

氏 名	ファン ジェ ユン 黄 載 允
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2302 号
学位授与の日付	平成 15 年 7 月 23 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	Stability Evaluation of Rock Blocks in Tunnels for Observational Method (トンネルの情報化施工のための岩盤ブロック安定性評価に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 大 西 有 三 教 授 青 木 謙 治 助教授 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

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は、その強度や応力分布を支配し、その結果工事における掘削方法や支保の選定を考慮する際の重要な要素となる。逆に言えば、この不連続面に支配される挙動が岩盤の力学的安定性を決定することになる。本論文は岩盤の不連続面の挙動という観点から岩盤の安定性を捉える理論を展開し、さらに不連続面情報を設計および施工と反映させるトンネルの情報化施工に前記理論を取り入れることで効率的かつ合理的な支保構造の設計および掘削法について検討した結果をまとめたものである。これまでに不連続面に着目した岩盤の安定性を評価する手法は提案されてはいるが、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し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ための計測法を含めた工学的に実用化を図るための新たな手法を提案し、さらに現位置における実験的試行によってその効果を実証したものであり、序論と結論を含めて8章から成っている。

第1章は序章であり、既往の研究例から岩盤を対象にした工事における不連続面情報の重要性を述べ、本研究がブロック理論をトンネルの情報化施工に取り入れることの工学的意義を明らかにすることによって、本研究の目的および位置付けについて記述する。

第2章は、岩盤を連続体と見るか不連続体としてモデル化すべきかを評価する代表要素容積の概念を紹介し、それと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既往の研究から、岩盤におけるトンネルの施工においては不連続体として岩盤を捉えることが妥当であるという結論を導き、現場において着目すべき不連続面の測定間隔や頻度を提案する。さらにこの結果に基づき、岩盤でのトンネルの施工において重要な情報となる不連続面特性について整理し、走向傾斜をはじめとする幾何学的特性が支保設計や掘削工程にどのように影響を与えるのかを事例を挙げながら考察する。本章では、これら不連続面の情報の取得法と計測結果の取り扱いについてまとめ、後ほど議論する不連続面の3次元的な配置から岩盤の安定性の評価を行うブロック理論を施工に活用するための計測方法に関する一連のシステムについての提案を述べる。

第3章は本研究において岩盤の安定性を解析的に評価するためのブロック理論について記述する。ブロック理論は不連続面の幾何学的形状によって決定される岩盤ブロックが、掘削されて新しい岩盤表面が形成される場合に、露出する当該ブロックが安定であるか否かを判断し、さらにそれが不安定になることによって岩盤全体にどのような挙動が生じるのかを評価するための理論であり、本研究ではこの理論をトンネルの施工に適用し、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、従来のトンネル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示すものである。本研究は、任意の断面形状に適用し、トンネルの線形構造にも対応可能な解析法をプログラミング化し、本ブロック理論をトンネルの施工に対して汎用化するためのコード開発について詳細に検討した結果を明示している。

第4章では実際のトンネル施工にブロック理論を適用し、その効果ならびに実用性を示している。適用現場は不連続面が発達した硬岩地山に位置し、断面が扁平な大断面で天端の幅が広いことより、一般のトンネルに比べ岩塊崩落の危険性が高

いたため本理論を適用したのであるが、TBM（トンネルボーリングマシン）導坑から得られる不連続面群の方向性から形成されるブロック形状をステレオ投影法により分類し、掘削面の方向性を決定することで崩落の可能性のあるキーブロックと称される岩塊ブロックに対し、本坑拡幅前に追加支保を実施した工事例を通して本研究が提言する手法の有用性を証明している。さらに、本章では先進導坑から得られた情報による解析結果に加えて、本坑切羽でも不連続面調査を行うことで再度解析を行うことでキーブロックの標準支保構造での安定度の見直しを行い、支保耐力の不足による追加支保の検討を行う工法の有用性を実証した結果を基にして、ブロック理論を用いたトンネル情報化施工の具体的な提案を行う。

第5章では、トンネル切羽の不連続面情報をデジタルカメラで撮影した画像から抽出し、さらに写真計測手法と組み合わせることで、当不連続面の走向傾斜を高精度に計測する技術を記述している。具体的には、画像処理の応用により切羽画像から着目すべき不連続面を客観的に見出し、ステレオ撮影による実態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応用したもので、遠方より非接触で計測しながらも、多数の写真枚数を使用し、ラブラシアン処理を取り入れたリニアメント抽出技術と不連続面に関する多数の計測点から最小二乗法によって平面方程式を決定するアルゴリズムを開発し、高精度に走向傾斜を計測する手法を提案する。本研究成果を室内実験によって確かめ、これにより切羽を遠隔から撮影した写真からリアルタイムに不連続面の3次元情報を取得する技術の構築を図ることを可能にしている。

第6章では前章まで述べた不連続面の計測技術とブロック理論の適用を組み合わせ、短時間で高精度なキーブロックの形状と発生位置の抽出と安定計算を行うシステムの適用を論じる。計測を通して設計と施工を一体化させる情報化施工において、本研究は掘削の限られたサイクルタイムの中で計測を行い、従来のスケッチに替わる客観的な判断によって不連続面情報を得ることができ、さらに日常的に管理するためのキーブロックの抽出と安定計算を行うシステムを構築した。本章では、前章と同じく硬質地山における大断面トンネルに本研究を適用し、同じくTBM拡幅工事における追加支保工の効果から本研究のトンネル施工における効果を実証する。この結果、計測から解析の一連の工程において従来の手法と比較して合理的なトンネルの施工を実現する研究であることを示している。

第7章は本手法のさらなる高機能化について言及している。具体的には、これまで適用されてきたブロック理論は、不連続面を円盤に置き換え、その半径を無限のものとして扱ってきたが、この仮定をはずし不連続面の有限性を考慮した手法を提案するものである。不連続面を無限に拡がると仮定するモデルは、現場によっては非現実的なブロックの支保を検討する危険性があり、それを回避するための手段として、有限性を考慮した場合の半径の設定値の違いによるブロック形成の相違に関する解析例についての考察を展開する。また、ブロックの構成面となる可能性のある不連続面を連結不連続面として表現する手法を提案し、半径の有限性を設定することで連結不連続面だけについてブロック理論を適用することも可能であることを示す。これらの結果からTBM導坑から本坑掘削時のキーブロックの発生予測の解析を行い、先行補強を実施する場合には、さまざまな半径の不連続面を設定し、大きな半径でしか現れないキーブロックを現実的でないブロックとして判断することの可能性とその工学的考察を行っている。また規模の大きな不連続面を決定論的に表現し、規模の小さな不連続面を確率論的に発生させた場合の解析例を通して、大規模な不連続面がトンネル全体のブロックの形成傾向を作り、中小規模の不連続面は付随する小さなブロックを形成するという結果から確率論を導入したブロック理論の有用性についての見解をまとめ、今後のブロック理論を適用したトンネルの情報化施工のより一層の高度化に対する提言とその可能性を述べている。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を統括すると共に、今後の課題について記述している。

論文審査の結果の要旨

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に岩盤の力学的挙動は支配される。この事実に基づいて工学的な観点から着目し、トンネル施工において当該不連続面情報を効率的に得るための新しい調査技術と、得られた不連続面情報を活用して岩盤の安定性を評価する解析技術に関する研究成果をまとめたものであり、本論文の主な内容は次の通りである。

1) 岩盤における不連続面が力学的挙動に与える影響についてこれまでの事例を考察した結果、不連続面の3次元的な配置で形成される岩盤ブロックの安定性に注目することで岩盤の補強あるいは支保工の設計が合理的に行えること、すなわち岩盤の不安定性が不連続面の幾何学的特性と力学的特性の両者の関数となることを見出し、不連続面の3次元的な幾何学

特性を解析するブロック理論が岩盤の安定性の評価に有用であることを明示した。さらに現場で採取したデータから、岩盤における不連続面特性についての情報について処理し、トンネルの施工において着目すべき不連続面情報を具体的にまとめ、その物理的意義について考察した。

- 2) 実際のトンネル施工にブロック理論を適用し、その効果ならびに実用性を証明した。特に、本トンネルの施工に先行して掘削されるTBM（トンネルボーリングマシン）導坑から得られる不連続面情報を活用する手法を展開し、本研究によって提言されるブロック理論が安全ながらも効果的で経済的な支保工の設計と施工を実現できることを実例で示した。
- 3) 先行導坑を伴わない一般のトンネル施工に対して、その切羽の不連続面情報をデジタルカメラで撮影した画像から抽出する新しい理論を構築し、さらに写真計測手法と組み合わせることで当不連続面の走向傾斜等を計測する技術を構築した。具体的には、ラプラシアン処理を用いた画像処理の応用により切羽画像から着目すべき不連続面を客観的に見出し、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を3次元的に計測するものである。この研究によって切羽より離れたところで切羽の写真を撮影するという安全かつ簡便な手法で不連続面の3次元情報を取得する計測方法を実現した。
- 4) 本研究が提案する不連続面の計測技術とブロック理論を組み合わせ、短時間で高精度なキープロックの形状認知と発生位置の抽出ならびにブロックの安定計算を行うシステムの適用を論じている。計測を通して設計と施工を一体化させる情報化施工において、本研究は掘削の限られたサイクルタイムの中で計測を行い、従来のスケッチに替わる客観的な判断によって不連続面情報を得ることができることを示し、さらに日常管理のためのキープロックの抽出と安定計算を行うシステムが構築できることを明らかにした。

以上本論文は、岩盤の不連続面情報に着目し、それが形成する岩盤ブロックの安定性を検討することで合理的なトンネル施工を行う手法の理論面及び実用面での新たな提案を行うもので、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15年6月24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。