

非局所理論を用いた初期不整粘土供試体の変形局所化解析

岐阜大学 ○学生員 福島 耕司 今江 礼行 正会員 沢田 和秀 八嶋 厚

はじめに

地盤材料の変形が進むと極度に変形の集中した領域が現れ、ついには破壊へと至る。ここで破壊近傍の数値解析を目的とした場合、地盤材料の持つ特性長さ(粒径など)を考慮していない有限要素解析を行った場合、メッシュ分割の大きさにより得られる解に差異が生じることが知られている。このような問題点を解決する方法として、ひずみ勾配依存型理論・コセラ連続体理論を導入することが挙げられる。本研究では、局所変形を顕在化させるため供試体の両側面に微小な初期不整をあらかじめ与え、正規圧密粘土における局所破壊現象の数値シミュレーションを行う。そしてそれぞれの理論が解析結果に及ぼす影響について比較・検討する。

構成式

粘塑性体積ひずみの二階勾配を導入した場合

式(1)に、足立・岡の弾粘塑性構成式¹⁾に粘塑性体積ひずみの二階勾配を導入したものを示す。この二階勾配項は、長さの次元を持つためせん断帯の幅など特性長さの表現が可能であり、また有限要素解析における解析解のメッシュサイズ依存性を緩和できると考えられる。

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

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

ε_{ij}^{vp} : 粘塑性ひずみ速度テンソル σ'_{m0} : 初期圧密応力 C : 粘塑性パラメータ M^* : 破壊応力比
 λ : 圧縮指数 σ'_m : 平均有効応力 e : 間隙比 γ : 粘性係数 v^p : 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項にかかる定数 σ'_{ij} : 有効応力テンソル
 f : 動的降伏関数

なお、 $\Phi_2(\xi)$ は第2材料関数であり、次式で表される。

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

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

コセラモデルを導入した場合

本研究では、偶応力と材料の特性長さを考慮した。流れ則は以下の式で与えられる。

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = c \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \quad , \quad \kappa_{ij}^{vp} = c \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial m_{ij}} \quad (4)$$

κ_{ij}^{vp} : 粘塑性の曲率速度テンソル c : 粘性係数 m_{ij} : 偶応力テンソル

$\Phi(F)$: ひずみ速度効果に関する材料関数

ここで降伏関数は以下のように表される。

$$f = \frac{\sqrt{2J_2}}{M^* \sigma'_m} + \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} = 0 \quad (5)$$

σ'_{m0} : 硬化パラメータ

ここで J_2 は偏差応力 S_{ij} と偶応力テンソルと特性長さ l_c の2次不変量である。(5)式中の J_2 は次式で表される。

$$J_2 = \frac{3}{4} S_{ij} S_{ij} + \frac{1}{4} S_{ij} S_{ji} + \frac{2}{l_c^2} m_{ij} m_{ij} \quad (6)$$

材料関数 $\Phi(F)$ は

$$\Phi(F) = M^* \sigma'_m \text{Cexp} \left\{ m' \left(\frac{\sqrt{2J_2}}{M^* \sigma'_m} + \ln \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{me}} \right) - \frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^p \right) \right\} \quad (7)$$

σ'_{me} : σ'_m の初期値

解析方法

大阪沖積粘土の材料定数を用いて、縦20cm×横10cmの粘土供試体に初期不整として微小な余弦波(振幅0.003cm)を与え、ひずみ速度1.0(%/min)で平面ひずみ圧縮せん断試験の有限要素シミュレーションを行った。要素分割は、5×10、10×20、20×40要素の3種類とした。その際、粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項にかかる係数 a_3 、コセラ理論特有の係数 l_c を変化させる。図1に粘土供試体の境界条件、表1に材料定数を示す。

解析結果と考察

図2に、ひずみ勾配依存型モデルを用いて数値解析したときの、勾配項($a_3 \nabla^2 v^p$)にかかる係数 a_3 が0, 5.0における50, 200, 800要素での変形メッシュ図を示す。800要素の変形メッシュ図より、せん断帯の発生が抑制され、メッシュサイズ依存性が緩和している様子がわかる。これは、式(2)からわかるように、勾配項にかかる係数が正($a_3 = 5.0$)のとき、粘塑性ひずみの発生が抑制されるからである。50, 200要素では、800要素ほど勾配項の影響は確認できなかった。

同様に、コセラ連続体理論においてもコセラ理論特有の係数 l_c を変化させることにより局所部分に与える影響を考察する。

参考文献

1) Adachi.T and Oka.F (1982): Constitutive equation for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, Soils and Foundation, 22(4), pp.57-70

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'	21.5
粘塑性パラメータ	C	4.5×10^{-8} (1/sec)
破壊時の応力	M^*	1.05
せん断弾性係数	G	132.1(kgf/cm ²)
透水係数	k	1.16×10^{-12} (cm/sec)

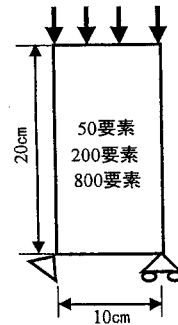


図1 境界条件

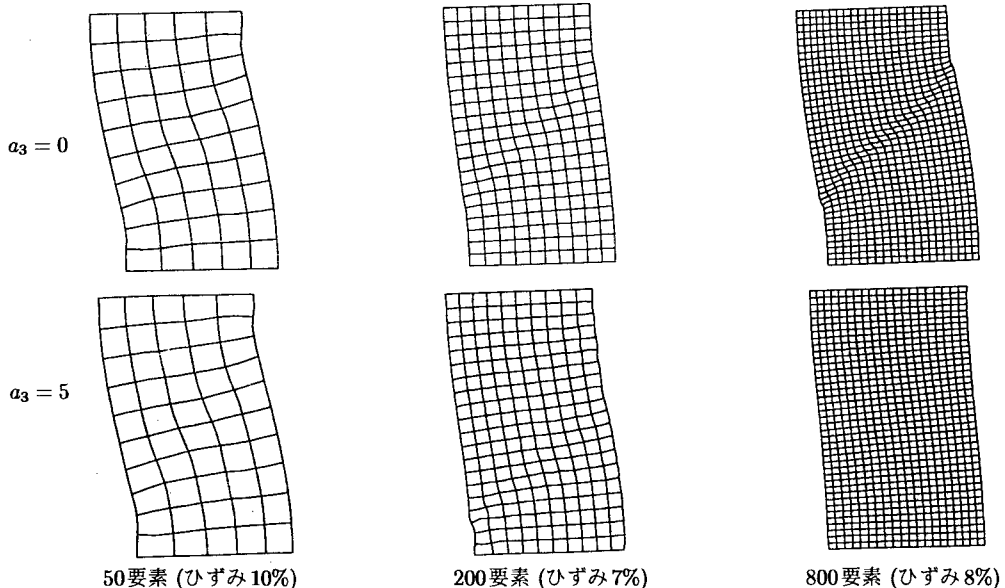


図2 変形メッシュ図