

鹿島建設技術研究所

庄子幹雄

正会員 ○ 佐々木 猛

1. まえがき

土木工事のなかでも、大型構造物基礎、道路斜面、トンネル、地下空洞等の掘削は、土や岩盤で構成される広義の構造物の材料を除去し、そこに新しい構造物を建設するものといえる。これらの掘削断面が大きくなれば、全断面の掘削に数十日を要することもしばしばである。掘削が進むにしたがって構造物の周辺材料がどのように挙動するかを把握することが、施工上重要な問題となる。ここでは、これらの粘弾性材料で構成される構造物に逐次掘削施工が及ぼす安定性の問題を、有限要素法を用いて、各応力水準における材料の非線型特性、クリープ、間隙水圧を考慮して、各掘削時点における応力径路を追跡し、施工時の安定解析を目的とする。これまでもこれらの問題は多くの研究者によってなされ、それぞれ多大の成果を上げている。²⁾ 材料の降伏条件として軟弱な地盤を対象とした flow-rule による弾塑性解析⁵⁾もあるが、ここでは、特にコンクリート、岩盤等のように比較的ぜい性の強い材料の解析を目的としているため、岩盤の破壊規準は、通常よく用いられる Mohr の破壊包絡線説に従った。非線型鈎合方程式の解法として、時間軸に対して増分展開し、空間軸に対して、ニュートン・ラブソン法を用いた。この両者を組合せることにより、時間的に変化する実施工の状態、材料の粘弾性的変化と、各掘削時点での応力水準による物性の変化によって引き起こす構造系全体の応力の再配分計算が考慮できる。また構造物の幾何学的な形状から局所的な応力集中等によって破壊した要素と、その影響を受ける周辺要素の応力径路を、比較的正確に追跡することができた。

2. 材料の非線型特性、クリープ、間隙水圧について

掘削における周辺岩盤の挙動解析で最も重要な材料の非線型特性と破壊規準の詳細は参考文献6)を参照されたい。ここではその概略をのべる。Fig. 1 の Mohr の破壊包絡線で、応力状態円が破壊包絡線に接触するかまたはこれを切断するとき、岩盤は破壊に到達したとする。応力水準と物性値の関係は破壊接近度 $R = \min\{d_1/D_1, d_2/D_2\}$ で表わし、任意の応力状態における物性値が、 $0 \leq R \leq 1$ に対して、常に $D_F/D_0 \leq D/D_0 \leq 1$ とし、 $\nu_0 \leq \nu \leq \nu_F$ の範囲の実数値をとるように導入している。ここに D は変形係数、 ν はポアソン比で添字のゼロおよび F は、それぞれ最も安定な状態および、最も不安定な状態すなわち破壊発生時の状態における値を意味する。クリープの取扱については、Fig. 2 にあるような掘削を行なう場合、各掘削ステージでの掘削による解放力に対するクリープひずみを各掘削区間に対して、参考文献1)にあるような Burgers 型のクリープ関数を用いた。

$$C(t) = \Delta \epsilon_c = \Delta \sigma_e \left\{ \frac{1}{D_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{D_2} \left(1 - e^{-\frac{D_2 t}{\eta_1}} \right) \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C(t)$ ；クリープ関数、 $\Delta \epsilon_c$ ；クリープひずみ、 $\Delta \sigma_e$ ；解放力による応力、 D_1 ；岩盤の変形係数、 t ；時間、 η_1 ；二次クリープの粘性係数、 D_2 ；一次クリープの変形係数、 η_2 ；一次クリープの粘性係数である。また間隙水圧については、均質な物体内部での浸透流のポテンシャル分布が、掘削や排水施工等により、各掘削ステージで変化するので、各掘削ステージで、境界条件を設定し、参考文献3),4)にあるような方法で間隙水圧を求めた。

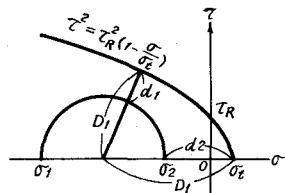


Fig. 1 Mohr's envelope

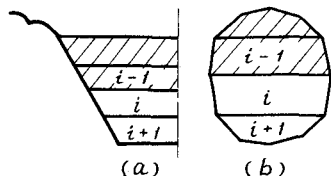


Fig. 2 Excavation stage

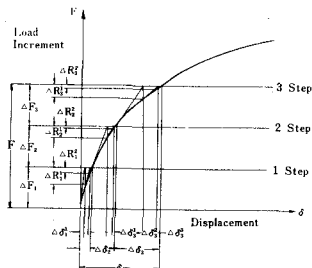


Fig. 3 Load-displacement relation

3. 逐次掘削における計算過程と解法

ここでは Fig. 2 の(a), (b)に示すような大規模断面の斜面、空洞掘削の状態を二次元的に取扱った。掘削にともなう応力変化は解析を対象とする地山の初期応力分布が支配的であり、これを忠実に再現することが重要な課題となっている。一般には、現地実測による値を用いる方法もあるが、ここではマクロ的な立場から、初期応力状態も body-force を等価節点外力として、非線型解析を行う。Fig. 2 で、通常上部からインデックス i にしたがって掘削が進行するものとして、いま、斜線部分のステージ $i-1$ 段階まで掘削が進行した場合の構造系の釣合方程式を(2)式のように定義する。

$$\left\{ -\frac{K_{ii}}{K_{i-1,i}} - \frac{K_{i,i-1}}{K_{i-1,i-1}} \right\} \left\{ \frac{\delta_i}{\delta_{i-1}} \right\} - \left\{ \frac{F_i}{F_{i-1}} \right\} = \left\{ \varphi \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

さらに、 $i-1$ 回目の掘削が終了して、 i 回目の釣合方程式を(3)式で表わす。

$$[K_{ii}]\{\delta_i\} + [K_{i,i-1}]\{\delta_{i-1}\} - \{F_i\} = \{\varphi\} = 0 \quad (3)$$

これを Fig. 2 のように各掘削ステージでニュートン・ラプソン法を適用すれば、いま各ステージ内の第 $n+1$ 回目の変位を $\{\delta_i\}^{n+1} = \{\delta_i\}^n + \{\Delta\delta_i\}^{n+1}$ とすれば

$$\{\Delta\delta_i\}^{n+1} = -([K_i]^n)^{-1} \left(\sum_{n=1}^n [K_i]^n \{\delta_i\}^n - \{R\} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 $\{R\} = -[K_{i,i-1}]\{\delta_{i-1}\} + \{F_i\}$ である。第 n 回目の不釣合力を $\{\Delta R_i\}^n = -\left(\sum_{n=1}^n [K_i]^n \{\delta_i\}^n - \{R\} \right)$ とすれば、収束基準として $\lim_{n \rightarrow \infty} \{\Delta R_i\}^n < e$ を与える。ここに $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{\delta\}$ は変位、 i は掘削ステージ、 n は $N-R$ 法のインデックス、 $\{\varphi\}$ は汎関数、 e は収束誤差を示す。また、クリープ、間隙水圧は、(2)式の等価節点外力項として評価すれば(5)式になる。

$$\{F_i\} = \{\Delta F_i^c\} + \{\Delta F_i^p\} + \{\Delta F_i^s\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、各ステージでの応力は $\{\Delta\delta_i\} = [D_i]^t \{\Delta\epsilon_i^e\} - [D_i]^t \{\Delta\epsilon_i^c\} + \{P\}$ となる。ここに、 $\{\Delta F_i^c\}$; クリープ外力、 $\{\Delta F_i^p\}$; 間隙水圧外力、 $\{\Delta F_i^s\}$; PS 工法による外力、 $\{\Delta\epsilon_i^e\}$; 弾性ひずみ、 $\{\Delta\epsilon_i^c\}$; クリープひずみ、 $\{P\}$; 要素内間隙水圧である。ここでは、紙面の都合上これらの詳細は省略する。

4. 結果の検討と考察

Fig. 4~7は、簡単なモデルの結果を示す。ここでは定性的な一応の検討をするが、その詳細については、当日スライドで説明したい。ここでは、材料非線型の問題を逐次掘削の問題に、増分法、 $N-R$ 法を組合せて適用した。掘削の各ステージ、 $N-R$ の各ステップで Piece-wise-linear な関係の重ね合せとして、応力を表現した。この方法により、掘削ステージ(増分)を大きくとっても比較的精度の良い結果が得られた。また、要素の破壊、クリープ、間隙水圧等による応力の再配分計算と応力径路の追跡が合理的に行なわれる。

参考文献

- 1) 平松, 西原; 二, 三の堆積岩のクリープについて、日本鉱業会誌、昭32年、73巻、830号
- 2) 林, 日比野; 地下の開削による周辺地盤の緩みの進展に関する解析、電力中央研究所、(1968)
- 3) 佐々木, 今井, 杉岡; 拡散問題へのFEMによるアプローチについて、土木学会年次論文集、昭46年
- 4) 門間, 今井, 杉岡; 有限要素法による三次元浸透流解析、鹿島技研年報, Vol. 20 (1971)
- 5) 佐々木, 松本; 有限要素法による土の弾塑性解析、鹿島技研年報, Vol. 20 (1971)
- 6) 谷本, 佐々木; 岩盤, 断層, 破砕帯の各変形特性の試料の強度による表現に関する試みとその検討、鹿島技研年報 Vol. 22
- 7) 庄子, 岡林, 谷本, 佐々木; 有限要素法による地下構造物の非線型解析、鹿島技研年報, Vol. 22 (1973)

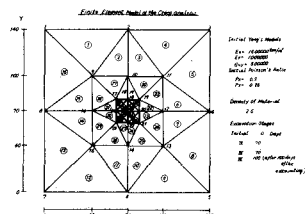


Fig. 4 Finite element model

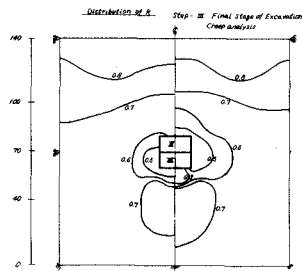


Fig. 5 Distribution of fracture severity R

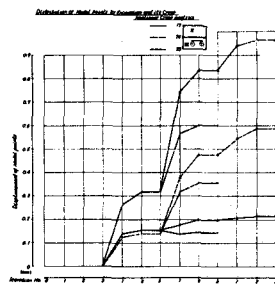


Fig. 6 Displacement of side wall

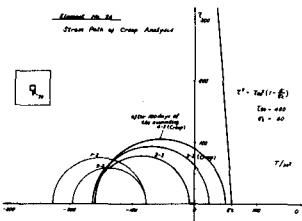


Fig. 7 Stress-path of element