

III-438

非排水3軸圧縮試験における「背圧効果」の数値解析

名古屋大学大学院 学生会員 野田利弘

名古屋大学工学部 正会員 中野正樹

名古屋大学工学部 正会員 浅岡 顕

1. はじめに

飽和正規粘土の非排水3軸圧縮試験を「エレメント試験」とみなす立場から有効応力原理に従うと、粘土の初期圧密圧力が同一であれば、(セル圧, 背圧)の組合せによらず「応力～ひずみ」関係は一意に定まる。しかしながら、3軸圧縮試験を境界条件が明確な水～土骨格2相系の連成境界値問題と捉え、刻々変化する供試体の形状も考慮してゆく計算では、(セル圧, 背圧)の違いにより異なる「応力～ひずみ」関係が得られてもよい。そこでこの事情の説明を含め、異なる(セル圧, 背圧)の組合せを用いた場合の計算例を報告する。

2. 水～土骨格連成境界値問題における力のつり合い式の弱形式と有限要素計算

速度型(構成式を増分形で与えるため)の力のつり合い式に、有効応力原理を適用し、適合条件式等を加味すれば力のつり合い式の弱形式は、有効応力 T' と間隙水圧 u を用いて、次式で与えられる。

$$\int_v \left\{ \dot{T}' \cdot \delta D + (\text{tr } D) T' \cdot \delta D - T' L^T \cdot \delta L - u (\text{tr } D) (\text{tr } \delta D) + u L^T \cdot \delta L \right\} dv \\ - \int_v \dot{u} (\text{tr } D) dv = \int_a \dot{s}_t \cdot \delta v da - \int_v (\Omega T' - T' \Omega) \cdot \delta D dv \quad (1)$$

ここに、 δv , δL , δD はそれぞれ、境界条件を満足するような仮想的な変位速度とそれから得られる仮想的な速度勾配とストレッチングである。また、 $\dot{s}_t = \dot{t} + (\text{tr } D - \mathbf{n} \cdot D \mathbf{n}) \mathbf{t} \cdots (2) (= \dot{S}_t \mathbf{n}, \dot{S}_t = \dot{T} + (\text{tr } D) T - T L^T)$ 、 $\mathbf{n}$ は境界に立てた外向き単位法線ベクトル、 D はストレッチング)は公称表面力速度であり、応力境界に作用する実質的な表面力増分(第1項)と、この境界の伸縮や回転にともなう生ずる表面力増分(第2項)に分けることができる。有限要素計算では式(1)左辺第1項が土骨格の剛性マトリクスを作ることになる。ここで、この土骨格の剛性マトリクスの中に間隙水圧が含まれることに注意する。つまり、粘土の硬さに背圧が関係することを示している。また、有効応力の速度としてGreen-Nahdhiの速度 $T'^{(2)}$ を用いる場合にはスピン Ω を含む項を等価な節点力として処理するために式(1)右辺第2項が現れる。これ以外にKirchhoff応力やCauchy応力のJaumann rateを用いる場合は、この付加項を左辺に移項できて、土骨格の剛性マトリクスの中にも含めることもできる。したがって、応力速度の選択によって見掛け上弱形式の形が異なり、土骨格の剛性マトリクスの意味合いが曖昧になるが、本報告の3軸圧縮試験のシミュレーションにおいて、応力速度の差異による有意な差はほとんど生じなかった。(以下の計算結果はGreen-Nahdhiの速度を用いたものである。)なお、構成式にはカムクレイモデルを、水～土骨格の連成式には田村の方法³⁾を拡張して用いるが、負荷基準を含め詳細は文献4)参照。

3軸供試体の4分の1断面(高さ4cm, 幅1.75cm)を対象とした以下の計算において、上端ではrigid-roughの条件で軸変位を与えて反力としての荷重を求める一方、セル圧が一定に作用する応力境界では、式(2)第1項がなく $\mathbf{t} = c \mathbf{n}$ (c はセル圧)なので、イタラティブに $\mathbf{n}$ を考慮しつつ第2項のみを与えていった。なお、要素には4節点アイソパラメトリック要素を、時間軸には後退差分を用い、変位ステップごとにBマトリクスを更新するとともに、 T' , u , Ω に関する非線形項も各ステップでイタラティブに収束させた。

3. 計算例

計算では初期平均有効応力を 3.0 kgf/cm^2 とし、①セル圧=3.0, 背圧=0.0、②セル圧=5.0, 背圧=2.0(単位は kgf/cm^2)の2ケースを計算した。また、軸「ひずみ」速度 $\dot{\epsilon}$ は(a) $4.9 \times 10^{-3} \text{ \%}/\text{min}$ (間隙水の移動はほとんどない)と(b) $9.7 \times 10^{-3} \text{ \%}/\text{min}$ (十分にマイグレーションが起こる)の2ケースをとりあげた。計算結果として①、②そ

それぞれの「軸差応力～軸ひずみ」関係を図1, 2に、 $\dot{\epsilon}$ が(b)の時の供試体内の同一エレメントの様子を図3, 4に示す。なお、解析に用いた材料定数は表1、図3, 4中の記号の説明は表2の通り。

表1 材料定数

λ	0.108
κ	0.025
M	1.55
ν'	0.2
v_0	1.83
$p_0(\text{kgf/cm}^2)$	3.0
$k(\text{cm/sec})$	3.7×10^{-8}

表2 記号の説明

Mean effective stress : $p'/p'_0, p' = -\text{tr}T'/3$ (初期平均有効応力 p'_0 で 正規化している)	Deviatoric stress : $q/p'_0, q = \sqrt{3S \cdot S}/2$ $S = T' - p' \cdot I$ (p'_0 で正規化している)
Specific volume : $v = 1 + e$ $= v_0(1 - \det F)$ e : 間隙比 v_0 : 初期比体積 F : 変形勾配テンソル	Shear strain : $\epsilon_s = \sqrt{2e' \cdot e'}/3$ $e' = e - \text{tr}e'/3 \cdot I$ $e = (I - B^{-1})/2$ $B = FF^T$

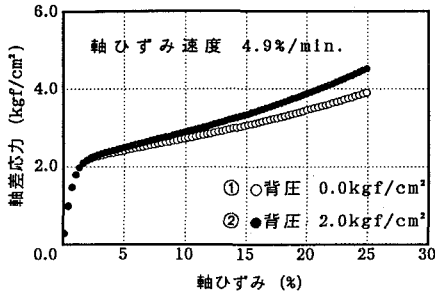


図1 「軸差応力～軸ひずみ」関係 (a)の場合

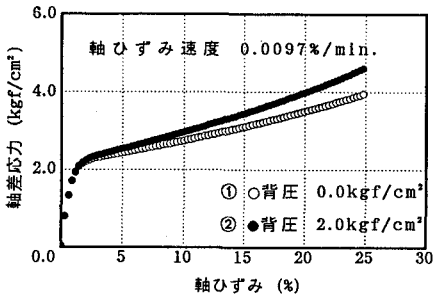


図2 「軸差応力～軸ひずみ」関係 (b)の場合

図1, 2からわかるように背圧の影響は特に破壊後、大変形になると現れ、背圧が大(②)の方が硬くなっている。また、(セル圧, 背圧)の組合せによって大変形時の供試体形状が異なり①の方が②よりも側方上端付近がくびれた形になっている。それと呼応して、間隙水のマイグレーションが十分起こる(b)では、図3, 4に示すように、背圧の違いによって軟化の度合い、供試体内のエレメントの挙動も異なる。これら背圧の効果は、「有効応力原理」の適用によるもので粘土の構成式の種類を問わず現れるものと考えられる。

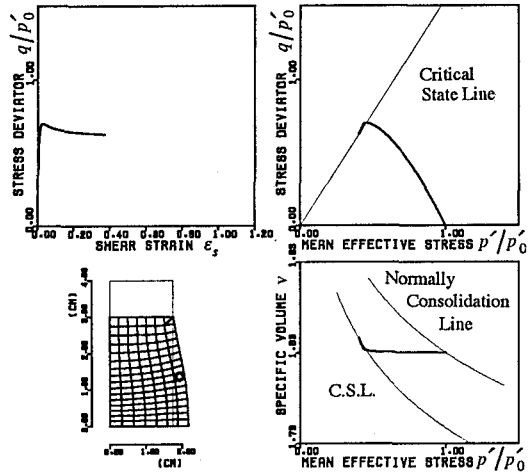


図3 供試体内のエレメントの様子の比較 (①の場合)

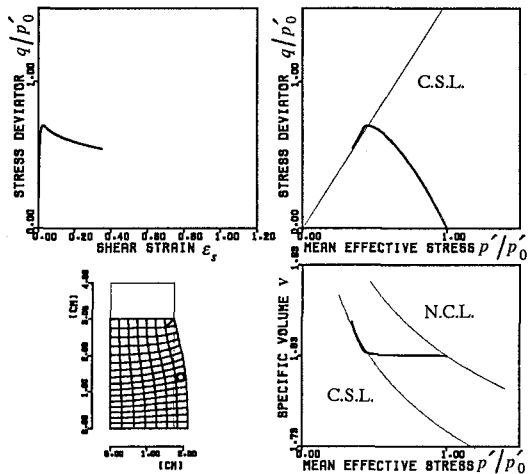


図4 供試体内のエレメントの様子の比較 (②の場合)

参考文献 1)Yatomi, Yashima, et. al.: General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, S. & F., Vol. 29, No. 3, pp. 41-53, 1989. 2)Green & Naghdi: A general theory of an elastic-plastic continuum, Arch. Ratl. Mech. Anal., Vol. 18, pp. 251-281, 1965. 3)赤井・田村: 弾塑性構成式による多次元正密の数値解析, 土木学会論文集, 第269号, pp. 95-104, 1978. 4)浅岡・野田: 限界状態近傍にある飽和土の弾塑性境界地問題の実験・解析とその応用, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 361-34, 1994.