

八、附錄：

附錄一：楔型管內的流場分佈與軌跡吸附方程式的推導

1、楔型管內的流場分佈：

為了詳細的描述過濾床內收集器周圍流場分佈，我們假設每一個顆粒狀收集器可視為一個基本單位(UBE, Unit bed element)，即為一個楔型管，並令此楔型管的入口半徑與直徑分別為 r_{\max} 和 d_{\max} ，最窄半徑與直徑為 r_c 和 d_c 而其中 r_{\max} 與 r_c 可表示為^[33]

$$r_c = \frac{d_c}{2} = 0.175d_f \quad (\text{A1-1})$$

$$r_{\max} = \frac{d_{\max}}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{e(1-S_{wi})}{1-e} \right]^{1/3} d_f \quad (\text{A1-2})$$

其中 S_{wi} 為過濾床的不可還原飽和度，可由壓力飽和圖求得。一般而言，玻璃珠濾床為 0.111，砂濾床為 0.127^[18]。 ϵ 則表示過濾床的孔隙度。

在描述流場時，一般可使用 Navier-Stokes 方程式求解，但是二維或三維 Navier-Stokes 方程式的求解相當的困難，因此需藉助特殊方法，例如對於固定密度與黏度的問題可以使用流線函數(Streamline function)來求解。假設流體的密度為一定值，且不可壓縮的牛頓流體，當在 $r_w \leq r \leq -r_w$ 的範圍

內，可以將其流線函數 y 表示為如下所示：

$$E^4 \mathbf{y} = 0 \quad (\text{A1-3})$$

若其速度分量以軸對稱的二維圓柱座標系統，則可表示如下：

$$u_r = \frac{1}{r} \frac{\partial y}{\partial z} \quad (\text{A1-4})$$

$$u_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial y}{\partial r} \quad (\text{A1-5})$$

$$E^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{A1-6})$$

若此時流體在收集器表面不滑動，且在管中央流速最大時，則邊界條件如下：

$$u_r = u_z = 0 \quad \text{當} \quad r = r_w \quad (\text{A1-7})$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial r} = 0 \quad u_r = 0 \quad \text{當} \quad r = 0 \quad (\text{A1-8})$$

因此可解得零階、一階及二階的拖曳力擾動解如下所示^[20]：

$$\mathbf{y}_0^* = 0.5(R^4 - 2R^2) \quad (\text{A1-9a})$$

$$\mathbf{y}_1^* = 0.25 N_{\text{Re},m} \frac{dR_w / dZ}{R_w} \left[\frac{1}{9} (R^8 - 6R^6 + 9R^4 - 4R^2) \right] \quad (\text{A1-9b})$$

$$\begin{aligned}
y_2^* = & -0.5 \left[5 \left(\frac{dR_w}{dZ} \right)^2 - R_w \frac{d^2 R_w}{dZ^2} \right] \frac{(R^2 - 1)^2 R^2}{3} \\
& - 0.125 N_{\text{Re},m} \left(\frac{dR_w / dZ}{R_w} \right)^2 [32R^{12} - 305R^{10} + 750R^8 - 713R^6 + 236R^4] / 3600
\end{aligned} \tag{A1-9c}$$

$$\mathbf{y}^* = \frac{\mathbf{y}}{u_m r_m^2} = \mathbf{y}_0^* + R_m \mathbf{y}_1^* + R_m^2 \mathbf{y}_2^* \tag{A1-10}$$

其中

$$Z = z / l_f \tag{A1-11a}$$

$$R_w = r_w / r_m \tag{A1-11b}$$

$$R = r / r_w \tag{A1-11c}$$

$$R_m = r_m / l_f \tag{A1-11d}$$

$$r_m = \frac{1}{l_f} \int_0^{l_f} r_w dz \tag{A1-11e}$$

$$N_{\text{Re},m} = \frac{u_m r_m \mathbf{r}_f}{\mathbf{m}} \tag{A1-11f}$$

利用(A1-7)、(A1-8)兩式，可求得 r 方向與 z 方向的速度分佈^[21]如下：

$$u_{r0}^* = -2 \frac{dR_w / dZ}{R_w} (R^3 - R) \tag{A1-12a}$$

$$u_{r1}^* = \frac{0.25}{R} N_{\text{Re},m} \left\{ F \left[\frac{d^2 R_w / dZ^2}{R_w} - \left(\frac{dR_w / dZ}{R_w} \right)^2 \right] + \frac{dF}{dZ} \frac{dR_w / dZ}{R_w} \right\} \quad (\text{A1-12b})$$

$$u_{r2}^* = -0.5 \left\{ \left(9 \frac{dR_w}{dZ} \frac{d^2 R_w}{dZ^2} - R_w \frac{d^3 R_w}{dZ^3} \right) \frac{G}{R} + \left[5 \left(\frac{dR_w}{dZ} \right)^2 - R_w \frac{d^2 R_w}{dZ^2} \right] \frac{dG}{R dZ} \right\} \\ - 0.125 N_{\text{Re},m} \left\{ 2 \frac{dR_w / dZ}{R_w} \left[\frac{d^2 R_w / dZ^2}{R_w} - \left(\frac{dR_w / dZ}{R_w} \right)^2 \right] \frac{E}{R} + \left(\frac{dR_w / dZ}{R_w} \right)^2 \frac{dE}{R dZ} \right\} \quad (\text{A1-12c})$$

$$u_{z0}^* = 2(1 - R^2) \quad (\text{A1-13a})$$

$$u_{z1}^* = -\frac{0.25}{R} N_{\text{Re},m} \frac{dF}{dR} \frac{dR_w / dZ}{R_w} \quad (\text{A1-13b})$$

$$u_{z2}^* = 0.5 \left[5 \left(\frac{dR_w}{dZ} \right)^2 - R_w \frac{d^2 R_w}{dZ^2} \right] \frac{dG}{R dR} + 0.125 N_{\text{Re},m} \left(\frac{dR_w / dZ}{R_w} \right)^2 \frac{dE}{R dR} \quad (\text{A1-13c})$$

$$u_r = u_m \left(u_{r0}^* + R_m u_{r1}^* + R_m^2 u_{r2}^* \right) \frac{r_m^2}{r_w l_f} \quad (\text{A1-14})$$

$$u_z = u_m \left(u_{z0}^* + R_m u_{z1}^* + R_m^2 u_{z2}^* \right) \frac{r_m^2}{r_w^2} \quad (\text{A1-15})$$

其中

$$F = (R^8 - 6R^6 + 9R^4 - 4R^2) / 9 \quad (\text{A1-16a})$$

$$G = (R^2 - 1)R^2 / 3 \quad (\text{A1-16b})$$

$$E = (32R^{12} + 305R^{10} + 750R^8 - 713R^6 + 236R^4) / 3600 \quad (\text{A1-16c})$$

2、軌跡方程式的推導：

在分析膠體粒子的吸附現象時，以往是使用對流擴散方程式加以描述，但由於本論文中的方程式是建立在 Eulerian 座標系統上，並無法描述膠體粒子的隨機布朗行為。因此，在論文中的軌跡分析計算我們將使用 Langevin 方程式^[22,23,34]以描述之，如下所示：

$$m_p \frac{dV}{dt} = F_d + F_e + F_r \quad (2-13)$$

其中 m_p 為粒子的質量， V 為粒子的速度， t 為時間， F_d 為流體拖曳力， F_e 為外力，以及 F_r 則為隨機碰撞力。

流體拖曳力 F_d 可表示如下：

$$F_d = m_p \mathbf{b}(U - V) \quad (A1-17)$$

其中 U 為流體速度， β 則表示摩擦係數。

對於球型粒子而言，當低雷諾數時，我們可以將 β 表示如下：

$$\mathbf{b} = \frac{6\pi r_p \mathbf{m}}{C_s m_p} \quad (A1-18)$$

其中 μ 為流體黏度 r_p 為粒子半徑， C_s 則表示 Cunningham 修正因子，一般而言，在水溶膠系統中可定義 $C_s=1.0$ 。

粒子隨機碰撞力 F_r 可表示如下

$$F_r = m_p A(t) \quad (\text{A1-19})$$

其中 $A(t)$ 表示隨機布朗加速度。

當粒子半徑小於 $5\mu\text{m}$ 時，布朗運動的影響將顯得重要。我們利用於論文中的模擬主要是將布朗運動視為一個隨機過程（又稱為 Gaussian white noise 過程），並將加速度 $A(t)$ 獨立於粒子速度 $V(t)$ 加以計算，其方程式可表示如下

$$\begin{cases} \langle A(t) \rangle = 0 \\ \langle A(t)A(t-\tau) \rangle = K_1 \delta(t-\tau) \end{cases} \quad (\text{A1-20})$$

其中 $\delta(t - \tau)$ 為脈衝函數(Impulse function)，而 τ 為一極短的時間。

外力 F_e 包含了重力、浮力、粒子與收集器之間的作用力，因為本論文中討論的粒子非常小，且與流體的密度非常相近($\rho_f = \rho_p = 1.0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)，所以可忽略重力與浮力的影響。因此，論文中僅考慮當粒子與收集器距離很近時，

其內部作用力的影響，在此我們將採用 DLVO 理論加以描述之。

根據 Ruckenstein & Prieve^[16], Rajagopalan & Kim^[35]及 Bhattacharjee et al.^[36]等人的論點，故在進行軌跡分析時加入內部作用力的考量，而內部作用力的考量，本論文採用 DLVO 理論。所謂 DLVO 理論是 Derjaguin、Landau、Verwey 及 Overbeek 在 1941 所發表的理論，主要是探討粒子與粒子間內部作用力，根據這個理論，可知主要的內部作用力有二者：一為凡得瓦爾力，又稱倫敦力，是因為粒子間電偶極相互作用所產生的吸引力；另一則為電荷排斥力，這是由於粒子間電雙層相互重疊所造成的排斥力。根據 Ruckenstein & Prieve^[16]的論點，無因次凡得瓦爾作用力(f_{LO})能量可表示如下：

$$f_{LO} = -N_{LO} \left[\frac{2(H+1)}{H(H+2)} + \ln H - \ln(H+2) \right] \quad (2-15)$$

其中

$$N_{LO} = \frac{A}{6k_B T} \quad (A1-21a)$$

$$H = h / r_p \quad (A1-21b)$$

$$A = -aD/4 \quad (A1-21c)$$

$$\mathbf{a} = 1 - \mathbf{e} \quad (\text{A1-21d})$$

$$D = -4 / (2 \ln \mathbf{a} + 3 - 4\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \quad (\text{A1-21e})$$

且 H 為粒子表面到收集器表面的距離， A 為 Hamaker 常數， k_B 為波茲曼常數， T 則為絕對溫度。

將無因次凡得瓦爾作用力能量(V_{LO})對 H 微分可以求得凡得瓦爾作用力(F_{LO})

如下：

$$F_{LO} = \frac{k_B T dV_{LO}}{dh} = \frac{k_B T dV_{LO}}{r_p dH} = \frac{A}{6r_p} \left[\frac{1}{(H^2 + 2H)^2} \right] \quad (\text{A1-22})$$

無因次電荷排斥力(V_{DL})能量可表示如下：

$$\mathbf{f}_{DL} = N_{E1} \left\{ N_{E2} \ln \left[\frac{1 + \exp(-X)}{1 - \exp(-X)} \right] + \ln[1 - \exp(-2X)] \right\} \quad (2-16)$$

其中

$$N_{E1} = \frac{n r_p (\mathbf{j}_1^2 + \mathbf{j}_2^2)}{4k_B T} \quad (\text{A1-23a})$$

$$N_{E2} = \frac{2\left(\frac{j_1}{j_2}\right)}{\left[1 + \left(\frac{j_1}{j_2}\right)^2\right]} \quad (\text{A1-23b})$$

$$X = N_{DL}H \quad (\text{A1-23c})$$

$$N_{DL} = kr_p \quad (\text{A1-23d})$$

並且其中 n 為流體介電常數， j_1 為粒子表面電位， j_2 為收集器表面電位， k 則表示電雙層厚度倒數。

將無因次電荷排斥力能量 (V_{DL}) 對 H 微分可以求得電荷排斥力 (F_{DL}) 如下：

$$F_{DL} = \frac{k_B T dV_{DL}}{dh} = \frac{k_B T dV_{DL}}{r_p dH} = -\frac{2N_{E1}k_B T}{r_p} \left(N_{DL} e^{-N_{DL}H} \right) \left\{ \frac{-N_{E2} + e^{-N_{DL}H}}{1 - e^{-2N_{DL}H}} \right\} \quad (\text{A1-24})$$

所以外力 F_e 可寫為：

$$F_e = F_{LO} + F_{DL} \quad (\text{A1-25})$$

根據 Spielman & Fitzpatrick^[37] 的定義，在水溶膠中，當膠體粒子靠近一收集器表面時會產生一個減速的效應，稱之為 Retardation effect。在該文獻中定義了三個減速因子(Retardation factor)： $F_1(H)$ 、 $F_2(H)$ 、 $F_3(H)$ 。其中 H

的定義與式(A1-21b)相同。而 $F_1(H)$ 、 $F_2(H)$ 、 $F_3(H)$ 分別為正向、拖曳力及切線方向的減速因子。

為了要求得收集效率，先要知道膠體粒子運動的軌跡。我們將式(A1-17)、式(A1-19)與式(A1-25)代入式(2-13)後可改寫如下：

$$\frac{dV}{dt} = \mathbf{b}(U - V) + \frac{F_{LO} + F_{DL}}{m_p} + A(t) \quad (\text{A1-26})$$

在此我們做一假設，令流體速度為定值，所以(A1-26)可以改寫如下：

$$\frac{dV}{dt} + \mathbf{b}V = \mathbf{b}U + \frac{F_{LO} + F_{DL}}{m_p} + A(t) \quad (\text{A1-27})$$

定義布朗速度為：

$$R_V(t) = \int_0^t e^{\mathbf{b}(z-t)} A(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \quad (\text{A1-28})$$

初始條件定義如下：

$$\text{當 } t=0 \text{ 時 } \begin{cases} V = V_0 \\ R_V(t) = 0 \end{cases} \quad (\text{A1-29})$$

利用式(A1-29)將式(A1-27)式積分求得粒子速度如下：

$$V = V_0 e^{-bt} + U(1 - e^{-bt}) + R_v(t) + \frac{1}{b} \left(\frac{F_{LO} + F_{DL}}{m_p} \right) (1 - e^{-bt}) \quad (\text{A1-30})$$

又因為

$$V = \frac{dS}{dt} \quad (\text{A1-31})$$

定義布朗運動位移

$$R_r(t) = \int_0^t \left[\int_0^n e^{bz} A(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \right] e^{-bn} dn \quad (\text{A1-32})$$

加上初始條件

$$\text{當 } t=0 \text{ 時 } \begin{cases} S = S_0 \\ R_r(t) = 0 \end{cases} \quad (\text{A1-33})$$

可積分求得位移

$$S = S_0 + \frac{V_0}{b} (1 - e^{-bt}) + U \left[t - \frac{1}{b} (1 - e^{-bt}) \right] + R_r(t) + \left(\frac{F_{LO} + F_{DL}}{b m_p} \right) \left(t + \frac{e^{-bt}}{b} - \frac{1}{b} \right) \quad (\text{A1-34})$$

$R_v(t)$ 及 $R_r(t)$ 同時也是雙變數 Gaussian 分佈的隨機變量，常用以下方法計算

$$\begin{bmatrix} R_{Vi} \\ R_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{Vi} & 0 \\ \mathbf{s}_{Vri} / \mathbf{s}_{Vi} & (\mathbf{s}_{ri}^2 - \mathbf{s}_{Vri}^2 / \mathbf{s}_{Vi}^2)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ m_i \end{bmatrix} \quad (\text{A1-35})$$

其中 n_i 與 m_i 為常態分佈數(Normal distributed number) , 若我們取 N_i 與 M_i 為[0,1]的隨機數 , 則 n_i 與 m_i 可以表示如下

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{a_i} e^{-z^2/2} dz \quad (\text{A1-36})$$

其中 $A_i=N_i$ 或 M_i 而 $a_i=n_i$ 或 m_i , 而其他的變數則定義為

$$\overline{\mathbf{s}_{Vi}^2} = \frac{q}{b} (1 - e^{-2b\Delta t}) \quad (\text{A1-37a})$$

$$\overline{\mathbf{s}_{ri}^2} = \frac{q}{b^3} (2b\Delta t - 3 + 4e^{-b\Delta t} - e^{-2b\Delta t}) \quad (\text{A1-37b})$$

$$\overline{\mathbf{s}_{Vri}^2} = \frac{q}{b^2} (1 - e^{-b\Delta t})^2 \quad (\text{A1-37c})$$

以及

$$\overline{q} = \frac{bk_B T}{m_p} \quad (\text{A1-37d})$$

在我們計算布朗粒子的初速度時 , 假設粒子本身初始在流體的熱力學

平衡下，因此粒子速度與流體相同，並包含了熱力學運動。我們可以運用 Maxwellian 分佈，即為：

$$V_0 = U_0 + V_0' \quad (\text{A1-38})$$

其中 U_0 為 $s=s_0$ 時的流體速度

而 V_0' 為 Gaussian 隨機變數可表示如下

$$\langle V_0' \rangle = 0 \quad (\text{A1-39a})$$

$$\langle V_0' V_0' \rangle = \frac{3 \mathbf{b} k_B T}{m_p} \quad (\text{A1-39b})$$

另外考慮減速效應的影響，我們將式(A1-30)及式(A1-34)分別改寫如下：

$$V = \left\{ \left[V_0 e^{-bt} + U(1 - e^{-bt}) \right] F_2(H) + R_v(t) + \frac{1}{\mathbf{b}} \left(\frac{F_{LO} + F_{DL}}{m_p} \right) (1 - e^{-bt}) \right\} F_1(H) F_3(H) \quad (\text{A1-40})$$

$$S = S_0 + \left\{ \frac{V_0}{\mathbf{b}} (1 - e^{-bt}) + U \left[t - \frac{1}{\mathbf{b}} (1 - e^{-bt}) \right] \right\} F_1(H) F_2(H) F_3(H) \\ + \left\{ R_r(t) + \left(\frac{F_{LO} + F_{DL}}{\mathbf{b} m_p} \right) \left(t + \frac{e^{-bt}}{\mathbf{b}} - \frac{1}{\mathbf{b}} \right) \right\} F_1(H) F_3(H) \quad (\text{A1-41})$$

附錄二：在模擬流程中，過濾器的可穿透度、壓降及其他參數的計算

在討論可穿透度等參數之時，Pore volume 是於模擬過程中相當重要的時間指標。一般而言，Pore volume (即 p.v.)的定義如下^[26]：

$$p.v. = \frac{Ut}{e_0 L} \quad (A2-1)$$

其中 ε_0 為過濾床的初始孔隙度， U 為流體流速， t 為過濾時間， L 則表示過濾器總長度。但在本論文中，須以膠體粒子數來模擬 Pore volume 以利於模擬計算，因此在此將 Pore volume 其定義如第三章模擬方法中(3-1) ~ (3-3) 三個方程式表示之。

因為過濾床的孔隙度會隨著膠體粒子的吸附及堵塞等過濾行為而下降，所以在過濾時間的變化過程之中，過濾床的孔隙度的計算亦相當重要，而過濾床中第 i 層的孔隙度可表示如下：

$$\varepsilon_i = \frac{\text{過濾床中第 } i \text{ 層總平均體積}}{\text{過濾床中第 } i \text{ 層初始總平均體積}} \times \varepsilon_0 \quad (A2-2)$$

經由方程式(A2-1)求得單層孔隙度之後，我們就可利用毛細管模型所使用的

Carman-Kozeny 方程式^[3]計算過濾床中第 i 層的可穿透度如下：

$$K_i = \frac{e_i^3 \langle d_s \rangle^2}{180(1 - e_i)^2} \quad (\text{A2-3})$$

若收集器共有 N_L 層，則整個過濾床可穿透度可由(A2-3)計算求得：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N_L} K_i}{N_L} \quad (\text{A2-4})$$

為表現出過濾床可穿透度下降的趨勢，因此在本論文的模擬結果中，均以 K/K_0 (可穿透度比) 加以探討，其中 K_0 為初始的可穿透度。

另外，於壓力降的求值，我們可使用 Darcy's law 求得過濾器於過濾過程之中所產生的總壓力降：

$$\Delta P = \frac{l_f u_s \mu}{K} \quad (\text{A2-5})$$

附錄三：於本論文研究過程中，已發表的文獻與會議報告

1、發表文獻：

(1). Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles, You-Im Chang, Shan-Chih Chen, Hsun-Chih Chan, and Eric Lee, Chemical Engineering Science, Volume 59, Issue 21, November 2004, Pages 4467-4479.

(2). Network simulation for deep bed filtration of Brownian particles - a supplement, You-Im Chang, and Hsun-Chih Chan, Chemical Engineering Science, Volume 60, Issue 10, May 2005, Pages 2827-2831.

(3). Simulation: the deposition behavior of Brownian particles in porous media by using the triangular network model, Hsun-Chih Chan, Shan-Chih Chen, and You-Im Chang, Separation and Purification Technology, Volume 44, Issue 2, 15 July 2005, Pages 103-114.

(4). Effects of three different network models on the filter coefficient of Brownian particles, You-Im Chang, and Hsun-Chih Chan, Separation Purification Technol. 2006, paper in press.

2、會議報告：

(1). Network Model for Simulating the Deposition of Brownian Particles in Porous Media, You-Im Chang, Hsun-Chih Chan, and Shan-Chih Chen, Division of Colloid and Surface Chemistry, 227th ACS National Meeting, Anaheim, CA March 28-April 01, 2004.

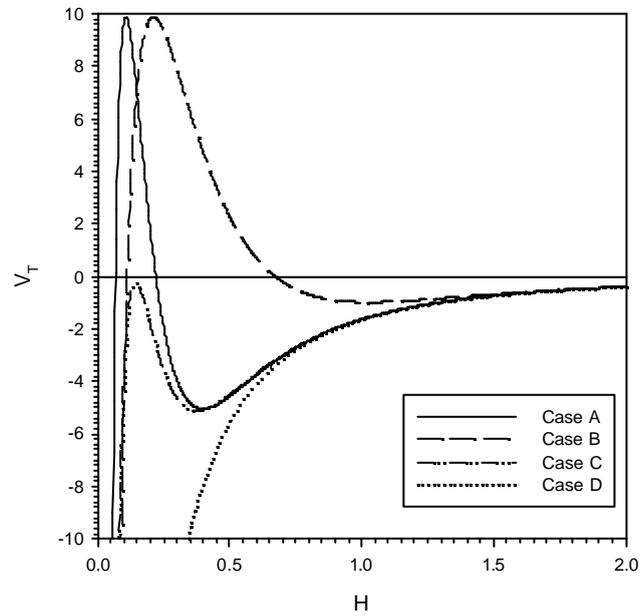
附錄四：於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管的條件，在相同的 DLVO 能障曲線下，不同的膠體濃度對於可穿透度與壓降變化的探討

附錄四所探討的是使用網絡架構為改良式正方型網絡、楔型管 SCT 的條件，在相同能障曲線下，相異膠體濃度於可穿透度、壓降與進出濃度比變化的探討，茲將所設定的模擬各項條件列於下頁附表 4-1 與 4-2 所述，四種 DLVO 能障圖形則如附圖 4-1-1 所示。

於探討相異膠體濃度下，可穿透度、壓降值、以及膠體溶液濃度進出比值隨 Pore Volume 改變的影響；無論膠體粒子具有何種能障，亦或是有無布朗運動的狀況下，可穿透度(附圖 4-2-1 至 4-9-1)、壓降值 (附圖 4-2-2 至 4-9-2) 及膠體濃度進出比值(附圖 4-2-3 至 4-9-3)均隨膠體溶液濃度的增加，呈現出可穿透度下降量增大、壓降值增加、以及膠體溶液濃度進出比值較快達到 Break-through curve 穩定平衡的趨勢，其原因在於膠體溶液濃度增加，所代表的是於單位時間內進入過濾器的粒子數將隨之增加，促使於過濾器內堵塞與吸附的粒子數也隨之增多，也加速使過濾器達到飽和，所以可穿透度下降量增多、壓降值也提升、亦加快使得堵塞吸附的平衡現象呈現。

No. of Case	N_{E1}	N_{E2}	N_{DL}	N_{LO}
Case A	105	1	10.75	7
Case B	50	1	5.02	7
Case C	77	1	10	7
Case D	0	1	0	7

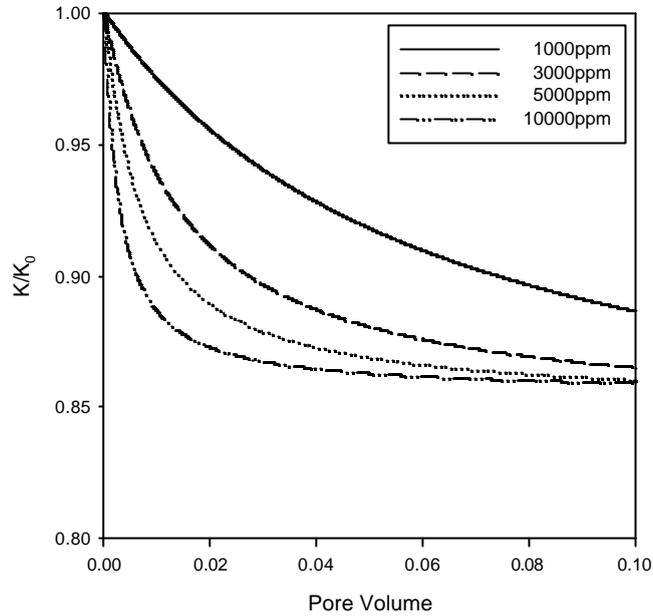
附表 4-1 附錄四模擬條件中所描述 DLVO 曲線四種能障的各項參數值^[1]



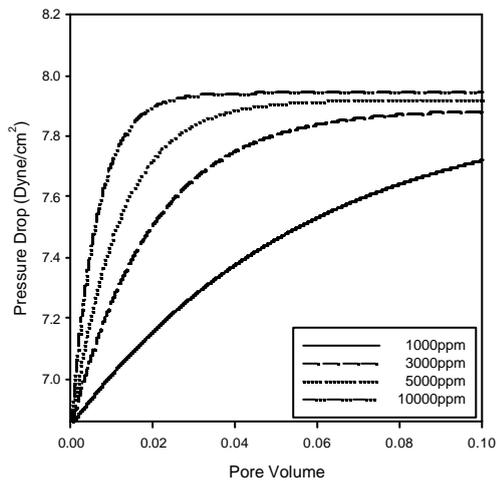
附圖 4-1-1 附錄四之四種 DLVO 曲線能障示意圖^[1]

Parameters	Value
Boltzmann 常數, K_B	1.38×10^{-16} erg/K
孔隙度, ϵ	0.40
流體黏度, μ	1 cp
溫度, T	293 K
流體密度, ρ_f	1 g/cm ³
膠體粒子密度, ρ_p	1 g/cm ³
收集器平均管徑, D_f	20 μ m
膠體粒子平均粒徑, D_p	1 μ m
膠體粒子進口濃度, C_{in}	1000,3000,5000,10000 ppm
膠體溶液平均進口流速, U_m	0.1 cm/sec
過濾床的不可還原飽和度, S_{wi}	0.127

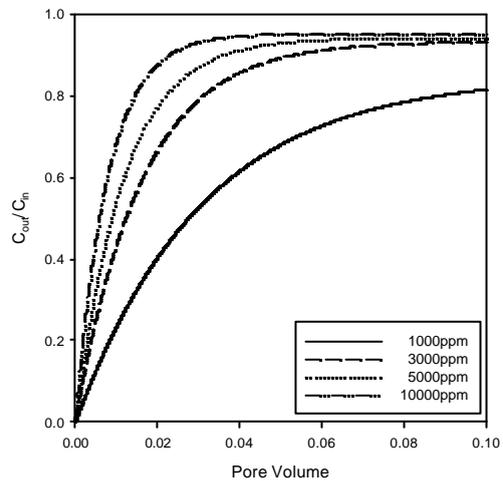
附表 4-2 附錄四圖形中所使用的模擬條件中各項操作變因



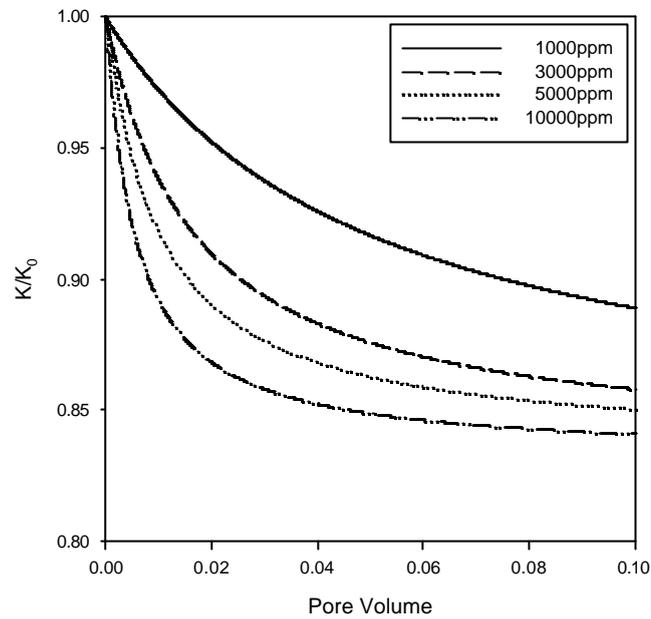
附圖 4-2-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



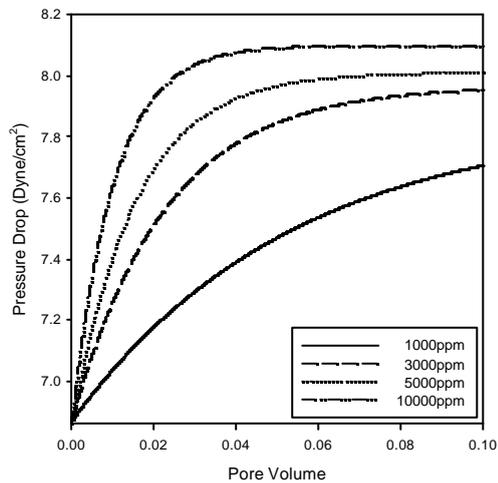
附圖 4-2-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



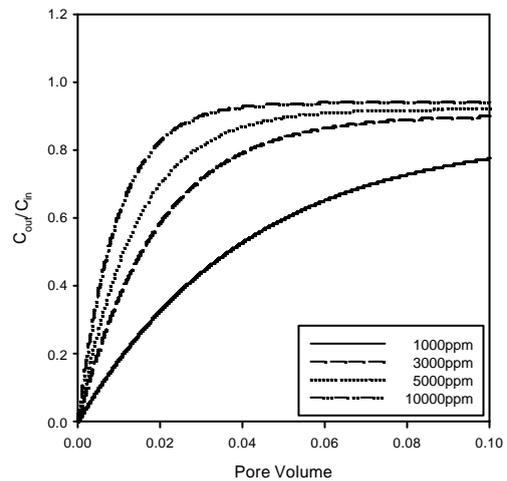
附圖 4-2-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



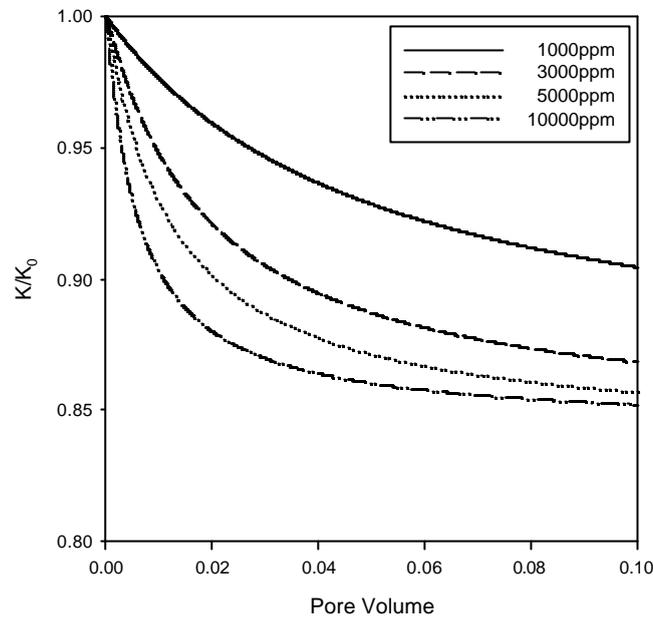
附圖 4-3-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



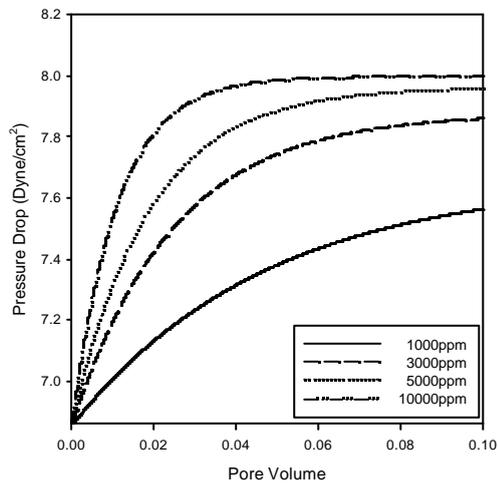
附圖 4-3-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



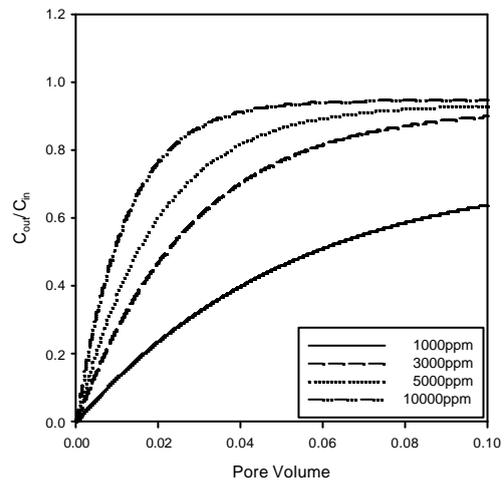
附圖 4-3-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



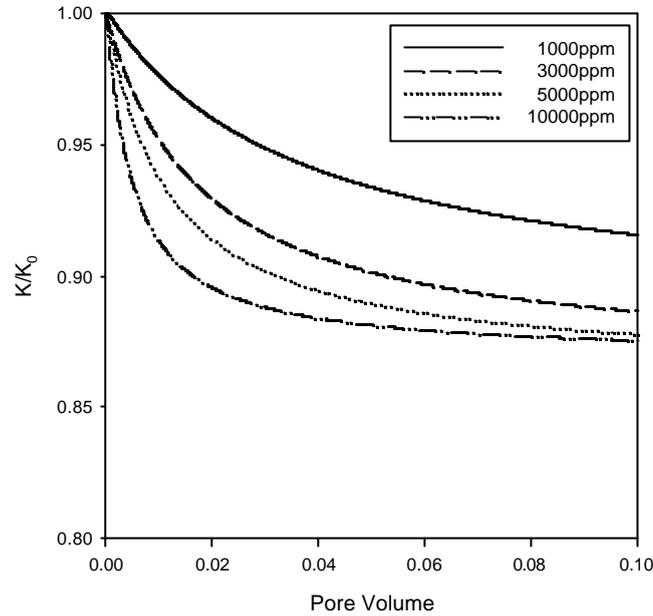
附圖 4-4-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



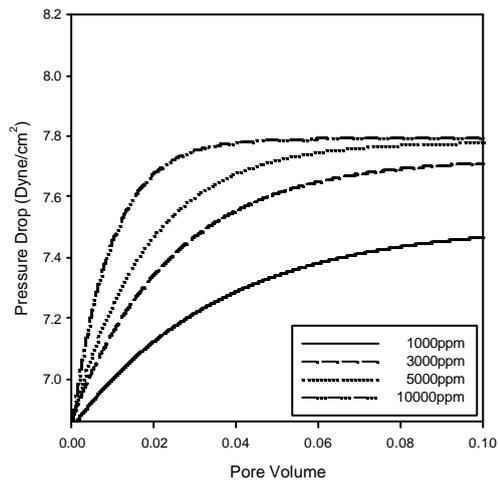
附圖 4-4-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



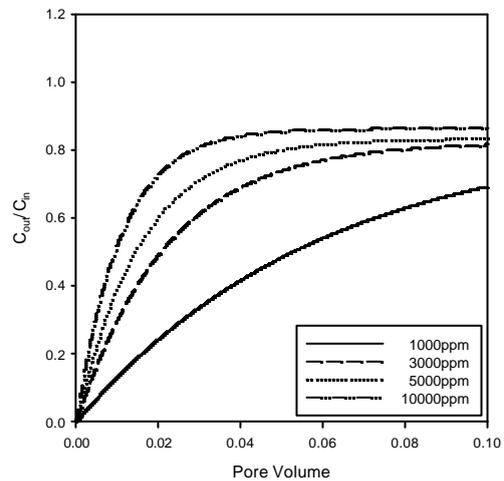
附圖 4-4-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



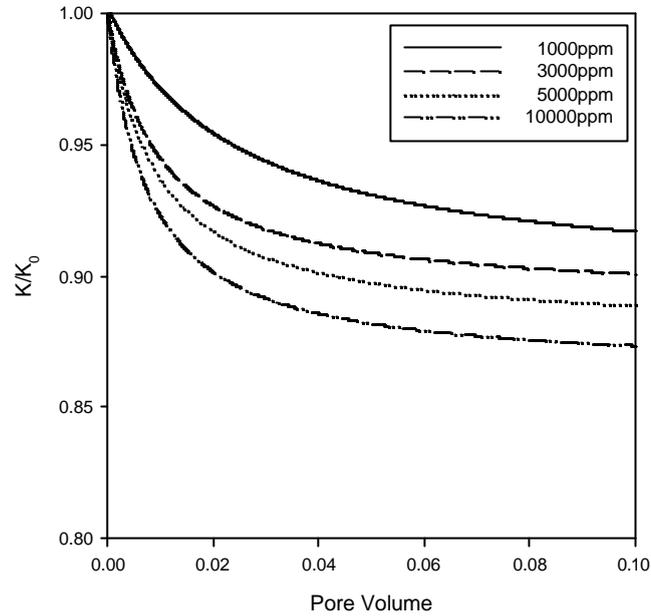
附圖 4-5-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



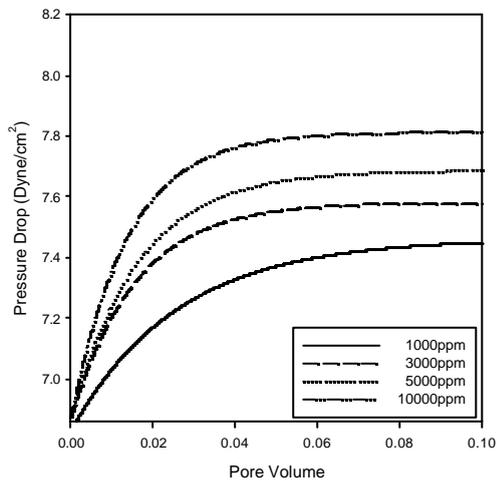
附圖 4-5-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



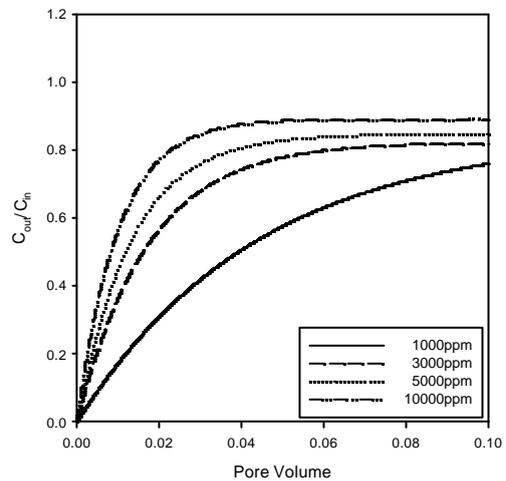
附圖 4-5-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及有布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



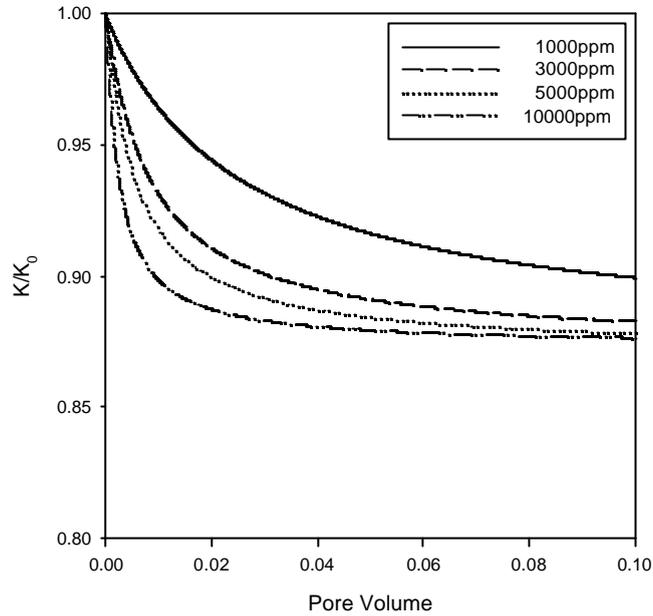
附圖 4-6-1 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



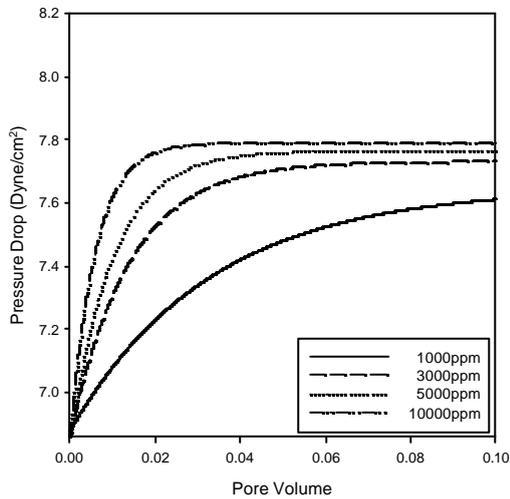
附圖 4-6-2 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



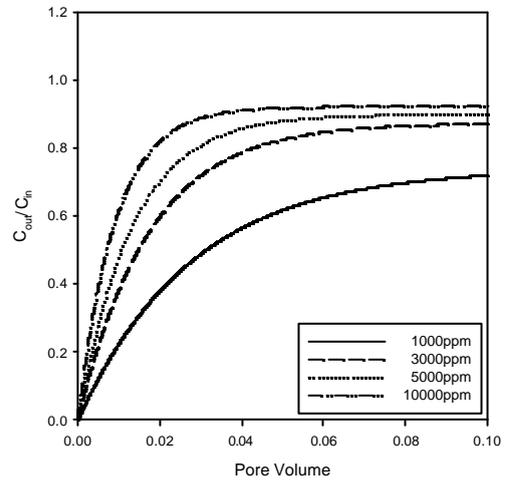
附圖 4-6-3 於改良式正方型網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 A 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



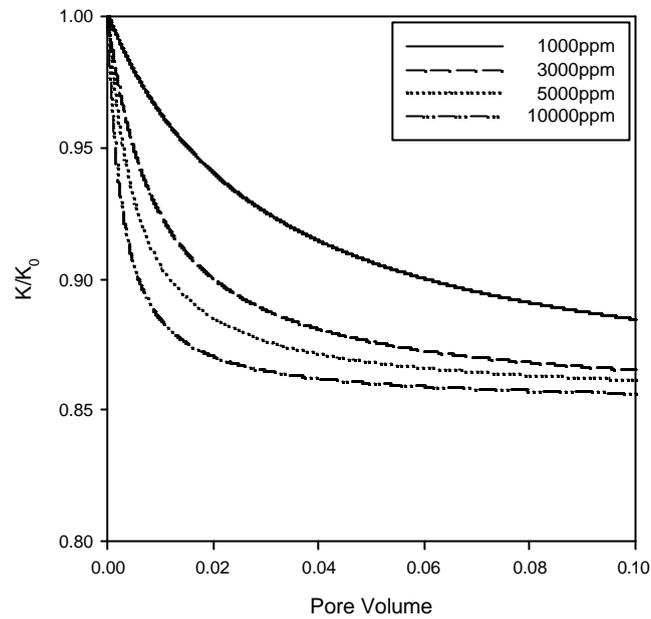
附圖 4-7-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



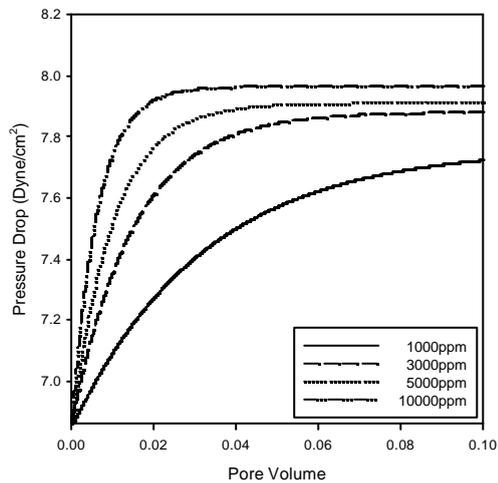
附圖 4-7-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



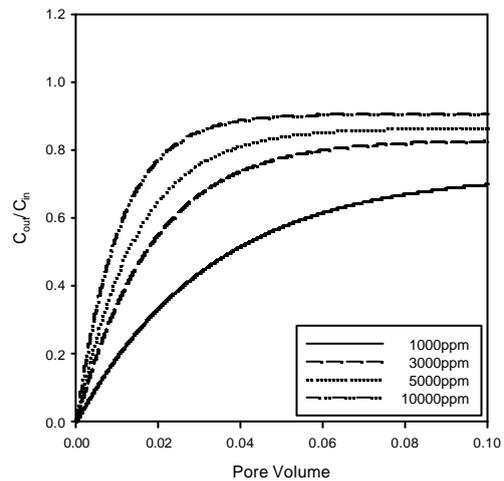
附圖 4-7-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 B 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



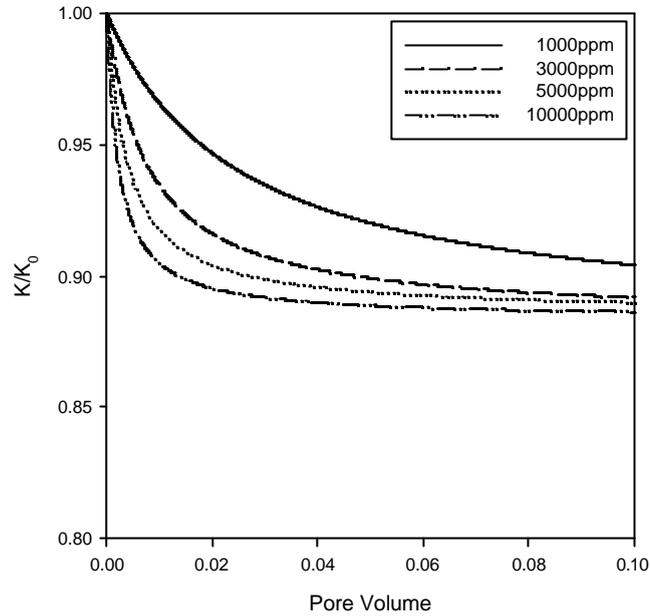
附圖 4-8-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



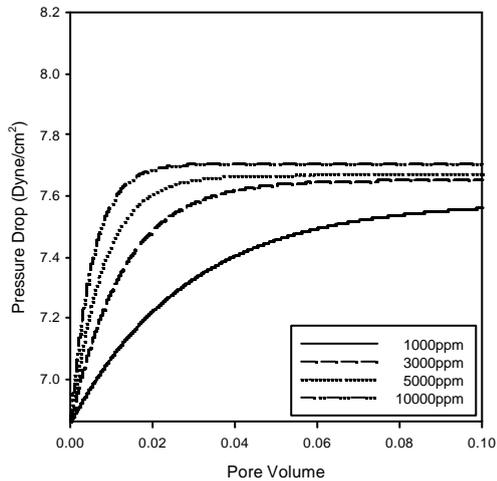
附圖 4-8-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



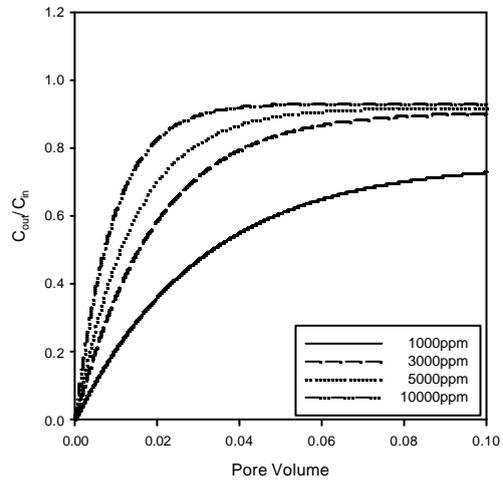
附圖 4-8-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 C 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢



附圖 4-9-1 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，可穿透度隨 Pore Volume 值變化的趨勢



附圖 4-9-2 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，壓降隨 Pore Volume 值變化的趨勢



附圖 4-9-3 於改良式正方形網絡模型、SCT 楔型管，在膠體粒子與孔隙度的直徑均有 Raleigh Distribution、不同膠體濃度、以及膠體本身具有 D 能障曲線及無布朗運動之下，進出口濃度比隨 Pore Volume 值變化的趨勢

附錄五：膠體粒子大小對於 DLVO 能障曲線形狀改變影響的探討

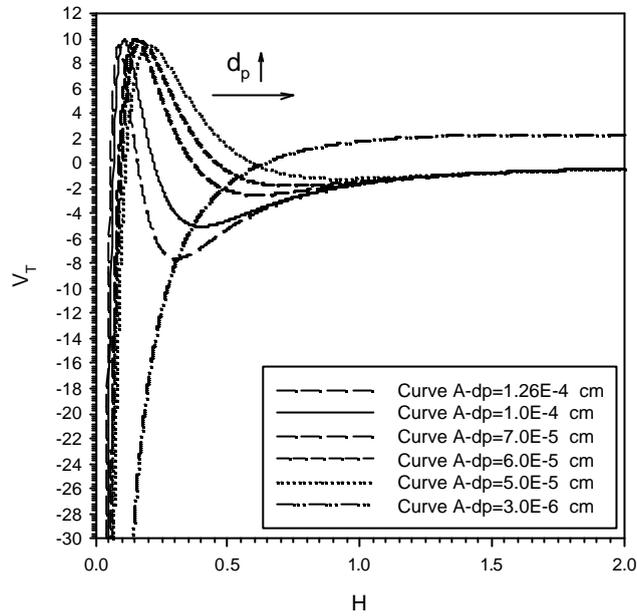
附錄五所探討的是改變膠體粒子大小對於粒子本身所具有能障值變化趨勢，所設定四種能障與模擬各項條件如同附表 4-1 與 5-1 所述，膠體粒子直徑 $1\ \mu\text{m}$ 時四種 DLVO 能障示意圖如附圖 4-1-1 所示。

由附圖 5-1-1 至 5-1-3 均可發現，當膠體粒子本身並非具有純吸附能障時(也就是本論文中所提到的 Curve D 能障)，無論膠體粒子所具有的能障為何，隨著膠體粒子直徑減小，其所具有的 DLVO 能障圖形中的 Primary Maximum 以及 Secondary Minimum 能障所具有的特徵波峰與波谷亦隨之縮小，直到膠體粒子直徑於 $0.03\ \mu\text{m}$ 時，能障圖形將完全轉為純吸附的能障，依據 DLVO 理論中，於膠體粒子直徑減小之時，電荷排斥力將會隨之減小，因此當膠體粒子直徑減小至一定程度之時，此時將不具有電荷排斥力的作用而僅剩下凡得瓦吸引力，能障曲線也轉成純吸附的能障曲線。

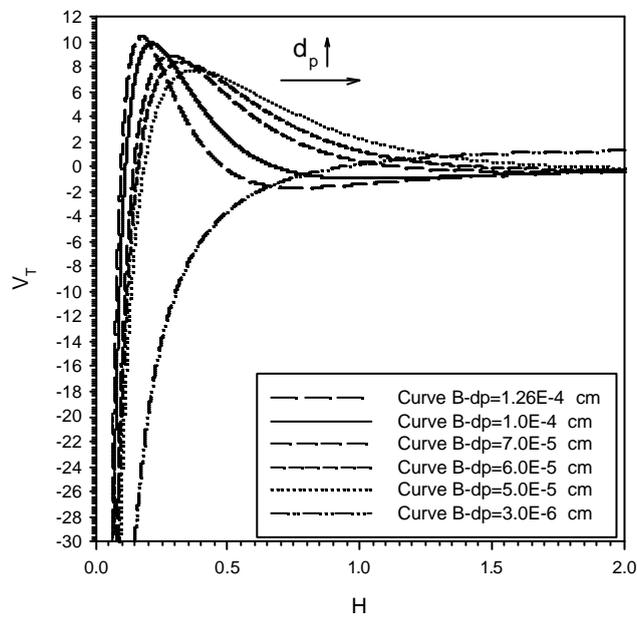
若膠體粒子具有純吸附能障時，無論粒子直徑大小如何改變，能障圖形如附圖 5-1-4 中趨勢與量值均無變化，主因在於純吸附能障所代表的另一個意義就是不具有電荷排斥力，而僅會剩下凡得瓦吸引力，所以縱使改變膠體粒子直徑大小，仍會維持純吸附能障曲線。

Parameters	Value
Boltzmann 常數, K_B	1.38×10^{-16} erg/K
孔隙度, ϵ	0.40
流體黏度, μ	1 cp
溫度, T	293 K
流體密度, ρ_f	1 g/cm ³
膠體粒子密度, ρ_p	1 g/cm ³
收集器平均管徑, D_f	20 μ m
膠體粒子平均粒徑, D_p	0.03 ~ 1.26 μ m
膠體粒子進口濃度, C_{in}	1000 ppm
膠體溶液平均進口流速, U_m	0.1 cm/sec
過濾床的不可還原飽和度, S_{wi}	0.127

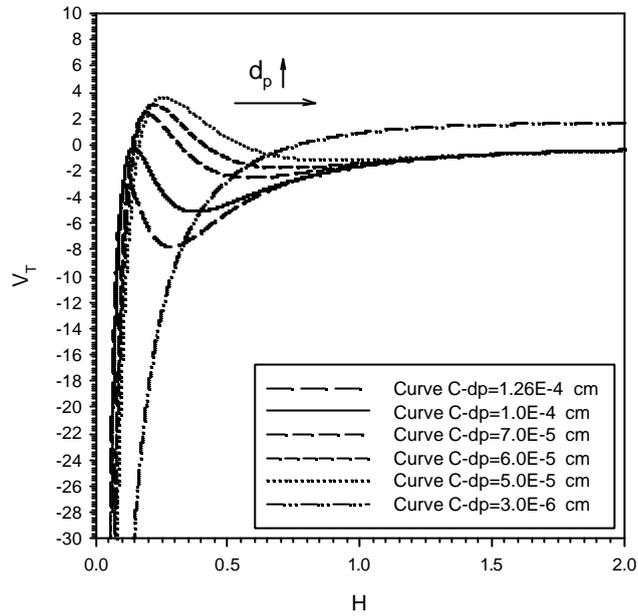
附表 5-1 附錄五圖形中所使用的模擬條件中各項操作變因



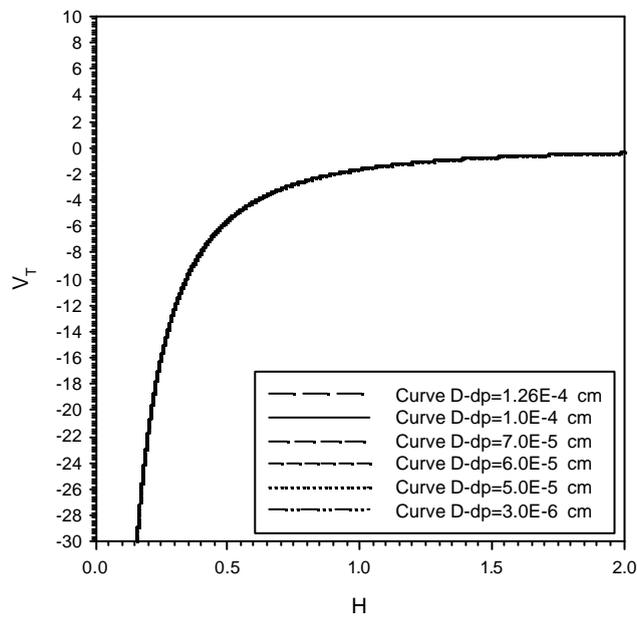
附圖 5-1-1 膠體粒子在具有 A 形狀的吸附能障時,改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢



附圖 5-1-2 膠體粒子在具有 B 形狀的吸附能障時,改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢



附圖 5-1-3 膠體粒子在具有 C 形狀的吸附能障時,改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢



附圖 5-1-4 膠體粒子在具有 D 形狀的吸附能障時,改變膠體粒子粒徑對於 DLVO 能障圖形變化的趨勢

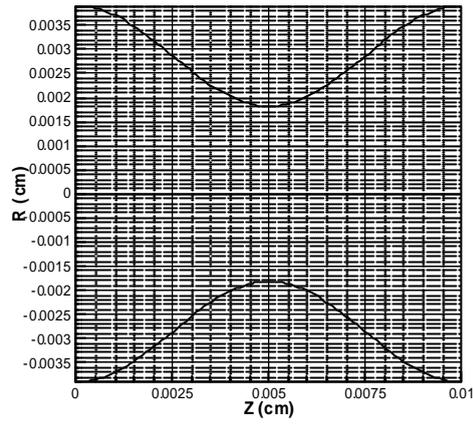
附錄六：於不同的網絡模型、DLVO 能障、楔型管管型、及有無布朗運動的模擬條件下，filtration functions $F_1(a, s)$ (break-through concentration)與 $F_2(\beta, s)$ (pressure drop)的比較與探討

附錄六所示是於不同網絡模型、DLVO 能障、楔型管管型、及有無布朗運動的條件下，以 filtration functions $F_1(a, s)$ (break-through concentration)與 $F_2(\beta, s)$ (pressure drop)進行其所對應的過濾效應比較；其中所使用的網絡模型已在論文本文敘述，所探討的 DLVO 能障分別為附表 4-1 中所述的四種 DLVO 能障，採用的三種楔型管模型則為 SCT(Sinusoidal Constricted Tube)、HCT(Hyperbolic Constricted Tube) 以及 PCT(Parabolic Constricted Tube)，並配合有無布朗運動進行比較；四種 DLVO 能障示意圖則如附圖 4-1-1 所示，楔型管的管型則分別如附圖 6-1-1 至 6-1-3 所示，所使用的模擬條件如附表 6-1 所述，附錄六中所有圖形之 $F_1(a, s)$ 與 $F_2(\beta, s)$ 的表示式可整理如附表 6-2 與 6-3 所示。

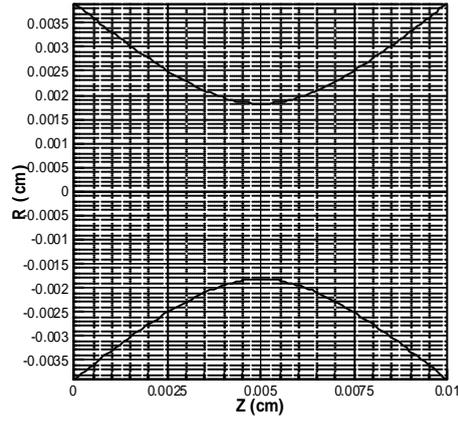
在正三角型網絡、SCT 楔型管的條件下，改變 DLVO 能障與有布朗運動時所得的 $F_1(a, s)$ (附圖 6-2-1)與 $F_2(\beta, s)$ (附圖 6-2-2)的趨勢發現，當 DLVO 理論的能障為 Curve A 時，其能障同時具備 Primary

maximum 以及 Secondary minimum，會對吸附相當不利。也因此單位收集器體積所收集的膠體粒子體積值為最小；而 DLVO 理論能障為 Curve B 時，因只具備 Primary maximum，雖然這也是對膠體粒子吸附不利的條件，但是此不利效應比 Curve A 要弱。因此其值略大於 Curve A；當 DLVO 理論能障為 Curve C 時，因只具備 Secondary minimum，這會造成膠體粒子在 Secondary minimum 的絮聚，而當流體剪切力過大時，則膠體粒子會被沖走而無法吸附於收集器表面。雖然這也是對膠體粒子吸附不利的條件，但是比 Curve A 與 B 更弱，故值大於 Curve A 與 B；最後，當 DLVO 理論的能障為 Curve D 時，由於不具有能障，對膠體粒子的吸附相當有利，所以它的值大於其他三種能障。是故膠體粒子在有考慮布朗運動的條件下，吸附效果為 Curve A < B < C < D。然而當不考慮布朗運動的條件時，由 $F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-3-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-3-2)的變化趨勢發現，四種 DLVO 能障的值彼此間並無太大的差別，其主要原因在於布朗運動不利於膠體在楔型管中的吸附，但在不考慮布朗運動的情況下，膠體粒子較容易吸附所造成的結果。雖然 Curve D 的值仍大於其他三種能障，且吸附效果仍為 Curve A < B < C < D，不過其趨勢並不明顯，由於膠體粒子在沒有考慮其布朗運動行為時將增加其吸附效果，故會導致具其餘三種能障的粒子轉趨為吸附的狀況，而促使其值增加，使得於

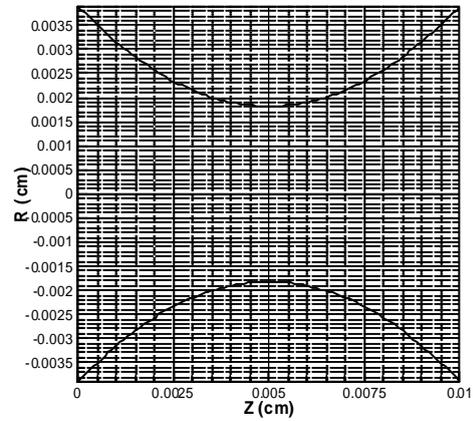
膠體粒子不考慮布朗運動行為時四種 DLVO 能障的 值並無太大的差異。由此可知膠體粒子於有考慮布朗運動作用時，不同 DLVO 能障的效果才會凸顯出，當不考慮布朗運動之時，則 DLVO 能障對過濾效率的影響將變得明顯。



附圖 6-1-1 SCT 楔型管 (Sinusoidal Constricted Tube) 示意圖^[1]



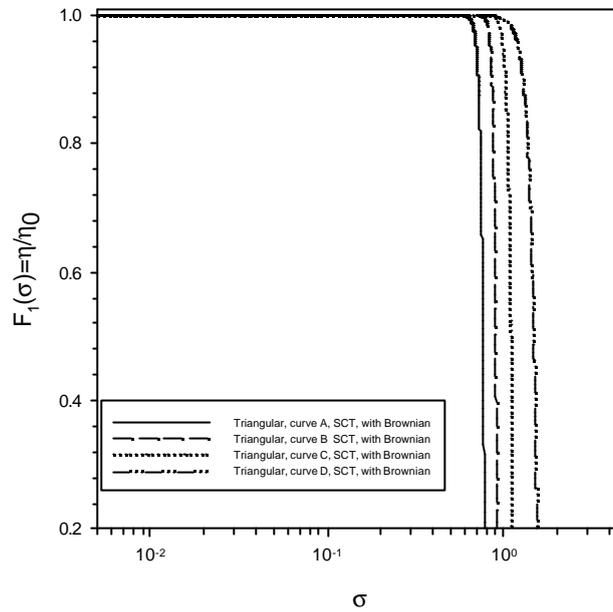
附圖 6-1-2 HCT 楔型管 (Hyperbolic Constricted Tube) 示意圖^[1]



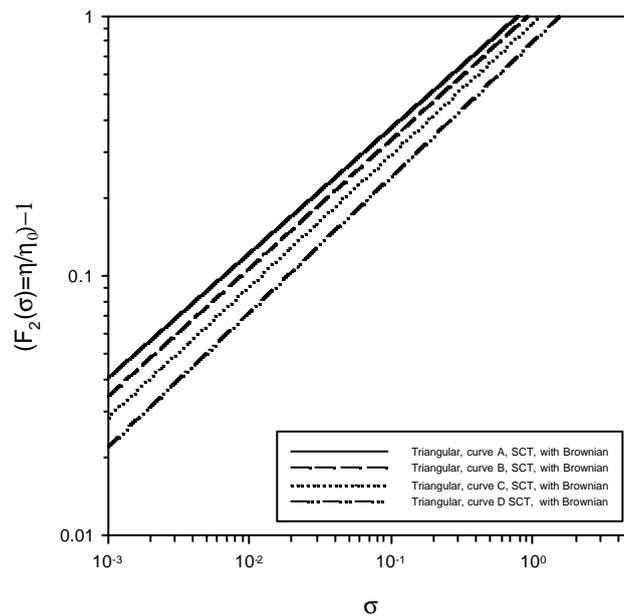
附圖 6-1-3 PCT 楔型管 (Parabolic Constricted Tube) 示意圖^[1]

Parameters	Value
Boltzmann 常數, K_B	1.38×10^{-16} erg/K
孔隙度,	0.40
流體黏度, μ	1 cp
溫度, T	293 K
流體密度, ρ_f	1 g/cm ³
膠體粒子密度, ρ_p	1 g/cm ³
收集器平均管徑, D_f	20 μ m
膠體粒子平均粒徑, D_p	1 μ m
膠體粒子進口濃度, C_{in}	1000 ppm
膠體溶液平均進口流速, U_m	0.1 cm/sec
過濾床的不可還原飽和度, S_{wi}	0.127

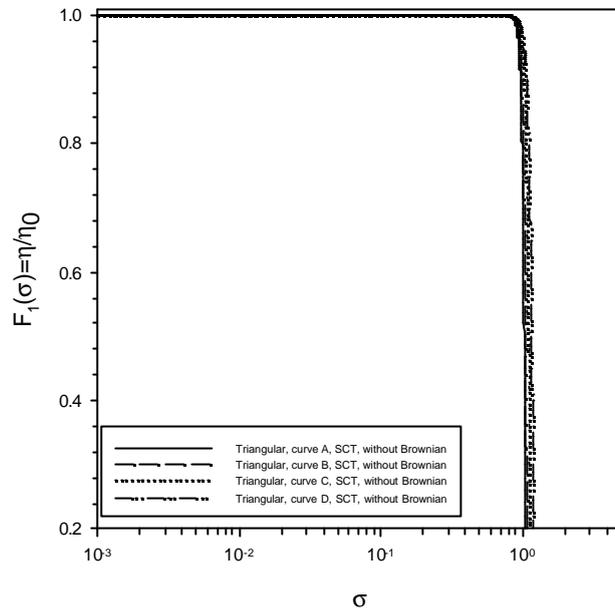
附表 6-1 附錄六圖形中所使用模擬條件中的各項操作變因



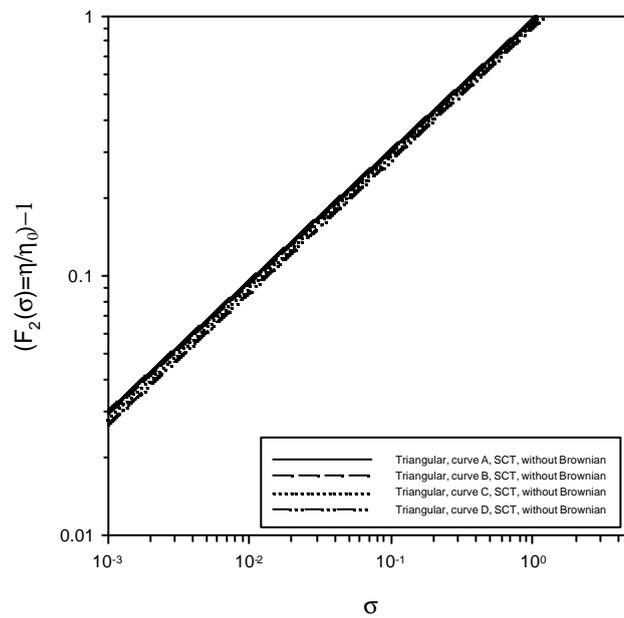
附圖 6-2-1 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-2-2 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



附圖 6-3-1 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-3-2 於正三角型網絡模型，SCT 楔型管的條件，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同 DLVO 能障對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響

在有 DLVO 能障(Curve A-C)及具布朗運動作用下，當 $N_{Re} > 1.0$ 時，膠體粒子吸附效率的大小依序為 $SCT > HCT > PCT$ ；而當 $N_{Re} \ll 1.0$ 時，三者並無顯著之差異。而隨 N_{Re} 的減小，吸附效率開始降低的順序依序為 PCT、HCT、SCT。主要是由於 SCT 模型的管壁斜率為先平緩後陡峭(附圖 6-1-1)；HCT 模型的管壁斜率則差不多一樣(附圖 6-1-2)；而 PCT 模型的管壁斜率則先陡峭後平緩(附圖 6-1-3)。這些管壁幾何圖形上的差異使得膠體粒子易吸附於 SCT 的中段狹窄口處，和易吸附於 PCT 與 HCT 的入口處。於不具能障(Curve D)狀態之下，膠體粒子的吸附效率的大小順序則將轉變為 $PCT > HCT > SCT$ ，但若不考慮布朗運動作用，且於 N_{Re} 很小時，則膠體粒子的吸附效率會遽降且大小順序變為 $SCT > HCT > PCT$ 。此是因為膠體粒子吸附效率愈高，愈會產生大粒徑膠體粒子堵塞小管徑的機會，及膠體粒子較易吸附在大管徑的收集器壁上等現象；此外，當 N_{Re} 下降至某一定值時，PCT 和 HCT 收集效率會增加，此現象稱為「入口邊際效應」(Entrance effect)。由前述論文的分析得知^[1]，膠體粒子會主要吸附於 PCT 與 HCT 的入口處，此是因為 PCT 與 HCT 入口處的流場梯度比較陡峭。在 N_{Re} 低時，當收集器入口處幾何形狀的梯度較大時(PCT 與 HCT)，膠體粒子將更容易直接就在入口處被吸附收集。而 SCT 由於其入口處的幾何形狀較為平緩，所以上述的入口處邊際效應將不易發生。

於正三角型網絡之下，配合四種 DLVO 能障，及膠體粒子有無布朗運動作用，在不同楔型管時對 $F_1(\quad, \quad)$ 與 $F_2(\quad, \quad)$ 的探討。

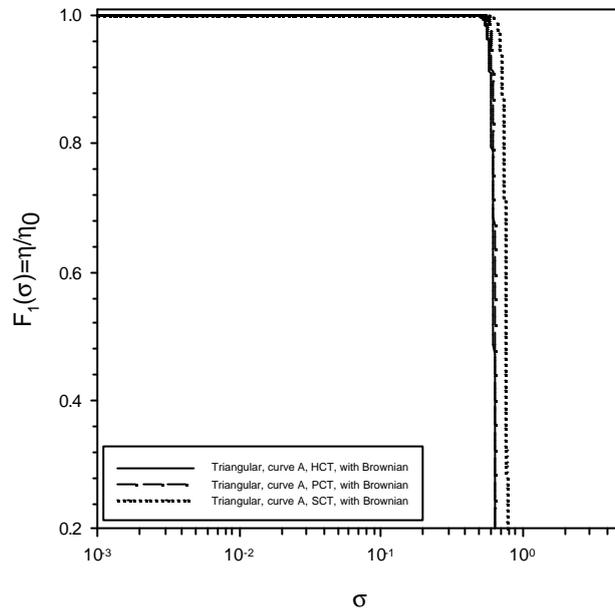
由於本論文中模擬狀態的 $N_{Re} = 0.02$ ，符合 $N_{Re} \ll 1.0$ 的狀態，因此僅針對能障的改變進行討論。

於 Curve A 且具有布朗運動作用的時候($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-4-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-4-2))， η 值的大小依序為 $SCT > HCT > PCT$ ，而不考慮布朗運動時($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-5-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-5-2))，則 η 值的大小為依序為 $SCT > PCT > HCT$ ；於 Curve B 且具有布朗運動作用的時候 $F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-6-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-6-2))， η 值的大小依序為 $SCT > PCT > HCT$ ，而不具布朗運動時($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-7-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-7-2))，則為 $SCT > PCT > HCT$ ；於 Curve C 且具布朗運動作用時($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-8-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-8-2))， η 值的大小依序為 $SCT > HCT > PCT$ ，而不具布朗運動時($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-9-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-9-2))，則為 $SCT > PCT > HCT$ 。由此可知，在不考慮布朗運動作用時，三種楔型管的 η 值相差無幾，其主因在於不考慮膠體布朗運動行為時，較為有利膠體的吸附，再加上 N_{Re} 很小時膠體粒子會更有機會吸附於管壁上，此時楔型管的幾何結構因素將顯得較不重要；而當考慮有布朗運動行為時，此時雖然 SCT 的 η 值較高，

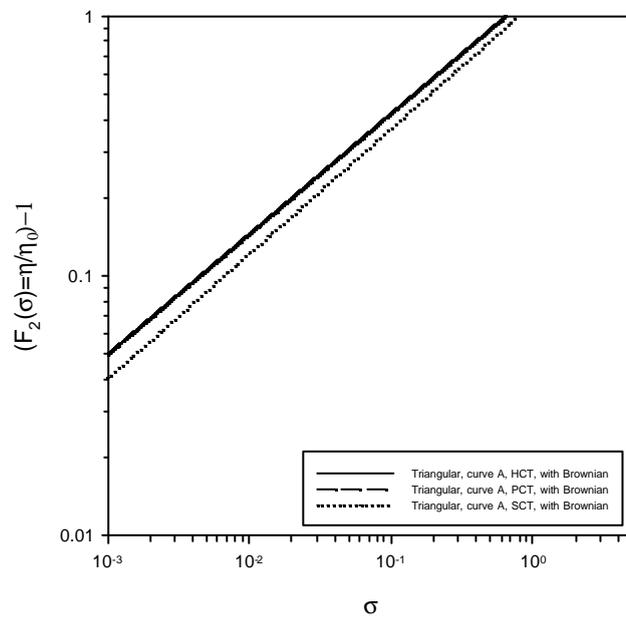
但卻與其他兩種楔型管差異不大，其主因在於正三角型網絡本身具有較佳的可穿透性，PCT 與 HCT 所具有的入口效應會因為能障的影響而降低膠體的吸附機會，但整體而言，三種楔型管的 β 值差異並不顯著。

於 Curve D 且具有布朗運動作用時($F_1(\beta, \gamma)$ (附圖 6-10-1)與 $F_2(\beta, \gamma)$ (附圖 6-10-2))， β 值的大小依序為 PCT>HCT>SCT，而不具布朗運動時($F_1(\beta, \gamma)$ (附圖 6-11-1)與 $F_2(\beta, \gamma)$ (附圖 6-11-2))，則為 SCT > PCT > HCT，不考慮布朗運動的狀態與前述 Curve A-C 的結果相同，而考慮膠體粒子的布朗運動行為時，且配合如 Curve D 純吸附的能障時，PCT 與 HCT 的入口效應因素便顯得重要，但整體趨勢與陳善智論文所提出的論點相符。

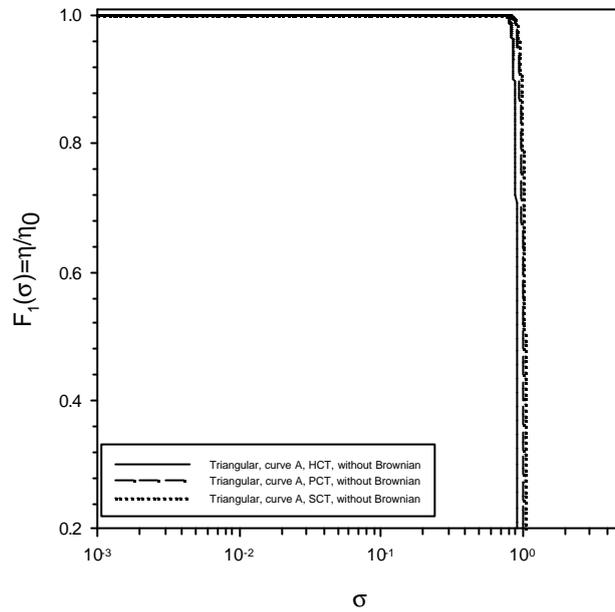
由以上分析可知，楔型管幾何形狀相較於其他的變因(網絡模型、DLVO 能障、有無布朗運動)而言，其差異性較難去判定，其原因在於楔型管幾何結構對於膠體粒子吸附與堵塞影響性遠低於其他變因，再加上本論文所使用的是網絡模型，相對亦降低楔型管幾何形狀影響的重要性。



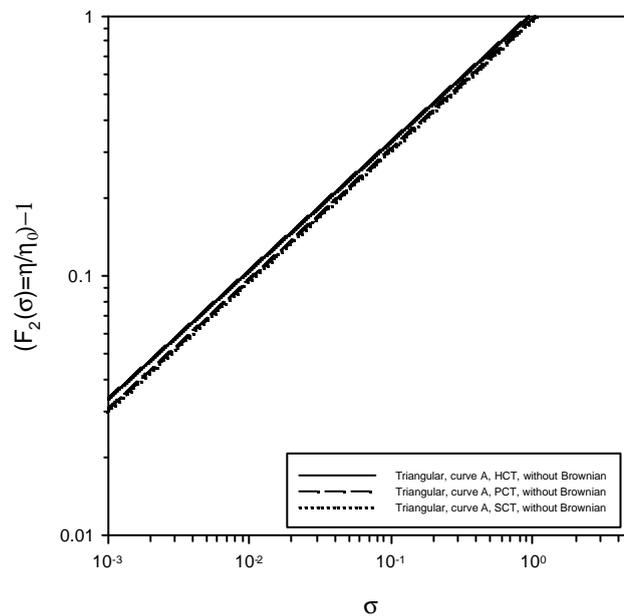
附圖 6-4-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



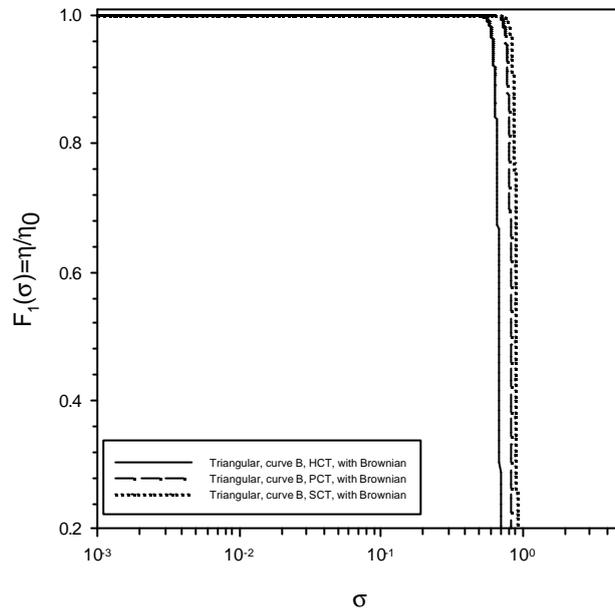
附圖 6-4-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



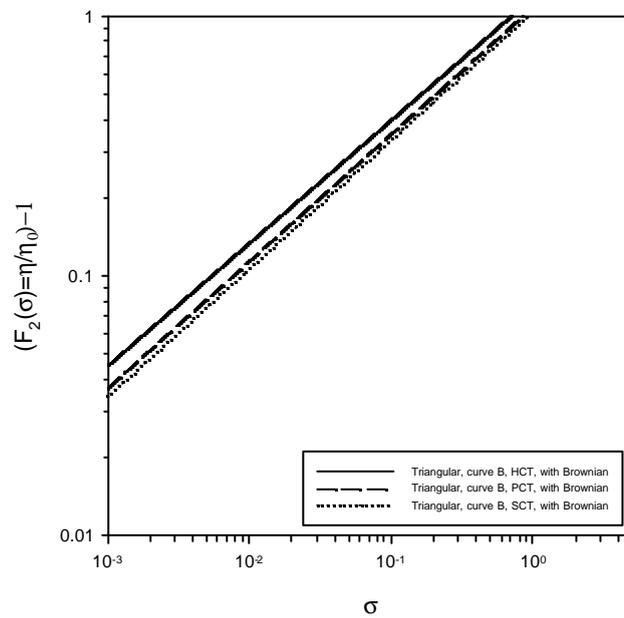
附圖 6-5-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



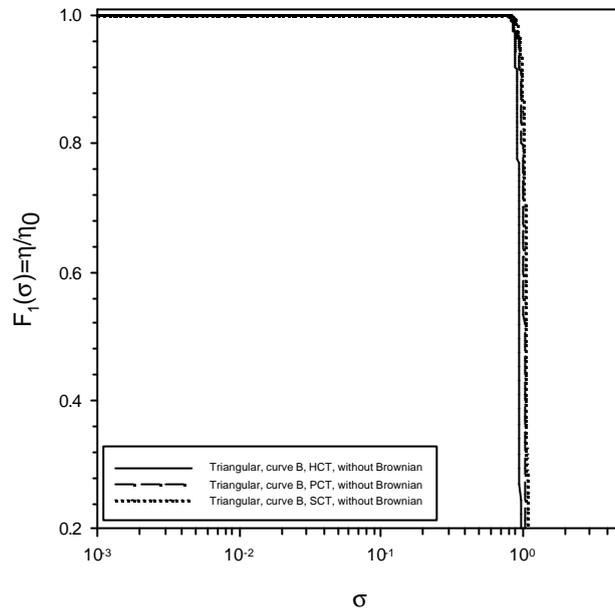
附圖 6-5-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve A能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



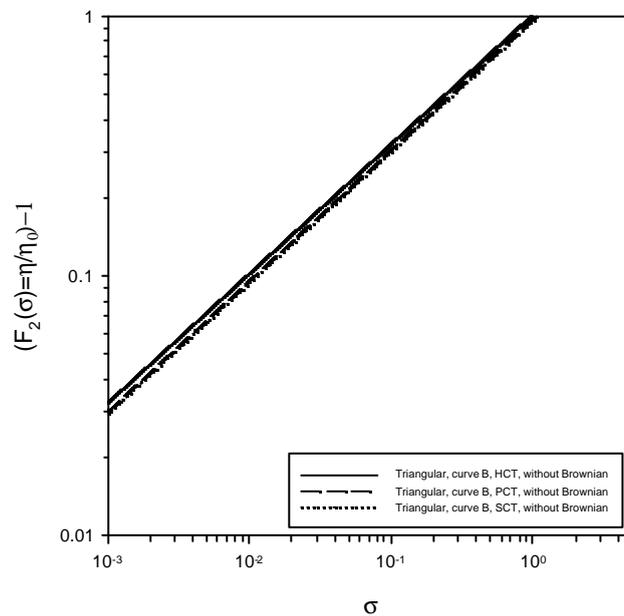
附圖 6-6-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



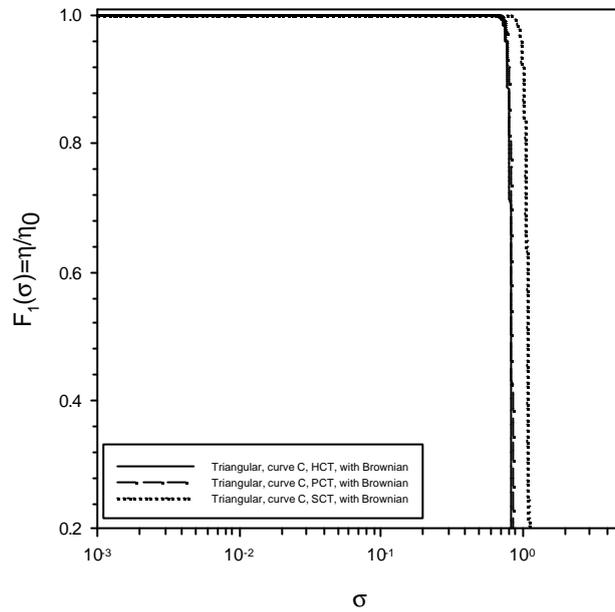
附圖 6-6-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



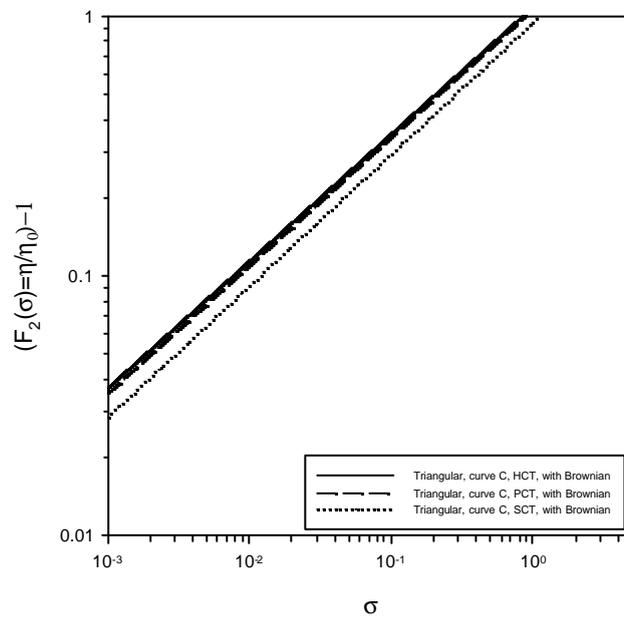
附圖 6-7-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



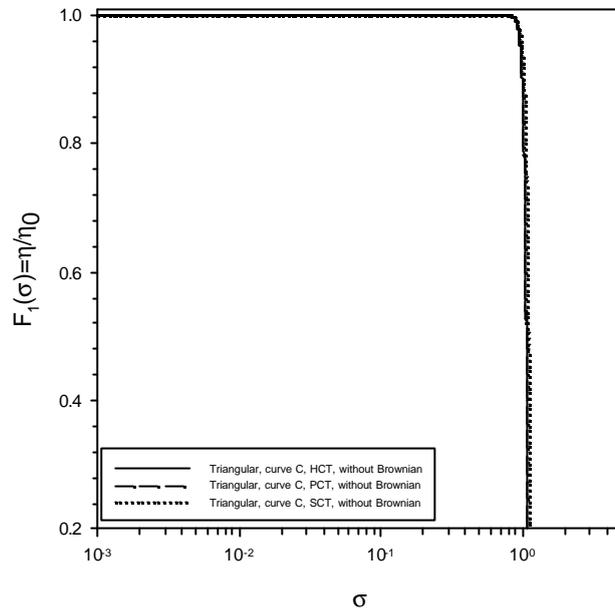
附圖 6-7-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



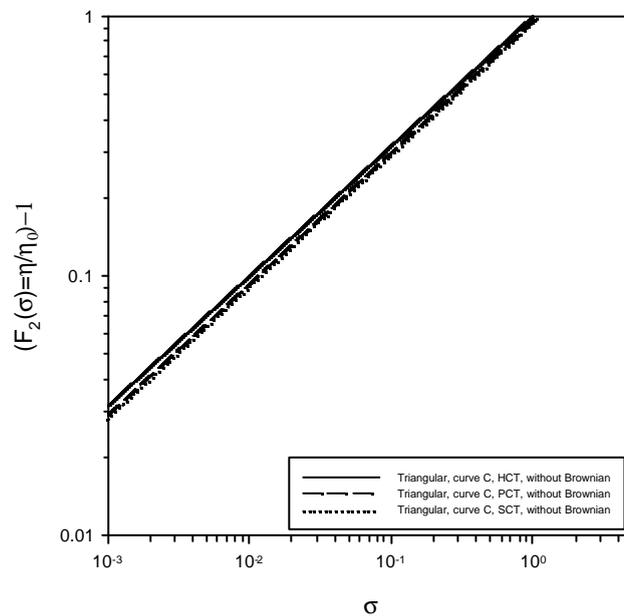
附圖 6-8-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



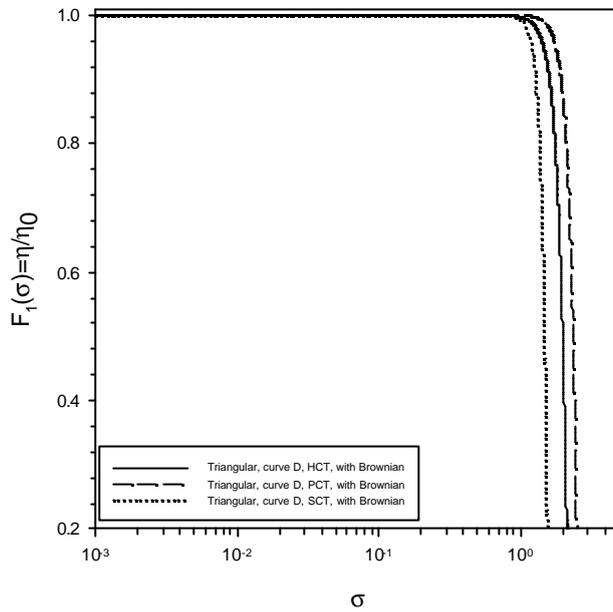
附圖 6-8-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



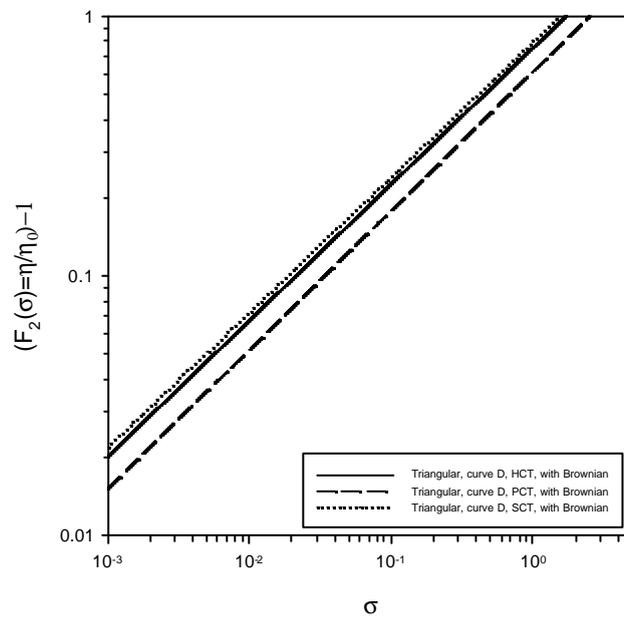
附圖 6-9-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



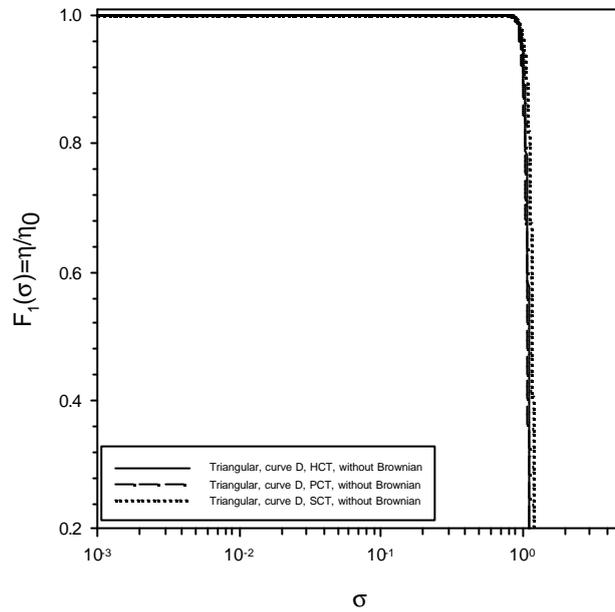
附圖 6-9-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



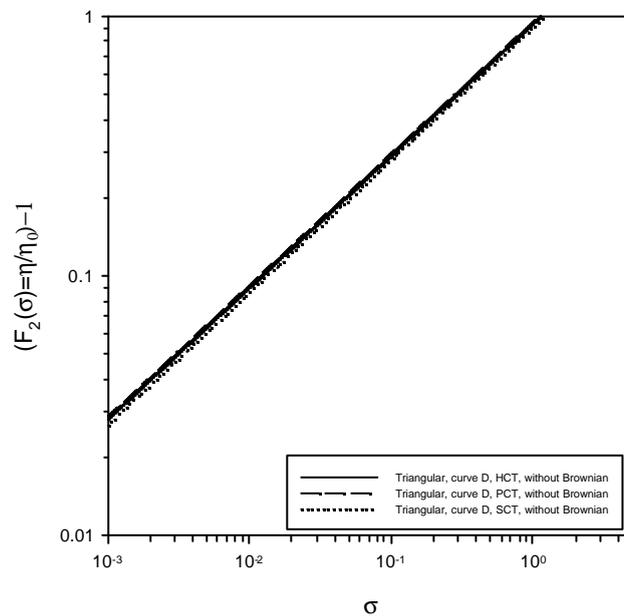
附圖 6-10-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-10-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



附圖 6-11-1 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-11-2 於正三角型網絡模型，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同的楔型管模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響

本論文所探討的三種網絡模型已於本文所述，此三種網絡模型的差異 Z 值大小(coordination number value)與此網絡的可穿透性有關， Z 值愈低，進出管數較少，可穿透性也愈差，相對的 Z 值愈高，進出管數較多，可穿透性也愈佳。而網絡模型的可穿透性對於膠體粒子吸附堵塞的量影響性相當高，當網絡通路愈多時，膠體粒子愈有機會流出過濾器，吸附過濾的機會將大幅降低，但當通路減少時，膠體們則有機會撞向收集器管壁而吸附，將會提高其吸附效率。

於 SCT 楔型管之下，配合四種 DLVO 能障，及膠體粒子有無布朗運動作用，在不同網絡架構時對 $F_1(\quad, \quad)$ 與 $F_2(\quad, \quad)$ 的探討。

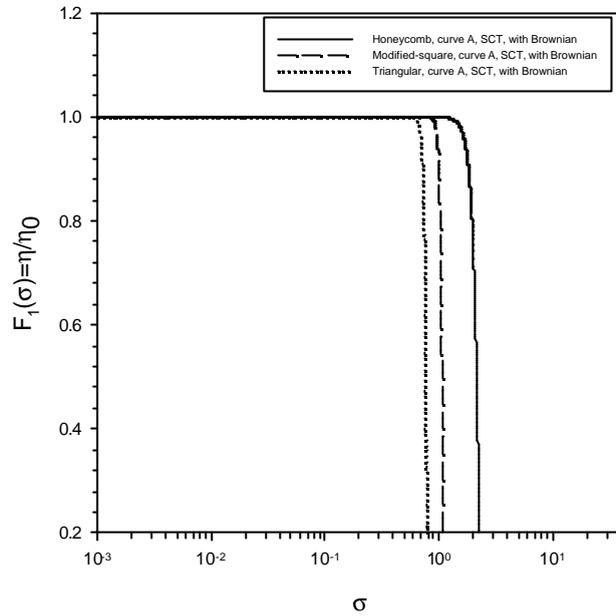
當考慮布朗運動行為時，無論是 Curve A($F_1(\quad, \quad)$)(附圖 6-12-1) 與 $F_2(\quad, \quad)$)(附圖 6-12-2))、Curve B($F_1(\quad, \quad)$)(附圖 6-14-1)與 $F_2(\quad, \quad)$)(附圖 6-14-2))、Curve C($F_1(\quad, \quad)$)(附圖 6-16-1)與 $F_2(\quad, \quad)$)(附圖 6-16-2))、及 Curve D($F_1(\quad, \quad)$)(附圖 6-18-1)與 $F_2(\quad, \quad)$)(附圖 6-18-2)) 四種能障所造成的變化趨勢均顯示， θ 值依大小順序分別為蜂窩型網絡($Z=3$) > 改良式正方型網絡($Z=4$) > 正三角型網絡($Z=6$)，其趨勢相當符合網絡架構 Z 值的定義，也就是 Z 值愈少，過濾器愈容易吸附飽和，使得其 θ 值亦愈大；當不考慮布朗運動行為時，於 Curve A($F_1(\quad, \quad)$)(附圖 6-13-1)與 $F_2(\quad, \quad)$)(附圖 6-13-2))、Curve B($F_1(\quad, \quad)$)(附圖

6-15-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-15-2))二個能障亦呈現相同的趨勢,然而於 Curve C($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-17-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-17-2))卻出現蜂窩型網絡的 η 值與改良式正方型網絡幾乎相同的狀況,甚至在 Curve D($F_1(\quad, \quad)$ (附圖 6-19-1)與 $F_2(\quad, \quad)$ (附圖 6-19-2))竟出現改良式正方型網絡的 η 值大於蜂窩型網絡的狀況,其原因推測應為蜂窩型網絡由於太容易達到吸附飽和,且其可穿透性最差,容易在過濾器的前端發生堵塞現象,而促使整個過濾器因前端完全被堵塞,造成過濾器中後段無法充分被利用,進而使得整個過濾器的 η 值無法提高。然而改良式正方型網絡卻因為有比蜂窩型網絡較佳的可穿透性,能夠將膠體粒子導入過濾器的中後段,進而使得當膠體粒子不具布朗運動行為時,且為具較佳吸附效果的 Curve C 或 D 時,蜂窩型網絡極有可能因此造成前端完全堵塞而降低了其 η 值,所以會出現改良式正方型網絡的 η 值迎頭趕上蜂窩型網絡的 η 值,進而出現超越的狀況,但是當網絡的可穿透性過佳時,則有適得其反的效果,這可由正三角型網絡自始至終其 η 值均為最差可以佐證,因為可穿透性過佳的結果,反而會易使膠體粒子流出過濾器外,而降低了過濾器收集過濾的效果。

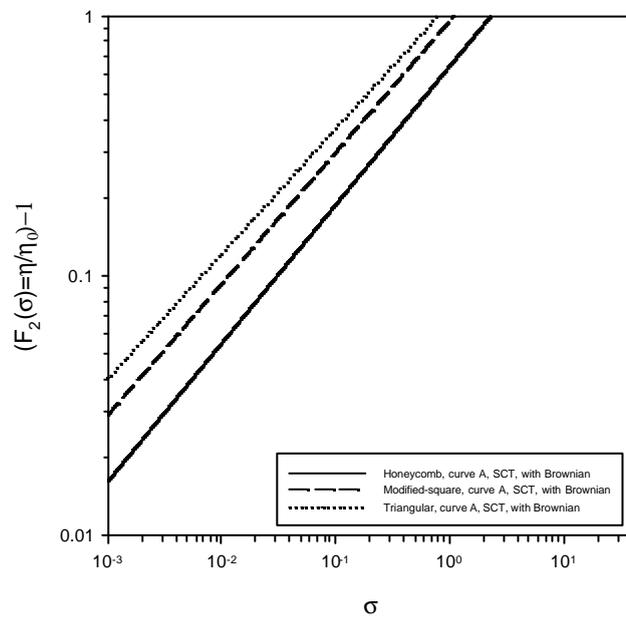
由以上分析可得知,大體上無論 DLVO 能障的大小,或是膠體粒子有無布朗運動等條件, η 值依大小順序分別為蜂窩型網絡($Z=3$) > 改良式正方型網絡($Z=4$) > 正三角型網絡($Z=6$),也就是也就是 Z 值

愈少，愈容易使過濾器達到吸附飽和，使得其 K_d 值亦愈大，但於不具布朗運動時且其能障較接近於完全吸附的 Curve D 能障時，由於網絡可穿透性的影響，蜂窩型網絡有機會形成前端完全堵塞而使整個過濾器失去效能，進而降低其過濾的效果。換言之，過濾器的可穿透性在膠體粒子吸附效果較佳的狀況下，應適當的調整，以避免造成過濾器前端完全堵塞而影響了過濾效果。

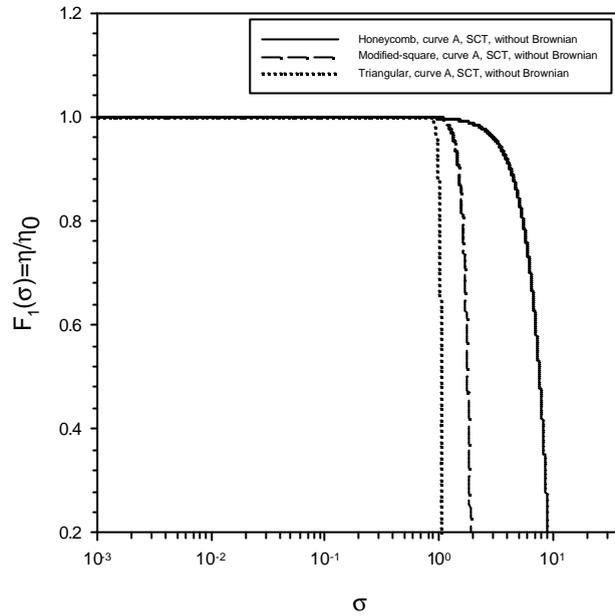




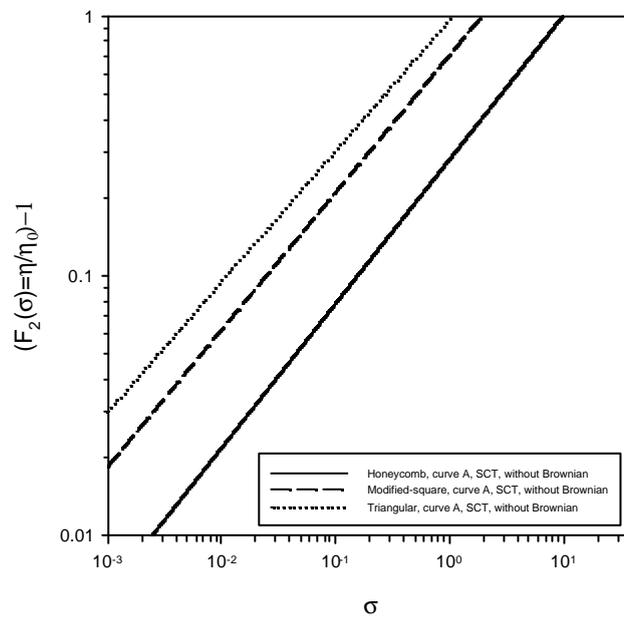
附圖 6-12-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



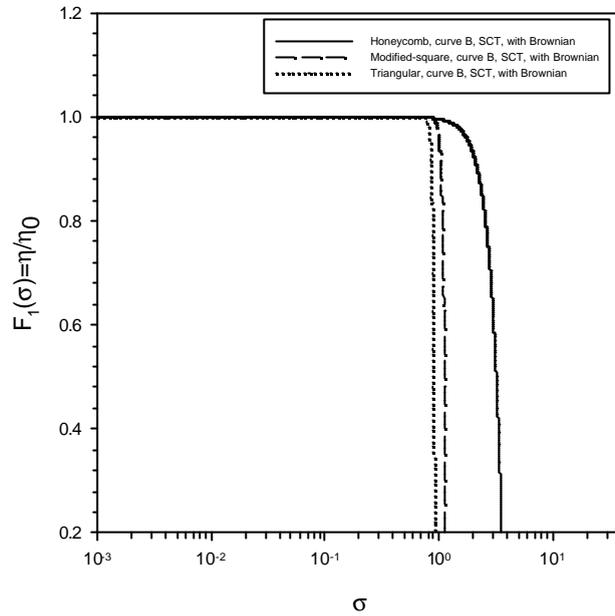
附圖 6-12-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



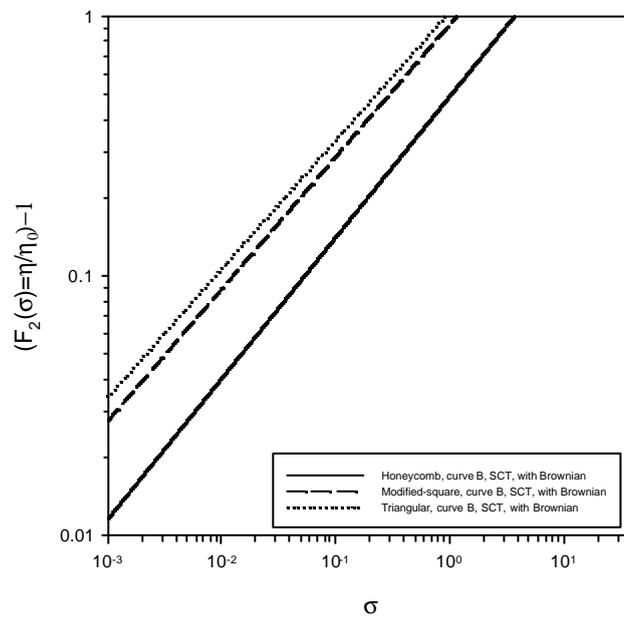
附圖 6-13-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



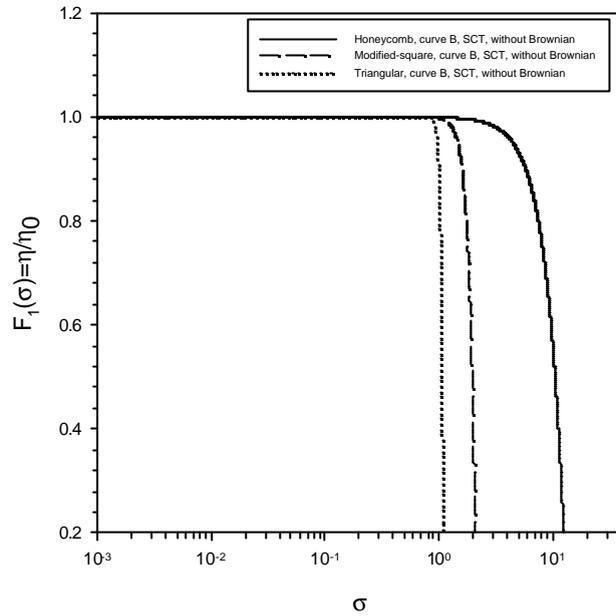
附圖 6-13-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve A 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



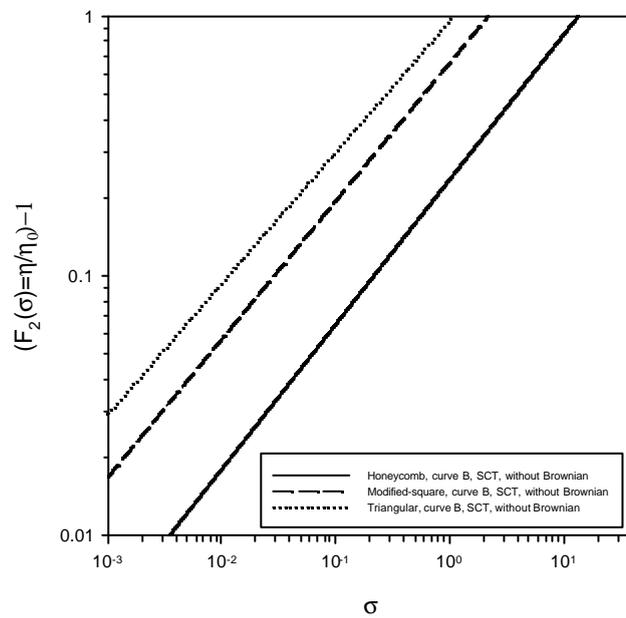
附圖 6-14-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



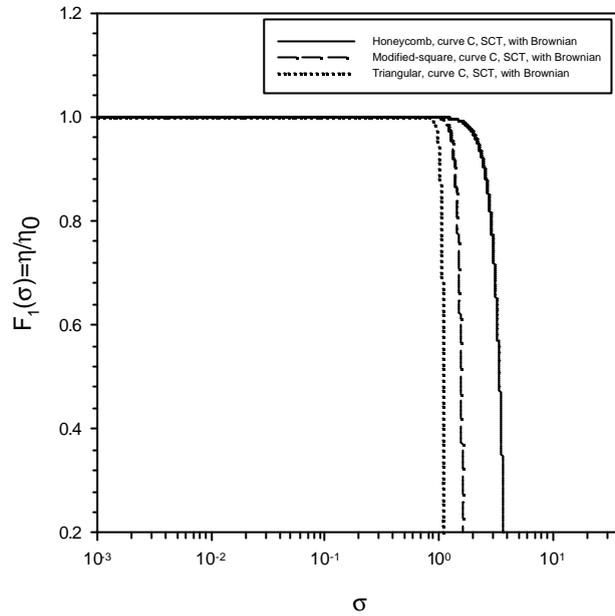
附圖 6-14-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



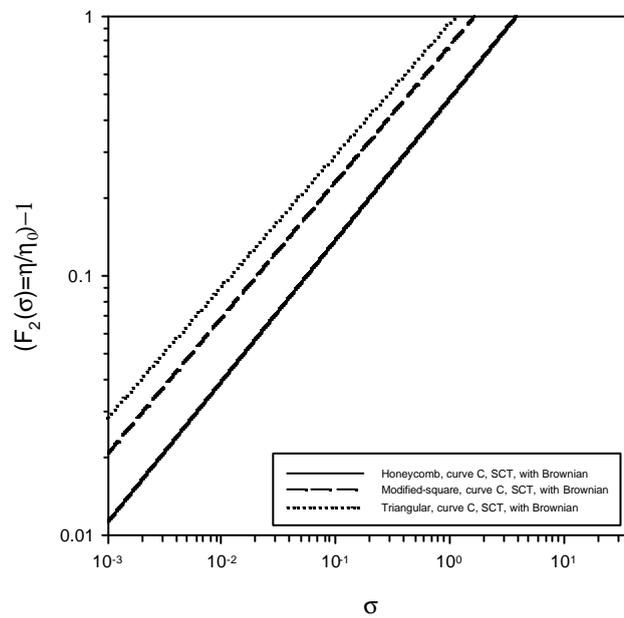
附圖 6-15-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



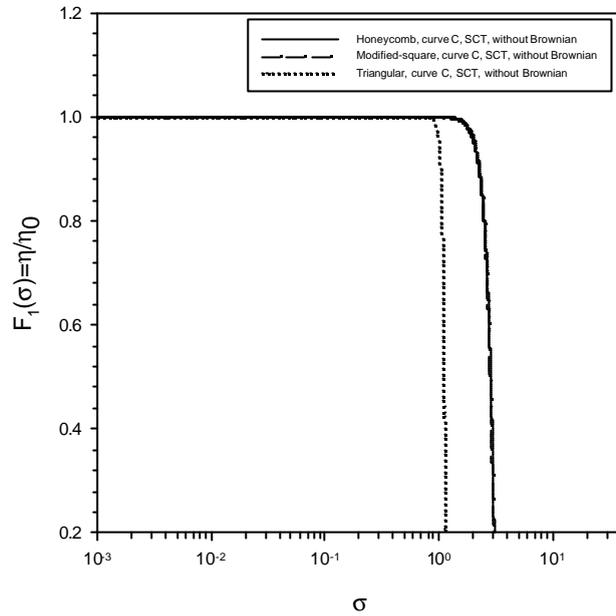
附圖 6-15-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve B 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



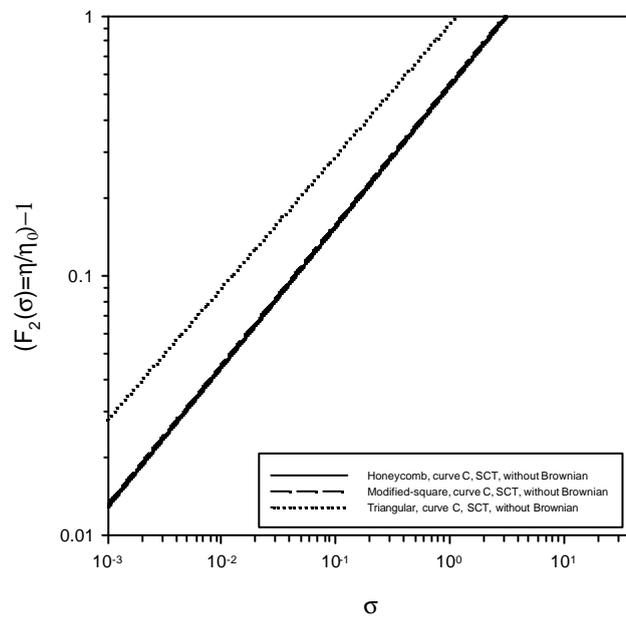
附圖 6-16-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



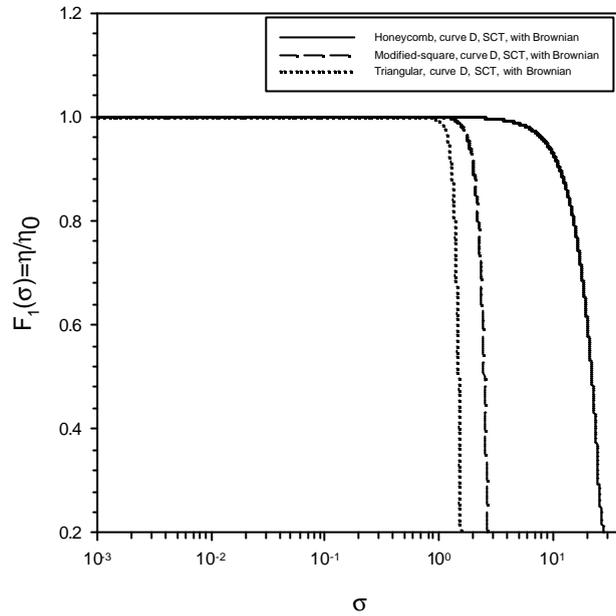
附圖 6-16-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



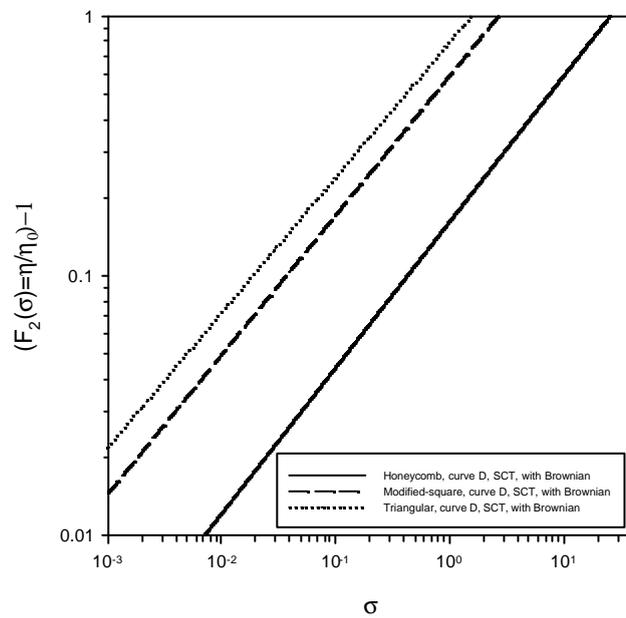
附圖 6-17-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



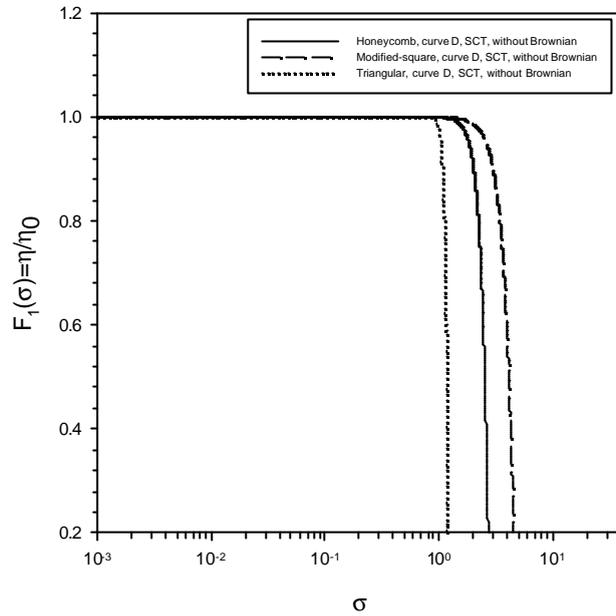
附圖 6-17-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve C 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



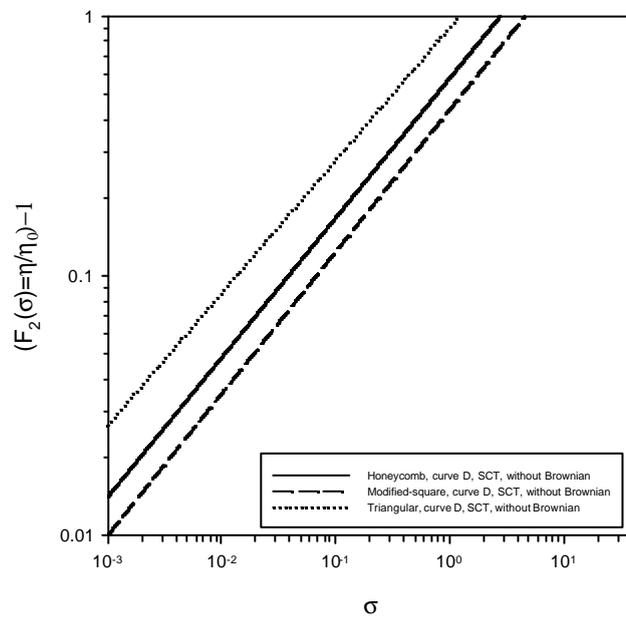
附圖 6-18-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-18-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響



附圖 6-19-1 於 SCT 楔型管，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_1(\sigma)$ 的影響



附圖 6-19-2 於 SCT 楔型管，DLVO Curve D 能障，當考慮膠體粒子不具有布朗運動行為時，不同網絡模型對於 filtration functions $F_2(\sigma)$ 的影響

Specific functions Network structures	$F_1(\mathbf{a}, \mathbf{s}) = 1 - \mathbf{a}_1 \mathbf{s}^{a_2}$		$F_2(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = 1 + \mathbf{b}_1 \mathbf{s}^{b_2}$	
	\mathbf{a}_1	\mathbf{a}_2	\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2
Triangular, curve A, SCT, with Brownian	488.645	25.287	1.126	0.482
Triangular, curve B, SCT, with Brownian	14.599	31.475	1.044	0.494
Triangular, curve C, SCT, with Brownian	0.078	22.755	0.947	0.506
Triangular, curve D, SCT, with Brownian	0.006	11.347	0.800	0.521
Triangular, curve A, SCT, without Brownian	0.202	26.943	0.973	0.503
Triangular, curve B, SCT, without Brownian	0.129	24.814	0.961	0.505
Triangular, curve C, SCT, without Brownian	0.060	21.601	0.939	0.507
Triangular, curve D, SCT, without Brownian	0.030	18.186	0.909	0.510
Triangular, curve A, HCT, with Brownian	1.0×10^5	26.740	1.223	0.463
Triangular, curve B, HCT, with Brownian	2055.723	22.314	1.177	0.473
Triangular, curve C, HCT, with Brownian	114.640	30.332	1.081	0.489
Triangular, curve D, HCT, with Brownian	0.003	7.371	0.755	0.524
Triangular, curve A, HCT, without Brownian	6.887	32.297	1.031	0.496
Triangular, curve B, HCT, without Brownian	2.138	34.058	1.012	0.498
Triangular, curve C, HCT, without Brownian	0.098	23.971	0.998	0.500
Triangular, curve D, HCT, without Brownian	0.053	21.390	0.935	0.508
Triangular, curve A, PCT, with Brownian	2.7×10^7	40.032	1.220	0.464
Triangular, curve B, PCT, with Brownian	91.417	29.015	1.081	0.489
Triangular, curve C, PCT, with Brownian	97.703	31.690	1.055	0.493
Triangular, curve D, PCT, with Brownian	4.0×10^{-4}	8.179	0.611	0.535
Triangular, curve A, PCT, without Brownian	0.327	29.442	0.982	0.502
Triangular, curve B, PCT, without Brownian	0.193	26.551	0.971	0.504
Triangular, curve C, PCT, without Brownian	0.098	23.971	0.954	0.505
Triangular, curve D, PCT, without Brownian	0.079	21.220	0.944	0.507

附表 6-2 附錄六中所討論之特徵過濾函數，於正三角型網絡模型時， $F_1(\mathbf{a}, \mathbf{s}) = 1 - \mathbf{a}_1 \mathbf{s}^{a_2}$ 與 $F_2(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = 1 + \mathbf{b}_1 \mathbf{s}^{b_2}$ 的表示式中， $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_1$ 與 \mathbf{b}_2 各參數的數值

Specific functions	$F_1(\mathbf{a}, \mathbf{s}) = 1 - \mathbf{a}_1 \mathbf{s}^{a_2}$		$F_2(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = 1 + \mathbf{b}_1 \mathbf{s}^{b_2}$	
	\mathbf{a}_1	\mathbf{a}_2	\mathbf{b}_1	\mathbf{b}_2
Network structures				
Honeycomb, curve A, SCT, with Brownian	4.0×10^{-4}	9.422	0.641	0.533
Honeycomb, curve B, SCT, with Brownian	0.004	4.120	0.491	0.543
Honeycomb, curve C, SCT, with Brownian	8.0×10^{-4}	5.197	0.481	0.543
Honeycomb, curve D, SCT, with Brownian	2.0×10^{-4}	2.465	0.162	0.561
Honeycomb, curve A, SCT, without Brownian	0.002	2.700	0.281	0.555
Honeycomb, curve B, SCT, without Brownian	9.0×10^{-4}	2.682	0.235	0.557
Honeycomb, curve C, SCT, without Brownian	4.0×10^{-4}	6.680	0.537	0.540
Honeycomb, curve D, SCT, without Brownian	7.0×10^{-4}	7.026	0.577	0.537
Modified-square, curve A, SCT, with Brownian	0.098	25.550	0.956	0.505
Modified-square, curve B, SCT, with Brownian	0.041	20.963	0.927	0.509
Modified-square, curve C, SCT, with Brownian	0.002	12.720	0.770	0.523
Modified-square, curve D, SCT, with Brownian	6.0×10^{-4}	7.314	0.589	0.536
Modified-square, curve A, SCT, without Brownian	0.003	8.586	0.708	0.528
Modified-square, curve B, SCT, without Brownian	0.003	7.688	0.660	0.532
Modified-square, curve C, SCT, without Brownian	3.0×10^{-4}	7.323	0.546	0.539
Modified-square, curve D, SCT, without Brownian	4.0×10^{-4}	4.988	0.436	0.546

附表 6-3 附錄六中所討論之特徵過濾函數，於蜂窩型與改良式正方形網絡模型時， $F_1(\mathbf{a}, \mathbf{s}) = 1 - \mathbf{a}_1 \mathbf{s}^{a_2}$ 與 $F_2(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = 1 + \mathbf{b}_1 \mathbf{s}^{b_2}$ 的表示式中， $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_1$ 與 \mathbf{b}_2 各參數的數值

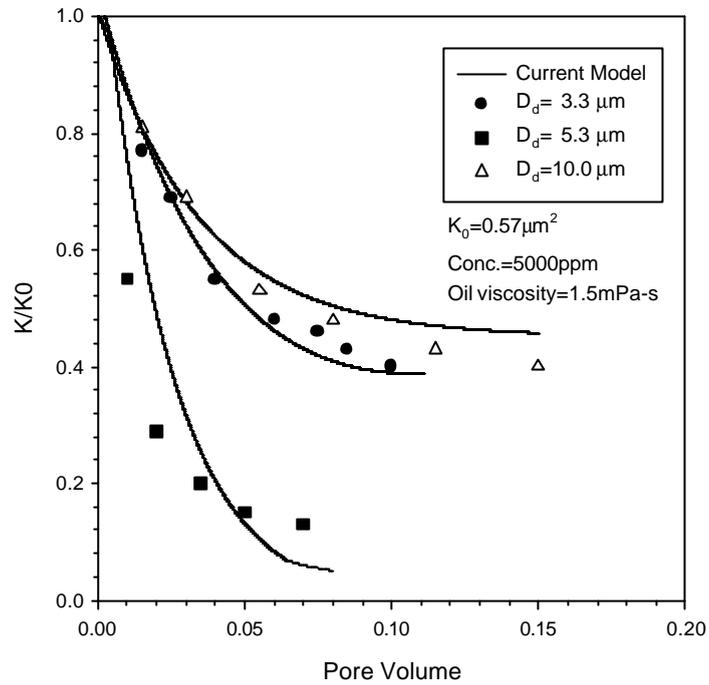
附錄七：以正三角型網絡模型、SCT 楔型管的條件下，進行模擬並與實驗數據比較的探討

附錄七所探討的是以正三角型網絡、楔型管 SCT 為條件進行模擬並與實驗數據比較，由於論文本文中已提到至目前為止以上述條件進行模擬的結果可以對實驗數據得到最佳的預測，因此希望與更多的實驗數據比較以印證這個論點，故進行以下模擬與實驗數據的比較。

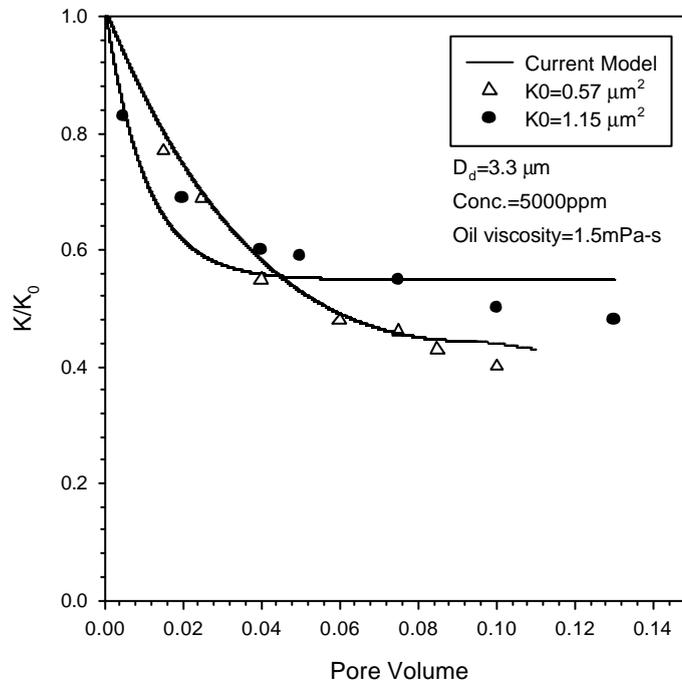
附圖 7-1-1 至 7-1-3 為依據 Soo 和 Radke 於 1984 年所發表文獻^[25]中的可穿透度對 Pore Volume 的實驗進行模擬並比較其實驗數據，模擬條件如附表 7-1 所述，所使用的網絡與楔型管仍為正三角型網絡與楔型管 SCT，其中圖內所標示的實線為所模擬的趨勢，數據點為實驗數據，由附圖 7-1-1 至 7-1-3 的結果均顯示使用正三角型網絡與楔型管 SCT 進行模擬的趨勢與實驗數據相當吻合，因此可證明論文本文中所以提到以正三角型網絡與楔型管 SCT 進行模擬有最佳的預測的觀點的正確性。

Parameters	Value
Boltzmann 常數, K_B	1.38×10^{-16} erg/K
孔隙度, ϵ	0.39
流體黏度, μ	1.5, 23 mPa-s
溫度, T	294.2 ~ 296.5 K
流體密度, ρ_f	1 g/cm ³
膠體粒子密度, ρ_p	1 g/cm ³
收集器平均管徑, D_f	15.3, 17.3 μ m
膠體粒子平均粒徑, D_p	3.1 ~ 10 μ m
膠體溶液平均進口流速, U_m	0.136 cm/sec
膠體粒子進口濃度, C_{in}	5000 ppm
初始可穿透度, K_0	0.57, 1.15 μ m ²

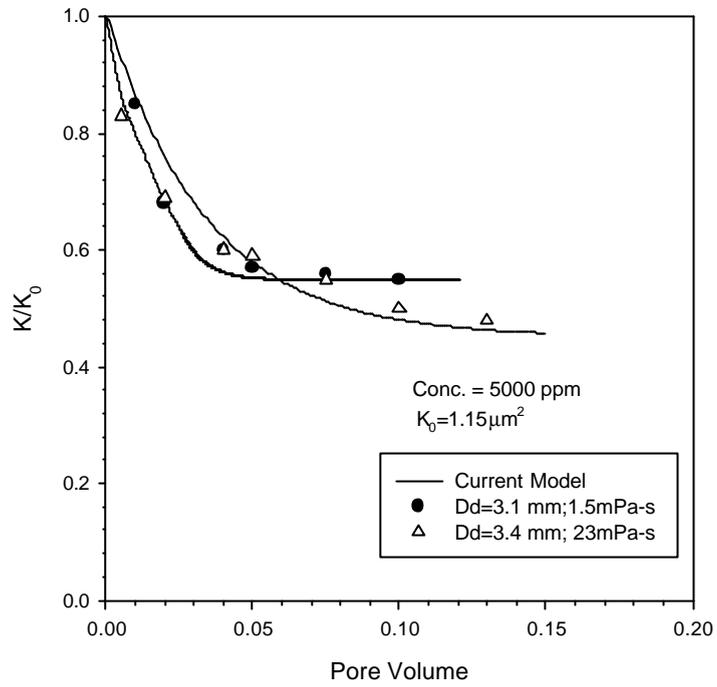
附表 7-1 針對 Soo 和 Radke 文獻^[25]中可穿透度對 Pore Volume 實驗進行比較時所使用模擬條件



附圖 7-1-1 以正三角型網絡模型、SCT 楔型管進行模擬，並與 Soo 和 Radke 文獻^[25]中(圖九)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果



附圖 7-1-2 以正三角型網絡模型、SCT 楔型管進行模擬，並與 Soo 和 Radke 文獻^[25]中(圖十)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果



附圖 7-1-3 以正三角型網絡模型、SCT 楔型管進行模擬，並與 Soo 和 Radke 文獻^[25]中(圖十一)可穿透度對 Pore Volume 實驗比較的結果

作者簡歷

姓 名：詹訓誌

籍 貫：台灣省雲林縣

出生年月日：民國六十三年十二月八日

學 歷：私立東海大學化學工程學系(1998)

私立東海大學化學工程研究所碩士(2000)

私立東海大學化學工程研究所博士(2006)

經 歷：私立東海大學化學工程學系助教(1999~2003)

財團法人塑膠工業技術發展中心科專計畫研究助理(1998~2000)

財團法人工業技術研究院化學工業研究所計畫研究助理(2004)

展頌股份有限公司專案計畫研究助理(2000~2001)

鴻來企業股份有限公司專案計畫研究助理(2001~2002)