

# 直接過濾濾前處理最佳化之研究

## The Optimization of Pretreatment for Direct Filtration

葉宣顯\*、李俊德\*\*、黃國林\*\*\*撰

### 摘要

直接過濾是過濾之前省略沉澱池的一種快濾程序，適於處理低濁度原水。本研究係以水庫水為對象，進行直接過濾之模廠試驗。結果顯示以硫酸鋁或 PAC 為混凝劑，在適當濾料、濾率及濾前處理條件之配合下，可得濁度低於 0.5 NTU 之過濾水，且直接過濾所需之混凝劑加量低於傳統處理程序所需者。適當的快混攪拌強度及時間是必需的，且其最適值應隨濾料及濾率之大小而調整。

### 一、前言

直接過濾是過濾之前省略沉澱池的一種快濾程序，可節省淨水廠建造所需土地面積、初設費、及操作維護費，尤其適於處理低濁度原水。台灣地區河川大多短促，坡度陡峻，洪、枯流量相差甚大，利用不易，河川中、下游因人口密度高及工商業發達，污染日趨嚴重，故新開發之自來水水源，漸以修築水庫為主。經由天然沉澱作用，水庫水之濁度大多較低，適於直接過濾，此法亦可減輕本省淨水廠用地不易取得之困擾。

直接過濾由於係將原水中之膠體 ( Colloid ) 經去穩定 ( Destabilization ) 後所生成之膠羽 ( Floccule )，直接導入濾牀，故如何生成適當之膠羽，包括粒徑分佈、強度、黏性等，對直接過濾之效率有直接之影響。而膠羽之性質主要受濾前處理之影響，包括混凝劑之種類、加藥量、攪拌強度及停留時間等。尤以後兩者在文獻上出現許多相互矛盾的數據。譬如 Letterman 研究以陽離子聚合物為唯一混凝劑之雙層濾料直接過濾，發現短時間之膠凝 ( 2 - 10 分鐘 ) 可增加出水量，但如濾前之攪拌強度 ( 平均速度坡降 G 值 ) 大於  $25 \text{ sec}^{-1}$ ，則會增加濁度貫穿的機會。<sup>(1)</sup> Tate 等進行以明礬及陽離子聚合物為混凝劑之直接過濾模廠試驗，濾前處理之攪拌強度為  $100 \text{ sec}^{-1}$ ，他們發現在膠凝時間分別為 13 及 26 分鐘時，出水水質並無差異。<sup>(2)</sup> Hutchison 及 Foley 指出在固定的濾速，明礬加量，及膠凝平均速度坡降下，增加膠凝時間常常會使濾程縮短。<sup>(3)</sup> Hutchison 在另一組試驗以三種不同粒徑之濾煤進行過濾，結果顯示如果膠凝時間長於 4.5 分鐘 ( 平均速度坡降 G 為  $500 \text{ sec}^{-1}$  )，則濁度貫穿之可能性大為增加。<sup>(4)</sup> Stump 則報告以高分子聚合物為直接過濾之混凝劑時，需要有 20 分鐘或更長之膠凝時間。<sup>(5)</sup> Treweek 研究直接過濾前之最佳膠凝時間，指出膠凝時間必須大於 7 分鐘方能生成足夠大之膠羽在直接過濾中被去除。<sup>(6)</sup> 另外 AWWA 有關直接過濾之調查報告則指出美國現有直接過濾水廠所採用之攪拌強度及停留時間並不一致，但可見的是對混凝及膠凝程序均有良好控制之水廠較少發生問題。<sup>(7)</sup> Yeh 及 Ghosh 利用高分子聚合物為直接過濾之主凝劑，結果指出分

\* 葉宣顯：國立成功大學環境工程研究所副教授

李俊德：國立成功大學環境工程研究所教授兼所長

黃國林：國立成功大學環境工程研究所碩士

子量在 10,000 ~ 100,000 之間的陽性聚合物較適合於直接過濾使用；且較佳之快混平均坡降約在  $300 \sim 650 \text{ sec}^{-1}$ ，停留時間約在 3 ~ 8 分鐘。(8)

本研究主在以適當的水庫水為對象，建立模廠進行試驗，基於混凝—過濾之整體觀，考慮過濾出水濁度、水頭損失等參數，以探討濾前處理對直接過濾的影響，及其如何配合濾料、濾率以達到最佳化之目的。

## 二、試驗設備、材料與方法

### (一)模型廠之構造

本試驗之直接過濾模型廠設於烏山頭淨水廠內，該廠原水來自烏山頭水庫，水質良好，根據過去四年間之水質紀錄，濁度甚少超過 10 NTU。在本研究期間（民國七十三年十月到七十四年九月），除七十四年七、八月間因集水區暴雨及水庫持續放水，濁度曾高達 25 NTU 外，濁度經常在 1.5 ~ 5 NTU 間。原水之其他水質參數見表一

表一 原水水質

濁 度	1.5 ~ 25 NTU
鹼 度	100 ~ 120 mg / ℓ as CaCO <sub>3</sub>
硬 度	130 ~ 180 mg / ℓ as CaCO <sub>3</sub>
氯 塩	3 ~ 25 mg / ℓ
硫 酸 塩	16 ~ 38 mg / ℓ
pH 值	8.0 ~ 8.4

模廠之進流水係自烏山頭淨水廠之未預氯原水管線中抽取，進入 1000 公升之 PE 貯水槽，然後再以抽水機打入三套並列之直接過濾試驗設備。每套包含快混槽、慢混槽及濾筒三個主要部份（如圖 1 所示）。快混槽及慢混槽為容積分別為 50 公升及 138 公升之壓克力槽，各設有溢流板以保持定水頭，並各有可變速馬達帶動不銹鋼槳葉，以達到攪拌作用，由改變轉速以造成不同之平均速度坡降 G 值。至於各槽之停留時間則由迴流管線（By-pass）來控制，且水流亦可繞過慢混槽直接進入濾筒，以模擬沒有慢混之情況。濾筒內徑 10 公分，高 250 公分之壓力圓筒，在不同深度設有採樣口及水頭損失量口，後者並由塑膠管接至水頭損失量板上。濾筒底部出水管經由針閥及流量計接到浮球濾率控制箱。濾料採用無煙煤（Anthracite）及矽砂之雙層濾料，兩者之厚度各為 50 及 25 公分，本研究共試驗過三組濾料組合，其規格如表二所示。

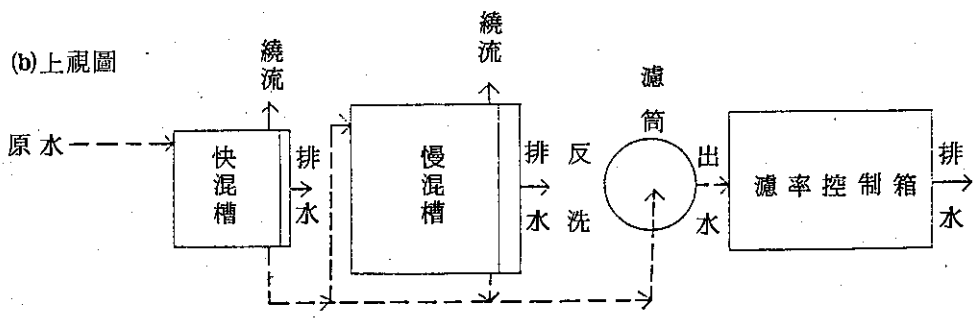
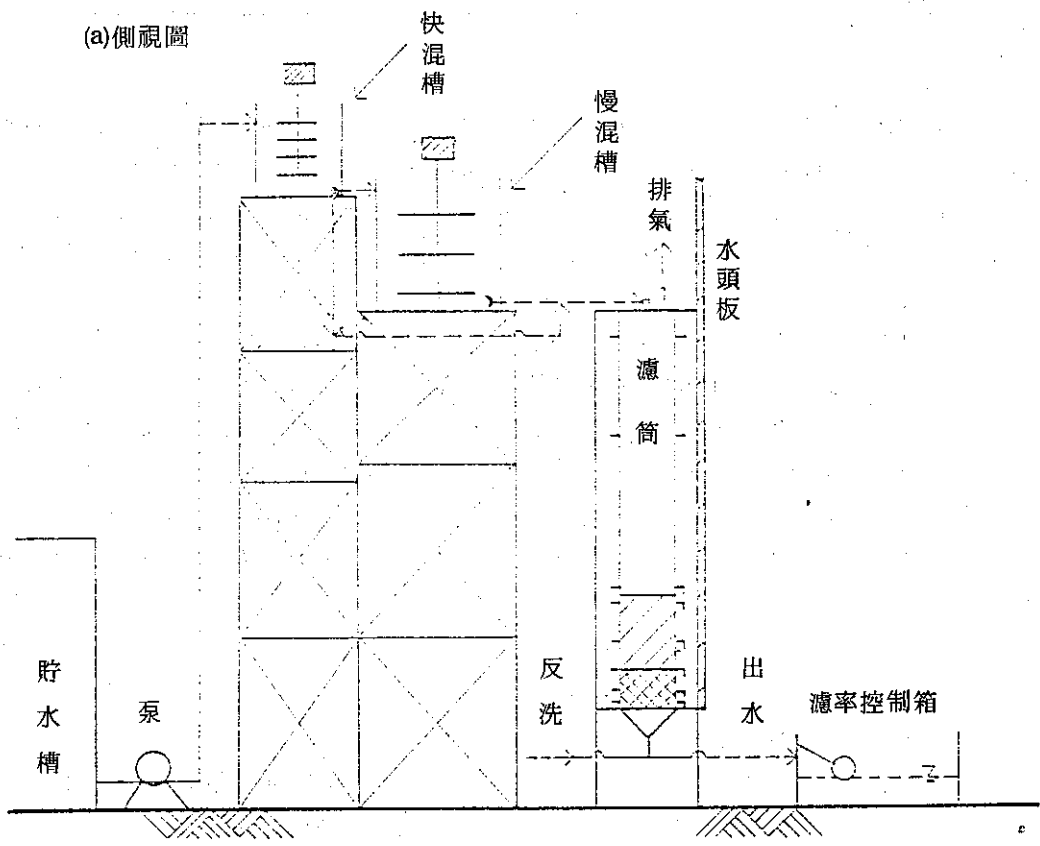


圖 1 模廠示意圖

表二 濾料之編號及規格

規 格 \ 編 號 (No.)	1		2		3	
	砂 S <sub>1</sub>	煤 C <sub>1</sub>	砂 S <sub>2</sub>	煤 C <sub>2</sub>	砂 S <sub>3</sub>	煤 C <sub>3</sub>
有效粒徑 ES (mm)	0.65	1.05	0.8	1.5	0.5	1.5
均勻係數 UC	1.4	1.43	1.4	1.33	1.5	1.33

### (二) 試驗程序及方法

在進行直接過濾模廠試驗之前，先取原水利用瓶杯試驗機 (model JT-4 Jar Tester, Iwaki Co., Japan) 進行瓶杯試驗，以決定混凝所需較佳之混凝劑加藥量，通常在 100 - 120 rpm 下快混 3 - 5 min；再經 30 rpm 下慢混 25 - 30 min，然後靜置沉澱 30 min，測上澄液濁度及 pH 值。所使用之混凝劑包括液狀硫酸鋁 (7%，比重 1.29 g/ml) 及 PAC (Poly Aluminum Chloride, 9%，比重 1.18 g/ml) 二種。

直接過濾模廠試驗之混凝劑加量係以瓶杯試驗所得之最佳加藥量為基準，取包括此值之一組加藥量在一固定濾率及濾前攪拌狀況下進行試驗，由過濾出水水質及水頭損失，以判斷直接過濾之最適加藥量，然後以所得之最適加藥量，進行快混強度 (即平均速度坡降 G 值) 及停留時間影響之試驗。本研究包括快混 G 值之範圍在 185 至 900 sec<sup>-1</sup>，停留時間在 2.5 ~ 10 min 之間。隨後比較快混→慢混→過濾，及快混→過濾之程序，以決定直接過濾是否需要膠凝之程序。然後再改變濾率及濾料，重覆上述試驗，以視濾前處理之需求與濾率、濾料之關係。本研究所用之濾率在 200 ~ 800 m/day 之間。

## 三、結果與討論

### (一) 濾前處理混凝劑加藥量之決定

圖 2 (a)(b) 係原水濁度 1.5 NTU，水溫 20 °C，在 pH 8.2 下分別以硫酸鋁 (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)，PAC 為混凝劑之瓶杯試驗結果，顯示硫酸鋁及 PAC 之最適加藥量分別為 15 及 10 mg/l 左右，且當加藥量低於或高於此最適加藥量時，均有加藥量不足 (Underdose) 或加藥量過量 (Overdose) 之現象，圖 3 所示者係以瓶杯試驗所得硫酸鋁最適加藥量為基準，選擇 0, 5.0, 7.5, 10, 15, 20 mg/l 等加藥量，以 200 m/day 之濾速通過一號濾料濾床，快混及慢混之平均速度坡降分別為 600 及 50 sec<sup>-1</sup>，停留時間分別為 5 及 15 min。由該圖可知當未加硫酸鋁或當加藥量僅為 5.0 mg/l 時，過濾水濁度幾與原水相同，故濾床水頭損失之增加甚低，可見此時水中引起濁度之膠狀雜質仍以穩定狀態存在於水中，故未能被過濾去除。當硫酸鋁加藥量增加至 7.5 及 10 mg/l，過濾水濁度可降至約 0.3 NTU，但以前者之濁度貫穿 (以出水濁度大於 0.5 NTU 為準) 時間較遲，且水頭損失較低，故對直接過濾而言，最適加藥量應以 7.5 mg/l 為宜。當加藥量增至 15 及 20 mg/l 時，則濁度貫穿迅速發生且單位時間之水頭損失增加率亦迅速增加，可見有加藥超量之現象。將直接過濾硫酸鋁之最適加量 (7.5 mg/l)，與前述瓶杯試驗所得結果比較 (最適加量 15 mg/l)，可見前者低於後者，可能

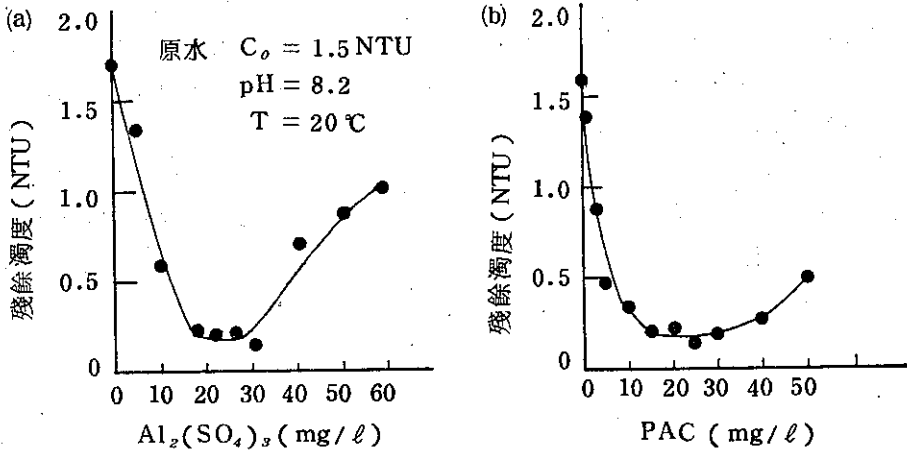


圖 2 混凝劑加藥量之瓶杯試驗

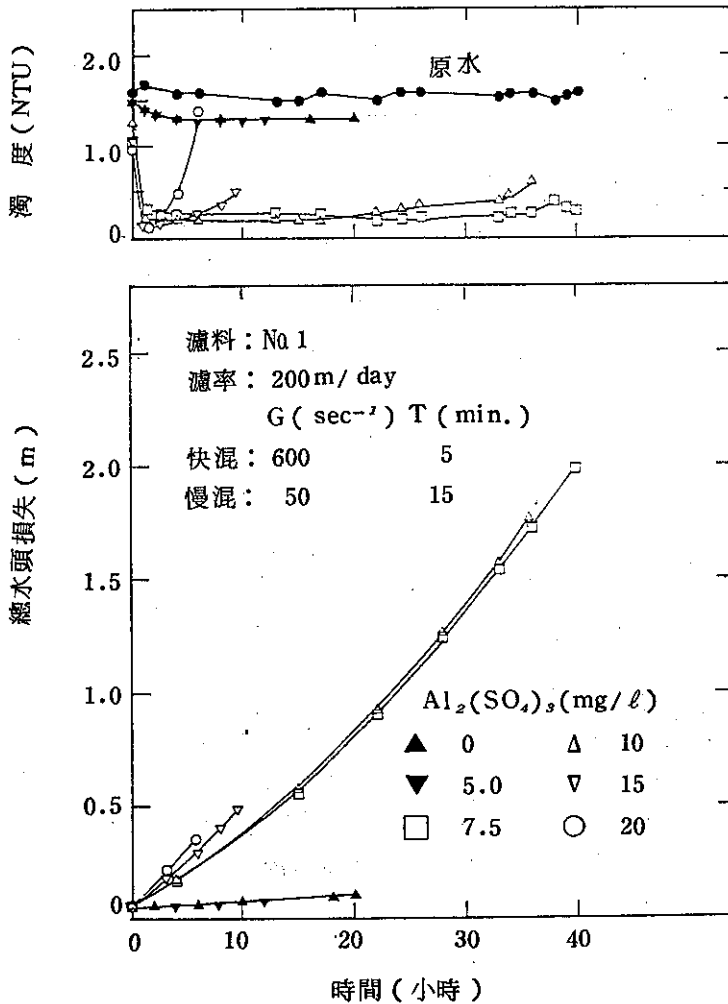


圖 3  
 明礬加藥量之模廠試驗  
 (原水濁度 1.5 NTU ,  
 1 號濾料)

之解釋為在濾牀內雜質顆粒與顆粒間，或顆粒與濾料間之碰撞機會較之燒杯內為大，且瓶杯試驗上澄液之剩餘濁度受到固、液分離之影響甚大，亦即瓶杯試驗以產生利於重力沉降之膠羽為主，但直接過濾所需之膠羽則不一定如此。圖 4 係在三種 PAC 加量下，以 400 m/day 之濾率，通過一號濾料，快混平均速度坡度為  $340 \text{ sec}^{-1}$ ，停留時間 5 min，由圖知較適加藥量為  $2.50 \text{ mg}/\ell$ ，亦較圖 2 (b) 所示瓶杯試驗 PAC 之最適加藥量為低。文獻上已有報告指出將混凝劑加入原水中，經適當攪拌後，以顆粒計數器 ( Particle Counter ) 量測膠羽大小分佈，所預測之直接過濾最適加藥量較傳統式瓶杯試驗所預測者準確。<sup>(9)</sup> 但該法之缺點為需要較複雜之設備。由本研究可知如使用傳統式瓶杯試驗法來預測直接過濾混凝劑之最適加藥量，則實際所需之加藥量常較預測值為低。

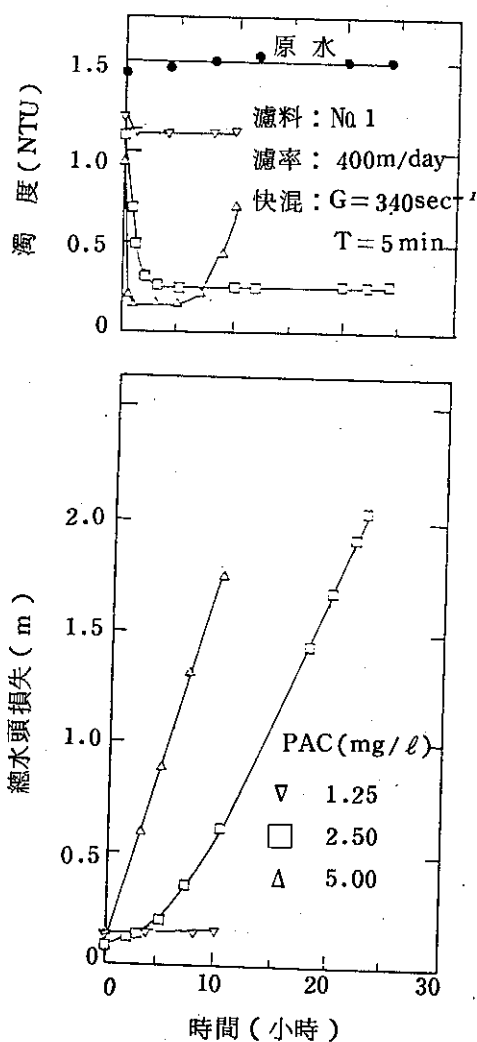


圖 4 PAC 加藥量之模廠試驗 (原水濁度 1.5 NTU, 1 號濾料)

## (二) 濾前所需快混強度之探討

有些研究者認為直接過濾之膠凝現象主要發生於濾床內，故直接過濾又稱接觸膠凝 (Contact Flocculation)、接觸過濾 (Contact Filtration) 或微膠羽 (Microfloc Filtration)。依此論點，則濾前攪拌之主要任務在將混凝劑分散於水中而已。但另一些研究者則認為濾前處理必須能夠產生某種適當大小之膠羽分佈，方能使某一特定濾床發揮最大之功效。

為驗證快混之影響，濁度約 1.5 NTU 之原水經加入前述最佳加藥量之硫酸鋁 (7.5 mg/ℓ) 後，分別經三種不同快混強度之攪拌，其平均速度坡降分別為 340, 600 及 900 sec<sup>-1</sup>，停留時間 5 分鐘，再經 G=50 sec<sup>-1</sup>，15 分鐘之慢混後，以 200 m/day 之濾速，通過一號濾料濾床，其結果如圖 5 所示，三者均可得到濁度低於 0.3 NTU 之過濾水，但以快混 G 值等於 600 sec<sup>-1</sup> 者，發生濁度貫穿之時間最遲，且水頭損失最小。圖 6 所示者係取圖 4 之最佳濾程 (PAC 加量 2.50 mg/ℓ)，改變其快混平均速度坡降 G 值為 185, 340 及 600 sec<sup>-1</sup> 三者，結果顯示三者之出水濁度非常接近，但水頭損失之增加仍以 G = 340 sec<sup>-1</sup> 者最為緩和。此兩組試驗均表示進入濾床膠羽之大小會影響濾床之表現。

## (三) 濾料粒徑大小對快混強度需求之影響

圖 7 所示係使用三號濾料，在 200 m/day 濾率下，當原水濁度在 5.5~7.0 NTU 之間，混凝劑硫酸鋁之加量為其較適加藥量 5 mg/ℓ，在快混停留時間 5 分鐘，平均速度坡降為 340, 600 及 900 sec<sup>-1</sup> 三個快混強度下所得之結果。由圖中可見三種前處理所得濾床出水之水質均甚佳，濁度均低於 0.5 NTU，但水頭損失之增加以 G = 900 sec<sup>-1</sup> 者最低。與圖 5 比較可知當濾砂較細時 (三號濾料之砂 ES 為 0.5 mm，而一號濾料之砂 ES 為 0.65 mm)，其孔隙亦較小，故進入濾床之膠羽其大小分佈亦應偏向於細者，如此方能均佈於整個濾砂厚度，而減少水頭損失。但如使用二號濾料，則快混 G 值之變動對出水濁度及水頭損失之影響均甚微，如圖 8 及圖 9 所示。其原因可能在於該濾料無論濾砂或濾煤之粒徑均甚大，濾砂之有效粒徑為 0.8 mm 而濾煤為 1.5 mm，故濾料內之孔隙甚大，相形之下，進入濾床內膠羽大小之影響，也就是攪拌強度之影響就顯得不重要。

## (四) 濾率改變時對快混強度需求之影響

圖 10 所示之原水水質與圖 5 相近，但濾率由 200 m/day 提高至 400 m/day，其他操作條件相近，由該圖可見最適快混 G 值應為 340 sec<sup>-1</sup>，因其水頭損失之增加率最低，雖然平均出水濁度 (0.38 NTU) 稍高，但仍在吾人所要求之 0.5 NTU 以下。將圖 10 中快混 G 值為 185, 340 及 600 sec<sup>-1</sup> 等三個濾程之每一濾料層 (全濾床共分 0~5, 5~25, 25~50 及 50~75 cm 等四層，前三層為砂，最下一層為無煙煤)，在一特定時間之水頭損失值 (ΔH) 除以該濾料層之厚度所得值 (ΔH/ΔL) 為縱座標，過濾時間 (T) 為橫座標，繪如圖 11 所示。由 ΔH/ΔL 與 T 之關係圖可知在一濾程內，膠羽在各濾料層內被去除之情形。表三所示係在開始過濾後六小時，三個不同快混 G 值之濾床內各層水頭損失所佔全部水頭損失之百分比。由圖 11 及表三可知在 G = 340 sec<sup>-1</sup> 時，總水頭在各濾料層之分佈最為均勻。將圖 10 與圖 5 比較，可知當濾率提高時，最適快混 G 值有下降之趨勢 (圖 5 之最適快混 G 值為 600 sec<sup>-1</sup>)，吾人之解釋為當濾率提高時，水流對膠羽所產生之向下曳力同時升高，故對同一濾率濾床而言，此時進入濾床之膠

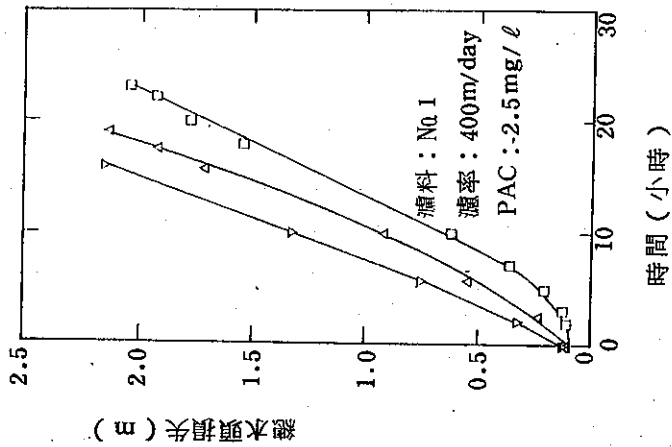
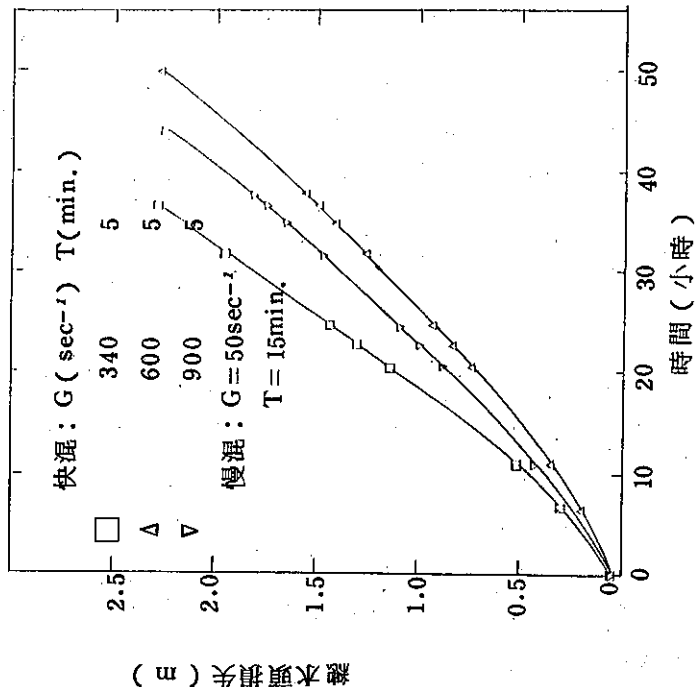
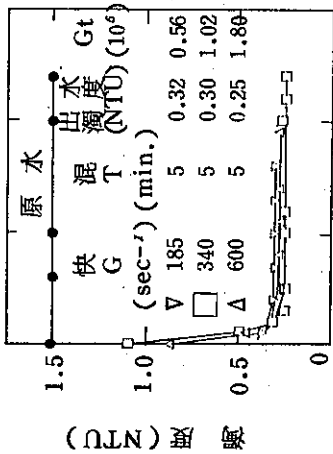
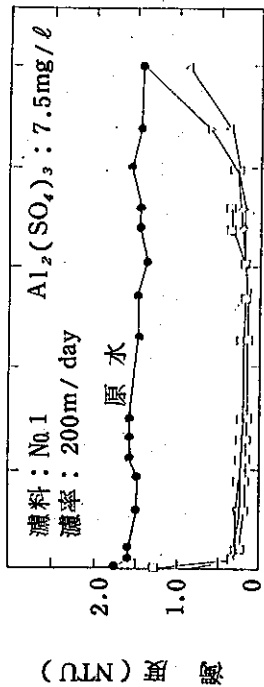


圖 5 快混強度之模廠試驗 (1 號濾料、濾率 200m/day)

圖 6 快混強度之模廠試驗 (PAC, 1 號濾料、濾率 400m/day)

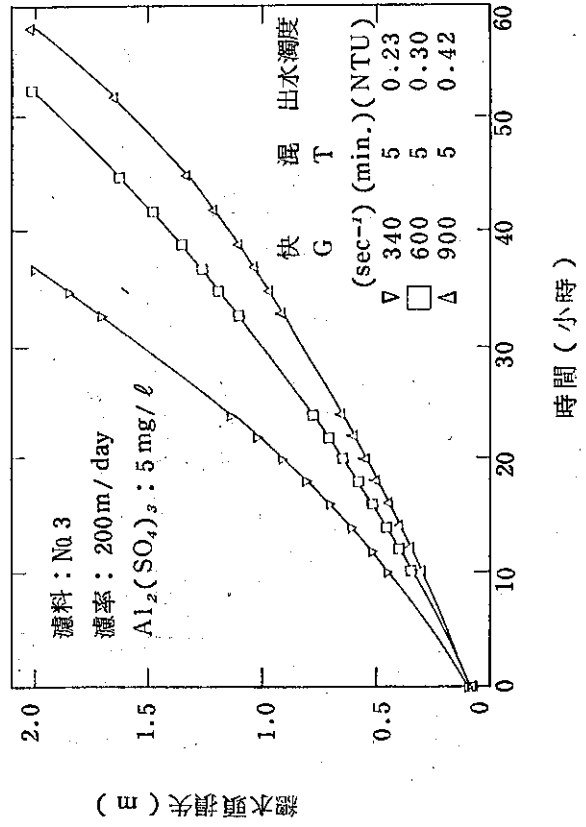
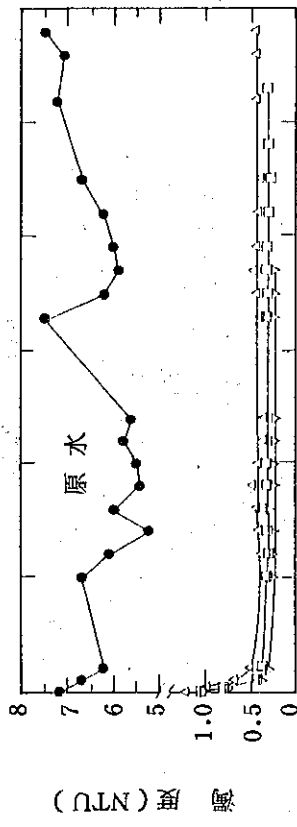


圖 7 快混強度之模廠試驗 (3 號濾料，濾率 200m/day)

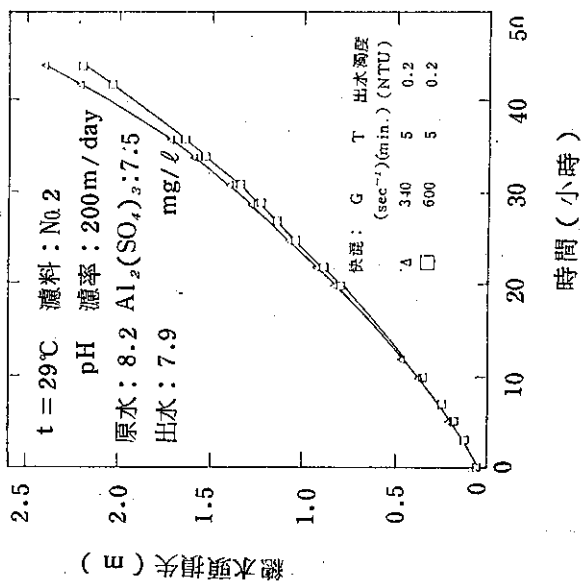
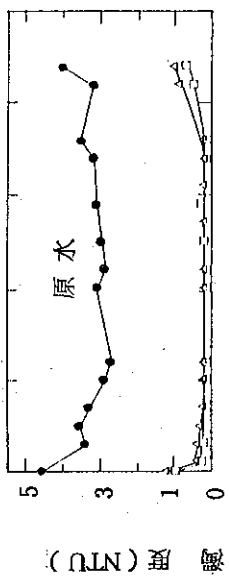
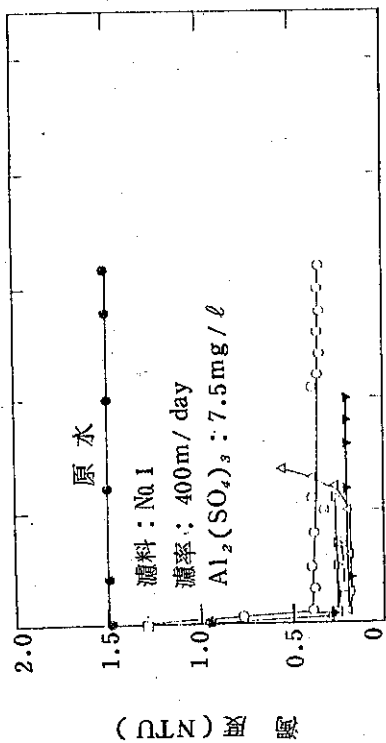
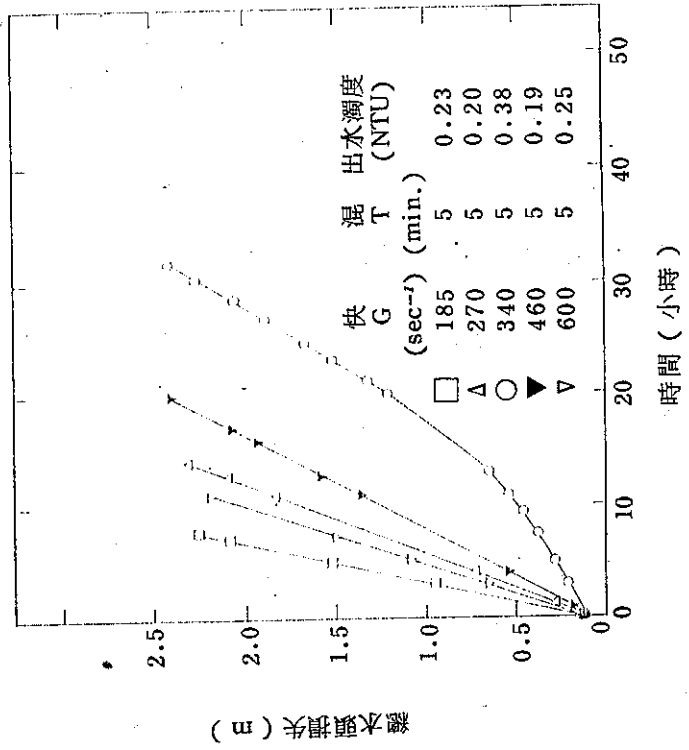


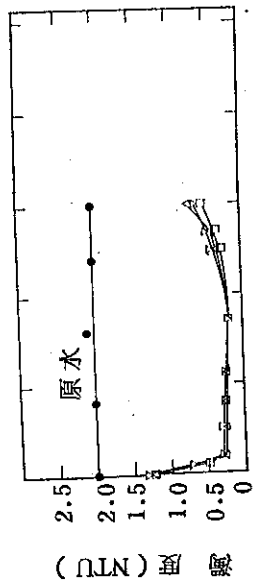
圖 8 快混強度之模廠試驗 (2 號濾料，濾率 200 m/day)



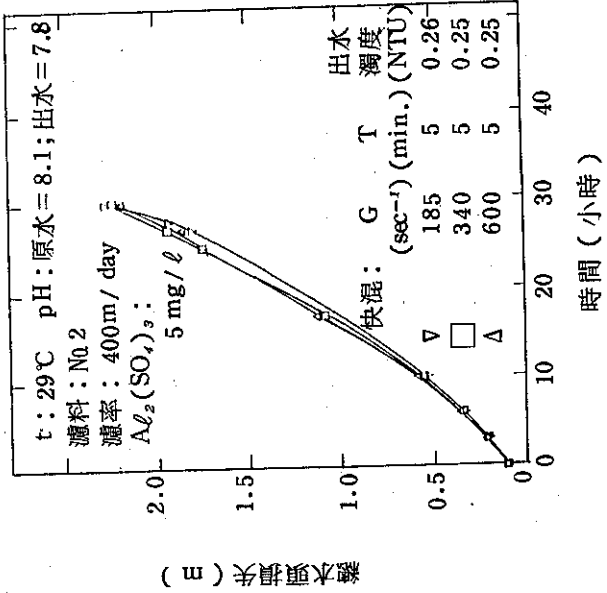
(A) 濁度 (NTU)



(B) 濁度 (NTU)



(C) 濁度 (NTU)



(D) 濁度 (NTU)

圖 10 快混強度之模廠試驗 (明礬、1 號濾料、濾率 400m/day)

圖 9 快混強度之模廠試驗 (2 號濾料、濾率 400m/day)

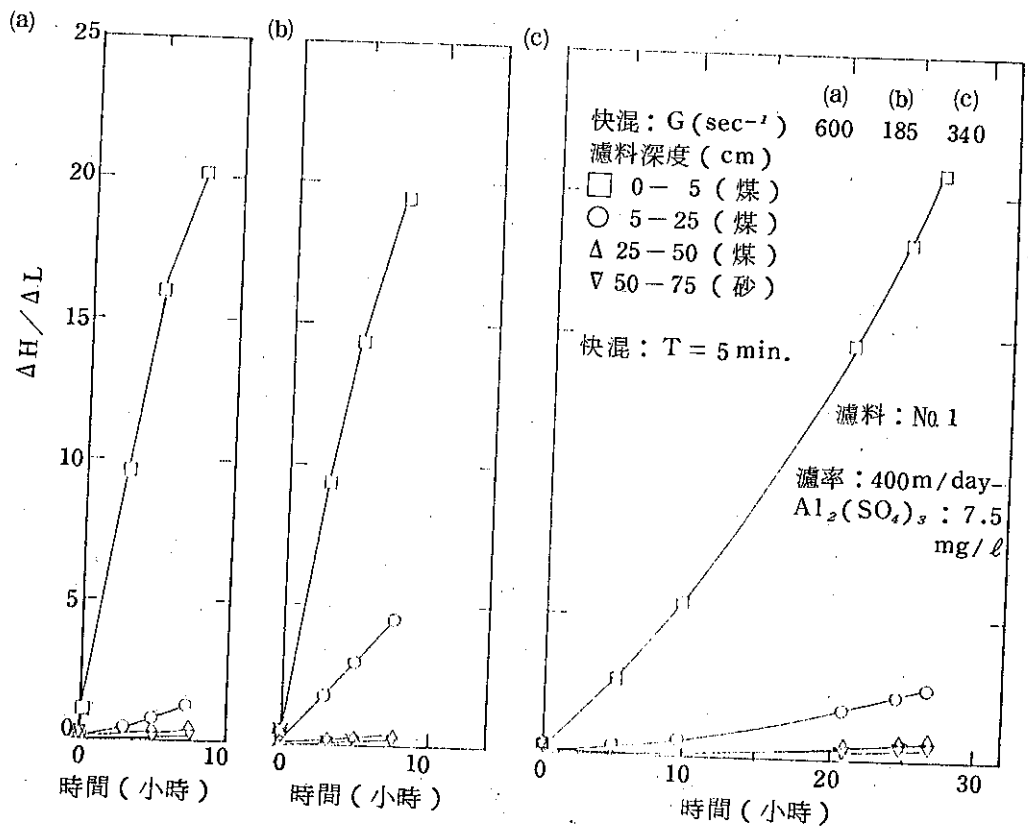


圖 11 不同快混強度時各濾料層水頭損失之比較 ( 1 號濾料 )

表 3 不同快混強度下各濾料層水頭損失分佈比較 ( 1 號濾料 )

水頭損失, % 濾料層, cm 快混強度, % S <sup>-1</sup>	(a) 600	(b) 185	(c) 340
0 ~ 5	71	48	49
5 ~ 25	16	42.5	24
25 ~ 50	6.5	6	15
50 ~ 75	6.5	3.5	12
Σ	100	100	100

\* : ( 濾料層水頭損失 / 四層濾料層水頭損失之和 ) × 100 % , 以過濾 6 小時之時刻為準。  
濾率 400 m / day

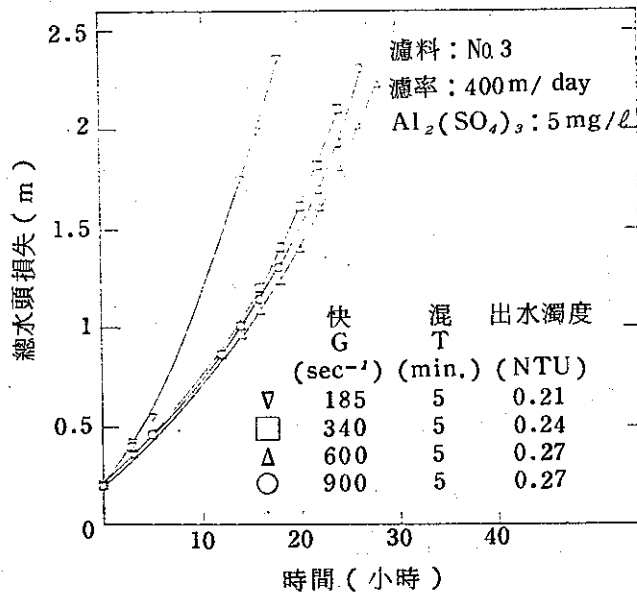
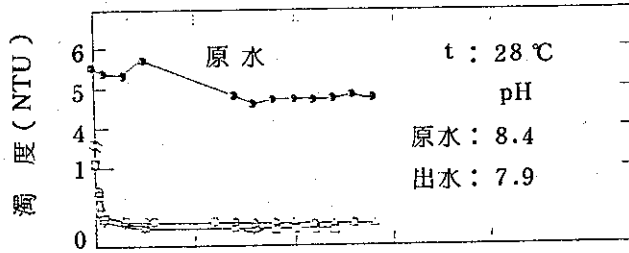


圖 12 快混強度之模廠試驗 ( 3 號濾料 , 濾料 400m/day )

羽大小分佈即使偏向於較大者，仍可被均勻分佈於濾床之整個濾料深度內。

當改用三號濾料，而濾料亦由 200 m/day (圖 7) 提高至 400 m/day (圖 12)，可發現其最適快混 G 值亦由 900 sec<sup>-1</sup> 降低為 600 sec<sup>-1</sup>。另外比較圖 10 與圖 12 亦可發現與前節所示同樣之結果，即當其他條件相近，而濾砂由粗者改為細者，即由一號濾料改為三號，則其最適快混 G 值亦由 340 sec<sup>-1</sup> 提高至 600 sec<sup>-1</sup>。圖 13 所示係在與圖 12 相同之操作條件下，探討快混停留時間之影響，在前所得最適快混 G 值下，試驗 2.5，5，10 分鐘三個停留時間，結果以 5 分鐘者水頭損失最小。

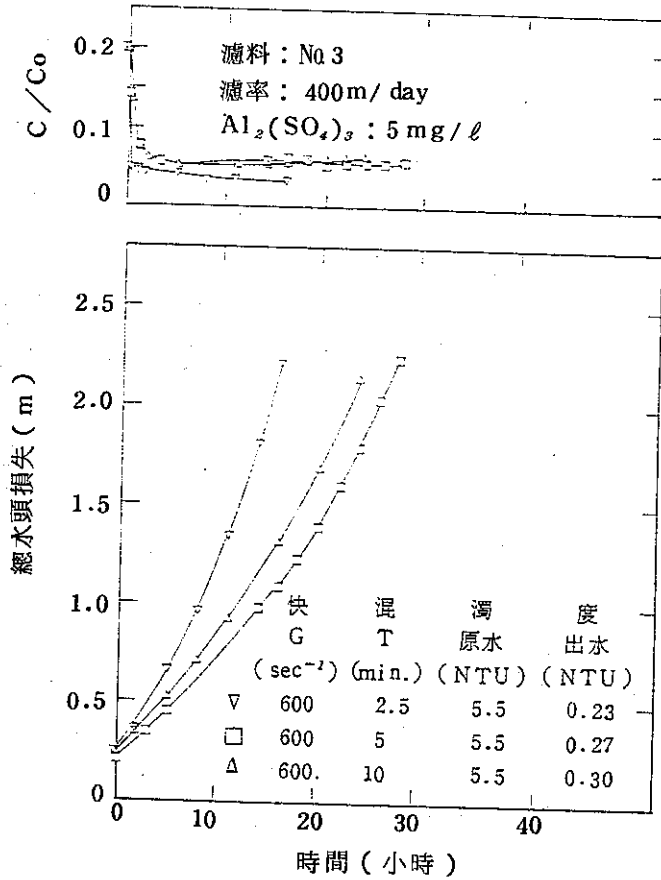


圖 13 快混延時之模廠試驗 (明礬，快混 2.5 , 5 , 10 min. , 3 號濾料)

(五) 慢混對直接過濾之影響

圖14所示係一號濾料濾床，在 400 m/day 濾率下，分別以硫酸鋁及 PAC 之最適加藥量，7.5 mg/ℓ 及 2.5 mg/ℓ，在快混最適 G 值 340 sec<sup>-2</sup> 下，攪拌五分鐘，但一組係沒有慢混，另一組則經慢混強度 G = 25 sec<sup>-2</sup>，停留30分鐘，再進入濾床內。由該圖可以看出無論以硫酸鋁或 PAC 為混凝劑，經過慢混者，水頭損失之增加率較低，但亦較容易發生濁度貫穿。以二號濾料為濾材，PAC 為混凝劑時，亦得相同之結果 (如圖 15)。推測其原因可能慢混會削弱膠羽之強度，使對水流剪力之抵抗力較差，而容易發生濁度貫穿，故對直接過濾而言，慢混程序似乎並非必要。

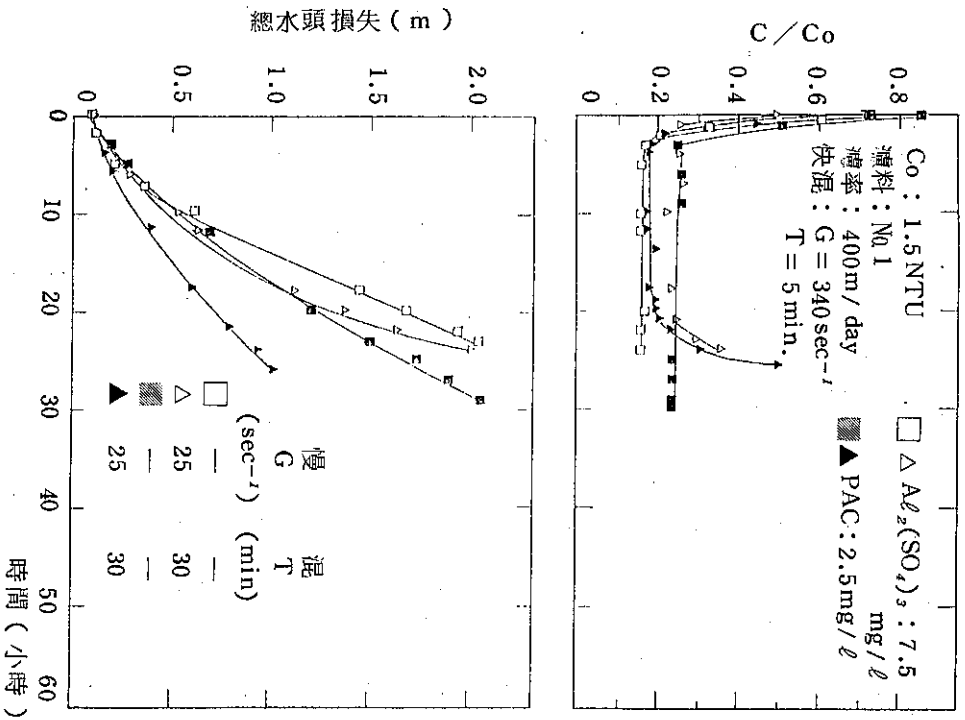


圖 14 有無慢混之比較 (1 號濾料, 濾料 400  $\text{m}/\text{day}$ )

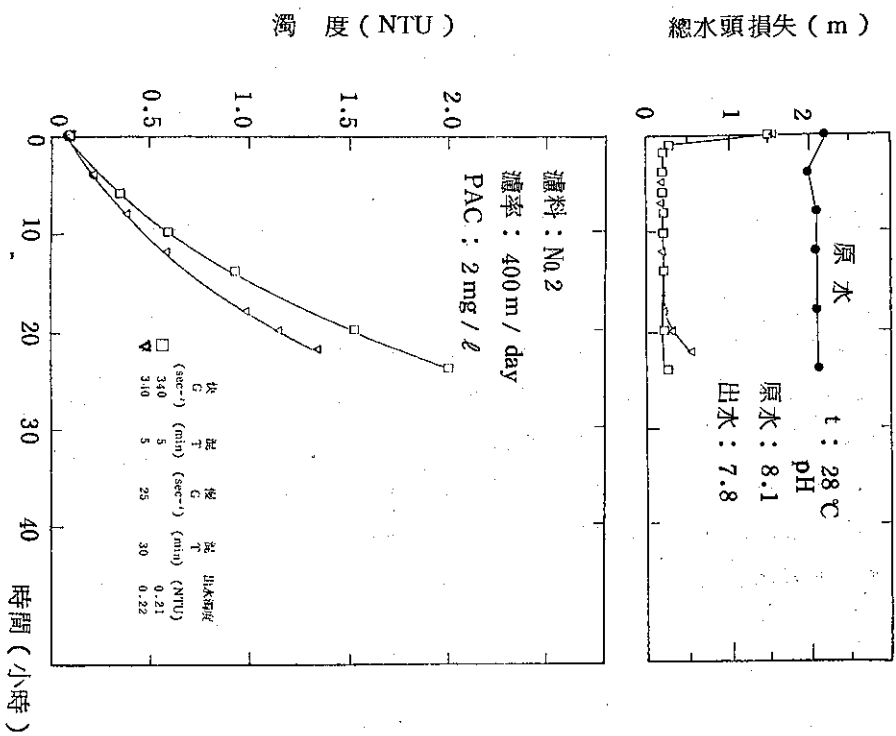


圖 15 有無慢混之比較 (PAC, 2 號濾料, 濾率 400  $\text{m}/\text{day}$ )

#### 四、結 論

由本模廠直接過濾試驗，可得到以下之結論：

- (一)在適當的濾料、濾率及濾前處理配合下，以硫酸鋁或 PAC 為混凝劑，可造成有效去穩定，使直接過濾出水濁度低於 0.5 NTU。
- (二)直接過濾所需之混凝劑最適加量比由瓶杯試驗所預測者為低，但與混凝作用同樣有加藥不足及加藥過量之現象。
- (三)直接過濾之濾前處理需要有適當之快混，不足或過度之攪拌強度與時間，均會使直接過濾的效果變差。在本模廠試驗中，較佳之快混強度為  $G = 340 \sim 900 \text{ sec}^{-1}$  之間，所需停留時間約 5 分鐘左右。
- (四)在某一定範圍內，當濾料較細或濾率較小時，濾前處理較佳之快混強度 G 值趨向較大者，顯示膠羽大小分佈與過濾效率有密切關係，即在某種濾料、濾率條件下，有適於此種條件之最佳膠羽大小分佈存在。但若濾料甚粗，則濾前處理攪拌強度之影響不明顯。
- (五)慢混步驟雖可使水頭損失降低，但同時削弱膠羽強度，而較易發生過早濁度貫穿，故以本模廠之直接過濾而言，慢混程序並非必要。

## 五、參考文獻

1. Letterman, R.D., A Study of the Treatment of Lake Michigan Water Using Direct Filtration, Water Resources Center Report, No.102, University of Illinois at Urbana - Champaign (1975).
2. Tate, C.H., Lang, T.S., and Hutchison, H.L., "Pilot Plant Tests of Direct Filtration," Jour. AWWA, 69:7:379 (1977).
3. Hutchison, W.R., and Foley, P.D., "Operation and Experimental Results of Direct Filtration," Jour. AWWA, 66:2:79 (1974).
4. Hutchison, W.R., "High-Rate Direct Filtration," Jour. AWWA, 68:6:292 (1976).
5. Stump, V.L., and Novak, J.T., "Mixing of Polyelectrolytes for Direct Filtration," Proceedings AWWA 97th Annual Conference, Anaheim, CA, May 8-13, 1977, Paper No.14A-2, 18F.
6. Treweck, G.P., "Optimization of Flocculation Time Prior to Direct Filtration," Jour. AWWA, 71:2:96 (1979).
7. Report of the Direct Filtration Subcommittee of the AWWA Filtration Committee "The Status of Direct Filtration," Jour. AWWA, 72:7:405 (1980).
8. Yeh, H.H., and Ghosh, M.M., "Selection and Use of Polymer in Direct Filtration," Jour. AWWA, 73:4:211 (1981).

致 謝

本研究承台灣省自來水公司提供研究經費，烏山頭淨水廠諸位先生模廠試驗期間鼎力協助，謹此深致謝忱。