

地下空洞掘削における MBC 解析の現状と展望

The present status and prospect of MBC analysis for the excavation problem of tunnel and cavern

吉田秀典*, 堀井秀之**, 横澤良枝†

Hidegori YOSHIDA, Hideyuki HORII and Yoshie YOKOZAWA

Mechanical behaviors of jointed rock mass are governed by the existences and behaviors of joints in the rock mass. To find solutions to engineering problems such as design of a large scale cavern in the rock mass, the problems must be set as mathematical problems or boundary value problems in many cases. "Micromechanics-based Continuum (MBC) Modeling" provides a constitutive equations in the equivalent continuum problem by taking average of strain and stress over a representative volume element, which enables us to analyze the excavation problem of cavern. In this article, the MBC analysis is applied to the excavation problem of large-scale tunnel and discuss the present status and prospect of the MBC analysis.

1 はじめに

トンネルや地下空洞を掘削する場合、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。しかしながら、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到底不可能であるため、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望まれる。

岩盤を連続体として取り扱う場合、不連続面の特性をより客観的に評価し、岩盤のモデル化を行うことが要求される。Hill [1] が提案した複合材料の等価弾性係数を求める理論に基づいて、多くの研究者が不連続性岩盤の等価弾性コンプライアンスを評価し、解析手法を提案している。例えば、Singh [2] は、岩盤内の不連続面は周期的に分布するものと仮定し、一組の不連続面を含む代表的な岩盤要素 (Representative Volume Element, R.V.E) を取り出し、そのコンプライアンスを求めている。Yamabe ら [3] は不連続面を評価するために、Oda [4] の提唱しているクラックテンソルの概念を適用して、亀裂を含む岩盤と等価な連続体モデルとしてのクラックテンソルによる解析手法を開発している。Kyoya ら [5] は岩盤中の不連続面を、岩盤内で有効面積を減少させることによって岩盤を劣化させる損傷と捉え、これを定量化している。

解析手法の構築において重要なことは、現象を支配しているメカニズムを適切にモデル化することであるが、著者ら [6] 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。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理論とは、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内において平均化操作を行うことにより、等価な連続体としての挙動、すなわち構成式が導かれる。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、岩盤挙動の解析が可能となる。

*正会員 博士(工学) 東京大学助教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

**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

†学生員 千葉工業大学 土木工学科

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。この手法を用いて、東京電力塩原発電所 [6]、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 [7] および本体空洞 [8]、そして関西電力大河内発電所 [9] 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。

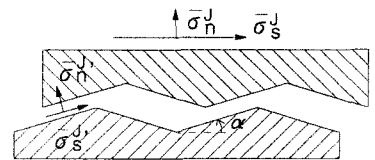
本報告では、マイクロメカニクスに基づく連続体モデルの概要を紹介し、さらにこの手法を大断面トンネルの掘削問題にも適用し、その解析結果を通して、手法の特徴や展望について考察を行う。

2 MBC モデルの概要

MBC モデルは、前章で述べたように、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）[6] が求まる。

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 [10] 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。



図一1 起伏を有するジョイント

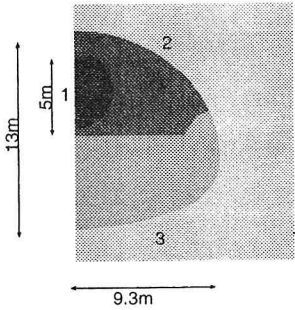
空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴って応力が解放されるとは言え、依然として圧縮場にある。圧縮下においてジョイントが開口変形を生ずるメカニズムとして、著者らは起伏を有するジョイントを考えている [6]（図1参照）。岩盤中でジョイントは局所的に見れば平坦であるが、巨視的には少なからず起伏を有している。空洞掘削時には、あるジョイント面ではせん断すべりを起こし、別の面では開口するというような複雑な挙動を起こすものと思われる。こうしたモデル化を行うことにより、ジョイントの挙動が定式化され、さらにジョイントを包含する岩盤の構成式を導くことができる。さらに導かれた構成式を有限要素解析コードに組み込むことにより、任意の岩盤構造物の掘削解析が可能となる。

4 MBC モデルによるトンネル掘削解析

これまで著者らは開発した解析手法の妥当性・適用性を検討する目的で、主として地下空洞の掘削問題を取り上げて議論してきた [6][8][9]。本章では、この手法をトンネル、特に大断面トンネルの掘削問題にも適用可能かどうかを検討するために、大断面トンネルにおける掘削解析を行う。第二東名レベルの大断面トンネルの場合、掘削断面の規模が 200 m^2 を超えるため、その規模は地下空洞、例えば岩盤タンクのアーチ部と大差がない。しか

も横に長い偏平トンネルであるため、掘削方法も、従来のトンネル掘削工法よりも、むしろ地下空洞のアーチ掘削方法に類似することが予想される。

したがって本解析においては、トンネルは図－2に示すような、横幅9.3 m、高さ13 mの規模の偏平断面を有し、その掘削については、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84 mとし、卓越ジョイントを除いた基質岩盤の弾性係数を2.040 MPa、ポアソン比を0.25、単位体積質量を2.5 t/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(21.4 MPa)とし、そして側圧係数を1.2(水平応力は25.7 MPa)として解析に用いた。



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($\bar{L}^J$)	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°

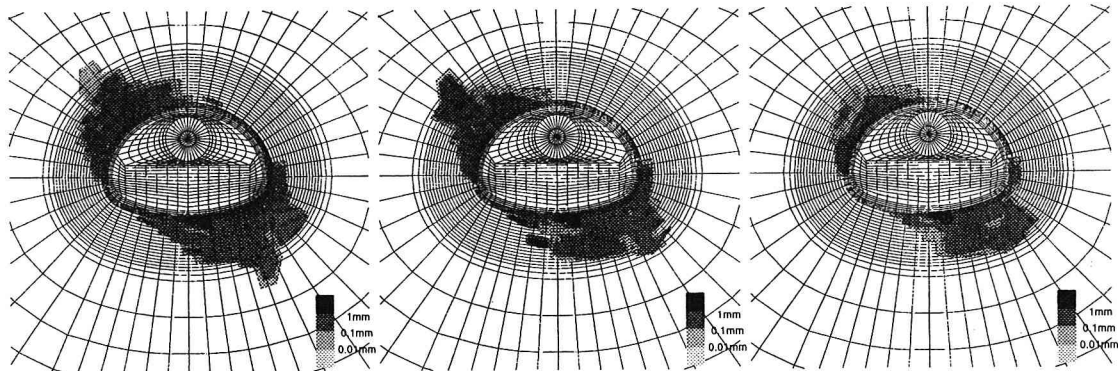
表－2 支保部材の入力パラメータ

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	5.10×10^4	ポアソン比=0.2
ロックボルト	2.04×10^5	断面積=4.46

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[6][8][9]を参考に、適当であろうと思われる値を仮定して用いた。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1 m ピッチ、下半の一部に約2 m のピッチで長さ6 m のロックボルトを計27本、また上半に20 cm、下半に厚さ10 cm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、その後に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。解析では、支保の効果を比較検討するために、(case1):無支保解析、(case2):上半吹付けコンクリートのみの解析、(case3):上半および下半吹付けコンクリート+ロックボルトを考慮に入れた解析という3通りのケースを設けた。



図－3 開口変位分布 (case1)

図－4 開口変位分布 (case2)

図－5 開口変位分布 (case3)

まず、図－3から図－5に、case1 から case3 の解析における、全断面掘削後における左落ち50度のジョイントセットの開口変位分布を示す。これより、無支保解析ではトンネル壁面近傍から広い範囲に渡って、ジョイントが変形していることが分かる。紙面の都合上掲載できないが、右落ち40度のジョイントとセットについてもほぼ同ような傾向であった。それに対して、上半に吹き付けコンクリートを施すとその領域はやや縮小し、さらにロックボルトと下半に薄い吹き付けを施すだけで、かなり領域は縮小していることが分かる。

次に、図－6から図－8に、case1 から case3 の解析における、全断面掘削後の最大せん断ひずみの分布を示す。これより、無支保による解析では、トンネルの周辺、特にトンネル天端付近でひずみレベルが大きな領域が発生

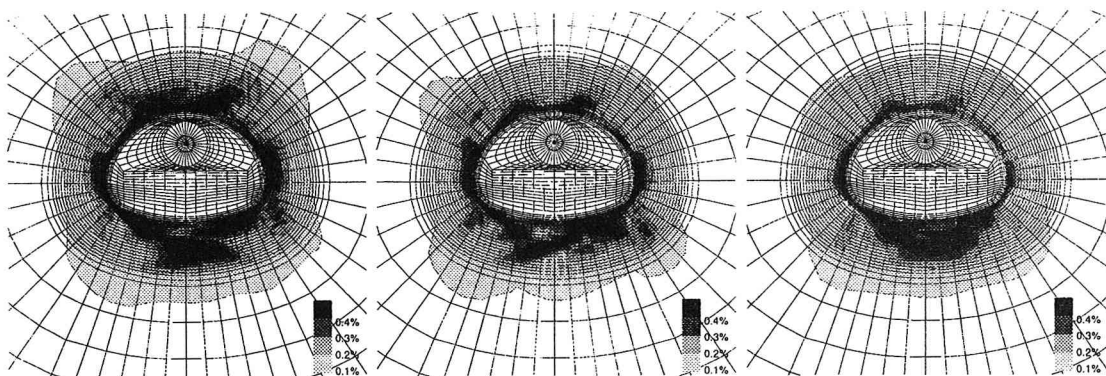


図-6 最大せん断ひずみ部分 (case1) 図-7 最大せん断ひずみ部分 (case2) 図-8 最大せん断ひずみ部分 (case3)

している。こうした領域は、ジョイントが変形した領域と一致しており、ひずみの大きな領域は支保が増すにつれて、ジョイントの開口変位領域と同様、縮小している。図-3に示した通り、天端から左斜め上の広い領域で左落ち50度のジョイントは変形しており、同様に、右落ち40度のジョイントは天端から右斜め上の広い領域で変形している。これに対応して、ほぼ同じ領域でひずみレベルが大きくなっていることが分かる。

5 まとめ

本報告では、マイクロメカニクスに基づく連続体モデルの概要を紹介し、この解析手法を大断面トンネルの掘削問題に適用した。その結果、大断面を有するトンネルにおいても、地下空洞のケースと同様、かなり岩盤深度にまで渡ってジョイントが変形する可能性があることが判明した。さらに、支保の影響を解析的に評価するために、支保パターンを変化させて解析を行ったが、解析より、支保の影響は大きく、支保の増減によって岩盤の変形量が顕著に異なることが判明した。MBC解析においては、トンネル掘削の場合においても支保の効果を議論できる可能性があるものと思われる。MBC解析は、不連続面の挙動を反映できるように開発された手法であり、不連続面の影響（岩盤力学ではジョイントなど）が顕著になるような構造物においては、有効な解析手法ではないかと考えている。さらに、支保の効果を議論できるという特徴も兼ね備えているため、今後は設計・施工において用いられるよう、支保の効果発生メカニズムなどを引き続き検討していく必要があると思われる。

参考文献

- [1] Hill, R.: Elastic Properties of Reinforced Solids, Some theoretical Principles, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.11, pp.357-372, 1963.
- [2] Singh, B.: Continuum Characterization of Jointed Rock Masses, Part-I The Constitutive Equations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.10, pp.311-335, 1973.
- [3] 山辺正, 原夏生, 小田匡寛: クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性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.
- [4] Oda, M.: Fabric Tensor for Discontinuous Geological Materials, *Solid & Found.*, Vol.22, No.4, pp.96-108, 1982.
- [5] Kyoya, T., Ichikawa, T. and Kawamoto, T.: A Damage Mechanics Theory for Discontinuous Rock Masses, *Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech.*, A.A.Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.469-480, 1985.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 吉田秀典, 堀井秀之: 地盤材料に体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.
- [9] 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.
- [10] 服部邦男: 奥美濃地下発電所掘削時のゆるみ領域の進展について, 第2回地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, pp.141-145, 1992.