

## カオリン粘土の一面せん断試験における周面摩擦特性と限界強度

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 公開日: 2025-03-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 古谷, 保, 有吉, 充, 奥山, 武彦, 黒田, 清一郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/0002001281">https://doi.org/10.24514/0002001281</a>

(c) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構  
National Agriculture and Food Research Organization, Japan

## カオリン粘土の一面せん断試験における 周面摩擦特性と限界強度

古谷 保\*\*・有吉 充\*\*・奥山武彦\*\*\*・黒田清一郎\*\*\*

### 目 次

緒 言 .....	25
反力計測型一面せん断試験機の概要と試験法 .....	26
定圧試験の結果 .....	27
1 正規圧密カオリン粘土の定圧試験 .....	27
a 上下せん断箱の間隙0.2 mmの試験 .....	27
b 上下せん断箱の間隙0.5 mmの試験 .....	28
2 過圧密カオリン粘土の定圧試験 .....	29
定体積試験の結果 .....	30
1 正規圧密カオリン粘土の定体積試験 .....	30
a 上下せん断箱の間隙0.2 mmの試験 .....	30
b 上下せん断箱の間隙0.5 mmの試験 .....	32
2 過圧密カオリン粘土の定体積試験 .....	33
試験結果の考察 .....	34
1 正規圧密供試体の定圧試験における周面摩擦特性と限界強度 .....	34
2 過圧密供試体の定圧試験における周面摩擦特性と限界強度 .....	35
3 正規圧密供試体の定体積試験における周面摩擦特性と限界強度 .....	35
4 過圧密供試体の定体積試験における周面摩擦特性と限界強度 .....	38
5 反力計測型一面せん断試験機による定体積試験の問題点 .....	38
結 言 .....	38
参考文献 .....	39
Summary .....	40
Appendix .....	41

### 緒 言

地すべりや斜面崩壊の対策を検討する上で、すべり面のせん断強度測定は重要な項目のひとつである。この強度を測定するための室内試験機としては、三軸圧縮試験機や一面せん断試験機、リング式せん断試験機が一般に使用されている（例えば、La Gatta, 1970. Bishopら, 1971. Townsend ら, 1973. 中村ら, 1973. Skempton, 1977. 宜保, 1979. Lefebvre, 1981. 農林水産省・農業土木学会, 2004）。このうち一面せん断試験は、試験機の構造や試験法が簡単であるため実用的に便利な方法である。特に完全軟化状態の強度を測定する場合には、せん断箱内でスラリー試料から圧密して供試体を作成し、そのまません断を行うことができるので、三軸圧縮試験と比較して格段に簡易に試験を行うことができる。リング式せん断試験と比較した場合には、せん断変位が限られているた

め残留強度の測定に不利であるように思われるが、この点は繰り返し（あるいはPre-cut）一面せん断試験という方法でかなりまで補うことができる。

しかしながら、一面せん断試験機やリング式せん断試験機は供試体をせん断箱（あるいは固定リング）で拘束するため、せん断箱内面と供試体周面との摩擦（周面摩擦）が必然的に発生し、かつこの影響が大きいため、何らかの方法でこれを補正する必要がある。このためBishopら（1971）のリング式せん断試験機では、載荷側の内外の固定リングに垂直方向の荷重計を取り付けて周面摩擦力を測定するようにした。一方、一面せん断試験機の場合、「土質試験の方法と解説」（地盤工学会, 2000）では、周面摩擦の影響を避けるために垂直荷重計を反力受け側に設置することとしている。しかし、土質の違いによる周面摩擦特性について十分解明されていないため、限界強度の決め方に曖昧さを残している（地盤工学会, 2000. p.580）。この点について、大島ら（1997）は「砂と粘土の  $c_d$  と  $c_1'$ ,  $c_2'$  の対応関係の違いは、定体積試験で  $c_u$  が増加して包絡線に達するか、減少して達するかの違いと考えられるが、現時点では定かではない。以上から、砂は従来通り  $c_2'$  を、粘土では安全をみてやはり従来通り  $c_1'$  を  $c_d$  に用いるのが良いと考えられる。」としており、正規圧密粘土の定体積試験では、せ

\* 農村総合研究部 広域防災研究チーム

\*\* 施設資源部土質研究室

\*\*\* 施設資源部基礎地盤研究室

平成19年3月13日受理

キーワード：カオリン、一面せん断、周面摩擦、限界強度、反力計測型、定圧、定体積

ん断強度の最大値 ( $\sigma_1'$ ) を採用するのか、応力曲線の包絡線 ( $\sigma_2'$ ) を採用するのかについて根拠が不明瞭である。このため筆者等は垂直荷重計を反力受け側に設置した一面せん断試験機 (Fig.1(a), (b)) 以下、「反力計測型一面せん断試験機」と呼ぶ) を用いて、カオリン粘土の正規圧密及び過圧密供試体について定圧排水及び定体積一面せん断試験を行い、周面摩擦特性と限界強度等について検討を行った。

周面摩擦力の影響は定圧試験・定体積試験ともに大きく、この評価の違いにより、また限界強度の考え方の違いにより、大きい場合にはせん断抵抗角で $6^\circ$  前後の差違を生み出している。この違いは安全率では0.2~0.5程度にもなり、地すべり対策工や斜面安定工の設計と工事費に大きな影響を及ぼす。したがって、周面摩擦力を正確に評価して限界強度の正しい決定法を究明することは、実務上も極めて重要である。本報では、反力計測型一面せん断試験機によるカオリン粘土の定圧及び定体積一面せん断試験の結果と周面摩擦特性、並びに定体積試験の垂直変位制御法の問題点等について述べている。また、周面摩擦の補正法を論じ、定圧及び定体積一面せん

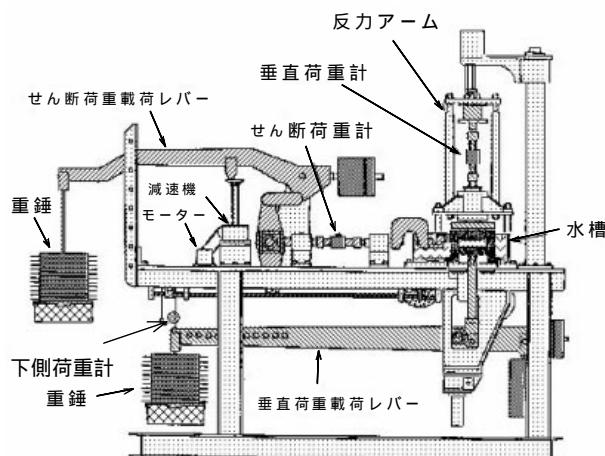


Fig.1 (a) 一面せん断試験機の概要図  
Design of direct shear box test apparatus(a)

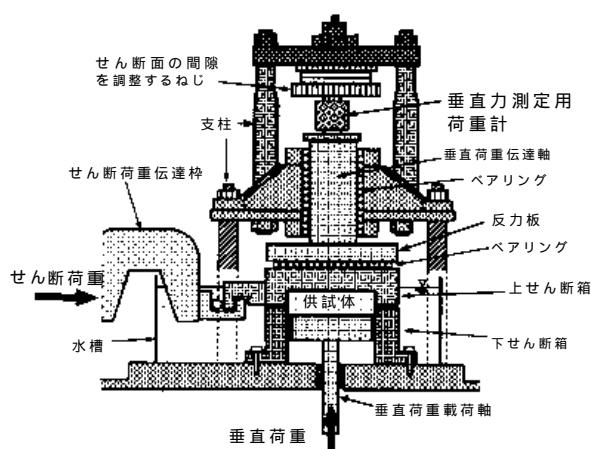


Fig.1 (b) せん断試験機の概要図  
Design of direct shear box test apparatus(b)

断試験における限界強度について検討を行っている。

### 反力計測型一面せん断試験機の概要と試験法

用いた試験機は、反力側に垂直荷重計が取り付けられた垂直力下面載荷・上箱可動型 (Fig.1 (a), (b). 古谷, 1983) で、供試体直径15 cm, 厚さは3 cm前後である。今回、定体積試験において載荷側の垂直荷重を計測するため、新たに垂直荷重載荷レバーをつり上げるチェーンに連結して、小型荷重計をレバーの先端部に取り付けた (Fig.1 (a), Fig.2)。また、せん断歪の進行に伴うせん断面積の変化をせん断変位のデータから計算し (Fig.3), 垂直応力とせん断応力を補正できるようにした。



Fig.2 垂直荷重載荷レバーの先端部に取り付けられた小型荷重計 (Fig.1(a)の下側荷重計)  
Small type load cell mounted at the top of loading lever

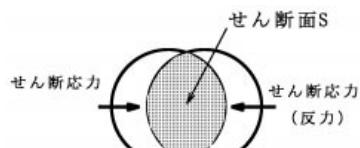


Fig.3 せん断面S  
Shearing section S

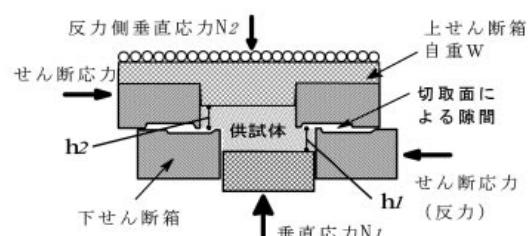


Fig.4 切り取り面による隙間  
Space cut in shear plane of direct shear box

せん断箱の特徴として、供試体のせん断面とせん断箱の接触面との摩擦を小さくするため、せん断箱と供試体のせん断面には隙間ができるように加工されている (Fig.4)。また、せん断箱内面にはワセリンと潤滑油を

混ぜたもの（以下、オイル）を塗布して周面摩擦を減らす工夫をした。

せん断面付近の平均垂直応力を推定する一方方法として、試験中の供試体厚さを垂直荷重載荷軸に取り付けたダイヤルゲージの計測データから計算して、周面摩擦力をせん断面を挟んで上下供試体の厚さで比例配分して補正した。すなわち、せん断面の垂直応力（以下、補正垂直応力）は次式より求められる（古谷、1980）。

$$N_t = \frac{N_1 \cdot h_2 + (N_2 + W) \cdot h_1}{h_1 + h_2} \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで  $N_t$  : せん断面の補正垂直応力

$N_1$  : 載荷側垂直応力 (Fig.4)

$N_2$  : 反力側垂直応力 (Fig.4)

$W$  : 単位面積当たりの上せん断箱の自重

$h_1$  : 載荷側供試体の厚さ (Fig.4)

$h_2$  : 反力側供試体の厚さ (Fig.4)

定圧及び定体積試験ともに、載荷側、反力側及び補正垂直応力によるせん断抵抗角を求めた。

試験の組み合わせとして、正規圧密及び過圧密供試体の定圧排水試験を行い、この強度と比較する形で正規圧密及び過圧密供試体の定体積試験を行った。これから、各試験の周面摩擦特性と限界強度を求め、比較を行い、強度定数の求め方を検討した。

せん断試験における上下せん断箱の間隙は、「土質試験の方法と解説」では0.2~0.5 mmと定めている。今回は、この範囲の間隙で周面摩擦と強度特性等にどのような違いが出るかを確認するため、正規圧密供試体の場合は、定圧、定体積試験ともに0.2 mmと0.5 mmについて試験を行った。過圧密供試体については、今回は0.2 mmの場合についてだけ試験を行っている。

また、せん断速度は、過剰間隙水圧の発生について確認するための予備試験を含め、定圧試験の場合は0.016~0.1 mm/min. の試験を行い、定体積試験の場合は0.1 mm/min. を標準とし、一部0.063~0.275 mm/min. の試験を行った。供試体の大きさが標準（直径 6cm、厚さ 2 cm）よりも大きいため、せん断速度も標準より若干小さくしている。

用いたカオリン粘土は市販のH A粘土 ( $G_s = 2.738$ ,  $W_L = 41.3\%$ ,  $I_P = 16.8$ ) である。供試体の作成方法としては、正規圧密供試体は、定圧試験及び定体積試験とともに、十分に攪拌したスラリー試料をせん断箱内に直接流し込んで圧密し、圧密の終了を待ってそのまません断した。圧密時間は最後の重錘を載荷してから平均して約15時間ほどである。また、過圧密供試体の定圧試験の場合は、スラリー試料を直接せん断箱に流し込んで、垂直応力490, 392, 294, 196 kPa でそれぞれ圧密し、98 kPa でせん断した。

過圧密供試体の定体積試験の場合は、スラリー試料を直接せん断箱に流し込んで、垂直応力490, 392, 294, 196 kPa でそれぞれ圧密した。圧密の後に一旦98 kPaまで除荷して垂直変位が安定するのを待ち、その位置で載荷レバーを固定してから、せん断により供試体が膨張しようとする力を制御するため、丁寧に1~8 kg程の錘を載荷レバーに増やした。

また、定体積試験における体積変化の制御方法としては、下側から垂直荷重を載荷する機構であるため、下側の載荷レバーをハンドルで制御して、載荷軸に取り付けた垂直変位測定用ダイヤルゲージの目盛りを一定に保つた。ただし、今回は反力側荷重計の圧縮または復元に伴う上下せん断箱の間隙変化も同時に計測した。

## 定圧試験の結果

### 1 正規圧密カオリン粘土の定圧試験

#### a 上下せん断箱の間隙0.2 mmの試験

試験結果をTables 1, 2 及びFigs.5 ~ 7 並びにFig.5の詳細を載荷側、反力側、補正垂直応力に分けてAppendixのFigs.1 ~ 3に示す。またTable 1 に、載荷側垂直応力、各試験において粘着力をゼロとした時のせん断抵抗角、及びせん断速度を示している。

Table 1 正規圧密カオリン粘土供試体の定圧試験結果  
(上下せん断箱の間隙0.2 mm)

Results of constant pressure direct shear box test  
on normally consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.2 mm)

試験	載荷側 垂直応力 kPa	せん断抵抗角 degree			せん断 速度 mm/min.
		反力側 垂直応力	補正垂 直応力	載荷側 垂直応力	
	49	32.2	<b>29.2</b>	26.6	0.1
	78	30.0	<b>28.6</b>	27.4	0.1
	98	30.9	<b>30.2</b>	29.7	0.05
	154	30.7	<b>29.1</b>	27.8	0.032
	196	30.4	<b>29.0</b>	27.9	0.032
	294	31.2	<b>28.9</b>	27.3	0.032
	392	31.6	<b>28.6</b>	26.6	0.016
	490	32.2	<b>28.3</b>	26.1	0.02
	平均	31.2	<b>29.0</b>	27.4	

Table 2 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	載荷側 垂直応力 kPa	試験後		
		含水比	湿潤密度	乾燥密度
	49	39.4	1.71	1.23
	78	39.6	1.73	1.24
	98	38.7	1.75	1.26
	154	37.6	1.77	1.28
	196	35.7	1.79	1.32
	294	34.7	1.84	1.36
	392	34.3	1.85	1.38
	490	32.4	1.83	1.38

反力側垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $31.2^\circ$ 、補正垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $29.0^\circ$ 、載荷側垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $27.4^\circ$ であった。ただし、補正垂直応力で整理した限界強度について例示したように(Fig.5の赤直線)、垂直応力が200 kPa以上の領域の場合、粘着力が5 kPa、せん断抵抗角が $28^\circ$ の方が直線性が良くなっている。これは破壊包絡線が垂直応力200 kPaあたりで少し屈曲しているためである。

また、垂直応力が98 kPa以下の低圧領域の試験では、定圧試験としてはせん断速度が速いが、密度が小さいので透水性が高く、過剰間隙水圧は発生しなかったと思われる。

定圧試験について、「土質試験の方法と解説」(p.582)では反力側の垂直応力で整理した最大せん断強度を採用するように解説されている。今回の試験では、反力側と載荷側の垂直応力で整理した平均せん断抵抗角の差は $3.8^\circ$ となっている。また、粘性土の場合にはオイルを塗布すれば周面摩擦は容易に小さくできると記述されているが、今回の正規圧密供試体の定圧試験では、せん断箱内面にオイルを塗布しても周面摩擦力を除去しきれなかった(Fig.5)。載荷側垂直応力が294 kPaの時の応力・変位曲線をFig.6に、供試体の垂直変位をFig.7に例として示した。正規圧密粘土の試験ではせん断変位に伴って体積は減少し続け、周面摩擦力は逆に増加する傾向が見られる。

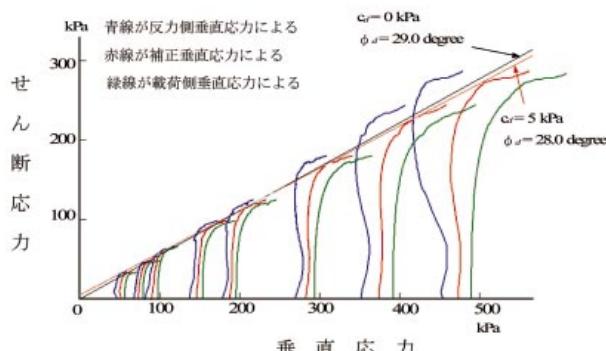


Fig.5 反力側、補正及び載荷側垂直応力による応力曲線  
Vector curves by normal dead load, corrected normal force,  
and force measured on load-receiving plate

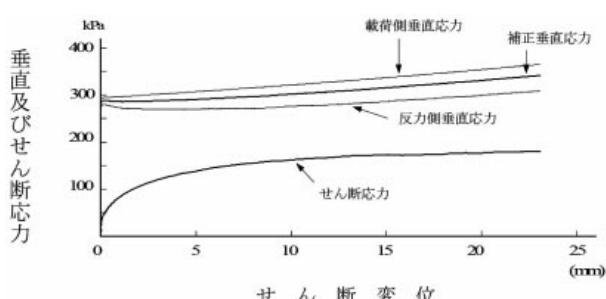


Fig.6 載荷側垂直応力が294 kPaの時の応力・変位曲線  
Stress-displacement curve at 294 kPa of normal dead load

せん断面積の補正については、補正を行う場合も行わない場合も最終的な強度定数の値はほとんど同じになり、補正しなくても実用上問題はないが(地盤工学会, 2000), 今回は応力曲線を正確に表すためにすべて補正した値で示している。せん断面積の補正を行った場合の限界強度は[せん断応力 / 垂直応力]の最大値すなわち応力曲線の包絡線から求めることになるが、粘着力がゼロの時は、補正を行わない場合のせん断応力の最大値から求める方法と強度定数は結果的に同じになる(Fig.8.古谷, 1980)。

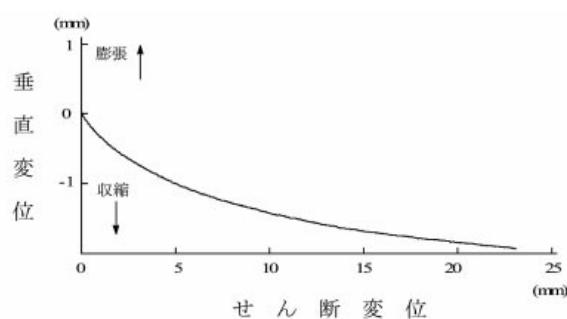


Fig.7 載荷側垂直応力が294 kPaの時の垂直変位曲線  
Volume changing curve at normal dead load of 294 kPa

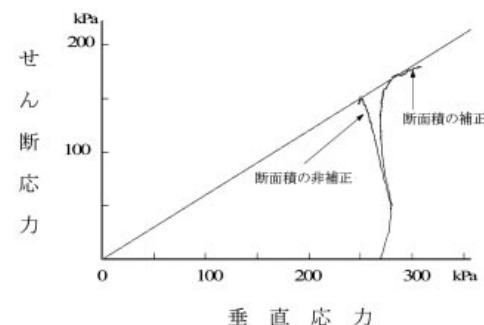


Fig.8 せん断面積を補正した場合と補正しない場合の比較  
(Table 2- の試験で、反力側垂直応力で整理した場合の応力曲線)  
Comparison of corrected and non-corrected shear plane  
(Normal stress is calculated by the force measured  
on load-receiving plate at normal dead load of 294 kPa)

## b 上下せん断箱の間隙0.5 mmの試験

試験結果をTables 3, 4 及びFig.9並びにFig.9の詳細を載荷側、反力側、補正垂直応力に分けてAppendixのFigs.4~6に示す。Table 3のせん断抵抗角もTable 1と同様に、各試験において粘着力をゼロとした時のものを示している。反力側垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $31.0^\circ$ 、補正垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $28.9^\circ$ 、載荷側垂直応力で整理した平均せん断抵抗角が $27.7^\circ$ であった。正規圧密カオリン粘土の定圧試験では、上下せん断箱の間隙が0.5 mmの場合も、周面摩擦とせ

ん断抵抗角は0.2 mmの場合とほとんど同じ傾向を示しており、どの試験も載荷側垂直応力が反力側よりも大きい。反力側と載荷側の平均せん断抵抗角の差は、0.2 mmの場合よりわずかに小さく、 $3.3^\circ$  となった。

Table 3 正規圧密カオリン粘土供試体の定圧試験結果  
(上下せん断箱の間隙0.5 mm)

Results of constant pressure direct shear box test  
on normally consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.5 mm)

試験	載荷側 垂直応力 kPa	せん断抵抗角 $\phi_d$ degree			せん断 速度 mm/min.
		反力側 垂直応力	補正垂 直応力	載荷側 垂直応力	
	98	31.6	<b>28.9</b>	27.0	0.026
	196	31.0	<b>28.8</b>	27.3	0.026
	294	30.6	<b>28.9</b>	27.9	0.026
	392	31.2	<b>29.4</b>	28.4	0.025
	490	30.6	<b>28.7</b>	27.7	0.020
	平均	31.0	<b>28.9</b>	27.7	

Table 4 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	載荷側 垂直応力 kPa	試験後		
		含水比	湿潤密度	乾燥密度
	98	36.1	1.83	1.35
	196	34.3	1.81	1.35
	294	32.1	1.86	1.41
	392	31.9	1.83	1.39
	490	32.5	1.88	1.42

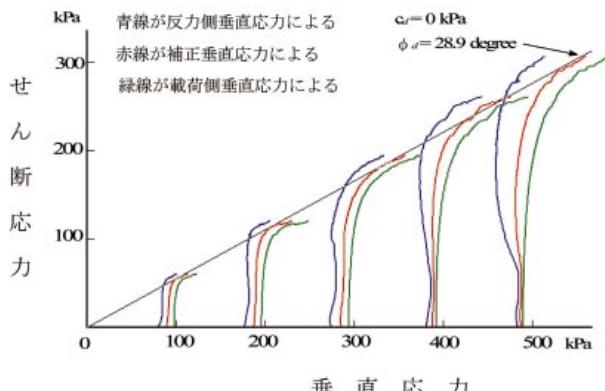


Fig.9 反力側、補正及び載荷側垂直応力による応力曲線  
Vector curves by normal dead load, corrected normal force,  
and force measured on load-receiving plate

## 2 過圧密カオリン粘土の定圧試験

試験結果をTables 5, 6 及びFigs.10 ~ 16に示す。過圧密供試体なので粘着力を考慮すべきであるが、強度を単純に比較するため、Table 5 では粘着力をゼロとした時のせん断抵抗角を示している。

過圧密供試体の場合も、すべての試験において載荷側垂直応力が反力側よりも大きい。過圧密比が小さい場合(Figs.10, 11)には、周面摩擦は小さくならず、反力側垂直応力が載荷側垂直応力よりも常に小さく、かつ両者の差が大きくなっている。正規圧密供試体の応力曲線と

Table 5 過圧密カオリン粘土供試体の定圧試験結果  
(上下せん断箱の間隙0.2 mm)

Results of constant pressure direct shear box test  
on over consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.2 mm)

試験	圧密垂直 応力 kPa	せん断抵抗角 $\phi_d$ degree			せん断 速度 mm/min.
		反力側 垂直 応力	補正垂 直応力	載荷側 垂直 応力	
	196	32.0	<b>29.5</b>	27.6	0.032
	294	32.2	<b>31.0</b>	30.0	0.032
	392	32.2	<b>31.1</b>	30.4	0.032
	490	33.0	<b>32.6</b>	32.5	0.032

Table 6 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	圧密垂直 応力 kPa	試験後		
		含水比	湿潤密度	乾燥密度
	196	38.7	1.74	1.25
	294	38.0	1.78	1.29
	392	欠測	欠測	1.29
	490	37.2	1.78	1.30

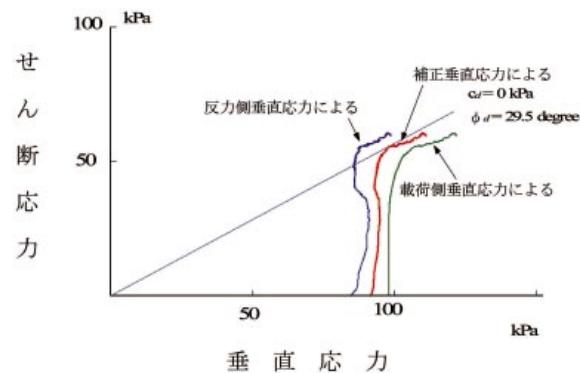


Fig.10 過圧密比 2 の供試体の応力曲線 (Table 5 - )

Vector curve of specimen with over consolidated ratio 2

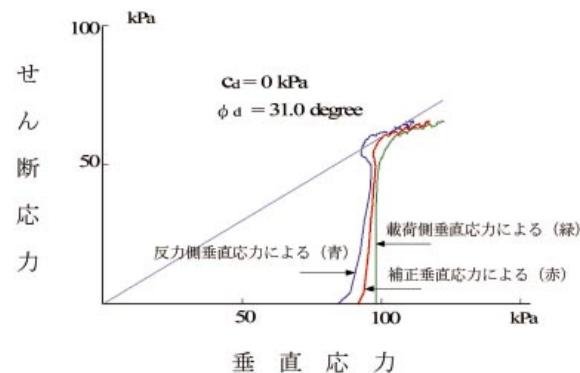


Fig.11 過圧密比 3 の供試体の応力曲線 (Table 5 - )

Vector curve of specimen with over consolidated ratio 3

類似している。また、せん断開始時の体積膨張もごくわずかである(Fig.14)。これに対して過圧密比が大きい場合は、供試体の膨張と共に反力側垂直応力が大きくなり、載荷側垂直応力との差が小さくなっている(Figs.12, 13, 15)。体積変化をみると、せん断の開始と共に供

試体は一旦膨張し、その後収縮する。最終的に、体積は試験前と比較してあまり変化していない (Fig.14)。せん断抵抗角は過圧密比が大きくなるにつれて大きくなり、正規圧密供試体と比較して  $0.5 \sim 3^\circ$  程度大きい (Fig.16)。

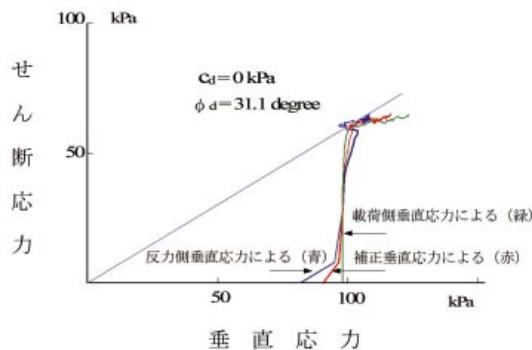


Fig.12 過圧密比4の供試体の応力曲線 (Table 5 - )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 4

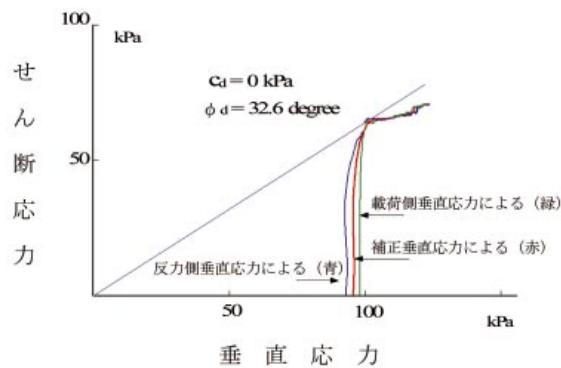


Fig.13 過圧密比5の供試体の応力曲線 (Table 5 - )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 5

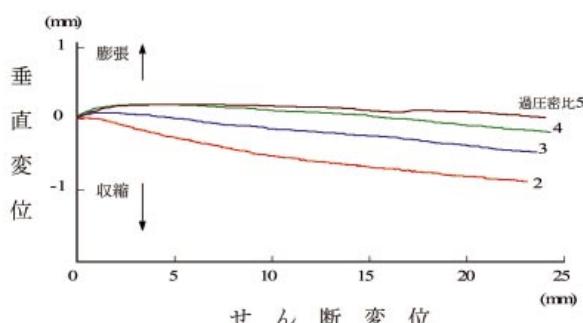


Fig.14 4過圧密比5,4,3,2の供試体の体積変化曲線  
Volume changing curve of specimen with over consolidated ratio 5,4,3,2

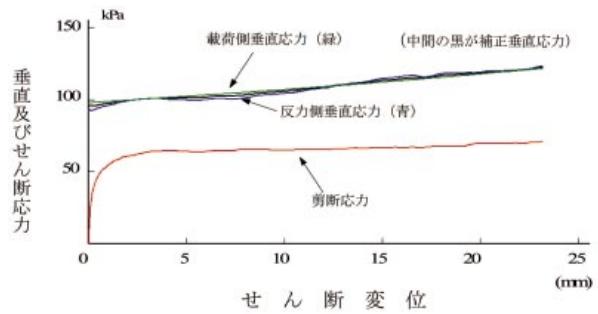


Fig.15 過圧密比5の供試体の応力変位曲線  
Stress-displacement curve of specimen with over consolidated ratio 5

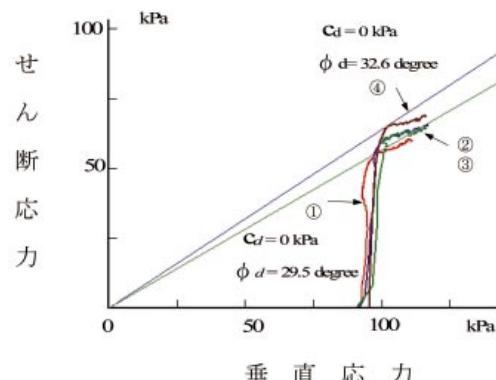


Fig.16 補正垂直応力による応力曲線の比較  
Comparison of four vector curves by corrected normal force

## 定体積試験の結果

### 1 正規圧密オリン粘土の定体積試験

#### a 上下せん断箱の間隙0.2 mmの試験

試験結果をTables 7, 8及びFigs.17 ~ 22に示す。Figs. 17 ~ 19 には上下せん断箱の間隙0.2 mm時の定圧試験の破壊包絡線を比較のため示した。Table 7 のせん断抵抗角もTable 1と同様に、各試験において粘着力をゼロとした時のものを示している。各試験について、それぞれ載荷側垂直応力、反力側垂直応力、補正垂直応力で整理した [せん断応力 / 垂直応力] の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi_2'$  とせん断応力の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi_1'$  を示した。

またFig.23に、圧密時の垂直応力が490 kPaの供試体の試験について、上下せん断箱の間隙の変化を一例として示した。間隙0.2 mmの正規圧密オリン粘土の定体積試験では、どの試験についても、せん断面はおよそ0.06 ~ 0.1 mm前後の圧縮を起こしていて、Fig.23と同様の傾向を示していた。反力側に取り付けてある荷重計は一般的な歪ゲージ式の圧縮・引張型のもの (フルスケール 2 トン、歪量は圧縮2011, 引張り2001  $\mu$ ストレイン) である。

結果を見ると、 $\phi_2'$ については、いずれも反力側垂直

応力によるせん断抵抗角が載荷側垂直応力による値よりも小さくなっている（ただし、 $\phi'$ は両者の差が小さい）。これは載荷側と反力側の垂直応力がせん断中に逆転し、最終的に反力側垂直応力の方が大きくなっているためである（Figs.20~22）。また、Fig.18の載荷側垂直応力による応力曲線の場合だけは、せん断応力の最大値による強度 $\phi'$ が、定圧試験の載荷側垂直応力による強度 $\phi'$ <sub>d</sub>に比較的近い値を示している。

Table 7 正規圧密カオリン粘土供試体の定体積試験結果  
(上下せん断箱の間隙 0.2 mm)

Results of constant volume direct shear box test  
on normally consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.2 mm)

試験	圧密時の 垂直応力 kPa	/ $\phi'$ の最大値 degree			せん断 速度 mm/min.
		反力側 垂直応力	補正 垂直応力	載荷側 垂直応力	
	98	29.9	<b>29.8</b>	30.6	0.1
	196	<b>29.1</b>	31.2	36.1	0.1
	294	<b>28.8</b>	32.4	37.7	0.1
	392	<b>29.0</b>	29.2	29.7	0.1
	490	<b>29.2</b>	30.6	33.3	0.1
	平均	29.2	30.6	33.5	
試験	圧密時の 垂直応力 kPa	最大せん断応力による強度線 / $\phi'$ degree			
		反力側 垂直応力	補正 垂直応力	載荷側 垂直応力	
	98	24.2	21.6	22.8	
	196	27.9	29.1	30.3	
	294	26.1	26.9	26.5	
	392	24.8	24.0	23.3	
	490	24.3	24.0	23.8	
	平均	25.5	25.1	25.3	

Table 8 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	圧密時の 垂直応力 kPa	試験後			
		含水比	湿潤密度	乾燥密度	
	98	41.6	1.70	1.20	
	196	38.4	1.73	1.25	
	294	37.0	1.75	1.28	
	392	35.4	1.75	1.29	
	490	36.3	1.77	1.30	

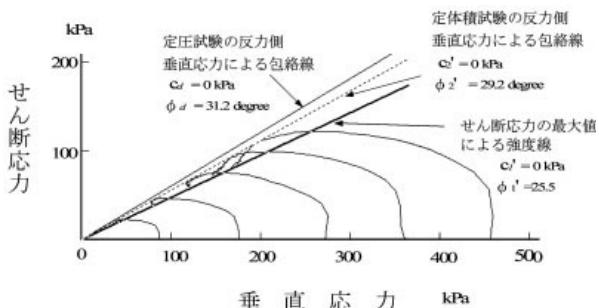


Fig.17 反力側垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較  
Vector curves by force measured on load-receiving plate,  
and comparison to constant pressure direct shear box test

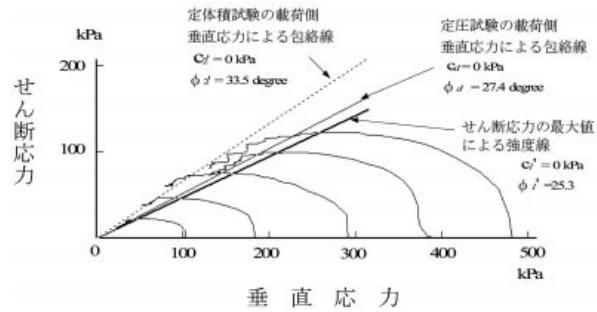


Fig.18 載荷側垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較  
Vector curves by normal dead load,  
and comparison to constant pressure direct shear box test

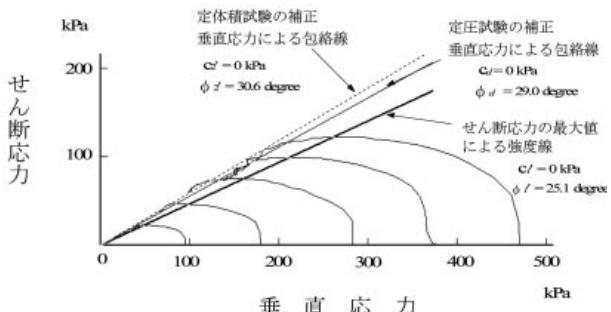


Fig.19 補正垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較  
Vector curves by corrected normal force,  
and comparison to constant pressure direct shear box test

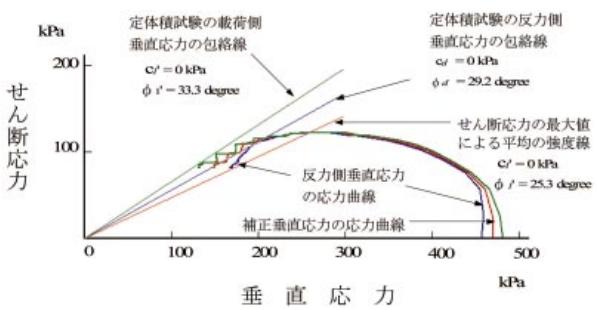


Fig.20 Table 7- の三種類の垂直応力による応力曲線  
Three types of vector curves on the test of Table 7-

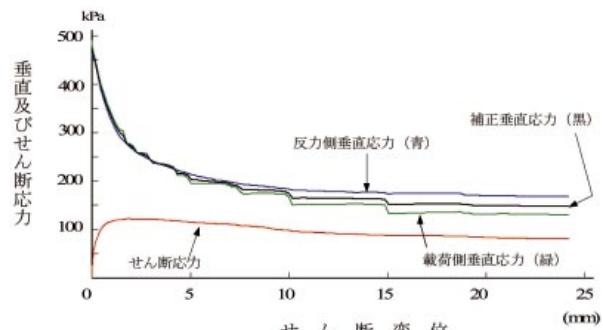


Fig.21 Table 7- の応力・変位曲線  
Stress-displacement curve on the test of Table 7-

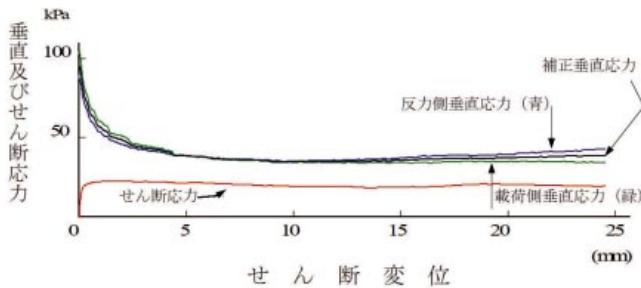


Fig.22 Table 7- の応力・変位曲線  
Stress-displacement curve on the test of Table 7-

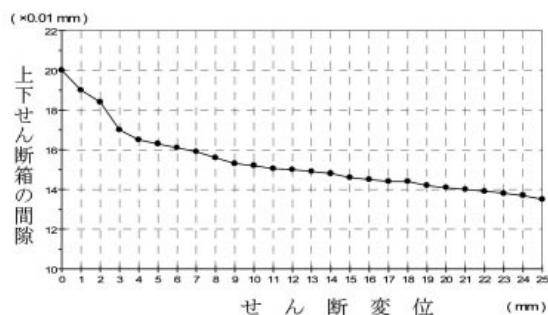


Fig.23 Table 7- の試験における上下せん断箱の間隙の変化  
Change of shearing thickness during the test of Table 7-

Table 9 正規圧密カオリン粘土供試体の定体積試験結果  
(上下せん断箱の間隙 0.5mm)

Results of constant volume direct shear box test

on normally consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.5mm)

試験	圧密時の 垂直応力 kPa	/ の最大値 $\phi'$ degree			せん断 速度 mm/min.
		反力側 垂直応力	補正 垂直応力	載荷側 垂直応力	
	98	<b>29.5</b>	31.2	33.4	0.1
	196	31.7	<b>29.1</b>	27.0	0.1
	294	<b>29.0</b>	29.1	29.3	0.1
	392	31.0	<b>28.9</b>	27.9	0.1
	490	30.8	<b>29.5</b>	28.6	0.1
平均		30.4	29.6	29.2	
試験	圧密時の 垂直応力 kPa	最大せん断応力による強度線 $\phi'$ degree			
		反力側 垂直応力	補正 垂直応力	載荷側 垂直応力	
	98	27	28.2	29.6	
	196	26.4	24.3	22.6	
	294	25	24.4	23.9	
	392	26.2	24.3	22.9	
	490	25.4	23.9	22.8	
平均		26.0	25.0	24.4	

Table 10 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	圧密時の 垂直応力 kPa	試験後		
		含水比	湿潤密度	乾燥密度
	98	41.6	1.70	1.20
	196	38.4	1.73	1.25
	294	37.0	1.75	1.28
	392	35.4	1.75	1.29
	490	36.3	1.77	1.30

### b 上下せん断箱の間隙0.5 mmの試験

試験結果を Tables 9, 10 及び Figs.24 ~ 29 に示す。Figs.24 ~ 26 には、上下せん断箱の間隙 0.5 mm 時の定圧試験の包絡線を比較のため示した。Table 9 のせん断抵抗角も Table 1 と同様に、各試験において粘着力をゼロとした時のものを示している。各試験について、それぞれ載荷側垂直応力、反力側垂直応力、(1) 式による補正垂直応力で整理した [せん断応力 / 垂直応力] の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi'_2$  と、せん断応力の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi'_1$  を示した。また、この試験でも反力側荷重計の圧縮及び復元に伴う上下せん断箱の間隙の変化を同時に計測した。

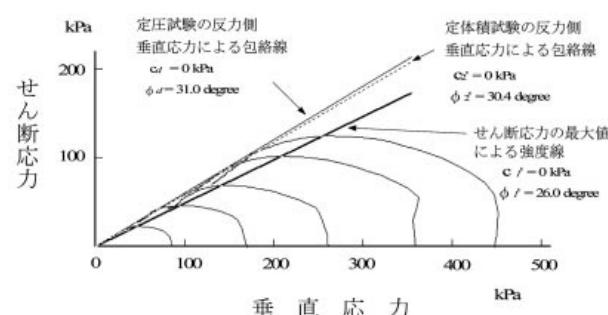


Fig.24 反力側垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較  
Vector curves by the force measured on lead-receiving plate,  
and comparison to constant pressure direct shear box test

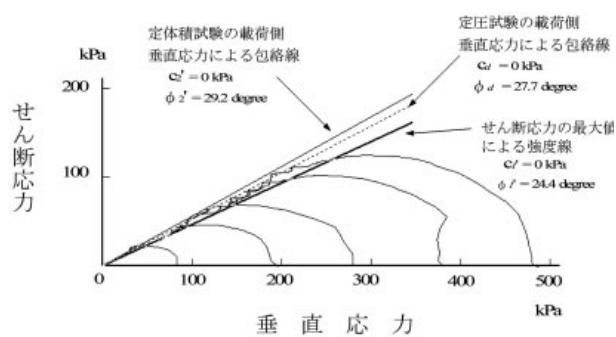


Fig.25 載荷側垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較  
Vector curves by the normal dead load, and comparison to  
constant pressure direct shear box test

上下せん断箱の間隙 0.2 mm 時の定体積試験の場合と異なり、反力側、載荷側、補正垂直応力により整理したせん断抵抗角は、それぞれ上下せん断箱の間隙 0.5 mm 時の定圧試験の結果に近いものとなっている (Figs.24 ~ 26)。Table 9 の結果をみると、せん断中に載荷側と反力側の垂直応力が逆転して反力側が大きくなつた (反力側垂直応力によるせん断抵抗角が小さくなつた) のはとである。そのうち については両者の垂直応力がほとんど一致している (Fig.27)。その他の 3 個の試験は、載荷側の垂直応力が反力側の垂直応力よりもせん断中に常に大きくなつてあり (Figs.28, 29 に例示), 周面摩擦

の発生状況が定圧試験の結果と類似している。この点が、間隙0.2 mm時の定体積試験と異なった特徴である。上下せん断箱の間隙のわずかな違いが、こうした周面摩擦特性に微妙な違いを与えている。

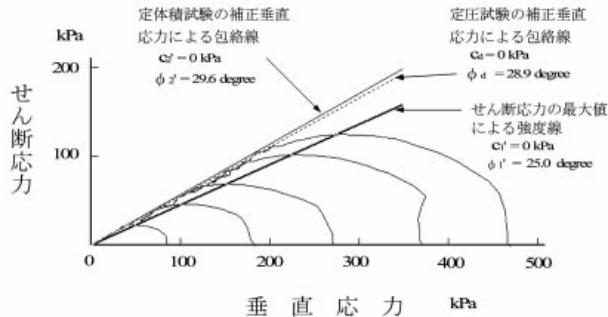
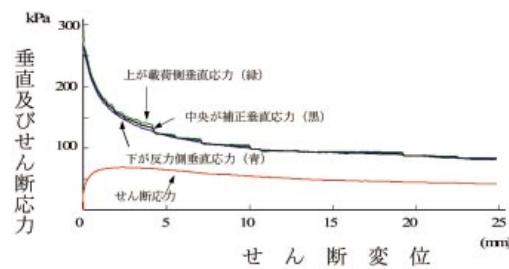
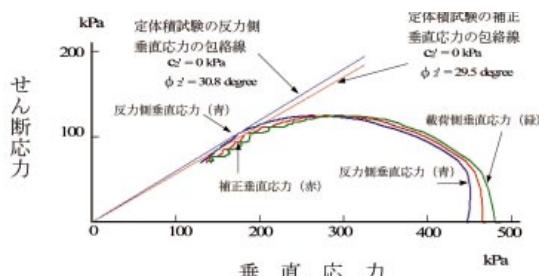
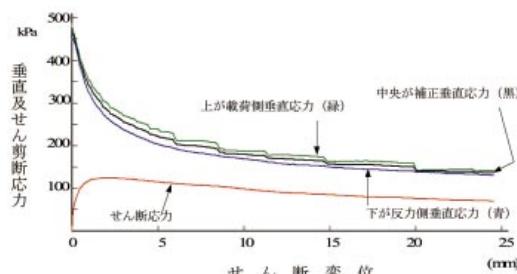
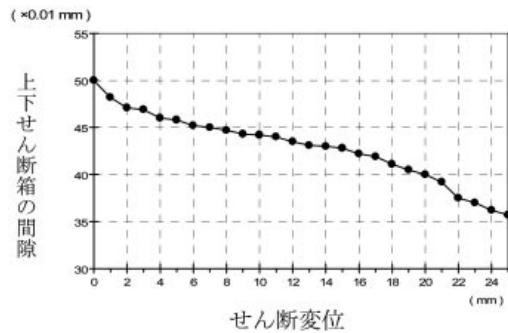


Fig.26 補正垂直応力による応力曲線と定圧試験との比較

Vector curves by the corrected normal force,  
and comparison to constant pressure direct shear box test

Fig.27 Table 9- の応力・変位曲線  
Stress-displacement curve on the test of Table 9-Fig.28 Table 9- の三種類の垂直応力による応力曲線  
Three types of vector curves on the test of Table 9-Fig.29 Table 9- の応力・変位曲線  
Stress-displacement curve on the test of Table 9-Fig.30 Table 9- の試験における上下せん断箱の間隙の変化  
Change of shearing thickness during test of Table 9-

## 2 過圧密カオリン粘土の定体積試験

試験結果をTables 11, 12 及びFigs.31 ~ 35に示す。Table 5の場合と同様に、過圧密供試体なので粘着力を考慮すべきであるが、強度を単純に比較するため、Table 11でも粘着力をゼロとした時のせん断抵抗角を示している。

Table 11 過圧密カオリン粘土供試体の定体積試験結果  
(上下せん断箱の間隙0.2 mm)

Results of constant volume direct shear box test

on over consolidated Kaolin clay (shearing thickness 0.2 mm)

試験	圧密垂直応力 kPa	せん断抵抗角 $\phi'$ degree			せん断速度 mm/min.
		反力側	補正	載荷側	
	196	30.9	<b>30.7</b>	30.4	0.275
	294	<b>31.9</b>	32.0	32.4	0.14
	392	<b>32.1</b>	33.3	34.3	0.11
	490	30.9	<b>30.8</b>	31.1	0.11
平均	31.5	31.7	32.1	最大せん断	
試験	圧密垂直応力 kPa	強度による強度線 $\phi'$ degree			
		反力側	補正	載荷側	
	196	27.6	26.4	25.3	
	294	29.9	30.0	30.0	
	392	28.8	28.5	28.3	
	490	30.1	30.4	30.6	
平均	29.1	28.8	28.6		

Table 12 試験後の供試体の含水比、湿潤密度、乾燥密度  
Water content, wet density, dry density after direct shear box test

試験	圧密垂直応力 kPa	試験後		
		含水比	湿潤密度	乾燥密度
	196	39.0	1.69	1.21
	294	37.8	1.70	1.23
	392	35.5	1.74	1.28
	490	35.8	1.75	1.29

過圧密供試体の定体積試験の場合は、Table 11- 以外の3個の試験において、最終的に載荷側と反力側垂直応力がほとんど等しくなっている。この試験では、途中で垂直変位の制御が一時的に不安定になり他の試験より差が出たが、それでも最終的にはほとんど一致している

(Fig.33)。定圧試験と異なる点は、過圧密比が高くなつてもせん断抵抗角の差が比較的小さいことである(Fig.35)。

上下せん断箱の間隙の変化をFig.36に示したが、せん断の開始とともに供試体が膨張するため、間隙は一旦は広がるが、その後縮小する。最終的にも上下せん断箱の間隙の変化が比較的小さく、最大と最小の差が約0.04mmである。

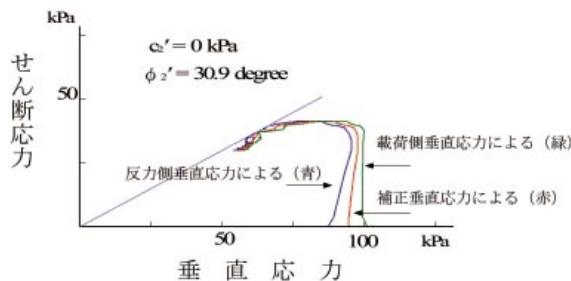


Fig.31 過圧密比2の供試体の応力曲線 (Table 11- )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 2

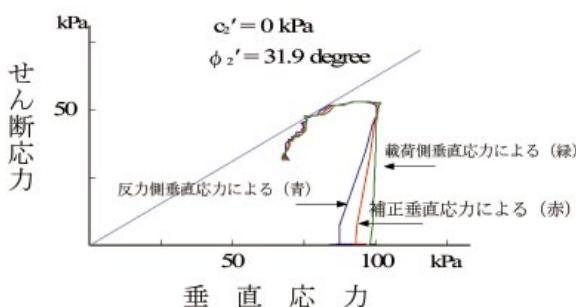


Fig.32 過圧密比3の供試体の応力曲線 (Table 11- )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 3

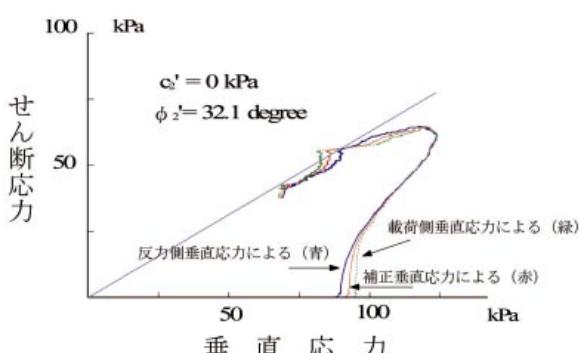


Fig.33 過圧密比4の供試体の応力曲線 (Table 11- )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 4

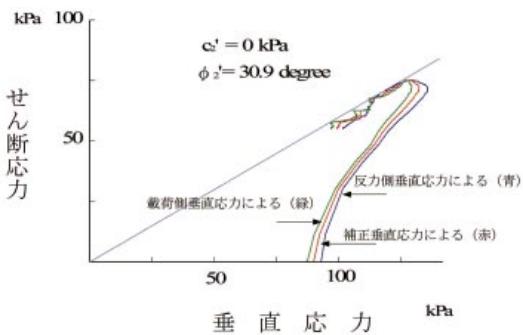


Fig.34 過圧密比5の供試体の応力曲線 (Table 11- )  
Vector curve of specimen with over consolidated ratio 5

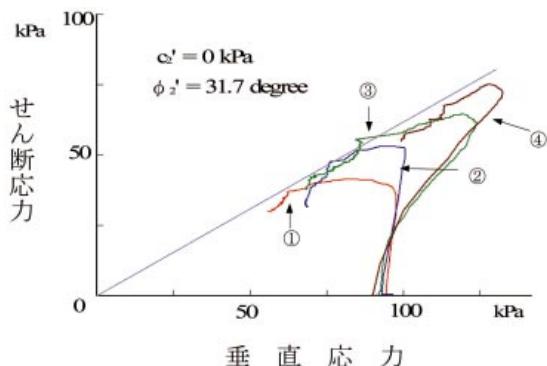


Fig.35 補正垂直応力による応力曲線の比較  
Comparison of four vector curves by corrected normal force

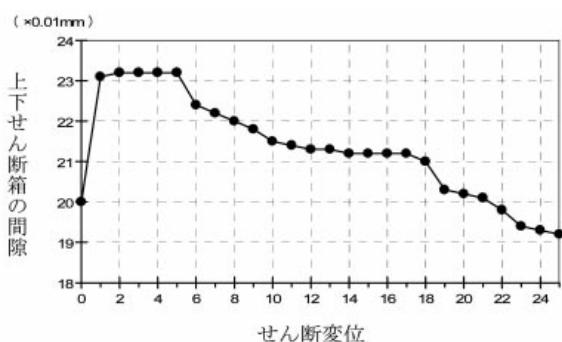


Fig.36 Table 11- の試験における上下せん断箱の間隙変化  
Change of shearing thickness during test of Table 11-

## 試験結果の考察

### 1 正規圧密供試体の定圧試験における周面摩擦特性と限界強度

載荷側と反力側の垂直応力で整理したせん断抵抗角の差が3~4°程度あり、この差が安定計算に与える影響は無視できない。地すべり粘土のせん断強度の測定では、ほとんどの場合ですべり面から採取できる試料の量が少ないため、できればせん断箱内面にオイル等を使用せず、

同一の試料で繰り返しせん断試験を行わなければならぬことが多い。さらに今回の定圧試験の場合のように、オイルを塗布しても周面摩擦を除去しきれない場合もあり、この影響をどう評価するかは重要な問題である。

「土質試験の方法と解説」(p.582)では、ダイラタンシーが負の正規圧密粘土においても反力側の垂直応力を整理することとしている。しかしながら、「反力計測型一面せん断試験機」による正規圧密粘土の定圧試験では、載荷側の供試体厚さだけでなく、反力側の供試体厚さが変わっても反力側垂直応力によるせん断抵抗角は変化する(古谷・小倉, 1999)。この場合は反力側の上せん断箱にも周面摩擦が作用し、せん断面の垂直応力が直接反力側の荷重計で計測されないので、反力側の垂直応力を整理した強度は一般に危険側にやや過大である可能性が高い。

周面摩擦は供試体の厚さに比例して直線的に変化するので、両者の平均的な垂直応力がせん断面の垂直応力に近いと仮定し、(1)式により補正する方法が提案された(古谷, 1980)。この補正法による強度は三軸圧縮試験の結果ともかなり近いことが示されている(古谷, 1980, 1983)。今回の正規圧密カオリン粘土の定圧一面せん断試験の結果は約 $\phi_d = 29^\circ$ であった。今後、三軸圧縮試験の結果と比較することが望ましいが、類似のカオリン粘土( $I_p = 17.2$ ,  $CE = 39.8\%$ )を用いて行われた長岡技術科学大学の三軸圧縮試験結果では、定圧試験の補正垂直応力によるせん断抵抗角に近い値 $28.9^\circ$ を得ている(徳山・豊田, 2001)。

## 2 過圧密供試体の定圧試験における周面摩擦特性と限界強度

過圧密比が高くなるにつれて載荷側と反力側の垂直応力の差(周面摩擦)が小さくなる傾向を示し、強度の決定に問題は生じなくなる。過圧密比が低い場合には正規圧密供試体の場合と似ており、(1)式による補正垂直応力を整理すれば良いと思われる。

## 3 正規圧密供試体の定体積試験における周面摩擦特性と限界強度

「土質試験の方法と解説」では、せん断強度の最大値から求める $\phi_1'$ が $\phi_d$ に近いとしているが、Fig.18に示したように、比較的このことが該当するのは上下せん断箱の間隙0.2 mmの定圧及び定体積試験を、載荷側垂直応力を整理した場合だけであった。このことから、垂直荷重計を反力側に設置する以前の試験機を使用していた時期に、上記の考え方が示されたものと思われる。しかし、「土質試験の方法と解説」に記述されているとおりに反力側垂直応力を整理した場合には、上下せん断箱の間隙0.2 mmの場合で、 $\phi_1' = 25.5^\circ$ であり、0.5 mmの場合では $\phi_1' = 26^\circ$ である。これに対して、定圧試験ではそれぞれ $\phi_d = 31.2^\circ$ と $31.0^\circ$ であり、 $5.7^\circ$ と $5^\circ$ の差となっ

ている。補正垂直応力の場合も同程度の差が出ており、また間隙0.5 mmの載荷側垂直応力の場合も $3.4^\circ$ の差となっていて、今回の試験で見る限り、せん断強度の最大値から求めた値 $\phi_1'$ は定圧試験の代替にはならないと思われる。また、せん断応力の最大値を限界強度と考えた場合、限界強度に到達した後に、さらに限界強度線の上を応力が移動することになり、力学的意味が不明確である。

一方、[ / ]の最大値から求めたせん断抵抗角 $\phi_2'$ は、上下せん断箱の間隙が0.2 mmの場合、載荷側、反力側及び補正垂直応力により整理したせん断抵抗角がそれぞれ $33.5^\circ$ ,  $29.2^\circ$ ,  $30.6^\circ$ であり、反力側が定圧試験の補正垂直応力による値に近い結果となっている。上下せん断箱の間隙0.5 mmの場合では、載荷側、反力側及び補正垂直応力により整理したせん断抵抗角がそれぞれ $30.4^\circ$ ,  $29.6^\circ$ ,  $29.2^\circ$ であり、載荷側と補正垂直応力による値が定圧試験の補正垂直応力による値に近い結果となっている。

上下せん断箱の間隙0.2 mmの試験(Table 7)では、いずれの試験でも反力側垂直応力が最終的に載荷側よりも大きくなつた。一方、0.5 mmの場合(Table 9)には、明確に大きくなつたのは $\phi_2'$ だけである( $\phi_1'$ はほとんど一致)。このように上下せん断箱の間隙のわずかな違いが周面摩擦力の発生の違いに微妙に影響している。正規圧密粘土の定体積試験では、せん断の開始に伴つて体積が減少しようとするため垂直荷重を減らして体積を一定に保とうとする。垂直荷重の除荷により反力側の荷重計が歪みを復元しようとして上せん断箱を下方に押し戻すので、せん断面が圧縮される。この時に反力側垂直応力が載荷側よりも大きくなる場合が出てくる。詳細なメカニズムは明らかでないが、上下せん断箱の間隙が小さい場合にこの現象が起きやすくなっている(Fig.37に例示)。

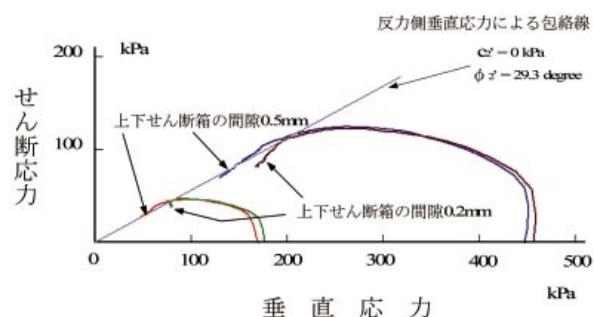


Fig.37 上下せん断箱の間隙の違いによる応力曲線  
(反力側垂直応力で整理)の違い

Difference of vector curves due to thickness of shear zone  
(by the normal force measured on the load receiving plate)

この原因として、間隙が0.1~0.2 mm程度と小さい場合には、反力側垂直荷重計の歪みの復元による力がせん断面から下供試体に伝達され、載荷側垂直荷重よりも反力の方が大きくなつて上下せん断箱の周面摩擦力 $F_1$ 、 $F_2$ の向きが逆転することが考えられる。一方、上下せん断箱の間隙が0.5 mmへと広がるにつれて変形が上下せん断箱の間隙部分で起きてしまい、下せん断箱の周面摩擦力の向きが変化しにくいのではないか。この現象解明も今後に残された課題であり、上下せん断箱の間隙を段階的に変えて試験を行つてみる必要がある。

Fig.38に、載荷側垂直応力が反力側より大きい場合(a)と、小さい場合(b)の力関係を模式的に単純化して示した。(a)の場合には周面摩擦力は下向きに作用する。粘土供試体のように供試体がせん断面で分離せず一体の状態では、周面摩擦力は上下のせん断箱に作用し、 $P_1 - F_1 = P_2 + w + F_2$ の力の平衡が成立する。このため、せん断面の垂直応力は(1)式によって推定される(古谷・小倉, 1999)。一方、(b)の場合には $P_2$ が $P_1$ よりも大きくなつており、周面摩擦力 $F_1$ 、 $F_2$ は上向きとなる。この場合、 $P_1 + F_1 + F_2 = P_2 + w$ という力の平衡が成立する。せん断面の下向きの垂直力が載荷側垂直力よりも大きい場合には、 $F_2$ は供試体を介してせん断面の垂直力の一部に転化され、せん断面に作用する垂直力は反力側荷重計で計測された値と上せん断箱の自重から求められると考えられる。上せん断箱が反力側荷重計で支えられて自由な状態であることが両者の違いに影響している。(a)の場合には、周面摩擦力は試験機台に固定された下せん断箱に支えられ、反力側荷重計では直接計測されないとと思われる。

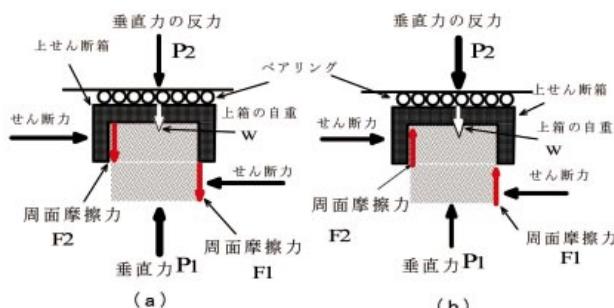


Fig.38 周面摩擦特性の違い  
Two types of characteristics of side friction

Fig.39には、定体積試験において反力側垂直応力が載荷側より大きい場合と小さい場合を一例ずつ、及び定圧試験の2例を示した。載荷側垂直応力が反力側より大きい場合の補正垂直応力と、反力側垂直応力が載荷側より大きい場合の反力側垂直応力による応力曲線が $\phi_d = 29^\circ$ の包絡線上に一致して並んでおり、上記の仮定を裏付けている。

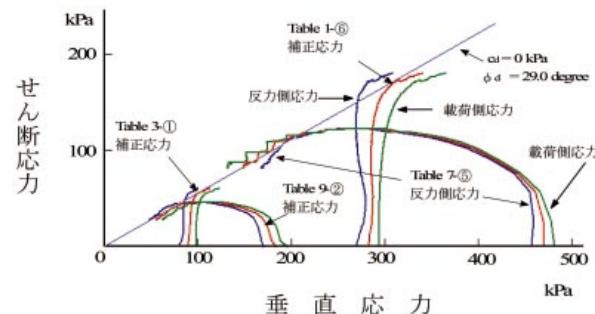


Fig.39 載荷側と反力側垂直応力の組み合わせによる包絡線  
Envelop by corrected normal stress and measured normal force  
on load-receiving plate

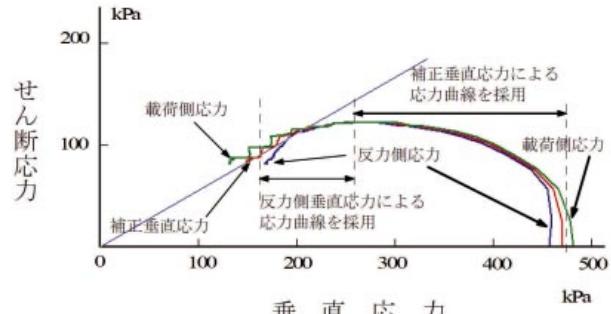


Fig.40 応力曲線の組み合わせ補正法  
Composite correct method of vector curve

ここで、定体積試験の一つの試験ごとの応力曲線において、載荷側垂直応力が反力側より大きい領域では補正垂直応力を採用し、反力側垂直応力が載荷側より大きい領域では反力側垂直応力を採用して応力曲線を描き(組み合わせ補正法、Fig. 40)、載荷側、補正、反力側垂直応力による応力曲線と比較したものがFigs. 41~44である。載荷側垂直応力による応力曲線は $\phi_d = 29^\circ$ の包絡線と比較して大きい場合も小さい場合もあってデータのバラツキが大きいのに対し(Fig.41、一次相関係数0.9658)、補正及び反力側垂直応力による応力曲線(一次相関係数0.9959及び0.9966)は、全体に $\phi_d = 29^\circ$ の包絡線に近く、数例でこれより幾分大きくなつた(Figs.42~43)。

大きくなつた事例としては、Fig.42では載荷側垂直応力が反力側より小さい場合であり(黒線)、またFig.43では反力側垂直応力が載荷側より小さい場合であった(赤線)。しかし、組み合わせ補正による応力曲線の包絡線は、全体に補正垂直応力による定圧試験の結果にほとんど一致しており、平均で $\phi_d' = 29.2^\circ$ である(Fig.44、一次相関係数0.9998)。なお、組み合わせ補正による強度についてはTables 7, 9に太字で示した値に相当する。

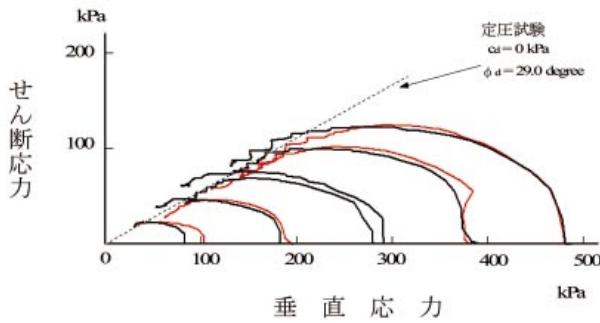


Fig.41 載荷側垂直応力による定体積試験の応力曲線  
Vector curves of constant volume test by normal dead load

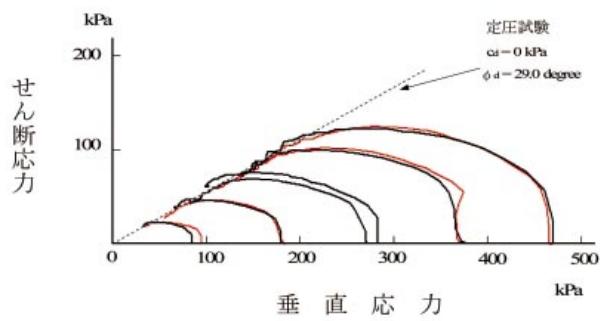


Fig.42 補正垂直応力による定体積試験の応力曲線  
Vector curves of constant volume test by corrected normal force

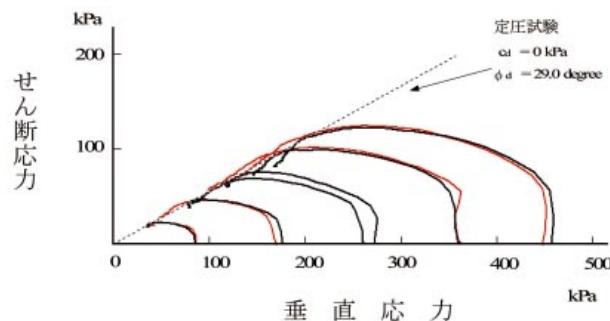


Fig.43 反力側垂直応力による定体積試験の応力曲線  
Vector curves of constant volume test by measured normal force on load-receiving plate

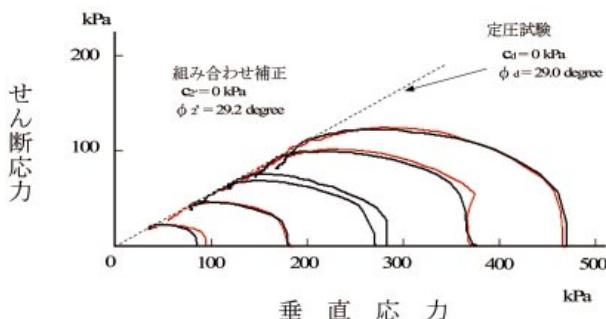


Fig.44 組み合わせ補正による定体積試験の応力曲線  
Vector curves of constant volume test by composite correct method

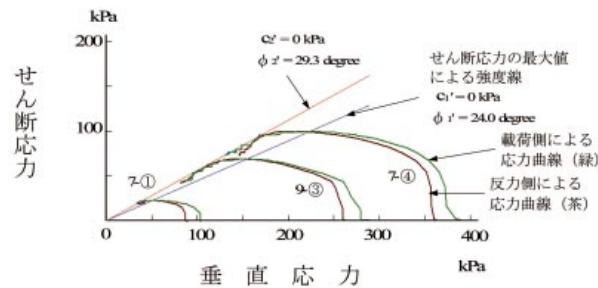


Fig.45 載荷側と反力側の垂直応力がほとんど一致した事例  
Table 7- , Table 9- , Table 7-  
Three examples that normal dead load had almost correspondence to measured normal force on load-receiving plate

また、上下せん断箱の間隙0.2及び0.5 mmの両試験から、載荷側と反力側の垂直応力がほとんど一致した3事例を選びFig.45に示した。この場合は周面摩擦が除去されているので、載荷側と反力側の双方ともせん断面の垂直応力がそのまま得られていると考えられる。この3事例の $\phi'_d$ の平均は29.3°であり、定圧試験の補正垂直応力によるせん断抵抗角 $\phi_d$ 及び組み合わせ補正によるせん断抵抗角 $\phi'_d$ とほとんど一致している。これに対し、せん断強度の最大値から求めた平均せん断抵抗角 $\phi'_1$ は24.0°である。

せん断箱の内部では実際には相当複雑な力学現象が起きていると思われ、ダイラタンシーの正負や粘着力の有無等の違いに伴い、周面摩擦特性も異なるようである(古谷・小倉, 1999)。例えば、ダイラタンシーが正の密な乾燥砂では、Fig.38(b)で $F_2$ は下向きになる。この場合、反力側垂直荷重による強度は供試体層厚の影響を受けず一定となり(高田ら, 1996), 三軸圧縮試験の強度にも近い(古谷, 1984)。また、せん断面で明確に分離している供試体では、上せん断箱の周面摩擦 $F_2$ は作用しないと思われ、周面摩擦力は分離していない供試体の半分程度になる。緩い乾燥砂は分離供試体のモデルに近く、正規圧密粘土の場合と異なり、ダイラタンシーが負であっても反力側垂直応力による応力曲線の包絡線から求められる(住ら, 1997)。これに対し、正規圧密粘土供試体の定圧試験は非分離体モデルに近く、供試体は固体のように一体となって収縮しながらせん断され、上下せん断箱の周面摩擦力 $F_1$ ,  $F_2$ は共に載荷垂直応力に抵抗するよう下向きに作用すると考えられる。

せん断面の平均的な垂直応力と周面摩擦特性、及び組み合わせ補正法の妥当性についてはさらに詳細に検証する必要がある。この点についてはFig.46に示すように、反力側の垂直力と載荷側せん断箱の周面摩擦力を同時に計測することで、緻密な検証が可能になるのではないかと考えている。また、反力側荷重計で周面摩擦力を補正する方法は、上記のように現象が相当複雑になるので、Bishopら(1971)のリング式せん断試験機のように、一

面剪断試験機も載荷側せん断箱の周面摩擦力を直接計測して補正する方が単純になる。

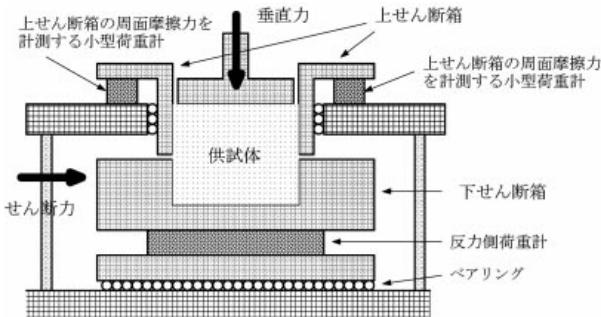


Fig.46 載荷側せん断箱の周面摩擦力をと反力側垂直力を同時に計測するせん断箱

Direct shear box to measure simultaneously side friction of upper box and normal force on load-receiving plate

#### 4 過圧密供試体の定体積試験における周面摩擦特性と限界強度

過圧密供試体の定圧試験では過圧密比が高くなるにつれて強度が大きくなる傾向を示すが、定体積試験では個々の供試体密度に対応して垂直応力が増減するので、[ / ] の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi'_2$  については明確な増加傾向は見られない。

過圧密供試体の応力曲線については、「土質試験の方法と解説」も応力曲線の包絡線、すなわち [ / ] の最大値から限界強度を求ることとしている。また、過圧密比が高くなるにつれて試験の終わりには周面摩擦が小さくなり、載荷側と反力側垂直応力はほとんど一致する傾向を示すことから、強度の決定は難しくない。

ただし、過圧密供試体の定圧と定体積試験の比較については、同じ過圧密比であっても破壊時の垂直応力が大きく異なり、密度も異なるため単純に比較することが難しい。

#### 5 反力計測型一面せん断試験機による定体積試験の問題点

Figs.23, 30, 36に示したように、反力計測型一面せん断試験機による定体積試験では、垂直荷重計の圧縮と復元により、せん断中に上下せん断箱の間隙が変化している。当所の試験機では0.1 mmを越えるせん断面の圧縮を起こした試験例もあった。「土質試験の方法と解説」では試験中の垂直変位を±0.01 mm以内に押さえることとしている。しかし載荷側で正確に制御しても、正規圧密粘土の試験では最大強度が発揮される時点での垂直応力は圧密時の半分程度になるので、この応力変化に対する荷重計の歪みの復元は0.01 mmよりも遙かに大きなものとなる。一般的の歪みゲージ式荷重計を使う限り、反力側

で0.04 ~ 0.15 mm程度にもなる変位を起こし、なおかつこの変位のほとんどが実質的なせん断面である上下せん断箱の間隙で起きている。もし垂直変位を±0.01 mm以内に押さえることが定体積試験として必要であるなら、載荷側を制御する方法では本質的に定体積試験になっていない。また、この程度の垂直応力の増減に対して、歪みによる変位を±0.01 mm以内に収め、かつ計測精度を十分満足する荷重計を入手することは難しい。反力計測型試験機を用いて行う載荷側制御の定体積試験において、載荷側供試体の端の変位だけを±0.01 mm以内に収める試験法は、定体積試験の理論と合致せず意味がないのではないかという疑問が生ずる。

しかしながら、載荷側制御による定体積試験の強度は、組み合わせ補正の場合だけでなく、補正及び反力側垂直応力による強度を含めて、定圧試験の補正垂直応力による排水強度と比較してわずかに大きいながらも、かなり近い強度を示している(Figs.42 ~ 44)。定体積試験は厳密でないにしても、正規圧密粘土の試験において垂直応力を減少させながらせん断することで過剰間隙水圧の発生もある程度まで抑制し、かつ変位の初期の段階で限界強度に到達するので、せん断速度を比較的速くしても有効応力強度を測定できるのではないかと考えられる。この点については、上下せん断箱の間隙が変化しないように反力側の垂直変位も制御して定体積試験を行うなど、引き続き検討する必要がある。

#### 結 言

反力計測型一面せん断試験機によりカオリン粘土の定圧と定体積一面せん断試験を行い、周面摩擦特性を検討して補正法を提案するとともに、定体積試験の垂直変位制御法の問題点を述べ、定圧及び定体積一面せん断試験における強度定数の求め方について検討を行った。

定圧試験においては、正規圧密・過圧密供試体のどちらの場合も反力側垂直応力が載荷側垂直応力よりも小さかった。また、正規圧密供試体では上下せん断箱の間隙が0.2 mmと0.5 mmの場合で傾向に違いは見られず、補正垂直応力による包絡線が三軸圧縮試験(徳山・豊田, 2001)や周面摩擦が小さい場合の定体積試験の包絡線(Fig.45)に近かった。

正規圧密供試体の定体積試験では、上下せん断箱の間隙の取り方により周面摩擦特性が大きく異なった。上下せん断箱の間隙が0.2 mmの場合は反力側垂直応力がすべての場合で載荷側より大きくなり、反力側垂直応力による[ / ] の最大値から求めたせん断抵抗角  $\phi'_2$  が定圧試験の補正垂直応力による  $\phi_a$  に近くなった。逆に0.5 mmの場合は反力側垂直応力が載荷側より小さくなることが多く、補正垂直応力によるせん断抵抗角  $\phi'_2$  が  $\phi_a$  に近くなかった。これらに対し、せん断強度の最大値から求めた  $\phi'_1$  は定圧試験の結果より2.1 ~ 5.7° 小さ

かった。

ひとつの応力曲線について、反力側と載荷側の垂直応力の状態に応じて、反力側垂直応力と補正垂直応力を組み合わせて補正する方法により、正規圧密供試体の定体積試験結果全体を整理すると、せん断抵抗角 $\phi_2'$ は定圧試験の補正垂直応力による $\phi_d$ 値とほとんど一致した。この方法の妥当性については、反力側垂直応力と載荷側せん断箱の周面摩擦力を同時に測定すれば検証できると思われる。

過圧密供試体の定体積試験では、載荷側と反力側垂直応力がほとんど一致する傾向を示すので、限界強度の決定は応力曲線の包絡線から比較的容易に求められる。

定体積試験では、反力側垂直荷重計の変位により、試験中に上下せん断箱の間隙が0.04～0.15 mm程度変化している。このため、載荷側制御の定体積試験の妥当性について引き続き検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Anderson, A. and Brown, J.D. (1971) : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, 21, 273～328
- 2) 古谷 保 (1980) : 直接せん断試験における有効垂直応力の補正法と地すべり粘土のせん断強度測定, 農土試技報, C20, 17～44
- 3) 古谷 保 (1983) : 一面せん断試験を中心とした地すべり粘土の強度測定. 農土試報告, 第23号, 31～54
- 4) 古谷 保 (1984) : 改造した「改良型」による標準砂の一面剪断試験, 昭和59年度農業土木学会大会講演要旨集, 430～431
- 5) 古谷 保・小倉 力 (1999) : 「反力計測型一面せん断試験機」における周面摩擦の補正法と斜面安定問題への適用, 農工研技報 第197号, 25～37
- 6) 宜保清一 (1979) : 粘土の残留強度決定に関する研究, 琉球大学農学部学術報告, 第26号, 183～272
- 7) 地盤工学会 (2000) : 土質試験の方法と解説, 第一回改訂版, 第4章 一面せん断試験, 563～600
- 8) La Gatta, D.P. (1970) : Residual Strength of Clay and Clay-Shales by Rotation Shear Tests, Harvard Soil Mechanics Series, No.86, 1～204
- 9) Lefebvre, G. (1981) : Fourth Canadian Geotechnical Colloquium: Strength and Slope stability in Canadian soft clay Deposits, Canadian Geotechnical Journal, 18, 420～442
- 10) 中村浩之・清水清文 (1973) : すべり面における剪断強度決定のための土質試験法, 地すべり, 15(2), 25～32
- 11) 農林水産省農村振興局計画部資源課・農業土木学会 (2004) : 土地改良事業計画設計基準, 計画「農地地すべり防止対策」, 技術書・基準書, 167
- 12) 大島昭彦・高田直俊・深見知亭・住 武人 (1997) : 一面せん断定圧試験による $\phi_d$ と定体積試験による $\phi_s$ の比較, 第32回地盤工学研究発表会講演集, 523～524
- 13) Skempton,A.W.(1977) : Slope stability of cuttings in borwn London clay, Proc.9th.Int.Conf.Soil Mech. Found. Eng., 3, 261～270
- 14) 住 武人・大島昭彦・高田直俊・深見知亭 (1997) : 一面せん断定圧試験における供試体層厚の影響 (第2報), 土木学会第32回年次学術講演会概要集, - A 30, 60～61
- 15) 高田直俊・大島昭彦・坂本佳理 (1996) : 一面せん断定圧試験における供試体層厚の影響, 第31回地盤工学研究発表会講演集, 669～670
- 16) Townsend,F.C. and Gilbert, P.A. (1973) : Tests to measure residual strength of some clay shales, *Geotechnique*, 23, 267～271
- 17) 徳山英之・豊田浩史 (2001) : 原位置せん断試験装置開発に関する基礎的研究, 平成13年度建設工学専攻・建設工学課程修士論文要旨集, 長岡技術科学大学ホームページ, [http://glbce.nagakaut.ac.jp/yoshisyu/2001/kensetu\\_zibun/ken02407.pdf](http://glbce.nagakaut.ac.jp/yoshisyu/2001/kensetu_zibun/ken02407.pdf)

# Characteristic of Side Friction between Specimen and Inner Wall of Shear Box and the Maximum Angle of Shearing Resistance in Direct Shear Box Test on Kaolin Clay

FURUYA Tamotsu, ARIYOSHI Mitsuru, OKUYA M A Takehiko, KURODA Seiichirou

## Summary

Results of constant pressure and constant volume direct shear box tests on normally and over-consolidated Kaolin clay are compared using a direct shear box test apparatus described in the designation of the Japanese geotechnical society (JGS T-560&561-1997). Normal force is measured on load-receiving plate against normal dead load and side friction between the soil specimen and inner wall of the shear box is estimated from difference to the normal dead load. The normal dead load is always larger than the force measured on the load-receiving plate in the constant pressure tests. In this case, the side friction is estimated from the difference between the two forces. In the constant volume test, the force measured on the load-receiving plate is larger than the normal dead load in almost cases of 0.2 mm shearing thickness; on the other hand, the former is smaller than the latter in many cases of 0.5 mm shearing thickness. The average normal force on the shear plane will be close to the resultant of the force measured on the load-receiving plate and the weight of the upper shear box when the force measured on the load-receiving plate is larger than the normal dead load. A composite correct method of vector-curve due to appearance condition of the side friction is proposed using the resultant force and the normal dead load. The maximum angle of shearing resistance of constant volume test is decided from the maximum ratio of [shear force/ compositely corrected normal force], and is shown good agreement to the result of the constant pressure test with corrected normal force. It is also noticed that the normal displacement of the shear zone in the constant volume test exceeds the allowable limit commented in the designation of the Japanese geotechnical society (JGS T-560-1997) because of the strain of the normal load-cell mounted at the load-receiving plate, and the validity of this test is discussed comparing to the result of the constant pressure test.

**Keywords :** Kaolin, direct shear box test, side friction, maximum angle of shearing resistance, normal load-cell on load receiving plate, constant pressure test, constant volume test

## Appendix : 上下せん断箱の間隙0.2 及び0.5 mmの時の定圧試験のデータ

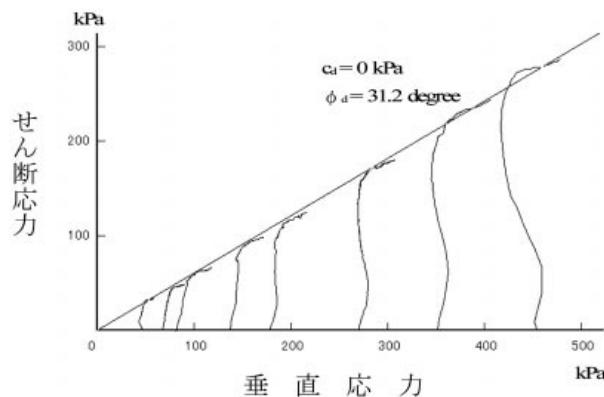


Fig.1 反力側垂直応力による応力曲線0.2mm  
Vector curves by force measured on load-receiving plate

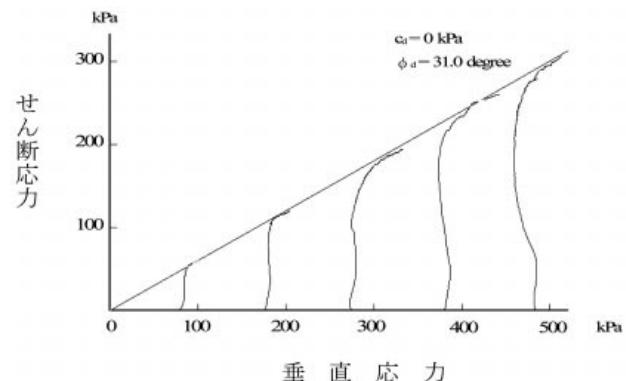


Fig.4 反力側垂直応力による応力曲線  
Vector curves by force measured on load-receiving plate

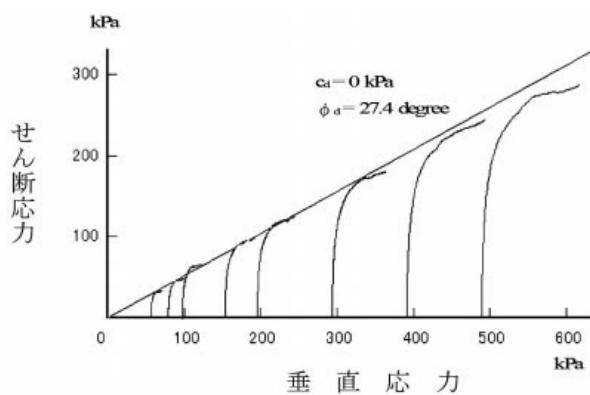


Fig.2 載荷側垂直応力による応力曲線0.2mm  
Vector curves by normal dead load

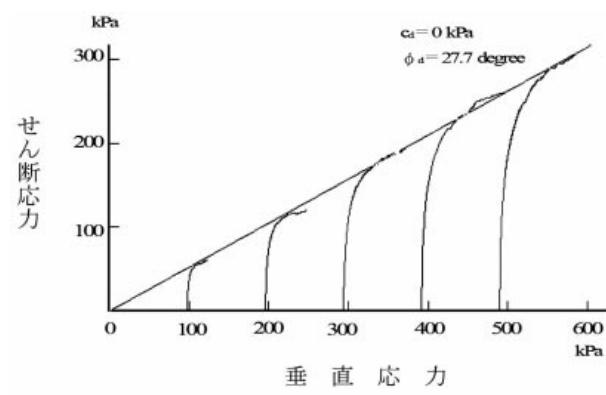


Fig.5 載荷側垂直応力による応力曲線  
Vector curves by normal dead load

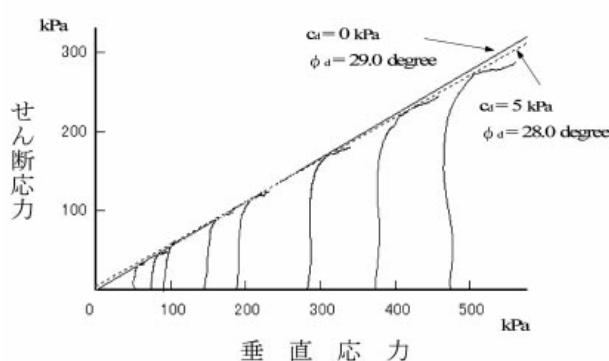


Fig.3 補正垂直応力による応力曲線0.2mm  
Vector curves by corrected normal force

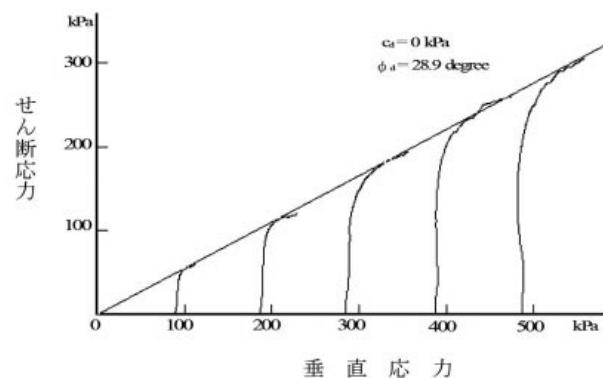


Fig.6 補正垂直応力による応力曲線  
Vector curves by corrected normal force