

## II-14 土中水の電気浸透的流動と脱水機構

日本大学理工学部 准員 浅川美利

1. 概要 電気浸透による土中水流動の因子や脱水機構などの基本的問題に触れ、その理論的解析や実験によって得た結果を報告する。取り扱いとして次のような点を挙げ、それぞれについて考察した。

(1) 電気浸透式として一般に表わされている、 $v_e = \text{const.} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{E}{l}$  の個々の関数はどんな界面要因によって支配されるか。また一般の土が有する電荷 ( $\rho/\text{const.}$ ) とそれと支配する主な原因は何か。

(2) 動水的流動 ( $q_R = A \cdot i_R \cdot R_R$ ) と電気浸透的流動 ( $q_e = A \cdot i_e \cdot R_e$ ) との相似点と相異点。両浸透係数 ( $R_R$  と  $R_e$ ) の関係。

(3) 電気浸透脱水機構と水槽排水の類似解析。

(4) 脱水過程と電流値減少過程の類似性。

(5) 脱水による土の収縮機構と圧密促進のための有用性。

以上の各項を検討した結果について述べる。

### 2. 電気浸透現象とは

固相と水が飽和或は全面附着しているような土の毛管系では毛管表面の液相に吸着が固体の解離によるカのイオンによって  $e =$

$\rho/\text{const.}$  となる電荷をもつ電気二重層が形成される。この界面が直流電場におかれるとその電荷と電場のポテンシャルによって電気力 ( $e \cdot E/2$ ) を生ずる。その力は壁に固着していない二重層部分 (拡散層) の水を流動せしめる。この流動は自由水の流動を誘引するので毛管中の水全体が流れるものだと考えられている。

### 3. 電気浸透における流動と脱水の区別

ここでいう流動と脱水は次のような理由によりとづいて区別した。

流動：毛管中を移動した水が地の側から等量流入し、液損失がないもの。

脱水：移動しただけの水量が毛管中で損失するもの。従って水位の变化が刻々記し、位置エネルギーの減少によって流速が減ずる水槽中の水の放出に類似する現象である。

### 4. 電気浸透流動と動水流の相似と相異

毛管中を流れる液の流量に関し、電気浸透流と動水流とを比較するに、

$$q_e = R_e \cdot i_e \cdot A, \quad q_R = R_R \cdot i_R \cdot A \quad \dots \dots \dots (1)$$

表-1 動水流と電気浸透流の相似点と相異点

| 要 因 比 較                                    | 動 水 的 流 動                                                                                                                                            | 電 気 浸 透 的 流 動                                                                                                                                                                               | 備 考                                                                                   |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 浸透の原因                                      | 動水圧力                                                                                                                                                 | 電場と界面二重層の電荷による電気力                                                                                                                                                                           | 電気エネルギー → 運動エネルギー<br>位置エネルギー → 運動エネルギー                                                |
| 流速分布の形状                                    | 拋物線形状                                                                                                                                                | 二重層部分 (固着層を除く) が拋物線状、自由層部分は最大速度と直線形。                                                                                                                                                        | 相対的に毛管壁面に垂直な流速分布。<br>完全な拋物分布。(相異)                                                     |
| 浸透係数<br>(ディメンジョン)<br>支配条件<br>或は透水係数<br>前件量 | $\text{cm}^2/\text{sec} \text{ (L} \cdot \text{T}^{-1}), \left(\frac{\text{cm}^2 \cdot \text{dyne}}{8\eta}\right)$<br>毛管形状、半径及び液の物理量<br>毛管形状、半径支配する。 | $\frac{\text{cm}^2}{\text{sec} \cdot \text{rad/cm}} \left( \frac{\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{E}^{-1}}{\text{const.} \cdot R_e} \right)$<br>界面の電気的性質と液の物理量<br>毛管形状と直接関係をもたない。 | 単位ポテンシャルに対して同じ。(相似)<br>電気浸透では毛管径は直接影響しない<br>動水流では毛管径が比例する。(相異)                        |
| ポテンシャル                                     | $i_R = H/l$ (無名数)                                                                                                                                    | $i_e = E/l$ (rad/cm)                                                                                                                                                                        | 共にポテンシャルの大小に比例する。(相似)                                                                 |
| 流動効果                                       | $q_R/A \cdot l = R_R \cdot i_R/l$<br>毛管径の大小に比例<br>(細粒土に対して小)                                                                                         | $q_e/A \cdot l = R_e \cdot i_e/l$<br>毛管径には無関係<br>(細粒土に対して大)                                                                                                                                 | $i_R, i_e$ が共に相似するから、支配条件は $R_R, R_e$ となる。<br>従って $R_R$ は毛管径に依存するに反し、 $R_e$ は無関係。(相異) |

いま見掛けの加電面(加水面)を $A$ 、長さ $L$ とし、上の同ゲキ比を $E$ とすると、(1)式の $A_0$ 及び $i_e, i_R$ はそれぞれ $(\frac{S}{S+e})A, \frac{S}{S+e}L$ 及び $\frac{H}{S+e}$ となる。但し $\alpha$ は毛管変曲度で、実毛管長さを $l=\alpha \cdot L$ としたものである。以上のことから(1)式は、

$$\left. \begin{aligned} j_e &= j_{e0} \cdot (\frac{S}{S+e}) A \cdot (\frac{H}{S+e}) \\ j_R &= j_{R0} \cdot (\frac{S}{S+e}) A \cdot (\frac{H}{S+e}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式中 $E$ 及び $H$ は電場電圧及び水頭である。また $j_e$ (電気浸透係数) $= (\frac{q}{q_0}) \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \text{const}$ ,  $j_R = \frac{F^2 \cdot \gamma}{8 \pi \eta}$  (Poiseuilleの式と透水係数)。 $\gamma$ : 電媒常数(一般に水は81),  $\eta$ : 粘性,  $r$ : 毛管半径,  $\gamma_0$ : 水の単位体積重量及び $\text{const}$ : 一般に $4\pi$ 。両者の相似度と相異度は表-1のようになる。

## 5. 電気浸透に關与する因子の分析

表-2は(2)式の個々の関数に対し、それに影響すると考えられる界面の物理的、化学的因子を分類したものである。

電気浸透を支配する(界面の性質中)ものはポテンシャルである。実験では個々の要因についてその変化を検べ、一般に電気浸透が適用される上の個有値などを求めてみた。

## 6. 電気浸透脱水理論

### A) 脱水の時局過程

\* 図-1(a)に示すような水で飽和された毛管を電場におくとき、一方の極に向って流れる水の移動速度は図-1(b)に示す水槽の水位変化と類似するものである。両者の差異は位置エネルギーの性格のみである。従って電気浸透の場合の位置エネルギーの変化を考えると、時局過程は全く同じ解析となしう。

解析に先立ち次の仮定をおく(図-1(b)参照)。

- (1) 水の速度分布を直線状とする。
- (2) 有効電圧は②に加わる電圧( $E' = E - \Delta E$ )で、④の固着水は電導のみで有効である。
- (3) ④の電導度を $\lambda$ , ②の電導度を $\lambda'$ とする。
- (4) 脱水中温度及び界面性質の変化はない。電気浸透による水の移動速度は;

$$\left\{ \begin{aligned} t=0 \text{ (初期)} \text{ 時, } v_e &= j_e \cdot i_e, (i_e = \frac{E}{L}) \\ t=t' \text{ (任意の時間)} \text{ 時, } v_e' &= j_e \cdot i_e', (i_e' = \frac{E-L}{L}) \\ t=T \text{ (毛管の全長に達する時間)} \text{ 時, } v_e' &= 0 \end{aligned} \right.$$

いま境界面 $m-n$ が $dl$ 移動するに要する時間を $dt$ とするとき、 $v_e' = -\frac{dl}{dt} \dots\dots\dots (3)$

(3)式と $t=t'$ における連立条件より、

$$-\frac{dl}{dt} = j_e \cdot \frac{E-L}{L} = j_e \cdot \frac{E}{L} \dots\dots\dots (4)$$

②の有効電圧は、電導度と $\lambda$ , 電気抵抗と

$$R \text{ とすると, } E' = R \cdot i = (\frac{L}{A \cdot \lambda}) i \dots\dots\dots (5)$$

④の損失電圧は、 $\Delta E = E - E' = (\frac{A \cdot \lambda}{A_0 \cdot \lambda'}) i \dots\dots\dots (6)$

(5)及び(6)式より $E, E'$ の関係は;

$$E' = \frac{E}{(\frac{A \cdot \lambda}{A_0 \cdot \lambda'}) - (\frac{A \cdot \lambda}{A_0 \cdot \lambda'}) + 1} \dots\dots\dots (7)$$

表-2 電気浸透の関数とそれに影響する因子

| 因子       | 数     | 界面動電位<br>$\zeta$ (volt) | 浸透係数<br>$D$ | 粘性<br>$\eta$ (poise) | 電場の強さ<br>$E/L$ (volt/cm) | 組織係数<br>$\text{const. (dyne)}$ | 備考                                      |
|----------|-------|-------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 液の性質     | 種類    | ◎                       | ●           | ●                    |                          |                                | イオンの和濃度に關係し、移動の速さを左右する。                 |
|          | 濃度    | ◎                       | ●           | ●                    |                          |                                | 固相に結合する体の強弱に關係する。                       |
|          | 温度    | ○                       | ●           | ●                    |                          |                                | 液の物理的性質に影響大。                            |
| 固体の性質    | 鉱物成分  | ○                       |             |                      |                          |                                | 固体の解離に關係する。                             |
|          | 粒子の散状 |                         |             |                      |                          | ●                              | 粒子の形および濃数に變化する。 $(D \propto \eta)$ の考え。 |
| 電場の強さ    |       |                         |             |                      | ◎                        |                                | 界面条件が同じ時、浸透は比例する。                       |
| 毛管構造と粗密度 |       |                         |             |                      | ○                        |                                | 毛管長さがポテンシャルを支配する。浸透量は有効面積が影響する。         |
| 備考       |       | 電気浸透を支配する数              | 毛管の表面積に比例する | 左に同じ                 | 外的条件としての支配数              | 通常 $4\pi \text{ const}$        |                                         |

註: 表中◎は影響が最大, ○普通, ●支障には一定の見做らるもの。

(7)式を(4)式に代入して、

$$-\frac{dL}{dt} = R_e \cdot \frac{1}{L} \left\{ \frac{E}{(\gamma/\kappa)(4L) - (\gamma/\kappa) + 1} \right\} \quad (8)$$

cndまでの脱水を考え、LをsL, sが積分すると、

$$t = -\frac{1}{R_e E} \int_L^{L_0} \left\{ (\gamma/\kappa)L - (\gamma/\kappa)L + L \right\} dL = \frac{1}{2R_e E} \left\{ 2L(\gamma/\kappa)L - L^2 + (\gamma/\kappa - 1)L^2 \right\} \quad (9)$$

t=T(脱水完了)は(9)式にてL=0であるから、

$$T = \frac{1}{2R_e E} \left\{ L^2 \cdot \frac{\gamma + \gamma'}{\gamma} \right\} \quad (10)$$

## B) 任意の時間の理論脱水量

任意の時間までの脱水量は $g_r = \Delta L \cdot A_v$ である。

$\Delta L$ は(9)式より得られ、

$$g_r = (L - L_0) \cdot A_v = \frac{A_v \cdot \left\{ L^2 - \gamma L + \sqrt{L^2 - \gamma L + 2R_e E T \gamma (\gamma - \gamma')} \right\}}{\gamma - \gamma'} \quad (11)$$

よって理論脱水速度 $v_e'$ は、

$$v_e' = \frac{R_e \cdot E}{\sqrt{L^2 - (\gamma - \gamma')L} \cdot 2R_e E T} \quad (12)$$

## C) 電流値の時間変化

適用電圧Eを一定とすると、脱水が進むに従って $\gamma/\kappa$ が変化するので、電流値は時間と共に減少する。初期電流を $i_0$ 、t時後の電流を $i_t$ とすると、(5)及び(6)式より、

$$\frac{i_0}{i_t} = \frac{L\gamma - L(\gamma - \gamma')}{L\gamma} = \frac{\sqrt{L^2 - \gamma L + 2R_e E T \gamma (\gamma - \gamma')}}{L\gamma} \quad (13)$$

脱水完了時の電流を $i_T$ とすると、(10)式より

$$\frac{i_0}{i_T} = \frac{\gamma}{\gamma'} \quad \text{となるから、} i_T \text{を実測から得ると、} \gamma' = \gamma \left( \frac{i_0}{i_T} \right) \text{を知ることが出来る。}$$

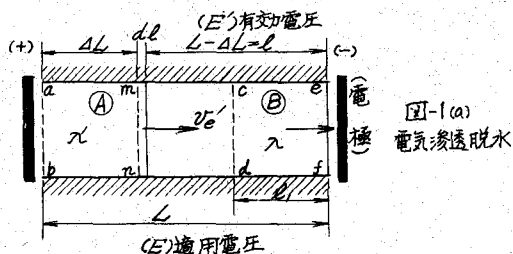
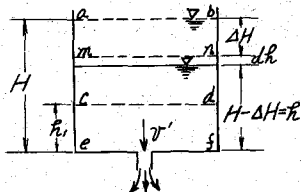


図-1 (b) 水槽中の水の排水



## 7. 収縮機構の現象的考察

電気浸透による土の収縮は 蒸発による土の収縮機構と類似するものである。

土粒子骨格(毛管壁)に及ぼす圧縮力 $C_p = \pi F T \cos \alpha$ はメニスカスによる表面張力であり、膨張力 $C_s = A_v \gamma_w R_c$ は毛管中の静水圧による。

従って土の収縮は脱水によって両力の平衡が破れて起り( $C_p > C_s$ )、脱水の進捗に伴って進展し、 $C_p$ が骨格圧力 $C_r$ (土の固有値)に等しくなると完了する。蒸発速度は相対湿度が一定ならば一定の収縮を起すはずであるが、電気浸透では一定加電では漸次脱水速度が減少するので、収縮速度も遅くなる。(省略)

## 8. 試験方法、装置及び試料

### A) 電気浸透流動の実験

(1) 測定槽: 40x15x7cmの寸法で、厚5mmのベークライト製のもの(一面ガラス板)。

(2) 試料及び液: 精純な相模砂を4800~200 $\mu$ mまでの標準網フルイで分け、それを適当に配合したものを用いた(土自身の電解質の未知影響を除くため)。試験時の試料条件として、使用液0.005N KClで水締り、最良相対比とした。

(3) 電源: 電源能力を大きくし、整流を適切にするために図-1(a)のような半波回路を用いた。

電極には有孔炭素板を用いた。

### (4) 測定方法:

測定中試料は常に飽和した。

浸透水は陰極側に集まり、移動水量を溢流パイプから流出するようにして測った。

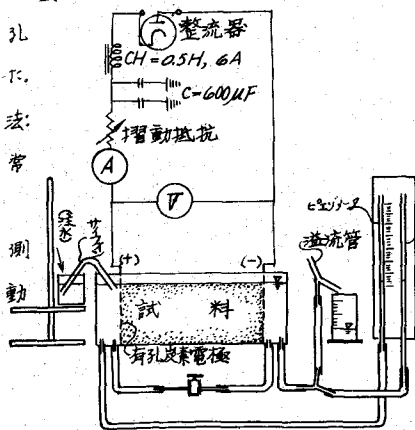
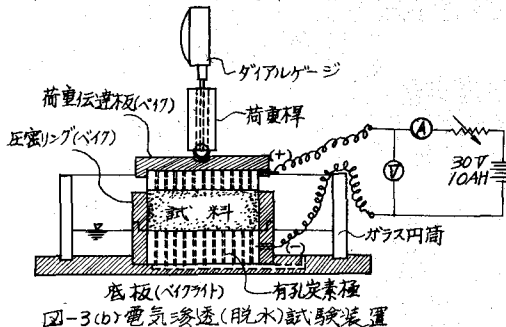


図-3(a) 電気浸透(流動)試験装置

## B) 電気浸透脱水の場合

(1) 装置: 図-3(a) のような固定リング式圧密装置(リング外径50mm, 高さ17mmのベリ製)を用いた。必要に応じマレー式荷重装置を用いた。

(2) 粘土(埼玉)一種を用い, 初期条件を一揃とするため $\Delta L$ テスターによって40回叩数とレタ詰めた。使用水は蒸留水になった。



(3) 電源及び回路: 回路は流動の場合と同く電源には30V, 10Ahrの蓄電池を用い, 加電圧は常に一定とし, 電流値のみの読みを記録した。電極は透水板と兼ねる有孔炭素板を用いた。

## 10. 結果の考察

図-4~5は電気浸透脱水による収縮実験の結果の一例を示すもので, これより一連の実験から次のようなことを知ることができた。

(1) ポテンシャルの大きい程, 収縮速度が速い。一般に一時冒みでどのポテンシャル下でも脱水が終了し, 収縮過程は収斂する。

(2) 収縮過程と電流比( $i_t/i_0$ )の時間過程は形状的に全く相似する。

(3) 通電時間によって増すが, 増加率は時間経過に従って減少する。

(4) 透水度の極めて小さい土の圧密を促進する効果があると共に, 二次圧密を減ずる。

(5) 載荷と通電との併用は圧密量を大きくし, その最終量は個々の最終量を合計したもののよりはるかに大きい。

図-4 いろいろな電圧による時間-収縮の関係

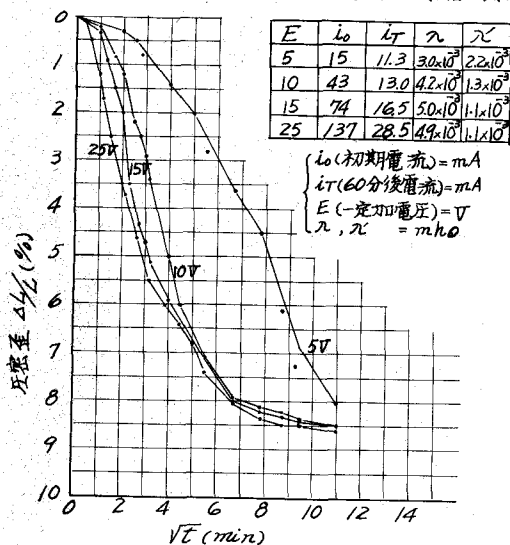
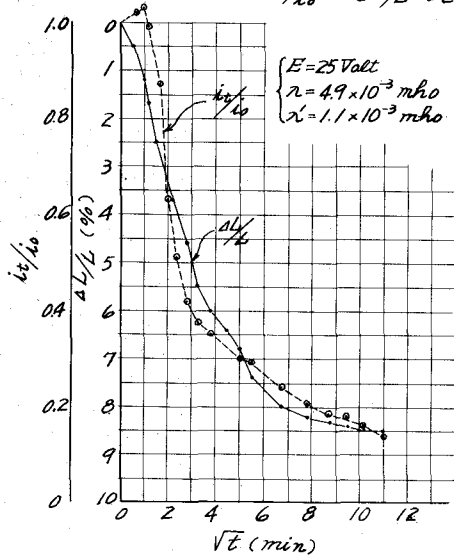


図-5 ある電圧下での  $i_t/i_0$ - $t$  と  $\Delta L/L$ - $t$  の比較



本研究は 日本大学教授岡山道三先生の御教示を得て行なったもので, ここに改めて御礼申し上げる次第である。また実験及び整理など多大の協力を惜まれないに本学土木工学科学生倉田文一郎, 新海武, 岡本照及び中村勉君に負うところ大であった。

なほ本研究は昭和32年度文部省科学研究費(當山教授各個人研究)の援助を受け行なったもので, ここに深謝の意を表する。