

(論文内容の要旨)

我が国は、戦後著しい経済繁栄を遂げ、今や世界有数の経済大国となった。その間の発展を支えるために社会資本の整備も進み、道路・鉄道などの交通施設、ダム、発電所およびエネルギー貯蔵施設等が数多く建設された。山岳地の多く狭隘な日本の国土においては、こうした施設の建設では、大規模な岩盤斜面や地下の掘削を伴うことが多く、岩盤を適切に評価し、安定性を確保することが重要な課題となっている。岩盤斜面の分野では、いくつかの岩盤崩落事故を契機に、崩壊メカニズムに関する検討、対策が精力的に進められている。一方、岩盤地下空洞の分野では、過去数十年間にわたり、地下発電所空洞や石油備蓄空洞などの大規模地下空洞が多数建設されており、また、最近ではLPG備蓄空洞、地下調整池、多目的ドームなどさまざまな地下構造物が建設されている。大規模地下空洞の建設の歴史の中で、その設計、施工にかかわる技術上の諸問題の多くが克服されてきた。これらの技術的課題のうち、地下空洞の力学的な安定性を適切に判断する技術の向上は、今もって岩盤力学の重要な課題と言わざるを得ないし、事実、今日の多くの研究者の中心的テーマのひとつとなっている。

岩盤を扱うことの難しさは、岩盤が断層・破碎帯や節理等の多数の不連続面を含む、いわゆる不連続性岩盤としての挙動を示すことによる。本論文では、不連続性岩盤の解析手法としてキーブロック解析を取り上げ、大規模地下空洞の建設工事への適用を試み、空洞の安定性評価に関する研究を実施した。ブロック理論は、岩盤中に存在する不連続面と掘削面により囲まれ、滑動あるいは崩落する可能性のある不安定な三次元形状の岩盤ブロックを見つけ出し、そのブロックの安定性を判断し、必要ならば補強工の設計を行うものである。本研究では、確定論的なキーブロック解析の実用化を目的として、施工中の切羽観察結果からキーブロック解析、補強工の設計をリアルタイムで実施するためのシステムを開発し、実際の施工現場において適用を図ることを試みた。さらに、新たなキーブロック解析手法として、確率・統計論的なキーブロックの事前予測、ブロックの破壊確率、不連続面の有限性について提案を行った。

本論文は、序論および結論を含め、6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述べたものである。ここではまず、不連続性岩盤の解析手法の変遷と概要についてまとめた。断層から節理に至るまで様々な規模と頻度を持つ不連続面を含む岩盤をそのまま正確に表現して解析することは不可能であり、何らかのモデル化が行われる。その手法は大きく2つに分類され、不連続面を多数含む岩盤を等価な連続体に置き換えて解析する等価連続体解析法と、不連続面を直接モデルに取り込む不連続体解析法である。ここでは、現在提案されている主な手法の概要および特徴を述べる。その上で、従来の連続体解析手法を中心とした不連続性岩盤の解析技術の課題点を解決するために、新しい解析技術としてキーブロック解析に取り組む必要があることを述べた。

2章では、キーブロック解析の入力情報となる不連続面の調査方法および評価方法について述べた。また、不連続面のモデル化と評価の一例として花崗岩地域の露頭調査を実施し、2次元の不連続面ネットワークモデルの作成を行い、不連続面密度や不連続面の連結性の評価を実施した。さらに、不連続面調査の定量化を行う方法として、ステレオロジーによる方法を提案し地下空洞の現場で不連続面調査を行い本手法の適用を試みた。取得したデータを本手法で解析した結果、3つの不連続面群とそれらの分布密度を特定することが可能となった。また、別途実施した、走向傾斜の測定結果と比較して整合性のある卓越方向のデータが得られ、本手法の妥当性を示すことができた。

3章では、キーブロック解析の基本的な考え方を述べるとともに、理論の拡張として凹型ブロックの判定方法および回転モードのキーブロックに関する検討を加えた。キーブロック解析の基本条件是、位置と方向性を与条件として無限な平面で囲まれた凸型岩盤ブロックの剛体移動によるすべり破壊の検討を行うものであり、移動可能性の検討、すべりモードの検討、安定解析の3段階で解析を行うものである。これらの基本条件下におけるキーブロック解析は、岩盤構造物の設計や安全性評価において十分に有力な手段といえるが、実際の岩盤の不連続面に起因する不安定化や崩壊のメカニズムはより複雑なモードが存在する。そこで、まず凹型ブロックに対する移動可能性の判定法について検討した。研究した手法では、ステレオ投影法と行列計算を組み合わせたもので、凸型、凹型ブロックのいずれに対しても、ブロックの有限性判定が行えることを示した。次に、回転モードのブロック破壊について検討した。回転モードについては、4面体ブロックに限定して検討を行い、回転移動の可能性、回転モードの決定法について述べた。

4章では、大規模地下空洞の掘削時においてキーブロック解析を運用するシステムを確立するための手法と実現場への適用について述べた。実際の掘削中の現場においてキーブロック解析を導入することにより、補強が必要な部分について重点的に補強工を実施し、それ以外の部分については軽い支保設計とし、安全確保のためには計測を併用した上で、全体としての支保の数量を低減し経済的かつ合理的な地下空洞の設計・施工を実現することが可能になることを示した。

キーブロック解析にもとづく情報化施工を実施した結果、奥多々良木地点ではアーチ掘削時に合計28個のキーブロックに対して追加補強を実施した。その内容は、キーブロックの大きさ、不足する導入力の高さを考慮して、追加ロックボルト、追加吹付けコンクリート、追加PSアンカーを適宜施工した。その結果、発見されたキーブロックに対して、適切な補強工の設計・施工を実施することによりアーチ天端の変位はほとんど発生せず、アーチ部での変状も観測されなかった。

また、盤下げ掘削時には追加補強を必要とするキーブロックは発生しなかった。これは、盤下げ掘削時には、出現するキーブロックに対して前リフトまでの支保工かが期待できること、および破壊モードがすべり型であり、自重による不連続面耐力が期待できることが、その要因となっていると考えられる。

5章では、確率統計的な手法を用いて、キーブロックを予測する手法について述べたものである。まず、事前の不連続面調査結果をもとに空洞掘削時のキーブロックの発生状況を予測し、実際の掘削時に発見されたキーブロックの発生状況と比較することを試みた。試掘坑での調査結果からクラスター分析を行い卓越方向群に分けて卓越方向群ごとの傾斜、傾斜方位、方位分散計数、平均間隔を求め、これらをパラメータとして空洞アーチに不連続面を乱数にて発生させて出現するキーブロックを予測した。その結果、実測結果によるキーブロックの発生割合は、予測値による発生割合を超えないこと、アーチ周方向の発生傾向が良く一致していることが示された。

次に、破壊確率により危険なキーブロックを統計的に予測する手法について検討した。これは、不連続面組合せの確率関数 $P(JC)$ 、ジョイントピラミッドの形状指数 K 、ジョイントピラミッドの不安定指数 F の積として、ブロックの破壊確率 $P(B)$ を定義して、最も出現しやすく、かつすべり破壊しやすい危険なキーブロックを評価しようとするものである。実際の地下空洞側壁でのキーブロックの発生状況と比較して、破壊確率によるキーブロックの発生頻度には、良い相関が得られ、有効な手法になりうることを示した。そして、綿密な調査の基で、これらの新しい方法を組み合わせると、より合理的で経済的な地下空洞設計・施工が可能となることを示した。

第6章は、結論として本研究の成果をまとめたものである。

--	--

氏名

西村 毅

(論文審査の結果の要旨)

岩盤構造物は、地下空洞、岩盤斜面、岩盤基礎の三つに大別される。これらの構造物の建設においては、大規模な岩盤斜面や地下の掘削を伴うことが多く、岩盤を適切に評価し、安定性を確保することが重要な課題となっている。岩盤を扱うことの難しさは、岩盤が断層・破碎帯や節理等の多数の不連続面を含む、いわゆる不連続性岩盤としての挙動を示すことによる。不連続性岩盤をモデル化し、安定性を評価するための方法論はさまざまなものが提案されている。本研究では、不連続性岩盤の安定性を評価する有効な手法の一つである三次元キーブロック解析を対象として、その理論的な発展を図るとともに、大規模地下空洞の建設工事への適用を試み、不連続性岩盤の安定性評価に関する研究を実施している。

本論文の主な内容は、以下の通りである。

- (1) 不連続性岩盤の解析手法を連続体解析法と不連続体解析法に分けて、従来の主な解析手法について整理し、キーブロック解析の特徴および必要なデータについて述べ、解析を実施するために必要な不連続面の幾何学情報と力学情報について整理した。さらに、ステレオロジー理論による不連続面調査の定量化を試みた事例として、地下空洞壁面での調査、定量化の手順を示し、従来の地質調査結果と比較して手法の有効性を確認している。
- (2) ブロック理論の基本的な考え方について整理するとともに、従来のブロック理論では対象としていなかった凹型ブロックの有限性についてステレオ投影法と行列計算を組み合わせた判定方法を提案し、凸型、凹型ブロックのいずれの形状に対しても、ブロックの有限性判定が行えることを示した。次に、回転モードのブロック破壊について検討した。回転モードについては、4面体ブロックに限定して検討を行い、ステレオ投影法を用いた回転移動の可能性、回転モードの決定法について述べた。
- (3) 確定論的なキーブロック解析の実用化を目的として、施工中の切羽観察結果からキーブロック解析、補強工の設計をリアルタイムで実施するためのシステムを開発し、2地点の大規模地下空洞の施工現場において適用を図り、その有効性を確認した。発見された三次元キーブロックに対して、不足する導入力を算定し、追加アンカー等の適切な補強工の設計・施工を実施することにより、その後の計測管理による空洞の安定性を確認している。さらに、計測された岩盤挙動を検討することにより、不連続面に対する試験結果について考察を加えた。本手法の適用は、地下空洞の安全かつ経済的な設計施工の実現に寄与するものと評価される。
- (4) 新しいキーブロック解析手法として、統計論的手法によるキーブロックの事前予測、ブロックの破壊確率による評価、不連続面の有限性に関する手法の提案を行った。現場データを用いて検討し、実際に出現したキーブロックと比較することにより、その有効性を示すとともに、課題について考察を加えている。

以上のように本論文は、岩盤工学における重要な研究課題である不連続性岩盤の調査・解析手法において、キーブロック解析の適用により、合理的な安定性評価が実現できることを示している。また、大規模地下空洞におけるキーブロック解析の適用は先駆的なものであり、岩盤力学分野の発展に関し、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21年2月12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。