

氏 名	ソウ シュン セイ 宋 俊 生
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2142 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 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 土 木 シ ス テ ム 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Numerical Analysis of Discontinuous Rock Masses Using Modified Manifold Method (不連続性岩盤のマニフォールド法による数値解析手法の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 大 西 有 三 教 授 齋 藤 敏 明 助教授 西 村 直 志

論 文 内 容 の 要 旨

岩盤の力学的特性は、断層や節理といった大小様々な亀裂によって支配され、これまでの岩盤を連続体として取り扱う解析手法では、その挙動を正確に把握することが出来ない。そこで近年、岩盤を不連続体として認識して岩盤構造物の変形特性を解析する試みがなされている。本研究はこの不連続体解析法の一つであるマニフォールド法を発展させ、内在する不連続面に強く影響される複雑な岩盤構造物の変形挙動を、より正確にシミュレーションするための手法を構築したものであり、序論・結論を含め7章から成っている。

第1章は序論であり、これまでの岩盤数値解析手法全般について総括し、本研究が取り組む不連続体解析法の位置付けと特徴についての概要を述べる。さらに、マニフォールド法は、有限要素法と同様のポテンシャルの最小化原理に基づいて剛性マトリックスを作成し、連続体モデルと不連続体モデルを統一的に解析する利点をもつ手法であることを説明し、さらに複雑な岩盤の挙動をより正確にシミュレーションするために、形状関数の高次化を図り、ブロックの接触問題に新しい概念を取り入れるという本研究の目的を述べている。

第2章では、マニフォールド法の原理と特徴を詳細に論じる。マニフォールド法は有限要素法と同じように対象領域を分割して近似関数を与え、各々の近似関数をその要素の結合情報に基づいて系全体の連立方程式に再構築する手法である。ただし、形状関数が定義される数学的な部分領域と支配方程式が満たされる物理的な領域に分離して考えるという特徴があり、前者は数学被覆と呼ばれ、これを対象領域全体を覆い尽くすように重ね合わせ、対象領域と数学被覆の重なり合う物理被覆領域において剛性方程式を組み立てる。変位を規定する形状関数は各数学被覆において定義され、それらに重みを付けて重ね合わせることで系全体の変位関数を表現するが、形状関数は不連続面の境界で分離される特徴をもつことより、特に有限被覆関数と称される。本研究では、この有限被覆関数に四角形要素を用いることを提案する。この方法によれば、要素内を一定のひずみと仮定することがなく、双一次の形状関数に相当する重み関数を用いて、より高精度に岩盤の変位挙動をシミュレーションすることが可能である。

第3章では、前章での四角形要素による有限被覆関数において、高次の被覆関数を導入することを試みる。数学被覆内ではある値を取り、物理被覆以外では零とし、さらに物理被覆同士が重なっている領域での総和は1であるという制約をもつ重み関数を導入し、有限被覆関数に重み関数を掛けて重ね合わせることで、高次化された有限被覆関数の全体としての連続性を保たせる。ブロックの接触問題に関してはペナルティー法を用い、最小二乗的に貫入エネルギーを零とする手法によって導かれる式を全体の釣り合い方程式に組み入れることを考察する。そして、有限被覆関数の重み関数を変位一定とした場合と、一次の変位関数を用いた場合での解析精度の差について論じ、本研究による2次の有限被覆関数を用いると、高精度な変位挙動のシミュレーションが可能であることを実証している。

第4章は、ブロックの接触問題について、従来のPenalty法に変わる拡張Lagrange法の適用を検討する。特に接触面の相対的な移動が大きくなる大変形を伴う不連続体の挙動を解析するには、ブロック同士の接触問題をどう取り扱うかが問題

となる、これまでの不連続体解析では、接触領域に幾何学的な拘束条件と力の釣り合い条件を付加する事で、接触条件によって定まる要素特性をもつ体積の無い仮想的な接触要素を導入することで解析してきた。代表的なものに、幾何学的な拘束条件を全体系の剛性方程式に導入する Penalty 法があるが、この手法は単純で物理的解釈が容易である反面、Penalty 値の増加に従って数値的に不安定になるという欠点を有している。本論文では、制約条件付き最適化問題として利用される Lagrange の未定乗数法を改良した拡張 Lagrange 法を接触問題に適用することを試みる。この手法は力の釣り合い方程式を幾何学的条件下で解くものであり、変位の増分から接触力の増分を求め、さらに接触判定から接触面の不整合量を求め、接触力の予測量を計算して接触力を修正し、この修正された接触力で変位の増分を求めながら変位を更新していく。四角形要素による有限被覆の高次化と拡張 Lagrange 法による接触問題の解析を複雑な梁の変形問題に適用し、従来の手法よりも高精度の変位挙動の解析に成功していることが示されている。

第5章は、前章までの研究成果を岩盤中を伝播するクラックの進展問題に応用した例を示すもので、応力集中による開口亀裂の伝播挙動を例題に取り上げ、岩盤における不連続面の挙動を精度よく追従することが可能であることを示す。また解析の際、応力集中領域に対して自動的に数学メッシュを細分化する方法を開発し、岩盤における物理的な分離を伴う不連続面の変形挙動を高精度に考察することが可能であることを示している。

第6章は、ダムの基礎、斜面およびトンネルといった具体的な岩盤構造物を対象とした解析例において、本研究の成果の有用性を実証する。本研究で開発した手法を用いることにより、数学要素の形状を変更することなく高次の関数が定義でき、任意の不連続面を容易にモデル化しながらも、変形の解析精度を向上させることが可能であることが示されている。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめ、総論を導くとともに、今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

大規模な構造物の基礎岩盤、大深度地下空間の利用に供する地下構造物、複雑な斜面をなす岩盤などの岩盤構造物の変形性および安定性は、内在する不連続面に強く影響される。そのため有限要素法などの連続体を対象にする手法ではなく、不連続体を対象にした数値解析によって岩盤の挙動を研究する試みがなされてきた。不連続体解析として開発された手法の一つにマニフォールド法がある。この手法は不連続面を含む物理要素に対して、不連続面の境界で分離できる有限被覆 (finite covers) と呼ばれる形状関数で変形を規定し、それを重ね合わせることで系全体の変形を表し、さらにこれらに接触の条件を加えて離散化し、釣り合い方程式を動的に解く手法であり、物体の分離・離散を模擬できる。本研究は、このマニフォールド法を不連続性岩盤の解析に適用するための研究に取り組んだ成果をまとめたもので、その主な内容は次のとおりである。

- 1) 対象物の要素分割を効率的に行うため、従来の三角形数学要素に代わる四辺形要素の導入を試み、その有効性を明らかにした。さらに有限被覆関数に高次要素を用い、曲げ挙動を精度よく表現する方法を開発した。これにより二次の有限被覆関数を用い、数学要素の形状を変更することなく高次の関数が定義できることを示した。
- 2) 不連続性岩盤においては、大変位が生じるとブロック間の接触問題が発生する。本手法は、任意の不連続面を容易にモデル化することを可能にし、大変形に伴う接触問題を簡易に解析する方法も提示し、その有効性を検証した。
- 3) 岩盤内には比較的明瞭に観察される顕在的な不連続面である断層と、節理群やクラックのように潜在的でその繋がりが比較的曖昧な不連続面が同時に存在する。こうした岩盤の解析にマニフォールド法を適用する手順を提示し、クラックの伝播や破壊の進行、その結果として生じる岩盤の分離現象の解析に適用した。さらに、応力集中領域には自動的に数学メッシュを細分化する方法を示し、物理的な分離現象に追従できることを示した。
- 4) 開発した高次の有限被覆関数を用いた四辺形要素による不連続性岩盤の解析手法を、具体的に複雑な実岩盤の挙動解析に摘要し、その効果を明らかにした。

以上、要するに本論文は、連続体モデルと不連続体モデルを統一的に解析する手法であるマニフォールド法の高度化を行い、内在する不連続面に強く影響される複雑な岩盤の挙動を正確に解析するための理論面および実用面での新たな方法を提案したものであって、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14年2月8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。