演算的過程中。同時，為確保演算基因交配的過程不會將到目前為止所找到的較佳解移除，因此亦在搜尋優選程序中，保留到目前為止最佳的優選解。

STEP 9: 基因演算優選程序為避免搜尋求解的過程被限制在 local optima，因此亦設計一基因突變的機制，若滿足事先設定的突變機率，則變化交配出基因的決策組合，以增加決策解的歧異性，擴大後續搜尋演算的自由度。

STEP 10: 接續則得到一組新的基因群組。

STEP 11: 若已經滿足基因演算的停止條件則停止搜尋並將其中最佳的解輸出為最後的決策結果。而停止條件的設定如為固定一個數量的演算世代，或者世代間的改善目標值已經很小，表示優選解已經收斂，則可以停止優選搜尋演算。

6. 小結

本研究所發展的供水分區劃分優選模式，僅考量制水閘分區間的連通特性，來劃分最接近規劃減供水量的供水分區，然而執行分區供水而輪流關閉各供水分區，由於有大部分的管網系統將被截斷供水，將造成管網供水連通特性明顯的改變，在水力上可能會造成某些區域壓力不足的狀況，而無法滿足用戶用水量。因此未來應進一步結合管網水力損壞模擬程序，以確保劃分出來的分區供水策略不會有上述的問題。另一方面，由於決策變數數量過大，而基因演算交配的過程容易破壞較佳組合解，而使得劃分結果不夠理想，且該決策過程需要執行大量的決策模擬，決策過程可能較沒有效率，後續應嘗試改善決策程序，如應用 Simulated Annealing 演算法等，以縮減規劃求解所需要的運算時間，並嘗試提出如線性規劃等最佳化的優選模式，進一步改善劃分結果與決策效率。

附錄 B 簡歷

李沛濠

300 新竹市博愛街 75 號
國立交通大學
環境工程研究所

電話(公)：03-5731947
手機：0958415217
E-Mail: peihaoli@gmail.com

基本資料	國籍：台灣 性別：男 生日：1977 年 7 月 27 日
目前職稱	國立交通大學環境工程研究所 博士候選人
學歷	2002/09 ~ 國立交通大學 環境工程研究所 博士班 1999/09 ~ 2002/06 國立交通大學 環境工程研究所 碩士班 1995/09 ~ 1999/06 國立清華大學 原子科學系
經歷	2006/07 ~ 2007/07 美國紐約哥倫比亞大學 地球與環境工程系 訪問學生
獲獎記錄	2006 國科會「補助博士生/博士後研究人員赴國外研究」計畫 2003 中興工程顧問公司博士班獎學金 2002 第十五屆環境規劃與管理研討會 最佳論文獎
學術專長	永續環境系統分析 自來水管網系統規劃與管理 人工智慧 地理資訊系統 決策支援系統 程式語言： C/C++, JAVA, FORTRAN, PERL, PHP, VB 科研軟體： MATLAB, MATHEMATICA, ARCGIS, MICROSTATION, JBUILDER 作業系統： LINUX, WINDOWS XP 資料庫系統： MYSQL

發表著作

期刊論文

Li, P.-H. and Kao, J.-J., "Segment-based Vulnerability Analysis System for a Water Distribution Network." Civil Engineering and Environmental Systems, 25(1), 41-58, 2008.

(SCI)

Kao, J.-J. and Li, P.-H., "A Segment-based Optimization Model for Water Pipeline Replacement." Journal of the American Water Works Association, 99(7), 83-96, 2007. (SCI)

Kao, J.-J., Li, P.-H., Lin, C.-L., and Hu, W.-H., "Siting Analyses for Water Quality Sampling in a Catchment." Environmental Monitoring and Assessment, 139(1-3), 205-215, 2008. (SCI)

李沛濠, 潘子欽, 劉坤興, 高正忠, 自來水管網管理維護技術, 土木水利雙月刊, 2007。

Liu, K.-H., Li, P.-H., Lin, H.-Y., Lu, L.-B., and Huang, P.-Y., "Local Environmental Information and Sustainability Indicator System." Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering, 16(2), 83-91, 2006.

高正忠, 李沛濠, 潘子欽, 劉坤興, 企業環境資訊公開之國內外現況及趨勢, 工業污染防治季刊, 25(1), 115-138, 2006。

審查中之期刊論文

Li, P.-H., Kwon, H.-H., Sun, L.-Q., Lall, U., and Kao, J.-J., "A Support Vector Machine Based Prediction Model on Streamflow at the Shihmen Reservoir, Taiwan." (submitted)

準備中之期刊論文

Kao, J.-J., Hu, W.-S., and Li, P.-H., "Optimization Models for Siting Water Quality Monitoring Stations in a Catchment." (to be submitted).

研討會論文

李沛濠、高正忠, 基於制水閘分區之換管及缺水調配規劃模式, 第三屆海峽兩岸飲用水安全控制技術及管理研討會, 2006。

Kao, J.-J., Pan, T.-C., Li, P.-H., and Lin, C.-M. (July 2005) "A Prototypical Web-based Regional Environmental Sustainability Index System." 2005 IASME / WSEAS International Conference, Vouliagmeni, Athens, Greece.

林宏嶽、李沛濠、劉坤興、陳立夫、郭菁, 環境資訊建置規範及新竹市公開系統推動現況, 地方資料庫研討會, 景文技術學院, 2004。

李沛濠, 高正忠, 自來水管網水質監測站點選址模式, 第十五屆環境規劃與管理研討會, 環境工程學會, 2002。

李沛濠, 高正忠, 基於制水閘分區評估自來水管網可靠度, 第十九屆自來水研究發表會,

	<p>中華民國自來水協會，2002。</p> <p>高正忠、林宏嶽、李沛濠，環境資訊管理與公開法規研擬之探討，環境資料庫及資訊系統建置研討會，行政院環保署，2002。</p>
<p>參與計畫</p>	<p>2001.2~2001.12，「整合性詮釋資料庫之建立計畫」，行政院環保署監資處。</p> <p>2001.8~2002.7，「國科會永續發展知識管理系統計畫」，國科會。(NSC 90-2621-Z-002-038)</p> <p>2002.2~2002.12，「環境資料庫之詮釋系統建置、管理及公開規範制定、地方環境資料庫調查及規劃暨教育宣導計畫」，行政院環保署。(EPA-91-L105-02-214)</p> <p>2002/7~2003/9，「自來水管網決策支援系統發展之研究」，教育部國際學術合作計畫。</p> <p>2002.8~2003.7，「自來水管網可靠度提昇之研究」，國科會。(NSC 91-2211-e-009-015)</p> <p>2002.8~2003.7，「永續台灣的願景與策略研究-子計劃一：永續發展知識庫之建立(V)」，國科會。(NSC 91-2621-Z-002-028)</p> <p>2003.7~2003.12，「九十二年度新竹市空氣品質與相關環境資訊系統規劃計畫」，新竹市環保局。</p> <p>2003.6~2003.12，「加壓站操作最佳供水模式之探討規劃」，臺北自來水事業處。</p> <p>2003.8~2004.7，「基於制水閥權重可靠度之自來水管網換管規劃(II)」，國科會。(NSC 92-2211-E-009-018)</p> <p>2003.8~2004.7，「永續台灣的願景與策略研究：永續發展知識庫之建立(VI)」，國科會。(NSC 92-2621-Z-002-033)</p> <p>2004.2~2004.12，「九十三年度新竹市空氣品質與相關環境資訊系統建置維護計畫」，新竹市環保局。</p> <p>2004.8~2005.7，「自來水管網決策支援系統」，國科會。(NSC 93-2211-E-009-020)</p> <p>2004.8~2005.7 今年度的，「永續台灣的願景與策略研究：永續發展知識管理系統建立之整合成果呈現推動計畫」，國科會。(NSC 93-2621-Z-002-031)</p> <p>2005.2~2005.12，「新竹市空氣品質與相關環境資訊系統維護計畫」，新竹市環保局。</p> <p>2005.8~2006.7，「管網可靠度提升決策支援系統」，國科會。(NSC 94-2211-E-009-010)</p>