

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

MBC ANALYSIS OF DISPOSAL TUNNEL FOR HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE AND STUDY ON THE EVALUATION OF THE AREA AFFECTED BY EXCAVATION

吉田秀典*, 金子岳夫**, 堀井秀之††

Hidenori YOSHIDA, Takeo KANEKO and Hideyuki HORII

Since the disposal institution of high-level radioactive waste is composed of various underground structures, a geological environment is expected to be changed by the construction of the institution. It is important to grasp the geological environment accurately during and after the construction. Thus, in this article, the change of the environment around a disposal tunnel is discussed with paying attention to joints in a rock mass through analytical approaches. As a result, the mechanical behaviors and permeability of the rock mass are strongly affected by the direction of initial stress, the density of joints, etc.

Key Words: jointed rock mass, nuclear waste, joint deformation, permeability

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分については、地下の安定な地層中に長期にわたり閉じ込めておく、いわゆる地層処分がスタンダードになるつつある。地層処分の利点としては、多重バリアである人工バリアと天然バリアの組み合わせによる核種移行の抑制ということが挙げられる。天然バリアの長所としては、岩盤自体の核種吸着能力が高い、地下水の移動が緩慢であることなどが挙げられるが、処分場施設は、多岐にわたる地下空間（アクセス坑道、主要坑道など）が建設されるため、施設の建設前後において、地盤環境が変化する可能性もある。万が一に備え、核種が最終バリアである地下水に漏洩することも想定し、こうした地下空間の掘削に伴う地盤環境の変化の程度も予測しておく必要がある^[1]。

しかしながら、既存の工事実績を遥かに上回る深度（500m～1000m）、多岐に渡る処分坑道が建設されるなど、これまでの施工とは異なる点もいくつか存在する。従来の施工実績が存在しないため、処分施設の設計にあたっては、その評価に困難が伴うものと思われる。岩盤が天然バリアとしての機能を果たすか否かを判断するためには、より精緻に処分施設建設後の地盤環境を予測しておくことが強く望まれる。とりわけ地盤の透水性に関しては、注意を払う必要がある。施工実績の乏しい条件の下でより信頼性の高い予測を行なうためには、地下空間の掘削を精度よく再現でき、かつ、不連続面群の変形なども表現できる解析手法による解析的アプローチが必要となる。そこで本研究では、地下空洞掘削解析として実績のあるMBC解析を処分坑道および処分孔の掘削解析に採用し、掘削に伴う周辺地盤の緩みと、それに伴って変化するものと思われる地盤の透水性の変化について、解析的検討を通して議論を行う。

*正会員 博士（工学） 香川大学助教授 工学部 安全システム建設工学科

**正会員 修士（工学） 東京電力株式会社建設部・東京大学派遣

††正会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

2 MBCモデルの概要

トンネルや地下空洞の建設において、掘削の対象となる岩盤が比較的硬い部類に属する場合、そのトンネルおよび地下空洞周辺の岩盤の挙動は、岩盤中に包含されるジョイントに代表される不連続面の存在に、少なからず影響を受ける。この時の岩盤挙動の支配的なメカニズムは、地山応力解放により生ずる不連続面群の変形であることが知られている。したがって、空洞周辺岩盤の変形予測、さらに支保の設計などを合理的に行なうためには、こうした不連続面群の挙動を解析に反映させる必要がある。

しかしながら、我が国の地盤環境においては、岩盤内には多くの不連続面群が存在し、それらを個別に評価・モデル化し、数値解析手法に取り込む事はほとんど不可能に近い。そこで著者らは、空洞掘削に伴い生ずる不連続面群のせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的なメカニズムと捉え、不連続面群の変形挙動を考慮に入れることができる空洞掘削解析手法（マイクロメカニクスに基づく連続体解析、以降、MBC解析と呼ぶ）を開発している。詳細は文献[2]を参照されたい。

MBC解析の特徴は、個々の不連続面群の挙動を捉えた連続体解析手法であり、卓越する不連続面群の走向・傾斜やジョイントの平均間隔等の情報を直接入力データとして解析に反映することが出来ること、さらに解析結果として、その卓越する不連続面群の開口・せん断変位の空間分布が得られるということである。この時、考慮に入れるべき不連続面群のセットは幾つであっても構わない。この手法を用いて、東京電力塩原発電所^[2]、東京電力葛野川発電所の地下発電所掘削に先行する模擬空洞^[3]および本体空洞^[4]、関西電力大河内発電所^[5]の地下空洞掘削の解析が行ったが、いずれの解析結果も計測値と比較して妥当なものとなっている。

3 高レベル廃棄物処分坑道および処分孔のMBC解析

(1) 解析概要

処分場の配置については、敷地条件（地形、敷地の形状、面積）や初期地圧、割れ目の卓越方向、広域地下水流動（流速、流向）などの地盤環境条件を考慮する必要がある。本研究では、処分坑道および処分孔の掘削問題を取り上げ、割れ目系（ジョイント）が掘削にどのような影響をもたらすか、また、処分坑道および処分孔掘削に伴い生じる割れ目系の変形によって、地盤の透水性がどの程度変化するかについて、解析的な検討を加える。

処分坑道は縦置き方式とし、図-1に示されるような規模・形状を仮定した。掘削については、まず処分坑道（馬蹄形部分）を掘削し、それから、処分孔部分を2段階に渡って掘下げるものとした。

本解析では、処分坑道が土被り1000m程度の深部に位置すると仮定し、また、岩盤の単位体積密度を 2.5g/cm^3 とした。初期地圧としては、土被りに単位体積密度を乗じた程度とし、最大および最小主応力をそれぞれ29.4MPa、24.5MPaとした。初期地圧の方向としては、最大主応力の方向が水平より0度（case1）、および水平より時計回りに30度（case2）の2種類とした。解析で考慮する卓越ジョイントは、その走向が坑道とほぼ平行な2種類（左右60度落ち）とし、それらの物性パラメータを表-1のように設定した。尚、case2については、左落ち60度のジョイントのみ、平均間隔を密（0.5m）にしたケース（case3）を追加した。

また、卓越ジョイントを除いた基質岩盤の弾性係数を19.6MPa、ポアソン比を0.25とした。解析は全て2次元平面ひずみの条件下で行った。

表-1 ジョイントの物性パラメータ

傾斜	右落ち60度	左落ち60度
走行	空洞軸に平行	空洞軸に平行
平均間隔	1.0 m	1.0 or 0.5 m
有効寸法	2.5 m	2.5 m
摩擦角度	30 度	30 度
起伏角度	10 度	10 度

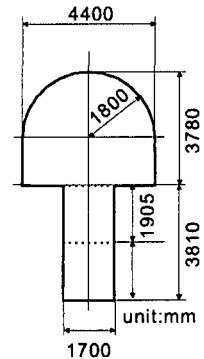


図-1 処分坑道の概要

(2) 解析結果および考察

岩盤の水利特性などを考えるにあたっては、初期の亀裂群の存在による影響だけでなく、掘削中にジョイントが変形し、それに伴って透水性の高い領域が新たに形成される可能性が高い。そこでジョイントの変形に着目し、各掘削段階ごとに、初期地圧の方向およびジョイントの密度と、ジョイントの変形量および岩盤の透水係数（変化分）との関係について考察する。

a) ジョイントの開口変位

MBC 解析の大きな特徴としてジョイントの変形量（せん断変形および開口変形）を算出できることが挙げられ、これよりジョイントの変形に支配される岩盤挙動を的確に判断し得るものとする。本解析では、2 セットのジョイントを考慮しているため、解析結果として両セットの開口変位分布がそれぞれ得られる。

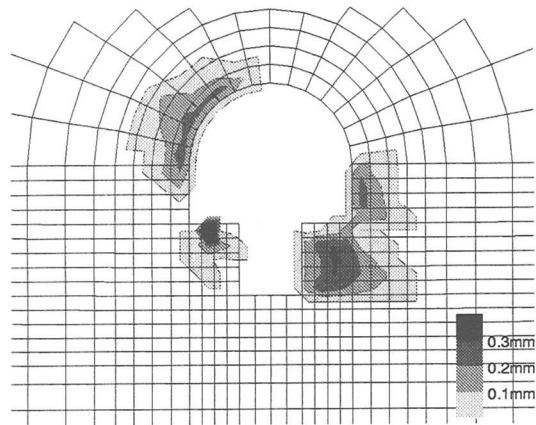
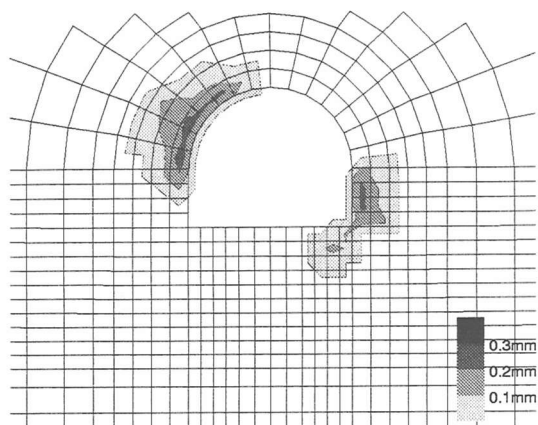


図-2 開口変位分布 (case1, 左落ち, 第1ステップ) 図-3 開口変位分布 (case1, 左落ち, 第2ステップ)

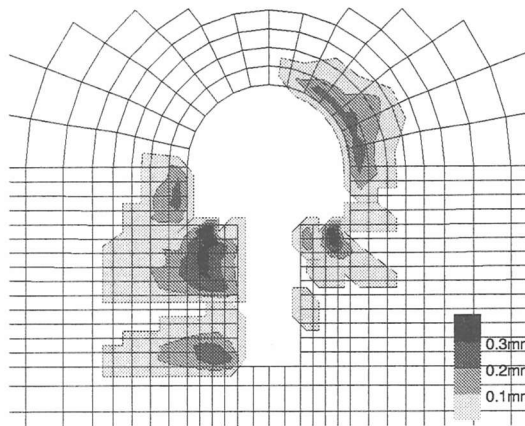
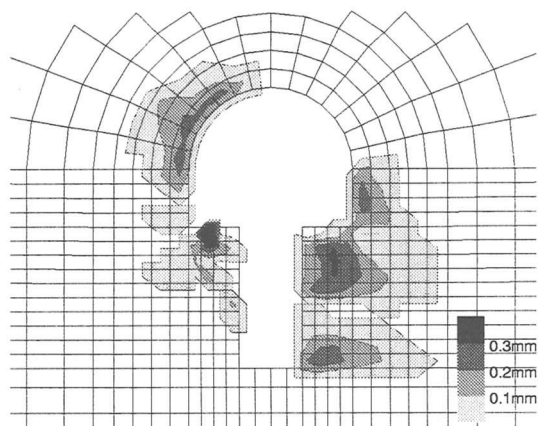


図-4 開口変位分布 (case1, 左落ち, 第3ステップ) 図-5 開口変位分布 (case1, 右落ち, 第3ステップ)

まず、図-2から図-4に、case1における各掘削段階ごとの左落ちジョイントの開口変位分布を示す。ジョイントが坑道周辺部において変形しているが、掘削ボリュームの大きい第1ステップより、処分孔の掘削時のほうが、ジョイントの変形領域が大きく、さらにその変形量も大きいことが分かる。特に隅角部付近で変形が大きくなっている。参考として、全断面掘削時の右落ちのジョイントの開口変位分布を図-5に示す。初期地圧、ジョイントの幾何学的および力学的条件に関して左右対称問題であるため、図-5は図-4と左右対称となっている（等高線処理において、やや違いが見られるが結果は対称である）。

次に、初期地圧とジョイントの変形量との関係を考察するために、case2における掘削終了時の左落ちジョ

イントの開口変位分布を図-6に示す。この場合、左落ちジョイントの傾斜は、初期地圧の最小主応力方向と一致するため、case1より変形しやすい。図-4と比べると、左斜め上、あるいは右斜め下に向かって変形の領域が大きくなっている。これは、初期地圧の方向とジョイントの幾何学的条件の組合わせによって、岩盤の変形が異なることを示している。

最後に、ジョイントの密度とジョイントの変形量との関係を考察するために、case2と同条件で、左落ちのジョイントの平均間隔のみを0.5mにした場合(case3)の結果を図-7に示す。密度が増すことで変形量が大きくなっている箇所があるが、変形領域そのものについては、図-6とそれほど差がない。密度をさらに増すと、顕著な差が出るものと思われる。

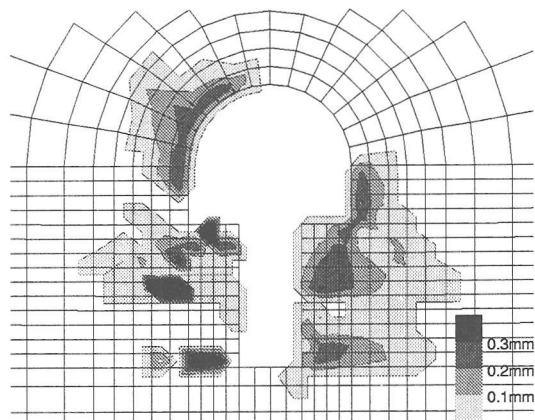
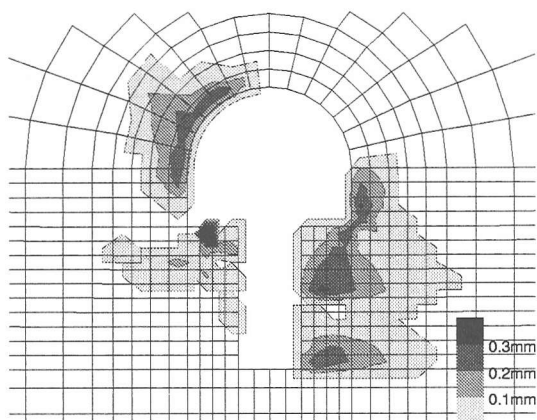


図-6 開口変位分布 (case2, 左落ち, 第3ステップ) 図-7 開口変位分布 (case3, 左落ち, 第3ステップ)

b) 透水係数の変化

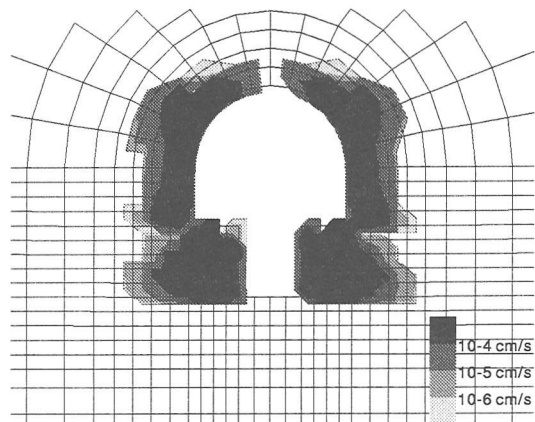
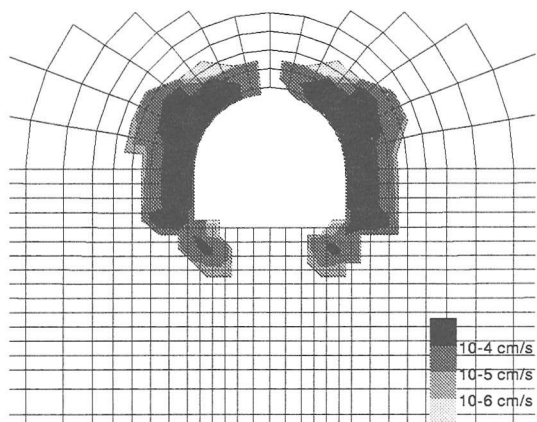


図-8 透水係数の増分 (case1, 第1ステップ)

図-9 透水係数の増分 (case1, 第2ステップ)

本研究では、ジョイントの変形に伴う透水係数の変化分が、ジョイントの開口変位量の三乗則に従うものと仮定した。ただし、2つのジョイントセットの開口変位量から計算される透水係数は、ジョイントの幾何学的分布を考慮せず、単純の為に両者の線形和で表すものとする。まず、case1における各掘削ステップにおける透水係数の増分を、図-8から図-10に示す。左右対称問題となっているため、空洞断面に対して、左右対称の透水係数増分分布を示している。透水係数の増分が 10^{-4}cm/s を超える領域が空洞周辺に広がっている。特に、処分孔を掘り下げた際の掘削隅角部分において透水係数増分が大きくなっていることが分かる。

次に、case2の掘削終了時における透水係数の増分を図-11に示す。左落ちジョイントの変形領域の拡大に

対応して、図-10よりも透水係数が大きくなった領域もやや拡大している。また、左右の両ジョイントセットが変形している空洞周辺において、透水係数が増大が著しい。図-12はcase3の結果であるが、case2よりも透水係数の増大した領域が、処分孔の左側の領域に際だっている。これは、図-6と図-7を比較して分かる通り、ジョイントの密度の増大に伴いジョイントの変形領域も拡大していることに対応している。

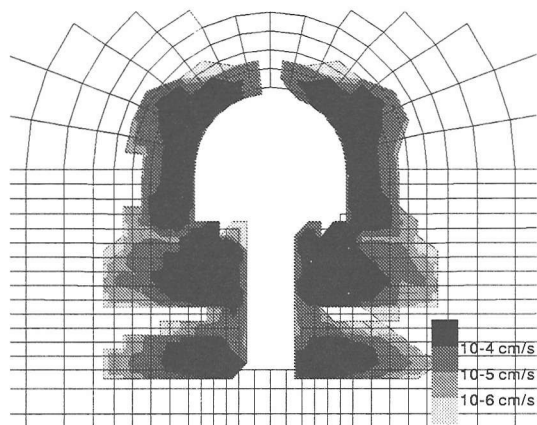


図-10 透水係数の増分 (case1, 第3ステップ)

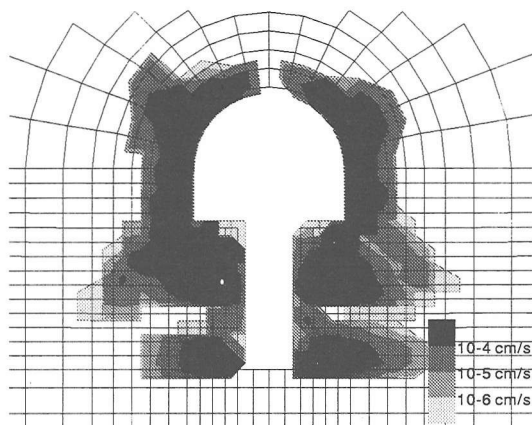


図-11 透水係数の増分 (case2, 第3ステップ)

4 まとめ

本解析より、処分坑道および処分孔の掘削に際して、初期地圧の方向やジョイントの密度などがジョイントの変形に、ひいては岩盤の透水係数に大きな影響を与えることが判明した。また、処分孔を掘り下げる際にジョイントの変形領域がかなり大きくなることが分かった。これは、岩盤に内在する不連続面（ジョイントなど）が、空洞周辺に限られているとは言え、処分坑道／処分孔の掘削に伴って変形し、それにとまって種々の地盤環境、例えば岩盤の水利特性などが変化する可能性を示唆している。ただし今回の解析は、2次元平面ひずみの条件下で行なっていること、また、透水係数増分を2つのジョイントセットの開口変位量から計算される線形和としていることなど、解析設定を単純化しているため、実際とはやや異なることが予想される。したがって今後は、各種パラメータの感度解析や3次元解析を行ない、より詳細な検討を加える必要がある。

参考文献

- [1] (財)電力中央研究所編：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術。
- [2] 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理論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。
- [3] Yoshida, H., Horii, H. and Uno, H.: Micromechanics-Based Continuum Theory for Jointed Rock Mass and Analysis of Large-Scale Cavern Excavation, *Proceedings of Eighth International Congress on Rock Mechanics*, pp.689-692, 1995.
- [4] 吉田秀典，堀井秀之：地盤材料に対するマイクロメカニクスに基づく連続体モデル，応用力学論文集，Vol.1，pp.527-536，1998。
- [5] 吉田秀典，堀井秀之，打田靖夫：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルによる大河内発電所地下発電所空洞掘削の解析と計測値との比較，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.39-56，1996。

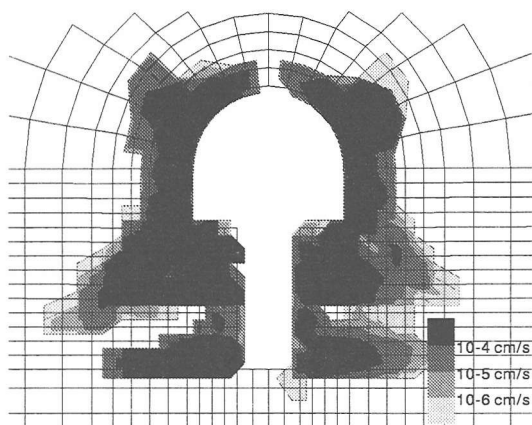


図-12 透水係数の増分 (case3, 第3ステップ)