

CS 47 破壊するジョイントを含む岩盤に対する Homogenization 理論

東京大学工学部 学生員 ○吉田秀典

東京大学工学部 正員 堀井秀之

1. はじめに

不連続性岩盤に対する解析手法の確立は、岩盤力学における重要な課題の一つである。地下深部において岩盤掘削をする場合、掘削前に既に高い地圧を受けて閉塞していたジョイントが、岩盤掘削後、応力解放により変形・開口し、破壊に至る。生ずるジョイントの変形量はピーク応力前の変形量に比べて非常に大きく、大規模空洞掘削の問題ではジョイントの破壊、すなわちピーク応力後の挙動を考慮しなくてはならない。一方、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取り扱うのは不可能に近く、ジョイントを含む岩盤を等価な連続体に置き換えて解析することが必要となる。大規模空洞掘削の解析を高い精度・確度で行うためには、弾性定数の低減というような解析手法では十分とは言えず、解析の基となる等価な連続体の挙動は個々のジョイントの変形・破壊というような現象を反映したものでなくてはならない。

Homogenization 理論はマイクロクラック・不均一介在物の発生・成長に支配された物体の力学的挙動に対する連続体理論の一つである。この理論によれば、まず個々の微視的構造要素をモデル化し、その挙動を定式化した上で平均化を行うことにより、等価な連続体の支配方程式が導かれる。これは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。文献[1]ではジョイントの変形に着目し、Homogenization 理論に基づきジョイントを多数有する岩盤の構成式モデルを提案している。本研究は文献[1]に変更を加え、ジョイントの変形は考慮せず、破壊するジョイントを含む岩盤の構成方程式のモデル化を行い、岩盤に対する連続体理論と解析手法の構築を目的とする。

2. 破壊するジョイントを含む岩盤の構成式

破壊するジョイントを含む岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ と平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_{ij}$ の関係は、代表要素内の応力とひずみを平均することにより次のように得られる。[3]

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta\bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_k \int_{S_k^J} (\Delta[u_i]n_j + \Delta[u_j]n_i)_k dS \quad (1)$$

ここで、 C_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 S_k^J は代表要素の k 番目のジョイント面、 n_i はその単位法線ベクトル、 $\Delta[u_i]$ はジョイントの相対変位増分である。文献[2]で示した破壊するジョイントのモデルに系の剛性という概念[3]を導入することにより、次のようにジョイントの相対変位増分が平均応力増分の関数として与えられる。

$$\Delta[u_i] = f_{ijk}(E, \nu, \lambda, \phi, \alpha, L^J) \Delta\bar{\sigma}_{jk} \quad (2)$$

ここで、 E は弾性定数、 ν はポアソン比、 λ はジョイントの連結性を表すパラメーター、 $\phi \cdot \alpha \cdot L^J$ はそれぞれジョイント摩擦角・起伏角度・代表寸法である。式(2)を式(1)に代入することで、平均応力増分と平均ひずみ増分の関係が得られ、破壊するジョイントを含む等価な連続体の平均コンプライアンスが求められる。

3. 構成方程式モデルの結果

本構成方程式モデルの解析例として、3軸に直交する一つのジョイント系を含む岩盤において、初期応力として三方向から10MPaの圧縮応力を与え、応力を徐々に0まで解放した場合のジョイントの変位と応力の関係を求めた。これは、高い応力を受けて閉塞していたジョイントが、岩盤掘削によって応力が解放され、やがて破壊に至るという状況を再現したものである。ジョイントの変位量の巨視的法線・接線方向成分と応力の関係を図1に示した。図は、応力を約3MPaまで解放したときにせん断すべりが生じ、ジョイントが破壊することを示している。応力をさらに解放するにしたがってジョイントの変位量は増大するが、ジョイントは岩盤に包含されているため、変形は適当な値に収まっている。

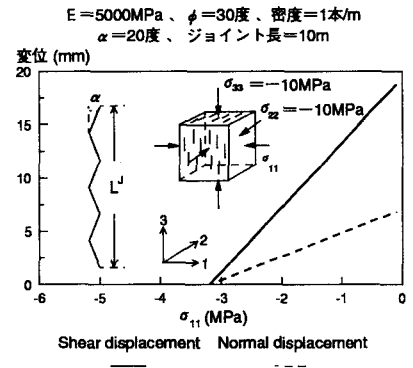


図1 解放応力とジョイントの変位の関係

4. 有限要素解析

開発された破壊するジョイントを含む岩盤の構成モデルを有限要素解析プログラムに組み込むことにより、任意の岩盤構造物に対する3次元有限要素解析を可能にした。解析例として、地下発電所建設における搬入口掘削の問題を取り上げた。掘削により岩盤の応力が解放されたケースを想定し、その際の空洞周辺のジョイントの開口量の分布（緩み域）を解析した。解析においては、問題が非線形であるため、地下空洞内の応力を徐々に比例的に解放することとした。計算では基質岩盤（コア）の弾性定数を $E = 10000\text{MPa}$ 、ジョイントの摩擦角・本数・起伏角度・代表寸法をそれぞれ $25^\circ \cdot 1\text{本/m} \cdot 20^\circ \cdot 1\text{m}$ とした。ジョイントが空洞の側壁に対して平行、及び反時計回りに 20° の傾きを持つという2例について、空洞内壁の応力を0まで解放したときのジョイントの開口変位量の分布を図2に示した。ここに空洞周辺部でジョイントが開口し、緩み域が広がっている様子が示されている。また、図2 b(20度の傾きを持つ場合)でマークの付いた地点における岩盤の変位について、本手法による解とジョイントを含まない弾性解とを併せて図3に示した。

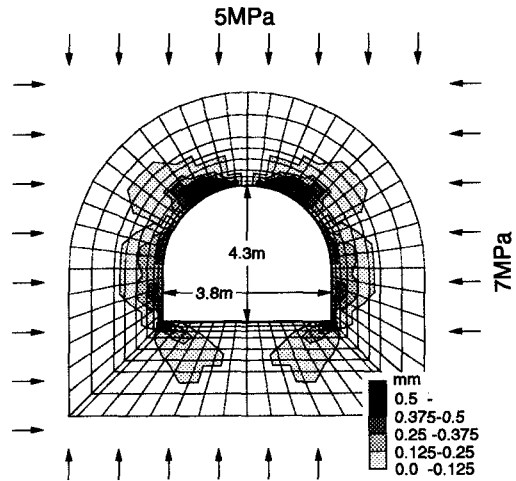


図2 a ジョイントの開口変位量（側壁に平行）

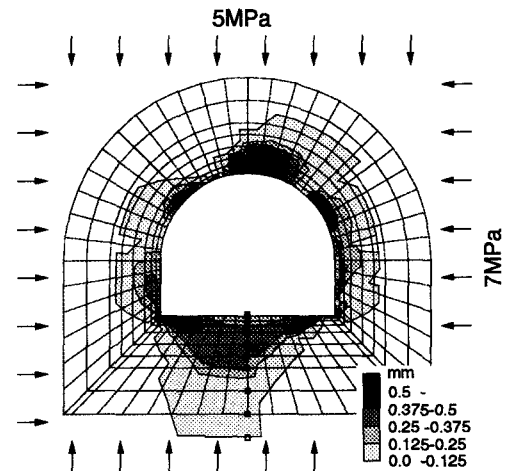


図2 b ジョイントの開口変位量（20度の傾き）

5. 考察

本研究では、破壊するジョイントを含む岩盤の構成式を Homogenization 理論 [1] に基づき導いた。その構成式を3次元有限要素解析プログラムに組み込み、地下空洞掘削の解析例を示した。本解析手法で用いた計算パラメーターは比較的少なく、弾性定数、ポアソン比の他にジョイントの摩擦角・本数・起伏角度・代表寸法である。ここではジョイントの代表寸法は与えられるものとしているが、ジョイントの進展条件を加えることにより、変形・破壊する部分の進展や基質岩石を破壊することによるジョイントの進展などを解析し、ジョイントの寸法自身が解析によって求まるようにすることが今後の課題であると考えている。

【参考文献】

- [1] Cai M. and Horii H. A constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses, *Mechanics of Materials*, **13**, pp.217-246 (1992)
- [2] 吉田, 堀井, 破壊するジョイントを含む岩盤の構成式と FEM 解析, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.91-95 (1993)
- [3] 堀井, 吉田, 久保田, 岩盤の構成式モデルにおけるジョイントの連結性の評価とその妥当性の検証, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.86-90 (1993)

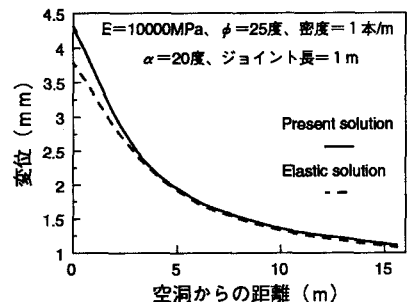


図3 空洞からの距離と変位量の関係