

掘削損傷領域を考慮した 研究坑道周辺岩盤挙動の3次元予測解析

3D analysis for predicting the rock mass behavior of a research shaft and gallery
considering Excavation Damaged Zone

瀬野康弘¹・森孝之²・郷家光男³・中間茂雄⁴・佐藤稔紀⁵
Yasuhiro Seno, Takayuki Mori, Mitsuo Gohke, Shigeo Nakama
and Toshinori Sato

¹正会員 工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64) E-mail: seno.yasuhiro@jaea.go.jp

²正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

³正会員 工修 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)

⁴正会員 工修 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 ニアフィールド研究グループ
(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33)

⁵正会員 工博 資源エネルギー庁 放射性廃棄物等対策室 (〒100-8931 東京都千代田区霞が関 1-3-1)

The Excavation Disturbed Zone is defined as the zone where host rock around an underground excavation whose characteristics are altered by excavation. This includes the Excavation Damaged Zone, Stress Redistribution Zone and Unsaturated Zone. It is assumed that such zone will become a selective pathway for the migration of groundwater and/or radioactive materials. Therefore, for the design of geological repository where low permeability is required, it is important to establish an accurate method for evaluating and predicting the rock mass behavior due to excavation.

This paper describes the results of 3D FEM analysis results using two type continuous models that consider the reduction of stiffness of the Excavation Damaged Zone due to blasting.

Key Words: rock mass behavior, Excavation Damaged Zone, MBC model, Crack Tensor Model,
Virtual Fractural Model, 3D numerical analysis

1. はじめに

地下岩盤中に坑道などの空洞を掘削すると、その周辺岩盤では、応力状態の変化、き裂の発生・進展、間隙水圧の変化などに伴い、空洞周辺岩盤の力学的性質、水理学的性質、および地下水の地球化学的性質などが変化することが想定される。この変化が生じる領域は掘削影響領域と呼ばれており、地下水の選択的な移行経路となることも想定されるため、岩盤の低透水性が重視される高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、空洞周辺岩盤挙動の評価・予測手法を確立することが重要な課題である¹⁾。

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技術に関する

研究開発の一環として、岐阜県瑞浪市において、結晶質岩を対象とした「超深地層研究所計画」²⁾を進めている。本計画は、深度 1,000m まで達する 2 本の立坑と複数の水平坑道の建設を伴う深地層の研究施設計画であり、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いる。

これまで、原子力機構では岩手県の釜石鉱山において結晶質岩を^{3),4)}、岐阜県の東濃鉱山において堆積岩を^{例えば5)}対象として掘削影響領域に関する調査・研究を行ってきた。その結果、掘削影響領域は、①発破などの直接的な損傷によって生じる掘削損傷領域（以下、損傷領域）、②坑道から岩盤への大気の侵入によって生じる不飽和領域、③掘削に伴う応力再配

分によって生じる応力再配分領域の三つの領域の重ね合わせによって形成されていると考えられた(図-1 参照)¹⁾。

通常、坑道の力学的安定性や掘削影響領域を予測評価するために数値解析が実施されるが、一般的な数値解析(例えば6,7)では、掘削により坑道周辺岩盤の応力が解放されることによる応力変化によって応力再配分領域が評価されるのみで、損傷領域については考慮されていない。しかし、実際の掘削では、発破や機械掘削により損傷領域が形成されることから、力学的安定性や掘削影響の予測解析では、損傷領域を適切にモデル化することが重要である。

本検討では、3次元的な配置となる坑道のうち、特に坑道連接部(分岐部)の力学的安定性を事前評価し、「超深地層研究所計画」における第2段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)以降の調査研究計画の基礎情報を得ることを目的としている。そのために、不連続性岩盤を対象として損傷領域を考慮したこれまでの2次元での解析的検討⁸⁾⁻¹¹⁾をさらに進め、3次元解析によりその影響を検討した。

2. 解析手法

解析手法は、FEMを基本とし、結晶質岩などのき裂性岩盤を表現可能な等価連続体解析手法である①MBC (Micro-mechanics Based Continuum model) 解析¹²⁾および②CTM (Crack Tensor Model)^{13),14)}と仮想割れ目モデル⁷⁾を組み合わせた解析^{10),11)}(CTMを用いて空洞掘削時の周辺岩盤の応力を求め、その応力と仮想割れ目モデルを用いて透水性変化を求める手法;以下、CTM+仮想割れ目モデル)を用いた。本検討では既報^{8),11)}と同様、これらのモデルに損傷領域を組み込み、その影響について解析的検討を行った。

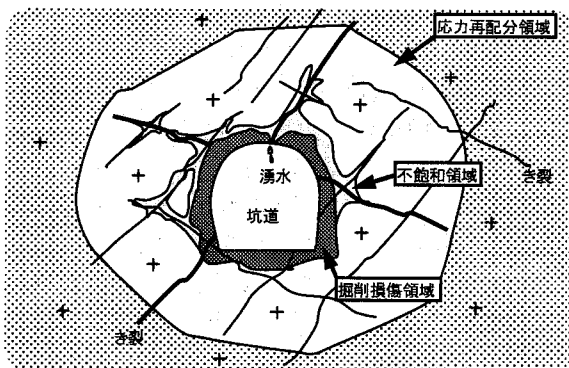


図-1 掘削影響領域の概念図^{1),8)}

(1) 損傷領域のモデル化

損傷領域のモデル化に際し、損傷領域の幅は、釜石鉱山や東濃鉱山での掘削影響試験結果^{4),5)}より、立坑、水平坑道とも80cmとした。また、損傷領域で生じる剛性の低下⁴⁾などの原因は、既往の観察結果^{15),16)}を参考に、基質部中に新たなき裂が発生することによると想定し、その新規のき裂面は、全てが壁面平行方向に発生するものとした。

図-2に、損傷領域のモデル化の概念図を示す。

(2) 損傷領域を考慮したMBC

マイクロメカニクスに基づく連続体理論を岩盤に適用する場合、微視的構造要素は個々のき裂である。き裂を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換えるとき、岩盤の任意の点に着目し、その点を含む部分領域である代表要素を考える(図-3参照)。ここで、代表要素は微視的構造要素に比べて十分大きく、かつ物体の代表寸法に比べて十分小さい領域とする。

MBC解析は、き裂を含む岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ と平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_{ij}$ の関係、すなわち巨視的な構成式(式(1))を求め、この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行うものである¹²⁾。

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{ij} = \left[D_{ijkl}^R + \sum_m D_{ijkl}^{J(m)} (\bar{E}^{(m)}, \bar{G}^{(m)}) \right] \Delta\bar{\sigma}_{kl} = \bar{D}_{ijkl} \Delta\bar{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

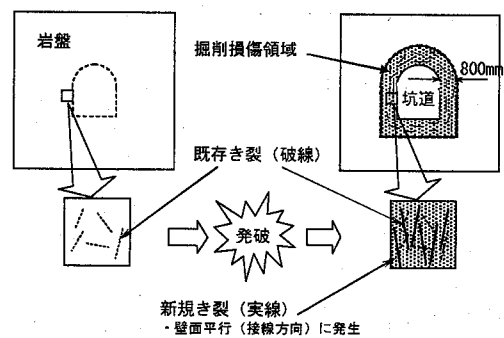


図-2 掘削損傷領域のモデル化の概念図¹¹⁾

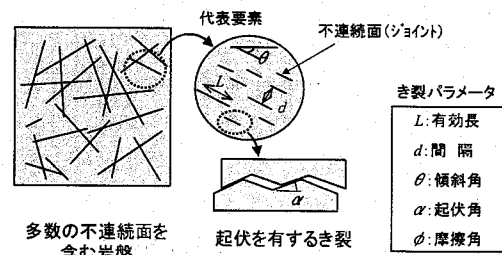


図-3 MBCの概要

ここで、 D_{ijkl}^R は岩盤基質部のコンプライアンステンソル、 $D_{ijkl}^{J(m)}$ は m 番目のき裂セットの岩盤のコンプライアンステンソル、 $\bar{E}^{(m)}$ 及び $\bar{G}^{(m)}$ は、それぞれ、き裂セットの方向に対する岩盤の等価垂直剛性と等価せん断剛性、 $\bar{D}_{ijkl}$ はき裂を含む岩盤の巨視的な接線コンプライアンステンソルである。

MBCでは、岩盤内の圧縮応力場でのき裂の開口変形を生じるメカニズムを表現する方法として、図-3のように起伏を有するき裂を考え、起伏面でクーロンの摩擦条件を満足した時、せん断すべり・開口が生じるものとしている。

MBC で損傷領域を表現する場合、既存のき裂状態から変化したき裂群について図-3 に示す五つのパラメータを設定する^{8),9)}。

(3) 損傷領域を考慮したCTM

CTM は、岩盤中の不連続面群の幾何学的特性を無次元のテンソル量で表し、多数の不連続面を含む岩盤をそれと等価な連続体に置き換えて解析するモデルであり、き裂が統計的な意味で均質に分布する岩盤領域に対して、巨視的な応力 (σ_{kl}) と巨視的なひずみ (ε_{ij}) の関係を求め、不連続性岩盤を等価な異方弾性体としてモデル化する手法である^{13),14)} (図-4 参照)。巨視的な応力とひずみの関係は、岩盤基質部に生じるひずみと、き裂によって生じるひずみの和から定式化される (基本構成式)。

損傷領域において、新規き裂が発生して、その変位により付加的なひずみが起こるものと考えれば、基本構成式に新規き裂による付加的なひずみの項を加えればよいことになり、損傷領域の応力とひずみの関係は以下に示す式で表すことができる^{10),11)}。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl}^P + C_{ijkl}^B) \sigma_{kl} \quad (2)$$

$$C_{ijkl} = \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik}) \quad (3)$$

ここで、 M_{ijkl} は基質部のコンプライアンステンソル、 C_{ijkl} はき裂によるコンプライアンステンソル (添え字 P および B は、それぞれ、既存き裂および新規き裂に対応)、 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。また、き裂の寸法と方向 (法線ベクトル) が統計的な意味で独立している場合、クラックテンソル F は、き裂の寸法・密度を表す量 F_0 と、き裂の方向から定

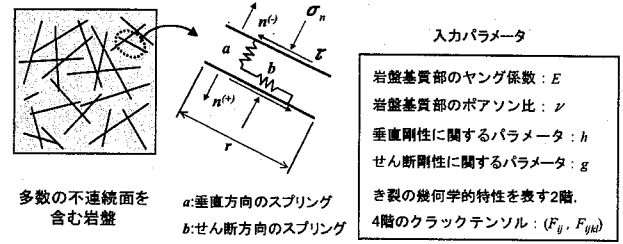


図-4 CTM の概要

まる 2 階、4 階の構造テンソル N_{ij} および N_{ijkl} とから次式のように求められる。

$$F_{ij} = F_0 N_{ij}, \quad F_{ijkl} = F_0 N_{ijkl} \quad (4)$$

クラックテンソルモデルにより損傷領域を表現する場合、新規き裂の方向に関するパラメータ (N)、寸法・密度に関するパラメータ (F_0) および剛性に関するパラメータ (g, h) を設定する。

(4) 損傷領域を考慮した仮想割れ目モデル

仮想割れ目モデルは、応力再配分により岩盤中のき裂に作用する垂直応力の変化に伴って、き裂の開口量が増減し、それにより岩盤の透水性が変化することに着目したモデルである⁷⁾。仮想割れ目モデルでは、岩盤の透水性は仮想的に発生させたき裂の方向分布と透水係数から決定される。仮想割れ目モデルによる岩盤の透水テンソルは、個々のき裂の透水テンソルをその体積で重み付けして平均化していることから、新規き裂が発生した場合の損傷領域の透水テンソルは、既存き裂による成分と新規き裂による成分の足し合わせとなる。

新規き裂が発生した場合の損傷領域の透水テンソル k_{ij} は、既存き裂による成分 k_{ij}^P と新規き裂による成分 k_{ij}^B の足し合わせとなる。3 次元における透水テンソル k_{ij} は下式のように表現できる。

$$k_{ij} = k_{ij}^P + k_{ij}^B = \frac{\pi \rho^P}{4} \sum_{k=1}^m (r^P)^2 e^{P(k)} k_f^{P(k)} (\delta_{ij} - n_i^{P(k)} n_j^{P(k)}) D(n^{P(k)}) + \frac{\pi \rho^B}{4} \sum_{k=1}^{m'} (r^B)^2 e^{B(k)} k_f^{B(k)} (\delta_{ij} - n_i^{B(k)} n_j^{B(k)}) D(n^{B(k)}) \quad (5)$$

ここに、 ρ は仮想割れ目群の密度、 r は仮想割れ目の形状を円盤と仮定したときの直径、 e は水理学的開口幅、 k_f は仮想割れ目の透水係数、 $D(n)$ は法線ベクトル n の相対頻度を表す関数である。透水係数は、き裂に作用する垂直応力 σ_n によって変化し、き裂の

透水係数と垂直応力の関係は、き裂を含む岩石の室内透水試験から求める。

仮想割れ目モデルにより損傷領域を表現する場合、既存き裂の情報に加えて、新規き裂に関するき裂密度、垂直応力-透水係数関係、およびき裂の方向分布の情報が必要になる^{10),11)}。

3. 解析条件

(1) 解析対象

検討対象とした地下構造物（地下空洞）は、原子力機構の瑞浪超深地層研究所用地に建設中の研究坑道である。解析対象領域である研究所用地周辺の地質は、表層から新第三紀鮮新世の瀬戸層群、新第三紀中新世の瑞浪層群、白亜紀後期の土岐花崗岩からなっている。解析対象は、GL-500mの深度（土岐花崗岩部）に建設予定の主立坑（掘削径 7.3m、内径 6.5m、以下、立坑）と中間ステージ（幌形：高さ 3.5m × 幅 3.5m、以下、水平坑道）との接続部である。図-5 に、瑞浪超深地層研究所研究坑道のレイアウト¹⁷⁾と解析対象部を示す。

なお、立坑の施工はショートステップ工法にて行われており、掘進長 1.3m の発破を 2 回繰り返した後、厚さ 400mm の覆工コンクリートを打設する。水平坑道は NATM により行われ、掘進長 1.5m を発破掘削後、ロックボルトと吹付けコンクリートが施工される。

(2) 基本条件

解析の基本条件を以下に示す。

- 解析領域は、水平・鉛直方向とも、接続部から 5D（D：立坑掘削径）以上とし、水平坑道の展開方向は、立坑部から南西方向とする（図-6）。
- 解析上、拡張部や換気立坑は考慮せず、また、支保工や覆工コンクリートの存在も考慮しない。
- 初期応力は、過去の調査・試験で得られた値から推定した深度 500m 地点の値^{18),19)}とし、解析領域全体で一様とする（図-6）。
- 掘削順序は立坑上部→水平坑道→立坑下部とし、解析上の掘削過程は全て一括掘削とする（図-7）。
- 岩盤基質部の物性値は、過去の調査・試験で得られた土岐花崗岩の物性値²⁰⁾（表-1）を使用する。初期透水係数は、深度 300～600m 地点における原位置透水試験結果の対数平均値である。
- 各モデルに必用なき裂パラメータの値は、研究所用地における力学ボーリング調査・試験結果¹⁸⁾⁻²⁰⁾

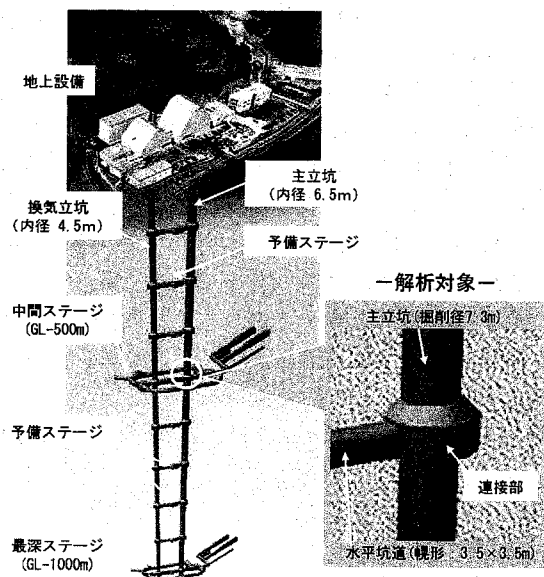


図-5 瑞浪超深地層研究所研究坑道レイアウト¹⁷⁾および解析対象部

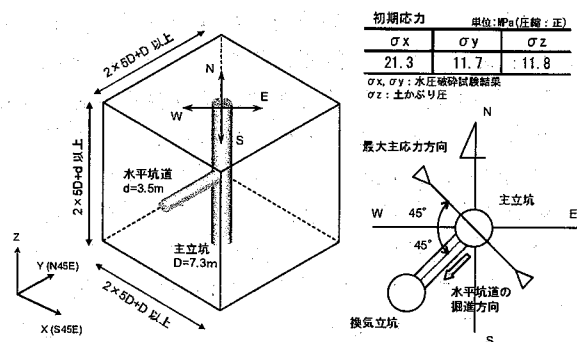


図-6 解析モデルと初期応力

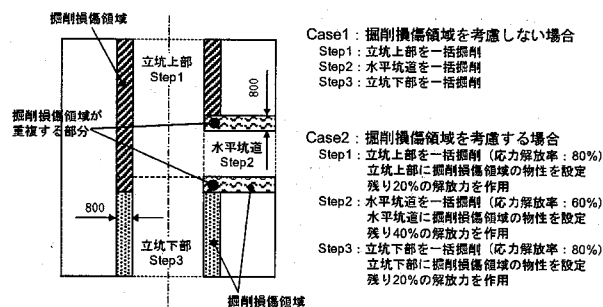


図-7 解析ステップと損傷領域の発生

表-1 岩盤基質部（健岩部）の物性値

見かけ比置 (乾燥状態)	岩石の 弾性係数* E (GPa)	岩盤の 弾性係数** E (GPa)	ポアソン比 ν	岩盤の 粘着力 C (MPa)	岩盤の 内部摩擦角 φ (°)	初期 透水係数 k _{init} (m/s)
2.63	55.8	49.3	0.27	34.3	52.4	2.25 × 10 ⁻⁸

*: 50%接線ヤング率...CTM+仮想割れ目モデル解析で使用

**：次式にて補正...MBC解析で使用

岩盤の弾性係数=岩石の弾性係数 × 亀裂係数

ここに 亀裂係数=(V_D破砕/V_D健全)²

V_D破砕: 音波速度によるP波速度, V_D健全: 室内超音波速度試験によるP波速度

ただし、亀裂係数が1を超える場合は、亀裂係数1とする。

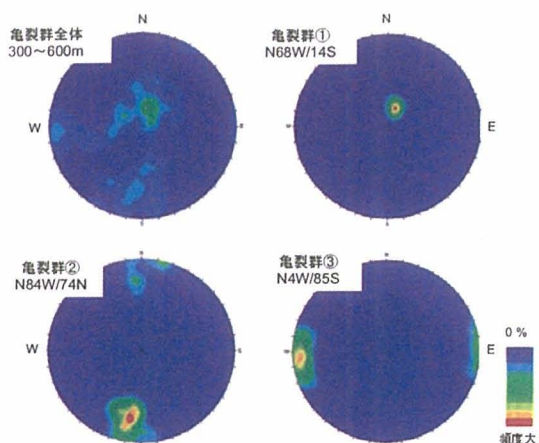


図-8 対象き裂群（深度300～600m）の
頻度コンターのステレオネット⁹⁾

や、き裂を含む岩石コアの試験結果^{9),10),21)}、および過去の検討結果^{8),22), 23)}などを参考に設定する。BTV調査結果に基づく解析対象範囲のき裂群のステレオネットを図-8に示す。

- ・ 損傷領域は、図-2に示したようにモデル化し、立坑と水平坑道の損傷領域の交差部は両坑道の壁面接線方向のき裂を考慮する（図-7）。
- ・ 損傷領域を考慮する場合、応力解放率は、水平坑道ではNATMの2次元解析における一般的な値として60%とする。その後、損傷領域の物性値を設定し、残りの40%を解放する。立坑については覆工の施工法を考慮して応力解放率を80%とし²⁴⁾、損傷領域の物性値を設定した後、残りの20%を解放する（図-7）。
- ・ 損傷領域の物性は、損傷領域内の岩盤剛性が健岩部の25%^{4),5)}となるように設定する。

4. 解析結果および考察

(1) 岩盤変位

立坑下部の掘削が終了した時点での岩盤変位のコンターを図-9に示す。図より、MBC解析では、損傷領域を考慮することによる岩盤変位分布への影響は少ないが、CTM+仮想割れ目モデル解析では、損傷領域を考慮すると、岩盤の変位や内空変位は増加することが見て取れる。

立坑下部掘削終了時点での、立坑および水平坑道の内空変位、天端沈下量の分布を図-10および図-11に示す。これらの図からもMBCよりもCTM+仮想割れ目モデルの方が、掘削損傷を考慮した影響が、変位分布へ顕著に現れていることがわかる。また、

掘削損傷を考慮しない場合でもCTM+仮想割れ目モデルの変形量が多い。これは、CTM+仮想割れ目モデルではMBCに比べ、き裂分布を考慮したことによる岩盤の初期剛性の低下が大きいためと思われる。

なお、両解析結果とも、立坑の内空変位は、水平坑道軸方向よりも直角方向が大きい。これは、初期

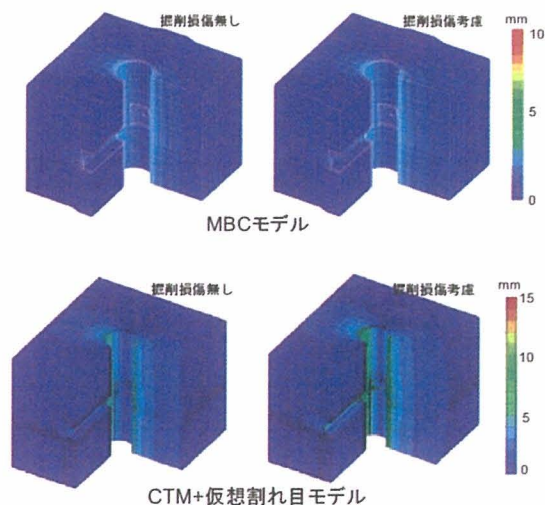


図-9 岩盤変位のコンター

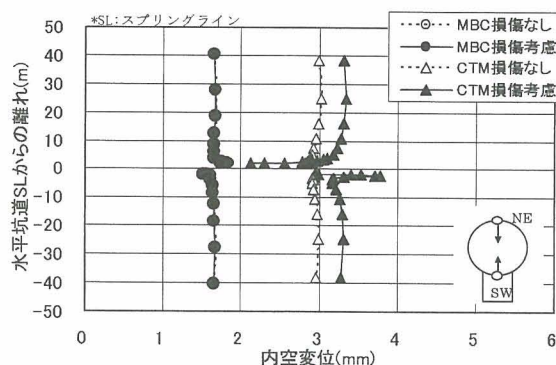


図-10(a) 立坑内空変位分布（水平坑道軸方向）

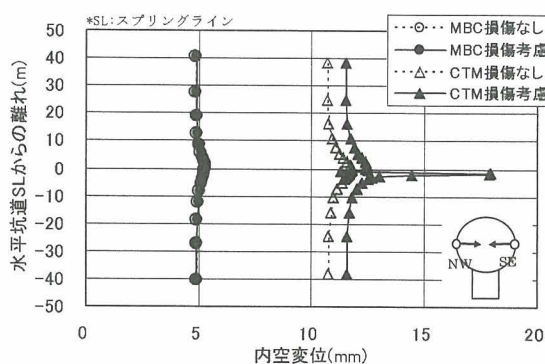


図-10(b) 立坑内空変位分布（水平坑道直角方向）

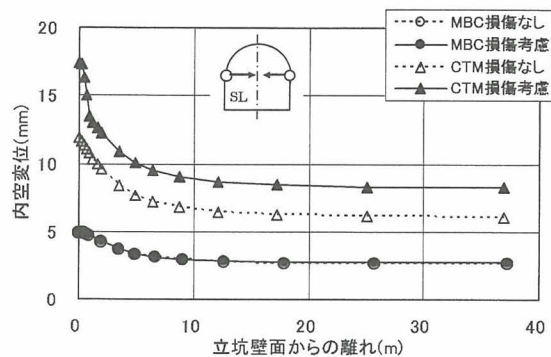


図-11(a) 水平坑道内空変位分布

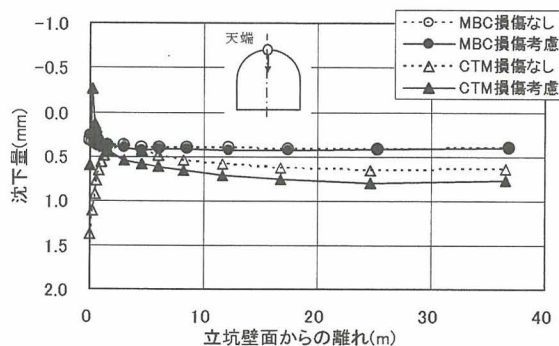


図-11(b) 水平坑道天端沈下量分布

応力（最大主応力）の方向が、水平坑道に対し直角方向であることが考えられる。水平坑道側壁の内空変位が天端変位よりも大きく現れている原因も、初期応力の方向の影響が現れたと考えられる。

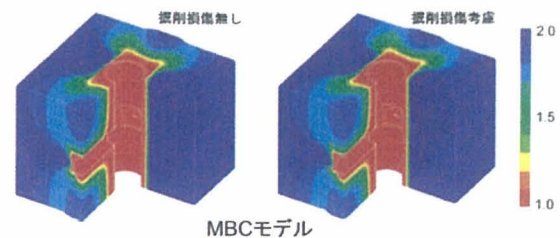
(2) 安全率

立坑下部掘削終了時の安全率のコンターを図-12に示す。なお、MBC解析の安全率（局所安全率）は、き裂がせん断すべりする条件で決定され、CTM解析の安全率は、モール・クーロンの破壊規準を用いている。

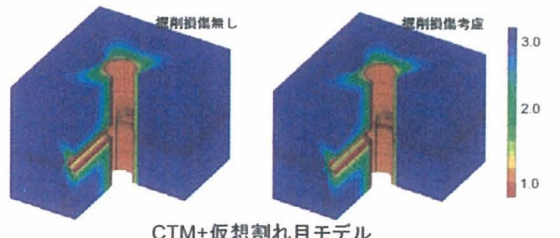
安全率の解析結果は、両モデルとも、立坑および水平坑道のいずれにおいても、初期応力の方向の影響を受けており、立坑では水平坑道方向の要素において、安全率が低下する傾向を示した。また、水平坑道では底盤と側壁において安全率の低い領域が広がっていた。この傾向は、CTM+仮想割れ目モデルで顕著であった。なお、MBC、CTM+仮想割れ目モデルのいずれにおいても、損傷領域を考慮しても安全率への影響はほとんど見られなかった。

(3) 透水係数

立坑下部掘削終了時の透水係数のコンターを図

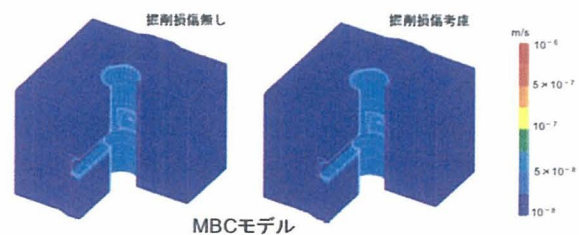


MBCモデル

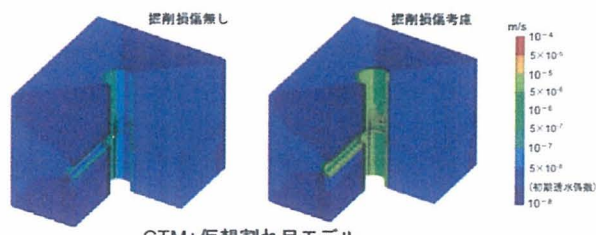


CTM+仮想割れ目モデル

図-12 安全率のコンター

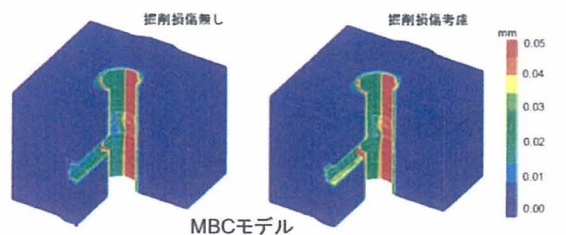


MBCモデル



CTM+仮想割れ目モデル

図-13 透水係数のコンター



MBCモデル

図-14 き裂開口量のコンター

-13に示す。

MBCでは損傷領域を考慮した影響は、透水係数に関して顕著な変化となって現れなかった。図-14に示すように、き裂開口量は損傷領域を考慮した影響が、水平坑道の底盤や接続部近傍に現れているが、き裂開口量の増加は0.01mmオーダーよりも小さいため、

透水係数の変化に与える影響が少ないものと考えられる。

一方、CTM+仮想割れ目モデルでは損傷領域を考慮した影響が現れており、平均透水係数は、ほとんどの損傷領域内で約50倍以上の増加が認められた。これは、新規き裂に作用している垂直応力が、掘削による応力解放によってほとんどなくなった結果、透水性の増大に寄与したと考えられる。

(4) 損傷領域の影響

今回の解析条件での損傷領域を考慮することによる解析結果への影響をまとめて表-2に示す。

損傷領域を考慮した場合の岩盤挙動は、MBCでは考慮しない場合と大差は認められなかったが、CTM+仮想割れ目モデルでは、岩盤変位や透水係数に影響が生じる結果となった。これは、主として①弾性係数へのき裂の影響の程度、②き裂成分の取扱い方の違いによるものと考えられる。

(5) 接続部の影響

接続部から十分離れた断面の変位と比較して5%以上変化する領域を、接続部の影響が坑道に及ぶ範囲と仮に定義して評価した結果を表-3に示す。

表によれば、損傷領域を考慮することにより接続部の影響が広がる場合もあるが、影響範囲はほとんど変わらない。したがって、水平坑道においては立坑壁面より2D (D:立坑掘削径7.3m)以上、立坑においては水平坑道スプリングライン (SL)より1.5d (d:水平坑道代表径3.5m)以上離れていれば、解析的には接続部の影響はないと判断できる。

5. まとめ

き裂の影響を考慮できる二つの解析手法を適用し、坑道接続部における掘削時の岩盤挙動を、損傷領域考慮の有無を含めて3次元解析により検討した。その結果、岩盤挙動に及ぼす影響や程度について以下に示す知見を得た。

- ・岩盤変位や坑道内空変位は、損傷領域考慮の有無に関わらず、MBC解析よりCTM+仮想割れ目モデル解析が大きく予測された。
- ・損傷領域を考慮した場合の岩盤変位や透水係数の変化は、MBC解析よりCTM+仮想割れ目モデル解析の感度が高い。
- ・損傷領域を考慮することによる安全率への影響は、両手法ともほとんど無い。

表-2 損傷領域を考慮した場合の影響

	MBC	CTM+仮想割れ目モデル
岩盤変位	影響なし	影響あり
安全率 ¹⁾	影響なし	影響なし
開口量 ²⁾	影響あり	—
透水係数 ³⁾	殆ど影響なし	影響あり

1)MBC解析では局所安全率

2)MBC解析で出力可能

3)CTM+仮想割れ目モデル解析では、平均透水係数

表-3 接続部の影響範囲

解析手法		MBC		CTM+仮想割れ目モデル	
損傷領域		なし	考慮	なし	考慮
立坑 ¹⁾	水平坑道軸方向 内空変位	1.0d	1.0d	0.6d	1.5d
	水平坑道直交方向 内空変位	1.5d	1.5d	1.5d	1.5d
水平坑道 ²⁾	側壁内空変位	1.5D	1.5D	2.0D	2.0D
	天端沈下	0.5D	0.7D	2.0D	2.0D

1)水平坑道スプリングライン(SL)からの離れを、水平坑道代表径(d=3.5m)の比で表示

2)立坑壁面からの離れを、立坑掘削径(D=7.3m)の比で表示

- ・き裂のモデル化の違いが解析結果に現れる。
- ・水平坑道においては立坑壁面より立坑掘削径の2倍以上、立坑においては水平坑道スプリングラインより水平坑道代表径の1.5倍以上離れていれば、解析的には接続部の影響はない。

本検討の結果、接続部のような3次元的な坑道配置において、力学的には損傷領域の存在による影響は小さいが、透水性については損傷領域の存在により大きな変化が生じる可能性のあることが明らかとなった。今後は、本結果を基本として、原位置における掘削影響試験などを計画・実施し、適切なき裂のモデル化手法を構築していく予定である。

参考文献

- 1) 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—，分冊1 わが国の地質環境，pp.Ⅲ126-Ⅲ142，JNC TN1400 99-021，1999。
- 2) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018，2002。
- 3) Sugihara, K., Matsui, H., Ishijima, F. and Sato, T.: Study on excavation disturbance in the kamaishi mine, Japan, in *Proceedings of the excavation disturbed zone workshop on Designing the excavation disturbed zone for a nuclear repository in hard rock*, International conference on deep geological disposal of radioactive waste, Winnipeg, Manitoba Canada, pp.15-25, 1996。

- 4) 核燃料サイクル開発機構：釜石原位置試験総括報告書，
サイクル機構技術資料，JNC TN7410 99-001，1999.
- 5) Sato, T., Kikuchi, T. and Sugihara, K.: In-situ experiments on
an excavation disturbed zone induced by mechanical
excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine,
central Japan, *Eng. Geol.*, Vol.56, pp.97-108, 2000.
- 6) 吉田秀典，金子岳夫，堀井秀之：高レベル廃棄物処分
坑道・処分孔のMBC解析と掘削影響領域の評価に関する
研究，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論
文集，土木学会，pp.226-230，2001.
- 7) 石井卓，郷家光男，桜井英行，里優，木下直人，菅原
健太郎：仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水
性変化予測手法，土木学会論文集，No.715/III-60，
pp.237-250，2002.
- 8) 中間茂雄，森孝之，郷家光男，青木俊朗，佐藤稔紀：
掘削損傷領域を考慮したMBCおよびクラックテンソル
モデルによる岩盤挙動の予測解析，第34回岩盤力学に
関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp.33-40，
2004.
- 9) 森孝之，森川誠司，田部井和人，岩野圭太，中嶋誠門：
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，サイクル機構技術資料，JNC TJ7400
2005-080，2005.
- 10) 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予測解析，サイクル機構技術資
料，JNC TJ7400 2005-058，2005.
- 11) 郷家光男，多田浩幸，瀬野康弘，中間茂雄，佐藤稔紀：
瑞浪超深地層研究所の研究坑道における掘削損傷領域
を考慮した掘削影響解析，トンネル工学論文集第16巻，
pp.35-45，2006.
- 12) 吉田秀典，堀井秀之：マイクロメカニクスに基づく岩
盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析，土木学会
論文集，No.535，III-34，pp.23-41，1996.
- 13) Oda, M.: An equivalent continuum model for coupled stress
and fluid flow analysis in jointed rock masses, *Water Resour.
Res.*, Vol. 22, No. 13, pp.1845-1856, 1986.
- 14) Oda, M.: An experimental study of the elasticity of mylonite
rock with random cracks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &
Geomech. Abstr.*, Vol. 25, No. 2, pp.59-69, 1982.
- 15) 堀田政國，木下直人，松井裕哉，杉原弘造：坑道底盤
の坑軸方向透水性の計測，第29回岩盤力学に関するシ
ンポジウム講演論文集，土木学会，pp.166~170，1999.
- 16) 前田信行，石原輝行，佐藤稔紀，杉原弘造：き裂観察
による坑道周辺の掘削損傷領域の評価，土木学会第54
回年次学術講演会講演概要集，III-B53，pp.106-107. 1999.
- 17) 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター：地層研
究を科学する，日本原子力研究開発機構，2005.
- 18) 加藤春實：MIZ-1号孔の岩芯を用いた初期応力評価試験，
核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TJ7400
2004-018，2004.
- 19) 山田淳夫，佐藤稔紀，中間茂雄，加藤春實：瑞浪超深
地層研究所を中心とした東濃における深地層の科学的
研究-水圧破碎法による初期応力測定結果と地質構造，
地球惑星科学関連学会，2005年合同大会要旨集，2005.
- 20) 杉田信隆，中島雅之，中村敏明：MIZ-1号孔の岩芯を用
いた室内物理・力学物性試験，核燃料サイクル開発機
構技術資料，JNC TJ7450 2004-002，2004.
- 21) 中間茂雄，中島貴弘，青木俊朗，佐藤稔紀：DH-2号孔
の岩芯を用いた力学特性調査結果，サイクル機構技術
資料，JNC TN7400 2003-003，2003.
- 22) 大津宏康，西山哲，土山富広，中井亮太郎，澤田淳，
山田直之，坂本和彦，内田雅大：我が国の岩盤におけ
る亀裂特性とそのモデル化に関する研究－亀裂モデル
の信頼性評価手法の開発－，サイクル機構技術資料，
JNC TY8400 2001-004，2001.
- 23) 森孝之，森川誠司，田部井和人，岩野圭太：研究坑道
掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析，サ
イクル機構技術資料，JNC TJ7400 2002-007，2002.
- 24) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地
層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りま
とめ－ 一分冊1 深地層の科学的研究－，核燃料サイ
クル開発機構，JNC TN1400 2005-014，2005.