

# 有効応力規準による粘性土の強度特性について

八木則男<sup>1</sup>・矢田部龍一<sup>2</sup>・向谷光彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 愛媛県松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

<sup>3</sup>正会員 工博 (財)大阪土質試験所

本論文は、有効応力規準による粘性土の強度定数に与える乱れ、応力履歴、主応力の回転、ならびに中間主応力の影響について検討し、また、海成および地すべり地の粘性土のせん断抵抗角を調べたものである。その結果、日本の粘性土は大半が  $c'$  および  $c_e$  がほぼゼロであり、 $\phi'$  は乱れ等の影響を殆ど受けないこと、また、海成の粘性土の  $\phi'$  は地すべり地のそれと比べて  $10^\circ$  程度大きいこと等が分かった。

**Key Words :** strength parameters, clay, undrained strength, triaxial test, plane strain test

## 1. まえがき

粘性土の非排水強度は有効応力規準による見かけの強度定数  $c'$ 、 $\phi'$  と Skempton の破壊時間隙圧係数  $A_r$  により求められることが知られている。しかし、設計に際して非排水強度は一軸圧縮試験により求められたものが使用されている。それは強度定数や間隙水圧係数を用いて非排水強度を求めることが煩雑であるからである。また、異方圧密三軸圧縮・伸張試験、平面ひずみ圧縮・伸張試験等の圧密非排水せん断試験によって得られたせん断強度をそのまま用いるいわゆる全応力法が用いられているものもある。これらは、得られた圧縮強度と伸張強度の平均値をもって地盤の非排水強度とするという観点に立脚している。また、正規圧密領域における強度増加率算定にも主眼が置かれている。

ところで、一軸圧縮試験にも様々な問題があることが知られている。一つは応力解放と機械的な乱れにより実地盤の強度より小さな強度を示すという要素試験としての問題である。一軸圧縮試験の問題点解決のために多くの研究がなされているが、まだ十分な成果は得られていない。もう一つの問題は実地盤の安定解析を行う際の問題である。

地盤の安定解析を行う場合の問題点としては2点ある。一つは何れのせん断試験にも共通していることであるが、すべり面上の応力状態を再現できていないことである。すべり面上の応力状態を再現してせん断試験を行うためには、ねじりせん断試験機や著者等が試

した任意の応力制御型せん断試験機等が必要である。このとき、 $\phi'$  と  $A_r$  に及ぼすせん断試験機の相違の影響を無視することはできない。しかし、実際問題として  $\phi'$  と  $A_r$  を調べられるせん断試験機は、三軸圧縮試験機であると考えられる。したがって、三軸圧縮試験機により求められた  $\phi'$  と  $A_r$  が基準になるパラメータになれば都合がよい。そこで、三軸圧縮試験機とすべり面の応力状態を再現できるせん断試験機から得られるパラメータの相違についても調べておく必要がある。もう一つの問題は、非排水強度解析を行う場合でもすべり面は円形ではなく、また、すべり面では最大せん断強度が発揮されている訳ではないということである。一般に、飽和粘性土地盤を対象にして非排水強度解析を行う場合には円形すべり面が採用されている。しかし、すべり面の形状は  $\phi'$  と  $A_r$  により決まると考えられる。したがって、非排水強度解析も厳密には一軸圧縮試験により求めた非排水強度を用いて行うより、 $\phi'$  と  $A_r$  を用いる方が望ましい。

粘性土の非排水強度を  $c'$  と  $\phi'$  それと  $A_r$  を用いて決定する際に個々のパラメータが大きく変化するならば非常に煩雑となる。しかし、日本の粘性土は真の粘着力  $c_0$  がほぼゼロであるものが大半であると思われる。 $c_0$  がゼロであれば  $c'$  もゼロである。また、 $\phi_0$  は応力状態の変化の影響を受けにくいと思われる。ここで、 $c_0$  と  $\phi_0$  について簡単に触れる。これらは、Hvorslev によって示された破壊規準におけるパラメータであり、飽和粘性土では同一含水比を有していれば、 $c_0$ 、 $\phi_0$  は等しい値を有することから導かれた。以上のことが

ら考えると  $c'$  がゼロであれば  $\phi'$  も乱れや応力状態の影響を大きくは受けないと思われる。もし、 $c'$  と  $\phi'$  が一つの粘性土に対して一つに決まるならば、応力状態の変化や乱れの影響等は、全て  $A_r$  の変化として評価できることになる。したがって、乱れや応力状態の変化と  $A_r$  との関係を明らかにしておけば非排水強度を比較的に容易に推定でき、十分実用に用いることができると思われる。

本報告では、 $c'$ 、 $\phi'$ 、 $A_r$  の内、 $c'$  と  $\phi'$  に与える乱れや応力履歴、主応力の回転ならびに中間主応力の影響を検討した結果と日本各地の粘性土の  $\phi'$  について検討した結果を述べる。なお、 $A_r$  に関しては別の機会に報告する。

## 2. $c'$ と $\phi'$ に与える乱れと応力履歴の影響

### (1) 試料および試験方法

有効応力規準による強度定数  $c'$  と  $\phi'$  に影響すると考えられるものは①乱れ、②応力履歴、③主応力の回転、④中間主応力等である。本章では乱れと応力履歴の影響に関して述べる。乱れと応力履歴の影響に関しては三軸圧縮試験により調べた。

試料としては海成の不かく乱粘性土、湖成の不かく乱粘性土、それと地すべり地のすべり面の不かく乱粘性土ならびに断層破砕帯の不かく乱粘性土を用いた。海および湖の沖積粘性土供試体はボーリングコア内に取り込まれたものを出来るだけ乱さないように採取し、地すべり地および断層破砕帯の粘性土はブロックサンプリングした試料より採取した。海成粘性土は舞鶴港の試料であり、湖成の粘性土は高知県伊野町の宇治川の護岸部からサンプリングしたものである。X線回折による鉱物分析によればクォライトを多く含んでおり、護岸工事の際に崩壊をしばしば起こしている。地すべり地の粘性土は徳島県祖谷山村の善徳地すべり地の集水井掘削時に採取した黒色片岩の風化したものである。断層破砕帯の粘性土は和歌山県下津町の切土のり面の露頭より採取したもので、蛇紋岩の破碎した粘性土である。物性をTable 1に、粒度分布をFig.1に示す。地すべり地粘性土および断層破砕帯の粘性土は礫分と砂分をかなり含んでいる。

行った試験は圧密非排水条件の三軸圧縮試験である。何れの試料もモンモリロナイトのような透水性の低い粘土鉱物を含んでいないか含んでいても僅かであると考えられたので、軸変位速度は0.0625mm/minで行った。以下のせん断試験を含めて、地盤工学会基準のひずみ速度がほぼ0.1%/minになるように設定した。

用いた供試体は次のようである。ボーリングおよびブロックサンプリング試料から不かく乱状態で成形した不かく乱供試体(UNC)、それを液性限界以上の高含水

Table 1 Physical properties

Specimen	Sampling depth G.L.-(m)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$	$G_s$	gradation(%)		
						<2 $\mu$	2 $\mu$ m- 20 $\mu$ m	20 $\mu$ m <
Maizuru	15.1	75.3	21.9	53.4	2.75	35.5	42.1	22.4
Ujigawa	3.4	60.6	26.9	33.7	2.72	12.7	2.8	84.5
Zentoku	25.0	39.2	20.5	18.7	2.72	2.7	18.1	79.2
Simotsu	12.5	28.3	16.4	11.9	2.83	10.0	5.5	84.5
Tobe	-	49.0	27.0	22.0	2.68	24.0	54.0	22.0

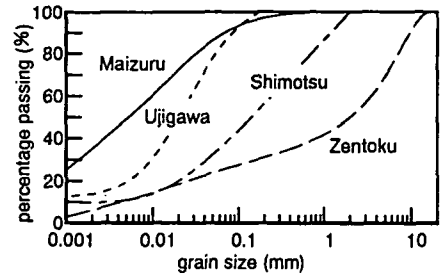


Fig.1 Grain size distribution curve

比で繰り返し、再圧密した正規圧密供試体(NC)と過圧密供試体(OC)である。ここで、NCは78.4kPaで一次元圧密した後、三軸セル内で等方圧密した試料である。また、OCはNCと同様に先行圧密圧力196kPaで圧密後、過圧密比2, 4, 5になるように膨潤させた試料である。

### (2) 試験結果

各試料の有効応力径路の一例と破壊強度線をFig.2~5に示す。なお、Fig.5にはUNCの飽和と不飽和試料(飽和度80%程度)の試験結果も示してある。これから乱れの程度や応力履歴の違いにより有効応力径路は大きく異なるが、今回試験を行った圧密圧力の範囲では破壊強度線はほぼ原点を通る一つの直線で表されると考えても工学的には、大きな相違はないことがわかる。 $c'$ 、 $\phi'$ ともに淡水や海水といった堆積環境の違いあるいは自然堆積や断層破碎、地すべり滑動といった生成環境(原因)の違いによる影響はなく、何れも  $c'$  はゼロであり、 $\phi'$  は乱れと応力履歴によっては変化しない。また、Fig.5から80%程度の飽和度であれば不飽和状態でも  $c'$ 、 $\phi'$  は大きくは変わらないことがわかる。なお、液性限界以下の種々の低含水比で繰り返し再圧密した正規および過圧密粘性土の  $\phi'$  もNC, OCのそれと変わらないことは既に確かめている<sup>1)</sup>。

ここで、液性限界以下の低含水比で繰り返し再圧密した正規および過圧密試料を含めて強度定数を考えなければならないのは、以下の理由による。それは、自然堆積地盤に砂杭を打設したり動圧密工法を施工されたような

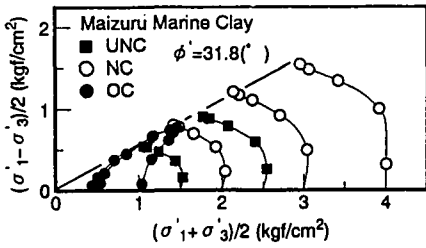


Fig.2 Effective stress passes and failure line

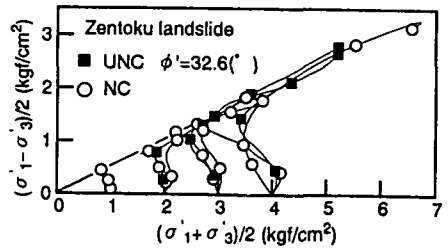


Fig.4 Effective stress passes and failure line

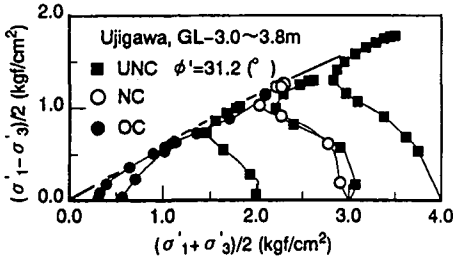


Fig.3 Effective stress passes and failure line

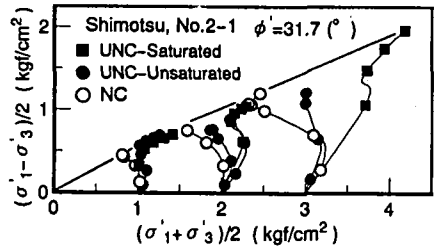


Fig.5 Effective stress passes and failure line

地盤を含めると、従来の長期圧密された粘性土の力学だけでは、地盤の支持力等を評価する事が困難であると考えたためである。そこで、より広範囲な状態変化に対応する強度定数を調べた結果、上記の結論を得た。

不かく乱試料と練り直し試料の  $\phi'$  がほぼ同じであるという性質は地すべり地のすべり面の粘性土の  $\phi'$  を求める際に非常に有用である。これまで地すべり地のすべり面の土のせん断試験はあまり行われていない。以下のことも、その理由の一つである。

一般に地すべり地のすべりは、薄層で起こっている。数cm或いは10数cmといった薄いすべり面の粘性土を不かく乱状態で採取し、せん断試験することは非常に困難である。練り直し再圧密すれば試験は可能であるが、乱した試料に対するせん断試験結果は不かく乱試料の結果と異なり、意味がないと思われる。しかし、上述したことから  $\phi'$  は練り直し試料を用いて求めることができる。このことは、従来からその有用性が指摘されていたが<sup>11, 2)</sup>、地すべり地のすべり面の粘性土に対して著者らの研究により再確認された<sup>3)</sup>。

ボーリング調査は通常の地すべり調査で行われている。すべり面の最低長さ10cm程度の粘土化したコアがあれば、練り直し再圧密して三軸試験が可能であるので  $\phi'$  を求めることができる。また、その際  $c'$  がゼロであれば少ない試験数で  $\phi'$  を求めることができる。地すべり地の安定解析は逆算した強度定数を用いて行われているが、試験により求めた  $\phi'$  を用いれば排水強度解析を行うことができ、地すべり地より詳細な機構の検討が可能と

なる。なお、地すべり地の解析に  $\phi'$  が有効なのは、移動速度が遅く、すべり面の土が排水状態でせん断されると考えてもあまり問題がないからである<sup>4)</sup>。

ここで、地すべりのすべり面の粘性土に見られるような、いわゆる大変形履歴を受けた粘性土の強度は残留強度状態であると考えられることから、それに相当する強度定数  $\phi_r$  を用いて安定性を評価することが考えられる。しかし、一般的に各地すべり地のすべり面粘性土の過去の履歴・堆積環境・すべり層の拘束条件の程度等を正確に把握することは困難である。したがって、地盤の安定性を評価するために残留状態における強度定数  $\phi_r$  とともにピーク強度に相当する強度定数  $\phi'$  を求めておくことは、地盤の現況・現象を理解するうえで重要であると考えられる。

以上のことから  $\phi'$  は三軸圧縮試験に限定すれば乱れや応力履歴に影響されずほぼ一つに定まること、 $c'$  はほぼゼロであることがわかった。

### 3. $c'$ 、 $\phi'$ に与える主応力回転の影響

#### (1) 試料および試験方法

主応力の回転の影響は、試作した任意応力制御型の単純せん断試験機により調べた<sup>9)</sup>。試験機の概要をFig.6に示す。試験機の詳細は省略するが、三軸セル内に単純せん断試験機を入れている構造であり、試料の側面はゴムスリーブで覆われている。試料は砥部焼に用いる陶土を用いた。供試体の大きさは直径5.0cm、高さ2.5cmである。

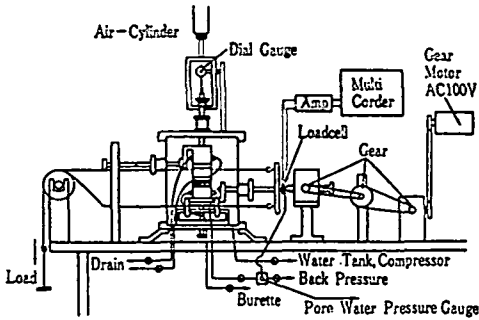


Fig.6 Schematic diagram of simple shear apparatus

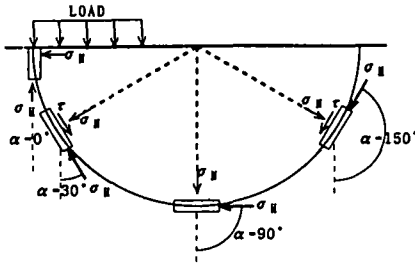


Fig.7 Initial stress conditions of simple shear tests

試料の物性値は、Table 1中に既に示した。なお、上下載荷板の、圧密時の摩擦除去法の詳細も参考文献に詳述してあるが<sup>5)</sup>、圧密試験により圧密時の載荷板の摩擦はほぼ除去されていることを確認している。

実験はFig.7に示す4種類の応力状態に対して行った。供試体は、脱気水を供給しながらセットし、空気が管路等に残留しないように注意しながらゴムスリーブをかぶせた後、排水口から短時間僅かに負圧を作用させ、残留している空気を再度排出させた。初期せん断力を与える場合は、まず所定の圧密圧力まで異方圧密を段階的に行い、ついで、せん断時用の金属歯を供試体に貫入させた後、初期せん断力を段階的に所定の応力まで作用させ、所定の初期応力状態とした。せん断時の変位速度は $1.14 \times 10^{-2}$  mm/minである。

## (2) 試験結果

単純せん断試験では水平面上の垂直応力とせん断応力しか測定していないので破壊面上の応力状態は不明確である。単純せん断試験の応力状態を求めるために幾つかの提案がなされている<sup>6), 7)</sup>。本単純せん断試験機の構造上、水平面のせん断力のみを与える構造であるので平均主応力 $\sigma_m$ の増加はないと考えられる。 $\sigma_m = \text{const}$ とすると初期せん断力が作用している場合の破壊時のモール円はFig.8に示すようである。図は水平面上の初期せん断応力 $\tau_{h0}$ が正の場合と負の場合に分けて示してある。

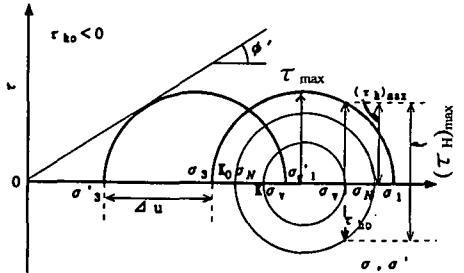
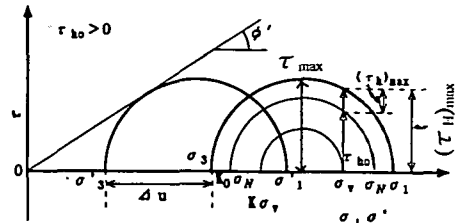


Fig.8 Mohl's stress circle

これから

$$\tau_{\max} = (c_u)_{ss} = \sqrt{\frac{\sigma_N^2 \cdot (1-K)^2}{4} + (\tau_h)_{\max}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{(1+K) \cdot \sigma_N}{2} + \tau_{\max} - \Delta u \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{(1+K) \cdot \sigma_N}{2} - \tau_{\max} - \Delta u \quad (3)$$

$$\sin \phi' = \frac{\tau_{\max}}{(\sigma_N + \sigma_H) / 2 - \Delta u} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ は破壊時の最大せん断応力、 $(c_u)_{ss}$ は単純せん断試験による非排水強度、 $\tau_h$ は水平面上のせん断応力であり、 $(\tau_h)_{\max}$ は破壊時の水平面上のせん断応力、 $\Delta u$ は破壊時の間隙水圧、 $K$ は鉛直方向の垂直応力 $\sigma_N$ と水平方向の垂直応力 $\sigma_H$ との比で $K = \sigma_H / \sigma_N$ である。また、Fig.8中の $K_0$ は静止土圧係数、 $(\tau_h)_{\max}$ は $\tau_{h0}$ と $(\tau_h)_{\max}$ を足したものである。

Fig.9に有効応力径路の一例と破壊強度線を示す。これから破壊強度線に与える主応力の回転の影響は小さく、 $c'$ はほぼゼロで、 $\phi'$ は殆ど変わらないことがわかる。なお、三軸試験により得られた $\phi'$ は33.6°で、本試験結果とほぼ同じであり、試験機の信頼性は高いと思われる。大島等は定体積一面せん断試験により粘土の非排水強度異方性を調べている<sup>8)</sup>。その中で種々の初期応力状態からのせん断試験を行っているが、その試験結果でも主応力の回転による $\phi'$ の変化は殆どみられない。

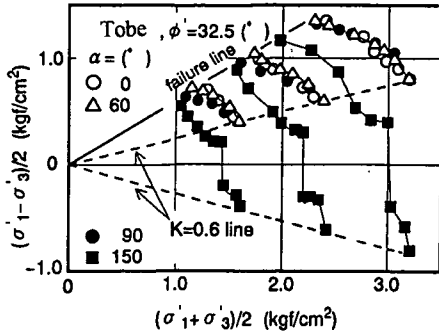
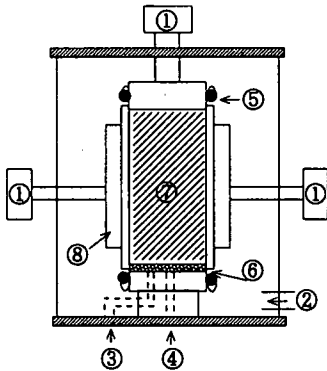


Fig.9 Effective stress passes and failure line



① load cell, ② lateral pressure, ③ measurement of pore water pressure, ④ burette, ⑤ O-ring, ⑥ porous plate, ⑦ specimen, ⑧ acrylic plate

Fig.10 Schematic diagram of plane strain apparatus

#### 4. $c'$ , $\phi'$ に与える中間主応力の影響

##### (1) 試料および試験方法

中間主応力の影響は平面ひずみ試験機により調べた。試作した平面ひずみ試験機の概要をFig.10に示す。平面ひずみ試験機は種々の方式が提案されているが<sup>9), 10)</sup>, 従来の試験機と若干異なる点は $\sigma_2$ を自由に制御できるところにある。つまり、図中の側方ロードセルの外側には、応力制御でも変位制御でも可能なアダプターがあるので、圧密時の側方応力や側方変位を任意に制御できるということである。また、平面ひずみ条件でせん断試験を行うときには、アダプターに取り付けてあるネジを剛に支持棒に締め付けることにより側方変位を小さくすることが出来る。このとき、ダイヤルゲージにて側方変位がせん断試験中に生じていないことを確認している。供試体は、ゴムスリーブで側面が覆われており、最小主応力 $\sigma_3$ は水圧で作用させ、 $\sigma_2$ はゴムスリーブの外側に密着した剛板で作用させている。剛板に作用する荷重を変化させることで任意に $\sigma_2$ を変化させることができる。供試体寸法は2.6×5.2×10.0cmの直方体で、 $\sigma_3$ は幅5.2

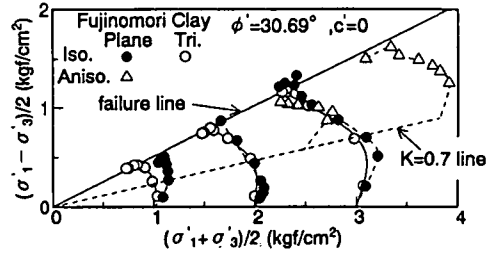


Fig.11 Effective stress passes and failure line

cmの面に、 $\sigma_2$ は幅2.6cmの面にそれぞれ作用する。供試体とベDESTALの間には、シリコングリースを塗り、短冊状に重ね合わせたOHPシートを置き、また、中間主応力 $\sigma_2$ の載荷面にはシリコングリースを塗布して、それぞれ摩擦の軽減を図っている。

試験には藤の森粘性土( $w_L=50.0\%$ ,  $I_p=20.9$ ,  $G_s=2.71$ , Clay Fraction=3.5%)を用いた。実験は全て圧密非排水試験であり、間隙水圧と $\sigma_2$ の変化の測定も行っている。初期の圧密は、等方圧密と異方圧密を行っている。等方圧密は $\sigma_3$ を98, 196, 294kPaの3種類、異方圧密は $K=\sigma_{3c}/\sigma_{1c}=0.7$ で行った。なお、何れも正規圧密状態である。せん断速度は0.088mm/minで行った。

##### (2) 試験結果

Fig.11に有効応力径路と破壊強度線を示す。平面ひずみ試験機ならびに三軸試験機による等方圧密供試体の有効応力径路を比較すると殆ど違いはみられない。今回の供試体のサイズでは供試体の形状の影響はあまり大きくないと考えられる。

平面ひずみ状態と等方圧密状態における有効応力規準による強度定数を比較すると両者で違いは殆どみられない。従来、平面ひずみ試験による $\phi$ の方が三軸試験によるそれと比べて若干大きいといわれていたが<sup>11)</sup>, 本試験結果をみるかぎりではばらつきの範囲内である。これから実用的には中間主応力が変化しても $c'$ はほぼゼロで、 $\phi'$ は変わらないと考えて良いと思われる。なお、中間主応力は載荷中に初期応力状態より若干大きくなる。平均主応力が増加すれば、それに見合う過剰間隙水圧が発生し、結果的に非排水強度が小さくならなければならないが、今回調べた限りでは、違いは殆ど認められない。今後ダイレイタンスー特性などの詳細な検討が必要である。

#### 5. 有効応力規準による飽和粘性土の粘着力について

以上の試験結果に示した以外にも著者等は、日本各地の20種類におよぶ海成粘性土と100種類近い変成岩地帯

Table 2 Physical properties

Kaoline fraction (%)	Montmorillonite fraction (%)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$	$G_s$	gradation (%)		
						<2 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$ -20 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$ <
100	0	41.3	13.3	28.0	2.71	28.7	63.0	8.3
95	5	47.7	16.0	31.7	2.71	32.3	59.9	7.8
90	10	54.2	18.7	35.5	2.71	35.9	56.7	7.4
80	20	67.0	24.1	42.9	2.70	43.0	50.4	6.6
70	30	79.9	29.5	50.4	2.70	50.2	44.1	5.7

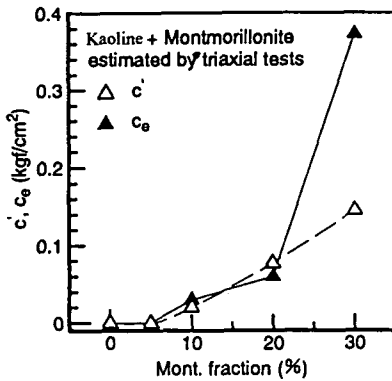


Fig.12 Relationships between  $c'$ ,  $c_e$  and Montmorillonite content

の地すべり地粘性土の  $c'$  を調べた結果、全ての試料に対してほぼゼロであった。また、日本の海成粘性土に対してこれまで調べられた結果をみても  $c'$  はほぼゼロのものが多い<sup>12), 13)</sup>。これから日本の海成粘性土と変成岩地帯の粘性土では、真の粘着力を有しているものは非常に少ないと思われる。真の粘着力を有していなければ  $\phi'$  と  $A_L$  により土の非排水強度が決まるので実用的には非常に有意義であるが、日本の大半の粘性土が  $c_e$  あるいは  $c'$  を実際に有さないか否かに関しては充分検討しておく必要がある。ここで、Hvorslev規準の強度定数の考え方については既に述べた。

真の粘着力を有すると思われる代表的な粘土鉱物としてはモンモリロナイトが考えられる。そこで、カオリンとモンモリロナイトを混合した人工粘土に対するせん断試験を行い、モンモリロナイト含有率と  $c_e$  の関係を調べた。

(1) モンモリロナイト含有率と  $c_e$  の関係

試料には市販のカオリンとモンモリロナイトを用いた。物性をTable 2に示す。供試体はカオリンとモンモリロナイトを所定の割合（モンモリロナイト含有率）で混ぜ合わせて作成した。

行った試験は圧密非排水条件の三軸圧縮試験であり、軸変位速度は0.044mm/minである。

Table 3 Results of X-ray analysis

Sample	Depth (m)	Mont.	Fel.	Chl.	Mica & Ill.	Qz.	grain size
Rokko	15.0-15.8		+		-	+	Natural
	29.0-29.9		-	+	*	-	Natural
	31.0-31.9	-	-	-	-	+	Natural
	34.0-34.9				+	+	<420 $\mu\text{m}$
	35.0-35.9	-	+		-	*	<420 $\mu\text{m}$
	36.0-36.9	-	-	+	+	-	Natural
	37.0-37.9	-	*		+	*	<420 $\mu\text{m}$
	38.0-38.9	-	-		*	-	Natural
	39.0-39.9	-	-	-	+	-	Natural
	40.0-40.9	-	*	-	-	*	Natural
	78.0-78.9	-	-	+	-	-	Natural
	82.0-82.9	-	-	+	+	*	Natural
86.0-86.9		*		+	+	Natural	
Haneda	12.0-12.8		*	+	+		Natural
	15.0-15.7		-		-	+	Natural
	21.3-22.1	-	-		+	*	Natural
	22.0-22.8				*	-	<420 $\mu\text{m}$
	24.2-25.0	-	*		-	-	Natural
	26.5-27.3	-	-	+	+	-	Natural
	28.7-29.5	-	-		+	-	Natural
39.4-40.2	-	*	-		+	Natural	
Itsukaichi	13.0-13.8		*	-	-	+	<420 $\mu\text{m}$
Maizuru	14.3-15.1	-	+		-		<420 $\mu\text{m}$

\*: rich, +: medium, -: low  
 Mont.: Montmorillonite, Fel.: Feldspar, Chl.: Chlorite,  
 Ill.: Illite, Qz.: Quartz

Fig.12にモンモリロナイト含有率と  $c'$  および  $c_e$  の関係を示す。モンモリロナイト含有率が増加すると共に  $c'$  および  $c_e$  が大きくなる傾向がある。しかし、モンモリロナイト含有率が5~10%程度より少なければ  $c'$  はほぼゼロと考えて良い。

以上のことからモンモリロナイトが含まれていはいくらかの  $c'$  を有することが予想されるので、日本の20種類程度の海成粘性土試料の粘土鉱物分析を行った。鉱物分析はX線回折により行った。X線回折線は粉末法により、無処理とエチレングリコール処理、加熱処理した試料に対して行った。

Table 3に一覧表を示す。含まれている鉱物は長石、雲母、石英、クロライト、イライト、モンモリロナイトなどである。長石、石英、モンモリロナイト等の一次鉱物が多く含まれており、粘土鉱物の含有量は少ない。モンモリロナイトも大半の試料に含まれるが量的には僅かである。しかし、 $c'$  に影響するほどの含有量ではないと思われる。また、変成岩地帯の地すべり地の粘性土の鉱物分析でもモンモリロナイトが含まれているものは殆どないことは既に確かめている<sup>14)</sup>。

6. 海成粘性土と地すべり地粘性土のせん断抵抗角

(1) 試料および試験方法

日本の海成粘性土や変成岩地帯の粘性土では  $c'$  がほ

ぼゼロであること、また、 $\phi'$  は乱れや応力状態の影響を受けにくい材料定数であることが明らかになった。したがって、各種粘性土の $\phi'$ の一般的特性を把握しておくことは工学的に非常に有用である。

そこで、日本の各種の粘性土のせん断抵抗角を調べた。なお、対象とした土は工学的に多くの問題を引き起こしている地すべり地のすべり面の粘性土と海成の沖積粘性土である。海成粘性土のデータの一部は、文献から引用したものが含まれている<sup>13)</sup>。したがって、一部データについては粒度か塑性指数のいずれかのみ情報しか得られなかったものが含まれる。地すべり地の粘性土試料は、三波川帯と御荷鉾帯の変成岩帯のものが大半で、第三紀層の泥岩および砂岩地帯のものも一部含まれており<sup>15)</sup>、全てのデータは実際に試料を入手し、せん断試験を行った結果である。

行った試験は圧密非排水三軸圧縮試験である。海成粘性土の多くは不かく乱試料を使用した。地すべり地の試料に関しては大半が420 $\mu$ mの篩を通過した細粒分を繰り返し再圧密したものを用いている。軸変位速度は何れも0.0625mm/min程度である。

## (2) 試験結果

粘性土の $\phi'$ は粘土鉱物、粒度、吸着イオン等により大きく異なると思われる。 $\phi'$ を土の基本的物性と関係づけておけば非常に有意義である。そこで、 $\phi'$ と塑性指数 $I_p$ および粘土分含有量CF (<2 $\mu$ m)の関係をFig.13, 14に示す。

これから日本の海成粘性土の $\phi'$ は30~50°程度であることがわかる。 $I_p$ が大きくなれば $\phi'$ が小さくなるような傾向は認められない。また、粘土分含有量との関係をもみてもCFが大きくなれば $\phi'$ が小さくなるといった傾向も認められない。

地すべり地のすべり面の粘性土の $\phi'$ は20~35°程度であり、海成粘性土のそれと比べると10°程度小さい。これが地すべりが緩斜面で起こっている理由の一つである。 $\phi'$ と $I_p$ やCFとの関係をみると海成粘性土と同様に $\phi'$ は $I_p$ やCFと殆ど無関係であるといえる。

以上のことから、陸地にある粘性土が海中で堆積すると $\phi'$ が大きくなる傾向があることが分かった。しかし、その理由は定かではない。吸着イオンの分析や、粘土鉱物分析、元素分析を行って検討する必要がある。なお、 $\phi'$ を基本的物性から推定しようとするには無理があるので、個別に試験を行って求めるべきである。

## 7. あとがき

有効応力規準による強度定数に与える乱れと応力履歴、主応力の回転、中間主応力の影響をせん断試験結果に基

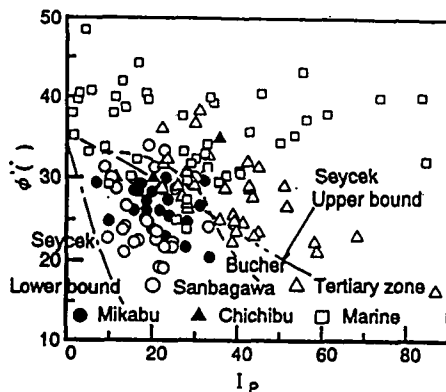


Fig.13 Relationships between  $\phi'$  and  $I_p$

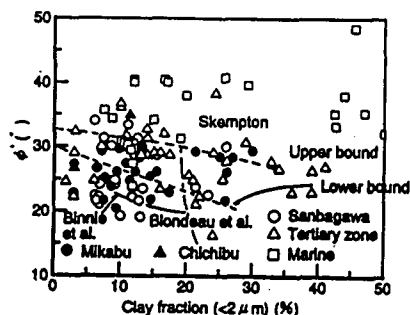


Fig.14 Relationships between  $\phi'$  and clay fraction

づいて検討した。また、日本各地の海成粘性土と地すべり地の粘性土の $\phi'$ を調べた。得られた結果は次のようである。

1) 日本の粘性土では真の粘着力を持っているものは少なく、今回試験した程度の通常の圧密圧力下では実用的に $c'$ はゼロと考えてよい。カオリンにモンモリロナイトを含んだ人工試料に対するせん断試験結果では、モンモリロナイト含有率が5%程度以下では、 $c'$ はほぼゼロである。

2) 海成および淡水成の沖積粘性土、地すべり地のすべり面粘性土、断層破碎帯の粘性土に対する三軸試験の結果、 $\phi'$ は乱れや応力状態の影響を殆ど受けないことが明らかになった。また、繰り返し再圧密試料に対するせん断試験の結果、主応力が回転したり、中間主応力が変化しても $c'$ はほぼゼロで、 $\phi'$ は殆ど変化しないことがわかった。

3) 海成粘性土と比べて地すべり地のすべり面の粘性土の $\phi'$ は10°程度小さい。詳しい理由は分からないが、これが地すべりが緩斜面で発生している理由の一つである。なお、日本の粘性土の $\phi'$ は $I_p$ やCFと強い相関はないことも分かった。

本研究を行うに際して試料採取に協力いただいた関係

機関ならびに関係各位に感謝いたします。また、試験機の設計は愛媛大学工学部技官二神治氏が、製作は愛媛大学工学部機械実習工場で行った。実験の多くは、愛媛大学工学部土木海洋工学科の卒業生による。

#### 参考文献

- 1) 八木則男, 矢田部龍一, 松村真一郎: 繰り返し時含水比の異なる再圧密粘土の力学特性, 土木学会論文報告集, 第330号, pp. 96-106, 1983.
- 2) 農林水産省構造改善局: 土地改良事業計画設計基準, pp. 34-35, 1989.
- 3) 矢田部龍一, 八木則男, 榎明深, 中森克己: 地すべり粘土の強度特性, 地すべり, 第28巻, 第1号, pp. 9-16, 1991.
- 4) 矢田部龍一, 八木則男, 榎明深: 有効応力よりみた地すべりのすべり層の粘性土の強度特性, 地すべり, 第28巻, 第2号, pp. 20-26, 1991.
- 5) 八木則男, 矢田部龍一: 応力の制御が可能な単純せん断試験機の試作, 土と基礎, Vol. 31, No. 7, pp. 23-27, 1983.
- 6) Duncan, J. M. and Dunlop, P. D.: Behavior of soils in simple shear test, Proc. 7th ICSMFE, Vol. 1, pp. 101-109, 1969.
- 7) Roscoe, K. H., Basset, R. H. and Cole, E. R. L.: Principal axes observed during simple shear of a sand, Proc. Geotechnical Conf., Oslo, Vol. 1, pp. 231-237, 1967.
- 8) 大島昭彦, 高田直俊, 岩崎哲, 村中一郎: 一面せん断試験による粘土の非排水強度異方性, 土質工学会, 直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集, pp. 211-218, 1995.
- 9) Pearce, J. A.: A new true triaxial apparatus, stress strain behavior of soils, Proc. Roscoe Memorial Sympo., pp. 330-339, 1971.
- 10) Ko, H. Y. and Scott, R. F.: A new soil testing apparatus, Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 40-57, 1967.
- 11) Shibata, T. and D. Karube: Influence of the intermediate principal stress on the mechanical properties of normally consolidated clay, Proc. 6th ICSMFE, Vol. 1, pp. 359-363, 1965.
- 12) 土田孝: 三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 688, pp. 169-193, 1990.
- 13) 大植正紀, 堀越伸幸, 坪田幸雄, 山本竜太郎: 漁港地区のサンプリング土の非排水強度特性, 水工研研報, 13, pp. 31-56, 1992.
- 14) 矢田部龍一, 八木則男, 榎明深: 破砕帯地すべり地粘性土のリングせん断特性, 土木学会論文集, 第436号/III-16, p. 93-101, 1991.
- 15) 八木則男, 矢田部龍一, 向谷光彦: 海底粘性土と地すべり地粘性土の力学特性, 地盤と建設, Vol. 12, No. 1, pp. 79-85, 1994.

(1995. 11. 17 受付)

## EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON STRENGTH PARAMETERS IN TERMS OF EFFECTIVE STRESS OF CLAY

Norio YAGI, Ryuichi YATABE and Mitsuhiko MUKAITANI

The influence of the disturbance, stress history, rotation of principal stress and intermediate principal stress on the strength parameters in terms of effective stress of clay were investigated experimentally. The apparent cohesion  $c'$  and  $c_e$  of clayey soils in Japan were nearly zero. It was clear that apparent cohesion  $c'$  and  $c_e$  of soil which a montmorillonite content was less than 5% were nearly zero. The effective angle of friction  $\phi'$  didn't change by the disturbance, stress history, rotation of principal stress and intermediate principal stress. The  $\phi'$  of soil at the slip surface of a landslide was relatively small, about 20-35°. This is one of the reason that the landslide occur at the gentle slope.