

## 土の電気伝導について

准員 森

麟\*

## ON ELECTRIC CONDUCTION OF SOILS

(JSCE Nov. 1952)

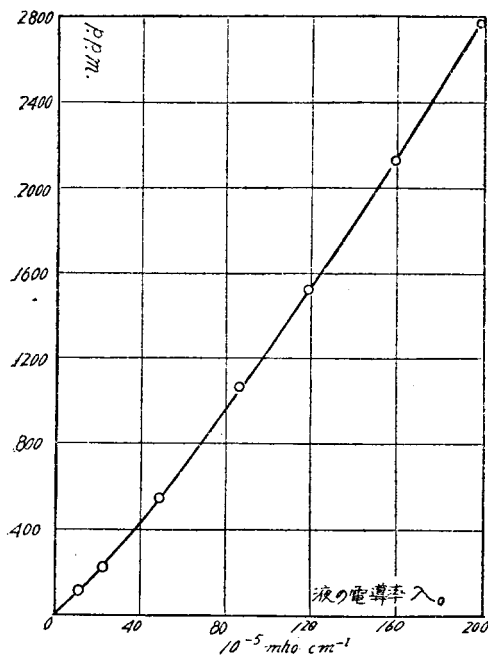
Akira Mori, C. E. Assoc. Member

**Synopsis** This investigation is a fundamental research of electric conduction of soils. The object of this study is to give a supplementary theory for applied investigations of electric conduction of soils and to develop the region of application.

**要旨** 本研究は土の電導性を利用した諸研究に一つの補助理論を与えること、新しい応用面の開拓に役立たせることを主な目的として、土の電導現象を基礎的な面から検討してみたものである。また以上のような目的他に、土を電気化学的な面から観察してこの方面の特性より土を調査する手がかりを得たいためであつた。

## 1. 飽水状態土の電気伝導要素及び機構

土粒子自身は電導性が非常に小さいため電気伝導は

図-1 土壤溶液の濃度と電導率  $\lambda_0$  (18°C)

土粒子によつて構成される毛管内に起る現象であり、毛管内の土壤溶液のイオン電導と毛管壁と液との界面に生ずる表面電導によるわけである。土の電導率は毛管の形状特性及び液のイオン電導と表面電導の大きさにより決定されることになる。

## (a) 土壤溶液のイオン電導 毛管内に存在する土

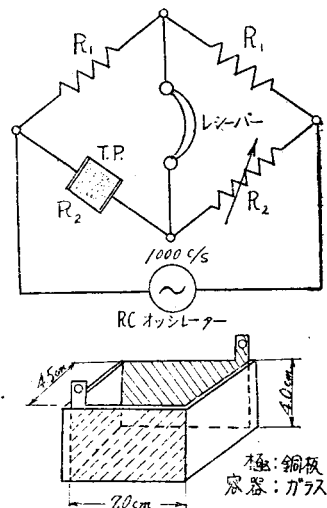
壤溶液中に含まれている各種イオン電荷による電気伝導はイオンの電気量と移動度及びイオン濃度によつて定まる。移動度は液温に影響され、土壤溶液濃度の大きい場合はイオン濃度も温度の影響を受ける。荒川砂質ローム中に含まれている土壤溶液の電解質濃度

と電導率との関係を図-1に、また測定装置を図-2に示す。

東京附近の数種の土の含水比を100%に換算した場合、その土壤溶液の電導率を表-1に示す。

表-1により一般に  $10^{-4} \text{ mho cm}^{-1}$  の桁のものが多いことが想像される。自然土の土壤溶液中の電解質の量は降水等による流失量と補給量がほとんど等しい状態であることが想像され常時は一定と考えられる。それ故乾燥時には濃度が増すことになる。また自

図-2 測定装置



\* 早稲田大学大学院特別研究奨学生、理工学部土木工学教室

表-1

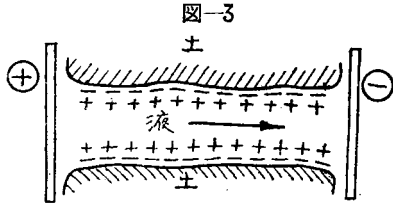
試料番号	土の名称	液の電導率 $\lambda_0$ mho $\text{cm}^{-1}$
1	ベントナイト	$3.50 \times 10^{-3}$
2	荒川砂質ローム	$4.17 \times 10^{-4}$
4	東京近郊の土	$2.17 \times "$
5	"	$2.04 \times "$
6	"	$3.49 \times "$
7	"	$1.20 \times "$
8	関東ローム	$6.85 \times "$
9	"	$6.14 \times "$

然土中の溶液濃度は毛管径の大きい所に薄く、径の小さい所に濃いことも容易に推定できる。

(b) 表面電導<sup>1)</sup> 毛管壁と液との界面に生ずる表面電導は次の2つのものから構成されている。

1. 電気浸透電流によるもの
2. 界面過剰イオンによるもの

(i) 電気浸透電流によるもの: 毛管の壁を構成する土粒子は水溶液中で一般に負に帯電する(ある種の土は正に帯電)ので毛管壁附近の液中には正電荷のイオンが集まり図-3のように電気2重層を構成する。



このような状態において毛管の両端に直流電圧  $V$  が加わると液は正に帯電しているため一極に移動する。毛管の単位表面積当りの電荷  $q$  は2重層の間隔を  $\delta$ , この層間の電位差を  $\zeta$ , 液の電媒恒数を  $D$  とすると

$$q = D\zeta / 4\pi\delta^2 \dots\dots\dots (1)$$

で表わすことができる。また液の移動速度  $u$  は

$$u = VD\zeta / 4\pi\eta l^3 \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここに  $\eta$  は液の粘性係数,  $l$  は毛管長である。したがって電気浸透によつて運ばれる電荷は毛管単位表面積当り  $qu$  で示すことができる。すなわちこれは電気浸透電流  $I_{s01}$  であり(1), (2)式から次のように書ける。

$$I_{s01} = qu = (D\zeta)^2 V / (4\pi)^2 \eta \delta l \dots\dots\dots (3)$$

これを表面電導率<sup>4)</sup>(mho)の形に書き直すには  $V/l$  で除せばよい。すなわち

$$\lambda_{s01} = (D\zeta)^2 / (4\pi)^2 \eta \delta \dots\dots\dots (4)$$

で示すことができる。

この電気浸透電流は交流電圧においても当然振動的に生ずるのであるから(4)式はそのまま用いられる。

(ii) 界面過剰イオンによるもの: 毛管壁と液との

間にも吸着現象が起り界面近くと液内部とではイオン濃度が異なる。一般に界面附近の濃度が大であるので電流密度も大きくなる。毛管単位表面積当りの界面過剰イオン電流  $I_{s02}$  は次式で表わすことができる。

$$I_{s02} = \nu F v \Delta V / l \dots\dots\dots (5)$$

ここに  $\Delta$  は毛管単位表面積当りの過剰イオン量,  $\nu$  と  $v$  はそれぞれイオン価数及びイオンの移動度,  $F$  はファラデー恒数である。(5)式を表面電導率(mho)の形にするには  $V/l$  で除して

$$\lambda_{s02} = \nu F v \Delta \dots\dots\dots (6)$$

と書くことができる。

(iii) 表面電導率  $\lambda_{s0}$ : 表面電導率  $\lambda_{s0}$  は(4)式と(6)式の和で表わすことができる。

$$\lambda_{s0} = \lambda_{s01} + \lambda_{s02} \dots\dots\dots (7)$$

$\lambda_{s0}$  は毛管単位表面積当りの電導率であるので単位は mho である。また  $\lambda_{s0}$  は(7)式で明らかな通り毛管構造に無関係に液と土の性質により定まるものである。

(iv) 表面電導の測定: 土の電気伝導は毛管中の現象であるので, この毛管構造が電導率に関係する。土単位体積当りの毛管数を  $n$ , 半径と長さを一率に  $r$  及び  $l$  とすると毛管組織恒数  $K$  は次のようになる。

$$K = n\pi r^2 / l \dots\dots\dots (8)$$

土の電導率を  $\lambda$ , 毛管の電導率を  $\lambda_s$  とすと  $\lambda_s$  は次式で表わすことができる。

$$\lambda_s = \lambda / K \dots\dots\dots (9)$$

毛管中の液の電導率を  $\lambda_0$  とすると  $\lambda_s - \lambda_0$  は毛管単位体積当りの表面電導量を示すことになる。これは単位が  $\text{mho cm}^{-1}$  であるので  $\lambda_0$  と比較するのに便利である。それ故表面電導として  $\lambda_{s0}$  よりも  $\lambda_s - \lambda_0$  を取りあげて論ずることとする。  $\lambda_{s0}$  と  $\lambda_s - \lambda_0$  との間には次の関係がある。

$$\lambda_s - \lambda_0 = \lambda_{s0} / r \dots\dots\dots (10)$$

$\lambda_s$  は  $\lambda$  と  $K$  を求め(9)式で計算する。 $\lambda$  の測定は図-2の方法で行い試料は荒川砂質ローム及びこの土を粘土,シルト,砂の3部に分けたものを用いた。試料は予め大体電気透析をし,この土の土壤溶液を加えて攪拌一昼夜放置した後濾過し濾紙上の土について  $\lambda$ , 濾液について  $\lambda_0$  を測定した。土壤溶液の濃度を漸次大きくして同様に  $\lambda, \lambda_0$  を求めた。 $K$  は表面電導の無視できる電導率の高い KCl N/10 溶液を土と混同した試料について  $\lambda$  及び  $\lambda_0$  を測定し次式で計算した。

$$K = n\pi r^2 / l = \lambda / \lambda_0 \dots\dots\dots (11)$$

$K$  は含水比を変えた試料について測定しておき  $\lambda_s$  を求める土の含水比に相当する  $K$  を用いた。測定した  $\lambda, K, \lambda_s, \lambda_0$  及び  $\lambda_s - \lambda_0$  を表-2~5に示す。

$\lambda_s - \lambda_0$  と  $\lambda_0, \lambda_s - \lambda_0 / \lambda_0$  と  $\lambda_0$  の関係を図示すると

聴 講 自 由

## 欧米視察報告講演会

米国技術百年祭及び第4回国際橋梁及び構造工学会議に当土木学会代表として出席され、先般帰朝せられた下記4氏の講演会を併催致します。奮つて御聴講下さい。

### 記

日と時 昭和27年12月4日、午後正1時より  
ところ 国鉄本庁八階大会議室（東京駅降車口前）

### 講演

1. 国際会議出席報告（幻灯使用）  
土木学会副会長 福 田 武 雄  
工学博士
2. 欧米における鉄道事情  
国鉄施設局長 江 藤 智  
工学博士
3. 米国の河川事情 建設省九州地方建設局長 伊 藤 剛
4. アメリカにおける畑地灌漑（幻灯使用）  
森林省農地司 清 野 保  
計画部技術課長

主催 社団法人 土 木 学 会

表-2 荒川砂質ローム  
含水比  $w=38\%$  毛管組織恒数  $K=0.294$

土の電導率 $\lambda$ mho cm <sup>-1</sup>	毛管電導率 $\lambda_s$ mho cm <sup>-1</sup>	液の電導率 $\lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	表面電導量 $\lambda_s - \lambda_0$	$\lambda_s - \lambda_0$ $\lambda_0$
0.66 × 10 <sup>-4</sup>	2.24 × 10 <sup>-4</sup>	0.51 × 10 <sup>-4</sup>	1.73 × 10 <sup>-4</sup>	3.39
1.15 × "	3.89 × "	1.30 × "	2.59 × "	1.99
1.40 × "	4.74 × "	1.95 × "	2.79 × "	1.43
2.18 × "	7.42 × "	3.82 × "	3.60 × "	0.94
3.14 × "	10.67 × "	7.02 × "	3.65 × "	0.52
5.76 × "	19.60 × "	15.50 × "	4.10 × "	0.26
10.30 × "	35.20 × "	30.80 × "	4.40 × "	0.14

表-3 粘土分 < 0.005 mm  
含水比  $w=83\%$  毛管組織恒数  $K=0.510$

土の電導率 $\lambda$ mho cm <sup>-1</sup>	毛管電導率 $\lambda_s$ mho cm <sup>-1</sup>	液の電導率 $\lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	表面電導量 $\lambda_s - \lambda_0$	$\lambda_s - \lambda_0$ $\lambda_0$
1.45 × 10 <sup>-4</sup>	2.84 × 10 <sup>-4</sup>	1.06 × 10 <sup>-4</sup>	1.78 × 10 <sup>-4</sup>	1.68
1.88 × "	3.69 × "	1.59 × "	2.10 × "	1.32
2.98 × "	5.95 × "	3.38 × "	2.57 × "	0.72
4.38 × "	8.60 × "	6.00 × "	2.60 × "	0.43
6.23 × "	12.21 × "	9.65 × "	2.56 × "	0.27
8.12 × "	15.92 × "	13.70 × "	2.22 × "	0.16

表-4 シルト分 0.005~0.076 mm  
含水比  $w=48\%$  毛管組織恒数  $K=0.396$

土の電導率 $\lambda$ mho cm <sup>-1</sup>	毛管電導率 $\lambda_s$ mho cm <sup>-1</sup>	液の電導率 $\lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	表面電導量 $\lambda_s - \lambda_0$	$\lambda_s - \lambda_0$ $\lambda_0$
0.60 × 10 <sup>-4</sup>	1.51 × 10 <sup>-4</sup>	0.45 × 10 <sup>-4</sup>	1.05 × 10 <sup>-4</sup>	2.36
0.73 × "	1.86 × "	0.63 × "	1.23 × "	1.95
0.85 × "	2.16 × "	0.87 × "	1.29 × "	1.48
1.35 × "	3.43 × "	1.80 × "	1.63 × "	0.91
1.88 × "	4.77 × "	2.98 × "	1.79 × "	0.60
3.19 × "	8.06 × "	6.25 × "	1.81 × "	0.29
8.82 × "	22.04 × "	20.00 × "	2.24 × "	0.11

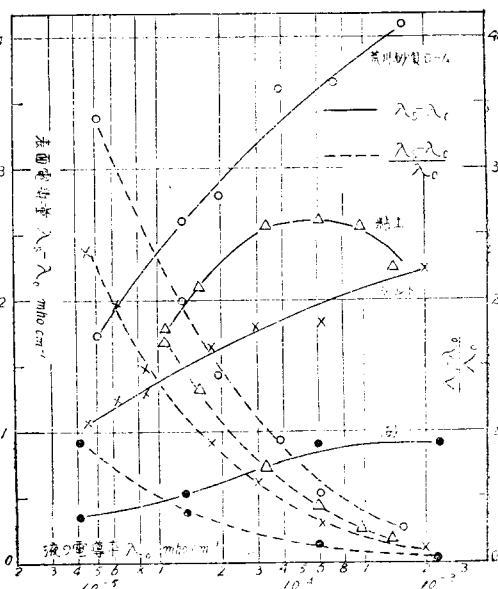
表-5 砂分 > 0.076 mm  
含水比  $w=36.3\%$  毛管組織恒数  $K=0.357$

土の電導率 $\lambda$ mho cm <sup>-1</sup>	毛管電導率 $\lambda_s$ mho cm <sup>-1</sup>	液の電導率 $\lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	表面電導量 $\lambda_s - \lambda_0$	$\lambda_s - \lambda_0$ $\lambda_0$
1.49 × 10 <sup>-5</sup>	4.16 × 10 <sup>-5</sup>	1.47 × 10 <sup>-5</sup>	2.69 × 10 <sup>-5</sup>	1.83
2.79 × "	7.82 × "	4.10 × "	3.72 × "	0.91
6.75 × "	18.80 × "	13.50 × "	5.30 × "	0.39
2.40 × 10 <sup>-4</sup>	6.90 × 10 <sup>-4</sup>	6.00 × 10 <sup>-4</sup>	9.00 × "	0.15
8.70 × "	24.40 × "	23.50 × "	9.00 × "	0.04

図-4 のようになる。

以上の表及び図から明らかなように  $\lambda_s - \lambda_0$  は  $\lambda_0$  と共に増加する傾向を示すが  $\lambda_s - \lambda_0 / \lambda_0$  は  $\lambda_0$  の大とな

図-4



るに従い急激に減少する。それ故表面電導は液の電導率  $\lambda_0$  が小さい時には  $\lambda_0$  の数倍にも達し表面電導が土の電気伝導の大半を占めることもある。このような結果より表面電導は一般に土の電気伝導の有力な要素であることが推定できたので幾つかの土について表面電導量  $\lambda_s - \lambda_0$  と  $\lambda_0$  を調べてみた。試料は炉乾燥土 300 g に蒸留水 700 g を加え攪拌し一昼夜放置後濾過したものである。表-6 に試料の含水比も併せ示す。

表-6 土の表面電導量  $\lambda_s - \lambda_0$

試料番号	土の名称	$\lambda_s - \lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	$\lambda_0$ mho cm <sup>-1</sup>	含水比 %
1	ベントナイト	9.20 × 10 <sup>-4</sup>	7.30 × 14 <sup>-4</sup>	620
2	荒川砂質ローム	3.60 × "	3.82 × "	38
3	東京近郊の土	2.40 × "	1.86 × "	62
4	"	2.02 × "	0.92 × "	97
5	"	1.64 × "	2.64 × "	71
6	"	1.24 × "	1.80 × "	78
7	"	1.31 × "	0.56 × "	80
8	関東ローム	0.16 × "	1.75 × "	175
9	"	0.10 × "	2.84 × "	159
10	"	0.04 × "	1.20 × "	200
11	カオリン粘土	0.14 × "	1.75 × "	97
12	豊浦砂	0.02 × "	0.01 × "	34
13	相馬砂	0.01 × "	0.08 × "	27

表-6 によると土としては関東ロームの  $\lambda_s - \lambda_0$  が非常に小さいが他の土は一般に液の電導率  $\lambda_0$  と同等の値である。また表面電導は2つの要素から構成されているのであるからその両者の受持つ比率を調べてみ

た。電気滲透電流による表面電導量を  $(\lambda_s - \lambda_0)_1$  とすると (4), (7) 及び (10) 式より次のようになる。

$$(\lambda_s - \lambda_0)_1 = \lambda_{s0} 2/r = 2(D\zeta)^2 / (4\pi)^2 \eta \delta r \dots\dots (12)$$

界面過剰イオンによる表面電導量  $(\lambda_s - \lambda_0)_2$  は, (6), (7) 及び (10) 式より次のように示される。

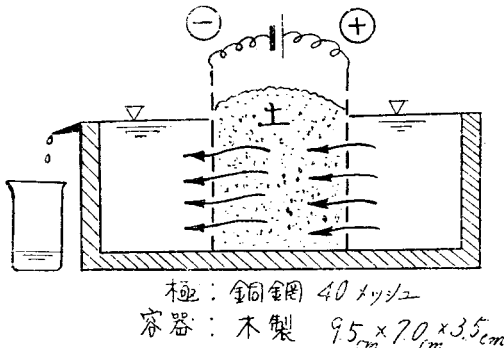
$$(\lambda_s - \lambda_0)_2 = \lambda_{s0} 2/r = 2\nu F v_d / r \dots\dots (13)$$

また

$$\lambda_s - \lambda_0 = (\lambda_s - \lambda_0)_1 + (\lambda_s - \lambda_0)_2 \dots\dots (14)$$

(12) 式と (13) 式を比べてみると前者の計算の方が容易であるので  $(\lambda_s - \lambda_0)_1$  を求めてみた。(12) 式で  $\delta$  を  $5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$  と仮定した。 $\zeta$ -電位は多少 rough ではあるが図-5 に示す装置で測定した。

図-5  $\zeta$ -電位測定装置



流量を  $v \text{ cc/sec}$  とすると  $\zeta$ -電位は次式で求められる。

$$\zeta = 4\pi\eta v (300)^2 / DVK^2 \dots\dots (15)$$

ここに  $D$  は液の電媒係数 (80),  $V$  は電圧,  $K'$  は土の単位体積でなく供試土全体の毛管組織係数,  $\eta$  は液の粘性係数,  $(300)^2$  は C.G.S. 単位を M.K.S. 単位に変換する因数である。(15) 式で求めた結果を表-7 に示す。

表-7 土の  $\zeta$ -電位

試料番号	$\zeta$ -電位 (volt)	試料番号	$\zeta$ -電位 (volt)
1	- 0.031	8	+ 0.005
2	- 0.028	9	- 0.002
3	- 0.013	10	+ 0.003
4	- 0.007	11	- 0.008
5	- 0.010	12	- 0.028
6	- 0.014	13	- 0.017
7	- 0.023		

表-7 によると  $\zeta$ -電位は  $10^{-2}$  volt の桁であるが関東ロームは一桁小さい値を示している。いま土の  $\zeta$ -電位を  $-0.020 \text{ volt}$ ,  $r$  を  $3 \times 10^{-1} \text{ cm}$ ,  $\eta$  を  $10^{-2} \text{ g/cm sec}$  として (12) 式に代入してみると次のようになる。

$$\begin{aligned} & (\lambda_s - \lambda_0)_1 \\ &= \frac{2(80 \times 2 \times 10^{-2})^2}{(4\pi)^2 \times 10^{-2} \times 5 \times 10^{-7} \times 3 \times 10^{-1} \times (8 \times 10^{15})} \\ &= 1.6 \times 10^{-6} \text{ mho cm}^{-1} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

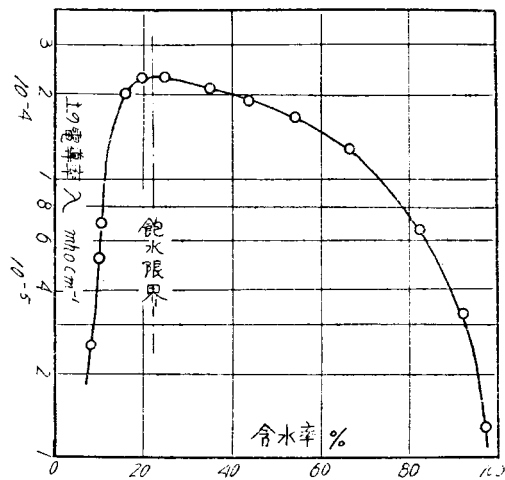
(16) 式の分母の  $8 \times 10^{15}$  は単位係の変換因数である。 $(\lambda_s - \lambda_0)$  はたかだか  $10^{-6} \text{ mho cm}^{-1}$  の桁であるので表-6 の  $\lambda_s - \lambda_0$  と比較してみると土の表面電導はほとんど界面過剰イオンの  $(\lambda_s - \lambda_0)$  の項に支配されるわけである。関東ロームの表面電導量の小さいのは表-7 に示す通り  $\zeta$ -電位が小で土が無活性に近くイオン吸着量(界面過剰イオン量)が少くないためである。pH を下げて  $\zeta$ -電位を大にすると  $\lambda_s - \lambda_0$  も他の土の場合と同様な値を示すようになる。

(C) 土の電導率  $\lambda$  土の電導率  $\lambda$  は毛管中の液の電導率を  $\lambda_0$ , 表面電導量を  $\lambda_s - \lambda_0$ , 毛管組織係数を  $K$  とすると次式で表わすことができる。

$$\lambda = \{\lambda_0 + (\lambda_s - \lambda_0)\} K \dots\dots (17)$$

蒸留水の中に土を少しずつ加えて行つた場合, 含水率と土の電導率  $\lambda$  との関係を図-6 に示す。

図-6 荒川砂質ローム含水率と土の電導率



蒸留水 ( $\lambda_0 = 2 \times 10^{-6} \text{ mho cm}^{-1}$ ) に土を加えて少くと  $\lambda_0$  は漸次増加し毛管組織係数  $K$  は減少する。また表面電導量  $\lambda_s - \lambda_0$  は (12), (13), (14) 式及び図-4 からわかるように毛管半径に逆比例し, かつ  $\lambda_0$  と共に増加する傾向があるので土の量を増すに従い大きくなる。すなわち  $\lambda_0$  及び  $\lambda_s - \lambda_0$  は含水率の減少と共に大きくなるが  $K$  は逆に小さくなる。土が未飽水状態になると毛管中に空気が入り電導路としての毛管組織係数  $K$  は急激に小さくなるので  $\lambda$  も飽水未飽水の限界附近から再び小さくなる。

2. 表面電導の応用研究の一例

表面電導量  $\lambda_s - \lambda_0$  と表面電導率  $\lambda_{s0}$  の間には (10) 式のような関係がある。 $\lambda_{s0}$  は毛管の単位表面積当り

の表面電導であるから毛管径には無関係で液と土の性質により定まるものである。それ故含水比  $w_1$  の土を圧密して含水比  $w_2$  にした場合は液と土の性質に変化がなく  $\lambda_{s0}$  は同一であるので次式が成立する。この場合  $w_1, w_2$  とも飽水状態の場合に限る。

$$w_1: \lambda_{s1} - \lambda_0 = \lambda_{s0} 2/r_1 \dots \dots \dots (18)$$

$$w_2: \lambda_{s2} - \lambda_0 = \lambda_{s0} 2/r_2 \dots \dots \dots (19)$$

ここに  $\lambda_{s1}, r_1$  は含水比  $w_1$  の場合の毛管電導率  $\lambda_s$  と毛管半径であり、 $\lambda_{s2}, r_2$  は  $w_2$  の場合のものである。(18), (19) 式から次式が成立する。

$$r_1/r_2 = (\lambda_{s2} - \lambda_0) / (\lambda_{s1} - \lambda_0) \dots \dots \dots (20)$$

(20) 式から含水比  $w_1$  及び  $w_2$  の場合の表面電導量  $\lambda_{s1} - \lambda_0, \lambda_{s2} - \lambda_0$  を測定すれば含水比が  $w_1$  から  $w_2$  に変化した場合の毛管半径の比を求めることができる。

表—8

試料番号	$w_1/w_2$	$r_1/r_2$	$\frac{r_1/r_2}{w_1/w_2}$
1	830/620=1.35	1.77	1.31
2	38/23 = 1.65	1.53	0.93
2の粘土分	57/83 = 1.47	1.63	1.11
2のシルト分	48/34 = 1.41	1.82	1.29
3	62/38 = 1.63	2.54	1.55
4	97/78 = 1.24	1.73	1.39
5	71/46 = 1.54	2.03	1.32
6	78/53 = 1.47	2.41	1.64
8	176/121=1.46	2.63	1.80
9	160/115=1.39	2.50	1.80

この測定結果を表—8 に示す。

表—8 中の  $\frac{r_1}{r_2} / \frac{w_1}{w_2}$  は含水比の変化に対する毛管径の変化する割合を示すものであるが土により相当の差がある。これは土の毛管特性を示しているものと考えられる。

附記 この報告は飽水状態土の電導現象を少し基礎的に調査したのであるが未飽水状態の場合には更に毛管内の電導路が複雑になり解析困難なことが予想される。

本研究は絶大な協力をして下さった九州電力の坂東宏君及び早大大学院の松本博君に負うところが多い。ここに深く謝意を表する。

参考文献その他

- 1) Freundlich: Colloid and Capillary Chemistry p. 249, 後藤廉平: 膠質化学 p. 196 (至文堂), 金丸競, 祖父江寛: 高分子構造論, p. 605
- 2) 後藤廉平: 膠質化学, p. 197, 金丸競, 祖父江寛: 高分子構造論, p. 610
- 3) Freundlich: Colloid and Capillary Chemistry, p. 244, 後藤廉平: 膠質化学, p. 194
- 4) 本報文 1. (b) (iii) 参照
- 5) 金丸競, 祖父江寛: 高分子構造論, p. 611
- 6) 後藤廉平: 膠質化学, p. 199
- 7) Freundlich: Colloid and Capillary Chemistry, p. 249
- 8) 後藤廉平: 膠質化学, p. 194 (8.7)
- 9), 10) 理化学辞典 (岩波書店)

(昭. 27. 6. 13)

UDC 624.131.6 : 624.136

上下流の水位差に比し巾の狭い矩形断面堤体の滲透

正・貞 田 中 茂\*

SEEPAGE THROUGH RECTANGULAR DAMS HAVING NARROWER WIDTHS AS COMPARED WITH UPPER AND LOWER WATER LEVEL DIFFERENCES

(JSCE Nov. 1952)

Shigeru Tanaka, C. E. Member

**Synopsis** The problems of seepage through rectangular dams which have narrower widths as compared with water level differences between the upper and the lower streams, can not be treated just in the same manner as the ordinary problems through dams with rectangular sections. And yet, up to the present such important problems have hardly been clarified. The writer picked up these problems and clarified the boundary positions of water levels between the zone in which the seepage was governed by the Dupuit-Forchheimer theory and the zone to which the theory was not applicable. He solved the seepage problems within the latter zone by using the writer's approximate theory, and checked whether or not the values obtained by the theory showed good agreement with the experimental results.

\* 神戸大学助教授, 工学部土木教室