

氏 名	イ 李 ミョン ホ 昊
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2489 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 土 木 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Electrokinetic Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils (重金属汚染土の動電浄化手法に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 嘉 門 雅 史 教 授 大 西 有 三 教 授 森 澤 眞 輔

論 文 内 容 の 要 旨

土壌・地下水汚染浄化対策法の確立は緊急に要請される事項の一つである。我が国では平成15年2月の土壌汚染対策法の施行によって、近年は地盤汚染の浄化に関した数多くの技術開発がなされているが、浄化メカニズムについては必ずしも十分に解明されたとは言い難い工法も多い。

1980年に Segall らが浸漬された底泥からの流出水中に含有される様々な汚染物質を、電氣的に抽出した結果を報告して以来、動電土壌処理技術 (electrokinetic soil processing) は汚染地盤の浄化方法として数多くの取り組みがなされてきた。しかしながら、動電 (Electrokinetic: EK) 現象を用いた重金属浄化工法は比較的新しい技術であり、汚染物質の除去の基本メカニズムについても不確定要素を残している。本論文では、このような EK 現象の基本要素を解明して、浄化効率の評価を実施したものであり、以下の6章からなっている。

第1章は、序論であって、本研究の背景となる重金属で汚染された地盤の浄化のため、現在まで採用されてきた処理方法、特に動電学的な処理について概観し、本研究の目的を示した。

第2章では粘性土の基本的な挙動である、汚染物質の収着 (sorption) と脱着 (desorption)、分解 (dissolution) と沈殿 (precipitation) を示し、電気浸透流と電気浸透圧密の理論、および動電学的影響下における土の挙動に関する基本的な概念をとりまとめた。

第3章では、電気移動 (electromigration: EM) および電気浸透 (electroosmosis: EO) のプロセスによる無機汚染物質の砂質土中の移動特性についての室内試験の検討結果をとりまとめた。はじめに実験装置、および実験方法について詳述し、異なる排水条件での動電学的影響下の亜鉛イオンの移動特性について実験的に検討した結果、以下の結論が得られた。

システム中の亜鉛量と、電氣的に誘起される水の流動に直接の相関が存在し、直流電場下の土に亜鉛を添加することによって、間隙水の流動が発生した。直流電圧を土に印可することにより、電気移動 (EM) および電気浸透 (EO) 現象が生じ、陰極方向への電気浸透流により陽イオンの移動が促進される挙動、もしくは陽極方向への水の流れによって陽イオンの移動が妨害される挙動が確認された。一方、電気分解 (electrolysis) 作用によって発達する酸性域およびアルカリ性域 (Acid/base fronts) は、亜鉛濃度と排水条件に依存した位置で接触して中性化を引き起こし、土からの重金属除去効率を低下させる。これは、電気移動 (EM) 作用によって土中を移動する重金属は、沈殿の形成により中性化領域 (neutralization zone) を通過することができないためである。さらに、動電学的処理時の土中の pH 分布は流速に依存し、流速が大きい場合は酸性域が拡大する傾向がみられた。陰極側を排水境界とした場合、亜鉛は陰極方向に移動するが、陰極周辺は pH が高いことから沈殿を形成した。一方、陰極側を非排水境界とした場合、陰極への電気浸透流が阻害され、電気移動 (EM) 作用による亜鉛の移動は陽極側のみに制限された。

第4章では、電気泳動 (electrophoresis: EP) および電気浸透 (EO) 現象が懸濁液中での粘性土粒子の沈降挙動と圧密挙動に及ぼす影響を室内カラム試験により評価した。様々な電気極性、汚染レベル、電場強度の条件で実施した試験結果よ

り、以下の結論が得られた。

電気的に引き起こされた粒子の沈降と圧密速度は、自然沈降および自重圧密速度と比較して大きなものであった。その際、過剰間隙水圧の消散速度と電場強度の間には直接の相関が見られた。沈降した層の表面付近における密度が高い層の形成は、動電学現象の付加的な効果（例えば、ゼータ電位の変化といった電気化学的反応）によるものであり、土中には非線形な電位勾配が形成された。また、有効応力と間隙比の関係より、動電学的に引き起こされた圧密過程においては、自重圧密（self-weight consolidation）による有効応力の増加が支配的要因になることが確認された。さらに、Acid/base fronts と土中の pH は動電学的処理において、局所的な電位勾配と電気の流れを保つことに重要な役割を果たしていること、および懸濁液中の重金属は動電学的処理によって除去することが可能であり、その除去効率は64 %に達することを確認した。

第5章では、亜鉛で汚染されたカオリン粘土（kaolin clay）を対象として動電学的処理を実施し、固体相および液体相における汚染物質の浄化に関する詳細なメカニズムの評価と議論を実施した。特に、土粒子からの重金属の脱着特性、間隙水中の重金属イオンの移動特性、および異なる pH 条件下における重金属の溶解と沈殿特性に着目して検討を行った。陰極付近を除いた土中の大部分においては、除去効率は58%~94%の間で変動したが、陰極付近の pH が高い領域においては沈殿を形成したことから、全体的な除去効率は30%以下に留まった。また、電気移動（EM）効果によって移動する重金属は、中性化領域を通過できず沈殿を形成することから、動電学的処理を実際に適用する際には、浄化効率を改善するためアルカリ領域が浄化対象領域内に形成されないような適正な促進工法を採用する必要がある。そこで、促進工法として陽極液（anolyte）や酢酸（ CH_3COOH ）を注入する条件で浄化実験を行ったところ、陰極付近において pH が低下し、除去効率が改善された。その結果、重金属のマテリアルバランスとして、陰極付近を除いた土中の大部分における浄化効率は84%~94%の間を示し、陰極付近を含めた全領域においても最大65%となった。これらのことから、電気移動（EM）による重金属の脱着と電気浸透（EO）効果によるフラッシング（flushing）作用によって高い除去効率を得られることを明らかにした。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の課題を整理して示している。

論文審査の結果の要旨

平成15年2月の土壤汚染対策法の施行によって、近年は我が国でも地盤汚染の浄化に関した数多くの技術開発がなされているが、浄化メカニズムについては必ずしも十分に解明されたとは言い難い工法も多い。本論文は、そのような工法の一つとして電気化学的な動電（Electrokinetic:EK）現象を用いた重金属浄化工法を取り上げ、適用土質として砂質土と粘性土とのそれぞれについての実験結果から、電気移動（Electromigration:EM）、電気泳動（Electrophoresis:EP）、電気浸透（Electroosmosis:EO）の各プロセスを区分して、重金属のマテリアルフローに基づく浄化効率に関する詳細な検討を実施したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1) 砂質土へ通電した際には、EM 及び EO 現象が優先的に生じることを明らかにし、陰極方向への電気浸透流によって陽イオンの移動が促進されることを示した。一方電気分解作用によって発生する酸性域とアルカリ性域が重金属濃度に依存した中性化を引き起こし、汚染土からの重金属除去効率を低下させる。これは EM 作用によって移動する重金属が、沈殿の形成によって中性化領域を通過できないことに基づくことを明らかにした。さらに、結果として生じる pH 分布が流速に依存し、流速が大きいと酸性域が拡大することから、陰極側を排水境界にすることによって浄化が促進されることを示した。また、陰極側では pH がより高くなることによって重金属が沈殿を形成することを明らかにした。
- (2) 重金属汚染カオリン粘土を対象にして重金属の収脱着作用と浸透・沈殿作用とについて、EP 及び EO 現象と、EM 現象との相関から詳細に検討した。カラム試験による懸濁液状態での動電浄化メカニズムを、フローティング電極を用いて追求し、電氣的沈降速度が自然沈降や自重圧密速度と比較して十分大きく、土中に非線形電位勾配が形成されることを明らかにした。
- (3) 土粒子からの重金属の脱着特性を間隙水中の重金属濃度バランスで説明し、動電カラムの陰極側と陽極側で浄化効率が大きく変化することを、経過時間との関係で明らかにした。特に陰極の近傍付近での高い pH 領域による沈殿による重金属の収着と、間隙水濃度の時間的变化とを明瞭に表現した。
- (4) 浄化促進工法として、陽極液や酢酸溶液の注入実験を試み、陰極付近でも著しい浄化効果が得られ、EM による重金

属の脱着とEO効果によるフラッシング作用によることをマテリアルバランスから実証した。

以上要するに、本論文は、重金属汚染地盤を浄化しうる工法として電気化学的なEK現象に着目し、砂質土や粘性土という土質性状の違いが浄化の有効性へ及ぼす影響を明確に示し、EK浄化工法の除去効率を評価したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月18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。