

## 電気化学的土質安定工法について

三 瀬 貞\*

## 1. 緒 言

電気化学的土質安定工法に関する研究は、相当古くから考えられてきた。化学的土質安定工法としては、土に種々の薬品を加えて締固める方式を取るものもあり、これらのうちには、土の界面電気化学的性質を一部利用しているものもあるが、本研究では、もっぱら、外部から電気エネルギーを直接与えて土を安定化することを目標とする安定工法を研究したものである。

この方面の研究では、1935年前後よりドイツにおいて発達し、遂次ヨーロッパを経てアメリカにおいても、実施せられてきた電気浸透脱水工法がまず取りあげられる。この原理は、古く界面電気化学の方面で詳細に研究されていたが、この現象を土質安定工法として利用するにあたって、形式的に従来の方法をそのまま踏襲してきたので、多くの矛盾と困難を内包してきた。著者は、これについて、脱水の機構と施工に対する管理指針ともいうべきものを理論的、実験的に研究し、その一部を発表してきた<sup>1)</sup>。

また、電解固結は、薬液を電氣的に土中に浸透せしめ硬化をはかるものであるが、これについても数年来研究を続けてきた。

本報告では、以上の土質安定工法における電気化学的方法の適用に関する研究について検討を加えたものである。

## 2. 電気浸透脱水による土質安定工法

電気浸透による土の脱水現象を利用し、軟弱粘土質地盤の安定を図る工法を電気浸透脱水による土質安定工法という。この方法は、歴史的にみると、初めは、電気浸透ではなく、電気化学的固結法を目的および対象として研究がはじめられていたが、次第に電気浸透を利用する方法に移行して行ったものである。すなわち、それは、L. Casagrande<sup>2)</sup>の特許にかかる粘土質軟弱地盤の電気化学的固結法にはじまるといえる。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、K. Endell<sup>3)</sup>、U. Hoffmann<sup>4)</sup>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ゲキに析出充填される金属酸化物の鉱物化に帰した。L. Erlenbach<sup>5)</sup>、L. Casag-

rande<sup>6)</sup>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、W. Bernatzik<sup>7)</sup>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はじまる。次いで、L. Casagrande<sup>8)</sup>が始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 W. Schad と R. Haefeli<sup>9)</sup>が電気浸透脱水の基本式を立てた。Preece<sup>10)</sup>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<sup>11)</sup>は電気浸透と熱浸透の類似について述べた。その他、W. Bernatzik<sup>12)</sup>は電気浸透圧について述べ、Geuze<sup>13)</sup>らは3軸圧縮試験機を応用して電気浸透の土の強度に及ぼす影響をみ、Dawson<sup>14)</sup>、Vey<sup>15)</sup>らは前記 Preece 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、L. Casagrande<sup>16)</sup>、K. Steinfeld<sup>17)</sup>、Bellugi<sup>18)</sup>は電気浸透の実際への応用について研究した。

以上のように種々の研究がなされてきているが、いずれも似た点が多いようである。

著者は、多数の実験より、脱水過程を熱伝導に対比して考え、基本式を誘導した<sup>1)</sup>。すなわち、印加電圧(有効電圧)を  $E$ 、時間を  $t$ 、電気浸透脱水係数を  $C_e$  とすると

$$C_{ex} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + C_{ey} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + C_{ez} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{\partial E}{\partial t} \dots\dots(1)$$

で示される。

このことより、有孔電極を千鳥形に配置した場合を例として、粘土質地盤の電気浸透による脱水過程を考察した<sup>19)</sup>。すなわち、中央に陰極1本、周囲に陽極6本を配したとき、流入区域を円として、鉛直方向への電気浸透脱水係数を  $k_{ev}$ 、電気浸透脱水係数を  $C_{ev}$ 、水平方向におけるそれらを、それぞれ  $k_{eh}$ 、 $C_{eh}$  とすると、基本方程式として

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

が得られる。

この式は、実験値と良好な一致を示すことが認められた。

## 3. アルミニウム電極の電解固結による土質安定工法

アルミニウム電極による電気化学的固結法は、土中に挿入したアルミニウム電極を通して土に直流を印加する

\*工博 大阪市立大学助教授、工学部土木工学教室

もので、L. Casagrande をはじめとして多くの人の実験があり、陽極に接する土を固結することにより、クイとして用いた陽極の支持力を増大することを目的としている。

一般に、この電気化学的固結法においては、電気浸透による脱水作用と電解したアルミニウムを土粒子間ゲキに沈澱固結させる電気化学的固結作用との2作用が同時に生ずる。ゆえに、アルミニウム極による電気化学的固結法では、所要電力量は、電解、電気浸透ならびに加熱その他に費される電力量よりなり、普通 1 m<sup>3</sup> の土には、3~360 kWh くらいを要するといわれている。この効果は、従来の実験によれば、クイ状電極の支持力において5~10 倍の増加を示し、固結された粘土は、数年間水中に放置しても崩壊しないことが認められている。従来の報告によれば、団結の機構は不明な点が多く、その上固結が陽極周囲に生ずるものとされていたが、著者は、実験的に、その誤りであることを検討した<sup>20)21)</sup>。すなわち、この場合における固結は、pH の躍層における水酸化アルミニウムの沈澱と酸化およびこの躍層の両側における電気浸透透水係数のいちじるしい変化にもとづく土の脱水硬化によるものであることを結論づけた。これは、従来の説とは全く異なるところではあるが、これにより固結層の時間とともに推移してゆく現象や、pH によってその位置を自由に変えることの可能なことの説明をすることができた。

#### 4. ケイ酸ナトリウムの電解固結による土質安定工法

前述した、アルミニウム電極による電気化学的固結法は、アルミニウム金属を電解的にイオン化して沈澱させる操作をとるので、直接アルミニウムイオンを含む溶液を電極付近に注入した方が能率がよいであろうと考えられる。ただ、この場合、既述の通り生成するケイ酸アルミニウム複合体は、十分な強度を持ち得ない欠点と生成後、短期間はpHの変動で再溶解のおそれも生ずる。そこで、ケイ酸ナトリウム水溶液を陰極または陽極より多孔性物質を通して注入し、これに直流電圧を印加して、泳動せしめることが利用できないかを検討してみた。この場合、問題となる点は、濃厚なケイ酸ナトリウム水溶液の粘性が非常に高いことと、pH が高いことおよびケイ酸イオンが遊離状態で存在しがたく、ゾル化またはゲル化しやすいことである。

このケイ酸ナトリウムの土中の移動

を起させるものを大別して、電気浸透による流動とイオン泳動による流動とにわけ、それぞれについて論ずることとする。

#### (1) ケイ酸ナトリウムの電気浸透注入による土質安定工法

電気浸透による注入工法は、電気浸透を利用して薬液を地中に誘導し、その薬液の作用により、土を安定にする方法である。

本研究では、薬液としてケイ酸ナトリウムを用いた。さきに発表した装置<sup>22)</sup>を用い、ケイ酸ナトリウムの濃度を種々に変えて浸透量を測定した。試料としては、大阪梅田駅構内より採取した梅田層粘土を用いた。各濃度段階を水ガラス溶液（比重 1.28）1 に対する水の量で示した。すなわち、1/300（水ガラス 1：水 300）、1/150、1/80、1/20、1/10、1/5 の7段階として移動量を測定し

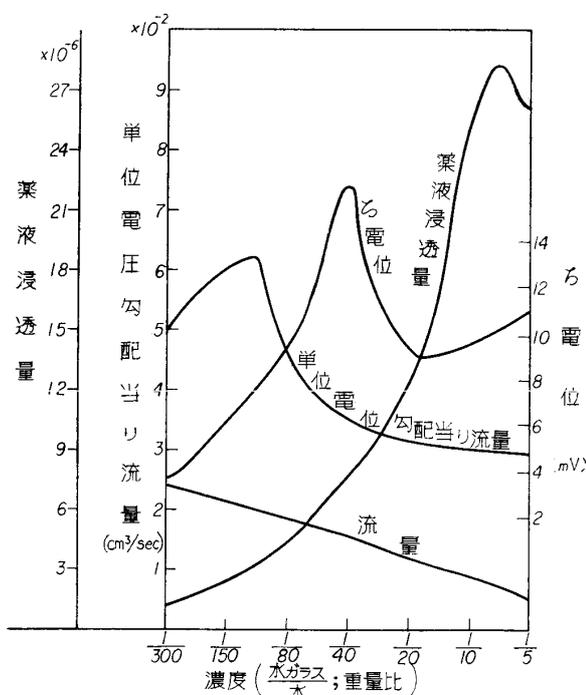


図-1 濃度による浸透量の変化

表-1

C	1/300	1/150	1/80	1/40	1/20	1/10	1/5	水道水
X'	1,050	620	390	220	132	95	61	—
λ	0.000625	0.00106	0.00168	0.00298	0.00498	0.00692	0.01075	—
4π/D	0.157×9=1.41×104=14100							
v'	0.025	0.022	0.020	0.020	0.014	0.010	0.008	0.27
v''	0.00042	0.00037	0.00033	0.00033	0.00023	0.00027	0.00013	—
η	0.0101	0.010	0.0102	0.0104	0.0108	0.0114	0.0138	0.01
I	0.0105	0.0091	0.0090	0.0073	0.0178	0.0185	0.024	—
1/I	95.2	110.0	111	137	56.3	53.1	41.7	—
ζ	0.0036	0.0060	0.0089	0.0168	0.0098	0.010	0.0113	—
M(×10⁹)	1.4	2.5	4.1	8.2	12	27	26	—

C: 水ガラスと水の重量比 (水ガラス/水) X': Kohlrauch 電橋に表われた見掛け抵抗値 (Ω)  
 λ: 液の比電導度 (Ω<sup>-1</sup>, cm<sup>-1</sup>) D: 液の誘電率  
 v': 浸透水の速度 (cm<sup>3</sup>/min) v'': 浸透水の速度 (cm<sup>3</sup>/sec)  
 η: 液の粘度 (センチポアーズ) I: 電流の強さ (mA)  
 ζ: 界面動電位 (volt) ζ =  $\frac{4\pi\eta\lambda}{ID}$  M: c·v''

た。結果を 図-1 および 表-1 に示す。

液の浸透効果は、ケイ酸ナトリウム分の単位時間当りの浸透量で示されるので、これは、表-1 で  $M=cv$  で示される。この量の極大値は、図-1 よりほぼ濃度が 1/8 のところにある。

結局、効率の点よりみて、この場合、濃度を水ガラスと水の比で 1/8 に規定した方がよいと結論することができる。また、この場合の注入実験結果を 図-2、図-3 に示す。

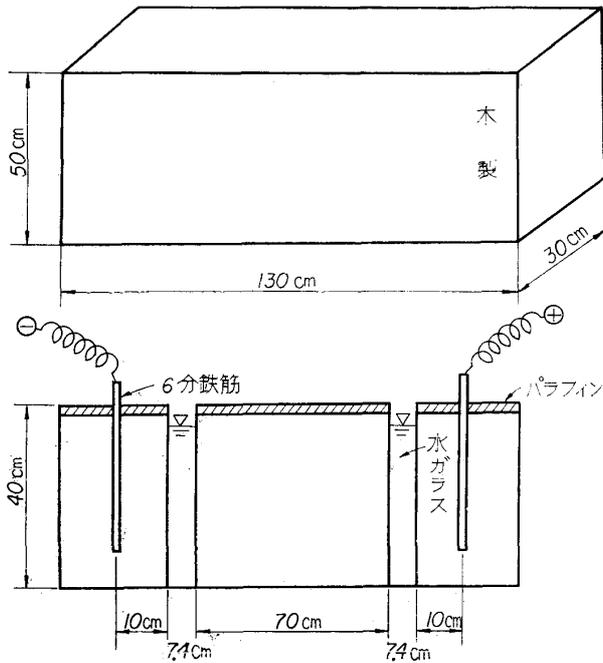


図-2 電気浸透注入実験装置

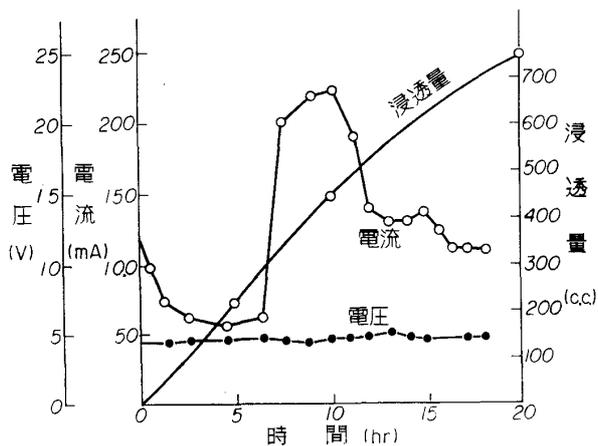


図-3 電気浸透注入実験

(2) ケイ酸ナトリウムの電気泳動による土質安定工法

本方法は、土中に直流を通電し、それによって硬化性物質を土中に誘導し、その会合の結果生ずる硬化性物質をもって粘土質軟弱地盤の団結を図る目的で著者<sup>23)</sup>らの考案した方法であって、これによると電気浸透法のみによる安定工法のいくらかの欠点は除去できるものと考えられる。

i) 電解固結法の原理

一般に、固結性物質を  $A, B$  で表わし、固結に必要な助剤を  $MN$  とする。ここに、 $A, M$  は正に帯電しており、 $B, N$  は負に帯電しているものとする。また、 $A^+, B^-, M^+, N^-$  を含む物質をそれぞれ  $AC, DB, ML, KN$  とし、土中相対した位置に有孔の筒状電極を設け、負の極筒中には、 $DB, KN$  を正の極筒中に  $AC, ML$  を入れる。極から土中に通電するとそれぞれ反対符号の電極の方へ移動してゆき、途中土の中で会合し、凝固と固結反応が始まる。

ii) ケイ酸の移動量の測定

土に直流を通じた場合、浸透流により土中のイオンおよびコロイドが運搬され移動するが、一方電場によって、陰陽に帯電したイオンおよびコロイドが反対符号の極に向かって泳動する。この場合、稀薄溶液あるいは稀薄分散相の場合は、一応各イオンあるいはコロイド粒子が独立していると考えてよいが、濃厚溶液および濃厚分散

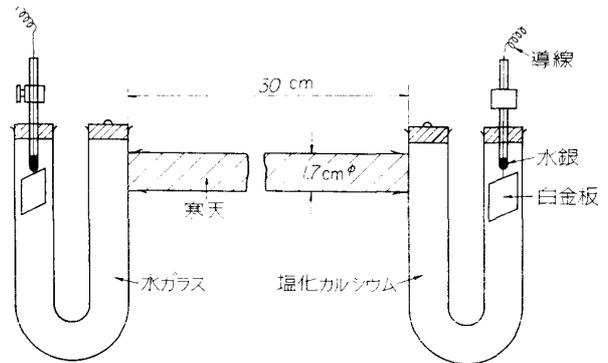


図-4 電気泳動装置

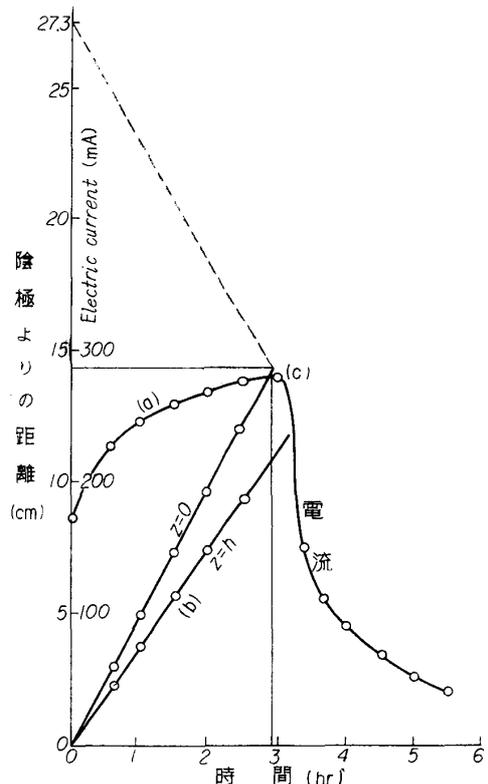


図-5 ケイ酸の移動状況

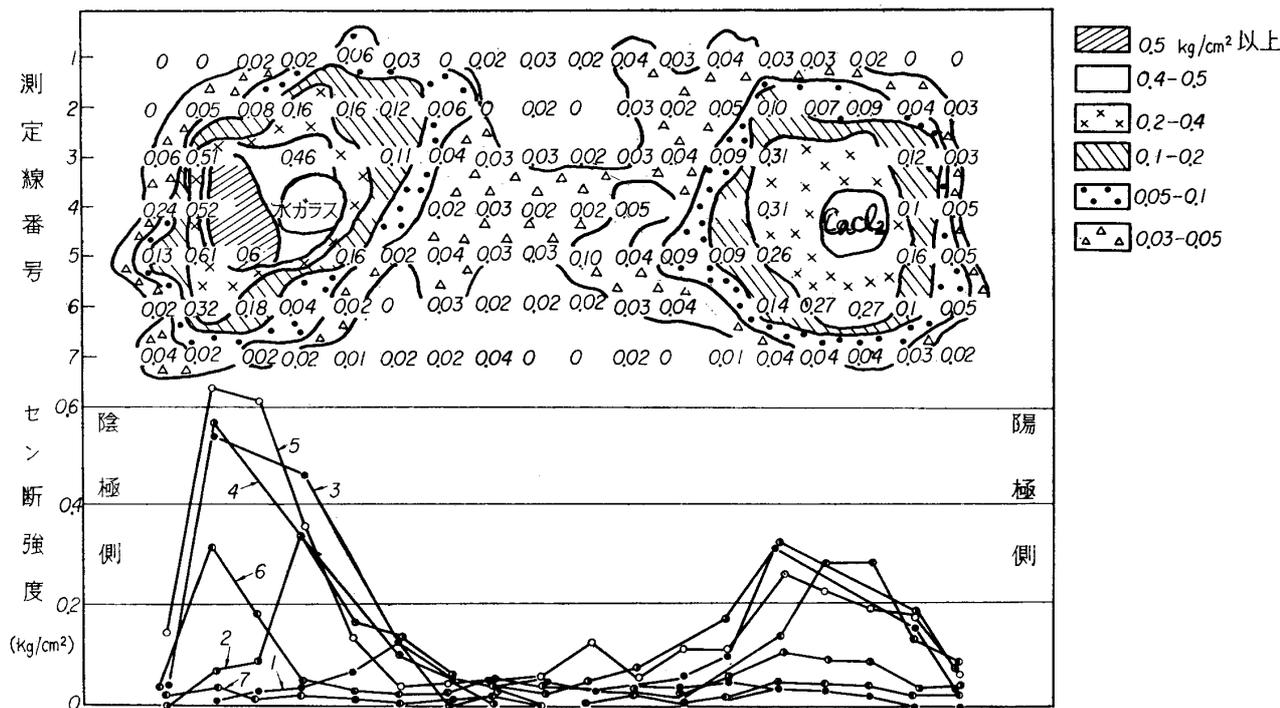


図-6 電解固結の効果

相の場合は、各イオンおよびコロイド粒子の相互作用を考慮する必要があるので理論的取扱いは困難である。

本研究では、図-4 に示す装置を用い、寒天もしくは土を用いて、ケイ酸コロイドの移動を観察してみた。その結果を、図-5 に示す。図-5 で  $z=0$ ,  $z=h$  の直線は、ケイ酸コロイドの上、下端の進行距離を示す。

### iii) ク形箱による実験

長さ 1 m, 巾 40 cm, 高さ 20 cm の箱の中に土を入れて、陰極側に水ガラス、陽極側に塩化カルシウムを入れた場合の試験結果の一例を図-6 に示す。図の数字はベインセン断試験値である。

結果よりみて、表面より下方に行くに従い、中央部の強度が減少している。このことは、表面伝導と表面蒸発による含水量の低下に起因していると考えられる。極の中間部の強度の小さいことは薬液の浸透量の少ないことを意味している。これは、土中の塩類とカルシウムおよびケイ酸などの結合による遮断効果とも考えられる。また土の pH 分布よりみて、カルシウムイオンおよびコロイド状ケイ酸の等電点における電荷放出の結果よりくる泳動停止効果も考慮しなければならない。いずれにしても、この種土壌では浸透しやすい塩化カルシウムのみを用いて一応浸透効果を増大させておくことが必要であるが、強度としては充分期待できる大きさであることが結論される。

## 5. 結 言

本報告では、電気化学的土質安定工法の応用として、電気浸透脱水による安定工法と電解団結による安定工法とをとりあげ、それぞれの機構を主として土質化学の面

より究明してみた。

終りに、終始御指導をいただいた京都大学教授村山朔郎博士、同助教授松尾新一郎博士に深甚なる謝意を表明する。

## 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., : "Beitrage 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.," Sonderdurch aus dem Schlu Bericht ds Intern., (1939) pp. 319~924
- 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 443~446
- 12) Bernatzik, W.: "Contribution to the problem of seepage pressure in electroosmosis.," Proc. 2nd 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. 578~589
- 16) Casagrande, L.: "Electro-osmotic stabilization of soils.," Journ. Boston Soc. Civ. Eng. **39** (1952) pp 51~83
- 17) Steinfelt., K.: "Über Theorie und Praxis elektroosmotische Bodenentwässerung.," Bautechnik **28** (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) 三瀬 貞: 粘土の電気浸透による脱水工法の一考察, 土木学会論文集 **69** (1960) pp. 22~27
- 20) 村山朔郎, 三瀬 貞: "On the electrochemical consolidation of soil using aluminium electrodes" Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. **1** (1953) pp. 156~159
- 21) 三瀬 貞: 土の電気浸透中の間げき水圧の分布について, 土木学会論文集, **67** (1960) pp. 42~48
- 22) 三瀬 貞: 土の電気浸透透水係数について, 土と基礎 Vol. **8**, No. **37** (1960) pp. 27~33
- 23) 村山朔郎, 三瀬 貞: 電解重合による土の新固結法, 土木学会誌, **39** (1954) pp. 20~25

## 討 論

○山内豊聡 (九州大学)

図-1 の  $\zeta$  電位はどのようにして測ったか。

○三瀬 貞 (発表者)

この  $\zeta$  電位は浸透量から逆算したものである。

○山 内

コウ配あたり流量については、電流が1ばん高い所を流れるように感じるが、図-1 ではそうになっていないのはなぜか。

○三 瀬

電位だけではなく、その中の電解質、などの影響が関係しているかと思う。

○犬東尚生 (芝浦大学学生)

61 ページの 図-6 について水が陰極に集まると、陰極の方の土が弱くなるのではないかと思う。

○三 瀬

実際水だけを電気浸透で抜く場合は、陰極に水がどうしても集積して、それを抜くことがかなり困難で、陰極付近が弱くなる傾向が見られる。水ガラスの場合は陰極から陽極に向かって浸透するが、その場合その周辺から反対極に向かって浸透量がだんだん急激に減少していくわけである。従って周辺が水ガラスの浸透により非常に強度が増大するというので、水の浸透による強度の減少よりも、水ガラスの浸透による強度の増大のほうが大きく利いてくると考えている。

○犬 東

次にアルミニウムの電極板を使った場合、溶けて土の中に入るが、これが土の中で強度的にどう強響するか。

○三 瀬

それは第一に pH が大体 5 を中心にして少しアルカリ側に寄ったところで  $Al^{+++}$  が  $Al(OH)_3$  の形になって沈殿する。これは半固体のゲル状になっており、さらに  $Al_2O_3$  の形になり、さらにいろいろの珪酸との複雑な化合物を形成するのだといわれている。こういうものと土の粒子とが結合して強度をふやす。第二にイオン交換である。土の中のイオンが三価のアルミニウムに置きかわり、イオン交換による強度がふえるのである。第三には pH が変わっているために、電気浸透的に水の流れが変わってくる。pH の高い方が移動・速度が大で含水比の断層ができる、そのために脱水が非常に進行して固くなる。以上の3つの影響があるわけだが、私の考えでは含水比が減少することが最も強度的に利いてくると思う。

○犬 東

工事を行なう際の経済性についてききたい。

○三 瀬

経済性については、一例によれば、これは土によって違うが、普通大阪の海水中に沈殿している海水滞積土の場合は、大体 1000 円/m<sup>3</sup> 見当で改良できると思う。それよりイオンの量の少ないものは、もっと単価が安くなると考えている。