

Ⅲ-681

節理の介在する岩盤における空洞掘削時の挙動解析(その1)

—入力パラメータの設定—

東電設計(株) 正会員 蔡 明 田坂 嘉章 安部 明夫 宇野 晴彦
東京電力(株) 正会員 幸村 秀樹

1. はじめに

地下空洞を掘削するに際して、支保等により空洞の安定性を確保するためには、空洞周辺の岩盤の挙動を正確に把握することが要求される。節理性岩盤の場合には、卓越した節理の存在により岩盤が異方性を有することが多いため、岩盤物性を異方性物性として取り扱うことが考えられる。本研究では、節理の介在する岩盤を対象に、物性評価の検討として、室内節理試験および原位置平板载荷試験結果から、直交異方性岩盤の物性パラメータの設定方法について提案した。そして、この物性設定法により評価した異方性特性を用いて、本報告その2^[1]において空洞掘削時の岩盤挙動解析を実施した。

2. 直交異方性材料の構成モデル

図-1に示すように、局部座標系 $x'-o'-y'$ において、直交異方性材料の応力-ひずみ関係は次の形で表される。

$$\sigma'_i = D'_{ij} \varepsilon'_j \quad (1)$$

ここに、 σ'_i 、

ε'_i は応力、ひずみベクトルであり、 $[D']$ は平面ひずみ条件では次のように与えられる。

$$[D'] = \frac{E_2}{K} \begin{bmatrix} n(1-nv_2^2) & nv_2(1+v_1) & 0 \\ nv_2(1+v_1) & 1-nv_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & mK \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $n=E_1/E_2$ 、 $m=G_{12}/E_2$ 、 $K=(1+v_1)(1-v_1-2nv_2^2)$ であり、 E_1 、 E_2 は x' 、 y' 軸方向の弾性係数、 v_1 、 v_2 はそれぞれの方向に対するポアソン比、 G_{12} はせん断弾性係数である。

3. 試験データに基づく直交異方性岩盤物性パラメータの設定

直交異方性構成モデルを工学的問題に適用するためには、独立した五つのパラメータ E_1 、 E_2 、 G_{12} 、 v_1 、 v_2 を設定する必要がある。これらのパラメータを設定するために、節理を含めた岩盤ブロックの三軸試験が有効と考えられる

が、試験方法、物性値抽出については実務レベルに至っていないのが現状である。一般的には、地下空洞周辺岩盤の変形特性を調べるために、原位置平板载荷試験が行われており、ここでは、この結果に基づく異方性パラメータの設定法について以下のものを提案する。

(1) E_1 、 E_2 の設定

原位置の平板载荷試験は、限られた節理密度・節理方向の条件下で実施されることが多いため、主弾性係数の決定に当たっては、HJM岩盤モデル(節理性岩盤モデル)^{[2],[3]}を用いて、定量的な物性補完を実施する。つまり、調査坑試験位置の節理分布と室内試験で得られた岩石および節理面の力学特性試験結果を用いてHJM岩盤モデルによる卓越節理の方向をパラメータとした平板载荷試験のシミュレーションを行い、主弾性係数 E_1 、 E_2 を求める。

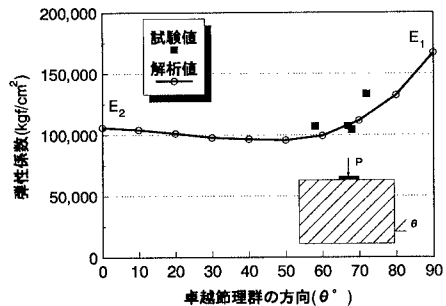


図-2 HJM岩盤モデルによる岩盤物性補完

図-2に上記の方法で求めた E_1 、 E_2 の一例を示す。本報告その2の解析対象地点(以下「A地点」と称する)では、平板载荷試験データは $\theta = 60^\circ \sim 75^\circ$ の間に集中し、節理の密度は2~5本/mとなっている。HJM岩盤モデルを用いて岩盤物性を補完し、求められた主弾性係数は $E_1=167,000\text{kgf/cm}^2$ 、 $E_2=106,000\text{kgf/cm}^2$ である。

(2) v_1 、 v_2 の設定

節理が無視できるほどの厚さ(開口幅)を有すると仮定すれば、ポアソン比と弾性係数は次の関係式を満足する。

$$v_1/E_1 = v_2/E_2 = v/E \quad (3)$$

ここに、 E 、 v は岩石の弾性係数とポアソン比である。したがって、岩盤の v_1 、 v_2 は次の式から求められる。

$$v_1 = vE_1/E, \quad v_2 = vE_2/E \quad (4)$$

A地点の岩石試験結果によると、 $E=551,000\text{kgf/cm}^2$ 、 $v=0.25$

あり、算定した岩盤の ν_1 は0.0758、 ν_2 は0.0481である。

(3) G_{12} の設定

直交異方性材料の物性設定において、原位置・室内岩盤試験結果から直接せん断弾性係数 G_{12} を求めることが困難なため、現状では、 G_{12} を間接的な近似により推定することになる。一般に現在よく用いられる直交異方性材料のせん断弾性係数は、次の式で与えられる。

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_2}{E_2} \quad (5)$$

式(5)はSt Venantにより提案されている^[4]。St Venant法により推定したせん断弾性係数は、節理性岩盤に対するせん断弾性係数を過大に評価する可能性があるため、本研究では、節理の法線方向剛性とせん断方向剛性の比率を導入した次の置換法を提案する。

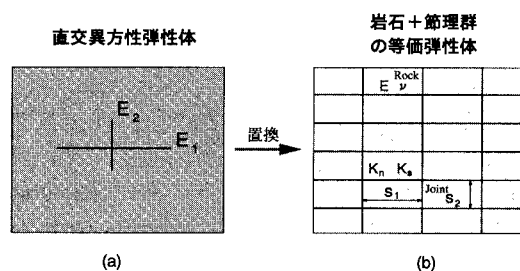


図-3 等価弾性体への置き換え

直交異方性岩盤は、岩石と弾性主軸に平行な節理群により構成され、等価な弾性体に置き換えることができるものと考えられる。図-3に示すように、置き換えた節理は連続節理として仮定し、その節理群の間隔を s_1 、 s_2 、せん断・法線方向のバネ係数を K_s 、 K_n とすると、岩盤の弾性係数は、次の式で与えられる。

$$\frac{1}{E_1} = \frac{1}{E} + \frac{1}{s_1 K_n}, \quad \frac{1}{E_2} = \frac{1}{E} + \frac{1}{s_2 K_n} \quad (6), (7)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G} + \frac{1}{s_1 K_s} + \frac{1}{s_2 K_s} \quad (8)$$

ここで、 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ である。一般的に、室内試験から求めた節理のせん断方向剛性は、法線方向剛性より小さいとされている。節理の剛性比 $R = \frac{K_n}{K_s}$ を定義すると、式(6)、(7)および(8)から G_{12} は次の式で与えられる。

$$\frac{1}{G_{12}} = R \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2(1+\nu-R)}{RE} \right) \quad (9)$$

節理のせん断剛性と法線方向剛性が同じであれば、 $R=1$ であり、式(9)と式(5)が等しくなる。節理性岩盤にお

いては、節理面のせん断剛性と法線方向剛性が著しく異なるため、St Venant法より得られた G_{12} は岩盤のせん断弾性係数を過大に評価する可能性がある。等価物性置換法は、St Venantの方法を説明することができ、より実岩盤に近いせん断弾性係数を推定できるものと考えられる。

本研究では、A地点原位置で採取した節理を一条含む供試体を用いて、室内圧縮試験を行った後、引き続きせん断試験を行った^[3]。試験結果を整理・分析し、次の式から算出した R を表-1に示す。

$$R = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_0}{V_m K_{ni} + \sigma_0} \right]^{-2} \left[\frac{\sigma_0 \tan \phi_r}{\alpha u_p} \right]^{-1} \quad (10)$$

ここに、 K_{ni} 、 V_m は圧縮曲線の包絡線によるものであり、 $\alpha = 0.0554$ (A供試体)、 $\alpha = 0.0905$ (B供試体)、 $\phi_r = 30^\circ$ である。

表-1 節理試験結果による R 値の算定表

供試体	供試体寸法m	拘束圧MPa	K_{ni} MPa/mm	V_m (mm)	u_p (mm)	R
A1	0.0746	1.00	25.8	0.139	0.346	1.40
A2	0.1004	3.00	60.2	0.119	0.947	3.67
A3	0.1004	3.00	43.4	0.088	0.947	4.19
B1	0.1003	2.00	15.6	0.328	0.426	1.01
B2	0.1003	2.00	21.7	0.260	0.426	1.33
B3	0.0700	1.00	21.1	0.146	0.362	2.10
B4	0.1002	2.00	21.6	0.143	0.605	2.78

以上の結果から、 R の平均値は2.35である。 $R=2.35$ に基づき算定した G_{12} は31,000kgf/cm²であり、これに対して、St Venant 式から算定した G_{12} は61,200kgf/cm²である。

4. おわりに

本研究において、節理性岩盤を対象とした直交異方性物性を平板荷試験結果から設定する方法を提案した。変形特性異方性の主弾性係数 E_1 、 E_2 は、HJM岩盤モデルを用いた岩盤物性補完により設定することができる。せん断弾性係数 G_{12} は、節理の剛性比 R を考え、等価弾性体への置換法により設定することができる。このように設定した異方性パラメータを用いて、本報告その2において地下空洞掘削解析を実施した。

参考文献

- 田坂、蔡、豊田、宇野、阪本(1995)、節理の介在する岩盤における空洞掘削時の挙動解析(その2)―解析手法および解析例一、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、第3部、掲載予定。
- Cai, M. and Horii, H. (1992), A constitutive model of highly jointed rock masses, *Mech. Materials*, **13**, pp.217-246.
- 田坂、蔡、宇野、前島(1995)、節理性岩盤の変形挙動解析手法と原位置岩盤への適用、第26回岩盤力学に関するシンポジウム、p.416-420。
- Lekhnitskii, S.G.(1963), *Theory of elasticity of an anisotropic elastic body*, Holden, Day, Inc.