

水汚泥の加圧脱水に及ぼす電気泳動の効果



近藤 史朗 環境装置事業部
E O 技術室

えがき

電気浸透式加圧脱水機「スーパーフィルトロン」は電気泳動及び電気浸透の現象を利用して、当社が独自に開発し脱水機であるが、このたび全国で10指に入る大規模浄水である神奈川県内広域水道企業団、西長沢浄水場向けに型機種5台(ろ過面積288.8m²/台)の採用が決定した。土では開発当初より各種の実験・検討を重ねてきたが、水汚泥の脱水プロセスにおいては電気浸透現象による脱水の促進以外に、その前段階で起きる電気泳動現象が脱水率に多大の影響を及ぼしていることを見いだした。ところが、界面動電現象を利用したスラリーの加圧脱水に関する研究の多くは、最終過程の圧密期間における電気泳動の効果に多くの関心が向けられているため、前半のろ過期間における電気泳動の効果に言及した例は少なく、理未確立である。¹⁾²⁾ すなわち、電気浸透現象は、ろ過水が進行し、ろ過系内で被圧搾物の粒子が濃縮され、その粒子の移動が拘束される状態になってはじめて起こるが、多くの論文は、この状態のケースについて論じている。そこで本稿では筆者らが見いだした電気浸透式加圧脱水プロセスのろ過期間における電気泳動効果に関する新しい理論解析方法を紹介する。³⁾⁴⁾

理論

1 理論解析上の仮定

圧搾過程の前半に現れるろ過期間の初期におけるろ過速に及ぼす電気浸透の効果は、電気泳動のそれに比して小さいので、脱水に及ぼす電気浸透の効果は無視できるものとする。個体粒子の沈降速度は十分小さいので、ケーキ厚の鉛直方向の相違を無視する。

2 理論解析手順

- 1) Ruthのろ過式に従い、定圧ろ過時におけるろ液量 V_s の時のケーキ厚み l を求める。
- 2) 電気泳動速度式より、電気印加時の電気泳動による固体粒子の移動距離 t_E を求め、ろ液量が V_s の時の陰極側のケーキ厚さ l_c を $l_c = l + at_E$ と定義する。但し a は実験定数

- (3) 電気印加効果によるケーキ厚み増加分(at_E)はケーキの空隙率が増加したと考えKozeny-Carman式を適用し、ろ液流速 u_c の増加を予測する。結果は定圧ろ過時の見かけ脱水速度 u との比で求める。

1.3 理論解析

Ruthの定圧ろ過式は次の(1)(2)式で表される。

$$(V + V_m)^2 = K_v(\theta + \theta_m) \quad (1)$$

$$K_v = \frac{2A^2 P(1 - m \cdot s)}{\mu \alpha_{av} \rho \cdot s} \quad (2)$$

ここで、 K_v [m⁶/s]はRuthの定圧ろ過係数、 θ_m [s]は仮想ろ過液量 V_m を得るのに要する仮想ろ過時間で $V_m^2 = K_v \cdot \theta_m$ の関係がある。

今ケーキの平均空げき率を ϵ_{av} [-]、個体密度を ρ_s [kg/m³]とすると次式が成立する。

$$W_s = AL(1 - \epsilon_{av})\rho_s \quad (3)$$

また、任意のろ過時間 θ におけるろ液量 V とケーキ固形物質量 W_s との関係はケーキ内の物質収支より次式で与えられる。

$$W_s = \frac{\rho \cdot s}{(1 - m \cdot s)} \cdot V \quad (4)$$

この(3)式と(4)式よりケーキ厚さ L [m]が求まる。

$$L = \frac{\rho \cdot s}{\rho_s(1 - \epsilon_{av})(1 - m \cdot s)} \cdot \frac{V}{A} \quad (5)$$

また(1)式より(6)式が得られ、(7)式が求まる。

$$\frac{d\theta}{dV} = \frac{2}{K_v}(V + V_m) \quad (6)$$

$$\frac{\theta}{V} = \frac{1}{K_v} \cdot V + \frac{2V_m}{K_v} \quad (7)$$

一方、電圧を印加した場合の平均空隙率を $n_c \cdot \epsilon_{av}$ で表すと(8)式の Kozeny-Carman 式をろ液流動基礎式に代入した式³⁾は、陰極側の見かけ脱水速度 u_c を与える(9)式となる。

$$u = \frac{\rho_s \epsilon_{av}^3}{k S_0^2 (1 - \epsilon_{av})} \cdot \frac{\partial P_L}{\mu \rho_s \partial \omega} \quad (8)$$

$$u_c = \frac{\rho_s (n_c \epsilon_{av})^3}{k S_0^2 (1 - n_c \epsilon_{av})} \cdot \frac{1}{\mu \rho_s} \left(\frac{\partial P_L}{\partial \omega} \right)_{\omega=0} \quad (9)$$

ここで、 $n_c \epsilon_{av} < 1 - s$ である。ケーキ内の個体質量が同一ならばケーキの平均空隙率にかかわらず $\frac{\partial P_L}{\partial \omega} \Big|_{\omega=0}$ は同一なので、定圧圧搾のみの場合の見かけ脱水速度 u との比として

$$\frac{u_c}{u} = \frac{(1 - \epsilon_{av})}{(1 - n_c \epsilon_{av})} (n_c)^3 \quad (10)$$

を得る。

ここで、陰極側のケーキ厚さ l_c を

$$l_c = l + at_E \quad (11)$$

と仮定すれば、質量保存則

$$\frac{l_c}{l} = \frac{1 - \epsilon_{av}}{1 - n_c \epsilon_{av}} \quad (12)$$

より n_c を与える(13)式を得る。

$$n_c = 1 + \frac{\left(\frac{1}{\epsilon_{av}} - 1 \right) \frac{at_E}{l}}{1 + \frac{at_E}{l}} \quad (13)$$

ここで、 a は実験定数である。液の移動距離に相対的な電気泳動による個体粒子の移動距離 t_E は、(14)式に示した電気泳動速度⁶⁾

$$u_E = \frac{\zeta \epsilon_E H}{\mu} \quad (14)$$

を用いて(15)式で定義する。

$$t_E = \int_{\theta_{st}}^{\theta_s} u_E \cdot d\theta_s \quad (15)$$

ここで

A : ろ過面積 [m^2]

P : ろ過圧力 [Pa]

m : 湿乾質量比 = $\frac{\text{湿潤ケーキ質量}}{\text{乾燥ケーキ質量}}$ [—]

S : スラリーの個体質量分率 [—]

μ : ろ液粘度 [Pa·s]

ρ : 液体の密度 [kg/m^3]

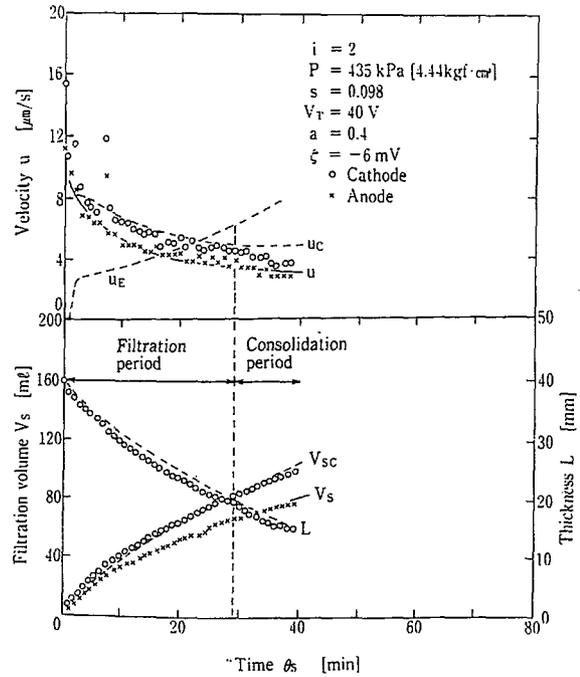
k : Kozeny 定数 [—]

S_0 : 位置 ω における粒子有効比表面積 [m^{-1}]

P_L : 局所過剰液圧 [Pa]

n_c : 定数

ϵ_E : 液の誘導率 [F/m]



第1図 ろ過曲線 ($V_T = 40V$, $i = 2$, $s = 0.098$)

Fig. 1 Relations between Filtration volume and Velocity vs. Time

ζ : 粒子のゼータ電位 [V]

H : 電解の強さ [V/m]

ω : ケーキ底面から任意の位置までに存在する単位面積当たりの正味個体積 [m]

次に実験により a を定める。

2. 実験

2.1 実験方法

片面脱水 ($i=1$) と両面脱水とが可能な内径95 mmの横軸形小形カラム実験装置³⁾を使用した。一定の初期厚さのカラムに、個体粒子の比重2.24, メディアン径33 μm , ゼータ電位 $\zeta = -6 mV$ である上下汚泥を封入後、一定圧搾圧力 $P = 435 kPa$ 下で、一定の直流電圧 $V_T = 40 V$ を印加する。圧搾時間 θ と脱水ろ液量 V やケーキの厚さ L の関係を求めるには、

$$\theta_s = \theta - 60, \quad V_s = V - V |_{\theta_s=0} \quad (16)$$

を用いる。従って Ruth の式は

$$(V_s + V_m)^2 = K_v (\theta_s + \theta_m) \quad (17)$$

となる。

2.2 実験定数 a の計算方式

脱水に関する電気泳動の効果に関する理論の予測値を求める手順は次の通りである。

(1) 定圧圧搾の実験値より、 m や(7)式中の K_v , V_m ならびに θ_m をもとめる。

(2) 電気泳動の効果が現れるに要する時間遅れ θ_{st} における L ならびに $\zeta = -6 mV$, $\epsilon_E = 6.95 \times 10^{-10} F/m$

を用いて(14)式より u_F を求める。

- 3) 時間 $\Delta\theta_s = 1$ 分経過ごとに t_B , l を求めた後、電圧印加のない場合の u を利用して、種々の実験定数 a に関して u_c を予測する。
- 4) 以上の手順を、ろ過期間終了まで繰り返す。
- 5) 理論の予測値と実験値とを比較・検討することにより最適な実験定数 a を見いだす。

理論と実験との比較

電気泳動効果が現れるに要する時間遅れの実験値を用い理論式(10)と(13)とより予測値を求め、実験と比較した結果第1図に示す。第1図で V_{s0} , u_c の破線は $a=0.4$ としたの電圧印加時における理論値で、○印及び×印は(−)側と(+)極側の実験値である。 u , V_s は定圧ろ過実験の脱水速度及びろ液流量である。

第1図より電圧印加時のろ過速度 u_c は電圧印加のない圧ろ過の場合のろ過速度 u に比べて $\theta_s = 20$ 分の時、約%の増加となる。また(+)極側のろ過速度は定圧ろ過速度 u とほぼ同じであることが判る。

そして第1図より電圧印加直後の数分間と、圧密期間(Consolidation Period)を除けば、実験定数 $a=0.4$ のと理論値 u_c は実験値とよい一致を示す。

考 察

第1図より u_c の解析値と実験値の違いが、ろ過期間(Filtration Period)終了時近辺から現れはじめることができる。特に圧密期間(Consolidation Period)に入ってからはその差が増大している。これは圧密期間に入ると粒子移動が拘束され電気泳動効果は消えて、電気浸透効果がはじめるためと思われる。

従って、本稿で述べた解析式は電圧印加直後の数分間か、ろ過期間終了近辺までが適用範囲と考えられる。電圧印加直後の数分間は、 u_c の解析値と実験値が大きく異なるが、この原因は粒子の衝突や気泡その他の影響等により動効果が現れるのに時間を要するためと思われる。

す び

電気浸透式加圧脱水機は、もちろんその名の通り電気浸透現象を利用して脱水の促進をはかるものであるが、本稿

で述べたように上水スラッジを対象にした場合には電気泳動現象の効果も非常に大きいことが判る。

電気泳動・浸透現象は1808年に発見され、多くの基礎的研究や実用化等が試みられたが、長い間産業機械用脱水機としての電気浸透脱水機は完成されなかった。

その主な原因としては次のことが考えられる。

- (1) 電気浸透法による液移動のスピードは非常に遅いため脱水に時間がかかり、処理性能が低く、装置が大型化し、設備費が高くなった。
- (2) 電気浸透効果のみに目が向けられ電気泳動効果に対する認識が薄かったため圧力との効率的な併用や、電流、電圧等のかけ方等の工夫が不足しており、特に電気代が高くつき経済的でないと思われていた。
- (3) 電気浸透式脱水機の心臓部である電極において、安価で長寿命のものが開発されなかった。
- (4) 電気浸透脱水法は、この原理単独での実用は困難で、他の機械的脱水法と組み合わせて実用化が試みられたため、装置が複雑となり、自動化及び材質面、安全面等で完成度の高い装置が要求されたが、それまでの技術では対応が難しかった。

私共は、前述の点に鑑み、各種の改良を行って、現在では出願中をも含めて46件の特許(内、海外4件)を出願するなど各種の方法で解決してきた。本稿で述べた電気泳動効果に注目した解析方法も、これらと同様に少しでも今後の電気浸透脱水技術の発展に貢献できれば幸いである。

[参考文献]

- 1) Wakeman, R, J : Filtration & Separation, 316, (1982)
- 2) Yukawa, H. et al : J. Chem. Eng. Japan, 9, 396, (1976)
- 3) 近藤史朗 : 京都大学学位論文, 電気浸透脱水法に関する研究, p. 19-42, (1994)
- 4) 近藤史朗, 中村克孝 : 化学工学会秋田大会研究発表講演要旨集, p. 130-131, (1993-8)
- 5) 白戸紋平 : 化学工業, 機械的操作の基礎, p.170, 丸善, (1980)
- 6) D.H. Everett (関集三 : 訳) : コロイド化学の基礎, p.90-93, 化学同人, (1992)