

繊維-粒子複合材料における構成材料の応力・ひずみ関係の関連性

九州大学大学院 学生会員 ○宮本慎太郎, 正会員 安福規之・石藏良平・笠間清伸
長崎大学大学院 正会員 大嶺聖

1. はじめに

産業廃棄物の不法投棄等の崩壊や処分場跡地の高度利用に目を向けた長期的な視点での廃棄物問題の解決を考える上で、廃棄物地盤の力学的性質の解明やその評価法の提示が強く求められている。本研究では、実廃棄物を対象とした実験結果を元に、廃棄物を繊維材料と粒状材料により構成された繊維-粒子複合材料と捉え、複合則を用いた構成モデルの構築を試みている。複合材料内部では応力とひずみが不均質に分布しているため、繊維材料と粒状材料の特性から複合材料の構成関係をどのように求めるかが重要な課題となる。金属材料や粒状材料と対象とした代表的な例としては、各材料の応力増分を一定と仮定する Reuss model や、ひずみ増分を一定と仮定する Voigt model、ひずみエネルギー増分を一定と仮定する大嶺の研究成果などが存在する¹⁾。しかし、繊維-粒子複合材料に関する研究成果は少なく、適切な仮定を導入できない現状にある。そこで本稿では、複合材料がせん断変形を示す際の繊維材料のひずみ(応力)値を求めた実験結果より、繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性を考察し、最適なパラメーターの導入を試みた。

2. 実験方法と使用する材料の概要

ポリエステル樹脂で構成されたひずみゲージそのものを繊維材料と見立てて実験を行うことで、繊維材料のひずみの発達傾向を把握した。実験のイメージは図-1に示すようであり、微視的な要素を抜き取った状態を想定した。繊維の堆積方向とせん断面の角度(「繊維配向角度 α 」)と定義)が異なる場合の繊維材料の挙動を把握することを考え、せん断面が固定できる一面せん断試験を選定した。試験装置はせん断箱の寸法が幅 30 cm、奥行 30 cm、高さ 15 cm となる中型一面せん断試験装置を使用し²⁾、繊維配向角度 $\alpha = 0, 30, 60, 90^\circ$ の条件において、上載圧 $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kPa}$ 時の挙動を把握した。

使用する材料は、粒状材料に礫質土を、繊維材料に引張抵抗のみが働くひずみゲージを使用した。ただし、ひずみゲージ単体での実験が難しかったため、ひずみゲージに比べて無視できるほど小さな剛性を有する高分子材料をダミー材料として使用し、そのダミー材料にひずみゲージを張り付けたものを試験体とした(図-2)。繊維材料の引張特性は、単軸張試験により調べており、代表的な応力・ひずみ関係は図-3のようであった。また引張速度や温度の違いによらず、一定の剛性と強度を有することを確認している。これより、せん断時に繊維材料が発揮する応力値は、試験時に測定される繊維材料のひずみ値より、図-3を用いて計算した。せん断試験用の供試体は、締固めを行わずに作製するものとし、粒状材料の相対密度は $D_r = 38\%$ で一定、混入する繊維材料は1本のみとした。各実験ケースにおいて3回以上の実験を行い、再現性のあることを確認している。

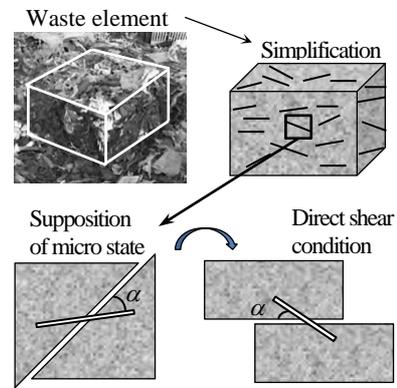


図-1 実験のイメージ

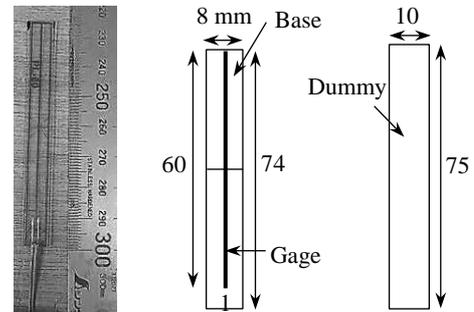


図-2 実験に使用した繊維材料の様子

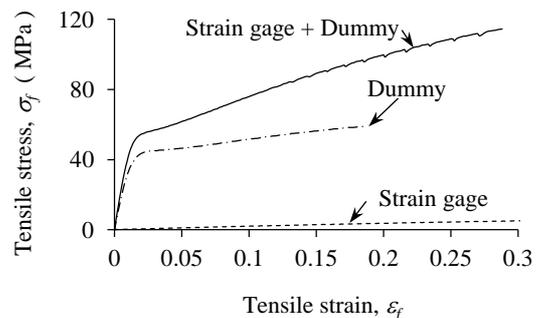


図-3 繊維材料の引張特性

キーワード 繊維-粒子複合材料, 複合則, 応力・ひずみ関係, せん断試験
連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 WEST2 号館 1108 Tel 082-900-3378

3. 繊維材料と粒状材料の応力・ひずみ関係の関連性に関する考察

せん断試験より得られる結果の例として、上載圧 $\sigma = 20 \text{ kPa}$ 時の繊維材料のひずみ値とせん断変位の関係を図-4に示す。繊維材料のひずみ値は正が引張り、負は圧縮を表している。繊維配向角度 $\alpha = 0^\circ$ の場合には繊維材料が粒状材料内を滑っていたため、ひずみの発達は認められない。しかし、繊維配向角度 $\alpha = 30, 60, 90^\circ$ の場合には、せん断変位の増加に伴って繊維材料の引張りひずみが発達していき、あるひずみ値を境にして一定値に収束するような、弾完全塑性的な挙動を示すことが確認される。

本稿では、この実験結果を用いて、繊維材料と粒状材料の応力 / ひずみ / ひずみエネルギー増分値を比較することで材料間の関連性を考察する。今回は特に、弾性領域 (せん断変位 $0 \sim 0.5 \text{ mm}$) を対象とすることとし、粒状材料のひずみ値については、単純せん断変形を仮定して求めることとした。繊維材料と粒状材料の各増分値を比較した結果として、特に顕著な一致が認められたひずみエネルギー増分の比較結果を図-5に示した。例として、上載圧 $\sigma = 20 \text{ kPa}$ の結果を示すが、他の条件においても同様の結果が得られており、繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分はよい一致を示し、適切なパラメーターになり得ることが確認できる。しかし当然ではあるが、拘束圧が大きくなる場合にはひずみエネルギー増分も大きくなり、拘束圧の異なる条件下においても一貫したモデルの構築を図ることは難しい。そこで本研究では、拘束圧が異なる場合の複合材料の構成則をも一貫してモデル化することを想定して、状態量増分 (State parameter increment: dW/p) 一定という仮定を導入することを考えた。状態量増分とは、ひずみエネルギー増分を拘束圧で除したパラメーターであり、拘束圧の影響を排除した評価を行える可能性がある³⁾。検討結果として、図-6に繊維配向角度 $\alpha = 90^\circ$ の場合の繊維材料の状態量増分と複合材料のせん断変位の関係を示した。結果より、状態量増分で整理することで拘束圧によらずに一定した増分値が得られることが確認される。さらにこの結果より、上載圧 $\sigma = 10, 15, 20 \text{ kN/m}^2$ の結果の平均値を粒状材料と繊維材料で比較した結果が図-7であり、状態量増分を一定と仮定できることの妥当性が検証された。

4. おわりに

本稿では、複合則を用いて繊維-粒子複合材料の構成モデルを構築することを目標として、構成材料間の応力・ひずみ関係の関連性を考察した。その結果、複合材料の変形時において、構成材料間のひずみエネルギー増分が一定となることを見出した。さらに、拘束圧の異なる場合の構成関係を一貫してモデル化することを想定して、状態量増分を一定とする考え方を提案し、その妥当性を検証した。今後は、実際に複合則を用いて構成関係の定式化を行っていく。

(参考文献) 1) 大嶺聖: 中間土の圧縮および強度特性に関する基礎的研究, 九州大学博士論文, 1992. 2) S. Miyamoto et al: Shearing response and shear strength of solid waste material conducted by developed direct shear test apparatus, Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, Session25-5, 2014.9. 3) 諸戸靖史・河上房義: 砂の変形における状態関数, 土木学会論文報告集, 第299号, pp.77-86, 1974. [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。

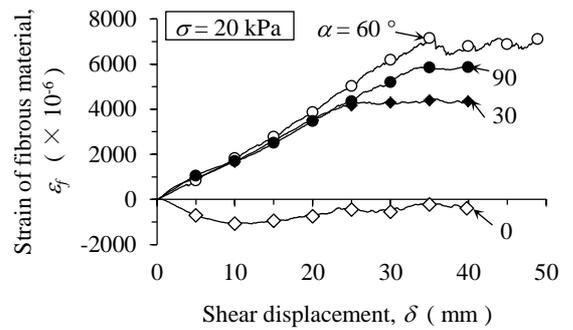


図-4 繊維材料の粒状材料内の挙動

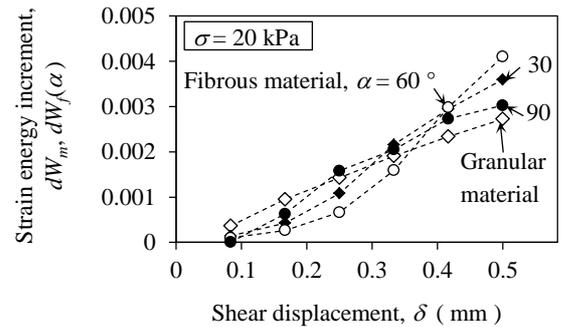


図-5 ひずみエネルギー増分の比較 ($\sigma = 20 \text{ kPa}$)

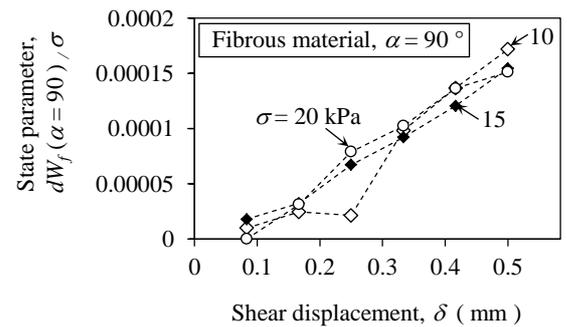


図-6 状態量増分による検討結果 ($\alpha = 90^\circ$)

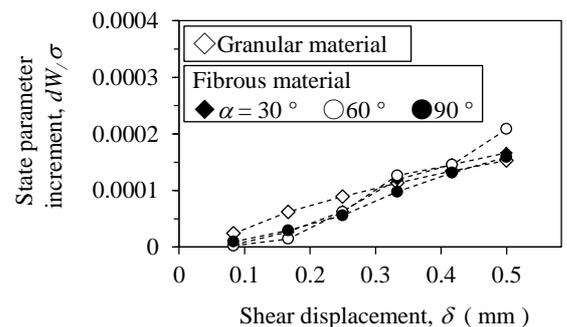


図-7 状態量増分の比較