

## 軟岩におけるトンネル掘削に関する数値実験

京都大学工学部 正 員 丹羽義次  
 〃 正 員 小林昭一  
 京都大学大学院 学生員 ○大津政康  
 戸田建設 正 員 上田 進

## 1. はじめに

トンネル工事は、解析技術ならびに物性の測定技術の進歩もあって、従来より生として経験的な判断に依存することが多かった。しかし、最近の数値解析技術の進歩は著しく、種々の複雑な荷重を示すような材料を含んだ問題に関しても、相当の精度で解析することが可能となった。本研究は、軟岩に掘削したトンネル周辺の応力ならびに変形状態を、施工過程をも勘案して解析しようとしたものである。具体的には、初期応力を受けている極めて弱い多孔質な凝灰岩、泥岩内にトンネルを掘削する際の施工順序、特に全断面掘削、上部半断面掘削、底設導坑掘削、側壁導坑掘削などの各工法に伴って、円形ないし馬蹄形トンネル周辺ならびにライニング内に生じる応力ならびに変形挙動を、実験的に求められた非線形粘弾性クリープ関係式に基づいて、F.E.M.により解析を行ない、各工法、施工順序などの特性を比較検討した。

## 2. 解析方法と解析条件

解析は、二次元平面ひずみ問題とし、時間増分形式の逐次計算によった。

## 2.1 解析モデル

表-1 解析モデルの分類

解析モデルとしては、表-1のようなものを考えた。ここで円形、馬蹄形の頂部の半径は、ともに4.8mである。またB2、B3、B4については、各工法で掘削後、残りの断面を掘削するとして解析した。

| トンネル形状 | 施工法     | ライニング無 | ライニング有 |
|--------|---------|--------|--------|
| A. 円形  | 全断面掘削   | A10    | A1L    |
| B. 馬蹄形 | 全断面掘削   | B10    | B1L    |
|        | 上部半断面掘削 | B20    | B2L    |
|        | 底設導坑掘削  | B30    | B3L    |
|        | 側壁導坑掘削  | B40    | B4L    |

## 2.2 解析条件

表-2 クリープ関数

岩盤のクリープ特性としては、実験の結果によると非線形クリープ特性を示しているけれども、これを数値計算に便利のように応力レベルで分けて、部分的には線形Kelvinモデルで近似できるものと考えた。この場合Kelvinモデルによる線形クリープ関数  $J(t)$  は、次のように表わされる。

$$J(t) = 1/E \{ 1 - \exp(-Et/\eta) \}$$

表-2には、部分的に線形近似したクリープ関数を示す。

さらに、岩盤は弾塑性の性質を有するものとし、降伏条件は、次の *Drucker-Prager* 式に従うものとした。

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - c$$

ここに、 $I_1$ 、 $J_2$ はそれぞれ応力の第一不変

| 応力                    |       | クリープ関数                                           |                                 |
|-----------------------|-------|--------------------------------------------------|---------------------------------|
|                       |       | E                                                | $\eta$                          |
| 20 kg/cm <sup>2</sup> | $J_1$ | E                                                | 62000 kg/cm <sup>2</sup>        |
|                       |       | $\eta$                                           | 22000000 kg·min/cm <sup>2</sup> |
| 30 kg/cm <sup>2</sup> | $J_2$ | E                                                | 29000 kg/cm <sup>2</sup>        |
|                       |       | $\eta$                                           | 11000000 kg·min/cm <sup>2</sup> |
| 40 kg/cm <sup>2</sup> | $J_3$ | E                                                | 26000 kg/cm <sup>2</sup>        |
|                       |       | $\eta$                                           | 9700000 kg·min/cm <sup>2</sup>  |
| 50 kg/cm <sup>2</sup> | $J_4$ | $J_4 = J_3 + \frac{t}{14000000}$ (粘散型)<br>t; min |                                 |

量、第二偏差不変量であり、 $\alpha$ 、 $k$ は定数で次のように表わされる。

$$\alpha = \sin \phi / \sqrt{9 + \sin^2 \phi}, \quad k = 3C \cos \phi / \sqrt{9 + \sin^2 \phi} \quad (\text{ここで } \phi: \text{内部摩擦角}, C: \text{粘着項である。})$$

数値計算では、 $\phi = 30^\circ, 35^\circ, C = 15, 20 \text{ kg/cm}^2$  に選んだ。また岩盤のポアソン比は  $\nu = 0.35$  とし、ライニングは弾性体と考えて弾性係数、ポアソン比をそれぞれ  $E = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  および  $\nu = 0.25$  とした。

### 3. 解析結果および考察

紙面の都合により、代表的なものに限って結果のみを略述することにした。

#### A. 円形トンネルの場合

i) 岩盤を線形粘弾性とした場合には、応力は時間経過にかかわらず一定であるのに対し、非線形粘弾性とした場合には、応力の絶対値は、時間経過と共に減少する。

ii) ライニングが有る場合には、そのために変形が拘束され、線形および非線形いずれの場合にも、応力は変化し、岩盤内では、円周方向応力は減少し、半径方向応力は増大する。

iii) ライニング内壁の応力は、非線形クリープ関数を用いて解析した結果が、線形に比して大きな応力増加を示し、塑性域が生じれば、内壁の応力は減少する。

#### B. 馬蹄形トンネルの場合

図-1、図-2には、上部半断面掘削(B20)、側壁導坑掘削(B40)それぞれの工法による場合の塑性域の発達状態を示した。

i) いずれの場合にも、内部摩擦角  $\phi$  が小さくなれば塑性域は増大し、また粘着力  $C$  が小さくなるほど、更に顕著に塑性域は増大する。

ii) B20のステップ1によって、頂部に塑性域が形成されるのは勿論のこと、底盤部に大きな塑性域が形成される。これは、いわゆる盤ぶくれの原因と考えられよう。

iii) B20のステップ2に伴っては、頂部の塑性域は殆んど増大しないのに反して、側壁部ならびに底盤部には塑性域が形成される。

iv) B40のステップ1に伴って、導坑周辺に塑性域が生じ、ステップ2によって、半円頂部ならびに側壁部分に塑性域が発達する。塑性域の大きさはB20の場合に比較して、全係に小さくなるが、側壁下部に比較的大きな塑性域が形成されるのが特徴的がある。

なお、その他結果については、当日発表する。

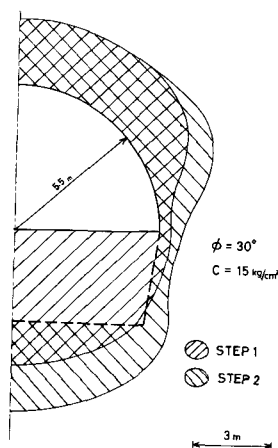


図1 上部半断面掘削工法に伴う塑性領域の形成 (C=15 弾塑性解析)

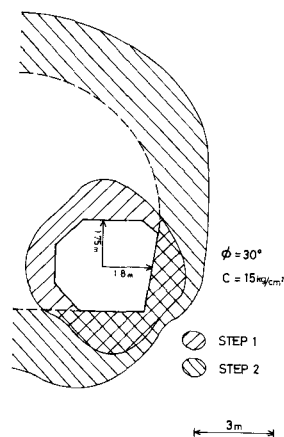


図2 側壁導坑掘削工法に伴う塑性領域の形成 (C=15 弾塑性解析)