

氏 名	ジョーン 鄭 載 衡
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2308 号
学位授与の日付	平成 15 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科土木工学専攻
学位論文題目	Solidification/stabilization of dredged sludge with low alkalinity additives and geo-environmental assessment (低アルカリ固化材を用いた浚渫土の処理とその地盤環境的観点からの評価)
論文調査委員	(主 査) 教授 嘉 門 雅 史 教授 大 西 有 三 教授 宮 川 豊 章

論 文 内 容 の 要 旨

地盤工学分野で廃棄物を再利用する取組は、当初、石炭灰や鉄スラグのように建設材料としての再利用性に優れた材料に限定されていたが、リサイクル可能な材料の再利用を促進するリサイクル法が1991年に制定されて以来、各種建設廃棄物の再利用が積極的に行われている。建設廃棄物のリサイクル率は各方面からの種々の社会的努力により、2000年度においては85%に達している。しかし、建設汚泥は、その特性に起因して処理が困難でコストを要するため、再資源化・縮減率は41%に低迷しており、廃棄物処分場への埋立処分に大きく依存している。浚渫土に関しても同様に、その軟弱性によって処理・処分を困難にしている。処分場の残余容量がますます少なくなっていることから、埋立処分に先立って、容量を減らすとともに、汚染物質の溶出を低減させて地盤材料として再利用する努力が求められている。再利用技術の中で、無機系固化材による処理は汚泥の特性（強度、透水性、密度など）の改質が比較的簡単で経済的であり、処理後の再利用が可能な事などのメリットが多いが、処理土からの高アルカリの溶出や、一部の重金属が溶出することなどの環境リスクが危惧される。したがって、これらの地盤環境リスクを防止する観点から、低アルカリ性の固化材を用いた固化処理についての研究が望まれている。

本論文は新しく開発された低アルカリ固化材を浚渫土や建設汚泥の固化／安定化処理に適用し、地盤環境工学的な適合性を固化メカニズムの実験的解明に基づいて評価し、固化処理土を地盤材料として実際現場へ適用した際の、アルカリおよび重金属の溶出に関する長期的な挙動評価を実施して、低アルカリ固化材の適用性を詳細に検討したものであり、以下に示される7章から成っている。

第1章は序論であり、浚渫土や建設汚泥の低アルカリ固化材を用いた固化／安定化処理の研究の背景に基づいて、本研究を遂行する目的、および本論文の構成について述べている。

第2章では研究に用いた汚泥の材料特性と選定理由を明らかにし、有機系と無機系の汚泥を代表するものであることと、含有重金属による環境汚染リスクについて述べている。さらに新しく開発された低アルカリ固化材の材料特性を示し、C₃AとC₂S系の固化材であることを明示している。

第3章では、低アルカリ固化材による固化処理土を対象に、X線回折分析（XRD）、X線蛍光分析（XRFS）、走査電子顕微鏡（SEM）分析を行い、水和反応に伴うミクロ構造の変化を観察するとともに、処理土の一軸圧縮強さとpH、締固め特性、透水性、乾湿繰返しに対する耐久性等について実験的に検討を行い、その地盤環境工学的特性を明らかにしている。

第4章と第5章では、低アルカリ固化処理のアルカリ抑制特性と陽イオン溶出特性（Ca, Mg, Na, Al, Si, K）を、養生に伴う処理土中の炭酸塩の量的変化から解明し、さらに、酸中和能力試験（Acid Neutralization Capacity Test）を実施して、炭酸塩量の測定結果と併せて処理土中の反応生成物の変化を把握した。それらの結果を総合的に比較して、アルカリ抑制に寄与する主な水和反応、メカニズムを推定した。

酸中和能力試験による酸添加に対する汚泥中の鉛の溶出試験結果では、未処理の汚泥に存在する鉛が固化処理によってマ

トリックス内に取り入れられ、ある程度の不溶化効果が得られていることが判明した。また、養生条件が異なる処理土を対象とした酸中和能力試験の結果より、酸添加量が0.18mol/L以上になると気中養生と密閉養生の処理土の酸緩衝特性に相違がみられなくなり、pHに影響を及ぼす水和反応生成物が酸添加により溶解されたことを意味している。

XRD分析、Calcimeter test、溶出試験、および酸中和能力試験の結果から、気中養生した処理土では、処理土の間隙水中の二酸化炭素がpHに影響を与え、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化作用を促進して処理土からのアルカリ溶出を減少させる役割をしていることを明らかにした。さらに、処理土中のMgイオンと MgCO_3 の量が固化処理土のpH変化と連動していることが確認され、処理土のCa、Mgイオンとカルシウム炭酸塩、マグネシウム炭酸塩が低アルカリ固化処理におけるアルカリ抑制の主な役割を果たしていることが結論付けられる。

第6章では、低アルカリ固化処理土を地盤材料として再利用した現場を想定し、50年間に渡って酸性雨に晒されている条件下における固化体の中性化速度を、移流—拡散—分散方程式を用いた有限要素法（FEM）により推定した。さらに、周辺地盤に対するアルカリの溶出や中性化の進行に伴う重金属の溶出についても同様に推定を行い、低アルカリ性固化材の適用性について評価した。その結果、固化体の密度と空隙率が溶出の支配要因であること、移流分散現象を考慮した場合には固化体に浸透する酸性雨の流量の解析結果へ及ぼす影響が著しいことを示した。また、低アルカリ固化処理土はセメント処理土と比較してアルカリの拡散による周辺地盤への影響が少ないことを明らかにした。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の課題を整理して示している。

論文審査の結果の要旨

各種建設工事で発生する余剰の土材料は、近年の公共工事抑制条件下においても年間3億 m^3 という膨大な量に及んでおり、その有効利用は今日でも重要な課題である。

本論文は、建設発生土のうちの浚渫土と、行政上は建設廃棄物に分類されるがその特性は類似している建設汚泥とを取り上げ、地盤材料としてリサイクル利用する際に、低環境負荷型の固化処理を実施することの有効性を、固化メカニズムの解明と周辺環境への影響評価の観点から実験的ならびに数値解析的に詳細に考察したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 新しく開発された低アルカリ固化材を浚渫土や建設汚泥の固化/安定処理へ適用することの優位性を、得られる物理特性から評価した。特に、浚渫土の粒状改良によって、低アルカリ固化処理土の強度は、第1種改良土に相当するレベルに達しうることが明らかにした。また乾湿繰返しに対する耐久性も高いことを実証した。

(2) 低アルカリ固化材のアルカリ抑制特性について、これに寄与する水和反応と固化メカニズムを実験的検討に基づいて明らかにし、アルカリ抑制作用が主としてCSH系の反応生成物とCAH系の反応生成物によることを示した。特に、酸中和能力試験を実施し、炭酸塩量の測定と併せて具体的な水和反応メカニズムを推定した。さらに、空気中の CO_2 の吸収によるpH抑制効果を指摘した。

(3) 酸中和能力試験によって、浚渫土や建設汚泥中の酸緩衝能力と重金属の溶出ポテンシャルを評価し、固化体の安定性が重金属の溶出ポテンシャルの低減化に効果を示していることを明らかにした。

(4) 固化処理土が50年間にわたって酸性雨に晒される条件下における対象固化物の劣化速度を、移流・拡散の数値解析による中性化深度から推定する方式を開発し、周辺への重金属の溶出リスクの低下にも固化処理が貢献していることを明らかにした。

以上要するに、本論文は浚渫土や建設汚泥の地盤材料としての利用に際して、低環境負荷型の固化処理を実施することの有効性を、固化メカニズムの解明によって明らかにすると共に、周辺環境への影響評価についての重要な知見を得たものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年7月22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。