

立坑施工における覆工透水係数推定方法の提案

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: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

本研究は、北海道幌延町において(国研)日本原子力研究開発機構が建設した地下研究施設の立坑掘削時の記録を用いて、覆工クラックの進展と透水係数が等価であると仮定して、クラックに関する情報を用いて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透水係数を推定する手法を提案した。その結果、立坑掘削に伴う坑壁地質観察で得られた岩盤坑壁クラックと覆工コンクリートのクラックの相関分析結果より、覆工に発生したクラックの分布は、初期地圧の最大主応力が卓越する岩盤におけるクラックの幾何学的特性や岩盤強度のばらつきの影響を受けていることを明らかにした。

Key Words: initial rock pressure, anisotropy, permeability conductivity of lining, cracks of excavated rock wall, crack tensor method

1. 序論

鉄道や道路等のトンネルが果たすべき機能は、安全な空間を確保することであり、供用期間中の維持管理ができることである。しかし、供用中のトンネルの変状に伴う影響が懸念されている。

トンネル覆工の代表的な変状として、クラック、湧水、変位・変形、剥離・剥落などが挙げられる。特に、覆工に発生したクラックに関する情報は、トンネルの健全度を判定する目安として非常に重要視されている¹⁾。その健全度評価基準は、維持管理を行う各機関で定められているが、トンネルの劣化状態を定量的かつ客観的に評価することは難しく、技術者の経験的な判断によるところが大きいことから、定量的かつ客観的に評価する様々な維持管理手法の検討がなされている。

こうした中で、トンネル掘削時に発生する岩盤クラックと覆工コンクリートに発生するクラックについて関連性を評価できれば、覆工コンクリートのクラック発生が予想される箇所においてトンネル掘削時の坑壁のクラックの記録から適切な対策を施すことによって覆工コンクリート表面のクラック発生の抑制に寄与できると考えられる。

山崎ら²⁾は、北海道幌延町において(国研)日本原子力研究開発機構が建設中の地下研究施設の立坑掘削時の記録を用いて、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。

そして、この研究を発展するために、覆工コンクリートの透水性については、覆工コンクリートのクラックを抑制することにより、覆工コンクリートのクラックからの漏水の抑制に寄与できると考えられる。

本論文では、コンクリート覆工の透水テンソルの考え方について述べ、立坑掘削や支保設置における各種調査データにより、岩盤坑壁クラックと覆工クラックの相関関係についてクラックテンソル理論を適用して定量的に分析し、初期地圧が異方性を伴う岩盤であることを考慮して、岩盤坑壁クラックテンソルから覆工の透水テンソルを推定する手法を提案した。さらに、提案した推定手法を他の立坑に適用し、等価な覆工の透水テンソルの推定精度を評価した。

2. 覆工の透水テンソルの考え方

(1) クラックテンソル理論の概要

クラックテンソルは、岩盤中の割れ目群の幾何学的特性をテンソル量で表したものである。2次元領域のクラックの分布における2階のクラックテンソル F_{ij} は、加算形で式(1)のように定義される^{3,4,5)}。なお、割れ目やヘアークラックのような不連続面を、その地質学的な起源に関わり無く、ここでは、クラックと呼ぶ。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (1)$$

ここに、 m は対象範囲の面積 A (m^2)中に含まれているクラックの本数である。 k 番目のクラック長さ $l^{(k)}$ において、 $n_i^{(k)}$ が X_i 軸($i=1,2$)となす角度を $\theta^{(k)}$ とすると、その成分(n_1, n_2)はそれぞれ($\cos \theta^{(k)}, \sin \theta^{(k)}$)と表わせる。 F_{ij} の各成分は式(2a)～式(2c)に表し、クラックの密度を表すクラックテンソル第一不変量 F_0 は式(2d)に表わす。単位は無次元である。

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

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \quad (2b)$$

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

$$F_0 = F_{11} + F_{22} \quad (2d)$$

(2) 覆工の透水テンソルの概要

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、クラックの進展と覆工の透水性の進行は等価であると考え、覆工の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。

クラックテンソルの考え方をいれれば、覆工の透水性を定量的に表すことができる。 k 番目の覆工クラックは、長さ $l^{(k)}$ 、開口幅 $b^{(k)}$ 、 $n_i^{(k)}$ が X_i 軸($i=1,2$)となす角度 $\theta^{(k)}$ の情報得られる。2次元領域のクラックの分布における覆工クラックの透水性に関する2階のクラックテンソル P_{ij} は、加算形で式(3)のように定義される。

$$P_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} (t^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3)$$

P_{ij} の各成分は式(4a)～式(4c)に表し、覆工の透水性を表すクラックテンソル第一不変量 P_0 は式(4d)に表わす。単位は2次元である。

$$P_{11} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} (t^{(k)})^3 \cos^2 \theta^{(k)} \quad (4a)$$

$$P_{12} = P_{21} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} (t^{(k)})^3 \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \quad (4b)$$

$$P_{22} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} (t^{(k)})^3 \sin^2 \theta^{(k)} \quad (4c)$$

$$P_0 = P_{11} + P_{22} \quad (4d)$$

覆工に発生したクラックは貫通しているものと仮定し、また、覆工背面には全水頭 h に導水勾配 I が発生していると仮定すると、水に流れが生じ、その平均流速(ダルシー流速) v は透水テンソルを用いて式(5)のように表される。

$$v_i = -\frac{g}{\nu} k_{ij} J_j \quad (5)$$

ここで、 g ：重力加速度(m/sec^2)、 ν ：動粘性係数(sec/m^2)、 k_{ij} は透水テンソル(m^2)で、クラックの分布によって決まる2階の対称テンソルである。水の流れは以下の仮定を満足するものとする。

- 1) 水はクラックに沿ってのみ流れる。
- 2) クラックは2枚の平行板として近似し、水の流れは平行平板間の層流とする。
- 3) 水頭の分布は十分なクラック密度のもとで一様とする。

このクラックテンソル P_{ij} から透水テンソル k_{ij} は式(6)で表わされる。

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_0 \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (6)$$

ここに、 P_0 はクラックテンソル P_{ij} の第一不変量($P_0=P_{11}+P_{22}$)である。 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。また、 λ はクラックの連続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、クラックが覆工コンクリート内を完全に貫通している場合は1に等しく、クラックが完全に貫通していない場合は0に等しくなる。ここでは、クラックが完全に貫通しているとして $\lambda=1$ と仮定し、透水テンソル k_{ij} (m^2)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(7)により計算した。重力加速度 g を 9.81m/sec^2 、水の動粘性係数 ν を $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ (水温 20°C)とした。

$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (7)$$

3. 覆工の透水テンソルの適用例

(1) 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、水平坑道が三心円馬蹄形である。

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⁶⁾。

2) 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。掘削方式について、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。一例として東立坑の施工フローを図-1 に示す⁸⁾。同図には、(a)掘削～(b)掘削土搬出～(c)コンクリート打設までの手順を示している。スcaffolding はジャッキにより固定されている。

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、立坑の施工手順は大きく分けて以下の3つの段階について、2m を1サイクルとして繰り返し行われる⁹⁾。

- 底盤から 1m の部分まで支保が構築された状態から、1m 盤下げ掘削した後、鋼製支保工とロックボルトを建て込む。
- 同様に、1m 盤下げ掘削して、鋼製支保工とロックボルトの支保工を建て込む。
- 底盤から 1m を残して設計巻厚 400mm の覆工コンクリートを構築する。

(2) クラックテンソルの算定

1) クラックテンソル算定手順

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} ならびに覆工の透水テンソル K_{ij} を算定する手順は以下の通り

である。

- 岩盤クラックと覆工クラックの分析対象は、東立坑深度 50～380m と換気立坑深度 50～350m を対象として、地下施設計測データ集のうち岩盤壁面クラック調査結果、覆工クラック調査結果を使用した^{10), 11), 12), 13), 14), 15), 16)}。ただし、接続部区間は立坑と水平坑道と交差している区間であり、覆工背面の応力状態が複雑であることを考慮して対象外とした。
- 岩盤クラックについては引張とせん断と断層角礫の掘削直後に発生した初生的な成因に伴うクラック(以降、初生クラックと呼ぶ)を対象とした。ここで、断層角礫はクラックの充填物であり、断層活動によって岩石が破壊されて生じた角礫岩である。覆工クラックについては、スcaffolding (図-1) を固定するジャッキ反力により発生したクラックは対象外とした。
- クラックテンソル算定領域は、設計掘削径(東立坑 7.3m, 換気立坑 5.3m)と同程度であることを考慮して、深度方向 10m 区間を1ブロックとし、東立坑深度 50～380m と換気立坑深度 50～350m を深度方向 10m 毎に分割して、各ブロックについてクラックテンソルや透水テンソルを算定した。
- 対象領域において確認できる各クラックの CAD 座標(始点と終点)を入力する。始点と終点の座標

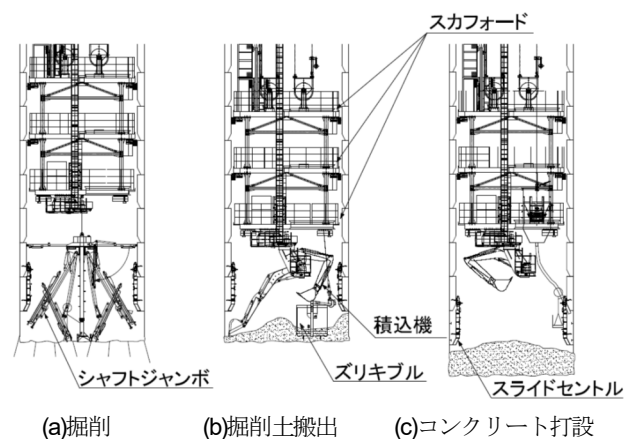


図-1 東立坑施工フロー⁸⁾

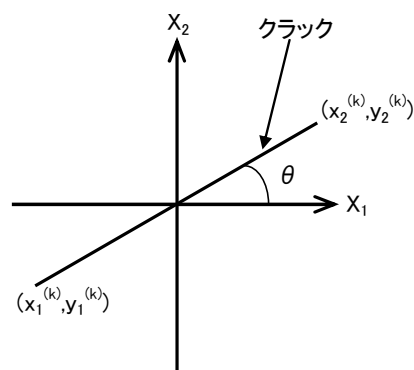


図-2 クラックの定義²⁾

値より、クラックの長さを算出する。

- e) 図-2に示すようにクラックの X_1 軸から角度 θ を定義し、各クラックの始点座標を $(x_1^{(k)}, y_1^{(k)})$ 、終点座標 $(x_2^{(k)}, y_2^{(k)})$ に対して、式(8)より角度 $\theta^{(k)}$ を算出する。

$$\theta^{(k)} = \tan^{-1} \frac{x_2^{(k)} - x_1^{(k)}}{y_2^{(k)} - y_1^{(k)}} \quad (8)$$

- f) 式(2a)～式(2d)より岩盤クラックのクラックテンソル F_{ij} を算出し、式(4a)～式(4d)、式(6)～式(7)より覆工クラックの透水テンソル K_{ij} を算出する。

2) クラックテンソル算定に用いる岩盤坑壁分割図

立坑掘削後の坑壁に発生するクラックについて、初期地圧の最大主応力が東西方向に卓越する岩盤^{5,6)}であることを考慮して、図-3に示すように最大主応力と最小主応力の方向別に領域①～④の4方向に分割し、各領域について岩盤クラックテンソル F_0 を算定した²⁾。

3) クラックテンソル算定に用いる岩盤クラック

クラックテンソル算出に用いる立坑掘削における坑壁地質観察で得られたクラックに関する情報（長さ、方向）のうち、一例として深度 300m～330m の展開図を図-4に示しており、上段には方角を示している。岩盤クラックの種類について、赤色は断層角礫を、青色は引張ならびにせん断系クラックを示している。同図より、比較的高角の引張、せん断、断層角礫が確認されている。また、同図において、深度 300m～316m と深度 322m～330m については初生的な成因のクラックが多く、深度 316m～322m については初生的な成因のクラックが少ない²⁾。

4) クラックテンソル算定に用いる覆工クラック

クラックテンソル算出に用いる覆工コンクリート施工後、覆工には圧縮クラック（圧ざ）は確認されていないが、東西方向を中心に引張クラックの発生が確認されている。図-5にはクラックに関する情報（長さ、方向、開

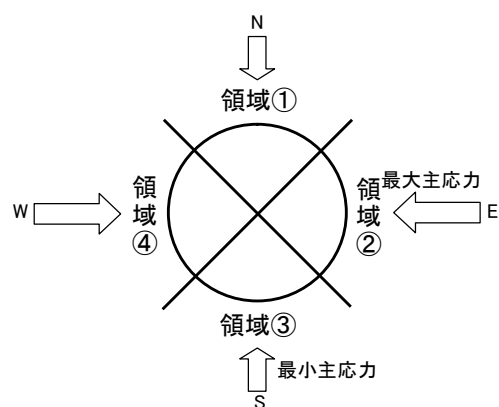


図-3 岩盤坑壁分割の模式図²⁾

口幅)のうち、一例として、東立坑深度 300～330m のクラックの展開図を示しており、上段には方角を示している。図中に示すクラック開口幅については、覆工コンクリート打設後、コンクリートが十分硬化した時点の測定

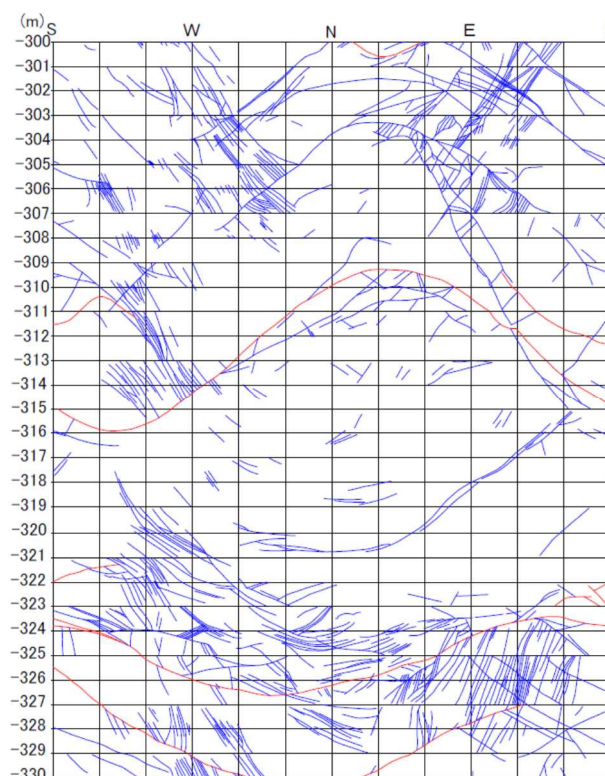


図-4 岩盤クラックマップの一例²⁾

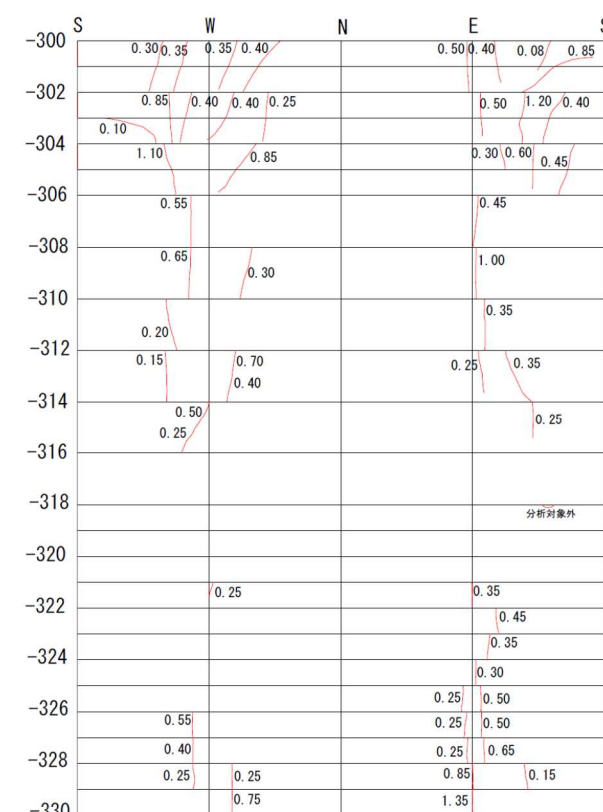


図-5 覆工クラックマップの一例²⁾

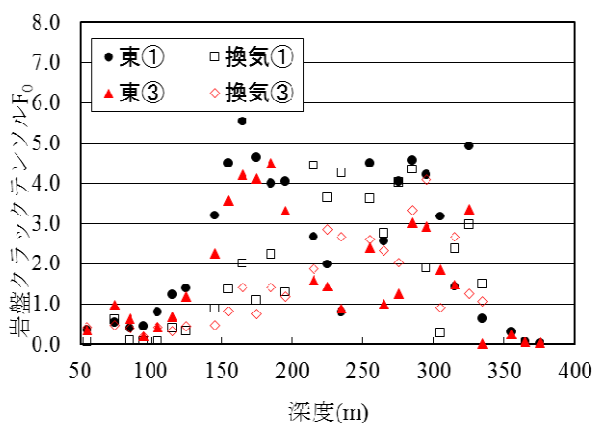
値を示している。同図の横線は覆工スパンを示しており、深度 300m～306m と深度 318m～330m については 1m 毎、深度 306m～318m については 2m 毎に覆工コンクリートを施工している。同図より、深度 300m～316m と深度 321m～330m においては、西方向と南東方向の覆工コンクリートにクラックが集中している。深度 300m～306m は東西方向に 5～8 本程度、深度 306m～316m と深度 321m～330m は 2～4 本程度で分布し、深度 316m～321m はクラックが発生していない²⁾。

図-4 と図-5 を比較すると、覆工クラックが発生している深度 300m～316m ならびに深度 321m～330m については、初生クラックが多く発生しているのに対して、覆工クラックが発生していない深度 316m～321m については、初生クラックの発生は少ない傾向にある²⁾。

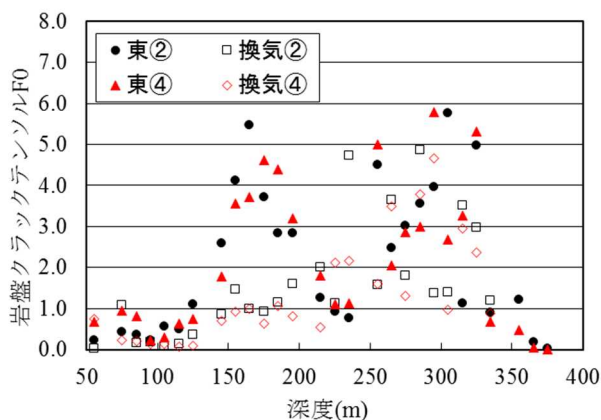
(3) 岩盤クラックテンソルと覆工透水テンソルの相関分析

1) 覆工透水テンソルの単回帰分析

岩盤クラックと覆工クラックについて、岩盤クラックテンソル F_0 と透水テンソル K_0 のデータを用いて岩盤クラックと覆工の透水係数の関連性について分析を行った。図-6(a)～(b)に各立坑の岩盤クラックテンソル F_0 の深度



(a) 領域①と領域③

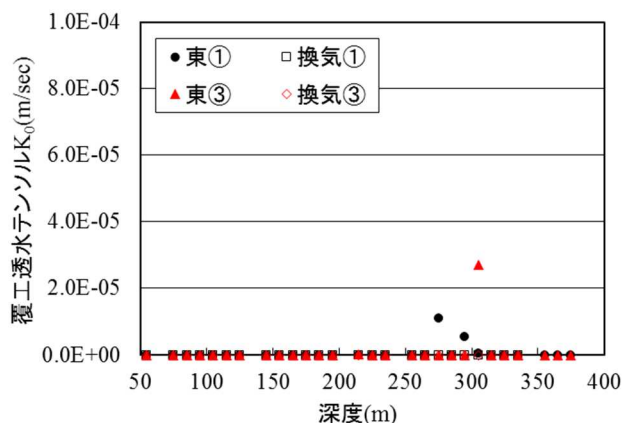


(b) 領域②と領域④

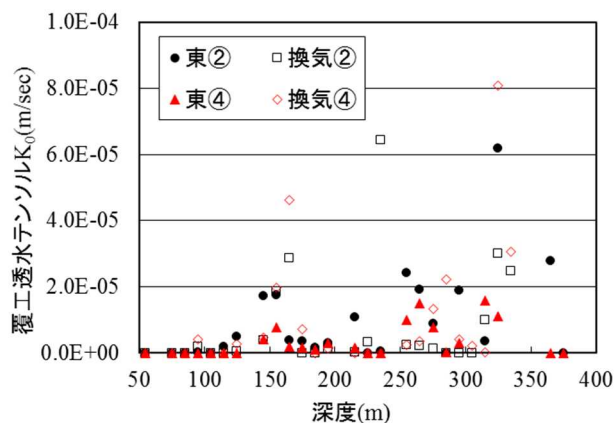
図-6 方向別の岩盤クラックテンソル F_0 の深度分布²⁾

分布を示す。図-3 に示す幌延地点の初期地圧の最大主応力の卓越方向を考慮し、東西方向である領域①と領域③、南北方向である領域②と領域④で区別して示している。

図-7(a)～(b)に各立坑の覆工の透水テンソル K_0 の深度分布を示す。同図の縦軸は対数で表示している。図-7(a)よ

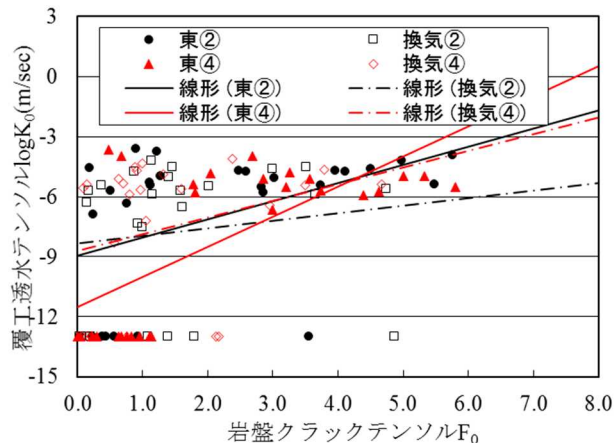


(a) 領域①と領域③



(b) 領域②と領域④

図-7 覆工透水テンソル K_0 の深度分布



立坑	相関式	相関係数
東②	$\log K_0 = 0.91F_0 - 8.96$	0.46
東④	$\log K_0 = 1.50F_0 - 11.5$	0.67
換気②	$\log K_0 = 0.38F_0 - 8.35$	0.15
換気④	$\log K_0 = 0.83F_0 - 8.70$	0.29

図-8 岩盤クラック F_0 と覆工透水テンソル $\log K_0$ の相関

り領域①と領域③では各立坑の一部区間を除いて概ね 4.0×10^{-13} m/sec で推移しており、図-7(b)より、各立坑の領域②と領域④について $4.0 \times 10^{-13} \sim 6.3 \times 10^{-5}$ m/sec の範囲で推移している。ここで、覆工にクラックが発生していないときの透水係数は既存の試験結果より 4.0×10^{-13} m/sec と仮定した¹⁷⁾。図-8 に各立坑の岩盤クラックテンソル F_0 と覆工の透水テンソル K_0 の相関を示す。併せて、各領域の相関式ならびに相関係数を示している。同図より単回帰分析では比例関係にあるが、相関係数が 0.15～0.67 の範囲であり、相関性が低い。

2) 覆工透水テンソルの重回帰分析

1)で述べたように岩盤クラックの密度と覆工クラックの透水性には比例関係にあるが相関性は低いことから、単回帰分析ではなく、重回帰分析を行った。

覆工クラックの発生については、初期地圧の最大主応力が東西方向に卓越していることから、覆工の透水テンソル K_0 に影響を与える要因について、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 との関連性に影響があると考えられるため、覆工の透水テンソル K_0 を目的変数、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 、対象深度の立坑深度、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た。

重回帰分析に使用したデータは東立坑を対象とし、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 は図-6(a)と図-6(b)とし、立坑深度は対象区間の中央値とした。また、津坂⁹⁾によると岩盤一軸圧縮強さについては、地下施設建設に先立ち、深層ボーリング孔より得られた岩石コアを用いたエコーチップ反発硬度と一軸圧縮強さには明瞭な相関が認められており、その関係を表す近似式を用いて、深度 50～380m で実施したエコーチップ反発硬度試験の結果から岩石の一軸圧縮強度を推定し、この結果を図-9に示す。同図より、横軸の深度は対象区間の平均値とした。

重回帰分析の結果、表-2(a)に示すように各領域の覆工の透水テンソル K_0 と各説明変数に対して、重相関係数は 0.55～0.81 が得られ、方向別の岩盤クラックテンソル、対象区間の立坑深度ならびに岩盤の一軸圧縮強さと推定した覆工の透水テンソルの相関式は、例えば、領域①においては式(9)と求められた。その他の領域について、各係数は表-2(b)に示すとおりである。推定した覆工の透水テンソル K_0 と初生的なクラックの方向別の岩盤クラックテンソル F_0 については、比較的高い相関係数が得られていることから、立坑掘削に伴う坑壁地質観察結果の方向別の岩盤クラックテンソル F_0 、対象区間の立坑深度ならびに対象区間の岩盤一軸圧縮強さから覆工の透水テンソル K_0 を予測できる可能性がある。

$$\log f = -14.549 + 0.808g - 0.022h - 1.659i + 1.052j - 0.019k + 0.609l \quad (9)$$

ここに、 f : 覆工の透水テンソル K_0 (m/sec)、 g : 領域①の岩盤クラックテンソル F_0 、 h : 領域②の岩盤クラックテンソル F_0 、 i : 領域③の岩盤クラックテンソル F_0 、 j : 領域④の岩盤クラックテンソル F_0 、 k : 対象区間の立坑深度(m)、 l : 対象区間の岩盤一軸圧縮強さ(MPa)

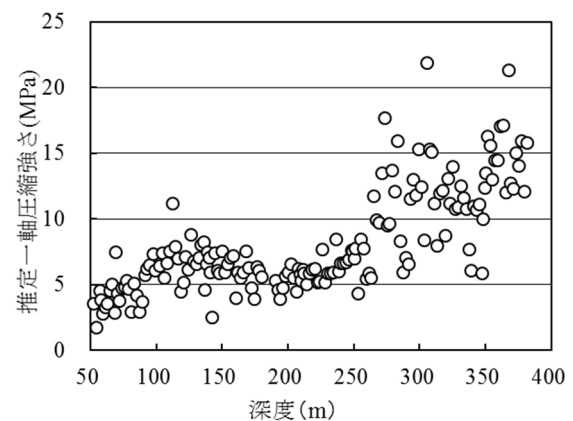


図-9 岩盤の推定一軸圧縮強さの深度分布（東立坑）²⁾

表-2 重回帰分析結果で得られた係数

(a) 重相関係数

	領域①	領域②	領域③	領域④
重回帰係数	0.75	0.55	0.55	0.81

(b) 相関式の各係数

	領域①	領域②	領域③	領域④
切片	-14.549	-11.238	-12.472	-13.646
g	0.808	0.013	-0.690	0.454
h	-0.022	0.602	1.400	1.091
i	-1.659	-0.265	-0.122	-0.498
j	1.052	0.440	-0.473	0.270
k	-0.019	0.004	0.002	0.022
l	0.609	0.186	-0.076	-0.296

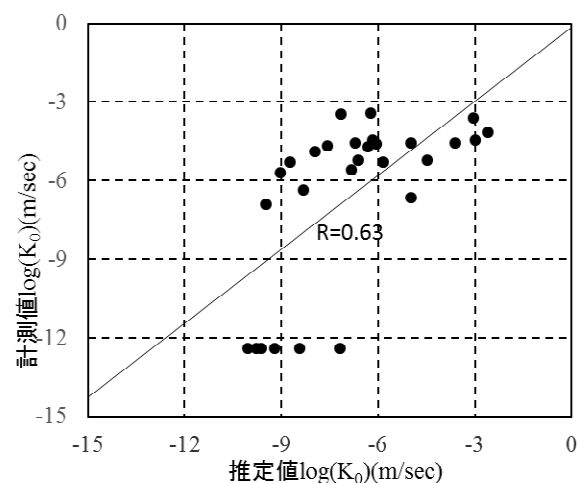


図-10 覆工の透水テンソル K_0 の推定結果（東立坑）

東立坑における覆工の透水テンソル K_0 について、予測式(9)により求めた推定値は $8.7 \times 10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ の範囲で、覆工クラックの情報から算定した計測値は $4.0 \times 10^{-13} \sim 3.9 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ の範囲で推移している。図-10に示す同じ深度における覆工透水係数の推定値と計測値の相関係数 R は 0.63 であり、比較的良好な相関が得られている。推定値と計測値の差分の絶対値である推定誤差 ER の深度分布を図-11に示す。同図より、推定誤差 ER は $9.0 \times 10^{-11} \sim 3.3 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現できた。一部の深度については、最大 $3.9 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ 程度の誤差があるが、最大主応力の卓越方向や岩盤強度のばらつきの影響を受け、各領域の岩盤クラックテンソル F_0 が変動したことが考えられる。

予測式の適用例として、換気立坑について式(9)に示す予測式と図-6に示す方向別の岩盤クラックテンソルならびに図-12に示す深度 50～350m で実施したエコーチップ反発硬度試験の結果から推定した岩石の一軸圧縮強度²⁾を用いて、覆工の透水テンソル K_0 を推定した結果を図-13に示す。同図より、覆工の透水テンソル K_0 の推定値は $6.4 \times 10^{-11} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ の範囲で、計測値は 4.0×10^{-13}

～ $1.1 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ の範囲で推移している。同じ深度における覆工透水係数の推定値と計測値の相関係数 R は 0.49 であり、比較的良好な相関が得られている。

推定値と計測値の差分の絶対値である推定誤差 ER の深度分布を図-14に示す。同図より、推定誤差 ER は $6.3 \times 10^{-11} \sim 5.5 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現でき、予測式は有効であることが分かった。一部の深度については、最大 $1.4 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ 程度の誤差があるが、最大主応力の卓越方向や岩盤強度のばらつきの影響を受け、各領域の岩盤クラックテンソル F_0 が変動したことが考えられる。

これまでの分析結果に基づき、覆工クラックの発生原因は、初期地圧の水平面内のばらつきが覆工の作用荷重と整合する構造であるため、覆工の透水テンソル K_0 は、立坑掘削によって初期地圧の最大主応力が卓越する岩盤における初生的なクラックの幾何学的な特性や岩盤強度のばらつきの影響を受けていると考えられる。このことから、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 や岩盤強度か

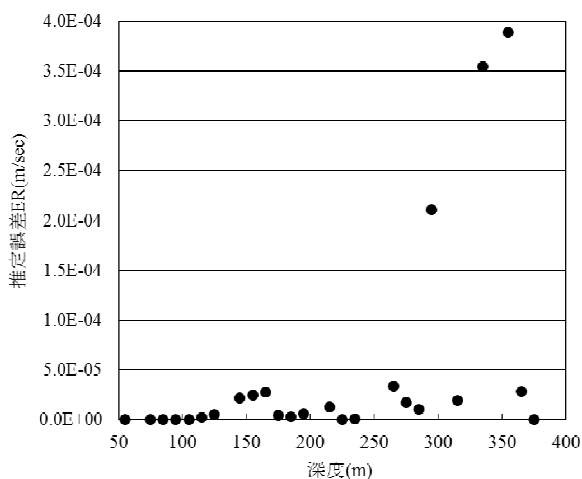


図-11 覆工の透水テンソル K_0 の推定誤差 (東立坑)

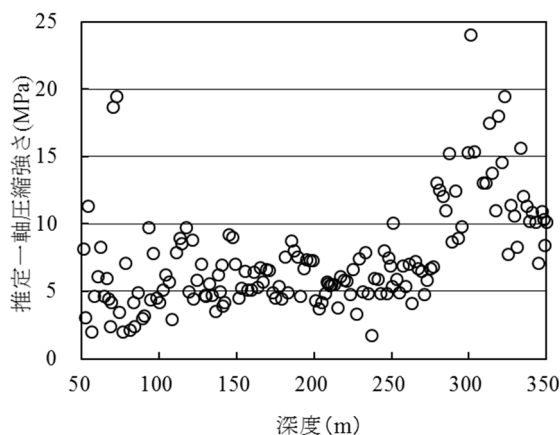


図-12 岩盤の推定一軸圧縮強度の深度分布 (換気立坑)²⁾

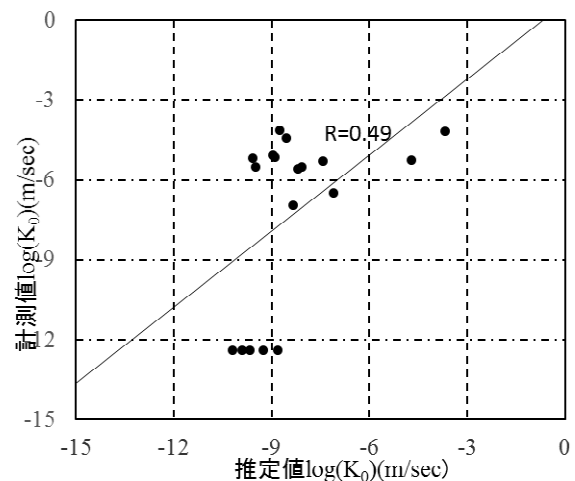


図-13 相関式の適用例 (換気立坑)

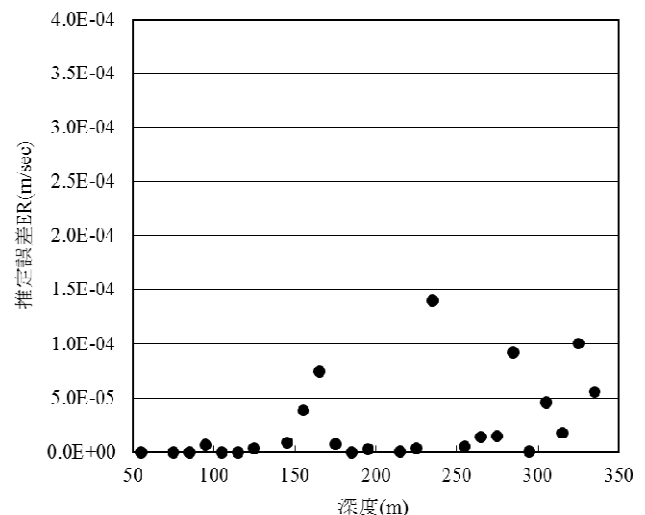


図-14 相関式の適用例の推定誤差 (換気立坑)

ら覆工の透水テンソル K_0 が推定できれば、覆工コンクリート施工前に適切な対策工を実施して、覆工クラックの発生を抑制できるとともに、覆工背面に地下水圧が作用している場合は覆工コンクリートのクラックからの漏水の抑制できることを示唆している。

4. 結論

幌延深地層研究所地下施設の大深度立坑を対象として、立坑掘削に伴う坑壁地質観察結果を用いて、岩盤クラックテンソルから覆工の透水テンソルを推定する手法の提案について得られた知見を以下にまとめる。

- ① 岩盤クラックの密度と覆工クラックの透水性について単回帰分析した結果、両者には相関性が低いことから、初期地圧の最大主応力の卓越方向を考慮した領域を設定して、東立坑を対象に覆工の透水テンソル K_0 を目的変数、方向別の岩盤クラックテンソル F_0 、対象深度の立坑深度や岩盤強度を説明変数として、重回帰分析を実施した結果、比較的高い相関が得られた。
- ② この相関関係から得られた予測式を用いて、覆工の透水テンソル K_0 の推定値と覆工クラックの情報から算定した計測値の相関係数 R は比較的良好な相関が得られた。推定値と計測値の差分の絶対値である推定誤差 ER より計測値と推定値は概ね再現できた。
- ③ 予測式を換気立坑に適用した結果、覆工の透水テンソル K_0 の推定値は概ね再現でき、予測式は有効であることが分かった。
- ④ 覆工の透水テンソル K_0 は立坑掘削によって初期地圧の最大主応力が卓越する岩盤における初生的なクラックの幾何学的な特性や岩盤強度のばらつきの影響を受けていると考えられる。

本論文では、幌延深地層研究所のような初期地圧の最大主応力が卓越する岩盤において、方向別の岩盤クラックテンソルや岩盤強度に関する情報が取得できれば、覆工の透水テンソル K_0 が推定可能であることを明らかにした。今後は、立坑掘削の進捗に合わせて、各データを蓄積し、覆工の透水係数の推定精度を向上することにより、山岳トンネルの維持管理に適用できる可能性がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，2020.
- 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，第25回地下空間シンポジウム講演論文・報告集，pp. 7-17，2020.
- 3) Oda, M : Fabric tensor for discontinuous geological materials, Soils & Found., Vol.22, No.4, pp.96-108, 1982.
- 4) 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.
- 5) 小田匡寛，鈴木健一郎，山崎雅直，齊藤禎二郎：岩石構造の数量化とその岩盤力学への応用，テクニクスと変成作用(原郁夫先生退官記念論文集)，創文，pp.367-378，1996.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 小西一寛，中畑明彦，山本修一，辻幸和：コンクリートの長期飽和透水性状，コンクリート工学年次論文集，pp. 805-810, Vol22, No.2, 2000.

(2021.8.6受付)

SUGGESTION OF LINING PERMEABILITY CONDUCTIVITY ESTIMATION METHOD FOR SHAFT CONSTRUCTION

Masanao YAMASAKI, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

In this study, assuming that the growth of lining cracks and the hydraulic conductivity is equivalent, a method for estimating the permeability conductivity of lining from rock crack tensors and rock strength based on crack tensors calculated based on information on cracks is used. As a result, the distribution of cracks generated in the lining is based on the correlation between the cracks in the rock wall and the cracks in the lining concrete obtained by observing the geology of the rock wall associated with the excavation of the shaft. It was clarified that it is affected by the geometrical characteristics of cracks in the mine wall and the variation in rock strength.