

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	赤司有三
論文題目	鉄鋼スラグを活用したカルシア改質土の実用化に向けた土質特性の評価と品質管理に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>社会資本整備において港湾機能を維持拡大していくためには航路や泊地に堆積した土砂の浚渫が不可欠であり、毎年大量に発生する浚渫土砂の有効活用が環境保全の観点からも望まれている。一方、我が国では多くの主要産業で、港湾機能を活用して原材料を輸入し製品を製造しており、その製品製造の過程では多くの産業副産物が生成される。鉄鋼業では、製鉄の過程で鉄鉱石由来のシリカ (SiO_2) などの成分が石灰 (CaO) と熔融・結合した鉄鋼スラグが生成されるが、鉄鋼スラグは我が国最大の産業副産物であり、天然資材に代わる用途開発が期待されている。近年、港湾工事で発生する浚渫土砂に鉄鋼スラグを原料としたカルシア改質材を混合することで強度等が改良されたカルシア改質土の実用化が進められ、埋立工事における天然石代替材や浅場造成基盤材等の環境改善事業への適用が進められている。しかし、カルシア改質土の適用拡大が進む一方、浚渫土砂の固化改良効果や施工時の流動性低下による濁り抑制効果等に関して品質管理技術が確立されておらず、現場では都度の配合試験や、高い安全率を見込んだ高頻度の現場管理等で対応している状況である。そこで、本論文では実効性のあるカルシア改質土の特性評価と品質管理技術の確立に向けた研究を行った。本論文は7つの章で構成されており、以下に各章の内容を示す。</p> <p>第1章では、カルシア改質技術の設計・施工技術の開発や公認化の歴史について概説するとともに、施工時の法面勾配形成や耐震性能等の実用化技術の開発状況について説明し、今後の技術の発展に向けた3つの視点を整理している。</p> <p>第2章では、カルシア改質土の強度発現の原理を整理している。石灰系固化材の固化メカニズムとの比較により、1) カルシア改質土の強度発現に対するカルシア改質材から溶出するカルシウムと浚渫土砂から溶出するシリカの相互影響評価、2) 強度発現に寄与するカルシア改質材から溶出するカルシウムと浚渫土砂から溶出するシリカの評価に向けた試験方法の提案、3) カルシア改質材の混合直後に浚渫土砂の流動性が低下するメカニズムの解明と、施工検討に活用可能な解析手法の提案、4) 固化した浚渫土砂への粒状材料としてのカルシア改質材の混合が強度変形特性に与える影響の評価、の4つの研究課題を設定し、本論文の位置づけを明確化している。</p> <p>第3章では、固化に寄与する成分である、浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分が強度発現に与える相互影響を評価している。試験結果の考察から、浚渫土砂から溶出するシリカ成分が多く、かつ供給するカルシア改質材からのカルシウム溶出量が多い方が、強度発現が大きいことを明らかにしている。また、十分な固化反応を得るためにはシリカ成分とカルシウム成分の溶出</p>			

量のバランスが重要であり、シリカ溶出量とカルシウム溶出量を指標として図示することで、目標強度に応じた必要溶出量の過不足を判定できる可能性を述べている。この判定法を用いて、現場において一軸圧縮強さ 100 kN/m^2 の強度を確保するためには、カルシウム溶出量 \times (改質材量 / 含水量) = 5.0 mg/g 、シリカ溶出量 \times (土分乾燥質量 / 含水量) = 60 mg/g が目安として必要であることを明らかにしている。

第4章では、第3章で検討した強度管理のための使用材料の品質評価に必要となる、浚渫土砂から溶出するシリカ成分と、カルシア改質材から溶出するカルシウム成分の定量試験法を提案している。カルシア改質材から溶出するカルシウム量の測定法として、地盤材料の溶出特性評価法として一般的な環境庁告示第46号で定められている溶出試験方法を改良し、溶媒を人工海水に、試料を有姿の粒度分布に、振とう時間を30分間へ変更する方法を提案している。浚渫土砂から溶出するシリカ量の測定法は、試料を水中で7分程度攪拌して検液を作製する簡便法を提案している。これらの溶出結果と、6種類のカルシア改質材と15種類の浚渫土砂の一軸圧縮強さを比較分析した結果、提案した方法で得られた溶出値によって強度発現を予測することができ、実工事における強度管理の1次判断指標として適用しうることを示している。

第5章では、浚渫土砂へのカルシア改質材混合直後に見られる、フレッシュな状態での粘性増大による流動性低下のメカニズムについて議論している。検討の結果から、従来から知られているカルシア改質材の粒度改善効果と吸水効果に加えて、イオン交換反応による凝集効果が存在することを明らかにしている。さらに、この流動性の低下により実工事において海洋投入時に形成される法面勾配等を、流動解析により検討している。その結果、フレッシュなカルシア改質土の流動性はフレッシュなコンクリートと同様にビンガムモデルを用いて表現でき、逆解析的に得られる降伏値はスランプ値から推定しうることを、降伏値を用いることで精度良く形成勾配を再現できることを示している。

第6章では、骨材の混合がせん断挙動に及ぼす影響を、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験により検討している。カルシア改質土には粒径の大きい骨材が混合されているにも関わらず、せん断挙動は未解明な部分が多く、内部摩擦角を持たない粘性材料として扱われることが多い。実験の結果から、カルシア改質土は内部摩擦角を有すると期待でき、その発現には固化土領域と骨材の付着が関連している可能性を指摘しているものの、詳細なメカニズムの解明には至っておらず、今後の課題として挙げている。

第7章では、上記の結果を総括し、得られた成果と今後の展開について述べている。本研究では、これまで未解明であったカルシア改質土の強度発現や土質特性を明らかにするとともに、評価指標、設計/施工計画立案手法、施工時の品質管理手法を提案しており、カルシア改質土の今後の適用拡大に寄与することが期待されると結論づけている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の資源有効利用や環境保全の観点から、発生土や産業副産物の活用が望まれており、その活用方法が課題となっている。本論文では、浚渫土砂に鉄鋼スラグを原料としたカルシア改質材を混合することで強度等を改良したカルシア改質土について、適用領域拡大を想定しながら、化学的固化反応による強度予測、材料混合直後の流動性制御、粒状材料混合が土質特性に与える影響の3点について、検討を行っている。本研究によって得られた主な成果は以下のとおりである。

第一に、カルシア改質材から溶出するカルシウムと、浚渫土砂から溶出するシリカの溶出量を定量化する試験法を提案し、それらが強度発現に与える相互影響に基づき、カルシア改質土の発現強度を予測する手法を提案している。これらの成果は、カルシウムによる土の固化効果を、従来のサイト毎の場当たりの対応ではなく統一かつ定量的に予測可能とするもので、学術的意義が高い。さらに、カルシア改質材から溶出するカルシウムと浚渫土砂から溶出するシリカを室内試験で比較的容易に計測できる方法としたことは、実務的に意義深い。

第二に、流動性が高い浚渫土砂にカルシア改質材を混合した直後の流動性の低下について、メカニズムを解明し、制御方法を提案している。これらの成果は、カルシア改質土の実海域施工における海中投入時の濁り発生の抑制や海中での法面勾配形成に関して制御が可能であることを示すものであり、今後の適用性向上を図る上で有意義である。流動性メカニズムの解明においては、従来の指標である粒度改善と吸水に加えて、イオン交換反応という新たな原理を導入してメカニズムを解明するとともに、その流動特性をモデル化して流動解析で精度良く表現できることを明らかにした点も、学術的な価値が高い。

第三に、粘着力のみが期待できる粘性地盤材料としてこれまで取り扱われてきたカルシア改質土について、実際には内在する粗粒材に起因して内部摩擦角が発揮される可能性を明らかにしたことは価値が高い。内部摩擦角が期待できる設計が可能になれば、カルシア改質土の適用範囲が拡大し、鉄鋼スラグの利用促進につながると期待できる。詳細なメカニズムの解明には至っていないものの、本研究で得られた知見は、カルシア改質土のみならず、粗粒土・細粒土混合材料や固化を伴う地盤材料の力学挙動の解明につながるものであり、地盤改良技術の発展に寄与しうることから、波及効果は大きい。

以上の成果より、本論文は産業副産物である鉄鋼スラグが地盤材料である浚渫土砂の物理化学特性に及ぼす影響とその活用に関する科学的知見を示しており、学術的・社会的意義は大きく、地球環境学の発展に大きく寄与した。よって、本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認められる。また、令和4年8月4日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降