時間依存性を考慮した道路トンネルの変状予測と補強工効果の解析的評価

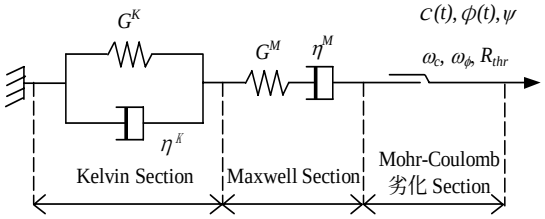
長崎大学工学部　学生会員　○東　幸宏　　長崎大学工学部　正会員　　蒋　宇静
長崎大学大学院　フェロー会員　棚橋　由彦　　長崎大学工学部　正会員　杉本　知史

1.はじめに

道路トンネルにおいて，二次覆工が施工された後，時間経過と共に地山に塑性領域が拡大し，塑性圧が覆工に作用するケースがあり，覆工にダメージを及ぼす原因になる．また，他の要因として，覆工自体の経年劣化が挙げられる．このようにトンネルは経時的変状を生じるため，合理的な維持管理を目指すには，変状の度合いの予測や，有効な対策工の選定と補強効果の評価が求められる．本研究では，地山の強度低下時間依存性モデル（Burger-MC劣化モデル[1]）を用いてトンネル供用後の経時的変状の予測とトンネル補強後の変状解析を行うことで各種補強工による変位抑制の効果を解析的に評価することを目的とする．

2.強度低下時間依存性モデルの概要

トンネル変状は，周辺地山の経年劣化が原因の 1 つであると考えられるため, 本研究では時間の経過に伴い岩盤強度が低下するモデルを用いる．各部はKelvinモデル，Maxwellモデル，Mohr-Coulombモデル（MCモデル）から成り，KelvinモデルとMaxwellモデルの直列をBurgerモデルと呼ぶ. Burger-MCモデル中のMCモデルの粘着力 c と摩擦角 ϕ を時間と共に低下させ, 岩盤の強度劣化を考慮することが出来るように修正したモデルを，Burger-MC劣化モデル[1]として図-1 に示す．図中の ψ は岩盤のダイレーション角，R_{thr} は岩盤の応力状態限界係数であり，応力状態係数 R が R_{thr} 値を超えるとMCモデルの c，ϕ が低下し，劣化を始める．ω_c，ω_ϕ は粘着力と内部摩擦角の劣化率であり，両者の経時的変化は R に比例する[2]．



ω_c： MC 要素の粘着力劣化率
ω_ϕ： MC 要素の摩擦角劣化率
R_{thr}：MC 要素の劣化応力状態限界係数

図-1　Burger-MC劣化モデル[1]

3.解析モデルと解析ケース

図-２に本研究で用いた解析モデルの概略図を示す．本研究では一例としてうれしのトンネル(土被り約 375m，地山強度比 0.24)を解析の対象とした．解析ケースは，補強なしの場合と，塑性圧に対して有効であるとされる各種補強工[3] (ロックボルト補強工(増設)，鋼板接着工，炭素繊維シート接着工，内巻工，覆工背面に空洞がある場合を想定した裏込め注入工)を施工した場合について変状解析を行う．ロックボルトはケーブル要素，鋼板・炭素繊維・内巻工はシェル要素，裏込め注入工は背面空洞部をMohr-Coulombでモデル化をした注入材として物性を変えることで表現した．表-１に入力物性値を示す．施工時期は供用されてから 2 年後，3 年後，4 年後のいずれかとし，5 年間の変状解析を行った．

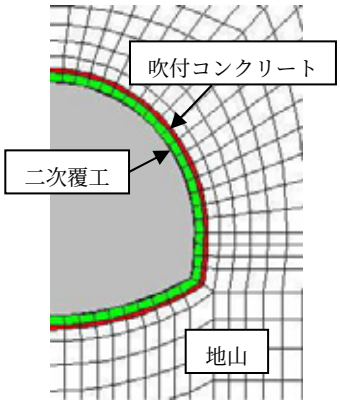


図-2　解析モデルの概略

表-1　入力物性値

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
内巻工	3.10×10^4	0.2
炭素繊維シート接着工	2.30×10^5	0.3
鋼板接着工	2.10×10^5	0.3
ロックボルト補強工	2.06×10^5	-
裏込め注入工	5.00×10^3	0.4

4.補強工施工後の変状解析と補強効果の評価

4.1 補強工施工による塑性領域の変化

図-3 に補強工を施工しない場合と供用後 2 年で各種補強工を施工した場合の 5 年経過時点における塑性領域の進

キーワード：トンネル，補強工，変状解析，Burger-MC 劣化モデル
連絡先　〒852-8521　長崎県長崎市文教町 1-14　長崎大学 工学部 社会開発工学科 地盤環境研究室

展状態を示す．塑性領域全体で大きな違いは見られないが，ロックボルトを増設した場合の塑性領域を補強なしの場合と比較してみると，側壁側の塑性領域が進展している．これは*Srp*=0.24 と地山強度比が極端に低く，ボルトに作用する軸力によってボルトと地山の境界に生じるせん断応力が圧縮方向に大きく生じたため，塑性領域を促進させたと考えられる[4]．　鋼板接着工と内巻工に関しては，側壁側の塑性領域を抑制している．これは，上部の覆工面に対して補強を行っているため，覆工背面の塑性域を抑制したと考えられる．一方，炭素繊維シート接着工に関しては，補強なしの場合と同様な塑性領域の進展を示している．これは，炭素繊維モデルの性質が鋼板・内巻工の各モデルと異なり，面に作用する荷重に対する抵抗を有しないため，地山の塑性領域の抑制には至らなかったものと考えられる．

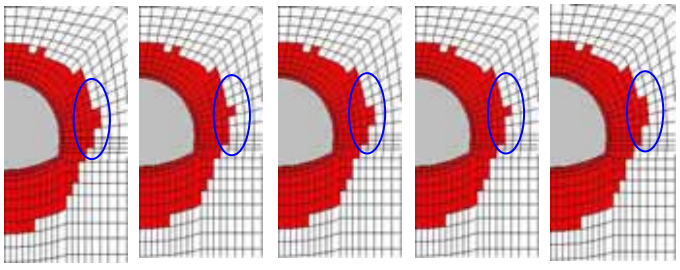


図-3　各ケースの塑性領域の比較

4.2 各種補強工による変状抑制効果の比較

図-4 に 2 年後に補強工を施工した場合の補強工種による内空変位の比較を示す．変位抑制の度合いを比較すると，最も補強効果が現れているのは内巻工である．鋼板接着工と炭素繊維シートも補強工を施工しない場合よりも変位を抑制しているが，これは内巻工と鋼板及び炭素繊維シートの基本的性質の違いから内巻工ほどの補強効果が得られなかったものと考えられる．

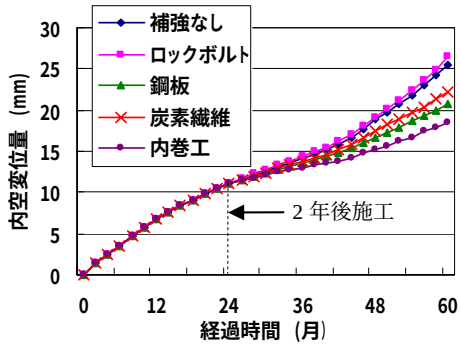
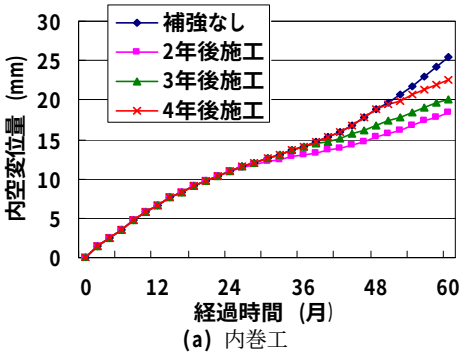


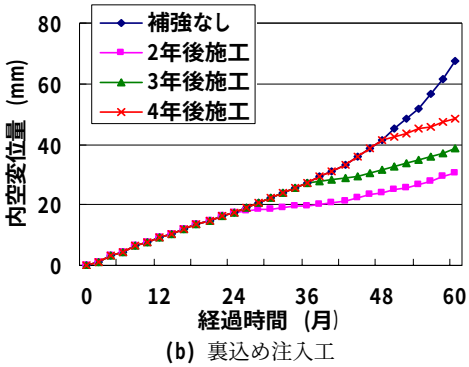
図-4　各補強工による内空変位比較

内巻工(厚さ 10cm)を施工した場合の施工タイミングによる内空変位の相違を図-5（a）に示す．最も変位を抑制したのは 2 年後に施工した場合で，無補強時と比較すると変位を 27.7%低減させることになり，より早期の補強効果が期待できると考えられる．

側壁部の覆工背面に深さ 5cm 範囲 10 ° の空洞が存在すると仮定した場合における裏込め注入工の施工タイミング毎の内空変位を図-5（b）に示す．裏込め注入工においても内巻工と同様に，2 年後施工のケースが最も抑制効果が高く，変位を 54.6%低減させていることより，早期施工においての補強効果が期待できると考えられる．



(a) 内巻工



(b) 裏込め注入工

図-5　施工タイミング毎の内空変位比較

5.おわりに

本研究によって，鋼板接着工・炭素繊維シート工・内巻工・裏込め注入工の 4 種の補強工法は，補強時期が早いほど変位の抑制効果が現れることが確認できた．しかし，ロックボルト補強工に関しては，必ずしも変位の抑制効果があるわけではなくかえって変位を促進させる結果も得られた．今後は地山強度比を変化させることにより，地山の分類に応じた変状予測と各種対策工の効果評価を行っていく．

【参考文献】1) Guan Z., Jiang Y., Tanabashi Y. and Huang H.: A new rheological model and its application in Mountain Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology (article in press, available online on Aug. 2007). 2)里優ほか：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第 18 回土質工学研究発表会論文概要集, pp.817-820, 1983. 3)（財）鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，pp.89-96，1988．4)蒋宇静ほか：軟岩地山の安定におけるロックボルトの力学的作用効果，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，pp.19-31，1997