

学 位 論 文 題 名

廃棄物埋立地における水分移動現象と
その制御法に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

資源循環型社会を目指した法整備や廃棄物処理システムの構築が進められているが、廃棄物埋立地は最終的な廃棄物の行き先として現在でも主要な役割を担っている。しかしながら、国土の狭限な我が国では、その建設はますます困難になりつつある。廃棄物埋立地の建設に反対する住民の懸念の一つは廃棄物層を通過した浸出水が漏洩し、地下水などの周辺水系を汚染することにある。漏洩リスクを低減するために、埋立地に水を入れないという考え方がある。しかし、今日の廃棄物は完全な安定化物ではないものも多く、汚濁・汚染物の安定化が必要でな場合もある。そのような場合には、適切な量の水分を供給して安定化を促進させる必要がある。したがって、必要とされる技術は、水分の浸入を適切に制御しながら、浸出水の漏洩リスクを低減できるものであると考えられる。そのためには、まず、埋立地内部での水分移動現象を明らかにし、埋立地内部で水分移動を制御できる仕組みを確立することである。そこで、本研究では、埋立地内部での水分移動現象の解明と制御方法の確立を目的に、様々な廃棄物を対象として水分移動実験を行い、水分移動現象の把握を試みるとともに、埋立地表面の覆土層での水分移動、廃棄物層と中間覆土層の境界における水分移動について検討し、さらに、埋立地底部に到達する浸出水を迅速に排除する機構について実験的に検討した。

はじめに、埋立地内部の水分移動を表現するために必要な理論をまとめ、廃棄物層内の水分移動現象や埋立地表面・埋立地底部での浸出水挙動を対象に行われてきた既往の研究をまとめた。

次に、廃棄物層の水分移動現象を実験的に検討するために、今日我が国で埋立物の主体となっている焼却灰層を対象として水分移動に関わる基礎的な物理特性（比重、粒度、飽和透水係数、水分特性曲線）を測定すると共に、一次元／二次元の不飽和浸透実験を行った。その結果、焼却灰層内の水分移動は、均質な土壌に適用されるような圧力水頭を駆動力とした流れ理論では表現することが困難であり、特に、一次元の不飽和浸透現象は、焼却灰中の粗大間隙を重力によって急速に流下する成分と、微細間隙を緩速で移動する成分が存在し、数 mm/h～数 10mm/h の降雨浸透現象では前者の流れが支配的であることを明らかにした。この流れを表現するために、膜状流れ式を適用してパラメータを流束制御法から実験的に決定した関数系は、焼却灰層内の一次元不飽和浸透を良好に再現した。また、二次元浸透現象に関しては、水平方向フラックスを増加含水率勾配とべき乗型の関数の拡散係数の積として表現した。この焼却灰層に関する検討から得られた知見を基に、他の埋立廃棄物であるスラグ、破碎残渣、模擬人工ごみ（家庭系可燃ごみを模擬）に対象を広げ、水分特性値の把握、一次元／二次元不飽和浸透浸透実験を実施し、

より多くの廃棄物、充填条件での水分移動現象の把握を行ったが、こうした廃棄物においても、流出の応答現象は早く、毛管現象を基礎とした不飽和浸透式よりも膜状流れ式による水分移動の表現方法が有効であった。

また、実験室による小規模な浸透実験が現実の埋立地内部の廃棄物層の浸透現象と同様であることを確認するために、埋立地の原位置で廃棄物層の浸透能を測定した。浸透能試験から得られた最終浸透能は、実験室で測定した各廃棄物層の飽和透水係数値と概ね一致し、実験室での実験結果が妥当なものであることが検証された。また、各廃棄物の不飽和浸透には重力が支配的であり、毛管吸引力の影響が極めて小さいという傾向も、浸透能の低下曲線に対して毛管吸引力が小さいと仮定したシミュレーションから検証した。

さらに、覆土上に生成する表面流、覆土層と廃棄物の境界に発生する側方流を明らかにするために、実際の埋立地の覆土上で表面流と側方流の測定を試みるとともに、覆土と廃棄物を互層にした流出測定実験を実施した。覆土を対象に表面流発生に与える条件（透水係数、勾配）について検討した結果、定常時の流出係数は覆土材の透水係数の影響を強く受ける傾向にあった。また、覆土と廃棄物を互層にした充填層に対する降水実験により、側方流は、 $(\text{覆土透水係数}) > (\text{廃棄物透水係数})$ の条件で生ずること、および砂層と廃棄物層の間にキャピラリーバリアによる水分の側方移動が生ずることを明らかにした。こうした覆土表面における表面流出現象を、飽和不飽和浸透理論と拡散波近似によって計算した結果、現場、および単層の表面流出係数を良好に再現し、 10mm/h 以下の弱い降雨も含めて表面排除の対象とするならば、 10^{-6}cm/s 程度以下の低透水性が必要であると言う結果を得た。

埋立地底部での水分制御方法に関しては、キャピラリーバリア型の集排水構造を築き、底部到達水量を低減することを提案し、キャピラリーバリアの排水能力に関して実験的に検討した。その結果、キャピラリーバリアは、勾配が大きいほど、降雨強度が小さいほど、斜面長が短いほど効果が高いこと、バリアを構成する上部砂層は、粒子径の偏りの大きいものほど効果が高いこと、バリアの排水能力は、バリアに負荷される総浸入水量（降雨強度×斜面の水平距離）で評価することが必要であることを明らかにした。さらに、キャピラリーバリアでの流出現象を表現するために、上部（砂）層に Richards 式、下部（礫）層に膜状流れ式を用い、両層境界を二層の土柱法から決定した境界面の毛管ポテンシャルで接続する計算モデルを作成し、数値計算を試みた結果、作成した計算モデルは実験結果を概ね再現できた。実規模のキャピラリーバリアを対象に計算を試みた結果、斜面距離 20m 、勾配 0.05 程度では、約 $0.2\sim 0.4\text{mm/h}$ に浸入水の強度を抑制すれば、下方浸透を生じずに排除可能であることが明らかとなった。

以上の、埋立地表面、廃棄物層内部、埋立地底部の水分移動とその制御をまとめるために、覆土と廃棄物の互層構造における大規模な二次元実験を実施し、それを数値計算で表現した。その結果、中間覆土上に廃棄物層がある場合、下方浸透と側方流の分配は、覆土層の透水係数に大きく支配的され、覆土上の側方流を利用した水分排除は、覆土層の透水性を制御することで実現されることを明らかにしたほか、廃棄物層と砂層の間にもキャピラリーバリアによる側方流が生ずることを明らかにした。そして、覆土の透水係数を下げ、キャピラリーバリアを導入すれば、埋立地底部到達水量を無くすることができることを明らかにした。

最後に、埋立地各部（表面、内部、底部）についての実験から決定した水分移動式をまとめ、埋立地全体の水分移動を計算するシミュレーションモデルを作成した。実気象データを入力し、埋立構造を変

化させた計算を実施した結果、廃棄物層内への浸入水量，底部到達水量，底部負荷水圧を埋立地内集排水構造と中間覆土材の透水係数などによって制御できることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	田 中 信 壽
副 査	教 授	恒 川 昌 美
副 査	教 授	古 市 徹
副 査	助教授	松 藤 敏 彦

学 位 論 文 題 名

廃棄物埋立地における水分移動現象と その制御法に関する基礎的研究

我が国では廃棄物埋立地に対する忌避感強く、生活基盤施設である埋立地の建設が大変困難な状態にある。法的基準の強化や住民との対話促進と共に、環境的に一層安全な埋立地建設技術を構築する必要がある。特に、浸出水による地下水や公共水域の汚染を防ぐことが重要であり、そのためには埋立地における水分の流れを制御し、地下水への漏洩を最小化する技術を開発する必要がある。

本論文では、埋立地内部の不飽和水分移動現象の解明と制御法の開発を目的に、廃棄物層内、埋立地表面の覆土層、及び廃棄物層と中間覆土層の境界における水分移動の解明、並びに、埋立地底部に到達する水分を排除する方法について、実験的、理論的に研究している。

第1章では、本論文の研究背景及び目的を述べ、本研究に関連する水分移動理論及び既往研究をまとめている。

第2章では、焼却灰層を対象として一次元／二次元の不飽和浸透実験を多数行い、水分移動は均質な土壌に適用されるような圧力水頭を駆動力とした流れ理論では表現することが困難であり、特に、一次元の不飽和浸透現象は、層中の粗大間隙を重力によって急速に流下する成分と、微細間隙を緩速で移動する成分が存在し、数 mm/h～数 10mm/h では前者の流れが支配的であることを明らかにしている。続いて、膜状流れ式を適用し、一次元不飽和浸透を良好に再現している。また、二次元浸透現象に関しては、水平方向フラックスを、べき乗型関数の拡散係数と含水率勾配の積として表現できることを示している。

第3章では、灰溶融スラグ、粗大ごみ破碎残渣、模擬人工ごみ（家庭系可燃ごみを模擬）を対象を広げ、一次元／二次元不飽和浸透実験を実施し、毛管現象を基礎とした不飽和浸透式よりも膜状流れ式による水分移動表現方法が有効であることを示している。

第4章では、実埋立地の廃棄物層の浸透能を測定し、得られた最終浸透能は、実験室で測定した飽和透水係数値と概ね一致し、各廃棄物の不飽和浸透には重力が支配的であり、毛管吸引力の影響が極

めて小さいという傾向も、浸透能の低下曲線に対して毛管吸引力が小さいと仮定したシミュレーションから検証している。

第5章では、覆土上に生成する表面流、覆土層と廃棄物層の境界に発生する側方流を明らかにするために、実埋立地の覆土上での測定を試みるとともに、覆土と廃棄物を互層にした流出測定実験を実施し、定常時の流出係数は覆土材の透水係数の影響を強く受ける傾向にあること、また、覆土と廃棄物を互層にした充填層に対する降水実験により、側方流は、(覆土透水係数) > (廃棄物透水係数)の条件で生ずること、および砂層と廃棄物層の間にキャピラリーバリアによる水分の側方移動が生ずることを明らかにしている。この覆土表面流出現象を、飽和不飽和浸透理論と拡散波近似によって計算し、現場、および単層の表面流出係数を良好に再現している。

第6章では、埋立地底部への到達水分量の制御方法に関して、キャピラリーバリア型の集排水構造を築くことを提案し、実験的に検討している。その結果、キャピラリーバリアは、勾配が大きいほど、降雨強度が小さいほど、斜面長が短いほど効果が高いこと、バリアを構成する上部砂層は、粒子径の偏りの大きいものほど効果が高いこと、バリアの排水能力は、バリアに負荷される総浸入水分量(降雨強度×斜面の水平距離)で評価することが必要であることを明らかにしている。さらに、キャピラリーバリアでの流出現象を表現するために、上部(砂)層に Richards 式、下部(礫)層に膜状流れ式を用い、両層境界を二層の土柱法から決定した境界面の毛管ポテンシャルで接続する計算モデルを新たに開発し、実験結果を概ね良好に再現している。

第7章では、覆土と廃棄物の互層構造における二次元実験を実施し、実験結果を数値計算で再現し、中間覆土上に廃棄物層がある場合、下方浸透と側方流の分配は、覆土層の透水係数に大きく支配されること、中間覆土上の側方流を利用した浸入水分制御は、覆土層の透水性を制御することで実現されることを明らかにしている。

第8章では、埋立地各部(表面、内部、底部)について実験から決定した水分移動式をまとめ、埋立地全体の水分移動を計算するシミュレーションモデルを作成している。実気象データを入力し、埋立構造を変化させる計算を行い、廃棄物層内への浸入水分量、底部到達水分量、底部負荷水圧を埋立地内集排水構造と中間覆土材の透水係数などによって制御できることを明らかにしている。

第9章は、結論であり、論文全体の成果を要約している。

これを要するに、著者は、実験的、理論的な取り組みにより、埋立地内における不飽和水分移動現象を解明し、降雨浸入水量や底部遮水工への到達水量を制御する方法を開発したものであり、廃棄物工学及び環境工学に寄与するところが大きい。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める