

# 立坑施工における覆工劣化度推定方法の提案

山崎 雅直<sup>1</sup>・石山 宏二<sup>2</sup>・林 久資<sup>3</sup>・進士 正人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力ホールディングス(株) リニューアブルパワー・カンパニー  
(〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3) E-mail: yamasaki.masanao@tepcoco.jp

<sup>2</sup>正会員 西松建設(株) 技術研究所 (〒105-0004 東京都港区新橋6丁目17番21号)  
E-mail: koji\_ishiyama@nishimatsu.co.jp

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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性を分析し、覆工に発生したクラックの分布は、初期地圧の異方性に伴う岩盤坑壁の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が明らかになった。

**Key Words :** *initial rock pressure ,anisotropy, cracks 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<sup>1)</sup>。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工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。

そこで、国内のトンネル工事における坑壁地質観察に関する情報を調査した結果、掘削面の坑壁のクラックと覆工のクラックの情報(長さ、方向、開口幅)を取得しているトンネル工事は、幌延深地層研究所の立坑掘削工事においては、1 サイクル 2m 毎に坑壁地質観察、覆工のクラック観察により、詳細にクラック調査を行っているため、本研究を実施する上で必要な情報を満足していることが分かった。

これまでは、岩盤を対象にクラックテンソル理論<sup>2),3),4)</sup>を適用されているが、覆工コンクリートクラックに対してもクラックの長さや方向や開口幅に関する情報が得られるため、クラックテンソル理論の適用が可能である<sup>5)</sup>。そして、トンネル掘削後の岩盤クラックと覆工コンクリート施工後の覆工クラックの関連性を評価した事例はこれまで確認されていない。

今後予定されている高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設に向けて、岩盤坑壁クラックにおけるクラックテンソルから、覆工クラックの劣化度テンソルが予測で

きれば、覆工クラックの劣化度テンソルが大きくなるクラックの発生場所について岩盤坑壁に適切な対策を施すことで、覆工クラックの発生を抑制出来る可能性がある。

本研究は、立坑掘削や支保設置における各種調査データにより、覆工クラックが発生している位置について岩盤坑壁クラックと覆工クラックの相関関係を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劣化度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、等価な劣化度テンソルの推定精度を評価した。

## 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。

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<sup>6)7)</sup>。

### (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<sup>6)7)</sup>。

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<sup>6)7)</sup>。

### (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

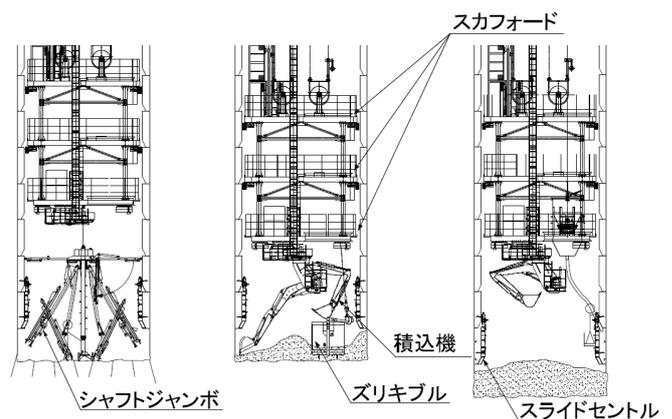
リング孔において実施した水圧破碎法による原位置測定結果<sup>8)</sup>より、水平面内において偏圧が認められ、最大主応力の作用方向は概ね東西方向であることがわかっている。これにより、鉛直方向の主応力を土被り圧相当と仮定し、三次元での主応力比は、鉛直応力を1とした場合、水平面内最大主応力：水平面内最小主応力：鉛直主応力=1.3:0.9:1.0と設定している<sup>6)7)</sup>。

### (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。一例として東立坑の施工フローを図-1に示す<sup>9)</sup>。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<sup>10)</sup>。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。



(a) 掘削 (b) 掘削土搬出 (c) コンクリート打設

図-1 東立坑施工フロー<sup>9)</sup>

## 3. クラックテンソル理論の概要

## (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<sup>2),3),4)</sup>。なお、2.(2)にて述べたように、割れ目やへ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<sup>2</sup>)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Xi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) 覆工の劣化度テンソルの概要

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、クラックの進展と劣化の進行は等価であると考ええると、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。亀村ら<sup>5)</sup>は覆工の劣化評価についても、クラックテンソルの考え方をを用いれば、劣化の進行性や劣化パターンの定量化に適用できると述べている。

亀村ら<sup>5)</sup>の提案式を参考にして、 $k$ 番目の覆工クラックは、長さ $l^{(k)}$ 、開口幅 $t^{(k)}$ 、 $n_i^{(k)}$ がXi軸( $i=1,2$ )となす角度 $\theta^{(k)}$ の情報が得られる。2次元領域のクラックの分布における覆工クラックの劣化度テンソル $P_{ij}$ は、加算形で式(3)のように定義される。

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

$P_{ij}$ の各成分は式(4a)～式(4c)に表し、覆工の劣化度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。単位は無次元である。

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

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

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

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

## 4. 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  $F_{ij}$  ならびに覆工の劣化度テンソル  $P_{ij}$  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<sup>11),12),13),14),15),16),17)</sup>。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)ならびに掘削後の緩みに伴うクラック(以降、緩みクラック)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、スカフォード(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劣化度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。始点と終点の座標値より、クラックの長さを算出する。
- 図-2に示すようにクラックの $X_1$ 軸から角度 $\theta$ 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(5)より角度 $\theta^{(k)}$ を算出する。

$$\theta^{(k)} = \tan^{-1} \frac{x_2^{(k)} - x_1^{(k)}}{y_2^{(k)} - y_1^{(k)}} \quad (5)$$

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)より覆工クラックの劣化度テンソル  $P_{ij}$  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、2.(3)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。

(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、黒は掘削後の緩みに伴うクラック（以降、緩みクラックと呼ぶ）を示している。同図より、比較的高角の引張、せん断、断層角礫などが、比較的低角の緩みクラックが確認されている。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、緩みクラックが少な

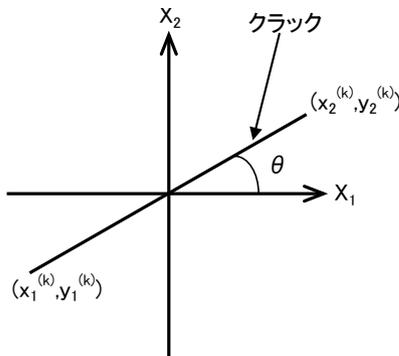


図-2 クラックの定義

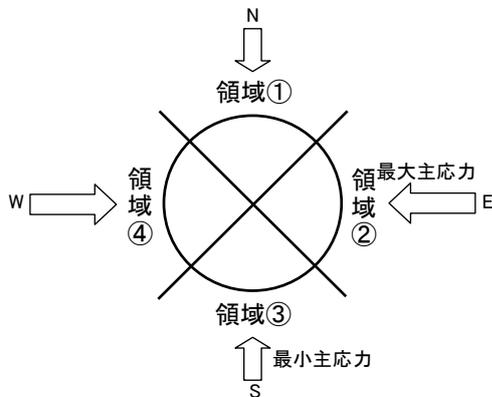


図-3 岩盤坑壁分割の模式図

クラックが少なく、緩みクラックが多い。

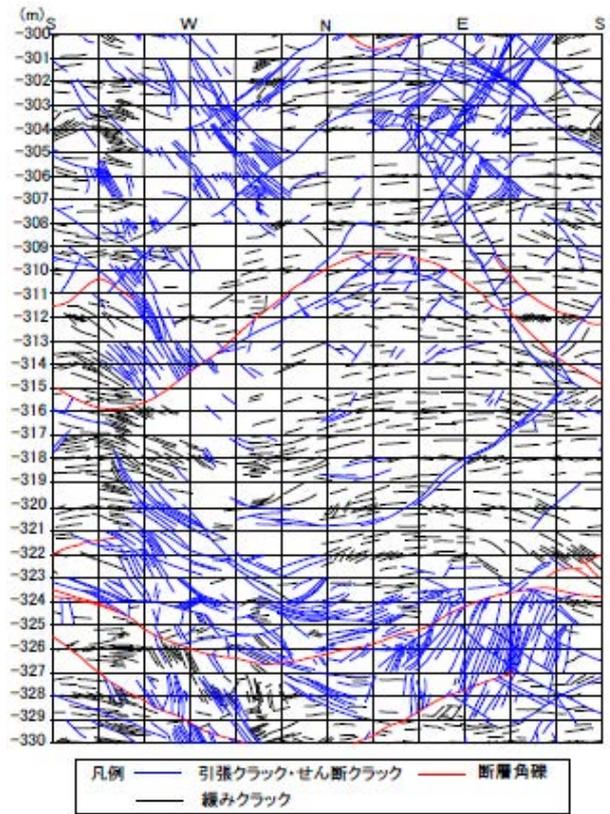


図-4 岩盤クラックマップの一例

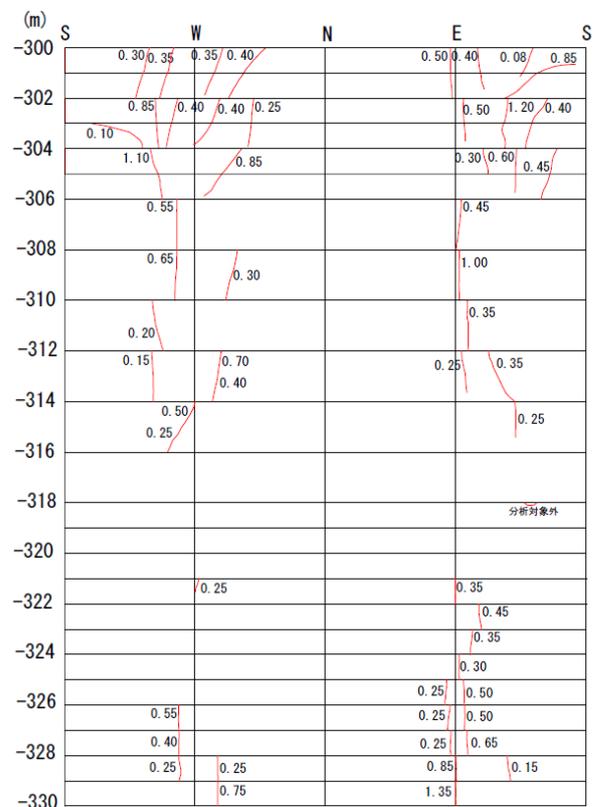


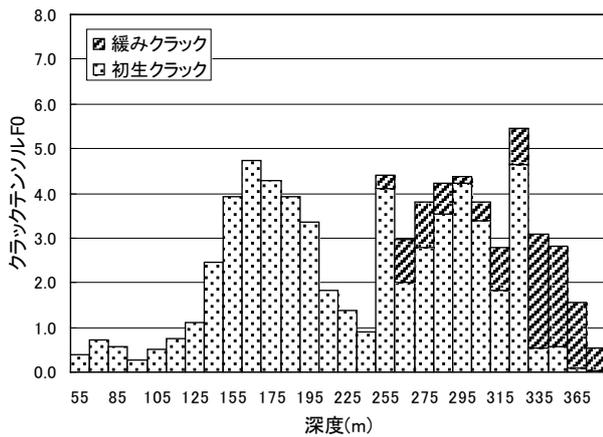
図-5 覆工クラックマップの一例

い。一方、深度 316m～322m については初生的な成因の

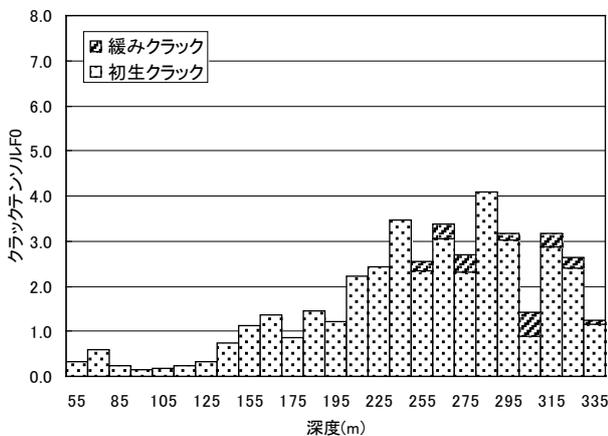
#### (4) クラックテンソル算定に用いる覆エクラック

クラックテンソル算出に用いる覆エコンクリート施工後、覆エには圧縮クラック（圧ぎ）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、覆エ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値を示している。同図の横線は覆エ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毎に覆エ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エ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。

図-4と図-5を比較すると、覆エ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



(a) 東立坑



(b) 換気立坑

図-6 岩盤クラック $F_0$ の深度分布

ては、初生クラック48%、緩みクラック52%に対して、覆エ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37%、緩みクラック63%であり、覆エクラックが発生している深度は覆エクラックが発生していない深度に対して初生クラックの割合が多い傾向にある。

## 5. 岩盤クラックと覆エクラックの相関分析

### (1) 分析に使用する岩盤クラック

岩盤クラックと覆エクラックの関連性の分析に先立ち、分析に使用する岩盤クラックについて、深度250m以浅は、4.(1)で述べた初生クラックが、深度250m以深は初生クラックと緩みクラックと2種類のクラックが分布しており、両者についてクラックテンソル $F_0$ で立坑毎に整理した結果を図-6(a)~(b)に示す。同図より深度250m以深は深度に比例して緩みクラックのクラックテンソル $F_0$ の割合が大きくなっているが、緩みクラックについては、掘削直後に発生したクラックであり、図-4に示すように、緩みクラックの連続性は初生クラックと比べて乏しいことから、緩みクラックは分析対象とせず、分析に使用する岩盤クラックは初生クラックとした。

### (2) クラックテンソル算定領域の妥当性

岩盤クラックと覆エクラックの相関分析の実施に当たって、クラックテンソルを算定する領域（以降、クラック算定領域と示す）の妥当性を分析した。東立坑における方向別の岩盤クラックの平均長さを表-1に示した。表中の深度は、1ブロック10m区間の中央値を示している。例えば、深度150m~160mの場合は155mである。小田ら<sup>24)</sup>は、理想化された岩盤を前提とした場合、クラックテンソル算定領域について等価な正方領域の一边を代表長さとして表すと、クラックテンソル算定領域はクラック平均長の2~3倍であると十分であることを示している。表-1より、岩盤クラックの平均長さは0.4~1.1mの範囲で分布しており、クラックテンソル算定領

表-1 回帰分析に使用した岩盤クラックの平均長さ

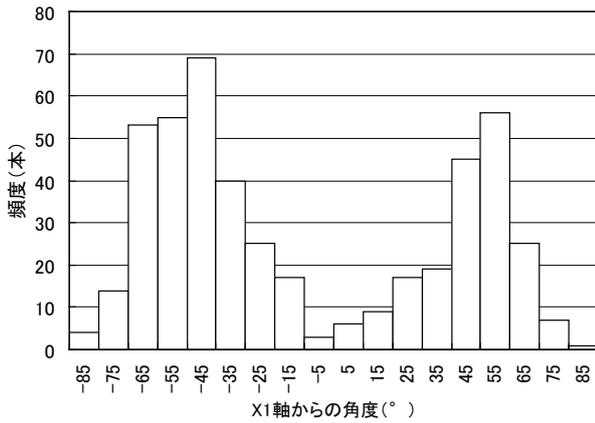
深度(m)	平均長さ(m)				深度(m)	平均長さ(m)			
	領域①	領域②	領域③	領域④		領域①	領域②	領域③	領域④
55	0.64	0.54	0.53	0.72	225	0.87	0.73	0.73	0.65
75	0.85	0.79	0.80	0.66	235	0.72	0.56	0.63	0.58
85	0.47	0.40	0.77	0.50	255	0.87	0.99	0.83	0.76
95	0.70	0.80	0.57	0.53	265	0.74	0.91	0.66	0.68
105	0.68	0.65	0.61	0.51	275	0.77	0.72	0.80	0.71
115	0.62	0.52	0.54	0.54	285	0.96	0.82	0.85	0.75
125	0.56	0.53	0.54	0.50	295	1.03	0.91	0.81	0.93
145	0.92	0.84	0.83	0.70	305	0.85	0.89	0.80	0.66
155	0.94	0.97	0.81	0.79	315	0.84	0.87	0.78	0.86
165	0.95	1.05	0.76	0.78	325	0.88	0.91	0.86	0.79
175	0.95	1.03	0.97	0.99	335	0.91	0.77	0.76	0.68
185	0.95	1.06	0.90	0.88	355	0.71	0.69	0.62	0.61
195	1.01	0.97	0.95	0.96	365	0.53	0.60	0.57	0.47
215	1.10	1.02	1.00	0.91	375	0.45	0.46	0.39	0.36

域は東立坑の掘削径 7.3mの円周の 1/4 に 1 ブロックの深  
度 10m を掛け合わせた 57.3m<sup>2</sup> に対して、その代表長さ  
は 7.6m であるため、調査領域は岩盤クラック平均長さ  
に対して約 7~19 倍であり、十分な調査領域であると言  
える。

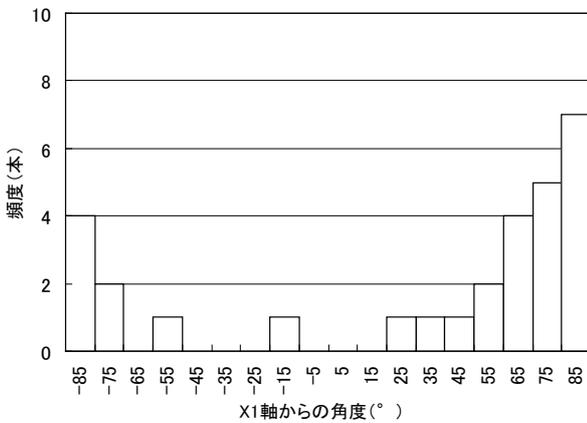
### (3) 岩盤クラックと覆エクラックの方向分布の関係

分析対象が、坑壁の展開図や覆工表面の展開図のよう  
な二次元断面のクラックとしているため、クラックの角  
度で整理した。岩盤クラックと覆エクラックについて、  
各クラックの方向の関連性を分析した。各クラックの  
X<sub>1</sub> 軸から角度の分布の一例として東立坑深度 300m~  
310m 区間の分布を図-7(a)~(b)に示す。図-7(a)は岩盤ク  
ラックの分布を示し、-70° ~-30° と 40° ~70° の頻度  
が高い傾向にある。図-7(b)は覆エクラックの分布を示し、  
X<sub>1</sub> 軸から角度が-90° ~-70° と 60° ~90° の頻度が高い  
傾向にある。

クラックの角度の分布より、高傾斜である縦クラック  
とそれ以外の斜めクラックで整理すると岩盤クラックと  
覆エクラックの傾向が分かるため、縦クラックの角度は

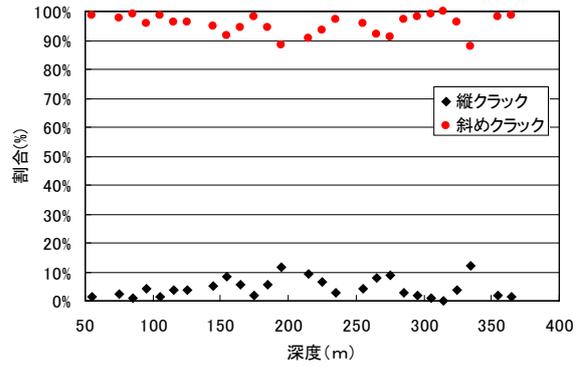


(a) 岩盤クラック

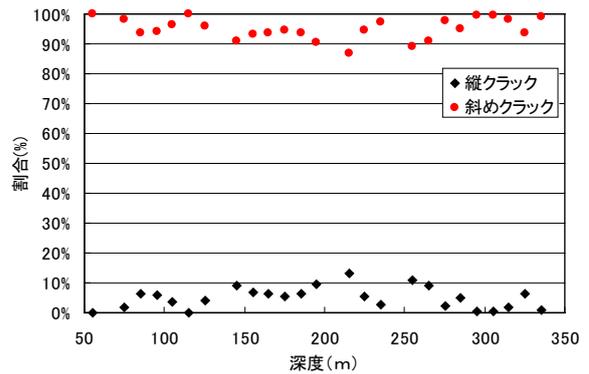


(b) 覆エクラック

図-7 クラック方向別分布 (東立坑深度 300m~310m 区間)

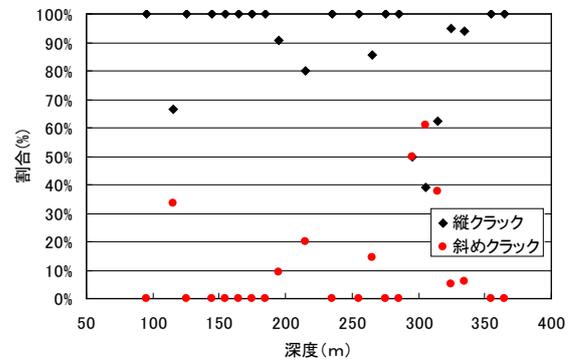


(a) 東立坑

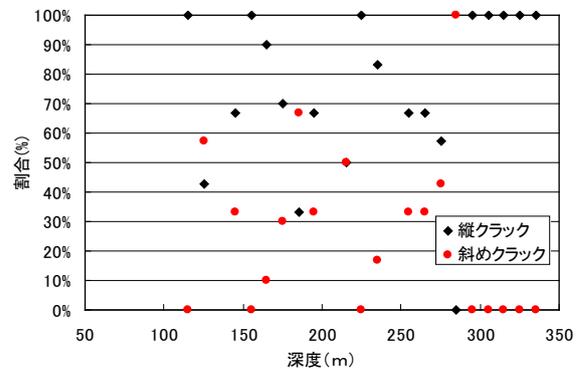


(b) 換気立坑

図-8 岩盤クラック方向の深度分布

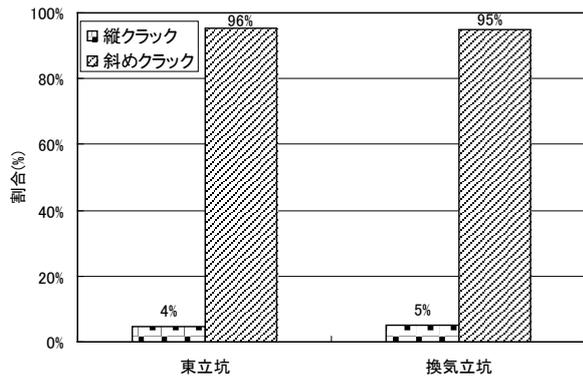


(a) 東立坑

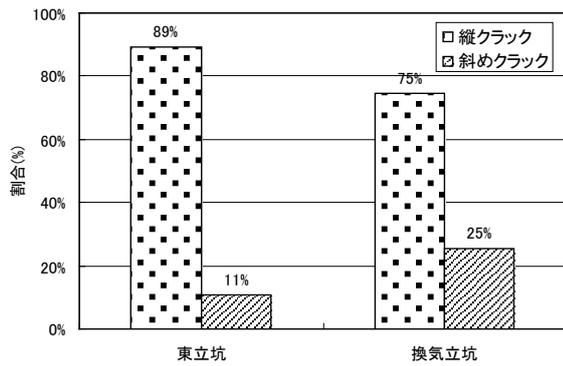


(b) 換気立坑

図-9 覆エクラック方向の深度分布



(a) 岩盤クラック



(b) 覆工クラック

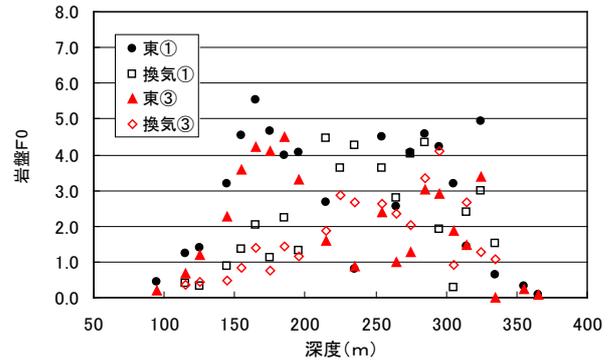
図-10 縦クラックと斜めクラックの割合

図-2 に示すクラックの  $X_1$  軸から角度  $\theta$  が  $\pm 80^\circ$  以上, 斜めクラックの角度はそれ以外と定義した. 深度方向は 10m 区間を 1 ブロックとして, 各ブロックにおける縦クラックと斜めクラックの割合を示している.

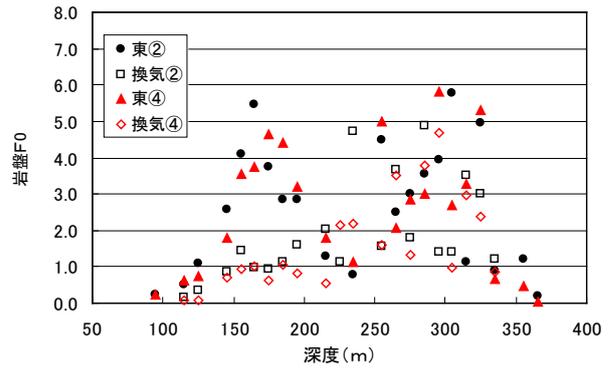
図-8(a)~(b) に各立坑の岩盤クラックの方向の深度分布を示す. 同図より, 各立坑ともに縦クラックの割合は 0~10% 程度で, 斜めクラックの割合は 90~100% で推移している. 図-9(a)~(b) に各立坑の覆工クラック角度の深度分布を示す. 同図より, 各立坑ともに一部区間で斜めクラックの割合が高い区間が認められるが, 大部分の区間について縦クラックの割合は 70~100% で, 斜めクラックの割合は 0~30% で推移している.

図-10(a)~(b) に各立坑全体の岩盤クラックと覆工クラックについて縦クラックと斜めクラックの割合を示す.

図-10(a) より, 岩盤クラックは斜めクラックの割合が 95~96% に対して, 図-10(b) より覆工クラックは縦クラックの割合が 75~89% であるため, 両者は同じ傾向を示しているとは言えず, クラックの方向について関連性は低い. これは, 立坑の施工はショートステップ工法により施工箇所上下面に縁が切られたことや坑壁の岩盤クラックの分布によらず, 最大主応力の卓越方向の荷重が作用し, 覆工に縦クラックが多く発生したことが考えられる.

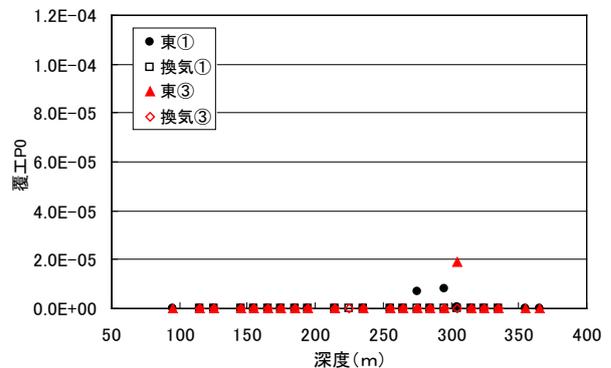


(a) 領域①と領域③

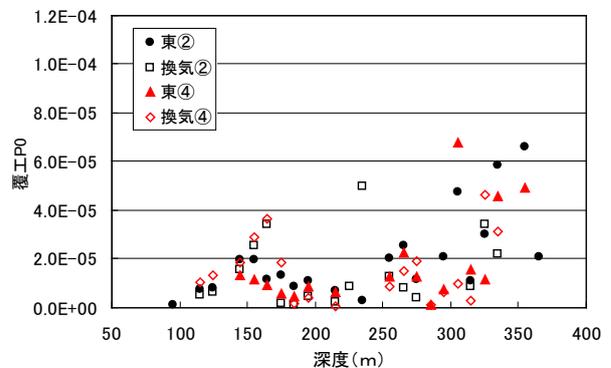


(b) 領域②と領域④

図-11 方向別の岩盤クラック  $F_0$  の深度分布

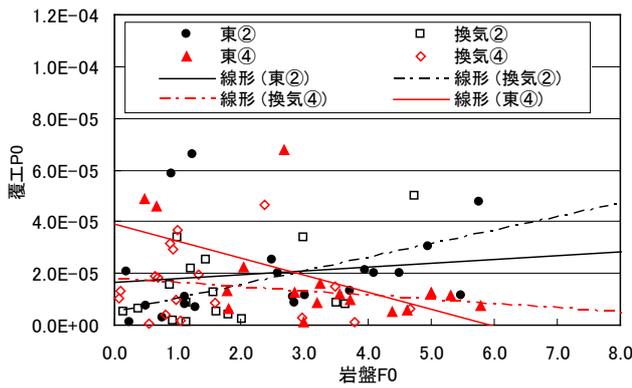


(a) 領域①と領域③



(b) 領域②と領域④

図-12 覆工クラック  $P_0$  の深度分布



立坑	相関式	相関係数
東②	$P_0 = 1.0 \times 10^{-6} F_0 + 2.0 \times 10^{-5}$	0.15
東④	$P_0 = -7.0 \times 10^{-6} F_0 + 4.0 \times 10^{-5}$	0.55
換気②	$P_0 = 5.0 \times 10^{-6} F_0 + 5.0 \times 10^{-6}$	0.47
換気④	$P_0 = -2.0 \times 10^{-6} F_0 + 2.0 \times 10^{-5}$	0.16

図-13 岩盤クラック  $F_0$  と覆工クラック  $P_0$  の相関

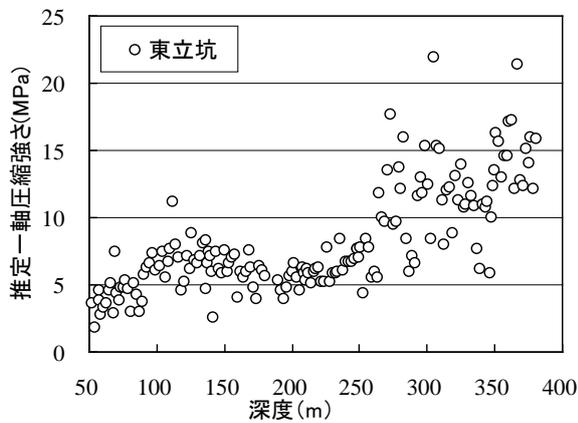


図-14 岩盤の推定一軸圧縮強さの深度分布 (東立坑)

#### (4) 岩盤クラックテンソル $F_0$ と覆工劣化度テンソル $P_0$ の関係

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  $F_0$  と劣化度テンソル  $P_0$  のデータを用いて岩盤クラックと覆工の劣化度の関連性について分析を行った。図-11(a)~(b)に各立坑の岩盤クラックテンソル  $F_0$  の深度分布を示す。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て、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-12(a)~(b)に各立坑の覆工の劣化度テンソル  $P_0$  の深度分布を示す。図-12(a)より領域①と領域③では各立坑の一部区間を除いて概ね 0 で推移しており、図-12(b)より、各立坑の領域②と領域④について、 $0 \sim 7.0 \times 10^5$  の範囲で推移している。図-13 に各立坑の岩盤クラックテンソル  $F_0$  と覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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、相関性が低い。

#### (5) 覆工の劣化度テンソル $P_0$ の重回帰分析

5(4)節で述べたように岩盤クラックと覆工クラックの密度や劣化度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、2.(3)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していることから、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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-11(a)と図-11(b)とし、立坑深度は対象区間の中央値とした。また、津坂<sup>10)</sup>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との近似式を用いて、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-14に示す。同図より、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劣化度テンソル  $P_0$  と各説明変数に対して、重相関係数は 0.74~0.81 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劣化度テンソルの相関式は、例えば、領域①においては式(6)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。推定した覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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劣化度テンソル  $P_0$  を予測できる可能性がある。

$$f = -1.59 \times 10^{-6} + 1.40 \times 10^{-6} g - 1.10 \times 10^{-6} h - 1.57 \times 10^{-6} i + 1.32 \times 10^{-6} j - 1.64 \times 10^{-8} k + 5.42 \times 10^{-7} l \quad (6)$$

ここに、 $f$ : 覆工の劣化度テンソル  $P_0$ 、 $g$ : 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)

東立坑の覆工の劣化度テンソル  $P_0$  については、式(6)により求めた推定値と計測値を比較した図を図-15に示す。

す。同図より、東立坑では  $0 \sim 1.4 \times 10^4$  の範囲で推移している。推定値と計測値の差分の絶対値を推定誤差  $R$  とした結果を図-16 に示す。同図より、 $0 \sim 3.0 \times 10^5$  の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現できている。一部の深度については、 $5.0 \times 10^5$  の程度の誤差があるが、最大主応力の卓越方向のばらつきの影響を受け、

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	0.77	0.74	0.80	0.81

(b) 相関式の各係数

	領域①	領域②	領域③	領域④
切片	-1.59E-06	7.62E-07	4.90E-07	4.62E-06
$g$	1.40E-06	-9.63E-06	-2.86E-06	-1.11E-05
$h$	-1.10E-06	1.26E-05	3.88E-06	1.69E-05
$i$	-1.57E-06	-6.66E-07	3.26E-07	-1.91E-06
$j$	1.32E-06	-1.24E-06	-7.41E-07	-3.05E-06
$k$	-1.64E-08	9.22E-08	-4.26E-09	9.17E-08
$l$	5.42E-07	-6.88E-07	8.89E-08	-1.56E-06

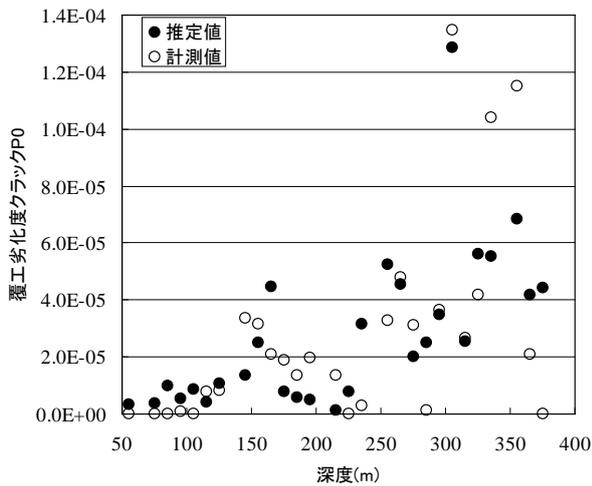


図-15 覆工の劣化度テンソル  $P_0$  の推定結果 (東立坑)

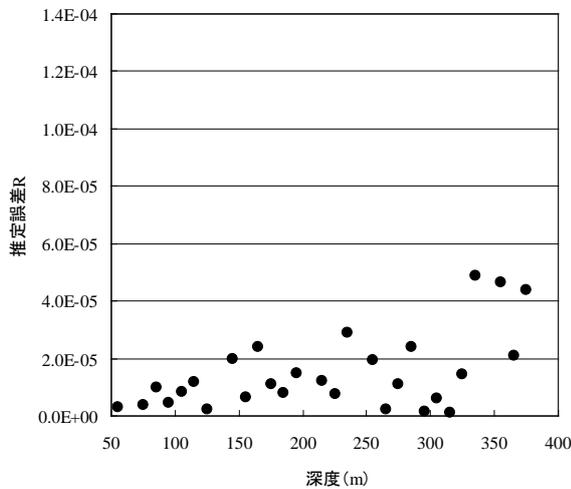


図-16 覆工の劣化度テンソル  $P_0$  の推定誤差 (東立坑)

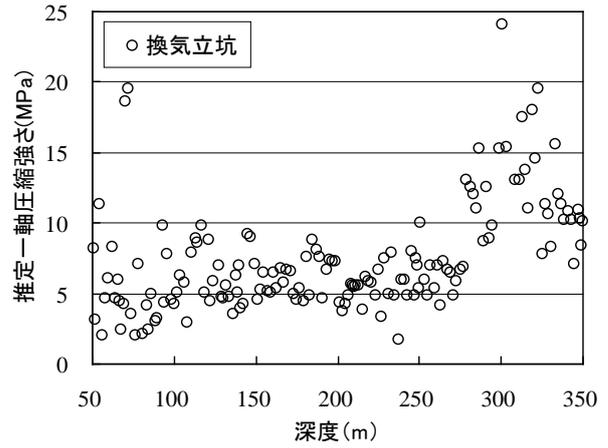


図-17 岩盤の推定一軸圧縮強さの深度分布 (換気立坑)

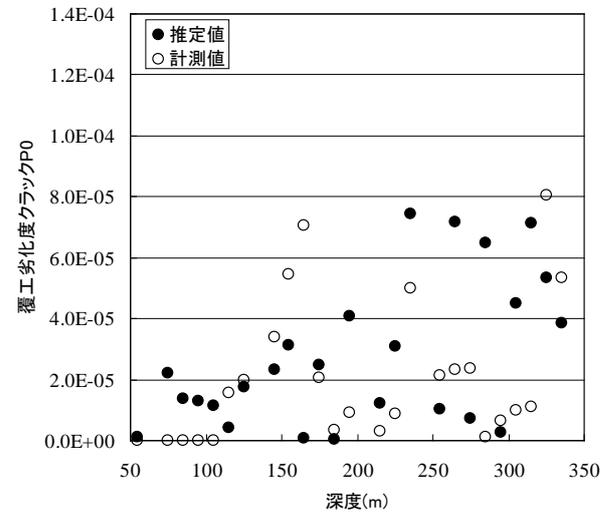


図-18 相関式の適用例 (換気立坑)

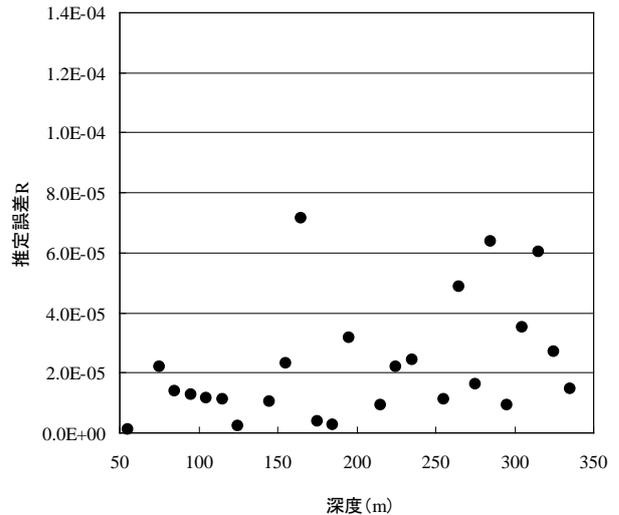


図-19 相関式の適用例の推定誤差 (換気立坑)

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(6)に示す予測式と図-11 に示す方向別の岩盤クラックテンソルならびに、図-17 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を用いて、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  を推定した結果を図-18 に示す。同図より、 $0\sim 8.0\times 10^5$  の範囲で推移している。推定値と計測値の差分の絶対値を推定誤差  $R$  とした結果を図-19 に示す。同図より、 $0\sim 4.0\times 10^5$  の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現できている。一部の深度については、 $7.0\times 10^5$  の程度の誤差があり、最大主応力の卓越方向のばらつき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、立坑という初期地圧の水平面内ばらつきが覆工の作用荷重と整合するイメージを持ちやすい構造により成立しているところが大きく、立坑掘削に伴い初期地圧の異方性に伴う岩盤の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おり、方向別の岩盤クラックテンソル  $F_0$  や岩盤強度から覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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ことを示唆している。

## 6. 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劣化度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 岩盤クラックは斜めクラックの割合が高く、覆工クラックは縦クラックの割合が高いことから、両者には関連性が低い。立坑の施工箇所上下面の縁が切れていることや坑壁の岩盤クラックの分布によらず、最大主応力の卓越方向の荷重が作用し、覆工に縦クラックが多く発生したことが考えられる。
- ② 岩盤クラックの密度と覆工クラックの劣化度について単回帰分析した結果、両者には関連性が低いことから、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劣化度テンソル  $P_0$  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。この相関から得られた予

測式を用いて、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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推定誤差  $R$  より、 $0\sim 3.0\times 10^5$  の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現できている。一部の深度については、 $5.0\times 10^5$  の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。

- ③ 予測式の適用例として換気立坑に適用した結果、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  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推定誤差  $R$  より、 $0\sim 4.0\times 10^5$  の範囲で推移しており、計測値と推定値は概ね再現できている。一部の深度については、 $7.0\times 10^5$  の程度の誤差があり、最大主応力の卓越方向のばらつき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。
- ④ 覆工クラックの発生原因は、立坑という初期地圧の水平面内ばらつきが覆工の作用荷重と整合するイメージを持ちやすい構造により成立しているところが大きく、立坑掘削による初期地圧の異方性に伴う岩盤の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ことを示唆している。

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東西方向に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、覆工の劣化度テンソル  $P_0$  が推定可能であることを明らかとした。今後は、立坑掘削の進捗に合わせて、各データを蓄積していくことにより、覆工の劣化度テンソルの推定精度を向上していくことにより、岩盤クラックと覆工クラックの関連性を検証することにより、山岳トンネルの維持管理に適用できる可能性がある。

このためには、宇津木ら<sup>2)</sup>による人工知能を適用した画像認識技術を活用すると、岩盤クラックの発生情報の取得が可能となり、岩盤クラックテンソルの算出が簡便にできるため、本手法の適用が有効になり、覆工の維持管理の予測精度向上につながるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧 2016。
- 2) Oda, M : Fabric tensor for discontinuous geological materials, Soils & Found., Vol.22, No.4, pp.96~108, 1982.
- 3) 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.
- 4) 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, テクトニクスと変成作用(原都夫

- 先生退官記念論文集),創文,pp.367-378,1996.
- 5) 亀村勝美, 須藤敏明: トンネル覆工劣化度評価のためのデータ解析の試み, 土木学会第57回年次学術講演会, VI-107, pp. 213-214, 2002.
  - 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 TJ5400 2005-004, 2005.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) 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.
  - 12) 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.
  - 13) 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.
  - 14) 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.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 石井英一, 福島龍朗: 新第三紀形質岩における断層の解析事例, 日本応用地質学会 応用地質, 第47巻第5号, 2006.
  - 19) 森岡宏之, 山口雄大, 舟木泰智, 尾留川剛: 幌延深地層研究計画における立坑掘削時の計測計画及び情報化施工プログラム, JAEA-Research 2007-050, 2007.
  - 20) 櫻井春輔, 足立紀尚: 都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会, 1988.
  - 21) 森岡宏之, 山崎雅直, 松井裕哉, 尾留川剛, 山口雄大: 幌延深地層計画における地下施設の支保設計 (実施設計), JAEA-Research 2008-009, 2008.
  - 22) 中山雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田裕: 幌延深地層研究計画 平成21年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2010-039, 2010.
  - 23) 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—, トンネル技術協会, トンネルと地下, 2015年7月号, pp.13-21, 2015.
  - 24) 小田匡寛, 羽出山吉裕, 高野正明: 不連続性岩盤の水理・力学的性質を評価するために必要な最小供試体寸法について, 土木学会第18回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 126-130, 1986.
  - 25) 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巻, 1-25, pp. 1-7, 2017.

## SUGGESTION OF ESTIMATION METHOD OF DETERIORATION DEGREE ON LINING FOR SEDIMENTARY SOFT ROCK

Masanao YAMASAKI, Koji ISHIYAMA, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

Japan Atomic Energy Agency has been constructed the Underground Research Laboratory in Hokkaido. In the shaft excavation, length and direction of geological observation are measured, initial rock pressure are surveyed and analyzed in order to estimate crack generation on the lining. In this report, correlation between frequency of cracks on the shaft wall and frequency of cracks on the lining based on crack tensor was discussed. Estimation method of degradation degree tensor  $P_0$  on the lining from crack tensor  $F_0$  on the shaft wall was also proposed.

In the area setting where the predominant direction of major principal stress of initial rock pressure, multiple regression analysis was analyzed with deterioration degree tensor  $P_0$  as the objective variable and rock crack tensor  $F_0$  on the shaft wall, the shaft depth of the target depth and the rock strength as the descriptive variable. As a result, high correlation was obtained relatively. Assessed value of degradation degree tensor  $P_0$  of lining and the measured value calculated from information on the lining crack are being adjusted mostly using the estimated formula. The cause of generation of cracks on the lining are influenced of the geometrical characteristic of the primordial cracks and the variation of the rock strength with anisotropy of initial rock pressure with the shaft excavation.

When the image recognition technology to which artificial intelligence was applied is used in geological observation in tunnel excavation, application of this technique will be effectively, and I think I can improve the prediction accuracy of the maintenance on lining.