

氏名	さとう よしゆき 佐藤 佳之
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	工博 第238号
学位授与年月日	平成25年9月25日
学位授与の要件	学位規則 第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	舗装材料としての下水汚泥焼却灰の複合的利用技術の開発に関する研究
学位 審査委員	主査 教授 羽原 俊祐 副査 教授 岩崎 正二 副査 教授 海田 輝之 副査 教授 中澤 廣

論文内容の要旨

下水道の終末処理場で発生する下水汚泥焼却灰の発生量は増加の一途をたどっており、日本国内の発生量は平成22年度には約221,000トン、うち岩手県内の発生量は約1,000トンに達した。この焼却灰は、セメントの原料として使用される以外、ほとんどが埋立て処分されており、多量に利用が可能な新たな技術の開発が望まれてきた。路盤材およびアスファルト混合物などの舗装材料はその利用用途の一つである。下水汚泥焼却灰以外の熔融スラグ等の廃棄物は、同用途への利用実績が高いが、下水汚泥焼却灰の適用例はほとんどなく、検討の余地がある。本研究の目的は、舗装材料である路盤材およびアスファルト混合物に着目し、両用途に複合的に焼却灰を利用することで、多量に利用が可能な技術を開発することにある。現況の発生量を上回る利用可能量を確保する手法を開発するため、本研究では、両用途へ下水汚泥焼却灰を利用した場合の品質への影響原因を考察し、利用可能量の増加対策を提案することで、総合的な焼却灰の利用可能量を確保しようとした。

本論文の構成を以下に示す。

第1章「序論」では、本研究の目的および概要について述べた。

第2章「下水汚泥焼却灰の利用技術に関する研究の動向」では、既往の下水汚泥焼却灰の利用に関連した研究について整理し、下水汚泥の焼却技術の動向、下水汚泥焼却灰の舗装材料としての利用の有効性と現状の課題について述べ、本研究の位置付けを明確にした。

第3章「下水汚泥焼却灰の特性」では、下水汚泥の燃焼炉の形式として主流である流動床式焼却炉で燃焼された焼却灰を選定して、物性分析、化学分析、粒子

分析、環境安全性について検討した。その結果、リンが P_2O_5 換算で合計 25wt% を超えて存在し、一部はリン酸マグネシウムとして、多孔質かつ大きな粒子として存在することを明らかとした。さらに、焼却灰は概ね $300\mu\text{m}$ 以下の微粒子であり、作業時の飛散が懸念されること、焼却灰からヒ素とセレンの溶出が見られ、その含有量が僅かであることから、そのまま利用するよりも他材料と混合して、溶出しにくい処理を行い、利用することが有利であると結論付けた。

第4章「焼却灰の路盤材としての利用」では、第3章で検討した焼却灰を利用した路盤材の開発を行った。焼却灰を生コンクリートと混合してから硬化させ、破碎して、その混合破碎物を路盤材として使用する手法であり、生コンクリートに対する焼却灰の外割混合割合と混合破碎物の品質の関係を検討した。その結果、焼却灰の混合割合が 15wt% であれば生コンクリート単体よりも支持力が高い路盤材として利用できることを明らかとした。さらに焼却灰の混合割合が 30wt% を超えると、締固めエネルギーの増加によって支持力が低下するオーバーコンパクションが発生することを見出した。これは混合破碎物の締固め時に粒子が細粒化することで、粒子中に収着された水が自由水となることが原因と推定した。そこで混合破碎物の最適含水比の低下、強度の増加を指向して、焼却灰の粉碎処理または脱リン処理を行ってから混合したところ、両対策ともオーバーコンパクションの発生を抑制でき、焼却灰を多量に利用した場合でも混合破碎物の支持力を確保できることを確認した。

第5章「焼却灰のアスファルト混合物用フィラーとしての利用」では、下水汚泥焼却灰をアスファルト混合物用フィラーとして使用する手法を検討した。通常使用される石灰石微粉末（石粉）に対して焼却灰を置換して用いたところ、置換率 45wt% まで、アスファルト混合物の目標品質を満足することを明らかとした。しかし、置換量の増加に伴ってマーシャル安定度が低下し、配合すべきバインダー量（最適アスファルト量）が増加する。この点について、 $150\mu\text{m}$ 以上の粗粒分を除去または粉碎した試料を用いることにより、粗粒分がマーシャル安定度と最適アスファルト量の増加に大きく影響していることを明らかとした。第3章で明らかにしたとおり、この分級した粗粒分にはリン酸マグネシウムの多孔質粒子が多く含まれることから、焼却灰の多孔質な性状がマーシャル安定度の低下と最適アスファルト量の低下原因と断定した。この結果を受け、焼却灰を分級せずに全量粉碎してから用いたところ、石粉と全量置換して用いた場合でもマーシャル安定度、最適アスファルト量は焼却灰を用いない基準配合と遜色ない結果が得られた。これと同時に、粉碎した焼却灰の置換量によっては基準配合よりも最適アスファルト量が低くなることを見出した。この知見は、焼却灰が石粉の単なる代替材料にとどまらず、石粉より優位な材料として利用できる可能性を示している。なお、粉碎した焼却灰を石粉と全量置換して用いると、残留安定度が規格値を下まわる。この点については、粉体の表面電荷量に着目して検討し、粉碎時に粉体

の表面電荷量が負に移行したことが剥離を引き起こした一因であることを示した。なお、残留安定度は消石灰などの剥離防止材の添加によって改善でき、この対策を加えることにより、下水汚泥焼却灰の利用可能性を向上できることを述べた。

第6章「焼却灰利用可能性の評価および利用コスト試算」では舗装材料への焼却灰の利用可能性を評価した。前章までの検討結果と標準的な舗装構成の仮定および舗装材料の出荷実績から、下水汚泥焼却灰を舗装材料として複合的に利用した場合の利用可能性を試算した。その結果、製品当たりの利用可能性および舗装面積あたりの利用可能性は、路盤材としての利用が有利となった。過去の製品出荷実績から試算した利用可能性はアスファルト混合物用フィラーとしての利用が有利となり、試算の結果、各々の利用手法の優位性が認められた。なお、本検討で提案した焼却灰の粉砕処理は、利用可能性を倍程度高めることができる。路盤材、アスファルト混合物用フィラーのどちらの用途でも、試算した下水汚泥焼却灰の利用可能性は発生量よりも十分に大きく、今回開発した手法は利用可能性の確保に資する有効な技術であると結論付けた。さらに一定の仮定の下で焼却灰の利用コストを試算したところ、開発した舗装材料としての利用技術が、既存の処理技術であるセメント原料化および埋立て処理よりもコスト上も有利な手法と成り得ることを確認した。

第7章「結論」では、これまでの6章の検討による結論を導いた。

論文審査結果の要旨

下水道は人間の文化的かつ衛生的な都市生活を支える基盤施設であり、我が国においてもその整備が着々と進められてきた。全人口に対する下水道利用可能人口は平成23年末で75.8%に達しており、その結果下水処理の際に発生する下水汚泥焼却灰も増加の一途をたどっている。下水汚泥焼却灰はこれまでセメント原料化による処理が積極的に行われてきたが、その他の利用事例は少なく、未だ埋立て量も多い。近年では焼却灰の複数の処理用途を確保することが事業継続性の観点からも強く求められている。セメント原料化以外の焼却灰の利用検討は適用性の検討にとどまり、焼却灰利用製品の品質および利用量の確保を指向した検討例は少ない。このような背景を受け、本論文は下水汚泥焼却灰を多量に利用するために舗装材料に着目し、路盤材およびアスファルト混合物用フィラーとしての利用技術の開発を行ったものである。

本論文では、下水汚泥焼却灰を構成する粒子の多くが多孔質であること、形状および元素組成から複数種に分類すると、多孔質なリン酸マグネシウムの粗粒子が存在することを明らかとした。

第一の利用法として、焼却灰を路盤材として利用する手法を開発した。そのま

ま焼却灰を路盤材として用いた場合には飛散、ヒ素およびセレンの溶出が懸念されることを挙げ、新たに焼却灰を生コンクリートと混合してから硬化、破碎して、その破碎物を路盤材として使用する手法を開発し、課題の解決に成功している。さらに、生コンクリートに対する焼却灰の混合割合と混合破碎物の品質の関係を検討した結果、焼却灰の混合割合が 15wt% の場合には、焼却灰を使用しない場合よりも修正 CBR が 2 倍程度に高まることから、提案する手法の優位性が認められる。さらに、焼却灰の混合割合が 30wt% を超えると、締固めエネルギーの増加によって支持力が低下するオーバーコンパクションが発生し、路盤材としては不適となるため、焼却灰の改質処理によって多量利用時の問題点を解決する手法を提案している。オーバーコンパクションの発生メカニズムは混合破碎物の締固め時に粒子が細粒化することで、粒子中に収着された水が自由水となることと考え、この対策として混合破碎物の最適含水比の低下、強度の増加を達成するため、焼却灰の粉碎処理および脱リン処理を行った。その結果、両手法ともオーバーコンパクションの発生が抑制されたことから、推定したメカニズムの立証と焼却灰の利用可能量の増大を達成している。

第二の利用法として、下水汚泥焼却灰をアスファルト混合物用フィラーとして利用する手法を検討した。通常使用される石灰石微粉末（石粉）に対して焼却灰を置換して用い、置換量を 45wt% まで増加させてもアスファルト混合物の目標品質を満足し、利用可能となることを確認した。この時、焼却灰置換量の増加に伴いマーシャル安定度の低下と最適アスファルト量の増加が起こる。これは粗粒部を除去および粉碎した焼却灰を用いて比較することで、前述した多孔質なリン酸マグネシウム粒子の影響であることを断定した。下水汚泥焼却灰の全量を粉碎して用い、粉碎を進行させるほど最適アスファルト量が低下すること、粉碎した焼却灰の置換量を 30wt% とした場合には、石粉のみの基準配合よりも最適アスファルト量が最大 10% 低下すること、粉碎した焼却灰の置換量を 100wt% とした場合でも基準配合の最適アスファルト量と遜色ない結果が得られることを明らかとした。なお、粉碎した焼却灰の置換量を 100wt% とした場合は、残留安定度が規格値を下まわること指摘し、この原因として粉碎時に粉体の表面電荷量が負に移行したことを挙げた。これは消石灰の添加により解決可能であることも明らかとし、粉碎処理が利用可能量の増加に有効であると結論付けた。

本論文ではこれらの実験結果をもとに総合的な焼却灰の利用可能量を試算している。路盤材、アスファルト混合物のどちらの用途でも、検討した下水汚泥焼却灰の利用可能量は発生量よりも十分に大きく、今回検討した手法は利用可能量を十分に確保できると評価できる。さらに、焼却灰の利用コストを試算した結果、舗装材料としての利用が、セメント原料化および埋立て処理よりも有利な手法となることを確認した。

以上、今回の論文中で述べられた舗装材料としての下水汚泥焼却灰の利用技術

の開発は、路盤材とアスファルト混合物用フィラーへの複合的な利用検討により、多量利用可能な技術として工学的に有用な成果を上げていると判断できる。また、焼却灰を改質して利用製品の性能、利用可能量を増加させる手法は新規性が認められ、いずれも効果を上げており、同分野の今後の更なる研究展開が大いに期待できる。併せて、本検討において得られた焼却灰の性質、路盤材およびアスファルト混合物の性質変化の知見は、実験手法に独自の工夫が見られ、得られた結果の信頼性も高いことから、学術的な価値がある。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編）

下水汚泥焼却灰および戻りコンクリートを利用した路盤材の開発

佐藤佳之、小山田哲也、羽原俊祐、今雄希

セメント・コンクリート論文集、No.66、pp637-644、2012