

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651173

研究課題名(和文) ガウジ介在岩の前兆を含む破壊全過程における電磁気学的応答

研究課題名(英文) Electromagnetic response during failure process including pre-phenomenon of gouge-bearing rock

研究代表者

中川 康一 (Nakagawa, Koichi)

大阪市立大学・都市研究プラザ・名誉教授

研究者番号：80047282

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：ガウジがせん断変形によって電氣的に分極すること(せん断分極、SIP)が明らかになっている。この分極メカニズムを解明するため、圧密によって間隙水の電解質濃度がどのように変化するかを観察した。電解質濃度は時間と共に大きく変化することが明らかとなった。濃度変化は圧密荷重の大きさによって変化するが、いずれにしても、二次圧密に入る段階あたりから間隙水の電導度が下がる結果となった。しかし荷重が大きくなると、載荷時に電導度の急上昇が観察され、せん断によって構造が破壊され、粒間結合部付近の電解質が自由水に吐き出される結果とみられる。なお、圧密に伴う濃度減少は粘土粒子間結合の構造形成の結果であると解釈された。

研究成果の概要(英文)：It has been clarified that the gouge is polarized electrically (SIP: Shear-induced Polarization) by shear deformation. To solve the mechanism of SIP, the time variation of electrolyte concentration was measured in pore water of the kaolinite squeezed out under the compaction loading. The changing manner of the electrolyte concentration depends on the magnitude of compaction load, however, the concentration decreases with time generally. On the other hand, in the large loading cycle, the rapid increasing of the concentration was observed during the primary consolidation. This rapid increasing of the electrolyte concentration is interpreted as result of the collapsing inter-particle bonding of the clay by the shearing. General decreasing of the concentration during the secondary consolidation may be recognized as result of structuring the inter-particle bonding in the clay.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム、自然災害科学

キーワード：せん断分極 断層粘土 岩盤破壊 震源過程 地すべり 間隙水の化学

## 1. 研究開始当初の背景

わが国は地震や、崩壊など地下の岩盤破壊に関する災害が後を絶たない。地質構造的に沈み込み帯に属しているので当然とはいえるものの、これらの災害に結びつく地下岩盤の破壊を予測できれば被害を劇的に減らすことができるはずである。最近巨大地震の発生に伴って、電磁気異常が相次いで観測されている。またそれらのメカニズムについても提案されている。

一方、著者の研究によると、震源域や岩盤のすべり帯に普遍的に存在されると考えられるガウジの力学試験に伴って、供試体が電氣的に分極することがわかった。極性分布は応力配置に依存し、最大圧縮面に負電荷が、最小圧縮面（最大引張面）に正電荷が発現することが明らかになった。また、地すべりの室内模型実験では、地すべりブロックの先端部に正の、背後に負の電荷が生成されることが観察され、野外における地すべり地の自然電位観測でも矛盾しない結果を得ている。

これがガウジの本質的特性であるとするならば、詳しく変形過程を調べることによって、岩盤が破壊する前後の電氣的变化を捉えられる可能性が浮上してきた。この事象について詳しく検討することがひとつの大きな課題となっている。一方、せん断分極のメカニズムについては不明な点が残っており、その解決も大きな課題として残されている。

## 2. 研究の目的

せん断に伴う粘土の分極の程度は構成粒子の粒度が小さいほど、間隙水の電解質濃度が高いほど、また圧密期間が長いほど大きくなることが知られている。これらの強度特性が、一体どのような物理化学的メカニズムによっているのかということが問題点として浮上してきた。工作用の油粘土ではまったく分極しないことから、間隙流体が水である必要が考えられてきた。すなわち、油は高分子であって無極性に近い液液体であるのに対し、水は特殊ともいえる双極性分子であることから、粘土粒子表面とは電氣的

に強く結合することが可能となる。粘土のせん断変形では粒子間の相対変形のひずみは、粒子接合部近傍に集中すると見られることから、この付近の材料科学的構造がきわめて重要な情報を提供するに違いない。この問題解決にアプローチする観点から実験計画を立て、まずは計測機器の設計から、実験・検討を進めることとした。

## 3. 研究の方法

(1) 圧密試験： 粘土のような細粒物質の集合体では圧密によって強度やスティフネスが上昇することが知られている。なお、間隙水圧が消散された後の圧縮過程を二次圧密と呼んでいるが、この過程でも強度やスティフネスが上昇することが知られており、エージング過程と位置付けられている。この過程で粒子間結合がより強固になると考えられるが、そのメカニズムは必ずしも明らかでない。これは土質工学のひとつの大きな課題であるが、また、せん断分極現象の機構とも密接に絡む事象と考えられ、粒子間構造の形成・破壊という点で、裏腹の関係にあると考えられる。したがって圧密過程で何が起こっているのかを解明することが非常に重要な課題となる。そこで、ここでは圧密過程において間隙水がどのような役割を担うかを把握するために、排水される間隙水の電解質濃度変化の観測を試みることにした。

(2) 電氣伝導度計の開発： 市販されている電導度計は数 10cc 以上の検査溶液を必要とするが、圧密によって排出される間隙水はほんのわずかしき採取できないため、電導度計を新しく開発する必要がある。そこで、ごく少量の排出溶液でも精度よく計測できるような電導度計を試作した。電導度計のセンサー部は計測に必要な電極間の容積は 0.078cc と大変小さい。このセンサー系を圧密容器（内径 40mm 高さ約 150mm、塩ビ製）底面排水部に接続されている排水管に直列的に挿入するようになっており、わずかの間隙水でも電導度を刻々とリアルタイムで計測できるようになっている（図 1 参照）。



(a) 全体像



(b) 圧密装置

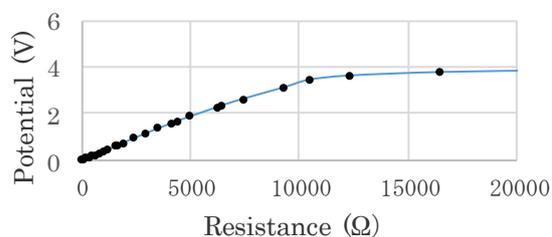


(c) センサーセル部

図 1. 実験装置の概要

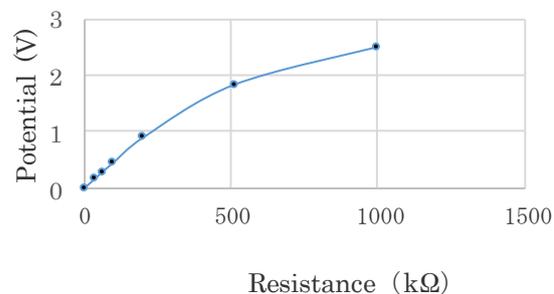
(3) 電導度計測システムの校正：計測システムの心臓部である電極セル部を自作したため。これと整合を取るためシステム全体を新たに設計する必要が生じた。計測の原理は、電流回路の中の標準抵抗と直列に繋がれたセル電極間の抵抗比と校正用標準溶液から比較的簡単に電導度を求めることができる。また、この値と温度から電解質濃度を導き出すことも可能である。電極に供給する電流は約 10kHz の交番電流とした。これを整流・平滑して、信号出力とした。この電圧信号を Keithley Instrument 社製の 6.5 桁デジタルマルチメータ 2100 を用いて読み取り PC に転送した。セル電極間の抵抗値と電圧とは必ずしも線形性が保たれないので、校正する必要がある。下図にその校正曲線例を示す。

Range 1



(a) 低抵抗域

Range-2



(b) 高抵抗域

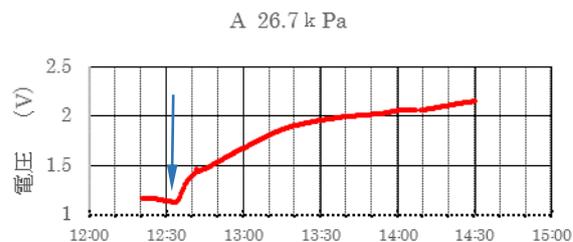
図 2. 電導度計セル電極間抵抗と出力電圧の関係

(4) 実験概要：圧密試験に供する試料には市販のカオリナイトを用いた。カオリナイトの粉末を等量の5%食塩水溶液を加え、よく攪拌して圧密容器に移し、上方から荷重を加えて圧密させる。圧密容器の底面にはポーラスメタルと濾紙を敷き、底面中央には排水孔を設け、圧密によって搾り出される間隙水を排出させる。排水孔に繋がる配水管には上記のセンサーセルが接続されており、圧密によって絞り出される間隙水の電導度がリアルタイムで、読み取られる。

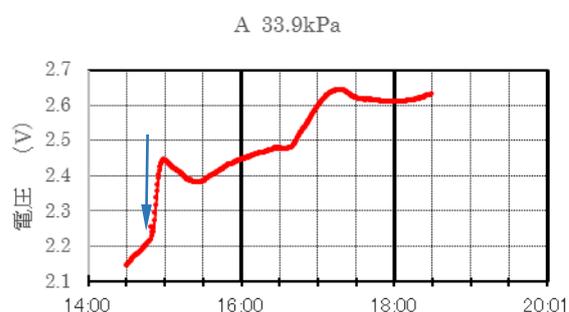
#### 4. 研究成果

圧密試験に伴って、排水される間隙水の抵抗の時間変化例を図3に示す。抵抗の変化を電圧の変化として読み取るので、電圧の時間変化としてそのまま示している。図中の下向きの矢印は荷重した時刻を示す。荷重時刻に対応して、抵抗は時間と共に大きく変化し、その変化の様相は圧密荷重の大きさに依存しているが、概ね低圧密荷重下(図3a、3bおよび3c)では、荷重と同時にパルス状の上昇・下降が見られるものの、以降は緩やかに上昇する。つまり塩分濃度が下がることを意味する。この一時的な濃度変化は時間と共に低濃度となって自由水が荷重と共に最初に流出するからであろう。一方、高圧密荷重下(図3d、3eおよび3f)では、荷重に伴って、一時的に電解質濃度が上がりピークを迎えた後はゆっくりと下降してゆく。いずれにしても、ある一定時間を経た後では、排出される間隙水の濃度は低下してゆくことが明らかとなった。排出される間隙水の電解質濃度は、圧密中に形成される粘土粒子間結合に関与する粒子表面近くの間隙水よりも、粒子表面から離れた自由水の濃度に近いはずで、粒子間結合に電解質イオンの移動が重要に関わっていることが明らかで、これがせん断分極強度をコントロールしていると思われる。

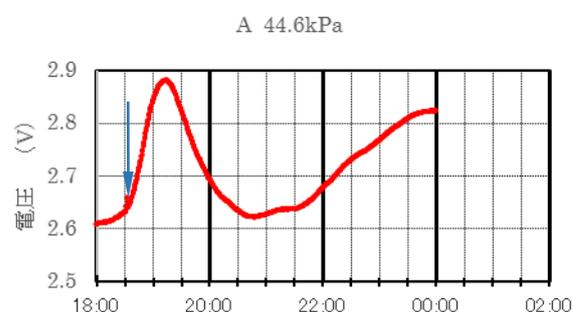
図3を見ると、粘土粒子表面は、一般に負に帯電していると見られており、電氣的に非常に偏った状



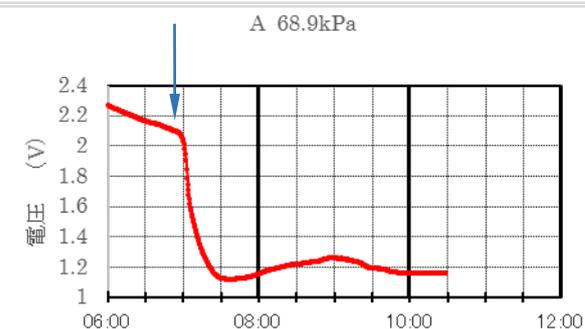
(a) 時刻



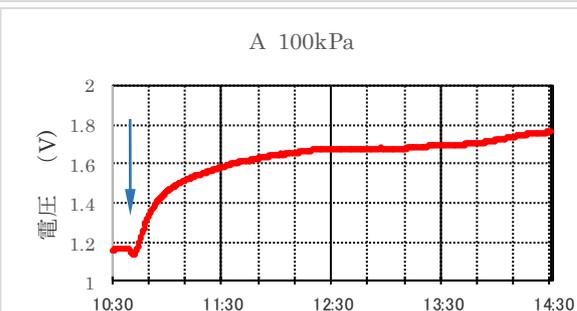
(b) 時刻



(c) 時刻



(d) 時刻



(e) 時刻

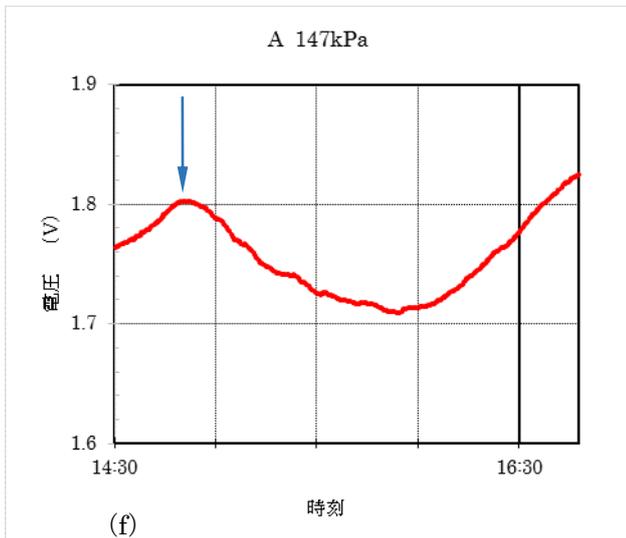


図 3. 圧密によって搾り出された間隙水の電気抵抗に対応する電圧の時間変化例

態にある。したがって、水と接した場合に水分子の水素側は粘土粒子表面に強く引き付けられるであろうし、間隙水中の陽イオンも同様に吸着するであろう。溶液の塩濃度が高い場合に電気二重層の厚さは薄くなることから粒子どうしはより接近しやすくなる。

二次圧密過程で、粘土の強度やスティフネスが、上昇する事実はこのようなメカニズムによるものと考えられる。この強度やスティフネスは拘束圧の上昇に伴って、さらに大きくなることから、地下深部に行くにしたがって、粘土粒子間の結合はより強固になると見られる。このような強固な結合は粘土粒子表面と高電解質溶液との電氣的な作用によって構築される。このような構造にせん断が加わると、応力集中を受けた粒子接触部の結合部が破壊すると同時に、電氣的バランスが一気に崩れて、強い分極が発現すると見られる。これがせん断分極(SIP)の主要なメカニズムであろう。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表]

K. Nakagawa, I. Shimoda, S. Yamada, R. Kanai, Y. Ogawa, Y. (Yasuda) Ohta, M. Fukuda, A. Jomori,

T. Takahashi and Y. Iwasaki, Resistivity profiles and foundation structure of Central Tower, Bayon in Angkor, Central Asian Geotechnical Symposium (IVth CAGS), Geoengineering for construction and conservation of cultural heritage and historical sites ,(2012, 9, 23), Samarkand, Uzbekistan

Y. Iwasaki and K. Nakagawa, Effects of vibration by demolition to nearby machine shop floor-wave measurement for dynamic property of ground, Fourth International Seminar on Forensic Geotechnical Engineering, (2013, 1, 11), Bengaluru, India

中川康一, 仏念寺山断層帯に現れた断層露頭とその破碎特性、日本活断層学会、(2013, 11, 29-30), つくば国際会議場, つくば

中川康一, ガウジの変わった性質とすべり破壊予測の可能性、日本活断層学会、(2013, 11, 29, ), つくば国際会議場, つくば

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 康一 (NAKAGAWA Koichi)

大阪市立大学都市研究プラザ・名誉教授

研究者番号： 80047282