

向上流動懸浮流化床之泥毯動態研究

蘇信團、吳容銘、李篤中

台灣大學化學工程學系

前言

高速膠凝澄清池自 1930 年代起即使用於淨水處理。由於具有較佳的混凝效果，可使顆粒間更有效的接觸，因此其表面負載能力可達傳統式混凝沉澱池的 2~3 倍。台灣自來水公司自 1990 年代已於淨水場廣設膠凝澄清池，目前膠凝澄清池已供應台灣 70% 以上的飲用水，其處理水量與膠凝澄清池內之泥毯(floc blanket)有關。泥毯本身為粒子的混凝器與過濾器，澄清池生產優質的飲用水時需有一穩定存在之泥毯。

泥毯穩定性是由混凝膠羽沉降速度和給予一向上流速度控制。操作必須小心謹慎方能防止泥毯從澄清池沖刷掉(AWWA/ASCE, 1990)。然而台灣目前應用中之澄清池時常發生泥毯被淘析現象。

本論文針對淨水程序之膠凝澄清池之上浮泥毯進行研究，希望能有助於膠凝澄清池操作及預防泥毯的淘析現象。並推導泥毯模型，以預測泥毯裡的固體濃度時空變化。

實驗方法與設備

實驗藥品

- (1) 碳酸氫鈉(NaHCO_3 , Nacalai Tesque)：用於控制人工原水鹼度。於本實驗中添加 0.1 g/L NaHCO_3 以控制鹼度。
- (2) 過氯酸鈉($\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Merck)：購自默克，用於控制人工原水離子強度。於本實驗中添加 0.1 g/L $\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 以控制離子強度。

- (3) 黏土(UK ball clay)：其平均粒徑為 8.6 μm ，購自桃園晉榮有限公司。
- (4) 聚氯化鋁(Polyaluminum Chloride, PACl)：實驗之混凝劑，其規格如表 3.1 所示，購自苗栗聯碳實業有限公司，為台灣省自來水有限公司平鎮淨水現場所用之藥劑。由 ICP 測得 PACl 母液之鋁離子濃度為 40,000 ppm。
- (5) 過氯酸(HClO_4 , Merck)：購自默克，用於調整實驗所需之 pH 值。
- (6) 氫氧化鈉(NaOH , Nacalai Tesque)：用於調整實驗所需之 pH 值。

採用實驗室所製備之人工原水，為 0.125 g/L Clay、0.25 g/L Clay 與 0.5 g/L Clay，其初始濁度分別為 100、200 及 450 NTU。取 6 個 1 L 之燒杯個別加入 0.1 g NaHCO_3 及 1.237 g $\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 加入 0.125 或 0.25 或 0.5 g 黏土再加水至 1 L，於攪拌機中調整原水之 pH 至 7 後再添加 PACl。先於 90 rpm 下進行 1.5 分鐘快混，再於 50 rpm 下進行 8.5 分鐘慢混，經 2 小時沉降後收集底部泥毯，再加水至 2.07 L(流化床圓管柱內之總體積)。實驗中採用 3 個 PACl 劑量(不足量、適量及過量)，而 PACl 之最適劑量則由杯瓶實驗之上澄液濁度來決定。在 PACl 劑量 8~28 ppm as Al 其表面電位皆接近 32 mV， $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 劑量約在 8.5 ppm as Al 處表膠羽粒子表面電位為零，為電中性。

流化床實驗

首先藉由杯瓶實驗決定混凝劑最適劑量，再決定流化床實驗之混凝劑添加量。流化床實驗分為上浮與沉降實驗，及動態實驗之部分。其中流化床上浮實驗為給於一向上流速使泥毯向上懸浮之流體化床實驗；沉降實驗為第一次流化床結束時，使 $U=0 \text{ m/hr}$ 令泥毯做總體沉降；動態實驗為在一恆定向上流速($U=\text{常數}$)情況下，泥毯之界面高度會隨時間之增加而下降。

將人工原水 2.07 L 傾斜倒入圓管柱內，同時必須打開流量計，給予流化床一較小的上升流速，使其能形成一個清楚之固液界面、均一分佈的沈積層。至界面穩定後記錄溢流水之體積流率並測溢流水之濁度，然後稍微增加水的流速，至 10 分鐘後即重複上述測量，一直重複至固液界面模糊為止。此時關閉流量計(即沉降實驗開始)，記錄泥毯界面隨時間之增加與相應之沈降高度。

將人工原水 2.07 L 傾斜倒入圓管柱內，同時打開流量計給予流化床一特定的上

升之流速，並記錄時間。膠羽泥毯會隨時間增加而緩慢的沈降至形成一清晰之固液界面及有均一分佈的沈積層，泥毯會降至一特定之平衡高度。然後將流量計關閉，泥毯會再一次隨時間的增加而緩慢降至一特定平衡高度。此實驗為觀察泥毯高度隨著時間之增加而下降之高度。

結果與討論

泥毯模型

圖 1 為所研究的泥毯系統。泥毯的穩定藉膠羽粒子的重力與上浮流體的拖曳力之間達平衡控制。泥毯裡固體濃度的時空變化，可簡化為下述之一維模型 (Chen et al., 2003c)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C(U - V_{sett}(C, A\bar{V}I, d_f))}{\partial z}, \quad (1)$$

C 是固體濃度； D (m^2/hr) 是膠羽在泥毯裡有效擴散係數； t (hr) 是時間。由於膠羽在泥毯中常形成均勻分佈。另外，在穩態操作中泥毯表面是一清晰界面，因此在當泥毯存在中可忽略擴散項影響，即令 $D=0$ ，則式(1)可簡化為下述之波動方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v(C) \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

此式有一個衝擊波(shock-wave)解。式(2)中之 $v(C)$ 是特性速度， $v(C)$ 為固體通量差值之偏微分，即 $v(C) = \frac{\partial(CU - CV_{sett})}{\partial C}$ ，因此在 $z=z_0$ 與 $t=t_0$ 之膠羽會隨速度 $v(C)$ 向上

或向下移動，其軌跡路徑如下所示：

$$z = z_0 + v(C(z_0, t_0))t, \quad (3)$$

其中 $C(z_0, t_0)$ 為在 $z=z_0$ 與 $t=t_0$ 之泥毯濃度，而在 $t=t_0$ 時一任意分佈的膠羽將以符合特性速度 v 之軌跡運動。

圖 2a 為一懸浮床中之固體通量曲線。在濃度很低或很高時沉降通量(CV_{sett})為零，而 $C=C_{max}$ 處有一極大通量。向上流動之通量是斜率 U 之直線。固體通量差值

$(CU - CV_{sett})$ 與它的斜率分別示於圖 2b 與圖 2c 中。當 C 較低時特性速度為負；當 C 較大時，特性速度會達到一恆正常數。在 $C=C_0$ 時，固體通量之差值 $(CU - CV_{sett})$ 為一極小值，即 $v(C_0)=0$ 。

依據式(3)當 $C > C_0$ 時 $v(C)$ 為正，且和 $C=C(z_0, t_0)$ 垂直的位置會依據方程式(4.3)向上移動；當 $C < C_0$ 時，從 $v(C) < 0$ 處，和 $C=C(z_0, t_0)$ 垂直的位置會依據方程式(4.3)向下移動。在 $v(C_0)=0$ 時，局部的固體濃度之分佈不會隨時間而改變。泥毯的演化過程如圖 3 所示。泥毯裡的固體濃度分佈會在 $C=C_0$ 處收斂成一個衝擊波解，界面之上則有一上澄液($C \approx 0$)。

顯然在 $C=C_0$ 處 $CU > CV_{sett}$ (圖 2b)，固體濃度在 $C=C_0$ 處達到衝擊波解後，泥毯會在 $C=C_s$ 處逐漸形成另一個衝擊波解，其中 C_s 為 CU 與 CV_{sett} 曲線之交點。

由式(2)無法求出 $C > C_0$ 後之泥毯動態變化時間。定義臨界速度為

$$U_{crit} = \lim_{C \rightarrow 0} \left[\frac{\partial(CV_{sett})}{\partial C} \right] \text{ (m/s)}, CU_{crit} \text{ 為圖 2 中具斜率 } U_{crit} \text{ 之直線，即在 } U > U_{crit} \text{ 時 } C$$

沒有穩態解，泥毯會完全流失。

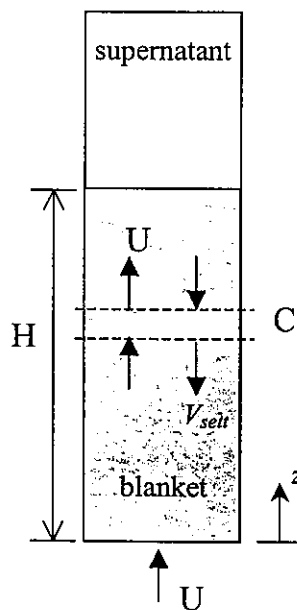


圖 1 泥毯系統模型

流化床實驗

圖 4 為初始濁度為 200 NTU +16 ppm as Al 在上浮流速 $U=2.49\text{ m/hr}$ 之流化床動態行為。將泥毯傾倒入圓管柱內，同時給予一恆定之上浮流速即 $U=2.49\text{ m/hr}$ ，則約 20 分鐘後泥毯界面會於 $H=63\text{ cm}$ 處開始出現，然後泥毯會逐漸地沉降至 $H=55\text{ cm}$ 之時，且泥毯高度於 $t=60\sim 100$ 分間皆處於 $H=55\text{ cm}$ 處(region AB)。之後泥毯會再度沉降，最後泥毯平衡於 $H=42\text{ cm}$ 處。實驗觀察顯示泥毯中之固相皆處於完全懸浮狀態，固體濃度於圓管柱中呈現均勻分佈。AB 區中泥毯的平均固體濃度約為 0.115% ($C=C_0$)，而於 $H=42\text{ cm}$ 處 C 約為 0.150% (即 C_s)，這個觀察與泥毯模式預測符合：即任意分佈之膠羽會首先匯聚成一均勻分佈之泥毯 (即 $C=C_0$)，然後泥毯會自身壓密形成另一較高固體濃度之均勻分佈泥毯 (即 $C=C_s$)。

當上浮流速由 2.49 m/hr 降為零時，泥毯花了 5 分鐘沉降至 $H=13\text{ cm}$ (圖 4)。可看出在 $H=39\sim 18\text{ cm}$ 處 $H-t$ 為一直線，即具總體沉降特性。在 $H<18\text{ cm}$ 處(相當於 $C=0.350\%$ ，即 C_t)，膠羽開始相互接觸產生應力使膠羽沉降減慢。因 C_0 與 C_s 均小於 C_t ，因此圖 4 中之 AB 區域及 D 點皆是在懸浮的狀態，即 AB 區之恆定濃度區應為式 (4.3) 所描述之衝擊波解，而並非由因膠羽接觸而產生具應力之網狀結構，進而支撐整個泥毯不致進一步沉降。

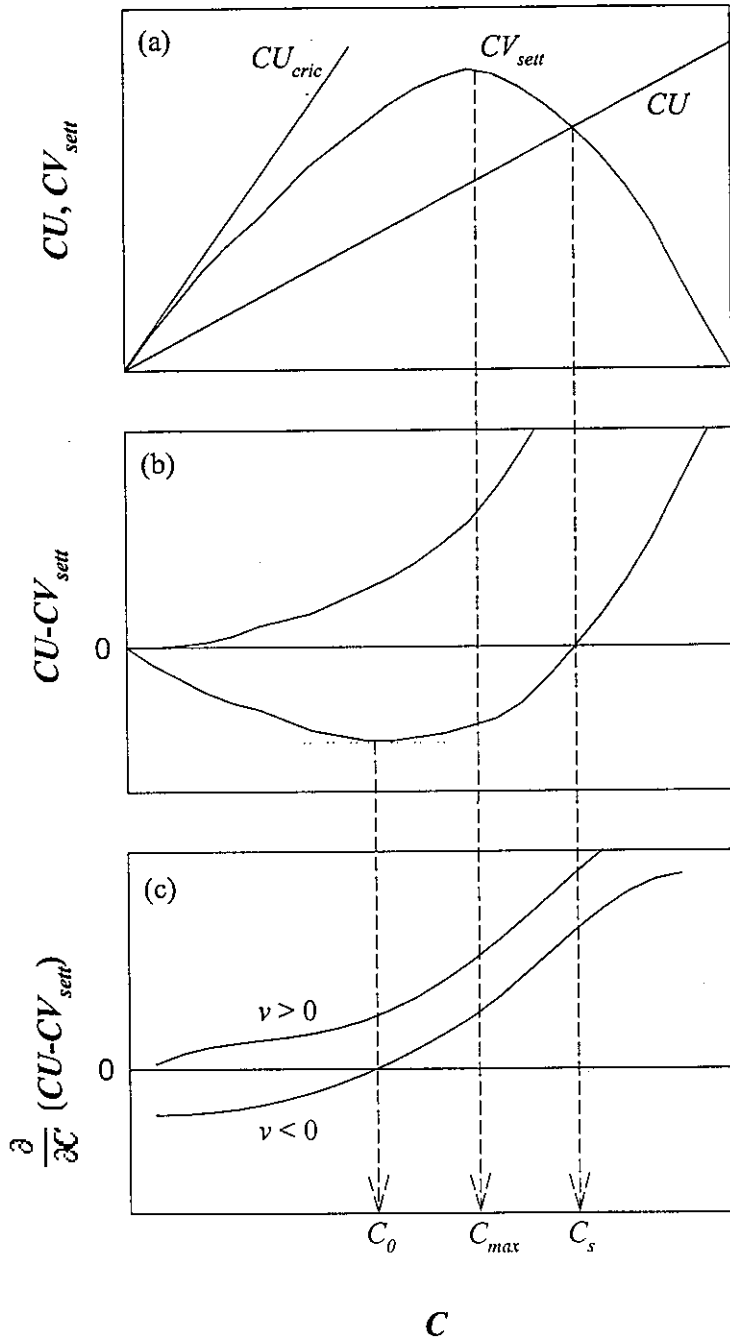


圖 2 固體通量對固體濃度之繪圖；(a) 沉降與上浮之固體通量曲線；(b) 沉降與上浮的固體通量差值；(c) 微分(b)部份，相當於系統之特性速度。

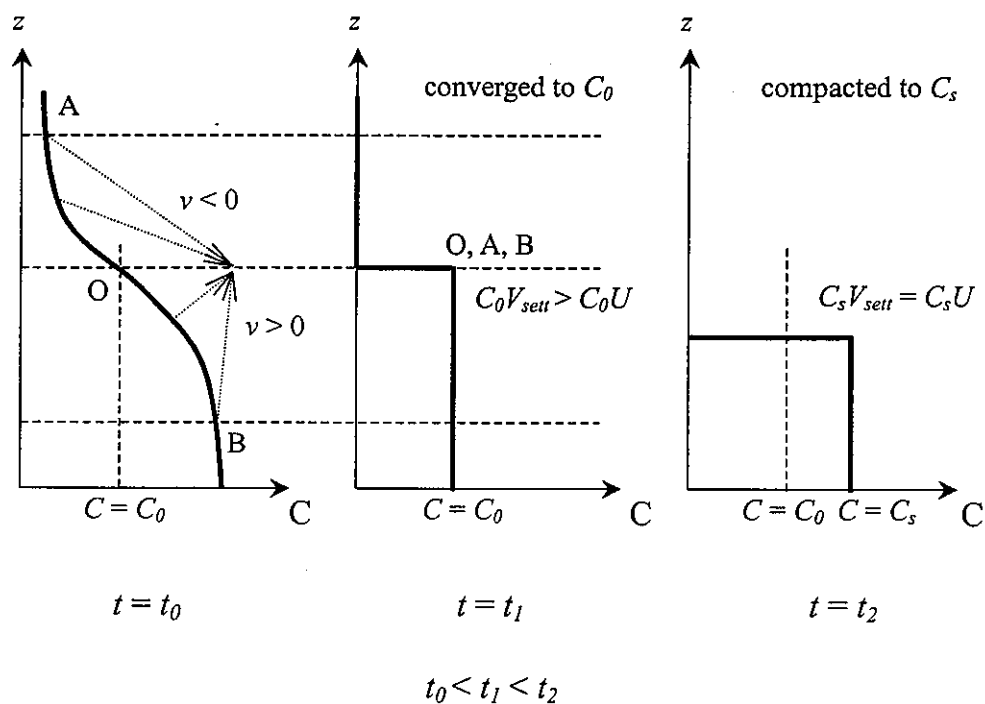


圖 3 泥毯發展過程之圖示；於 $t=t_0$ 泥毯之最初分佈；於 $t=t_1$ ，泥毯在 $C=C_0$ 收斂為均一分佈；於 $t=t_2$ ，泥毯自身壓密至在 $C=C_s$ 之均一分佈。

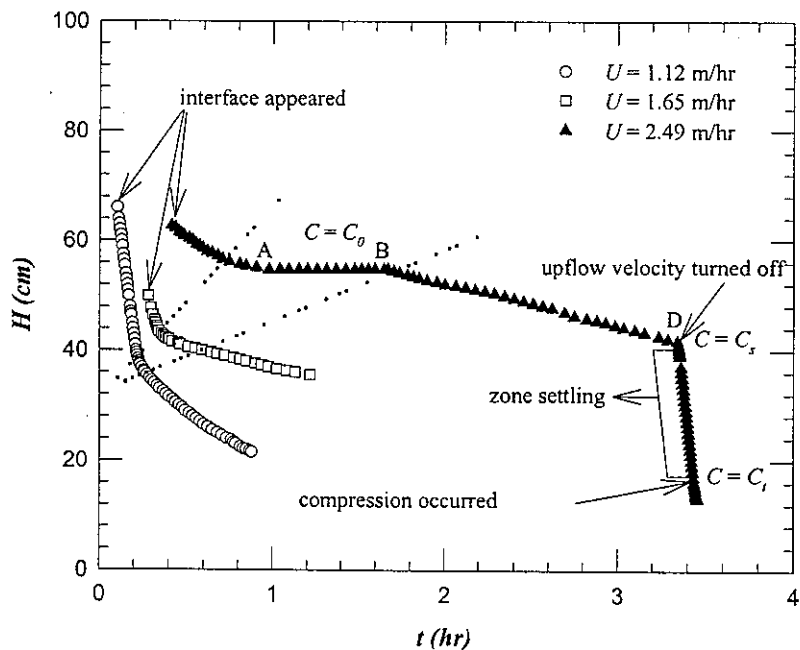


圖 4 初始濁度為 200 NTU + 16 ppm as Al 之動態實驗。

圖 4 中也顯示出 $U=1.12$ 及 $U=1.65$ m/hr 之測試。如預料中在低上浮流速下泥毯之界面較易形成，且沉降速度較快；此外，在 $U=1.12$ 及 $U=1.65$ m/hr 測試中並未觀察到和 $U=2.49$ m/hr 一樣之 AB 區，而只有在 $H-t$ 曲線上分別於 $H=37$ 或 42 cm 處斜率發生明顯變化，其對應之固體濃度部分(C_0)分別為 0.170% 或 0.150% ，此變化如上所述並非歸因於泥毯中粒子的接觸及壓密，而應來自於形成式(3)之衝擊波解其對應平衡高度為 $H=22$ 及 30 cm，其 C_s 分別為 0.287% 及 0.210% 。

其餘流化床實驗(圖 5 及圖 6 分別為初始濁度為 200 NTU + 12 與 20 ppm as Al)也與前述，即經過一段沉降時間之泥毯會於圓管柱內形成(泥毯高度可能會靜止停留一段時間)，呈現類似衝擊波分佈($C=C_0$)，之後會再次沉降至平衡高度($C=C_s$)。

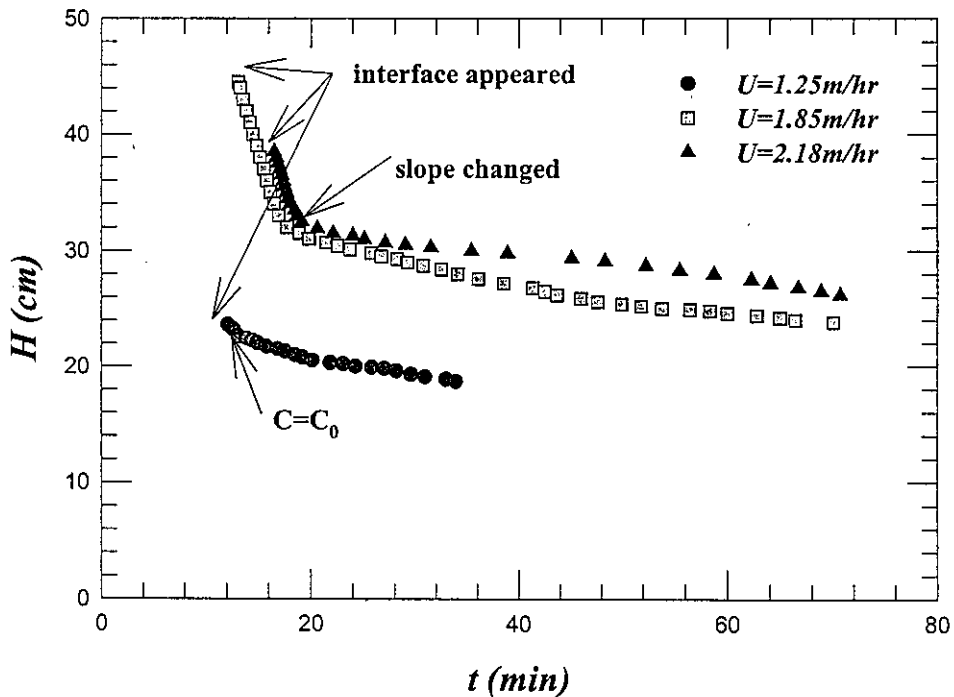


圖 5 初始濁度為 200 NTU + 12 ppm as Al 之動態實驗。

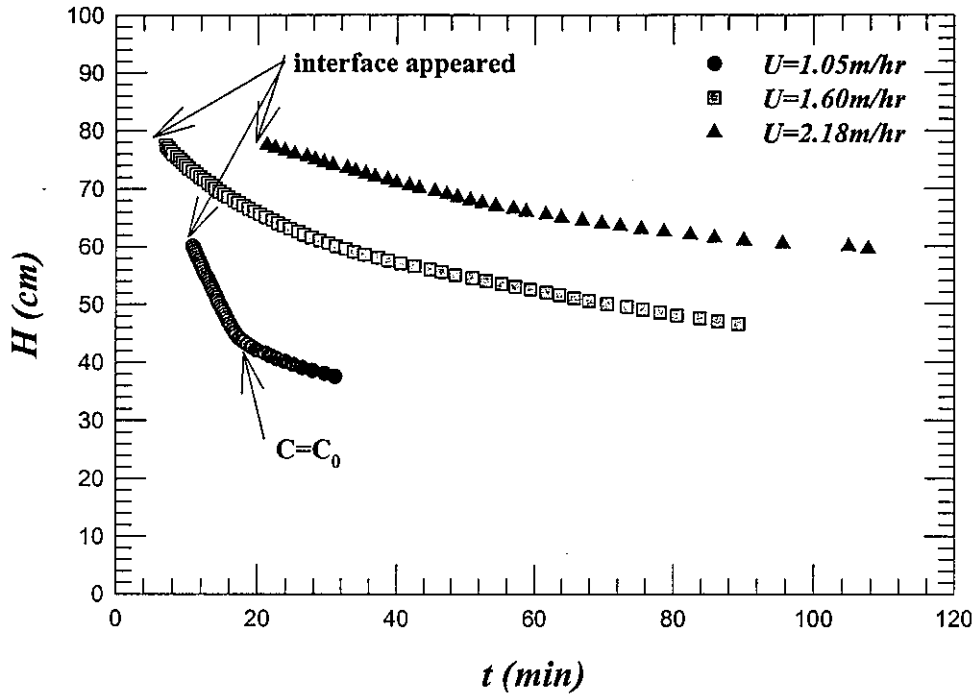


圖 6 初始濁度為 200NTU + 20 ppm as Al 之動態實驗。

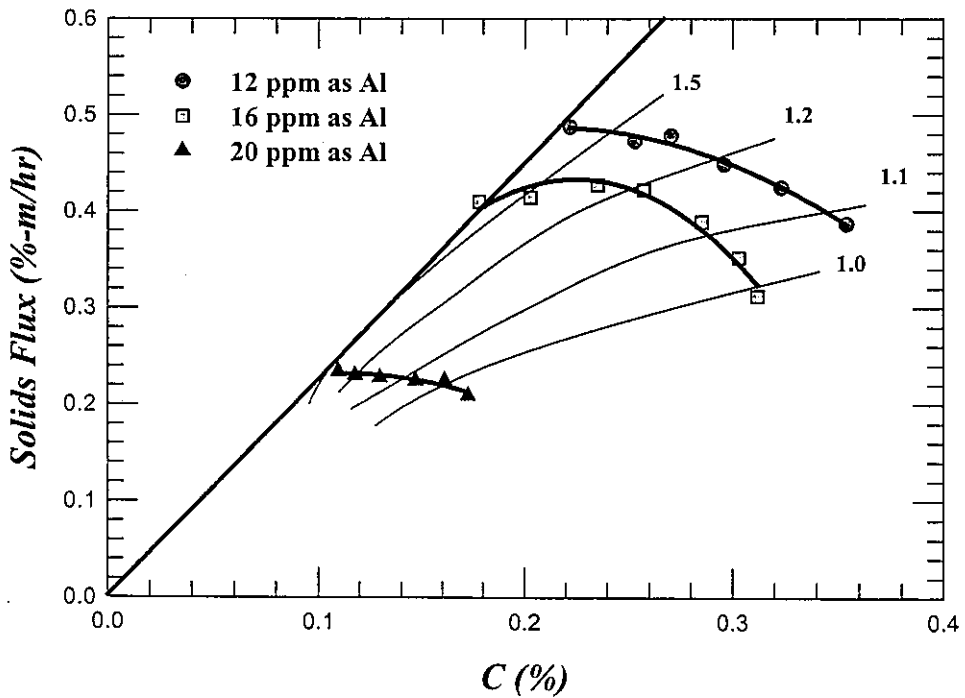


圖 7 初始濁度為 200 NTU 流化床之泥毯上浮實驗。

由圖 7 為初始濁度為 200 NTU 的泥毯上浮實驗的溢流水剩餘濁度之等高線圖。在定流速情況下，隨著 PACl 劑量逐漸增加，流化床之溢流水濁度會逐漸遞減。且各 PACl 劑量下之 U_{crit} 值相當接近，即所有曲線會在 $\lim_{C \rightarrow 0} U$ 可用一條漸進線 $U_{crit} \doteq 2.9$ m/hr。

結論

本論文對泥毯裡固體濃度的時空變化考量水力傳播與對流影響提出一維模型。這模型預測出泥毯的固體濃度分佈膠羽會首先匯聚成一均勻分佈之泥毯，然後泥毯會自身壓密成形成另一較高固體濃度之均勻分佈泥毯。即流化床實驗在經過一段沉降時間之泥毯會於圓管柱內形成(泥毯高度可能會靜止停留一段時間)，呈現類似衝擊波分佈($C=C_0$)。

在初始濁度為 200NTU 的泥毯上浮實驗的溢流水剩餘濁度之等高線圖。在定流速情況下，隨著 PACl 劑量逐漸增加，流化床之溢流水濁度會逐漸遞減。且各 PACl 劑量下之 U_{crit} 值相當接近 $\doteq 3$ m/hr。