

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

不同混凝條件對微米及次微米顆粒
濁度去除之影響

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2211-E-009-050-

執行期間：89年08月01日至90年07月31日

計畫主持人：黃志彬 教授

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

中華民國九十年十月二十五日

不同混凝條件對微米及次微米顆粒濁度去除之影響

Removal of Micron- and Submicron- Colloid Particles
under various Coagulation/Flocculation Conditions

計畫編號：89-2211-E-009-050-

執行期間：89/08/01 - 90/07/31

主持人：黃志彬 交通大學環境工程研究所教授

一、摘要

中文摘要 (關鍵字：快混、顆粒計數器、光纖膠羽偵測儀、膠羽)

快混為淨水廠中重要的流程之一，本研究即探討快混操作對原水中的顆粒聚集以及沈澱去除的影響，除了利用濁度量測觀察顆粒去除的情形，也利用顆粒計數器分析殘餘濁度中特定粒徑大小(0.2~2, 2~15 μm)的顆粒。在顆粒聚集方面，則利用光纖膠羽偵測儀觀察顆粒聚集的狀態，而針對混凝形成的膠羽則進行特性分析。結果顯示在足夠的快混攪拌強度操作下，顆粒去除效果好，殘餘濁度中微小顆粒數目較少，顆粒的聚集則呈現聚集體與聚集體的結合，但形成較鬆散的膠羽，沈降速度較慢；而在不足夠的快混攪拌強度操作下，顆粒去除效果差，殘餘濁度中微小顆粒數目較多，顆粒的聚集則呈現顆粒與聚集體的結合，但形成較結實的膠羽，沈降速度極快。透過以上試驗的結果，我們嘗試建立一套模式來完整描述不同快混操作對後續顆粒聚集以及膠羽沈降的影響。

英文摘要 (keyword: Coagulation, Flocculation, Photometric Dispersion Analyzer)

Rapid-mixing is a critical process in water treatments. Most studies on rapid-mixing have focused on its efficiency in particle destabilization. In this study, the effects of rapid-mixing on the subsequent particles aggregation and settling were investigated. Aggregation dynamics was monitored with a Photometric Dispersion Analyzer, and the characteristics of flocs, namely, settling

velocity, floc density and fractal dimension were determined. The impact of rapid-mixing on residual turbidity and particle count in the supernatant of the effluent from the subsequent sedimentation process can be attributed to its effect on particle aggregation and flocs characteristics. A model was proposed to illustrate this theory.

二、計畫緣由與目的

在環保署新修訂的飲用水管理條例中，對飲用水水質作更清楚與嚴格的規定，飲用水的濁度限值於民國 89 年 12 月，將由現行的 4 NTU 限值降至 2 NTU，面對此一趨勢，台灣省自來水事業於各地的淨水場勢必提升其淨水效能以符合要求。

然而經蔣氏⁽¹⁾及本實驗室^(2,3)評估國內淨水場的操作效能後發現部份淨水場內混凝/膠凝單元操作不佳，而影響後續處理單元的操作效率，因此提昇此單元的操作效率實為當務之急。根據以上所述，在進流原水為高濁度的情況下，混凝/膠凝單元處理的效率更是水中濁度去除的決定因子。而國內外的研究對於混凝程序之中混凝作用機制有著較廣泛的探討，但對於快混操作影響水中微米以及次微米顆粒去除的研究則不多見。

本研究主要目的在建立一完整概念，探討不同的快混攪拌強度對膠凝階段中微粒聚集情況的影響、聚集體沈降特性的影響，以及在沈澱程序中濁度顆粒去除的影響。研究之中，水中微粒去除的評估，除了採用傳統的濁度量測作為評估項目外，也將採用顆粒計數技術分析上層液中不同大小顆粒之數目，粒

徑範圍涵蓋 0.2~15 μm 。顆粒聚集的動力分析，則利用光纖技術進行觀察。形成膠羽則以沈降特性以及膠羽碎形維度特性作為評估。

三、實驗設備方法

實驗設備

(1) 混凝劑-- 聚合氯化鋁 (PACl)，為目前淨水工程中最常被使用的混凝劑種類。使用景明化工所提供的多元氯化鋁溶液 (Showa, Japan)，濃度為 10% as Al_2O_3 (100,000 mg/l)。於實驗之前再以蒸餾水將濃度稀釋為 1,000 mg/l as Al。

(2) 原水水樣製備-- 水樣為人工原水，為球土 (Ball clay) 所配製之原水，為高濁度水為 180 NTU，pH 值控制在 7.5，水溫 25 $^\circ\text{C}$ ，比導電度 130~250 μs ，經粒徑分析儀 (Coulter LS-230) 分析後，平均粒徑為 4.1 μm 。研究所採用的稀釋水為自來水經極微過濾 (nanofiltration) 處理後的出流水，水質特性為濁度 0.2 NTU 以下，pH 值 6.5 左右，鹼度 20 以下 (mg/l as CaCO_3)，TOC (NPDOC) 0.4 mg/l 以下，顆粒數 30 count/ml (2~15 μm) 以下，比導電度在 250 以下，鹼度則利用 NaHCO_3 調整，pH 值以 $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 或 $\text{HNO}_3_{(\text{aq})}$ 調整。

(3) 微粒計數器-- 本研究中共採用 2 台顆粒計數器，粒徑偵測範圍可由 0.2 至 15 μm 。2 至 15 μm 的顆粒偵測，所採用的儀器是 Met One 公司 (USA) 生產的微粒計數器，型號為 WGS267，包含採樣器、內建蠕動幫浦，感應器、LED 顯示螢幕及分析軟體。0.22 至 2 μm 的顆粒偵測，所採用的儀器是 Rion 公司 (Japan) 生產的微粒計數器，型號為 KE-28B，包含 KS-28B 感應器、數位顯示螢幕及分析軟體，但須外加蠕動幫浦 (EYELA 公司，MP-3N)。

(4) 其他重要實驗設備-- 光纖膠羽偵測儀、界達電位儀 (Zeta-meter)，詳細內容可參閱甘氏及黃氏⁽⁴⁾ (1999)。瓶杯試

驗機及攪拌槽則依美國自來水協會所發表之標準規格及步驟進行⁽⁵⁾。

實驗方法

(1) 瓶杯試驗 (混凝劑量決定)

瓶杯試驗主要用來評估 PACl 混凝劑量，在混凝劑注入瓶杯之後，提供 1 分鐘快混，攪拌速度 200 rpm (350 s^{-1})，接下來提供 20 分鐘慢混，攪拌速度 30 rpm (25 s^{-1})，慢混結束後靜置瓶杯沈降 10 分鐘，取其上層液量測殘餘濁度。在快混之後，隨即擷取混合槽中的懸浮微粒，利用界達電位儀量測微粒的界達電位。

(2) 混凝批次試驗 (殘餘濁度量測與顆粒計數)

試驗的進行主要來評估快混攪拌強度對後續顆粒聚集以及濁度去除的影響，批次實驗採取的不同的快混攪拌 G 值 (25、80、200、350、600 s^{-1})，接下來的慢混與瓶杯實驗相同，也是提供 20 分鐘慢混，攪拌速度 30 rpm (25 s^{-1})，慢混結束後靜置瓶杯沈降，但分別在沈降 5、10、20 分鐘後，取其上層液量測殘餘濁度。對於沈降 10 分鐘的上層液也進行顆粒數目的量測，粒徑範圍包含 0.2 2 μm 以及 2 15 μm 。顆粒膠凝的狀態則利用 PDA 進行監測。

(3) 膠凝狀態監測 (光纖膠羽偵測)

詳細內容可參閱甘氏及黃氏⁽⁴⁾。

(4) 膠羽特性分析 (自由沈降試驗與 Stoke's 公式計算)

將批次沈澱的膠羽移作自由沈降試驗，以分析不同加藥量下所產生膠羽的粒徑以及沈降速度，再代入 Stoke's 公式，可計算出膠羽之密度。Stoke's 公式如以下所示，

$$w = \frac{g(\dots_f - \dots_w)d^2}{18\mu} \quad (\text{式 1})$$

w 為沈降速度，g 為重力加速度， \dots_f 為膠羽密度， \dots_w 為水密度，d 為膠羽粒徑， μ 為水的黏滯係數。膠羽維度的分

析則利用沈降試驗觀察所得到的沈降速度以及膠羽粒徑大小，透過計算可得，其關係如下式表示：

$$V \propto D^{df-1} \quad (\text{式 2})$$

式中 V 為沈降速度， D 為膠羽大小， df 為膠羽的碎形維度。在已知沈降速度以及膠羽大小的情況下，透過雙對數的運算，可以求得碎形維度⁽⁶⁾。此外，研究之中也利用顯微照相技術將已沈澱之聚集體的型態記錄下來。

四、結果討論

(I) PACl 劑量判定

實驗之中首先利用 Zeta-Meter 量測原水中濁度顆粒表面的界達電位為 -20 mV，為一穩定的膠體系統。因此採用了 7 種 0.5~10 mg/l 的 PACl 加藥量進行混凝，在各加藥量下，所得到的顆粒界達電位值與進行 Jar-Test 之後的殘餘濁度如圖 1 所示。在 0.5 mg/l PACl 加藥量下，顆粒的界達電位達到 -16.3 mV，在 1.5 mg/l 以及 2 mg/l 的 PACl 加藥量下，顆粒的界達電位達到 -2.5 mV 及 2.1 mV，已經達到去穩定的狀態，因此在沈澱 10 分鐘之後，即可得到 4.8 及最低的 2.8 NTU 的殘餘濁度。

混凝劑增加至 3 mg/l，水中顆粒的界達電位轉為正值為 5.1 mV，上層液的殘餘濁度 3.0 NTU。至 10 mg/l 的混凝加藥量時，雖然此時利用界達電位儀的量測，發現顆粒已有電性逆轉的情況，然而殘餘濁度並沒有很明顯的升高趨勢，上層液的殘餘濁度即維持在 3.0 NTU 左右。這是由於 PACl 的聚集物具有相當高的表面積體積比，所以能更有效地以電性中和的方式吸附於帶負電的顆粒上。因此當 PACl 吸附於顆粒時，顆粒表面電性雖由負電性轉為正電性，但顆粒表面仍有可以供多核鋁錯合物吸附的區位，使顆粒能夠繼續成長，而這膠羽成長的現象將持續到其吸附達到飽和為止，所以在過量加藥的情形下，瓶杯試驗所測

得的殘餘濁度並不會有明顯上升的趨勢。

由圖 1 透過殘餘濁度以及界達電位的量測，可以判定 2 mg/l 的混凝劑加藥量為一適當加藥，但在以下的實驗之中，為凸顯快混攪拌對後續顆粒凝集以及膠羽沈降的影響，研究之中則採用稍微不足的混凝劑量，1.5 mg/l as Al，為後續的實驗所採用。

(2) 快混攪拌對濁度及顆粒去除的影響

批次混凝實驗採取的不同的快混攪拌 G 值，並皆提供相同慢混操作（20 分鐘，30 rpm），沈降 5、10、20 分鐘後，取其上層液量測殘餘濁度，其結果如圖 2 所示，兩個明顯的趨勢在此被提出討論。首先是對應不同的快混 G 值所得到的上層液殘餘濁度，在經過相同慢混攪拌與沈澱之後，以沈降 10 分鐘的殘餘濁度為例，快混 G 值 25 s^{-1} 的殘餘濁度最高為 12.8 NTU，隨著快混攪拌 G 值的升高殘餘濁度越低，在 G 值 350 s^{-1} 的濁度最低為 3.0 NTU，但在快混 G 值 600 s^{-1} 得到的濁度則稍微上升至 3.2 NTU，由以上的結果可得知快混攪拌對濁度去除的影響極大，而且存在一最佳操作的範圍。

由圖 2 也顯示出，不同的快混 G 值後即使接續相同慢混與沈澱，所得到的沈降曲線有明顯不同的趨勢變化，以快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的沈降曲線為例，快混 G 值 25 s^{-1} 的沈降曲線趨勢變化相當穩定，沈降 5 分鐘與 20 分鐘所得到的殘餘濁度相差不到 1 NTU。由快混 G 值 350 s^{-1} 所得的結果，從沈降 5 分鐘所得到的 4.5 NTU 到沈降 20 分鐘的 2.3 NTU，沈降曲線變化則有明顯下降的趨勢。由以上的結果判斷快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的沈降膠羽以及上層液的特性有所不同，推論快混 G 值 25 s^{-1} 的膠羽沈降在開始沈澱之後的 5 分鐘之內已完成，上層液之中則存在穩定且難以沈降的顆粒；而快混 G 值 350 s^{-1}

的膠羽沉降在開始沈澱 20 分鐘之內依舊持續發生，上層液中則是存在具沈降性的顆粒。

對於沈降 10 分鐘的上層液進行 0.2 15 μm 顆粒數目的量測，其結果如圖 3 所示。可以發現在快混 G 值 25 s^{-1} 情況下，其 2 15 μm 的顆粒數目在 1,250 cnt/ml，0.2 2 μm 的顆粒數目在 2.9×10^7 cnt/ml；隨著快混攪拌 G 值的升高可得越少的顆粒數目，在快混 G 值 350 s^{-1} 得到的最少顆粒數目，2 15 μm 的顆粒數目在 570 cnt/ml，0.2 2 μm 的顆粒數目在 0.75×10^7 cnt/ml。在快混 G 值 600 s^{-1} 得到的 2 15 μm 顆粒數目則稍微上升至 720 cnt/ml，0.2 2 μm 的顆粒數目則接近於快混 G 值 350 s^{-1} 所得。由顆粒數目量測的結果發現，有兩個值得注意的地方，首先發現顆粒計數與殘餘濁度的結果，出現相當吻合的趨勢變化。此外，由圖 2 結果可知最高與最低的殘餘濁度分別出現在 G 值 25 與 350 s^{-1} ，比較在粒徑範圍 2 15 μm 的顆粒數目，G 值 25 s^{-1} 為 350 s^{-1} 的 2 倍（1250 : 570），在粒徑範圍 0.2 2 μm 的顆粒數目，G 值 25 s^{-1} 為 350 s^{-1} 的 4 倍（ 2.9×10^7 : 0.75×10^7 ）。由以上的比較可知，兩者殘餘濁度的差距主要由 0.2 2 μm 的顆粒所造成，也因為 G 值 25 s^{-1} 的上層液之中存在大量 0.2 2 μm 的顆粒，較 2 15 μm 的顆粒更細微、難以沈澱，因此沈降曲線表現並無太大的變化（如圖 1 所討論），很不幸的是，此粒徑大小的顆粒在淨水過濾流程中是最難被移除的⁽⁷⁾。在底下的實驗中，基於突顯實驗數據差異的考量，因此將觀察的對象固定為快混 G 值 25 以及 350 s^{-1} 的操作情況。

(3) 膠凝狀態偵測

光學膠羽偵測儀，可用來監測流動性的懸浮固體溶液顆粒的聚集狀態，PDA 的 Ratio 輸出值可作為懸浮液中顆粒聚集的指標並可進行顆粒膠凝動力分析^(8,9)。

利用 PDA 進行膠凝的動力分析，結果如圖 4 所示，在快混 G 值 25 s^{-1} 後，於慢混階段（20 分鐘、30 rpm）進行 PDA 偵測，結果 PDA 的 Ratio 輸出值在膠凝開始後“緩慢”上昇，到 8 分鐘達到最大 Ratio 輸出值 3.8，之後 Ratio 輸出值急速下降。而在快混 G 值 350 s^{-1} 後，於慢混階段（20 分鐘、30 rpm）進行 PDA 偵測，結果 PDA 的 Ratio 輸出值在膠凝開始後“急速”上昇，到 2.5 分鐘達到最大 Ratio 輸出值 4.7，之後 Ratio 輸出值呈現“緩慢”下降的趨勢。

於膠凝的階段中，水中微小顆粒聚集成膠體顆粒時，Ratio 輸出值會逐漸變大，由文獻指出 PDA 的 Ratio 輸出達最大值時為膠凝聚集達穩定平衡，之後 Ratio 值則會因聚集膠羽的沈降或膠羽破壞而下降。利用 PDA 對慢混階段顆粒的聚集情形進行分析，由以上的定義可以發現，於快混 G 值 350 s^{-1} 之後，於慢混階段 2.5 分鐘時顆粒聚集可達平衡，於快混 G 值 25 s^{-1} 之後，於膠凝 8 分鐘時顆粒聚集可達平衡，顯示出在膠凝階段之中，快混 G 值 350 s^{-1} 可導引出較 G 值 25 s^{-1} 更快速的顆粒聚集速度。

當微粒間的吸引力大於排斥力時，顆粒與顆粒才會有碰撞的機會，進而形成聚集體，在慢混的過程中，Smoluchowski 在 1917 年所提出顆粒碰撞公式：

$$-\frac{dn_T}{dt} = \frac{1}{6} G (d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \quad (\text{式 } 3)$$

式中 n_T 為顆粒的總數目， n_1 為粒徑 d_1 顆粒的數目， n_2 為粒徑 d_2 顆粒的數目， dn_T/dt 為顆粒的減少速率（即凝聚速度）， G 為水流剪力值。所以凝聚速度與水溫有關，也與顆粒數目的平方成正比，因此高濁度的原水，如果所有的顆粒可完全去穩，那麼在凝聚的過程中，由於水中顆粒濃度高，凝聚速度也會極快，所以慢混階段所需的時間也可縮短。但在本研究之中，快混 G 值 350 與 25 s^{-1} 的批次實驗

條件中，皆控制相同的溫度以及顆粒數目，卻顯示出差距極大的顆粒聚集速度。

(4) 膠羽特性分析

為了瞭解在不同快混條件下，生成膠羽特性的差異，研究之中對混凝批次試驗所沈澱的膠羽進行採樣，以自由沈降法觀察膠羽的粒徑與沈降速度，再利用 Stoke's 公式(式 1) 計算生成膠羽的密度。在快混 G 值 25 s^{-1} 的條件下，生成膠羽的平均粒徑 0.42 mm ，平均沈降速度為 7.8 mm/sec ，經公式計算後可得到膠羽密度為 1013.78 kg/m^3 。在快混 G 值 350 s^{-1} 的條件下，生成膠羽的平均粒徑 0.39 mm ，平均沈降速度為 4.8 mm/sec ，計算後可得到膠羽密度為 1009.84 kg/m^3 。

比較在兩種快混攪拌條件所得的形成膠羽的特性，可以發現形成平均粒徑差不多，但 G 值 350 s^{-1} 所形成膠羽的密度較小，因此沈降速度較慢，而根據 1997 年 Yasuhisa 觀察高嶺土混凝膠羽的沉降過程，發現膠羽粒徑與沉降速度呈現一指數關係⁽⁶⁾，如式 2 所示。所以將膠羽樣本的粒徑與沈降速度取對數分析，可以計算其斜率而求出膠羽的碎形維度。根據自由沈降試驗所觀察到的膠羽樣本，在快混 G 值 25 s^{-1} 的條件下，粒徑與沈降速度的對數分析如圖 5 所示，可以計算斜率為 1.15，而在快混 G 值 350 s^{-1} 的條件下，對數分析如圖 6 所示，斜率為 0.8，因此生成膠羽的維度分別為 2.15 以及 1.80，此一數據與上述沈降實驗之中，觀察到快混 G 值 25 s^{-1} 的生成膠羽的密度大於 G 值 350 s^{-1} 的膠羽，其結論相互吻合。此一結論再透過顯微照相後，可得到更進一步的支持，圖 7 為快混 G 值 25 s^{-1} 的生成膠羽，顯示出一密實的膠羽結構型態，圖 8 為快混 G 值 350 s^{-1} 的生成膠羽，則是一較鬆散的膠羽結構。

五、結論

快混操作的確對後續顆粒的聚集以及膠羽的沈降影響極大，最主要的因子取決於顆粒去穩的情況。均勻的快混攪拌，

可使大部分的顆粒去穩，在膠凝的過程中會引起聚集體與聚集體的聚集型態，因而形成較鬆散且沈降性較差的膠羽。不均勻的快混攪拌，會導致顆粒與聚集體的聚集型態，形成密實且沈降性較佳的膠羽，但是上層液中會存在大量的細微顆粒，值得注意的是，此粒徑大小的顆粒在後續的過濾流程中仍是令人頭痛的問題。

由以上研究結果，本研究群認為淨水廠在面臨高濁原水進入的情況下，快混單元的混凝劑分散效率勢必不高，因此會產生局部過量加藥之情況，面對此一情形，除了過量加入混凝劑之外，本研究群提供一些操作概念以因應之，如在快混操作方面增加混凝劑的注入管道、快混池分次加藥以提高混凝劑分散效率。而在慢混操作方面，可提高其攪拌速度，除了避免膠羽顆粒於膠凝池中發生沈澱的情況，亦可讓水中的微小顆粒繼續碰撞膠羽而結合，以利後續沈澱與過濾的處理。

六、參考文獻

1. 蔣本基、張怡怡 "建立國內淨水場綜合效能評估 (CPE) 制度研究" 自來水協會，民國八十九年五月。
2. 甘其銓 "淨水廠濁度去除效能評估及混凝監測之研究—以豐原淨水廠為例" 交通大學環境工程研究所碩士論文，民國八十六年。
3. 李丁來、甘其銓、黃志彬、劉廷政、李乾華、林慶春 "淨水場去除濁度功能自我評鑑之初步研究" 第十六屆自來水研究發表會，台北，民國八十八年十一月。
4. 甘其銓、黃志彬 "淨水場快混程序之動力分析" 第十六屆自來水研究發表會論文集，pp190-206，台北，民國八十八年十一月。
5. AWWA. (1992) Jar Testing. *Operation Control of Coagulation and Filtration Processes*. Denver, AWWA Research Foundation., 1-41.
6. Yasuhisa, A. and Yoshikazu, T. (1997) Settling velocity of an aluminium-kaolinite floc. *Wat. Res.*, 31, 449-454.

7. Wiesner, M. R. and Klute R. (1998) Properties and Measurements of Particulate Contaminants in Water. *Treatment Process Selection for Particle Removal*. Edited by Mcewen, J. B., AWWA Research Foundation Press: Denver, Chapter 4.
8. Huang, C. P. and Chen, G. S. (1996) Use of the fiber-optical monitor in evaluating the state of flocculation. *Wat. Res.*, **30**, 2723-2727.
9. Kan, C. C. and Huang, C. P. (1998) Coagulation monitoring in surface water treatment facilities. *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 237-244.

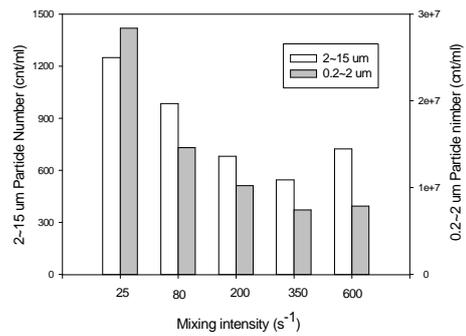


圖 3 混凝批次試驗中，上層液中 0.2~2 and 2-15 μm 顆粒數目與快混攪拌強度之關係 (快混 1 分鐘後接續慢混 20 分鐘、G 值 25 s^{-1} , PACI 加藥量 1.5 mg/l)

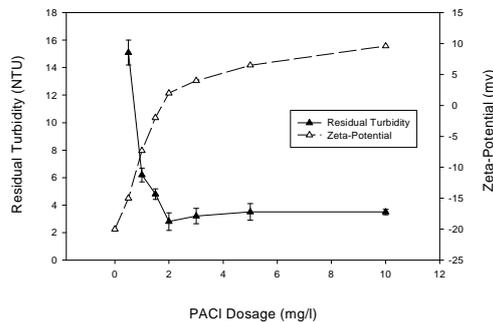


圖 1 殘餘濁度與顆粒界達電位於不同 PACI 加藥量下的變化(原水濁度 180 NTU)

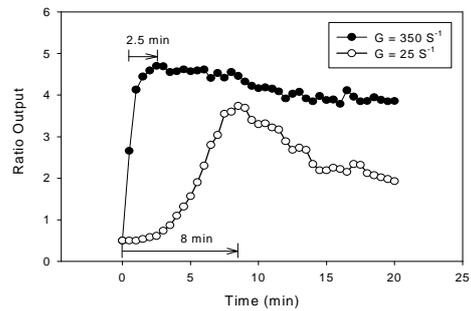


圖 4 快混 G 值 350 s^{-1} 及 25 s^{-1} 後，PDA Ratio 輸出值於慢混階段隨時間之變化 (快混 1 分鐘接續慢混 20 分鐘、30 rpm , PACI 加藥量 1.5 mg/l)

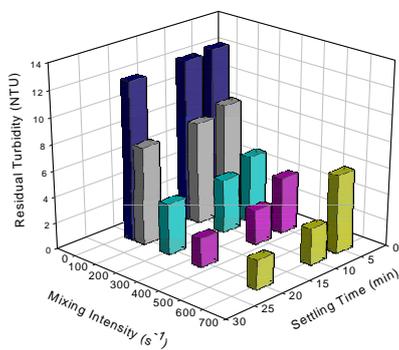


圖 2 混凝批次試驗中不同快混攪拌下，殘餘濁度隨沉降時間的變化 (快混 1 分鐘後接續慢混 20 分鐘、G 值 25 s^{-1} , PACI 加藥量 1.5 mg/l)

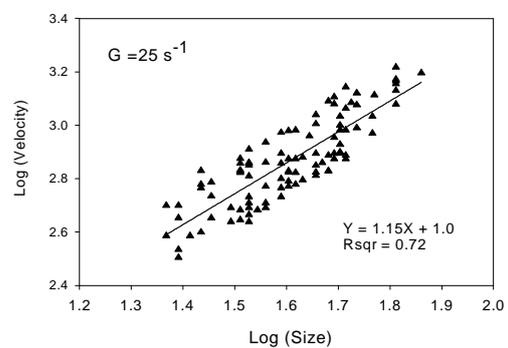


圖 5 膠羽粒徑與沉降速度對數關係圖 (快混 1 分鐘、G 值 25 s^{-1} , 慢混 20 分鐘、30 rpm , PACI 加藥量 1.5 mg/l)

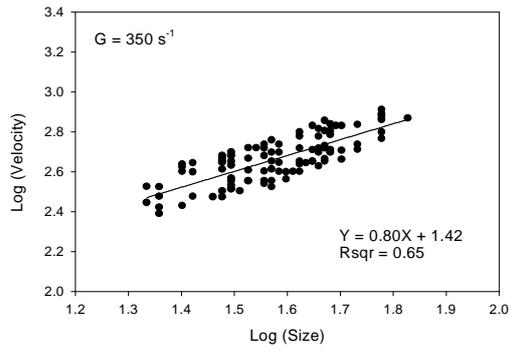


圖 6 膠羽粒徑與沈降速度對數關係圖 (快混 1 分鐘、G 值 350 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/

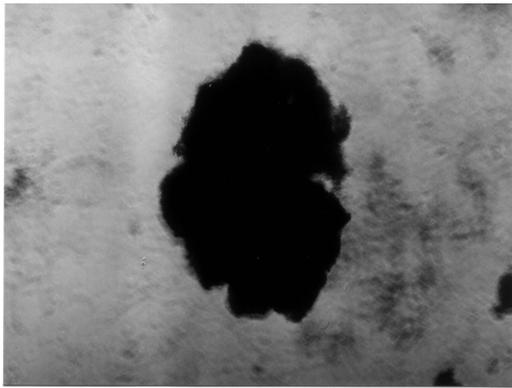


圖 7 膠羽顯微照片
(快混 1 分鐘、G 值 25 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)

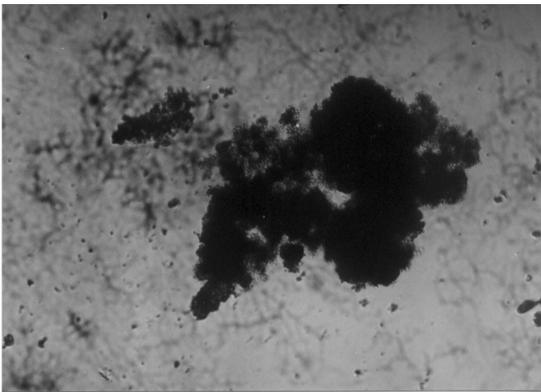


圖 8 膠羽顯微照片
(快混 1 分鐘、G 值 350 s^{-1} ，慢混 20 分鐘、30 rpm，PACl 加藥量 1.5 mg/l)