

氏名	なか い たく み 中 井 卓 巳
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2312 号
学位授与の日付	平 成 15 年 9 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	ブ ロ ッ ク 理 論 と 写 真 測 量 技 術 を 適 用 し た 不 連 続 性 岩 盤 の 管 理 手 法 に 関 す る 研 究

論文調査委員 (主査) 教授 大西有三 教授 青木謙治 教授 齋藤敏明

### 論 文 内 容 の 要 旨

トンネルやダムなどの土木構造物はもとより、斜面災害に関係する防災関連、あるいは放射性廃棄物や二酸化酸素の地中貯留などの新たな地下空間の利用が注目されており、岩盤の力学的および水理学的挙動を把握するための研究は数多く行われてきた。特に、岩盤の安定性に焦点を当てた研究においては、応力に誘起される破壊だけでなく、内在する不連続面に支配される構造的な破壊を加味する必要があることが判明する一方で、逆にその不連続面がもたらす多くの不確定な要素のために、それらを含む岩盤挙動を正確に管理することが困難であった。すなわち、岩盤における安定性は、構造の幾何学的特性と力学的特性の両者の関数となるため、不連続な材料という新たな視点で岩盤を捉える必要があるものの、岩盤をどのように調査し、その結果をどのように使って管理すれば良いのかということに関して、未だ確立された手法が見出されていないのが現状である。

本論文はこのような現状を鑑み、不連続性という観点から岩盤の挙動を捉えて管理する手法について研究したものである。すなわち、岩盤を対象とする土木構造物の調査、設計および施工さらには維持管理に至る一連の工程において、不連続面の把握とモデル化、それを利用した安定性の解析と計測法を研究することによって、例えば施工時の支保工やメンテナンスのための岩盤の補強などを工法的あるいは経済的に最も合理的に行うための手法を提案するものである。さらに本論文は、この岩盤の管理手法に関する研究成果を実際の現場へ適用することによって、その効果を具体的に検証した結果に基づいて工学的な価値についても考察するものである。

本論文の構成は、序章および結論を含め、以下のように、7章から成っている。

第1章は序論であり本論文の研究の背景と目的について論じるもので、岩盤を不連続性体として捉えることの重要性を、具体的な岩盤物性の計測事例あるいは、これまで発生してきた災害事例などから証明し、本研究が不連続性に着目した新しい調査、解析および計測技術でもって安定性の管理に取り組むものであることを述べている。

第2章は不連続面の調査技術と岩盤のモデル化に関して記述する。例えば岩盤斜面においては、類型化された崩壊形態を経験にもとづいて把握しようとしてきた。本論文では、まず岩盤に内在する不連続面を分類した後、方位や間隔といった幾何学的特性あるいは充填物などの物理的特性といった不連続面の各種特性と力学的安定性の関係を事例に基づいて研究し、着目すべき岩盤の不連続面の特性と安定性に影響を及ぼす要因の相互作用を考察するための手法についてまとめている。より具体的には、岩盤を不連続性体としてモデル化すべき指標としての代表要素容積の概念について考察し、さらに不連続面の連続性を表すトレース長とその分布状況に関する事例研究から、現場において着目すべき不連続面の測定間隔や頻度などの具体的物性の計測法などについて考察したものである。また、安定性は不連続面の方位や摩擦角に対する岩盤斜面の方位に関係している事実から、不連続面の三次元的な配置が岩盤の構造を評価するためには重要であることを指摘し、掘削によって形成される新たな岩盤表面を含めた幾何学形状をモデル化するための手法を提案し、次章以降で議論する解析および計測技術のための基礎となる不連続物性の調査法について論じている。

第3章は不連続性岩盤のための解析技術に関して記述している。不連続性岩盤の力学的挙動を解析する目的は、掘削斜面、自然斜面あるいはトンネルなど岩盤構造物の安全性の評価を確実に行うことである。本論文では、岩盤中の断層、層理あるいは節理といった大小さまざまな不連続面が、その強度や応力分布を支配しており、その結果として工事における掘削方法や支保の選定、あるいは維持管理のための補強法が決定されるということであらためて指摘し、この事実に基づいて、不連続面に支配される挙動が岩盤の力学的安定性を左右するという観点から導かれるブロック理論の適用法について論じている。特に、前章までの不連続面の物性と関連させ、移動可能性のある岩盤ブロックに対して効果的に支保を施す設計を行うことで、従来の工事に比べ工法上あるいは経済的にも合理的な施工が可能であることを明らかにしている。

第4章は、不連続性岩盤の挙動を監視するための計測システムの研究について論じている。前章において抽出された不安定性をもたらす危険なブロックを含んだ岩盤の挙動監視、あるいは施工した支保や補強が適切に作用しているかを把握するための計測は、岩盤管理の基本となるものである。特に変位は岩盤に印加している応力や変形挙動をモニタリングするための最適なパラメータであるが、これまで適用されてきた計測方法の多くは局所的な観測であり、広範囲にわたる面的な観測を連続的に評価することができず、そのため正確な岩盤の挙動を把握することが困難であった。本研究は、ステレオ撮影による実体視を利用した写真測量技術によって不連続面上の任意の計測点の3次元座標を計測する技術を発展させ、多数のデジタル画像を利用することで対象物を高精度に復元する精密写真測量技術を岩盤の変位計測に適用するための研究を試みる。本研究による計測手法は、熟練を不要とする計測方法であり、しかも必要なハード機器に要するコストを低減化できるという利点をも兼ね備えたものである。本研究では、この手法を岩盤の動態観測に適用するために、ある一つの計測区間の結果を利用して隣接する区間の計測を順次行っていく方法を開発し、その結果、対象を多数の計測区間に分割しても、各計測区間の結果をリアルタイムに統合することができる技術を完成させることを可能にした。さらに前章まで述べた不連続面のモデル化とブロック理論を利用した設計および施工法と組み合わせることで、計測を通してそれら設計と施工を一体化させる情報化施工の構築を試み、岩盤における不連続面の三次元的な配置からその安定性の評価およびモニタリングを施工や維持管理に活用するための一連のシステムを提案している。

第5章では、これまで得られた調査、設計および計測技術を総合した管理技術の有用性を、不連続性岩盤を対象にしたトンネル拡幅工事に適用して実証するものである。具体的にはトンネルボーリングマシン掘削による先行導坑を利用した不連続面調査とその結果に基づくブロック理論による解析と対策工の決定、さらには拡幅時のトンネルの挙動を精密写真測量によって観測した事例について考察している。これらの結果に基づき、岩盤固有の特性と掘削による幾何学的情報から岩盤ブロックを抽出することで、その安定性を評価するブロック理論とトンネルの情報化施工に当該理論を取り入れる際の計測法を含めた工学的な実用化を図るための新たな手法を提案している。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を総括している。すなわち、本研究で示した調査技術、解析手法あるいは計測技術は各々単独でも有効に利用することができるものであるが、それらを統合化することによって多様な事例に柔軟に適用することが可能であることを、具体的事例における実証を通して示したものである。

最後に第7章において、本研究が提案する管理手法の課題と、実用化のためにさらなる高度化を図るための考察について言及する。具体的には不連続面に強く影響される結果として複雑な挙動を示す岩盤の安定性を管理する技術という視点より、個々の技術を今後どのように高度化させることが可能かについて著者の考えを述べ、論文のまとめとしている。

## 論文審査の結果の要旨

岩盤を対象とするトンネルやダムなどの土木構造物の施工や維持管理だけでなく、斜面災害に関係する防災関連の研究において、その変形挙動と力学的安定性を把握するための研究は数多く行われてきた。しかしながら、岩盤の物性は不均質かつ異方性という特性を有する上に、連続体と見なす解析手法によっては実際の挙動を捉えることが困難であり、崩壊などの事故の発生を防ぐための有効な手段を講じることが未だに困難な状況である。本研究はこのような背景を鑑み、内在する亀裂や弱面といった不連続面が岩盤の力学的安定性に大きな影響を与えることに着目し、岩盤の力学的安定性を不連続面の構造を反映した解析手法とその挙動を面的にモニタリングする技術を組み合わせた技術によって、安全かつ施工上および経済的に合理的である岩盤の施工時の管理技術を提案するものである。本論文の内容は次の通りである。

- 1) 力学的安定性を検討するための岩盤のモデル化技術に関して、不連続面の特性を分析し、その種類に応じた有効な調査法とその適用性を事例に基づいて論じた。具体的には、内在する不連続面を岩盤のモデル化という観点から分類すると同時に、岩盤の安定性に影響を与える各種要因と不連続面特性の相互作用を系統的に考察する手法を考案し、不連続性岩盤のモデル化手法を完成させた。
- 2) 岩盤不連続面と掘削による幾何学的形状の関係から岩盤ブロックの三次元的な配置を決定し、当岩盤の安定性を考察するブロック理論を用いた設計法について論じ、上記モデル化の手法によって考察される幾何学的特性に加えて、ブロックの力学的特性を考慮した関数によって施工中の岩盤の安定性を評価することで補強ならびに支保工構造の合理的な設計法を可能にする手法を考案し、さらにその有用性を現場にて実証した。
- 3) 不安定な岩盤ブロックに対する対策工の効果をモニタリングする技術としての精密写真測量に関し、広範囲の計測対象を効率的に計測するための手法を考案した。具体的には、一つの計測区間の結果を利用して隣接する区間の計測を順次行っていく後方交會法と前方交會法を開発した。その結果、対象を多数の計測区間に分割しても、各計測区間の結果をリアルタイムに統合することができる技術が完成され、施工中の岩盤の安定性をデジタル画像を用いて面的に計測できることを明らかにした。
- 4) これまで得られた調査、設計およびモニタリング技術を総合した管理技術が有効であることを、不連続性岩盤を対象にしたトンネル拡幅工事に適用して実証した。これはTBM掘削による先行導坑を利用した不連続面調査とその結果に基づくブロック理論による解析と対策工の決定、さらに拡幅時のトンネルの挙動を精密写真測量によってモニタリングする技術を現場に適用したものであり、本研究が不連続性岩盤の施工中の管理技術として有効であることを明らかにした。

以上本論文は、不連続面に強く影響された複雑な挙動を示す岩盤に対する施工を行う時に有用な安定性管理技術に関する新たな方法を提案したもので、学術上および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15年8月26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。