

(18) 有限要素法に依る発電所応力解析

東北電力(株) 土木部 正会員 清野良平

1. まえがき

近年、地形、設計上の制約などから、発電所が地下につくられる事が多くなってきている。

発電所の建設にあたって、地下に大規模な空洞を掘削する場合の地盤の応力解析法として、現在最も有効な方法の1つと考えられている有限要素法を用いて、地下発電所の応力解析を行ない、地下発電所の合理的かつしのぬ点に合致した設計、施工の計画、立案の資料とする。

2. 解析の理論

地山全体を幾種類かの静弾性係数を有する岩盤で構成させて、二次元解析を行う。

その際の解析理論は次の通りである。

2.1. 変位関数

連続体を幾つかの三角形要素に分割し、要素内では歪、応力は一定と仮定し、x, y方向の変位u, vを次のように仮定する。

$$u = d_1 + d_2 x + d_3 y, \quad v = d_4 + d_5 x + d_6 y$$

ここで、 $d_1 \sim d_6$ は未定係数

三角形要素の節点、i, j, kの各点を式(1)へ代入すると次のようになる。

$$\{v\} = [A]\{d\}$$

$$\text{ここで、}\{v\}^T = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k\}, \{d\}^T = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$$

2.2. 歪と変位の関係式

弾性学より、歪と変位の関係は、次の通りである。

$$\epsilon_x = du/dx, \quad \epsilon_y = dv/dy, \quad \gamma_{xy} = du/dy + dv/dx$$

式(2)に式(1)を代入すると、次のマトリックス表示得る。

$$\{\epsilon\} = [C]\{d\}$$

$$\text{ここで、}\{\epsilon\}^T = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}\}$$

2.3. 応力と歪の関係式

応力と歪の関係式は、次の通りである。

$$\{\sigma\} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/1+\nu & 0 \\ \nu/1+\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu/2(1+\nu) \end{bmatrix} \{\epsilon\} = [D]\{\epsilon\}$$

$$\text{ここで、}\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}$$

尚、E:静弾性係数、 ν :静膨アソソ比、 σ_x :x方向の応力、 σ_y :y方向の応力、 τ_{xy} :剪断応力とする。

$$\text{式(2)より、}\{d\} = [A^{-1}]\{v\}$$

$$\text{よれ故、}\{\epsilon\} = [C]\{d\} = [C][A^{-1}]\{v\}$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} = [D][C][A^{-1}]\{v\}$$

2.4. 要素剛性マトリックス

節点に作用する力を, $\{S\}^T = \{S_{xi}, S_{yi}, S_{xj}, S_{yj}, S_{xk}, S_{yk}\}$ とし, 仮想仕事の原理より, 次の節点荷重と節点変位に関する式を得る。

$$\{S\} = [k]\{V\}$$

ここで, $[k]$ は要素剛性マトリックスで, 次のように表わされる。

$$[k] = 4[A]^T[C]^T[D][C][A]$$

3. 解析例

放水路方向断面と地下発電所中心点において放水路方向と直角方向断面の2断面について, 2次元的に応力解析を行なった。それぞれの解析断面について, 本研究では, リーゴコンの関係上, 3段階に分けて, 行なった。

3.1. 応力解析の第1段階

応力解析の第1段階では, 応力範囲にわたる地山全体を比較的大きな三角形要素で構成させ, 初期地圧, 変位などを求めた。尚, この時の固定条件は, ローラ支承とヒンデ支承の2種類がある。

3.2. 応力解析の第2段階

応力解析の第2段階では, 第1段階の応力解析で得られた変位を固定条件として用いて, 地下発電所予定地点のまわりの比較的狭い空間を, 小さな三角形要素で構成させて, 初期地圧, 節点変位などをとらえた。

3.3. 応力解析の第3段階

応力解析の第3段階では, 第2段階で用いられた三角形要素で構成された断面を用いて, 地下発電所の掘削部分及び掘削相当外力を考慮に入れた掘削後の二次応力即ち自重に依る応力と掘削相当外力に依る応力を加えた応力と掘削相当外力に依る節点変位などをとらえた。但し, 固定条件として, ローラ支承とヒンデ支承の2種類を用い, 安全率を求める際の降伏条件として, 内部摩擦説を用いた。

4. 解析結果

4.1. 鉛直方向の節点変位に関して

放水路方向断面の地下発電所掘削予定面の節点変位に関しては, 天から見て山側の側壁の鉛直方向節点変位は, 天側の側壁の鉛直方向節点変位に比べて大きく, しかも符号が逆であり, 山側の側壁が持ち上げられ, この結果, 天側の側壁が少し落ち込むような傾向を呈するということが言える。また, 地下発電所底掘削予定面は, いわゆる盤びくれ現象を示し, 盤びくれ厚最大が 5^{mm} という結果が得られた。

4.2. 水平方向の節点変位に関して

放水路方向断面の地下発電所掘削予定面の節点変位に関しては, 天寄りの地下発電所側壁掘削予定面の節点変位より, 天から見て山側の地下発電所側壁掘削予定面の節点変位が大きな値を示し, いわゆる地下発電所の側壁の盤びくれ現象は, 天から見て山側の地下発電所側壁において顕著であるといえる。

以上の事から, 地山の応力の大きさは, 地形的なものに負うところが大きいと言える。

最後に, 本研究では, 室内試験より岩盤物性値を得るが, 初期地圧測定試験, 変形試験, 岩盤剪断試験などの現場試験より, より正確な岩盤の物性値を得, 現実性を体现させるため, 有限要素法に依る非線型・粘弾性解析及び施工工程に合わせた応力解析を行う必要がある。

(参考文献)

「土木技術者のための岩盤力学」

「コンピュータによる構造工学講座Ⅰ・1」

「FORTRANによる有限要素法入門」