

研 究 報 告

令和 7 年 3 月 26 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 港湾空港技術研究所

氏 名 : 杉山 友理

研究課題名 : 電気浸透を用いた粘性土の新たな圧密手法の開発

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

電気浸透を用いた粘性土の新たな圧密手法の開発

Development of a new consolidation method for clay induced by electroosmosis

港湾空港技術研究所 主任研究官 杉山 友理

(研究計画ないし研究手法の概略)

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(図-1)。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。電気浸透を用いた圧密手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。電気浸透圧密の理解には、マクロな地盤挙動とミクロな電気化学現象を同時に扱う必要があるため、地盤工学と電気化学の分野融合に加えマルチスケールでの検討が求められる。しかし、これまでマルチスケールに検討された例は少なく、粘性土に対する電気浸透圧密効果を評価するための指標の提案には至っていない。このような背景から、粘性土の電気浸透圧密を電気化学的な視点で整理し、ミクロな電気浸透脱水が地盤の変形挙動に及ぼす影響について検討することを本研究目的とした。

本研究では、①様々な粘性土に対して電気浸透による脱水効果を評価し、②理論上求まる地盤内電位分布から電気浸透効果が大きくなると考えられる電極を開発し、③従来電極および開発した電極を用いた電気浸透脱水試験を実施することで地盤の圧密沈下量について検討した。各課題に対する詳細な研究計画は以下である。

課題①: 脱水量を大きく左右する影響因子として、①粘土種類によってドラスティックに異なる帯電量、②粘土材料の組み合わせによって誘発する電極界面での電位ロスが考えられる(図-2)。応募者の所属するグループは日本各地の浚渫粘土を採取・所持しているため、様々な粘土材料の帯電量や電位ロスの計測が可能である。これら二つの影響因子について、計測データの収集・整理を行い、各種粘土に対する電気浸透脱水効果について検討した。

課題②: 電気浸透脱水は電位勾配により生じるため、地盤内電位勾配を把握することは電気浸透圧密プロセスを知るために必要不可欠である。応募者らはプレ実験の中で、電気浸透圧密効果を高めるためには地盤内電位分布を調整することが有効であることを明らかにした。そこで、数値計算により地盤内電位分布を推定し、地盤内分布を調整可能な電極を開発した。

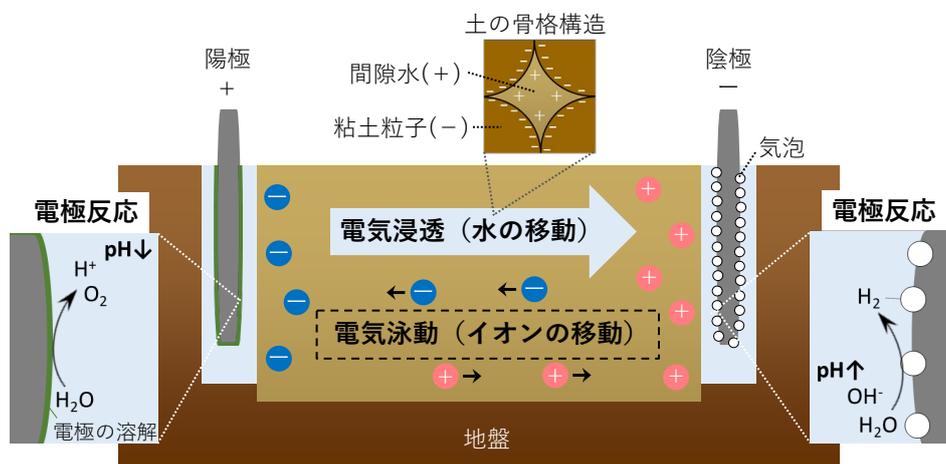


図-1 土中で生じる電気化学現象

課題③: 従来型の電極に加え, 課題②で開発した電極を用いた電気浸透脱水試験を実施し, 開発電極の有効性について検討した. また, 画像解析によりミクロな電気浸透流により生じる地盤沈下量について検討した.

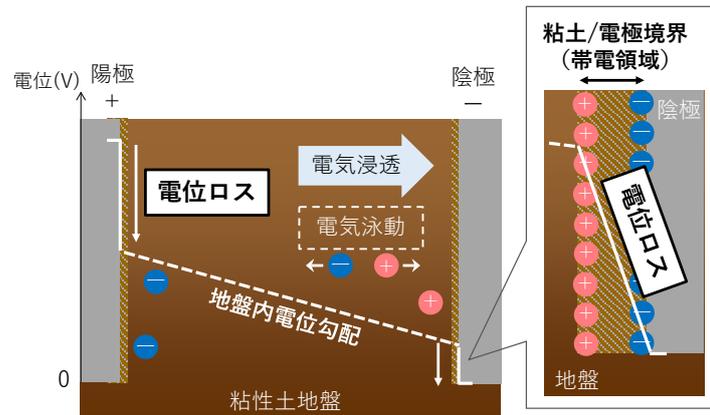


図-2 粘土/電極界面で生じる電位ロス

(実験調査によって得られた新しい知見)

粘性土/電極界面では電圧が急激に降下することが分かっている[1, 2]. そのため, 本研究ではこの電圧降下のことを電圧損失とよぶ. 電圧損失が大きいと, 粘性土に作用する電圧が小さくなるため, 電気浸透脱水が生じにくくなり, 脱水量が少なくなる. 電気浸透脱水効果を正確に評価するためには, 電圧損失を計測し把握しておくことが重要である. そこで, 粘性土/電極界面の電圧降下について調べるため, 粘性土と電極の境界近傍に生じる分極量を分極試験により計測した. 実験装置の概要を図-3 に示す. 図-4 にはカオリンと東京湾粘土を用いた分極試験結果を示す. 縦軸正が陽極側, 負が陰極側で生じる分極量 (電圧損失) である. 図-4(a)に示すカオリンのケースを見ると, 陽極側の分極量はステンレスと比較してアルミニウムと鉄で小さくなった. ステンレスの陽極側の分極量について, 電流密度が $0.2\text{mA}/\text{cm}^2$ で急激に変化する傾向を示した. 陰極側の分極量は全ての材料でほとんど同程度であるが, アルミニウムの分極曲線が電流密度 $0.5\text{mA}/\text{cm}^2$ で急激に変化する傾向を示した. 図-4(b)の東京湾粘土のケースを見ると, 陽極側の分極曲線はアルミニウム以外のケースで電流密度が $5.0\text{mA}/\text{cm}^2$ のあたりで急激に変化することが分かる. 陰極側の分極曲線につい

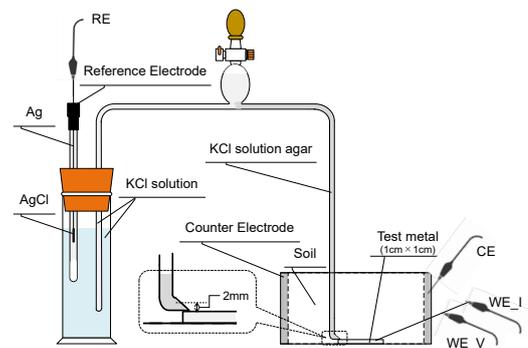


図-3 分極量取得時の実験装置概要

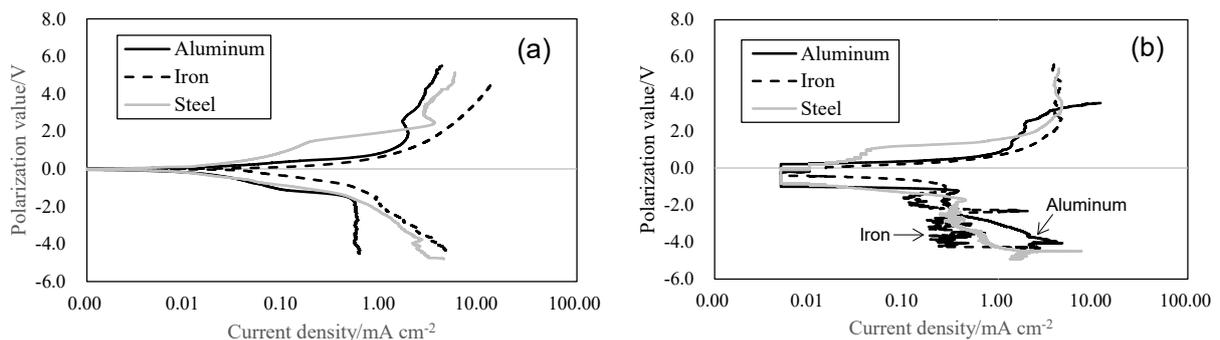


図-4 分極曲線 ; (a)カオリン, (b) 東京湾粘土

ては材料による顕著な差は生じなかった。これらの結果から、同じ電極材料であっても粘性土により分極曲線の傾向が異なることが分かった。電気浸透圧密工法適用時は、電極間に数十Vの電圧を印加することから、電極の電流密度はある程度大きくなり、使用する電極によっては粘性土/電極界面の電圧降下が非常に大きくなる。したがって、分極試験等を用いて粘性土/電極界面の電圧降下を計測することは、電気浸透圧密系の電気化学的性状を理解するために重要であることを明らかにした。

次に、地盤内分布を調整可能な電極を開発するため、地盤内電位分布を数値計算により求めた結果を図-5に示す。電気浸透脱水は電位勾配により生じるため、従来用いられる陰極と陽極が対になった状態では陽極から陰極に向かって脱水が生じる(図-5a)。一方、陰極を分割してそれぞれ異なる電位を与えたケースでは、陽極から陰極方向への脱水に加え、上部陰極から下部陰極にも脱水が生じる(図-5b)。このような地盤内電位分布が実現できた場合、陰極周辺で生じる脱水は、極板間隔が陽極-陰極間隔と比較して非常に短いため、電位勾配が大きくなり、素早く脱水が生じることが期待できる。

そこで、図-5bに示す地盤内電位分布を実現するため、陰極を上部と下部に分割し、陰極上部の電位を陰極下部の電位の間電位に保持する独自の回路を組み込んだRail Splitter電極(以降RS電極)を開発した。従来電極および開発したRS電極を用いた模型実験により、Rail Splitter効果について検討した。図-6に模型断面および用いたRS電極を示す。

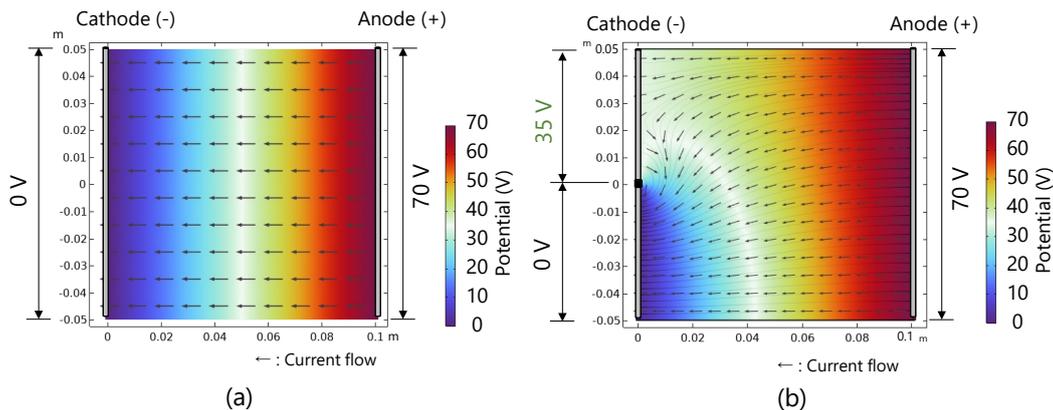


図-5 地盤内電位分布；(a)陰極：0V,陽極：70V (b)上部陰極：35V（陽極電位の1/2），下部陰極：0V，陽極：70V

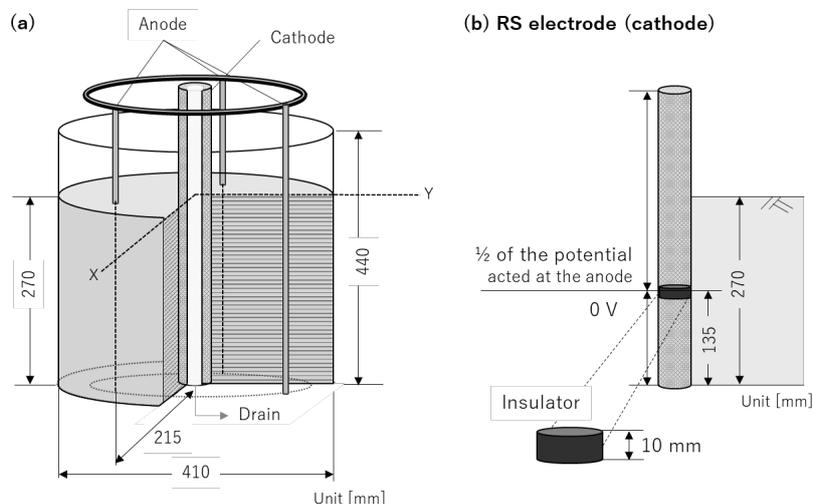


図-6 電気浸透脱水試験概要；(a)模型断面，(b)RS電極

図-7 に得られた実験結果を示す。地盤材料にはカオリンを用いた。ここに示すケースは、陰極および陽極にアルミニウムを用いた Case Al-Al，陽極にアルミニウム，陰極に鉄を用いた Case Al-Fe，および陽極にアルミニウム，陰極に鉄製の RS 電極を用いた Case Al-Al_RS の 3 ケースである。図-4a に示すように、カオリンの場合陰極での電圧損失はアルミニウムよりも鉄が小さいことが分かっている。図-7b に示す粘土/陰極界面で計測した電圧損失の経時変化から、分極試験と同様に試験中の電圧損失が Case Al-Al で大きくなった。その差は 3 ~ 4 V 程度であるが、図-7a から最終脱水量および脱水速度が Case Al-Fe よりも小さくなっており、電極界面で生じる電圧損失は電気浸透脱水効果に影響を及ぼすことを明らかにした。一方で、Case Al-Al_RS の脱水曲線は Case Al-Fe と一致しており、RS 電極が電気浸透脱水効果を向上させることに有効であることが分かった。

次に、電気浸透脱水により生じた地盤沈下量について画像解析から求めた結果を図-8 に示す。画像解析は粘性土が模型側面から剥離するまで実施した。これらの結果から、最も脱水量が少なかった Case Al-Al で沈下量が小さくなり、モデル地盤全体の収縮に伴う壁面からの剥離が他のケースよりも早く生じ、沈下時間が短いことが分かった。一方、Case Al-Fe と Case Al-Al_RS を比較すると、脱水量がほとんど同じであったにもかかわらず、沈下時間が Case Al-Fe の方が長くなる結果を得た。このことから、粘土/電極界面で生じる電圧損失は地盤変形にも影響を及ぼし、収縮よりも沈下による圧密を促進させるためには電圧損失が小さくなる電極を選定する必要があることを明らかにした。

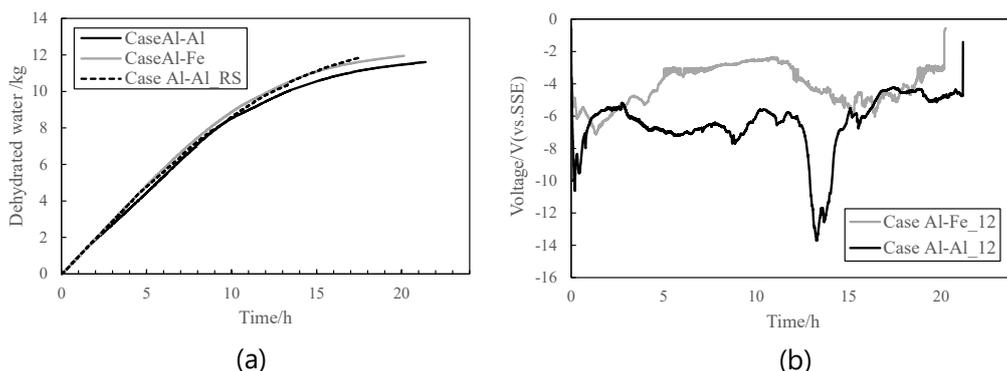


図-7 実験結果；(a)脱水量の経時変化，(b)試験中の粘土/陰極界面電圧損失

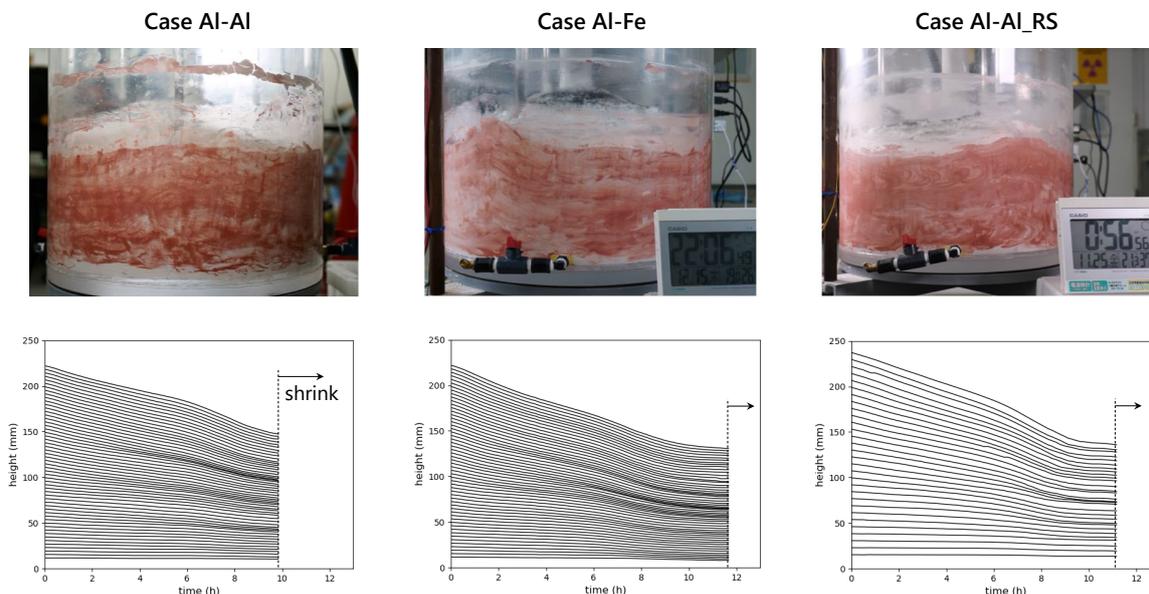


図-8 画像解析により得られた地表面変位

図—9 に、先述した模型実験の予備実験として実施した簡易電気浸透脱水実験前後の CT 撮影画像を示す。色が濃いほど密度が大きいことを意味する。図—9 から、陽極付近において、実験後の地盤の密度が大きくなっていることが分かる。このことから、陽極から陰極に向かって電気浸透により水が移動し、電位が最も大きくなる陽極付近から圧密が進行することが分かった。陰極付近では電極反応により水の電気分解が生じ、水素ガスが発生したため陰極周辺が白くなっている。この結果から、水の電気分解により発生するガスを活用することで、粘土と杭間の摩擦を低減させることが可能であると考えた。今後は、電気浸透圧密手法の現場適用を目指すと共に、本成果の応用課題として、電気浸透を用いたスパッドカンの引拔手法についても提案したいと考えている。

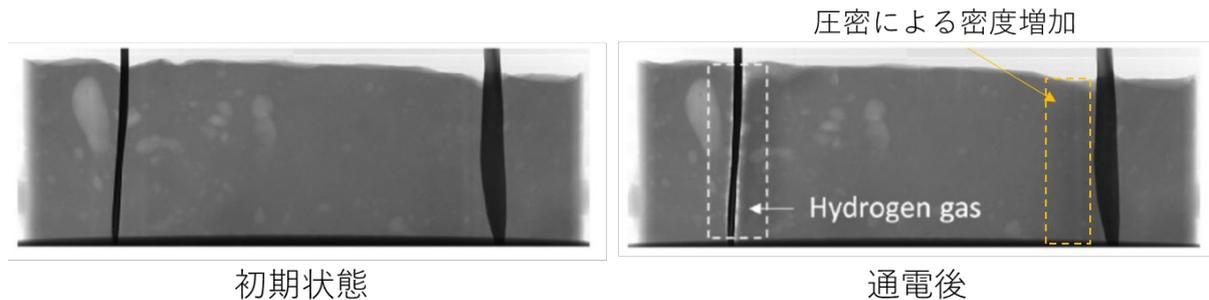


図-9 電気浸透脱水実験前後の CT 撮影画像

参考文献

1. Zhuang, Y.F. and Wang, Z. (2007) Interface electric resistance of electroosmotic consolidation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133(12), pp.1483-1640.
2. Yang S., Jianting F., Wen S., Chenchen Q. (2019) Effects of voltage gradients on electro-osmotic characteristics of Taizhou soft clay. *Int J Electrochem Sci* 14:2136–2159.

(発 表 論 文)

1. Y. Sugiyama, N. Hashimoto, C. Couture and D. Takano, Electrochemical perspective on the applicability of electroosmosis for clay consolidation, *Journal of applied Electrochemistry*, Vol. 54, pp. 1057-1073, 2024.
2. 杉山友理, 橋本永手, Couture Cyrille, 高野大樹, 電気浸透を用いた浚渫土砂減容化手法に関する研究—粘性土の電気浸透圧密効果に関する電気化学的考察—, 港湾空港技術研究所報告, Vol.63, No.1, pp.104-122, 2024.
3. 杉山友理, 橋本永手, 高野大樹, 電気浸透を用いたスパッドカン引拔手法の提案, 第 59 回地盤工学会研究発表会講演集, 旭川, DS-3-7, 2024.
4. Y. Sugiyama, N. Hashimoto, C. Couture, D. Takano and F. Arai, The applicability of electroosmosis for clay consolidation, IS Grenoble, Grenoble, 2024 (掲載決定) .
5. Y. Sugiyama, N. Hashimoto, C. Couture and D. Takano, Study on electroosmosis consolidation method of clay, JGSK006, JS-Surabaya, Surabaya, 2024.