

土の電気浸透中の間げき水圧の分布について*

正 員 三 瀬 貞**

ON THE DISTRIBUTION OF THE PORE WATER PRESSURE IN SOIL DURING ELECTRO-OSMOTIC PROCESS

By Tadashi Mise, C.E. Member

Synopsis : The pore water pressure in soil during the stationary electro-osmotic process in soil mass was studied with respect to the mechanism of the variation of its distribution in soil mass and also to the influence on the soil properties.

Several apparatuses for measuring the pore water pressure in soil were designed and used. The analysis of the experimental results may develop a completely different theory of the distribution of the pore water pressure during electro-osmotic process in soil as in the past.

According to this theory, the variation of the distribution of the pore water pressure was chiefly caused by the junction of pH in soil mass and the difference of the speed of electro-osmosis between the right hand side and the left hand side of this zone.

The physical and mechanical soil properties was much influenced by this variation of the distribution of the pore water pressure during electro-osmotic process.

要 旨 土の電気浸透現象において、最も重要な役割を演ずるものの一つである間げき水圧について、その変化の機構と、それが土の性質におよぼす影響について研究した。

すなわち、試作した間げき水圧測定装置を用い、従来の諸研究とは全く異なる観点より実験的研究を進め、土中の間げき水圧の分布の変化してゆく主要原因が、通電によつて生ずる土中の pH の躍層と、これにもとづく電気浸透速度の差によることを明らかにすることができた。

また、このような間げき水圧の分布の変化の結果生ずる土の物理的・力学的性質の変化についても論じた。

1. ま え が き

最初、電気浸透の土質工学的研究は、土の粘着力の増減にのみ注意が向けられて、電気浸透にともなう土の他の性質については関心が少なかつたようである¹⁾。

1947年に、Casagrande, L.²⁾が、電気浸透の効果を土の間げき水圧の低減にあるとしたが、それ以後、電気浸透中の間げき水圧の変化について多くの研究が進められた^{3)~7)}。これらの研究のうち、Casagrande, L. は、間げき水圧の発生を土粒子壁と浸透液との摩擦効果による張力⁸⁾に帰せしめたが、他のものは、間げき水圧を電気浸透透水係数と静水圧透水係数との相対的關係による水頭面差にもとづくものとして種々計算を展開しているようである。これらの考えの根本は、いずれも電気浸透現象と静水圧現象とを、水に対して等価な力によるもの、いわば一様な機械的な力が全体に働らくものとしている点である。しかし、このような考えでは、後述の実験で示されるような負の間げき水圧の分布状況が時間とともに推移してゆく現象を具体的に説明しがたくなることは明らかであろう。電気浸透中に発生する負の間げき水圧は、多くの実験で示されているように、10数日の経過で次第に消滅してゆくものであるが、その値の大きな間においては、粘土層におけるきれつや不等沈下の発生あるいは流動化などの諸現象が生起するので、これらの現象を調べ、制御可能な方策を立てることが必要とされる。

本研究は、この点に関して、土の電気浸透による間げき水圧の発生、分布および推移の状態を従来の説とは全く異なる観点より、実験にもとづいて考察したものである。

2. 間げき水圧の測定法

(1) 測定装置

使用した測定装置のうち代表的なものを、図-1 および 図-2 に示す。

図-1 は、装置の全体を示したもので、A は電解槽、D₁ は液の補給管で塩化ビニール製の外径 10 mm の透

* 昭和 33 年 11 月 6 日 土木学会関西支部学術講演会において発表

** 大阪市立大学講師，工学部土木工学教室

明のもの、 J は空気抜きのためのビニール管（外径 10 mm）、 H は A と水銀マンメータ M を連続するガラス管、 M は水銀を入れたガラス製 U 字管（毛細管内径 1 mm）で、 N は排水量測定メスシリンダー、 Q は所望の薬液補給ビンで P なる開放ガラス管の先端の位置を A 中の土の上端面に合すことにより常に水位差を 0 に保つようにしてある。電源は交流（100 V, 60 サイクル）をセレン整流器を用いて整流したものである。

図-2 は、電解槽の詳細を示したものである。 A は硬質透明塩化ビニール製円筒で、内径 74 mm、長さ 100 mm のもの 2 個を連結した。 B は緊結用のフランジ、 C_1 はゴムパッキング、 D_1 は沈下量測定用ダイヤルゲージ L の脚の挿入管、 D_2, D_4 は導線の挿入管、 D_3 は液の補給のための管で内径 10 mm、 E_1, E_2 は導線、 F_1, F_2 は有孔炭素板で、この炭素板と導線の接続は炭素にあらかじめ表面に貫通しない程度にせん孔し、この中に導線をハンダ付けしたものを強くつめ込んだ後表面に水ガラスを塗布して風乾したのち、接着用合成樹脂を塗布して作った。 G は多孔質石板で、図のごとく上面水平、下面傾斜し、発生気泡の逃散を容易にした。 $H_1 \sim H_5$ は間げき水圧計のチップで硬質塩化ビニール管（内径 2 mm）にガーゼをゆるくつめたものである。これは最初注射針の大きいものを用いたが、充填方法に不硬が多いため取りかえたものである。 I_1, I_2, I_3 は液捕集用ゴム栓で、ここより注射針で液を捕集したり、逆に注入したりするために設けた。 J は G よりの気泡を空気中に逃散させるためのものである。 K は流出管で、流出水はメスシリンダーに受ける。

電解槽 A への試料の充填は、 F_2 および水圧計を組立てたのち、 G の上に東洋ろ紙 No.5 A を敷き、ついで緩衝液を電解槽に満し、間げき水圧計チップなどの気泡を完全にのぞいたあと、土試料の緩衝液で練つたものを少しずつかくはんしながら入れる。十分かくはんしたのち静置し、沈降せしめ、上面を水平に均したあと、No.5 A ろ紙を置き、電極 E_1 を置き、つぎに多孔質石板の小型のものを置き、ダイヤルゲージの先端をこれにたてる。 Q は P を緊結したのち、上下することにより、 D_3 中の気泡をのぞいて P の先端が土表面に一致するように固定する。流出管 K はあらかじめ満水したのち、メスシリンダーに連絡する。装置の組立の終つたあと、2 昼夜放置して後通電し、電流、電圧、流出量、間げき水圧および沈下量を測定する。

図-3 の装置は、図-2 において、(a) 沈下量測定装置をはぶいたこと、(b) 極より発生した気泡が土の表面をおおわないよう水平としたこと、(c) 間げき水圧計チップにガラスフィルターを用いたこと、以上 3 点を改めたものである。

横型箱型電解槽を 図-4 に示す。電解槽以外は、前の装置と同じである。電解槽は透明塩化ビニール製で、5.5×21.5×7.0 cm、厚さ 0.2 cm の寸法であり、両極室 B, C の隔膜としては、有孔塩化ビニール板にろ紙を 2 枚おつたものを用いた。電極として四辺をガラス管で支えた白金板 2×2×0.01 cm を用いた。間げき水圧計チップとマンメータとの連絡管はガラス管を用い、曲部のところだけ硬質ビニール管を用いた。 E に土を入れたのち、透明塩化ビニール製ふたを用いて土試料をおおい、蒸発を防いだ。この装置は主として、液の通電時の着色の変化状態、気泡

図-1 土の電気浸透中の間げき水圧の測定装置 (全般図)

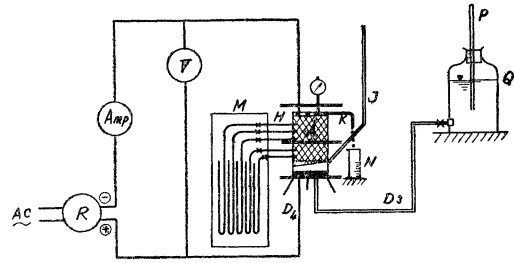


図-2 土の電気浸透中のげき水圧測定装置 (電解槽)

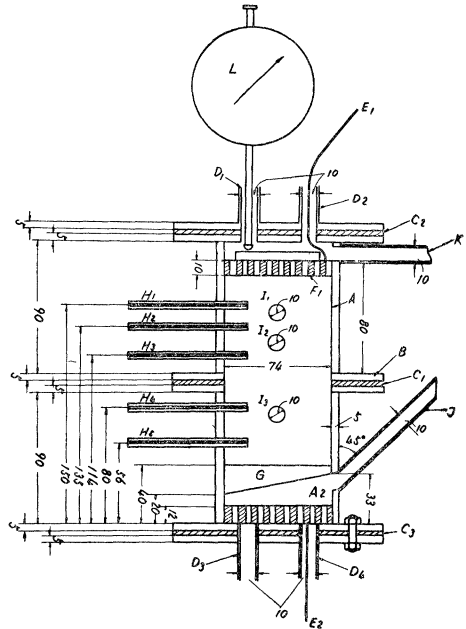
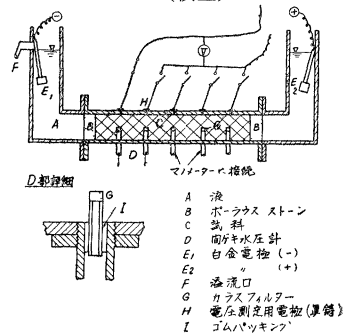


図-3 間げき水圧計を有する土の電気浸透測定装置 (横型)



およびきれつの発生を肉眼で観察できることを主眼とした。

(2) 試料調整および測定方法

使用した試料は、カオリン、ベントナイトおよび大阪平野の堆積層粘土である。カオリン、ベントナイトを使用したのは、普通の土にくらべ、典型的な粘土鉱物を比較的少量にふくむものについての測定値が、種々の組成の鉱物を雑多にふくむ普通の土に対する値よりも明りような意味を持ち得ると考えたからである。

カオリンおよびベントナイトは、交換容量の2倍量の2/100規定の塩酸中に浸漬し、かくはんして24時間放置後、東洋ろ紙 No.131 で静かに吸引ろ過したのち、交換容量の5倍量の2/100規定塩酸で洗滌した。次いで、イオン交換水でろ液中に塩素イオンの認められなくなるまで(5% AgNO₃ で白濁の認められなくなるまで)洗滌した。十分吸引して水分を切つたのち、ろ紙よりはらずし、大型バット上に拡げて風乾し、風乾後磁製乳鉢で粉碎して貯蔵した。以上の操作で大体近似的に水素粘土としてのカオリン、ベントナイトが得られたものとする。

大阪堆積層粘土については、上の方法に従い、一応水素粘土に転換して使用したのであるが、採取した不かくらん試料をみだされないように電解槽に入れ使用したもの、およびねり返したものを使用した場合もある。

これらの土試料を充填したあと、気泡がどこにも残留しないように緩衝液を入れ、チップを取りつけて、間げき水圧計の読みを調節し、電解槽の両極室の水位および補給ビンの水流を調節し、電流回路を整備して2昼夜放置したのち通電し、電流、電圧、流出量、間げき水圧および沈下量を測定した。

また横型電解槽では、一定時間ごとに、一定位置より土試料を小さなステンレス製スパチュラで取り、10倍量のイオン交換水を加えて、pHを測定した。また、カオリンをカセイソーダでねり、pH 10.3にしたのち、フェノールフタレンを加えて赤色にしたものを入れ、電気浸透の進行とともに退色してゆく状態をも観察した。

(3) 測定結果

種々の測定結果を得たが、いずれも傾向としては同じであるので、ここでは、図-4の装置についての測定結果について述べることにする。

この場合の間げき水圧の分布の通電時間による変化の状態を 図-5 に示す。また電流および電圧の時間的変化の一部を 図-6、図-7 に示す。

多数の測定結果について、共通な点は、試料中央部に

図-5 土の電気浸透中に生ずる間げき水圧の時間的変化

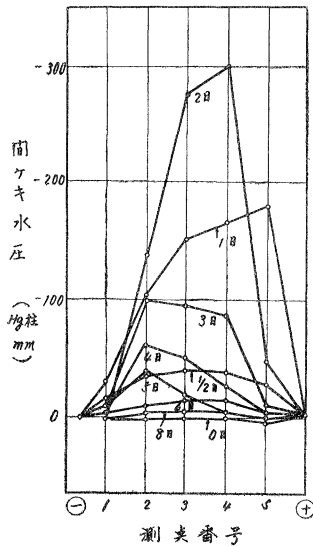


図-4 間げき水圧計を有する土の電気浸透測定装置(横型上面解放)

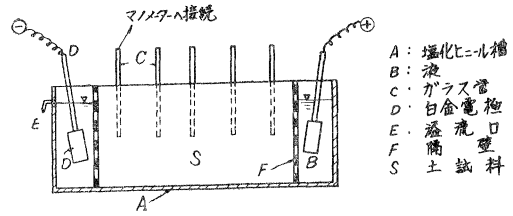


図-6 土の電気浸透中の電流の時間的変化

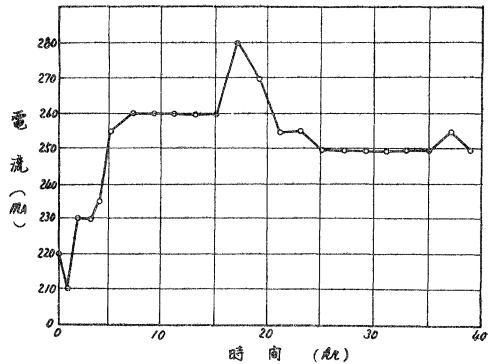
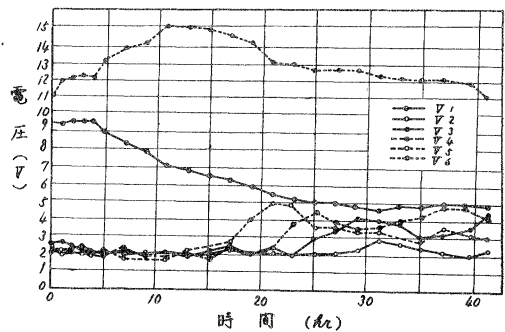


図-7 土の電気浸透中の電圧の変化



おける間げき水圧が最大の負圧を呈することであるが、この傾向は、図-5 のように時間とともに変化してゆくものである。

3. 間げき水圧に影響する因子

土の間げきに存在する水の圧力は、条件に応じ非常に広範囲に変化する。電気浸透中に生ずる間げき水圧の変化は、電気浸透圧によって水が陽極側から陰極側へ流れようとするために生ずるものがおもなものである。この結果、土試料内部の間げき水圧は、特別の条件を与えない限り、ことごとく土試料の中央部において極大の負圧をていし、この負圧は時間の経過とともに絶対値を増し、数日後に最大値をとり、次いで次第に絶対値を減じて消失してゆく。この過程は、図-5 に示すとおりである。このような間げき水圧分布に影響する因子は種々雑多であるが、特別な場合をのぞき、土試料中の pH の各点の分布が最も大きな原因であることを見出した。以下 pH 分布について解説するとともに、他の要因についても、簡単な考察を進めることにした。

(1) 土試料中の pH の分布の時間的变化

図-4 の装置について、通電後の各時間ごとの土試料中の一定点における pH をガラス電極を用いて測定した。結果を図-8 に示す。また、このときカオリンを用いて、あらかじめフェノールフタレインにより着色しておき、時間の経過につれての退色状況を観察した。

その結果によると、土試料は、各部とも均一で、最初 10.3 の pH をもっていたのであるが、通電と同時に陽イオンは陰極に向い、陰イオンは陽極に向うため、両極付近の反対符号のイオンの濃度が高くなり、陽極側は酸素の放電により酸性に、陰極側は水素の放電によりアルカリ性となる。粘土は、通常負に帯電しているため、陽イオンは通しやすく陰イオンは通しにくい傾向にある。結局陽極室の酸性化と陰極室のアルカリ性化は、電気浸透現象とは関係なく成立する。一方、電気浸透は通電と同時に生起し、透が生じる。補給ビンからは、浸透量に等しい液が不断に補給されてゆく。この補給液は、最初の液同様 pH 10.3 であり、かなりの緩衝能を有するものである。この液が、陽極室に補給されると、陽極室の酸性化が補給液の pH に補なわれて pH 2~3 となり、この pH 2~3 の液が次第に陰極に向って浸透してゆくことになる。この pH 2~3 の部分は、白色の部分として明りように観察せられる。陰極側のアルカリ性液は、OH⁻ イオンの集積ともなつて、それが陽極側に向って拡散を始め、このため時間の経過とともに、pH 14 以上の範囲が陰極から陽極に向って拡つてゆく。この pH 14 以上の部分は、深紅色の部分で陰極室に接して観察せられる。この陰極よりのアルカリ性液の拡散は、電気浸透による陽極部の酸性液が電気浸透流に乗るので次第に後退を始め、数日後には、全試料にわたり pH 2~3 になり、陰極隔膜に接して、急激な pH の傾斜 (pH 3→pH 14) の境界面が生ずる。

最初、全体にわたり pH 10.3 であつた土試料は、通電を開始してからは、電気分解をともなる電極反応にもとづく陽極の酸性化と、電気浸透にもとづく緩衝液の浸透とにより、pH 2~3 から pH 10 以上への pH の急上昇する境界層が土中に生じ、そのような境界層が時間とともに陰極に向って進んでゆく。極間距離 15 cm の場合を図-9 に示す。図-9 によると、境界層の進行速度は、最初は急速であるが、次第に遅くなり、1 週間くらいで平衡値に近くなる。通電時間の常用対数を取り、境界層の進行距離との関係を見ると、図-10 のように完全な直線となる。実験の精度よりみて、これは、きわめて明りような関係が両者に存在することを示して

図-8 通電中の土の pH の時間的变化

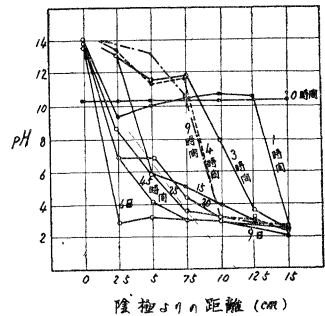


図-9 電気浸透中の土中の pH の躍層の移動状況

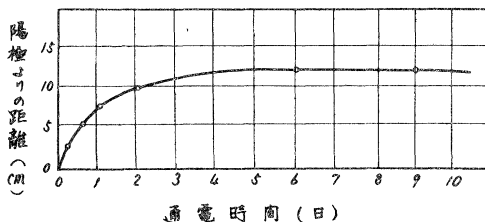
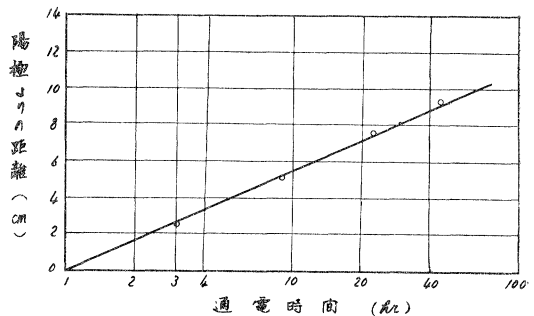


図-10 土の電気浸透中の躍層の移動状況



いる。すなわち、陽極を座標の原点にとり、陰極の方向へ x 座標を正にとると、境界層の座標を x 、時間を t 、 A を定数とすると

$$\frac{dx}{dt} = \frac{A}{t} \dots\dots\dots (1) \quad \text{ゆえに} \quad eA^2 = t \dots\dots\dots (2)$$

となる。

図-5 より、電気浸透時の土試料中に発生する間げき水圧は、最初、陽極側において、負の極大点があり、その極大点の位置は、時間の経過とともに陰極側に移り、間げき水圧の絶対値は、時間の経過とともに次第に上昇し、2日目くらいを最高にして減少をはじめ1週間後にはもとの状態になるようである。この間の pH の変化は、図-8 に示すとおりで、両端の開放性を考慮に入れるとき、きわめてよい一致を示している。このことは、つぎのように説明される。

カオリンの電気浸透透水係数は、図-11 によると* pH 2 と 12 とでは数倍の差がある。土の流れ方向の断面において、収縮などによる体積変化がないとすれば、定常状態が維持されるかぎり、土試料の各点で、Bernoulli の定理が維持される。すなわち

$$E_K + E_P = \text{const.} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E_K 、 E_P はそれぞれ Kinetic energy, Potential energy である。これは、浸透流の速度を v 、質量を m 、密度を ρ 、重力常数を g 、その点のある基準面よりの高さを h とすれば、

$$1/2mv^2 + \rho gh = \text{const.} \dots\dots\dots (4)$$

で示される。 h は水位差であり、いまの場合は間げき水圧にほかならない。境界層では、間げき液の pH が 2 から 10 以上に飛躍的に増大するので、定常状態が維持されるかぎり、間げき水圧は境界層の陽極側が陰極側に比し、大となる。しかし、この状態は通電後、きわめて短時間の間の現象である。一方、境界層を境として陽極側は電気浸透速度が小さく、陰極側は電気浸透速度が大であるので、この境界層付近で水には強大な張力が働かし、土にきれつが発生する。きれつの発生と同時に間げき水圧は負となり、きれつの増大とともに、間げき水圧の負値もしだいに大となる。すなわち、大きな気泡を持つたきれつの部分が、時間の経過とともにしだいに陰極側に移行してゆくのがみられる。この場合、大きな負圧のため、きれつに接した土から小さきれつに沿って間げき液がきれつ中に流れ込むことが起こる。したがって、負圧の大きな値は、瞬時に低下し、しばらくたつてもとの負圧に回復してゆく。ゆえに、間げき水圧測定中に観察される間げき水圧値のはげしい変動も、その大部分の理由をこれに帰することができる。

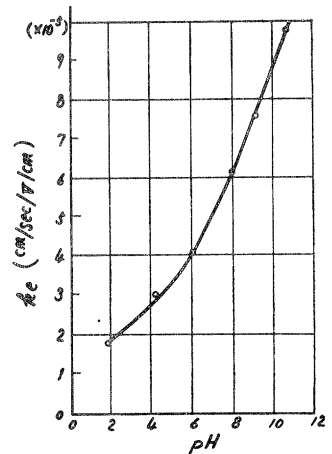
土試料の両端が大気圧に開放されているので、間げき水圧の負圧の最大値が生ずるのは、ちょうど境界層が中央にきたときであり、それよりはずれた場合はいずれも小となる。また、時間の経過につれて pH の躍層が、しだいに陰極側に移行するので、pH の躍層にもとづく負圧は、開放大気圧の影響を受けて次第に消滅してゆく。したがって、間げき水圧の分布も土試料を通じて次第に均一化されてゆくことになる。

以上のように、電気浸透過程中には、試料中に pH の急に変化する層が発生し、このような層が時間の経過とともに陰極に向つて次第に発達してゆき、かつその点で間げき水圧が負の極大値をていすることが明らかとなった。この極大値は、試料中央部に発生した場合が最大である。すなわち、土試料中の間げき水圧の分布は、全くこの pH の急激に変化する層にもとづくものといえるので、著者は、この層を電気浸透過程中に、土試料中に発生する、“pH の躍層”(layer of discontinuity of pH) となづけることにした。

上述の推論は、きわめて簡単な考察のもとに進められたもので、pH の躍層における間げき水圧と pH との関係には、なお、その他多くの因子が複雑に関係するであろうことは想像にかたくないところである。

このような過程は、したがって間げき液の組成および補給液の組成により、また電極の配列条件によつても異なるわけで、場合によつては、負の間げき水圧の全然発生しない場合も、また発生した間げき水圧の負の極大値がいつまでも消失しないというようなこともありえる。このような個々の現象については、さらに数多くの測定を必要とするが、本実験のみからも、電気浸透現象を土に應用する場合、pH について考慮を払わないときは、予期する成果をあげ得ないということを強調できるものである。

図-11 土の pH と k_e との関係 (k_e は電気浸透による透水係数)



* 別に発表の予定

(2) 土試料の粒度分布

土試料がその粒度分布において各部一様でない場合は、実際の地盤、土構造物中でよくそう遇するところである。この場合には、上述の pH の躍層による影響のほか、粒度分布の影響が顕著に入ってくる。粒度分布とくにコロイド含有量により、電気浸透透水係数は大きく影響される。ゆえに、一つの通電土試料中に粒度分布の異なる部分が存在するときは、定常状態が巨視的に成立しているものとして、その k_e の差により、間げき水圧の土中分布が種々異なつた形をていすることが考えられる。実際に、細長い円筒中に、シルトと粘土を交互に入れて通電した場合には以上のような現象を認めることができた。

4. 電気浸透にともなう土の性質の変化

(1) 含水比の分布

陰極の方から間げき液が排出され、それと同量の液が陽極の方から補給される定常的電気浸透において、このような定常条件が土試料のどの微小な部分でも維持されているときには、土試料中の間げき水量分布、いいかえると、土の含水比分布は、各部とも一様であるはずである。しかし、実際には、土試料の含水比は場所により非常に異なることが観測されている。これには、種々の原因があるが、土の k_e が部分的に異なることが主要原因の一つであろう。シルトや粘土の互層からできている地層のように、初めから層ごとに k_e が異なっている場合や、また通電のような外部的処理により土中の pH が部分的に変化し、そのため土の k_e が部分的に異なつてくるといような場合には、 k_e の大きな層の次の層には水が次第に集積してゆき、一方その前の層では水が次第に少なくなつてゆくという現象、すなわち、一方では含水比が増加し、他方では含水比が減少するという現象が生ずる。この場合、土の透水係数 k が大きなときは、この効果は平均されて事実上消滅してしまうが、土の k が小さいときは、この効果は顕著にあらわれる。したがつて、前述のように pH の躍層が時間とともに陽極の方から陰極の方へ進んでゆく場合には、最初に、陽極に近いところで含水比の低い部分と、含水比の高い部分とが生ずる。含水比の低い部分は、きれつおよび気泡が発生し、高い部分はほとんど流動状態となる。そして、この低い含水比の部分と、高い含水比の部分との境界付近で、非常に堅い固結帯が生じてくる。このような pH の躍層での含水比の変化は、躍層の移動につれて、しだいに陰極の方に進行してゆく。一方陽極の方の含水比は、躍層付近より少しく増大したままで存在する。

(2) 土の物理的・力学的性質の変化

(1) で述べたように、土試料中の含水比の分布は通電とともに変化するが、これは土の物理的および力学的性質が含水比の関数である点よりみて、通電された土の性質に大きな影響を与えることとなる。すなわち、土が十分圧密されている場合は、含水比の分布の変化も小さく、力学的性質への影響も小さいが、土がゆるく、したがつて間げき比の大きな場合は、含水比の分布における差異が非常に大きく、そのため力学的性質も大きく変化する。含水比の低いところでは、せん断強度はいちじるしく大であり、含水比の高いところではほとんど 0 に近い場合も生じてくる。含水比の低いところでは、一方土粒子間の強いけん引力のために、きれつが多数発生し、このため見掛け上のせん断強度が低下する。この場合、土が層をなして厚い場合は、圧密と膨張が生ずる。すなわち、地盤面についていえば、最も好ましくない不等沈下が生じる。一方、過剰間げき水圧が低下するので、有効荷重の増加による土の強度の増大が促進されることとなる。

5. むすび

土の電気浸透中に発生する過剰間げき水圧について、その発生機構と、それが土の性質に与える影響について研究した。

まず、間げき水圧の測定のための装置および操作について詳述した。この場合の測定は、長期間にわたるので、電極付近にガスが集積することによるなど種々の分極現象によつて電流が変動することをできるだけ避けることに重点がおかれた。

次に、間げき水圧の分布に影響する諸因子について、従来の説と全く異なつた立場において研究し、その主要原因が、通電によつて生ずる土中の pH の躍層と、これにもつづく電気浸透速度の差によることを明らかにした。また、このほか、土の粒径および粒度分布に原因する過剰間げき水圧の分布についても論じた。通電中に発生する間げき水圧は、負値をていするが、これは通電中に土中に発生した pH の躍層にもつづく生じたものである。間げき水圧の負値は、通常 10 数日経過すると消滅するが、その初期の値が過大であると、きれつ、不等沈下あるいは流動などを発生することとなる。これらの現象は、pH を制御すること、印加電圧の増加速度をできるだけ緩徐とするような段階的通電をとることなどにより、ある程度制御できるものといえる。

最後に、電気浸透にともなつて生ずる土の性質の変化について述べた。すなわち、通電によつて生ずる pH の

躍層にもとづく、土中の含水比の分布の不均一性、それらにもとづく物理的・力学的性質の変化について論じた。

本研究にあたり、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、京都大学名誉教授 岡田辰三博士、京都大学教授 吉沢四郎博士、京都大学助教授 松尾新一郎博士、同 渡辺信淳博士に深甚なる謝意を表す次第である。また、実験を手伝っていただいた京都大学 佐々木 伸氏、大阪工業大学 岡 巖氏に衷心より謝意を表明する。

参 考 文 献

- 1) Casagrande, L.: "Verfahren zur Verfestigung toniger Bden" German Patent No.621694 (1935)
- 2) Casagrande, L.: "The application of electroosmosis to practical problems in foundations and earthworks" Technical paper No.30, Dep. Sci. Ind. Res. London (1947)
- 3) E.C.W.A. Geuge, C.M.A. de Brugn, K. Joustra: "Results of laboratory investigations on the electrical treatment" Proc. 2nd. Int. Conf. Soil. Mech. & Found. Eng. Vol 3 (1948) pp 153~157
- 4) Silverberg, L.: "A new problem in soil physics" Statens geoteknsika, Instituts, Meddelande (1949)
- 5) U.S. Bureau of Reclamation: "Laboratory investigation of electrical drainage and electro-chemical stabilization of soils" Structural Research Section Report. No.29, Denver Colorado (1951)
- 6) Casagrande, L.: "Elektro-osmotic Stabilization of soils" Journ. Boston Soc. Civ. Eng. 39 (1952) pp 51~83
- 7) Wang, W.S.: "Pore water pressures in soil during electro-osmosis" Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. & Found Eng. 1 (1953) pp 76~79

(昭. 34. 8. 3)