

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	加藤 智大
論文題目	Geoenvironmental Management of Excavated Earthen Materials with Geogenic Contamination (自然由来重金属等を含む地盤材料の適正利用に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、地質起源の自然由来の重金属等を含む掘削岩石・土砂 (以下、掘削土) の有効利用を目的として、掘削土からの重金属等の溶出特性と土壌吸着層の性能を実験的に評価したものである。日本には地質的な要因でヒ素などの重金属等を含む地層が広く分布しており、建設工事で生じる掘削土から環境基準値を超過する濃度で自然由来重金属等が溶出することがある。しかし、元来は自然地盤内に存在していたことや、多くの場合で溶出濃度が基準値の数倍程度におさまっていること、地盤中での移動性が低いことなどを考慮すれば、自然由来重金属等を含む掘削土を処分場に廃棄するのではなく、適切な管理により溶出リスクを抑制しつつ地盤材料として活用することが望ましい。本論文では重金属等を捕捉しうる吸着層を敷設し、その上部に自然由来重金属等を含む掘削土の層を構築することで、流下する浸出水中の化学物質濃度を許容レベルまで低下させうる吸着層工法に着目してその性能評価を行っている。これまで、吸着層に流入しうる重金属等の負荷量を推定し、吸着層工法の設計を検討した事例は限られている。そこで本論文では、重金属等の溶出特性を踏まえた吸着層の性能評価を議論している。論文は8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、日本における掘削土の発生状況や地盤汚染に関する規制について基本事項を概説するとともに、自然由来重金属等を含む掘削土への対応に関する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情報を整理し、論文の新規性と重要性を述べている。特に、公定法で定められている試験法では現実に則した条件で自然由来重金属等の溶出特性を評価できていない可能性があること、吸着層に混合する人工の吸着材の水和反応や汚染物質の吸脱着反応を考慮した吸着層の性能評価は十分に行われていないことを示している。</p> <p>第3章では、回分式の溶出試験によって自然由来重金属等の溶出特性評価を行っている。具体的には温度 (5~60 °C) , 固液接触時間 (6~360時間) , 振とう方法 (200 rpm の水平振とう, または静置) を変化させて回分式の溶出試験を行い、これらの要因が自然由来のヒ素とホウ素の溶出挙動に及ぼす影響を調査している。その結果、室温 (20 °C) の条件に比べて高温の条件では、土壌汚染対策法の溶出量基準 (0.01 mg/L) を超えるヒ</p>			

素の溶出濃度が得られ、掘削土を有効利用する際には表層地盤の温度の変動に留意する必要性を示している。さらに、高温ほど反応速度が大きくなること、自然由来重金属等の溶出は公定法で定められている6時間の水との接触では濃度平衡に至らない可能性があることを指摘している。2種類の掘削土を対象とした実験結果から、温度の上昇により重金属等の溶出濃度は大きくなるが数倍程度の差異におさまるため、適切な対策工により掘削土が有効利用できる可能性を示している。

第4章では、カラム溶出試験方法の標準化が進められている一方、試験結果から設計用パラメーターを取得する方法は定まっていないことを踏まえ、2種類の海成堆積物を用いた上向流カラム溶出試験の結果から重金属等の溶出特性の類型化を試みた。具体的には、通水量/間隙体積比 (PVF) で整理した濃度破過曲線が単調減少で、 $PVF \leq 1$ で濃度が最大濃度の半分以下になる物質を、溶出が速やかに完了する「易溶性物質」と定義したところ、実験を行った重金属等ではセレンやホウ素が易溶性物質と判定された。易溶性物質は通水初期に最大濃度を示すため、カラム試験で得られた最大濃度をもとに設計用の流入濃度を設定することでより現実に近いリスク評価を行うこと、易溶性物質の判定には2 PVFまでカラム試験を実施することがのぞましいことを明らかにしている。

第5章では、吸着材を土に混合した供試体を対象に既存の物質移行モデル (移流分散方程式) の適用可能性を調べている。本章では、直径5 cm×高さ10 cmの円筒カラムに、酸化マグネシウムが主成分の吸着材を質量比1, 5, 10%で珪砂に混合して充填し、フッ素を含む溶液を通水した後に蒸留水を通水する吸脱着試験を行っている。また、得られた実験値 (フッ素の濃度プロファイル) に対して移流分散方程式の解析解をフィッティングしている。その結果、80%以上のフッ素が吸着層に固定化されたことから吸着層の有効性を実験的に示した一方、実験値と解析解が乖離する結果を明らかにしている。

第6章では、パラメトリック解析による36通りの架空のカラム吸着実験のそれぞれの結果に対して、異なる4つの計算方法で分配係数 (吸着性能を表すパラメータ) を求め、比較した。その結果、本研究で扱った解析条件では、異なる4手法によって得られた分配係数は最大で40%程度の差異であったこと、非線形の濃度プロファイルが得られた場合には、線形モデルの数値解をフィッティングして分配係数を取得すると、最も安全側の評価となる可能性を示している。

第7章では、第3,4章で得られた溶出特性の結果と、第5,6章で得られた吸着性能評価の結果を踏まえて実務的意義を議論している。短期のカラム溶出試験によって重金属等の溶出特性を大別し、速やかに溶出が終了する物質では吸着シート材のような対策を、溶出が続く物質は回分式試験で平衡濃度を調べて対策工を講じる必要性に言及している。

第8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)

掘削を伴う建設工事から自然由来の重金属等を含有する岩石や土砂が発生しているが、このような掘削土は、土砂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。このような背景を踏まえ、本論文では、建設工事で発生した掘削土の自然由来重金属等の溶出特性と、人工の吸着材と土を混合した吸着層の材料を突き固めて盛土底部に敷設する吸着層工法の性能を評価している。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、回分式の溶出試験により、温度上昇による自然由来重金属等の溶出量の増加の傾向を明らかにした。また、人為由来汚染を対象とした公定法で自然由来重金属等の溶出試験を実施した場合は、溶出が平衡に至らない可能性も示唆した。掘削土は盛土構造物などへの有効利用が考えられるが、本研究ではこれまで検討事例が限られていた浅層地盤の環境を考慮した溶出特性を検討した点で新規性に優れている。より現実に近い溶出濃度の推定に貢献しうることから、実務的意義も大きい。

第二に、カラム溶出試験の結果から設計用パラメーターを取得する方法を示した。カラム溶出試験の標準化が進められてきた一方で結果の活用方法が定まっていない中、本論文では濃度-時間曲線に着目して重金属等の類型化を行い、速やかに溶出が終了する易溶性物質を定義して、吸着層を設計する際の流入濃度の設定方法を示した。重金属等の溶出特性と吸着層の性能を個別に検討した研究が多い中で、両者の関係に着目して溶出特性の評価を行った点で、学術的に重要な成果と言える。

第三に、人工の吸着材を添加した地盤における既存の物質移行モデルの適用限界を明らかにした。すなわち、カラム吸着試験の実験値にフィッティングさせた移流分散方程式の解析解は、実験値との乖離が顕著であった。吸着材を添加した地盤では水和反応により吸着材の材質が変化する可能性があるが、既存の移流分散方程式では吸着能の変化を表現できないことを示しており、設計の実務に重要な示唆を与えている。また、既存のモデルの限界を踏まえた上で、簡便な手法を用いて安全側となる吸着層の性能評価手法を提案した点で実務的意義は大きい。

以上より、本論文は自然由来重金属等の溶出特性と吸着層の性能評価を実施することにより掘削土の適正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