

自來水配水系統中各種管型對餘氯消耗的研究：

(一)不規則管壁

Effects of Various Pipe Geometry on the Chlorine Residual Decay in Distributed Water: (1) Irregular Pipe Surface

李舒寧¹ 李連堯² 盧重興³

摘要

在自來水配水系統中餘氯的消耗原因非常複雜，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、氯、有機物質)和生物性因子。其中物理性因子中的管型，因所造成的影響是人為設計上可以克服，且對水質有立即改善的效果，因此有其研究的必要。

本研究內容主要是針對配水管中的直管及不規則管壁如管內障礙物及寬深比為 1/3、1/2、1、2 的孔穴進行研究。由研究的結果發現，若要克服管型及不規則管壁所造成餘氯濃度分布不均的現象，應該將流況保持在紊流情況，如儘量使用大管徑的水管、保持在較高的流速等。在直管研究上發現，管中餘氯濃度與流速之間呈現指數關係，且當管中流速改變愈大，則管中餘氯濃度下降到穩定濃度的時間與理論水力停留時間的比值會愈大。在不規則管壁上，障礙物後方對餘氯濃度的影響比障礙物前方嚴重，所以配水管線中若有焊接管壁障礙物、結節或沈澱的發生，須注意障礙物後方的水質變化。在孔穴方面，由實驗的結果得知，水中的餘氯並不易進入孔穴中，且寬深比愈小對餘氯濃度分布的影響就愈大。

前言

配水管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)(圖 1、圖 2)，甚至分支管與 T 型管等，使整個配水系統變得複雜。而這些管型的存在將會產生各種大小的分離流(separated flow)、旋轉流(recirculated 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(Galwin, 1989)。

¹ 國立中興大學環境工程學系大學部

² 國立中興大學環境工程學系研究所博士班

³ 國立中興大學環境工程學系教授

因為自來水輸送管線常因地形變化、道路開發或需水量不同而有所改變，故探討管型變化對餘氯消耗的影響是有其必要性。本研究的内容包括在不同流速下，探討不同幾何構造的孔穴、障礙物等管型對餘氯濃度消耗的影響。

文獻回顧

針對配水系統中管型所導致自來水水質變化的相關研究，國內外均不常見。國內的盧氏 (1993) 及簡氏 (民國 84 年) 曾利用理論的方式探討配水管管末端地區的流場分布與配水管線中微粒的傳輸特性及管線接頭所形成之對稱性孔穴流對微粒捕抓與沈澱的影響。由其研究中可很明顯地看出直管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直線，而在孔穴中流線則形成迴圈，且在直管與孔穴的交界處會形成所謂的分離流。而在孔穴內部的流況，與孔穴的幾何性質有關，當寬深比 $\alpha=1$ 時會形成一個渦流，且隨著寬深比的減小 (即孔穴愈來愈深) 渦流數目會愈來愈多。而對具有重力的微粒傳送而言，就同一管長與管徑而言，Stokes 數愈大，沈澱效率較大，此乃因慣性力增加的原故；對同一 Stokes 數的微粒，於低流體雷諾數時，沈澱效率較大，此乃因微粒在低雷諾數流體下，其在管中的停留時間也愈大。此外，假始微粒掉入孔穴中，滯留時間便無窮大。

國外的 Galowin (1989) 曾在 10cm 直徑的管中，以微粒的流動沉澱現象來說明配水管中物質 (含微生物) 遇到各種不同形狀高度的障礙物的分布情形。由其實驗結果發現當流速超過 0.3m/s 時，沒有顆粒的累積；而若流速低於 0.1m/s 時，所有顆粒均會沉澱下來。而在各種不同幾何形狀的孔穴研究中，更明白地指出支配分離、再循環水流的因子是孔隙的深度和寬度。而當物質通過一障礙物時會在障礙物的上下游處形成兩個封閉的循環水流。在下游分離區域的水流會被向上送至貫穿水流 (through-flow) 與漩渦水流的邊緣後下降，而引起在分離區域內的“封閉循環水流”。而障礙物後的再附著點 (point of reattachment) 為物質是否會進入分離區域的重要指標。在“再附著點”之前的水流將會進入分離區域而造成水管中水質二次污染的問題。而“再附著點”會因越過障礙物的流速增加移到更下游的地方，使下游分離區域的大小增加。但值得一提的是，當流速太大時，因紊流混合及漩渦旋轉的速度也增加反而會使物質不易沉澱。另外，在上游的分離區域隨著流速增加而減少。

研究方法

試驗設備

本試驗的目的在於瞭解不同孔穴及不規則管壁對餘氯消耗的影響，其中設計了 6 種管型，包括直管、孔穴的寬深比值 (α) 為 1/3、1/2、1 及 2 與障礙物高度為管徑 3/4 倍 ($L/D=3/4$) 的障礙物。圖 3、圖 4 分別為 $\alpha=1/3$ 、 $L/D=3/4$ 管型的示意圖。

反應器的主體為模組式設計 (如圖 5)，以方便更換各種管型，各管型的材質均採 PVC 材質，每一種管型其內徑均 10cm，長 40cm，並以四節為單位，串成一條直線水平的管線並以懸掛方式掛在鋼架上，鋼架為長 260cm、寬 76cm、高 150cm

之立體構造。利用管末端的浮子流量計控制流量，原則上在每種管型的前後 10cm 處及變化區均設有取樣口。

操作條件與試驗方法

本研究的試驗方法主要有下面二種：

第一種試驗方法則是將含氯濃度約 1.04 mg/L 的水注滿管線之後，再以不含氯的水注入，同時打開流量計至所需的流速，於水力穩定時間後取樣檢測。

第二種試驗方法是將管線中先充滿未含餘氯的水，並打開流量計至所需的流速，待流速穩定之後，再啓動加氯機加入氯源，於水力穩定時間後取樣檢測。本試驗方法的設計流速為 5、20、100、1000cm/min 以代表配水管中層流及紊流的情形，加氯濃度則控制在 1.04mg/L 左右，而試驗所使用的水源是取自台中市國立中興大學地下抽取的地下水，使用的氯源為 Riedel-deHaen Chemical Industries Ltd. 的 NaOCl。各種流速下的相關水力參數如表 1。

水質分析方法

本試驗是採用 HACH 公司所生產之攜帶型分光光度計 (Pocket Colorimeter Chlorine) 檢測總餘氯及自由餘氯，此儀器是採用 DPD 比色法 (N,N-diethyl-p-phenylenediamine)，其有效測定範圍在低濃度為 0.01-2.20mg/L，在高濃度為 2.0-4.5mg/L。

結果與討論

流速對餘氯濃度的影響

在很多的情況下，我們對於一個加氯量穩定的自來水中，當流速改變時其管中濃度變化的情形非常有興趣。故研究一開始，將含總餘氯濃度 1.04mg/L 的水注滿管中，以找出不同的流速在距加氯點 127cm 處的所須穩定的時間及穩定時的濃度。試驗結果如表 2。由表 2 可發現，在相同加氯濃度下，不同的流速會有不同的穩定濃度，也就是流速愈快，穩定時的濃度則愈低。而不同流速與其穩定的濃度可迴歸如下：

$$\text{穩定濃度 (mg/L)} = 2.6253 \times \text{流速 (cm/min)}^{-0.5437} \quad R^2 = 0.978 \quad (1)$$

由方程式 (1) 中，我們發現若管中的流速發生改變時，管中餘氯濃度的變化與流速並非成正比，這意謂著當流量加倍時，管中餘氯濃度並非減半，而是呈指數關係遞減。另外，也可經由方程式 (1) 所獲得的預估穩定濃度，而預先決定加氯量改變的大小，以使管線中的餘氯濃度均能維持在法規範圍內。研究中亦發現，當管中流速發生變化時，到達穩定濃度所須的時間與理論水力停留時間的比值與流速的關係式如下：

$$\frac{\text{濃度穩定時間}}{\text{理論水力停留時間}} = 3.9121 \times \ln(\text{流速, cm/min}) - 7.9346 \quad R^2=0.975 \quad (2)$$

在這迴歸式中，可以看出當管線中的流速愈快時，其達到穩定濃度所須的時間與理論水力停留時間的比值就愈大。這結果說明了當管線中流速改變愈大（如管線突然破裂或消防用水的使用），則管中餘氯濃度下降到穩定濃度的時間與理論水力停留時間的比值會愈大。

由這兩個方程式也可以推估，在管徑 10 cm 的 PVC 管中，一開始餘氯濃度維持在 1.04 mg/L，若流速突然由 0.00084 m/sec 增至 4.16m/sec 時，在距加氯處 127cm 處的餘氯濃度會在 0.3 分鐘由 1.04 mg/L 下降至只剩下 0.01mg/L，這表示在此處之前的管中已幾乎無法保持消毒的功能。也就是說淨水廠加氯機的加氯量必須在 0.3 分鐘之內提高加氯量以保持水中的餘氯濃度。

直 管

為能瞭解管線中餘氯變化的基本現象，以為接下來研究各種管型所造成影響的基礎，故在穩定研究之後，我們將討論直管中餘氯變化的情形。試驗中分別在距加氯處 44、86、124、168、187cm 取樣。圖 6 及圖 7 分別是加氯濃度 1.04mg/L 總餘氯及自由餘氯的結果。而為能比較實驗的結果，研究結果將以下面的兩個參數進行分析：

$$\text{餘氯消耗率(\%)} = \frac{\text{注入餘氯濃度} - \text{取樣點餘氯濃度}}{\text{注入餘氯濃度}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{平均餘氯消耗速率} \left(\frac{\text{mg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{min}} \right) = \frac{(\text{注入餘氯濃度} - \text{取樣點餘氯濃度})}{1000 \times \text{理論水力停留時間}} \quad (4)$$

表 3 是將此試程的試驗結果利用上面兩個方程式所計算出的結果。由表 3 可看出當流速愈快時，不論是總餘氯或是自由餘氯的消耗率均愈少。但就平均餘氯消耗速率而言，則不論是總餘氯或是自由餘氯，流速愈快時卻是愈大。考慮這兩個參數的物理意義，不難發現其差別在於是否考慮餘氯在水中的停留時間。當就同一取樣點而言（即就餘氯消耗率來看），管中流速愈慢時（停留時間愈久），餘氯濃度自然會較低，因其反應的時間較久。然若考慮同一反應時間（即就平均餘氯消耗速率來看），流速愈快則混合效果愈好，故平均餘氯消耗速率就愈大。這結果說明了，在管線末端或是用水離峰時間，自來水中的餘氯濃度除會因停留時間較久（反應時間較久）而降低外，當流速加快時（如用水尖峰時段），餘氯濃度會因平均消耗速率的上升而更加難以保持。

平均餘氯消耗速率和流速的關係式如下：

$$\text{平均總餘氯消耗速率} = 3 \times 10^{-6} \times \text{流速}^{0.7174} \quad R^2=0.979 \quad (5)$$

$$\text{平均自由餘氯消耗速率} = 2 \times 10^{-6} \times \text{流速}^{0.7295} \quad R^2=0.995 \quad (6)$$

其結果與方程式 (1) 類似，也是呈現指數的關係，即低流速環境對平均餘氯消耗速率的改變比高流速環境大，故對於配水管中餘氯濃度的保持，低流速比高流速更不易。因此，若純粹對餘氯濃度的保持上來討論，自來水公司對餘氯的監測是晚上比白天重要，尤其是凌晨的時段。

另外，就餘氯的消耗率而言，總餘氯當中因含有氯胺 (結合餘氯)，而自由餘氯會比結合餘氯易被消耗，所以總餘氯的消耗率較自由餘氯小，且自由餘氯佔總餘氯的比例會隨著距離的增加而逐漸降低；就平均餘氯消耗速率而言，總餘氯之所以大於自由餘氯是由於其消耗速率中包含了自由餘氯與結合餘氯的消耗速率。

管壁障礙物

管壁障礙物的形成，包括了人為的 (如焊接管壁) 及自然的 (如使用一段時間後產生的結節及沈澱)，為瞭解及突顯這些障礙物對水質的影響，本試驗在 PVC 管壁上設計了高度為管徑 3/4 倍 ($L/D=3/4$) 的障礙物。實驗結果表示於圖 8 至圖 11，管下方的數字為總餘氯的量，其中括號內為自由餘氯。而管內的曲線為流況示意曲線。

圖 8 為流速 5 cm/min (層流，雷諾數 $Re=90.70$) 時的試驗結果。在這種流況的情形下，會於障礙物上下游處形成封閉循環水流 (Galowin, 1989) 而造成滯留，故在此區應該沒有餘氯的存在，或即使存在濃度也應該極低。而由障礙物後方的第二點餘氯的濃度上升至初使加氯濃度可約略推估其後面的封閉循環水流區應在 10cm 以內。

當流速增加為 20 cm/min 時，因慣性的作用會使障礙物前方的滯留區變小，後方的滯留區加大 (如圖 9)，這結果導致了障礙物前方第二點的餘氯濃度的減少現象不及流速 5 cm/min，障礙物後方第二點的餘氯濃度減少的現象大於流速 5 cm/min。另外，因隨著流速的加快，物質傳輸的主要機制會漸漸地由流速所控制，此意謂著餘氯進入障礙物前後滯留區的機會將漸漸減少，而這也是為什麼此流速下障礙物前後的餘氯濃度會比流速 5 cm/min 小。同樣的，由障礙物後方的第二點餘氯濃度變化可知障礙物後方的封閉循環水流區應大於 10cm，此長度已比障礙物的高度 (7.5cm) 大。

由上面的推論可知，當流速加快到 100 cm/min (層流， $Re=1814$) 時 (如圖 10)，障礙物前方的滯留區會變得更小，而造成此試程實驗結果中障礙物前方兩點的餘氯濃度與加氯處的餘氯濃度相差不多。至於障礙物後方的餘氯濃度，原本照理會因後方滯留區的再加大而降至更低，然此流況因與紊流較接近，小渦流的漸漸形成，反將使餘氯濃度的下降不若 20 cm/min，但濃度降低的現象會持續較遠的距離。

流速 1000 cm/min ($Re=18140$) 為紊流的流況，由於渦流的形成會增加混合的程度，故即使是障礙物前後兩個取樣點的水樣，仍然沒有太大的變化情形 (如圖 11)。

綜合以上的結果可知，若要使管線中餘氯濃度分佈均勻，可加快流速使其保持在紊流的流況。而紊流的達成須雷諾數 (Re) 大於 2100，雷諾數因與流速、管徑成正比，所以選擇較大管徑的水管及流速較快的環境，不會為使管中餘氯濃度分佈均

勻的一種方法。由這結果也顯示，在使用長時間未使用的自來水時，應先完全打開水龍頭讓水流掉一些，除能使因擴散作用由管壁上所溶入水中的銅、鉛等有害物質流掉外，更可藉由管中流速的加快，所造成餘氯濃度分佈均勻的現象，使飲用的自來水水質得以保持。

若將這些試驗結果與距離加氯點同位置的直管試驗結果互相比較，發現障礙物後方對餘氯濃度的影響比障礙物前方嚴重，其中以 20 cm/min 的障礙物後方第一點差別高達 68%，而流速 1000 cm/min (紊流) 的差別最少，幾乎可說沒什麼變化。故配水管線中若有焊接、結節或沈澱的發生，須注意障礙物後方的水質變化。

孔 穴

配水系統中常在附件、分支接合管、凸緣連接管、閘及管壁表面的腐蝕凹痕等常會形成孔穴，爲了得知這些孔穴對餘氯濃度分佈的影響，本試驗設計了寬深比 (α) 爲 1/3、1/2、1 及 2 的四種孔穴管型。研究中爲了突顯孔穴對餘氯濃度分布的影響，以方便研究的進行，我們刻意加大了孔穴的尺度。表 4 爲各種不同流速的水流流經各種不同的孔穴時，孔穴中的餘氯濃度與孔穴前的餘氯濃度依下面的公式 (7) 所求得的结果。

$$\text{孔穴餘氯濃度變化率}(d\%) = \frac{\text{孔穴前的餘氯濃度} - \text{孔穴中的餘氯濃度}}{\text{孔穴前的餘氯濃度}} \times 100\% \quad (7)$$

由試驗結果發現，當水流流經孔穴時，水中的餘氯並不會進入孔穴中，故使孔穴餘氯濃度變化率均不爲零。而不論流速爲何，當孔穴的 α 值愈小 (愈深) 時，孔穴餘氯濃度變化率愈大。這現象的發生可利用簡氏 (民國 84 年) 所模擬的結果來解釋，本中提到直管與孔穴的交界處會形成分離流，而在孔穴內部的流況，與孔穴的幾何性質有關。當寬深比的愈來愈小時 (即孔穴愈來愈深)，由直管至孔穴底部的分離流數目愈來愈多，故餘氯愈不易進入孔穴中 (如圖 12)。

就流速的影響方面來說，當流況爲層流時 (流速爲 5 cm/min、20 cm/min、100 cm/min)，對於 $\alpha \leq 1$ 的孔穴，孔穴餘氯濃度變化率會隨著流速的增加而變大，這意謂著水流中的餘氯愈不易進入孔穴中，維持孔穴中的水質。造成這現象也是因爲當流速增加時，對流現象對於物質的傳輸影響會相對顯著，而使餘氯不易進入孔穴中。但對於 $\alpha > 1$ 的孔穴，其孔穴餘氯濃度變化率卻完全相反，也就是流速愈大，孔穴中的餘氯濃度就愈高，這是因爲在 $\alpha > 1$ 的孔穴中，分離流並未形成，管線中含有餘氯的水可以進入孔穴內 (如圖 13)，故當流速愈快時，餘氯在孔穴中的時間愈短，因此孔穴餘氯濃度變化率會隨流速增加而降低。

而在流況爲紊流時 (流速爲 1000 cm/min)，不論是何種孔穴，其孔穴餘氯濃度變化率均比層流小，這表示說紊流情況下孔穴中的餘氯濃度比層流高。比較 α 值 ≤ 1 的各種孔穴，可發現其孔穴餘氯濃度變化率與層流一樣，隨 α 值愈小 (愈深) 而增加，這結果的也是因爲孔穴愈深，紊流同樣也愈不易將餘氯帶到孔穴底部。

圖 14 中虛線是流速 5 cm/min 的水流流經寬深比 $\alpha=1/3$ 的孔穴，從開始加氯之後的 100min 之內孔穴外及孔穴中的連續觀測結果；實線則是以孔穴進行 100min，

初始餘氯濃度 1.3 mg/L 的批次實驗結果。由圖中可以很明顯地看出孔穴外的餘氯濃度在 80min 之後濃度已增加到 1.4 mg/L 左右且已穩定，而孔穴中的餘氯濃度卻依舊很低 (0.05mg/L)。與批次實驗比較，孔穴在 100 分鐘內幾乎沒有什麼消耗，這表示孔穴本身對餘氯濃度的消耗很少，故孔穴中的餘氯濃度之所以保持那麼低的真正原因確實是因分離流的存在，使直管中的餘氯不易進入所致。

由上述結果得知，在配水管線中應儘量不要出現孔穴，因為除了直管中的餘氯難以進入孔穴中外，同時該處的低餘氯濃度，減少了消毒效用，只要有微生物附著，便有可能大量生長繁殖污染水質，故如管線接合處及管壁上的小孔隙等易忽略的小地方應特別注意。另外，幹管所分出的支管，最好在連接處做成漏斗型 (使 α 值大於 1)，以防止支管內餘氯濃度下降太快。如果水中有不可避免的孔穴存在，最好將其設計成寬且淺的孔穴 (使 α 值大於 1)，讓餘氯能夠進入。

結論及建議

1. 若要使餘氯濃度分佈均勻，克服管型及不規則管壁所造成餘氯濃度分佈不均的現象，應該將流況保持在紊流情況，如儘量使用大管徑的水管、保持在較高的流速等。但須注意流速愈快時，平均餘氯消耗速率會愈大。
2. 配水管線中流速與餘氯濃度為指數關係。
3. 管線中流速改變愈大 (如管線突然破裂或消防用水的使用)，則管中餘氯濃度下降到穩定濃度的時間與理論水力停留時間的比值相差愈多。
4. 管線末或用水離峰時段，端自來水中的餘氯濃度除會因停留時間較久而降低外，當流速加快時 (如用水尖峰時段)，餘氯濃度會因平均消耗速率的上升而更加難以保持。
5. 若純粹對餘氯濃度的保持來討論，自來水公司對餘氯的監測是晚上比白天重要，尤其是凌晨的時段。
6. 由水流流經障礙物的餘氯濃度分布結果可知，障礙物後方對餘氯濃度的影響比障礙物前方嚴重，所以配水管線中若有焊接、結節或沈澱的發生，須注意障礙物後方的水質變化。
7. 由水流流經孔穴的餘氯濃度分布結果可知，水中的餘氯並不易進入孔穴中。因此如果水中有不可避免的孔穴存在，最好將其設計成寬且淺的孔穴 (使 α 值大於 1)，讓餘氯能夠進入以維持水質。
8. 配水管網中的管型變化非常的多，如分叉管、彎管、漸縮管、漸擴管、突縮管、突擴管等，故應繼續針對其他管型加以研究。

誌 謝

1. 本研究承蒙國科會部份經費補助(NSC 86-2211-E-005-013)，特此誌謝。

2. 本研究能順利的完成，乃因本研究室的自來水配水系統研究小組(WDSRG)共同協力，特此誌謝。

參考文獻

1. Lu, C. and Yeh, A.C., "Modeling of Particle Transport in Pipes", Proc. Conference on Computer Applications in Civil and Hydraulic Engineering, pg. 112-121, Oct. 15-16, Tainan, Taiwan, (1993).
2. Bruce R.M., Donald F.Y. and Theodore H.O., "Fundamentals of Fluid Mechanics", 2nd Ed., Jihn Wiley & Sons, New York, (1994).
3. Galowin, L.S., "Separated Flow Conditions at Pipe Walls of Distribution Mains", U. S. EPA Report, (1989).
4. 簡志益，「微粒在直管與對稱性孔穴中傳輸之研究」，碩士論文，國立中興大學環境工程研究所，台北，民國84年6月。

表 1 四種流速的相關水力參數

流速 (cm/min)	水力穩定時間 (min)	流量 (ml/min)	雷諾數 (Re)	流況
5	100	392	90.70	層流
20	30	1570	362.81	層流
100	8	7850	1814.06	層流
1000	1.5	78500	18140.59	紊流

表 2 在初始總餘氯濃度 1.04mg/L、距加氯點 127cm 處，各試程的理論水力停留時間、濃度穩定時間及穩定濃度

流速 (cm/min)	理論水力停留時間 (min)	濃度穩定時間 (min)	穩定濃度 (mg/L)
15	25.4	52	0.65
20	6.35	28	0.47
50	2.54	20	0.32
75	1.69	14	0.24
100	1.27	13	0.223

表 3 直管中不同流速下的餘氯消耗率及平均餘氯消耗速率

流速 (cm/min)	消耗率 (%)		平均餘氯消耗速率 (mg/cm ³ · min)	
	總餘氯	自由餘氯	總餘氯	自由餘氯
5	18	23	1.2×10^{-5}	7.3×10^{-6}
20	9	11	2.0×10^{-5}	1.9×10^{-5}
100	5	8	1.1×10^{-4}	7.9×10^{-5}
1000	1	4	4.4×10^{-4}	3.3×10^{-4}

表 4 不同流速的水流流經各種不同孔穴時，孔穴中總餘氯濃度變化率

流速 (cm/min)	寬深比 α 值			
	1/3	1/2	1	2
5	92	92	70	50
20	99	98	79	41
100	97	98	81	10
1000	90	60	16	4

單位：%

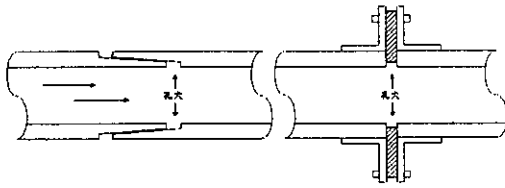


圖 1 配水管中孔穴形成示意圖



圖 2 配水管中管壁障礙物形成示意圖

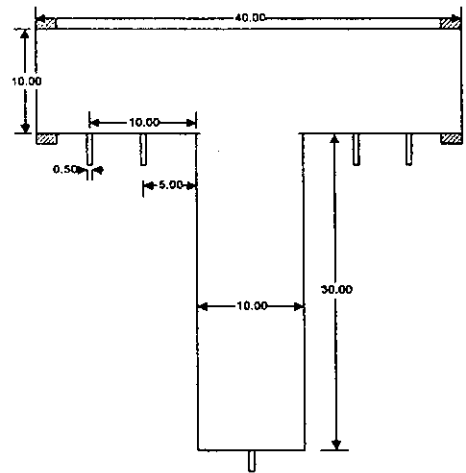


圖 3 $\alpha=1/3$ 的孔穴管型設備圖(單位：公分)

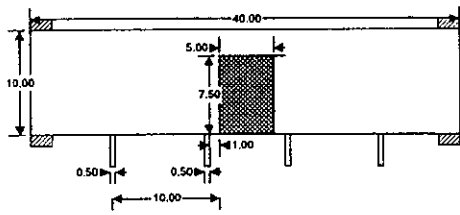


圖 4 L/D=3/4 的障礙物管型設備圖(單位：公分)

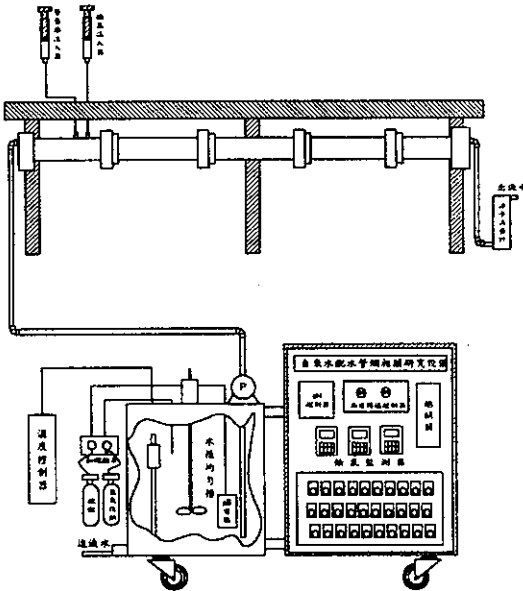


圖 5 管型變化試驗設備圖

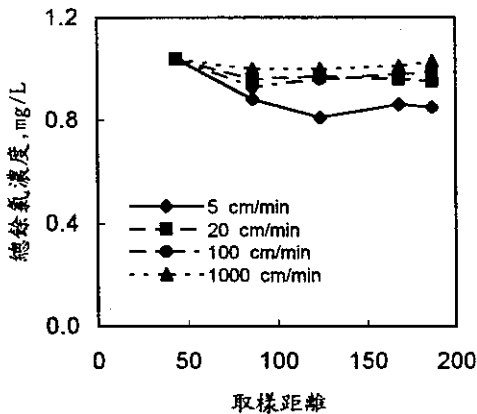


圖 6 初始餘氯濃度為 1.04mg/L 時，直管內各流速總餘氯濃度變化圖

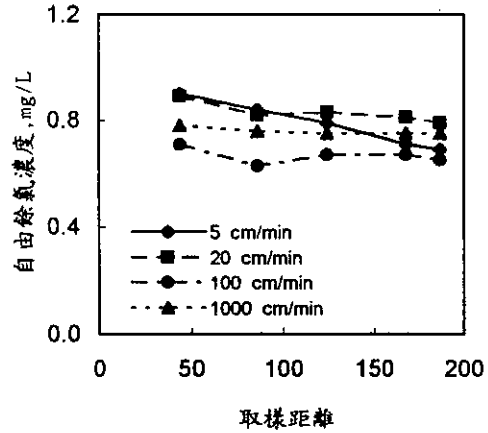


圖 7 初始餘氯濃度為 1.04mg/L 時，直管內各流速自由餘氯濃度變化圖

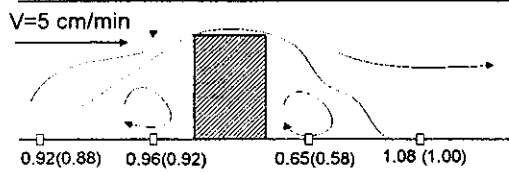


圖 8 流速 5cm/min 時在 L/D=3/4 障礙管內餘氯濃度的變化情況。(管下方為總餘氯的濃度，括號內為自由餘氯濃度。單位：mg/L)

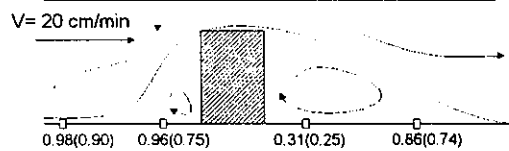


圖 9 流速 20cm/min 時在 L/D=3/4 障礙管內餘氯濃度的變化情況。(管下方為總餘氯的濃度，括號內為自由餘氯濃度。單位：mg/L)

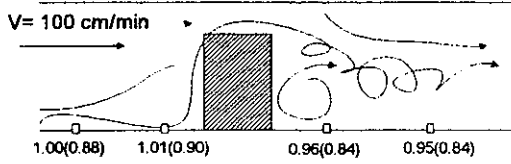


圖 10 流速 100cm/min 時在 $L/D=3/4$ 障礙管內餘氯濃度的變化情況。(管下方為總餘氯的濃度，括號內為自由餘氯濃度。單位：mg/L)

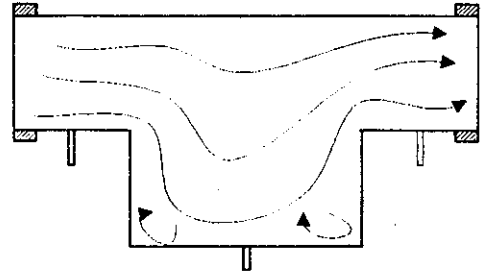


圖 13 水流流經 $\alpha=2$ 的孔穴時，流線分布示意圖

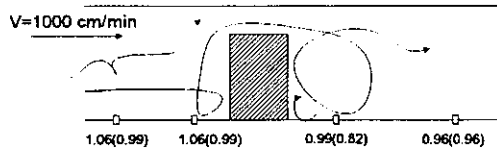


圖 11 流速 1000cm/min 時在 $L/D=3/4$ 障礙管內餘氯濃度的變化情況。(管下方為總餘氯的濃度，括號內為自由餘氯濃度。單位：mg/L)

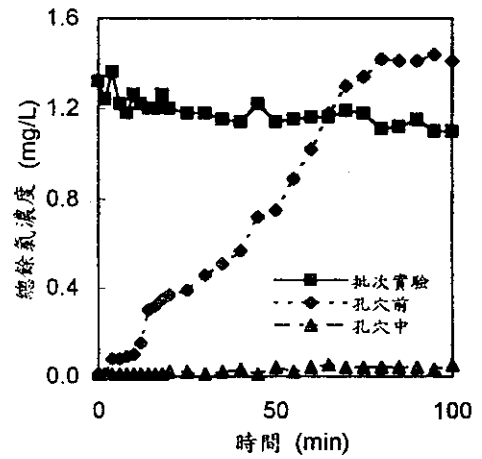


圖 14 流速 5 cm/min 的水流流經 $\alpha=1/3$ 的孔穴時，餘氯濃度隨時間變化情形

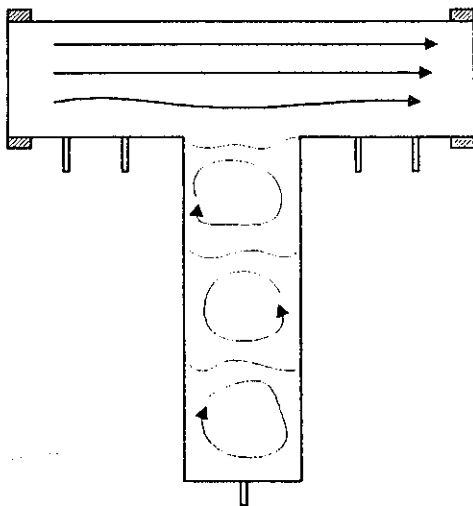


圖 12 水流流經 $\alpha=1/3$ 的孔穴時，流線分布示意圖