

トンネル断面の平均ひずみによる岩盤の変形挙動の表現

○千葉工業大学 正 員 吉田 秀典
 千葉工業大学 学生員 日比野繁信
 東京大学 正 員 堀井 秀之

1. はじめに

我が国の岩盤は、多くの不連続面を含むため、その挙動は強い異方性を示すという特徴がある。こうした地点に大規模地下空洞、例えば地下発電所空洞の掘削を行う場合、その設計・施工管理において岩盤の変形メカニズムを捉えた解析手法を用いることが重要である。著者らは不連続性岩盤に対する解析手法の一つとして、マイクロメカニクスに基づいた連続体理論(MBCモデル)を提案している¹⁾。この手法は、空洞掘削時に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なメカニズムとして捉えた、不連続性岩盤に対する連続体理論に基づいている。この解析手法が現実の計測や施工管理において利用可能となるためには、その入力データを現位置試験や地質調査から客観的に決められなければならない。入力データの中には、卓越ジョイントの方向や平均間隔など地質調査より比較的容易に得られるデータもあるが、ジョイントの有効長さや起伏角など測定し難いものもある。著者らは、例えば地下発電所掘削に先行して行われるトンネル掘削を現位置応力解放試験として捉え、それより得られる計測結果、例えば内空変位のデータより、解析に必要な入力データの同定を行う手法を提案している²⁾。本研究ではその手法に改良を加え、トンネル断面の平均ひずみをパラメータとして用いる方法を提案し、各種のジョイントパラメータとトンネル断面の平均ひずみの関係を前述の解析手法を用いて調べる。

2. トンネル断面の壁面変位と平均ひずみ

本研究では、岩盤の変形を表すパラメータとして、トンネル断面の平均ひずみを提案する。平均ひずみは以下に示すように、計測された壁面変位(u_i)より計算される。トンネル断面の壁面変位と平均ひずみ($\bar{\varepsilon}_{ij}$)の関係は、発散定理を用いて、

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{A} \int_{c^t} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dc \dots\dots\dots (1)$$

と求まる。ここで、 A はトンネルの断面積、 n_i はトンネルの壁面に対する単位法線ベクトルの成分、 c^t はトンネル壁面の周長である。求められた3成分の平均ひずみより、主ひずみ($\bar{\varepsilon}_{max}, \bar{\varepsilon}_{min}$)と最大主ひずみの方向(θ)を求め、岩盤の変形を表すパラメータとする。断面の平均ひずみは局所の変形成分に影響されずに岩盤の全体的挙動を表すことが出来る。トンネル断面の平均ひずみをパラメータに選べば、壁面変位(内空変位)の計測数を増やしても取り扱うパラメータの数は増えない。以下では、マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体解析手法を用いてトンネルの掘削解析を行い、ジョイントのパラメータなどを変化させた場合のトンネル断面の平均ひずみの変化を調べる。

3. 解析概要と解析結果

(1) 解析概要

解析では、図1に示すような半径10mの円形トンネルを想定し、200m×200mの矩形領域について、二次元平面ひずみの条件下で解析を行った。また、卓越したジョイントを除いた、連続体として扱える基質岩盤の弾性係数を100,000kgf/cm²、ポアソン比を0.25とした。岩盤の単位体積重量を2.5gf/cm³と仮定し、それに土被り(500m)を乗じた値を初期鉛直応力とした。初期最小(水平)応力(σ_{min})と初期最大(鉛直)応力(σ_{max})との比($\sigma_{min}/\sigma_{max}$ 、以後、応力比と呼ぶ)は、0.6、0.7、0.9、1.0と設定した。ジョイントの起伏角度を10度、ジョイント面の摩擦角を25度と固定し、種々のジョイントの平均間隔(d)、有効長さ($\bar{L}=2a$)のもとで解析を行った。

(2) 解析結果

まず、種々の $d/2a$ に対する応力比と最大主ひずみの方向（水平方向より反時計回り）の関係を図2に示した。ただし、解析断面に対してジョイントの傾斜角を右落ち70度、初期最大圧縮応力を鉛直方向とした。最大主ひずみの方向は、ジョイントの密度が小さい ($d/2a$ が大きい) 場合、ジョイントによる変形の影響よりも、初期応力による影響が大きく、主ひずみの方向は鉛直方向（水平より90度）に近づく。逆にジョイントの密度が大きくなると、ジョイントの変形による影響を強く受け、最大主ひずみの方向はジョイントに対して垂直方向（この場合は水平より反時計回りに20度）に近づく。応力比が1の場合は、応力が等方状態にあるため、岩盤の変形に対してはジョイントの変形による影響のみが現れる。また、応力比が小さいほど初期応力の影響が卓越する。

次に、応力比を0.6とした時の種々の $d/2a$ に対するジョイントの傾斜角（右落ち）と最大主ひずみの方向との関係を図3に示した。ジョイントの密度が小さい場合、岩盤の変形は初期応力に強く影響を受けて主ひずみの方向は90度（鉛直方向）に近くなる。一方、ジョイントの密度が大きいとジョイントの変形の影響が大きくなり、最大主ひずみの方向はジョイントに対して垂直の方向（90度-傾斜角）に近づく。

4. 解析パラメータの同定方法

著者らはトンネル掘削において計測される内空変位の比を用いて解析パラメータを同定する方法を提案した²⁾。この方法では、計測点を増やした場合には内空変位の比も増加する。ここでは多数の変位比を用いる代わりに、掘削断面の平均ひずみを用いる方法を提案する。まず、平均ひずみより等方的、あるいは連続体的変形成分と土被りの影響を除去するために、これらより最大せん断ひずみ ($\frac{\epsilon_{max}-\epsilon_{min}}{2}$) と体積ひずみ ($\epsilon_{max}+\epsilon_{min}$) の比（ひずみ比）をとる。そして、解析から求まるひずみ比、及び最大主ひずみの方向 (θ) と計測から得られた両者の誤差の二乗和をとる。つまり、

$$\text{誤差} = \left(\frac{\text{解析ひずみ比}}{\text{計測ひずみ比}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\text{解析最大主ひずみ方向}}{\text{計測最大主ひずみ方向}} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

を計算する。この値は、解析値が計測値に近ければ小さくなり、逆に解析値が計測値と離れていれば大きくなる。この誤差を各種ジョイントのパラメータ、初期応力について計算し、誤差を最小にする組合せを探すことにより、地下空洞掘削解析に必要な解析パラメータを決定する。さらに、こうして求めた解析パラメータのもとで平均ひずみを計算し、計測値と比較することにより、卓越ジョイントを除いた、連続体として扱われる基質岩盤の弾性係数を同定することができる。

参考文献

- 吉田, 堀井, 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地下空洞掘削の解析, 土木学会論文集, 1995 (投稿中)
- 吉田, 林, 堀井, トンネル掘削時の内空変位の計測結果による解析パラメータの同定, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, pp426-430 (1995)

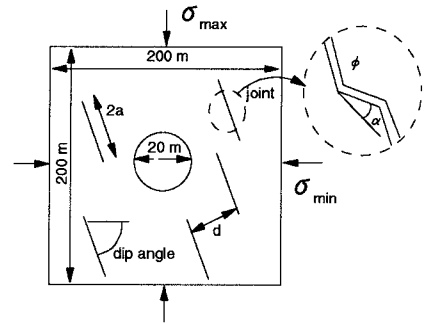


図1 解析概要

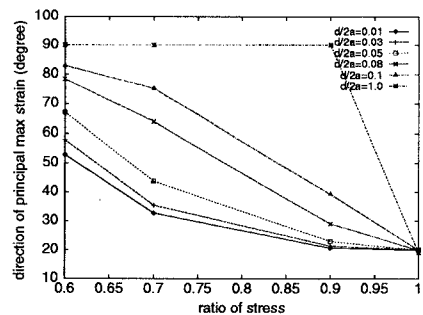


図2 応力比と主ひずみの方向の関係

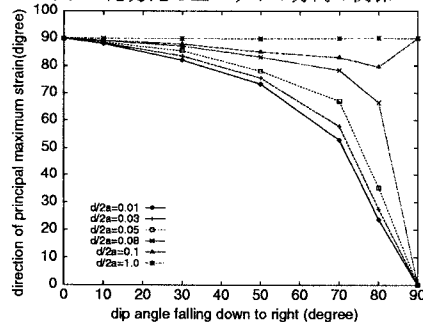


図3 傾斜角と主ひずみの方向の関係