

# 異方性粘土の二・三の力学特性について

村山 朔郎・栗原 則夫

## SOME MECHANICAL PROPERTIES OF ANISOTROPIC CLAY

By *Sakuro MURAYAMA* and *Norio KURIHARA*

### Synopsis

To investigate the influence of anisotropy of the clay on the undrained shear strength, consolidated undrained triaxial shear tests were performed on two kinds of cylindrical samples trimmed vertically and horizontally from the artificially sedimented kaolin clay.

The sedimented kaolin clay was made by the following procedure: kaolin clay was mixed with 0.01N  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solution and sedimented from a dilute suspension whose clay content was about 10 weight %. Orientation of clay particles was measured by using X-ray diffraction and it was found that particles in the sedimented clay orientated parallel to the horizontal bedding plane.

For normally consolidated samples, the undrained shear strength of vertically cut samples was almost equal to that of horizontally cut ones, and for overconsolidated samples, the former was greater than the latter.

It is concluded that anisotropy with respect to undrained strength of anisotropic clay is mainly attributed to the character of tendency of volume change due to shear.

### 1. ま え が き

実際の粘土地盤中に非排水状態でセン断破壊が生じる場合、破壊面で発揮されるセン断強度はその破壊面の方向によって異なることがある。これは、その粘土の構造の異方性、または粘土の応力履歴の異方性、あるいはその両方によって生じるものと考えられている。

一般に粘土の堆積時に平板状粒子が分散 (dispersion) を生じるような条件がある場合や、多くの土がそうであるように堆積後一次的な圧密を受けた場合には、扁平な粘土粒子は一定の方向に配列し、その結果粘土は巨視的にみて異方性をもつ。普通この異方性は直交異方性であって、扁平な粒子は圧密方向と直角に、すなわち水平に平行配列している。このような異方性の粘土地盤中に非排水セン断破壊が生じる場合、破壊面の方向によって発揮されるセン断強度が異なることが予想される。事実、自然粘土地盤中から軸がいろいろな方向に傾いた供試体を採取して行なった非排水セン断試験において強度の異方性があることが、かなり報告されている (例えば、Hvorslev (1960)<sup>1)</sup> Lo(1965)<sup>2)</sup> Duncan and Seed (1966)<sup>3)</sup> など)。

実際問題として異方性粘土地盤に斜面をつくる場合、安定計算に際してどのように異方性の影響を考慮に入れるかは重要な問題となってくる。Lo<sup>2)</sup>は破壊面の方向によるセン断強度の変化が簡単な数式で表わされる場合について、安定係数を計算しているが、それによると、きつい勾配の斜面では異方性の影響は小さいが、斜面がゆるくなるにつれてその影響は重要となる。また異方性が増すほど、潜在スベリ面は円弧から逸脱してくる。

この研究では、粘土の異方性が非排水セン断強度に及ぼす影響を調べるため、人工的に作った異方性粘土

について圧密非排水試験を行なった。

## 2. 試 料

用いた粘土は市販のカオリン粘土で、その物性は **Table 1** の通りである。試料は、まず粘土と 0.01N  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液で粘土含有率10%の懸濁液を約 120 l 作り、これを内径 25 cm, 高さ約 2 m の円筒容器に入れて静置して自然堆積させ (水温 30~32°C), 容器底部に堆積した粘土をその後1カ月間溶脱 (leaching) してイオンを除去した後、2 kg/cm<sup>2</sup> の圧力で先行圧密したものである。なお、X線回折においては、4 kg/cm<sup>2</sup> で先行圧密した試料を用いた。こうして得られた試料は、後述するように平板状粒子が水平方向に平行配列していることが確かめられた。すなわち、この堆積試料は異方性である。

Table 1 Properties of kaolin clay.

Specific gravity	2.725
Liquid Limit	48%
Plastic Limit	29.4%
<2 $\mu$ fraction	30%

## 3. 粉子配列の測定

広範囲な含水比における粘土-水系の挙動は、いわゆる構造 (structure) の概念によって説明される。構造とは、粒子の幾何学的配列とそれら粒子間に作用する物理化学的力の総称として定義される。粒子の幾何学的配列は粒子配列 (fabric) と呼ばれ、もっとも測定しやすい構造の成分である。

粒子配列の測定の問題は、実際上次の四つの問題と関連する。すなわち、(1) 測定方法に関する問題、(2) 実際の粘土中の粒子配列を乱さないで測定用の供試体を得る問題、(3) 粘土鉱物の諸性質を調べる問題、および (4) 粒子配列を定量的に表わす問題、である。Mitchell (1956)<sup>4)</sup> は、乱さない自然粘土試料の水をポリアルコールで徐々に置換することによって、もとの粒子配列の攪乱を最小限にとどめた固い混合物をつくり、それから削った薄片供試体の顕微鏡写真から粒子配列を定量的な尺度で表わす方法を考案した。Martin (1966)<sup>5)</sup> は、Mitchell と同じような方法で作ったカオリナイトの供試体の平滑に磨いた表面についてX線回折を行ない、得られた回折図の適当な反射のピークの値の比によってその表面付近での粒子配列を定量的に表わしている。もとの粒子配列を保存した供試体を作る方法として、他に、供試体を凍結して真空中で水を昇華させる方法を用いた実験例もある。

ここでは Mitchell, Martin の方法にならって、堆積粘土から注意深く切り出した小さな直方体の供試体 (3×3×1 cm) を融解したカーボワックス No. 600 (ポリエチレン・グリコール) 中に浸す方法を用いた。このワックスは 65°C で液体状であって、水と完全に混合する。また室温ではモース硬度が1度 (滑石の硬さ) の固体である。十分な時間の後には、粘土中の水と融解したワックスは拡散によって一様な混合物をつくる。ここでは約2週間ワックス中に浸した後、供試体を取り出して徐々に室温まで冷却した。X線回折においては、供試体表面が完全に平滑であることが必要であるから、できるだけ平滑な表面を得るため、サンドペーパーの目の粗いものから細かいものに順次使い変えながら表面を磨き、最後にガラス板で灯油にとかしたカーボランダム No. 600 の粉末によって磨いた。ここで用いた堆積試料は、物理化学の知識と予備実験から、平板状の粒子が水平に平行配列していると考えられる。すなわち、堆積時の水平断面には粒子の平板面が多く露出しており、鉛直断面には粒子の端面が多く露出しているであろう。したがって、試料の堆積時の水平断面と鉛直断面の粒子配列を保存するように作った供試体表面について得られるX線回折図には、各 (hkl) 反射の消滅や強調によって差があらわれるであろう [(注) ミラーの記号]。この差から半微視的な粒子配列の様子を知ることができる。

ところで粒子配列の両極端としては、粒子平板面が完全に平行な配列 (平行配列) と平板面の方向がラン

ダムな配列（ランダム配列）がある。この二つの配列は一般の粘土の粒子配列の様子を知る上で参考になる。ランダム配列をもつ試料としては、カオリン粘土の乾燥粉末をX線回折用の窓付きカバーガラスにへらで詰め込んで表面を平らに成形したものを用いた。また平行配列を得るには、Martinの実験で最も適当と認められた方法に準じて次のようにした。まずカオリン粘土を0.01N  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液で粘土含有率10%（重量パーセント）の懸濁液をつくり、ミキサーで約1時間攪拌する。ピペットでこの懸濁液0.5ccを採取し

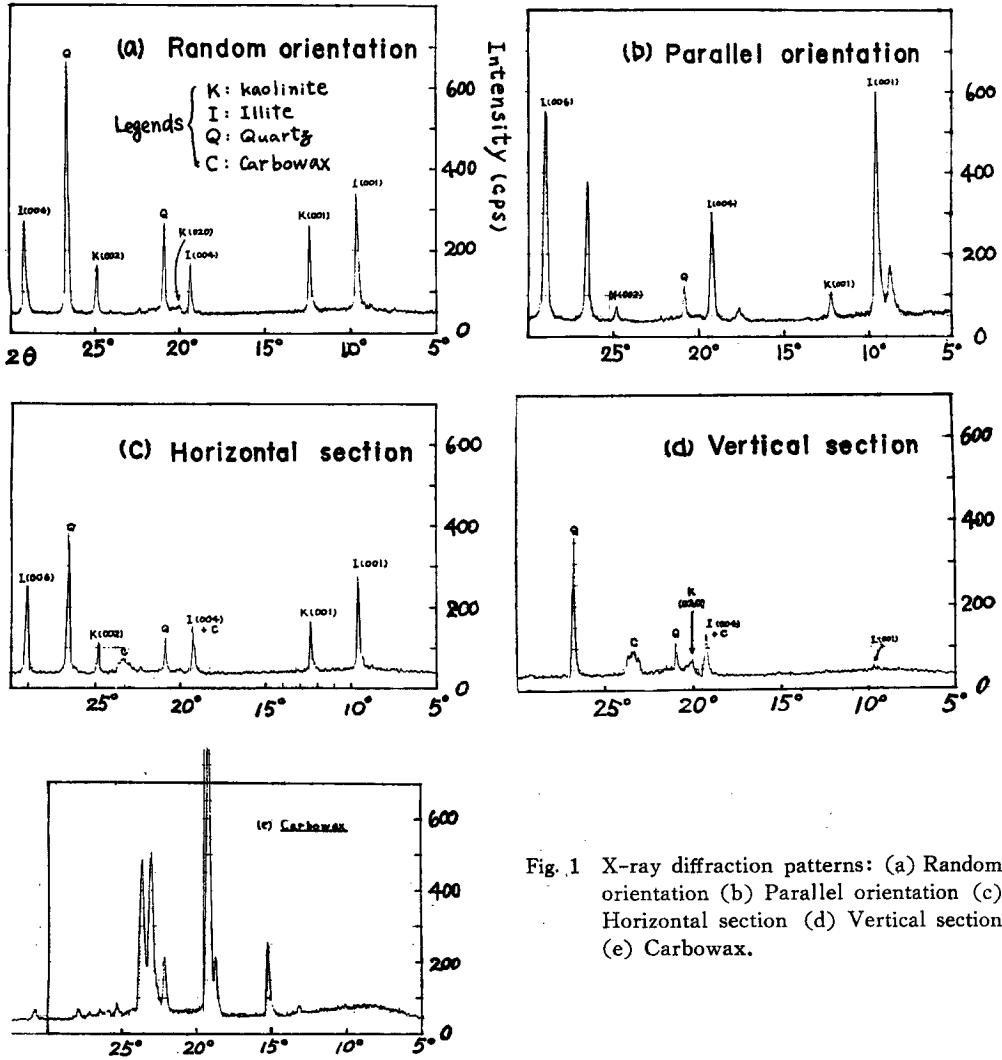


Fig. 1 X-ray diffraction patterns: (a) Random orientation (b) Parallel orientation (c) Horizontal section (d) Vertical section (e) Carbowax.

てカバーガラス上に点滴し、室内で1日以上自然乾燥した後、デシケーター中で十分乾燥させた。ガラス板上には、平板状粒子がガラス面に平行に重なっている。

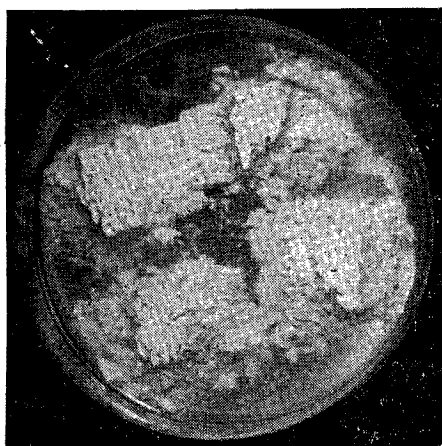
Table 2 にX線回折の測定条件, Fig. 1 に上述のランダム配列 (a), 平行配列 (b), および前記の方法で得た人工堆積粘土試料の水平断面 (c), 鉛直断面 (d), さらにカーボワックス (e) の代表的な回折図を示す。まず (a) (b) を比較すると、どちらも同じ  $2\theta$  (X線の入射角) に反射のピークがあらわれ

Table 2 Conditions of measurement for X-ray diffraction.

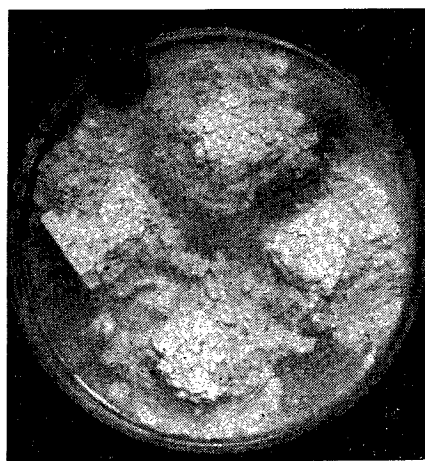
Apparatus	Shimazu Recording X-Ray Diffractometer
Scanning speed	1/2°/min
Full scale	1000 cps
Time constant	1.25 sec
Divergence slit	1.00 mm
Receiving slit	0.08 mm
X-ray	$CuK\alpha$ (at 40kV, 20mA)

ているが、(b)の方が(001)ピークの大きさが大きい。ところで反射の強さは、主としてX線で照射される供試体表面の部分の粒子の密度と、その供試体中での粒子配列によって決まる。したがって、(a)(b)の場合、供試体の密度が異なるからピークの大きさを直接比較してもあまり意味がない。しかし、石英の粒子は粘土粒子のように扁平でなく角ばっているから、粒子配列の方向性はあまり考えられない。また、供試体の一定の体積中に含まれる石英粒子の割合は一定であると考えてもあまり無理はないであろう。したがって、各図における各ピークの値の石英のピークの値に対する相対的な大きさによって、各ピークの値の大体の比較ができる。それによると、イライトの(001)反射、(004)反射、および(006)反射は、それぞれ(b)の方が(a)より明らかに大きい。カオリナイトの(001)反射、(002)反射は、(a)(b)であまり差がない。このこととイライトの方がカオリナイトより扁平な形状をしていることを考えると、(b)の方が供試体表面に粒子の平板面がより多く露出していると推定できる。

次に(c)(d)を比較すると、両者には明らかな差異がみられる。(c)(d)は同一試料から採った供試体から得られたデータであり、しかも石英の反射ピークの大きさがほぼ等しいから、各ピークの値を直接比較できる。(c)ではイライトの(001)反射と(006)反射、カオリナイトの(001)反射と(002)反射があらわれているのに対して、(d)ではそれらはほとんどあらわれていない。また、(c)ではカオリナイトの(020)反射のピークがないが、(d)ではかなりの大きさを示している。 $2\theta=19^{\circ}15'$ のところには、(c)(d)ともに反射ピークがあらわれているが、(e)からわかるように、この点にはワックスのピークが重なっている。これらのことから、水平断面には粒子の平板面((001)面)が多く露出しており、鉛直断面には粒子端面が多く露出していることがわかる。なお、ワックスの浸み込み、供試体表面を磨くことによる粒子配列の攪乱については、Martinの実験でほとんど影響がないことが確かめられている。



(a) vertical section



(b) Horizontal section

Photo. 1 Slaking tests on sedimented samples.

X線回折によって、ここで用いた堆積粘土は堆積時の水平面に平行な粒子配列が卓越した異方性をもつことが確かめられたが、同じ材料を水中に浸したとき生じたひび割れの様子からも異方性が推察された (Photo. 1)。

#### 4. 圧密非排水試験

##### 4.1 実験方法

前記2.の方法で得た異方性粘土中から供試体軸の方向が  $90^\circ$  違う2種類の3軸供試体 (直径, 3.57cm, 高さ 7.95cm) を採取して、圧密非排水せん断試験をした。供試体としては、軸が堆積時の鉛直方向に一致したもの (以下V供試体と呼ぶ) と、軸が堆積時の水平方向に一致したもの (以下H供試体と呼ぶ) を用いた。各供試体について、正規圧密のものは等方応力  $\sigma_e=3, 4, 5\text{kg/cm}^2$  で圧密した後、過圧密のものはすべて  $5\text{kg/cm}^2$  で先行圧密して  $\sigma_e=0.5, 1, 2\text{kg/cm}^2$  で膨潤させた後、それぞれ非排水せん断した。圧密は、まず  $1\sim 2\text{kg/cm}^2$  で1時間圧密したのち所定の圧力  $\sigma_e$  で24時間圧密した。膨潤は48時間行なっている。また、供試体端面の摩擦を軽減するため、供試体底面とポーラス・ストーンの間にプラスチック円板を入れ、供試体両端とプラスチック円板および載荷キャップの間に両面にシリコングリースを塗った銀紙をはさんだ。排水は供試体側方へのみ起っている。

##### 4.2 実験結果

##### 4.2.1 圧密変形の異方性

Fig. 2 にせん断前の圧密による体積圧縮率  $\Delta V/V_0$  と軸方向ヒズミ  $\Delta h/h_0$  との関係を示す。図中の実

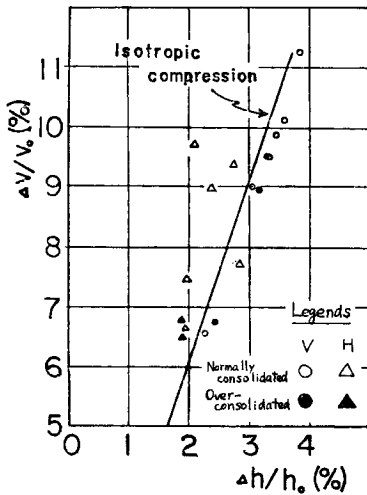


Fig. 2 Relationship between volumetric strain  $\Delta V/V_0$  and axial strain  $\Delta h/h_0$  after consolidation

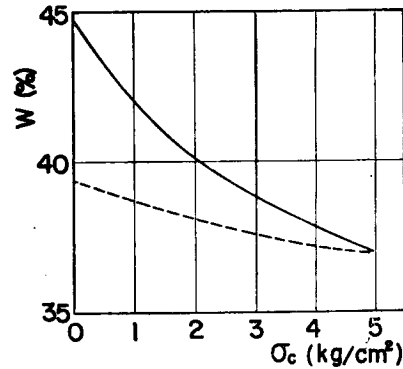


Fig. 3 Relationship between water content  $W$  and consolidation pressure  $\sigma_e$ .

線は等方的な圧縮変形をあらわしている。図からわかるように、V供試体、H供試体ともに等方的でない変形をしているがV供試体の方が等方圧縮に近い。また、堆積後  $4\text{kg/cm}^2$  で先行圧密して得た試料については、供試体両端からも圧密排水させる試験を行なったが、V供試体とH供試体の圧密変形の異方性の差は Fig. 2 の場合より少ないが、傾向としては同じ傾向を示している。

Fig. 3 にせん断前の圧密による排水量と供試体の初期含水比から求めた平均的な圧密応力  $\sigma_e$  と含水比  $w$  の関係を示す。V供試体とH供試体で差はなく、同じ圧密圧力の増加に対する体積圧縮率は変わらない。し

たがって、同じ体積圧縮率に対する軸方向ヒズミは、*V* 供試体の場合、等方圧縮の場合の軸方向ヒズミより大きく、*H* 供試体の場合はそのいずれの場合より小さい。

なお、一般にこの粘土のような異方性材料では、主応力の方向と主ヒズミの方向は一致しない。したがって、*H* 供試体の場合のように供試体軸が異方性の対称軸 (= 堆積時の鉛直方向) と一致しない場合、最初円形であった断面は圧密後円形ではない。すなわち等方応力によってせん断ヒズミが生じる。

4.2.2 非排水せん断強度の異方性

Table 3 に試験結果を示す。表には有効主応力比最大  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  と主応力差最大  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  での結

Table 3 Results of triaxial tests.

Sample No.	$w_i$ (%)	$w_r$ (%)	$\sigma_e$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$			$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$			
				$\epsilon$ (%)	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\text{kg/cm}^2)}$	$A$	$\epsilon_f$ (%)	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\text{kg/cm}^2)}$	$A_f$	
normally consolidated	V-3	44.6	40.1	3	11.5	4.04	0.43	18.7	4.60	0.32
	V-4	43.9	38.2	4	12.0	5.31	0.43	22.5	6.27	0.28
	V-5	45.2	38.4	5	11.5	5.64	0.55	20.0	6.38	0.43
	H-3	44.9	39.9	3	10.5	3.97	0.41	13.5	4.38	0.33
	H-4	44.7	39.4	4	12.0	4.51	0.54	16.0	5.04	0.43
	H-5	44.9	38.1	5	11.5	5.93	0.47	13.8	6.21	0.43
overconsolidated	V-0.5-0	44.9	39.5	0.5	10.0	3.28	-0.17	21.0	4.28	-0.24
	V-1-0	45.8	39.5	1	9.5	3.83	-0.06	21.5	4.89	-0.16
	V-2-0	46.0	39.1	2	12.5	4.63	0.11	19.8	5.12	0.04
	H-0.5-0	43.5	39.2	0.5	9.5	3.17	-0.19	12.4	3.53	-0.22
	H-1-0	44.1	38.5	1	8.5	4.25	-0.10	10.7	4.66	-0.13
	H-2-0	43.9	37.7	2	11.0	5.70	0	13.5	6.22	-0.03

(\*) Maximum pre-consolidation pressure was 5kg/cm<sup>2</sup> in all overconsolidated samples.

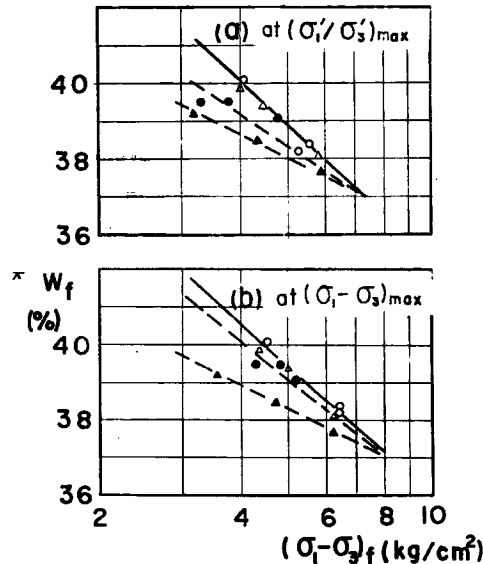


Fig. 4 Relationship between the undrained shear strength and water content at failure: (a)  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  (b)  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ .

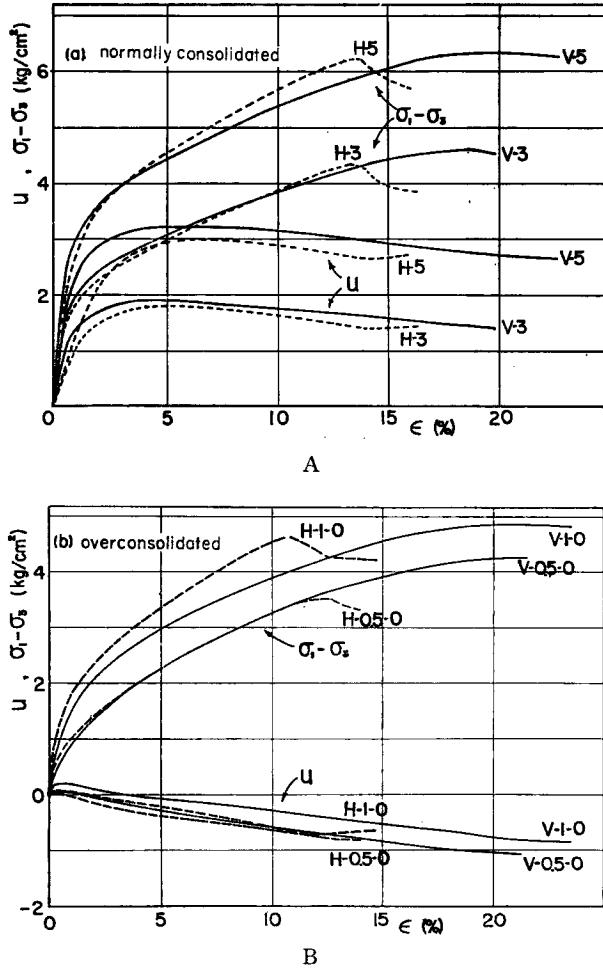


Fig. 5 Relationship between stress  $\sigma_1 - \sigma_3$ , pore-water pressure  $u$  and strain  $\epsilon$ : (a) normally consolidated (b) overconsolidated.

果をまとめてある。上記2つの破壊規準での主応力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と含水比  $w_f$  の関係をプロットすると Fig. 4 の通りである。(a) は  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  の場合、(b) は  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  の場合であるが、いずれの場合も正規圧密試料ではV供試体とH供試体で同じ含水比に対して強度の差はないが、過圧密試料では同じ含水比に対してV供試体の方が大きい強度を与えることがわかる。この試験結果が正しいとすれば、正規圧密領域では非排水せん断強度の異方性はないが、過圧密領域ではその異方性がある、ということになる。

Fig. 5 に応力、間ゲキ水圧～ヒズミ関係を示す。応力  $\sigma_1 - \sigma_3$  は、正規圧密試料では、いずれも小さいヒズミ (1~2%) まで急に増加したのち、増加の割合が急に減少し、以後直線的に増加しているが、過圧密試料では、初期のヒズミにおける増加の割合も小さく、また増加の割合が急に変化することもない。また正規圧密領域、過圧密領域それぞれにおけるV供試体とH供試体の応力～ヒズミ曲線をくらべると、直線部分の勾配がH供試体ではより大きい。一方、間ゲキ水圧の大きさは、正規圧密領域、過圧密領域どちらにおいても、同じ圧密圧力、同じヒズミに対してV供試体の方が大きい。

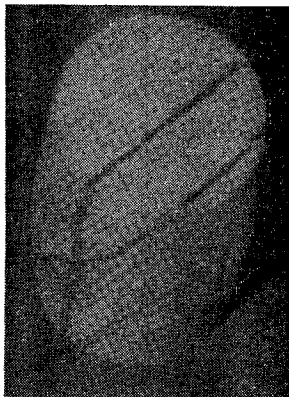


Photo. 2 H-specimen after failure.

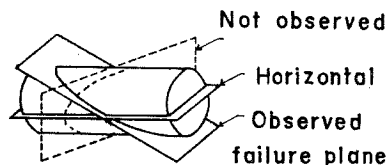


Fig. 6 Orientation of the failure plane with respect to the horizontal for H-specimen.

破壊ヒズミ  $\epsilon_f$  は,  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  では V 供試体, H 供試体ともに 10% 前後,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  では V 供試体で 20% 前後, H 供試体で 13% 前後である。このようにこの堆積粘土では, 正規圧密試料でも  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  の方が小さいヒズミであられ, その後いくらかヒズミが増大して  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  が生じており, これは普通の自然堆積粘土の傾向と逆である。

また破壊面のあらわれ方も供試体によって異なる。V 供試体の場合は多数のスベリ面が一樣に発達してタル状に歪むのに対して, H 供試体ではすべて Fig. 6 のように破壊スベリ面と堆積時の水平面の交線は, 供試軸とほぼ直交し, 粒子配列の方向によってスベリ面が拘束されている (Photo. 2 に実例を示す)。このことと圧密変形の異方性を考えると, H 供試体はあたかも平面変形状態に近いせん断が起っているようにみえる。

さて, 非排水せん断強度の異方性を表わす場合, 現在のところ次の 2 つのタイプが仮定される。すなわち, モール・クーロンの破壊条件の有効性を認めた上で,

- (1) せん断強度定数  $c, \phi$  に関する異方性
- (2) 間ゲキ水圧  $u$  の発生の異方性

を考える。すると, 異方性材料の破壊条件は

$$\tau_f = c + (\sigma_n - u) \tan \phi$$

とあらわされ, 破壊面と粒子配列方向のなす角を  $\alpha$  とすれば,  $c, \tan \phi, u$  は  $\alpha$  の関数である。この場合, 問題点として, (イ) 異方性材料に対し, 等方性材料に対して作られたモール・クーロンの破壊条件を適用することの妥当性, (ロ) 上述の 2 つの異方性は互いに独立には起り得ないものだが, それを別々に考えることの妥当性, が考えられる。また普通の飽和粘土の試験結果でも粘土の不規則性や応力の不均一分布などによってかなりのバラツキが仕方のないこととされている。異方性粘土の試験をしたとしても, そのような不規則性から生じるバラツキや (イ) で述べたように等方性材料に対して有効な方法を用いることによるバラツキのため, 異方性の確認に十分な精度があげられないおそれもある。

このような問題点はあるが, 一応ここでは上述の (1) (2) の異方性に分けて考える。

- (1) せん断強度定数に関する異方性

Fig. 7 に  $(\sigma_1' - \sigma_3')_f / 2 \sim (\sigma_1' + \sigma_3') / 2$  関係を示す。V 供試体, H 供試体の有効内部のマサツ角をそれぞれ  $\phi_V', \phi_H'$  とすると,  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  では  $\phi_V' = 37^\circ, \phi_H' = 36^\circ$  ((a) 図),  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  では  $\phi_V' = \phi_H' = 36^\circ$  ((b) 図), かついずれの場合も, 粘着力  $c' = 0$  である。しかも正規圧密試料, 過圧密試料ともに同一の破壊線上にある。なお, 堆積後  $4 \text{ kg/cm}^2$  で先行圧密した試料についての同様な試験においても過圧密試料の破壊線は, 原点を通る直線であった。



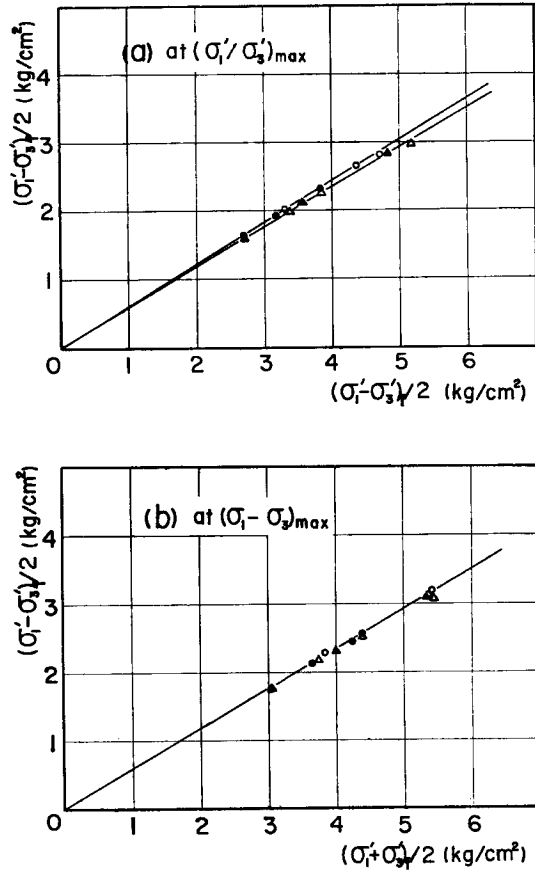


Fig. 7 Relationship between  $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$  and  $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ : (a) at  $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$  (b) at  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ .

Fig. 8 のベクトル・カーブにおいて、 $V$  供試体、 $H$  供試体それぞれの正規圧密のもの、過圧密のものでヒズミ  $\epsilon$  の等しい点は一直線上にあるが、その直線の傾斜角を  $\alpha$ 、縦軸上の切片を  $d$  とし、 $\bar{\phi}$ 、 $\bar{c}$  をそれぞれ  $\sin \bar{\phi}' = \tan \alpha$ 、 $\bar{c}' = d / \sqrt{1 - \tan^2 \alpha}$

で定義すると、ヒズミ  $\epsilon$  による  $\bar{c}$ 、 $\bar{\phi}'$  の変化の様子を知ることができる。ヒズミの増大とともにこの等ヒズミ線は破壊包絡線へ近づき、ヒズミの大きいところでは破壊包絡線に一致する。したがって、ヒズミ  $\epsilon$  の大きいところでは  $\bar{c}' = c'$ 、 $\bar{\phi}' = \phi'$  である。このようにして得られた  $\epsilon$  の関係を Fig. 9 に示す。 $V$  供試体と  $H$  供試体を比較すると、(a) の場合、すなわち正規圧密試料の場合、 $H$  供試体は小さいヒズミ (0.5%) で大きい  $\bar{c}_H'$  を発揮し、ヒズミの増大とともに急速に減少していること、また常に  $\bar{\phi}_V' > \bar{\phi}_H'$  であることが特徴的である。(b) の場合、すなわち過圧密試料の場合は  $\bar{c}_H'$  は  $\epsilon = 7 \sim 8\%$  で 0 になるのに対して、 $\bar{c}_V'$  は小さい  $\epsilon$  で一定の大きさに達した後、 $\epsilon = 7 \sim 8\%$  まで一定値を保ち、以後徐々に減少したのち  $\epsilon = 13\%$  で 0 になっていること、また (a) とは逆に  $\bar{\phi}_V'$  は  $\bar{\phi}_H'$  より幾分小さい値を示している。また正規圧密試料と過圧密試料をくらべると、 $H$  供試体では  $\bar{c}_H'$  の傾向は同じだが、大きさは正規圧密試料の方がずっと大きく、しかも大きい  $\epsilon$  まで発揮されており、 $\bar{\phi}_H'$  も正規圧密試料の方が大きい。一方、 $V$  供試体では  $\epsilon =$

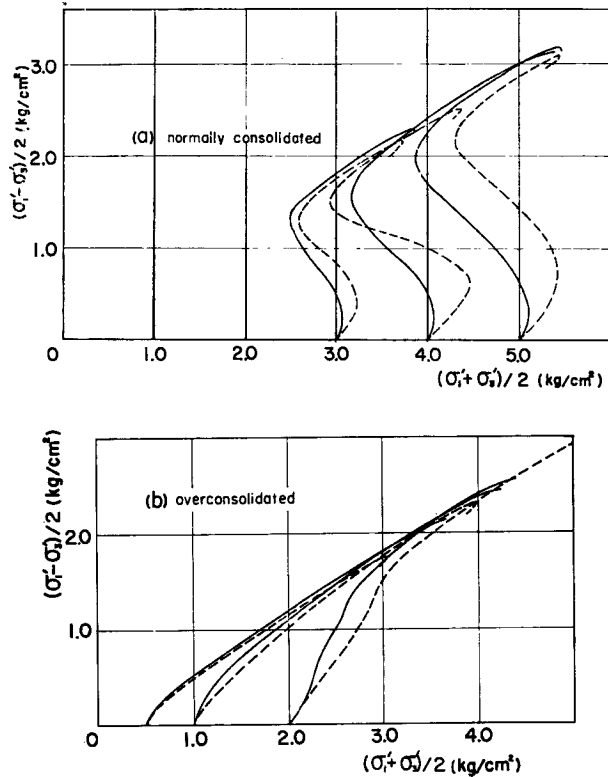


Fig. 8 Effective stress paths: (a) normally consolidated (b) overconsolidated.

6% くらいまでは  $\bar{c}_v', \bar{\phi}_v'$  とともに正規圧密試料の方が大きく、以後はほぼ同じとなっている。このように  $V$  供試体と  $H$  供試体で、また同じ供試体でも正規圧密試料と過圧密試料で、ヒズミ  $\epsilon$  とともに  $\bar{c}', \bar{\phi}'$  が発揮される様子および大きさは異なる。

ところで、一般にモール・クーロンの破壊条件からは、水平から  $45^\circ + \phi/2$  ( $\phi$ : 粘土の内部マサツ角) の角度をなす面で破壊が生じることになるが、正確には破壊面の傾きは知ることができない。Hvorselv (1960)<sup>1)</sup> は粘土の異方性が破壊面の傾きに及ぼす影響を理論的に考察している。それによると、 $\phi = 30^\circ$  とするとき、水平からの角度  $\alpha_0 = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$  の面から  $\pm 4^\circ$  偏った面内のせん断強度が、傾き  $\alpha_0$  の面内の強度より 1~1.5% 小さければ、傾き  $\alpha = \alpha_0 \pm 4^\circ$  の面で破壊が生じ得る。このような小さな強度の差は、供試体の異方性や不規則性、供試体端面での応力の不均一な分布によって十分生じうる。もし異方性が破壊面の傾きに影響するものとするれば、ここで用いたような異方性粘土では、せん断方向が粒子配列の方向となす角度が大きいほど大きい強度を与えるから、 $V$  供試体、 $H$  供試体の破壊面が水平となす角をそれぞれ  $\alpha_V, \alpha_H$  とすると、 $\alpha_V < \alpha_H$  であると考えられる。Table 4 に堆積後  $4\text{kg/cm}^2$  で先行圧密した試料の過圧密領域での試験から得られた破壊面の測定値を示す(測定値は  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  以後に測定したものである)。一応平均値としては  $\alpha_V < \alpha_H$  であるが、バラツキが大きくてこれからだけでははっきりしたことはいえない。さらに破壊面が生じてその後  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  に達するまでかなりのヒズミを要するような供試体においては、破壊面の傾きがヒズミとともに減少してゆくことが考えられる。

## (2) 間ゲキ水圧の発生に関する異方性

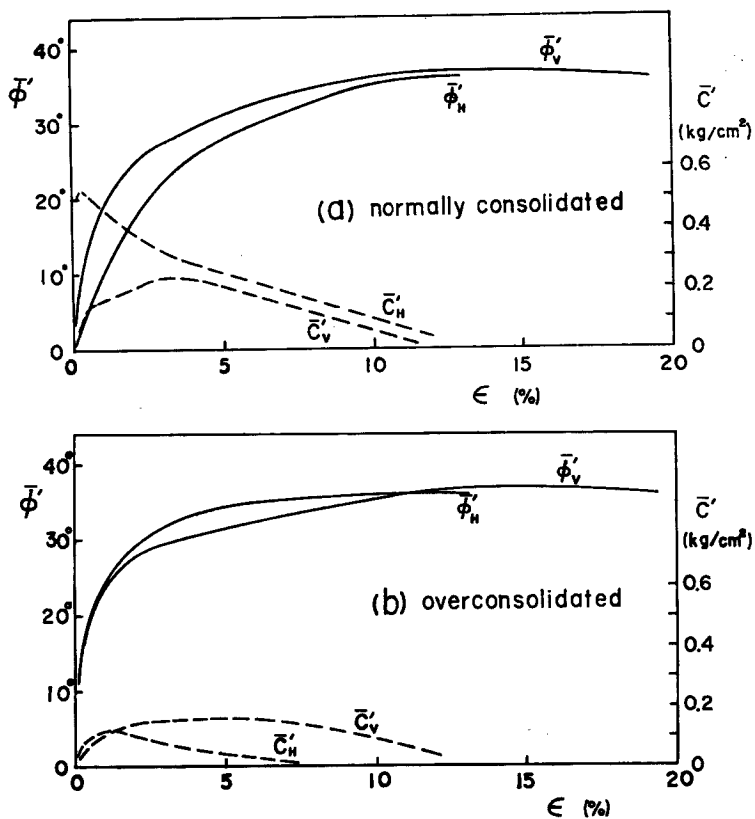


Fig. 9 Mobilization of  $\bar{c}'$ ,  $\bar{\phi}'$  with strain  $\epsilon$ .

Table 4 Measured angles of inclination of failure planes.

V-specimen		H-specimen	
Sample No.	Angle of inclination of failure plane $\alpha_V$	Sample No.	Angle of inclination of failure plane $\alpha_H$
V 1	62.3°	H 1	63°
2	52°	2	67.5°
3	65°	3	61.5°
4	60.7°	4	65°
5	60.5°	5	61.7°
6	53°	6	60.5°
7	58.8°	—	—
average value	58.9	average value	63.2

飽和粘土の場合、破壊時の間ゲキ水圧の大きさは、 $\Delta u_f = A_f \cdot \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と表わされる。ここに  $A_f$  は破壊時の間ゲキ水圧係数である。Fig. 10 に間ゲキ水圧係数  $A_f$  と過圧密比 O. C. R. の関係を示す。Table 3 からわかるように、正規圧密試料については  $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  いずれの場合も V 供試体と H 供試体で  $A_f$  の値に差はみられない。その平均値とバラツキの範囲は Fig. 10

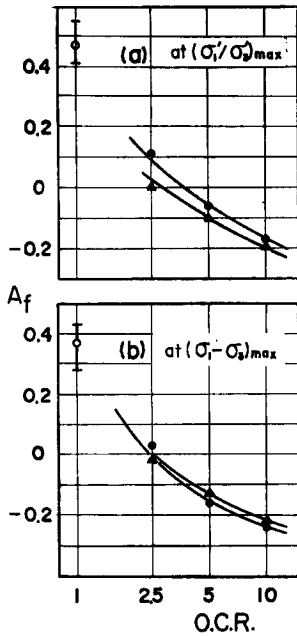


Fig. 10 Relationship between pore-water pressure parameter  $A_f$  and overconsolidation ratio (O.C.R.): (a) at  $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$  (b) at  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ .

の O.C.R. = 1 の軸上に示してある。図によると、 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$  では同じ O.C.R. に対して V 供試体の方が H 供試体より大きい  $A_f$  を与えている。一方、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  では逆に同じ O.C.R. に対して H 供試体の方が V 供試体より大きい  $A_f$  を与えている (ただし O.C.R. = 2.5 では逆になっている)。これらの傾向は、堆積後  $4 \text{ kg/cm}^2$  で先行圧密した試料の場合もっと明白であった。

以上 (1) (2) をまとめると、

(イ)  $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$  において：

過圧密領域では  $\phi_V' > \phi_H'$ ,  $(A_f)_V > (A_f)_H$  であって強度の差は小さい。正規圧密領域では  $\phi_V' > \phi_H'$ ,  $(A_f)_V = (A_f)_H$ , しかも  $\phi'$  の相違は  $1^\circ$  で、これは強度の差としては顕著にあらわれない。すなわち、強度の差はほとんどない。

(ロ)  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$  において：

過圧密領域では、 $\phi_V' = \phi_H'$ ,  $(A_f)_V < (A_f)_H$  であって、強度は V 供試体の方が大きい。正規圧密領域では、 $\phi_V' = \phi_H'$ ,  $(A_f)_V = (A_f)_H$  で強度の差はない。

## 5. ま と め

結論として、粘土の異方性が非排水せん断強度に及ぼす影響は、主としてせん断方向と粒子配列方向のなす角度によって、せん断時の体積変化の傾向が違うことに帰着される。

最後に、X線回折については、京都大学工業教員養成所の西田一彦先生に大変お世話になりました。ここに厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Hvorslev, M. J., "Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays" Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, June, 1960 pp. 169—273.
- 2) Lo, K. Y., "Stability of Slopes in Anisotropic Soils" A. S. C. E. Vol. 91, No. SM4, July 1965 pp. 85—106.
- 3) Duncan, J. M., and Seed, H. B., "Anisotropy and Stress Reorientation in Clays" A. S. C. E. Vol. 92 No. SM5, September 1966, pp. 21—50.
- 4) Mitchell, J. K., "The Fabric of Natural Clays and its Relation to Engineering Properties," Highway Research Board, Vol. 35, 1956, pp. 693—713.
- 5) Martin, R. T., "Quantitative Fabric of Wet Kaolinite," Proc. 14th National Conf. on Clay and Clay Minerals, Vol. 26, 1966, pp. 271—287.