

以陡降階梯式追蹤劑注入法探討自來水流經直管、彎管 與孔穴的水力特性

A Study on the Hydraulic Characteristics of Drinking Water Pipes by Step-Decrease Technique

楊泰辰¹、李連堯²、盧重興³

摘要

自來水配水管線中，無論是餘氯消耗或是微生物再生成，其原因都非常複雜，其中物理性因子中的管型及不規則管壁，是人為設計上可以克服，且對水質有立即改善的效果，因此有研究的必要性。

本研究的目的是利用實驗室已起動的配水管線系統，藉由陡降階梯式(step-decrease)追蹤劑試驗的方法，探討在不同水力停留時間下，自來水流經直管、彎管、不規則管壁(如孔穴)的流況分布與混合效率，以瞭解消毒劑與污染物在自來水配水系統中的傳輸特性。

由試驗結果得知，彎管及直管的延散數，在層流的狀態下，會隨著流速的增加而增加，隨著距離的增加而降低。流體經過孔穴時，會因內部旋轉流現象的發生，使其延散數變大，其變大的程度與孔穴的幾何形狀有關，較深孔穴的延散數比較淺孔穴的延散數小。而這些延散數變小的現象將是配水系統中水質二次污染的一大隱憂。

壹、前 言

在淨水處理廠中的水質問題已經被廣泛的討論及研究，各種發展完備的處理方法，使得自來水水質在離開淨水廠時，大都能夠符合政府公告的安全標準。然而，自來水一旦離開淨水廠，進入配水管線後，由於管線本身的複雜性及維修的困難，可能會因為水質的變化而發生異常現象，如自來水變得混濁、有顏色、有異味，甚至流出水生物或是使用時器物發生異常現象等，使得自來水水質安全再度受到威脅。

¹ 國立中興大學環境工程學系學士班

² 國立中興大學環境工程學系博士班

³ 國立中興大學環境工程學系教授

事實上，配水系統中無論是餘氯消耗、基質反應或是微生物的再生成，其原因均非常複雜。主要可分為物理性(如溫度、管材、水流速度、管型)、化學性(如 pH 值、加氯量、含氮物質、有機物質)和生物性因子。其中物理性因子中的管型及不規則管壁，因所造成的影響是設計上可以克服，且對水質有立即改善的效果，因此有其研究的必要。

自來水配水系統中有許多障礙物(如：附件(fittings)、彎管(bends)、分支接合管(branch junction)、凸緣連接管(flanged connectors)、閘(valves)等)及管壁粗糙位置(如：焊接點(welds)、表面的凹痕(pitting of surfaces)、腐蝕/水垢的位置(corrosion/encrustation locations)、不規則電鍍製造管表面(irregularly coated manufactured pipe surfaces)的孔穴等)，甚至分叉管與 T 型管等，使整個配水系統變得非常複雜。而這些管型及不規則管壁的存在將會產生各種大小不同的分離流(separating flow)、旋轉流(recirculating flow)和停滯流(stagnant flow)等易沈積懸浮微粒及易使微生物再生成的地區，可能對自來水水質造成二次污染。

本研究的主要目的是利用實驗室已起動的自來水配水管線系統，藉由陡降階梯式追蹤劑注入法，進行配水管線中不同管型如彎管、直管及不規則管壁如寬深比 $\alpha=1/2$ 、1 孔穴水力特性的研究，以明瞭延散效應及混合效應於這些環境中對自來水水質所造成的影響。

貳、理論基礎

一、延散係數及延散數的定義

由於分子擴散(D_m)與力學延散(D_h)具有相似的效應，因此常將此二項合稱為動力延散(hydrodynamic dispersion)，並假設二係數具有加成作用：

$$D_{dis} = D_m + D_h \quad (1)$$

其中 D_{dis} 為動力延散係數，或簡稱延散係數。 D_{dis} 值受液體黏滯性、密度及平均流速所影響。而動力延散所造成的混合程度亦隨溶質濃度梯度及飽和程度而定。一般將延散係數無因次化成延散數(D)：

$$D = \frac{D_{dis}}{U_{av}L} \quad (2)$$

而D值的大小為判斷反應槽中延散效應的重要參數。當D值趨近於 ∞ 時，反應槽內延散效應很大，可視為完全混合流；反之，當D值趨近0時，可忽略延散效應，視為柱塞流。而延散數與雷諾數(Re)的關係詳見圖1(Levenspiel, 1972)。由圖1可知流體在層流時，雷諾數與延散數成正比，但在紊流時，延散數開始會急速下降，然後以類似反比的關係漸漸降至0.2左右。

二、陡降階梯式追蹤劑注入法

當考慮配水管線中一流動的流體時，其內部常因流體渠流、回流或配水管線中形成滯流區等現象與理想的柱塞流或完全混合流有所差別，因而形成非理想流況分布的情形。此等因素的產生除了會改變配水管線中餘氣、基質及微生物的分布外，對於實場配水管線物質傳輸的模擬亦有極大的影響。因此，有必要針對配水管線中非理想流動的問題進行探討。

然而，研究配水系統中的水力特性需要知道管線中流體的流況分布及混合效率。欲求得此數據，一般常利用對反應槽進行刺激-回應(stimulus-response)試驗，以瞭解流體中的粒子在反應槽內的滯留時間分布(residence time distribution, RTD)，進而獲知反應槽中非理想流況分布及混合效率。

一般而言，追蹤劑注入反應槽的型式有隨意式(random)、週期式(periodic)、階梯式(step)及脈衝式(pulse signal)等。不管注入訊號型式為何，所求得的回應分析卻可獲得相同的資料。然其中階梯式(F 曲線)及脈衝式(C 曲線)為探討反應器水力特性最常使用的方法。本試驗設備因管徑小，脈衝注入不易達到，加上試驗所規劃的水力停留時間最久高達一天，而 F 曲線相對於 C 曲線取樣間隔較大，比較輕鬆，且取樣較少，於小系統的設備進行採樣時，對系統衝擊較小，故可知應以 F 曲線的追蹤劑試驗來進行。因此，本研究係利用階梯式注入法將追蹤劑注入連續式配水管線中，然後利用流出的追蹤劑所形成的 F 曲線進行分析，以求出配水管線中各種水力停留時下的延散數及追蹤劑移動時間(travel time)。

若以 x 表縱軸， y 表橫軸，則溶質在二維、均質、無化學反應的配水管中其延散方程式如下：

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - U_{av} \frac{\partial S}{\partial x} + D_T \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \quad (3)$$

考慮邊界條件的設定，若假設在未開始進行試驗時其管線內自來水中含有 S_i 的背景溶質濃度，而在試驗開始之後，將配水管的圓切面分成上下兩半面而各給予不同的初始溶質濃度，即在配水管的上方半面初始溶質濃度為 S_1 ，在下方半面初始溶質濃度為 S_r ，則邊界條件如下：

$$\begin{aligned} S(x,y,0) &= f(y) = S_i & 0 < x < \infty & \quad -\infty < y < \infty \\ S(0,y,t) &= g(y) = S_1 & y < 0 & \quad t > 0 \\ S(0,y,t) &= g(y) = S_r & y > 0 & \quad t > 0 \\ \frac{\partial S}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} &= 0 & -\infty < x < \infty & \quad t > 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t} \Big|_{y \rightarrow \pm \infty} &= 0 & 0 < y < \infty & \quad t > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

採取 Leij and Dane(1990)所使用的解法，即對 t 取拉式轉換(laplace transformation)，對 y 取傅立葉轉換(fourier transformation)，不考慮將配水管分成上下兩種濃度(即 $S_1 = S_r = S_0$)且初使背景濃度為 $S_i \neq 0$ ，配合誤差函數之一些性

質，可得方程式(3)的解析解：

$$S(x, y, t) = \frac{(S_0 - S_i)}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{x - U_{av}t}{2\sqrt{D_L t}} + \exp \frac{U_{av}x}{D_L} \operatorname{erfc} \frac{x + U_{av}t}{2\sqrt{D_L t}} \right] + S_i \quad (5)$$

爲了研究比較上的方便，我們將方程式(5)無因次化後可得：

$$\frac{S}{S_i} = 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1-P}{2\sqrt{DP}} \right) + \exp \left(\frac{1}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{1+P}{2\sqrt{DP}} \right) \right] \quad (6)$$

其中 $P = \frac{U_{av}t}{L}$ 。若將上式(6)以 (S/S_i) 爲 y 軸，無因次化時間 P 爲 x 軸可得一類似 S 型的曲線如圖 4 所示。圖 4 中的細線爲無延散效應的柱塞流所形成的陡降式 F 曲線。

不論是陡降或是陡升的 F 曲線中，當 $S/S_0=0.5$ 時所對應的 F 曲線爲一轉折點。此點所對應的無因次時間 P ，在物理的意義上爲追蹤劑到達一半濃度所須的時間，一般稱爲移動時間(travel time)。若爲混合效果較爲完全的系統中(即延散數愈大)其所對應的移動時間會愈小。

三、延散數的求取

本研究利用中央微分法來求取延散數。將 $x=L$ (管長)代入方程式(5)中可得：

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{L - U_{av}t}{2\sqrt{D_L t}} + \exp \frac{U_{av}L}{D_L} \operatorname{erfc} \frac{L + U_{av}t}{2\sqrt{D_L t}} \right] \quad (7)$$

將(7)式對 t 微分得

$$S_i = \frac{d(S/S_0)}{dt} = \frac{L}{2\sqrt{\pi D_L t^3}} \exp \left[-\frac{(L - U_{av}t)^2}{4D_L t} \right] \quad (8)$$

當 $L=U_{av}t$ 時，方程式(8)可簡化成

$$S_i = \frac{L}{2\sqrt{\pi D_L t^3}} \quad (9)$$

即

$$D_L = \frac{L^2}{4\pi S_i^2 t^3} \quad (10)$$

若把陡降階梯式追蹤劑注入法試驗所得數據繪出 $S/S_0 - t$ 曲線圖，取 $S/S_0 = 1/2$ 時所對應曲線的斜率 S_i 及時間 t ，利用方程式(10)即可獲得延散係數 D_L ，再代入方程式(2)即可獲得延散數 D 。

參、實驗材料與方法

一、連續式配水管線設備

此設備的主要目的是為瞭解在不同水力停留時間下對管線水力特性的影響，以及直管、彎管、孔穴三種不同的管型對水力特性的影響。這套設備的管材為鑄鐵管，其設備示意圖如圖 2 所示。

1. 反應器主體

本組管線是採用內徑 2cm 的直管，以向下螺旋 15 迴圈 (loop) 所構成，每一迴圈長為 420cm，由四段水管構成，並以彎管銜接，每段水管皆有約 5 度的斜度，其主要的功能為能夠產生位能差，使水流能夠順利流動。管線置放於鋼架上，鋼架為長 125cm、寬 85cm、高 170cm 之長方體構造，全長 6347cm，利用管末端的浮子流量計控制流量，在第 12 及第 15 圈安裝上寬深比 $\alpha=0.5$ 及 $\alpha=1$ 的孔穴，並在每一迴圈的轉彎處設有採樣點以為彎管的試驗結果。

2. 採樣點

圖 3 為配水管試驗設備採樣點示意圖。其中第一個英文字代表採樣點的管型 (S 表示直管，B 表示彎管，C 表示孔穴)，第二個英文字用來分辨當同一迴圈有二個以上的同種管型採樣點 (F 表示在迴圈的前端)，剩下的數字則用來表示取樣點所在的迴圈數，而各取樣點下方的數字表示距水源入口處的距離 (單位：cm)。

二、試驗方法

實驗方法是採用陡降階梯式注入法，試驗中以 NaCl 當溶質，地下水當溶劑，配製 NaCl 的濃度約為 125g L^{-1} ，做為試驗的追蹤劑。再利用階梯式注入法，將追蹤劑由混合槽注入配水系統中。根據四種不同的水力停留時間 (1 天、6 小時、1 小時、6 分鐘)，調整浮子流量計控制出流水的流量。以混杯法量測採樣點的 NaCl 濃度，採樣方法為將採樣口的原水去除約 1 毫升後，再取大約 4 毫升的水樣進行比電導度的量測。採樣時間間隔固定，減少採水樣時對水體流況的干擾。實驗的操作條件列於表 1。

肆、結果與討論

表 2-5 是以陡降階梯式追蹤劑注入法得出各採樣點的 F 曲線，再利用中央微分法求出各採樣點在每一水力停留時間的延散數，而此 F 曲線在追蹤劑濃度到達一半時所對應的時間為移動時間。本研究也針對所求得的延散係數與文獻

值做比較發現，水力停留時間為 1 天的平均延散係數約為 $7 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ ，水力停留時間為 6 小時的平均延散係數約為 $4 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ ，水力停留時間為 1 小時的平均延散係數約為 $4 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$ ，水力停留時間為 6 分鐘的平均延散係數約為 $9 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$ ，這些延散係數的範圍與文獻(Biswas *et al.*, 1993)中提到的延散係數範圍($1.03 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$ 至 $6.14 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$)大致一樣。以下分別探討溶質在直管、彎管、孔穴的水力特性。

一、直管

延散數的大小，代表溶質在配水系統中混合效率的高低。當延散數大時，溶質在配水系統中混合效率高；反之，當延散數小時，混合效率則低。從距離的觀點來看，水流於層流($Re < 2100$)時，不論在那一個水力停留時間下，其延散數隨著採樣點距離的增加有愈來愈小的現象，其結果如圖 5 所示；在相同的採樣點下，水力停留時間愈短，其延散數愈大，其結果如圖 6 所示。

由上述結果可知，在自來水配水管線中，流體並非呈現完全混流或完全柱塞流，而是由混合流漸向柱塞流發展，這也說明了管線中的物質會在距離入口處較遠的地方沉澱下來，且此現象會因管線的加長而愈來愈嚴重。

二、彎管

圖 7 是不同水力停留時間下，各彎管延散數比較的結果。由圖 7 中可知其結果與直管的結果相類似，即不論水力停留時間的長短，當採樣點離入口處愈遠時，其延散數有愈來愈小的趨勢。圖 8 為不同彎管採樣點，各水力停留時間其延散數比較的結果。由圖 8 可知其趨勢與直管相似，即隨著水力停留時間的減小，其延散數有愈來愈大的現象。

圖 9 為不同水力停留時間下，同一圈彎管前的直管部分(S5)與彎管(B5)延散數比較結果。由圖 9 得知，不論那一個水力停留時間下，彎管的延散數都小於彎管前的直管部分，其下降的幅度約為 8.81%，這是因為彎管距入口處的距離較直管遠 10 公分所造成的。此外，流體流入彎管後，由於流向的改變，使得水體所含的動量減少，間接地影響流速，此原因也是造成彎管的延散數小於直管的延散數。因此，在管中即將進入彎管的水流流速會有局部變小的趨勢，而此現象有可能會造成配水管中餘氯、有機物質及微生物的累積。

圖 10 為探討各水力停留時間的彎管前(SF9)、彎管(B9)和彎管後(S9)延散數的比較。由圖中可知，不論水力停留時間為多少，在彎管的延散數都比彎管前和彎管後小。造成這種現象的原因，可能是當水流流經彎管後，在彎管後方會產生渦流的現象，使得水流在此產生瞬間的混合，且因彎管後的流速會比彎管中的流速快，故在彎管後方的延散數反而比彎管部分大，其上升的幅度約為 3.65%。

綜合而言，每當水流流入彎管時，延散數會減小，在彎管後的延散數則因渦流的發生而上升，此雙重的影響會使配水管網中的彎管部分造成水質異常或

物質的累積，值得注意。

三、孔穴

配水系統中，管與管的接合處由於不易吻合，常常會造成空隙存在，此空隙稱為孔穴(cavity)。由於孔穴在配水管線中有存在的事實，而且出現的頻率很高，因此探討孔穴在配水系統中所扮演的角色實屬必要。為了研究孔穴對配水系統水質的影響，本研究設備的第 12 及 15 迴圈上設有兩種規格的孔穴。而為了能突顯孔穴的流況及混合效率以便我們的研究，將其形狀依寬深比 α 放大，其中第 12 迴圈(C12)為 $\alpha=0.5$ 的較深孔穴，第 15 迴圈(C15)為 $\alpha=1.0$ 的較淺孔穴。

圖 11 為不同水力停留時間下，各孔穴延散數的變化情形。由結果可知各孔穴的延散數與採樣點離入流口遠近並沒有關係，反而是第 15 圈孔穴的延散數比第 12 圈孔穴的延散數大，而造成這種特殊現象的原因，主要是因為孔穴中的流場與直管明顯的不同。圖 13 及圖 14 為簡氏(1995)在其碩士論文「微粒在直管與對稱性孔穴中傳輸之研究」中所模擬的孔穴流場分布情形，圖中很明顯的可以看出直管部的流場與孔穴的流場為完全不一樣的流況。在直管中流線呈現水平，而在孔穴中流線則形成迴圈，此種迴圈會造成所謂的旋轉流現象，而在孔穴內部的流況，與孔穴的幾何性質有關。當寬深比 $\alpha=1$ 時會形成一個旋轉流，且隨著寬深比的減小(即孔穴愈來愈深)旋轉流數目會愈來愈多，但其每一個旋轉流的強度也相對的降低。

C12 為較深的孔穴，C15 為較淺的孔穴。比較此二組孔穴的延散數可發現，採樣點 C12 的延散數都比採樣點 C15 要來的小。這種現象是由於孔穴中的旋轉流能量來自於直管中流動的水體，故當旋轉流與直管中的流體距離愈遠或中間的阻礙愈多時，其旋轉流的強度會降低，即旋轉流的現象愈不明顯。因此，孔穴較深者除與直管部分距離較遠外且有較多的分離流，使直管中的能量不易傳入，故混合效應較差。

圖 12 是在不同孔穴採樣點下，各水力停留時間延散數的變化情形。由圖 12 可知，隨著水力停留時間減小其延散數愈大，但水力停留時間為 6 分鐘時，延散數有降低的趨勢，但其值與直管和彎管的延散數相差不大，其可能是因為流速太大以致於旋轉流效應變得不明顯，因而延散數下降。

由表 2-5 中亦可發現，在不同水力停留時間下，孔穴 C12 與 C15 的延散數比其前後直管的延散數大很多。水流於孔穴為層流時，C12 與其前面的直管(S12)相比，其上升的幅度約為 3-5 倍，C15 與其前面的直管(S15)相比，其上升的幅度約為 15-60 倍，其原因是因為在孔穴中會形成旋轉流現象，使得孔穴內延散數會突然上升，而增加其混和效應，值得注意的是孔穴中的旋轉流現象會使物質一但由直管進入孔穴後不易流出來；對顆粒性物質而言，如微生物，因重力的原因進入孔穴，造成物質的累積。而在移動時間方面，直管與彎管的移動時間與理論值的誤差約在 $\pm 5\%$ 左右，算是一合理的誤差，但在孔穴的移動時間則會延遲出現，其誤差約在 $\pm 20\%$ 左右，此現象是因直管與孔穴交界處

的分離流所造成；對溶解性的物質而言，如消毒劑，會因為直管與孔穴交界處的分離流而不易進入。此現象將造成配水系統水質二次污染的一大隱憂，值得進一步的探討。

伍、結論

對直管而言，當水流為層流時，相同位置的採樣點其延散數隨著水力停留時間變短而有愈來愈大的趨勢，即延散數隨著流速的增加而增加；而不論那一個水力停留時間下，延散數隨著採樣點距離的增加而減少。因此在自來水配水管線中，流況並非是完全混合流或完全柱塞流，而是由混合流漸向柱塞流發展，即當採樣點距離增加時，其混合效果會變小。

對彎管而言，其延散數的變化趨勢與直管完全一樣，也就是其延散數會隨著流速的增加而增加，隨著採樣點距離的增加而減少。在彎管內，由於流向的改變以及能量的損耗，加上距離的增加，使得彎管的延散數都小於彎管前的延散數，但在彎管後延散數會因渦流現象的發生而加大，而此渦流為一很慢的旋轉流，故彎管後的延散數還是比彎管前的延散數小。此種彎管延散數變小的現象，可能會使配水管線中彎管部分造成水質的異常。

對孔穴而言，水流於層流時，其延散數隨著水力停留時間減小而有愈來愈大的趨勢。因孔穴中的流況與直管完全不同，故孔穴的延散數與採樣點距離無關，而與孔穴本身的幾何形狀有關，通常較深孔穴的延散數比較淺孔穴的延散數小。孔穴中的旋轉流現象會使物質一但由直管進入孔穴後不易流出來，造成污染物的累積。而孔穴移動時間的延遲則會造成溶解性物質(如消毒劑)不易進入，無法有效去除有毒物質。

誌謝

本研究承蒙國科會大專學生參與專題研究計畫(NSC 87-2815-C-005-018-E)特此謝誌。

符號說明

D_m	: 分子擴散係數(cm^2s^{-1})
D_h	: 力學延散係數(cm^2s^{-1})
D_{dis}	: 延散係數(cm^2s^{-1})
D	: 延散數
U_{av}	: 反應器內水流的平均流速(cm s^{-1})
L	: 反應器長度(cm)
S	: 溶質濃度(mg/l)
t	: 反應時間(s)
x	: 橫軸
y	: 縱軸
D_L 、 D_T	: 縱向及橫向延散係數(cm^2s^{-1})
S_i	: 初始溶質濃度(mg/l)

S_1 、 S_r	:管線的上方半面及下方半面初始溶質濃度(mg/l)
P	:無因次化時間
V	:反應器體積(cm^3)

參考文獻

李連堯、盧重興、李志成(1996)“自來水配水系統中基質、餘氯及微生物傳輸模式之研究”，第十三屆自來水研究發會報告集，103-118。

Levenspiel, O., "Chemical Reaction Engineering", John Wiley & Sons, second edition, New York, 1972.

曹舜評、萬鑫森，“二維無反應多孔體橫向流散係數之研究”，國立中興大學水土保持學報，Vol.26，No.1，pp.27-37，1994。

簡志益，“微粒在直管與對稱性孔穴中傳輸之研究”，國立中興大學環境工程研究所碩士論文，民國84年6月。

Allen M.T., Taylor R.H. and Geldreich E.E. (1980) "The Occurrence of Microorganisms in Water Main Encrustations", J.AWWA, vol. 72, no. 11, pp.614-625.

Leij, F.J., and J.H. Dane, 1990, "Analytical solution of the one-dimensional advection equation and two- or three-dimensional dispersion equation." *Water Resour. Res.* 26:1475-1482.

表 1. 實驗的操作條件

參數	條件	附註
流速	(1)4.41cm/min (2)17.63cm/min (3)105.78cm/min (4)1057.8cm/min	
流量	(1)13.85ml/min (2)55.39ml/min (3)332.32ml/min (4)3323.2ml/min	
雷諾數 (VD/ν)	(1)16 (2)64 (3)384 (4)3840	D = 2cm ν = 0.55 cm ² /min
溫度	27.5°C	
pH 值	6.5-7.5	
背景 濃度	0.2ms/cm	地下水
追蹤劑 濃度	125gNaCl L ⁻¹ = 110ms/cm	精鹽配製

表 3. 水力停留時間為 6 小時，各採樣點的
延散數及移動時間

採樣 點	延散數 (×10 ⁻⁴)	理論移動時間 (min)	移動時間 (min)
SF1	15.69	23	24.8
S5	4.58	122	133
B5	4.25	124	137
S8	3.89	194	213
B8	3.87	195	214
SF9	3.84	219	238
B9	3.67	219	239
S9	3.85	219	238
SF12	3.47	288	315
C12	21.14	288	369
S12	3.44	289	316
B14	3.25	338	370
SF15	3.19	359	396
C15	106.30	360	452
S15	3.08	360	394

表 2. 水力停留時間為 1 天時，各採樣點的
延散數及移動時間

採樣 點	延散數 (×10 ⁻⁴)	理論移動時間 (min)	移動時間 (min)
SF1	13.17	91	92
S5	3.69	488	512
B5	3.23	495	524
S8	2.97	774	823
B8	2.84	781	832
SF9	2.70	875	927
B9	2.56	876	927
S9	2.62	878	927
SF12	2.48	1152	1236
C12	10.55	1154	1295
S12	2.31	1155	1237
B14	1.97	1353	1442
SF15	1.93	1437	1520
C15	32.30	1438	1630
S15	1.84	1440	1520

表 4. 水力停留時間為 1 小時，各採樣點的
延散數及移動時間

採樣 點	延散數 (×10 ⁻⁴)	理論移動時間 (min)	移動時間 (min)
SF1	22.88	4	3.85
S5	9.03	20	21.0
B5	8.03	21	21.3
S8	7.30	32	33.2
B8	7.18	33	33.3
SF9	6.37	36	36.2
B9	5.98	37	36.2
S9	6.20	37	35.8
SF12	5.71	48	48.8
C12	34.10	48	78.0
S12	5.24	48	48.9
B14	4.14	56	57.3
SF15	3.80	60	63.75
C15	227.40	60	84.1
S15	3.33	60	61.25

表 5. 水力停留時間為 6 分鐘，各採樣點的延散數及移動時間

採樣點	延散數 ($\times 10^{-4}$)	理論移動時間 (min)	移動時間 (min)
SF1	45.45	0.38	0.57
S5	21.44	2.03	2.18
B5	20.50	2.06	2.17
S8	15.74	3.23	3.28
B8	15.71	3.25	3.28
SF9	14.83	3.65	3.72
B9	14.23	3.65	3.71
S9	14.75	3.66	3.73
SF12	12.66	4.80	4.65
C12	13.87	4.81	6.00
S12	12.28	4.81	4.64
B14	12.04	5.64	5.75
SF15	11.98	5.99	6.06
C15	14.96	5.99	6.05
S15	11.68	6.00	5.93

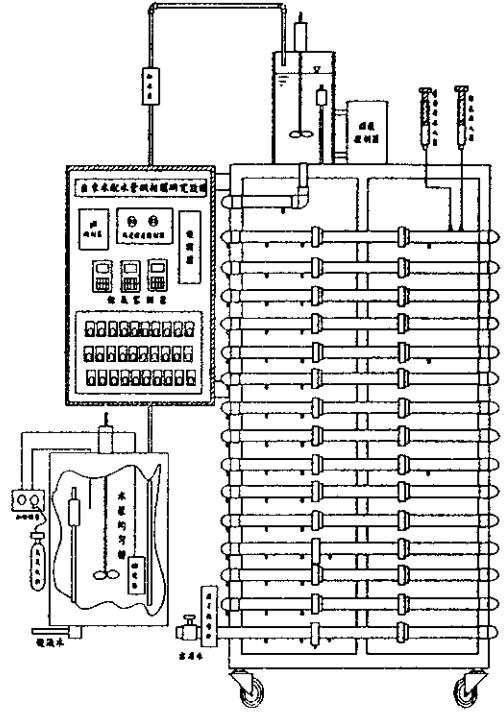


圖 2. 連續式配水管試驗設備圖

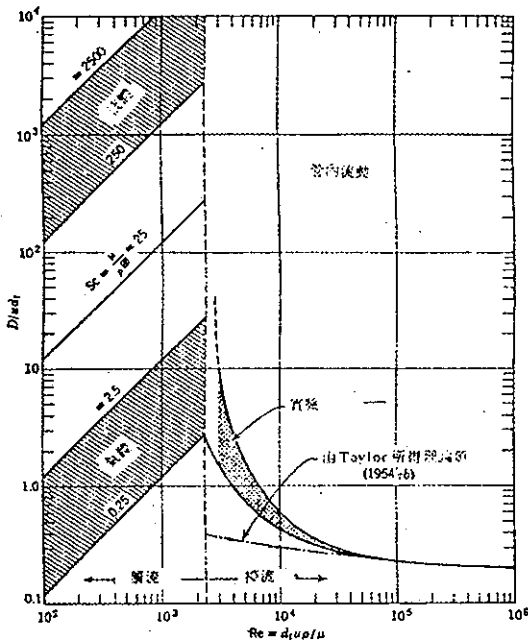
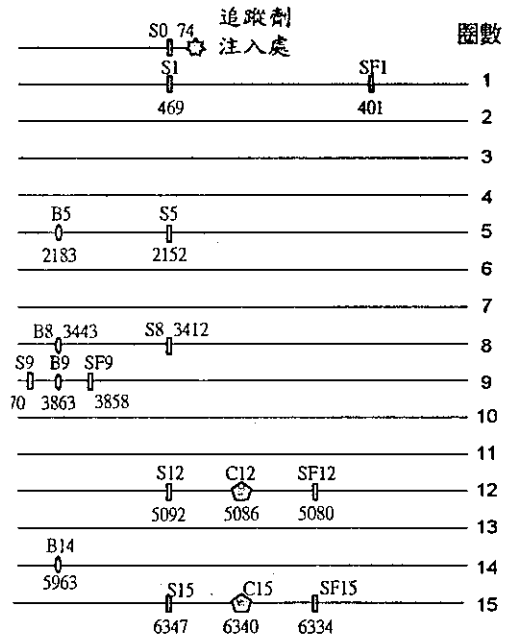


圖 1. 圓管中延散強度與雷諾數的關係示意圖 (Levenspiel, O., 1972)



□ 直管採樣點, S ○ 彎管採樣點, B
 ⊕ 孔穴採樣點, C

圖 3 連續式配水管設備採樣點示意圖

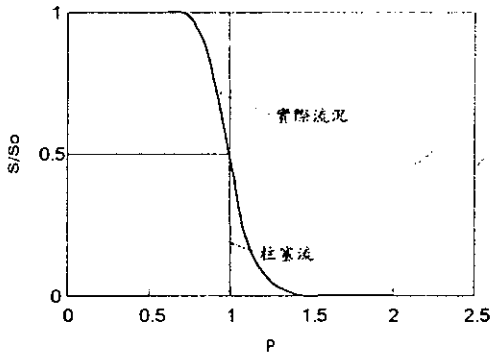


圖 4 陡降階梯式注入法的 F 曲線

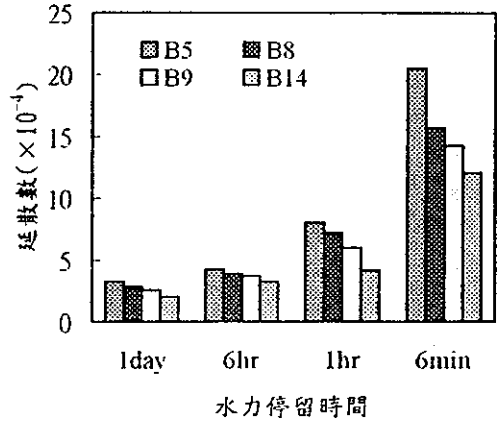


圖 7. 不同水力停留時間下，各彎管採樣點的延散數

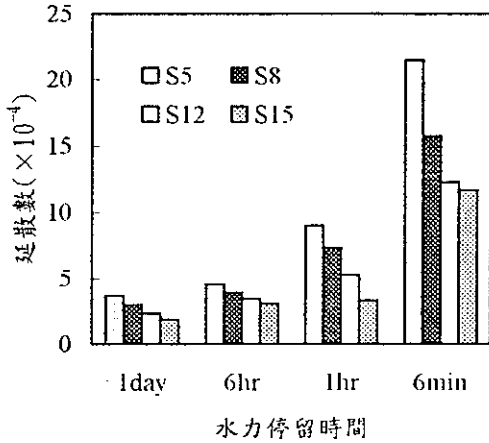


圖 5. 不同水力停留時間下，各直管採樣點的延散數

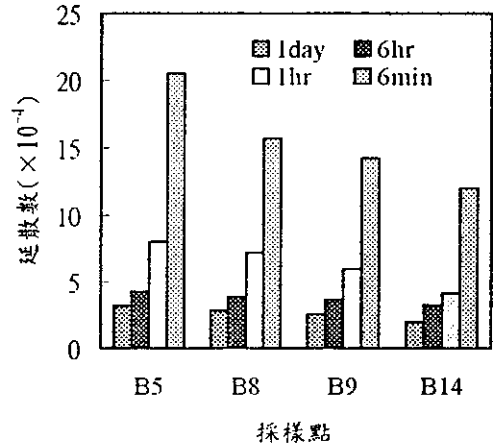


圖 8. 不同彎管採樣點下，各水力停留時間的延散數

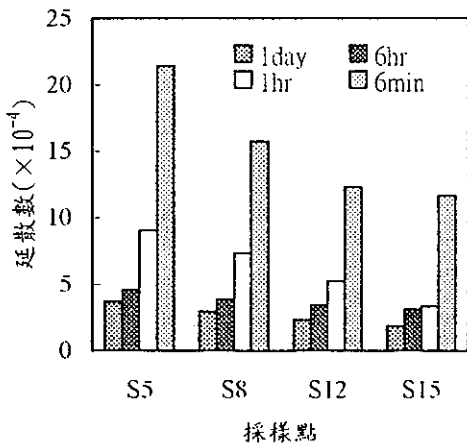


圖 6. 不同的直管採樣點下，各水力停留時間的延散數

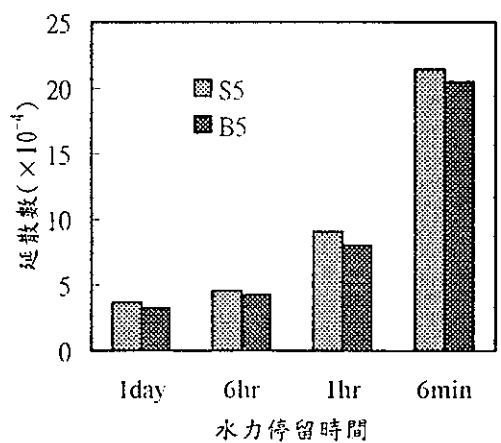


圖 9. 不同水力停留時間下，同一圈彎管前的直管部分與彎管的延散數

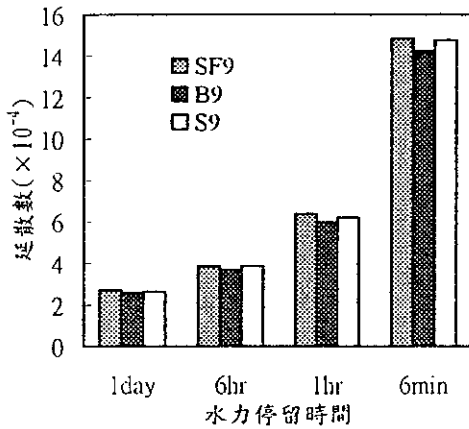
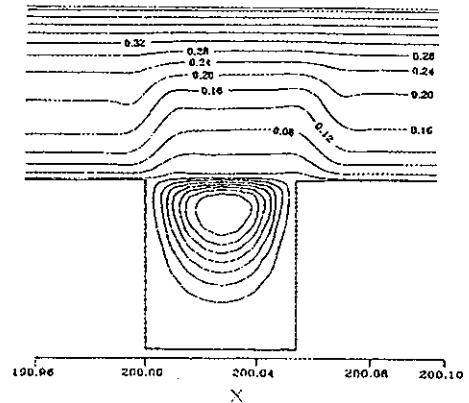


圖 10. 不同水力停留時間下，同一圈彎管前後的直管部分與彎管的延散數



無因次化軸向距離

圖 13. $Re=2000$ ， $\alpha=1$ 時，直管與對稱性孔穴內流線函數的分布情形

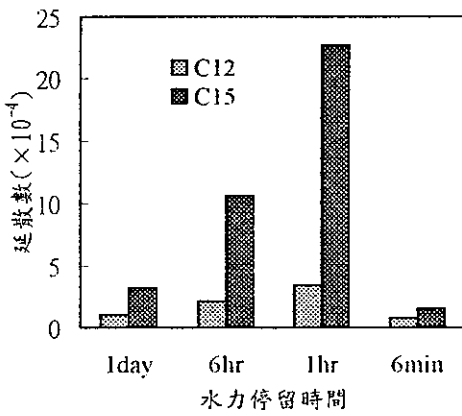
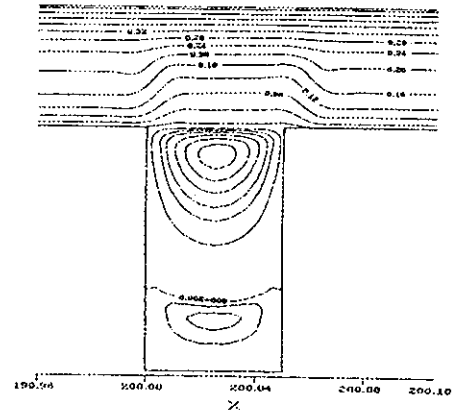


圖 11 不同水力停留時間下，各孔穴採樣點的延散數



無因次化軸向距離

圖 14 $Re=2000$ ， $\alpha=0.5$ 時直管與對稱性孔穴內流線函數的分布情形

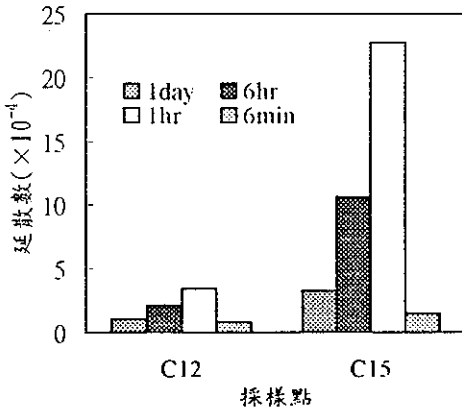


圖 12 在不同孔穴採樣點下，各水力停留時間的延散數