

堆積構造の異方性が砂質土および粘性土の 擬似弾性係数に及ぼす影響

堀 智仁¹・山下 聡²・山口 岳志³・鈴木 輝之⁴¹学生会員 工修 北見工業大学大学院 工学研究科 システム工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165)²正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)³工修 萩原建設工業株式会社 (〒080-0807 帯広市東7条南8丁目2)⁴フェロー会員 工博 北見工業大学教授 工学部 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

砂質土および粘性土の擬似弾性係数に及ぼす堆積構造の異方性の影響を調べるために、堆積構造の異なる供試体を作製し、ベンダーエレメントを用いて直交する3方向のせん断波速度を求め比較した。さらに、繰返し載荷試験および単調載荷試験からヤング率を求め、弾性係数の異方性を調べた。その結果、ベンダーエレメント試験では、堆積面に平行に伝播・振動するせん断波から得られたせん断弾性係数は、他の2方向で得られたそれよりも高く、今回行った試験では豊浦砂に比べNSF粘土のせん断弾性係数の異方性が高いことがわかった。同様に、載荷試験から求めたヤング率も、小ひずみ域では堆積面に垂直な方向に比べ平行な方向のヤング率が高く、ベンダーエレメント試験の結果と同様の傾向を示した。

Key Words : *bender elements test, fabric anisotropy, quasi-elastic stiffness, sand, clay*

1. まえがき

微小ひずみ (10^{-5} 程度以下) でのヤング率やせん断弾性係数などの変形係数は、擬似弾性係数とも呼ばれ、単調載荷や繰返し載荷などの載荷方法や載荷速度の影響をほとんど受けず、密度や応力レベルに依存する材料固有の定数と言われている。

原位置試験でせん断弾性係数を求めるために、PS 検層やサイズミックコーン試験等の弾性波探査試験が行われている。弾性波探査試験では、ダウンホール法によって鉛直方向に伝播するせん断波速度 V_{vh} を、クロスホール法では水平方向に伝播するせん断波速度 V_{hh} または V_{hv} が測定される。なお、第1, 2添え字はせん断波の伝播方向と振動方向を表し、鉛直方向を v 、水平方向を h とする。一方、室内試験からせん断弾性係数を求める方法の一つとして、ベンダーエレメントと呼ばれる圧電セラミックスを三軸試験装置に取り付け、せん断波速度を測定しせん断弾性係数を求める方法が挙げられる。この方法では、一般に等方圧密した供試体を伝播する鉛直方向のせん断波速度 V_{vh} の測定が行われている。

上記のせん断波の測定においてせん断弾性係数は、次式の等方弾性体でのせん断弾性係数とせん断波速度の関係に基づいている。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

ここで、 G はせん断弾性係数、 ρ は土の湿潤密度、 V_s はせん断波 (S波) 速度である。

地盤内が等質で等方応力状態であれば $V_{vh} = V_{hh} = V_{hv}$ となるが、実際の地盤は異方圧密状態にあり、堆積構造の異方性を有しているため、せん断波の伝播方向によって得られるせん断弾性係数は異なると考えられる。

Butcher & Powell¹⁾ や Hight²⁾ は、英国の Madingley や Sizewell でクロスホール法やダウンホール法でせん断波速度を求めた結果、粘土地盤では、 V_{hh} は V_{hv} や V_{vh} に比べ高く、砂質土地盤では V_{hh} は V_{hv} よりやや低く、原位置試験で求めたせん断波速度にも異方性が存在し、その関係も地盤の構成材料によって異なることを報告している。

室内試験で伝播・振動方向の異なるせん断波速度からせん断弾性係数を求めた既報³⁾ では、豊浦砂と屈斜路火山灰に対して等方応力状態で3方向のせん断波速度を測定した結果、両試料において、 V_{hh} から求めたせん断弾性係数は V_{hv} や V_{vh} から求めたものに比べやや高く、 V_{hv} と V_{vh} から求めたせん断弾性係数は、等方応力状態では等しいことが明らかにされた。

Yimsiri & Soga⁴⁾ は過去に行われた砂質土および粘性土に対するせん断弾性係数とヤング率の異方性をまとめた結果、等方応力状態では砂質土および粘性土のせん断弾性係数は、すべてのケースで G_{hh} は G_{vh} より高く、室内試験においても波の伝播方向により弾性係数が異なることを指摘している。また、粘性土は砂質土よりも構造異方

性と小ひずみでの弾性係数の異方性が高く、鉛直方向よりも水平方向の弾性係数が高いことを報告している。さらに、砂質土のヤング率は研究者によって水平方向のヤング率 E_h に比べ鉛直方向のヤング率 E_v が高く、波動試験と異なる結果も報告されている^{5), 6)}。例えば、Hoque & Tatsuoka⁵⁾は水平面でのポアソン比 ν_{hh} を等方応力状態での鉛直・水平面のポアソン比 ν_{vh} と等しいと仮定して E_h を求めている。また、Kuwano⁶⁾は水平方向 (2 方向) の応力変化 $\Delta\sigma_h$ およびひずみ変化 $\Delta\varepsilon_h$ とベンダーエレメント試験から求めた G_{hh} から間接的に E_h を求めている。このように、直接水平方向のヤング率 E_h を求めているため、波動試験と異なる結果になったと考えられる。そこで、本研究では堆積構造の異なる供試体を作製し、繰返し載荷試験および単調載荷試験を行い、直接的に水平方向のヤング率 E_h と鉛直方向のヤング率 E_v を求めた。また、ベンダーエレメント試験によって、等方応力状態で 3 方向のせん断波速度を測定しせん断弾性係数を求め、ベンダーエレメント試験と載荷試験の結果から、堆積構造の異方性が広範なひずみレベルにおける変形係数に及ぼす影響を調べた。

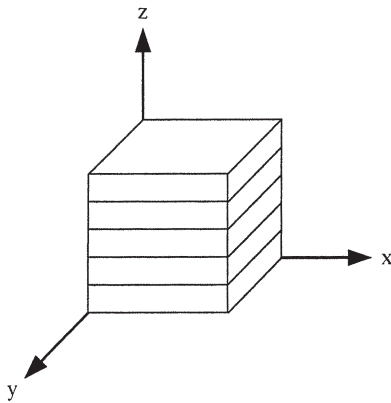


図-1 直交異方弾性体

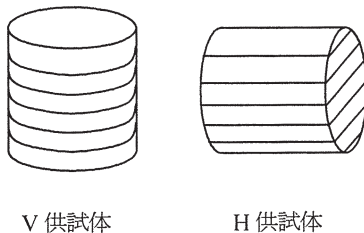


図-2 V 供試体と H 供試体

2. 直交異方弾性体を用いたときの三軸試験およびベンダーエレメント試験

(1) 直交異方弾性体の応力ひずみ関係

図-1に示すような水平方向に堆積した直交異方弾性体の応力ひずみ関係は式 (2) のように表される。

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{xx} \\ \delta\varepsilon_{yy} \\ \delta\varepsilon_{zz} \\ \delta\varepsilon_{yz} \\ \delta\varepsilon_{zx} \\ \delta\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{hv}}{E_h} & \frac{-\nu_{hv}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_{xx} \\ \delta\sigma'_{yy} \\ \delta\sigma'_{zz} \\ \delta\sigma'_{yz} \\ \delta\sigma'_{zx} \\ \delta\sigma'_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 E , G および ν の添え字の v は鉛直方向 (z 方向)、 h は水平方向 (x または y 方向) を示す。

式 (2) より、応力～ひずみ関係は式 (3) ～式 (5) のように表現できる。

$$\delta\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E_h} \delta\sigma'_{xx} - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_{yy} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_{zz} \quad (3)$$

$$\delta\varepsilon_{yy} = -\frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_{xx} + \frac{1}{E_h} \delta\sigma'_{yy} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_{zz} \quad (4)$$

$$\delta\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_{xx} - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_{yy} + \frac{1}{E_v} \delta\sigma'_{zz} \quad (5)$$

また、マトリックスの対称性ならびに水平面上での等方性より式 (6) および式 (7) が得られる。

$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \quad (6)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hh})} \quad (7)$$

(2) V供試体での側圧一定の排水および非排水試験

図-1に示す堆積構造を有する試料から図-2に示すように、鉛直方向に切り出したV供試体に対して、供試体軸方向 (z 方向) に載荷する排水試験の場合 $\delta\sigma'_{xx} = \delta\sigma'_{yy} = 0$ であるので、式 (5) から式 (8) が得られる。

$$E_v = \frac{\delta\sigma'_{zz}}{\delta\varepsilon_{zz}} = \frac{\delta q}{\delta\varepsilon_{zz}} \quad (8)$$

ここで、 q は軸差応力である。一方、非排水試験では $\delta\sigma'_{xx} = \delta\sigma'_{yy}$ であるので、式 (6) を式 (5) に代入して、式 (9) が得られる。

$$\delta\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_{xx} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_{yy} + \frac{1}{E_v} \delta\sigma'_{zz}$$

$$E_v = \frac{\delta\sigma_{zz}' - 2\nu_{vh}\delta\sigma_{xx}'}{\delta\epsilon_{zz}} \quad (9)$$

非排水条件であるから、体積ひずみ $\delta\epsilon_{vol}$ は0である。

$$\delta\epsilon_{vol} = \delta\epsilon_{xx} + \delta\epsilon_{yy} + \delta\epsilon_{zz} = 0 \quad (10)$$

z 方向載荷では、 $\delta\epsilon_{xx} = \delta\epsilon_{yy}$ であるので、

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_{xx} &= -\frac{\delta\epsilon_{zz}}{2} \\ \nu_{vh} &= -\frac{\delta\epsilon_{xx}}{\delta\epsilon_{zz}} = 0.5 \end{aligned} \quad (11)$$

式 (9) に式 (11) を代入して、式 (12) によって非排水時の鉛直方向のヤング率 $(E_v)_u$ が得られる。

$$(E_v)_u = \frac{\delta\sigma_{zz}' - \delta\sigma_{xx}'}{\delta\epsilon_{zz}} = \frac{\delta q}{\delta\epsilon_{zz}} \quad (12)$$

式 (8) および式 (12) に示したように、側圧一定の場合、V供試体に対して排水および非排水条件で三軸試験を行うことによって、軸差応力と軸ひずみの変化のみから直接的に鉛直方向ヤング率 E_v を求めることができる。

(3) H供試体での側圧一定の排水および非排水試験

図-2に示すように、水平方向に切り出したH供試体に対して供試体軸方向 (x 方向) に載荷した排水試験の場合 $\delta\sigma_{yy}' = \delta\sigma_{zz}' = 0$ であるため、式 (3) から式 (13) が得られる。

$$E_h = \frac{\delta\sigma_{xx}'}{\delta\epsilon_{xx}} = \frac{\delta q}{\delta\epsilon_{xx}} \quad (13)$$

一方、非排水試験では $\delta\sigma_{zz}' = \delta\sigma_{yy}'$ であるので、式 (3) に式 (6) を代入して、式 (14) が得られる。

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_{xx} &= \frac{1}{E_h} \delta\sigma_{xx}' - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma_{yy}' - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma_{yy}' \\ E_h &= \frac{\delta\sigma_{xx}' - (\nu_{hh} + \nu_{hv})\delta\sigma_{yy}'}{\delta\epsilon_{xx}} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、非排水および直交異方性から、式 (10) より

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_{yy} + \delta\epsilon_{zz} &= -\delta\epsilon_{xx} \\ \nu_{hh} + \nu_{hv} &= -\frac{\delta\epsilon_{yy}}{\delta\epsilon_{xx}} - \frac{\delta\epsilon_{zz}}{\delta\epsilon_{xx}} \\ \nu_{hh} + \nu_{hv} &= -\frac{\delta\epsilon_{yy} + \delta\epsilon_{zz}}{\delta\epsilon_{xx}} = -\frac{-\delta\epsilon_{xx}}{\delta\epsilon_{xx}} = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

式 (14) に式 (15) を代入して、式 (16) によって非排水時の水平方向のヤング率 $(E_h)_u$ が得られる。

$$(E_h)_u = \frac{\delta\sigma_{xx}' - \delta\sigma_{yy}'}{\delta\epsilon_{xx}} = \frac{\delta q}{\delta\epsilon_{xx}} \quad (16)$$

式 (13) および式 (16) に示したように、側圧一定の場合、H供試体においても排水および非排水条件で三軸試験を行うことによって、軸差応力と軸ひずみの変化のみから、直接的に水平方向ヤング率 E_h を求めることができる。

(4) ベンダーエレメント試験

ベンダーエレメント試験では3方向のせん断波速度 (V_{vh} , V_{hh} , V_{hv}) を測定し、せん断弾性係数 (G_{vh} , G_{hh} , G_{hv}) を求めることができる。したがって、直交異方弾性体の応力ひずみ関係を表した式 (2) のせん断弾性係数 G を求めることができる。また、V供試体とH供試体に対して三軸試験を行うことによって、ヤング率 (E_v , E_h) を測定することができるため、式 (2) のせん断弾性係数 G とヤング率 E のすべてを求めることができる。

3. 試料と試験方法

(1) 試料と供試体作製法

用いた試料は、豊浦砂 ($\rho_s = 2.650 \text{ g/cm}^3$, $e_{max} = 0.980$, $e_{min} = 0.608$) およびNSF粘土⁷⁾ ($\rho_s = 2.724 \text{ g/cm}^3$, $w_L = 58.4\%$, $w_P = 28.1\%$, $I_P = 30.3$) である。NSF粘土は岡山県産で、市販されている粉末粘土である。

豊浦砂の供試体は、多重ふり落下装置(MSP)を用いてコンテナ内に試料を堆積させ、凍結後供試体を作製するMSP-F法³⁾によって作製した。この時、図-2に示した供試体軸方向が堆積面と直交するV供試体と平行なH供試体を作製した。既報³⁾では、図-3(a)に示した多重ふり落下装置を用いたが、砂の落下範囲がコンテナの断面積よりも小さく、均一な層構造になりにくいため、新たに図-3(b)に示した砂の落下範囲が広いものを用いた。

NSF粘土の供試体の作製については、液性限界の2倍の含水比になるように蒸留水を加えてスラリー状にし、真空に近い状態で1時間攪拌した。攪拌後、24時間放置し、再度1時間攪拌してから予圧密セルに移し、鉛直応力 $\sigma_v = 150 \text{ kPa}$ で10日間一次元圧密を行った。予圧密後、粘土試料を取り出し、供試体軸方向が堆積面に対して鉛直なV供試体と水平なH供試体の2種類の供試体を作製した。

供試体寸法は、豊浦砂、NSF粘土ともに直径70mm、高さ150mmである。

(2) ベンダーエレメント試験

せん断波速度は3対のベンダーエレメントを用いて3種類のせん断波速度 (V_{vh} , V_{hv} , V_{hh}) を測定した。1対のベンダーエレメントは、キャップとペDESTALに埋め込まれている。他の2対は、30kPaの負圧を与えた状態で側面に取り付けた。キャップおよびペDESTALに埋め込ま

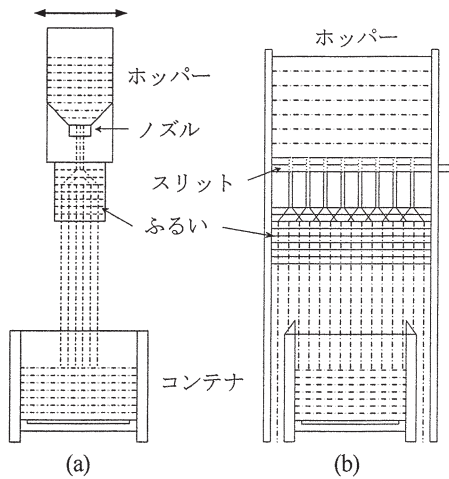


図-3 多重ふるい落下装置 (a)従来型 (b)改良型

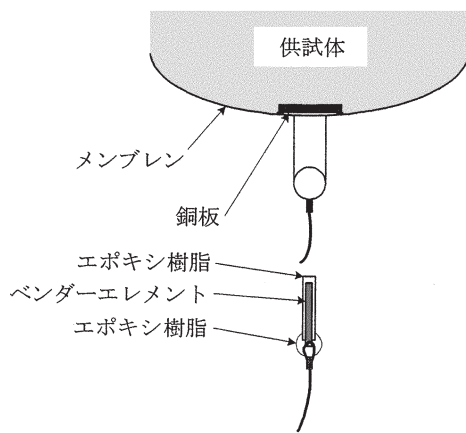


図-4 ベンダーエレメントの設置方法

れているベンダーエレメントは、幅10mm、長さ20mm、厚さ0.5mmの圧電セラミックスにエポキシ樹脂で厚さ0.5mmのコーティングを施したもので、供試体への貫入量は約3mmである。また、側面に取り付けたベンダーエレメントは幅5mm、長さ10mm、厚さ0.5mmで同様に0.5mmのコーティングを施している。

ここで、ベンダーエレメントの供試体側面への設置方法として図-4に示すFioravante⁸⁾が提案する方法を用いた。この方法は、あらかじめベンダーエレメントより少し大きめに穴を開け、内側から銅板を接着したメンブレンを用いる。ベンダーエレメントは供試体設置後、瞬間接着剤で銅板に固定する。この方法を適用することによって、試料に乱れを与えることがなく、また、粒径の粗い試料でも試験を行うことができる。なお、 vh 波は伝播距離が長く、受信波の減衰が大きいため、せん断波の到達地点の読み取りが困難であった。そこで、電圧増幅器を使用して送信電圧を20Vから200Vに増幅して試験を行った。送信波はsin波で、周波数 $f=5, 10, 15, 20\text{kHz}$ で試験を行い、得られた結果を平均してせん断弾性係数を求めた。また、せん断波の伝播時間は、送信波および受信波の波の立ち上がりを時間差とするstart-to-startによって求めた。

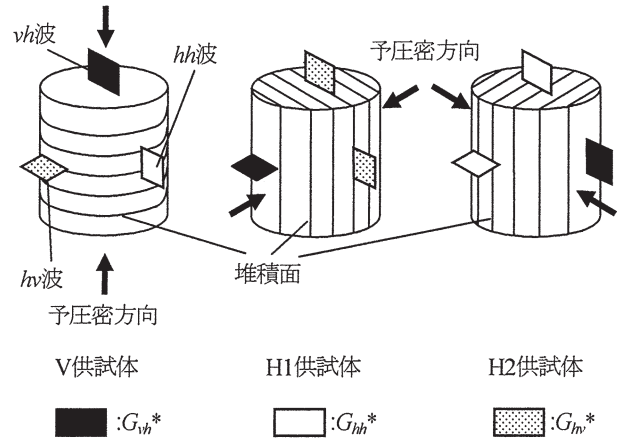


図-5 ベンダーエレメントの設置方向と堆積面の関係

表-1 せん断波の伝播・振動方向と堆積面との関係

| 波 | V供試体 | H1供試体 | H2供試体 |
|--------|------------|------------|------------|
| vh 波 | G_{vh}^* | G_{hv}^* | G_{hh}^* |
| hh 波 | G_{hh}^* | G_{hv}^* | G_{vh}^* |
| hv 波 | G_{hv}^* | G_{vh}^* | G_{hh}^* |

V供試体に対してベンダーエレメント試験を行うことによって、すべてのせん断波速度 (V_{vh} , V_{hh} , V_{hv}) を測定することができる。しかし、鉛直方向と水平方向のベンダーエレメントの設置方法や、ベンダーエレメント間距離が異なるため、それらの因子が試験結果に影響を及ぼす可能性がある。したがって、試験の精度を上げるためにV供試体だけではなくH供試体についても試験を行った。

図-5は、V供試体およびH供試体での堆積面に対するベンダーエレメントの設置方向を示したものである。H供試体においては、堆積面に対するベンダーエレメントの設置方向の違いによってH1供試体とH2供試体の2種類がある。そこで、堆積面に対するベンダーエレメントの設置方向の違いから表-1に示すように以下の3種類のせん断弾性係数を定義した。

G_{vh}^* : 堆積面に対してせん断波の伝播方向が垂直で、振動方向が平行なせん断波速度から求めたせん断弾性係数

G_{hh}^* : 堆積面に対してせん断波の伝播方向と振動方向がともに平行なせん断波速度から求めたせん断弾性係数

G_{hv}^* : 堆積面に対してせん断波の伝播方向が平行で、振動方向が垂直なせん断波速度から求めたせん断弾性係数

したがって、H供試体での、 G_{vh}^* , G_{hh}^* , G_{hv}^* は、堆積面とせん断波の伝播・振動方向の関係ではV供試体の G_{vh} , G_{hh} , G_{hv} と同義である。

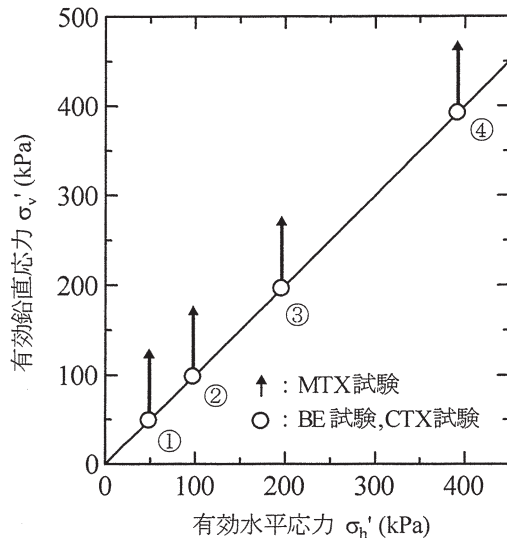


図-6 応力経路

表-2 試験条件

| | 有効拘束圧 σ_c' (kPa) | | | | | | | | 単調載荷時の 有効応力 σ_c' (kPa) |
|---|-------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------------|
| | 49 | | 98 | | 196 | | 392 | | |
| | BE | CTX | BE | CTX | BE | CTX | BE | CTX | |
| ① | ○ | | — | | — | | — | | 49 |
| ② | ○ | | ○ | | — | | — | | 98 |
| ③ | ○ | | ○ | | ○ | | — | | 196 |
| ④ | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | 392 |

○: 試験を行う —: 試験を行わない

(3) 繰返し載荷試験および単調載荷試験

繰返し載荷試験では、V供試体とH供試体に対して片振幅軸ひずみ(ε_a)_{SA}= 10^{-5} 程度の繰返し載荷を非排水状態で与え等価ヤング率 E_{eq} を求めた。変位の測定は、非接触変位計を用いてキャップの変位を測定した。

単調載荷試験では、ひずみ速度0.5%/minで豊浦砂では排水試験、NSF粘土では非排水試験を行い、微小ひずみから大ひずみまでの変形特性を求めた。

(4) 試験手順

NSF粘土の試験の応力経路を図-6、試験条件を表-2に示した。ベンダーエレメント試験をBE試験、繰返し載荷試験をCTX試験、単調載荷試験をMTX試験と示している。また、表-2の①～④はそれぞれ図-6の応力経路の①～④の地点に対応している。単調載荷試験は有効拘束圧 σ'_c =49, 98, 196, 392kPaで行い、ベンダーエレメント試験および繰返し載荷試験は、単調載荷試験を行う前の各応力段階で試験を行った。例えば、有効拘束圧が392kPaの試験では、それ以前の応力段階(49, 98, 196kPa)でベンダーエレメント試験と繰返し載荷試験を行っているため、低い応力段階ほどデータの数は多くなっている。なお、拘束圧を上げた後の圧密時間は24時間とした。

豊浦砂については、有効拘束圧 σ'_c =98kPaで繰返し載荷

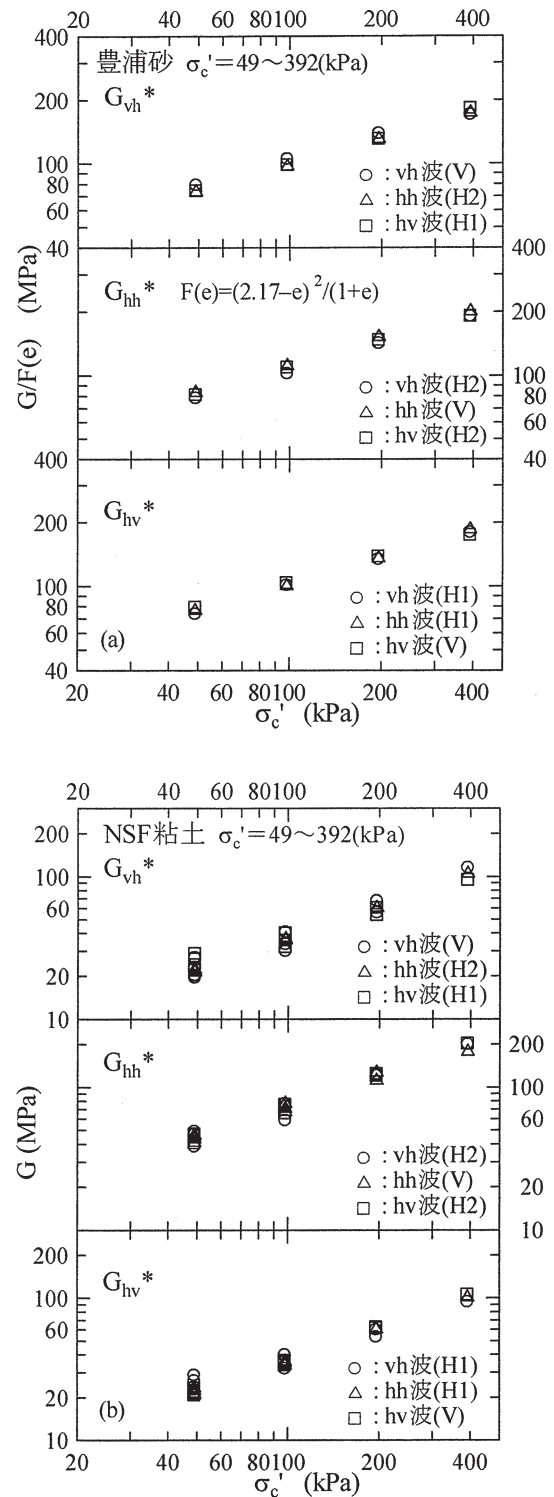


図-7 BE の設置方法およびせん断波伝播距離の違いがせん断剛性率に及ぼす影響 (a)豊浦砂 (b)NSF 粘土

試験と単調載荷試験を行い、ベンダーエレメント試験はNSF粘土と同様に σ'_c =49, 98, 196, 392kPaで試験を行った。拘束圧を上げた後の圧密時間は15分とした。

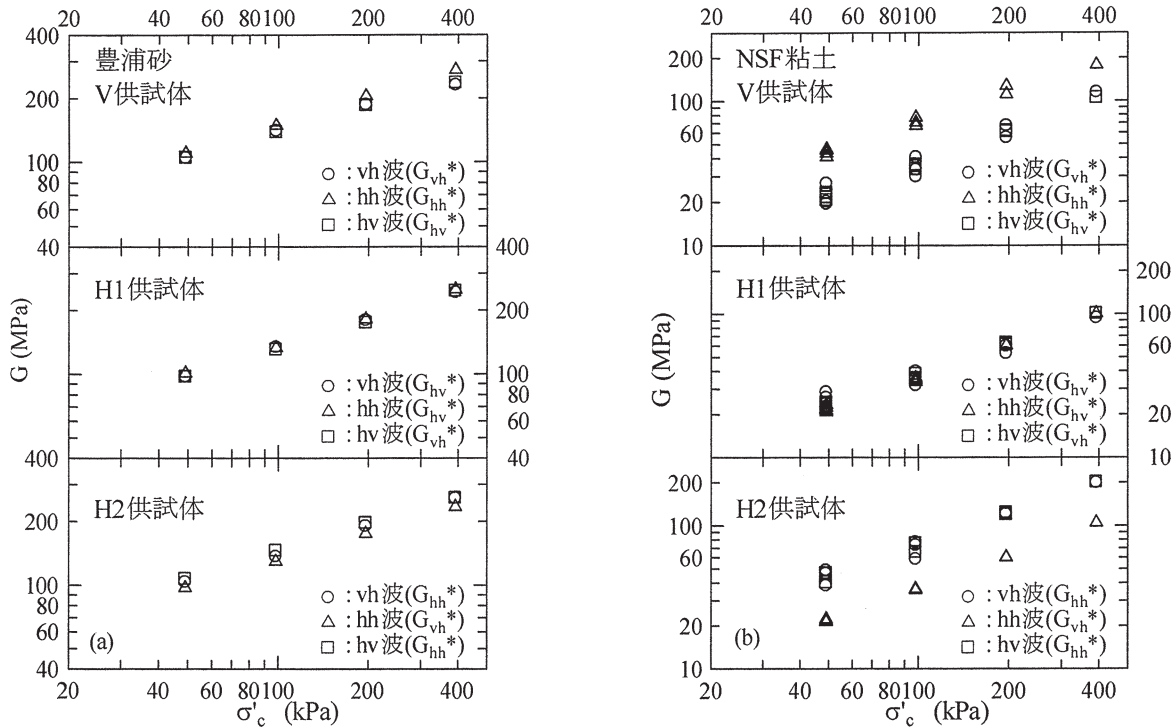


図-8 V 供試体および H1, H2 供試体の結果 (a)豊浦砂 (b)NSF 粘土

4. 試験結果

(1) ベンダーエレメント試験結果

ベンダーエレメントの設置方法およびせん断波の伝播距離の違いがせん断弾性係数に及ぼす影響を調べるために、 G_{vh}^* 、 G_{hh}^* 、 G_{hv}^* についてまとめたものを図-7に示す。 G_{vh}^* は、V供試体のvh波、H1供試体のhv波、H2供試体のhh波から求めたせん断弾性係数である。せん断波の伝播方向は異なるが、堆積面に対する伝播・振動方向は等しい。 G_{hh}^* 、 G_{hv}^* についても同様である。豊浦砂の結果については、試験毎の密度差の影響を除くため式(17)で示した間隙比関数 $F(e)^9$ で正規化している。なお、試験毎の密度のバラツキは、相対密度で3%以内であった。

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (17)$$

図より豊浦砂、NSF粘土ともにベンダーエレメントの設置方法および伝播距離の違いによらず、 G_{vh}^* 、 G_{hh}^* 、 G_{hv}^* の結果は、それぞれほぼ一致している。このことから、ベンダーエレメントの設置方法と伝播距離の違いがせん断弾性係数に及ぼす影響はほとんどない。

図-8は、V供試体およびH1, H2供試体の試験結果を示したものである。豊浦砂の結果を示した図-8(a)では、試験結果に大きな差はないものの、 G_{hh}^* は他の剛性に比べてやや高くなっている。これは、既報の試験結果³⁾と一致している。一方、NSF粘土の結果を示した図-8(b)では、 G_{vh}^* と G_{hv}^* はほぼ等しいのに対し、 G_{hh}^* はそれらよりも明らかに高い。図-9は有効拘束圧 $\sigma'_c = 196 \text{ kPa}$ における

NSF粘土のV供試体、H1, H2供試体の送受信波形を示したものである。周波数は $f=10 \text{ kHz}$ である。送信波と受信波の立ち上がりを▲の印でそれぞれ示している。vh波では到達地点の前で、ノイズやP波の影響によって受信波に乱れが生じているが、受信波の到達地点は、様々な周波数で試験を行い、すべての波の立ち上がりの位置を比較して到達地点を決定している。また、vh波については供試体の高さが直径よりも大きいので、ベンダーエレメント間距離Dは他の2方向に比べて大きい。V供試体の結果を示した図-9(a)では、伝播距離がほぼ等しいhh波(G_{hh}^*)とhv波(G_{hv}^*)を比較すると、hh波の受信波の到達地点がかなり早いことがわかる。H1供試体の結果を示した図-9(b)では、hh波(G_{hh}^*)とhv波(G_{hv}^*)の受信波の到達地点はほぼ等しく、同様にせん断弾性係数も等しい。H2供試体の結果を示した図-9(c)では、hh波(G_{hh}^*)に比べhv波(G_{hv}^*)の伝播速度が速く、せん断弾性係数も高いことがわかる。

V供試体およびH供試体のすべての供試体から G_{vh}^* を求めることができるため、 G_{vh}^* と G_{hh}^* および G_{hv}^* を比較したものを図-10に示した。縦軸は G_{hh}^* および G_{hv}^* 、横軸は G_{vh}^* である。豊浦砂の結果を示した図-10(a)では、 G_{vh}^* と G_{hv}^* はほぼ等しいのに対し、 G_{hh}^* は G_{vh}^* に比べ約1割高い。一方、NSF粘土の結果を示した図-10(b)では、豊浦砂と同様に G_{vh}^* と G_{hv}^* はほぼ等しい。しかし、 G_{hh}^* は G_{vh}^* に比べ非常に高く、その比は $G_{hh}^*/G_{vh}^* = 1.89$ であった。これは、平均的な数値であり、拘束圧の増加に伴いその比はやや低下している。以上の結果から、豊浦砂に比べNSF

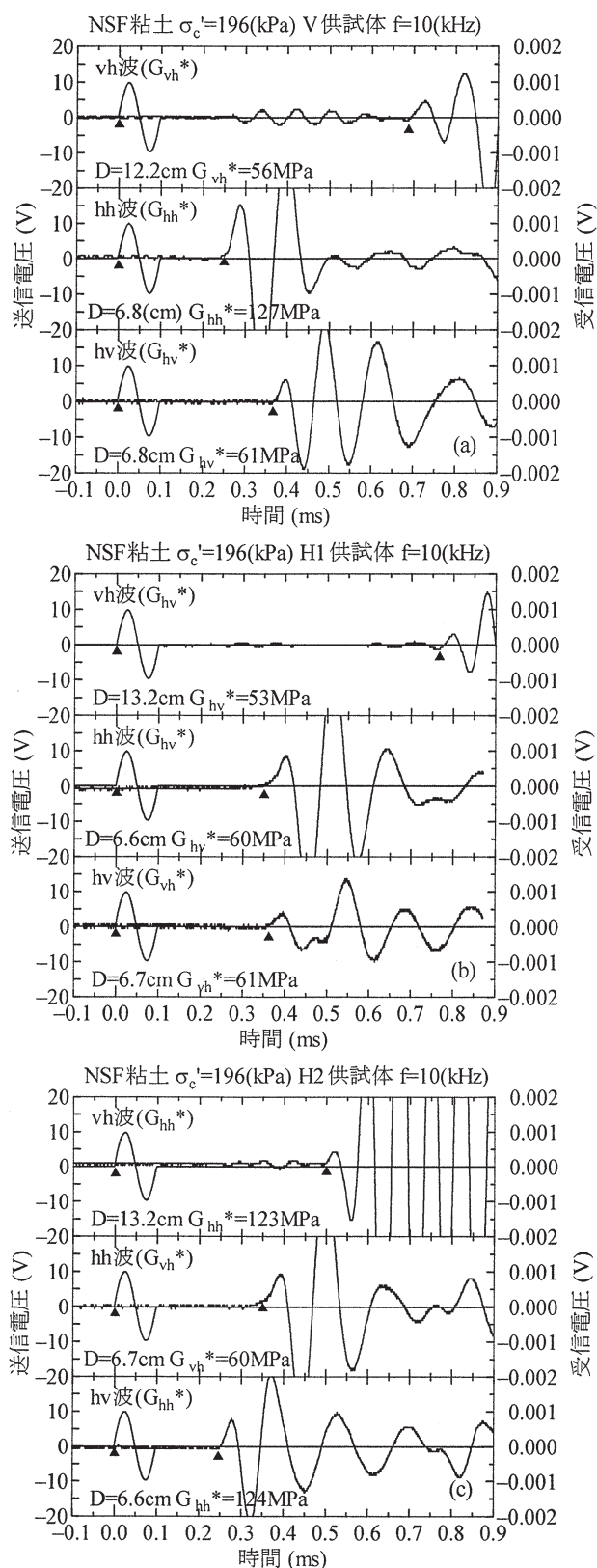
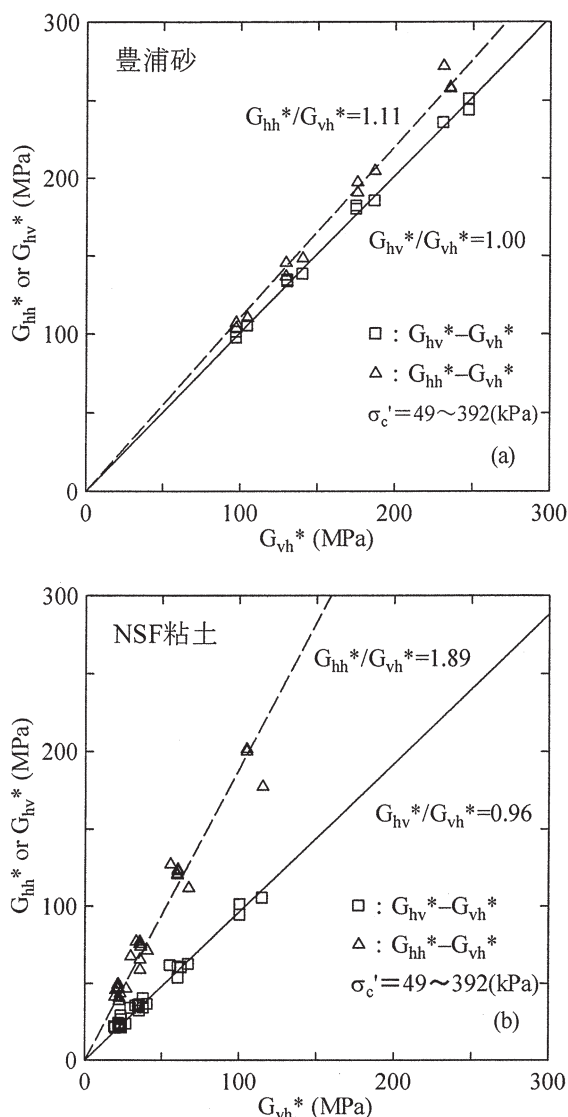


図-9 せん断波の送受信波形

(a) V 供試体 (b) H1 供試体 (c) H2 供試体

粘土のせん断弾性係数の異方性は非常に高いことがわかった。

豊浦砂よりもNSF粘土のせん断弾性係数の異方性が高くなった原因として、粒子形状の違いが考えられる。豊


 図-10 G_{vh}^* と G_{hh}^* および G_{hv}^* の比較

(a) 豊浦砂 (b) NSF 粘土

浦砂は、角張っているもののやや丸い形状をしているのに対し、NSF粘土は扁平な粒子形状をしている。NSF粘土に対してX線回折分析を行った結果、石英を主成分として、多量のパイロフィライト、少量のカオリナイトが含まれていた。パイロフィライトは、葉ろう石とも呼ばれ、薄片状、薄板状のような形状をしている。このことから、予圧密の際に一次的に圧密されることによって、異方性の高い供試体が作製されたと考えられる。

せん断弾性係数の異方性と有効拘束圧との関係を図-11に示した。縦軸は G_{hh}^*/G_{vh}^* および G_{hv}^*/G_{vh}^* 、横軸は有効拘束圧 σ'_c をそれぞれ示している。図-11(a)に示した豊浦砂の結果では、拘束圧によらず G_{vh}^* と G_{hv}^* はほぼ等しい。また、 G_{hh}^* は拘束圧によらず G_{vh}^* よりも1割程度高くなっている。一方、NSF粘土の結果を示した図-11(b)では、 G_{hv}^* は豊浦砂と同様に G_{vh}^* とほぼ等しい。それに対して、 G_{hh}^* は G_{vh}^* よりも2倍程度高く、拘束圧の増加に伴

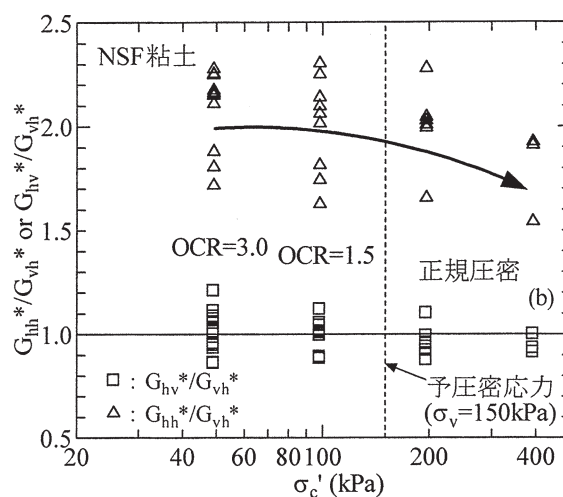
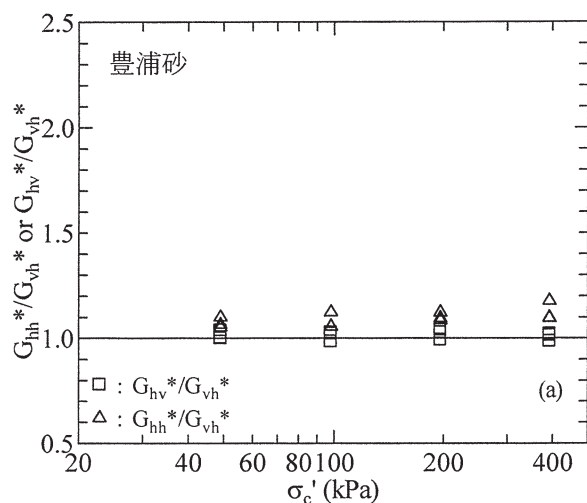


図-11 せん断剛性率の異方性と拘束圧の関係 (a)豊浦砂 (b)NSF 粘土

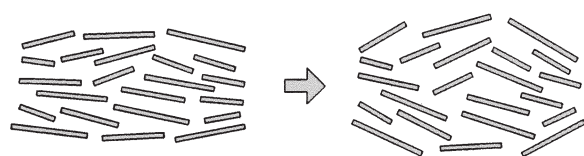


図-12 等方圧密による粒子配列の変化

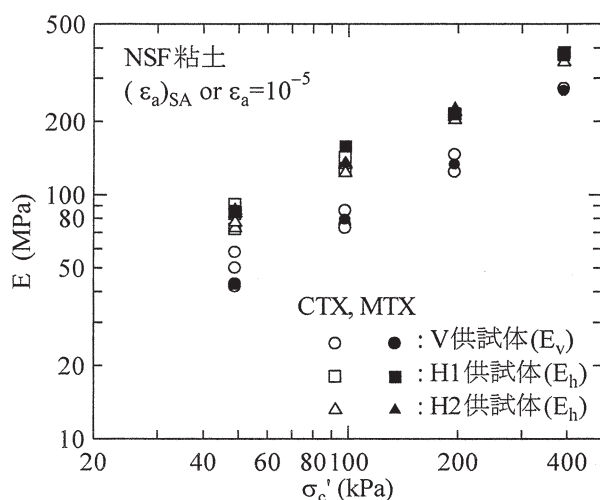


図-13 ヤング率と有効拘束圧との関係

いやや低下し、予圧密圧力の150kPaを超えると明らかにその比は低くなっている。図-12は圧密による配向の変化を模式的に示したものであるが、予圧密によって一定方向に配列した粘土粒子が等方圧密することによって等方的な構造に変化したため¹⁰⁾ G_{hh}^*/G_{hv}^* が低下したと考えられる。

(2) 繰返し三軸試験および単調載荷試験

バンダーエレメント試験によってせん断波速度から求めたせん断弾性係数 G には異方性があり、砂質土に比べ粘性土の弾性係数の異方性が高いことがわかった。本

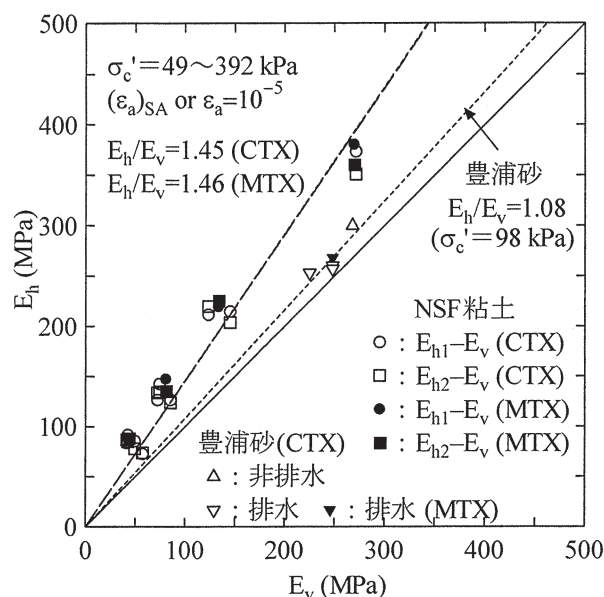


図-14 E_v と E_h の比較

節では、繰返し載荷試験や単調載荷試験のような静的試験を行い、V供試体から鉛直方向ヤング率 E_v 、H供試体から水平方向ヤング率 E_h を求め、砂質土と粘性土の弾性係数の異方性を検討した。

a) 小ひずみ域での弾性係数の異方性

図-13は、NSF粘土における片振幅軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}=10^{-5}$ 程度の繰返し載荷を与えたときの等価ヤング率 E_{eq} および単調載荷試験での $\epsilon_a=10^{-5}$ に対する割線ヤング率 E_{sec} と有効拘束圧 σ'_c との関係を示したものである。ここで、繰返し載荷試験の結果をCTX、単調載荷試験の結果をMTXと表している。

図より、繰返し載荷試験と単調載荷試験の結果はほぼ等しく、すべての応力状態でV供試体から求めたヤング率 E_v に比べ、H1およびH2供試体から求めたヤング率 E_h は非常に高くなっている。

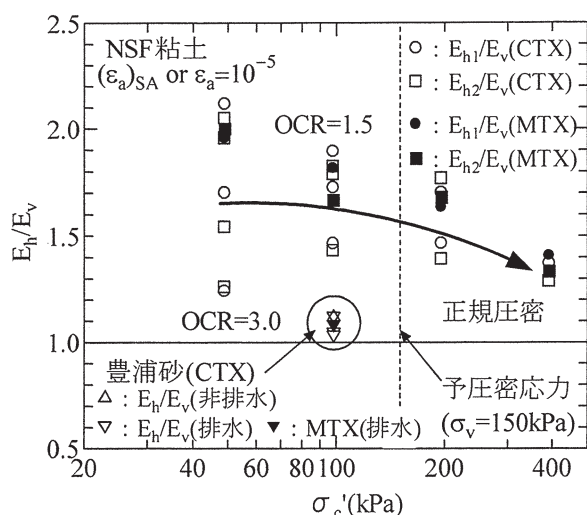


図-15 弾性係数の異方性と拘束圧の関係

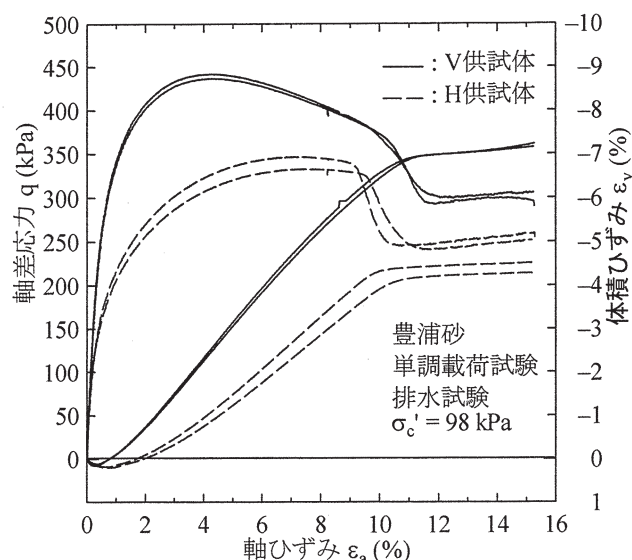


図-17 豊浦砂の応力～ひずみ曲線

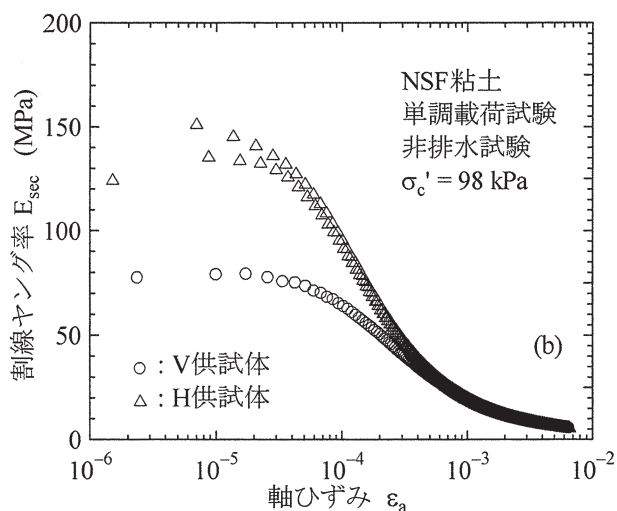
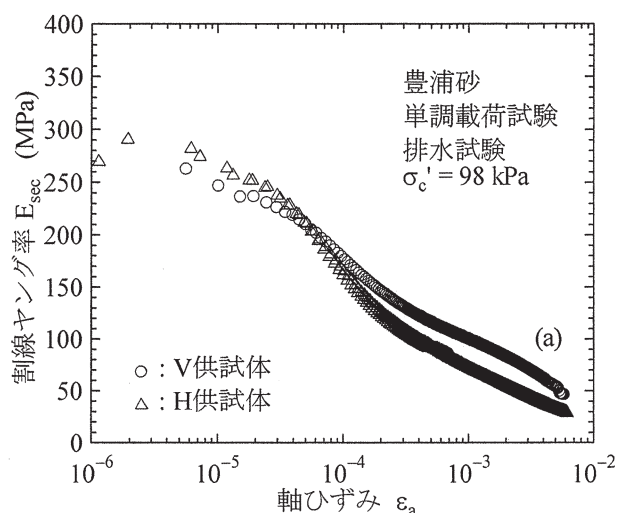


図-16 単調載荷試験結果 (a) 豊浦砂 (b) NSF 粘土

E_v と E_h を比較したものを図-14に示す。図中には有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ での豊浦砂の排水および非排水条件で行った繰返し載荷試験の結果と、排水条件で行った単調載荷試験の結果も追加している。豊浦砂の結果は、ヤング率の比 E_h/E_v が1.08と弾性係数の異方性は低いのに対し、

NSF粘土のヤング率の比 E_h/E_v は1.45となり弾性係数の異方性は高い。また、ベンダーエレメント試験の結果と同様に、拘束圧の増加とともにその比はやや低下している。

繰返し載荷試験と単調載荷試験から求めたヤング率の比と有効拘束圧の関係を示したものを図-15に示す。豊浦砂の結果は、排水条件にかかわらず三軸試験から求めた E_h は E_v よりもやや高くなっているが、ヤング率の異方性は低い。それに対し、NSF粘土のヤング率の異方性は非常に高く、ベンダーエレメント試験の結果と同様に、有効拘束圧の増加に伴い弾性係数の異方性はやや低下し、392kPaではその比はかなり低くなっている。このことから、試験方法の違いにかかわらず、等方圧密することによって、弾性係数の異方性が低下することが明らかになった。また、予圧密応力の2倍以上の応力で等方圧密を行っても弾性係数の異方性はなくなることがわかった。

b) 小ひずみ域～大ひずみ域での弾性係数の異方性

小ひずみ～大ひずみでのヤング率を調べるために、豊浦砂とNSF粘土に対して単調載荷試験を行った。

図-16は、有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ での試験結果を示している。縦軸は割線ヤング率 E_{sec} 、横軸は軸ひずみ ϵ_a である。豊浦砂は排水条件で試験を行い、NSF粘土は非排水条件で試験を行った。

豊浦砂の結果を示した図-16(a)は、 $\epsilon_a=10^{-5}$ 程度の微小ひずみレベルでは、 E_v に比べ E_h はやや高い。しかし、軸ひずみが $\epsilon_a=10^{-4}$ より大きくなるとその関係が逆転し、 E_v の方が高くなっている。それに対してNSF粘土は、微小ひずみレベルでは E_v に比べ E_h は非常に高く、軸ひずみが $\epsilon_a=4 \times 10^{-4}$ になると両者の差はなくなり E_v と E_h はほぼ等しくなっている。

中ひずみから破壊に至までの応力～ひずみ曲線を図-17および図-18に示した。豊浦砂の結果には体積ひずみ、NSF粘土の結果には過剰間隙水圧も示している。

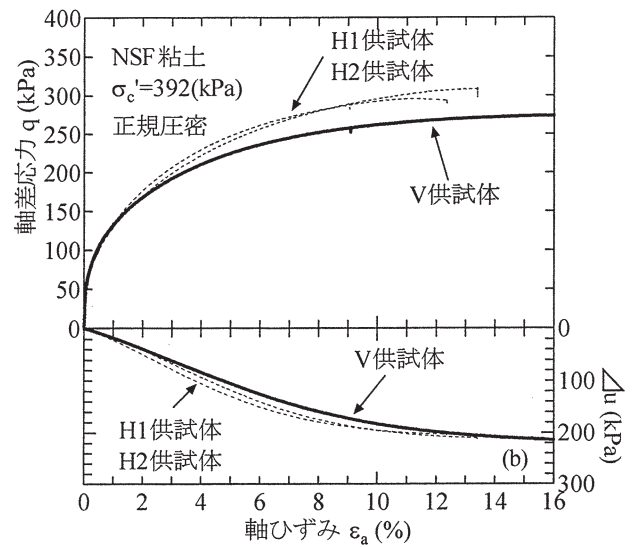
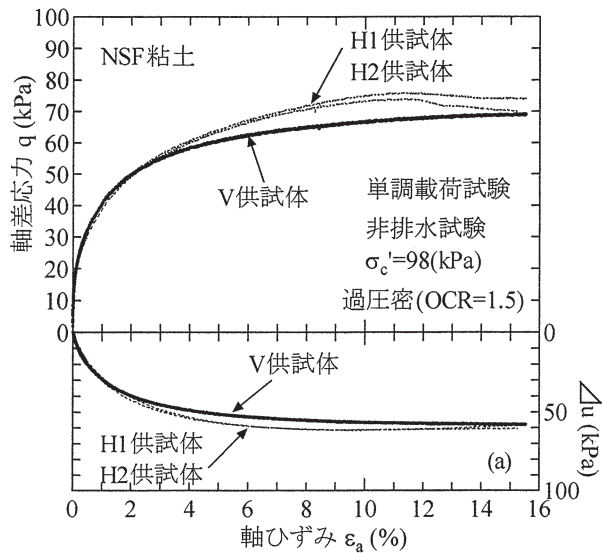


図-18 NSF 粘土の応力～ひずみ曲線 (a)98kPa (b)392kPa

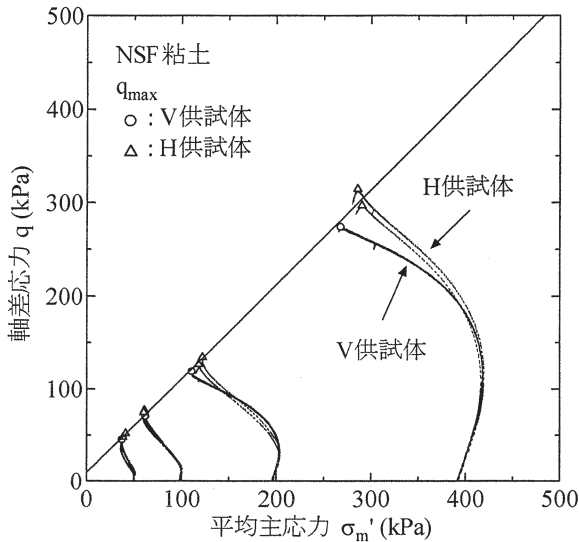
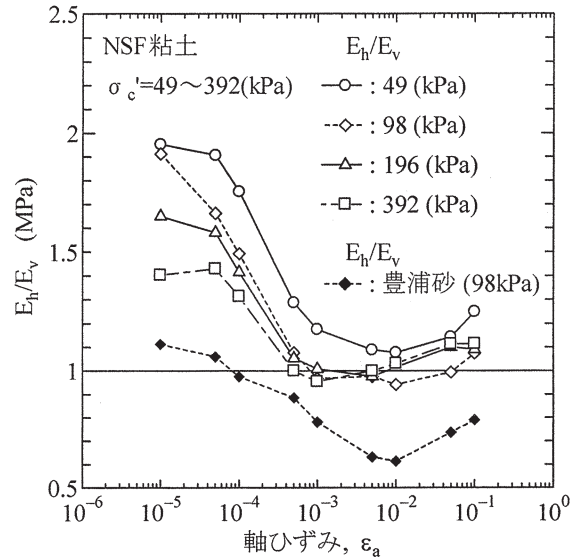


図-19 NSF 粘土の有効応力経路


 図-20 E_h/E_v とひずみの関係

有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ における豊浦砂の結果を示した図-17では、H供試体に比べV供試体の強度が高い。これは、V供試体の方が負のダイレイタンスーが大きいことに起因している。NSF粘土の結果を示した図-18では、有効拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ および 392kPa ともに、H供試体の強度はV供試体に比べ高く、豊浦砂の結果とは異なっている。

NSF粘土の有効応力経路を図-19に示した。縦軸は軸差応力、横軸は平均有効主応力である。図より、せん断の進行に伴ってV供試体の間隙水圧がH供試体よりも高くなっている。このことから、V供試体に比べ、H供試体の強度が高くなったものと考えられる。

図中のラインは、最大軸差応力 q_{max} を結んだ線である。V供試体とH供試体の最大軸差応力は異なるのに対し、最大軸差応力と平均有効主応力の関係を示した結果では、V供試体とH供試体の結果に有意な差は認められず、ほぼ等しいことがわかる。Duncan & Seed¹¹⁾は、カオリン粘土

に対して同様の試験を行った結果、全応力で示した場合には、V供試体とH供試体の結果に差が認められたのに対し、有効応力で示した場合にはV供試体とH供試体の結果はほぼ一致しており、本研究結果と同様な結果が得られている。

図-20は豊浦砂とNSF粘土の単調荷重試験におけるひずみレベルに応じたV供試体とH供試体のヤング率の比 E_h/E_v を示したものである。図より、豊浦砂の結果は、微小ひずみレベルでは E_h の方が高いが、ひずみが大きくなるとダイレイタンスーの影響により E_v が高くなっている。NSF粘土の結果は、ひずみレベルが大きくなるにつれてヤング率の異方性が徐々に低下していき、軸ひずみ $\varepsilon_a=10^{-2}$ では E_h/E_v はほぼ1.0となっている。これは、せん断に伴う構造の乱れによって、異方性が低くなったものと考えられる。さらに、軸ひずみが大きくなると、前述したようにV供試体の過剰間隙水圧の発生量はH供試体よ

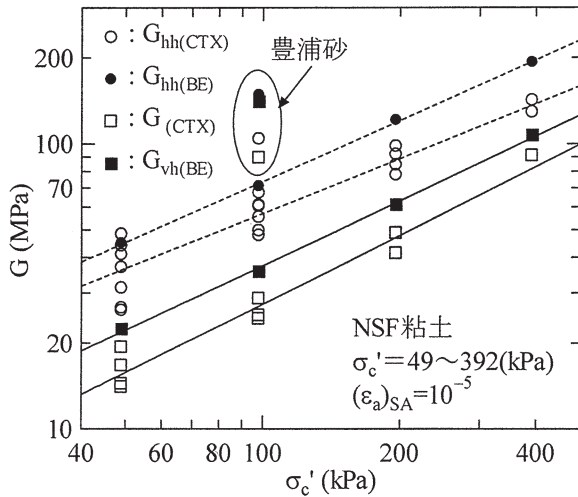


図-21 CTX 試験と BE 試験のせん断弾性係数の比較

り多くなるため、 E_v は低下し、 E_h/E_v はともに1.1~1.3程度となっている。また、 E_h/E_v は拘束圧が低い程高く、拘束圧が高くなるとヤング率の異方性が低下している。このことから、弾性係数の異方性の低下に与える影響は、等方圧密による構造の乱れよりも、せん断による構造の乱れの方が大きいことがわかった。

(3) ベンダーエレメント試験と繰返し載荷試験から求めた弾性係数の比較

豊浦砂とNSF粘土の繰返し載荷試験から求めたヤング率を用いて、供試体を等方弾性体および直交異方弾性体としてせん断弾性係数を求め、ベンダーエレメント試験の結果と比較した。

供試体を等方弾性体とした場合のせん断弾性係を式(18)によって求めた。

$$G_{(CTX)} = \frac{E_v}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

ここで、 E_v はV供試体のヤング率、 ν はポアソン比である。ポアソン比は非排水条件から $\nu=0.5$ とした。

直交異方弾性体のせん断弾性係数は、V供試体とH供試体から求めたヤング率 E_v および E_h を用いて、式(6)と式(11)の関係から、式(19)によって ν_{hv} を求める。

$$\begin{aligned} \frac{E_h}{E_v} &= \frac{\nu_{hv}}{\nu_{vh}} = \frac{\nu_{hv}}{0.5} \\ \nu_{hv} &= 0.5 \times \frac{E_h}{E_v} \end{aligned} \quad (19)$$

次に、式(15)の関係より ν_{hh} を求め、式(7)からせん断弾性係数 $G_{hh(CTX)}$ を算出する。

$$\nu_{hh} + \nu_{hv} = 1 \quad (15)$$

$$G_{hh(CTX)} = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hh})} \quad (7)$$

図-21は豊浦砂とNSF粘土のベンダーエレメント試験および繰返し載荷試験より求めたせん断弾性係数 G を示

したものである。図に示すように、供試体を等方弾性体と仮定し、繰返し三軸試験の E_v から式(18)によって求めたせん断弾性係数 $G_{(CTX)}$ に比べ、供試体を直交異方弾性体と仮定して式(7)から求めたせん断弾性係数 $G_{hh(CTX)}$ およびベンダーエレメント試験から求めた $G_{vh(BE)}$ 、 $G_{hh(BE)}$ は高い。豊浦砂とNSF粘土の結果を比較すると、豊浦砂は弾性係数の異方性が低いため、等方弾性体と仮定した結果(□印)と直交異方弾性体と仮定した結果(○印)に大きな差はない。それに対して、NSF粘土の弾性係数の異方性は高いため、等方弾性体と仮定した結果に比べ、直交異方弾性体と仮定した結果は高くなっている。一方、繰返し載荷試験とベンダーエレメント試験から求めたせん断弾性係数 G_{hh} を比較すると、繰返し載荷試験から求めたせん断弾性係数 $G_{hh(CTX)}$ に比べ、ベンダーエレメント試験から求めたせん断弾性係数 $G_{hh(BE)}$ は高くなっている。

この原因として、一般的に波動試験から求めた弾性係数は、静的な載荷を与える三軸試験から得られた弾性係数より高い¹²⁾ことや、ベディングエラー、飽和度等の影響が考えられる。ベンダーエレメント試験は、供試体内を一番速くせん断波が伝播した速度から弾性係数を求めているのに対し、繰返し載荷試験のような静的試験では、供試体全体の平均的な弾性係数を求めている。また、三軸試験では 10^{-5} のひずみに対するヤング率からせん断弾性係数を求めているのに対し、ベンダーエレメント試験のような波動試験では、 10^{-6} 程度のひずみのせん断弾性係数を求めているため、比較しているひずみレベルの相違が考えられる。キャップの変位を測定する場合、ベディングエラーの影響により試験時の軸ひずみを過大評価する傾向にある。しかし、三軸試験において、圧密時の軸ひずみが1%以上の軟らかい粘性土の場合、経験上ベディングエラーが無視できることや¹³⁾、豊浦砂でも、軸ひずみが 10^{-5} では、キャップの変位から測定したヤング率と供試体側面でひずみを測定するLDTから求めたヤング率はほとんど差がないと報告されているため¹²⁾、ベディングエラーの影響は小さいと考えられる。飽和度の影響について、山下ら¹⁴⁾は、NSF粘土の等価ヤング率 E_{eq} の低下を5%以内にするためにはB値を0.95以上にする必要があると報告している。しかし、本研究でのNSF粘土供試体でのB値は0.9程度とやや低かった。したがって、これらの影響によって、繰返し載荷試験によって求めた結果が低くなったと考えられる。

以上のことから、供試体を等方弾性体と仮定して、繰返し載荷試験によって求めたせん断弾性係数は、ベンダーエレメント試験から求めたせん断弾性係数や、供試体を直交異方弾性体と仮定して算出した弾性係数に比べて小さいことから、弾性係数を過小評価していると考えられる。

本論文では、粘性土の弾性係数の異方性が非常に高い

結果であった。しかし、人工的に堆積構造の異方性を有する供試体を作製したため、結果的に異方性が非常に高い結果になったことも考えられる。したがって、堆積構造の異方性を定量的に評価するためには、予圧密の程度や構成成分の違い、起源の異なる粘土等で試験を行い、さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

5. 結論

- (1) ベンダーエレメント試験では、堆積面に平行に伝播・振動するせん断波から得られたせん断弾性係数 G_{hh} は、他の2方向で得られた G_{vh} および G_{nv} よりも高く、今回扱った NSF 粘土は豊浦砂と比較してせん断弾性係数の異方性が高いことがわかった。
- (2) 繰返し載荷試験のような静的試験から求めたヤング率も軸方向が堆積面に垂直になるように切り出した供試体のヤング率 E_v に比べ、軸方向が堆積面に平行になるように切り出した供試体のヤング率 E_h は高く、ベンダーエレメント試験と同様に豊浦砂に比べ NSF 粘土の構造異方性は非常に高いことがわかった。
- (3) 等方圧密することによって NSF 粘土の弾性係数の異方性は低下し、予圧密応力の2倍以上の応力で等方圧密を行っても、微小ひずみでの弾性係数の異方性はなくなるということがわかった。
- (4) ベンダーエレメント試験と繰返し載荷試験から求めた弾性係数を比較した結果、供試体を等方弾性体と仮定した弾性係数は、直交異方弾性体として求めた弾性係数よりも過小評価される。

謝辞：粘性土の試験を実施するに当たり、函館工業高等専門学校 川口貴之助手にご助言を頂きました。末筆ながらここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Butcher, A.P. and Powell, J.M.M. : The effects of geological history on the dynamic stiffness in soils, Proc. 11th European Conf. on Soil Mechanics, Copenhagen, Vol.1, pp.127-136, 1995.
- 2) Hight, D.W., Bennell, J.D., Chana, B., Davis, P.D., Jardine, R.J.

- and Provic, E. : Wave velocity and stiffness measurements of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell, *Géotechnique*, Vol.47, No.3, pp.451-474, 1997.
- 3) 山下 聡, 喜多川俊介, 堀 智仁, 鈴木輝之 : 堆積構造と応力の異方性が砂質土の初期せん断剛性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.319-329, 2001.
- 4) Yimsiri, S. and Soga, K. : Application of micromechanics model to study anisotropy of soils at small strains, *Soils and Foundations* Vol. 42, No.5, pp.15-26, 2002.
- 5) Hoque, E. and Tatsuo, F. : Anisotropy in elastic deformation of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.1, pp.163-179, 1998.
- 6) Kuwano, R. : The stiffness and yielding anisotropy of sand, Ph.D. Thesis, Imperial College, 1999.
- 7) 福田文彦, 三田地利之, 澁谷啓 : 面積ひずみにもとづく状態境界面の概念の再考, 土木学会論文集, No.708/III-63, pp.69-78, 2002.
- 8) Fioravante, V. : Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.4, pp.129-142, 2000.
- 9) Iwasaki, T., Tatsuo, F. and Takagi, Y. : Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39-56, 1978.
- 10) 粘土の不思議編集委員会: 粘土の不思議, pp.19-30, 土質工学会, 1986.
- 11) Duncan, J. M. and Seed, H. B. : Anisotropy and stress reorientation in clay, Proc., ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation*, Vol.92, SM5, pp.21-50, 1966.
- 12) Yamashita, S., Kohata, Y., Kawaguchi, T. and Shibuya, S. : International round-robin test organized by TC-29, *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, Balkema, pp.65-110, 2001.
- 13) 龍岡文夫, 木幡行宏 : ベディングエラー, 土と基礎, vol.42, No.9, pp.53-55, 1994.
- 14) 山下聡, 澁谷啓, 稲原英彦, 古川卓: 砂および粘性土の繰返し変形特性に及ぼす B 値の影響, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-」に関する国内シンポジウム, pp.137-142, 1994.

(2005. 4. 11 受付)

EFFECT OF FABRIC ANISOTROPY ON QUASI-ELASTIC MODULUS OF SAND AND CLAY

Tomohito HORI, Satoshi YAMASHITA, Takeshi YAMAGUCHI
and Teruyuki SUZUKI

To examine the effect of the fabric anisotropy of sand and clay on the quasi-elastic modulus, the shear wave velocity in three different directions was measured by the bender element method on specimens with different fabric anisotropy. In addition, the Young's modulus was measured by cyclic triaxial test on small strain and monotonic loading test. Test results showed that; 1) the initial shear modulus obtained from the shear wave for propagating and vibrating parallel to the bedding plane is higher than the other two kinds of moduli, 2) the Young's modulus in the horizontal direction, E_h , is higher than that in the vertical direction, E_v , 3) the anisotropy of elastic modulus in NSF clay is more considerable than that in Toyoura sand in this study.