

学位論文題名

球形粒子モデルに基づく土壌の保水機構に関する研究

学位論文内容の要旨

従来より、地下水流れや雨水の浸透流はその特性を巨視的に取り扱った飽和・不飽和浸透理論により議論がなされてきた。しかし、近年マスコミ等でも報道されているよう、土壌内の化学物質の残留などに見られるよう浸透現象を微視的に取り扱う必要がある。

周知のように一般に、不飽和浸透理論は Richards 式を用いて解析的に解かれるが不飽和透水係数(k)は体積含水率(θ)またはサクシヨン(ϕ)の関数として表される。しかし、 θ と ϕ の2つとも未知数であるため Richards 式を解くには $\theta - \phi$ 関係または $\theta - k$ 関係を事前に求めておかなければならない。現在、これらの関係式の多くは予め室内実験で求められているのが現状である。

本論文は、土壌を構成する土粒子が球形であり、間隙率が既知であるとの仮定により、 $\theta - \phi$ 関係を理論的に算出することを目的として以下の手法により研究を行った。

第1章では土壌内の保水形態を整理し、文献調査より粒径 10^{-3}mm の自然土壌では土粒子接合部で保水されるリング水が土粒子表面で保水される被膜水より卓越していることを示した。

第2章では2個の土粒子間で保水されるリング水について表面張力のラプラスの式を適用することにより、リング水のサクシヨンと保水量の算定式の誘導を行った。また、2球間の粒子径の比を用いることにより、リング水を形成する2球間の距離は粒径比に依存することを示した。また、得られたサクシヨン算定式より土粒子同士が完全に接触している場合と非接触時では保水量の増加とともにサクシヨンの変化に大きな違いがあることが示された。また、粒径比の違いにより保水量も大きく変化することが確認された。

提案された2球間モデルは粒子接合部1個のサクシヨンと保水量の関係式である。一般土壌に本関係式を拡張するためにはある粒子が他の粒子と何個接触しているかの推定が必要となる。

第3章では上述の推定を行うため粒子の充填方法で最も基礎となる等球径規則充填体の充填物理特性について検討を行った。その結果、ある粒子の接合個数は規則充填体の間隙率と相関があることが見いだされた。さらに、等球径ランダム充填にも間隙率が既知ならば、このランダム充填体はこの間隙率を挟む2つの等球径規則充填体との混合体であるとの考えにより、ある粒子の接合個数の推定法を提示した。

一般に、土粒子の充填はランダムであり、土壌の間隙率はある分布を持っている。本章の最後で土壌の平均間隙率から標本の間隙率の確率密度関数を求める方法を示している。

第4章では第3章の考えを発展させ粒径分布を持つ土壌に対し、ある粒子の接触個数

を推定する方法を提示している。本章で採用したある粒子の接触個数推定式はその粒子の半径とそれに接触している球の全ての体積と等しいとした仮想球の等価半径の関数として表される。本章ではこの等価半径のパラメータ決定法として第3章で述べた等球径規則充填体にも本式が成り立つものとして等価半径と粒子接触個数の関係式を求めた。得られた推定法の有用性を検討するため、半径 R の等球径からなる Simple Cubic の空隙に内接するよう $(\sqrt{3}-1)R$ の異球径粒子を充填させ理論解と比較したところほぼ同様の結果が得られた。得られた接触個数推定式を用いて粒径範囲 $0\sim 5$ の範囲にある一様分布および三角分布を持つ2つの粒径分布形に対し接触個数の推定を行ったところ分布形による接触個数の違いは見られなかった。

第5章では本論文の $\theta-\phi$ 関係の計算手法と比較するため、鉛直不飽和吸水実験の概要を述べている。用いた試料は山形産7号硅砂（粒径範囲 $3.5\sim 250\mu\text{m}$ ）であり、さらにこの試料を $145\mu\text{m}$ と $250\mu\text{m}$ で篩い分けした2種類の吸水実験を行った。両者の間隙率はほぼ45%と差異はなかったが、体積含水率 $10\sim 30\%$ の範囲でサクシオンに大きな違いが見られ、 $\theta-\phi$ 関係が粒径分布によって大きく影響することが実験結果からも示された。

本論文第4章までの計算手法は粒子接合部でリング水が完全に独立して存在するものとして計算がなされている。多球間モデルでは保水量の増加に伴い隣接するリング水が結合し、もはや独立して存在しなくなる。そこで構成する土粒子の中で最大粒径2個と最小粒子から成る3球間でリング水が独立して存在する条件式が誘導された。

本手法は上述したようにリング水が独立した範囲のみで成り立つ計算手法であるが全保水域に対して $\theta-\phi$ 関係の推定を試みている。推定方法は砂質土壌に適応可能な Brooks & Corey 式を用いた。

本式のパラメータの決定法はリング水が独立して存在する範囲までで決定し、飽和水分量の決定についてはエントラップト・エアの影響を考慮し間隙率の85%の値とした。実験値との比較では両者ほぼ同様の傾向が見られた。しかし、篩い分け試料では体積含水率の増大につれ実験値との差が顕著となっている。この原因の1つとして篩い分け試験では $149, 250\mu\text{m}$ の2種類の土粒子から構成されるとしているためリング水が独立して存在する範囲が過大に評価されたものと考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 長谷川 和 義

学 位 論 文 題 名

球形粒子モデルに基づく土壌の保水機構に関する研究

本邦のように林層で被覆された山腹斜面の流出の主たる生起場は、植生によって涵養されている山腹の表層土壌である。表層土壌内の流れは、リチャーズの式に代表される飽和・不飽和浸透流式によって記述できる。

一方、飽和・不飽和浸透流式を用いて、実際の山腹斜面からの流出量を求めようとすると、リチャーズの式以外に土壌特性を記述する2種類の関係式、すなわち、不飽和透水係数～体積含水率の関係式と体積含水率～吸引圧の関係式を必要としている。不飽和透水係数～体積含水率の関係式は、これまで理論的な解析がなされてきた。しかし、体積含水率～吸引圧の関係式を理論的に求める研究はこれまでなされておらず、現地より採取した土壌の室内実験によってその関係式を得ている。

本研究は、上記の2種類の土壌特性式を理論的に推定する実用的条件として、土壌の間隙率と粒径分布が既知として、特に理論解析の遅れている体積含水率～吸引圧の関係式の推定手法を提案している。本手法は、土粒子を球形と仮定し、2個の粒子間に保持されているリング水の容積～吸引圧の關係に着目した土壌内の保水機構の微視的解析を土壌全体の体積含水率～吸引圧の關係式にまでに拡張したもので、本手法の特徴になっている。

本論文は、7章より構成されている。

第1章は序論で、研究の背景、目的を述べている。

第2章は、粒子間のリング水に表面張力に関するラプラス式を適用することによって、2球形粒子間に保持されるリング水内の吸引圧と保水量間の關係を求めている。さらに、粒子間距離および2粒子の粒径とリング水の存在条件を明らかにしている。

第3章は、粒子の充填方法の基礎となる等球形規則充填体の間隙率と粒子の配位数、すなわち、粒子の接合個数の關係を明らかにしている。さらに、等球形不規則充填体の場合にも、間隙率が既知であれば粒子の配位数を求めることができることを示している。

第4章は、粒径分布を有する土壤にまで第3章の結論を拡張する手法を提案している。すなわち、注目している粒子の配位数は、接合点に構成した接平面に囲まれる多面体の面数に一致していることに着目し、粒径分布と多面体の面数の関係式を誘導している。さらに、多面体の平均面数を求める手法を提案し、粒径分布と間隙率より体積含水率～吸引圧の関係式を理論的に誘導している。

第5章は、提案している体積含水率～吸引圧の推定手法を検証するために鉛直不飽和吸水実験結果と比較している。実験は、山形産7号硅砂(粒径範囲 $3.5 \sim 250 \mu\text{m}$)を用いて、篩い分けして $149,250 \mu\text{m}$ の2粒径分布資料と篩い分けしない多粒径分布資料について行っている。第4章までに得られた体積含水率～吸引圧の推定手法は、厳密に言うならば、粒子間のリング水が互いに独立して存在する範囲内でしか有効でない。したがって、低含水率域でしか実験値と直接比較できない。著者は、高含水率域までに体積含水率～吸引圧関係拡張するために Brooks & Corey 式のパラメータを低含水率域で同定する手法を提案している。

第6章は、第5章で得た体積含水率～吸引圧関係式は低含水率域でパラメータを同定しているために高含水率域になると実験値との差が大きくなる傾向のあることを指摘し、高含水率域における実験値との差が流出に及ぼす影響を数値実験で確認している。まず、第5章で実験的に得た2種類の体積含水率～吸引圧の関形式(2粒子径実験と多粒子径実験)を用いて想定した山腹斜面末端からの流出量を求めている。ついで、著者が提案している体積含水率～吸引圧の関形式を用いて山腹斜面末端からの流出量を求め、両者を比較している。両者は十分な精度で一致しており、体積含水率～吸引圧の関係式の推定手法が妥当であること示している。

第7章は、本論文で得られた結論をまとめている。

これを要するに、著者はこれまで実験的にしか得られなかった土壤内保水量の体積含水率と吸引圧の関係式を理論的に誘導したもので、山地水文学に寄与するところ大なるものがある。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があるものと認める。