

繊維含有率の異なる繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係

九州大学大学院 学 ○宮本慎太郎 正 安福規之 正 石藏良平 正 笠間清伸

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「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目指した取り組みを行ってきた^{1), 2)}。本モデルでは、繊維材料の体積含有率・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おり、既往の実験成果との比較により、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係をおおよそ予測 / 評価できることを検証している²⁾。今回、本モデルの詳細な妥当性の検証を行うことを目的として、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、その実験結果を紹介し、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす繊維含有率の影響について考察を行った。

2. 実験概要

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。繊維材料の特性は、単繊維引張試験により把握しており、引張剛性は 30000 kN / m²、破断時の応力は 30000 kN / m² であった。今回は、このような特性を有する繊維材料を、粒状材料との重量含有率で $w_f = 0, 3, 5, 7\%$ の条件で混入した供試体を対象として、側圧 $\sigma_r = 50, 100, 150$ kN / m² の三種類で実施した実験の結果を議論するものとした。

供試体作製は、1 / 6 層毎にランマーによる締固めを行うものとし、粒状材料のみの相対密度を基準とした締固めエネルギーを各層毎に与えるように突き固め回数を決定した。供試体作製後は、二酸化炭素を通気させた後で供試体直下より水を通して飽和させるものとし、さらに背圧を 200 kN / m² とした条件で B 値が 0.95 以上となるように飽和状態を管理した。またせん断速度は、せん断中に間隙水圧の上昇がないことを確認した上で、軸差ひずみ 0.2% / min に決定した。

3. 繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係

実験結果の一例として、側圧 $\sigma_r = 50$ kN / m² 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-1 に示した。本図では、繊維材料の重量含有率の異なる結果をまとめて示している。軸差応力と軸差ひずみの関係より、繊維含有率に関わらず、初期剛性はほぼ同様であった。しかし、粒状材料が塑性挙動を示している軸差ひずみの領域においては、繊維含有率に依存して顕著な軸差応力の増加が認められた。また、体積ひずみと軸差ひずみの関係では、繊維含有率が増加することによって、体積が圧縮する特性が卓越する傾向が認められた。これより、図-2 に示すように、ストレス・ダイレイタンスー関係において、応力比の高い領域での挙動に繊維含有率に依存した傾向が認められた。すべての条件において、応力比の増加に

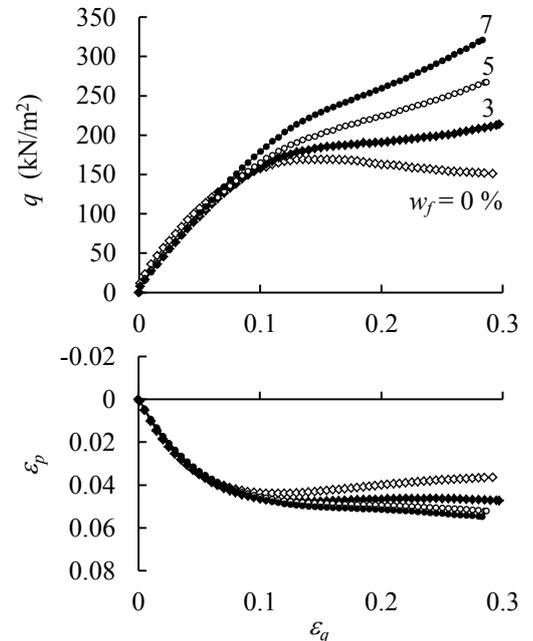


図-1 応力・ひずみ関係

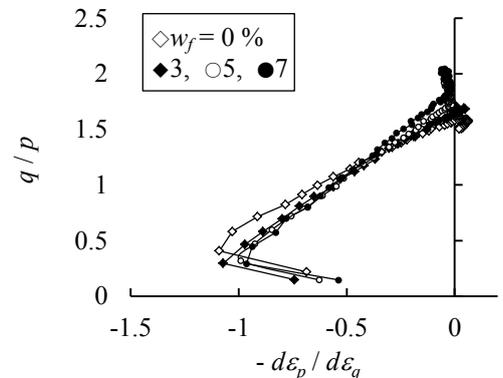


図-2 ストレス・ダイレイタンスー関係

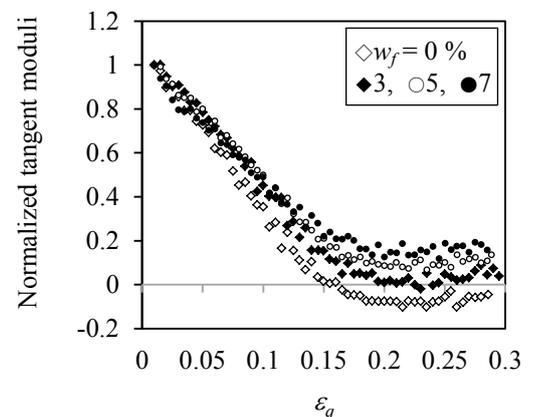


図-3 接線剛性のひずみ依存性

伴って圧縮から膨張に移る傾向が認められるが、繊維含有率の大きい場合、圧縮・膨張の後にさらに圧縮が卓越する特性を示していることが確認できる。このような傾向は、他の側圧下においてもみられており、繊維含有率に依存して、粒状材料が塑性変形を示す領域での靱性や圧縮特性が顕著に卓越する傾向を示すことが明らかになった。

またここでは、繊維含有率に依存した補強効果の影響について詳細に議論するものとし、まず軸差応力と軸差ひずみの関係より、接線剛性と軸差ひずみの関係を図-3 に示した。本図では、軸ひずみ $\epsilon_q = 0.01$ の接線剛性によって正規化した接線剛性を示している。また側圧 $\sigma_r = 150 \text{ kN/m}^2$ における結果を示しているが、他の条件についても結果は同様であった。図-3 より、すべてのケースで、軸差ひずみの増加に伴って接線剛性が低下する傾向を示している。しかし、繊維含有率の大きいほど、接線剛性の低下は少なく、大きなひずみ領域においても、ある程度の抵抗性を示すことが理解される。実際、軸差ひずみ時の接線剛性を確認すると、繊維含有率 7% の場合では、初期の接線剛性の 30% 程度の剛性を保持しており、繊維含有率の増加によって、相当の靱性の増加が見込まれることが明らかになった。また、軸差ひずみ $\epsilon_q = 0.02$, 0.2 時の接線剛性と繊維含有率の関係を示したのが図-4, 5 であり、せん断初期では、繊維含有率に関わらずに接線剛性はほぼ同様の値を示すことが確認される。しかし、軸差ひずみの増加した際には、繊維含有率の大きいほど接線剛性の増加する傾向が認められた。

次に、軸差ひずみ $\epsilon_q = 0.2$ 時の軸差応力を降伏時の応力点と定義し、降伏応力と繊維含有率の関係を図-6 に示した。これより、繊維含有率の大きいほど、降伏時の応力も大きくなる傾向にあり、繊維含有率 7% の場合には繊維含有率 0% と比較して 1.5 倍近い強度増加を示している。さらに、降伏時の軸差応力と平均主応力 p の関係を整理した図-7 より、繊維含有率に関わらずに、軸差応力・平均主応力関係の傾きはほぼ同等であることが確認できる。しかし、繊維含有率の大きいほど切片の増加する傾向を示しており、繊維含有率に依存して、強度特性において粘着成分の増加する傾向にあることが明らかになった。

3. おわりに

本論文では、繊維含有率の違いが、繊維-粒子複合材料の応力・ひずみ関係に及ぼす影響を実験的に把握した。これより、繊維含有率の増加に伴って、粒状材料が塑性領域を示している範囲での軸差応力や圧縮特性の卓越することが明らかになった。さらに、接線剛性のひずみ依存性を確認したところ、繊維含有率の大きいほど、軸差ひずみが大きい範囲でも剛性を保持する特性を示した。また、降伏時の応力値も繊維含有率に依存して増加する傾向を示し、さらにその影響によって、強度特性における粘着成分が増加することを明らかにした。

(参考文献) 1) 宮本慎太郎: 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 分冊(特集号), 2015. (印刷中). 2) 宮本慎太郎: 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, 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。

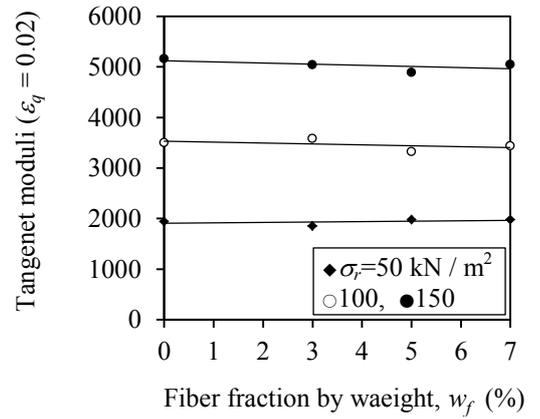


図-4 接線剛性(ε_q=0.02)と繊維含有率の関係

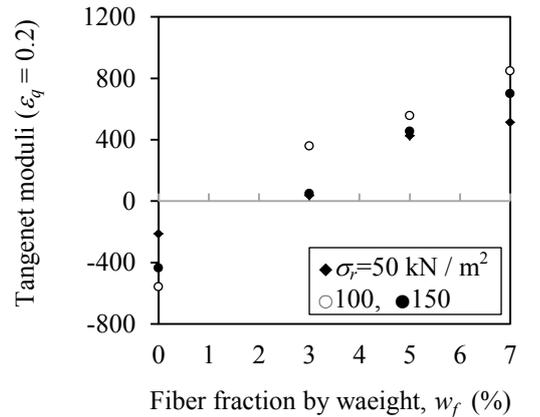


図-5 接線剛性(ε_q=0.2)と繊維含有率の関係

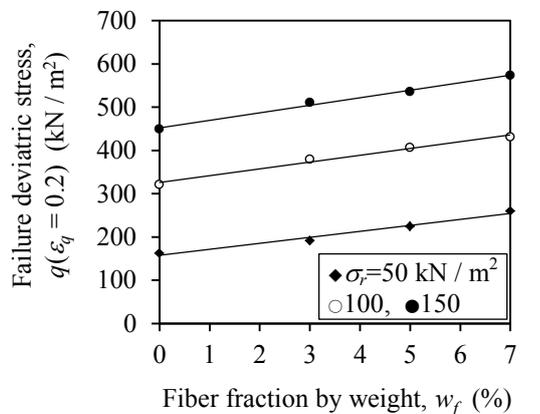


図-6 降伏応力(ε_q=0.2)と繊維含有率の関係

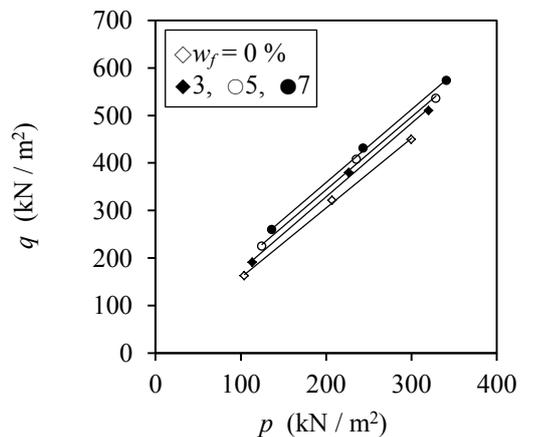


図-7 軸差応力と平均主応力の関係