

MB C解析に基づく大深度トンネル に対する支保設計手法

金子岳夫¹・堀井秀之²・吉田秀典³

¹正会員 修士(工) 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²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(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 博士(工) 香川大学助教授 安全システム建設工学科(〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

原子力発電によって発生する放射性廃棄物の処分方法としては、大深度地下に埋設する地層処分が最も有力視されている。しかし、想定される大深度地下におけるトンネルの施工実績はほとんど存在せず、処分坑道の設計手法の構築が課題となっている。実績の存在しない大深度地下のトンネル設計を行う場合、支配的な現象を再現できる設計手法が必要となるが、本研究では不連続面性岩盤の変形において支配的なメカニズムであるジョイントのせん断変形、開口を考慮できる解析手法であるMB C解析を採用し、トンネル支保設計手法の提案を行う。既往地点の計測結果と解析結果の比較を行い、変状を生じる最大せん断ひずみの限界値を定めた上で、大深度地下トンネルの試設計を実施し、必要覆工厚を種々の深度、ジョイント密度に対して算定した。

Key Words : high-level radio active waste, tunnel, underground, MB C, joint and rock

1. はじめに

(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の設立を目前に控え、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。

地層処分は、安定な大深度地下の地層に長期間放射性廃棄物を閉じ込めておくという概念に基づいている。地層処分では、人工バリアと天然バリアを組み合わせて用いる。人工バリアは、ガラス固化した廃棄物、オーバーパック、ベントナイト緩衝材など人工的な製作物を使用することで埋設後1000年程度の期間核種の漏出を防ぐことを目的としている。一方、天然バリアは地下数百mより深い地層に処分することにより、核種の地表面への移行を防ぐことを目的としている。このように複数のバリアシステム(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¹⁾。

(2) 支保設計の課題

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を、そのまま大深度地下における支保設計手法として適用することの是非には検討が必要である。

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、MB Cモデル^{2),3),4)}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する。

2. MB C解析の概要

不連続面を含む岩盤にトンネルなどの空洞を掘削する場合、掘削空洞周辺の岩盤挙動は岩盤中の不連続面の変形(せん断すべり、開口)に支配される。しかし、

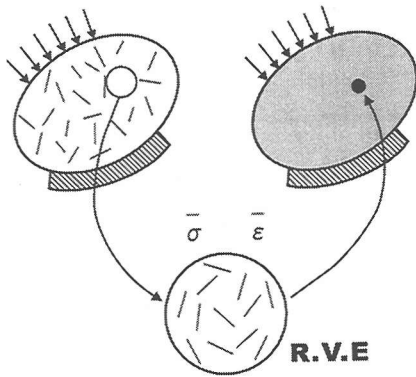


図-1 代表要素 (Representative Volume Element, R.V.E)

岩盤に含まれるジョイントの数は膨大であり、個々のジョイントを個別に扱うことはほとんど不可能であるため、ジョイントを含む岩盤を等価な連続体に置き換えた解析が必要となる。地下空洞掘削の予測に高い精度・確度が求められる場合、弾性定数の低減というような解析手法では信頼性を確保することは難しく、ジョイントの挙動を考慮に入れた岩盤の連続体理論が必要となる。

MBCモデルは、材料の巨視的挙動の支配的メカニズムはマイクロクラックや不均一介在物といった微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長であるという見地に立って、微視構造要素を含む材料の力学的挙動を捉えようとする連続体理論である。定式化にあたっては個々の微視構造要素をモデル化し、その挙動に基づき代表要素 (Representative Volume Element, R.V.E) 内において平均化操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係が求まる (図-1)。

一般に岩盤の力学挙動は非線形であるため、その関係を増分方程式で表すと、

$$\Delta \epsilon_{ij} = \bar{D}_{ijkl}^R \Delta \sigma_{kl} + \frac{1}{V} \sum_m \int_{\Omega_m} \{ \Delta [u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta [u_j^{(m)}] n_i^{(m)} \} dS$$

となる。ここで V は代表要素の体積、 \bar{D}_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 Ω_m は代表要素 m 中の m 番目のジョイント面、 $n_j^{(m)}$ はジョイント面での単位法線ベクトル、そして $\Delta [u_j^{(m)}]$ はジョイント面での相対変位量である。ここで、ジョイント面における相対変位増分 $\Delta [u_j]$ が平均応力増分 $\Delta \sigma_{ij}$ の関数として与えられるならば、岩盤の構成式は、

$$\Delta \epsilon_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \Delta \sigma_{kl}$$

と得られる。ここで、 \bar{D}_{ijkl} はジョイントを含む岩盤

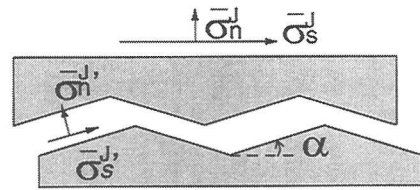


図-2 起伏を有するジョイント

の巨視的接線コンプライアンスである。

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。代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔、及び方向分布に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。不連続面同士の相互干渉を考慮に入れて不連続面の挙動を算定し、その結果を基に代表要素内で平均操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係 (構成式) が求まる。この理論は、例えば、個々のジョイントの挙動に支配される不連続性岩盤の解析に適しているものと思われる。導かれた不連続性岩盤の構成式を有限要素解析コードなどに組み込むことにより、任意の岩盤構造物・荷重条件における岩盤挙動の解析が可能となる。尚、本論文で用いる基質岩盤とは卓越不連続面 (ジョイント) を除いた、連続体として挙動する材料基質部と定義する。

前述の通り、ジョイントを多数含む岩盤においてトンネル掘削が行われる場合、地山応力解放により生ずるジョイントのせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的メカニズムである。空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴って応力が解放されるとは言え、依然として圧縮場にある。圧縮下においてジョイントが開口変形を生ずるメカニズムとして、図-2に示すような起伏を有するジョイントを考える。起伏の片面でクーロンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生ずる。こうしたモデル化を行うことにより、ジョイントの挙動が定式化され、さらにジョイントを包含する岩盤の構成式を導くことができる。岩盤の挙動は不連続面の方向や岩盤に作用している初期地圧の大きさ・方向の組み合わせに依存するが、この解析手法はそのような影響を表すことが可能となる。MBC解析は、東京電力塩原発電所および葛野川発電所の地下空洞掘削、関西電力大河内発電所の地下空洞掘削に対して適用され、解析値は計測値と比較して妥当な結果が得られたことが報告されている^{2),3)}。

この解析手法の特徴としては、地質調査で得られた不連続面の方向や間隔が直接解析の入力データとなることや、不連続面のせん断・開口量の空間分布が解析

結果として得られること、などが挙げられる。高レベル廃棄物処理施設の安全性を論ずる際には、掘削に伴う岩盤の透水性の変化を考慮に入れた浸透流解析を行い、掘削影響領域の影響評価を行うことが必要である。MBC解析の結果から得られる不連続面開口量の空間分布は、処理施設周辺の浸透流解析を実施する際の重要な情報となるものと考えられる。

3. 設計の考え方

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⁵⁾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。

この限界せん断ひずみを許容値の一つとして考えることもできるが、変状が生ずる最大せん断ひずみの値は不連続面を含む岩盤の平均的な(巨視的)ひずみに対するものであり、トンネル掘削の実績に基づいて決定されるべきものと考えられる。ここでは、既存トンネルの掘削解析を行い、解析結果と実績を比較することにより最大せん断ひずみの許容値として決定する必要があるものと考えられる。

4. トンネル内空変位の実測値と解析結果の比較

ここでは、土被り200~500mの条件の下で施工された馬蹄形NATMトンネルの内空変位データを用いて、解析結果との比較を行う。その上で、設計条件のひとつである最大せん断ひずみ許容値の設定方法を検討する。

(1) 施工条件と計測結果

ここで使用した内空変位データは土被り200~500mの条件の下で施工された馬蹄形NATMトンネル(図-4)における計測値である。当該箇所岩盤は、砂岩・泥

表-1 トンネル岩盤物性

岩盤弾性係数	11.7 GPa
一軸圧縮強度	105.8MPa
初期地圧	$\sigma_1=14.2$ MPa(N17E68)
	$\sigma_2=12.0$ MPa(N191W20)
	$\sigma_3=9.4$ MPa(N97W9)

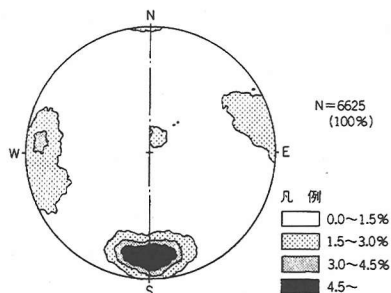


図-3 ジョイント分布

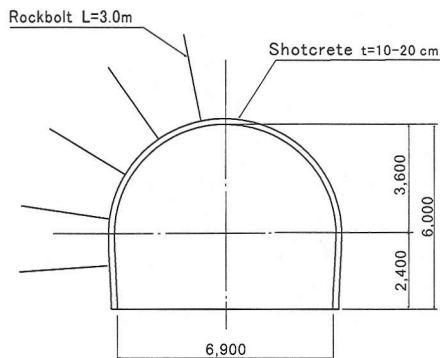


図-4 トンネル仕様

岩によって構成され、図-3に示すように比較的急傾斜の節理が発達した節理性硬岩地山である。主要な物性値、初期地圧は表-1の通りである。吹付けコンクリート厚さは10cm~20cm、ロックボルト長Lは3.0mであり、1発破当たりの進行長は1.5m~2.5mである。

図-5に、内空変位を深度方向について取りまとめたグラフを示す。計測箇所は合計60箇所であり、それらを切羽地質観察結果に基づき、「全てC_H級岩盤で構成されている箇所」と「C_M級以下の岩盤が混在する箇所」に区分して示す。当該箇所地質観察における指標は、C_H級岩盤をジョイント密度15本/m以下としている。C_H級岩盤として分類された箇所においても、大きな内空変位が計測された箇所が一部存在するが、基本的には、C_M級以下の岩盤を含み、深度が大きな箇

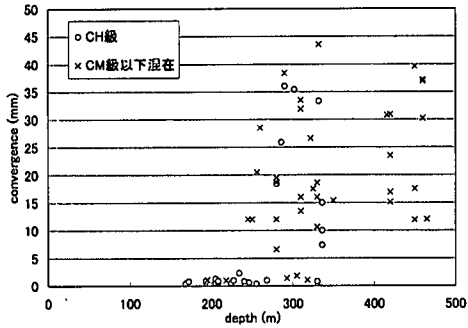


図-5 トンネル 内空変位

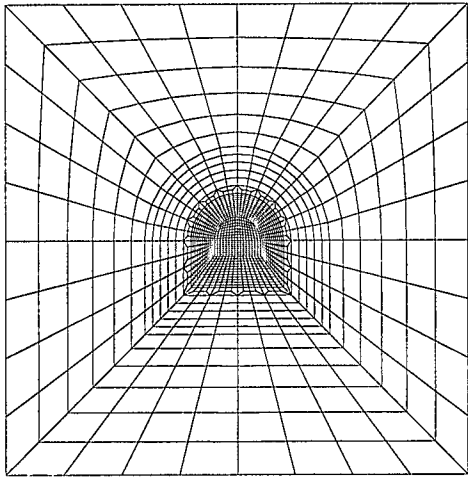


図-6 解析メッシュ

表-2 解析使用物性値

岩盤弾性係数	11.7 GPa	
岩盤ポアソン比	0.3	
初期地圧	2.7 g/cm ³ × Depth	
側圧係数	1.0	
ジョイントセット	有効寸法	1.2 m
右落ち 70°	間隔	0.1, 0.2, 0.5 m
左落ち 70°	摩擦角度	30°
	起伏角度	10°

表-3 トンネル内空変位 (吹付コンクリート 10cm)

	サンプル数	内空変位平均値
全て C _H 級	20	4.64 mm
C _M 級以下混在	21	16.25 mm
合計	41	10.30 mm

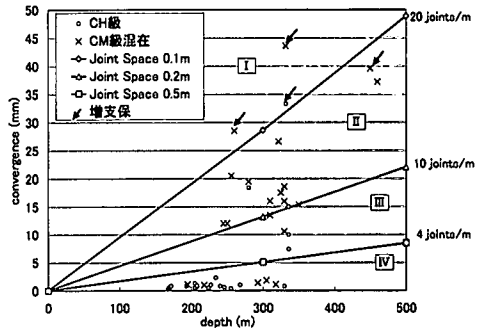


図-7 実測値と解析値の比較 (吹付厚 10cm)

所で内空変位が大きくなる傾向がある。

(2) 解析条件

実測結果に基づき、表-2に示す物性値、応力条件を使用し、二次元のMBC解析を行った。考慮したジョイントは右落ち70°、左落ち70°の2セットであり、有効寸法は空洞高さの1/5の値を採用した。トンネル深度は300m、500mの2ケース、ジョイント間隔は0.1m、0.2m、0.5mの3ケースを設定し、それらを組み合わせて解析を行った。解析に使用したメッシュは72m×72m(1626要素：図-6)であり、中心部に図-4に示す形状の馬蹄形トンネルを配置している。解析では、平面ひずみ条件を仮定し、初期地圧を作用した後、外側境界を固定した。

初期地圧の解放率は、まず初期地圧60%を解放し、支保要素を追加した上で、残り40%を解放することとし

ている。この解放率の値は軸対称三次元弾性解析による覆工応力から算定したものであり、通常の内空変位量から算定される値より小さくなっている(補遺I参照)。ここで、コンクリート覆工、ロックボルトはトラス要素を用いており、それぞれの弾性係数は4GPa、210GPaと設定した。比較の対象となる内空変位は、支保要素追加後の節点変位から算定したものである。

(3) 実測値と解析値の比較

吹付けコンクリート厚さ10cmのケースの実測値と解析値の内空変位比較を図-7に示す。解析から求まる内空変位量はそれぞれの密度において、深度に対して直線となる。吹付けコンクリート厚さが10cmである箇所サンプル数、内空変位平均値を表-3にまとめる。

解析におけるジョイントは右落ち70°、左落ち70°

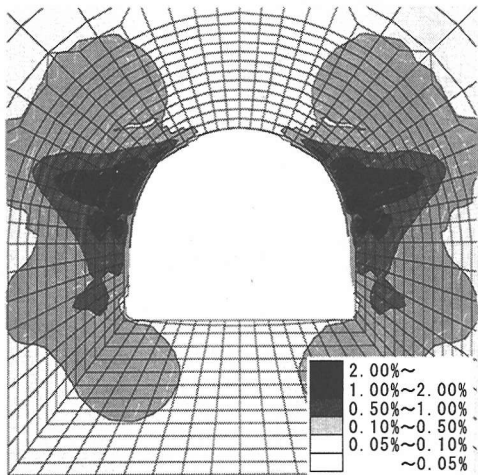


図-8 最大せん断ひずみ分布, 深度 500m
ジョイント間隔:0.1m, 吹付厚 10cm

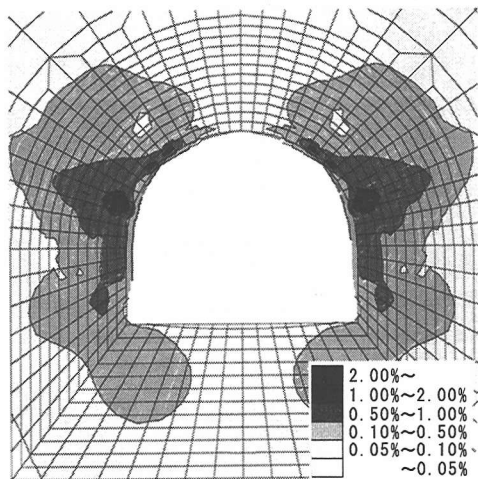


図-9 最大せん断ひずみ分布, 深度 500m
ジョイント間隔:0.1m, 吹付厚 20cm

の2セットをそれぞれ同じ間隔で考慮しているため、両者を合わせて考えるジョイント密度は2倍になる。つまり、図-7の右側に記述されるジョイント密度は、右落ち70°、左落ち70°を合わせたジョイント密度である。

前述の通り、ジョイント密度が15本/m以下であることが C_H 級の条件であるから、ジョイント密度10本/mの直線より下の領域III、IVが C_H 級岩盤相当の内空変位を表す。実測内空変位(図-7中○印)も、ほぼ領域III、IVあるいは領域IIの下方に集まっており、解析で定めたジョイント間隔と実際の岩盤等級には強い相関があり、解析結果から得られた内空変位は実測値

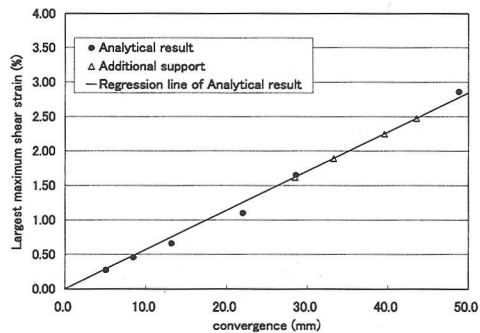


図-10 内空変位と岩盤内の最大せん断ひずみ最大値

とほぼ一致した傾向にあると言える。

また、ジョイント密度10本/mの直線と20本/mの直線によって区分される領域IIが、 C_M 級の混在する地質における内空変位量を表すことになる。実測内空変位でも C_M 級の混在した箇所(図-7中×印)は、領域II~IV、特に領域IIに多く点在しており、解析結果と一致した傾向を見ることが出来る。

解析から得られた最大せん断ひずみの分布を図-8、9に示す。トンネル壁面近傍における最大せん断ひずみの最大値は吹付厚さが10cmのケースでは図-8のように、1%を超過する最大せん断ひずみの領域が広がるほか、2%を超過する領域が存在する。また、吹付厚さが20cmのケースでは図-9のように壁面近傍の一部に1%を超過する領域も存在するが、図-8の吹付厚10cmのケースと比較して最大せん断ひずみの値が低く抑えられており、支保の効果が明確に表れている。

(4) 最大せん断ひずみの許容値

ここで、図-7で示した解析結果を、内空変位と岩盤内の最大せん断ひずみ最大値の関係について図-10にまとめる。解析から得られた内空変位と岩盤内最大せん断ひずみ最大値ひずみの関係は、図中に示すようにほぼ線形である。

今回の対象地点では、吹付コンクリートにヘアクラック等の変状が生じた場合、および過大な内空変位が連続して管理基準値に抵触した場合に増支保を行っている。

当該地点において増支保を行った際の内空変位は28.5~43.6mm(図-7参照)である。そこで、解析から得られた内空変位と岩盤内最大せん断ひずみ最大値の関係を用いれば、図-10から、増支保を行った段階では岩盤内の最大せん断ひずみは1.5~2.4%に達していたと推定される。そこで本論文ではトンネル掘削時の最大せん断ひずみ許容値として、1.5%を使用する。

この値は岩盤特性に依存して変化すると考えられる。異なる地山において設計を行う場合には、各種岩盤試

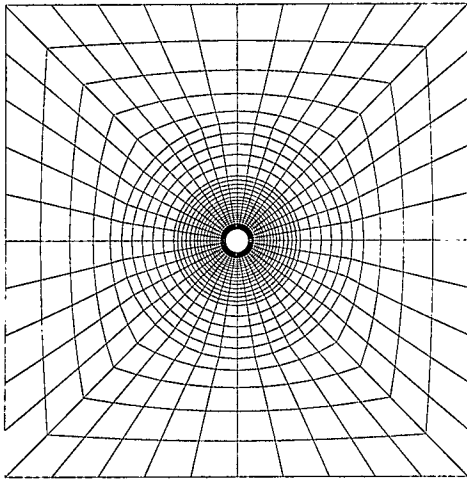


図-11 解析メッシュ

験，調査坑掘削などで得られたデータを用いて，本研究で示した方法と同様にひずみの許容値を設定することが必要である。また，データの蓄積により，岩盤特性とひずみの許容値の関係が整理されることが望まれる。

5. 設計例

ここでは4章において使用した物性値，最大せん断ひずみの許容値を使用して，大深度地下におけるトンネルの試設計を行う。

(1) 設計条件

トンネル仕様は円形断面，直径5.0mとし，地下深部の硬岩中において全断面を1度に掘削することを想定した。解析に使用したメッシュは100m×100m(1300要素：図-11)の領域を表し，中心部に直径5.0mのトンネルを配置している。解析は二次元平面ひずみ状態を仮定し，まず初期地圧を作用させる解析を行った後，掘削解析時は外側境界で変位を固定し，掘削予定線から応力を解放した。ジョイントはトンネル軸に対して平行な走行を持ち，傾斜角度が右落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は表-2とほぼ同じ物であるが，ここでは側圧係数を0.6とし，ジョイントの有効寸法を1.0mとしている。

解析，設計ではトンネル深度(500~1000m)，岩盤のジョイント間隔(0.07~0.5m)の組み合わせでパラメトリックスタディを行い，それぞれについて必要となるコンクリート覆工厚を算出した。設計に使用する最大せん断ひずみの許容値は4(4)で設定した許容値1.5%を採用，支保材としては，コンクリート覆工のみを想定す

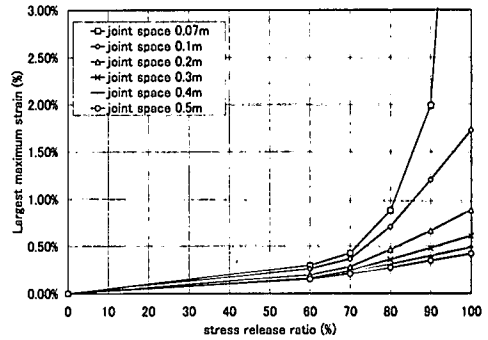


図-12 ジョイント密度と最大せん断ひずみ
トンネル深度 500m

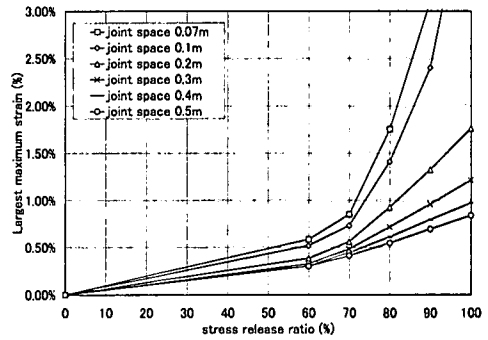


図-13 ジョイント密度と最大せん断ひずみ
トンネル深度 1000m

るが，吹付コンクリートおよびコンクリートセグメントの両者に対して設計を行う。ここでのコンクリート材料強度は吹付コンクリート24.0MPa，セグメント48.0MPaと設定し，弾性係数は吹付コンクリート4.0GPa，セグメント39.0GPaとした^{6),7)}。

支保を導入する際の掘削解析の手順は，4章と同じく，

- 1) 初期応力の60%を解放する掘削解析
- 2) コンクリート要素(トラス要素)追加
- 3) 初期応力の40%を解放する掘削解析とした(補遺I参照)。

(2) 解析結果と設計の結果

以上の物性値，設計条件を使用して，支保無しの場合で掘削解析を行った。図-12, 13にトンネル深度500, 1000mにおける最大せん断ひずみの値をジョイント間隔毎に示す。

深度500mでは，ジョイント間隔が0.1m以下になると，最大せん断ひずみの許容値1.5%を超過するため，支保が必要となる。ジョイント間隔がそれ以上のケースでは，変状は発生しない。また同様に深度1000mに

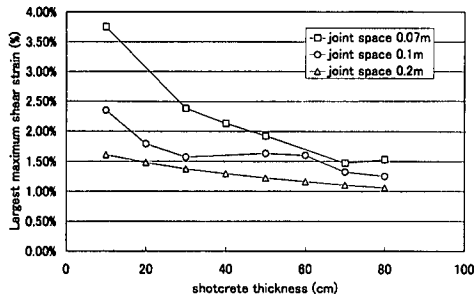


図-14 吹付厚とひずみ (深度 1000m)

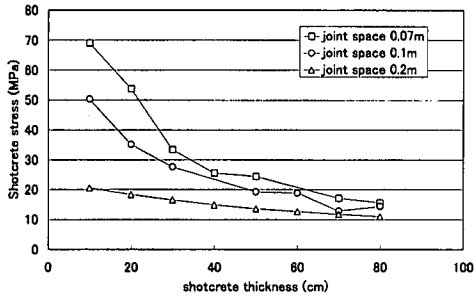


図-15 吹付厚と応力 (深度 1000m)

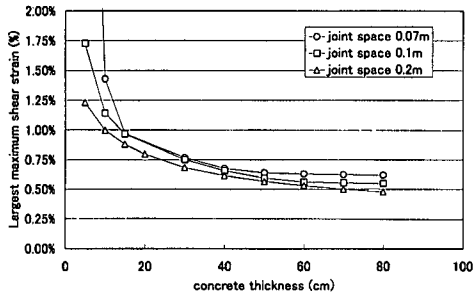


図-16 コンクリート厚とひずみ (深度 1000m)

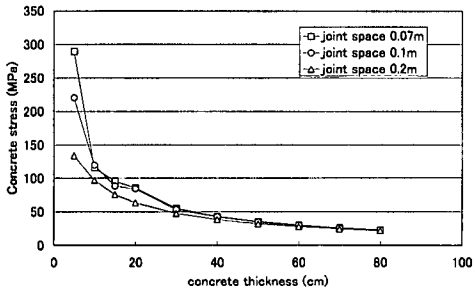


図-17 コンクリート厚と応力 (深度 1000m)

について見れば、ジョイント間隔 0.2m 程度で最大せん断ひずみが許容値 1.5% を超過するため、支保工が必要となる。

ただし、ここでのジョイント間隔は右落 70°、左落 70° のそれぞれについてのジョイント間隔であるため、

表-4 必要覆工厚 トンネル深度 1000m

吹付コンクリート			
ジョイント間隔	ひずみより決定	応力より決定	内空変位
0.20m	20 cm	10 cm 以下	22.8 mm
0.10m	65 cm	37 cm	23.1 mm
0.07m	70 cm	52 cm	21.4 mm
セグメント			
ジョイント間隔	ひずみより決定	応力より決定	内空変位
0.20m	5 cm 以下	30 cm	6.4 mm
0.10m	7 cm	35 cm	6.8 mm
0.07m	10 cm	36 cm	7.0 mm

両者を合わせて考える場合は 2 倍のジョイントが存在することになる。つまり、ジョイント間隔 0.1m のケースは両者合わせて 1m 当たり 20 本のジョイントが存在するケース、ジョイント間隔 0.07m のケースは両者合わせて 1m 当たり 30 本のジョイントが存在するケースについての解析結果となる。

これらの結果から、深度、あるいはジョイント間隔に依存して、トンネル周辺岩盤に最大せん断ひずみ許容値を超過する大きなひずみが生じることがわかる。つまり支保設計において、トンネル深度あるいは周辺岩盤のジョイント間隔は重要であり、特に大深度においては大きな変形を引き起こす可能性があることがわかる。

次に、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とりまとめ、図-14~17 に示す。それぞれ図-14, 15 は最終支保として吹付コンクリート覆工を考慮した結果、図-16, 17 は吹付コンクリートは考慮せず、セグメントによる覆工を最終支保として考慮した結果である。

弾性係数の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が(図-15)、岩盤に発生する最大せん断ひずみが大きくなり(図-14)、岩盤変形を抑制するための覆工厚が厚くなる。また、弾性係数の高いコンクリートセグメントを支保とする解析結果は、比較的小さい覆工厚でトンネル周辺の岩盤に発生する最大せん断ひずみを抑制することができるが(図-16)、覆工部材に発生する応力が高くなるため(図-17)、その覆工厚はコンクリート強度から決定される結果となった。

ここで、それぞれのグラフから最大せん断ひずみ許容値に対する必要覆工厚、コンクリート応力許容値に対する必要覆工厚を読み取り、トンネル深度 1000m における必要覆工厚として表-4 にまとめる。表中において太字で示された設計条件によって、必要覆工厚は決

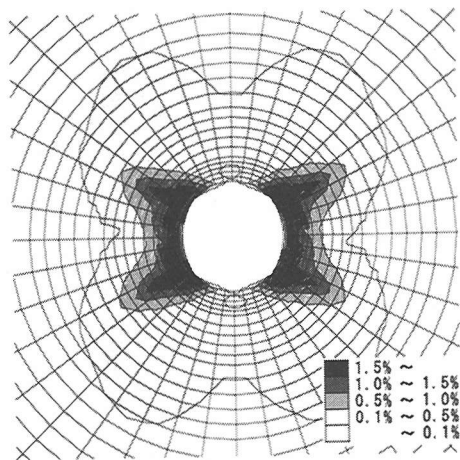


図-18 最大せん断ひずみ分布, 深度 1000m
ジョイント間隔:0.1m, 支保なし

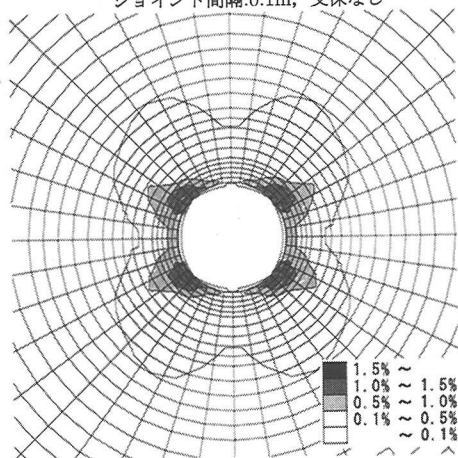


図-19 最大せん断ひずみ分布, 深度 1000m
ジョイント間隔:0.1m, 吹付厚 65cm

定している。また、ここで決定した覆工厚を用いた場合に得られる内空変位を示す。吹付コンクリートを用いた場合は、岩盤ひずみの許容値から覆工厚が決定されるため、セグメントを用いる場合と比較して大きな内空変位が認められる結果となった。

図-18, 19に深度 1000mの最大せん断ひずみ分布を示す。支保なしでは、ひずみ許容値 1.5%を超過する領域が広がっており、施工時の変状発生が予想されるが、支保として吹付コンクリートを導入することで、図-19のように変形を抑制することが可能である。

同様の解析をトンネル深度 500m, 750mのケースについて行い、吹付コンクリート必要厚さを図-20にまとめる。吹付コンクリートの必要厚さは、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。これ

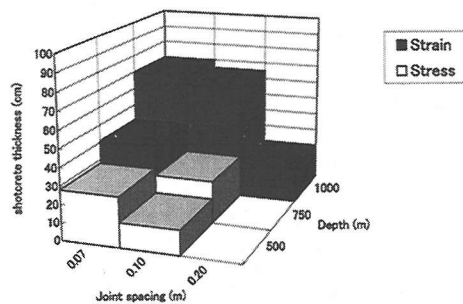


図-20 設計支保厚(吹付コンクリート)

は、岩盤の変形量が大きくなるためであり、施工実績のあまり存在しない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を使用することが必要になるものと考えられる。

また、図-20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されたもの、stressと分類されるものは、コンクリート応力から必要厚が決定されたものである。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、ひずみの許容値から必要覆工厚を決定している。

6. おわりに

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MBC解析を採用し、大深度におけるトンネル設計手法の提案を行った。また、トンネル掘削時の内空変位実測値を用いて設計条件を設定し、大深度地下トンネルの試設計を行った。必要支保厚は深度とジョイント密度に依存して定められる。ここではジョイントセット数やジョイントの走向傾斜を固定して試設計を実施したが、これらを変化させて設計することも容易である。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。

本研究では実測結果に基づいて、試設計を実施した。そのため、採用した物性値は必ずしも処分に適したものではない。ここで用いた実測結果はかなりジョイント密度の高い岩盤から得られたものである。ジョイント密度の低い岩盤が対象になるとすれば、岩盤の変形で支保厚が決まらず、全て覆工に発生する応力で設計が決まる可能性がある。覆工に発生する応力は支保材の弾性係数と覆工施工時の応力解放率に依存する。材

料の選択と覆工施工の時期をコントロールすることにより、最適な設計が行えることが考えられる。

本研究では、発破の影響を考慮していない。本研究で対象とした地点は節理性硬岩地質であること、発破の影響を極力低減するように配慮していたことから、発破による影響よりも、純粋に応力解放による節理の開口、すべりの影響が大きかったものと考えられるが、発破損傷域の影響を考慮して、評価することは今後の課題としたい。また、今回の解析では、応力解放率 60% の結果しか示せなかったが、この値の影響を評価することも今後の課題である。

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。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。

補遺 I 初期地圧解放率の算定

二次元トンネル掘削解析では、初期地圧を一部解放した後、支保要素を追加し、残りの初期地圧を解放する手順をとる。支保要素を追加する際の初期地圧解放率によって、解析結果は変化する。本研究では、三次元軸対称弾性解析を行い、二次元トンネル掘削解析で用いるべき初期地圧解放率を決定した。

ここでは、トンネル ($\phi = 5.0 \text{ m}$) を掘削し、進行長 0.5 ~ 3.0 m 毎に支保を導入することを想定した解析を行った。解析の概要は図-21 の通りであり、軸対称解析の手順は以下に示す。

- 1) 左側進行長区間を掘削して (トンネルに相当する領域の要素を削除して) 応力解放を行う。
- 2) 掘削領域のうち、覆工に相当する領域にコンクリート物性を持つ要素を追加する。
- 3) 次ステップの進行長区間を掘削、応力を解放する。
- 4) X 方向に順次繰り返す。

解析に用いた物性値は表-5 にまとめる。

図-21 中の A における覆工に発生する Z 方向の圧縮応力と切羽からの距離の関係を整理すると、図-22 の通り変化し、切羽からの距離が大きくなると、一定の値に収束する。切羽からの距離が十分大きな位置で覆工に発生する圧縮応力 σ_z を用い、二次元弾性解より、最終的に覆工に作用する地圧 p を計算する。ここで、 a はトンネル半径、 t はコンクリート厚さを表す。

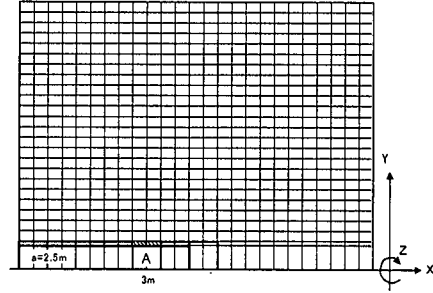


図-21 軸対称解析

表-5 軸対称解析 使用物性

岩盤弾性係数	E^R	11.7 GPa
岩盤ポアソン比	ν^R	0.3
コンクリート弾性係数	E^L	39.0 GPa
コンクリートポアソン比	ν^L	0.3
トンネル半径	a	2.5 m
コンクリート厚	t	0.25 m
初期地圧	σ_0	13.5 MPa

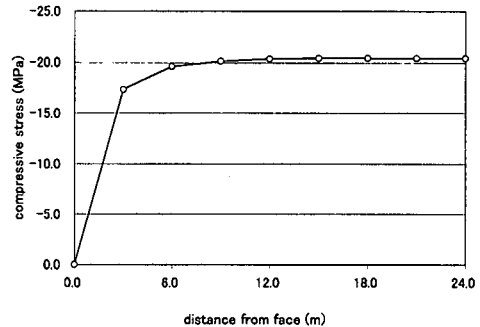


図-22 覆工圧縮応力と切羽距離

$$p = \frac{\sigma_z t}{a} \quad (I.1)$$

その後、覆工に作用する地圧 p によって、覆工に生じる変位量 u_r を算定する。ここで、 ν^L はコンクリートポアソン比、 E^L はコンクリート弾性係数を表す。

$$u_r = \frac{-a^2 p (1 - \nu^{L2})}{t E^L} \quad (I.2)$$

以上の関係を図-23 にまとめる。ここで、 u_2 は覆工が効果を発現するようになった点であり、覆工を導入する時点での初期地圧 (σ_0) の解放率は u_2/u_0 として得られる。ここで u_0 は 100% 初期地圧解放時のトンネル壁面変位量 (二次元弾性解) であり、次式で与えられる。 ν^R は岩盤のポアソン比、 E^R は岩盤の弾性係数を表す。

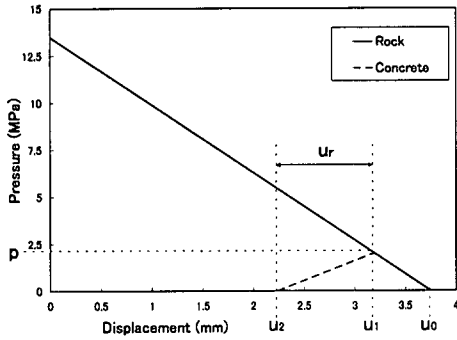


図-23 地圧解放率と変位量

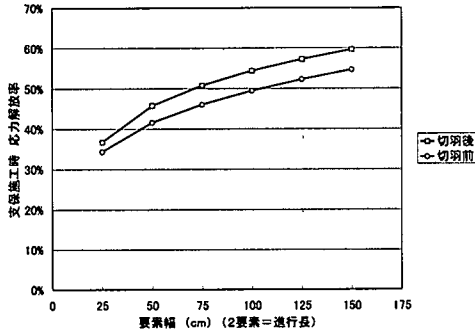


図-24 進行長と地圧解放率

表-6 計算結果

覆工圧縮応力	σ_z	18.1 ~ 29.5 MPa
覆工作用地圧	p	2.0 ~ 3.3 MPa
無支保時トンネル変形量	u_0	3.75 mm
覆工変形量	u_r	0.95 ~ 1.55 mm
覆工効果発現時変位	u_2	1.29 ~ 2.24 mm
初期地圧解放率		34 ~ 60 %

$$u_0 = \frac{\sigma_0 a (1 + \nu^R)}{ER} \quad (I.3)$$

進行長と初期地圧解放率の関係を図-24 にまとめる。トンネル掘削時の進行長 1.5~2.5m について見れば 45~55% 程度の地圧解放率であり、進行長を 3.0m とした場合でも 60% の解放率であった。結果をまとめたものが表-6 である。この結果に基づき初期地圧の解放率を 60% と決定した。

参考文献

- 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事業化計画，1999.3
- 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
- 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
- 吉田秀典，日比野繁信，堀井秀之，工藤蛮吾：トンネル掘削時の内空変位を用いた解析パラメータの同定法，土木学会論文集，No.596/III-43,11-27,1998
- 桜井春輔，川島幾夫，大谷達彦，松村真一郎：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
- (社)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付コンクリート，1996.2
- 土木学会：トンネル標準示方書 [シールド工法編]，1996.7

(2000. 8. 7 受付)

PROPOSAL OF TUNNEL DESIGN METHOD IN DEEP UNDERGROUND WITH MICROMECHANICS-BASED CONTINUUM MODEL

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 comparing analytical results with measured convergence data and determining the critical value of maximum shear strain, the trial design is conducted. It is shown that a lining thickness is determined for different values of joint spacing and tunnel depth.