

有明, Bothkennar, Champlainおよび Drammen粘土の一面せん断試験結果

辻 清¹・Dam Thi Kim LOAN²・半沢秀郎³

¹正会員 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035横浜市鶴見区安善町1-3)

²工博 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035横浜市鶴見区安善町1-3)

³正会員 工博 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035横浜市鶴見区安善町1-3)

世界を代表する海成粘土である有明(九州), Bothkennar(英国), Champlain(カナダ)およびDrammen(ノルウェー)粘土について, 三笠式一面せん断試験機を用いて実施した一連の一面せん断試験結果について報告する。まず, 正規圧密および原位置応力状態でのせん断強度について報告する。次いで, 原位置応力状態でのせん断強度と有効土被り圧の関係が2つのパターンに分類されることを示すと共に, せん断剛性率や内部摩擦角についても報告する。最後に, 一軸圧縮試験, 現場ベーン試験およびコーン貫入試験より得られたせん断強度と一面せん断強度の相関関係について検討を加えた。

Kew Words: marine clay, shear strength, direct shear test, unconfined compression test, field vane test, cone penetration test

1. はじめに

有明, Bothkennar(英国), Champlain(カナダ)およびDrammen(ノルウェー)粘土は世界的によく知られた海成粘土で, これまで多くの研究成果が報告されてきた^{1),2),3),4)}。しかし調査, 試験手法はそれぞれの地域によって違うため, 同一手法による研究成果は未だ得られていない。このような観点から, 筆者らは4つの粘土の不攪乱試料を入手し, 三笠式一面せん断試験機による一連の一面せん断試験(DST)を実施した。

本論文では, まず正規圧密状態(以下, NC状態と称する)における一面せん断強度($\tau_{f(d)}$)と再圧縮法⁵⁾にて得られた原位置応力状態での一面せん断強度($\tau_{f(d)}$)について報告する。更に, $\tau_{f(d)}$ と有効土被り圧(σ'_{v0})の関係について検討を加え, 4つの粘土の「 $\tau_{f(d)} \sim \sigma'_{v0}$ 」が2つのパターンに分類されることを示す。NC状態における内部摩擦角(ϕ)について報告すると共に, せん断剛性率とせん断強度の関係についても検討を加えた。最後に, 一軸圧縮試験(UCT), 現場ベーン試験(FVT)およびコーン貫入試験(CPT)より得られるせん断強度, $\tau_{f(UCT)}$, $\tau_{f(FVT)}$,

およびコーン先端抵抗(q_r)と $\tau_{f(d)}$ の相関関係を示すと共に, これらの試験の適用性についても検討を加えた。

2. 粘土の性質とサンプリング法

上記4つの粘土の自然含水比(w_n), 塑性限界(w_p), 液性限界(w_L)および湿潤単位体積重量(γ)の深度方向分布を図-1に示す。有明粘土は, 深度12mで上部粘土と下部粘土に分けられ, w_n が w_L よりも大きい特徴がある¹⁾。Bothkennar粘土とChamplain粘土は共に深度方向に均一である。両粘土は鋭敏で, 構造が発達した粘土であることがHightら²⁾やLeroueilら³⁾によって報告されている。Drammen粘土については, 2カ所で調査された結果をNutら⁴⁾が報告しており, 彼らは上部粘土をplastic clay(塑性粘土), 下部粘土をlean clay(リーン粘土)と呼んでいる。リーン粘土と呼ばれるのは, この土が農作物に適さない栄養分の少ない土であるためと思われる。この粘土は, 氷河が滑り降りる時に岩を削ってできたロックフラワー(rock flour)と呼ばれる粒径では粘性土に分類されるが, 粘土鉱物を含まない粘土粒子を多く含んでい

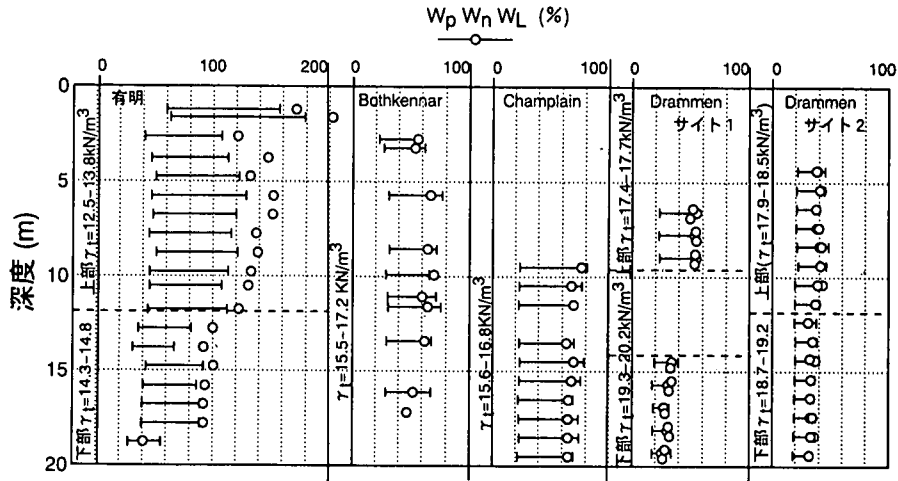


図-1 4地域の粘土の物理的性質

表-1 4地域の粘土のサンプリング法

粘土	サンプラー	試料寸法	サンプリング方法
有明	JPN-Standard	$\phi=75\text{mm}$, $L=1,000\text{mm}$ $\phi=200\text{mm}$, $L=600\text{mm}$	プレボーリング法
Bothkennar	Laval		プレボーリング法
Champlain	JPN-Standard		プレボーリング法
Drammen	サイト1: NGI-95 サイト2: JPN-Standard	$\phi=95\text{mm}$, $L=1,000\text{mm}$	サイト1: ディスプレースメント法 サイト2: プレボーリング法

る⁹⁾。粘土の活性度(A)は、 $A=(\text{塑性指数})/(2\mu \text{以下の粘土分の重量}\%)$ で表され、構成鉱物の電気的性質の活発さ度合いを表現する。主要な粘土鉱物の活性度は、 Na^+ モンモリロナイト($A=7.2$)、イライト($A=0.9$)、カオリナイト($A=0.38$)である⁷⁾。活性度による粘性土の種類は、不活性粘土($A=0.75$ 以下)、通常の粘土($A=0.75\sim 1.25$)、活性粘土($A=1.25$ 以上)に分類される⁹⁾。本研究に使用した粘土の活性度は、有明粘土($A=0.8\sim 1.2$:粘土分60%)、Bothkennar粘土($A=1.0$:粘土分40%)、Champlain粘土($A=1.0$:粘土分50%)で活性度からみて通常の粘土に分類されるのに対し、Drammen粘土は $A=0.5$ 、粘土分40%で不活性粘土に分類される。本研究で使用した粘土では、Drammen粘土が最も低塑性(塑性指数、 $I_p=10\sim 32$)で、Bothkennar粘土とChamplain粘土は中塑性(各々 $I_p=35\sim 45$ と $I_p=50\sim 55$)で、有明粘土は高塑性($I_p=50\sim 80$)粘土に分類される。 w_n は有明粘土を除き w_l にほぼ等しいか、やや低めかである。本研究で使

た上記3地域の海外の粘土は、異なった方法によりサンプリングされ、日本に空輸された。各粘土の不攪乱試料サンプリング法を表-1に示す。

3. せん断試験

(1) 三笠式一面せん断試験機

三笠式一面せん断試験機⁹⁾は30年以上も前に開発されたもので、高田¹⁰⁾が詳しく報告しているように、従来の一面せん断試験機の様々な欠点を除去すると共に、定体積せん断が簡単に行える点に特徴がある。そのせん断試験機の構造を図-2に示す。下部載荷板(下部せん断箱の直径より4mm小さい)は、ガイドローラーで鉛直に支持された載荷ラムに固定され、一方、上部載荷板は調整可能な3つのガイドローラーで水平方向に移動するような構造となっている。圧密中、調整ねじを締めて上部せん断箱(可動)と下部

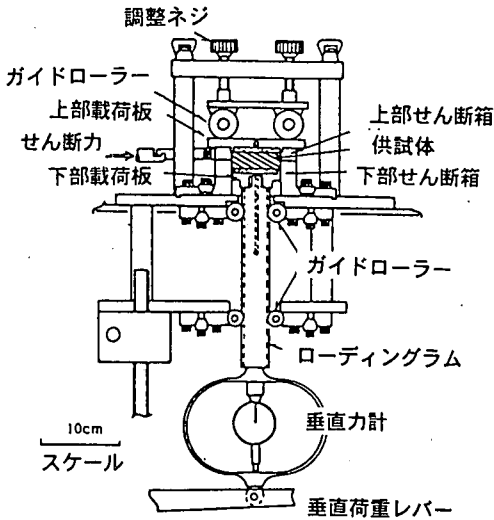


図-2 三笠式一面せん断試験機の構造⁹⁾

せん断箱(固定)を密着させる。せん断開始前、水平ガイドローラーのレベルをねじで調整し、上下せん断箱間に0.2mm~0.5mmの隙間を与える。このような構造により、せん断中の載荷板と下部せん断箱の摩擦や載荷板の傾きがない水平方向へのせん断が保持される。なお定体積せん断は、供試体の高さが一定となるよう直応力を制御することによって達成される。

(2) 試験法

以下に示す2種類のDSTを行った。

a) DST1シリーズ ($\tau_{f(d)}$ を求める試験)

不攪乱試料から作成した直径 $D=60\text{mm}$ 、高さ $H=20\text{mm}$ の供試体を、有効土被り圧(σ'_v)で5~10分再圧縮した後、定体積条件で、せん断変位速度 0.25mm/min でせん断する。この試験は、原位置のせん断強度($\tau_{f(d)}$)を得るために行う。

b) DST2シリーズ ($\tau_{f(d)}$ を求める試験)

不攪乱試料あるいはリモールド試料から作成した供試体を、圧密降伏応力(σ'_v)より大きな有効鉛直応力で、1次圧密終了まで圧密した後、DST1と同じ条件でせん断する。この試験から得られるせん断強度は、NC状態のせん断強度($\tau_{f(d)}$)を表す。通常、NC試料はリモールド試料から作成されることが多いが、不攪乱試料を用いて上記の方法で試料を作成するほうが簡便である。辻ら¹¹⁾は、上部Drammen粘

土を用いてリモールド試料と不攪乱試料から作成したNC供試体($\sigma'_v=400\text{kPa}$ 、圧密時間=24hr)に対して、定体積一面せん断試験(せん断変位速度 $=0.25\text{mm/min}$)を行い、せん断応力~間隙水圧~せん断変位関係を比較し、両者が一致することを確認している。

4. 試料の品質

不攪乱試料の品質を評価する方法として、Andersen and Kolstad¹²⁾による、 σ'_{v0} での再圧縮時の体積ひずみ(ϵ_v)による方法や、せん断破壊時の変位(D_f)による方法が挙げられる。しかし、たとえ試料の品質が同じでも、圧縮性が高い土とそうでない土、あるいは構造が発達している土とそうでない土とでは、 ϵ_v や D_f が異なることが容易に想像される。前者を塑性指数(I_p)、後者を過圧密比(OCR)で評価すると、 ϵ_v と D_f は本来式(1)で表示されるべき値であろう。

$$\epsilon_v \text{ \& } D_f = F(\text{品質}, I_p, \text{OCR}) \quad (1)$$

このような観点から、DST1での各粘土の ϵ_v と D_f をOCRと I_p に対しプロットした結果を図-3に示す。なお、OCRは定ひずみ速度圧密試験(ひずみ速度 $0.02\%/min$)により求めた。図より ϵ_v はOCRの増加と共に明らかに減少し、Drammen粘土を除き、 I_p の増加と共に漸増することが読み取れる。一方 D_f とOCRの間には有意な相関関係が認められないが、Drammen粘土を除くと I_p の増加と共に ϵ_v と同様漸増する傾向が見られる。田中ら¹³⁾は、地盤工学会標準の固定ピストン式シンウォールサンプラー(JPN-Standard)とNGI-95サンプラーで採取したDrammen粘土(特に下部粘土)の一軸圧縮試験における残留有効応力が σ'_{v0} の数%に過ぎないことを報告している。下部Drammen粘土($I_p \leq 20$)に見られる大きな ϵ_v や D_f はこのこととは無関係とは思えない。下部Drammen粘土のような低塑性粘土については、通常のチューブ型サンプラーでは良質な試料は得られないことが推察される。

5. 正規圧密状態と原位置状態のせん断強度

(1) せん断強度

DST2により得られたNC状態の粘土の非排水せん断強度($\tau_{f(d)}$)を σ'_v に対してプロットした結果を図-4に示す。NC状態の強度増加率($\tau_{f(d)}/\sigma'_v$)を以下に示す。

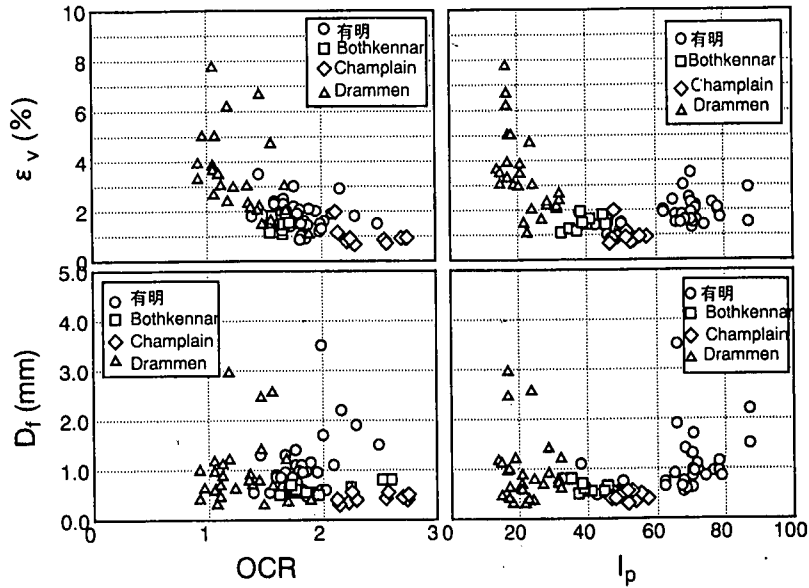


図-3 DSTにおける再圧縮時の体積ひずみおよび破壊時のせん断変位とOCRおよびIpの関係

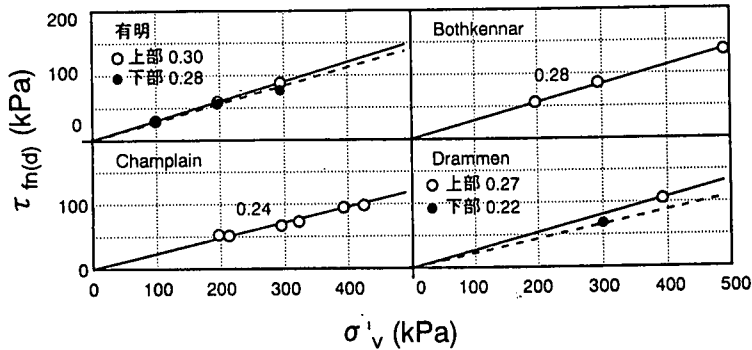


図-4 DSTより得られた4地域の粘土の $\tau_{m(d)}$ と σ'_v の関係

$\tau_{m(d)}/\sigma'_v=0.30$ (上部), 0.28 (下部有明粘土)
 $=0.28$ (Bothkennar粘土)
 $=0.24$ (Champlain粘土)
 $=0.27$ (上部), 0.22 (下部Drammen粘土) (2)

有効土被り圧で正規化した原位置状態の粘土の非排水せん断強度 ($\tau_{m(d)}/\sigma'_{v0}$) の深度方向分布を図-5に示す。この図より以下のことが指摘される。

- 1) 下部Drammen粘土を除く粘土の $\tau_{m(d)}/\sigma'_{v0}$ は、 $\tau_{m(d)}/\sigma'_v$ より大きく、これらの粘土が過圧密状態にあることがわかる。
- 2) 有明粘土とBothkennar粘土の $\tau_{m(d)}/\sigma'_{v0}$ は、ある深

度(有明粘土：8m, Bothkennar粘土：12m)まで深度と共に減少し、それ以深はほぼ一定の値を示すのに対し、Champlain粘土のそれは深度と共に連続的に減少する。

3) Drammen粘土の $\tau_{m(d)}/\sigma'_{v0}$ の深度方向分布はややバラツキがあるが、2カ所のデータを比較してみると、上部粘土の $\tau_{m(d)}/\sigma'_{v0}$ は深度方向にほぼ一定で、0.4で、 $\tau_{m(d)}/\sigma'_v (=0.27)$ より大きいものに対し、下部粘土では両者に有意な差は認められない。

各粘土の $\tau_{m(d)}$ を σ'_{v0} に対してプロットした結果を図-6に示す。 $\tau_{m(d)}$ と σ'_{v0} の関係は、以下に示す2つ

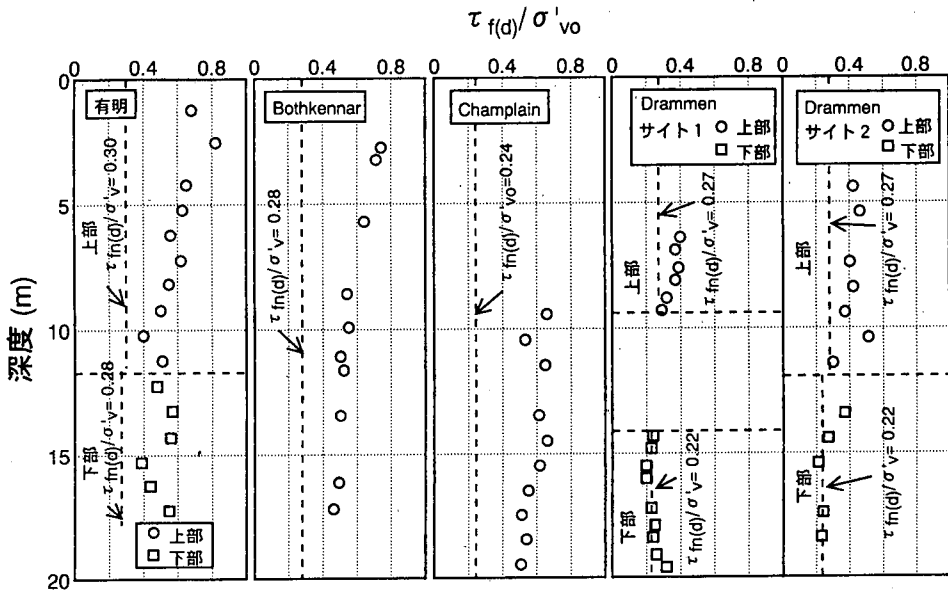


図-5 4地域の粘土の正規化強度($\tau_{f(d)}/\sigma'_{vo}$)の深度方向分布

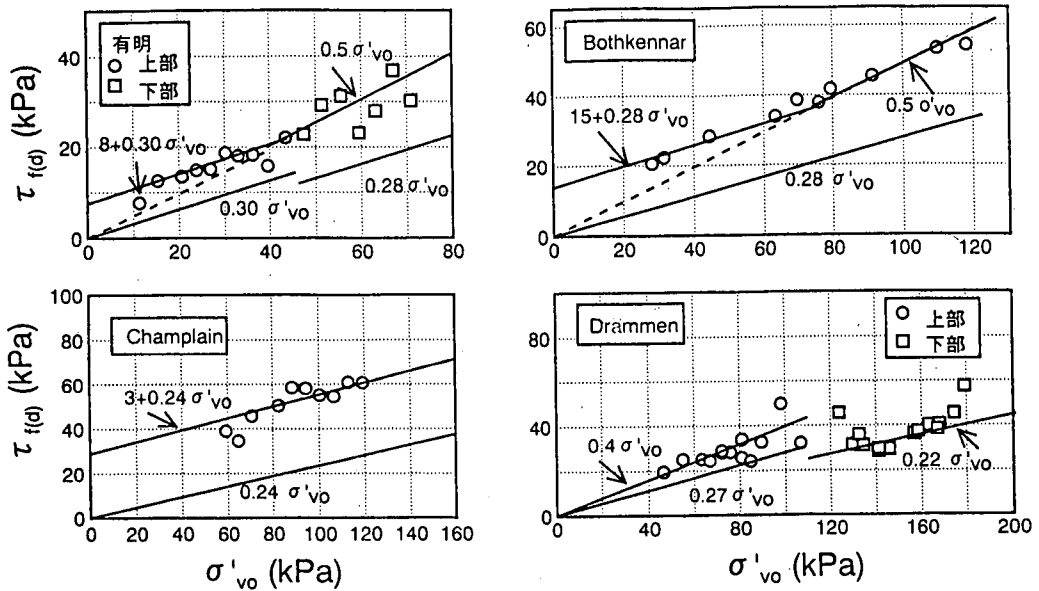


図-6 DSTより得られた4地域の $\tau_{f(d)}$ と有効土被り圧 σ'_{vo} の関係

のパターンに分類される。

パターン I :

$$\tau_{f(d)} = \tau_{f(d)0} + \tau_{fn(d)}/\sigma'_{vo} \times \sigma'_{vo} \quad (3a)$$

パターン II :

$$\tau_{f(d)} = k \times \tau_{fn(d)}/\sigma'_{vo} \times \sigma'_{vo} \quad (3b)$$

ここに、 $\tau_{f(d)0}$: 地表面におけるせん断強度

k : 係数(≥ 1.0)でOCRと等価値

半沢¹⁴⁾は、この2つのパターンはアジアの海成粘土についても認められることを報告すると共に、パターンIでは化学的結合作用、パターンIIでは二次圧密作用が主たる年代効果作用であることを指摘している。図-6に示すように、パターンIは上部有明粘

表-2 4地域の粘土の $\tau_{f(d)0}$ とk

粘土	層	$\tau_{f(d)0}$ (kPa)	k	層境界 σ'_{v0} (kPa)
有明	上部	6	-	40
	下部	-	1.8	
Bothkennar	上部	15	-	75
	下部	-	1.8	
Champlain		30	-	-
Drammen	上部	-	1.5	-
	下部	-	1.0	

土、上部Bothkennar粘土、Champlain粘土に、パターンIIは下部有明粘土、下部Bothkennar粘土、上部Drammen粘土に適用できる。各粘土の $\tau_{f(d)0}$ とkを両パターンの境界 σ'_{v0} と共に表-2に示す。

年代効果として様々な作用が挙げられるが、その中の代表的な作用として化学的結合と二次圧密作用があげられる。半沢ら¹⁵⁾はこれらの作用の相互作用について考察し、最初に化学的結合作用が起こり、次いで二次圧密作用が起こるのが一般的であることを指摘した。この場合、二次圧密の進展は、既に化学的結合作用により形成されている構造によって阻害される。しかし、堆積時間と共に二次圧密がさらに進展すると、化学的結合は破壊される。二次圧密量は σ'_{v0} に比例するので、 σ'_{v0} がある値($\sigma'_{v0(b)}$)を超えると化学的結合作用により形成された構造が、二次圧密作用による構造に置き換えられる。粘土の構造をせん断強度で代表させて上記の関係を表したものを図-7に示す。図により式(3)が説明できる。

(2) 応力～ひずみ関係

DST1およびDST2より得られた正規化されたせん断応力($\tau_{n(d)}/\sigma'_{v0}$ および $\tau_{(d)}/\sigma'_{v0}$)とせん断変位Dの関係を図-8に示す。下部Drammen粘土以外の粘土の曲線は、不攪乱試料の曲線がNC試料の曲線の上に位置し、かつ脆性的な挙動を示す。Champlain粘土の $\tau_{(d)}/\sigma'_{v0} \sim D$ 曲線は際だった特徴を有しており、せん断強度は、ピークを超えてからわずかのせん断変位($D=0.7\text{mm}$)内で急激に低下し、その後緩やかに残留強度に達する。このような脆性的挙動は結合構造が高度に発達した粘土の典型であり¹⁶⁾、Champlain粘土が沖積粘土としては高度にセメンテーションされていることと一致する¹⁷⁾。Bothkennar粘土と下部有明粘土も上部Drammen粘土と比べるとやや脆性的な性質を有する。一方、下部Drammen粘土では、不攪乱試料の曲線とNC試料の曲線には違いが認められない。

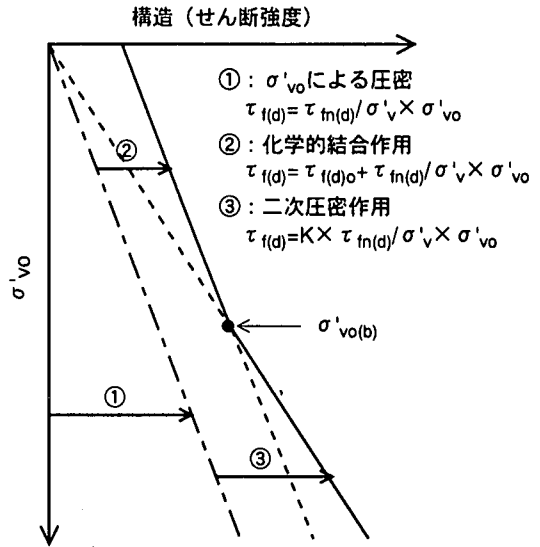


図-7 σ'_{v0} と構造の模式的表示

(3) 見かけのせん断剛性率

見かけのせん断剛性率(G_{50})を式(4)のように定義する。

$$G_{50} = (\tau_{f(d)}/2) \div (D_{50}/H_0) \quad (4)$$

ここに、 D_{50} ：せん断強度の1/2のせん断応力に対応するせん断変位

H_0 ：供試体の初期高さ

各粘土について、 G_{50} を $\tau_{f(d)}$ に対してプロットした結果を図-9に示す。 G_{50} と $\tau_{f(d)}$ の間には線形関係があり、各粘土については以下ようになる。

$$\begin{aligned} G_{50} &= 85 \tau_{f(d)}(\text{上部}), 110 \tau_{f(d)}(\text{下部有明粘土}) \\ &= 110 \tau_{f(d)}(\text{Bothkennar粘土}) \\ &= 155 \tau_{f(d)}(\text{Champlain粘土}) \\ &= 180 \tau_{f(d)}(\text{上部}), 235 \tau_{f(d)}(\text{下部Drammen粘土}) \end{aligned} \quad (5)$$

$G_{50}/\tau_{f(d)}$ を I_p に対してプロットした結果を図-10に示す。 $G_{50}/\tau_{f(d)}$ は、 I_p の増加と共に減少する。Champlain粘土のほとんどの $G_{50}/\tau_{f(d)}$ が破線で示した領域の上にくるのは、この粘土が、前記のように高度にセメンテーションされているためである。

(4) 有効応力経路

DST1およびDST2より得られた有効応力経路を圧密応力で正規化した結果をNC状態の内部摩擦角(ϕ')と共に図-10に示す。下部Drammen粘土を除き両試験の応力経路には大きな違いが見られ、特に、DST1におけるChamplain粘土の経路は鉛直に延びる

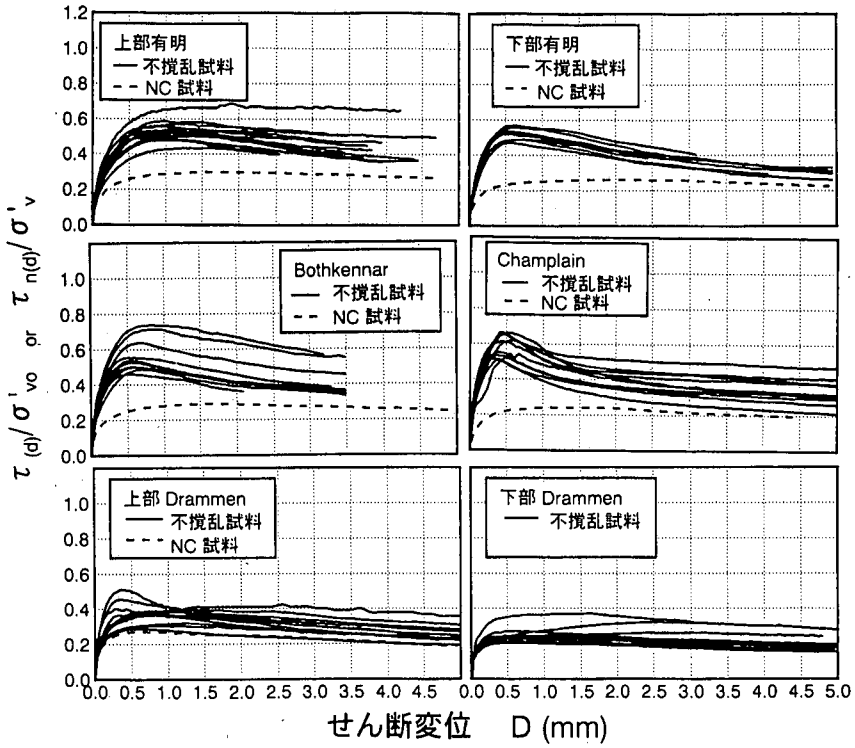


図-8 DSTより得られた4地域の粘土の正規化せん断応力とせん断変位の関係

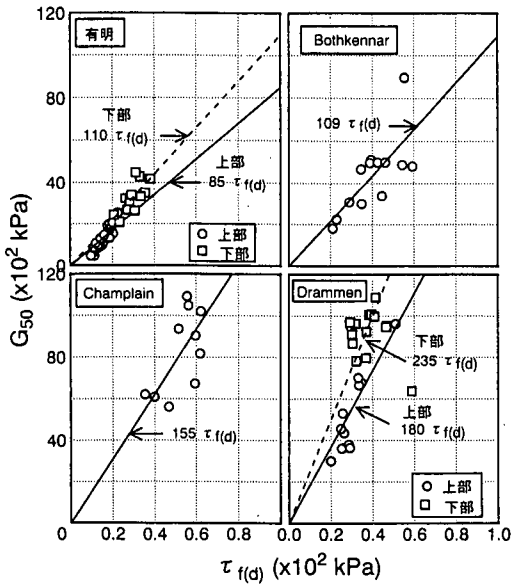


図-9 DSTより得られた見かけのせん断剛性率 G_{50} と $\tau_{f(d)}$ の関係

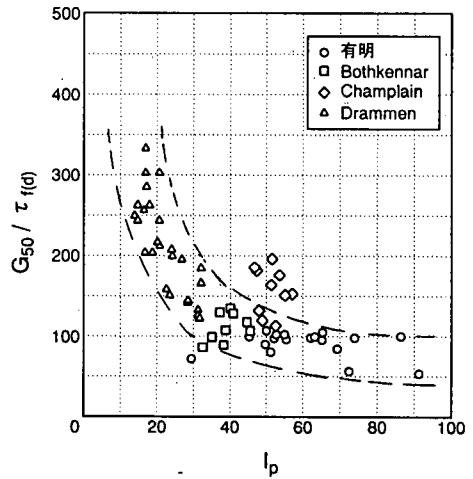


図-10 $G_{50}/\tau_{f(d)}$ と I_p の関係

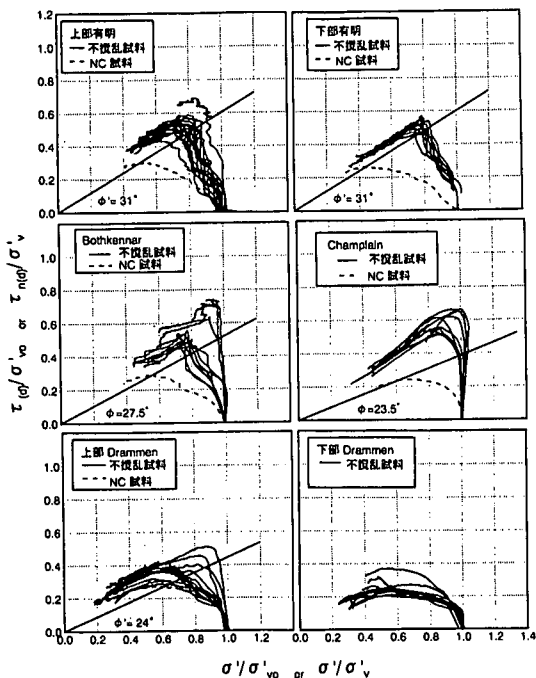


図-11 DSTより得られた4地域の粘土の正規化応力経路
 ことが注目される。各粘土のφ'をまとめて以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \phi' &= 31.0^\circ \text{ (有明粘土)} \\
 &= 27.5^\circ \text{ (Bothkennar粘土)} \\
 &= 23.5^\circ \text{ (Champlain粘土)} \\
 &= 24.0^\circ \text{ (上部Drammen粘土)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

6. 各種試験より得られたせん断強度の比較

本研究では、上記の4地域の粘土について一軸圧縮試験(UCT)、現場ベーン試験(FVT)およびコーン貫入試験(CPT)も実施した。これらの試験から得られたせん断強度パラメータ ($\tau_{(UCT)}$, $\tau_{(FVT)}$, および $(q_T - \sigma_{vo})$)とDST1より得られた非排水せん断強度($\tau_{(d)}$)を比較した結果を、各々図-12(a), (b)および(c)に示す。各粘土について以下の関係が得られた。

$$\begin{aligned}
 \tau_{(UCT)} &= 0.67 \tau_{(d)} \text{ (上部)}, 0.87 \tau_{(d)} \text{ (下部有明粘土)} \\
 &= 0.97 \tau_{(d)} \text{ (Bothkennar粘土)} \\
 &= 0.60 \tau_{(d)} \text{ (Champlain粘土)} \\
 &= 0.79 \tau_{(d)} \text{ (上部)}, 0.51 \tau_{(d)} \text{ (下部Drammen粘土)}
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{(FVT)} &= 0.83 \tau_{(d)} \text{ (有明粘土)} \\
 &= 0.87 \tau_{(d)} \text{ (Bothkennar粘土)} \\
 &= 1.12 \tau_{(d)} \text{ (Champlain粘土)} \\
 &= 0.75 \tau_{(d)} \text{ (上部)}, 0.47 \tau_{(d)} \text{ (下部Drammen粘土)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 (q_T - \sigma_{vo}) &= 10 \tau_{(d)} \text{ (有明粘土)} \\
 &= 13 \tau_{(d)} \text{ (Bothkennar粘土)} \\
 &= 15 \tau_{(d)} \text{ (Champlain粘土)} \\
 &= 15 \tau_{(d)} \text{ (Drammen粘土)}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Champlain粘土と下部Drammen粘土の $\tau_{(UCT)}$ と $\tau_{(d)}$ の相関性は他の粘土に比べてバラツキが大きく、かつ $\tau_{(UCT)}/\tau_{(d)}$ が小さな値を示す。この理由は、これら2つの粘土のUCTにおける残留有効応力が非常に小さかった¹³⁾ためと考えられる。更に、構造が発達したChamplain粘土では、土田¹⁸⁾が指摘した応力解放に伴うクラック型乱れが生じた可能性もある。一方、Bothkennar粘土では $\tau_{(UCT)}/\tau_{(d)}$ は0.97と1.0に近く、不攪乱試料の品質が他の3つの粘土に比べ高かったことが推察される。

$\tau_{(FVT)}$ と $\tau_{(d)}$ の相関性は、 $\tau_{(UCT)}$ に比べてバラツキが少ない。下部Drammen粘土について得られた「 $\tau_{(FVT)}/\tau_{(d)}=0.47$ 」という異常に低い値は、このような低塑性粘土にベーンを押し込むと有効応力が大きく減少することによると思われる。

標準型ベーン(H=2D: H=高さ, D=直径)ではベーンせん断強度は次式によって示される。

$$\frac{\tau_{(FVT)h}}{6} + \tau_{(FVT)v} = \frac{M}{\pi D^3} = \frac{7}{6} \cdot \tau_{(FVT)} \tag{10}$$

ここに、 $\tau_{(FVT)h}$, $\tau_{(FVT)v}$: ベーンブレード上下面および側面のせん断強度, M: 回転トルク $\tau_{(FVT)h}$ はFVTのせん断機構を考えると $\tau_{(d)}$ に等しいので、 $\tau_{(FVT)v}/\tau_{(FVT)h}$ は次式で与えられる。

$$\frac{\tau_{(FVT)v}}{\tau_{(FVT)h}} = \frac{7}{6} \cdot \frac{\tau_{(FVT)}}{\tau_{(d)}} - \frac{1}{6} \tag{11}$$

式(11)より得られた $\tau_{(FVT)v}/\tau_{(FVT)h}$ を $\tau_{(FVT)}/\tau_{(d)}$ に対しプロットした結果を図-13に示す。貝ガラやサンドシームをあまり含まない比較的きれいな粘土では、この比は通常1.0より小さいことが知られている。しかしChamplain粘土ではこれらの混入物はほとんど見られない。

ところで、式(11)を別の式で表すと、式(12)のようになる。

$$\begin{aligned}
 \tau_{(FVT)v}/\tau_{(FVT)h} &= \sigma_h \tan \phi_v / \sigma_v \tan \phi_h \\
 &= K_0 \times \mu_{A(inh)}
 \end{aligned} \tag{12}$$

ここに、 σ_h : 水平応力
 σ_v : 鉛直応力
 ϕ_v : 鉛直面のせん断抵抗角
 ϕ_h : 水平面のせん断抵抗角

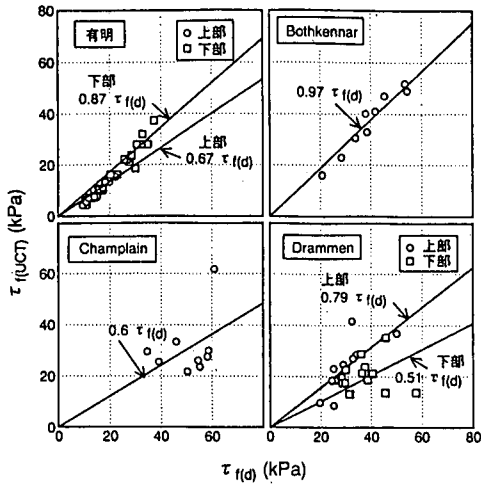


図-12(a) 4地域の粘土の τ_{UCT} と $\tau_{(d)}$ の関係

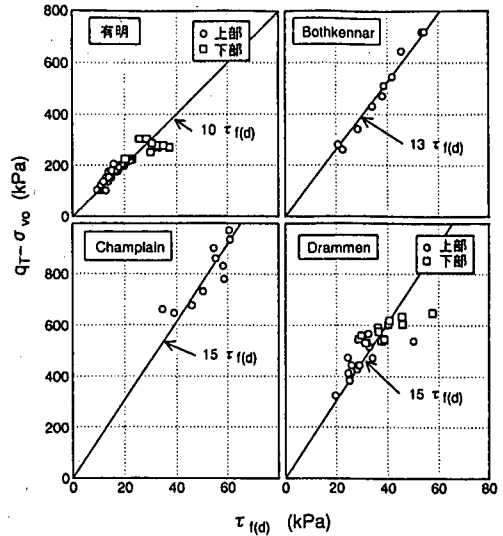


図-12(c) 4地域の粘土の $(q_T - \sigma_{v0})$ と $\tau_{(d)}$ の関係

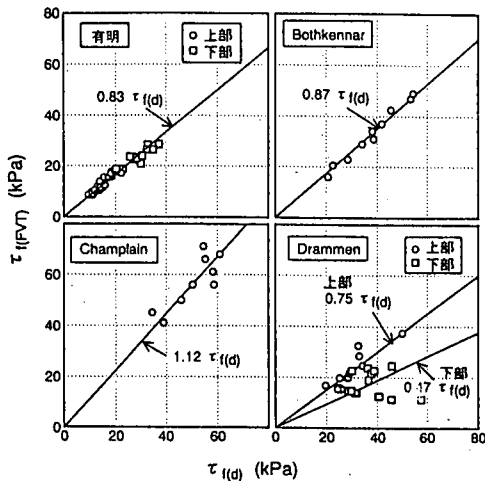


図-12(b) 4地域の粘土の τ_{FVT} と $\tau_{(d)}$ の関係

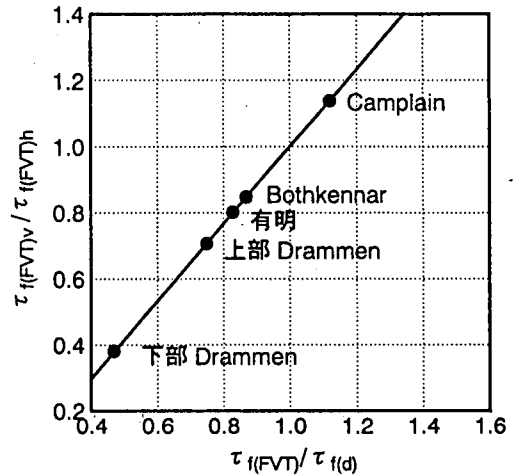


図-13 $\tau_{FVT}/\tau_{FVT}h$ と $\tau_{FVT}/\tau_{(d)}$ の関係

K_0 : 静止土圧係数

$\mu_{A(inh)}$: 水平および鉛直堆積面での固有異方性 (inherent anisotropy)に関する補正係数($\tan \phi_v / \tan \phi_h$)
固有異方性は堆積過程における土粒子の配向性に代表される「構造の方向性」によって引き起こされるものであり、板状、薄片状の粒子形状を持つ粘土に代表される物性で、粘土粒子が一定方向に並んだ配向構造をとるとき顕著にみられる。通常、鉛直面の強度のほうが水平面のそれより大きいので、 $\mu_{A(inh)} > 1.0$ となる。図-13に示す $\tau_{FVT}/\tau_{FVT}h$ を式(12)に代入すると、 K_0 と $\mu_{A(inh)}$ の関係として図-14が得られる。Champlain粘土の K_0 は他の3つの

粘土の K_0 より大きいことが推察されるが、事実この粘土の K_0 は1.0~1.2とする報告もある¹⁷⁾。

$(q_T - \sigma_{v0})$ と $\tau_{(d)}$ の相関性は、特に下部Drammen粘土に見られるように、他の2つのせん断強度、 τ_{UCT} と τ_{FVT} の場合よりもバラツキは小さい。この点はCPTの大きな利点と考えられる。半沢¹⁹⁾はピートを含むアジアの海成粘土について、 $(q_T - \sigma_{v0}) = (7 \sim 13) \tau_{(d)}$ であることを示した。今回4つの粘土について得られた $(q_T - \sigma_{v0}) / \tau_{(d)}$ (コーン係数、 N_{ki})をアジアの粘土の場合も含め I_p に対しプロットした結果を図-15に示す。 N_{ki} と I_p の間には特に有意な関係は認められない。

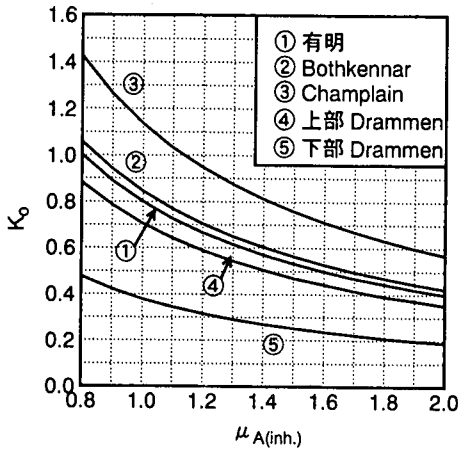


図-14 K_0 と $\mu A(\text{inh})$ の関係

7. 結論

世界的に有名な4つの粘土について実施した一面せん断試験結果より、下記のような結論が得られた。

1) 正規圧密状態での強度増加率および内部摩擦角として下記のような値が得られた。

$$\begin{aligned} \tau_{f(d)}/\sigma'_{v0} &= 0.30(\text{上部}), 0.28(\text{下部有明粘土}) \\ &= 0.28(\text{Bothkennar粘土}), 0.24(\text{Champlain粘土}) \\ &= 0.27(\text{上部}), 0.22(\text{下部Drammen粘土}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi' &= 31^\circ (\text{有明粘土}), 27.5^\circ (\text{Bothkennar粘土}) \\ &= 23.5^\circ (\text{Champlain粘土}), 24^\circ (\text{Drammen粘土}) \end{aligned}$$

2) 各粘土の原位置状態でのせん断強度 $\tau_{f(d)}$ と σ'_{v0} の関係は以下に示す2つのパターンに分類できる。

パターンI: $\tau_{f(d)} = \tau_{f(d)0} + \tau_{f(d)}/\sigma'_{v0} \times \sigma'_{v0}$
(上部有明粘土, 上部Bothkennar粘土, Champlain粘土)

パターンII: $\tau_{f(d)} = k \times \tau_{f(d)0}/\sigma'_{v0} \times \sigma'_{v0}$
(下部有明粘土, 下部Bothkennar粘土, Drammen粘土)

3) 各粘土の $\tau_{f(d)0}$ および k として下記の値が得られた。

$$\tau_{f(d)0} = 6\text{kPa}(\text{上部有明粘土}), 15\text{kPa}(\text{上部Bothkennar粘土}), 30\text{kPa}(\text{Champlain粘土})$$

$$k = 1.8(\text{下部有明粘土}), 1.5(\text{上部Drammen粘土}), 1.0(\text{下部Drammen粘土})$$

4) $\tau_{f(d)}$ で正規化した見かけのせん断剛性率, $G_{50}/\tau_{f(d)}$ は I_p の増加と共に減少する。しかし4つの粘土の中で相対的に大きなセメンテーションを受けたChamplain粘土では、同一 I_p の他の粘土よりも大きな値を示す。

5) $\tau_{f(UCT)}$ と $\tau_{f(FVT)}$ の $\tau_{f(d)}$ への相関性にはかなりのバラツキが見られ(特に $\tau_{f(UCT)}$)、その原因として不攪乱試料の品質や試験時の残留有効応力の大小が挙げられる。

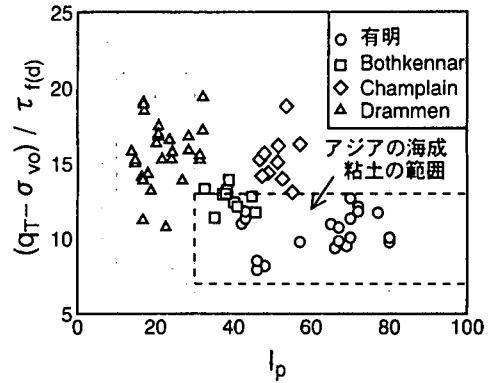


図-15 コーン係数($N_{kt}=(q_T-\sigma_{v0})/\tau_{f(d)}$)と I_p の関係

6) $(q_T-\sigma_{v0})$ と $\tau_{f(d)}$ の関係は上記の2つのせん断強度に比べてバラツキが小さく、 N_{kt} として I_p に関係なく下記の値が得られた。

$$\begin{aligned} N_{kt} &= (q_T-\sigma_{v0}) = 10 \tau_{f(d)}(\text{有明粘土}) \\ &= 13 \tau_{f(d)}(\text{Bothkennar粘土}) \\ &= 15 \tau_{f(d)}(\text{Champlain粘土}) \\ &= 15 \tau_{f(d)}(\text{Drammen粘土}) \end{aligned}$$

参考文献

- 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.
- Leroueil, S., Tardy, J., Roy, M., La Rouchelle, P. and Konrad, J.M.: Effect of Frost on the Mechanical Behavior of Champlain Sea Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, pp.690-697, 1991.
- Hight, D.W., Bond, A.J. and Legge, J.D.: Characterization of the Bothkennar clay: an overview, Geotechnique, Vol.4, No.2, pp.303-347, 1992.
- Nut, N., Tom Lunne, Hanzawa, H. and Tang: A Comparative Study between NGI Direct Simple Shear Apparatus and the Mikasa Direct Shear Apparatus, A joint report 521666-1, 1994.
- Jamilkowski, M., Ladd, C.C., Germain, J.T. and Lancellotta, R.: New development in field and laboratory testing of soils, Proc., 11th ICSMFE 1, pp.57-153, 1985.
- 田中洋行, 田中政典: 日本と海外の海成粘性土の比較, 地質と調査, 第1号, pp.13-19, 1997.
- 今井五郎: わかりやすい土の力学, pp.40-41, 鹿島出版会, 1983.
- 浅川美利: 粘土の活性度(アクティビティ), 土と基礎, Vol.20, No.12, pp.77-78, 1972.

- 9) 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.
- 10) Takada,N.：Mikasa's Direct Shear Apparatus, Test Procedures and Results, Geotechnical Journal, Vol.16, No. 3, pp.314-322, 1993.
- 11) 辻清，湯怡新，Lunne,T.：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，土木学会論文集，No.589/Ⅲ-42，pp.275-285，1998.
- 12) Andersen,A. and Kolstad,P.：The NGI 54mm Sampler for Undisturbed Sampling of Clays and Representative sampling of Coarser Materials, Proc. Int. Symp. of Soil sampling, Singapore, pp.13-21, 1979.
- 13) 田中洋行，田中政典，Hamouche,K.K.：海外の粘土に対する一軸圧縮試験の適用性，第41回地盤工学シンポジウム，pp.61-66，1997.
- 14) Hanzawa,H.：In-situ shear strength of marine clay related to aging effect, Proc., 11th European Conf., SMFE,Copenhagen, Vol.1, pp.141-146, 1995.
- 15) Hanzawa,H. and Adachi,K.：Overconsolidated state of alluvial marine clay, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, pp.106-118, 1983.
- 16) Burland,J.B., Rampello,S., Georgiannou,V.N. and Calabresi,G.：A Laboratory Study of the Strength of Four Clays, Geotechnics, Vol.46, No.3, pp.491-514, 1996.
- 17) Hamouche,K.K., Laurel,S., Roy,M. and Lutenegeger,A.J.：In-situ Evaluation of K_0 in Eastern Canada Clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, No.4, pp.677-688, 1995.
- 18) 土田孝：三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究，港湾技研資料，No.688，pp.48-60，1990.
- 19) Hanzawa,H.：Determination of In-situ Shear Strength for Earthworks on Soft Marine Clay, Special Lecture, Nanyang Technological Univ., Singapore, 1993.

(1998. 1. 14受付)

DIRECT SHEAR TEST RESULTS ON ARIAKE, BOTHKENNAR, CHAMPLAIN AND DRAMMEN CLAYS

Kiyoshi TSUJI, Dam Thi Kim LOAN and Hideo HANZAWA

Direct shear test results with Mikasa's apparatus are presented for Ariake(Japan), Bothkennar(U.K.), Champlain(Canada) and Drammen(Norway) clays which are representative soft marine clays in the world. Direct shear strength of the four clays measured both in the normally consolidated state and in the field state are indicated and discussed together with stiffness. In addition, distribution patterns of the in-situ shear strength and various shear strength from unconfined compression, field vane and cone penetration tests are shown.