

繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係のモデル化とその検証

防衛大学校 正 ○宮本慎太郎

九州大学 正 安福規之 石藏良平

防衛大学校 正 宮田喜壽

1. はじめに

筆者らは、これまで、繊維材料と粒状材料の複合材料（本研究では広義な意味で「繊維-粒子複合材料」と称する）を対象として、均質化理論をベースとした構成モデルの構築を行ってきた^{1), 2)}。開発した構成モデルは、特に繊維材料の特性に着目しており、体積含有率・引張剛性・配向角分布・粒状材料との界面強度による影響を考慮できるものとなっている。今回、本モデルの有用性の検証を目的として、繊維含有率に着目した三軸圧縮試験を実施した。そこで本稿では、構成モデルの概要を紹介すると共に、実験結果と解析結果の比較を行った成果を記すものとした。

2. 開発した構成モデルの概要と特色

本研究では、粒状材料内での繊維材料の変形挙動を把握した実験結果より、1) 繊維材料は粒状材料内で引張挙動を示し、粒状材料との界面強度を超える応力状態に達すると引き抜け挙動を示す 2) 繊維配向角度の違いは引き抜け挙動時に顕著に表れるため、配向角度を適切に考慮する必要がある 3) 引張挙動時には粒状材料とひずみエネルギー増分が等価となるように応力が分担される、ことを明らかにしている²⁾。これより、本モデルでは、特に以下のことに着目したモデル化を行った。1) 繊維材料の応力・ひずみ関係を引張挙動と引き抜け挙動によって評価した 2) 繊維材料の配向角度のばらつきを確率密度関数で評価すると共に、繊維配向角度に応じて繊維材料に引張ひずみが発生する条件を考慮した 3) 繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分の等価性を仮定して導かれる応力分担テンソルを導入して均質化を行った。具体的には、三軸圧縮試験時の繊維材料の引張挙動は、以下の式のように、ヤング率 E_f 、繊維配向角度 θ 、繊維配向角分布 $f(\theta)$ 、引張ひずみの発生する条件式 $g(\theta)$ によって評価した。

$$\begin{bmatrix} d\bar{p}_f \\ d\bar{q}_f \end{bmatrix} = \frac{E_f}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\theta)g(\theta)\cos\theta \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{6}(2-3\cos^2\theta) \\ \frac{1}{6}(2-3\cos^2\theta) & \frac{1}{4}(2-3\cos^2\theta) \end{bmatrix} d\theta \begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_{fp} \\ d\bar{\varepsilon}_{fq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分の等価性を仮定して導かれる応力分担テンソル $\mathbf{b} (= \{\mathbf{D}_f / \mathbf{D}_m\}^{1/2})$ を導入することで、以下の式を用いて繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係を評価するものとした。ここで、 μ_f は繊維材料の体積含有率、 $\mathbf{D}_f$ と $\mathbf{D}_m$ はそれぞれ繊維材料と粒状材料の剛性マトリックスを意味する。

$$\begin{bmatrix} d\bar{\varepsilon}_p \\ d\bar{\varepsilon}_q \end{bmatrix} = [(1-\mu_f)\bar{\mathbf{D}}_m^{-1} + \mu_f\bar{\mathbf{D}}_f^{-1}\mathbf{b}][(1-\mu_f)\mathbf{I} + \mu_f\mathbf{b}]^{-1} \begin{bmatrix} d\bar{p} \\ d\bar{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

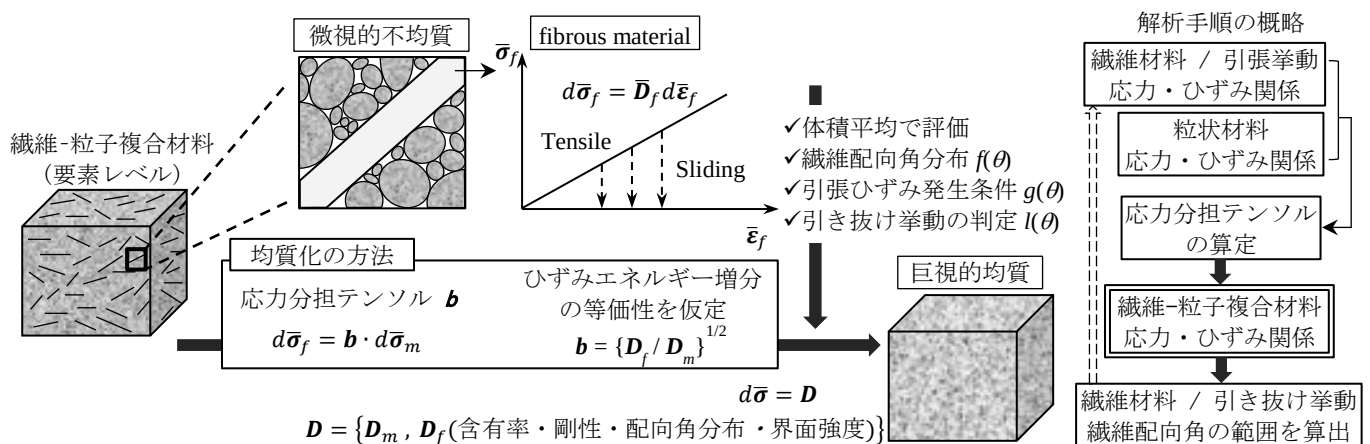


図-1 均質化理論をベースとした構成モデルの概略

キーワード 繊維-粒子複合材料, 応力・ひずみ関係, 構成モデル, 三軸圧縮試験

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 理工学 5 号館 252 室 Tel 046-841-3810

さらに、繊維材料の引き抜け挙動については、複合材料の応力状態に応じて以下の式を計算することで、引き抜けに至った繊維配向角度を評価する。 c_{fg} , ϕ_{fg} は界面強度を規定する界面粘着力・摩擦角である。

$$l(\bar{p}, \bar{q}, \theta) = \left\{ c_{fg} + \left(\bar{p} + \frac{1}{6} \bar{q} + \frac{\bar{q}}{2} \cos 2\theta \right) \cdot \tan \phi_{fg} \right\} - \frac{\bar{q}}{2} \sin 2\theta \quad (3)$$

式(3)によって繊維材料が引き抜けを示す繊維配向角度の範囲を導出すると共に、それに応じて繊維配向角分布および式(1)を再計算することで引き抜けの影響を照査するものとなっている。本モデルの概要および解析手順は図-1 に示すようであり、解析に必要なパラメーターである、繊維材料のヤング率は単繊維引張試験により、界面強度は土とジオシンセティックスの一面せん断試験により比較的容易に求まるものである。また今回は簡単のために、粒状材料の応力・ひずみ関係を Mohr-Coulomb の弾・完全塑性モデルで単純化して評価した。

3. 三軸圧縮試験の概要とモデル解析による評価

供試体のサイズが直径 10 cm, 高さ 20 cm となる中型三軸圧縮試験装置を使用して、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係の把握を行った。供試体作製に使用した材料は、粒状材料として真砂土を、繊維材料は幅 10 mm, 長さ 50 mm, 厚さ 1 mm の高分子材料を使用した。今回は、粒状材料との重量含有率で $w_f = 0, 3, 5, 7\%$ の条件で繊維材料を混入し、側圧 $\sigma_r = 50, 100, 150 \text{ kN/m}^2$ で実験を行った。

比較結果の一例として、側圧 $\sigma_r = 100 \text{ kN/m}^2$ 時の軸差応力 q と軸差ひずみ ε_q の関係、および体積ひずみ ε_p と軸差ひずみ ε_q の関係を図-2 に示した。解析に使用したパラメーターの値は図-2 に同時に記載した通りである。結果より、軸差応力と軸差ひずみの関係において、解析結果が実験結果の傾向をおおよそ再現できていることが確認できる。特に、粒状材料が塑性領域に到達した後の繊維材料の補強効果が発揮される挙動を比較的良く再現しており、本モデルの有用性が伺えた。軸差ひずみ 0.2 の軸差応力を破壊に相当する応力値として定義し、繊維含有率で整理した図-3 から、

解析結果が実験結果を良く評価できていることが確認される。しかしながら、体積ひずみと軸差ひずみの関係においては、解析結果では繊維含有率に依存して体積圧縮が増加していく挙動を過剰に評価している。体積変化挙動の評価には、繊維配向角分布の影響が大きいことが考えられており、粒状材料のような圧縮性の高い材料の中に繊維材料がある場合、粒状材料の変形に伴って繊維材料の配向角分布も変化している可能性が高い。繊維材料の影響を精度良く評価するためには、応力状態や粒状材料の変形性を考慮した繊維配向角分布が今後必要になるといえる。

4. おわりに

本稿は、本研究で開発している繊維-粒子複合材料の構成モデルを紹介し、三軸圧縮試験との比較によって有用性に関する考察を行ったものである。結果より、軸差応力と軸差ひずみの関係では、繊維材料による補強効果を良く表現できることが確認された。しかし、体積変形挙動については、圧縮傾向を過剰に評価することが明らかになった。今後は、繊維配向角分布の拘束圧依存性を適切に評価する手法を開発し、モデル精度の向上を図る予定である。

(参考文献) 1) 宮本慎太郎, 安福規之, 笠間清伸, 石蔵良平: 繊維材料と粒状材料の関連性を考慮した繊維-粒子複合材料の構成モデル, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2, pp.I_485-I_496, 2015. 2) 宮本慎太郎, 安福規之, 石蔵良平, 笠間清伸: 繊維-粒子複合材料を対象とした繊維材料の変形挙動に関する実験的考察, ジオシンセティックス論文集, 第 30 巻, pp.89-96, 2015. [謝辞] 本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (課題番号 26・4964) の助成を受けたものです。

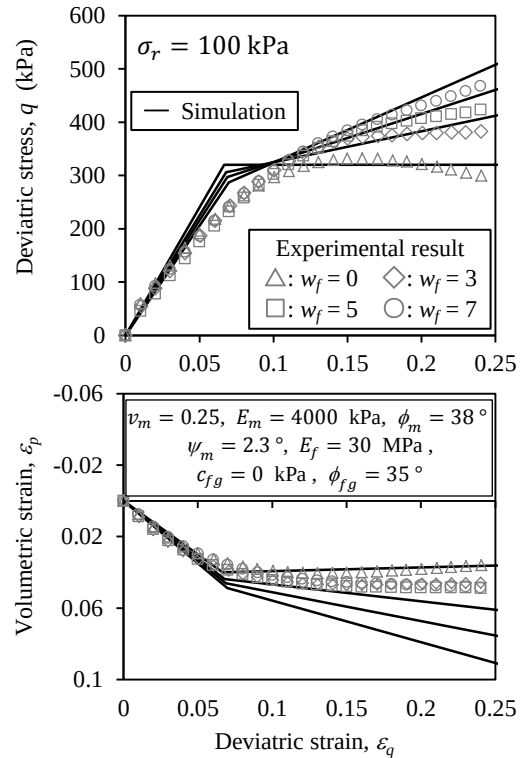


図-2 応力・ひずみ関係の一例

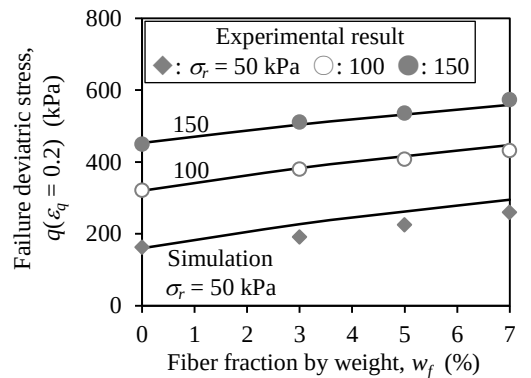


図-3 $\varepsilon_q=0.2$ の応力値と繊維含有率の関係