

学 位 論 文 題 名

急速濾過過程の数式モデル

学位論文内容の要旨

急速濾過（深層濾過）は、最も一般的な浄水方式である急速濾過システムの最終段に用いられる仕上げの固液分離プロセスである。急速濾過の理論的研究を概観すると、濾過の作用機構についてはほぼ解明することができるレベルに到達しているが、濾過実験の結果の定量的評価や急速濾過池の設計・運用のためにそれらの理論的研究の結果を用いようとすると必ずしも十分な実用性を持ちえない。したがって、実用面においては理論的な解析よりも経験則への依存度が高い状況で設計運用が行われている。実用に足る濾過過程の定量化や数式モデル化が十分になされていないことがこの理由の主なものである。

本論では、急速濾過過程を定量的に表現するために、濾過過程における流出濃度と損失水頭の時間変化を広範な操作条件にわたって正確に表現できる数式モデルを提案し、その有用性を確認する。そのためにダイナミックに変化する濾層内のフロック粒子の挙動を簡明に表現することのできる抑留モデルを提案し、従来定量的にはほとんど扱うことができずにいた濾過池の流入フロックの粒径や付着強度などの被除去成分の性質をも条件に含み、濾過構成と被除去成分の両者を共に考慮して濾過過程を定量的に記述する数式モデル化を試み、実験的検討、検証を加えた。次いで、数式モデルを用いた濾過池の流入フロックの性質及び濾過池の設計・操作の条件について検討を行った。

第1章では研究の背景と目的について記述した。

第2章では、ダイナミックに変化する濾層内のフロック粒子の抑留過程を簡明に表現するためのモデル化を試みる。特に従来ほとんど定量的に扱われていなかった濾過池の流入フロックの粒径や付着強度などの被除去成分の性質をも考えにいれて、濾過池の構成操作条件と合わせて濾過過程を数式化することを試み、損失水頭の増加と懸濁質の破過過程を定量的に記述する数式モデルを提案した。

提案した数式モデルは、損失水頭式（抑留形状変化式）、濾層内速度勾配式、除去速度式（除去反応ステップ数変化式、フロック輸送効率式、濾層間隙表面衝突合一式）、濾層内懸濁質収支

式、抑留したフロック中の懸濁質含有量と体積の換算式より構成される。懸濁粒子の除去モデル式は、懸濁粒子（フロック）の濾層中の移動過程を多段の仮想的な混合モデルで表現することを出発点とし、濾過係数を仮想混合スケール内の除去率と仮想混合の濾層方向の数の積で表現した偏微分方程式で表現している。仮想混合スケール内の除去率は懸濁粒子の濾材への輸送因子としてさえぎり効果と濾材表面での衝突合一関数を導入して表現される。フロックと濾材の間の衝突合一確率は濾層内の抑留表面の剪断力とフロックと濾材の間の付着力の比の関数として表現した。仮想混合スケール内におけるフロックの濾材への衝突率は濾層空隙に対する濾材表面近傍のフロックの空間的割合で表現した。濾層の損失水頭を表現する式は空隙内の表面積の変化を定式化した Ives 型の概念モデルを使用した。濾層の物質収支を懸濁粒子の質量基準で表現し、さらに新たに抑留されたフロックに作用する力のバランスを考えることによって抑留層を構成する粒子群の空隙率の変化を考慮した抑留フロックの体積と含有懸濁質量の換算式を提案した。

第3章では、2章で提案された濾層での濁質除去過程と濾層の圧力損失の時間変化過程を記述する数式モデル式中に含まれる定数や係数、および未定関数として式中に含まれる項の推算法を述べ、その結果を明らかにする。これらの検討は次の各項のように進められた。1) フロックの抑留に伴う濾層内空隙の変化を食塩をトレーサーとした電導度の時間変化を計測することによって推定し、提案されたモデル式に含まれる濾層の内部構造の変化に関わる濾層内空隙の表面積変化式と濾層の仮想混合段数変化式中の係数を評価した。2) 様々な濾過条件について濾層の阻止率を測定し、フロックの濾層内表面における衝突合一確率関数を定式化した。3) 直接濾過の際の流入マイクロフロックの粒径を PDA（変動透過光測定器）で計測し、濾過操作の入力条件を定量化した。

第4章は、濾過過程のシミュレーション結果と実験結果を比較し、提案されたモデル式の妥当性を確認し、次いで異なる操作条件下の濾過過程についての数式モデルの予測性について検討した。その結果、さらにモデルの精度を高めるために濾層方向でのフロックの変化過程を考慮する必要が示唆され、濾層内空隙水路におけるフロック形成について検討を加え、濾層方向のフロック径の変化を表現する濾層内フロック形成式を定式化し、濾過の数式モデルに組み込むことを提案した。濾層内フロック形成式は速度勾配による粒子の衝突理論に衝突合一確率とフロックの体積濃度などを導入して誘導された。

第5章では、1) 濾過のモデル式中のフロックの性質に関するパラメーターが濁度と凝集剤注入率に対してどのように変化するかを検討し、最終的にフロックの粒径、付着力（フロックと砂の間、及びフロックと抑留したフロックの間の値）と抑留フロック中の懸濁質濃度の4変数のみ

を入力とするモデル式として提案することとなった。次いで、それらの値の評価に必要な実測データをどのような条件について求めるかの検討を加えた。2) 数式モデルを用いたシミュレーションにより、単層や2層濾過池が層厚、濾材径、濾速などの設計・操作条件によってどのように挙動するかを検討し、それらの最適操作条件の設定に際して、濾過のシミュレーションを援用する方法を提案した。3) 濾過過程に対する凝集条件の影響を、数式モデル中のフロックの性質に関するパラメーターの変化としてとらえ、最適凝集操作条件について考察を加えた。

第6章は、本論の結果を総括したものである。提案された式は、急速濾過池における濾過機構を適切に組み合わせることによって誘導され、実操作に用いることのできる簡略さを持ち、従来全く扱われなかったフロックの性質を含むことに特徴がある。提案した数式モデルに基づいて数値シミュレーションにより濾過過程の予測を行うことにより、様々な濾層の設計・操作条件や濾過のための適切な凝集条件についての検討が可能となった。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	丹 保 憲 仁
副 査	教 授	高 桑 哲 男
副 査	教 授	田 中 信 壽
副 査	教 授	山 口 賢 治

本研究は、水道等の浄水過程で最も広範に用いられている急速濾過プロセスにおける凝集フロックの濾層内における挙動を定量的に表現し、濾過池の理論的な設計、操作を的確に行うことを目的とした動力学的研究である。

従来より急速濾過過程の動力学に関する研究は、国の内外を問わず極めて多数にわたっている。現在最も広く用いられている濾過の数式モデルはロンドン大学の Prof. Ives のモデルであり、提案されてから20年にわたり多くの研究の基礎として現在まで用いられて来た。極めて良く現象を説明するモデルであるけれども、最大の問題点は、ある凝集状態のフロックについて実験的に係数を求めなければ運用出来ないモデルであり、フロックの性質を濾過に関わる汎用性のある特性値として表す事が出来ないために、被除去対象の一般化した定量化がほとんど出来ず、いろいろな研究成果の汎用化が難しかった。

著者は、上述のように従来はほとんど定量的に扱うことが出来ないうでいたフロックの性質を粒径や付着強度等の濾層における挙動と対応する性質として定量化し、濾過池の構成要素、操作条件と合わせて、濾過過程を数式モデル化することを試みた。その結果、濾過の進行に伴う懸濁質の破過過程、濾層の内部抑留状態の進行、及び損失水頭の増加を経時的に定量的に表現する数式モデルを提案し、様々な実験的、理論的検討を行ってその実用化を計った。

すなわち、濾過過程を仮想混合スケールを持つ多段の濾層における濾材表面のフロック輸送付着過程として表現し、抑留表面の剪断力とフロックと濾材の付着力の比によって衝突合一の確率を記述した。その結果供給されるフロックと剝離するフロックの収支を動的に表現し、砂層内の抑留状況の経時的变化を記述することを可能とした。

必要な式中の諸係数は、トレーサー実験による濾過空隙率の経時的变化の測定結果と、流入するマイクロフロックの実測粒径値を入力とし、提案した動力学式を用いた数値探索によって評価した。数式モデルと様々な実測結果を重ね、深い砂層においては更に砂層内におけるフロック形成過程をモデル式中に導入して定式化する必要のあることを示し、最終的に流入フロック径、砂とフロック・フロックとフロックの付着力、抑留フロック中の濁質濃度を入力とするモデルを提案し、現象の正確な記述を可能とした。

次いで、提案した数式モデルを用いて実験的に求めようとすれば極めて多大の時間と労力を要し実際に行うことが困難である多くの操作条件についてコンピューターシミュレーションを行い、単層や2層濾過池の濾層厚さ、濾材径、濾過速度等の設計・操作条件の変化が処理過程にどのように影響するかを明らかにし、多様な外的操作条件に対する急速濾過池の応答を記述することに初めて成功した。

これを要するに、著者は従来はほとんど成功を収めていなかった被除去物質であるフロックの性質を入力の一部として濾過池の操作変数に加えて急速砂濾過過程を的確に表現することを初めて可能とし、設計に実用し得る数式モデルの構築に成功したもので、衛生工学、水処理工学の進歩に寄与すること多大である。

よって、博士（工学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。