

アルミニウム電極による土の電気化学的 固結法について*

正 員 工 博 村 山 朔 郎**
正 員 越 賀 正 隆***
准 員 三 瀬 貞****

ON THE ELECTROCHEMICAL CONSOLIDATION OF SOIL BY MEANS OF ALUMINIUM ELECTRODES

(JSCE March 1953)

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

Synopsis Since L. Casagrande developed the electrochemical consolidation by means of aluminium electrodes in 1934, many experiments have been treated by several researchers. But the mechanism of consolidation has been unknown.

Here, although it is laboratory scale, we have made the mechanism of consolidation clear, and investigate its application for practical purpose.

要旨 L. Casagrande (1934) 以来アルミニウム電極を用いて土を電気化学的に固結させる実験が数多く実施されてきたが、固結機構の解明には明確を欠いていた。著者等は実験室的研究により、主として固結機構について研究し、従来不明とされていた点を明らかにするとともに、この方法の適用について若干の検討をした。

1. 緒言

軟弱地盤の土粒間隙に他物質を充填して地盤を固結する方法の1つには注入法がある。これはセメントまたはモルタルを、あるいは珪酸ナトリウムを主剤とする無機化合物¹⁾を、または尿素樹脂²⁾・アクリゾール³⁾・メタアクリル酸塩類⁴⁾等を主剤とする有機化合物を土中に加圧注入して土を固結する方法である。そのためには注入物質の粒径または粘性が小さいことが必要で、例えばセメント注入の適用限度は粒径約 0.6mm の土までであり、珪酸ナトリウムは粘性の点から通常粒径 0.1mm 以下の土には困難であり、メタアクリル酸塩類でも土の粒径は 0.05mm 程度を限度とすると思われる。

他の方法は電気化学的固結法であつて、固結性物質を土粒間隙に電気的に誘導し、これを土中にて化学的に沈澱固結させる方法である。電気化学的固結法は注

入法と異なり、イオンの流動あるいは界面動電現象によるため粘質土のごとき微粒の土にまでも応用できる特徴がある。

Al一極による電気化学的固結法は土中に設けた Al一極(陰極に Cu を用いたこともあつた)を通して D.C. を通電するもので、1934 年始めて L. Casagrande⁵⁾ が行い、その後 Erlenbach⁶⁾、Endell 及び Hoffmann⁷⁾、Geuze・Bruyn 及び Joustra⁸⁾、Steinfeld⁹⁾ 等の実験があり、陽極に接する土を固結することにより陽極(極として杭を用いた)の支持力を増大することを目的としている。

一般に土壌コロイドを含む土においては、間隙水は正に帯電しているから、Al一極より土中に D.C. を通電すると電気浸透による脱水作用と電解した Al を土粒間隙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。電気浸透においては間隙水はその土の電気浸透係数(単位電圧によつて生ずる浸透水流の速度を以て示す)と両極間電圧とに比例する流速で負極の方向に流れて脱水される。これに所要の電力量は普通 1 m³ の土に対して 0.7~1.4 kWh くらいといわれる。土は脱水とともに強度を増すが、再び水を含めばもとの軟かさに戻る不利がある。一方 Al一極による電気化学的固結法では Al一極の電解を要するから、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 m³ の土には 3~360 kWh くらいを要するといわれる。しかしこの効果は従来の実験によれば、杭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ビ

* 土木学会第7回(昭. 26. 5. 27)および第8回(昭. 27. 5. 25)年次講演会にて発表

** 京都大学教授, 工学部土木工学教室

*** 名古屋工業大学教授

**** 京都大学助手, 工学部土木工学教室

ーカー内の水中に放置しても沸化しないことを認めている。ただ従来の報告によれば、固結の機構の解明が不詳であり、その上固結が陽極周囲に生ずるとされていた点は筆者等の実験とは必ずしも一致せず、固結の可能性と固結位置はさらに検討の必要があることを認め、ここに固結の条件を研究したのである。

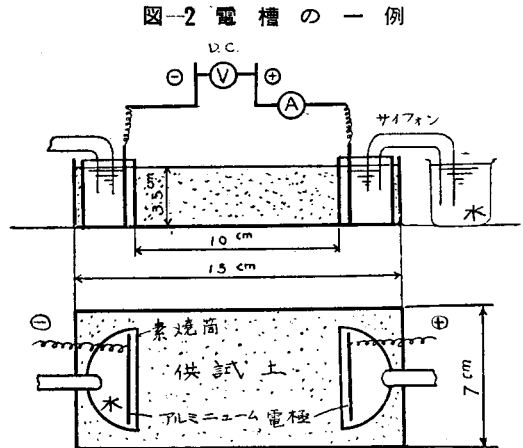
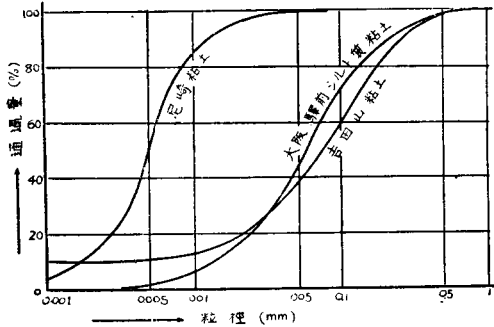
2. 実験

表-1 のごとき供試土を用いた。これらの粒度組成は図-1 に示す。装置は種々用いたがそのうち代表的なものは図-2 のごとく15 cm (長さ) × 7 cm (巾)

表-1 供試土の性質

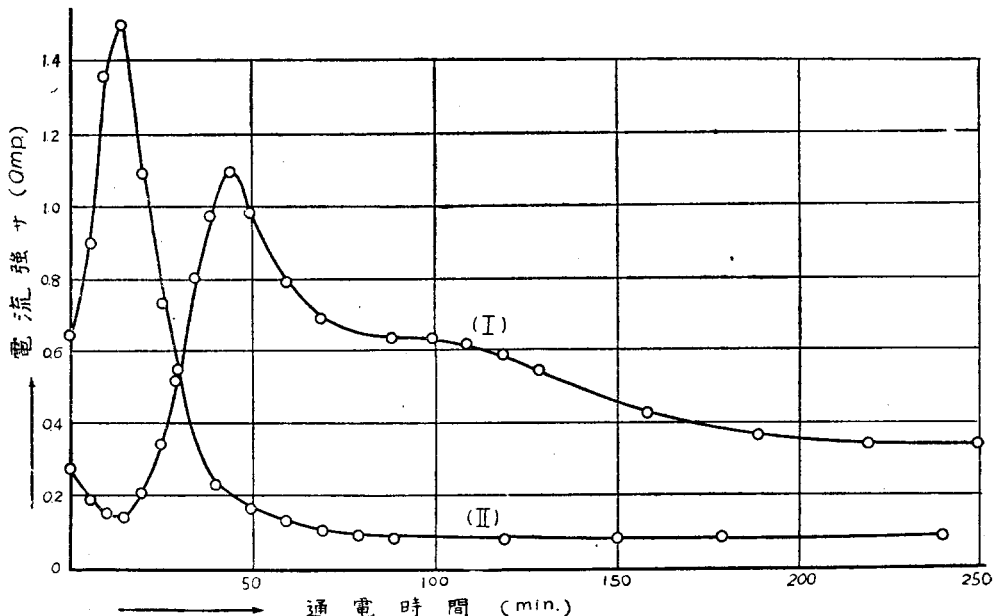
供 試 土	液性限界	塑性指数	pH 値
京都市 吉田山 赤粘土	42.60	21.23	6.20
尼 崎 海 底 青粘土	76.20	47.30	7.68
大阪駅前 シルト質粘土	39.00	10.72	7.34

図-1 試料土の粒度分布図



× 3.5 cm (深さ) の合成樹脂製容器を電槽とし、その両端に厚さ 0.8 mm 面積 5 × 5 cm² の Al-板を電極として用いた。電極は図-2 のごとき半月形の素焼筒の中に入れ、素焼壁を隔膜とした。これは水の電解の結果発生する H₂, O₂ 等のガスを逃げやすくさせ、ガスが電極を覆つて絶縁を増し、電気抵抗の増大の結果極に接する土が局部的に加熱されるのを防ぐためである。素焼隔膜の有無の影響は図-3 の電流-時間曲線からも明らかで II-曲線は隔膜がなく極が直接土に接する場合、I は II と同一条件でただ隔膜を用いた場合で I は II にくらべて電流が急減しないことがわかる。また脱水による土の硬化を除く目的と電導性を得るため素焼筒の中には水を充し、電気浸透による陽極側の減水および両極よりの蒸発等はサイフォンを用いて自

図-3 隔膜の有無の電流におよぼす影響



働的に調節し、常に両極の水位を同一にするようにした。供試土は素焼筒のまわりに充填し、厚さ3cm、素焼筒の対向面間隔は10cmとした。土の固結度はセメント凝結試験用貫入針を用い、土表面からの針の貫入深さを表面各区分点について測つた。また供試土のpHおよび実験後各区分点における土のpHを求めた。pH測定には土4gを取り、10cc蒸留水を加え(土と水との比は1:2.5; 国際土壤学会1930年規定)板野式pHメータおよび東洋濾紙社製pH試験紙によつて測定した。

約20時間通電を行つると(電圧50V)尼崎粘土および大阪駅前シルト質粘土においては明らかに固結帯が認められ、これについて貫入試験およびpH測定を行つた結果は図-4および図-5に示す。図より明らか

図-4 貫入量とpHとの関係(大阪シルト質粘土)
供試土表面測点位置図

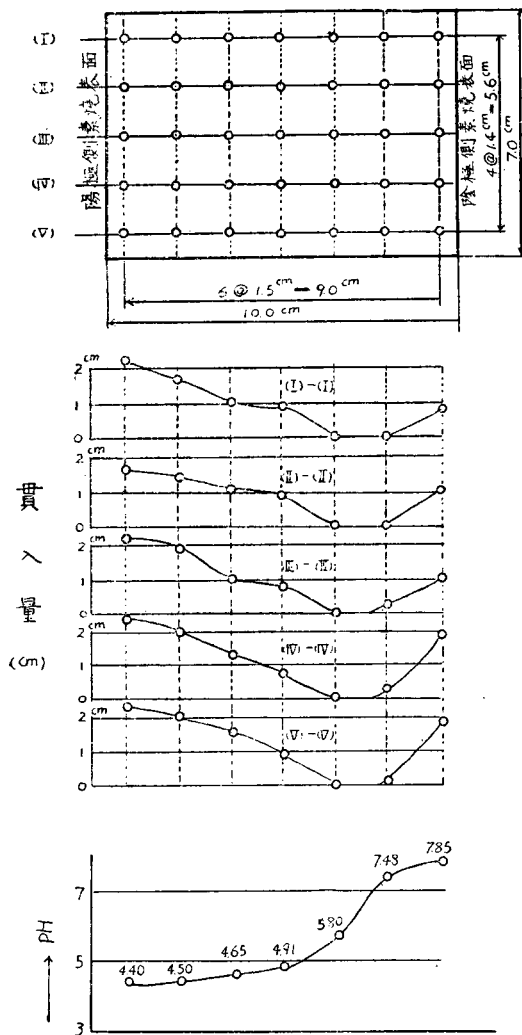
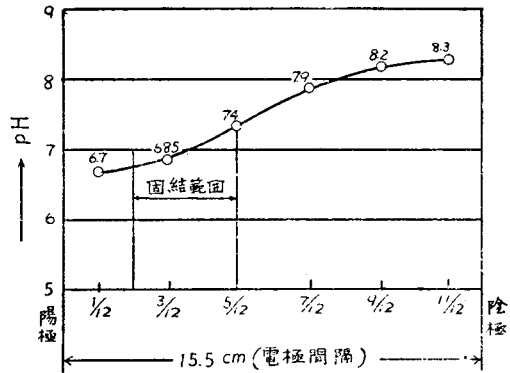


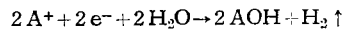
図-5 固結範囲とpHとの関係(尼崎粘土)



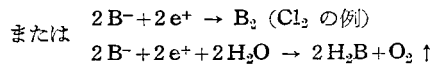
なように、pH=7 付近において貫入深さは 0 となっている。これは pH=7 のところを中心として固結層の生じていることを示すもので、固結位置は pH=7.68 の尼崎粘土では陽極に近いけれども、pH=7.34 の大阪駅前シルト質粘土ではむしろ陰極側に近い。しかし pH=6.20 の吉田山粘土では数日の通電にもかかわらずこのような固結層は生じない結果を示した。しかし吉田山粘土に 1%濃度の塩化ナトリウムを加えると、明らかに両極のほぼ中央位置に固結帯が生じるが、塩化ナトリウムの代りに硫酸アルミニウムを用いても固結帯は見られない。なお NaCl または $Al_2(SO_4)_3$ の加え方は素焼筒内の水に塩を入れるか、または粘土をこねる水に混入するかした。

3. 実験に対する考察

実験に用いた土は土壤コロイドを含み、土壤コロイドは陰陽のイオンを吸着し、さらに水を吸着しており、これをかりに式で示せば、 $[A(\text{土壤コロイド})B] \cdot H_2O$ の形で記せる。ここに A は陽イオン、B は陰イオンを示す。この土に D.C. を通電すれば A イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Al^{+++} 等) は陰極に向つて移動し、陰極付近に集まるが、これらのイオンは放電して金属を析出する代りに H^+ を放電させて次式のごとく水を電解して H_2 ガスを発生する。



ゆえに陰極側は NaOH, KOH ができて次第に pH が大となる。一方吸着陰イオン B^- (SO_4^{--} , Cl^- , CO_3^{--} 等) は陽極に向つて移動し、陽極にては次式のごとく O_2 , Cl_2 を放出し、 H_2SO_4 , H_2CO_3 等を生じこの pH は低下し酸性を帯びる。

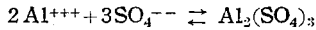


(H_2SO_4 , H_2CO_3 の例)

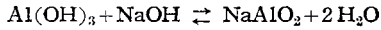
また土壤コロイドは通常負に帯電しているから、多少のものは陽極に向つて電気泳動し、また吸着水は通常

正に帯電しているから陰極に向つて電気滲透する。

一方陽極に用いた Al—板はイオン化して溶出し、もし陽極側に SO_4^{--} があれば

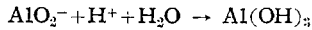
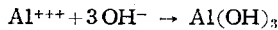


のごとく陽極側の酸性地帯では Al^{+++} , H^+ , SO_4^{--} , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ が共存する。また陰極側では陰極側のアルカリによつて溶けた Al^{+++} , 土中よりでた Al^{+++} , は $\text{Al}(\text{OH})_3$ の形で存在し、ここにある NaOH と次式のごとく化合する。

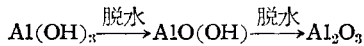


ゆゑに陰極側のアルカリ地帯ではイオンとしては、 Na^+ , Al^{+++} , OH^- , AlO_2^- (アルミン酸イオン) が共存している。ただし $\text{Al}(\text{OH})_3$ は両性コロイドであるから、溶液がアルカリ性であれば溶解している。

一方 $\text{pH}=7$ の中性地帯では $\text{Al}(\text{OH})_3$ が凝固コロイドとなる上、粘質土であれば不透水性であるから、この地帯は特に透水性が低下してイオンの移動の自由が妨げられる。このため中性地帯では酸性側の H^+ , Al^{+++} とアルカリ側の OH^- , AlO_2^- とは Donnan の膜平衡の状態をつくり、これらの各イオンは中性地帯内に拡散によつて徐々に移動する。ゆゑに中性地帯では



となつて $\text{Al}(\text{OH})_3$ が析出する。これはさらに加熱作用と電気滲透作用によつて徐々に脱水され、結晶性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ あるいは次式のごとく結晶性 $\text{AlO}(\text{OH})$ (ボーキサイト) に、さらに結晶性 Al_2O_3 (アルミナ) に変化すると思われる。



この脱水変化は通電を絶つた後もつづけてきわめて徐々に進行するものと考えられる。 $\text{AlO}(\text{OH})$, Al_2O_3 は水に不溶性でまた化学的に安定しており、これが土粒間隙を充して結晶的に硬化するために、軟弱土の固結、不透水化を行うものと思われる。なお軟弱土の固結には結晶性 Al 化合物の生成が影響するのみでなく、塩基交換等の界面化学的作用も大いに関与していると思われるが、この点の詳細は今後の研究によるつもりである。また固結作用が単に $\text{Al}(\text{OH})_3$ の単なる土粒間隙の充填物としての作用のみでないことは、別につくつたコロイド状 $\text{Al}(\text{OH})_3$ を単に土に混合し、この混合土を 100°C 附近に長時間放置脱水したものを浸水すれば沸化することよりみてもうかがわれる。なお $\text{pH}=7$ の地帯は大体等電位線において生ずる。以上は固結層が $\text{pH}=7$ にて生ずることの解明である。

以上のごとく $\text{Al}(\text{OH})_3$ の沈澱生成が液の pH に影響するゆゑ、供試土の pH が固結および固結位置に影

響することは当然である。尼崎粘土および大阪駅前シルト質粘土では pH は 7 以上であるから、 Na^+ , K^+ 等のアルカリイオンが吸着していることおよびこれらの吸着時それにとまつていた SO_4^{--} , Cl^- 等が吸着されていることは当然予想されるから、実験のごとく何等の処理を施さず、そのまま Al—極に通電するのみで固結体が生成したと考えられる。

また吉田山粘土は酸性土であつて、吸着イオンのうち Na^+ , K^+ 等が流出して、 H^+ がこれにおきかわつたものと考えられ、このままでは通電しても陰極側は pH のさほど増大する要素をもたないから、中性地帯が生ぜず、したがつて固結層も見られないと考えられる。もしこれに NaCl を加えれば、これが電気分解して陽極には HCl が、陰極には NaOH が生じ pH 傾度が高まり、その中間に $\text{pH}=7$ を得られ、ここに固結層を見られることになる。しかし NaCl の代りに $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ を加えた時は、陽極には H_2SO_4 の強酸が生じるが、陰極側は中性程度の $\text{Al}(\text{OH})_3$ ができるので、土の固有の pH よりみて全体としての pH はむしろ低下するのみで、したがつて $\text{pH}=7$ に相当する固結位置は存在しなくなると思われる。

また固結層の生成が土壌コロイドの吸着イオンの塩基交換から受ける影響を見るため、セメント試験用豊浦標準砂に、 NaCl を加えて通電した。砂のような土壌コロイドのないものでもやはりわづかながら Al 化合物の沈澱層が認められるから、塩基交換だけが固結の主因とは思われない。

Al—極により電気化学的に固結された土は従来の報告にもあるように、水に漬けても安定している。しかし脱水硬化土の安定を見るため土に交流を通電して硬化させたもの、または炉で乾燥硬化させたものを作り水に入れた。これはたちまち沸化し脱水硬化土は電気化学的固結土と全く異なる固結状態にあることが認められる。また固結層の土を分析すると、 Al_2O_3 が増加していることが見られた。

4. 本国結法の効果

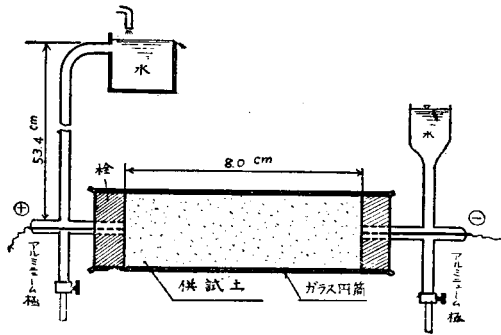
尼崎粘土を例にとり、剪断試験を行つて力学的強度を測つた結果は、表—2のごとく θ , c とともに増大した。

表—2 処理前後の剪断試験結果の比較

試験項目	未処理土(含水比55%)	処理土(含水比55%)
内部摩擦角(θ)	10° 20'	13° 25'
凝集力(c)	0.006 kg/cm ²	0.027 kg/cm ²

水密性の増加を見るため図—6 の装置を用い、豊浦標準砂と、溶液に 1% NaCl とを用いて、50 V, 20 時

図-6 透水試験器



間通電を行つたところ、透水係数は処理前 $K=1.2 \times 10^{-3}$ cm/sec であつたものが処理後 $K=0$ となり不透水となつた。

5. 通電方式について

図-3のごとく電圧一定の時は電流密度は時とともに減少する。これは Donnan 膜平衡の発達、含水比の低下も原因となるが、極を直接土中に入れたものでは、前述のごとく O_2 , H_2 等のガスが極を包み、これが極に吸着されて電気抵抗を高めること、および土中の陰陽イオンの分布がその反位の極に集まるため、あたかも極中間の土は蓄電池のごとくなりいわゆる分極作用に基づく逆起電力が作用するためである。ガスによる絶縁作用と分極作用とを除くには、断続通電を行つて時どきガスの放散と逆電圧の時間を与える。加賀美一二三氏¹⁰⁾が断続通電の方が連続通電の場合より効果的であることを認めたのはこの理によると思われる。

6. 結論

Al-極を用いる電気化学的固結法による固結層の位置は決して従来いわれてきたような陽極側に限定されるものではない。従来の実験において極に用いた杭の支持力の増大したのは、たまたま塩基性土に対して実験され、そのため比較的陽極近くに中性地帯が生じたことならびに多分に脱水硬化が生じていたのではないと思われる。それは電流密度の低下とともに杭支持力が低下したり、施工後杭支持力が低下したりすることがこれを暗示しているように思われるからである。本実験により得られた所を要約すると、

(1) 固結層は通電時生じる pH = 7 の線を中心にしておよそ電極間隔の 0.1 倍の巾に、ほぼ等電位線に沿つて生じる。ゆえに電極配置を工夫すれば、地中に所要の形の固結層が作られる。

(2) (1) の理によつて、固結層の位置、固結の有無は土および地下水の pH に影響される。

(3) 塩類を注加することにより人為的に pH=7 の発生ならびに位置を加減できる。注加方法としては、

陽極の周囲に池を作り、そこに塩類を入れて電気滲透により地中に導くか、直接地中に注入する等の方法が考えられる。

(4) 固結層を分析すると Al_2O_3 の増加が見られる。

(5) 固結の原因は固結層に生成する $AlO(OH)$ または Al_2O_3 の結晶化にあると思われるが、その他塩基交換等の界面化学的な影響も予想され、なおこの点研究の必要がある。

(6) 固結層は化学的に安定であり、また力学的にも強化され、水密性も増加されている。

(7) Al の溶解量の増大従つて通電時間の増加とともに固結程度も増加する。

なお本研究に文部省科学研究費をうけたことをここに謝する。

参考文献

- 1) 渡辺貫, 有馬宏, 石川九五: セメント注入, 昭. 10.10.
沼田政矩, 丸安隆和, 黒崎達二: 新しい薬液注入による地盤の固結方法に関する研究, 土木学会論文集 12 号
- 2), 3) 土木学会 (運輸省下関地方施設部編): 関門隧道, 昭. 24. 3, p. 569
- 4) 近藤泰夫, 松尾新一郎: 薬液注入工法について, 土木学会第 8 回年次講演会講演概要, p. 31
- 5) L. Casagrande: Verfahren zur Verfestigung toniger Böden, Patentschrift DRP Nr. 621694, Gruppe 6, Klasse 84 c, 1934
L. Casagrande: Grossversuch zur Erhöhung der Tragfähigkeit von schwebenden Pfahlgründungen durch electrochemische Behandlung, Bautechnik, 15, 1937, S. 14
L. Casagrande: Die electrochemische Bodenverfestigung, Bautechnik, 17, 1939, S. 228
- 6) L. Erlenbach: Anwendung der electrochemischen Verfestigung auf schwimmende Pfahlgründungen. Bautechnik, 14, 1936, S. 257
- 7) K. Endell: Beitrag zur chemischen Erforschung und Behandlung von Tonböden, Bautechnik, 13, 1935, S. 226
K. Endell & U. Hoffmann: Electrochemical Hardening of Clay Soils, Proc. 1st International Conf. on Soil Mechanics & Found. Engr. Vol. I, 1936 p. 273
- 8) E.C.W.A. Geuze, C.M.A. Bruny & K. Joutstra: Results of Laboratory Investigations on the electrical Treatment of Soils. Proc. 2nd International Conf on Soil Mechanics & Found Engr. Vol. II, 1948, p. 153
- 9) K. Steinfeld: Die Entwässerung von Feinböden, Bautechnik, 28, 1951, S. 269
- 10) 加賀美一二三: 軟弱地盤における基礎杭の電気化学的固定法について, 土木学会第 7 回年次講演会講演概要, p. 115 (昭. 27. 9. 19)