

Ⅲ-B379

塑性ひずみ勾配項の係数が粘土の局所変形解析結果に及ぼす影響について

岐阜大学 正会員 沢田 和秀 八嶋 厚 学生会員 福島 耕司 京都大学 岡 二三生

1. はじめに

これまで筆者らは、非局所理論の一つであるひずみ勾配理論を用いて粘土の有限要素解析を行い、粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項が、粘土の局所変形領域にどのような影響を及ぼすかを検討してきた。勾配項内の粘塑性体積ひずみの影響により、各有限要素の変形が抑えられ、それにより供試体全体の変形が抑えられ強度が増すという結果が得られた。このことから、供試体に発生するせん断帯の幅を大きくする、またはせん断帯に変形が集中しなくなるような勾配項の値があることも分かっている。しかしながら、この値は供試体の形状や要素分割数、境界条件のみならず、せん断速度や粘土の材料定数など、種々の条件により決定される。この値の決定法が分かれば、有限要素解析におけるメッシュサイズの影響を受けることなく、効率よく数値解析が行える。

本研究では、これまでの研究と同様に足立・岡の弾粘塑性構成式に粘塑性体積ひずみの二階空間勾配を導入し、有限要素解析を行った。これまでの有限要素解析では、局所変形の起こりやすい条件を設定していたが、それが原因で勾配項の影響が率直に理解できなかった面もあると考えた。今回は局所変形の引き金となるような境界条件にはせず、要素メッシュ数を一定とし、二階空間勾配項にかかる係数をこれまでより細かく変化させ粘土の変形解析を行った。

2. 構成式と解析手法

岡・足立の弾粘塑性構成式に粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項 ($a_3 \nabla^2 v^p$) を導入している。この長さの次元をもつ項の導入によって、物理的には材料の特性長さの表現を、数学的には有限要素解析解のメッシュサイズ依存性を緩和することが期待できる。

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

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

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 : 圧縮指数, e : 間隙比, σ'_m : 平均有効応力, 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 : 粘塑性ひずみ勾配に関する材料定数

上式中の第二材料関数 $\Phi_2(\xi)$ は次式のように仮定した。

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

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

第二材料関数は次の二つの条件を満たす。ここで $\eta_{mn(0)}^*$ の (0) は圧密終了後の初期値を示す。

- ・ 限界状態で ξ は無限大になり $\Phi_2(\xi)$ は無限大になる。
- ・ ξ は正の値を取る。

本研究では、有限変形理論に基づき、粘塑性体積ひずみを1要素8節点で定義し有限変形有限要素解析プログラムに導入した。有限要素解析を行う際に粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項を形状関数を用いて定式化しているため、つり合い式、連続式の他に構成式も有限要素法によって離散化している。また固体-流体連成の支配方程式はBiotの理論に基づいて定式化している。

3. 解析及び考察

10cm × 20cmの正規圧密粘土に対する非排水圧縮試験をシミュレートした。ただし要素供試体内の間隙水の移動は許している。解析に用いた要素メッシュの形状及び境界条件を図1に、材料定数は表1に示した。図1の供試体について有限要素メッシュを20 × 40要素に分割した。ひずみ勾配にかかる係数 a_3 を0から3(cm²)まで順に変化させ結果を考察した。すべての計算はみかけの軸ひずみ10%まで行ったが、ひずみ勾配にかかる係数 a_3 の値により、解が分散してしまい見かけの軸ひずみ10%まで計算できない場合もあった。

図2には見かけの軸ひずみ10%時の変形メッシュを、図3にはせん断ひずみ分布 ($\sqrt{\gamma_{xy} \gamma_{xy}}$) を示した。それぞれの図で左からひずみ勾配にかかる係数 a_3 の値は0, 1, 2, 3(cm²)となっている。図2、図3より、ひずみ勾配にかかる係数 a_3 の値が0(cm²)の場合はせん断帯がはっきりしているが、 a_3 の値が1(cm²)になるとその幅が広がり、 a_3 の値が2(cm²)になると全く分からなくなる。しかし a_3 の値を3(cm²)にすると再びせん断帯がはっきり現れる。また、図3のせん断ひ

キーワード：塑性ひずみ勾配理論、局所変形領域、弾粘塑性構成式

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部 土木工学科 電話058-293-2422 FAX058-230-1891

ずみ分布 ($\sqrt{\gamma_{xy}\gamma_{xy}}$) の値をみると、その最高値は左から 0.39, 0.35, 0.26, 0.41 となっている。つまり、ひずみ勾配にかかる係数 a_3 の値がある値 (本研究の場合 $2(\text{cm}^2)$) まではひずみを抑制するが、それを越えるとさらに大きなひずみを発生させていることになる。他にも、供試体の上部左端の側方変位の絶対値をみてみると、 a_3 の値が $2(\text{cm}^2)$ のときが一番小さくなっており、逆に a_3 の値が $3(\text{cm}^2)$ の場合は他のどれよりも大きくなっている。以上のことから、この解析においては供試体のひずみをもっともよく抑えることのできる a_3 の値は $2(\text{cm}^2)$ であることが分かった。勾配項を考慮しない場合からその値までは徐々にひずみの集中がなくなっていくが、この値を超えた場合の勾配項から受ける供試体の影響はさらに数値解析を行い検討する必要がある。

参考文献

- 1) Oka, F., Adachi, T. and Mimura, M., Elasto-viscoplastic constitutive model for clay, Proc. of the International Conference on Rheology and Soil Mechanics, Edited by M. J. Keedwell, Coventry, UK., 12-16, September, 1988. pp. 12-18
- 2) ひずみ勾配依存弾塑性構成式による粘性土の局所変形解析, 今江礼行, 岐阜大学修士論文, 1999

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}	588 (kPa)
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	$4.5 \times 10^{-8} (1/\text{sec})$
破壊時の応力	M^*	1.05
せん断弾性定数	G	12945.8 (kPa)
透水係数	k	$1.16 \times 10^{-12} (\text{cm}/\text{sec})$
ひずみ速度	$\dot{\epsilon}$	1.0 (%/sec)
軟化パラメータ	G_2^*	100

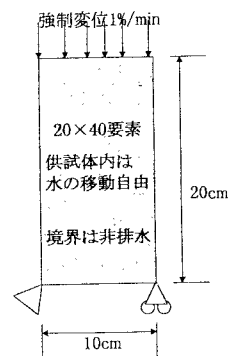


図1 境界条件

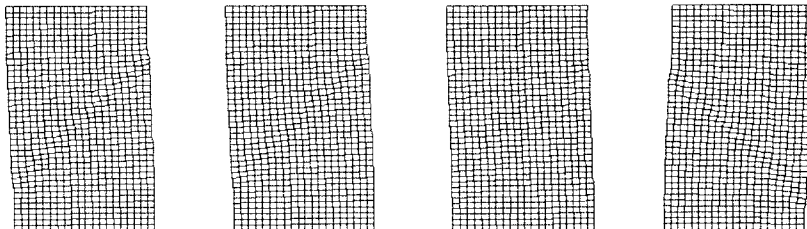


図2 みかけの軸ひずみ10%時の変形メッシュ (左から $a_3 = 0, 1, 2, 3(\text{cm}^2)$)

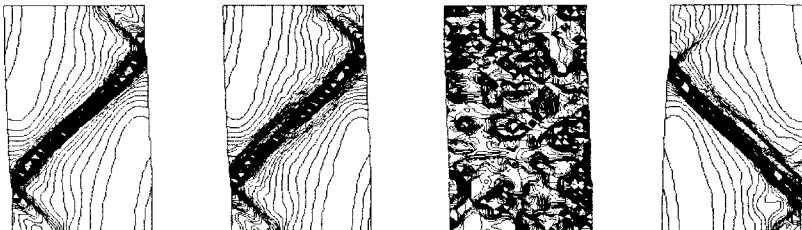


図3 みかけの軸ひずみ10%時のせん断ひずみ ($\sqrt{\gamma_{xy}\gamma_{xy}}$) の分布 (左から $a_3 = 0, 1, 2, 3(\text{cm}^2)$)