

CS1-9〔I〕 連続体理論による圧縮荷重下における粒状体の変形解析

埼玉大学大学院 学生員 長谷川光正 埼玉大学工学部 正員 奥井 義昭
 長谷工コーポレーション 斎藤 稔 東京大学工学部 正員 堀井 秀之
 日本大学生産工学部 正員 秋山 成興

1. はじめに

圧縮荷重下における粒状体の変形を解析する手法として損傷理論の適用を検討した。具体的には粒状体を弾性体内部に微小なすべり面を含む材料と考え、それに均一化操作を施すことにより、連続体理論の範疇で定式化を行った。以下では、まず粒状体間のすべり変形をモデル化した微小なすべり面(マイクロスリップモデル)について説明し、その後これを均一化した連続体理論について説明する。最後に数値計算結果より本手法の有効性について検討を加える。

2. マイクロスリップモデル

粒子間のすべり変形をモデル化する目的でFig.1 に示すマイクロスリップモデルが提案されている¹⁾。このモデルでは荷重の増大に伴い、摩擦すべりによって初期欠陥(長さ:2a)の両端にスリップゾーン(長さ:c-a)が形成されるものとし、次の境界条件を満足するものと仮定する。

$$\tau_s = (\sigma_n + \sigma_d) \tan \phi_0 \quad (\text{初期欠陥上})$$

$$\tau_s = (\sigma_n + \sigma_d) \tan \phi_c \quad (\text{マイクロスリップ上})$$

ここで τ_s 、 σ_n は各々マイクロスリップの表面に作用するせん断応力、垂直応力であり、 ϕ_0 、 ϕ_c は初期欠陥上、スリップゾーン上での摩擦角である。上式において σ_d はすべり面上での粒子の再配列によって生じる局所的な体積膨張の影響を表すダイレクشنシー応力であり、次式

$$\sigma_d = -\alpha_d (c - a)^m$$

によって表されるものとする。ここで、 α_d 、 m は材料定数とする。また、マイクロスリップの方向は最小圧縮主応力 σ_3 方向に対し $\pi/4 + \phi_c/2$ の角度をとるものと仮定する。

3. 均一化操作による連続体理論

まず、材料のある一点の近傍での平均応力および平均歪を定義し、これらの平均量に関し応力-歪関係を誘導し、つぎにマイクロスリップの発展則を考える。

平均応力-平均歪関係 マイクロスリップ間の相互干渉を無視した場合、平均応力と歪の関係は次式で与えられる。

$$\sigma = D^* (I - H) \varepsilon + \sigma^*$$

ここで、 D^* は材料基質部の弾性定数、 I は単位マトリックス、 $\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}$ 、 $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}\}$ であり、 H 、 σ^* はすべり変形に伴う非弾性歪影響を表すものである。

マイクロスリップの発展則 上記の応力-歪関係はマイクロスリップのある状態について求めたものであるから、次にこのマイクロスリップがどのように発展するかを規定する発展則が必要になる。発展則は、粒状体の塑性変形によってマイクロスリップ先端の応力集中が緩和され特異性が無いという条件よりモード

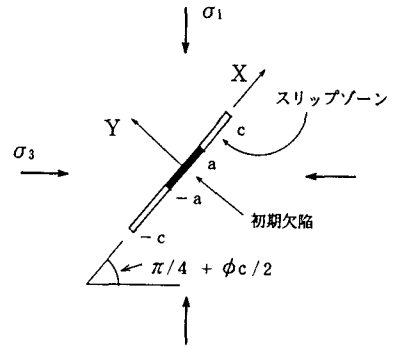


Fig.1 マイクロスリップモデル

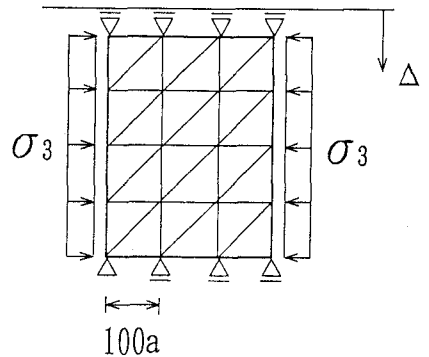


Fig.2 有限要素モデル

IIにおける応力拡大係数 K_{II} が0とした。すなわち、

$$K_{II} = \sqrt{\pi c} \{-\sigma_{xy} + (\sigma_{yy} + \sigma_d) \tan \phi_c\} + \frac{2a}{\sqrt{\pi c}} (\sigma_{yy} + \sigma_d) (\tan \phi_c - \tan \phi_0) = 0$$

以上の基礎式の他に平均量に関する微小変形のつりあい式および歪-変位式が成立すると仮定し、通常のFEMの離散化を行えば剛性方程式が得られる。ただし、剛性マトリックスはマイクロスリップ長 c の関数であり、これとマイクロスリップの発展則を考慮すれば問題は非線形連立方程式に帰着される。

4. 解析結果及び考察

解析に用いたモデルをFig. 2に示す。入力データは平面歪試験の実験結果²⁾とフィットするように表-1のように定めた。

荷重条件は一定な拘束圧 σ_3 を加え、上端部の変位 Δ を増加させることにより最大圧縮主応力 σ_1 を増加させた。初期欠陥長で無次元化したスリップ長と応力比(σ_1/σ_3)との関係をFig. 3に示す。同図より応力比が低い領域ではマイクロスリップ上ですべりを生じないためマイクロスリップは発展しないが、応力比の増大に伴いだいにマイクロスリップが発展することがわかる。次に応力比と偏差歪の関係、体積歪と偏差歪の関係をFig. 4に示す。また、同図には豊浦砂の平面歪試験の実験結果²⁾も「・」で示してある。同図より、歪軟化が起きるまでは解析と試験結果とがほとんど一致しているものの歪軟化および変形局所化などは本解析モデルでは生じなかった。

5. まとめ

今回の解析により、歪軟化が起きるまでの応力比-偏差歪関係を表現できることが明らかになった。しかしピーク荷重や破壊モードは表せない。今後の課題はこれらを表現できるような連続体モデルを検討することである。

[参考文献]

- 1) Zi-Hai SHI and H. Horii : Microslip model of strain localization in sand deformation, Mech. Mater., Vol. 8, 1989
- 2) Woon-Kwan Lam and F. Tatsuoka : Effect of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand, Soils and foundations, Vol. 28, No. 1, 1988

Table 1 入力データ

ヤング率 (E/σ_3)	500
ポアソン比 (ν)	0.2
密度 (ρa^2)	0.7
ϕ_0, ϕ_c	$10^\circ, 50^\circ$
α_d	0.05
m	0.1

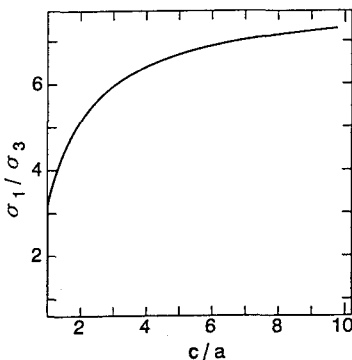


Fig. 3 応力比とスリップ長の関係

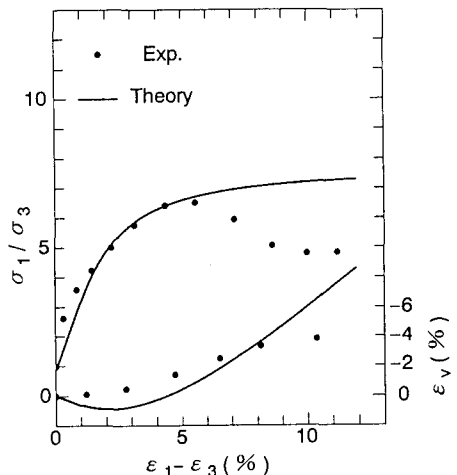


Fig. 4 応力比-偏差歪、体積歪関係