

瑞浪超深地層研究所での研究事例に基づいた 等価連続体モデル化手法の適用に関する一考察

丹野 剛男^{1*}・佐藤 稔紀¹・松井 裕哉¹・真田 祐幸¹・熊坂 博夫²・多田 浩幸²

¹独立行政法人 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

²清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）

*E-mail: tanno.takeo@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構では地層処分技術に関する研究の一環として、超深地層研究所計画を進めている。超深地層研究所計画における岩盤力学分野では、研究坑道の掘削に伴い周辺岩盤に生じる掘削影響の評価方法の構築を課題の一つとして設定して調査研究を行っている。その中で本報では、瑞浪超深地層研究所において研究坑道を利用し、等価連続体モデル化手法の一つであるクラックテンソルによるモデル化領域設定のための検討結果を報告する。クラックテンソルの算出では、坑道壁面などの曲面状の壁面に現れる割れ目のトレース長の算出が必要であり、本研究では、その算出方法を新たに提案した。また、算出されたクラックテンソルについて、岩盤等級との関係を検討した。

Key Words : *equivalent continuum model, crack tensor, trace length, rock mass classification*

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発の一環として、超深地層研究所計画を進めている¹⁾。

本計画は、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備および深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、原子力機構が岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所で実施している結晶質岩（土岐花崗岩）を対象とした深地層の研究所施設（図-1、2）の建設を伴う研究プロジェクトである。本計画における岩盤力学分野では、研究坑道の掘削に伴い周辺岩盤に生じる掘削影響の評価方法の構築を課題の一つとして設定し、調査研究を進めている¹⁾。

地下岩盤中に空洞を掘削すると、空洞壁面近傍に割れ目の発生・進展、応力状態の変化、間隙水圧の変化が生じることにより、空洞周辺岩盤の破壊強度や変形特性などの力学的性質、透水係数などの水理学的性質、地下水の酸化還元電位などの地球化学的性質が変化することが想定され、この変化が生じる領域を、掘削影響領域と呼んでいる。掘削影響領域は、掘削損傷領域、不飽和領域および応力再配分領域の3つの領域の重ね合わせと考えられている²⁾。地層処分を考える場合、掘削影響領域の性質と広がり把握することは地下施設の建設に関する

安全性を考慮した設計や施工にとって必要不可欠であるほか、掘削影響領域そのものが地層処分場閉鎖後の地下水や物質の選択的な移行経路となり得るため、処分場の機能に関する安全評価の観点からも、その物性や範囲を評価する手法を確立することは重要な課題である²⁾。

結晶質岩のような硬岩系岩盤の場合、初期の岩盤物性や坑道掘削による岩盤物性の変化は岩盤中に内在する不連続面の幾何学的な分布や力学的特性に支配される。従って、掘削影響を予測する場合には岩盤の不連続面の影響を考慮したモデル化手法を適用する必要があるが、地表からの調査段階では不連続面を一つ一つ厳密にモデル化することが難しいため、岩盤を不連続体モデルとしてモデル化することは非常に難しい。そこで瑞浪超深地層研究所では、岩盤力学分野における坑道掘削時の周辺岩盤の掘削影響を予測する手法として、ボーリング調査等の地上からの調査段階で得られたデータを用いた等価連続体モデル化手法を適用した解析による評価を試みてきた^{3) 4)}。本報では、等価連続体モデル化手法の適用に関する一考察として、瑞浪超深地層研究所においてこれまでに実施してきた研究事例を基にして、割れ目のトレース長の新たな算出方法やクラックテンソルモデル^{5) 6)}に基づくパラメータと電中研式岩盤等級との関係性について検討した研究結果を報告する。

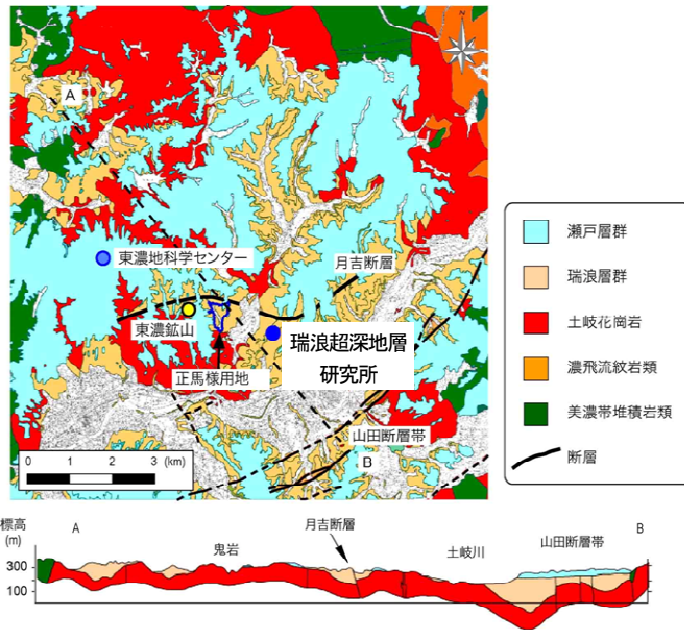


図-1 東濃地区の地質分布および研究所位置
(地質分布は糸魚川⁷⁾を一部修正)

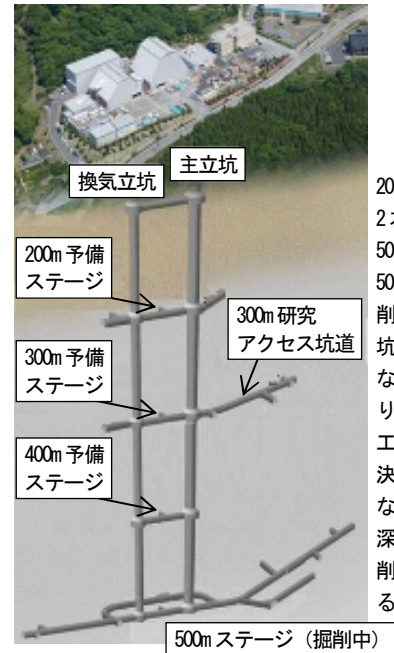


図-2 研究坑道のイメージ⁸⁾

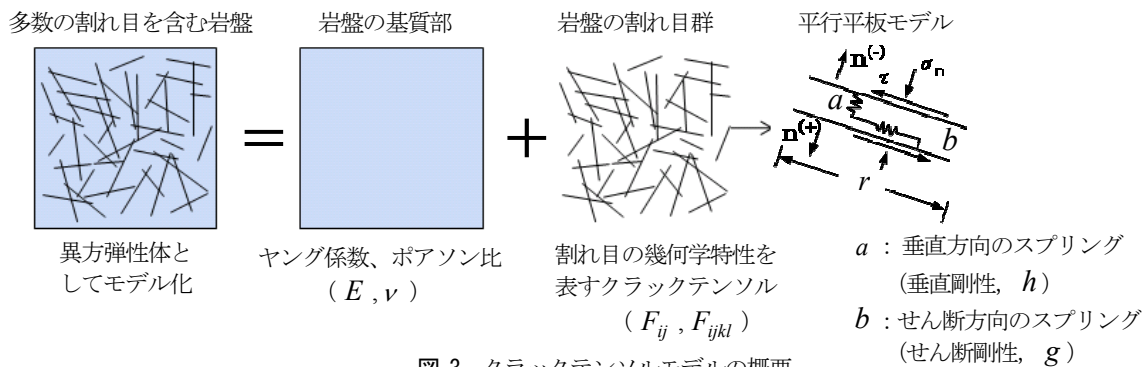


図-3 クラックテンソルモデルの概要

2. クラックテンソルの概要

Oda^{9),10)}によって提案されているクラックテンソルとは、割れ目が統計的な意味で均質に分布する領域の割れ目の密度、大きさ、方向などの幾何学特性をテンソルで表現したものである。クラックテンソルモデルとは、クラックテンソルを用いて多数の割れ目を含む不連続性岩盤を等価な連続体に置き換え、解析上、異方弾性体としてモデル化するものである。クラックテンソルの概要を図-3に示す。

多くの割れ目を含む岩盤について、巨視的な応力 σ を受けて変形するとき発生する巨視的なひずみ ε は、基質部の弾性ひずみと割れ目のひずみの二つの成分の和で表され、図-3のように割れ目をスプリングで連結させた平行平板でモデル化すると、割れ目群の幾何学特性を表すクラックテンソルを導入することによって、 ε と σ との関係は、次式のように示される。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl})\sigma_{kl} \\ = \left[\frac{1}{E} \{ (1+\nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl} \} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} \right] \sigma_{kl} \\ + \frac{1}{4g} (\delta_{ik}F_{jl} + \delta_{jk}F_{il} + \delta_{il}F_{jk} + \delta_{jl}F_{ik}) \sigma_{kl} \quad (1)$$

M_{ijkl} は基質部のコンプライアンステンソル、 C_{ijkl} は割れ目のコンプライアンステンソル、 E と ν は基質部のヤング係数とポアソン比、 F_{ij} と F_{ijkl} は2階と4階のクラックテンソル、 h と g は割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタを示す。

割れ目のトレース長と方向とが統計的な意味で独立していると仮定すると、式(1)中の2階、4階のクラックテンソル F_{ij} 、 F_{ijkl} はクラックテンソルのトレース F_0 を使って、以下のように定義される。

$$F_{ij} = F_0 N_{ij} \quad (2)$$

$$F_{ijkl} = F_0 N_{ijkl} \quad (3)$$

N_{ij} , N_{ijk} は割れ目の方向分布により決定される2階, 4階の構造テンソルであり, 以下のように表される.

$$N_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{L=1}^M n_i^{(L)} n_j^{(L)} \quad (4)$$

$$N_{ijkl} = \frac{1}{M} \sum_{L=1}^M n_i^{(L)} n_j^{(L)} n_k^{(L)} n_l^{(L)} \quad (5)$$

また, クラックテンソルのトレース F_0 についてOda⁵⁾より, 観察壁面上で割れ目の3次元的な形状が不明瞭な場合は3次元空間中にスキャンラインを設定して解析する方法が提案されている. スキャンラインに平行な単位ベクトルを $\mathbf{q}$, 単位ベクトル $\mathbf{q}$ に交わる割れ目の個数を $N^{(q)}$, 壁面に現れる割れ目のトレース長を t とすると2階のクラックテンソルのトレース F_0 は次式のように表される.

$$F_0 = \frac{3\pi}{8} \frac{\langle t^2 \rangle}{\langle t \rangle} \frac{N^{(q)}}{\langle \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} \rangle} \quad (6)$$

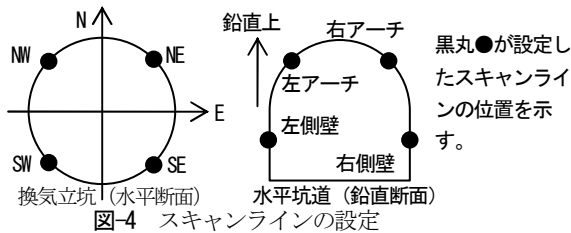
$\langle t^n \rangle$ はトレース長 t の n 次のモーメントの平均である.

クラックテンソルのトレース F_0 は(6)式より, 割れ目の密度およびトレース長により決定されるもので, 割れ目を含んだ岩盤の剛性に関する無次元量であると言える. 具体的には, F_0 が大きくなると割れ目を含んだ岩盤の等価剛性は小さくなる.

3. 曲面状の壁面に現れる割れ目のトレース長

(1) 割れ目のトレース長の検討

本研究では, 図-2に示す換気立坑と水平坑道の坑道壁面上に坑道軸に平行にスキャンラインを設定し (図-4), 壁面観察結果に基づきスキャンラインと交差した割れ目の密度・方向・トレース長に基づいてクラックテンソルの算出を行った. 割れ目のトレース長は, Oda^{5) 6)}の論文では, 平面状の側壁に現れる割れ目のトレース長としているが, 坑道壁面のような曲面状の側壁に現れる割れ目と平面状の壁面に現れる割れ目とは形状が異なる. そこで本研究では, 曲面状の側壁に現れる割れ目から, そのトレース長を精度よく算出するため, 仮想平面を設定し, その平面に割れ目を投影してトレース長を算出する方法を新たに検討した. 以降, 具体的な算出方法を述べる.



(2) トレース長の算出方法

割れ目は3次元空間において平面であるとする. 曲面状の壁面に現れる割れ目を, 割れ目を含む平面に沿ってスキャンラインの位置に設定した坑道との接平面に投影したものが割れ目のトレース長であるとした (図-5).

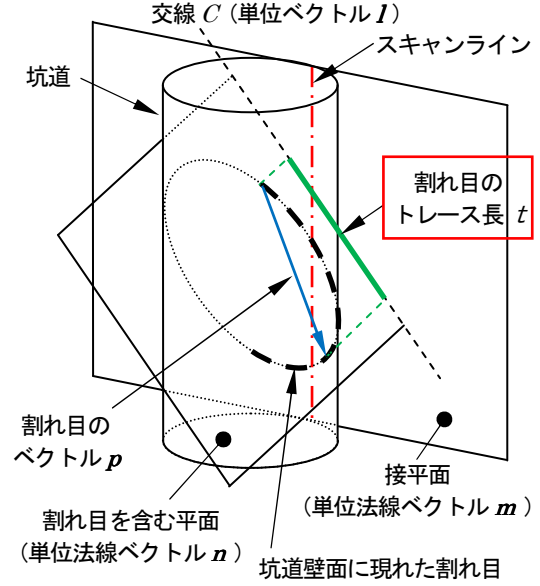


図-5 トレース長の算出の概念図

割れ目の単位法線ベクトルを $\mathbf{n}$, 接平面の単位法線ベクトルを $\mathbf{m}$ とすると, 割れ目を含む平面と接平面との交線 C の単位ベクトル $\mathbf{l}$ は以下のように表される.

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{m}}{|\mathbf{n} \times \mathbf{m}|} \quad (7)$$

図中の割れ目のベクトル $\mathbf{p}$ は接平面に投影された割れ目が最大になるように設定する. 割れ目のトレース長 t は, ベクトル $\mathbf{p}$ とベクトル $\mathbf{l}$ との内積であり, 以下の式のように表される.

$$t = |\mathbf{p} \cdot \mathbf{l}| \quad (8)$$

本研究では, 式(8)に基づき割れ目のトレース長を算出した. 本研究以前は他サイトの既往の知見を参考にトレース長を仮定していたが³⁾, 本報で提案した算出方法により, 原位置のデータに基づきトレース長を算出することができ, 算出結果の信頼性が高まったと言える.

4. クラックテンソルの算出結果

超深地層研究所計画では地上からの調査段階における研究所の設計時に電中研式岩盤分類に基づき物性分布評価とパラメータの設定を行っている. 電中研式岩盤分類は, 一般的な岩盤構造物の設計施工時に広く用いられている. 瑞浪超深地層研究所では割れ目の密度を考慮した

岩盤分類を実施しているが、定性的な判断基準に基づくものも含まれている。クラックテンソルモデルに基づき算出される等価物性は、割れ目の幾何学特性を考慮した理論的な値であるので両者の関係性を検討することは設計時に設定した岩盤物性の妥当性を示すことにつながる。

上記の観点から、クラックテンソルモデルに基づき算出した各種パラメータと電中研式岩盤分類結果との関係性について検討を行った。

(1) 坑道ごとのクラックテンソルの算出結果

式(8)より、割れ目のトレース長を算出し、換気立坑および水平坑道についてクラックテンソルのトレース F_0 を算出した。算出結果を図-6、7に示す。

換気立坑について、50m区間ごとに算出した結果、 $F_0=4.17\sim 21.45$ となり、最小値と最大値とを比較すると、約5倍の変動が認められた。水平坑道について、坑道ごとに算出した結果、 $F_0=9.46\sim 21.74$ となり、最小値と最大値とを比較すると、約2倍の変動が認められた。スキャンラインによる割れ目の抽出例を図-8、9に示すが、換気立坑では割れ目の連続性が低く、各スキャンラインにおいて抽出された割れ目のほとんどが異なっている。一方、300m研究アクセス坑道では割れ目の連続性が高く、各スキャンラインにおいて抽出された割れ目は同一のものが多く、図-6、7の結果は、以上のような傾向を反映しているものと考えられる。

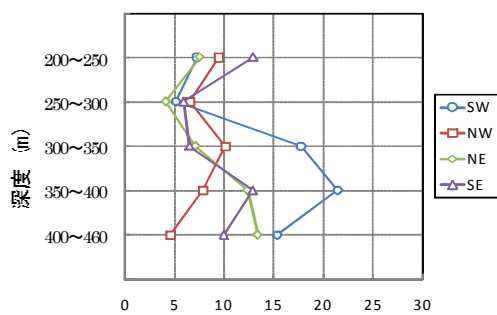


図-6 換気立坑における50mごとの F_0 の算出結果

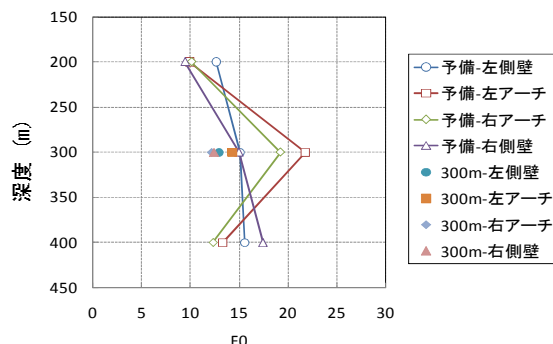


図-7 水平坑道ごとの F_0 の算出結果

(2) クラックテンソルモデルで求まる各種パラメータと電中研式岩盤分類結果との比較

割れ目の密度、割れ目のトレース長の平均、クラック

テンソルのトレースについて電中研式の岩盤等級ごとに集計し、岩盤等級との関係を検討した。

算出対象区間は、換気立坑の深度200.2~459.8m、および深度200m、300m、400mの各予備ステージ、300m研究アクセス坑道の4本の水平坑道とした。グラフ化により相関性の検討を可能にするため岩盤等級は、B級=5点、CH級=3.5点、CM級=3点、CL級=2.5点、D級=1点と点数化した。例えば、ある区間の岩盤等級がB-CH-CM級（B級、CH級、CM級が混在している）と判定されている場合は、B級、CH級、CM級が均等に分布していると仮定して、 $5 \times 1/3 + 3.5 \times 1/3 + 3 \times 1/3 \approx 3.8$ （点）とした。

割れ目の密度、割れ目のトレース長の平均、クラックテンソルのトレースと岩盤等級との関係を図-10に示す。坑道軸方向により、捉えやすい割れ目の方向が異なるので、換気立坑と水平坑道とに分けて整理した。図中、左の図が換気立坑、右の図が水平坑道であり、上から順に、割れ目の密度、割れ目のトレース長の平均、クラックテンソルのトレースの結果である。3つのパラメータとも岩盤等級と負の相関関係を示すものと想定される。

a) 換気立坑

割れ目の密度は、壁面観察結果に基づく岩盤等級の分布の幅が3~4点程度と狭く、傾向が見づらいが、わずかに負の相関関係が認められる。割れ目のトレース長の平均は約1~3mの範囲であり、岩盤等級との相関は認められない。クラックテンソルのトレースは約5~20の範囲であり、岩盤等級との相関は認められない。

b) 水平坑道

割れ目の密度は、岩盤等級が低くなるのに伴って大きくなり、明瞭な負の相関関係が認められる。割れ目のトレース長の平均はいずれも約2m程度であり、岩盤等級との相関は認められない。クラックテンソルのトレースは岩盤等級が低くなるのに伴って大きくなり、明瞭な負の相関関係が認められる。

以上より、換気立坑では割れ目の密度について、水平坑道では割れ目の密度およびクラックテンソルのトレースについて、岩盤等級と負の相関関係が認められた。

(3) 考察

研究所の深度200~500m付近では高傾斜の割れ目が卓越している。高傾斜の割れ目は、幾何学的に換気立坑よりも水平坑道と交差しやすいと考えられるため、水平坑道では、割れ目の密度の局所的な変化が明瞭に現れ、岩盤分類の結果についても密度変化が反映されたことが、岩盤等級と割れ目の密度およびクラックテンソルのトレースが良好な相関を示した要因と思われる。

(4) 今後の課題

クラックテンソルのトレース F_0 の値は密度だけでなく

トレース長の情報も含んでいる．実際の壁面観察結果は図-8, 9の左端の図のようではあるが，特に換気立坑についてスキャンラインごとの割れ目の抽出と比較すると，割れ目の連続性について改良する余地があると考えられる．大局的にはサインカーブ状の連続性が高い割れ目に見えても，局所的には短いトレース長の割れ目の集合体である場合が多い．このような場合，スキャンラインと交差した短い割れ目を抽出しているが，実際の岩盤の割れ目の連続性を考慮して1本の連続する割れ目と解釈して抽出する方法が考えられる．このような考察を踏まえつつ，スキャンラインと交差する割れ目を抽出し，割れ目のトレース図を作成することで，実際の岩盤の割れ目の連続性を考慮したトレース長を算出することができ，より信頼性の高い結果を得られるものと考えられる．

5. まとめ

曲面状の壁面に現れる割れ目のトレース長について算出方法を新たに提案し，換気立坑および水平坑道でのクラックテンソルを算出した．また，割れ目の密度，割れ目のトレース長の平均，クラックテンソルのトレースについて岩盤等級との関係を調べた．その結果，瑞浪超深地層研究所の水平坑道においては，岩盤等級とクラックテンソルのトレースには負の相関関係が認められた．今回用いたデータによると，4.(3)節で考察したように，領域内の割れ目の分布特性と坑道軸との関係を考慮すれば，岩盤等級とクラックテンソルのトレースとが関連付けられる可能性があることが分かった．今回の検討結果は地表からの調査段階における試錐孔などの調査結果により

判断された岩盤分類に基づき設計時に設定された物性値に理論的な根拠を与えることができ，岩盤等級ごとに設定した物性分布の妥当性を評価できる可能性を示唆するものである．

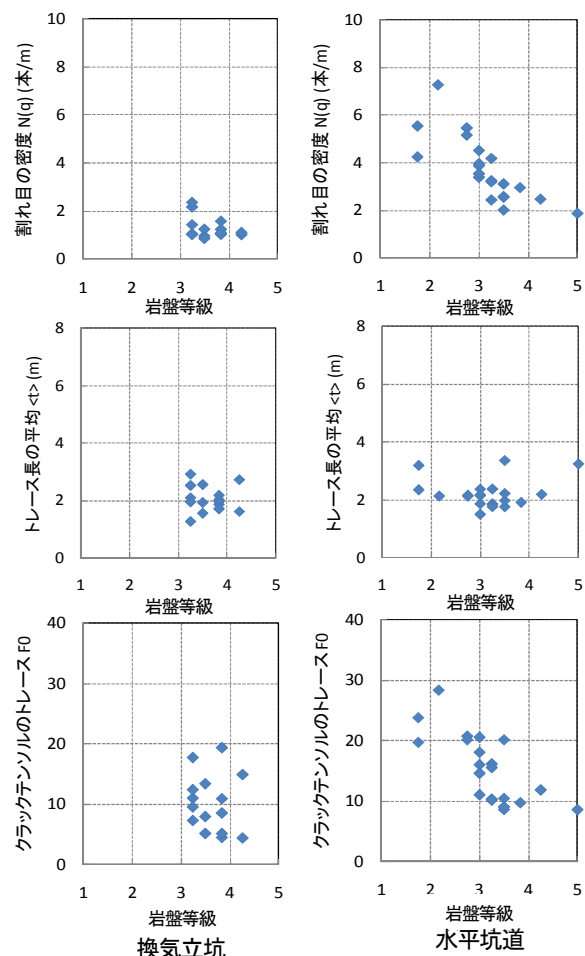


図-10 クラックテンソルのパラメータと岩盤等級との関係

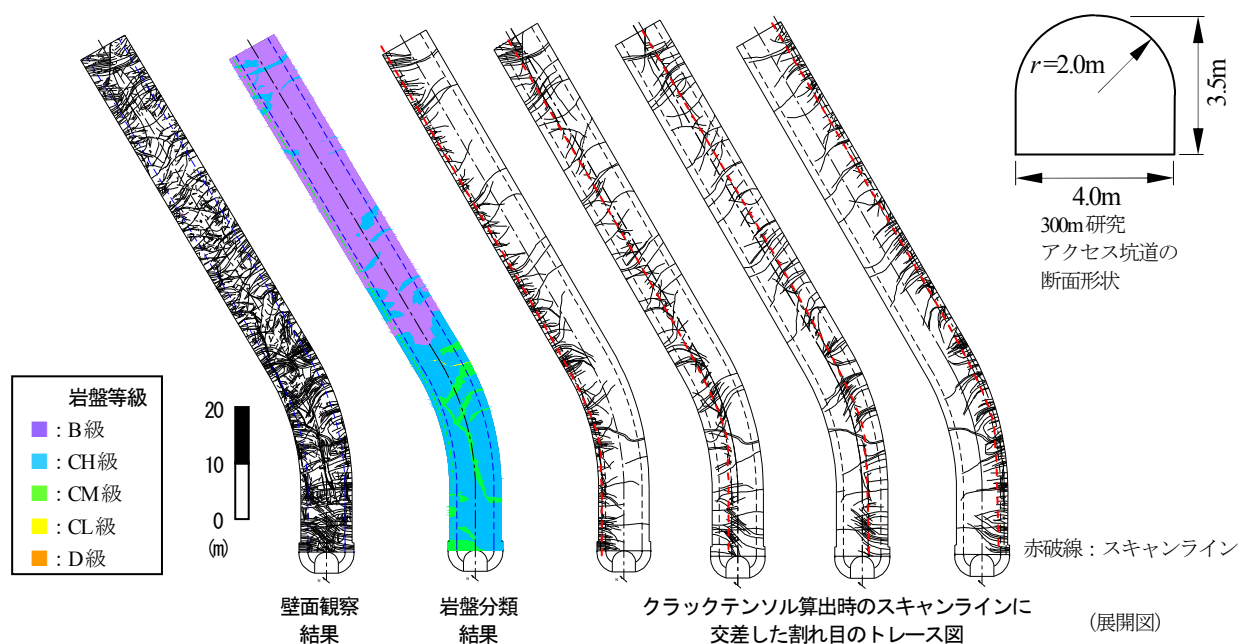


図-8 壁面観察，岩盤分類およびスキャンライン法で抽出した割れ目のトレースの比較例（300m 研究アクセス坑道）

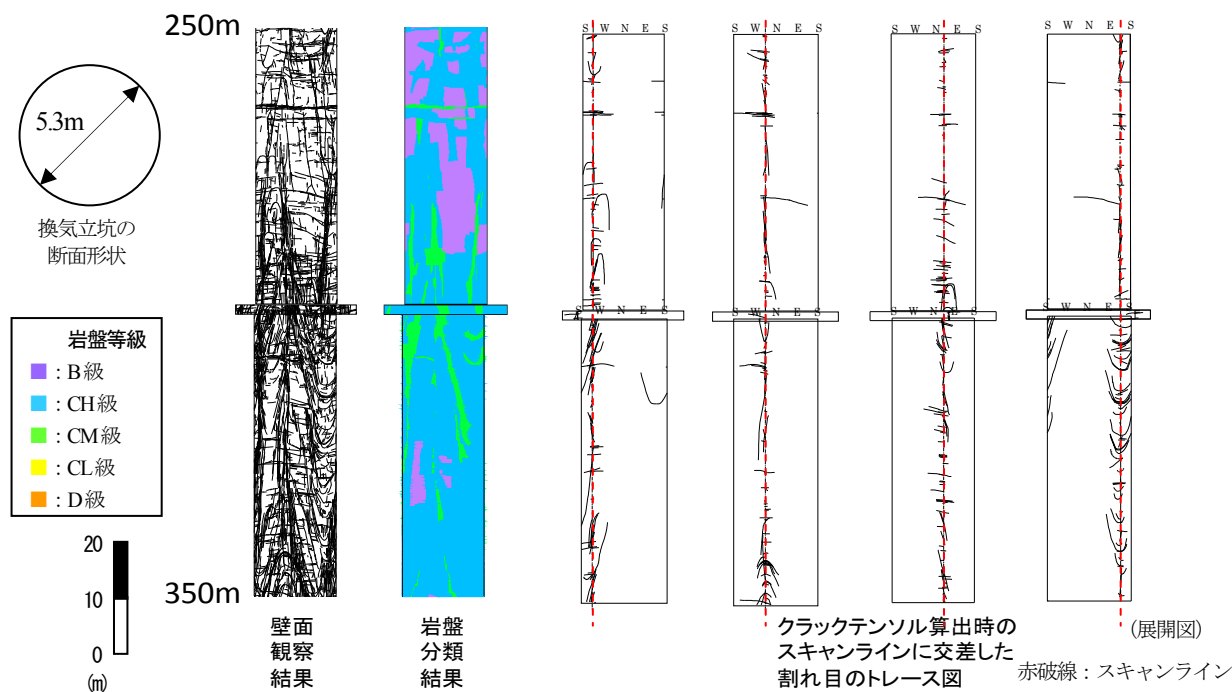


図-9 壁面観察、岩盤分類およびスキャンライン法で抽出した割れ目のトレースの比較例（換気立坑）

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所 地層科学研究基本計画，JAEA-Review 2010-016, 2010.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—，JNC TN1400 99-020～024, 1999.
- 3) 郷家 光男，堀田 政國，若林 成樹，中谷 篤史：クラックテンソル・仮想割れ目モデルによる瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響解析，JNC TJ7400 2005-058, 2005.
- 4) 瀬野 康弘，中間 茂雄，佐藤 稔紀，森 孝之，森川 誠司，田部井 和人，須山 泰宏，村上 浩次：MBCモデルによる瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響予測解析，JAEA-Research 2007-080, 2008.
- 5) Oda, M : An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- 6) Oda, M : A method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses, *Canadian Geotechnical Journal*, pp.440-447, 1988.
- 7) 糸魚川 淳二：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，No.1, pp.1-50, 1980.
- 8) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方—深度 500m までの調査研究計画—，JAEA-Review 2011-022, 2011.

STUDY ON AN EQUIVALENT CONTINUUM MODEL AT THE MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Takeo TANNO, Toshinori SATO, Hiroya MATSUI, Hiroyuki SANADA,
Hiroo KUMASAKA and Hiroyuki TADA

The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is conducting the Mizunami Underground research laboratory (MIU) Project in order to develop comprehensive geological investigation and engineering techniques for deep underground applications (e.g. geological disposal of HLW). This modelling study has a two-fold objective, to contribute to the evaluation of the mechanical stability of shaft and research drifts, and to plan the future studies. A crack tensor model, a method of an equivalent continuum model, has been studied at the MIU. In this study, the relationship between the estimated crack tensor parameters and the rock mass classification was revealed.