# 強度低下の時間依存性を考慮した トンネル変状の予測

東幸宏1\*・高橋俊長2・福田毅3・山田浩幸4・蒋宇静5

<sup>1</sup>長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)
 <sup>2</sup>東日本高速道路株式会社 千歳工事事務所 (〒066-0037 北海道千歳市新富 1-2-14)
 <sup>3</sup>株式会社 地層科学研究所 (〒112-0004 東京都文京区後楽二丁目 20-2)
 <sup>4</sup>株式会社 鴻池組大阪本店 土木技術部 (〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)
 <sup>5</sup>長崎大学 工学部 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)
 \*E-mail: d709170d@cc.nagasaki-u.ac.jp

トンネルでは掘削により周辺地山に塑性領域が形成され,地質によっては時間の経過とともに塑性領域 が拡大することでトンネルに変状が生じる.このようにトンネルの完成後に地山劣化に伴う経時的な変状 が生じる場合には、トンネルの施工時から変状に対する事前評価が重要となる.また、トンネルでは長期 的に変状を生じるため、変状を事前に予測し、適切な対策手法を選定する必要がある.しかし、トンネル 変状の時間依存性に関するパラメータは各種の力学実験などでは得られないことが現状である.本報告で は、膨張性を呈する蛇紋岩地山のトンネルにおいて Burger-MC 劣化モデルによる有限差分法を用いた再現 解析により必要なパラメータの同定を行い、1年間のクリープ変形の変状シミュレーションを行った.

Key Words: Tunnel, Burger-MC deterioration model, Deformation analisys, Creep

### 1. はじめに

岩盤の力学的特徴として、ひずみ軟化やダイレーショ ンのみならず、クリープや時間経過に伴う強度低下とい った性質が挙げられる.トンネルを掘削し、覆工などの 支保工が施工された後、時間の経過とともに周辺地山に 塑性領域が拡大してトンネル内空側に地山が押し出され て地圧が覆工に作用するケースが見られる.この地圧は 塑性圧と呼ばれ、覆工に対して変形・ひひ割れ・剥落な どのダメージを与えることがある.この塑性圧は、トン ネル掘削によって周辺地山に塑性領域が形成されたあと, が拡大するものであり、 塑性領域における地山の力学的 特性が変化するなどの時間経過に伴う力学的挙動に起因 すると考えられる. このような状況においては、内空変 位の進行を抑制したり、必要な内空断面を確保するなど のトンネルの変状に対する補強対策が必要となる. その ため、設計段階より変状の発生箇所や程度、トンネル変 状に対する補修の必要性、最適な対策工の選定、対策工 施工後の効果を精度よく予測することが求められる.

上述したように、トンネルは後期変状を生じるため、 トンネルの変状予測や危険度の評価には変状の発生メカ ニズムが的確に反映された事前の力学的検討が有効であ ると考えられる. これにはトンネル周辺の地山の適切な カ学モデルを準備し、その力学モデルに基づく力学挙動 を良好に再現できる数値解析手法の適用が必要となる. しかし、トンネル変状の時間依存性に関しては、岩盤強 度の低下率などの各種パラメータが不足しているのが現 状である. そのため、数値解析に必要なパラメータを決 定するのは非常に困難である.

本報告では、膨張性地山に施工されたトンネルの長期 間の変状予測を行うことを目的としている.しかし、前 述のような問題があるため、対象としているトンネルが 施工されている地山のクリープ変形に関するパラメータ の同定を行うために、先行して施工されている避難坑の 1年間の変状の計測値を用いた再現解析を行った.これ によって同定されたクリープ変形に関するパラメータを 本坑に適用して、クリープ解析を行うことで、本坑の長 期間における変状予測を行うものとした.

また,この予測解析によって得られた結果より,実現 場における施工時のトンネル断面変形に対する予防保全 対策・補強対策に関する指標の1つとすることを目的と している.

#### 2. 解析概要

#### (1) 強度低下時間依存性モデル

トンネルの変状は、周辺地山の経年劣化が原因のひと つとして挙げられるため、本解析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.

図-1のレオロジーモデルは、Kelvinモデル, Maxwellモ デル, Mohr-Coulombモデル(MCモデル)から成り、こ れらを組み合わせることで様々なモデルを作成すること ができ、Kelvin-MCモデルやMaxwell-MCモデルといった モデルが挙げられる.またKelvinモデルとMaxwellモデル を直列につないだものをBurgerモデルと呼ぶ.ここで、 すべてのモデルを組み合わせたBurger-MCモデル中のMC セクションの粘着力 cと摩擦角 ø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<sup>1)</sup>と呼ぶ.

Burger-MC劣化モデルの構成式は以下のように表される.ここに、 $R_{trr}$ は岩盤の応力状態限界係数であり、応力状態係数Rが $R_{trr}$ 値に達すると劣化を始める.MCセクションの $\omega_c$ 、 $\omega_o$ 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<sup>2</sup>.Burger-MC劣化モデル構成式においては、粘着力cと摩擦角 $\phi$ の単位時間当たりの増加量は、粘着力劣化率 $\omega_c$ と応力状態係数Rの比例式、摩擦角劣化率 $\omega_o$ と応力状態係数Rの比例式で表すことができる.

$$\frac{dc}{dt} = -\omega_c R \tag{1}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\omega_{\phi}R \quad (R \ge R_{dur})$$
<sup>(2)</sup>

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c\cos\phi + (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi}$$
(3)



#### (2) Burger-MC劣化モデルによる再現解析

本報告では、北海道横断自動車道穂別トンネル西工事 を解析の対象とした.穂別トンネルは泥岩、緑色岩、蛇





図-3 本坑解析モデル

表-1 地盤の物性値						
	E (MPa)	ν	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	C (MPa)	φ (deg)	T (MPa)
	150	0.34	24	0.2	30	0.04

紋岩といった異なる岩体が複雑に関係した地質構造を呈 しており、硬軟も様々な地山で施工されている.また、 土被りの大きい蛇紋岩区間(土被り250m以上)におい て大きな変位が生じている<sup>3</sup>.また、避難坑では、次頁 の図-4の計測結果から施工完了時の2006年2月末から 2007年3月末までにかけてクリープ変形が生じていると 考えられる.

そこで、本報告ではこの期間に着目し、計測した変位 量にフィッティングするように穂別トンネル西避難坑の クリープ変形を考慮した再現解析を行い、穂別トンネル 本坑クリープ解析に必要なパラメータを決定する.本来、 再現解析によりパラメータをフィッティングする場合、 すべての変位にたいしてフィッティング行うべきである が、本報告では最も変位が顕著であった「水平測線」を 基準にフィッティングを行い、パラメータの同定を行う こととした.図-2および図-3に避難坑、本坑の解析モデ

#### ルを示す.また,表-1に地盤の物性値を示す.

本解析における解析ステップは、本坑の施工手順を参 考に全断面掘削、一次・二次支保工同時施工,覆工打設 として解析を行い,覆工打設後にクリープ変形が生じる という流れで解析を行った.

#### 3. 解析結果と検討

本章では、前章で述べた避難坑の解析モデルを用いて 再現解析を行い、クリープ解析に必要な地盤のパラメー タを決定する.また、求めたパラメータを用いて本坑の 1年間のクリープ解析を行い、本坑のクリープによる変 形の予測を試みる.

再現解析において、決定するパラメータはKelvinセク ションにおけるせん断弾性係数 $G^{K}$ ,粘性係数 $\eta^{K}$ , Maxwellセクションにおける粘性係数 $\eta^{M}$ , MCセクショ ンにおける粘着力劣化率 $\omega_{o}$ ,摩擦角劣化率 $\omega_{o}$ ,劣化応 力状態限界係数 $R_{hr}$ の6つであり、これらのパラメータは 力学実験などでは得られないパラメータである.

#### (1) 再現解析の結果と検討

前章で述べたように、再現解析では計測結果にフィ ッティングするようにクリープに関するパラメータを決 定する.なお、比較の規準となるパラメータは同様な軟 岩地山に施工されたトンネルにおけるBurger-MC劣化モ デルを用いたパラメータ同定に関する既往研究<sup>4</sup>の結果 において最も実測値との誤差が小さい結果となったパラ メータを用いることとした.

図-5に水平測線における計測結果と解析結果を示す. この図-5より、変位量のフィッティングの状況は概ね良 好な一致を示しており、表-2に示している最終変形量と の比較より0.03%と非常に小さい誤差となっていること がわかる.このときの設定パラメータを表-3に示す.11 月3日を境としてパラメータを変えている理由は、掘削 時の対策等により、11月3日までの変形とそれ以降の変 形の推移の傾きが異なるため、11月3日を目安としてク リープ係数を変更した.水平測線以外の天端沈下、側壁 沈下、斜測線については、表-3より最大で27%の誤差と なった.



図-4 避難坑計測結果 表-2 最終変形量との比較と誤差

	天端沈下	左沈下	右沈下	左斜測線	右斜測線	水平測線
実測値	-35.80 mm	-50.10 mm	-42.20 mm	-24.30 mm	-22.40 mm	-80.90 mm
解析值	-26.13 mm	-43.88 mm	-35.80 mm	-22.73 mm	-19.37 mm	-80.87 mm
誤差	27.02 %	12.41 %	15.18%	6.47 %	13.52 %	0.03 %

表-3 再現解析によって求められたクリープに関するパラメータ

	$G^{\!K}$	$\eta^{K}$	$\eta^M$	$\omega_{c}$	$\omega_{arphi}$	R <sub>thr</sub>
	(Pa)	(Pa · s)	(Pa · s)	(Pa/year)	(°/year)	
11/3まで	6.04E+08	4.04E+16	3.83E+17	5.88E+04	5.0	0.6
11/3以降	6.04E+08	4.04E+16	3.83E+17	5.88E+04	3.0	0.6



図-5 水平測線における実測結果と解析結果 この再現解析によって決定されたクリープ変形に関 するパラメータを用いて本坑のクリープ解析を行った. 解析の期間は施工完了から1年間として、本坑変位の予 測を行った.

#### (2) 本坑クリープ解析の結果

本坑の解析では、図-3で示した解析モデルを用いて1 年間のクリープ解析を行い、トンネル変形の予測を行っ た.図-6に本坑のクリープ解析結果、表-4にクリープに よる変形量、図-7に変位ベクトル図を示す.

約1年間(400日)のクリープ解析を行った結果,表-4 に示すような変形を生じる結果となった.天端および両 側壁が沈下していることから,トンネル全体として共下 がりとなる変形を生ずる.これは,実測の変形傾向も同 様な変形傾向を示している.また,図-7より,上下に押 しつぶされるような変形モードを示していることもわか る.

クリープによる変形量は、表-4より天端で7mm程度の 沈下が生じ、水平測線では9mm程度地山側に広がるという結果が得られた.



図-7 変位ベクトル図

	天端沈下	左側壁沈下	右側壁沈下			
変形量	-6.8mm	-0.5mm	-0.5mm			
	左斜測線	右斜測線	水平測線			
変形量	-1.2mm	-1.2mm	+8.9mm			
+ : 隆起・伸張 - : 沈下・収縮						

#### 4. まとめ

本報告では、今回の解析では地山の強度低下の時間依 存性を考慮した予測解析を行うために、クリープ変形に 関する実験等では得られない地盤のパラメータを再現解 析を行うことで同定し、そのパラメータを用いてクリー プ解析による変状予測を行うことを目的とした.

この予測解析によって北海道穂別トンネル西本坑にお ける約1年間のクリープ変形の概ねの特徴をつかむとと もに、実現場における補強対策・予防保全のための指標 として示すことができた.また、解析を行う期間を5年、 10年と長くすることでより長期的な予測が可能になるも のと考えられる.

しかし、本解析では水平測線に着目してのパラメータ



の同定を行っている.そのため、今後より高い精度での 予測解析を行うためには天端や斜測線など多くの計測点 における変位量ともフィッティングを行い、より実地盤 のパラメータに近づける必要があると考える.

#### 参考文献

- 1) Guang Z, et al : A new rheological model and its application in Mountain, *Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, No.3, pp.292-299, 2008
- 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集,pp.817-820,1983
- 3) 山田浩幸,佐々木正博,大村修一,高田篤:土被りの大きい脆弱地山(蛇紋岩)におけるトンネル設計と施工に関する一考察, 2009トンネル技術研究発表会, pp81-92,2009.
- 小坂悠樹ほか:地山強度低下を考慮したトンネル変状予測モデルのパラメータ同定法の提案, 2007.3

# TUNNEL DEFORMATION PREDICTION BY CONSIDERING DETERIORATION STRENGTH OF ROCK IN THE PLASTIC ZONES

## Yukihiro HIGASHI, Toshihisa TAKAHASHI, Tsuyoshi FUKUDA, Hiroyuki YAMADA and Yujing JIANG

. Deformation is caused in tunnel because the plastic zones are formed in the surrounding rocks of tunnel, and the plastic zone expand with the time passage according to the geological features. When the tunnel is constructed, the initial evaluation to displacement becomes important when displacement according to the natural ground deterioration the passing time is caused. And, it is necessary to forecast displacement to cause displacement in the tunnel for the long term beforehand, and to select appropriate measures technique. A necessary parameter was identified by the reproduction analysis by the Burger-MC deterioration model, and the displacement simulation of the creep transformation was done.