

京都大学 正会員 岡 二三生
 京都大学 正会員 小高 猛司
 京都大学大学院 学生員 ○ 肥後 陽介

1. はじめに

一般的に地盤材料は自然環境下で堆積した粒状材料であるため、いかなる地盤材料も細かく見れば不均質であると言える。従って要素試験などによって求まる材料定数は、その材料全体で一定ではなく、少なからず揺らぎのあるものであると考えられる。そこで本研究では、その揺らぎ、すなわち不均質性が粘土材料の変形特性にどのような影響を与えるかを有限要素解析により検討した。特に本研究では、材料内の不均一な変形及びその局所化の進行を精度良く追跡する事が可能な、岡らのひずみ勾配依存性弾粘塑性構成式¹⁾を用いた。

2. ひずみ勾配依存性弾粘塑性構成式と有限要素定式化手法

足立・岡の弾粘塑性構成式²⁾に粘塑性体積ひずみの二階空間勾配($a_3 \nabla^2 v^p$)を導入する。これにより不均質性が及ぼす、不均一な変形やその材料の非局所性を精度良く追跡することが期待できる。

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}}, \quad \langle \Phi_1(F) \rangle = \begin{cases} 0 & (F \leq 0) \\ \Phi_1(F) & (F > 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\gamma \Phi_1(F) = M^* \sigma'_m C_N \exp \left\{ m'_N \left(\ln \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \right) + \frac{\bar{\eta}^*}{M^*} - \frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^p - a_3 \nabla^2 v^p \right) \right\} \quad (2)$$

ε_{ij}^{vp} : 粘塑性ひずみ速度テンソル σ'_{m0} : 初期圧密応力 C_N, m'_N : 粘塑性パラメータ M^* : 破壊応力比
 λ : 圧縮係数 σ'_m : 平均有効応力 e : 間隙比 γ : 粘性係数 v^p : 粘塑性体積ひずみ κ : 膨潤指数
 $\bar{\eta}^*$: 相対応力比 a_3 : 粘塑性体積ひずみの二階空間勾配にかかる係数

なお、 $\Phi_2(\xi)$ は第二材料関数であり、次式で表される。

$$\Phi_2(\xi) = 1 + \xi, \quad \xi = \frac{M_f^* \bar{\eta}_x^*}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^*)}{\bar{\eta}^*} \right\}} \quad (3)$$

$$\bar{\eta}^* = \left\{ \left(\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^* \right) \left(\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad G_2^*: \text{軟化パラメータ} \quad (4)$$

有限要素法については、釣り合い式・連続式・構成式を Updated Lagrangian 法により時刻 $t + \Delta t$ で離散化している。

3. 不均質粘土の模擬

本研究では、不均質な粘土材料を表現するため、一様乱数を用いて破壊応力比 M^* に揺らぎを持たせ、各要素に異なる値の破壊応力比 M^* を代入した(式(5)) M^{*i} 。破壊応力比 M^* に揺らぎを持たせる事は、各要素が破壊に耐えうる応力に差異を持たせる事となり、不均一な変形やそれによる局所化が期待できる。

$$M^{*i} = M^* \times \{ 1 + (x_i - 0.5) \times 2 \times k / 100 \} \quad (5)$$

M^{*i} : 乱数を与えた後の M^* x_i : $0 \leq x_i < 1$ の一様乱数 k : 与える揺らぎの幅

4. 解析及び考察

20cm×20cm の土供試体を用いて平面ひずみ非排水圧縮試験をシミュレートした。材料定数を表-1に示す。これを400要素に分割し、図-1のような境界条件で解析を行った。

まず、均質な場合について解析を行ったが、変形(図-2)及び過剰間隙水圧の分布は均一であった。また、軸差応力-軸ひずみ関係も図-3に示すように、ピーク後は応力がほぼ一定であった。

次いで、不均質な場合については、 M^* に与えた揺らぎ幅を0.25%、0.5%、1.0%、2.0%、のパターンについて解析を行った。図-3を見ると揺らぎ幅0.25%の時以外は均質な場合とは異なる挙動を示している。また軸差応力の増加に伴い、変形・過剰間隙水圧が局所化するという結果が得られた。揺らぎ幅2.0%の場合について変形図、過剰間隙水圧のコンター図を図-4に示す。軸差応力が増加し始める軸ひずみ7.0%あたりから変形と過剰間隙水圧の局所化が始まり、軸ひずみ20.0%では特に変形の局所化が際立っている。

Fusao Oka, Takeshi Kodaka and Yousuke Higo

5. 結論

乱数により破壊応力比 M^* に揺らぎを持たせる事で不均質な粘土材料を模擬し、ひずみ勾配依存性弾粘塑性構成式を用いて変形解析を行い、均質な場合と比較する事で不均質性の影響を検討した。その結果次のような結論を得た。

- 材料の不均質性により、ピーク後の軸差応力が増加し、それと同時に変形、過剰間隙水圧が局所化する。
- 破壊応力比に揺らぎを与える場合は、揺らぎ幅0.25%以内であれば不均質性の影響はなく、均質であると呼んでも差し支えない。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Adachi, T. and Aifantis, E. C. : Instability of gradient dependent visco-plasticity model for clay saturated with water and FEM analysis, Applied Mechanics Review, ASME, 45, 3-2, pp.140-148, 1992.
- 2) Adachi, T. and Oka, F. : Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, Soils and Foundations, 22(4), pp.57-70, 1982.

表-1 材料定数

圧縮指数	λ	0.372
膨潤指数	κ	0.054
初期平均有効応力	σ'_{m0}	6.0(kgf/cm ²)
間隙比	e	1.28
粘塑性パラメータ	m'_N	21.5
粘塑性パラメータ	C_N	4.5×10^{-8} (1/sec)
破壊応力比	M^*	1.05
せん断弾性剛性	G	132.1(kgf/cm ²)
透水係数	k	1.16×10^{-12} (cm/sec)
ひずみ速度	$\dot{\epsilon}$	1.0(%/min)
軟化パラメータ	G_2^*	100

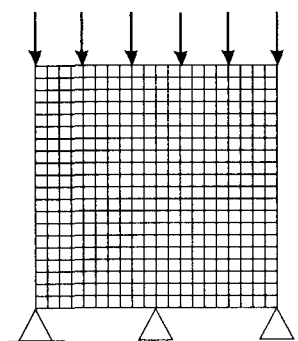


図-1 供試体の境界条件

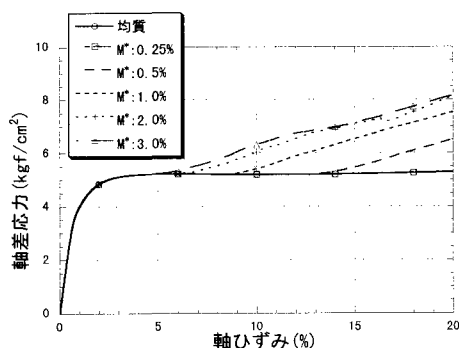


図-3 軸差応力-軸ひずみ関係

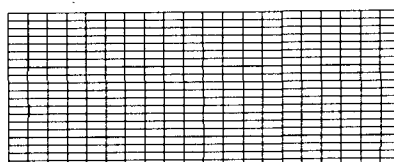


図-2 均質な場合の変形図(軸ひずみ20%)

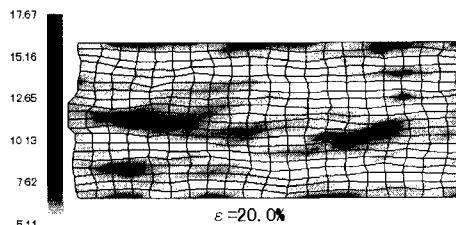
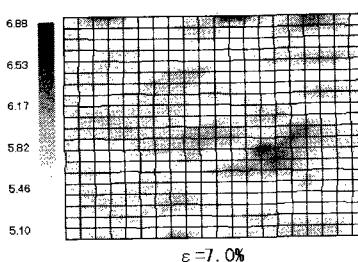
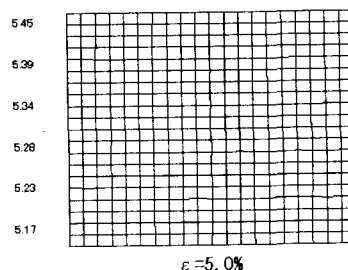


図-4 変形及び過剰間隙水圧コンター図(揺らぎ幅3.0%)