

氏 名	ウ 干 青 春
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1980 号
学位授与の日付	平 成 12 年 7 月 24 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 土 木 シ ス テ ム 工 学 専 攻
学位論文題目	Analyses for Fluid Flow and Solute Transport in Discrete Fracture Network (岩盤亀裂ネットワーク中の浸透流と物質移行解析に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 大 西 有 三 教 授 岡 二 三 生 教 授 青 木 謙 治

論 文 内 容 の 要 旨

ダム基礎岩盤の漏水や降雨浸透による斜面崩壊など、岩盤の水理特性と構造物との相互作用を検討するため、水理地質構造モデルを構築し岩盤内の地下水や浸透水の挙動を数値解析する研究が続けられている。また近年、高レベル放射性廃棄物あるいは産業廃棄物の地中処分に関する問題においても、物質移行プロセスの解明が期待されている。岩盤の水理特性を評価するために開発されてきたモデルには、岩盤をそれと等価な(連続)多孔質体に置きかえるものと、亀裂の連結からなる亀裂ネットワークモデルを構築するものがある。花崗岩に代表されるような割れ目が卓越した岩盤を対象にする場合には、後者のモデルがその水理特性を良好に反映すると考えられているが、亀裂の幾何学特性を表す変数には多くの不確定要素が含まれているため、そのモデルの多くは現場の状態を再現できず、また確率論的に発生した亀裂モデルの実験による検証も不十分であったといわれている。本研究は、亀裂ネットワークモデルを作成するための手法を新たに開発し、さらに現場での透水特性の実測値による検証を行い、亀裂ネットワークモデルを使った浸透流解析および物質移行解析の実用化を図る研究成果をまとめたものであり、次に述べるように7章から構成されている。

第1章は序論であり、これまでの浸透流及び物質移行問題の解析、および岩盤のモデル化と数値解析についての研究を概観し、本研究の位置付けと目的について記述している。

第2章では、本研究で開発した亀裂ネットワークモデルの作成法について記述する。これまで亀裂系岩盤に適合するモデルとして提案されているネットワークモデルは、一般に亀裂の幾何学的性質を決定するパラメーターの確率密度関数を坑道や試錐孔で取得される水理地質構造データから推定し、さらにそれを基にしたモンテカルロシミュレーションによって個々の亀裂特性を作成するものであった。一方、本研究ではまず亀裂を確率論的なものと確定的なものに大別し、2次元の円盤形として表現した亀裂を3次元的に配置しモデルを構築する。確率論的に作成される頻度の多い小規模な亀裂は、現場での観察結果に基づいてモンテカルロシミュレーションによって作成され、モデル化する領域を横断するような比較的大きな亀裂は確定論的に扱いその情報を入力することで作成する。本研究は確率論的に作成した亀裂の数およびそのトレース長の平均値と分散を算出し、逆解析の手法によってその値が現場の実測値と一致するように亀裂の幾何学的定数を修正する。岩盤の水理特性に多大な影響を及ぼす大規模な亀裂がまず作成され、現場の観察結果に合致する幾何学特性をもつ高頻度の亀裂がこの逆解析によって確率論的に作成されることにより、現場の状態を良好に再現するハイブリットモデルの構築を可能にした。さらに実際の岩盤をモデル化した結果の検討を通して、本研究の妥当性を検証している。

またここでは、本研究のモデル作成法を利用した応用例を紹介している。岩盤の掘削においては、不連続面が交差して形成されるブロック(岩塊)が移動することにより岩盤の破壊が始まる。このブロックの挙動を考察するための解析法がいくつか提案されているが、本研究による亀裂モデル作成法を前記解析に供するブロック同定に应用することを試みる。本研究では掘削の設計段階でのデータからブロックの大きさと空間分布を予測し、その後施工の段階で得られたデータを用いて亀裂モデルの幾何学的定数を詳細に算出し直し、その結果から交差する亀裂を抽出し、最終的に亀裂が形成するブロックの位置

と大きさを確定する。本研究によるブロックの同定法をブロック理論による解析法と組み合わせることで、あらたな岩盤の安定性解析が可能なことを示している。

第3章では本研究による亀裂ネットワークモデルからチャンネルネットワークというモデルを構築して浸透流解析を行う研究について記述する。亀裂ネットワークモデルでの水理特性の解析では、個々の亀裂を面内で要素分割するため計算容量が膨大になるという欠点がある。そこで本研究は、個々の円盤亀裂が交差する線分を1次元のチャンネル（パイプ）で表現し、そのチャンネルで構成される3次元モデルにて浸透流解析を行うことにより計算容量の低減を図る。さらに本研究のチャンネルネットワークモデルでは、モデルから算出される流量と現場の実測値とを比較して、逆解析の手法によって両者の値が一致するようにチャンネル直径の平均値と分散を決定する。これによって、実際の現場で測定された透水特性を良好に再現するチャンネルネットワークモデルの構築を可能にしている。また、本研究による手法を現場での浸透流実験により検証し、計算容量の低減化を図りながら現場の流量の実測値とよく一致するモデルが構築できることを実証している。

第4章では2次元円盤亀裂ネットワークモデルで浸透流を解析する手法について記述する。前章では、チャンネルネットワークモデルの作成による浸透流解析について考察したが、ここでは大規模な不連続面亀裂が存在し、またその幾何学的パラメーターが実測・確定される現場における浸透流解析に適した手法として、2次元円盤亀裂ネットワークを提案、個々の亀裂内部を3角形メッシュに分割し有限差分法を用いた浸透流解析法を開発した。本解析手法を検証するため、均質媒体と不均質媒体を想定したモデルに対して当解析手法を適用し、本手法によって算出される透水特性値と理論的に求められる値を比較検討した結果、両者の値がよく一致することが示されている。また、計算の負荷を低減させるため、亀裂ネットワークモデルにおいて交差していない亀裂を除去し、また透水性に影響を与えないと考えられる微小な半径の亀裂を除去する手法を開発し、現場での浸透流実験に本解析手法を適用しその有用性を検証した。その結果、本解析手法で得られた透水特性は現場での観測結果とよく一致することが確かめられ、前章での結果と合わせて、本研究によって現場の多様性に応じた浸透流解析を行う手法が確立されたことを示している。

第5章では物質移行解析に本研究の亀裂ネットワークモデルを適用させることについての考察を記述する。亀裂ネットワークモデルを使った放射性核種などの移行プロセスの解析として、亀裂内での移流・拡散現象を考慮したランダムウォークによる粒子追跡法の適用を試みた。本研究はこの手法を用いて、前章までに開発したチャンネルネットワークモデルと円盤亀裂ネットワークモデルでの、亀裂中での核種の移行速度を算出する解析法を開発している。また、現場でポアホールを利用したトレーサーテストを行い、漏出してくる溶液のトレーサー濃度の破過曲線（breakthrough curve）を解析したところ、その値は実測値とよく一致することが示されており、本研究の物質移行問題への適用の有用性を実証している。

第6章では、前章までの考察に基づき、チャンネルネットワークモデルと円盤亀裂ネットワークモデルを組み合わせた新しいハイブリットモデルの提案を行う。すなわち、大規模な亀裂を確定論的に円盤亀裂で表現し、頻度の高い小規模な亀裂を確率論的に作成し、それをチャンネルネットワークモデルで表現する手法を組み合わせるモデル化技術を提案する。これにより、本研究で開発した両モデルの長所を組み合わせた新たな複合モデルを構築することができ、さまざまな現場に対応できる多様なモデル作成を可能にしている。さらに、この複合モデルの効果を実証する実験として、実際の現場で坑道周辺のゆるみ領域を横断する浸透流解析を行い、本研究による解析値と現場で計測された流量とが合致する結果を示し、さらに他の数値解析による結果と比較することで、本研究で開発した手法の優位性を客観的に証明している。

第7章は、本研究のまとめであり、本研究で開発した亀裂ネットワークモデルとそれを利用した浸透流解析および物質移行解析の工学的意義とその成果を総括し、また今後の課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は岩盤中に数多く存在する亀裂をモデル化して亀裂ネットワークとして表現するための手法を開発し、そのモデルを利用した浸透流および物質移行解析を論じているものである。さらに本研究を実際の岩盤へ応用し、その水理特性の解析値と実測値を比較検討した結果も考察しており、本論文により得られた主な成果は次のとおりである。

1. 亀裂性岩盤の亀裂システムをより精密に表現する亀裂ネットワークのモデル化手法を新たに開発した。具体的には、頻度の多い小規模な亀裂を確率論的方法にて形成し、岩盤の水理特性に多大な影響を与える大規模な亀裂を確定論的方法に

てモデルに組み込む手法を提案している。その際、確率論的に作成される亀裂の幾何学特性は、原位置での観察結果と合致させるように逆解析の手法で作成する。これにより、これまで幾何学的パラメーターに多くの不確定要素を含む亀裂ネットワークモデルが原位置の状態を再現し難いものであったという欠点を克服し、浸透流解析への応用に際して実用的な亀裂ネットワークモデルの作成を可能にした。

2. 亀裂性岩盤内を流れる地下水の流れパターンの多様性に対処できるように、前述のモデル化手法に基づいて亀裂ネットワークを作成し、それをパイプモデルによるチャンネルネットワークに置き換えて解析する手法と2次元円盤モデルで解析する手法を提案した。前者のチャンネルネットワークモデルの構築では、原位置試験の結果から、パイプの直径を決定する逆解析手法を開発し、従来にない現場を良好に再現する浸透流解析モデルの作成を可能にした。さらに、現場調査データに基づき特定された規模の大きい亀裂をモデル化した2次元円盤モデルと、小規模で数の多い亀裂を1次元パイプモデルで確率論的に取り扱うモデルを組み合わせで解析する新しいハイブリット手法を確立した。これにより、現場を再現しながらも計算容量の低減化を可能にするという解析用モデルの作成法を可能にした。また、現場実験の結果と理論的な解析解を比較検討することによって本手法の有効性も実証している。さらに、本研究による複合モデルを坑道掘削周辺のゆるみ領域を横断する浸透流の解析に適用し、他の解析手法と比較することも行い、本研究の妥当性を客観的に評価している。

3. 亀裂ネットワークを用いた物質移行解析手法を確立するために、放射性核種などの移流・拡散を考慮した粒子追跡法を、本研究による亀裂ネットワークモデルへ適用している。また、本研究による粒子の移行速度解析結果を現場における実験の結果と比較し、提案した解析手法の妥当性を明らかにしている。

以上要するに本論文は、亀裂性岩盤のモデル化とそれを使つての浸透流および物質移行解析手法が抱えていた問題の解決に取り組み、岩盤の亀裂ネットワークとその水理特性を良好に表現するモデルの構築を可能にし、それを基に浸透流や物質移行の挙動を解明する研究の成果をまとめたものであり、学術上、實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12年5月31日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。