

国鉄岐阜工務局 正会員 長山 喜則  
 同上 〃 山崎 幹男  
 同上 〃 篠原 茂夫

(1) まえがき 最近NATMによるトンネル施工の増加に伴い、トンネルの最終的な構造体となる二次覆工についても議論される場合が多くなってきている。もともと、NATMの原理からすれば一次覆工により変位が収束した後、二次覆工を施工するのが一般的であるが、泥岩等の地山で膨圧が予想される箇所では、トンネル内空変位が収束するには長期間を要し、トンネル自体の安定、周辺地山のゆるみ領域拡大の防止、及び工程等から、早期に二次覆工を施工する場合もある。そこで今回筆者等は、泥岩中のトンネルの計測結果に基づき、二次覆工を設計するうえで重要な要素となるクリープによる地圧の算定を、三要素Voigtモデルの仮定により試みた次第である。

(2) 覆工に作用する地圧の一般式 図-1に解析モデルを示す。これは三要素Voigtモデルに、キで表わしたひずみ拘束のための要素を並列に加えたものである。この要素は任意の値以下のひずみに対しては全く抵抗せず、ひずみがその値を超えないように拘束する。載荷と同時に弾性変形が生じ、その後の経時的なクリープ変形は任意のひずみに達した後に拘束される。 $\sigma$ なる外力の作用によって(I)の部分では $\sigma = E_0 \varepsilon_0 \dots (1)$ 、(I)の部分では $\sigma = E_1 \varepsilon_1 + \eta \dot{\varepsilon}_1 \dots (2)$ が成立する。よって $\varepsilon_1 = \{1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta} t)\} \sigma / E_1 \dots (3)$ を得る。ここに $t$ は載荷後の経過時間である。従って、 $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 = \sigma / E_0 + \{1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta} t)\} \sigma / E_1 \dots (4)$ 。このひずみの経時変化を途中で拘束する。 $\varepsilon_c$ を拘束時の全ひずみとする( $\varepsilon_c > \varepsilon_0$ )。  $t = t_c$  のとき  $\varepsilon = \varepsilon_c$  となったと仮定すると、 $\varepsilon_c = \sigma / E_0 + \{1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta} t_c)\} \sigma / E_1 \dots (5)$ 。  $t > t_c$  においては、ひずみは一定値 $\varepsilon_c$ である。しかしこの時 $\varepsilon_1$ は増大し、 $\varepsilon_0$ は減少する、すなわち、

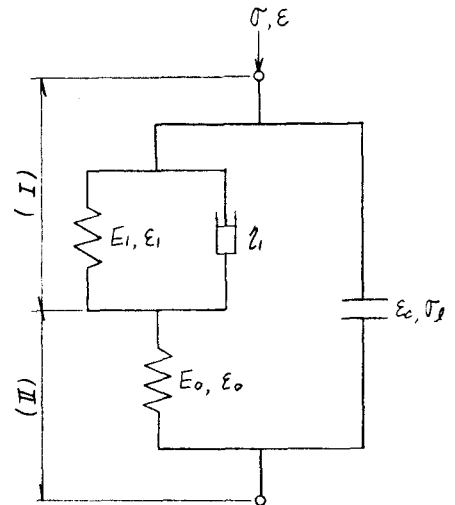


図-1 解析モデル

$\varepsilon_1 = \frac{E_0 \varepsilon_c}{E_1 + E_0} - \frac{\sigma}{E_1 + E_0} \exp(-\frac{E_1 + E_0}{\eta} t) \cdot \exp(-\frac{E_1}{\eta} t_c) / \exp(-\frac{E_1 + E_0}{\eta} t_c), (t \geq t_c) \dots (6)$ 。  $t \rightarrow \infty$  のとき  $\varepsilon_1 = \frac{E_0 \varepsilon_c}{E_1 + E_0} \dots (7)$ 、  $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 = \frac{E_1 E_0 \varepsilon_c}{E_1 + E_0} \dots (8)$ 、ここに $\sigma_1$ は要素内の応力である。 $\sigma_2$ をクリープを拘束するために必要な応力とすると、 $\sigma_2 = \sigma - \sigma_1 = \sigma - \frac{E_1 E_0 \varepsilon_c}{E_1 + E_0} \dots (9)$ 。式(5)、式(9)より $\sigma_2 = \exp(-\beta t) \sigma / (1 + \alpha) \dots (10)$ を得る。ただし、 $\alpha = E_1 / E_0$ 、 $\beta = E_1 / \eta$ である。式(10)は、載荷後 $t_c$ を経過してクリープ変形を拘束した場合に、その拘束に必要な最終的な応力を、クリープ係数 $\alpha$ 、 $\beta$ と、載荷応力 $\sigma$ 及び $t_c$ によって表わすものである。

NATMに用いる吹付コンクリートやロックボルトは、肌落ちや岩盤の節理の拡大を防止しトンネル周辺の地山の均一性を保つものと仮定してその剛性を無視する。また、クリープ変形に伴うトンネル周方向の地山応力の変化を無視してトンネル半径方向の一次元的クリープのみを考慮すると、初期応力 $\sigma$ の地山内にNATMで掘削したトンネルに二次覆工を施工してクリープ変形を拘束した場合に、二次覆工に作用する地圧の最終値は式(10)の $\sigma_2$ によって与えられる。式(10)より、 $(1 + \alpha) \sigma_2 / \sigma = \exp(-\beta t_c) \dots (10')$ として種々の $\beta$ に対して任意時刻 $t_c$ に二次覆工の施工をした場合の覆工への地圧を表わしたのが図-2である。

(3) 適用例 実際のトンネル掘削においては、切羽の支保効果によって解放応力(掘削相当外力) $\sigma$ が変化する。

切羽で $\sigma$ の約 $\frac{1}{2}$ が作用し、切羽より $(2\sim 3)D$  ( $D$ はトンネルの直径)離れると全 $\sigma$ が作用することが知られている。切羽近傍で二次覆工を施工して地山の変形を拘束すると、その後の $\sigma$ の増加が全て $\epsilon$ の増加となることは図-1からもよく判る。

NATMにおいては殆どの場合にコンバージェンスの測定が行われているので、この内空変位の経日変化から $\alpha$ ,  $\beta$ を求める。切羽の影響を受けていない位置での変位の経日変化と、クリープによる三要素Voigtモデルのひずみの変化が相似であると仮定して、計測したコンバージェンスを整理すると、泥岩中で掘削した塩嶺トンネルにおいて  $\alpha=1.2$ ,  $\beta=0.043$  を得た。図-3にコンバージェンス(上半水平測線)とひずみの経日変化を50日目の値で無次元化して示した。この図より先の仮定の妥当性が分る。尚この図のひずみの変化には切羽の影響を別のクリープ関数で近似させて考慮している。<sup>1)</sup>

この図で初期のコンバージェンスがやや小さくなっているのは、下半の存在のためと思われる(パンチ長は約30m)。こうして求めた $\alpha$ ,  $\beta$ を用いて 当トンネルに二次覆工を施工した場合に予想される地圧は式(10)を用いて、土被り100mとして覆工時期 $t_c$ が50日で $13\text{ t/m}^2$ , 60日で $9\text{ t/m}^2$ , 90日で $2\text{ t/m}^2$ である。

(4) あとがき コンバージェンスが収束する前に二次覆工を施工する場合に、将来その覆工に作用する地圧をそれまでの計測データを用いて簡単に算出する方法を試みた。この方法は従来から良く用いられている三要素Voigtモデルに、 $\kappa$ で表わしたひずみ拘束の要素を加えただけの単純なモデルに基づいている。しかしクリープひずみを拘束すると要素内の応力の減少がはじまり、リラクセーションのような動きをするのは興味深い。

一次元モデルをそのまま三次元問題に適用しているため、概略値を与えるにすぎないが、今後覆工地圧の実測等を行って更に検討を加えたい。

参考文献 1)土屋敬,「システムロックボルトに関する最近の研究」,トンネルと地下 Vol. 11, 1980, pp7-17.

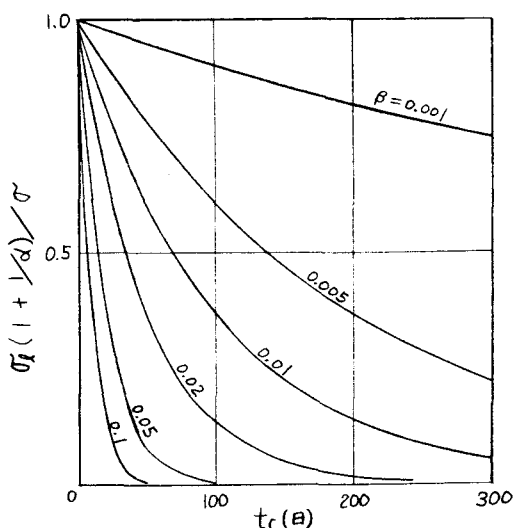


図-2 覆工時期と覆工土圧

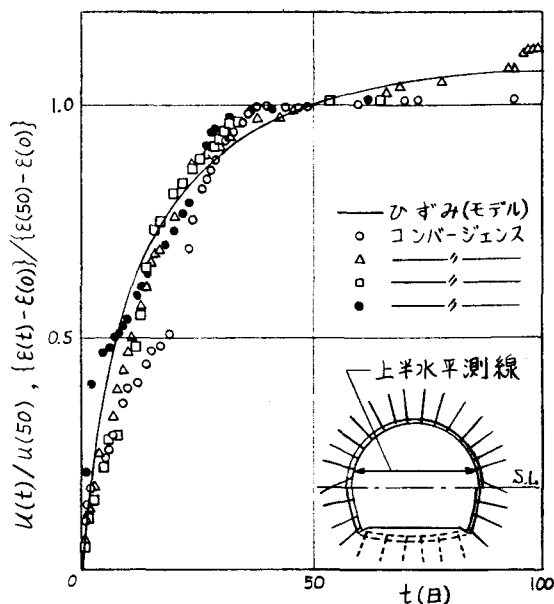


図-3 ひずみとコンバージェンスの経日変化