

海底粘性土と地すべり地粘性土の力学特性

Shear Properties of Undisturbed and Disturbed Marine and Landslide Clayey Soils

八木 則男* (Norio Yagi)

矢田部 龍一** (Ryuichi Yatabe)

向谷 光彦*** (Mitsuhiko Mukaitani)

海底や地すべり地よりサンプリングされた不かく乱試料と、室内で練り返し再圧密された試料を用いて、強度定数の一般的な特性、せん断特性に与える粒度の影響、せん断特性に与える吸着イオンの影響について調べた。その結果、①破砕帯地すべり地粘性土の有効応力規準によるせん断抵抗角 ϕ' が $20\sim 35^\circ$ 、残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ_r が $10\sim 31^\circ$ 、第三紀層の ϕ' が $20\sim 40^\circ$ 、 ϕ_r が $14\sim 27^\circ$ 、海底粘性土の ϕ' が $30\sim 50^\circ$ 、 ϕ_r が $21\sim 34^\circ$ である。②破砕帯と第三紀層地すべり地粘性土の残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ_r と粘土分含有量および塑性指数 I_p との間の相関性を比較すると、破砕帯は従来指摘されているような相関は認められない。③粒度の影響について考察し、砂間隙比 e_s の導入により、砂間隙比が3以下(砂分含有率の30%以上)になるときに、砂粒子のせん断抵抗の影響が大きい。④吸着イオンの影響について考察し、海底粘性土の交換性陽イオンの量は、地すべり地粘性土の量より卓越していることや、粘土の保水能力を高めること、有効応力規準の強度定数 ϕ' を増加させること、破壊時間隙水圧係数 A_v を増大させることが明らかとなった。

キーワード: Consolidated Undrained Shear, Effective Stress, Landslide, Residual Strength

1. まえがき

近年の沿岸海域における構造物基礎の設置や、埋め立てを行うに際しては、海岸や海洋域をいかに人間社会のために役立てるかということに労力を費やしてきた。また、地球規模の環境を考え、地盤工学の知見を用いて種々の問題解決に取り組もうとする試みが環境地盤工学として進みつつある。しかし、海底地盤や地すべり地の安定性を評価する上で、あるいは機構解明のためにその各フィールドにおいて様々な力学特性を明らかにしておく有用性に変わりはない。そして、それらの粘性土の全般的な力学特性が把握されれば、実際の設計に役立つものと考えられる。

海底粘性土は地すべり地やその他の斜面崩壊地に比べて一般的に原位置より均質な不かく乱試料を入手できることが多く、練り返し再圧密試料を用いて力学特性を明らかにしようとすることはあまり用いられていない。地すべり地などでは、十分な量の粘性土試料を入手することが困難なため、逆算法により所定の安全率から強度定数を求めたり、練り返し

再圧密試料を用いて力学特性が明らかにされつつある。

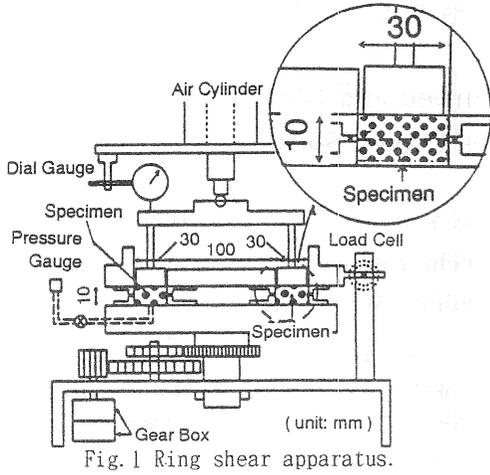
本論文では、海底や地すべり地よりサンプリングされた不かく乱試料と、室内で練り返し再圧密された試料を用いて、強度定数の一般的な特性、せん断特性に与える粒度の影響、せん断特性に与える吸着イオンの影響について述べる。

2. 海底粘性土と地すべり地粘性土の強度定数

2.1 試料、実験装置、実験方法

せん断試験に用いた試料は、東北、北陸、山陰地方の第三紀層地すべり地粘性土と四国に広く分布する破砕帯地すべり地粘性土と日本全国の漁港の海底粘性土であり、各粘性土ごとに数十箇所の試料を集めた。地すべり地粘性土試料は、ボーリングコアから採取したものであり、また、一部ブロックサンプリング(集水井掘削時など)にもよっている。なお、これら地すべり地の試料は、孔内傾斜計などにより観測されたすべり層の部分のものである。また、図中の凡例で、破砕帯地すべり地粘性土は秩父帯、三

*愛媛大学工学部教授, **愛媛大学工学部助教授, ***愛媛大学大学院工学研究科生産工学専攻



波川帯および御荷鉢帯について分類したものを示している。

せん断試験に用いた供試体は、純水で練り返した後、420 μ mのふるいを通し、飽和度を高めるため脱気槽で放置した後、再圧密して作製した。行った試験は、側圧一定の圧密非排水三軸圧縮試験と一面せん断型リングせん断試験である。三軸圧縮試験はピーク強度に関する強度定数を、一面せん断型リングせん断試験は、残留強度に対応する強度定数を求めるためのせん断試験である。

三軸圧縮試験の供試体の大きさは、直径 35 mm、高さ 80 mm である。圧密時間は 2~3 日であり、バックプレッシャーは 2 kgf/cm² を 12 時間程度作用させ、非排水状態で圧縮せん断試験を行った。これらの操作により、Skempton の間隙圧係数 B 値(= $\Delta u / \Delta \sigma_m$)は、すべて 0.95 以上を得ている。せん断試験時は変位制御法で行い、変位速度は 0.044 mm/min である。

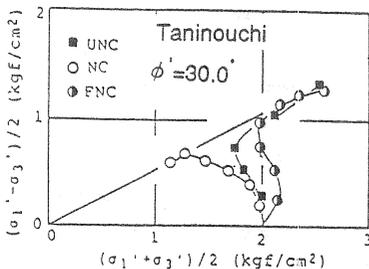


Fig. 2 Stress paths and failure line of Taninouchi landslide clay.

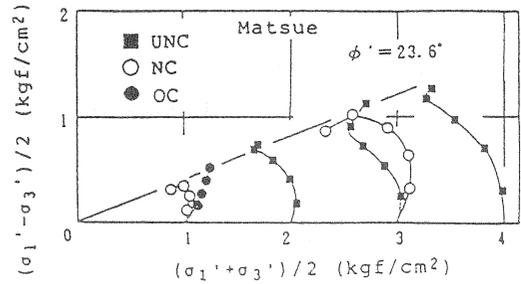


Fig. 3 Stress paths and failure line of Matsue landslide clay.

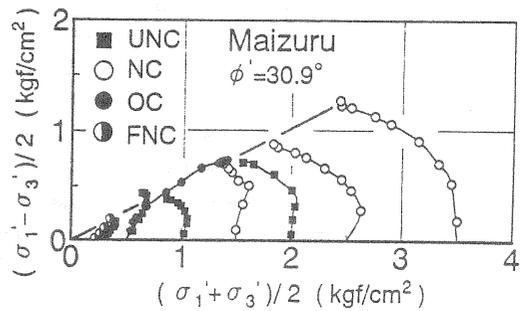


Fig. 4 Stress paths and failure line of Maizuru marine clay.

一面せん断型リングせん断試験機は、リングの外径が 16 cm、内径 10 cm で、供試体高さが 1 cm、変位速度が 0.3552°/min であり、供試体高さ 0.5 cm のところでせん断される。また残留強度は 1 回転程度変位を与えた時の強度としている。試験機の概略を Fig. 1 に示す。通常行われているリングせん断試験の速度よりかなり早い、残留強度にほとんど影響を与えないことを既に確認している¹⁾。また、各試料について物性試験を行っている、その結果についても検討を加えた。

2. 2 実験結果と考察

① Fig. 2, 3, 4 は、かく乱試料と練り返し再圧密試料のピーク強度に関する強度定数を三軸圧縮試験より求めた結果である。Fig. 2 は破碎帯の谷の内陸すべり地粘性土（秩父帯、泥岩）の試験結果であり、Fig. 3 は第三紀層の松江地すべり地粘性土（泥岩、砂岩）、Fig. 4 は舞鶴港内の海底粘性土の結果である。図中、UNC はかく乱試料を、NC は練り返し正規圧密試料を、OC は練り返し過圧密試料を、また、FNC は NC を一度せん断破壊させた後、再

成形後、再圧密した正規圧密試料である。

これらの結果より、三軸圧縮試験では繰り返し再圧密試料と不かく乱試料で有効応力径路や非排水強度が大きく異なるが、有効応力規準による見かけの強度定数にはほとんど違いが見られないことが分かる。そして、強度定数がほぼ同じで非排水せん断強度が異なるのは、せん断時の間隙水圧の発生が異なるからである。今回示した以外の第三紀層や破碎帯地すべり地粘性土、海底粘性土についても三軸圧縮試験による ϕ' は、繰り返し等による構造の乱れの影響を受けないこと、有効応力規準による見かけの粘着力 c' はほぼゼロであること、破壊線はほぼ直線で示されることを確認している。

したがって、第三紀層や破碎帯地すべり地粘性土、海底粘性土の有効応力規準による三軸圧縮状態での強度定数は、繰り返し再圧密試料を用いて求められることが分かる。

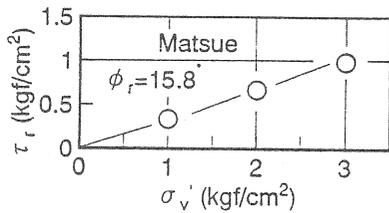


Fig. 5 Residual strength line of Matsue landslide clay.

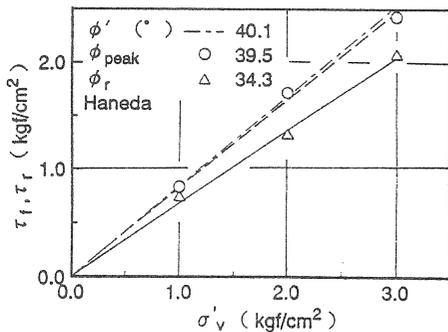


Fig. 6 Failure lines of Haneda marine clay.

② Fig. 5, 6は、松江の地すべり地粘性土と羽田の海底粘性土の繰り返し再圧密試料の残留強度に関する強度定数を、一面せん断型リングせん断試験により求めたものである。今回示した以外の第三紀層や破碎帯地すべり地粘性土、海底粘性土についてもリ

ングせん断試験による残留強度定数で、見かけの粘着力 c_r がほぼゼロであること、破壊線はほぼ直線で示されることを確認している。

したがって、第三紀層や破碎帯地すべり地粘性土、海底粘性土の有効応力規準による一面せん断型リングせん断状態の強度定数は、繰り返し再圧密試料を用いて求められることが分かる。

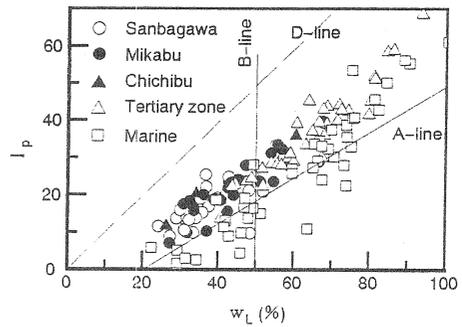


Fig. 7 Plasticity chart.

③ 強度定数等は、各地域ごとに異なるので、個別に試験して求めなければならないが、全体的な傾向を把握しておくことは工学的に意味がある。

Fig. 7は、各粘性土の結果を塑性図上にプロットしたものである。液性限界が80%前後までは海底粘性土が、A線($I_p = 0.73(LL - 20)$)の下にあることが分かる。また、破碎帯と第三紀層地すべり地粘性土は、A線より上側に集中していることが分かる。

④ 従来より残留強度を支配する因子の把握や、残

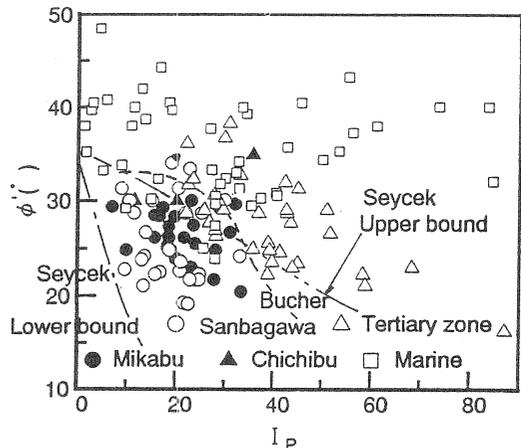


Fig. 8 Relationship between ϕ' and plasticity index.

留強度を簡単に推定することを目的として残留強度と塑性指数 I_p および粘土分含有量 C_F の関係が調べられており、相関があることが指摘されている。そこで、各粘性土の相関性について調べた。

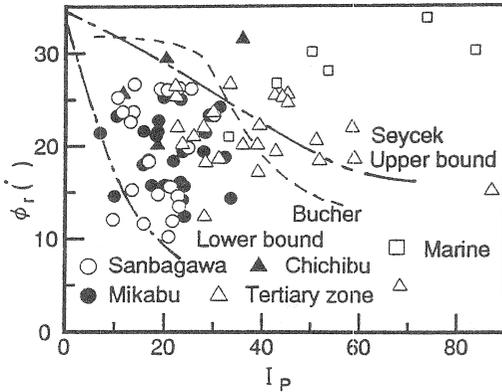


Fig. 9 Relationship between ϕ_r and plasticity index.

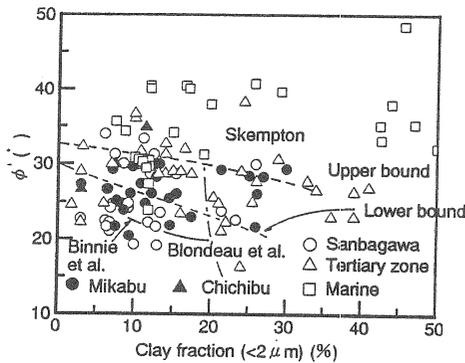


Fig. 10 Relationship between ϕ_r and clay fraction.

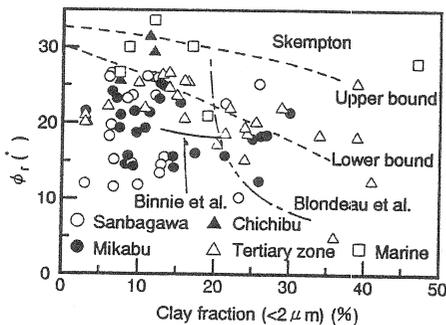


Fig. 11 Relationship between ϕ_r and clay fraction.

Fig. 8, 9は、三軸圧縮試験より得た有効応力規準のせん断抵抗角 ϕ' ならびに一面せん断型リングせん断試験による残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r と塑性指数 I_p の関係を示す。また、Fig. 10, 11に ϕ_r および ϕ_r と粘土分含有量の関係を示す。図中にはSkempton²³⁾が $PI/CF=0.5\sim 0.9$ の試料に対して示した ϕ_r と粘土分含有量の関係、ならびにLupini²²⁾らが従来の研究をまとめて示した ϕ_r と粘土分含有量および I_p の関係の上限と下限を併記してある。これらより、海底粘性土の ϕ' は $30\sim 50^\circ$ 程度であり、破碎帯の $20\sim 35^\circ$ 、第三紀層の $20\sim 40^\circ$ と比較して相対的に大きいことが分かる。

また地すべり地粘性土の ϕ_r で、破碎帯は $10\sim 31^\circ$ 、第三紀層は $14\sim 27^\circ$ 、海底粘性土の ϕ_r は $21\sim 34^\circ$ である。ここで、塑性指数が大きくなると第三紀層地すべり地粘性土の ϕ_r はある程度の相関性がみられる。これは、第三紀層地すべり地の主要な鉱物が泥岩の風化した粘性土で、それに含まれるスメクタイトが他の粘土鉱物と比較して大きな塑性指数を示すからである。また、スメクタイトはせん断抵抗角が小さいので、塑性指数をパラメータにした時比較的良好な相関がみられると思われる。

従来の第三紀層（泥岩）を主として行われている研究は、それらの理由により良好な相関があると思われる^{41) 42)}。また、海底粘性土の ϕ_r は ϕ' と同様に地すべり地粘性土と比較して大きく、 I_p や C_F に対して良好な相関は見られない。

3. 海底粘性土と地すべり地粘性土のせん断特性に与える粒度の影響

3. 1 試料、実験装置、実験方法

① 粒度の影響を評価するとは、相対的に粒径の大きな土粒子の混合割合により、せん断特性がいかに変化するかということを示している。しかしながら、粒径の大きな土粒子を含む土のせん断特性を調べるためには、装置上の工夫が必要となる。したがって、今回は比較的簡易に行うことができるように、細粒分に砂分を混合するという方法を用いた。つまり、所定の砂分含有率が得られるよう豊浦標準砂を粘性土に調合し試料を作製した。

また著者らは⁷⁾、供試体作製方法について供試体内が一樣な砂分含有率を有しているという最低条件を常に満足し再現性のある突き固めによる法を採用

した。

② 試験方法は、等方圧密非排水三軸圧縮試験である。供試体の作製方法は、風乾状態の試料を供試体高さ 10.00 cm、直径 5.00 cm のモールドに 10 層に分け、各層 50 回ずつ突き固めることにより一番密詰め状態が得られるよう心掛けた。この方法により Skempton の間隙水圧係数 B 値は 0.90 以上を得た。せん断過程におけるその他の点は、2. 1 と同様である。

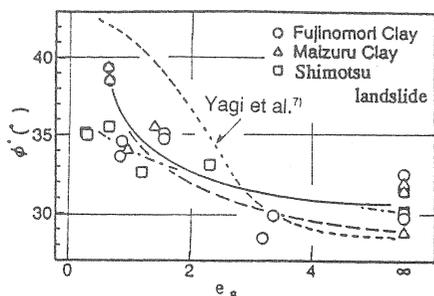


Fig. 12 Relationship between e_s and ϕ' .

3. 2 実験結果および考察

① 前章で有効応力規準のせん断抵抗角 ϕ' に与える乱れの影響は小さいことを明らかにした。しかしながら、砂分含有率が大きくなれば、 ϕ' が変化することが予想される。また著者は^{71~93} ϕ' と礫分含有率の関係から、ある含有率までは粘性土か礫自身の挙動であり、一定の含有率付近において過渡的な挙動を示すことを明らかにしている。そして Fig. 12 に示されている破線は、過去に実験により調べた関係である。

ここで、礫間隙比 e_s (= 粘土粒子と水の体積 / 礫粒子の体積) を導入した。ただし、 e_s の最小値は礫自身の最小間隙比時の ϕ' であり、 $e_s = \infty$ とは粘性土自身の ϕ' となることを断っておく。

そして、Fig. 12 の破線の勾配は ∞ からゼロに近づくにしたがって、礫間隙比が 3 付近になると礫粒子の影響によりせん断抵抗角が増加することが分かる。今回は粘性土に混合させる試料が砂であるから、砂間隙比 e_s と呼ぶことにする。

② Fig. 12 に砂間隙比 e_s と有効応力規準のせん断抵抗角 ϕ' の関係を示す。これより全ての試料で砂間隙比が 3 以下より、粘性土の強度に対し砂のせん断抵抗の影響が現れていることが分かる。ここで

$e_s = 3$ とは、砂分含有率の 30 % 前後を意味している。

ところで、著者が過去に調べた粘性土と礫の混合試料の結果と今回調べた粘性土と砂の混合試料の挙動は、類似していると思われる。そして、粘性土のせん断特性に与える粒度の影響を、通常の三軸圧縮試験機を用いて、比較的容易に有効応力規準のせん断抵抗角 ϕ' を調べることができた。しかし、突固め供試体を用いたため Skempton の間隙水圧係数 B 値が低かったと思われる。したがって有効応力に基づく試験結果の解釈には課題が残る。今後は試験方法を工夫する必要があると思われる。

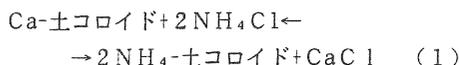
最後に、今後海底地盤の改良に際し砂や礫の置換率が 30 % 程度するとき、ふるい分けられた砂や礫のせん断強度定数を用いて原位置強度を算定することは、危険側の設計であると考えられる。

4. 海底粘性土と地すべり地粘性土のせん断特性に与える吸着イオンの影響

4. 1 試料、実験装置、実験方法

① 用いた試料は広島港内で採取された海底粘性土である。まず風乾試料 2.0 g を 100 ml ポリエチレン製試葉びんに取り、1 M・pH 7 の酢酸アンモニウム溶液 30 ml を加え 10 分間振とうした後、遠沈洗浄を行った。次に洗液をろ過し、200 ml 容量のメスフラスコに採取した。そして、この作業を 5 回繰り返した後、200 ml 容量メスフラスコに 1 M・pH 7 の酢酸アンモニウムを適量加え 200 ml にし、洗液中の C_s^{2+} 、 M_s^{2+} 、 K^+ 、 N_s^+ を原子吸光光度法により定量した。

② また、地すべり地粘性土の吸着イオンも同時に調べ、地すべり地粘性土や粘土鉱物が有している交換性陽イオンを海水中に含まれる陽イオンと交換を行った。これは、地すべり地粘性土と海底粘性土の ϕ' の違いは、間隙水が海水で満たされていることが少なからず影響していると思われるためである。また、土コロイドは通常負の電荷を帯びており、これに陽イオンが吸着、保持されていると考えている。そして、土コロイドに C_s^{2+} イオンと NH_4Cl 溶液を加えると、次式の化学的に可逆な平衡状態が得られる。



つまり、ある交換性陽イオンを保持している土に他の陽イオンを含む溶液を加えた場合、双方ともイオン濃度が等しくとも、あるいは交換浸透力が弱くとも、溶液濃度を高めればイオン交換が行われることになる。

③ 試料中の交換性陽イオンを海水の陽イオンに交換する手順は次の2通りを用いた。まず、浸水型の海水置換とは、バケツの風乾試料に試料が浸るほどの海水を注入し1週間静置した後上澄み液を取り除き、前記2. 1の要領で再圧密した。しかし、この方法では②の理由により完全な陽イオン交換されない可能性がある。もう一方の方法は、風乾試料、約200 gを1 lガラス製試薬びんに取り、1 MのNaCl溶液を加え、800 mlにし、10分間振とうした後静置する。上澄み液を取り除いた後、この作業を5回繰り返した。次に海水で上述の作業を7~8回繰り返し、完全型の海水置換に近づけるよう努めた。

Table 1 Exchangeable cation.

Soil sample	Exchange cations me/100g (%)				pH		dispersion ratio (%)
	Ca	Mg	K	Na	H ₂ O	KCl	
Hiroshima marine clay	17.9 (71.5)	3.70 (14.8)	1.84 (8.5)	1.81 (7.2)	7.78	7.24	88.3
Inuyose landslide clay	5.28 (76.7)	1.06 (15.4)	0.20 (2.9)	0.34 (5.0)	8.58	7.99	100
Choja A landslide clay	83.9 (83.7)	0.80 (10.5)	0.22 (2.9)	0.22 (2.9)	8.18	6.61	94.9
Sagayama A landslide clay	1.88 (81.8)	0.90 (33.1)	0.08 (2.9)	0.08 (2.2)	7.29	4.82	74.1
Sagayama B landslide clay	4.35 (92.9)	0.14 (3.0)	0.12 (2.8)	0.07 (1.5)	7.88	8.04	58.9
Nuta landslide clay	1.88 (58.9)	0.84 (29.5)	0.19 (6.7)	0.14 (4.9)	8.08	6.75	100
Kawadotsubi landslide	15.0 (82.2)	2.88 (15.8)	0.31 (1.7)	0.08 (0.3)	8.21	7.82	80.2

4. 2 実験結果および考察

① 著者は従来より地すべり地粘性土のイオンに関する繰り返しの影響について調べ、以下の結論を得ている^{10), 11)}。それは、純水で繰り返すことによりφ'やA_fが変化すると思われる。そして、現位置より採取された試料を室内で高含水比で繰り返すときには、(1)式より可逆的に変化すると思われる。

Table 1は、原子吸光光度法により定量した試験の一覧である。表中、交換性陽イオンの量は、土100 g当たりのミリ当量数(meg)とpH、分散率を併記してある。これより、海底粘性土の交換性陽イオンの量は、いずれの地すべり地粘性土の量より卓越していることが分かる。その相対的な容量は、地すべり地粘性土の平均と比較すると、3~10倍程度の違いがあると思われる。

② Fig. 13は、地すべり地粘性土に浸水型と完全型の海水置換を施したせん断試験の結果である。有効応力規準のせん断抵抗角φ'は完全型が最も大きく、次いで浸水型、原試料の順である。

これらの結果より、海水中の交換性陽イオンの働きによりφ'を増加させ、破壊時間隙水圧係数A_fは増大する傾向が見られることが分かる。つまり、海水中の交換性陽イオンは、粘土の保水能力を高める作用があると考えられる。

5. あとがき

本論文では、海底粘性土と地すべり地粘性土のなく乱試料と室内で繰り返して再圧密された試料を用いて、強度定数の一般的な特性、せん断特性に与える粒度の影響、せん断特性に与える吸着イオンの影響に対し基礎的な考察を加えた。各章より得られた結論は以下の通りである。

- 1) 今回試験した破碎帯地すべり地粘性土の有効応力規準によるせん断抵抗角φ'が20~35°、残留状態におけるせん断抵抗角φ_rが10~31°、第三紀層のφ'が20~40°、φ_rが14~27°、海底粘性土のφ'が30~50°、φ_rが21~34°であることが明らかとなった。
- 2) 破碎帯と第三紀層地すべり地粘性土の残留状態におけるせん断抵抗角φ_rと粘土含有量および塑性指数I_pとの間の相関性を比較すると、特に破碎帯は従来指摘されているような相関は

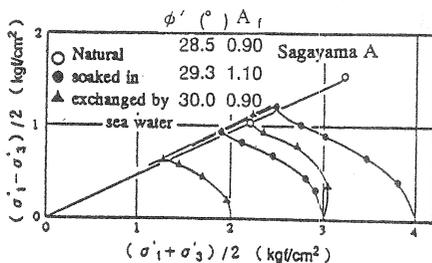


Fig. 13 Stress paths and failure lines of Sagayama A landslide clay replaced pore water with sea water.

認められない。

- 3) せん断特性に与える粒度の影響について考察し、砂間隙比 e_s (=粘土粒子と水の体積/砂粒子の体積) の導入により、砂間隙比が3以下(砂分含有率が30%以上)になると、砂粒子のせん断抵抗の影響が大きくなることを明らかにした。
- 4) せん断特性に与える吸着イオンの影響について考察し、海底粘性土の交換性陽イオンの量は、地すべり地粘性土の量より卓越していることや、粘土の保水能力を高めること、有効応力規準のせん断抵抗角 ϕ' を増加させること、破壊時間隙水圧係数 A_f を増大させることを明らかにした。

謝辞 試験機の改良のために、愛媛大学工学部機械実習工場の関係諸氏にお世話になった。リングせん断試験機の設計は、愛媛大学工学部技官の二神治氏による。実験遂行のため、元愛媛大学大学院生矢野勝敏氏、元愛媛大学工学部学生松本洋一氏、石川敏宣氏、越智洋秀氏をはじめとして、試料提供、ご指導賜った関係機関、諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢田部龍一、八木則男、榎明潔：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性、土木学会論文集、第436号/Ⅲ-16、pp. 93~101、1991.
- 2) Skempton, A. W. :Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3~18, 1985.
- 3) J. F. Lupini, A. E. Skinner and P. R. Vaughan :

The drained residual strength of cohesive soils, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 181~213, 1981.

- 4) 玉田文吾：地すべり面のせん断強度常数と粘土鉱物の関係、地すべり、Vol. 20, No. 4, pp. 7~13, 1984.
- 5) 濱崎英作、守随治雄、白石一夫：地すべり粘土の残留強度とX線分析結果(スメクタイト含有量)の比較、第26回地すべり学会研究発表講演集、pp. 54~57、1987.
- 6) 宜保清一：すべり面付近泥岩の残留強さ-残留せん断抵抗角 ϕ_r と塑性指数 I_p との関係一、第24回土質工学研究発表講演集、pp. 595~596、1989.
- 7) 八木則男、矢田部龍一、向谷光彦：粒度が不連続な土の強度特性、土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 123~128、1993.
- 8) 八木則男、矢田部龍一、向谷光彦：不連続粒度を有する土の強度特性、愛媛大学工学部紀要、Vol. 13, pp. 81~88、1994.
- 9) 八木則男、矢田部龍一、向谷光彦：不連続粒度を有する土の強度特性、第46回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、pp. 374~375、1994.
- 10) 八木則男、矢田部龍一、榎明潔、石井朋紀：第三紀泥岩の強度特性に与える溶脱の影響、土質工学会四国支部技術・研究発表会発表論文集、pp. 25~26、1992.
- 11) 矢田部龍一、八木則男、榎明潔：破碎帯地すべり粘土の力学特性、土木学会論文集、第406号/Ⅲ-11、pp. 43~51、1989.