

## 繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築とその埋立廃棄物への適用に関する研究

宮本, 慎太郎

<https://doi.org/10.15017/1654853>

---

出版情報 : 九州大学, 2015, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 : 全文ファイル公表済

氏名：宮本 慎太郎

論文名：繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築とその埋立廃棄物への適用に関する研究

区分：甲

## 論文内容の要旨

土などの粒状材料に繊維材料が混入することで、強度の増加や靱性の向上などの補強効果が表れることが知られており、土構造物の粘り強さや被災時の復旧の簡便さ、および長寿命化などを考慮する上で、このような繊維材料と粒状材料の複合材料(「繊維-粒子複合材料」と称する)を用いた補強技術が注目を浴びている。しかし、繊維-粒子複合材料は、繊維材料の特性に加え、粒状材料の特性および複合材料の状態量など、様々な影響要因が絡み合う複雑な力学体系を有しており、補強メカニズムには未だ未解明な点も多い。このため、補強土工法として実際に繊維-粒子複合材料を適用する際には、事前試験を行って繊維配合条件や材料特性を決定しておく必要があり、また古典土質力学の考え方に基づいた極限安定解析を代用して補強土構造物の設計を行っていることから、繊維材料の補強効果を適切に評価できていないことが指摘されている。実用化において最適な繊維配合条件の決定や合理的な設計法の提示を実現するためには、繊維材料による補強メカニズムを明らかにし、その特性を評価する手法を導入した理論モデルを構築することが必要不可欠になっている。

本論文では、以上のような観点から、粒状材料内での繊維材料の変形挙動を解明し、補強メカニズムを考察すると共に、均質化理論をベースとした理論的な検討により、繊維材料の補強効果に着目した繊維-粒子複合材料の構成モデルの構築を行った。さらに、その有用性を確認した上で、本モデルの工学的な課題解決への新たな適用として、埋立廃棄物の力学特性の評価を取り上げた。近年、産業廃棄物の不法投棄等の発生により、廃棄物の崩落や斜面の崩壊などの力学的な問題が顕在化しており、廃棄物の力学特性の解明とその評価手法の提示が急務となっている。特に、廃棄物を構成する廃材の種類や割合(「組成割合」と称する)は現場によって大きく異なるため、組成割合を考慮して、種々の廃棄物地盤を包括的に評価できる手法を提示することが求められている。このため、組成割合と力学特性の関係を実験的に把握すると共に、本構成モデルを適用することにより、繊維廃材の特性に着目して廃棄物の応力・ひずみ関係を適切に評価できることを検証するものとした。

第1章では、本研究の背景と目的を示し、既往の研究の課題点を整理した。これより、粒状材料内での繊維材料の変形挙動を繊維配向角度に着目して明らかにすることの重要性を示した。また埋立廃棄物については、組成割合の影響と力学特性の関係性を明確にすることの必要性を述べた。

第2章では、粒状材料内における繊維材料の変形挙動、およびその配向角度の影響を明らかにするために、可視化と数量化を目的とした2種類の一面せん断試験を実施した。実験結果より、複合材料の変形に伴って繊維材料の引張変形が進行し、繊維材料と粒状材料の界面強度を超える応力状

態に達すると引き抜ける，引張挙動と引き抜け挙動からなる弾完全塑性的な挙動を示すことを明らかにした．さらに，繊維材料が引張挙動を示す際には，繊維材料と粒状材料のひずみエネルギー増分が等価となるように，複合材料内に発生する応力が分担されていることを検証した．また，繊維配向角度の影響は引張挙動時にはほとんど認められず，引き抜け挙動時に顕著に表れることを示した．これは配向角度に応じて繊維材料に働く拘束圧が変化するためであり，引き抜けが発生する条件を繊維配向角度と複合材料の応力状態から評価する必要のあることを言及した．

第3章では，以上の実験的考察より，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することにより導出される応力分担テンソルを導入して，繊維材料と粒状材料の特性を均質化する構成モデルを提案した．また，繊維材料の応力・ひずみ関係のモデル化においては，微視的な特性から巨視的な特性を表現する際に，確率分布関数により繊維配向角分布を導入するものとした．さらに，繊維配向角分布と関連付けて繊維材料の引張挙動と引き抜け挙動を区別する手法を開発することで，繊維材料が補強効果を発揮する条件を明確に表現できるモデルを構築した．最後に，本モデルを実験成果に適用することで，繊維材料による補強効果を適切に評価できることを示した．

第4章では，国内不法投棄等現場2カ所，海外処分場内2カ所の計4カ所の廃棄物地盤を対象として，室内と原位置で一面せん断試験を行い，組成割合の違いと埋立廃棄物の力学特性の関係を明らかにすることを目指した．実験結果より，廃棄物の原位置せん断特性は，繊維廃材による補強効果によって，せん断応力が線形的に増加してピーク値や限界状態などの収束値を示さない延性的な挙動を示すことを明らかにした．さらに，廃棄物の原位置せん断強度を繊維含有率に着目して整理することで，組成割合の異なる廃棄物を包括的に評価できることを実験的に検証した．

第5章では，提案した構成モデルを適用することで，組成割合を考慮した廃棄物の応力・ひずみ関係の評価を試みた．この際，廃棄物は様々な繊維廃材を含んでいるため，すべての繊維廃材の特性を把握して解析に必要なパラメーターを決定することは実用的に無理のあることを考察した．これより，廃棄物そのものを使用した引張試験によって求まる初期剛性・引張粘着力・引張摩擦角を，解析に必要なパラメーターである繊維廃材の引張剛性・界面粘着力・界面摩擦角として代用する方法を考案した．さらに，実験結果と解析結果を比較することで本モデルの適用性を検証したところ，様々な廃材を含む廃棄物についても，本モデルの考え方に基づいて繊維廃材の特性に着目した理論的解釈を施すことで，廃棄物特有の延性的な挙動を適切に評価できることを明らかにした．

第6章では，本論文で得られた結果を総括し，これを受けて今後の課題と展望を整理した．