

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	GATHUKA LINCOLN WAWERU
論文題目	Performance of sandy soil mixed with calcium-magnesium composite as attenuation layer for geogenic contaminants (カルシウム-マグネシウム系不溶化材を混合した砂質土による緩衝層の自然由来重金属に対する性能)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、天然鉱物の焼成物を主成分としたカルシウム-マグネシウム (Ca-Mg) 系不溶化材を混合した地盤材料を対象とし、通水溶液中に含まれるヒ素に対する濃度低減効果とそのメカニズムを実験により評価したものである。日本には地質起源でヒ素や鉛など重金属等を含む岩石や土壌が広く分布しているため、トンネル掘削等の建設工事で発生する大量の土砂や岩石にそのような自然由来の重金属等が含まれていることが少なくない。重金属等による周辺環境の汚染を防止するため、掘削した土砂等は適切に管理・保管することが求められるが、自然由来で存在する重金属等の岩石からの溶出は基準値の数倍以内であることが多く、環境安全性を確保しつつ合理的に地盤材料として再資源化する技術の確立が求められている。本研究で対象とする吸着層工法はそのような地盤汚染対策技術の一つであり、重金属等を捕捉しうる吸着材料の層を敷設し、その上部に自然由来重金属等を含む土砂・岩石の層を構築することで、通過する浸出水中の化学物質濃度を低下させる工法である。従来の遮水シートを用いて自然由来重金属等含有土を周辺環境から隔離する封じ込め工法では、シートがすべり面となりうるため地盤構造物内に弱部を形成するのに対し、吸着層工法では締固めにより堅固な土木構造物を構築できる点で有利であるが、設計法の確立には至っておらず、科学的知見の蓄積が求められている。本論文では、まさ土にCa-Mg系不溶化材を添加した混合土を対象とし、水理的特性と吸着性能の観点から吸着層工法としての適用性を評価している。Ca-Mg系不溶化材とは、天然鉱物と特殊添加材を混合し、焼成して生成される材料で、細孔構造による物理的な固定と化学的な難溶化により重金属等に対する高い吸着性能を発揮する。本論文は7章からなっており、以下に各章の内容を説明する。</p> <p>第1章は序論であり、本論文で対象とする吸着層工法の構造や特徴、地盤汚染対策における位置付け等を整理するとともに、Ca-Mg系不溶化材の特徴と重金属吸着性能や基本的なメカニズムについて概説している。</p> <p>第2章は既往の研究のレビューであり、日本国内の建設工事における自然由来重金属等を含む岩石や土壌の発生について、現在及び過去の代表的な事例を取り上げ概説するとともに、掘削土や岩石に含まれる自然由来の重金属等や酸性水の成因を整理している。また、本研究で対象とする吸着層工</p>			

法の対策技術としての優位性を、他の工法との比較を通じて論じ、用いたCa-Mg系不溶化材の効果や吸着性能に関する既往研究を取りまとめている。2010年頃から行われてきた一連の研究成果を紹介し、実務への展開を図る上で未解明な点を述べており、本研究の意義と位置づけを明確にしている。

第3章では、Ca-Mg系不溶化材を添加した混合土の吸着性能を、振とう式の吸着試験により評価している。ここでは、質量比で約5%の不溶化材を添加した混合土を対象に、材料粒径、養生期間、溶液pHの影響に着目して議論している。粒径は製造コストだけでなく、現場での取り扱いや混合のしやすさにも影響するため考慮すべき因子である。また、掘削岩石や土壌に含まれる硫化鉱物が降水や地下水と接触すると浸出水が強酸性を示すため、吸着層としてのCa-Mg系不溶化材混合土の適用性を論じる上で低pH条件下での性能は重要である。実験結果から、不溶化材の粒径によらず浸出水のpHを中性域に維持しうるpH緩衝能が期待できること、溶液のpHが低い場合にも混合土は吸着性能を維持しうることを明らかにしており、吸着層の性能に影響を及ぼす要因を整理している。

第4章では、細粒状、粗粒状の2種類のCa-Mg系不溶化材を取り上げ、吸着層としての長期性能を論じている。具体的には、数ヶ月間にわたる通水試験と滴定試験を行い、性能の変化を評価している。滴定試験の結果から、強酸で不溶化材の溶解が生じる場合でも固体状を保持できるため、細粒材と比較すると粗粒材の方が低pH条件で高い性能を発揮しうることを示しており、さらに通水試験の結果から、低pH溶液を通水させた場合にも浸出液のpHは長期間にわたり中性域を維持しうることを示している。また、化学分析の結果に基づき、ヒ素濃度低減の主なメカニズムは、不溶化材に含まれるカルシウムやマグネシウムの炭酸塩によるヒ素の沈殿物の形成であることを指摘している。

第5章では、原地盤と吸着層の水分保持特性について検討している。実際の地盤構造物内に存在する間隙水は、水分保持特性によって各層への分配や移動性が決定されることから、本章では、Ca-Mg系不溶化材の添加が水分保持特性に及ぼす影響を、保水性試験によって定量評価している。実験結果から、不溶化材の添加によって保水性は大きく変化し、特に粒径幅の広いまき土を母材に用いた場合にその影響が顕著になることを明らかにしている。

第6章では、前章までで得られた結果をもとに、吸着層工法の実環境での適用性を数値計算によって議論している。吸着層直下での化学物質濃度を算出することで、吸着層工法の適用による濃度低減効果を定量化するとともに、供用期間や流入濃度に応じた吸着層の必要層厚を提案している。

第7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)

我が国には自然由来の重金属等を含有する岩石や土壌が広く分布しており、建設工事に伴って基準不適合土壌等が大量に発生しているが、土砂処分場の残余容量確保のためにも、そのような重金属等を含む土砂を環境安全性を担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。本論文は、構造安定性や経済性に優れた吸着層工法を対象とし、カルシウム-マグネシウム (Ca-Mg) 系不溶化材を混合した地盤材料の吸着層への適用性を評価したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、Ca-Mg系不溶化材を混合した地盤材料の吸着性能に及ぼす種々の要因の影響を明らかにした。既往研究では、不溶化材の添加量と吸着性の関係については議論されていたが、本研究では、養生日数や材料粒径、溶液pH等の影響を定量的に明らかにしており、様々な現場条件に対応しうる合理的な設計方法の確立に資する知見を得た。特に、材料粒径の影響に着目した検討例はこれまでになく、吸着性能に加え、施工性や取り扱い容易性を考慮した材料選定が可能になると考えられる。

第二に、カラム通水試験によりCa-Mg系不溶化材混合土の長期性能を初めて明らかにした。特に、低pH条件で不溶化材の溶解が生じる場合であっても、粗粒状の不溶化材であれば長期にわたり吸着性能を保持しうることを明らかにした点や、低pH条件下でも流入溶液に含まれる95%以上のヒ素を吸着層が除去しうることを示した点は、これまでに類似する検討例はなく学術的意義が高い。実環境でも酸性水の発生はしばしば問題になることから、吸着層工法の技術的信頼性を高める知見であり、合理的な地盤汚染対策の普及に貢献しうると判断できる。

第三に、吸着層工法の実環境での適用性を明らかにしている。数値計算によって吸着層直下での化学物質濃度を算出し、吸着層工法の適用による濃度低減効果を定量的に示した。さらに、供用期間や流入濃度に応じた必要層厚を示しており、現場条件に応じた吸着層の仕様を決定する上で必要な知見を提示しており、実務的意義が高い。

以上の成果より、本論文は吸着層工法の現場条件に応じた適切な設計方法の確立に資する科学的知見を提示しており、自然由来重金属等を含む掘削土砂等の再資源化に貢献することが期待され、社会的意義は高く、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る。また、令和2年2月7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。