

迴流污泥對鋁鹽污泥含水率之研究

Effect of Recycling Sludge on the Moisture Content of Alum Sludge

吳志超¹ 張進興² 張然武² 黃志彬³

摘要

豐原淨水廠於大甲溪枯水期間，以迴流污泥法改善因進水濁度過低所生之操作問題。此法所造成之膠羽特性改變進而影響其污泥特性變化，是否對後續之污泥處理處置產生影響則值得關切。

本研究乃於豐原淨水廠進行實場之調查研究。研究中以膨脹計法測定該廠污泥之結合水含量，並以自由沈降法分析其污泥膠羽密度與粒徑，並藉由碎形維度分析，計算其碎形維度值，並亦進行孔隙度分析，以了解其結構變化。經由實地分析顯示，迴流污泥可降低污泥結合水含量約5~23%，並增加其密度且形成一較緻密之結構體。另污泥結合水含量與其碎形維度值亦呈現一線性相關。

關鍵字：污泥，膠羽，結合水，膨脹計法，碎形分析，
孔隙度

1. 逢甲大學環境工程與科學系講師；交通大學土木工程研究所博士班
2. 豐原淨水廠
3. 交通大學環境工程研究所副教授

前言

台灣地區每日由淨水場所生之污泥量估計約為460噸(46,200立方公尺)，在日趨嚴格之法令要求下，如何妥善處理處置這些污泥已成為淨水廠操作管理之重要課題。

化學混凝在淨水廠中幾乎是一必備程序，混凝操作之成敗除影響出水水質外，更影響其後污泥之脫水性。Knocke與Dulin(1987)在其研究中發現以enmeshment coagulation為主要機制及以charge-neutralization為主者所生污泥含水與脫水性質相異。迴流沈澱後污泥添加於快混池之操作則常被用於改善因低濁度進水所生之處理不佳、耗用混凝劑之情況。添加沉澱後污泥已確知可提高混凝時膠羽之膠凝速率及增加膠羽密度(Glenn等,1973)。一般而言，較低密度之膠羽可被視為擁有較鬆散結構、高孔隙度及含水較多等特質。

近年來研究污泥脫水或與水有關之學者大多將污泥中水份分成四大類：自由水(Free)、間隙水(Interstitial)、表面水(Surface)與內部水(Internal)或結合水(Bound)。Tsang與Vesilind(1990)曾指出一般的脫水程序很難移除表面水與內部水。故如能了解或改變污泥內水份分佈狀況，將對污泥脫水與後續處置提供相當之助益。以往對迴流污泥操作之研究多集注在其沈降性、脫水性等效能研究。本研究則以豐原淨水廠實場取樣，並朝以密度、結構、含水分佈等基本特性為分析對象進行比較研究，以了解迴流污泥操作對污泥結構及其含水之影響。

豐原淨水廠為台灣中部地區之主要供水來源，日出水量均超過40萬噸以上，其水源主要來自大甲溪之石岡壩，進水水質易受季節天候影響，在大甲溪枯水期時，進水濁度甚低，廠方以迴流沈澱後污泥改善濁度不足、膠凝不佳之問題。但因受限於原有設計及處理成本之故，在枯水期

操作並未能進行24小時全迴流操作，間有無迴流操作，是故本研究乃針對此現況進行一由汙泥處理觀點而發之比較研究。

研究方法

1. 污泥膠羽來源

研究中所需之污泥均來自豐原淨水廠，為使污泥膠羽不受沈澱、濃縮與抽送設備等影響，故均取自慢混池中。

在枯水期時，豐原廠由污泥濃縮池以液位控制方式迴流污泥至取水井與進水混合，以增加進水濁度。迴流頻率約二小時一次，亦即全日中約有十二小時屬迴流淨水操作，另十二小時則無迴流淨水操作，取樣時則分別於迴流時及不迴流時取樣之。

2. 沈降試驗

光學攝影法已廣用於膠羽之沈降速度與粒徑測定 (Tambo與Watanabe, 1979; Li與Ganczarczyk, 1987; Lee與Hsu, 1994)。藉由膠羽自由沈降量測其粒徑及終端速度，並代入修正後之Stokes之公式，即可求得該膠羽之有效密度。實驗中以一特製沈降筒（兩端各有一活動開口）裝入已過濾之清水，浸入慢混池內，再打開頂口與底口以候膠羽之自然流入，再關閉二口取出水面，進行沈降試驗。膠羽沈降過程則以攝影機全程拍入，並藉由放影機以量取其粒徑及終端速度。計算有效密度則引用1979年Tambo與Watanabe所修正之Stokes公式：

$$(\rho_f - \rho_w) = \frac{34V_s \mu}{g(d_f)^2} \quad \text{式(1)}$$

$\rho_f - \rho_w$ ：顆粒有效密度

μ ：水之黏度

V_s ：顆粒沈降終端速度

d_f ：顆粒粒徑

3. 結合水測定

在測定鋁鹽污泥結合水含量上，Robinson與Knock(1992)曾比較膨脹計法(dilatometric method)與乾燥法(drying method)之測定結果，發現膨脹計法擁有較高之準確性且耗時亦較短，較適合進行結合水之施測。污泥膠羽結合水量測定以膨脹計分析法測定之，1956年Heukelekian與Weisberg首度應用於活性污泥之研究，爾後Foster(1983)，Robinson與Knocke(1992)，Colin與Gazbaz(1995)等則亦分別用於污泥研究上。

此法之原理乃是利用自由水在由 20°C 降溫至 -20°C 間體積之變化反應在膨脹計之液面上，此液面變化與其間自由水含量成一線性關係。分析時乃將一已知重量之污泥樣本與油置入膨脹計中，以乾冰及酒精水浴降溫至 -20°C ，記錄膨脹計之起末液位差，另以二膨脹計一裝填已知體積之油，另一則為已知體積油及已知體積水同時，進行降溫並記錄液面，可由此二膨脹計之液面差及其油與水之體積而求得單位油液面降量及單位水液面增量，進而計算污泥中自由水含量。所用油品須符合(1)不溶於水(2)不揮發(3)單位降溫之體積變化率恆定(4)不結冰(固化)。經以純水進行方法誤差之分析、其純水含量之誤差在2%以內。測定之污泥膠羽亦由慢混池取出，經重力沈澱後移除上澄液濃縮之。同一天之污泥分別取自三次之迴流操作與無迴流操作。進行測定時則分成一式三份，取其平均值表示之。

結果與討論

1. 膠羽密度—粒徑關係

圖一為豐原淨水廠於枯水期採迴流污泥操作時，慢混池中PACL膠羽在不同粒徑下之有效密度分佈狀況，由該分佈可看出PACL膠羽顆粒之有效密度隨著顆粒粒徑變大而變小。如將此粒徑與有效密度進行對數迴歸分析後，則形成一直線關係（如圖二所示）。1979年Tambo與Watanabe在其研究中即提出一數學式描述鋁鹽膠羽顆粒其粒徑與有效密度之關係。

$$\rho_e = \rho_f - \rho_w = \frac{a}{\left(\frac{d}{1}\right)^k} \quad \text{式(2)}$$

ρ_e ：有效密度

d ：顆粒直徑

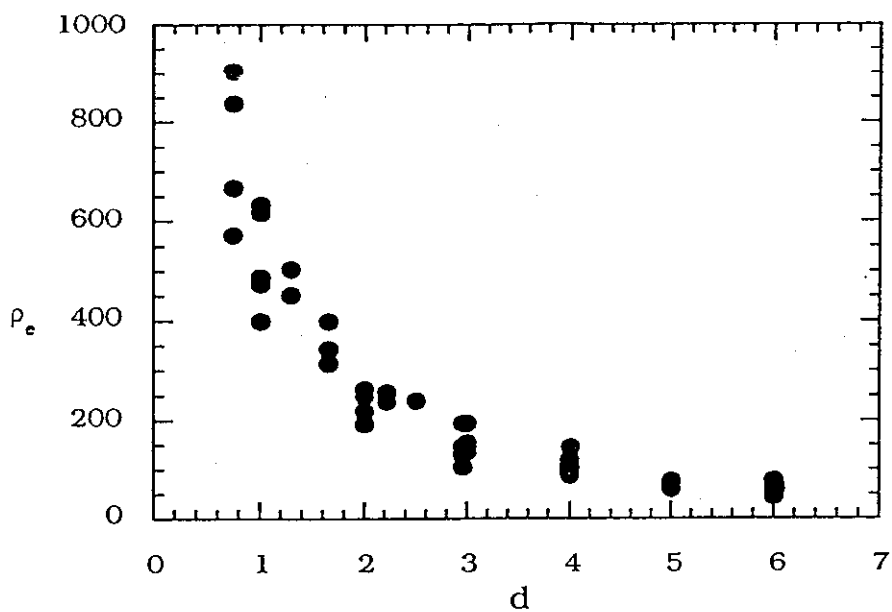
ρ_f ：顆粒密度

ρ_w ：流體密度

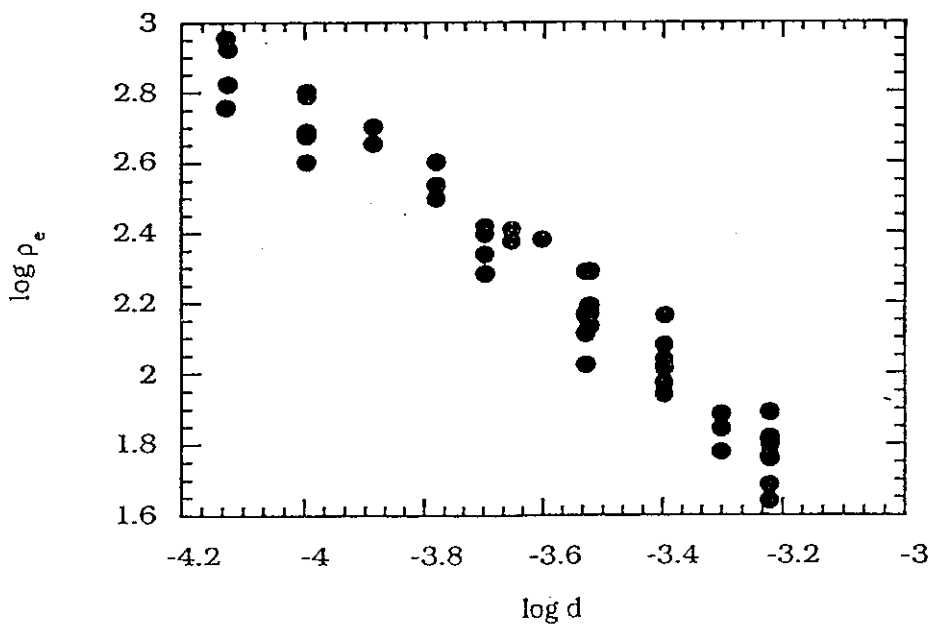
如將此式經雙對數處理後整理改成

$$\log(\rho_f - \rho_w) = \log a - k \log\left(\frac{d}{1}\right) \quad \text{式(3)}$$

則此處之 k 值即為圖二中直線關係式之斜率值， $\log a$ 值則為截距值。在混凝與膠凝之過程中，諸多因素可影響此二值之變化，諸如混凝劑之種類、劑量，水中顆粒成份，攪拌強度，pH值等等。但在此研究中，對同一天之採樣中，在淨水場內其加藥量，pH值等影響項在有迴流與不迴流時之變化相當之小，可視為常數。唯一產生變化即是在迴流



圖一、 實廠污泥膠羽粒徑—有效密度之典型分佈圖 (迴流操作)
 粒徑單位：100 μm 密度單位：Kg/m³



圖二、 迴流操作生成膠羽具粒徑—有效密度之雙對數分佈圖
 粒徑單位：m

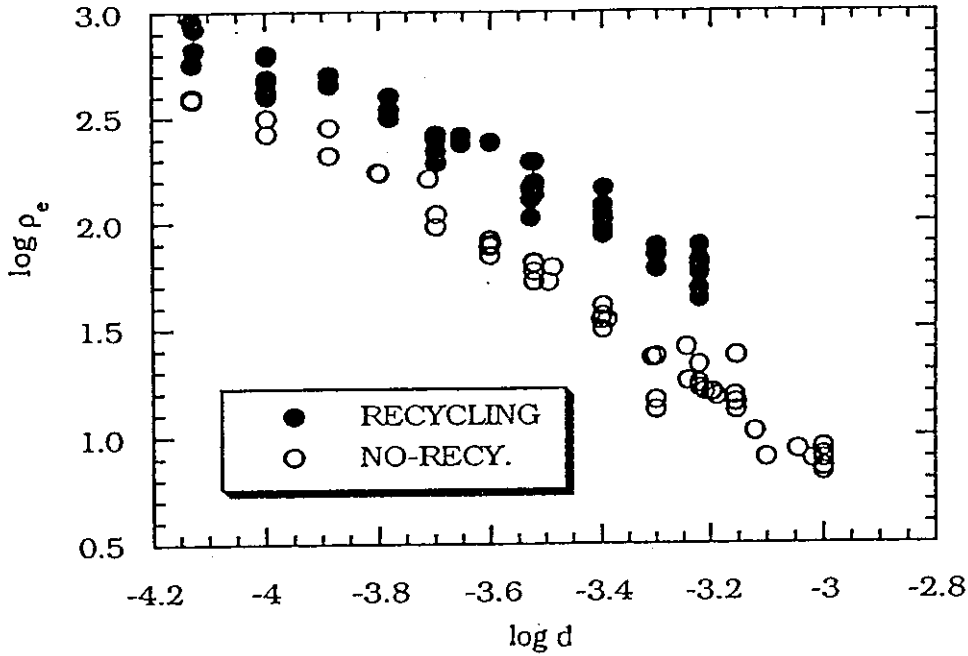
時因迴流污泥之加入使進水濁度大為增加，導致ALT比值（鋁鹽加入量/進水懸浮固體量）相較於不迴流來得低，故此時k、a之變化便可完全視為是因迴流與否所產生之變化。表一即為五次測量之迴歸分析結果，由結果可看出，在迴流狀態下之k值皆明顯異於無迴流操作之k值，而且其值亦小於無迴流之k值，由此可顯示出此二操作狀況產生不同密度-粒徑之關係。另由圖三，則亦可明顯看出，在同一天之採樣分析下其迴流狀況下各粒徑之有效密度皆較大於無迴流狀況。其餘四次之取樣亦皆有同樣之現象（在此不予列出）。在經由迴歸分析後以粒徑同為 $100\mu\text{m}$ 進行有效密度計算亦得相同結果，迴流操作者之有效密度值大於無迴流者。此等結果應可說明，迴流污泥之操作可促進形成一較重之膠羽以利於其在沈澱池中之被沈澱移除，此亦回應Glenn等在1973年之研究結果—在低濁度原水時，迴流鋁鹽污泥可增加其膠凝速率及膠羽密度。

表一、五次取樣分析後之K值及粒徑 $100\mu\text{m}$ 之有效密度計算值

原水濁度	採樣次	操作狀況	K值	d= $100\mu\text{m}$ 有效密度
<10 NTU	A	R	1.17	190.5
		N	1.81	147.9
	B	R	1.69	354.8
		N	1.79	234.4
	C	R	1.22	575.4
		N	1.64	331.1
	D	R	1.07	275.4
		N	1.45	186.2
	E	R	1.42	245.5
		N	1.72	162.2

R:Recycling-sludge operation;

N:Normal operation.



圖三、迴流與無迴流之粒徑—有效密度比較

2. 結合水含量

Robinson與Knocke二人於1992年以膨脹計法分析鋁鹽污泥中之結合水含量發現，膨脹計所測得之結合水量較以乾燥法所測得量低約17%。Lee與Hsu(1995)則認為乾燥法所測得之結合水量應為內部水與表面水之總和量，如此一來，膨脹計法所測得之結合水含量便已十分接近於污泥膠羽所含之內部水水量，而此水量通常已被視為一般機械脫水所無法移除之水量，亦即脫水後泥餅中之最終含水量。由採樣之分析結果看來（表二），迴流操作所生之膠羽其結合水含量較低於無迴流操作，最高可降低約23%，最低亦有5%，此舉對污泥餅之最終處置將有所助益。迴流污泥操作除可提高PACL膠羽之密度，在此亦降低了膠羽之結合水含量，對一膠羽而言，結合水含量降低意味了膠羽內水分子所佔體積減少，自然其密度值便相對提高。此點亦可由以下之碎形分析及孔隙度測定得證之。

表二、各取樣污泥膠羽結合水含量值及碎形維度值

原水濁度	採樣次	操作狀況	碎形維度值	結合水量(g-水/g-乾污泥重)	結合水減少率(%)
<10 NTU	A	R	1.83	4	23
		N	1.19	5.2	
	B	R	1.31	5.8	5
		N	1.21	6.1	
	C	R	1.78	4.5	13
		N	1.36	5.2	
	D	R	1.93	4.5	19
		N	1.54	5.6	
	E	R	1.58	4.7	11
		N	1.28	5.3	

3. 碎形分析與膠羽結構

一般在水處理程序中所產生之膠羽因其幾何構造具有高度不規則性及無次序之排列而難以進行定量描述(Li與Ganczarczyk, 1989)。1982年Mandelbrot提出所謂碎形理論(Fractal Theory)，以數學模式來描述具不定狀、不規則態之物狀結構，此後即有許多學者利用此理論進行膠羽結構之相關研究。(Li與Ganczarczyk, 1989；Lee與Hsu, 1994；Logan與Kilps, 1995)。膠羽主要乃由許多粒子因凝聚作用堆積而成之凝聚團，可視為一碎形(Fractal)(Li與Ganczarczyk, 1989)，而此碎形之有效密度則可以式(4)來表示之(Lee與Hsu, 1994)，其乃由一群粒徑為 R_0 之粒子凝聚成粒子為 R 之膠羽。

$$\rho_f - \rho_w = c \left(\frac{R}{R_0} \right)^{D-3} (\rho_p - \rho_w) \quad \text{式(4)}$$

ρ_p ：主要粒子之密度

D ：碎形維度值 (Fractal Dimension Value)

C ：常數值

式中之D值乃介於1至3間，D等於3時表示該碎形為一由基本粒子以最密堆積方式所組成之立方體（三維），D等於1則僅形成一線性結構（一維）。亦即一膠羽結構可藉由D值來判定其結構之緻密性(Ng等,1993；Lee,1994)，D值愈大其結構愈緊緻，D值愈小其結構愈鬆散。

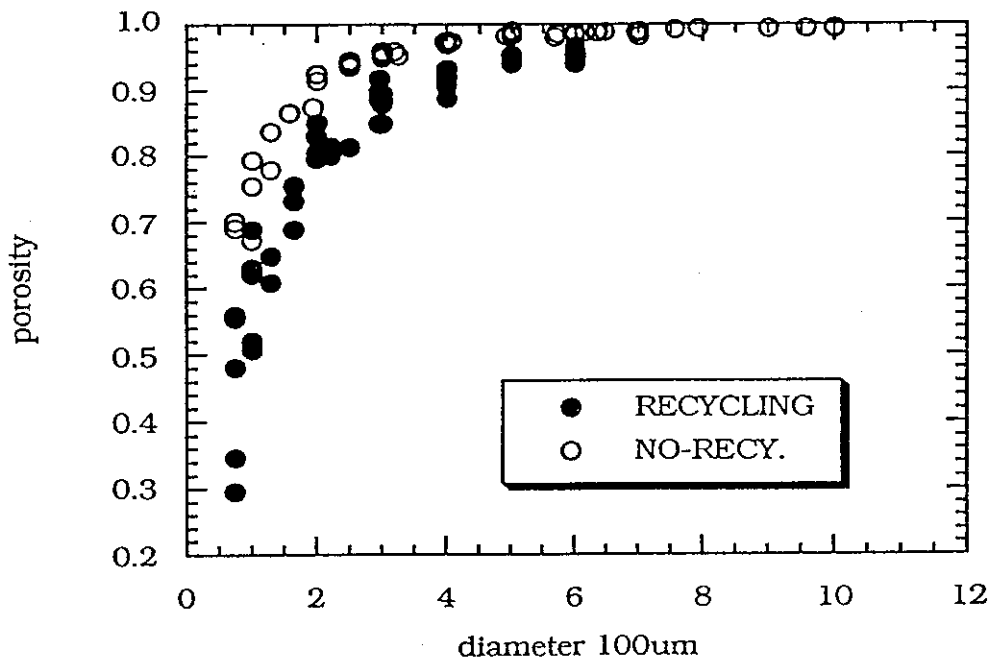
D值之求得可由式(4)中，對粒徑與有效密度進行雙對數迴歸所得之直線斜率計算而得。調查所得之D值則詳列於表二。由該等結果可明顯比較出。迴流操作所得之D值較無迴流時D值大，亦即迴流形成一較緻密之膠羽結構。此現象已由前面密度增加與結合水降低而證實。Tambo與Watanabe(1979)之研究亦指出，不論是以鋁鹽或PACL為混凝劑，混凝後膠羽有效密度對粒徑之雙對數迴歸直線斜率會隨ALT比值增加而增大。相對於無迴流操作下之ALT值，迴流操作之進水濁度提高，ALT比質便下降，自然產生斜率變化（k值變小），碎形維度相對提高。曾氏等(1989)亦指出將沈澱池污泥添加於快混池中，有助於節省混凝劑用量，且濁度愈高，形成的污泥沉降性愈好，污泥量亦少，處理容易。此外，迴流污泥之操作可能亦改變了系統內原有之混凝機制，在無迴流狀態下，因濁度過低，廠方多以過量加藥方式以形成enmeshment coagulation，此類機制生成之膠羽較以電性中和為主生成者含有較多水份，（結合水較高），密度亦較小，並導致其污泥脫水性較差(Knocke等,1987)。Knocke與Kelley在1987年以迴流污泥改善重金屬污泥脫水性之研究結果亦顯示提高污泥密度可改善污泥之脫水速率及泥餅固含量。

為驗證膠羽結構之變化影響，本研究亦分析膠羽之孔隙度。孔隙度之分析是以一單位膠羽進行固液相平衡而求得，其計算式如下(Nómer與Ganczarczyk,1993)

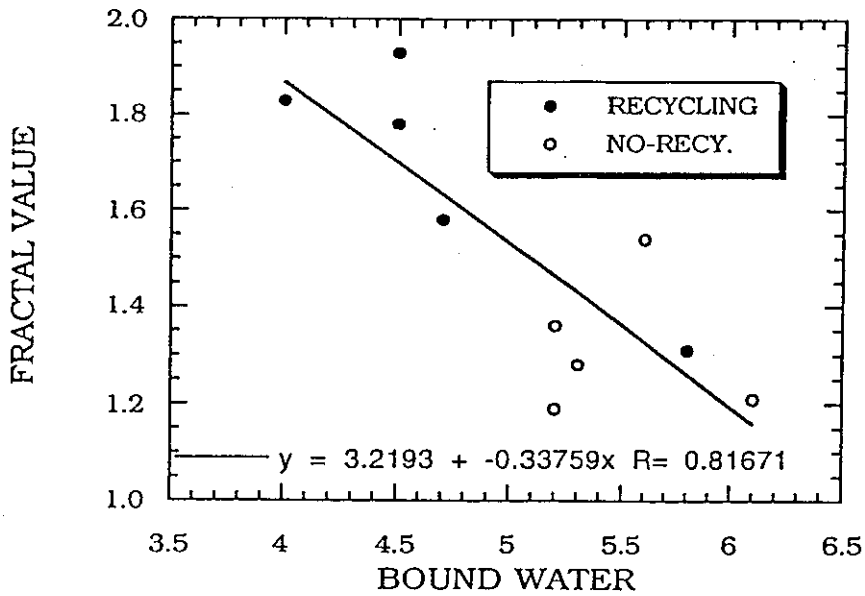
$$\varepsilon = 1 - \frac{(\rho_f - \rho_w)}{(\rho_s - \rho_w)} \quad \text{式(5)}$$

ε : 孔隙度

其 ρ_s 之求得則是將每次採樣之污泥膠羽烘乾，以比重瓶測定而得。圖四為圖三所示之迴流與不迴流比較組之孔隙度計算圖，由圖中亦可明顯看出兩者間孔隙度之差異，顯然迴流污泥之孔隙度在較小粒徑膠羽時，小於無迴流者，在較大粒徑時，則無太明顯差異。由此分析結果可推判污泥結合水含量可能與其結構存在相當關係，圖五為碎形維度值與結合水含量之迴歸分析結果似乎存在一線性關係。此現象稍早在Lee, 1994之研究中亦出現。影響污泥結合水含量因素相當多，此結果或許可提供一思考方向。



圖四、迴流與無迴流之粒徑-孔隙度比較



圖五、碎形維度值與結合水含量關係圖

結論與建議

根據五次之實地調查結果，本研究歸納出以下之結論及建議。豐原淨水廠在枯水期所採用之迴流污泥操作，確可提高PACL膠羽密度，並形成孔隙度較低、結構較緻密之膠羽，而由此膠羽所聚集而生之污泥其結合水含量亦較無迴流操作者低。不論是否迴流操作，其污泥結合水含量與其碎形維度值呈一線性相關。

本研究之主要目的在於探討混膠凝操作對污泥膠羽結構及含水特性影響，故取樣時僅限於慢混池。惟膠羽經由沈澱刮除、抽送等機械剪力作用後，是否仍具上述之結果則仍屬研究調查中。如上述結果具經濟面價值，則迴流操作應可提供水廠作為污泥處理之選擇策略。

誌謝

本研究調查期間承蒙豐原淨水廠大力協助，深表謝意。

參考文獻

- Colin, F., Gazbaz, S. (1995) Distribution of water in sludge in relation to their mechanical dewatering. *Wat. Res.* 29, 2000-2005.
- Forster C. F, (1983) Bound water in sewage sludge and its relationship to sludge surfaces and sludge viscosities. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 1983, 33B, 76-84.
- Heukelekian, H.; Weisberg, E. (1956) Bound water and sludge bulking. *Sewage and industrial wastes.* 28, 558-575.
- Knocke, W. R., Hamon, J. R., Dulin, B. E. (1987) Effects of coagulation on sludge thickening and dewatering. *J. AWWA.* June 89-98.
- Knocke, W. R.; Wakeland, D. L. (1983) Fundamental characteristics of water treatment plant sludges. *J. AWWA.* October, 517-523.
- Lee, D. J. (1994) Floc structure and bound water content in excess activated sludge. *J. Chin. I. Ch. E.* 25, 201-207.
- Lee, D. J., Hsu, Y. H (1995) Measurement of bound water in sludges: A comparative study. *Wat. Environ. Res.* 67, 310-317.
- Lee, D. J., Hsu, Y. H (1994) Fast freeze/thaw treatment on excess activated sludges: floc structure and sludge dewaterability. *Environ. Sci. Technol.* 28, 1444-1449.
- Li, D. H., Ganczarczyk, J. J. (1987) Stroboscopic determination of settling velocity, size and porosity of activated sludge flocs. *Wat. Res.* 21, 257-262.

- Li, D. H., Ganczarczyk, J. J. (1989) Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes. *Environ. Sci. Technol.* **23**, 1385-1389.
- Logan, B. E., Kilps, J. R. (1995) Fractal dimension of aggregates formed in different fluid mechanical environments. *Wat. Res.* **29**, 443-453.
- Mandelbrot, B. B. (1982) *The fractal geometry of nature*, 1st ed., pp 1-24, W. H. Freeman Co., New York.
- N'amer, J. , Ganczarczyk, J. (1993) Settling properties of digested sludge particle aggregates. *Wat. Res.* **27**, 1285-1294
- Ng, k., Amal, R., Raper, J. Waite, T.D. (1993) The effect of different coagulation conditions on the aggregation mechanism of colloidal hematite. *APPCHE & Chemeca '93 Proceedings* ,**2**,75-81 .
- Robinson, J., Knocke, W. R. (1992) Use of dilatometric and drying techniques for assessing sludge dewatering characteristics: *Water Environ. Res.* **64**, 60-68.
- Tambo, N., Watanabe, Y. (1979) Physical characteristics of flocs-I. The floc density function and aluminum floc. *Wat. Res.* **13**, 409-419.
- Tsang, K. R., Vesilind, P. A. (1990) Moisture distribution in sludge. *Wat. Sci. Tech.* **22**, 135-142.
- 曾四恭, 蔡利局, 林亨鍇, 「化學混凝法對水源中藻類之去除」, 第六屆自來水論文發表會論文集, pp.75-82.