

氏名（本籍） よし かわ とも たか  
吉 川 友 孝（埼玉県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第 1132 号  
学位授与の日付 2022 年 3 月 19 日  
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
学位論文題目 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の地盤工学的  
特性とその耐久性に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 菊池 喜昭  
教授 塚本 良道 教授 二瓶 泰雄  
教授 鎌倉 高志 教授 兼松 学

## 論文内容の要旨

本研究は、地盤材料としては低品質な篩下残渣を水硬性のある鉄鋼スラグ(製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を混合したもの)と混合して有用な地盤材料とすることができるかを検討したものである。篩下残渣には多量の木屑が含まれており、木屑の特性が混合物の土質力学的特性に及ぼす影響が大きい。そこで本研究では、木屑と鉄鋼スラグを混合した材料(以降、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料と称す)を用いて、室内要素力学試験からこの材料の力学的特性と、乾湿繰返し実験や木材腐朽実験からこの材料の耐久性を検討し、その地盤工学的特性について多くの重要な事実を明らかにした。この材料の特性を効果的に利用することで、篩下残渣由来の地盤材料の様々な場所への利活用が可能となることを示した。

以下に本論文の各章の要約を示す。

第 1 章では、本研究の背景・目的として、災害廃棄物の一種である篩下残渣の有効利用法を提案することの重要性について示した。また、学位論文全体の構成について説明した。

第 2 章では、篩下残渣の利用に向けての問題点と現状の利用方法について、また、鉄鋼スラグの分類と物理化学的性質、現状の利用方法について、既往の研究をまとめた。さらに、本研究の実験条件の選定に向けてこれまでに行われた研究結果を総括した。これらを取りまとめることで本研究の位置付けを明確にした。

第 3 章では本研究で使用する各種試料の特徴や物性値を示し、実施する各種力学試験概要について記述した。その上で、本研究で使用する試料と一般的な地盤材料との類似点と相違点について示した。

第4章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性に及ぼす様々な影響(木屑形状, 木屑混合割合, 養生期間, 固化強度, 拘束圧依存性, 排水条件依存性)について検討した. その結果, 木屑の形状が異なると, せん断特性は異なり, 木屑の縦横比が大きくなるほど, 破壊ひずみが大きくなり, せん断剛性が低下する傾向を示すことが分かった. 特に繊維状の木屑を混合した場合には靱性が卓越した材料となることを明らかにした. また, 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は, 鉄鋼スラグの一軸圧縮強さが 500kPa 以下の場合, いずれの木屑形状においても, 木屑混合割合が 10 vol.%の時に最も高いせん断強さを発揮し, それ以上混合すると強度低下が生じることがわかった. また, 木屑混合割合が 33vol.%以上では養生してもせん断強度およびせん断剛性がほとんど変化しないことが分かった, 以上の結果を基に, 木屑の混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性推定手法の提案を行った.

第5章では第4章で繊維状木屑を混合した場合に鉄鋼スラグのみよりも高いせん断強度および破壊ひずみを発揮し, ピーク強度後の応力低下が緩やかになることが確認されたことから, 第5章ではこれらのせん断抵抗発現機構について実験的な検討を行った. その結果, 繊維が引抜き抵抗を発揮することで強度および破壊ひずみが増加すること, また, スラグ粒子が木屑繊維と絡み合い供試体(スラグ)が拘束されることでピーク強度後の応力低下が緩やかになることを明らかにした. さらに, 第4章で得られた結果を基に木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の一軸圧縮強さの地盤工学的な解釈を行った. その結果, 木屑混合割合によらず, 一軸圧縮強さ  $q_u$  は排水・低拘束圧(50kPa)条件下でのせん断強度  $\tau_{max}$  の2倍になることを示した. ただし, 木屑混合割合 33 vol.%においては  $\varepsilon_a = 7\%$ 以下で  $q_u = 2\tau_{max}$  が成り立つものの, それ以上の大ひずみにおいては成り立たず  $q_u < 2\tau_{max}$  となることを示した. つまり, 実務的には, 比較的浅い場所(3m 以浅)で使用する場合の最大せん断強度  $\tau_{max}$  は一軸圧縮強さの 1/2 とすることで推定できることを示した. また, 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料はせん断に伴い微細な固結が崩壊した後, 密に締固めた粒状材料のように振舞うため, 非排水せん断強度は排水せん断強度よりも大きくなる( $q_{max} < c_u$ ). つまり, 非排水条件の強度についてはUU試験やCU試験などから求める必要があることを示した.

第6章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性について, 耐候性と耐朽性の観点から, 乾湿繰り返し(DW)実験および木材腐朽実験を行った. DW 実験の結果, 乾湿繰返しを受けることで体積膨張しせん断強度も低下するが, 飽和状態を維持していれば, 体積変化も力学特性の劣化もないことを明らかにした. また, 腐朽実験の結果, この固化材料の内部では pH が大きく, 酸素の供給に限られるため木屑は極めて腐朽しにくいことがわかった. 以上のことから, この固化材料を乾燥させないことと腐朽菌の繁殖を抑える状況で利用すれば, 耐久性には影響がないことを明らかにした.

第7章では総括として各章の結論を述べ, この種の混合材料に関する力学特性を総覧し, 地盤材料としての利用方針を示した.

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、地盤材料としては低品質な篩下残渣を水硬性のある鉄鋼スラグ(製鋼スラグ)と高炉スラグ微粉末を混合したものと混合して有用な地盤材料とすることができるかを検討したものである。篩下残渣には多量の木屑が含まれており、木屑の特性が混合物の土質力学的特性に及ぼす影響が大きい。そこで本研究では、木屑と鉄鋼スラグを混合した材料(以降、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料と称す)を用いて、室内要素力学試験からこの材料の力学的特性と、乾湿繰返し実験や木材腐朽実験からこの材料の耐久性を検討し、その地盤工学的特性について多くの重要な事実を明らかにした。この材料の特性を効果的に利用することで、篩下残渣由来の地盤材料の様々な場所への利活用が可能となることを示した。

以下に本論文の各章の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景・目的として、災害廃棄物の一種である篩下残渣の有効利用法を提案することの重要性について示した。また、学位論文全体の構成について説明した。

第 2 章では、篩下残渣の利用に向けての問題点と現状の利用方法について、また、鉄鋼スラグの分類と物理化学的性質、現状の利用方法について、既往の研究をまとめた。さらに、本研究の実験条件の選定に向けてこれまでに行われた研究結果を総括した。これらを取りまとめることで本研究の位置付けを明確にした。

第 3 章では本研究で使用する各種試料の特徴や物性値を示し、実施する各種力学試験概要について記述した。その上で、本研究で使用する試料と一般的な地盤材料との類似点と相違点について示した。

第 4 章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性に及ぼす様々な影響(木屑形状、木屑混合割合、養生期間等)について検討した。その結果、木屑の形状が異なると、せん断特性は異なり、木屑の縦横比が大きくなるほど、破壊ひずみが大きくなり、せん断剛性が低下する傾向を示すことが分かった。特に繊維状の木屑を混合した場合には靱性が卓越した材料となることを明らかにした。また、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は、鉄鋼スラグのみで一軸圧縮強さが 500kPa 以下の条件の場合、いずれの木屑形状においても、木屑混合割合が 10 vol.%の時に最も高いせん断強さを発揮し、それ以上木屑を混合すると強度低下が生じることがわかった。また、木屑混合割合が 33vol.%以上では養生してもせん断強度およびせん断剛性がほとんど変化しないことが分かった。以上の結果を基に、木屑の混合割合と養生期間をパラメータに取った強度剛性推定方法の提案を行った。

第 5 章では第 4 章で得られた結果を基に木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の一軸圧縮強さの地盤工学的な解釈を行った。実務的には木屑混合割合が 10vol.%以下であれば、比較的浅い場所(3m 以下)で使用する場合の最大せん断強度  $\tau_{max}$  は一軸圧縮強さの 1/2 とすることで推定できることを示した。また、化学繊維を含む繊維を固化処理土に混合した力学試験の

結果から、せん断時に繊維が引抜き抵抗を発揮することでせん断強度および破壊ひずみが増加すること、スラグ粒子が木屑繊維と絡み合うことでピーク強度後の応力低下が緩やかになることを明らかにした。

第 6 章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性について、耐候性と耐朽性の観点から、乾湿繰り返し(DW)実験および木材腐朽実験を行った。DW 実験の結果、乾湿繰り返しを受けることで体積膨張しせん断強度も低下するが、飽和状態を維持していれば、体積変化も力学特性の劣化もないことを明らかにした。また、腐朽実験の結果、この固化材料の内部では pH が大きく、酸素の供給が限られるため木屑は極めて腐朽しにくいことがわかった。以上のことから、この固化材料を乾燥させないことと腐朽菌の繁殖を抑える状況で利用すれば、耐久性には影響がないことを明らかにした。

第 7 章では総括として各章の結論を述べ、この種の混合材料に関する力学特性を総覧し、地盤材料としての利用方針を示した。

以上のことから、本論文は博士(工学)の論文として十分に価値のあるものとして認められる。