

破壊するジョイントを含む岩盤の構成式のモデル化

The Modeling of Constitutive Equation of Rock Masses Containing Fracturing Joints

吉田秀典* 堀井秀之**

By Hidenori YOSHIDA and Hideyuki HORII

Mechanical behaviors of jointed rock masses are strongly affected by the property and geometry of joints. In the case of the excavation under deep ground, the large opening and sliding of joints which are closed by the earth pressure before excavation are dominant under the stress relaxation by excavation. In such a situation, large-scale undulations of joints play an important role. In the present study, a constitutive model of rock masses with 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 joint is required. The relative displacement across 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.

Key Words: Fracturing Joints, Constitutive Model, FEM Analysis

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、掘削前に非常に高い地圧を受けて閉塞していたジョイントが応力解放により開口・せん断すべりを生ずることが、岩盤挙動の支配的メカニズムであると考えられる。この時のジョイントの変位量は、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く、大規模空洞、例えば地下発電所などの掘削では、こうしたジョイントの破壊、すなわちピーク後の挙動を考慮しなくてはならない。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有しており、破壊時には、ある場所ではせん断すべりを起こし、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。しかも、空洞側壁周辺では周方向に大きな圧縮力が作用し、この圧縮力に平行なジョイントが存在する場合、ジョイントはこの圧縮力により大きく開口するものと思われる。しかしながら、岩盤中において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必要がある。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、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。

文献¹⁾ではジョイントの変形に着目し、マイクロメカニクスに基づきジョイントを多数有する岩盤の構成モデルを提案している。本研究はこれに変更を加え、ジョイントの変形は考慮せず、ジョイントのピーク後の挙動(本研究ではこれを破壊するジョイントと定義している)のみに着目し、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。

* 工修 東京大学工学部大学院 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

** Ph.D 東京大学工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

2. 破壊するジョイントを含む岩盤の構成方程式モデル

(1) 平均応力—平均ひずみ関係

ジョイントを有する岩盤の応力—ひずみ関係は、代表要素内の応力とひずみを平均化することにより得られる。平均応力 $\bar{\sigma}$ と平均ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は次式で定義される²⁾。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV, \quad \bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV \quad (1)$$

ここで、 V は代表要素の体積である。代表要素内で平均応力 $\bar{\sigma}$ はジョイント除いた基質岩石の平均応力 $\bar{\sigma}^R$ と同じであるが、平均ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は基質岩石の平均ひずみ $\bar{\varepsilon}^R$ とは異なる。ただし、応力は引張が正である。ひずみ—変位関係 $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ を式(1)に代入し、それに発散定理を用いることにより次式が得られる。

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

ここで、 S^J はジョイントの表面、 n_i はジョイント面での単位法線ベクトル、 $[u_i]$ はジョイント面での不連続量(相対変位量)をそれぞれ表している。また、基質岩石は均質な弾性体に見なせるものとし、 $\bar{\varepsilon}_{ij}^R = C_{ijkl}^R \bar{\sigma}_{kl}$ を用いた。一般にジョイントの力学的応答は非線形であるため、式(2)を増分方程式に書き換えると、

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_k \int_{S_k^J} (\Delta [u_i]n_j + \Delta [u_j]n_i)_k dS \quad (3)$$

となる。ここで、 S_k^J は代表要素 V の k 番目のジョイントの表面を表している。したがって、相対変位増分 $\Delta [u_j]$ が平均応力増分の $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$ の関数として与えられるならば、式(3)より岩盤の構成式が、

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = \bar{C}_{ijkl} \Delta \bar{\sigma}_{kl} \quad (4)$$

と、得られる。ここで、 \bar{C}_{ijkl} は破壊するジョイントを含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスである³⁾。

(2) 岩盤中のジョイントの挙動

ジョイント面での相対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、

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\sigma}_n - \Delta \bar{\sigma}_n^J &= \bar{K}_n \Delta [\bar{u}_n^S], \\ \Delta \bar{\sigma}_s - \Delta \bar{\sigma}_s^J &= \bar{K}_s \Delta [\bar{u}_s^S] \end{aligned} \quad (5)$$

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、

$$\bar{K}_n = \frac{E}{\lambda_n L^J}, \quad \bar{K}_s = \frac{G}{\lambda_s L^J} \quad (6)$$

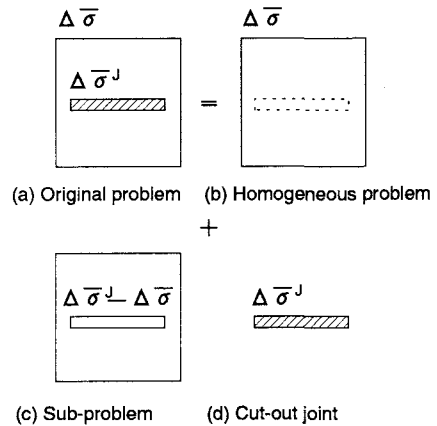


図1 問題の重ね合わせ

と、与えられる。ここで、 \bar{E} 、 \bar{G} はそれぞれジョイントの垂直方向の等価ヤング係数、及び等価せん断係数で、 λ_n 、 λ_s はジョイントの連結性を表すパラメーターである。式(5)において、 $\Delta[\bar{u}_n^S]$ 、及び $\Delta[\bar{u}_s^S]$ はそれぞれ、表面に応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n^J$ 、 $\Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s^J$ 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相対変位増分量は等しい。つまり、

$$\Delta[\bar{u}_n^S] = \Delta[\bar{u}_n^J], \quad \Delta[\bar{u}_s^S] = \Delta[\bar{u}_s^J] \quad (7)$$

である。ここで、 $\Delta[\bar{u}_n^J]$ 、及び $\Delta[\bar{u}_s^J]$ 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のようにのこぎり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。

破壊の条件としては、次式に示すようなクーロンの破壊条件を用いた。

$$|\bar{\sigma}_s^J| = -\bar{\sigma}_n^J \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^J < 0 \quad (8)$$

ここで、 ϕ はジョイント面の摩擦角であり、 $\bar{\sigma}_n^J$ 、 $\bar{\sigma}_s^J$ は起伏を有する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。(図2参照)

また、ジョイントの一方の面でせん断すべりが生じた場合、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ものと仮定した。したがって、図1(d)のくり抜かれ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 $\Delta\bar{\sigma}_n^J$ ・ $\Delta\bar{\sigma}_s^J$ は、起伏を有するジョイントに作用する平均応力増分を用いて、力のつりあいより次のように表される。

$$\Delta\bar{\sigma}_n^J = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^J \tan \alpha + \Delta\bar{\sigma}_n^J), \quad \Delta\bar{\sigma}_s^J = \frac{1}{2}(\Delta\bar{\sigma}_s^J - \Delta\bar{\sigma}_n^J \tan \alpha) \quad (9)$$

ここで、 α は起伏角度である。

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。

$$\Delta\bar{\sigma}_s^J = \begin{cases} -\Delta\bar{\sigma}_n^J \tan \phi & \alpha > 0 \\ \Delta\bar{\sigma}_n^J \tan \phi & \alpha < 0 \end{cases} \quad (10)$$

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数 m にもおよぶ巨視的なジョイントの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、ジョイントの相対変位増分の巨視的法線・接線方向成分と局所的法線・接線方向成分の関係は次のように表される。

$$\Delta[\bar{u}_n^J] = \Delta[\bar{u}_s^J] \sin \alpha, \quad \Delta[\bar{u}_s^J] = \Delta[\bar{u}_n^J] \cos \alpha, \quad \Delta[\bar{u}_n^J] = 0 \quad (11)$$

式(5)・(6)・(7)・(9)・(10)・(11)を連成する事により、ジョイント面上の相対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。

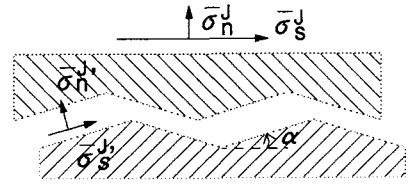


図2 起伏を有するジョイント

そこで系の剛性さえ定まれば、式(3)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、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を得る。

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3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、やがて開口・せん断すべりを生じるという状況を再現したものである。計算に用いたパラメータは、岩石コアの弾性定数 $E = 5000\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.25$ 、ジョイント面の摩擦角度 $\phi = 30$ 度、ジョイントの密度 $S^J/V = 1\text{m}^{-1}$ 、ジョイントの起伏角度 $\alpha = 20$ 度、ジョイントの代表寸法 $L^J = 10\text{m}$ 、ジョイントの連結率を法線方向 $\lambda_n = 1.592$ 、せん断方向 $\lambda_s = 12.0$ とした。用いたジョイント密度のパラメータ $S^J/V = 1\text{m}^{-1}$ は、 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$ の立方体中に 10m 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。ジョイントの変位量の法線・接線方向成分と応力 σ_{11} の関係を図3に示した。

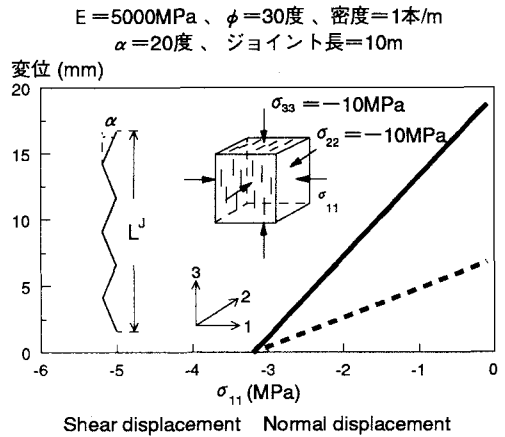


図3 応力解放に伴うジョイントの変位量

図は、応力 σ_{11} を約3MPaまで解放したときにジョイント面上で応力成分が式(8)を満たし、ジョイントがせん断すべりを生じることを示している。応力をさらに解放すると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、変形は有限な値に収まっている。ジョイントの変位量は、ジョイントの代表寸法・密度に依存する。

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機器搬入坑掘削の問題を取り上げた。機器搬入坑の寸法としては、図4に示す程度のものを仮定した。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。初期応力として、図4のように鉛直応力=5MPa、水平応力=3MPaをそれぞれ圧縮で作用させ、計算パラメータは、岩石コアの弾性定数 $E = 10000\text{MPa}$ 、ジョイントの代表寸法 $L^J = 1\text{m}$ とし、それ以外のパラメータは前章と同じものを用いた。ジョイント密度のパラメータ $S^J/V = 1\text{m}^{-1}$ は、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ の正方形に 1m 程度の寸法のジョイントが100個存在している場合に対応しており、この時のジョイントの平均間隔は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、その応力成分がすべりを生じる条件である式(8)を満たしていれば、すべる方向を決定し、ジョイントの変位量を計算する。

ジョイントの走向が機器搬入坑の軸に平行で傾斜が右落ち90度、及びジョイントの走向が機器搬入坑の軸に平行で傾斜が右落ち70度という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4、図5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ており、本研究ではこの開口変位分布が岩盤の緩み域に相当するものと考えている。いずれのケースでも、搬入坑の近傍でジョイントの開口変位量が大きく、岩盤の緩み域は搬入坑の坑壁からおよそ4mである。図4はジョイントが搬入坑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5はジョイントが側壁に対して傾いているため、地下空洞に対して左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0.5mm程度の開口変位量が計算から求められている。

また、ジョイントの傾斜が右落ち70度というケースについて、応力解放時の岩盤の変位分布を図6に示した。括弧の中に示した値はジョイントを含まない、つまり弾性解である。解析による岩盤の変位量は、機器搬入坑側壁の中央付近で約1.08mm、天端部で約3.28mmであり、いずれの値も弾性解よりも若干大きい。図に示した例はあまり顕著ではないが、一般には岩盤が緩んだ(ジョイントが開口した)付近で岩盤の変位が大きい。

さらに、図5でマークの付いた地点における搬入坑中心向きの岩盤変位量を図7にプロットした。ここではジョイントの物性パラメーターである、ジョイントの代表寸法とジョイントの密度を変化させ、ジョイントを含まない弾性解と併せて示した。ジョイントを含む岩盤の変位量は、岩盤が緩んだ領域(この場合、坑壁より約4m)で弾性解よりも大きく、ジョイントの代表寸法・密度が大きくなるにしたがって増大することがわかる。岩盤が緩んでない領域では、全てのケースで弾性解とほぼ一致している。ジョイントの代表寸法が5m、密度が $5m^{-1}$ の場合、坑壁のはらみだし量は弾性解の4倍以上である。したがって、これらのパラメーターは岩盤の変位特性を評価するうえで重要であると思われる。

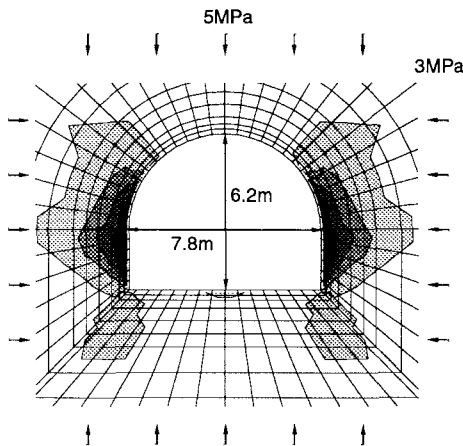


図4 ジョイントの開口変位量
(ジョイントの傾斜が右落ち90度)

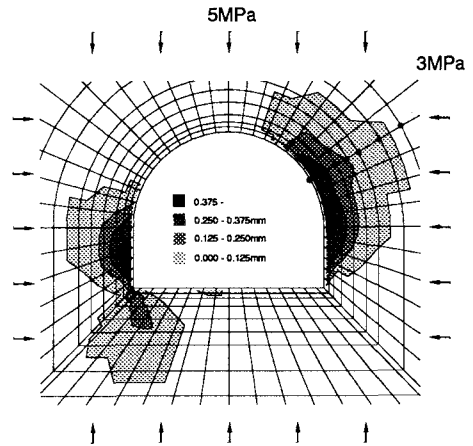


図5 ジョイントの開口変位量
(ジョイントの傾斜が右落ち70度)

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マイクロメカニクスに基づき導いた。その構成式を

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・岩盤の緩み域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平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特徴の一つである。本解析に必要な入力データは比較的少なく、基質岩石の弾性定数、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、ジョイントの連結率、及びジョイントの起伏を表す角度である。例えば、ポ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・連結率・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。

得られた解析結果より、ジョイントの代表寸法とジョイントの密度が増大するにしたがい、岩盤の緩み域は拡大し、地下空洞への岩盤のはらみだし量は大きくなるのがわかる。ただし、本解析ではロックボルトや吹き付けコンクリートの影響を考慮していないため、ロックボルトや吹き付けコンクリートを施工する場合の岩盤変位やジョイントの開口変位量は解析結果よりも小さいものと考えられる。この点は本研究の今後の課題である。

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、基質岩石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、これも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マイクロメカニクスの立場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したがい、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が増大していく、という結果が得られるものと考えられる。

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) 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) 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、pp86-90 (1993)

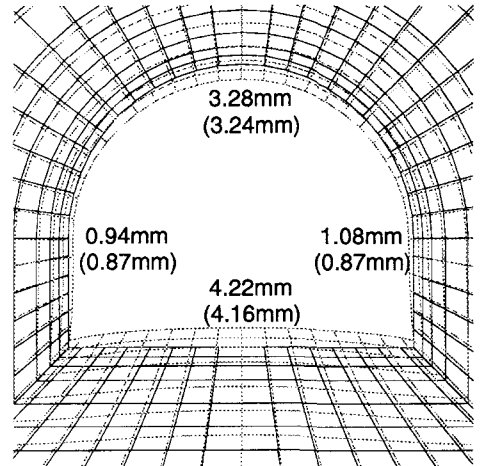


図6 岩盤変位量

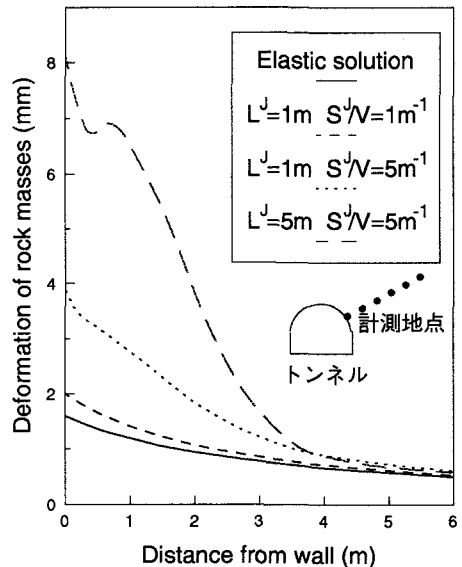


図7 種々のパラメーターと岩盤変位量

(1992年9月16日 受付)