

Ⅲ－49

粘土の残留強度発現に関する電気化学的特性

岩手大学工学部 正会員 ○大河原正文
 北海道大学工学研究科 フェロー 三田地利之
 岩手大学工学部 学生員 久常 雄大

1. はじめに

地すべり安定解析において強度定数の適切な設定は最も基本的な問題である。SPlice 法¹⁾を用いて平均強度パラメータを得るには、すべり面構成土の残留強度を求めておかなければならない。ここで残留強度とは、大きなせん断変形を受けて残留状態に至った時点での最小せん断強度で、鏡肌を呈しているすべり面のせん断強さに相当するとされる。せん断面は、板状、鱗片状の粒子においてせん断方向への粒子配向がほぼ終了していることから、残留状態でのせん断現象が平滑な粘土粒子表面間の摩擦現象であると理解される。くわえて、この強度が粘土鉱物の種類ごとに一定値に収束することから、残留強度が粘土鉱物の表面・界面特性を強く反映した物質固有値であることが示唆される。残留強度を発現している力は、いわゆる電弱力（電磁気力）に分類され²⁾、粘土鉱物が比較的大きな電荷を有しているので、残留強度が粘土鉱物の電気化学的特性の影響を受けていることはまず間違いない。そこで本研究では、残留強度の発現に関与している粘土鉱物と水の電気化学的特性について考察した。

2. 粘土鉱物と水との静電的相互作用

粘土鉱物は、四面体シート(SiO₄などの面的なつながり)と八面体シート(Al₂O₆などの面的なつながり)の組み合わせから構成され、その表面は水酸基（水酸基表面）もしくは酸素(シロキサン表面)からなる。多くの場合、粘土鉱物は結晶内の同型置換などにより負電荷が卓越している。そのため水と接した場合、極性をもつ水分子は表面に吸着され、粘土が塑性、膨潤性などの性質を示すことの一因となっている。粘土鉱物と水との相互作用は残留強度の発現機構を解明する上で重要である。

粘土鉱物中の水は、吸着水、層間水、構造水に大別され、吸着水は表面に吸着している水、層間水は単位層間に存在する水、構造水は結晶内部に組み込まれている水酸基 OH である。残留強度の発現に関与する水は、その存在状態から吸着水と層間水と考える。すなわち、吸着水は粘土粒子の周りを取り囲むように存在することから、粒子が相対運動する際に真っ先に関わる位置にあり、さらに粘土鉱物の最表面に吸着されている強吸着水は密度がバルク水の約 1.4 倍もあるなど固体に近く、せん断に抵抗し得る物性を有しているからである。層間水は、自由水と氷の中間的性質で、Sposito and Prost(1982)によると、1 層の水分子をもつモンモリロナイトの層間水の誘電緩和時間 τ_d は、層間陽イオンが Na, K など 1 価のときは水の τ_d と同程度、Ca, Mg など 2 価の陽イオンの場合は氷の τ_d と同程度であることを示している。このことは、モンモリロナイトの層間水が条件によりバルク水のように動きやすい場合もあれば、氷のように動きにくい場合もあることを意味する。つまり、モンモリロナイトの層間水は条件次第ではせん断に抵抗する成分になることを示している。

粘土鉱物と水分子との相互作用について考察する。上平(1998)は、「液体の構造と性質や溶質-溶媒間の相互作用は分子間力によって支配される」と述べている。水分子間に作用する分子間力は、水素結合力、クーロン力(静電的相互作用)、ファン・デル・ワールス力であり、これら 3 つの分子間力は粘土鉱物表面-水分子間でも作用しているとみられる。しかし、各々の力の貢献度は不明で、今後の重要な研究課題である。現時点では、水分子は他の物質と比較して大きな誘電率 ϵ_r をもつことから(表 1)、物体間に水が進入すると大幅にクーロン力を小さくするということである。物体間のクーロン力を求める式において、 ϵ_r に水の誘電率($\epsilon_r=80.36$; 20℃)が代入すると、クーロン力 F は元の $1/80.36$ に低下することがわかる。

表 1 物質の誘電率

(理科年表(1999)より算出)

物質	ϵ_r
空気(乾)	1.000536
水(0℃)	88.15
水(20℃)	80.36
アルミナ	8.5
雲母	7.0
アセトン	20.7
石英	3.8
パラフィン	2.2

クーロン力を求める式

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2}$$

F : クーロン力[N]

Q : 電荷[C]

r : 物体間距離[m]

ϵ_0 : 真空の誘電率

(8.854×10^{-12} [F/m])

ϵ_r : 物質の誘電率

3. 粘土鉱物中の水の赤外吸収スペクトル

水の結合状態やその量を調べる方法として、赤外線吸収スペクトル法がある。この方法は、水分子のもつ固有振動（対称・逆対称伸縮振動、変角振動）について、その振動数に対応する赤外線が水分子に吸収されるという分光学的特性を利用して水の定性・定量分析を行う方法である。なかでもOH伸縮振動数は、高温の気体で 3600cm^{-1} から低温の氷の 3200cm^{-1} まで広い範囲にわたって変化し、そのスペクトル幅は室温付近の液体の水で最も大きく³⁾、多くの情報が得られる。粘土中の水がバルク水と異なるならば、赤外スペクトルとりわけOH伸縮振動の変化として現れるはずである。

赤外スペクトル測定は、フーリエ変換型赤外顕微分光装置（日本分光 VI R-9500）を使用し、試料表面にプリズムを密着させるATR法（全反射法）によった。顕微FT-IRは試料表面の局所分析、微量試料などの測定に威力を発揮し、本実験での測定範囲は $\phi 250\mu\text{m}$ 、測定深度は数 $100\mu\text{m}$ である。測定試料は、パイロフィライトと石英を主成分とするNSF粘土で、大変位一面せん断試験装置⁴⁾により形成した残留状態せん断面を測定面とした。測定においては、まず試料のない状態でバックグラウンド測定を行い、次いで、試料のせん断面部分をATRプリズムに密着させて測定した。このとき、試料下部の小型圧力計により試料表面とプリズムとの接触圧を測定した(図1)。測定波数域は中赤外領域 $4000\sim 400\text{cm}^{-1}$ 、測定時の分解能は 4cm^{-1} 、積算回数は32回である。

図2に振動スペクトルを示す。図より、 3375cm^{-1} 付近に幅の広いピークが確認できる。この吸収スペクトルは吸着水のOH伸縮振動である。吸光度は接触圧の増加に伴い減少していることが認められる。ATRプリズムの大きさが $\phi 250\mu\text{m}$ と非常に小さく試料に全面接触していると考えられるので、吸光度の減少は水の減量を示している。また、接触圧による波数の移動が認められないことから、水分子間の水素結合力は接触圧により変化しないようである。

4. ゼータ電位の適用性

粒子に電場をかけると、粒子は周りの電気二重層の一部を伴って泳動する。このときの粒子周囲の固定層と流動層との境界面である“すべり面”

(図3)と液体自体との電位差をゼータ電位といい、動電現象を表す物性値として広く知られる。電気二重層は、溶液中での粒子分散系において適用が確認されているモデルであり、残留状態のような圧力によって強制的に粒子が拘束された状態で適用されるか否かの検証が必要である。粒子が接近して2つの電気二重層が重なり合うと、粒子間に反発力が発生するが、これはクーロン力によるものではなく、粒子間の対イオン濃度が高くなることで起こる浸透圧効果によるものとされている。このように粘土の残留せん断状態における電気二重層モデルの検証には、浸透圧の効果を見積もる必要がある。仮に電気二重層モデルが確認されたとしても、ゼータ電位の“すべり面”と残留状態せん断面とが一致していなければ、測定されたゼータ電位を安易に残留強度の発現機構に結びつけることはできない。

5. おわりに

残留強度の発現機構の解明には、粘土鉱物のみならず水の物性評価が重要である。なぜなら、水は粘土鉱物との相互作用によってせん断に抵抗しうる存在になり得るからである。

参考文献：1)Mitachi et.al., Landslide vol.40, No.2, 2003, 2)大河原ら, 第42回地すべり学会研究発表会, 2003, 3)尾崎ら, 近赤外分光法, 学会出版センター, 1998 4) 甲谷ら, 平成13年度東北支部技術研究発表会, 2002



写真1 FT-IRと顕微赤外装置

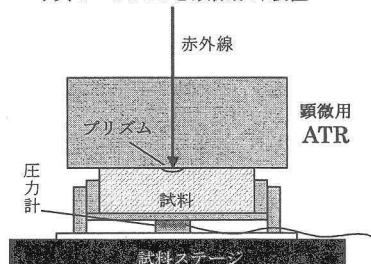


図1 ATRによる試料接触圧測定概要

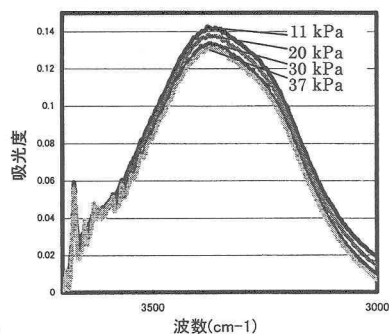


図2 NSF粘土の赤外吸収スペクトル

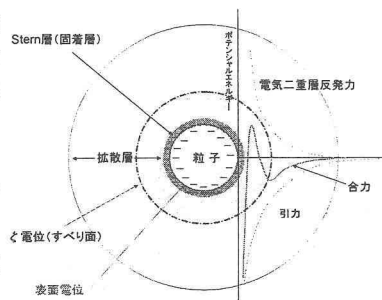


図3 電気二重層“固定層・拡散層”と合力“反発力・引力”との関係（想定概念図）