

論文の内容の要旨

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

世界的に循環資源の価値が高まる近年においては、資源の新たな採取や環境への負荷を可能な限り少なくした循環型社会の形成がますます必要となってきた。我が国でも、循環型社会に向けた最終処分量の削減とともに、建設副産物や産業副産物の積極的な活用により、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いる。このため、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で、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（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）に対する改良効果の検討結果をまとめたものである。なお、研究の実施にあたっては、以下の目標を設定した。

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や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）を用いた。Fe粉は、従来から消石灰と混合した土質安定処理材（Fe石灰）として、九州地方を中心に利活用されている。Fe石灰による安定処理は、実績を重ねることで強度発現効果が立証された技術であるので、Fe粉の強度発現性に関しては経験的に培われた面が多く、未だ解明すべき点も多く残されている。そこで、本研究では、FNS石灰の改良効果について評価するとともに、Fe石灰の効果性についても評価し、比較検討を行った。

本論文は、全6章から構成されている。まず、「産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術の現状、および産業副産物の再利用に関する課題（第1章～第2章）」を明らかにしている。つぎに、それらの問題解決の1案として「産業副産物の1つであるフェロニッケルスラグ微粉末と消石灰の混合物（FNS石灰）の改良材としての評価および特殊土に対する強度発現性、環境安全性および経済性についてFe石灰との比較検証（第3章～第5章）」を実施した結果をまとめている。そして最後に研究成果を総括するとともに「フェロニッケルスラグ微粉末の地盤改良材への適用とその展望」を述べている。

以下に各章ごとの要旨を述べる。

第1章 序論

本章では、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微粉末の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た。

第2章 既往の技術・研究

建設副産物および産業副産物等のリサイクル材料は、これまでに建設資材として技術開発が進められている。それらの活用実績などを基にした開発用途は、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。

本章では、産業副産物による地盤材料・舗装材料へのリサイクル技術を中心とした再生利用の現状および既往の研究成果を述べるとともに、今後の産業副産物の再生利用に関する課題を示した。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た。

第3章 改良材の検討

本章では、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、まず、FNS微粉末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した。つぎに、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微粉末と石灰との結合性について検討した。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た。

その結果、まず、締固め特性については、FNS微粉末あるいはFe粉と石灰との混合割合において、微粉末の割合が高くなるほど最適含水比が減少し最大乾燥密度が増加する傾向を確認した。つぎに、強度特性について、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となった。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%の割合をピークに凸型となることが確認できた。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粉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となった。SEMによる観測で、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つとして考えられた。

第4章 地盤改良材の特殊土への適用

本章では、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。その結果、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が確認できた。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見受けられた。

つぎに、改良土の微視的構造についてSEM（走査電子顕微鏡）を用いた観察を実施した。その結果、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が確認できた。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た。

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、改良土は土壌環境基準に適合していることを明らかにした。

第5章 路床土の安定処理材としての適用

本章では、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。

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た。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/m²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できた。特に、添加量30%におけるFNS石灰処理土（黒ぼく）のFNS20+石灰80あるいはFNS40+石灰60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可能で、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が判明した。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が確認できた。

第6章 総括

本章では、各章から得られた結果を概括したうえで、FNS微粉末の地盤改良材としての適用性とその展望と課題について言及した。