

# 繰り返し再圧密した島尻粘土の 変形特性に関する実験とその解析

原久夫<sup>1</sup>・上原方成<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 琉球大学助手 工学部環境建設工学科(〒903-01 沖縄県西原町千原1)

<sup>2</sup>正会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科(〒903-01 沖縄県西原町千原1)

本論文では、沖縄島の新第三紀中～新世「島尻層群(泥岩, 砂岩)」由来の島尻粘土(沖積層)の排水せん断試験から、弾性変形、遅延弾性変形、塑性変形の有効応力に関する変形定数を求めた結果を報告する。島尻粘土の変形特性を表すモデルとして本論文では、弾性、遅延弾性変形成分には一般化Voigtモデルを、塑性成分は修正Cam-Clayモデルを用いた。また有効応力に関する粘弾性定数を決定するための漸増載荷排水試験を提案し、その適用性を実験結果との照合によって検証した。

**Key Words:** Shimajiri clay, visco-elastic model, plasticity, drained test, effective stress path

## 1. はじめに

沖縄県本島中南部、宮古島などには、第三紀中新世から鮮新世にかけての海成堆積岩層である島尻層群が広く分布する。島尻層群中の泥岩は、第四紀琉球層群の下にある基盤層で、半固結～固結泥岩である。地殻変動などで隆起した島尻層泥岩が風雨により侵食され海域へ流出し、沿岸部に沖積軟弱層を形成し、正規圧密状態で堆積している。この沿岸域では近年浚渫又は埋め立て造成がなされ、港湾や臨海造成団地として活用されている。

この軟弱層については、たとえば、中城湾港地区で採取された不攪乱試料について、一軸圧縮強度、圧密特性など多くの基礎的特性が調べられている<sup>1),2)</sup>。これらの報告値は、本土各地の沖積粘土と比較しそれほど大きな差はないが、その報告値には、膨潤指数が含まれていないなど、地盤の精密な変形解析や有限要素法などの計算資料としては不十分なところがあった。

そこで沿岸沖積層の多様な工学的特性把握のため、繰り返し再圧密した島尻粘土を利用し、その変形特性を詳しく調べ、有効応力に関する変形パラメータを求める目的で、低応力レベルを含む広い応力範囲での繰り返し載荷による排水三軸圧縮試験を行った。その結果、島尻粘土の有効応力に関する変形諸定数を得ることができたので報告する。

表-1 島尻粘土の物理特性および弾塑性定数<sup>3)-6)</sup>

土粒子の密度	2.72~2.79 g/cm <sup>3</sup>
液性限界	53.7~71.4 %
塑性限界	22.7~27.6 %
粘土分	45.2~52%
シルト分	41~44.6%
砂分	7~10.2%
限界状態線の勾配: M	1.108~1.245
基準間隙比: e <sub>N</sub>	1.108~1.220
圧縮指数: λ	0.126~0.180
膨潤指数: κ	0.015~0.036

## 2. 試料土と実験の種類

### (1) 試料土: 島尻粘土

実験に使用した島尻粘土には、沖縄県西原町の丘陵部から採取された島尻層泥岩を準備した。島尻層泥岩をハンマーで打ち砕き、液性限界の2~3倍の含水比で攪拌した後、CBR試験用モールドに移し変え、高圧圧密試験機の載荷装置を利用し、49kPaの鉛直応力で一次元圧密し、実験用の供試体を作成した。圧密期間は20日である。

島尻粘土の物理特性、圧密特性などを表-1に示す。これらの諸数値は、筆者等がこれまでに行ってきた一連の島尻粘土を用いた実験によるもの

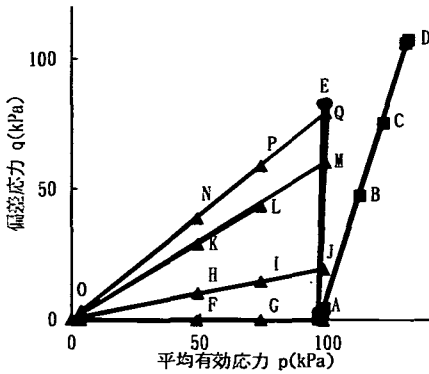


図-1 実験の応力経路概念図

で、標準圧密試験、等方圧密および異方圧密非排水三軸圧縮試験による実験値<sup>3),4),5),6)</sup>の代表値である。

## (2) 排水三軸圧縮試験の方法

実験は、パソコンを利用して荷重制御ができるように改良した三軸圧縮試験機を使用して行った。軸荷重はペロフラムシリンダーに空気圧を供給して与えた。側圧およびペロフラムシリンダー圧は最大5秒間隔で測定され、電空変換器によって応力経路に応じた所定値に補正する。また本研究では、供試体寸法は、直径5cm、高さ10cmとし、背圧はすべての実験をとおして98kPaとした。有効応力に関する変形パラメータを求めることを目的としているので、実験は間隙水圧がほとんど発生しないようなゆっくりとした応力速度(平均有効応力と偏差応力のベクトル合成応力速度で5.3~6.3kPa/min)を行った。なぜならば、このような応力速度で実験すれば、かなり長期の実験期間が必要とされるが、全応力と有効応力が一致し、直接的に土の応力とひずみの関係を調べることができるからである。

また弾性成分と塑性成分を明確に区分するため、いくつかの試験では除荷、再載荷をおこない、軸方向変位および体積変形について、回復した変形量を測定している。実験は圧縮領域のみで行い、その応力経路は次の5種類である(図-1参照)。

1. 等方圧密排水せん断試験<sup>5)</sup>:CID-test
2. 等方圧密排水せん断試験<sup>5)</sup>(くり返し載荷):CIDR-test
3. 等方圧密排水せん断試験<sup>6)</sup>(くり返し載荷+排水クリープ):CIDRC-test
4. 平均有効応力一定排水せん断試験<sup>7)</sup>(くり返し載荷):CP-test
5. 応力比一定圧密試験(くり返し載荷)<sup>8)</sup>:C $\eta$ -test
  - 1.のCID-testは標準的な排水三軸圧縮試験であり、2.のCIDR-testは、弾性変形量を調べるた

## 排水せん断試験の応力経路

1	CID	O→A→D
2	CIDR	O→A→B→A→C→A→D
3	CIDRC	O→A→B→B*→A→A*→ C→C*→A→A*→D
(B→B*などは24hrの放置期間を表す)		
4	CP	O→A→E→A→E
5-1	C $\eta$ ( $\eta=0$ )	O→F→O→G→O→A
5-2	C $\eta$ ( $\eta=0.2$ )	O→H→O→I→O→J
5-3	C $\eta$ ( $\eta=0.4$ )	O→K→O→L→O→M
5-4	C $\eta$ ( $\eta=0.8$ )	O→N→O→P→O→Q

め等方応力状態までの繰り返し載荷も行った試験である。さらに3.のCIDRC-testは、繰り返し載荷で荷重が変化するすべての応力点で24時間の放置期間をおいている。この期間に遅延弾性変形が生じ、変形が落ち着いたところ(せん断ひずみ、体積ひずみのひずみ速度が $1.7 \times 10^{-5} \%$ /min以下)で次の載荷を行う試験である。4.のCP-testは、有効応力に関するせん断弾性係数を直接求めるための試験で、平均有効応力一定条件下で繰り返し載荷を行い、弾性領域での応力ひずみ曲線を得ることが主たる目的である。5.のC $\eta$ -testは応力比一定の圧密試験で、応力比の大きさを $\eta/M$ で表示すると $\eta/M=0, 0.2, 0.4, 0.6$ に設定した。また除荷段階で平均有効応力を完全にゼロまで除荷することは実験上困難なので約5kPaまで除荷した時点で次の再載荷を行った。

## (3) 実験結果

各実験で得られた応力~ひずみ関係は3章の計算値との比較の図で示しているが、ここでは、繰り返し載荷部分に着目し、その典型的な応力~ひずみ曲線例として、図-2にC $\eta$ -test( $\eta=0.8$ )試験結果を示す。

図に示すように、この曲線は①処女載荷部、②除荷、再載荷部、③再処女載荷部に区分される。①の部分は、弾性と塑性ひずみ、②は弾性ひずみ、③はふたたび弾性と塑性ひずみからなっている、とみることができる。そこで粘土を弾塑性材料として、実験の応力を作用させてみると、図-2中の計算値(弾塑性)曲線が得られる。このとき除荷、再載荷過程での応力経路が同一なので、弾性領域内部での応力~ひずみ曲線は、1本の曲線となる。しかし実験曲線では②の除荷、再載荷過程ではっきりとしたヒステリシスループを描いていることから、遅延弾性変形の存在が明らかである。したがって遅延弾性成分の存在を考慮に入れると、①、③の弾性変形成分の中にもこの遅延弾性変形成分が含まれていると考えられる。

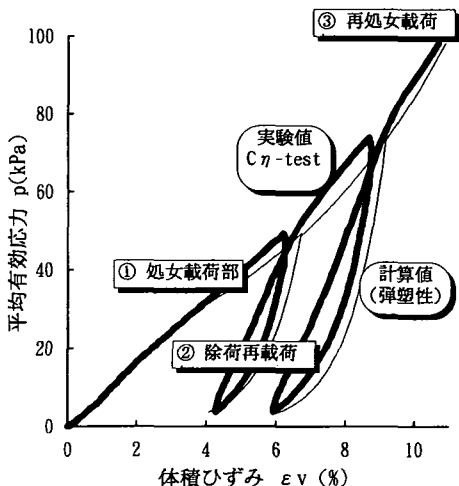


図-2 繰り返し載荷試験時の応力ひずみ曲線

この遅延弾性変形の存在は、後で図示するように、その他の繰り返し載荷を含む実験結果でも確認される。

#### (4) 構成モデル

上で述べた遅延弾性変形成分をあらわすために図-3に示すような3要素一般化 Voigt 要素<sup>9)</sup>と塑性要素を直列に結合した構成モデルを採用した。このモデルは、正規状態では粘弾性ひずみと塑性ひずみ、過圧密では粘弾性ひずみが表せるので繰り返し載荷のような応力変化に対する変形を表現することができる。

塑性要素は修正 Cam clay モデル<sup>10)</sup>のうちから弾性成分を除いた部分を適用し、その弾塑性定数は、これまでの実験<sup>2)-8)</sup>から表-1に示すような値が得られている。

3要素一般化 Voigt 要素は、瞬時弾性変形に対応するばね要素、Voigt 要素からなり、それぞれの変形定数は、ばね要素のコンプライアンス  $C_M$ 、Voigt 要素のコンプライアンス  $C_V$ 、遅延時間  $T_V$  である。

3要素一般化 Voigt 要素の有効応力に関する粘弾性定数を決定するためここでは線形漸増載荷排水試験を新たに提案する。図-3に示すモデルで一般化 Voigt 要素だけにかかわる変形成分を取り出すためには塑性変形のない弾性領域での載荷が必要であり、除荷、再載荷が必要である。この試験法は通常の三軸圧縮試験機を利用し、荷重制御方式で簡単に実施できる利点がある。以下に粘弾性定数の決定方法を簡単に述べる。

3要素一般化 Voigt 要素の支配方程式は式(1)のようであり、初期の応力とひずみをゼロとしたとき、応力速度  $\dot{\sigma} = \text{一定}$  条件下でのひずみ応答は、式(2)のようである<sup>11)</sup>。

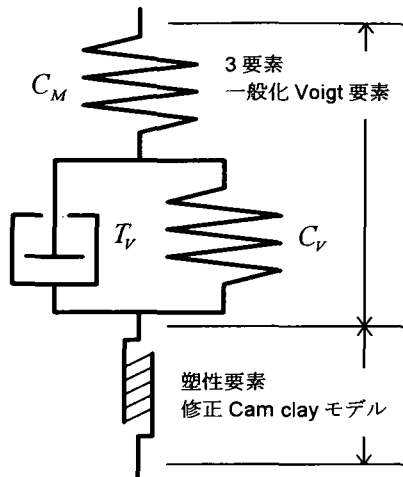


図-3 構成モデル

$$C_M \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{C_M + C_V}{T_V} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{1}{T_V} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sigma(C_M + C_V) - \dot{\sigma} T_V \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_V}\right) \right] \quad (2)$$

式(2)には  $C_M$ 、 $C_V$ 、 $T_V$  の3個の未知材料定数が含まれているので、これらの数値を決定するには三つの観測点が必要である。3観測点の時間を  $t_A$ 、 $t_B$ 、 $t_C$ 、応力を  $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_C$ 、ひずみを  $\varepsilon_A$ 、 $\varepsilon_B$ 、 $\varepsilon_C$  とする。この観測点の選定は、任意であるので後の計算が便利となるように観測時間間隔を一定にとり、時間に比例関係があるように選ぶ。すなわち

$$\left. \begin{aligned} t_B = 2t_A, t_C = 3t_A \\ \sigma_B = 2\sigma_A, \sigma_C = 3\sigma_A \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)、(3)から  $T_V$  を含む変数  $E(t_A)$  に関する3次方程式(4)が得られる。

$$\begin{aligned} -\varepsilon_A + 2\varepsilon_B - \varepsilon_C - E(t_A)(3\varepsilon_B - 2\varepsilon_C) \\ - E^3(t_A)(\varepsilon_C - 3\varepsilon_A) - E^3(t_A)(2\varepsilon_A - \varepsilon_B) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで

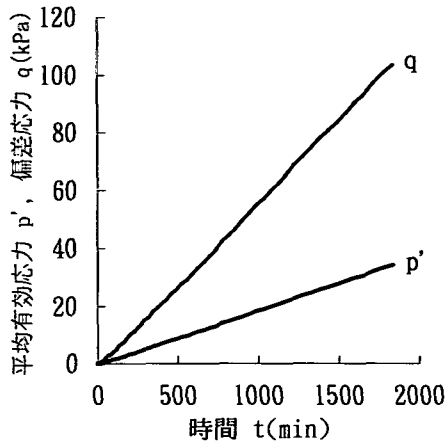
$$E(t_A) = \exp\left(\frac{-t_A}{T_V}\right) \quad (5)$$

である。

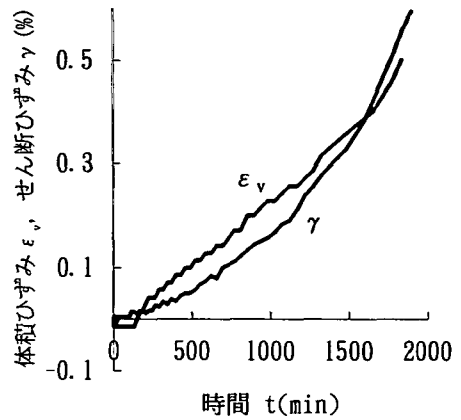
これを解いて、それぞれの粘弾性定数が次のように求められる。

$$T_V = \frac{-t_A}{\ln(E(t_A))} \quad (6)$$

$$C_V = \frac{\varepsilon_B - 2\varepsilon_A}{\sigma_{TV}(2F_A - F_B)} \quad (7)$$



(a) 平均有効応力, 偏差応力～時間関係



(b) 体積ひずみ, せん断ひずみ～時間関係

図-4 線形漸増載荷排水せん断試験による島尻粘土の応力～ひずみ～時間関係

$$C_M = \frac{\epsilon_A + \sigma_n C_v F_A}{\sigma_A} - C_v \quad (8)$$

ただし

$$\begin{aligned} F_A &= 1 - E(t_A) \\ \sigma_n &= \dot{\sigma} T, \end{aligned} \quad (9)$$

である。

以上の説明は一軸状態の粘弾性定数を扱っているが、一般の変形状態では変形に関して等方性を仮定すると、変形成分を体積ひずみ成分とせん断ひずみ成分に分けて扱うことができ、それぞれの変形成分に対応する粘弾性定数が求められる。体積ひずみ成分にはK、せん断ひずみ成分にはGの添字を付して表すことにする。

#### (5) 線形漸増載荷排水せん断試験と粘弾性定数

##### a) 線形漸増載荷排水せん断試験の方法と結果

2. (4)で述べた方法で粘弾性定数を決定するには応力速度一定の載荷試験を行う必要がある。また、回復する変形部分を対象としているので、粘土は過圧密状態であればならない。本研究では、CIDRC-testを利用して粘弾性定数を決定した。この試験では、粘土の過圧密状態を次のようにして得ている。

まず  $p = 98\text{kPa}$  の圧力で 24 時間の等方圧密を行い、正規圧密状態の粘土を作る。次にこれを線形漸増載荷方式で  $q = 78\text{kPa}$  まで側圧一定で排水せん断し、その応力状態を保って 24 時間放置する。次に側圧一定で等方応力状態まで除荷し、再び 24 時間放置する。この放置期間によって直前の除荷時間の影響が緩和される。除荷によって粘土は過圧密状態となり、有効鉛直応力  $\sigma_z$  で定義される過圧密比は  $\text{OCR} = 1.91$  となる。等方圧密以降の応力～時間関係は図-13(a)に示す。

実験では、この過圧密状態を粘弾性定数決定のための基準状態とし、基準状態にある過圧密粘土に対して線形漸増載荷を行う。基準状態を始点とするひずみを用いて粘弾性定数を決定する。このときの応力速度は  $\dot{q} = 83.7\text{kPa}/\text{min}$ ,  $\dot{p} = \dot{q}/3$  である。

図-4は、基準状態からの線形漸増載荷による体積変形とせん断変形についての時間～応力～ひずみ関係を示している。図-4(b)のひずみの応答曲線の中で降伏応力 ( $q < 78\text{kPa}$ ) 以下の範囲内が粘弾性定数決定のために使われる。

##### b) 粘弾性定数の検討

a)の実験結果に対し、2. (3)で述べた方法によって3要素Voigtモデルの粘弾性定数が計算される。これらの値は、実粘土では遅延時間  $T_v$  が一定とならないことから  $t_A$  の選び方によって多少変化する。そこで  $t_A$  の選び方による定数の変化の様子を調べたものが図-5, 6である。

これらの図に示すように、 $C_{GV}$  以外の粘弾性定数は、 $t_A$  の選び方によらずほぼ一定である。線形漸増載荷での  $t$  は、その時点での応力と比例関係にあることから、これらの粘弾性定数は応力に依存しない定数とみなせる。一方  $C_{GV}$  は偏差応力  $q$  の増加に伴って大きくなり、応力依存性であると考えられる。その変化は瞬時変形量の分担率  $\alpha_G$  の大きさに表れる。

またせん断変形の遅延時間  $T_{GV}$  (12000 ~ 11200min) と体積変形の遅延時間  $T_{KV}$  (215 ~ 577min) には数十倍もの大きな違いがあり、回復性せん断変形は体積変形に比べ長時間にわたって続くことがわかる。

回復する変形のうちのいわゆる瞬時変形量と遅延変形量の大小関係も大いに重要であるが、これらはそれぞれの要素のコンプライアンスの大小か

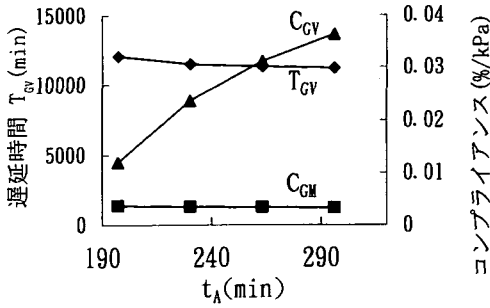


図-5 せん断変形に関する粘弾性定数

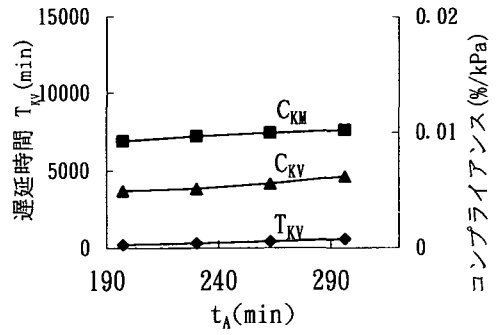


図-6 体積変形に関する粘弾性定数

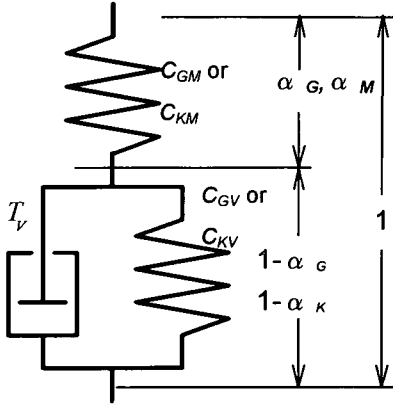


図-7 瞬時変形量と遅延変形量の分担割合

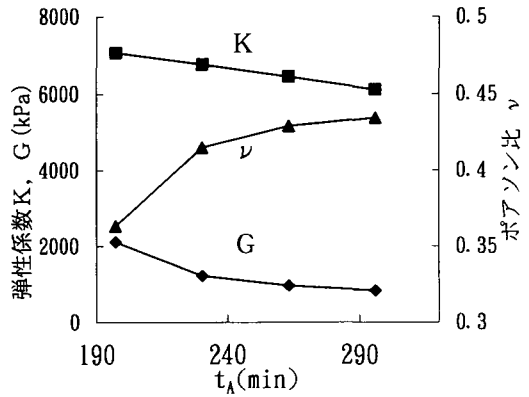


図-8 弾性係数, ポアソン比の変化

ら判定できる。瞬時変形量は、ばね要素のコンプライアンス  $C_M$  から、遅延変形量は Voigt 要素のコンプライアンス  $C_V$  から得られるので、全体の弾性変形量に対する瞬時変形量の分担率  $\alpha_G, \alpha_K$  は次のように求められる(図-7 参照)。

$$\alpha_G = \frac{C_{GM}}{C_{GM} + C_{GV}} \quad (10)$$

$$\alpha_K = \frac{C_{KM}}{C_{KM} + C_{KV}} \quad (11)$$

図-5 から弾性せん断変形では、 $C_{GM}=0.003 \sim 0.004, C_{GV}=0.012 \sim 0.036$ /kPa となり、遅延変形量が変形の大部分を占め、瞬時変形量の分担率  $\alpha_G$  は 0.05~0.23 となる。特に偏差応力が大きくなるほど遅延変形量が増えることがわかる。逆に弾性体積変形では、瞬時変形量の方が大きくなっており、その分担率  $\alpha_K$  は 0.6 である。ただし実粘土の排水変形では排水の時間遅れのため、この瞬時体積変形を直接観測することはできないことに注意する必要がある。

島尻粘土の物理特性は一般のそれと比較してもそれほど大きな差がないことから、分担率の差は粘性土の一般的特徴と考えられ、島尻粘土以外

表-2 島尻粘土の粘弾性定数

ポアソン比 $\nu$	0.35
せん断変形即時変形分担率 $\alpha_G$	0.2
Voigt 要素の緩和時間 $T_{GV}$	12000 分
体積変形即時変形分担率 $\alpha_K$	0.6
Voigt 要素の緩和時間 $T_{KV}$	500 分

の粘土についても分担率を求め、データを集積していくことは興味深い。

なお、 $T_{GV}, \alpha_G$  の値は  $t_A$  の選び方によって変わるが、ここでは次節で述べる実験結果との適合性をみながら、計算簡略化のために定数とした。ポアソン比  $\nu$  は後述するように 0.35~0.45 となるが、正規状態では全変形量に対し、弾性変形量が小さいため、ポアソン比の変動がひずみ応答に与える影響は小さく、ここではポアソン比は一定とした。このようにして表-2 のような 5 個の値が得られ、これに  $\kappa$  を加えた 6 個がこのモデルの粘弾性定数となる。

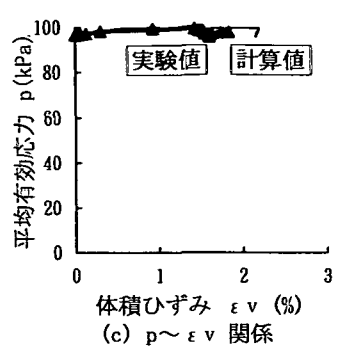
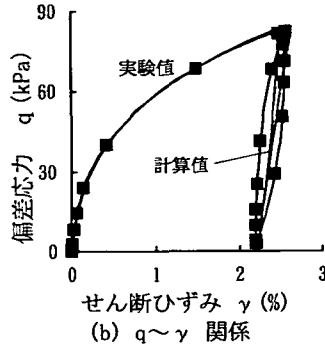
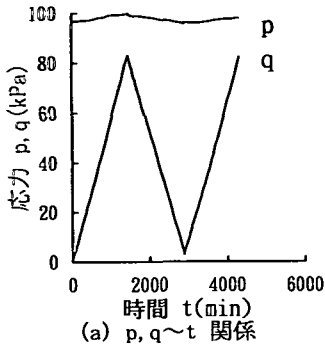


図-9 応力～ひずみ～時間関係(CP-test)

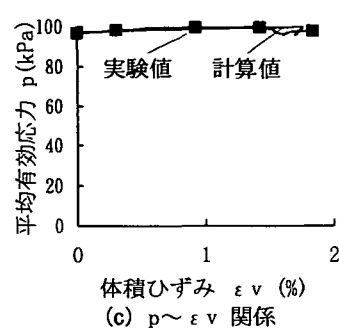
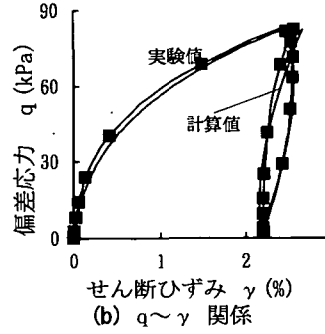
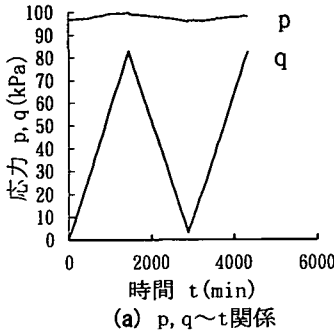


図-10 応力～ひずみ～時間関係(CP-test) :  $T_{cr}$ ,  $\lambda$  補正

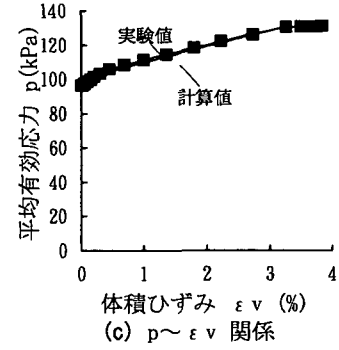
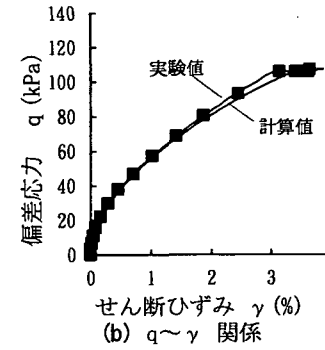
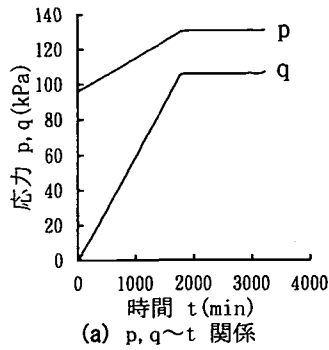


図-11 応力～ひずみ～時間関係(CID-test)

次にこれらのコンプライアンスと弾性変形全体についての有効応力に関する体積弾性係数  $K$ 、せん断弾性係数  $G$  およびポアソン比  $\nu$  は式(12)の関係があるのでこれより求めた結果を図-8に示す。

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{C_{KM} + C_{KV}} \\ G &= \frac{1}{3(C_{GM} + C_{GV})} \\ \nu &= \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで

$C_{GM}$ 、 $C_{GV}$  は、偏差応力を  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 、せん断ひずみを  $\gamma = 2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3$  とした応力ひずみ曲線から得られるコンプライアンスである。

$K$  や  $G$  は  $t_A$  の増加によって減少する傾向があるがわかる。またこの体積弾性係数から膨潤指数  $\kappa$  を求めると  $\kappa = 0.0254 \sim 0.0318$  となり、これまでに得られている島尻粘土の  $\kappa$  値 (0.015 ~ 0.036) にほぼ一致する。

また  $G$  の値は平均有効応力一定試験から得られた値  $G = 2800 \text{ kPa}$  と近い値となっていることが確かめられた。

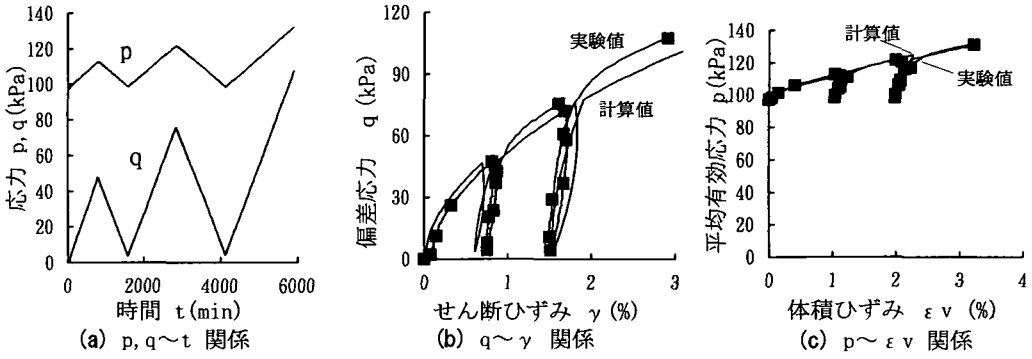


図-12 応力～ひずみ～時間関係(CIDR-test)

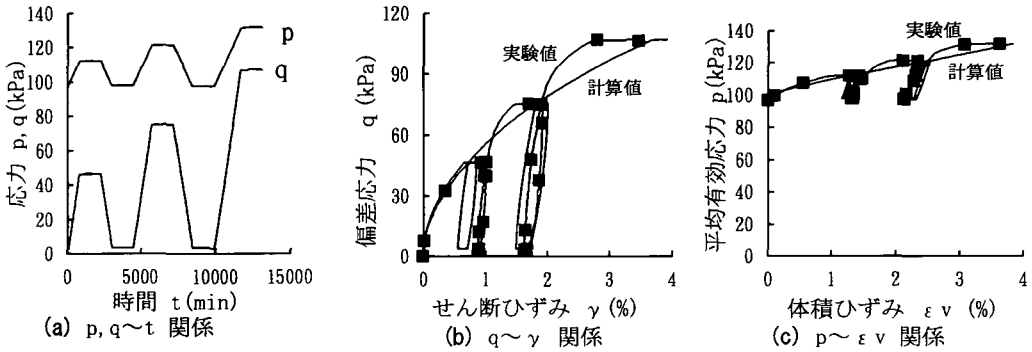


図-13 応力～ひずみ～時間関係(CIDRC-test)

### 3. 実験による構成モデルの検証と問題点

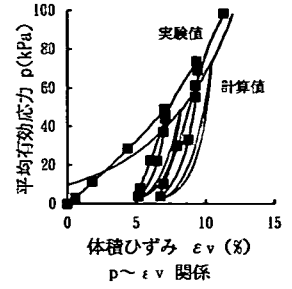
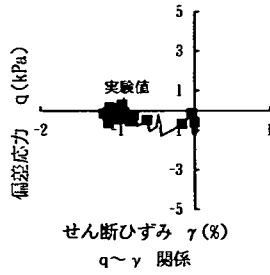
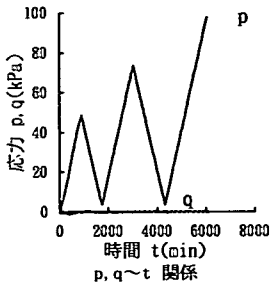
2. (5) で得られた島尻粘土の粘弾塑性定数の妥当性を実験結果との比較によって検証する。比較する実験の応力経路は2. (5) にあげた5種類で、すべて漸増载荷、応力制御方式の排水せん断試験である。使用した粘土は先に述べた再圧密島尻粘土である。

図-9 は CP-test での実験結果(マーク付き実線)と表-1, 2 の粘弾性定数を用いて計算した値(実線)を比較したものである。図-9(b)に示すようにヒステリシスループの幅は実験値に比較して狭い。そこでヒステリシスループの幅が一致し、またその他の実験結果とも適合するように、緩和時間  $T_{GV}$  を 1/10 に、 $\lambda = 0.14$  に補正して計算し直したものが図-10 である。

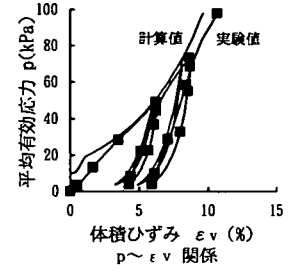
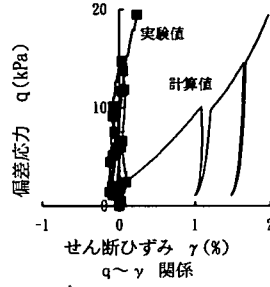
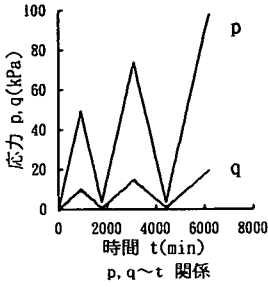
図-10～13 は補正された粘弾塑性定数を用いて計算した各種の応力経路に対する応力ひずみ曲線と実験値を比較したものである。図-10 は CP-test, 図-11 は CID-test, 図-12 は CIDR-test, 図-13 は CIDRC-test, 図-14 は  $C\eta$ -test の比較である。各図の (a) は载荷応力と時間の関係を示し, (b), (c) はせん断変形, 体積変形に関する応力～ひずみの関係である。図-10～12 から排水

せん断経路では実験値と計算値がよく一致していることが確認できる。一方, 図-13 に示す CIDRC-test のように排水クリープがある場合には両者の不一致がある。その期間の変形量を遅延弾性だけで表現することに原因があると考えられる。改良方法としては, 正規状態では, 3 要素一般化 Voigt モデルを 4 要素一般化 Voigt モデルに置き換えること, が考えられる。この場合あらためて Maxwell 要素の緩和時間  $T_M$  を決定する排水クリープ試験が必要となるが, より広い時間依存性挙動を表現するモデルとして拡張することができる。

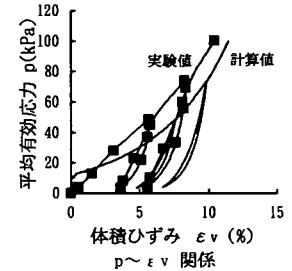
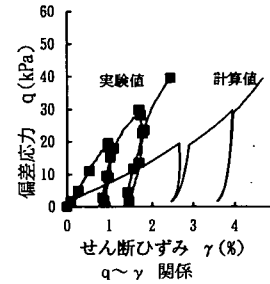
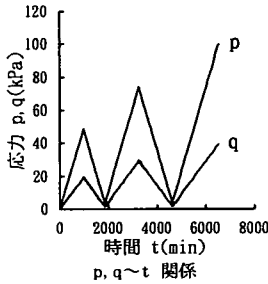
図-14 は  $C\eta$ -test の比較であるが, せん断ひずみの計算値が実験値の約 2 倍となっている。一方体積ひずみについてはほぼ一致していることから, この正規圧密領域でのせん断ひずみの不一致の原因は, 正規圧密状態で計算される塑性変形量にあると考えられ, 修正 Cam clay モデルによる塑性ベクトルの方向を見直す必要がある。また広い範囲での応力変動に対するひずみ応答を単一組みの一定定数だけで表現しようとしていることも不一致の原因となっている。次に弾性領域内での変形を比較してみる。古典弾塑性モデルを使って繰り返し応力に対するひずみ応答を計算すると, 図-2 にも示したように弾性領域内部では, 载荷除荷に対する応力ひずみ曲線は同一のものとなり実



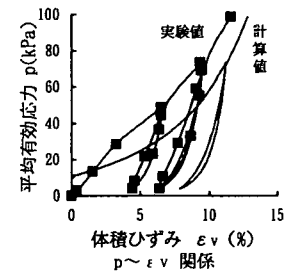
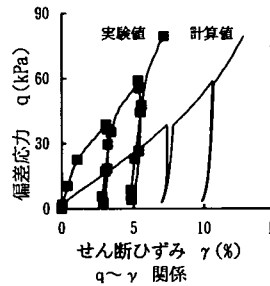
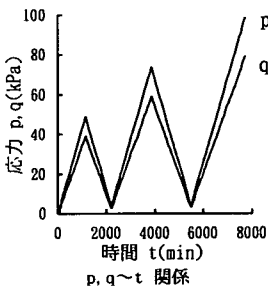
(a) 応力～ひずみ～時間関係 ( $C\eta$ -test :  $\eta/M=0.0$ )



(b) 応力～ひずみ～時間関係 ( $C\eta$ -test :  $\eta/M=0.2$ )



(c) 応力～ひずみ～時間関係 ( $C\eta$ -test :  $\eta/M=0.4$ )



(d) 応力～ひずみ～時間関係 ( $C\eta$ -test :  $\eta/M=0.6$ )

図-14 応力比一定圧密試験による島尻粘土の応力～ひずみ～時間関係

験値のようなヒステリシスループを表現することはできない。

これに対し、図-3のモデルを使えば、平均有効応力一定、応力比一定、側圧一定排水せん断試験など種類の異なる応力径路での繰り返し载荷についても実験値に近いひずみを表すことができる。

このモデルとその定数は、島尻粘土の変形特性をうまく表現できるが、応力比一定試験におけるせん断ひずみについては、応力ひずみ曲線の形状、大きさとも実験値と差があり、即時変形の分担率や緩和時間の応力依存性を考慮するなど、改善の余地がある。



正規圧密領域でのクリープを表現できない点や上記のような課題が残されているものの、線形漸増載荷排水せん断試験から求められた同一組の粘弾性定数を使って、いろいろな応力経路でのひずみ応答を求めてみると、排水せん断の応力経路が異なっているにもかかわらず、本モデルを適用することによって実験値はおおむね一致する計算値が得られる。

#### 4. まとめ

本論文では、沖縄島の沖積層を構成する島尻粘土の排水せん断試験から、弾性変形、遅延弾性変形、塑性変形の有効応力に関する変形定数を求めた結果を報告した。島尻粘土の変形特性を表すモデルとして本論文では、弾性、遅延弾性変形成分には3要素一般化Voigtモデルを、塑性成分は修正Cam-Clayモデルを適用した。また有効応力に関する粘弾性定数を決定するための漸増載荷排水試験を提案して、その適用性を検証した。実験の結果得られた、繰り返した島尻粘土の変形特性は、次のようである。

- 1) 漸増載荷試験で有効応力に関する粘土の粘弾性定数を得ることができる。
- 2) 除荷、再載荷時に応力ひずみ曲線はヒステリシスループを描く。回復する弾性ひずみ成分の中で、瞬時変形量が占める割合はせん断変形と体積変形で異なることが明らかとなった。島尻粘土の場合、その分担率はせん断変形では約0.2、体積変形では約0.6となった。
- 3) せん断変形に関するVoigt要素の遅延時間は過大な値が算出され、実験値と一致しないため、ヒステリシスループの幅が一致するように補正する必要がある。
- 4) 遅延時間を補正すれば、繰返し載荷を含むいろいろな荷重条件での島尻粘土のひずみ応答が計算できる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり東京工業大学教授日下部先生には懇切なご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 沖縄県土木建築部中城湾港建設事務所：中城湾港(新港地区)調査ボーリング資料，1990。
- 2) 沖縄県土木建築部中城湾港建設事務所：浚渫埋立地追跡調査及び解析委託業務資料編，1990。
- 3) 原久夫，上原方成：応力誘導異方性を有する正規圧密粘土の非排水せん断特性，土質学会論文報告集，土質工学会，Vol.28, No.2, pp.196～204，1988。
- 4) Uehara, H., Hara, H., Yosizawa, M., and Taira, S., "Case Study of Vertical Drain in Shimajiri Marine Clay": *Proc. of the Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Port and Harbor Research Institute. GEO-COAST'91*, pp. 411-416, 1991.
- 5) 上原方成，原久夫，又吉康之：飽和粘土の降伏曲面形状に関する実験的研究，琉球大学工学部紀要，Vol.49, pp45-66, 1995。
- 6) 原久夫：一般化Voigtモデルの粘弾性定数解析について，第6回沖縄土質工学研究発表会講演概要集，沖縄土質工学研究会，pp.65-68, 1993。
- 7) 呉屋健一，上原方成，原久夫：正規圧密粘土の静的平均有効応力一定繰返し排水せん断試験結果について，琉球大学工学部紀要，Vol.45, pp21-32, 1993。
- 8) 原久夫，上原方成，呉屋健一：飽和粘土の応力比一定静的繰返し試験結果について，平成4年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp552-523, 1993。
- 9) 山田嘉昭：塑性・粘弾性，培風館，pp.124～135, 1980。
- 10) Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet clay', in *J. Heyman and F.A. Leckie(eds.)*, *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, pp.535-609, 1960.
- 11) 原久夫，上原方成，又吉康之，宮原慶：漸増載荷排水せん断試験による飽和粘土の粘弾性定数の決定法，平成5年度土木学会西部支部研究発表会，pp.660-661, 1994。

(1996.3.11 受付)

# CHARACTERISTICS OF DEFORMATION ON REMOLDED SHIMAJIRI CLAY

Hisao HARA and Hosei UEHARA

The moduli of deformation of the remolded Shimajiri clay are experimentally investigated in the present paper. These moduli consist of modulus of elasto-plasticity and coefficient of viscosity in terms of effective stress. Generalized Voigt model is applied to the deformation of elasticity and viscosity, and modified Cam clay model is applied to the deformation of plasticity. A new test method is proposed to determine the coefficient of viscosity of clay in terms of effective stress. The experimental results were compared with the estimated results, and the applicability was verified.