

III-363

節理性岩盤におけるトンネル掘削のFEM解析

東京大学 学生員 吉田秀典
 東京大学 正 員 堀井秀之

1. まえがき

節理性岩盤の空洞掘削においては、初期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せん断すべり・開口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。そうしたジョイントの変形特性はジョイントを包含している岩盤の剛性に依存する。本研究では、このようなメカニズムを考慮し、ジョイントを多数含む岩盤の構成式のモデル化を行い、こ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、任意の岩盤構造物の解析手法を開発・提案する。解析例としてトンネル掘削問題を取り上げ、ジョイントを多数含む岩盤の変形特性の解析を行う。

2. 解析手法

(1) 破壊するジョイントを含む岩盤の構成方程式

破壊するジョイントを含む岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}$ と平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}$ の関係は、代表要素の応力増分とひずみ増分を平均することにより、次のように得られる¹⁾。

$$\Delta\bar{\epsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta\bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_{\alpha} \int_{\Omega^{\alpha}} (\Delta[u_i]n_j + \Delta[u_j]n_i)_{,\alpha} dS \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C_{ijkl}^R は基質岩石のコンプライアンステンソル、 n_i はジョイント面での単位法線ベクトル、 Ω^{α} は代表要素 V の α 番目のジョイント面、 $\Delta[u_i]$ はジョイントの相対変位増分を表している。いま、ジョイントの相対変位増分 $\Delta[u_i]$ 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、破壊するジョイントを含む岩盤の構成方程式が完結する。

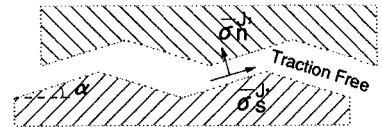


図1 起伏を有するジョイント

(2) 破壊するジョイントの挙動

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1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、他方の面が開口し、ストレスフリーになるものとする。ジョイントの破壊の条件としては、クーロンの破壊条件を採用した。また、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。最終的に系の剛性¹⁾という概念を導入し、上述の事項を連成することにより、ジョイントの変位増分が応力増分の関数として求めることができ、岩盤の巨視的接線コンプライアンスが得られる²⁾。

3. 有限要素解析

(1) 解析条件

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、地下発電所建設に先行する機器搬入坑掘削問題を取り上げた。空洞掘削によって地山応力が解放されたケースを想定し、その際の岩盤の変形挙動について解析を行った。想定する地点における岩盤等級については C_M 級、 C_H 級が大半を占め、他に C_L 級が認められている場合を考える。基質岩石の弾性定数は C_L 級では 10000kgf/cm^2 、 C_M 級では 30000kgf/cm^2 、 C_H 級では 50000kgf/cm^2 として計算に用いた。また、いずれのケースにおいてもポアソン比は0.25とした。

機器搬入坑の経過地は地山かぶり 100m～500m に位置し、その岩盤の単位体積重量を $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ とした。側方からの初期応力は鉛直からの初期応力の 0.9 倍として計算した。例えば、深度 200m では鉛直方向からの初期応力を $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、側方からの初期応力を $45\text{kgf}/\text{cm}^2$ という境界条件を設定した。機器搬入坑の大きさと解析エリアを図 2 に示した。その他の計算パラメータは、以下の通りである。ジョイントの走向はトンネル掘削軸方向とはほぼ平行で、傾斜は右落ち 70 度とした。ジョイント表面の摩擦角を 25 度、ジョイントの起伏の角度を 15 度、ジョイントの連結率の法線方向を 1.592、接線方向を 12.0、種々のジョイント長、ジョイントの平均間隔について解析を行った。

(2) 解析結果

まず、ジョイントの平均間隔をジョイントの長さで無次元化したものと機器搬入坑の内空変位の関係を図 3 に示した。ジョイントの平均間隔が狭い程、あるいはジョイント長が長い程、内空変位が大きい。また、ジョイントの平均間隔とジョイントの長さの比が 0 に近づくとき機器搬入坑の内空変位は一定の値に収束し、一方、その比が大きくなると弾性解に漸近していく。

次に、ジョイント長を 5m、ジョイントの平均間隔を 1m とし、種々の弾性定数について、土被りと機器搬入坑の内空変位の関係を図 4 に示した。図は、土被りが大きくなるのに比例して内空変位が大きくなることを示している。また、弾性定数が小さい程、つまり岩盤等級が低い程、内空変位が大きい。さらに弾性定数を $30000\text{kgf}/\text{cm}^2$ について、土被りと機器搬入坑の内空変位の異なる 3 箇所（図 5 参照）での内空変位の関係を図 5 に示した。この場合も、いずれの箇所においても、土被りが厚くなるのに比例して内空変位が大きい。岩盤内のジョイントの走向・傾斜は前節の通りだが搬入坑に対して右上方、及び左下方のジョイントがせん断・開口し、その近辺で搬入坑へのはらみ出し量が大きい。つまり、図 5 で示す△の箇所よりも□の箇所の方が変位量大きい。

4. 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用いた有限要素プログラムにより、地下空洞（トンネル）掘削の解析結果を示した。ジョイントの走向・傾斜、ジョイントの平均間隔、ジョイント長の影響が解析結果に反映されている。

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のモデル化, 構造工学論文集, Vol.40A, pp451-456 (1994)

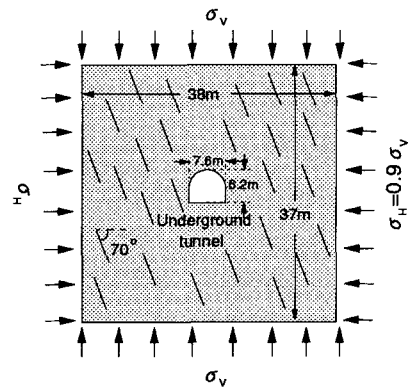


図 2 解析条件

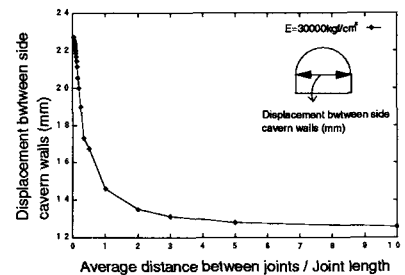


図 3 (ジョイントの平均間隔／ジョイント長) と内空変位の関係

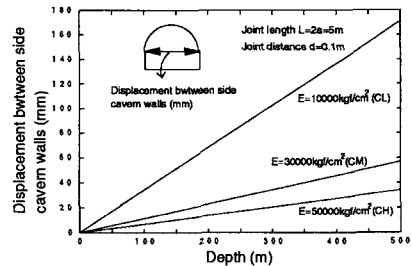


図 4 種々の弾性係数における土被りと内空変位の関係

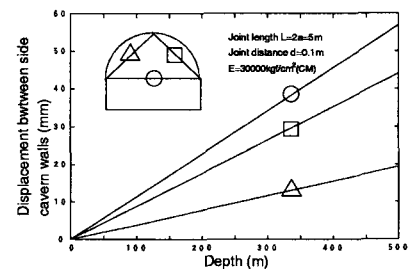


図 5 土被りと内空変位 (3 パターン) の関係