

Ⅲ-682

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—

東電設計（株）正会員 田坂 嘉章 蔡 明 豊田 耕一 宇野 晴彦
東京電力（株）正会員 阪本 肇

1. はじめに

解析で対象とした岩盤は、いくつかの卓越した節理群を有する節理性岩盤であり、地下空洞の掘削時に内空変位が非対称的な変形挙動を示した。本研究では、このような節理性岩盤を等価な連続体の異方性岩盤として捉え、既往の等方性モデルによる2次元非線形解析手法（ひずみ軟化特性を考慮）^[1]に対して直交異方性モデルを導入し、本報告その1^[2]で設定した異方性パラメータを用いて空洞掘削解析を実施した。そして、実測値との比較も含め等方性および異方性モデルの違いについて検討を行った。

2. 解析手法

異方性を考慮した非線形解析では、変形特性の異方性に対しては、岩盤の異方性パラメータ（ E_1 、 E_2 、 G_{12} 、 ν_1 、 ν_2 ）を直接反映させ、強度特性に対しては、FEM要素自体には等方性を仮定した岩盤の破壊強度と残留強度を与えて破壊包絡線との接触判定を行うのと合わせ、局所座標系における弾性主軸方向すなわち節理面上での応力を算定し、与えた節理のせん断抵抗と照査することにより、岩盤の強度異方性を表現している。そして、岩盤が破壊した場合には残留強度までの余剰応力を、節理が破壊した場合には節理の破壊強度までの余剰応力を再配分し、修正Newton-Raphson法により収束解を求めている。なお、岩盤および節理は、引張応力に抵抗しないものとして取り扱っている。

3. 解析例

(1)解析条件

地下空洞は、土被りが約450mの泥岩主体の節理性岩盤において、図-1に示すようにアーチ部掘削後3ベンチで掘削した。掘削時には、隣接する先進の計測坑から多段に配置された岩盤変位計（R01、R02測線）により初期状態からの岩盤変位を計測するとともに、コンバージェンスメジャーにより内空変位（A～Eの5測線）を計測した。

図-2に空洞周辺の節理分布および節理密度を示す。解析では、解析断面内で空洞掘削時の岩盤の変形挙動に影響を及ぼすと考えられる空洞軸（N10E方向）にほぼ平行な節理群のうち、節理の集中度および節理密度が最も大きいNo.2ピークの節理群（N30E/30SE）を卓越節理群と仮定し

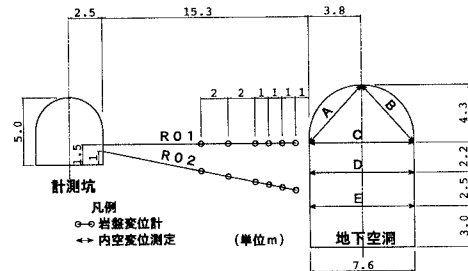


図-1 計測配置図

た。すなわち、弾性主軸方向 θ （ E_1 軸方向）を、 $\theta = -30^\circ$ （右落ち 30° ）とし、卓越節理群に共役なNo.4ピークの節理群（N5W/80SW）を E_2 軸方向の共役節理群と仮定した。

初期応力は、鉛直応力（ σ_y ）が土被り圧にほぼ等しく、側圧比 $K(=\sigma_x/\sigma_y)=0.9$ のほぼ等方応力状態であり、最大主応力（ σ_1 ）は、鉛直方向（y軸）から時計回り方向に約13度傾いている。

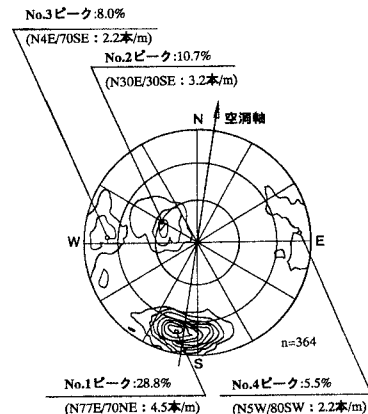


図-2 シュミットネット(南半球投影図)

解析ケースは、岩盤の変形特性に対して、その1で設定した主弾性係数 E_1 、 E_2 および試験で得られた節理の剛性比 $R(K_1/K_2=2.35)$ に基づいて推定したせん断弾性係数 G_{12} を用いた異方性モデルによる解析を基本ケースとし、等方性モデルによる解析およびSt Venantの推定値と等価な剛性比が $R=1$ の場合の G_{12} を用いた異方性モデルによる解析を比較ケースとした。各ケースの岩盤の変形特性を表-1に示

す。岩盤の破壊強度および残留強度は、原位置の岩盤せん断試験結果および摩擦試験結果の平均値を用い、節理の強度は、岩盤の残留強度を用いた。

表-1 各解析ケースの岩盤の変形特性

岩盤モデル	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	G_{12} kgf/cm ²	ν_1	ν_2
等方性	136,500		54,600	0.25	
異方性(R=1)	167,000	106,000	61,200	.0758	.0481
異方性(R=2.35)	167,000	106,000	31,000	.0758	.0481

(2)解析結果

表-2に示した最終ベンチ掘削時の内空変位(単位mm)によると、等方性モデルによる解析では、左右の内空変位(A測線、B測線)がほぼ同程度となっているのに対して、異方性を考慮した場合、A測線とB測線の変位の比率(A/B)は、R=1の解析ではA/B=5.2mm/2.3mm=2.26、R=2.35の解析ではA/B=6.5mm/2.2mm=2.95となっており、特に、R=2.35の解析結果は、実測値(A/B=6.6mm/2.4mm=2.75)に近い値を示す。

このR=2.35とした異方性モデルによる内空変位は、C測線において実測値よりもかなり高めの値を示しているものの、その他の測線ではほぼ実測値と一致している。

表-2 各解析で得られた内空変位と実測値の比較

測線	計測	等方性 モデル	異方性 モデル: R=1	異方性 モデル: R=2.35
A	6.6	3.8	5.2	6.5
B	2.4	3.4	2.3	2.2
C	13.3	14.4	15.1	18.1
D	16.7	13.3	14.4	17.1
E	11.0	7.7	9.9	10.9

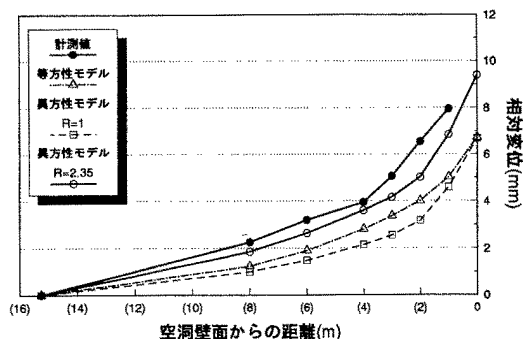


図-3 R01測線における岩盤変位の比較

図-3、図-4に示した岩盤変位によると、R02測線では、どの解析ケースも実測値に概ね対応しているが、R01測線では、R=2.35とした異方性モデルによる変位は実測値に近い値を示している。なお、他のケースは実測値よ

りも低めの変位を示しており、R=1とした異方性モデルによる変位は、等方性モデルよりも実測値から離れる結果となっている。

図-5に等方性および異方性(R=2.35)モデルによる最終ベンチ掘削時の破壊領域図を示す。異方性モデルの破壊領域は、弾性主軸方向(E_1 、 E_2 軸方向)に広がり、等方性モデルよりも大きくなる傾向が見られる。

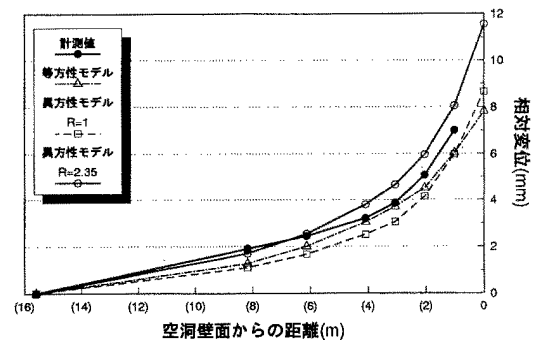


図-4 R02測線における岩盤変位の比較

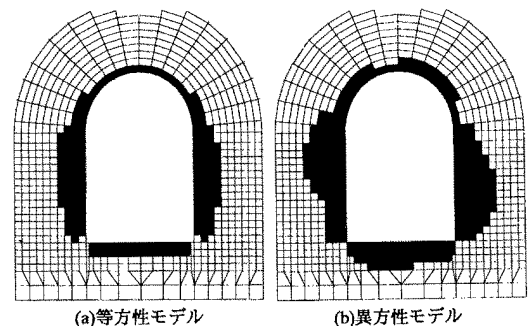


図-5 破壊領域図

4. おわりに

本検討において、異方性を考慮した2次元非線形解析手法を用い、異方性パラメータ E_1 、 E_2 および節理等の不連続面の剛性比Rに基づくせん断弾性係数 G_{12} による解析を実施し、等方性モデルとの比較を行った。その結果、異方性モデルにおいては、内空変位の非対称的な測定結果を表現することができた。また、異方性モデルでは、岩盤の破壊領域が、等方モデルより大きな結果となっており、今後は、節理と岩盤との強度関係および方向性について、詳細な検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 宇野、酒井、佐藤、福井(1990)、人工岩材料を用いた岩盤せん断試験について、第25回土質工学研究発表会講演集、pp.1075-1078。
- [2] 萩、田坂、安部、宇野、幸村(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1)-入力パラメータの設定-、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。