

(21)破壊するジョイントを含む岩盤の構成式とFEM解析

東京大学大学院 学生員 ○吉田秀典

東京大学工学部 正会員 堀井秀之

A Constitutive Equation and FEM Analysis of Rock Masses Containing Fracturing Joints

Hidehiko YOSHIDA, University of Tokyo

Hideyuki HORII, University of Tokyo

ABSTRACT

The mechanical behaviors of jointed rock masses are strongly affected by the property and geometry of joints. Cai and Horii proposed the constitutive model which represents the effects of density, orientation and connectivity of joints as well as the property of joints itself before the failure of joints. In the case of the excavation in rock masses under deep ground, the post-peak behavior of joints which are closed by the earth pressures before excavation are dominant under the stress relaxation by the excavation. In such situation, undulations of joints play an important role. Sliding along some parts of joints results in large opening at the other parts. In the present study, a constitutive model of rock masses with widely-distributed joints is proposed which considers only the post-peak behavior of joints. The stress-strain relations of jointed rock masses are formulated by taking the volume average of stress and strain over a representative volume element in which the evaluation of the relative displacement across the joint is required. The relative displacement across the joint is obtained by introducing a concept of the system stiffness. The sliding and associated opening of joints with undulations is considered where the amount of sliding and opening is determined by the constraint of the surrounding material whose effect is evaluated through the system stiffness. Then, the proposed constitutive model of jointed rock masses is implemented into a finite element analysis code with a three-dimensional element. As an example, a problem of excavation of a power station cavern is analyzed. The distribution of joint opening distribution is obtained and it is shown that regions with large opening displacement appear and the maximum opening displacement is about 10mm.

1. はじめに

岩盤は其中に多数存在するジョイントによって特徴づけられる。ジョイントを多数含む岩盤の場合、その力学的挙動はジョイントの力学的特性だけでなく、その密度・配置・連結性などに大きく依存す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、これらをそれぞれ個別に扱うことは不可能に近く、統計的にしか取り扱うことができない。したがって、工学的な問題を解決するためには、岩盤を連続体として取り扱うことのできる連続体理論が必要であるが、それにはジョイントを有する岩盤の構成方程式を要する。CaiとHoriiはHomogenization理論に基づき、岩盤の構成式をモデル化した。この構成式モデルは、ジョイントが破壊に至る前の変形を対象としている。ジョイントの特性・密度・方向性・連結性を考慮に入れることのできる新しい構成式であるが、地下深部の岩盤掘削というように、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、応力解放により破壊に至るような場合には適していない。ジョイントの変形量はジョイントが破壊に至る前の変形による成分に比べて非常に大きい。また、岩盤中でジョイントは、局所的に見れば直線的であるが、グローバルには少なからず起伏を持っており、これによってある場所ではせん断すべりを起こし、また別の場所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。このとき、こうした挙動に対してジョイントと並行な方向に作用する圧縮応力が大きな働きをするものと考えられる。例えば、空洞側壁近傍で大きく開口するジョイントの挙動は側壁周方向に作用する大きな圧縮応力を考えずに説明することは出来ない。大規模空洞掘削の解析を高い精度で行うためには、こうした現象・メカニズムを反映した連続体理論が必要である。本研究は、Caiらのモデルに変更を加

え、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を構築することを目的とする。

2. 破壊するジョイントを含む岩盤の構成方程式モデル

破壊するジョイントを含む岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ —平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_{ij}$ 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得られる²⁾。

$$\Delta\bar{\epsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta\bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_k \int_{S_k'} (\Delta[u_i] n_j + \Delta[u_j] n_i)_k dS \quad (2.1)$$

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' は代表要素 V の k 番目のジョイント面、 n_i はその単位法線ベクトル、 $\Delta[u_i]$ はジョイント面での相対変位増分を表している。したがって、ジョイント面での相対変位増分 $\Delta[u_i]$ が平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ の関数として与えられるならば、平均応力増分と平均ひずみ増分の関係を得ることができる。

ジョイント面での変位増分を材料の平均応力増分で表すために以下のような問題の重ね合わせを考える。図1に示すように、ある一つのジョイントに着目し、そのジョイントを包含する系を等価な均一材料とみなし、元の問題(a)をジョイントを含まない均一な問題(b)、ジョイントをくり抜いた問題(c)、そしてくり抜かれたジョイントの問題(d)の3つに分ける。ここで問題(c)におけるスリットの相対変位とスリットに作用する応力の関係は、系の剛性¹⁾によって与えられるものとする。すなわち、

$$\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n' = \bar{K}^n \Delta\bar{u}_n^s, \quad \Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s' = \bar{K}^s \Delta\bar{u}_s^s \quad (2.2)$$

となる。ここで、 $\bar{K}^n$ 、及び $\bar{K}^s$ はそれぞれ法線方向、及び接線方向の系の剛性であり、 $\Delta\bar{u}_n^s$ 、及び $\Delta\bar{u}_s^s$ はそれぞれ、表面に応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_n' - \Delta\bar{\sigma}_n$ 、 $\Delta\bar{\sigma}_s' - \Delta\bar{\sigma}_s$ が作用する問題(c)のスリットにおける法線方向、及び接線方向の相対変位増分である。変位の適合条件を考慮すると、ジョイントとスリットにおける両者の変位増分量は等しい。つまり、

$$\Delta\bar{u}_n^s = \Delta\bar{u}_n', \quad \Delta\bar{u}_s^s = \Delta\bar{u}_s' \quad (2.3)$$

である。ここで、 $\Delta\bar{u}_n'$ 、及び $\Delta\bar{u}_s'$ はそれぞれジョイントにおける法線方向、及び接線方向の相対変位増分である。

前述の通り、岩盤中でジョイントは局所的に見れば直線的であるが、巨視的には完全に平面ではなく、大きな周期の起伏を有しているものと考えられる。そこで本研究では、ジョイントの起伏の影響を考慮するために、図2のように鋸の歯型をしたジョイントを考える。ジョイントの変形は、一方の面におけるせん断すべりにより生じ、この場合、他方の面が開口するものとした。

破壊の条件は、次式で与えられる。

$$|\bar{\sigma}_s''| = -\bar{\sigma}_n'' \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n'' < 0 \quad (2.4)$$

ここで、 ϕ はジョイント面の摩擦角であり、 $\bar{\sigma}_n''$ 、 $\bar{\sigma}_s''$ は起伏を持つジョイントに作用する法線方向、及び接線方向の平均応力である。起伏を持つジョイントのどちらの面ですべるかは、そのときの応力を比較し、 $|\bar{\sigma}_s''/\bar{\sigma}_n''|$ の大きい方の面でせん断すべりが生じ、他方の面ではジョイント面の開口が起こるためストレスフリーになる。

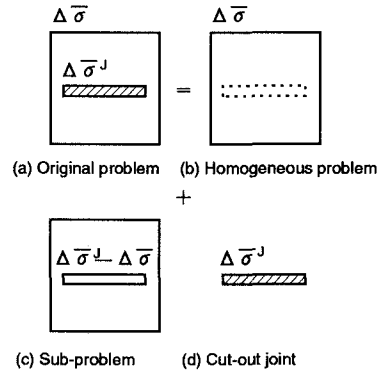


図1 問題の重ね合わせ

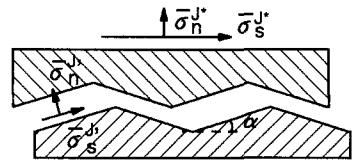


図2 起伏を有するジョイント

また、ジョイントに作用する法線方向・接線方向の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_n^*$ ・ $\Delta\bar{\sigma}_s^*$ は、次のように表される。

$$\begin{aligned}\Delta\bar{\sigma}_n^* &= a_1(\alpha)\Delta\bar{\sigma}_n'' + a_2(\alpha)\Delta\bar{\sigma}_s'' \\ \Delta\bar{\sigma}_s^* &= a_3(\alpha)\Delta\bar{\sigma}_n'' + a_4(\alpha)\Delta\bar{\sigma}_s''\end{aligned}\quad (2.5)$$

ここで、 $a_i(\alpha)$ は起伏角度 α の三角関数を含む係数である。

さらに、ジョイント面においてせん断すべりを起こしている間、応力増分は次の条件を満たすものと仮定する。

$$|\Delta\bar{\sigma}_s^*| = |\Delta\bar{\sigma}_n^*| \tan \phi \quad (2.6)$$

ジョイントのすべりを生じている面における変位成分は、せん断方向のすべりのみを生じて、法線方向には変位を生じないものとする。これは局所的なダイレイテーションが起伏によるダイレイテーションに比べて小さく、無視できるからである。これより、ジョイントの変位増分の巨視的法線・接線方向成分と局所的な法線・接線方向成分の関係は次のように表される。

$$\Delta\bar{u}_s^* = \Delta\bar{u}_s'' \cos \alpha, \quad \Delta\bar{u}_n^* = \Delta\bar{u}_s'' \sin \alpha, \quad \Delta\bar{u}_n'' = 0 \quad (2.7)$$

式(2.2)・(2.3)・(2.5)・(2.6)・(2.7)を連成する事により、ジョイント面上の変位増分が応力増分の関数として求められる。ただし、ここで式に含まれる系の剛性は未知である。

そこで系の剛性をさ定まれば、式(2.1)を用いて平均応力増分と平均ひずみ増分の関係を得ることができるわけであるが、あるジョイントを包含する岩盤の剛性である系の剛性を定めるためには、系に含まれるジョイントの挙動により系の剛性が低減する効果を評価しなければならない。そこで参考文献[1]で提案されているHomogenization理論を用い、この系の剛性の低減を算定する。最初に、系がジョイントを含まない基質岩石であるとして岩盤の接線コンプライアンステンソルを求める。次に、この求められた接線コンプライアンステンソルを持った等価な岩盤中にジョイントがあるものとして同様の計算を行い、最終的な岩盤の接線コンプライアンステンソルが得られる。

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、 x_1 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、それから応力 σ_{11} を徐々に0まで解放する場合の、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、岩盤掘削などによって応力が解放され、やがて破壊に至るといった状況を再現したものである。計算に用いたパラメータは、弾性定数 $E=5000\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.25$ 、ジョイント面の摩擦角 $\phi=30$ 度、ジョイントの起伏の角度 $\alpha=20$ 度、ジョイントの代表寸法 $L'=10\text{m}$ とした。ジョイントの変位量の巨視的法線・接線方向成分、 $\Delta\bar{u}_n^*$ 、 $\Delta\bar{u}_s^*$ と応力 σ_{11} の関係を図3に示した。図より、応力 σ_{11} を約3MPaまで解放したときに、ジョイントにおいてせん断すべりが生じ、ジョイントが破壊することが示されている。そして、応力をさらに解放するに

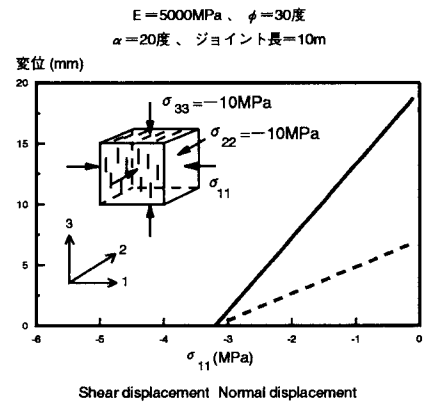


図 3 応力 σ_{11} とジョイントの変位量の関係

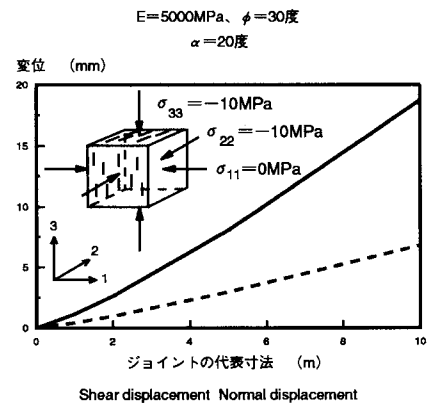


図 4 異なるジョイント代表寸法と最大変位量

したがってジョイントの変位量は増大する。

さらに同じ条件で応力を0まで解放したときの、ジョイントの変位量をジョイントの代表寸法の関数として図4に示した。これよりジョイントの代表寸法が大きいほど変位量もまた、それに比例して大きくなることが分かる。

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地下空洞掘削の問題を取り上げた。地下発電所掘削によって岩盤の応力が解放されたケースを想定し、その際に地下空洞周辺の岩盤内に存在するジョイントがどの程度開口し、また緩み域がどのように広がっていくかを解析した。計算パラメーターは、弾性定数 $E=5000\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.25$ 、応力は鉛直方向、及び水平方向からそれぞれ 6MPa 、 10MPa 、ジョイント面の摩擦角 $\phi=30$ 度、ジョイントの密度 $S'/V=1.0\text{ m}^{-1}$ 、ジョイントの代表寸法 $L'=10\text{m}$ 、ジョイントの起伏の角度 $\alpha=20$ 度とした。用いたジョイント密度のパラメーターは、 $100\text{m}\times100\text{m}\times100\text{m}$ の立方体中に $10\text{m}\times10\text{m}$ 程度の寸法のジョイントが10000個存在している場合に対応している。このとき平均のジョイント間隔は1本/mである。

解析においては、問題を簡単にするために、掘削過程を再現するのではなく、地下空洞内の応力を徐々に比例的に解放することにした。各ステップごとに各要素においてジョイントに作用する応力を計算し、その応力成分より最大せん断応力の方向を算出して、すべりを生じる条件である式(2.4)を満たしていれば、すべる方向、及びすべるジョイント面を決定し、ジョイントの変位量を計算する。ジョイントが地下発電所の側壁に対して並行、及び反時計回りに10度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5、図6にそれぞれ示した。地下空洞の周辺部において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。図5はジョイントが地下発電

所の側壁に対して並行であるため、解析結果は左右対称になっているが、図6はジョイントが側壁に対して若干傾いているため、地下空洞に対して右に振れた方向にジョイントの開口量が大きい。本解析では最大で13

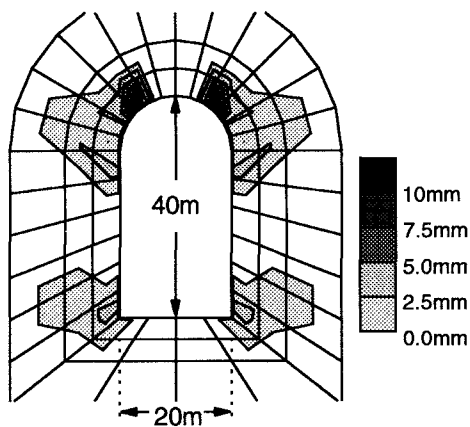


図5 応力解放時のジョイントの開口変位量
(ジョイントが地下発電所の側壁と並行な場合)

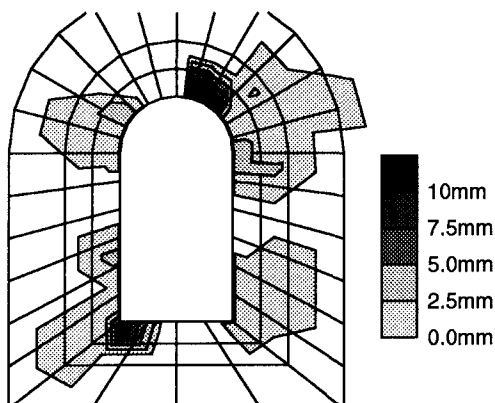


図6 応力解放時のジョイントの開口変位量
(ジョイントが地下発電所の側壁に対して10度の傾きを持つ場合)

mm程度の開口変位量が計算から求められており、ボアホールカメラを用いて観察された結果と比較して、これは定量的に一致している³⁾。

また、ジョイントが地下発電所の側壁に対して並行であるケースについて、応力解放時の岩盤の変位分布を図7に示した。解析による岩盤の変位量の最大値は、地下発電所側壁の中央付近に見られ、約75 mmである。

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。本解析によれば、空洞側壁のはらみ出しなどの変形量だけでなく、同時にジョイントの開口変位量の分布を求めることができる。理論はジョイントのピーク後の挙動に基づいているが、こうしたジョイントの破壊基準に対してジョイントとほぼ並行方向に作用する圧縮力が大きく影響するという点に着目し、モデル化しているということがキーポイントである。

入力データは基質岩盤の弾性定数、ポアソン比以外にジョイントの代表寸法、ジョイントの密度、ジョイントの方向分布、ジョイント表面の摩擦角、及びジョイントの起伏を表す角度である。例えば、ボアホールカメラを用いてジョイントの間隔やシュミットネットを求め、コアに現れたジョイント面の摩擦角を測れば、後はジョイントの代表寸法と起伏を表す角度を推定することにより解析を行うことができる。

本研究ではジョイントの代表寸法は一定であるとして定式化を行ったが、実際には応力解放（または載荷）にしたがって変化するものであると考えられる。既存のジョイントが変形・破壊する場合も、ジョイントが進展し、基質岩盤を破壊する場合についてもモデルを拡張することが可能であり、これは今後の課題の一つであると考えている。進展するジョイントはHomogenization理論から見れば微視的構造要素の発展であり、通常用いられている方法に従い、ジョイントの進展則を仮定して理論に組み合わせてやればよい。結果として、例えば空洞掘削解析であれば応力解放にしたがって、あるジョイントが破壊を開始し、破壊しているジョイントの寸法を増大していくという結果が得られるものと考えられる。

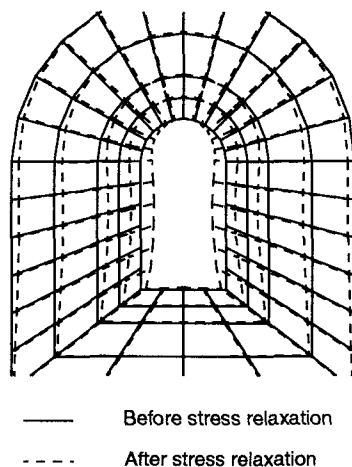


図 7 応力解放時の岩盤の変位分布

[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) Horii H. and Nemat-Nasser S. Overall Moduli of Solids with Microcracks: Load-Induced Anisotropy, *J. Mech. Phys. Solids*, **31**, pp. 155-171 (1983)
- 3) 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、pp141-145 (1992)
- 4) 堀井、吉田、久保田、岩盤の構成モデルにおける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 (掲載予定)