

琉球大学学術リポジトリ

弱固結粘土岩の異方弾性挙動(農業工学科)

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新城, 俊也, Shinjo, Toshiya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4162

弱固結粘土岩の異方弾性挙動

新城 俊也*

Toshiya SHINJO: Anisotropic elastic behavior on clay-stone with weak bonds

I はしがき

近年土木構造物の重量化、大規模化に伴って、支持層としての軟岩地盤あるいは著しく過圧密された硬質粘土地盤を対象とする地盤の支持力が注目されているが、破壊荷重以下での地盤の変形問題も、その変形が上部構造物に有害なものであってはならないことから基礎工学上重要である。この種の地盤はもとより、通常の土質地盤においても、外力による地盤内応力あるいは変形の予測には、従来から弾性体理論がよく適用されている。しかし、実際の地盤は異方性を示す場合が多いにもかかわらず、その変形挙動に関する研究は対象を主に等方性地盤としている。異方性地盤では、主軸が地盤に対し鉛直な対称軸である直交異方性体とみなせる場合が多い。

著者は先に、弱固結粘土岩とみなせる島尻層泥岩供試体を用いて、軸対称三軸圧縮試験によって圧密圧力 60 kg/cm²までの強度特性について報告した。^{10,11)} この泥岩の応力～ひずみ関係は軸応力の増加に伴って弾性的挙動を経てひずみ硬化を伴う塑性変形を示し、最大応力に達した後ひずみ軟化、すなわちひずみの増大とともに応力は減少し、最終的に応力がほぼ一定となる残留応力状態に至る、典型的なひずみ硬化～軟化型である。その際、島尻層泥岩が異方性の挙動を示すにもかかわらず、主に破壊付近における挙動に注目し、その強度特性あるいは有効応力による破壊規準について検討した。その検討の過程で、応力～ひずみ関係の初期の線形範囲において間隙水圧の発生ならびにそれに反映される有効応力径路が供試体の軸方向によって著しく異なることを指摘したが、このことは外力作用による変形挙動が異方性を示すことを示唆するものである。従って、島尻層泥岩を弾性体とみなし、先の地盤に対して鉛直軸方向にある供試体についての圧密圧力 60 kg/cm²までの圧密非排水型三軸試験および圧密圧力 25 kg/cm²までの圧密排水型三軸試験の結果に基づいて、三軸圧縮試験における鉛直方向と水平方向の供試体の弾性挙動について明らかにする必要がある。

本研究においては、初めに硬質粘土および軟岩の弾性挙動に関する従来の主たる研究を概観し、それらの研究成果に基づいて応力～ひずみ関係における弾性挙動とその弾性限界について検討を加え、対象とする供試体の弾性挙動の特性を明らかにしている。次に、異方弾性体に対する間隙圧係数を誘導し、その特性を利用して圧密非排水せん断試験における間隙水圧の挙動を検討するとともに異方弾性パラメータを推定する。続いてこのパラメータを用いて排水せん断における弾性変形挙動についていくつかの検討と考察を加えている。

なお、島尻層泥岩の三軸圧縮試験の結果は先に述べた報告に詳細に示されているので、ここでは必要

* 琉球大学農学部農業工学科

に応じて実験結果のみを引用して検討の対象とする。

II 異方弾性土の応力～ひずみ関係ならびに弾性挙動の特性

1 従来の研究

室内三軸試験に弾性体理論を適用することにより、硬質粘土あるいは軟岩の弾性変形挙動に関する研究がいくつか行なわれている。

Henkel⁷⁾は非排水三軸圧縮及び平面ひずみ試験における有効応力径路が異方性の影響を受けることから、この有効応力径路の勾配をもって異方弾性挙動を予測できるとした。Atkinson⁵⁾は、排水せん断試験ではRoweのダイレイタンシー式の線形性が、また非排水せん断試験ではHenkelの有効応力径路の線形性が異方弾性挙動を支配するパラメータとし、不攪乱のLondon clayについて三軸圧縮及び平面ひずみ試験を行ない、鉛直及び水平方向供試体に対する排水せん断から弾性パラメータが決定できることを示し、さらにヤング率に及ぼす応力履歴の影響を調べている。Starzewski¹³⁾は著しく過圧密されたLias clayについて排水せん断を行い、弾性領域では体積ひずみと軸ひずみの関係が線形となり、そのひずみ比は載荷径路の影響を受けず一定となることを示し、かつ排水せん断から求めた弾性パラメータから非排水せん断におけるヤング率及び間隙圧係数が予測できるとしている。

一方、赤井^{1,2,3)}は等方材料である堆積軟岩を用いた三軸試験により、軟岩を対象とする構造物の強度・変形問題に適用できるより一般性をもつ構成式の確立を目的とした一連の研究を行っている。その結果のうち軟岩の弾性挙動に注目すると、非排水圧縮せん断過程で平均応力 σ_m の増分 $\Delta\sigma_m$ に見合うだけの間隙水圧増分 Δu が生ずる完全な弾性体として挙動する領域があり、排水せん断では体積圧縮が生じ、この領域で弾性定数が決定できるとしている。また、骨格構造の弾性挙動とダイレイタンシーを伴う弾性変形挙動とがあり、両者を含めた領域が弾性変形の限界であるとし、その限界である塑性降伏応力は主応力差～偏差ひずみ関係を両対数紙上に求めて得られる折点の応力値として決定でき、この降伏値から求まる降伏曲面は平均有効応力 σ_m と非線形関係にあるとしている。

以上の研究において弾性領域は体積ひずみと軸ひずみの線形関係で定義されているが、London clayやLias clayのような硬質粘土と赤井らの用いた堆積軟岩とは差異が存在するようである。次に、上述の研究成果に基づいて島尻層泥岩の弾性変形の特性を検討するが、その準備として異方弾性地盤の応力～ひずみ関係について概略する。

2 異方弾性地盤の応力～ひずみ関係

地盤材料の応力～ひずみ関係は一般に非線形であってフックの法則は適用しにくい。しかし、その要素が現在地盤内で受けている応力とひずみ状態を基準にとり、小さな応力増分に伴う微小ひずみ増分に注目すれば近似的にフックの法則の適用が容認され、地盤を弾性体と仮定した線形弾性体理論が地盤内応力あるいは変形の推定に援用される。弾性体の表面に集中荷重が作用するときの応力および変形に関するBoussinesqの厳密解は岩盤あるいは土質地盤における応力分布、変位の推定の基本となっていることは周知のことであるが、これは等方等質弾性体に対する解である。しかし、土の堆積過程で予想されるように、堆積した板状粘土粒子は引続き堆積する土の上載荷重の増加によって水平に配向し、成層や層状構造を形成する。その傾向は堆積岩や著しく過圧密された粘土層で顕著となり、その地盤が弾性的挙動を示すなら異方弾性体として取扱わなければならない。このような地盤で成層が水平のとき、地盤に対する鉛直軸が異方性の対称軸となる直交異方体はcross anisotropyあるいはtransverse isotropyと呼ばれ、対称軸とそれに直交する水平面の弾性パラメータは異なるが、水平面では等方性であ

る。本研究では、異方性とは、上述の異方性体のもつ性質を示すものとする。

弾性体理論において線形を仮定すると、応力とひずみの関係は主軸を x, y, z 軸とすれば一般に次の式で示される。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} \quad (1)$$

この式には36個の弾性パラメータが含まれているが、地盤に対し鉛直方向に z 軸、それに直交する平面に x, y 軸をとると、 z 軸が異方性の対称軸、 xy 平面で等方性であるような異方弾性においては独立した5つの弾性パラメータを含む式となる。この弾性パラメータとして次のものが選ばれている⁶⁾。
 $n = E_H / E_V$: ヤング率比, E_H : 水平方向のヤング率, E_V : 鉛直方向のヤング率, ν_H : 水平応力が水平方向のひずみに及ぼす影響を示すポアソン比, ν_{HV} : 水平応力が鉛直ひずみに及ぼす影響を示すポアソン比, ν_{VH} : 鉛直応力が水平ひずみに及ぼす影響を示すポアソン比, G_{VH} : 鉛直方向のせん断弾性定数, これらの弾性パラメータ間にはひずみエネルギーの考察から次の関係が成立する。

$$\nu_{VH} / E_V = \nu_{HV} / E_H$$

この弾性パラメータを用いて式(1)を有効応力表示で書き改めると

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma'_x}{E_H} - \frac{\nu_H \sigma'_y}{E_H} - \frac{\nu_{VH} \sigma'_z}{E_V} \\ \epsilon_y &= -\frac{\nu_H \sigma'_x}{E_H} + \frac{\sigma'_y}{E_H} - \frac{\nu_{VH} \sigma'_z}{E_V} \\ \epsilon_z &= -\frac{\nu_{HV} \sigma'_x}{E_H} - \frac{\nu_{HV} \sigma'_y}{E_H} + \frac{\sigma'_z}{E_V} \\ \gamma_{xy} &= \frac{1 + \nu_H}{E_H} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz} / G_{VH} \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx} / G_{VH} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

従って、式(2)の弾性パラメータは有効応力に基づく量である。また、この式に含まれるポアソン比は次の条件を満足しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} 1 - \nu_H - 2 \nu_{VH} \nu_{HV} &> 0 \\ 1 - \nu_H &> 0 \\ 1 + \nu_H &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なお、式(2)に $n=1, E=E_V=E_H, \nu=\nu_H=\nu_{VH}=\nu_{HV}, G=G_{VH}=E/2(1+\nu)$ とおけば、等方弾性体における周知の応力～ひずみ関係となる。

3 軸対称三軸圧縮試験への適用

軸対称の三軸圧縮試験においては円柱供試体の軸方向の最大主応力 σ'_1 , それに直角な方向に最小主応力 σ'_3 を作用させるから、地盤に対し鉛直な供試体と水平な供試体を選べば、異方性対称軸と主応力軸は一致することになる。いま主応力増分を $\Delta\sigma'_1$ および $\Delta\sigma'_3$ として、それぞれの向きの供試体に式(2)を適用する。

(a) 鉛直供試体の場合 ($\Delta\sigma'_z = \Delta\sigma'_1$, $\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma'_y = \Delta\sigma'_3$)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r = \varepsilon_x = \varepsilon_y &= \frac{1}{E_H} [(1 - \nu_H) \Delta\sigma'_3 - n\nu_{VH} \Delta\sigma'_1] \\ \varepsilon_a = \varepsilon_z &= \frac{n}{E_H} [-2\nu_{VH} \Delta\sigma'_3 + \Delta\sigma'_1] \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに ε_a : 軸ひずみ, ε_r : 側方ひずみ

(b) 水平供試体の場合 (x 軸を最大主応力軸に一致させると, $\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma'_1$, $\Delta\sigma'_y = \Delta\sigma'_z = \Delta\sigma'_3$)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_a = \varepsilon_x &= \frac{1}{E_H} [\Delta\sigma'_1 - (\nu_H + n\nu_{VH}) \Delta\sigma'_3] \\ \varepsilon_{r1} = \varepsilon_y &= \frac{1}{E_H} [-\nu_H \Delta\sigma'_1 + (1 - n\nu_{VH}) \Delta\sigma'_3] \\ \varepsilon_{r2} = \varepsilon_z &= \frac{n}{E_H} [-\nu_{VH} \Delta\sigma'_1 + (1 - \nu_{VH}) \Delta\sigma'_3] \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに ε_{r1} , ε_{r2} はそれぞれ y 軸および z 軸方向への側方ひずみ

式(4), (5)に注目すると, せん断弾性定数 G_{VH} が含まれていないので, 鉛直および水平供試体の変形挙動は4つの独立した弾性パラメータ n , E_H (E_V), ν_{VH} (ν_{HV}), ν_H で記述できることになる。

4 弾性変形挙動の特性

Atkinson⁴⁾ は土の弾性挙動と塑性挙動の区別について次のような検討を行っている。理想弾性体の変形は, 除荷過程では完全回復性で, 応力増分に依存し, 載荷履歴には無関係であるとし, 一方理想塑性体の変形は非回復性で載荷履歴に基づく応力状態に依存し, そのひずみ増分ベクトルの方向は応力増分の方向に無関係であるとし, 次の構成関係でそれぞれの挙動を定義した。

$$\text{弾性変形} \quad d\varepsilon_{ij} = F(d\sigma'_{kl}) \quad (6)$$

$$\text{塑性変形} \quad d\varepsilon_{ij} = G(\sigma'_{kl}) \quad (7)$$

ここに i, j および $k, l = 1, 2, 3$

式(6)は式(1)の増分形式で示され, 他方式(7)の関数 G には降伏関数, 流れ則および硬化則が含まれる。他方, 排水ならびに非排水型三軸圧縮試験における供試体の挙動は, 主応力差~軸ひずみ関係に代わるものとして次式で示される2つのパラメータでもって弾性と塑性の区別が可能であるとしている。

$$D = 1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a} \quad (8)$$

$$M = \frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} \quad (9)$$

ここに ε_v : 体積ひずみ, ε_a : 軸ひずみ

D は Rowe のダイレイタンスー式で ε_v と ε_a の関係の傾きに関係し, M は Henkel による σ'_1 , σ'_3 応力面での有効応力径路の傾きである。いま式(6)が式(2)で示され, ヤング率 E_{ij} とポアソン比 ν_{ij} を含むものとするれば, 弾性としてのサフィクス e を付し, 式(8), (9)は次式で示される。

$$D_e = F_1(\nu_{ij}, n, \frac{d\sigma'_3}{d\sigma'_1}) \quad (10)$$

$$M_e = F_2(\nu_{ij}, n) \quad (11)$$

いま, ν_{ij} と n は一定とすれば, 通常の側圧を一定に保つ三軸排水試験では $d\sigma'_3 = 0$ となるから

$$D_e = \text{const.}, \quad M_e = \text{const.} \quad (12)$$

この式は弾性挙動の条件として, ひずみ径路あるいは応力径路が線形であることと, そのためにはヤング率は一定となる必要はないが, ポアソン比 ν_{ij} とヤング係数比 n は一定でなければならないことを意

味している。従って、塑性域では D_p, M_p (p : 塑性の意味) は非線形となり、この線形から非線形に変化する際の応力値を降伏応力と定義している。この手法は軸対称三軸圧縮試験のみならず平面ひずみ試験にも適用できること、また、 D および M の線形からの離脱点として求めた降伏応力は両者で一致することが不攪乱 London clay で確かめられている⁵⁾。なお、Stazenwski らの Lias clay の弾性挙動は上述の特性を満足するものである¹³⁾。

一方、赤井³⁾による等方性凝灰岩の排水せん断試験に基づく弾性挙動の定義をみよう。Fig.1 は圧密圧力 5 kg/cm^2 と 25 kg/cm^2 の場合における体積ひずみ ϵ_v と偏差ひずみ $e_1 (= \epsilon_a - \epsilon_v/3)$ の関係を示したものである。この関係は、図中の A 点まで α の角度をもつ直線関係、A 点からは α' の異なる角度の直線関係で B 点に至り、それ以降は急激に非線形の関係となっている。図中の B 点の応力が降伏応力に対応している。図中の直線部分の勾配 $\tan \alpha$ ($\tan \alpha'$) はポアソン比 ν と次の関係にある。

$$\nu = (1 - \frac{2}{3} \tan \alpha) / 2(1 + \frac{1}{3} \tan \alpha) \quad (13)$$

$\tan \alpha$ 一定から求めるポアソン比は圧密圧力に関係なく一定であるとしているが、A 点以降での $\tan \alpha'$ 一定部分では圧密圧力の大きさによりポアソン比が変化するとし、A 点までを骨格構造の弾性挙動、A

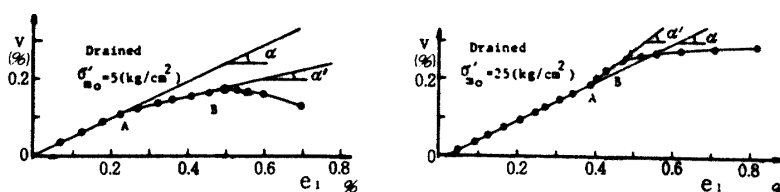


Fig. 1 多孔質凝灰岩の体積ひずみと偏差ひずみの関係 (赤井らによる)

点以降 B 点までを構造の局部的破壊が拘束圧力の大きさによって体積膨張あるいは体積圧縮となるダイレイタンスを伴う弾性挙動としている。すなわち A 点は体積変化の比例限界、B 点はせん断変形の比例限界で、B 点までは安定な変形過程にあるとしている。なお、A 点までの骨格構造の弾性挙動は、非排水せん断試験において平均応力の増分 $\Delta \sigma_m$ に等しいだけの間隙水圧増分 Δu が生ずるという実験事実に基づくものであるから、Henkel の有効応力径路も弾性領域内で 2 つの異なる勾配の直線関係が成立するものと予想される。

London clay や Lias clay は古第三紀、中生代の古い地層の硬い土であるにもかかわらず比較的固結度が低く、過圧密効果のみが卓越した粘土であるのに対し、我国における堆積軟岩は新しい時代の堆積物であるにもかかわらず固結したものが多いいわれている。従って、前者のような著しい過圧密土では主にダイレイタンスを伴う弾性変形が生ずるのに比べ、後者のような続成作用による結合力が発達した軟岩では結合力が破壊されるまでは骨格構造の弾性挙動を、その後過圧密土と類似のダイレイタンスを伴う弾性変形が生ずるものと考えられる。

次に、上述のような弾性挙動を定義する体積ひずみと軸ひずみの比あるいは有効応力径路の傾きと異方弾性パラメータの関係を示す。排水型軸対称三軸圧縮において $\Delta \sigma_1$ と $\Delta \sigma_3$ が一定の応力比で作用するとき、その比を $\bar{K} = \Delta \sigma_3 / \Delta \sigma_1$ とおき、式(4)を利用して鉛直供試体の体積ひずみ ϵ_v を求めると

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2 \epsilon_r = \frac{\Delta \sigma_1'}{E_H} [(1 - 2\nu_{VH})n + 2(1 - \nu_H - n\nu_{VH})\bar{K}]$$

$$\text{従って } \left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_a}\right)_V = [(1 - 2\nu_{VH}) + 2(1 - \nu_H - n\nu_{VH})\bar{K}/n] / (1 - 2\nu_{VH}\bar{K}) \quad (14)$$

同様に、水平供試体に対しても次式が求まる。

$$\left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_a}\right)_H = \frac{[(1 - \nu_H - n\nu_{VH}) + (1 + n - \nu_H - 3n\nu_{VH})\bar{K}]}{1 - (\nu_H + n\nu_{VH})\bar{K}} \quad (15)$$

側圧を一定に保ち、軸応力だけを增加させる通常の三軸圧縮試験では $\Delta\sigma_3' = 0$ であるから、

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_a}\right)_V &= 1 - 2\nu_{VH} \\ \left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_a}\right)_H &= 1 - \nu_H - n\nu_{VH} \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{従って } D_V &= 2\nu_{VH} \\ D_H &= \nu_H + n\nu_{VH} \end{aligned} \right\} (17)$$

Henkelは有効応力径路の勾配Mを次のように求めている⁷⁾。非排水せん断試験では供試体が水で飽和していれば、固体実質部の圧縮率が水の圧縮率より小さいので水の体積圧縮量に近い変化しか生じない。従って、通常体積変化がない $\epsilon_v \approx 0$ として取扱うことができるから鉛直供試体に対する勾配M_Vは、

$$M_V = \frac{\Delta\sigma_1'}{\Delta\sigma_3'} = -\frac{2(1 - \nu_H - n\nu_{VH})}{n(1 - 2\nu_{VH})} \quad (18)$$

また、水平供試体に対する勾配M_Hは

$$M_H = \frac{\Delta\sigma_1'}{\Delta\sigma_3'} = -\frac{1 + n - \nu_H - 3n\nu_{VH}}{1 - \nu_H - n\nu_{VH}} \quad (19)$$

いま、等方性を仮定すれば、 $n = 1$ 、 $\nu = \nu_{VH} = \nu_H$ として $M = M_V = M_H = -2$ となり、弾性パラメータに無関係な定数となる。このことは有効応力径路の勾配を調べるにより異方性を容易に判断できることを示唆するものである。

5 弱固結粘土岩の弾性変形特性

ここで対象としている島尻層泥岩の変形特性をAtkinsonあるいは赤井らの結果と比較してみよう。

Fig.2は鉛直供試体に対して行った排水せん断試験結果のうち、圧密圧力 $\sigma_c' = 1, 10, 25 \text{ kg/cm}^2$ のそれぞれについての体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係を示したものである。 $\sigma_c' = 1 \text{ kg/cm}^2$ と 10 kg/cm^2 の

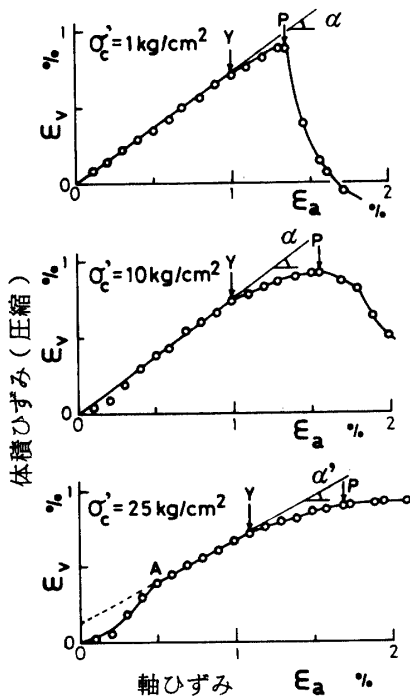


Fig. 2 排水圧縮せん断過程における体積ひずみと軸ひずみの関係

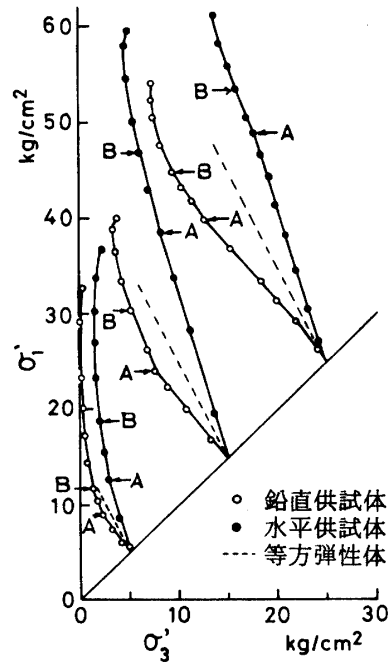


Fig. 3 有効応力径路の比較

場合、初期の角度 α からなる直線関係は図中の Y 点で直線から離脱し、わずかな範囲で別の角度の直線に移行し、その後非線形となって破壊点 P に至るひずみ径路をたどる。一方、 $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合には線形関係の初期の部分に乱れを生ずるが、図中の A 点から Y 点まで角度 α' の線形にあり、Y 点以降では $\sigma'_c = 1 \text{ kg/cm}^2$ あるいは 10 kg/cm^2 の場合と同様な径路にある。このように、ひずみ径路は Y 点まで 1 つの直線関係で示されるタイプと、初期の部分に乱れを生ずるタイプの 2 つのグループに分けられ、図示していないが、前者は $\sigma'_c = 1, 10, 15, 20 \text{ kg/cm}^2$ の場合、後者は $\sigma'_c = 3, 5, 7, 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合に現われ、両タイプは半々であった。いま、初期に乱れを生ずる場合、原点と A 点を直線で置換えると骨格構造の弾性挙動の存在が示唆される。 $\sigma'_c = 3, 5, 7, 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合のように弾性変形に骨格構造の弾性挙動が顕著に現われるのか、あるいは $\sigma'_c = 1, 10, 15, 20 \text{ kg/cm}^2$ の場合のように骨格構造の弾性挙動とせん断変形の弾性挙動がその卓越した特性を相互に相殺しながら挙動しているのか、行った排水試験の結果からは判断できない。そこで、この挙動を非排水試験の有効応力径路で調べてみよう。

Fig. 3 は $\sigma'_c = 5, 15, 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合の鉛直および水平供試体に対する有効応力径路を最大応力まで示したものである。また、Fig. 4 は $\sigma'_c = 30 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ における鉛直供試体の有効応力径路を示したものである。Fig. 3 から明らかのように、応力径路の立ち上りは、平均有効応力が一定であり、かつ等方弾性体の有効応力径路の勾配である -2 を基準とすると、鉛直供試体で左方へ、水平供試体で右方へ向いている。しかも、それぞれの径路は図中の A 点まである勾配の線形関係にあり、A 点から B 点までは別の勾配の線形関係を示し、その後非線形となって破壊に至る。この A ~ B 間の線形関係は、鉛直供試体では $\sigma'_c = 60 \text{ kg/cm}^2$ まで体積膨張の傾向を示しているが、水平供試体については $\sigma'_c = 20 \text{ kg/cm}^2$ まででは体積膨張傾向、 $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ では体積圧縮傾向 ($\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ では水平供試体 3 個について同じ結果である) を示し、骨格構造の弾性変形とダイレイタンスを伴う弾性変形の存在が予想される。さて、等方弾性体の有効応力径路の勾配 $M = -2$ と比較すると島尻層泥岩は明らかに異方弾性体として挙動しており、しかも圧密圧力 60 kg/cm^2 においても異方的挙動は顕著である。いま、A 点までの有効応力径路の勾配を鉛直および水平供試体に対しそれぞれ M_V, M_H として各圧密圧力に示すと Fig. 5 となる。図には、 $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ までにはばらつきの幅と平均値を同時に示してあるが、 M_V, M_H は圧密圧力の大きさに関係なく、 $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ 以下ではその平均値は $M_V = -1.30, M_H = -3.10,$

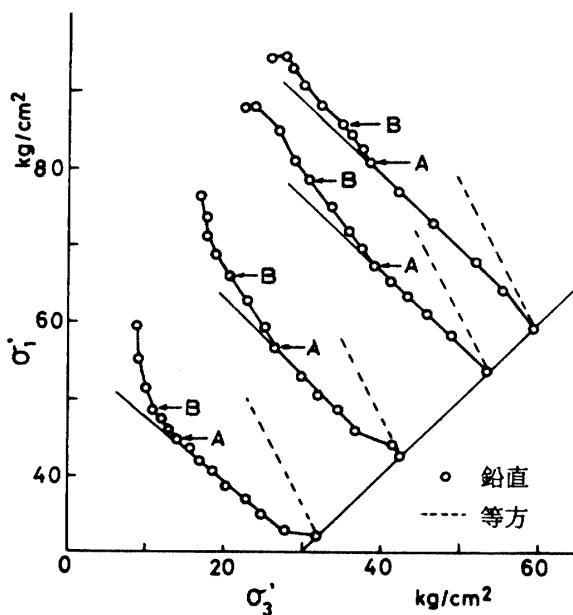


Fig. 4 高压密圧力時の有効応力径路

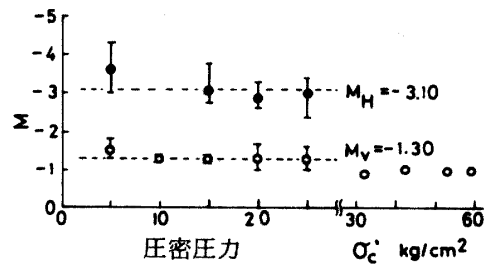


Fig. 5 圧密圧力と有効応力径路勾配 M の関係

また、 $\sigma'_c = 30 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ では $Mv = -0.9 \sim -1.0$ である。

次に、排水試験におけるひずみ径路、あるいは非排水試験における有効応力径路に対する線形関係の限界を降伏応力から検討しよう。ここに降伏応力は赤井ら³⁾による決定法に基づき、また、排水と非排水試験結果を比較するため鉛直供試体のみに限定する。排水試験による主応力差と偏差ひずみの関係を両対数プロットした例がFig.6であり、降伏応力は容易に決定できる(偏差ひずみの代わりに軸ひずみを用いても結果は同じである)。このようにして求めた降伏応力とFig.2におけるひずみ径路の線形関係からの離脱点として求まるY点の応力を $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \sim \sigma'_m$ 応力面で比較するとFig.7となる。この図には同時に非排水試験における両対数表示で求めた降伏応力も示してある。排水試験におけるY点の応力は降伏応力と一致し、しかも非排水試験における降伏応力とも一致している。このことから弾性限界は、ひずみ径路の線形関係の限界Y点として決定でき、その決定は容易である。次にFig.8は非排水試験における降伏応力とFig.3あるいはFig.4に示した有効応力径路におけるB点及びA点の応力を比較したものである。B点の応力が降伏応力と一致することから、B点が弾性限界となることがわかる。また、A点の応力レベルはB点の応力レベルより低い値を示している。従って、この島尻層泥岩の弾性挙動特性はA点まで骨格構造の弾性挙動、A点からB点まではダイレイタンスを伴う弾性挙動を示すものである。なお、Fig.8には排水試験におけるひずみ径路の初期に乱れがある場合のひずみ径路上のA点の応力も比較してあるが、この応力は非排水試験における有効応力径路でのA点の応力とほぼ一致し、排水試験でも骨格構造の弾性挙動が顕著に現れうることを示唆している。また、比較のため残留強度時の応力状態も同時に図中に示してある。

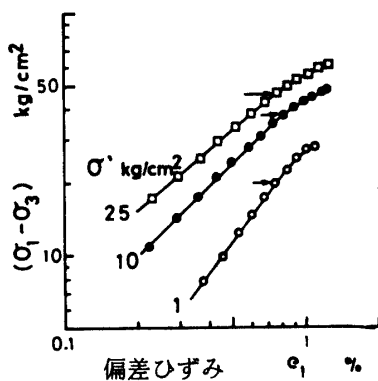


Fig. 6 降伏応力の決定

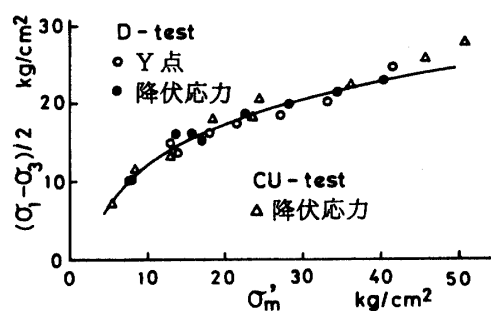


Fig. 7 降伏応力の比較

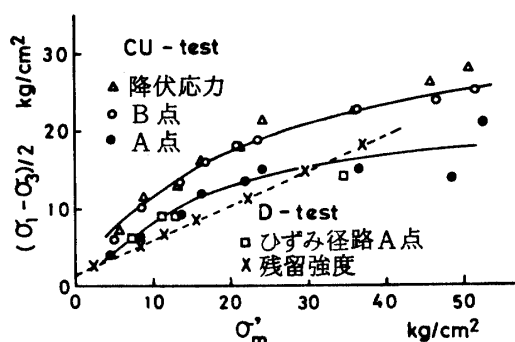


Fig. 8 降伏応力と径路変曲点の応力値の比較

以上の検討より、島尻層泥岩における弾性挙動の特性が明らかとなったので、再びFig.2のひずみ径路に注目しよう。図において $\sigma'_c = 1, 10 \text{ kg/cm}^2$ の場合のように ($\sigma'_c = 15, 20 \text{ kg/cm}^2$ を含む), O~Y間

の勾配が一定であるひずみ径路の勾配を $\tan \alpha$ とし、また $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合のように ($\sigma'_c = 3, 5, 7 \text{ kg/cm}^2$ を含む)、AY間の直線勾配を $\tan \alpha'$ とし、さらにOAを近似的に直線とおき、その勾配を $\tan \alpha_1$ として式(16)からそれぞれのポアソン比 ν_{VH} を求め、各圧密圧力に対して示すと Fig.9 となる。 $\tan \alpha$ と $\tan \alpha'$ から求まるポアソン比はばらつきがあるが、傾向として圧密圧力の大きさにかかわらずほぼ一定値で、平均値はそれぞれ 0.14, 0.18 である。この $\tan \alpha'$ から求めたポアソン比 0.18 は上述の弾性挙動の特性から明らかのようにダイレイタンシーを伴った弾性挙動における値を示している。一方、 $\tan \alpha_1$ から求まる骨格構造の弾性挙動時のポアソン比は、 $\sigma'_c = 1 \text{ kg/cm}^2$ での -0.19 から $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ での 0.10 と変化し、確かな傾向でないが、圧密圧力の影響を受ける結果となり、Fig.5 に示したように骨格構造の弾性挙動としての Mv が圧密圧力の大きさにかかわらず一定であること相反する結果となっている。このことについては、さらに詳細な排水試験の追試が鉛直供試体のみならず水平供試体について行われる必要がある。従って、先に報告した実験結果だけでは確かなポアソン比を決定することができない。しかし、次節での間隙水圧特性から異方弾性挙動を検討する上で何らかの異方弾性パラメータを排水試験から求める必要があり、しかもその際ポアソン比が圧密圧力の影響を受けるならその取扱いは非常に困難となる。そこで $\tan \alpha$ から求まるポアソン比が骨格構造の弾性挙動をも表現するものと仮定し、以後本研究ではこの試料のポアソン比の1つである ν_{VH} は 0.14 の値であると仮定する。この仮定は、以後の検討で定量的には問題を生ずるところであるが、異方弾性体挙動の定性的取扱い、あるいは異方弾性パラメータ決定手法に関しては何ら支障をきたすものではないと考えられる。

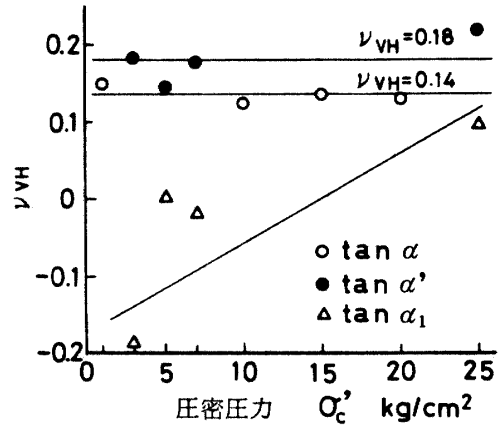


Fig.9 ポアソン比の比較

以上のことを島尻層泥岩についてまとめると、次のようになる。弾性挙動は骨格構造の弾性挙動とダイレイタンシーを伴う弾性挙動の両挙動を示し、弾性限界は排水試験の場合 Fig.2 に示すひずみ径路の Y 点、非排水試験の場合 Fig.3 と Fig.4 に示す有効応力径路の B 点に相当し、その応力～ひずみ関係を両対数紙上に求めて得られる折点の応力値として決定される降伏応力と一致している。骨格構造の弾性挙動は続成作用による結合力の寄与によるものと考えられ、この挙動は非排水試験の有効応力径路に顕著に現われる。弾性挙動としてのダイレイタンシー過程は、鉛直供試体の場合圧密圧力 60 kg/cm^2 においても体積膨張傾向にあるが、水平供試体の場合小さい拘束圧で体積膨張傾向、大きな拘束圧 (圧密圧力 25 kg/cm^2) で体積圧縮傾向にある。また、有効応力径路から異方性が明らかであるが、異方弾性パラメータの決定にはさらに水平供試体についての排水試験を必要とする。

次に、排水試験に基づくポアソン比 ν_{VH} を利用し、弾性挙動を骨格構造の弾性挙動に限定し、非排水せん断試験における間隙水圧の挙動から他の異方弾性パラメータの決定を試みる。

III 間隙水圧の挙動からみた異方弾性挙動

1 間隙圧係数

非排水せん断試験での異方弾性挙動はHenkelの有効応力径路の勾配 M_V, M_H で示されるが、有効応力径路はせん断に伴う発生間隙水圧の影響を受けることから、弾性挙動範囲での間隙水圧挙動に注目し

てみよう。¹²⁾

Skempton は、土を等方弾性体と仮定して飽和した土の三軸圧縮試験における間隙水圧を次式で示した。

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

しかし、実際の土は弾性体でも等方性でもないことから、間隙圧係数 A を導入し

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (20)$$

と表示した。土が等方弾性体であるなら $A = 1/3$ である。

Pickering⁹⁾ は Skempton と同様な手法を用いて異方弾性土に関する間隙水圧の挙動を考察している。異方弾性供試体に等方有効応力 $\Delta \sigma'$ を作用させると、そのときの体積ひずみは

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = (n + 2 - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H) \frac{\Delta \sigma'}{E_H} \quad (21)$$

となり、この体積ひずみは一般に次式で示される。

$$\epsilon_v = \Delta V / V = C_s \Delta \sigma' \quad (22)$$

$$\text{ここに } C_s = \frac{n + 2 - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H}{E_H} \quad : \text{土の骨格圧縮率} \quad (23)$$

通常の側圧一定の圧密非排水型三軸圧縮試験では、間隙水圧の変化によって $\Delta \sigma'_1$, $\Delta \sigma'_3$ が変化するため、 $\Delta \sigma'_1$, $\Delta \sigma'_3$ の変化による鉛直供試体に対する体積ひずみは

$$\epsilon_v = \frac{n(1 - 2\nu_{VH})}{E_H} \Delta \sigma'_1 + \frac{2(1 - \nu_H - n\nu_{VH})}{E_H} \Delta \sigma'_3$$

である。一方、供試体が飽和していると、その供試体の間隙率を n' 、間隙を満す水の圧縮率を C_w とし、間隙水圧が Δu だけ変化したときの間隙水の体積変化は $\Delta u \cdot C_w \cdot n'$ となる。この間隙水の体積変化と有効応力変化による上式の体積ひずみを等しくおき、 $\Delta \sigma'_1 = \Delta \sigma_1 - \Delta u$, $\Delta \sigma'_3 = \Delta \sigma_3 - \Delta u$ および C_s を考慮すると

$$\Delta u (C_s + C_w \cdot n') = C_s \Delta \sigma_3 + \frac{n(1 - 2\nu_{VH})}{E_H} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

の関係が得られる。 C_w の値は一般の地盤材料の C_s に比べてそのオーダーが低いことからこれを無視し、 C_s を弾性パラメータで表示すると、間隙水圧は次式となる。

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + \frac{n(1 - 2\nu_{VH})}{n + 2 - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (24)$$

この式を式(20)の形で表示すると、鉛直供試体の間隙水圧は

$$\Delta u_V = \Delta \sigma_3 + A_V (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

$$\text{ここに } A_V = \frac{n(1 - 2\nu_{VH})}{n + 2 - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H} \quad (25)$$

となり、 A_V が鉛直供試体の間隙圧係数である。

Pickering は鉛直供試体だけについて式を誘導しているが、この手法は水平供試体にも容易に適用できる。水平供試体に $\Delta \sigma'_1$, $\Delta \sigma'_3$ が作用するときの体積ひずみは

$$\epsilon_v = \frac{(1 - \nu_H - n\nu_{VH})}{E_H} \Delta \sigma'_1 + \frac{(1 + n - \nu_H - 3n\nu_{VH})}{E_H} \Delta \sigma'_3$$

これを間隙水の体積変化と等しくおいて、 C_s が式(23)で表わされることと、 $\Delta \sigma'_1 = \Delta \sigma_1 - \Delta u$, $\Delta \sigma'_3 = \Delta \sigma_3 - \Delta u$ を考慮し、さらに C_w を無視すれば

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + \frac{1 - n\nu_{VH} - \nu_H}{n + 2 - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

すなわち、水平供試体の間隙水圧は

$$\Delta u_H = \Delta \sigma_3 + A_H (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

ここに
$$A_H = \frac{1 - n\nu_V\nu_H - \nu_H}{n + 2 - 4n\nu_V\nu_H - 2\nu_H} \quad (26)$$

となり、 A_H が水平供試体の間隙圧係数である。式(25)、(26)から明らかなように、間隙圧係数は骨格構造の異方弾性パラメータで表現でき、間隙水圧の挙動は異方性であることがわかる。等方弾性体の場合 $A = A_V = A_H = 1/3$ となりSkemptonの間隙圧係数と一致する。

ところで、式(20)における間隙水圧は平均応力と偏差応力による間隙水圧に分離され次式で示される。

$$\Delta u = \Delta\sigma_m + (A - \frac{1}{3})(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (27)$$

ここに、 $\Delta\sigma_m = (\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3)/3$

この式を変形すると

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_m} = 1 + (A - \frac{1}{3}) \frac{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)}{\sigma_m}$$

側圧 σ_3 一定の三軸圧縮試験では、主応力差の増加 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ とともに平均応力 $\Delta\sigma_m$ は $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)/3$ だけ増大することになるから、上式の左辺の $\Delta u/\Delta\sigma_m$ はそのままにして右辺で $\Delta\sigma_m = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)/3$ とし、 A について整理すると

$$A = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_m} \quad (28)$$

すなわち、弾性領域では Δu と $\Delta\sigma_m$ の比が一定となり、その比の $1/3$ が間隙圧係数として求まる。赤井ら³⁾は等方性である多孔質凝灰岩を $\Delta u \sim \Delta\sigma_m$ 関係で整理し、これらの関係が 45° の直線上にあること、すなわち $\Delta u/\Delta\sigma_m = 1$ から $A = 1/3$ を求め、理想等方弾性として挙動することを示した。

島尻層泥岩の鉛直供試体と水平供試体について、平均応力増分と間隙水圧の関係の代表例を示したのがFig.10である。 Δu と $\Delta\sigma_m$ の関係は、図中のA点までである勾配の直線関係、A点からB点までは別の勾配であるが、やはり直線関係を示し、B点以降では非線形となっている。A点までの平均応力増分と間隙水圧変化の関係をみると、鉛直供試体では $\Delta\sigma_m$ の増分より大きな間隙水圧変化を、水平供試体では $\Delta\sigma_m$ の増分より小さな間隙水圧変化を示し、しかも等方弾性体に対する 45° 線上になく明らかに異方性である。A点以後の線形が初期の線形から下方へ離脱するのは間隙水圧の減少、すなわち体積膨張傾向を、また水平供試体の $\sigma_c^0 = 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合のように上方への離脱は体積圧縮傾向を表わし、AB間でせん断による体積変化、いわゆるダイレイタンス挙動を示していることが明らかである。しかも、この

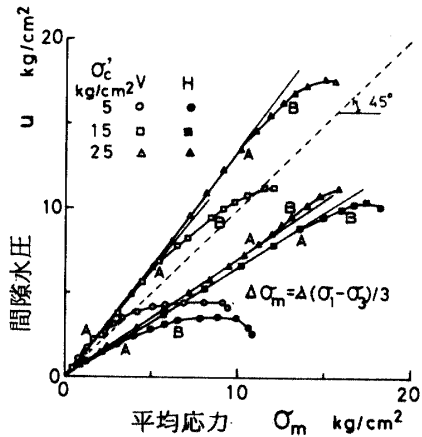


Fig. 10 非排水圧縮せん断過程の平均応力増分と間隙水圧増分の関係

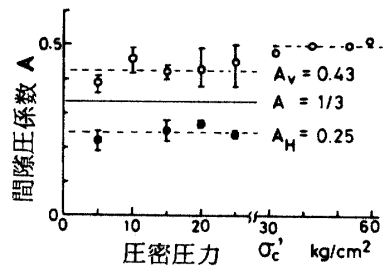


Fig. 11 間隙圧係数と圧密圧力の関係

A, B 点はFig.3に示した有効応力径路上のA点, B点に対応するものである。従って、A点までを骨

格構造の弾性挙動とみなし、その直線の勾配の1/3として求めた間隙圧係数 A_V , A_H を圧密圧力に対して示すと Fig.11 となる。 $\sigma_c = 30 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ における A_V は平均0.5と大きな値を示すが、 $\sigma_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ 以下に限定すると A_V , A_H はともに圧密圧力の影響がみられず、平均値はそれぞれ $A_V = 0.43$, $A_H = 0.25$ である。一方、A B間はダイレイタンスー過程にあるのでせん断応力の増加に伴って間隙圧係数は変化する。これをA点からB点までの間隙圧係数の変化量で示すと、その変化量は原点とB点を結んだ直線の勾配の1/3の値と骨格構造の弾性挙動としての A_V あるいは A_H との差で示される。そこでその変化量を各圧密圧力での平均値の差で求めると、鉛直供試体では $\sigma_c = 30 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ の領域を含めて、 $-0.06 \leq \Delta A_V \leq -0.02$, 水平供試体では $\sigma_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ の場合の増加をも含めると $-0.06 \leq \Delta A_H \leq 0.02$ で、その変化量は著しいものではない。なお、A B間の間隙圧係数は、式(28)で $\Delta \sigma_m = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)/3$ として $A = \Delta u / \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ で示される。

また、有効応力径路の勾配 M_V , M_H は間隙圧係数 A_V , A_H と次の関係にある。

$$M_V = -2 \frac{A_H}{A_V}, \quad M_H = -\left(1 + \frac{A_V}{A_H}\right) \quad (29)$$

2. 非排水圧縮におけるヤング率

非排水三軸圧縮試験から求まるヤング率 E_U は排水三軸圧縮試験、すなわち有効応力状態でのヤング率 E とは異なったものである。

Henkel⁷⁾ は非排水ヤング率 E_U と M_V , M_H , 異方弾性パラメータの関係を次のように求めている。鉛直供試体に対し、

$$E_{UV} = \frac{\Delta \sigma_a}{\epsilon_a} = E_V \left(\frac{M_V - 1}{M_V - 2\nu_{VH}} \right) \quad (30)$$

水平供試体に対し

$$E_{UH} = \frac{\Delta \sigma_a}{\epsilon_a} = E_H \frac{(1 - M_H)}{1 - (\nu_H + n\nu_{VH})M_H} \quad (31)$$

一方、Starzewski¹³⁾ は、間隙圧係数 A_V を利用した鉛直供試体のヤング率を、式(4)に $\Delta \sigma'_1 = (1 - A_V)\Delta \sigma'_1$ および $\Delta \sigma'_3 = -A_V \Delta \sigma_1$ を代入して次の関係で示している。

$$E_{UV} = \frac{\Delta \sigma_1}{\epsilon_a} = \frac{E_V}{1 - A_V(1 - 2\nu_{VH})} \quad (32)$$

この関係は水平供試体についても A_H を用いれば、 $\epsilon_a = [\Delta \sigma'_1 - (\nu_H + n\nu_{VH})\Delta \sigma'_3] / E_H$, $\Delta \sigma'_1 = \Delta \sigma_1 - \Delta u = (1 - A_H)\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma'_3 = -\Delta u = -A_H \Delta \sigma_1$, なる関係から

$$E_{UH} = \frac{\Delta \sigma_1}{\epsilon_a} = \frac{E_H}{1 - A_H(1 - n\nu_{VH} - \nu_H)} \quad (33)$$

式(30)と(32)または式(31)と(33)は、異方弾性パラメータだけで表示すると同一の式となり、ヤング率は間隙圧係数 A_V あるいは A_H で表示できる。また、非排水ヤング率の比 N は式(32)と(33)を用いると

$$N = \frac{E_{UH}}{E_{UV}} = n \frac{1 - A_V(1 - 2\nu_{VH})}{1 - A_H(1 - n\nu_{VH} - \nu_H)} \quad (34)$$

となる。この式はUriel¹⁴⁾ によって求められた次の異方弾性パラメータ表示式と同一のものである。

$$N = \frac{2n(1 - \nu_H - 2n\nu_{VH}^2)}{(1 - 2n\nu_{VH} + n - n^2\nu_{VH}^2 - 2n\nu_{VH}\nu_H - \nu_H^2)} \quad (35)$$

一般に、地盤材料のヤング率は応力～ひずみ関係における最大応力の1/2点と原点の割線係数としての E_{50} , あるいは応力～ひずみ曲線の原点における初期接線係数 E_i が用いられる。周知のように、排水三軸圧縮試験では E_{50} と E_i は比較的一致するが、非排水試験ではそれらに差異が生ずるといわれ、またヤング率はせん断開始時の応力状態あるいはそれ以前の応力履歴に影響されるといわれている。

Atkinson⁵⁾は、非線形の応力～ひずみ曲線の任意のひずみ測定点jにおけるヤング率Etを

$$E_t(j) = \frac{\sigma'(j+1) - \sigma'(j-1)}{\epsilon_a(j+1) - \epsilon_a(j-1)} \quad (36)$$

ここに $\sigma' = (\sigma_1 - \sigma_3)$, ϵ_a : 軸ひずみ

として求め、 $\epsilon_a(j)$ に $E_t(j)$ をプロットして、 $\epsilon_a = 0$ での値を E_i としている。このように求めた E_{UV} , E_{UH} と圧密圧力の関係を示すとFig.12となる。図からわかるように、圧密圧力の増加に伴ってヤング率は増大する傾向にある。また、平均値に対するヤング率の比 N も同時に示したが、 N は圧密圧力に無関係ではば一定値を示し、その平均は $N = 1.54$ である。一方、Fig.13には E_{50} による E_{UV} , E_{UH} を圧密圧力に対して示してあるが、 E_i の場合と同じように圧密圧力の増加に伴い増大し、その値は E_i の場合に比べて小さいが、 N はやはり圧密圧力に無関係で、その平均は $N = 1.60$ であって、 E_i の場合とほぼ一致している。従って、決定法の便宜さを考慮すると、 N は E_{50} から求めても支障がないといえよう。

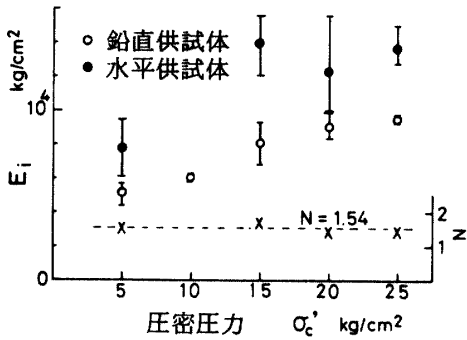


Fig.12 非排水初期接線ヤング率と圧密圧力の関係

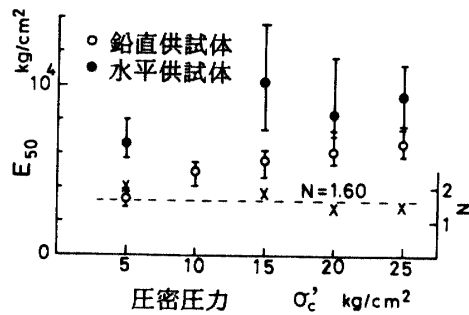


Fig.13 非排水E50と圧密圧力の関係

3. 異方弾性パラメータの決定

異方弾性パラメータ n , E_V (E_H), ν_{VH} , ν_H は、鉛直および水平供試体について排水せん断試験を行えば、式(16)から決定できるが、ここでは非排水せん断試験結果に基づいてパラメータを決定しようとするものである。また、全応力と有効応力による弾性パラメータを区別するために全応力による異方弾性パラメータを明確にしておく。式(2)を全応力表示に書き改めて異方弾性パラメータを N , E_{UV} (E_{UH}), ν_{UVH} , ν_{UH} とすると、非排水条件では $\epsilon_v = 0$ となるので、

鉛直供試体の場合

$$N(1 - 2\nu_{UVH})\Delta\sigma_1 + 2(1 - \nu_{UH} - N\nu_{UVH})\Delta\sigma_3 = 0 \quad (37)$$

水平供試体の場合

$$(1 - \nu_{UH} - N\nu_{UVH})\Delta\sigma_1 + (1 + N - \nu_{UH} - 3N\nu_{UVH})\Delta\sigma_3 = 0 \quad (38)$$

両式はいかなる応力径路に対しても成立しなければならない。従って、両式を満足するためには

$$\nu_{UVH} = \frac{1}{2}, \quad \nu_{UH} = 1 - N/2 \quad (39)$$

すなわち、 N , E_{UV} (E_{UH}), G の3つがわかれば全応力による異方弾性挙動を記述でき、さらに等方弾性体では $G = E_U/2(1 + \nu_U)$, $\nu_U = 1/2$ なる周知の関係から E_U だけ求めればよいこととなる。島尻層泥岩の異方弾性パラメータは $N = 1.60$, $\nu_{UVH} = 0.5$, $\nu_{UH} = 0.2$ で与えられる。

さて、非排水せん断試験に基づいて有効応力による異方弾性パラメータを決定するために、Henkel⁷⁾は、その仮定の根拠は定かでないが、London clayについて $\nu_H = (\nu_{HV} + \nu_{VH})/2 = \nu_{VH}(1 + n)/2$ なる仮定を行ったが、後に排水せん断試験による結果と矛盾することがAtkinson⁵⁾によって指摘され

た。従って、非排水せん断試験だけでは異方弾性パラメータは求まらず、何らかの排水試験を必要とする。ここでは、鉛直供試体の排水せん断試験から ν_{VH} が既知であるとし、圧密非排水せん断試験での測定量と異方弾性パラメータの関係を再度次の関係で示す。

$$a_r = \frac{A_v}{A_H} = \frac{n(1-2\nu_{VH})}{1-n\nu_{VH}-\nu_H} \quad (40)$$

$$m_r = M_v M_H = \frac{2(1+n-\nu_H-3n\nu_{VH})}{n(1-2\nu_{VH})} = 2\left(1 + \frac{1}{a_r}\right) \quad (41)$$

$$N = n \frac{1-A_v(1-2\nu_{VH})}{1-A_H(1-n\nu_{VH}-\nu_H)} \quad (34)$$

ここに、式(40)と(41)は等価で、しかも測定量 a_r 、 m_r 、 N は全応力量であるから、上記3式から求まるパラメータは式(39)と一致することになる。そこで、 ν_{VH} は既知量として、式(40)と(34)から残りの ν_H 、 n を求めようとすると、 A_v 、 A_H 、 N および ν_{VH} は圧密圧力の影響を受けないことが実験的に明らかにされているので、 ν_H 、 n も圧密圧力に無関係であるとする。式(40)を ν_H について解くと

$$\nu_H = 1 - \frac{[1 - (2 - a_r)\nu_{VH}]}{a_r} \quad n = 1 - bn$$

$$\text{ここに} \quad b = \frac{[1 - (2 - a_r)\nu_{VH}]}{a_r}$$

$\nu_H = 1 - bn$ を式(34)に代入し、 n について整理すると

$$n = \frac{N}{1 - A_v(1 - 2\nu_{VH}) - A_H N(\nu_{VH} - b)}$$

いま、既知量あるいは測定量を、 $\nu_{VH} = 0.14$ 、 $A_v = 0.43$ 、 $A_H = 0.25$ ($a_r = 1.72$)、 $N = 1.60$ 、とすると $b = 0.56$ となり、これより $n = 1.86$ 、 $\nu_H = -0.04$ が求まる。すなわち、島尻層泥岩の異方弾性パラメータは

$$n = 1.86, \nu_{VH} = 0.14, \nu_H = -0.04$$

となり、しかもこの値は条件式(3)を満足するものである。

以上ここでは、非排水せん断試験の有効応力径路の測定量としての間隙水圧に支配されることから、間隙水圧そのものに注目して弾性挙動を検討した。土の骨格構造の弾性領域では間隙水圧の変化そのものが異方性で、その挙動はSkemptonの間隙圧係数 A と類似の間隙圧係数で表現できる。しかも、この間隙圧係数は間隙水圧と平均応力の関係から求まり、異方弾性挙動のパラメータとして有効である。有効応力径路の勾配 M および非排水ヤング率は間隙圧係数で現わすことができる。なお、非排水せん断試験結果だけでは有効応力による異方弾性パラメータを決定できないが、排水試験データの一部であれば可能となり、ここでは鉛直供試体の排水試験結果と間隙圧係数、非排水ヤング率比から異方弾性パラメータを決定する手法について示した。この手法は既往の非排水せん断試験結果を利用する場合に参考になるとと思われる。このことに関連して、異方弾性挙動に対する有効応力径路の他の表示法の特性について次に検討しておく。

4. 他の有効応力径路表示について

土の有効応力径路を示すのに $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 関係、および $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \sim \sigma'_m = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 関係がよく用いられる。鉛直および水平供試体に限定するが、これらの有効応力径路を M_v 、 M_H あるいは A_v 、 A_H 、また異方弾性パラメータ n 、 ν_{VH} 、 ν_H と関係付けておくことは既往の試験結果を利用する場合、また等方弾性体と比較する場合有用である。

$$(i) \quad (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 \sim (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 \text{ 関係}$$

鉛直供試体の場合

$$\frac{\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'}{\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3'} = \frac{Mv - 1}{Mv + 1} = - \frac{Av + 2Ah}{Av - 2Ah} = \frac{2 + n - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H}{2 - 2\nu_H - n} \quad (42)$$

水平供試体の場合

$$\frac{\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'}{\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3'} = \frac{MH - 1}{MH + 1} = \frac{Av + 2Ah}{Av} = \frac{2 + n - 2\nu_H - 4n\nu_{VH}}{n(1 - 2\nu_{VH})} \quad (43)$$

等方弾性体の場合、 $n = 1$ 、 $\nu = \nu_{VH} = \nu_H$ とすると、式(42)、(43)はともに3となり、有効応力径路の向きは勾配3の直線で示される。

Fig.14は実験結果を例示したものである。先に求めた異方弾性パラメータを用いて計算した径路の向きは、 $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ 軸から反時計方向に、鉛直供試体で $\beta_V = 86^\circ$ 、水平供試体で $\beta_H = 65^\circ$ （等方弾性体で $\beta = 72^\circ$ ）となり、実験結果と比較的よく一致している。

(ii) $(\sigma_1' - \sigma_3') \sim \sigma_m'$ 関係

鉛直供試体の場合

$$\frac{\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'}{\Delta\sigma_m'} = 3 \frac{Mv - 1}{Mv + 2} = - \frac{3}{2} \frac{Av + 2Ah}{Av + Ah} = \frac{3}{2} \frac{2 + n - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H}{1 - \nu_H - n(1 - \nu_{VH})} \quad (44)$$

水平供試体の場合

$$\frac{\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'}{\Delta\sigma_m'} = 3 \frac{Mv - 1}{Mv + 2} = 3 \frac{Av + 2Ah}{Av - Ah} = -3 \frac{2 + n - 4n\nu_{VH} - 2\nu_H}{1 - \nu_H - n(1 - \nu_{VH})} \quad (45)$$

等方弾性体の場合、 $n = 1$ 、 $\nu = \nu_{VH} = \nu_H$ とすると、式(44)、(45)はともに、 $\frac{\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'}{\Delta\sigma_m'} = \infty$ 、となり、有効応力径路の向きは σ_m' 軸に垂直となる。

Fig.15に実験結果が例示されている。径路の向きを σ_m' 軸から反時計方向に β をとると、異方弾性パラメータによる予測値は、 $\tan \beta_V = -\tan(180^\circ - \beta_V) = -7.76$ 、 $\tan \beta_H = 15.5$ から、 $\beta_V = 97^\circ$ 、 $\beta_H = 86^\circ$ となる（等方弾性体では $\beta = 90^\circ$ ）。ただし、図では縦軸を $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ で示してあるから $\beta_V = 104^\circ$ 、 $\beta_H = 83^\circ$ となって、これも比較的よく一致している。

また、式(44)と(45)の比をとると

$$\frac{\tan \beta_V}{\tan \beta_H} = -\frac{1}{2} \quad (46)$$

となり、鉛直あるいは水平供試体のどちらか一方の有効応力径路がわかれば他方の径路も推定できることを意味する。すなわち、 β_V が既知のとき、 β_H は次式で求まる。

$$\beta_H = \beta_V - \tan^{-1} \left(\frac{3 \tan \beta_V}{1 - 2 \tan^2 \beta_V} \right) \quad (47)$$

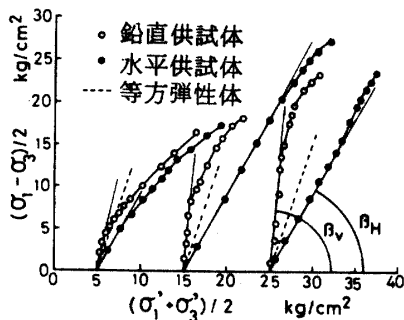


Fig.14 有効応力径路に及ぼす異方性の影響

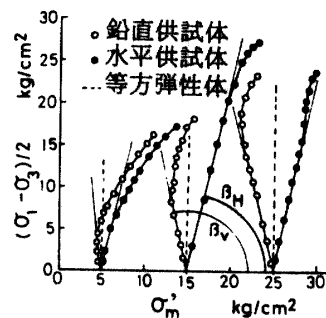


Fig.15 $(\sigma_1' - \sigma_3')/2 \sim \sigma_m'$ 関係に及ぼす異方性の影響

IV 排水せん断試験における弾性挙動

1. 排水三軸圧縮試験によるヤング率

排水せん断試験は鉛直供試体だけについて行っているため、水平供試体の挙動をも予測することを含めて、排水せん断による弾性挙動について検討する。

島尻層泥岩の水平供試体の弾性挙動は、すでに求めた異方弾性パラメータ n , ν_{VH} , ν_H で予測されるので、その妥当性を E_V で確かめてみる。排水試験によるヤング率は E_{50} と E_I がほぼ一致しているため、ここでは E_{50} から求めた E_V を圧密圧力に対して示したのが Fig. 16 である。この E_V は E_{UV} 及び E_{UH} と同様、圧密圧力の増加に伴って増大する傾向にある。また、式(32), (33) から非排水ヤング率は $E_{UV} = 1.45 E_V$, $E_{UH} = 2.31 E_V$ として推定できるので、その結果も実測値と比較して示してある。推定値と実測値はよく一致することがわかる。

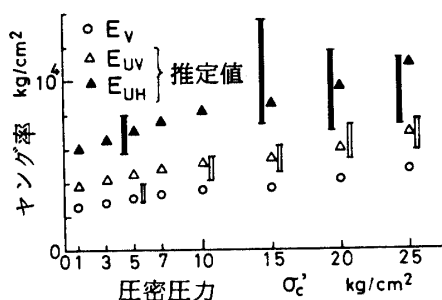
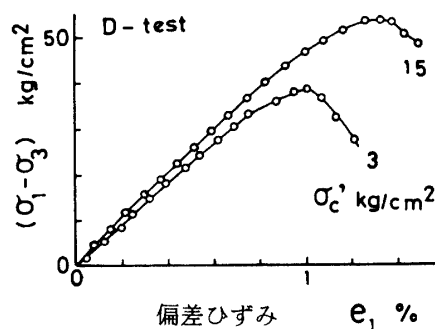
Fig. 16 E_V と推定 E_U の比較

Fig. 17 偏差ひずみと主応力差の関係

2. 排水せん断試験における弾性定数

Fig. 17 は排水せん断試験による主応力差と偏差ひずみの関係を、また Fig. 18 は主応力差と体積ひずみの関係を示したものである。

等方弾性理論によると次式が成立する。

$$\epsilon_v = \sigma'_m / K, \quad e_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3G \quad (48)$$

ここに、 ϵ_v : 体積ひずみ, $\sigma'_m = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3$: 平均有効応力, $e_1 = \epsilon_a - \epsilon_v / 3$: 偏差ひずみ, σ'_1, σ'_3 : 軸方向ならびに側方応力成分, K : 体積弾性係数, G : せん断弾性係数。従って、 ϵ_v と σ'_m の関係から K が、 e_1 と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の関係から G が決定できる。しかし、ここでは異方弾性体を対象とし、実験は主応力方向と異方弾性対称軸が一致する場合を取扱っているから、上記の K と G にはサフィクスとして鉛直供試体に V , 水平供試体に H を付す。ただし G_V, G_H は式(2)における G_{VH} とは区別されるもので、 e_1 と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を関係付ける定数である。また、側圧一定の軸対称三軸圧縮試験を対象とする。

等方応力状態での体積弾性係数 $K_{(i-p)}$ は式(23)の逆数で示される。

$$K_{(i-p)} = \frac{nE_V}{n+2-4n\nu_{VH}-2\nu_H} \quad (49)$$

一方、排水せん断試験では $\Delta\sigma'_m = \Delta\sigma'_1 / 3$ となるから、鉛直供試体の場合、 $\epsilon_v = \Delta\sigma'_1(1-2\nu_{VH}) / E_V = \Delta\sigma'_1 / 3K_V$ より

$$K_V = \frac{E_V}{3(1-2\nu_{VH})} \quad (50)$$

水平供試体の場合、 $\epsilon_v = \Delta\sigma'_1(1-n\nu_{VH}-\nu_H) / E_V = \Delta\sigma'_1 / 3K_H$ より

$$K_H = \frac{E_H}{3(1 - n\nu_{VH} - \nu_H)} \quad (51)$$

等方弾性体の場合、 $n=1, E = E_V = E_H, \nu = \nu_{VH} = \nu_H$ とすれば、 $K = K_{(i-p)} = K_V = K_H = E/2(1 - 2\nu)$ なる周知の関係となり、等方圧密試験と排水せん断試験の K は一致する。飽和試料のせん断試験では本実験同様、排水促進のためペーパードレインがよく使用されるが、赤井ら³⁾は等方圧密試験でドレイン自体の圧密排水量を補正するのに難点があることから、側圧一定の排水型三軸圧縮せん断試験から K を求めることを提案している。しかし、異方弾性体では、排水せん断試験から求まる K_V あるいは K_H は、等方圧密試験による $K_{(i-p)}$ とは異ったものである。

次に、式(48)は偏差応力として考慮されているが、偏差応力は $\Delta\sigma'_1 - \Delta\sigma'_m = \frac{2}{3}\Delta\sigma'_1$ となるので鉛直供試体の場合、 $e_1 = \epsilon_a - \epsilon_v/3 = 2(1 + \nu_{VH})\Delta\sigma'_1/3E_V = \Delta\sigma'_1/3G_V$ より

$$G_V = \frac{E_V}{2(1 + \nu_{VH})} \quad (52)$$

水平供試体の場合、 $e_1 = (2 + n\nu_{VH} + \nu_H)\Delta\sigma'_1/3E_H = \Delta\sigma'_1/3G_H$ より

$$G_H = \frac{E_H}{2 + n\nu_{VH} + \nu_H} \quad (53)$$

等方弾性体の場合 $G = G_V = G_H = E/2(1 + \nu)$ の周知の関係となる。また、等方弾性体におけると同様、それぞれの向きの供試体に対して次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} E_V &= 9K_V G_V / (3K_V + G_V) \\ 2\nu_{VH} &= (3K_V - 2G_V) / (3K_V + G_V) \\ E_H &= 9K_H G_H / (3K_H + G_H) \\ \nu_H + n\nu_{VH} &= (3K_H - 2G_H) / (3K_H + G_H) \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

これらの式の(2), (4)は、式(17)の D_V, D_H を K_V, G_V, K_H, G_H で表現していることになる。

n, ν_{VH}, ν_H が既知であれば、 K_V, G_V は E_V から推定でき、さらに $n = E_H/E_V$ を考慮すると、 K_H, G_H も E_V から推定可能である。また、これらは E_V 同様、圧密圧力の影響を受けることが明らかである。島尻層泥岩では $K_V = 0.46E_V, G_V = 0.44E_V$ となり、 K_V と G_V はほぼ等しい結果となっている。

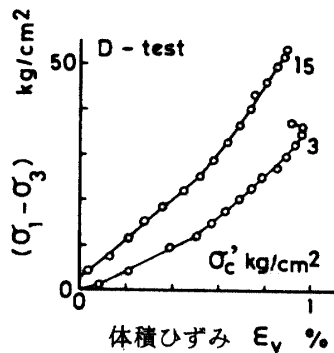


Fig. 18 体積ひずみ主応力差の関係

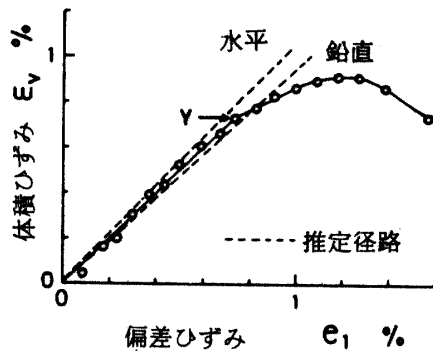


Fig. 19 ひずみ径路

3. ひずみ径路

Fig. 19は $\sigma'_c = 10 \text{ kg/cm}^2$ における体積ひずみと偏差ひずみの関係を示したものである。図中のY点まで線形関係にあって、その後非線形となることはFig. 2の体積ひずみ～軸ひずみ関係と同じで、Y点は降伏点に一致している。この直線の勾配、すなわち体積ひずみ ϵ_v と偏差ひずみ e_1 の比を異方弾性パラメータ

および図中の α_V を用いて示すと次式となる。

$$\left(\frac{\epsilon_V}{e_1}\right)_V = \frac{3(1-2\nu_{VH})}{2(1+\nu_{VH})} = \tan \alpha_V \quad (55)$$

これを変形すると

$$\nu_{VH} = \frac{3-2\tan \alpha_V}{2(3+\tan \alpha_V)} = \frac{1-\frac{2}{3}\tan \alpha_V}{2(1+\frac{1}{3}\tan \alpha_V)}$$

となり、この直線の勾配から ν_{VH} が求まる。上式を式(54)の(2)と比較すると次式となる。

$$G_V/K_V = \tan \alpha_V \quad (56)$$

すなわち、 $\tan \alpha_V$ が一定であるということは、偏差応力の増加に伴い G_V 、 K_V が変化するとしてもその比が一定であるように変化することになる。

水平供試体について $\epsilon_V \sim e_1$ 関係の直線関係を予測すると

$$\left(\frac{\epsilon_V}{e_1}\right)_H = 3 \frac{1-\nu_H-n\nu_{VH}}{2+\nu_H+n\nu_{VH}} = \tan \alpha_H \quad (57)$$

これより

$$\nu_H + n\nu_{VH} = \frac{1-\frac{2}{3}\tan \alpha_H}{1+\frac{1}{3}\tan \alpha_H}$$

これと式(54)の(4)と比較すると次式となる。

$$G_H/K_H = \tan \alpha_H \quad (58)$$

いま、異方弾性パラメータを $n=1.86$ 、 $\nu_{VH}=0.14$ 、 $\nu_H=-0.04$ とすれば、 $(\epsilon_V/e_1)_V=0.95$ 、 $(\epsilon_V/e_1)_H=1.05$ となり、この関係はFig.19に破線で示してある。 $(\epsilon_V/e_1)_V=0.95$ は実験結果とわずかにずれているが、 $(\epsilon_V/e_1)_V$ と $(\epsilon_V/e_1)_H$ とを比較すると、その径路の差はわずかである。また、その径路は $G_V=0.44 E_V$ と $K_V=0.64 E_V$ との比あるいは $G_H=0.45 E_H$ と $K_H=0.43 E_H$ との比から求めた結果とも一致する。

Atkinson⁵⁾は、London clayの D_V 、 D_H は圧密圧力の影響を受けるが、両者には差がないことから $D_V \approx D_H$ とおき、 $2\nu_{VH} = \nu_H + n\nu_{VH}$ から次式を求めた。

$$\nu_H = \nu_{VH}(2-n) \quad (59)$$

$n=1$ とすれば $\nu_H = \nu_{VH}$ となり等方性を満足し、また、排水試験から求めたLondon clayの値 $n=2$ 、 $\nu_H=0$ 、 $\nu_{VH}=0.19$ を満足するもので、 $n>1$ のときは $\nu_{VH} > \nu_H$ となることが妥当であるとしている。島尻層泥岩では $D_V=0.28$ 、 $D_H=0.22$ であるが、これをあえて $D_V \approx D_H$ とすれば式(59)の適用が可能となるであろうが、あくまでも ν_H を求めるのに利用すべきである。一方、Starzewski¹³⁾によるLias clayの結果は $n=3.97 \sim 6.37$ 、 $\nu_{VH}=0.04$ 、 $\nu_H=-0.35$ であるが、 $n=3.97 \sim 6.37$ 、 $\nu_{VH}=0.04$ として式(59)を利用すると、 $\nu_H = -0.08 \sim -0.21$ となり、実験値と著しく異っている。このことは、 n が大きい場合は経験式としての式(59)は不適当で、 n が2前後のとき適用可能と考えられる。

以上、ここでは鉛直供試体の排水せん断試験について述べ、水平供試体の弾性挙動を推定した。すなわち、ヤング率 E_V を求め、これから非排水ヤング率を推定して実験値と比較するとよく合うことがわかった。そして鉛直および水平供試体のそれぞれの弾性定数 K_V 、 G_V あるいは K_H 、 G_H と n 、 E_V 、 ν_{VH} 、 ν_H との関係を求め、それらの関係はそれぞれの供試体で等方弾性体における関係と等価な関係にあることがわかった。また、島尻層泥岩は非排水せん断試験では異方性が顕著であるのに比較し、ひずみ径路の異方性は著しくない。このことについてはさらに詳細な排水せん断試験を必要とする。

V 結 論

本研究においては、先に報告した非排水および排水型三軸圧縮試験の結果^{10,11)}に基づき、弱固結粘土

岩としての島尻層泥岩の弾性挙動を異方性の観点から検討し、線形異方弾性理論を適用して若干の考察を加えることにより、間隙水圧ならびに変形挙動の異方性を明らかにした。その結果を要約すると次のようになる。

1. 著しく過圧密された硬質粘土、ならびに骨格粒子間に結合力をもつ多孔質凝灰岩の弾性挙動に関する従来の研究を有効応力径路とひずみ径路について検討し、その結果と本実験に用いた泥岩の挙動と比較したところ、この泥岩を含めて粒子間結合力をもつ軟岩の弾性挙動は、骨格構造の弾性過程とダイレイタンスーを伴う弾性過程とからなることが明らかとなった。骨格構造の弾性挙動は続成作用によってもたらされた粒子間結合力の寄与によるものと考えられ、せん断応力が増加して結合力の強さを越えると、骨格の局部的破壊を生じてダイレイタンスー挙動に移行すると考えられる。

2. 実験に使用した泥岩の弾性挙動は、非排水試験での有効応力径路の線形関係あるいは排水試験での体積ひずみと軸ひずみ、または偏差ひずみとの関係、すなわちひずみ径路の線形関係で示されるが、これは骨格構造の弾性挙動としての線形関係と、それとは勾配を異にしたダイレイタンスーを伴う弾性挙動としての線形関係とからなる。しかし、先に報告した実験結果だけでは、ひずみ径路に関する両者の区別が明確でなかった。弾性限界は、この直線関係からの離脱点として決定され、その応力値は応力～ひずみ関係を両対数紙上に求めて得られる折点で定義される降伏応力と一致する。このようにして求めた降伏応力は平均有効応力 σ'_m と非線形関係にあり、しかも非排水試験による結果は一致する。

3. この弾性領域での有効応力径路は鉛直および水平供試体で著しく異なり、実験試料の泥岩は明らかに異方弾性体である。有効応力径路を支配するのは間隙水圧である。従って、間隙水圧特性に注目し、この泥岩の異方弾性挙動を検討した。

4. 弾性領域内で、間隙水圧は平均応力と線形関係にある。この線形関係は、骨格構造の弾性挙動とダイレイタンスーを伴う弾性挙動に区分される。骨格構造の弾性領域における間隙水圧増分 Δu は平均応力の増分 $\Delta \sigma_m$ に比べて鉛直供試体では大きく、水平供試体では小さな値を示し、間隙水圧の挙動そのものが異方性にある。その挙動は、Skemptonの間隙圧係数Aと同様、それぞれの軸方向をもつ供試体について式(25)と式(26)の間隙圧係数 A_v 、 A_H で表現できる。しかも、これは異方性の程度を示すパラメータとなり、ヤング率とも関係づけられるものである。

5. ダイレイタンスーを伴う弾性過程は、鉛直供試体では $\sigma'_c = 60 \text{ kg/cm}^2$ でも体積膨張傾向、すなわち間隙水圧の減少にあるのに比べ、水平供試体では $\sigma'_c = 25 \text{ kg/cm}^2$ ですでに体積圧縮傾向、すなわち間隙水圧の増加に移行する。この過程で間隙圧係数は変化するが、全過程を通じての変化量は骨格構造の過程の一定値に比べて顕著なものではない。

6. この泥岩の異方弾性パラメータ n 、 ν_{VH} 、 ν_{H} は、非排水試験からの A_v 、 A_H 、ヤング率比 N と鉛直供試体の排水せん断試験結果とを利用して求められた。これらの値は圧密圧力の影響を受けない。

7. 排水せん断試験は鉛直供試体だけについて行っているため、先に求めた異方弾性パラメータを用いて水平供試体の弾性変形挙動を予測したが、ひずみ径路の異方性は間隙水圧におけるほど顕著ではない。また、側圧一定の三軸圧縮試験の弾性域から求まる鉛直ならびに水平供試体のそれぞれの弾性定数 K_v 、 G_v あるいは K_H 、 G_H は等方弾性体の場合と等価な関係にあつて、しかも n 、 ν_{VH} 、 ν_{H} を用いて E_v と関係づけられ、圧密圧力の影響を受けるものである。

以上の結論はさらに詳細な排水せん断試験を行って確認する必要があるが、そのことと併せて、種々の応力・変形条件下での挙動を原地盤に適合させた変形問題として、今後さらに究明されなければならない。

参 考 文 献

1. Akai, K., Adachi, T. and Nishi, K. 1977 Mechanical properties of soft rocks, Proc. the 9th I C S M F E, Vol. 1, p7 ~ 10
2. _____, _____, and Fujimoto, K. 1977 Constitutive equations of geomechanical materials based on elasto-visco plasticity, Constitutive Equations of Soils, Proc. speciality session 9, 9th I C S M F E, p1 ~ 10
3. 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一 1978 堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾・塑性挙動, 土木学会論文報告集, 271 : 83 ~ 95
4. Atkinson, J. H 1973 Elasticity and plasticity in soils, Geotechnique 23 : 565 ~ 571
5. _____ 1975 Anisotropic elastic deformation in laboratory test on undisturbed London clay, Geotechnique, 25 : 357 ~ 374
6. Barden, L. 1963 Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil, Geotechnique, 13 : 198 ~ 210
7. Henkel, D. J. 1972 The relevance of laboratory-measured parameters in field studies, Proc. the Roscoe Memorial Symposium, p 669 ~ 675
8. J. C. ジェーガー著, 飯田汲事訳 1968 弾性・破壊・流動論, 共立出版, 東京, p67 ~ 73
9. Pickering, D. J. 1970 Anisotropic elastic parameters for soil, Geotechnique, 20 : 271 ~ 276
10. 新城俊也 1976 島尻層岩泥のせん断特性, 琉大農学報, 23 : 237 ~ 254
11. _____ 1976 島尻層泥岩の強度異方性, 琉大農学報, 23 : 255 ~ 267
12. Skempton, A. W. 1954 The pore-pressure coefficients A and B, Geotechnique, 4 : 143 ~ 147
13. Starzewski, K. and Thomas, C. P. 1977 Anisotropic behaviour of an overconsolidated clay, Proc. the 9th I C S M G E, Vol. 1, p305 ~ 310
14. Uriel, A. O. and Cañizo, L. 1971 On the elastic anisotropy of soil, Geotechnique, 21 : 262 ~ 267

Summary

This paper is discussed with regard to the anisotropic elastic behavior of clay-stones with weak bonds based on pore pressure coefficients derived from the application of cross-anisotropic elastic theory to samples with vertical and horizontal axis in axi-symmetric triaxial compression tests. The results are summarized as follows.

1. The elastic behavior of clay-stones can be identified with a linear effective stress path in undrained condition and a linear strain path in drained condition. The region of those behavior consists of both elastic deformation of clay skeleton and elastic deformation with dilatancy.
2. The elastic limit is determined as the stress corresponding to the departure point from a linear effective stress path or strain path and this stress is identified with the yield stress, measured as the stress corresponding to the bending point of stress-strain curve on a logarithmic paper.
3. The effective stress path of vertical samples is remarkably different from that of horizontal samples. Therefore the effective stress path is clearly anisotropic.
4. The anisotropic behavior of pore pressure can be shown by the pore pressure coefficients denoted by A_V and A_H that were expressed by Eqs. (25) and (26) to vertical and horizontal samples. These values can easily be determined from the relationship between pore pressure and mean principal stress.
5. The anisotropic elastic parameters are obtained by making use of the results of drained tests for vertical samples and the parameters denoted by A_V , A_H and N , which are constant in spite of increasing consolidation pressure.
6. The relationship of anisotropic elastic parameters obtained from drained tests for vertical or horizontal samples is analogous to that of isotropic elastic material.