

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

自來水管網可靠度提昇之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-009-015-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

計畫主持人：高正忠

計畫參與人員：李沛濠

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 23 日

## 一、中文摘要

自來水管網傳送民生用水，必須有計畫的進行維修工作，以維持供水系統的可靠度。以往在進行換管規劃或是管網可靠性分析研究時，一般是以管線為單位進行影響分析，然而當管線損壞時，必須將管線周圍的制水閥加以關閉後才能進行維修，因而實際影響範圍包含周圍制水閥關閉時所封閉起來的供水區域及受其影響的鄰近供水(Walski, 1993)。本研究因而以制水閥分區為管網損壞影響單位，發展一個管網管線換管優選模式，以期提升自來水管網可靠度。首先採用 depth-first search 進行關鍵制水閥分區的判識，同時使用 EPANET2 進行各制水閥分區的損壞影響分析。進而以更換管線所能得到之最大缺水量可靠度 (shortage reliability) 改善量為目標，發展出一個換管優選模式，並以一個案例示範模式之應用，且分析在不同成本限制下的選管決策改變情形，所得結果再與不考量制水閥分區影響下的換管優選結果進行比較。結果顯示，在不考量制水閥分區影響下，由於無法適當反應影響程度，所以導致決策不一定達到較好的缺水量可靠度改善量，且會隨成本增加，其缺水量可靠度改善量反而有減少的狀況，而本研究所發展之模式可改善此問題。

關鍵詞：自來水管網、可靠度、換管規劃、監測站、優選、環境系統分析

## Abstract

Proper pipe replacement is necessary for a water distribution network to assure its reliability of water supply. Previous studies for pipe replacement planning generally regarded each pipe as an independent unit during analysis. However, closing all peripheral valves is required prior to performing maintenance on a failed pipe, and the actual influence includes the network segment closed off and adjacent segments (Walski, 1993). This study therefore views valve-enclosed segments as units for determining the impact of damage to pipes. A computer program based on a depth-first search algorithm is developed to identify critical segments. The EPANET2 model is used to estimate the demand shortage impact caused by a failed segment. A segment-based pipe replacement optimization model is developed with the objective to maximize improvement in shortage reliability after replacement. A case study is implemented for comparing the proposed model with the conventional pipe-based model based on varying cost limitations. Results show that the proposed model is effective in making effective replacement decision for improving overall shortage reliability.

**Keywords:** water distribution network; reliability; rehabilitation; optimization; environmental systems analysis

## 二、前言與研究目的

自來水管網為了提供用戶安全、適飲及穩定的用水，必須維持管網傳送系統的可靠度，然而自來水管線會隨著管齡增加而提高其損壞發生率，進而影響到供水品質或是造成水資源上的浪費。直接或間接影響傳送飲用水的能力，因此有必要針對較不可靠的管線進行換管，以提升管網整體傳輸用水的可靠度。然而由於自來水管線常常分布極廣且複雜常造成分析上的困難，所以如何以有效的方式進行管網換管規劃分析以確保管網的可靠度是一個重要的研究課題。

以往在進行管網可靠性或換管等相關分析研究時，主要以管線為單位進行研究，進行影響分析，這樣的考量只有在管網中的每條管線的頭尾兩端都裝置有制水閥時，可以在管線發生損壞時關閉單一管線的供水，以進行維修更新的工作，才可以以考量單一管線方式進行分析。但如 Walski(1993)所討論，在實際的系統中，並不存在這樣的管網，當管線損壞時必須關閉週遭的制水閥才可以進行修復的工作，故當管線損壞時，不只影響單一管線，而是影響制水閥所能截斷的獨立供水區域(此稱為制水閥分區)及其鄰近之供水。因而若只基於單一管線進行影響分析，則可能導致低估管線損壞所造成的缺水量及影響範圍，並誤導換管規劃最終的決策結果。故在進行管網換管優選分析時，有必要考量制水閥在管網中的影響。

## 三、文獻探討

損壞分析應考量制水閥在管網中的影響的觀念早在 1987 年就已由 Walski(1987)提出，Bouchart(1991)曾應用此觀念於提昇自來水管網可靠度上的研究。制水閥所包圍的分區常是不規則形狀的管線及節點的組合，雖然制水閥分區可以人工由圖上判別，但這對於大管網甚為不便且易出錯，然而由於制水閥分區的不規則形狀，造成分區辨識自動化上的困難，在文獻中亦未曾提出制水閥分區判識之演算程序，本研究因而探討發展出一個判識制水閥分區之演算程序，以便進行制水閥分區的相關研究。

Walski(1993)曾定義若制水閥分區為通往管網其他部分的唯一路徑，則稱這樣的分區為關鍵分區，這樣的分區一旦有損壞，不但會影響本身分區的供水，也會影響與其相連下游端之供水，Walski 曾建議使用 breath-first search(BFS)進行關鍵分區的判識，然而由其演算效率較不佳，本研究因而改以 depth-first search (DFS) (Horowitz et al., 1993)撰寫程式判識關鍵分區。

過去有關換管優選決策的研究(Kim et al., 1994; Walski et al., 1982; Shamir et al., 1979)，主要著重在管線維修以及更換管線成本隨時間變化上的分析，並未考量管線損壞對管網傳送的影响程度，所以無法完全反應出管線在管網中的重要性及其更新迫切性。因此本研究利用管線對所在之制水閥分區及鄰近供水的影响下進行損壞程度分析。另一方面本研究為了了解制水閥分區損壞對鄰近供水的影响，採用目前常用的管網水力模擬模式 EPANET2 (Rossman, 2000)模擬移除分區管線後之水力傳送情形，並依據損壞前後節點壓力差，分析因分區損壞所造成的影

響。並配合各管線之失敗機率定義各管線在管網中的損壞影響權重，進而建立在某一成本限制下求最大缺水量可靠度改善量的換管規劃優選模式。

以下首先說明制水閥分區之判識演算程序及對於轉換後之分區特性管網進行關鍵分區之判識演算程序進行說明。接著說明分區損壞影響程度與失敗率的推求方式，之後提出本研究所發展之基於制水閥分區的模式以及單考量管線損壞影響之基於管線的模式，並以一個示範管網為案例，探討比較二個模式在不同最大成本限制換管決策結果之優劣點。

#### 四、研究方法

##### 制水閥分區之判識

本研究撰寫一支程式進行制水閥分區之判識，該程式主要是由任一個未尋訪之節點，找與節點相連接且尚未尋訪至某一分區的管線，將其納入目前的分區中，若這些管線的另一端是一個制水閥，則停止擴張目前分區，若不是，則繼續由另一端的節點繼續擴張目前的分區，直到無法擴張分區時，則再由一個未曾尋訪的節點重新決定下一個分區所包含的管線。直到所有分區均決定為止。

##### 關鍵分區之判識

本研究採用的演算程序(Horowitz et al., 1993)主要在找尋圖形(graph)中之連接點，而連接點為可以將圖形切割成數個子圖形(subgraphs)的接合點，與Walski(1993)針對經制水閥分區判識而得之制水閥分區網路所定義之關鍵分區是同樣的道理。所以本研究採用此演算程序進行制水閥分區網路之關鍵分區的判識工作。

此演算程序以 DFS 進行搜尋，搜尋之順序以 depth first number (DFN)表示，並與 graph 中每個 point 的 Low number 進行比較，Low number 依式(1)決定。

$$low(u) = \min \{ dfn(u), \min \{ low(w) \mid w \text{ 為 } u \text{ 的子節點} \}, \min \{ dfn(w) \mid (u,w) \text{ 為後對邊} \} \} \quad (1)$$

若節點之 DFN 小於等於其子節點之 Low number 則這個節點就是連接節點，也就是關鍵分區。

##### 制水閥分區損壞影響分析

制水閥分區損壞時有兩種影響：直接缺水量及間接缺水量，其中直接缺水量以該分區之供水量值表示，間接缺水量是採用 EPANET2 模擬推求，首先求取出正常供水狀況下之各節點水頭壓力值，接著模擬去除損壞影響分區管件，若為關鍵分區則一同去除連接截斷之管網部分，以進行損壞模擬，並利用下列 Wagnir et al. (1988) 所提出的節點供水量估算式，依據損壞前後壓力差推估所影響缺水量：

$$Q_d = \left[ 1 - \left( \frac{H - H_m}{H_s - H_m} \right)^{1/2} \right] \times C \quad (2)$$

其中  $Q_d$  為節點的推估缺水量， $H$  為移除損壞分區後以 EPANET2 所模擬的壓力，

$H_m$  為節點可以取得供水最小水頭值， $H_5$  為取水節點可以取得充足供水的水頭值，本研究以正常無任何分區損壞的情形下以 EPANET2 所模擬之水壓及  $H_m$ ， $C$  為取水節點的需水量。當  $H < H_m$  時  $Q_d$  為 0。依據此公式加總所有的節點的缺水量之後，即可以得知因為關閉分區所造成的間接缺水量值。

### 管線損壞機率之推求

本研究採用 Walski et al. (1982) 針對實際之維修紀錄所迴歸出的損壞率推估式估算管線之失敗率，由於台灣的溫度沒有太大的變化及沒有過去維修的資料，故忽略迴歸式中溫度以及過往損壞影響之校正係數，最後本研究所採用之失敗機率估算公式如下：

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

其中  $N(t)$  為現年度  $t$  之失敗機率， $c$  為反應不同管徑大小對損壞率影響的校正係數，而  $k$  為管線裝設年度， $N(t)$  則為在年度  $t$  管線預估每年每英哩可能產生的壞管次數。並且因為管線發生損壞為一隨機的分布並不限定在哪一個時間點，所以可以設定其分布為 Poisson 分布並應用其分布特性取得管線之失敗機率 (Su et al., 1987)，其轉換公式如下：

$$P_j = 1 - e^{-\beta_j} \quad (4A)$$

$$\beta_j = \gamma_j L_j \quad (4B)$$

其中， $p_j$  為管線  $j$  的損壞機率， $\gamma_j$  管線  $j$  每年可能發生的損壞次數， $L_j$  為管線  $j$  預期每年每單位長度所會發生的損壞次數， $L_j$  為管線  $j$  的長度。

而制水閥分區之損壞機率計算則如：

假設管線彼此之間的損壞關係為獨立的，因此可以下式計算分區失敗率 (Wu et al., 1993)：

$$R(t) = \sum_{j=1}^m P_j - \sum_{i < j} [P_i \cap P_j] + \dots + (-1)^{m-1} [P_1 \cap \dots \cap P_m] \quad (5)$$

其中， $R(t)$  為分區  $t$  的損壞機率， $P_j$  為包含在分區中的管線  $j$  之損壞機率。

### 基於制水閥分區之換管模式

本研究所建立的管線置換優選模式是以制水閥分區為損壞分析單位，並以其損壞所影響缺水量配合分區之整體失敗機率，用以反應各管線裝置在管網之重要性，以期選擇可顯著改善可靠度的換管方案。本研究所提出考量制水閥分區影響下的換管優選模式如下所示：

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N (F_i^{\text{old}} - f_i^{\text{new}}) SS_i \quad (6a)$$

Subject to

$$P_j = P_j^{\text{new}} z_j + P_j^{\text{old}} (1 - z_j) \quad \forall j \in \{1, \dots, M\} \quad (6b)$$

$$f_i^{new} = \sum_{j \in U_i} P_j \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (6c)$$

$$\sum_{j=1}^M C_j z_j \leq TC \quad (6d)$$

$$z_j \in [0,1] \quad \text{integer variable} \quad (6e)$$

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

目標式 (6a) 是用以求取所有分區可靠度改善量最大的換管方案, 可靠度改善量是以分區推估缺水量為權重乘以改善失敗率之總和, 限制式 (6b) 決定單一管線換管後之失敗率, 若未換, 則維持舊失敗率; 限制式 (6c) 決定換管之後分區  $i$  的整體失敗率, 如前述, 為了簡化模式, 本研究採用分區失敗率的上限值來代表制水閥分區的失敗率。限制式 (6d) 用以限制管線方案的最大總成本。

### 基於管線之換管模式

為了解所建立優選模式是否能夠得到較適當的換管決策, 本研究亦分析只考量單一管線失敗率下的換管規劃優選模式, 以了解二者間的差異。基於管線之模式如下列:

$$\text{Max} \sum_{j=1}^M (P_j^{old} - p_j) SP_j \quad (7a)$$

Subject to

$$p_j = P_j^{new} z_j + P_j^{old} (1 - z_j) \quad \forall j \in \{1, \dots, M\} \quad (7b)$$

$$\sum_{j=1}^M C_j z_j \leq TC \quad (7c)$$

$$z_j \in [0,1] \quad \text{integer variable} \quad (7d)$$

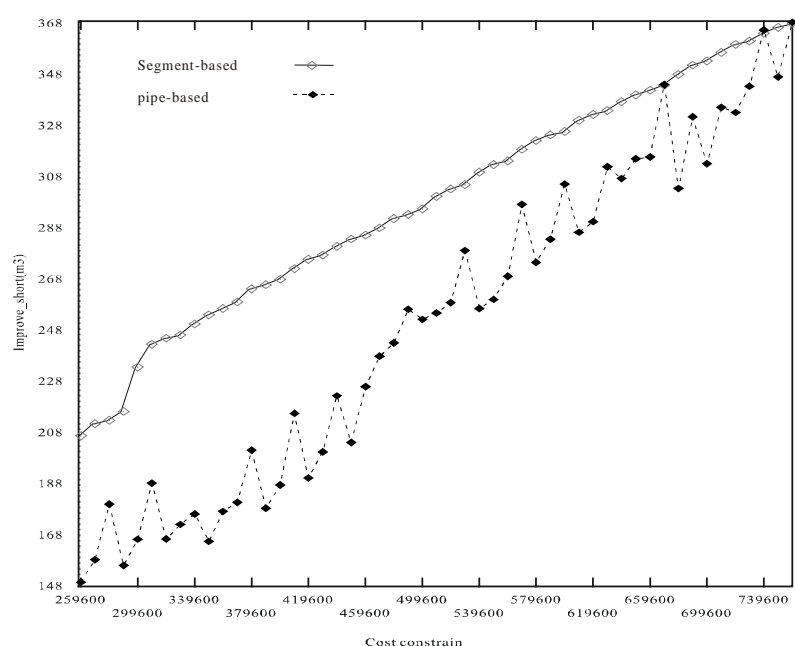
其中  $SP_j$  為管線  $j$  損壞所可能造成的缺水量, 其損壞缺水量為以 EPANET2 直接模擬推求而得;  $P_j^{old}$  為管線  $j$  未換管前的壞管機率,  $P_j^{new}$  為管線  $j$  經換管後的壞管機率,  $Z_j$  為  $[0,1]$  整數變數, 如果其值為 1 表示管線  $j$  需要替換, 若為 0 則表示未被選為需換掉的管線;  $P_j$  則為經決策後管線  $j$  的壞管機率;  $C_j$  為更換管線  $j$  的成本, 而  $TC$  為換管成本總花費上限值。

目標式 (7a) 乃是以管線經過換管決策分析換管之後所能得到的可靠度改善量為優選目標, 可靠度改善量為管線推估缺水量為權重乘以改善失敗率之總

合，限制式 (7b) 決定單一管線換管後之失敗率，限制式 (7c) 用以限制換管方案的最大總成本。此模式所得結果，將換算成基於制水閥分區的結果，以了解以基於管線模式所得換管方案與基於制水閥分區結果之差異。

### 案例探討

本研究以一個虛擬自來水管網系統示範應用所建立的模式，總長約為 20 公里，總共有 142 條自來水管線，218 管網節點，其中 84 個節點為取水節點，46 個節點設有制水閥，整個示範管網系統的總需水量為 82,337 CMD。以 EPANET2 模擬此管網並調校各取水節點之水壓分布在合適範圍之內。利用上述之各個模擬步驟進行模擬分析，並以不同成本限制進行分析。根據兩模式所得之換管規劃缺水兩改善值，在不同成本限制下缺水量改善度的變化曲線如圖一所示。



圖一 基於管線與制水閥分區之換管規劃缺水量可靠度改善量變化值

## 五、結果與討論

比較圖一中基於制水閥分區模式與基於管線模式的結果，可以發現在多數的情形之下，基於制水閥分區模式較基於管線模式平均可增加 47CMD-% 的缺水量可靠度改善量，這主要因為基於管線模式僅考量管線本身所造成的損壞影響，而忽略了其對於分區整體會造成損壞的影響關係，然而管網損壞應該是以制水閥分區為考量單位，當分區當中有任一管線發生損壞時，即會對分區所包含的所有的供水發生影響，所以管網可靠度的改善應該也要以制水閥分區為考量單位，針對損壞影響程度較大的分區其中較不可靠的管線應該首先考慮加以選取更新，如此對於管網的供水可靠度的改善才能有較大的貢獻。

這是因為在基於管線模式的優選策略下，其較大的影響因子為管線的獨立損壞影響量，因而以改善單一管線的可靠度改善量為主，但如此可能造成重複在相

鄰管線上重複改善，而對總體可靠度改善量並未顯著改善，或只改善一個管線，整個分區仍受同一區其他管線所影響，導致實際改善量並不高。而基於制水閥分區之模式則因為將分區當作損壞影響單位，而以提升制水閥分區整體可靠度改善量為主，換管時除了能以改善管線可靠度改善量為考量因子，更能選擇能顯著成本效益較高的方案，尤其是在成本不足以作全面換管時(通常成本應不足以全面換管)能選擇具最佳可靠度改善量效益的換管方案。

在圖一中也可以發現基於管線之模式的優選結果，並不必然會隨著總成本增加而可達到更多的可靠度改善量。此乃由於基於管線模式在成本增加時，雖然會選擇管線可靠度改善量較高的管線，但由於仍落在整體失敗率較差的分區中，故實際改善效率並不顯著，而基於制水閥分區模式，則可選擇各個失敗率較高分區中具較大可靠度改善量的管線方案，因此可持續提升管網整體可靠度改善量。此外，當成本足夠換掉所有不好的管線時，兩個模式的缺水量可靠度改善量將相近而差異不大，此乃必然的結果，不過，現實問題中，通常成本只能做有限的換管。

過往在管網分析上的研究，主要以管線為單位進行研究，然而在實際的管網之中，當管線發生損壞時，必須先將管線周圍之制水閥關閉之後，才可以進行維修工作(Walski, 1993)，因此當管線損壞時，其所影響的範圍應該包含週邊制水閥所包圍起來的所有管線節點，若是只單以管線當作管線損壞影響單位則會發生錯估其影響程度的情況，進而影響後續之規劃及決策。故本研究以制水閥分區為損壞分析單位，應用制水閥分區之損壞影響缺水量配合分區之管線組合失敗率為換管規劃優選模式之評選指標，進行換管優選決策，並與不考量制水閥分區影響下之規劃優選決策進行比較。結果發現在不考量制水閥分區影響下的基於管線之模式，可能並未選擇改善量最大的管線，甚至可能發生成本增加時可靠度改善量反而減少的情形。而基於分區換管模式較能選取成本效益高的換管方案，亦較符合實際應用時之需求。

## 六、成果自評

本計畫成果符合原進度規劃。本研究所發展之基於制水閥分區換管模式，可應用於自來水事業單位改善供水設施的規劃設計上，輔助決策者以較經濟的換管方案有效提升管網之可靠度，亦已以一個示範案例證明所發展模式之適用性。目前(第二年計畫正進行中)亦正積極應用該模式於實際案例中，預計近期內取得結果後即會將該模式及結果投稿至國際知名期刊。此外，本研究亦完成一個程式用以辨識制水閥分區及關鍵分區。目前亦正探討將其應用於分區及監測站網選址研究上之可行性，預計近期內會有具體成果。本研究亦正發展一個決策支援系統中，預期將結合一些常用模式工具(如 EPANET2 等)，及本研究所發展的模式工具，除了用以改善決策分析效率，亦期望能有效提昇自來水管網可靠度及相關決策品質。



## 七、參考文獻

- Kim, J.H. et al., 1994. Optimal Rehabilitation Model for Water-Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120:5:674.
- Fujiwara, O. et al., 1998. Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand. *Water Resources Research*, 34:7:1834.
- Walski, T.M., 1982. Economic analysis of water main breaks. *Journal of American Water Works Association*, March.
- Walski, T.M., 1993. Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 42:21.
- Walski, T.M., 1987. Discussion of “Quantitative approaches of reliability assessment in pipe networks” by Goulter and Coals. *Journal of Transportation Engineering*, 113:5:585.
- Bouchart, F. et al., 1991. Reliability Improvements in Design of Water Distribution Networks Recognizing Valve Location. *Water Resources Research*, 27:12:3029.
- Horowitz, E. et al., 1993. *Fundamentals of Data Structures in C*. Computer Science Press, New York, N.Y.
- Shamir, U. et al., 1979. An Analysis Approach to Scheduling Pipe Replacement. *Journal AWWA*, 71:5:248.
- Rossman, L.A., 2000. *EPANET2 users manual*, Risk Reduction Engineering laboratory., U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Kleiner, Y., 1998. Selection and Scheduling of Rehabilitation Alternatives for Water Distribution Systems. *Water Resources Research*, 34:8:2053.
- Alonso, J.M., 2000. Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126:4:251.
- Wagner, J.M., 1988. Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114:3:276.
- Su, Y.C., 1987. Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114:12:1539.
- Wu, S.J., 1993. Capacity-Weighted Water Distribution System Reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 42:39.
- Ross, S.M., 1985. *Introduction to Probability Models*. Academic Press Inc., Orlando, Fl.