

## 定圧一面せん断試験における供試体層厚と周面摩擦の関係

- 正規圧密カオリン粘土と緩詰め三隅砂供試体の比較 -

古谷 保\*・川本 治\*\*・山田康晴\*\*・中里裕臣\*\*・井上敬資\*\*

		目 次			
I	緒言	81	IV	緩詰め三隅砂供試体の周面摩擦特性	87
II	試験機の概要と試験法	81	V	考察	87
III	正規圧密カオリン粘土の定圧試験	83	VI	結言	90
1	せん断箱内面にオイルを塗らない試験	83		参考文献	90
2	上せん断箱内面にオイルを塗った試験	84		Summary	91
3	上下せん断箱内面にオイルを塗った試験	85			
4	せん断面の間隙を変化させた試験	86			

## I 緒 言

一面せん断試験機は構造や試験法が簡単なため実務上便利であり、斜面安定問題に関連する土のせん断強度測定に使われている(農林水産省, 2004)。しかしながら供試体をせん断箱で拘束するため、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、実務上無視できないほど結果に大きな影響を与える。これを補正するため「土質試験の方法と解説」(地盤工学会, 2000)では、垂直荷重計を反力受け側に設置することとした。この方法は、砂のような粒状体(古谷, 1984; 住ら, 1997; 新城ら, 2003)、又は反力側の垂直応力が載荷側より大きくなる供試体ではせん断面の垂直応力を直接測定できると考えられる(高田ら, 1996; 古谷ら, 1999, 2007)。しかし、負のダイラタンシー特性を持ち、かつ粒子間結合力の強い正規圧密粘土のような供試体では、反力側のせん断箱との間にも周面摩擦が発生するため、砂供試体とは異なる垂直応力の補正法が必要となる(古谷, 1983; 古谷ら, 1999)。

こうした負のダイラタンシー特性を持つ供試体について、土質の違い(特に粒子間結合力の大小)による周面摩擦特性は十分解明されているとは言えず、かつ、この評価の違いが強度の決定に無視できない影響を与える(古谷ら, 2007)。特に、正規圧密粘土の強度は地すべり対策において重要な強度の指標の一つである完全軟化

強度(Skempton, 1977)に関連し、この強度の概念は日本の地すべりや破砕帯などの粘土にも当てはまることが多いと考えられるので(仲野ら, 1992; 農林水産省, 2004)、一面せん断試験における周面摩擦力の正確な評価は実務上重要な課題である。この周面摩擦力は供試体層厚の影響を受けやすいため、層厚を変えた試験により検討することができる。

供試体層厚を変えることによって周面摩擦特性を検討する試験は、これまでも砂質土については高田ら(1996)や住ら(1997)によって行われ、反力側の垂直応力で整理された強度がダイラタンシーの正負にかかわらず供試体層厚(すなわち周面摩擦)の影響を受けないことを確認している。また粘性土については、古谷ら(1999)がカオリン粘土を用いて、ダイラタンシーが負となる正規圧密供試体について載荷側と反力側の供試体層厚を変化させた試験を行い、反力側垂直応力が載荷側供試体層厚だけでなく反力側供試体層厚の影響も受けることを指摘している。

今回は、せん断箱の内面にオイルを塗布した場合と塗布しない場合について、それぞれ載荷側の供試体層厚を変化させた試験を行い、それらの違いを比較することで反力側せん断箱と供試体との周面摩擦特性を論じている。また住ら(1997)の行った緩詰め三隅砂供試体の試験結果と比較し、砂と粘土の周面摩擦特性の違いや正規圧密粘土の試験における垂直応力の補正法等について検討を行った。

## II 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; 古谷, 1983)で、供試体直径は150mmである。

\*農地・水資源部

\*\* 農村総合研究部 広域防災研究チーム

平成20年1月17日受理

キーワード: 定圧一面せん断試験, 周面摩擦, カオリン, 正規圧密, 三隅砂

試験の方法は、カオリン粘土による正規圧密供試体の定圧（従来型の載荷側の垂直応力を一定とする）排水試験であり、せん断試験における上下せん断箱の間隙は0.2mmである。また、せん断速度は0.02mm/min.である。

用いたカオリン粘土は市販のHA粘土（Gs=2.738, WL=41.3%, Ip=16.8）である。供試体の作成方法としては、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、最初は垂直応力10kPa程度で圧密し、圧密終了とともに段階的に垂直応力を増やしていき、最終的に垂直応力294kPaで圧密した。圧密時間は平均して約15時間ほどであり、圧密の終了を待ってせん断した。

供試体層厚は、上供試体（反力側）の層厚を15mmとし、上下供試体層厚を20～40mm程度まで変化させた。

今回は、反力側の上せん断箱に作用する周面摩擦特性をより明確に検討するため、潤滑油とワセリンを混ぜて粘性を調整したオイル（以下、オイル）を使用して、①せん断箱内面にオイルを塗布しない試験（Fig.2 (a)）、②上せん断箱内面にだけオイルを塗布した試験（Fig.2

(b)）、③上下せん断箱の両方の内面にオイルを塗布した試験（Fig.2 (c)）を行った。

せん断面付近の平均垂直応力を推定する一方法として、①試験中の供試体層厚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垂直応力（古谷，2007；以下、比例配分垂直応力）、②載荷側と反力側垂直応力の単純平均による垂直応力（以下、単純平均垂直応力）、及び③載荷側垂直応力、④反力側垂直応力による4とおりのせん断抵抗角を求めた。これらの試験では、データの整理にあたってせん断面の面積補正は行っていない。

さらに、試験中の操作により周面摩擦がどの程度除去されるかを確認するため、試みに98, 196, 294, 392, 490kPaの垂直応力で、せん断面の間隙を変化させた正規圧密カオリン粘土供試体の定圧排水一面せん断試験を行った。

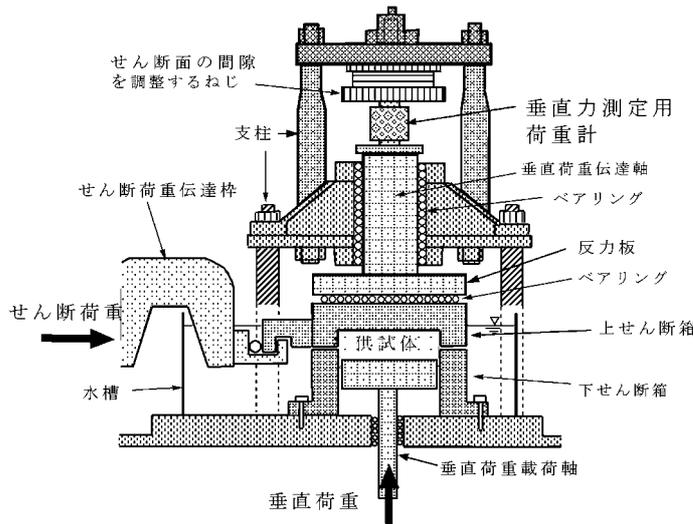


Fig.1 せん断試験機の概要図  
Design of direct shear box test apparatus

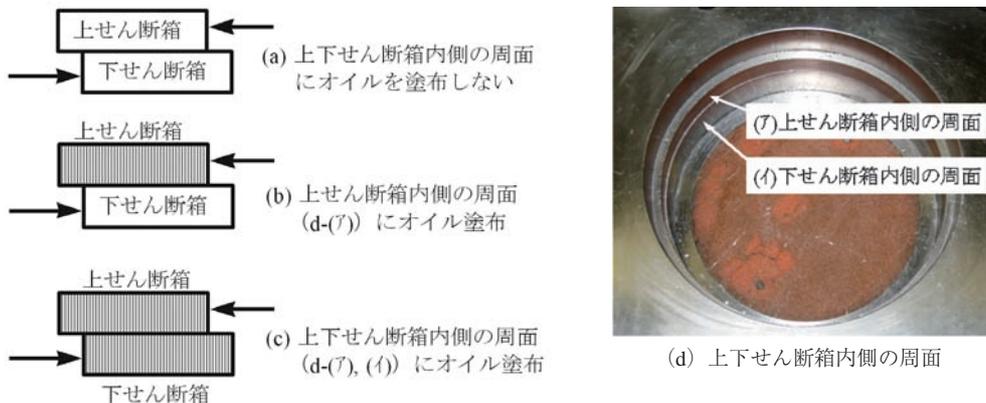


Fig.2 せん断箱のオイルの塗布方法  
Oil smeared pattern of inner shear box

### Ⅲ 正規圧密カオリン粘土の定圧試験

#### 1 せん断箱内面にオイルを塗布しない試験

最大強度を発揮した時のせん断応力と供試体層厚の関係をFig.3, 最大強度を発揮した時の垂直応力と供試体層厚の関係をFig.4, 試験後に計測した密度と供試体層厚の関係をFig.5, 最大せん断抵抗角と供試体層厚の関係をFig.6に示す。また, 一次回帰式の係数と標準回帰係数をTable 1に示す。

せん断応力と密度は供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している (Figs.3, 5)。また, 反力側垂直応力と単純平均垂直応力も, ばらつきはあるものの供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している。これに対し, 比例配分垂直応力は供試体層厚が大きくなるにつれて減少している。せん断抵抗角と供試体層厚の関係 (Fig.6) では, 反力側垂直応力によるせん断抵抗角 (以下, 反力側せん断抵抗角), 載荷側垂直応力によるせん断抵抗角 (以下, 載荷側せん断抵抗角) の差は平均で5.7°となる。これらの二

者と, 単純平均垂直応力によるせん断抵抗角 (以下, 単純平均せん断抵抗角) は, 供試体層厚が変化してもほぼ一定となる傾向を示している。これに対し, 比例配分垂直応力によるせん断抵抗角 (以下, 比例配分せん断抵抗角) は, 供試体層厚が大きくなるにつれて大きくなっている。

Table 1 一次回帰式の係数  $\alpha 0$ ,  $\alpha 1$  と標準回帰係数 (オイルを塗布しない場合)

Factors of linear correlation function,  $\alpha 0$ ,  $\alpha 1$  and correlation factor  $y = \alpha 0 + \alpha 1 \cdot x$ ;  $x$ : 供試体層厚

y	$\alpha 0$	$\alpha 1$	標準回帰係数
せん断応力	144.01	-0.02098	-0.09844
反力側垂直応力	230.04	0.09893	0.15708
単純平均垂直応力	266.88	-0.09803	-0.30218
比例配分垂直応力	301.66	-1.21421	-0.94583
載荷側せん断抵抗角	26.83	-0.02580	-0.45188
反力側せん断抵抗角	31.99	-0.01272	-0.21471
単純平均せん断抵抗角	29.04	-0.01502	-0.36992
比例配分せん断抵抗角	26.08	0.07981	0.91004

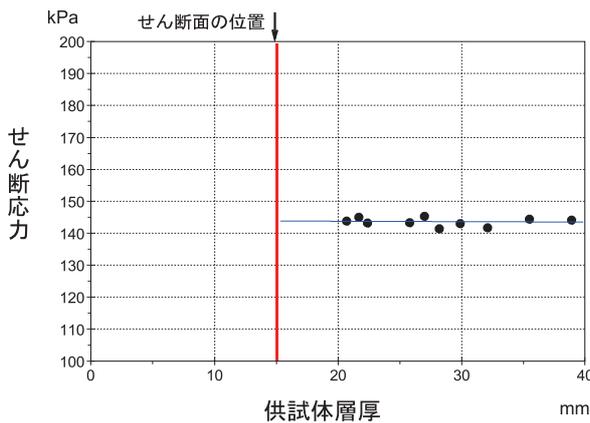


Fig.3 供試体層厚とせん断応力の関係 (オイルを塗布しない場合)

Relation between specimen thickness and shear stress

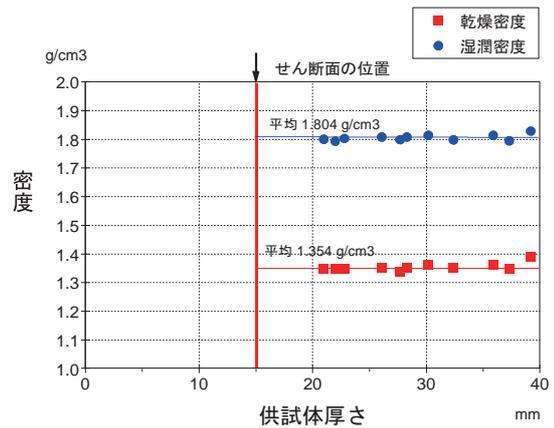


Fig.5 供試体層厚と密度の関係 (オイルを塗布しない場合)

Relation between specimen thickness and density

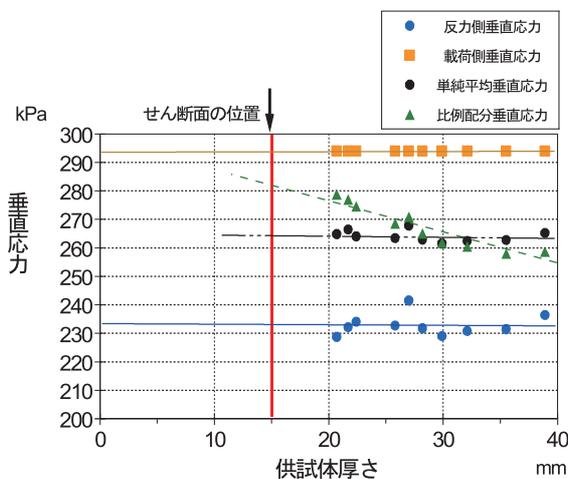


Fig.4 供試体層厚と垂直応力の関係 (オイルを塗布しない場合)

Relation between specimen thickness and normal stress

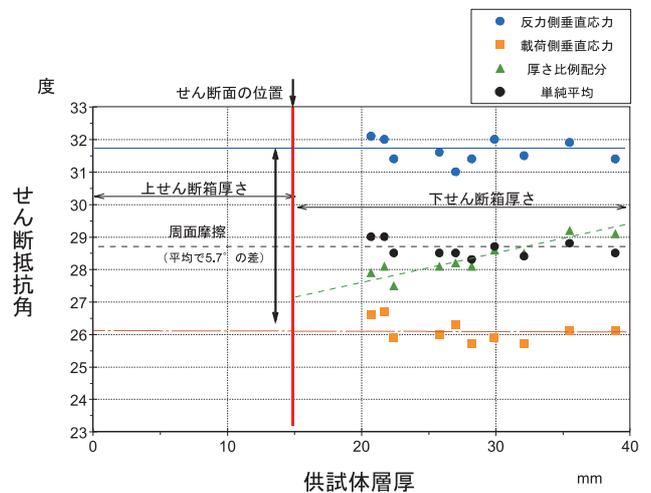


Fig.6 供試体層厚とせん断抵抗角の関係 (オイルを塗布しない場合)

Relation between specimen thickness and angle of shearing resistance

2 上せん断箱内面にオイルを塗布した試験

最大強度を発揮したときのせん断応力と供試体層厚の関係を図7, 最大強度を発揮した時の垂直応力と供試体層厚の関係を図8, 試験後に計測した密度と供試体層厚の関係を図9, 最大せん断抵抗角と供試体層厚の関係を図10に示す。また, 一次回帰式の係数と標準回帰係数を表2に示す。

せん断応力と単純平均垂直応力は, 図3と比較するとバラツキが出たが, 供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している(図7, 8)。これに対し, 反力側垂直応力と密度は, 供試体層厚が大きくなるにつれていくぶん減少している(図8, 9)。また比例配分垂直応力は供試体層厚が大きくなるにつれて減少している(図9)。

せん断抵抗角と供試体層厚の関係(図10)では, 反力側せん断抵抗角, 単純平均せん断抵抗角は, 供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している。載荷側せん

断抵抗角は, 供試体層厚が大きくなるにつれて減少しているように見える。これに対し, 比例配分せん断抵抗角は, 供試体層厚が大きくなるにつれて大きくなっている。

Table 2 一次回帰式の係数 $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ と標準回帰係数(上せん断箱内面にオイルを塗布)

Factors of linear correlation function,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  and correlation factor  $y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x$ ;  $x$ : 供試体層厚

y	$\alpha_0$	$\alpha_1$	標準回帰係数
せん断応力	140.68	-0.01091	-0.01554
反力側垂直応力	242.77	-0.38679	-0.33294
単純平均垂直応力	263.82	-0.04060	-0.06676
比例配分垂直応力	309.73	-1.51901	-0.92438
載荷側せん断抵抗角	27.01	-0.04565	-0.41233
反力側せん断抵抗角	32.04	-0.02284	-0.32803
単純平均せん断抵抗角	28.68	-0.01563	-0.19708
比例配分せん断抵抗角	25.65	0.08234	0.70073

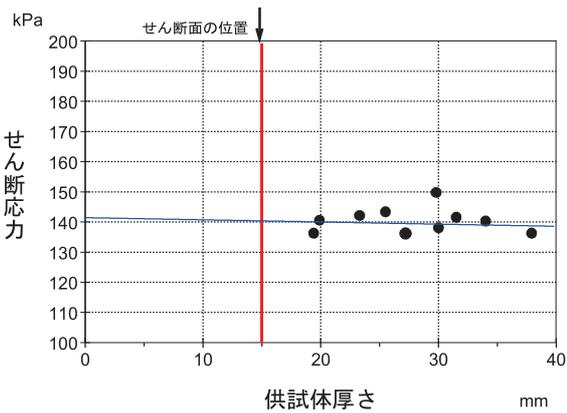


Fig.7 供試体層厚とせん断応力の関係(上せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and shear stress

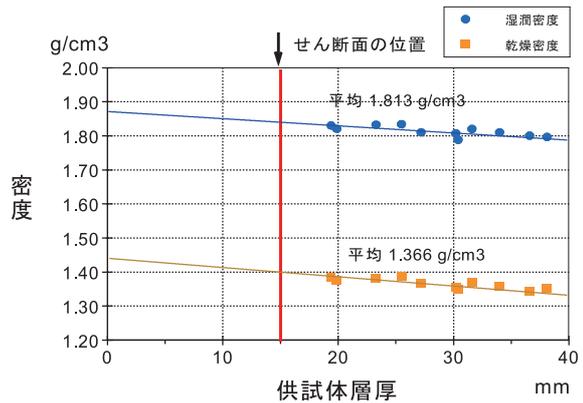


Fig.9 供試体層厚と密度の関係(上せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and density

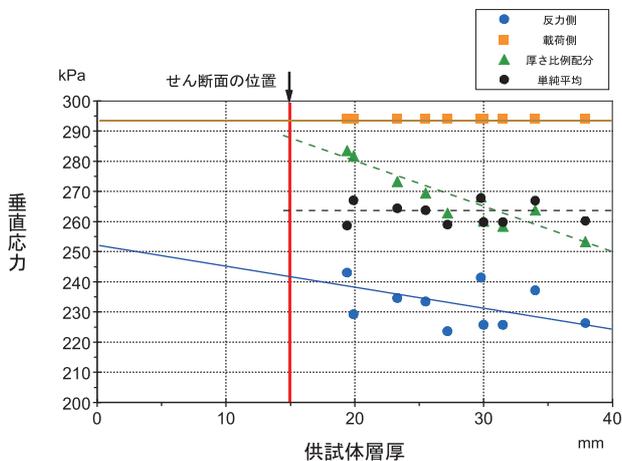


Fig.8 供試体層厚と垂直応力の関係(上せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and normal stress

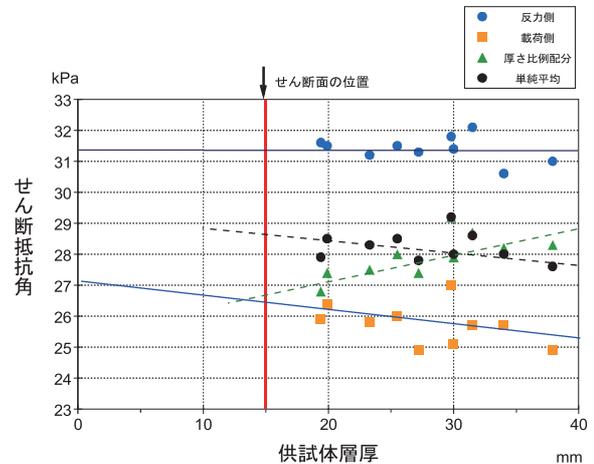


Fig.10 供試体層厚とせん断抵抗角の関係(上せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and angle of shearing resistance

### 3 上下せん断箱の内面にオイルを塗布した試験

最大強度を発揮したときのせん断応力と供試体層厚の関係を図.11、最大強度を発揮した時の垂直応力と供試体層厚の関係を図.12、試験後に計測した密度と供試体層厚の関係を図.13、最大せん断抵抗角と供試体層厚の関係を図.14に示す。Ⅲ-2と同様に図.3と比較して全体にバラツキが出た。

また、せん断応力と単純平均垂直応力はばらつきはあるものの、供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している(図.11, 12)。これに対し、比例配分垂直応力は供試体層厚が大きくなるにつれて小さくなっている。反力側垂直応力は特にバラツキが大きいが、供試体層厚が大きくなるにつれていくぶん大きくなる傾向がある(図.12)。密度は、供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している(図.13)。一次回帰式の係数と標準回帰係数をTable 3に示す。

せん断抵抗角と供試体層厚の関係(図.14)では、全

体にバラツキが大きく傾向が不明瞭であるが、反力側せん断抵抗角、単純平均せん断抵抗角、比例配分せん断抵抗角及び載荷側せん断抵抗角のいずれも、供試体層厚が

Table 3 一次回帰式の係数 $\alpha 0$ 、 $\alpha 1$ と標準回帰係数(上下せん断箱内面にオイル塗布)

Factors of linear correlation function,  $\alpha 0$ ,  $\alpha 1$  and correlation factor  
 $y = \alpha 0 + \alpha 1 \cdot x$  ;  $x$ : 供試体層厚

y	$\alpha 0$	$\alpha 1$	標準回帰係数
せん断応力	162.32	-0.26124	-0.33957
反力側垂直応力	244.12	0.41346	0.28558
単純平均垂直応力	277.38	-0.04857	-0.06343
比例配分垂直応力	298.81	-0.72507	-0.66835
載荷側せん断抵抗角	29.61	-0.06100	-0.44972
反力側せん断抵抗角	32.28	-0.04392	-0.67409
単純平均せん断抵抗角	30.64	-0.04593	-0.58987
比例配分せん断抵抗角	29.24	-0.00151	-0.02200

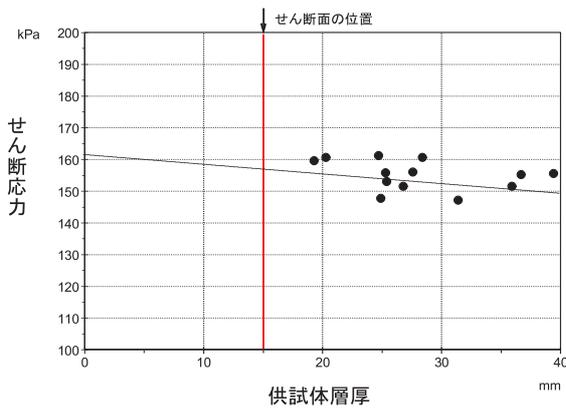


Fig.11 供試体層厚とせん断応力の関係(上下せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and shear stress

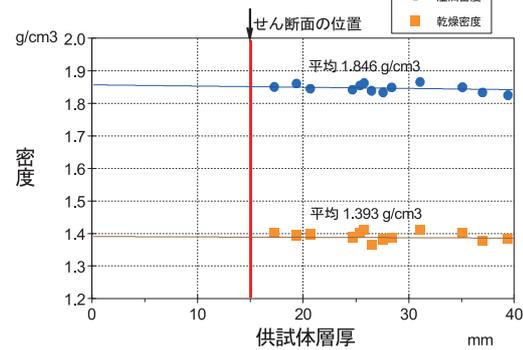


Fig.13 供試体層厚と密度の関係(上下せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and density

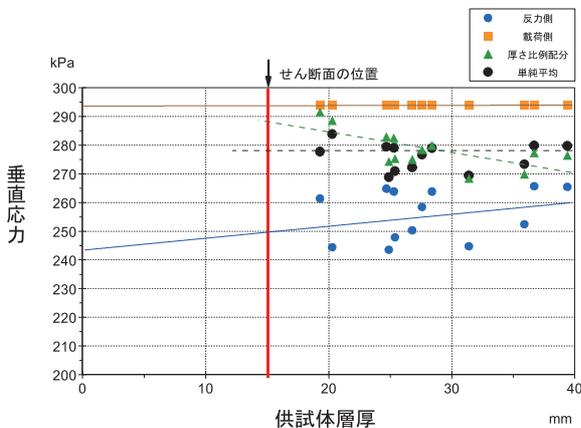


Fig.12 供試体層厚と垂直応力の関係(上下せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and normal stress

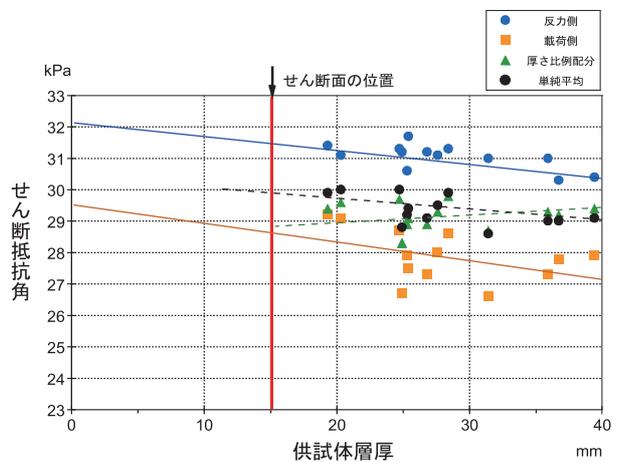


Fig.14 供試体層厚とせん断抵抗角の関係(上下せん断箱内面にオイルを塗布)

Relation between specimen thickness and angle of shearing resistance

大きくなるにつれてわずかに小さくなっている。載荷側せん断抵抗角については、特にバラツキが大きい。

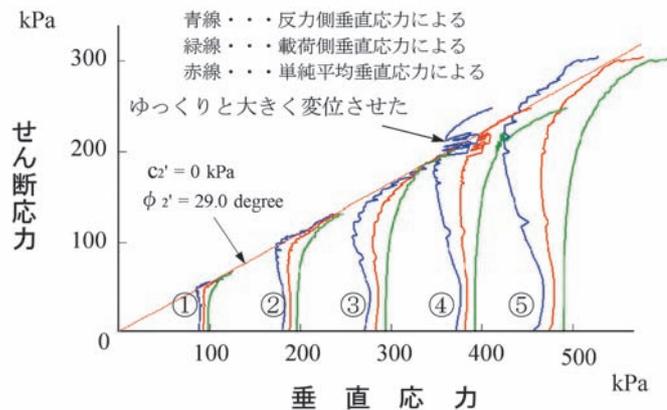
**Figs.5, 9, 13**を比較すると、①せん断箱にオイルを塗らなかつた場合が最も周面摩擦が大きく、次に②上せん断箱にオイルを塗つた場合となり、③上下せん断箱にオイルを塗つた場合が周面摩擦は最も小さい。結果として①→②→③となるにつれて大きな力で圧密されるので、③,②,①の順に密度が大きい。

#### 4 せん断面の間隙を変化させた試験

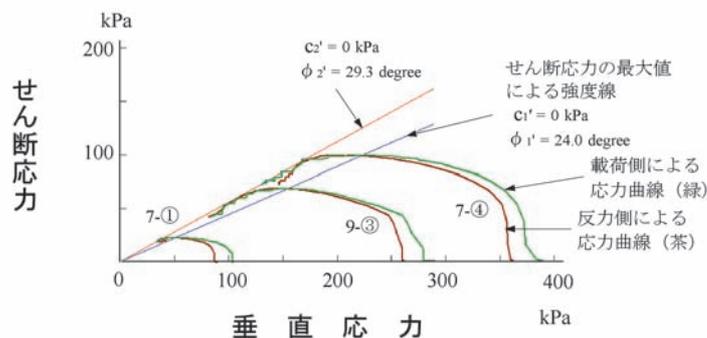
カオリン粘土の正規圧密供試体について、98, 196, 294, 392, 490kPaの五段階の垂直応力で、せん断試験中に上下せん断箱の間隙を変化させた定圧排水試験を行った。上下せん断箱の間隙は、①と② (**Fig.15**)については、最初、試験開始から毎時0.01mmの割合で0.10mmまで変化させたが、載荷応力が弱くて上下せん断箱が接触していると思われる結果となったため、初期間隙を0.25mmとし、試験開始から毎時0.01mmの割合で0.15mmまで変化させてやり直した。また、③, ④, ⑤ (**Fig.15**)については、初期間隙を0.20mmとし、試験開始から毎時

0.01mmの割合で0.10mmまで変化させた。ただし、④については、確実に周面摩擦を除去することを狙い、試行的に途中でゆっくりと±0.03mmほど反力側せん断箱を上下に変位させた。応力曲線の場合はせん断面の面積を補正した図の方がわかりやすいので、**Figs.15, 16**については補正した図を示している（せん断面積の補正は $C_d$ 、 $\phi_d$ には影響しない）。

①, ②, ③については周面摩擦がほぼ除去され、反力側垂直応力、載荷側垂直応力、単純平均垂直応力による応力曲線のいずれも $C_d = 0\text{kPa}$ 、 $\phi_d = 29^\circ$ の線に近づく傾向を示した。しかし、定体積試験の場合のように、試験中にせん断面の間隙が小さくても反力側垂直応力が載荷側よりも大きくなる現象（古谷ら, 2007）は起きなかつた。また、垂直応力の高い領域の④と⑤は周面摩擦は減少したものの除去されなかつた。特に④の試験では、途中で、反力側せん断箱を上下に変位させたが除去されなかつた。この二個の試験の場合は、単純平均垂直応力による応力曲線が $C_d = 0\text{kPa}$ 、 $\phi_d = 29^\circ$ の線にほぼ一致している。この強度は、載荷側と反力側の垂直応力がほぼ一致した定体積試験の例 (**Fig.16**)に近い。



**Fig.15** せん断面の間隙を変化させた定圧試験  
Constant pressure test that shearing thickness was changed



**Fig.16** 載荷側と反力側の垂直応力がほぼ一致した定体積試験の例（古谷ら, 2007）

Three examples that normal dead load had almost correspondence to measured normal force on load-receiving plate

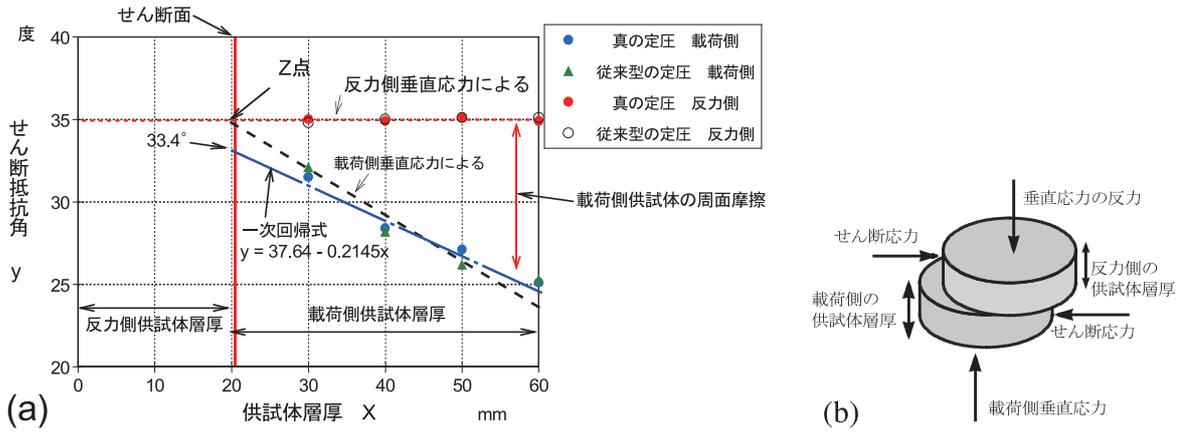


Fig.17 三隅砂における供試体層厚とせん断抵抗角の関係 (a) と供試体に作用する力と供試体層厚 (b)  
Relation between specimen thickness and angle of shearing resistance of the Misumi sand (a)  
and forces acting on the specimen and Specimen thickness (b)

#### IV 緩詰め三隅砂供試体の周面摩擦特性

Fig.17 (a) は住ら (1997) の行った緩詰め砂 (鳥根県三隅町の砂) の試験結果から作成したものである。試験は学会基準 (地盤工学会, 2000) に示された試験機により, 試験中のせん断面積の変化に関係なく载荷側の垂直荷重を一定 (196kPa×試験開始時のせん断面積) に保つ従来型の定圧試験と, 試験中のせん断面積の変化に対して, せん断面上の垂直応力が一定 (196kPa) となるように载荷側の荷重を制御する真の定圧試験が行われた。供試体層厚 (Fig.17 (b)) は, 反力側 (上) 供試体層厚を20mmとして, 下部载荷方式なので, 载荷側 (下) 供試体層厚を30, 40, 50, 60mmの4段階に変えている。供試体直径は120mmである。

供試体層厚とせん断抵抗角の関係から, 载荷側の供試体層厚がゼロ (供試体層厚20mm) の時のせん断抵抗角を読み取ることにより, せん断面上のせん断抵抗角を推定することができる。この値が, 周面摩擦が無い時の垂直応力に基づくせん断抵抗角である。Fig.17 (a) から,

従来型の定圧試験と真の定圧試験の結果はほとんど一致し, 反力側せん断抵抗角は供試体層厚が変化してもほぼ一定の値を示している。それだけでなく, 供試体層厚が小さくなるにつれて, 载荷側せん断抵抗角が大きくなり, 供試体層厚が20mmの位置, すなわちせん断面で反力側と载荷側のせん断抵抗角がほとんど一致することがわかる (黒の破線; 青の一点鎖線は一次回帰式であり, 差は1.6°程度)。このことは, 反力側せん断角と供試体の周面摩擦がせん断面の垂直応力に影響しないことを示している。

#### V 考察

III-1のオイルを塗布しない試験が他の二試験 (III-2, 3) と比較してデータのバラツキが小さく, 供試体層厚と周面摩擦力の関係をより明確に示している。この試験の結果からは, せん断応力が供試体層厚の変化に対してほぼ一定であるので (Fig.3), せん断面の垂直応力も供試体層厚が変化してもほぼ一定であると推定される。ま

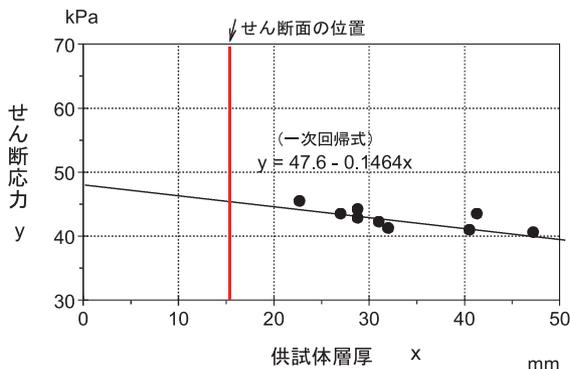


Fig.18 カオリン粘土供試体の層厚とせん断応力の関係  
Relation between specimen thickness and shear stress of Kaolin clay

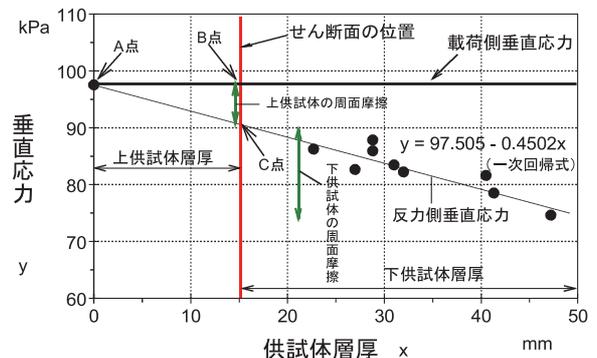


Fig.19 カオリン粘土供試体の層厚と垂直応力の関係  
Relation between specimen thickness and normal stress of Kaolin clay

た、供試体層厚とせん断抵抗角の関係では (Fig.6), 載荷側と反力側のせん断抵抗角のいずれもが、供試体層厚の増減に対してバラツキはあるものの一定となる傾向を示している。せん断面の位置となる供試体層厚15mmの線においても、載荷側と反力側のせん断抵抗角は全く一致せず、供試体層厚の大小に関わらず、平均で5.7°に相当する周面摩擦が存在すると考えることができる。

これに対して、三隅砂の場合 (Fig.17 (a)) では、反力側せん断抵抗角は供試体層厚が変化してもほぼ一定であるが、同時に、せん断面の位置で反力側と載荷側のせん断抵抗角がほぼ一致することから、砂のような粒状体の供試体では上せん断箱に周面摩擦はほとんど発生せず、せん断面の垂直力は反力側荷重計で直接計測できることを裏付けている。新城ら (2003) の行った豊浦砂の試験でも、反力側垂直応力で整理したせん断抵抗角が定圧と定体積一面せん断試験においてほぼ一致し、また三軸圧縮試験の結果ともほぼ一致しており、このことを裏付けている。

一方、Figs.18, 19は、カオリン粘土 ( $W_L=51.1\%$ ,  $I_p$

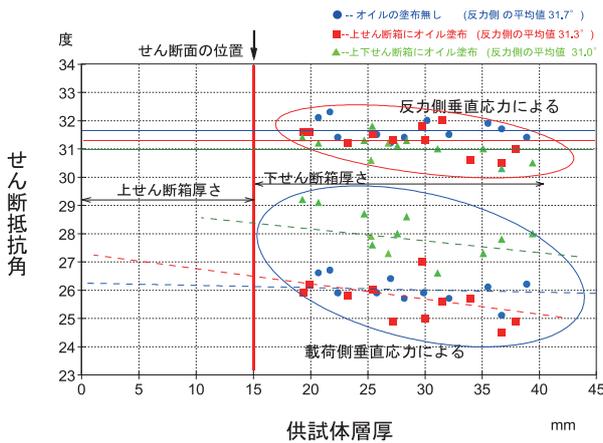


Fig.20 カオリン粘土における供試体層厚とせん断抵抗角の関係  
Relation between specimen thickness and angle of shearing resistance of Kaolin clay

=22.8で、今回用いた試料とは異なる) 供試体について載荷側垂直応力98kPaで圧密及びせん断を行った例である (古谷ら, 1999から作成)。供試体層厚の減少に対して、せん断応力、反力側垂直応力がともに増加している。特に、Fig.19の供試体層厚と (最大強度発揮時の) 反力側垂直応力の関係では、供試体層厚がせん断面の位置である15mmの位置で反力側垂直応力と載荷側垂直応力が一致せず、0mmの位置において載荷側垂直応力98kPaとほぼ一致しており (Fig.19, A点), 周面摩擦力が上下供試体の層厚にほぼ比例して変化していることがわかる。このことから、この試験例の場合には、供試体層厚に比例して反力側の上せん断箱にも周面摩擦 (Fig.19, BC) が発生していると考えられる。上下供試体の厚さによって周面摩擦力を比例配分してせん断面の垂直応力を推定する方法 (古谷, 1983) は、この特性に基づいている。同類の粘土であってもⅢ-1の試験との傾向の違いは、粘土の性質や供試体の含水比、密度、堅さ等の違いにより周面摩擦の発生特性が異なることを示している。この点については、今後、粘土の種類ごとに、含水比、密度等を変化させて傾向を調べるなど、より詳細な検討が必要であると考えている。

Fig.20はⅢ-1~3の試験における載荷側及び反力側のせん断抵抗角のデータを比較したものである。載荷側せん断抵抗角については、Ⅲ-1と2はほとんど差が無く (Ⅲ-2が平均で0.4°小さい), 上下せん断箱にオイルを塗布したⅢ-3が2°程度大きくなっており、周面摩擦力が大幅に減少している。これは試験時に、載荷側供試体が圧密して変位するのに対して、反力側は一定であることが一因として考えられる。特に、オイルを塗布した場合の供試体層厚20mm前後では、周面摩擦力はかなり小さくなっている。このことから、正規圧密粘土の試験の場合、オイルをせん断面内側に塗布して試験を行い、載荷側の垂直応力により強度を整理すれば少し安全側の強度が求まり、簡単で、かつ過度に不経済な設計にはならないと思われる。

Ⅲ-1と3の試験全体 (Ⅲ-2は上下せん断箱の周面摩擦係数が異なり、単純平均にならないので除外) におけるせん断抵抗角の単純平均値は29.0°となり、周面摩擦が除去された定圧試験の強度29.0° (Fig.15の①, ②, ③) や定体積試験の強度29.3° (Fig.16) に近い。ただし、オイルを塗布した場合 (単純平均で29.4°) と塗布しない場合 (単純平均で28.6°) で、単純平均せん断抵抗角は明確に差が出ている。この両者が一致しない原因はよく解らず、今後、検討すべき事項の一つであるが、乾燥密度の平均は塗布した場合の1.393 g/cm<sup>3</sup>に対して、塗布しない場合は1.354g/cm<sup>3</sup>であり、周面摩擦の減少が供試体密度とせん断強度に影響している。

一方、反力側せん断抵抗角については、オイルを塗布することで、密度が大きくなっているにもかかわらず徐々に小さくなる傾向が見られる (オイルを付けない

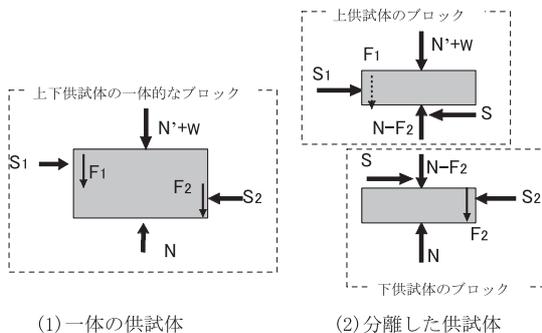


Fig.21 一体の供試体と分離した供試体に作用する力 (古谷ら, 1999)  
Forces acting on single and separated specimens

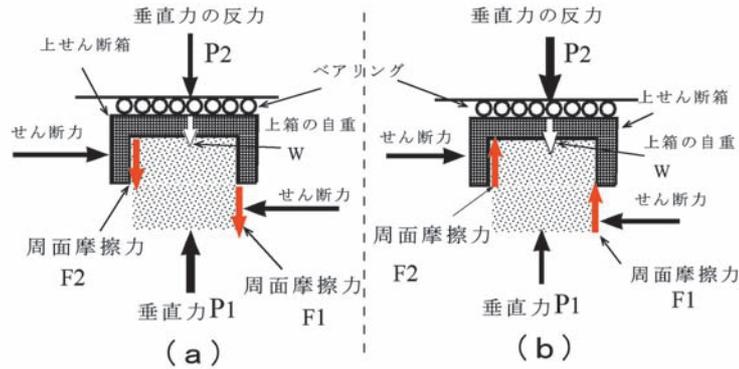


Fig.22 垂直応力の状態と周面摩擦特性の違い (古谷ら, 2007)  
Two types of characteristics of side friction

場合の平均 $31.7^\circ$  →上せん断箱にだけ付けた場合の平均 $31.3^\circ$  →上下せん断箱に付けた場合の平均 $31.0^\circ$  )。オイルを塗布して上せん断箱内面の摩擦係数を変化させることで反力側せん断抵抗角が変化する事実は、上せん断箱と上供試体との周面摩擦が影響して、反力側の荷重計でせん断面の垂直力を直接測定できないことを示している。上せん断箱の周面摩擦が影響しないのであれば、せん断箱内面の摩擦係数が変化しても強度は一定となるはずだからである。この結果は、上供試体層厚を三段階に変化させた場合にも反力側せん断抵抗角が変化する(古谷ら, 1999) ことと調和している。

載荷側垂直応力が反力側垂直応力よりも大きい条件下で、反力側のせん断箱と供試体との間に周面摩擦が作用する場合と作用しない場合の違いについて、(1) 一体の供試体と (2) 分離した供試体に作用する力の概念を Fig.21 に単純化して示した。豊浦砂をセメントで固めて作成したこれら二種の供試体 (1), (2) の周面摩擦を測定した試験では、(2) の周面摩擦は (1) の半分程度であり、両者に明らかな差が出ている(古谷ら, 1999)。(1) は粘土供試体、(2) は乾燥砂のような粒状体の供試体や

粘土供試体の残留強度測定の場合などに対応すると考えられるが、供試体を構成する土の含水比、密度や粒子間結合力などによって、周面摩擦特性が異なることを暗示する例である。

正規圧密粘土供試体のように、ダイラタンシーが負で、粒子間結合力が強く上下供試体が一体となってせん断される時、同時に、載荷側垂直応力が反力側垂直応力よりも大きくなっている場合に、上せん断箱と供試体との周面摩擦が影響すると考えられる(古谷ら, 2007)。このことから軟岩や安定処理等による固結した供試体も、同様に、反力側の周面摩擦の影響を受けると推定される。

供試体層厚の変化に対して反力側垂直応力が変化しない場合のせん断面の垂直応力の推定法としては、単純平均垂直応力による方法 (a) と、比例配分垂直応力による方法 (b) が考えられるが、両者を比較すると (Fig.4), (b) は供試体層厚の変化に対して変化するのに対し、(a) は供試体層厚の影響を受けない傾向にあるため、(a) の単純平均垂直応力による方法が良いと考えられる。この強度 ( $28.6^\circ$ ) は、Figs.15, 16 に示した周面摩擦が無くなったときの強度に近い値である。

また、載荷垂直応力 $294\text{kPa}$ の今回の試験では、供試体層厚の変化に対してせん断抵抗角の変化も小さい。これに対し、三隅砂ではせん断面の位置で載荷側と反力側のせん断抵抗角が一致する。これらの特徴が、粘土と砂とで周面摩擦特性が明確に異なる点である。粘土では種類や載荷垂直応力等により周面摩擦特性が変化することから、正規圧密粘土の試験では、最大強度発揮時に上下供試体の層厚をおよそ等しくなるように初期供試体層厚を調節して(すなわち、供試体層厚 $30\text{mm}$ で比例配分と単純平均のせん断抵抗角が一致する)、単純平均せん断抵抗角を求める方法が誤差が少ないと思われる。

砂と粘土の違いによる周面摩擦特性とせん断面の推定垂直応力について、これまでの知見を単純化して整理すると Fig.22 及び Table 4 のようになる。正規圧密粘土は Fig.22 では (a) の場合に相当する。反力側垂直応力が

Table 4 垂直応力の状態とせん断面の垂直応力  
Two types of normal stress condition and normal stresses on the shear plane

載荷側と反力側の垂直応力の状態	試料	せん断面の垂直応力
(a) 載荷側垂直応力が反力側垂直応力よりも大きい	砂	反力側垂直応力
	粘土	載荷側と反力側の垂直応力の平均値
	中間土*	砂と粘土の比率、粒度分布等により、反力板側又は平均値
(b) 反力側垂直応力が載荷側垂直応力よりも大きい	砂	反力側垂直応力
	粘土**	
	中間土*	

\*これまでの知見に基づく推定。  
\*\*定体積試験でも発生することがある(古谷ら, 2007)。

載荷側垂直応力よりも大きい場合については、砂や粘土と同様に中間土もせん断面の垂直応力は反力側垂直応力に近いと考えられる。しかし、密度が低くダイラタンシーが負となる場合の中間土については、砂と粘土の混合割合や粒度分布等によって異なる周面摩擦特性を示すことが予想され、これらの確認も今後に残された課題である。

## VI 結 言

正規圧密カオリン粘土供試体を用いて、反力側のせん断箱内面にオイルを塗布した場合、上下せん断箱内面にオイルを塗布した場合、及びどちらにも塗布しない場合について、それぞれ載荷側の供試体層厚を変化させて定圧一面せん断試験を行い、また緩詰の砂供試体の試験例と比較して、反力側せん断箱と供試体との周面摩擦特性を検討した。

- ① 正規圧密カオリン粘土の場合には、反力側せん断箱にオイルを塗布することで、反力側垂直応力によるせん断抵抗角が変化する (Fig.20)。このことは、反力側せん断箱と供試体に周面摩擦力が発生していることを示している。
- ② 正規圧密カオリン粘土の供試体では、供試体の密度によっても周面摩擦特性が変化すると考えられ、このことは垂直応力の大小に影響される。98kPaで圧密された供試体では、供試体層厚が大きくなると周面摩擦力が比例して大きくなり、294kPaで圧密された供試体では層厚が変化してもほぼ一定となる傾向があった。
- ③ 正規圧密粘土の定圧一面せん断試験では、最大強度発揮時の上下供試体の層厚がおおよそ等しくなるように初期層厚を調整し、単純平均垂直応力をせん断面の垂直応力としてせん断抵抗角を求める方法が誤差が少ないと考えられる。
- ④ 砂の定圧一面せん断試験では、供試体層厚Xがせん断面の位置 (Fig.17 (a) のZ点) に等しくなるところで載荷側と反力側のせん断抵抗角がほぼ等しくなることから、反力側の荷重計で直接、せん断面の垂直力を測定できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 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, p.17-44
- 2) 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, p.31-54
- 3) 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, p.430-431
- 4) 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, p.25-37
- 5) 古谷保・有吉充・奥山武彦・黒田清一郎 (2007) : カオリン粘土の一面剪断試験における周面摩擦特性と限界強度, 農業工学研究所技報, 第206号, p.25-41
- 6) 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, p.563-600
- 7) Skempton, A.W. (1977) : Slope stability of cuttings in borwn London clay, Proc.9th.Int.Conf.Soil Mech.Found.Eng., 3, p.261-270
- 8) 新城俊也, 宮城調勝, 小宮康明, 永吉功治 (2003) : 一面せん断試験による砂のせん断強度の決定法, 琉球大学農学部学術報告 50, p.117-124
- 9) 住武人・大島昭彦・高田直俊・深見知亨 (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, III - A30, p.60-61
- 10) 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, p.669-670
- 11) 仲野良紀・清水英良・西村真一 (1992) : 断層粘土化した新第三紀層凝灰質泥岩の力学特性, 農業土木学会論文集, 第157号, p.95-104
- 12) 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, p.165-174及び p.297-306

# Relation between Specimen Thickness and Side Friction of Inner Wall in Constant Pressure Direct Shear Box Test

– Comparison of Normally Consolidated Kaolin Clay and Loose Misumi sand Specimen –

FURUYA Tamotsu, KAWAMOTO Osamu, YAMADA Yasuharu, NAKAZATO Hiroomi  
and INOUE Keisuke

## Summary

Constant pressure direct shear box tests were conducted on normally consolidated Kaolin clay specimens with various thickness, for three cases of oil smearing to the inner wall of the upper shear box, the upper and lower shear box, and no oil smearing to the inner wall of the shear box. Side friction characteristics between the inner wall of the upper shear box and specimen are discussed on normally consolidated Kaolin clay, comparing to the case of the loose Misumi sand specimen. In case of granular material specimen like dry sand, the normal load of shear plane is close to the load measured by the load-cell on the load receiving plate. However, in case of normally consolidated Kaolin clay specimen, the angle of shearing resistance by the normal load measured on the load receiving plate varies by oil smearing to the inner wall of the upper shear box. This suggests that side friction occurs between the inner wall of the upper shear box and the upper specimen in case of normally consolidated clay. The side friction characteristics at the direct shear box test on normally consolidated clay change delicately depending on the normal load at the test. The side friction of low density specimen at low normal load is apt to increase as the specimen thickness decreases, and the side friction of high density specimen at high normal load is apt to keep constant as the specimen thickness decreases. Therefore, it will be better to adopt the average normal load of the dead and the measured one on the load receiving plate by adjusting the initial lower specimen thickness about equal to the upper one at the peak shear strength.

**Keywords** : constant pressure direct shear box test, side friction, normally consolidated Specimen, Kaolin

