

# 自來水配水槽餘氯濃度變化之研究

江柏霖<sup>1</sup> 余孟懷<sup>1</sup> 盧重興<sup>2</sup>

## 摘 要

自來水配水槽的主要目的是為了調節自來水水量，以提供用戶足量的用水。由相關文獻得知，配水槽會使自來水中的餘氯消耗，對水質造成負面的影響。一般而言，配水槽混合效果愈好，自來水的品質會愈高、愈有保障。

本研究的主要目的包括：探討變動流量下不同徑高比、導流板數與進流位置對配水槽中餘氯濃度分布的影響。另外，並發展一可預估配水槽餘氯變化的三間隔水質模式。

由不同徑高比試程得知，隨著徑高比值的減小，進、出流濃度差的平均值會有增大的趨勢，這是因為在較小徑高比下，自來水在配水槽之滯留時間會較長，餘氯濃度消耗也會較多。

不同導流板數與進流位置試程得知，在頂部進流、底部出流之配水槽，沒有導流板之配水槽混合情形最好的。而在底部進流、底部出流之配水槽，在沒有導流板時，混合情形並不是很好，當加一塊導流板時，混合情形明顯變好，但是當加至三塊時，混合情形又變得較差。由以上結果可知，適當進出流位置與導流板的設計有助於提昇混合效果，進而增進自來水品質。

在水質模式方面，在一階反應速率常數  $k$  值為  $0.1056/\text{day}$ 、滯留區比例為  $0.01\sim 0.05$  配水槽體積、間隔間體積交換流量為  $50\text{ml}/\text{min}$  下，模式模擬值和實驗值相比較，可以得到不錯的一致性。

---

<sup>1</sup> 國立中興大學環境工程學系研究生

<sup>2</sup> 國立中興大學環境工程學系教授

## 壹、前 言

飲用水是人類維持生存所不可或缺的重要物質，而飲用水品質的優劣，直接影響到全體國民的安全與健康。自來水配水系統的目的是為了傳送安全、量足、高品質的飲用水給消費者。因此，為了避免自來水水質受到污染，除了要做好水源的保護與提高淨水處理技術外，配水系統的維護也是一大重要課題。

配水槽普遍存在於配水系統中，但是至目前為止，對於配水槽影響水質的研究並不多。雖然，配水槽提供足夠的用水，但在另一方面卻也被視為化學和生物的綜合反應槽，因此不良的操作和設計會導致水質的變壞，包括提高在配水槽中的停留時間、降低消毒劑的含量、增加消毒副產物的生成和微生物菌數。

在國外，有些研究以氟離子做為追蹤劑，然而氟離子在某些地區為管制藥品，所以並非完全適用。另外，由於實場配水槽非常複雜，研究詳細的水質變化並不容易，且無法探討配水槽進出流口位置不同對水質的影響，因此有必要在實驗室進行一系列基礎性的試驗。

本研究主要的目的是利用實驗室已啟動的自來水配水槽系統，藉由餘氯注入試驗，以了解餘氯在配水槽中的分布情形。最後，進一步建立配水槽的水質模式，並由試驗數據驗證模式的可靠性。研究主要的內容包括：

1. 實驗室規模配水槽系統的架設、啟動與操作;
2. 進行餘氯濃度試驗，在不同的水位高度、進出流口位置及隔板數下，探討這些變因對餘氯分布造成的影響;
3. 建立配水槽的水質模式，模擬配水槽中餘氯的分布情形。

## 貳、理論與模式建立

本研究配合實驗設計採用連續流模式。連續流式的模擬，主要是考慮配水槽是進流與出流同時運作的狀態下而建立。研究中採用三間隔模式，如圖 1 所示，三間隔模式是將配水槽分成三個區域，其中 A 部分為包含進、出流口的區域，B、C 部分為滯流區。其統御方程式如下：

A 部分間隔方程式

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{in}(C_{in} - C_A) + Q_{CA}C_C - Q_{AC}C_A + Q_{BA}C_B - Q_{AB}C_A}{V_A} - kC_A \quad (2-1)$$

$$\text{初始條件： } C_A(t=0) = C_{A0} \quad (2-2)$$

B 部分間隔方程式

$$\frac{dC_B}{dt} = \frac{Q_{AB}C_A - Q_{BA}C_B}{V_B} - kC_B \quad (2-3)$$

$$\text{初始條件： } C_B(t=0) = C_{B0} \quad (2-4)$$

C 部分間隔方程式

$$\frac{dC_C}{dt} = \frac{Q_{AC}C_A - Q_{CA}C_C}{V_C} - kC_C \quad (2-5)$$

$$\text{初始條件： } C_C(t=0) = C_{C0} \quad (2-6)$$

其中：

$C_A$  : A 部分的餘氯濃度

$C_B$  : B 部分的餘氯濃度

$C_C$  : C 部分的餘氯濃度

$C_{in}$  : 進流中餘氯的濃度

$k$  : 一階反應速率常數

- $Q_{AB}$  : A 部分流到 B 部分的流量
- $Q_{BA}$  : B 部分流到 A 部分的流量
- $Q_{BC}$  : B 部分流到 C 部分的流量
- $Q_{CB}$  : C 部分流到 B 部分的流量
- $Q_{CD}$  : C 部分流到 D 部分的流量
- $Q_{DC}$  : D 部分流到 C 部分的流量
- $Q_{in}$  : 進流流量
- $t$  : 時間
- $V_A$  : A 部分的體積
- $V_B$  : B 部分的體積
- $V_C$  : C 部分的體積

## 參、材料與研究方法

### 3-1 實驗設備

本配水槽試驗設備內部材質為內襯混凝土，其設備示意圖如圖 2，圖 3、4 分別為配水槽單一導流板及三塊導流板之設備示意圖。

### 3-2 操作條件與試驗方法

#### 3-2-1 穩定流量試驗

配水槽餘氯穩定流量試驗，是以穩定法注入氯源，來探討配水槽在四組流量時餘氯濃度分布變化的情形，採樣點示意圖如圖 5。各試程的條件詳見表 1。

### 3-2-2 變動流量試驗

連續流量變動試程詳細的條件如表 2 所示。此試程主要是要探討配水槽在四組進流流量（800、1200、2000 及 4800 ml/min）的交替變動下，進流水氯濃度經配水槽混和後，出流口餘氯濃度變化情形。圖 6 為流量隨時間變動示意圖。

## 肆、結果與討論

### 4-1 配水槽的餘氯濃度分析

#### 4-1-1 穩定流量分析

穩定流量試驗，主要的目的是要了解餘氯在配水槽中的分布情形，如表一所示。分成出流口與內部分析來進行探討，詳述如下。

#### 1. 出流口

表 3 為固定徑高比下( $D/H=1$ )，四種流量試程之水力停留時間、容比時間 (Space-time) 與穩定時進出流餘氯的濃度差。由表 3 中可以看出，進出流餘氯濃度差值，隨流量的加大，呈現減小的趨勢。原因是流量較大，則滯留時間較短，餘氯消耗量相對較小。

容比時間為當出流濃度達到穩定值，亦即出流濃度不再隨時間變化所需之時間，其與配水槽水位高、配水槽內徑成正比，與進流動量通量成反比。配水槽水位愈高、配水槽內徑愈大、進流動量通量愈小的配水槽，其所需要的容比時間就愈長。

## 2. 內部分析

內部分析主要探討配水槽中餘氯的分布情形，包含餘氯在同一水平面與不同高度的分布情形。

圖 7 與圖 8 為  $D/H=1$ ，流量為  $4800 \text{ mL/min}$  條件下，0 公分與 90 公分水層高度中(0 公分水層表示配水槽水層之底部;90 公分表示配水槽水層之頂部)，C1、C3、S1、S2 採樣點的濃度隨時間分布圖。在圖 7 中可觀察出，C1 點的濃度在任何時段都高於其他點，圖 8 中則是都低於其他點。

探究同一水平面餘氯分布情形，C1 點是 90 公分水層中離進流口最近的取樣點，所以採樣之餘氯濃度值會比其他點高。另一方面，水自頂部進流底部出流，在 90 公分和 0 公分水層間會有流動的動力產生，使得上層流往下層的水，會直接流向出流口，但因為出流口相較於配水槽為一小管，故當水流流至出流口，會產生沿著槽壁往上移動與反彈迴流的現象，而造成在 0 公分水層中，C3、S1、S2 的濃度皆差不多。而 C1 點因為較遠，水流反彈迴流的力量較小，使此點之餘氯濃度為 0 公分水層中最低。

圖 9 及圖 10 為  $D/H=1$ ，流量為  $800 \text{ mL/min}$  時，同一水平面各點間濃度之變化圖，在穩定時間上大致和流量為  $4800 \text{ mL/min}$  時的差不多;不過由圖 8 及圖 10 兩張 0 公分水層的圖中可知，在各點間的濃度差異，隨著流量的降低，有變大的趨勢，且濃度分佈情形愈不平均。故當配水槽的流量愈小，則混合效果愈差。

由圖 11~圖 14 中可以發現，在  $800\text{mL/min}$  流量下，C1、C3 點在 0 公分與 90 公分水層的濃度中，皆為 90 公分水層餘氯濃度較高;而在  $4800\text{mL/min}$  流量時，C1 點在 90 公分水層濃度較 0 公分水層濃度為高，而 C3 點之 90 公分水層濃度與 0 公分水層濃度都差不多。由此可知，在流量較小時，配水槽分層現象較明

顯;而在流量較大時,配水槽分層現象較不明顯,除了因為在 C1 點 0 公分水層時,有死角區的形成,而造成濃度較低外,其他各點濃度皆差不多。

在圖 11 及圖 12, 800mL/min 流量條件時可以觀察到,在 0 公分水層中,點 C1、C3 中,其濃度在開始進流時,所測得之值很低,顯示水體自 90 公分水層注入時,一開始幾乎流不到下層水面;而在 90 公分水層中,其濃度則累積的相當的快,幾乎和流量 4800mL/min 的差不多,這是因為在低流量時,水體無法突破配水槽內水體之阻力,在入流口會形成短流的現象。另外,在圖 12 中,0 公分水層之 C3 點,在經過 3 小時之後,才開始有濃度的累積,這是因為在低流量下,進流水不易突破配水槽內水體之阻力,要等出口附近原本的水體流出後,才會開始有餘氯濃度的累積。

#### 4-1-2 變動流量分析

在此將分成出口與內部分分析二部分來進行探討,進流量試程規劃如圖 6 所示:

##### 1. 出口

圖 15~20 為徑高比為 1.0 下,變動流量試程進流、出流餘氯濃度與流量隨時間分布圖。進流口在頂部的試程中,在圖 15~17 可發現進流濃度上升,出流濃度下降之情形,集中在清晨六點至九點之間,造成此影響的原因,應是在深夜為最小流量時段,停留時間增長使餘氯消耗較多,致使出流濃度明顯下降。

而進流口在底部的試程中,在圖 18~20 進流濃度上升,出流濃度下降,集中在清晨零時至三點之間,造成此現象的原因,是深夜時段最小流量所造成,其和進流口在頂部試程不同之處為時間往前提早,由此可知,配水槽進流口位置的

不同，會影響到配水槽的混合情況和滯留時間。

表 4 為各試程進、出流濃度差之平均值。在徑高比試程中，隨著徑高比值的減小，進、出流濃度差的平均值會有增大的趨勢，這是因為在較小徑高比下，進流水在配水槽之滯留時間會較長，會使餘氯消耗較多。而在進流位置的試程，當進流位置在底部時，無論導流板數為何，其進出流濃度差皆較進流位置在頂部時為高。

## 2. 內部分析

表 5 為配水槽內各採樣點之濃度平均值（為 12~16 次採樣數據的平均值），將同一試程各點最大值使其為 1.00，則其他之值，為相對於最大值之值，亦即各點之值接要除以參考值之值，藉此而得到表 5 中各無因次之值。

### 2-1 頂部進流、底部出流：

表 5 中，在沒有導流板時，同一水平面之濃度值皆相近，表示水體混合均勻；在徑高比為 1、3 時，頂部進流、底部出流之各點值，在 C1t 點出現最高值，在 S2t 點則有同一水平面之最低值。由上述可知，餘氯濃度在頂部同一水平面的分布是有差異的，在體積交換率較好的位置，餘氯濃度會相對較高；而在接近死角區則餘氯濃度較低。在底部同一水平面上，濃度值在靠近出流口的部分較高。而在底部離出流口最遠的部分，餘氯濃度會較低。

在縱截面的濃度值上，由表 5 可以發現，在沒有導流板時，餘氯分佈都很均勻，此時配水槽沒有分層現象；而在導流板數為一及三時，除了在點 S2 為底部較頂部為高外，其餘各點皆為頂部較高，因為導流板造成水體受到導流板的阻礙，而使 S2t 之體積交換較差，導致濃度值較底部為低，但在其他的部分，則上層水體由於較易有新進流體，體積交換較好，所以濃度值皆較下層水體為高，有

分層現象的產生。由此可知，在頂部進流、底部出流之條件，不加導流板，已有不錯的混合效果，此時再加隔板，反而造成混合效果變差。

## 2-2 底部進流、底部出流：

表 5 中，在沒有導流板時，此時底部進流的配水槽內各點之值略有差異，配水槽混合情形並不是很好；當加一塊導流板至配水槽內時，配水槽內各點之值有明顯改善，；而加三塊導流板時，此時配水槽內混合情形又變得較差。

## 4-2 模式的建立與應用

模式的建立，主要的目的是用來模擬餘氯濃度在配水槽的變化情形，以達到預警的功能。模擬變動流量試程中導流板數為零、不同徑高比下出流口的餘氯濃度。方程式如 2-1 至 2-6 式，所需參數如下：

1. 一階反應消耗速率常數： $k=0.1056/\text{day}$
2. 各間隔所佔之比例：配水槽體積之 0.01~0.05 倍
3. 各間隔間之交換流量：50 ml/min

圖 21 及圖 22 為模式模擬之結果，在圖中，模擬值和實驗值有不錯的一致性。

## 伍、結論與建議

### 5-1 結論

1. 穩定流量試驗的結果中，進、出流餘氯濃度的差值隨流量的增大，呈現減小的趨勢。

2. 在穩定流量試程中，流量愈小及愈底部之水層其混合效果愈差。
3. 變動流量試程中，由於深夜時段為低流量，滯留時間增長使餘氯消耗較多，造成清晨時段用水的品質受影響。
4. 頂部進流、底部出流的配水槽，其混合情況較底部進流、底部出流為佳，緩衝效果也較好。
5. 對於混合情形較差的配水槽，配水槽導流板的設置，有改善的效果，但是在原本混合不錯的配水槽加入導流板，反而會造成反效果。

#### 5-2 建議

1. 應針對不同的供水方式，以更瞭解其對配水槽水質的影響。
2. 由於配水槽外型設計對內部水體變化影響相當大，配水槽的型式也相對較多元化，故對於不同外型的配水槽必須進行研究。
3. 進行實場的試驗，以瞭解實際配水槽中餘氯的消耗情形及配水槽內的層化以及滯留區的現象。
4. 對於配水槽內微生物的再生長情形與其生長機制的資料相當缺乏，因此建立相關的資料實屬必要。

#### 參 考 文 獻

1. 高肇藩，給水工程，修定版，成功大學，第 167-175 頁，民 79。
2. 李志成，自來水配水池水力特性與餘氯濃度之研究，國立中興大學環境工程學系碩士論文，民 88。

3. Clark, R. M., Abdesaken, F., Boulos, P. F., and Mau, R. E. (1996).  
"Mixing in distribution system storage tanks: Its effect on water quality." *J. Envi. Eng.* 814-821.
4. Grayman, W. M., deiningen, R. A., Boulos, P. F., and Bowcock, R. W., (1996). "Water quality and mixing models for tanks and reservoirs." *J. AWWA*, 88:7:60-73.
5. Kennedy, M. S., Moegling, S., Sarikelli, S., and Suravallop, K., (1993).  
"Assessing the effects of storage tank design." *J. Am. Water Works Assn.*, 85(7), 78-88.

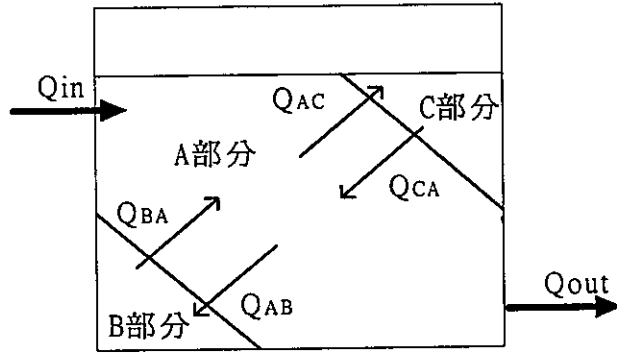


圖 1 三間隔模式示意圖

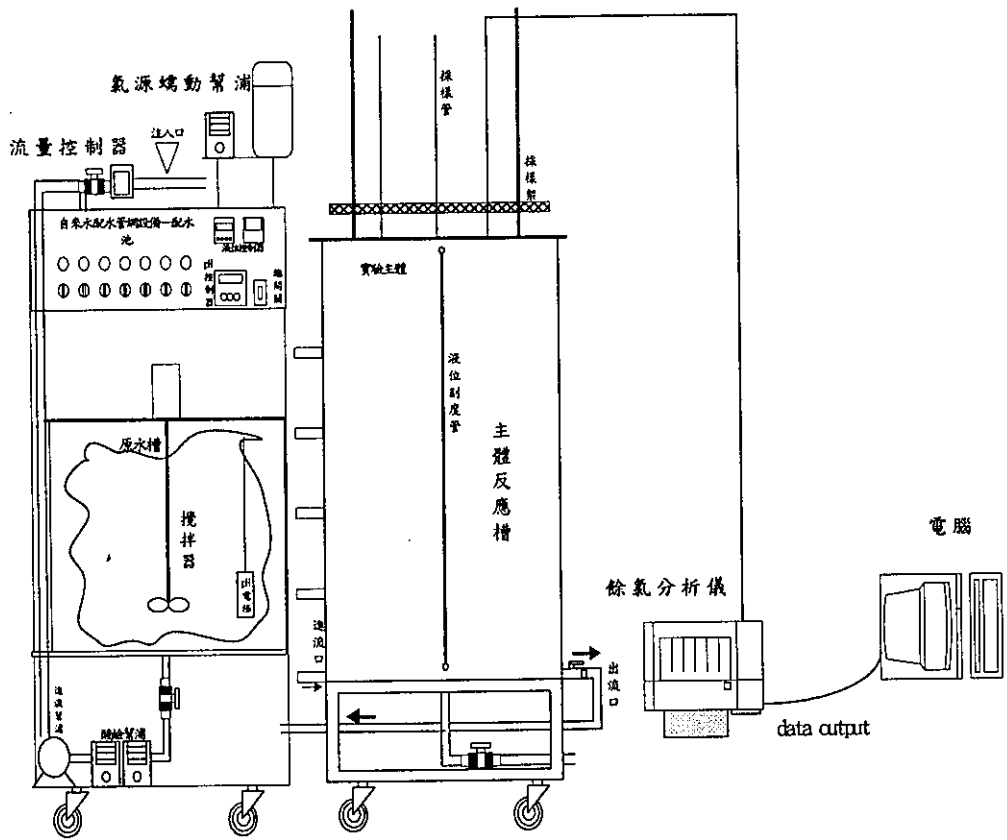


圖 2 配水槽試驗設備圖

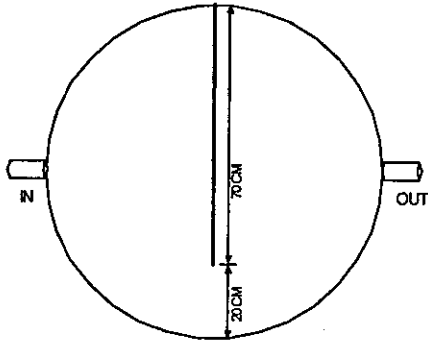


圖 3 單一導流板示意圖

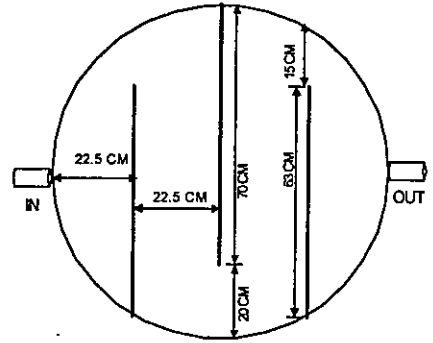


圖 4 三塊導流板示意圖

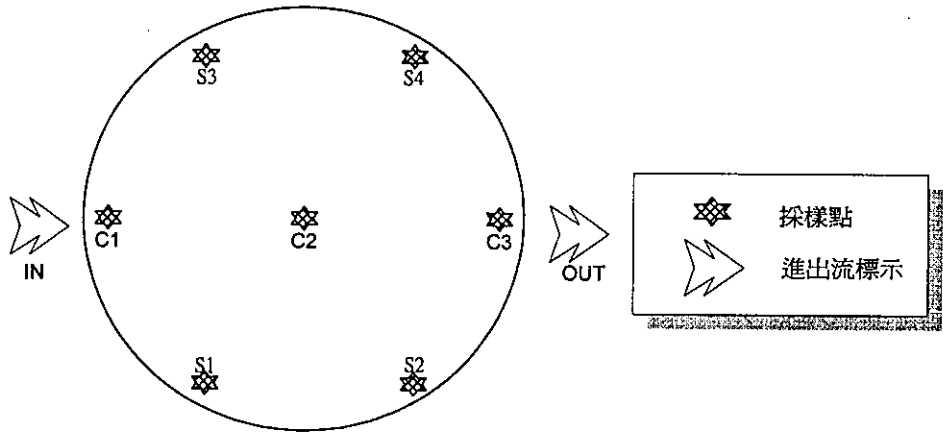


圖 5 採樣點示意圖

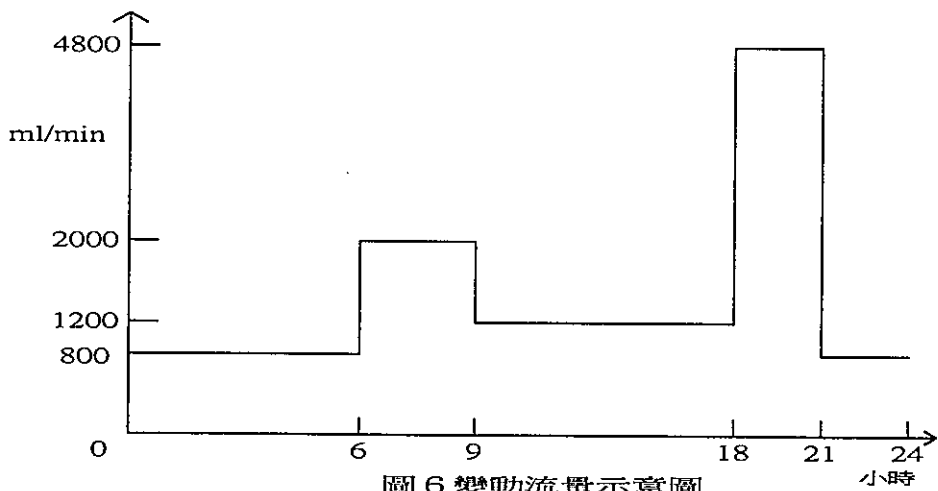


圖 6 變動流量示意圖

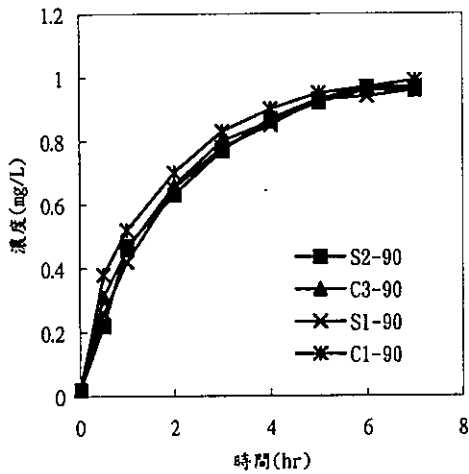


圖 7 D/H=1.0 及流量 4800mL/min  
90 公分水層，採樣點與時間作圖

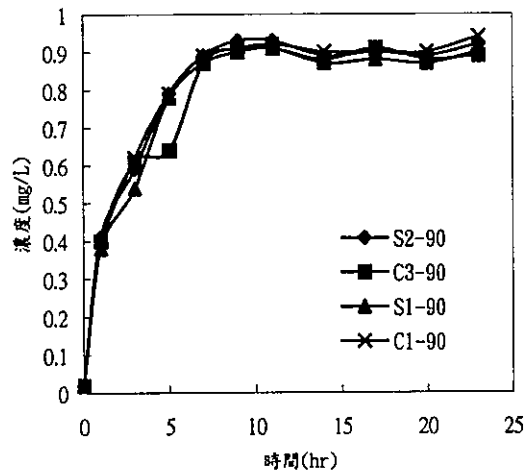


圖 9 D/H=1.0 及流量 800mL/min，90  
公分水層，各採樣點與時間作圖

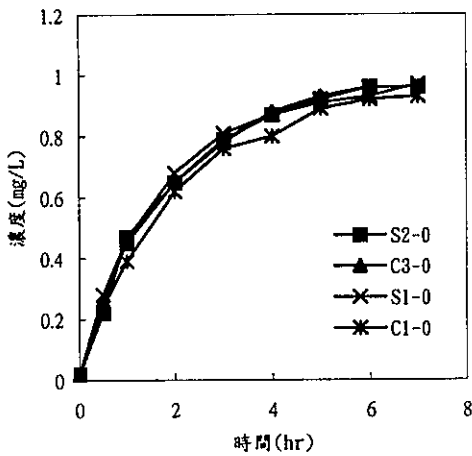


圖 8 D/H=1.0 及流量 4800mL/min，  
0 公分水層，各採樣點與時間作圖

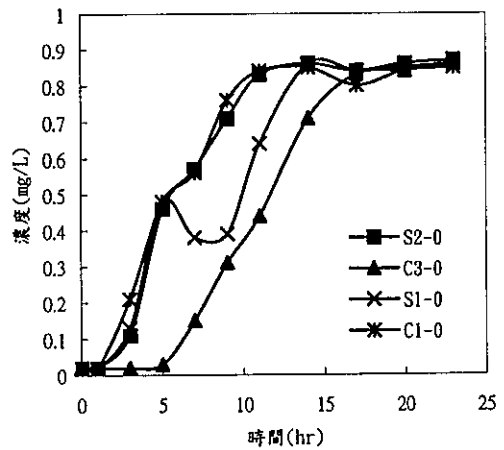


圖 10 D/H=1.0 及流量 800mL/min，  
0 公分水層，各採樣點與時間作圖

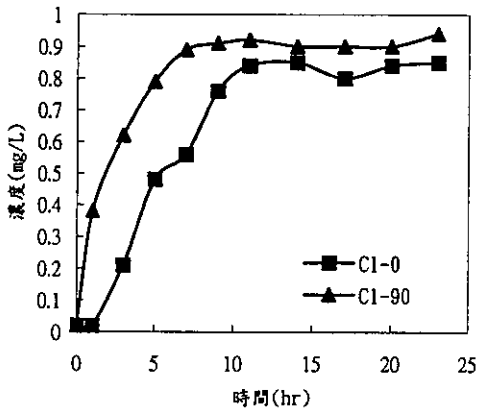


圖 11 D/H=1.0 及流量為 800mL/min 下，C1 點在 0 與 90 公分水層總餘氯濃度隨時間變化圖

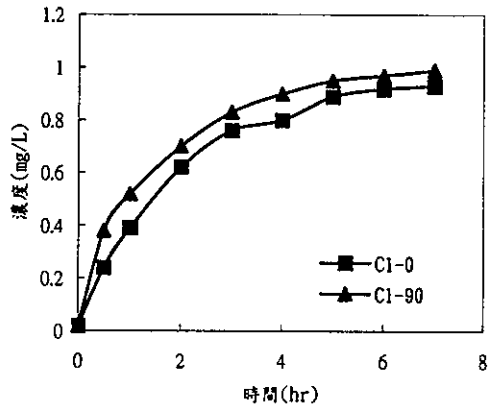


圖 13 D/H=1.0 及流量為 4800mL/min 下，C1 點在 0 與 90 公分水層總餘氯濃度隨時間變化圖

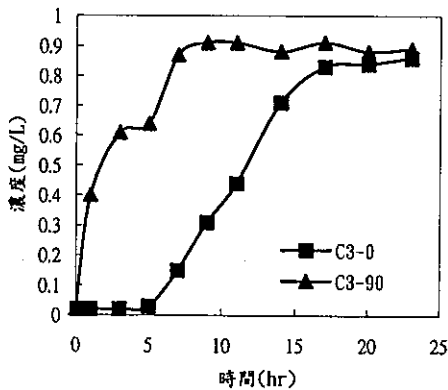


圖 12 D/H=1.0 及流量為 800mL/min 下，C3 點在 0 與 90 公分水層總餘氯濃度隨時間變化圖

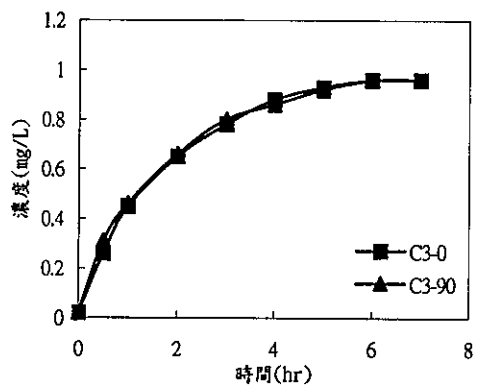


圖 14 D/H=1.0 及流量為 4800mL/min 下，C3 點在 0 與 90 公分水層總餘氯濃度隨時間變化圖

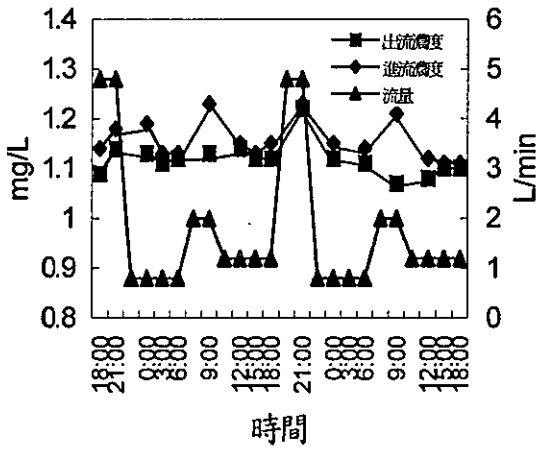


圖 15 D/H=0.75、導流板數=0，餘氮濃度隨時間變化圖

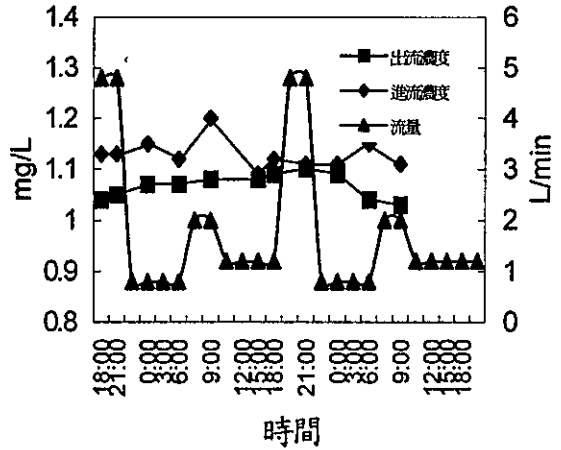


圖 17 D/H=0.75、導流板數=3，餘氮濃度隨時間變化圖

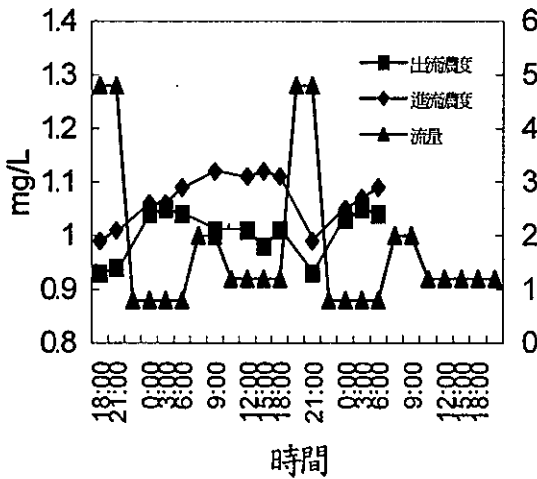


圖 16 D/H=0.75、導流板數=1，餘氮濃度隨時間變化圖

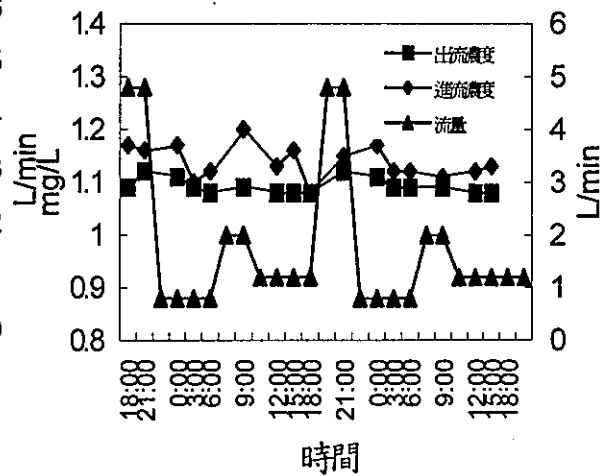


圖 18 底部進流 D/H=0.75、導流板數=0，餘氮隨時間變化圖

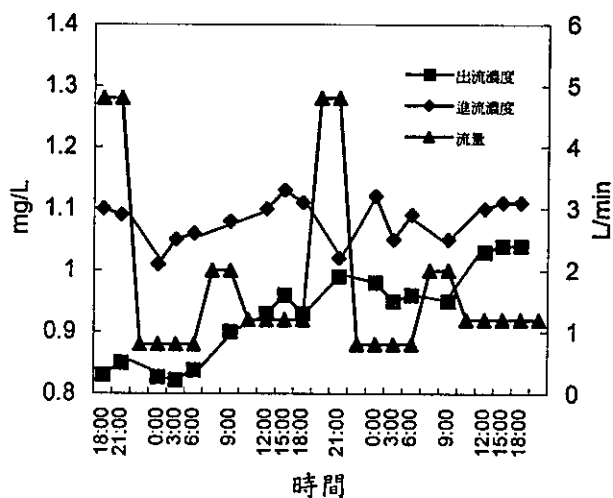


圖 19 底部進流  $D/H=0.75$ 、導流板數=1，餘氯濃度隨時間變化圖

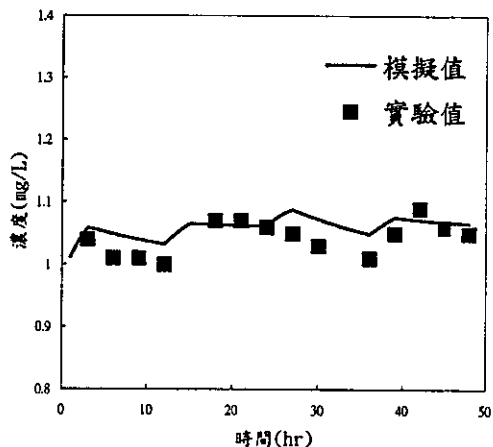


圖 21  $D/H=3.0$ 、導流板數=0 下，模擬值與實驗值比較圖

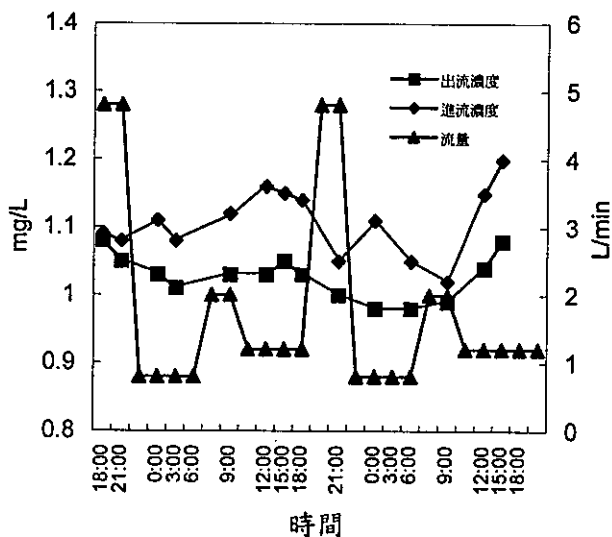


圖 20 底部進流  $D/H=0.75$ 、導流板數=3，餘氯濃度隨時間變化圖

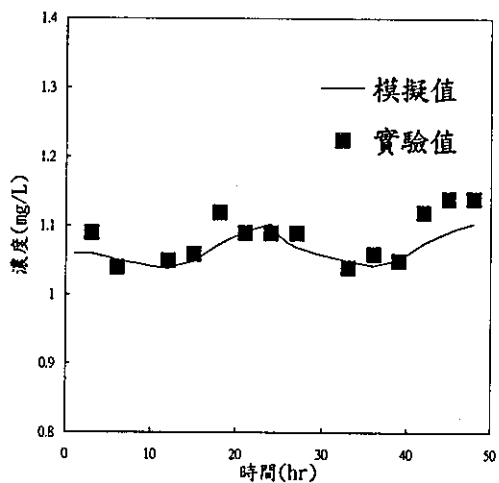


圖 22  $D/H=1.0$ 、導流板數=0 下，模擬值與實驗值比較圖

表 1 穩定流量試程條件

參數	條件	備註
徑高比	1.0	
流量 (ml/min)	800、1200、2000、4800	四種流量
採樣點	IN、C1、C3、S1、S2、OUT	
採樣點高度	0、90 公分	

表 2 變動流量試程

參 數	條 件	備 註
徑高比值(配水槽內徑和高度的比值)	D/H=3.0、1.0、0.75	
導流板數	0、1、3	放置位置如圖 4-3 所示
進流位置	配水槽頂部	三個徑高比，三個隔板數，共 9 組試程；另於 D/H=0.75 時，做一組底部進流的試程，共 3 組試程，總計 12 組試程。
流 量 (mL/min)	變動流量	800、1200、2000、4800 四種流量
採 樣 點	C1、C3、S1、S2、OUT	
採 樣 層 高 度	D/H=3.0	0、30 公分
	D/H=1.0	0、90 公分
	D/H=0.75	0、120 公分

表 3 各試程的穩定時間與進出流口餘氯的濃度差

D/H	流量(mL/min)	理論水力停留 時間(hr)	容比時間(hr)	穩定時進出流餘氯 的濃度差(mg/L)
1	800	12.0	23	0.09
	1200	8.0	19	0.08
	2000	4.8	12	0.08
	4800	2.0	7	0.04

表 4 進出流濃度差平均值 (mg/L)

進流口位置	頂部			底部
導流板數	0.75	1.0	3.0	1.0
D/H比				
0	0.06	0.05	0.05	0.07
1	0.05	0.04	0.04	0.07
3	0.08	0.06	0.07	0.09

表 5 各採樣點濃度平均之無因次之值

D/H	導流 版數	C1t	C1b	C3t	C3b	S1t	S1b	S2t	S2b
頂部進流、底部出流									
3	0	1.00	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99	None	None
	1	1.00	0.96	0.98	0.97	0.99	0.99	0.97	0.99
	3	1.00	0.95	0.97	0.95	0.97	0.94	0.96	0.98
1	0	1.00	0.97	1.00	0.96	1.00	0.98	None	None
	1	1.00	0.94	0.96	0.94	0.98	0.95	0.95	0.99
	3	1.00	0.94	0.96	0.95	0.97	0.95	0.97	0.99
0.75	0	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	None	None
	1	1.00	0.95	0.96	0.94	0.97	0.95	0.95	0.99
	3	1.00	0.95	0.96	0.94	0.97	0.95	0.95	0.99
底部進流、底部出流									
0.75	0	0.97	0.96	0.98	1.00	0.98	0.98	None	None
	1	0.98	0.98	0.98	1.00	0.98	0.99	0.99	1.00
	3	1.00	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99

註:其中 t 代表採樣點的高度位在頂部

b 代表採樣點的高度位在底部