応力・時間依存性を考慮したトンネル変状の予測と対策

鉄建建設　正会員　松岡　茂
同　上　正会員　松浦和也
同　上　正会員　土井至朗

１．目的

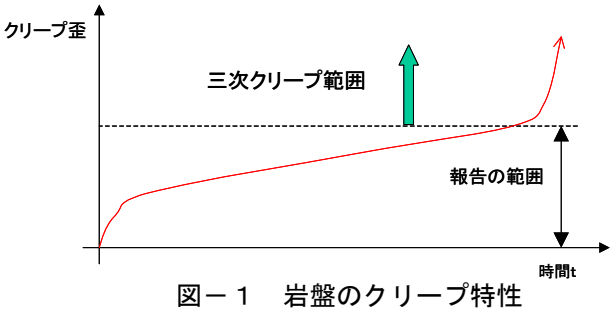
トンネルの変位が長期間継続する場合，その原因として周辺地山の経時的な変位挙動であると考え，クリープモデルによる検討 [1)]が行われている．しかしながら，周辺地山のクリープ特性に基づいた解析結果により，トンネルの変状予測あるいは補強対策を行った事例 [2)]は少ない．そこで，周辺地山のクリープ特性を時間依存性のみでなく応力依存性も考慮してモデル化することで，トンネルの変状予測およびロックボルト等の補修・補強効果の推定を試みた．

２．計算モデル

岩盤のクリープ特性は，図－１に示すように表すことできるが，ここでは三次クリープを考慮しないものとした．計算で考慮する地山のクリープ特性は，式(1)に示すように相当応力と時間の関数として表されるものと仮定する [3)]．

$$\overline{\varepsilon_c} = A \cdot \overline{\sigma}^{n} \cdot t^{m} \quad (1)$$

ここに，$\overline{\varepsilon_c}$：相当クリープひずみ，A：定数（1.3931×10^{-7}）、$\overline{\sigma}$：相当応力、n：相当応力に関わる係数(1.7478)，t：経過時間，m：時間に関わる係数（0.3709）である。

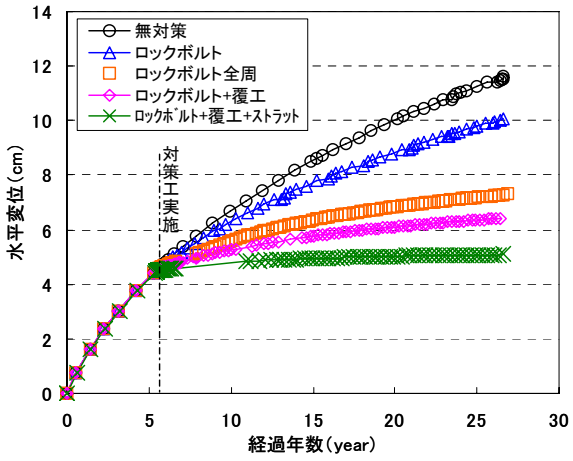


図－１　岩盤のクリープ特性

相当応力については、モール・クローンの破壊規準に基づいて算定している．なお，モール・クローンの破壊規準は，相当応力を算定するために用いているものであり，弾塑性解析を行っているわけでない．地山のクリープ特性を表す定数については，トンネルの内空変位測定結果に基づいて定めるものとした．

３．計算事例

本報告では，長期間内空変位が継続した只見線の六十里越えトンネル [2)]に適用した計算事例を紹介する．対象としたトンネルは，トンネル完成後も内空変位が約 1㎜/年程度の速度で発生しており，現地調査ではトンネル覆工のひび割れ及びトンネルの覆工背面に存在する広い範囲の空洞が確認されている．



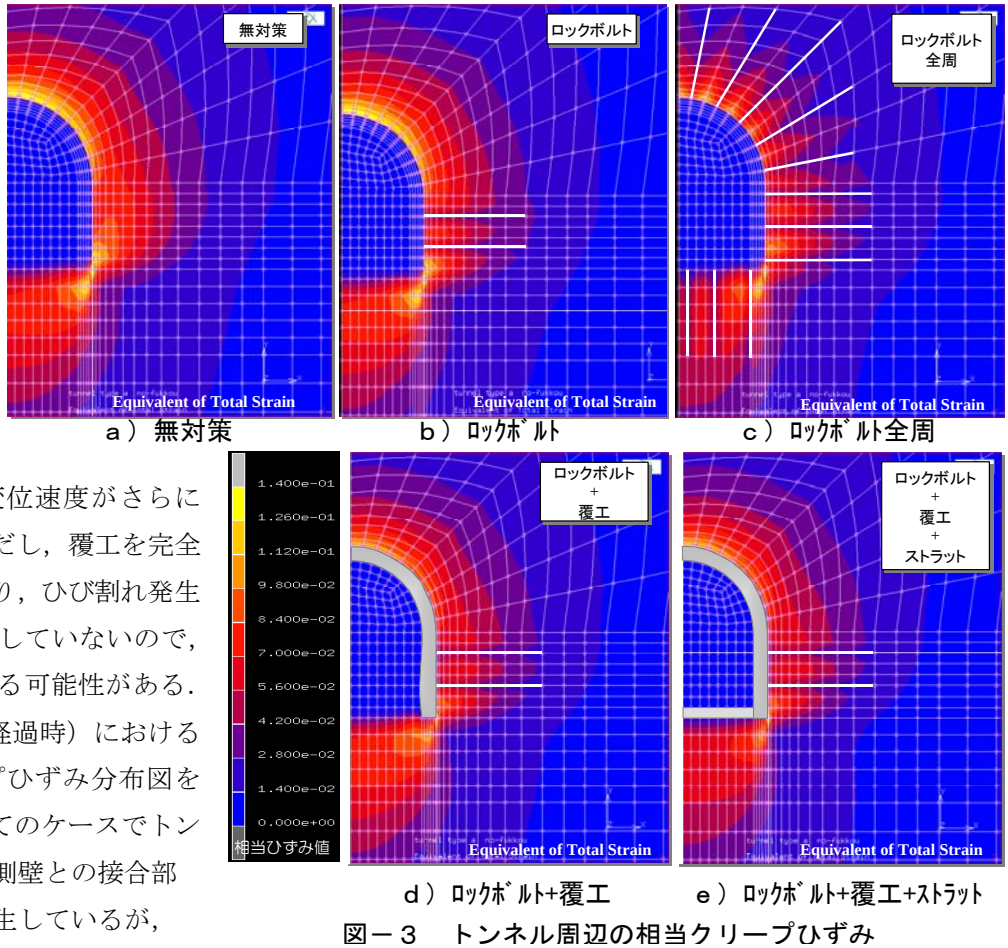
図－２　トンネルの内空変位

そこで，数値解析ではトンネル覆工は機能していない状態であると仮定して計算を行った．図－２に示すように内空変位速度が実測と一致するようにクリープ特性の定数を定めた．その後，トンネル変状対策として側壁部に長さ３ｍのロックボルトを片側２本（トンネル軸方向に１ｍピッチ）打設した場合の効果を算定した．さらに，ロックボルト打設と同時に，覆工背面への裏込め注入および損傷部分の補修・補強などを施工することで覆工が有効に作用したと想定し，ロックボルトと覆工の変位抑制に対する効果を試算した．

計算結果によると図－２に示すようにロックボルトを側壁に打設することで，内空変位速度は小さくなっており，周辺地山のクリープ特性に起因して長期間変状が生じているトンネルに対し，ロックボルトは有効であることが判明した．計算結果によるとトンネル底盤の盤膨れが顕著であることから，底盤などにロックボルトを打設した場合についても計算を行った．その結果，底盤部を含むトンネル周面にロックボルトを打設することで、図－２に示す

キーワード　トンネル，クリープ，ロックボルト，覆工，
連絡先　〒286-0825　千葉県成田市新泉 9-1　鉄建建設（株）技術センター　ＴＥＬ0476-36-2350

ように内空変位を抑制することができることがわかる．さらに，側壁のロックボルトと同時に健全な覆工並びにストラットを施工したと仮定して計算した結果，健全な覆工を施工することで，内空変位速度をロックボルトのみの場合より小さくすることが可能となり，さらにストラットを施工することで変位速度がさらに低減することが判明した．ただし，覆工を完全弾性体としてモデル化しており，ひび割れ発生などの損傷による影響を考慮していないので，覆工の効果を過大評価している可能性がある．



ａ）無対策　ｂ）ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ　ｃ）ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ全周

ｄ）ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ+覆工　ｅ）ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ+覆工+ｽﾄﾗｯﾄ

図－３　トンネル周辺の相当クリープひずみ

図－３に最終状態（27 年経過時）におけるトンネル周辺地山のクリープひずみ分布図を示す。クリープひずみは，全てのケースでトンネル天端近傍とインバートと側壁との接合部に大きなクリープひずみが発生しているが，その範囲はロックボルトなどの支保の影響を受けている．特に，ロックボルトと覆工の両方を考慮した結果では，大きなクリープひずみが発生している領域が非常に小さくなっている（図－３ｄ） ｅ)）．また，側壁のみにロックボルトを考慮した結果では，側壁のロックボルト部分付近のクリープひずみが非常に小さく，ロックボルトにより地山のクリープ変形が局部的に拘束されている（例えば図－３ｂ)）．次にトンネル底面から下方に着目すると，クリープひずみは比較的大きく，クリープひずみが増加する領域も広くなっている．そこで，底盤部分のクリープひずみの増加を抑制する目的で底盤にロックボルト並びにストラットを打設したケース（図－３ｃ）ｅ)）を計算した．その結果，底盤に打設したロックボルトは，トンネル底面から下方に広がるクリープひずみの増加を抑制しており，この効果によりトンネルの内空変位が抑制されたと考えられる．このように，底盤部分のクリープひずみの増加を抑制することがトンネル安定に大きな影響を及ぼすことから，周辺地山がクリープ特性を示すトンネルではインバートの早期閉合は有効であると思われる．

4. まとめ

周辺地山のクリープ特性を時間依存性のみでなく応力依存性を考慮してモデル化することにより，トンネルの変状予測およびロックボルトなどの補強効果を数値解析で評価することが可能となった．このような手法を用いることで，長期間変位が継続するトンネルに対して，適切な補強方法を提案することが可能になると思われる．さらに，インバート等の有無あるいは早期閉合による影響を評価することができることから，クリープひずみの増加に起因する盤膨れおよび内空変位に対する検討も可能であることが判明した．

参考文献

1) 松長剛ほか「地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究」土木学会論文集, No. 799, Ⅲ-72, pp. 75-88

2) 野澤伸一郎ほか「既設トンネルの膨圧を克服」トンネルと地下, Vol. 23, No. 10, 1992, pp. 17-22

3) 土井至朗ほか「応力・時間依存性を考慮したクリープ解析による支保効果の検討」土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，VI-231，pp. 461-462，平成 17 年 9 月