

III-187

正規圧密粘土の部分排水三軸圧縮試験のシミュレーション

名古屋大学大学院 学生会員 野田利弘
 名古屋大学大学院 学生会員 中野正樹
 名古屋大学工学部 正会員 浅岡 顕

1. はじめに

浅岡・中野¹⁾らは正規圧密川崎粘土供試体に対し、非排水ならびに部分排水三軸圧縮試験を行い、①せん断強度が载荷速度の違いにより変化すること（せん断強度の载荷速度効果）、および②そのレンジが両試験で同じになることを示している（図1）。ここでは部分排水試験での左上がりの曲線（図中□印）に注目して、部分排水試験を有限変形理論に基づく弾完全塑性圧密変形解析により、定性的にシミュレートする。剛塑性解析を用いたシミュレーションは文献²⁾にすでに示している。なお、図1の非排水試験による左下がりの曲線（図中○印）は、供試体内で吸水膨張により弱いところがあったためであると考え、このことを考慮した非排水試験のシミュレーションは行っていない。

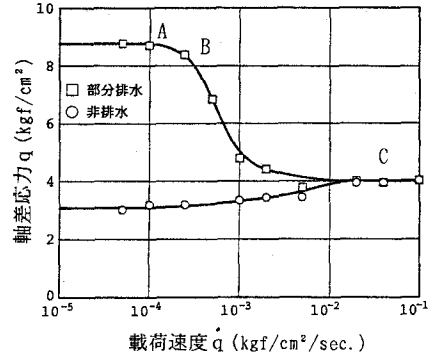


図1 非排水・部分排水試験の载荷速度効果

2. 部分排水試験の解析方法ならびに解析条件

(1)解析方法:有効応力の原理 $T = T' + p I$ (T :全応力テンソル, T' :有効応力テンソル, p :過剰間隙水圧, I :等方テンソル)を代入した速度型の力のつりあい式 $\text{div } \dot{S} = 0$ ($\dot{S} = \dot{T} + (\text{tr } D) T - T L^T$, $\dot{S}$:全応力の公称応力速度テンソル, L :速度勾配テンソル, $D = (L + L^T)/2$)と、等方性を仮定したダルシー則を代入した連続式に、有限要素法(4節点アイソパラメトリック要素を使用)を適用し、up-dated Lagrange法によって解析を行った。連続式には田村の方法³⁾を用いている。また、土骨格には、弾完全塑性構成式 $\dot{T}' = \dot{\lambda} (\text{tr } D) I + 2\dot{\mu} D - \dot{\mu}/2\sigma_0^2 (S \cdot D) S$ ($\dot{T}'$:有効応力のDienes rate, $\dot{\lambda}$, $\dot{\mu}$:Lameの定数, $S = T' - (\text{tr } T')/3 I$, σ_0 :Mises定数)を仮定する。有限要素メッシュは供試体の軸対称性からその1/4とし、上端排水ならびにrigid roughの境界条件で行った(図2)。(2)弾塑性パラメータの設定:「土は限界状態にあるとき、軸差応力 q_1 、平均有効応力 p' 、および比体積 v_1 は一意に決まる。」という点に着目して、土の強度に関して2通り行った。方法①Mises定数 σ_0 が解析を通して一定の場合と、方法②エレメントの排水による比体積減少に応じて増加する、つまり σ_0 が比体積 v の関数 $\sigma_0 = f(v)$ とする場合である。具体的には、限界状態式 $q_1 = M \exp((v_0 - v_1)/\lambda)$ (M :限界状態定数, λ :圧縮指数, v_0 :初期比体積)を変形して $q_1 = q_{f0} \exp(-\lambda(v/v_0))$ ($\Delta v = v_1 - v_0$, q_{f0} :土の最初の強度)と、 $\sigma_0 = \sqrt{(2/3)q_1}$ を用いて、 σ_0 を各Gaussの数値積分点で決定した。また、各計算ステップ(1ステップは1分に相当するものとする)では、Mises定数が変化しないものとし、各計算ステップで非線形計算が収束したその時の応力状態が、新しく得られたMises半径を越えていないことを確かめた。なお、初期Mises定数を決めるための q_{f0} は非排水試験より得られた軸差応力～軸ひずみ関係から図式的に(図3)、Lame定数は $m_v = \lambda/\sigma_0/v_0$ (m_v :体積圧縮係数, σ_0 :セル圧)と等方性から決めた(表1)。 λ は標準圧密試験より得られた値0.135を、 σ_0 は3.0kgf/cm²を、 v_0 は1.981を用いた。(3)

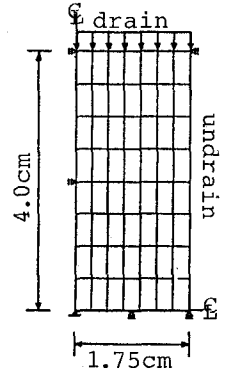


図2 メッシュ図と境界条件

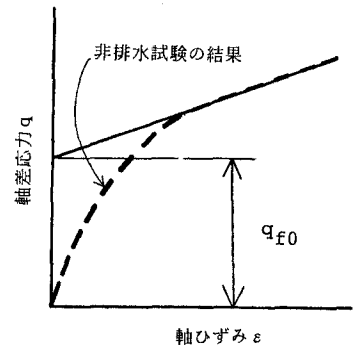


図3 q_{f0} の定義

ひずみ制御の計算:土〜水二相混合体では応力制御とひずみ制御とでは有効応力が経時的に異なっているが、実験と同じ応力制御の計算は煩雑になるので行わず、軸ひずみ(変位)制御で解析を行った。実験における載荷速度の違いは、ひずみ速度を変えないで透水係数を変えることにより表現した。(4)透水係数の設定:数値計算例では、ひずみ速度を、0.00345%/min.(ひずみ15%で約8時間に相当)とした。ここで、透水係数に標準圧密試験より得られた値 3.7×10^{-8} cm/sec.を用いた場合、このひずみ速度は十分遅いと考えて、このとき「透水係数が大きい場合」と呼び、実験の載荷速度が小さい場合と対応づけた。一方、透水係数にその値よりも 10^{-6} のオーダーだけ小さい値を用いるとき、「透水係数が小さい場合」と呼び、実験の載荷速度が大きい場合と対応づけた。

表1 Laméの定数とMises定数

λ	μ	q_{ro}	σ_o
34.0	17.0	2.56	2.09

単位はkgf/cm²

3. 解析結果

方法①(σ_o が一定)の結果得られた軸差応力〜軸ひずみ関係を図4に示す。透水係数が大きい場合(載荷速度が小さい時)は、透水係数が小さい場合の下側にあり、また最初に破壊する点(折曲点)は少し軸ひずみが大きいところで起きる。これは、排水により供試体自体の体積が小さくなったため断面積も小さくなり、同じ軸変位でも上端の反力を面積で割って求められる軸差応力が小さくなっているためであると考えられる。これは、土〜水二相系で得られる幾何形状変化(geometry change)によるものと言える。次に、方法②(σ_o が増加できる)の結果を図5に示す。透水係数が小さい場合は方法①でも方法②でも同じ軸差応力〜軸ひずみ曲線となる。しかし、透水係数が大きい場合は、方法①では既に破壊点であっても、まだ方法②では弾性域にあり、破壊時の軸差応力が増加していることがわかる。さらに図5と、正規川崎粘土に対して載荷速度を変えて行った部分排水試験の結果(図6)を比較する。せん断強度の値そのものは異なるが、透水係数の違いによって得られる各曲線が交差している点で計算結果は実験結果と類似している。以上から、部分排水試験では、載荷速度が小さい(透水係数が大きい)とせん断強度が増加する一つの理由には、比体積 v が減少し、その程度に応じて強度 σ_o が不均質になりながら全体的に増加するためであると言える。

4. おわりに

土〜水連成問題の場合、要素レベルでの排水能力を透水係数が縛り、載荷速度あるいはひずみ速度との相対的な大小関係によって(比)体積減少が生じる。これに伴う強度増加とgeometry changeに着目して部分排水三軸圧縮試験をシミュレートし、定性的には実験と類似の傾向を表わした。しかしながら、非排水三軸圧縮試験におけるせん断強度の載荷速度効果に対しては、三軸圧縮試験をエレメント試験ではなく二相混合体の境界値問題とする立場からすると、ひとつには吸水によって弱くなる(強度 σ_o が下がる)ことが必要であると考えるが、この計算は今後の課題である。

参考文献

- 1) 中野・小倉・浅岡: 正規圧密三軸供試体の破壊モードに及ぼす載荷速度効果、第27回土質工学会(1992)。
- 2) 中野・泉並・浅岡: 正規圧密粘土における非排水せん断強度の載荷速度効果、第26回土質工学会(1991)。
- 3) 赤井・田村: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析、土木学会論文報告集、第301号, pp. 93-104, 1978。

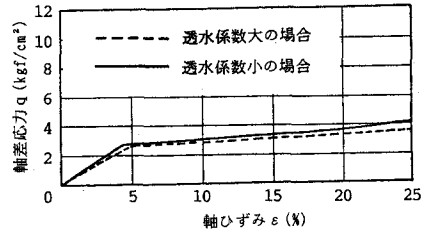


図4 軸差応力〜軸ひずみ関係
方法① (σ_o =一定の場合)

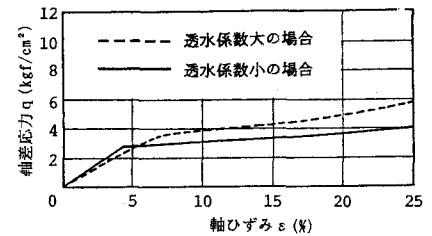


図5 軸差応力〜軸ひずみ関係
方法② ($\sigma_o=f(v)$ の場合)

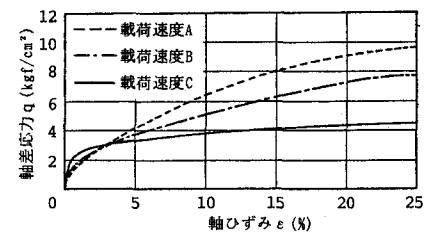


図6 部分排水試験の載荷速度効果