

(続紙 1)

| | | | |
|------|---|----|------------------|
| 京都大学 | 博士 (地球環境学) | 氏名 | 唐 强 (TANG QIANG) |
| 論文題目 | Factors Affecting Waste Leachate Generation and Barrier Performance of Landfill Liners (廃棄物埋立処分場における浸出水の発生特性と遮水工の性能への影響要因の解明) | | |

(論文内容の要旨)

廃棄物埋立処分場の設計や環境影響評価において重要となる様々な因子の中でも、浸出水の水質予測、および浸出水の処分場外への流出を防止する底部粘土ライナーの化学物質遮蔽性能の評価の重要性は高い。浸出水の水質予測に関しては様々な実験手法が開発されているが、大型の円筒カラムに実際の廃棄物を充填して通水を行うライシメータ試験は現場に近い条件が再現できる特長から適用事例が多い。しかし、ライシメータ試験の統一的な試験法は現時点では確立されておらず、既往の研究では様々な内径や高さのカラムが用いられている。カラムの内径や高さは、廃棄物試料内部の応力状態や生化学的環境、カラムと廃棄物試料の境界部における局所的な水の流れの発生状況等に影響を及ぼすと考えられ、いわゆる寸法効果が浸出水の水質評価結果に影響することが懸念される。一方、底部粘土ライナーによる化学物質の遮蔽性能の評価に関しては、透水係数や水位差に依存する移流による物質輸送、粘土層内部の化学物質の濃度勾配による拡散輸送、粘土鉱物による化学物質の吸着効果等に関して数多くの研究が行われてきたが、近年はメンブレン効果による化学物質の輸送抑制効果が着目されている。メンブレン効果とは、粘土ライナー内部の空隙が非常に小さいことに起因する構造的要因、および粘土鉱物周辺に形成される電気拡散二重層とイオン状の化学物質の電氣的相互作用によって、水分の通過を許容しつつも化学物質の輸送が抑制される現象である。このことから、高いメンブレン効果を有するモンモリロナイト系の粘土鉱物を粘土ライナー材料として使用することにより、粘土ライナーの化学物質遮蔽性能が増大することが期待されるが、その有用性については十分な検証が行われていない。これらの背景に基づき、本論文ではライシメータの高さや内径の差異が浸出水の水質に及ぼす影響の評価と適切な試験条件の解明、ならびにベントナイト添加による粘土ライナーのメンブレン効果の改良を図るとともにその有用性の検証を行うものである。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、本研究の主題となるライシメータの寸法効果や粘土ライナーのメンブレン効果の概要、本論文の目的と構成について示している。

第2章では関連する先行研究をとりまとめている。ライシメータ試験を用いた廃棄物埋立層から発生する浸出水の水質評価に関する既往の研究、および浸出水の水質に影響を及ぼす要因を整理し、ライシメータ試験の適用に際して寸法効果を考慮することの重要性を論じている。また、粘土ライナーにおいてメ

ンブレン効果が発揮されるメカニズム、ならびに各種粘土ライナーのメンブレン効果を実測した既往の研究を整理し、透水係数の低い粘土ライナー材料においては一定のメンブレン効果が期待できるデータが示されている一方で、ベントナイト添加量や締固め度、化学物質の種類がメンブレン効果に及ぼす影響については未解明であることを述べ、本研究の意義を裏付けている。

第3章では、浸出水の水質評価におけるライシメータの寸法効果を議論すべく、高さが異なる4種類のライシメータ、および体積が等しく高さ／内径比が異なる3種類のライシメータをそれぞれ用いて建設系廃棄物を対象に試験を実施している。寸法効果の影響は化学物質の種類によって異なり、反応性の低い無機イオンは高さ／内径比が大きいライシメータで溶出濃度が急激に低下する一方、高さが大きいライシメータにおいては最大ピーク濃度が低くなることを示した。この要因としては、廃棄物試料とライシメータ間の局所流の影響と、上載圧の変化による間隙構造の変化に起因すると結論づけている。一方、微生物分解によって影響を受ける化学的酸素要求量等の観測値からは、高さ／内径比が小さいほど微生物による有機物分解作用が促進されることが示された。

第4章では粘土ライナーのメンブレン効果を評価するために新たに開発した試験装置の構造と対象試料、実験条件を示し、試験装置の適用性と各種要因がメンブレン効果に及ぼす影響を評価した室内試験結果を示している。メンブレン効果は実際に発生した浸透圧と粘土層が完全な半透膜と仮定したときの理論上の浸透圧の比（以下、浸透圧比）を指標として評価を実施している。粘土ライナーのベントナイト混合率を5%としたときには化学物質濃度が高いケースを除いて浸透圧比が上昇する一方で、添加量を5%以上としても浸透圧比の明確な上昇はみられなかった。一方、締固め度を上昇させることで浸透圧比が上昇すること、1価のカチオンと比較してカルシウムや亜鉛、鉛といった2価のカチオンに対するメンブレン効果が小さいこと、酸性の浸出水に対してはメンブレン効果が低下すること等を明らかにした。これらの試験結果の妥当性は、拡散二重層理論に基づく考察やX線回折分析や電子顕微鏡観察による微視的構造の変化に基づいて確認をしている。

第5章では、粘土ライナーの化学物質遮蔽性能を評価する際にメンブレン効果を考慮することの重要性を議論するために、第4章で得られた実験結果と解析解に基づいて、ベントナイト混合による化学物質輸送特性への影響を定量的に評価した。その結果、化学物質濃度が数mmol/L程度でかつ拡散輸送が卓越する条件であればメンブレン効果を評価する意義がみられる一方、移流による化学物質輸送が生じる条件ではベントナイト混合による透水係数の低下による影響が卓越し、メンブレン効果を評価する意義は小さいことを示した。

第6章は結論であり、第3章から第5章で得られた室内試験を中心とする成果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)

廃棄物最終処分場の適切な管理は様々な国・地域に共通する重要な環境課題であり、環境上安全な設計を行うことが求められている。本論文では、廃棄物最終処分場の環境安全性の評価において重要となる様々な因子のうち、浸出水の水質予測に用いるライシメータ試験の寸法効果、および底部遮水工として機能する粘土ライナーのメンブレン効果に基づく化学物質の遮蔽性能に着目し、これらの因子が評価結果に及ぼす影響を論じたものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、浸出水の水質予測に一般的に用いられるライシメータ試験において、浸出水水質に及ぼすライシメータの寸法効果を実験的に明らかにした。寸法効果の存在は従来の研究においても指摘されていたが、系統立てた比較試験によって評価した事例は本研究が初めてである。微生物による有機物分解反応が寄与する化学的酸素要求量や全窒素等の測定結果からは、ライシメータの高さ／内径比が小さいほど廃棄物層内への空気の浸入が容易となり、結果として微生物活性が高くなることが裏付けられた。一方で、無機系物質の場合、供試体高さが大きい条件においては上載圧の増加に伴う供試体の有効間隙率の低下、ならびにフィルトレーション効果によって溶出濃度が低下する傾向が示された。これらの知見はライシメータ試験の適切な試験条件を設定するためには重要な知見であり、実務的な意義が高い。

第二に、遮水工に用いられる粘土ライナーのメンブレン効果に及ぼすベントナイト混合量、水素イオン濃度指数、化学物質の種類、締固め度の影響を体系的な試験を実施して明らかにした。既往の研究においては、化学物質の濃度や粘土の種類によってメンブレン効果が異なることは示されていたが、これらの要因が及ぼす影響を実際に発生した浸透圧と粘土層が完全な半透膜と仮定したときの理論上の浸透圧の比を用いて定量的に示したのは本研究が初めてである。これらの成果は、吸着や沈殿形成といった作用以外の粘土材料による化学物質の緩衝特性を詳細に把握する上で重要であり、地盤環境工学の成果として学術的意義が高い。

第三に、メンブレン効果を粘土ライナーの設計において評価することの意義と適用条件を実験結果や解析解を用いて明らかにした。ベントナイト混合量や締固め度といった人為的に制御できる要因がメンブレン効果に及ぼす影響を定量的に評価したことは、メンブレン効果を考慮した粘土ライナーの設計が可能になることを示唆している。また、化学物質濃度や水素イオン濃度指数、化学物質の種類といった浸出水の水質に起因する要因が及ぼす影響を明らかにしたことは、埋立廃棄物の種類や気候条件によって、粘土ライナーの性能に及ぼすメンブレン効果の影響が異なることを示している。これらの成果は環境安全性の観点から廃棄物処分場の設計に重要な事項であり、社会的意義も高い。

以上の成果により、本論文は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25年8

月19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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表と
する。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある
場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降