

京都大学大学院 学生会員 ○ 藤田 裕司
 京都大学大学院 正会員 岡 二三生
 京都大学大学院 学生会員 肥後 陽介

1. はじめに

地盤材料は通常均一とみなされているが、実際の地盤材料は不均一であり、その不均一性が変形特性に影響を与えると考えられている¹⁾。また、供試体形状の違いがひずみの局所化に影響を及ぼすことも知られている²⁾。そこで本研究では、正規圧密粘土のひずみの局所化に与える形状と不均一性の影響について、検討を行った。解析手法は、有限変形理論に基づく水-土連成有限要素法である。構成式には足立・岡の弾粘塑性構成式³⁾を用い、ひずみ制御の平面ひずみ圧縮試験をシミュレートした。

2. 構成式と定式化

本解析に用いた、足立・岡による正規圧密粘土の弾粘塑性構成式は粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ を以下のよう定義している。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2 \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}}, \quad \Phi_1(F) = C \exp \left\{ m' \left(\frac{\bar{\eta}^*}{M_f^*} + \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{me}} - \frac{1+e}{\lambda-\kappa} \Delta v^{vp} \right) \right\}, \quad \Phi_2 = 1 + \xi$$

$$\xi = \frac{M_f^* \bar{\eta}^*}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{ij}^* (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)}{\bar{\eta}^*} \right\}}, \quad \bar{\eta}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* + \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad \eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma'_m}, \quad \eta_{ij(0)}^* = \frac{S_{ij(0)}}{\sigma'_{m(0)}}$$

F : 超過応力, f : 動の降伏関数, M_f^* : 破壊時の応力比, S_{ij} : 偏差応力, C, m' : 粘塑性パラメータ, G_2^* : 軟化パラメータ, e : 間隙比, λ : 圧縮指数, κ : 膨潤指数, $\langle \Phi_1(F) \rangle = (\Phi_1(F) (F > 0), 0 (F \leq 0))$, 添え字 (0) は初期値であることを示す。

支配方程式は、流体相の釣り合い式、固体・流体混合相の釣り合い式であり、これと構成式、有効応力の定義を用いて updated-Lagrangian 法により定式化する⁴⁾。

3. ひずみの局所化解析に与える形状の影響

解析に用いたパラメータを表1に、境界条件を図1に示す。供試体幅が20cm、高さが20cm、40cm、60cmでそれぞれ400要素、800要素、1200要素の供試体を用いて解析した。要素全体としてのみかけのひずみ速度は0.1%/minで強制変位を与えた。変形の局所化のトリガーとして、供試体上下端面には摩擦を考慮し、鉛直方向の節点反力に摩擦係数 C_f を乗じたものを水平方向変位と逆向きに加える。図2に応力-ひずみ関係を、図3に要素全体のみかけの軸ひずみ4.0%、10.0%での粘塑性ひずみの第二不変量の蓄積量 γ^p の分布図を示す。応力-ひずみ関係を見ると、ピーク応力は供試体高さの高いものほど小さい。ピーク応力時のひずみは供試体高さの低いものほど小さい。 γ^p の分布図を見ると、形状に関わらず供試体上端面左右両端から斜め方向にひずみが発達する。軸ひずみが10.0%になる段階で左右非対称なせん断帯が発達するが、このあたりで応力-ひずみ関係に違いが現れる。400要素ではせん断帯が下端面と交わり、折り返すように発達するが、800要素、1200要素ではせん断帯が下端面と交わることはなく、斜めに1本のせん断帯が卓越している。非対称な変形モードになった原因として、上下端面水平方向変位が拘束されることに大きく関係して計算誤差がトリガーとなったことが考えられる。

表1. 解析に用いたパラメータ

圧縮指数 λ	0.172
膨潤指数 κ	0.054
初期間隙比 e_0	0.72
初期圧密応力 σ'_{me}	392 (kPa)
静止土圧係数 K_0	1.0
粘塑性パラメータ m'	21.5
粘塑性パラメータ C	4.5×10^{-8} (1/s)
破壊応力比 M_f^*	1.05
せん断弾性係数 G	5500 (kPa)
軟化パラメータ G_2^*	100
透水係数 $k = k_x = k_y$	1.54×10^{-8} (m/s)
摩擦係数 C_f	0.01

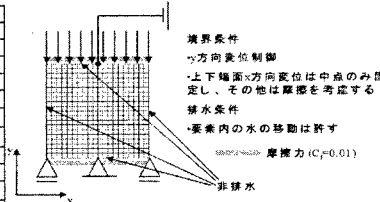


図1 境界条件

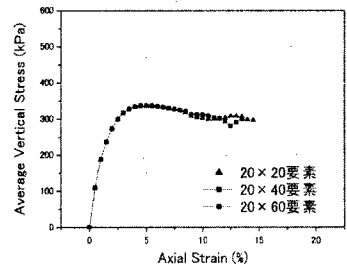


図2 応力-ひずみ関係

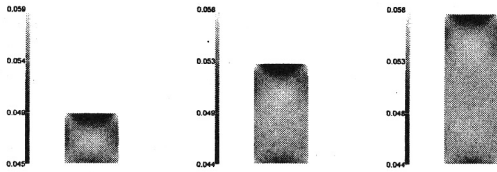


図3 軸ひずみ 10.0%での γ^p の分布図

4. ひずみの局所化解析に与える不均一性の影響

解析に用いたパラメータを表2に、境界条件を図5に示す。供試体は20要素×20要素の正方形とし、上下端面には3節で述べた摩擦境界を適用し、下端面左端のみを固定した。材料の不均一性を再現するため、合同式法による擬似一様乱数を用いて要素ごとの破壊応力比 M_f^* に揺らぎを持たせ、3ケースについて解析を行った。揺らぎ幅は上下2.0%とする。ひずみ速度は1.0%/minとした。図6にCase1の応力-ひずみ関係を、図7、図8にそれぞれケース1での変形図と γ^p の分布図と、均一材料の軸ひずみ12.0%での変形図と γ^p の分布図を示す。応力-ひずみ関係を見ると、ピーク応力は均一材料との差はわずかである。その後、全ケースでひずみ軟化を示すが、不均一材料の方が均一材料に比べて大ひずみでの応力は大きい。 γ^p の分布図、変形図を見ると、軸ひずみ4.0%で下端面左端から斜め方向にひずみの集中帯が発現し、その後、材料の不均一性がひずみの局所化を分散させることがわかる。他の2ケースについても同様の結果が得られたが、破壊応力比の揺らぎの分布パターンとひずみの集中する部分との直接的な関係については今後検討する必要がある。

5. まとめ

供試体形状を変えた解析では供試体長さによってひずみの局所化モードが異なることが明らかになった。今後は3次元での解析も検討する必要がある。また、材料の不均一性により、応力-ひずみ関係に影響を与えることや、ひずみの局所化が分散されるなどの結果が得られた。材料の不均一性によるひずみの局所化は確認されたが、材料定数の揺らぎ分布との直接的な関係については2次元フーリエ変換などを用いて、今後その関連性を調べる必要がある。

参考文献

- 1) Oka, F., Jian, M. and Higo Y., Computer Methods and Advances in Geomechanics, Proc.10th LACMAG, pp.519-524, 2001.
- 2) 小高猛司, 岡二三生, 肥後陽介, 田久勉, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), III-A054, 2000.
- 3) Adachi, T., Oka, F. and Mimura, M., Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.31-42, 1987.
- 4) Oka, F., Adachi, T. and Yashima, A., Int. J. Plasticity, 11, 5, pp.523-545, 1995.

表2 解析に用いたパラメータ

圧縮指数 λ	0.372
膨潤指数 κ	0.054
初期間隙比 e_0	1.28
初期圧密応力 σ_{me}	588.4 (kPa)
先行圧密応力 σ_{mbi}	588.4 (kPa)
静止土圧係数 K_0	1.0
粘塑性パラメータ m'	21.5
粘塑性パラメータ C	4.5×10^{-8} (1/s)
破壊応力比 M_f^*	1.05
せん断弾性係数 G	1.29×10^4 (kPa)
軟化パラメータ G_s^*	100
透水係数 k	1.16×10^{-14} (m/s)

表3 M_f^* に与えた乱数の幅

乱数幅	最小値	最大値
2.0%	1.029	1.071

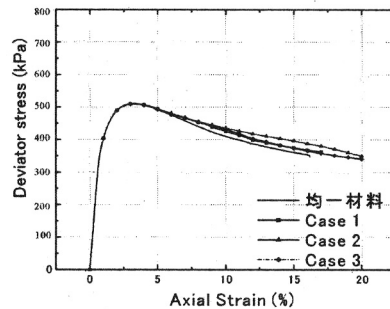


図6 応力-ひずみ関係

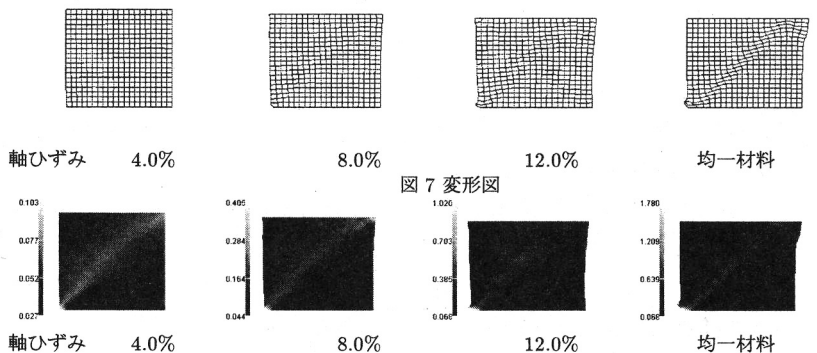


図7 変形図

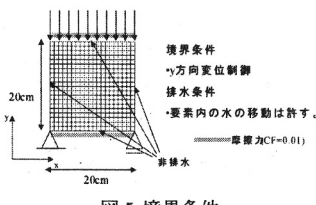


図5 境界条件