

應用電子試算表建立污泥沉降通量模式之探討

黃維祥* 張鎮南** 紀子文**

摘 要

將污泥沉降通量特性運用在二次沉澱池，兼具有作為沉澱池設計及操作控制的雙重功能；而利用量筒進行污泥的批次沉降試驗(batch settling test)可簡單快速的取得污泥沉降速率的數據，同時應用試算表強大的計算能力，可立刻將新的數據計算，更新污泥沉降模式及相關應用圖表，有助於提升污水廠立即應變的能力，本實驗將取自某工業區污水廠活性污泥批次沉降試驗的數據，計算其沉降速率與污泥濃度以經驗式 $V_c = ae^{-nc}$ 表示具有良好的相關性（相關係數=0.98），可用以推導固體沉降通量曲線，並進一步建立沉澱池排泥速率與污泥迴流比，迴流污泥濃度及沉澱池溢流率之間的關係圖表，提供污水廠操作人員運用。

【關鍵詞】

1. 污泥沉降通量(sludge settling flux)
2. 二次沉澱池(secondary settler)
3. 活性污泥(activated sludge)
4. 批次沉降試驗(batch settling test)
5. 污泥沉降模式(settling velocity model)

*東海大學環境科學研究所研究生

**東海大學環境科學研究所副教授

一、前言

廢水生物處理的作用在於利用微生物將水中溶解性有機物代謝轉化為新的微生物體，再利用微生物膠羽本身具有沉降性予以分離，以達到淨化水質的目的。而二次沉澱池在活性污泥處理系統中擔負了澄清及濃縮的雙重功能，一方面將來自曝氣池的懸浮性膠羽(MLSS)沉澱以產生清澈的放流水，另一方面將沉澱的污泥加以濃縮，俾減少抽取污泥及廢棄污泥的成本⁽¹⁾，有時為解決曝氣槽所發生的操作問題亦要配合良好的沉澱池污泥控制，藉適當的操控二次沉澱池來使得活性污泥系統獲得正常的程序控制⁽²⁾。

理想二次沉澱池的設計，設計參數的獲得應有實際的污泥沉降特性作為基礎，因此一般於實驗室或廢水處理操作現場以量筒進行批次沉降試驗來收集所需的數據。過去文獻曾介紹利用電腦程式⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾來分析實驗結果以得到所需的設計參數，然因限於這些應用程式均需有相關的電腦程式語言撰寫經驗，始能了解並進一步擴充運用；因此本文乃介紹利用現已商業化之電子試算表（本文使用EXCEL 4.0中文版）快速的計算繪圖功能，直接計算分析實驗所得數據，迅速產生設計、操作二次沉澱池所需的相關圖表及模式，以為設計及操作人員運用，如此可免去學習程式語言的困擾。

二、文獻回顧

1984年Luis等⁽⁶⁾針對不同種類廢水進行層沉降試驗，結果顯示層沉降速率會隨有機負荷的增加而增加，因有機負荷大時產生較大顆粒的膠羽，同時亦指出污泥齡太長會使沉降速率下降，即使添加聚合物(polymers)助凝，效果亦有限。

1993年Urbain等⁽⁷⁾報告中提到至少25%的污水廠都有污泥沉降不良(SVI \geq 150mg/g)的困擾，同時污泥的沉降性受到碳氮比及菌生聚合物(Exocellular polymers,ECP)的影響，在不良沉降時，觀察到有比較多量的ECP存在。

1993年Cho等⁽⁸⁾比較不同的污泥沉降模式，指出 $V = KC^{-n}$ (power model)、 $V = Ke^{-nc}$ (exponential model)及 $V = Ke^{(-nc)}/C$ 三種模式均可有效的描述污泥沉降情形與污泥濃度(C)之關係。

1985年曾氏⁽⁹⁾的報告指出沉降通量的方法(settling flux approach)是一種設計與操作一致的方法，對處理廠短期與長期進流量變化的控制與系統操作情況的分析與控制，十分有效。

鑑於污泥沉降速率的變動性及處理廠控制之需要，本文乃試著結合污泥沉降模式及批次沉降試驗應用試算表簡單快速的計算能力，提高污水廠二次沉澱池的設計、操作能力。

三、基本模式之建立

應用固體沉降通量(flux)設計二次沉澱池時，乃是以批式沉降試驗的結果，推導不同污泥固體濃度的沉降速率及沉降通量，並進一步求得沉澱池所需的面積。因沉澱池在實際操作上，其進出流及排泥動作是連續的，即沉澱池中污泥沉降到池底的速率除污泥本身的重力沉降速率外，還有底部排泥所產生向下的速率，因此實際的固體通量必需同時包含重力沉降速率及排泥速率。設計一座二次沉澱池時，固體通量(G)與污泥MLSS濃度(C)，有如下關係⁽¹⁰⁾：

$$G = G_s + G_u = C \cdot V_s + C \cdot U \dots\dots\dots (1)$$

G：總固體通量(kg/m²-d)

C：曝氣池MLSS濃度(kg/m³)

V_s：污泥層沉降速率(m/day)

U：沉澱池底部的排泥速率(m/day)

G_s：沉降通量(kg/m²-d)

G_u：排泥通量(kg/m²-d)

圖1為一典型沉降通量關係曲線圖，由圖中可看出總通量曲線有一最小值G_L存在，定義為極限通量，為沉澱池所處理的最大固體負荷量，當流進沉澱池的總固體量超過極限通量時，其固體會上升而流失，造成沉澱池的失敗⁽¹⁾。因此可計算沉澱池濃縮作用所需的最小面積A_T(m²)：⁽⁹⁾

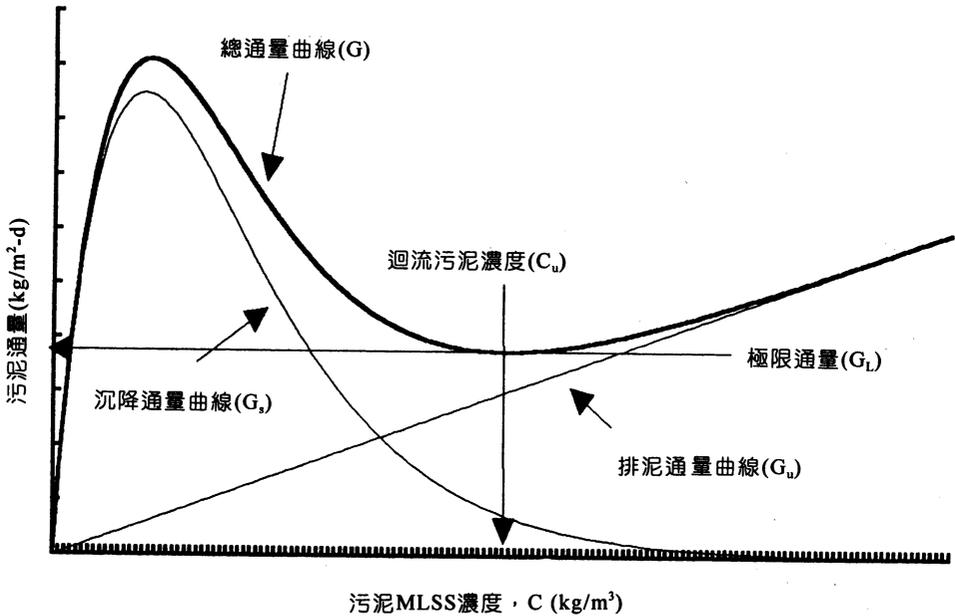


圖1 典型污泥通量曲線圖

$$A_T = \frac{CQ}{G_L} = \frac{CQ_0}{G_L - C \cdot U} \dots\dots\dots (2)$$

Q：曝氣池進流量(m³/d)

Q₀：污水廠處理水量(m³/d)

由圖1，自極限通量G_L處水平延伸與排泥通量曲線的交點向下與X軸垂直相交，得迴流污泥濃度(C_u)：

$$C_u = \frac{G_L}{U} \dots\dots\dots (3)$$

當系統控制在使曝氣池內MLSS濃度(C)維持穩定時，所需的迴流污泥比(α)隨迴流污泥濃度而變動⁽¹¹⁾：

$$\alpha = \frac{C}{C_u - C} \dots\dots\dots (4)$$

此時二次沉澱池的溢流量Q₀（同等於曝氣池的處理水量）

$$Q_0 = \frac{Q}{1 + \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

當沉澱池進流水量控制在極限通量點時，沉澱池的進流量 q (q 為 $Q/A_T m^3/m^2-d$)：

$$q = G_L/C \dots\dots\dots (6)$$

綜合以上諸模式，當曝氣池MLSS濃度維持穩定時，由排泥速率(U)的控制可以變化總通量曲線，進而調整極限通量、迴流污泥濃度、迴流比及處理水量等。

以下將介紹污泥沉降模式及總通量曲線的建立方式，並利用上述諸模式及排泥速率的控制進一步建立相關應用圖表。

四、批次沉降試驗步驟⁽¹²⁾⁽¹³⁾

4.1 污泥採樣及實驗設備

1. 污泥採取後（取自迴流污泥或直接取自曝氣池），利用濃縮、稀釋的方式調製不同濃度污泥，其中應含欲獲得的迴流污泥濃度。
2. 1,000ml量筒數支。
3. 計時器（精確至秒）。
4. 攪拌設備：使用4~6rph攪拌器。

若無攪拌器建議可用較量筒高度略長的玻璃棒，使穿過厚紙板垂直伸入量筒內（如圖2），實驗時輕輕移動紙板使玻璃棒可緩緩攪動。攪拌的目的在減少量筒實驗時污泥彼此間黏滯力及污泥吸著管壁等干擾作用⁽¹⁴⁾。

4.2 實驗步驟

1. 記錄1,000ml刻度的高度（本實驗所用量筒高度為36公分）。
2. 將污泥緩緩注入量筒至1,000ml，3~4秒後，開始計時記錄不同時間固液界面的高度(以ml表示)。
3. 前10分鐘，每隔1分鐘記錄一次界面高度，10分鐘後隔5分鐘至10分鐘記錄一次至50分鐘。

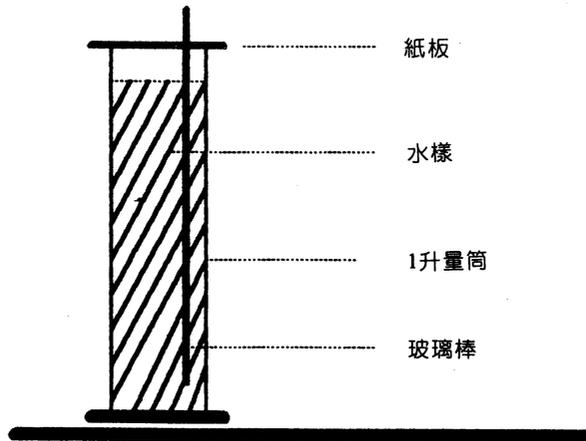


圖2 簡易污泥沉降實驗裝置圖

五、實驗結果及模式計算

5.1 污泥沉降速率計算

1. 本研究污泥採自某工業區污水處理廠曝氣池出流水。實驗結果如表 1，將表中數據繪成沉降高度與時間關係圖（圖 3），在圖中沉降曲線變化可看出沉降分速率較快的層沉降段及速率較慢的壓密沉降兩段，對層沉降段切直線，其斜率即為不同污泥濃度的沉降速率(V_c)。

2. 以計算表計算沉降速率

(1) 計算各觀測時間(t_n)的沉降速率(V_m)

$$V_m = (1,000\text{ml 的高度} - t_n\text{ 時的界面高度}) / t_n$$

(2) 逐項判斷沉降速率的變化，當 $V_n < 0.9V_{n-1}$ 成立時，判斷由 t_0 至 t_n 為直線段，則取 V_m 為沉降速率 V_c 。

(3) 使用公式複製的方式可求得不同濃度污泥的沉降速率。

表1 某工業區污水廠污泥沉降試驗結果

體積單位：ml

MLSS濃度(mg/L)	3,600	4,340	5,100	6,400	6,800	9,700	12,000	22,000
時間 min	體積	體積						
0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1	840	860	900	958	970	991	993	999
2	540	620	700	890	930	986	987	998
3	395	485	570	820	877	980	983	997
4	340	425	502	770	837	974	980	996
5	312	390	463	715	797	969	977	995
6	292	365	433	675	760	962	973	994
7	276	345	410	647	727	958	970	993
8	265	330	390	621	700	951	965	992
9	252	315	375	595	676	946	961	991
10	242	305	360	572	652	942	958	990
15	210	264	312	495	558	915	936	985
20	190	237	274	445	493	882	920	980
30	167	205	242	377	408	812	883	968
40	152	186	218	332	355	720	847	954
50	145	175	205	305	317	638	810	945

5.2 污泥沉降模式的建立

為便於後續利用電腦計算各模式的相關數值，本文使用 $V_c = a \cdot e^{-nC}$ 的經驗模式⁽¹⁵⁾，來模擬沉降速率與污泥濃度的關係，其中a、n為常數，將該式取對數得

$$\ln V_c = \ln a + (-n) \cdot C \dots\dots\dots (7)$$

將前一步驟計算所得的 V_c 取對數後，可利用Excel分析工具中的迴歸功能求出 $\ln a$ 及 $(-n)$ ；再取 $\ln a$ 的反對數求出a值。計算結果得到的沉降模式如下（相關係數0.98）

$$V_c = 323 \times e^{-0.000336C} \dots\dots\dots (8)$$

將 V_c 與C繪成關係圖（圖4）。

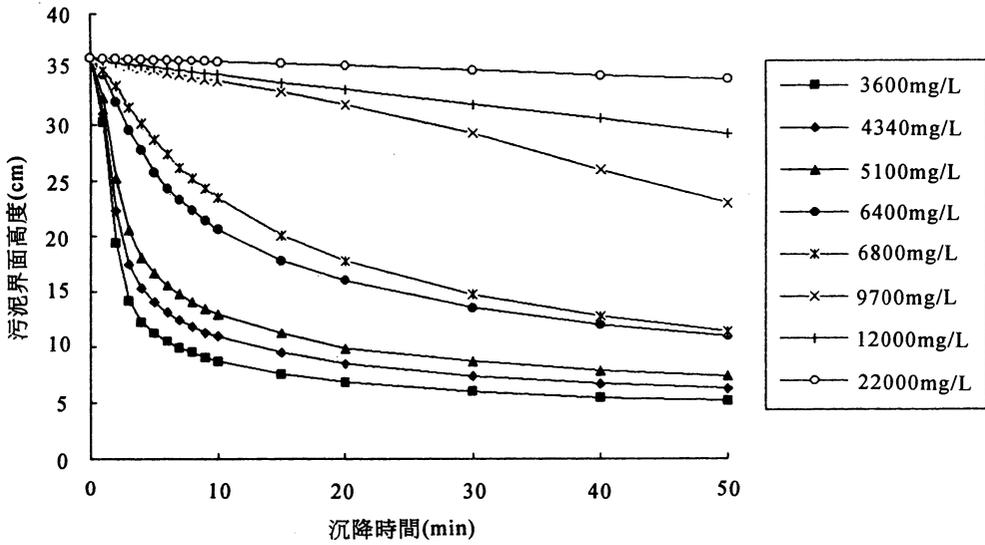


圖 3 污泥沉降界面高度與時間關係

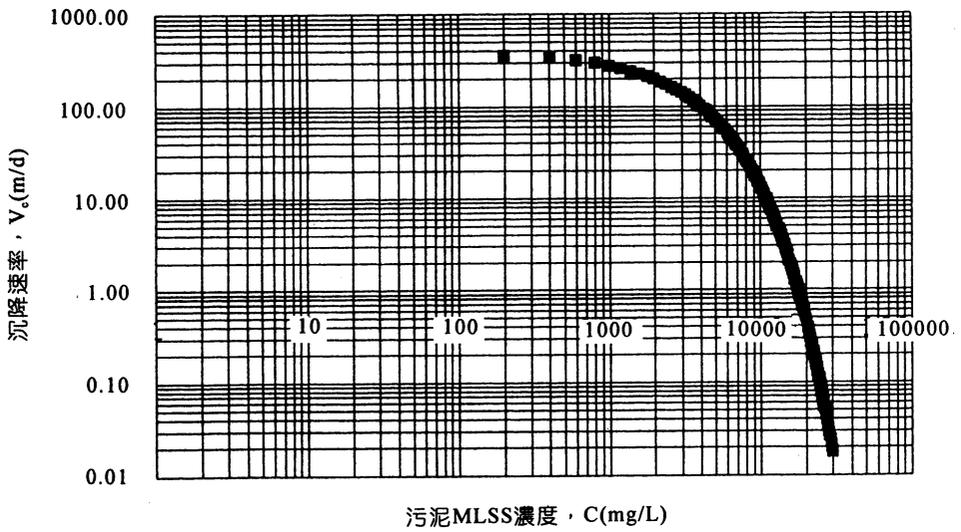


圖 4 污泥沉降速率與污泥濃度對數關係圖

5.3 總通量曲線的建立

1.將式(8)代入式(1)得到

$$G_s = C \times 323 \times e^{-0.000336C} \dots\dots\dots(9)$$

以多點描繪的方式，輸入一數列的污泥濃度 $C(C_1, C_2, C_3, \dots\dots C_n)$ 代入式(9)，可以得到一組對應的數列 $G_s(G_{s1}, G_{s2}, G_{s3}, \dots\dots G_{sn})$ 。

2.再由式(1)，排泥通量 $G_u = C \cdot U$ ，因排泥速率 U 為控制條件，因此可給定一個 U 值利用步驟一的 C 數列，計算得到一組對應的數列 $G_u(G_{u1}, G_{u2}, G_{u3}, \dots\dots G_{un})$ 。

3.由式(1)，總通量 $G = G_s + G_u$ ，將步驟1的數列 G_s 與步驟2的數列 G_u 相加，可得數列 $G(G_1, G_2, G_3, \dots\dots G_n)$ 。

4.以 C 數列為 X 軸， G 數列， G_s 數列， G_u 數列為 Y 軸作圖，可得總通量曲線關係圖（如圖1）。

5.應用三點比較的方法找出 G 數列中的最小值，即為極限通量 G_L ，其判斷方法為數列中任一項 $G_a(a = 1 \dots\dots n)$ ，當 $G_a < G_{a+1}$ 且 $G_a > G_{a-1}$ 同時成立時，即可得最小值 $G_a = G_L$ 。

6.因排泥速率 U 為操作條件，因此重複利用步驟3，在上述第5項中可計算不同排泥速率時的極限通量，其關係圖如圖5。

5.4 計算污水廠處理水量(Q_0)與迴流污泥比(α)關係圖

1.利用前段步驟6已計算出一組 U 值($U_1, U_2, U_3, \dots\dots U_n$)所對應的 $G_L(G_{L1}, G_{L2}, G_{L3}, \dots\dots G_{Ln})$ ，利用式(3) $C_u = G_L/U$ 可計算得排泥濃度 $C_u(C_{u1}, C_{u2}, C_{u3}, \dots\dots C_{un})$ ，以數列 U 為 X 軸，數列 C_u 為 Y 軸作圖，可得圖6排泥速率與迴流污泥濃度的關係圖。

2.利用式(4) $\alpha = C/(C_u - C)$ ，將步驟1所得的數列 $C_u(C_{u1}, C_{u2}, C_{u3}, \dots\dots C_{un})$ 代入式(4)，可計算得一組對應的數列 $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots\dots \alpha_n)$ 。

3.利用式(6) $q = G^2/C$ ，當曝氣池 $MLSS$ 濃度(C)不變時，代入前段之 $G_L(G_{L1}, G_{L2}, G_{L3}, \dots\dots G_{Ln})$ 數列，可得一組對應的數列 $q(q_1, q_2, q_3, \dots\dots q_n)$ ，此時 q 的單位為 $m^3/m^2 \cdot d$ 。

4. 利用式(5) $Q_0 = Q/(1 + \alpha)$ ，將步驟2, 3的 α 數列及 q 數列代入，得數列 q_0 ($q_{01}, q_{02}, q_{03}, \dots, q_{0n}$)。
5. 以數列 q_0 為X軸，數列 α 為Y軸，作圖可得沉澱池溢流率與污泥迴流比之關係（如圖7）。
6. 以數列 U 為X軸，數列 q_0 為Y軸，作圖可得沉澱池溢流率與排泥速率之關係（如圖8）。

5.5 模式敏感度分析

1. 由圖5，排泥速率每增加1m/d大約可使沉澱池的固體極限通量增加17kg/m²-d。
2. 由圖6，排泥速率與迴流污泥濃度間大約呈線性關係，每增加1m/d的排泥速率，大約使迴流污泥的濃度減少450mg/L。
3. 由圖7，每增加1m/d的排泥速率，約需提高0.003的迴流污泥比，以維持曝氣槽內MLSS濃度的穩定，因增加排泥速率會減少迴流污泥濃度。
4. 由圖8，若曝氣池MLSS濃度4,000mg/L，每增加1m/d的排泥速率，約可增加3m/d的溢流率；同理若溢流率上下波動1m/d，約需調整0.33m/d的排泥速率。

六、模式應用

6.1 二次沉澱池設計

污水廠於新建或改建之前，理想的設計應先進行廢水的可處理度分析，因此可利用模型實驗後的污泥或現有的污泥進行批次沉降試驗，以取得設計參數。設計應用時可由圖6查得期望的迴流污泥濃度所對應的排泥速率，再由圖8求得最大表面溢流率，依預計的處理水量計算決定沉澱池面積；或由圖5求出極限通量，再利用式(2)計算沉澱池面積。

【計算例】

設某污水廠設計處理水量9,000CMD，迴流污泥濃度20,000mg/L，曝氣池MLSS濃度4,000mg/L。

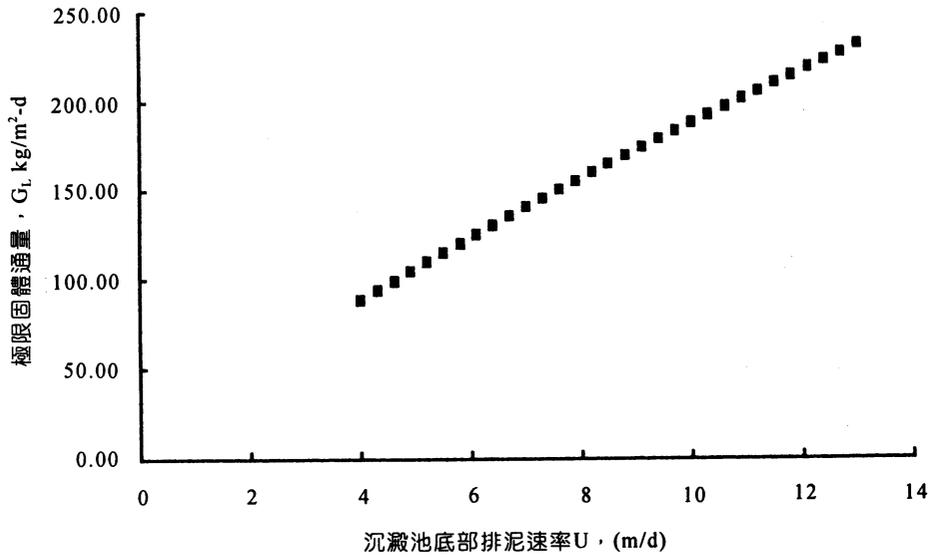


圖5 排泥速率調整對極限通量影響之關係圖

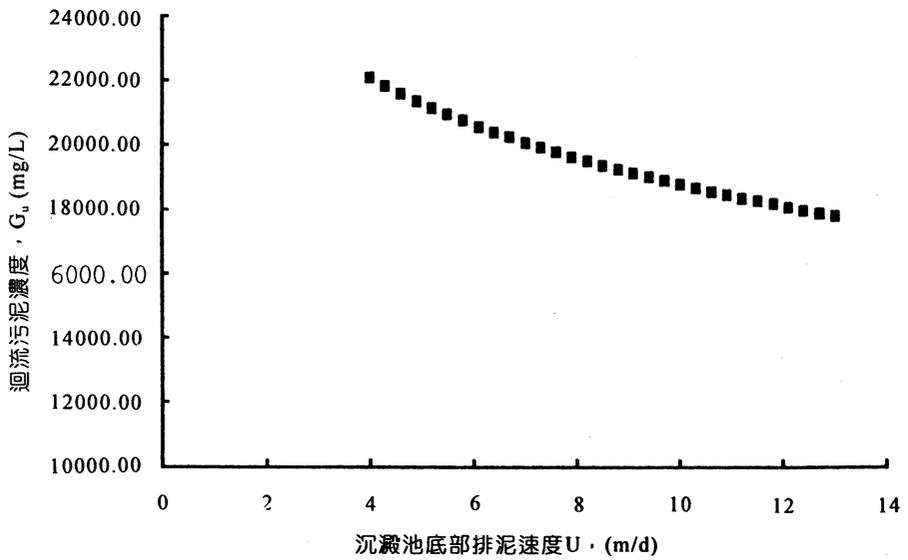


圖6 排泥速率對迴流污泥濃度之影響

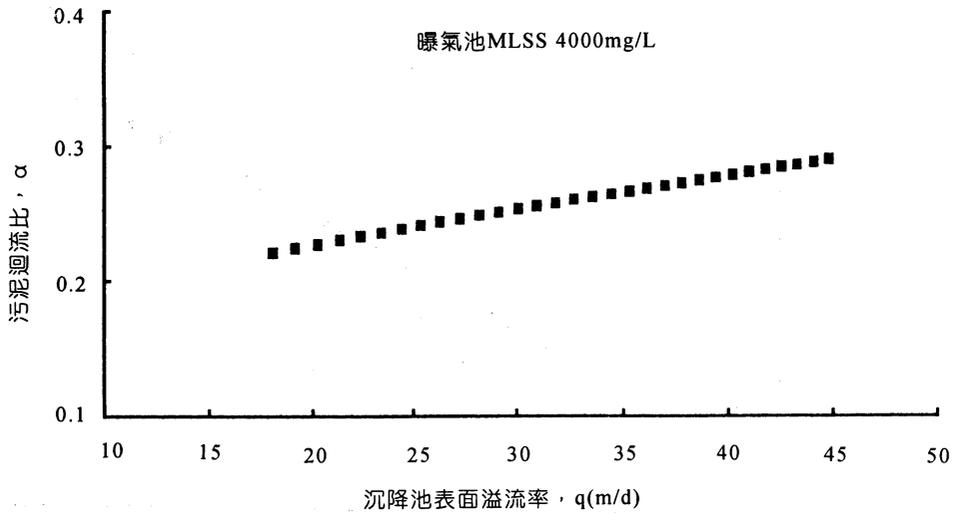


圖7 沉澱池表面溢流率與污泥迴流比之關係

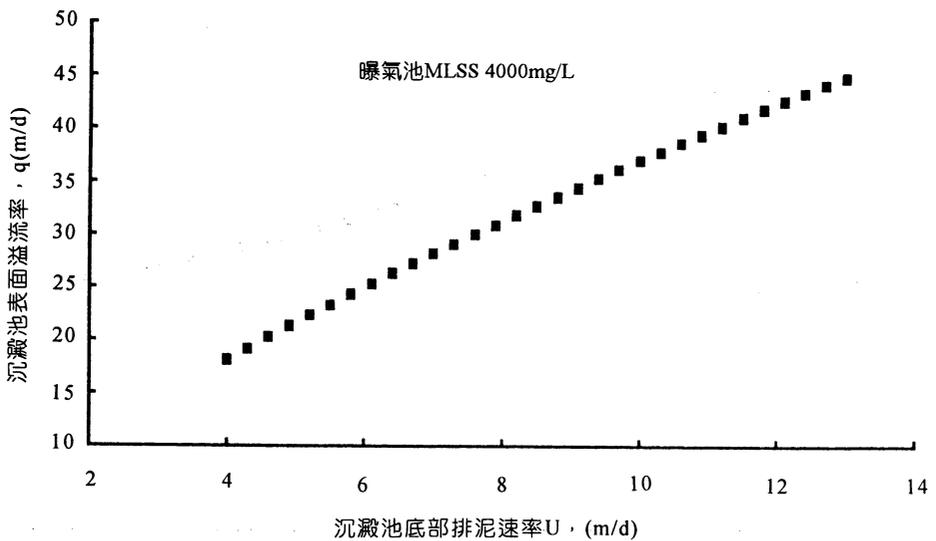


圖8 排泥速率對沉澱池表面溢流率之影響

- 1.設計時由圖 6 求得操作排泥速率為5.72m/d，再由圖 8 獲得最大表面溢流率為25.7m/d，因此沉澱池最小需要面積

$$A_T = 9,000/25.7 = 350(\text{m}^2)$$

- 2.由圖 5 得排泥速率5.72m/d時，極限通量為119kg/m²-d，利用式(2)

$$A_T = 4 \times 9,000 / (119 - 4 \times 5.72) = 374(\text{m}^2)$$

考量查圖時的誤差，設計時應選用較大值374m²。

6.2 操控二次沉澱池

一般污水廠的廢水進流量，於一日間的時段變動，可藉由調整池來維持後續程序處理水量的穩定性，但對雨天或季節性等較大的水量變動，則通常要由改變操作條件以維持放流水水質的穩定，因此當進流量增加或減少時，操作人員可利用圖 7、圖 8 的關係線來調整排泥速率及迴流污泥量，以維持曝氣槽內的污泥濃度。

七、結 論

藉用商用電子試算表及利用批次沉降試驗所得的模式，可以即時的顯示二次沉澱池內的操作特性，藉此所求取的沉澱池面積可兼顧澄清及濃縮的功能，以保持良好的放流水質，並進一步可用以操控迴流污泥以維持曝氣槽的穩定。因進流水質、氣候變化及曝氣等因素均會改變污泥膠羽的沉降特性，建議在運用時最好能經常適時更新實驗數據，以使得各應用模式能正確反應實際情況。

參考文獻

- 1.高信福，二次沉澱池之設計，工業污染防治，第三卷，第三期，pp.142~147, 1984。
- 2.曾迪華，活性污泥控制對策之簡易測定方法，工業污染防治，第四卷、第四期、pp.156~160, 1985。

- 3.張有義，非穩定狀態活性污泥法之電腦模擬，工業污染防治，第三十四期，pp.157~171, 1990。
- 4.張有義、林陽森，污泥沉降槽的電腦模擬設計，工業污染防治，第三十九期，pp.107~119, 1990。
- 5.張有義、吳先民，以固體沉降通量設計二級沉降槽的電腦模擬，工業污染防治，第10卷，第4期，pp.179~187, 1991。
- 6.Luis Baranona and W.Wesly Eckenrelder Jr., Relationship Between Organic Loading and Zone Settling Velocity in the Activated Sludge Process, Water Research, Vol.18, No.1, pp 91~94, 1984.
- 7.V.Urbain, J.C. Block and J.Manem, Biofloculation in Activated Sludge:A Analytic Approach, Water Research, Vol.27, No.5, pp.829~838, 1993.
- 8.S. H. Cho, F. Colin, M. Sardin and C. Prost, Settling Velocity Model of Activated Sludge, Water Research, Vol.27, No.27, pp.1273~1242, 1993.
- 9.曾迪華、葉俊宏，污水處理廠終沉池的設計與操作狀態分析，土木水利，第十二卷，第二期，pp.29~49,1985。
- 10.Richard I. Dick, Makarm T. Suidan, Modeling and Simulation of Clarification and Thickening Processes, Mathematical Modeling for Water Pollution Control, pp.147~155, 1975.
- 11.歐陽嶠暉，下水道工程學，長松出版社印行，p379，1980。
- 12.張鎮南，以污泥沉降實驗設計二級生物沉澱池，東海環科，第五期，pp.34~44, 1993。
- 13.曾四恭，水及廢水基本實驗手冊，中國土木水利工程學會出版，pp.84~88，1992。
- 14.C.E.Adams, Jr., Davis L. Ford and W.Wesley Eckenfelder, Jr., Development of Design and Operation Criteria for Wastewater Treatment, CBI Publishing Co., Int, 1981.
- 15.Zdeokn Vitasovic, Continuous Settler Operation:A Dynamic Model, Dynamic Modeling and Expert System in Wastewater Engineering, Edited by Gilles G. Patry and David Chapman, pp.59~81, 1989.
- 16.林宏諭，中文Excel 4.0(二)－管理決策分析篇，松崗電腦圖書資料股份有限公司出版，1993。