

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	CHEN Ji
論文題目	Enhanced performance of bentonite-based materials for preservation of geoenvironment (地質環境保全のためのベントナイト系材料の性能向上に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、地盤環境保全に用いられるベントナイト系材料を対象に、室内実験により性能の向上を検討したものである。天然の粘土であるベントナイトは、水と接触すると水分子を静電的に取り込み膨潤する性質を有するため、単体のベントナイトや原位置土と混合して作製されるソイルベントナイトには高い遮水性能が期待でき、地盤汚染を封じ込める鉛直遮水壁や廃棄物処分場の底部遮水工として広く用いられてきた。ベントナイト系材料は、セメント等の固化材を用いないために施工後も柔軟性が維持され、変形追従性や自己修復性等の特長を有する一方で、鉛直遮水壁として利用した場合には、近接構造物による側方土圧に抵抗できず周辺地盤も含めて長期的に変形する可能性が指摘されている。また、ベントナイトは化学物質に対する吸着性を有し、様々な化学物質の濃度低減にも有効である。近年対応が急がれている廃水銀の最終処分では、流出や雨水浸入を防止しつつ他の廃棄物から隔離する必要があるため、隔離層としてベントナイトの利用が想定されているものの、十分にその有効性が検証されていない。本論文はこのような課題に着目し、ソイルベントナイトの改質を強度特性と遮水性能の観点から議論するとともに、廃水銀の埋立てに使用される粒状ベントナイトの性能を評価したものである。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章は序論である。日本における土壌・地下水汚染の現状や、本論文で対象とする鉛直遮水壁を用いた原位置封じ込め工法について概説するとともに、ソイルベントナイトの遮水材としての有効性と課題をとりまとめ、本論文の背景を示している。また、廃水銀をとりまく規制の現状を整理するとともに、現在検討されている廃水銀の最終処分の構造を示し、研究対象と目的を明確化している。</p> <p>第2章は、既往研究のレビューである。ベントナイトの膨潤メカニズムを述べつつ、ベントナイト混合土の遮水性能に関する既往研究を整理している。セメントとベントナイトを用いた混合土の強度特性や遮水性は過去にも研究例があるが、これらの材料は載荷に対して脆性的に破壊するため、地震のような動的荷重作用時に亀裂が生じる恐れがある。本論文では、ソイルベントナイトの最大の特長である柔軟性と変形追従性を維持しつつ強度増加を達成する点が既往研究と異なることを述べ、研究の独創性を明示している。</p>			

第3章では、セメント添加によるソイルベントナイトの強度改善を議論している。砂質土に115 kg/m³のベントナイトと0~75 kg/m³のセメントを添加し、7日と28日の養生後の強度特性を三軸圧縮試験により評価した結果、養生期間が長くセメント添加量が多いほどソイルベントナイトの強度が高くなることを示している。試験後の供試体に対して目視観察を行った結果、セメント添加量の増加とともに、供試体に明瞭な破断が生じない延性破壊から明瞭なせん断面が発現する脆性破壊へと段階的に移行することや、50 kg/m³のセメント添加量で脆性破壊に転じる可能性があることを明らかにしており、動的荷重に対しても亀裂を生じずソイルベントナイトの健全性を維持するためには、セメント添加量を50 kg/m³以下にすべきであると述べている。

第4章では、改質したソイルベントナイトの遮水性を議論している。セメントから溶出するカチオンはベントナイトの膨潤を阻害しうることから、セメント添加は遮水性の点では不利に働く可能性がある。本章では、前章と同じ手順で作製したソイルベントナイトを用いて透水試験を行い、セメント由来の水溶性成分により透水開始直後の透水係数が顕著に増加するものの、セメント水和物が間隙に生成されるため時間とともに透水係数が低下し、一般的な性能基準を満足しうることを明らかにしている。透水係数はセメント添加量が増加するほど大きく低下し、本論文で検討したセメント添加量や化学物質濃度の範囲では十分に高い遮水性能が見込めることを述べている。

第5章では、廃水銀の埋立てに使用が想定される粒状ベントナイトの性能を評価している。本論文では3種類の粒状ベントナイトを用いて、処分場内部で想定される嫌気性条件下での膨潤量を、異なる鉄イオン濃度の溶液に対して評価するとともに、ベントナイトの含水比の違いがガス状水銀の吸着量に及ぼす影響をバイアル瓶を用いた吸着試験により評価している。その結果、500 mg/Lの鉄イオン濃度でモンモリロナイトのイオン交換と結晶層間の拡大により膨潤量が最大となること、自然含水比や最適含水比に調整した湿潤状態のベントナイトのガス状水銀吸着量は、乾燥状態と比較し1オーダー低下し、分配係数は2オーダー低下することを明らかにしている。

第6章では、前章までに得られた研究成果の実務的意義を議論している。強度と遮水性の双方の観点から25~50 kg/m³程度のセメント添加量が最適であったが、原位置土の特性にも影響を受けることから、サイト条件に応じて適切な設計が必要であることを述べている。廃水銀の最終処分に関しては、嫌気条件下でも粒状ベントナイトの膨潤は期待できるものの、乾燥状態と比較し湿潤状態ではガス状水銀に対する吸着能が著しく低下することから、慎重な事前検討が求められることを指摘している。

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。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

水と接触すると高い膨潤力を発揮するベントナイトは、単体あるいは原位置土との混合土であるソイルベントナイトとして、地盤汚染の封じ込めや廃棄物の管理に広く用いられているが、近年は高強度化や新たな環境影響物質への対応が求められている。本論文は、セメント添加によるソイルベントナイトの強度増加の可能性と、廃水銀埋立てへの粒状ベントナイトの有効性を検証したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、ソイルベントナイトの柔軟性を維持しつつ強度を高めうるセメント添加の可能性を示した。柔軟性の維持と強度増加はトレードオフの関係にあり、両者の達成は技術的に困難と考えられていたが、本論文では数多くの強度試験結果に基づき柔軟性と強度発現が両立する上限のセメント添加量を示した。セメント改良土の強度特性に関する研究事例は多く存在するが、破壊形態や柔軟性と関連付けて詳細に検討した事例は少ない。原位置土の特性にも影響を受けるため、結果の一般化にはさらなる検証が必要だが、本論文で提案した評価方法は汎用性があり、学術的価値が高い。

第二に、セメント添加したソイルベントナイトの遮水性能を定量化した。セメントの水和生成物は間隙を充填し遮水性能を高めうる一方で、セメントから溶出する水溶性成分はベントナイトの膨潤を阻害しうるため、遮水性に及ぼす影響は予測困難であった。本論文では、透水開始直後に透水係数が1オーダー程度高くなるものの、セメント水和物の生成により経時的に透水係数が低下し、一般的な性能基準を十分に満足することを明らかにしており、地盤環境保全の実務に直結する成果を提示している。

第三に、廃水銀の埋立てに使用される粒状ベントナイトの性能とその評価法に関する新たな知見を示した。ベントナイトの膨潤性を嫌気条件下で評価した事例は過去に報告されておらず、さらにその影響は無視しえないことから、新規性が高い。また、湿潤状態の粒状ベントナイトのガス状水銀に対する吸着能は乾燥状態のものより大幅に低下することが明らかになったことから、利用状態を適切に再現した性能評価の重要性を示唆しており、試験方法の標準化にも資する科学的知見を示している。

以上のように、本論文は強度改善したソイルベントナイト鉛直遮水壁の実用化と、合理的な廃水銀の最終処分方法の実現に向け、多くの科学的知見を示しており、地盤環境工学の発展に貢献した。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8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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降