

一面せん断試験と単純せん断試験から得られた海成粘土のせん断強度の比較

辻 清¹・湯 怡新²・Tom LUNNE³

¹正会員 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230横浜市鶴見区安善町1-3)

²工博 運輸省港湾技術研究所 土質部 (〒239神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway

九州の有明粘土およびノルウェーのDrammen粘土について、三笠式一面せん断試験機とNGI型単純せん断試験機による一連の比較実験を行った。実験は、不攪乱試料をその有効土被り圧で再圧縮した後せん断に供するものと人工的に作成した過圧密粘土について実施した。その結果、下記のような結論が得られた。

1) 一面せん断試験は単純せん断試験よりも高い剛性とせん断強度を与える、2) この違いは主としてせん断機構と載荷速度の違いによるものと考えられ二つの要因に対する補正係数を導いた、3) この係数を一面せん断強度に乗じた補正一面せん断強度は、単純せん断強度と良い一致を示した、4) しかし人工的に作成した過圧密粘土の試験結果についてはこの補正は適用できない。

Key Words : marine clay, shear strength, direct shear test, direct simple shear test

1. はじめに

代表的直接せん断試験法として、三笠¹⁾により開発された改良型一面せん断試験機と、BjerrumとLandva²⁾により開発された単純せん断試験機を用いる方法が挙げられる。両者とも①試験が簡単で迅速である、②K₀圧密が自動的に達成される、③得られるせん断強度が強度の異方性を旨く相殺する^{3), 4)}、などの様々な利点を有し、実際問題に広く利用されている。しかし、一面せん断試験(DST)と単純せん断試験(DSST)結果を具体的に比較した例は殆どないように思える。そこで、九州の有明粘土とノルウェーのDrammen粘土について不攪乱試料を採取輸送し、二つの粘土について一連のDSTとDSSTを実施した。

本論文は、まず二つの試験の機構について考察を加え、次いで、実験に供した粘土の性質を実施した試験と共に報告する。DSTとDSSTより得られたせん断強度を示すと共に、二つの試験より得られるせん断強度の違いについて、載荷速度とせん断機構の違いの点から検討を加えた。

2. 一面せん断試験と単純せん断試験に関する概論

(1) 一面せん断試験(DST)

DSTおよびDSSTのせん断機構を図-1に示す。DSTでは剛に固定された供試体中央部が水平方向に互いに移動するようにせん断応力を受けるのに対し、DSSTでは供試体頭部にせん断応力が作用する。在来型一面せん断試験機では、せん断ひずみとせん断応力がせん断面上で均一にならず前後端に近い部分で大きくなる、という欠点が指摘されてきた。しかし、高田⁵⁾は三笠式改良型一面せん断試験機において、供試体の変形状態を写真撮影し、破壊までの変形状態は非常に均一で、大変形においてのみ不均一さが認められることを示した。Pottsら⁶⁾は、矩形せん断箱試験での供試体内の応力状態を調べるために弾塑性モデルを使用したFEM解析を用い、その結果を理想的単純せん断での応力～ひずみ挙動と比較すると共に、体積変化、初期応力およびひずみ軟化の影響を調べた。その結果、体積変化が無ければ、DSTより得られるせん断強度は、理想的DSSTより得られ

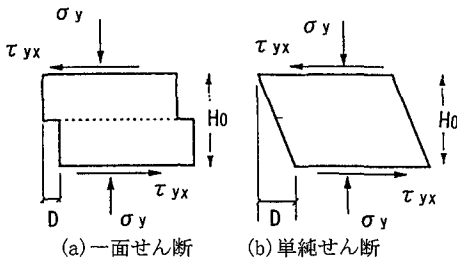


図-1 DSTとDSSTのせん断機構

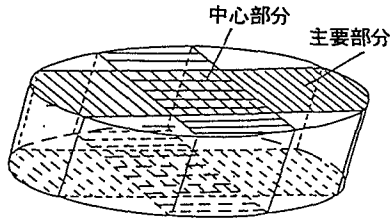


図-2 DSSTにおける供試体の挙動⁹⁾

るせん断強度より約6%ほど大きくなることを示した。

(2) 単純せん断試験 (DSST)

DSSTでは、供試体の上面と下面でも不均一なせん断応力を受ける。実用上この応力状態は、純粋なせん断応力状態下での試験と解釈できる。Luckra⁷⁾はNGI型DSSTの理論的線形弾性解析を行い、この仮定の正当性を確認した。Vucetic⁸⁾は、直径・高さ比が異なる中程度の硬質粘土について一連の試験を行い、供試体内の応力分布の不均一さは、測定された供試体の挙動に重要な影響を及ぼさないことを明らかにした。Airey⁹⁾は、図-2に示すような理想的単純せん断状態で供試体中央部の応力～ひずみ挙動が測定できる特殊な試験機を用いて、正規圧密状態のカオリン粘土について実験を行った。その結果をNGI型DSSTの結果と比較し、後者の結果は、理想的単純せん断試験より得られるせん断強度およびせん断剛性率より約10%小さくなることを示した。

このようにDSSTはせん断強度および剛性とも、理想的単純せん断状態に比べて過小評価し、逆にDSTでは過大評価することが推察される。

3. 二つの試験におけるせん断機構の違い

図-1に示すように、DSTでは破壊面は水平面に沿って強制されるのに対し、DSSTでは図-3(a)に示すような供試体頭部の水平面に沿った移動と図-3(b)に示す回転に伴う鉛直面での移動である。太田¹⁰⁾は種々の試験より得られる非排水せん断強度につい

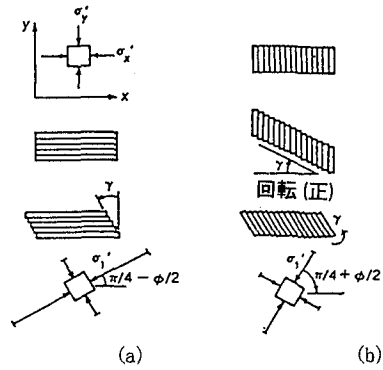


図-3 DSSTのせん断中の破壊機構¹⁰⁾

て一連の理論式を示した。この式は関口と太田¹²⁾が提案した弾塑性構成式を用いて平面ひずみ条件下で K_0 圧密された粘土に対して定式化されたものである。太田らは、Ladd¹³⁾やBjerrum¹⁴⁾の実験データを用いてその有効性を報告しているが、この理論によるDSTおよびDSSTより得られるせん断強度は、式(1)(DST)と式(2)(DSST)で与えられる。

$$\frac{\tau_f}{\sigma'_{v0}} = \frac{(1+2K_0)M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$\frac{\tau_f}{\sigma'_{v0}} = \frac{(1+2K_0)M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3} \cosh \beta} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{3} \eta_0 \Lambda / 2M \quad (3)$$

$$\eta_0 = 3(1-K_0) / (1+2K_0) \quad (4)$$

$$\Lambda = 1 - C_s / C_c \quad (5)$$

$$M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \quad (6)$$

ここに、 K_0 =静止土圧係数、 ϕ' = K_0 圧密三軸圧縮試験より得られる内部摩擦角、 C_c =圧縮指数、 C_s =膨張指数である。式(1)および式(2)に示すように、 τ_f (DST)と τ_f (DSST)の違いは分母に $\cosh \beta$ を有するかどうかだけである。

4. 試験プログラム

(1) 対象土

実験に使用した粘土は、九州佐賀県の沿岸部に広く分布する有明粘土とBjerrum¹⁴⁾の遅延圧密の論文で有名なノルウェーのDrammen粘土である。二つの粘土の物理的性質を図-4に示す。有明粘土は深さ12m付近で上部粘土($I_p=62 \sim 116$, $\gamma_t \approx 13.5 \text{ kN/m}^3$)と下部粘土($I_p=28 \sim 50$, $\gamma_t \approx 14.5 \text{ kN/m}^3$)に分けられ、前者は縄文海進後の堆積物であるが、後者はそれ以前に堆積した粘土である。自然含水比は液性限界より

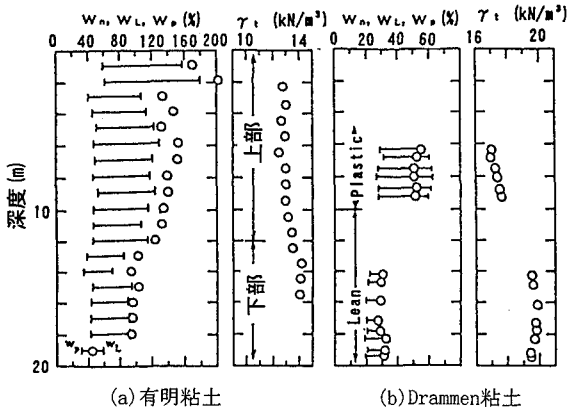


図-4 有明粘土とDrammen粘土の物理特性

高く、鋭敏であることが読みとれる。この粘土の工学的性質については、半沢ら¹⁵⁾により詳しく報告されている。一方、Drammen粘土は、深さ5m~10mに分布する比較的塑性が高い「Plastic Clay」($I_p=28\sim 32$, $\gamma_t=17.5\text{kN/m}^3$)と14m以深の「Lean Clay」($I_p=14\sim 21$, $\gamma_t=19.5\text{kN/m}^3$)より構成される。二つの粘土の間には、塑性、密度に大きな違いが認められる。

(2) サンプリング法

有明およびDrammen粘土の不攪乱試料採取は、それぞれ異なる方法で行われた。有明粘土については、日本の標準型である固定ピストンサンプラー(真鍮製、内径75mm、厚さ1.5mm、長さ1m)を、一方、Drammen粘土については、NGIが開発したNGI-95型固定ピストンサンプラー(鋼製、内径96mm、厚さ2.6mm、長さ1m)を使用した。サンプラーそのものには大きな違いは無いが、サンプリング法に大きな違いがある。有明粘土についてはサンプリング深さまで泥水を用いて掘削した後、サンプラーを押し込む方式である。しかし、Drammen粘土については、まずインナーロッドをボーリングロッドに固定し所定の深さまで強引に押し込み、次いでインナーロッドを所定の方法で固定しサンプリングする方法である。この方法は「Displacement法」と呼ばれるサンプリング法で、北欧を中心としたヨーロッパで広く用いられている方法である。Hightら¹⁶⁾によれば、「Displacement法」にて採取した試料の品質は幾分劣るとのことである。試料採取後、有明粘土については、パラフィンワックスでシールシクッション材を充填した試料箱に密閉し空輸したが、Drammen粘土についてはサンプラーごとに木箱に入れて同じく空輸された。

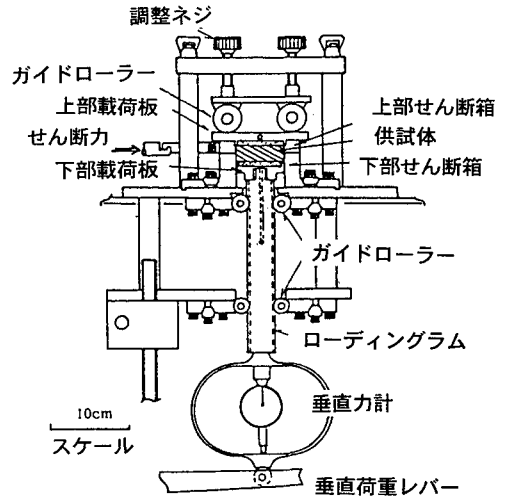


図-5 三笠式一面せん断試験機の構造⁵⁾

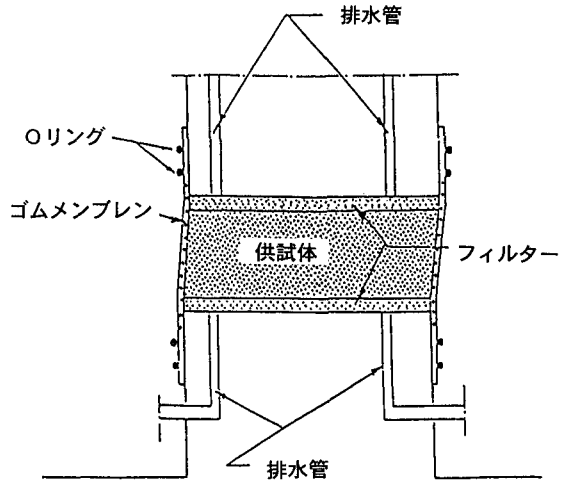


図-6 NGI型単純せん断試験機の構造²⁾

(3) 試験機

三笠により開発された改良型一面せん断試験機の構造を図-5に示す。ローディングラムと上部載荷板をガイドローラーを用いてそれぞれ鉛直および水平に支えることにより、従来から指摘されてきた、せん断箱間の摩擦やせん断過程でのせん断箱の傾きを除去できる構造となっている。供試体の直径は60mm、高さ20mmで、高さ・直径比、 H/D は0.33である。NGI型単純せん断試験機の構造を図-6に示す。供試体はピアノ線で補強されたゴムメンブレン内にセットされる。この特殊なメンブレンを用いることにより、 K_0 状態が保たれる。供試体の直径は67mm、高さ16mmで H/D は0.24となる。定体積せん断は、いずれの場合もせん断中の供試体高さを一定となるよう鉛直応力を制御することにより達成される。

表-1 実施した試験の条件と数量

粘土	試験	σ'_{v0}	OCR	圧密時間	載荷速度	数量	備考
有明	DST ₁	σ'_{v0}	-	10分	0.25mm/min	14	
	DSST ₁	σ'_{v0}	-	8時間	0.1%/min	7	
Drammen	DST ₁	σ'_{v0}	-	10分	0.25mm/min	15	
	DSST ₁	σ'_{v0}	-	8時間	0.1%/min	6	
	DST ₂	400kPa	1~40	24時間	0.1mm/min	10	Upper Drammen
	DSST ₂	400kPa	1~40	24時間	0.1%/min	6	

(4) 実施した試験

有明, Drammen粘土について下記の試験を実施した。

a) 有明粘土

採取した試料をその有効土被り圧 σ'_{v0} で圧密した後, 定体積条件でせん断に供する. σ'_{v0} での圧密時間はDSTでは一次圧密完了まで(約10分), DSSTでは約8時間とし, 次いで, 0.25mm/minの変位速度(DST)と0.1%/minのひずみ速度(DSST)でせん断に供した. 圧密時間や載荷速度が違った理由は, それぞれの研究所が従来から採用してきた方法を用いたからである. 以下この試験をDST₁およびDSST₁と称する.

b) Drammen粘土

Drammen粘土についてはDSSTによる膨大な試験が既に実施されているので, 下記の2種類のDSTを実施した.

①DST₁: 有明粘土と同様, 不攪乱試料をその σ'_{v0} で約10分圧密した後, 0.25mm/minの変位速度で定体積せん断に供する.

②DST₂: 上部の「Plastic Clay」をリモールドし, 次いで400kPaのもとで圧密(24時間)し, 正規圧密粘土を作成する. この粘土を種々の過圧密比OCR(OCR=1~40)のもとで膨張(24時間)させ過圧密粘土とし, 最後に0.25mm/minの変位速度で定体積せん断に供する. なお, リモールド試料と不攪乱試料の違いをチェックするために, 不攪乱試料を400kPaで圧密した正規圧密粘土についても同じ試験(ただし, OCR=1~10)を実施した.

実施した試験の条件, 数量などをまとめて表-1に示す.

5. 有明粘土の試験結果

DST₁およびDSST₁試験より得られた有明粘土のせん断強度 τ_f (DST) と τ_f (DSST) を深さに対してプロッ

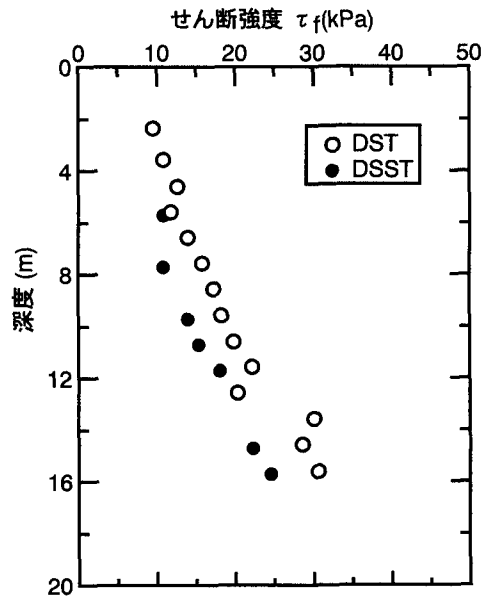


図-7 DST₁とDSST₁より得られた有明粘土のせん断強度

トした結果を図-7に示す. 図に示すように τ_f (DST) が τ_f (DSST) より大きいことが読みとれる. 以下この原因について, ①試料の乱れ, ②圧密時間の影響, ③載荷速度の影響, ④両試験のせん断機構の違いから検討してみよう.

(1) 試料の乱れ

不攪乱試料の品質は, σ'_{v0} で再圧縮した場合の体積変化量 ϵ_v とせん断試験における破壊時のひずみ γ_f によって評価できるとされている. 特に ϵ_v によって試料の品質を定量的に評価する方法が提案されているが¹⁷⁾, ϵ_v は, 品質だけでなく対象土の圧縮性や過圧密比にも影響されることが予想される. この問題についての議論はさておき, DST₁およびDSST₁より得られた ϵ_v と γ_f を図-8に示す. DSTでは

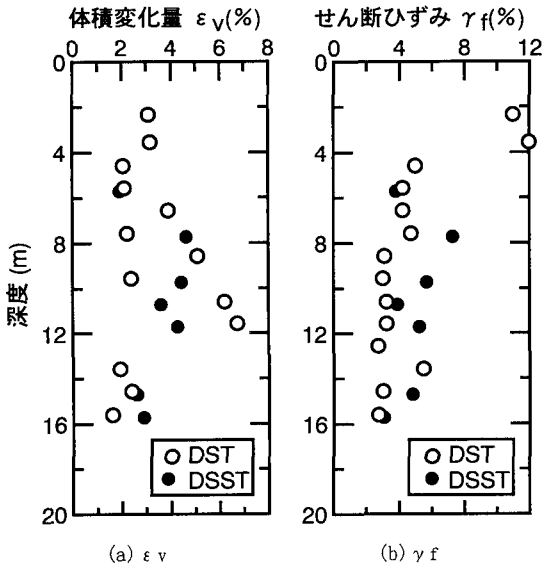


図-8 DST1とDSST1における ϵ_v と γ_f

本来ひずみが得られないが、ここでは次式で算定される見掛けのひずみ $\gamma_{(ap)}$ を用いた。

$$\gamma_{f(ap)} = D_f / H_0 \quad (7)$$

ここに、 $\gamma_{f(ap)}$ =破壊時における見掛けのせん断ひずみ、 D_f =破壊時の変位(mm)、 H_0 =せん断開始前の供試体高さである。

図に示すように、両試験における ϵ_v と γ_f に特に有意な違いは認められない。従って試料の品質の違いが図-7に示す τ_f (DST)と τ_f (DSST)の違いの要因ではないことは明らかである。

(2) 圧密時間の影響

一般に圧密時間が長いほど土のせん断強度は増加する。しかし、今回実施したDST1とDSST1では圧密圧は σ'_{v0} であり、通常の粘土地盤が幾分過圧密状態にあることを考慮すれば、圧密時間の長短はせん断強度に特に影響を及ぼさないと考えられる。事実Berre¹⁸⁾は、Drammen粘土について圧密時間を変えてDSSTを行い、圧密時間が18時間のときのせん断強度は、40分の場合の1.5%だけ大きいにすぎないことを報告している。

(3) 載荷速度

半沢ら¹⁵⁾は不攪乱試料のK0圧密三軸圧縮試験から有明粘土について載荷速度の影響を調べた。その結果を図-9に示す。DST(1.25%/min)の載荷速度は、DSST(0.1%/min)のそれよりおよそ1オーダー大きい。図-9より、せん断ひずみ速度0.1%/minで載荷された

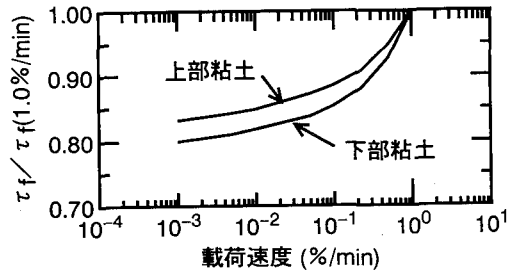


図-9 K0圧密三軸圧縮試験にて得られたせん断強度に及ぼす載荷速度の影響(有明粘土)

供試体のせん断強度は、せん断ひずみ速度1%/minで載荷された供試体のせん断強度に比べて、上部粘土で0.88倍、下部粘土で0.86倍となる。よって、載荷速度に対する補正係数 μ_R は次式にて与えられる。

$$\mu_R = 0.88 \quad (\text{上部粘土}) \quad (8)$$

$$= 0.86 \quad (\text{下部粘土}) \quad (9)$$

(4) せん断機構

3. で述べたように、太田ら¹¹⁾はDSTとDSSTの間のせん断強度の差異を定量化できる理論強度を表した。半沢ら¹⁵⁾は有明粘土のK0は深さ12mより上が0.54、深さ12mより下が0.49となることを示した。太田らの理論強度式に必要とされる粘土の内部摩擦角 ϕ' の推定には、Wroth¹⁰⁾により多くの正規圧密粘土で検証された式(10)を用いる。

$$(\tau_f / \sigma'_{v})_{NC} = 0.57 \times 3 \sin \phi' / (3 - \sin \phi') \quad (10)$$

半沢ら¹⁵⁾は有明粘土の三軸圧縮試験における非排水強度比として次の値を与えた。

$$(\tau_f / \sigma'_{v})_{NC} = 0.31 \quad (\text{上部粘土}) \quad (11)$$

$$(\tau_f / \sigma'_{v})_{NC} = 0.32 \quad (\text{下部粘土}) \quad (12)$$

そこで、式(10)に式(11)および式(12)を代入して有明粘土の内部摩擦角を計算すると、上部粘土が27°、下部粘土が28°となる。これらの値を用いて式(3)~(6)を計算し、 $\cosh \beta$ を求め、その逆数を補正係数とする。計算結果を表-2に示す。なお、 Δ は0.8とした。よって、せん断機構の違いについての補正係数 μ_M は次式で与えられる。

$$\mu_M = 0.92 \quad (\text{上部粘土}) \quad (13)$$

$$= 0.89 \quad (\text{下部粘土}) \quad (14)$$

式(8)と式(13)および式(9)と式(14)より、載荷速度とせん断機構の違いを考慮すると、 τ_f (DSST)に等価なせん断強度 τ_{fe} (DST)は次式より求めることができる。

表-2 DSTとDSSTのせん断機構の違いに対する補正値を
求めるための物性値 (有明粘土)

	上部粘土	下部粘土
K_0	0.54	0.49
ϕ'	27°	28°
M	1.07	1.11
η_0	0.66	0.77
Λ	0.8	0.8
β	0.427	0.479
$\cosh \beta$	1.093	1.117
補正係数	0.92	0.89

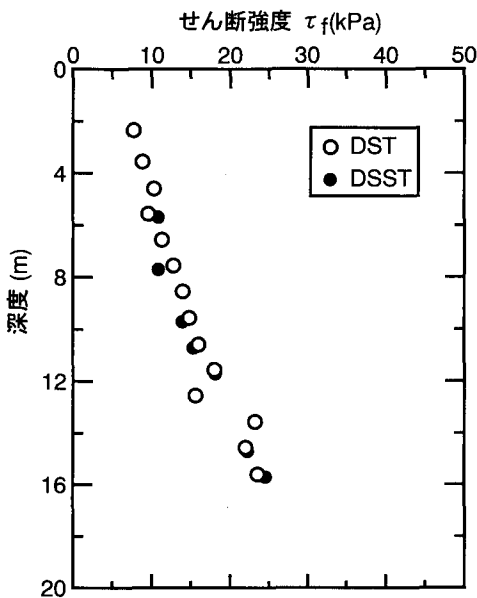


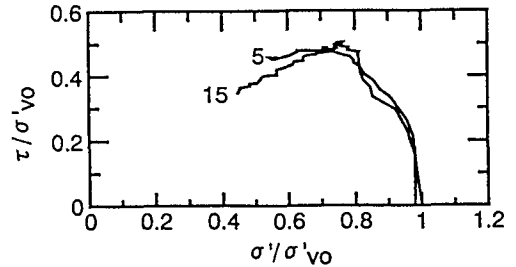
図-10 DSTおよびDSSTより得られた有明粘土のせん断強度 (補正後)

$$\begin{aligned} \tau_{fe}(DST) &= \mu R \times \mu M \times \tau_f(DST) \\ &= 0.81 \tau_f(DST) \quad (\text{上部粘土}) \quad (15) \\ &= 0.77 \tau_f(DST) \quad (\text{下部粘土}) \quad (16) \end{aligned}$$

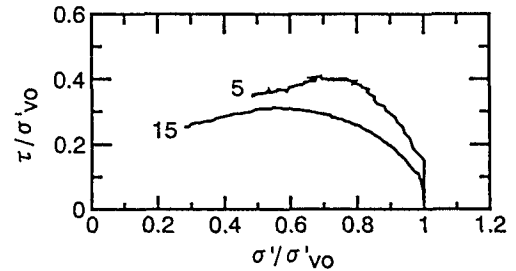
式(15)および式(16)を用いて補正を行った後の有明粘土のDSTとDSSTによるせん断強度の深さ方向分布を図-10に示す。これによると、補正後のDSTによるせん断強度とDSSTによるせん断強度はほぼ一致する。

(5) 応力経路

図-11(a)に上部粘土(試験番号5)および下部粘土(試験番号15)のDSTの応力経路を示す。試験番号は概略の深さ(m)に相当する。同様に、対応する深さのDSSTの応力経路を図-11(b)に示す。二つの応力経路を比較すると、まず第1に、下部粘土の挙動と上部粘土のそれはあまり差がないことがわかる。



(a) DST



(b) DSST

図-11 DSTおよびDSSTによる応力経路 (有明粘土)

第2に、DSSTの応力経路がDSTのそれに比べて左側(より大きな有効応力の減少)に位置することが読みとれる。この原因は、DSSTにおけるひずみ速度がDSTの約1/10のため、いわゆるクリープの進行に伴うより大きな過剰間隙水圧が発揮されたために他ならない。

(6) せん断剛性率

次に、DSSTより得られるせん断剛性率 G_{50} とDSTより得られる見掛けの G_{50} (= $G_{50}(ap)$)を比較してみよう。DSTより得られる $G_{50}(ap)$ は次式にて算定した。

$$G_{50}(ap) = \frac{\tau_f/2}{D(at \tau_f/2)/H_0} \quad (17)$$

ここに、 $D(at \tau_f/2)$: $\tau_f/2$ におけるせん断変位

H_0 : 供試体の初期高さ

このようにして得られた $G_{50}(ap)$ と G_{50} を $\tau_f(DST)$ と $\tau_f(DSST)$ で正規化した結果を図-12に示す。

$G_{50}/\tau_f(DSST)$ が $G_{50}(ap)/\tau_f(DST)$ より若干低めの値を示すが、試料の乱れや試験法の違いによる G_{50} や E_{50} のような変形係数の変化は、せん断強度の変化よりも遥かに鋭敏であることを考えると、図-12に示す $G_{50}(ap)/\tau_f(DST)$ と $G_{50}/\tau_f(DSST)$ は実用上一致するとみてよいだろう。

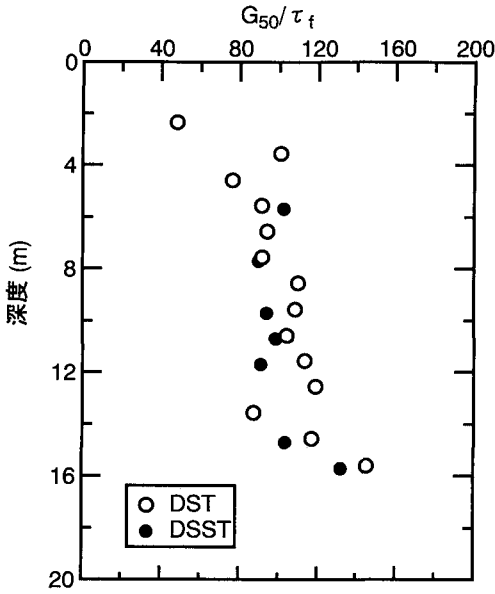


図-12 DSTおよびDSSTにて得られた G_{50}/τ_f
(有明粘土)

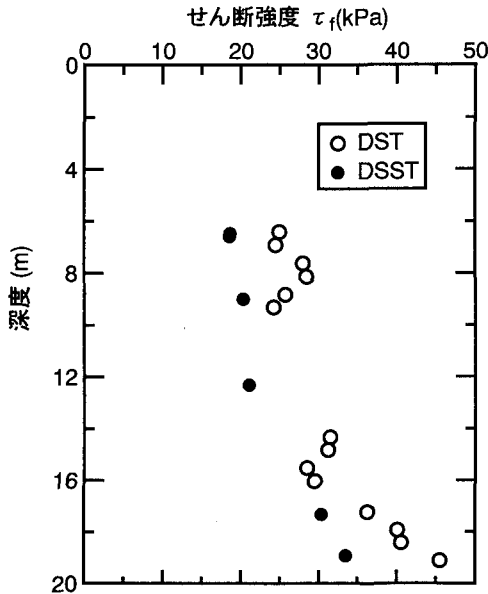


図-13 DSTとDSSTより得られたDrammen粘土のせん断強度

6. Drammen粘土の試験結果

DSTおよびDSSTより得られたDrammen粘土のせん断強度を図-13に示す。有明粘土と同様、 $\tau_f(\text{DST}) > \tau_f(\text{DSST})$ なる結果が得られた。以下、有明粘土についてと同様な検討を行ってみよう。

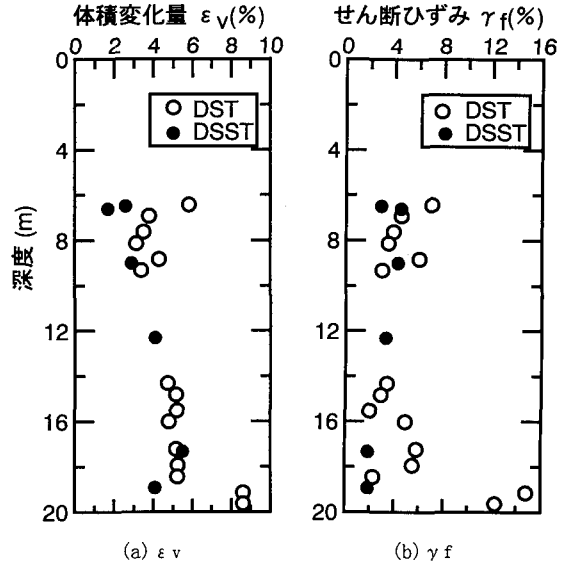


図-14 DSTとDSSTにおける ε_v と γ_f

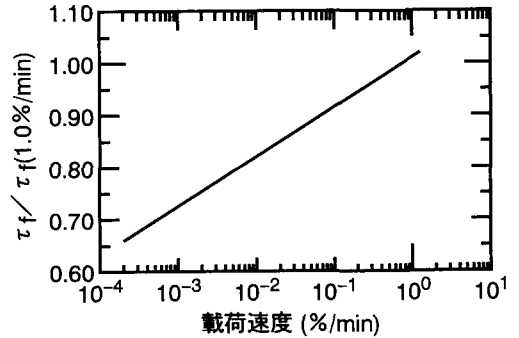


図-15 DSSTより得られた載荷速度がせん断強度に及ぼす影響 (Drammen粘土)

(1) 試料の乱れ

DSTとDSSTにおける ε_v と γ_f を図-14に示す。平均 ε_v は5.1%(DST), 3.5%(DSST)で、一方、 γ_f は5.5%(DST), 3.1%(DSST)である。いずれの値もDSTのほうが大きく、試料運搬過程で若干乱されたことが推察される。

(2) 載荷速度

NGI¹⁹⁾は上部Drammen粘土について、種々の載荷速度(0.12%/min, 0.011%/minおよび0.00036%/min)でDSSTを実施した。その結果を図-8と同様、 $[\tau_f/\tau_f(1.0\%/min)]$ とひずみ速度の関係に整理した結果を図-15に示す。DSTおよびDSSTのひずみ速度は、それぞれ1.25%/minと0.1%/minなので、 μ_R は下記のように得られる。

$$\mu_R = 0.91/1.02 = 0.89 \quad (18)$$

表-3 DSTとDSSTのせん断機構の違いに対する補正値を求めるための物性値 (Drammen粘土)

	上部粘土	下部粘土
K_0	0.49	0.49
ϕ'	25°	26°
M	0.98	1.03
η_0	0.77	0.77
Λ	0.8	0.8
β	0.544	0.518
$\cosh \beta$	1.152	1.137
補正係数	0.87	0.88

(3) せん断機構の違い

NGIが上部および下部Drammen粘土について実施した K_0 圧密三軸圧縮試験²⁰⁾より得られた K_0 値は、両者とも等しく0.49である。またこの試験から求めた強度増加率はそれぞれ0.28(上部)と0.29(下部)で、式(10)より ϕ' を求めると25°(上部)と26°(下部)が得られる。これらの値を用いて式(3)~式(6)を計算し、 $\cosh \beta$ を求め、その逆数を補正係数とした。なお有明粘土と同様、 Λ は0.8とした。計算結果を表-3に示す。

よって有明粘土と同様な方法で μ_M は次のように求められる。

$$\mu_M = 0.87 \quad (\text{上部粘土}) \quad (19)$$

$$= 0.88 \quad (\text{下部粘土}) \quad (20)$$

式(18)~式(20)を用いて載荷速度とせん断機構の違いの両者に対する補正を行った後の τ_{fe} (DST)は式(21)および式(22)で与えられる。

$$\begin{aligned} \tau_{fe}(\text{DST}) &= \mu_R \times \mu_M \times \tau_f(\text{DST}) \\ &= 0.77 \tau_f(\text{DST}) \quad (\text{上部粘土}) \quad (21) \end{aligned}$$

$$= 0.78 \tau_f(\text{DST}) \quad (\text{下部粘土}) \quad (22)$$

式(21)と式(22)を用いて補正した後のDrammen粘土の $\tau_f(\text{DST})$ と $\tau_f(\text{DSST})$ を深さに対してプロットした結果を図-16に示す。両者は良い一致を示す。

(4) せん断剛性率

DST1およびDSST1より得られた $G_{50}(\text{ap})$ と G_{50} を τ_f で正規化した値、 $G_{50}(\text{ap})/\tau_f(\text{DST})$ 、 $G_{50}/\tau_f(\text{DSST})$ の深さ方向分布を図-17に示す。これらの値には有意な違いは認められないが、注目すべきことは、下部粘土の $G_{50}(\text{ap})/\tau_f(\text{DST})$ および $G_{50}/\tau_f(\text{DSST})$ が深さとともに急激に減少することである。一方、図-16に示すように、下部粘土の $\tau_f(\text{DST})$ と $\tau_f(\text{DSST})$ は深さとともにかなりの勾配で増加している。DST1より得られた下部粘土の代表的なせん断応力~変位曲線を図-18に示す。図-18(ピーク強度のときの変位)およ

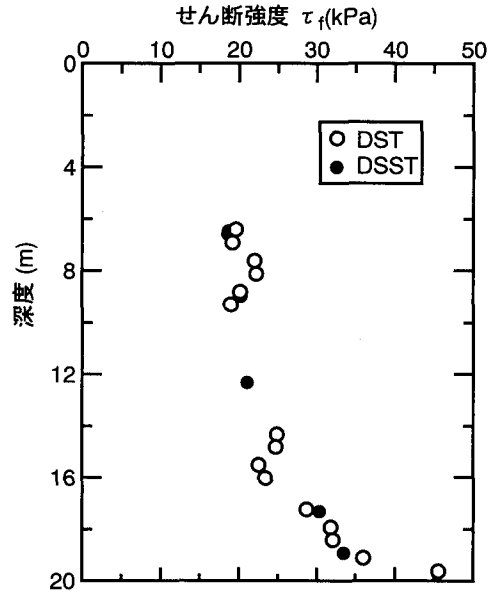


図-16 DST1およびDSST1より得られたDrammen粘土のせん断強度 (補正後)

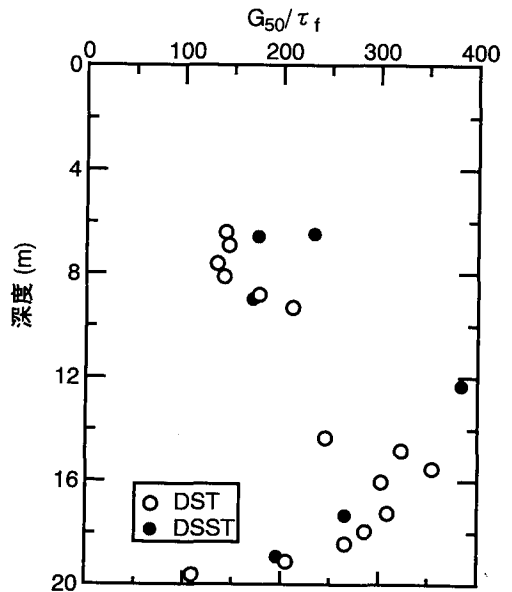


図-17 DST1とDSST1より得られた G_{50}/τ_f (Drammen粘土)

び図-14(ϵ_v および γ_f)から考えて、深さ19.1mと19.6mの試料が乱れていたために $G_{50}(\text{ap})$ が小さくなったと考えられる。

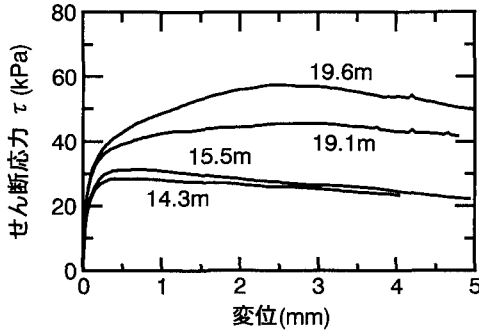


図-18 DST1より得られた下部Drammen粘土のせん断応力～変位曲線

7. 過圧密Drammen粘土の試験結果

前節までは不攪乱試料をその σ'_{v0} で再圧縮して定体積せん断試験に供する試験結果について報告した。本節では、上部Drammen粘土について実施した人工過圧密粘土についてDSTとDSST(表-1に示したDST2およびDSST2)の結果について報告する。

本試験ではまずリモールドした試料と不攪乱試料を400kPaで圧密(24時間)して正規圧密粘土を作成し、次いで種々のOCR(=1, 2, 4, 5, 10, 20および40, ただし、不攪乱試料についてはOCR=1, 3および10)のもとで膨張(24時間)させ定体積せん断に供した。荷重速度は、0.1mm/min(DST2)と0.1%/min(DSST2)である。リモールドおよび不攪乱試料のDST2より得られたせん断応力～間隙水圧～変位曲線を図-19に示す。当然のことながら二つの間に有意な違いは認められない。

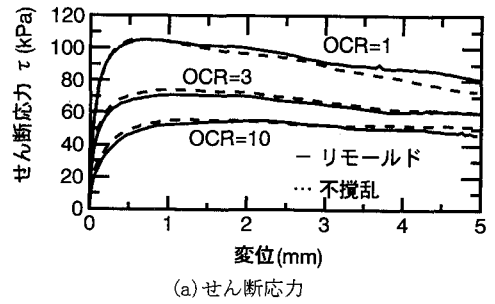
DST2とDSST2より得られた τ_f を、圧密(膨張)応力 σ'_{v0} で正規化した τ_f/σ'_{v0} をOCRに対してプロットした結果を図-20に示す。DST1, DSST1の結果と異なり、両者は極めて良い一致を示す。過圧密の影響は、太田らのDSTとDSSTのせん断機構の違いに関する理論式に関係ないので、前節で求めた補正係数(=0.87)を適用する。荷重速度の影響についての補正係数は、前節に示した手法により下記のように求められる。

$$\mu_R = 0.91/0.97 = 0.93 \quad (23)$$

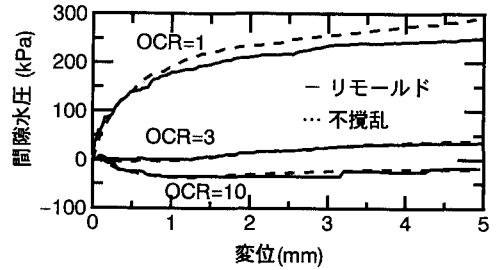
従って、せん断機構の違いと荷重速度の両者を取り入れた補正係数は次式で与えられる。

$$\mu_R \times \mu_M = 0.87 \times 0.93 = 0.81 \quad (24)$$

式(24)を用いて補正した τ_f (DST)と τ_f (DSST)をOCRに対してプロットした結果を図-21に示す。当然ながら τ_f (DST)が低い値を示す。



(a)せん断応力



(b)間隙水圧

図-19 リモールドおよび不攪乱試料より作成した人工過圧密粘土のDST2より得られた応力～間隙水圧～変位曲線 (Drammen粘土)

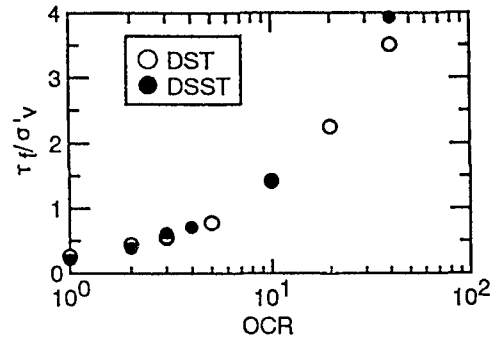


図-20 DST2とDSST2より得られた正規化したせん断強度とOCRの関係 (Drammen粘土)

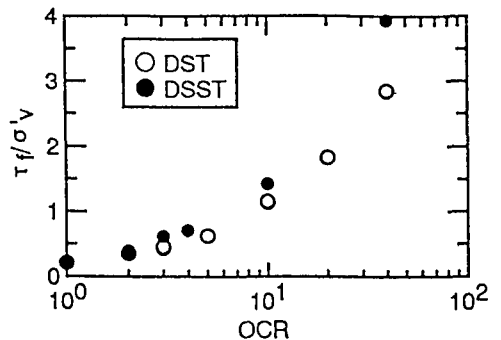


図-21 DST2とDSST2より得られた正規化したせん断強度とOCRの関係(補正後) (Drammen粘土)

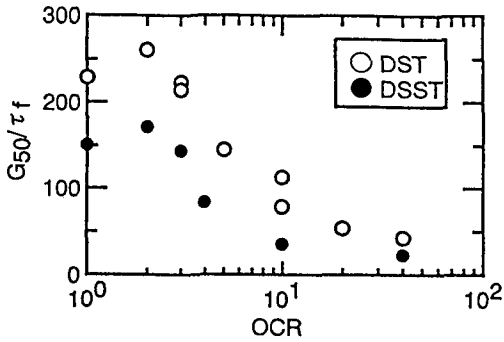


図-22 DSTとDSSTより得られた G_{50}/τ_f とOCRの関係 (Drammen粘土)

DSTおよびDSSTより得られた G_{50}/τ_f を図-22に示す。DST1およびDSST1では両者が良く一致したが、この場合はDST2より得られた結果が高い値を示す。

8. 結論

九州の有明粘土とノルウェーのDrammen粘土について実施した一連のDSTとDSST結果について報告した。その結果次のような結論と推察が得られた。

(1) 不攪乱試料をその土盛り圧で再圧縮した後、せん断に供する[DST1]より得られたせん断強度(τ_f (DST))とせん断剛性率($G_{50(ap)}$)は、同じ条件での[DSST1]より得られる値(τ_f (DSST)および G_{50})よりも高い値を示す。

(2) しかし $G_{50(ap)}$ と G_{50} をそれぞれのせん断強度で正規化した値、 $G_{50(ap)}/\tau_f$ (DST)と G_{50}/τ_f (DSST)は比較的良い一致を示す。

(3) DSTとDSSTの荷重速度とせん断機構の違いによる補正係数として下記のような値が得られた。

$$\begin{aligned} \mu_R \times \mu_M &= (0.77 \sim 0.81) \quad (\text{有明粘土}) \\ &= (0.77 \sim 0.78) \quad (\text{Drammen粘土}) \end{aligned}$$

(4) DST1より得られた τ_f (DST)に上記の補正係数を乗じたせん断強度は、DSST1より得られた τ_f (DSST)と良い一致を示した。

(5) しかし人工過圧密粘土について実施したDST2とDSST2より得られたせん断強度およびせん断剛性率については、このような補正が有効でないことが判明した。この理由は両試験機の機械的な問題か、実験誤差なのか、人工粘土と自然粘土(不攪乱粘土)の持つ本質的な違いなのか現状では不明だが今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 三笠正人：新型一面せん断試験機について，土木学会第15回年次学術講演会講演概要，pp. 45-48, 1960
- 2) Bjerrum, L. and Landva, A. : Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay. *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20, 1966.
- 3) 半沢秀郎：土の一面せん断試験結果の実務への適用，直接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. 87-94, 1995.
- 4) 土質工学会編：土質試験法第6編土の力学的性質の試験(II)，pp. 423-571, 1979.
- 5) Takada, N. : Mikasa's Direct Shear Apparatus, test procedures and results. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 314-322, 1993.
- 6) Potts, D. M., Douglas, G. T. and Vaughan, P. R. : Finite element analysis of the direct shear box test. *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 11-23, 1987.
- 7) Lucks, A. S., Christian, J. T., Brandow, G. E. and Hoeg, K. : Stress condition in NGI simple shear test. *J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE*, Vol. 98, SM1, pp. 155-160, 1972.
- 8) Vucetic, M. and Lacasse, S. : Specimen size effect in simple shear test. *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol. 108, GT12, pp. 1567-1585, 1982.
- 9) Airey, D. W. and Wood, D. M. : An evaluation of direct simple shear tests on clay. *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 25-35, 1987.
- 10) Wroth, C. P. : The interpretation of in situ soil tests. 24th Rankine Lecture. *Geotechnique*, Vol. 34, No. 4, pp. 449-489, 1984.
- 11) Ohta, H., Nishihara, A. and Morita, Y. : Undrained stability of K₀consolidated clays. *Proc. 11th ICSMFE, San Francisco*, Vol. 2, pp. 613-616, 1985.
- 12) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clay, 9th ICSMFE, Tokyo, Proc. Specialty session 9, pp. 229-239, 1977.
- 13) Ladd, C. C. : Discussion, main session, 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 4, pp. 108-115, 1973.
- 14) Bjerrum, L. : Problems of soil mechanics and construction on soft clay. *Proc. 8th ICSMFE, Moscow*, Vol. 3, pp. 109-159, 1973.
- 15) Hanzawa, H., Fukaya, T. and Suzuki, K. : Evaluation of engineering properties for an Ariake clay. *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 4, pp. 11-24, 1990.
- 16) Hight, D. W., Boese, R., Butcher, A. P., Clayton, C. R. I. and Smith, P. R. : Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing. *Geotechnique*, Vol. 42, No. 2, pp. 199-217, 1992.

- 17) Andersen, A. and Kolstad, P. : The NGI 54mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarse material. NGI Publ., No. 130, 1980.
- 18) Berre, T. : Effect of consolidation time on triaxial and direct simple shear tests. NGI Internal Report, No. 56103-29, 1985.
- 19) NGI Internal Report 50320-1, 1972.
- 20) Berre, T. and Bjerrum, L. : Shear strength of normally consolidated clays. Proc. 8th. ICSMFE, Moscow, Vol. 1. 1, pp. 39-40, 1973.

(1997. 5. 15受付)

A COMPARATIVE STUDY ON SHEAR STRENGTH OF MARINE CLAYS BY DIRECT SHEAR AND DIRECT SIMPLE SHEAR TESTS

Kiyoshi TSUJI, Yi-Xin. TANG and Tom LUNNE

A comparative study of the Mikasa Direct Shear Test (DST) and the NGI Direct Simple Shear Test (DSST) has been carried out on shear properties of two marine clays. Samples from Ariake clay and Norwegian Drammen clay have been subjected to both types of test. An evaluation of these test results and a theoretical consideration on the different shearing mechanisms in these testing types are presented.