

電気浸透と電解の原理による土と壁体間 摩擦の軽減に関する実験¹⁾

正員 浅川 美 利*

REDUCTION OF SKIN-FRICTION BETWEEN SOIL AND METAL WALL BY THE ELECTRO-OSMOSIS METHOD

By Mitoshi Asakawa, C.E. Member

Synopsis : If the principle of electro-osmosis is applied as a method of reducing skin friction between a metal wall and a mass of clay, the operation is simpler as compared with the conventional methods.

Moreover, this method is convenient, because the same equipment can be simultaneously used for not only reducing but also increasing the skin friction.

H.K.S.Ph. Begemann suggested already that this method could be successfully applied to the pile-driving and the sinking of pile foundation.

But he did not present the mechanism of reducing skin friction, nor a possibility of effectively utilizing this method for various types of soil.

On the mechanism of decreasing skin friction, the author indicated that the electro physical effects consists of two reducing effects; the bubble effect due to electrolysis of water and the jetting and accumulating effects due to development of osmotic water around the negative electrode. Furthermore, the author treated experimentally the practical application of this method to the various conditions of samples.

As a general result, it has been discovered that there is a possibility of effectively utilizing this method to the foundation work in clay soil having high adhesion.

要旨 土と壁体間に生ずるスキンフリクションの軽減法として電気浸透と電解の原理とが応用できるということについて述べ、それに関する実験をいろいろな条件について行い、摩擦軽減の機構や可能な軽減量および土に対する適性などの問題について考察した。本文で述べる軽減法の特長は、ガス・バルブ、ウォーター・ジェッティングおよびウォーター・アキユムレーションの効果を直流電気の適用のみで同時に発揮させることと、加電圧の調節だけで任意の軽減をはかりうることである。一方欠点としては、土と水との界面性質によつて軽減効果が変わることと危険性があるということである。

軽減の様相としていえることは、直流電気を適用するとただちに軽減の効果が表われ、大抵の場合、10分以内で軽減可能な全効果が生ずる。またそれに達するまでの軽減速度は電圧の大きさで変わる。本法は付着力の大きい粘土地盤における摩擦軽減法として有効である。

I. 概要

土と壁体間に生ずるスキンフリクションは、地中に埋設しようとする基礎工の実施に当つて妨げとなるものである。したがつてこの種の摩擦を除去あるいは軽減してやることは、施工促進および適用外力の軽減という意味から、工事の容易さと経済性を与える。実施の方法は別として、壁体面の摩擦を軽減するには、水あるいは空気の動的作用および静的作用を利用して壁面と土との離縁をはかるようにするのが最も一般的な手段となつている。従来用いられてきている方法は、その効果を機械的に与えるもので、それを単独あるいは複合した方式が採られてきている。本文で述べるものは、水およびガスの動、静的作用を利用してスキンフリクションを軽減しようとするには変わらないのであるが、その効果を機械的に外部から与えるものではなく、土中水の電気化学的性質によつてそれを実現しようとするものである。土に直流電流を与えてスキンフリクションを軽減する原理は、特に新しいものではなく、すでに W.B. Hains²⁾ は農業用耕作機械にそれが応用できることを指摘しているし、東大 最上武雄教授³⁾ もそれに関する基本的な実験を行つている。また H.K.S.Ph. Begemann⁴⁾ は現場実験によつ

* 日本大学講師，理工学部土木教室

て、杭の打込みやピット基礎にそれが十分応用できることを報告している。しかしこの論文も実用できることのみを指摘しているにとどまり、軽減の機構や土による適性の問題などには触れていない。土中水の移動あるいは電解を利用する本法の実施では、土の界面問題をよりよく究明されておらなければ、実用性を拡張できない。筆者は、独自の立場からそれを研究し、主としてウエルの沈設やパイプの押し込み、矢板の引き抜きなどの実施に本法を適用していこうとして、小規模な模型実験や軽減機構を知るための基礎実験を行った。ここで述べるものはまだ理想条件下の実験という域を出たものではないが、摩擦軽減の様相、土や水の物理化学的性質が軽減効果におよぼす影響および土の鉱物的性質や粒度が異なればどんなにその軽減の状況が変ってくるかの問題を一応検討することはできた。

結論として次のようなことが述べられる。

(1) 土中に直流電流を加電すると、土中水は電気浸透の原理にもとづいて、一方向に強制された移動を起こす。一方電極面では、水の電解のためにガスの発生が浸透と同時に起こる。この両作用を、摩擦軽減すべき壁面にて起させしめると、スキンプリクシヨンの除去は、直流電流を適用することだけで実現できることになる。

(2) 直流電流を与えた下でのスキンプリクシヨンの軽減効果は、電気浸透度と電解ガスの発生度とに左右されるわけであるから、これらの能力を支配する原因が、軽減度を変えることになる。いま土と水の性質を一定とみなして上述のことを考えると、加電圧の大小が浸透および電解の主要な支配因子となるので、この加電圧を調節すれば軽減度が時間的に変わるようになる。これは埋設物沈設中の速度を加電調節のみで制御できることを意味する。

(3) 土の界面電気的性質によつて電気浸透効果は異なるので、スキンプリクシヨンの軽減効果は、土の種類や堆積条件で変ってくる⁵⁾ので、それらによつて本法適用の制約をうけることはまぬがれない。しかし、浸透と電解の効果はそれぞれの支配因子が本質的に異なるものであるから、浸透の効果が減じても電解効果が反対に増す場合もあり、結果として一効果が減じても必ずしも全効果を減じってしまうということにはならない(これは本法適用の範囲が拡張され、土に対する選択性を縮める意味で重要なものである)。

(4) 軽減を目的とする電気回路は、また摩擦増加をはかることを目標とする場合にも併用できる。例えばウエル沈設後のスキンプリクシヨンの増加を同じ回路ではかりうる。さらにこの操作の実施は、周辺土の脱水によつて圧密が促進されることになるので⁶⁾、施工後ウエルに生ずるネガティブフリクシヨンの影響を事前に除去することもできよう。

(5) 本法は付着力の大きい粘性土に対して有効で、砂および砂礫土では効果的でない。適用可能な地盤では加電後まもなく効果が現われ、10分間以内で軽減の全効果を発揮しうる。軟弱な粘性土では、適当な電圧を与えるとほとんど100%の軽減が可能で、一般の土でも70~90%の軽減が期待できる。

II. 原理

概要で述べたように直流電場下では、土中水は一方向に強制された流動を起こす性質がある(これは電気浸透の原理によるもので、一般に土中水は陰極に向かつて流動する。いまこの流動がHolmholtzの理論によるものと仮定すると、その浸透速度は $V_e = k_e \cdot i_e$ で表わされる。

ここに $k_e = \frac{D \cdot \zeta}{4 \pi (300)^2 \cdot \eta} (e/1+e)^{-1}$ 、 $i_e = E/L$ で、 E : 加電圧、 L : 電極間距離、 D : 水の電媒常数、 ζ : 土の界面動電位、 η : 水の粘性係数および e : 土の間ゲキ比)。一方水に直流電流が与えられると水は電解され、水の浸透方

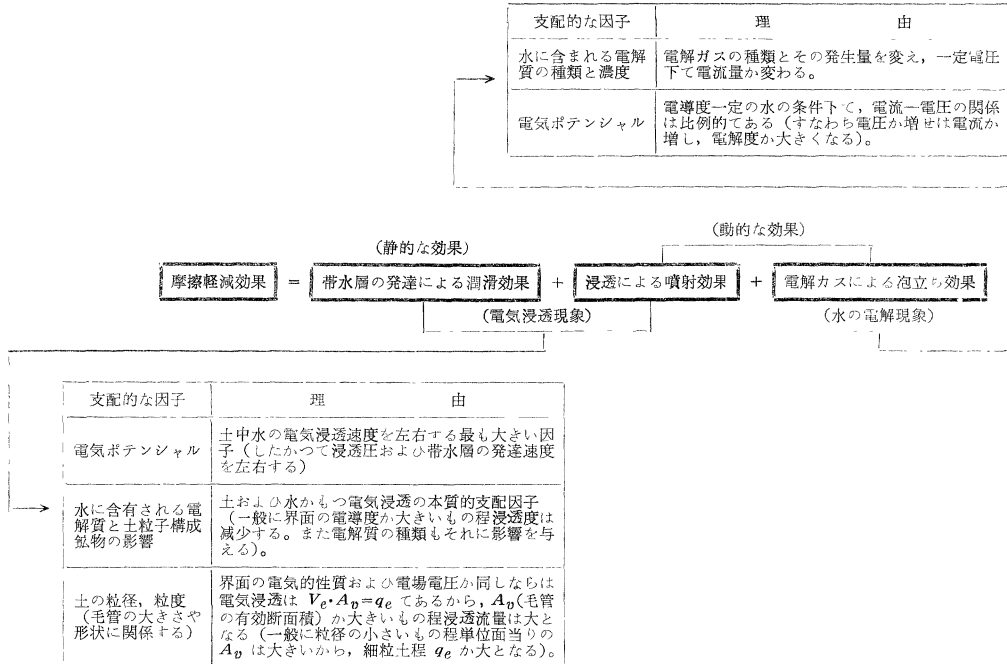
向すなわち陰極側についてこれを考えると H_2 ガスが電極面にて発生する ($2H_2O \rightleftharpoons 2H_2^{(+)} + O_2^{(-)}$)。これら二つ

の現象は通電によつて同時に起こるわけであるから、スキンプリクシヨンを軽減しようとする壁面を陰極になるようにすると、浸透水の浸透作用と集水による潤滑作用および電解ガスの泡立ち作用がその面で合成されて起こる。これらの作用がフリクシヨンを除去する効果であらうと考えられるもので、表-1に示すものは個々の現象あるいは効果に影響すると思われるいろいろの因子を分類してみたものである。

III. スキンプリクシオンとそれの軽減機構を知るための予備実験

スキンプリクシヨンの考え方を土のセン断面におけるセン断応力と同じように考えられるものとする、壁面に働く鉛直応力 σ_N の下でスキンプリクシオン F_s は(以下特別な表示以外スキンプリクシオンを F_s と表わす)、 $F_s = \sigma_N \cdot f + C_A$ (ここに f : 摩擦係数、 C_A : 壁と土との付着力)で表わすことができる⁹⁾。この F_s は土と壁体のいろいろな性質によつて変わるので、簡単にその因子をあげることはできないが、上式中第一項は壁面粗度、土と壁との噛み合わせ度および土の粒度によることが大きく、第二項は界面張力に関係があることから土の細粒分の多少と含水の状態が支配的なものであることは知られる。したがつて土の種類と壁面の粗度とが定め

表-1 摩擦軽減効果とそれを支配する因子の分類

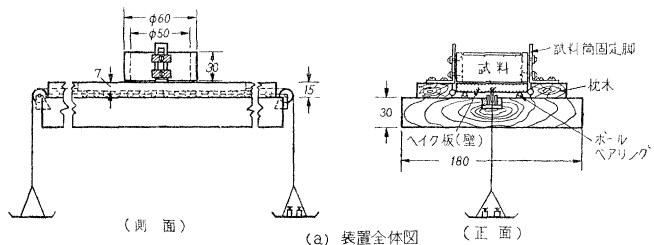


ば、土の締めり度と含水状態が F_s を左右する主因子と考えてさしつかえないことになる。これから述べる実験では、結果の処理を容易にするため $F_s = C_A$ なる条件を与えるようにして F_s 軽減の様相を考察することにした。

(1) 実験の装置と方法

(a) 装置の主な部分 図-1 に示すような装置で、試料を詰める固定された箱（内径 50 mm、高さ 30 mm）のベイクライト円筒と水平引き抜き板（試料端面に接して、水平に移動できるようにしたベイクライト板で、試料接触面は鉄板が固定されるようにしてある）とよりなる。

図-1 スキンフリクション測定装置



(b) 载荷方法 付着力の平衡が破れて水平引き抜き板が滑動し始めるまで一定の荷重を一定時間ごとに段階的に加えていく応力制御方式(5g の荷重を 30 sec ごとに加えた) によつて土と鉄板との F_s をはかるようにした。

(c) F_s 軽減回路 回路は図-5 (b) と同じもので、電源には 12 V、10 A hr の蓄電池を用い、電圧調整用摺動抵抗器は 1 A、43 Ω のものを並列に設けた。また電極は試料上端に炭素板を密接し、それを陽極として、鉄板を陰極とした(図-1 (b) 参照)。

(d) 試料 用いた試料はすべて練り

返したもので、その初期含水量は含水比変化の問題を検討する以外には、どの土に対しても液性限界試験器による叩数 30 回(以後 $LL=30$ などの表示はこの意味)に相当する含水条件を与えた。添加電解質の影響をしらべる場合には、純水の代りにいろいろな濃度の電解質溶液を用いた。また使用土は、 F_s 軽減の過程などを知るための実験では埼玉粘土(ベントナイト系粘土)一種により、土の種類による効果の比較実験では、表-2 中に示した数種のものを用いた。

(e) 試験方法 F_s 軽減の時間過程およびそれに影響する加電圧の大きさなどをしらべる実験では、所定の

表-2 F_s の軽減効果を動的と静的に分離して検討するための実験結果

試料 No.	試料に与えた条件および試料種類	初期 F_s 土と鉄板 (g/cm ²)	通電時間 (min)	加電圧 (V)	電流 (mA)	全軽減 F_{so} (g/cm ²)	回路遮断後の F_{sc} (g/cm ²)	動的効果 ($F_{so}' - F_{sc}'$) = F_s'	F_{sc}'/F_s'
1	埼玉粘土と水道水 (w=99.66%)	8.17	0.42	4	89	2.76 (66.7)	3.36 (58.9)	0.60 (7.8)	(7.6)
2	埼玉粘土と2% KCl液 (w=99.53%)	16.63	0.33	4	110	5.53 (66.8)	6.43 (61.4)	0.90 (5.4)	(11.3)
3	埼玉粘土と蒸留水 (w=67.18%)	41.46	2.33	4	8.5	16.58 (60.1)	28.59 (31.0)	12.01 (29.1)	(1.1)
4	埼玉粘土と蒸留水 (w=79.82%)	13.46	3.51	4	6.7	3.87 (71.3)	6.81 (49.0)	2.94 (22.3)	(2.2)
5	東京シルト質土と蒸留水 (w=61.36%)	3.30	6.83	4	13.0	1.11 (66.7)	2.61 (21.2)	1.50 (45.5)	(0.5)
6	関東ロームと蒸留水 (w=111.43%)	2.40	2.50	4	17.0	1.11 (54.1)	1.71 (21.1)	0.60 (33.1)	(0.6)

- (備考) ① $F_{so}' = F_s - F_{so}$ (全軽減量), $F_{sc}' = F_s - F_{sc}$ (静的軽減量)
 ② $(F_{sc}')/(F_s') > 1$ は動的効果大, $(F_{sc}')/(F_s') \approx 1$ は両効果か同程度, $(F_{sc}')/(F_s') < 1$ は動的効果大
 ③ 表中 () 中は軽減率 % で示すもの
 ④ 試料 No. 6 は極性が反対, すなわち陽極面で F_s を軽減

F_s 量になるまでの時間をはかり、時間—軽減率 $\left(\frac{\text{最初の } F_s - (\text{ある時間たつたときの軽減 } F_s)}{\text{最初の } F_s} \right)$ の関係を探るようとした。軽減の動的効果と静的効果とを分離してその負担度を検討するための実験では、初期の F_s と全軽減 F_{so} とをはかつた後、回路を遮断したときの F_{sc} とをはかり、表-2 の要領で静、動両効果を分離した。いろいろの土に対する軽減効果の比較では、初期 F_s の 50% 軽減に要する時間とつてそれを比較した。

(2) 実験結果の考察

(A) 初期 F_s の条件を含水量のみで変え、一定加電圧下でそれを軽減した場合の軽減過程と軽減範囲 一種の土の初期 F_s を含水量のみで変えた試料について一定加電圧 (4V) で F_s を軽減を行い、その軽減時間過程をしらべたのが図-2 および図-3 である。

図から、土の界面条件が本質的に変わるものでなければ、電気浸透度は含水の多少にあまり関係ないはずであり、しかもある時間通電していると最終 F_{so} は初期の条件に無関係に一定となることがわかる。これを軽減速度と最終軽減度の観点からすると、電導度や浸透効果が通電初期には試料飽和度にいくらか影響されるので、軽減速度も初期には多少それが現われるが、軽減が進捗するにしたがつてそれは全くなり、最終 F_{so} は一定となる。これを初期 F_s に対する軽減率で表わすと、初期 F_s 値の大きいものが大きい軽減効果を示すはけである。図-3 では最終 F_{so} の軽減率が 65~95% に達し、10 分以内にそれが現われている。

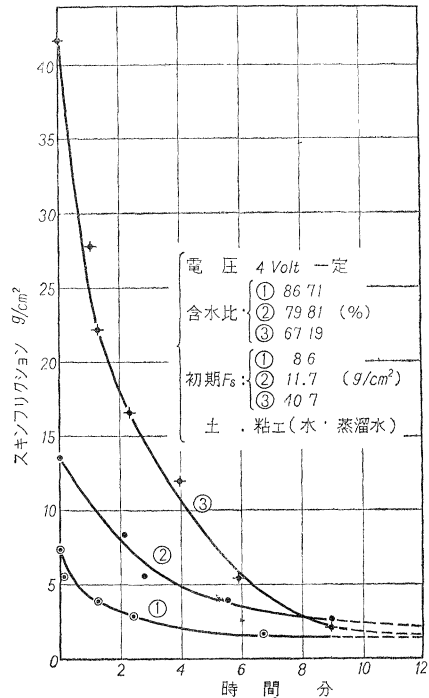
(B) 土の初期 F_s の条件が一定で、加電圧のみを変えた場合の軽減度 試料の初期条件 (一種の土で、一定含水量) を一定とし、加電圧のみを 4~6V と変えて F_s の軽減時間過程をしらべたものを図-4 に示した。加電圧の大小は、浸透と電解とを共に左右する外的な因子であるから、一定試料条件に対する軽減度はそれによつて変わつてくることになる。

図-4 によると、試料条件が一定であれば、最終軽減率は加電圧に関係なく一定となるが、それに達するまでの時間過程が電圧によつて変わるものであることを知る。

(A) と (B) で述べたことを総合して、土の初期 F_s の差異は最終軽減率に関係し、加電圧の大小は軽減速度に関係するものであるということが出来る⁹⁾。

(C) F_s の軽減における動的効果と静的効果の分離 表-1 で示したように全 F_s の軽減効果は、静的なものとの動的な効果が複合されてのものと考えられる。

図-2 初期 F_s を含水で変え一定電圧下で軽減した場合の時間過程



動的効果には浸透と電解の両者があり、これらを分けて扱うことはできない。しかし全効果と静的効果とは、通電中の F_{so} と回路を遮断してからの F_{sc} とがはかりうるので両 F_s の差をとつて動的効果とすることができる。

表-2 は、いろいろの条件の試料につき加電圧 4V で軽減し、約 1/3 F_s に達するまでの時間をはかつておき、その後回路を遮断してからの F_{sc} をはかり $F_{sc} - F_s/3 = F_s'$ (動的効果) 求めて両効果を分離し、さらに F_{sc}/F_s' (静的効果との比) によつて両効果の負担度を示した。判然とした結論は、得られなかつたが、その取扱によつて試料条件に対し、いずれの効果が支配的であるかの傾向は知ることができた。

(i) 含水量が少なく F_s の大きいもの (同じ土で) では全軽減効果のうち動的効果に依存することが大きいようである。

(ii) 同程度の F_s でも細粒土のほど F_s 軽減効果は大きく、その効果は静的なものによりがちで、砂分の多い土のほど動的効果によりがちである。

(iii) 一般に軽減効果の低いものは動的効果に、高いものは静的効果による傾向がある。

(D) いろいろな試料条件に対する軽減効果の比較 いままで述べてきたのは F_s 軽減の基本的な様相を知る

図-3 初期 F_s を含水で変え一定電圧下で軽減した場合の時間過程 (F_s を初期 F_{so} に対する比で表わしたもの)

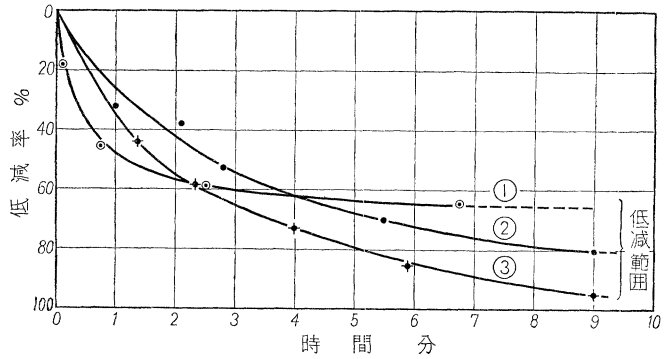


図-4 土および F_s 条件を一定として加電圧を加えた軽減時間過程

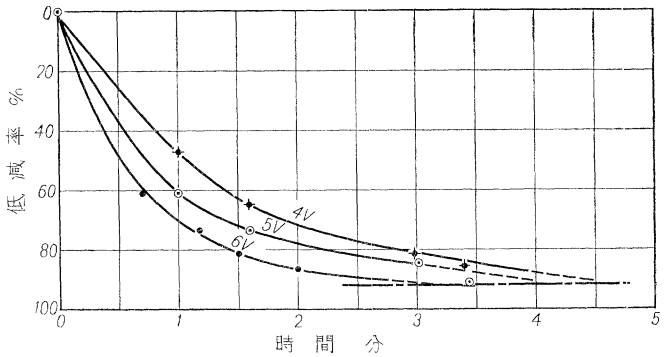


表-3 いろいろの含有水条件と土の種類に対する軽減効果の比較

要因別分類	試料 No.	採取場所と土の種類	含有水の条件	含水比 (%)	初期 F_s 土と鉄板 (g/cm ²)	電流密度 (mA)	F_s を 50% 軽減するに要した時間 (sec)
土の含水量による軟硬 (I)	I-1	ホーリング用粘土	水道水	38.5	9.93	9	5
	I-2	"	"	40.0	9.67	12	9
	I-3	"	"	42.6	8.66	14	10
含有水の電解質濃度と含水量の変化 (II)	II-1	ホーリング用粘土	2% NaCl	44.7	11.54	43	75
	II-2	"		45.6	7.97	45	60
	II-3	"	3% NaCl	42.7	11.00	38	70
	II-4	"		47.3	8.24	49	50
	II-5	"	5% NaCl	38.1	12.08	59	130
	II-6	"		42.3	9.34	57	100
	II-7	"	6% NaCl	39.4	15.37	50	151
	II-8	"		44.8	9.91	59	75
種々の自然土を用いた種類別 (III)	III-1	埼玉粘土	水道水	99.7	8.17	89	25
	III-2	荒木田ローム	"	40.4	4.95	5	15
	III-3	栃木 (日光) 粘土ローム	"	29.7	5.49	6	20
	III-4	お茶の水ローム	"	38.0	5.77	11	14
	III-5	"		40.0	5.49	10	14
	III-6	東京沖積土 (シルト質土)	"	37.9	9.62	11	4
	III-7	"		40.7	7.68	10	4
	III-8	真室川粘土室ローム*	"	63.5	4.95	8	330
	III-9	寺島粘土	"	57.4	5.77	18	8
	III-10	練馬関東ローム	"	114.7	2.40	17	150

(備考) ① 自然土は気乾したものを水道水でこね LL テスター 30 回前後としたもの。
 ② * は多量の石灰が混入するものである。また 4V では軽減不能 10V とした。
 ③ ホーリング用粘土は市販のヘントナハト系粘土。
 ④ 加電圧はすべて 4V、軽減率は F_s の 50%。

ためのものであつたが、試料条件はごく単純なものであつたので、ここでは含有水の電解質条件をさらに細かく変えたり、土も自然のものを多く選んで、それぞれの軽減効果を比較してみた。表-3 中、試料 No. 1~4 は電解質の影響をしらべるために一種の粘土に濃度を変えた NaCl 溶液を加へた試料について行つた効果の比較を示すものであるが、それによると添加電解質濃度の大きくなる程軽減効果が低くなつていく傾向があることが知られる。しかし 2~3% 以下の濃度ではそれがいちじるしく低減されるものでない。

試料 No. 5~10 はいろいろな自然土の効果を比較して、土による選択性を検討してみたものである。それによると、ある種の土は軽減効果のきわめて低いものがあることがわかる。一般に火山灰質土とがかなり多量の石灰分を含んだ残積土などでは軽減効果が低くなるようである¹⁰⁾。これはいままで筆者が行つてきた電気浸透に関する一連の実験でも知られた現象で、その種の鉱物成分の土は、低い界面動電位を有するためと考えることができる。

IV. ウェルやパイプ沈設の模型実験

F_s 軽減の機構を基本的に知つたので、これを応用する意味でウェルなどの沈設実験を模型的に行つた。

(1) 実験方法と実験計画

(a) 装置 模型実験では 図-5 (b) に示すようなガラス槽 (20×20×25 cm) に試料を詰めた。また沈設すべき模型ウェルとして、内径 75 mm, 肉厚 2.5 mm の真鍮パイプ (長さ 150 mm とし、貫入側の先端を刃先になるように加工したもの) を用いた。

陽極は電蝕の影響の少ないグラファイト棒 (径 6 mm, 長さ 150 mm のも) を使い、ウェルを陰極とした。

回路は 図-5 (a) に示すようなもので¹¹⁾、電源は 30 V, 18 Ahr の蓄電池によつた。また図中、スイッチに極コントロールと変換スイッチとを設けたのは、使用陽極の任意選択と必要に応じて極性を反転交換するためのものである。

(b) 実験方法 パイプの沈設実験では、 F_s 軽減をはかる前にあらかじめ 3 cm 程度静荷重によつて沈めておき、それが平衡するときの荷重 W を記録してから それを 0.5~1.0 kg 残して他を取り去り、しかる後 F_s 軽減を施して沈降せしめ、その時間一沈降を記録した。また試験前の単位 F_s を求めるのに径 6 mm の鉄棒を所定の深さ (10 cm) に挿入し、それを引き抜くようにした。

(c) 試料 実験に用いた試料は、試料の硬さによる影響をしらべるためのもの以外には、試料の一様性を保ちやすくすること、飽和に近いものとする事および $F_s \approx C_A$ の条件を与えて解析を容易にすることのために LL テスターによつて 150 回叩数程度となるようにコンシステンシーを管理した。また土は粒度による影響を検討する目的以外は粘土一種を用いた。

電解質の影響をしらべる場合には、同じ粘土に規定の NaCl を加へ、それを試料とした。

(d) 実験計画 予備実験にて F_s 軽減の支配因子が何であるかを大体知つたので、模型実験でもそれを考慮して行つた。表-4 は本実験で行う要因別の「わりつけ」をまとめて掲げたものである。

(2) 実験結果の考察

(A) 模型ウェルの沈降の様相 II で F_s 軽減の原理を述べたが、この原理がウェル沈設などの場合にも同じように考えられるとすると、図-6 に示したような F_s 軽減の様相が想像できる。

図-7 は、時間一沈降の関係から、 F_s 軽減によつて沈降がどのように起こるかを知るために、静荷重のみで沈降せしめたものと比較した。図から知られるように 1V/cm 程度の電圧勾配を与えただけで、 F_s の大部分が軽減されるものであることが知られる。一方 F_s 固結を施したものであれば、それが永久的でないにしても F_s はかなり大きくなる。

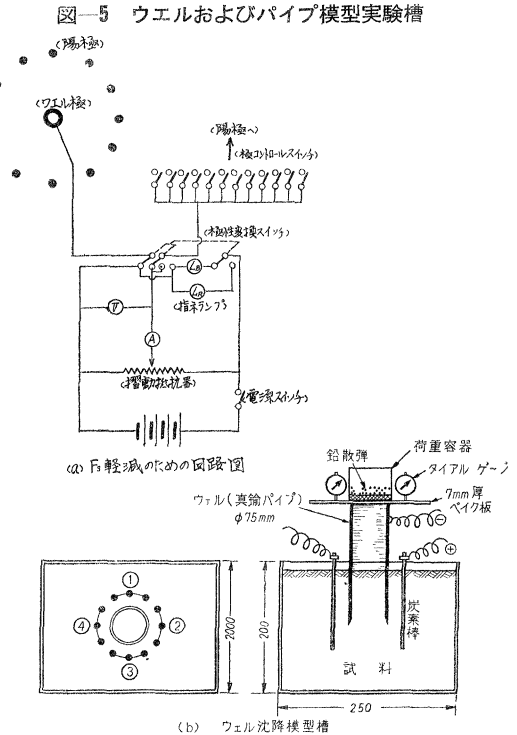


表-4 F_s 軽減を支配する主な因子の分類と実験の「わりつけ」

	含水比 (%)	砂配合率 (%)	添加した NaCl の濃度 (%)	加電圧 (V)	陽極本数	両極間距離 (m)
含水量のみで初期 F_s を変えた 試料条件	42.5 (LL=100回) 40.2 (LL=150回) 32.8 (LL=300回)	0 (粘土のみ)	0 (水道水)	各試料につき { 3.0 3.5 4.0 4.5 }	{ ウエル外12本 内1本 }	3.0
(粘土)+(砂) の配合率を変えて作った 試料条件	40.2 34.0 28.6 40.2 (各 LL=150 回)	0 20 40 60	0 (水道水)	各試料につき { 3.0 4.0 5.0 }	同上	同上
添加電解質の水分量に対する含有率を変えた試料条件	40.2 39.7 40.5 45.3 46.2 (各 LL=150 回)	0 (粘土のみ)	0 2 3 5 6	各試料につき { 3.0 4.0 5.0 }	同上	同上
加電圧の大きさか沈降速におよぼす影響	—	—	—	上記条件の試料についての総合比較	同上	同上
陽極本数による沈降の変化と最小必要本数	42.5 (LL=100)	0 (粘土のみ)	0 (水道水)	4.0	3 4 6 8 12	同上
両極間の位置と電圧勾配との問題	同上	同上	同上	電圧勾配 2.0 (1.0) 3.0 (1.0) 5.0 (1.0)	4	2 3 5

註) 表中 LL とは LL テスターによる打撃数を示し、土の軟さの状態をそれで管理した。
要因の中土の種類別は模型実験では取り扱はなかつた。

図-7 同じ試料条件で F_s を軽減した場合、しない場合および周辺固結した場合の沈降状況の比較

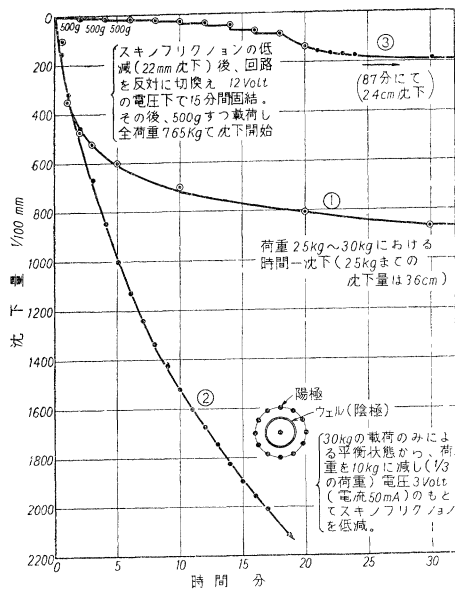
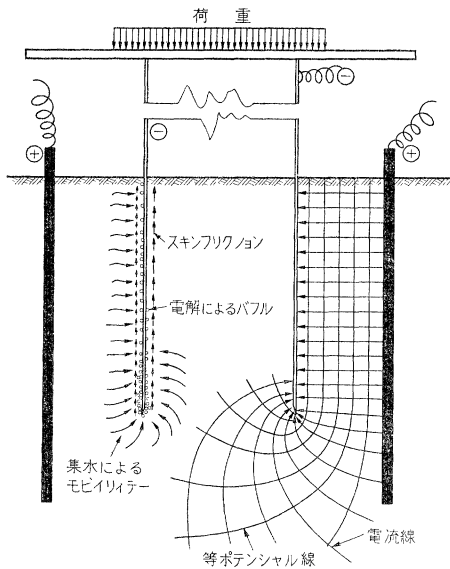


図-6 F_s 軽減機構を示した原理想像図



(B) 含水量の多少で試料の硬さを変えた場合の沈降 初期 F_s を含水量の多少のみで変化せしめ、かつ $F_s = C_A$ の条件を与えるようにした試料を用いて、土のコンシステンシーが沈降におよぼす影響をしらべたものが図-8である。図によると、低い加電圧条件下では試料の軟硬が沈降にかなり影響するものであるが、加電圧を大

図-8 土の軟さによる沈降の比較

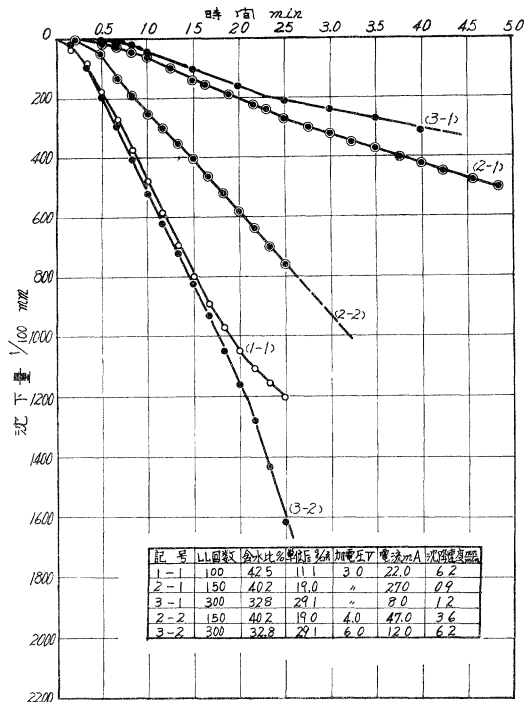
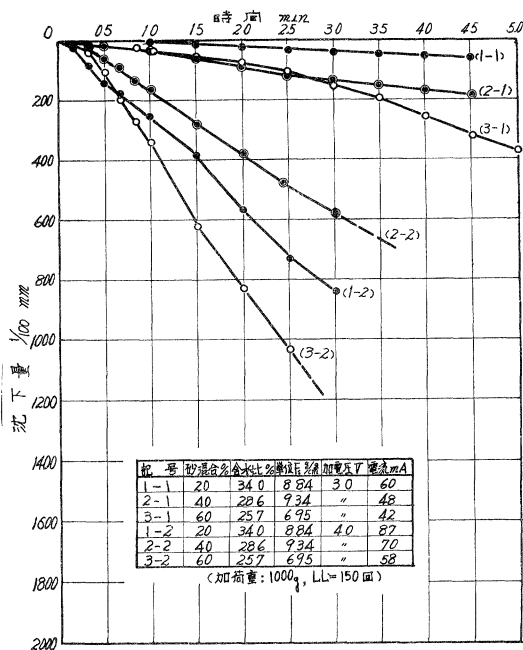


図-9 砂の配合率を変えて作った試料の粒度別沈降比較



大きくすると、その影響はほとんどなくなる。

例えば、図-8、(3-1)と(1-1)の曲線とを比較するに、単位 F_s が2倍程度大きくなる硬さでさえも、平均速度は1/5となり、硬さが(電圧が低い場合)いちじるしく影響してくることがわかる。また単位 F_s が大きくなっても加電圧を2倍位大きくすると、沈降速度は5倍も増すことが(3-1)に対し(3-2)をみれば知られ、加電圧が F_s 、軽減に支配的な因子となるものであることがわかる。

(C) 粘土と砂の配合率を変えて作った試料の粒度による影響 土の種類を単純に粒度のみで変わるとして、配合率を変えた試料を作り、砂混入率が F_s 、軽減におよぼす影響をしらべた。

図-9に示す結果は、どの配合のものも硬さの程度を一樣となるようにした試料について行つた実験であるがこの実験結果による限りでは、砂分が多くても軟さが一樣であれば、 F_s 、軽減には粒度の影響は考えなくてもよいと思われる。結局土の種類として考える必要のあることは土粒子構成鉱物および水の界面としての性質の差異であつて、粒度は F_s 、軽減に本質的な影響を与えるものでないと考えてさしつかえないようである。

しかし一般には、砂分の多い土は固結度も大きく、また電気浸透の効果が水理の逆流によつて少なくなる傾向があるので¹²⁾、 F_s 、軽減効果はそれらの理由で低下する。

(D) 電解質の濃度による影響 自然土の含有する電解質の種類や濃度は堆積されているところによつてさまざまではあるが、ここでは海水の影響を直接あるいは間接に受けている土を対称として扱い、添加した NaCl が F_s 、軽減におよぼす影響を検討することを目標とした。これは電気浸透に関する限り、ある電圧下では一般に電解質の濃度の高い程浸透度が減ずるものであることが知られているので¹³⁾、その影響を F_s 、軽減についてしらべた。図-10は、軟さを一樣として添加した NaCl の濃度のみを2~6% 変えて四種の試料を作り、おのおのの試料について3~5Vまで電圧を変えて行つた実験である。その結果によると、 F_s 、軽減効果が電気浸透のみによらないで、電解効果が条件によつてはかなり大きい軽減原因となることが知られる。例えば3.0Vの電圧下では2% NaCl よりも5%、6% NaClの方が大きい沈降速度を示している。加電圧を大きくすると、電解質の影響はほとんど現われないようである。

(E) 加電圧と平均沈降速度 加電圧の大小は、 F_s 、軽減を支配する外的因子として最も大きいものであるから、土の条件が定まつたものでは、それが沈降速度を左右する主な原因となる。いままで述べてきたいろいろの条件別実験結果を一括して、加電圧と平均沈降速度の関係をとつてみると図-11のようになる。図-11から考察できることは、ある加電圧を超す電圧を与えると、どの試料条件の場合も平均沈降速度は電圧の増加によつ

図-10 液の電解質濃度の影響をしらべるための比較

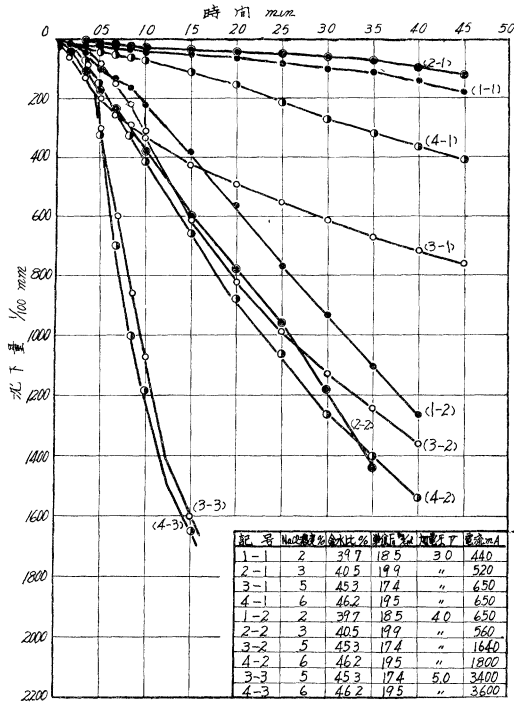
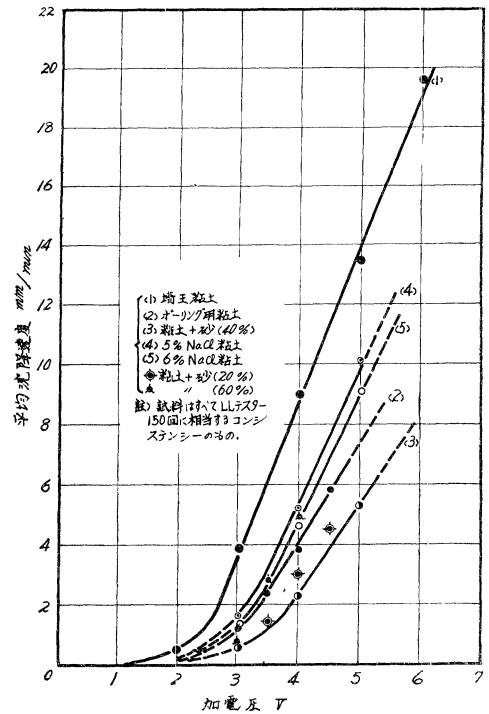


図-11 いろいろな条件の試料についての加電圧—平均沈降速度の関係



て直線的に増すということである。

またそれらの結果が、情報することは、試料条件は電圧—沈降速度関係の位置を変化させるだけのものであつて、ある加電圧以上の電圧下では軽減効果にあまり大きい影響を与えるものでない、ことが知られる。

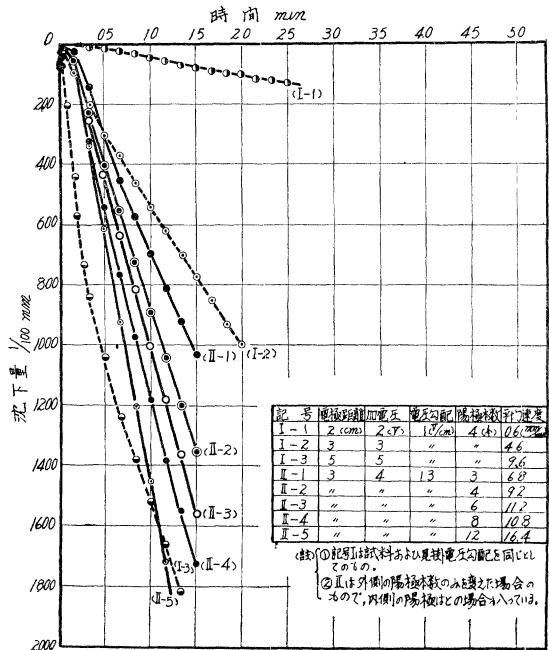
総合していえることは、外的に加える電圧の調節だけで沈降速度を変化させることができるということ、電圧さえ大きくすれば試料条件の影響は軽減できるといふことである。

(F) 陽極配列と電極間距離に関する電極設置上の問題 本法の実施で、経済性と設置計画の面から電極位置の決定は重要なことである。その効果と影響とをしらべるために陽極の挿入深度、本数および間隔などいろいろ変えて実験したのが 図-12 に示すものである。

図中破線で示した曲線 (I-1)~(I-3) は、見掛けの電圧勾配を一樣とした場合の結果である。ここでいう見掛けの電圧勾配とは、電極間距離に応じて $1V/cm$ (一定) となるような電圧を与えたという意味 (例えば電極間距離 2 cm 場合は加電圧 2 V) である。その結果によると、沈降速度は加電圧の絶対値の大きいものが大きく、それに対し、距離はあまり問題とならない。一方陽極本数は、多くなる程効果は増すが、極本数が3倍となつても速度はせいぜい1.8倍程度しか増さない。

結局陽極本数を多くするよりも加電圧でそれを補うようにする方が経済的でもあり、4本以上ならば特に本数を問題にするにたらない。陽極深さは少なくとも計画深度の半分を要する¹⁴⁾。

図-12 陽極本数とそれの設置条件をしらべるための比較



(G) 曲進回復法としての適用 ウェル沈設中地層の不整形や荷重の偏心などによつてウェルが曲進していくことがしばしばある。ここではその種の曲進が起り始めたときに、 F_s 軽減方法を変え、それを回復させるように同じ電気回路を用いて行う場合について述べる。曲進がいまだ大きくないときには、図-13に示すような F_s の場所的变化を与える手段をとれば回復できるわけであるから、それを与えるような方法すなわち F_s の増減を極性のみの交互変換を行うことによつて実現できる。図に示すものは、あらかじめ 6° の傾きを与えておいたウェルの回復実験の一例であるが、この実験では電圧 15 V を加電したもで行い、1 分間ずつのスイッチコントロールによつて固結と軽減を交互に繰り返す、もとの状態から 8.8 cm の沈降によつて回復できた。

この方法の応用は、実際にそれを行うおとする場合、かなりむずかしいことであろうが、方法としての可能性は十分ある。

(H) 沈設後の周辺土固結 埋設物は沈設が終れば周辺の F_s が大きくなる程抵抗が増すから、軽減の逆手段を用いて F_s を増すことが望ましいわけである。それを実現するには、沈設完了と同時に回路を反転して、電気浸透的固結を行つてやればよいこととなる。しかし 図-14 から知られるように水の復元のためこの種の固結は、 F_s 増加の意味からは一時的な効果を与えるだけで、永久的なものとはならない。それゆえ固結による F_s 増加はせいぜい元の F_s 程度しか期待できず、あまり、重要な意味をもたないことになる。

しかしながら周辺土を固結することは上述の理由の他に周辺土の圧密促進という重要な現象を伴うはずである。この短時間に生ずる圧密は、施工後長い時間を経て起りうるネガティブフリクションの影響を軽減にするはずで、構造物の安定を事前に大きくしておくという意義をもつ。

ネガティブフリクションに関する実験は行っていないが、将来その問題も取り扱つてみるつもりである。

V. Begemann の研究に対する 2.3 の討議¹⁵⁾

Begemann の行つた実験は、それが野外における実物大のものであつたという点では実際的かつ有用な研究ではあるが、 F_s 軽減の基本的な考え方に問題とされる点があるように思う。そこで軽減機構や土に対する適性の問題をあげ、筆者の考えと対比してみた。

(1) F_s 軽減の原理について

Begemann は F_s 軽減が壁面でどんな状態が起こるかの考察を除き、「粘土に挿入した二木の金属棒を直流電源の陰、陽にそれぞれ接続したとき、陽極の棒は固くくつき、反対に陰極の棒は 1~3 分で、それを引き抜くに要する力が非常に少なくてすむ」といつた結果的な現象のみをもつて原理としている。筆者の提案も想定の域を出たものではないが、電気浸透と電解の概念を拡張し、いろいろの基本実験でそれを裏付けたので、考え方に大きな誤りはないと思う。 F_s 軽減の機構をよりよく解していないと本法適用に大きい限定をうける。

(2) 室内実験結果の考察について

Begemann は挿入深さ 50 cm の金属棒を電流適用時間ごとに引き抜き、各時間ごとの最大 F_s を求め、次のような考察を行つている。

加電を 5 分以上続けると通電によつて逆に F_s 軽減効果がドロップしていく傾向があることを指摘している。そしてその原因が、簡単に電気—物理的效果によるものであろうと述べている。

図-13 曲進回復の実験図

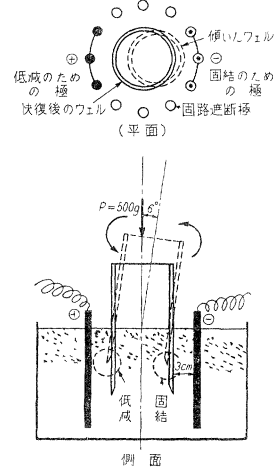
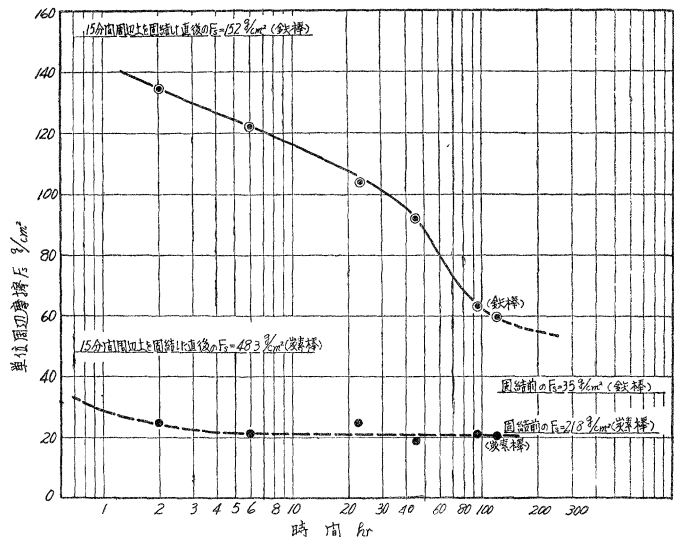


図-14 周辺土を固結して放置した場合の F_s 低減状況



F_s 軽減が電気浸透のみによつて起こるとすると、たしかに通電時間によつて浸透が低減されていくものがあるが（一定電圧下では継続通電によつて電流密度が減るため）¹⁶⁾、 F_s 軽減に関する実験では、その現象は認められなかつた。これは浸透の軽減のみが原因でないためと思う。

またこの現象を除く方法（ F_s 軽減効果を維持する方法として）として Begemann は switch and cut off を繰り返すと効果的であるとしているが、これは有効な手段であることは別の実験で筆者も認めた¹⁷⁾。しかしこの操作が有効であることの理由には触れていない¹⁸⁾。

VI. 結 言

以上は、 F_s 軽減法として直流電流の適用による方法が可能であることを指摘し、いろいろな条件についての実験を行い、各項を逐一検討した。与えた条件が理想的に過ぎることと小規模な実験結果の考察という点から実用するにはいまだ多くの検討を要するものであるが、この方法が、ウエルの沈設、矢板引き抜き、鋼パイプの挿入、およびその引き抜き等の実施に当つて F_s 軽減の手段として用いるるものであることは予想できる。

本研究は、日本大学教授、当山道三先生の御教示を得て行つているものであることを述べ、また研究のために多大な援助を与え下さつている先生の御厚情に対し深謝の意を表する。

本学土木工学科学生、中川 茂、荒木和彦、武藤隼彦の三君には実験および整理で多大な労を負わせた。また梶谷調査工事 K K、梶谷正孝氏の協力を受けることができた。ここで各位に御礼申し上げる。

この一文を故巻内一夫先生の霊前に捧げる。

参 考 文 献 そ の 他

- 1) 浅川美利：“電気浸透法を用いたスキンプリクシヨンの低減”，日大工学研究所集報 No. 17, pp 1~17 (1958)
- 2), 3) 最上武雄：“土質力学”，pp. 145~149
- 4) H.K.S. Ph. Begemann：“The Influence of a Direct Current Potential on the Adhesion between Clay and Metal Objects”，Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Eng. Vol. 1, pp. 89~93 (1953)
- 5) 例えば，① 浅川：“土中水の電気浸透的流動および脱水過程について”，日大工学研究所集報 No. 19, pp.1~21 (1959)
② H.F. Winterkorn：“Fundamental Similarities Between Electro-Osmotic & Thermal-Osmotic Phenomena”，Proc. Highway Res. Board, Vol. 27, pp. 443~455 (1947)
- 6) ③ 同上，④ E. Vey：“The Mechanics of Soil Consolidation by Electro-Osmosis”，Proc. Highway Research Board, pp. 578~589 (1949)，⑤ 三 瀬 貞：土木学会 33 年度年次講演会概要 “土の電気浸透的脱水”，⑥ M.G. Spangler & H.L. King：“Electrical Hardening of Clays Adjacent to Aluminum Friction Piles”，Proc. Highway Resea. Board, Vol. 29, pp. 589~599 (1949)
- 7) 例えば，駒形作次：界面電気化学概要，pp.60~63，あるいは L. Casagrande：“Electro-Osmotic Stabilization of Soils”，Jour. Boston Soc. Civil Eng. Vol. I, pp.51~83 (1952)，or Proc. of the Conf. on Soil stabili. M.I.T (1952)
- 8) 最上武雄：“土質力学”，pp.145~149，最上，水野：東大理工研報告 Vol. 3 (1949) および文献 1) pp.1~6
- 9) 詳細は文献 1) pp.7~9
- 10) 森 麟：土木学会誌 Vol. 37, No. 11, pp. 13~17，浅川：文献 1) pp 8~9 と土と基礎 Vol. 6, No. 5 pp.28~31 (1958)
- 11) 文献 1) p. 9 に示すものを改良した装置
- 12) 駒形作次：“界面電気化学概要”，p.75
- 13) 同上 pp.28~36 あるいは 加藤二郎：“界面電界”，pp 32~33
- 14) 文献 1) p. 13 に「陽極挿入深さについてのいろいろな場合」を述べている。
- 15) 文献 4) の中 pp.89~90 の Laboratory test について
- 16), 17) 文献 5) に継続通電の影響を実験的に検討し，詳説してある。
- 18) 電流密度の減少は，例えば「イオン雲の発生による（志方氏の思想）あるいは「コンデンサー効果」とかの原因によると考える。

(昭. 34. 1. 26)