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方法

琉球大学　正　上原 方成　○ 原 久夫
琉球大学　学　又吉 康之　　宮原 慶

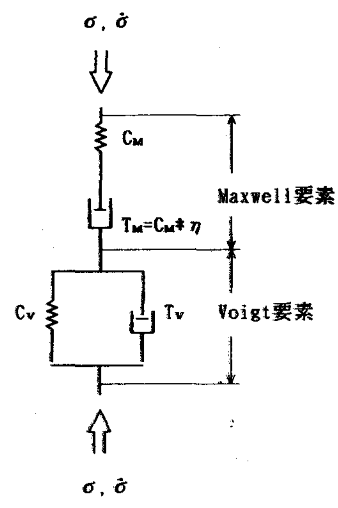
1 まえがき

飽和粘土の変形は時間依存性挙動を示す．このような時間依存性挙動を説明する力学モデルは，粘弾性モデルとよばれ，バネとダッシュポットの２種類の構成要素を現象にあうように適当に組み合わせて作られ，多くの粘弾性モデルが提案されている．

本論文ではこの中でも代表的な一般化Voigtモデル[1]を飽和粘土の時間依存性挙動に適用し，粘土の有効応力に関する弾性係数，粘性係数を求めるための実験および計算方法を提案する．

2 一般化Voigtモデル

一般化Voigtモデルは図－１に示すようにMaxwell要素とVoigt要素を直列に結合したモデルで，応力入力に対するひずみ応答計算に有利なモデルである．図のモデルは２個のバネと２個のダッシュポットを有し，全部で４個の構成要素からなっているので４要素一般化Voigtモデルと呼ばれている．



図－１　４要素一般化Voigtモデル

４要素一般化Voigtモデルは次の４個の粘弾性定数を持つ．

C_M：Maxwell要素のコンプライアンス
T_M：Maxwell要素の緩和時間
C_V：Voigt要素のコンプライアンス
T_V：Voigt要素の遅延時間

緩和時間と遅延時間は，それぞれのダッシュポットの粘性係数とコンプライアンスとの積である．

また，４要素一般化Voigtモデルにおいて，Maxwell要素の緩和時間$T_M\to\infty$とすると，ダッシュポットは剛体として挙動するため，要素数が一つ減ることになる．このようにしてできる粘弾性モデルを３要素Voigtモデルと呼ぶ．

3 粘弾性定数の決定方法

3－1 漸増載荷試験

４要素一般化Voigtモデルや３要素一般化Voigtモデルなどの粘弾性定数は実験によって決定される．一般材料の場合，これらの定数はクリープ試験（応力を一定に保ったままで材料のひずみを測定する試験）によって求めることが最も簡便な方法である．

しかし飽和粘土のクリープ試験では，瞬時載荷によって間隙水圧が発生し，有効応力一定というクリープ試験の条件を満たすことができないため，この方法では粘弾性定数を合理的に決めることができない．

そこでここでは，線形漸増載荷試験によってこれらの定数を求める方法を提案する．漸増載荷のスピードは，間隙水圧がほとんど発生しないような非常にゆっくりとした速度で行い，そのときのひずみ応答を観測する．また粘土の粘弾性変形を対象としていることから，過圧密領域で実験を行うことが必要である．

3－2 漸増載荷に対するひずみ応答[2]

４要素一般化Voigtモデルの漸増載荷によるひずみの応答は次のようである．

$$\varepsilon(t)=\sigma\left(C_M+\frac{t}{2\eta}+C_V\right)-\sigma_{TV}C_V\left\{1-\exp\left(-\frac{t}{T_V}\right)\right\}\quad\cdots\cdots(1)$$

式(１)は４要素一般化Voigtモデルの線形漸増載荷に対するひずみ応答を表す式である．式(１)において$\eta\to\infty$とすると３要素一般化Voigtモデルに対する式(２)が得られる．

$$\varepsilon(t)=(C_M+C_V)\,\sigma-\sigma_{TV}C_V\left\{1-\exp\left(-\frac{t}{T_V}\right)\right\}\quad\cdots\cdots(2)$$

ただし

$$\sigma_{TV}=\dot{\sigma}T_V$$

である．

3－3 粘弾性定数の決定方法

飽和粘土に対して，過圧密領域で行った漸増載荷試験での時間～ひずみ関係があれば式(１)，(２)を利用して粘弾性定数を求めることができる．ここでは３要素一般化Voigtモデルの粘弾性定数を求める場合について説明する．４要素一般化Voigtモデルの場合にもこれと全く同様にして求めることができる．

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．したがって，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．

観測した時刻をt_1, t_2, t_3とすると，式(2)から

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_1&=\sigma_1(C_M+C_V)-\sigma_{TV}C_VF_1\\ \varepsilon_2&=\sigma_2(C_M+C_V)-\sigma_{TV}C_VF_2\\ \varepsilon_3&=\sigma_3(C_M+C_V)-\sigma_{TV}C_VF_3\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(3)$$

となる．ここで

$$\left.\begin{aligned}\sigma_i&=\dot{\sigma}t_i\\ F_i&=1-E(t_i)\\ E(t_i)&=exp(-t_i/T_V)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(4)$$

である．t_1, t_2, t_3は任意に選べるので

$$\left.\begin{aligned}t_2&=2t_1\\ t_3&=3t_1\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(5)$$

のようにt_2, t_3を選ぶことにすると，応力～ひずみ～時間関係は図－2に示すようになる．このように観測点を選ぶと以下の計算が便利となる．

式(4)に式(5)を代入して整理すると，$E(t_1)$について，次の3次方程式が得られる．

$$\begin{aligned}&-\varepsilon_1+2\varepsilon_2-\varepsilon_3\\ &-E(t_1)(3\varepsilon_2-2\varepsilon_3)\\ &-E^2(t_1)(\varepsilon_3-3\varepsilon_1)\\ &-E^3(t_1)(2\varepsilon_1-\varepsilon_2)\\ &=0\quad\cdots\cdots(6)\end{aligned}$$

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．

$$T_V=-\frac{t_1}{log(E(t_1))}\quad\cdots\cdots(7)$$

$$C_V=\frac{\varepsilon_2-2\varepsilon_1}{2F_1-F_2}\frac{1}{\sigma_{TV}}\quad\cdots\cdots(8)$$

$$C_M=\frac{\varepsilon_1+\sigma_{TV}C_VF_1}{\sigma_1}-C_V\quad\cdots\cdots(9)$$

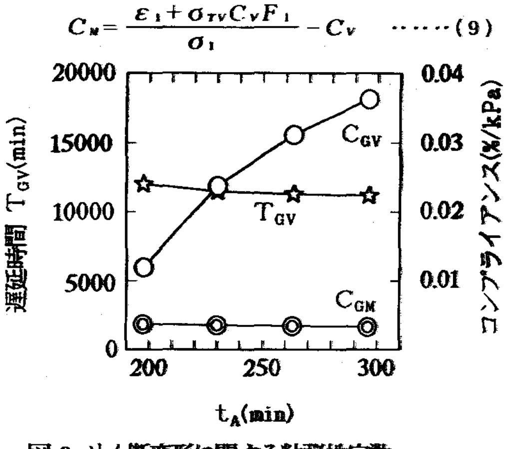
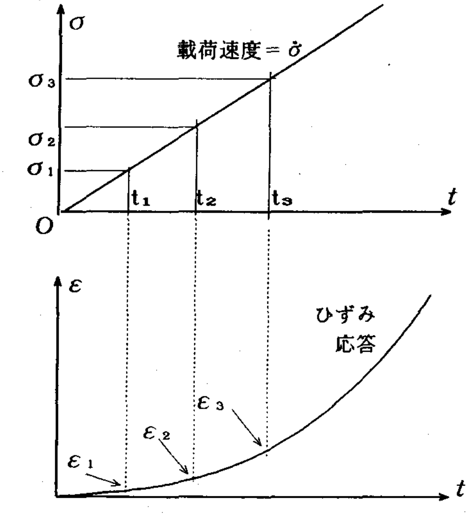


図3 せん断変形に関する粘弾性定数

3－4 粘弾性定数の計算例

ここに述べた方法によって得られた粘弾性定数を図3，4に示す．



図－2 漸増載荷とその応答ひずみ

4 あとがき

粘土の時間依存性挙動を表す一般化Voigtモデルの粘弾性定数を合理的に求める方法として，線形漸増載荷方式による排水三軸圧縮試験の利用について考察した．まず漸増載荷によるひずみ応答の解析解を導き，これを応用して，粘弾性定数を決定する手法を述べた．次に過圧密粘土の漸増載荷試験を行い，この手法を適用して粘土の粘弾性定数を求める例を紹介した．

－ 参考文献 －

1) 山田嘉昭，"塑性・粘弾性"，培風館

2) 原久夫(1993)，"一般化Voigtモデルによる粘土の粘弾塑性構成式とその適用性について"，琉球大学工学部紀要46号，pp. 85-104

3) 宮原他(1993)，"静的な繰返し排水せん断における島尻粘土の変形特性"，第6回沖縄土質工学研究発表会概要集，pp. 61-64

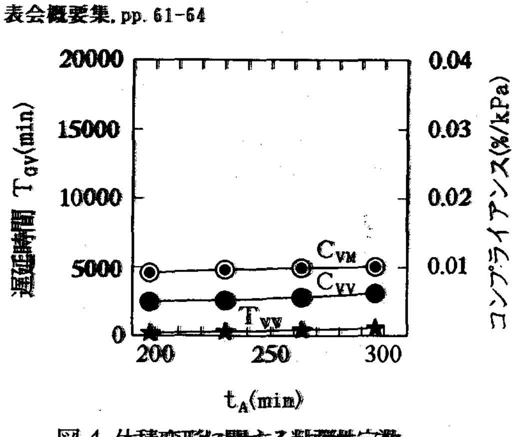


図4 体積変形に関する粘弾性定数