

立坑施工における岩盤透水係数と覆工劣化状態 の予測手法の運用に関する提案

山崎 雅直¹・林 久資²・進士 正人³

¹正会員 東京電力リニューアブルパワー(株) 水力部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: yamasaki.masanao@tepcoco.jp

²正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学 (〒753-8511 山口県山口市吉田1677-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

(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立坑施工時の記録を用いた著者らによる既往研究成果に基づき, 立坑施工時の岩盤透水係数や立坑施工後の覆工劣化状態の予測手法の提案とその運用について提案した。

岩盤クラックの情報からクラックテンソル理論とステレオロジーの概念を適用して推定した岩盤透水係数に基づく岩盤透水係数の予測式を用いて, 岩盤クラックの情報から岩盤透水係数に基づく湧水対策工の選定の判断基準を提案した。また, 覆工ひび割れの判定基準の各評価区分に対応する覆工劣化に関するクラックテンソルを設定し, 岩盤の情報(クラック, 強度)から推定した覆工の劣化に関するクラックテンソルによる支保選定と補修・補強時期の判断基準を提案した。

Key Words: shaft, hydraulic conductivity of rock mass, deteriorated condition of lining, prediction method, crack tensor theory

1. 序論

(国研)日本原子力研究開発機構は, 北海道幌延町において, 幌延深地層研究計画¹⁾を実施している。同計画にて, 地下施設は 2005 年 11 月に建設が開始され, 2014 年 6 月時点で, 東・換気立坑の深度 380m まで, 西立坑の深度 365m までと, 深度 140m, 250m 及び 350m 調査坑道の整備が完了している²⁾。

立坑の合理的かつ効率的な施工にあたり, 立坑施工時において発生する大量湧水のような施工上の問題点を事前に予測して実施するためには, 立坑周辺を流れる地下水を適切に評価することが重要となる。また, 立坑の覆工のクラックが集中したことに伴い, 立坑からの小石ほどのコンクリート片が落下する事象を事前に予測して対策工を検討・実施することが重要となる。そして, 立坑施工時の岩盤透水係数や立坑施工後の覆工の劣化状態について, 立坑施工時に予測できれば, 適切な湧水処理工や支保を施すことができ, 施工後の維持管理費用の抑制に貢献できると考えられる。

山崎ら³⁾は, 当該地下研究施設の立坑施工時の記録を用いて, 互いに直交する 3 断面のクラックに関する情報を用いて, ステレオロジー(統計幾何学)の概念とクラックテンソル理論を適用して立坑坑壁の 3 次元透水テンソルを推定し, 等価な透水係数を算定した。さらに, 互いに直交する 3 断面のクラックの情報が得られる深度について, 坑壁地質観察結果より得られた割れ目頻度(m/m^2)と推定した透水係数の相関関係を分析し, これらの相関式を用いて, 互いに直交する 3 断面のクラックの情報が得られない深度においても, 等価な透水係数を予測する手法を提案している。

また, 山崎ら⁴⁾は, 当該地下研究施設の立坑施工時の記録を用いて, 覆工クラックの進展と劣化進行が等価であると仮定において, 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度を推定する手法を提案している。

本稿では, 今後, (国研)日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターにて深度 500m までの立坑の施工

が予定されていることを踏まえて、これらの成果を実務として運用するためのより合理的な支保の選定や湧水対策の実施を目指して、立坑施工時の岩盤の透水係数や立坑施工後の覆工の劣化状態の予測手法の適用について提案した。そして、岩盤透水係数については、湧水処理工選定フローを設定し、立坑掘削時の岩盤クラックの情報により推定した岩盤透水係数に応じた湧水対策を評価した。また、覆工の劣化状態については、覆工ひび割れの判定基準の各判定区分に対応する覆工の劣化に関するクラックテンソルを設定し、当該地点の覆工の劣化状態を評価した。

なお、本稿では、(国研)日本原子力研究開発機構において公開されたデータを使用している^{6,7,8,9,10,11,12}。

2. 幌延深地層研究所の地下研究施設と立坑の施工方法の概要

(1) 幌延深地層研究所の地下施設の概要

(国研)日本原子力研究開発機構は、北海道幌延町において、堆積岩を対象とした地下研究施設の建設を伴う研究プロジェクトを実施している。地下研究施設は、立坑3本(連絡立坑2本、換気立坑1本)と試験研究用の水平坑道から構成される計画である。坑道断面は連絡立坑(東立坑・西立坑)で内径6.5m、換気立坑で内径4.5m、水平坑道で内空幅4mを標準とし、断面形状は立坑が円形、水平坑道が三芯円馬蹄形である^{13,14}。

地下研究施設の建設工事は、現在3つの立坑(東立坑、西立坑、換気立坑)ならびに立坑に接続する水平坑道の建設を進めている^{13,14}。地下施設は2005年11月に建設が開始され、東・換気立坑の深度380mまで、西立坑の深度365mまでの施工が完了し²、現在維持管理中であるが、今後、深度500mまでの施工が予定されている。

(2) 幌延地点の岩盤の特徴

地下研究施設周辺の岩盤は、主として新第三紀堆積岩(珪藻質泥岩および珪質泥岩)からなる。そして、地下研究施設近傍の深層ボーリング孔にて実施した孔内水平載荷試験結果ならびにボーリングコアによる一軸圧縮試験結果(一軸圧縮強さは5~25 MPa)から、地下研究施設周辺に分布する岩盤の工学的特徴は軟岩であるが、割れ目やヘアークラックのような不連続面の存在が岩盤の力学的特性(強度・変形特性)に影響を与える可能性がある^{13,14}。ここで、割れ目とは、ボーリング調査におけるコア観察やEMI検層において確認できる既存の分離面と定義し、ヘアークラックとは、柱状のコア中において乾燥や外的荷重によって顕在化する潜在的な弱面と定義している^{13,14}。

(3) 幌延地点の初期地圧の特徴

岩盤内の初期応力は、地下研究施設近傍の深層ボーリング孔において実施した水圧破砕法による原位置測定結果¹⁵より、水平面内において偏圧が認められ、最大主応力の作用方向は概ね東西方向であることがわかっている。これにより、鉛直方向の主応力を土被り圧相当と仮定し、三次元での主応力比は、鉛直応力を1とした場合、水平面内最大主応力:水平面内最小主応力:鉛直主応力=1.3:0.9:1.0と設定している^{13,14}。

(4) 立坑の施工方法の概要

地下施設工事のうち立坑工事は、地上から換気立坑深度52.0mまで、東立坑深度42.1mまでの坑口部はバックホウによる施工を行い、換気立坑52.0m以深、東立坑42.1m以深の一般部は、スcaffoldingと櫓設備を使用して施工を行っている。掘削方式は換気立坑は積込機一体型の自由断面掘削機を使用した機械掘削であり、東立坑は発破掘削である。主な支保部材は、鋼製支保工、全面接着式のロックボルト、無筋の覆工コンクリートである。立坑の施工はショートステップ工法を採用しており、2mを1サイクルとして繰り返し行われる¹⁶。

3. 立坑の岩盤透水係数の予測手法の適用に関する提案

(1) 透水性に関するクラックテンソル^{17,18}

岩盤内の不連続面に沿う透水性に関するクラックテンソル P_{ij} は積分形式で、式(1)のように表される。

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} t^2 r^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1)$$

ここに、 ρ はクラックの密度、 r はクラックの代表長さ、 r_m は r の最大値、 n_i はクラックの法線ベクトル n の基準軸 X_i の成分($i,j=1\sim3$)、 $E(n, r)$ は法線ベクトル n と代表長さ r の統計的分布を与える確率密度関数、 Ω は全立体角を表している。確率密度関数 $E(n, r, t)$ は統計的に独立であると仮定して、式(1)は式(2)のように、現場計測データにより誘導することが出来る。

$$P_{ij} = \frac{N^{(q)}}{\langle |n \cdot q| \rangle} \langle t^3 \rangle N_{ij} \quad (2)$$

ここに、 $N^{(q)}$ は方向 q に走査線を入れた時の単位長さ当たりのクラックとの交点数であり、 $N^{(q)}$ を方向に関する補正係数 $\langle |n \cdot q| \rangle$ で割ると、方向 q によらない一定値になる。 $\langle t^3 \rangle$ はクラックの開口幅の3乗平均、 N_{ij} はクラック

の方向分布によって定まる2階のテンソルである。

この透水性に関するクラックテンソル P_{ij} から幾何学性に関する透水テンソル k_{ij} は式(3)で表わされる。

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_{0i}\delta_{ij} - P_{ij}) \quad (3)$$

δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。また、 λ はクラックの連結性に依存したスカラー量である。 λ の範囲は $0 \leq \lambda \leq 1$ であり、クラック相互の連結性が完全な場合は1に等しく、クラック相互が完全に連結していない場合が0に等しくなる。ここでは、クラックが全て流路であるとして $\lambda=1$ と仮定し、透水テンソル k_{ij} (m²) を計算した。さらに、ダルシー流速の透水係数 K_{ij} (m/sec) を式(4)により計算した。重力加速度 g を 9.81m/sec²、水の動粘性係数 ν を 1.0×10^{-6} m²/sec (水温 20°C) とした。

$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (4)$$

(2) 岩盤透水係数の予測手法

立坑施工時における岩盤クラックの情報から岩盤透水係数を予測する方法は、以下の通りである。

まず、立坑施工時の坑壁地質観察結果より、互いに直交する3断面の岩盤クラックに関する情報(長さ、方向、開口幅)を基に、式(1)~式(4)を用いて3次元透水テンソルを推定する。次に、岩盤の割れ目頻度と推定した岩盤透水係数の相関分析を行い、その結果を図-1に示す。ここで、縦軸の岩盤透水係数は対数で表わしている。同図より、割れ目頻度と推定した岩盤透水係数には比例関係にあり、割れ目頻度 3m/m² 以下に対する岩盤透水係数の相関係数は約 0.7 と比較的高い。そして、割れ目頻度と推定した岩盤透水係数の相関式は式(5)と求められた³⁾。

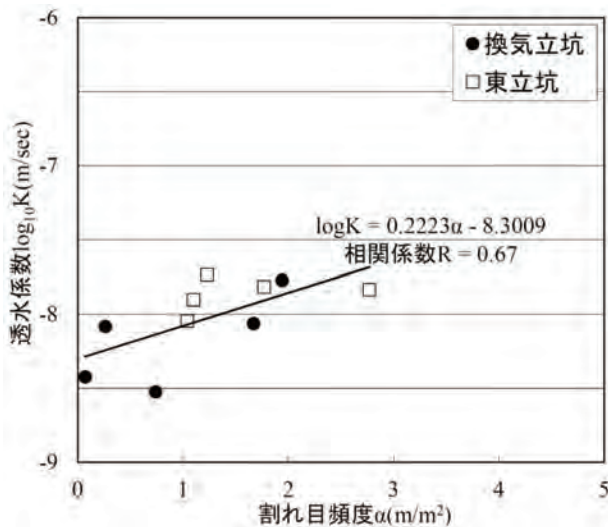


図-1 岩盤の割れ目頻度と岩盤透水係数の相関³⁾

$$\log_{10} K = 0.2223\alpha - 8.3009 \quad (5)$$

ここに、 K は透水係数(m/sec)、 α は割れ目頻度(m/m²)である。なお、割れ目頻度は、観察した割れ目の長さの総和を観察対象となった壁面の面積で除した値であり、その次元は(m/m²)である。式(5)については、当該地点のような新第三紀堆積岩(珪藻質泥岩および珪質泥岩)において適用できるものである。他の岩盤においても、互いに直交する3断面の岩盤クラックに関する情報を基に、3次元透水テンソルを推定し、式(5)のような予測式を誘導することによって、岩盤透水係数の予測に応用できる。

立坑施工時の岩盤透水係数による湧水処理工の選定における、岩盤透水係数の判断基準として、立坑施工に伴う湧水量を抑制するために、深度 250m 以深の立坑施工前に深度 250m の立坑底盤から実施したプレグラウト工の改良目標値である 0.1Lu (= 1.0×10^{-8} m/sec)¹⁹⁾ と設定した。

図-2に示す立坑施工時の岩盤透水係数による湧水処理工の選定フローにおいて、幌延地点における立坑施工時に坑壁地質観察により抽出したクラックの情報から山崎ら³⁾が提案した式(5)により岩盤透水係数を推定した結果、改良目標値である 0.1Lu 未満であれば、次の掘削に進むが、0.1Lu 以上 10Lu 未満であれば裏面排水材の追加を検討・実施し、10Lu 以上であれば岩盤改良するというような湧水対策の判断基準が構築できれば、合理的に湧水対策工を選定出来る。

一例として、式(5)に示す予測式と図-3に示す換気立坑と東立坑の各深度の割れ目頻度を用いて、各深度の岩盤透水係数を推定した結果を図-4に示す。図-3には深度 50~250m における 1 サイクル 2m 毎の割れ目頻度をプロットしている。換気立坑は 0.02~2.2 m/m²、東立坑は 0.06~3.9 m/m² の範囲で分布している。

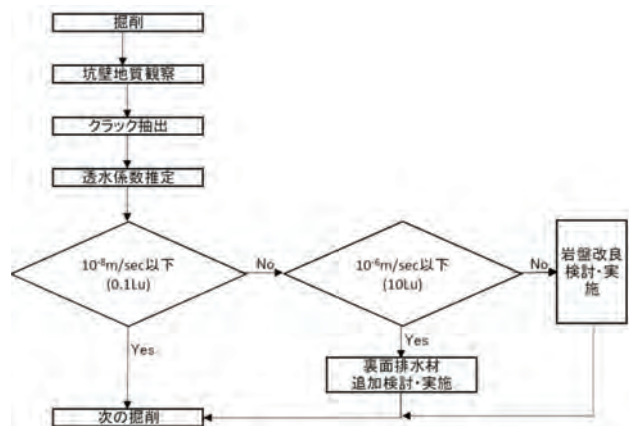


図-2 岩盤の透水係数による湧水処理工の選定フロー

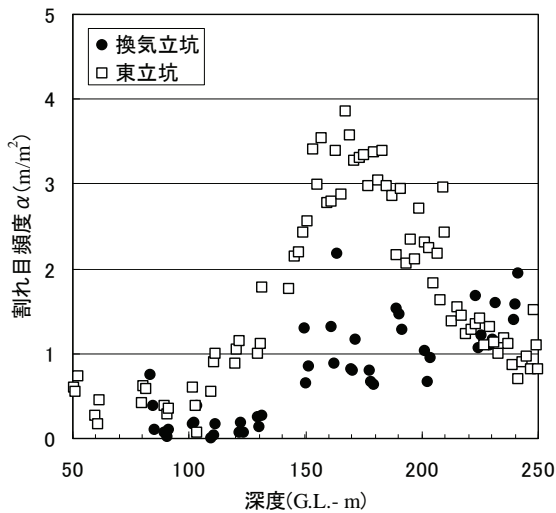
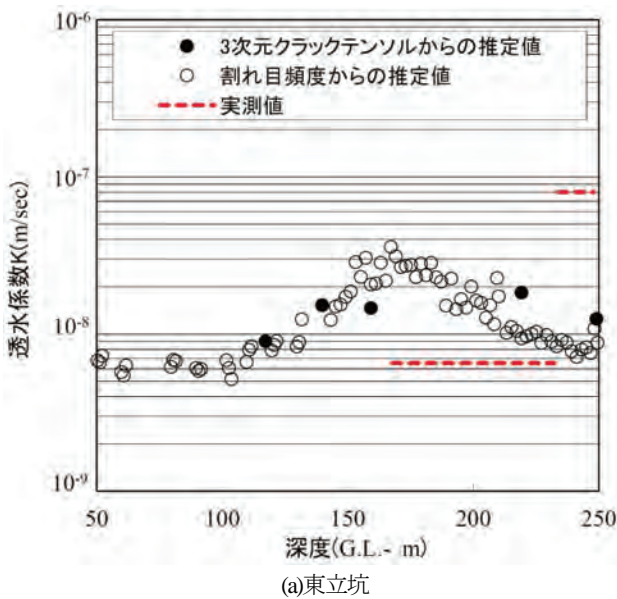
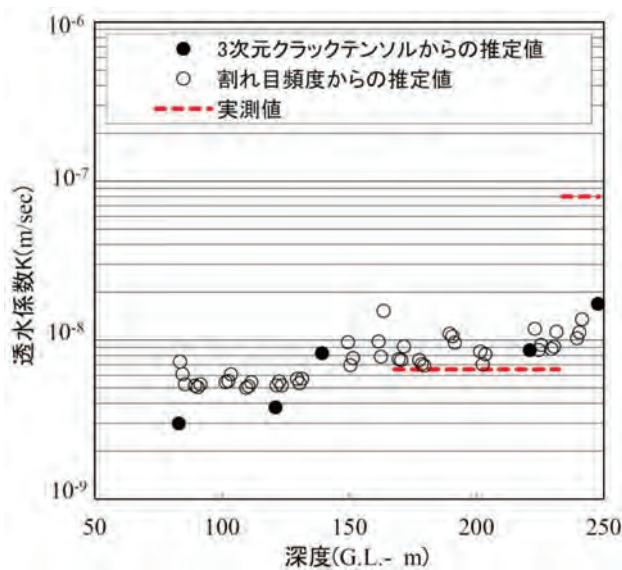


図-3 割れ目頻度の深度分布³⁾



(a)東立坑



(b)換気立坑

図-4 岩盤透水係数の深度分布³⁾

図-4には、推定した岩盤透水係数と原位置の平均岩盤透水係数の実測値を示している。●は3次元透水テンソルより求めた岩盤透水係数の推定値を示し、○は図-3にプロットした割れ目頻度より式(5)の予測式を用いて求めた岩盤透水係数の推定値である。同図より、割れ目頻度から推定した岩盤透水係数の推定値は、深度 50m～160m の岩盤透水係数の推定値は 10^9 m/sec オーダー、深度 160m～250m では 10^8 m/sec オーダーである。なお、 3 m^2 を超える割れ目頻度は、予測式を外挿して岩盤透水係数を推定している³⁾。

図-2の湧水処理工選定フローによると、深度50m～250mにおいて透水係数推定値 10^8 m/sec 以下の区間は計画した裏面排水材を設置することで問題はないものの、 10^8 m/sec を超える東立坑深度 150m～200m 区間では追加の裏面排水材の設置を検討が必要であったが、実施では計画していた裏面排水材を設置していることから、定期的に湧水量の変化に監視していく必要があることを示唆している。

今後、図-2の湧水処理工選定フローを運用するためには、幌延地点のような研究施設では1サイクル2m当たり150分と人力によるクラックの情報を含めた観察時間を取っている¹⁰⁾。そして、抽出したクラックの情報についてCADによる電子化については1サイクル2m当たり2日程度かかっており、岩盤透水係数の把握には時間が掛かり、覆工の施工サイクルの中での反映が難しい現状である。このことから、画像処理技術²⁰⁾を活用すると観察時間を短縮できるとともに、クラックの情報を効率的に抽出できるため、迅速な岩盤透水係数の把握に役立てられる。

また、岩盤クラックのクラック幅については、実際には取得していない。今後は、画像処理技術により坑壁岩盤クラックの情報の効率的な抽出に応用できれば、岩盤クラックの情報から割れ目頻度を算出し、予測式による岩盤の透水係数の推定に役立てられる。

4. 立坑の覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案

(1) 覆工の劣化に関するクラックテンソル

立坑掘削における坑壁地質観察で得られたクラック(以降、岩盤クラックと呼ぶ)と覆工に現れたクラック(以降、覆工クラックと呼ぶ)に関する情報(長さ、方向、開口幅)を用いて2次元クラックテンソル F_{ij} ならびに覆工の劣化に関するクラックテンソル S_{ij} を算定する手順は以下の通りである。

供用中のトンネルの変状状態のうち覆工のクラックについて、クラックの進展と劣化の進行は等価であると考

えると、クラックの進展状況を定量的に捉えることは可能である。

図-5に示す覆工表面に現れる k 番目の覆工クラックは、長さ $l^{(k)}$ 、開口幅 $t^{(k)}$ 、 $n_i^{(k)}$ が X_i 軸 ($i=1,2$) となす角度 $\theta^{(k)}$ の情報が得られる。2次元領域 (対象領域 $A(m^2)$) のクラックの分布における覆工の劣化に関するクラックテンソル S_{ij} は、加算形で式(6)のように定義される^{4,5)}。

$$S_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (6)$$

覆工の劣化に関するクラックテンソル S_{ij} の各成分は式(7a)～式(7c)に表し、覆工の劣化度を表す覆工の劣化に関するクラックテンソル第一不変量 S_0 は式(7d)に表わす。単位は無次元である。

$$S_{11} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \cos^2 \theta^{(k)} \quad (7a)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \quad (7b)$$

$$S_{22} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \sin^2 \theta^{(k)} \quad (7c)$$

$$S_0 = S_{11} + S_{22} \quad (7d)$$

(2) クラックテンソル算定に用いる岩盤坑壁分割

立坑掘削後の坑壁に発生するクラックについて、2(3)節で述べたように初期地圧の最大主応力が東西方向に卓越する岩盤であることを考慮し、図-5に示すように最大主応力と最小主応力の方向別に領域A～Dの4方向に分割し、各領域についてクラックテンソルを算定した^{4,5)}。

(3) クラックテンソル覆工劣化状態の予測手法

立坑施工時のトンネル坑壁のクラックの情報より、著者ら^{4,5)}が提案した式(8a)～式(8c)に示す覆工の劣化状態の予測式を用いて、覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を求める。その結果に覆工ひび割れの判定基準と覆工の劣化の進行性を総合的に評価して、覆工劣化箇所の補修・補強の必要性を判断する。

ここで、覆工クラックの発生については、岩盤クラックテンソル F_0 や地山被りや岩盤強度が覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 に影響を与えたと考え、覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を目的変数、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 、対象深度の地山被り、ならびに岩盤の一軸圧縮強さを説明変数として、重回帰分析を実施し、得られた予測式である。

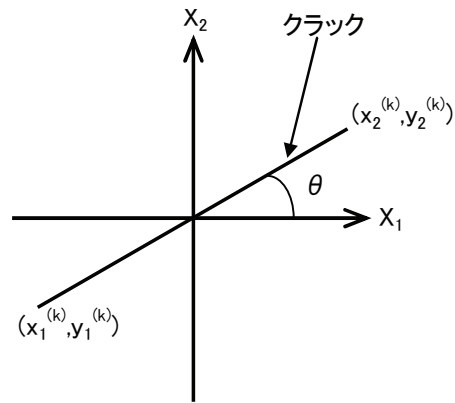


図-5 クラックの定義^{4,5)}

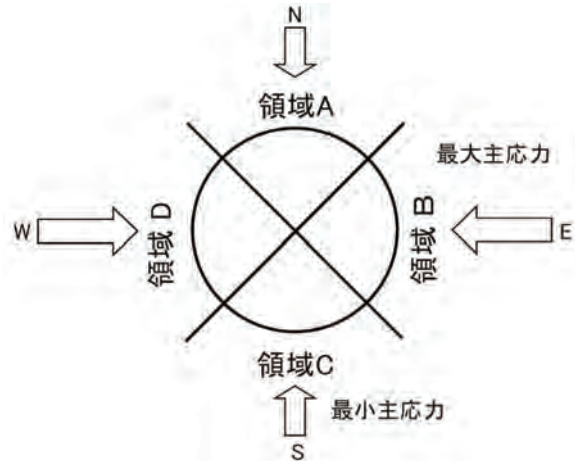


図-6 岩盤坑壁分割の模式図^{4,5)}

また、予測式については、覆工にクラックが発生している断面を対象として重回帰分析を行ったことから、クラックが発生している領域Bと領域Dについて示しており、領域Aと領域Cについては、覆工クラック有りのデータが2～3個と少なく推定式が得られないため対象外とした。

$$\log f_B = -5.953 + 0.040g + 0.121h + 0.075i - 0.148j - 0.004k + 0.002l \quad (8a)$$

$$\log f_D = -3.458 - 0.437g + 0.322h - 0.200i + 0.100j - 0.003k + 0.005l \quad (8b)$$

$$\log f = \log((10^{\log f_B} + 10^{\log f_D}) / 4) \quad (8c)$$

ここに、 f_B : 領域 B における覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 、 f_D : 領域 D における覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 、 f : 覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 、 g : 領域 A の岩盤クラックテンソル F_0 、 h : 領域 B の岩盤クラックテンソル F_0 、 i : 領域 C の岩盤クラックテンソル F_0 、 j : 領域 D の岩盤クラックテンソル F_0 、 k : 対象区間の地山被り (m)、 l : 対象区間の岩盤一軸圧縮強さ (MPa)

式(8a)～式(8c)に示す覆工の劣化状態の予測式の適用に

あたっては、説明変数のうち岩盤強度については当該地点に限定されるものの、予測式の設定の考え方は、当該地点に限定されるものではない。例えば、幌延深地層研究センター以外の立坑施工時に覆工コンクリートに発生するクラック（覆工の劣化に関するクラックテンソル）を推定する場合、岩盤クラックテンソルは岩盤壁面観察より、地山被りは対象地点の土被りより、一軸圧縮強さは岩盤壁面を利用した簡易原位置試験より取得可能であることから、これらのパラメータは取得可能であるため他の立坑建設現場でも適用が可能であり、一般化できる。また、幌延深地層研究センターでは、初期地圧の方位依存性が認められているため、初期地圧の卓越方向を考慮した2つの推定式を提案したが、偏圧等がみられない現場では1つの式で覆工コンクリートに発生するクラック（覆工劣化に関するクラックテンソル）が推定できる。

覆工に発生したクラックの定量的評価手段として、岩盤のクラックテンソルの考えをもとに提案された覆工ひび割れ指数 TCI（トンネルクラックインデックス）を用いた。TCIの基礎式を式(9)に示す²¹⁾。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (l^{(k)})(l^{(k)}) \cos \theta_i^{(k)} \sin \theta_j^{(k)} \quad (9)$$

ここに、 A ：覆工コンクリートの面積(m²)、 n ：ひび割れの本数、 $l^{(k)}$ ：ひび割れ k の長さ(m)、 $l^{(k)}$ ：ひび割れ k の幅(m)、 $\theta_i^{(k)}$ ：ひび割れ k の法線ベクトルが X_1 軸となす角度、 $\theta_j^{(k)}$ ：ひび割れ k の法線ベクトルが X_2 軸となす角度

覆工ひび割れ指数 TCI の F_{ij} と覆工の劣化に関するクラックテンソル S_{ij} はクラックの長さで表される成分とクラックの開口幅の積で表されるため、等価である。両者の違いは、図-5に示すクラックの方向の取り方について、覆工ひび割れ指数 TCI の F_{ij} は X_1 軸からの角度と X_2 軸からの角度を用いているのに対して、覆工の劣化に関するクラックテンソル S_{ij} は X_1 軸からの角度のみを用いていることである。

覆工ひび割れ指数 TCI の F_0 と覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 はクラックの長さで表される成分とクラックの開口幅の積で表されるため、等価である。このことから、既往研究の結果²¹⁾を参考にして、覆工ひび割れ指数 TCI と覆工のひび割れに対する判定区分²²⁾（以降、判定区分と称す）との関連性を整理した。分析対象トンネルは過去2回以上の点検記録がある計13本のトンネル、総数1002スパンである。内訳は、山口県が管理するトンネルが11本、福岡県が管理するトンネルが2本である。この点検記録のクラックデータを用いて覆工ひび割れ指数 TCI を求めている²³⁾。

表-1に示す覆工のひび割れに対する判定区分と覆工ひ

び割れ指数 TCI の各判定区分の95%信頼下限値を求めた。表-2に示す各ひび割れ判定区分の TCI 値の95%信頼下限値を用いて、幌延深地層研究センターの地下施設の東立坑と換気立坑の覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を覆工ひび割れの判定基準に基づき評価した。

東立坑と換気立坑の覆工劣化状態の判定結果を図-7に示す。同図には、深度10m区間の覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を示している。●は式(8a)～式(8c)により求めた覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 の推定値、○は覆工クラックの情報（長さ、方向、開口幅）により算出した覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 の計測値を示している。東立坑において推定値は対数値で-5.5～-4.4 ($3.4 \times 10^6 \sim 3.7 \times 10^5$) の範囲で、計測値は対数値で-6.6～-4.5 ($2.5 \times 10^7 \sim 3.4 \times 10^5$) の範囲で推移している。換気立坑において推定値は対数値で-5.4～-4.3 ($3.7 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^5$) の範囲で、計測値は対数値で-6.5～-4.7 ($2.9 \times 10^7 \sim 2.0 \times 10^5$) の範囲で推移している。推定値と計測値は良く一致しているが、一部の区間で領域Bまたは領域Dにクラックが発生していないため区間として計測値が推定値と比べて小さくなっている。

そして、図-7には各ひび割れ判定区分(I～III)に対応する覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を示している。推定値と計測値については判定区分 I～II_b であり、「ひび割れが軽微」または「ひび割れがあり、監視を必要とする状態」であることから、今後のクラックの進行性の有無を把握するため、定期的な監視を行う必要があると評価される。また、判定基準で用いた13本のトンネルのクラックのデータは施工後平均約34年経過して取得したデータであり、当該地点は覆工施工後1ヶ月程度経過して取得したデータであることから、判定区分 I～II_b として評価している。

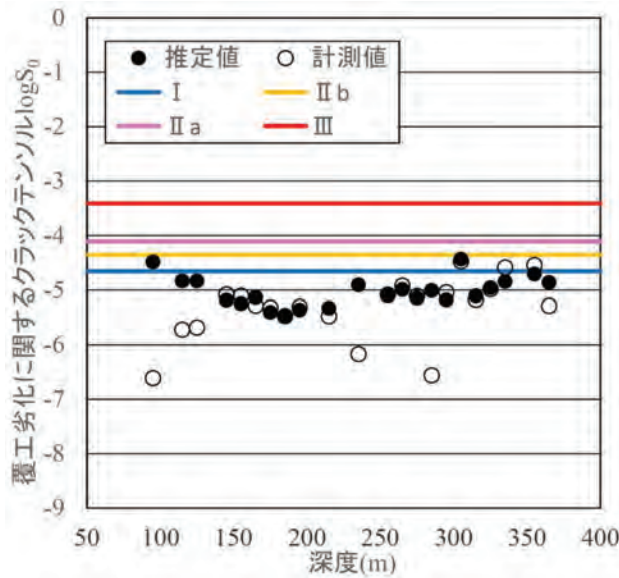
図-8に覆工の劣化状態による立坑施工時における支保選定のフローと立坑施工後の維持管理フローを示す。図-8(a)は、立坑施工時において、坑壁地質観察時に抽出したクラックの情報と原位置試験（エコーチップ反発硬度）の結果より近似式²⁴⁾より求めた岩盤強度を用いて、山崎ら⁴⁹⁾が提案した予測式による覆工の劣化状態を推定し、

表-1 ひび割れに対する判定区分²²⁾

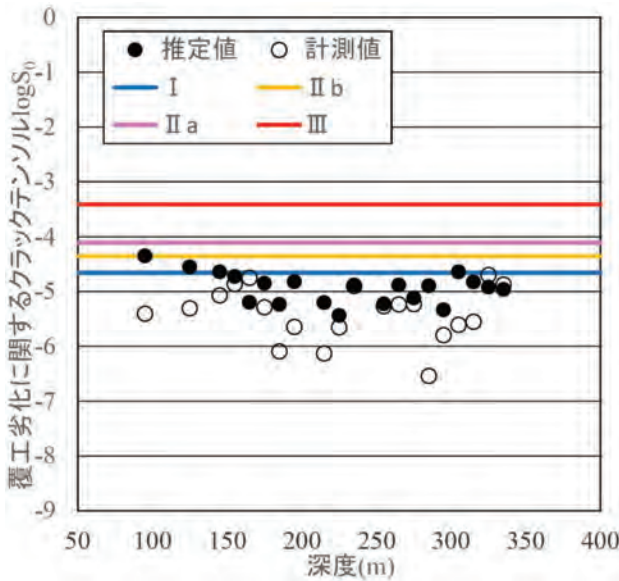
判定区分	変状の状態
I	ひび割れが生じてない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
II	II b ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	II a ひび割れがあり、進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に対策を講じる必要がある状態
IV	ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2 ひび割れ判定区分と TCI の比較

ひび割れ判定区分	データ数 (個)	平均値 ($\times 10^5$)	平均値 ($\times 10^5$)	95%信頼下限値 ($\times 10^5$)
I	748	2.3	3.7	2.2
II _b	229	4.9	7.7	4.4
II _a	14	10.1	8.6	7.8
III	11	44.8	19.7	38.8



(a)東立坑



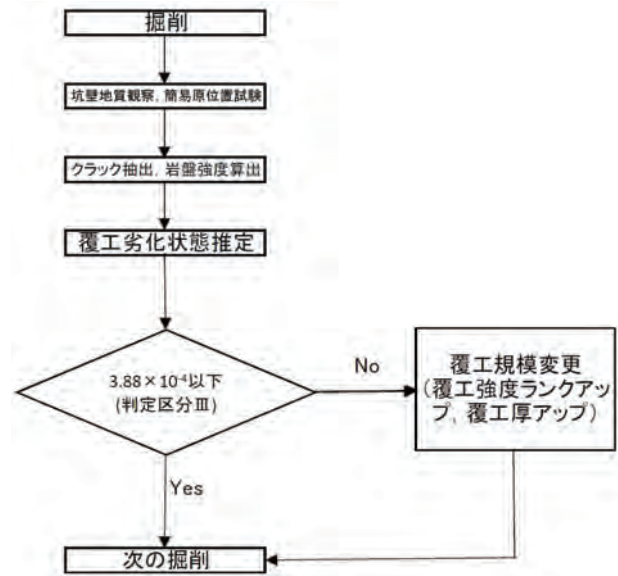
(b)換気立坑

図-7 覆工劣化度の判定結果

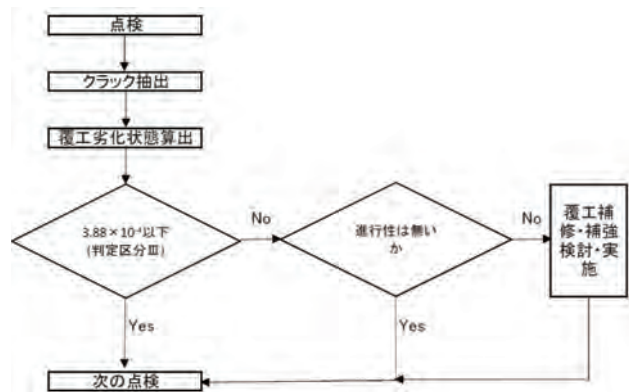
推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 がひび割れ判定 III ($=38.8 \times 10^5$) 以下であれば、当初設計した覆工を施工して次の掘削に進むが、ひび割れ判定 III を超えると覆工強度のランクアップや覆工厚さの増加のように覆工の規模を変更して、覆工を施工して次の掘削に進むというフローを示している。図-7の覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 の判定区分は I~II_b であることから、

計画した支保は妥当であると評価される。図-8(b)は、立坑施工後において、覆工表面により抽出したクラックの情報より、覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を算出する。その結果、ひび割れ判定 III ($=38.8 \times 10^5$) 以下であれば、何も対策を行わずに次の点検に進む。そして、ひび割れ判定 III を超えて、進行性が無ければ何も対策を行わないが、進行性がある場合は、補強工法や補修工法を検討し、実施することで適切な維持管理を行うというフローを示している。

今後、図-8(a)のフローを運用していくためには、3(2)節で示したように幌延地点のような研究施設では1サイクル 2m 当たり 150 分と人力によるクラックの情報を含めた観察時間を取っている¹⁶⁾。そして、抽出したクラックの情報について CAD による電子化については1サイクル 2m 当たり 2 日程度かかっており、覆工の劣化状態の把握には時間が掛かり、覆工の施工サイクルの中での反映が難しい現状である。このことから、画像処理技術²⁰⁾を活用すると観察時間を短縮できるとともに、クラック



(a)立坑施工時



(b)立坑施工後

図-8 覆工劣化状態による支保選定と維持管理フロー

クの情報を実率的に抽出できるため、迅速な覆工の劣化状態の把握に役立てられる。

また、図-8(b)のフローを運用していくためには、定期的な点検（例えば、1年毎）を実施し、劣化状態の進行性の有無を確認していく必要があると考える。また、点検にあたっては、立坑を対象としているため、覆工の近くまで目視で計測できないことから、ドローン等を用いた写真撮影により、画像処理技術²⁰⁾を活用して抽出したクラックの情報から覆工の劣化に関するクラックテンソル S_0 を算出することにより、進行性の有無の判断に役立てられる。

5. 結論

幌延深地層研究所地下施設の立坑を対象として、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の推定手法の運用に関する提案について得られた知見は以下のとおり。

- (1) 立坑施工時において、坑壁クラック観察から抽出した岩盤クラックの情報を用いて、予測式により推定した岩盤透水係数に応じた湧水処理工の選定のフローによると、透水係数推定値 10^{-8}m/sec 以下の区間は計画した裏面排水材を設置することで問題はないものの、 10^{-8}m/sec を超える東立坑深度 150m~200m 区間では追加の裏面排水材の設置を検討が必要であったが、実施では計画していた裏面排水材を設置していることから、定期的に湧水量の変化に監視していく必要があることを示唆している。
- (2) 覆工の劣化に関するクラックテンソルを覆工ひび割れの判定基準の各判定区分に対応する覆工の劣化に関するクラックテンソルを設定した。立坑施工時における岩盤の情報（クラック、強度）から予測式を用いて推定した覆工の劣化に関するクラックテンソルによる支保選定の判断のフローにより、計画した支保は妥当であると評価できる。また、立坑施工後の覆工クラックに関する情報から算出した覆工の劣化に関するクラックテンソルによる補修・補強時期の判断のフローにより、補修・補強に至る劣化状態ではないものの、定期的な監視が必要と評価できる。
- (3) 今後、立坑施工時の坑壁クラック観察については、写真等により坑壁を撮影して、画像認識技術を活用して実率的にクラックの情報を抽出することにより、迅速な岩盤透水係数や覆工劣化状態の予測に役立てられる。また、立坑施工後の覆工クラックについては、立坑を対象としているため、直接目視にて確認できないことから、ドローン等により覆工表面を撮

影し、画像処理技術にてクラックの情報を抽出することにより、迅速な覆工劣化状態の予測に役立てられる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画，平成 12 年度調査研究成果報告，JNCTN1400 2001-008，2001。
- 2) 藤田朝雄，青柳和平，名合牧人：情報化施工による大深度立坑掘削の中間評価—幌延深地層研究計画地下研究施設整備（第Ⅱ期）事業一，トンネルと地下，Vol.46，No.7，pp.481-489，2015。
- 3) 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，Vol.71，No.1，pp.1-10，2015。
- 4) 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，第 25 回地下空間シンポジウム講演論文・報告集，土木学会【査読付き論文】，pp.7-17，2020。
- 5) M.YAMASAKI, T.TOTANI, K.ISHIYAMA, H.HAYASHI and M.SHINJI: Suggestion of estimation method of the deterioration degree on lining for Shaft, *ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 47th General Assembly Bella Center, Copenhagen 2-8 September 2022*.
- 6) 熊谷恭人，舟木泰智，山崎雅直，山口雄大，尾留川剛，真田祐幸，阿部寛信：平成 18 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2007-025，2007。
- 7) 山崎雅直，舟木泰智，山口雄大，新沼寛明，藤川大輔，真田祐幸，平賀正人，津坂仁和：平成 19 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2008-023，2008。
- 8) 佐野満昭，石井英一，新沼寛明，藤川大輔，真田祐幸，平賀正人，津坂仁和，山崎雅直：平成 20 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2009-015，2009。
- 9) 稲垣大介，石井英一，新沼寛明，真田祐幸，津坂仁和，佐野満昭，澤田純之：平成 21 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2010-027，2010。
- 10) 稲垣大介，澤田純之，常盤哲也，津坂仁和，天野由紀，新沼寛明：平成 22 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2012-019，2012。
- 11) 稲垣大介，常盤哲也，村上裕晃：平成 23 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2012-029，2013。
- 12) 稲垣大介：平成 24 年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2013-022，2014。
- 13) 森岡宏之，尾留川剛，村川史朗，菅原健太郎，小林隆志：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計，土木学会，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集（CD-ROM），pp.69-74，2006。
- 14) 尾留川剛，森岡宏之，山上光憲，村川史朗：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の概要と支保設計，電力土木技

- 術協会, 電力土木, 平成 18 年 7 月号, pp.82-86, 2006.
- 15) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一: 幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-6, 7, 8 孔) のうち HDB-6 孔, JNC TJ54002005-004, 2005.
- 16) 山崎雅直, 関谷美智, 藤川大輔, 北川義人: 幌延深地層研究計画における立坑工事の施工実績とサイクルタイム分析, 第 14 回地下空間シンポジウム講演論文・報告集, pp. 191-196, 2008.
- 17) Oda, M.: Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 96-108, 1982.
- 18) Oda, M.: A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behaviour of cracked rock masses, *Mechanics of Materials*, Vol. 2, pp. 163-172, 1983.
- 19) 津坂仁和, 稲垣大介, 名合牧人, 松原誠 堆積軟岩における大深度立坑掘削に伴う壁面崩落現象, 土木学会, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 回, pp.155-162, 2011.
- 20) 宇津木慎司, 中谷匡志, 鶴田亮介, 野村貴律: AI を活用したトンネル切羽地質状況自動評価システムの構築および施工現場への適用, 土木学会, トンネル工学報告集, 第 27 卷, I-25, pp. 1-7, 2017.
- 21) 重田佳幸, 飛田敏行, 亀村勝美, 進士正人, 吉武勇, 中川浩二: ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 4, pp. 628-632, 2006.
- 22) 公益社団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧 [本体工編] 令和 2 年度, 2020.
- 23) 桑田大輝, 林久資, 進士正人: トンネル覆工健全性評価の定量化に向けた覆工ひび割れ指数 TCI と技術者判定の比較, 第 72 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, VI-5, pp.388-390, 2020.
- 24) 津坂仁和: 堆積軟岩における立坑掘削の内空変位計測に基づく岩盤挙動分類の提案, 土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 1, pp. 181-192, 2010.

PROPOSAL FOR OPERATION OF ROCK HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND LINING DETERIORATED CONDITION PREDICTION METHOD IN SHAFTS CONSTRUCTION

Masanao YAMASAKI, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

Based on the results of previous research by the authors using the records of the Horonobe Underground Research Center of JAEA during the shafts construction, the rock hydraulic conductivity during the shafts construction and the deteriorated condition of the lining after the shafts construction We proposed a prediction method and its operation.

Measures against spring water based on the rock hydraulic conductivity estimated from the rock crack information using the prediction formula of the rock hydraulic conductivity based on the rock hydraulic conductivity estimated by applying the crack tensor theory and the concept of stereology from the rock crack information. A crack tensor for lining deteriorated condition corresponding to each evaluation category of lining selection judgment and lining crack judgment criteria is set, and support by crack tensor for lining deteriorated condition estimated from rock information (cracks, strength). It can be expected to contribute to the control of maintenance costs by making selections and determining the timing of repairs and reinforcements.