

法政大学大学院 学生会員 ○ 高原 秀夫

法政大学 正会員 大地 羊三

1 はじめに

NA TMはロックボルトと吹き付けコンクリートを主体とするトンネル工法であり、地山が持つ固有の強度を積極的に利用し、地山によってトンネルを安定に支持するという概念によって成り立っている。この工法の普及により「理屈にあったトンネル」、「質のよいトンネル」といった命題が課せられることになり数値解析が重要な役割を果たすこととなった。そこで本研究では有限要素法を用いたトンネル掘削時の応力再配分を解析するプログラムを作成しその構成を述べる。

2 有限要素法による非線形解析の基礎理論

2.1 岩盤のモデル化

岩盤をモデル化するとき主に塑性の問題と引張力に抗せない問題を考えなければならない。

塑性の問題において構成式は(1)式のように表され、結合流れ則を適用して弾塑性行列 D_{ep} は(2)式の形となる。

$$d\sigma = D_{ep} d\varepsilon \quad (1)$$

$$D_{ep} = \left\{ D - D \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) \left[\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) \right]^{-1} \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D \right\} \quad (2)$$

ここで D は弾性行列であり F は降伏関数である。 F は Drucker-Prager の条件を使うこととした。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (3)$$

この条件を越えた応力は残差応力として次式により、等価な節点荷重として計算の次のステップで載荷される。

$$f = \int_V B^T \sigma^r dV \quad (4)$$

引張力に抗せない問題ではno-tension法に準じた方法を用いる。すなわち、引張強度を超えるかどうかの判定を主応力方向で行い、引張強度を超えた場合にこの主応力を残差応力とする。又、この方向と直交する方向にクラックが入ると仮定し、計算の次のステップにおいても、この方向の応力を残差応力として消去する。言い換えれば、クラックが入ることにより材料が直交異性を持つとする。

簡単な例題を図1に示す。この例では載荷面より上の要素に対し引張応力が鉛直方向に作用するので、この応力が残差応力として載荷面より下の圧縮要素に再配分される。図2は載荷面直下の圧縮要素の応力の変化を示したものである。ここで一軸圧縮に対する解とは、載荷面より下の部分に対してのみ同じ荷重を載荷したときの応力である。この結果から、鉛直方向応力は載荷面より上の要素が剛性を持たないので一軸圧縮に対する解と同じになるのに対し、水平方向応力は引張要素が剛性を持つので異なった値を示す。当然、載荷面より上の要素は鉛直方向には応力が発生せず、水平方向にのみ応力が発生することとなる。

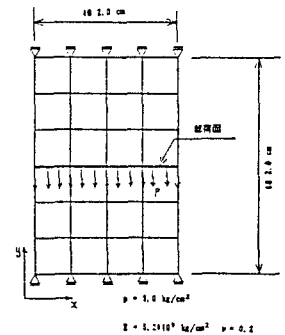


図1 No-tension法による解析例

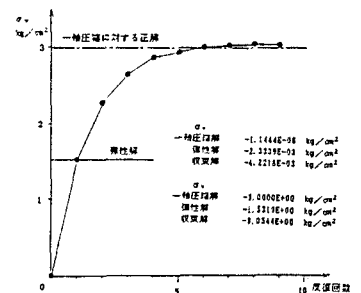


図2 圧縮要素の応力変化

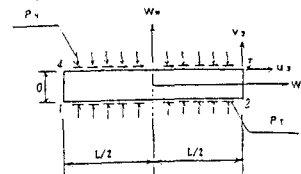


図3 接合要素と局所座標

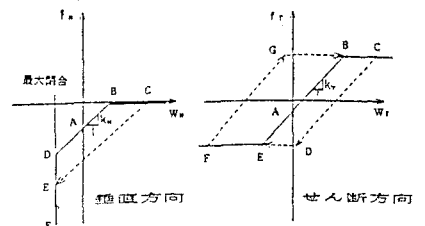


図4 接合要素の構成関係と履歴ループ

2.2 不連続面のモデル化

岩盤の不連続面に対しGoodman⁽¹⁾らにより導かれた図3に示す接合要素を用いる。この要素は次のように定式化される。

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{4} [\mathbf{N}]^T \begin{bmatrix} k_T & 0 \\ 0 & k_N \end{bmatrix} [\mathbf{N}] dx \mathbf{u} \quad N_A = 1 - \frac{2x}{L} \quad (5)$$

$$[\mathbf{N}] = \begin{bmatrix} -N_A & 0 & -N_B & 0 & N_B & 0 & N_A & 0 \\ 0 & -N_A & 0 & -N_B & 0 & N_B & 0 & N_A \end{bmatrix} \quad N_B = 1 + \frac{2x}{L}$$

この接合要素に用いられる構成関係と履歴ループを図4に示す。ここで注意しなければならないのは、垂直方向の圧縮側が応力でなく変位が制限されていることである。弾性解として図の最大閉合を超える変位が計算された場合(圧壊した場合)に、この超過変位を次式で等価な応力に換算し、これを残差応力とする。

$$f_N^R = k_N \cdot w_N^R \quad (6)$$

垂直方向の引張側は零以上のものを残差応力とし、せん断方向については次式で表わされる許容値を超えたものを残差応力とする。

$$f_T^R = c + f_N \tan \phi \quad (7)$$

残差応力は次式にて等価節点荷重にする。

$$\mathbf{f} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} [\mathbf{N}]^T \begin{Bmatrix} f_T^R \\ f_N^R \end{Bmatrix} dx \quad (8)$$

履歴ループについて考察すると、せん断方向に関しては一般的な形をしている。垂直方向に関しては、初期状態Aから負荷されその後除荷された時の経路A→B→C→Eは問題無いが、この後再び負荷された場合、E→CではなくE→D→A→B...で示される経路をとると仮定する。これは、接合要素が圧壊した後に圧縮応力が持続している状態Eから、わずかばかり圧縮応力が減少したからといって変位が始まるとは考え難いからである。このような仮定を解析に用いると応力は問題無いが、E→Cと推移する変位をE→D→Aと推移するように修正せねばならない。ここに、前述の圧壊した時の場合とは逆方向の超過変位が発生する。この超過変位も前述の場合と同じように処理をする。

図5に接合要素の例題を示す。この例では水平荷重 P_x を載荷する前に、垂直方向に単位長さ当たり -300 kg/cm^2 の初期応力が働いている。初期変位の段階で接合要素の右側2つが圧壊した状態で左側2つが圧縮応力下で開いてしまった状態であるが、収束後の変位ではこの2種類の超過変位が消去されている状況がよく解る。図6がその時の応力状態であり、せん断応力の白抜きの点は(7)式の許容値を超えて、滑っている要素を表わしている。

3 解析例

図7は当研究室にあった実測値と検証するために解析したメッシュ図であり、斜めに2本の不連続面を持った地下発電所の例である。図8に実測値と解析値の比較を示すが、おおむね、本研究で作成したプログラムの妥当性が示されているのではないと思われる。

[参考文献] (1) R.E. Goodman "A Model for Mechanics of Jointed Rock" ASCE Vol. 94 SM3 (1968)

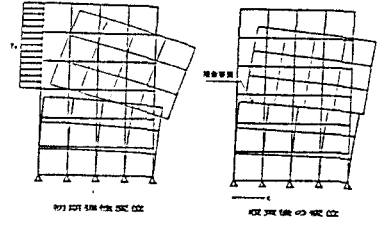


図5 接合要素の解析例

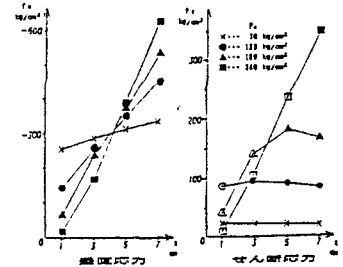


図6 接合要素の応力

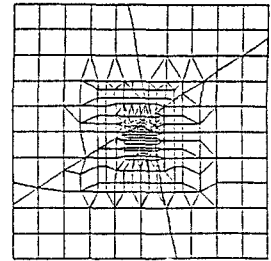


図7 地下発電所解析モデル

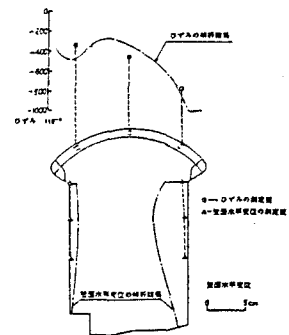


図8 地下発電所解析結果