

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	クラックテンソル理論を拡張した立坑の透水係数と劣化状態の推定ならびに予測手法に関する研究 (Estimation and Prediction Methods for Hydraulic Conductivity and Deteriorated Condition of Vertical Shafts by Extended Crack Tensor Theory)
氏名(Name)	山崎 雅直(Yamasaki Masanao)
<p>立坑施工時に発生する大量湧水のような問題や立坑施工後の覆工クラックの集中のような維持管理上の問題を事前に予測して施工を実施することが重要であり、立坑における合理的な支保の選定や湧水対策の実施を目指して、(国研)日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの地下施設の立坑の施工により得られる岩盤の情報(クラック、強度)からクラックテンソル理論に基づき、立坑施工時の岩盤の透水係数ならびに立坑施工後の覆工の劣化状態を評価するとともに、これらについて簡易な予測手法を確立することを本研究の目的として、研究成果を取りまとめた。</p> <p>「第1章 序論」では、立坑における岩盤の地質観察や覆工の維持管理に関する現状、岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化状態に関する国内外の既往研究を整理し、岩盤の情報を用いた岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化状態を評価するとともに、これらの簡易な予測手法を確立することを課題として、本研究の目的を明らかにした。</p> <p>「第2章 立坑の岩盤透水係数の推定ならびに予測手法」では、立坑施工時における岩盤のクラックの情報(長さ、方向、開口幅)を用いてクラックテンソル理論とステレオロジー(統計幾何学)の概念を適用することにより、3次元の透水テンソルを精度良く推定した。そして、3次元透水テンソルより得られた透水係数と立坑近傍の深層ボーリング孔を用いた原位置透水試験結果に基づく透水係数を比較すると、よく一致していることを明らかにした。また、立坑施工において得られた割れ目の長さの総和を掘削面の面積で除した割れ目頻度と3次元透水テンソルより得られた透水係数とは高い相関が得られたことから、割れ目頻度から岩盤の透水係数を簡便に予測する手法を提案した。得られた予測式は岩盤クラック観察面の互いに直交する3断面が得られる深度を対象としたものであるが、互いに直交する3断面が得られない深度においても、予測式を用いて得られた岩盤の透水係数と原位置透水試験結果に基づく透水係数を比較すると、良く一致していることを明らかにした。</p> <p>「第3章 立坑の覆工劣化状態の推定ならびに予測手法」では、幌延深地層研究センターの地下環境においては、地圧の方位依存性が認められ、地下施設の立坑において最大主応力方向である東西方向の覆工壁面にクラックが発生している。しかしながら、当該地点における立坑の覆工クラックは、地圧の方位依存性によるものだけではなく、覆工背面の岩盤クラック、地山被りや岩盤強度にも依存している可能性があり、これらを考慮した覆工劣化予測のための予測式を作成できれば、施工時の対策に有益な情報となる着想を得て、クラックに関する情報を基に算定したクラックテンソルに基づき、岩盤クラックテンソルや岩盤強度から覆工の劣化状態を推定する手法を提案した。得られた予測式を用いた覆工の劣化に関するクラックテンソルの推定値と覆工クラックの情報から算定した計測値とは、相対誤差による許容誤差を0.1とすると、推定値と計測値は良く一致していることを明らかにした。</p> <p>「第4章 立坑の岩盤透水係数ならびに覆工の劣化状態の予測手法の適用に関する提案」では、今後予定されている地下施設の立坑延長に対する合理的な支保の選定や湧水対策の実施を目指して、立坑施工時の岩盤透水係数ならびに立坑施工後の覆工の劣化に関するクラックテンソルの予測手法を適用した施工管理システムの提案を行った。今後、より合理的な支保の選定や湧水対策を実施するためには、立坑施工時に取得される岩盤の情報(クラックや岩盤強度)を2章と3章で確立した予測式を用いて岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化に関するクラックテンソルを予測し、岩盤の湧水対策や覆</p>	

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）(Format No.7) 英語版

工の変状対策に反映することで，維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

「第5章 結論」は，各章における研究成果を総括し，今後の課題を提起して結論とした。

（和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度）  
（about 800 words）

<h2>学 位 論 文 要 旨</h2> <p>(Summary of the Doctoral Dissertation)</p>	
学位論文題目 (Dissertation Title)	クラックテンソル理論を拡張した立坑の透水係数と劣化状態の推定ならびに予測手法に関する研究 (Estimation and Prediction Methods for Hydraulic Conductivity and Deteriorated Condition of Vertical Shafts by Extended Crack Tensor Theory)
氏 名 (Name)	山崎 雅直 (Yamasaki Masanao)
<p>It is important to anticipate problems such as a large amount of spring water that occurs during shafts construction and maintenance problems such as concentration of lining cracks after shafts construction in advance, and to carry out construction in a rational manner. Crack tensor from the rock mass information (cracks, strength) obtained by the construction of the shafts of the Horonobe Underground Research Laboratory of the JAEA, aiming at the selection of support and the implementation of spring water countermeasures. Based on the theory, the research results were summarized with the aim of evaluating the water hydraulic conductivity of the rock mass during shafts construction and the deteriorated condition of the lining after shafts construction, and establishing a simple prediction method for these.</p> <p>Chapter 1 summarizes the current state of rock mass geological observation and lining maintenance in the shafts, the water permeability coefficient of the rock mass, and the past domestic and overseas studies on the deterioration state of the lining, and the hydraulic conductivity of the rock mass using the rock mass information. The purpose of this study was clarified with the task of evaluating the deterioration state of the lining and establishing these simple prediction methods.</p> <p>In Chapter 2, crack tensor theory and stereology (statistical geometry) are used using information (length, direction, opening width) of rock cracks during shafts construction. By applying the concept, the three-dimensional permeable tensor was estimated accurately. Then, when the hydraulic conductivity obtained from the three-dimensional hydraulic tensor and the hydraulic conductivity based on the result of the in-situ permeability test using the deep borehole near the shafts were compared, it was clarified that they were in good agreement. A high correlation was obtained between the crack frequency obtained by dividing the total length of the cracks obtained in the shafts construction by the excavation surface area and the hydraulic conductivity obtained from the three-dimensional hydraulic tensor. Therefore, we proposed a method to easily predict the hydraulic conductivity of rock from the frequency of cracks. The obtained prediction formula targets the depth at which three cross sections orthogonal to each other can be obtained on the rock crack observation surface, but the prediction formula was also obtained at a depth where three cross sections orthogonal to each other cannot be obtained. Comparing the hydraulic conductivity of the rock mass and the hydraulic conductivity based on the in-situ permeability test results, it was clarified that they are in good agreement.</p> <p>In Chapter 3, the orientation dependence of the earth pressure is recognized in the underground environment of the Horonobe Underground Research Center, and it is the major principal stress direction in the shafts of the underground Laboratory. Cracks have occurred on the lining wall surface in the east-west direction. However, the lining cracks in the shafts at that point may depend not only on the orientation dependence of the ground pressure, but also on the rock cracks on the back surface of the lining, the ground cover and the rock strength. If a prediction formula for predicting lining deterioration can be created in consideration, it will be useful information for countermeasures during construction, and based on the crack tensor calculated based on the information on cracks, from the rock crack tensor and rock strength. I proposed a method to estimate the deterioration condition of the lining. The estimated value of the crack tensor regarding the deterioration of the lining using the obtained prediction formula and the measured value</p>	

様式7号 (第12条, 第31条関係)

(様式7号) (Format No.7) 英語版

calculated from the information of the lining crack, assuming that the margin of error due to the relative error is 0.1, the estimated value and the measured value are well one. I made it clear that I am doing it.

In Chapter 4, aiming at selection of rational support for shafts extension of underground Research Laboratory planned in the future and implementation of spring water countermeasures. I proposed a construction management system that applies the crack tensor prediction method for rock hydraulic conductivity during shafts construction and deterioration of lining after shafts construction. In the future, in order to select more rational support and implement measures against spring water, the rock mass information (cracks and rock mass strength) acquired during shafts construction will be obtained using the prediction formulas established in Chapters 2 and 3. By predicting the hydraulic conductivity of the rock and the crack tensor related to the deterioration of the lining, and reflecting it in the measures against spring water in the rock mass and the measures against the deformation of the lining, it can be expected to contribute to the reduction of maintenance costs.

Chapter 5 summarizes the research results in each chapter and raises future issues for conclusion.

(様式9号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	山崎 雅直
審査委員	主査：吉武 勇
	副査：麻生 稔彦
	副査：河村 圭
	副査：中島 伸一郎
	副査：林 久資
論文題目	クラックテンソル理論を拡張した立坑の透水係数と劣化状態の推定ならびに予測手法に関する研究 (Estimation and Prediction Methods for Hydraulic Conductivity and Deteriorated Condition of Vertical Shafts by Extended Crack Tensor Theory)
<p><b>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</b></p> <p>高レベル放射性廃棄物を地下に長期間処分するためには、地表と廃棄物保管坑道を短絡する立坑を長期間安定して維持管理する必要がある。立坑施工時に発生する突発湧水の問題や、立坑施工後の覆工面のクラック集中のような維持管理上の問題を建設段階から予測して立坑を施工することが重要である。立坑の合理的な支保選定や湧水対策を実施するため、立坑の施工時に得られる岩盤の割れ目情報をクラックテンソル理論に基づき数値化し、立坑施工時の岩盤の透水係数ならびに立坑施工後の覆工の劣化状態を評価し、さらに、これらについて簡易的な予測手法を構築することを本研究の目的とした。本論文は計5章から構成されており、各章の主な要点は以下の通りである。</p> <p>「第1章 序論」では、立坑施工における岩盤の地質観察や覆工の維持管理に関する現状、岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化状態に関する国内外の既往研究を整理している。さらに、岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化状態を評価することの必要性と、これらの予測手法を確立することの意義を示しながら、本研究の目的を明らかにしている。</p> <p>「第2章 立坑の岩盤透水係数の推定ならびに予測手法」では、立坑施工時における岩盤のクラックの情報（長さ、方向、開口幅）を用いてクラックテンソル理論とステレオロジー（統計幾何学）の概念を適用し、3次元の透水テンソルを推定している。3次元透水テンソルより推定された透水係数は、立坑近傍の深層ボーリング孔を用いた原位置透水試験結果に基づく透水係数とよく一致していることを述べている。また、立坑施工において得られた割れ目の長さの総和を掘削面の面積で除した割れ目頻度と3次元透水テンソルより得られた透水係数に高い相関性が得られることを報告し、割れ目頻度から岩盤の透水係数を簡便に予測する手法を提案している。</p> <p>「第3章 立坑の覆工劣化状態の推定ならびに予測手法」において、本研究の主対象とし</p>	

(様式 9 号)

た幌延深地層研究センターの地下環境では、地圧の方位依存性があり、地下施設の立坑において最大主応力方向である東西方向に覆工壁面のクラックが発生している状況を報告している。そして、これらの立坑の覆工クラックは、地圧の方位依存性によるものだけではなく、覆工背面の岩盤クラック、地山被りや岩盤強度にも依存している可能性があることを指摘している。これらを考慮した覆工劣化予測のための予測式を作成し、施工時の対策にも活用できるようにクラックテンソル理論に基づいて、岩盤クラックテンソルや岩盤強度から覆工の劣化状態を推定する手法を提案している。提案した予測式を用いた覆工劣化の推定値と覆工クラックの情報に基づく計測値は、概ね良く一致したことを報告している。

「第 4 章 立坑の岩盤透水係数ならびに覆工の劣化状態の予測手法の適用に関する提案」では、今後建設される地下施設の立坑に対する合理的な支保の選定や湧水対策に寄与するべく、立坑施工時の岩盤透水係数と立坑施工後の覆工劣化に関するクラックテンソルの予測手法を用いた施工管理システムの提案を行った。より合理的な支保の選定や湧水対策を実施するためには、立坑施工時に取得される岩盤の情報（クラックや岩盤強度）を本研究で提案した予測式を用いて岩盤の透水係数ならびに覆工の劣化を予測し、岩盤の湧水対策や覆工の変状対策に反映させることで、合理的な維持管理を行うことを述べている。

「第 5 章 結論」では、本研究で得られた知見と成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめている。

なお、本審査申請時の英文題目は「A Study on the Estimation and Prediction Method for Hydraulic Conductivity and Deteriorated Condition of Vertical Shafts by Extended Crack Tensor Theory」であったが、本審査での意見を受けて「Estimation and Prediction Methods for Hydraulic Conductivity and Deteriorated Condition of Vertical Shafts by Extended Crack Tensor Theory」に修正された。

公聴会はオンラインのみで実施し、学内外から 28 名の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、立坑岩盤の透水係数の実測値のバラツキについて、覆工劣化に関するクラックテンソルの推定式の適用限界について、掘削前後のクラックの違いを考慮した分析の考え方について、岩盤のクラックと覆工のクラックの相関について、実用化に向けた研究開発の展望について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 0 編）

- 1) 山崎雅直, 津坂仁和, 大谷達彦, 進士正人: クラックテンソルによる現場スケールにおける透水係数の評価, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.71, No.1, pp.1-10, 2015.
- 2) 山崎雅直, 石山宏二, 林 久資, 進士正人: 立坑施工における覆工劣化度推定方法の提案, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 25 巻, pp.7-17, 2020.

ほか 1 編