（ 続紙 1 ）

京都大学	博士（ 地球環境学 ）	氏名	髙 井 敦 史
論文題目	Geoenvironmental Reliability of Soil-Bentonite Mixture Cutoff Walls （ソイルベントナイト遮水壁の地盤環境的信頼性）		

（論文内容の要旨）

本論文は，地盤汚染の原位置封じ込めに用いられるソイルベントナイト遮水壁を対象とし，その適用性を地盤環境工学の観点から評価したものである。我が国では土壌地下水汚染に関わる調査件数はここ十数年で飛躍的に増加しており，社会的な重要性は高まっている。一方で汚染対策としては，ゼロリスクを求める社会的傾向もあり，汚染土壌を掘削し最終処分場に運搬・処分するいわゆる掘削除去が採用される割合が依然として高く，運搬に伴う二次汚染リスク，最終処分場の受入許容量の逼迫，過剰な対策費用の投入等の観点から，合理的な対策が選択されているとは言い難いのが現状である。原位置封じ込め工法は，低透水性の遮水壁を汚染地周辺に打設することで汚染物質の移流輸送を抑止する工法であり，掘削・運搬を伴わないことから，掘削除去と比較して環境面・経済面で有利であるとされている。このような掘削除去に代わる技術の普及を果たすためには，科学的知見を蓄積し信頼性の向上を図る必要がある。本論文で対象とするソイルベントナイトは，モンモリロナイト系粘土鉱物を主成分とするベントナイトを原位置土に直接混合することによって作製される低透水性材であり，固化材を添加しないため施工後も高い柔軟性を発揮すること，腐食等の劣化が生じないため長期的な安定が見込めること，等の特長を有している。本論文では，(1) 遮水性能に与える影響因子，(2) 原位置での品質評価，(3) 地震時挙動，の３つの課題に対して実験的検討を行い，ソイルベントナイト遮水壁の地盤汚染対策技術としての適用性を評価している。論文は６章からなっており，以下に各章の内容を説明する。

第１章は序論であり，地盤汚染の基本事項を概説するとともに，地盤汚染対策における原位置封じ込めの位置付けを述べている。また，対象とするソイルベントナイトの遮水性能に関する基本的なメカニズム，施工方法及び技術的特徴をまとめている。

第２章では，ソイルベントナイトの遮水性能に及ぼす影響因子を一連の透水試験により定量的に評価している。ソイルベントナイトの遮水性能は，溶液に接すると吸水して膨らむベントナイトの膨潤特性に依存するが，カチオンを含む溶液に曝された場合にはその膨潤が阻害されることが懸念される。そのため，母材となる原位置土の間隙水及び透水溶液に含まれる化学物質が遮水性能に及ぼす影響を評価し，海岸近傍のように母材の間隙水中に化学物質が存在する場合には遮水性能が低下することを明らかにした。粉体ベントナイト添加量や応力状態，母材の種類が遮水性能に及ぼす影響についても検討を行い，母材の種類によらず高い遮水性能が期待できること，作用する応力が大きくなるほど透水係数が小さくなること等を定量的に示した。また，亀裂やピンホール等の損傷を有する供試体を用いて透水試験を行い，ベントナイトが十分

に膨潤できる条件であれば供試体内のベントナイトの再膨潤によって損傷箇所を自己修復し，透水係数を経時的に回復しうることを明らかにした。さらに，ソイルベントナイトの膨潤圧や塑性指数等の物性値が，透水係数と良い相関を有していることが示された。

第３章では，ソイルベントナイト遮水壁の原位置での品質管理・品質保証手法として，電気式静的コーン貫入試験の適用性を検討している。汚染物質の封じ込めのためにはベントナイト量が不足する貧配合部の存在が許容されないが，従来の現場試料採取による品質評価は空間連続的な評価となっていないという課題があった。この問題を解決するため，地盤調査に広く用いられており鉛直方向に連続的なプロファイルが取得可能な電気式静的コーン貫入試験を応用し，ソイルベントナイト遮水壁の品質管理・品質保証手法としての適用性を室内実験により評価している。具体的には，ベントナイト添加量の異なるソイルベントナイトを用いて三軸圧縮試験及び直径 0.8 m の大型土槽実験を行い，コーン貫入試験の実行可能性を検討している。その結果，ソイルベントナイトの強度変形特性がベントナイト添加量に大きく影響を受けるような条件であれば，コーン貫入試験で得られる物性値のプロファイルから，遮水壁内部の貧配合部を検知しうる可能性が示唆された。また，コーン貫入を一時的に停止することで実施される間隙水圧消散試験によって，透水試験で得られる値と同程度の透水係数が数分で確認できることが示された。本章ではこれらの得られた成果に基づき，電気式静的コーン貫入試験を用いた現場での品質管理・品質保証の実施フローを提案し，均質性と遮水性能について二段階の評価を行うのが妥当であると論じている。

第４章では，ソイルベントナイト遮水壁の地震時挙動について検討を行っている。この遮水壁は施工後も固化せず柔軟性を有していることから，地震時において周辺地盤の変状に追随できると考えられるが，動的荷重に対する強度変形特性や液状化発生の可能性については未解明の課題となっていた。本章では繰返し三軸圧縮試験と遠心模型実験を行い，遮水壁の地震時挙動を評価している。その結果，ソイルベントナイトに繰返し荷重が作用した場合，過剰間隙水圧はほぼ発生せず液状化には至らないが，剛性の低下に伴い大きく変形することが明らかとなった。また，砂地盤に打設されたソイルベントナイト遮水壁を模擬した遠心模型実験において，50 G の遠心力場で最大 500 gal 程度の地震波を入力したところ，周辺砂地盤が液状化に至った場合でも遮水壁は液状化に至らず，周辺地盤と一体となって振動することが明らかとなった。高い柔軟性のため地震時には大きな変形が遮水壁に残留するものの亀裂等は発生しておらず，健全性を維持できる可能性が示唆された。

第５章では，各章で得られた成果の実務的意義を述べており，配合設計及び現場特性解明への寄与を明らかにするとともに，一連の施工プロセスとの対応関係から各成果の相互の関係について論じている。

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）

地盤汚染への合理的な対策の実施は地球上の様々な国・地域における重要な環境課題であり，汚染土壌の掘削を要しない原位置封じ込めの適用を適切に推進するための科学的な検討が求められている。本論文は，ベントナイトを原位置土に直接混合することで造成されるソイルベントナイト遮水壁を対象とし，地盤汚染の原位置封じ込め工法として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，地盤内の化学物質濃度や粉体ベントナイト添加量，内部応力等の因子がソイルベントナイトの遮水性能に及ぼす影響を定量的体系的に明らかにした。特に，膨潤圧や塑性指数等の物性値と透水係数との相関を明らかにしたことで，透水係数を簡便に予測する手法を示した。また，ベントナイトが十分に膨潤できる溶液を透水させた場合には，亀裂やピンホールを有していても健全な供試体と同程度にまで透水係数が回復されることを明らかにしており，ソイルベントナイトの自己修復性とその程度が初めて実証された点で，地球環境学ならびに地盤環境工学における学術的意義が高い。

第二に，ソイルベントナイトの強度変形特性がベントナイト添加量に大きく影響を受けるような条件であれば，電気式静的コーン貫入試験により遮水壁内部の貧配合部を検知しうる可能性を示したことで，これまで課題とされてきたソイルベントナイト遮水壁の原位置における空間連続的な品質評価の可能性を見出した。コーン貫入試験で併せて実施される間隙水圧消散試験により，品質評価として求められる精度で透水係数を算出しうることが実証されたことから，試料採取を伴わない原位置での遮水性能評価が可能であることを明らかにした。これらの得られた成果及び提案された品質管理・品質保証の実施フローは，原位置における品質保証の観点からソイルベントナイト遮水壁の信頼性の向上に大きく寄与するもので，実務的意義が高い。

第三に，ソイルベントナイトに繰返し荷重が作用した場合，過剰間隙水圧はほぼ発生せず液状化には至らないが，剛性の低下に伴い大きく変形することを示し，繰返し荷重に対するソイルベントナイトの強度変形特性を初めて明らかにした。遠心力場での遠心模型実験により地震時の遮水壁の振動特性及び水平変形挙動を明らかにしたことで，これまで未解明となっていたソイルベントナイト遮水壁の地震時における変形追随性を明らかにした。亀裂等の発生はみられなかったことも踏まえ，最大 500 gal 程度の地震動に対してはソイルベントナイトは健全性を維持しうることを示した。

以上の成果により，本論文はソイルベントナイト遮水壁の信頼性の向上に寄与し，合理的な地盤汚染対策技術の普及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，平成 26 年 2 月 10 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