

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	Aye Cho Cho Zaw
論文題目	Strength and leaching properties of soil-steel slag mixtures in marine environments (海域環境における鉄鋼スラグ改良土の強度・溶出特性)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、製鉄の過程で生じる副産物である鉄鋼スラグの有効利用、特に土質改良材としての活用を目的として、軟弱粘土の強度改善と有害物質の不溶化効果を実験的に評価したものである。鉄鉱石から鉄を精錬するプロセスで大量に生じる鉄鋼スラグにはセメントや石灰の材料と同じくカルシウム (Ca) やケイ素 (Si) が含まれることから、セメント等の代替材料として有効利用できる可能性があり、資源循環や廃棄物処分場の残余容量の確保に貢献しうる。そこで本研究では、港湾における航路の維持等で発生する浚渫土を鉄鋼スラグで土質改良することを研究の対象としている。海底から浚渫された土砂は細粒かつ高含水の軟弱土のため強度が不十分でこれまでは処分に供されることが多かったが、副産物である鉄鋼スラグと混合して強度改善を図ることができれば、浚渫土砂が発生した周辺の海面埋立工事等に鉄鋼スラグ改良土を利用できる可能性がある。また、海域に広く分布する海成堆積粘土は堆積の過程でヒ素やホウ素などの自然由来の重金属等を含むことが知られており、これら重金属等の濃度が土壤汚染対策法の指定基準値を超えて溶出する場合には、周辺環境に配慮した対策が必要になる。鉄鋼スラグには酸化カルシウムや水酸化カルシウムが含まれており、これらが水和して固化する際に重金属等を不溶化できる可能性がある。このように、軟弱粘土に鉄鋼スラグを混合することで強度改善と重金属等の不溶化効果が期待されるものの、これまで十分な検討はなされていないのが現状である。特に、浚渫土砂の有効利用先として海面埋立を想定する場合、海水に含まれる電解質等の影響を考慮した海域環境における鉄鋼スラグ改良土の強度発現や溶出特性の評価が重要だが、知見が不足している。論文は6章からなり、以下に各章の内容を説明する。</p> <p>第1章は序論で、鉄鋼スラグの発生状況、製鉄の過程で副産される高炉水砕スラグと製鋼スラグの特性、世界における浚渫土砂の発生状況について現状を整理して、本論文の構成と目的を述べている。</p> <p>第2章は、既往研究を調査して関連する情報を整理している。具体的には、セメントや石灰による地盤の強度特性と不溶化効果に関する研究をレビューし、海域環境で改良土の表面が劣化する可能性を指摘している。</p> <p>第3章では、高炉水砕スラグと製鋼スラグの2種類の鉄鋼スラグを用いて軟弱粘土の強</p>			

度発現特性と溶出特性を評価している。実験には、笠岡粘土を亜硝酸ナトリウム水溶液に1週間浸漬して作製した模擬汚染土に鉄鋼スラグを混合し、一定期間養生した後に一軸圧縮試験によって強度特性を、回分式溶出試験によって溶出特性をそれぞれ検討している。実験条件は、鉄鋼スラグが2種類、スラグの配合量が3通り（10, 30, 50 wt.%）、養生日数が3通り（7, 14, 28日）の計18通りである。一軸圧縮試験の結果、高炉水砕スラグを混合したケースでは顕著な強度増加が確認されなかった。一方、製鋼スラグを10, 30, 50 wt.%で混合して28日養生したケースではそれぞれ5, 150, 250 kPa程度の一軸圧縮強さが得られ、製鋼スラグを添加することで強度が増加すること、添加量が増えると一軸圧縮強さも大きくなること、養生日数が長くなると供試体の強度が増加する可能性を明らかにしている。本章では遊離カルシウムの濃度も測定しており、高炉水砕スラグで約0.3 wt.%に対して製鋼スラグで約2.4 wt.%と大きな差がみられ、遊離カルシウム量の違いが供試体の強度発現に影響を及ぼした可能性に言及している。また、回分式の溶出試験では、スラグを混合しないケースで1.9 mg/Lの溶出濃度だったヒ素が、高炉水砕スラグを混合すると1.0 mg/L以下に、製鋼スラグを混合すると0.02 mg/L以下になった。養生日数と添加量の影響を比較して、高炉水砕スラグのケースでは顕著な効果とは言えない一方で、製鋼スラグでは強度の増加とともに不溶化効果が顕著であると結論づけている。

第4章では製鋼スラグ改良土が海域環境におかれることを想定し、模擬海水等に浸漬した製鋼スラグ改良土の供試体表面の劣化の程度を評価した。具体的には、製鋼スラグを笠岡粘土に30 wt.%で混合した供試体を作製し、異なる溶液（蒸留水、人工海水、塩化マグネシウム六水和物の溶液）で満たした容器中に7, 28, 90日間浸漬した後、針貫入試験を実施している。その結果、長期間浸漬するほど、また、浸漬する溶液のマグネシウム濃度が高くなるほど、供試体表面の劣化は進行して貫入深さが大きくなることを明らかにしており、溶液のマグネシウムイオンが改良土の強度を低下させる可能性を示した。また、供試体の一部を採取して回分式の溶出試験を行った結果、劣化が確認された表層のpHは9~10程度で、劣化が確認されなかった供試体深部のpHが11~12程度であるのに比べて小さい値であり、供試体の固化にはアルカリ化が重要と推察している。

第5章では、海洋環境でのスラグ改良土表面の劣化とヒ素の溶出特性の関係を調べている。本章では、第3章と同様にヒ素を含む模擬汚染粘土を作製した後、製鋼スラグと混合し、第4章のようにモールドに充填して7日または28日間人工海水に浸漬をした結果、28日間人工海水に浸漬したケースではヒ素溶出濃度が0.002 mg/Lで、製鋼スラグを混合しない場合の0.06 mg/Lを大きく下回り、不溶化効果を確認している。また、浸漬前に気中養生することで、ヒ素の溶出濃度を低減できる可能性にも言及している。

第6章は結論であり、論文を総括するとともに今後の課題を示している。

(論文審査の結果の要旨)

製鉄の過程で大量に発生する鉄鋼スラグや港湾における航路の維持等で発生する浚渫土は、処分場の残余容量の確保や資源循環の観点から、環境安全性を確保しつつ地盤材料として再資源化することが求められている。鉄鋼スラグを浚渫土に混合することで強度発現と環境安全性が担保できる改良土が作製できれば再資源化の有効な方策になりうるが、学術上ならびに実務上の知見が十分には得られていない。そこで本論文は、鉄鋼スラグを軟弱粘土（模擬汚染粘土）に所定の配合量で混合した供試体の強度特性と溶出特性を議論している。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、鉄鋼スラグについて、セメントや石灰などの代替材料としての土質改良効果を明らかにするとともに、遊離カルシウム量の違いがスラグ改良土の強度特性に影響を及ぼす可能性を示した。また、これまで検討事例が限られていた改良土からの重金属等の溶出濃度を評価し、本研究で用いた高炉水砕スラグのような顕著な強度発現がみられない材料であっても一定の重金属等の不溶化効果があることを明らかにした。鉄鋼スラグの土質改良材としての適用範囲を明らかにしたことで現場での有効利用の促進に貢献することから、実務的意義が大きい。

第二に、鉄鋼スラグ改良土の利用先の一つである海洋環境を模して供試体の表面劣化を評価した。改良土の強度や溶出特性は気中養生後の供試体を用いて評価される事例が多いが、本論文は改良土が海水に浸漬される過程での表面劣化に着目し、針貫入試験を用いて強度特性を評価した。その結果、浸漬が長期に及ぶほど劣化深度が大きくなり、海水中のマグネシウムが特に劣化に影響を及ぼす可能性を示した。スラグ改良土の劣化メカニズムを評価した点で、学術的に価値のある成果と言える。

第三に、スラグ改良土の表面劣化が重金属等の不溶化効果に及ぼす影響を調査した。その結果、供試体表面が劣化しても製鋼スラグが混合されていることで一定の不溶化効果が確認されること、水浸の前に気中養生をすることで不溶化効果を高められることを明らかにした。これらの科学的知見は、現場におけるスラグ改質土の製造・施工・管理の適正化を実現する上で不可欠であり、実務に重要な示唆を与えている。

以上より本論文は、鉄鋼スラグ改良土の強度特性と溶出特性を評価することにより、鉄鋼スラグと浚渫土の有効利用に資する重要な知見を示しており、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る。また、令和6年2月9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