

| | | | |
|----------------|------------------------------------|-----|----|
| 氏 名 | いわもと よしあき | | |
| 本籍（国籍） | 岩本 容昭 | | |
| 学位の種類 | 兵庫県 | | |
| 学位記番号 | 博士(工学) | | |
| 学位授与年月日 | 理工博 第3号 | | |
| 学位授与の要件 | 令和4年3月23日 | | |
| 研究科及び専攻 | 学位規則第5条第1項該当 課程博士 | | |
| 学位論文 題目 | 理工学研究科システム創成工学専攻 | | |
| | 建設発生土の砒素の溶出と封じ込めに関する地盤工学的研究 | | |
| 学位審査委員 | 主査 准教授 | 大河原 | 正文 |
| | 副査 教授 | 大西 | 弘志 |
| | 副査 准教授 | 齊藤 | 貢 |

論文内容の要旨

近年、建設工事で発生する土や排水に含まれる自然由来の重金属による環境汚染への対策が問題となるケースが増えている。たとえば、事例の多い砒素では、溶出試験において基準となる 0.01 mg/L を超えた場合は、発生した土を、ベントナイトを混合した透水性の低い土（透水係数 1×10^{-6} cm/s 以下）と遮水シートで覆って重金属の漏洩を防ぐ遮水工封じ込めにより処理されている。しかし、基準値を超える重金属を含有する建設発生土の処理には非常に大きなコストが発生するため、それを低減する方法が強く望まれている。そのため、重金属の含有量の判別方法を工夫して少しでも処理土を減容化することや、コスト低減を目的として砒素が溶出しないように不溶化する技術、溶出した砒素を吸着する技術などが研究開発され、その適用が広がりつつある。このような処分場の設計では、長期的な周辺環境への影響予測も重要な課題である。しかし、現状では盛土内の浸出水の挙動や重金属の溶出特性を正確に反映した予測方法は確立されておらず、処分場周辺のモニタリングを継続的に行い監視することで補完されている。正確な影響予測ができれば、処分場の設計を最適化できコスト低減にもつながる。そこで、本研究は、自然由来の砒素を含む建設発生土の封じ込め処分場において、最適な設計・施工方法を考案することを目的として、盛土内の砒素の分布および浸出水の挙動や砒素の溶出量を調査し、移流分散解析による数値解析手法を用いて検討した。この処分場は、施工上の都合で、上部の一部を約 1 年間開放した状態にできたため、上部から降雨を浸透させて浸出水の量や砒素濃度を観測した。盛土内の砒素の分布調査は、盛土内に調査ボーリングを行い、採取したコアから 50 cm 間隔で試料採取し溶出試験をした。浸出水の挙動については、土壌水分計を用いた

不飽和透水試験を給水しながら行うケースと自然降雨で測定するケースで行った。また、調査ボーリング孔を利用して、注水後の水位低下速度を測定することで、不飽和状態の透水性の評価を行った。浸透特性は、これらの試験を数値シミュレーションし、得られた解析パラメータを比較してその妥当性を評価した。この処分場では、通常遮水工封じ込めで適用される遮水シートを省略し、厚さ 50 cm のベントナイト混合土で覆う設計となっており、コストの低減を図っている。調査では、この合理化された設計の妥当性についても言及した。次に、現場検証の結果について、浸出水の不飽和浸透流解析と砒素の移流分散解析による 3 次元数値シミュレーションを実施した。その結果、浸出水の流量については、初期の全水頭を仮定して内部水を考慮することにより一定の再現ができることが確認できた。しかし、砒素濃度については、溶出速度を決める溶出係数の設定に課題があり現地を再現することはできなかった。そこで、透水係数および溶出係数を見直して再現解析を行ったところ、現地の浸出水量や砒素濃度を精度よく評価できた。これは、透水係数や溶出係数といった物性値の決定方法を確立できれば、精度の高い解析が可能であることを示すものである。次に、課題のある溶出特性について検討するため、現場のずりを用いた不飽和状態の大型カラム試験装置を製作し、現場の実現象再現試験を試みた。また、大型カラム試験を補完する目的で上方流飽和カラム試験を行い飽和状態の溶出特性についても検討した。カラム試験は、砒素の溶出に影響があると考えられるずりの粒径や通水流量を変化させて実施した。砒素の溶出モデルを作成し、カラム試験の結果を数値シミュレーションで検証した結果、一定の精度で溶出量を再現することができた。しかし、特に不飽和状態の実験では含水率や流量の影響が十分検証できておらず、課題が残った。今後、大型カラム試験の実験条件をさらに検討して溶出モデルを見直し、数値シミュレーションの精度を向上させていく必要がある。溶出モデルで使用するパラメータは大型カラム試験で得られる実験定数であり、この大型カラム試験が処分場を設計する上での実現象再現試験として標準化できれば、数値シミュレーションを用いた長期的な周辺環境への影響を含めた検討が可能となり、処分場の最適設計につながるものと考えられる。一方で、大型カラム試験は、多くの試料を必要とするため、試料の調達という点で実用性に欠ける。溶出モデルの実験定数を小型カラム試験で推測できればより実用性の高い手法の確立が可能となる。また、本研究では砒素の溶出における化学的作用は全く考慮しておらず、他の重金属の検証と合わせて今後の課題であると考えている。

論文審査結果の要旨

本論文は、建設工事で発生する土砂等に含まれる自然由来の重金属、とくに第二種有害物質の砒素を対象に、その溶出特性と砒素の漏洩を防ぐ封じ込め工法の周辺

環境への影響予測手法についてまとめたものである。建設工事現場において発生する土砂に対して、通常、環境庁 46 号試験等の溶出試験が実施されるが、溶出基準 0.01 mg/L を超えた場合、発生した土砂の不溶化処理や透水性の低いベントナイト系粘土で封じ込めるなどの対策が取られる。このとき漏出する微量砒素による環境への影響予測が実施されるが、施設から浸出する水の挙動については不明な点が多い。本論文は、自然由来の重金属を含む建設発生土の封じ込め処分場の最適な設計・施工方法を提案するものであり、そのために封じ込めされた岩石ずり中の砒素の分布、浸出水の季節変動、降雨・融雪水との連動性、砒素の溶出量を詳細に調べ、移流分散解析による環境への影響を評価している。とくに砒素の溶出特性を明らかにするために、上向流飽和カラム試験のほか現場状況を再現するために不飽和大型カラム試験を行っている。これらカラム試験より得られた各種パラメータを使って数値シミュレーションを実施し、単位溶出量が現地試験の 7.5 倍となることを明らかにした。これは既往の溶出試験が岩石を粉砕している点で実際より粒度が小さく、溶出量が過大に評価されていることを示している。本論文では、より現場状況に近い大型カラム試験で得られたパラメータを用いてシミュレーションをしており、その場合でも重金属の溶出を過大に評価することを指摘している点は重要である。これら研究成果は自然由来の重金属の溶出特性評価のみならず、今後の処分場の設計の合理化に資すること大きく、学術的かつ工学的に大変重要な意義をなすものである。

よって、本論文は博士（理工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

山岳トンネル掘削ずり処分場内の重金属の挙動把握に関する研究 - 実現場における透水試験および数値解析に基づいたデータ分析 - , 岩本容昭, 太田博光, 倉品悠, 長千佳, 清水祐也, 森田修二, 大河原正文, 地盤工学ジャーナル, 15 巻, 1 号, 181~197 ページ, 2020 年 3 月