

博士論文

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)

2022年9月

山崎 雅直

Yamasaki Masanao

山口大学大学院創成科学研究科



## 学位論文の要旨

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、立坑施工時の岩盤透水係数ならびに立坑施工後の覆工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。

「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、岩盤透水係数ならびに覆工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透水係数ならびに覆工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。

「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岩盤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岩盤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岩盤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透水係数と原位置透水試験結果に基づく岩盤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。

「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。

「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。

## ABSTRACT

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.

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.

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.

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 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.

## 目 次

第1章 序論	1
1. 1. 研究の背景	1
1. 2. 立坑の施工・維持管理の現状と課題	1
1. 2. 1. 立坑の施工の現状と課題	2
1. 2. 2. 立坑の維持管理の現状と課題	17
1. 3. クラックテンソル理論	23
1. 3. 1. クラックの幾何学特性の仮定	24
1. 3. 2. クラックの幾何学特性の指標	26
1. 3. 3. クラックテンソルの概要	27
1. 3. 4. 2階のクラックテンソル	28
1. 3. 5. クラックテンソルに関する既往研究	30
1. 4. 岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態に関する既往研究	32
1. 4. 1. 岩盤透水係数に関する既往研究	32
1. 4. 2. 覆工劣化状態に関する既往研究	35
1. 5. 本研究の目的	38
1. 6. 本論文の構成	39
参考文献	42
第2章 立坑の岩盤透水係数の推定ならびに予測手法	47
2. 1. はじめに	47
2. 2. クラックテンソルの算定	48
2. 2. 1. クラックの定義	48
2. 2. 2. 3次元クラックテンソルの算定	48
2. 3. 坑壁地質観察結果に基づく透水テンソルの推定	51
2. 3. 1. 計算に用いるクラックの抽出	51
2. 3. 2. クラックテンソルの推定	52
2. 3. 3. 透水テンソルの推定	57
2. 3. 4. 供試体による透水テンソルの推定結果と推定精度の評価	59
2. 4. 立坑による推定した岩盤透水係数の評価	62
2. 4. 1. 推定した3次元クラックテンソルの評価	62
2. 4. 2. 岩盤透水係数の推定精度の評価	65
2. 4. 3. 岩盤透水係数の推定値と割れ目頻度との相関	69
2. 5. まとめ	73
参考文献	74

<b>第3章 立坑の覆工劣化状態の推定ならびに予測手法</b>	76
3. 1. はじめに	76
3. 2. 岩盤のクラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの算定	77
3. 2. 1. 岩盤のクラックテンソルの算定	77
3. 2. 2. 覆工の劣化に関するクラックテンソルの算定	78
3. 2. 3. クラックテンソルの算定手順	78
3. 2. 4. クラックテンソル算定に用いる岩盤坑壁分割図	80
3. 2. 5. クラックテンソル算定に用いるクラック	80
3. 3. 岩盤クラックと覆工クラックの相関分析	83
3. 3. 1. 分析に使用する岩盤クラック	83
3. 3. 2. クラックテンソル算定領域の妥当性	84
3. 3. 3. 岩盤クラックと覆工クラックの方向分布の関係	85
3. 3. 4. 岩盤クラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの単回帰分析	91
3. 3. 5. 岩盤クラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの重回帰分析	95
3. 3. 6. 重回帰式の適用例	99
3. 4. まとめ	103
参考文献	104
<b>第4章 立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案</b>	105
4. 1. はじめに	105
4. 2. 立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案	106
4. 2. 1. 立坑の岩盤透水係数の予測手法の適用に関する提案	106
4. 2. 2. 立坑の覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案	111
4. 3. まとめ	118
参考文献	119
<b>第5章 結論</b>	121
5. 1. 本研究のまとめ	121
5. 2. 今後の課題と展望	123
5. 3. おわりに	124
<b>謝辞</b>	125



## 第1章 序論

### 1. 1. 研究の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設のような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。しかし、立坑施工時の坑壁地質観察において、坑壁周辺の透水性は湧水の状況よる定性的な評価に留まっており、定量的に評価されていない状況である。

立坑施工時の坑壁背面の透水性を定量的に把握できれば、透水性の状況に対応した湧水対策の実施ができ、岩盤中の地下水は主に節理や断層に沿って流れることから、坑壁に現れる不連続面の幾何学特性をテンソル量で表したクラックテンソル<sup>1), 2)</sup>の値から岩盤の透水テンソルが推定できれば、湧水対策の速やかな実施のような岩盤構造物周辺を流れる地下水の問題の解決への貢献が期待できる。

次に、立坑が果たすべき機能は、立坑内の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、供用中の立坑の変状に伴う影響が懸念されているものの、立坑においては目視での点検に限界があり、覆工の健全性やクラックの進行性が定量的に把握できないことから、対策工の実施時期について判断がつかない。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等の事象が確認された時点で、対策工を検討・実施することとなり、対策工の実施に掛かる工事費用についてはトンネルに対して高価となる。さらに、覆工クラックと岩盤クラックの関連性について明らかにされていないため、岩盤掘削時の情報から覆工に発生するクラックの予測が出来ていない。

このため、覆工の変状対策については、コンクリート覆工の変状と立坑施工時の岩盤強度やクラックに関する情報との関連性が解明できれば、立坑施工時の情報より覆工の劣化状態を推定でき、適切な支保の選定の速やかな実施や総合的な維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

以上の背景より、本研究では、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、立坑の施工により得られる岩盤の情報（クラック、強度）を用いてクラックテンソル理論に基づき、立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態を推定し、これらについて簡易な予測手法を確立することを目的として、研究成果を取りまとめたものである。

### 1. 2. 立坑の施工・維持管理の現状と課題

鉄道、道路、電力、鉱山、地下施設に関する既往の立坑の施工実績を表 1.1 に示す。鉄道においては、従来は、坑口付近の地形的制約条件から、坑口取り付けが困難な場

合に、立坑を施工して本坑掘削のための作業坑として利用することが一般的であった<sup>3)</sup>。

道路においては、長大トンネル等で工程面や坑口地形上の条件から工区を分割し、作業機械や資材の搬入、ずりの搬出等に用いられる作業用と道路供用時の換気を目的としたものがある<sup>3)</sup>。

電力においては、取水口立坑、取水口ゲート室立坑、調圧水槽立坑、水圧管路立坑などの用途があるが、ここでは調圧水槽立坑の用途について説明する。調圧水槽は導水路と水圧管路の接続部に設けられることが多く、調整池または貯水池を有するダム水路式発電所において、使用水量の急変時に発生する大きな水撃圧の減少を図り、またこれに耐える水圧鉄管を極力短くして、総合的な経済性と安全性を向上させることを目的としている<sup>3)</sup>。

炭鉱や金属鉱山においては、採鉱のための進入道路、鉱石搬出路、換気等の目的として利用されている<sup>3)</sup>。

## 1. 2. 1. 立坑の施工の現状と課題

### (1) 立坑の主な施工方法<sup>3)</sup>

立坑の掘削工法として、ショートステップ工法、ロングステップ工法、セミロングステップ工法が挙げられる。各工法の概要を図 1.1～図 1.3 に示す。

ショートステップ工法は、掘削・覆工を1サイクルずつ順に施工していく方法で、切羽側壁を直ちに覆工コンクリートで支持し、支保工を必要としない特徴がある。地圧を全面的に覆工コンクリートで受けることとなり、早強性のコンクリートを必要とし初期強度を高くする必要がある。覆工コンクリートは、無筋コンクリートが用いられる。

ロングステップ工法は、掘削と覆工を通常 20～30m 程度ごとに交互に施工していく方法で、掘削後の地山の緩みを支保工で一時的に支保し、地質状況に応じて一定の区間ごとにまとめて施工を行うものである。覆工コンクリートは、支保工は仮受材として取り扱い、構造体は地圧を覆工コンクリートで支保する設計となる。

セミロングステップ工法は、ショートステップ工法の欠点を緩和し、かつロングステップ工法の欠点である支保作業を簡素化し、ショートステップ工法の能率・コストを維持しようと考えられた方法である。支保工はロングステップ工法に対して軽微なものとなるが、覆工コンクリートはロングステップ工法と同様の考え方となる。

表 1.1 既往の立坑の実績 <sup>3)改</sup>

トンネル名	場所	区分	完成年度	深さ(m)	内径(m)	
青函トンネル	吉岡方立坑	北海道	鉄道	188.5	7.50	
	竜飛方立坑	青森県			7.50	
中山トンネル	四方木立坑	群馬県	鉄道	371.6	6.00	
	高山立坑		鉄道	295.0	6.00	
	中山立坑	鉄道	1973	312.9	6.00	
小倉山トンネル	小倉山立坑	京都府	鉄道	1986	220.0	8.00
福岡トンネル	犬鳴立坑	福岡県	鉄道	1973	118.0	6.00
北陸トンネル	板取立坑	福井県	鉄道	1958	230.2	6.00
関越トンネル	谷川立坑	群馬県	道路	173.0	9.70	
	万太郎立坑			187.0		
牛頭山トンネル	換気立坑	広島県	道路	1982	167.0	5.40
恵那山トンネル	I期線立坑	岐阜県	道路	1975	620.0	6.20
恵那山トンネル	II期線立坑	岐阜県	道路	1985	571.0	6.10
安房トンネル	換気立坑	岐阜県-長野県境	道路	1998	450.7	7.50
第2阪奈トンネル	換気坑	大阪府	道路	1995	481.0	9.30
第2阪奈トンネル	奈良側立坑	奈良県	道路	1995	265.0	6.00
香港島西雨水トンネル		香港	その他	2012	165.0	2.30
俣野川発電所	管路立坑	鳥取県	電力	1982	420.0	4.20
朝日小川第一発電所	第1立坑	富山県	電力	1986	190.5	1.80
	第2立坑				176.7	1.90
葛野川発電所	導水路水槽立坑	山梨県	電力	1999	87.4	14.00
	放水路水槽立坑			1999	121.8	12.00
神流川発電所	導水路水槽立坑	群馬県	電力	2005	104.4	17.00
	放水路水槽立坑			2005	126.4	10.00
三井鉱山	山野第2立坑	福岡県	鉱山	1959	737.5	6.00
住友石炭鉱業	奔別立坑	北海道	鉱山	1960	1222.0	7.00
住友石炭鉱業	赤平第1立坑	北海道	鉱山	1961	647.7	6.60
日本炭鉱	高松第5立坑	福岡県	鉱山	1962	1016.0	6.00
三菱高島炭鉱	二子立坑	長崎県	鉱山	1963	965.0	6.50
日本炭鉱	高松第6立坑	福岡県	鉱山	1965	648.2	5.50
三井鉱山	砂川中央立坑	北海道	鉱山	1966	766.0	4.85
松島炭鉱	池島排気立坑	長崎県	鉱山	1967	639.0	6.20
松島炭鉱	大島入気立坑	長崎県	鉱山	1968	705.0	4.85
北海道炭礦汽船	平和第3立坑	北海道	鉱山	1969	396.0	6.00
日本炭鉱	若松第7立坑	福岡県	鉱山	1970	640.7	5.00
松島炭鉱	池島第2立坑	長崎県	鉱山	1971	600.0	6.00
三井鉱山	三池島立坑	福岡県	鉱山	1973	509.3	6.00
北海道炭礦汽船	幌内排気立坑	北海道	鉱山	1974	1044.0	6.50
北海道炭礦汽船	夕張新炭鉱第1立坑	北海道	鉱山	1974	916.0	7.00
北海道炭礦汽船	夕張新炭鉱第2立坑	北海道	鉱山	1975	808.0	7.00
松島炭鉱	ひき島入気立坑	長崎県	鉱山	1976	720.0	5.00
松島炭鉱	ひき島排気立坑	長崎県	鉱山	1979	720.0	5.00
松島ひき島排気立坑	排気立坑	長崎県	鉱山	1979	670.0	6.00
三井石炭鉱業	砂川南部排気立坑	北海道	鉱山	1977	891.0	5.50
棚原鉱山	採鉱立坑	岡山県	鉱山	1960	507.0	5.0×4.0
田老鉱山	第5立坑	岩手県	鉱山	1969	150.0	4.00
小坂鉱山	上向立坑	秋田県	鉱山	1969	342.0	4.50
釈迦内第3立坑	黒鉱採掘	秋田県	鉱山	1967	380.0	4.00
松木鉱山	運搬立坑	秋田県	鉱山	1971	380.0	5.00
松木鉱山	排気立坑	秋田県	鉱山	1972	260.0	4.00
金属事業公団	獅子ヶ森立坑	秋田県	鉱山	1985	684.5	5.00
伊吹鉱山	上部第1立坑	大阪府	鉱山	1976	140.0	5.30
	上部第2立坑				162.0	5.30
瑞浪超深地層研究所	換気立坑	岐阜県	地下施設	維持管理中	500.0	4.50
	主立坑				500.0	6.50
幌延深地層研究所	換気立坑	北海道	地下施設	維持管理中	350.0	4.50
	東立坑,西立坑				380.0	6.50
オンカロ地下特性調査施設		フィンランド	地下施設	建設中	437.0	6.00

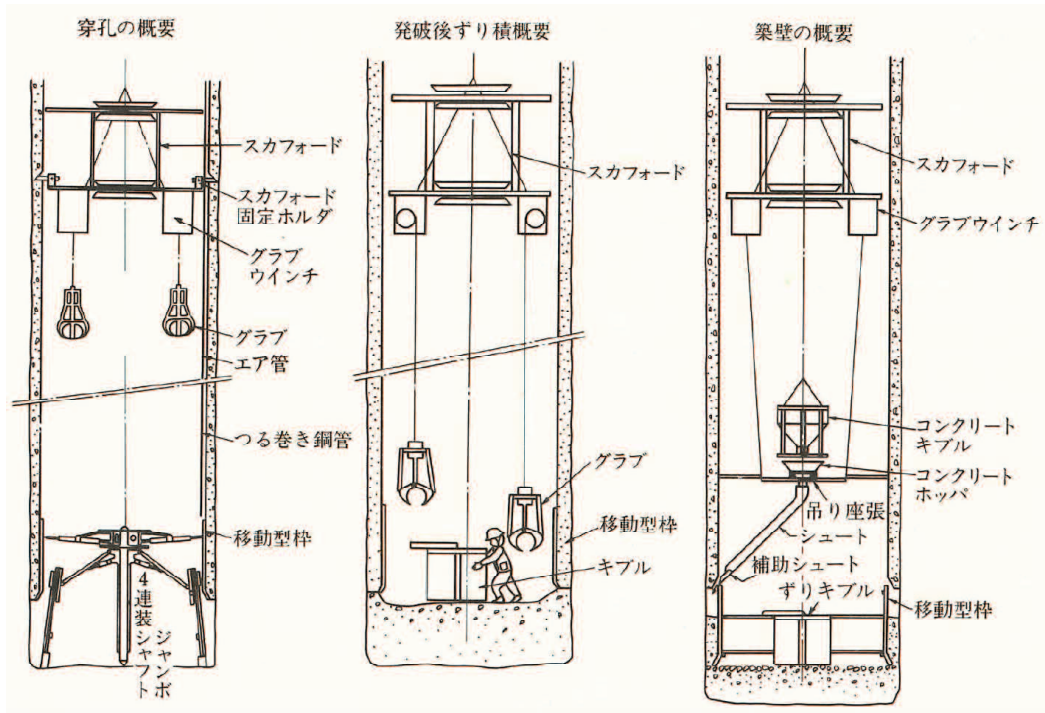


図 1.1 ショートステップ工法<sup>4)</sup>

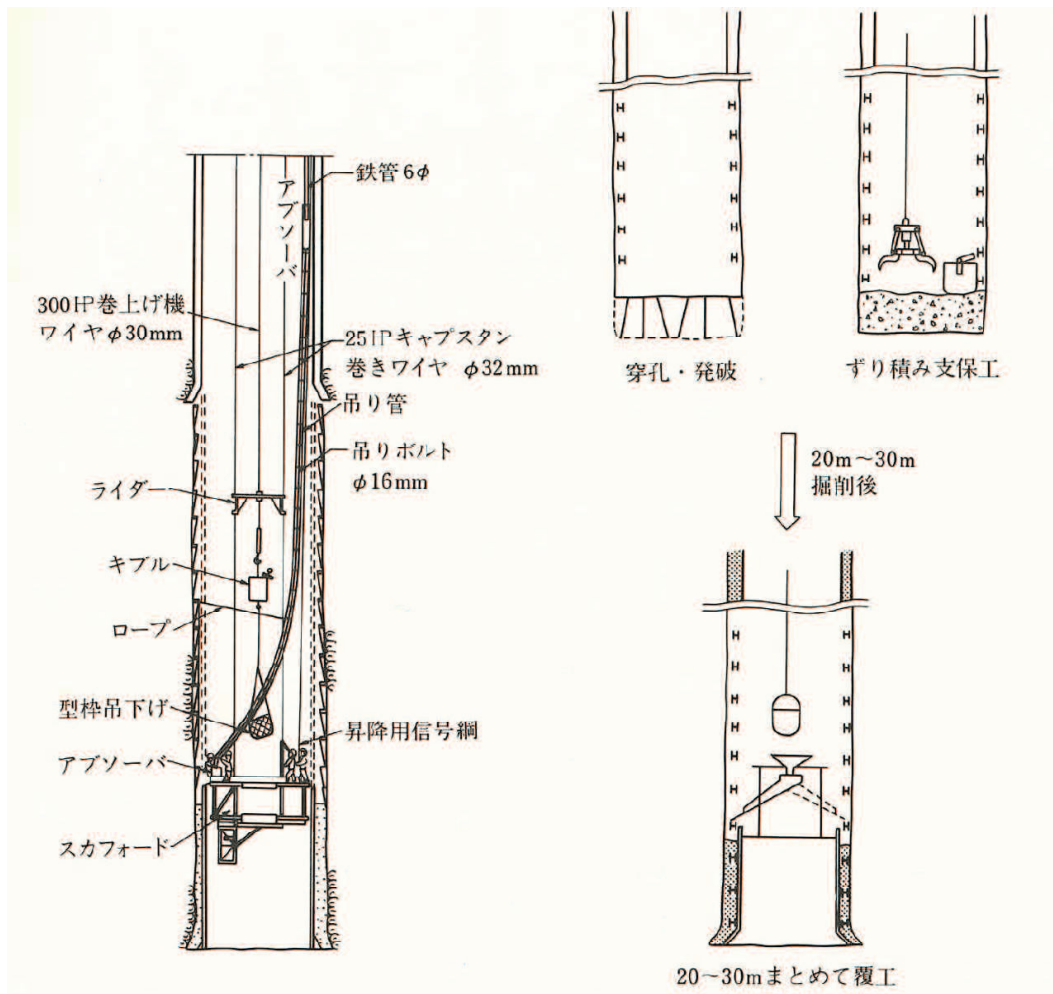


図 1.2 ロングステップ工法<sup>5)</sup>

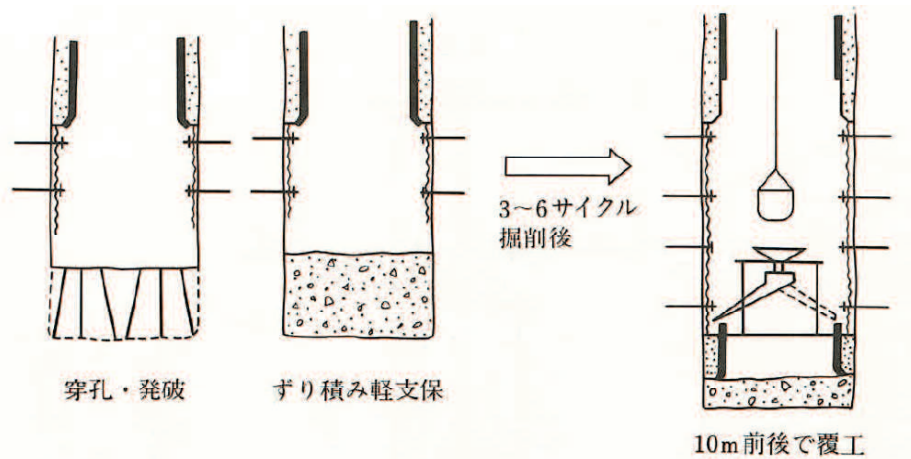


図 1.3 セミロングステップ工法<sup>6)</sup>

以降は、代表的な工法であるショートステップ工法の例として、(国研)日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究所の地下施設建設プロジェクトの事例を示す。

## (2) 幌延深地層研究所地下施設の概要

### 1) 核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の処分

核燃料サイクルとは、原子力発電で使い終えた燃料から核分裂していないウランや新たに生まれたプルトニウムなどをエネルギー資源として回収し、再び原子力発電の燃料に使うしくみである<sup>7)</sup>。

高レベル放射性廃棄物とは、使用済燃料の再処理過程で再利用できないものとして残った放射能レベルの高い廃液をガラス固化にしたものを言う。最終的には、地下 300m 以深の安定した地層に処分する計画である<sup>7)</sup>。

この中で、高レベル放射性廃棄物地層処分施設における問題点のうち、処分箇所へのアクセス立坑に着目した。

立坑施工時において発生する大量湧水や立坑内の冠水のような施工上の問題点があり、立坑施工後において、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し、立坑下への点検者へのリスクが考えられる。

立坑は深度に比例して地圧が高くなり、施工・維持管理上のリスク高くなることから、立坑の施工後の状態を施工時に予測することにより、維持管理時のリスクを低減することができる。核燃料サイクルと地層処分について図 1.4 に示す。

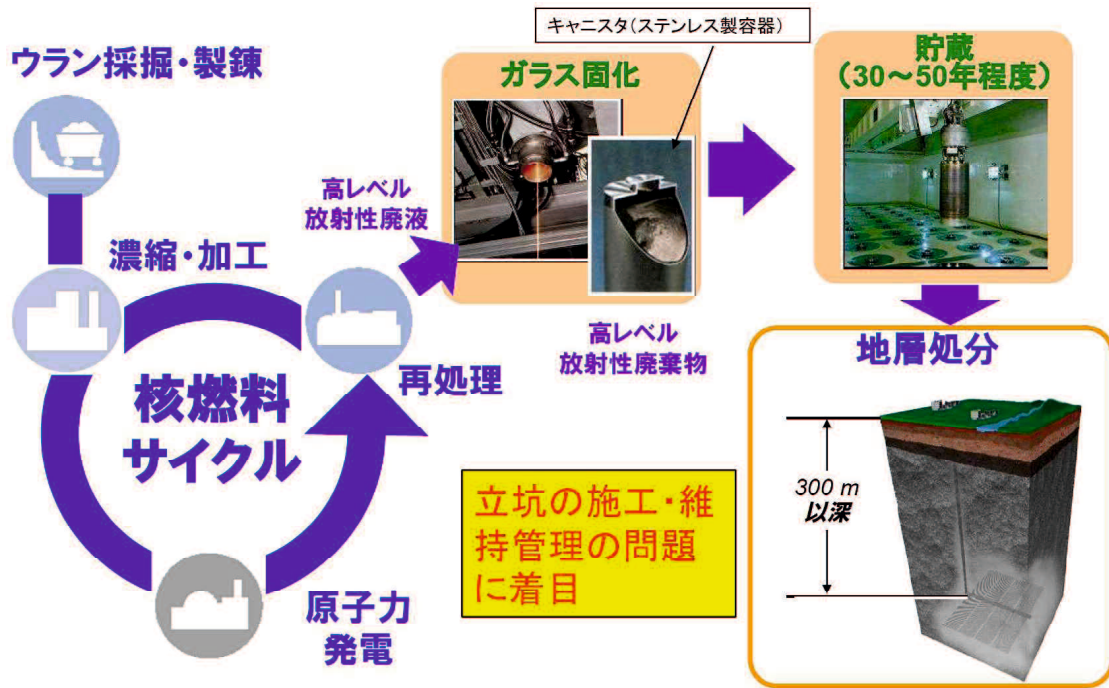


図 1.4 核燃料サイクルと地層処分 8)改

## 2) 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

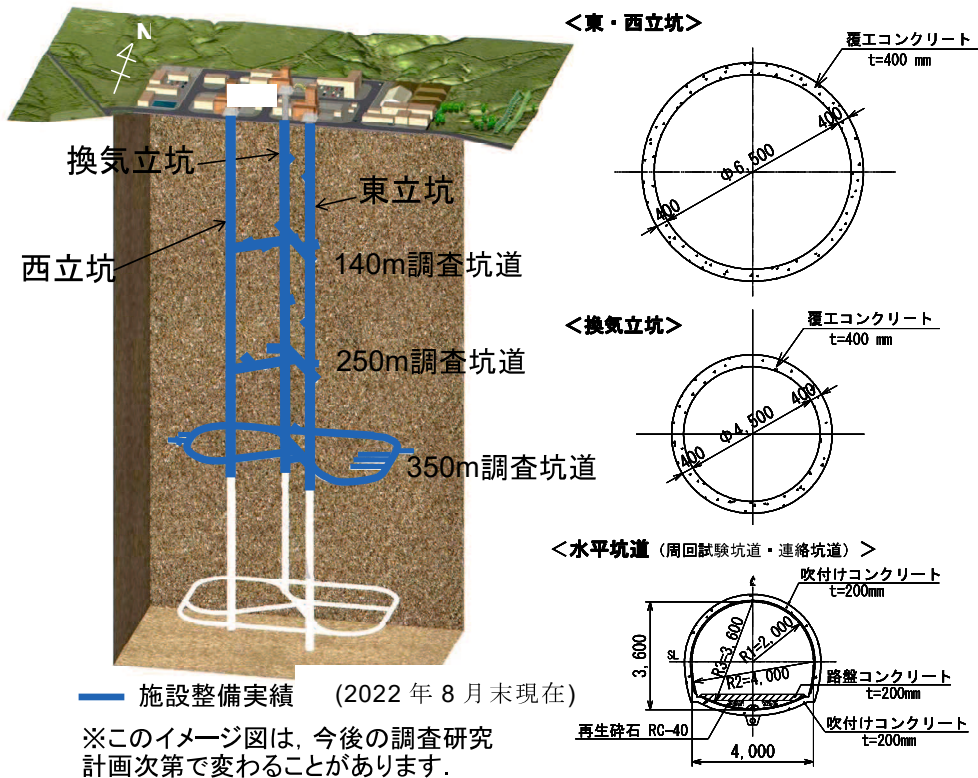


図 1.5 地下研究施設イメージ図および坑道標準断面図 9), 10)

である（図1.5）. 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）の建設を進めている. 立坑の施工はショートステップ工法を採用している<sup>9), 10)</sup>.

各立坑の施工進捗状況については, 表 1.2 に示すとおりであり. 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.

表1.2 各立坑の施工進捗状況

	施工開始	到達深度
換気立坑	2005年11月	380m
東立坑	2006年9月	380m
西立坑	2011年3月	365m

### 3) 幌延地域の地質

#### ①幌延地域の地層

北海道北部の幌延町は, 図 1.6 に示すように天北堆積盆の東端部に位置し, 白亜系を基盤岩とし, 古第三系の羽幌層および曲淵層, 中期中新世前半の宗谷夾炭層, 鬼志別層および増幌層, 中期中新世後半～鮮新世の稚内層および声問層, 鮮新世～前期更新世の勇知層および更別層が分布している<sup>11), 12)</sup>. このうち, 増幌層の下部は礫岩・砂岩・泥岩の互層からなり, 増幌層の上部, 稚内層および声問層はともに珪質岩からなる<sup>13), 14)</sup>. 稚内層および声問層は, 従来, 増幌層に不整合で重なると考えられてきた<sup>15)</sup>が, 広岡<sup>16)</sup>および辻・横井<sup>13)</sup>は調査地域周辺で実施したボーリング調査の結果などから, 特に構造的なギャップが認められないため, 増幌層と稚内層を一連の堆積物として扱っている.

#### ②幌延地域の岩盤

珪質岩は, 珪藻の遺骸を主体とする堆積物であり, 埋没続成が進行するにつれて, 堆積物中に含まれるシリカ鉱物が, 非晶質シリカ（オパール A）から低温型クリストバライト（オパール CT）を経て低温型石英へと相変化する<sup>17)</sup>. Tada and Iijima<sup>18)</sup>は, この相変化に基づき珪質岩をオパール A 帯, オパール CT 帯および石英帯に区分している. 幌延地域では, 声問層を構成する珪質岩がオパール A 帯, 稚内層の上部を構成する珪質岩がオパール CT 帯, 稚内層の下部と増幌層の上部を構成する珪質岩が石英帯にそれぞれ区分される<sup>13), 19)</sup>（図 1.7）.

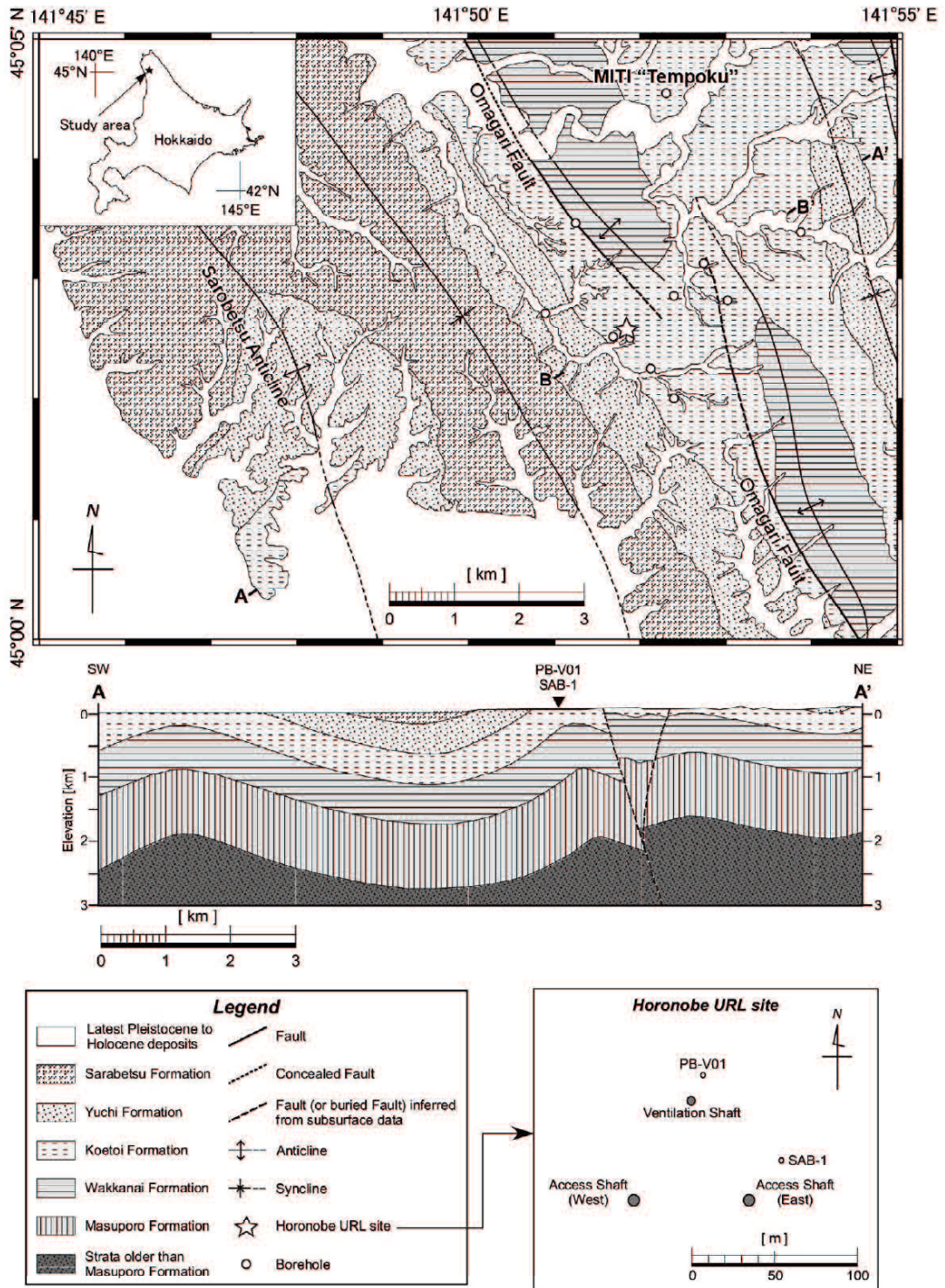
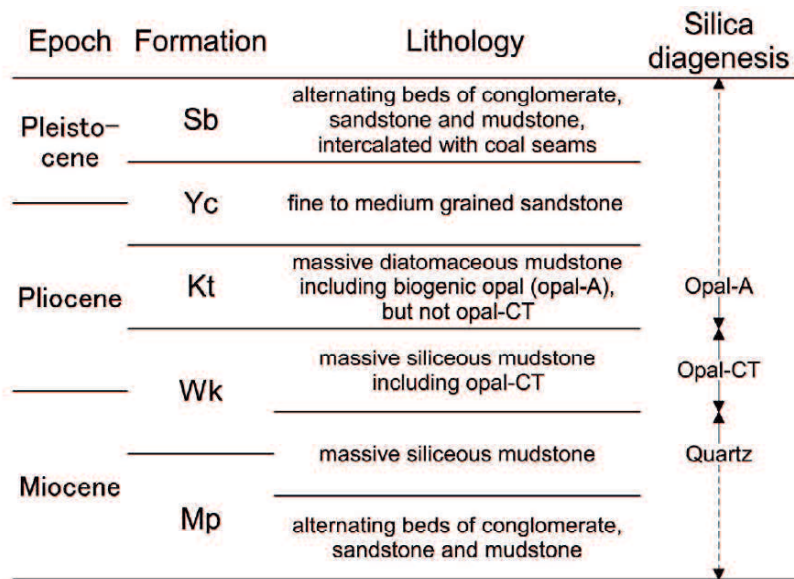


図 1.6 幌延地域の地質図及び地質断面図<sup>20)</sup>





凡例：Sb:更別層，Ye：勇知層，Kt:声問層，Wk:稚内層，Mp:増幌層

図 1.7 幌延地域の模式柱状図<sup>20)</sup>

#### 4) 地下施設における岩盤等級区分

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ことがわかっている。

なお、割れ目とはボーリング調査におけるコア観察やEMI検層において目視で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。

地下研究施設の設計（空洞安定性の検討（支保設計））では、これらの割れ目および潜在的な弱面の影響を考慮し、岩盤等級を岩石の硬さ・割れ目頻度・ヘアークラックの有無の3つの指標を用いて、表 1.3 に示すように区分している<sup>9), 10)</sup>。

表1.3 ボーリングコアに基づく岩盤等級区分<sup>9), 10)</sup>

岩盤等級 区分	割れ目 頻度	ヘアー クラック	岩石コアの特徴
D		—	カッターの刃が2mm以上刺さる コアは角礫状～岩片状～粘土状を示す
CL	L	—	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃が1mm程度刺さる コアは概ね10cm以上の長柱状から棒状を主体とする
CM	L	—	カッターの刃で傷が付く程度 コアは角礫状～岩片状を示す
	M	有・無	カッターの刃で傷が付く程度 コアは概ね10cm未満の短柱状を主体とする
	H	有・無	カッターの刃で傷が付く程度 コアは概ね10cm以上の長柱状から棒状を主体とする

## 5) 初期地圧

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>10)</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分かっている。これにより、鉛直方向の主応力を土被り圧相当と仮定し、3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と設定している<sup>9), 10)</sup>。

## 6) 立坑の支保設計

立坑の支保設計にあたっては、前述の岩盤等級区分と解析用物性値を考慮し、岩盤と支保部材（コンクリート、鋼製支保工）をモデル化した2次元弾完全塑性FEMにより挙動予測解析を実施している。挙動予測解析においては、切羽進行に伴う掘削解放力を外力として、空洞周辺に発生する塑性領域の幅や支保部材に発生する応力を算定し、塑性領域幅は、ロックボルトが一般的な施工方法により打設可能な範囲内（4m以内）に収まるように、支保部材の発生応力度は、長期許容応力度以内（安全率4以上）となるように支保部材の仕様を決定している<sup>9)</sup>。

## 7) 支保設計のための解析用物性値

表1.4に示す解析用物性値は、岩石供試体での力学試験結果（割れ目・ヘアークラックの影響を受けない物性値：CM-H級、CL-H級）を基準とし、孔内水平載荷試験結果から割れ目の影響を、また、ボーリングコアを用いた一軸圧縮試験結果からヘアークラックの影響をそれぞれ低減係数として評価し、これらを乗じることで解析に用いる岩盤等級に対応した岩盤物性値を設定している<sup>9), 10)</sup>。

表1.4 解析用岩盤物性値<sup>9), 10)</sup>

岩盤等級区分	割れ目頻度	ヘアークラック	岩盤物性値					ヘアークラック(Hr)による低減係数	
			単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	ポアソン比 $\nu$	変形特性	強度特性		変形	強度
					静弾性係数 E[Mpa]	粘着力 c[MPa]	内部摩擦角 $\phi$ [°]		
CL	L	—	15.1	0.164	300	0.5	15	1.0	1.0
		無			500	0.8		0.9	0.8
	有	450			0.6				
	H	無			1300	2.2			
		有			1040	1.5			
CM	L	—	18.5	0.186	500	1.0	25	1.0	1.0
		無			1500	3.1		0.9	0.5
	有	1350			1.6				
	H	無			2500	5.2			
		有			2000	1.6			

### (3) 立坑の施工の事例

立坑の施工の事例として、(国研)日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究所の地下施設について述べる。

#### 1) 掘削・覆工

地下施設の立坑の施工方法は、1 m×2回の掘削後に覆工コンクリートを打設する変則的なショートステップ工法である。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方式、東立坑は発破方式、水平坑道はブレーカによる機械方式である<sup>21)</sup>。

2005年11月より地下施設工事を開始し、地上から換気立坑深度51.1mまでと東立坑深度42.1mまでの坑口部はバックホウによる掘削を行い、換気立坑51.1m以深と東立坑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。各立坑のスcaffoldingと櫓設備を使用した施工フローを図1.7と図1.8に示し、施工状況写真を図1.9と図1.10に示す。換気立坑においては、積込機一体型の自由断面掘削機を掘削に使用し、積込機は掘削土の積込用として計画していた<sup>21)</sup>が、対象としている岩盤が想定した強度(5MPa程度(声間層))よりも低いため、主に積込機による掘削を実施し、壁面の整形に自由断面掘削機を使用している<sup>21)</sup>。

東立坑において、図1.11に示す装薬パターンについても、同様の理由により、実施時の火薬量は計画時の1/3以下とするとともに、装薬前に先行して深さ1m程度の壺掘りを実施している<sup>21)</sup>。

掘削 → 掘削土(ズリ)搬出 → 覆エコンクリート打設

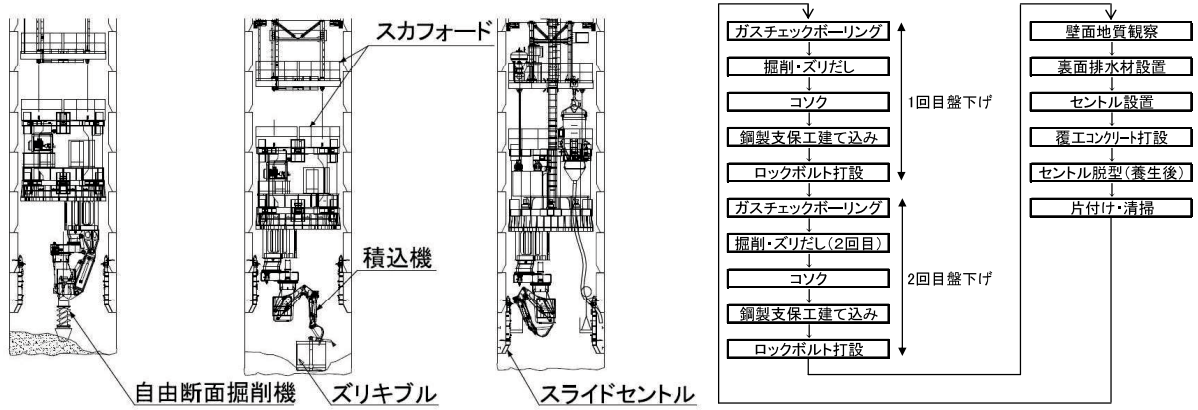


図1.7 換気立坑施工フロー<sup>21)</sup>

掘削 → 掘削土(ズリ)搬出 → 覆エコンクリート打設

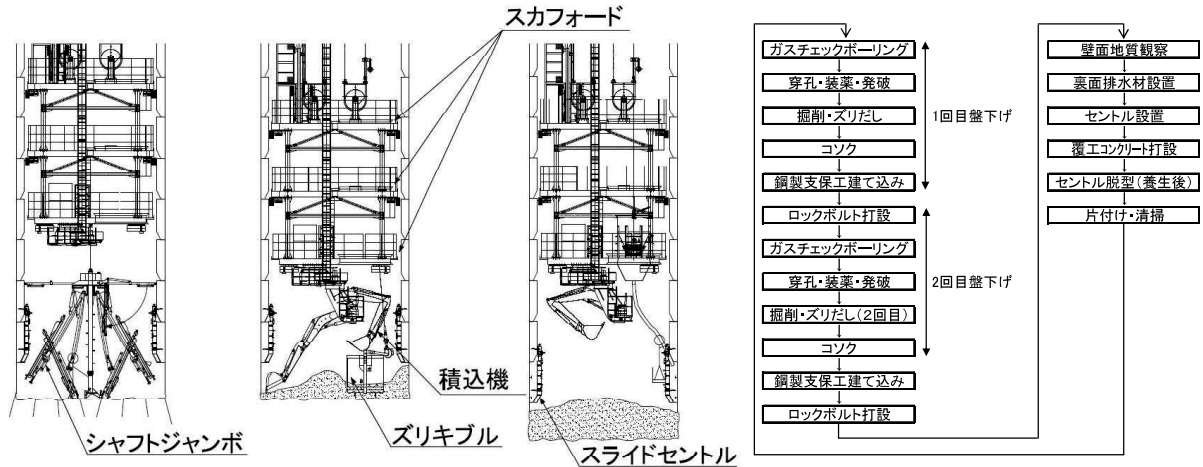


図1.8 東立坑施工フロー<sup>21)</sup>



掘削機・積込機全景



掘削状況



掘削土（ズリ）積込状況



壁面観察状況



鋼製支保工設置況

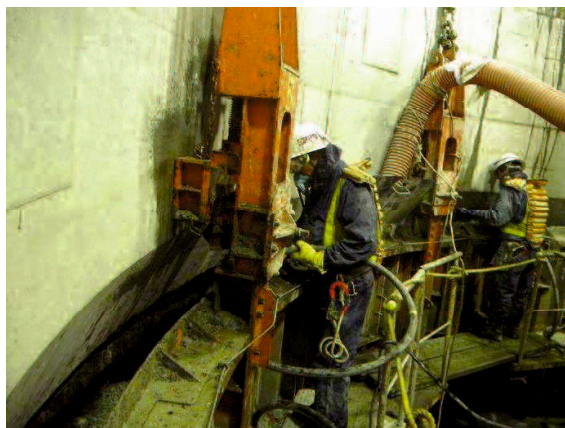


裏面排水材設置状況

図1.9 東立坑施工状況写真（その1）



移動式型枠設置況



覆工コンクリート打設状況



覆工完了状況

図1.10 東立坑施工状況写真（その2）

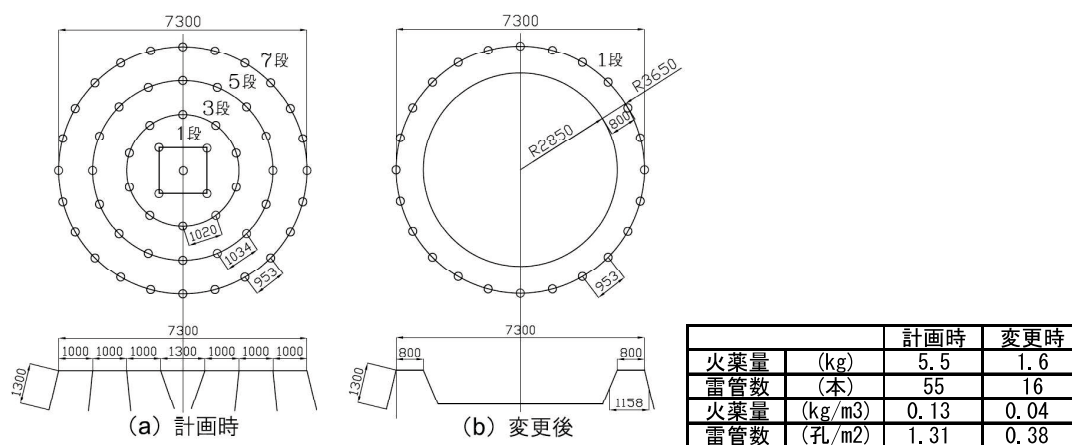


図 1.11 発破パターン図<sup>21)</sup>

## 2) 坑壁地質観察・計測管理

水平トンネルにおける観察・計測の目的は、施工中の切羽の状況や既施工区間の支保部材、周辺地山および周辺構造物の安全性を確認するとともに、調査段階で予

期できなかつた要因を抽出し、観察・計測結果に基づき、トンネル現場の実情に合った設計に修正して、安全で経済的なトンネルを構築することにある<sup>3)</sup>。

トンネルや一般的な立坑における坑壁地質観察の観察時間は限られているため、地質技術者によるクラックの詳細の情報の取得が困難である。一方、幌延深地層研究所の地下施設の立坑掘削におけるサイクルタイム（約4方/サイクル）のうち地質観察時間は150分と約7%を占めている。ただし、1方の全工程は540分としている<sup>2)</sup>。このことから、研究施設の立坑においては坑壁地質観察によるクラックの詳細な情報の取得が可能であると考えられる。

表 1.5 坑壁地質観察によって得られるクラックの情報<sup>2)</sup>

項目	分類基準または取得する情報
クラックの種類	断層，癒着割れ目，せん断割れ目，伸張割れ目，引張せん断割れ目，せん断引張割れ目，ゆるみ割れ目，成因不明割れ目
割れ目の形態	直線状，曲線状，ジグザグ状，階段状
割れ目面の形態	シャープ，凹凸状，滑り痕跡あり
条線の方向	水平面より0°右傾斜のように記載
変位・向き	断層の見かけの鉛直変位量（cm），変位センス（正断層，逆断層，右横ずれ断層，左横ずれ断層），変位の指標とした構造名（岩相など）を記載
割れ目面の姿勢	北を基準として時計回りの角度で記載する方位（azimuth）法と北または南から東または西の方向にどの程度の角度をとるかを示す方角（bearing）法を記載
割れ目の開口幅	スキャンライン上の割れ目の開口幅を記載
充填鉱物	割れ目に充填鉱物が認められる場合は，スキャン幅，最大幅，充填率，色調，推定鉱物を記載
変質	割れ目周辺に変質が認められる場合は，スキャン幅，最大幅，色調を記載
湧水	割れ目からの湧水を記載

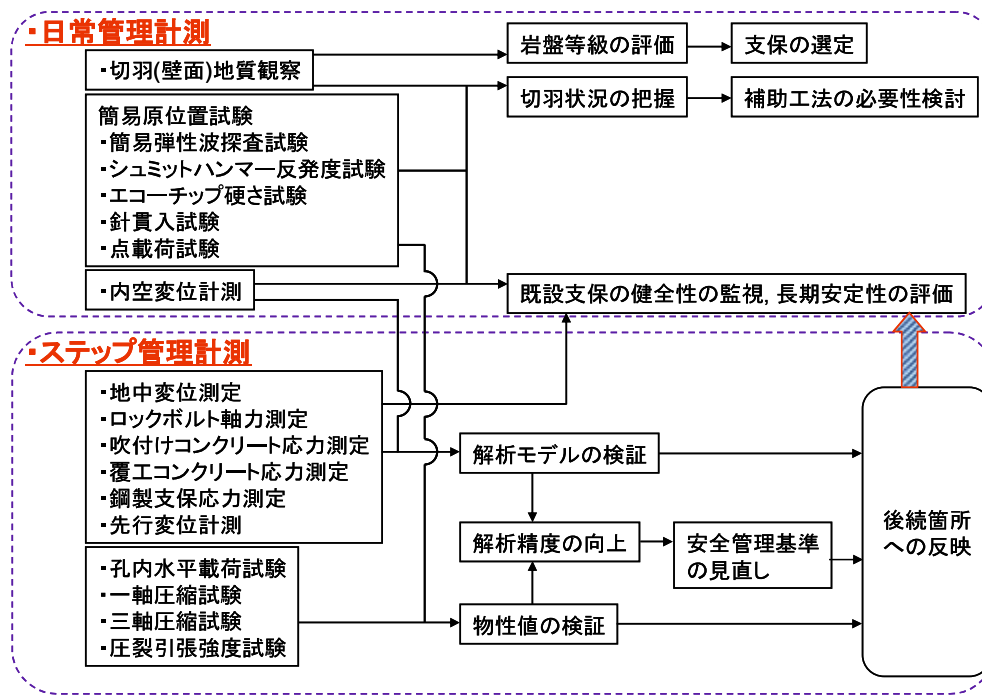


図1.12 幌延深地層研究所の立坑建設における計測結果の反映フロー図<sup>23)</sup>

坑壁地質観察によって得られるクラックの情報は表 1.5 に示す通り、得られるクラックの情報としては、クラックの種類、形態、方向、面の形態、条線や鏡肌の有無、断層岩の種類、充填鉱物の色、充填鉱物の種類（推定）、湧水の状況である<sup>10)</sup>。

立坑における観察・計測についても、水平トンネルの観察・計測を参考に計測計画を立案し、計測管理を実施している。

幌延深地層研究計画では、地上からの調査に基づき、地下環境をモデル化し、地下研究施設建設に伴う影響を予測した結果の妥当性を検証するため、取得した計測データを設計や施工に反映する情報化施工プログラム<sup>23)</sup>を地下研究施設建設開始前に策定し、現在運用中である<sup>23)</sup>。

情報化施工プログラムは、日常管理計測とステップ管理計測に大別される。計測結果の反映フロー図を図 1.12 に示す。同図より、日常管理計測として切羽（壁面）地質観察結果により表 1.2 に基づき岩盤等級の評価を行い、支保を選定する。なお、切羽（壁面）観察結果より、連続性の高い割れ目に起因する不連続体的挙動（キーブロックの滑落等）が予想される場合は、個別に安定性を検討し、必要に応じて局所的な対策を講じる。また、ステップ管理計測として、内空変位計測データおよび地中変位や覆工コンクリート応力等のステップ管理計測データの経時変化を分析することで、既設支保の健全性の監視ならびに地下空洞の長期安定性の評価を行う<sup>23)</sup>。

#### （４）立坑の施工における課題について

立坑施工時の岩盤評価において、岩盤クラックは覆工の支保選定のための定性的



な評価に留まっており，岩盤壁面のクラック 1 本 1 本の長さや方向や開口幅に関する評価は定量的に行われていない．また，クラック 1 本 1 本について観察し記録に残しているものの，その情報を定量的な評価に活用できていない．

岩盤坑壁から発生した湧水の処理について，湧水の発生が確認されたら湧水処理を実施している状況であり，岩盤掘削時の覆工背面の岩盤透水性について，岩盤坑壁クラックから岩盤の透水性を予測できていない．

岩盤の透水性については，直接的に透水係数を取得する透水試験を立坑施工の過程では行わず，高透水層が想定される場合，立坑背面の岩盤の透水性について，掘削後に透水試験を実施して直接的に透水係数を取得している．

一方，岩盤の透水係数とクラックの情報とは関連性があり，坑壁地質観察より得られる岩盤のクラックの情報（クラック長さ，方向や開口幅）を取得・利用することにより，透水係数の評価が出来れば，グラウチングによる岩盤背面の透水性の改良のような湧水対策を速やかに実施することができ，建設工事費用の抑制への貢献に期待できる．

以上より，立坑施工時の岩盤の情報を用いて，岩盤の透水係数を推定し，透水係数の簡易な予測手法を確立することを課題とした．

## 1. 2. 2. 立坑の維持管理の現状と課題

### (1) 一般的な立坑の変状と対策工

トンネルや立坑のような地下構造物の覆工に発生する変状の種類としてはクラック，うき・はく離，はく落，漏水が代表的なものとして挙げられるが，それ以外にも変形や隆起，沈下，移動，そして段差を伴う事例もあり，原因によって発生する変状が異なる<sup>24)</sup>．ここでは，クラック，うき・はく離・はく落，漏水についてその原因と対策について述べる．

#### 1) クラック

##### ①クラックの発生原因

外力により発生するトンネルの変状は，局所的に見れば引張によるクラックや圧縮による圧ざ，せん断によるクラック等の組合せである．作用外力とクラックの状態には密接な関係があり，現場で問題となるのは，外力によってクラックが発生した場合に，それがどのような外力によって発生したものか，また，クラックの発生がどの程度構造の安定性に影響を及ぼしているかということになる．

外力により変状が発生する原因としては，(1)緩み土圧(突発性崩壊も含む)，(2)偏土圧，(3)膨張性土圧，(4)水圧・凍上圧，(5)地すべり，(6)地震力，そして(7)支持力不足などがあり，発生した変状は放置するとトンネルの構造の破壊まで至ることが

あり注意を要する<sup>24)</sup>。



図 1.13 クラックの例<sup>25)</sup>

## ②クラック対策

クラック対策として、主にクラック注入工が挙げられる。RC 構造の鉄筋防錆対策のためのクラックの閉塞，および当て板工の下地処理に適用される。材料は、エポキシ樹脂または、超微粒子無機系セメントを用いられる<sup>26)</sup>。



クラック注入状況

クラック注入完了状況

図 1.14 クラック対策工の例<sup>26)</sup>

## 2) うき・はく離・はく落

### ①うき・はく離・はく落の発生原因

材料や施工に起因して覆工コンクリートにうき・はく離やはく落等を生じる場合がある。また、クラックの発生や豆板が現れる場合もある。原因として材料や施工による影響に加えて、トンネルの置かれている環境の影響を受ける場合もある。

材料や施工に起因して変状が発生する原因は、(1)温度応力(コンクリート硬化時)・乾燥収縮(トンネル坑内の湿度の低下)、(2)施工方法、(3)使用材料(鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応)、そして(4)自然環境による誘発(時間経過といった不可避な事象も含む)などが挙げられる<sup>24)</sup>。

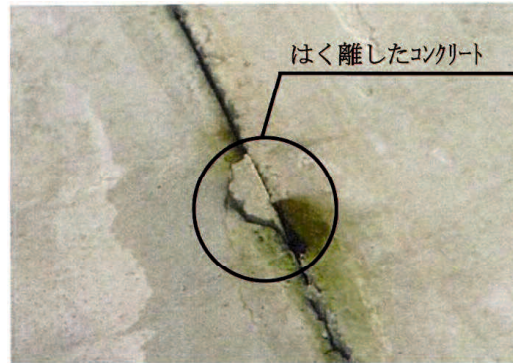


図 1.15 はく離の例<sup>27)</sup>

## ②うき・はく離・はく落の対策

うき・剥離・はく落の対策として，主にはつり落とし工，断面修復工，当て板工が挙げられる．それぞれの工法は以下の通り．

### a) はつり落とし工<sup>28)</sup>

ハンマー，電動ピック，ディスクサンダー，ウォータージェット等を用いて覆工コンクリート表面の劣化部および，劣化した既設補修・補強材を除去する．はつり落としたコンクリート部分の表面は，劣化防止コーティング剤を塗布することが望ましい．変状規模が  $1.0\text{m}^2$  未満の場合に適用する<sup>28)</sup>．

### b) 断面修復工<sup>28)</sup>

不良部分をはつりとした後の部分，もしくは既に脱落した部分の断面をモルタル系材料にて復旧させる．はつり落とし工を行い，かつ変状規模  $0.5\text{m}^2$  以上の場合に適用する．修復材の劣化により，それ自体が落下することがあるので，必ず当て板工と併用する．

### c) 当て板工<sup>28)</sup>

断面修復工を実施した箇所，および変状規模が  $1.0\text{m}^2$  以上の箇所に適用する．当て板工の工種についてはパネル系（鋼板）と繊維シート系（炭素繊維シート）が挙げられる．



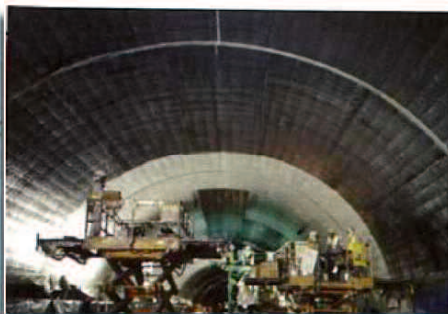
はつり落とし工



断面修復工



当て板工（パネル系）



当て板工（繊維シート系）

図 1.16 はく離の対策工の例<sup>28)</sup>

### 3) 漏水

#### ①漏水の発生原因

漏水による変状について、覆工の材質劣化の原因や背面の土砂の流出による緩みの増加等により外力による変状自体が問題となる場合と漏水に伴って土砂流入、滞水、石灰分の溶出、つらら、側氷、氷盤等の二次的な変状が発生する場合がある<sup>29)</sup>。

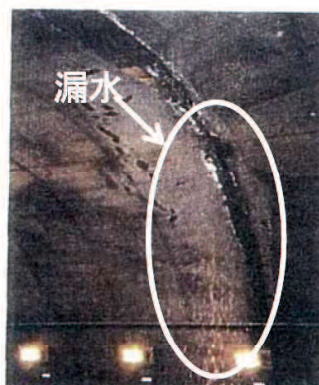


図 1.17 漏水の例<sup>30)</sup>

#### ②漏水の対策

覆工からの漏水対策として、線状の漏水対策工、面状の漏水対策工ならびに地下水

位低下工が挙げられる。線状の漏水対策工は導水樋工，溝切り工，止水注入工（クラック注入），止水充填工（V カット充填）が挙げられ，面状の漏水対策工は防水パネル工，防水シート工，防水塗布工が挙げられ，地下水低下工は水抜きボーリング，水抜き孔が挙げられる<sup>29)</sup>。



導水樋工



溝切り工



面状対策工（防水パネル工）

図 1.18 漏水対策工の例<sup>28)</sup>

## （2）立坑の覆工の点検

### 1）トンネルにおける覆工の点検

道路トンネルにおいて，従来の点検技術においては，①スケッチによる変状の記録，②点検者の主観による打音判定（うき，剥離判定），③暗所で狭隘での作業であるなどの理由により，安全性や客観性に乏しく，見落としの発生や変状の進行性を適正に評価できないなどの課題に対して，走行型画像計測技術，走行型レーザー計測技術および走行型レーダー計測技術を有する走行型高速 3D 計測システムによるロボット技術を活用し，これまで行われていた目視点検を主体とした人力による点検と融合させることにより，トンネル点検の効率化・高精度・低コスト化を図ることが可能となることから，走行型高速 3D 計測システムの機能とトンネル定期点検の支援技術としての活用方法，診断方法について提案されている<sup>31)</sup>。

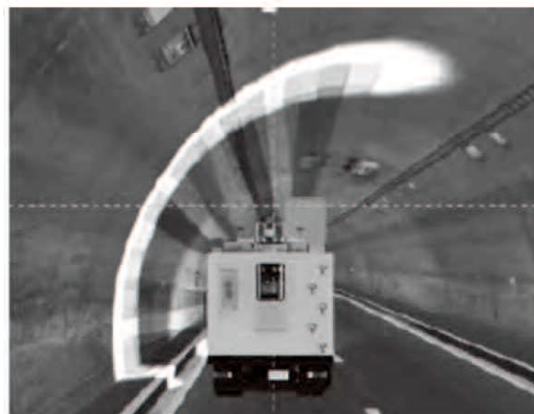
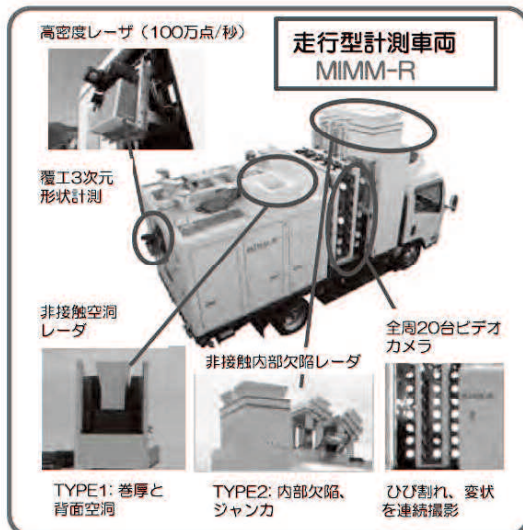


図 1.19 走行型 3D 計測車両の計測システム <sup>31)</sup> 図 1.20 画像計測状況イメージ <sup>31)</sup>

## 2) 立坑における覆工の点検

ショートステップ工法は、スcaffordと櫓設備を使用して施工を行っており、覆工施工後、スcaffordが通過する区間における覆工のクラックについては、スcafford上で覆工のクラックの長さや開口幅を調査することにより、進行性について定量的に把握することが可能であるが、それ以降の深度については、スcafford上で覆工のクラックを確認できないことから定量的な把握が出来ない。また、スcafford設備の点検等で地上への移動にあわせて、覆工のクラック調査を実施して進行性について把握することは可能である。

しかしながら、一般的には、立坑の覆工の点検においては、覆工の状況を目視で確認する程度であるが、目視での点検には限界があり、立坑からのコンクリート片の落下や顕著な漏水が無いなどの定性的に異状が無いことを確認しているのが現状である。

## (3) 立坑の覆工の健全性評価

### 1) トンネルにおける覆工の健全性評価

海瀬ら <sup>32)</sup>は、高速道路の覆工詳細点検の高精度化及び効率化を目的に、覆工ひび割れ指数(TCI)に基づく外力および剥落に関連する評価点と特記項目を組み合わせた評価による高速道路会社(NEXCO)が保有する 85,000 スパン以上の点検データ分析を行っている。分析の結果、建設工法の違いにより覆工健全度評価に異なる傾向を有することが分かっている。また、机上点検と詳細実施点検との比較により、点検システムの実用性は高いが、今後、更なる高精度化と効率化のため特記事項の照査や変状の進行性の把握等を検討する必要性が明らかとなったと報告されている。

## 2) 立坑における覆工の健全性評価

立坑の点検において、覆工の状況を目視で確認する程度であるため、覆工のクラックの情報を記録に残している事例は殆ど無く、覆工の定量的な健全性評価は行われていない。

### (4) 立坑の維持管理の課題について

トンネルにおいては、覆工のクラックの長さや開口幅の測定による定量的な評価がなされているが、立坑においては目視での点検に限界があり、覆工の健全性について定量的な評価ができず、定期的に覆工の健全性やクラックの進行性が把握できないことから、対策工の実施時期について判断がつかない。また、立坑の覆工のクラックの集中した時等の事象が確認された時点で、対策工を検討・実施することとなる。

一方、覆工のクラックの長さや開口幅の情報を取得して、それらの進行性について把握できたとしても、その情報を使用して定量的に覆工の健全性が把握できていない。覆工クラックと岩盤クラックの関連性について、立坑掘削時の岩盤坑壁の情報（クラック、岩盤強度）を用いた評価はされていないため、岩盤掘削時の情報から覆工に発生するクラックの予測が出来ていない。

立坑施工後、コンクリート覆工に対策が必要な変状が確認された場合、対策工の検討においては、建設当時の記録を参考にすることになるが、岩盤のクラックに関して詳細な記録が残っていないことが多いため、追加のボーリング調査など岩盤調査により検討に必要な情報を取得して対策工を検討することとなる。そして、覆工の変状対策については、覆工のクラックの集中のような変状が確認されて対策工を実施しているのが現状である。

しかし、コンクリート覆工の変状と岩盤掘削時の岩盤強度やクラックに関する情報との関連性が解明できれば、立坑施工時の岩盤の情報を利用し、覆工の劣化状態を推定でき、合理的な支保の選定ならびに実施により、総合的な維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

以上より、立坑施工時の岩盤の情報を用いて、覆工の劣化状態を推定し、これらについて簡易な予測手法を確立することを課題とした。

## 1. 3. クラックテンソル理論

岩盤の水理・力学的挙動を論ずるためには、少なくとも応力、歪み、変位、透水係数などのベクトル、テンソル量を扱わなければならない。地質情報がテンソル量で表されていれば、これらのテンソル量と違和感なく共存できる。また、地質情報をテンソル量で表すことにより、連続体力学より得られた様々な理論や手法を特別

な工夫することなく利用することができる。これらの観点から、小田<sup>1),2)</sup>は岩盤中に分布する不連続面の幾何学性をテンソル量で表すクラックテンソル理論を提案した。

### 1. 3. 1. クラックの幾何学特性の仮定

クラックテンソルはクラックの幾何学的情報をテンソル量で表したものであるが、クラックの幾何学性を支配する密度、大きさ、方向、開口幅を以下のように仮定している。

#### (1) クラックの密度

クラックの場所は、 $m^{(V)}$ を体積  $V$  の中心数であると仮定する。そして、統計的に均質な領域  $V$  におけるクラックの体積密度  $\rho$  は式(1.1)のように定義される。

$$\rho = \frac{m^{(V)}}{V} \quad (1.1)$$

#### (2) クラックの方向

クラックは、その表面に対して単位法線ベクトルを持つ 2 つの平面から構成される。従って、2 つの単位ベクトル  $n^{(+)}$  と  $n^{(-)}$  は各クラックに与えられ、 $2m^{(V)}$  は、体積  $V$  中のクラックの総数になる。簡単のために、これら 2 つのベクトルは、両方とも、 $n$  で表わされる。 $d\Omega$  を微小な立体角(ステラジアン)であると仮定する。確率密度関数  $E(n)$  を用いて、 $2m^{(V)} E(n) d\Omega$  は、クラックの方向が微小な立体角  $d\Omega$  の範囲内に存在するクラックの数となる。確率密度関数  $E(n)$  は、式(1.2)を満足する。

$$\int_{\Omega} E(n) d\Omega = 2 \int_{\Omega/2} E(n) d\Omega \quad (1.2)$$

ここで、 $\Omega$  と  $\Omega/2$  は立体角である。 $\Omega(4\pi)$  は単位全球体、 $\Omega/2(2\pi)$  は単位半球体である。 $E(n) = E(-n)$  の時、 $\Omega$  に関する  $E(n) d\Omega$  の積分値は、 $\Omega/2$  に関する積分値と同じになる。この法則もまた、 $P(n) = P(-n)$  の時、 $P(n)E(n)d\Omega$  の積分に応用される。クラックの方向は、傾斜と走向の測定により記録され、シュミットネット上の極の集中度として報告されている。等高線は、単位領域における  $n$  の集中度を示すために作られる。それぞれの等高線の割合は、等方であれば  $1/4\pi$  で割り当てられ、 $E(n)$  のコンター値と同じ意味を持つ<sup>33)</sup>。そのようなコンターマップを作ることは一般的であるので、 $E(n)$  はよく知られている関数としてみなされる。 $E(n)$  の信頼できる関数を得るために、偏りのあるクラックのサンプリングを避けるように注意が必要となる。



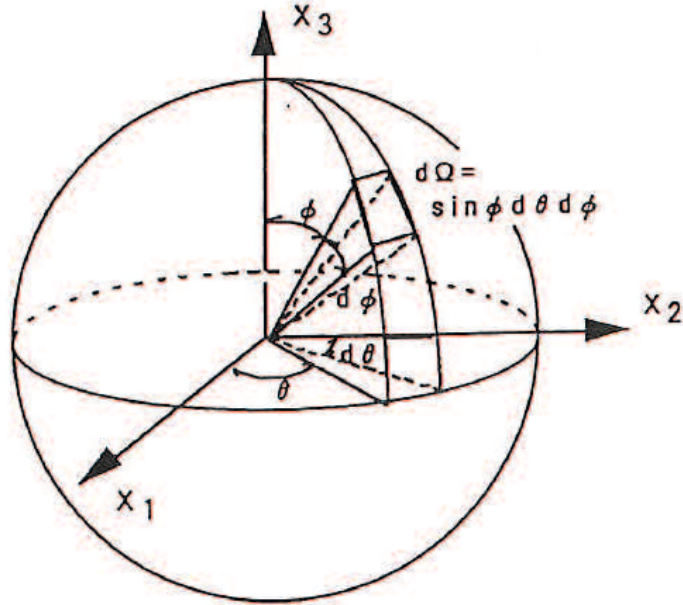


図 1.21 クラックの方向の定義<sup>1)</sup>

### (3) クラックの大きさ

面積  $S$  の広がりを持つクラックをそれと等価な円盤と置換する．そうすると，直径  $r$  を大きさのインデックスとして仮定する ( $r=2(S/\pi)^{1/2}$ )．

確率密度関数  $f(r)$  は， $f(r)dr$  が  $r$  と  $r+dr$  の範囲に存在するクラックの確率として与えられる． $f(r)$  について利用可能な情報はない．必要であれば，

$$f(r) = \lambda e^{-\lambda r} \quad (1.3)$$

のような負の指数分布や，

$$f(r) = \frac{1}{\sigma r \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1.4)$$

のような対数正規分布によって求めることができる．式(1.3)は，平均と標準偏差が共に  $1/\lambda$  を持つ関数である．そして，式(1.4)の  $\mu$ ， $\sigma$  はそれぞれ平均値と標準偏差である．確率密度関数  $E(n,r)$  では， $n$  と  $r$  が統計的に独立では無いより一般的な場合で用いられなければならない．もし，独立ならば， $E(n,r)=E(n) \cdot f(r)$  が成立する．

### (4) 開口幅

開口幅は，クラック間の距離でありクラックで最も重要な要素の一つである．クラックの形状を直径  $r$ ，開口幅  $t$  の penny shape とするため，クラックの開口幅は  $t$  と仮定する．

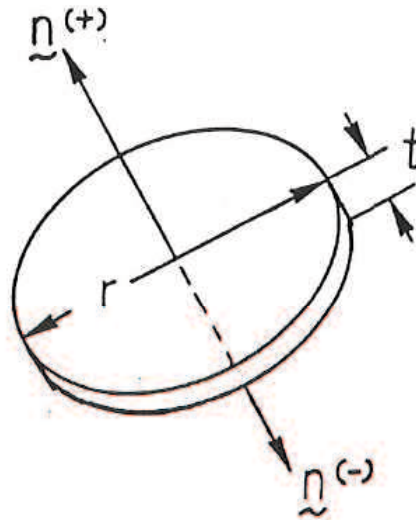


図 1.22 3次元クラックモデル

### 1. 3. 2. クラックの幾何学特性の指標

岩盤評価においては、クラックの幾何学特性を用いた評価が行われている。例えば、クラックの幾何学的指標として、ダメージテンソルならびにクラックテンソルについて述べる。

#### (1) ダメージテンソル

岩盤内に分布する不連続面群は、各不連続面が厚みを有しない平面であるとの理想化のもとに式(1.5)で与えられるダメージテンソル  $\Omega_{ij}$  によって定量化される<sup>34),35),36)</sup>。

$$\Omega_{ij} = \frac{\hat{l}}{V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} S^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (1.5)$$

ここに、 $\hat{l}$  は不連続面を含んだ岩盤が、不連続面の完全な進展により無数の岩石ブロック  $V$  の集合体と化す極限状態を考えたときのその岩石ブロックの代表的長さを与えるもので、節理群の平均間隔を目安に決定される。この岩石ブロックをその系の構造最小単位と呼ぶ。 $n$  はクラックの法線方向を向く単位ベクトルで、座標軸  $x_i$  に対し  $n_i$  の成分を持つ。式(1.5)のダメージテンソルは、岩盤内部の有効面積の欠損率を三次元的に表している。

#### (2) クラックテンソル

クラックテンソルはクラックの幾何学的情報（密度、大きさ、方向、開口幅）をテンソル量で表したものであり、式(1.6)のように表す。

$$F_{ij} = \frac{1}{4V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.6)$$

透水性のテンソルは、式(1.7)のように表す。

$$P_{ij} = \frac{\pi}{4V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^2 (t^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.7)$$

ここに、 $m^{(V)}$ は体積  $V$  のクラックの数、 $r^{(k)}$ は  $k$  番目のクラックの長さ、 $t^{(k)}$ は  $k$  番目のクラックの長さ、 $n$  はクラックの法線方向を向く単位ベクトルで、座標軸  $x_i$  に対し  $n_i$  の成分を持つ。

上記より、それぞれについてクラックの方向については表現できているが、損傷テンソルは不連続面の開口幅を考慮していないことや、岩石ブロックの代表長さが節理群の平均間隔を目安に決定されるのに対して、クラックテンソルは開口幅を考慮していることや、1本1本のクラックの長さや方向や開口幅に対して、テンソル量を直接算出でき、岩盤のクラックの情報を定量的に評価できることから、クラックテンソルの適用が適切であると考えられる。

### 1. 3. 3. クラックテンソルの概要

与えられた境界条件のもとで、不透水の基盤を持つクラックを含む岩盤の水理・力学的性質はクラックの幾何学的性質によって決定される。実際のクラックは、複雑な表面と様々な開口幅を持つが、理論や解析のためにその幾何学的記述を単純化する。図 1.21 に示すように、クラックを直径  $r$  ( $r_m$  : 最大値)、一様な開口幅  $t$  ( $t_m$  : 最大値)、方向は主平面の単位法線ベクトル  $n$  によるコイン状のものとしてモデル化する。全てのクラックはこれらのランダムな変数でその特性を記述できる。

$(n, r, t)$  で表されるクラックは、 $n$  周りの微小立体角  $d\Omega$  の内側を向いている単位法線ベクトル  $n$  を持ち、直径  $r \sim r + dr$ 、開口幅  $t \sim t + dt$  という範囲内にあるクラックを示す。確率密度関数  $E(n, r, t)$  を用い、 $(n, r, t)$  クラックのある確率は  $2E(n, r, t) d\Omega dr dt$  である。

#### (1) クラックテンソルの定義

クラックテンソルは先に述べたクラックに関する幾何学的情報を定量的にテンソル量で表したものであり、式(1.8)によって定義される偶関数のテンソルである。

$$F_{ij \dots k} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} t^b r^a n_i n_j \dots n_k E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1.8)$$

ただし、 $\rho$  は、単位体積当りのクラック数、 $a$  はクラックの直径  $r$  の  $a$  次モーメント、 $b$  は開口幅  $t$  の  $b$  次モーメントを表す。 $\Omega$  は全立体角で  $4\pi$  に等しく、 $n$  はクラックの法線方向を向く単位ベクトルで、座標軸  $x_i$  に対し  $n_i$  の成分を持つ。この式は、ISRM の 10 個のパラメタのうち方向、開口幅、間隔、連続性、セット数、ブロックサイズの 6 つを取り込んでいると言える。式(1.8)の定義では、クラックの相対的な位置関

係が欠落している．なぜならば，統計的に均質に空間的に分布しているとみなしているためである． $n_i n_j = 1$  を考慮して，式(1.8)を縮約すれば，0階，2階，4階のテンソルが定義でき，特に  $a=3, b=0$  とした次のテンソルは岩盤の水理・力学的挙動を扱ううえで重要である．

$$F_0 = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1.9)$$

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1.10)$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j n_k n_l E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1.11)$$

同様に， $a=2, b=3$  の2階のテンソルを特に  $P_{ij}$  とすると，式(1.5)より式(1.9)を得る．

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^2 t^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1.12)$$

式(1.9)～式(1.11)のテンソルは，いずれも無次元量であるのに対して， $P_{ij}$  はクラックの幾何学性に関する2階のテンソルであり，長さの2乗の次元を持つ．そして，岩盤内の不連続面に沿う水の流れを考えるとときに重要となる．

### 1. 3. 4. 2階のクラックテンソル

#### (1) 定義

式(1.10)で表されるクラックテンソル  $F_{ij}$  は総和形式により式(1.13)と表され，2次元の2階のクラックテンソルは式(1.14)のように表される．

$$F_{ij} = \frac{1}{4V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.13)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{L^2} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (i, j = 1, 2) \quad (1.14)$$

これらを成分表示すると，

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (3 \text{ 次元}) \\ &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \quad (2 \text{ 次元}) \end{aligned} \quad (1.15)$$

ここで， $V$  は領域の体積(2次元の場合はその領域の面積)であり， $r^{(k)}$ ， $n_i^{(k)}$  は，それぞれ  $k$  番目のクラックの直径及び方向を表すベクトルである．

## (2) クラックテンソルの主方向と主値

2 階のクラックテンソル  $F_{ij}$  は  $F_{ij}=F_{ji}$  の対称性をもつ．また，直交デカルト座標に定義される  $F_{ij}$  に対して，

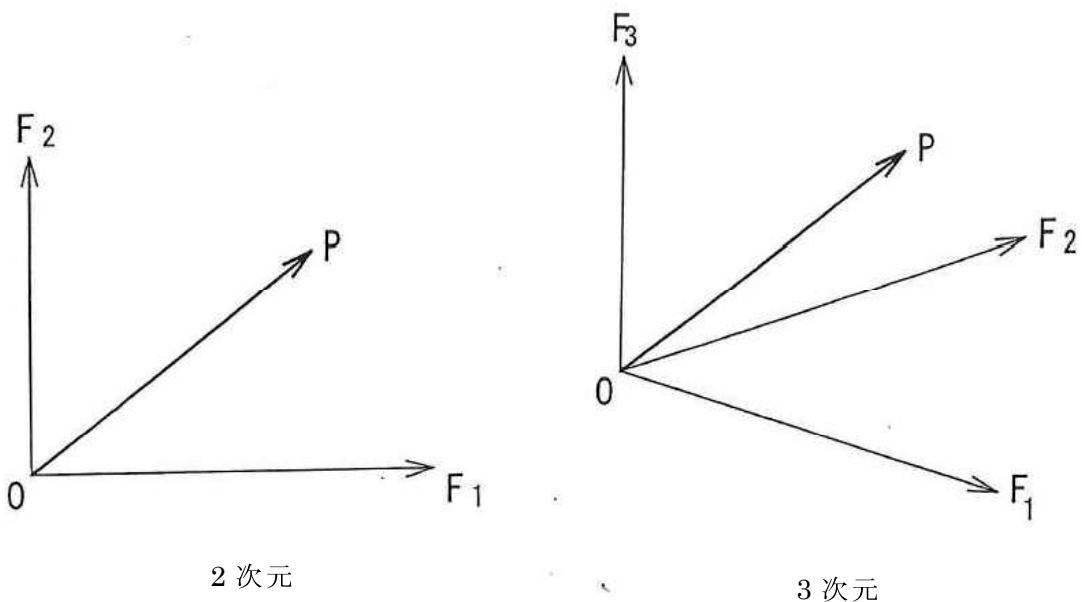
$$(F_{ij} - \lambda \delta_{ij})e_i = 0 \quad (1.16)$$

という互いに直交する 3 つのベクトル  $e_i$  が存在する．このベクトルを  $F_{ij}$  の固有ベクトルと呼び，その方向を主方向という．それぞれの主方向は 3 次元のクラックの配列を最大，中間，最小の卓越方向を示している．

また，スカラー量  $\lambda$  は固有ベクトルに対応した固有値であり， $F_{ij}$  の主値である．各々の主方向に対応する主値を  $F_1, F_2, F_3$  とすると，ある 2 階のクラックテンソルは式 (1.14) のように成分表示される．

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.17)$$

2 階のクラックテンソル  $F_{ij}$  の幾何学的性質を具体化するために，その主値である  $F_1, F_2, F_3$  を軸とする空間を導入する．これを主構造空間と呼ぶと，2 階のクラックテンソル  $P$  は主構造空間内で，**図 1.23** のように 2 次元と 3 次元のベクトル表示される．



**図 1.23** 2 階のクラックテンソルと主構造空間 <sup>1)改</sup>

## (3) クラックテンソルの不変量

式(1.16)において自明解  $e_i=0$  以外の解を持つ必要十分条件は式(1.18)で与えられる．

$$|F_{ij} - \lambda \delta_{ij}| = 0 \quad (1.18)$$

これは $\lambda$ に関する3次式であり、式(1.19)のように表すことができる。

$$\lambda^3 - I_1 \lambda^2 + I_2 \lambda - I_3 = 0 \quad (1.19)$$

ここで、

$$I_1 = F_{11} + F_{22} + F_{33} (= F_0) \quad (1.20)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} F_{22} & F_{23} \\ F_{32} & F_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} F_{11} & F_{13} \\ F_{31} & F_{33} \end{vmatrix} \quad (1.21)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{vmatrix} \quad (1.22)$$

$I_1, I_2, I_3$  は基底の選び方によらず、一意に定められるので不変量である。これらは、それぞれ2階のクラックテンソル $F_{ij}$ の第一、第二、第三不変量と呼ぶ。

### 1. 3. 5. クラックテンソルに関する既往研究

クラックテンソル理論に関する既往研究について、変形、浸透・透水、分散・拡散で分類した。変形については、不連続面をモデル化することにより地下発電所のような不連続性岩盤の掘削解析により地下空洞の変形挙動を評価している。詳細は以下の通り。なお、浸透・透水については、1.4節にて詳述する。

#### (1) 変形

- 1) 小田ら<sup>37)</sup>は、クラックの幾何学的特徴と弾性波の速度構造との関連性を明らかにする目的で、石膏モデルと原位置岩盤に対する弾性波速度試験の結果を分析・検討している。弾性波速度（S波を含めた）の方向依存性は、節理性岩盤のクラック調査法として有力であることを確認されている。
- 2) 山辺ら<sup>38)</sup>は、クラックテンソルの概念を適用し、多数の亀裂を含む岩盤と等価な非線形および線形な異方弾性体の有限要素解析を行い、実測値と比較検討した。また、解析に用いるパラメタについての考察から、いずれのパラメタも原位置で従来実施されている実験から求め得ることを示した。しかし、パラメタの決定方法に関する妥当性は、原位置岩盤における調査・試験により一層の検討を重ねるべきである。さらに、岩盤構造物の安全性を論じるうえで、破壊に対する検討が重要であることは言うまでもないが、そのためには本研究の手法に加えて、亀裂を含む材料の降伏条件や、亀裂の進展を考慮し得る一般的な形式を持つ構成関係が必要であることを付記しておく。
- 3) 山辺ら<sup>39)</sup>は、多数の不連続面を含む岩盤とそれと等価な連続体として評価した

ときの変形問題に限定してクラックテンソル理論の適用性を検討している。その結果、多数の亀裂を含む岩盤と等価な非線形異方弾性体の有限要素解析の解析結果が実験値をよく説明できていることが判明している。また、実験から得られる割線弾性係数の変化を線形異方性弾性体としての弾性コンプライアンスから予測できることを示している。

- 4) 岩盤内に存在する不連続面群から形成される幾何学形状を表現するクラックテンソル、初期地圧としての応力テンソル、地下空洞の幾何形状としての長軸方向に注目し、これら三者の影響を一般的に表現することを目的としている。多田ら<sup>40)</sup>は、不連続性岩盤を等価な異方線形弾性体で表すクラックテンソルの概念を用いた三次元有限要素変形解析を実施し、クラックの幾何学性と空洞の方向と初期地圧との相互関係が、不連続性岩盤の弾性変形挙動に重要な影響を与えることを示している。
- 5) 多田ら<sup>41)</sup>は、不連続性岩盤解析の一つであるクラックテンソルを用いた解析により、円形断面の空洞掘削解析を行い、不連続面の垂直剛性とせん断剛性の比が空洞周辺岩盤の応力・変形状態に与える影響を調べるとともに、不連続面の剛性の応力依存性を考慮した解析を円形・幌型断面空洞および大規模地下発電所空洞の掘削解析に適用した。その結果、不連続面の垂直剛性とせん断剛性の応力依存性を考慮することにより、従来の不連続面の剛性を一定値で近似する方法よりも精度良い不連続性岩盤の変形挙動予測が可能となることを明らかにした。

## (2) 分散・拡散

- 1) Oda ら<sup>42)</sup>は、理論的および数値的研究について、クラックの幾何学性がクラック媒体の透水性や流体力学的分散などの水理現象にどのように影響するかについての基本的な理解を深めることに特に重点を置いて行われた。透水テンソル  $k_{ij}$  は、クラックの長さ、開口部、方向の観点から定式化され、さらに 1 つの無次元量  $\lambda$  は、既存のクラックの密度と異方性の関数として与えられる。分散テンソル  $D_{ij}$  は 2 つの異なる原因で構成されている。1 つ目は、各トレーサーが平均経路から外れた方向にあるクラックに沿って移動するように強いられているという事実から来ている。2 つ目は、クラックの入った媒体全体に水頭が不均一に分布することである。2 番目の原因は、クラック密度が低い場合だけでなく、クラックの配置に異方性がある場合にも重要性を増している。特に全体的な導水勾配がクラックの優先方向と平行である場合、水頭の分布は非常に不均一になる。関連するクラックテンソル  $N_{ij}$  が等方性である限り、透水テンソル  $k_{ij}$  は等方性である。4 階のクラックテンソル  $N_{ijkl}$  が等方性でない限り、分散テンソル  $D_{ij}$  は異方性である。したがって、等方性透水テンソルを特徴とするクラック媒体は、必ずしも分散が等方性である

とは限らない。

## 1. 4. 岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態に関する既往研究

### 1. 4. 1. 岩盤透水係数に関する既往研究

岩盤の透水係数に関する国内外の既往研究を分析すると、岩盤のクラックを用いた研究事例は少ない中で、ステレオロジーを適用した三次元クラックテンソルの推定について、供試体スケールでは検証されている事例がある。そして、現場スケールへの展開はなされているものの、その構造テンソルについては、ステレオネットにより卓越方向のような割れ目群の代表的な方向について構造テンソルを推定しているのもであり、ステレオロジーによりクラックの単位法線ベクトルの分布を表わす確率密度関数を級数展開して定式化した計算方法を用いて構造テンソルの推定したものでは無かった。国内外の既往研究の詳細は以下の通り。

#### (1) 岩盤透水係数に関する国内の既往研究

- 1) 平間ら<sup>43)</sup>は、石灰岩の採石場において、クラック調査並びに透水試験などの各種の岩盤試験を実施し、クラックテンソルによる透水係数の推定と実験結果との比較を行った結果、よく一致していることが分かっている。
- 2) 斉藤ら<sup>44)</sup>は、現地調査の結果を浸透流解析に直接利用するシステム開発の一端として、応力が岩盤の浸透流に及ぼす影響を検討している。岩盤の透水性を調査・解析するときには不連続面の幾何学的特性と原位置の応力状態を把握することが重要であることが分かっている。
- 3) 斉藤ら<sup>45)</sup>は、クラックテンソルを地質調査によって求め、クラックテンソルにより現地の岩盤の透水テンソルを決定した結果を報告し、既に公表されている実測値と比較検討した結果、クラックの幾何学的特徴量の分布を調べることにより、統計幾何学の手法を用いて透水テンソルを決定でき、またその値は実測値をオーダー的に良い一致を見ることが分かっている。
- 4) 斉藤ら<sup>46)</sup>は、現地調査において、岩盤の不連続面の幾何学的な情報により、透水テンソルを決定した例を示している。また、透水テンソルの決定については、不連続面の開口幅の計測が重要であることが分かっている。
- 5) 羽出山ら<sup>47)</sup>は、菊間地下石油備蓄基地の岩盤タンク工事を対象として、岩盤タンク掘削時に観察・計測された地下水挙動（湧水量）、内空変位量と岩盤タンク壁面観察から算定した不連続面の幾何学特性を評価するクラックテンソルを比較した結果より、原位置岩盤の水理・力学評価へのクラックテンソル理論の適用性について検討を行っている。

その結果、岩盤の水理学的挙動（湧水量）と $F_0$ が7以上の箇所と湧水箇所が概ね



一致している。また、岩盤の平均内空変位量と  $F_0$  の間に相関関係が認められた。このことから、原位置岩盤の水理・力学特性（湧水箇所や内空変位量）評価の一手法としてクラックテンソル理論の適用性が確認された。

6) 山崎ら<sup>48)</sup>は、温水中に 0, 180, 1030, 2000 日養生した花崗岩の供試体中のマイクロクラックを用いて、三次元のクラックテンソルから透水テンソルを **kanatani** の関係式を応用して推定し、この測定結果と実測結果の比較により、推定精度を検討した結果、透水テンソルの推定値はクラック間が完全に連結していると仮定した為に、実測値より若干大きくなっているものの、ほぼ妥当であることが分かっている。

7) 小田ら<sup>49)</sup>は、テンソル量が岩石構造を記述するのにいかに有効であるかを例示するために、不連続性岩盤の力学で導入されたクラックテンソルを取り上げ、その幾何学的意味やその利用法について解説している。実際にクラックテンソルを決定するには、統計幾何学を基礎としたステレオロジーの方法が有効である。90°C の温水中で 0, 180, 1030, 2000 日間養生した花崗岩供試体を使って、マイクロクラックのクラックテンソルが顕微鏡観察のみから実際に決定された。クラックテンソルは、例えば、不連続面を流れる水の透水テンソルと理論的に関連付けられるが、花崗岩供試体を使った透水試験によって理論の妥当性が示された。

8) 日本原子力研究開発機構において、坑道の掘削に伴う周辺岩盤中に生じる掘削影響の評価を地上からの調査段階で実施する方法の構築という課題を達成するために、岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所において、クラックの力学特性やその幾何学的分布が岩盤の変形に支配的な影響を及ぼす結晶質岩について、クラックテンソルモデルによる研究を進めている。

この中で、丹野ら<sup>50)</sup>は、換気立坑深度 200.2~459.6m を対象として、壁面観察結果を基に深度 50m 区間ごとの 3 次元クラックテンソルを算出し、クラックの方向の深度分布、および深度に伴うクラックの密度  $F_0$ 、トレース長の平均値、クラックテンソルのトレースの変化を調べている。

その結果、深度 50m 区間毎の観測区間の結果について、クラックの密度は深度が深くなるにつれてクラックの密度  $F_0$  はやや減少する傾向にあり、トレース長の平均値は  $2\text{m} \pm 1\text{m}$  程度の値を示し、深度との明確な関係は認められない。また、クラックテンソルのトレースは、深度との明確な関係はほとんど認められないことを明らかにしている。

## (2) 岩盤透水係数に関する海外の既往研究

1) Oda<sup>33)</sup>は、関連するクラックの幾何学性（開口部、サイズ、配向）のみに依存する対称テンソル（クラックテンソル）を導入することで成功している。対称クラ

ックテンソルに関連する主方向は、透水テンソルの主方向と同軸である。クラックテンソルの第一不変量は平均透水係数に比例するが、偏差部分は異方性透水係数に関連する。これらの結果は、Long, Remer, Wilson, および Witherspoon によるクラック媒体の透水性に関する数値実験によって十分に裏付けられている。実岩盤（適度な節理性花崗岩）を調査して、クラックテンソルを現場で決定できるかどうかを確認した。幾何学的統計に基づくステレオロジーは、原位置でクラックテンソルを決定するための健全な基礎を提供する。クラックテンソルは、岩石の露出で見られるクラックトレースの詳細なマッピングとともに、ステレオ投影を介して提示されたクラックの方向データを統計的に処理することによって取得される。

2) Oda ら<sup>51)</sup>は、不連続面によって形成されるフローネットワークと水理学的に等価な透水テンソルは、2つのテンソルと1次元のスカラーで定式化される。どちらも、間隔、大きさ、方向、開口幅などの不連続面の幾何学的な側面にのみ依存する。ネットワークを流れる浸透流の二次元数値解析は現在の理論の妥当性を支持する。スウェーデンのストリパ鉍山での換気坑から得られる節理の幾何学性に関する情報は、対応する透水テンソルを与えると解釈される。透水テンソルは、大規模透水試験の結果と比較され、ストリパの節理性花崗岩の透水特性の合理的な予測を提供するという結論に達した。

3) Suzuki ら<sup>52)</sup>は、風化試験中に起こった花崗岩の透水性の変化をクラックによる微細構造の観点から定量的に説明するために、固有のクラックだけでなく、誘発されたクラックの透水試験と観察が行われた。このため、透水テンソルは、レプリカ法を使用したクラックシステムの観察および走査型電子顕微鏡によるクラックの開口部の観察から推定された。次の結論に達した：90° Cの温水への1000日間の養生付近での透水性の劇的な増加は、クラックテンソルのトレースが浸透の限界密度を超えていたという意味で全ての供試体が透水性を有していたため、浸透閾値の存在によって説明できなかった。一方、SEM観察では、温水養生によりクラック開口幅が広がり、分布が広がっていることを確認した。観測された開口幅の3乗を使用して推定された透水係数は、測定された透水係数の増加をよく示している。連結性パラメタ $\lambda$ を評価して、測定された透水係数と推定透水係数の定量的な一致を与えると、浸透閾値よりマイクロクラックの密度が高いにもかかわらず、養生期間に関係なく、0.17という低い定数値が得られた。自然の3次元クラック系を考えると、物理的開口幅の3乗が透水係数の予測に重要な役割を果たしており、 $\lambda$ はクラックの開口幅の広がりに大きく影響されると言える。

4) 微小クラック（クラックの成長）は、非弾性ひずみの蓄積とともに、花崗岩などの結晶質の岩石が異なる応力を受けたときに発生する。その結果、成長するク

クラックが相互に関連し、透水性が完全に变化する。したがって、クラックの成長と透水性の変化の関係は、非静水圧応力にさらされた岩石の流体力学的応答を完全に理解するために決定する必要がある。Oda ら<sup>53)</sup>は、稲田花崗岩の 140 MPa までの圧力下での三軸試験における損傷の成長は、Oda によって提案されたクラックテンソルの概念を使用して分析され、透水性の変化も損傷の成長に関して定式化された。損傷した供試体に対して過渡パルス試験を実施し、透水性の変化が関連する損傷の成長に本当に関連しているかどうかを確認した。結論は次のように要約される。微細構造パラメタによって定式化された透水テンソルは、過渡パルス試験によって十分にサポートされている。これは、損傷の大きい花崗岩を扱う場合に特に当てはまる。ただし、クラック密度が低い場合は、球形の細孔がそれらに及ぼす影響を考慮して、水理特性を考慮する必要がある。破損するまで応力が増加する供試体の透水係数は、同じ封圧 (140 MPa) で岩盤実質部の花崗岩の透水係数よりも約 2~3 桁大きくなる。この変化は、Zoback と Byerlee による結果と比較すると、驚くほど大きくなっている。損傷した供試体の透水テンソルは、多かれ少なかれ等方性のテンソルとして表される。クラックが主応力と平行に優先的に成長するという事実にもかかわらず、原位置の応力下の岩盤は等方性多孔質媒体と見なすことができる。

#### 1. 4. 2. 覆工劣化状態に関する既往研究

覆工の劣化特性に関する国内外の既往研究について分析すると、クラックテンソルを改良したトンネル覆工ひび割れ指数(TCI) による評価手法を適用して、トンネルの覆工の劣化特性の定量的な評価が行われている。しかし、立坑において覆工の劣化特性の定量的な評価や岩盤クラックと覆工のクラックの関連性については研究がなされていない。岩盤坑壁クラックにおけるクラックテンソルから、覆工の劣化に関するクラックテンソルが予測できれば、覆工の劣化に関するクラック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。国内外の既往研究の詳細は以下の通り。

##### (1) 覆工劣化状態に関する国内の既往研究

1) 重田ら<sup>54)</sup>は、覆工コンクリートの健全度を簡易的に数量化できる評価手法としてクラックテンソルを改良し、トンネル覆工ひび割れ指数(TCI)による評価手法を考案した。そして、TCI (Tunnel-lining Crack Index) を実トンネルのひび割れに対しても適用することで、その適用性と有効性について検討を試みた結果、TCI の評価法では、その健全度を数値化して表現できるため、効率的な維持管理計画

に寄与できる。そして、TCI の評価法は、トンネル軸方向、軸直角方向の成分を個々に定量化できるため、特に剥落等の危険性に繋がるひび割れ成分に着目した評価が可能となることが分かっている。

2) 山田ら<sup>55)</sup>は、高速道路トンネル点検の更なる効率化を図る目的で、これまで提案してきた健全度評価基準に対し、点検技術者の技術力に依存せず客観的な評価ができる TCI を導入し、その適用性について検討を行った。これにより得られた知見は以下のとおり。

①収束関数のゴースル曲線を用いることで、TCI の  $F_0$  を健全度評価基準のひび割れ評価点に換算できる簡易手法を示した。

②TCI を用いた健全度評価では、外力判定に比べ、剥落判定における健全度ランクが、従来法に対してより高い割合で一致した。

③TCI を用いた評価法は、従来の評価点による健全度評価の代替として利用できるため、点検評価の客観性や効率性を向上できる。

3) 前田ら<sup>56)</sup>は、トンネル覆工コンクリートの点検の効率化に向けて、トンネルの覆工コンクリートに発生した施工に起因するひび割れ形態を把握するために、過去のひび割れの点検データを収集した。そして、代表的な工法である矢板工法（上半先進、側壁導坑）および NATM で施工されたトンネル覆工されたトンネルの覆工コンクリートに発生するひび割れ形態について、ひびわれ指数 TCI を用いて、定量的な評価を行い、標準的な施工工法別のひび割れ分布の特徴を分析した結果、上半先進工法は、天端付近の 2 条の縦断方向ひびわれに加え、数本の横断方向ひびわれ、側壁導坑工法は左右アーチ肩部に 2 条の縦断方向ひびわれ、NATM 工法は天端中央付近に 1 条の縦断方向ひびわれであり、これらのひび割れ形態は施工に起因したものであると報告している。

4) 海瀬ら<sup>57)</sup>は、高速道路の覆工詳細点検の高精度化及び効率化を目的に、覆工ひび割れ指数(TCI)に基づく外力および剥落に関連する評価点と特記項目を組み合わせた評価による、高速道路会社(NEXCO)が保有する 85,000 スパン以上の点検データ分析を行った。分析の結果、建設工法の違いにより覆工健全度評価に異なる傾向を有することが分かった。また、机上点検と詳細実施点検との比較により、点検システムの実用性は高いが、今後、更なる高精度化と効率化のため特記事項の照査や変状の進行性の把握等を検討する必要性が明らかとなったと報告している。

## (2) 覆工劣化状態に関する海外の既往研究

1) Wu ら<sup>58)</sup>はトンネル覆工の振動特性とクラック指数の相関を分析し、トンネル覆工の健全性評価手法の開発について紹介している。トンネルの覆工の安定性は、

目に見えない空隙やクラックの影響を受けているため、目視検査方法は十分に信頼できなかつた。トンネル覆工の健全性評価のための新しい方法が提案され、トンネル覆工の振動特性に従って全体の構造状態を評価した。この新しい方法の有効性を評価するために、一連の現場試験が実施された。トンネル覆工の平均スペクトル(RAS)は、日岳トンネルの周囲振動試験の加速度データに基づいて特定された。このトンネルで調査されたスパンの TCI は、デジタル目視検査テストによっても取得された。クラック指数と振動特性の相関関係を確認した。しかし、従来の目視検査では、覆工内側の空隙やクラックが無視され、トンネルの安全性に深刻な脅威をもたらしていた。これらの欠陥は、新しい方法に反映された。新しい方法の重要性は、振動が異常である箇所を特定し、更なる詳細実施検査の基礎を提供することである。地震計による振動測定は、トンネルの覆工の全体的な安定性を評価するための効果的な方法である。周囲振動試験の結果によると、トンネル覆工の安全性に影響を与える要因が詳細に議論された。多数の現場試験データと詳細な地質データが提示され、将来の比較分析の参考になる可能性があると報告している。

2) Wu ら<sup>59)</sup>は、トンネル覆工の健全性評価のために、クラックのフラクタル次元に従って覆工状態を評価する方法を提案した。そして、マシンビジョンベースの方法に基づいて、クラック画像を効率的に抽出することができた。この方法の有効性を評価するために、一連の比較テストを実施した。比較テストにより、フラクタル次元がクラックの密度、幅、および分布を特徴付けることができることが確認された。その結果、クラック幅の影響がクラック密度よりも大きいことを証明した。覆工崩壊のリスクを高めるクラックの交差もフラクタル次元を増加させる可能性があるが、TCI は一定に保たれる。トンネル覆工クラックのフラクタル次元は、日岳トンネルの全 65 スパンのデジタル検査試験に従って得られている。

さらに、フラクタル次元とトンネル覆工の TCI との相関関係を分析した。この評価指標の重要性は、トンネル覆工のいくつかの異常なスパンを識別し、さらなる詳細実施検査の基礎を提供できることである。従来の目視検査方法を補完するものとして、クラックのフラクタル次元は有望な健全性評価指標であると報告している。

3) 覆工トンネル検査システムには、検査 A と検査 B で構成され、検査 A は、覆工検査画像撮影システムによる写真記録の机上調査を通じて優先検査領域を抽出する机上検査システムを実施する。検査 A の結果に基づき、技術者による近接目視検査による詳細検査（検査 B）を実施している。Miyaji ら<sup>60)</sup>は、B 検査を 2 回実施したトンネルの検査記録から、2 回の検査結果のばらつきの要因を分析し、クラックマップの比較では、温度差と材料の劣化や外的要因によるクラック幅が変化

する可能性があることがわかったと報告している。

4) Aio ら<sup>61)</sup>は、山口県が管理する 10 本の道路トンネルのクラックマップにトンネル覆工ひび割れ指数 (TCI) を適用し、トンネル覆工の維持管理効率と定量的健全性評価を向上させた。その結果から、クラック発生要因を推定し、クラックの進行と検査優先順位の決定を適用した結果、トンネル B と C では、TCI が急激に増加するスパンに焦点を当て、クラック発生の可能性として断層、表土の厚さのような地質学的遷移が判明した。また、トンネル F では、トンネル全体にひび割れが発生していることから、ひび割れの主な原因は外部荷重によるものではなく、トンネル覆工の材料劣化によるものと推測される。そして、クラックの進行性は、トンネル全体か局所的に進行するのかに注目することで、各トンネルのクラック進行の特徴をより深く把握することができた。また、ひび割れ量も含めることで、トンネルのひび割れの進行性の程度を判断することもできたと報告している。

## 1. 5. 本研究の目的

### (1) 本研究の課題

1.2 節～1.4 節より立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態に関する課題を整理すると、以下の通りである。

- 1) 立坑施工時における岩盤坑壁から発生した湧水の処理について、湧水の発生が確認されたら湧水処理を実施している状況であり、岩盤掘削時の覆工背面の岩盤透水性について、岩盤坑壁クラックから岩盤の透水性を予測できていない。このため、立坑掘削時の岩盤透水係数を予測することにより、湧水量が定量的に予測でき、湧水対策（裏面排水材の増設）に反映できることから、クラックテンソル理論やステレオロジーの概念を立坑施工時の地質観察記録の情報を用いて、立坑における岩盤透水係数を推定し、これらについて簡易な予測手法を確立することである。
- 2) 立坑施工後においては目視での点検に限界があり、覆工の健全性について定量的な評価ができず、定期的に覆工の健全性やクラックの進行性が把握できないことから、対策工の実施時期について判断がつかない。また、立坑の覆工のクラックの集中した時等の事象が確認された時点で、対策工を検討・実施することとなる。このため、立坑施工時に発生する岩盤クラックと立坑施工後に発生する覆工クラックについて関連性を評価できれば、立坑施工時の坑壁のクラックの記録から適切な対策工への反映により、覆工コンクリートのクラック発生の抑制に寄与できることから、クラックテンソル理論を適用し、立坑施工時の地質観察記録の情報を用いて、岩盤クラックと覆工クラックの関連性を分析することにより、立坑における覆工劣化状態を推定し、簡易な予測手法を確立することである。

## (2) 本研究の目的

1.5(1)節に基づき、立坑施工時に発生する大量湧水のような施工上の問題や立坑施工後の覆工の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についての主要技術が1.3.2節にて述べたクラックテンソルであり、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、幌延地下施設の立坑工事における立坑の施工により得られる岩盤の情報（クラック，強度）を用いてクラックテンソル理論に基づき，立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態を推定し，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た。

## (3) 本研究の新規性

これまで進められてきたクラックテンソルに関する類似研究では実験室レベルでの検討であったが，本研究は立坑での適用を目指したものである。

クラックテンソルの現場への適用に関する既往研究において，岩盤が露頭している場所や応力状態が複雑でない場所で適用されている中で，本研究のような構造物（特に立坑）への適用にあたっては，掘削による応力状態の変化，深度変化や偏圧，長期的なクラック観測が難しい環境下であるため苦慮した。

本研究により，立坑での岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態が予測出来るようになり，今後の立坑建設に有益な知見となる。

## (4) 本研究における用語の定義

既往研究において定義されている「割れ」に関する用語（クラックテンソル<sup>1),2)</sup>，割れ目頻度<sup>62),63)</sup>）は文献にて定義されている通りに引用し，それ以外の「割れ」に関する用語は「クラック」で統一した。

また，岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態において定義されている用語は，以下のよう定義した。

- $P$  : 岩盤の透水性に関するクラックテンソル
- $k$ (小文字) : 岩盤クラックの幾何学性に関する透水テンソル
- $K$ (大文字) : 岩盤の透水テンソル
- $S$  : 覆工の劣化に関するクラックテンソル

## 1. 6. 本論文の構成

1.5節で述べた研究目的に従って，実施した本研究の概要は次のとおりである．研究フローを図1.24に示す．

1章では，立坑における岩盤の地質観察や覆工の維持管理について現状，岩盤透水

係数ならびに覆工劣化状態に関する国内外の動向を整理し、これらに関する課題を抽出して、本研究の目的を示した。

2章では、立坑施工時の坑壁地質観察と底盤地質観察で得られるクラックに関する情報（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次元クラックテンソルと透水テンソルを推定し、等価な岩盤透水係数を算定した。そして、3次元クラックテンソルより求めた等価な岩盤透水係数と立坑近傍で実施した深層ボーリング孔を用いた透水試験により得られた岩盤透水係数を比較することにより、等価な岩盤透水係数の推定精度を評価した。

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 ( $m/m^2$ ) と推定した岩盤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、等価な岩盤透水係数を予測する手法を提案した。

3章では、コンクリート覆工の劣化に関するクラック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劣化に関するクラックテンソルを推定する手法を提案した。そして、提案した予測手法を他の立坑に適用し、等価な覆工の劣化に関するクラックテンソルの推定精度を評価した。

4章では、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までの施工が予定されていることを踏まえて、2章～3章の成果を実務として運用するためのより適切な支保の選定や湧水対策の実施の判断を行うための立坑施工時の岩盤透水係数ならびに立坑施工後の覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案を行った。

5章では、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。



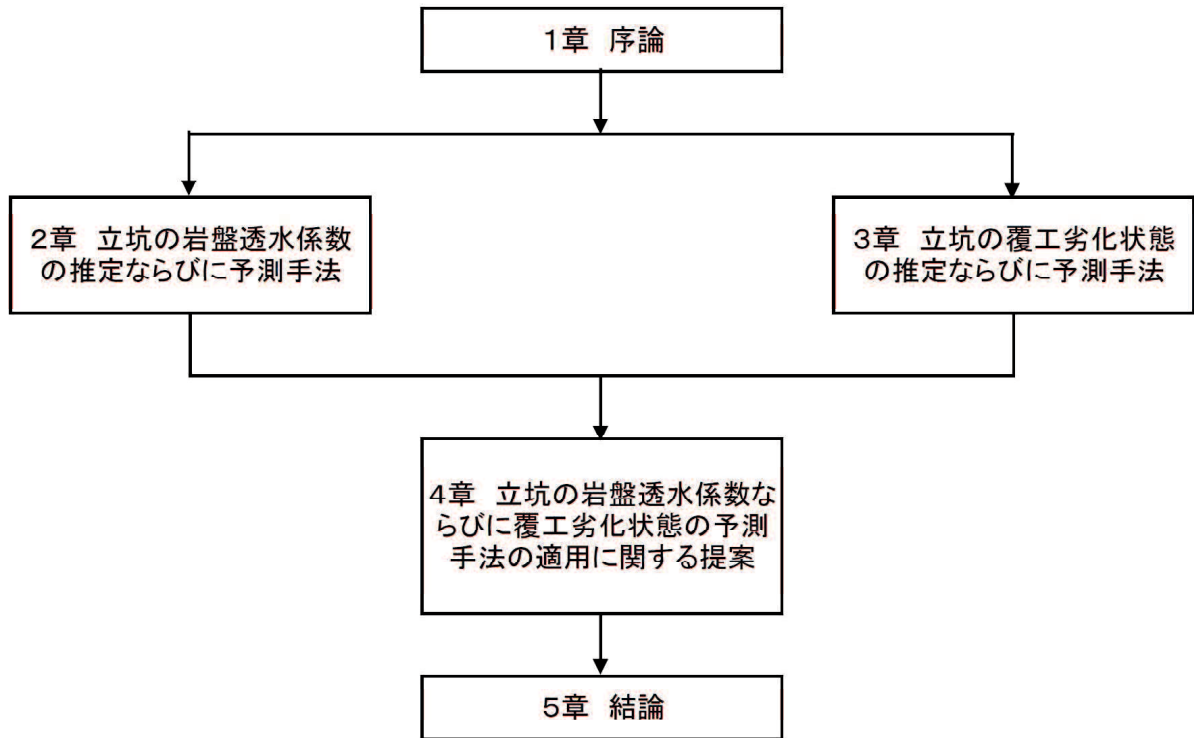


図 1.24 研究フロー

## 参考文献

- 1) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 96-108, 1982.
- 2) 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.
- 3) 土木学会：トンネルライブラリー 第7号 山岳トンネルの立坑と斜坑,1994.
- 4) 三井建設：立坑開さく工法，パンフレット，pp.9-10.
- 5) 三井建設：立坑建設技術，三井建設資料，p.15.
- 6) 武田衛：トンネルと地下，換気立坑入門（2），1980.7.
- 7) 原子力総合パンフレット 2021 年度版：一般財団法人 日本原子力文化財団，2021.
- 8) 幌延深地層研究計画 平成 19 年度調査研究成果報告（住民説明資料），日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター，2008.7.29.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 岡孝雄，五十嵐八枝子：北海道・天塩平野北部の上部新生界-特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について-，1997.
- 12) 新里忠史，舟木泰智，安江健一：北海道北部，幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史．日本地質学会第 114 年学術大会見学旅行案内書，地質学雑誌，113，補遺，119-135, 2007.
- 13) 辻隆司，横井悟：北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ，石油技術協会誌，59，283-295, 1994.
- 14) 石油公団：平成 5 年度 国内石油・天然ガス基礎調査 基礎試錐「天北」調査報告書,1995.
- 15) 長尾捨一：5 万分の 1 地質図幅「豊富」及び同説明書，北海道立地下資源調査所，42p, 1960.
- 16) 広岡悦郎：北海道天北地方の石油地質学的研究．石油技術協会誌，27，323-344, 1962.
- 17) Aoyagi, K. and Kazama, T.: Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. *Sedimentology*, 27, 179-188, 1980.
- 18) Tada, R. and Iijima, A.: Petrology and diagenetic changes of Neogene siliceous rocks in north-ern Japan. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53, 911-930, 1983.

- 19) 三谷勝利, 早川福利, 高橋功二, 石山昭三, 和気徹, 重山武: 豊富背斜地域の天然ガス鉱床, 北海道地下資源資料, no.125, 北海道開発庁, 31p, 1971.
- 20) 舟木泰智, 石山宏二, 早稲田周, 加藤進, 渡辺邦夫: 北海道北部, 幌延地域に分布する新第三紀堆積岩中の炭化水素ガスの分子組成と炭素同位体組成, 地学雑誌, 121(6), 929-945, 2012.
- 21) 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, 土木学会, 第14回地下空間シンポジウム講演論文集, PP.191-196, 2009.1.
- 22) 例えば, 櫻井彰孝, 青柳和平: 幌延深地層研究計画平成26年度地下施設計測データ集, JAEA-Data/Code2016-003, 2016.
- 23) 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-Research2007-050, 2007.
- 24) 砂金伸治, 真下英人, 角湯克典: 特集: 舗装・トンネルの維持管理 トンネルの変状原因の推定方法, 土木技術資料 53-4, pp.22-25, 2011.
- 25) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検要領(案)(参考資料), p.20, 2002.2.
- 26) 国土交通省 道路局: 総点検実施要領(案)【道路トンネル編】(参考資料), p.32, 2013.2.
- 27) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検要領(案)(参考資料), p.10, 2002.2.
- 28) 国土交通省 道路局: 総点検実施要領(案)【道路トンネル編】(参考資料), p.33, 2013.2.
- 29) 砂金伸治: トンネル維持管理の現状と課題—道路トンネルの点検制度と対策技術—, ベース設計資料, 建設工業調査会, No.172-15, pp.54-57, 2011.
- 30) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検説明会テキスト, p.4-11, 2002.8.
- 31) 山本秀樹, 重田佳幸, 安田亨: 走行型高速3D トンネル点検システム MIMM-R (ミーム・アール) 画像・レーザー・レーダー技術による点検・調査・診断支援技術, 建設機械施工, Vol.69 No.9, pp.33-38, 2017.
- 32) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洸樹, 進士正人: コンクリート覆工の健全度評価手法に関する検証, 土木学会, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.74 No.1, 1-14, 2018.
- 33) M.Oda: Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35(4), pp.483-495, 1985.
- 34) Kawamoto, T., Ichikawa, Y. and Kyoya, T.: Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory, *Int. J Numer Anal Methods Geomech*, 12, 1-30, 1986.

- 35) 京谷孝史, 市川康明, 川本朧万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文報告集, 第 358 号/Ⅲ-3, pp.27-35, 1985.6.
- 36) 韓思雄, 京谷孝史, 市川康明, 川本朧万: 損傷力学モデルによる不連続性材料の動的力学特性の評価について, 土木学会論文集, 第 400 号/Ⅲ-10, pp.65-74, 1986.12.
- 37) 小田匡寛, 山辺正, 毎熊輝記, 原夏生, 亀村勝美: 弾性波速度とクラックテンソル, 土木学会第18回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 176-180, 1986.
- 38) 山辺正, 原夏生, 小田匡寛: クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究, 土木学会論文集, 第 382 号/Ⅲ-7, pp.121-130, 1987.6.
- 39) 山辺正, 小田匡寛, 原夏生: クラックテンソルによる異方性弾性変形解析と実岩盤への適用性, 土木学会第20回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 209-213, 1988.
- 40) 多田浩幸, 山辺正, 小田匡寛, 石塚与志雄, 熊坂博夫: 実岩盤の計測結果から見た節理性岩盤の三次元掘削解析, 土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 31-35, 1990.
- 41) 多田浩幸, 小田匡寛: 岩盤不連続面の剛性が空洞周辺岩盤の変形挙動に与える影響, 土木学会論文集 C, Vol63, No.2, pp.447-466, 2007.5.
- 42) M.Oda, M.Kanamaru, and K.Iwashita: The effect of crack geometry on hydrodynamic dispersion in crack media, *Soils and Foundations*, JGS 36(2), pp.69-80, 1996.
- 43) 平間邦興, 丸山誠, 鈴木健一郎: 節理調査と透水試験に基づく岩盤の透水性評価について, 土木学会, 第19回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 151-155, 1987.
- 44) 斉藤禎二郎, 小田匡寛, 大坂一: 応力を考慮した岩盤の浸透解析, 土木学会, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 354-358, 1988.
- 45) 斉藤禎二郎, 小田匡寛, 山辺正, 亀村勝美: 現地調査による透水テンソルの決定法, 土木学会, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 386-390, 1989.
- 46) 斉藤禎二郎, 北川隆, 小田匡寛: 現地調査による透水テンソルの決定例, 土木学会, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 146-150, 1990.
- 47) 羽出山吉裕, 大津宏康, 大矢敏雄, 岡本淳: クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察, 土木学会, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 501-505, 1993.
- 48) 山崎雅直, 鈴木健一郎, 小田匡寛: クラックテンソルによる花崗岩の透水性の評価, 土木学会第51回年次学術講演会, 第3部門, pp. 622-623, 1996.9.
- 49) 小田匡寛, 鈴木健一郎, 山崎雅直, 斉藤禎二郎: 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 (原郁夫先生退官記念論文集), 創文, pp. 367-378, 1996.
- 50) 丹野剛男, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 引間亮一, 松井裕哉, 多田浩幸, 郷家光男, 熊坂博夫,

石井卓：結晶質岩を対象としたクラックテンソルによる等価連続体モデル化手法に関する研究, JAEA-Research 2012-002, 2012.

- 51) M.Oda, Y.Hatsuyama, and Y.Ohnishi : Numerical Experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden, *Jour. Geophys. Res.* 92(B8), pp. 8037-8048, 1987.
- 52) K.Suzuki, M.Oda, M.Yamasaki, and T.Kuwabara : Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35(7), pp. 907-921, 1998.
- 53) M.Oda, T.Takemura, and T.Aoki : Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite, *Mechanics of Materials* 34(6), pp. 313-331, 2002.
- 54) 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, 土木学会論文集 F, Vol.62 No.4, 628-632, 2006.
- 55) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 重田佳幸, 吉武勇, 西村和夫: ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築, 土木学会, 土木学会論文集 F, Vol.65 No.1, 11-16, 2009.
- 56) 前田佳克, 八木弘, 海瀬忍, 増田弘明, 水野希典, 重田佳幸, 前田洸樹: ひび割れ指数 (TCI) を用いた覆工に発生するひび割れ形態の整理, 土木学会, トンネル工学報告書, 第 26 巻, I-30, 2016.
- 57) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洸樹, 進士正人: コンクリート覆工の健全度評価手法に関する検証, 土木学会, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.74 No.1, 1-14, 2018.
- 58) Xuezhen Wu, Yujing Jiang, Kusaba Masaya, Tetsuya Taniguchi, and Takahide Yamato: Study on the Correlation of Vibration Properties and Crack Index in the Health Assessment of Tunnel Lining, *Hindawi Shock and Vibration*, Volume 2017, Article ID 5497457, 9 pages.
- 59) Xuezhen Wu, Yujing Jiang, Jianhua Wang, Kusaba Masaya, Tetsuya Taniguchi and Takahide Yamato: A New Health Assessment Index of Tunnel Lining Based on the Digital Inspection of Surface Cracks, *Appl. Sci.* 2017, 7, 507,12 pages.
- 60) T. Miyaji, H. Hayashi, M. Shinji, S. Kaise and S. Morimoto: Study on cracks in concrete lining based on inspection records on tunnel, *Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress*, pp.4080-4085, 2019.
- 61) H. Aio, H. Hayashi, M. Shinji, T. Nakamura, S. Yamada and S. Morimoto: Tunnel inspection analysis based on the crack progression of the change by Tunnel-lining Crack Index (TCI) for road tunnel, *Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel*

*Congress*, pp.4633-4640, 2019.

- 62) 津坂仁和, 山崎雅直, 羽出山吉裕, 山本卓也: 幌延深地層研究所の立坑掘削に伴うコンバージェンス曲線の評価, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 311-317, 2008.
- 63) 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, 2010.3.

## 第2章 立坑の岩盤透水係数の推定ならびに予測手法

### 2. 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設や石油地下備蓄施設等のように岩盤構造物周辺を流れる地下水の問題がその技術開発にとって、重要成功要因となる事例がある。この場合、地下水は主に節理や断層に沿って流れることから、不連続面の幾何学特性をテンソル量で表したクラックテンソル<sup>1),2)</sup>の値から岩盤の透水テンソルが推定できれば、このような問題の解決への貢献が期待できる。

岩盤構造物の建設における地質観察においては、岩盤壁面に現れるクラックの情報からクラックテンソル理論を用いて等価な透水係数を推定した事例はいくつかあるものの<sup>3)</sup>、これらはクラックの走向・傾斜による方向データを用いた卓越方向について構造テンソルを推定したものである。しかし、この方法では卓越方向のような割れ目群の代表的な方向について構造テンソルを求めたものであり、全てのクラックを対象としたものではない。こうした問題を解決するためにKanatani<sup>4)</sup>によって提案されたステレオロジー（統計幾何学）の概念を用いて、クラックの単位法線ベクトルの分布を表わす確率密度関数を級数展開して定式化した計算方法を用いて構造テンソルの推定を行うことが可能である。この手法では、掘削時の岩盤壁面に現れる2次元のクラックの情報（長さ、方向、開口幅）を用いてクラックテンソル理論を適用することにより、3次元のクラックの分布を精度良く推定することができる。

このステレオロジーを用いたクラックテンソルの推定手法については、室内試験レベルで概ね適用できることが明らかとなっている。例えば、供試体レベルの花崗岩中のマイクロクラックを対象として、互いに直交する3断面のクラックの情報から、ステレオロジーの概念を用いて、クラックテンソルと等価な透水テンソルを決定し、実測の岩盤透水係数と比較した結果、岩盤透水係数は良く一致していることが示されている<sup>5),6),7)</sup>。このように、室内試験レベルではその妥当性が確認されているが、現場スケールでは確認ができていない。

本手法の適用可能な現場条件は、以下の通りである。

- (1)互いに直交する3断面のクラックの情報が得られること。
- (2)十分なクラックの調査領域が確保できること。
- (3)十分なクラック調査時間が確保できること。

ここで、立坑の断面は円形であるため、互いに直交する3断面のクラック情報を直接取得することは困難であったが、坑壁地質観察面を投影して隣り合う断面が相対的に直交すると仮

定して、互いに直交する3断面のクラック情報の取得を可能にし、互いに直交する3断面のクラックの情報から、ステレオロジーの概念を用いて、クラックテンソルと等価な透水テンソルを推定したところに新規性ならびに独自性がある。

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、幌延深地層研究所の立坑工事においては、1サイクル2m毎に坑壁地質観察、約50m毎の底盤地質観察により、詳細にクラック調査を行っているため、本検討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。そして、立坑施工時の坑壁地質観察と底盤地質観察で得られるクラックに関する情報、つまり、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次元クラックテンソルと透水テンソルを推定し、等価な岩盤透水係数を算定した。さらに、3次元クラックテンソルより求めた等価な岩盤透水係数と立坑近傍で実施した深層ボーリング孔を用いた透水試験により得られた岩盤透水係数を比較することにより、等価な透水係数の推定精度を評価した。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( $m/m^2$ )と推定した岩盤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、等価な岩盤透水係数を予測する手法を提案した。立坑施工時の岩盤透水係数を予測することにより、湧水量が定量的に予測でき、湧水対策（裏面排水材の増設）に反映するための有益な情報となると考える。

## 2. 2. クラックテンソルと透水テンソルの算定

### 2. 2. 1. クラックの定義

割れ目やヘアークラックのような弱面を、その地質学的な起源に関わり無く、今後、クラックと呼ぶことにする。ここで、クラックが統計的に均一に分布する領域を仮定する。クラックは、面に立てた単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ の方向を持つ、直径 $r$ の円盤と定義し、ある任意の場所のクラックを、図2.2のように表した。ただし、図中には、一つのクラックの表と裏に $\mathbf{n}$ と $-\mathbf{n}$ の対をなす二つのベクトルを示しているが、これらをまとめて $\mathbf{n}$ と表わすこととする<sup>1), 2), 6)</sup>。

### 2. 2. 2. 三次元クラックテンソルの算定

#### (1) クラックテンソル理論

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。



3次元空間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、式(2.1)で定義される<sup>1), 2)</sup>.

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j E(n, r) d\Omega dr \quad (2.1)$$

ここに、 $\rho$ 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 $\mathbf{n}$ の基準軸 $X_i$ の成分( $i, j=1\sim 3$ )、 $E(\mathbf{n}, r)$ は法線ベクトル $\mathbf{n}$ と代表長さ $r$ の統計的分布を与える確率密度関数、 $\Omega$ は全立体角を表している。

クラックの代表長さと方向が統計的な意味で独立しているとする、 $E(\mathbf{n}, r) = E(\mathbf{n}) \cdot f(r)$ と表すことができ、式(2.1)は、式(2.2)のように表される<sup>1), 2)</sup>。

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} r^3 f(r) dr \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \quad (2.2)$$

ここに、 $f(r)$ はクラックの代表長さ $r$ の確率密度関数、 $E(\mathbf{n})$ は法線ベクトル $\mathbf{n}$ の確率密度関数である。また、式(2.2)を加算形に直すと式(2.3)のようになる<sup>1), 2)</sup>。

$$F_{ij} = \frac{\pi}{4V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^3 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (2.3)$$

ここに、 $m^{(V)}$ は対象範囲の体積 $V$ 中に含まれているクラックの総数であり、 $m^{(V)} = \rho V$ である。また、透水性に関する2階のクラックテンソル $P_{ij}$ は、式(2.4)で定義される<sup>1), 2)</sup>。

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{t_m} \int_{\Omega} r^2 t^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (2.4)$$

クラックの代表長さと方向と開口幅が統計的な意味で独立しているとする、 $E(\mathbf{n}, r, t) = E(\mathbf{n}) \cdot f(r) \cdot g(t)$ と表すことができ、式(2.4)は、式(2.5)のように表される<sup>1), 2)</sup>。

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} r^2 f(r) dr \int_0^{t_m} t^3 g(t) dt \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \quad (2.5)$$

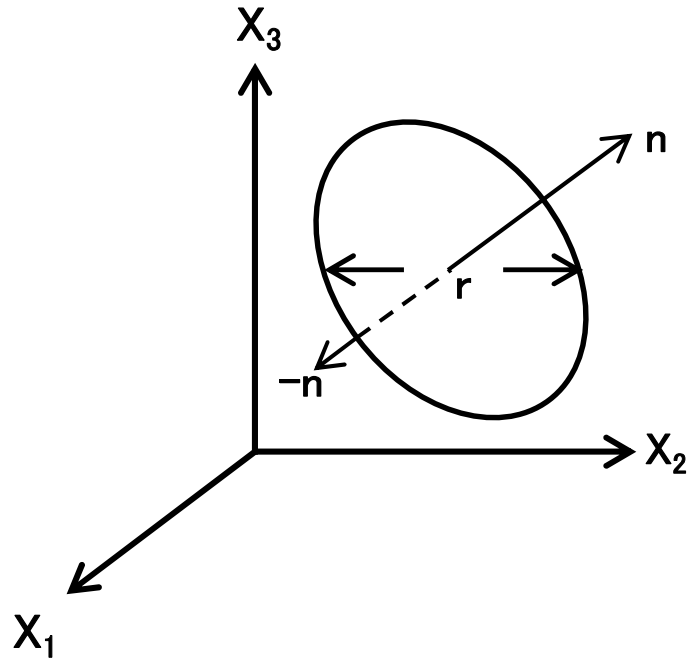


図2.2 クラックの定義<sup>1), 2), 6)</sup>

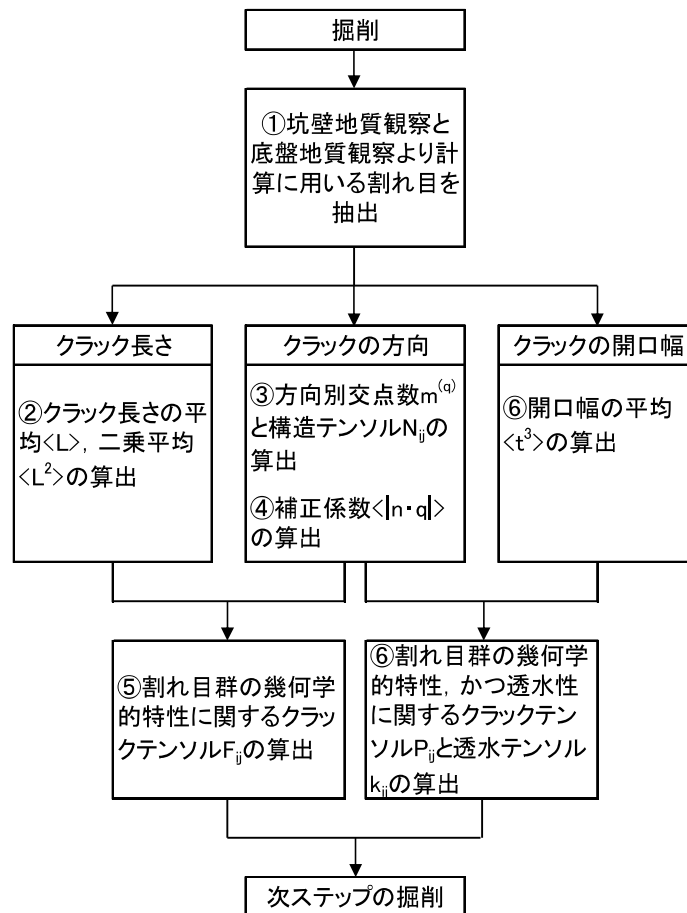


図2.3 3次元クラックテンソルの推定フロー<sup>3), 4)</sup>

## 2. 3. 坑壁地質観察結果に基づく透水テンソルの推定

立坑施工におけるサイクルタイム（約4方／サイクル）のうち地質観察時間は150分と約7%を占めている。ただし、1方全工程540分としている<sup>8)</sup>。

立坑施工における坑壁地質観察ならびに底盤地質観察で得られたクラックに関する情報（トレース長さ、方向、開口幅）を用いて3次元クラックテンソルや透水テンソルを推定する手順を図2.3に示す<sup>3), 4)</sup>。なお、図中の(1)～(6)は以下に述べる(1)～(6)に対応している。

### 2. 3. 1. 計算に用いるクラックの抽出

クラックの調査対象は、換気立坑と東立坑とし、それぞれ深度50mから250.5mまでとした。坑壁については坑壁全周に現れているクラックを、底盤については換気立坑深度83.0m, 121.0m, 139.3m, 221.0m, 247.8mの5箇所、東立坑深度117.2m, 139.8m, 159.2m, 219.2m, 249.1mの5箇所の底盤の半分の断面に現れているクラックをスケッチし、CADにより電子データ化する<sup>9), 10), 11), 12), 13)</sup>。地質観察時には、初生的なクラック（引張、せん断、圧縮）や機械掘削に伴い発生したクラックを区別し、機械掘削に伴い発生したクラックは除外した。計算に用いるクラックの抽出断面は、以下のように設定した。まず、底盤であるXY断面について底盤地質観察では割れ目を出すために岩盤清掃を行うこと、施工箇所が狭隘（換気立坑：掘削径5.3m、東立坑：掘削径7.3m）であることを考慮して、底盤観察断面は半分の断面とした。次に、図2.4に示すように供試体<sup>5)</sup>では直交3断面のクラック情報の取得は可能であるが、立坑の断面は円形であるため、立坑坑壁から直接YZ断面、ZX断面を設定することはできない。ここでは、図2.5に示すように立坑坑壁においてYZ断面とZX断面をそれぞれ

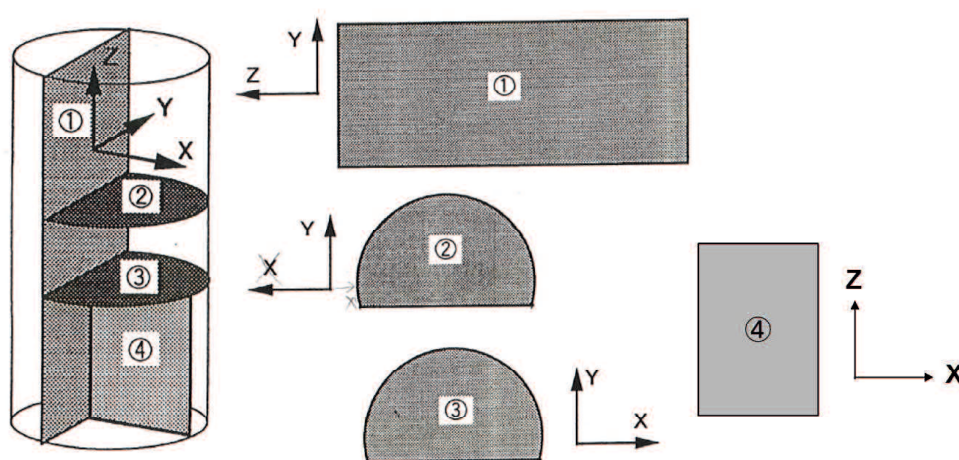


図 2.4 供試体における直交3断面<sup>5)</sup>

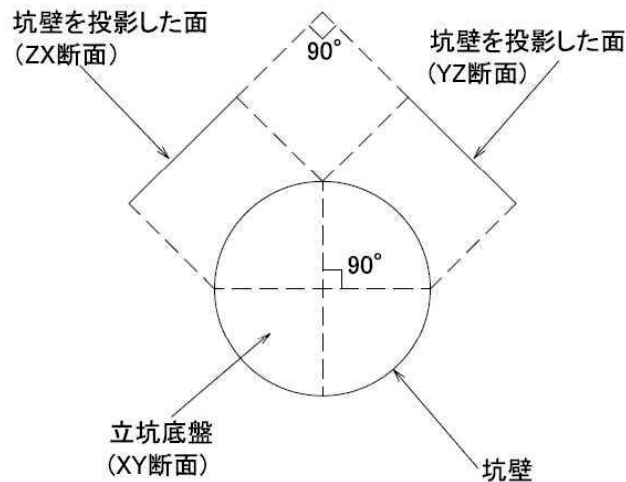


図 2.5 坑壁観察における互いに直交する断面の定義

れ投影して隣り合う断面が相対的に直交すると仮定した。この方法により、互いに直交する 3 断面のクラック情報の取得が可能となる。

### 2. 3. 2. クラックテンソルの推定

空間中に分布する粒子の粒度分布について、粒子を直接数えることはできないため、現状は、色々な方向から切断された断面で観測している。そして、いくつかの断面を観測して、空間分布を知ることは重要な課題であり、このような考え方は数学的には、「積分幾何学」、金属学や生物学や医学への応用としては「ステレオロジー」と呼ばれている。特に、空間的に分布する粒子の粒形分布を断面上に現れた粒子の切り口の大きさの分布から逆算することが行われている<sup>4)</sup>。

ここでは、岩盤のクラックの空間的な分布について、ステレオロジーを応用して、立坑施工時の掘削断面で計測できるデータを用いて 3 次元クラックテンソルの推定を試みた。ここで、クラックに関する現場で取得できる情報と推定する情報の関係を図 2.6 に示す。現場で取得できる情報のうち 1 次元の情報は、各走査線(赤線)と交線(黒線)が交わった個数であり、2 次元の情報は、クラックと切断面の交線(黒線)であり、3 次元の情報は平面である。

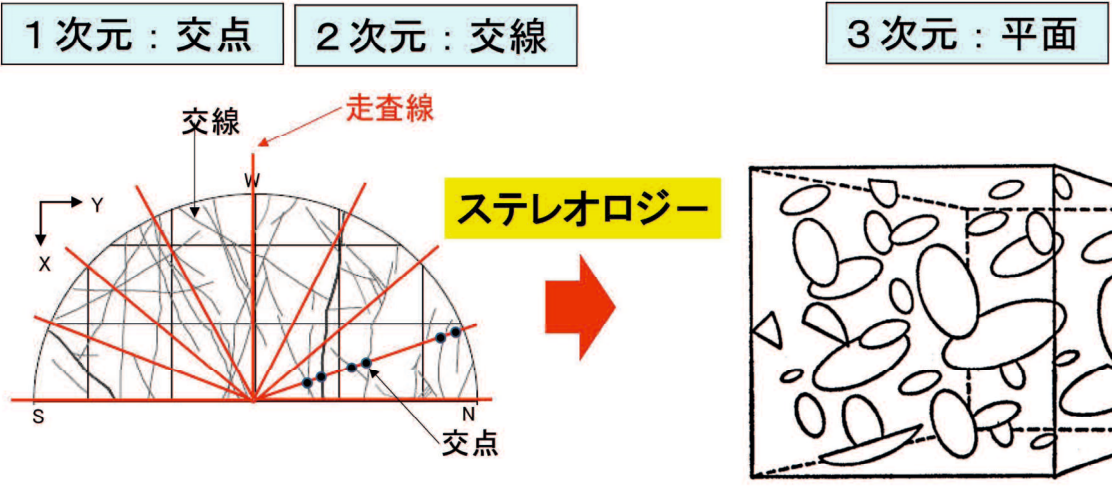


図 2.6 クラックに関する現場で取得できる情報と推定する情報の関係

(1) 抽出したクラックに対する平均値の算出

互いに直交する 3 断面上のクラックのトレースデータを用いて、その平均  $\langle L \rangle$ 、ならびに二乗平均  $\langle L^2 \rangle$  を計算する。

(2) 交点数と構造テンソル  $N_{ij}$  の算出

構造テンソル  $N_{ij}$  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。互いに直交する 3 断面である XY 断面，YZ 断面，ZX 断面において抽出したクラックに対して、各断面上に 15° 毎計 24 方向の測線を張る。測線毎に、単位長さ当たりのクラックとの交点数  $m^{(q)}$  を求める。交点数  $m^{(q)}$  は、測線の方向  $q$  (単位ベクトル) によって変わるが、その変化は、クラックの単位法線ベクトル  $n$  の分布を表わす確率密度関数  $E(n)$  や、また、式(2.6)に示す  $E(n)$  から計算される 2 階の構造テンソル  $N_{ij}$  に関係している。

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \tag{2.6}$$

Kanatani<sup>4)</sup> はこれらの関係を確率密度関数  $E(n)$  について級数展開して定式化し、その計算法を示している。Kanatani の関係式は、式(2.7), 式(2.8)のとおりである。

$$N_{ij} = \frac{2}{15} D_{ij} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tag{2.7}$$

$$E(n) = \frac{1}{4\pi} (1 + D_{ij} n_i n_j) \tag{2.8}$$

ここに、 $D_{ij}$  は偏差テンソルと定義し、各断面上での交点数の計測から算出され、各成分は式(2.9a)～式(2.9g)で表される。 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。算出された偏差テンソル  $D_{ij}$

と式(2.7)により，構造テンソル $N_{ij}$ が算出されることになる．

$$c = \frac{2}{3}(m^{(x)} + m^{(y)} + m^{(z)}) \quad (2.9a)$$

$$D_{11} = \frac{16}{3c}(-2m^{(x)} + m^{(y)} + m^{(z)}) \quad (2.9b)$$

$$D_{22} = \frac{16}{3c}(m^{(x)} - 2m^{(y)} + m^{(z)}) \quad (2.9c)$$

$$D_{33} = \frac{16}{3c}(m^{(x)} + m^{(y)} - 2m^{(z)}) \quad (2.9d)$$

$$D_{12} = \frac{32}{c}m_{12}^{(z)} \quad (2.9e)$$

$$D_{23} = \frac{32}{c}m_{23}^{(x)} \quad (2.9f)$$

$$D_{31} = \frac{32}{c}m_{31}^{(y)} \quad (2.9g)$$

式(2.9)のうち，例えば $m^{(z)}$ や $m_{12}^{(z)}$ については，Z軸に垂直な面上，すなわちXY断面上の交点数を式(2.10a)～式(2.10b)により表わされる．式中の $m^{(q(k))}$ は， $k$ 番目の方向に張った測線の単位長さあたりの交点数， $n$ は測線数である．

$$m^{(z)} = \frac{2\pi}{n} \sum_{k=1}^n m^{(q(k))} \quad (2.10a)$$

$$m_{12}^{(z)} = \frac{\pi}{n} \sum_{k=1}^n m^{(q(k))} \sin \frac{2\pi k}{n} \quad (2.10b)$$

### (3) 補正係数の算出

$m^{(q)}$ は，測線の方向 $q$ に依存している．しかし，式(2.11)に示す $m^{(q)}$ 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り，単位体積当たりのクラックの総面積を得る．確率密度関数 $E(n)$ として式(8)を用いて，補正係数 $\langle |n \cdot q| \rangle$ を計算する．

$$\langle |n \cdot q| \rangle = \int_{\Omega} |n \cdot q| E(n) d\Omega \quad (2.11)$$

### (4) クラックテンソル $F_{ij}$ の算出

(1)～(3)の結果を用いて，式(2.21)に表されるクラックテンソル $F_{ij}$ を計算する．

### 1) 1次元のクラックの情報<sup>14)</sup>

クラックテンソル  $F_{ij}$  は式(2.2)または式(2.3)で定義される。しかし、この理論を適用するために原位置で得られる量を用いてクラックテンソルを推定する必要がある。ここでは、利用可能な調査データはごく一般のクラックである。このため、変数  $n$  と  $r$  は統計的に独立であるという仮定を用いる。

$$E(n, r) = E(n)f(r) \quad (2.12)$$

式(2.12)を用いると、式(2.2)は、

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} r^3 f(r) dr \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \\ &= \frac{\pi\rho}{4} \langle r^3 \rangle N_{ij} = F_0 N_{ij} \end{aligned} \quad (2.13)$$

となる。ここで、

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \quad (2.14)$$

式(2.13)の  $N_{ii}$  は、 $n_{11}+n_{22}+n_{33}=1$  となる対称な 2 階のテンソルであり、確率密度関数  $E(n)$  のみに依存する。クラックの調査では一般的に方向が単位ベクトル  $q$  に平行な走査線の単位長さに交わったクラック数  $N^{(q)}$  が計測可能であり、 $N^{(q)}$  がクラックテンソルの推定の際に重要な量となる(図 2.7 参照)。小田<sup>2)</sup>は、次のような関係を示している

$$N^{(q)} = \frac{\pi\rho}{4} \langle r^2 \rangle \int_{\Omega} |n \cdot q| d\Omega = \frac{\pi\rho}{4} \langle r^2 \rangle \langle |n \cdot q| \rangle \quad (2.15)$$

ここで、

$$\langle |n \cdot q| \rangle = \int_{\Omega} |n \cdot q| d\Omega \quad (2.16)$$

$E(n)$  と  $q$  はクラック調査において重要な量となる。 $N^{(q)}$  の値は走査線  $q$  の方向によって変化する。その数を  $\langle |n \cdot q| \rangle$  で補正すると、 $q$  に独立になることに注意する(この点で、 $\langle |n \cdot q| \rangle$  は補正係数と呼ぶ)。

補正係数  $\langle |n \cdot q| \rangle$  について、方向が等方性の場合、つまり方向の確率密度関数はすべての方向に対して  $1/4\pi$  とする場合は、 $n=(n_1, n_2, n_3)=(\cos \theta \sin \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \phi)$  でこれと  $X_1$  軸と平行な単位長さの走査線  $q=(1,0,0)$  についての内積の絶対値を一様な確率密度を用いて全立体角について積分する。微小立体角  $d\Omega$  は、 $\sin \phi d\theta d\phi$  より、式(2.17)となる。

$$\langle |n \cdot q| \rangle = \int_{\Omega} |n \cdot q| d\Omega = 2 \int_{\Omega/2} n_1 \frac{\pi}{4} d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin^2 \phi d\phi d\theta = \frac{1}{2} \quad (2.17)$$

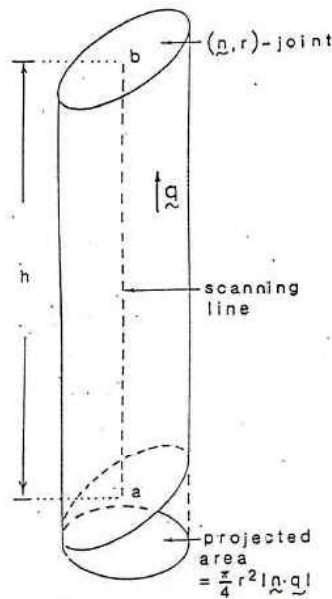


図 2.7 走査線を入れたクラックの数<sup>14)</sup>

## 2) 2次元のクラックの情報<sup>14)</sup>

掘削面の観察から得られるデータの利用を考える。図 2.8 に示す法線が単位ベクトル  $e^{(i)}$  に対して平行な  $e^{(i)}$  平面と呼ばれる平面を考える。  $\rho^{(i)}$  を  $e^{(i)}$  平面の単位領域に交わっているクラック数とする。統計的に式(2.18)が導ける。

$$\rho^{(i)} = 2\rho \langle r \rangle \int_{\Omega/2} \sqrt{1-(n)^2} E(n) d\Omega \quad (2.18)$$

ここで、  $n^{(i)}$  は単位ベクトル  $e^{(i)}$  に対して投影された  $n$  の成分である。式(2.15)や式(2.18)は  $F_{ij}$  の定義式中の  $\rho$ ,  $f(r)$ ,  $E(n)$  を原位置で得られる量で表されるという点で重要である。

次に、  $\phi^{(i)}(l)$  をトレース長さ  $l$  の確率密度関数とする。ここで、添え字  $i$  は確率密度関数が  $e^{(i)}$  平面に関して定義されていることを意味している。小田は、  $\phi^{(i)}(l)$  は式(2.19)のように  $f(r)$  に関係していることを示している。

$$\phi^{(i)}(l) = \phi(l) = \frac{1}{\langle l \rangle} \int_l^\infty l(r^2 - l^2)^{-1/2} f(r) dr \quad (2.19)$$

$N^{(i)}$  は式(2.19)から消えているので添え字  $i$  は省略されることに注意する(式(2.19)は、変数  $n$  と  $r$  が統計的に独立であれば有り得る)。クラックのトレース長さのヒストグラムを用いて推定されうる  $l$  の  $n$  乗平均は、式(2.20)のように理論的に  $r$  の平均で関係づけられる。

$$\langle l^n \rangle = \int_0^l l^n \phi(l) dl = \frac{\langle r^{n+1} \rangle}{\langle r \rangle} \int_0^{\pi/2} \sin^{n+1} \theta d\theta \quad (2.20)$$



式(2.15)～式(2.20)を用いて式(2.12)における  $\rho$  と  $\langle r^3 \rangle$  は  $\langle l^n \rangle$  と  $N^{(q)}/\langle |n \cdot q| \rangle$  のように原位置で得られる量で置き換えられる。

$$F_{ij} = \frac{3\pi \langle L^2 \rangle}{8 \langle L \rangle} \frac{m^{(q)}}{\langle |n \cdot q| \rangle} N_{ij} = F_0 N_{ij} \quad (2.21)$$

ここに、 $F_0$  はクラックの密度を表わす 0 階のクラックテンソル  $F_{ij}$  の第一不変量 ( $F_0 = F_{11} + F_{22} + F_{33}$ ) である。

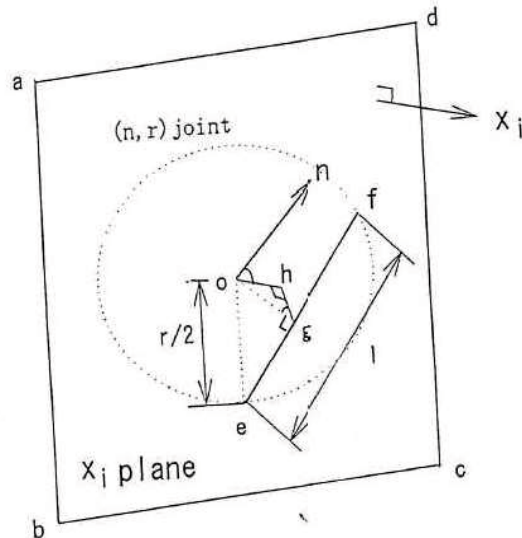


図 2.8 切断面と交差したクラックの数<sup>14)</sup>

### 2. 3. 3. 透水テンソルの推定

#### (1) 透水性に関するクラックテンソル $P_{ij}$ と透水テンソル $k_{ij}$ の算出

岩盤を等価な多孔質媒体とし、また、全水頭  $h$  に導水勾配  $J_i$  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)  $v_i$  は透水テンソルを用いて式(2.22)のように表される。

$$v_i = -\frac{g}{\nu} k_{ij} J_j \quad (2.22)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)、 $\nu$ : 動粘性係数(sec/m<sup>2</sup>)、 $k_{ij}$  は透水テンソル(m<sup>2</sup>)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。

4)クラックの連結部における水頭損失は無視する.

対象とする深度における坑壁地質観察結果より, 壁面に現れる初生的なクラックは全線で開口しておらず, 密着していることを確認している. また, 当該箇所クラックの開口幅は, 市販のクラックゲージで測定できるような大きさではないが, ここでは, クラックの開口幅  $t$  は市販のコンクリートひび割れ測定用のクラックゲージの最小幅である 0.03mm 一定と仮定した.

(1), (3), (4)の結果を用いて, 透水性に関するクラックテンソル  $P_{ij}$  を計算する. 2.2.2.(1)節で触れたように, 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(2.23)のように表される.

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} t^2 r^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (2.23)$$

ここで, 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, つまり,

$$E(n, r, t) = E(n) f(r) g(t) \quad (2.24)$$

を適用して, 式(2.23)は,

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \langle r^2 \rangle \cdot \langle t^3 \rangle N_{ij} \quad (2.25)$$

となる. ただし,

$$\langle r^2 \rangle = \int_0^{r_m} r^2 f(r) dr$$

$$\langle t^3 \rangle = \int_0^{t_m} t^3 g(t) dt$$

である. 式(2.15)を用いて, 式(2.25)は,

$$P_{ij} = \frac{N^{(q)}}{\langle |n \cdot q| \rangle} \langle t^3 \rangle N_{ij} \quad (2.26)$$

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(2.27)で表わされる.

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_0 \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (2.27)$$

ここに, 式(2.14)のうち  $\langle t^3 \rangle$  はクラックの開口幅の三乗平均, 式(27)のうち  $P_0$  はクラックテンソル  $P_{ij}$  の第一不変量 ( $P_0 = P_{11} + P_{22} + P_{33}$ ) である.  $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである. また,

$\lambda$ はクラックの連結性に依存したスカラー量である。 $\lambda$ 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  $k_{ij}$  (m<sup>2</sup>) 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(2.28)により計算した。重力加速度  $g$  を 9.81m/sec<sup>2</sup>、水の動粘性係数 $\nu$ を  $1.0 \times 10^{-6}$ m<sup>2</sup>/sec(水温 20°C)とした。

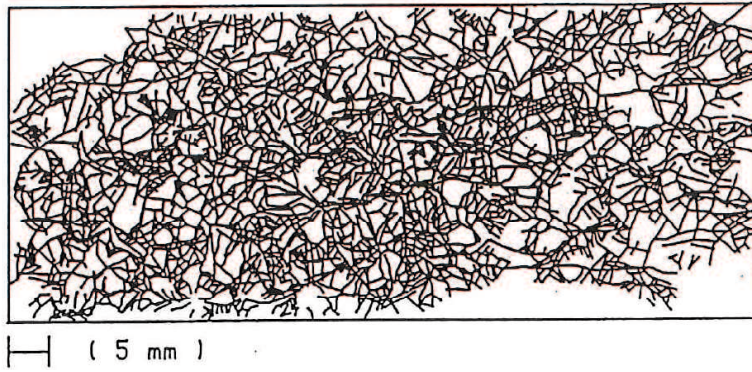
$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (2.28)$$

### 2. 3. 4. 供試体による透水テンソルの推定結果と推定精度の評価

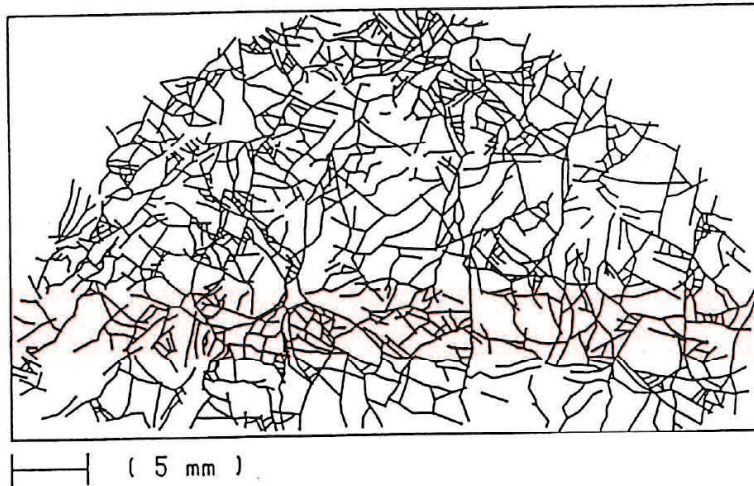
既往研究として供試体を対象とした透水テンソルの推定結果と推定精度の評価を行った<sup>5)</sup>。直径 50mm、高さ 100mm の円柱に整形した花崗岩の供試体を 90°Cの温水中に 0, 180, 1030, 2000 日間養生した。この花崗岩供試体の 3 次元クラックテンソル  $F_{ij}$ ,  $P_{ij}$  をレプリカフィルムに写し取ったマイクロクラックから、2.3.2.節ならびに 2.3.3.節の方法を用いて推定した。ここでは、2000 日間養生したものを一例として結果を示す。直交する 3 断面の交線分布図を図 2.9 に、クラック交点数の方向分布図を図 2.10 に示す。マイクロクラックの開口幅  $t$  については、鉦物顕微鏡を使用して計測し、その分布を図 2.11 に示す。これらを用いて、3 次元クラックテンソル  $F_{ij}$ ,  $P_{ij}$  ならびに透水テンソル  $K_{ij}$  は表 2.1 のように推定される。

表 2.1 クラックテンソルおよび透水テンソル (供試体) <sup>5)</sup>

養生日数(日)		0	180	1030	2000
$F_0$		3.09	7.63	9.16	11.70
$N_{ij}$	$N_{11} \ N_{12} \ N_{13}$	(0.69 -0.02 -0.01)	(0.59 -0.03 -0.03)	(0.42 -0.03 0.02)	(0.38 -0.03 0.04)
	$N_{22} \ N_{23}$	0.14 0.03	-0.07 0.07	0.24 0.00	0.17 -0.02
	symm. $N_{33}$	symm. 0.18	symm. 0.48	symm. 0.34	symm. 0.45
$F_{ij}$	$F_{11} \ F_{12} \ F_{13}$	(2.13 -0.06 -0.03)	(4.50 -0.23 -0.23)	(3.85 -0.27 0.18)	(4.45 -1.35 -0.47)
	$F_{22} \ F_{23}$	0.43 0.15	-0.53 0.38	2.20 0.00	1.99 -0.23
	symm. $F_{33}$	symm. 0.56	symm. 3.66	symm. 3.11	symm. 5.27
$P_{ij}$ (m <sup>2</sup> )	$P_{11} \ P_{12} \ P_{13}$	(5.03 -0.15 -0.07)	(2.66 -0.14 -0.14)	(8.50 -0.61 0.41)	(11.40 -0.90 1.20)
	$P_{22} \ P_{23}$	1.02 0.22 $\times 10^{-17}$	-0.32 0.23 $\times 10^{-16}$	4.86 0.00 $\times 10^{-15}$	5.11 -0.60 $\times 10^{-15}$
	symm. $P_{33}$	symm. 1.31	symm. 2.16	symm. 6.88	symm. 13.50
$k_{ij}$ (m <sup>2</sup> )	$k_{11} \ k_{12} \ k_{13}$	(1.88 0.12 0.06)	(1.54 0.11 0.11)	(0.98 0.05 -0.03)	(1.55 0.08 -0.10)
	$k_{22} \ k_{23}$	5.23 -0.18 $\times 10^{-18}$	4.02 -0.19 $\times 10^{-17}$	1.28 0.00 $\times 10^{-15}$	2.08 0.05 $\times 10^{-15}$
	symm. $k_{33}$	symm. 4.98	symm. 1.95	symm. 1.11	symm. 1.38

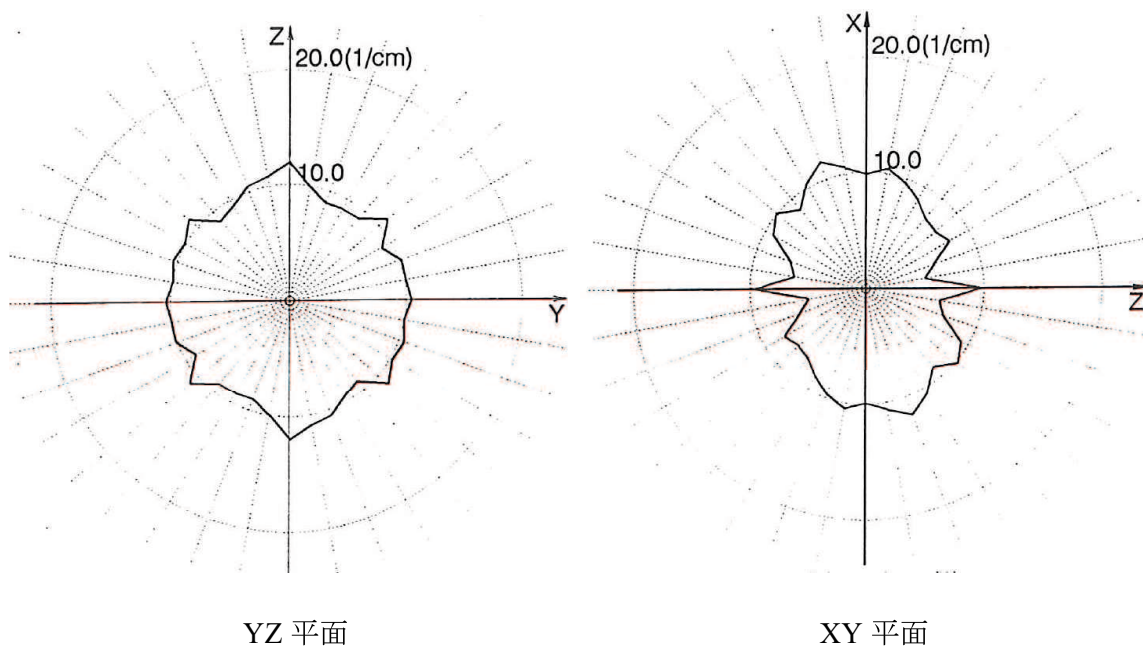


YZ 平面



XY 平面

図2.9 交線分布図(2000日間養生)<sup>5)</sup>



YZ 平面

XY 平面

図2.10 クラック交点数の方向分布図(2000日間養生)<sup>5)</sup>

上記で推定した2000日間養生の結果を含めた4ケースについて透水係数の実測値と推定値を図2.12に示す。同図より、養生日数が1000日を超えると、透水係数の実測値と推定値はともに約2オーダー上昇している。また、4ケースのいずれも推定値はクラック間が完全に連結していると仮定したために、実測値より若干大きくなっているものの、良く一致している。

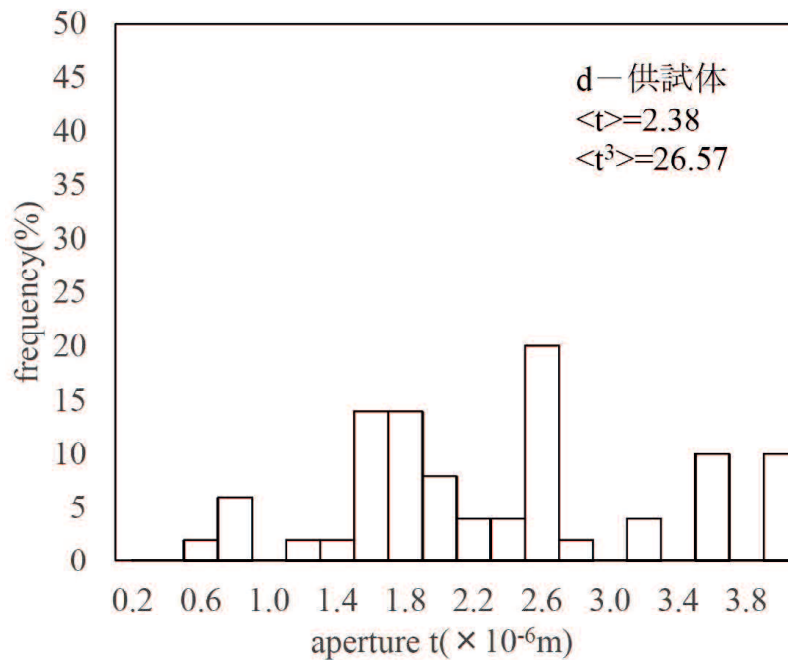


図2.11 クラック開口幅の頻度分布図(2000日間養生)<sup>5)</sup>

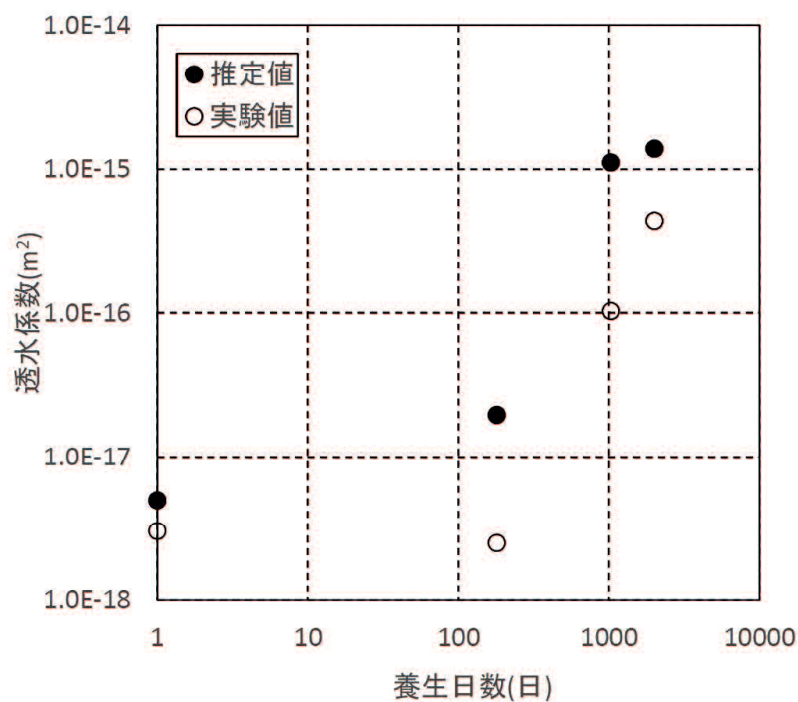


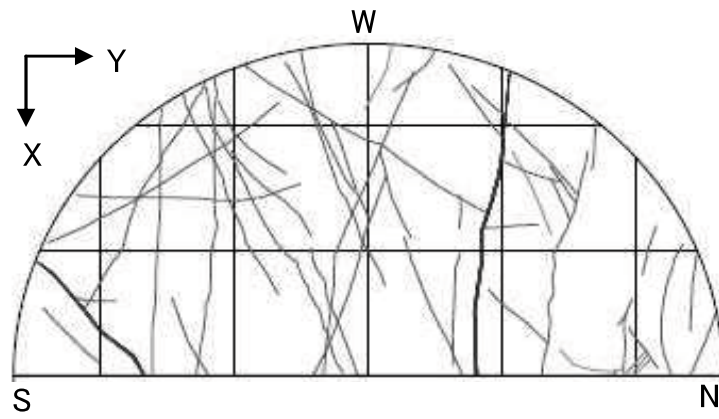
図2.12 透水係数の実測値と推定値の比較<sup>5)</sup>

## 2. 4. 立坑による推定した岩盤透水係数の評価

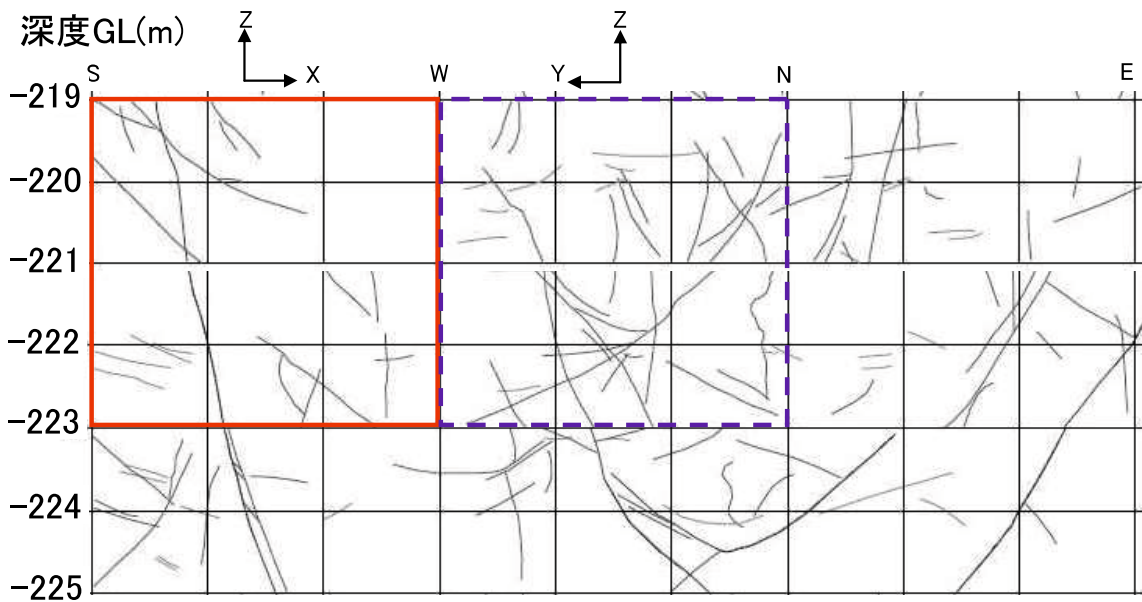
### 2. 4. 1. 推定した3次元クラックテンソルの評価

2.3節の手順に従って、坑壁地質観察結果と底盤地質観察結果より、初生的なクラックを抽出して、3次元クラックテンソルと透水テンソルを推定した。一例として、換気立坑深度221.0mの坑壁クラックマップを図2.13に示す。底盤地質観察領域であるXY断面は図2.13(a)に示し、図2.13(b)のうちYZ断面は青の破線で示す範囲、ZX断面は赤の破線で示す範囲と設定した。なお、図2.13(b)のYZ断面とZX断面はXY断面と同じ面積になるように設定し、底盤観察の深度を基準とした。壁面観察結果におけるクラックに関する統計量を表2.1に示す。同表より、調査領域について等価な正方領域の一辺を代表長さ $D$ として表すと、調査領域はクラック平均長の3倍以上であり、十分であるといえる<sup>3)</sup>。

換気立坑深度221.0mの単位長さ当たりの交点数 $m^{(q)}$ の方向分布を図2.14に示す。同図よりYZ断面は $105^\circ$ 方向にZX断面とXY断面は $45^\circ$ 方向と $135^\circ$ 方向に交点数が卓越していることがわかる。表2.2と図2.14より、クラックテンソル、透水テンソルを求めた結果を表2.3に示す。表2.3より、クラックテンソルの第一不変量 $F_0$ の深度分布を図2.15に示す。同図より、深度50m～250mにおいて推定したクラックテンソル $F_0$ は深度と概ね比例関係にある。つまり、深度50m～250mにおいて、エコーチップ反発硬度試験結果より推定した岩石の一軸圧縮強さは概ね一定(2～10MPa)<sup>15), 16)</sup>であるが、初期地圧が深度に比例する条件では、クラックの密度を表わす3次元クラックテンソル $F_0$ は深度に比例して増加することを示唆している。



(a)XY断面 (縮尺S=1/75)



(b)YZ断面とZX断面 (縮尺S=1/165)

図2.13 クラック分布図(換気立坑GL.-221.0m直交3断面)

表2.2 クラックに関する統計量(XY平面)

立坑	深度 (m)	本数 $N$ (本)	一次モーメント $\langle L \rangle$ (m)	二次モーメント $\langle L^2 \rangle$ (m <sup>2</sup> )	対象面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	代表長さ $D=A^{0.5}$ (m)	$D/\langle L \rangle$
換気	83.0	7	1.00	1.62	11.03	3.32	3.3
	121.0	23	0.45	0.23	12.76	3.57	8.0
	139.3	36	0.42	0.20	23.28	4.83	11.6
	221.0	51	0.96	1.41	12.76	3.57	3.7
	247.8	570	0.40	0.35	23.28	4.83	12.2
東	117.2	63	0.61	0.53	23.28	4.83	7.9
	139.8	130	0.62	0.57	31.11	5.58	8.9
	159.2	1116	0.22	0.23	23.28	4.83	21.7
	219.2	271	0.29	0.16	23.28	4.83	16.8
	249.1	595	0.21	0.08	31.11	5.58	26.2

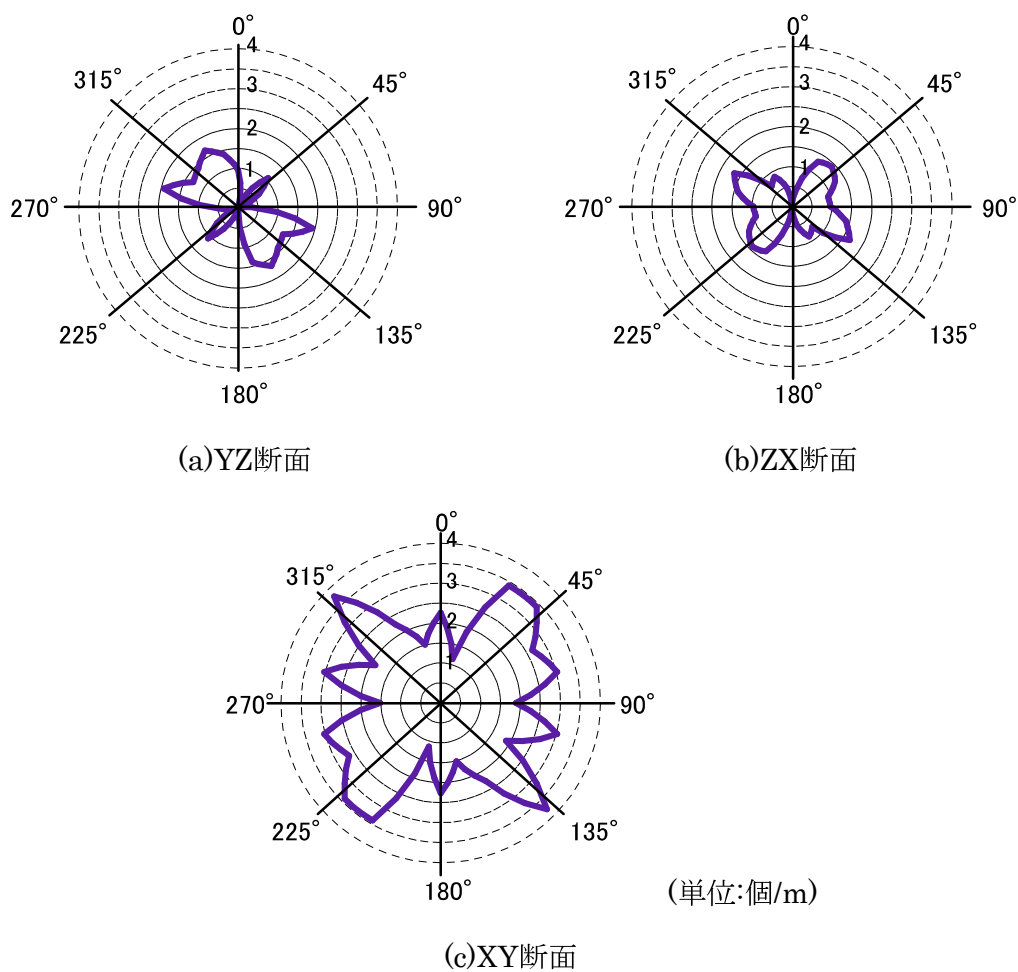


図2.14 各断面の交点数 $m^{\theta}$ の方向分布(換気立坑GL.-221.0m)



表2.3 クラックテンソルおよび透水テンソル

立坑		換気				
深度G.L.- (m)		83.0	121.0	139.3	221.0	247.8
$F_0$		0.14	0.05	0.11	0.79	1.62
$N_{ij}$	$N_{11} N_{12} N_{13}$	1.05 0.43 -1.04	1.00 -0.30 0.11	0.33 -0.21 0.44	0.75 0.07 0.03	0.36 0.13 0.24
	$N_{22} N_{23}$	-0.19 0.00	0.86 -0.16	0.04 0.09	0.70 -0.24	0.57 -0.06
	symm. $N_{33}$	symm. 0.14	symm. -0.86	symm. 0.63	symm. -0.44	symm. 0.07
$F_{ij}$	$F_{11} F_{12} F_{13}$	0.14 0.06 -0.14	0.05 -0.02 0.01	0.04 -0.02 0.05	0.59 0.05 0.02	0.58 0.21 0.39
	$F_{22} F_{23}$	-0.03 0.00	0.05 -0.01	0.00 0.01	0.55 -0.19	0.92 -0.09
	symm. $F_{33}$	symm. 0.02	symm. -0.05	symm. 0.07	symm. -0.35	symm. 0.12
$P_{ij} (m^2)$	$P_{11} P_{12} P_{13}$	2.80 1.13 -0.28	1.33 -0.40 0.15	1.83 -1.17 2.43	7.38 0.65 0.30	2.39 0.88 1.62
	$P_{22} P_{23}$	-0.50 0.00	1.14 -0.21	0.24 0.52	6.87 -2.33	3.83 -0.38
	symm. $P_{33}$	symm. 0.36	symm. -1.14	symm. 3.51	symm. -4.39	symm. 0.48
$k_{ij} (m^2)$	$k_{11} k_{12} k_{13}$	1.38 -0.09 0.23	1.91 0.03 -0.01	4.14 0.10 -0.20	0.42 -0.05 -0.02	1.46 -0.73 -1.35
	$k_{22} k_{23}$	1.66 0.00	1.93 0.02	4.27 -0.04	0.46 0.19	0.26 0.31
	symm. $k_{33}$	symm. 1.58	symm. 2.12	symm. 4.00	symm. 1.40	symm. 3.05
$K_{ij} (m/sec)$	$K_{11} K_{12} K_{13}$	1.36 -0.09 0.23	1.88 0.03 -0.01	4.06 0.10 -0.20	0.41 -0.05 -0.02	1.43 -0.72 -1.32
	$K_{22} K_{23}$	1.63 0.00	1.89 0.02	4.19 -0.04	0.45 0.19	0.26 0.31
	symm. $K_{33}$	symm. 1.55	symm. 2.08	symm. 3.92	symm. 1.37	symm. 3.00
立坑		東				
深度G.L.- (m)		117.2	139.8	159.2	219.2	249.1
$F_0$		0.24	0.42	0.63	0.47	0.45
$N_{ij}$	$N_{11} N_{12} N_{13}$	0.23 -0.22 -0.15	0.12 -0.28 -0.18	0.63 0.18 -0.08	0.34 0.10 0.18	1.02 -0.08 0.31
	$N_{22} N_{23}$	0.96 0.21	0.38 -0.12	0.54 -0.07	0.40 -0.06	0.43 -0.07
	symm. $N_{33}$	symm. -0.19	symm. 0.51	symm. -0.17	symm. 0.25	symm. -0.44
$F_{ij}$	$F_{11} F_{12} F_{13}$	0.05 -0.05 -0.04	0.05 -0.12 -0.07	0.40 0.11 -0.05	0.16 0.05 0.08	0.46 -0.04 0.14
	$F_{22} F_{23}$	0.23 0.05	0.16 -0.05	0.34 -0.04	0.19 -0.03	0.19 -0.03
	symm. $F_{33}$	symm. -0.04	symm. 0.21	symm. -0.11	symm. 0.12	symm. -0.20
$P_{ij} (m^2)$	$P_{11} P_{12} P_{13}$	0.35 -0.34 -0.23	0.51 -1.20 -0.77	5.57 1.62 -0.73	2.18 0.64 1.11	5.23 -0.41 1.62
	$P_{22} P_{23}$	1.47 0.33	1.63 -0.52	4.80 -0.66	2.53 -0.37	2.19 -0.36
	symm. $P_{33}$	symm. -0.29	symm. 2.19	symm. -1.47	symm. 1.61	symm. -2.28
$k_{ij} (m^2)$	$k_{11} k_{12} k_{13}$	5.04 0.28 0.19	8.23 1.00 0.64	0.71 -0.13 0.06	0.95 -0.05 -0.09	0.51 0.34 -0.13
	$k_{22} k_{23}$	4.11 -0.27	7.30 0.44	0.78 0.05	0.92 0.03	0.76 0.30
	symm. $k_{33}$	symm. 5.57	symm. 6.83	symm. 1.30	symm. 0.99	symm. 1.13
$K_{ij} (m/sec)$	$K_{11} K_{12} K_{13}$	4.95 0.28 0.19	8.08 0.98 0.63	0.70 -0.13 0.06	0.93 -0.05 -0.09	0.50 0.03 -0.13
	$K_{22} K_{23}$	4.03 -0.27	7.16 0.43	0.76 0.05	0.90 0.03	0.75 0.03
	symm. $K_{33}$	symm. 5.46	symm. 6.70	symm. 1.27	symm. 0.97	symm. 1.11

2. 4. 2. 岩盤透水係数の推定精度の評価

図2.16に示すように地下施設の建設に関わる詳細なグラウト施工計画の策定に必要な立坑近傍の地質構造と岩盤の水理特性、及び今後の排水処理設備で対象とする地下水の水質に関する情報を取得することを目的として、地上から深度520.5mの間において深層ボーリング削孔ならびに深層ボーリング孔を用いた透水試験等を実施している<sup>17)</sup>。

深層ボーリング孔のうち深度147.3m～520.5m区間を対象に実施した単孔式水理試験結果から、深度167.78m～232.33m区間の平均岩盤透水係数は $6.54 \times 10^{-9} m/sec$ 、深度233.86m～247.91m区間の平均岩盤透水係数は $8.00 \times 10^{-8} m/sec$ が得られている<sup>17)</sup>。なお、得られた岩盤透水係数は対象区間を試験範囲として得られたものであるため、当該区間の岩盤透水係数のばらつきは得られていない。ばらつきを調査する場合は、試験区間を短い区間で実施することを考慮することとなる。

立坑掘削時の地質観察結果より得られた互いに直交する3断面のクラックの情報より、クラックテンソル理論ならびにステレオロジーの概念に基づいて推定した岩盤透水係数の推定

精度を評価するために、立坑周辺で実施された深層ボーリング孔を用いた透水試験より得られた岩盤透水係数との比較分析を行った。ただし、原位置試験は換気立坑から17m、東立坑から81m離れた位置と換気立坑は近傍に設置しているが、原位置試験実施深度は147m以深であり、透水試験実施時点の換気立坑深度140m、東立坑深度90mである。透水試験完了後に当該深度以深の施工における坑壁地質観察結果より透水試験に伴う開口クラックは確認

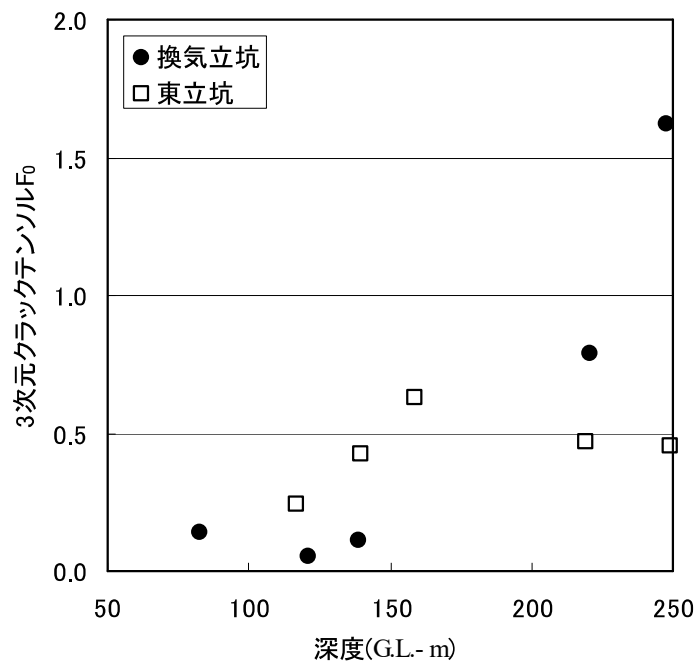


図2.15 クラックテンソル $F_0$ の深度分布

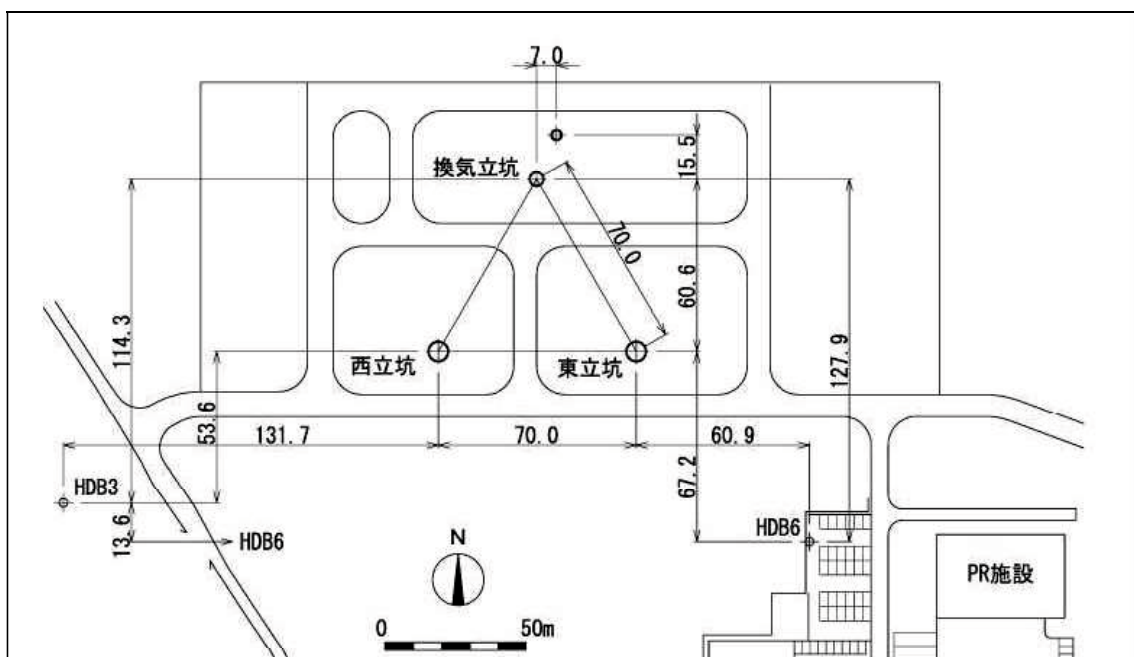


図 2.16 深層ボーリング調査位置図<sup>16)</sup>

されていないため、同じ岩盤透水係数として評価した。

原位置の透水試験より得られた岩盤透水係数は透水テンソルの成分のうち  $K_{11}$  と  $K_{22}$  の和に相当する。従って、表 2.3 に示す透水テンソルより、岩盤透水係数推定値  $K=K_{11}+K_{22}$  とし算出し、その結果を表 2.4 に示した。

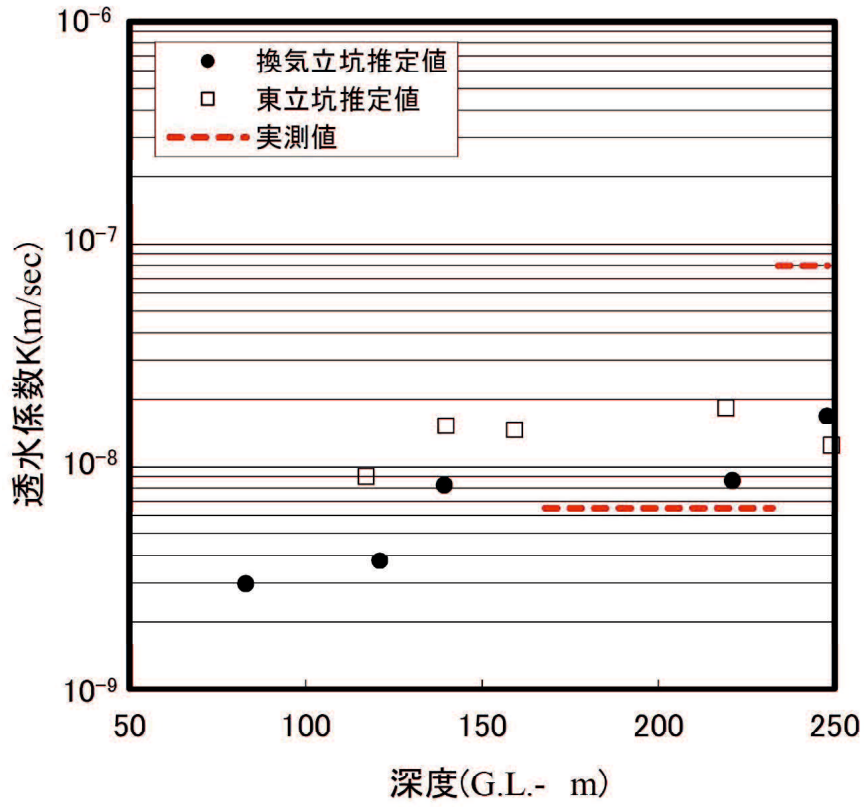
表2.3に示した岩盤透水係数推定値と原位置の平均岩盤透水係数の深度分布を図2.17(a)に示す。その結果、深度50m～160mの岩盤透水係数推定値は $10^{-9}$ m/secオーダー、深度160m～250mでは $10^{-8}$ m/secオーダーであり、原位置の岩盤透水試験結果と良く一致している。

一方、岩盤透水係数の実測値は推定値の40%から80%程度と小さい。これは、推定値ではクラックの連結性を完全である( $\lambda=1$ )として推定したためである。このことから、実際のクラックの連結性は完全ではないと考えられる。また、岩盤透水係数の実測値と推定値の違いを連結性の程度 $\lambda$ の影響のみと考えると、実際のクラックの連結性 $\lambda=$ 実測値/推定値と表わされ、 $\lambda$ の範囲は0.4から0.8程度である。

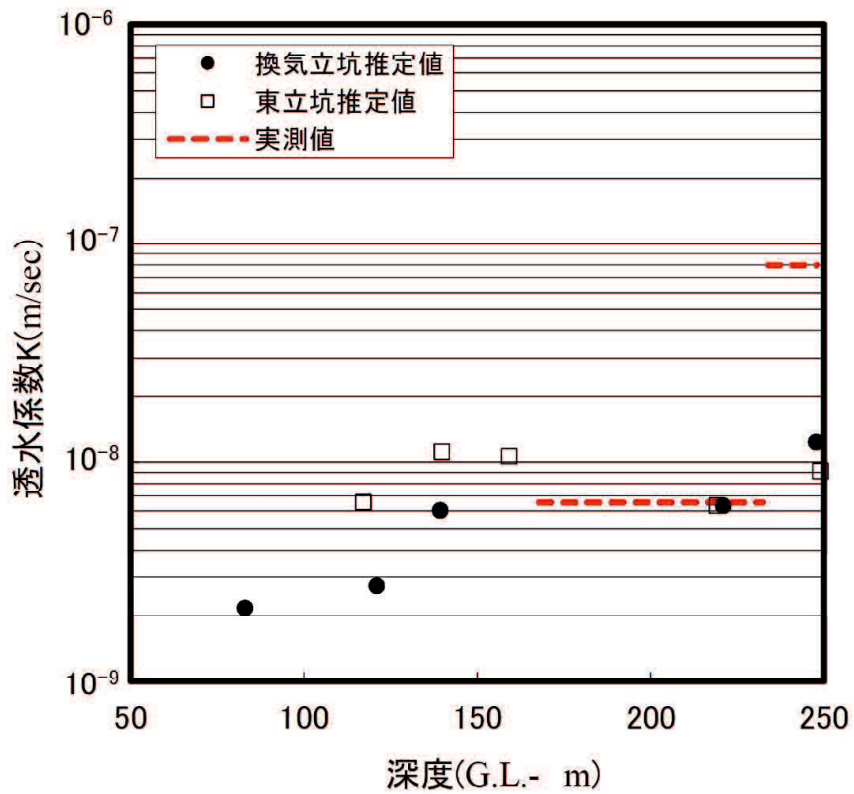
加えて、本研究では、坑壁地質観察結果からクラックの開口幅を一定かつ0.03mmと仮定して岩盤透水係数を推定した。しかし、実際には一定では無く、バラツキもあるため、今後、坑壁地質観察において初生的なクラックの代表的な開口幅を測定し、そのデータを利用すると、より岩盤透水係数の推定精度は向上すると考えられる。また、代表的な開口幅を測定する技術が確立できれば、3次元クラックテンソルにより岩盤透水係数が推定できるため、より透水係数の推定精度が向上すると考えられる。例えば、図 2.17(b)に示すようにクラックの開口幅を一定かつ0.027mmと仮定すると、岩盤透水係数は深度160m～250mにおいて、原位置の透水試験結果と概ね整合している。

表 2.4 透水テンソルより求めた岩盤透水係数推定値

立坑	深度(m)	透水テンソル		透水係数推定値
		$K_{11}$ (m/sec)	$K_{22}$ (m/sec)	$K=K_{11}+K_{22}$ (m/sec)
換気	83.0	$1.36 \times 10^{-9}$	$1.63 \times 10^{-9}$	$2.99 \times 10^{-9}$
	121.0	$1.88 \times 10^{-9}$	$1.89 \times 10^{-9}$	$3.77 \times 10^{-9}$
	139.3	$4.06 \times 10^{-9}$	$4.19 \times 10^{-9}$	$8.25 \times 10^{-9}$
	221.0	$4.10 \times 10^{-9}$	$4.50 \times 10^{-9}$	$8.60 \times 10^{-9}$
	247.8	$1.43 \times 10^{-8}$	$2.60 \times 10^{-9}$	$1.69 \times 10^{-8}$
東	117.2	$4.95 \times 10^{-9}$	$4.03 \times 10^{-9}$	$8.98 \times 10^{-9}$
	139.8	$8.08 \times 10^{-9}$	$7.16 \times 10^{-9}$	$1.52 \times 10^{-8}$
	159.2	$7.00 \times 10^{-9}$	$7.60 \times 10^{-9}$	$1.46 \times 10^{-8}$
	219.2	$9.30 \times 10^{-9}$	$9.00 \times 10^{-9}$	$1.83 \times 10^{-8}$
	249.1	$5.00 \times 10^{-9}$	$7.50 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-8}$



(a) 開口幅  $t=0.03$ mm 一定の場合



(b) 開口幅  $t=0.027$ mm 一定の場合

図 2.17 岩盤透水係数の深度分布

### 2. 4. 3. 岩盤透水係数の推定値と割れ目頻度との相関

施工箇所の岩盤透水係数を把握するためには、互いに直交する3断面のクラックの情報に基づき、3次元クラックテンソルや透水テンソルにより、岩盤透水係数を推定することは重要である。そのため、立坑掘削の進捗にあわせて、3次元クラックテンソルにより推定した岩盤透水係数のデータを順次蓄積していく必要がある。

一方、3次元クラックテンソルによる岩盤透水係数の推定に必要な底盤地質観察は岩盤清掃等の手間がかかり、立坑工事の進捗に支障を与えることから、底盤地質観察は代表する深度(約50m毎)にしか行われぬ。このため、互いに直交する3断面のクラック分布が得られない深度については、直接3次元クラックテンソルによる岩盤透水係数を推定できない。従って、各サイクルで得られた坑壁地質観察結果から得られた割れ目頻度と岩盤透水係数ならびに2次元のクラックテンソル  $F_0$  と岩盤透水係数の関係を分析し、これらの相関より相関性が高い相関式を使って、岩盤透水係数を推定することとした。相関式より求めた岩盤透水係数は施工箇所のバラツキがあるため、3次元クラックテンソルにより推定した岩盤透水係数と比べて、優位性は低い。

#### (1) 2次元クラックテンソル $F_0$ と岩盤透水係数の相関

2次元の2階のクラックテンソル  $F_{ij}$  は総和形式により式(2.29)と表される。2階のクラックテンソルの第一不変量である  $F_0$  は、 $F_0 = F_{11} + F_{22}$  で求められる。

$$F_{ij} = \frac{1}{L^2} \sum_{k=1}^{m^{(r)}} (r^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (i, j = 1, 2) \quad (2.29)$$

2次元クラックテンソル  $F_0$  と推定した岩盤透水係数の相関を図2.18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、2次元クラックテンソル  $F_0$  と推定した岩盤透水係数には比例関係にあり、2次元クラックテンソル  $F_0$  が11以下に対する岩盤透水係数の相関係数は約0.5と比較的低い。そして、2次元クラックテンソル  $F_0$  と推定した岩盤透水係数の相関式は式(2.30)と求められた。

$$\log_{10} K = 0.0354 F_0 - 8.1422 \quad (2.30)$$

ここに、 $K$ は透水係数(m/sec)、 $F_0$ は2次元クラックテンソルの第一不変量である。

#### (2) 割れ目頻度と岩盤透水係数の相関

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

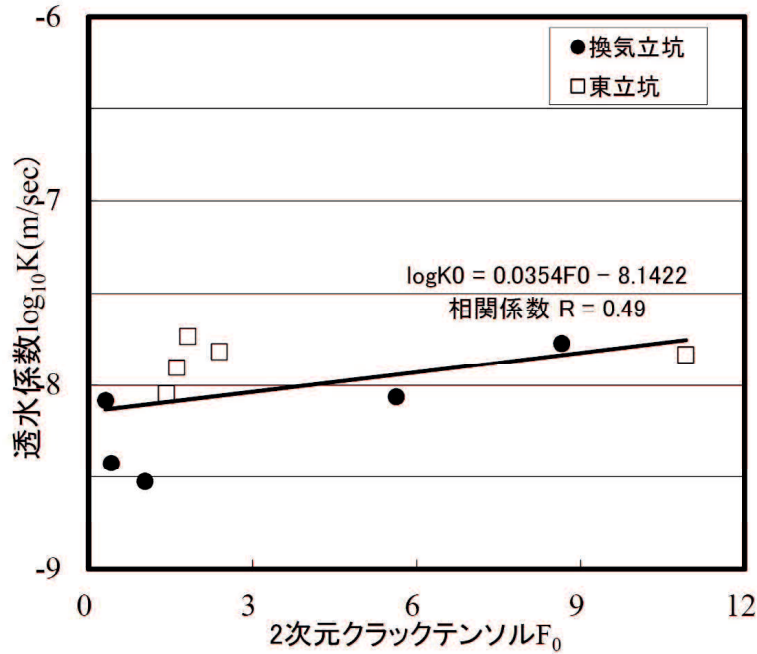


図 2.18 2次元クラックテンソル  $F_0$  と岩盤透水性係数の関係

あり，その次元は(m/m<sup>2</sup>)である<sup>15), 16)</sup>。

割れ目頻度と推定した岩盤透水性係数の相関を図2.19に示す。ここで，縦軸の岩盤透水性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性係数には比例関係にあり，割れ目頻度3m/m<sup>2</sup>以下に対する岩盤透水性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性係数の相関式は式(2.31)と求められた。

$$\log_{10} K = 0.2223\alpha - 8.3009 \quad (2.31)$$

ここに， $K$ は岩盤透水性係数(m/sec)， $\alpha$ は割れ目頻度(m/m<sup>2</sup>)である。

2.4.3.(1)節で評価した2次元クラックテンソル $F_0$ と岩盤透水性係数の相関と比較して，推定した岩盤透水性係数と坑壁地質観察結果より得られる割れ目頻度については比較的高い相関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割れ目頻度から岩盤透水性係数を予測できる。

式(2.31)に示す予測式と図 2.20 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，各深度の岩盤透水性係数を推定した結果を図 2.21 に示す。なお，図 2.20 に示すように割れ目頻度 3m/m<sup>2</sup>を超える深度があるため，一部予測式を外挿している。図 2.21 より，割れ目頻度から推定した岩盤透水性係数推定値は，深度 50m～160m の岩盤透水性係数推定値は 10<sup>-9</sup>m/sec オーダー，深度 160m～250m では 10<sup>-8</sup>m/sec オーダーであり，3次元クラックテンソルからの推定値と比較して，概ね整合が取れているものの，詳細には全体的に各深度の割れ目頻度

から推定した岩盤透水係数推定値は 3 次元クラックテンソルからの推定値と比較して、大きめに分布している。

これは、式(2.31)に示す予測式においては、施工場所毎の割れ目頻度のばらつきがあり、感度があまり良くないこと、東立坑の深度 160m~210m においては、割れ目頻度  $3\text{m}^2$  を超えるため、予測式を外挿した影響が現れているものと考えられる。そして、割れ目頻度の深

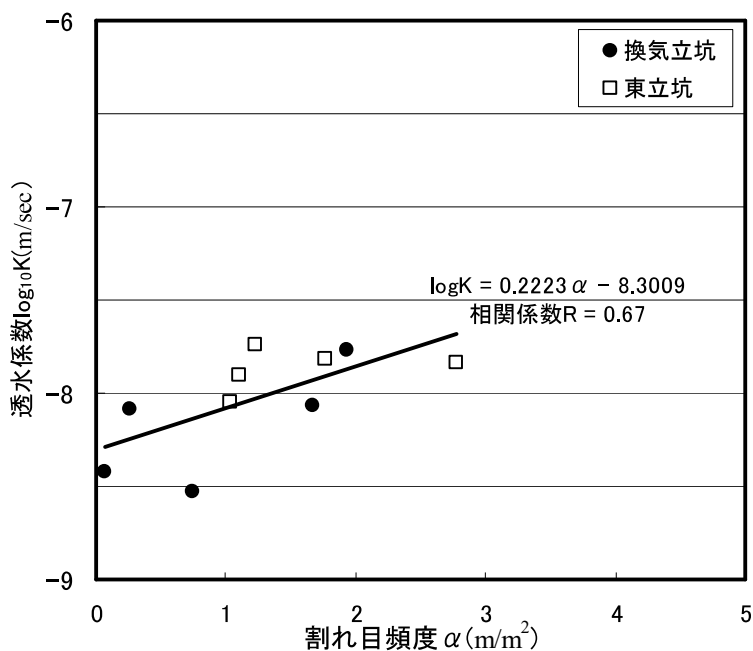


図 2.19 割れ目頻度と岩盤透水係数の関係

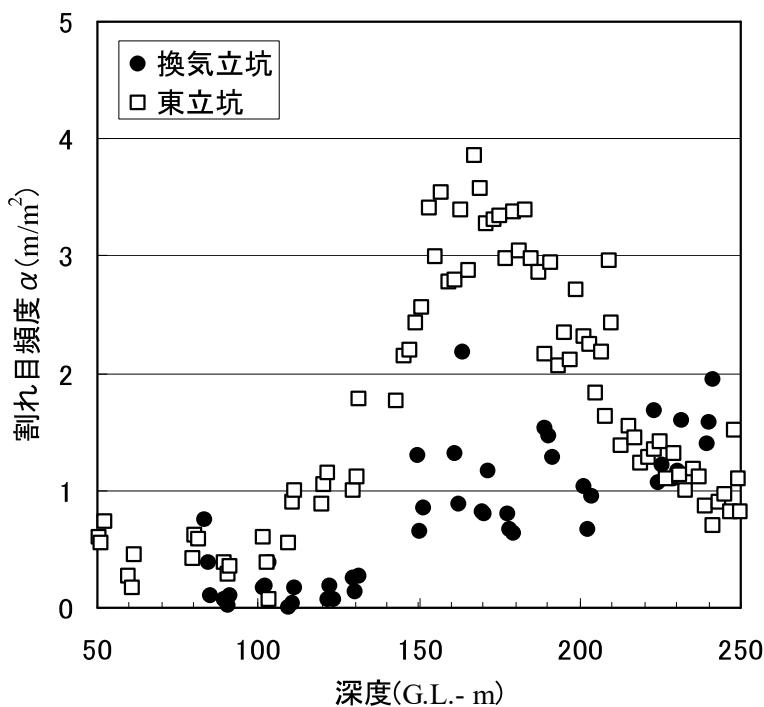
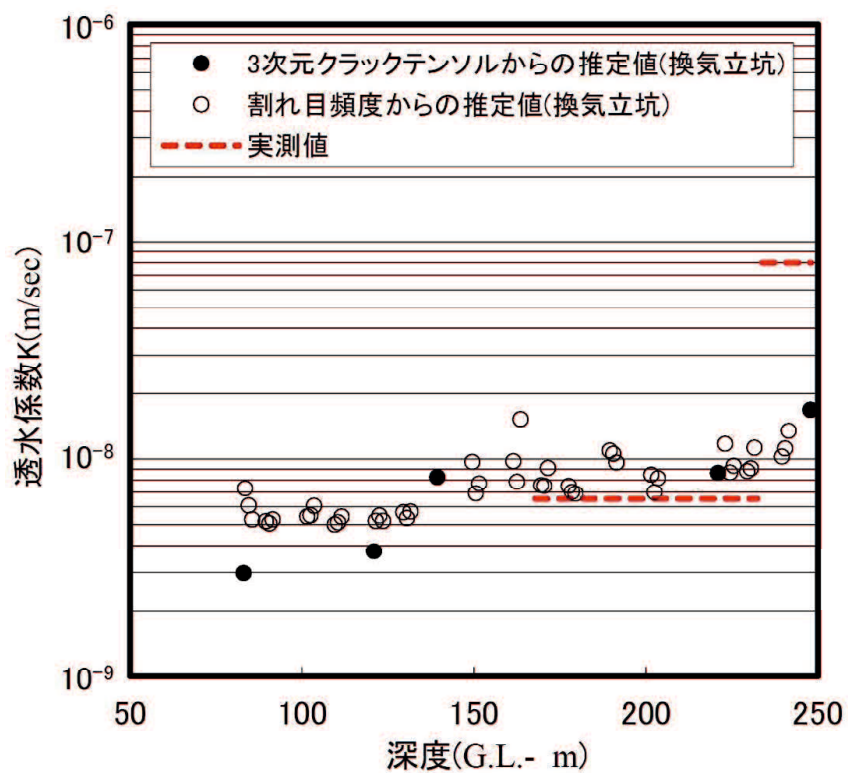
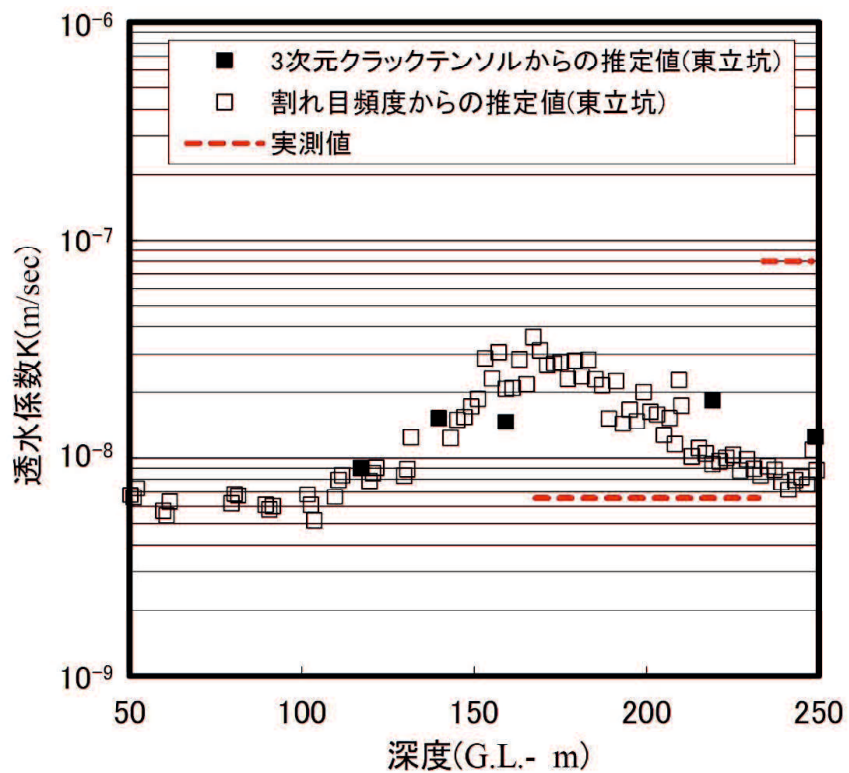


図 2.20 割れ目頻度の分布 <sup>14), 15)</sup>



(a)換気立坑



(b)東立坑

図 2.21 岩盤透水係数の深度分布



度分布は施工箇所（換気立坑，東立坑）による違いがあるものの，各深度の割れ目頻度から推定した岩盤透水係数推定値は，換気立坑も東立坑も同じオーダーである。

割れ目頻度から岩盤透水係数が予測できれば，施工箇所の湧水量が推定でき，グラウチングの必要性の有無の検討等に役立てられる．利用する岩盤透水係数については，推定値と実測値を比較すると施工箇所のバラツキがあるものの，岩盤透水係数のオーダーは良く一致していることから，推定した岩盤透水係数のオーダーの精度が有れば良いと考えられる．

今後も立坑掘削の進捗にあわせて，互いに直交する 3 断面が得られる深度では 3 次元クラックテンソルにより岩盤透水係数を推定し，順次データを蓄積することにより，割れ目頻度と岩盤透水係数の相関式の精度を高めていく必要がある．また，本章では深度 250m までを対象としたため，緩みクラックが確認されておらず初生クラックのみの分析となったが，深度 250m 以深については，掘削によって発生した緩みクラックが確認されていることから，今後，初生クラックと緩みクラックの違いを考慮した分析・評価をしていくこととしたい．

## 2. 5. まとめ

幌延深地層研究所地下施設の立坑を対象として，掘削に伴う坑壁地質観察結果に基づくクラックに関する情報から推定した岩盤透水係数の評価について得られた知見は以下のとおり．

- (1) 坑壁地質観察結果より，互いに直交する 3 断面のクラックに関する情報(長さ，方向，開口幅)を基に，Kanatani が提案したステレオロジーの概念を用いて 3 次元のクラックテンソルや透水テンソルを推定することができた．
- (2) 坑壁地質観察におけるクラックの情報より，クラック開口幅を一定かつ 0.03mm と仮定して透水テンソルを推定した岩盤透水係数と，立坑近傍の深層ボーリング孔を用いた原位透水試験結果に基づく岩盤透水係数を比較すると，良く一致していることが分かった．しかし，実際には開口幅は一定では無く，バラツキもあるため，坑壁地質観察において初生的なクラックの代表的な開口幅を測定し，そのデータを利用すれば，より岩盤透水係数の推定精度は向上すると考えられる．
- (3) 互いに直交する 3 断面が得られる深度において，立坑掘削に伴う坑壁地質観察結果に基づく割れ目頻度と 3 次元クラックテンソルにより推定した岩盤透水係数については比較的高い相関が得られた．この相関を用いて，互いに直交する 3 断面が得られない深度においても，坑壁地質観察結果に基づく割れ目頻度より，岩盤透水係数が予測できた．

## 参考文献

- 1) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 96-108, 1982.
- 2) 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.
- 3) 例えば, Oda, M., Hatsuyama, Y. and Ohnishi, Y. : Numerical Experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden, *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 92 (B8), pp. 8034-8048, 1987.
- 4) Kanatani, K. : Measurement of crack distribution in a rock mass from observation of its surfaces, *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-83, 1984.
- 5) 山崎雅直, 鈴木健一郎, 小田匡寛 : クラックテンソルによる花崗岩の透水性の評価, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 第 3 部門, pp. 622-623, 1996.9.
- 6) 小田匡寛, 鈴木健一郎, 山崎雅直, 斉藤禎二郎 : 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 (原郁夫先生退官記念論文集), 創文, pp. 367-378, 1996.
- 7) Suzuki, K., Oda, M., Yamasaki, M. and Kuwabara, T. : Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 35, No. 7, pp. 907-921, 1998.
- 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集, pp. 191-196, 2009.1.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.

- 14) M. Oda : Stereology on crack geometry, *Research of pattern Formation*, KTK Scientific Publishers, Tokyo, Japan, pp. 517-553, 1986.
- 15) 津坂仁和, 山崎雅直, 羽出山吉裕, 山本卓也 : 幌延深地層研究所の立坑掘削に伴うコンバージェンス曲線の評価, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp. 311-317, 2008.
- 16) 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, 2010.3.
- 17) 藪内聡, 國丸貴紀, 石井英一, 羽出山吉裕, 井尻裕二, 松岡清幸, 井原哲夫, 松波伸次郎, 松野章也 : 幌延深地層研究計画 換気立坑先行ボーリング(PB V01 孔)調査報告書ー岩盤の水理特性調査ー, JAEA-Data/Code 2008-026, 2008.

## 第3章 立坑の覆工劣化状態の推定ならびに予測手法

### 3. 1. はじめに

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)</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>3)</sup>。そして、トンネル掘削時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に関するクラックテンソルが予測できれば、覆工クラックの劣化に関するクラック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。立坑掘削時の岩盤クラックと立坑施工後の覆工クラックの関連性について、クラックテンソ

ル理論を用いて分析し、立坑掘削時の岩盤の情報から立坑施工後の覆工劣化状態を覆工の劣化度により定量的に予測したところに新規性ならびに独自性がある。

本章では、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劣化に関するクラックテンソルを推定する手法を提案した。さらに、提案した予測手法を他の立坑に適用し、等価な覆工の劣化に関するクラックテンソルの推定精度を評価した。

### 3. 2. 岩盤のクラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの算定

立坑掘削時の岩盤クラックと覆工施工後の覆工クラックの関連性について、立坑の側壁を展開して分析するために2次元の岩盤クラックテンソルならびに覆工の劣化に関するクラックテンソルを適用する。

#### 3. 2. 1. 岩盤のクラックテンソルの算定

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(3.1)のように定義される<sup>2)</sup>。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。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3.1)$$

ここに、 $m$ は対象範囲の面積 $A$  ( $\text{m}^2$ )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(3.2a)～式(3.2c)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 $F_{0l}$ は式(3.2d)に表わす。単位は無次元である。

$$F_{11} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 \cos^2 \theta^{(k)} \quad (3.2a)$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \quad (3.2b)$$

$$F_{22} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (l^{(k)})^2 \sin^2 \theta^{(k)} \quad (3.2c)$$

$$F_0 = F_{11} + F_{22} \quad (3.2d)$$

### 3. 2. 2. 覆工の劣化に関するクラックテンソルの算定

供用中のトンネルの変状状態のうち覆工のクラックを対象として、覆工の健全度を定量的に評価した。覆工のクラックの長さや開口幅が大きくなると、覆工の健全性が低下する、つまり、覆工の劣化度が進行するものとし、「覆工のクラックの進展と覆工の劣化の進行は等価である」と仮定した。亀村ら<sup>3)</sup>は覆工クラックの劣化評価について、クラックテンソルの考え方をいけば、劣化の進行性や劣化パターン<sup>3)</sup>の定量化に適用できると述べている。

亀村ら<sup>3)</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 $S_{ij}$ は、加算形で式(3.3)のように定義した。

$$S_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (3.3)$$

$S_{ij}$ の各成分は式(3.4a)～式(3.4c)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 $S_0$ は式(3.4d)に表わす。単位は無次元である。

$$S_{11} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \cos^2 \theta^{(k)} \quad (3.4a)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \cos \theta^{(k)} \sin \theta^{(k)} \quad (3.4b)$$

$$S_{22} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} \sin^2 \theta^{(k)} \quad (3.4c)$$

$$S_0 = S_{11} + S_{22} \quad (3.4d)$$

### 3. 2. 3. クラックテンソルの算定手順

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。

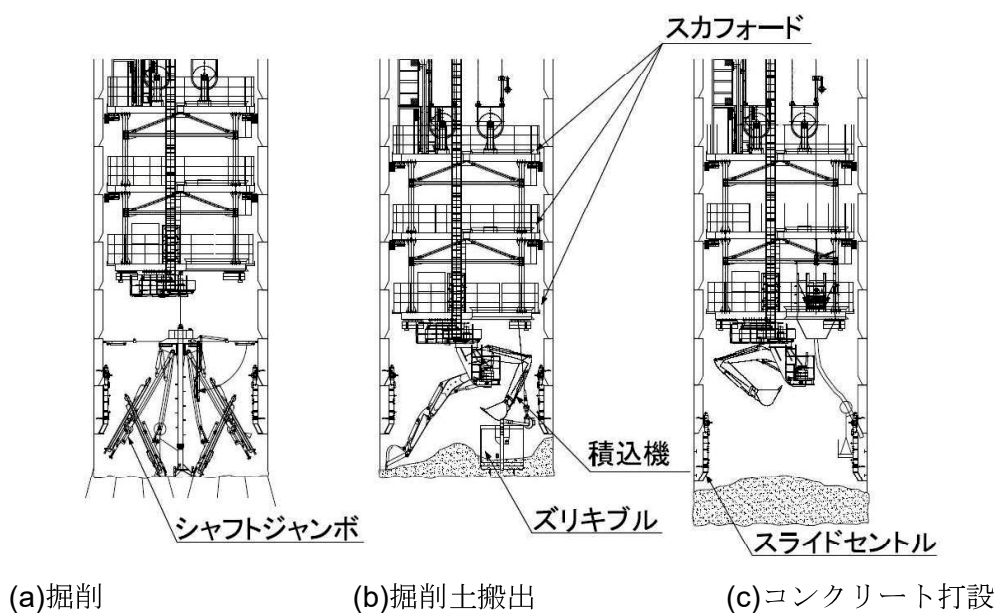
- a) 岩盤クラックと覆工クラックの分析対象は、東立坑深度50～380mと換気立坑深度50～350mを対象として、地下施設計測データ集のうち岩盤壁面クラック調査結果、覆工クラ

ック調査結果を使用した<sup>4), 5), 6), 7), 8), 9), 10)</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。

- b) 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caffold（**図 3.1**）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。
- c) 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や内空変位測定頻度が 10m 毎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。
- d) 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。
- e) **図 3.2** 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(3.5)より角度  $\theta^{(k)}$  を算出する。

$$\theta^{(k)} = \tan^{-1} \frac{x_2^{(k)} - x_1^{(k)}}{y_2^{(k)} - y_1^{(k)}} \quad (3.5)$$

- 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に関するクラックテンソル  $S_{ij}$  を算出する。



**図3.1** 東立坑施工フロー<sup>13)</sup>

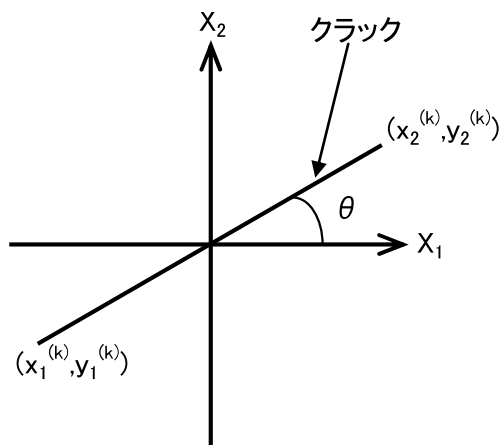


図3.2 クラックの定義

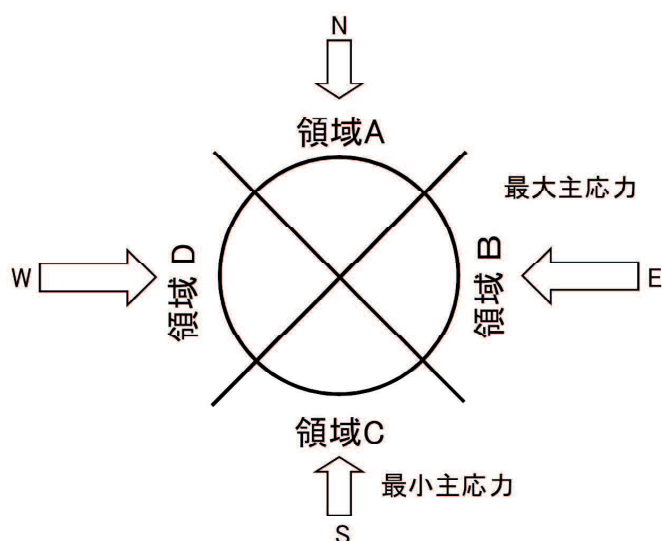


図3.3 岩盤坑壁分割の模式図

### 3. 2. 4. 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岩盤クラックについて、3.2.3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て、図3.3に示すように最大主応力と最小主応力の方向別に領域A～D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. 2. 5. クラックテンソル算定に用いるクラック

#### (1) クラックテンソル算定に用いる岩盤クラック

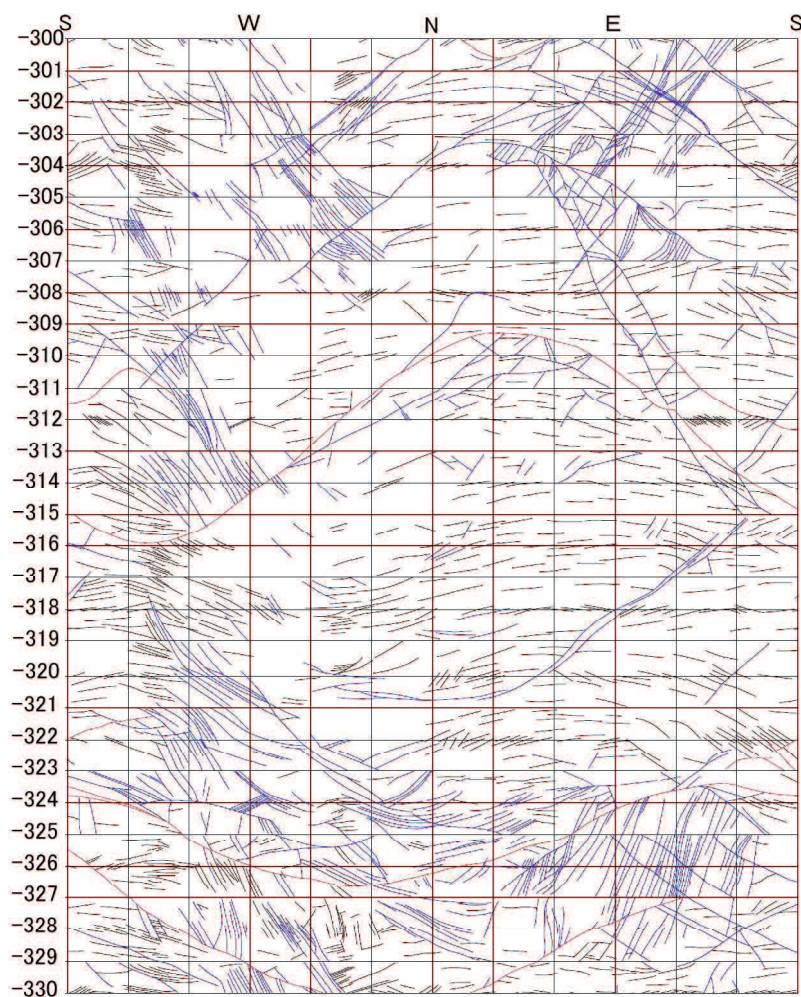
クラックテンソル算出に用いる立坑掘削における坑壁地質観察で得られたクラックに関する情報（長さ、方向）のうち、一例として深度 300m～330m の展開図を図 3.4 に示しており、



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い。一方、深度 316m～322m については初生的な成因のクラックが少なく、緩みクラックが多い。

## (2) 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 3.5 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



凡例 — : 引張クラック・せん断クラック — : 断層角礫 — : 緩みクラック

図 3.4 岩盤クラックマップの一例

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。図3.4と図3.5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48%、緩みクラック52%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37%、緩みクラック63%であり、覆工クラックが発生している深度は覆工クラックが発生していない深度に対して初生クラック

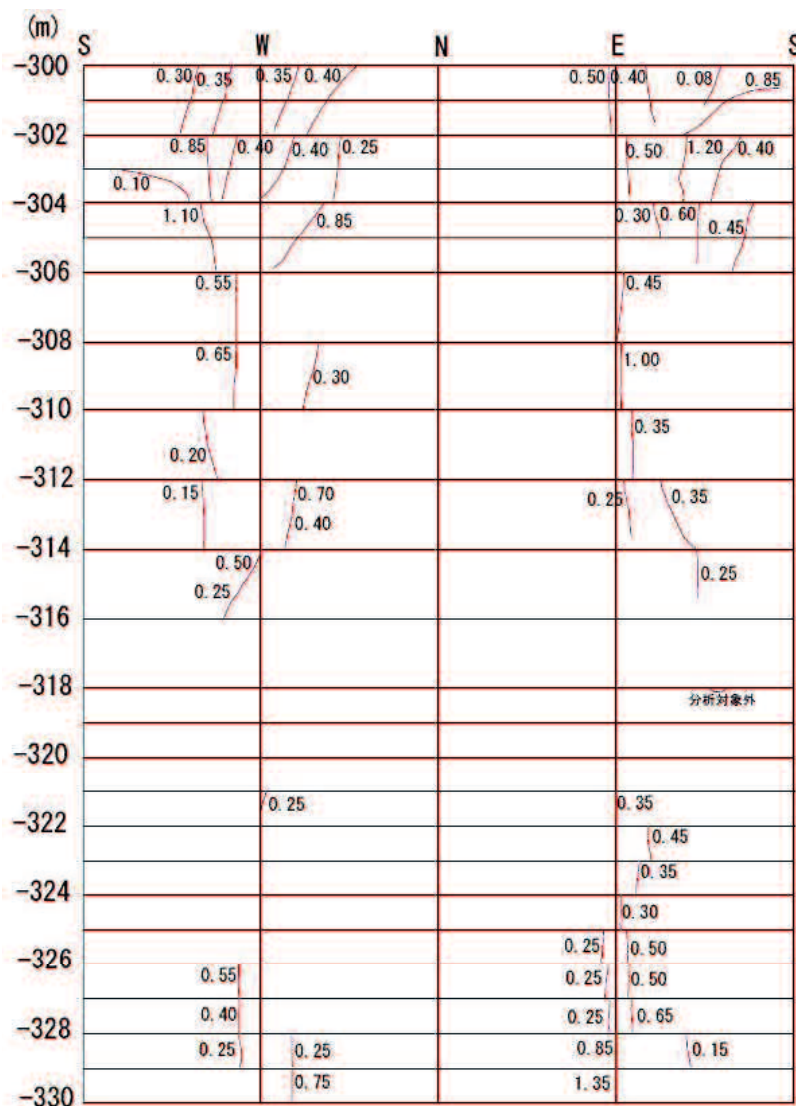


図3.5 覆工クラックマップの一例

の割合が多い傾向にある。

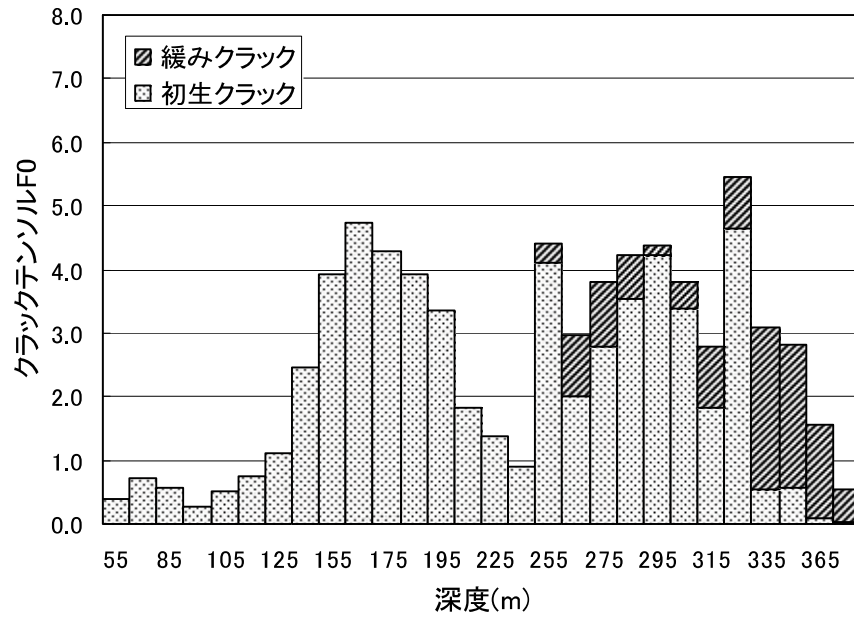
### (3) 岩盤クラックと覆工クラックの取得時期

岩盤クラックについては、立坑1サイクル2mの掘削完了後、0.5時間後より坑壁地質観察を開始し、2.5時間経過後に取得を完了する。一方、覆工クラックについては、岩盤壁面クラックを取得後、8時間後覆工打設、さらに120時間後に覆工クラックを取得することから、覆工クラックの取得と岩盤クラックの取得には時差が有る。覆工クラックの取得時点では、岩盤クラックは進展している可能性があるが、覆工されていて岩盤クラックを取得することが出来ないことから、時差があるものの、覆工に関する情報と岩盤に関する情報の関連性について分析を行った。

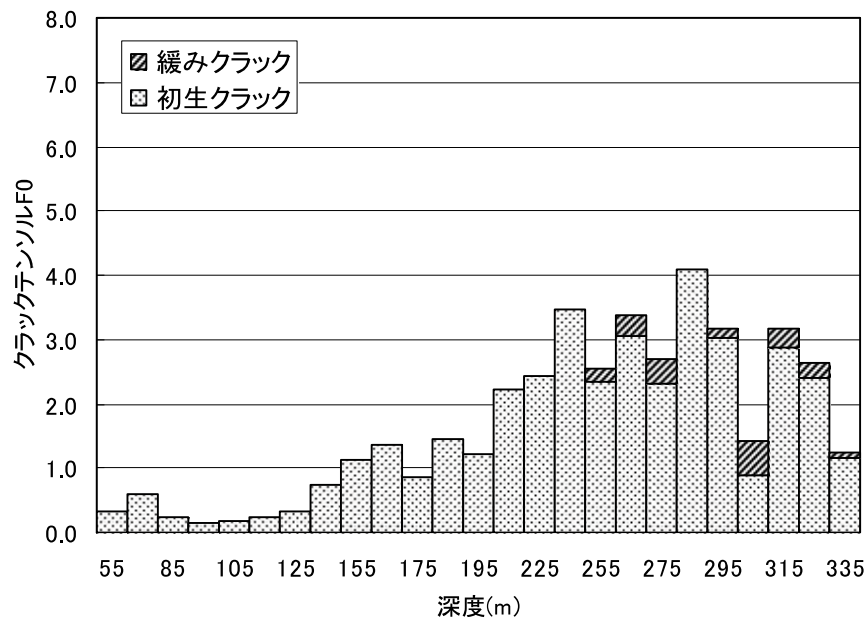
## 3. 3. 岩盤クラックと覆工クラックの相関分析

### 3. 3. 1. 分析に使用する岩盤クラック

岩盤クラックと覆工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、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3.7(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3.4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。



(a) 東立坑



(b) 換気立坑

図3.7 岩盤クラックテンソル $F_0$ の深度分布

### 3. 3. 2. クラックテンソル算定領域の妥当性

岩盤クラックと覆工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 3.1 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>11)</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辺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 3.1 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。

表 3.1 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A	領域B	領域C	領域D		領域A	領域B	領域C	領域D
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	0.86	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

### 3. 3. 3. 岩盤クラックと覆工クラックの方向分布の関係

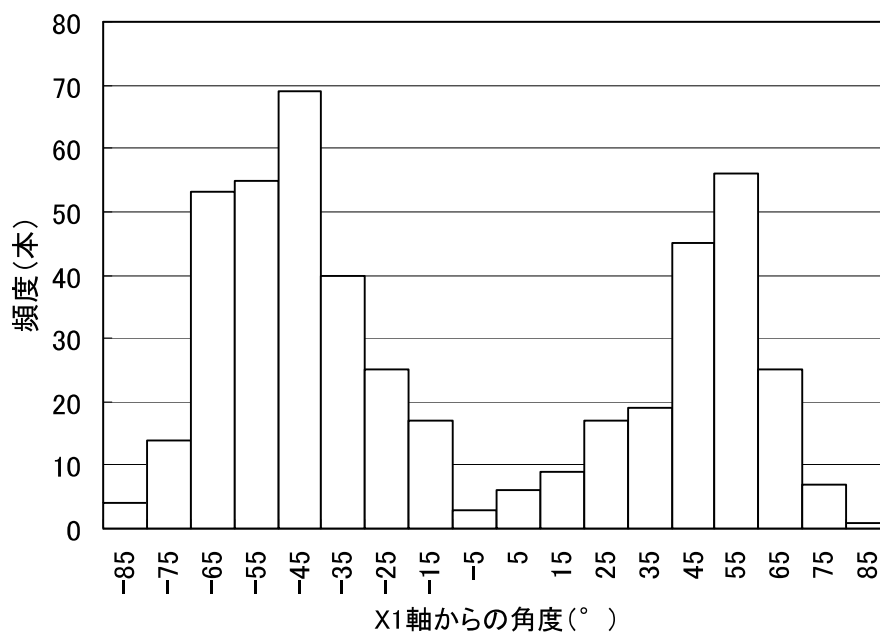
分析対象が、坑壁の展開図や覆工表面の展開図のような二次元断面のクラックとしているため、クラックの角度で整理した。岩盤クラックと覆工クラックについて、各クラックの方向の関連性を分析した。各クラックの  $X_I$  軸から角度の分布の一例として東立坑深度 300m～310m 区間の分布を図 3.7(a)～(b)に示す。図 3.8(a)は岩盤クラックの分布を示し、 $-70^\circ \sim -30^\circ$  と  $40^\circ \sim 70^\circ$  の頻度が高い傾向にある。図 3.8(b)は覆工クラックの分布を示し、 $X_I$  軸から角度が  $-90^\circ \sim -70^\circ$  と  $60^\circ \sim 90^\circ$  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工クラックの傾向が分かるため、縦クラックの角度は図 3.2 に示すクラックの  $X_I$  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

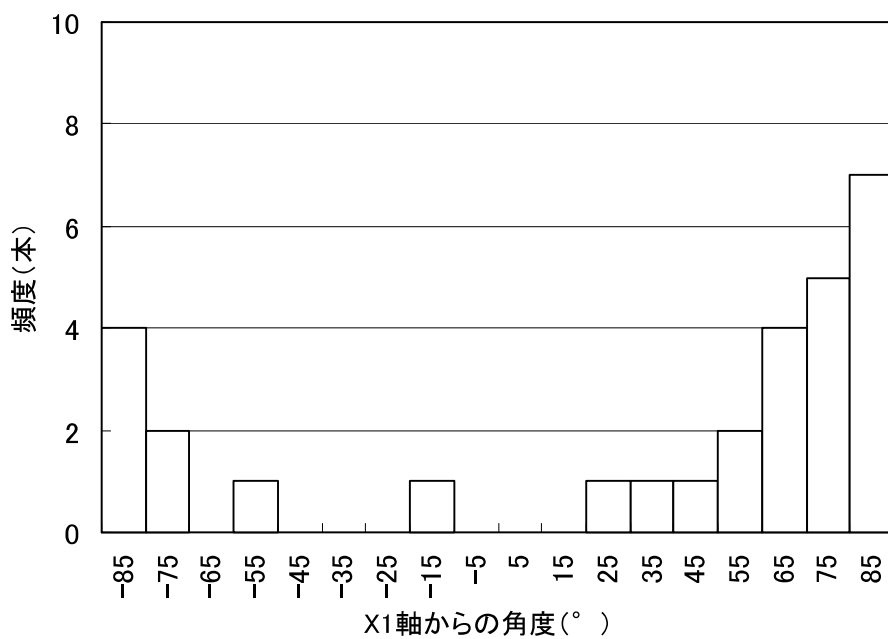
向は 10m 区間を 1 ブロックとして、各ブロックにおける縦クラックと斜めクラックの割合を示している。

図 3.9(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 3.10(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 3.11(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 3.11(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 3.11(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方向分布によらず、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。

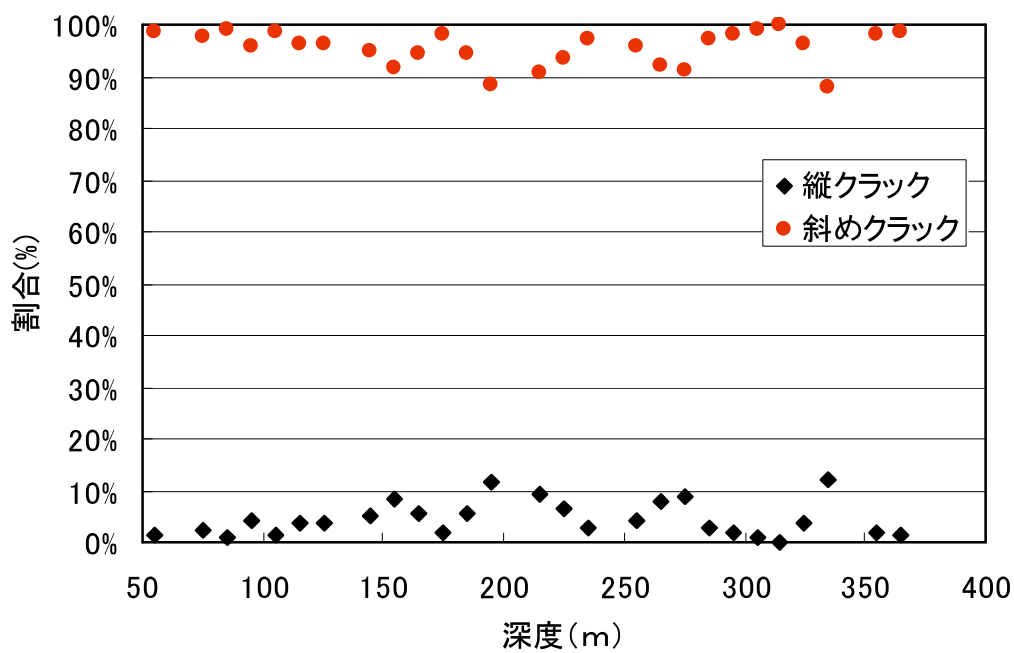


(a) 岩盤クラック

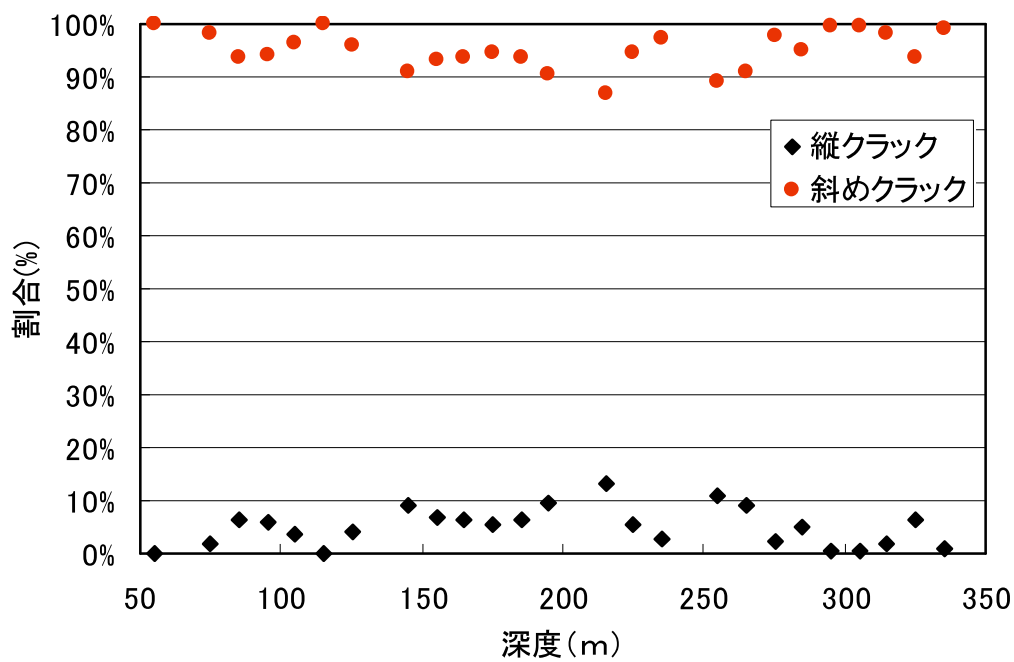


(b) 覆エクラック

図 3.8 クラック方向別分布 (東立坑深度 300m~310m 区間)



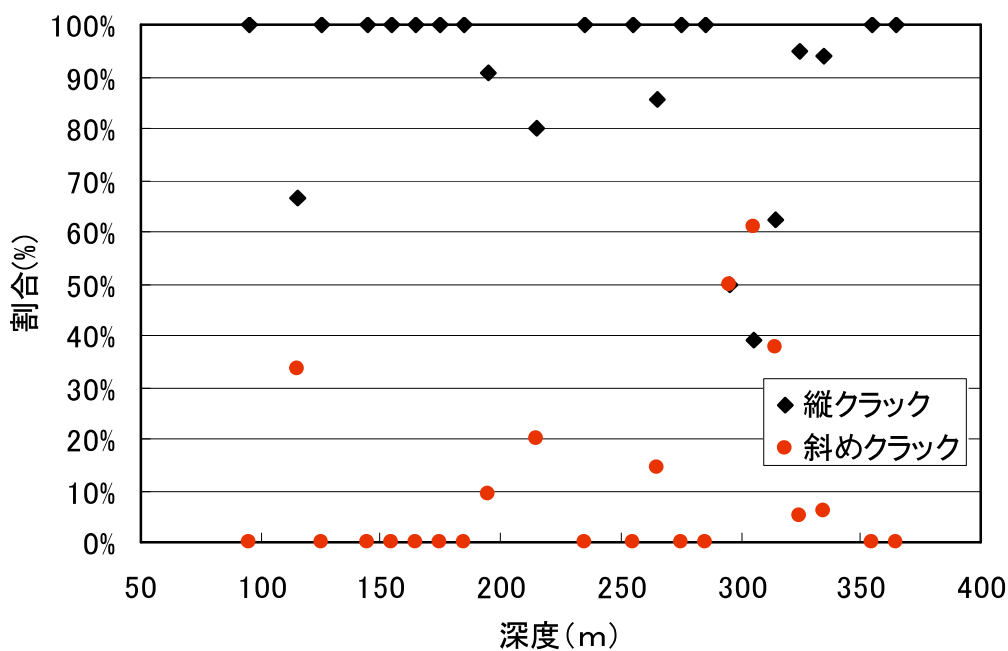
(a) 東立坑



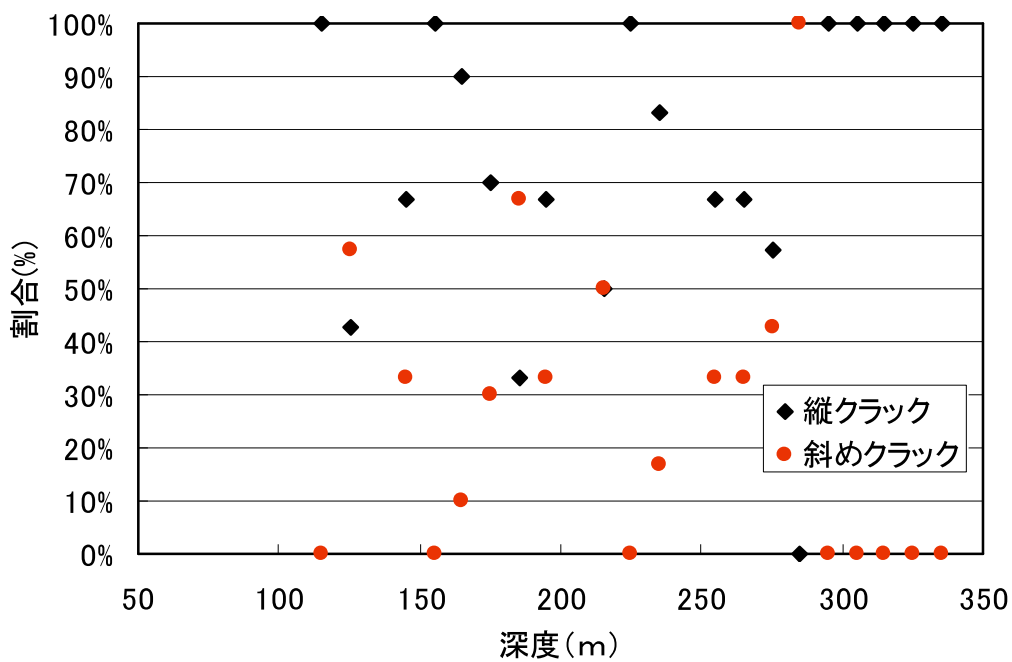
(b) 換気立坑

図3.9 岩盤クラック方向の深度分布



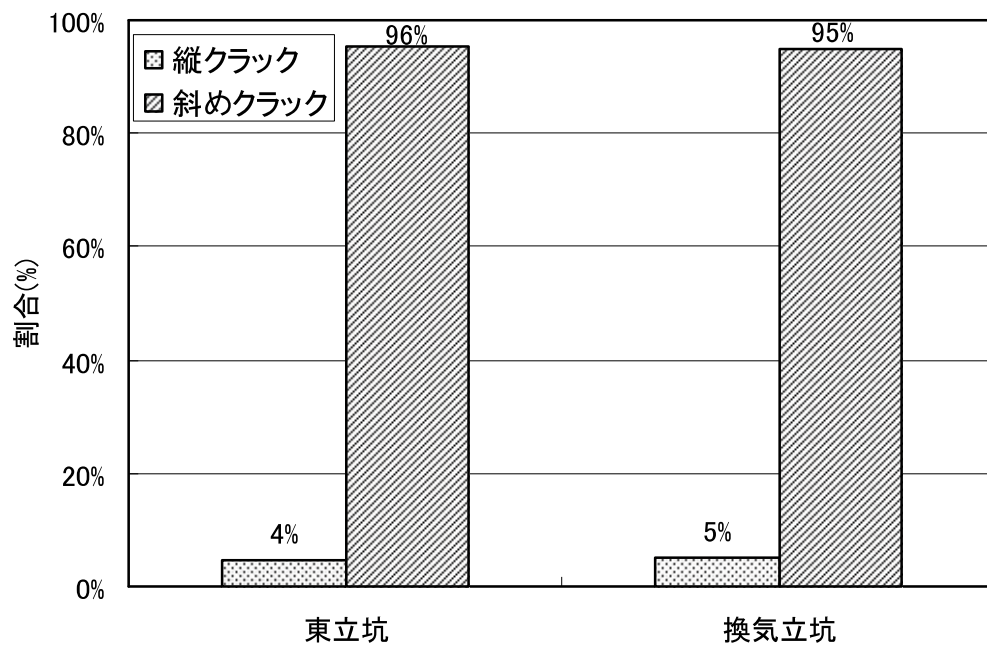


(a) 東立坑

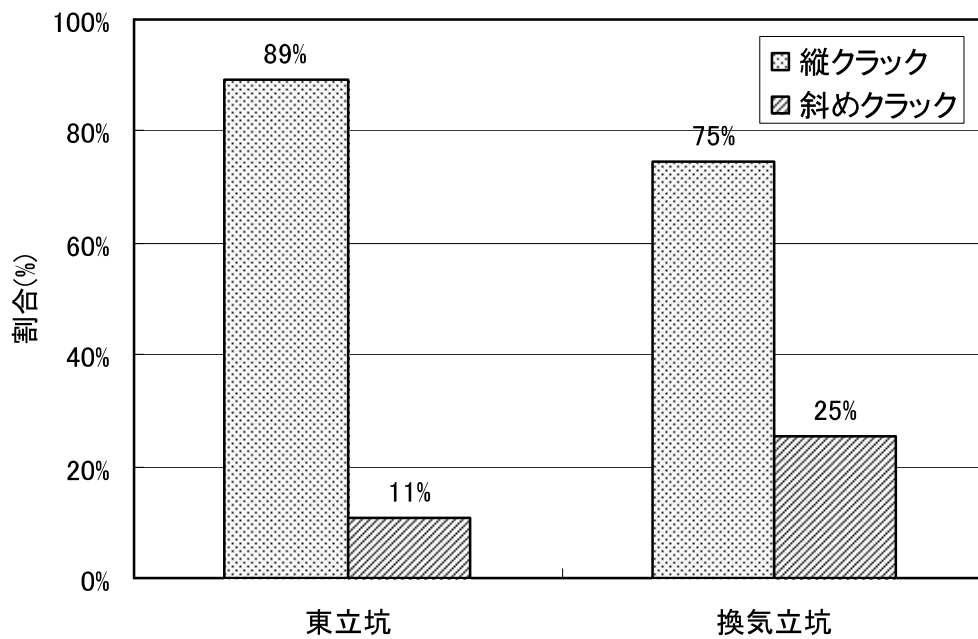


(b) 換気立坑

図3.10 覆工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 3.11 縦クラックと斜めクラックの割合

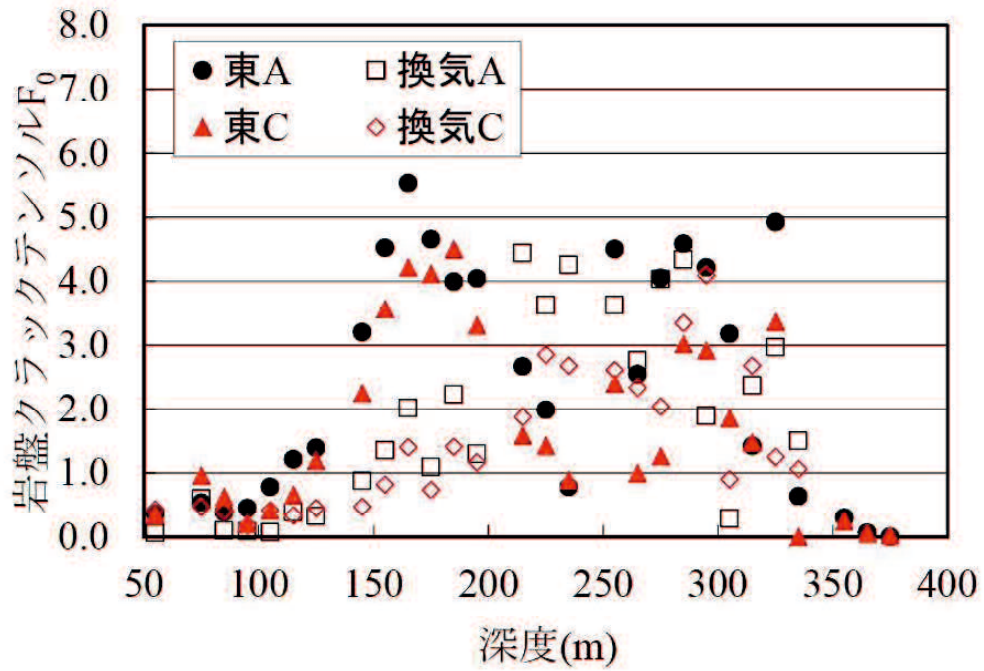
### 3. 3. 4. 岩盤クラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの単回帰分析

(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ることから、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 $F_0$ と覆工の劣化に関するクラックテンソル $S_0$ のデータを用いて岩盤クラックの密度と覆工の劣化度の関連性について分析を行った。

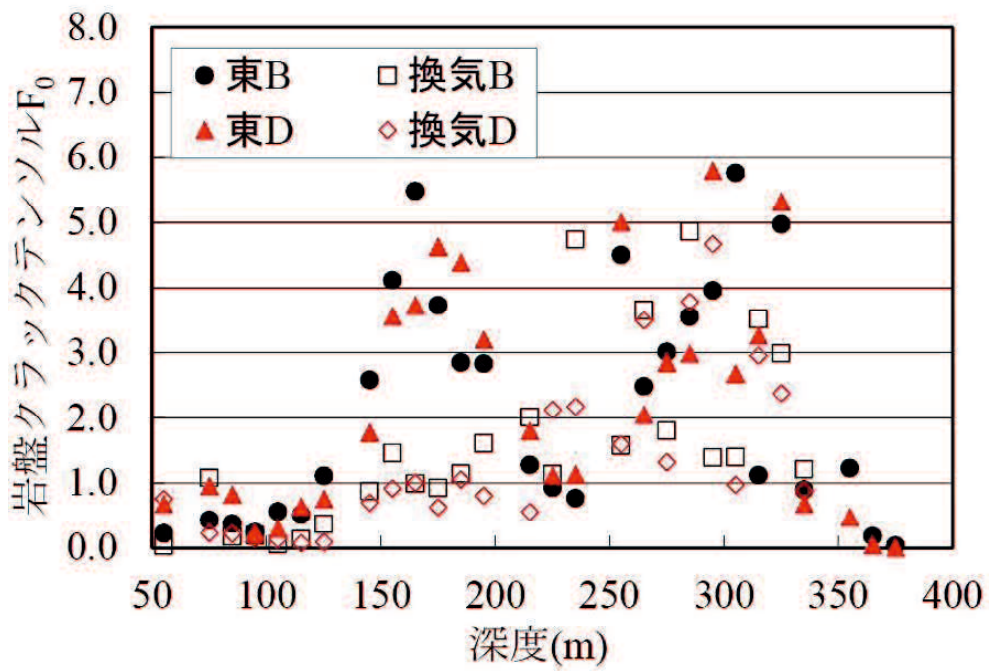
図 3.12(a)~(b)に各立坑の岩盤クラックテンソル  $F_0$  の深度分布を示す。図 3.3 に示す幌延地点の初期地圧の最大主応力の卓越方向を考慮して、東西方向である領域 A と領域 C、南北方向である領域 B と領域 D で区別して示している。図 3.13(a)~(b)に各立坑の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の深度分布を示す。図 3.13(a)より領域 A と領域 C では各立坑の一部区間を除いて概ね 0 で推移しており、図 3.13(b)より、各立坑の領域 B と領域 D について、 $6.0 \times 10^{-9} \sim 7.0 \times 10^{-5}$  の範囲で推移している。図 3.14 に各立坑の岩盤クラックテンソル  $F_0$  と覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関を示す。ここで、図 3.13(b)のうち覆工にクラックが発生していない時の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0=0$  は対象外とし、縦軸は対数表示している。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、相関係数 0.20~0.47 の範囲にあり相関性が低い。

また、覆工クラックの発生については、岩盤クラックテンソル  $F_0$  の他にも初期地圧の最大主応力が東西方向に卓越していることや岩盤強度や地山被りが、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  に影響を与えると考え、地山被りならびに一軸圧縮強さと覆工劣化状態についても、単回帰分析を行った。ここで、一軸圧縮強さについては当該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の関係を表す近似式<sup>12)</sup>を用いて算出した。

図 3.15 に各立坑の地山被りと覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関を示す。同図より、相関係数は 0.07~0.50 の範囲にあり相関性が低い。図 3.16 に各立坑の一軸圧縮強さと覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関を示す。同図より、相関係数は 0.20~0.44 の範囲にあり相関性が低い。

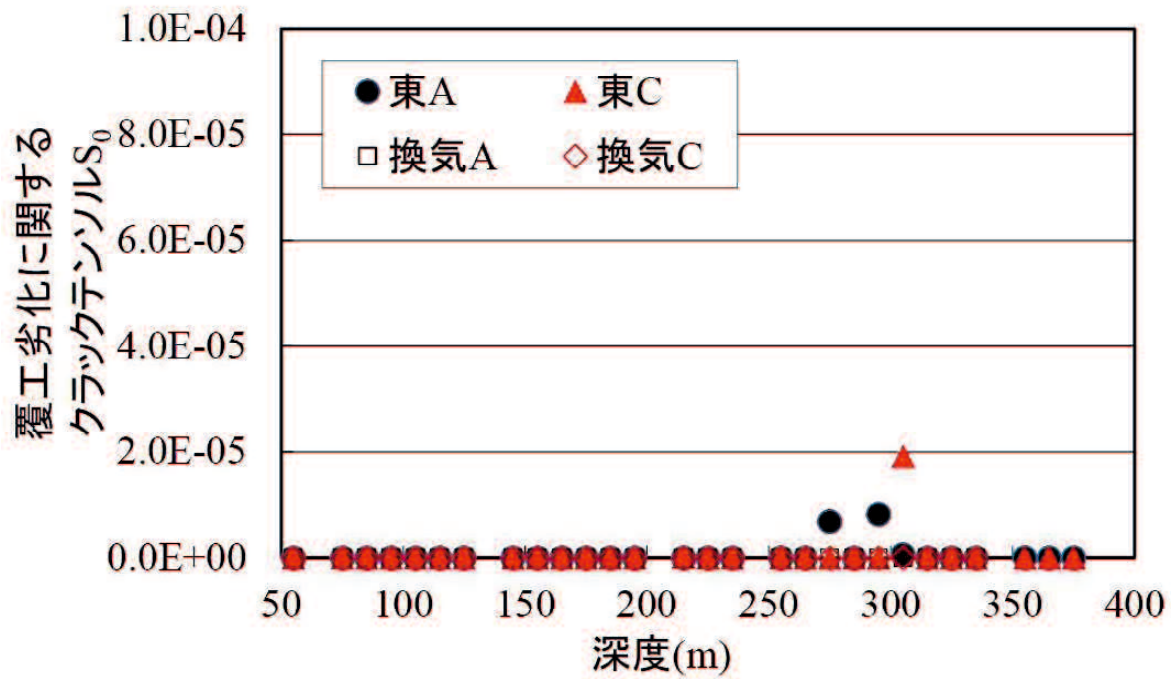


(a) 領域Aと領域C

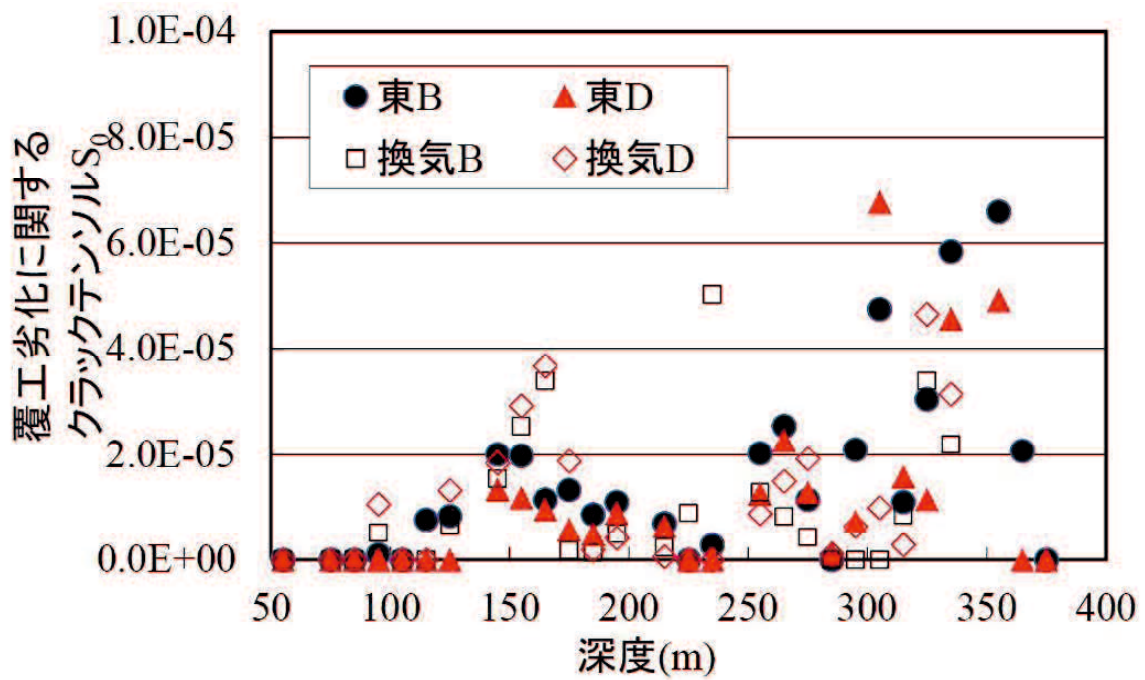


(b) 領域Bと領域D

図3.12 方向別の岩盤クラックテンソル $F_0$ の深度分布

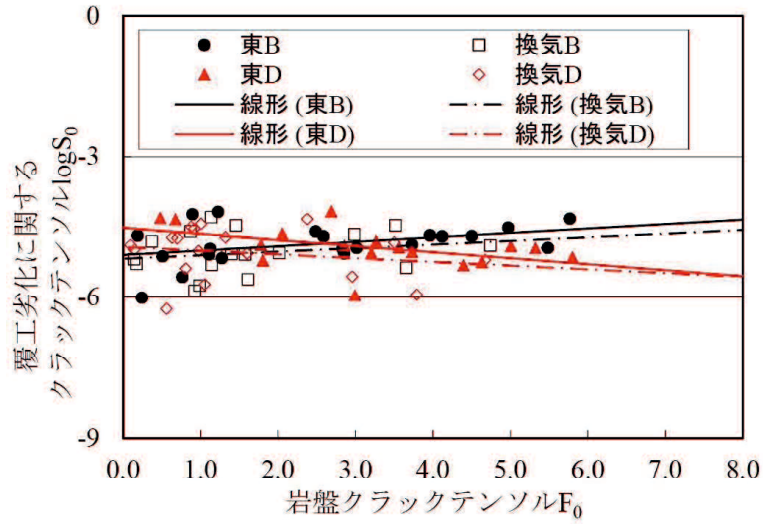


(a) 領域Aと領域C



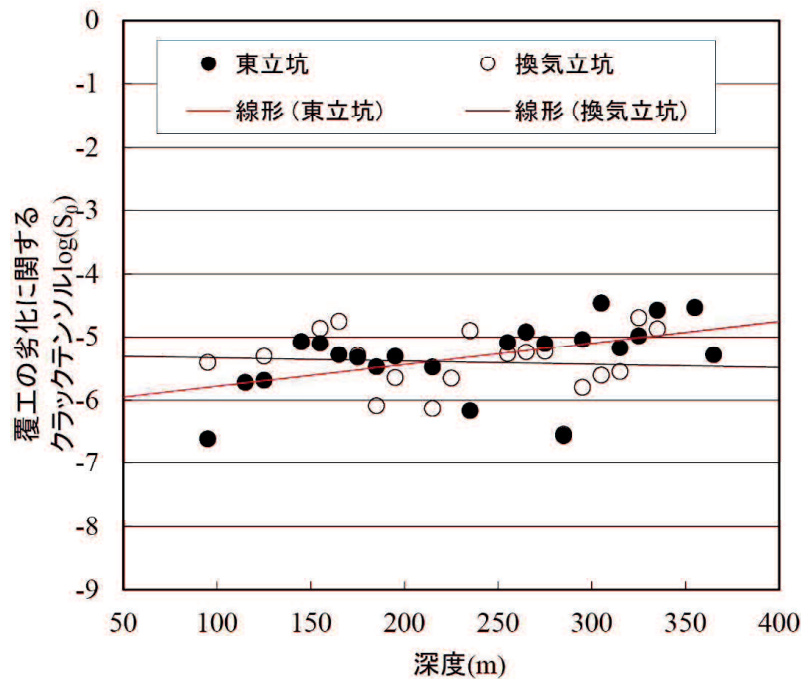
(b) 領域Bと領域D

図3.13 覆工の劣化に関するクラッククラック  $S_0$  の深度分布



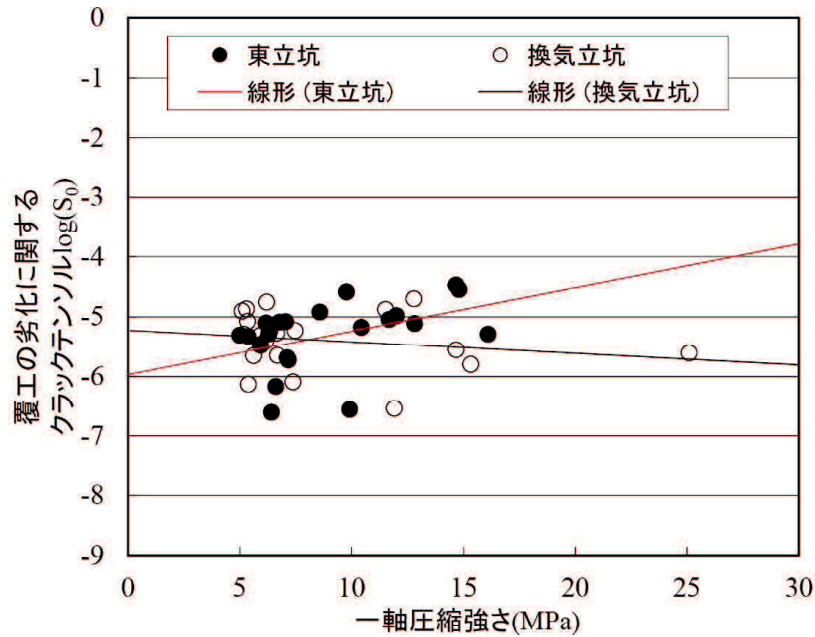
立坑	相関式	相関係数
東B	$\log S_0 = 0.094F_0 - 5.10$	0.39
東D	$\log S_0 = -0.128F_0 - 4.52$	0.47
換気B	$\log S_0 = 0.076F_0 - 5.18$	0.21
換気D	$\log S_0 = -0.080F_0 - 4.92$	0.20

図 3.14 岩盤クラックテンソル  $F_0$  と覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関



立坑	相関式	相関係数
東	$\log S_0 = 0.0034h - 6.12$	0.50
換気	$\log S_0 = -0.0005h - 5.28$	0.07

図 3.15 地山被りと覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関



立坑	相関式	相関係数
東	$\log S_0 = 0.0726 \sigma - 5.97$	0.44
換気	$\log S_0 = -0.0194 \sigma - 5.23$	0.20

図 3.16 一軸圧縮強さと覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の相関

### 3. 3. 5. 岩盤クラックテンソルと覆工の劣化に関するクラックテンソルの重回帰分析

3.3.4 節で述べたように方向別の岩盤クラックテンソル  $F_0$ , 地山被りならびに岩盤強度と覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  には比例関係にあるが相関性は低い。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  $S_0$  に影響を与えることから、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 3.12(a)と図 3.12(b)とし、立坑深度は対象区間の中央値とした。また、岩盤一軸圧縮強さについては、図 3.17 を用いた。ここでは、覆工にクラックが発生していない時の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0=0$  は対象外とし、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。

重回帰分析の結果、表 3.2(a)に示すように各領域の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  と各説明変数に対して、重相関係数は 0.79~0.92 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に関するクラックテンソルの相関式は、式(3.7a)～式(3.7c)に示すように求められた。ここで、式(3.7a)は領域 B において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ 、式(3.7b)は領域 D において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ 、式(3.7c)は領域全体において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ を表す。各領域における各係数は表 3.2(b)に示すとおりである。なお、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。推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ 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、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  $F_0$ 、対象区間の地山被りならびに対象区間の岩盤一軸圧縮強さから覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ が予測できる。

$$\log f_B = -5.953 + 0.040g + 0.121h + 0.075i - 0.148j - 0.004k + 0.002l \quad (3.7a)$$

$$\log f_D = -3.458 - 0.437g + 0.322h - 0.200i + 0.100j - 0.003k + 0.005l \quad (3.7b)$$

$$\log f = \log((10^{\log f_B} + 10^{\log f_D})/4) \quad (3.7c)$$

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)

東立坑の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ については、式(3.7a)～式(3.7c)により求めた推定値と覆工クラックの情報(長さ、方向、開口幅)により算出した計測値を比較した図を図 3.18 に示す。同図より、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。各深度について推定値と計測値の差分を計測値で除した時の絶対値を相対誤差 RE とし、相対誤差のヒストグラムとして図 3.19 に示した。許容誤差を 0.1 (対数値で±10%) とすると、推定値と計測値は良く一致している。相対誤差が大きい深度については、最大主応力の卓越方向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。



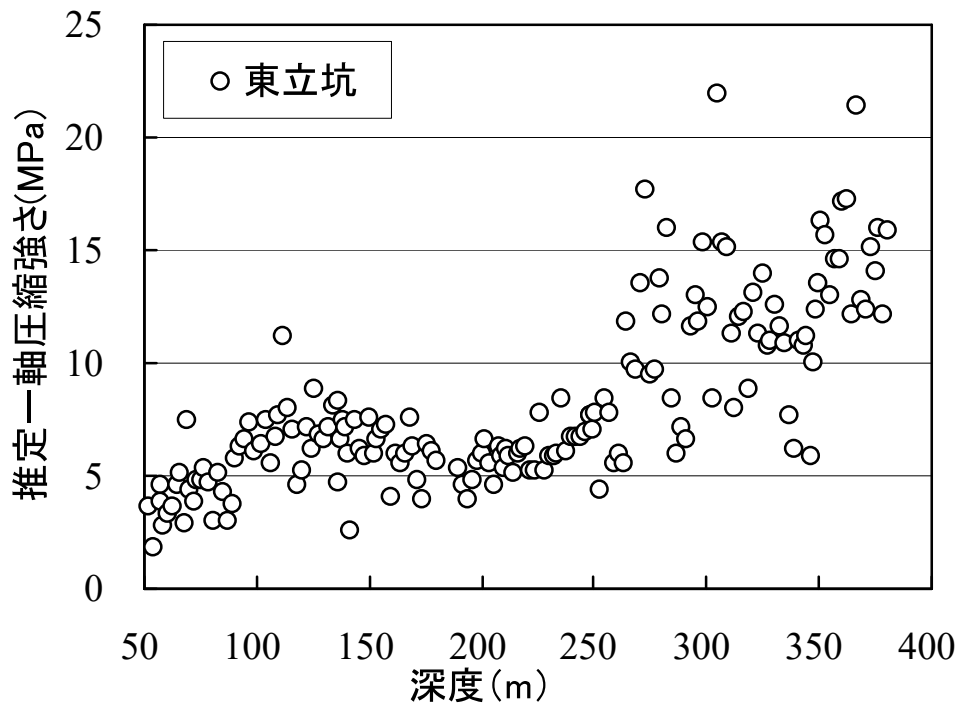


図 3.17 岩盤の推定一軸圧縮強さの深度分布（東立坑）

表 3.2 重回帰分析より得られた係数

(a) 重相関係数

	領域 A	領域 B	領域 C	領域 D
重回帰係数	—	0.79	—	0.92

(b) 相関式の各係数

	領域 A	領域 B	領域 C	領域 D
切片	—	-5.953	—	-3.458
$g$	—	0.040	—	-0.437
$h$	—	0.121	—	0.322
$i$	—	0.075	—	-0.200
$j$	—	-0.148	—	0.100
$k$	—	0.004	—	-0.003
$l$	—	-0.002	—	0.005

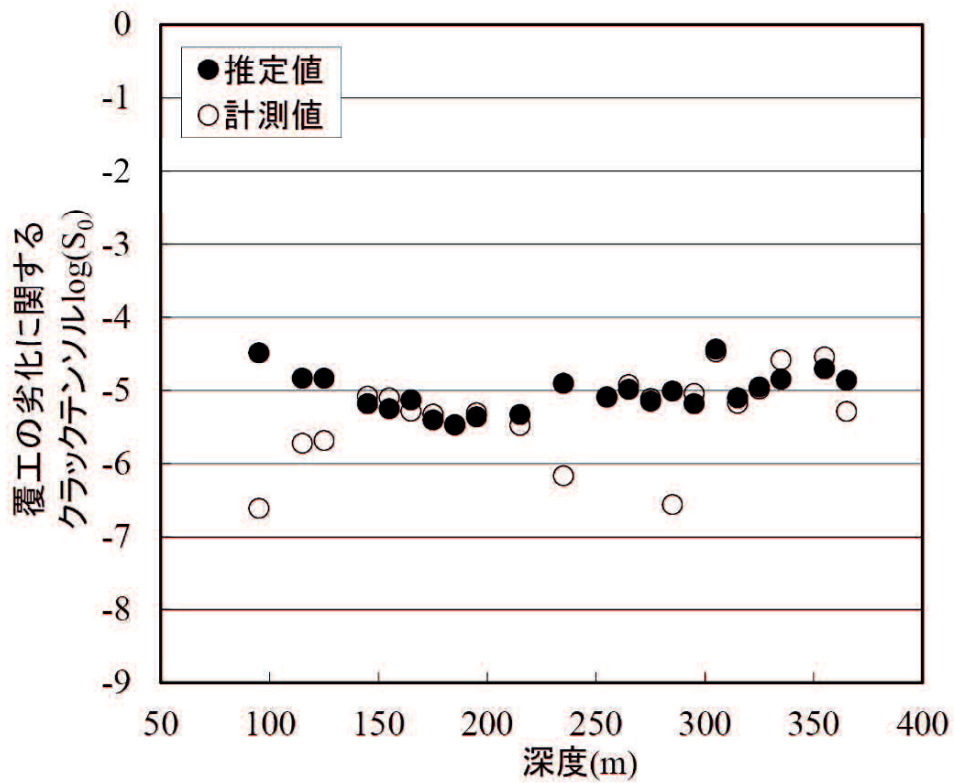


図 3.18 覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の計測値と推定値の深度分布（東立坑）

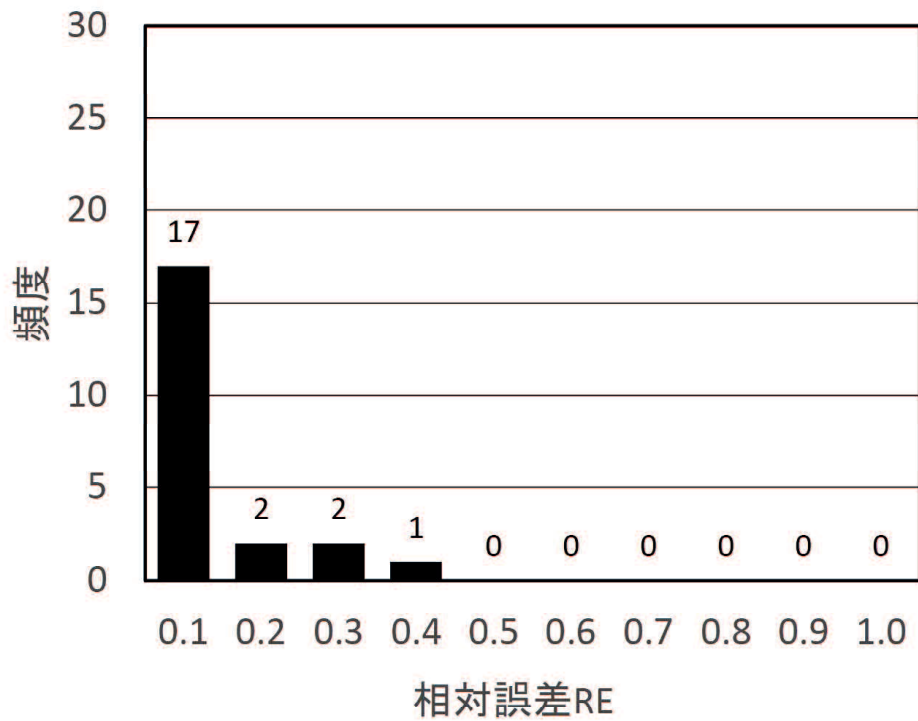


図 3.19 相対誤差のヒストグラム（東立坑）

### 3. 3. 6. 重回帰式の適用例

3.3.5 節で求めた予測式の適用例として、東立坑と同様に初期地圧が異方性を伴う岩盤である換気立坑について、覆工クラックの発生については、方向別の岩盤クラックテンソル  $F_0$  や岩盤強度や地山被りが、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  に影響を与えると考え、**図 3.12** に示す方向別の岩盤クラックテンソル、地山被り、ならびに**図 3.20** 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より式 (7) に示す予測式を用いて、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  を推定した結果を**図 3.21** に示す。併せて、覆工クラックの情報(長さ, 方向, 開口幅)により算出した計測値も示している。同図より、対数値で $-5.4 \sim -4.3$  ( $3.7 \times 10^{-6} \sim 4.4 \times 10^{-5}$ ) の範囲、計測値は対数値で $-6.5 \sim -4.7$  ( $2.9 \times 10^{-7} \sim 2.0 \times 10^{-5}$ ) の範囲で推移している。

各深度について推定値と計測値の差分を計測値で除した時の絶対値を相対誤差 RE とし、相対誤差のヒストグラムとして**図 3.22** に示した。許容誤差を 0.1 (対数値で $\pm 10\%$ ) とすると、推定値と計測値は良く一致している。相対誤差が大きい深度については、最大主応力の卓越方向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。

**図 3.23** に示す立坑施工に伴う覆工クラックの発生について図示した。同図には立坑の施工段階(掘削時, 覆工コンクリート施工時, 覆工コンクリート硬化時)における覆工クラックの発生過程を示している。立坑の施工は 1m を 2 回掘削した後で覆工コンクリートにより打設するショートステップ工法であり、各施工箇所上下面について縁が切られており、坑壁の岩盤クラックの密度である岩盤クラックテンソル  $F_0$  や岩盤強度や最大主応力の卓越方向の荷重作用の影響を受けて、覆工にクラックが発生していることを示している。ただし、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。今後、（国研）日本原子力研究開発機構幌延深地層センターでは深度500mまで掘削する予定であるため、本研究で明らかにした研究成果を適用するとともに、他の立坑に適用していき、実用性を高めていくことで推定式の精度向上を図っていく。

これまでの分析結果に基づき、立坑における覆工クラックの発生原因は、初期地圧の水平面内の方向依存性に起因しているところが大きいものの、覆工背面の岩盤の初生的なクラックの幾何学的な特性、地山被りや岩盤強度の関係も関係していることから、これらを考慮しなければならない。そして、覆工背面の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に関するクラックテンソル  $S_0$  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。

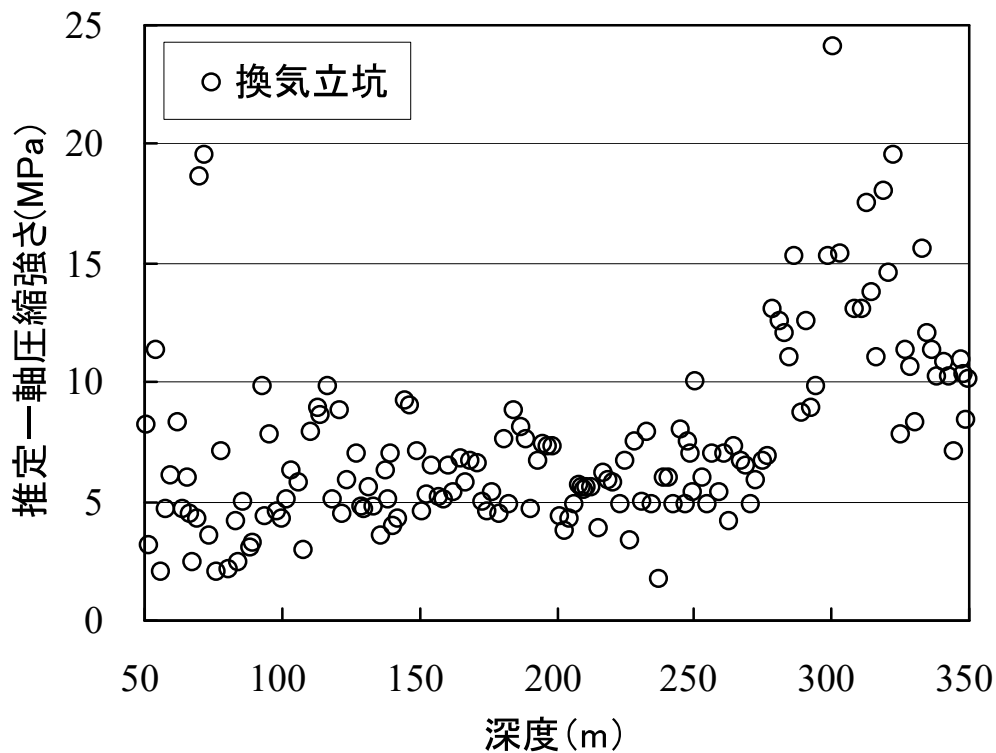


図 3.20 岩盤の推定一軸圧縮強さの深度分布（換気立坑）

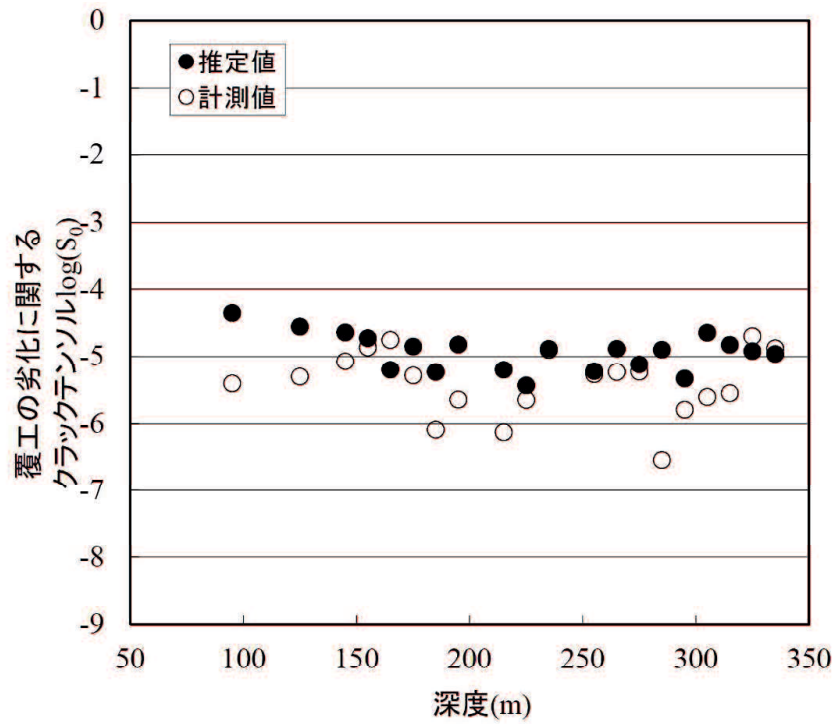


図 3.21 覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  の計測値と推定値の深度分布 (換気立坑)

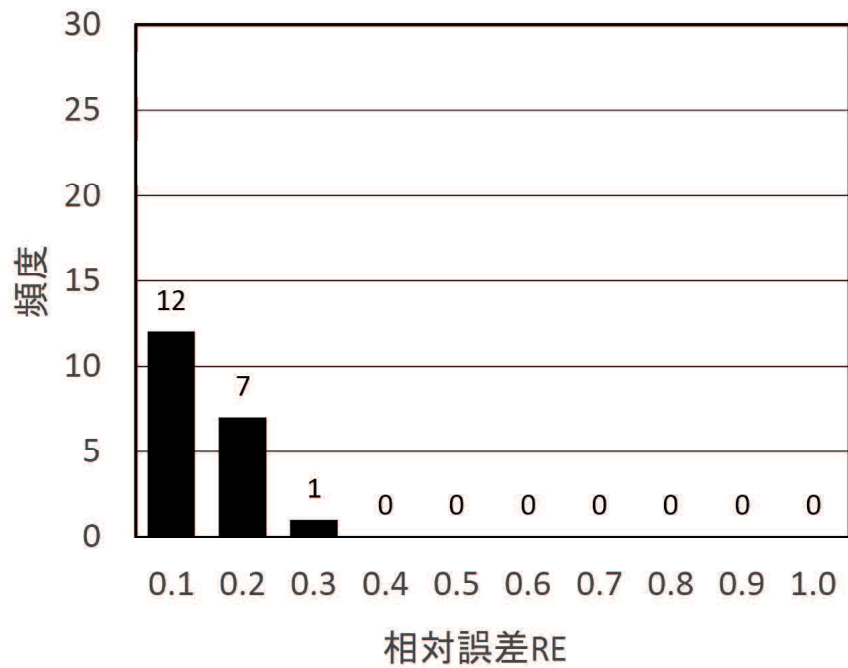


図 3.22 相対誤差のヒストグラム (換気立坑)

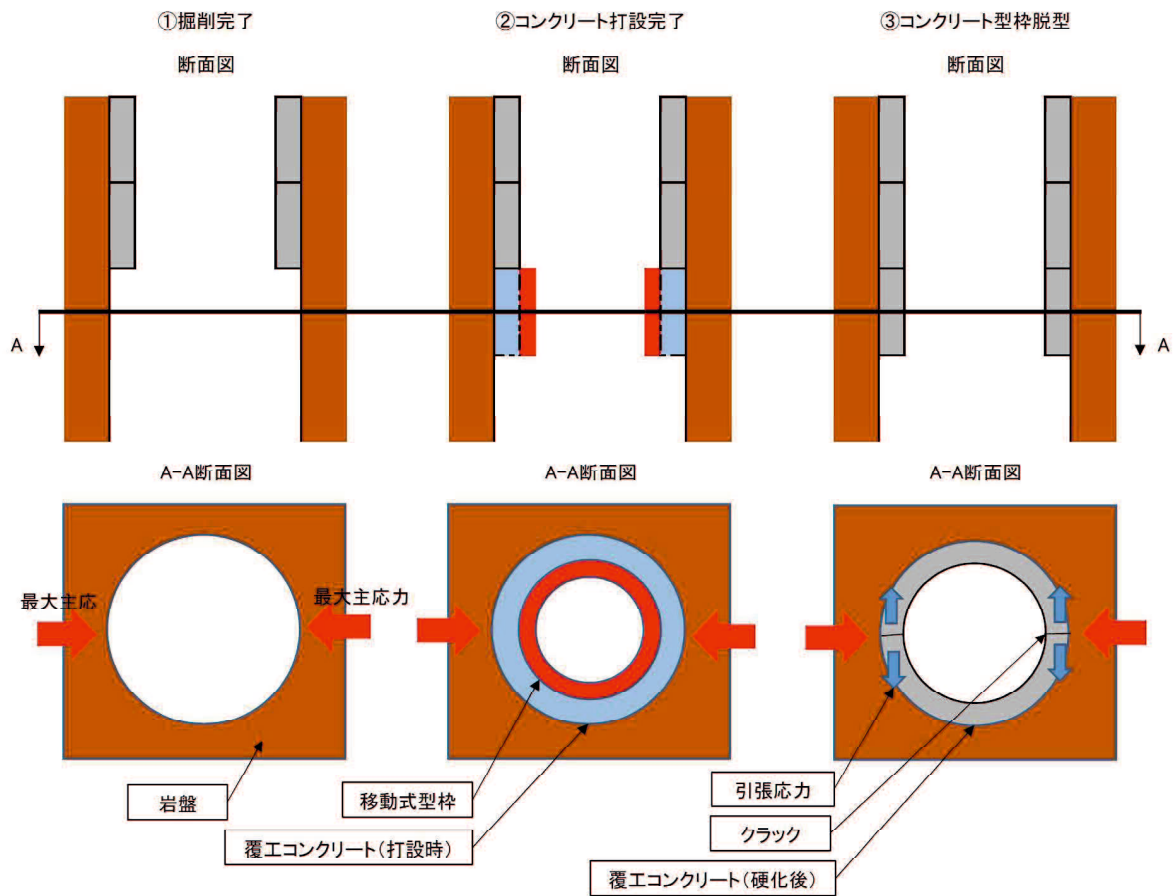


図 3.23 覆エのクラック発生メカニズム

### 3. 4. まとめ

幌延深地層研究所地下施設の立坑を対象として、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に関するクラックテンソルを推定する手法の提案について得られた知見は以下のとおり。

- (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) 初期地圧が異方性を伴う岩盤であることを考慮し、東立坑の覆工にクラックが発生している区間を対象として、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、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、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  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、相対誤差 RE 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。相対誤差が大きい深度については、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、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  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相対誤差 RE 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。相対誤差が大きい深度については、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。ただし、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。
- (4) 立坑における覆工クラックの発生原因は、初期地圧の水平面内の方向依存性に起因しているところが大きいものの、覆工背面の岩盤の初生的なクラックの幾何学的な特性、地山被りや岩盤強度も関係していることから、これらを考慮しなければならないことを示唆している。

## 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) 小田匡寛, 鈴木健一郎, 山崎雅直, 斉藤禎二郎： 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(原郁夫先生退官記念論文集), 創文, pp.367-378, 1996
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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, 2010.3.



## 第4章 立坑の岩盤透水係数と覆工劣化状態の予測手法の 適用に関する提案

### 4. 1. はじめに

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<sup>1)</sup>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、等価な岩盤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( $m/m^2$ )と推定した岩盤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、等価な岩盤透水係数を予測する手法を提案している。

また、山崎ら<sup>2),3)</sup>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劣化状態を推定する手法を提案している。

本章では、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、立坑施工時の岩盤透水係数や立坑施工後の覆工劣化状態の予測手法の適用について提案した。

#### 4. 2. 立坑の岩盤透水係数と覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案

##### 4. 2. 1. 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<sup>4),5)</sup>

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(4.1)のように表される。

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} t^2 r^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (4.1)$$

ここに、 $\rho$ 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  $\mathbf{n}$  の基準軸  $X_i$  の成分( $i, j=1\sim 3$ )、 $E(\mathbf{n}, r)$ は法線ベクトル  $\mathbf{n}$  と代表長さ  $r$  の統計的分布を与える確率密度関数、 $\Omega$ は全立体角を表している。確率密度関数  $E(\mathbf{n}, r, t)$ は統計的に独立であると仮定して、式(4.1)は式(4.2)のように、現場計測データにより誘導することが出来る。

$$P_{ij} = \frac{N^{(q)}}{\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle} \langle t^3 \rangle N_{ij} \quad (4.2)$$

ここに、 $N^{(q)}$ は方向  $\mathbf{q}$  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 $\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle$ で割ると、方向  $\mathbf{q}$  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(4.3)で表わされる。

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_0 \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (4.3)$$

$\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタである。また、 $\lambda$ はクラックの連結性に依存したスカラー量である。 $\lambda$ 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  $k_{ij}$  ( $\text{m}^2$ )を計算した。さらに、ダルシー流速の透水係数  $K_{ij}$  ( $\text{m}/\text{sec}$ )を式(4.4)により計算した。重力加速度  $g$  を  $9.81\text{m}/\text{sec}^2$ 、水の動粘性係数  $\nu$  を  $1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$ (水温  $20^\circ\text{C}$ )とした。

$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (4.4)$$

## (2) 岩盤透水係数の予測手法

岩盤クラックの情報（長さ、方向、開口幅）からクラックテンソル理論とステレオロジー（統計幾何学）の概念を適用して岩盤透水係数を推定し、坑壁地質観察のクラックに関する情報から山崎ら<sup>3)</sup>より提案した予測式により岩盤透水係数を推定することにより、高透水区間についてはグラウチングの実施により坑壁背面岩盤の透水係数を低減するための判断に役立てることが出来る。

（国研）日本原子力研究開発機構は、平成 18 年 1 月に北るもい漁業協同組合と締結した「幌延深地層研究所の放流水に関する協定書」に基づいて、幌延深地層研究所からの 1 日あたりの排水量を 750m<sup>3</sup>以下としている。これを踏まえて、換気立坑を 140.5m まで掘削した時点にて、換気立坑近傍の地質構造や透水性等の地質環境特性を詳細に把握するために、換気立坑の中心から概ね東北方向に約 17m の位置に、掘削長 520m の深層ボーリングを掘削した。このボーリング調査結果から、換気立坑の深度 250m 以深に高透水性の破碎帯が確認され、協定書遵守のために、適切な湧水対策が必要であると判断した。このことから、立坑掘削に伴う湧水量を抑制するために、深度 250m 以深の立坑の施工前に、深度 250m の立坑底盤から、プレグラウト工を実施している。岩盤の改良目標値は 0.1Lu(=1.0×10<sup>-8</sup>m/sec)以下である<sup>6)</sup>。

図 4.1 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<sup>3)</sup>が提案した式(4.5)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。なお、岩盤の改良目標値については、各地点の地下の条件や覆工の設計条件を考慮して設定する必要がある。

$$\log_{10} K = 0.2223\alpha - 8.3009 \quad (4.5)$$

ここに、 $K$ は岩盤透水係数(m/sec)、 $\alpha$ は割れ目頻度(m/m<sup>2</sup>)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/m<sup>2</sup>)である。

一例として、式(4.5)に示す予測式と図 4.2 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 4.3 に示す。同図には、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。同図より、割れ目頻度から推定した岩盤透水係数推定値は、深度 50m～160m の岩盤透水係数推定値は  $10^{-9}$ m/sec オーダー、深度 160m～250m では  $10^{-8}$ m/sec オーダーである<sup>7)</sup>。この結果を図 4.1 の湧水処理工選定フローによると、深度 50m～250m において  $10^{-8}$ m/sec 以下の区間は計画してい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 を超える区間では追加の裏面排水材の設置を検討が必要であり、深度 150m～200m 区間については、定期的に湧水量の変化に監視していくことを示唆している。

一般的な立坑の坑壁の地質観察は短時間であるが、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<sup>7)</sup>。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 日程度かかっている現状であることから、画像処理技術<sup>8)</sup>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と考えられる。

現時点において、岩盤クラックのクラック幅については、実際に取得していない。取得できれば研究が進むが、施工サイクルの限られた時間の中ですべてのクラック幅の取得は現状では難しい。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、予測式による岩盤透水係数の推定に役立てられる。

以上より、岩盤透水係数による湧水対策の判断を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

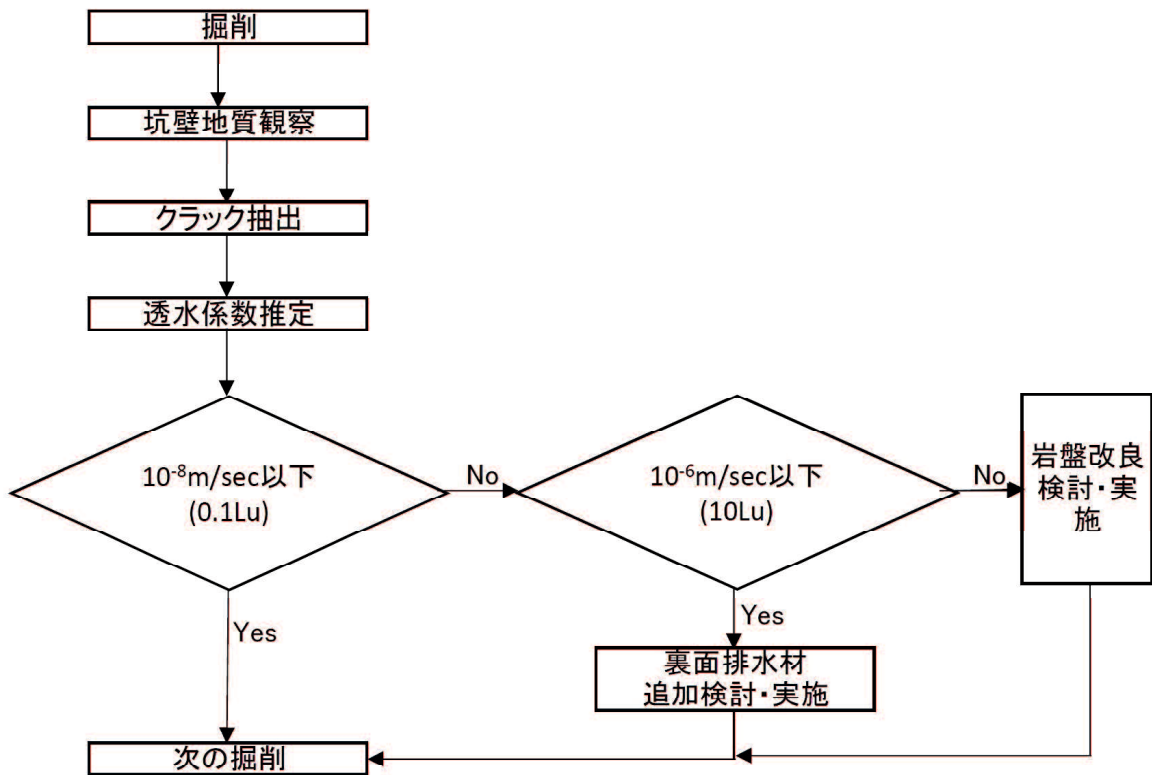


図 4.1 立坑施工時の岩盤透水係数による湧水処理工の選定フロー

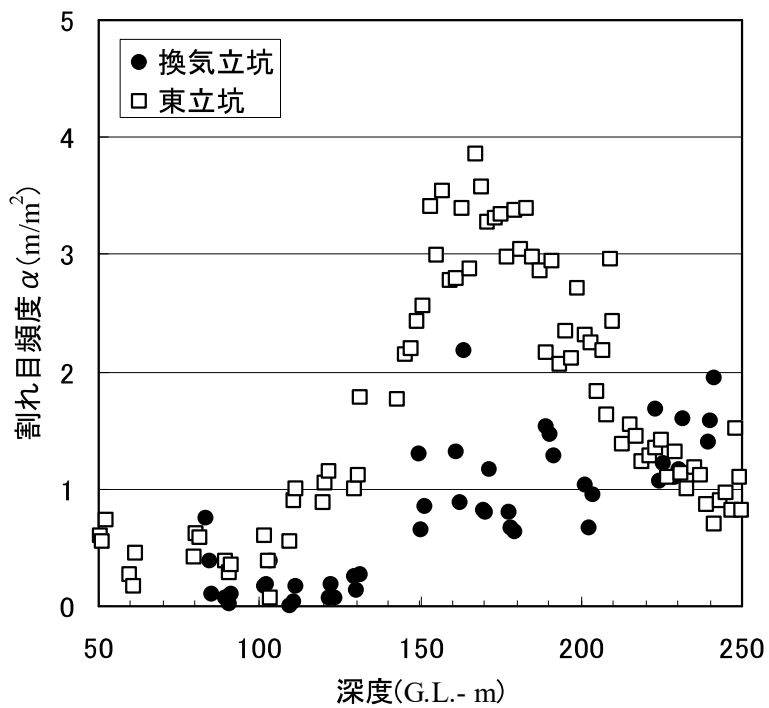
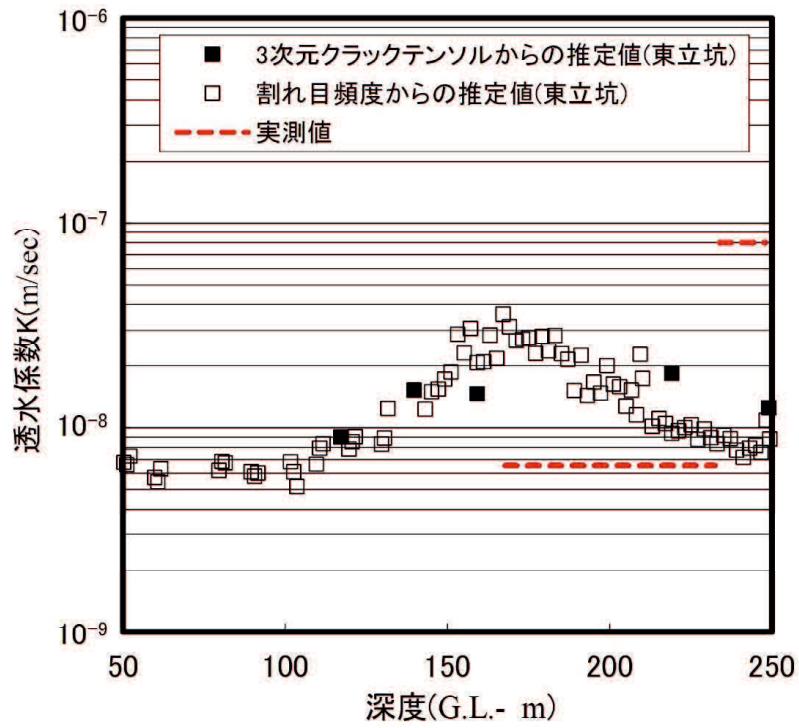
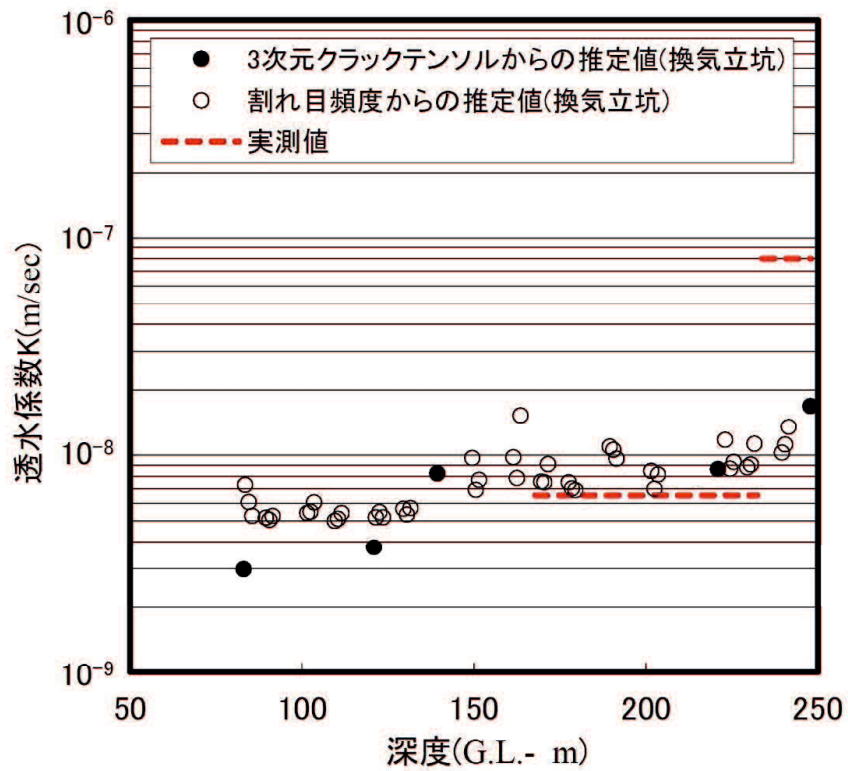


図 4.2 割れ目頻度の分布<sup>1)</sup>



(a)東立坑



(b)換気立坑

図 4.3 岩盤透水係数の深度分布<sup>1)</sup>

## 4. 2. 2. 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

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、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。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(対象領域A(m<sup>2</sup>))のクラックの分布における覆工クラックの劣化に関するクラックテンソル $S_{ij}$ は、加算形で式(4.6)のように定義される<sup>2),3)</sup>。

$$S_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m l^{(k)} t^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (4.6)$$

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(4.7)に表わす。単位は無次元である。

$$S_0 = S_{11} + S_{22} \quad (4.7)$$

### (2) クラックテンソル算定に用いる岩盤坑壁分割

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<sup>9)</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、3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>10),11)</sup>。

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であることを考慮して、**図 4.4**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。

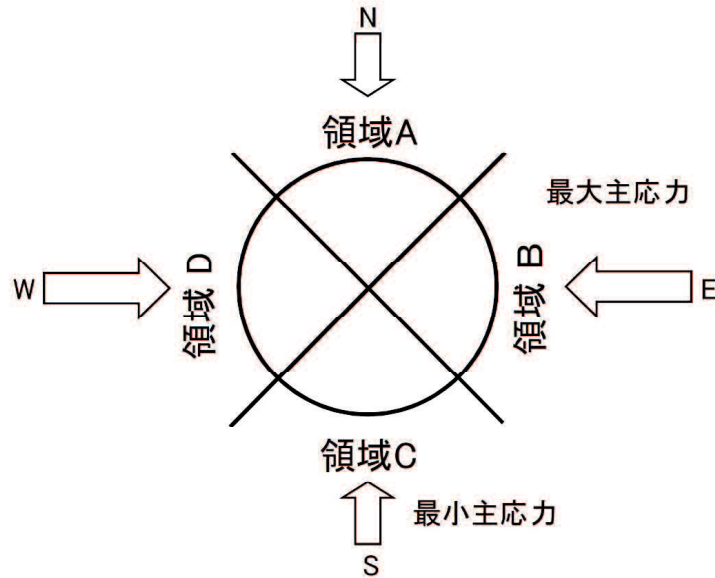


図 4.4 岩盤坑壁分割の模式図<sup>2),3)</sup>

### (3) 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、山崎ら<sup>2),3)</sup>が提案した式(4.8a)～式(4.8c)に示す覆工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。ここで、式(4.8a)は領域 B において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ 、式(4.8b)は領域 D において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$ 、式(4.8c)は領域全体において推定した覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  を表す。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。

$$\log f_B = -5.953 + 0.040g + 0.121h + 0.075i - 0.148j - 0.004k + 0.002l \quad (4.8a)$$

$$\log f_D = -3.458 - 0.437g + 0.322h - 0.200i + 0.100j - 0.003k + 0.005l \quad (4.8b)$$

$$\log f = \log((10^{\log f_B} + 10^{\log f_D})/4) \quad (4.8c)$$

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  $S_0$ 、 $f$ : 領域全体における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)



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(4.9)に示す<sup>12)</sup>。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (t^{(k)})(l^{(k)}) \cos \theta_i^{(k)} \sin \theta_j^{(k)} \quad (4.9)$$

ここに、 $A$ ：覆工コンクリートの面積(m<sup>2</sup>)、 $n$ ：ひび割れの本数、 $l^{(k)}$ ：ひび割れ  $k$  の長さ(m)、 $t^{(k)}$ ：ひび割れ  $k$  の幅(m)、 $\theta_i^{(k)}$ ：ひび割れ  $k$  の法線ベクトルが  $x_i$  軸となす角度、 $\theta_j^{(k)}$ ：ひび割れ  $k$  の法線ベクトルが  $x_j$  軸となす角度

覆工ひび割れ指数 TCI 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 とクラックの開口幅の積で表されるため、等価であると考え、既往研究の結果<sup>13)</sup>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<sup>14)</sup>（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<sup>13)</sup>。

ひび割れに対する判定区分毎の覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  を定量的に 評価するために、表 4.1 に示すひび割れに対する判定区分と表 4.2 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 4.5 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。その結果、全て I~II<sub>b</sub> であ り、定期的な監視を行う必要があると評価される。

図 4.6 に覆工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 4.6(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<sup>15)</sup>より求めた岩 盤強度を用いて、山崎ら<sup>2),3)</sup>が提案した予測式による覆工劣化状態を推定し、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(=3.88×10<sup>-5</sup>)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 4.6(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( $=3.88 \times 10^{-5}$ )以下であれば、何も対策を行わずに次回の点検に進む。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。なお、フロー図には示していないが、覆工背面の岩盤が大きな破碎帯のような弱層が予想される場合は、グラウチングのような岩盤改良等対策を検討していくこととなる。

今後は定期的な点検（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<sup>9)</sup>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、進行性の有無が判断できる。なお、ドローンの運用については、年 1 回の点検のため当面は人による操縦とし、最終的には自動化を目指していく。

当該立坑にて観測された覆工クラック幅は 0.1mm～1.6mm であることから、本研究で提案している手法を今後、自動化への適用するためには、0.1mm 程度のクラックの自動化が行えれば覆工劣化状態による補修・補強時期の判断に役立てられる。

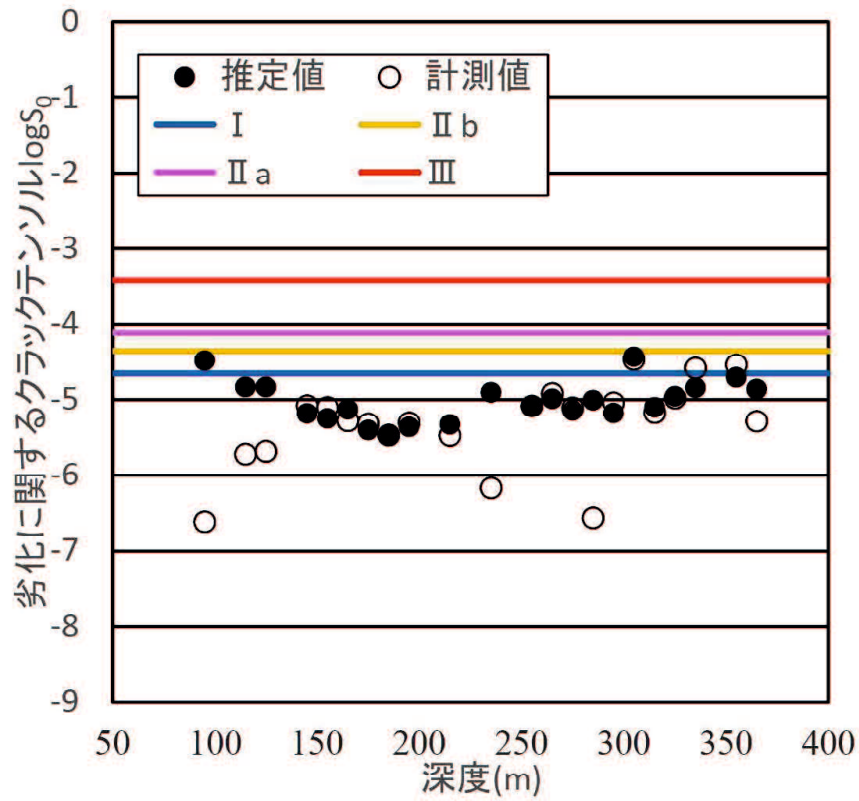
以上より、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  による支保選定や補修・補強時期の判断かつ、合理的で適切な維持管理を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

表 4.1 ひび割れに対する判定区分<sup>14)</sup>

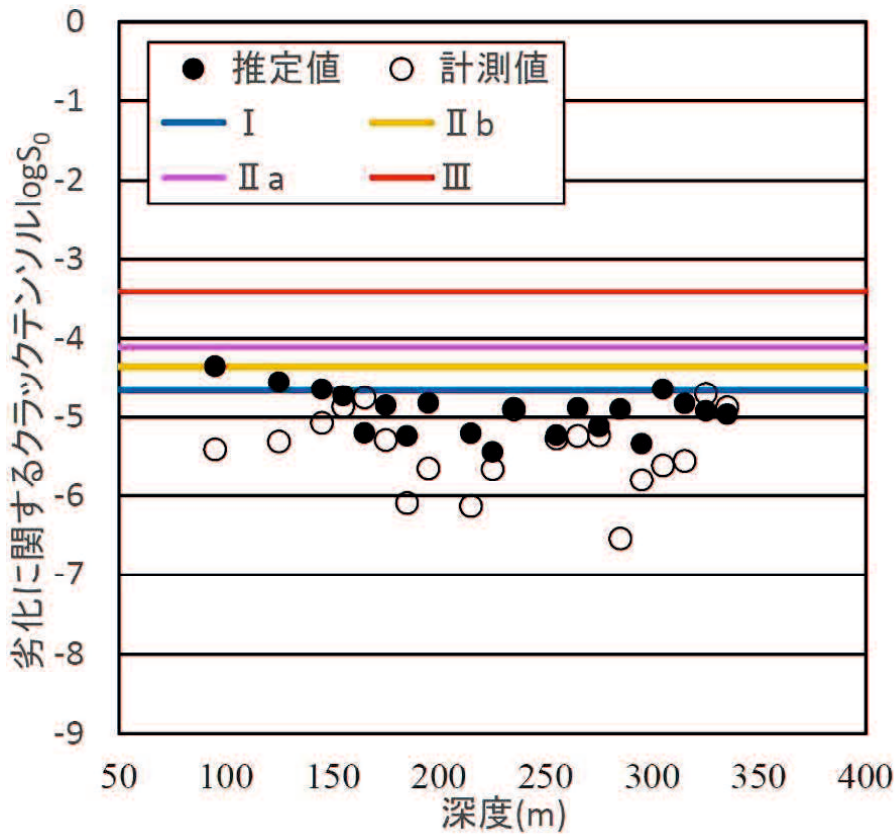
判定区分	変状の状態	
I	ひび割れが生じてない，または生じていても軽微で，措置を必要としない状態	
II	II b	ひび割れがあり，その進行が認められないが，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，監視を必要とする状態
	II a	ひび割れがあり，進行が認められ，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	ひび割れが密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が低下しているため，早期に対策を講じる必要がある状態	
IV	ひび割れが大きく密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が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 4.2 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 ( $\times 10^{-5}$ )	標準偏差 ( $\times 10^{-5}$ )	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

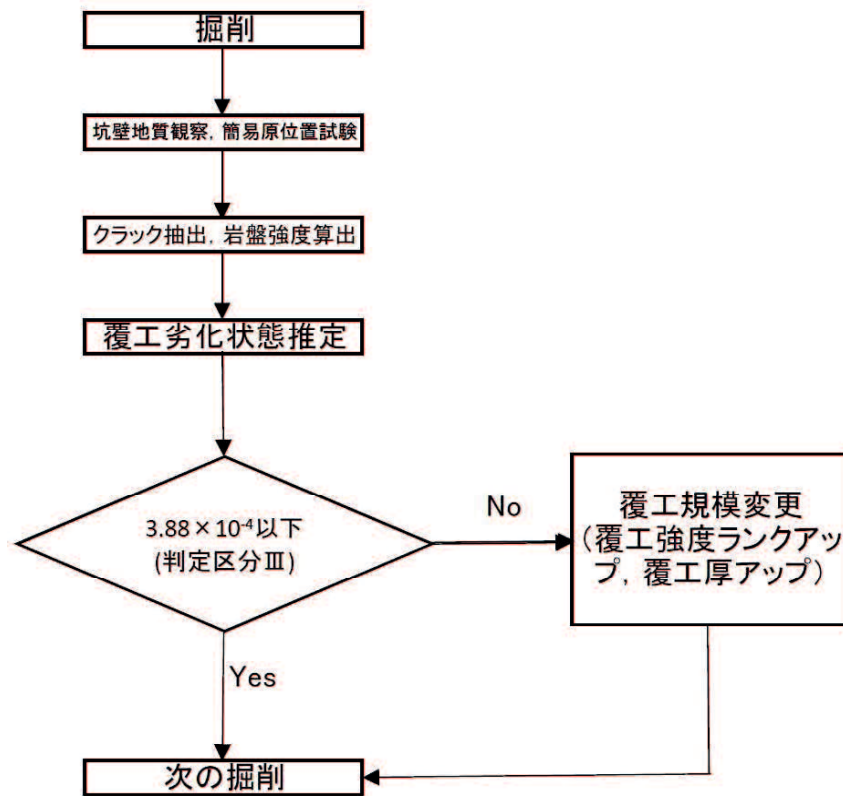


(a)東立坑

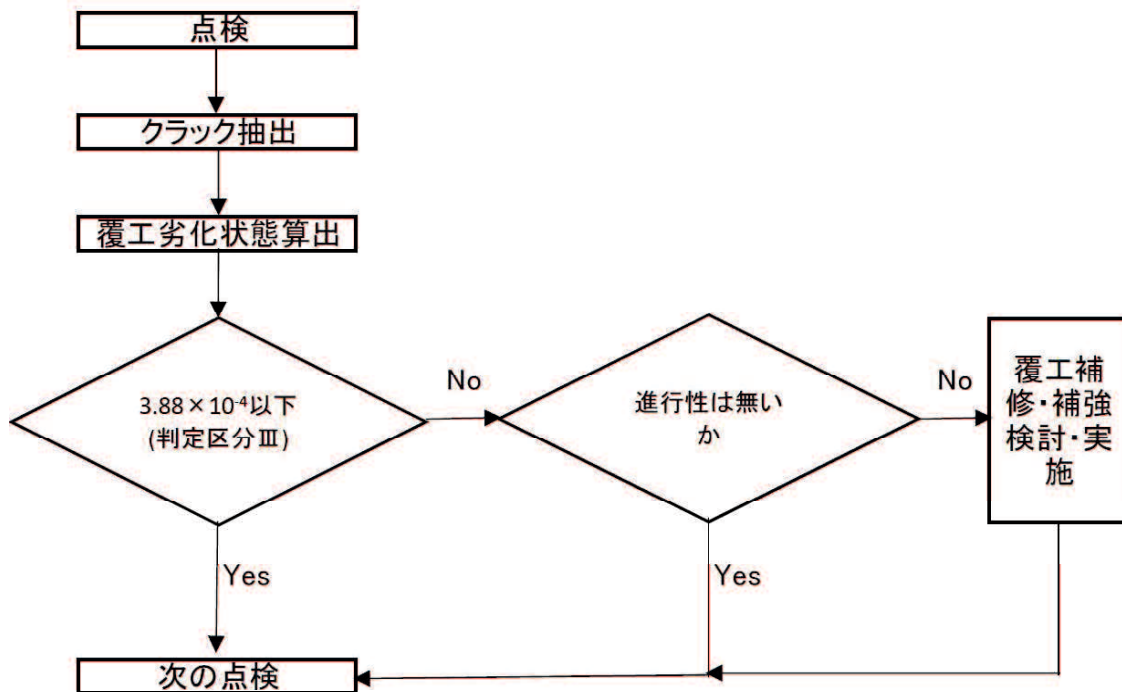


(b)換気立坑

図 4.5 覆工劣化度の判定結果



(a) 立坑施工時



(b) 立坑施工後

図 4.6 覆工劣化度による支保選定と維持管理フロー

#### 4. 3. まとめ

幌延深地層研究所地下施設の立坑を対象として、立坑施工時の岩盤透水係数ならびに立坑施工後の覆工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<sup>16)</sup>。

- (1) 立坑の岩盤透水係数の推定方法の実務的な運用において、坑壁クラック観察から抽出した岩盤クラックの情報より、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判断を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。
- (2) 立坑の覆工劣化状態の推定方法の実務的な運用において、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、坑壁クラック観察から抽出したクラックの情報と岩盤の情報（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と補修・補強時期の判断を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。
- (3) 今後、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、人工知能を適用した画像認識技術を活用して効率的にクラックの情報を抽出することにより、迅速に岩盤透水係数や覆工劣化状態を予測できる。また、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、撮影した画像を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、迅速に覆工劣化状態を予測できる。これらにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できると考えられる。

## 参考文献

- 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, 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, 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.
- 3) M.YAMASAKI, T.OTANI, 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*.
- 4) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 96-108, 1982.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 例えば, 宇津木慎司, 中谷匡志, 鶴田亮介, 野村貴律: AI を利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, I-25, pp. 1-7, 2017.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 山崎雅直, 林久資, 進士正人: 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適用に関する提案, 第 28 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】, 2023. (投稿中)



## 第5章 結論

### 5. 1. 本研究のまとめ

幌延深地層研究所地下施設の立坑を対象として、クラックに関する情報から以下の研究を通じて得られた知見を以下にまとめる。

- ・立坑施工時の坑壁地質観察結果に基づくクラックに関する情報からクラックテンソル理論とステレオロジー（統計幾何学）の概念を適用して岩盤透水係数を推定し、坑壁地質観察のクラックに関する情報から岩盤透水係数を簡便に予測できること
- ・立坑施工時の坑壁地質観察結果や立坑施工後の覆工クラック観察結果に基づく、岩盤クラックや岩盤強度と覆工劣化状態の相関性について、クラックテンソル理論を用いて分析し、坑壁地質観察結果の岩盤に関する情報（クラック、強度）から覆工劣化状態を簡便に予測できること

#### (1) 立坑の岩盤透水係数の推定ならびに予測手法

- 1) 坑壁地質観察結果より、互いに直交する3断面のクラックに関する情報(長さ、方向、開口幅)を基に、Kanatani が提案したステレオロジーの概念を用いて3次元のクラックテンソルや透水テンソルを推定することができた。
- 2) 坑壁地質観察におけるクラックの情報より、クラック開口幅を一定かつ0.03mmと仮定して透水テンソルを推定した岩盤透水係数と、立坑近傍の深層ボーリング孔を用いた原位透水試験結果に基づく岩盤透水係数を比較すると、良く一致していることが分かった。しかし、実際には開口幅は一定では無く、バラツキもあるため、坑壁地質観察において初生的なクラックの代表的な開口幅を測定し、そのデータを利用すれば、より岩盤透水係数の推定精度は向上すると考えられる。
- 3) 互いに直交する3断面が得られる深度において、立坑掘削に伴う坑壁地質観察結果に基づく割れ目頻度と3次元クラックテンソルにより推定した岩盤透水係数については比較的高い相関が得られた。この相関を用いて、互いに直交する3断面が得られない深度においても、坑壁地質観察結果に基づく割れ目頻度より、岩盤透水係数が予測できた。

#### (2) 立坑の覆工劣化状態の推定ならびに予測手法

- 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の劣化度について単回帰分析した結果、両者には相関性が低い。また、地山被りや一軸圧縮強さと覆工の劣化度にも比例関係にあるが相関性は低い。このことから、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、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  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、相対誤差 RE による許容誤差を 0.1 とすると、良く一致している。相対誤差の大きい深度については、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、覆工の劣化に関するクラックテンソル  $S_0$  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相対誤差 RE より、許容誤差を 0.1 とすると、良く一致している。相対誤差の大きな深度については、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) 立坑における覆工クラックの発生原因は、初期地圧の水平面内の方向依存性に起因しているところが大きいものの、覆工背面の岩盤の初生的なクラックの幾何学的な特性、地山被りや岩盤強度も関係していることから、これらを考慮しなければならない。

#### (4) 立坑の岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態の予測手法の適用に関する提案

- 1) 立坑の岩盤透水係数の推定方法の実務的な運用において、坑壁クラック観察から抽出したクラックの情報より、第2章で確立した予測式による岩盤透水係数の算出に反映でき、推定した岩盤透水係数に応じた湧水処理工選定の判断を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。
- 2) 立坑の覆工劣化状態の推定方法の実務的な運用において、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に基づき評価し、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算定し、坑壁クラック観察から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）による岩盤強度を用いて、第3章で確立した予測式による覆工劣化度の算出に反映でき、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・補強時期の判断を実施することにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できる。

- 3) 今後、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、人工知能を適用した画像認識技術を活用して効率的にクラックを抽出することにより、迅速に岩盤透水係数や覆工劣化状態を予測できる。また、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、撮影した画像を画像処理技術にてクラックを抽出することにより、迅速に覆工劣化状態を予測できる。これらにより、維持管理費用の抑制への貢献が期待できると考えられる。

## 5. 2. 今後の課題と展望

今後の研究課題と展望については以下の通り。

### (1) 岩盤透水係数の推定ならびに予測手法

幌延深地層研究所の地下施設のような透水係数が小さい岩盤を対象としたが、互いに直交する3断面のクラックに関する情報が取得できれば、他の立坑や地下空洞においても適用可能であるため、岩盤透水係数の推定精度を検証していく必要がある。

このためには、今後、坑壁クラック観察については、従来の目視による観察から写真等により坑壁を撮影して、人工知能を適用した画像認識技術を活用してクラックの情報を抽出する手法を適用していく必要がある。そして、互いに直交する3断面が得られる深度では3次元クラックテンソルにより岩盤透水係数を推定し、逐次データを蓄積することにより、割れ目頻度と岩盤透水係数の相関式の精度を高めていく必要がある。

### (2) 覆工劣化状態の推定ならびに予測手法

幌延深地層研究所の地下施設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、地山被りや岩盤強度に関する情報が取得できれば、覆工の劣化に関するクラックテンソルが推定可能であることを明らかとした。今後、他の立坑においても、適用可能であるため、覆工の劣化に関するクラックテンソルの推定精度を向上し、岩盤クラックと覆工クラックの関連性を検証していく必要がある。

そのためには、立坑のような目視にて覆工劣化状態が確認できない設備の点検について、

ドローン等を用いて画像を撮影し、人工知能を適用した画像認識技術を活用してクラックの情報を抽出する手法を適用していく必要がある。

### 5. 3. おわりに

立坑の施工時における岩盤の情報（クラック，岩盤強度）から岩盤透水係数ならびに覆工劣化状態を推定できれば，合理的な岩盤の湧水処理や覆工の支保選定ができるとともに，立坑という目視による点検が困難な設備に対して，ドローンによる写真撮影を活用してクラックを撮影し，画像処理技術により効率的に抽出したクラックの情報をを用いて，覆工の劣化に関するクラックテンソルを算出することにより，覆工劣化状態の進行性の有無を把握し，適切な時期に補修・補強することにより，維持管理費用の抑制に貢献が期待できる。

今後，(国研)日本原子力研究開発機構幌延深地層センターでは深度500mまで掘削する予定であるため，本研究で明らかにした研究成果を適用するとともに，他の立坑に適用していき，実用性を高めていきたい。

以 上

## 謝辞

本論文の執筆にあたっては、多くの方々にご指導、ご鞭撻、ご協力をいただきました。

山口大学理事進士正人先生には、本研究への取り組み、ならびにとりまとめの機会を与えていただき、懇切な指導とご鞭撻をいただきました。工学的な問題に対する捉え方から技術的な解決までの方向性まで、丁寧にご教示いただきました。心より御礼申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科助教林久資先生には、論文のとりまとめや工学的な問題に対する技術的な解決までの方向性や公聴会直前の発表練習まで、丁寧にご教示いただきました。心より御礼申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授吉武勇先生には、副査の立場として論文審査において本論文の構成及び内容全般に関して非常に有益で的確なご助言とご意見をいただくとともに、2022年4月より主査の立場として論文審査における修正事項のとりまとめや論文構成の方向性など丁寧にご教示いただきました。心より御礼申し上げます。

副査の先生方である山口大学大学院創成科学研究科教授麻生稔彦先生、教授河村圭先生、ならびに准教授中島伸一郎先生には、論文審査において本論文の構成及び内容全般に関して非常に有益で的確なご助言とご意見をいただきました。心より御礼申し上げます。

今後、博士という名に恥じない技術者・研究者になれるように精進していきます。

西松建設株式会社の石山宏二氏ならびに大谷達彦博士におかれましては、査読付き論文作成において、多大なるご指導ならびにご鞭撻をいただきました。心より御礼申し上げます。

本研究は、私が（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出向中に行った研究ならびに復職後も（国研）日本原子力研究開発機構からの公開データに基づき、業務の傍ら行ってきた成果を取りまとめたものです。公開データについては、（国研）日本原子力研究開発機構の青柳和平氏より提供いただきました。心より御礼申し上げます。

最後に、経済的な面のみならず、精神的にも支えとなってくれた家族に心より感謝いたします。

2022年9月吉日 著者 山崎雅直