

管網模式應用於預估自來水配水系統餘氯濃度之研究

李連堯¹、張鴻耀²、盧重興³

摘 要

許多實場觀察及實驗室的研究證實，自來水水質於配水系統中會產生二次污染。許多學者以理論來分析配水系統內的傳輸問題，因而發展出各種水質模式。這些模式在國外已成功地應用於許多配水系統水質管理上，然在國內相關研究仍然非常缺乏，有待各方面努力。

基於上述理由，本研究建立一結合水力及水質管網模並將其應用於模擬中部某都市自來水配水系統消毒劑的濃度。研究結果發現本研究所建立的模式可以有效地預估管線中自由餘氯與結合餘氯隨時間與空間的消耗情形。另外，並發現處理廠清水中的自由餘氯濃度變化是影響配水系統自由餘氯變化的主要原因，結合餘氯在配水系統中的變化則和處理廠清水中的氯氮濃度有密切關係。

關鍵字：配水系統、自由餘氯、結合餘氯、水力及水質模擬

前 言

配水系統的主要功能在將淨水廠處理完的自來水，安全地由淨水廠輸送至消費者，並維持供水區域內足夠的水量與水壓。而在配水過程中為了防止水質受到外來因素影響，一般均在自來水中加入消毒劑防止細菌生長，但在一些管末地區，仍可發現細菌再生長(regrowth)現象，如自來水變得混濁、有色、有異味等，造成民眾對飲用水安全的疑慮。

雖然已有許多實場觀察及實驗室的研究證實，自來水水質於配水系統中會產生二次污染。為了能更了解其原因，一些國外學者(Biswas *et. al.*, 1993; Rossman, 1993; Sharp *et. al.*, 1979)以理論來分析配水系統內的傳輸問題，因而發展出各種水力與水質模式，並成功地應用於配水系統水質的管理。在國內相關研究非常缺乏，因此建立國內自來水配水系統完整的水力、水質資料及預估模式以供管理水質之用，實為值得努力的目標。

¹ 國立中興大學環境工程系博士班

² 國立中興大學環境工程系碩士

³ 國立中興大學環境工程系教授

理論與模式推導

A. 基本假設

在建立模式方程式之前，依照基本考量及模式在實際應用的可行性做下列假設：

1. 假設所有管線的 Hazen-Williams 粗糙係數均為一定值。
2. 不考慮管線入流及出流之間的高度差。
3. 不考慮自由餘氯與結合餘氯之間的反應。
4. 總餘氯為自由餘氯加上結合餘氯。
5. 假設整個管線中水溫及 pH 值保持一定值。
6. 假設整個管線中餘氯在自來水中與管壁的消耗速率常數均相同，不隨距離變化。
7. 忽略軸向延散與徑向延散。
8. 各種反應是在柱塞流的情況下進行，即平均流速僅與流量與管線截面積有關。
9. 在配水管網的結點，各物質濃度均能立即且完全混合。

B. 模式建立

B-1 水質模式

令 $C_1 = [\text{Free Chlorine}]$ 、 $C_2 = [\text{Combined Chlorine}]$ ，則在配水管線中各物質在平均流速 U_{av} 下的統御方程式可以表示如下。

自由餘氯($\text{HOCl} + \text{OCl}^-$):

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -U_{av} \frac{\partial C_1}{\partial x} - \left(k_{bf} - \frac{k_{mf}k_{wf}}{R_h(k_{mf} + k_{wf})} \right) C_1 \quad (1)$$

其中

- x : 軸向距離
- U_{av} : 平均流速
- k_{bf} : 自由餘氯在流動的水中(bulk)的消耗速率常數
- R_h : 水力半徑
- k_{mf} : 自由餘氯在水中的質傳係數
- k_{wf} : 自由餘氯在管壁上的消耗常數

方程式左邊第一項為自由餘氯的累積項(accumulation term)，表示餘氯濃度隨時間變

化率；右邊第一項為對流項(convection term)，表示餘氯濃度因對流而造成的濃度變化率；右邊第二項為餘氯在水中(bulk)及管壁處的消耗速率。

結合餘氯：

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -U_{av} \frac{\partial C_2}{\partial X} - \left(k_{bc} - \frac{k_{mc} k_{wc}}{R_n (k_{mc} + k_{wc})} \right) C_2 \quad (2)$$

其中

- k_{bc} : 結合餘氯在流動的水中(bulk)的消耗速率常數
- k_{wc} : 結合餘氯在管壁上的消耗常數
- k_{mc} : 結合餘氯在水中的質傳係數

B-2 水力模式

在自來水配水系統中，由於各管線的管徑、管長、管網型式以及用水量變化等因素，均會影響到各管線中流量的變化，因此必須建立一配水管網水力模式來求得各管線的水力狀況，並提供水質模式的計算資料，如流速等。

在配水管網的分析方法中，以 Hardy Cross 法(1963)最常見且簡單。此方法先假設管網內各管線流量，再利用 Manning、Chezy 或 Hazen-Williams 公式計算損失水頭，最後改正假定流量至水頭或水量達平衡為止(高肇藩,1990)。

B-3 數值方法

單管水質模式求解的方法是利用外顯式有限差分法(explicit finite difference)，先針對單管軸向分割成 n 等分，下一個時間間隔餘氯濃度則由上一個時間間隔的物質濃度與初始條件聯立求解，並重覆這些步驟直到預定模擬時間為止。

B-4 穩定性考慮

在以數值方法求解微分方程式時，必須符合下式才能收斂且穩定

$$\frac{U\Delta t}{\Delta x} = R \quad R \leq 0.5 \quad (3)$$

為了求得較佳的 R 值，研究中以三種 R 值(0.5、0.4、0.3)進行單管水質模擬，從模擬結果發現三者的結果完全一致，因此採用 $R=0.5$ 為模擬值。而 Δt 值則是藉由觀察結果是否收斂且穩定來獲得，本研究中取 0.005 小時。在 R 值及 Δt 值固定後，則可求取適當的切割數及利用上式求得 Δx 。

B-5 參數求取

至於，其它的模式中所使用到的參數(k_{bf} 、 k_{wf} 、 k_{bc} 、 k_{wc} 、 k_{mf} 、 k_{mc})方面，其中 k_{bf} 、 k_{bc} 值的求取上是利用批次試驗求得本研究區域水質的最佳速率常數(Rossman et al.,1994)，而 k_{wf} 值取 Rossman et al. (1994)的模擬建議值、 k_{wc} 值取 Maier et al.(2000)的

最佳代結果值。最後， k_{mf} 值可由下式計算求得：

$$k_{mf} = Sh \frac{D_e}{d} \quad (4)$$

其中

Sh : sherwood number

D_e : 氟在水中的分子擴散係數

而 Sh 值可由下式計算求得：

$$Sh = 0.023Re^{0.83} \times Sc^{0.333} \quad Re > 2300 \quad (5)$$

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)(Re \times Sc)}{1 + 0.04 \left(\frac{d}{L} \times Re \times Sc \right)^{2.3}} \quad Re < 2300 \quad (6)$$

其中

Sc : Schmidt number

Re : 雷諾數

而 Sc 及 Re 值可由下式計算求得：

$$Re = \frac{U_{av} d}{\nu} \quad (7)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_e} \quad (8)$$

其中

ν : 水的動黏滯係數

實場水質分析

A. 研究背景

實場研究的對象為台灣中部某一都市，此區域的自來水是由位於東北方的一自來水淨水廠。這處理廠供水範圍涵蓋了台灣中部大部份的地區，以提供足夠的民生用水、公共用水、工業用水、特定區之公共給水、船舶用水等。總供水人口約 140 萬人，總供水量約每天 58 萬 CMD，水源取自淨水廠上方水壩的蓄水。而研究區域範圍約 27km²，供水人口約 2 萬戶，每日的總用水量約為 12 萬 CMD 至 15 萬 CMD。

圖 1 為本研究範圍的示意圖，圖中實線為管線，上方的編號為管線編號；圓點為取樣點，圓內號碼即為取樣點編號，黑色圓點表示此點有實驗及模擬的結果，白色的圓點則只

有模擬的結果，其中第 17 號的取樣點為自來水處理廠；至於圖中的羅馬數字，則是水力分析所須的管網迴圈編號。其中為了研究的方便，在管線的選擇上我們以管徑 300mm 以上為主，因此共篩選了 32 根管線(見表 3)及 21 個管線連接結點(見表 1)。

B. 取樣方法

在實驗設計方面，為了能和模式配合，在實場水質實驗的取樣點方面，將由上面所提到的 21 的結點中取較有代表性的結點進行取樣分析。本研究共設計了 13 個取樣點。取樣方式為利用開啓規劃點附近的救火栓來取樣，每次取樣均先放流約 2 至 5 分鐘，以確保取樣到的水為管線中流動的水。而所有的分析項目都是現場立即分析，分析方法請參考表 2。研究時期為 2000 年 7 月 5 日至 2000 年 9 月 15 日，共計 30 天的結果。每天的採樣均為上午 6 時至隔天上午 6 時，平均每點的採樣時間間格約為 4 小時。

C. 用水量推估

因實場並無法獲得真實的所有管線流量，故各結點用水量則是由推估的方式求得，推估的方法如下：

1. 將結點依附近的人為活動加以分類，在這我們分成三類：混合區、商業及住宅區、商業區，以決定每日的總用水量及每日用水量的變化。
2. 原則上就每天的總用水量來說，依商業區用水(約 10000CMD)>混合區用水(約 7000CMD)>商業及住宅區(約 5000CMD)用水的規則給予每個結點的"第一次推估用水量"。
3. 由管線所形成的小區域內的總人數(概略值)乘上每人每天 0.5m^3 的用水量，計算求得各小區域內的總用水量之後，再將結果均分在小區域內的各結點，即可得利用人口數觀點所獲得的各結點"第二次推估用水量"。
4. 比較第一次及第二次的推估用水量，取較合理者。
5. 各結點每小時的用水量推估，則是利用第一步分類時，依不同的類別而給予各小時的不同變化比例(其比例如表 3 所示)。乘上總用水量即可得結點每小時的用水量。

結果與討論

A. 模式驗證

在模式的驗證方面，以美國環保署所發展的 EPANET(Rossman,1993)第一個範例的水力及水質結果進行驗證。在此管網系統中包含了 10 根管線、8 個結點、1 個配水池及 1 個加壓馬達。其用水量會隨著時段不同而變化，第一種為由自來水廠供應，時段為 0~12 小時及 23~24 小時；第二種為當蓄水池水位高於一設定水位高時，加壓馬達則停止進流，改由蓄水池供應水源，此時段為 13~22 小時。而驗證的工作共分成流向的驗證、水質變化的比較及流量計算驗證三個方向。

首先是管網流況結果的比較，圖 2 中管線上的箭頭為模擬時間 0~12 點及 23~24 點的流向。此結果與 EPANET 水力結果完全一致。

其次比較在同一時段的不同管線流量情形。表 4 是在第三號管線中流量隨時間變化結果比較情形。各時段最大流量誤差為 13 小時到 22 小時之間，相差 6.42×10^{-5} gpm。從結果看來，不論在各管流量或流量隨間的變化上，均有非常好的一致性。

接下來是本模式模擬的水質變化與 EPANET(Rossman,1993)的水質變化結果進行比較，圖 3 為圖 2 中第 5 及第 6 號結點自由餘氯隨時間變化的結果，其中實線部份為本模式模擬的結果，三角點及方塊點則分別為 EPANET 模擬第 5 及第 6 個結點的結果，由圖中可知本模式模擬結果與 EPANET 所模擬的結果有相同的結果。

由以上的驗證可以證明，本研究所建立的配水管網模式的準確性。

B. 實場餘氯濃度變化

由實場水質研究的結果發現，本區的每天餘氯濃度變化可分成三個時段。第一個時段為每天 8~14 點及 18~20 點，屬於高餘氯濃度時段；第二個時段為每天 14~16 點及 0~4 點，為中餘氯濃度時段；第三個時段為每天 4~8 點、16~18 點及 20~22 點，屬於低餘氯濃度時段。因此在接著在模擬及探討各取樣點自由餘氯及結合餘氯濃度分佈變化時，將分成這三時段討論，以找出管網餘氯變化的原因。

模擬環境各結點、管線及管路迴圈的分佈情況可參考圖 1。模擬所須的管線資料(包括管線編號、管線前後結點、管線的材質、管長與管徑)可由表 1 獲得。而結點相關資料(如結點編號、該結點的用水量、高程與性質分類)則由表 5 獲得。表 6 是模式進行時所需要的各項參數定義、數值及單位。表 7、表 8 及表 9 則為各時段的水質平均值。

B-1. 各結點自由餘氯的預估結果

為了提高自由餘氯的預測結果，本研究中自由餘氯的流動水中的消耗速率常數(k_b)是取水廠清水利用杯瓶實驗求得。圖 4 是假設自由餘氯的消耗是一階反應時所求得的消耗速率常數示意圖，其值為 $0.168h^{-1}$ 。

圖 5 為自由餘氯在第一時段的分佈情形，圖中各結點旁附註的數字，M 代表模式模擬的結果，E 則代表實驗所得的平均濃度值。此時段屬於每天餘氯濃度較高的時段，由實驗及模擬結果可看出此時的自由餘氯濃度的分佈上很均勻，其中值約在 1.2mg/L 左右。圖 6 為自由餘氯在第二時段的分佈情形，此時段的自由餘氯濃度接近每天的平均結果，在這個時段的總用水量約只有第一時段的 70%，因此其自由餘氯整體看來會比第一時段低。圖 7 為自由餘氯在第三時段的分佈情形，這個時段的總用水量約為第一時段中的 65%。但有趣的是此時段的市中心自由餘氯雖如预期的濃度降的更低，但卻發現外環區域的餘氯濃度整體看來較市中心高。推估其原因可能是，外環的區域的各結點下所連接配水管線為管徑較大的管線流量較大、流速較快，而市中心的配水管線則是由外環的管線連接至市中心的，其留經路線與停留於管線中的時間皆較長所造成。

比較各結節的模式模擬值與實驗平均結果，可知在第一時段得到兩者的誤差總平均值為 1.30%，在第二時段則為 1.75%，在第三時段則為 2.31%，均為可接受的範圍內。

接著討論不同性質的結點其自由餘氯一天的變化情形。在這我們取第 12 號、第 13 號及第 14 號取樣點分別代表商業區、混合區及商業及住宅區的變化。圖 9、圖 10 及圖 11 即為這些結點模擬及實驗的結果，圖中虛線部分是將進流自由餘氯濃度設為定值（不考慮水廠餘氯變化）所模擬的結果，實線則是考慮到水廠清水中自由餘氯濃度一天的變化（參考圖 8）而模擬出的結果，方塊點則代表實驗值，而各方塊 Y 軸方向的直線為誤差線。

在實驗結果方面，發現第 12 號結點（代表商業區，圖 9）在上午餘氯濃度值上昇之後，便持續降低；第 13 號結點（代表混合區，圖 10）一天的自由餘氯變化較為穩定；第 14 號結點（代表商業及住宅區，圖 11）一天的自由餘氯變化會出現兩個餘氯濃度的高峰。而在模擬的結果方面，可發現當假設進流自由餘氯濃度為定值時，各結點所模擬出的一天濃度變化幾乎成一直線，並沒有太大的變化，但是若將清水自由餘氯濃度一天的變化考慮進去時，模擬結果則與實驗結果更為吻合，由此可知水廠的清水自由餘氯濃度變化與下游管線中餘氯的分佈情形有密切關係。

B-2. 各結點結合餘氯的預估結果

在結合餘氯方面，有關結合餘氯在流動水中的消耗速率常數(k_b)也一樣是取水廠清水利用杯瓶實驗求得。圖 12 是假設結合餘氯的消耗是一階反應時所求得的消耗速率常數示意圖，其值為 $0.034h^{-1}$ ，比自由餘氯小。

在結點濃度分佈方面，同樣的也利用一天的自由餘氯濃度變化的結果分成三個時段，以方便和自由餘氯的結果比較及討論。圖 13、14、15 分別為第一、二、三時段結合餘氯的分佈情形，與自由餘氯不同的是在這三個時段的結合餘氯變化就沒有像自由餘氯這樣有太明顯的差別或趨勢。這是因為結合餘氯的反應速率較小所致。

比較各結節的模式模擬值與實驗平均結果，可知在第一時段得到兩者的誤差總平均值為 4.08%，在第二時段則為 3.60%，在第三時段則為 4.65%，其值雖為可接受的範圍內但均比自由餘氯的模擬結果高。

同樣的，接著討論不同性質的結點其結合餘氯一天的變化情形。圖 16 及圖 17 為處理廠清水中結合餘氯及氮氮濃度一天的變化，而圖 18、19、20 則分別為代表商業區的第 12 號取樣點、代表混合區的第 13 號取樣點及代表商業及住宅區的第 14 號取樣點結合餘氯一天的變化情形。

由實驗結果來看，各結點每天都有兩個濃度高峰時段，不同的是商業及住宅區（圖 20）的高峰時段濃度較高，商業區（圖 18）的高峰時段濃度次低，混合區（圖 19）的高峰時段濃度最低。而在模式預估方面，出現了和自由餘氯同樣的現象，就是當考慮到清水結合餘氯濃度一天的變化（圖 16）考慮進去時，模擬結果則與實驗結果更為吻合。但不同的是，我們發現清水的結合餘氯一天的變化趨勢和清水中氮氮濃度一天的變化趨勢一樣，這現象表示真正影響到水中結合餘氯的濃度變化和水廠清水水中的氮氮濃度有密切關係。

結論與建議

1. 本研究建立了可有效預估配水管網中自由餘氯及結合餘氯濃度變化的模式。
2. 各結點之間自由餘氯濃度不同是因為用水量不同所致。

3. 各結點之間的結合餘氯的濃度差會比自由餘氯的濃度差較小。
4. 水廠清水中自由餘氯濃度的變化與下游管線中餘氯的分佈情形有密切關係。
5. 影響到水中結合餘氯的濃度變化和水廠清水中的氮氮濃度有密切關係。
6. 建立更多配水系統水力與水質資料有助於提昇模式的準確性。
7. 未來可以增加預估水質項目，如微生物、有機物與消毒副產物等。

參考文獻

1. Biswas, P. ; Lu, C.S. ; Clark, R.M., "A model for chlorine concentration decay in drinking water distribution pipes" , Wat. Res. 27 , pp.1717-1724 , (1993).
2. Clark, R.M. ; Grayman, W.M. ; Goodrich, J.A. ; Deininger, R.A. ; Hess, A.F. ; "Field-testing distribution water quality models" , , Journal AWWA. , July , pp.67-75 , (1991).
3. Clark, R.M., ASCE, "Chlorine demand and TTHM formation kinetics: A second-order model", Journal of Environmental Engineering, January, pp.16-24 , (1998).
4. Cussler, E. L., DIFFUSION mass transfer in fluid systems, 1st Ed., New York, pp.116 (1984).
5. Maier S. H., Powell R.S. and Woodward C. A., "Calibration and Comparison of Chlorine Decay Models for a Test Water Distribution System", Wat. Res. Vol.34, No.8, pp.2301-2309, (2000)
6. Rossman, L.A. EPANET User's Manual, EPA-600/R-94/057. Risk Reduction Engineering Laboratory, USEPA, Cincinnati, Ohio , Version 1.0, (1993).
7. Rossman, L.A. ; Clark, R.M. ; Grayman, W.M., "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems" , Journal of Environmental Engineering , Vol. 120, No. 4, July/August , pp.16-24 , (1994).
8. Sharp, W.W. ; Pfeiffer, J. ; Morgan, M. ; "Water quality modeling in distribution systems" , AWWA. Research Foundation, 3-5 Feb., Cincinnati, OH. , (1991).
9. Vasconcelos, J.J. ; Rossman, L.A. ; Grayman, W.M. ; Boulos, P.F. ; Clark, R. M. ; "Kinetics of chlorine decay", Journal AWWA. , V. 89, pp.54-65 , (1997).
10. 高肇藩, 給水工程, 國立成功大學環境工程學系, 台南(1990)。

致 謝

1. 本研究承蒙國科會經費補助(NSC89-2211-E-005-004)，特此誌謝。
2. 研究中，承蒙自來水公司台中縣豐原淨水廠的李春銓廠長、張進興先生、曾木坤先生及淨水廠各先進的大力幫助，而能順利推動，特此誌謝。

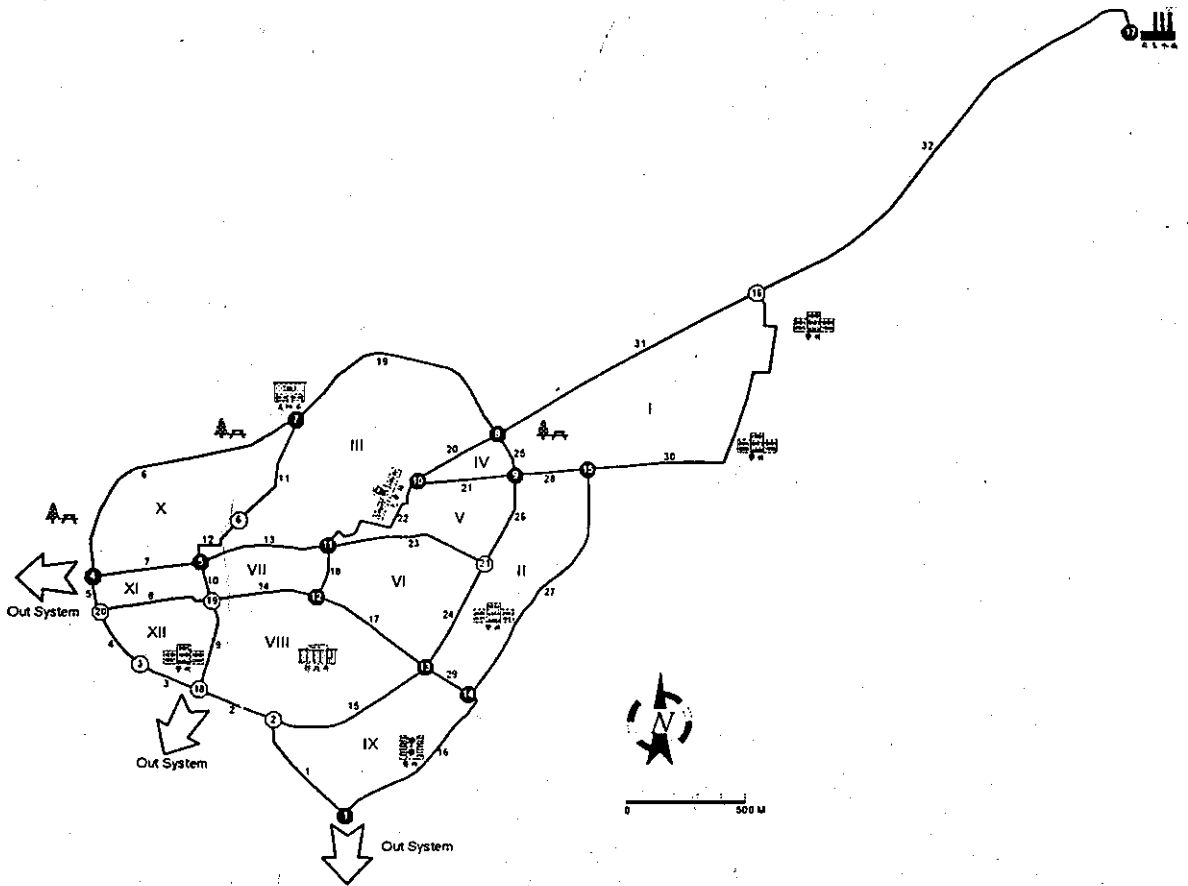


圖 1 本模式模擬結點及管線圖分佈示意圖(圓圈為取樣點，直線為管線)

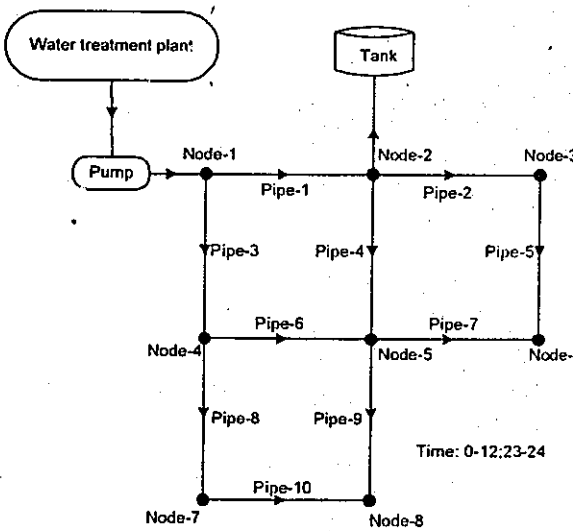


圖 2 EPANET 管網配置圖及流向驗證

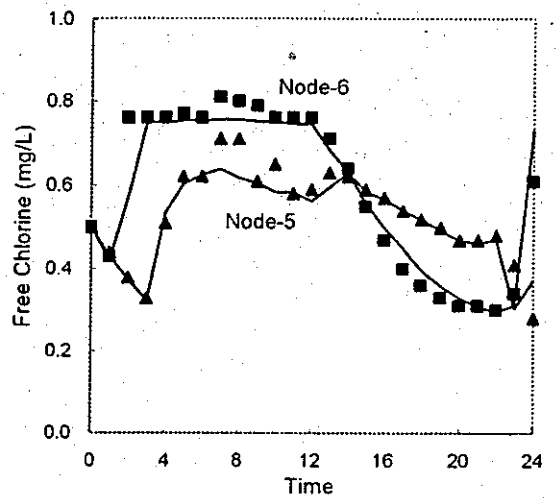


圖 3 本模式與 EPANET 水質變化的比較

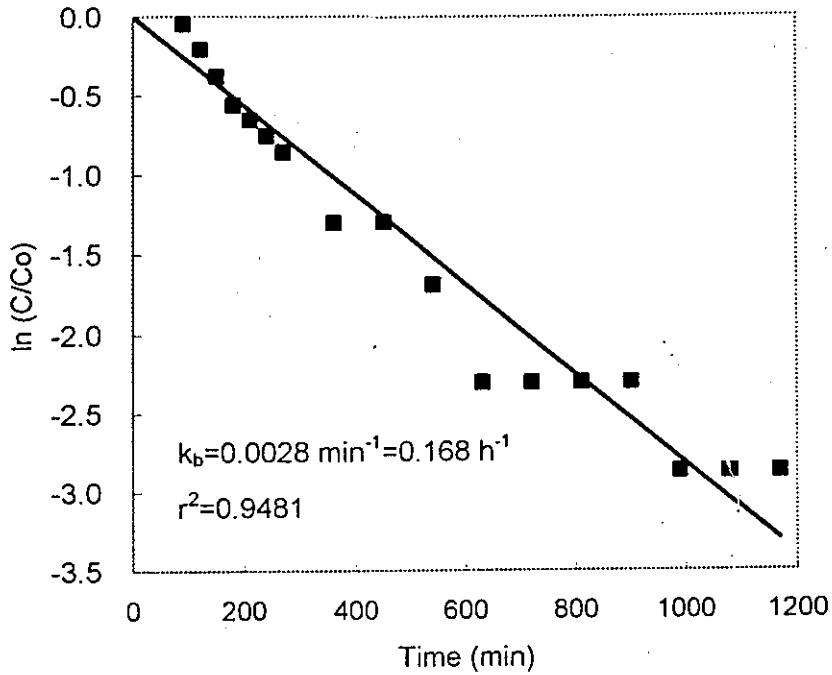


圖 4 自由餘氯在杯瓶實驗中的消耗情形

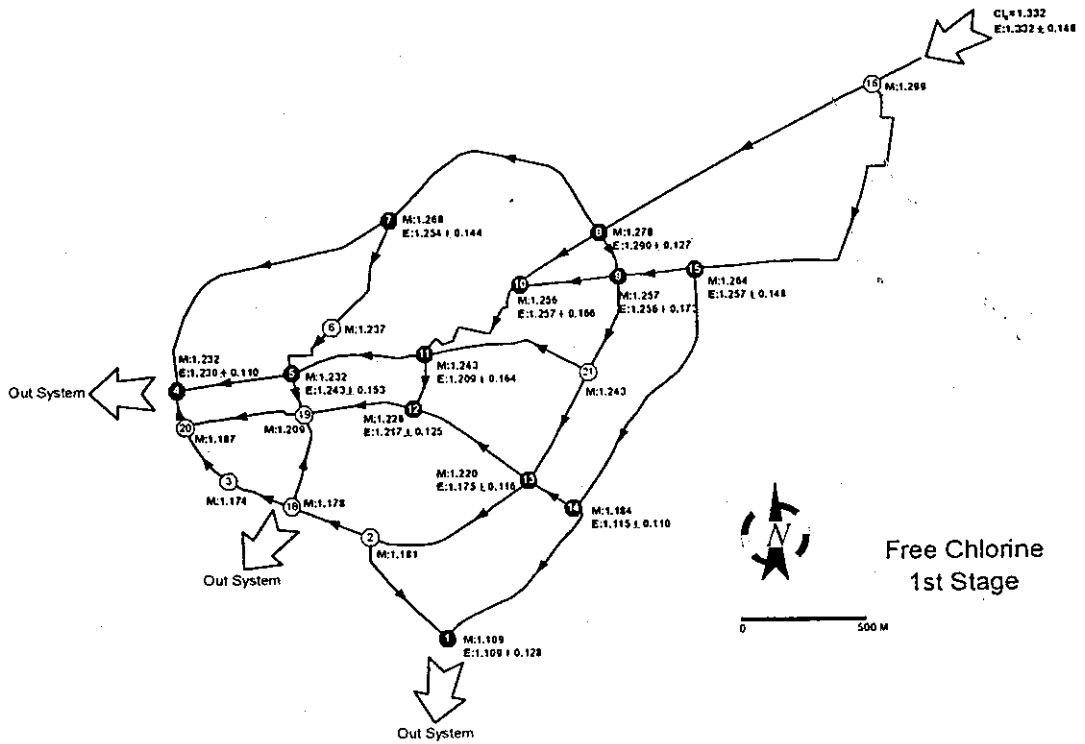


圖 5 自由餘氯在第一時段的分佈情形
(M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

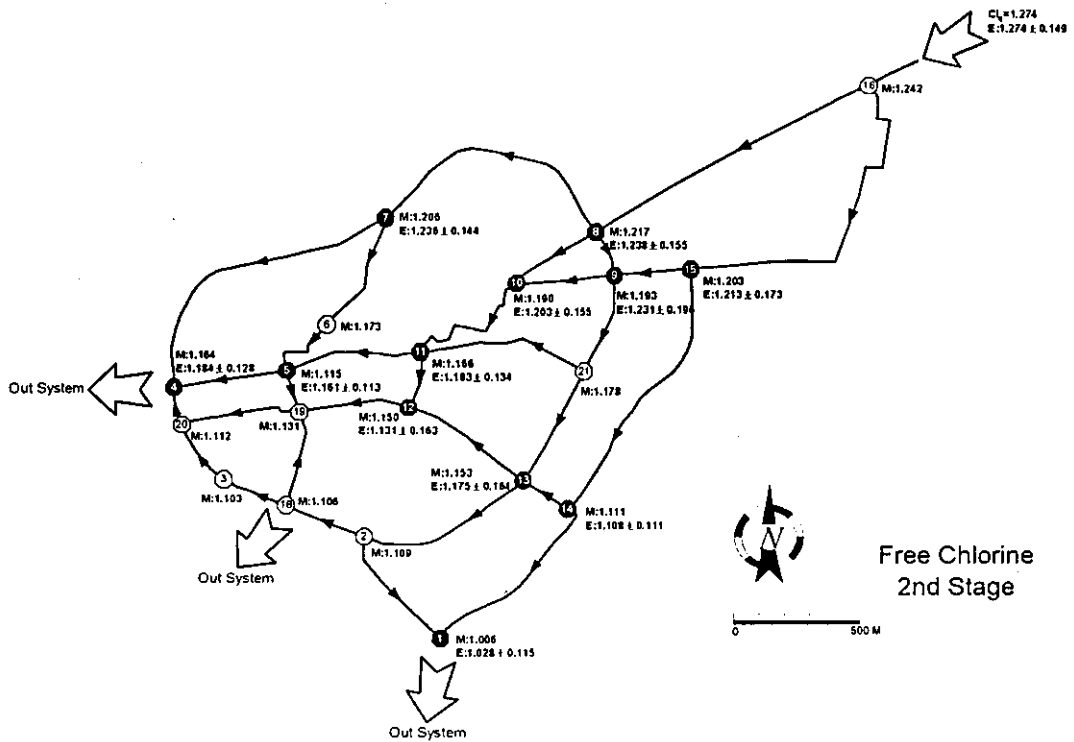


圖 6 自由餘氯在第二時段的分佈情形
(M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

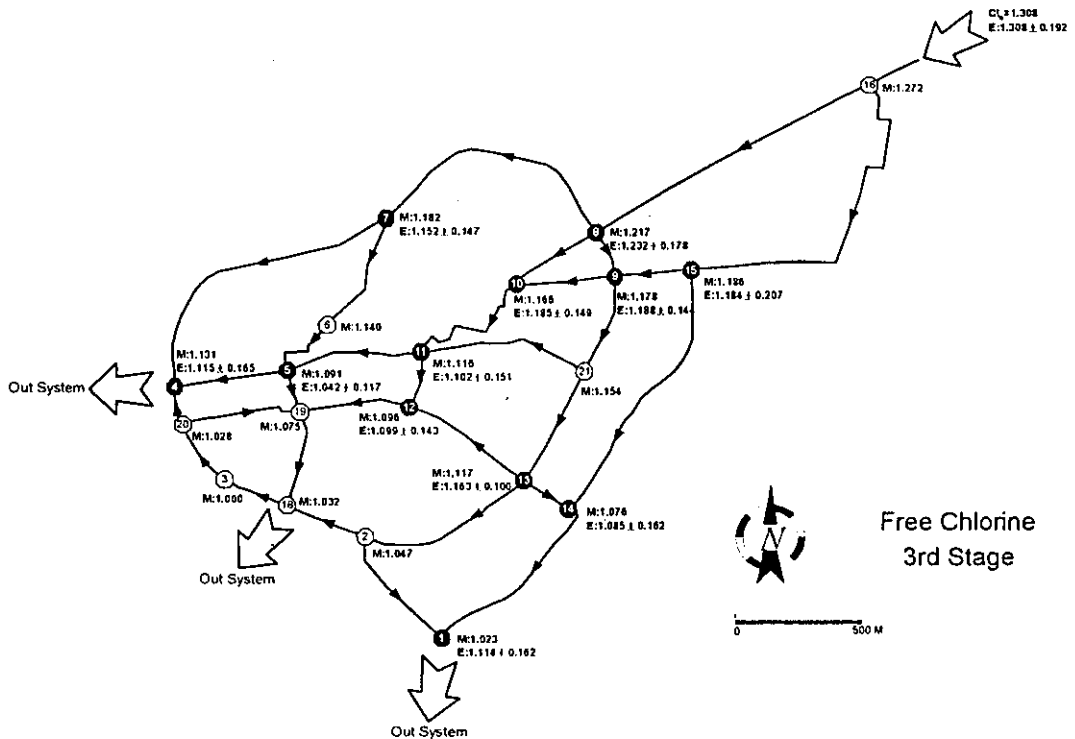


圖 7 自由餘氯在第三時段的分佈情形
(M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

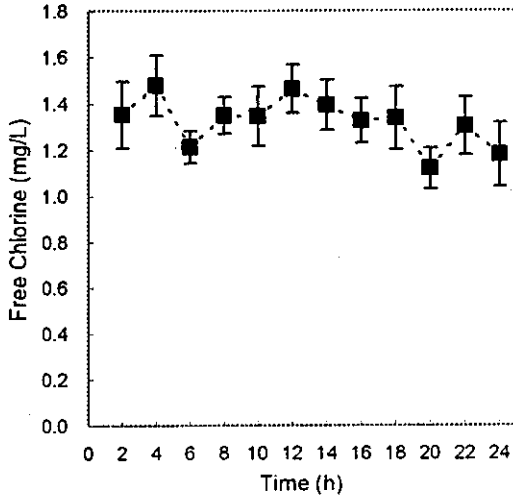


圖 8 處理廠清水中自由餘氯的一天變化

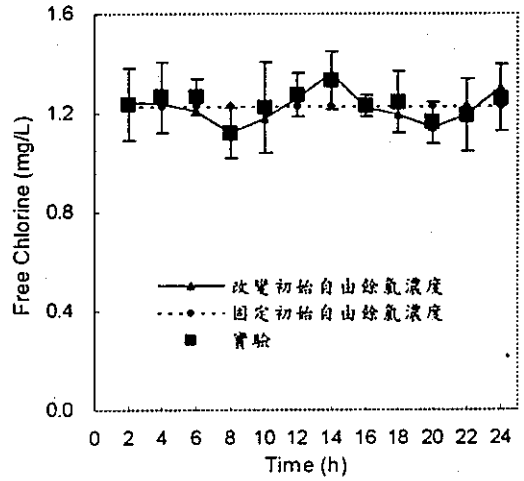


圖 10 第 13 號結點自由餘氯一天的變化

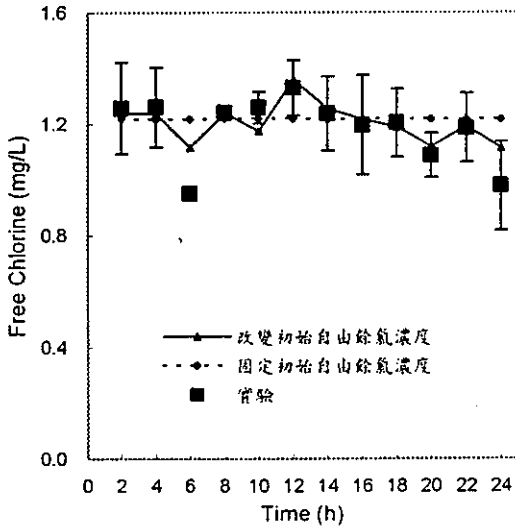


圖 9 第 12 號結點自由餘氯一天的變化

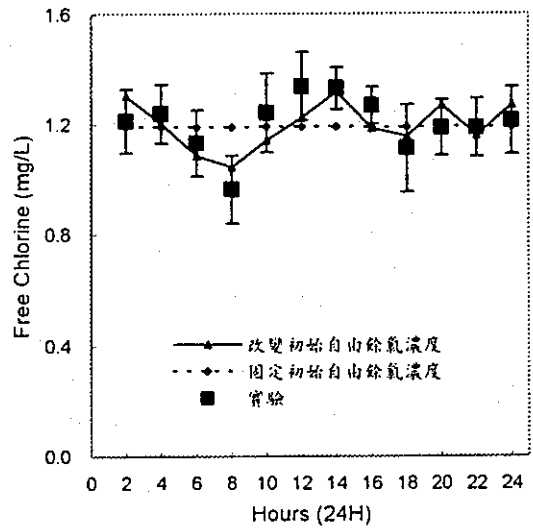


圖 11 第 14 號結點自由餘氯一天的變化

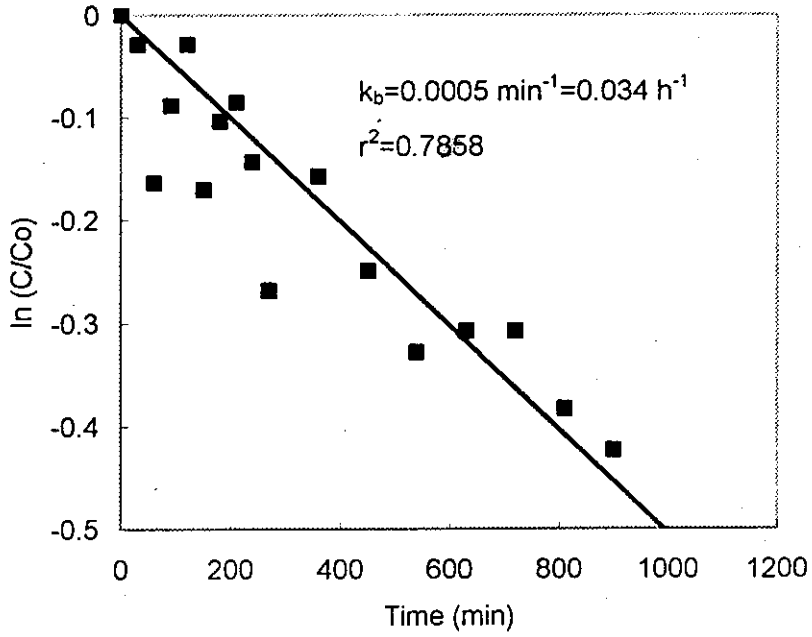


圖 12 結合餘氯在杯瓶實驗中的消耗情形

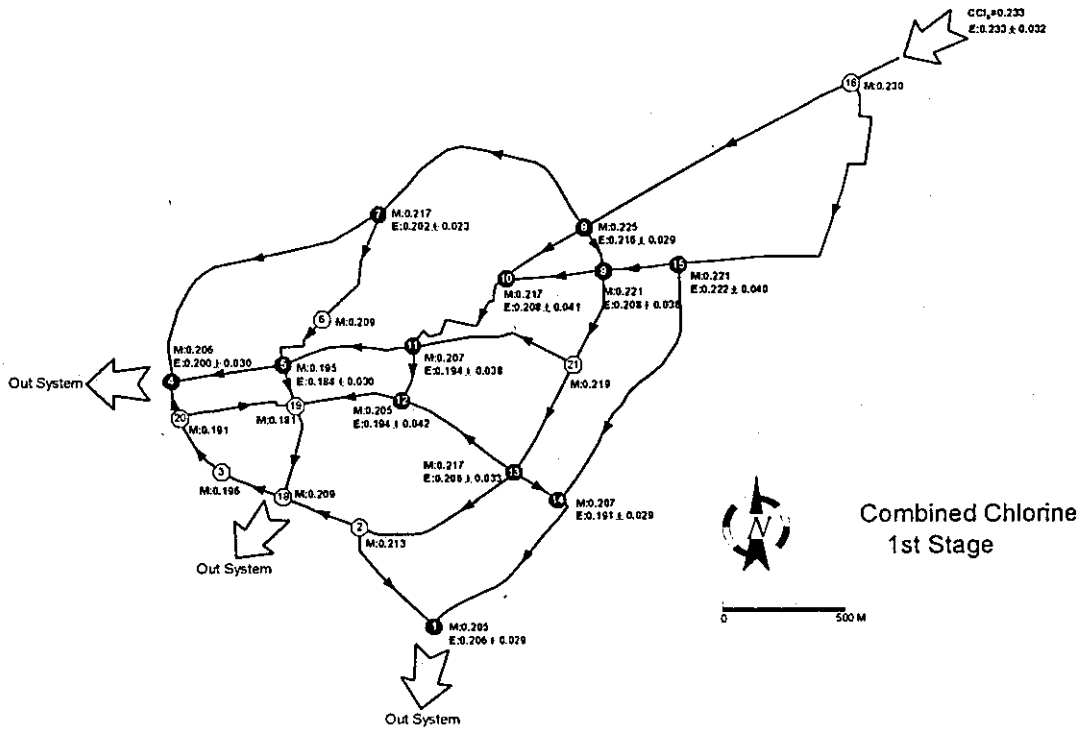


圖 13 結合餘氯在第一時段的分佈情形
 (M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

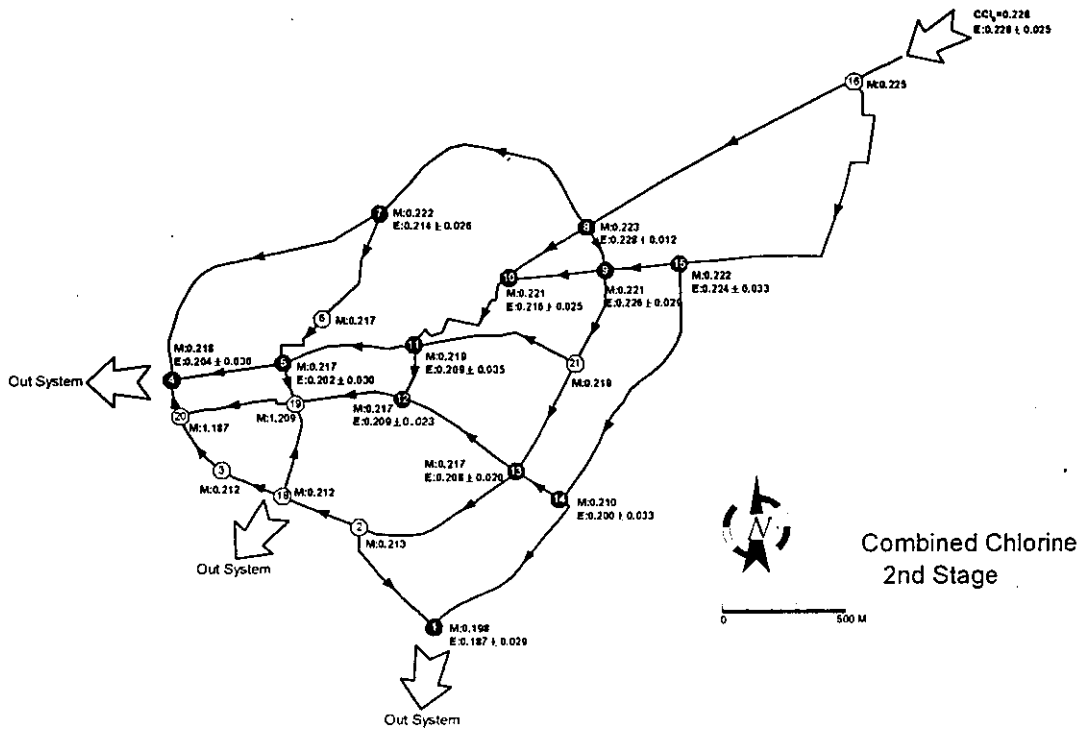


圖 14 結合餘氯在第二時段的分佈情形
(M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

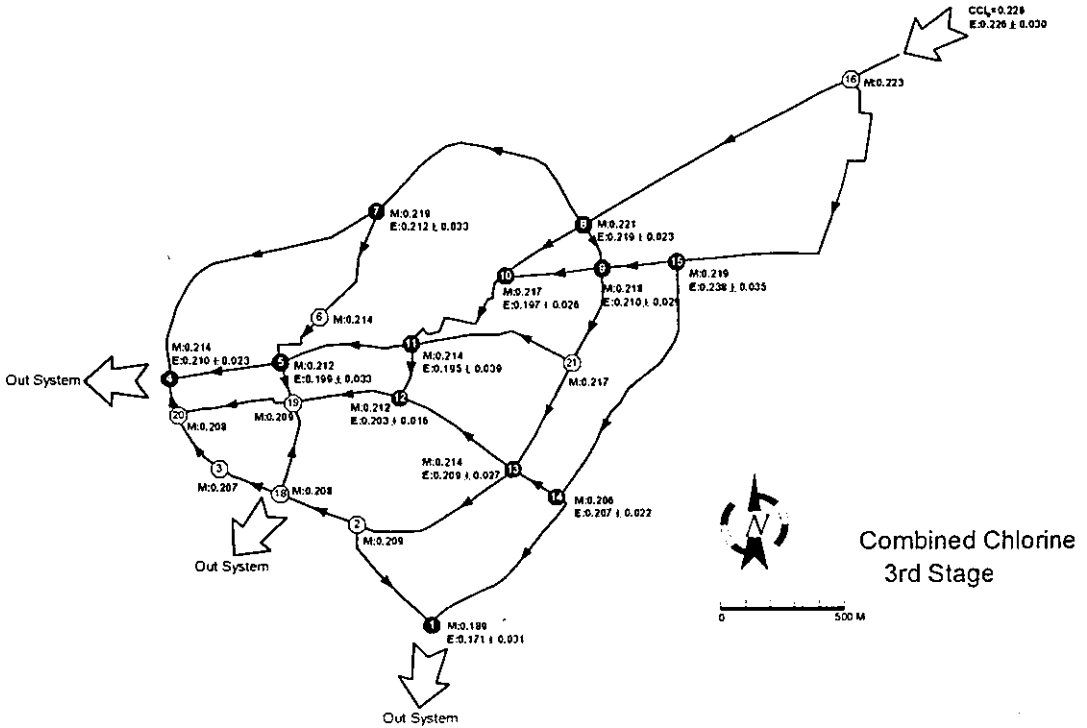


圖 15 結合餘氯在第三時段的分佈情形
(M 代表結點模擬結果；E 代表實驗平均結果；直線上的箭頭為流向)

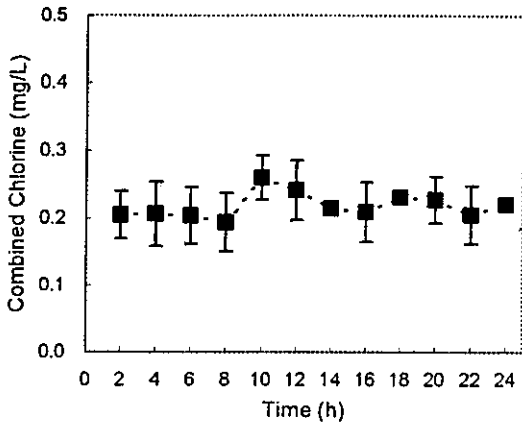


圖 16 處理廠清水中結合餘氯一天的變化

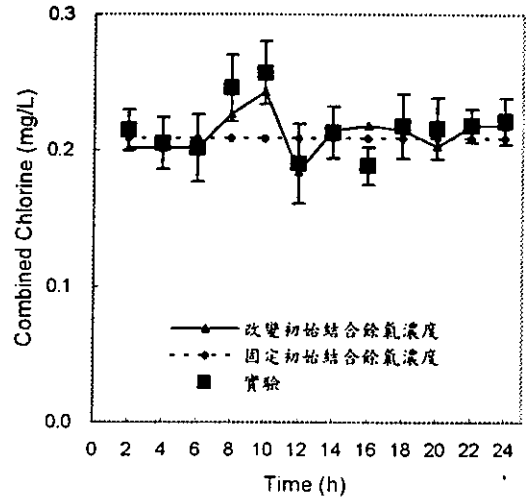


圖 19 第 13 號結點結合餘氯一天的變化

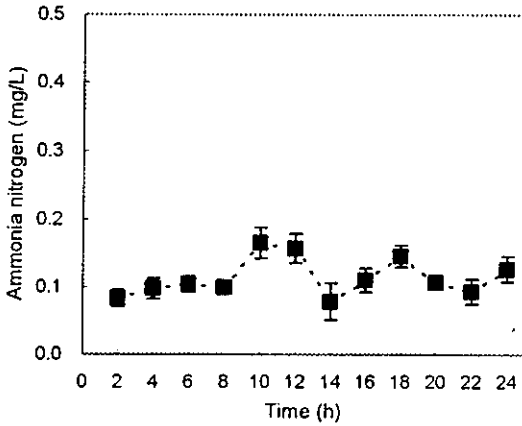


圖 17 處理廠清水中氨氮一天的變化

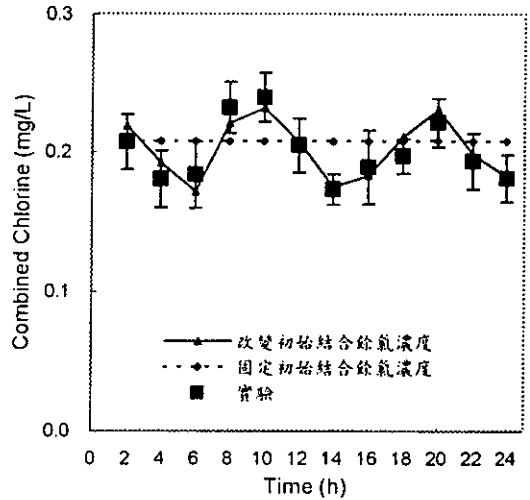


圖 20 第 14 號結點結合餘氯一天的變化

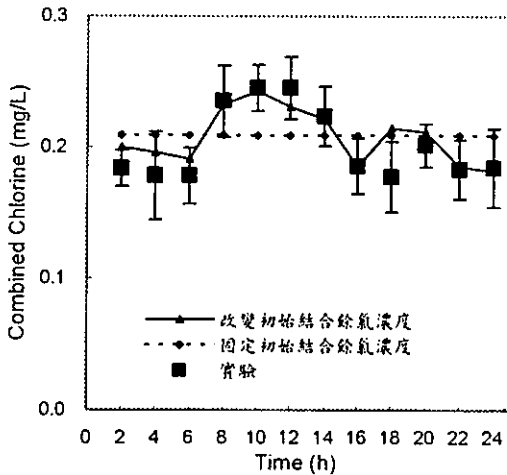


圖 18 第 12 號結點結合餘氯一天的變化

表 1 本研究使用的管線相關資料

管線編號	一號端點	二號端點	管線材質	管長(m)	管徑(m)
1	1	2	PVCP	525.67	0.25
2	2	18	PVCP	341.52	0.30
3	3	18	PVCP	289.63	0.30
4	3	20	PVCP	282.01	0.30
5	4	20	PVCP	152.27	0.60
6	4	7	PVCP	1252.09	0.60
7	4	5	DIP	452.06	0.25
8	19	20	PVCP	508.86	0.30
9	18	19	PVCP	400.96	0.25
10	5	19	PVCP	180.32	0.20
11	6	7	PVCP	503.36	0.30
12	5	6	PVCP	313.72	0.20
13	5	11	PVCP	565.36	0.30
14	12	19	PVCP	453.33	0.30
15	2	13	CIP	726.45	0.90
16	1	14	PVCP	785.93	0.25
17	12	13	PVCP	555.21	0.25
18	11	12	PVCP	233.27	0.35
19	7	8	PVCP	1092.05	0.60
20	8	10	PVCP	386.15	0.40
21	9	10	PVCP	401.85	0.40
22	10	11	PVCP	542.41	0.40
23	11	21	PVCP	691.46	0.25
24	13	21	CIP	517.57	0.90
25	8	9	CIP	195.97	0.90
26	9	21	CIP	403.13	0.90
27	14	15	PVCP	1141.22	0.35
28	9	15	PVCP	316.16	0.80
29	13	14	PVCP	221.14	0.25
30	15	16	PVCP	1457.43	0.80
31	8	16	DIP	1264.42	1.00
32	16	17	DIP	2129.11	1.10

註：PVCP：聚氯乙烯管； DIP：石墨鑄鐵管； CIP：一般鑄鐵管

表 2 實場水質分析方法

項目	分析儀器	分析範圍
水溫	WISEWIND Thermometer	-10~200°C
比電導度	SUNTEX SC-120 Portable Conductivity Meter	0.00 ~20.00 ms/cm
pH 值	HACH sension Portable Meter with Electode Models 519100-00	-2.00~19.99
溶氧	WTW Oximeter Oxi 330	0~19.99 mg/L
濁度	HACH Portable Turbidimeter, Model 2100P	0~1000 NTU
自由餘氯	HACH Pocket Colorimeter	0~2.0 mg/L
氯氮	HACH DR/2010 Spectrophotometer (Nessler Method)	0~2.5 mg/L

表 3 每天不同時間的用水量比率

時間(24H)	商業區	混合區	商業及住宅區
2	4.333%	3.837%	4.038%
4	4.245%	3.964%	4.035%
6	2.588%	4.077%	2.957%
8	3.972%	4.058%	2.696%
10	5.733%	5.005%	5.970%
12	6.135%	4.920%	5.571%
14	5.457%	5.102%	5.702%
16	4.882%	3.746%	3.152%
18	3.817%	3.764%	2.918%
20	2.889%	4.604%	5.150%
22	3.082%	3.315%	3.651%
24	3.082%	3.743%	3.842%

表 4 本模式與 EPANET 模式在第三管中流量隨時間變化結果比較情形

時間	D2k(gpm)	EPANET(gpm)	誤差(gpm)
0 小時	481.4829	481.48	-6.00E-06
2 小時	492.6732	492.67	-6.60E-06
4 小時	509.4840	509.48	-7.90E-06
6 小時	531.1013	531.10	-2.60E-06
8 小時	506.4452	506.44	-1.00E-05
10 小時	482.0201	482.02	-2.00E-07
12 小時	458.0539	458.05	-8.50E-06
14 小時	166.6692	166.68	6.42E-05
16 小時	125.0019	125.01	6.42E-05
18 小時	83.3346	83.34	6.42E-05
20 小時	125.0019	125.01	6.42E-05
22 小時	166.6692	166.68	6.42E-05

表 5 本模式模擬所使用的結點相關資料()

結點編號	每天用水量(m ³)	高程(m)	性質分類
1	7500	206.8	混合區
2	4500	210.1	商業及住宅區
3	3750	307.6	商業及住宅區
4	5250	205.8	商業及住宅區
5	4140	223.9	商業區
6	7500	213.2	商業及住宅區
7	2250	201.0	商業及住宅區
8	7800	229.1	混合區
9	7140	229.8	混合區
10	13000	223.5	商業區
11	16000	216.6	商業區
12	14500	216.7	商業區
13	6700	221.9	混合區
14	4500	221.4	商業及住宅區
15	7350	237.3	商業及住宅區
16	3000	242.0	商業及住宅區
17	0	264.5	處理廠
18	7140	307.6	混合區
19	10800	223.9	商業區
20	3500	205.8	混合區
21	7140	229.8	混合區

表 6 模式模擬中各項參數定義及其數值

編號	符號	說明	數值範圍	數值	單位	參考文獻
1	v	水的動黏滯係數		3.3×10^{-3}	m ² h ⁻¹	Clark(1996)
2	D _e	餘氯有效擴散係數		4.5×10^{-2}	m ² h ⁻¹	Cussler <i>et al.</i> (1984)
3	k _{bf}	自來水中自由餘氯消耗速率常數	$1.0 \times 10^{-3} \sim 70.8 \times 10^{-2}$	8.4×10^{-2}	h ⁻¹	本研究
4	k _{bc}	自來水中結合餘氯消耗速率常數	$1.7 \times 10^{-2} \sim 9.8 \times 10^{-2}$	3.4×10^{-2}	h ⁻¹	本研究
5	k _{wf}	管壁上自由餘氯的消耗常數	$3.6 \times 10^{-4} \sim 7.9 \times 10^{-1}$	1.87×10^{-2}	m h ⁻¹	Rossman <i>et al.</i> (1994)
6	k _{wc}	管壁上結合餘氯的消耗常數	$1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	1.95×10^{-7}	m h ⁻¹	Maier <i>et al.</i> (2000)

表 7 第一時段餘氯實驗平均結果

項目	平均值	標準偏差
氣溫(°C)	30.5	2.3
水溫(°C)	24.3	2.6
濁度(NTU)	1.371	0.805
比電導度(ms/cm)	0.184	0.032
pH 值	7.41	0.42
溶氧(mg/L)	6.2	0.7

表 8 第二時段餘氯實驗平均結果

項目	平均值	標準偏差
氣溫(°C)	25.9	1.5
水溫(°C)	24.6	2.2
濁度(NTU)	1.236	1.720
比電導度(ms/cm)	0.187	0.033
pH 值	7.39	0.45
溶氧(mg/L)	6.0	0.6

表 9 第三時段餘氯實驗平均結果

項目	平均值	標準偏差
氣溫(°C)	28.4	2.7
水溫(°C)	24.8	2.2
濁度(NTU)	1.004	1.480
比電導度(ms/cm)	0.184	0.037
pH 值	7.47	0.27
溶氧(mg/L)	6.0	0.7