

大成建設株式会社 正会員 ○亀村 勝美
大成建設株式会社 正会員 泉 博 允
大成建設株式会社 正会員 木 村 洋 行

1 まえがき

岩盤や地盤におけるトンネル、シールド、斜面切土などの掘削工事に対する有限要素法の適用は、他に有効な手法がないこともあって、盛んに行なわれている。最近では、有限要素法の基本である弾性連続体の解析に加えて、弾塑性や粘弾性などの材料非線形性や、特殊な要素を用いた不連続体の解析なども数多く試みられている。しかし、このような非線形性を考慮した解析では、掘削段階に対応した逐次解析のステップごとに生じる様々な数値誤差の累積により、解析全体の精度を著しく損なう恐れがある。そのような数値誤差の要因としては、材料非線形性や構造非線形性に起因するものの他、掘削解放力の算定方法に起因するものも考えられる。本文では、掘削解析の基本である掘削解放力の算定方法について述べるが、本法によれば掘削解放力そのものに関する誤差は生じないため、より精度の高い掘削解析が可能となる。

2 掘削に伴う解放力

有限要素法による掘削解析は、次のようにして行なわれる。まず有限要素モデルの作成時に、各掘削段階における形状を考慮して、掘削面が有限要素の境界線により表わされるようにモデル化する。次に掘削前の初期応力状態を設定する。そして各掘削段階ごとに、掘削面が自由表面となるような計算を行なう。即ち、図-1に示すように、掘削予定面に作用していた応力 $\{\sigma_n\}$ 、 $\{\tau_t\}$ と大きさが等しく、符号が反対の応力を被掘削部の掘削面に作用させる。有限要素法では、次式で示される節点力（掘削解放力）を掘削面に作用させることになる。

$$\{F\} = - \int [N] \{\bar{\sigma}\} ds \quad (1)$$

ここに $\{F\}$ は掘削解放力、 $[N]$ は内挿関数、 $\{\bar{\sigma}\}$ は掘削面に作用していた応力 $\{\sigma_n\}$ 、 $\{\tau_t\}$ であり、積分は掘削面について行なわれる。

ここで問題となるのは、応力 $\{\bar{\sigma}\}$ の評価方法である。今、掘削面を構成する掘削要素 e について考えると、この要素内の力のつり合いは次式により示される。

$$\sigma_{ij,j}^e + p_i^e = 0 \quad (2)$$

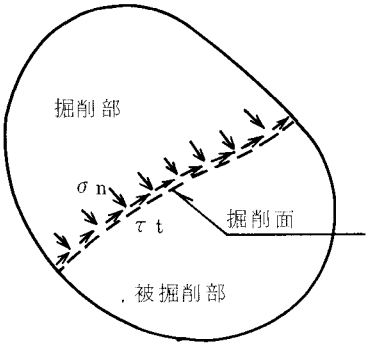
ここに、 j は $\partial/\partial x_j$ を、又 p_i^e は i 方向の物体力を示す。(2)式に内挿関数 N_α を掛け、要素体積 V_e について積分すると

$$\int N_\alpha \sigma_{ij,j}^e dV_e + \int N_\alpha p_i^e dV_e = 0$$
$$\int (N_\alpha \sigma_{ij}^e)_{,j} dV_e - \int N_{\alpha,j} \sigma_{ij}^e dV_e + \int N_\alpha p_i^e dV_e = 0$$

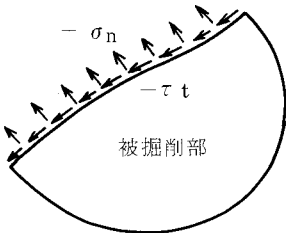
となる。

ここでGreenの定理を用い、式を整理すると次式が得られる。

$$\int N_\alpha \sigma_{ij}^e n_j dS = \int N_{\alpha,j} \sigma_{ij}^e dV_e - \int N_\alpha p_i^e dV_e$$



(a) 掘削前の状態



(b) 掘削の計算

図-1：掘削の解析法

これはマトリックス形式では次のように書かれる。

$$\int [N] \{\bar{\sigma}\} ds = \int [B] \{\sigma^e\} dV_e - \int [N] \{P^e\} dV_e \quad (3)$$

(1) 式と(3)式より、掘削解放力は掘削要素の応力 $\{\sigma^e\}$ と、物体力 $\{P^e\}$ により表されることが分かる。従って、掘削解放力の算定に当って(1)式の $\{\bar{\sigma}\}$ として掘削要素の $\{\sigma^e\}$ のみを評価するだけでは、物体力の項が考慮されないため誤差が生じる。

岩盤や地盤の初期応力状態の設定方法としては、i)地山の自重を物体力として作用させる。ii)計測値や推定式により求められた値を要素ごとに設定する、などがある。後者については、数値解析上物体力が考慮されていないため、掘削解放力の算定時の問題はないが、前者では自重に対する配慮が必要となる。

3. 有限要素法による掘削解析

有限要素法による掘削解析は、(3)式の掘削解放力の算定方法に基づき次のようにして行なわれる。

Stage 1 : 初期応力状態の算定 (自重を作用させる)

Stage 2 : 掘削部の応力を体積分して求めた節点力と、物体力を初期応力状態算定時と逆向きに作用させ求めた節点力を重ね合わせたものを掘削解放力として掘削面に作用させる。

ここで、簡単な例により掘削解放力の算定方法の違いによる計算結果の差を示す。図-2に示すように弾性体地山中に円形素堀りトンネルを全断面掘削により施工する場合について、次の3ケースの計算を行なった。

ケース1 : トンネルがある場合とない場合のそれぞれについて自重計算を行ない差を取る。

ケース2 : 掘削解放力として掘削要素応力と自重を考慮した解析

ケース3 : 掘削解放力として掘削要素応力のみを考慮した解析

計算により得られたトンネル内壁の変形状況を図-3に示す。ケース1と2は同一の変形となるが、ケース3は、かなり異った変形状況となる。これは、自重の存在によりトンネル天端付近では過大に、又下端付近では過小に掘削解放力が評価されたためである。

4. まとめ

有限要素法により掘削解析を行なう場合の掘削解放力の算定方法を示した。本法によれば掘削解放力算定時に誤差は生じないため、解析に当って掘削段数や掘削部のモデル化について特別な配慮を加える必要はない。

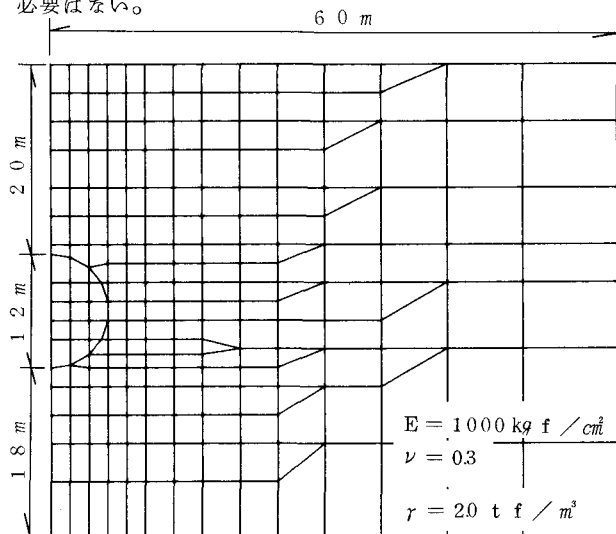


図-2 : 円形トンネル掘削解析モデル

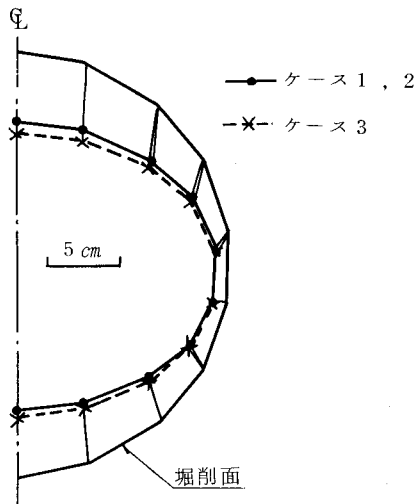


図-3 : トンネル内壁変形状況