

國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

碩士論文

自來水測漏小區管網劃分程序及優選模式

**District Metering Area Partition Procedure and Optimization Model
for Water Distribution Network Leakage Detection**

研 究 生：莊立偉

指 導 老 師：高正忠教授

中華民國九十七年 七 月

自來水測漏小區管網劃分程序及優選模式

District Metering Area Partition Procedure and Optimization Model for Water Distribution Network Leakage Detection

研 究 生：莊立偉

Student : Li-Wei Chuang

指 導 教 授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao

國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Environment Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environment Engineering

October 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年 七 月

摘要

自來水管網管線老舊破損會造成水在運送途中漏損，浪費珍貴的水資源，因而有必要執行「小區測漏」找出漏水管線，然目前測漏小區主要是依經驗劃分，多未系統化考量管網連通性及管線漏水潛勢因子，造成所劃分小區的測漏效益可能不佳。本研究因而以類似制水閘分區的獨立管網單位(Independent Network Unit, INU)當作小區劃分的基本單位，以簡化原始複雜的管網系統，並根據管線損壞機率、供水面積管線長度、用戶數量等因子，研擬可合理反應管網漏水潛勢的三個因子，且據以建立一個啟發式的優先測漏小區劃分程序，該方法可迅速取得結果，唯可能不是優選解，因而進一步提出優選模式劃分優先測漏小區，並應用基因演算法求解，以期求得管網中具有最大漏水潛勢因子的優先測漏小區，利於水公司執行小區測漏，提升管網檢漏效率。

本研究以台中市第四區的管網案例測試所發展程序及模式的適用性與可行性，以劃分三區的結果發現所發展的程序確可劃分出漏水潛勢因子所定義的高漏水潛勢小區，其中以依單位管長漏水潛勢因子所得結果最佳，以單位面積漏水潛勢因子所得結果最差。而模式所劃分出的優先測漏小區，證明可改善啟發式程序的缺點，劃分出更高漏水潛勢的小區，且聚集了較多個 INUs，供進一步縮小可能漏水之區域，讓測漏的效率與效益更高。

關鍵字：測漏小區、漏水、自來水配水管網、優選、基因演算法、永續環境系統分析

Abstract

In an aged water distribution network (WDN), a significant amount of water is frequently lost due to pipeline leakage. In order to prevent the leakage, delineating a WDN into numerous District Metering Areas (DMAs) is an effective approach for implementing leakage detection tasks. In Taiwan, DMAs were usually divided based on the empirical experiences of related engineers or planners without actually evaluating the leakage potential and connectivity of the DMAs. In this study, the Independent Network Unit (INU) is proposed to simplify a complex WDN and to serve as the smallest unit to form a DMA. The leakage potential of a DMA is evaluated based on a pipe failure rate and three major factors of leakage potentials per unit area, per unit pipe length, and per consumer, respectively. A heuristic procedure is proposed to delineate DMAs. Although the procedure can divide DMAs efficiently, the solution obtained may not be the optimum. An optimization model is thus developed and a Genetic Algorithm (GA) is applied to solve the model. The procedure and the model proposed in this study are intended to provide systematic approaches to delineate DMAs which have high leakage potential.

The Taichung City WDN of the Taiwan Water Corporation is the case study area for demonstrating the applicability of the proposed procedure and model. The procedure was applied to find three DMAs with high leakage potential based on the three aforementioned factors. The results for the leakage potentials per pipe length and per consumer are obviously superior to those for the leakage potential per unit area. The results obtained by the model can delineate DMAs with obviously larger leakage potential and more INUs than those obtained by the heuristic procedure, and subsequently the leakage detection tasks can be effectively implemented.

Key words: district metering area; leakage; water distribution network; optimization; genetic algorithm; sustainable environmental systems analysis.

致謝

能夠完成這本論文，首先要感謝父母的栽培，還有阿麻從小每天的照顧，三不五時跟我打打鬧鬧的妹妹，沒有他們，我沒辦法這麼順利的讀到研究所。還有大學時期的蕭政宗老師的指導，以及瑞艷、阿府、王 A、韓吉一起在圖書館奮戰，讓我順利進入交大。

此外更要感謝我的指導老師 高正忠教授對於論文方向的指點以及沛濠、子欽、冠華、坤興學長不厭其煩的協助我解決研究上的問題，還有自來水公司六區 郭得祿課長、四區 林清鑫課長、三區工程師 孫志仁，北水范總工…等對於論文上所需資料的提供，以及實務經驗的授與，讓這本論文增色許多，也更加的嚴謹。

親民、涵翔、雅茹、彥超、育農、家豪、宥禔、皮皮、旻韓、士強、彥瑋、雅如、展帆、京澄、還有所上的大家，陪我度過兩年多的研究所快樂時光，讓我可以放鬆做研究時的疲憊。

最後把這本論文獻給我的所有朋友，以及能夠協助你解決問題的無名氏。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
符號說明.....	x
第一章 前言.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究流程.....	4
1.4 論文內容.....	4
第二章 文獻回顧.....	7
2.1 國內自來水管網現況.....	7
2.1.1 售水現況分析.....	7
2.1.2 管網現況.....	9
2.2 管網漏水分析.....	9
2.2.1 無收益水費與真實漏水量.....	9
2.2.2 漏水原因分析.....	9
2.2.3 漏水控制及改善策略.....	10
2.3 測漏小區.....	11
2.3.1 小區檢測方法.....	11
2.3.2 小區劃分原則.....	12
2.4 損壞機率.....	13

2.5 基因演算法	14
第三章 優先測漏小區劃分程序.....	15
3.1 獨立管網分區(IS)與獨立管網單位(INU)	15
3.2 管線損壞機率	20
3.2.1 漏水潛勢分析	26
3.3 啟發式優先測漏小區劃分程序	30
第四章 優先測漏小區優選模式.....	34
4.1 優先測漏小區劃分優選模式	34
4.1.1 劃分因子	35
4.1.2 分群數與連接度指數.....	35
4.1.3 優選模式.....	38
4.2 以基因演算法求解優選模式	40
4.2.1 基因演算法簡介.....	40
第五章 案例研討.....	43
5.1 案例區介紹與資料蒐集整理.....	43
5.2 優先測漏小區劃分程序.....	45
5.2.1 單位面積漏水潛勢	45
5.2.2 單位管長漏水潛勢	48
5.2.3 單位用戶數漏水潛勢.....	50
5.2.4 小結	52
5.3 優先測漏小區優選模式.....	53
5.3.1 單位面積漏水潛勢	53
5.3.2 單位管長漏水潛勢	56
5.3.3 單位用戶數漏水潛勢.....	59
5.3.4 小結	62
第六章 結論與建議.....	63

6.1 結論.....	63
6.2 建議.....	64
參考文獻.....	65
附錄 小區測漏流程.....	68



圖目錄

圖 1.1	研究流程圖.....	6
圖 2.1	台灣自來水股份有限公司配水量與抄見量比較圖.....	8
圖 3.1	INU 判識示意圖.....	16
圖 3.2	案例區經轉換後之 IS 網路圖.....	17
圖 3.3	原始管網轉換成 IS 網路再轉換 INU 網路示意圖.....	18
圖 3.4	IS 合併為 INU 示意圖.....	19
圖 3.5	維修資料管材件數直條圖.....	27
圖 3.6	不分管徑管齡與損壞次數迴歸分析圖.....	28
圖 3.7	管徑<250mm 管齡與損壞次數迴歸分析圖.....	29
圖 3.8	管徑 250mm~300mm 管齡與損壞次數迴歸分析圖.....	29
圖 3.9	管徑>350mm 管齡與損壞次數迴歸分析圖.....	30
圖 3.10	優先測漏小區劃分啟發式程序流程圖.....	32
圖 3.11	優先測漏小區啟發式程序示意圖.....	32
圖 4.1	五個 INUs 的连接度指數範例及其值.....	37
圖 4.2	基因交配.....	42
圖 5.1	案例區原始管網圖.....	43
圖 5.2	案例區取水點分佈圖.....	44
圖 5.3	案例區制水閥分佈圖.....	45
圖 5.4	個別 INU 之 F/A 大小示意圖.....	46
圖 5.5	以 F/A 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖.....	47
圖 5.6	以 F/A 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖.....	47
圖 5.7	個別 INU 之 F/L 大小示意圖.....	48
圖 5.8	以 F/L 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖.....	49

圖 5.9	以 F/L 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖.....	50
圖 5.10	個別 INU 之 F/C 大小示意圖	50
圖 5.11	以 F/C 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖	51
圖 5.12	以 F/C 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖.....	52
圖 5.13	以 F/A 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區 ..	54
圖 5.14	以 F/A 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名.....	55
圖 5.15	以 F/L 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區 ..	57
圖 5.16	以 F/L 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名.....	58
圖 5.17	以 F/C 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區 ..	60
圖 5.18	以 F/C 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名.....	61

表目錄

表 3.1	納入建構漏水潛勢因子的管線漏水原因	22
表 3.2	暫不納入建構漏水潛勢因子的管線漏水原因	23
表 3.3	依水壓及管材之漏水量推估公式	26



符號說明

- IS : 獨立管網分區(Independent Segment)
- INU : 獨立管網單位(Independent network unit)
- U : 漏水量
- P : 水壓
- j : 某一管線。
- γ_j : 管線 j 在某年度每公尺之損壞次數。
- a 、 b : 迴歸之數值。
- t : 欲計算損壞機率之年度。
- k : 管線建置日期。
- P_j : 管線 j 損壞機率。
- L_j : 管線 j 之長度，以公尺為單位。
- W_j : 管線 j 上之用水量。
- F_j : 管線 j 之漏水潛勢。
- dia : 管徑。
- A : 面積。
- C : 用戶數。
- W_f 、 W_d 、 W_s : 權重。
- i, j : INU 的代碼。
- R_j : INU j 的區域大小屬性(如面積 A_j 、管長 L_j 、用戶數 C_j 等)。
- 小區 i : 以 INU i 為代表的小區。
- f_i : 小區 i 之漏水潛勢總值。



- r_i : 小區 i 之區域大小屬性總值。
- $D_{i,j}$: 若 INU_i 與 INU_j 相鄰，則其值為 1，反之為 0。
- d_i : 以小區 i 之連接度(connectivity)。
- G_i : 小區 i 之分群數。
- s_i : 小區 i 之某計量(如面積、管長、用戶數或是權重和)總值。
- TS_{min} 、 TS_{max} : 優先測漏小區某計量總值之最小值及最大值。
- ss_i : 小區 i 之某計量總值與欲劃分之優先測漏小區某計量最大最小值和之半的差值絕對值。
- N : 欲劃分出的優先測漏小區數目。



第一章 前言

1.1 研究緣起

台灣地區年平均降雨量雖為全球平均值三倍，但為世界第 18 位缺水的國家(北水處，2004)，水資源因而在台灣顯得格外重要。當水資源匱乏時，不外乎有「開源」與「節流」兩種方法來增加水資源(駱等，1997)。「開源」即尋找新水源，如興建水庫、抽地下水、海水淡化等，但因成本都頗高或已很難找到新水源，因此「節流」便為一重要的途徑。由於台灣的自來水系統老舊，漏水率高，若能使自來水不在運送過程中損失，即為一有效的節流方式。若能做好漏水控制，可降低自來水在管線中漏損，避免水資源浪費與提昇水公司售水率。

欲有效降低自來水管網中的漏損，小區管網 (District Metering Areas, DMA) 策略是國際間普遍採用的方法(WRc, 1994)。小區測漏可有效提升偵測到漏水區的機率。然而國內的管網在多年前建置時，並未依據設置 DMA 的需求加以規劃設計，導致在舊管網中，經常不太容易重新規劃 DMA，這也是國內自來水公司及台北市自來水事業處雖已嚐試小區測漏多年，但成效仍不顯著的主因之一，因而有必要發展一個工具協助工程師劃分小區。

劃分小區管網，根據國外的經驗，通常以天然地形與人造設施當邊界，並以 500~3000 個用戶栓(connections)為一單位(WRc, 1994; Farley and Trow, 2003; Charalambous, 2005)，而國內一般以管線長度 2km、1000~3000 戶為一小區(朱，2005)，亦採用天然地形與人造設施來當小區邊界(吳，2005)。以地面屏障物當作小區之分隔便於執行小區監測。但由於國內的管網屬連通性高的管網，不易建立獨立小區，且漏水潛勢受到很多因子所影響，例如管線材質(材質、管齡)、管內狀況(水壓、水質)、埋設環境(如

交通荷重、地盤下陷、土壤特性、地震帶等)等(Felipe & Leonel,1997; Covas et al., 2005; 北水處, 2003; 郭等, 2004; 褚等, 2004), 假若未考量這些漏水潛勢因子而僅依照地面屏障物來劃分小區, 將不易掌握高漏水潛勢管線, 因而不見得能有效改善漏水。此外亦應考量售水率與維修紀錄。售水率低一般也伴隨著漏水率高, 若能改善漏水, 亦能提高成本效益, 針對售水率較低的區域進行小區劃分預期會有較大改善效益; 而維修紀錄可以用以評估管線損壞機率, 本研究因而將分析上述資訊及以地理資訊系統(Geographic information system, GIS)資訊試著發展漏水潛勢評估方式, 並據以發展優先測漏小區劃分的程序及優選模式。

由於國外先進國家的自來水系統在設置時即將 DMA 納入考量, 故沒有劃分的問題, 而一些未在一開始即劃分 DMA 的國家如葡萄牙雖曾有學者(Covas et al., 2006)針對舊管網執行 DMA 劃分, 但並未提供系統化的劃分程序, 雖然亦有一些模式可供模擬及分析漏水影響, 如 EPANET2(Rossman, 2000)、BABE (Burst and Background Estimate) Methodology (McKenzie and Bhagwan, 2002)等模式。但因國內管網資料尚不足以建立這些模式。本研究因而試著建立一套適用於國內管網的測漏小區劃分程序與優選模式, 然而由於原始管網通常甚為複雜, 不易分析, 因而參考 Walaski(1983)所提出的制水閥分區, 並擴及至擬設及可設流量計之節點, 將複雜的原始管網簡化為由獨立管網分區(Independent Segment, IS)並進一步將 IS 結合成獨立管網單位(Independent Network Unit, INU), 以提高後續分析的效率。

發展優先測漏小區劃分程序及優選模式前, 本研究首先分析小區劃分所須考量的因子及可取得的資料, 包括前述的售水率、維修紀錄、管線特性、漏損因子、漏水潛勢等, 再依各因子的重要性及資料可取得性等建立篩選因子。由於劃分小區之後, 實際實施小區測漏需要進行關閉制水閥、設置流量計監測及抄錶記錄比對等工作, 需要不少人力時間及成本(經濟部水利署,

2006; Charalambous, 2005)。因此目前不太可能進行全區管網小區測漏。為了解決上述問題，本研究試著發展一個系統化的程序與優選模式找出預期改善效益較高的優先測漏小區，以期提升小區測漏的成本效益。所建立的程序及模式均採用自來水公司所建立的管網地理資訊資料，讓劃分程序及模式均可電腦化，以提高分析效率，且實際應用及測試所發展的方法。且以實際管網案例(自來水公司第四區的台中子系統)測試所發展程序及模式。

1.2 研究目的

本研究發展一套適用於台灣自來水管網之優先測漏小區劃分程序及優選模式，並從售水率、維修記錄、管線特性、漏損因子、漏水潛勢等會影響管線漏水的因子中，依各因子影響性、可分析性及資料可取得性等原則篩選出適用的因子，建構出漏水潛勢指標以推估管線損壞機率，並以獨立管網單位(Independent Network Unit, INU) 的總需水量、INU 的供水面積、INU 的總管線長等因子制定一套程序與優選模式劃分優先測漏小區，以提升執行小區劃分之效率，並期能提高小區管網檢漏的成效。主要研究目的有下列二項：

1. 發展系統化程序以有效提升優先測漏小區劃分效率：由於過往設計管網時未特別針對小區劃分做規劃，而目前國內小區劃分大多依據經驗。本研究因而建立一套啟發式且系統化程序劃分優先測漏小區，以期迅速獲得劃分結果，有效提升優先測漏小區劃分效率，亦期望能因此提高小區管網檢漏之成效。
2. 發展優選模式供劃分出漏水潛勢較高之優先測漏小區：由於啟發式優先測漏小區劃分程序雖可快速取得結果，唯可能不是優選解，因此本研究更進一步提出優先測漏小區劃分優選模式，並應用基因演算法求解，以

期能求得管網中具有最大漏水潛勢因子之優先測漏小區，以期更進一步提高檢測的效益。

1.3 研究流程

本研究流程圖如圖 1.1 所示，主要分為資料蒐集、小區劃分相關資料整理與分析、優先測漏小區劃分程序、優先測漏小區劃分優選模式等工作項目，以下一一說明之：

1. 資料蒐集：主要蒐集國內外小區設置、漏水因子、漏水檢測、漏水防治、基因演算法等相關文獻。並且蒐集案例區之用戶抄表紀錄、GIS、維修紀錄等資料。
2. 小區劃分相關資料整理與分析：包括空間資料處理、管線資訊及維修記錄分析、漏水潛勢評量方法之建立、IS 及 INU 劃分等作業，主要將四區台中市系統資料處理，以利執行所建立的優先測漏小區劃分程序及優選模式。
3. 優先測漏小區劃分程序：依四區台中市系統為案例區，發展一個啟發式程序劃分優先測漏小區，期能迅速劃分優先測漏小區。
4. 優先測漏小區劃分優選模式：由於上述優先測漏小區劃分程序可能不易找到最有效率的方案，故本研究進而以小區漏水潛勢值最大化為目標，發展優選模式劃分優先測漏小區。

上列步驟將在之後各章節中詳述之。

1.4 論文內容

本論文之後章節，第二章回顧所收集的相關文獻，說明目前台灣自來水管網現況、其他國家小區設置情形與影響管線漏水相關因子等相關文章。第三章說明所發展的優先測漏小區劃分程序，詳述該程序劃分小區的流程、IS、INU 與管線損壞機率等。第四章說明所發展的優先測漏小區優

選模式，根據前一章所說明的 INU 與管線損壞機率以優選模式劃分小區，由於該優選模式不易直接求解，故以基因演算法求解，該章亦詳述如何以基因演算法求解。第五章說明案例研討，以四區的台中市案例以所發展的程序與模式劃分優先測漏小區。第六章總結本研究並提供後續研究建議。



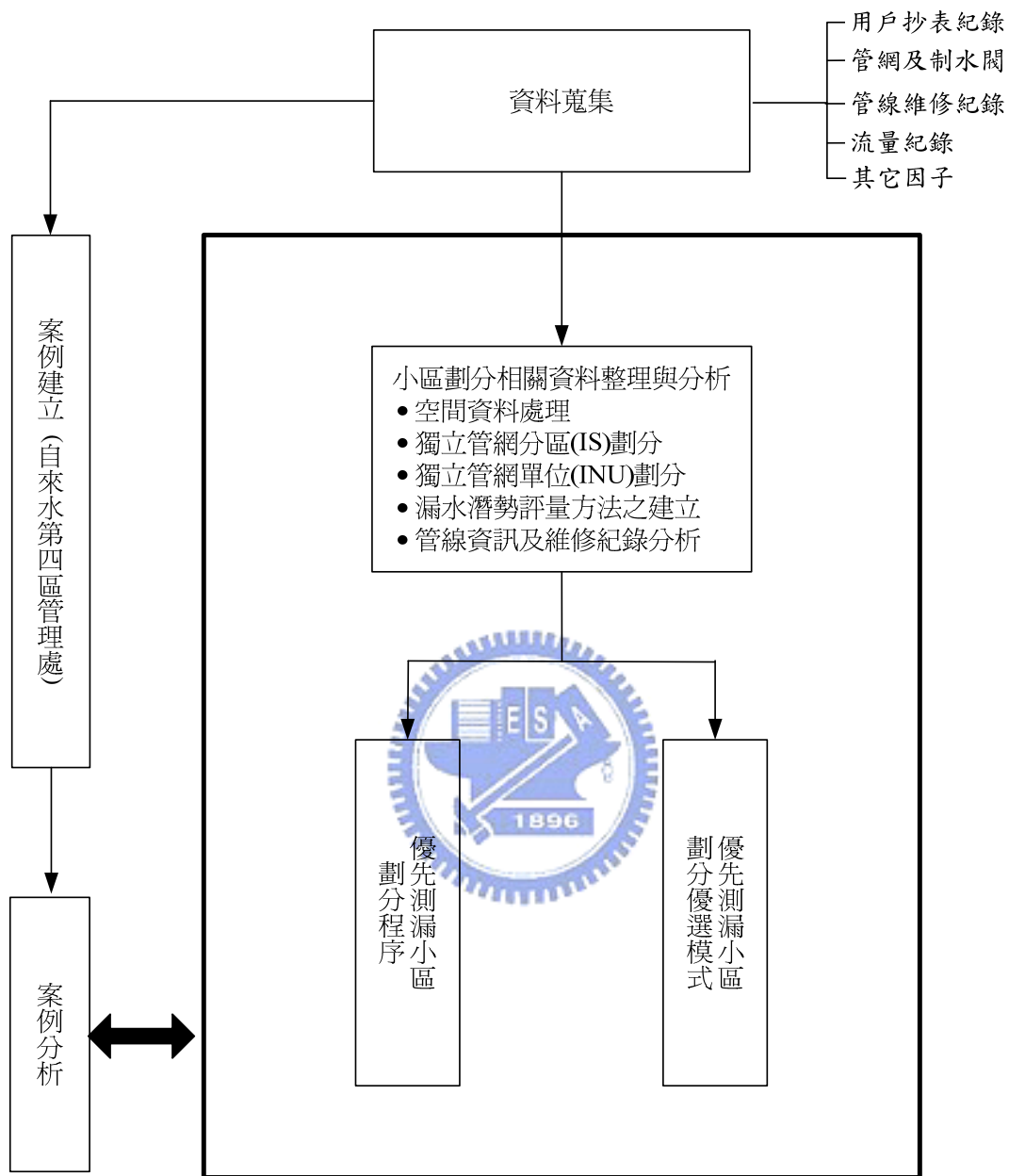


圖 1.1 研究流程


第二章 文獻回顧

本章主要回顧及討論與本研究相關的回顧，除了探討過去已有的相關研究成果，並探討本研究的重要性及所擬用於劃分測漏小區方法的可行性。相關重要文獻主要分為國內自來水管網現況、管網漏水分析、測漏小區、損壞機率、基因演算法等主題，以下各節一一討論各主題之相關文獻。

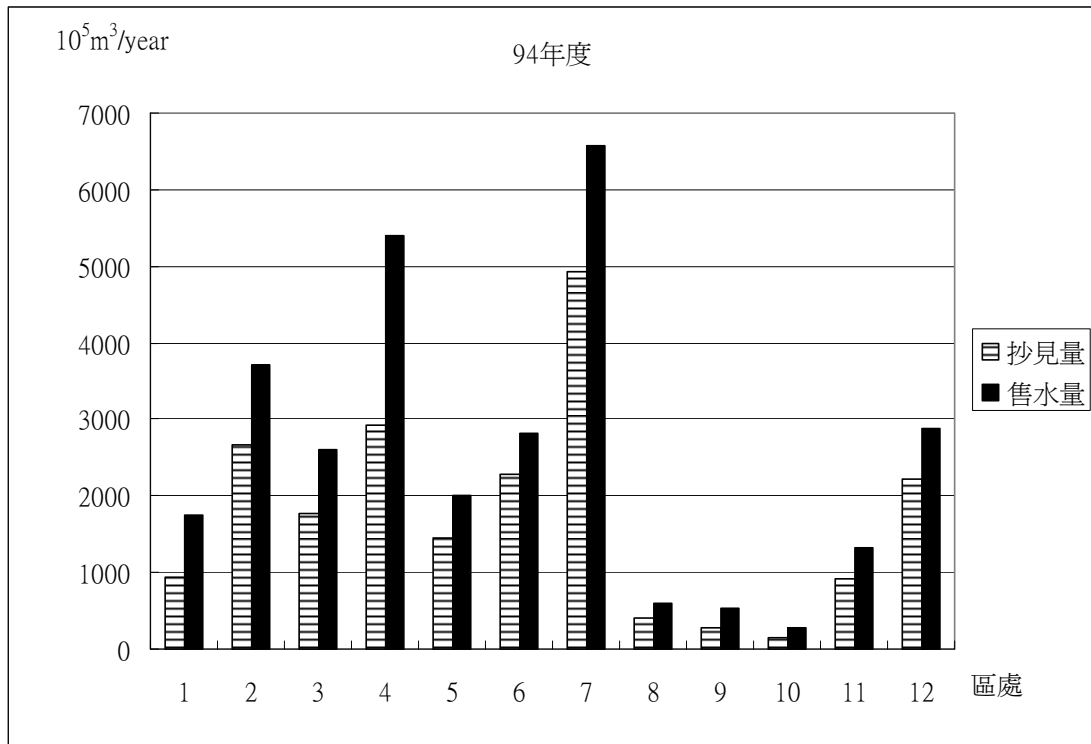
2.1 國內自來水管網現況

台灣自來水管網老舊漏水嚴重，加上台灣是屬水資源匱乏的地區，因而自來水管網漏水是應加以重視的問題，以下就台灣地區目前售水現況與管網現況討論之。

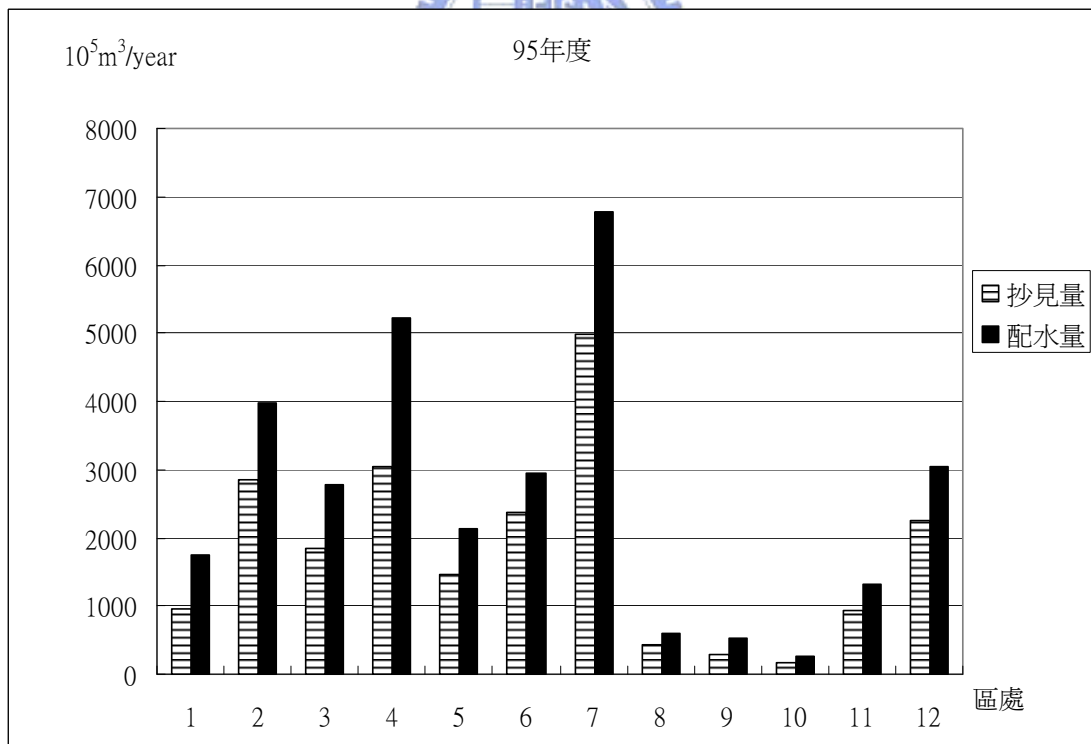
2.1.1 售水現況分析



台灣自來水股份有限公司網頁上公佈（96年）的94及95年年度配水抄見量，如圖2.1所示，由該圖可以看出，每個區處的無收益水量(配水量－抄見量)比例均不小，研究案例區第四區95年度更高達41.5%。台北市自來水事業處在赴日本東京考察漏水改善實務報告(北水處，93年)中提及92年度東京都漏水率僅為4.7%。而在考察新加坡自來水業務報告(北水處，91年)中指出新加坡91年漏水率亦僅為5%。若能將無收益水量降低，即可補充不足的水資源，且亦可增加水公司之營收。



(a)



(b)


圖 2.1 台灣自來水股份有限公司配水量與抄見量比較圖：(a)94 年度；(b)95 年度

2.1.2 管網現況

根據第二十屆國際自來水協會(IWA)(2000)建議，管網管線每年至少需達到 1.5%更換率才可維持管網的可靠度。即使根據 1.5%更換基準，則平均也約需 66 年才會更換到同一根管線，然而 95 年度水公司管線汰換率僅 1.33%。且根據該年度水公司統計管網資料指出，管材屬 PVC-P 者佔了所有管網的 79.8%，而行政院頒訂財務標準分類之使用年限(94 年)表中，PVC-P 管線使用年限為 20 年，水公司管網中的管線亦可能因而更不可靠而造成售水率偏低。

2.2 管線漏水分析

2.2.1 無收益水量與真實漏水量

The logo for Water Audit is circular with a blue border. Inside, there's a stylized water tap and the text 'Water Audit' in a circular arrangement. Below the tap, the year '1896' is visible. The logo is partially overlaid by the text of the paragraph.

Algre *et al.* (2000)所建議 Water Audit 中定義的無收益水量(Non-revenue water, NRW)包括免費授權用水量(Unbilled authorized consumption)、流失量(Apparent losses)、與漏水量(Real losses)三者之總和，免費授權用水量為市政消防用水等；流失量為表差、竊水等；以上二者不屬漏水量，漏水量即為管線漏水。而 Farley and Trow(2003)亦認為在無收益水量中以漏水量佔較大比例。故若可改善真實漏水量，可有效減少水資源的損失。

2.2.2 漏水原因分析

自來水管線乃由眾多直、彎管構成，長期使用下很難避免管線完好如初不發生漏水。自來水公司在修漏案件處理單(自來水公司, 92-97 年)內將管線漏水原因分為電腐蝕、荷重與震動、水錘、地盤下陷、施工不良、回填不良、材質老化、意外施工破壞等八類；管線修漏時常發生漏水的原因有折斷、破孔、裂痕、脫接、橡皮墊老化、管鞍(分水栓)。郭等(93 年)指

出管線汰換率偏低、管線材質不良、防火巷管線維修困難、同一巷道多條給水管、施工挖損漏水、各種管線重疊錯置、部分殘存管斷管未徹底、管線圖面資料不全影響修漏成效等八個是造成管線漏水的原因。駱等(86年)在減少漏損及無費用水之經濟研究中亦指出，管線材質不良、設計及施工欠周全、管線周遭環境改變、工事意外破壞、操作水壓過高等都會使管線發生漏水。國外相關文獻中，Felipe and Leonel (1997)提及土壤、水質、水壓、管齡等會造成管網漏水。Covas et al (2005)認為管齡、水壓、管線保護不足、電腐蝕等因素會導致管線損壞。Fanner (2004)指出 IWA 將漏水量定義為物理性漏損(physical losses)，造成物理性漏損有管線接頭漏損、儲水槽溢流、管線破裂等。

總觀過往研究所提出的漏水原因，可發現造成漏水的物理性、化學性與環境因子眾多，不易全部分析，加上考量資料的可取得性，故最後本研究以管齡當作漏水潛勢之主要考量因子，主要管線維修記錄資料庫與管網資訊擷取相關資料，發展一套管線漏水潛勢推估公式，以利後續小區劃分決策之執行。

2.2.3 漏水控制及改善策略

根據上節所述的漏水原因，若能針對漏水原因做改善，可減少管網漏水。駱等(86年)曾提出漏水防治的幾個方法：

- (1) 降低漏水發生率：包括供水壓力調整、管線材料施工要求、換管等。
- (2) 找出漏水並加以修理：聽音作業、計量作業(流量監測、小區計量)等方法、被動式漏水控制。

壓力調整屬於治標的方法，並未實際維修會漏的管線，且目前水公司調整壓力方式多仰賴人工判斷，在離峰時段降低水壓，此舉不易掌握管網實際需求水壓，易造成管線末端水壓不足進而影響用戶。聽音檢漏易受外界影

響，如地下水層，外界噪音，且需耗費人工實際勘查，較不符合效益。朱(83年)指出，若能建立輸配管網之監控系統，監控各種要輸水幹管每一時段的水壓、水質、日配水量等，發現異常時可及時派員檢測維修，減少漏水狀況發生。王(89年)則建議配水系統的小區模式應予重視，以提升緊急或地震等災害的應變能力，短時間內完成維修。蔡(90年)亦認為將給水區域的配水管網小區化，可提升管路系統安全度。Covas *et al.*(2006)以設置小區來縮小可能漏水範圍，再進行人工測漏找出漏水點以提升售水率。WRc(1994)調查世界各國發現小區測漏為普遍被用來控制漏水的方法，且可有效檢測出可能的漏水區域，並執行有效的漏水改善策略，因此為一有效的漏水控制法，國內亦宜規劃及推動小區測漏。

2.3 測漏小區

2.3.1 小區測漏執行方法



李(95年)在試辦計量小區檢漏之效益研析一文提及，近年國內亦因平均降雨量減少且用水量逐年增加，導致水資源不足，有必要改善管線漏水，因而開始採行小區檢漏策略，欲降低自來水在輸送過程中的漏水量。並在過往的執行經驗中，證明可有效掌握漏水及進行修復。范及張執行小區檢測的經驗(96年)，大略將國內可考量實施的小區測漏分為以下五種方法：

- (1) A 法：在小區的進流點設流量計監測，利用內插法將區內用戶兩個月抄表記錄換成與流量計抄表區段同一區間，經與進流點的總表比較，計算出漏水量。
- (2) B 法：派員實際在四個小時左右抄完小區所有用戶水表，兩個禮拜後再抄一次，搭配建置在小區邊界上的進流點流量計在這個時間區段數值，兩者差值為漏水量。

- (3) C 法：即為國際上常用的夜間最小流法(Minimum Nighttime Flow, MNF)(Farley and Rrow, 2003)，利用流量計量測，記錄時間及流入小區之瞬時流量，以 X 軸為時間，Y 軸為流量，繪製成一瞬時流量曲線。累計一日之瞬間流量即為小區日平均量，在深夜用戶用水少，會測得瞬間流量最小值，此為夜間最小流量。若此時段無人用水則該流量視為漏水量。
- (4) D 法：亦稱直接法，直接將小區內用戶栓全部關掉，並同時間內監測進流點流量計數據，該數值則視為漏水量。
- (5) 間接法：僅針對部分用水大之場所進行關閉止水栓，而不關閉用戶表前之開關，於離峰時段連續量測區內用水量，並測出所出現最低之用水空檔流量，該數值視為漏水量。

劃分小區測漏時亦有必要考量執行這些小區測漏方法時的便利性與經濟性，本研究因而將用戶數或栓數納入劃分小區的考量因子之一。

2.3.2 小區劃分原則

陳(73 年)及李(89 年)建議小區管網規劃原則如下。

- (1) 每一分區面積為 20~50 公頃。
- (2) 每一分區人口 5,000~10,000 人，最多不超過 15,000 人。
- (3) 每一分區用水量為 4,000~8,000CMD，最大不超過 12,000CMD。
- (4) 每一分區送配水管長度為 2~6 公里。
- (5) 每一分區內的水壓相差不超過 $\pm 20\%$ ，當最大用水量時水壓不能低於 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，而當最小用水量時水壓不能高於 $4.0\sim 5.0\text{ kg}/\text{cm}^2$ 。
- (6) 每一分區之進水開關 1~2 處。
- (7) 每一分區裝設總水表，必要時裝設壓力表。
- (8) 分區內的抄表時間應盡量集中，用以對照確實抄表率。

台灣自來水股份有限公司第三區管理處執行小區測漏時則建議劃分

小區應以管線 1.7KM~3.5KM 為一區，用戶數 1000~2500 戶。

Charalambous(2005)則指出應採用公路、河流等當作小區的邊界，3000 用戶數當做一小區之大小。IWA(2004)則建議一個良好的 DMA 應具備以下幾點：

- (1) 小區內的高程變化小。
- (2) 容易邊界劃分出來。
- (3) DMA 盡量僅有一個進流點。
- (4) 壓力足夠供給給 DMA 用戶使用。

綜觀過往在執行測漏小區劃分的時候，多以行政邊界或者道路河川等地上邊界為劃分原則，並未考量管網的漏水潛勢分佈，因此可能將漏水潛勢較高的區域劃分在不同的小區，造成漏水控制成本的增加，需執行多次的小區檢漏才能達到較好的漏水改善成效。且過往的研究僅提出一些小區的劃分原則，並以人工進行小區劃分，需耗費較多的人力成本，且可能因實際自來水管網的複雜連通關係而不易找到可關閉小區的恰當邊界。因此，為使劃分出來區域符合水公司人員執行測漏經驗的標準，並根據經濟部水利署「研訂自來水技術規範漏水防止對策及我國自來水漏水改善對策期末報告書」(95 年)一書中提及用以評估漏水所建議的單位面積、單位管長、單位用水量等因子，本研究因而以管長、面積、用戶數為小區劃分考量因子，並結合由管齡發展的漏水潛勢來劃分小區。

2.4 損壞機率

要評估漏水潛勢，最常用的是方式是評估管網的損壞機率，Walski and Pelliccai(1982)認為管網中的管線會因管齡、管材、管徑而有不同的損壞機率，亦提出一套管線損壞預測方程式，可根據過往管線損壞次數統計回歸出該方程式，並可利用該方程式預測未來管線每單位長度的損壞機率 (break rate)。Su *et al.*,(1987)根據管線的單位長度損壞機率另發展出一套用

以推估管線損壞率(probability of failure)的方程式本研究根據 Su *et al.*,(1987)的公式，將水公司維修資料進一步分析回歸出管線損壞的公式，該公式將用以評估 INU 的漏水潛勢。

2.5 基因演算法求解

以往的研究中，並未找到相關文獻是採用優選模式來規劃小區，如前述，本研究主要以單位面積、單位長度及單位用戶漏水潛勢為目標式，並加入分群及連接度，讓小區內的 INUs 必須連通，且能滿足劃分小區的限制因子(如人口數、管線長度、面積等)。

但本研究所發展模式的目標式並非線性，不易求解，由於基因演算法(Genetic Algorithm, GA)(ref)適用於複雜系統的優化、非線性函數的求解及多目標的規劃，它的蒐尋機制是以多個點並行搜尋，並非單獨一個點，因此對於多峰值的搜尋空間而言是較有機會得到優選解的。亦已有一些研究應用在環境工程及管網問題上，例如 Dandy *et al.*(1996)以紐約下水道管網為例，利用多種改良式 GA 進行系統成本評估；Miranda *et al.*(1994)以 GA 進行多階段水管網的擴建規劃；Simpson *et al.*(1994)以 GA 演算法進行管線優選。Dandy and Engelhardt(2001)則利用 GA 進行自來水管網換管優選的多目標模式問題。國內翁(96 年)研究亦應用 GA 建置污水管網系統配置最佳化模式。

因 GA 可求解複雜的組合問題，且已經被過往的許多研究成功的應用在複雜的管網系統的相關研究上，因此本研究亦採用 GA 求解所發展的小區規劃模式，以期在合理的時間內，決策出較佳的小區劃分結果。

第三章 優先測漏小區劃分程序

本研究已發展一套系統化程序與優選模式劃分優先測漏小區，期能有效劃分出較具高漏水潛勢小區，以提高後續進行小區測漏的效益，提升自來水管網管理維護效率。本章主要詳述優先測漏小區劃分所需的前置步驟及所建立的程序，而優選模式將在第四章中說明之。以下各節將逐一說明獨立管網分區(IS)與獨立管網單位(INU)、管線損壞機率及啟發式優先測漏小區劃分程序。

3.1 獨立管網分區(IS)與獨立管網單位(INU)

由於原始管網管線複雜，直接針對管網進行小區劃分不易掌握其連通性而導致劃分出來之優先測漏小區可能會不易單獨計量。若欲使測漏小區具備能獨立評估的特性，一般是以關閉制水閥或是設置流量計的方式來劃分出測漏小區。Walski(1993)提出的制水閥分區(valve-enclosed segment)正好很適用於本研究，制水閥分區是指由周遭可將該分區封閉的制水閥所包圍的管網，本研究群曾發展了一套制水閥分區辨識演算法及工具(Li and Kao, 2007)，唯之前的工具是以制水閥為劃分點，而測漏小區亦可以流量計來劃分，故本研究的分區與制水閥分區不同，故本研究另外定義獨立管網分區(Independent Segment, IS)以資區別，且將該演算法擴及有設或擬設(含固定位置但臨時設置)流量計的節點，本研究因而修改該工具，用以將管網劃分為若干 ISs，圖 3.1 所示為原始管網與 IS 的對照示意圖，其演算程序如下：

- (0) 以制水閥、有設及擬設流量計的點為此演算程序所考量的區分點。
- (1) 從管網任一節點開始，順著連接此節點但尚未被搜尋過的管線往下連接至下一個節點，如果下一個節點為區分點，則停止該方向的搜尋且

改由另一個方向繼續搜尋；若不是，則繼續往下搜尋，直到所有方向皆無法擴張為止。

(2) 將所有搜尋到的管線、節點判識為一 IS。

從上次搜尋停止的節點開始，繼續(1)、(2)的搜尋演算程序，直到所有的管件都被判識到個別的 IS 為止。以 IS 為單位，可減少後續分析的複雜度。

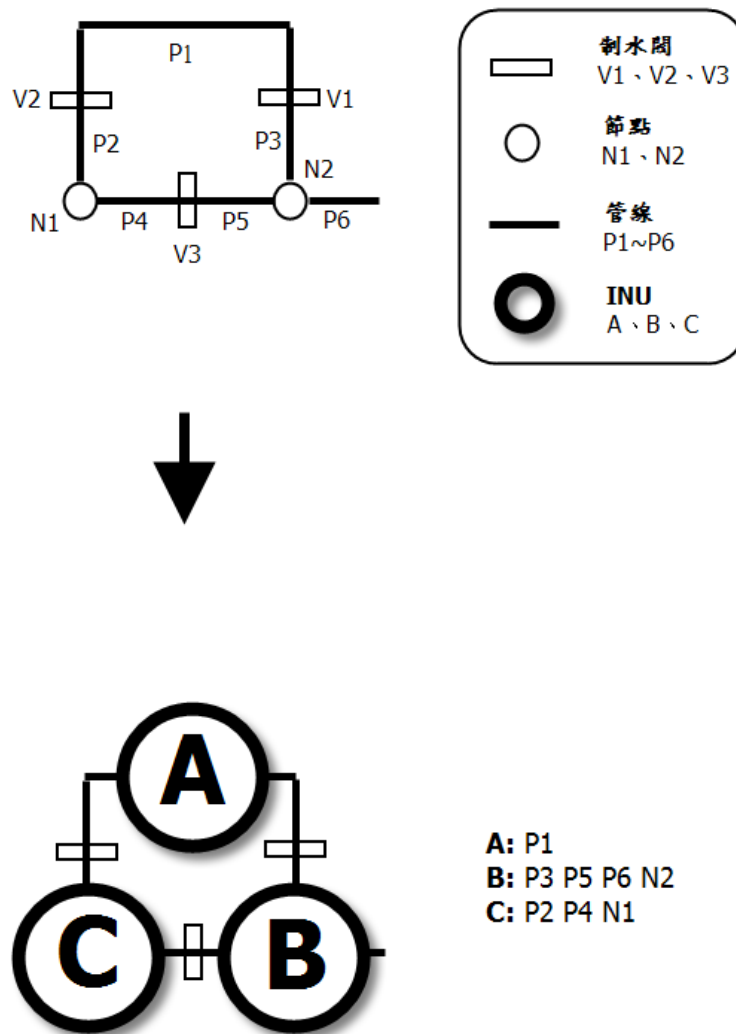


圖 3.1 INU 辨識示意圖

依據上述說明的 IS 辨識演算程序，將案例區原始管網經辨識演算以制水閥、流量計為分區的特性管網後如圖 3.2 所示，其中有 10,587 個 IS，圖中圓點為劃分出來之 IS，線段為 IS 與 IS 間的連接關係。以 IS 為單位分析較以管線為單位符合劃分小區的需求。由於本案例是市區高密度用水區，水公司在管網設計上為了便於管線維修時及避免關閉範圍過大影響過多用水戶，因而設置較密集的制水閥。由圖 3.3(b)亦可發現經 IS 辨識演算後有許多 IS 是連在一直線上的，小區劃分時，也宜在一起，故本研究進一步將一些 IS 進行合併，亦可減少後續進行 GA 演算所需的求解時間，合併後的 ISs 稱為 INU，為本研究分區的最小單位。



圖 3.2 案例區經轉換後 IS 分佈圖

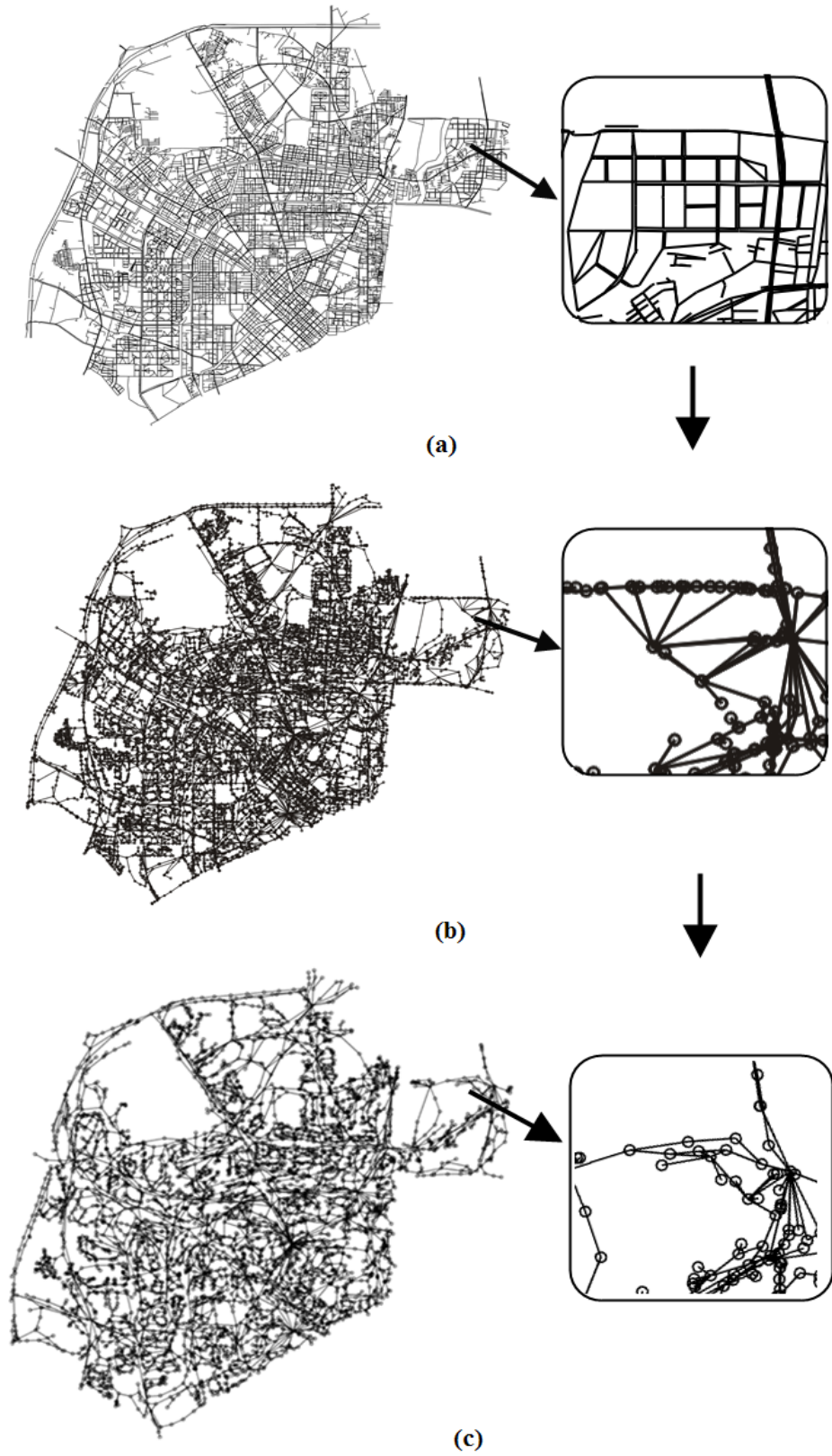


圖 3.3 原始管網轉換 IS 再轉換 INU 示意圖

為避免合併後的新 INU 面積(或人口)太大，結合 ISs 成為 INU 的方法是根據水公司建議劃分小區的管線長度 1.7-3.5KM 當作考量依據，取 3.5KM 的 1/10 為限制條件。取 1/10 的基準在於可讓合併後的新 INU 能仍有足夠的空間與其他 INU 合併，若取的值太大則易錯失較好的分區，此值可依地區特性調整。本研究以 350m 為限制條件合併後的 INU 如圖 3.4，共計有 5,287 的 INU。比較圖 3.3(b)與 3.3(c)可看出前者的直線範圍 INU 密集的连接在一起，經後續的合併後較符合本研究的需求。後續進行小區劃分即以該 INU 網路為依據進行小區劃分。



圖 3.4 IS 合併成 INU 示意圖

3.2 管線損壞機率

由於篩選出的子系統一般範圍較廣，可能的漏水點較多，並不適合直接進行檢漏作業，故需要再進一步將子系統劃分出具高漏水潛勢小區(稱為優先測漏小區)，以提高測漏的效率。

在劃分優先測漏小區之前，如能先掌握管網的漏水潛勢分佈狀況，將可易於將具有較高漏水潛勢之區域篩選出來或對系統做合理性的劃分，故先建立影響系統之漏水潛勢因子。然而由於國內的管線特性與歐美國家頗不相同，故有必要先收集及建立適合評估國內管網的漏水因子，以作為評估漏水潛勢指標之依據。本研究收集相關文獻(如 Dídía Covas et al., 2005; Felipe and Leonel, 1997; WRc, 1998; 台北自來水事業處, 2003; 台灣自來水公司, 2007; 駱, 1997; 郭等, 2004; 洪, 1992; 經濟部水利署, 2006; 褚等, 2006; 陳, 1984; 陳等, 1996)所提及的漏水原因及因子，並根據國內管網特性發展一系列可反應管網系統漏損特性的分析因子，總計如表 3.1 及 3.2 所列共有 27 個指標，以下說明如何篩選。

首先將所收集的漏水原因依其構成種類分類，共分成：(1)管線材質(2)管內狀況(3)埋設環境(4)設計、施工等四種類型。之後再分析這些漏水原因之構成因子與計算方法，若資料取得不易、難以分析或是分析後影響不大之因子都將予以剔除。較重要且可用以評估漏水潛勢的因子整理列於表 3.1，之後將依案例實際資料再進一步探討其適用性；若目前尚無資料或不了解影響程度時，則列入表 3.2 中。以下為就表 3.1、表 3.2 內容分別說明之：

- (1) 表 3.1 所列為構建漏水潛勢因子的管線漏水主要原因，此表為本研究劃分小區之漏水潛勢因子所宜考量的部分，各因子內容如該表所列。
- (2) 表 3.2 所列為暫不納入考量之因子，此表為將來可能改納入表 3.1 的考量因子中。由於這些因子的分析資料目前不易取得、影響不大或是

不易分析，如〔分析困難〕欄之描述，但若將來可取得這些資料及克服困難，可考量納入表 3.1 及用以評估漏水潛勢。水壓那列構成因子的 P 值與 N 值如表 3.3 所示，P 為水壓、L 為漏水量、N 為公式中的參數。

分析結果顯示不少漏水因子都因資料不易取得或是分析不易而未納入考量。經篩選出來的材質、管齡、管線汰換率等三個漏水因子的所需資料較能取得且對管網影響較大，故以該三個因子建構漏水潛勢因子及用來發展劃分程序與優選模式，將分別於 3.2.1 節說明漏水潛勢之應用、3.3 節說明優先測漏小區劃分程序以及 4.1 節說明優先測漏小區劃分優選模式。



表 3.1 構建漏水潛勢因子的管線漏水原因

類型	原因	說明	因子	分析/計算方法	出處	備註
管線材質	材質	強度不足、水密性不佳、耐震性不夠。	1.維修密度 ($\frac{\text{維修件數}}{\text{管線長度}}$) 2.估維修推估總漏水量百分比 (可能加一個分母：管線長度百分比)	以維修資料統計分析出各材質漏水密度及漏水量百分比	1、3 5、6 7、8	因維修主要是針對地面漏水，地下漏水不見得是同一比例
	管齡	使用年限。使用過久，材質老化。	1.管齡 2.使用年限	以維修資料推估最近的管線，並依管齡推估。	1、2 5	
	管線汰換率	第 20 屆國際自來水協會 (IWA) 建議自來水管線汰換率應高於 1.5%，台灣自來水公司 95 年汰換率 1.33%，台北自來水事業處 95 年汰換率 2.46%。	管線汰換率 	維修密度 = $\frac{\text{漏水件數}}{\text{管線長度}}$	3	

表 3.2：暫不納入建構漏水潛勢因子的原因

類型	原因	說明	分析困難	出處
管內狀況	水壓	漏水量和壓力成正比。P 值 N 值(見表 3.4)	需有監控資料。	1、2 6
	水流流況	低流量與管末會有高腐蝕率，彎管或流速快的區域會因水刀現象而腐蝕。	需有監控資料。	
	溫度變化	溫度高會加速化學反應。	影響可能不大。	9
	水質	低 PH、高溶氧、高導電度、高碳酸鹽與氯酸鹽濃度、鐵細菌與硫酸鹽還原劑、低鹼度與硬度、游離氯、金屬離子。	監測資料。	1、8
	水錘	在壓力管線中，因流量之急遽變化而產生之動水壓。	不易分析。	8
	穴蝕	微小的氣泡到特定的地方發生破裂造成管件損壞，可設排氣閥解決。	不易分析。	4、 5、
設計、施工	保護不足	應該設有排氣閥的地點未裝設或是容量不足。	不確認有資料可檢核。	2、8
	技術不良	偷工減料、承包商技術未達標準。	不易分析。	
	施工不良	回填不良、管件閉鎖不牢。	不易分析。	4、 5、 6、 7、8
	電腐蝕	與其它異種金屬接觸，因電位差造成電腐蝕。	不易分析。	2、 4、 5、8
	管線圖面資料不全	影響修漏成效	不易分析	3、7
	設計不良	採用不合適之荷重條件、水質條件、管外環境條件。	需有設計原始資料，或重新跑水力模式。	8

表 3.2：暫不納入建構漏水潛勢因子的原因(續)

類型	原因	說明	分析困難	出處
埋設環境	各種管線重疊錯置	因人口密集，道路空間不足，復因地下各類管線層層錯疊，不但影響施工品質，更造成維修困難，且易被其它施工單位挖損。	需有各種管線的圖層，但目前可能不易取得。	3
	交通荷重	車輛造成管件荷重增加或震動。	資料不易取得不易分析	4、5 6、7
	地盤下陷	土質流失造成的下陷使管件無足夠的支撐力，容易受到外力而破損。	資料不易取得	4、5 6、7
	土壤特性	土壤含酸性或鹽性成份，易造成管件受到腐蝕。	資料不易取得	1、6 7、12
	地震帶	處於地震帶之管線亦受震動脫落損壞。	資料不易取得	
	土壤移動	含水量變化，溫度變化、土壤凍結等使管線破裂或接頭鬆脫。	不易分析。	11
	部分殘存管斷管未徹底	由於埋設給水管線時圖資不足或因時空環境、地形改變，施工人員在廢除舊有管線時，不易尋獲當初接水點位置。	不易分析。	3、7
	外物侵入	路樹根部侵入管體。	不易分析。	10
	同一巷道給水管紛陳	早期部分巷道未埋設配水管，用戶申請接水均各別埋設給水管線，致同一巷道多條給水管線，隨著使用年限，易發生漏水	不易分析。	7
	防火巷管線維修困難	早期用戶在防火巷搭設違建，制埋設於防火巷之管線維修困難又無法更換，易有漏水、竊水等問題。	不易分析。	3、7
管線材質	腐蝕	軟水造成管線內部腐蝕，土壤造成管線外部腐蝕。	不易分析。	1

表 3.2：暫不納入建構漏水潛勢因子的原因(續)

類型	原因	說明	分析困難	出處
設計、 施工	保護不足	應該設有排氣閥的地點未裝設或是容量不足。	不確認有資料可檢核。	2、8
	技術不良	偷工減料、承包商技術未達標準。	不易分析。	
	施工不良	回填不良、管件閉鎖不牢。	不易分析。	4、 5、 6、 7、8
	電腐蝕	與其它異種金屬接觸，因電位差造成電腐蝕。	不易分析。	2、 4、 5、8
	管線圖面資料不全	影響修漏成效	不易分析	3、7
	設計不良	採用不合適之荷重條件、水質條件、管外環境條件。	需有設計原始資料，或重新跑水力模式。	8
	意外破壞	工程意外造成的小破損而未被發現，或是其它施工單位挖損，不願受罰而草率止水，使得管線仍有漏水現象。	不易分析。	4、 5、6

出處：

1. Felipe & Leonel, 1997
2. Dídia Covas et al. ,2005
3. 郭等 ,2004
4. 褚等 ,2006
5. 台灣自來水公司 ,2007
6. 駱 ,1997
7. 台北自來水事業處 ,2003
8. 經濟部水利署 ,2006
9. 洪，1992
10. 陳等，1996
11. WRC
12. 陳，1984

表 3.3 漏水量(U)、水壓(P)、管材推估公式

公式	推估方法	n 值及適用範圍	
$\frac{U_1}{U_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^n$	$U = CA\sqrt{2gP}$ $\frac{U_1}{U_0} = \frac{CA\sqrt{2gP_1}}{CA\sqrt{2gP_0}} = \sqrt{\frac{P_1}{P_0}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{0.5}$ <p>故之 n 值為 0.5，但實驗結果與理論值有出入，n 值會隨環境不同而有差異性。</p>	塑膠管(不論破孔大小)	1.5
		金屬管及細小裂孔	0.75~1.0
		明顯破孔(較大破孔)	0.5
		其它不易判定	1.15

摘譯自: Farley & Trow ,2003

3.2.1 漏水潛勢之分析

根據 3.2 節挑選出的三個因子，並實際依四區的資料計算，有關管線汰換率這個因子，雖有實際換管資料，但由於資料多為圖面資料未數位化，導致不易確切對應到 GIS 上，此部分水公司亦有著手數位化中，故此因子暫未列入考量。以下說明材質與管齡兩個因子的詳細分析與如何計算出漏水潛勢。

根據水公司第四區管理處的台中給水廠與台中服務所兩系統維修資料記錄，在民國 92 年 1 月至 95 年 12 月間，經篩除止水栓漏水 24,779 筆(此為用戶水表橡皮墊損壞漏水，經詢問水公司相關維修人員，漏水量小，故忽略之)後，計有 6,573 筆資料，按照管材區分後如圖 3.5 所示，可看出在所有管線中，材質屬 PVC 之管線佔大多數，雖管材會影響管線損壞機率高低(Felipe & Leonel, 1997)，但由於案例之維修資料 PVC 佔所有管線的 88%，其餘管線僅數百餘件，甚至數十件，由於資料過少致迴歸分析上較不客觀，因而未將管材列入漏水潛勢分析中。

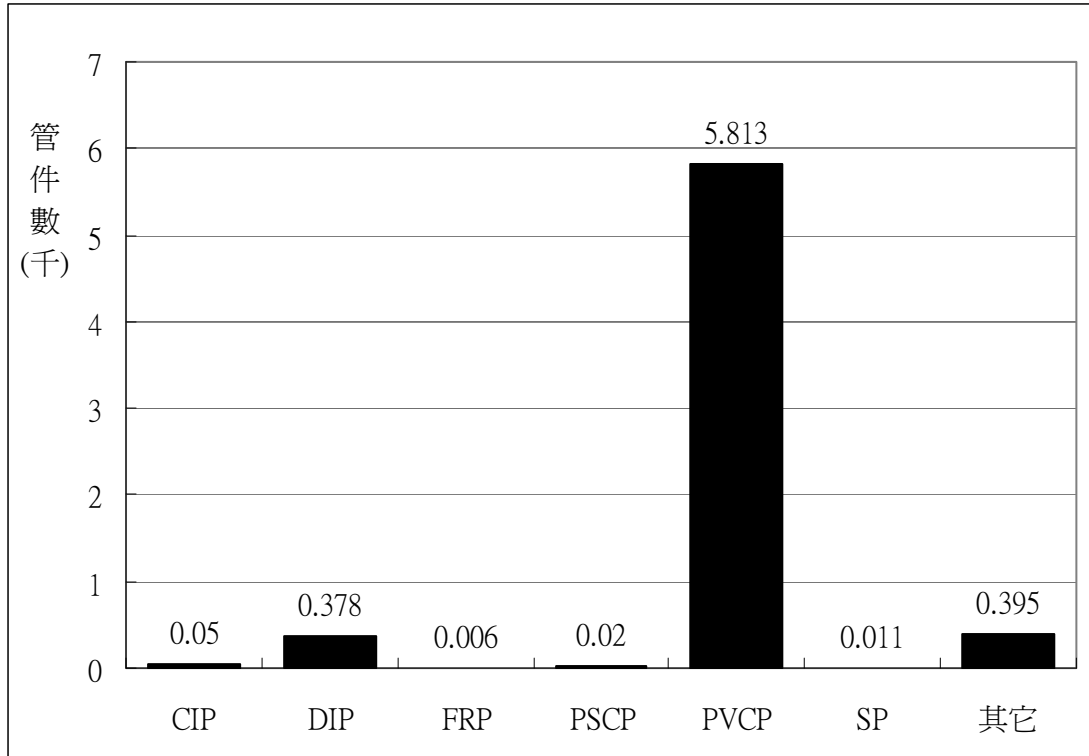


圖 3.5 維修資料管材料件數直條圖

本研究根據下列公式 3.1(a)(Walski and Pelliccia, 1982)與公式 3.1(b)、3.1(c) (Su et al., 1987)推估管線的損壞機率，以損壞機率評量漏水潛勢。

$$\gamma_j = ae^{b(t-k)} \quad (3.1a)$$

$$\beta_j = \gamma_j L_j \quad (3.1b)$$

$$P_j = 1 - e^{-\beta_j} \quad (3.1c)$$

$$F_j = P_j \times W_j \quad (3.1d)$$

其中 γ_j 為該年度每公尺管線之損壞次數， j 為某一管線， a 、 b 為迴歸之數值， t 為欲計算損壞機率之年度， k 為管線建置日期。 P_j 為損壞機率， L_j 為欲計算損壞機率管線之長度，以公尺為單位。 F_j 為漏水潛勢，為 P_j 與 W_j (管線上之用水量) 兩者的乘積，公式 3.1(d) 是用以評估漏水潛勢，根據管齡迴歸出來之損壞機率 P_j 雖可代表一條管線之可靠度，但在同管材、管徑之管線上，若有不同的用水量，則具有較高用水量的管線宜優先考量，因此

本研究以 F_j 來當作漏水潛勢之依據。案例實驗分析結果，發現在不分管徑時迴歸出來之公式的 R-square 為 0.6154，結果如圖 3.6 所示。

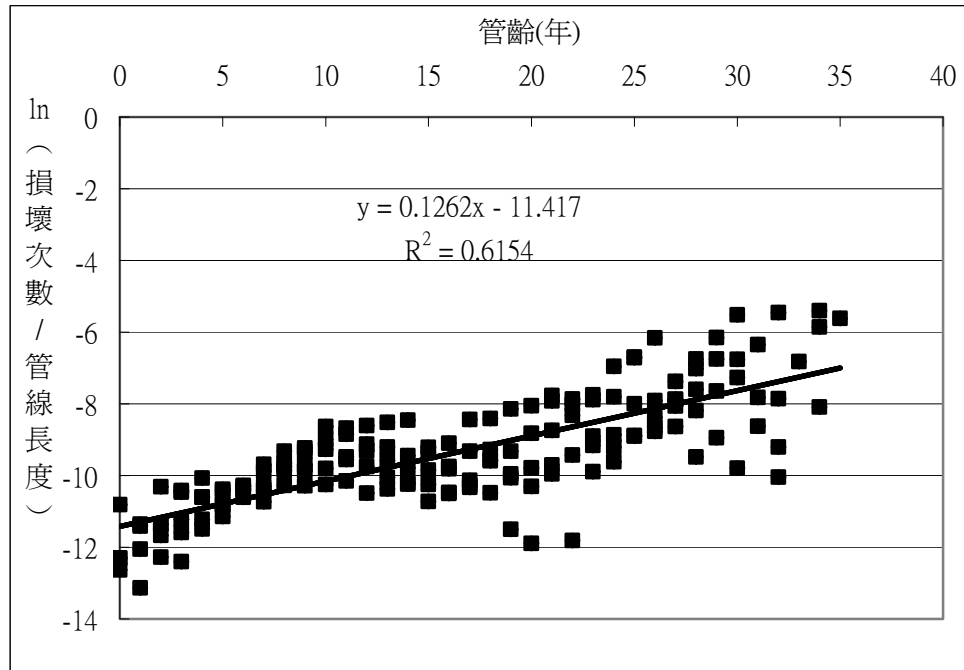


圖 3.6 不分管徑管齡與損壞次數迴歸分析圖

而進一步根據 Waski and Pelliccia(1982)所建議依管徑作分類，發現將管徑分為 0 ~ 250mm、250 ~ 300mm、300mm~ 時 R-square 分別為 0.6179、0.659、0.6116，結果分別如圖 3.7、圖 3.8、圖 3.9 所示，由於較不分類管徑所得的 R-square 佳，本研究因採用上述之管徑分類進行迴歸。迴歸分析前先對兩邊取 ln(自然對數)使其為線性，故圖 3.7、圖 3.8、圖 3.9 中的公式需再轉換回原本的公式型態，真正所用公式如下列：

$$\gamma_j = 1.29 \times 10^{-5} e^{0.1262(t-k)} \quad dia < 250mm \quad (3.2a)$$

$$\gamma_j = 2.14 \times 10^{-5} e^{0.0999(t-k)} \quad 250mm \leq dia < 300mm \quad (3.2b)$$

$$\gamma_j = 6.19 \times 10^{-6} e^{0.1184(t-k)} \quad dia > 300mm \quad (3.2c)$$

其中 dia 表示進行損壞機率評估管線之管徑。

上述公式 3.2(a)(b)(c)按照管徑區分將套用至 3.1(b)(c)(d)中，用以推估 INU 的漏水潛勢。

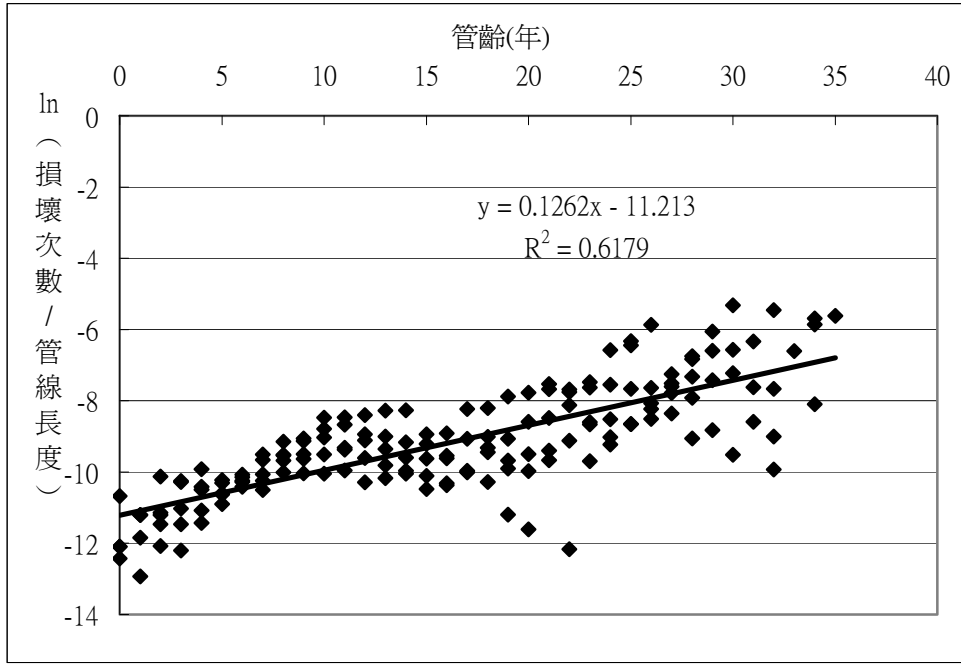


圖 3.7 管徑 < 250mm 管齡與損壞次數迴歸分析圖

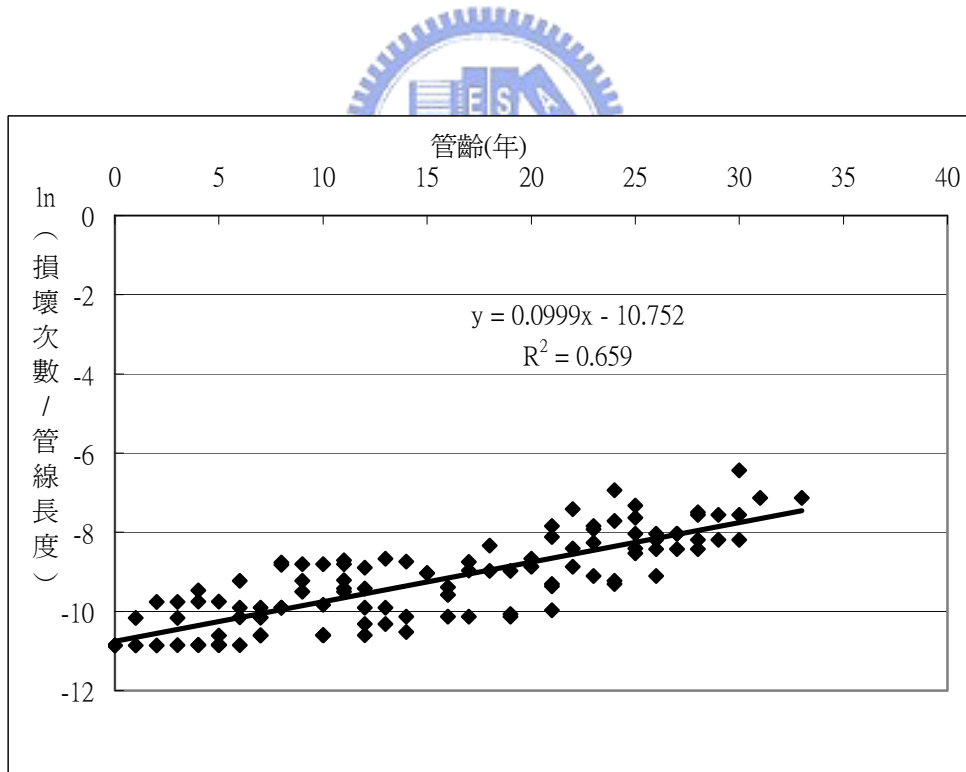


圖 3.8 管徑在 250mm~300mm 之管齡與損壞次數迴歸分析圖

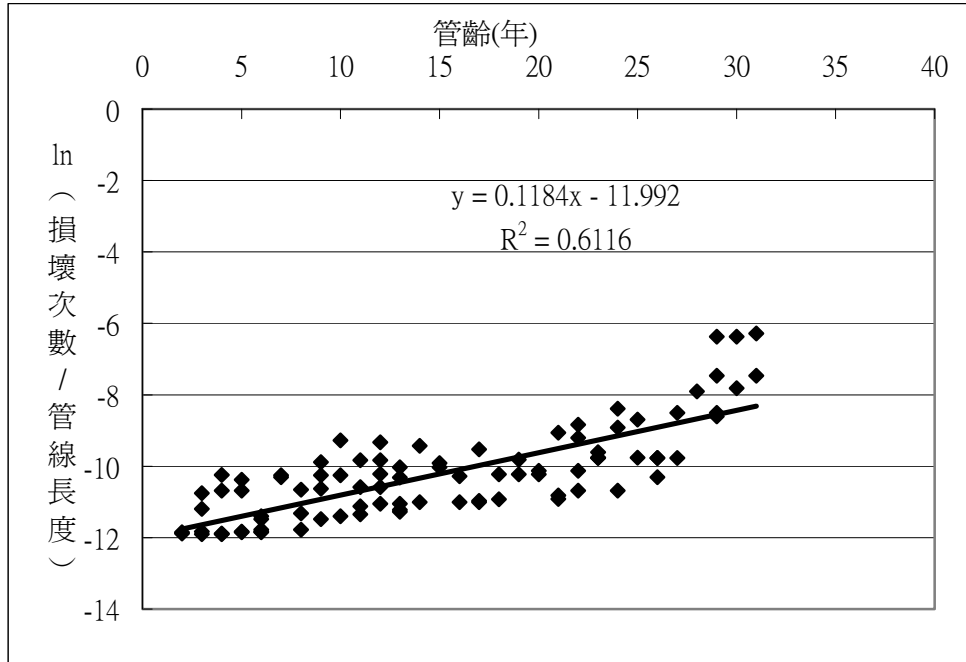


圖 3.9 管徑>300mm 管齡損壞壞次數散佈圖

3.3 啟發式優先測漏小區劃分程序

本研究發展一套劃分程序，期能提升測漏小區劃分效率。本劃分程序如圖 3.10 所示，以下將逐一說明其細節。

- (1) 資料蒐集：蒐集用戶用水資料、GIS 資料、流量記錄，決定用戶用水量所屬之管線，用以推估每個 INU 的用水量。
- (2) INU 漏水潛勢分析：針對一 INU 之所有管線，利用 3.2.1 節中計算方法得到管線之漏水潛勢 F ，同時並計算出每個 INU 的面積(A)、管線總長度(L)、還有區內用戶數(C)，並分別以 F/A 、 F/L 、 F/C 為每個 INU 的劃分考量因子，此三因子考量目的均希望能在較小範圍中找到較高漏水潛勢，以期符合優先測漏之考量。
- (3) 劃分 INU：這部分即為第 3.1 節中的獨立管網分區，其詳細方法如 3.1 節所說明。

- (4) 分區因子：為劃分測漏小區時之考量因子，包括連接度、抄表便利性等。連接度為辨識二個 INUs 間是否有連接，因測漏小區需為一獨立可計量之區域，若 INU 間無連接則不可將其併在一起；考量抄表便利性是因實際進行測漏時，通常需在同一時段內獲得進入測漏小區之進水量與用戶用水量，如此才能精準計算出無費用水(進水量與用水量之差值)，但由於台灣目前用戶水表尚未採用數位化水表，無法即時傳回用水資訊，故需派員實際進行抄表，若能在短時間完成抄表就能減少推估無費用水的誤差性，因此將其納入考量。
- (5) 分區限制：此部分為參考水公司之過往經驗予以制定。以天然地形或人造設施為邊界、限制管線長度在 1.7KM~3.5KM、面積 20~50 公頃與用戶栓在 1000~2000 個，小區太小不具成本效益，太大則執行困難，故採用這些限制。
- (6) 小區劃分：根據上述所得之 INU 漏水潛勢，分別對三個不同的考量因子做分析。之後為將案例區內所有 INU 之漏水潛勢作排序，以漏水潛勢排序最高的 INU 當作新分區的代表 INU α ，並向外擴張。接續將 α 周圍相鄰的 INUs 逐一納入計算疊加後之漏水潛勢，計算方式為

$$\frac{F}{R} = \frac{F_{\alpha} + F_{\beta}}{R_{\alpha} + R_{\beta}} \quad R \in \{A, L, C\} \quad (3.3a)$$

其中 β 為 α 相鄰之任一 INU，計算納入相鄰 α 的 F/R 值及前述分區因子評量適宜度(如連接度、抄表便利性等)，然後進行如圖 3.11 所示的劃分流程，最後挑出一與 α 結合後適宜度最高的相鄰 INU 與 α 結合，納入新的相鄰 INU 後檢核小區劃分限制，若不符合則重複上一步直到滿足小區劃分限制後即為一個已完成的優先測漏小區。若需一個以上的優先測漏小區則重複以上步驟，重新篩選出一代表 INU 並往外擴張，唯此步驟不可將已劃分過的 INU 納入考量，重複劃分直到完成目標優先測漏小區數。

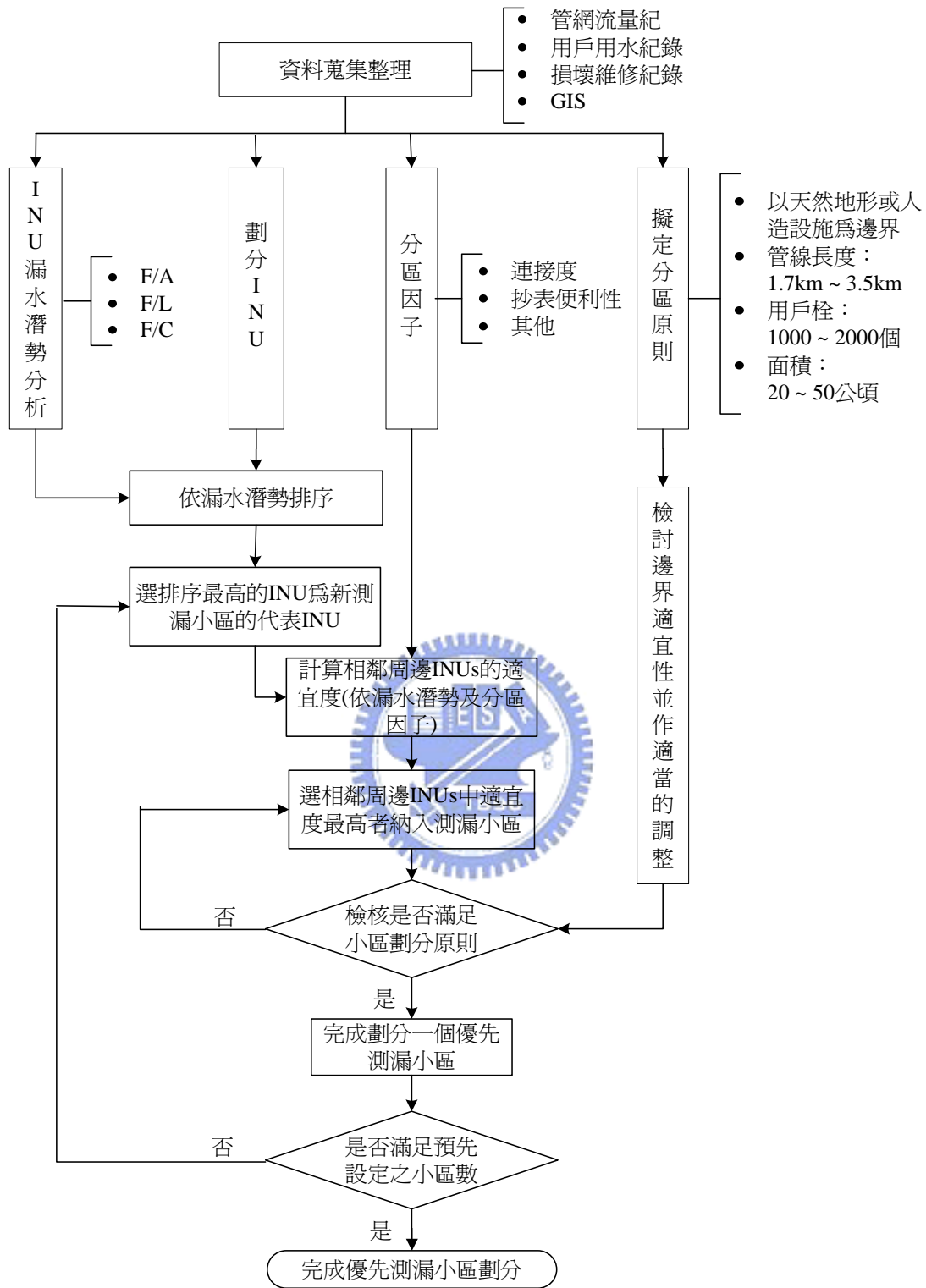


圖 3.10 優先測漏小區劃分程序流程圖

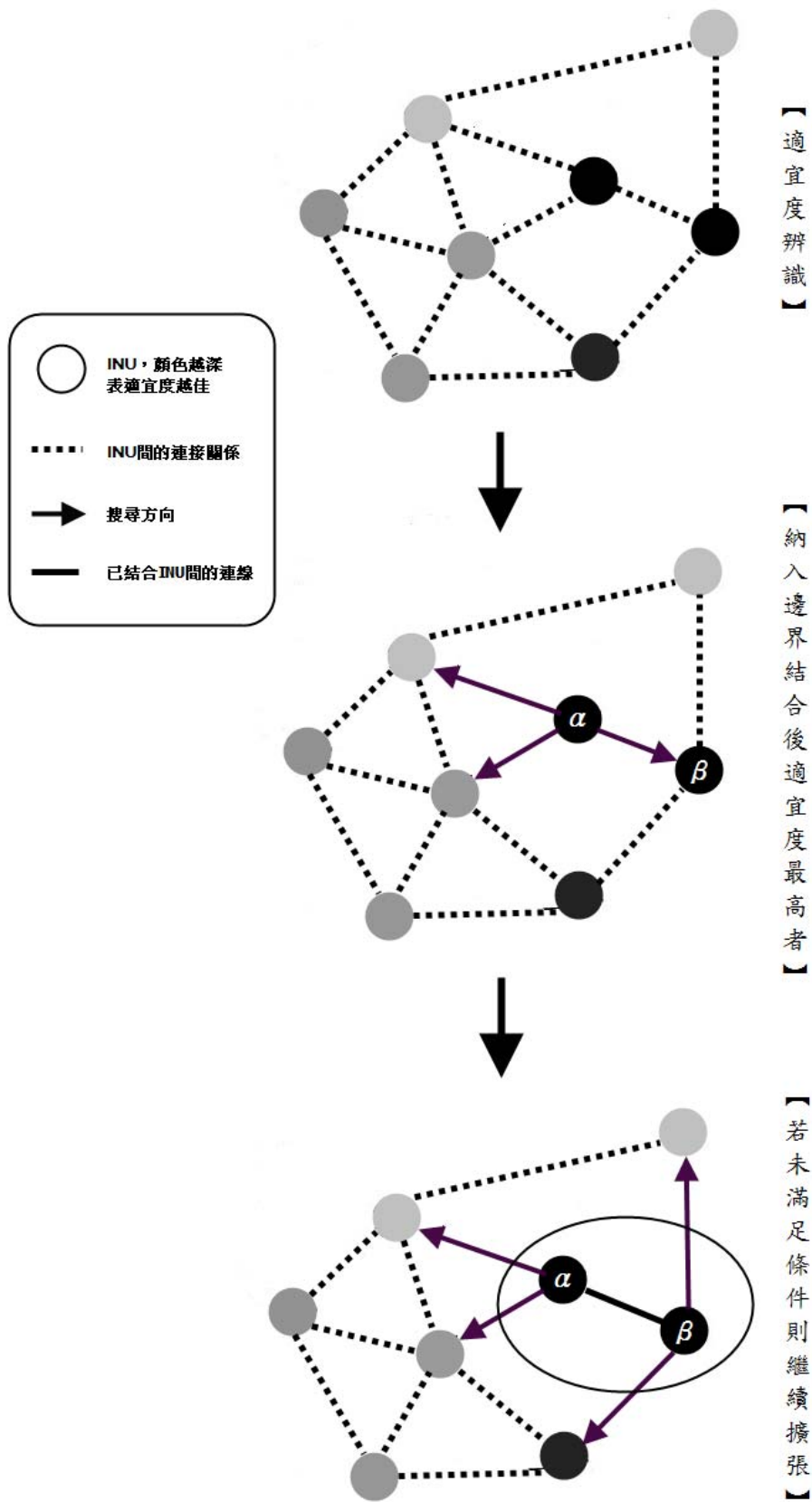


圖 3.11 優先測漏小區程序示意圖

第四章 優先測漏小區優選模式

上一章所發展的程序雖可快速取得結果，唯可能非優選解，因此本研究另發展一套優先測漏小區劃分優選模式，並依上一章所建構的漏水潛勢指標與獨立管網單位，採基因演算法求解該模式，以建立更有效率的小區劃分工具及提高小區測漏的效益。本章節將先說明優先測漏小區劃分優選模式及求解優選模式基因演算法。於第五章將說明以自來水公司第四區管理處台中系統為案例實例應用所建立的模式及討論所得的結果。

4.1 優先測漏小區劃分優選模式

由於經費及人力的限制，台灣還無法如日本一些城市的管網，數年內即完成全面式的小區測漏(北水處, 93 年)，國內的小區測漏仍屬初期測試階段，加上系統中一般會有某些區域的漏水潛勢較高，可能造成供水管網系統漏失較多的珍貴自來水資源，因此若能劃分出此類漏水潛勢較高區域，優先進行小區測漏，可有效減少水資源的浪費，提升小區測漏的效益及系統可靠度。

本研究為在合理的時間內找出較優選的解，因而除前一章節之程序外另發展一套優先測漏小區劃分優選模式，此模式以前一章節所述之 INU 為一最小單位，並根據 3.2.1 節中計算每個 INU 的漏水潛勢，將數個符合限制條件且連接在一起的 INU 相互結合，期結合出來的小區具有較大的漏水潛勢，即為需優先考量的測漏小區。亦可依據系統特性、作業需求及資源等找出數個具有較大漏水潛勢的小區，供自來水公司進行後續小區測漏工作。本研究發展的優先測漏小區劃分優選模式如下說明。

4.1.1 劃分因子

本研究期使所劃分出來的優先測漏小區能具有在較小範圍內具有較高漏水潛勢，因而進行模式劃分前，先定義了三個目標項供評估漏水潛勢，以下分別說明這三個目標項。

(1) 單位面積漏水潛勢

此目標項主要是用以驅使劃分出來的小區能在較小的面積內具有較高的漏水潛勢，以期提高測漏的效率，計算方式為 F/A ，其中 A 為 INU 的面積， F 為漏水潛勢值。

(2) 單位管長漏水潛勢

若在高密集用戶的區域，針對管線長度為優先考量較以上述之面積考量佳。若用戶密集度高則需花較多時間進行抄表，故根據此目標式期劃分出來之優先測漏小區在高用戶密集度時可較上述 F/A 方法佳。計算方式為 F/L ，其中 L 為 INU 的管線總長度。

(3) 單位用戶數漏水潛勢

此目標式考量因子與上述 F/L 近似，但改採用用戶數為考量，用以比較結果是否與以管線長度考量的差異。計算方式為 F/C ，其中 C 為 INU 內用戶數。

4.1.2 分群數與連接度指數

由於小區內的 INUs 必須相連接，不能分裂成二個以上，而 GA 隨機產生的解，有很大的可能會是分裂的，因而有必要定義罰值(penalty)來避免 GA 搜尋不必考量之不可行解。本研究以分群還有連接度兩者當做 GA 的罰值，以下分別說明之。

本研究首先定義分群數用以驅使劃分出來的優先測漏小區中的 INU 間必須是相連接，避免劃分出來的優先測漏小區是由兩個(或兩個以上)

獨立且未連接的小區組成。將劃分出優先測漏小區內的 INU 做群組辨識，若 INU 與 INU 間可連接則納入一個群組，INU 與 INU 若無任何連接關係則為兩個不同的群組，由於測漏小區內的 INU 僅為一個群組才符合本研究需求，若超過一個群組以上，群組越多則罰值越高。

然而只保證為相連的一群 INUs 並不足夠，例如若連成蛇狀亦不符合需求，故本研究進一步定義一個連接度(connectivity)，以確保 INU 間的連接關係，一般連接度除了相鄰關係，亦常採用距離來評估，但若以 INU 中心距離來評估，距離遠不代表不相連，而距離近也不代表會相連，本研究因而研擬一個較簡單且有效的定義。以小區劃分的需求而言，若劃分完成的形狀近似圓形，則水公司後續進行的小區測漏可節省較多成本與人力。而一個小區包括較多 INU 可較易進行測漏，若確定該測漏小區為高漏水區域(或無費用水達一定程度)，因 INU 可獨立計量的特性，甚至可利用各個制水閥間的開關進一步縮小漏水點的位置，降低以人力實際勘查漏水點的花費。

基於上述原因及需求，本研究因而建議一個簡單實用的連接度指數，若兩 INUs 有相鄰則設其連接度為 1，反之為 0，此連接度的定義容易操作及進行。本研究以連接度評估 INU 間的連通關係，可使所得小區有較高的連接性，且包含較多 INU 及較符合小區劃分的需求。如圖 4.1 所示，圖 4.1(a)的連接度指數為 2，分為 3 群；而圖 4.1(b)的連接度指數為 4，都相連，分為 1 群；圖 4.1(c)連接度為 5，亦分為 1 群，且連接度更佳；圖 4.1(d)連接度為 8，亦分為 1 群，連接度最好。在模式中加入連接度指數，則在模式目標式中最大化的趨使下，可讓結果儘可能如圖 4.1(d) 得到較大連接度且僅為一群。

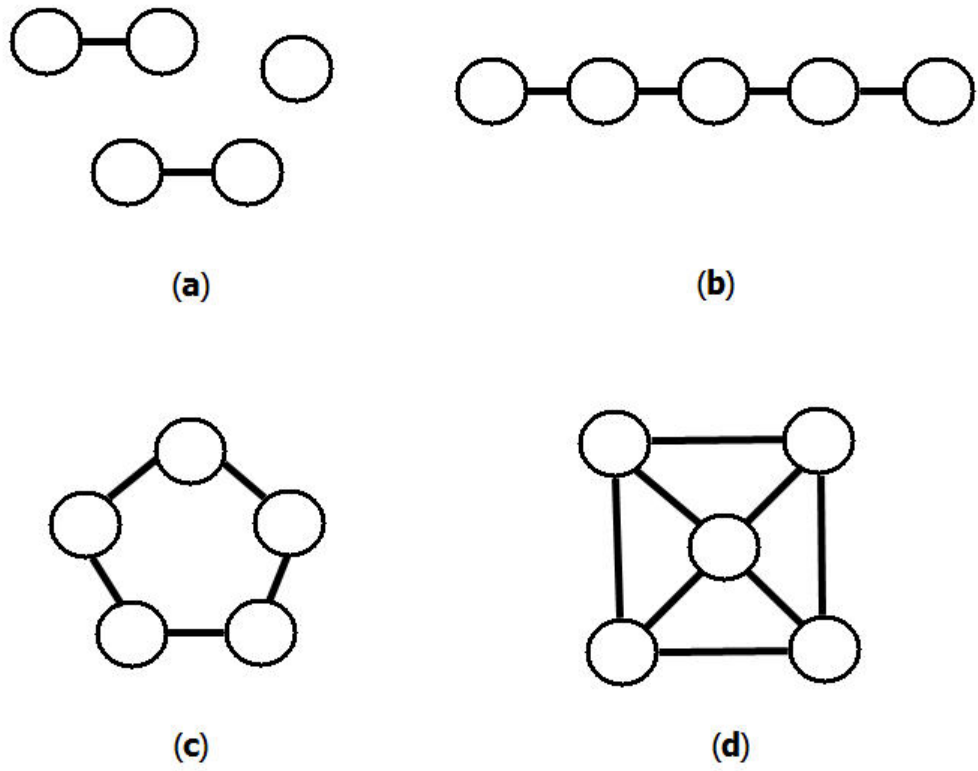


圖 4.1 五個 INUs 的連接度指數範例及其值:(a)2; (b)4; (c) 5;及(d)8.

4.1.3 優選模式

本研究以 INU 為一最小單位，並期劃分出來的優先測漏小區能具有高漏水潛勢、高連接度、且符合水公司劃分原則的小區，優選模式如下列：

$$\text{Max } W_f \frac{\sum_1^N f_i}{N} + W_d d_i - W_s ss_i - W_g G_i \quad (4.1a)$$

s.t

$$f_i = \sum_j F_j \quad \forall i \quad (4.1b)$$

$$r_i = \sum_j R_j \quad \forall i \quad (4.1c)$$

$$d_i = \sum D_{i,j} \quad \forall i, j \quad (4.1d)$$

$$R_j \in \{A_j, L_j, C_j\} \quad \forall j \quad (4.1e)$$

$$D_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (4.1f)$$

$$ss_i = \left| \frac{(TS_{min} + TS_{max})}{2} - s_i \right| \quad \forall i \quad (4.1g)$$

其中

W_f 、 W_d 、 W_s 為目標式各項因子的權重，其值需要依不同需求及考量來設定。

i, j 均為 INU 的代碼。

F_j 為 INU j 的漏水潛勢值。

R_j 為 INU j 的區域大小屬性(如面積 A_j 、管長 L_j 、用戶數 C_j 等)。

小區 i 以 INU i 為代表的小區。

f_i 為小區 i 之漏水潛勢總值。

r_i 為小區 i 之區域大小屬性總值。

$D_{i,j}$ 若 INU i 與 INU j 相鄰，則其值為 1，反之為 0。

d_i 為以小區 i 的连接度(connectivity)。

G_i 為小區 i 的分群數。

s_i 為以小區 i 之某計量(如面積、管長、用戶數或是權重和)總值。

TS_{min} 、 TS_{max} 分別為欲劃分之優先測漏小區某計量(如面積、管長、用戶數或是權重和)總值的最小值及最大值。

ss_i 為小區 i 之某計量(如面積、管長、用戶數或是權重和)總值與欲劃分之優先測漏小區某計量最大最小值和之半的差值絕對值。

N 為欲劃分出的優先測漏小區數目。

本模式期望所劃分出來之小區能在較小範圍內具較高漏水潛勢，故採用式 4.1a 所列的目標式，以 $\frac{F_i}{R_i}$ 為主要目標項(請參見 4.1.1 節之說明)，並加入 d_i 與 ss_i ，其中 d_i 為小區 i 內的所有 INU 間连接度值($D_{i,j}$)(請參見 4.1.2 節之說明)總和， d_i 可趨使小區 i 在限制條件下包含更多 INUs，且結合後具備較高的集中性； ss_i 為罰值，期使所得優先測漏小區的大小能儘可能接近限制區間的中間值。目標式中各項目的權重本身並沒有太大的意義，主要是用來調整各項的趨力，以期找到適當的可行解。

漏水潛勢 F_j 為根據 3.2.1 節中之說明計算得之。 R_j 則為不同的區域屬性。 i, j 均為小區 INU 本身的代碼，若數個 INU 形成一個小區時，則以其中一個 INU i 為此小區的代表 INU。 d_i 為小區 i 內所有 $D_{i,j}$ 總和， $D_{i,j}$ 為 INU 的连接關係，若 i, j 相鄰則 $D_{i,j}$ 為 1，反之為 0，如此可驅使劃分出來的小區較具集中性，且以期使模式在同樣大小的限制下，找到最多 INUs 相連接的小區，以提高測漏的效率。 ss_i 為水公司在規劃小區時建議規範

的最大與最小值的中間值，例如小區區內管線長度宜在 1.7~3.5KM、用戶栓為 1000~2000 個、面積為 20~50 公頃等，以這些容許區間的中間值為基準，當偏離愈多時其罰值愈高，以期使所得的小區儘可能在預設的區間中。

4.2 以基因演算法求解優選模式

由於實際管網系統通常較複雜及管線數量多，雖然已以 INU 簡化求解的負擔，但仍可能不易求解，為提升求解效率，本研究採用基因演算法輔助求解所提出的模式，以期在合理的時間內盡可能得到較佳的結果。

4.2.1 基因演算法簡介

基因演算法演算法(Holland, 1975)是一種有效搜尋優選解的方法，其基本觀念是以達爾文的進化論為基礎，模擬自然界”適者生存，不適者淘汰”的進化程序，利用染色體與染色體間的交配繁衍出更優良下一代。此方法已普遍用於很多問題上，包括管網問題，如 Simpson et al (1994)即曾採用該演算法進行管網的管線優選。基因演算法主要是由基因(gene)、染色體(Chromosome)、初始化、目標函數(Fitness Function)、選擇(Selection)、交配(Crossover)與突變(Mutation)等運算操作所組成，以下依本研究所擬求解的問題分別說明如下。

(1) 基因(gene)

利用基因演算法求解問題時，必須先針對求解的參數及其範圍進行編碼。一般使用的編碼方式是二元編碼，為 0、1 變數，為方便求解更大的範圍，亦可以實數編碼。本研究採實數編碼，基因編碼範圍為 0~n，其中 n 為優先測漏小區的數目，需根據水公司計畫經費預先擬定之。當一基因的編碼為 x 時(x 是 0~N 範圍內的小區代碼)則表示該基因屬於小區 x。

(2) 染色體(Chromosome)

數個基因可組成一個染色體。本研究染色體內的基因數目設為 M ， M 為案例區的 INU 總數。

(3) 族群(Population)

每個世代中由數個不同的個體(即染色體)所組成，而個體數則依結果調整，本研究以 500 個 population 為預先設定值。

(4) 初始化

開始執行演算程序的初始基因，本研究以隨機產生。

(5) 適應函數(Fitness Function)

本研採用式 4.1a 目標函數為 GA 的目標式，期使結果可使目標式值最大化。

(6) 選擇(Selection)

選擇是挑選出來進行交配產生下一代的運算。有兩種方式，輪盤式(Roulette Wheel Selection)與競爭式(Tournament Selection)兩種(Holland, 1975)。輪盤式為依照每個染色體的適應性而決定出其在圓盤上面的面積，若該染色體越符合目標函數，則其適應性越高，輪盤上面積就越大，因此在進行挑選的時候被選到的機率就越高。競爭式則為隨機挑選出兩個或多個染色體，經比較後選擇具較大適應性的進行下一步驟的交配。本研究採用競爭式的挑選方式，其計算時間預期可較輪盤式短。

(7) 交配(Crossover)

交配為染色體與染色體間交配挑選基因的方式，有單點交配(one-point)、雙點交配(two-point)與套選交配(uniform)三種(Holland, 1975)，如圖 4.2 所示。單點交配為選一截斷點接續兩物種截斷點兩邊基因互調。雙點交配為挑選截斷成三段的其中一段基因互調。套選交配為隨機產生一組 01 變數的遮罩(mask)在染色體基因上面，而

當基因的 mask 為 1 時，染色體間的基因則對調，反之則不動。本研究採以套選交配的方式，以期能求得較優選解。另其交配率設定為 0.95。

(8) 突變(Mutation)

突變乃是不透過交配編碼互換的方式改變基因，而是以隨機的方式將該染色體基因對調(將 01 互換)，本研究採用突變率為 0.1。

本研究詳細實例應用結果將在第五章說明。

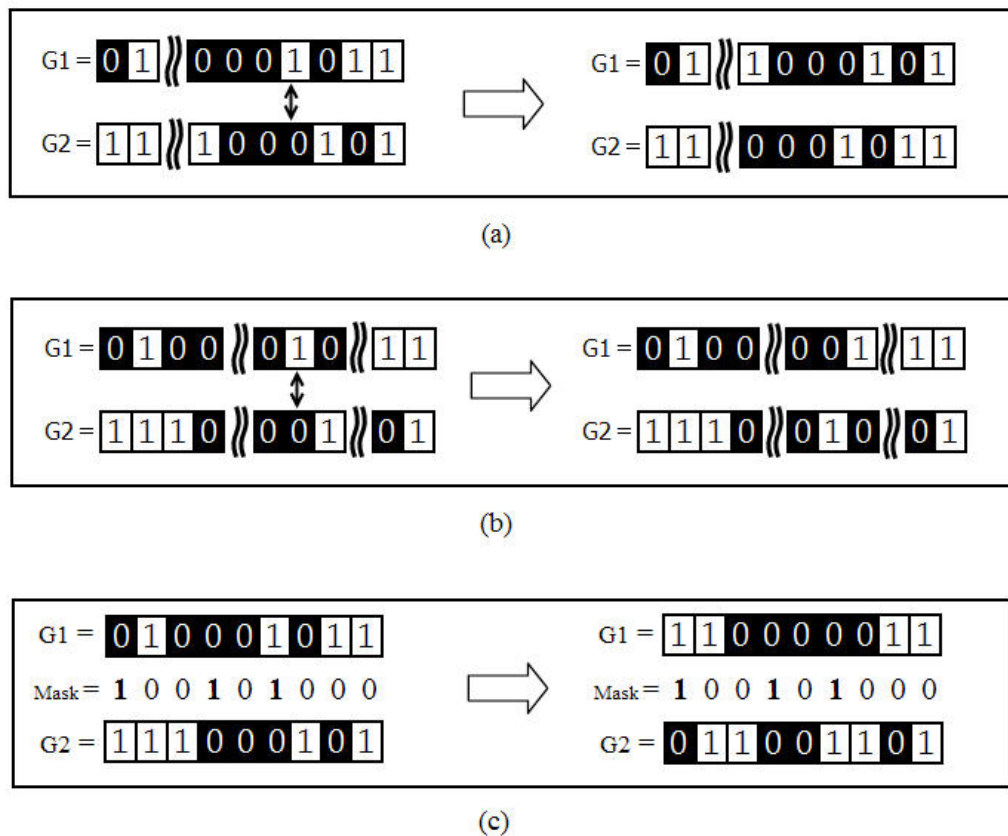


圖 4.2 基因交配 (a)單點交配 (b)雙點交配 (c)套選交配

第五章 案例研討

本研究以自來水公司第四區管理處的台中子系統為案例示範應用所建立的優先測漏小區劃分程序與模式，以下將分別說明之，且依據所得成果討論及分析所建立的程序與模式之可行性與實用性。

5.1 案例區介紹與資料蒐集整理

水公司第四區大台中子系統管網如圖 5.1 所示。其中管線共 54,586 條，總長約為 1,543 公里，取水點(用戶栓)17,954 個，23,508 個節點設有制水閥，整個管網系統的總需水量為 674,286 CMD。

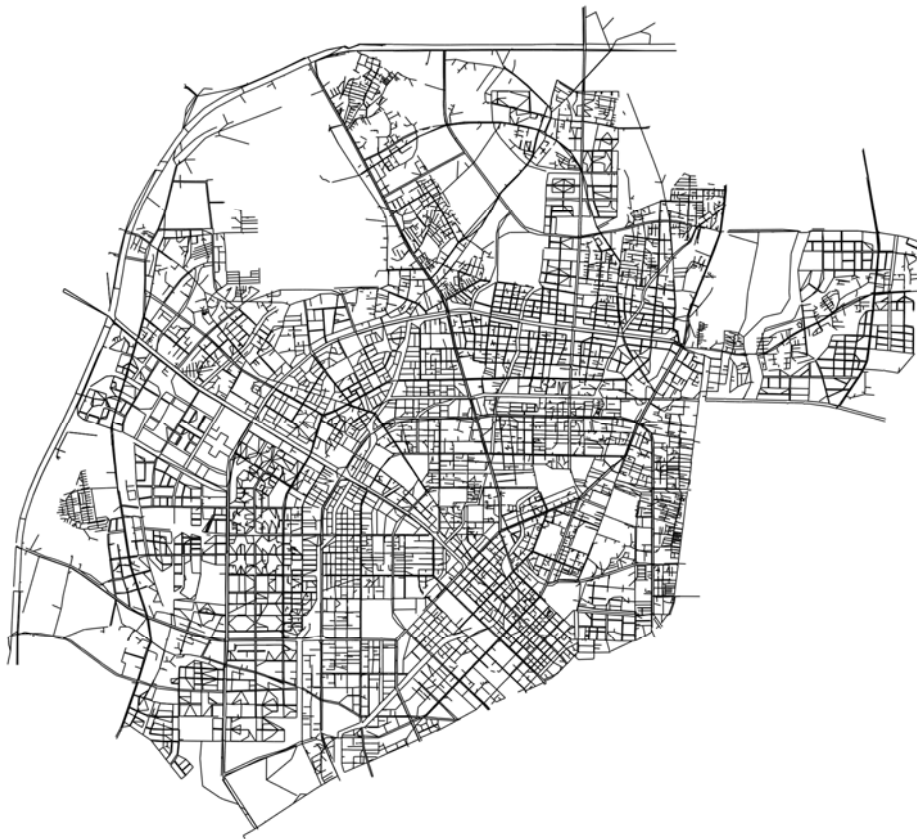


圖 5.1 案例區原始管網圖

圖 5.2 為取水點分佈圖，圖中的取水點以星號表示，圖 5.3 為制水閥分佈圖，制水閥以長方形表示，由圖中可發現制水閥密集度高，平均每公里約有 15 個制水閥，此密集的制水閥使本研究進行制水閥(或流量計)IS 分區時，並未有效降低原始管網之複雜度，因此本研究進一步將 IS 合併成 INU，其詳細內容如 3.1 節所述。管線材質有 CIP(鑄鐵管)、DIP(延性鑄鐵管)、FRP(玻璃纖維管)、PSCP(預力混凝土管)、PVCP(塑膠管)、SP(鋼管)等。



圖 5.2 案例區取水點分佈圖



圖 5.3 案例區制水閥分佈圖

除蒐集管線、用戶及監控等資料外，為進一步分析，亦建立各管線之漏水潛勢，此部分如 3.2 節之說明，主要參考 Walski and Pelliccia(1982) 與 Su et al.(1987)的管線損壞機率公式迴歸出在不同管徑範圍的管線損壞公式，再依所得公式評估各管線的漏水潛勢。

5.2 優先測漏小區劃分程序

根據第三章的優先測漏小區劃分程序，並納入 INU 與漏水潛勢，以 F/A、F/L、F/C 為目標式進行劃分，以下小節分別詳述之。

5.2.1 單位面積漏水潛勢

此因子計算方式為 F/A，首先將 INU 的個別 F/A 計算出來後，再以 F/A 最高的 INU 進行擴張。圖 5.4 為每個 INU 的漏水潛勢示意圖，其中顏色越深、圓圈越大者表示 F/A 值越大。

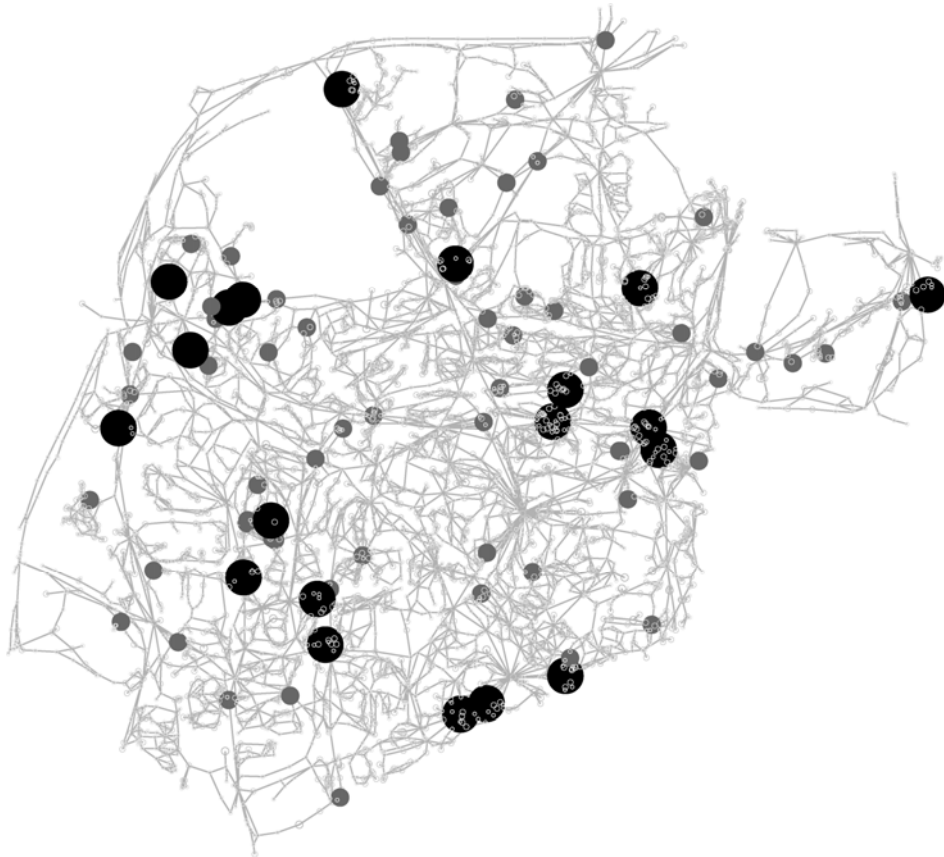


圖 5.4 個別 INU 之 F/A 大小示意圖

當以最高漏水潛勢的 INU 進行程序演算，且小區總面積滿足 35 公頃 (水公司建議值為 20-50 公頃) 為停止結合之限制時，結果如圖 5.5 所示，其中單位面積漏水潛勢大小依序是 A1、A2、A3。演算方式是以加入相鄰 INU 後會使小區內所有 INU 漏水潛勢最大者納入，但納入的 INU 並不一定會是相鄰 INU 中 F/A 最大者。從圖中可發現 A1、A2 會有往 INU 本身漏水潛勢即為大者去擴張，且最後形狀(圖 5.5)與一開始針對 F/A 排序的分佈(圖 5.4)類似，而亦可看出擴張方向易往 F/A 密集度高的地方發展。



圖 5.5 以 F/A 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖

當往外擴張達限制條件(面積)即停止。計算其 F/A 後予以排列繪成如圖 5.6，比較 A1、A2、A3 所得結果。首先將 A1、A2、A3 三者的 F/A 值，0.00244、0.00133、0.00000646 繪在圖 5.6 上。

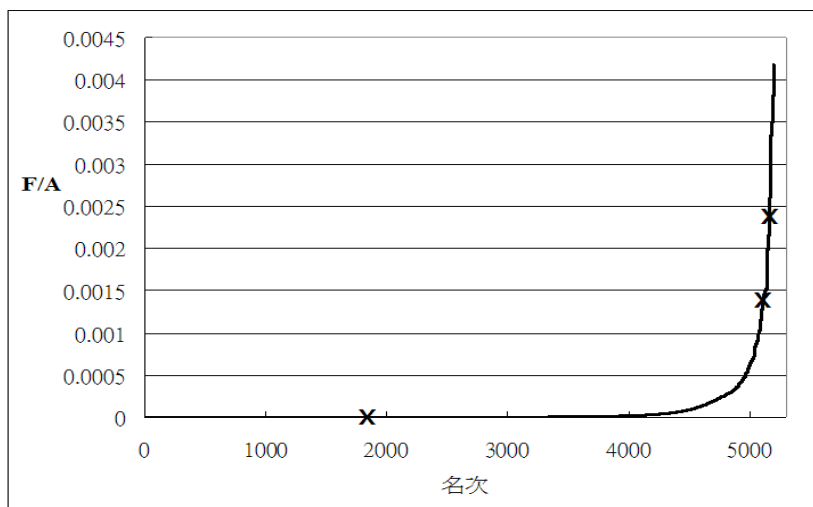


圖 5.6 以 F/A 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖

由圖中可看出，以 F/A 最高、次高者為小區中心點向外進行擴張，發現仍可達到不錯的水準，以圖中的名次來看的話，分別為 5,163、5,106、1,903 名，全部 INU 為 5,287 個，其中名次越高表示 F/A 越大，效果越好。可看出以 F/A 最高者進行小區擴張，可快速、簡便的獲得結果，且結果亦能掌握整個區域中的高漏水潛勢區域，但惟第二與第三兩者差距大，且第三已達中間名次之後，若後續再進行第四、第五個 INU 的話可能無法有效彰顯出較需優先改善的區域，因此再接續以單位管長漏水潛勢與單位用戶數漏水潛勢兩個因子為考量執行劃分程序。

5.2.2 單位管長漏水潛勢

本因子計算方式為 F/L。圖 5.7 為每個 INU 的 F/L 示意圖，其中顏色越深、圓圈越大者表示 F/L 值越大，由該圖概略可看出高 F/L 值的 INU(顏色深且大的圓)大略集中在五個區塊。



圖 5.7 個別 INU 之 F/L 大小示意圖

本研究以小區總管長滿足 2.6 公里(水公司建議值為 1.7~3.5 公里)為限，進行 INU 擴張程序演算，結果如圖 5.8 所示，其中單位管長漏水潛勢大小依序是 L1、L2、L3。經與圖 5.7 比較，可發現圖 5.7 中集中且密集度高的區域容易被畫成一區，如 L1、L2、L3。

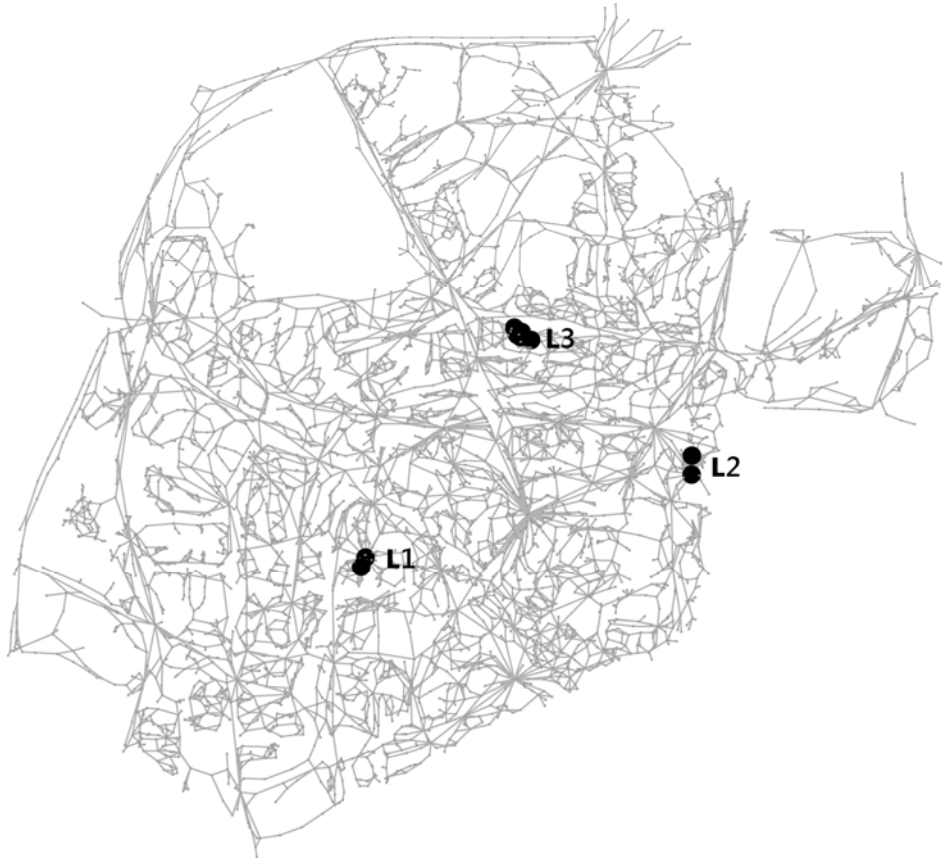


圖 5.8 以 F/L 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖

以每個 INU 為為中心起點往外擴張達限制條件(管線長度)後即停止。計算其 F/L 後予以排列繪成如圖 5.9，再將 L1、L2、L3 三者的 F/L 值，0.248、0.223、0.191 分別繪在圖 5.9 上比較可看出，將全域 INU 中的 F/L 進行比較，最高、次高、第三高 F/L 值的三個 INU 當做小區的中心點向外進行擴張，最後所得結果在圖中排名為 5,284、5,252、5,168，全部為 5,287 個 INU，其中名次越大表 F/L 越高。由上結果可知，以 F/L 最高者進行小區擴張，可快速簡便的獲得結果，且結果亦能掌握高漏水潛勢區。

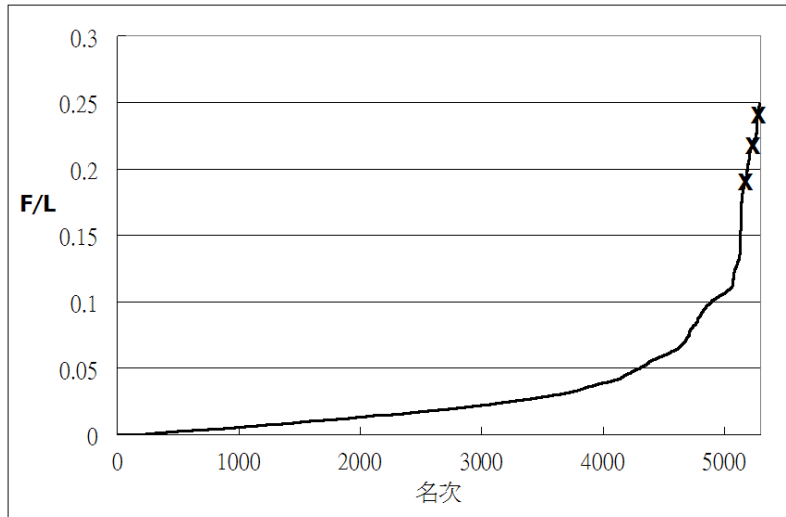


圖 5.9 以 F/L 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖

5.2.3 單位用戶數漏水潛勢

此因子計算方式為 F/C，類似之前的作法，以 INU 的 F/C 值最高者進行擴張，INC F/C 值如圖 5.10 所示，其中顏色越深、圓圈越大者表示 F/C 值越大。圖中劃分出的區域所在位置為人口較不密集區域，可看出以 F/C 為因子時較不受人口密度影響。



圖 5.10 個別 INU 之 F/C 大小示意圖

以最高 F/C 值的 INU 為起始點進程序演算，且以小區總用戶數 1500 戶(水公司建議值為 1000~2000 戶)為上限，結果如圖 5.11 所示，其中單位用戶數漏水潛勢大小依序是 P1、P2、P3。經與圖 5.10 比較發現，在相近的漏水潛勢下，當以 F/C 為考量時，在管線較不密集的區域容易有較高的 F/C 值。



圖 5.11 以 F/C 為決策因子及啟發式程序所劃分之小區示意圖

而當以每一各別 INU 為中心起點及在用戶數限制條件下往外擴張。其 F/C 值結果排予如圖 5.12，並將 P1、P2、P3 納入比較。P1、P2、P3 三者的 F/C 值分別為 0.79、0.47、0.22。以圖中的名次來看的話，分別為 5,203、5,133、4,776 名(全部為 5,287 個 INU，其中名次越大表 F/C 越高)，以最高與次高 F/C 值 INUs 擴張結果均有不錯之結果，唯再次高的結果則較差。

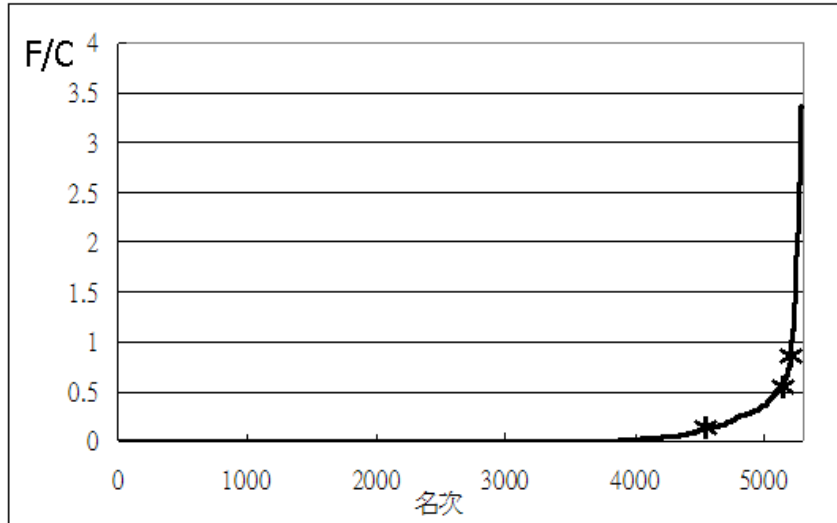


圖 5.12 以 F/C 為決策因子及依所有個別 INU 擴張所得小區之 F/A 值分佈圖

5.2.4 小結

比較圖 5.4、圖 5.7、圖 5.10 依三個不同因子所得結果，以 F/A、F/L(圖 5.4、圖 5.7)為考量因子時，漏水潛勢大的區域較聚集，而次低的漏水潛勢則均勻分布。而以 F/C(圖 5.10)為考量因子時，漏水潛勢大者較均勻分散，而次低的漏水潛勢反而較聚集。

比較圖 5.6、圖 5.9、圖 5.12 三者可看出，本程序以全域 INU 計算漏水潛勢(F/L、F/A、F/C)，挑出最高與次高者進行小區擴張，雖不能確保最後結果之小區為漏水潛勢最高值，但可保持在高漏水潛勢前 20%。滿足本研究一開始期望能快速、簡便提供劃分結果，提供水公司基層人員使用 EXCEL 即可計算的簡易方法。唯由於並未都得到很好的結果，甚至如單位面積因子在劃分第三個小區的結果即不佳，故若要提昇劃分品質，有必要使用優選模式。

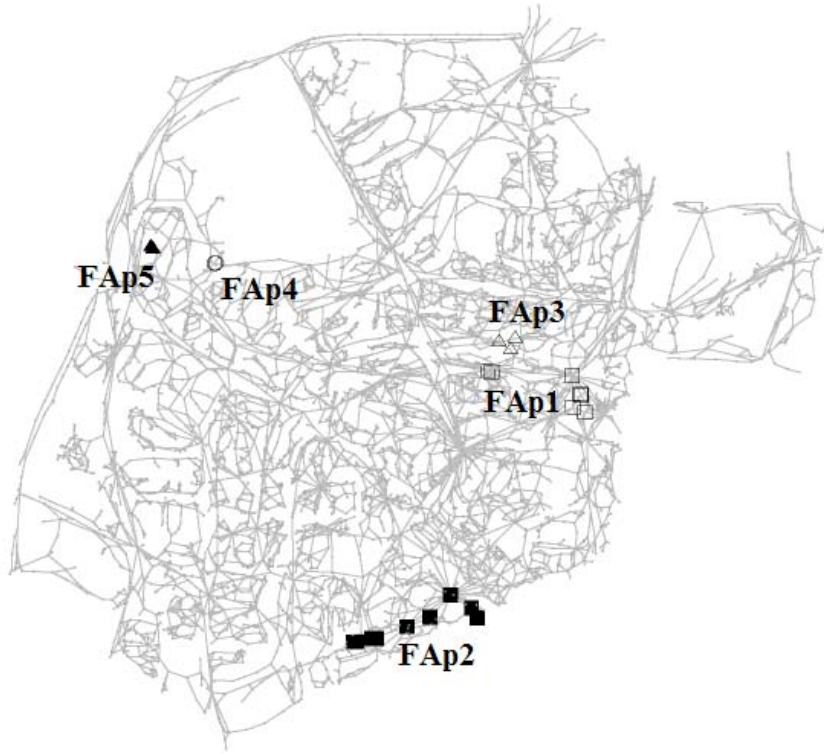
比較由 F/A、F/L、F/C 三個因子所挑選出來的優先測漏小區，可看出當以 F/L 為考量因子時其 F/L 值是在全區域各別擴張至滿足條件時結果的前 3%，顯示以 F/L 當作因子進行劃分時較可符合劃分出高漏水潛勢小區。

5.3 優先測漏小區劃分模式

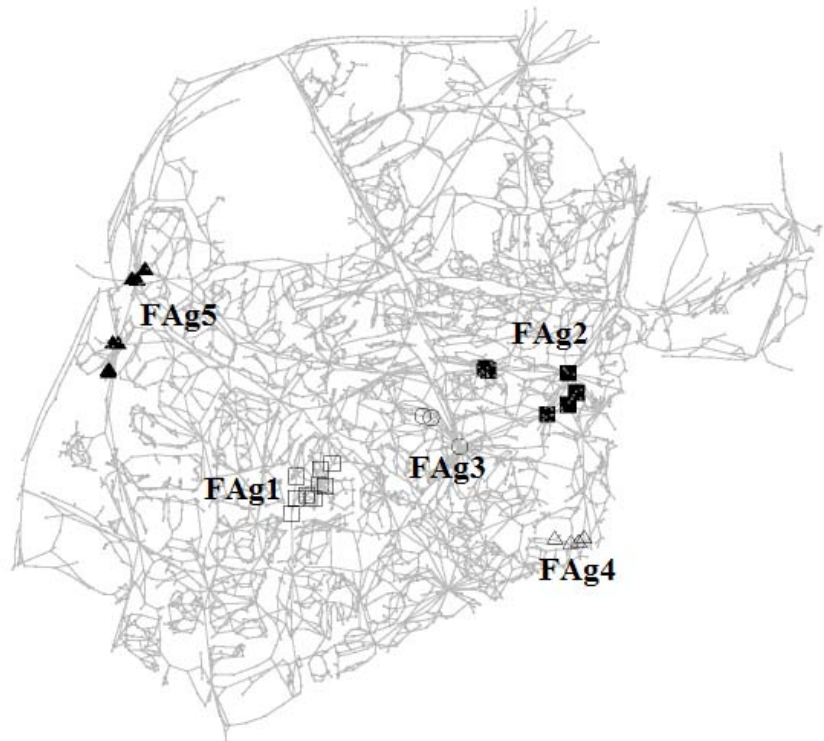
根據上節之結果，雖可迅速獲得結果，但其漏水潛勢或是進行較多測漏小區劃分時整體效益不一定為最高，因此本研究發展一套優選模式改善之。以第四章所說明的模式，以四區案例進行測試，以下分別說明依據單位面積、單位管長、單位用戶數為決策目標進行劃分之結果。

5.3.1 單位面積漏水潛勢

為測試模式與程序間的差異，以單位面積漏水潛勢為決策目標，分別採用程序與模式兩個方法進行 5 個測漏小區的劃分，小區總面積限制需滿足 35 公頃，所得結果如圖 5.13 所示。圖 5.13(a) 為以啟發式程序所得的結果，測漏小區分別以 FAp1~FAp5 表示，F/A 值分別為 0.00244、0.00132、 2.25×10^{-5} 、 6.47×10^{-6} 及 5.98×10^{-6} ，圖 5.14(b) 為優選模式所得結果，測漏小區以 Fag1~Fag5 表示，F/A 值分別為 0.00941、0.00383、0.00138、0.001 及 1.78×10^{-4} 。將上述 F/A 值分別繪在圖 5.14(a)(b) 中比較，而曲線仍採用 5.2.1 節之全區 INU 擴張結果。在圖 5.14(a) 中，當程序進行 5 個小區的劃分時，有兩個區域落在 4000 名以後，而 GA 的結果 5 個小區均在 4000 以前，且有一個測漏小區的 F/A 值為 0.00941，超出原本圖表範圍，其原因是程序在演算過程中是將相鄰邊界 INU 中最大 F/A 值的納入，但此舉並無法保證是最好的結果，有可能沒被納入的 INU 與下一個 INU 兩者合併才是優選解，而優選模式可改善這個問題，因此會有超出圖最大值的情形出現。圖 5.13(b) 的結果亦顯示出劃分出來的測漏小區為較多 INU 的集合。而 FAg2 小區內 INU 分隔較大的原因是因為 Fag2 左邊的 INU 為一面積較大的區域，但本研究未將面積大小列入畫 INU 考量，僅皆用一個小點表示，故看似會有與另一 INU 有較長的距離，然實際上為互相緊鄰的 INU。

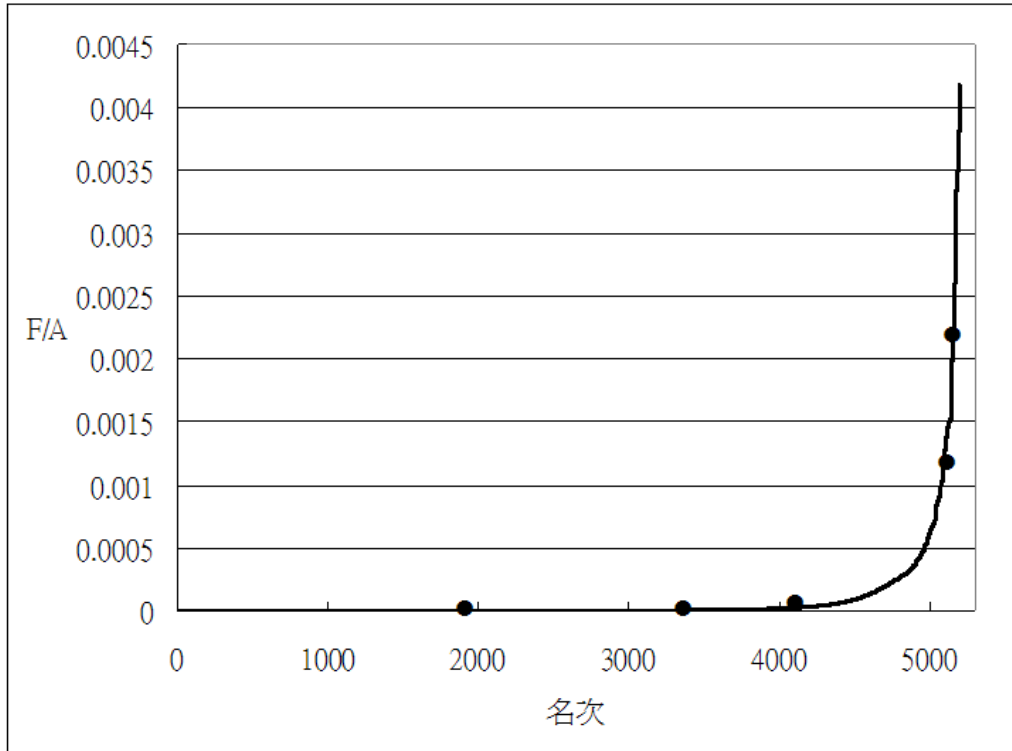


(a)

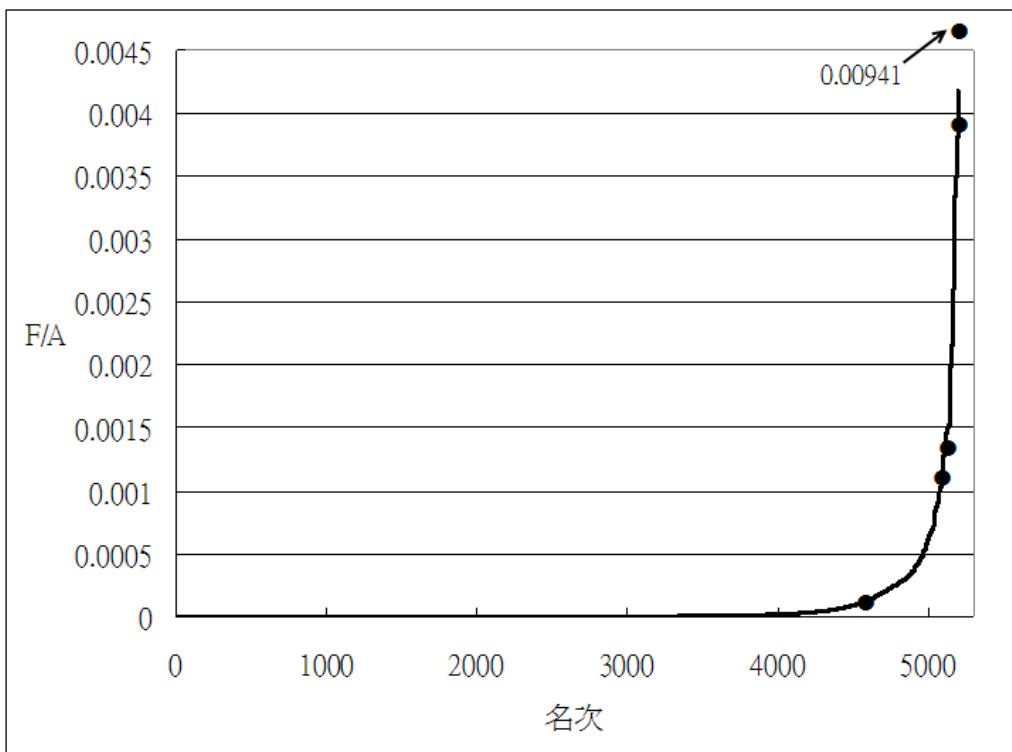


(b)

圖 5.13 以 F/A 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區



(a)



(b)

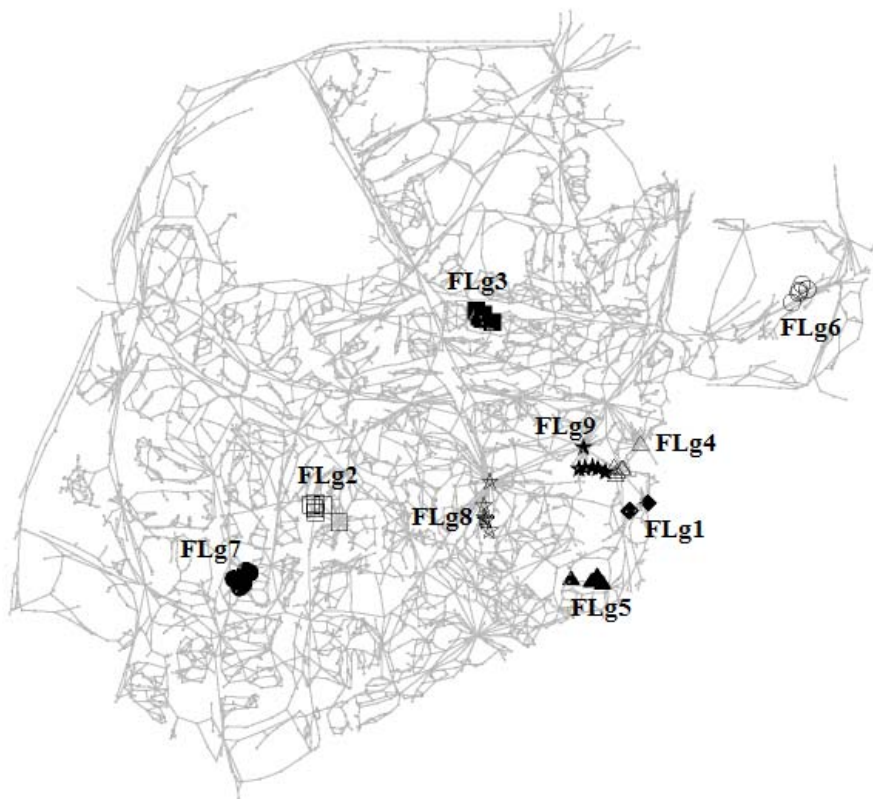
圖 5.14 以 F/A 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名

5.3.2 單位管長漏水潛勢

以 F/L 為決策目標，基本上若要求小區數不多時，如前述，啟發式程式仍可得到不錯的結果，當小區數較多時，結果才顯著變差，故以劃分 9 個測漏小區來測試程序與模式兩種方法結果之差異。區內管線長度達 2,600 公尺為小區的滿足限制條件，圖 5.15(a)為程序之結果，測漏小區以 FLp1~FLp9 表示，F/L 值分別值為 0.248、0.223、0.191、0.133、0.128、0.059、0.057、0.052 及 0.042，圖 5.15(b)則為模式所得之結果，以 FLg1~FLg9 表示測漏小區，F/L 值分別為 0.214、0.210、0.175、0.138、0.139、0.114、0.102、0.099 及 0.098。圖 5.16 比較二組結果值之差異，其曲線同 5.2.2 節中全域 INU 擴張之結果。由圖 5.16(a)中看出程序劃分結果散佈在 4,000 名以後，而圖(b)GA 結果集中在 5,000 名前後，證明了模式能劃分出具較高 F/L 的測漏小區。比較圖 5.15(b)中的結果能使較多的 INU 聚集再一起，在進行小區測漏時可在小區內部以不同制水閥開關控制進一步找出較確切的漏水點，縮小可能漏水的範圍。

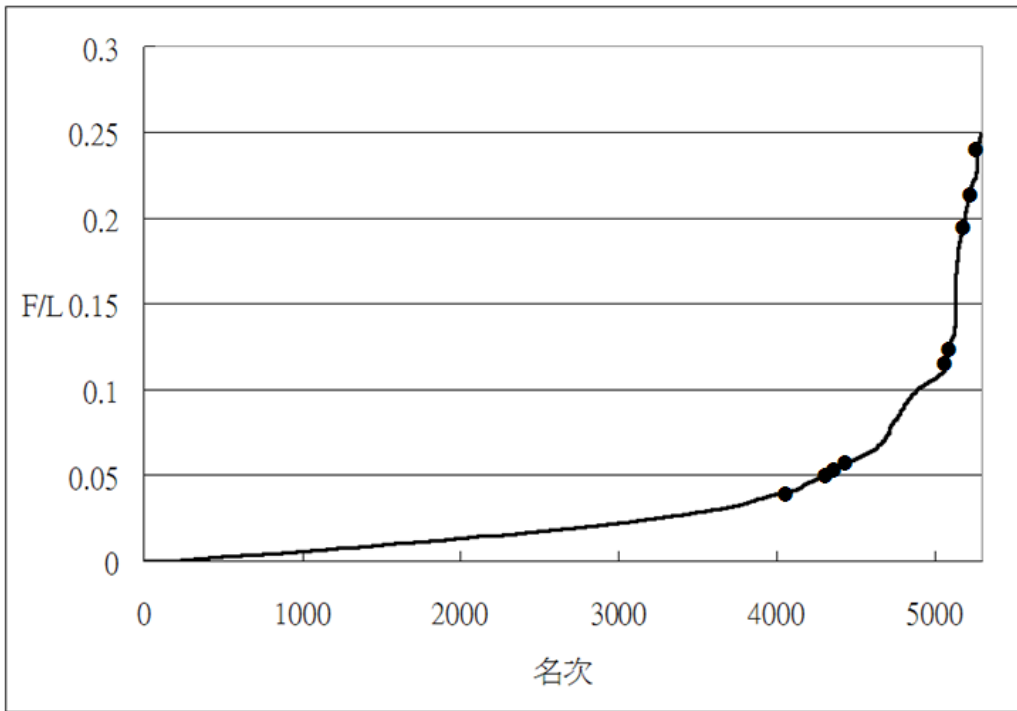


(a)

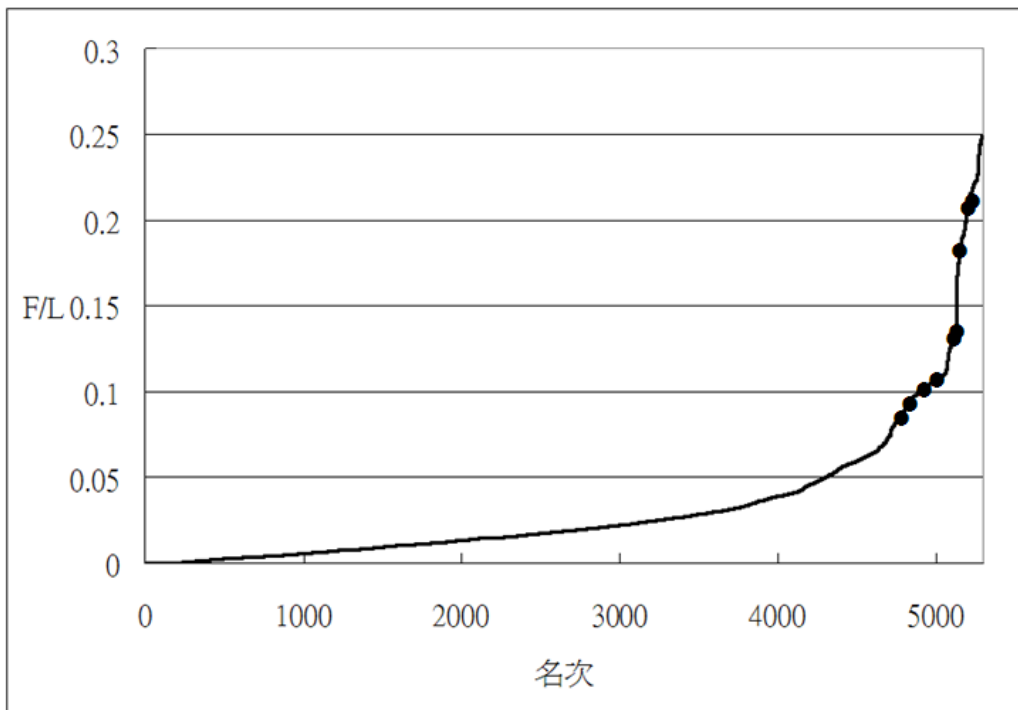


(b)

圖 5.15 以 F/L 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區



(a)



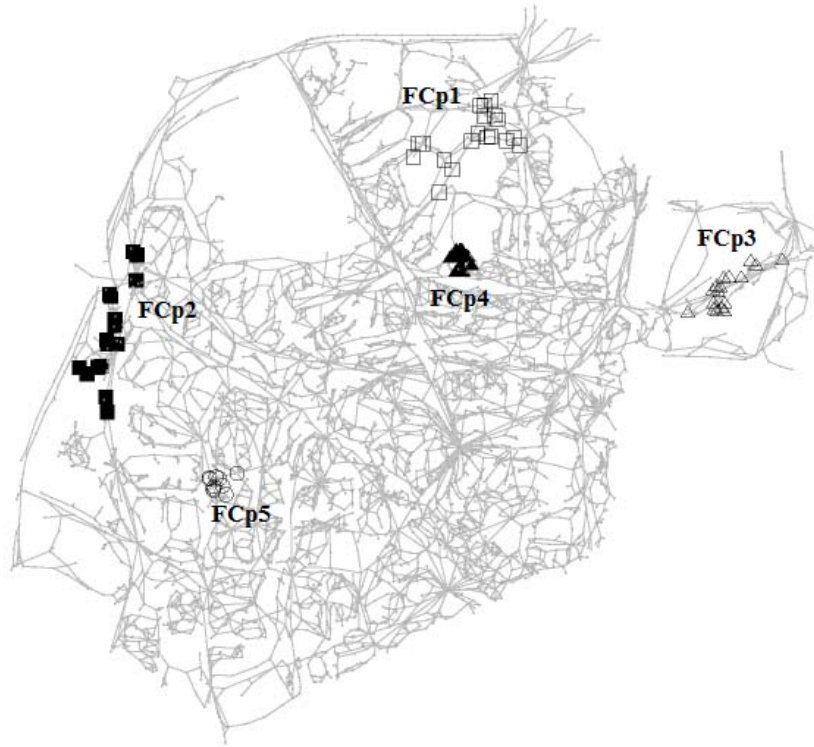
(b)

圖 5.16 以 F/L 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名

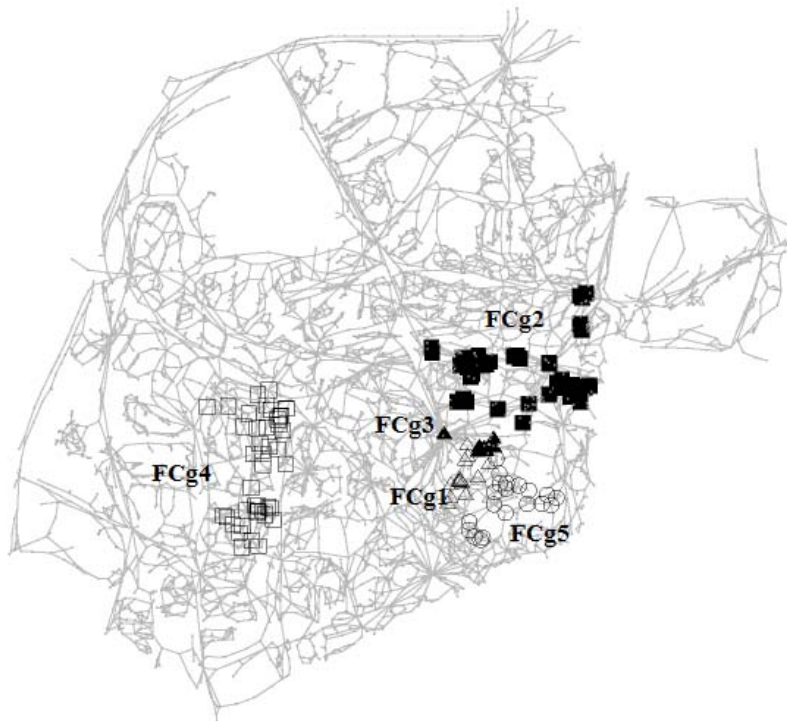
5.3.3 單位用戶數漏水潛勢

將程序與模式以 F/C 為決策目標，區內用戶數滿足 1,500 戶為限制式，進行 5 個測漏小區的劃分，其結果分別如圖 5.17 圖及圖 5.18 所示。FCp1~FCp5 為程序之結果，F/C 值分別為 0.793、0.474、0.457、0.222 及 0.120。FCg1~FCg5 為模式之結果，F/C 值為 3.853、3.682、1.374、0.979 及 0.209。圖 5.18(a)程序的結果看出其排名在 4,500 以後，而圖 5.18(b)雖也有在 4,500 名以後，但有兩個解超出曲線的範圍，其原因如 5.3.1 節所述，因此可看出模式的確能劃分出具高 F/C 值的測漏小區。



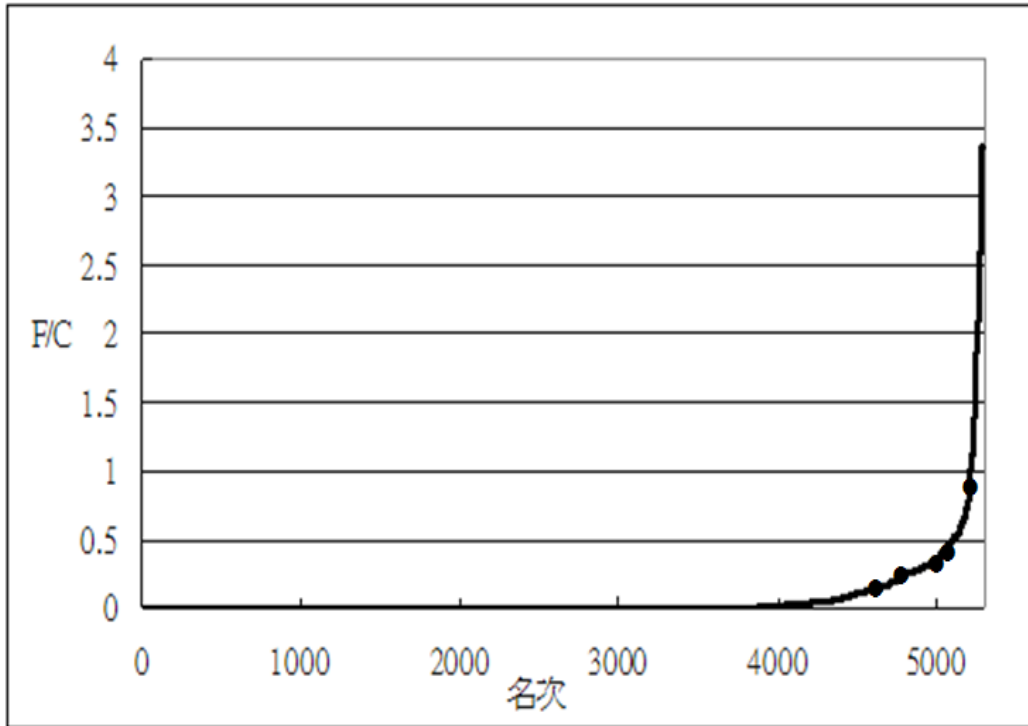


(a)

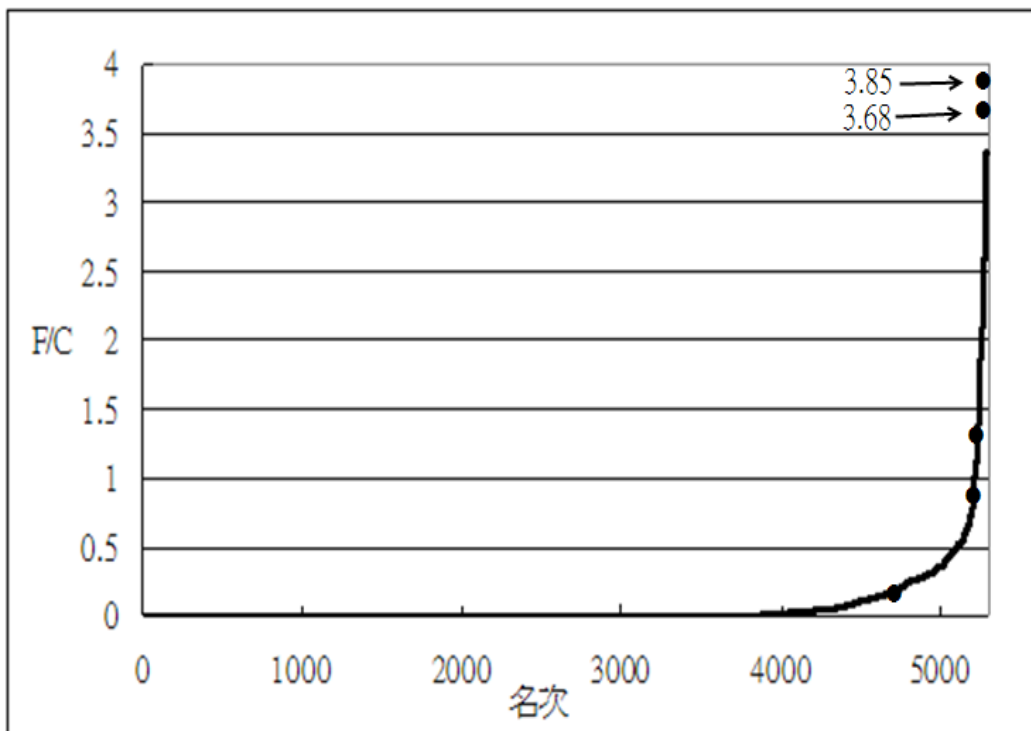


(b)

圖 5.17 以 F/C 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分之小區



(a)



(b)

圖 5.18 以 F/C 為決策因子及以(a)程序 (b)優選模式 所劃分小區之排名

5.3.4 小結

由圖 5.14、圖 5.16 及圖 5.18 可看出，當以模式進行測漏小區之劃分時，模式確能劃分出較佳漏水潛勢(單位面積、單位管長、單位用戶數漏水潛勢)的小區。程序在進行多個測漏小區劃分時，容易找到漏水潛勢較差的結果，因其演算程序並不是全域搜尋，而模式即可改善這點，甚至如圖 5.14(b)、圖 5.18(b)，可劃分出中比用程序法全域搜尋最高值的漏水潛勢更高的測漏小區。顯示模式是可劃分出較好的結果，有效改善程序的缺點，唯計算時間明顯長很多。



第六章 結論與建議

6.1 結論

由於以經驗方式進行小區劃分，較不易找到具有高漏水潛勢之區域，而影響到執行小區測漏之成本效率。本研究因而以維修記錄迴歸出管線損壞機率函數，以作為評估管線漏水潛勢之依據，並以漏水潛勢(F)為劃分小區之主要考量，再以面積(F/A)、管長(F/L)、及用戶數(F/C)為分母建立三個評估漏水潛勢目標式，由於管網複雜數量大不易求解，故將管線轉換成獨立單位管網(INU)後，再發展優先測漏小區劃分程序，所發展的程序雖可迅速取得劃分結果，但不易取得最佳解，因而進一步發展優先測漏小區劃分模式改善之，且以自來水公司第四區為案例區測試所發展的程序與模式。本研究主要結論有三點，如下一一說明之：

1. 在制水閥數量不多時，採用類似 Walsiki(1993) 所建議的制水閥分區而建立的獨立管網分區(IS)確實可以簡化管網，但在制水閥的數量密度高時，轉換成 IS 時，反而讓管網更複雜，本研究因而建立獨立管網單位(INU)來改善此問題，將管網轉換成 INU 網路，可有效簡化管網及使後續小區劃分程序與模式的演算能較快完成。
2. 基本上，以所發展的程序劃分優先測漏小區均可在短時間內獲得結果，其方法不僅快速、簡便，且以 F/A、F/L、F/C 為劃分小區之漏水潛勢目標式時，所得結果均可達到全區域的前 20%。依所發展的程序依不同目標式劃分漏水潛勢最高的三個小區時，發現以 F/A 為目標式時雖可找到排很前面的二個小區，但第三個小區的結果已不是很好；而以 F/L 為目標式時，所得的三個小區均在前 3%，較能有效找到具有高漏水潛勢之區域，結果最佳；而以 F/C 為目標式，由於以單位用戶漏水潛勢為依據，故所得小區不見得會在人口密度較高的地方。

3. 當劃分五個或是更多測漏小區時，啟發式程序雖可快速的獲得結果，但在後面幾個小區容易產生有不佳的結果，F/A 之結果有一個小區排名落在中間之後，但模式可有效改善這個缺點，均可維持在前 10%，甚至在以 F/A、F/C 為考量因子時可獲得超出以程序全域搜尋最佳的解。而模式所得結果具有多個 INUs 組合與近似圓形之特性，多個 INUs 可進一步縮小可能漏水區域，而近似圓型則在測漏時方便人員進行測漏。

6.2 建議

雖然水公司已建置管線損壞維修資料庫，但卻未與 GIS 連結，在進行分析上不易找出該筆損壞資料之確切管線，若能實際掌握該筆管線之過往損壞記錄，則所迴歸的管線損壞機率函數預期更加可靠。

用戶用水記錄目前仍仰賴人工進行抄表，當在進行測漏時亦無法確實掌握在某一時間點內小區內所有用戶之用水量，若能建置電子水表，可利於進一步進行小區用水資料監控，有效維護小區及進行小區測漏。

所建立的優選模式雖可劃分漏水潛勢較高的數個小區，但仍無法應用在全區劃分上，這部分仍有待後續研究發展更好的方法來進行全區劃分。

參考文獻

- 巨廷工程顧問公司處，(93 年)，「自來水供水管網改善計畫」，台北。
- 台灣省自來水公司，(93 年)，「降低漏水率實施計畫」，台中。
- 台灣自來水股份有限公司，(96 年)，「本公司各區管理處近 2 年配水量增(減)量一覽表」，http://www.water.gov.tw/02results/res_e_list.asp (accessed on July 10, 2008)。
- 朱撼湘，(94 年)，「小區檢測利用夜間最小流量判斷漏水量」，*自來水會刊*，第二十四卷，第一期。
- 李丁來，(79 年)，「本公司『小區管網計劃』簡介」，*台水月刊*，第七卷。
- 李基城，(95 年)，「試辦計量小區檢漏之效益研析」，第二十三屆自來水研究發表會論文。
- 吳錦振，(94 年)，「提升自來水售水率之小區計量運用」，淡江大學土木工程學系碩士在職專班，台北。
- 林子立，(85 年)，「計量檢漏在小區管網的實務運用與探討」，第二十三屆自來水研究發表會論文。
- 范煥英、楊鵬祥、張嘉詮、楊境維，(93 年)，「小區域分區計量探討管網漏水率及其改善之研究」，台北自來水事業處報告，台北。
- 范煥英、張世勳，(96 年)，「北水處小區測漏方式」，直接連絡請教。
- 洪武雄，(81 年)，「自來水管腐蝕之原因及對策」，*台水月刊*，第九卷，第四期。
- 陳耀仁、蔡彌、柳朝彰，(85 年)，「非開挖式輸水管線修復技術運用之探討」，*自來水會刊*，第五十八期。
- 陳廉泉，(73 年)，「台灣省自來水公司防漏措施之研究」，*自來水會刊雜誌*，第九期。

陳耀楠，(73 年)， “防漏實驗區計劃-技術研討會講述綱要” ， *自來水會刊雜誌*， 第九期。

陳耀楠，(82 年)， “台灣自來水建設與『節約用水』之關係” ， *自來水會刊雜誌*， 第四十八期。

郭瑞華、陳錦祥、張世勳、鄭答振，(83 年)， “台北自來水事業處漏水改善現況” ， *自來水會刊*， 第二十三卷， 第三期。

褚麗絹、江春盛、陳淑慧，(95 年)， “台灣自來水管網漏水評估之研究” ， *自來水會刊*， 第二十五卷， 第二期。

經濟部水利署，(95 年)， 「研定自來水技術規範『漏水防止對策』及『我國自來水漏水改善對策』期末報告書」， 台北。

駱尚廉、楊坤霖、陳亦能、林文淵，(86 年)， 「減少漏損及無費用水之經濟研究」， 中華民國自來水協會自來水研究發表會， 台北。

Arreguin-Cortes, F. I. and Ochoa-Alejo, L. H. (1997). “Evaluation of water losses in distribution networks.” *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 123(5).

Algere, H., Hirner, W., Baptista J. M., and Parena R. (2000). *Performance Indicators for Water Supply Services*, IWA.

Charalambous, B. (2005). “Experiences in DMA redesign at the Water Board of Lemesos, Cyprus.” *Leakage 2005 Conference Proceedings*.

Covas, D., Ramos, H., and de Almeida, A. B. (2005). “Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems.” *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 131(12).

Covas, D. and Ramos, H. (1999). “Practical methods for leakage control, detection and location in pressurized systems.” *13th Pipeline Protection Conference Proceedings*.

- Covas, D., Jacob, A., and Ramos, H. (2006). "Bottom-up analysis for assessing water losses: a case study." *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium Proceedings*.
- Dandy, G. C., Simpson, A. R. and Murphy, L. J. (1996). "An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization." *Water Resources Research*, 32(2).
- Dandy, G. C. and Engelhard M. (2001). "Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms." *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 127(4).
- Fanner, P. (2004). "Assessing real water losses: a practical approach." *Water* 21.
- Farley, M. and Trow S. (2003). *Losses in Water Distribution Network , A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control*, IWA.
- Kao, J.-J. and Li, P.-H. (2007). "A segment-based optimization model for water pipeline replacement." *Journal American Water Works Association*, 99(7).
- Lambert, A. O. and McKenzie R. D. (2002). "Practical experience in using the infrastructure leakage index." *International Water Association Conference*.
- McKenzie, R. S., Bhagean, J. N., and Lambert AO. (2002). *Leakage Reduction Software Developed Through the Water Research Commission*, WRc.
- Miranda, V., Ranito, J. V., and Proenca, L. M. (1994). "Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning." *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(4).
- Ramos, H., Reis, C., Ferreira, C., Falcão, C., and Covas D. (2001). "Leakage Control Policy within Operating Management Tools.", CCWI2001.
- Walaski, T. M. and Pelliccia, A. (1982). "Economic analysis of water main breaks." *Research and Technology*.

Walaski, T. M. (1993). *Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis*. Reliability Engineering & System Safety.

WRc. (1994). *WRc-Water Industry: Managing Leakage. Engineering and Operation Committee. Reports A to F*.



附錄 小區測漏流程

雖然小區測漏實作並非本研究的重點，但了解實際流程有助於本研究分析如何劃分出較有效率的流程，本研究因而首先了解國內的小區測漏流程。目前國內水公司所採用的小區測漏流程，尚無任何技術手冊，經詢問相關工程師，典型的測漏流程如圖 1.1 所示，由開始小區檢測作業至完成成果報告，工作項目不少，在進行實際測漏工作前，需先逐步檢測小區是否確實封閉、水壓是否足夠區內用戶使用等，如上述步驟皆可確實達到後則接續進行流量計安裝與監控小區改善前後的用水狀況。在這整個流程有若干檢核條件，若未達需求標準則必需往回上層重新作業，是一件頗耗費人力及成本的工作。因此有必要作好小區劃分，以提高測漏及成本效益。雖然劃分小區很重要，但如何劃分小區，目前實務上仍是依經驗為主，尚未有系統化的標準作業流程可供採用，而小區若劃分的不好，會讓後續檢測作業的效率大打折扣，本研究因而先就小區劃分進行研究。

1. 子系統(大區)篩選

依目前的人力經費及技術上的限制，不太可能全面進行小區測漏，故建議應先篩選具有高漏水潛勢之子系統，然後根據挑選出來的子系統進行優先測漏小區之劃分，以提高後續進行小區測漏的成本效益。以下說明子系統的篩選流程，雖然本研究後來受限於資料，而無法針對第四區所管轄的所有子系統作篩選，只針對該區最大的台中子系統作研究，但所建立的篩選流程相信仍具有實用性，未來俟資料充足或在其他區應用時，即可依所建議的流程進行。以下詳述本研究所建議的篩選流程。

自來水公司各區處管網是由數個數量不等的較獨立供水子系統所組成，為了便於管理供水，各子系統進出總水量大多都有即時監測。本研究建議首先針對各區處獨立監控的供水子系統或可明顯區隔的大區，嘗試結

合監控數據配合用戶用水抄表記錄，估算各子系統的可能漏水量，並分析維修記錄所反應的系統漏損趨勢，最後配合管網基本圖資以及壓力監測數據，建立一個漏水評估指標，並據以選取漏水潛勢較高或者較應考量的子系統，以期提高小區測漏的效益。

所建議的子系統篩選流程如圖 1.2 所示，共分為下列幾個步驟：

(一) 資料蒐集

首先收集總表流量記錄、用戶抄表資料、水平衡表 (water audit)、壓力監測記錄(平均壓力)、管網及制水閥(GIS)、維修紀錄等。

(二) 篩選

依上個步驟所蒐集的資料分析出兩個指標，漏水率(或量/百分比)與國際上常用的 Infrastructure Leakage Index (ILI) (Lambert and McKenzie, 2002)，以下分別說明之。

(1) 漏水率

依據總表流量紀錄可計算子系統或大區的水量，計算方式為配水量與支援量之差額。用戶抄表記錄為此區域內用戶之用水紀錄，亦稱抄見量。抄見率計算方式如下：

$$\text{抄見率} = \frac{\text{總表流量紀錄} - \text{用戶抄表紀錄}}{\text{總表流量紀錄}} \quad (1.1)$$

將再結合表 1.1 水平衡表(water audit)可推估出漏水率(或量/百分比)。由於目前台灣自來水公司為有效降低漏水率，經經建會審核通過於 93~95 年以三年為期「試辦小區管網計畫」要求漏水率在 10% 以內(林,95 年)，雖然該計畫已結束，但離漏水率 10% 以內的目標仍有相當距離，因而採用漏水率 10% 為基準，暫不納入小於此基準的子系統。

(2) ILI 指標

此指標為國際上常用來評估管網漏水情形的指標，主要由水平衡

表、壓力監測記錄(平均壓力)、管網及制水閥等資訊計算(Lambert and McKenzie, 2002)，計算公式如下：

$$ILI = \frac{\text{年漏水量}(CARL)}{\text{不可避免之漏水量}(UURL)} \quad (1.2),$$

其中

CARL 可由水平衡表(water balance)得知

$$UURL(\text{litres/day}) = (18 \times Lm + 0.8 \times NC + 25 \times Lp) \times P,$$

其中

Lm 為幹管長度、Nc 為用戶接水點數、Lp 為用戶地權至水表之私有管線長度，通常設為零、P 為平均壓力、DC 為幹管每公里之接點密度，亦可由壓力監測記錄、GIS 資料中的管網及制水閥資料中計算而得。

一般而言，ILI 值低於 1.5 為一管理良好之管網(Lambert and McKenzie, 2002)，故本研究將挑選 ILI 高於 1.5 之子系統。唯此數值對台灣目前的自來水管網而言可能過嚴，將於實際計算後再評估是否修正（您有算了嗎？沒看過這個數據？若沒有要說明）。

- (3) 維修密度(這個指標有出處嗎？若有,要 cite. 還是我們自己想的?)(您有算嗎?若沒有,也要交待)

此為本研究發展用以推估管線可靠度之指標，主要是以自來水公司的維修紀錄計算，計算公式如下：

$$\text{維修密度} = \frac{\text{維修件數}}{\text{管線長度}}$$

維修密度指標可以顯示出區域內管線的可靠度，假如一區域內經常在不同地點做管線維修則表示該區域可能因為水壓過高、管線老舊...等原因造成管線漏損，因此採用此指標來評估系統內管線之可靠性。計算方法是將前兩個指標 ILI 與漏水率篩選出的系統做交集，所交集出的系統再計算其維修密度，若維修密度在整體

排序上為前 20% 低，則表示管網狀況相對較好，故予以排除。

(三) 單位管長預期改善水量

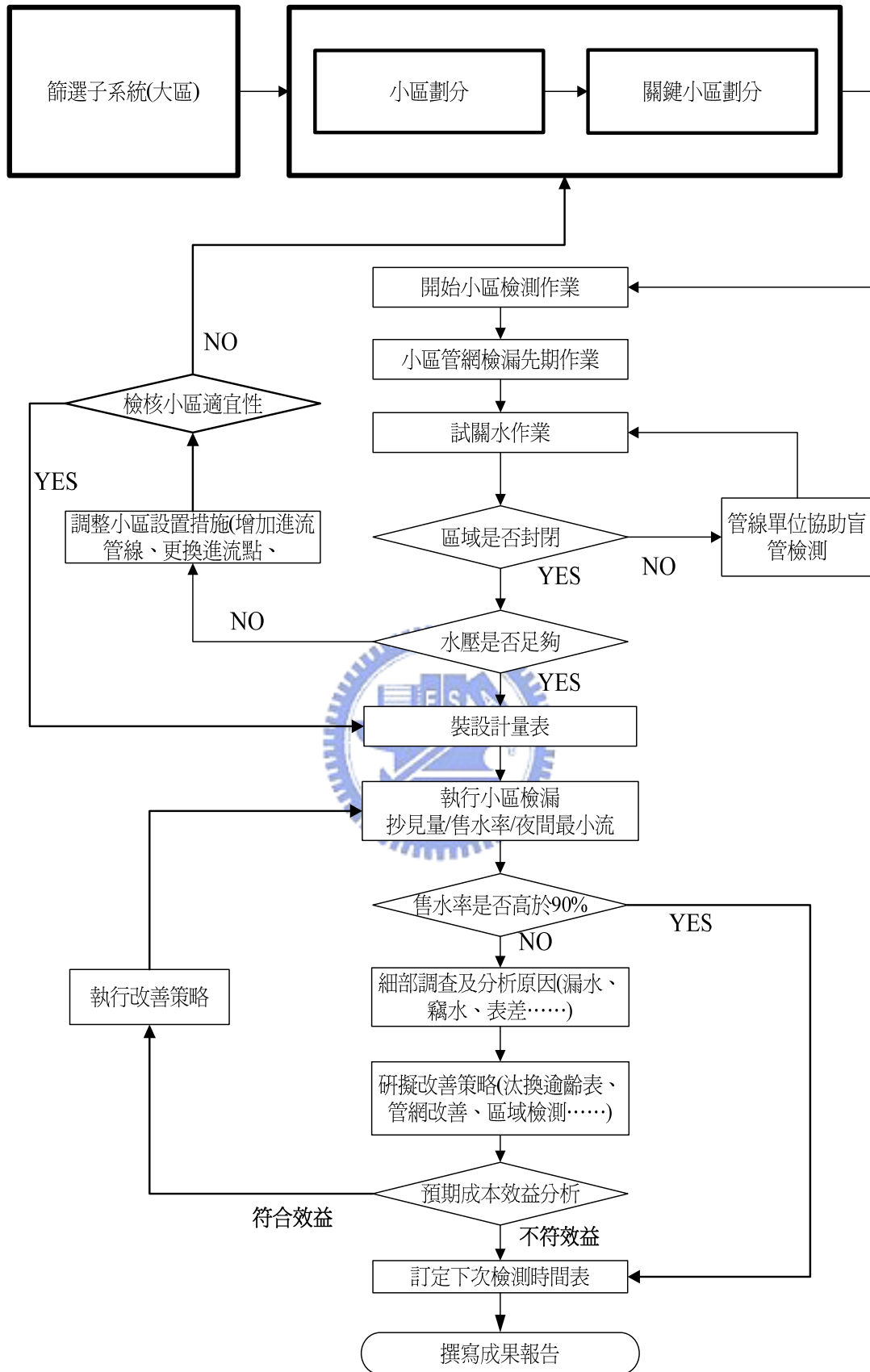
針對漏水率、ILI、維修密度篩選的子系統，假設改善至漏水率 10% 以內的目標值，則可依下列公式推估單位管長預期改善水量：

預期單位長改善水量=(漏水量 - 系統輸入水量 x 10%)/管線長度

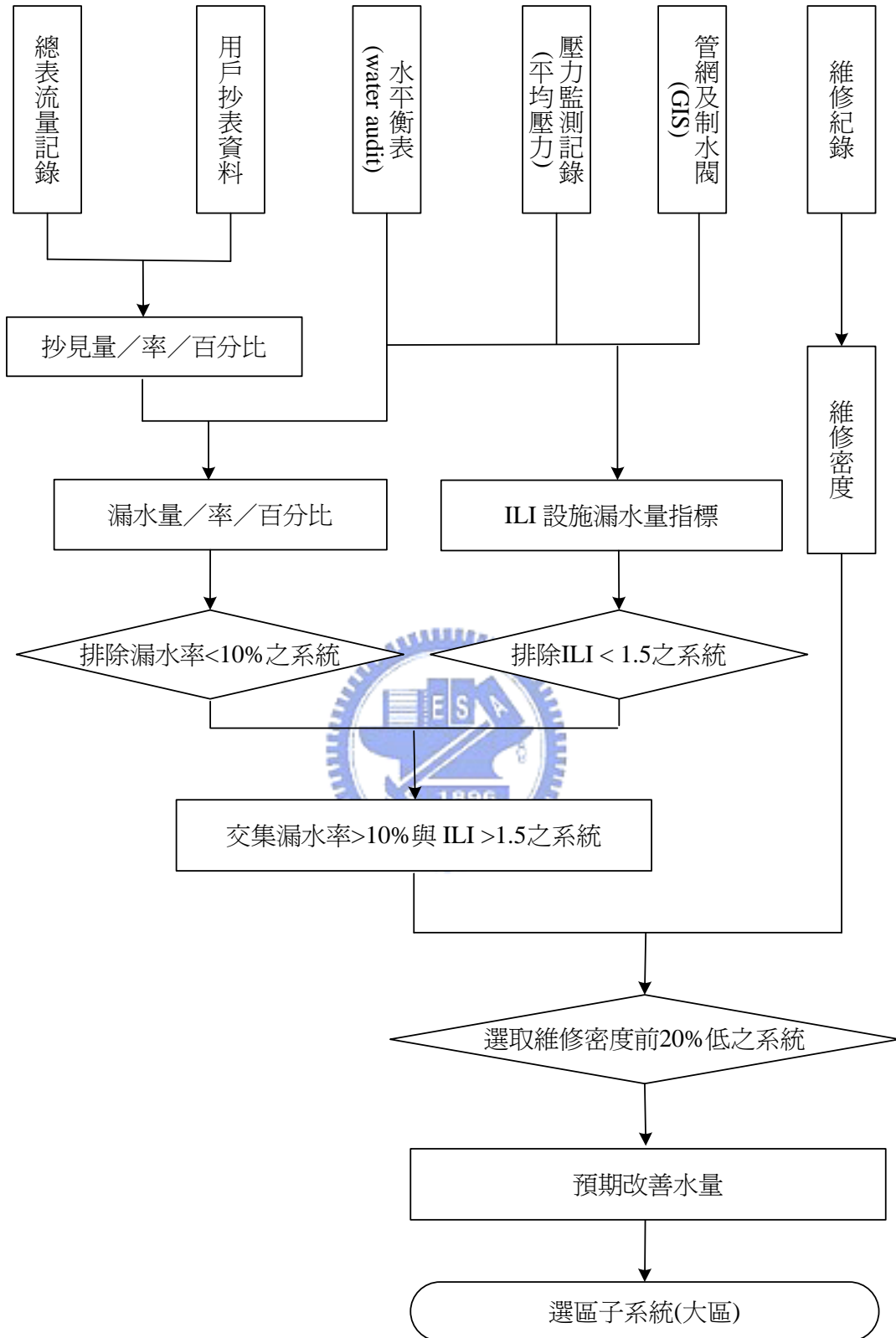
依預期改善水量大至小排序後，前幾名系統將是預期改善量較佳的子系統，預期再做後續的小區測漏的效益會較高。

上述提到的篩選數據，排除漏水率小於 10%、ILI 小於 1.5、及維修密度前 20% 低之子系統，亦可視實際情形作適當調整，各指標的篩選順序亦可調整，最後再依上述指標的綜合比較及人力經費預算的可行性篩選出優先進行小區測漏的子系統。





附圖 1.1 小區測漏流程



附圖 1.2 子系統(大區)測漏流程圖

附表 1.1 水平衡表(water balance)

外引水源				自有水源					
系統輸入(允許已知誤差)									
供應水量								支援水量	
漏水量				授權 用水量					
真實 漏水量		表面 漏水量		未付費 授權用水			付費 授權用水		
無收益 水量						收益 水量			
水錶前用戶接管漏水量	蓄水槽漏水與溢流量	幹管漏水量	用戶用水計量誤差、資料錯誤	未授權用水量	未付費未計量用水量	未付費計量用水量	付費未計量用水量	付費計量用水量	付費支援水量

出處：Alegre et al, 2000