

III-B 391

粘塑性ひずみ勾配型理論に基づく地盤の変形解析

岐阜大学 ○正会員 沢田 和秀 岡 二三生 八嶋 厚 脇田 智史

1. はじめに

自然粘土地盤上に盛り土などの荷重が作用したとき、破壊に近づくと、すべり面やせん断帯などの局所の変形が発生し、破壊が進展していく。この局所変形の位置や大きさ（幅）及び、局所変形が顕在化した後の挙動を知ることが、構造物の安全性を評価する上で非常に重要である。

ところが、従来の材料の特性長さ（粒径など）を考慮していない有限要素解析では、変形が一部に過度に集中して破壊に至るため、せん断帯の幅の予測が不可能であった。また、数値解析においては、材料の特性長さを考慮していない有限要素解析では、メッシュ分割の大きさにより得られた解に差異が生じる事が知られている。このような問題を解決する方法として、塑性ひずみの勾配項を導入する塑性ひずみ勾配型理論があげられる。本研究では、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、粘塑性体積ひずみを1要素8節点で、変位は1要素8節点・間隙水圧は1要素4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、解析結果を検討した。

2. 解析に用いた支配方程式

岡・足立・三村ら¹⁾は、従来の超過応力型の弾粘塑性構成式では表現できなかったクリープ破壊を表現するため、限界状態においてのひずみ速度依存性を考慮した第2材料関数の導入を行った。

粘塑性ストレッチングテンソル D_{ij}^{vp} を用いるので、関係式は次式となる。

$$D_{ij}^{vp} = \langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f}{\partial T_{ij}} = \langle \Phi(F, \xi) \rangle, \quad M^* : \text{破壊応力比} \quad (1)$$

$$\Phi_2(\xi) = 1 + \xi, \quad \xi = \frac{M_f^* \bar{\eta}_x}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^*)}{\bar{\eta}_x} \right\}} \quad (2)$$

$$\bar{\eta}_x = (\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^*) (\eta_{mn}^* - \eta_{mn(0)}^*)^{\frac{1}{2}} \quad G_2^* : \text{粘塑性パラメータ}, \bar{\eta} : \text{相対応力比} \quad (3)$$

第二材料関数は次の二つの条件を満たす。

・限界状態では 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、足立・岡^{1),2)}の弾粘塑性構成式に塑性ひずみの空間二階勾配の導入を行う。この二階勾配項を導入することにより、物理的には二階微分は長さの次元を持つため、せん断帯の幅の表現が可能となり、数学的には有限要素解析を行う際のメッシュサイズによる解析解の差異を緩和できると考えられる。

解析に用いた弾粘塑性構成式は、足立・岡の提案した下記のモデルを用いた。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}}, \quad \langle \Phi_1(F) \rangle = \begin{cases} 0 & (F \leq 0) \\ \Phi_1(F) & (F > 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi_1(F) = M^* \sigma'_m C_N \exp \left\{ m'_N \left(\ln \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \right) + \frac{\bar{\eta}^*}{M^*} - \frac{1+c}{\lambda-\kappa} v^p - a_3 \nabla^2 v^p \right) \right\} \quad (5)$$

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
 v^p : 塑性体積ひずみ κ : 膨潤指数 $\bar{\eta}$: 相対応力比 a_3 : 粘塑性ひずみ勾配に関する定数

有限要素解析を行う際には、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、釣り合い式・連続式の他に構成式も有限要素法によって離散化し、解析プログラムに導入した。

3. 解析及び考察

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の中心の要素は第二材料関数の効果により、ひずみ軟化の度合いを強く設定している。（弱い要素）図2は変位0.36cmでの解析メッシュの変形図である。また、図3にせん断力-変位関係を図4に図1の示したx軸での塑性体積ひずみを示す（変位0.36cm）。図3においては粘塑性体積ひずみに関する定数 $a_3 (1/cm^2)$ の影響によって、せん断力が大きく異なっている。また、図4において塑性体積ひずみの値は、 a_3 の正負の符号により逆の位相をとっている。これにより塑性体積ひずみの二階空間勾配項の符号が正の場合（ a_3 が負の場合）ひずみの増加を抑制されている。せん断帯の幅から塑性体積ひずみの二階空間勾配項の a_3 についての適正な数値を見つけることができると考えられる。

4. まとめ

今回の1次元的な解析により、塑性体積ひずみの二階空間勾配項を弾粘塑性構成式に導入することでひずみの局所的な増長を緩和できることが明らかになった。

参考文献

1) Oka, F., T. Adachi and M. Mimura, (1988), Elasto-viscoplastic constitutive modulus for lay, Proceedings of the International Conference on Rheology and Soil Mechanics, Edited by M. J. Keepwell, Coventry, UK., 12-16, September, 1988, pp. 12-28

2) Oka, F., A. Yasima, i. Kohara and T. Adachi (1994), Instability of a viscoplastic model for clay and numerical study of train localisation, Localisation and Bifurcation Theory of Soils and Rocks

表-1 材料定数

圧縮指数	λ	0.355
膨潤指数	κ	0.0477
初期平均有効応力	σ'_{m0}	$1.0(kgf/cm^2)$
間隙比	e	2.0
粘塑性パラメータ	m_N	12.8
粘塑性パラメータ	C_N	$2.85 \times 10^{-8}(1/sec)$
破壊時の応力	M^*	1.45
ポアソン比	ν	0.495
粘塑性パラメータ	G_2^*	0.1
粘塑性パラメータ（弱要素）	G_2^*	0.001

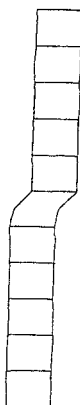


図2：メッシュ変形図

図3において勾配項なしと勾配項正のグラフは重なっている。

(勾配項正 > 勾配項なし)

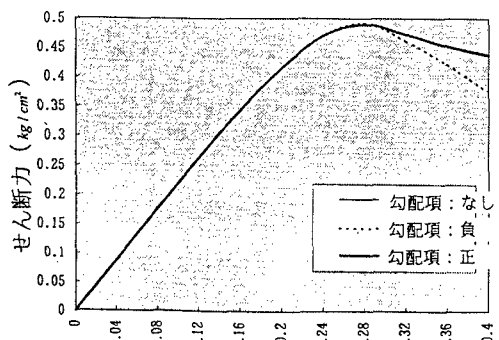


図3：せん断力－変位関係

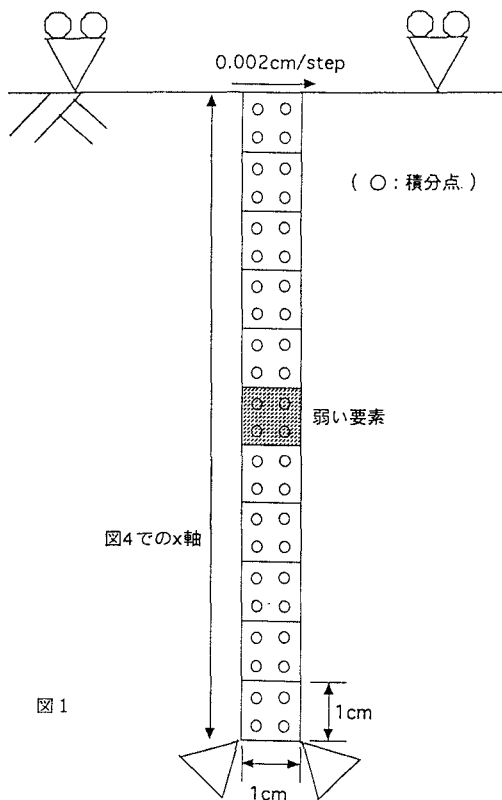


図1

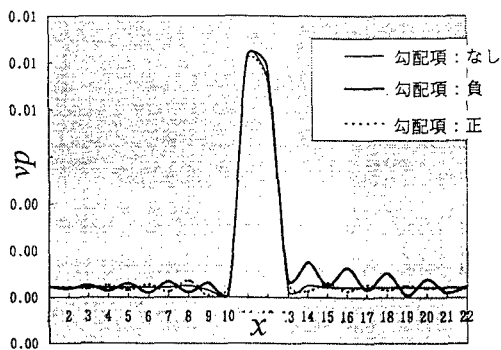


図4 $v p$ の分布