

氏 名	よし だ つぎ お 吉 田 次 男
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2872 号
学位授与の日付	平 成 19 年 11 月 26 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 都 市 環 境 工 学 専 攻
学位論文題目	現 場 計 測 結 果 を 用 いた 岩 盤 構 造 物 の 挙 動 評 価 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 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

岩盤の力学特性は、不連続面の挙動に大きく支配されることが知られている。しかしながら、不連続面が岩盤の力学特性に与える影響については、明確にされていないのが現状である。不連続面の挙動が岩盤の力学特性に与える影響を把握し、岩盤構造物の設計、施工に反映することは、設計の合理化、施工時の安全性を向上するために重要である。

そこで、関西電力㈱の奥多々良木増設発電所と大河内発電所の地下空洞掘削過程において、種々の計測を行い、亀裂進展特性、変位特性、応力再配分特性などを把握するとともに、データ分析を行い、不連続面頻度と変形係数の相関性や不連続面の変位が岩盤挙動に与える影響などについて考察を行うとともに岩盤構造物の掘削に対する新たな提案を行った。さらに、不連続面頻度が高い岩盤や粘土化したところなどを含む弱層部の物性評価精度を高めるために、先端駆動型ボーリング装置の開発やビット部の改良を行いボーリング時の乱れを低減する工夫を行い、設計・施工への反映を検討した。

本論文は、序論および結論を含め、8章から成っている。

第1章は序論であり、岩盤評価法や計測手法などについての現状と課題を記し、本研究の目的および位置付けについて述べている。

第2章は、奥多々良木増設発電所と大河内発電所の地下空洞における計測結果とそれに対する考察を記した。掘削時における亀裂進展特性、変位特性、応力再配分特性などを考慮し分析を行った。その結果、地下空洞壁面近傍のゆるみ領域の他に亀裂進展が顕著な損傷領域が存在することが新たに判明した。損傷領域では、亀裂頻度、亀裂開口幅に変化が生じ、変位の顕著な増加、変形係数の低下が認められた。特に、大河内発電所の地下空洞における損傷領域では、ゆるみ領域より損傷が顕著であり、ひずみが限界ひずみを越えたことは、追加支保工の施工が必要となったことと符合する。また、損傷領域では、不連続面の変位に伴う応力集中が生じることも新たに明らかにされた。

計測の際には、不連続面の変位を定量的に計測するための装置として、新たに沈下計を開発するとともに、AE計測などによる新たな損傷評価法の適用性の検討も行った。

第3章は、新たに確認された損傷領域における亀裂進展特性や応力再配分特性について、現場計測データの詳細な分析や解析によるシミュレーションを基に行った考察結果について記した。

現場計測データの分析結果から、地下空洞掘削時の亀裂進展は、従来考えられていたように地下空洞壁面から深部に進展するのではなく、応力開放によって生じるゆるみ領域と、アーチアクション形成に伴う応力再配分によって生じる損傷領域で併行して生じることを明らかにした。さらに、損傷領域での損傷拡大に伴い地下空洞に不安定化が生じることを示した。

現場計測データから、損傷領域において生じた応力集中は、不連続面の変位によるものと分析されたが、さらに、不連続面をモデル化し、不連続体解析によるシミュレーションを行った結果、損傷領域における応力集中は、不連続面の変位によることが再確認された。また、損傷領域での応力集中は損傷を促進する一因であると指摘した。

第4章では、奥多々良木増設発電所と大河内発電所の計測結果を比較することで、初期の不連続面頻度と空洞掘削時の岩

盤変形特性の相関性を検討した。その結果、不連続面頻度が高い箇所ほど、損傷領域での亀裂進展が顕著であるとともに、地下空洞周辺の岩盤全域において亀裂進展が顕著であることを明らかにした。例えば、両発電所における放水路側側壁岩盤の計測結果を分析すると、実質部での変形は両発電所とも同程度であるが、初期不連続面頻度の違いにより、掘削に伴う亀裂の開口量に8倍程度の違いが生じ、その結果、岩盤変位量に4倍程度の違いが生じたことが明らかになった。

奥多々良木増設発電所と大河内発電所の計測結果の比較で、初期不連続面頻度と亀裂開口特性の相関性が見出せたため、定量化を図るため応力開放が生じる岩盤構造物を対象に、他地点の変位計測データも併せて考察を行った。この際、構造物の形状や初期地圧の違いを考慮するために、変位計測データを基に逆解析により岩盤変形係数を評価し、計測箇所のボーリングコアのデータとの相関性を評価した。その結果、岩盤変形係数は、不連続面頻度をパラメータとする指数関数にコアの弾性係数を乗じた式として表すことが出来ることを明らかにした。また、岩盤変形係数を評価する手法として従来用いられている平板載荷試験は、応力開放時においては、不連続面頻度が高くなるに従い過大評価となることを実データより評価した。

第5章では、損傷領域の損傷進展特性に関して検討を行った。損傷領域は、アーチアクション形成に大きく影響し、地下空洞全体の安定性にかかわるため、損傷領域の破壊特性や支保工効果などについて十分な考察が必要である。弾頭型の地下空洞を対象に破壊が生じ易いと想定される箇所として、側壁部やアーチ隅角部などについて考察を行った。また、現場計測データから、破壊の前兆特性としてAE発生数や変化が生じた亀裂頻度の顕著な増加に注目した。支保工の役割として、従来のNATM工法の考え方では、ゆるみ領域に適正量の支保工を施すことで、地山強度を最大限に発揮させることであった。しかし、新たに損傷領域の存在が確認されたため、支保工の役割は、損傷領域に適正量の支保工を施すことでアーチアクションをうまく形成させ、地山強度を最大限に発揮させることであると指摘した。

第6章は、岩盤の不攪乱サンプリング技術の開発について記した。第2章から第4章において、不連続面の頻度が構造物の変形性や安定性に大きく影響することを明らかにした。そこで、不連続性岩盤や粘土化した層、軟岩、軟弱層、地質境界などの試料を乱さずに、しかも広域的にボーリングによるサンプリングを行い、適切な不連続面評価を行うために、削孔水流出機構の改良、薄型ビットの開発、先端駆動型サンプリング装置の開発を行った。

ビットの肉厚は従来のものより約2mm薄くするとともに、削孔水流出方向を工夫することで、岩盤への切り込み時の乱れを抑える工夫を行った。さらに、通常のボーリング装置は、地上に設置した削孔装置によりロッド全体を回転する機構である。そのため、深部ではロッドのぶれにより試料の乱れが生じやすい。そこで、ロッドは回転せず先端のコアチューブとビットのみ回転する先端駆動型のサンプリング装置を開発し特許を取得した。

第7章は、これまでの研究成果を基に、岩盤構造物の掘削を行う時の設計・施工技術として、新たに4技術の提案を行った。提案技術は、以下のとおりである。

- ①不攪乱サンプリング装置によるボーリング調査法の提案：地下空洞、堅坑、斜面などに対して、新たに開発した装置による不連続面高頻度部や弱層部の物性評価を高度化する提案を行った。
- ②不連続面頻度を考慮したパラメータ評価法の提案：不連続面頻度が高い箇所では、現場変形試験による変形係数は過大評価となるため、不攪乱サンプリング装置によるコアの亀裂頻度から評価した変形係数を用いて補正することで解析精度を向上させることを提案した。
- ③損傷領域評価のための計測法の提案：損傷領域の損傷を精度良く評価するために地中変位計と併用して新たに開発した沈下計を用いて計測することを提案した。さらに、損傷領域の変状を事前に評価する手法としてAE計測やボアホールスキャナーによる亀裂観察手法を提案した。
- ④逆解析による損傷領域評価法の提案：施工管理における逆解析や予想解析の際に、不連続面をモデル化することで損傷領域を表現することを提案した。

第8章は、結論として本研究により得られた成果をとりまとめている。

論文審査の結果の要旨

岩盤構造物においては、不連続面の変状に起因する災害や施工中のトラブルがしばしば発生する。特に、欧米などに比べ、

わが国の岩盤は不連続面が卓越するため、不連続面特性の評価精度を向上するとともに、シミュレーション、モニタリングの技術を向上させることは、安全性の向上のみならず、設計・施工の効率化に対して大いに貢献する。このような背景から、本論文は、地下空洞掘削時の計測結果を基に考察を行い、不連続面に重点を置いた岩盤物性評価法やモニタリング技術などの提案を行うとともに、不連続面特性を精度良く評価するためのサンプリング技術の開発を行ったものである。

本論文の主な内容は以下の通りである。

- 1) 不連続面特性が異なる2地点の地下空洞において、掘削時における亀裂進展特性、変位特性、応力再配分特性を現場計測により把握するとともに、その結果を用いて岩盤の損傷進展特性について考察を行っている。その結果、岩盤が損傷する領域は、従来考えられているゆるみ領域の他に、アーチアクション形成に伴う応力再配分による損傷領域が存在することを明らかにしている。
- 2) 初期に不連続面頻度が高い場合、損傷領域における損傷度は高くなり、ゆるみ領域の損傷と比較して大きな損傷を受けるとともに、地下空洞の安定性に大きな影響を与えることを明らかにした。また、損傷領域においては、不連続面の影響で応力集中が誘発され、損傷が促進されることを現場データや解析によるシミュレーションから明らかにしている。
- 3) 損傷領域の存在が明らかとなったことで、支保工の役割に関して考察を行っている。ゆるみ領域に適正量の支保工を施すことで、地山の強度を最大限に発揮させるという従来のNATM工法の考え方に考察を加え、地山強度を最大限に発揮させるためには、損傷領域にも適正量の支保工を施し、アーチアクションをうまく形成させる必要があることを指摘している。
- 4) 計測データを基にして、岩盤の変形特性は不連続面頻度と相関性が高いことが示されている。さらに、変形係数を定量化するために、他の地下空洞や堅坑の計測データも併せて、逆解析手法を用いて検討を行っている。その結果、ボーリングコアの不連続面頻度をパラメータとした指数関数にコアの弾性係数を乗じた式により、岩盤変形係数を表現している。また、従来の現場平板載荷試験では、不連続面頻度が高いサイトでは、岩盤変形係数が過大評価となることを現場データより示している。
- 5) 現場計測データの分析により、岩盤構造物の安定性評価における不連続面特性評価の重要性を認識し、ビット部の改良と先端駆動型装置の開発により、ボーリングによるサンプリング技術の向上を図っている。妥当性については現場実証で確認している。
- 6) 以上の研究成果を基に、岩盤構造物掘削に対して経済設計、安全性向上を図るために、以下に示す4技術の新たな提案がなされている。①不攪乱サンプリング装置によるボーリング調査法、②不連続面を考慮したパラメータ評価法、③損傷領域評価のための計測法、④逆解析による損傷領域評価法。これらをまとめ、新しい岩盤設計・施工法を提示した。

以上、要約すると、本論文は、大規模地下空洞掘削時の計測データを基に、岩盤損傷領域の存在を新たに示し、損傷が構造物の安定性に与える影響を考察するとともに、損傷を加味した新しい評価手法を提案したものであって、岩盤工学の分野の発展に関し、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19年10月5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。