

大断面トンネルにおけるMBC解析と地山挙動の評価

MBC Analysis of Large Scale Tunnel and Evaluation of Rock Mass Behavior

吉田秀典*, 堀井秀之**, 横澤良枝††

Hidenori YOSHIDA, Hideyuki HORII and Yoshie YOKOZAWA

Recently, several large-scale tunnels whose sectional area is beyond 200 m² have been constructed for express highways. The sectional area of large-scale tunnel is much larger than that of usual tunnel and smaller than that of underground cavern. The mechanical behavior of the large-scale tunnel during excavation is not clear and the concept of support system is not established since there is few actual construction. In this article, the excavation analysis of large-scale tunnel is carried out by MBC analysis and the mechanical behavior during excavation and the influence of discontinuities such as ad joints are considered.

1 はじめに

我が国において山岳トンネルや地下空洞といった岩盤構造物を建設する際には、ロックボルト、PSアンカー、および吹き付けコンクリートといった支保材料を積極的に用いて、岩盤構造物自体を地山で持たせるNATM工法が導入され、現在では、岩盤構造物の標準的的施工法として位置づけられるようになった。特に、トンネルの実績は数多く存在し、その実績を積み重ねた結果、トンネル標準示方書^[1]などがまとめられるに至っている。調査・設計から施工に至るまで体系化が図られ、現在ではほとんどのトンネル構造物はトンネル標準示方書に沿った建設が行なわれている。

一方、地下空洞では、トンネルほどの建設実績はなく、トンネル標準示方書に相当するような標準的な調査・設計・施工方法というものが存在せず、事前に入念な地質調査などが行なわれ、それに合わせて支保設計などが行なわれている。その背景として、地下空洞は構造物が大きいことに加え、構造物周辺の地質も一様でないため、その地質も多くの不連続面を含む非均質な性状を示すことが一般的である。近年では、情報化施工も導入され、より合理的で経済的な設計が行なわれるようになった。

では、そのほぼ中間に位置するような岩盤構造物、例えば、大断面トンネルなどはどのような調査・施工・設計を行なうべきであろうか。最近建設が進められている第二東名・名神高速道路は、その掘削断面積が200 m²に及び、これは、従来の2車線トンネル(約85 m²)の約2.5倍、東名改築3車線トンネル(約140 m²)の約1.4倍と、これまでの山岳トンネルでは例を見ない超大断面トンネルである。大断面トンネルの形状・規模は、従来のトンネルよりもむしろ地下空洞、例えば岩盤タンクのアーチ部に類似しており、地下空洞のアーチ部掘削におけるアプローチも参考になるものと考えられる。また、空洞が大きくなると不連続面の影響も増すことが予想され、大断面トンネルの設計・施工を合理的・経済的に行なうためには、こうした不連続面の影響についても考える必要性があるものと思われる。そこで本研究では、大断面トンネル掘削時の地山挙動の把握するために、著者らの開発したMBC(マイクロメカニクスに基づく連続体モデル, Micromechanics-Based Continuum Model)解析を採用し、大断面トンネル掘削時の地山挙動、およびその挙動と不連続面の関係について考察することを目的とした。

*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 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

††(株)コンピュータ・ハイテック 流通システム事業部

2 MBC モデルの概要

トンネルや地下空洞を建設において、掘削の対象となる岩盤が比較的硬い部類に属し、かつその掘削断面が大規模になる場合、そのトンネルおよび地下空洞の挙動は、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強く影響を受ける。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ジョイントの変形であることが知られている。したがって、空洞の変形予測、さらには支保の設計などを精度よく行なうためには、ジョイントに代表されるような不連続面の挙動を解析に反映させる必要がある。しかしながら、一般的に岩盤に包含される不連続面の数は膨大であり、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非常に困難である。そこで、著者らは空洞掘削により生ずるジョイントのせん断すべり・開口を岩盤挙動の支配的メカニズムと捉え、地下空洞の掘削に関する解析手法を開発している^[2]。提案している手法は、マイクロメカニクスという理論に基づいており、ジョイントの変形挙動を考慮に入れることができるものである。

マイクロメカニクスに基づく連続体モデルは、微視構造要素の存在あるいはその発生・成長に支配された材料に対する連続体理論であるが、対象となる微視構造はどのようなものであっても構わない。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ジョイントである。不連続面を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換える方法としては、まず、不連続面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、平均応力と平均ひずみの関係、すなわち巨視的な構成式を求め、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。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）^[2]が求まる。こうして導かれた構成式を有限要素解析コードに組み込むことにより、不連続面に支配される岩盤挙動の解析が可能となる。

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）の特徴は、個々のジョイントの挙動を捉えた連続体解析手法であり、卓越するジョイントセットの走向・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、および解析結果として、その卓越するジョイントの開口・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、考慮に入れる卓越ジョイントセットの数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]、そして関西電力大河内発電所^[5]の地下空洞掘削の解析が行われているが、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 不連続面を多数有する岩盤の構成モデル

ジョイントを多数含む岩盤において空洞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。服部^[6]は地下発電所本体空洞掘削時にボアホールテレビによる亀裂観察を行っており、これによれば、掘削進行に伴って空洞周辺では多くの亀裂群の開口が認められ、この亀裂群の変形は母岩の変形よりかなり大きいと報告している。

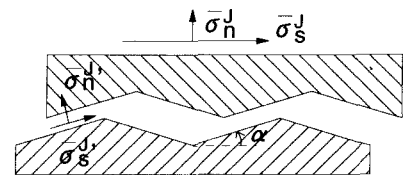


図-1 起伏を有するジョイント

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、著者らは起伏を有するジョイントを考えている^[2]（図-1参照）。このモデルでは、ジョイントは局所的には平坦であるが、巨視的には少なからず起伏を有しているものと仮定した。これによって、空洞掘削に伴う応力解放によって、ジョイントのある面ではせん断すべりを起こし、別の面で開口するというジョイントの複雑な挙動を再現できる。

4 大断面トンネルのMBC解析

4.1 解析概要

掘削解析の対象としたのは、図-2に示すような、横幅9.3m、高さ13mの規模の有し、その断面形状が横長に偏平している大断面トンネルである。掘削手順については、大断面トンネルの施工例にならって、TBM先進、上半、下半の3段階で掘削するものとした。尚、その掘削順序を図中に数字で示した。また、地山の土被りを84mとし、卓越ジョイントを除いた基質岩盤の弾性係数を2,040MPa、ポアソン比を0.25、単位体積質量を2.5t/m³と仮定して用いた。初期地圧としては、土被りに単位体積質量を乗じたものを鉛直応力(21.4MPa)とし、そして側圧係数を1.2(水平応力は25.7MPa)として解析に用いた。

また、卓越ジョイントについては、解析断面に対して左落ち50度と右落ち40度という2セットと考え、その走向は空洞軸に平行であるものとした。それぞれの物性値は空洞の大きさや過去の解析例[2][3][4][5]を参考に仮定して用いた。これらジョイントの物性パラメータをまとめて表-1に示す。

支保については、トンネル上半に1mピッチ、下半の一部に約2mのピッチで長さ6mのロックボルトを計27本、また上半に20cm、下半に厚さ10cmの吹付けコンクリートを施した。これらの諸元を表-2に示す。

解析手順としては、まず最初に初期応力解析を行い、その後トンネル掘削予定線より地山相当応力を逐次的に解放することで掘削を表現した。支保は、切羽到達後直ちに打設されるものとし、応力解放直前に施した。

本解析で用いた有限要素解析メッシュは要素数2254、節点数は2281で、130m×180mの矩形領域において解析を行った。計算では、外縁の境界に初期応力に相当する節点力を境界条件として作用させる。掘削解析においては、外縁の境界を固定し、そして掘削の要素を取り除くことで掘削を表現している。

4.2 解析結果および考察

4.2.1 開口変位図

本小節では、ジョイントの変形について、開口変位分布図を用いて考察を行った。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、これより不連続面に支配される岩盤挙動を的確に判断し得るものと考えられる。本解析では、左右2セットのジョイントを考慮しているため、解析結果として両ジョイントセットの開口変位分布がそれぞれ得られる。上半掘削後の右落ち40度および左落ち50度のジョイントセットの開口変位をそれぞれ図-3と図-4に、また、全断面掘削後の右落ち40度および左落ち50度のジョイントセットの開口変位をそれぞれ図-5と図-6に示した。図より、空洞周辺においてジョイントの変形が見られ、特に壁面近傍での変形量が大きいたことがわかる。左右のジョイントセットとも、緩やかな傾斜のジョイントセットを卓越ジョイントセットとしたことに加え、初期応力として鉛直および水平応力のみを作用させ、偏圧を生じさせていないために、両ジョイントセットの分布にはそれほど大きな差はみられない。特徴的なことは、傾斜角と直交するような方向に変形する領域が広がっており、それと共役する方向には変形が見られない。また、天端付近では、両ジョイントセットが変形している。尚、全断面掘削後、トンネル下部方向に大きな変形領域の広がりが見られるが、これは、解析ではインバージョンを施していないことなどに起因しているも

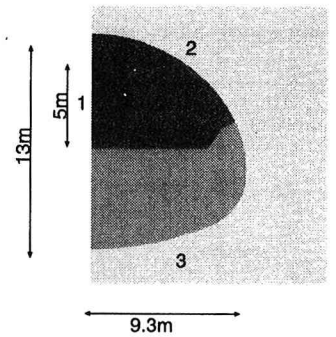


図-2 掘削規模および順序

表-1 節理特性

傾斜	左落ち50度	右落ち40度
有効寸法(L^J)	5.0 m	5.0 m
平均間隔(d)	2.0 m	2.0 m
摩擦角度(ϕ)	35°	35°
起伏角度(α)	10°	10°

表-2 支保部材の入力パラメータ

支保	弾性係数 E:(MPa)	ポアソン比 /断面積:(cm^2)
吹付けコンクリート	5.10×10^9	ポアソン比=0.2
ロックボルト	2.04×10^5	断面積=4.46

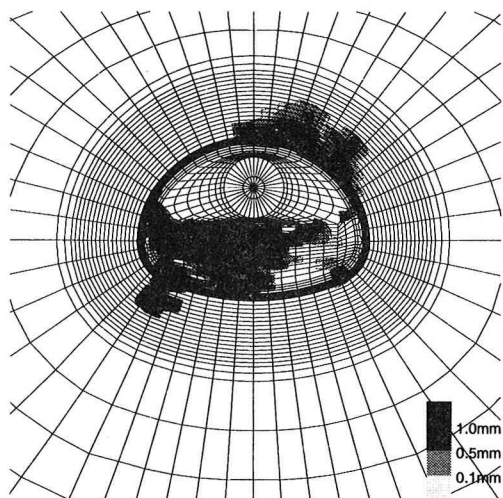


図-3 開口変位分布図 (右落ち 40 度, 上半掘削後)

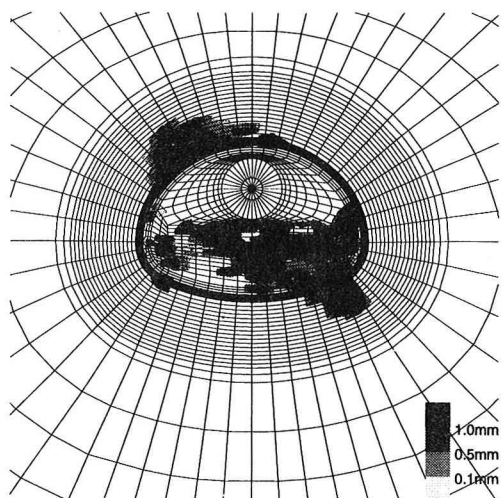


図-4 開口変位分布図 (左落ち 40 度, 上半掘削後)

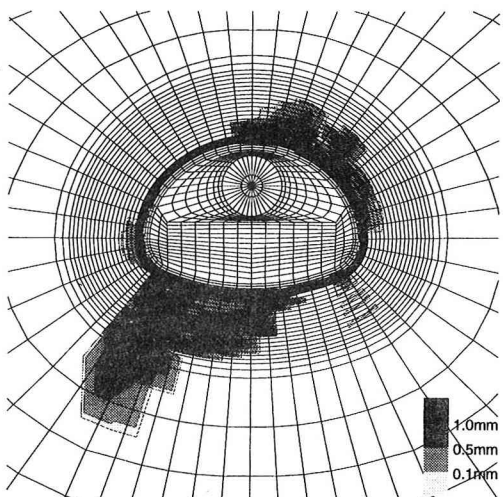


図-5 開口変位分布図 (右落ち 40 度, 下半掘削後)

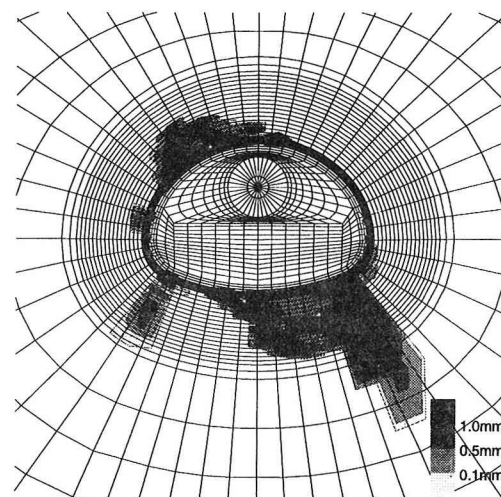


図-6 開口変位分布図 (左落ち 40 度, 下半掘削後)

のと思われる。実際の施工では、下部を一気に掘削するのではなく、両側壁付近にやや岩盤を残しながら掘削する手法などが取られているため、解析に見られるような変形領域が生じるわけではないものと思われる。

4.2.2 地中変位

本小節では、解析より求めた変位データより、トンネル壁面近傍のいくつかの測線に沿った地中変位を算出し（壁面より 12 m の点でゼロクリアしている）、それらを図-7 に示した。図中には上半および下半掘削後の地中変位がプロットされている。ただし、一番下に位置する左右の測線 E6 と E7 に関しては、下半掘削後からの変位としている。図より、上半掘削後と同時に変位が生じ、下半掘削後ではそれほど変位は増加していない。これは、図-3 から図-6 を見て分かるように、上半掘削後と下半掘削後では、ジョイントの開口変位分布はトンネル下部を除いてそれほど大きな差はない。つまり、下半を掘削しても、上半部において新たにジョイントが変形したり、上半掘削中に変形したジョイントがさらに変形するということがなく、岩盤自体の変位もほとんど生じていない。MBC 解析では、ジョイントが変形することによって岩盤の巨視的剛性が低減するため、新たにジョイントの変形などが生じない場合、岩盤自体もそれほど大きな変位を生じない。こうしたことに起因して、本解析では、下半

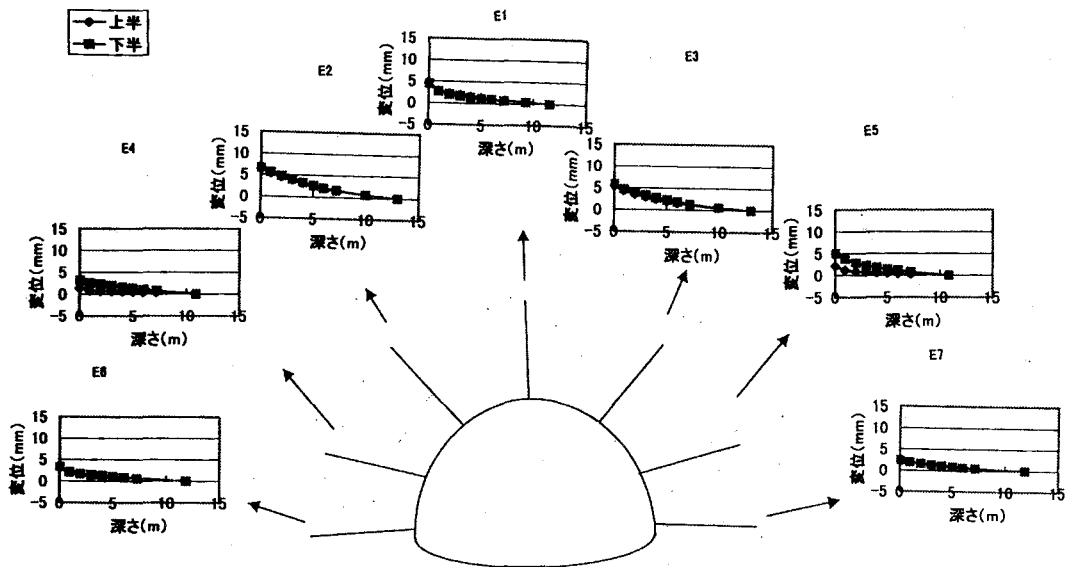


図-7 地中変位図

掘削後にはそれほど大きな地中変位の増分は生じていない。また、図-7のE4~E7に相当する箇所ではジョイントは変形しておらず、それに対応して地中変位も小さく、弾性変形の範囲にあるものと思われる。一方、壁面近傍でジョイントが変形しているその他の箇所では、地中変位も壁面近傍で大きくなっている。

5 まとめ

本研究では、大断面トンネル掘削時におけるトンネルの挙動を評価するという目的で、不連続面の挙動を解析に反映できる解析手法であるMBC解析による大断面トンネルの掘削解析を行なった。解析より、今回考えたような規模・形状の大断面トンネルでは、不連続面による影響が認められた。これより、従来の規模のトンネルで無視できる不連続面(ジョイント)も、掘削弾面積が200 m²を越えるような大断面トンネルの場合、無視できない可能性がある。したがって、地下空洞などの設計・施工に近いアプローチも、場合によっては必要になるものと思われる。今後は、大断面トンネルにおいてどのように支保が効果を発揮するかなど、支保設計がどうあるかなどについても検討していく必要があるものと思われる。

参考文献

- [1] 土木学会トンネル工学委員会編: トンネル標準施工方書, 土木学会, 1996.
- [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.
- [6] 服部邦男: 奥美濃地下発電所掘削時のゆみ領域の進展について, 第2回地下き裂のキャラクターゼーションワークショップ論文集, pp.141-145, 1992.