

勾配項の係数が初期不整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 ○学生員 福島 耕司 加藤 治弘 正会員 沢田 和秀 八嶋 厚

はじめに

粘土や砂などの地盤材料は、破壊に至る過程で変形が局所化してせん断帯が形成されることがある。このせん断帯の方向や大きさなどを予測することは、地盤の破壊過程を予測する上で非常に重要である。予測手法の一つとして有限要素法を用いた数値解析が挙げられるが、材料の持っている特性長さを考慮しない数値解析では、メッシュの大きさによって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非局所理論に着目した。その中の1つの方法である勾配依存型理論[1]を適用し、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項を導入したモデルを用いて有限要素解析を行った。これまでの研究[2]でもこのモデルを用いて解析を行い、勾配項が粘土の局所変形にどのように影響を及ぼすかが検討されてきた。その結果、勾配項の影響により供試体の局所変形を緩和するケースがあることが確認できた。しかしながら、粘塑性体積ひずみの二階勾配の値は供試体の形状・要素分割数・境界条件・粘土の材料定数など、種々の条件によって変化する。有限要素解析においてメッシュサイズの影響を回避するような二階勾配にかかる係数が決定できれば、精度よく数値解析が行える。

本研究では、これまでと同様に足立・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項を導入したモデルを用いて有限要素解析を行う。これまでの解析では、局所変形の起こりやすい非対称的な初期形状を設定していたが、それが原因で勾配項の影響が直接的に理解できなかった面もあると考えた。そこで今回は局所変形の引き金となるような境界条件を設定せず、要素分割数を一定として勾配項にかかる係数を変化させて粘土の局所変形解析を行う。さらに、解析結果に影響を及ぼす要因として考えられるひずみ速度・軟化項・透水性などに関する係数も変化させ、これらの及ぼす影響について得られた解析結果より検討する。

弾粘塑性構成式

モデルには粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項($a_3 \nabla^2 v^p$)を新たに導入した足立・岡の弾粘塑性構成式(1)を用いる。この二階勾配項の係数 a_3 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。

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

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

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$: 粘塑性ひずみ速度テンソル f : 動的降伏関数 σ'_{m0} : 初期圧密応力 C, m' : 粘塑性パラメータ
 γ : 粘性係数 M^* : 破壊応力比 λ : 圧縮指数 κ : 膨潤指数 σ'_m : 平均有効応力 e : 間隙比
 v^p : 粘塑性体積ひずみ $\bar{\eta}^*$: 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係数

なお、 $\Phi_2(\xi)$ は第2材料関数であり、次式で表される。

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

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

解析方法

大阪沖積粘土の材料定数を用いて、粘塑性体積ひずみの二階空間勾配項にかかる係数を $m'a_3 = 0, 1, 2, 3(\text{cm}^2)$ と変化させ、縦 $20(\text{cm}) \times$ 横 $10(\text{cm})$ の正規圧密粘土供試体の非排水圧縮試験を強制変位速度 $0.5(\%/min)$ で最終軸ひずみ 10% まで解析する。この際、初期供試体形状として、両側面に対称の微少不整を与えた。本解析では余弦波(振幅 $0.003(\text{cm})$)を供試体の両側面に位相差 π で与えた。表1に材料定数を、図1に境界条件を示す。

解析結果と考察

図2には見かけの軸ひずみ 9% 時における変形メッシュ図・せん断ひずみ測度($\sqrt{\gamma_{xy}\gamma_{yx}}$)の分布図(0.15 以上の数値)を示す。図3には局所変形領域内(要素番号411)の有効応力径路・偏差応力の第二次不変量とせん断ひずみ測度の関係を示す。図2より、勾配項にかかる係数 $m'a_3$ の値が $0, 1(\text{cm}^2)$ の場合はせん断帯がはっきりとみられるが、 $m'a_3$ の値が $2, 3(\text{cm}^2)$ となるにつれてせん断帯が分散し、ひずみが供試体全体に分布するようになる。また、せん断ひずみ測度の値をみると、その最高値は $m'a_3$ の値を 0 から順に大きくするにつれて $0.72, 0.55, 0.54, 0.47$ となっている。図3より、局所変形領域内におけるひずみの発生も、 $m'a_3$ の値を 0 から順に大きくするにつれて小さくなっていることがわかる。

以上のことから勾配項にかかる係数 $m'a_3$ の値を大きくするとひずみの局所的な発生を抑制し、局所変形を緩和することがわかる。

今後の課題として、勾配項にかかる係数 $m'a_3$ だけでなく、ひずみ速度・ひずみ軟化に関する係数 G_2^* や透水係数 k を変化させ、これらの解析解に及ぼす影響についても検討するため引き続き解析を行う。

参考文献

[1] 非局所理論, 地盤の破壊とひずみの局所化, pp.172-186, (社) 土質工学会, 岡二三生, 八嶋厚, 1994
[2] ひずみ勾配依存型弾粘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

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'	21.5
粘塑性パラメータ	C	$4.5 \times 10^{-8}(1/sec)$
破壊時の応力比	M^*	1.05
せん断弾性係数	G	12945.8(kPa)
透水係数	k	$1.16 \times 10^{-12}(cm/sec)$
軟化パラメータ	G_2^*	100

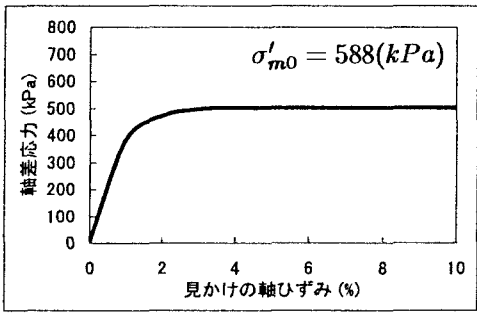
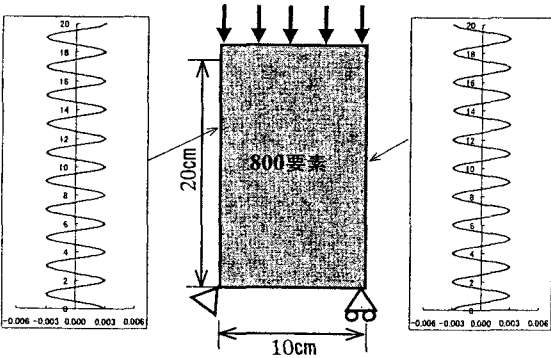


表1 大阪沖積粘土の材料定数と要素試験シミュレートによる軸差応力-軸ひずみ関係



強制変位速度 $\dot{\epsilon} = 0.5\%/min$
境界は非排水条件
要素間の間隙水の移動は許す

図1 境界条件と与えた初期不整

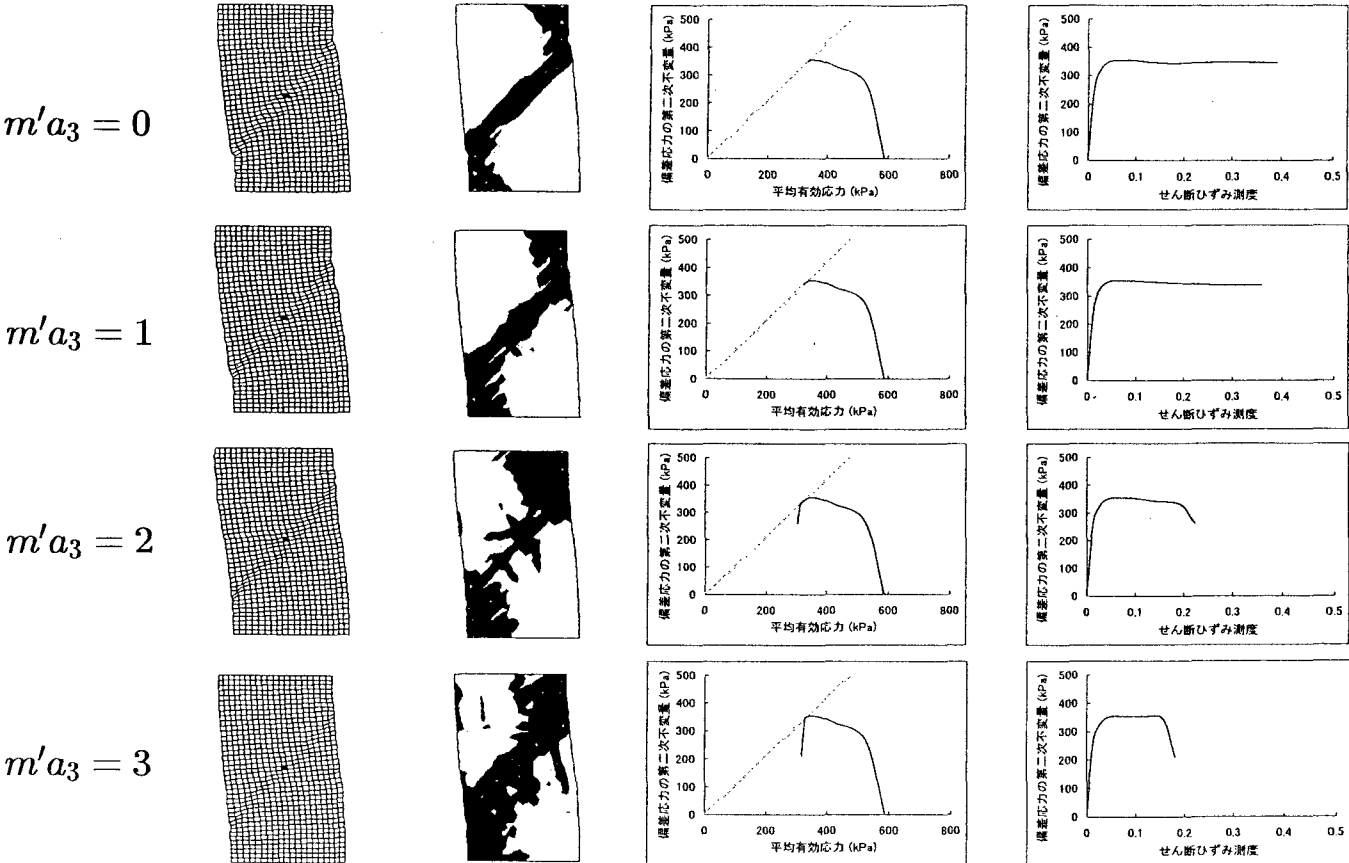


図2 変形メッシュ図
せん断ひずみ測度($\sqrt{\gamma_{xy}\gamma_{xy}}$)の分布図

図3 要素番号411(図2中の黒点)における有効応力経路
偏差応力の第二次不変量-せん断ひずみ測度の関係