

軟岩中に開削したトンネル周辺の応力ならびに変形状態

京都大学工学部 正員 丹羽 義次

“ “ 小林 昭一

“ 学生員 〇大津 政康

1 はじめに

高速鉄道網ならびに高速自動車道路網の整備、拡充に伴って、トンネルが全延長に占める割合は急激に増大し、同時に、より苛酷な地質条件下でも建設を余儀なくされるようになった。それにつれて、トンネル工事の技術的発展に強く要望されるようになり、なかでも、軟岩中でのトンネル開削は技術的に特に重要であるので、種々の面から検討が加えられてきた。それにもかかわらず、残念ながらトンネル工事は、従来より重宝として経験的な判断に依存することが多く、解析技術ならびに物性・測定技術の遅れもあって、総合した定量的な判断は余り期待できず、また、そのような判断を加える余地も殆んどなかったようである。しかし、最近の数値解析技術の進歩は著しく、従来は殆んど取り扱っていた種々の複雑な挙動を示すような材料を含めた問題に関しても、相当の精度で解析することが可能となり、より実際的な問題の解決にも希望をもてるようになってきた。

本研究は、このような背景の下に、軟岩中に開削したトンネル周辺の応力ならびに変形状態と、施工過程をも勘案して解析しようとする試みである。具体的には、極めて弱い多孔質な凝灰岩、泥岩に関して、実験的に求められた非線形粘弾性クリープ関係式を用いて、このような性質の岩盤内にトンネルを開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と、有限要素法を用いて解析を行ない、それぞれの特徴を比較検討した。

2 解析手法と解析条件

本研究では、初期応力を受けている粘弾塑性岩盤中に、上述の工法によってトンネルを開削した際に、トンネル周辺岩盤、未掘削部分の岩盤ならびにライニング内に生じる応力ならびに変形について、場所的ならびに経時的变化を求めることを主眼とした解析を行ない、その結果を基に各工法の特徴を比較検討した。

解析は、有限要素法により、時間増分形式の逐次計算による。また、解析に際しては、二次元平面ひずみ問題と仮定した。

(1) 解析モデル

解析モデルとしては、以下のものを考えた。

(A) 円形トンネル、半径 $r = 4.8\text{ m}$

(A1) 全断面掘削：ライニング無（記号、A10、以下記号を示す）；ライニング有（A1L、ライニング厚 $t = 70\text{ cm}$ ）

(B) 馬蹄形トンネル、頂部の半径 $r = 4.8\text{ m}$

(B1) 全断面掘削：ライニング無（B10）；ライニング有（B1L、ライニング厚 $t \approx 70\text{ cm}$ 、以下全て同じ）

(B2) 上部半断面掘削後、残りの断面の掘削：ライニング無（B20）；ライニング有（B2L）

(B3) 底設導坑掘削後、残りの断面の掘削：ライニング無（B30）；ライニング有（B3L）

(B4) 側壁導坑掘削後、残りの断面の掘削：ライニング無（B40）；ライニング有（B4L）

(2) 解析条件

岩盤のクリープ特性としては、実験より求められた結果によると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。

$$J(t) = \frac{1}{E} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E}{\tau} t\right) \right\}$$

ここに、 E 、 τ は、それぞれ弾性バネ定数、およびダッシュポットの粘性係数を表わしており、また、 t は時刻を表わす。

表-1には、部分的に線形を似したクリープ関数を示す。

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

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

ここに、 I_1 、 J_2 は、それぞれ応力の第一不変量、および偏差応力の第二不変量である。また、係数 α 、 k は次のように与えられる定数である。

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{9 + 3 \sin^2 \phi}, \quad k = \frac{9c^2 \cos^2 \phi}{9 + 3 \sin^2 \phi}$$

なお、ここに、 ϕ 、 c は、いわゆる内部摩擦角、および粘着力である。数値計算では、 $\phi = 30^\circ, 35^\circ$ 、 $c = 10, 15, 20 \text{ kg/cm}^2$ に選んだ。

また、岩盤のポアソン比は、 $\nu_c = 0.35$ とし、ライニングは弾性体と考えて、弾性係数およびポアソン比を、それぞれ $E_c = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、および $\nu_c = 0.25$ とした。

(3) 解析手順

岩盤の弾塑性的挙動は、空洞開削と同時に瞬時に終了するものと考えて、それ以後の変化は粘弾性的挙動に起因するもののみであると仮定して、以下の手順によって解析を行った。

(i) 岩盤は、初期応力 $\sigma_{init} = 40 \text{ kg/cm}^2$ を受けた静水圧状態にあるものとする。自重は考慮しない。

(ii) この岩盤中に、トンネルあるいはその一部を瞬時的に開削したものととして、弾性解析を行なう。

(iii) (ii)の解析で降伏する部分があれば、その部分の弾性係数を $1/100$ に低下させて繰り返し計算を行ない、弾塑性解を求める。

(iv) 時間増分法により、粘弾性解析を行なう。

(v) ライニングを施工する場合には、弾塑性解析終了後、直ちに、あるいは (iv) の解析の途中で瞬時的に施工したと仮定して、以後の解析を続行する。

なお、粘弾性解析を行なう際には、時間間隔としては、クリープひずみの増分の大きい初期段階では、時間間隔を 60 分に、2 時間経過後は 2 時間に、24 時間経過後は 12 時間とした。このように時間間隔を選ぶことにより、収束した安定な解が求められた。

なお、塑性域に入った後のクリープ特性については信頼できるデータが不足しており、クリープ関数を決め難いけれども、ここでは止むを得ず、一応表-1 に示したものを採用することにした。

3 解析結果および考察

断面の都合で解析結果を全て述べることはできないので、ここでは代表的なものに限って略述することにした。

表-1 クリープ関数

応力状態		クリープ関数	
		E	τ
20 kg/cm^2	J_1	E	62 000 kg/cm^2
		τ	22 000 000 $\text{kg} \cdot \text{min/cm}^2$
30 kg/cm^2	J_2	E	29 000 kg/cm^2
		τ	11 000 000 $\text{kg} \cdot \text{min/cm}^2$
40 kg/cm^2	J_3	E	26 000 kg/cm^2
		τ	9 700 000 $\text{kg} \cdot \text{min/cm}^2$
50 kg/cm^2	J_4	$J_4 = J_3 + \frac{t}{14 000 000}$ (発散型) t ; min.	

11.

図-1および2には、岩盤は粘弾性的であると仮定して、表-1 に示したクリープ関数を用いて解析したものである。

図中、非線形粘弾性解析は、表-1 の関数、 $J_1 \sim J_4$ を用いた解析を、また線形粘弾性解析は、 J_3 のみを用いた解析

(L_3)を意味している。また、横軸には、トンネル壁面からの距離を、縦軸には円筒方向応力 σ_1 の、および半径方向応力 σ_2 を取った。

図-1より、線形粘弾性の場合には、応力は時間経過にかかわらず一定であるのに対し、非線形粘弾性の場合には、応力の絶対値は時間経過と共に減少することになる。

また、図-2より、ライニングがある場合には、そのために変形が拘束されて、線形および非線形粘弾性、いずれの場合にも、応力は時間経過と共に変化する。岩盤内では、円筒方向応力 σ_1 は減衰し、半径方向応力 σ_2 は若干増大することになる。

図-3には、内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$ 、粘着力 $c = 20 \text{ kg/cm}^2$ とし、円形断面を瞬間的に掘削した場合の塑性域を示す。

図-4には、ライニング内壁の応力の経時変化を示す。

2の場合、Aは塑性域を考慮しない場合、Bは塑性域を考慮して、その領域が固定されたと仮定して解析した場合を示し、また、N、 L_3 、 L_2 は、それぞれ表-1の $J_1 \sim J_4$ を用いた場合、 J_3 のみを用いて線形と考える場合、および J_2 のみを用いて線形と考える場合の解析を意味している。

2の図より、非線形クリープ関数を用いて解析した結果が、最も大きな応力増加を示し、また、塑性域を考慮すれば、すなわち、塑性領域が生じたことにより、ライニングに生じる応力は非常に減少することになる。

図-5には、馬蹄形トンネルで上部半断面掘削(B20)工法を取った場合の塑性域の発達状態を示した。また、図-6には、側壁垂直掘削(B40)工法による場合の塑性域の状態を示した。いずれの場合にも、内部摩擦角 ϕ が小さくなるれば塑性域は増大し、また、粘着力 c が小さくなるほど、更に顕著に塑性域が増大することになる。

B20の場合を見ると、上部半断面掘削(ステップ1)によって、半円頂部には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のは特徴的である。これは、いわゆる盤ぶくれの最大の原因と考えられよう。底盤部の塑性域の大きさは、内部摩擦角 ϕ および粘着力 c が減少すれば、特に急激に増大することに注意されたい。塑性域の増大は、盤ぶくれの増大によって現われよう。また、底盤部の掘削(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ことになる。特に、塑性域の大きさは、内部摩擦角 ϕ および粘着力 c が低下すれば、著しく増大する。

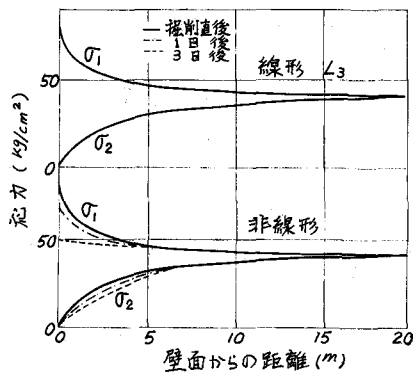


図-1 トンネル周辺の応力(ライニング無)

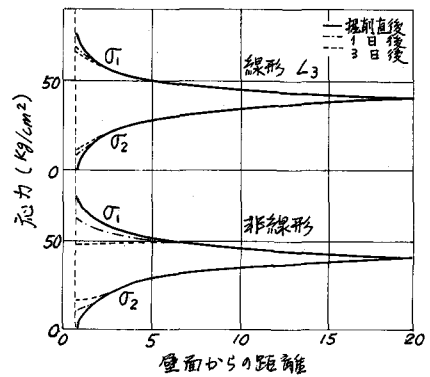


図-2 トンネル周辺の応力(ライニング有)

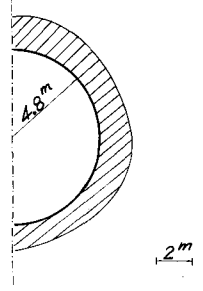


図-3 円形トンネル周辺の塑性域

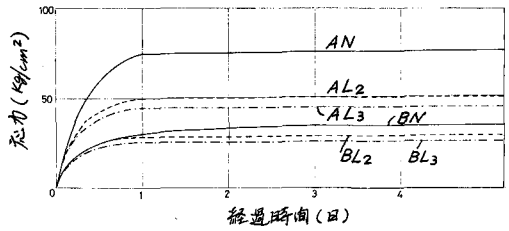


図-4 ライニング内応力の経時変化

図-6を見ると、側壁導坑掘削（ステップ1）に伴って、導坑周辺に塑性域が生じ、残りの部分を掘削すること（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ことになる。勿論、塑性域は、内部摩擦角 ϕ がおおい程、また粘着力 c がおおい程、増大する。塑性域の大きさには、B20 の場合に比較して、頂部、底盤部ならびに側壁部ともにおおくなるが、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である。

なお、紙面の都合で省略した解析結果、特に、ライニングの効果と非線形粘弾性の影響については、当日発表する。

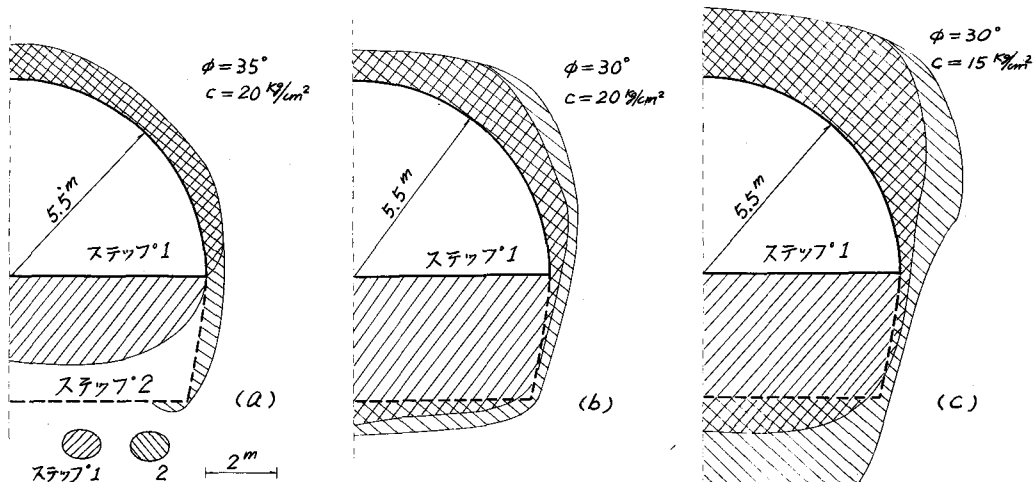


図-5 上部半断面掘削工法に伴う塑性域の形成

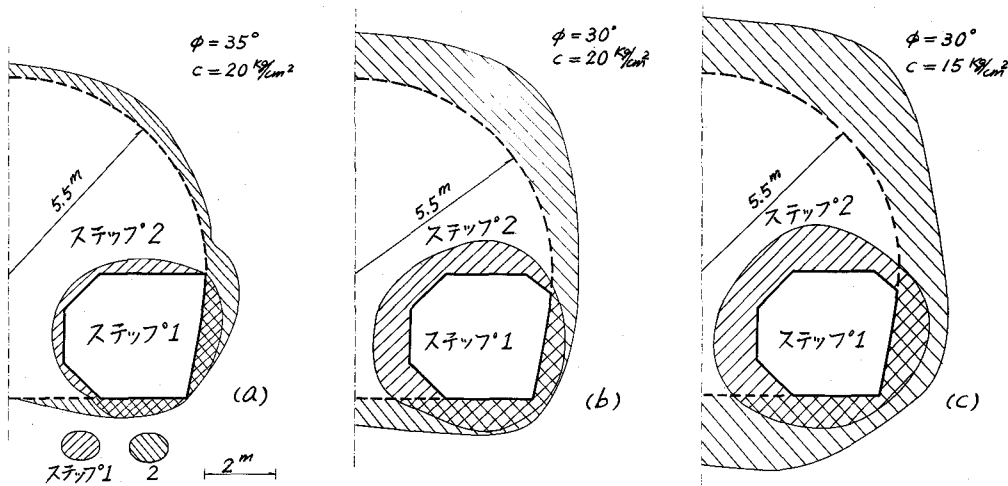


図-6 側壁導坑掘削工法に伴う塑性域の形成

STRESSES AND DEFORMATIONS PRODUCED AROUND TUNNEL EXCAVATED IN SOFT ROCK

by
Yoshiji NIWA*
Shoichi KOBAYASHI*
and Masayasu OTSU*

The present paper describes stresses and deformations produced around tunnel excavated in soft rock. In the analysis, the finite element method with successive time increment procedure was applied. The excavation and construction procedures were also taken into account. The rock was assumed to be elasto-plastic and nonlinear viscoelastic.

The results obtained are as follows:

- (1) Stresses around a circular unlined tunnel are independent on time history when the tunnel excavated in the linear viscoelastic rock, whereas they are not when it is excavated in the nonlinear viscoelastic rock.
- (2) Stresses around a circular lined tunnel, however, change by time even if the tunnel is excavated in the linear viscoelastic rock. As the time elapses, the tangential stress decreases and the radial stress increases.
- (3) Elasto-plastic analysis clearly showed that the yield zone formed in the surrounding rock expands as the so-called internal friction and the cohesion decrease in Mohr-Coulomb yield criterion. The yield zone is quite strongly influenced by the excavation procedures and geometry of the tunnel.
- (4) In the horseshoe shaped tunnel, excavation of the upper half causes the formation of wide yield zone in the bottom half, which may be the chief cause of the lift-up of the bottom. The excavation of the two pilot tunnels in the bottom greatly reduces the further formation of yield zone, specifically in the bottom and the side of the tunnel.

* Department of Civil Engineering, Kyoto University