

# 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—

杉山 友理\*・橋本 永手\*\*・Couture Cyrille \*\*\*・高野 大樹\*\*\*\*

## 要 旨

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定まらず、現場適用事例は非常に少ない。このような状況を鑑みると、粘性土に対する電気浸透現象を電気化学的な視点で整理する必要がある。電気浸透効果に影響する電気化学的な要因として、粘性土/電極界面の電圧降下、粘性土内の電流キャリア、電圧印可による粘性土内のイオン組成変化の3つが挙げられる。粘性土に電気浸透を適用するためには、これらの要因を適切に評価することが重要である。本研究では、3つの異なる実験系を構築し、それぞれの結果から電気浸透圧密に対する電気化学的な整理を試みた。その結果、分極試験により粘土材料と電極材料の組合せにより粘性土/電極界面の電圧降下が異なることを示した。また、電気浸透要素試験の結果から、大きな電流電圧値を印加しても電気浸透脱水効果は大きくならないことを明らかにした。このとき、電気浸透を起こす最適な電流電圧値は粘性土の組成に依存することがわかった。電気浸透圧密後の供試体を用いたEPMA分析では、粘土にナトリウムなどの酸化性イオンが多く含まれる場合、電気泳動や地盤内で起こる化学反応に影響を与えるため、電流を最適な印可方法が粘土によって異なる可能性を示した。さらに、本研究では、実験室規模の電気浸透脱水試験を原位置に近い配置で行うことで、粘性土の脱水、圧密および表面クラックの発生の関係について検討した。

キーワード：粘性土，減容化，電気浸透，圧密，模型実験

---

\* 地盤研究領域土質研究グループ 主任研究官  
\*\* 構造研究領域材料研究グループ 研究官  
\*\*\* 地盤研究領域土質研究グループ 専任研究官  
\*\*\*\* 地盤研究領域土質研究グループ長  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 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  
電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 E-mail：sugiyama-yu@p.mpat.go.jp

## Study on volume reduction method for dredged soil by electro-osmosis

— Electrochemical perspective on the applicability of electroosmosis for clay consolidation —

**Yuri SUGIYAMA\***

**Nagate HASHIMOTO\*\***

**Cyrille COUTURE\*\*\***

**Daiki TAKANO\*\*\*\***

### Synopsis

There are three main electrochemical factors affecting the electroosmotic flow in clay soil: the voltage loss at the clay/electrode interface, the type of current carriers in the soil, and the ion composition change in the clay due to voltage application. Appropriate evaluation of these factors is important to cost-effectively implement electroosmosis for in situ soil consolidation projects. In this study, three different experimental systems were developed and used to investigate electrochemical reactions occurring in reconstituted and natural marine clay during electroosmotic consolidation. The results of polarization tests show that the voltage loss at the clay/electrode interface is different depending on the combination of the clay material and electrode material. The results of electroosmotic element test also show that electroosmotic dehydration does not increase if large current-voltage value is applied, and that an optimal current-voltage value for causing electroosmosis depends on the cohesive soil composition. If the clay contains a lot of oxidizable ions such as sodium, these ions affect to electrophoresis and chemical reactions that occur in the soil. Therefore, the optimal configuration to apply electric current also differs depending on the clay. The results of laboratory scale electroosmotic dehydration tests, arranged in a realistic in-situ layout, are performed to study the relationship between soil dehydration, consolidation and surface crack generation.

**Key Words:** Dredged soil, Volume reduction, Electro-osmosis,

---

\* Senior researcher, Soil Mechanics and Geo-Environment Group, Geotechnical Engineering Department

\*\* Researcher, Materials Group, Structural Engineering Department

\*\*\* Postdoctoral Researcher, Soil Mechanics and Geo-Environment Group, Geotechnical Engineering Department

\*\*\*\* Head of Soil Mechanics and Geo-Environment Group, Geotechnical Engineering Department  
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute  
Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 E-mail : sugiyama-yu@p.mpat.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	104
1. まえがき .....	107
2. 地盤材料と実験手法 .....	107
2.1 地盤材料 .....	107
2.2 実験条件.....	108
2.2.1 粘性土/電極界面の電圧降下測定試験 .....	108
2.2.2 電気浸透圧密試験.....	108
2.2.3 3次元土槽を用いた電気浸透脱水試験 .....	109
3. 試験結果 .....	110
3.1 粘性土/電極界面の電圧降下測定試験 .....	110
3.2 電気浸透圧密試験 .....	110
3.2.1 カオリン粘土.....	110
3.2.2 東京湾粘土 .....	111
3.3 電子線マイクロアナライザーによる面分析.....	112
3.4 電気浸透により脱水した水の定性分析.....	112
3.5 3次元電気浸透脱水実験 .....	113
4. 考察 .....	116
4.1 粘性土/電極界面の電圧降下.....	117
4.2 粘性土内の電流キャリア .....	117
4.3 電圧印加による粘性土内のイオン組成変化 .....	119
5. あとがき .....	119
6. 電気浸透圧密工法の現場への適用について .....	119
参考文献 .....	120

## 1. まえがき

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[1-12]。その中で、Xue et al. [2]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. [3]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. [8]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。ここで、圧密とは、飽和粘性土地盤が静的荷重を受け、地盤の粒子間に含まれる水(間隙水)が時間遅れを伴って脱水し、密度を増加する現象である。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。

土木技術分野の現場への電気浸透の適用としては、シンガポールにおいてcofferdam(囲い堰)の脱水時に堤防が大きく動いた際、迅速な安定化手法として電気浸透が採用された[13]。他にも、電気浸透を用いた現地実証実験として、軟弱地盤の地盤改良[14]や有機質シルト質粘土の脱水[15]などが報告されている。土に対する電気浸透脱水現象の解明を目的とした実験[16-21]や数理モデルの提案[22-25]も行われており、電気浸透現象を実験的・解析的に追及することが可能になっている。

現場適用事例が少ない理由として、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められなかったことが挙げられる。このような状況を鑑みると、粘性土に対する電気浸透現象を電気化学的な視点で整理する必要がある。

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。ここで、電気浸透効果に影響する電気化学的な要因を列举すると次の通りである。

- ・粘性土/電極界面の電圧降下
- ・粘性土内の電流キャリア
- ・電圧印加による粘性土内のイオン組成変化

粘性土に電気浸透を適用するためには、これらの要因を適切に評価することが重要である。しかし、これらの要因が電気浸透効果に及ぼす影響については未解明である。そこで、粘性土の電気浸透圧密を電気化学的な視点で整理することを本研究の目的とした。本研究では、3つの異なる実験系を構築し、それぞれの結果から電気浸透圧密に対する電気化学的な整理を試みた。

## 2. 地盤材料と実験手法

### 2.1 地盤材料

本研究では、カオリン粘土及び東京湾粘土を用いる。カオリン粘土は、Si-Oの4面体層とAlの周りに2つのOと4つのOHが配位した8面体層とがOを共有して結びついた1:1型の層状珪酸塩鉱物を粉末状にしたものに、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ものである。一方、東京湾粘土は東京湾から浚渫した海成粘土である。東京湾粘土の初期含水比は自然含水比の140%とした。また、粘土中の間隙に含まれる溶液(以下間隙水とする)は海水である。溶液の分析を行った結果を表-1に示す。表-1より、東京湾粘土はカルシウムやマグネシウムイオンなどを多く含み、単位体積に含まれるイオン濃度が高いことが分かる。ここで、陰イオンはイオンクロマトグラフ法、ナトリウム及びカリウムはフレイム原子吸光法、カルシウム及びマグネシウムは発光分光分析法により測定した。また、東京湾粘土のXRD測定の結果、石英、斜長石、白雲母、緑泥石、黄鉄鉱が同定された。東京湾粘土はこれらの結晶構造を有する粘土鉱物が混在する材料であることが分かった。東京湾粘土及びカオリン粘土の物理試験結果を表-2に示す。塑性指数は粘土の粘性を表す指標であり、塑性指数が大きいほど粘性が大きい。東京湾粘土の塑性指数はカオリン粘土よりも大きいことから、粘性が大きい材料であることが分かる。また、透水係数はカオリン粘土及び東京湾粘土共に小さく、排水に長時間を要する材料であるといえる。

表 1 東京湾粘土の溶液分析結果

Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na	K	Ca	Mg
7300	2000	4200	200	220	530

Unit : mg/L

表 2 物理試験結果

	Kaolin	Tokyo Bay clay
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.77	2.68
Liquid limit (%)	52.1	102.4
Plasticity index	22.4	63.1
Hydraulic conductivity (cm/sec)	6.3E-06	6.1E-07
D60 (mm)	0.0020	0.0046

## 2.2 実験条件

本研究では、粘性土/電極界面の電圧降下測定試験、電気浸透圧密試験および原位置における電極配置を想定した室内模型実験を実施する。

### 2.2.1 粘性土/電極界面の電圧降下測定試験

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[26, 27]。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。粘性土には、カオリン粘土及び東京湾粘土を用いた。電極材料は、ステンレス、アルミニウム、鉄の3種類とした。実験装置の概要を図-1に示す。セルの寸法はφ60mm、高さ40mmの円筒形である。図中のWE\_V、

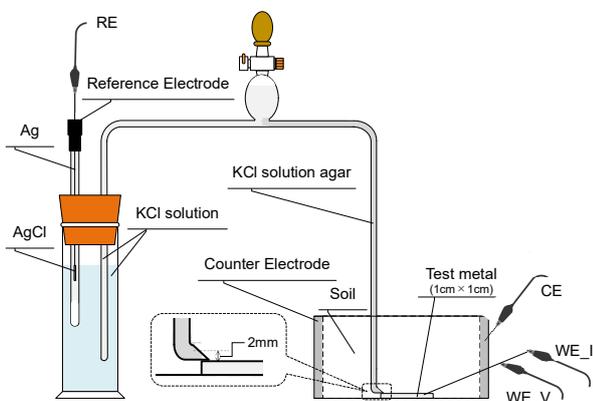


図-1 分極量取得時の実験装置概要

WE\_I, CE, およびREはそれぞれ、ポテンショスタットの作用電極の端子電圧、作用電極の端子電流、対極および参照電極である。WE\_V, WE\_I, CE, およびREは図-2に示すようにそれぞれ接続した。対極には銅電極を用いた。塩橋を試験片から1.5mm程度離れた位置に設置し、電流を対極と作用電極間に加え、粘性土/作用電極界面1.5mmの領域にかかる電位を測定した。参照電極には飽和塩化銀電極を用いた。内部溶液は飽和塩化カリウム水溶液とした。作用極の寸法は1cm×1cmで、被測定面積は1cm<sup>2</sup>ある。掃引速度は96mV/minで自然電位から±5V vs.SSEまで電圧をかけ、分極曲線を得た。なお、アノード分極とカソード分極で実験系は新しく作り直した。粘性土の系は水溶液の系に比べて拡散係数が小さいことが予想され、電圧印加によって電極界面の普遍性が損なわれる可能性を考慮したためである。

### 2.2.2 電気浸透圧密試験

粘性土内の電流キャリアと電圧印加による粘性土内のイオン組成変化について検討するため、東京湾粘土及びカオリン粘土を対象とした電気浸透圧密試験を実施した。

杉山ら[28]は、電気浸透圧密試験後のカオリン供試体に対してEPMA分析を行い、カオリンの間隙水のイオン分布がほぼ均一になることを明らかにした。一方、カオリンとは異なり、東京湾粘土は海成粘土であるため間隙水に多くのイオンを含む。東京湾粘土供試体の間隙水のイオン分布について検討するため、実験後の供試体を対象に、電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析(以下EPMA分析とする)により、供試体断面のイオン分布を調べた。

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-2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

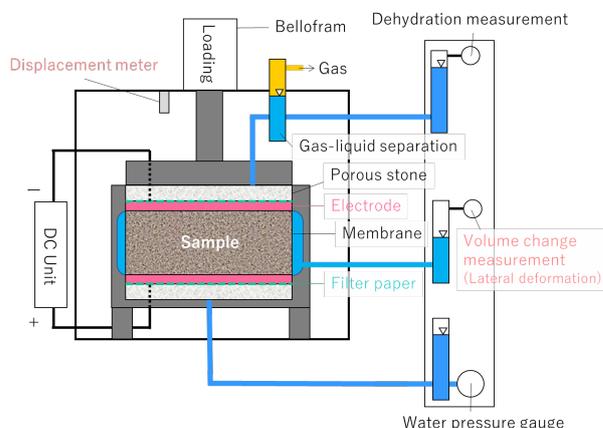


図-2 電気浸透圧密試験装置

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[29]. 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<sup>2</sup> 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。

実験後の供試体を対象に、電子線マイクロアナライザー(EPMA)による面分析(以下 EPMA 分析とする)により、供試体断面のイオン分布を調べた。分析には、日本電子社製電子線マイクロアナライザー JXA-8200 を用いた。分析条件は、加速電圧 15kV、試料電流 200nA、プローブ径(試料に入射する電子ビームの直径) 50 $\mu$ m とし、ピクセルサイズ(分析を行う一つの区画のサイズ)を 100 $\mu$ m とした。試料の中央近辺をカッターにより切断して縦 1.5 cm、横 5.5 cm、厚さ 0.5 cm 程度の試験片を採取し、1 週間真空乾燥した。これを樹脂により包埋した後、斜線の面を鏡面状に研磨し分析面とした。研磨は耐水研

磨紙を用いた乾式研磨とした。研磨後、分析面に導電性を与える目的で炭素を蒸着し、EPMA 分析を実施した。JSCE-G574[30]に準拠し、分析を実施した。スキャン方式はステージスキャンとした。濃度換算には比例法を用いており、測定元素の相対濃度は比較可能であるが、一般には絶対値は保証できないとされている。ただし、普通セメントに塩化物イオンを混入した試料の測定例によると、本手法で求めた質量濃度は化学分析によるデータと対応した値となっており、絶対値としても一定の精度を有していると考えられる。面分析画像の作成条件は、空隙など実体のない部分を除くピクセルを表示した。

### 2.2.3 3次元土槽を用いた電気浸透脱水試験

電気浸透脱水の3次元的效果について検討するため、アクリル円筒模型土槽を用いた実験を実施した。

用いた地盤材料は初期含水比100%のカオリン粘土である。模型土槽は、内径410mm、高さ440mmのアクリル円筒容器である。中央に外径56mm、厚さ2mmで、パンチング処理を施した陰極を設置した。陰極表面にベンコットを排水用のドレーン材として巻き付け、陰極の下部から排水するように陰極中央部に地盤下端面から10mmの高さまでチューブを通し、そこから集水し脱水量を計測した。地盤高さが270mmとなるように粘土試料を投入した。画像解析を実施するため、側面は色付きカオリンを塗布し、地表面には黒色ビーズを散布した。陽極は $\phi$ 12mmとし、極板間隔が110mmとなるように陰極の周囲に陽極を

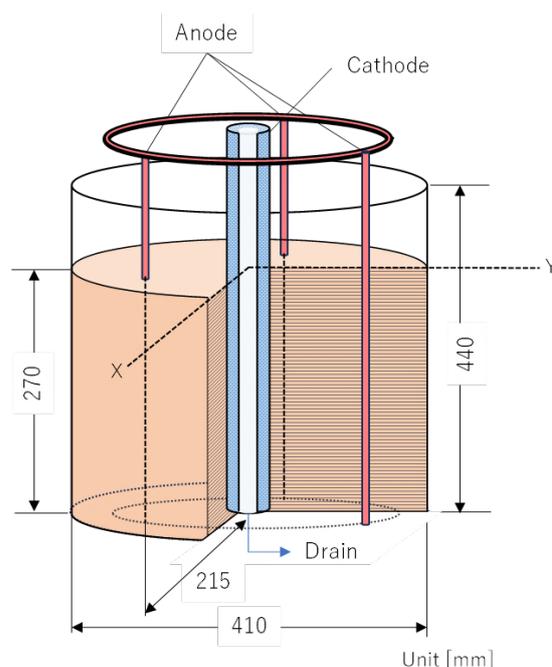


図-3 3次元モデル土槽断面図

設置した。実験断面を図-3に示す。同じ実験断面で、陰極材料の違いおよび陽極表面積の違いについて検討するため、3ケース（Case Al-Al\_12, Case Al-Al\_6, Case Al-Fe\_12）の実験を実施した。Case Al-Al\_12およびCase Al-Al\_6は、電極材料として陰極・陽極共にアルミニウムを用いた。Case Al-Fe\_12は、陰極材料を鉄、陽極材料をアルミニウムとした。Case Al-Al\_6では、陽極表面積の違いが脱水量に及ぼす影響について検討するため、陽極本数3本でφ6mmのアルミ棒を用いた。全3ケースについて、0.4Aの定電流で20時間通電した。電圧の最大値は73.5Vである。

### 3. 試験結果

#### 3.1 粘性土/電極界面の電圧降下測定試験

分極曲線を図-4に示す。縦軸正が陽極側、負が陰極側で生じる分極量である。分極量は測定電位から自然電位を差し引いた値とした。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0.2mA/cm<sup>2</sup>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0.5mA/cm<sup>2</sup>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

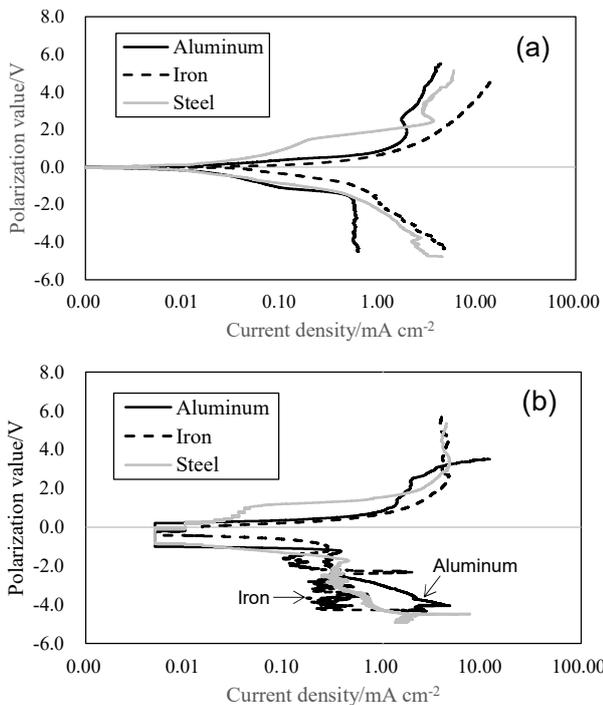


図-4 分極曲線 (a)カオリン, (b) 東京湾粘土

ウム以外のケースで電流密度が5.0 mA/cm<sup>2</sup>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ては材料による顕著な差は生じなかった。

#### 3.2 電気浸透圧密試験

##### 3.2.1 カオリン粘土

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。試験結果を図-5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-5(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。図-4(a)に示す分極曲線から、陰極側の鉄は

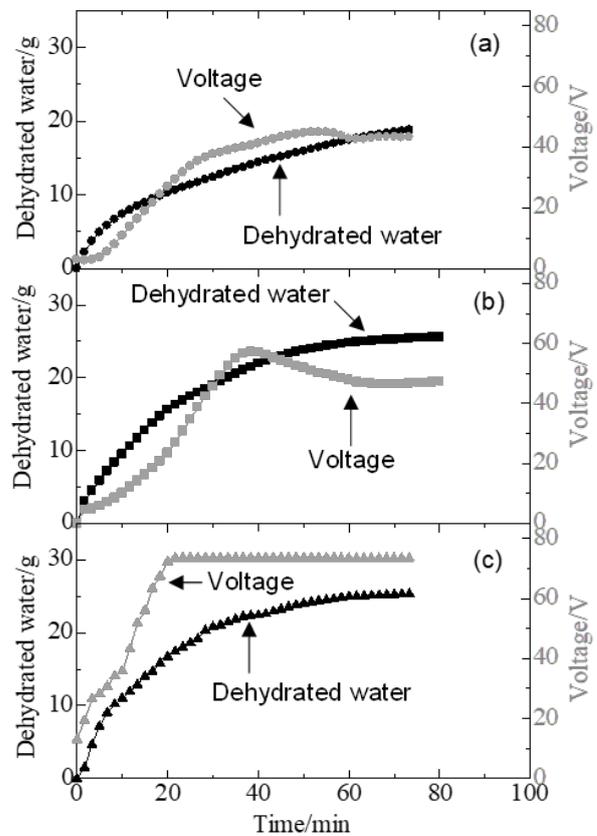


図-5 カオリン粘土の脱水量時間変化および電圧時間変化 (a) 0.01A, (b) 0.02A, (c) 0.05A

0.8mA/cm<sup>2</sup>を超えると分極量が大きくなり、陽極側のアルミは1.0mA/cm<sup>2</sup>を超えると分極量が急激に大きくなるのが分かる。0.02Aおよび0.05Aのケースは、電流密度がそれぞれ0.7 mA/cm<sup>2</sup>および1.8mA/cm<sup>2</sup>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。

### 3.2.2 東京湾粘土

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。脱水量の経時変化及び電圧変化を図-6に示す。図-6に示す0.05ACC条件のCase CC-Alと図-5(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-7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27gを得るのに要した180分よりも長いこと

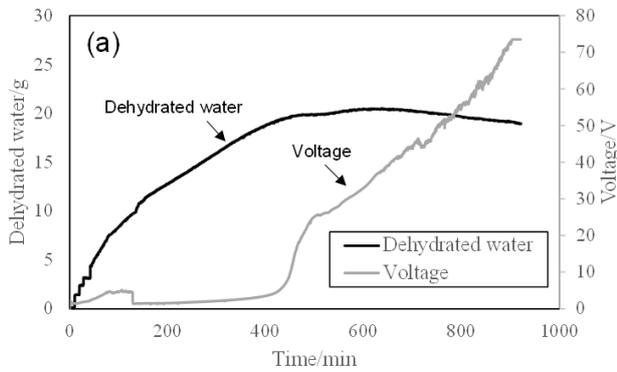


図-6 脱水量の経時変化及び電圧変化 (a) Case CC-Al, (b) Case CV-Fe

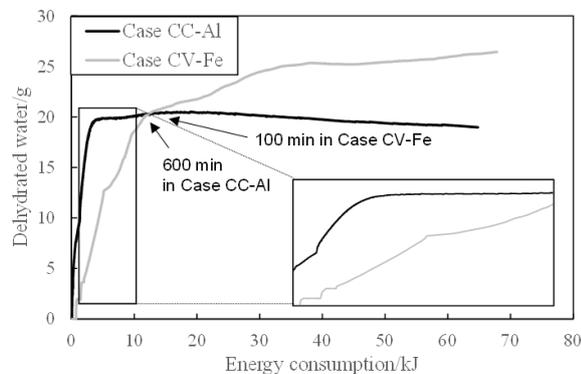


図-7 累積エネルギー消費量と脱水量の関係

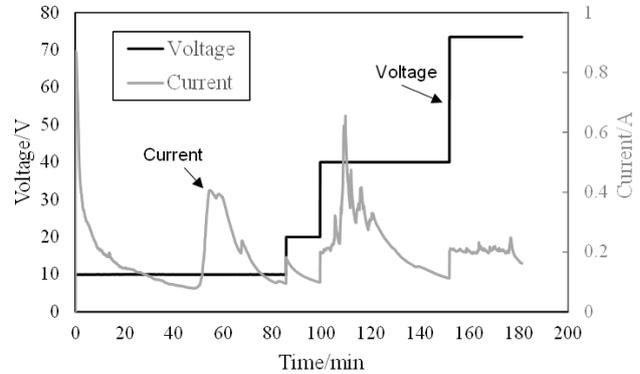


図-8 電流及び電圧の経時変化 (Case CV-Fe)

が分かる。図-7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20g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-8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かか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。

### 3.3 電子線マイクロアナライザーによる面分析

3.3.2節で実施した実験後の供試体についてEPMA分析を行った。測定元素は、ケイ素(Si)、アルミニウム(Al)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)、塩素(Cl)とした。Case CC-Al及びCase CV-Feの分析結果をそれぞれ図-9(I)、(II)に示す。図-9(a)が真空乾燥後の分析面の写真、図-9(b)が分析した各元素の濃度分布である。上方が試料の陰極側、下方が陽極側である。各画像左側のスケールは上面からの深さを表し、その目盛の間隔は1mmである。なお、包埋に用いた樹脂にはClが含まれているため、Clの濃度分布については参考程度に留める。図-9(I-a)より、試料上面において、上面から6mm離れた位置に横方向のひびが、試料全体に複数本の縦方向のひびが見られた。横方向のひびより上方側に薄い黒色層が確認された。試料は概ね暗緑色を呈しているが、ひび割れの周囲に明褐色を呈する部分が見られた。これは、樹脂の浸透の程度の差によるものと考えられる。図-9(I-b)のSiO<sub>2</sub>濃度を見ると、試料上面からの深さが2mm程度の位置に層状に濃度が低い部分があったが、その他は概ね一定であった。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度は、下面側の左右がやや高いことを除くと概ね一定であった。CaO濃度は、

上面から深さ3mm程度までにかけて層状に高い領域が見られ、その周囲がやや高かった。その他は概ね一定であった。MgO濃度は、分析面の右側2/3程度の領域において、上面からの深さが3mm程度の位置が層状に高かった。Cl濃度は、分析面の外周部に特に高い所が部分的に見られ、その他は高い部分とやや高い部分とが斑状に分布していた。

次に、図-9(II-a)より、分析面の状態は、Case CC-AlとCase CV-Feでほとんど差は見られなかった。MgO濃度は、左下と右下部分で低くなっており、高濃度層が上から7mm程度の位置に見られる。この位置はCase CC-Alよりも上端面から離れた位置であった。

### 3.4 電気浸透により脱水した水の定性分析

カオリン粘土を用いた電気浸透圧密試験で脱水した溶液が無色透明であったのに対し、東京湾粘土から脱水した溶液の色は暗褐色であった。溶液のpHを測定したところ、どちらもpH14.0程度と高アルカリであることが分かった。これは、陰極においてカソード反応で生成されるOH<sup>-</sup>が原因であるといえる。東京湾粘土からの脱水溶液について、着色の原因となったイオンについて調べるため、3.3.2項で示したCase CC-Alの東京湾粘土の電気浸透圧密試験により脱水した溶液を用いて、陽イオン6成分と陰イオン7成分についてそれぞれ定量分析及び定性分析を実施した。陽イオンは、試料を0.45μmPTFEメンブレンフィルターを用いてろ過した後、JIS K 0102:2019 [31]に従い、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>はイオンクロマトグラフ法、Fe<sup>2+</sup>はフェナントロリン吸光光度法により定量分析を実施した。なお、Fe<sup>3+</sup>は溶解性鉄及び鉄(II)からの計算法、Al<sup>3+</sup>は鉍泉分析法指針原子吸光法[32]による定量(Al換算)により分析した。陰イオンは、各陰イオン標準液の保持時間と試料検液のクロマトグラムを確認し、陰イオンの有無を判定した。また、含有する可能性のある陰イオンについては、標準液と試料検液の電気伝導度比から半定量値を算出した。イオンクロマトグラフ陰イオン定性分析には、サーモフィッシャーサイエンティフィック社製イオンクロマトグラフ分析装置(DIONEX INTEGRION HPIC システム IonPac AS22, IonPac AS18)を用いた。

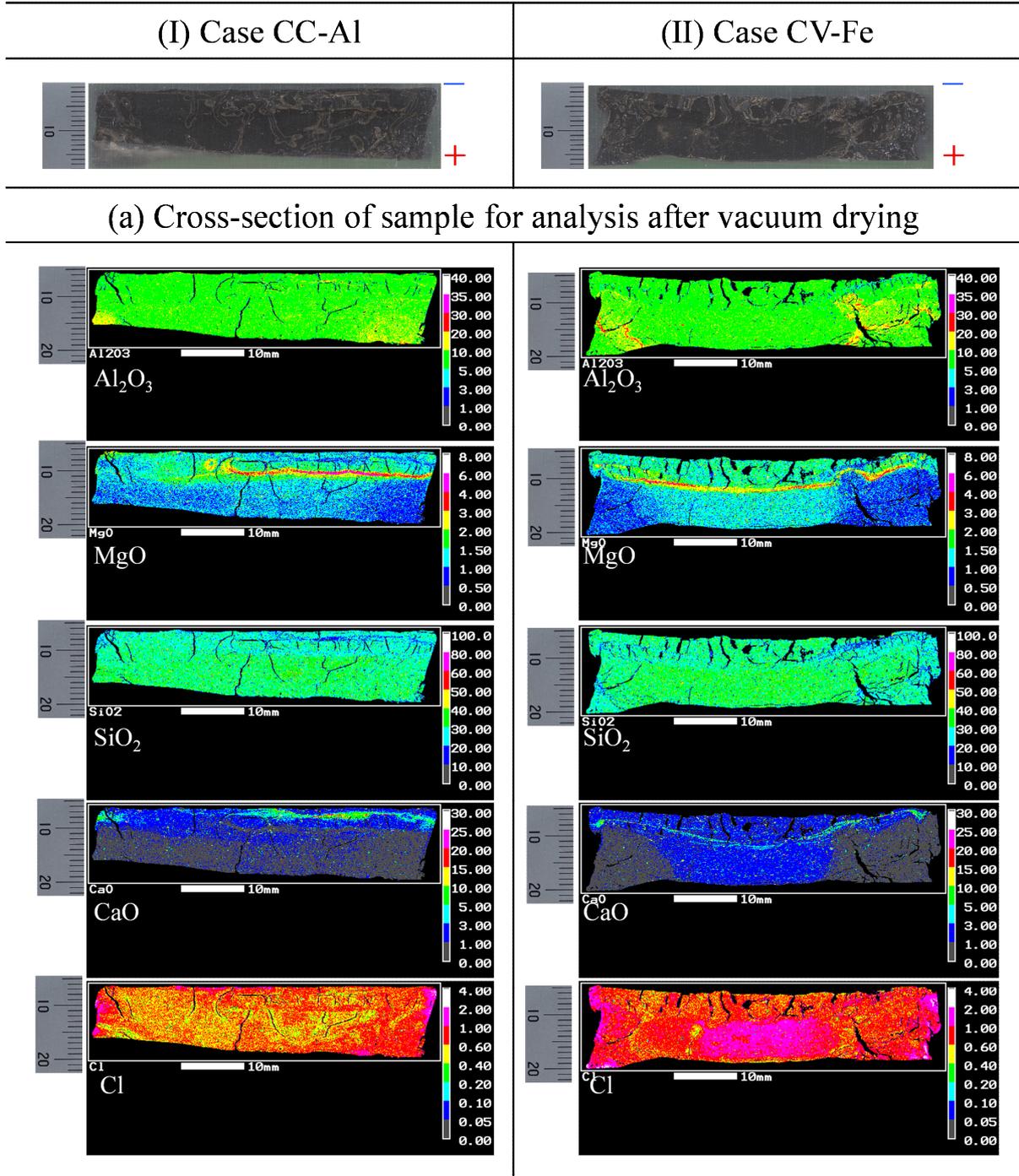
陽イオンの定量分析結果および陰イオンの定性分析結果を表-3に示す。表-3に示す半定量値は、標準物質と試料溶液の電気伝導から求めた相対的な面積比から算出した値であり、絶対値の正確度を保証するものではない。これらの結果から、着色に影響を及ぼす可能性があるイオンの含有量が非常に少なく、溶液が赤褐色を呈する原

因は含有イオンではないことが分かった。溶液は陰極側から排出され、非常に高い pH を有している。このときの pH 値は、粘土が持つ最大のゼータポテンシャル値である。また、溶液は長時間放置しても沈殿せず、溶液の色に変化も生じなかった。したがって、溶液の色は粘土の微粒子が分散されたコロイド溶液に起因するものと考えられる。

えられる。

### 3.5 3次元電気浸透脱水実験

図-10 に全ケースの脱水量と時間の関係をまとめる。陰極に鉄を使用した Case Al-Fe<sub>12</sub> で最も脱水量が多くなる結果を得た。Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Al<sub>6</sub> の結



(b) Concentration distribution of each element

図-9 東京湾粘土 EPMA 結果

果を比較すると、脱水曲線がほぼ一致していることが分かる。φ12 mm および φ6 mm の電流密度はそれぞれ 1.3 mA および 2.6 mA であり、図-4 の分極曲線から両者の分極量が類似していることが分かる。これらの結果から、この実験においては陽極表面積の違いが最終脱水量に及ぼす影響が小さかったといえる。

側方カメラで撮影した画像を用いた画像解析により得られた模型地盤高の経時変化を図-11 に示す。このとき、陰極付近の粘土は電極から剥離するまでの時間が短く、画像解析を実施した側面と模型地盤中央部の地盤高は異なるため、図-11 に示す地盤高は模型側面の結果である。画像解析は地盤が収縮して壁面から剥離するまでの間で実施した。図-11 より Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Al<sub>6</sub> は最終地盤高さが同程度であることが分かる。しかし、Case Al-Al<sub>12</sub> は Case Al-Al<sub>6</sub> よりも収縮が早く生じた。Case Al-Fe<sub>12</sub> は沈下量が最も大きく、収縮による体積変化が生じ始めるまでの時間が最も長くなった。図-9 に示す脱水量の経時変化において、600 分 (10 時間) 経過時から Case Al-Fe<sub>12</sub> の脱水曲線が他の 2 ケースと差が生じ始めることが分かる。また、700 分 (11~12 時間) 経過時に Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Al<sub>6</sub> についても脱水曲線に差が生じている。これらの時間は沈下よりも収縮による変形が卓越し始める時間に一致する (図-11)。

次に、上方カメラで撮影した画像を用いた画像解析により得られた地表面の偏差応力分布を図-12 に示す。図中の円形状クラックは陰極周りから同心円状に発生するクラックであり、放射状クラックは陰極から陽極に向かって発生するクラックである。図-12(a) に示す Case

Al-Al<sub>12</sub> の結果から、①の時刻では円形状クラックが陰極周辺に発生し、陰極側に無数の細かな放射状クラックおよび一部目視で確認可能な放射状クラックが発生した。その後、②に示す状態では円形状クラックが陰極側から陽極側に向って進展し、陽極が粘土と剥離するように円形状クラックが発生した。放射状クラックは陰極から陽極に向って徐々に進展する様子が見られた。③では陽極同士を結ぶように円形状クラックが発生し、3 つの大きな放射状クラックがそれぞれ陰極から陽極に向って徐々に進展した。④では画像解析対象領域ではほとんど変化は生じず、陰極-陽極間の粘土全体が持ち上がるように収縮し始め、陽極と壁面の間に無数の円形状クラックが生じた。Case Al-Fe<sub>12</sub> でも同様の傾向を示した。しかし、Case Al-Al<sub>12</sub> では放射状クラックよりも円形状クラックの発展が早く、Case Al-Fe<sub>12</sub> では円形状クラックよりも放射状クラックの発展が早く生じた。一方、Case Al-Al<sub>6</sub> では、陰極周辺で円形状クラックが生じるが、陽極側への進展が遅く、他の 2 ケースのように陽極同士を結ぶような円形状クラックは生じなかった。放射状クラックの発展は他の 2 ケースよりも早く、3 つの大きな放射状クラックで区切られる 3 つの粘土ブロックがそれぞれ陰極から剥がれるように収縮が生じた。Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Al<sub>6</sub> の結果から、陽極径が 12 mm の場合、円形状クラックが放射状クラックよりも速く進展した。一方、陽極径が 6 mm の場合、放射状クラックが円形状クラックよりも速く進展した。

クラックが生じることで、陰極周辺の地表面の粘土が陰極から徐々に剥離した。また、剥離したことにより、陰極中央付近で盛り上がるような変形が生じた。このとき、自重圧密による沈下も同時に生じ、脱水した水が壁面沿いの地表面に溜まる様子が確認できた。通電開始か

表-3 定量分析結果 (単位: mg/L)

Anions component	
Ca <sup>2+</sup>	< 1
Na <sup>+</sup>	8600
Fe <sup>2+</sup>	< 4
Fe <sup>3+</sup>	< 4
Mg <sup>2+</sup>	< 1
Al <sup>3+</sup>	< 100
Cationes component	
F <sup>-</sup>	0.3
Cl <sup>-</sup>	90
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.1
Br <sup>-</sup>	0.3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39

“<”は定量下限値未満であることを示す

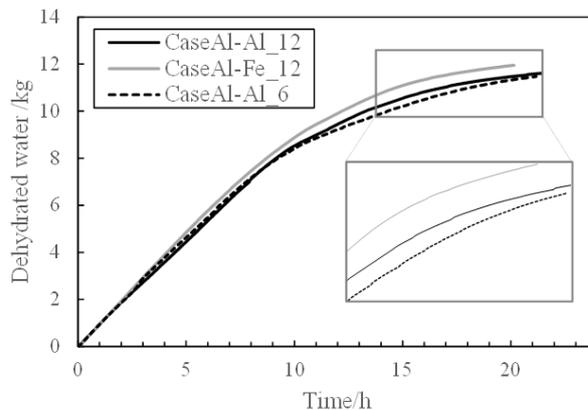


図-10 脱水量の経時変化

ら 10 時間後には、陰極で生じた無数のクラックのうちの 3 つが壁面付近まで進展する大きなクラックとなった。壁面にクラックが到達した後は、壁面付近の地表面に溜まった水が脱水し、電気浸透脱水により沈下ではなく収縮による変形が卓越する様子が確認できた。クラックの発生状況については、全ケースで同様の傾向を示し、初期に陰極周辺で無数の微細なクラックが生じた後、そのうちの 3 つが壁面付近まで進展する大きなクラックとなった。3 つのクラックができる間隔は、全ケースについ

て 100~140 度の範囲で生じた。

実験後に測定した地盤内含水比測定結果を図-13 に示す。含水比測定箇所は、(1)陰極付近、(2)陽極付近、(3)陰極と陽極間、(4)壁面付近である。含水比は深度ごとに 20 mm の間隔で測定した。壁面付近は陰極中央よりも沈下量が大きかったため、含水比測定は地盤高 60~80cm までとなっている。これらの結果から、全ての計測点において、初期含水比 100% からカオリンの液性限界である 52% 以下まで含水比が低下する結果を得た。各ケース

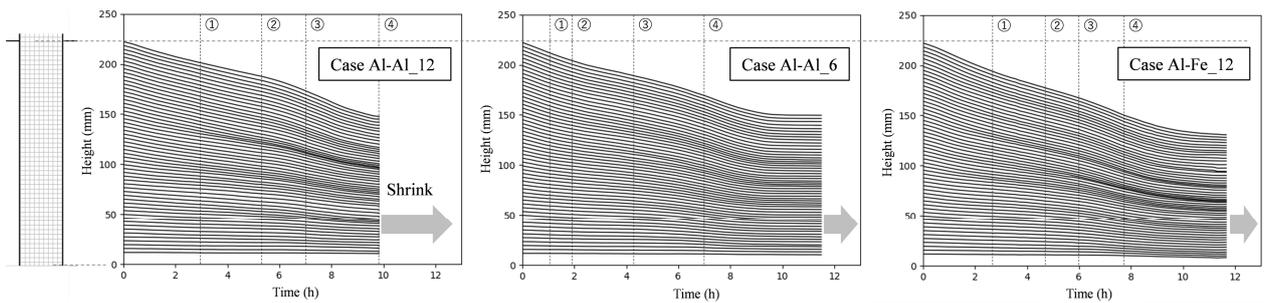


図-11 側方カメラ画像を用いた画像解析による地盤高の経時変化

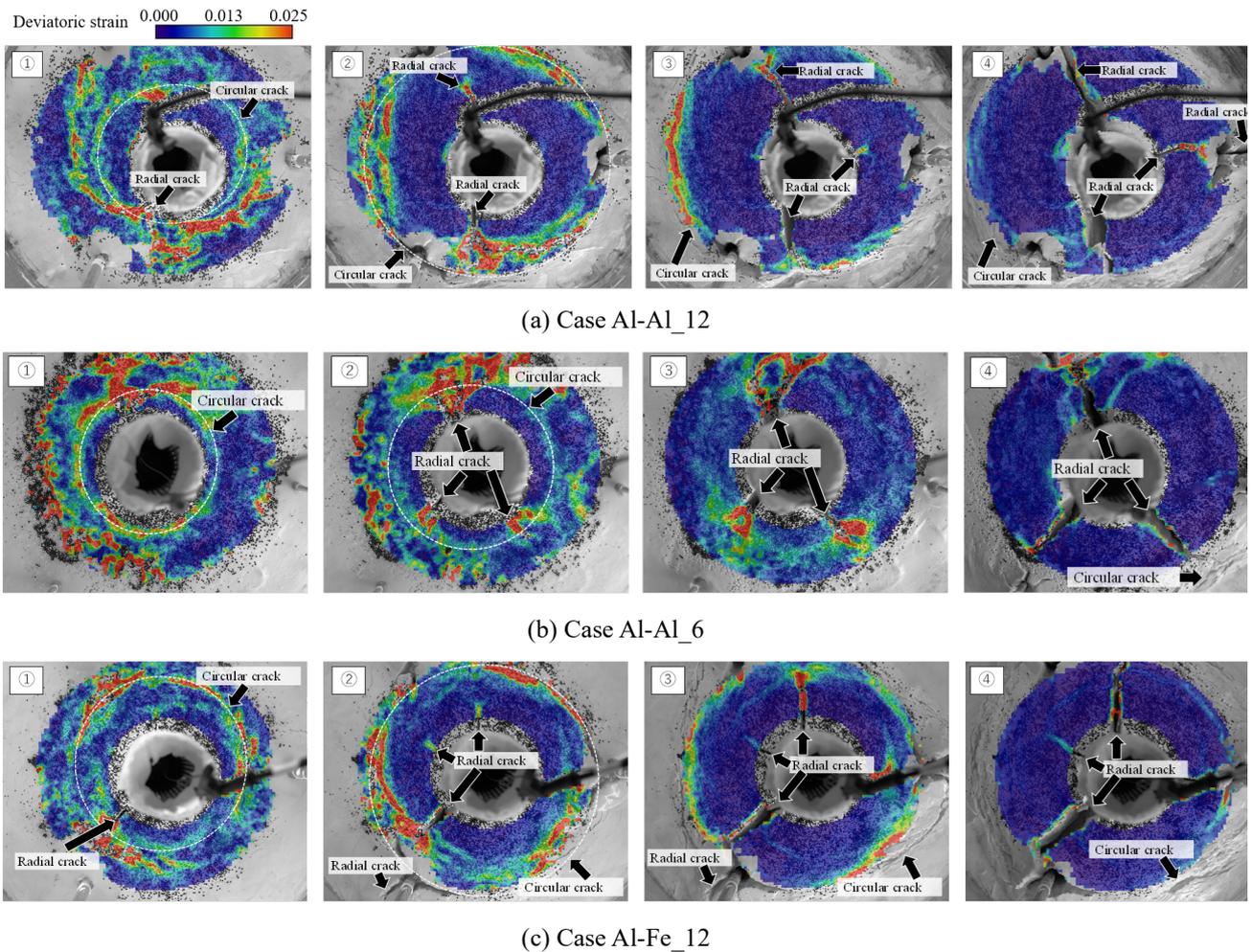


図-12 上方カメラを用いた画像解析による地表面の偏差ひずみ分布とクラックの進展の関係

の模型地盤全体の平均含水比は, Case Al-Al<sub>12</sub> が 47.5%, Case Al-Al<sub>6</sub> が 48.6%, Case Al-Fe が 46.0% となり, 含水比は Case Al-Fe<sub>12</sub> で最も小さく, Case Al-Al<sub>6</sub> で最も大きくなった. 陽極-陰極間の含水比分布はケースによらずほぼ同一であった. Case Al-Fe<sub>12</sub>, Case Al-Al<sub>12</sub>, Case Al-Al<sub>6</sub> の順に小さくなった. これは, 図-9 に示す最終脱水量の多い順に対応している. 含水比の深度分布については, 全ケース同様に底部の方が表層部よりも若干低下していることが分かる. 下部ほど自重圧密による脱水量が多くなるため含水比が低下したといえる.

Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Fe<sub>12</sub> は陰極材料以外の条件は全て同じであるが最終脱水量に差が生じた. Case Al-Al<sub>12</sub> および Case Al-Fe<sub>12</sub> で粘性土/陰極界面に設置した照合電極による電位測定結果を図-14 に示す. 図-14 より, Case Al-Al<sub>12</sub> は Case Al-Fe<sub>12</sub> よりも電極と粘土境界に作用する電位が大きいことが分かる. 通電することにより, 陰極付近の水はアルカリ性となるため (pH ≈ 14.0), アルミニウム電極の表面で腐食が発生しやすくな

る. 一方, 鉄電極の場合, アルカリ性環境での耐腐食状態にあるため, 腐食が発生しにくくなる. この影響により, 陰極で鉄とアルミニウムの粘土/電極界面に作用する電圧損失に大きな差が生じたと考えられる. また, 通電後 800 分経過時に急激に電位が上昇していることが分かる. 12 V という電圧値は, 電気化学反応により水素ガスが発生している限り本実験で与えている電流密度の値に対して大きすぎる値である. また, 照合電極の設置位置は水位よりも下にあるため, 常に電極に電流が流れていたと考えられる. 800 分経過時に見られた電圧降下の急激な上昇と下降の理由は本実験では明らかにすることはできなかったが, この時点では脱水がほぼ完了していたため脱水には影響を及ぼさなかったと考えられる.

#### 4. 考察

今後, 地盤の電気浸透脱水工法を確立するため, 上記で得られた実験結果から, 電気化学的な要因が電気浸透

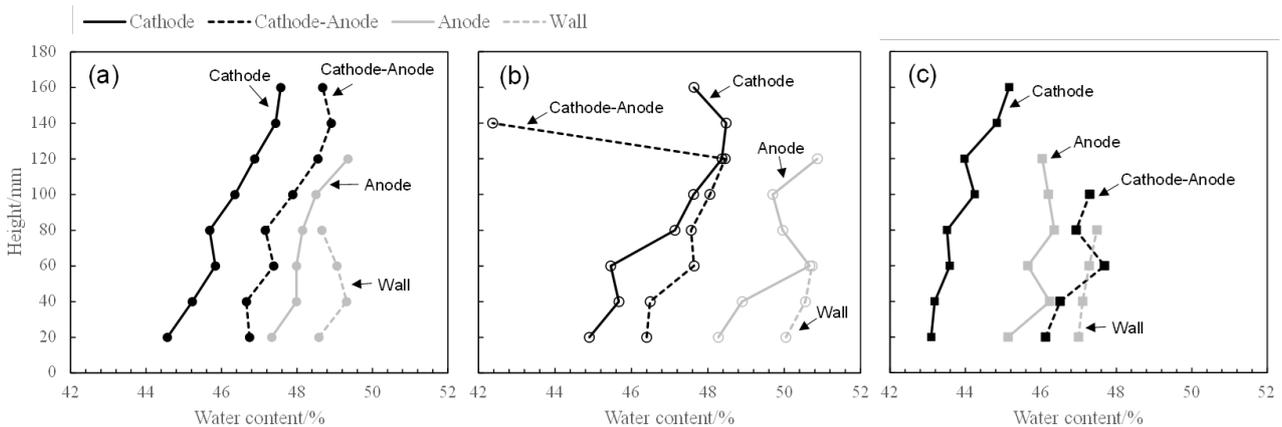


図-13 地盤内含水比分布 : (a) Case Al-Al<sub>12</sub>, (b) Case Al-Al<sub>6</sub> and (c) Case Al-Fe<sub>12</sub>

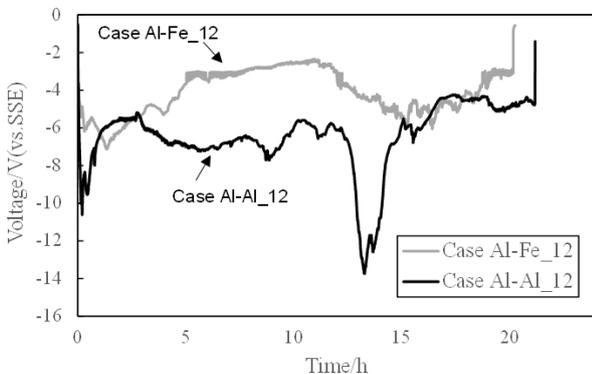


図-14 粘土/陰極界面での電圧損失測定結果

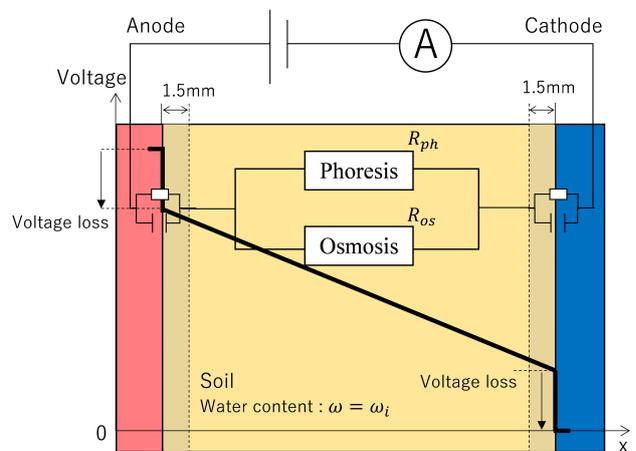


図-15 粘土の電気浸透脱水時の概要イメージ

効果に及ぼす影響について考察する。

#### 4.1 粘性土/電極界面の電圧降下

電気浸透脱水工法適用時は、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。2章では、液抵抗値の異なる2種類の粘土試料を用いて粘性土/電極界面の電圧降下測定試験を行い、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を示した。カオリン粘土のように液抵抗値が大きい地盤材料を用いる場合、比較的小さな電流密度を用いて電極間の粘土に大きな電圧を作用させることができる。そのため、粘性土/電極界面の電圧降下が電気浸透脱水効果に及ぼす影響は小さくなると考えられる。一方、東京湾粘土のように液抵抗値が小さい地盤材料を用いる場合、電極間の粘性土に大きな電位を与えるために電流密度を大きくする必要がある。この場合、粘性土/電極界面の電圧降下が電気浸透脱水効果に及ぼす影響が大きいため、電圧降下が小さくなる電極材料の選定が非常に重要になる。

#### 4.2 粘性土内の電流キャリア

3章で実施し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の概要を図-15に示す。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。

3.2.1項に示す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-16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  $R$  が大きいにも関わらず、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

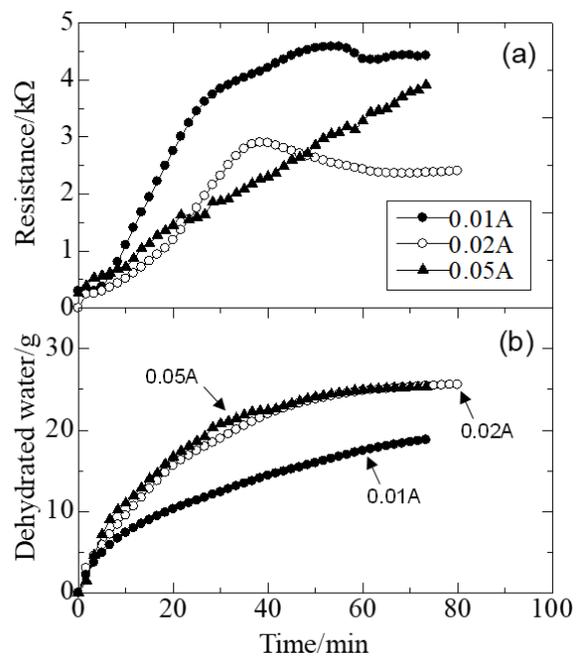


図-16 抵抗変化(a)および脱水量変化(b)

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。

東京湾粘土については、定電圧条件および定電流条件で電気浸透圧密試験を実施した。累積消費エネルギー量と正規脱水量の関係を図-17に示す。正規脱水量は、 $i_{os}$  に比例する脱水量を  $i_{os}$  および  $i_{ph}$  の和である累積電流値で除した値である。累積電流とは、陽極反応で生成された電子の総量であるため、正規化された脱水量は単位反応あたりの排水量、すなわち総電流に対する  $i_{os}$  の比率を意味する。そのため、正規脱水量が多いほどイオンが効率的に帯電し、電気泳動の抵抗  $R_{ph}$  が小さいことになる。正規脱水量はCase CV-FeがCase CC-Alよりも大きい結果となった。これは、 $R_{ph}$  が小さくなったことで、電気浸透脱水効果がより長く発揮されたことでCase CV-Feの最終脱水量が多くなったと考えられる。

東京湾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-18に示す。図-18(a)に示すCase CC-Al (0.05Aの定電流条件) では、通電後130分経過時までは徐々に  $R$  が増加した後、一度  $R$  が低下した状態で一定となった。400分経過時には  $R$  が急増した。 $R$  が急増する際、脱水量が変化していないことが分かる。このことから、カオリン粘土と同様、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。一方、Case CV-Feでは、 $(R+R_m)$  が徐々に増加し、定電圧値の切り替え後に一

旦急激に下がり、その後また徐々に増加する傾向を示している。この間、Case1とは異なり、脱水量も増加していることが分かる。このことから、このときの  $(R+R_m)$  変化は、 $R_{os}$ 、 $R_{ph}$  および  $R_m$  全ての変化が生じている状態であると考えられる。150分経過時には、 $R$  が不安定になった。このとき、脱水量に若干の変化があることから、電圧を大きくするために電流を与えすぎたことで  $R_{os}$  よりも  $R_{ph}$  が大きくなり、電気浸透よりも電気泳動が卓越する状態になっていると推測される。これらの実験結果から、粘性土に対する電気浸透脱水効果は、印可電流および印可電圧が大きいほど大きくなるものではないことが明らかになった。試験中、電気浸透による電流  $i_{os}$  が電気泳動による電流  $i_{ph}$  よりも大きくなる印可電流を与えることで、電気浸透脱水効果を高めることができると考えられる。

カオリン粘土と東京湾粘土の  $R_{os}$ 、 $R_{ph}$  および  $R_m$  は異なる値になることが本研究の実験結果から明らかになった。印可初期の粘性土の  $R_{os}$ 、 $R_{ph}$  の割合は粘性土ごとに異なるため、粘性土の種類により  $i_{os}$  および  $i_{ph}$  の割合も異なる。これらの電流値がそれぞれどのような値となるかを知ることは、効率的に電気浸透を生じさせるために重要であ

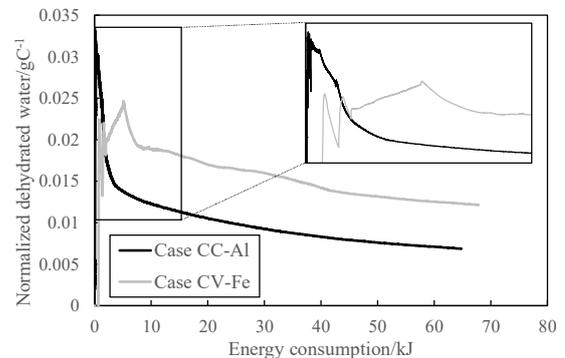


図-17 正規脱水量と累積エネルギー消費量の関係

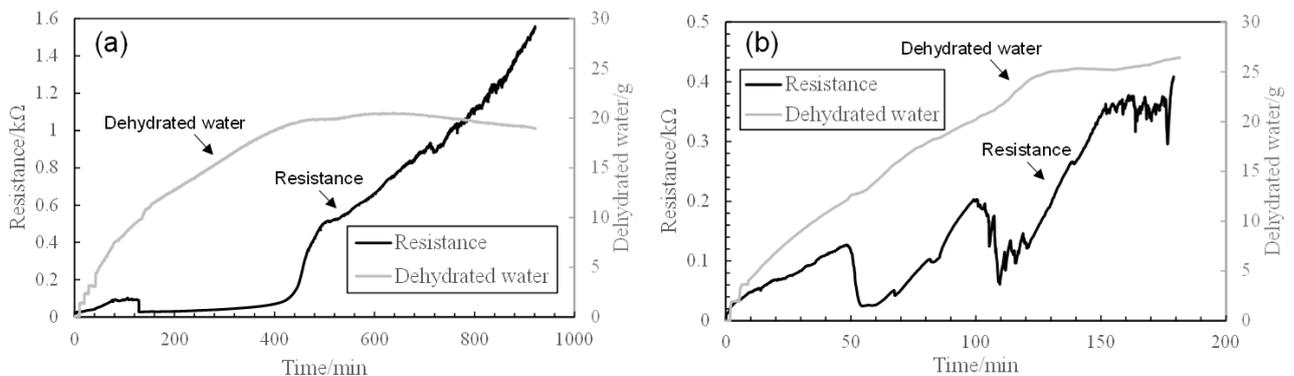


図-18 抵抗の経時変化 (東京湾粘土) : (a) Case CC-Al, (b) Case CV-Fe

り、これらの電流比率と粘性土の物理特性との関係を明らかにすることが必要である。

### 4.3 電圧印加による粘性土内のイオン組成変化

電圧印加によって、電極界面では電気化学反応が生じることから、粘性土の間隙水のイオン分布には偏りが生じると考えられる。粘性土の間隙水のイオン組成は、電極界面での電気化学反応、電気泳動、電気浸透、粘土の分散性等にも影響する重要な要因である。3.3節で実施した電気浸透圧密試験後の供試体を用いたEPMA分析結果より、電気浸透脱水をすると粘土に空間的イオン分布が生じることが分かった。また、電気泳動により陰極側に移動する陽イオンが陰極から生成されるOH<sup>-</sup>と結合することで酸化物の薄膜層ができることを明らかにした。一般に陰極付近ではpHが上昇し、陽極付近ではpHが低下するため、試料中のpH分布が均一でなくなる。pHはゼータ電位と密接に関係する。また、ゼータ電位の変化は脱水速度に影響を及ぼす。つまり、pHが不均一になることで電気浸透脱水効果が低下する。この問題を回避するためには、粘土試料を速やかに脱水し、試料内部のpHをある程度一定に保つ必要がある。粘性土/電極界面の電圧降下を最小限に抑え、電気浸透による電流が卓越する条件下で通電することで脱水効果を高めることができれば、pH変化を最小限に抑えて最終脱水量を増加させることにも繋がる。

## 5. あとがき

本研究では、粘土地盤における電気浸透流に影響を与える3つの主要な電気化学的要因である、粘性土/電極界面の電圧降下、粘性土内の電流キャリア、電圧印可による粘性土内のイオン組成変化について検討するため、3つの異なる実験系を構築し、それぞれの結果から電気浸透脱水に対する電気化学的な整理を試みた。得られた結果を以下にまとめる。

[1] 分極試験結果から、粘土/電極界面の電圧損失は粘土と電極材料の組み合わせによって異なることを明らかにした。東京湾粘土のように液抵抗値が低い地盤材料を使用する場合、電極間の粘土内に大きなポテンシャルを作用させるためには電流密度を増加させる必要がある。この場合、粘土/電極界面での電圧損失が電気浸透脱水に与える影響は大きい。

[2] 電気浸透圧密試験結果から、初期電気抵抗が小さい海成粘土に電流を流す場合、定電圧条件下で通電する方法が定電流条件下で通電する方法よりも脱水速度が約3倍速

くなった。さらに、EPMA分析結果から、ナトリウムなど酸化しやすいイオンを多く含む粘性土を対象に電気浸透を適用する場合、電気泳動により陽極に向かう陰イオンが陽極で生成されたOH<sup>-</sup>と結合することで酸化物の薄膜層が形成されることが分かった。

[3] 現場への適用を想定して実施した3次元模型土層を用いた電気浸透脱水試験結果から、粘土と電極の接触を長時間維持することで電気浸透脱水による収縮を遅らせることが、電気浸透脱水の効率向上に繋がることが分かった。

[4] 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。

本研究で得られた電気浸透圧密試験結果は、電気浸透圧密工法を効率的に実施し、現場適用時の仕様を決めるための一助となる可能性がある。ただし、そのためには電気浸透脱水後の地盤の力学特性について把握することも求められる。今後は、地盤力学的な視点から粘性土地盤への電気浸透の適用について検討するため、地盤材料の物理特性の違いを考慮し、様々な粘性土地盤を用いた電気浸透圧密試験を実施し、粘土地盤のゼータ電位と脱水メカニズムの関係について明らかにしたいと考えている。

## 6. 電気浸透圧密工法の現場への適用について

電気浸透圧密工法を現場に適用するためには、まず初めに対象地盤に対する電気浸透脱水効果について検討し、電極材料の選定、印可電流値及び印可方法を設定する必要がある。電気浸透脱水効果については、対象地盤の物理特性を調べた上で電気浸透圧密試験を実施し、脱水量変化や電流電圧変化のデータを取得することで定量的な評価が可能であると考えている。対象地盤が有機物やイオンを多く含むことが予想される場合、必要に応じて溶液分析を実施する必要がある。また、分極試験により電圧損失が小さくなる電極について検討することで最適な電極の選定が可能である。電極配列は、従来の真空圧密

工法のドレーン打設と同じように、図-19 のような対面的な配列で電極を打設しても十分電気浸透脱水効果が得られると考えられる。また、RS 電極 [33] を用いることで集水範囲が広がるため、分割数や任意電位の大きさ等を調整することで真空圧密と同様 1m~2m 間隔で電極を打設できる可能性があると考えている。

以上のことから、現場における電気浸透圧密工法施工の際の電極間隔について、従来適用されている真空圧密工法において排水材であるドレーンの打設が 1m 間隔程度であることから、電気浸透圧密工法適用時にも 1~2m 間隔で電極を打設することを目標とし、電気浸透圧密試験結果を用いた電気浸透圧密工法を現場適用する際は以下の流れで電極間隔および電流電圧値を設定する。

- ① 現地の地盤材料を用いた電気浸透圧密試験を実施し、電気浸透脱水に対する地盤材料特性を把握する
- ② 脱水に要する時間や必要となる電力を計測した結果から、電極間隔を従来のドレーン打設間隔である 1~2m とできるかどうかの判定を行う
- ③ ①で調べた地盤材料特性及び分極試験から、使用する最適な電極材料（従来電極・RS 電極（分割数・任意電位））を選定する
- ④ 施工対象となる現地の領域面積において必要となる電力を電気浸透圧密試験で計測した電流電圧値を参考に推定し、具体的な電極間隔を設定する

従来の真空圧密工法のドレーン打設間隔と同様、電気浸透圧密工法の電極間隔は地盤材料特性により異なり、電気浸透脱水効果が高い地盤材料であれば電極間隔は 2 m とし、電気浸透脱水効果が小さい場合には、RS 電極を用いるなど電極に工夫をして 1~2 m で電極を打設す

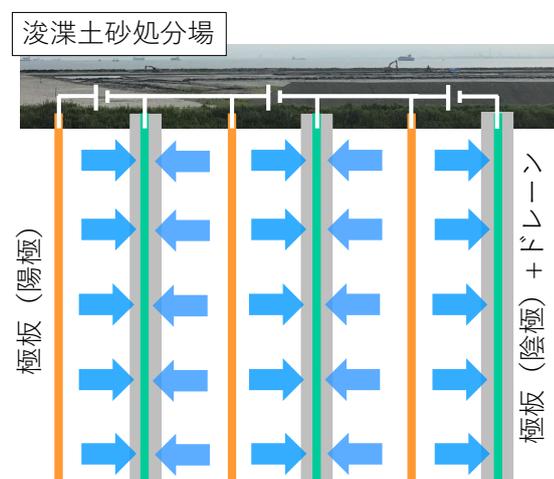
ることになる。電気浸透脱水効果が高い地盤材料についても、RS 電極を用いることで電極間隔を 2 m 以上にできる可能性があれば、別途大型の模型実験等により電極間隔を設定する必要がある。今後、現場実証実験を実施し、具体的な現場適用時の仕様設定について検討したいと考えている。

(2024年1月31日受付)

参考文献

1. L. Casagrande (1949), Electroosmosis in soils, Geotechnique, Vol. 1(3), pp.159-177. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1949.1.3.159>
2. Xue, Z., Tang, X., Yang, Q., Wan, Y. and Yang, G. (2015) Comparison of electroosmosis experiments on marine sludge with different electrode materials, Drying Technology, Vol.33(8), pp.986-995. DOI: 10.1080/07373937.2015.1011274
3. Jeyakanthan, V., Gnanendran, C.T. and Lo, S.-C. R. (2011) Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay, Journal of the Canadian Geotech, Vol. 48, pp.1788-1802. doi:10.1139/T11-073
4. Chappell, B.A., and Burton, P.L. (1975) Electro-osmosis applied to unstable embankment, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT8), pp.733-740.
5. Reddy, K.R., Urbanek, A. & Khodadoust, A.P. (2006) electroosmotic dewatering of dredged sediments: bench-scale investigation. Environ Manage 78(2), pp.200-208.

①真空圧密時のドレーン打設と類似配置



②現在の実験検討中の電極配置（具体的な電極間隔は検討中）

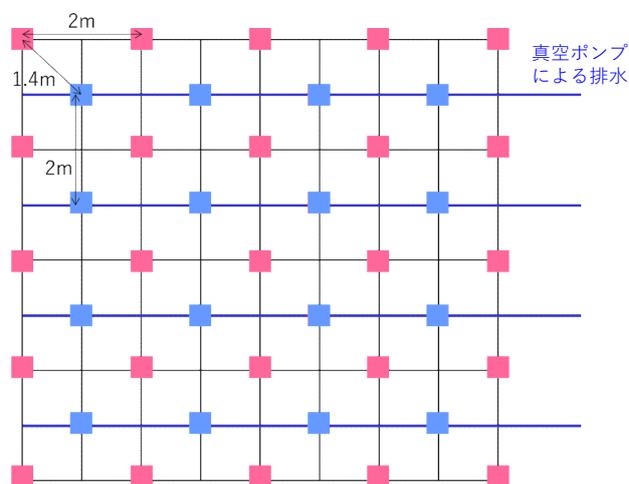


図-19 電気浸透による圧密工法の現場適用イメージ図

6. Lo, K.Y., Inculet, I.I., and Ho, K.S. (1991), Electroosmotic strengthening of soft sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), pp.62–73. doi:10.1139/t91-007.
7. Brian, A.C. & Peter, L.B. (1975) Electro-osmosis applied to unstable embankment, *Journal of the Geotechnical engineering division*, Vol.101(8), pp.733-740.
8. Zareh, A., Poursorkhabi, R. V., Majdi, A. A., & Sarand, F. B. (2023) 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.
9. Zhou J, Tao YL, Xu CJ, Gong XN, Hu PC (2015) Electro-osmotic strengthening of silts based on selected electrode materials. *Soils Found* 55(5):1171–1180. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.017>
10. Korolev, V. A., & Nesterov, D. S. (2019) Influence of electro-osmosis on physicochemical parameters and microstructure of clay soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(6), 570-581.
11. Mahalleh H.A.M., Siavoshnia M, Yazdi M (2021) Effects of electro-osmosis on the properties of high plasticity clay soil: chemical and geotechnical investigations. *J Electroanal Chem* 880:114890. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114890>
12. Silva, K. N., Paiva, S. S., Souza, F. L., Silva, D. R., Martínez-Huitle, C. A., & Santos, E. V. (2018) Applicability of electrochemical technologies for removing and monitoring Pb<sup>2+</sup> from soil and water. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 816, 171-178.
13. Estabragh, A. R., Naseh, M., & Javadi, A. A. (2014) Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Applied Clay Science*, 95, 32-36.
14. Liu, H., Cui, Y., Shen, Y. and Ding, X. (2014) A New Method of Combination of Electroosmosis, Vacuum and Surcharge, Preloading for Soft Ground Improvement, *China Ocean Eng.*, Vol. 28, No. 4, pp. 511 -528. doi: 10.1007/s13344-014-0042-3, ISSN 0890-5487
15. Karunaratne, G.P. (2011) Prefabricated and electrical vertical drains for consolidation of soft clay, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.29, pp.391-401.
16. Bo, M.W., Choa, V. & Zeng, X.Q. (2001) Laboratory investigation on electroosmosis properties of Singapore marine clay, *Soils and foundations*, Vol.41(5), pp.15-23.
17. Chew, S.H., Karunaratne, G.P., Kuma, V.M., Lim, L.H., Toh, M.L., and Hee, A.M. (2004), A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1–2), pp.17–35. doi:10.1016/S0266-1144(03)00049-9
18. Mohamedelhassan, E., and Shang, J.Q. 2002. Feasibility assessment of electro-osmotic consolidation on marine sediment. *Proceedings of the ICE – Ground Improvement*, 6(4): 145–152. doi:10.1680/grim.2002.6.4.145.
19. Shang, J.Q., Lo, K.Y., and Huang, K.M. 1996. On factors influencing electro-osmotic consolidation. *Geotechnical Engineering*, 27(2):23–26.
20. El Naggar, M.H., and Routledge, S.A. 2004. Effect of electro-osmotic treatment on piles. *Proceedings of the ICE – Ground Improvement*, 8(1): 17–31. doi:10.1680/grim.2004.8.1.17.
21. Zhuang Y.F. (2021) Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics. *Geotext Geomembr* 49(3):757-770. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.006>.
22. Hu, L., Wu, W. & Wu, H. (2012) Numerical model of electroosmotic consolidation in clay, *Geotechnique*, 62(6), pp.537–541.
23. Lewis, R.W., and Garner, R.W. (1972) A finite element solution of coupled electrokinetic and hydrodynamic flow in porous media, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 5(1), pp.41–55. doi:10.1002/nme.1620050105.
24. Mohamedelhassan, E., and Shang, J.Q. (2001) Analysis of electrokinetic sedimentation of dredged Welland River sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 85(1–2), pp.91–109. doi:10.1016/S0304-3894(01)00223-0. PMID:11463505.
25. Yuan J., Hicks M.A. (2015) Numerical analysis of electro-osmosis consolidation: a case study. *Geotech Lett* 5(3):147-152. <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00045>
26. 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. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1617)
27. 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. <https://doi.org/10.20964/2019.03.06>
28. 杉山友理, 高野大樹, 森川嘉之 (2022) 電気浸透を用いた浚渫土砂減容化手法に関する研究－粘性土に対する電気浸透の適用性に関する検討－, 港湾空港

技術研究所資料, No.1404, ISSN: 1346-7840.

29. 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.
30. JSCE-G574-2013 : EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法 (案), 2013 年制定コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, 土木学会, pp.387-400.
31. 詳解工場排水試験方法 : JIS K 0102:2019
32. 鉱泉分析法指針 (2014), 環境省自然環境局, pp. 79-85.
33. 杉山友理, 高野大樹, 森川嘉之, 電気浸透脱水を用いた浚渫土の減容化に関する検討, 第 57 回地盤工学会研究発表会講演集, 新潟, No. 80-8-3-05, 2022.