



粘性土の電気浸透圧密効果に関する検討

杉山, 友理
橘, 伸也

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 30:9-16

(Issue Date)

2026-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100504170>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100504170>



粘性土の電気浸透圧密効果に関する検討

Study on electroosmotic consolidation effect of clay

杉山 友理¹⁾

Yuri Sugiyama

橘 伸也²⁾

Shinya Tachibana

概要: 電気浸透圧密手法が浚渫土砂の減容化手法として非常に有効であることが分かっている。ここで、電気浸透圧密とは、粘性土中に電流を流すことで陽極から陰極に間隙水を強制脱水させる手法である。しかし、地盤材料や使用する電極材料により電気浸透効果が全く異なるため、電気浸透圧密工法として現場適用時の仕様が決まらず、現場適用事例は非常に少ない。そこで本研究では、カオリン粘土及び東京湾粘土を用いた電気浸透圧密試験を実施し、高い電気浸透圧密効果が得られる最適な通電方法について検討した。さらに、日本各地から浚渫土砂を採取し、様々な粘性土に対する電気浸透圧密効果について検討した。

キーワード: 電気浸透、浚渫土、圧密試験

1. はじめに

地盤工学や地盤環境工学における電気浸透の利用は、地盤の圧密・安定化手法、強度増加手法、汚染地盤浄化修復工法、汚泥の除水などへの適用性が非常に高く、多くの研究が報告されている。Xue et al.¹⁾ は様々な電極材料を用いた電気浸透実験を実施し、電気浸透効果に及ぼす影響について検討している。Ready et al.²⁾ は浚渫土に対する電気浸透の有効性について検討した結果、電気浸透による脱水効果が非常に高いことを明らかにしている。Zareh et al.³⁾ は、浚渫土とカオリンを用いた電気浸透圧密試験を実施し、圧密後の供試体を用いた一軸試験を実施した。その結果、印可電圧が大きいほど圧密沈下量が大きく、強度も大きくなることを明らかにした。このように、これまで多くの研究成果が報告されているが、粘性土への電気浸透効果に及ぼす電気化学的要因について検討された研究はほとんどない。

多くの場合、粘土粒子は水中で負に帯電している。そのため、土粒子表面付近の正に帯電した間隙水は通電により陰極側へ移動する。これにより陰極側から間隙水の脱水が生じる。これが電気浸透現象である。電圧が印加された粘性土内では、電気浸透の他にイオンやコロイドが電流キャリアとなる電気泳動が生じる。ここでは、イオンの泳動(Electromigration)もコロイドの泳動(Electrophoresis)も区別せずに”電気泳動”と称す。先述の通り、粘性土は負に帯電している場合が多く、陰極に向かって浸透による水の移動が生じる。電気浸透圧密工法とはこのような水の移動を利用して粘性土等を脱水するものである。粘性土は堆積する環境により含有イオンや組成が大きく異なるため、帯電量は粘性土により様々であり、これにより電気浸透脱水効果に差が生じると考えられる。粘性土の電気浸透圧密効果について検討するためには、様々な粘性土に対して電気浸透圧密試験を実施し、粘性土の物理化学特性と電気浸透圧密効果の関係性を明らかにする必要がある。本研究では、まず初めに、カオリン粘土及び東京湾粘土を用いた電気浸透圧密試験を実施し、高い電気浸透圧密効果が得られる最適な通電方法について検討した。次いで、様々な粘性土を用いた電気浸透圧密試験を実施し、各粘性土に対する電気浸透圧密効果について評価した。

2. 地盤材料

本研究では、カオリン粘土、東京湾粘土及び日本各地から採取した浚渫粘土を用いる。本研究では、七尾港、新門司沖及び中城港から採取した浚渫粘土を用いた。採取した浚渫土砂は、それぞれ $425\mu\text{m}$ のふるいを用いて粘性土に分類されるよう粒度を調整した。なお、粒度調整の際、加水は一切していない。

カオリン粘土は、初期含水比が 100%となるように水道水を加え攪拌して作成した。東京湾粘土は 10 年前に採取した以降、屋外の土槽で保管しており、間隙水(海水)が雨水で洗い流された状態である。一方、浚渫粘土は各港近郊から浚渫された粘土であるため、間隙水は海水である。カオリン粘土、東京湾粘土、及び浚渫粘土の物理試験結果を表-1 に示す。

表2 物理試験結果

	カオリン	東京湾	七尾港	新門司沖	中城港
土粒子密度 (g/cm^3)	2.77	2.68	2.63	2.68	2.75
液性限界 (%)	52.1	102.4	150.3	70.0	51.1
塑性指数	22.4	63.1	112.2	43.5	31.9
初期含水比 (%)	100	140	159.0	60.3	50.1

3. 電気浸透圧密試験

(1) 試験装置

電気浸透圧密試験には、電気浸透圧密試験装置を用いた。試験装置の概略図を図 1 に示す。将来的に、電気浸透による粘性土の圧密特性について調べるため、電気浸透圧密試験装置は標準圧密試験装置と同じ規格になるように製作した⁴⁾。標準圧密試験とは、直径 60mm、高さ 20mm の供試体を用いて側方変位を拘束し、上下面の排水を許した状態で鉛直荷重を載荷し、載荷荷重に応じた飽和粘性土地盤の沈下量や沈下時間の推定に利用され、圧縮性や圧密係数などを求めるものである。電気浸透圧密試験装置は標準圧密試験装置と異なり、供試体上下端面が電極に接しているため直流電流を印可可能である。また、電極反応によって生じるガスと電気浸透によって脱水した水を分離回収するための気液セパレータを設置している。また、電極反応により発生するガスが電極と粘土間に留まらないように、電極にはパンチング処理を施した。開口率は 20%で、電極面積は 2.239 mm^2 である。実験中常に電極が粘土と接するよう、圧密に影響を及ぼさない程度の鉛直荷重を与えた。電気浸透により供試体が収縮するため、圧密容器をメンブレンで覆い、その隙間を水で満たすことで鉛直荷重に等しい垂直荷重を作用させた。本研究で実施した電気浸透圧密試験では、標準圧密試験と同様、スラリー供試体のサイズが直径 60mm、高さ 20mm であるため、初期の電極間隔は 20mm である。電気浸透脱水により供試体が沈下した分だけ電極間隔が狭くなるが、本試験中の沈下量はいずれも 1mm 以下であり、電極間隔は試験中はほぼ一定であることを確認した。電気浸透圧密中常に電極を粘土と接触させた状態にするために鉛直荷重を載荷した。電気浸透圧密により試料が収縮するため、試料の側方変形量についても計測するため、試料側方をメンブレンで覆い、メンブレンと圧密容器との隙間を水で満たすことにより鉛直荷重に等しい水平荷重を載荷した。このとき、側圧は隙間に充填された水圧と等しく、水圧は圧密試験装置の横に設置したタンクとの水頭差により載荷した。電気浸透圧密試験中に与えた荷重のみを載荷して圧密試験を実施し、これらの荷重が電気浸透圧密に与える影響が非常に小さいことを確認した。

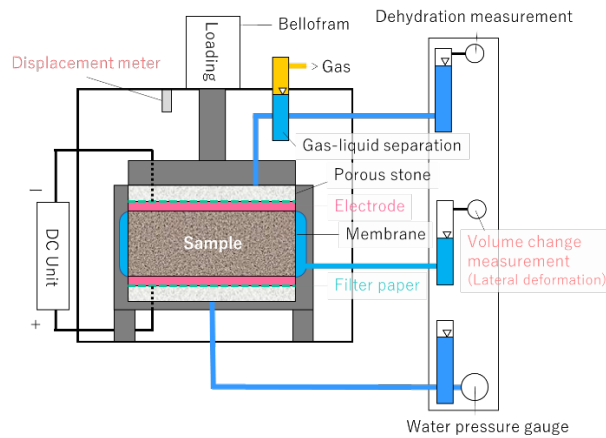


図1 電気浸透圧密試験装置

(2) 電気浸透圧密試験による最適な通電方法に関する検討

定電流値を 0.01、0.02、0.05A の 3 ケースとし、陽極材料にはアルミニウムを、陰極材料には鉄を用いた。カオリン粘土を用いた電気浸透圧密試験結果を図 2 に示す。これらの結果より、定電流値が 0.01A のケースで最終脱水量が最も小さくなり、0.02A と 0.05A のケースの脱水曲線がほぼ一致した。印可直後の脱水速度は、定電流値によらずほぼ同じであった。黒線で示す 0.01A のケースをみると、電位が緩やかに上昇するに従い脱水量が増加していることが分かる。しかし、電圧値が 40V を超えると電圧が一定となり、0.02A および 0.05A のケースの最終電圧値 73.5V よりも最終電圧値が小さかった。粘性土に作用する電圧が小さくなったため最終脱水量が小さくなったといえる。図 2(c)のグレー線で示す 0.05A の電位の経時変化をみると、印可直後から急激に電位が上昇している。ここで、カオリン粘土の粘性土/電極界面の電圧降下測定試験を図 3 に

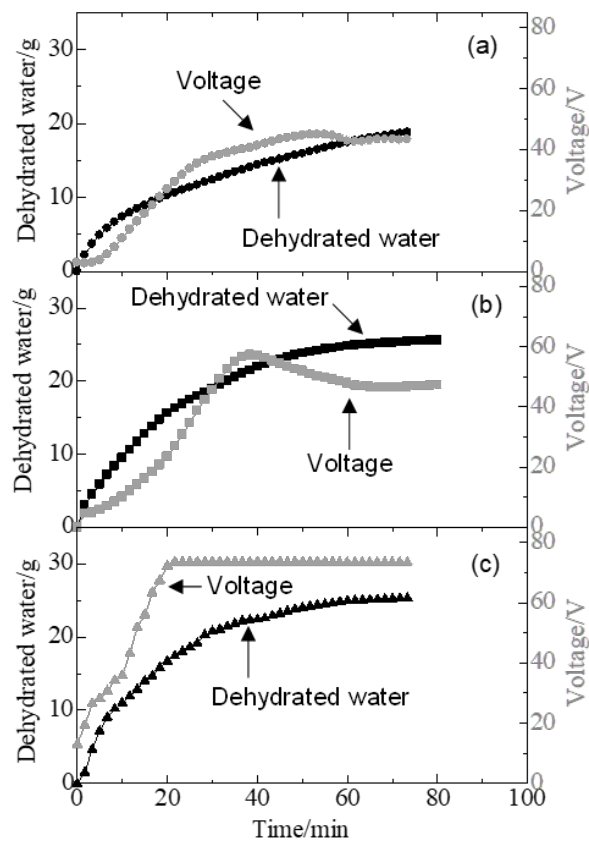


図2 カオリン粘土の脱水量時間変化および電圧時間変化 (a) 0.01A、(b) 0.02A、(c) 0.05A

示す⁵⁾。図3に示す分極曲線から、陰極側の鉄は、0.8mA/cm²を超えると分極量が大きくなり、陽極側のアルミは1.0mA/cm²を超えると分極量が急激に大きくなることから、0.02A および 0.05A のケースは、電流密度がそれぞれ 0.7 mA/cm² および 1.8mA/cm² 程度であり、0.05A のケースは分極量が大きくなる電流密度に近い値である。このことから、0.05A のケースは、粘性土/電極界面に集中して電位が作用することで、粘土内に作用する電位勾配が小さかったといえる。そのため、0.02A および 0.05A のケースの最終脱水量にほとんど差が生じなかったといえる。試験後の平均含水比は、0.01 A : 53.8%、0.02 A : 50.6%、0.05 A : 49.6%となり、全ケースで高い脱水効果が得られた。

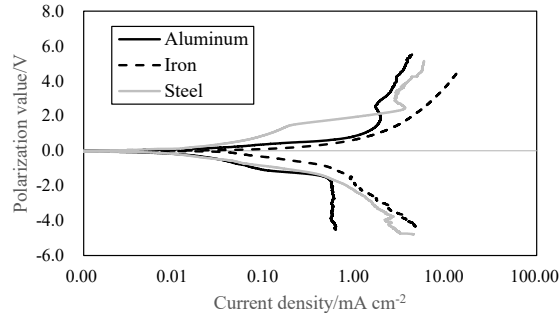


図3 カオリンの電圧降下測定試験結果⁵⁾

カオリン粘土を用いた電気浸透圧密試験結果から、電気浸透を生じさせるための最適な印可電流値が粘性土ごとに存在することを明らかにした。電圧が印加された粘性土内の電気浸透脱水時には、電気浸透による電流と電気泳動による電流が存在し、電流計で計測される電流は次の式で表される。

$$I_m = i_{os} + i_{ph} \quad (1)$$

ここに、 I_m は電流計で計測される電流[A]、 i_{os} は電気浸透による電流[A]、 i_{ph} は電気泳動による電流[A]である。様々な粘性土において i_{os} と i_{ph} がそれぞれどのような値となるかは電気化学的な解釈には非常に重要である。

i_{os} および i_{ph} の整理の仕方はさまざまに考えられるが、本論文では印加電圧 V を式(1)で割った値を次の通り定義する。

$$V = I_m (R + R_m) \Leftrightarrow \frac{V}{I_m} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{os}} + \frac{1}{R_{ph}} \right)} + R_m \quad (2)$$

ここに、 R_{os} は電気浸透による抵抗[Ω]、 R_{ph} は電気泳動による抵抗[Ω]、 R_m は電圧降下による抵抗[Ω]である。 R_{os} および R_{ph} は電極間の電圧に対してそれぞれ i_{os} および i_{ph} を決定する数値である。例えば、 R_{os} が大きく、 R_{ph} が非常に小さい粘性土があるとすれば、電流が多く流れても電気浸透は生じにくい結果となる。このように、電気浸透による電流、電気泳動による電流および粘性土/電極界面の電圧降下による電流は可能な限り分離して理解する必要がある。

カオリン粘土を用いた電気浸透圧密試験結果について、式(2)を用いて整理したものを図4に示す。0.01A のケースでは、脱水量と R 変化がほぼ比例関係であることが分かる。0.02A のケースでは、 R が安定して上昇し、40 分経過付近で R が一度低下する間、脱水量が増加した。その後 70 分経過時には R および脱水量が共に一定となった。120 分経過時をみると、 R が再度上昇することが分かる。このとき、 R が上昇しても脱水量に変化が生じなかった。粘性土中の含水量が変化しないため、式(2)に示す R_{os} は変化せず、 R_{ph} は粘性土中のイオンが増加するため減少する傾向を示すはずである。そのため、このときの抵抗 R の上昇は R_m に起因すると考えられる。粘性土/電極界面付近の間隙水は通電初期に脱水が完了しているため、 R_m が上昇しても脱水量が変化しなかったと考えられる。0.05A のケースでは、50 分経過時に脱水量が一定になっても R が上昇している。このときの R の上昇は、0.02A のケースと同様、 R_m が上昇したことが原因であると考えられる。各ケースの R の値を比較すると、0.01A のケースで最も R が大きいにもかかわらず、脱水量が最も小さくなった。こ

のことから、0.01A のケースでは脱水速度が遅いため粘性土中のイオンが増加することで電気泳動による電流キャリアが卓越し、それにより R_{ph} よりも R_{os} が大きくなったことで電気浸透が生じにくくなったと考えられる。一方、0.02A と 0.05A のケースは、脱水曲線が一致しているにも関わらず R は 0.05A のケースが大きかった。このことから、いずれのケースも電気浸透による電流 i_{os} は同じ値であり、0.05A では電気浸透に対して余分に電流を与えていたことが推測される。つまり、定電流値を 0.05A 以上に大きくしても、電気泳動による電流が増加するだけで電気浸透脱水効果を高めることができないといえる。

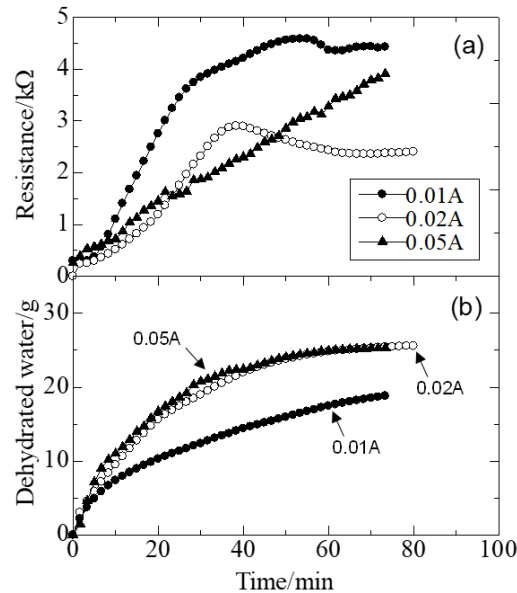


図4 カオリン粘土の抵抗変化(a)および脱水量変化(b)

次に、東京湾粘土を用いた電気浸透圧密試験結果について検討する。東京湾粘土は間隙水に塩化ナトリウムを含むため、粘土の抵抗が小さい。そのため、カオリン粘土のケースで用いた条件と同じ定電流値で通電すると、電気浸透脱水に時間がかかることが予想された。そこで、定電圧条件で通電することが効果的であると考え、定電流条件と定電圧条件の2ケースについて実験を検討した。Case CC-Al では、電極材料を両極共にアルミニウムとし、0.05A の定電流条件で実験を実施した。Case CV-Fe では、陽極にアルミニウム、陰極には鉄を用い、定電圧条件とした。定電圧値は、10 V→20 V→40 V→73.5 V の順に段階的に増加させた。電流値が 0.1 A まで低下したタイミングで定電圧値を切り替えた。

東京湾粘土の脱水量の経時変化及び電圧変化を図5に示す。図5に示す 0.05ACC 条件の Case CC-Al と図2(c)のカオリン 0.05ACC 条件のケースを比較すると、東京湾粘土の電位が非常に小さく、通電後 400 分経過時まで電位がほとんど変化しないことが分かる。小さな電位でも電気浸透脱水により脱水量は徐々に増加したが、脱水時間が非常に長くなる結果を得た。図6に累積エネルギー消費量と脱水量の関係を示す。図中の矢印で示す点は、総脱水量が両ケース 20g となる点で、このときの累積エネルギー量はいずれのケースも 12 kJ である。さらに、CV 条件下で通電した Case CV-Fe では、累積エネルギー消費量が両ケース同じであったにもかかわらず総脱水量が多くなる結果を得た。同じ脱水量を得るためのエネルギー消費量を比較すると、Case CC-Al が Case CV-Fe よりも脱水効率が高いが、Case CC-Al ではこの脱水量に到達するまでに 400 分かかり、Case CV-Fe で最終脱水量 27 g を得るのに要した 180 分よりも長いことが分かる。図5の矢印で示される同じ累積エネルギー消費量と脱水量に到達するために必要な時間を比較すると、Case CV-Fe が Case CC-Al よりも 6 倍速く脱水し、Case CC-Al の最終脱水量である 20 g に到達するために必要な時間を比較しても Case CV-Fe は脱水速度が約 3 倍になることが分かった。試験後の平均含水比は、Case CC-Al が 73.9%、Case CV-Fe が 55.6% となり、Case CV-Fe に関しては塑性限界以下まで低下した。このことから、定電圧条件で通電することが海成粘土の電気浸透脱水には有効であるといえる。Case CV-Fe の東京湾粘土の脱水に 180 分を要したが、粘性土の脱水時間としては非常に短い。

図7に示す Case CV-Fe の電流及び電圧の経時変化を見ると、50 分経過後付近において、電圧変化がないにも関わらず電流値が急激に増加していることが分かる。このとき、圧密容器にハンマーで軽く振動を与えると、気液セパレータ内に大粒の気泡が放出される様子が観察され、ある程度気泡が抜けると電流値が下がり始めた。このことから、電極反応により発生したガスが、供試体と電極間に一時的にトラップされたことが原

因で電流値が急に増加したと考えられる。そのため、本実験では電圧値を上げた直後は、電流値を確認し、必要に応じて圧密容器に振動を与えることでガス抜きを実施した。電流値が急激に変化しているのはガス抜きに伴うものである。

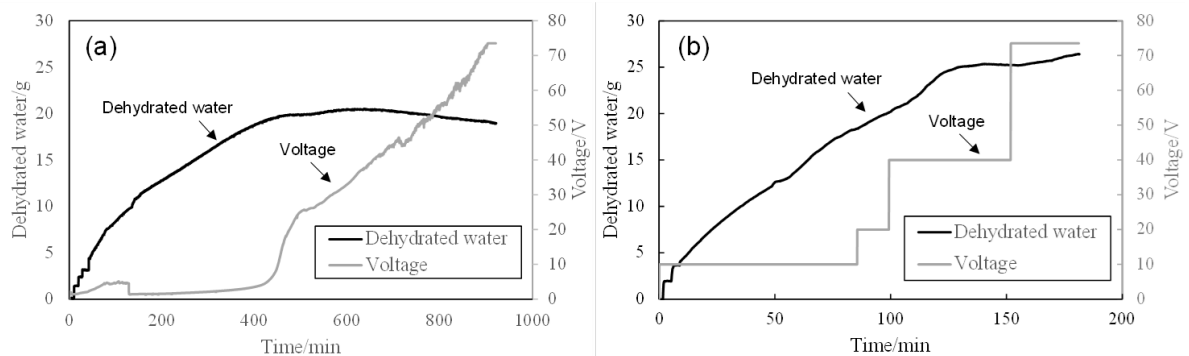


図5 東京湾粘土の脱水量の経時変化及び電圧変化 (a) Case CC-Al、(b) Case CV-Fe

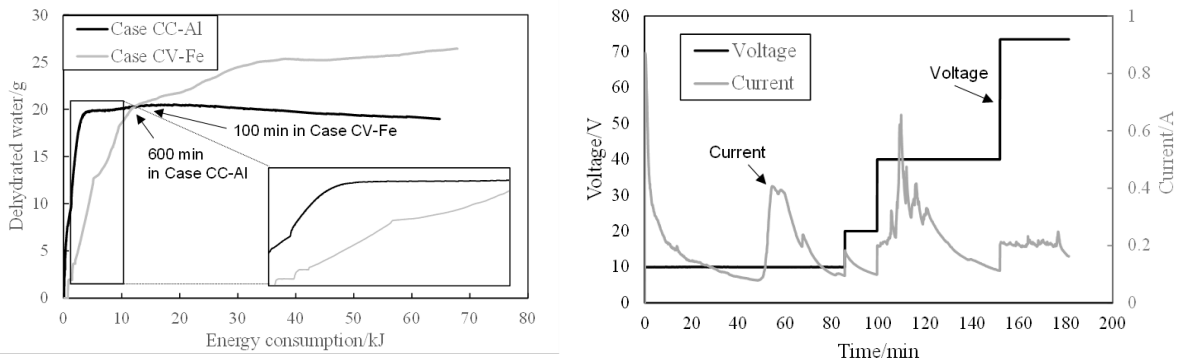


図6 累積エネルギー消費量と脱水量の関係

図7 電流及び電圧の経時変化 (Case CV-Fe)

(3) 様々な粘性土に対する電気浸透圧密効果に関する検討

日本各地から採取した浚渫粘土を用いた電気浸透圧密試験結果を図7及び図8に示す。それぞれ、最も脱水効果が高かったCV条件で得られた結果を示している。実験条件は東京湾粘土と同様、定電圧値を、10 V→20 V→40 V→73.5 Vの順に段階的に増加させた。

図4(b)及び図5に示すCV条件で得られた東京湾粘土の結果と比較すると、七尾港粘土は最終脱水量及び最終脱水量が得られるまでに要した時間が東京湾粘土の結果と同程度であった。しかし、最終脱水量が得られるまでに要した累積エネルギー消費量は、七尾港粘土の場合、東京湾粘土の3倍程度大きくなる結果を得た。これは、七尾港粘土の間隙水が海水であるため、粘土そのものの電気抵抗が東京湾粘土よりも小さく、定電圧値を与えるために必要な電流値が大きくなったことが原因である。この傾向は、新門司沖粘土及び中城港粘土でも確認でき、特に中城港粘土は累積エネルギー消費量が大きくなった。新門司沖粘土は最終脱水量が他の浚渫粘土と比較して小さくなる結果を得た。試験後の含水比は、七尾港粘土が82.7%、新門司沖粘土が49.1%、中城港が28.0%となった。七尾港粘土及び中城港粘土の初期含水比はそれぞれ液性限界と同程度であり、電気浸透圧密により液性限界の半分程度まで含水比が低下した。一方、新門司沖粘土は液性限界が70%で初期含水比が液性限界以下の60%であり、電気浸透圧密後の含水比は10%程度の低下であり、他の浚渫土と比較して電気浸透効果が小さいことが分かった。

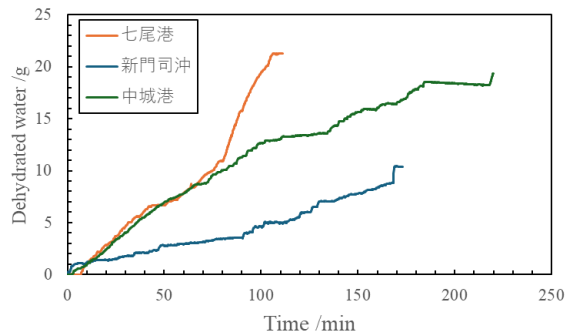


図7 脱水量の経時変化の関係

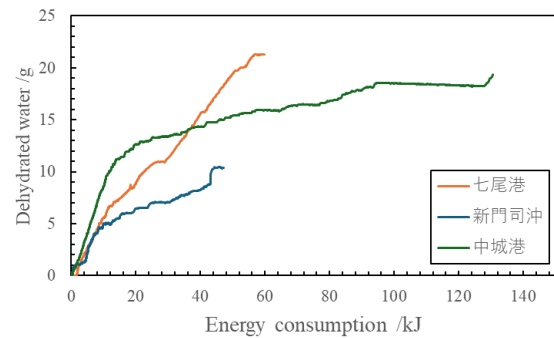


図8 累積エネルギー消費量と脱水量

4. 結論

本研究では、カオリン粘土及び東京湾粘土を用いた電気浸透圧密試験を実施し、高い電気浸透圧密効果が得られる最適な通電方法について検討した。さらに、日本各地から浚渫土砂を採取し、様々な粘性土に対する電気浸透圧密効果について検討した。その結果、初期電気抵抗が小さい海成粘土に電流を流す場合、定電圧条件で通電する方法が定電流条件で通電する方法よりも脱水速度が約 3 倍速くなった。粘性土地盤の電気抵抗と電流値の関係について検討した結果、粘性土ごとに電気浸透効果が大きくなる最適な電流値が存在することが分かった。粘性土に電圧を与えると、電気浸透と電気泳動が同時に発生する。しかし、脱水には電気浸透のみが影響を及ぼすため、電流値を単に増加させるだけでは、電気泳動に消費される電流も大きくなるため、電気浸透脱水効果を増加させることができない。しかし、粘性土の種類および電極材料により電気浸透に消費される電流を最大化する通電方法を選択することで、脱水効率を最適化することができる可能性があることが分かった。また、電気浸透圧密効果は粘性土のイオン組成や間隙水成分により異なり、特に浚渫粘土のように間隙水が海水である試料は、高い電気浸透圧密効果を得るために必要な消費電力が大きくなることが分かった。粘性土の種類により電気浸透圧密効果に違いは生じるが、いずれも電気浸透現象は確認でき、圧密効果が得られることを確認した。

参考文献

- 1) Xue, Z., Tang, X., Yang, Q., Wan, Y. and Yang, G., Comparison of electroosmosis experiments on marine sludge with different electrode materials, *Drying Technology*, Vol.33(8), pp.986-995, 2015. DOI: 10.1080/07373937.2015.1011274
- 2) Jeyakanthan, V., Gnanendran, C.T. and Lo, S.-C. R., Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay, *Journal of the Canadian Geotech*, Vol. 48, pp.1788-1802, 2011. doi:10.1139/T11-073
- 3) Zareh, A., Poursorkhabi, R. V., Majdi, A. A., & Sarand, F. B., The efficiency of the electro-osmosis method on the consolidation and strength properties of the gray clay of Tabriz. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 1-12, 2023.
- 4) ASTM, 2020. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. D2435. American Society for Testing and Materials, Philadelphia PA, USA.
- 5) Sugiyama, Y., Hashimoto, N., Couture, C. and Takano, D., Electrochemical perspective on the applicability of electroosmosis for clay consolidation, *Journal of applied Electrochemistry*, Vol. 54, pp. 1057-1073, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-02018-3>

筆者:1) 杉山 友理、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所、主任研究官 (神戸大学都市安全研究センター・客員研究員);2) 橘 伸也、神戸大学 都市安全研究センター、教授

Study on electroosmotic consolidation method of clay

Yuri Sugiyama
Shinya Tachibana

Abstract

The use of electroosmosis in geotechnical and geo-environmental engineering has extensive application potential, such as soil consolidation and stabilization, strength improvements, soil remediation and as de-watering of sludge. Clay particles are often negatively charged in water. Therefore, during electroosmosis, the positively charged pore water near the surface of the soil particles flows towards the cathode side, causing a transient dehydration of pore water. Despite a few successful examples of applications in the field, the use of electroosmosis remains scarce at the engineering scale. One of the reasons is that it's difficult to determine the specifications for on-site application of the electroosmotic consolidation (EOC) method since the electroosmotic effectiveness vary with clay materials. In this study, EOC tests were conducted to investigate the electroosmotic effects in various types of natural soft clays. The results of the EOC tests show that when a current is applied to natural soft clay with low initial resistance, the consolidation time under constant voltage conditions is three times faster than under constant current conditions.

©2026 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.