

# MB C解析に基づく大深度トンネル支保設計と トンネル併設時の影響検討

## TUNNEL DESIGN METHOD IN DEEP UNDERGROUND WITH MBC MODEL AND EFFECT OF DISTANCE BETWEEN TWO TUNNELS

金子岳夫\*・堀井秀之\*\*・吉田秀典\*\*\*  
Takeo KANEKO, Hideyuki HORII and Hidenori YOSHIDA

For the disposal of high-level radio active waste, repository in deep underground has been considered. To design deep underground structure without any experience, it is necessary to employ a numerical method that can reproduce the governing phenomenon. In this study, MBC (micromechanics-based continuum model) that can reproduce sliding and opening of joints due to stress relaxation during an excavation is adopted, and a new design method is proposed. After a trial design it is shown that a lining thickness is determined for different values of joint spacing and tunnel depth. Then effect of distance between two tunnels is considered.

**Key Word:** MBC, tunnel, design, support, deep underground

### 1. 背景

原子力発電にともなって発生する高レベル放射性廃棄物の処分は、今後本格的に事業化が進められることが予定されている。現在、諸外国も含めて、高レベル放射性廃棄物処分の手法として最も有力視されているのは地層処分であり、我が国においても実施主体が設立され、2030年～2040年代を操業開始の目途とした計画が立てられている。地層処分では、人工バリアと天然バリアを組み合わせる多重バリアシステムにより安全性を確保することを想定し、各分野での研究が進められている<sup>1)</sup>。

放射性廃棄物の地層処分における技術的な課題の一つとして、大深度地下におけるトンネルの支保設計が挙げられる。地層処分の対象となる数百mよりも深い大深度地下におけるトンネルについては、これまで施工実績がほとんど存在しない。そのため、既往の実績に基づいて支保仕様を決定し、等方弾性あるいは等方弾塑性を仮定した解析で支保の安全性を確認するという支保設計手法では、大深度地下における支保設計の妥当性に疑問が生じる。

施工実績の無い条件下のトンネルに対して支保設計を行うためには、支保設計において支配的な現象を再現し得る解析手法を用いることが必要である。不連続面を含む硬岩中に施工されるトンネルの掘削時変形挙動は、岩盤中のジョイントの変形(せん断すべり、開口)に支配されることが知られているが、このような実現象を再現しうる解析手法を用いた設計を行い、既存の実績に対してその有効性を確認した上で、経験の無い大深度地下における設計を行うことが必要な手順であると考えられる。

本研究では、そのような岩盤の掘削時挙動を表現できる解析手法としてマイクロメカニクスに基づく連続体モデル(Micromechanics-based Continuumモデル, MBCモデル<sup>2)3)</sup>)を用い、大深度地下におけるトンネルに対して適用可能な支保設計手法を提案し、加えてトンネル併設時の影響について考察する。

\* 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

\*\*\* 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専攻

## 2. 設計の考え方<sup>4)</sup>

本研究では大深度地下において不連続面を有する硬岩中のトンネル支保設計を対象とする。設計で考慮すべき限界状態はいくつか存在するが、ここではトンネル掘削により周辺岩盤がゆるみ、すなわち岩盤中のジョイントがせん断すべり・開口することにより、岩盤の変形が進行し変状に至る状態を考える。変状はトンネル周辺岩盤における最大せん断ひずみの最大値がある限界値に達したときに生ずるものと仮定する。

今回の支保設計条件は次の2点である。1) 周辺岩盤中に生じる最大せん断ひずみの最大値を許容値以下とする。2) 覆工に生じる応力を材料強度以下とする。

トンネル周辺岩盤の安定性評価として最大せん断ひずみを使用する手法については、桜井ら<sup>5)</sup>によって提案された限界せん断ひずみがあり、硬岩についても一軸、三軸試験から近似的に限界せん断ひずみを求める手法が提案されている。

## 3. 設計条件

設計手法の例示を目的として、以下のような条件により設計例を示す。解析に使用したメッシュは100m×100m, 1300要素であり、中心部に直径5.0mのトンネルを掘削する設定とした。掘削ステップ時の境界条件は端部固定である。掘削解析に使用したモデルはMBCモデルであり、ジョイントは右落70°、左落70°の2セットを想定している。解析に使用した物性値を表-1に示す。

解析はトンネル深度(500~1000m)、岩盤のジョイント間隔(0.07~0.2m)の組み合わせによるパラメータスタディを行い、設計条件となる最大せん断ひずみの許容値は1.5%、吹付コンクリート材料強度は24MPaとした。また、支保を導入する際の掘削解析手順の手順は次の通りとしている。

- (1) 60%初期応力解放の掘削解析、
- (2) コンクリート支保要素(トラス要素)追加、
- (3) 40%応力解放掘削解析

表-1 解析使用物性値

|              |          |                          |
|--------------|----------|--------------------------|
| 岩盤弾性係数       | 19.6 GPa |                          |
| 岩盤ポアソン比      | 0.3      |                          |
| 初期地圧         | 鉛直       | $2.7g/cm^3 \times Depth$ |
|              | 水平       | 鉛直 $\times 0.6$          |
| ジョイント<br>セット | 有効寸法     | 1.0 m                    |
|              | 間隔       | 0.07~0.2 m               |
| 右落 70°       | 摩擦角度     | 30°                      |
| 左落 70°       | 起伏角度     | 10°                      |
| 吹付弾性係数       | 4.0 GPa  |                          |

## 4. 解析結果と試設計

ここでは、トンネル深度1000mのケースについて、覆工厚と岩盤の最大せん断ひずみ最大値または覆工に発生した応力の関係をジョイント間隔毎に整理した解析結果を図-1に示す。それぞれの許容値(最大せん断ひずみ1.5%、覆工応力24MPa)と、解析結果の曲線が交差する点が必要覆工厚となる。

弾性係数が低い吹付コンクリートを支保とする解析結果は、覆工に発生する応力は比較的低いですが、岩盤に発生する最大せん断ひずみが大きくなり、最大せん断ひずみの許容値から覆工厚が決定された。

図-2, 3にジョイント間隔0.1mの最大せん断ひずみ分布を示す。無支保の場合は、トンネル壁面にひずみが1.5%を超過する領域が存在するが、図-1より決定される支保厚に従って、65cmの吹付を考慮した図-3では、吹付支保の効果により、許容値を超過する最大せん断ひずみは発生しなかった。

同様の解析をトンネル深度500m, 750mのケースについて行い、得られた吹付コンクリート必要厚さを図-4にまとめる。必要厚は、深度が深く、ジョイント密度が高いケースで急激に増加する傾向にある。これは、初

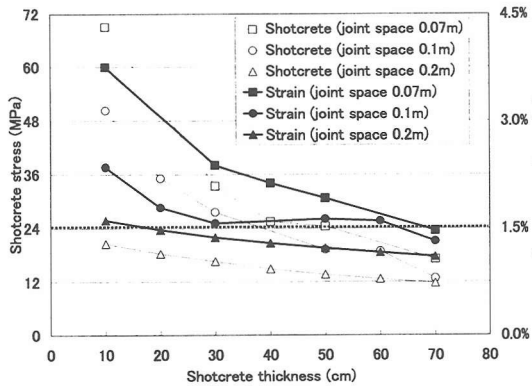


図-1 吹付厚と支保応力および岩盤のひずみ

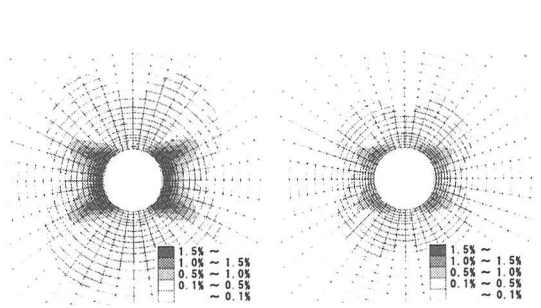


図-2 最大せん断ひずみ (無支保) 図-3 最大せん断ひずみ (吹付厚 65cm)

期地圧が増加に伴い岩盤の変形量が大きくなるためであり、吹付コンクリート必要厚さが 30cm を超過する場合には、高強度のコンクリートを使用したセグメントの使用が必要になると考えられる。また、図-4 中、strain と分類されるものは最大せん断ひずみの許容値から必要厚が決定したもので、stress と分類されるものは、コンクリート応力から必要厚の決定したものである。深度が大きく、ジョイントが密に入った厳しい条件のケースでは岩盤の最大せん断ひずみが大きくなり、最大せん断ひずみの許容値から必要支保厚を決定している。

以上のように、トンネル仕様と地質データを入力することで大深度におけるトンネル設計は可能であり、地質データをパラメータとした試設計を実施することができる。

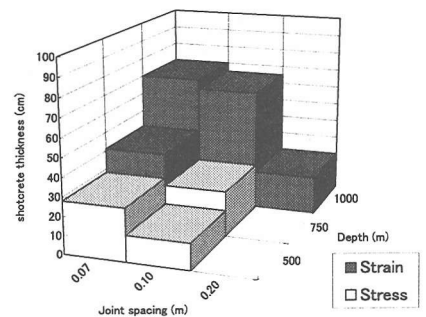


図-4 設計支保厚 (吹付コンクリート)

## 5. 併設トンネルの影響

次に、地層処分坑を想定して、既設のトンネルに併設してトンネルが施工された場合に周辺岩盤が受ける影響を考察し、必要なトンネル離隔距離の検討を行った。想定したトンネル形状は直径 5.0m の真円であり、解析に使用した物性は、表-1 のうち深度 1000m、ジョイント間隔 0.1m のケースである。トンネル離隔は、トンネル直径の 0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍の 3 ケースを考え、前段の支保設計結果から支保は吹付コンクリート覆工 65cm として設定し解析を行った。離隔 2D のメッシュを図-5 に示す。解析は図-5 に向かって左側のトンネルの掘削解析 (初期応力 60% 解放、支保要素追加、残り初期応力 40% 解放) を行い、続いて右側トンネルの掘削を行う手順とした。

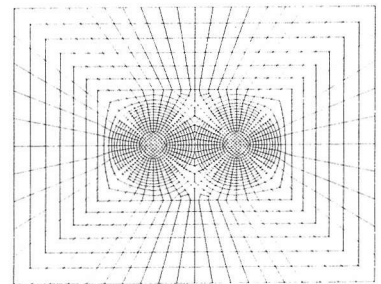


図-5 離隔 2D メッシュ

図-6~8 に掘削終了時の最大せん断ひずみ分布を示す。トンネル離隔が 0.5D のケースは併設による影響が明確に認められる。ここでは図-12 に示すように、65cm 支保でピラー部の岩盤ひずみが許容値 1.5% を若干超え、必要支保厚は 65cm より増えることになるが、その増分は小さい。離隔を 1.0D 以上としたケースでは、併設坑の影響は小さく、必要支保厚は変化しない。

次に、掘削終了時のジョイントせん断変位分布を図-9~11 に示す。離隔 0.5D のケースではトンネルを併設

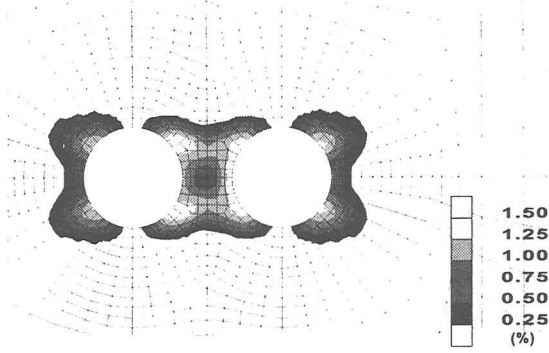


図-6 最大せん断ひずみ 離隔 0.5D

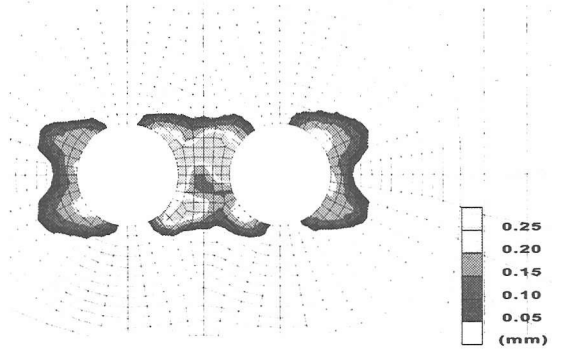


図-9 ジョイントせん断変位 離隔 0.5D

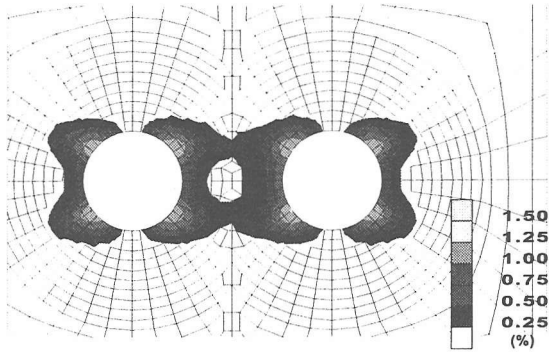


図-7 最大せん断ひずみ 離隔 1.0D

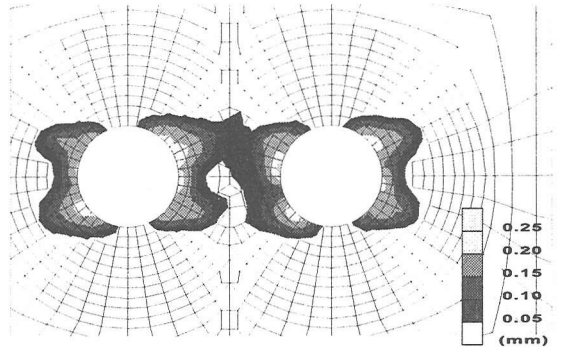


図-10 ジョイントせん断変位 離隔 1.0D

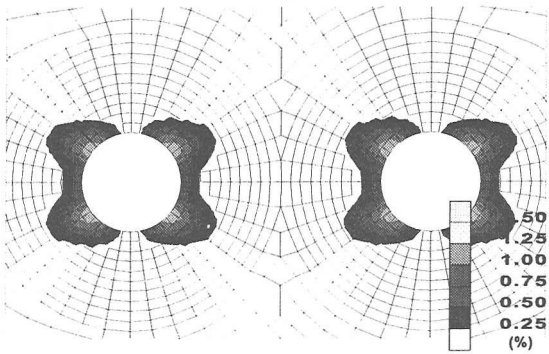


図-8 最大せん断ひずみ 離隔 2.0D

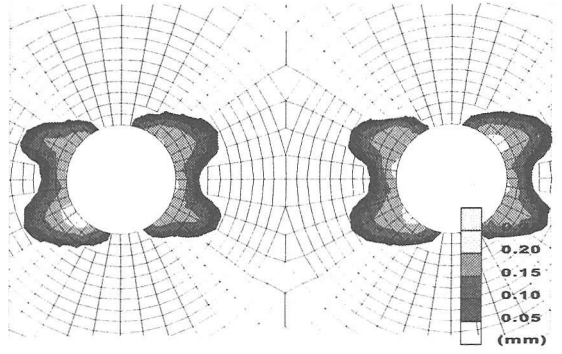


図-11 ジョイントせん断変位 離隔 2.0D

した影響が認められ、ピラー部でゆりみ域（ジョイントの変形領域）が連結している。同様に、離隔 1.0D のケースにおいてもピラー部にジョイントのせん断変位が促進されていることがわかる。

図-12はそれぞれの離隔をとった場合の最大せん断ひずみの履歴を示すものである。無支保のケースと支保 65cm を考慮したケースをひずみについて比較してみれば、支保の効果によってひずみは抑制されていることがわかる。トンネル離隔 0.5D のケースで最終的にひずみが 1.5% を超過する結果となったが、離隔 1.0D 以上のケースでは許容値 1.5% 以下の値となり、必要支保厚は変化しない。

図-13は2つのトンネル掘削完了時点での、トンネル離隔とジョイントせん断変位最大値の関係を整理したグラフである。単独のトンネルを掘削した場合のジョイントせん断変位の最大値（0.23mm）と比較して、離隔 1.0D 以下では変位量に増加が生じる。また、離隔 1.0D と 2.0D を比較すると、最大変位量には大きな差は

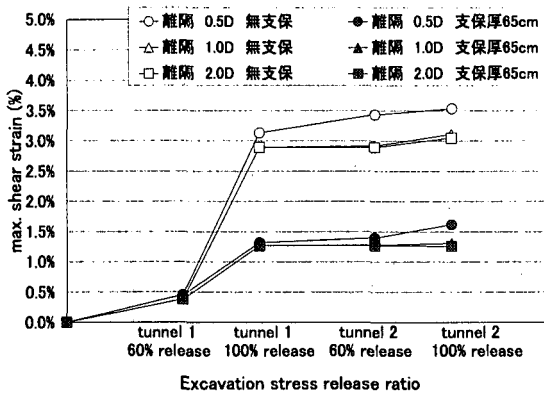


図-12 最大せん断ひずみ

認められないが、分布状況を見た場合、離隔 1.0D のケースはピラー部でジョイントせん断変位の生じた領域が繋がっている一方、離隔 2.0D のケースでは、そうした領域の繋がりは認められず、単独のトンネル掘削とほぼ同じ結果が得られる(図-10, 11 参照)。

離隔 1.0D 以下では透水性の上昇した領域が何本も併設される坑道群を全て連結することになり、地下水流動による核種移行を評価する上で、その影響を検討することが必要となるものと考えられる。結論はそのような評価に任せるべきであろうが、ゆるみ域が連結しないように離隔や支保量を決定するという点から、坑道離隔は 2.0D 程度とすることが望ましい。

## 6. まとめ

本研究では、岩盤の掘削時挙動を表現しうる解析手法として M B C 解析を採用し、大深度地下におけるトンネルの設計方法について提案、設計例を示し、安定した施工を行うために必要な支保量を算定した。また、トンネルが併設された場合に周辺岩盤が受ける影響について考察を行い、ゆるみ域の連結しない離隔距離を検討した。本設計手法を用いれば、物性値が明らかでない高レベル放射性廃棄物の処分候補地選定の段階においても、想定される物性値の範囲の中で、パラメトリックスタディを実施することが可能となる。また、本研究で用いた M B C 解析の特徴はジョイントの走向傾斜、平均間隔等が直接入力パラメータとして解析に反映されること、解析結果としてジョイントのせん断変位・開口変位の空間分布が求められることにある。安全評価上、処分坑道掘削によって、生ずるゆるみ域の透水性の評価が重要となる<sup>6)</sup>。ジョイントの開口変位分布より、透水性の変化を予測することにより、安全評価における掘削影響の評価や近傍断層との連結性の評価が可能になるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 財団法人 電力中央研究所 電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化計画，1999.3
- 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モデルと大規模地下空洞掘削の解析，土木学会論文集 No.535/III-34,23-41,1996
- 3) 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-36,39-56,1996
- 4) 金子岳夫，堀井秀之，吉田秀典：M B C 解析に基づく大深度におけるトンネル支保設計手法，第 55 回土木学会年次学術講演会講演概要集，CS158，2000.9
- 5) 桜井春輔 他：トンネル安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No493/III-27，pp.185-188，1994.6
- 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 M B C 解析と掘削影響領域の評価に関する研究，第 31 回岩盤力学シンポジウム，2001.1

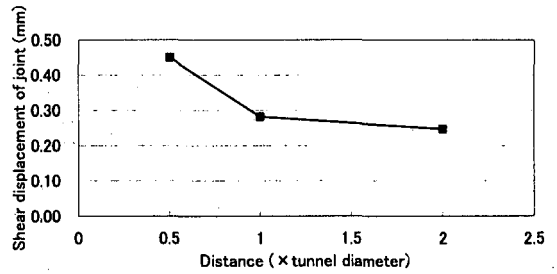


図-13 ジョイントせん断変位の最大値