

## 論文審査の結果の要旨

氏名：庄 嶋 芳 卓

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：土質安定処理材としてのフェロニッケルスラグ微粉末の適用に関する研究

審査委員：（主査） 教授 秋 葉 正 一 ㊞

（副査） 教授 伊 藤 義 也 ㊞ 教授 鵜 澤 正 美 ㊞

特任教授 三 田 地 利 之 ㊞

天然資源の枯渇や自然環境の変化抑制，空間資源としての廃棄物最終処分場の消費容量を節約などに対応することを目的に，多くのリサイクルに関する法体系が整備されている。特に「資源の有効な利用の促進に関する法律（資源有効利用促進法）」（経済産業省，2001）は，3R の取組みを求めており，循環型社会に向けた最終処分量の削減（平成27年度の目標は約2,300万トン）とともに，建設副産物や産業副産物の積極的活用により，天然資源の消費抑制や建設コストの低減を図ることが望まれている。

建設副産物を活用については，「総合技術開発プロジェクト」（国土交通省）において様々な技術開発がなされ，技術マニュアルや品質基準等が示されており，多くの建設副産物はリサイクル率が高水準で推移している。産業副産物についても道路用材などとしてのJIS化が図られ，各地方整備局で現地実証実験等を経て利用マニュアル等が作成されている。しかしながら，鉄鋼スラグのように高水準なリサイクル率を示す材料がある一方，非鉄金属スラグ（銅スラグや亜鉛スラグなど）のリサイクル率は必ずしも高いとは言えず，向上の余地が多く残されている。

非鉄金属スラグの中でもフェロニッケルの製錬で生成するフェロニッケルスラグ（以下，FNS）は，天然砂と類似した成分を多く含有しているため，主に建設分野で，骨材やより付加価値を高める利活用についての取り組みがなされ，土木用材料その他においてJIS化されている。しかしながら，JIS規格外のFNS微粉末については，一部でブラスト材として再生利用されるものの，多くの場合，使い道がなくストックされているのが現状である。

本論文は，FNS微粉末の再生利用量を高めるため，これまでほとんど再利用されていなかったFNS微粉末を安定処理材として利活用させることを目的に，九州地区の特殊土（まさ土や黒ぼく）に対する改良効果を検討するために，以下の目標を設定し研究を実施したものである。

1. FNS微粉末単体だけでは不足するセメンテーション効果を補うため，消石灰を混合した改良材（FNS石灰）の力学および工学特性を把握する。
2. FNS石灰を混合した材料を特殊土に混合することで地盤改良材としての有効性及び環境安全性を判断する。
3. FNS石灰を混合した材料を特殊土に混合することで路床安定材としての有効性，環境安全性や経済性を評価する。

なお，上記の検討にあたっては，比較用試料として製鉄所の溶鉱炉や転炉部の集塵ダストとして発生する産業副産物である微粉酸化鉄（Fe粉）を用い，FNS石灰の改良効果について比較検討を行っている。

本論文は，全6章から構成されており，以下に各章の概要を述べる。

第1章は，序論であり，産業副産物の再生利用に関する現況および非鉄金属スラグ，中でもFNS粉の特殊土に対する地盤改良材としての再生利用の必要性を述べるとともに，研究の背景と目的および論文の構成について概説している。

第2章は，既往の技術・研究をまとめている。具体には，建設副産物および産業副産物等のリサイクル材料が，これまでに建設資材として技術開発が進められていることから，それらの活用実績などを基にした開発用途が，コンクリート用骨材，舗装材料や中詰材など多岐にわたっている現状と，今後の産業副産物の再生利用に関する課題を示している。特に，研究対象であるFNSの利用状況を詳細に述べるとともに，利用価値の少ないFNS微粉末の現状と諸性質についても言及している。

第3章は，改良材の検討として，FNS粉の微粉末単体だけでは不足するセメンテーション効果を補うため，

まず、FNS 粉に石灰を混合した材料が改良材としての有効性を発揮できるか否かについて、締固めおよび強度特性の面から検討を実施している。次に FNS 石灰の微視的構造について SEM（走査電子顕微鏡）を用いた観察を実施し、FNS 粉と石灰との結合性についても検討している。また、Fe 粉についても同様の検討や観察を行い、これまで経験や実績によってのみ裏付けされていた Fe 石灰についての改良過程のメカニズムも明らかにしている。

その結果、FNS 石灰は、最適含水比から最適含水比より乾燥側で強度発現が最も発揮され、最適含水比において締固めることで長期にわたる強度発現効果が期待できる結果を明らかにしている。また、FNS 粉と石灰の割合に対する強度発現の傾向は、FNS 粉 40% で石灰 60%（FNS40+石灰 60）の割合をピークに凸型となることを確認している。

一方、Fe 石灰は、最適含水比から最適含水比より乾燥側で強度発現が最も発揮され、最適含水比において Fe の混合割合が高いほど長期にわたる強度発現効果が期待できる結果を示している。SEM による観察で、FNS 石灰および Fe 石灰ともに養生日数の増加にともない粒子間の間隔が小さくなり、粒子同士のポズラン硬化反応と思われる結合が見られ、この結合が強度を高める要因の 1 つとして明確に述べている。

第 4 章では、まず、第 3 章で明らかとなった強度発現効果が期待できる配合割合を有する FNS 石灰あるいは Fe 石灰を用い、特殊土である「まさ土」および「黒ぼく」に添加した場合の改良効果を確認するため一軸圧縮試験を実施した結果を述べている。これより、FNS 石灰および Fe 石灰を特殊土（まさ土や黒ぼく）へ添加することで、まさ土については概ね 15% 以下の添加量、黒ぼくについては概ね 30% 以上の添加量で非常に高い改良効果が期待できることを確認している。また、FNS 石灰処理土（黒ぼく）および Fe 石灰処理土（黒ぼく）は、地盤改良材の添加量が増加するとともに破壊時の圧縮ひずみが小さくなる傾向があることを示している。

つぎに、改良土の微視的構造について、SEM（走査電子顕微鏡）を用いた観察結果を述べている。これより、添加割合の多い場合の方が早期にポズラン硬化反応が発現されることを確認している。これは、一軸圧縮試験結果において、地盤改良材の添加量が多いものほど応力ひずみ曲線の勾配が大きくなったことと併せて、剛性の高い改良土に変化したと考えられた。また、FNS 石灰あるいは Fe 石灰を特殊土に添加することで、無添加のものと比較して供試体密度が増加することから、改良材の添加は土の粒度を改善し強度を高める効果があることを確認している。

さらに、FNS 石灰処理土（まさ土・黒ぼく）および Fe 石灰処理土（まさ土・黒ぼく）の六価クロムの溶出量試験を実施した結果、改良土は土壤環境基準に適合していることを明らかにしている。

第 5 章は、路床土の安定処理材としての適用として、化学的安定処理では効果があまり期待できない軟弱な路床土（設計 CBR < 3）の例として黒ぼくを取り上げ、FNS 石灰および Fe 石灰を添加することにより、これらの路床改良材としての適用の可否を検討するとともに、これらの路床改良材による構築路床を設けた舗装構成案による経済性比較や環境安全性についても評価した結果を述べている。その結果、化学的安定処理に対しあまり期待できない黒ぼくに、FNS 石灰あるいは Fe 石灰を添加することで CBR 値は高まり、これらの路床改良材としての適用性を示唆している。また、材齢 10 日の添加量 30% における FNS 石灰処理土（黒ぼく）の FNS20+石灰 80 および FNS40+石灰 60 におけるコーン指数が、建設機械（ダンプトラック）の走行に必要な 1200kN/m<sup>2</sup> 以上を示したことから、石灰より安価な FNS 石灰を用いることでトラフィカビリティを向上できることが確認している。特に、添加量 30% における FNS 石灰処理土（黒ぼく）の FNS20+石灰 80 は、ほとんど再利用されていなかった FNS 微粉末を路床改良材の一部として再利用できるだけでなく、一般的に安定処理で改良することが困難な黒ぼくを安価に改良することもでき、現地で再利用でき残土量の低減を図れる材料であることを明らかにしている。さらに、FNS 石灰処理土（まさ土・黒ぼく）および Fe 石灰処理土（まさ土・黒ぼく）は、粘性の高い黒ぼくに対しては土壤汚染対策法（溶出量）の基準値を満足したことから、FNS 石灰および Fe 石灰ともに安全性の高い材料であることを確認している。

第 6 章は、総括として、各章から得られた結果を概括したうえで、本研究の意義を明らかにするとともに、FNS 微粉末の地盤改良材としての適用性とその展望および課題について言及している。

以上、本論文は産業副産物である非鉄金属スラグの内、これまで利用価値の少なかった FNS 微粉末を用いて経済性および環境安全性に優れた新たな地盤改良材を開発した。この成果は、わが国における循環型

社会構築に向けた成果として寄与するものであり、また、生産工学、特に地盤工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成 年 月 日