

粘土の電気浸透による脱水工法の一考察*

正 員 三 瀬 貞**

ON THE ELECTRO-OSMOTIC DEHYDRATING PROCESS OF CLAY

By Tadashi Mise, C.E. Member

Synopsis : On the basis of the theory and experiments previously reported by the author, the electro-osmotic dehydrating process of clay was studied.

This process was done under an arrangement of electrodes, in which an anode was set at each apex of the regular hexagon and a cathode was set at a centre of this hexagon.

In this study, the results of the experiments and the theory were coincidence with each other for clay deposited in Osaka Bay.

要 旨 さきに発表した土の電気浸透による脱水の実験および理論的考察¹⁾の結果にもとづき、実際に軟弱粘土質地盤を電気浸透により脱水し、安定化をはかる場合の方法について、6本の陽極を正六角形の各頂点に、1本の陰極をその中心に配置した形式を用いて、その脱水過程を理論的・実験的に考察した。

この場合、大阪湾海底粘土を用いた実験においては、理論にもとづいて計算した値と、実測値とがきわめてよい一致を示すことを確かめることができた。

1. ま え が き

いわゆる土の電気的安定処理工法は、歴史的にみると、最初電気化学的固結法を目的、対象として研究が始められたものが、次第に電気的脱水を利用する方向に移行していったものようである。すなわち、それは、Casagrande, L.²⁾の特許にかかる粘土質軟弱地盤の電気化学的固結法に始まるといえる。彼の方法は、金属極を用いて粘土を固結することを主目的としたもので、Endell, K.³⁾ Hoffmann, U.⁴⁾らは化学分析およびX線的方法に鉱物化学的検討を加えて、その固結の原因を土の電気浸透脱水による含水比の低下、土と電極金属とのイオン交換作用および土粒子間げきに析出充填される金属酸化物の鉱物化(アルミ極の場合は、Bauxite($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)の生成)に帰した。これについて、Erlenbach, L.⁵⁾, Casagrande, L.⁶⁾らの研究がこのような方向で進められたが、電気浸透本来の研究としては、Bernatzik, W.⁷⁾が圧密試験器を用い、これに直流を加えて電気浸透による脱水過程を研究し、強度の増大することを報告したことに始まる。ついで、Casagrande, L.⁸⁾が初めてドイツの鉄道路盤およびアウトバーンで電気浸透脱水を安定工法として採用し、また、Schaad, W., Haefeli, R.⁹⁾らが電気浸透脱水の基本式を立てた。Prece, E.F.¹⁰⁾は圧密試験に電気を重畳させて実験し、その有効性を述べ、Winterkorn, H.F.¹¹⁾は電気浸透と熱浸透の類似について述べた。その他、Bernatzik, W.¹²⁾は電気浸透圧について述べ、Geuze¹³⁾らは3軸圧縮試験機を応用して電気浸透の土の強度におよぼす影響をみ、Dawson, R.F.¹⁴⁾, Vey, E.¹⁵⁾らは前記Preceに準じ、圧密試験器型の電気浸透脱水試験を実施し、さらに、Casagrande, L.¹⁶⁾, Steinfeld, K.¹⁷⁾, Belluigi, A.¹⁸⁾は電気浸透の実際の応用について研究した。

以上のように、多くの努力がなされたにもかかわらず実際の工事は、ほとんど経験とカンに終始し、技術的にも、学理的にも見るべき進展がなされなかったものといえよう。

前報¹⁾にも述べたように、土質工学において、軟弱粘土質地盤の脱水を主目的として行なういわゆる電気浸透脱水は、厳密な立場では、電気浸透現象と呼ばれ得るかどうか、はなはだ疑問といわなければならない。従来、この点に関しては、ほとんどすべての研究者が無批判的に電気浸透現象として、界面電気化学で得られる電気浸透についての諸知見を用いて、実験的および理論的研究を展開しているものようである。したがって、界面電気化学で用いられる電位なる概念をそのままこの現象の解析の中に取り入れているが、もともと電位そのものがきわめてあいまいなものであり、われわれはこれを直接的に、把握する方法を持たないといわなければならない。また、もし、電気浸透現象が電位に起因するものだとすると、上述の土に直流を印加して脱水をはかる方法が電位にのみ起因するものとは必ずしも断定できない問題である。すなわち、この場合、電位にもとづく浸透現象よりも、電気分解にもとづくその他の諸現象の方がより大きい影響を与えるものであるとの考えを否定

* 第9回応用力学連合講演会にて一部発表

** 工学博士、大阪市立大学助教授、工学部土木工学教室

することはできないであろう。これらの点は、界面電気化学的にきわめて興味のある問題点であるが、反面複雑な因子がからみ合っていて、その間の法則性をみ出すことは、非常に困難な事がらといわなければならない。これらのことより、土に直流を印加して主として浸透水を利用して脱水を行なう工法に厳密な意味での名称をつけることはきわめて困難と考えられるのであるが、交流を加え主としてジュール熱を利用して脱水をはかる電気的脱水工法と区別するという通俗的な意味で、本報告でも、従来の電気浸透による脱水工法という呼び方をそのまま用いることにした。

著者は、以上のようないわゆる土の電気浸透による脱水工法について、6本の陽極を正六角形の各頂点に、1本の陰極を中心に配置した形式を用いて、大阪湾海底粘土の脱水過程を実験的に研究し、主として現象論的立場より、その脱水の機構を明らかにし、施工に対する設計および管理上の指導原理ともいうべきものを確立することができたものと考えている。

2. 基礎理論

粘土質軟弱地盤の安定をはかるために、電気浸透による脱水工法を応用することが試みられているが、実際にこの工法を粘土質軟弱地盤に適用する場合は、有孔電極を図-1のように地中にそう入し、負極より排水する形式の取られる場合が多い。そこで、この形式における粘土の電気浸透による脱水過程について、Barron¹⁹⁾、矢内・水野・木庭²⁰⁾および高木²¹⁾氏らの論文を参照して理論的考察を行なつてみることにした。

図-1のように、電極を千鳥形に配置したものとすると、1本の陰極への流入区域は正六角形となるが、これらを等面積の円で置きかえて考える。円周上に陽極が配置されているので、円周を横切る流れは存在しないと仮定してもさしつかえない。

鉛直方向への電気浸透透水系数を k_{ev} 、電気浸透係数を C_{ev} 、水平方向におけるそれらをそれぞれ k_{eh} 、 C_{eh} とする。各点の有効電圧(印加全電圧のうち、電気浸透に有効に使われるものを有効電圧)と¹⁾いう。有効電圧でないものは、例えば熱として消費される。)を E とすると、有効電圧 E の基本方程式は、直交座標 x, y, z により次のように示される。 t は、時間を表わす。

$$C_{eh} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right) + C_{ev} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

いま、鉛直方向の流れを無視し、円筒座標を用いると、

$$C_{eh} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} \right) = \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

となる。 $R(r)$ を r のみの関数、 $T(t)$ を t のみの関数として、(3) 式をおけば、(4) 式および(5) 式が得られる。

$$E = R(r) T(t) \dots\dots\dots (3) \quad T(t) = e^{-k^2 C_{eh} t} \dots\dots\dots (4) \quad R(r) = A J_0(kr) + B Y_0(kr) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 k は定数で、 J_0 は0次の第1種ベッセル関数、 Y_0 は0次の第2種ベッセル関数、 A, B, C は積分定数を示す。ゆえに、(2) 式の解はつぎのようになる。

$$E = \sum_k \left\{ A_k J_0(kr) + B_k Y_0(kr) \right\} e^{-k^2 C_{eh} t} \dots\dots\dots (6)$$

これをつぎのようにおく。

$$E = \sum_k A_k V_0(kr) e^{-k^2 C_{eh} t} \dots\dots\dots (7)$$

r_e における境界条件は、

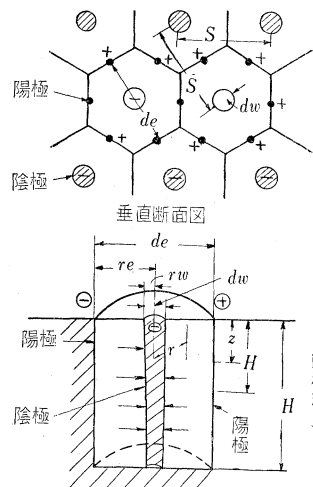
$$r = r_e \text{ で } \frac{\partial E}{\partial r} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

で示される。しかるに、(6), (7) 式より

$$\frac{\partial E}{\partial r} = - \sum_k \left\{ A_k J_1(kr) + B_k Y_1(kr) \right\} e^{-k^2 C_{eh} t} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ただし、 J_1, Y_1 はいずれも1次のベッセル関数である。よつて、(8) の条件を用いれば、

図-1 電極配置図
平面図



$$A_k J_1(kr_e) + B_k Y_1(kr_e) = A_k V_1(kr_e) = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore B_k = -A_k \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} \dots\dots\dots (11)$$

を得る。\$r_w\$ における境界条件は、

$$t > 0, r = r_w \text{ で } E = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{すなわち, } A_k J_0(kr_w) + B_k Y_0(kr_w) = A_k V_0(kr_w) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

となる。よつて、(10) 式と (13) 式とが連立になりたつためには

$$\frac{J_1(kr_e)}{J_0(kr_w)} = \frac{Y_1(kr_e)}{Y_0(kr_w)} \dots\dots\dots (14) \text{ または, } \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} = \frac{J_0(kr_w)}{Y_0(kr_w)} \dots\dots\dots (15)$$

なる関係が存在すべきであり、これから \$k\$ が決定される。あるいは (15) 式において

$$\frac{r_e}{r_w} = n, kr_w = \alpha, kr_e = n\alpha \dots\dots\dots (16) \text{ とおけば, } \frac{J_1(n\alpha)}{Y_1(n\alpha)} = \frac{J_0(\alpha)}{Y_0(\alpha)} \dots\dots\dots (17)$$

となり、これから \$\alpha\$ を決定してもよい。

次に、初期通電時の \$E\$ を \$E_0\$ とし、\$E_0 = f(r)\$ とおけば、初期条件として次の関係を満足すべきである。

$$t = 0, E = E_0 = f(r) \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{ゆえに, } f(r) = \sum_k A_k \left\{ J_0(kr) - \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} Y_0(kr) \right\} = \sum_k A_k V_0(kr) \dots\dots\dots (19)$$

がなりたつ。しかるに、\$V_0(kr)\$ は円筒関数であるから、両辺に \$rV_0(k'r)\$ を乗じて積分すると次のようになる。

すなわち、\$k \neq k'\$ の場合は

$$\int_{r_w}^{r_e} A_k V_0(kr) V_0(k'r) r dr = \frac{A_k}{k^2 - k'^2} \left[rk V_0(k'r) V_1(kr) - rk' V_0(kr) V_1(k'r) \right]_{r_w}^{r_e} = 0$$

となるから、\$k = k'\$ の値のみが残り

$$\int_{r_w}^{r_e} f(r) V_0(kr) r dr = \int_{r_w}^{r_e} A_k V_0^2(kr) r dr \quad \therefore A_k = \frac{\int_{r_w}^{r_e} f(r) V_0(kr) r dr}{\int_{r_w}^{r_e} V_0^2(kr) r dr} \dots\dots\dots (20)$$

で、\$A_k\$ が決定されることになる。特に、

$$E_0 = f(r) = \text{一定} \dots\dots\dots (21)$$

とすると、

$$\int_{r_w}^{r_e} E_0 V_0(kr) r dr = E_0 \left[\frac{r}{k} V_1(kr) \right]_{r_w}^{r_e} = -E_0 \frac{r_w}{k} V_1(kr_w) \dots\dots\dots (22)$$

$$\int_{r_w}^{r_e} V_0^2(kr) r dr = \left[\frac{r^2}{2} \{ V_0'^2(kr) + V_0^2(kr) \} \right]_{r_w}^{r_e} = \left[\frac{r^2}{2} \{ V_1^2(kr) + V_0^2(kr) \} \right]_{r_w}^{r_e} = \frac{r_e^2}{2} V_0^2(kr_e) - \frac{r_w^2}{2} V_1^2(kr_w) \dots\dots\dots (23)$$

$$\therefore A_k = \frac{2 E_0 \frac{r_w}{k} V_1(kr_w)}{r_w^2 V_1^2(kr_w) - n^2 V_0^2(n\alpha)} \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{または, } A_\alpha = \frac{2 E_0 V_1(\alpha)}{\alpha [V_1^2(\alpha) - n^2 V_0^2(n\alpha)]} \dots\dots\dots (25)$$

したがつて、(6) 式より

$$E = \sum_k A_k \left[J_0(kr) - \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} Y_0(kr) \right] e^{-k^2 C_e h t} = \sum_k A_\alpha \left[J_0\left(\frac{\alpha}{r_w} r\right) - \frac{J_1(n\alpha)}{Y_1(n\alpha)} Y_0\left(\frac{\alpha}{r_w} r\right) \right] e^{-\alpha^2 \frac{C_e h t}{r_w^2}} \dots\dots\dots (26)$$

が得られ、これがこの場合の電圧を与える式である。

次に、\$r_w\$ から \$r_e\$ に至る間の電圧の平均値を \$\bar{E}\$ とすると、(27)式をうる。

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{\int_{r_w}^{r_e} 2\pi r E dr}{\int_{r_w}^{r_e} 2\pi r E dr} = \frac{2 r_w}{(r_e^2 - r_w^2)} \sum_k \frac{A_k}{k} \left[J_1(kr_w) - \frac{J_1(kr_e)}{Y_1(kr_e)} Y_1(kr_w) \right] e^{-k^2 C_e h t} \\ &= \frac{-2}{n^2 - 1} \sum_\alpha \frac{A_\alpha}{\alpha} \left[J_1(\alpha) - \frac{J_1(n\alpha)}{Y_1(n\alpha)} Y_1(\alpha) \right] e^{-\alpha^2 \frac{C_e h t}{r_w^2}} \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

また、\$t = 0\$ での電圧分布が \$r\$ に比例して増大しているものと考えると、

$$E_0 = \frac{r}{r_e} E_{r_e}, \quad 0 \leq r \leq r_e \dots\dots\dots (28)$$

$$\text{とすると, } \int_{r_w}^{r_e} E_0 V_0(kr) r dr = \frac{E_{r_e}}{r_e} \int_{r_w}^{r_e} V_0(kr) r^2 dr \dots\dots\dots (29)$$

$$\int_{r_w}^{r_e} V_0^2(kr) r dr = -\frac{r_e^2}{2} V_0^2(kr_e) - \frac{r_w^2}{2} V_1^2(kr_w) \dots\dots\dots(30)$$

いま, $\frac{C_{eh}}{r_w} = T_e \dots\dots\dots(31)$

とおき, この T_e を電気浸透時間係数とよぶことにすると, (27) 式より

$$\bar{E} = -\frac{2}{n^2-1} \sum_{\alpha} \frac{A_{\alpha}}{\alpha} \left[J_1(\alpha) - \frac{J_1(n\alpha)}{Y_1(n\alpha)} Y_1(\alpha) \right] e^{-\alpha^2 T_e} \dots\dots\dots(32)$$

ゆえに, $\frac{\bar{E}}{E} = \frac{4}{n^2-1} \sum_{\alpha} \frac{V_1^2(\alpha)}{\alpha^2 \{n^2 V_0^2(n\alpha) - V_1^2(n\alpha)\}} e^{-\alpha^2 T_e} \dots\dots\dots(33)$

ある与えられた印加電圧傾度段階において, 最終脱水量に対する任意時間 t における脱水量の割合を電気浸透による脱水度とよび, U_e で示すと, これは次式で表わされる。

$$U_e = 1 - \frac{4}{(n^2-1)} \sum_{\alpha} \frac{V_1^2(\alpha)}{\alpha^2 \{n^2 V_0^2(n\alpha) - V_1^2(n\alpha)\}} e^{-\alpha^2 T_e} \dots\dots\dots(34)$$

電気浸透脱水度 U_e を, 各 n に応じて, 電気浸透時間係数 T_e に対して表示すると, サンドドレインの場合と同様なグラフが得られる。図-2 にその一部を示す。

鉛直方向の流れのない場合は, 図-2 を用いて, 電極の大きさ, 電極間隔を決定することができる。従来は, この点に関して何等具体的指針がなかつたので, ほとんど経験とカンおよび電源容量から, これら諸元が決められていたようである。

電極間においては, 電圧の垂直方向の変化はないものと考えてよいので, サンドドレイン工法における外部荷重やウエルポイント工法における吸引力などの力が存在しない場合は, 3次元の流れとしては, 電極底面を通つてそれより下への電流の拡がり方が考えられるだけである。しかし, この拡がり, は, 実験的に補正できるものとして無視することにする。

外部荷重や吸引力の存在するときは, それらにもとづく水流が生ずるので, 電気浸透流にこれらを代数的に重畳して考えなければならない。

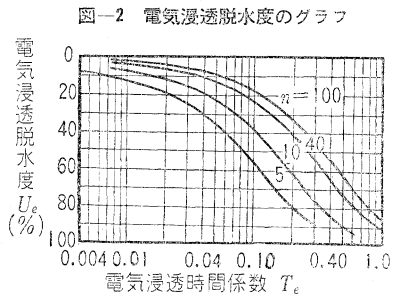


図-2 電気浸透脱水度のグラフ

3. 基礎実験

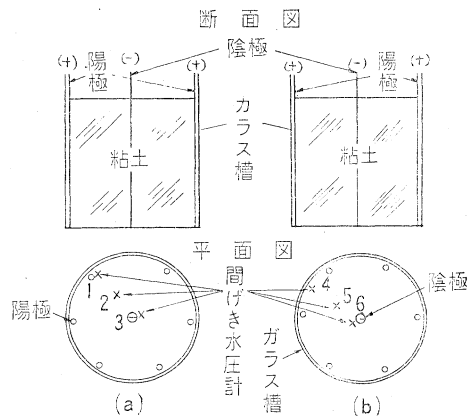
図-3 に示すような装置を用い, 土の電気浸透による脱水工法に関する室内実験を行なつた。陰極としては, 内径 5 mm, 外径 7 mm, 長さ 380 mm の有孔銅管を, 陽極として径 5 mm, 長さ 380 mm の鉄線を使用した。電源として, 単相交流 100V を使い, 100V, 10A のセレン整流器により半波整流した直流を用いた。

中央に陰極 1 本, 周囲に陽極 6 本を等間隔におき, 銅線をそれぞれの極にハンダで接着した。陰極と陽極との距離は 180 mm である。

土試料には, 大阪港海底粘土を用い, JIS A 1205, 液性限界試験器で落下回数が 9~12 になるように水でよく練つたものをガラス槽の中にできるだけ均一につめ, 土層の厚さ 5 cm くらいごとによくガラス槽を振動して気泡を追い出し, 気泡の混入をさけた。充てん後 7 日間表面にぬれ布をかぶせ, ビニール布でおおい, 室内に放置し安定せしめた。このような粘土の安定には, かなりの長期間を要するはずであるが, 実験期日の関係上, この程度で打ち切つた。しかし, 単純圧縮強度にあらわれるねり返しの影響のいちじるしい期間は, かなり短かいので試験の性質上この程度の期間で十分と考えられる。

そこで, 電圧は 20V とし, 各陽極を銅線で全部連絡した。陰極と陽極を結ぶ線上およびその線と線との間の部分に間げき水圧計を入れて, 通電中の間げき水圧の変化を調べ, 同時に陰極よりの脱水量を一定時間ごとに測定した。通電中極付近をのぞき試料表面をパラフィンで封じて水分の蒸発による減少をできるだけ少なくした。

図-3 実験装置



測定結果のうち、含水比の深さによる変化を図-4 および図-5 に、含水比の平面的な変化を図-6 に、脱水量の時間的変化を図-7 に、間げき水圧の時間的変化を図-8 に示す。

図-4 含水比の垂直分布
(図-3 の (a) に対応)

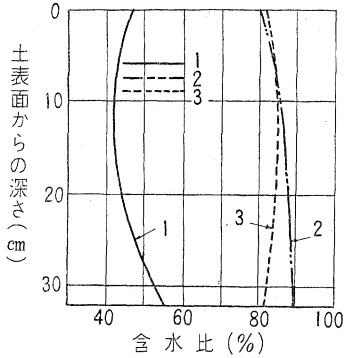


図-5 含水比の垂直分布
(図-3 の (b) に対応)

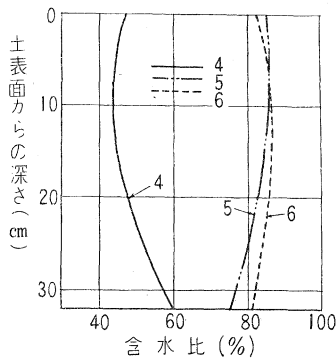


図-6 含水比の水平分布
測定点の表面からの深さ (cm)

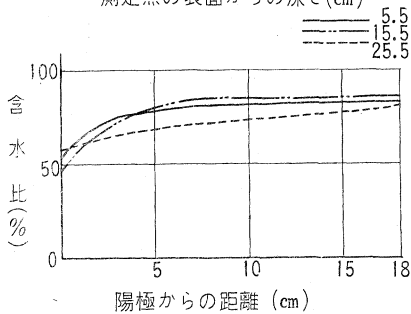


図-7 脱水量の時間的変化

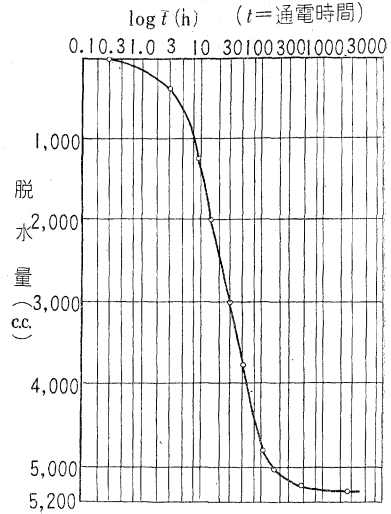
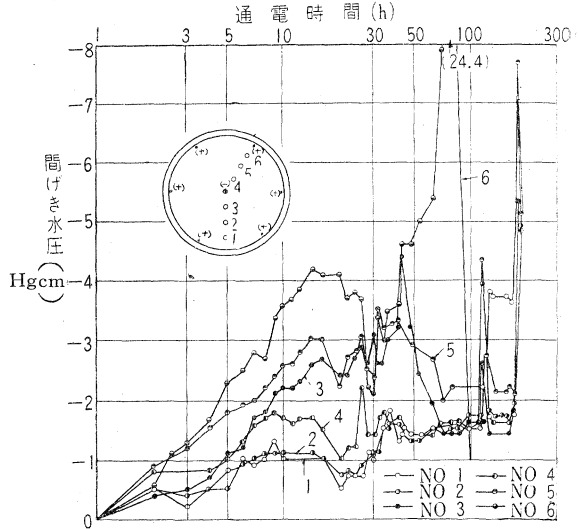


図-8 間げき水圧の時間的変化



4. 実験結果の考察

図-4 と図-5 とよりみると、含水比の垂直方向の変化は、陰極側および陰陽極中間部に比べ、陽極側の方が幾分大きいようである。また、陽極側は中央部が含水比が小さいのに対し、陰極側は中央部が含水比が高いようである。陰陽極の中間は、No. 5 の点は陰極側とよく似ているが、No. 2 の点だけは下にゆく程含水比が大となっている。陽極側で、含水比の垂直分布が表面から 10 cm くらい下の所で最も低くなっているのは、電流密度が上下の中間で最大となっていることに対応しているのではなかろうかと考えられる。表面に近い方が底部にくらべ含水比が小さくなっているのは表面蒸発の影響だと考えられる。含水比の最小の点が上下の中間すなわち表面から約 15 cm 下のところになく、それより少し上の 10 cm のところにあることもこの表面蒸発の影響であろう。陰極側で、含水比の垂直分布が表面から約 10 cm くらい下の所で最も高くなっているのは、電流密度の影響であろう。陰極側と陽極側の含水比の垂直分布曲線がかなり対称的なことは、この電流密度の関係を表わ

しているものであろうかと考えられるが、陰極側の垂直分布に変化の少ないのは、陰極がいつも集積水で満たされているための影響と思われる。

次に図-4 と図-6 よりみると、含水比の水平分布は、陽極と陰極から 5 cm 離れた点との間で変化がいちじろしく、陽極から 5 cm くらい離れた点と陰極の間ではあまり変化がみられないようである。陽極側においては水の補給がなく脱水が陰極に向つて進行してゆくのにに対し、陰極側は水が集まつてくるのであるから含水比の分布が、陽極側は低く、陰極側が高いことは当然予想されることであるが、陰陽極の中間部が陰極とその含水比において大体似ていることは、陽極付近が極端に脱水されやすいことを示して、実際施工する場合脱水の均一化という点で問題となつてくるものと考えられる。

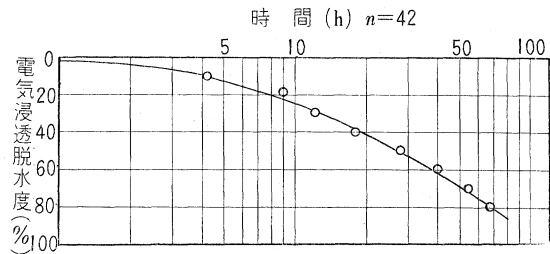
脱水の時間的経過は、図-7 よりみられるような状態を示し、圧密試験で通常の容器に入れて行なつた $e-\log t$ 曲線でみられる 2 次圧密過程 (Side friction の影響という人もあるが不明である) は示さない。

通電中の間げき水圧は、負圧として表われる。種々の条件 (主としてきれつの生成) により、その絶対値は確かではないが、図-8 にその時間的变化が示されている。図-8 において、陰極と陽極を結ぶ線上の間げき水圧が隣接の陰陽極を結ぶ線の中間の線上の間げき水圧に比し、絶対値が大きい傾向を示しているのと、また、陰陽極を結ぶ線上の間げき水圧が陽極に近づく程負圧が大となつてゆくのにに対し、中間線上の間げき水圧は陰極に近づくほど負圧が大となつてゆく傾向を示しているのは興味があるが、これは電流密度に起因するものと考えてよいであろう。

以上の実験結果より、電気浸透脱水度を時間に対して取つたものを、図-9 の○点で示す。これに対し、(34) 式に従つて計算した電気浸透脱水度と時間の関係を、図-9 の実線で示す。

電気浸透による脱水の実験が、種々複雑な条件に支配されて、定量的取扱いの困難なわりに、実験と理論とがきわめてよい一致を示しているのは、理論の誘導に際し用いた仮定が実際とそれほど矛盾していないことを示すものと考えてよいであろう。

図-9 電気浸透脱水度における理論値と実験値との比較



5. むすび

粘土の電気浸透による脱水工法について、理論的考察と室内実験とを行なつた結果について述べた。

まず、前報に導いた電気浸透による脱水の理論を用い、これを千鳥形式の正三角形型電極配列方式に適用して有効電圧に関する基本方程式を導き、簡単な条件のもとに解を見出した。

次いで、ガラス円筒による模型実験を行ない、土の電気浸透による脱水効果について、基礎理論式で得られた結果と、実験で得られた結果とが、きわめてよい一致を示すことを見出した。

また、電気浸透による脱水効果が、陽極側と陰極側および土表面と底面とでは、かなり差異のあることを実験的に確かめたが、これは実験の規模によりかなり異なるものと考えられる。

本研究にさいし、終始御懇篤なる御指導をいただいた京都大学教授 村山朔郎博士に衷心より感謝の意を表明する。また、実験を手伝つていただいた大阪工業大学 岡 巖助手、岡本利康、浜崎 明両氏および面倒な計算をしていただいた大阪市土木局 竹本良信技師に対して深甚の謝意を表する次第である。

なお、本研究は、文部省科学研究費にその費用の一部を仰いだ。付記して感謝の辞にかえることとする。

参考文献

- 1) 三瀬 貞: 電気浸透による土の脱水機構について, 土木学会論文集 第 64 号 (1959) pp. 73~78
- 2) Casagrande, L.: "Verfahren zur Verfestigung toniger Böden.," German Patent, No. 621694 (1935)
- 3) Endell, K.: "Beiträge zur chemische Erforschung von Tonböden.," Bautechnik, 13 (1935) pp. 226~229
- 4) Endell, K., Hoffmann, U.: "Electrochemical hardening of clay soils.," Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng. Vol 1 (1936) pp. 273~275
- 5) Erlenbach, L.: "Anwendung der elektrochemischen Verfestigung auf Schwimmende Pfahlgründungen.," Bautechnik, 14 (1936) pp. 257~259
- 6) Casagrande, L.: "Grosversuch zur Erhöhung der Tragfähigkeit von schwebenden Pfahlgründungen durch elektrochemische Behandlung.," Bautechnik, 17 (1939) pp. 228~230
- 7) Bernatzik, W.: "Elektrochemische Boden Verfestigung.," Sonderdruck aus dem Schlu Bericht ds Intern., (1939) pp. 319~324
- 8) Casagrande, L.: "Zur Frage der Entwässerung feinkörniger Böden.," Deutsche Wasserwirtschaft, 36 (1941) pp 556~559

- 9) Schaad, W., Haefeli, R. : "Die Anwendung der Elektrizität zur Entwässerung und verbesserung fein körniger Bodenarten.," *Strasse und Verkehr* **32** (1946) No. 23~24
- 10) Preece, E.F. : "Geotechnics and geotechnical research.," *Proc. Highway Res. Board.* **27** (1947) pp 384~417
- 11) Winterkorn, H.F. : "Fundamental similarities between electroosmotic and thermoosmotic phenomena.," *Proc. Highway Res. Board* **27** (1947) pp 443~445
- 12) Bernatzik, W. : "Contribution to the problem of seepage pressure in electroosmosis.," *Proc. 2 nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* **7** (1948) pp. 63~66
- 13) Geuze, E.C.W.A., C.M.A. de Bruyn., Joustra, K. : "Results of laboratory investigation on the electrical treatment of soils.," *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 3* (1948) pp. 153~157
- 14) Dawson, R.F., Mc Donald, R.W. : "Some effects of electric current on the consolidation characteristics of a soil.," *Proc. 2nd. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol 5* (1943) pp 51~57
- 15) Vey, E. : "The mechanics of soil consolidation by electro-osmosis" *Proc. High Res. Board* (1947) pp.573~589
- 16) Casagrande, L. : "Electro-osmotic stabilization of soils.," *Journ. Boston Soc. Civ. Eng.* **39** (1952) pp 51~63
- 17) Steinfelt., K. : "Über Theorie und Praxis elektroosmotische Bodenentwässerung.," *Bautechnik* **23** (1951) pp. 269~274
- 18) Belluigi, A. : "Über die elektroosmotische Entwässerung von Lockerböden in dreidimensionaler Form.," *Bautechnik* **34** (1957) pp. 1~3, *Bautechnik* **34** (1957) pp. 365~369
- 19) Barron, R.A. : "Consolidation of fine-grained soils by drain wells.," *Trans. A.S.C.E. Vol. 113* (1948) pp 718~754
- 20) 矢内保夫・水野高明・木庭宏美 : サンドドレーンの圧密理論について, *土木学会論文集* **36** (1956) pp. 38~43
- 21) 高木俊介 : サンドパイル排水工のためのグラフとその使用例, *土と基礎* **Vol. 3** No. 11. (1955) pp. 8~14
- 22) Lomize, G.M., Netushil, A.V. , : "Electro-osmotic Processes in clayey Soils and dewatering during excavations", *Proc. 4 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1* (1957) pp. 62~67
- 23) Praskowski, A. : "Investigations on electroosmotic flow in soils in relation to different characteristics", *Proc. 4 th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.1* (1957) pp. 89~92

(原稿受付 : 昭. 34. 8. 3)