

國 立 交 通 大 學

環境工程研究所

碩士論文

基於漏水潛勢改善量之自來水換管規劃優選程序

Leakage Potential Improvement based Optimization

Procedure for Developing Water Supply Pipeline

Replacement Plans

研 究 生：古展帆

指 導 教 授：高正忠

中華民國九十九年七月

基於漏水潛勢改善量之自來水換管規劃優選程序
Leakage Potential Improvement based Optimization Procedure
for Developing Water Supply Pipeline Replacement Plans

研 究 生：古展帆

Student：Chan-Fan Ku

指 導 教 授：高正忠

Advisor：Jehng-Jung Kao

國立交通大學

環境工程研究所



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

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

摘要

自來水供水系統換管一般是依據管線破損機率函數進行規劃，唯管線破損並不完全是隨機性，且同一破損機率的管線，其漏水潛勢不見得相同，故一些換管方案不見得可有效改善漏水率，本研究因而發展一套系統化程序規劃出可較有效降低漏水率的換管方案。該程序主要包括漏水因子、高破損機率管線區判識法、漏水潛勢函數及換管優選模式。分析漏水因子主要在於了解漏水特性及作為後續工作的依據及探討改善漏水率的方向；高破損機率管線區判識法主要依據維修記錄資訊，透過一個特殊的分析方法判識出因一些原因而有較高破損機率的管網區域，將其列入優先汰換的名單中；漏水潛勢函數則主要是改善過去破損機率函數未考量不同程度的漏水潛勢問題，比較及分析各種迴歸函數，以不同分區或分群方式建立適合國內管網特性的漏水潛勢函數，除了管齡，亦分析管徑、破損因素等因子，以期建立較佳的漏水潛勢函數；最後則發展一套基於漏水潛勢改善量最大化的換管優選模式，且依據不同函數分析其對換管決策的影響。

本研究以新竹管網系統應用所發展的判識方法找出高破損機率管網區域，並以管網維修資料建立不同型式的漏水潛勢函數，除了以上優先汰換的管線，再以所發展的優選模式研擬換管方案，結果發現以本研究建立的判識方法可有效找出破損率明顯較高的管線，而透過換管優選模式所研擬的方案可迅速篩選出對管網系統漏水改善率影響較高的管線，其中以編號 E-Ba 依管齡及地震分區的函數所研擬換管方案較佳。

關鍵字: 自來水管網、漏水潛勢、換管程序、換管模式、換管決策分析、
永續環境系統分析

Abstract

Previous studies for planning the pipe replacement of a water distribution network (WDN) were generally based on a pipe breakage function. However, pipe breaks do not randomly occur and pipes estimated with the same breakage probability may not have the same leakage potential. Therefore, the pipe replacement plan generated based on such a function may not effectively improve the leakage of a WDN. This study thus developed a systematic procedure for planning the pipe replacement. The procedure includes an analysis of various leakage factors, a method to identify pipes with high breakage potential, leakage potential functions, and a pipe replacement optimization model. The analysis of leakage factors determines which factors to be explored in this study. Based on historical breakage maintenance records and network spatial information, a connectivity method is proposed to identify pipes with high breakage potential. The proposed leakage potential functions enhance the conventional pipe breakage function with additional consideration of leakage potential and spatial variations. Finally, the optimization model maximizes the leakage potential improvement to generate various pipe replacement plans based on different leakage potential functions. The proposed procedure was applied to the Hsinchu City WDN. The results show that the proposed procedure can effectively identify the pipes that must be prioritized for replacement and generate optimal replacement plans according to varied leakage potential functions. The replacement plan generated by the function based on pipe ages and earthquake zones is the best plan.

Keywords: water distribution network; leakage potential; pipeline replacement; optimization model; sustainable environmental system analysis.

致謝

很高興我能完成這份論文，當初剛進研究所還是新鮮人的時候，看著學長姐們的論文，很難想像我也能完成，但是在大家的協助下，我真的做到了，這份喜悅希望能跟所有人分享。

謝謝父母和哥哥在我求學生涯總是適時的給我鼓勵，讓我有繼續下去的動力，也很開心哥哥今年也和我一起畢業了。感謝我的指導老師 高正忠教授在我進行研究時，總能給予我明確的方向與協助，讓我做起研究更加得心應手，也要感謝沛濠、子欽、坤哥、冠華、立偉、皮皮、仕強、旻韓學長與宥禔學姊在我研究遇到瓶頸時的幫忙，京澄、雅如、球球、岳奇、心怡在這段期間的陪伴，以及自來水公司第三區林慶春、彭正文先生提供論文所需資料，使研究得以順利進行。很慶幸能加入所上的排球隊，不然我想我也不能這麼快就認識到所上的其他同學，每當心情悶的時候，和你們痛快的打一場真的舒服很多，雖然我們的人不多，但總是能玩的很盡興，也希望男排趕快有新血加入，繼續把我們的熱情延續下去，這個重責大任就交給玗儀了。最後，僅將這份文獻給所有需要的人。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	viii
第一章 前言	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 論文內容.....	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 國內自來水管網漏水與換管現況分析.....	5
2.2 漏水潛勢影響因子.....	7
2.3 高破損機率區之判識方法.....	7
2.4 管線破損機率函數	8
2.5 換管模式.....	9
第三章 研究流程與方法	11
3.1 研究流程.....	11
3.2 漏水因子.....	14
3.3 高破損機率管線區判識法	18
3.3.1 N-pipe connectivity 判識方法	18
3.4 漏水潛勢函數	19
3.4.1 迴歸函數	19
3.5 換管優選模式	25

第四章 案例研討	28
4.1 案例簡介.....	28
4.2 相關資訊整理與分析	31
4.3 高破損機率管線區	35
4.4 漏水潛勢函數	37
4.5 換管方案優選結果及討論	41
第五章 結論與建議	44
5.1 結論.....	44
5.2 建議.....	45
參考文獻	46
附錄 A N-pipe connectivity 及道路與維修記錄相關性分析.....	51
附錄 B 地震與維修記錄相關性分析.....	63



圖目錄

圖 2.1	自來水公司 84 到 94 年歷年管線汰換率	6
圖 2.2	世界各國換管率	6
圖 3.1	研究流程	12
圖 4.1	大新竹系統管網管線分布圖	29
圖 4.2	大新竹子系統分佈統計: (a) 依管徑 (b) 依管材	30
圖 4.3	大新竹子系統口徑 65mm 以上管線維修紀錄件數分佈統計: (a) 依管徑 (b) 依管材	33
圖 4.4	大新竹系統管網中各監測站之 voronoi diagram.....	34
圖 4.5	地震與維修紀錄統計分佈.....	34
圖 4.6	0-pipe connectivity 取 3 次以上破損之分佈	36
圖 4.7	不重複的 1-pipe connectivity 取 4 次以上破損之分佈	36
附圖 A.1.1	N-pipe connectivity 之不同總破損次數分佈: (a) 0-pipe connectivity (b) 1-pipe connectivity (c) 2-pipe connectivity (d) 3-pipe connectivity (e) 4-pipe connectivity.....	52
附圖 A.1.2	0-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈: (a) 取 3 次以上總破損紀錄 (b) 取 5 次以上總破損紀錄.....	55
附圖 A.1.3	不重複的 n-pipe connectivity 之不同連接管線數統計 分佈	56
附圖 A.1.4	不重複的 1-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈: (a) 4 次以上總破損紀錄 (b) 6 次以上總破損紀錄 (c) 8 次以上總破損紀錄.....	57

附圖 A.1.5	不重複的 2-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈: (a) 6 次以上總破損紀錄 (b) 9 次以上總破損紀錄 (c) 12 次以上總破損紀錄.....	58
附圖 A.1.6	不重複的 3-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈: (a) 8 次以上總破損紀錄 (b) 16 次以上總破損紀錄.....	59
附圖 A.1.7	不重複的 4-pipe connectivity 之 13 次總破損紀錄 管齡分佈	60
附圖 A.1.8	不重複的 5-pipe connectivity 之 12 次以上總破損 紀錄管齡分佈	61
附圖 A.1.9	不重複的 6-pipe connectivity 之 94 次總破損紀錄 管齡分佈	61
附圖 A.1.10	不重複的 7-pipe connectivity 之 23 次總破損紀錄 管齡分佈	61
附圖 A.1.11	各種道路路寬與維修頻率的統計分佈	62
附圖 B.1.1	地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈: (a) 各測站地震總測值 (b) 維修件數.....	64
附圖 B.1.2	各年地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈: (a) 92 年 (b) 93 年 (c) 94 年 (d) 95 年 (e) 96 年.....	65
附圖 B.1.3	各年地震與維修紀錄統計分佈: (a) 92 年 (b) 93 年 (c) 94 年 (d) 95 年 (e) 96 年.....	68

表目錄

表 3.1	台灣省自來水公司 92 年-96 年維修記錄管徑大於 65mm 之漏水原因件數統計	15
表 3.2	本研究納入分析的漏水因子	15
表 3.3	未納入分析的漏水因子	16
表 3.4	各種管線破損機率函數	21
表 3.5	加入地震因子的各種管線破損機率函數	22
表 3.6	未納入研究之損壞機率函數及其原因	23
表 3.7	過去研究的各種建議換管模式	27
表 4.1	各種管線破損機率函數結果比較	39
表 4.2	管徑分類結果比較	40
表 4.3	各種換管優選模式結果比較	41
表 4.4	基於 EPANET2 模擬流量之各種換管優選模式依鑑別度 分析結果	43
表 4.5	基於用戶抄錶用水量之各種換管優選模式依鑑別度分析 結果	43

第一章 前言

1.1 研究緣起

台灣自來水管網供水普及率雖已提升至 90% 以上，唯漏水量仍高達 25% 左右，與其他先進國家約 10% 相較(褚等，95 年)，明顯浪費不少水資源且有頗大的改善空間。而管線漏水除了老化腐蝕之外，材質、施工、回填不良及地盤下陷、荷重振動等均會提高管線破損漏水的機率，因此有必要換管改善自來水管網品質及降低漏水率(Dandy and Engelhardt, 2006)，唯如何換管較能有效的改善漏水率，目前並沒有可供國內管網採用的系統性方法，仍然是一項研究挑戰。本研究因而發展一套系統化程序規劃出較有效降低漏水率的換管方案。

由於不同地區管網的漏水特性不盡相同，在研擬有效改善漏水率的換管方案之前，必須要先掌握影響管網漏水的因子，然後才能據以分析管網漏水潛勢的分佈特性，提高後續建立的分析方法的效益，本研究因而從相關資料及文獻(Felipe and Leonel, 1997; Dídia Covas *et al.*, 2005; Thornton *et al.*, 2008; 陳，73 年; 洪，81 年; 陳等，85 年; 駱，86 年; 台北自來水事業處，92 年; 郭等，93 年; 褚等，95 年; 經濟部水利署，95 年; 台灣自來水公司，96 年; 何，98 年)整理歸納各種漏水因子，將不同種類的漏水因子依其構成種類作分類，並分析其適用性，以作為後續其他工作的主要探討依據與方向。

自來水供水系統換管一般是依據管線破損機率函數(Shamir and Howard, 1979; Walski and Pelliccia, 1982; Clark *et al.*, 1982; Kettler and Goulter, 1985; Goulter and Kazemi, 1988; Crowder *et al.*, 1991; Goulter *et al.*, 1993; Jacobs and Karney, 1994; Pelletier *et al.*, 2003; Alvisi and Franchini, 2005; Giustolisi *et al.*, 2005; Davis *et al.*, 2007)進行規劃，唯管線破損並不完全是隨機性，且依這些函數所得同一破損機率的管線，其漏水潛勢也不見

得相當，導致所得換管方案不見得可有效改善漏水率，而本研究在分析實際維修記錄時，發現一些管網區域會有較高重複破損的情形發生，過去研究(Goulter and Kazemi, 1988; Sundahl, 1997)亦指出因管齡及用戶密度等原因讓管線發生重複破損的情形。本研究因而發展一套方法高破損機率管線區判識法，判識出高破損機率的區域，並列入優先換管的區域，以期換管能有效減少漏水率。

如前述，雖然過去已有不少研究發展了一些管線破損機率函數，但那些函數大多只考量破損的機率，並沒有分析漏水潛勢，真實破損事件的狀況其實各不相同，漏水情形也往往差異甚大，把不同管線不同程度破損視為機率相當的事件並不適當。此外，這些管線破損機率函數並沒有通用公式，不同函數除了適用性會因管網特性而有所差異，亦可能產生不同的換管決策，本研究因而發展一些漏水潛勢函數，主要是改善過去文獻中管線破損機率函數未考量不同程度的漏水潛勢問題，為找出最適用於國內管網特性的漏水潛勢函數，將比較及分析各種不同的迴歸函數，試著以不同分區或分群等方式提高適用性，並分別對管齡、管徑、破損因素等相關因子作分析，以期能建立較佳的漏水潛勢函數。

除前述優先汰換的管線外，換管率或預算通常會超過這些優先汰換管線，而如何規劃換那些管線可較有效改善漏水率，仍需要建立一個換管優選規劃模式研擬適當的換管方案，過去的換管模式大部分是依據管線破損機率函數來建立(Shamir and Howard, 1979; Kim and Mays, 1994; Halhal *et al.*, 1997; Kleiner *et al.*, 1998; Dandy and Engelhardt, 2001; Luong and Nagarur, 2001; Loganathan *et al.*, 2002; Mailhot *et al.*, 2003; Dridi *et al.*, 2005; Dandy and Engelhardt, 2006; Hong *et al.*, 2006)，部分模式是針對單一管線(Luong and Nagarur, 2001; Loganathan *et al.*, 2002)，並不適用於管網，而一些模式(Shamir and Howard, 1979; Kleiner *et al.*, 1998; Mailhot *et al.*, 2003; Dridi *et al.*, 2005; Dandy and Engelhardt, 2006)則分析數十年長期間的規

劃，這對於每年都需要進行的換管工作，亦不太實用。更重要的是這些模式皆未考量如何有效改善漏水率。本研究因而依據前述所建立的漏水潛勢函數，建立一套基於漏水潛勢改善量最大的換管優選模式，研擬適當的換管方案，並評估不同漏水潛勢函數對於換管決策方案的影響。

本研究以國內的管網系統為案例，試著應用所發展的判識方法找出高破損機率管線區域，接著依據維修紀錄、用戶需水量及漏水因子相關資料建立各種型式的漏水潛勢函數，並藉由該函數建立篩選方法找出具有高漏水潛勢的管線，最後發展一套換管優選模式，結合以上優先汰換管線研擬換管方案，以期所得的換管方案能有效改善漏水率。

1.2 研究目的

由於國內的換管並未能顯著改善漏水率，加上國內外以往的研究很少有以改善漏水率為主要目標的換管規劃模式可供採用，本研究主要目的因而是希望發展一套系統化程序供國內自來水管網系統研擬可有效改善漏水率的換管方案。本研究主要目的有下列三項：

1. 建立方法判識高破損機率管線區：自來水管網漏水並不一定是隨機性，往往某些管網區域因為一些因素而重複破損，所以有必要建立一個方法判識出這些管網區域，列入優先汰換，以改善漏水頻繁發生的區域，以提高換管的效益。
2. 建立可用以評估漏水潛勢的函數：文獻中換管規劃模式大多是基於管線破損機率函數，唯破損案件狀況與漏水量均不同，不同事件視為同一機率並不適當，亦無法據以有效改善漏水率，本研究因而擬建立一個適當的函數評估管線的漏水潛勢函數，以作為換管的依據，有效改善管網漏水率。
3. 建立基於漏水潛勢改善量最大之換管優選模式：除了找出明顯須優先汰換的管線外，針對其他管線仍不易決定適當的換管方案，故有必要

發展一個優選模式輔助研擬換管決策方案，以期得到最有漏水改善效益的換管方案。

1.3 論文內容

本論文之後續章節中，第二章回顧國內自來水管網漏水與換管現況分析、漏水潛勢影響因子、高破損機率區之判識方法、管線破損機率及換管模式等相關文獻；第三章首先簡介本研究流程，然後說明本研究發展的一套系統化程序，然後針對研究流程的每一個步驟詳細說明之；第四章則說明以國內案例研討的過程與結果，包括相關資訊的整理及分析，並將應用換管優選程序在案例上；最後第五章總結本研究並提供後續研究之建議。附錄 A 說明 N-pipe connectivity 及道路與維修記錄相關性分析；附錄 B 則說明地震與維修記錄相關性分析，雖然這些分析的結果並不理想，但提供記錄供未來進行後續研究時參考。



第二章 文獻回顧

本章主要回顧及討論自來水管線破損漏水與換管研究相關文獻，以下各節將依國內自來水管網漏水與換管現況分析、漏水潛勢影響因子、高破損機率區之判識方法、管線破損機率函數及換管模式等部分一一說明及討論相關文獻。

2.1 國內自來水管網漏水與換管現況分析

水利署(95年)指出台灣自來水公司在2005年的漏水率23.66%，相當於一年漏掉了約7.2億噸的珍貴水資源，加上台灣名列全世界第十八位缺水的國家，更突顯水資源缺乏與管網漏水問題的嚴重性，褚等(95年)亦指出台灣自來水管網供水普及率雖已提升到90%以上，但在2004年平均每日820萬立方公尺的配水量中，就有四分之一的水量流失，和其他先進國家約10%相較，有頗大的改善空間，也說明了漏水率偏高是急需改善的問題。

圖 2.1 為台灣自來水公司歷年的管線汰換率(水利署，95年)，其中只有84年的3.26%達到國際自來水協會(IWA)汰管建議最低比率1.5%，之後各年皆未達到國際建議比率，其中除了89年的1.29%，其他年都遠低於建議值；圖 2.2 為世界各國汰管率的比較，其中日本、美國及德國的汰管率分別為5%、3.5%及1.5%，相較之下，台灣的汰管率僅有0.91%，與國際建議值相比有不小差距，若依此換管率，則需110年的循環週期，且目前國內管線材質以PVCP占絕大多數，其使用年限是20年，實在難以適用110年的循環週期。

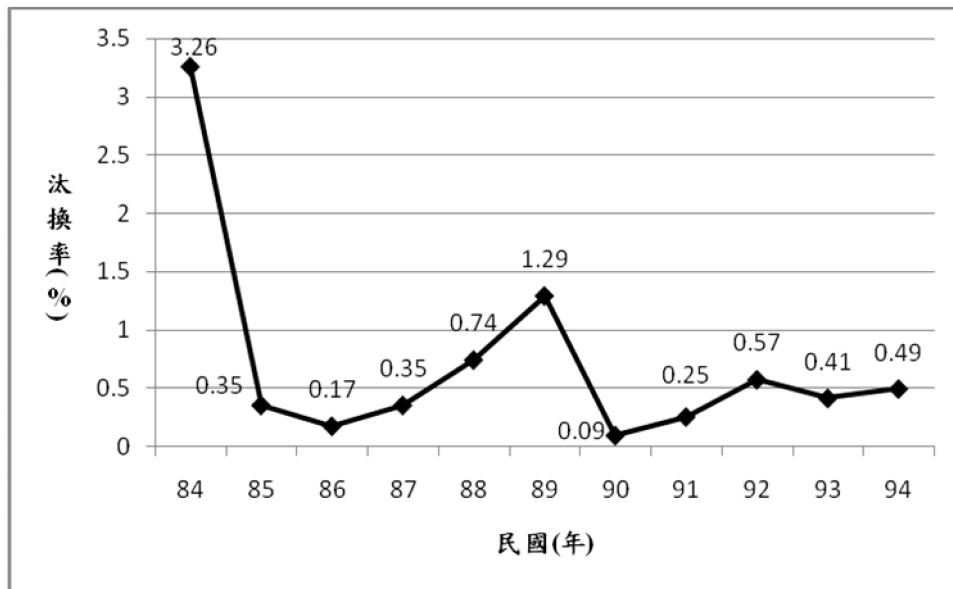


圖 2.1 自來水公司 84 到 94 年歷年管線汰換率(整理自 水利署，95 年)

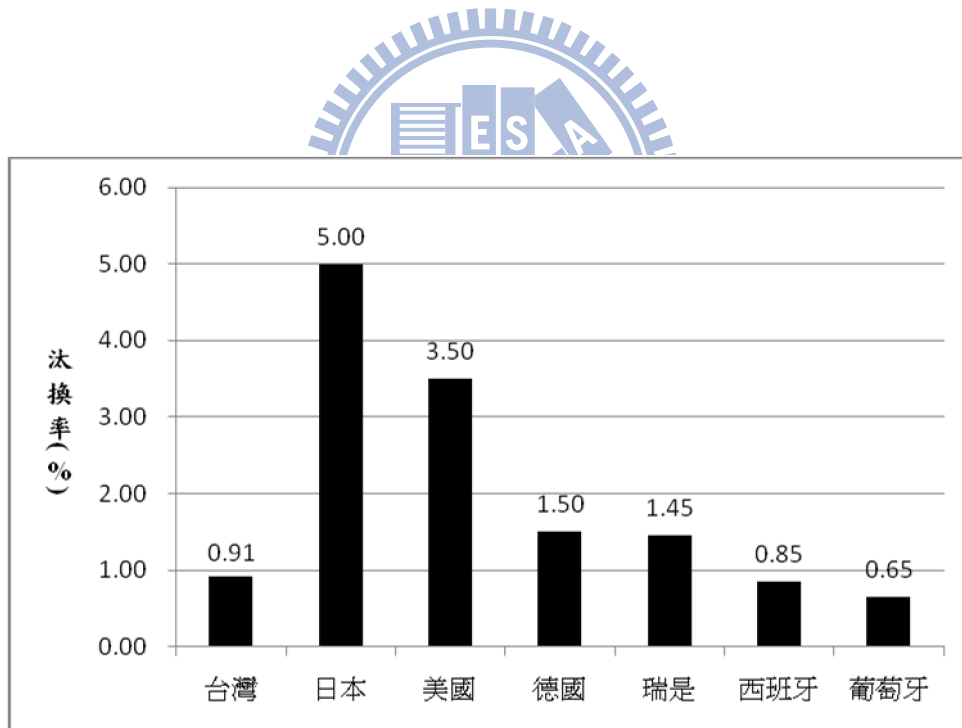


圖 2.2 世界各國換管率(整理自 曾，95 年)

2.2 漏水潛勢影響因子

自來水管網系統通常會因一些原因導致漏水，台灣自來水公司將管線漏水原因分成荷重振動、材質不良、工程施工挖損(含配合工程及外力撞擊)、水錘、地盤下陷、施工不良、老化腐蝕、回填不良與其他等九類，其中就漏水件數而言，以荷重振動為最主要的原因。水利署(95年)指出管線材料材質、管齡、設計與施工技術、管內水之狀態、埋設環境及工事災害等意外事故等原因會造成管線漏水，國際自來水協會(IWA)亦指出管線汰換率偏低會使管網系統漏水惡化。Thornton *et al.* (2008)亦提到不良的埋設與施工技術、管線材質、不正確的回填、操作水壓過大、腐蝕、振動與交通荷重、環境因素及缺乏計畫性維修等原因會造成漏水

經由上述過去研究所整理出的漏水原因，可發現影響漏水的因子眾多，後續針對國內管網特性，探討可行的因子，以作為後續建立分析方法與函數的依據，藉以提高所發展的換管優選程序的效益。

2.3 高破損機率區之判識方法

自來水管網系統分佈範圍廣泛，不同管網區域由於不同的環境因子其破損情形應有所差異，本研究在分析實際維修紀錄時，也發現一些管網區域會有較高重複破損的情形發生，為了有效判識出這些區域，回顧過去相關研究，以尋求較適合的判識方法。Goulter and Kazemi (1987)發展了一套空間性與時間性分群的分析方法，說明管線破損彼此間有一定的相關性，首先對破損資料作分群，將損壞資料發生地點在一定距離內為同一群組，整理出不同距離內之總破損件數，接著以各距離內單位距離所增加的破損件數定義一個空間破損機率公式，並觀察不同距離破損率的分佈特性，再依不同時間間隔依各距離作更細的分類，進一步評估不同空間性與時間性的破損率。Sundahl (1997)運用地理性的概念建立了一個判識方法，首先利用破損資料計算五個都市

的平均破損率，並據以定義高破損率，接著將一個都市劃分成數十區並算出各區的破損率，再對符合高破損率的區域以用戶數密度、管線埋設年分、土地利用型態等不同因子進行分析，並由結果說明高破損區域確實有異於其他區域的共通性。

上述研究除了指出部分管網區域會受一些因子導致破損率偏高，亦指出管線破損在空間上的相關性，唯卻是以土地或破損點間距等方式進行劃分，這對於不同管網區域其分佈密度有所差異的管網系統來說，可能不太適用，因此本研究考量以管線連接數的分式進行劃分，以期建立的判識方法能有較高的成效。

2.4 管線破損機率函數

一般自來水供水系統換管是依據管線破損機率函數進行規劃，而回顧過去文獻可發現已有不少研究發展了一些管線破損機率函數。Shamir and Howard (1979)提出了一個以管齡為主要因子的函數，須以管線破損資料進行迴歸。Walski and Pelliccia (1982)與 Alvisi and Franchini (2005)皆應用 Shamir and Howard (1979)所提出的函數作進一步改善，前者加入了管徑及過去損壞率等因子的考量，提出相關因子的校正係數對原函數作進一步修正，以期能更合理的推估不同管線屬性的破損率，後者主要是將原函數中的新管破損率加入了管徑的考量。Pelletier *et al.* (2003)提出以管齡為主要參數的 Weibull/Exponential model，其中 Weibull model 用以估算管線第一次破損的機率，Exponential model 則用以估算重複破損的的機率。Kettler and Goulter (1985)、Jacobs and Karney (1994)及 Giustolisi *et al.* (2005)亦分別提出以管齡、管徑及管長等相關因子為參數的管線破損機率函數。

回顧過去研究所建立的管線破損機率函數，大部分皆以管齡為主要設計參數，且皆須以迴歸的方式求解，但其求得之破損機率並無法表示破損

的程度，相同破損機率其漏水因子也可能有所差異，因此將其視為相同不太合理，更重要的是沒有加入漏水潛勢的考量，若將這些函數應用於本研究後續建立的篩選方法與模式，所研擬之換管方案不見得可有效改善整個管網系統的漏水率，本研究因而以這些管線破損機率函數為依據，加入一些相關因子的考量，並結合叢集分析方法進行改善，建立一個可有效考量漏水潛勢的函數。

2.5 換管模式

適當的換管模式可有效規劃須汰換的管線以進行換管方案的研擬，Kim and Mays (1994)提出將總成本最小化之換管模式，包括管線換管、管線更新、管線預設維修及能源(水頭損失)等成本的考量，須滿足需求量、壓力水頭及能量守恆的要求。Halhal *et al.* (1997)提出以有限資金滿足最大化總效益及最小化總成本的模式，其中總成本包含換管成本與更新成本，而總效益為各效益與其權重值相乘之後相加，分為水力、物理條件、管線可適應性及水質等四種效益，並分別以操作水壓、維修成本、管徑及管長作為各效益的估算參數。Kleiner *et al.* (1998)建立的模式則以更新成本、管線維修成本及第一次換管與之後換管週期到無窮的成本總合最小化為目標，亦需符合質量守恆及壓力水頭的限制，屬多年期的換管模式。Luong and Nagarur (2001)及 Loganathan *et al.* (2002)所發展的模式是針對單一管線的換管，前者由最大化之管線可靠度模式決定出最佳之維修程序，其模式是以 Semi-Markov 的程序進行推估，據以建立可靠度的估算方式，後者以維修與換管總成本的現值建立模式，須有較長時間同一管線的破損資料作為依據以進行評估。Mailhot *et al.* (2003)、Dridi *et al.* (2005)及 Hong *et al.* (2006)所提出的模式均以最小化維修與換管成本為目標，且皆用於多年期換管的規劃。Dandy and Engelhardt (2006)建立了一套最小化總成本及最小化用戶服務中斷次數之模式，其成本之計算會依據不同土地的利用而有不同的成

本關係，利用 trade-off 曲線可在成本與可靠度兩者之間找出一個折衷的方法，該模式亦屬於多年期的規劃。

上述所發展的換管模式中，部分模式是針對單一管線，並不適用於整個管網系統，而一些模式則是分析數十年的換管規劃，對於每年皆須進行的換管工作來說亦不大實用，且大多是以最小化總成本為目標，並未將漏水率納入考量，若依其模式進行換管可能無法據以有效改善管網漏水率，因此本研究建立一套基於漏水潛勢改善量最大化之換管模式，以供研擬適當的換管方案。



第三章 研究流程與方法

本研究已發展一套系統化程序規劃換管方案，以期依據換管方案所汰換的管線能有效降低管網漏水率。以下首先介紹本研究的流程，之後各節將逐一說明漏水因子、高破損機率管線區空間判識法、漏水潛勢函數、換管優選模式及換管方案研擬。

3.1 研究流程

本研究之流程如圖 3.1 所示，包括資料收集、漏水因子、高破損機率管線區空間判識法、漏水潛勢函數、高漏水潛勢管線篩選方法、換管優選模式、換管方案研擬及案例研討等主要工作項目，以下一一簡要說明，之後將針對各項目詳細說明之。

1. 資料收集:首先收集國內自來水漏水與換管相關文獻以及案例區之破損維修紀錄、GIS(Geographic Information System)管網、建立 EPANET2 模式所需相關資料及用戶抄表紀錄等資料。案例資料將於第四章案例研討詳細說明之。
2. 漏水因子:由於不同地區的管網其漏水的特性不盡相同，要改善漏水率，首先應了解漏水的主要原因，本研究因而先收集各種可能造成漏水的原因，並分析其是否適用國內管網及其發生的機率大小，以作為後續工作的主要探討依據與方向。此部分將在 3.2 節詳細說明之。

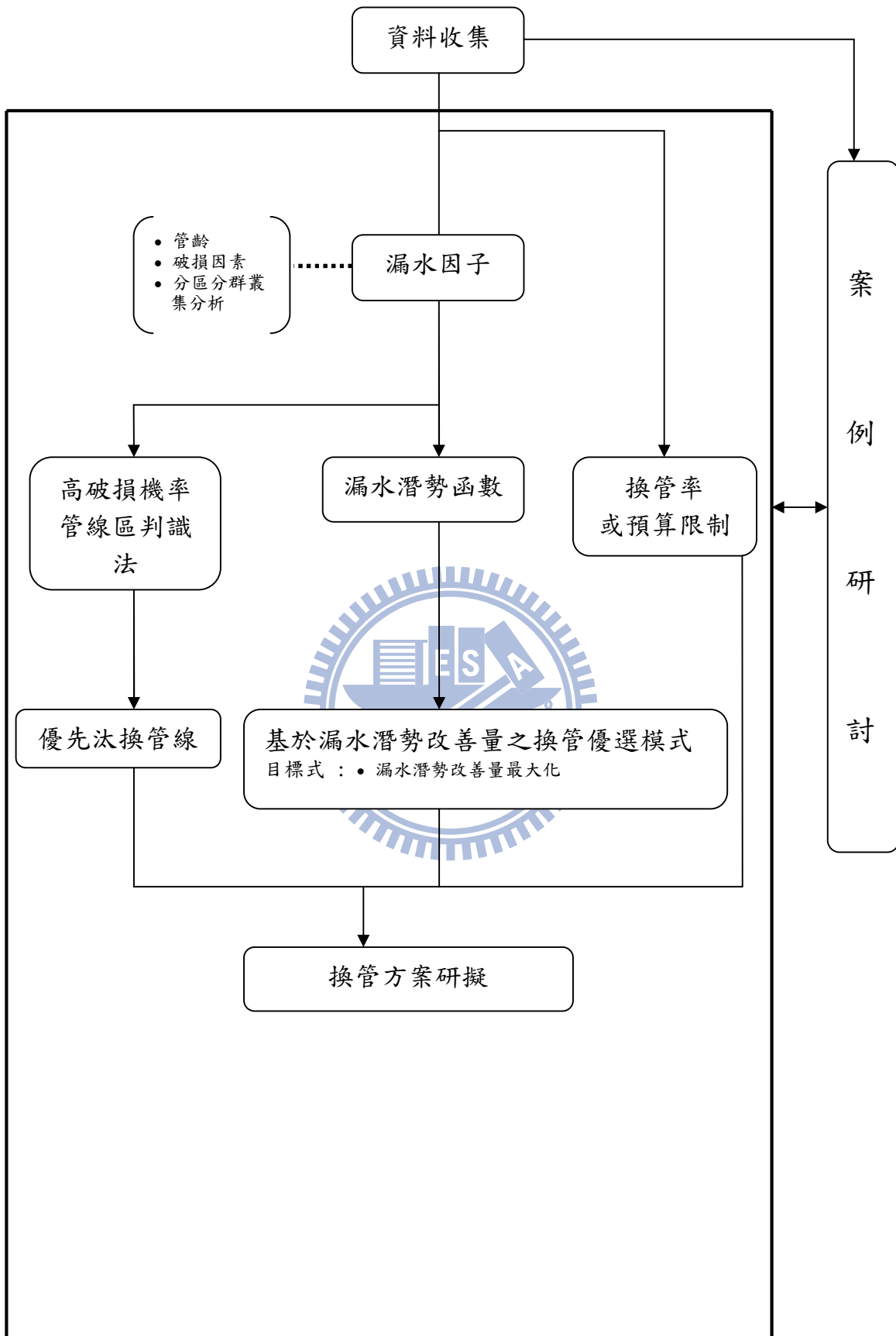


圖 3.1 研究流程

3. 高破損機率管線區辨識法:管網破損並不完全是隨機性，在分析實際破損維修紀錄時可以發現一些管網區域會有較高重複破損的情形，故本研究建立一個方法辨識出這些區域，列入優先汰換。此部分將在 3.3 節詳細說明之。
4. 漏水潛勢函數:文獻中換管規劃模式大多是基於管線破損機率函數，唯過去研究大多將不同程度與情況不同的破損視為機率相同的事件，此與真實情況並不符合，且破損機率並不同漏水率，因此無法據以有效改善管網漏水率，本研究因而建立一個適當的函數評估管線的漏水潛勢，以作為換管的依據。此部分將在 3.4 節詳細說明之。
5. 換管優選模式:除前述優先汰換的管線外，針對其他管線仍不易決定適當的換管方案，故本研究建立一個基於漏水潛勢改善量之優選模式，以輔助研擬適當的換管決策方案。此部分將在 3.5 節詳細說明之。
6. 換管方案研擬:本研究依據前述程序規劃適當之換管方案，藉由程序中考量管網漏水潛勢的特性，以期所得之換管方案能有效改善漏水率，並評估不同漏水潛勢函數對於換管決策方案的影響。
7. 案例研討:以本研究所發展的一套系統化程序應用於國內的管網系統，並對結果作進一步的討論。此部分將於第四章案例研討詳細說明之。

3.2 漏水因子

要以換管改善漏水率，首先須要掌握影響管網漏水的主要因子，然後才據以分析系統漏水潛勢的分佈特性，提高後續建立的分析方法的效益，表 3.1 所列為台灣省自來水公司全國大於 65mm 管線破損事件的漏水原因件數統計，由該表可看出荷重振動的比例最高，佔七成以上，其他主要原因為材質不良、工程施工挖損(含配合工程及外力撞擊)、水錘及地盤下陷等；本研究亦收集相關文獻(Felipe and Leonel, 1997; Dídia Covas *et al.*, 2005; Thornton *et al.*, 2008; 陳，73 年；洪，81 年；陳等，85 年；駱，86 年；台北自來水事業處，92 年；郭等，93 年；褚等，95 年；經濟部水利署，95 年；台灣自來水公司，96 年；何，98 年)中所提到的各種漏水原因，經整理歸納且並將不同漏水原因依其構成種類作分類，較適用國內管網的漏水因子如表 3.2 所列，為本研究考量的部分，若屬不易分析或資料難以取得則暫不納入分析範圍，如表 3.3 所列。唯由於不少因子都因為分析不易或資料難以取得而無法納入分析，最後本研究篩選出可取得資料的漏水因子，主要為管齡及地震，部分管齡不全的資料則採用合理推估的方式補足之，且將分管徑大小、所在區域、流量與用水量等作相關迴歸分析，將分別於 4.2 節、4.3 節及 4.4 節說明之。

表 3.1 台灣省自來水公司 92 年-96 年維修記錄管徑大於 65mm 之漏水原因
件數統計

漏水原因	全國		三區		四區	
	件數	百分比(%)	件數	百分比(%)	件數	百分比(%)
荷重振動	66,778	72.40	556	45.84	2,198	67.65
材質不良	4,567	4.95	153	12.61	32	0.98
施工挖損	4,513	4.89	149	12.28	97	2.99
水錘	4,189	4.54	17	1.40	14	0.43
地盤下陷	4,018	4.36	35	2.89	801	24.65
施工不良	2,346	2.54	99	8.16	42	1.29
老化腐蝕	1,788	1.94	33	2.72	4	0.12
回填不良	503	0.55	138	11.38	2	0.06
其他	1,660	1.80	15	1.24	37	1.14
未標明	1,871	2.03	18	1.48	22	0.68
總計	92,233	100.00	1,213	100.00	3,249	100.00

註 1: 施工挖損含配合工程及外力撞擊

表 3.2 本研究納入分析的漏水因子

類型	原因	說明	出處
管線	管齡	使用年限。使用過久，材質老化，或其他原因導致易破損	1、2、5
埋設環境	地震帶	處於地震帶之管線亦受震動脫落損壞。	12、13

表 3.3 未納入分析的漏水因子

類型	原因	說明	分析困難	出處
管線	材質	強度不足、水密性不佳、耐震性不夠	目前主要使用 PVC-P，其他材質所占比不大，故未來才納入分析。	1、3、5、6、7、8、11
	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、11
	漏水程度	漏水量的多寡。	資料難以取得	
埋設環境	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。	案例區的歷史紀錄上並無發生地盤下陷。	4、5、6、7
	荷重振動	車輛造成管件荷重增加或震動。	不易分析	4、5、6、7、11
	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。	須有各類管線圖層，不易取得。	3
	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
	土壤特性	土壤含酸性或鹽性成份，易造成管件受到腐蝕。	資料不足以分析。	1、6、7、12
	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。	
	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	資料難以取得。	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

表 3.3 未納入分析的漏水因子(續)

類型	原因	說明	分析困難	出處
管內狀況	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
	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。	未納入分析。	1、8
	溫度變化	溫度高會加速化學反應，溫度低管線受凍易破損。	不易分析。	9、11
	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
	需水量變化	未依據用戶需水量與密度、用水型態作適當的設計。	不易分析。	
	水壓	水壓越高，漏水量便越大。	不易分析。	1、2、6、11
	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。	不易分析。	
設計、施工	偏離設計值	使用不合適之荷重條件、水質條件、管外環境條件。	不易分析。	8
	工程施工挖損(含配合工程及外力撞擊)	因其他公事(如電力、瓦斯管線及道路的挖填等)而直接造成傷害，導致破管或接頭鬆動。	不易分析。	
	保護不足	應該設有排氣閥的地點未裝設或是容量不足，或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
	施工不良	回填不良、技術不良、接頭接合使用不當、管件閉鎖不牢。	不易分析。	4、5、6、7、8、11
	維修不足	缺乏適當且有計畫性的維修	不易分析。	11

出處:1. Felipe and Leonel (1997); 2. Covas *et al.* (2005); 3. 郭等 (93年); 4. 褚等 (95年); 5. 台灣自來水公司 (96年); 6. 駱 (86年); 7. 台北自來水事業處 (92年); 8. 經濟部水利署 (95年); 9. 洪 (81年); 10. 陳等 (85年); 11. Thornton *et al.* (2008); 12. 陳 (73年); 13. 何 (98年).

3.3 高破損機率管線區判識法

管線破損並不完全是隨機性，往往因一些原因使某些管網區域具有較高重複破損的情形，因此自來水供水系統的換管方案除了可依據管線破損機率函數進行規劃，若能將破損率較高的區域判識出來，可提高換管方案的成效，有效改善漏水率，本研究因而建立一套判識方法找出破損率較高的管網區域，以下一一說明之。

3.3.1 N-pipe connectivity 判識方法

本研究將維修破損紀錄佈點於自來水管網圖層上發現，部分管網區域重複破損發生的情形頗高，為有效將這些區域判識出來，將依以下程序進行分析：

- (1) N-pipe connectivity 分析：由整個管網系統中，以管線上具有破損紀錄的單一管線為基準，並依據相連接管線是否重複破損進行分析，且定義 n-pipe connectivity，若是 0-pipe connectivity，則只分析本身管線重複破損的情形；而 1-pipe connectivity 則是分析管線本身及在直接相鄰的管線有破損，則視為 1-pipe connectivity 的重複破損事件；2-pipe connectivity 則是將再連出去的一條管線的破損也納入考量，依此類推，在先暫不考量管線連接重複性的情形下，分析各類別中不同總破損次數所對應的群組數，從中觀察管網中破損的分佈特性。
- (2) 不重複的 n-pipe connectivity 分析：上一個分析步驟中雖可看出是否有重複發生破損的情形與區域，但除了 0-pipe connectivity 以外，其他均會有很多重複的情形發生，導致分析上的困難，因而此步驟不一一分析，改為不限制連接管線數，能連出去多遠就讓其無限制擴張，但有破損事件的管線才能擴張，分析不同連接管數所對應的群組數，此方

法可避免發生管線連接重複性的問題，且可進一步觀察管線重複破損影響範圍之程度。

- (3) 高破損機率管線區判識: 依據上述步驟所得結果作進一步探討，判識出具有較高破損機率的管線區域，列入優先換管的名單中。

3.4 漏水潛勢函數

自來水供水系統換管大部分是依據管線破損機率函數進行規劃，且已有不少研究發展了一些管線破損機率函數，但那些函數大多將不同程度與情況不同的破損視為機率相同的事件，此與真實情況並不符合，且破損機率並不同漏水率，無法考量不同程度漏水潛勢的問題，據以有效改善管網漏水率。此外，這些管線破損機率函數並沒有通用公式，不同函數除了適用性會因管網特性而有所差異，亦可能產生不同的換管決策，本研究因而建立較適當的管線漏水潛勢函數並經由分區分群等方式且考量重要的漏水因子建立適當的函數，以期可有效評估出管線的漏水潛勢，建立的方法如以下說明。

3.4.1 迴歸函數

表 3.4 所列為過去文獻中所建議的管線破損機率函數，該表函數雖仍有前述的問題，但其考量的一些重要因子仍然有必要考量，如管齡等，故本研究依據這些函數作進一步的改善;表 3.5 為加入地震因子的各種管線破損機率函數，由於相關文獻中指出地震亦會對管線破損漏水造成影響，因此將表 3.4 的函數以不同形式納入地震進行分析。上述各種函數主要是依據表 3.2 所列漏水因子所收集到的資料，進行相關性分析，且考量同一破損率的管線，其管線之供水量越大，相對的應會有較高的漏水量，因此接著結合 EPANET2 模式模擬之流量或用戶抄錶之用水量，據以重建一個能評估漏水潛勢的函數，該函數如下列:

$$LP_i = N_t Q_i \quad (3.1a)$$

Or

$$LP_i = N_t D_i \quad (3.1b)$$

其中

LP_i 為管線 i 之單位管長漏水潛勢值 (breaks · CMD /m)。

N_t 為管齡 t 年的損壞率 (breaks/m)。

Q_i 為管線 i 之 EPANET2 模擬流量 (CMD)。

D_i 為管線 i 之用戶抄錶用水量 (CMD)。

公式 3.1(a)是以 EPANET2 模擬流量為主要因子的漏水潛勢函數，由於用水量多亦可能造成漏水量較多，故也將 3.1(b)納入，以用戶抄錶用水量為主要因子的漏水潛勢函數。

而未納入考量的其他函數如表 3.6 所列，因這些函數所需的資料難以取得或估算方法不符合本研究的需求，故未納入。

表 3.4 各種管線破損機率函數

方法	函數編號	函數型式	出處
以管齡為主要因子	A1	$N_t = N_0 + At$	Shamir and Howard (1979)
	B	$N_t = N_0 e^{B_1 t}$	
考量過去損壞率及管徑。	D-Ba	$N_t = N_0 e^{B_1 t}$ $N_t = F_1 F_2 N_0 e^{B_1 t}$ F_1 為 Previous break factor Break frequency with (no/ one or more) previous breaks $= \frac{\text{Break frequency with (no/one or more) previous breaks}}{\text{Overall break frequency}}$ F_2 為 Pipe-size factor Break frequency with (< 500/ > 500 - mm) diameter $= \frac{\text{Break frequency with (< 500/> 500 - mm) diameter}}{\text{Overall break frequency}}$	Walski and Pelliccia (1982)
依管徑或管齡為參數進行迴歸，且針對不同管材分別迴歸。	未採用	$N_t = At$	Kettler and Goulter (1985)
以管長及管齡為參數。	A2	$N_t = C_1 + C_2 L + C_3 t$	Jacobs and Karney (1994)
採用 Weibull/Exponential model 及以管齡為主要參數。	C	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1}$ $(R^2=0.39)$ 另有提供計算一段期間的平均損壞次數的公式。	Pelletier <i>et al.</i> (2003)
以管徑及管長為參數。	D	$N_t = E_1 t^j d^j + E_2$ $j \in [1,3]$	Berardi <i>et al.</i> (2005)

A, B_i, C_i, D_i, E_i: 迴歸係數; t: 管齡; N₀: 安裝年的損壞率; N_t: 管齡 t 年的損壞率; L: 管長; d: 管徑; F_i: 修正係數.

表 3.4 各種管線破損機率函數(續)

方法	函數型式	出處
以曼哈頓歷史損壞資料作分析，由資料分佈認為安裝年份、管徑及腐蝕度等因子相較於管齡有較大的分析意義，說明建立地理資訊系統的重要性。	未提供	O'Day (1982)
先算出五個城市全部損壞資料的平均損壞率後，定義高損壞率，再對其中一個城市進行分區，並計算每個分區的損壞率，針對高損壞率的地區作原因分析，如安裝年份、土地利用、單位管長用戶數、重覆管損壞及損壞發生時維修對鄰近管線的影響等。	未提供	Sundahl (1997)

表 3.5 加入地震因子的各種管線破損機率函數

函數編號	函數型式
E-Ba	$N_t = N_0 e^{B_1 t} e^{B_2 z}$
E-Bc	$N_t = N_0 e^{B_1 t} + B_2 z$
E-Bd	$N_t = N_0 e^{B_1 t} + B_2 z + B_3 L$
E-Ca	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1} + D_3 z$
E-Cb	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1} + D_3 z + D_4 L$

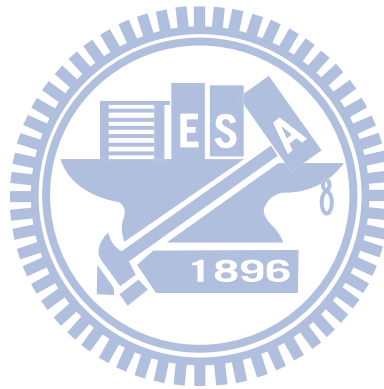
B_i, D_i : 迴歸係數; t : 管齡; N_0 : 安裝年的損壞率; N_t : 管齡 t 年的損壞率; L : 管長; z : 地震加速度

表 3.6 未納入研究之損壞機率函數及其原因

方法	函數	出處	未納入原因
以管徑、壓力、管齡、土壤腐蝕度、覆蓋管比例、土地利用等為參數。	$NY = x_1 + x_2D + x_3P + x_4I + x_5RES + x_6LH + x_7T$ $REP = y_1e^{y_2t}e^{y_3T}e^{y_4PRD}e^{y_5DEV}SL^{y_6}SH^{y_7}$	Clark <i>et al.</i> (1982)	部分資料國內難以取得。
損壞資料發生地點在一定距離內為同一群組。然後依不同時間間隔作更細分類。	$RS_{ds} = \frac{TSF_2 - TSF_1}{d_{s2} - d_{s1}}$ $RS_{ts}^{ds} = \frac{TSF_2^{ds} - TSF_1^{ds}}{t_{s2} - t_{s1}}$ $RSS_{ds}^{ts} = \frac{TSF_{ts}^{ds2} - TSF_{ts}^{ds1}}{d_{s2} - d_{s1}}$	Goulter and Kazemi (1988)	估算方式不符合本研究需求
考量歷史重複損壞率，須依據較長時間同一管線損壞資料來建立函數。	$V(t) = e^{(\beta_0 + \beta_1 t)}$ $V(t) = \gamma \delta t^{\delta - 1}$	Crowder <i>et al.</i> (1991)	國內資料時間範圍有限。
以 nonhomogeneous poisson 分佈估算在一定時段及距離內再損壞次數的機率，並以非線性迴歸求在任一個時段與距離的損壞機率，並以 Gauss-Newton 疊代法求迴歸係數解。	$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$ $m = b_0 t^{b_1} s^{b_2} + \epsilon$	Goulter <i>et al.</i> (1993)	由於估算的是整體系統的失敗機率，不符本研究的需求，唯其時段與距離叢集方式值得本研究參考。
新管損壞率主要以管徑(D)為參數。	$N_t = N_0 e^{Bt}$ $N_0 = 0.269 e^{-0.0023D}$	Alvisi and Franchini (2005)	資料量不足以估算 N_0

表 3.6 未納入研究之損壞機率函數及其原因(續)

方法	函數	出處	未納入原因
<p>利用 LEFM 來預測管內裂縫因壓力而隨時間變化導致損壞的公式，基於不確定性，以管內裂縫尺寸當作隨機變數，用 Monte Carlo simulation 結合 LEFM 求解，推估損壞率。</p>	$K_{ITOT} = K_{IP} + K_{ID} + K_{IR}$ $\frac{da}{dt} = DK_{ITOT}^m$ $m_1 = K_{IC} - K_{ITOT}; \quad m_2 = \sigma_{NS} - \sigma_{TOT}$ $S(a) = \exp\{-(a/\alpha)^n\}$	<p>Davis <i>et al.</i> (2006)</p>	<p>資料不易取得且不易進行分析</p>



3.5 換管優選模式

除了依前述方法篩選出須優先汰換的管線之外，預期換管率或年度預算通常會超過這些優先汰換管線，但針對其他管線仍不易決定適當的換管方案，因此為了規劃換哪些管線可較有效改善漏水率，需要建立一個優選規劃模式以供研擬適當的換管方案，本研究因而收集過去研究所發展的換管模式，其中有一些模式只適用單管換管的模式，由於本研究主要針對管網換管，故未將這些單管模式納入比較，那些模式請參見第二章之說明。

表 3.7 比較所收集的相關模式，其中部分模式是分析數十年長期間的規劃，雖然對於整個生命週期作長期規劃，可反應長期的成本效益，但在實務上不易如此規劃，且管網每年都會受一些其他因子所影響，故對於每年都需要進行的換管工作而言，並不大實用，且更重要的是這些模式皆未將漏水潛勢納入考量，改善漏水率的效益可能不大，因此本研究依據前述建立之漏水潛勢函數，建立一個基於漏水潛勢改善量最大化之換管優選模式，該模式如下列：

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^N (LP_i^B - LP_i^A) L_i x_i \quad (3.2a)$$

S.T.

$$\frac{\sum_{i=1}^N L_i x_i}{\sum_{i=1}^N L_i} = R \quad (3.2b)$$

其中

LP_i^B 為管線 i 換管前之單位管長漏水潛勢值(breaks · CMD /m)。

LP_i^A 為管線 i 換管後之單位管長漏水潛勢值(breaks · CMD /m)。

L_i 為管線 i 之管長(m)。

x_i 為 [0,1]二元整數，為 1 時表示管線 i 換管，為 0 時表示未換。

N 為所有管線數。

R 為預期汰管率。

目標式 3.2(a)為期使在管線經過汰換後能使漏水潛勢改善量最大;限制式 3.2(b)用以限制汰管率須達一定值。本研究依據此模式求取優先汰換管線名單，且評估不同漏水潛勢函數對於換管決策方案的影響，進一步找出效益較高的換管方案以供使用。

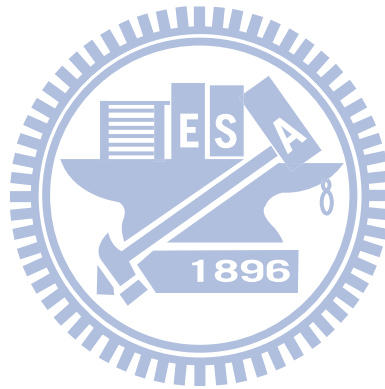


表 3.7 過去研究的各種建議換管模式

出處	說明	目標式	因子/指標	限制式
Kim and Mays (1994)	最小化換管、更新、維修及能源之總成本現值	Min cost $f_1 + f_2 + f_3 + f_4$	流量、壓力水頭、管長、換管與維修成本、能源成本	$\sum_{j \in I_i} q_j \geq Q_i \text{ and } \underline{H}_i \leq h_i$ $\sum_{j \in J_s} \Delta h_j = \sum_{k \in K_s} PH_k$ $\Delta E_R = \sum_{j \in J_R} \Delta h_j - \sum_{k \in K_R} PH_k$ $HP_K \geq \underline{HP}_k$
Halhal et al. (1997)	最大化總效益及最小化總成本	Max $benefit(i)$ And Min $cost(i)$	管齡、管徑、管長、維修成本、節點水壓、破損機率函數	$Cost(i) \leq Fund$
Kleiner et al. (1998)	最小化維修與換管總成本	Min $\sum_{\substack{i=1 \\ j \in R}}^p CAP(T_{ij}) + C_M(T_{ij})$ $+ C_{inf}(T_{ij}^{**})e^{-rT_{ij}}$	流量、壓力水頭、換管與維修成本、破損機率函數	$Q_{in_y} = Q_{out_y}$ $\sum_t h = const$ $P_{yt} \geq P_{min_y}$
Mailhot et al. (2003)	最小化維修與換管總成本	Min $C_{tot}(T_f; l)$	管長、維修與換管成本、破損機率函數	
Dridi et al. (2005)	最小化維修與換管總成本	Min $C(j, T_f(j) k(j))$	管長、換管與維修成本、水壓、破損機率函數	$H_c = \max_{\{j, T_f, l, T, n\}}$ $[\max_{\{m, n \in [1, n]\}} \{H_{min}(n, t) - H(n, t)\}]$
Dandy and Engelhardt (2006)	最小化多年施工總成本與最小化用戶服務中斷數	Min (C) and min $[TENCI(t)]$	管徑、管長、維修與換管成本、某管線影響用戶數、破損機率函數	$\sum_{i=1}^n 1000 \times \delta_{iT_{ri}} \times R(d_{mi}) \times l_i t$ $\leq k \times F_i$ $= (0, 1, \dots, 4)$
Hong et al. (2006)	由最小化 $E(C_T(t))$ 得到汰管的最佳時間	Min $E(C_T(t))$	維修與換管成本、管齡、破損機率函數	

第四章 案例研討

本研究以台灣自來水公司第三區管理處的大新竹子系統(新竹市)為案例區，示範應用所建立之換管規劃優選程序，以下將分別簡介案例、整理與分析相關資訊及進行案例研討與討論所得的結果。

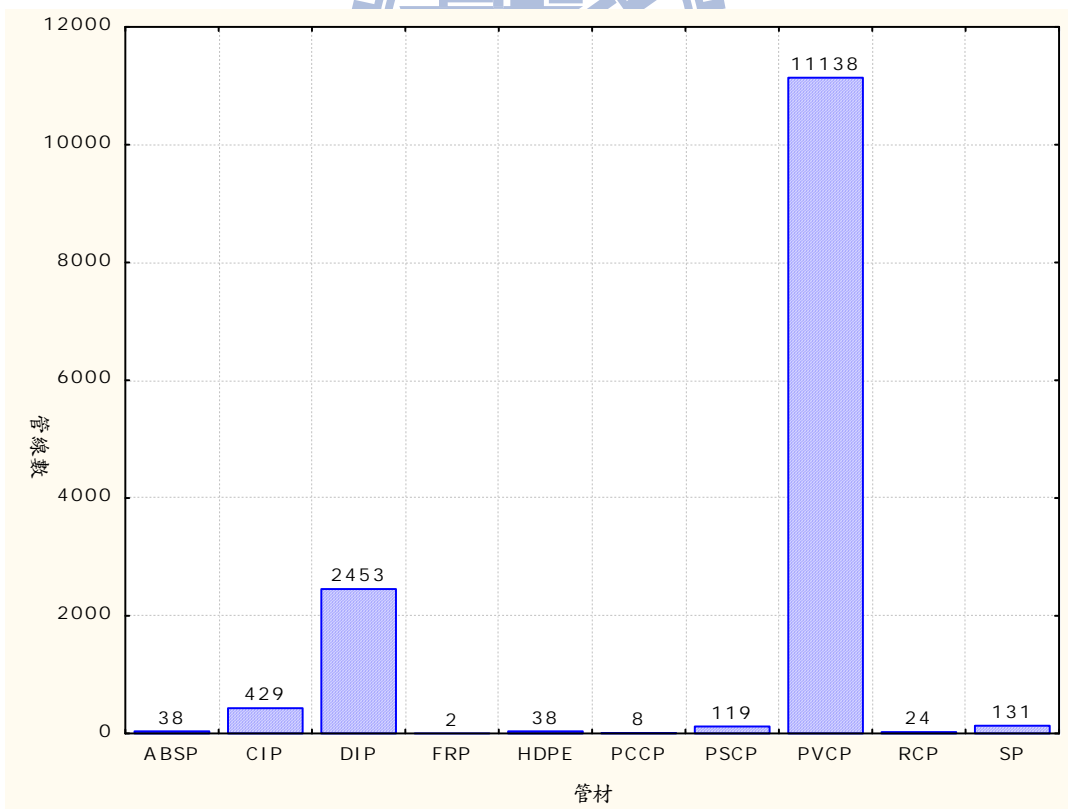
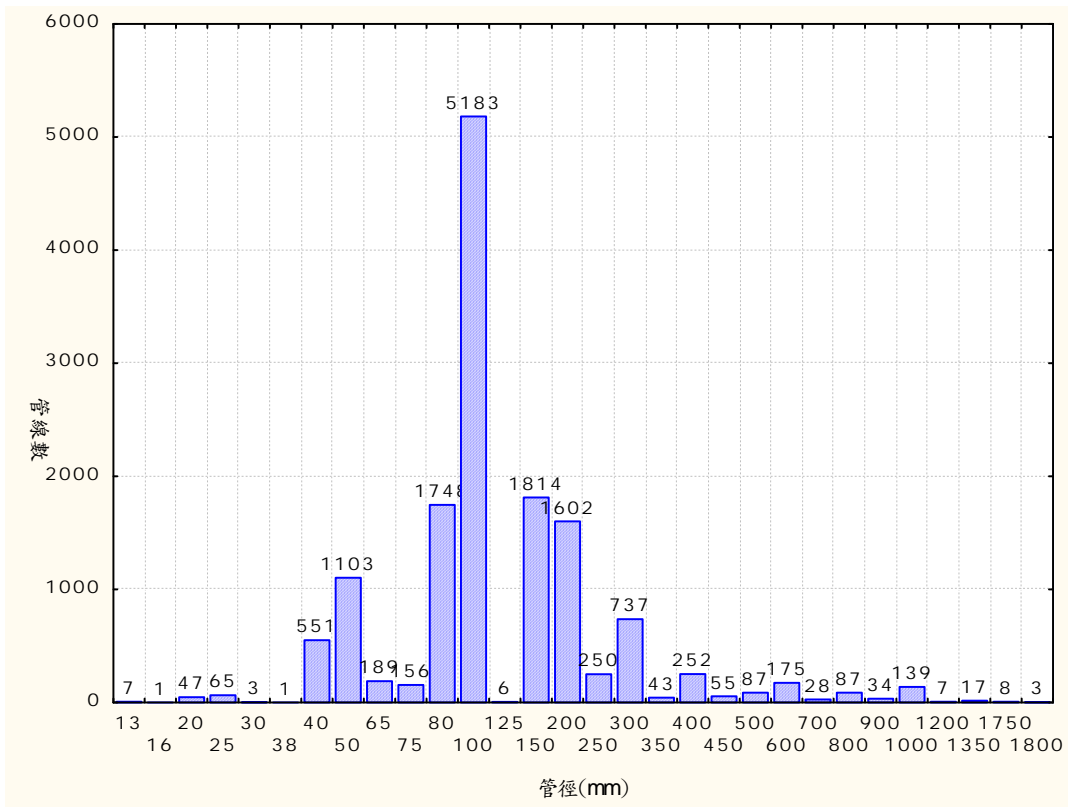
4.1 案例簡介

三區處大新竹子系統管網管線(自來水公司第三區,97年)分佈如圖 4.1 所示，本系統共有 12,760 條管線，132,441 個用戶水表，整個系統需水量約為 484,000CMD，子系統內目前出水量為 404,000CMD，由三區處東興廠每年約支援 70,000CMD 以及二區處支援 10,000CMD 來補足不夠的需水量，亦每年支援新埔系統約 1,300CMD。

圖 4.2 為大新竹子系統管徑與管材的分佈統計，該管網管線口徑範圍由 13mm 至 1,800mm；管線材質有 ABSP(ABS 塑鋼管)、CIP(鑄鐵管)、DIP(延性鑄鐵管)、FRP(玻璃纖維管)、HDPE(高密度聚乙烯塑膠管)、PCCP(鋼襯預力混凝土管)、PSCP(預力混凝土管)、PVCP(塑膠管)、RCP(鋼筋混凝土管)及 SP(鋼管)等，主要以 PVCP 占絕大多數。



圖 4.1. 大新竹系統管網管線分布圖.



(b)

圖 4.2 大新竹子系統分佈統計:(a) 依管徑 (b) 依管材

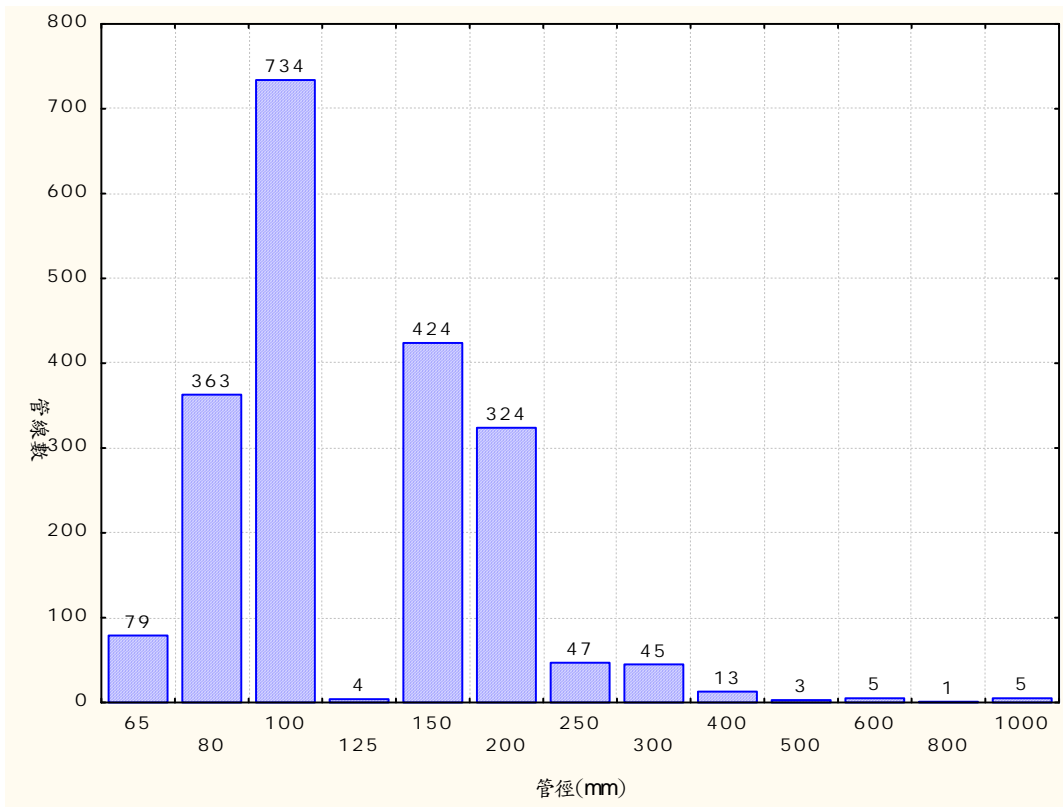
4.2 相關資訊整理與分析

進行案例研討時，應用本研究發展之換管規劃優選程序將需要案例區自來水管網系統的管線破損維修紀錄、GIS 相關資料、地震資料、EPANET2 模式及用戶抄表紀錄等執行程序所需的基本資料，亦需要收集一些影響管線破損的相關因子的資料，用以建立執行本研究所建議的分析方法、漏水潛勢函數及換管模式，以下分別說明各項資訊的整理與分析。

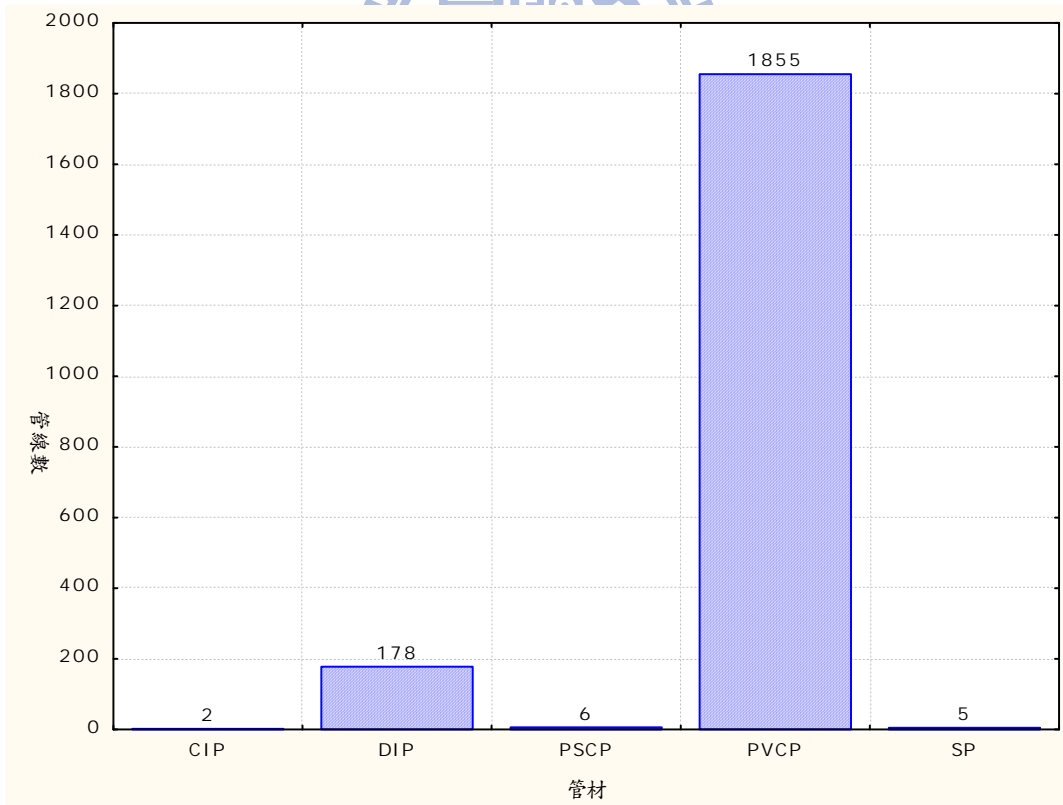
1. 管線破損維修紀錄:在執行本研究所建議的分析方法與建立函數時皆需要管線破損的相關資料，因此本研究由自來水公司收集了管線破損維修紀錄。管線口徑範圍由 13mm 至 1000mm，由於其中口徑較小的管線屬用戶給水管居多，本研究重點在於供水系統，因而本研究將只針對 65mm 以上之口徑進行分析，用戶給水管未列入本研究範圍，經整理後如圖 4.3 所示，其中管徑以 100mm 及 150mm 居多，管材以 PVC 為主，而從上述圖表可發現，目前的管網系統維修紀錄中管線材質除了 PVC 外，其他材質相較之下數量太少，因此若以管材作為後續分析的依據可能導致可靠度不高，故本研究不考量以管材為後續分析的因子。
2. 地震資料: 本研究為了改善漏水潛勢函數，因而進一步將地震因子與破損紀錄作相關性分析，由中央氣象局地球物理資料管理系統取得和案例區維修紀錄相同時段之地震資料，考量低震度應不至於對管網造成損壞，故將震度 2 級以下的資料排除，取 3 級以上的地震資料，而震度亦可用加速度值來劃分，以得到更準確的數值，因此將地震值由震級改為地動加速度值($\text{cm/s}^2, \text{Gal}$)使用。案例區共有 7 個地震監測站，本研究故將各監測站的歷史地震值進行加總，依此值與維修紀錄作分析，但各個監測站同一時段之監測值不一定相同，為與管網系統結合，

參考 Anil and Richard (1948)提到的 Voronoi Diagram 作影響區域劃分，其劃分方式是以各監測站之垂直平分線作分割，由於案例區外以北尚有兩個接近案例區之監測站，因此一併納入劃分，如圖 4.4 所示，圖中各點為監測站之位置，數字為各區域代號，接著以此區域劃分的方式進行地震與維修紀錄依發生時間依序排列的統計，結果如附圖 B.1.1、附圖 B.1.2 所示，但由於從結果中難以直接看出地震與管線破損兩者間的相關性，且管線長度與維修紀錄亦有關連，因此考量改以維修頻率作進一步的分析，圖 4.5 為 92 年至 96 年各區域地震總值與維修頻率之統計分析，可以看出除了第一區及第八區外，其餘區域的維修頻率皆隨著地震總值的增加而提高，兩者之相關性頗大，後續則以此改善漏水潛勢函數，詳細各區域地震總值與維修頻率於各年之統計結果如附圖 B.1.3 所示。

3. EPANET2 模式及用戶抄表紀錄:為求得管網系統中各管線之流量以供後續分析使用，本研究建立案例區 EPANET2 模式進行水力模擬，唯由於不少模式所需資料缺乏精確的資料，故模擬結果可能與真實情況有些差異;此外，亦利用 92 年 4 月至 97 年 2 月的用戶抄錶紀錄進行統計，進一步計算出管線的用水量。
4. 管線區空間判識:在 3.3 節提到的高破損機率管線區空間判識方法除了需要管線破損維修紀錄，亦需要收集 GIS 相關資料建立之，管網 GIS 資料已由三區處取得。
5. 漏水潛勢函數:所建立的漏水潛勢函數，除了需要管線破損歷史記錄，亦需要一些相關資料，如 EPANET2 模式、用戶抄表紀錄及 GIS 資料。
6. 換管模式:在 3.6 節提到的優選模式將參考管網 GIS 資料及漏水潛勢函數建立。



(a)



(b)

圖 4.3 大新竹子系統口徑 65mm 以上管線維修紀錄件數分佈統計：

(a) 依管徑 (b) 依管材

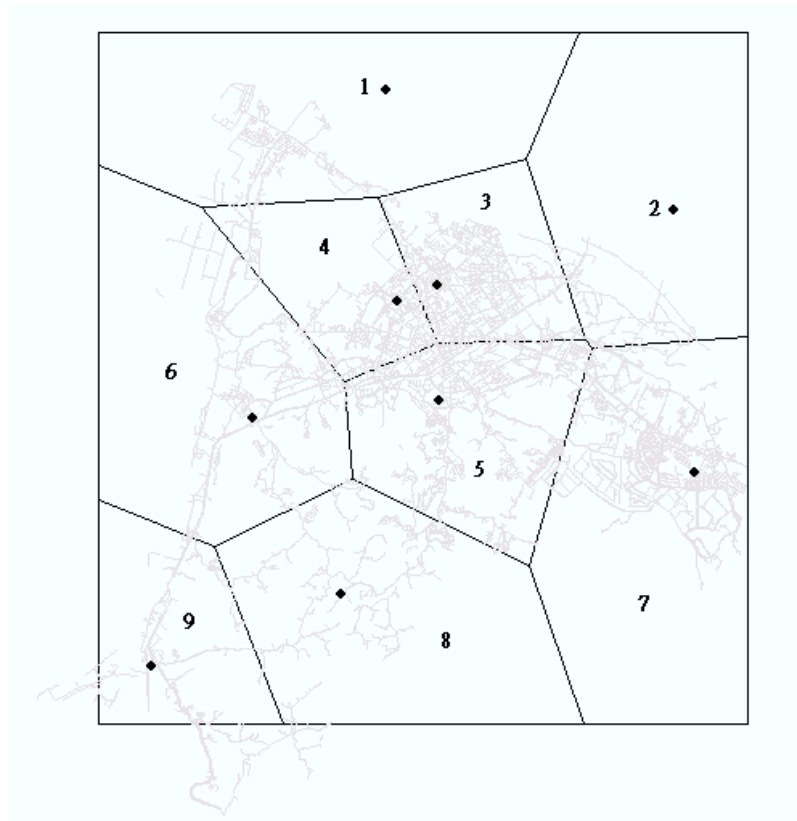


圖 4.4 大新竹系統管網中各監測站之 Voronoi Diagram.

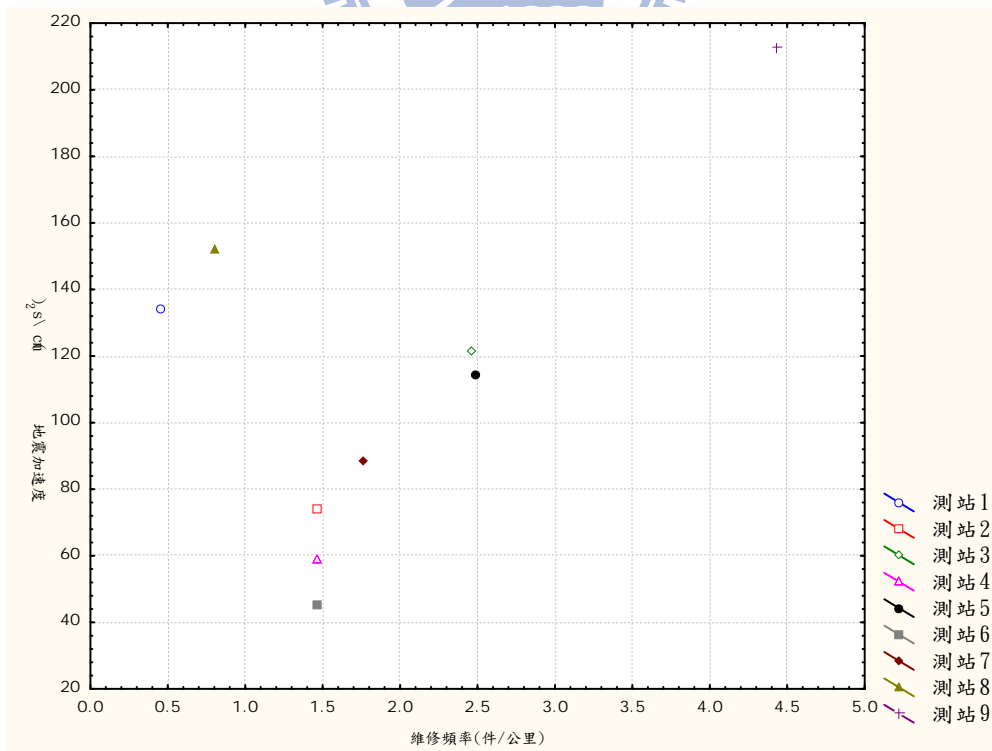


圖 4.5 地震與維修紀錄統計分佈

4.3 高破損機率管線區

利用本研究 3.3 節所建立的判識方法，將維修紀錄標記於自來水管網系統上，分別以 n-pipe connectivity 及不重複的 n-pipe connectivity 兩種方式進行分析，分析結果如附圖 A.1.1-附圖 A.1.10 所示，前者因當 n 為 1 以上時會產生管線連接重複性的問題，難以做進一步分析，故僅將 0-pipe connectivity 納入本研究分析。圖 4.6 為 0-pipe connectivity 取管線破損紀錄 3 次以上的分佈結果，也就是單一管具有重複破損 3 次以上的紀錄，由圖中可以發現管齡 15 年的管線所占最多，且大多數的管齡也有 12 年以上，基本上這些管線皆已使用一定時間了，且考量有 3 次以上重複破損的情形發生，因此把這些管線列入優先汰換。

當以不重複的 n-pipe connectivity 分析時，雖不會發生管線重複連接的問題，但在僅觀察總破損次數的情形下，可能有不少管線本身的破損次數僅有 1 次，且無法直接得知這些管線的管齡，當 n 越大時，這種情形可能也會越明顯，且高連接管線數對於本研究的分析意義不大，因此只分析不重複的 1-pipe connectivity，此外，由於不重複的 0-pipe connectivity 已包含在圖 4.6 的一部分，因此亦不納入考量。分析不重複的 1-pipe connectivity 取管線總破損次數達 4 次以上的分佈結果，如圖 4.7 所示，平均每條管線的重複破損次數達 2 次以上，管齡大部分在 13 年以上，雖有少部分較低的管齡，且有少數的連接管線本身的破損次數可能僅 1 次，但考量為相連接之管線，當進行管線汰換時其相連接之管線一併進行更換，於成本及執行層面上等整體考量而言，應具有較高的成效，因此這些管線一併列入優先汰換的名單中。

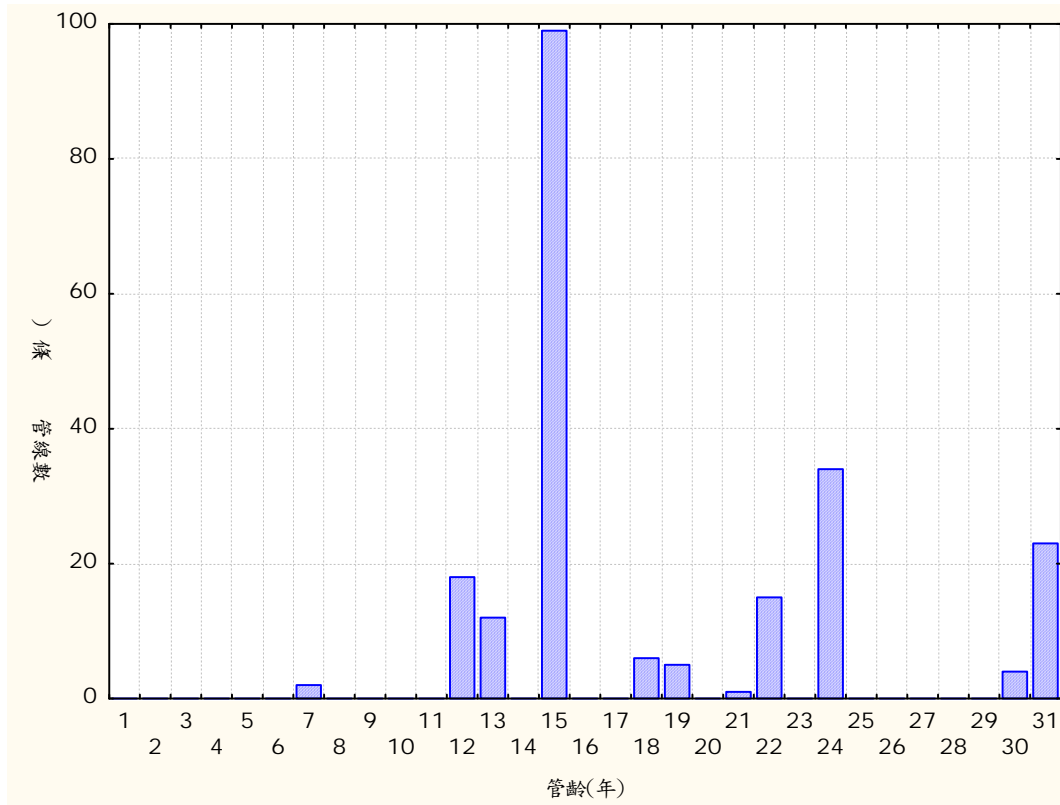


圖 4.6 0-pipe connectivity 取 3 次以上破損之分佈

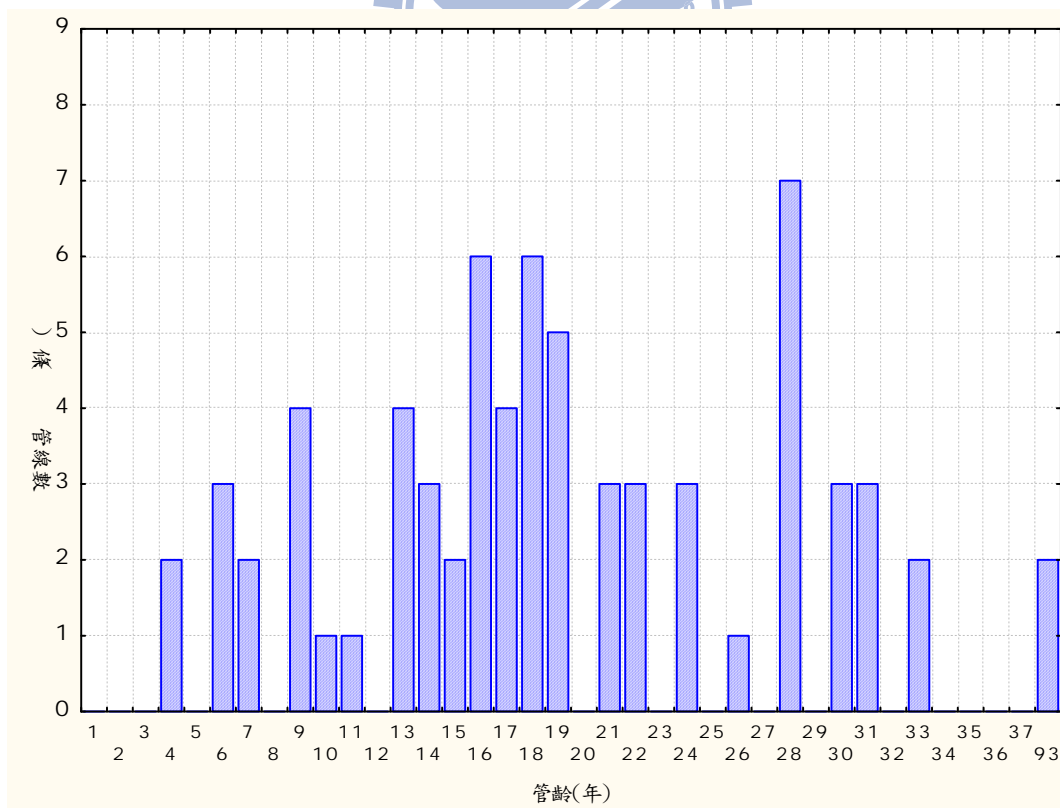


圖 4.7 不重複的 1-pipe connectivity 取 4 次以上破損之分佈

4.4 漏水潛勢函數

依據表 3.4 所提到的管線破損機率函數，與維修紀錄作迴歸分析，推估管線的破損機率，迴歸結果如表 4.1 所示，A1、A2、B 及 C 等函數是以案例區管網的維修紀錄以不分區的分式進行分析，其中 A1 由於在低管齡時其破損率為負值，故不適合納入本研究後續使用，而 A2、B 及 C 其 R-square 分別為 0.614、0.649 及 0.636，E-Ba、E-Bc、E-Bd、E-Ca 及 E-Cb 等函數則是將地震因子納入考量，將管網以前述地震分區的方式劃分加入地震監測值進行分區迴歸，由於是經過區域劃分後進行分析，其 R-square 相較不分區會較低，觀察分析結果發現 R-square 皆不甚理想，其中最高為 E-Ba 的 0.39，而考量第一區及第八區的地震值與維修頻率相關性不高，因此針對這兩區以外作分區迴歸，得到 E-Bb 的結果，R-square 為 0.465，和 E-Ba 相比有較佳的結果。因此將選用 A2、B、C、E-Ba 及 E-Bb 等函數，代入(3.1a)及(3.1b)式中即為漏水潛勢函數，並套用至本研究建立的換管優選模式。

如前述表 3.5 所示，本研究根據 Walski and Pelliccia (1982)的建議，不同的管徑範圍其破損率也不相同，應加入管徑修正係數進行改善，而修正係數即為各管徑範圍之歷史破損率除以總範圍的歷史破損率，該函數是取用表 4.1 中 B 函數之迴歸結果並加入修正係數，也就是將該函數的迴歸係數直接以 B 函數迴歸出的 N_0 及 B_1 代入，並將右式與修正係數兩者相乘，因此本研究將管徑範圍分別以 4 種不同的分類標準以上述方式進行分析，此外，一併分析只以管徑範圍分類而不加入修正係數的函數，試著比較兩種函數之差異，表 4.2 為管徑分類的迴歸結果，D-Ba 為加入管徑修正係數的函數，發現將管徑分為 65 ~ 125 mm、150 ~ 1000 mm 時 R-square 分別為 0.847、0.642，明顯高於其他的分類標準，且也較表 4.1 中 B 所得的 R-square 佳，而 D-Bb 為不加入修正係數單純以管徑進行分類的函數，同樣的在管

徑分為 65 ~ 125 mm、150 ~ 1000 mm 時其 R-square 也較其他分類標準佳，分別為 0.918、0.626，兩種函數皆在同樣的管徑分類標準下有較佳的結果，因此上述函數亦將選用此分類標準代入(3.1a)及(3.1b)式中套用至換管優選模式。

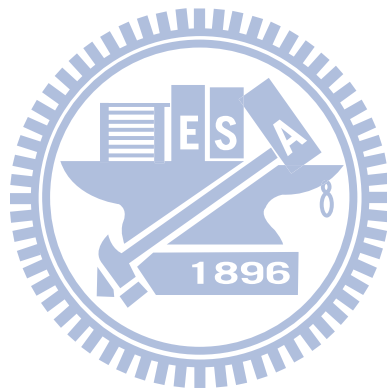


表 4.1 各種管線破損機率函數結果比較

編號 (參見表 3.5)	函數型式	結果
A1	$N_t = N_0 + At$	$R^2 = 0.563$; $N_0 = -6.337 \times 10^{-5}$; $A = 9.209 \times 10^{-6}$
A2	$N_t = C_1 + C_2 L + C_3 t$	$R^2 = 0.614$; $C_1 = -1.848 \times 10^{-4}$; $C_2 = 2.276 \times 10^{-10}$; $C_3 = 1.203 \times 10^{-5}$
B	$N_t = N_0 e^{B_1 t}$	$R^2 = 0.649$; $N_0 = 4.502 \times 10^{-5}$; $B_1 = 0.0349$
C	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1}$	$R^2 = 0.636$; $D_1 = 3.055 \times 10^{-3}$; $D_2 = 2.6393$
E-Ba	$N_t = N_0 e^{B_1 t} e^{B_2 z}$	$R^2 = 0.39$; $N_0 = 7.743 \times 10^{-9}$; $B_1 = 0.0933$; $B_2 = 0.0442$
E-Bb	$N_t = N_0 e^{B_1 t} e^{B_2 z}$	$R^2 = 0.465$; $N_0 = 2.968 \times 10^{-9}$; $B_1 = 0.0997$; $B_2 = 0.0479$
E-Bc	$N_t = N_0 e^{B_1 t} + B_2 z$	$R^2 = 0.275$
E-Bd	$N_t = N_0 e^{B_1 t} + B_2 z + B_3 L$	$R^2 = 0.319$
E-Ca	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1} + D_3 z$	$R^2 = 0.327$
E-Cb	$N_t = D_1 D_2 (D_1 t)^{D_2 - 1} + D_3 z + D_4 L$	$R^2 = 0.341$

A, B_i, C_i, D_i, E_i: 迴歸係數; t: 管齡; N₀: 安裝年的損壞率; N_t: 管齡 t 年的損壞率;
L: 管長; z: 地震加速度; d: 管徑.

表 4.2 管徑分類結果比較

管徑範圍 (mm)	函數型式	
	(D-Ba) $N_t = F_2 N_o e^{B_1 t}$	(D-Bb) $N_t = N_o e^{B_1 t}$
65-150	$R^2 = 0.604$	$R^2 = 0.625$
200-1000	$R^2 = 0.603$	$R^2 = 0.481$
65-125	$R^2 = 0.847$	$R^2 = 0.918$
150-1000	$R^2 = 0.642$	$R^2 = 0.626$
65-100	$R^2 = 0.842$	$R^2 = 0.919$
125-200	$R^2 = 0.573$	$R^2 = 0.555$
250-1000	$R^2 = 0.591$	$R^2 = 0.806$
65-125	$R^2 = 0.847$	$R^2 = 0.918$
150-200	$R^2 = 0.572$	$R^2 = 0.557$
250-1000	$R^2 = 0.591$	$R^2 = 0.806$

F₂: 管徑修正係數,其定義參照表 3.4.



4.5 換管方案優選結果及討論

由於國際自來水協會(IWA)建議汰管率至少為 1.5%，故本研究以 2 % 的汰管率進行換管方案研擬，因此除了優先汰換前述判識方法所篩選出的管線外，為達到預期汰管率，其餘須汰換管線則根據 3.5 節所建立的換管優選模式進行分析，配合建立的各種漏水潛勢函數，將優選模式以 CPLEX 求解，得到的結果如表 4.3，表中各欄位的值即為各種換管優選模式所求得之最大漏水潛勢改善量。

表 4.3 各種換管優選模式結果比較

使用函數編號	基於 EPANET2 模擬流量之最大漏水潛勢改善量 (breaks · CMD)	基於用戶抄錶用水量之最大漏水潛勢改善量 (breaks · CMD)
A2	1,580,428	265,123
B	408,671	67,851
C	641,662	117,139
E-Ba	986,170	347,706
E-Bb	981,685	371,593
D-Ba	410,627	105,260
D-Bb	1,325,155	137,162

依據前述所分析的各種換管優選模式結果，結合高破損機率管線區判識方法所篩選須優先汰換管線的名單，可得到不同的換管方案。由於不同換管方案是以不同換管優選模式進行規劃，因此雖然都是以漏水潛勢改善量最大化為目標，但無法比較不同優選模式的漏水潛勢改善量，故本研究依據鑑別度之篩選原則(黃，96年)進一步分析比較不同換管方案的換管依據，分析方式是對經由換管優選結果，計算汰換管線之個別漏水潛勢值與總平均值的偏差總合，若偏差總合的值越大，代表各汰換管線的漏水潛勢分佈範圍越廣泛，管線彼此間的漏水潛勢差異也越大，也說明了建立的換管優選模式越能明顯辨別出漏水潛勢的高低，鑑別度較高，換管方案亦較可靠，但由於不同優選模式的結果其漏水潛勢平均值皆不相同，無法直接經由偏差總合作比較，故以偏差總和與平均值的比值進行分析。以下分別以基於 EPANET2 模擬流量及基於用戶抄錶用水量針對不同換管方案進行說明。

當考量以 EPANET2 模擬之流量進行換管規劃，分析各種換管優選模式的鑑別結果，如表 4.4 所示，在不分區的各种漏水潛勢函數中，相較於其他函數，C 函數的鑑別度較高，依此函數規劃汰換的管線其漏水潛勢質差異較大，因此可將管網中漏水潛勢明顯較高的管線優先汰換出來，而當分區的漏水潛勢函數一併納入分析時，則 E-Ba 函數具有明顯較高的鑑別度，依據 B 函數所汰換的管線相較之下，較不能將管線的漏水潛勢明顯區分，因此鑑別度低，所規劃的換管方案較不可靠；當依據用戶抄錶用水量進行換管分析的結果如表 4.5，在不分區的各种函數中，D-Bb 函數具有較高的鑑別度，將分區的函數一併納入比較時，則以 E-Ba 函數的換管方案最佳，而依據 A2 函數研擬的換管方案和其他函數相比換管成效較低。

整體而言，無論是以管線之供水量或用水量進行分析，當依據 E-Ba 函數建立換管優選模式時，其分析結果之鑑別度皆明顯高於其他的漏水潛

勢函數，因此選用 E-Ba 函數研擬換管方案進行換管，對改善管網系統之漏水率預期可有較高的成效。

表 4.4 基於 EPANET2 模擬流量之各種換管優選模式依鑑別度分析結果

使用函數編號	偏差值總和 (breaks · CMD)	平均值 (breaks · CMD)	偏差值總和/平均值
A2	1,804,675	21,073	85
B	393,907	5,171	76
C	737,943	8,296	88
E-Ba	1,410,876	11,368	124
E-Bb	1,353,742	14,839	91
D-Ba	342,038	4,014	85
D-Bb	361,710	4,568	79

表 4.5 基於用戶抄錶用水量之各種換管優選模式依鑑別度分析結果

使用函數編號	偏差值總和 (breaks · CMD)	平均值 (breaks · CMD)	偏差值總和/平均值
A2	261,216	1,178	221
B	70,608	260	270
C	118,538	457	259
E-Ba	617,559	1,233	500
E-Bb	667,468	1,498	445
D-Ba	110,494	370	298
D-Bb	150,575	475	316

第五章 結論與建議

在進行自來水管網換管規劃時，為了使換管後的管網系統能有效改善管網漏水率，本研究建立一些分析方法及優選模式以期可以迅速及有效的判斷出管網系統中漏水潛勢較高之管線，根據本研究發展之換管優選程序規劃出最具效益的汰管決策方案，以下總結本研究的結果。

5.1 結論

本研究建立了一套換管規劃優選程序，包括漏水因子、高破損機率管線區辨識法、漏水潛勢函數及換管優選模式，並將其應用於國內自來水公司第三區的大新竹系統，主要的成果與結論說明如下：

1. 依據本研究發展的換管優選程序所研擬之換管方案，由於考量管線之漏水潛勢，對於改善管網系統漏水率預期可具有較高的成效，亦可較有系統的改善漏水率。
2. 若單以一般管線破損機率函數為依據進行換管方案規劃，這種方式並不能將重複破損機率較高的管線進行汰換，雖然亦可將重複性的機率納入函數中考量，但由於國內維修記錄仍不算長，並不太容易建立此種函數，而本研究建立之 n-pipe connectivity 辨識方法可有效篩選出這些管線，且此方法亦可透過管線連接性，一併找出相鄰宜汰換的管線，以提昇換管的效益。
3. 同樣以漏水潛勢改善量最大為目標的情形下，當以 EPANET2 模擬之流量進行換管規劃，僅比較不分區函數，C 函數可汰換出管網中漏水潛勢相對較高的管線，當分區函數一併納入比較則以 E-Ba 函數的鑑別度較高，研擬的換管方案較具成效；當依據用戶抄錶用水量進行換管分析時，僅以各種不分區函數進行規劃，D-Bb 函數可得較佳的換管方案，與分區函數一併考量時，E-Ba 函數能較有效的在管網系統中汰換出漏水潛勢明顯較高的管線，因此研擬的換管方案較佳。結合以上討論可知，無論是以管線之流量或用水

量進行分析，以 E-Ba 函數進行換管方案的研擬，皆可得到較佳的結果。

4. 本研究建立的漏水潛勢函數可改善過去建立的管線破損機率函數，得知管網中各管線的漏水潛勢，以供換管方案的研擬；而當以地震為因子進一步改善的漏水潛勢函數，相較於其他不分區函數，可將管網中漏水潛勢較高的管線明顯區分出來，因此研擬的換管方案亦較可靠。

5.2 建議

由於受限於人力及時間，故研究有些地方並不完善，以下依據本研究的經驗，提出一些建議供進行後續研究時參考。

由於自來水公司第三區處的管線破損維修紀錄無法直接對應到 GIS 管線資料中，造成破損紀錄無法準確對應到管線上，若能於維修紀錄上標明該管線之獨立編號利於對照，則分析的結果將更加可靠。

三區處的 GIS 目前正在建置當中，唯部分資料欄位並不完整，因此只能作合理假設，待建置完成時，可再重新依本研究所建立之換管優選程序分析，相信對於實際換管方案的研擬將更加實用。

目前所建立的換管規劃優選模式，是以改善漏水量為優先考量，但由於未將成本一併納入規劃，因此所研擬出的換管方案對於自來水公司而言，在年度預算考量下不見得可實際執行，因此未來有待進一步把成本納入研究。

由於地震是否對管線破損漏水有影響亦須分析管線受力扭曲、變形的情形，因此本研究目前僅以地動加速度值的方式進行分析其相關性可能不及變形分析，如何將管線受力的情形納入分析，有待進一步研究。

參考文獻

- 中央氣象局，(99 年)，地球物理資料管理系統，
<http://gdms.cwb.gov.tw/join1.php> (accessed on 2010/03/15)。
- 何承嶧，(98 年)，“自來水配水管網漏水現象之分析、預測與管理之研究”，
國立台灣大學環境工程研究所，博士論文初稿。
- 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，14-16 頁。
- 郭瑞華、陳錦祥、張世勳、鄭答振，(93 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，49-65 頁。
- 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*，第
九期，20-24 頁。
- 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，101-114 頁。
- 曾浩雄，(95 年)，“台灣地區缺水的原因及解決之道”，*自來水會刊*，第二
十五卷，第三期，41-54 頁。
- 黃宥禎，(96 年)，“廢棄物清運績效綜合指標”，國立交通大學環境工程研
究所，碩士論文。
- 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。
- 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，67-81 頁。
- 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。

- Alvisi, S. and Franchini, M. (2005). "Rehabilitation scheduling of water distribution systems based on multi-objective genetic algorithms." *CCWI International Conference*, Exeter, UK.
- Anil, K. J. and Richard, C. D. (1948). *Algorithms for Clustering Data*, Prentice Hall Advanced Reference Series, New Jersey.
- Clark, R. M., Stafford, C. L., and Goodrich, J. A. (1982). "Water distribution systems: A spatial and cost evaluation." *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 108(3), pp. 243-256.
- 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), pp. 1106-1116.
- Crowder, M. J., Kimber, A. C., Smith, R. L., and Sweeting T. J. (1991). *Statistical analysis of reliability data*, Chapman & Hall, London.
- 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), pp. 214-223.
- Dandy, G. C. and Engelhard, M. (2006). "Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains." *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 132(2), pp.79-88.
- Davis, P., Burn, S., Moglia, S., and Gould, S. (2007). "A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines." *Reliability Engineering & System Safety*, 92(9), pp. 1258-1266.

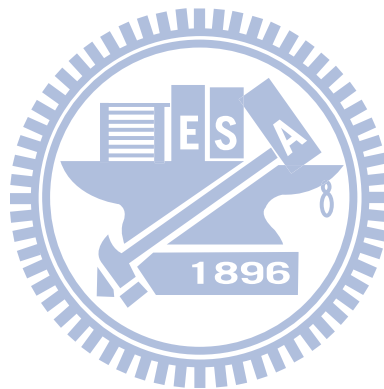
- Dridi, L., Mailhot, A., Parizeau, M., and Villeneuve, J. P. (2005). "A strategy for optimal replacement of water pipes integrating structural and hydraulic indicators based on a statistical water pipe break model." Proceedings of the Eight International Conference on Computing and Control for the Water Industry University of Exeter, UK.
- Giustolisi, O., Laucelli, D., and Savic, D. (2005). "A decision support framework for short-time rehabilitation planning in water distribution systems." *CCWI International Conference*, Exeter, UK.
- Goulter, I. C. and Kazemi, A. (1988). "Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp. 91-97.
- Goulter, I., Davidson, J., and Jacobs, P. (1993). "Predicting water-main breakage rates." *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 119(4), pp. 419-436.
- Halhal, D., Walters, G. A., Ouazar, D., and Savic, D. A. (1997). "Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm." *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 123(3), pp. 137-146.
- Hong, H. P., Allouche, E. N., and Trivedi, M. (2006). "Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 12(3), pp. 184-191.
- Jacobs, P. and Karney, B. (1994). "GIS development with application to cast iron water main breakage rate." 2nd international conference on water pipeline systems, Edinburgh, Scotland.
- Kettler, A. J. and Goulter, I. C. (1985). "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12(2), pp. 286-293.

- Kim, J. H. and Mays, L. W. (1994). "Optimal rehabilitation model for water-distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 120(5), pp. 674-692.
- Kleiner, Y., Adams, B. J., and Rogers, J. S. (1998). "Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation." *Water Resources Research*, 34(8), pp. 2039-2051.
- Loganathan, G. V., Park, S., and Sherali, H. D. (2002). "Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 128(4), pp. 271-278.
- Luong, H. T. and Nagrur, N. N. (2001). "Optimal replacement policy for single pipes in water distribution networks." *Water Resources Research*, 37(12), pp. 3285-3293.
- Mailhot, A., Poulin, A., and Villeneuve, J. P. (2003). "Optimal replacement of water pipes." *Water Resources Research*, 39(5), pp. HWC 2-1 – HWC 2-14.
- O'day, D. K. (1982). "Organizing and analyzing leak and break data for making main replacement decisions." *Journal American Water Works Association-AWWA*, 74(11), pp. 588-594.
- Pelletier, G., Mailhot, A., and Villeneuve, J. P. (2003). "Modeling water pipe breaks-Three case studies." *Journal of Water Resources Planning & Management-ASCE*, 129(2), pp. 115-123.
- Shamir, U. and Howard, C. D. D. (1979). "An analytic approach to scheduling pipe replacement." *Journal American Water Works Association-AWWA*, 71(5), pp. 248-258.

Sundahl, A. C. M. (1997). “Geographical analysis of water main pipe breaks in the city of Malmo, Sweden.” *Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA*, 46(1), pp. 40-47.

Thornton, J., Sturm, R., and Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control, Second Edition*, McGraw-Hill, New York.

Walaski, T. M. and Pelliccia, A. (1982). “Economic analysis of water main breaks.” *Journal American Water Works Association-AWWA*, 74(3), pp. 140-147.

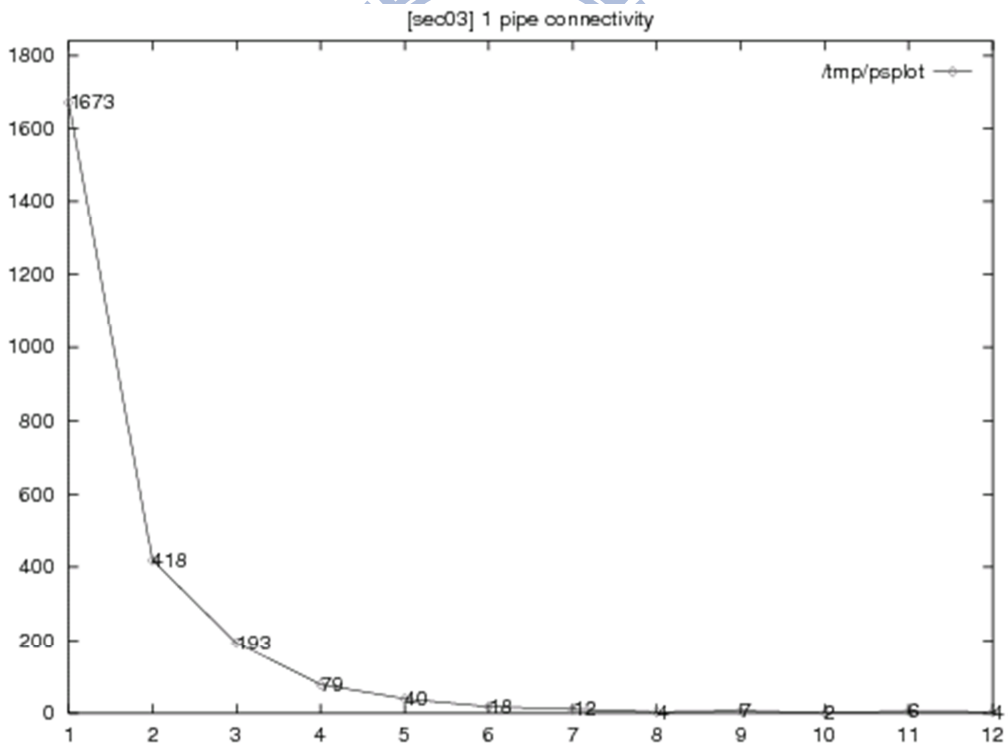
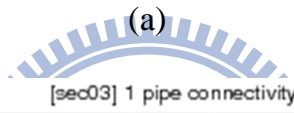
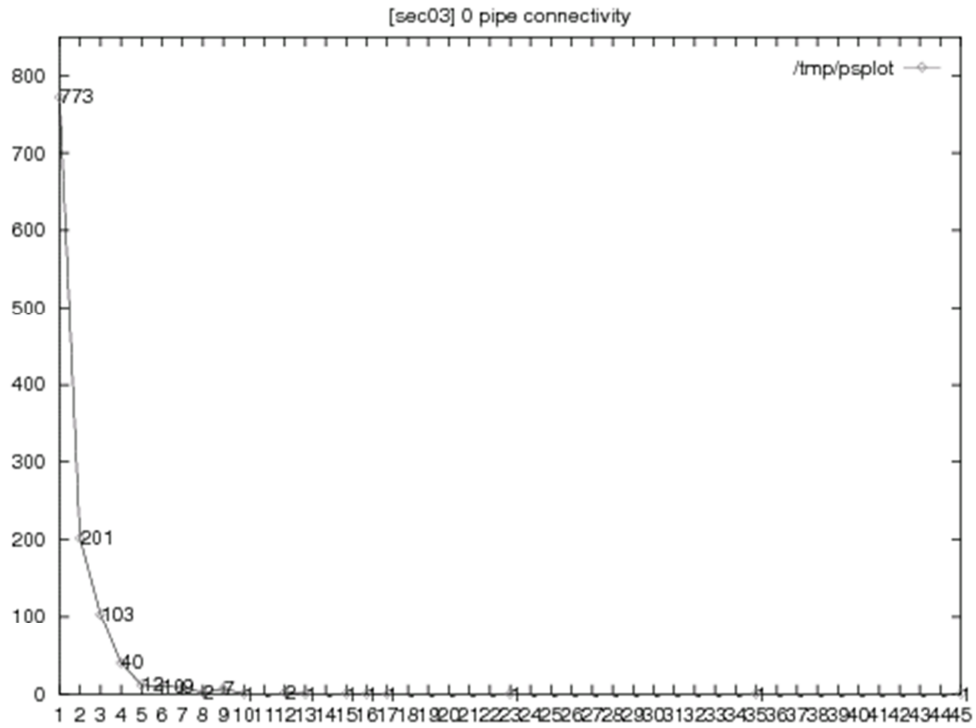


附錄 A N-pipe connectivity 及道路與

維修記錄相關性分析

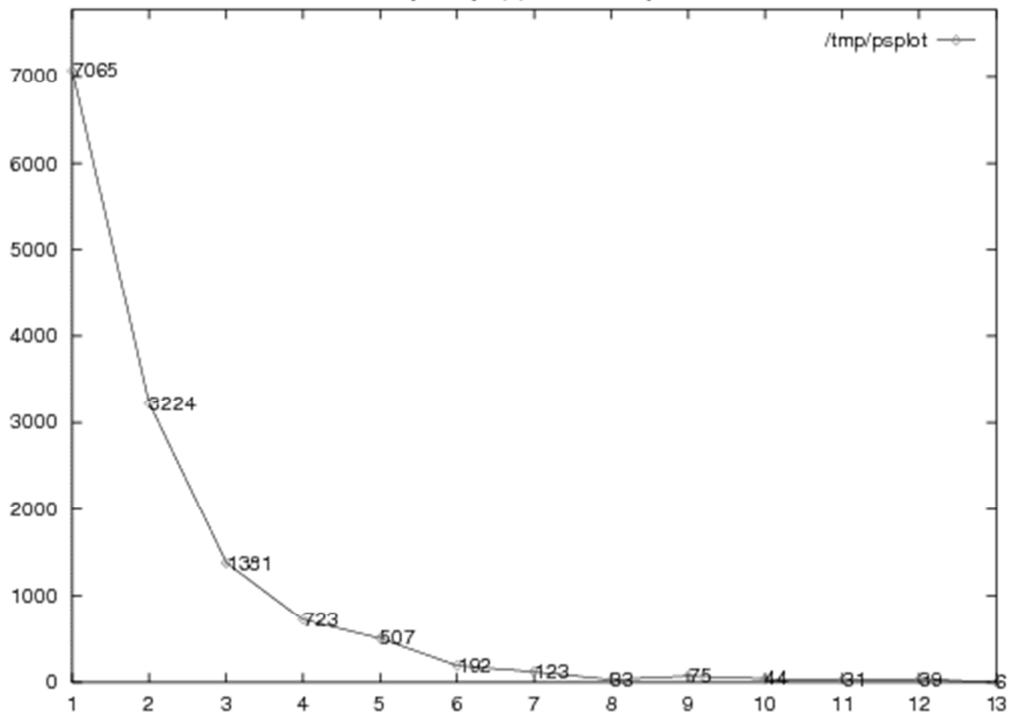
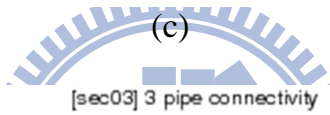
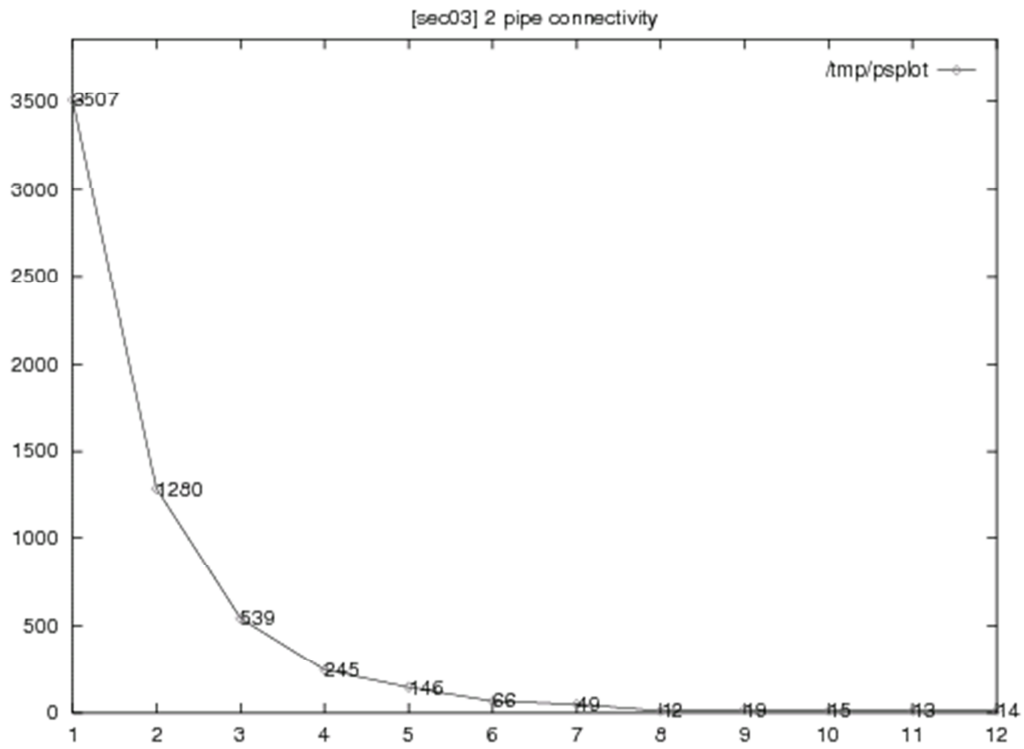
本研究為了找出高重複破損機率的管線，將維修紀錄與管線結合，以建立的 n-pipe connectivity 判識方法與維修紀錄作相關性分析，分別以 n-pipe connectivity 及不重複的 n-pipe connectivity 兩種方式進行，分析結果如附圖 A.1.1-附圖 A.1.10 所示，從 n-pipe connectivity 分析結果中可發現，當 n 為 1 以上時會產生管線連接重複性的問題，故除了 0-pipe connectivity，其他均無法明顯看出與維修紀錄的相關性，難以做進一步分析，而不重複的 n-pipe connectivity 雖然不會有管線連接重複性的情形發生，但是在僅能觀察總破損次數的情形下，可能有些管線本身只破損過一次，且這些管線的管齡亦無法直接看出，當 n 越大時，這些情形可能也會越來越明顯，且分析高連接管線數與本研究的目的較不相關，故只對不重複的 1-pipe connectivity 進行分析

從管線破損維修紀錄中可發現，荷重振動在所有漏水原因中高居第一，且文獻中亦說明車輛會造成管線荷重增加及振動以致損壞，本研究故考量以道路與維修紀錄作相關性分析，結合 n-pipe connectivity 找出重複破損機率較高的管線，考量國道應不至於對管線造成影響，因此不納入分析，將省道、縣道、鄉道、路街、巷弄等不同道路型態，依據其路寬做分類，並依其分類與維修紀錄進行分析，觀察管線在不同道路路寬下破損的情形，附圖 A.1.11 為各種道路路寬與維修頻率的統計分佈，從結果看來，管線破損與管線是否埋設於道路下沒有明顯的相關性，甚至埋設於非道路下的管線其維修頻率更高，且不同路寬與管線維修頻率亦看不出明顯關聯，因此難以作進一步分析。



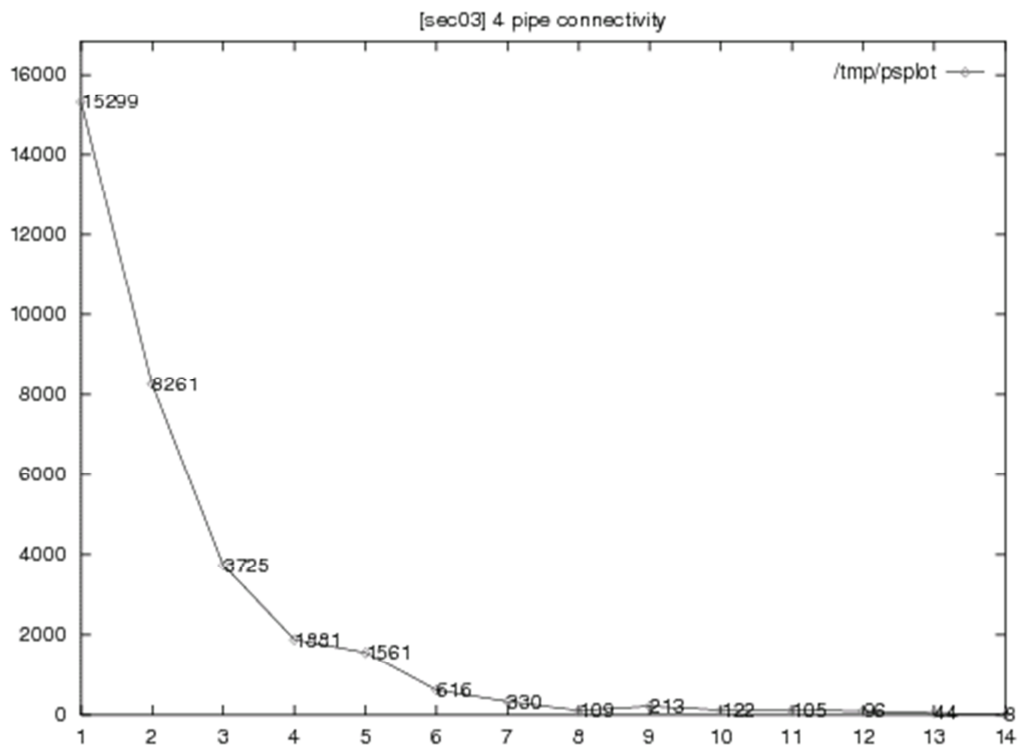
(b)

附圖 A.1.1 N-pipe connectivity 之不同總破損次數分佈：
 (a) 0-pipe connectivity (b) 1-pipe connectivity



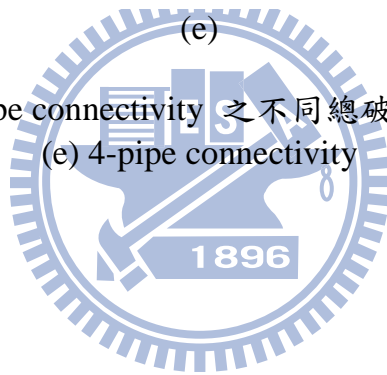
(d)

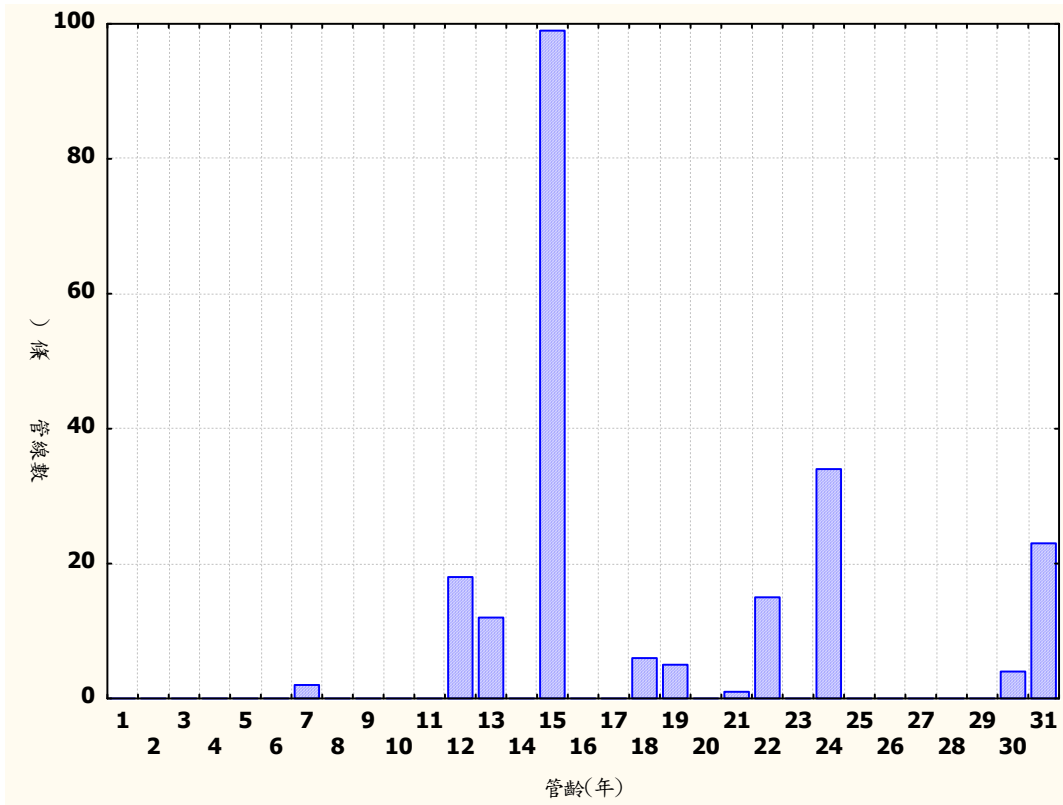
附圖 A.1.1 N-pipe connectivity 之不同總破損次數分佈(續):
 (c) 2-pipe connectivity (d) 3-pipe connectivity



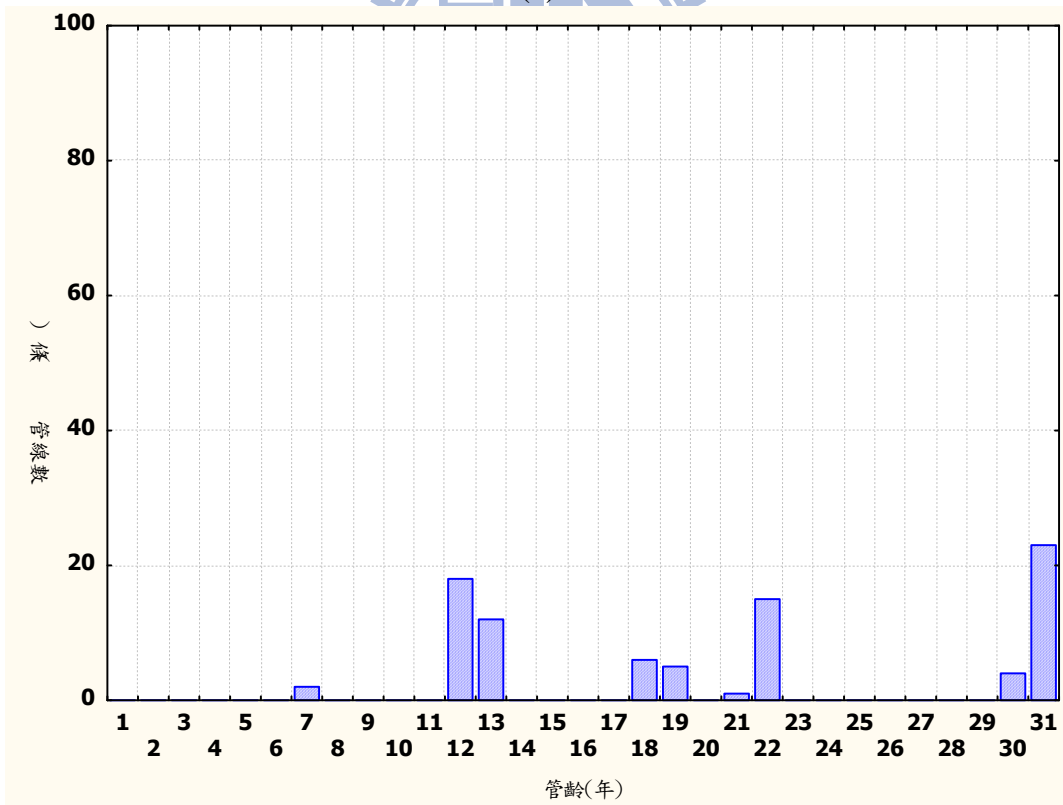
(e)

附圖 A.1.1 N-pipe connectivity 之不同總破損次數分佈(續):
(e) 4-pipe connectivity



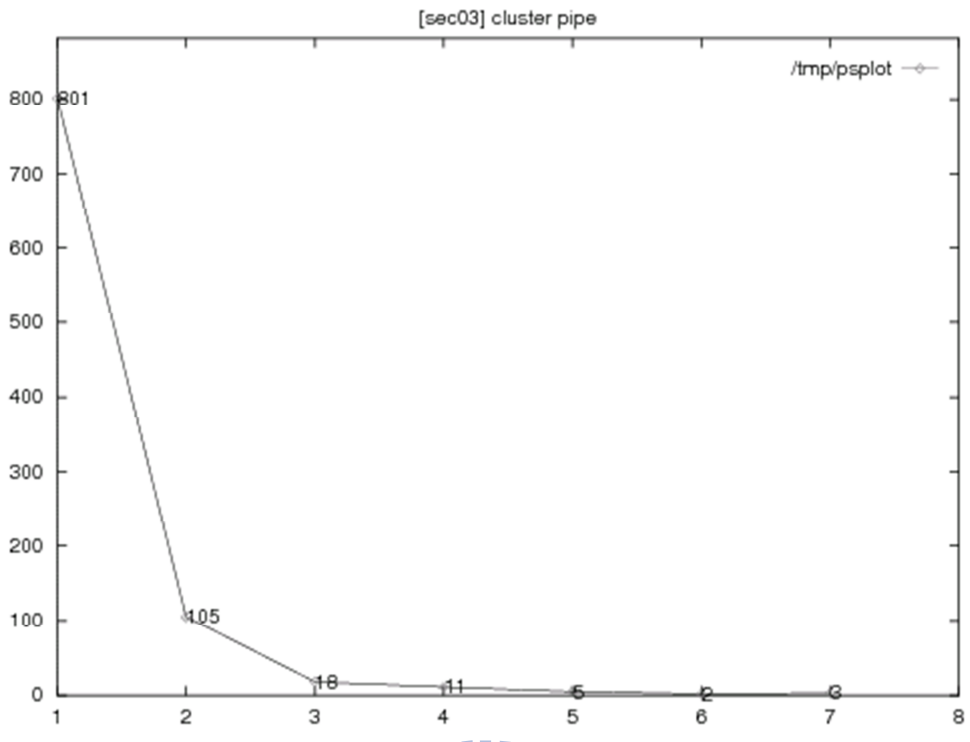


(a)

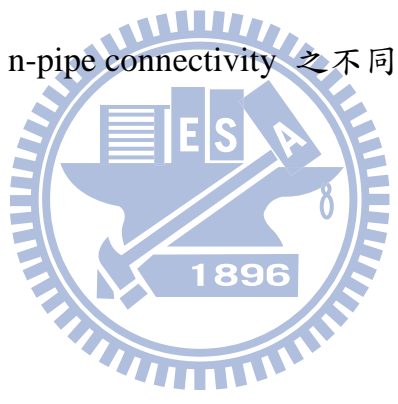


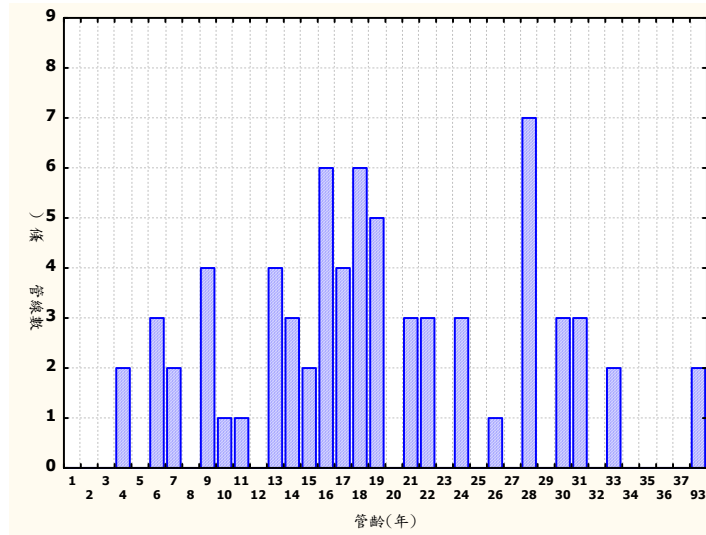
(b)

附圖 A.1.2 0-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈：
 (a) 取 3 次以上總破損紀錄 (b) 取 5 次以上總破損紀錄

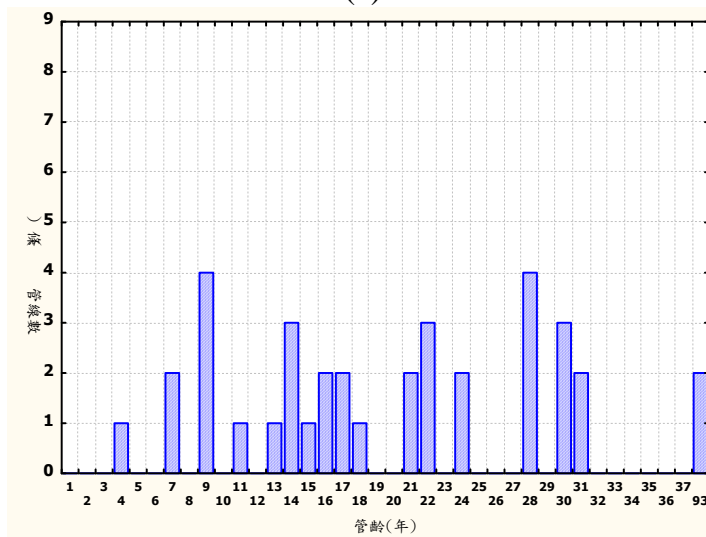


附圖 A.1.3 不重複的 n-pipe connectivity 之不同連接管線數統計分佈

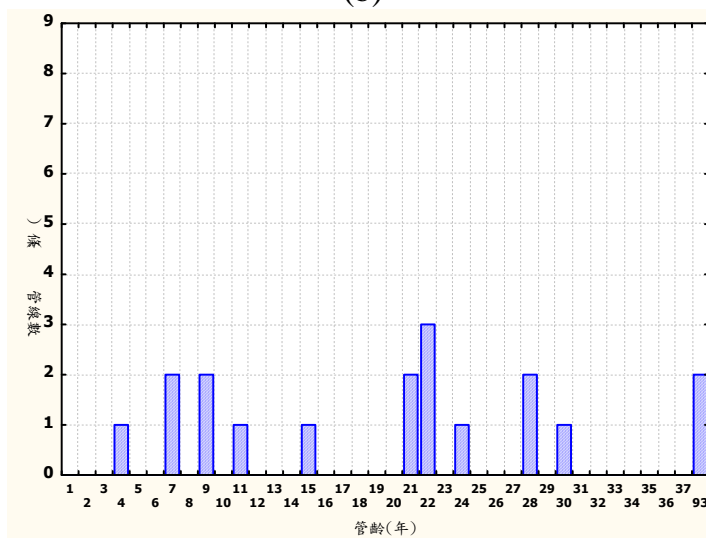




(a)

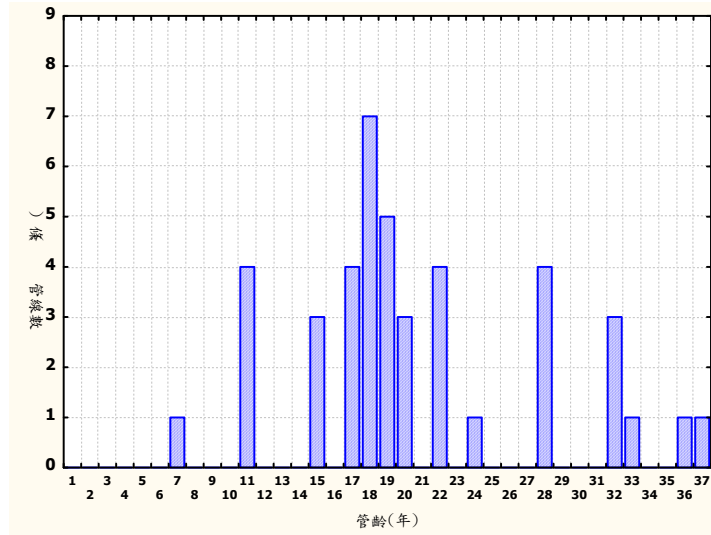


(b)

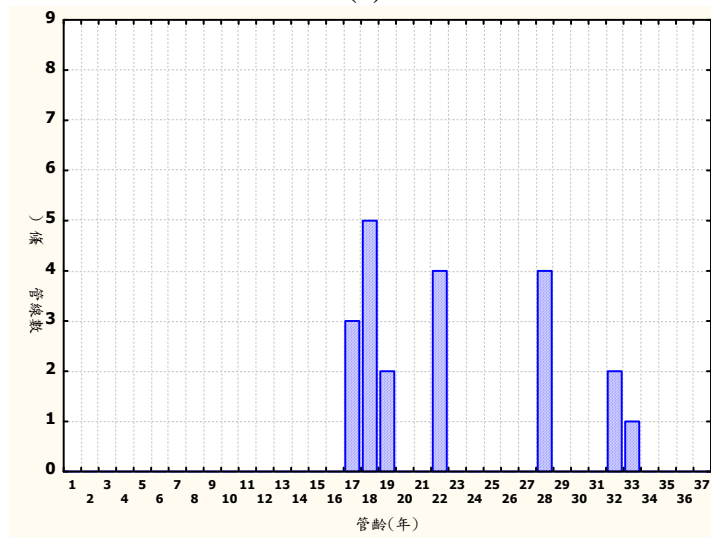


(c)

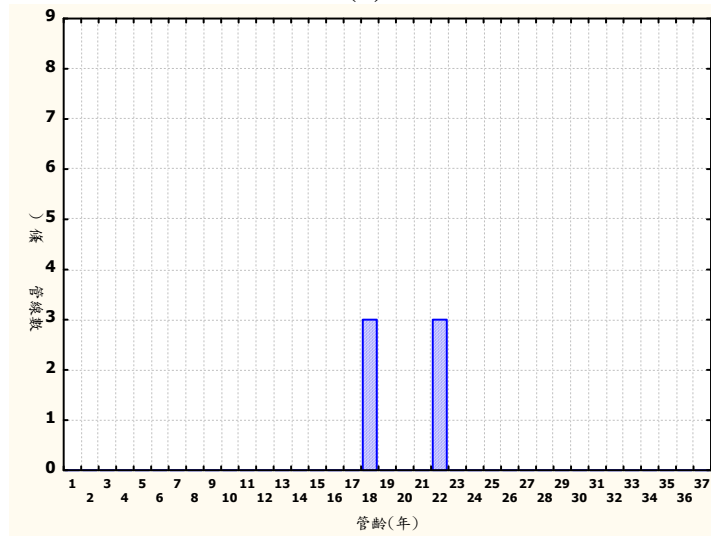
附圖 A.1.4 不重複的 1-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈：
 (a) 4 次以上總破損紀錄 (b) 6 次以上總破損紀錄 (c) 8 次以上總破損紀錄



(a)

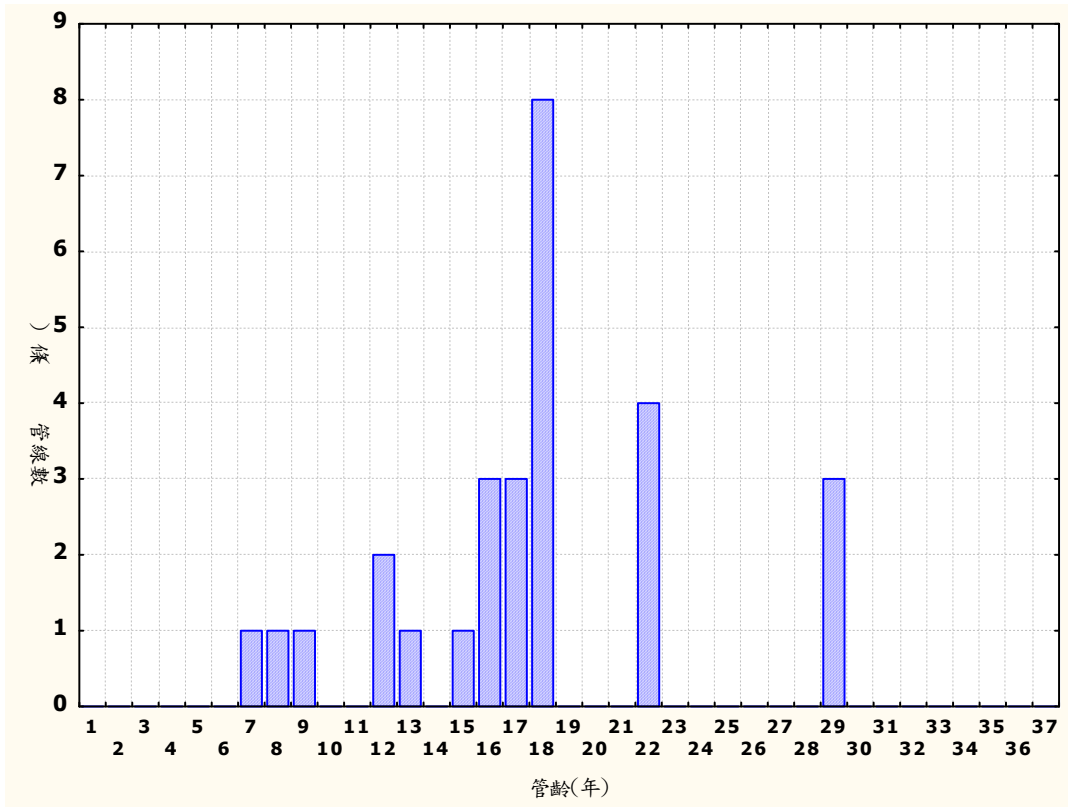


(b)

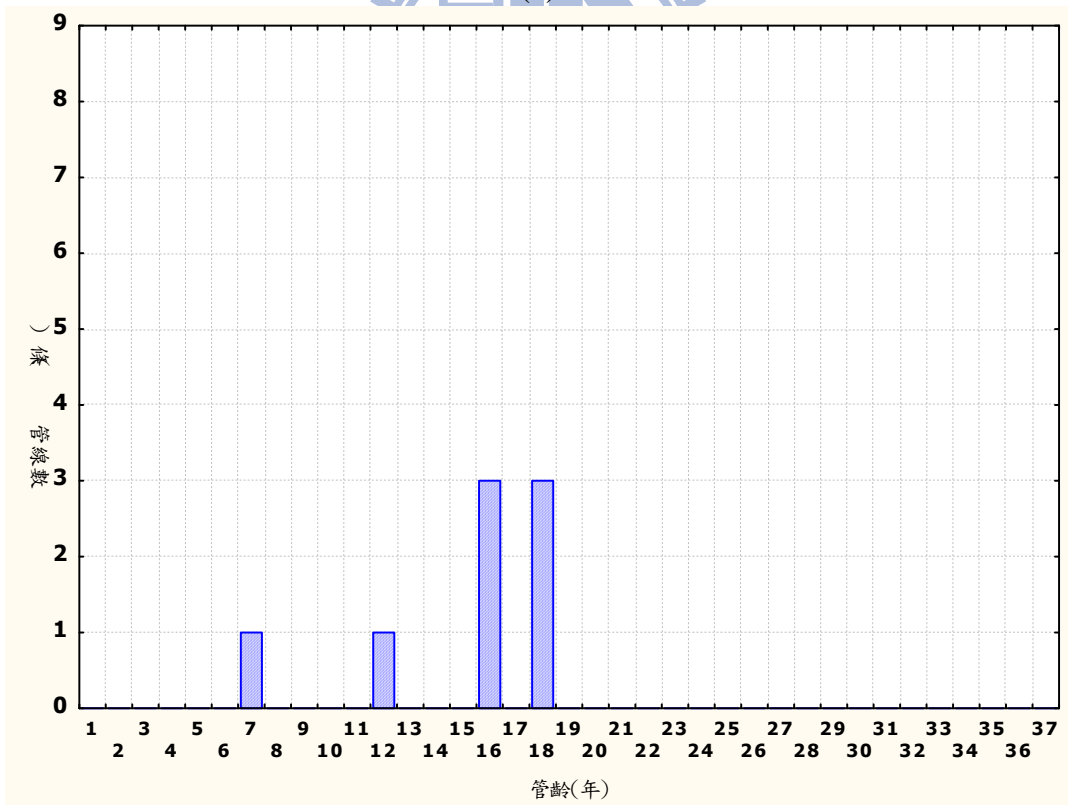


(c)

附圖 A.1.5 不重複的 2-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈：
 (a) 6 次以上總破損紀錄 (b) 9 次以上總破損紀錄 (c) 12 次以上總破損紀錄

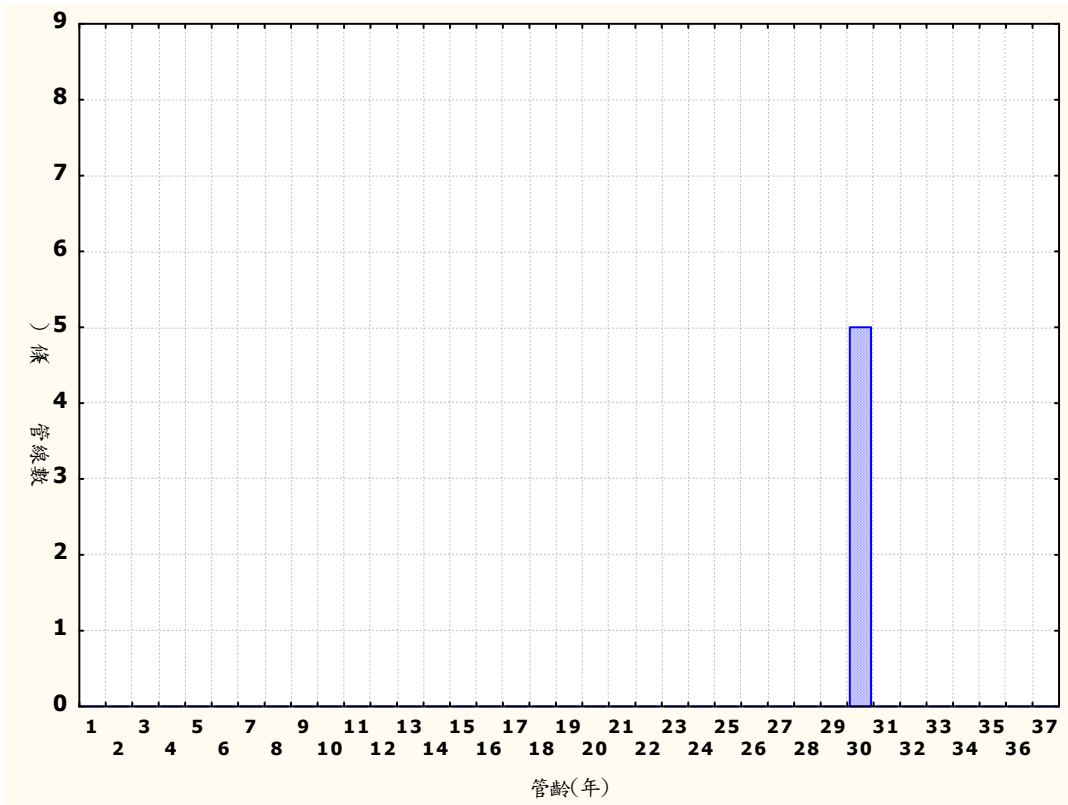


(a)

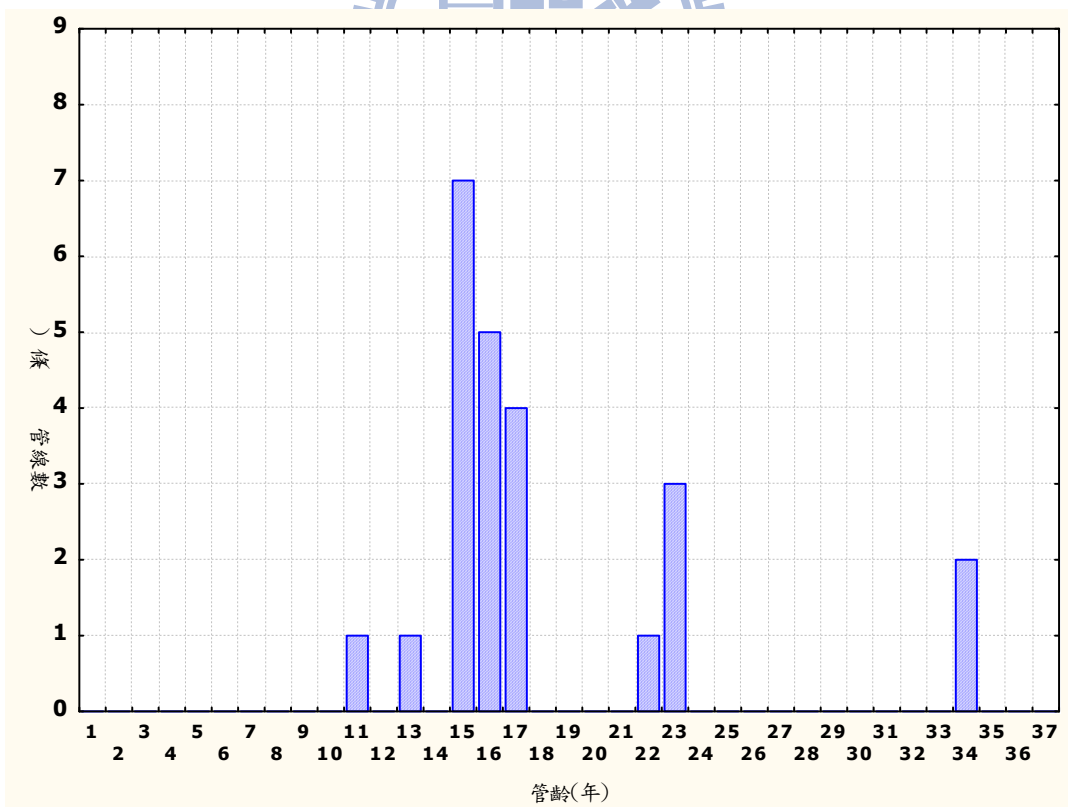


(b)

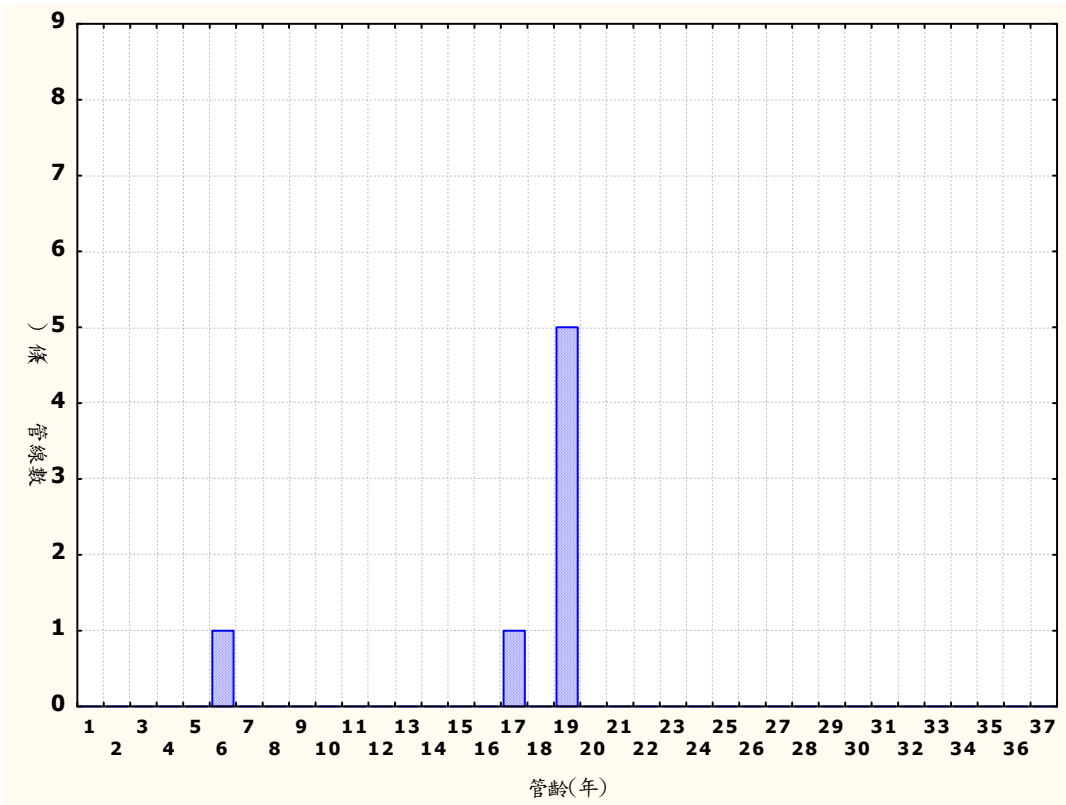
附圖 A.1.6 不重複的 3-pipe connectivity 之總破損次數管齡分佈：
 (a) 8 次以上總破損紀錄 (b) 16 次以上總破損紀錄



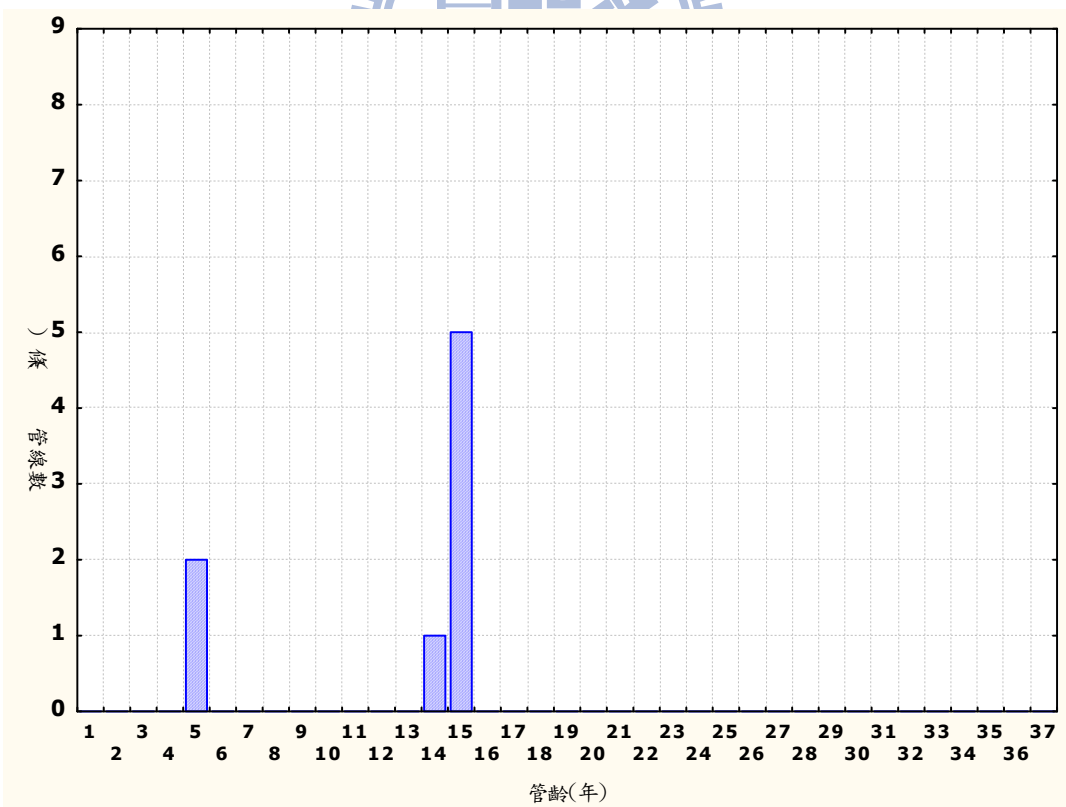
附圖 A.1.7 不重複的 4-pipe connectivity 之 13 次總破損紀錄管齡分佈



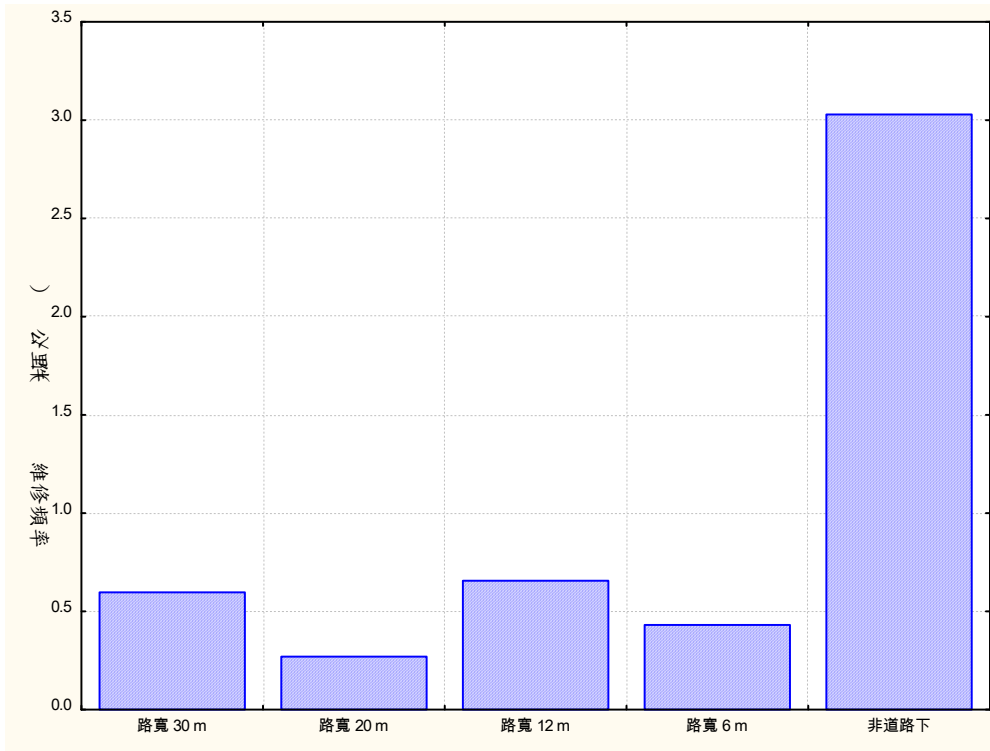
附圖 A.1.8 不重複的 5-pipe connectivity 之 12 次以上總破損紀錄管齡分佈



附圖 A.1.9 不重複的 6-pipe connectivity 之 94 次總破損紀錄管齡分佈



附圖 A.1.10 不重複的 7-pipe connectivity 之 23 次總破損紀錄管齡分佈



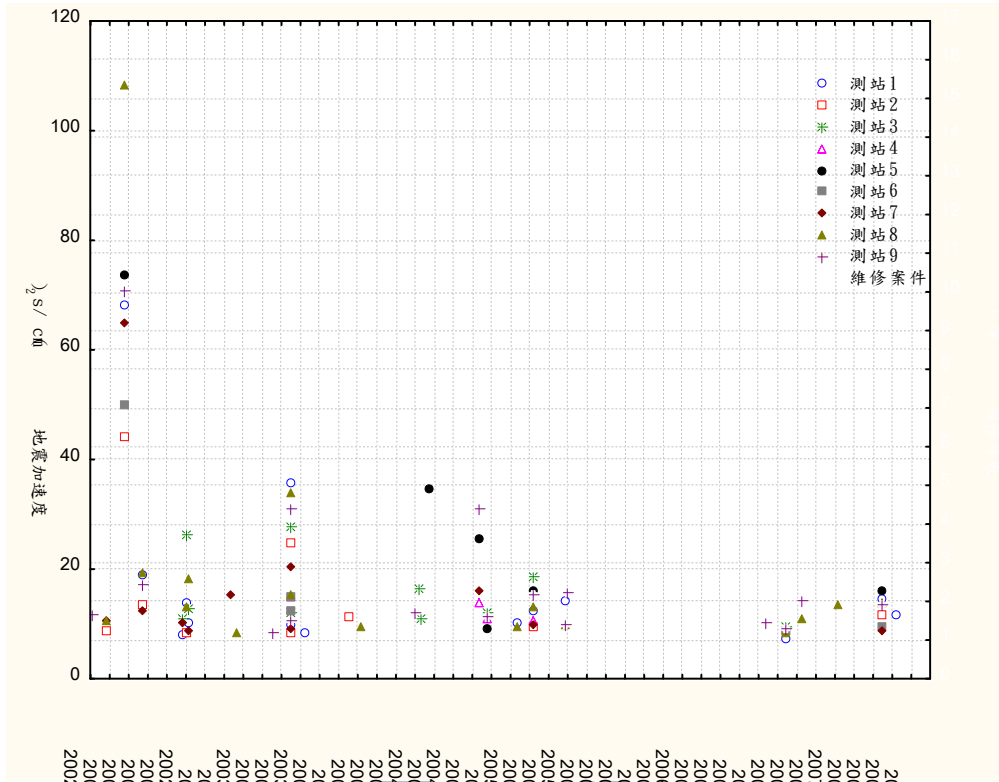
附圖 A.1.11 各種道路路寬與維修頻率的統計分佈



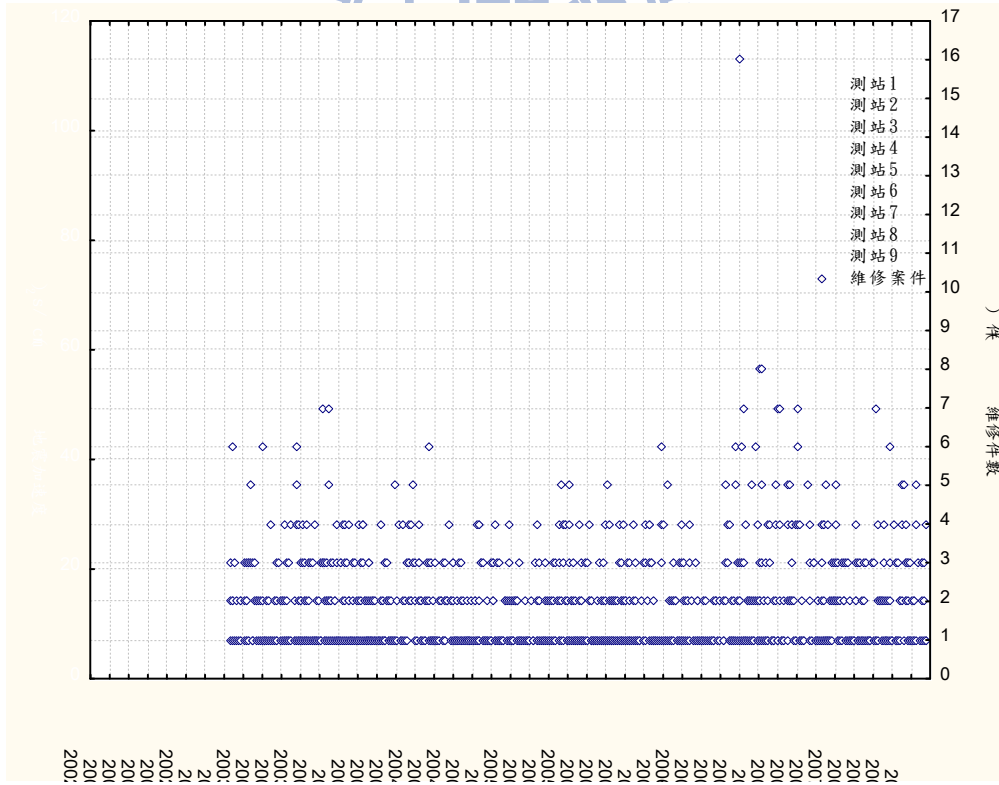
附錄 B 地震與維修記錄相關性分析

本研究參考相關文獻，發現地震亦是造成管線破損影響漏水的因子，故將地震與維修紀錄作相關性分析，以期建立較佳的漏水潛勢函數，附圖 B.1.1、附圖 B.1.2 為各區域地震與維修紀錄依發生時間依序排列的統計，由於從結果中無法明顯看出地震與管線破損的相關性，且考量管線長度與維修紀錄亦有關聯，因此以維修頻率作進一步分析，附圖 B.1.3 為各區域地震總值與維修頻率於各年之統計結果，大部分區域其地震總值與維修頻率的相關性頗大，但第一區及第八區則沒有明顯的相關性，唯由於這兩個區域的管線長度占所有區域的 15%，且在管網尾端，代表性可能較差，亦可能有特殊的地層結構，未來有必要作進一步分析其原因。而地震是否會造成管線破損亦須考量管線在地下受力扭曲、變形的情形，本研究目前僅以地動加速度值與維修紀錄進行分析，相關性可能不及變形分析，此部分有待未來進一步研究。





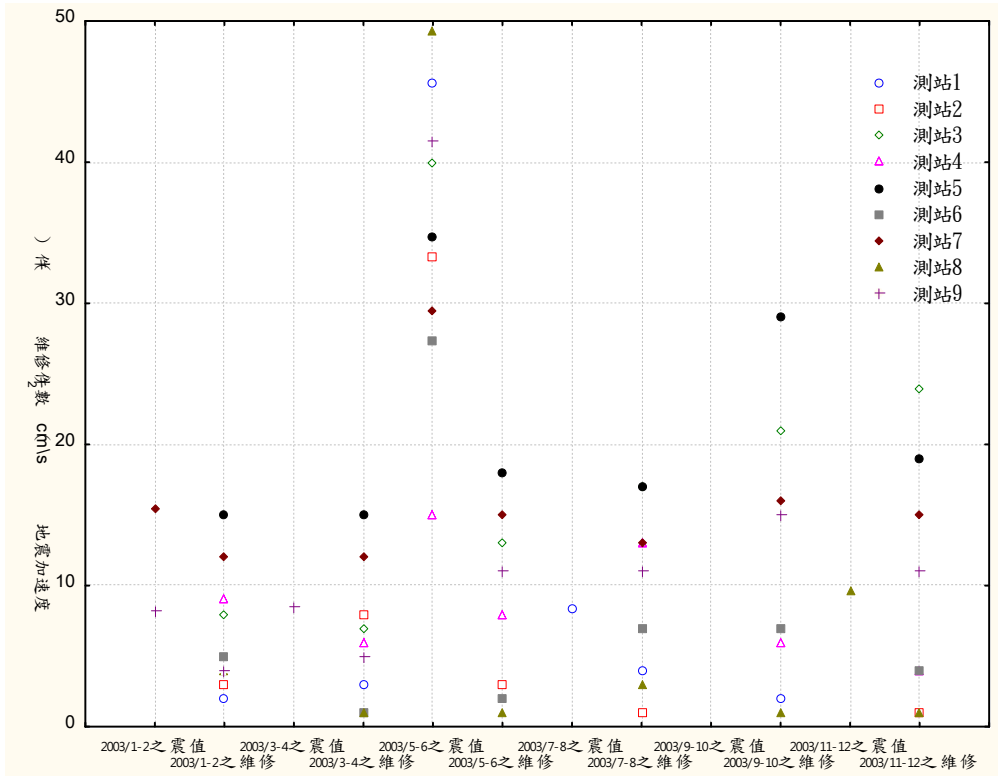
(a)



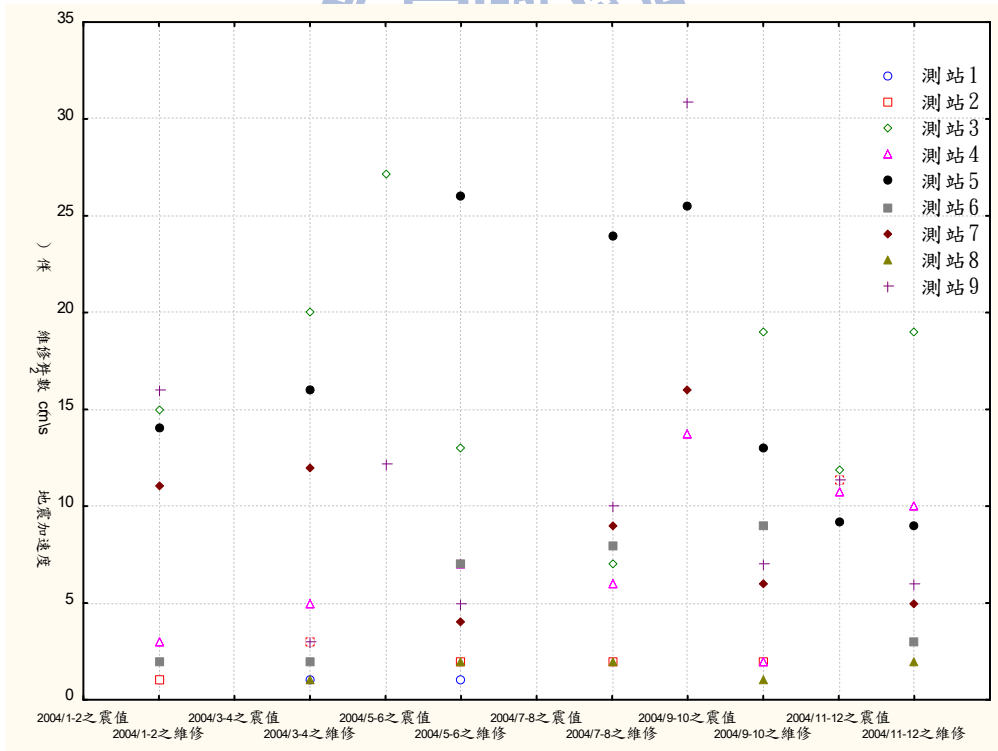
(b)

附圖 B.1.1 地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈:

(a) 各測站地震總測值 (b) 維修件數

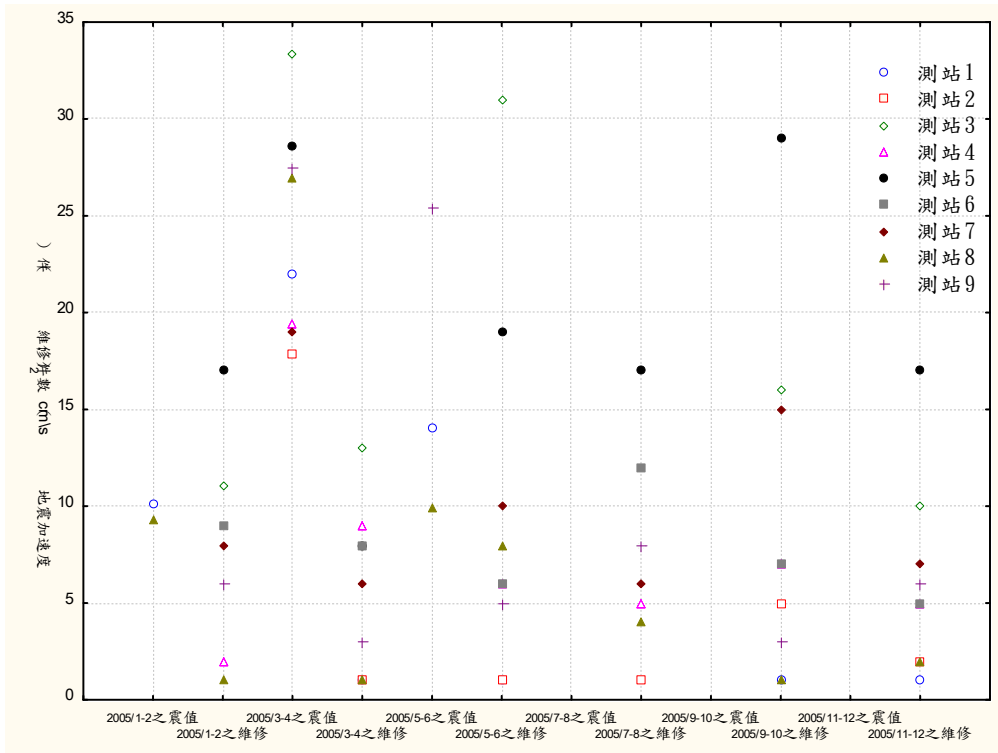


(a)

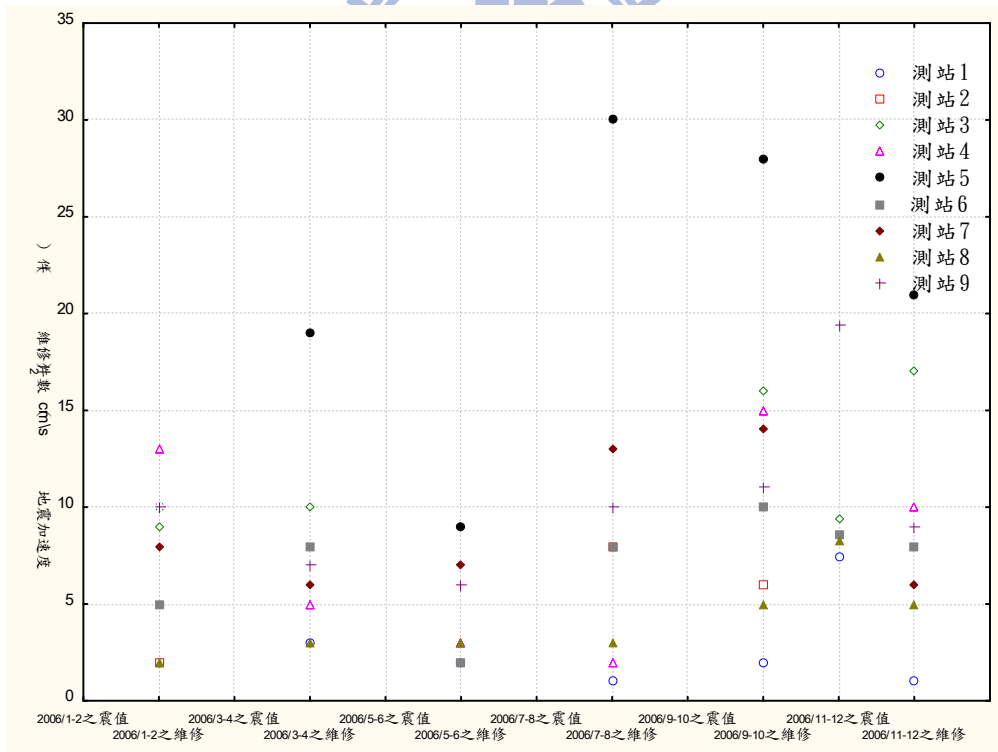


(b)

附圖 B.1.2 各年地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈：
(a) 92 年 (b) 93 年

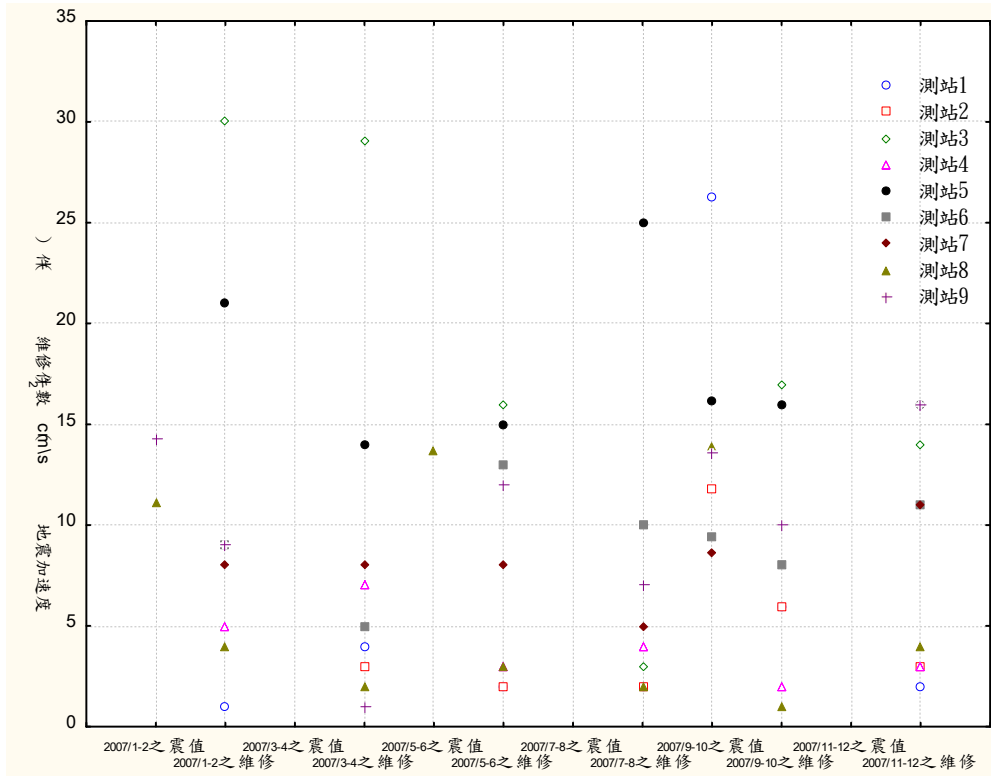


(c)



(d)

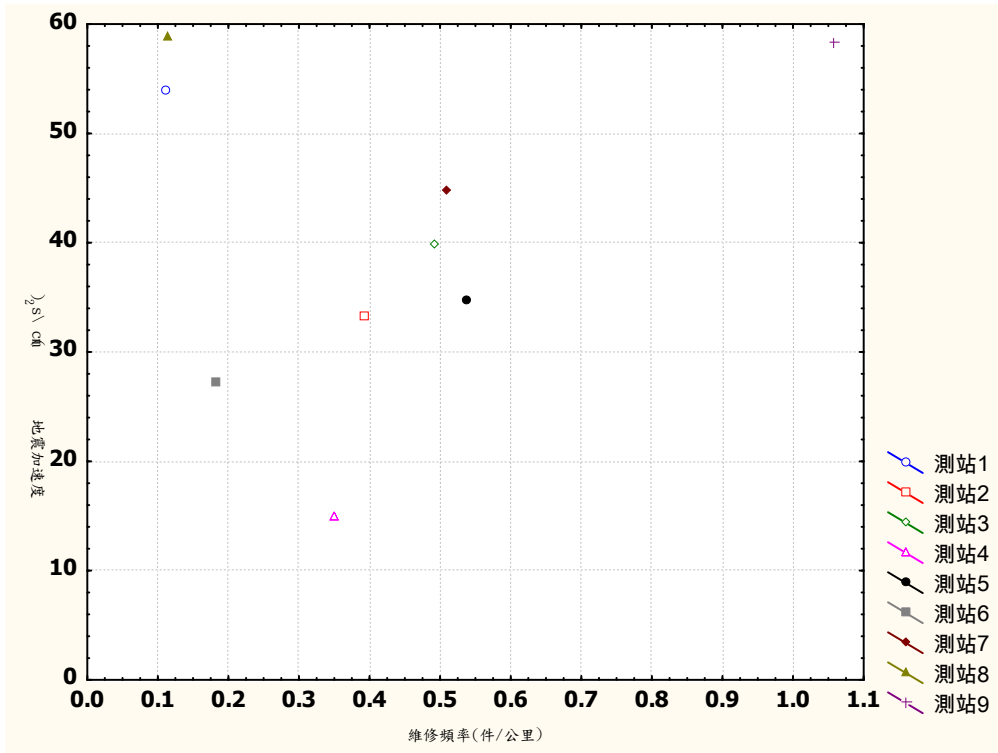
附圖 B.1.2 各年地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈(續):
(c) 94 年 (d) 95 年



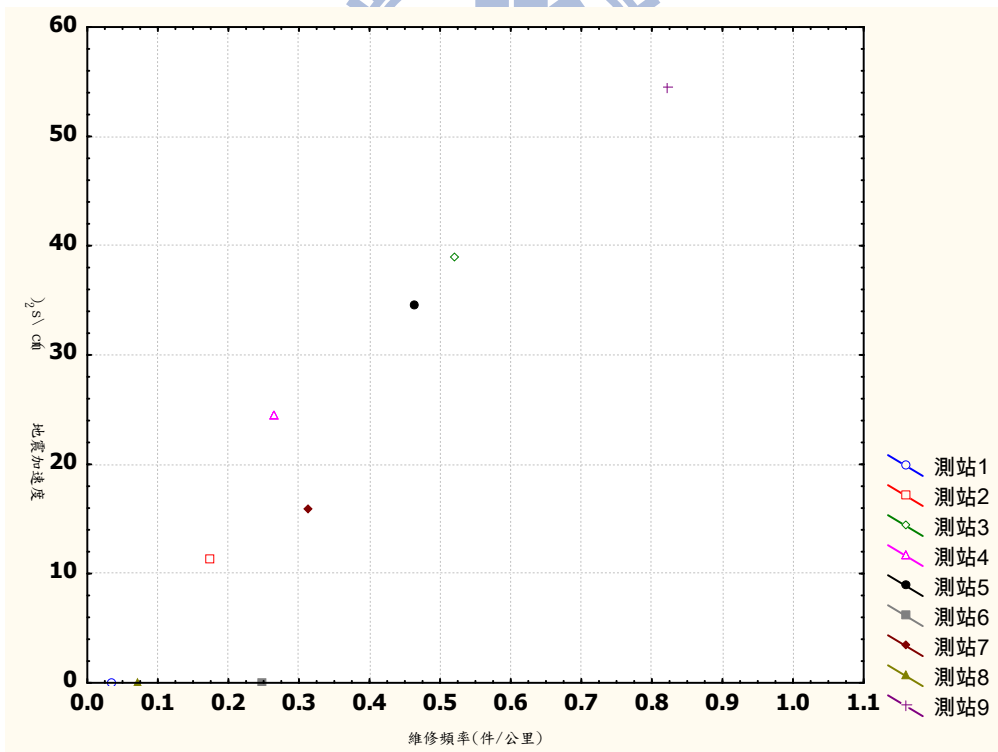
(e)
 附圖 B.1.2 各年地震與維修紀錄以發生時間依序排列的統計分佈(續):



(e) 96 年

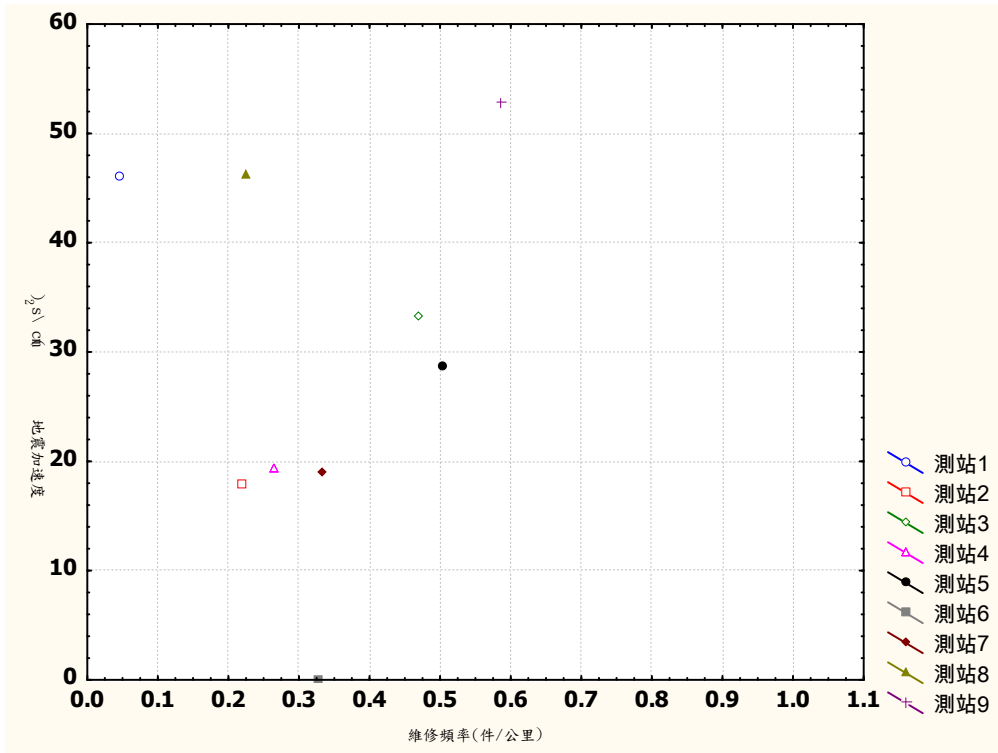


(a)

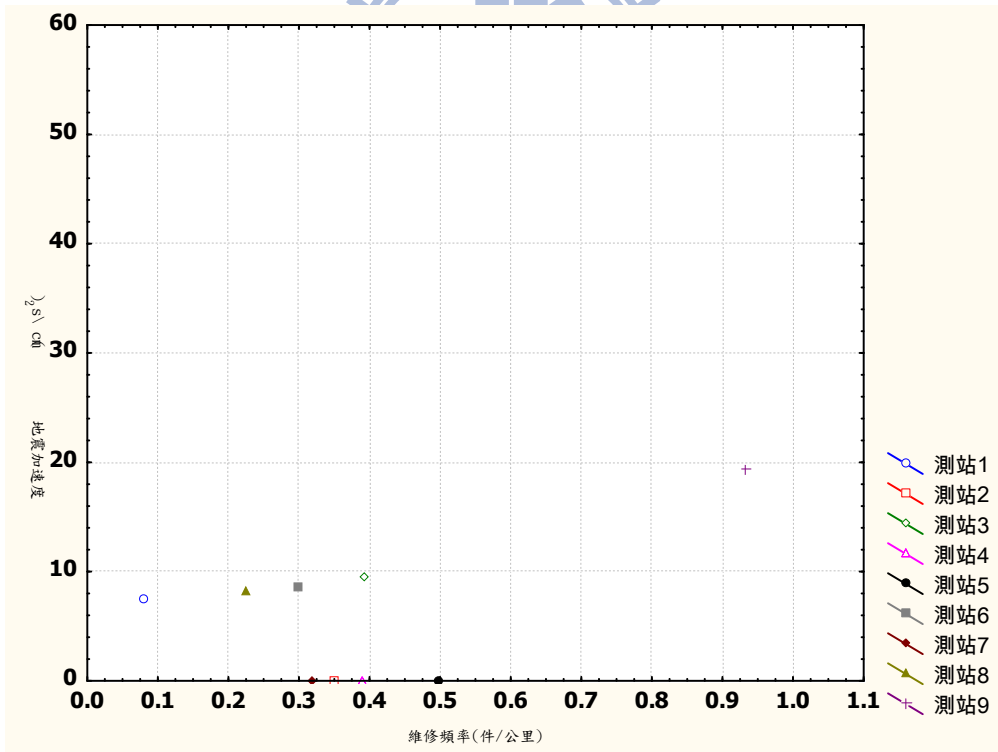


(b)

附圖 B.1.3 各年地震與維修紀錄統計分佈：
(a) 92 年 (b) 93 年

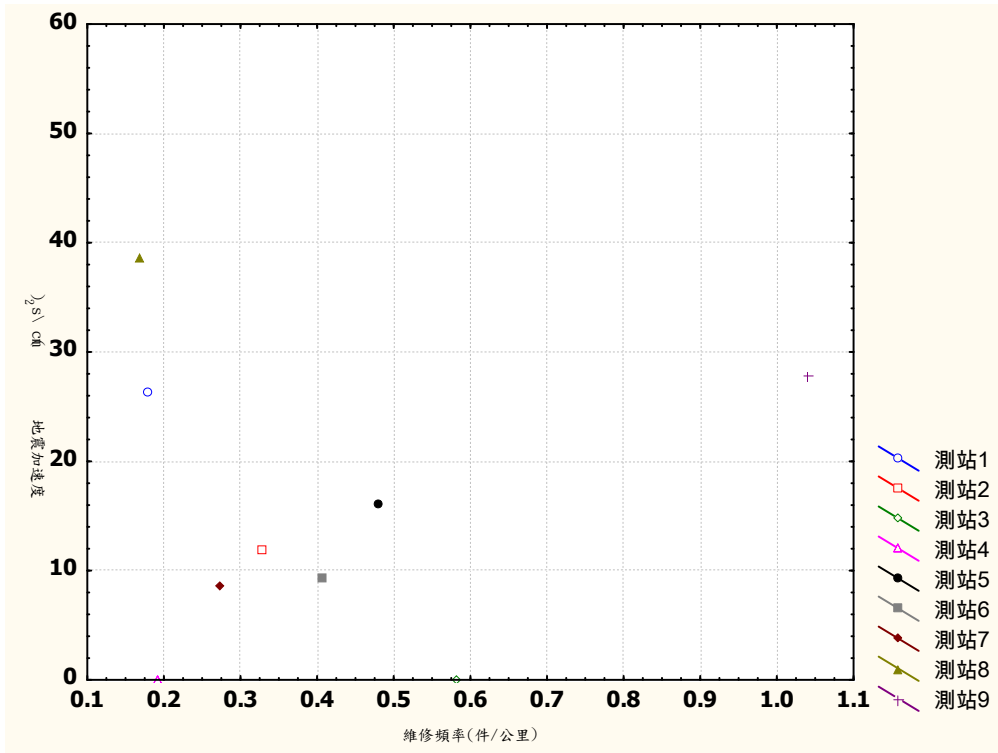


(c)



(d)

附圖 B.1.3 各年地震與維修紀錄統計分佈(續):
(c) 94 年 (d) 95 年



(e)
 附圖 B.1.3 各年地震與維修紀錄統計分佈(續):
 (e) 96 年

