## 計測データを用いた山岳トンネルの時間依存性 挙動の簡易評価手法に関する一考察

淡路 動太1\*・砂金 伸治1・日下 敦1・河田 皓介1・真下 英人2

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6) <sup>2</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1) \*E-mail: d-awaji@pwri.go.jp

山岳トンネルの建設において一般的に実施されている内空変位計測を用いて時間依存性挙動を把握するために、掘削停止期間中の変位増分から換算した変位速度に着目し、時間依存性挙動の識別精度の向上を図った。そして、地山劣化モデルに関する理論解を用いた簡易計算手法を実計測データに適用することで、変位速度に関する計測データから内空変位の遷移クリープ挙動が再現できることを示した。本簡易計算手法は、同定対象として変位速度を用いるため、総変位量の予測にはバラツキが認められるが、時間依存性挙動に関する物性値の取得、および掘削後の内空変位量や応力の増分量を推定する手法として有効であることが分かった。

Key Words: time-dependent deformation, squeezing, ground strength reduction, mountain tunnel

#### はじめに

押出し性や膨張性地山に代表されるような低強度地山における山岳トンネルの設計,施工を困難なものにする要因の一つに、トンネル掘削後にも比較的大きな変位が発生する時間依存性挙動が挙げられる。この時間依存性挙動により、長期間に渡ってトンネル変位が継続的に発生するため、建築限界の余裕が必要となり、さらに、覆工においても土圧の作用に対する構造耐力を考慮する必要性が生じる。また、時間依存性挙動が大きいときには、掘削後の一定期間が経過した後に、破壊に至るまでの大きな応力が支保工に発生する事例も認められる。このようなトンネルにおいて、合理的な設計、施工方法を確立するためには、時間依存性挙動を正確に識別し、的確な評価を行う手法の確立が求められている。

本研究では、掘削後の変位増加が比較的大きく、支保工の安定性に重大な影響を及ぼすような押し出し性地山の時間依存性挙動を対象とする。このような条件下においてトンネル支保工の安定性を確保するためには、その時間依存性挙動がクリープ曲線のどの段階に相当しているかを判断することが重要となる。すなわち、時間の経過と共に変位の進行は認めれらるが、変位速度が漸減傾向を示す遷移クリープ段階、ひずみ速度が一定となる定常クリープ段階、そして、ひずみ速度が加速傾向を示

し破壊に至る加速クリープ段階のどの状態にトンネルが相当しているかを早期に識別することが重要となる. そのためには、日常管理として実施されているトンネル内空変位の計測データ等を用いて、簡易的な手法により迅速に評価を行うことが有効である. また、こうした条件下のトンネルの長期安定性の検討で数値解析を実施する際には、得られた計測データから時間依存性に関する地山物性値を精度よく同定することも必要となる.

本研究では、掘削進行に伴う変位挙動を用いて、掘削後の比較的早い段階から時間依存性挙動を精度よく識別するために、掘削停止期間中の変位増分を抽出して変位速度を算出し、変位速度の時間依存性挙動を求めた. そして、地山劣化モデル<sup>1,2,3)</sup>を用いて変位速度の時間依存性挙動を同定する簡易計算手法を構築した. また、このモデルの実計測データへの適用性を検証するために、地山劣化モデルと粘弾性モデル<sup>4</sup>を用いた予測値を比較し、本手法の有効性について考察を行った.

## 2. 計測データを用いた時間依存性挙動の識別

## (1) 概要

図-1に本研究対象であるAトンネルの地質縦断図を示す. 土被り約200~350mで,葉片状~粘土状蛇紋岩が分

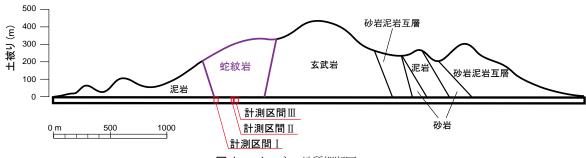


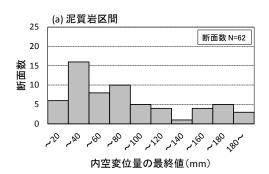
図-1 Aトンネル地質縦断図

布する区間において、掘削直後から比較的大きな時間依 存性挙動が認められた. この区間ではトンネル支保工の 変状対策として、早期断面閉合を実施している. Aトン ネルでは、泥岩区間においても、比較的大きな内空変位 や天端、脚部沈下が発生したために、早期断面閉合を実 施しながらトンネルの安定性を確保している. 近隣工区 のトンネルでも、同様の傾向が認められており、蛇紋岩 区間および泥質岩区間で早期断面閉合が実施されている.

Aトンネルの近隣工区を含めた泥質岩区間と蛇紋岩区 間の内空変位の発生状況を図-2,図-3に示す.これによ れば、泥質岩区間の最終内空変位量は200 mm程度を最 大としてバラつきが比較的大きいが(図-2(a)), 閉合 前変位発生率(最終変位量に対して閉合前の変位量が占 める割合) は70~80%をピークにした山型の頻度分布を 示し(図-3(a)), 断面閉合実施後の変位の発生量が小 さいことを示している. この特徴は早期断面閉合の施工 過程を再現した三次元数値解析によっても示されており, 支保構造の閉合後は速やかに内空変位が抑制され、閉合 前変位発生率は90%を超える結果となっている5.一方, 蛇紋岩区間の内空変位の発生状況を見ると、最終値は60 ~80 mmに頻度分布のピークが認められるが(図-2(b)), 閉合前変位発生率は、最頻値は70~80%に認められるが、 基本的に50~60%をピークとする緩やかな山状分布を示 す頻度分布が特徴的である(図-3(b)). この傾向は, 蛇紋岩区間で早期断面閉合後の変位の発生量が泥質岩区 間に比べて相対的に大きいことを示しており、断面閉合 後も比較的大きな変位が発生し、いわゆる後荷が支保工 に作用していることを示唆している. これは、掘削後に 比較的大きな時間依存性挙動を示す蛇紋岩区間の特徴の 一つであると考えられる.

## (2) 計測データ

一般的に計測されているトンネルの内空変位は、基 本的に掘削体積の変化に伴って進行する変位挙動である. このため、内空変位の経時変化は複雑な掘削工程の影響 を受けるため、時間依存性挙動のみを正確に抽出するこ とは困難である. そこで, 掘削停止期間中に内空変位の 計測を行い、掘削に伴う解放応力による変位挙動成分を 取り除くことで、時間依存性挙動の影響のみを持ったク



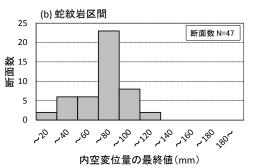
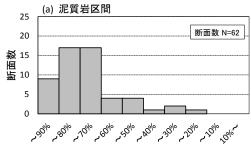
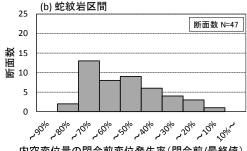


図-2 早期断面閉合を実施した近隣工区の泥質岩と蛇紋岩 区間における内空変位量の最終値の頻度分布



内空変位量の閉合前変位発生率(閉合前/最終値)



内空変位量の閉合前変位発生率(閉合前/最終値)

図-3 早期断面閉合を実施した近隣工区の泥質岩と蛇紋岩 区間における内空変位量の閉合前変位発生率の頻度分布

リープ変位速度を求めることとした.このとき,複数の断面で計測を行い,断面間で同一の時間依存性に関する地山物性値が仮定できれば,同時に計測された複数の変位速度は,掘削後の経過時間が異なるそれぞれの段階のクリープ変位速度を示す.したがって,求められたクリープ変位速度の傾向を見れば,遷移クリープ,定常クリープおよび加速クリープを識別できるようになる.このように,掘削停止期間中の複数断面における変位速度を抽出することにより,短期間で精度よくクリープ段階を識別し,トンネルの安定性を評価することが可能となる.

## a) 内空変位の経時変化

図-4にAトンネルの計測区間 I (図-1) で認められた 掘削停止期間中の内空変位の発生状況の一例を示す. このように, 基本的にトンネル掘削の進行に伴って内空変位は増加しているが(以後,トンネル断面の短縮側を正とする),掘削停止期間中においても各計測断面で変位が微増しており,時間依存性の挙動が認められる. このように,掘削停止期間中に掘削後経過時間の異なる複数

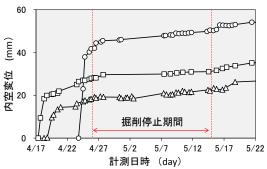


図-4 計測区間 A における内空変位の経時変化の例 (計測区間 I , 測線短縮側を正とする)

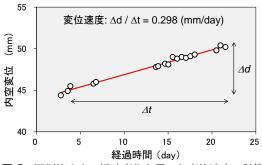


図-5 掘削停止中の経時変化を用いた変位速度の計算

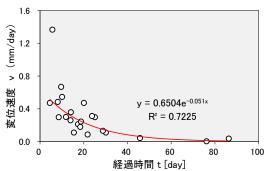


図-6 掘削停止中に求めた内空変位速度の経時変化

断面で時間依存性挙動に関する変位速度が得られれば, 経過時間の異なる時点での変位速度を同時に取得できる.

#### b) 変位速度

各断面における掘削停止期間中の変位データを抽出し、ある期間の変位速度が一定であると近似して、その期間中の変位データの傾きから変位速度を算出する(図 -5). これを掘削停止期間の異なる各計測断面で実施することにより、掘削後の経過時間に伴う変位速度の挙動を求めることができる.

#### c) 変位速度の時間依存性挙動

図-6にAトンネルの蛇紋岩中の計測区間 I~III(図-1)で得られた内空変位速度の時間依存性挙動を示す.これによれば、変位速度が時間の経過と共に徐々に低下し、約3か月後にはほとんど変位速度が0に近くなる挙動を示しており、典型的な遷移クリープ段階にあると判断することができる.したがって、本計測期間においてクリープ変位は基本的に収束に向かっており、直ちに破壊に至る状況とは認められず、一定の安定性は保たれていると評価することができる.ただし、本計測期間中にクリープ変位速度は完全に0とはならず、今後、定常クリープ段階から加速クリープ段階へと進む可能性を考慮して計測を続ける必要があると考えられる.

## 3. 地山劣化モデルを用いた時間依存性挙動の評価

## (1) 地山劣化モデル

#### a)概要

地山劣化モデル $^{1,2}$ , $^{3}$ とは,Mohr-Coulombの降伏条件に従う地山の力学モデルに対して,地山の強度定数(粘着力c,内部摩擦角 $\varphi$ )を時間とともに低減させて,塑性域の広がりを模擬することで,周辺地山の応力再配分が生じてトンネル内空側への変位が増分する過程を表現した手法である.ここでは,地山劣化モデルの簡易計算手法として,側圧係数を1としたときの円孔モデルにおけるSalenconの理論解 $^{0}$ を用いて,地山の強度定数の低減に伴うトンネル内空変位の経時変化を計算する.Salenconの理論解によれば,トンネル半径aに対する塑性域半径aに対する地域によれば、トンネル半径aに対する塑性域半径aに対することができる.

$$\frac{R}{a} = \left\{ \frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{(k_p - 1) \cdot P_0 + q_u}{(k_p - 1) \cdot P_i + q_u} \right\}^{\frac{1}{k_p - 1}}$$

$$\frac{U_a}{a} = \frac{1 - 2\nu}{2G} \left\{ P_0 + \frac{q_u}{k_p - 1} \right\} + \frac{1 - \nu}{2G} \left\{ P_i + \frac{q_u}{k_p - 1} \right\}$$

$$\cdot \left\{ \frac{1 - k_p^2}{k_p - k_{ps}} \cdot \left( \frac{R}{a} \right)^{k_p + k_{ps}} - \frac{k_p k_{ps} + 1}{k_p + k_{ps}} + \frac{\nu}{1 + \nu} \right\}$$
(2)

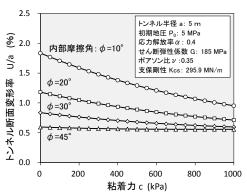
G: せん断弾性係数、 $\nu:$  ポアソン比、 $P_0:$  初期地圧、 $P_i:$  内圧、 $q_u=2c\cos\varphi/(1-\sin\varphi):$  一軸圧縮強さ、

 $k_p = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi),$  $k_{ps} = (1 + \sin \psi)/(1 - \sin \psi), \psi$ : ダイラタンシー角 上式のPiは、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の 合成部材における支保剛性Kcsを持つ薄肉円筒の支保工 が、トンネル壁面と一体となって変形したときに発生す る支保内圧として以下の式で計算を行う.

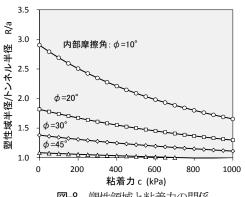
$$P_i = K_{cs} \cdot \left(\frac{U_a - U_0}{a}\right) = K_{cs} \cdot \left(\frac{U}{a}\right) \tag{3}$$

$$K_{cs} = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{a} \tag{4}$$

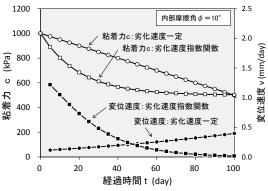
 $U_0$ : 支保工設置前の先行変位(ここでは応力解放率 $\alpha$ を 仮定し $\alpha P_0$ の応力が解放された時のトンネル変位として 求める),U: 支保設置後の変位, $E_c$ : 吹付けコンクリ ート弾性係数、 $A_c$ :吹付けコンクリートの単位掘削長 あたりの断面積、 $E_s$ :鋼アーチ支保工弾性係数、 $A_s$ : 鋼アーチ支保工の単位掘削長あたりの断面積



トンネル断面変形率と粘着力の関係 図-7



塑性領域と粘着力の関係



粘着力の劣化速度と変位速度の関係

これにより、支保剛性を考慮した弾塑性域の理論計 算が可能となり、任意の地山条件下における塑性域の大 きさ、トンネル変位、および支保工応力を計算すること ができる. DII相当の地山と支保パターンを持つ円孔に おいて、粘着力cと内部摩擦角 $\varphi$ が変化したときのトン ネル断面変形率U/aを図-7に、塑性域の大きさR/aを図 -8に示す. トンネル断面変形率および塑性域の大きさは、  $\varphi$ が大きいときにはcが低下しても大きな変化は認めら れないが、 $\varphi$ が小さいときにはcの低下に伴う変位の増 大傾向が顕著となる. したがって, 地山劣化モデルにお いては、 $\varphi$ が小さい条件になるほど、cの劣化に伴う変 位の発生感度が高くなると考えられる.

## b) 粘着力の劣化速度と変位速度の関係

図-7と同様の地山条件下において $\varphi = 10^\circ$ で固定し、 粘着力cの劣化速度を一定としたケースと、最終粘着力 まで劣化速度を指数関数により減少させたケースにおけ る変位速度の経時変化に関する計算結果を図-9に示す. 野城ほか(2009)2の検討結果と同様に、本研究の理論解を 用いた地山劣化モデルにおいてもcの劣化速度を一定と したときの変位速度は時間の経過とともに加速傾向を示 し、cの劣化速度を指数関数による減少関数で定義した 時には変位速度も漸減傾向を示すことが分かる. したが って、同定対象とする変位速度の経時変化が指数関数的 な漸減傾向を持つ遷移クリープ段階を示す時には、地山 劣化モデルにおけるcの劣化速度を指数関数で設定する ことが有効であると考えられる.

## (2) 計測データの同定

ここでは、Aトンネルの計測区間 I ~Ⅲで得られたト ンネル変位の時間依存性挙動のみを抽出した時の変位速 度の経時変化データ(図-6)を用いて、地山劣化モデル

表-1 地山劣化モデル計算条件一覧

			計測区間			
			I	П	Ш	
トンネル半径	a	(m)	6.80	6.85	6.85	
初期地圧	$\mathbf{P}_0$	(MPa)	5.25	7.00	7.50	
応力解放率	α			0.4		
地山のせん断弾性係数	G	(MPa)		111		
ポアソン比	ν			0.35		
内部摩擦角	φ	(deg)		10		
初期粘着力	$C_{i}$	(kPa)		500		
最終粘着力	$C_{\rm f}$	(kPa)		100		
吹付けコンクリート弾性係数	$E_c$	(MPa)		6,000		
吹付けコンクリート単位断面積	$A_{c}$	$(m^2/m)$	0.45	0.60	0.60	
鋼アーチ支保工弾性係数	$\mathbf{E}_{\mathrm{s}}$	(MPa)		205,000		
鋼アーチ支保工単位断面積	$A_s$	$(m^2/m)$	0.00636	0.00914	0.01829	
支保剛性	$K_{cs}$	(MN/m)	588.9	799.2	1,073	
計測点数	N		7	6	9	

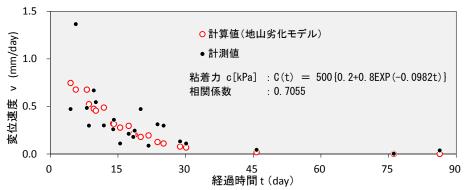


図-10 内空変位における変位速度の計測結果と地山劣化モデルによる計算結果の比較

による変位速度の同定解析を試みる. 同定解析に用いた 各計測断面における計算条件を表-1に示す. 同定には各 計測区間において異なる計測時間、初期応力、および支 保剛性を持つ22点の計測結果を用いている. 地山の強度 定数の低下は粘着力cの低減で表現することとし、内部 摩擦角φは固定する. また、ここでは同定対象の変位速 度が遷移クリープを示し指数関数的な変位速度の漸減傾 向を持つことから、cの劣化速度として指数関数を採用 する. cの設定値は、Aトンネルで得られている平均値 と下限値を参考として、初期粘着力500 kPaから20%の劣 化を想定し最終粘着力として100 kPaを設定した. なお, ここでは $\psi = 0$ として、ダイラタンシーは考慮していな い. トンネル掘削後の経過時間が異なる各計測断面に対 して、式(1)~(4)を用いて内空変位を求めて、変位速度 への換算を行い、最も計測値との誤差が小さくなるcの 劣化速度関数を求めた.

## (3) 結果と考察

#### a) 地山劣化モデルを用いた同定結果の評価

図-10に同定解析の結果を示す.得られたcの劣化速度による計算値と実計測値の相関係数は約0.7となり、概ね変位速度の遷移クリープ挙動が再現されていると考えられる.ただし、同定対象とした計測データは比較的経過時間が小さく変位速度の大きいデータを主としており、経過時間が60日を超えるような時点での変位速度のデータが不足しているため、この期間において継続している微小な変位速度は再現されておらず、60日経過時点で変位速度がほぼ0となる計算結果となっている.したがって、経過時間が60日以上における微小なクリープ変位を再現するためには、この期間の計測データを多く取得して同定感度を高める必要があると考えられる.

### b) 粘弾性モデルによる同定結果との比較

ここでは、地山劣化モデルを用いた本同定解析と、同一の計測データから粘弾性モデルを用いて変位速度の同定を実施したAwaji et al (2014)  $^4$ の計算結果について比較を行う。Awaji et al (2014)では、地山を3要素モデルとし、支保工設置後に本解析と同様の支保剛性 $K_{cs}$  に相当

する弾性バネを3要素モデルに平行に接続したモデルを採用している. Awaji et al (2014)の粘弾性モデルでは掘削速度の影響を考慮しているため、解析モデル間の比較を行う際には、掘進速度を3 m/dayとして、トンネル掘削距離2D (=トンネル掘削半径×4) となる約27mを9日で掘削することを仮定し、そのあとに生じた変位および応力を掘削後に生じたものと仮定する. 今回、同定対象とした遷移クリープ挙動から導かれた変位速度の経時変化曲線は60日以上の時点で収束して変位速度が0となる. したがって、ここでは掘削9日後から1年後までの増分変位と増分応力の計算結果について評価を行う.

表-2に地山劣化モデルと粘弾性モデルを用いて計算を行ったときの増分内空変位量、増分内空変位量の総内空変位量に対する割合、および増分吹付けコンクリート応力に関する計算結果を示す。増分内空変位量および増分吹付けコンクリート応力の推定値は両モデル間で概ね一致しており、計測結果とも概ね一致している。しかし、トンネルに発生する総内空変位量(内空変位の最終値、先行変位含まず)は地山劣化モデルで90~100 mmであるのに対して、粘弾性モデルでは50~70 mmとなり、両モデル間での計算結果の差は小さくない。これは、両モデルとも変位速度の経時変化を同定対象としているため、一定期間における変位量および応力増分量については推定精度の差は小さいが、総内空変位量は掘削速度や掘削工程の影響を受け、設定値によっては両モデル間の差が

表-2 切羽到達9日後(切羽距離2D到達時)から一年後の計算結果における地山劣化モデル(GR)と粘弾性モデル<sup>4</sup>(VE)の比較

				計測区間		
				I	п	Ш
増分内空変位量	⊿2U	(mm)	GR	6.80	5.34	5.35
			VE	8.12	3.73	4.00
総内空変位量	2U	(mm)	GR	91.84	96.31	96.06
			VE	66.95	53.12	56.91
増分変位発生率	⊿U/U	(%)	GR	7.40	5.54	5.57
			VE	12.12	7.02	7.02
増分吹付けコンクリート 応力	$\triangle \sigma_c$	(MPa)	GR	3.00	2.34	2.34
			VE	3.14	1.26	1.35

大きくなる可能性を示唆している. ただし、計測値における内空変位の最終値は35~160 mmと基本的にバラつきが大きく、総変位量については、どちらのモデルの精度が良好であるかを判断することはできない.

いずれのケースでも総変位量に対して時間依存性挙動に関する増分変位量は約10%前後が見込まれることが分かる. 図-3で認められたように閉合前内空変位発生率が泥質岩区間では約80%に最頻値を持つのに対し,本研究対象の計測区間を含めた蛇紋岩区間では約70%が最頻値となり,閉合後の変位が10%程度増大している.これは同定解析において推定された約10%程度の増分変位と調和的である.つまり,蛇紋岩区間では掘削後の時間依存性挙動によって約10%程度の変位増分が発生し,それに伴う後荷の発生によって,吹付けコンクリート応力が掘削後も増大していると考えられる.

## 4. 結論

本研究では、山岳トンネルで一般的に実施されている内空変位計測を用いた時間依存性挙動を抽出する方法、および得られた計測データから地山劣化モデルを用いた簡易計算手法によって時間依存性挙動に関する地山物性値を同定する方法について提案を行い、実測データへの適用を試みた。得られた知見は以下の通りである。

- 1. 掘削進行に伴う変位の影響を除去するため、掘削停 止期間中の変位速度に着目して、計測データの処理 を行うことで、精度よく変位速度の時間依存性挙動 を抽出することが可能である.
- 2. 内空変位の遷移クリープ挙動は、理論解を用いた地 山劣化モデルの簡易計算手法において、粘着力の低 下速度を指数関数で近似することで表現することが 可能である.
- 3. 地山劣化モデルによる簡易計算手法は、同定対象と

して変位速度を用いているため、総変位量の予測に はバラつきが認められるが、時間依存性挙動による 掘削後の内空変位量や応力の増加量を推定する手法 として有効である.

今後は、こうした簡易計算手法を用いることで、現場の計測データを迅速にフィードバックすることが可能になると期待している。また、地山劣化モデルに関する地山物性値を得ることで、より複雑なトンネル形状や掘削過程を反映した数値解析を行うことが可能になると考えている。こうした手法の発展により、時間依存性挙動を示すトンネル掘削における情報化施工の高度化に寄与することができれば幸いである。

謝辞:本研究を進めるにあたり、計測データ等をご提供 頂いた国土交通省の関係各位に深甚の謝意を表します.

#### 参考文献

- 1) 松長剛, 熊坂博夫, 小島芳之, 朝倉俊弘: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, 2005.
- 2) 野城一栄,嶋本敬介,小島芳之,高橋幹夫,松長剛,朝倉俊弘:地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用,土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp. 107-119, 2009.
- 3) 松長剛, 野城一栄, 朝倉俊弘: 地山劣化モデルによる トンネル変状の進展予測に関する研究, 土木学会論文 集 C, Vol. 65, No. 2, pp. 467-479, 2009.
- 4) Awaji, D., Isago, N., Kusaka, A., Kawata, K. and Mashimo, M.: A simple method for the extracting coefficients of viscoelastic behavior from filed measurements in mountain tunneling. *Proc. of 8th Asian Rock Mech. Sympo.*, 2014.
- 5) 淡路動太,砂金伸治,河田皓介,真下英人:早期断面 閉合における変位抑制効果と支保部材挙動の関係,ト ンネル工学報告集, Vol. 23, pp. 35-42, 2013.
- Salencon, J.: Contraction quasi-statique d'une cavite a symetrie spherique ou cylindirue dans un milieu elastoplastique. Armales Des Ponts Et Chaussees, No. 4, pp. 231-236, 1969.

# A SIMPLE EXTRACTING METHOD FOR TIME-DEPENDENT BEHAVIOR FROM FILED MEASUREMENTS IN MOUNTAIN TUNNELING

Dohta AWAJI, Nobuharu ISAGO, Atsushi KUSAKA and Hideto MASHIMO

To develop a simple method for recognizing time-dependent deformation from field data that has been measured as a part of the daily management of tunnel construction, we focus on the displacement rates of horizontal displacement measured while excavation is halted to eliminate the effects due to stress release. This simple method, which is applied an exact solution on the basis of the ground strength reduction model, is useful for expressing the transient creep. Although estimation of total displacement tends to have some dispersion because only the displacement rates are used as the identification factor, this method enables accurate estimation of the amount of time-dependent deformation in the future.