

氏 名	ブロスパー ムガヤ Prosper Mgya
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2703 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 月 25 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 都 市 社 会 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	A FUNDAMENTAL FLOW MODEL FOR SIMULATION OF THE GROUNDWATER FLOW IN SATURATED ROCK FRACTURES (岩盤フラクチャー内の地下水流動シミュレーションに関する基礎的研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 細 田 尚 教 授 椎 葉 充 晴 助 教 授 岸 田 潔

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、岩盤フラクチャー内の流れを容易に再現することを目的とした実用的平面2次元積分型の基本的な水理解析モデルを提案し、実験結果と比較することでモデルの検証を行うとともに、更なる理論的考察を行うことで基本モデルの改良を検討したもので、6章からなっている。

第1章は序論であり、研究の動機と目的を記述している。

第2章では、岩盤フラクチャー内の流れ解析に関する従来の研究についてまとめるとともに、本研究の位置づけと特徴を明らかにしている。

第3章では、岩盤フラクチャー内の流れを、上下境界が不規則な曲面で構成される微細空間内の流れとしてみなして、その流れを高さの変化する平面2次元管路の流れと考えることで、流速分布に放物線分布を仮定した実用的な平面2次元積分型モデルを導出している。このモデルは、平面内で複雑に分岐する微細空間内の流れを容易に取り扱うことができる実用的モデルと考えられた。次に、モデルの基本特性を考察するため、導かれた基礎式を上下曲面が正弦波状境界である場合に適用して理論解析を行っている。流れの抵抗特性と波状境界の波長・振幅比や上下境界の位相差などとの関係を導くことで、基礎式中の慣性項、粘性項、壁面応力項、上下境界からの反作用項の流れの抵抗則に及ぼす効果を明らかにし、古典的な三乗則やレイノルズ・モデルの限界と本モデルを用いることの長所を指摘した。

第4章では、提案した基本的な水理解析モデルを一面せん断・透水同時試験に適用し、実験結果と比較することでモデルの検証を行っている。まず、実施した一面せん断・透水同時試験の概要について記述し、得られた実験結果についてまとめている。次に、一面せん断試験中の上下境界形状変化を、従来提案されている力学モデルにより評価し、計算で得られた境界面内の空間の上下流端に透水試験の水頭差を与えることで実験条件下で生じる流れを数値計算により再現した。本水理解析モデルによって、上下面が多点で接近し接触することで生じる複雑に分岐する流れパターンを比較的容易に再現可能であることを示した。また、透水試験で得られた浸透流量と数値計算結果が適合していることを示すことで、提案した基本水理解析モデルの妥当性を検証した。その際、運動量方程式の慣性項と壁面からの反作用項を考慮していない従来の三乗則、およびレイノルズ・モデルを用いた比較計算を併せて行った。これらの項を無視した場合、流れの抵抗が小さく評価されるため、透水流量が実験より大きくなるなど試験結果を十分に再現できないことを指摘し、本解析モデルの優位性を示した。

第5章の前半では、基本モデルで用いられている静水圧分布の仮定の妥当性と適用限界について理論的な考察を行っている。まず、開水路流れに適用されるブシネスク方程式の導出の際に用いられる手法によって、平面2次元管路流れに対する鉛直加速度を考慮した圧力分布の数学的表現を導いた。圧力分布は静水圧項と水深平均流速、管路高さの微分で構成される鉛直加速度項で構成されており、圧力分布を水深積分モデルに代入することにより、ブシネスク方程式に対応する鉛直加速度を考慮した平面2次元管路の基礎方程式を導いている。導かれた基礎式を、第2章で用いた上下境界が正弦形状の波状管路に適用して理論解析を行い、圧力分布、および流れの抵抗特性を導いた。抵抗特性に及ぼす鉛直加速度の効果について、

静水圧分布を仮定した解析結果と比較することで検討し、静水圧分布の仮定が妥当と考えられる波長・振幅比、波長・平均管路高さ比、およびレイノルズ数の範囲を同定した。これらの結果より、本研究で対象としている岩盤フラクチャー内の流れでは、その幾何学条件、および水理条件から判断して、静水圧分布の仮定が概ね妥当であることを示した。

第5章後半では、空間内の流速分布形が放物線分布から変化するものの効果、すなわち波状境界クレスト背後で生じる逆流などの流速分布形の変化を平面2次元積分型モデルに考慮することでモデルの改良を試みた。まず、上下境界が正弦形状である波状管路内の流れに対してN・S式を用いた非線形解析を行った。その際、流速分布形状を鉛直方向相対座標のべき乗展開で表現し、べき乗の係数を未知数とした非線形連立方程式を数値解析する方法を用いている。理論解析と同一の条件下で一般座標系を用いた有限体積法による流れの数値解析を行い、非線形解析の結果と比較することで理論解析結果を検証した。次に、これらの考察結果を積分型モデルに組み込むことで基本水理解析モデルの改良を試みた。すなわち、理論解析結果を用いて流速分布形の変化と上下境界面の変動を関連付けることにより、境界面上のせん断応力項、運動量係数の評価に流速分布形変化の効果、具体的には波状境界せん断応力、および運動量係数と波状境界高さの空間微分との関係を考慮した改良モデルを提案している。ただし、改良型モデルの検証は十分行われておらず、さらなる詳細な検討が必要であることを指摘している。

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ている。

論文審査の結果の要旨

本論文では、上下境界が不規則な曲面で構成される微細空間と考えられる岩盤フラクチャー内の流れを容易に再現できる、実用的な平面2次元積分型の水理解析モデルを提案するとともに数値解析を行い、一面せん断・透水同時試験結果と比較することで提案した水理解析モデルの検証を行っている。さらに、空間内の流速分布が放物線分布から変化するものの効果を平面2次元積分型モデルに組み込むために、非線形解析に基づく理論的な考察を行うことで、提案した水理解析モデルの改良を行っている。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 上下境界が不規則な曲面で構成される微細空間内の流れを平面2次元管路流れと考え、流速分布に放物線分布を仮定した実用的な平面2次元積分型モデルを導出するとともに、複雑に分岐する微細空間に適用可能な数値解析モデルを開発した。モデルの基本特性を考察するため、積分型モデルを上下曲面が正弦波状境界の場合に適用して理論解析を行い、流れの抵抗特性と無次元水理量の関係を考察することで、基礎式中の慣性項、粘性項、壁面応力項、上下境界からの反作用項などの効果を明らかにし、古典的な三乗則とレイノルズ・モデルの限界を明らかにした。

2. 次に、上記の水理解析モデルを一面せん断・透水同時試験に適用することで検証を行った。一面せん断試験中の上下境界面形状変化を、従来提案されている力学モデルにより評価し、得られた境界面内の空間の上下流端に透水試験の水頭差を与えることで生じる流れを数値計算により再現した。透水試験で得られている浸透流量と計算結果を比較することで提案した水理解析モデルの妥当性を検証した。その際、運動量方程式の慣性項を考慮しない従来のレイノルズ・モデルでは流れの抵抗が小さく評価されるために試験結果を十分に再現できないことを指摘し、本解析モデルの優位性を示した。

3. さらに、空間内の流速分布形が上下境界面の変動により放物線分布から変化するものの効果を平面2次元積分型モデルに考慮するために、N・S式に基づいた流速分布形に関する非線形解析を行い、得られた理論的知見を積分型モデルに組み込むことで水理解析モデルの改良を行った。すなわち、理論解析結果を用いて流速分布形の変化を上下境界面の変動と関連付けることにより、境界面上のせん断応力項、運動量係数の評価に流速分布形変化の効果を考慮したモデルを提案するとともに、鉛直2次元数値解析結果と改良型モデルの結果を比較することにより改良型モデルの検証を行った。

要するに本論文は、岩盤フラクチャー内の流れを容易に再現することができる実用的な平面2次元積分型の水理解析モデルを提案するとともに、その検証とモデルの更なる改良を行ったもので、学術上、実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18年8月2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。