

電気浸透による土の脱水機構について*

正 員 三 瀬 貞**

ON THE MECHANISM OF THE ELECTRO-OSMOTIC DRAINAGE OF SOIL

By Tadash Mise, C.E. Member

Synopsis : The mechanism of the electro-osmotic drainage of soil had been studied by the many engineers on the standpoint of the stationary state, but the quantitative treatment could not be in practice.

The author studied the phenomena experimentally as well as theoretically, and discovered that the mechanism of the electro-osmotic drainage of soil was explainable analogously to the mechanism of the heat conduction. So the quantitative analysis for the electro-osmotic drainage process has been possible for the clay stratum.

要旨 電気浸透による土の脱水については、従来多くの人が定常状態またはそれに準ずる状態において、その機構を論じていたが、これに対して著者は実験的ならびに理論的研究を進め、その機構が熱伝導に類推的に説明せられることを見出し、したがって、また従来全く経験のみに依存していた電気浸透による土の脱水工法についての定量的設計資料を提供することができた。

1. 実験装置および試料

最初 図-1 に示す塩化ビニール製容器に土を入れ、上部を陽極、下部を陰極として種々の一定電圧の直流を加えたときの試料の収縮量を、上方に固定したダイヤルゲージで測定し、時間ごとの脱水量、収縮量を各電圧段階ごとに求めることを試みた。この場合、低電圧では収縮量がみられず、高電圧では試料の収縮変形が不連続となり、したがって収縮量と時間との関係を示す曲線が不連続になった。また試料上面よりの蒸発がさけられなかつたり、下部極板上に発生するガスが極板上に集積して抵抗を増大させる影響があるなど得られた結果の意味が十分に電気浸透による土の脱水過程を示さなかつた。そのためこの実験装置を用いず、次のような実験を行つた。

すなわち、図-2 に示すように、試料側面を薄肉ゴムスリーブでおおい水分の蒸発を防ぎ、両端面に円形有孔板を電極として取りつけ使用した。まず、極板の接触抵抗を検討するため、図-3 に示す装置で、極板の上に種々の錘を乗せたときの電気抵抗を Kohlrusch 電橋で約 1000 サイクルの交流を用いて測定した。測定値を図-4 に示す。乱されない試料において、電気抵抗は荷重の増大とともに急激に減少して 2.8 g/cm² 以上の荷重では一定値を示している。ねり返した粘土においては電気抵抗の減少割合は、乱されない試料に比し小さくかつゆるやかであるが、乱されない試料と同様に 14.0 g/cm² 以上

図-1 圧密試験器型電気浸透脱水装置

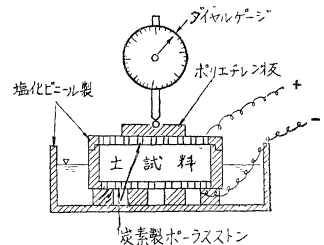


図-2 電気浸透脱水装置および試料

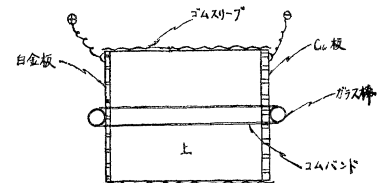
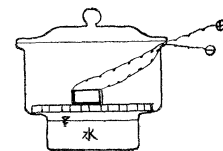
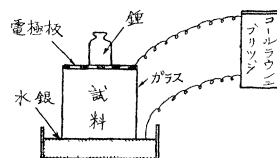


図-3 接触電気抵抗測定装置



* 第 13 回土木学会年次学術講演会(昭和 33 年 5 月)にて発表

** 大阪市立大学講師，工学部土質工学研究室

図-5 試料 No. 8 に対する含水比の時間的变化

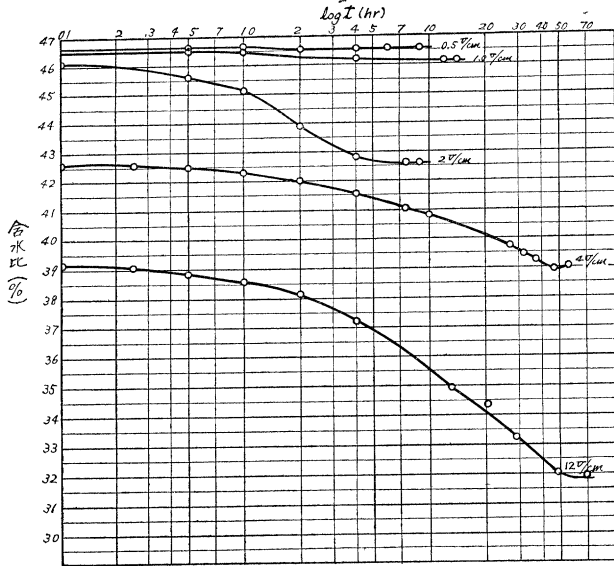


図-6 試料 No. 8 に対する印加電圧傾度と最終平衡含水比の関係

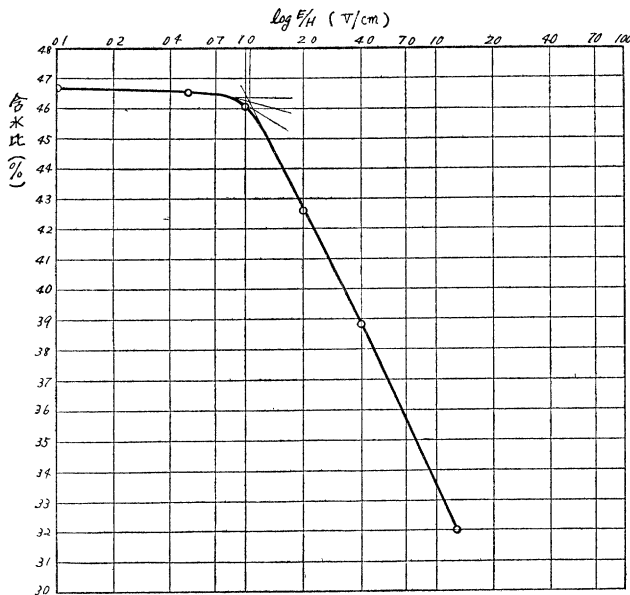
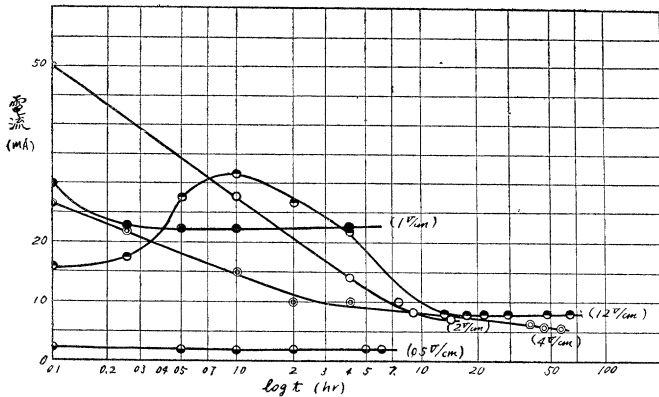


図-7 試料 No. 8 における電流の時間的变化



各電圧傾度において、一定時間ごとに試料重量を測定し、減量を脱水量とした。別に無通電の同一試料をデシケータ中に放置し通電試料と同時刻に重量を測定して自然蒸発による含水量の減少量とし、両者の差を電気浸透による脱水量とした。各電圧傾度段階において重量の減少がなくなつたときは脱水が終了したものとみなして、つぎの電圧傾度段階に移つた。この場合電流が小さいので計算の結果発生する熱量は無視できる量であつた。一例として試料 No. 8 についての各電圧傾度段階における含水比の時間的变化状態を図-5 に、各電圧傾度段階における最終平衡含水比と各電圧傾度との関係を図-6 に、各電圧傾度段階における電流の時間的变化状態を図-7 に示す。また乱されない試料とねり返した試料についての含水比の同様な変化を図-8 および図-9 に示す。

図-8 含水比の時間的变化

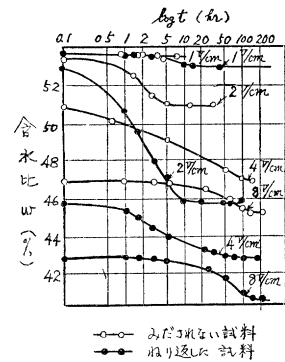
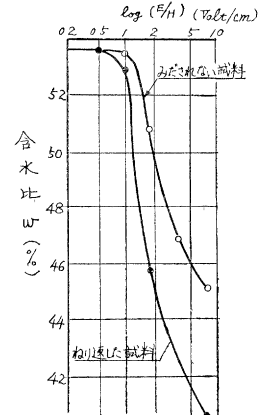


図-9 含水比-電圧傾度曲線



3. 実験結果の考察

電気浸透脱水により、土試料の含水比の減少速度はある一定電圧傾度以上では一定電圧傾度において時間とともに急激に減少してゆき、最後には無視できる量となる。各電圧傾度における最終平衡含水比と電圧傾度との関係図についてみると、電圧傾度の小さい間は含水比の減少はほとんどなく、ある電圧傾度以上で急激に減少を始める。この場合、全波整流用に構成したセレン整流器を用いたときは、半波整流の場合にくらべ、含水比の減少はいちじるしく小さく、かつ試料全体に様に脱水領域が拡がらず、試料のちょうど中央部が最も脱水程度が大であるという現象が明らかに認められた。また一定時間通電しておき、つぎに逆方向の電気を印加した場合は同一通電時間で約10倍量の脱水が行われた。この現象は電気界面攪乱現象としてすでに認められている事実であり、電気浸透脱水に衝撃的脈流を印加する必要性が当然要望される。以上のことにより、電気浸透による脱水効果を大きくするためにはある電圧傾度以上の電圧を印加しなければならないわけで、この電圧傾度を限界電圧傾度(Critical electric potential gradient)と呼ぶことにする。

乱されない試料については、限界電圧傾度と先行圧密荷重との間に対応関係が予想されたが、種々の影響により自然状態で採取した試料については一義的な関係が得られなかつた。これについては、さらに実験により確かめる必要がある。乱されない試料とねり返した試料とについてみると、限界電圧傾度の値がねり返した場合の方がいちじるしく小さい。すなわち、ねり返した試料は比較的小電圧傾度の所で脱水が急に進行する。ねり返すことにより土粒子界面に固く結合していた水がより自由性を帯びてきた結果、図-8.9に対応した現象が生じたものといえよう。

以上の結果をまとめてみると、陽極側において水の補給の少ない電気浸透による脱水においては

- (1) 限界電圧傾度が存在する。
- (2) 限界電圧傾度および電気浸透による脱水効果は、通電方式により影響される。
- (3) ねり返した試料は、みだされない試料に比し、限界電圧傾度が小さい。

4. 理論的解析

電気浸透による脱水機構については、駒形博士¹⁾が、図-10のように、水の境界面が陽極側から陰極側へ脱水の進行につれて移動してゆくものとの考えのもとに、理論を展開されている。しかし、境界層の移動するという仮定は、実験と必ずしも一致せず、場合によつては、電極間の中央部が最も脱水が進展してゆく場合もある。すなわち、境界層が時間の経過につれて陰極より陽極へ漸次進行してゆくという仮定は成立しないことになる。

著者は、これに対し現象に対応する、より一般的な理論を誘導した。

土の電気浸透による脱水現象を理論的に考察するため以下のように仮定する。

- (1) 土はその構造が各部均一である。
- (2) 土粒子の電気泳動は起らない。
- (3) 電気浸透透水係数は一定である。
- (4) 土中水の浸透速度は電圧傾度に比例する。
- (5) 印加電圧は最初その全部が電気浸透に有効に作用する。印加電圧のうち、電気浸透に有効に使われるものを有効電圧という、有効電圧はしだいに減少し、十分長い時間の後には0となる。

仮定(3)の電気浸透透水係数は実際には、細げき電解、分極諸現象のほか、土中水の誘電率、電導度、粘度、pHなどの変化によりしだいに変わってゆくのであるが、事柄を簡単にするため一定とした。

いま断面積A、長さLの円筒形土試料を考える。陰極側の先端を座標の原点とする。実験結果より、土の含水比と有効電圧との間に、図-11の関係が認められるので、含水比と有効電圧との間に直線関係があることを仮定すれば、熱伝導の方程式したがってTerzaghiの圧密理論式と同じようにして、次式のような電気浸透による脱水現象の理論式が誘導される。

$$\frac{\partial E_e}{\partial t} = C_e \frac{\partial^2 E_e}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1) \quad E = E_e + E_n \dots\dots\dots (2)$$

図-10 水槽排水と電気浸透脱水との対比

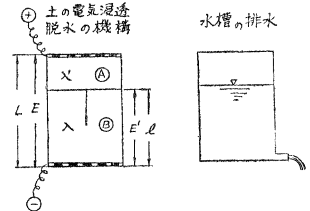
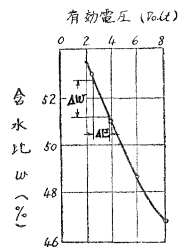


図-11 有効電圧と含水比の関係



ここに、 E は試料に印加された全電圧で、 E_e は電気浸透に有効な電圧、 E_n は電気浸透に無関係な電圧であり、これは圧密における全圧力、有効圧力および中立圧力にそれぞれ対応するものである。また、 C_e は圧密係数に対応するもので、著者は、これを電気浸透係数 (Coefficient of electro-osmosis) と仮に呼ぶこととした。

一般に、土に電気浸透による脱水を起させるときは、三次元的に次式で示される脱水過程が伴うことになる。

$$\frac{\partial E_e}{\partial t} = C_{ex} \frac{\partial^2 E_e}{\partial x^2} + C_{ey} \frac{\partial^2 E_e}{\partial y^2} + C_{ez} \frac{\partial^2 E_e}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式を適当な境界条件および初期条件で解くことにより、 E_e が時間と座標の関係として求められる。

本実験の場合の初期条件と境界条件はつぎの通りである。

(i) $t=0, 0 \leq x < L$ で $E_e = E_e(x) \dots\dots\dots (4)$

(ii) $x=L, 0 \leq t \leq \infty$ で $\frac{\partial E_e}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (5)$

(iii) $x=0, 0 \leq t \leq \infty$ で $E_e = 0 \dots\dots\dots (6)$

(iv) $t = \infty, 0 \leq x \leq L$ で $E_e = 0 \dots\dots\dots (7)$

(1) 式を (4), (5), (6), (7) 式の条件で解くと

$$E_e = \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 C_{et}/4L^2} \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2L} \int_0^L E(\lambda) \sin \frac{(2n+1)\pi \lambda}{2L} d\lambda \dots\dots\dots (8)$$

これが、電気浸透による脱水過程中の有効電圧を与える式である。ここに、 n は 0 または任意の定数である。

いま、 $t=0$ における電圧分布が x に比例して増大していると考えると、

$$E(x) = \frac{x}{L} E_L, 0 \leq x \leq L \dots\dots\dots (9)$$

(8) 式に代入して整理すると、

$$E_e = \frac{8}{\pi^2} E_L \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 C_{et}/4L^2} \sin \frac{(2n+1)\pi x}{2L} \dots\dots\dots (10)$$

電気浸透による脱水度を U_E とすると、これは圧密度に対応するもので、次式で示される。

$$U_E = 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \cdot e^{-(2n+1)^2 \pi^2 T_E/4} \dots\dots\dots (11)$$

図-12 電気浸透の脱水度と時間係数

ゆえにこの場合の T_E と U_E とを計算すれば、図-12をうる。

電気浸透による脱水を 1 軸方向にのみ起させるとすると、実験室における電気浸透による脱水試験から、実際の脱水量の計算ができる。この場合の必要量は

- (i) 地層の厚さと配列
- (ii) 地層を構成する土質
- (iii) 地下水の位置および性質
- (iv) 現地層より採取した乱されない試料に関する電気浸透による脱水試験
- (v) 採用すべき電源容量および極配列より求める電圧傾度

などである。(i), (ii), (iii) は現場のボーリングにより、(iv) は実験室における実験により、(v) は種々の条件 (土質および施工条件など) より決定される。現地で採用される電圧傾度が定まると、この傾度を i_e 、限界電圧傾度を i_c とし、極間距離を H_i とすると、単位断面積当りの全脱水量 ΔQ は

$$\Delta Q = \frac{w_1 - w_2}{1 + w_1} H_i i_e \dots\dots\dots (12)$$

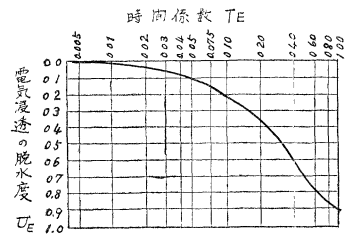
で示される。ここに w_1, w_2 は最初と終りの含水比、 r_1 は最初の湿潤単位重量である。また、脱水度 U_E % になるまでに要する時間は

$$t = \frac{H_i^2 T_E}{C_E} \dots\dots\dots (13)$$

より求められる。普通の水頭差にもとづく透水係数を k_h 、電気浸透による透水係数を k_e で示すと、 k_e と k_h とは同じように取りあつかうことができる。すなわち、電気浸透において、定常的な流れがあるものとする、浸透量 q は、単位時間、単位断面積当りで示すと、次式で示される。

$$q_h = k_h i_h \dots\dots\dots (14) \quad q_e = k_e i_e \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 i_h は動水傾度、 i_e は電圧傾度、 q_h, q_e はそれぞれ水圧および電圧にもとづく浸透水量を示す。この場合、 k_e は電気浸透透水試験により求められるものであるが、従来く電位なる名称で呼ばれているものに原因するとされてきた。しかし、く電位なるものがはたして存在するか否か、存在したとしてもそれが電気浸透の原因か否かは明らかではない。著者の見解によれば、かなり多量に水を含んだ土に直流を通じた場合に生ずる電気



浸透流において、実際に流量を測定し、それにもとづいてある仮説のもとに計算されたものが電位として表現される量であつて、現実にく電位なる物理量が存在し、それによつて浸透流が生ずるものとするのは、現在のところ不適当と考えられる。その意味で、最も直接的に示される電気浸透による透水係数 k_e をもつて電気浸透現象を論ずる方が当を得ているものと考えられる。

図-11における直線部分の傾斜よりみて、圧密係数 C_v と電気浸透係数 C_E とは、 k_h/k_e の比に応じて異なる。ゆえに、粘土においては、同一脱水度に達するのに要する時間は、圧密試験の場合の $1/10 \sim 1/1000$ くらいに短縮されることがわかる。

以上の理論により、電気浸透による脱水現象の基本的過程を考察したが、このような考え方で多数の電極を地中に挿入し、直流を印加して実際に脱水を行う場合を考察するには、Barron のサンド・ドレイン²⁾の理論式を適用するのが便利である。すなわち、図-13 に示すような電極配列においては、次式が成立する。

$$C_{eh} \left(\frac{\partial^2 E_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_e}{\partial y^2} \right) + C_{ev} \frac{\partial^2 E_e}{\partial z^2} = \frac{\partial E_e}{\partial t} \dots \dots \dots (16)$$

円筒座標を用いると

$$C_{eh} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_e}{\partial r^2} \right) + C_{ev} \frac{\partial^2 E_e}{\partial z^2} = \frac{\partial E_e}{\partial t} \dots \dots \dots (17)$$

ここに、 C_{eh}, C_{ev} は、それぞれ水平および鉛直方向の電気浸透係数である。この場合の詳細な数値計算および実験との対比について、種々興味ある関係を得たが、別に報告することとする。

なお、本報告では、 E_e の関数形を一応 x の線型関数としたが、通電方式その他により種々の関数形が考えられることを付言しておく。

5. む す び

土の電気浸透による脱水現象を実験的に研究し、従来不明であつた脱水機構を明確にすることができた。すなわち、

- (1) 土の電気浸透による脱水現象は、圧密による脱水現象と同じ過程を取る。
- (2) 電気浸透による脱水過程は、熱伝導の方程式、したがつて、Terzaghi の圧密理論式を応用して理論的に解析できる。
- (3) 限界電圧傾度が存在し、この電圧傾度以上の電圧を印加すると脱水が急速に進行する。
- (4) 限界電圧傾度および電気浸透による脱水効果は、通電方式により影響される。
- (5) ねり返された試料は、みだされない試料に比し、限界電圧傾度が小さい。
- (6) 限界電圧傾度と圧密の場合の先行荷重との間には対応関係が予想される。
- (7) 多極通電方式を用いる実際の施工設計に対しては、Barron のサンド・ドレインの考えと同様な取り扱いができる。
- (8) 電気浸透による脱水効果は、試料の初期含水比、間げき比、粒径、粘土含有量、粒子配列および間げき水中溶在物質などにより影響を受ける。

などの現象が明らかとなつた。

本研究を遂行するに当たり、終始御懇篤なる御指導を賜つた京都大学教授 村山朗郎博士に衷心より感謝の意を表明する。また、卒業研究として実験を手伝つていただいた鉄道建設興業 K K 榊田清治技師(当時大阪工業大学土木工科学科学生)に深甚なる謝意を表する次第である。

なお本研究は、文部省科学研究費の援助を受けた。付記して感謝の微意を表する。

参 考 文 献

1) 駒形作次: 電気浸透的脱水について, 電気化学 11 (1943) pp. 13~16
 2) R.A. Barron: Consolidation of the fine grained soils by drain wells, Trans. ASCE, 113 (1948) pp. 718~754
 3) 浅川美利: 土中水の電気浸透的流動および脱水機構について, 日本大学工学研究所集報 19 (1959) pp 354~355 (昭.34.2.19)

図-13 多極通電方式による脱水

