

塩分濃度が異なる純粋粘土鉱物の残留強度

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

笹西 孝行 (元 山口大学大学院生, 現 大成建設㈱)

菅原 真由美 (元 山口大学学生, 現 山口県土木建築部)

Residual strength characteristic of pure clay mineral prepared under condition of different salinity

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil Engineering)

Takayuki SASANISI (Taisei Co.)

Mayumi SUGAWARA (Yamaguchi Pref.)

If a clay on a slip surface in a landslide has an exchangeable cation e.g. Na montmorillonite, consistency and shear strength of the clay may be changed by the ion concentration of sodium. This paper describes the influence of salinity on peak and residual strengths of kaolin and Na montmorillonite. Ring shear tests were performed on specimen prepared under different concentrations of NaCl solutions. Main conclusions are as follows. Firstly, the consistency limits decreases with increasing the salinity. Secondly, the internal friction angles are almost constant to the change in salinity, whereas the apparent cohesions increase with increasing the salinity.

Key Words : landslide, residual strength, clay mineral, salinity, consistency, ring shear test

1. はじめに

土の残留強度は地すべりで受けるような大変形によって到達する最小のせん断強度と定義され, 再活動地すべり斜面の安定性評価において重要な強度定数の一つとされる¹⁾. これまでに残留強度に及ぼす影響因子が様々な観点から検討されているが, Kenney²⁾により残留強度は間隙水の化学的性質の影響を受けることが指摘されている. また, 松尾ら³⁾により地すべり斜面のすべり面付近には界面活性の高いモンモリロナイトや非晶質のアロフェンが卓越して存在することが示され, モンモリロナイトの強度・膨潤性状を改善するためにカリウム固定工法が提案されている.

一方, Bjerrum⁴⁾は, 北欧の“クイッククレイ”と呼ばれる粘土が著しい強度低下を生じる原因として海成粘土が陸化して高位な土粒子骨格を保持したまま含有Naイオンが淡水により溶脱されることを指摘した. こ

の報告が土の破壊メカニズムを解明する上で間隙水の化学的状態や履歴に注目する契機となった. それ以後, 地すべり粘土を対象として, 残留強度と水素イオン濃度の関係⁵⁾, 残留強度とNaイオンおよびCaイオン濃度の関係⁶⁾が報告されているが, 残留強度と間隙水の化学的性質の一般的な関係を見出すには十分なデータが得られていないのが現状である.

以上の点を踏まえて, カオリナイトおよびNaモンモリロナイトからなる粉末試料に対して異なる複数の濃度の塩化ナトリウム溶液を添加し, 練返し再構成粘土を作製し, これら試料に対して圧密・定圧リングせん断試験を実施した. 本文では, 試験結果に基づいて, まずは, 塩分無添加試料の残留強度のせん断速度依存性および垂直応力依存性を検討する. 次いで, コンシステンシー特性, ピーク強度および残留強度に及ぼす塩分濃度の影響について検討する.

Table1 Chemical composition of soil samples

試料	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	その他	計
カオリン	47.1	0.2	35.8	1.1	0.1	0.2	1.6	13.9	100
Na モンモリロナイト	68.1	0.2	13.5	0.7	2.9	3.5	0.1	11.0	100

(数値は質量百分率表示)

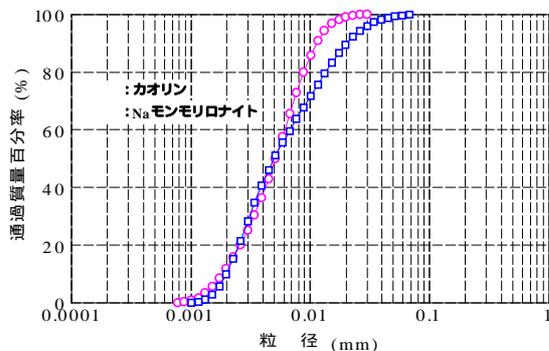


Fig.1 Grading curves of soil samples



Photo.1 Ring shear test apparatus



Photo.2 Annular specimen in ring shear box

2. 塩分濃度を变化させた土のリングせん断試験

(1) 試料の物理的性質

使用した試料はカオリンと Na モンモリロナイトである．その主要な物理的性質をまとめると、カオリンは $\rho_s=2.618 \text{ g/cm}^3$, $w_L=65.3\%$, $w_p=41.5\%$, $I_p=23.8$, $F_{clay}=35.3\%$ 、土質分類が MH である．Na モンモリロナイトは $\rho_s=2.471 \text{ g/cm}^3$, $w_L=351.1\%$, $w_p=64.1\%$, $I_p=287.0$, $F_{clay}=50.9\%$ で、土質分類は CH である．Fig.1 に両試料の粒径加積曲線を、Table1 に両試料の化学組成を示す．

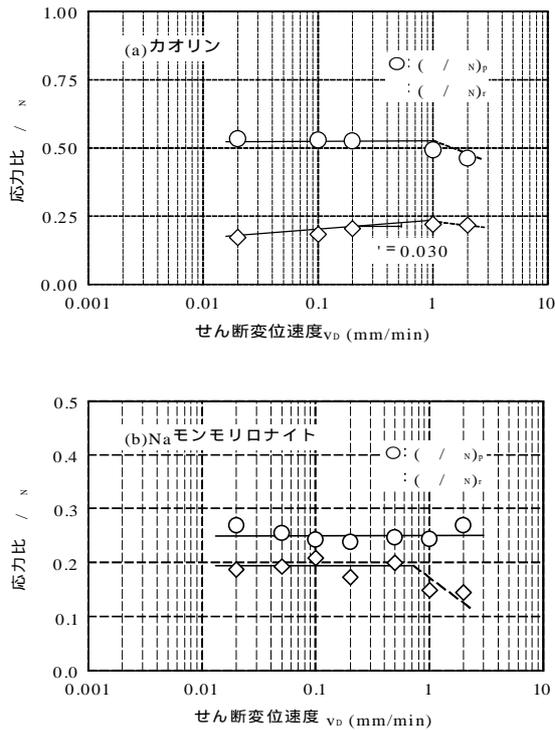
(2) 試験手順・試験ケース

カオリンの場合、液性限界の2倍程度の含水比、Na モンモリロナイトの場合、液性限界程度の含水比となるように純水および塩化ナトリウム水溶液(0.1, 0.3, 1.0 N)を粉末試料に加えて十分に練返し、一次元圧密圧力 $83 \text{ kPa}(=0.85 \times 98 \text{ kPa})$ の下で予圧密した(圧密時間は3t法により決定した)．供試体は予圧密試料から内径6 cm, 外径10 cm, 高さ2 cmの環状に成形する．試験ケースは複数個の供試体を用いて異なる一定のせん断速度 v_0 の下で圧密・定圧リングせん断試験(Photo.1, 2 参照)を実施した．供試体は正規圧密状態(圧密時間は3t法により決定)とし、圧密応力 σ_c の載荷直後に水浸させる．なお 塩分添加試料の場合には、水浸容器に試料調製時と同じ濃度の塩水を入れる．せん断時の上・下部リングの隙間は0.20 mm とする．せん断速度の影響(排水条件を満たす適切なせん断速度の決定)と垂直応力 σ_N の影響(残留強度線の湾曲化現象の把握)の検討を行い、これらの結果を踏まえた上で、塩分濃度を变化させた場合のピーク時および残留時の強度定数の変化を検討する．

3. カオリンおよびNa モンモリロナイトの残留強度特性

(1) せん断速度の検討

v_0 を0.02~2.0 mm/minの範囲で变化させてリングせん断試験を行い、応力比 σ_r/σ_N ~せん断変位角 曲線に双曲線近似を適用して、残留状態における応力比(σ_r/σ_N)_rを決定した⁷⁾．Figs.2 に試験結果を示す．縦軸にピ



Figs.2 Relationship between stress ratio and shear displacement rate at peak and residual state

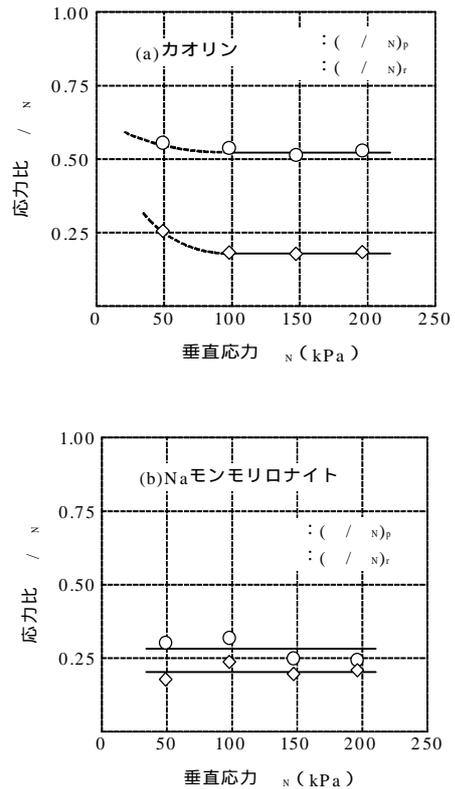
ークおよび残留状態の応力比 $(\sigma/N)_p$ および $(\sigma/N)_r$ をとり、横軸に対数表示の v_D をとっている。 $(\sigma/N)_p$ が一定である v_D の区間から排水条件を近似的に満たすせん断変位速度 v_D^* としてカオリンでは0.1 mm/minを、Na モンモリロナイトでは0.2 mm/minを採用する。

(2) 垂直応力の影響

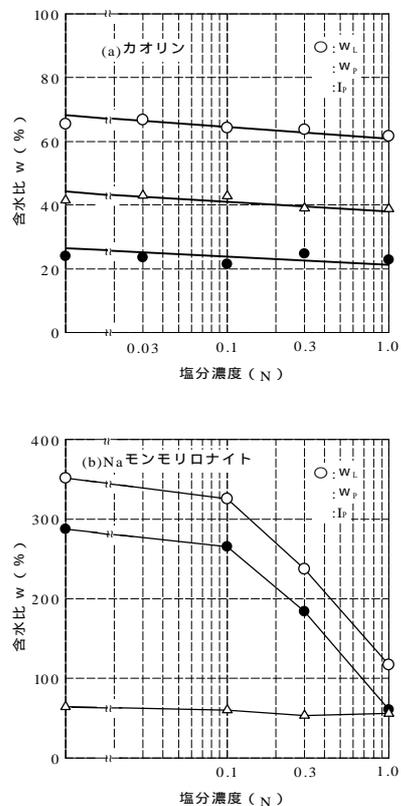
Figs.3 に N を 49 ~ 196 kPa の範囲で変化させたリングせん断試験から得られる $(\sigma/N)_p$ および $(\sigma/N)_r$ と N の関係を示す。 $(\sigma/N)_p$ と $(\sigma/N)_r$ はともに N の低い領域で急増する傾向がある^{B)} Na モンモリロナイトの場合、 $N=49 \sim 196$ kPa の範囲において $(\sigma/N)_p$ および $(\sigma/N)_r$ は N の変化に対してほぼ一定であり、垂直応力の影響をほとんど受けない。一方、カオリンの場合、 $N = 49$ kPa では $(\sigma/N)_p$ および $(\sigma/N)_r$ はともに若干増加する傾向が認められた。

4. コンシステンシー特性および強度特性に及ぼす塩分濃度の影響

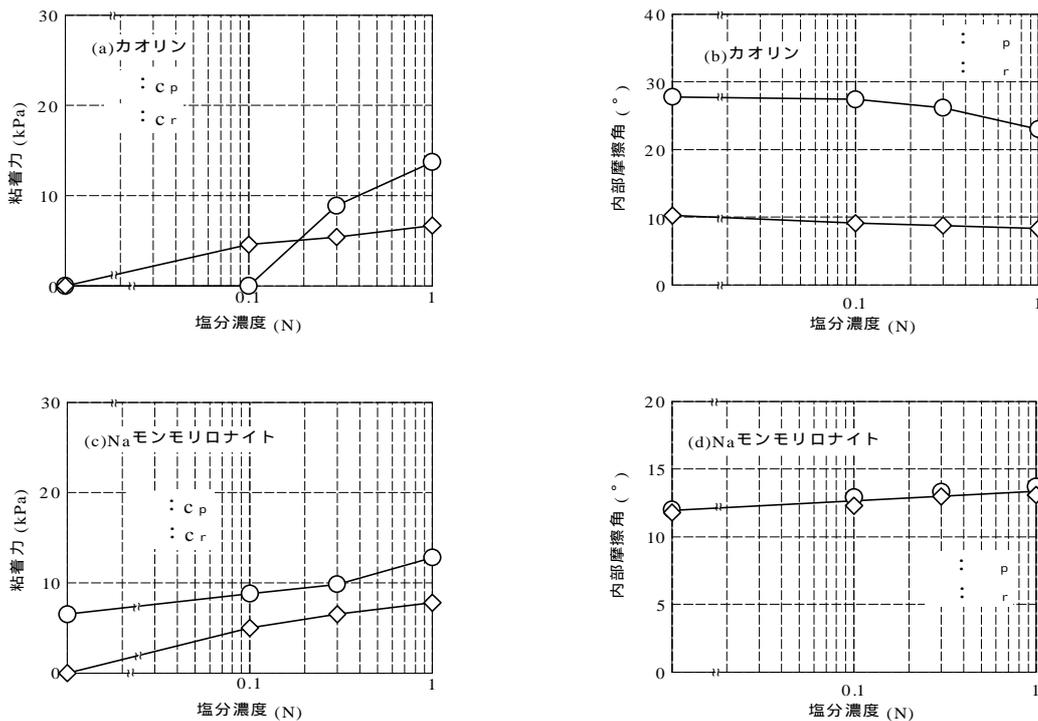
カオリンおよびNa モンモリロナイトの液性限界 塑性限界および塑性指数と塩分濃度の関係を調べた。その結果を **Figs.4** に示しているが、塩分濃度の増加に対してコンシステンシー限界はカオリンの場合やや減少



Figs.3 Relationship between stress ratio and normal stress at peak and residual state



Figs.4 Relationship between salinity and consistency

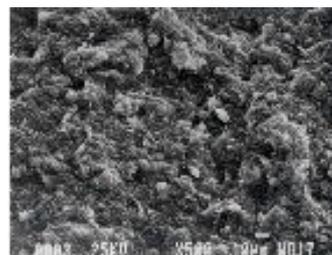


Figs.5 Relationship between salinity, cohesion and angle of internal friction

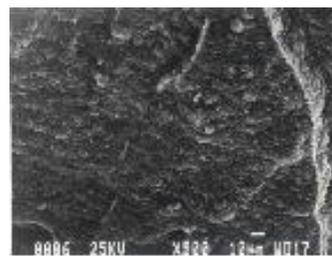
するのに対して,Na モンモリロナイトの場合著しく減少している.このことは吉國ら⁹⁾が報告した実験結果と一致し,土粒子表面でのイオン吸着によって界面活性作用が低減されたため,塩分濃度が粘土の活性度を大幅に下げたと考察している⁹⁾.

次に,塩分濃度が異なるカオリンおよびNa モンモリロナイトの応力経路からピーク時および残留時の強度定数 (c_p, ρ)と(c_r, r)を求めた.その結果を Figs.5 に示す.ここで塩分濃度が0 Nのデータは3.で求めたものである.カオリン(Figs.5(a), (b)参照)の場合, c_p および c_r はともに塩分濃度の増加に対して増加する傾向にあり, c_p の増加率の方が c_r よりも大きいようである.また, ρ は 4.4° , r は 0.7° ほど減少するようである.Na モンモリロナイト(Figs.5(c), (d)参照)の場合, c_p および c_r はともに塩分濃度の増加に対して同程度で増加し,また, ρ は 1.7° , r は 0.3° ほど増加するようである.

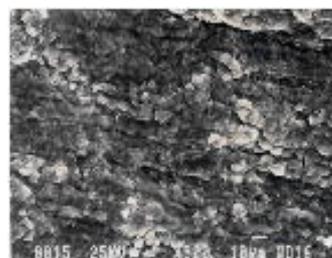
以上より,塩分濃度の影響は強度特性に明瞭に現れており,内部摩擦角よりも粘着力への影響が大きい.なお,試験後のSEM撮影(Photos.3参照)により塩分濃度が高いほどせん断面が平滑な状態となっていることが確認された.



(a) 0.1N



(b) 0.3N



(c) 1.0N

Photos.3 SEM photographs of Na montmorillonite

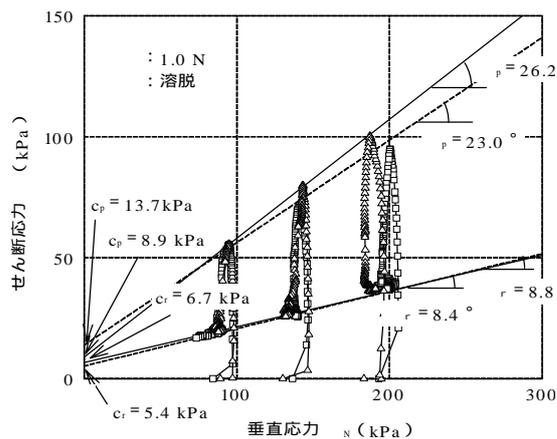


Fig.6 Effect of leaching on strength line of kaolin

5. 塩分溶脱による強度定数の変化

カオリンの塩分濃度を 1.0 N に調整した試料を人為的に塩分溶脱させ、強度定数に及ぼす影響を検討した。通常、所定の塩分濃度を有する供試体に対して試験を行う際には、試験装置の水浸容器にはそれと同じ塩分濃度の水溶液を入れることにしているが、塩分溶脱を起こす場合には、純水を入れて、圧密過程において 30 分毎に純水を交換した。

Fig.6 に、塩分溶脱した供試体の応力経路と塩分濃度 1.0 N の供試体の応力経路を示す。塩分溶脱の影響を受けていることは明らかであり、強度定数が変化していることを示している。なお、塩分溶脱した場合の強度定数は $c_p=8.9$ kPa, $\phi=26.2^\circ$, $c_r=5.4$ kPa, $r=8.8^\circ$ であり、Figs.5 に示す塩分濃度 0.3N の強度定数と一致している。

6. まとめ

本文では純粋粘土鉱物の残留強度と塩分濃度の関係について圧密・定圧リングせん断試験の結果に基づいて検討した。新たに得られた知見は以下のである。

- (1) 排水条件を満たすせん断速度はカオリンの場合、0.1 mm/min, Na モンモリロナイトの場合、0.2 mm/min である。

- (2) 垂直応力が 98 ~ 196 kPa の範囲ではピークおよび残留状態における応力比は垂直応力の影響をほとんど受けない。
- (3) コンシステンシー限界は塩分濃度の影響を受ける。その場合は粘土粒子表面の物理化学的作用の違いに起因するものと考えられる。
- (4) 上記(1), (2)の条件下において、ピークおよび残留時の強度定数は多少なりとも塩分濃度の影響を受ける。

謝辞：本論文の作成にあたり、研究室学生の都築俊輔氏に御助力頂きました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) Skempton, A. W.: Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102, 1964.
- 2) Kenney, T.C.: The influence of mineral composition on the residual strength of natural clays, *Proc. Geotechnical conference*, Oslo, Vol.1, pp.123-129, 1967.
- 3) 松尾新一郎, 嘉門雅史, 富田武満: 地すべりの物理化学的方法による予知とその対策, *土と基礎*, Vol.28 No.2, pp.45-52, 1980.
- 4) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol.17, No.2, pp.173-211, 1967.
- 5) 村上幸利, 土倉 泰, 鈴木史浩: 地すべり粘土の水素イオン濃度と残留強度の関係把握に関する基礎的研究, *土木学会年次学術講演会講演概要集*, pp.956-957, 1993.
- 6) Moore, R.: The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays, *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.35-47, 1991.
- 7) 鈴木素之, 梅崎健夫, 川上 浩: リングせん断試験における粘土の残留強度とせん断変位の関係, *土木学会論文集*, No.575/ - 40, pp.141-158, 1997.
- 8) 鈴木素之, 梅崎健夫, 川上 浩, 山本哲朗: 直接型せん断試験における土の残留強度, *土木学会論文集*, No.645/ -50, pp.37-50, 2000.
- 9) 吉國 洋, 森脇武夫, 池上慎司, 有本享作, 源 明夫: 粘土の物理的性質に及ぼす塩分濃度の影響, *土木学会第48回年次学術講演会概要集*, pp.356-357, 1993.