

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 地盤の変形あるいは支持力解析に用いる粘土の構成関係は、供試体をエレメントとみなすことにより求められる。しかしながら、その構成関係もまた、実際は境界条件が与えられて初めて解くことができる境界値問題の解であると言える。そこで、ここでは三軸圧縮試験を後者の立場に立って、土～水連成境界値問題として捉え、実際の正規川崎粘土供試体(詳細は参考文献<sup>1)</sup>参照)に対して行った軸ひずみ制御による非排水三軸試験の結果を、有限要素法によりシミュレートした。この時、土骨格の構成関係には弾完全塑性体を仮定した。

2. 非排水試験の解析手法ならびに解析条件

(1)解析手法:有効応力の原理  $T = T' + p I$  ( $T$ :全(コーシー)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  $\text{div } \dot{S}_i = 0; \dot{S}_i = \dot{T} + (\text{tr} D) T - T L^T$ , ( $\dot{S}_i$ :全応力の公称応力速度テンソル,  $L$ :速度勾配テンソル,  $D = (L + L^T)/2$ )を弱形式化し、4節点アイソパラメトリック要素を用いて有限要素に離散化した。土骨格の構成関係には、弾完全塑性体を仮定し、応力速度として有効応力のDienes rate  $\dot{T}' = \dot{T}' + \Omega T' - T' \Omega$ , ( $\Omega = \dot{R} R^T$ ,  $R$ :変形勾配テンソルを極分解した時の回転テンソル)を用いて、 $\dot{T}' = \dot{\lambda} (\text{tr} D) I + 2\dot{\mu} D - \dot{\mu} / (2\sigma_0^2) (S \cdot D) S$  ( $\dot{\lambda}, \dot{\mu}$ :Lameの定数,  $S = T' - (\text{tr} T' / 3) I$ ,  $\sigma_0$ :Mises定数)で表した。また、ダルシー則には等方性を仮定し、これを代入した連続式には、各要素中心に間隙水圧を代表させる田村の方法<sup>2)</sup>を適用した。ここで、up-dated Lagrange法により変形を追跡して行くが、上記で得られた剛性方程式において、式そのものが非線形であることと、この方程式の中でDienes rateの中に出てくる $\Omega$ に関する項を等価な節点力に置き換えて計算を行うこととのために、有効応力に関する収束計算を行った。(2)メッシュ図および境界条件: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、境界非排水ならびに上端がrigid roughの境界条件で行った(図2.1)。(3)ステップ幅:実験では、軸ひずみ速度を0.035%/min.(軸ひずみ15%で約8時間に相当)で行っているが、数値計算例では、応力や座標の更新に用いるオイラー積分の1ステップ幅を、実時間の1分とみなし、軸ひずみがこの1ステップで0.035%になるように変位を与えていった。(4)材料定数の設定:Lameの定数 $\dot{\lambda}, \dot{\mu}$ は実験から得られた $q \sim \epsilon$ 図の初期勾配に合うように決定した。また、Mises定数 $\sigma_0$ に関しては、実験から $\epsilon$ が初期の間と5%~12%の間で得られた2直線の交点における $q$ の値を $q_{f0}$ とし、 $\sigma_0 = \sqrt{2/3} q_{f0}$ から決定した(図2.2,表2.1)。(5)透水係数の設定:透水係数は標準圧密試験より得られた値 $3.7 \times 10^{-8}$ cm/sec.をはじめに用いた。また、(実験では行っていないが)ひずみ(あるいは変位)速度の影響が $q \sim \epsilon$ 関係等に影響するのかわるため、上記のひずみ速度がこの透水係数に対して十分遅いものと考えて、標準圧

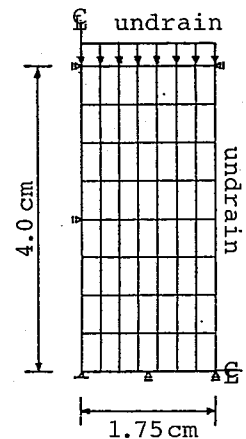


図2.1 メッシュ図および境界条件

密 表2.1 弾塑性パラメータ

$\dot{\lambda}$	114.0
$\dot{\mu}$	57.0
$q_{f0}$	2.76
$\sigma_0$	2.25

単位は  $\text{kgf/cm}^2$

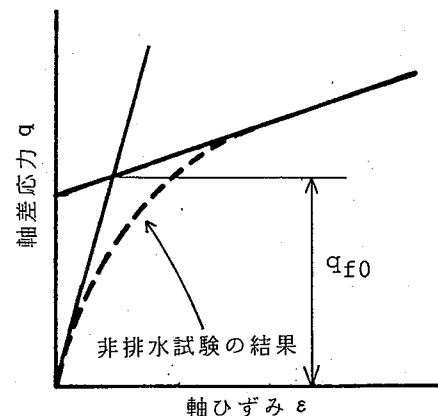


図2.2  $q_{f0}$ の定義

Finite element simulation of undrained triaxial tests of normally-consolidated clay : Toshihiro NODA(Nagoya University) Masaki NAKANO (Nagoya University) and Akira ASAOKA (Nagoya University)

密試験より $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ 小さいものを用いた解析も試みた。

### 3. 解析結果

(1)  $q \sim \varepsilon$  図: 図3.1に  $q \sim \varepsilon$  図を示し, 実線は解析結果を, 点線は実験結果を表している. この図で実線を見ると,  $\varepsilon$  が大きくなるにつれ  $q$  (上端で得られた反力を上端面積で割って求めた値) は直線のまま増加し,  $q$  が  $\sqrt{(3/2)}\sigma_0$  に近づくと実験と異なって, この曲線は鋭く折れ曲がる. この時, 上端の中心軸近傍を除いてほとんどの要素が同時に降伏していた. さらに  $\varepsilon$  が大きくなるにつれ, 再び直線的に増加してゆき, この勾配は見事に実験と一致した. これは Mises 定数  $\sigma_0$  が各ステップで増加することがないのにも関わらず, 実験における  $q$  の値が同じ割合で大きくなっていることであり, 供試体の形状がピア樽状に変化して

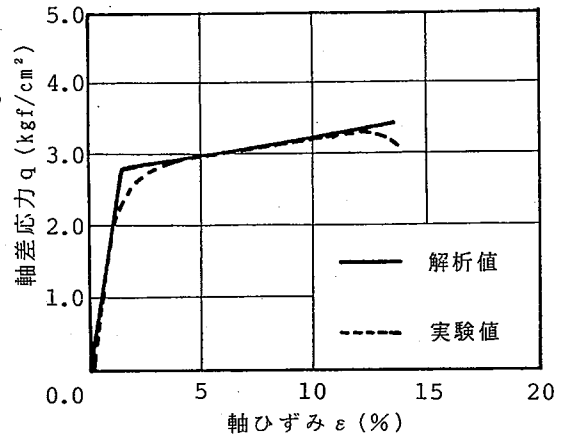


図3.1 軸差応力  $q \sim$  軸ひずみ  $\varepsilon$  関係

ゆくことのみのために実験値と同じ勾配が得られたことを意味している. このことは参考文献<sup>1)</sup>において, 土~水連成の剛塑性有限要素解析による塑性変形解析からも同様にこの勾配が再現できていることを鑑みれば, この  $q$  の直線的な増加は幾何形状変化(geometry change)の効果に依るものと言える. また, 上記の他の異なる2種類の透水係数を用いても,  $q \sim \varepsilon$  図に明確に現れるほどの有意な差はなかった. (2) 過剰間隙水圧分布: 図3.2に上記3種類の透水係数を用いたそれぞれの場合について解析最終ステップにおける過剰間隙水圧分布を示す. 標準圧密試験の値を用いた場合((a)), 一樣になっているが, 透水係数が小さくなるにつれて, 不連続な千鳥状になっている((b), (c)). (これも, 参考文献<sup>1)</sup>を参照すれば剛塑性解析においても値そのものは異なるが同様な不連続分布を示していることを付記しておく.) この透水係数の大および小はそれぞれ定性的に変位ある

いは荷重の載荷速度の小および大に相当する. したがって, このことは変位速度あるいは載荷速度が変われば, この過剰間隙水圧の消散の仕方が違ってきて, 非排水的に破壊した後の地盤や供試体の挙動が変わりうることを示している.

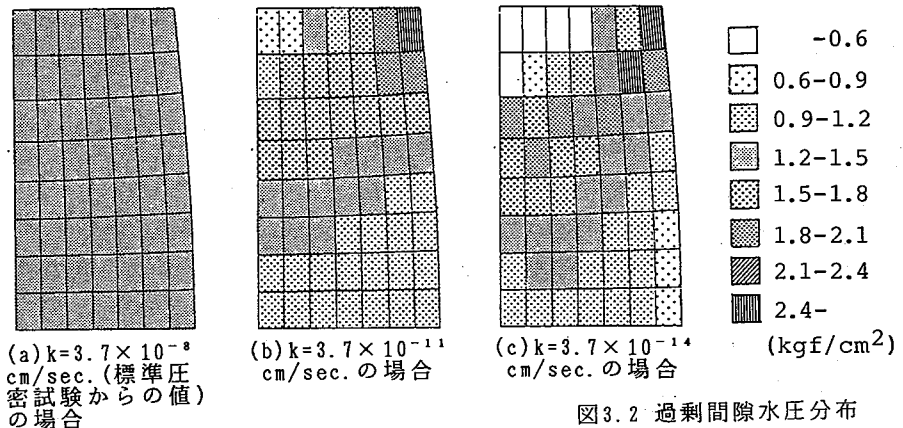


図3.2 過剰間隙水圧分布

### 4. おわりに

非排水三軸圧縮試験のシミュレーション結果から, ①軸差応力~軸ひずみ関係において, 軸ひずみが5%~12%の間での軸差応力が軸変位に対し一定の割合で増加するという実験事実に対し, これは従来, 供試体の弾塑性的な非線形性のみによるものと考えてモデル化されているが, 供試体の幾何形状変化にも起因するものであると考えられること, ②Mises定数をそのままにして, 透水係数を変えた解析を行ったところ, 軸差応力~軸ひずみ関係は透水係数によらずほとんど同じであるにもかかわらず, 供試体内の間隙水圧分布は大きく異なること, さらにこの②から, ③地盤または供試体の破壊後挙動(あるいはその解析)に必要な圧密過程の初期値としての過剰間隙水圧分布が, 変位速度(さらには荷重の載荷速度)の違いによって大きく異なり, 実際地盤においても破壊後の挙動(地盤の変形状態や支持力の大きさなど)が変位あるいは荷重の載荷速度によって異なる可能性があることを示した. 参考文献 1) 浅岡 中野正樹・小高 隆司(1992): 剛塑性変形解析による繰り返し正規圧密粘性土の破壊後挙動実験のシミュレーション, 第4回地盤工学シンポジウム. 2) 赤井浩一, 田村武: 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.