

127 弾粘塑性構成式による不均一な粘性土の変形解析

京都大学(院) 岡 二三生

京都大学(院) ○肥後 陽介

京都大学(院) 藤田 裕司

1 緒 言

粘性土などの地盤材料は土粒子と間隙によって構成されており、その構造は不均一である。また、地盤材料がせん断されると、せん断帯の発生に見られるように変形が局所化することも知られている。そこで本研究では、粘性土の時間依存性挙動と限界状態における材料の不安定性を表現可能な、足立・岡の弾粘塑性構成式¹⁾を用いて、不均一な粘性土の変形解析を行い、材料の不均一性が変形の局所化に与える影響について検討した。解析方法は、有限変形水一土連成有限要素法であり、updated-Lagrangian 法により定式化した。

2 足立・岡の弾粘塑性構成式

足立・岡¹⁾は粘性土の弾塑性モデルである Cam-Clay Model²⁾ および、Perzyna³⁾ による弾粘塑性理論に基づいて粘性土特有の時間依存性を表現できる、超過応力型の弾粘塑性構成式を導いた。足立・岡モデルでは関連流動則を用いて粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ が以下のように定義される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_1(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (1)$$

$$F = \frac{f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{vp}) - \kappa_s}{\kappa_s} \quad (2)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij} \quad (3)$$

γ は粘性パラメータ、 f は動的降伏関数、 κ_s は硬化パラメータ、 σ_{ij} は全応力テンソル、 σ'_{ij} は Terzaghi の有効応力テンソル、 u_w は間隙水圧、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。 $\langle \rangle$ は Macaulay の括弧で以下のような関係を定義するものである。

$$\langle \Phi_1(F) \rangle = \begin{cases} 0 & (F \leq 0) \\ \Phi_1(F) & (F > 0) \end{cases} \quad (4)$$

$\Phi_1(F)$ はひずみ速度依存性を表す関数で、実験結果に基づいて決定される。

$$\gamma \Phi_1(F) = \exp \left\{ m' \left(\frac{\bar{\eta}^*}{M_f^*} + \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{me}} - \frac{1+e}{\lambda - \kappa} v^p \right) \right\} \quad (5)$$

$$\bar{\eta}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma'_m} \quad , \quad \eta_{ij(0)}^* = \frac{S_{ij(0)}}{\sigma'_{m(0)}} \quad (7)$$

ここで、 C 、 m は粘塑性パラメータ、 M_f^* は破壊応力比、 σ'_{me} は初期平均有効応力、 e は間隙比、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 v^p は粘塑性体積ひずみである。

このうち、粘塑性パラメータ C 、 m は異なるひずみ速度によって行われた実験結果により求まるパラメータである。また、 η_{ij}^* は応力比テンソルで S_{ij} は偏差応力テンソル、下添え字の (0) はそれぞれの初期値をあらわす。

足立ら⁴⁾はこの段階での足立・岡モデルではクリープ破壊などの材料不安定性を表現できないことを指摘した。そして足立ら⁴⁾は材料不安定性を表現するために第二材料関数を導入し、以下のような流れ則を仮定した。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (8)$$

第二材料関数 $\Phi_2(\xi)$ は次のように定義された。

$$\Phi_2(\xi) = 1 + \xi \quad (9)$$

$$\xi = \frac{M_f^* \bar{\eta}^*}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^*)}{\bar{\eta}^*} \right\}} \quad (10)$$

ここで、 G_2^* は軟化パラメータである。第二材料関数は応力比が破壊応力比に近づくに従って大きくなり、限界状態付近でひずみ速度を増大させる。このことにより、足立・岡モデルはクリープ破壊などの材料不安定性が表現可能となった。

3 不均一な粘性土のひずみの局所化解析

3.1 解析方法 前節で誘導された弾粘塑性構成式を用いた有限変形水一土連成有限要素法により、ひずみの局所化解析を行った。応力速度には Cauchy 応力の Jaumann 速度を用い、Updated-Lagrangian 法により、全体相のつりあい式と流体相の支配方程式を離散化した。変位には 8 節点アイソパラメトリック要素、間隙水圧には 4 節点アイソパラメトリック要素を用いており、それぞれ 2×2 の Gauss Point を持つ。

3.2 不均一な粘土材料 本解析で対象とする不均一な粘土材料の模擬には擬似一様乱数を用いた。擬似一様乱数により材料定数のひとつである破壊応力比 M_f^* に揺らぎをもたせ、分割されたそれぞれの要素に異なる破壊応力比 M_f^* を与えた。Table 1 に解析に用いた材料定数を示す。破壊応力比の平均値は 1.05 であり、これに本研究では 2% の揺らぎを与えたので、最大値最小値は以下ようになった。

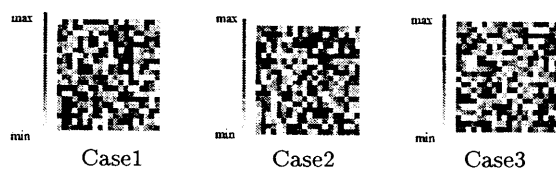
$$\max \quad 1.05 \times 1.02 = 1.071$$

$$\min \quad 1.05 \times 0.98 = 1.029$$

Fig.1 は異なる乱数列を用いて揺らぎを与えた時の破壊応力比 M_f^* の分布図である。ここに示す 3 ケースについて解析を行った。

Table 1 Material parameters for the analysis

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}	600 (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	1.32×10^4 (kPa)
軟化パラメータ G_2^*	100
透水係数 k	1.16×10^{-14} (m/s)
摩擦係数 C_f	0.01

Fig.1 Distribution of M_f^*

3.3 粘土材料の不均一性がひずみの局所化解析に及ぼす影響 3.2節で模擬した不均一な粘性土材料についてひずみの局所化解析を行い、材料の不均一性が変形の局所化に及ぼす影響について検討を行った。境界条件と供試体サイズは Fig.2 に示すようになっており、平面ひずみ圧縮試験をひずみ制御でシミュレーションした。供試体上下端面には摩擦境界を適用したが、摩擦係数 C_f は摩擦力がひずみの局所化のトリガーとなるのに十分な値 0.01 とした。解析結果の応力～ひずみ関係を Fig.3 に示す。ピーク応力を迎える軸ひずみ約 5% までは各ケースの差はわずかであるが、それ以降は均一材料よりも不均一材料のほうが軸差応力が大きくなった。Fig.4 は均一材料 (a) と不均一材料 (b) について粘塑性偏差ひずみの不変量の蓄積量 $\gamma^p (= \int d\gamma^p dt, d\gamma^p = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}}; de_{ij}^{vp})$ の分布図である。これらの図から、均一材料、不均一材料共に変位を固定した左下端から斜め上方向にひずみが局所化していることがわかる。しかし軸ひずみが大きくなると、均一材料では一本のせん断帯が明確に現れるのに対して、不均一材料ではひずみが比較的広範囲に分布しており、最大値も小さいことが見てとれる。ひずみの値が小さければ、ひずみ軟化の度合も小さいといえることができるので不均一材料のほうが軸差応力が大きくなることと関連していると考えられる。他の 2 ケースについても同様のことが言えるが、 M_f^* の分布パターンとひずみの集中する部分との関係について今後検討する必要がある。

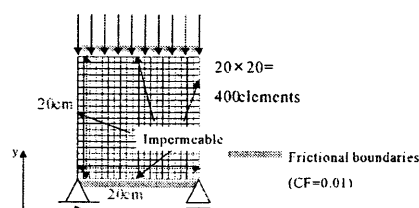


Fig.2 Boundary conditions and size of specimen

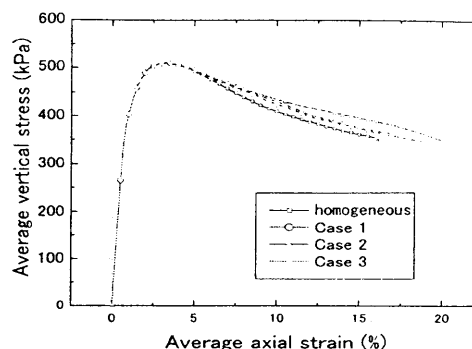
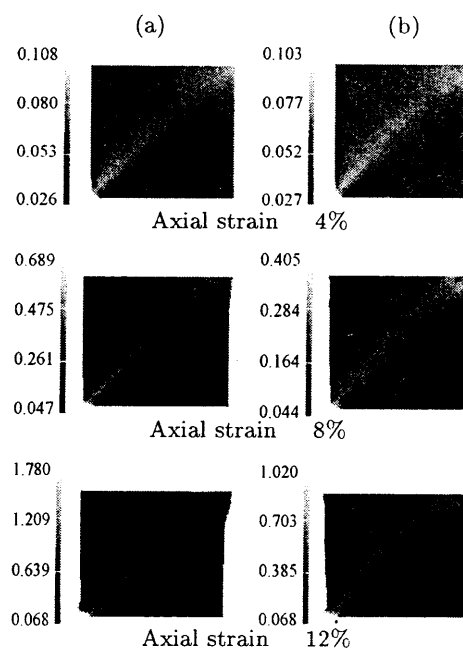


Fig.3 Stress-strain relationships

Fig.4 Distribution of γ^p

4 決言

足立・岡の弾粘塑性構成式を用いて、不均一な粘性土材料のひずみの局所化解析を行ったところ、材料の不均一性がその応力～ひずみ関係および変形パターンに及ぼす影響が明らかとなった。今後は様々な乱数パターンと揺らぎ幅を持つ粘性土材料についても解析を行い不均一性の影響を研究すると共に、 M_f^* の分布パターンとひずみの集中する部分との関係についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) T.Adachi and F.Oka, Soils and Foundations, **22**(4), 57(1982).
- 2) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A., Geotechnique, **13**(3), 221(1963).
- 3) Perzyna, P, Proc. of Vibrational Problems, Warsaw, **4**(3), 281(1963).
- 4) T.Adachi, F.Oka and M.Mimura, Proc. 8ARC. on SMFE, Kyoto, **1**, 5(1987).