

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

Analysis of rock mass behavior based on MBC and crack tensor model in consideration of Excavation Damaged Zone

中間 茂雄*・森 孝之**・郷家 光男***・青木 俊朗*・佐藤 稔紀*

Shigeo NAKAMA, Takayuki MORI, Mitsuo GOHKE, Toshirou AOKI and Toshinori SATO

In constructing rock structures in deep underground with joints, it is very important how precisely the excavation effect of underground drift can be estimated using limited information obtained from ground surface investigations. And, techniques to estimate the Excavation Disturbed Zone are required for ensuring the stability of drifts and shafts. The Excavation Disturbed Zone is defined as the rock zone where rock properties and conditions have been changed due to the processes induced by excavation, including the Excavation Damaged Zone, Stress Redistribution Zone and Unsaturation Zone. However, none of these analyses considered the Excavation Damaged Zone. In this study, in order to grasp the extent of the Excavation Disturbed Zone, MBC analysis and crack tensor model analysis considering the Excavation Damaged Zone were carried out.

Key words : Excavation Damaged Zone, rock mass behavior, MBC, crack tensor

1. はじめに

地下の岩盤中に坑道などの空洞を掘削すると、き裂の発生・伸展、応力状態の変化あるいは間隙水圧の変化が生じる。この変化により、周辺岩盤の強度特性や変形特性などの力学特性、透水係数などの水理特性あるいは地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。このような変化が生じる領域を「掘削影響領域」と呼ぶ。掘削影響領域は、掘削のダメージにより、岩盤が直接的に損傷を受ける「掘削損傷領域」、岩盤中の間隙水圧が低下する「不飽和領域」および空洞の掘削による応力解放により岩盤中の応力分布が変化する「応力再配分領域」の3つの領域の重ね合わせと考えられる¹⁾(図-1)。ただし、ここでは応力集中により発生する破壊領域は応力再配分領域に含めるものとする。

掘削影響領域に関連する研究は、海外ではスウェーデン、スイス、カナダ、ベルギーなどの地層処分研究開発のための地下研究施設において、掘削影響領域の特性・広がり・発生メカニズムや調査手法に関する研究が実施されている^{例えば 2)3)}。国内では、桜井らが、緩み領域の考え方や計測方法を整理するとともに、掘削工法や物性値別の緩み領域の範囲と物性変化の程度を明らかにしている⁴⁾。核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は、岐阜県の東濃鉱山(堆積岩)や、岩手県の釜石鉱山(結晶質岩)において、掘削影響領域に関する調査研究として掘削影響領域の特性・広が

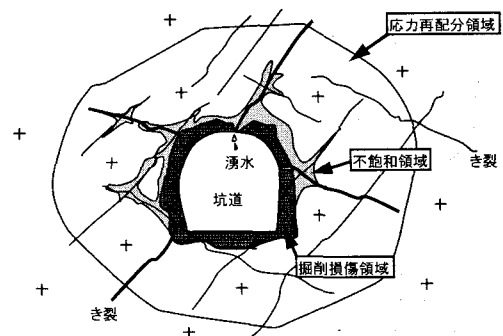


図-1 掘削影響領域の概念図(文献1を一部修正)

* 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所

** 鹿島建設株式会社技術研究所

*** 清水建設株式会社技術研究所

りおよび発生メカニズムに関する調査・研究を実施している(例えば5)6)。

これら掘削影響領域に関する調査研究では、坑道の力学的安定性および掘削影響領域を予測評価する目的で、数値解析が実施されるが、一般的な数値解析では、坑道掘削により応力が解放され、坑道周辺岩盤の応力変化によって応力再配分領域が評価されるのみである。実際の掘削では、発破や機械掘削による直接的なダメージによって掘削損傷領域が形成される。掘削損傷領域の形成は、応力再配分領域、すなわち掘削影響領域全体に影響を及ぼすことから、掘削解析において掘削損傷領域を適切にモデル化することが重要となる。しかし、このような掘削損傷領域を考慮した研究事例はほとんどなく、堆積岩を対象とした東濃鉱山における調査研究において、有限要素法による弾塑性解析によって掘削損傷領域の剛性を低下させた掘削解析が行われているのみである⁶⁾。とくに結晶質岩を対象とする場合、き裂の挙動が重要になってくるものの、き裂の伸展や発生、開口などを考慮に入れた掘削損傷領域のモデル化は行われていない。

そこで、本研究では、サイクル機構が計画している超深地層研究所計画⁷⁾で対象となる結晶質岩(土岐花崗岩)を例として、地表からの調査(深層ボーリング調査など)のデータに基づいて、掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析を実施し、掘削損傷領域のモデル化方法およびこれを考慮することによる解析結果に与える影響について検討を行った。解析の手法としては、東濃鉱山における研究事例に倣い、有限要素法による解析を基本とし、結晶質岩などのき裂性岩盤の挙動を考慮できる解析手法であるMBC(Micro-mechanics Based Continuum model)およびクラックテンソルモデルを用いた。

2. 解析条件

2. 1 解析対象領域および物性

解析対象領域は、岐阜県瑞浪市に位置するサイクル機構の正馬様用地である。この領域では、表層から新第三紀～第四紀の瀬戸層群、新第三紀中新世の瑞浪層群が層厚数10～100m程度堆積し、それ以深は基盤となる白亜紀後期の土岐花崗岩より構成されている。解析は、この領域の深度500mに研究坑道を掘削することを想定した。掘削坑道は円形立坑(掘削径7.3m)および幌形の横坑(高さ3m×幅3m)とした。

解析対象領域では、1,000m級の深層ボーリング調査を実施し、ボーリング孔に見られる地質の状況の把握、ボーリングコアを用いた室内試験による岩盤の物理・力学物性の把握、水圧破砕法、コア法による初期応力状態の把握がなされている。解析対象地点の諸物性を表-1に、初期応力状態を図-2に示す。また、ボーリング孔に見られるき裂の状態から抽出した、深度500m近傍のき裂卓越方向を図-3に、き裂の特性値とし

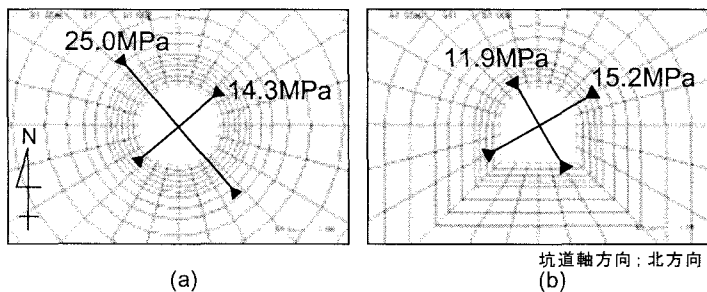


図-2 初期応力状態 (a)立坑2次元断面、(b)横坑2次元断面

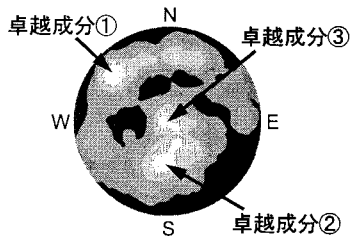


図-3 き裂方向の密度コンター図 (シュミットネット下半球投影)

表-1 基質部の岩盤物性値

弾性係数	49.4GPa
ポアソン比	0.34
単位体積重量	26.3kN/m ³
初期透水係数	6.5×10^{-10} m/s

表-2 き裂の特性値

	卓越成分①	卓越成分②	卓越成分③
走向・傾斜	N41E75SE	N87W51NE	NS4E
き裂間隔	0.20m	0.30m	3.45m
き裂有効長	0.35m	0.44m	1.71m

て、走向・傾斜、き裂間隔、き裂有効長を表－2に示す。なお、き裂有効長については、既存の大規模地下空洞やダムサイトなど様々なスケールで収集されたき裂トレース長とき裂密度との関係⁸⁾をもとに、ボーリング孔に見られるき裂密度から算出した。

2. 2 掘削損傷領域のモデル化

掘削損傷領域のモデル化に際しては、地表からの調査結果のみでは設定することが困難なパラメータについては過去の坑道を利用した調査結果を参照した。サイクル機構は、坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響を把握するために、釜石鉱山および東濃鉱山における掘削影響試験において、掘削損傷領域の幅は、発破掘削の場合約80cm、機械掘削の場合約30cmと評価しており¹⁾、本解析では、この2つの掘削損傷領域の幅を採用した。また、掘削損傷領域は、弾性波屈折法探査による弾性波速度の変化や孔内載荷試験の結果などから、弾性係数が50～25%にまで低下している⁶⁾。さらに、手塚らによると、掘削損傷領域に発生するき裂は、既存のき裂の伸展および新規のき裂の発生あるいはその両方が想定される⁹⁾。以上のことを勘案し、掘削損傷領域を表3に示すようなパラメータでモデル化した。解析手順は以下のとおりとした。すなわち、①解析モデル、初期条件（物性、応力）を設定、②応力解放率40%で全断面掘削、③掘削損傷領域の設定（領域物性の変更）、④残りの応力解放率60%で全断面掘削、である。

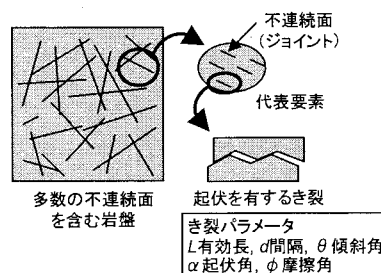
表－3 掘削損傷領域のモデル

掘削損傷領域の幅	80cm, 30cm
掘削損傷領域の剛性	健岩部の50%, 25%
き裂発生のパターン	既存き裂伸展モデル、新規き裂発生モデル

3. 解析

3. 1 MBCによる解析

MBCは吉田・堀井らにより提案された、微視的構造要素の存在やその発生・成長に支配された材料に対する連続体理論である¹⁰⁾¹¹⁾。岩盤にマイクロメカニクスに基づく連続体理論を適用する場合、微視構造要素は個々のき裂である。割れ目を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換えるとき、まず、図－4に示すような割れ目を多数有する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。ここで、代表要素は微視構造要素に比べて十分大きく、かつ物体の代表要素に比べて十分小さい領域とする。その代表要素における平均応力と平均ひずみの関係、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。



図－4 MBCの概要

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega^m} (\Delta [u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta [u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) ds \quad (1)$$

ここで、 V は代表要素の体積、 D_{ijkl}^R は岩盤基質部のコンプライアンステンソル、 Ω^m は代表要素 V 中の m 番目の亀裂、 $n_i^{(m)}$ はその亀裂の単位法線ベクトル、そして $[u_i^{(m)}]$ はその亀裂の相対変位量である。

また、岩盤内の圧縮応力場での亀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－4のように起伏を有する亀裂を考え、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。したがって、本解析モデルでは、亀裂がすべり・開口するまでは岩盤基質部の剛性を持つ等方弾性体であるが、すべり・開口後は亀裂の変形により剛性の低下や亀裂間の相互干渉が生じるなど非常に複雑な挙動となる。すなわち、掘削損傷領域の剛性を指定したパラメータ設定はできない。

掘削損傷領域のモデル化においては、既存のき裂状態から変化したき裂群について図－4に示す各パラメータを設定する必要がある。しかし、MBCには上述のような特徴があることから、パラメータを変化させた感度解析を行った。

(1) 感度解析

MBCにおいて、掘削損傷領域内のき裂に関するパラメータを変化させ、個々のパラメータが解析結果に及ぼす影響を把握するためのMBCによる感度解析を実施した。

感度解析は、深度500mの立坑を対象として、図-2(a)に示す最大主応力(25.0MPa)と最小主応力(14.3MPa)の平均値19.7MPaの等方等圧とした。岩盤のき裂は、簡単のため、東西方向のみとし、き裂の長さや密度などは、表-2に示す卓越き裂①を参照した。感度解析の条件として、弾性係数、き裂密度、き裂方向、起伏角、摩擦角の各パラメータを変化させた。表-4に各パラメータによる壁面近傍のき裂開口量の最大・最小値、その開口量差およびき裂開口に対する影響を示す。まず、き裂の開口条件はき裂面の摩擦角とその応力状態で決定されるため、直接的に影響を及ぼすのはき裂の摩擦角のみである。また、一度き裂が開くと、岩盤基質部の弾性係数 E が小さくなるほど、またき裂の密度 $1/d$ (d : き裂間隔)が大きくなるほどき裂を含んだ岩盤全体の系としてのコンプライアンスが大きくなるため、系としての剛性は小さくなり、き裂の開口量は大きくなる結果となった。したがって、掘削損傷領域の影響度の高いものとしては、岩盤基質部の弾性係数 E とき裂密度 $1/d$ であると考えられる。ただし、岩盤基質部の弾性係数 E は岩盤基質のみならず、き裂の剛性にも影響を与えるパラメータであること、MBCは岩盤基質部の破壊は考慮せず、き裂の破壊のみで岩盤挙動を表現するモデルであることから、掘削損傷領域を考慮した影響解析の検討に用いるパラメータとしては亀裂密度 $1/d$ が最も適当であると考えた。

表-4 各感度パラメータでのき裂の開口量

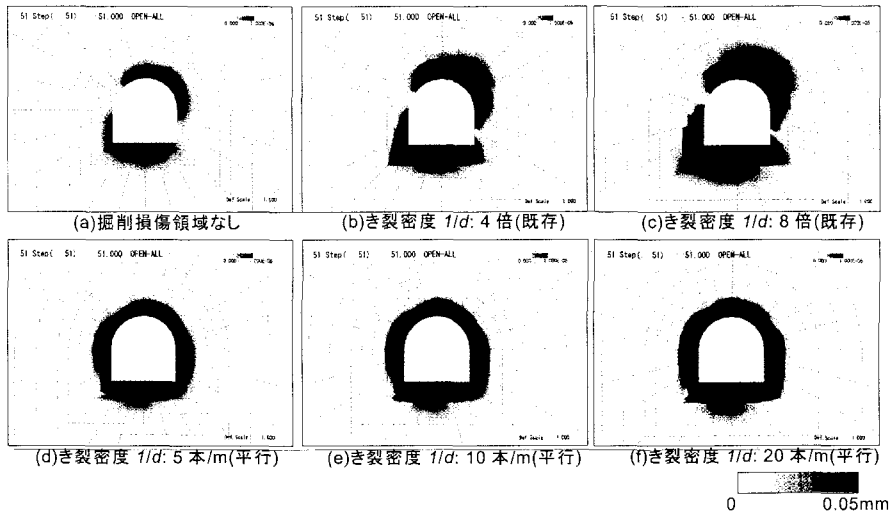
パラメータ	壁面近傍(立坑北側)のき裂の開口量			考察 き裂開口に対する影響
	①最大値	②最小値	開口量差 (①-②)	
岩盤基質部の弾性係数 E	0.34mm ($E/E_0=25\%$)	0.11mm ($E/E_0=100\%$)	0.23mm	小さくなると、き裂開口量は大きくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の密度 $1/d$	0.49mm ($1/d$: 8倍)	0.11mm ($1/d$: 1倍)	0.38mm	大きくなると、き裂開口量は大きくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の起伏角 α	0.11mm ($\alpha=20^\circ$)	0.02mm ($\alpha=5^\circ$)	0.09mm	小さくなると、き裂開口量は小さくなる*。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の摩擦角 ϕ	0.14mm ($\phi=20^\circ$)	0.14mm ($\phi=35^\circ$)	0.03mm	小さくなると、き裂開口量は小さくなる*。 き裂は開口しやすくなる。

* 今回、感度解析を実施したパラメータの設定範囲ではの意

(2) 解析結果

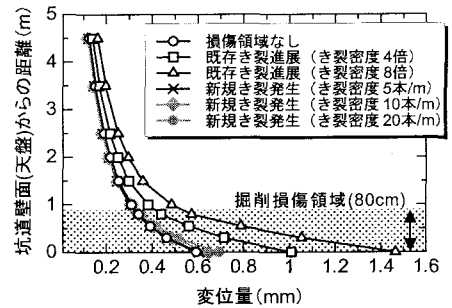
感度解析で影響が大きいと考えられたき裂密度 $1/d$ を変化させた解析を行った。掘削損傷領域の特性の違いをみるため、既存のき裂が伸展する場合および壁面平行方向に新規のき裂が発生する場合の2種類の解析を行った。また、掘削損傷領域の広がり(80cmと30cm)を変化させた解析を行った。なお、解析条件は無支保とした。

解析の結果として得られた横坑断面のき裂開口量分布図を図-5に示す。図-5(a)は掘削損傷領域が無い場合の解析結果である。図-5(b)(c)は、幅80cmの掘削損傷領域を設定し、掘削損傷により領域内の既存き裂が伸展し、き裂密度が4倍および8倍となった場合の解析結果である。図に示すように、き裂開口量の分布は掘削損傷領域を考慮しない場合の分布形状(右上部、左下部にき裂開口部が卓越)を維持したまま、その開口領域を拡大させ、その影響は掘削損傷領域外にまで及んでいる。図-5(d)(e)(f)は、幅80cmの掘削損傷領域内のき裂として、坑道壁面に平行なき裂を設定し、そのき裂密度を5本/m、10本/m、20本/mに変化させた場合の解析結果(開口量分布)である。図-5(d)より、壁面に平行なき裂による掘削損傷領域を解析上考慮すると、坑道壁面全周にわたってき裂開口部が分布しているのがわかる。図-5(e)(f)に示すように、壁面に平行なき裂の密度が増大による開口量分布の変化はごく僅かであり、その影響は掘削損傷領域外に及んでいない。



図－５ MBC による解析結果（き裂開口量分布図；き裂密度の影響）

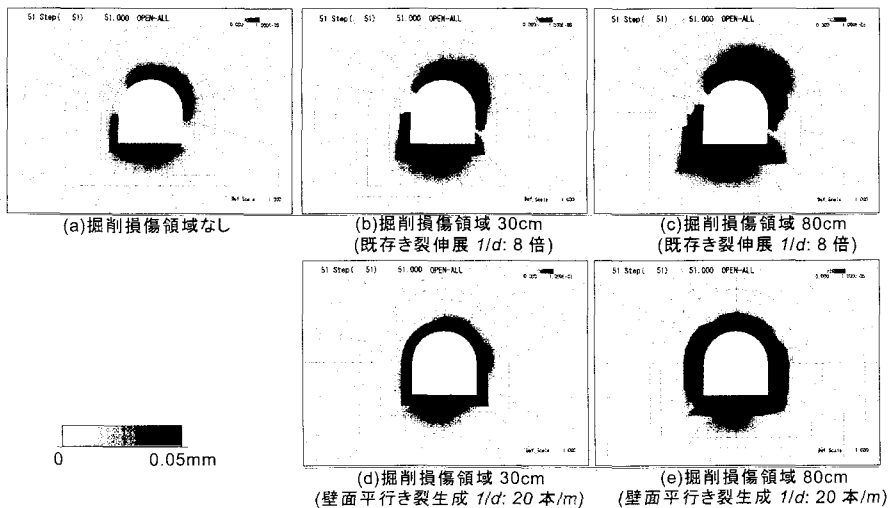
図－６は既存き裂伸展および新規き裂発生の2つのき裂発生パターンに対して、き裂密度を変化させた解析で得られた坑道天盤直上の変位量分布図である。変位量分布からも掘削損傷領域のき裂として既存き裂伸展モデルの方が掘削損傷領域および領域外への影響が大きいことがわかる。また、新規き裂発生モデルは、掘削損傷領域が無い場合とほぼ同じ結果であることがわかる。



図－６ MBC による解析結果
（坑道天盤の変位量分布）

図－７は掘削損傷領域の幅を30cmおよび80cmとした場合の解析結果として、横坑断面のき裂開口量分布を示したものである。図－７(a)は掘削損傷領域が無い場合、図－７(b)(c)は掘削

損傷により領域内の既存き裂が伸展したケース（幅30cmおよび80cm）、図－７(d)(e)は掘削により坑道壁面に平行なき裂が生成したケース（幅30cmおよび80cm）のき裂開口量分布である。解析結果より、掘削損傷領域の幅が広がると、基本的にそのき裂開口量分布も多くなる。ただし、既存き裂伸展モデルでは、掘削損



図－７ MBC による解析結果（き裂開口量分布図、掘削損傷領域の幅の影響）

傷領域外にも影響が及ぶものの、新規き裂生成モデルでは、掘削損傷領域外にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

3. 2 クラックテンソルモデルによる解析

小田により提案されたクラックテンソルモデルは、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る¹²⁾¹³⁾。この解析手法においては、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、巨視的な応力とひずみの関係を求め、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。巨視的な応力とひずみの関係は、き裂の寸法と方向が統計的な意味で独立している場合、基質部に生じるひずみとき裂に生じるひずみの和から次式のように定式化される。

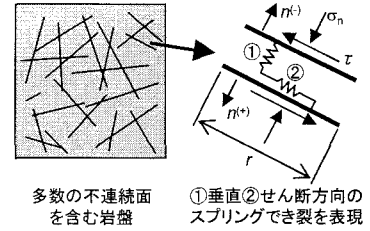


図-8 クラックテンソルモデルの概要

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl}) \sigma_{kl} = \left[\frac{1}{E} \{ (1+\nu) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu \delta_{ij} \delta_{kl} \} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{jl} F_{ik}) \right] \sigma_{kl} \quad (2)$$

ここに、 M_{ijkl} は基質部のコンプライアンステンソル、 C_{ijkl} は割れ目による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} は割れ目の方向と寸法から定められる幾何学特性を表す2階と4階のクラックテンソル、 h と g はき裂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、クラックテンソルはき裂の寸法・密度を表す量 F_0 と亀裂の方向から定まる構造テンソル N_{ij} および N_{ijkl} とから次式のように求められる。

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

すなわち、クラックテンソルモデルにより掘削損傷領域をモデル化するには、新規にき裂が発生する場合および既存き裂が進展する場合それぞれについて、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) を設定すればよい。

本解析ではクラックテンソルモデルを用いて坑道掘削時の周辺岩盤の応力を求めた後、その応力と以下に説明する仮想割れ目モデルを用いて透水性変化解析を行い、水理学的な掘削影響の変化について検討した。

(1) 仮想割れ目モデル

石井らは、岩盤の透水性は仮想的な割れ目の方向分布と各割れ目の透水性から決定されると考えて、仮想割れ目モデルによる岩盤の透水テンソルを定式化した¹⁴⁾。2次元解析の場合の透水テンソル k_{ij} は、次式の様になる。

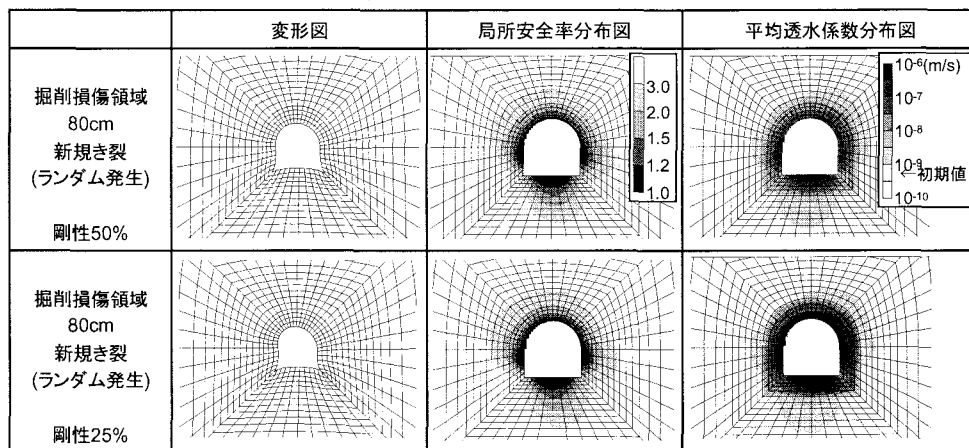
$$k_{ij} = \rho \sum_f l e_f k_f (\delta_{ij} - n_i n_j) D_f \quad (4)$$

ここで、 ρ は割れ目の面積密度、 l はトレース長、 e_f は水理学的開口幅、 δ_{ij} は Kronecher のデルタ、 D_f はトレースの法線ベクトル $\mathbf{n}$ の方向に関する相対頻度である。また、 k_f は割れ目の透水係数であり、割れ目に作用する垂直応力 σ_n によって変化する。坑道掘削後の岩盤の応力と式(4)により、周辺岩盤の平均透水係数を求めて、これを岩盤の初期透水係数 (掘削前の透水係数) で除することにより、周辺岩盤の透水係数の変化率を算定することができる。

(2) 解析結果

クラックテンソルモデルによる解析については、掘削損傷領域の剛性が岩盤の剛性の 50%および 25%となるようにき裂をモデル化した解析を行った。掘削損傷領域の幅は 80cm、掘削損傷領域のき裂は、新規き裂がランダムな方向に発生するモデルとし、無支保条件で解析した。解析結果を図-9 示す。坑道の変形については、坑道の底盤部で最大変位が発生しており、剛性が 50%の場合 1.91mm、25%の場合 2.52mm となっ

た。掘削損傷領域を考慮しなかった場合は1.48mmであり、このときに比べ、29～70%変位が増大している。その他、き裂の発生パターンを変えた解析では、変位の差はほとんど無かった。局所安全率分布については、2つの剛性の解析結果からもわかるように、その変化はほとんど見られなかった。これはいずれの解析ケースにおいても、掘削損傷領域のほとんどの要素の局所安全率が、引張側のモードで決まっていることから、せん断強度の低下の影響を受けていないことがその要因と考えられる。平均透水係数分布については、掘削損傷領域の剛性の低下に伴い、透水係数の低下領域が大きくなっている。透水係数の変化率としては、掘削損傷領域を考慮しない場合は掘削前の500倍以下であるのに対し、掘削損傷領域を考慮した場合、掘削前の800～1500倍程度と相当大きくなっている。



図－9 クラックテンソルモデルによる解析結果
(変形図，局所安全率分布図，平均透水係数分布図)

4. まとめ

解析の結果をまとめると以下のようなものである。

(1) MBC による解析

- ・ MBC で使用する岩盤やき裂のパラメータについて感度解析を実施し、各パラメータが解析結果に及ぼす影響を感度解析により検証し、き裂密度と岩盤基質部の弾性係数の影響度が高いことがわかった。
- ・ 掘削損傷領域を考慮した MBC による解析の結果、設定した掘削損傷領域のき裂密度を大きくするほど、またその領域を広げるほど、き裂の開口量は増大することがわかった。
- ・ 掘削損傷領域内のき裂状態に関して、既存き裂が伸展する場合と、新たに坑道壁面平行にき裂が発生する場合について解析を実施した結果、前者のケースは後者のケースに比べて、設定した掘削損傷領域の外へより影響が及ぶ傾向が確認された。

(2) クラックテンソルモデルによる解析

- ・ 掘削損傷領域を考慮したクラックテンソル解析の結果、掘削損傷領域を考慮しない場合に比べ、壁面変位は増加するものの、局所安全率分布に変化はほとんど現れなかった。
- ・ 掘削損傷領域を考慮した仮想割目モデルによる透水性変化解析の結果、掘削損傷領域を考慮しない場合に比べ、透水係数の最大増加率は大幅に増加した。

以上の解析によって得られた結果から以下のことが言える。

- ・ 掘削損傷領域をモデル化する場合に解析上とくに重要となるパラメータはき裂密度である。したがって、今後坑道などの地下空洞を構築し、掘削損傷領域を定量的に評価する際は、き裂密度に関連するき裂の長さや間隔などといったパラメータについて調査することが重要となる。

- ・ 掘削によって発生すると考えられる掘削損傷領域のき裂について、既存き裂を伸展させると、掘削影響領域が大きくなる。掘削影響領域をできる限り小さくするためには、既存き裂の伸展をできる限り抑える工法を採用することが望ましいことが解析上明らかとなった。
- ・ 本研究による解析的検討により、掘削損傷領域のモデル化手法および解析手法を構築し、MBC およびクラックテンソルモデルを用いた掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析による地下空洞掘削時の周辺岩盤の挙動についての詳細検討が可能ことが示された。

今後は、超深地層研究所計画において、地下 1,000m までの坑道を掘削し、坑道を利用した岩盤力学調査をはじめとする様々な調査・研究が行われる予定である。また、研究坑道の本格掘削に先立ち、地表からの調査データに基づいて、立坑ならびに水平坑道の設置位置において、本研究で示した掘削損傷領域を考慮した解析を行い、研究坑道掘削による坑道周辺岩盤の挙動予測を実施するとともに、坑道掘削後の坑道周辺岩盤の調査により、本解析手法の妥当性の検証および高精度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：我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―、サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-021, 1999.
- 2) OECD/NEA Workshop: Excavation Response in Deep Radioactive Waste Repositories; Implications for Engineering Design and Safety Performance, Winnipeg, OECD, Paris, 1989.
- 3) Excavation Disturbed Zone Workshop: Designing the Excavation Disturbed Zone for a Nuclear Repository in Hard Rock, International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Winnipeg, Manitoba Canada, 1996.
- 4) 桜井春輔：トンネル掘削によるゆみ領域の研究，トンネルと地下，14，pp.35-41, 1983.
- 5) Sato,T., et al.: Geoscientific Study at the Tono Mine and the Kamaishi in Japan, Proc. of 8th ISRM Congress, pp.47-51, 1995.
- 6) Sato,T., et al.: In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, 56, pp97-108, 2000.
- 7) 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.
- 8) 大津宏康ほか：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，サイクル機構技術資料（共同研究報告書；京都大学），JNC TY8400 2001-004, 2001.
- 9) 手塚昌信ほか：発破による爆破点近傍の岩盤の損傷に関する一考察，土木学会論文集，No.602/Ⅲ-7, pp.139-144.
- 10) 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.
- 11) Yoshida, H. and Horii, H.: Micromechanics-based continuum model for a jointed rock mass and excavation analysis of a large-scale cavern, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.41, Issue1, pp.119-145, 2004
- 12) 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.59-68, 1988.
- 13) 山辺正ほか：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，No.382/Ⅲ-7, pp.121-130, 1987.
- 14) 石井卓ほか：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.