

アーチダムの施工機械及び施工法は重力ダムと同様である。欧州では小規模のダムではタワークレーン及びデリックがコンクリート打設に用いられている。フランスのポールトでは多少目新しい工法が使用されている。アーチダムの幕板の位置の決定は両岸に設けた2基準点より各ブロック及び各リフトごとの位置を計算上より求め、これを現地に移すのが普通でこの点は多少重力ダムより複雑である。

6. 結 論

以上欧米のアーチダム視察の結果を取りまとめ報告

したが、欧州では戦後は主としてダムはアーチダムを築造している、その設計は米国より一歩前進しているように思えた。また米国はアーチダムの歴史は古いがポールダーダム以来特に新しい進展は見られないようである。しかしダム施工の面ではその施工機械及び工法とも参考になる点が多々ある。

また各国とも独創を尊び新しい技術を生むことに努力している点は敬服に値すると思う。

(昭.28.11.10)

電解重合による土の新固結法*

正 員 工学博士 村 山 朔 郎**
准 員 三 瀬 貞***

A NEW CONSOLIDATION METHOD OF SOIL BY MEANS OF ELECTROLYTIC POLYMERISATION

(JSCE Jan. 1954)

Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member, Tadashi Mise, C.E. Assoc. Member

Synopsis This is the explanation of principle and a report of the experiments on the new method invented by the authors to consolidate soft clayey soil with hard material which is polymerised with ions induced by direct electric current.

By our method, some demerits in the Casagrande's method—which has been the only method to consolidate the clayey soil using the aluminium electrodes—can be removed.

要旨 本法は土中に直流を通電し、それによつて重合硬化性イオンを誘導し、その会合の結果生ずる硬化性物質をもつて、粘土質軟弱地盤の固結を図る目的で著者等の考案した方法であつて、本文はその原理と実験の報告である。本法によれば、従来粘土に対しては唯一の固結法とされてきたアルミニウム電極による電気化学的固結法(L. Casagrande 法)のいくつかの欠点は除去できるものと考えられる。

1. 結 言

軟弱土を固結または硬化して、物理的、化学的に安定な地盤とすることは、地盤支持力の増加、あるいは地這り、侵蝕、漏水の防止などの対策として大いに要望される場所である。現今实用、あるいは研究されている土の固結法としては、表-1のごときものがある。これらのうち、表面固結法は薬品を土と混合し、あるいは地面に撒布し、主として表面に近い部分の土を固結させる方法で、侵蝕防止、路面強化などに利用

表-1 土の固結法

施工方法	主 固 結 剤	適用土粒径
表面固結法	澱青質材料, ソイルセメント, メタクリル酸カルシウム, フルフルアル樹脂, 珪酸ナトリウム	
内 部 固 結 法	セメント注入 セメント	約0.6 mm 以上 砂
	薬液注入 珪酸ナトリウム	約0.1 mm 以上 質
	薬液注入 アクリゾール, メタクリル酸カルシウム, 尿素樹脂	約0.1~0.05 mm以上 土
	Al 電極による固結法 電解重合による固結法	アルミニウム 珪酸ナトリウム その他

される。内部固結法のうち、多く用いられているのは注入法であるが、注入法は比較的粒径の大きい土に適用範囲が限定され、粘土のごとき微粒土には適用できない。強化対策を特に必要とする粘土質軟弱土に対しては、いままでのところわづかに L. Casagrande の考案した電気化学的固結法¹⁾が存在するだけである。なおこの方法については著者等はさきにもその機構上の新たな事実を発見して、種々の土に対しても適用可能な改良法²⁾を発表したが、これらの方法は施工が簡単に行ける長所はあるけれども、いずれにしても固結範囲が帯状の比較的狭い範囲に限られ、その硬化強度は

* 関西工学連合講演会(昭.27.10.19), 土, 粉体, 粒体に関する連合講演会(昭.27.12.13)にて発表

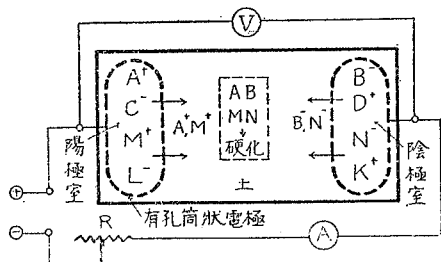
** 京都大学教授, *** 京都大学助手, とともに工学部土木工学教室

著大とはいえず、また所要電力量が多であるため、適用範囲が特殊な場合に限定される短所がある。これらの方法の欠点を除くため、著者等は土中に直流を通电し、電気によつて重合硬化性イオンを誘導し、その会合の結果生じる硬化性物質をもつて、粘土質軟弱土を固結硬化する全く新たな方法を考案し、これをその機構上電解重合 (Electrolytic Polymerisation) による土の固結法と仮称した。本法によれば、上述の方法にみられる短所は除かれ、固結範囲が広く、その硬化強度はいちじるしく大で、しかも使用電力量が僅少で済む。

2. 電解重合による土の固結法の原理

一般に重合の結果硬化した物質を AB で表わし、その重合助剤を MN とする。ここに A, M は正イオンを B, N は負イオンを示す。また A⁺, B⁻, M⁺, N⁻ の各1個のイオンを含む電解質をそれぞれ AC, DB, ML KN とし、これらは電離して A⁺, C⁻, D⁺, B⁻, M⁺, L⁻, K⁺, N⁻ なるイオンを生ずるものとする。いま図-1に示すごとく、土中に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、正の極筒中には AC, ML を入れる。極から土中に直流を通电すると、A⁺, M⁺, B⁻, N⁻ イオンはそれぞれその高電と反対符号

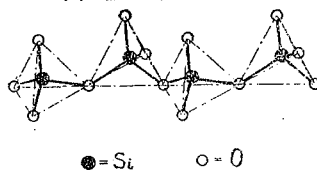
図-1 固結装置要領図



の電極の方へ移動してゆき、途中土の中で会合し、そこで重合性物質 AB と重合助剤 MN が共存し、重合反応を生じ土を固結硬化する。以上はきわめて一般的な形態で表現したが、場合によつては、各イオンの数、種類、組合せはさらに簡単になる場合も、また反対に複雑になる場合も考えられる。現在重合性電解質のうち、さしあつてこの方法に適するものとしては、まず珪酸ナトリウムが挙げられるが、将来このほかの有機、無機の薬品についても検討するつもりである。

珪素はその正四面体原子価が4個のOH基で充されたときは正珪酸 Si(OH)₄を生じる。ここではSiとOとは共有結合をなし、OとHとはイオン結合をしている。したがつて、正珪酸が電離すれば SiO₄⁻ なる正珪酸イオンを生じる。また図-2のごとく、Siの

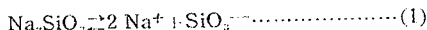
図-2 メタ珪酸イオン



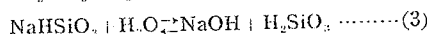
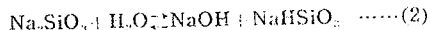
正四面体原子価を充している4個のOの中の1個のOが隣りのSiと共有結合し、SiO₃⁻を構造単位として

無限に長い分子鎖を作る場合、これをメタ珪酸イオンという。メタ珪酸イオンとナトリウムイオンとがイオン結合したものがメタ珪酸ナトリウムであるが、実在のものは分子鎖の長さは有限であるから、その組成は Na₂SiO₃ と Na₄SiO₄ との中間のものとなる³⁾。このものの水溶液は鎖の長短や形によつて、粘稠な液となつたり、あるいはゲル状になることがある。すなわち SiO₂ に対する Na₂O のモル比を変化させることにより、鎖状あるいは網状の構造を取り、その性質も種々に変化する。普通水ガラスといわれるものはこれであり、SiO₂ と Na₂O とのモル比によつて、規格では1号より4号に大別されている。

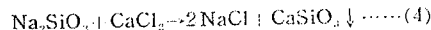
いま水ガラスをメタ珪酸ナトリウムと仮定して、一分子式で表わすと、水溶液では次のごとく電離している。



一部加水分解して、



しかしアルカリ金属以外の金属珪酸塩は水に不溶性の高分子物質を形成する。たとえば、珪酸ナトリウムにカルシウムイオンが作用する場合には、

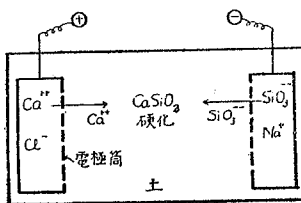


となつて、不溶性の珪酸カルシウムを作る。

したがつて珪酸ナトリウムを用いる場合には、単に前記の DB, AC のみを用い、すなわち陰極側には、DB として珪酸ナトリウムを、陽極側には AC として塩化カルシウムを置いただけでも差支えない。極より土中に直流を通じると、Ca⁺⁺ は陰極に、SiO₃⁻ は陽極に向つて進み、土中適応の場所で会合し、(4)式のごとく珪酸カルシウムの凝固を作り土を固結する。

図-3はこの機構の説明図である。

図-3 珪酸ナトリウムを用いる固結装置要領図



以上のごとく、珪酸ナトリウムを使用した場合の重合過程は原理的には簡単であるが、珪酸塩は化学構造が複雑であるから、本法の実施に適するよう、その性

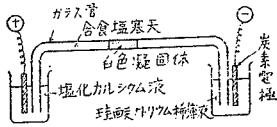
質を規定するための制禦条件を求める必要があり、また本法処理中の土が示す電気化学的挙動が固結に及ぼす影響を求めることも重要であつて、次節に記す諸実験においては、これらの代表的な種々の場合について実験を行ったのであるが、本固結処理法の一層の合理化には、今後さらにこれらの点に対し、定量的実験、並びに理論的考察を行いたいと思つている。

3. 実験の大要とその結果の考察

次のごとく土を用いない基礎実験および種々の土質に対する室内実験を行った。

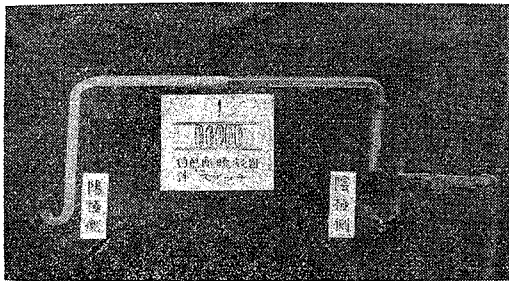
実験-1 本固結法の現象過程を目で観察するため、土を用いずに行つた基礎実験であり、その大要は図-4に示す。図-4は土の代りに、電導性を与えるため

図-4 含食塩寒天を用いた固結実験装置



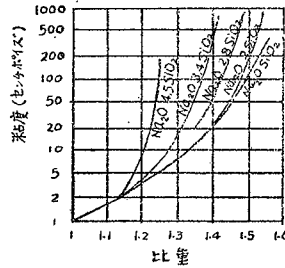
少量の食塩を混入した半透明の寒天をガラス管(内径7mm, 長さ50cm)に充して作った橋を用い、管の一端を陽極薬液槽内に入れ、液としては塩化カルシウムの10%水溶液を用い、他端は陰極槽に浸し、この槽内には市販水ガラス溶液1に対し水10を加えたものを用いた。電極としては炭素棒を使い、50Vの直流を通電すると、10mA程度の電流が流れ、約20hでガラス管の中央やや陰極寄りに白色凝固体が生じ、漸次陽極に向つて拡がっていつた。なおこの拡がり方は周期的に断続した凝固体が陽極側に次々と生成されるもので、その生成状態は写真-1のごとくである。一般に珪酸ナトリウムは Na_2O と SiO_2 とのモル比(組成)および濃度(比重)によつて、珪酸イオンの移動速度が変わるも

写真-1 図-4の装置における CaSiO_3 生成状況



のと考えられる。なぜならば種々のモル比の珪酸ナトリウムの比重と粘度との関係は図-5のごとくであり、またイオンの易動度はイオンの性質、大きさによるほか溶媒の粘性に支配されるからである。本実験の珪酸ナトリウムは稀薄水溶液であつて、この程度の稀薄水溶液では SiO_3^{2-} の移動速度は $4.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec/(volt/cm)}$, Ca^{++} のそれは $5.4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec/(volt/cm)}$

図-5 珪酸ナトリウムの比重と粘度との関係

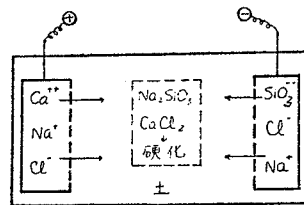


と測定されている。本実験にて白色凝固体が管の中央よりやや陰極寄りの点から発達していつたのは、両極からのイオンが含食塩寒天体内を上記移動速度にほぼ比例した速度で移動して会合した結果

と考えられる。また凝固反応が陽極に向つて進むのは、ある点で Ca^{++} と SiO_3^{2-} が会合し凝固反応を生じると、 SiO_3^{2-} は Ca^{++} よりも高分子であるから、会合点より陽極寄りにあつた Ca^{++} の濃度を非常に低下させる結果、凝固反応は一時その点にて停止し、その後暫時を経過した後、 Ca^{++} が陽極側より拡散してきて濃度が回復したときに、多少陽極の方向に移動した珪酸イオンとそこで会合して次の凝固反応が生ずるためであると考えられる。したがつて凝固は周期的に発達し、凝固体の生成状態は写真-1のごとく断続的となり、いわゆる Liesegang の周期的沈澱の様相を呈して陽極に向つて拡大するものと考察される。

実験-2 諸種の土質においても Liesegang 現象をおこさせ、極間にある土全体を固結させるため行つた実験である。土の比電導度を増すため、この実験では両極の薬液に食塩の水溶液を混入した(図-6)。すなわち陽極筒内には CaCl_2 の40%水溶液と NaCl の20%

図-6 低抵抗度を珪酸ナトリウムを用いて行つた固結装置要領図



水溶液とを混ぜたものを、陰極筒内には水ガラス水溶液(市販水ガラス1に対し水約1.5を加えたもので、化学分析による濃度は35.4%であつた)と NaCl の10%

水溶液とを混合したものを入れた。実験した土質、装置、固結結果などは表-2のとおりである。表-2中(d)の装置は写真-2のごとくである。表-2に示した実験では、凝固は陰極にはほとんど接したところから発達し、漸次陽極に向い、極間全部の土を固結することができた。これは土中では、珪酸イオンに比して Ca^{++} の方が移動速度が大である結果、両イオンの会合が陰極に接近した所で行われ、その点で固結が始まつた後、陽極に向つて Liesegang 現象によつて固結が発達していつたためであろう。なお断続的な固結帯の間に介在する未固結帯は、未固結帯の両側に残存する剰余の遊離イオンが異性電極の方に引かれる結

表-2 電解重合法による土の固結実験の装置および結果

番号	土質	実験容器の大きさ (cm) (長)×(巾)×(深)	電極材料	電極面の 間隔 (cm)	使用電解質溶液量 (c.c.)		使用電流			固結度※※ (kg/cm ²)		透係 ※ 水※ 数※ (cm/sec)
					陽極筒	陰極筒	電圧 (V)	電流 (A)	通電時間 (h)	空中養生	水中養生	
a	朝鮮カオリン	15×8×8 (磁製)	有孔鉄板	9	N=20 C=20	N=25 S=25	12.5	0.1	15	32	15	≐0
b	大阪府下 藤原赤粘土	22×22×12 (磁製)	銅網	15	N=25 C=25	N=25 S=25	12.5	0.1~0.4	7	30	12.5	≐0
c	京都市 吉田山赤粘土	37×30×5 (磁製)	鉄網	20	N=100 C=100	N=25 S=150	50	0.4~1.0	20	12.7	5.2	≐0
d	京都市 北白川砂質粘土	60×40×20 (木製)	有孔鉄板	45	N=500 C=500	N=500 S=500	125	2~4	20	26.0	8	≐0

註※ N は NaCl 水溶液, C は CaCl₂ 水溶液, S は 珪酸ナトリウム水溶液の略号。

※※ 圧縮強度をもつて測り, 空中養生, 水中養生とも養生期間は 3 日間である。

※※※ 水頭約 60 cm くらいで行った値である。

写真-2 図-6 の装置

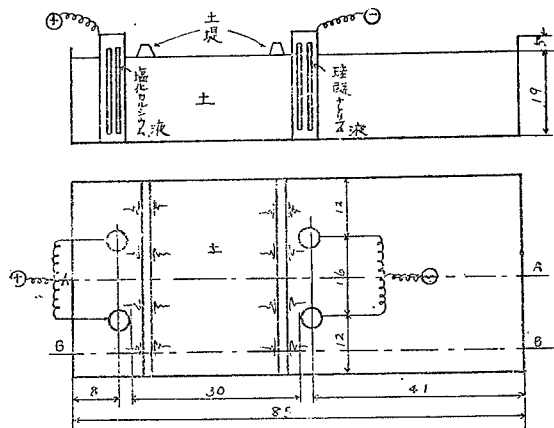


果, 未固結帯はあたかも Donnan の膜平衡⁷⁾ のような状態におかれ遊離イオンはこの帯内で会合凝団して固結を行い, 固結の熟成効果

が得られたように考えられる。なお本実験では, 通電にともない土中の水が電気浸透によつて, 陰極から溢れでて, 土表面に漏水するため, 漏水を経て電流が短絡するおそれがある。これを防ぐため両極の周囲には土で小堤防をつくり漏水を絶縁するようにした。

実験-3 やや濃い珪酸ナトリウムを用いた場合には, 実験-2 のような現象が生じるかどうかを検するため行つた。土を入れる容器は木箱の内側に防水のためアスファルトを塗布して, 内側寸法を 図-7 の

図-7 土の固結装置



とく作つたもので, 試用土は京都市吉田山赤粘土を用い, 電極面間隔は図示のごとく 30 cm とし各極 2 本づつ用いた。この土は特に比電導度が小さいから, 実験-2 のごとく両極内に食塩水溶液を混入して, 電気によつて食塩を土中に浸透させて比電導度をあげることは, 極間隔が長いために実験時間が長くなる。この手数を省くため, ここでは便宜上, 1.17% の食塩水をもつて土を練り, 各部分が一樣になるよう 3 層に分けて容器に入れ, 各層ごとに 8 kg の重りを 50 cm の高さより 20 回落下せしめて突き固めた。電極は 図-7 右のごとき鉄管に細隙をあけたものの外周を鉄網で巻き, さらにその上陽極に対しては絹布にて, 陰極のまわりは絹布で巻いて, 土が極内に入らぬよう, かつ極の帯電性能を極性に調和させるようにしたものを用いた。陽極筒内には CaCl₂ の 30% 水溶液を, 陰極筒内には市販水ガラス 1 に対し水 2/3 を入れ, 120 V の直流を通じた結果, 電流は平均 5.22 A (土中の電流密度; 5.22 ÷ (19 × 40) = 0.00685 A/cm²) が得られ, 24.5 h 経過しても陰極の周囲の土のみが固結し, その後固結は進展しなかつた。このさい消費した CaCl₂ 溶液は 2 l, 水ガラス溶液は 1.7 l であつた。本実験の際の温度および pH の分布の一例を 図-8,

9 に示す。このように水ガラスのやや濃い場合は陰極周囲は非常に固く固結させることはできるが, 極間の土を全体的に固結させることは不可能である。それは固結度が陰極周囲のみ局部的に過度に高くなつたため, それ以後固結層が珪酸イオンの透過を妨げるからである。

実験-4 本固結法にはイオンの誘導上, 一定限度以上の電流密度が必要ならずである。それは電流

図-8 土中温度分布図(通電5時間経過後)

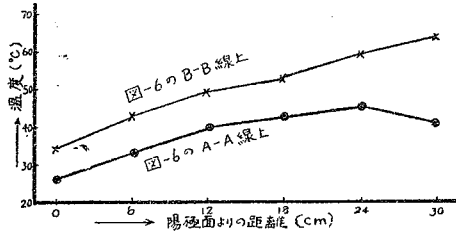
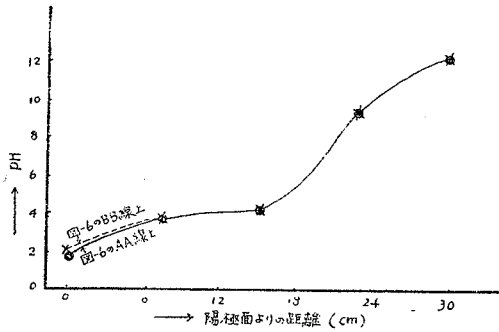
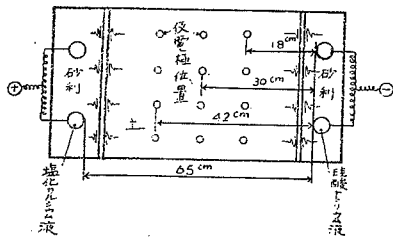


図-9 土中 pH 分布図(通電5時間後)



密度が微妙であれば、土粒の表面伝導²⁾が支配的となつて、自由水中のイオンの移動が微弱化するからである。本実験は本固結法に必要な電流の最低限度を求めるために行つた。実験装置および薬液は実験-3と同様であるが、ただ電極面間隔を65 cmに拡大したこと、吉田山赤粘土をそのまま用い、食塩によつて電導性を高めることを行わなかつた。なお通電前24 h土表面の上まで灌水して充分飽水させた。120 Vの直流を通電したが、45 mAしか流れず、46 h通電後も別

図-10 低速イオンの誘導を併用した固結方法



に感知できる程度の硬化は見られなかつた。電流密度を種々変えて、固結に必要な

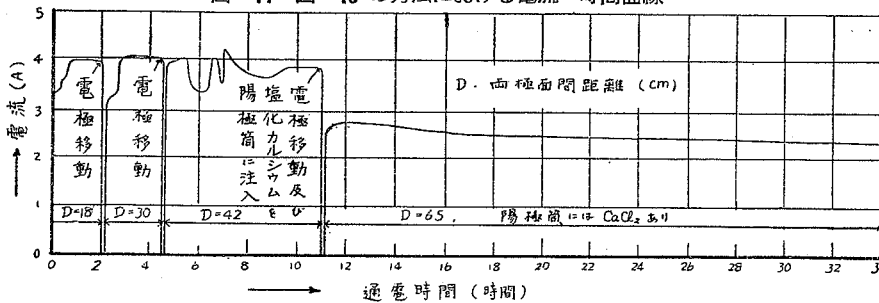
な最少電流密度を求めるべきであつたが、装置その他の関係で実験を中止したため、的確な資料が得られていないが、本実験は最少電流密度が存在する一暗示を与えたものと考えられる。

実験-5 実験-2では凝固体を生ずる異性イオンが、通電と同時に両極より移動を開始し、その会合点から固結が始まり陽極に向つて拡大していつたが、電極間隔が異なると最初の会合点の推定が困難な場合がある。この不便を除くため、本実験では最初は土中移動速度の遅い珪酸イオンのみを電氣的に誘導して、土中所要範囲に拡散させておき、その後実験-2と同様に塩化カルシウムおよび珪酸ナトリウムをそれぞれ両極から同時に拡散させる方法による実験を行つた。本実験では、極面間隔を65 cmとしたほかは、実験-3と同一の装置および同様処理した吉田山の土を用い、最初陰極筒のみ珪酸ナトリウム溶液(実験-3と同一濃度)を入れ、陽極筒は空とし、その代り径1 cmの単なる鉄棒4本を仮陽極として、陰極より18 cmの土中に図-10のごとく等間隔に突きさし、次にこれを抜いて陰極より30 cmに、さらに42 cmの所に移した。各位置においては48 Vを与え、図-11のごとく通電した。最初より11 hの後、第3の位置において土中の水をとり、モリブデン酸アンモンを試薬に用いて珪酸イオンが検出されたので、この位置まで珪酸イオンが到達したことが確認できた。それでただちに陽極筒内に30% CaCl₂を入れ、その後は鉄棒(仮電極)を用いず、両極筒のみを用いて通電した。使用電圧は48 Vで電流の変化は図-11のごとくである。通電34 hを経過したときには、陰極筒面より約47 cmまでの土を固結することができた。消費した薬液量は水ガラス水溶液4.5 l 塩化カルシウム水溶液3.4 lであつた。なお本実験では、水の電気分解の結果両極に発生するガスが電極の接触抵抗を増加するのを防ぐ目的で、両極筒の周囲に図-10のごとく豆砂利層を設けてガスの放散を図つた。

結言

以上の諸実験は本固結法の原理、可能性ならびに適用条件などをみるため、種々の場合に対して行つたものであるが、実験時間、装置その他の関係もあつて、それぞれの実験について充分系統的に、また定量的に

図-11 図-10の方法における電流-時間曲線



実験、測定などを行えなかつたところも多い。しかし以上の諸実験によつて、本固結法の原理が正しく、その実用化が可能であるとの推定は十分に得られものと考えられる。今後薬液の物理、化学的性状・土の特性、特に通電時の電気化学的挙動・使用電圧、電流密度・電極の構造などを研究、工夫してゆけば、本法は一層合理的に適用されるものと思われる。よつて本法は、従来完全な処理方法のなかつた軟弱地盤に対して、これを安定化し、硬化、不透水化する有効確実な固結手段を提供するものと信ずる。なお本法は全く新たな方法であるので、特許の申請を行つた。終りに実験の一部を手伝つていただいた長沢寛氏に謝意を呈する。

参考文献

- 1) L. Casagrande : Grossversuch zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Schwebenden Pfahlgründungen durch elektrochemische Behandlung, Bautechnik **15**, 1937, s. 14
- 2) 村山朔郎・三瀬 貞 : アルミニウム電極による土の電気化学的固結法, 土木学会第8回年次学術講演会講演概要, 1952, p. 29 土木学会誌,

- 38-3, 1953, p. 6
- 3) 久保輝一郎 : 珪素高分子化学, 学術図書社, 1952, p. 36
水島三一郎 : 高分子物質, 共立出版社, 1951, p. 77
小泉正夫訳 : ポーリング化学結合論, 共立出版社, 1950 p. 420
J.C. Slater : Introduction to Chemical Physics, Mc Graw-Hill, N.Y., 1939, p. 435
- 4) H. Meyer : Wasser-glass (奥田進訳 : 水ガラス, コロナ社, 1950)
- 5) R.W. Harman : Herstellung und elektrische Leitfähigkeit, Journal of Physical Chemistry, **29**, 1952, s. 1155
S. Glasstone : A Text book of Physical Chemistry, D. van Nostrand Co, N.Y., 1940, p. 870
- 6) 鮫島実三郎 : 膠質学, 葉華房, 1943, p. 597
A.A. Christomanos : Electric Potential of Solutions as a cause of the formation of Liesegang rings, Nature **165** 1950, p. 238
- 7) 後藤廉平 : 膠質化学, 至文堂, 1949, p. 228
- 8) 金丸 競・祖父江寛 : 高分子構造論, 修教社, 中巻, 1944, p. 605

(昭. 28.4.6)

土の突固めと強度との関係について

准員 米 倉 亮 三*

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN COMPACTION AND PENETRATING RESISTANCE OF SOIL

(JSCE Jan. 1954)

Ryōzō Yonekura, C.E. Assoc. Member

Synopsis Some compacted soil samples, with various water contents, are penetrated by the steel needle, and showed the decreasing of penetrating resistance by over-compaction.

要 旨 数種の土について、含水比を変えて、突固めを行いこれの貫入抵抗を測定して、過剰突固めによる強度減少の状態を調べてみたものである。

I ま え が き

盛土の輾圧ということは、すでに土工工事における常識となつてきているが、しかし実際の場合となると種々の困難がともなうものである。突固め試験によつて、輾圧に最適な条件を定めこれを現場で守るといふようなことも、かならずしも我國の現状で最良の方法であると云えないかも知れぬ。ここでは主として突固め後の土の強度を数種の土について測定し、これから

過剰突固めによる土の強度減少の問題およびこれらと土の consistency との間の関係について検討を行つてみた。

II 実 験

土を突固めるには、JISにより標準突固め試験法に規定されている試験装置を用い、土の強度は貫入抵抗によつて測定することにし、この貫入抵抗は図-1に示すような装置を用いて測定した。貫入棒の先端の鋼製円錐体は底面直径 20 mm, 先端角度 30° で歪リングの容量 500 kg 感度 1.5 kg である。型枠に突固めた土をそのままオイルジャッキに乗せ、これを上昇させ先端円錐体の底面が試料土上面に一致してから 5 mm

* 建設省土木研究所沼津支所