

山岳トンネルの時間依存性挙動の簡易評価手法

淡路 太・砂金 伸治・日下 敦・河田 皓介

1. はじめに

膨張性地山^{*}などに代表される低強度地山で山岳トンネル工事が進められる場合、トンネル建設を困難なものにする要因の一つに、掘削の進行とは無関係に時間の経過とともにトンネルの変形が進行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ってトンネル断面の変形が長期間に渡って継続的に発生する時には、トンネル内空の建築限界に対する余裕や、覆工への土圧の作用に対する構造耐力の検討が必要となる。

時間依存性挙動を示すトンネルの安定性を確保するためには、その挙動がいわゆる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である。すなわち、時間の経過と共に変形速度が漸減傾向を示す遷移クリープ段階、変形速度が一定となる定常クリープ段階、そして、変形速度が加速しながら破壊に至る加速クリープ段階のどの状態に時間依存性挙動が相当しているかを早期に識別する必要がある。そのためには、日常管理として実施しているトンネル断面の内空変位測定データを用いて、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、得られた測定データから時間依存性に関する地山物性値を同定することも必要となる。

本稿では、内空変位の測定データを用いて変位速度の時間依存性挙動を識別し、識別された変位速度データから地山劣化モデル^{1),2)}を用いて時間依存性挙動に関する物性値を同定する簡易計算手法を提案する。また、このモデルを実測定データに適用し、本手法の有効性について考察を行う。

2. 測定データを用いた時間依存挙動の識別

一般的に測定されているトンネルの内空変位は、基本的に掘削量の変化に伴って進行する変形挙動である。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ており、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、掘削停止期間中における内空変位の測定データに着目し、掘削量の変化に伴う変形挙動の影響を取り除くことで、時間依存性挙動のみを示す「クリープ変位速度」を導出することとした。このとき、各測定断面間で同一の地山物性値が仮定できれば、図-1に示すように同時に複数の断面で測定を実施することで、掘削後の経過時間が異なるクリープ変位速度が得られることとなる。これにより、クリープ変位速度の時間経過に伴う挙動を見れば、測定対象区間が遷移クリープ、定常クリープおよび加速クリープのどの段階にあるかを早期に識別することができる。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の導出により、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。

本評価手法の適用を試みたAトンネルでは、土被り約200~350mで葉片状~粘土状の蛇紋岩が分布し、掘削直後から顕著な時間依存性挙動が認められた。図-2にAトンネルで認められた掘削停止期間中におけるトンネル内空断面の変形挙動の一例を示す。このように、内空変位は基本的にトンネル掘削の進行に伴って増加するが、掘削停止期間中においても各測定断面で変位が微増しており、変位の時間依存性挙動が顕著に認められる。

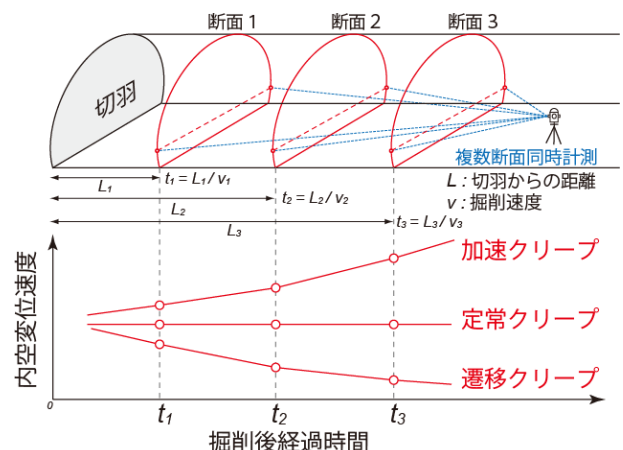


図-1 掘削停止時の複数断面同時測定によるクリープ段階の簡易判別方法の概念

Simple Extracting Method for Time-Dependent Behavior in Mountain Tunneling
^{*}土木用語解説：膨張性地山

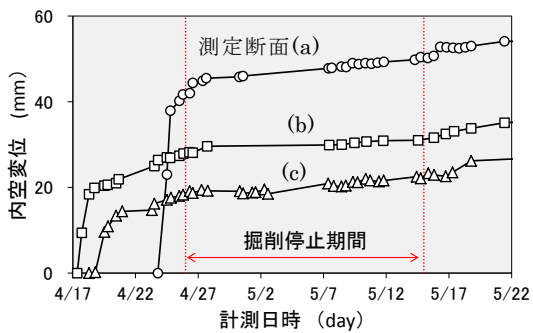


図-2 内空変位の経時変化の例 (測線短縮側を正とする)

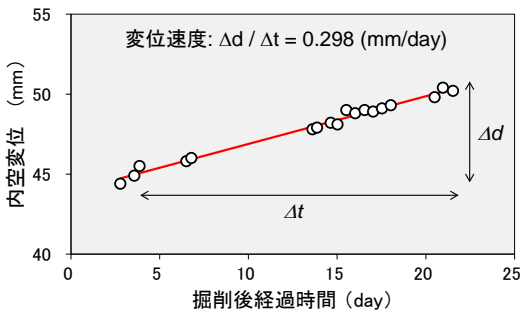


図-3 掘削停止中の変位増分による変位速度の計算

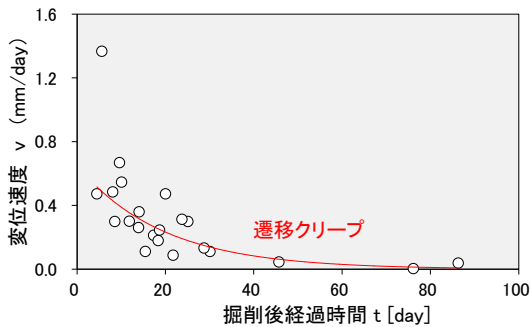


図-4 掘削停止中に求めたトンネル内空断面のクリープ変位速度と掘削後経過時間の関係

図-2の測定断面(a)に着目し、掘削停止期間中の変位増分を抽出すれば、その期間の変位速度は図-3のように求めることができる。同様に、同じ掘削停止期間中の他の測定断面(b)、(c)でも、それぞれ変位増分を抽出すれば、掘削後経過時間の異なる複数のクリープ変位速度を抽出することができる。そして、休日など比較的長時間に渡って掘削が停止する期間を利用して、この算出方法を繰り返していくことで、時間依存性挙動の影響のみを持ち、掘削後の経過時間が異なるクリープ変位速度を効率的に取得可能となる。

Aトンネルにおける10の測定断面で、上記の算出方法を用いて掘削停止の際に取得したトンネル内空断面のクリープ変位速度と掘削後経過時間の関係を図-4に示す。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、

ほぼ0に近くなる挙動を示しており、典型的な遷移クリープを示していると判断することができる。したがって、本測定結果から、時間依存性挙動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、本測定期間中で変位速度は完全に0とはなっておらず、今後、定常クリープ段階、そして加速クリープ段階へと進む可能性を考慮して測定を続ける必要がある。

3. 地山劣化モデルによる評価

3.1 地山劣化モデルの概要

地山劣化モデル^{1),2)}とは、Mohr-Coulombの降伏条件に従う地山の力学モデルにおいて、地山の強度定数(粘着力c、内部摩擦角φ)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、周辺地山に応力再配分が生じてトンネル内空断面の変形が増加する過程を表現する手法である。ここでは、地山劣化モデルの簡易計算手法として、トンネルを側圧係数1の円孔モデルで近似し、Salenconの理論解³⁾を用いて、トンネル内空変位の時間依存性を再現する手法を提案する。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Rおよびトンネル壁面の内空側への変位量U_aは以下の式で計算することができる。

$$\frac{R}{a} = \left\{ \frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{(k_p - 1) \cdot P_0 + q_u}{(k_p - 1) \cdot P_1 + q_u} \right\}^{\frac{1}{k_p - 1}} \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{U_a}{a} = \frac{1 - 2\nu}{2G} \left\{ P_0 + \frac{q_u}{k_p - 1} \right\} + \frac{1 - \nu}{2G} \left\{ P_1 + \frac{q_u}{k_p - 1} \right\} \cdot \left\{ \frac{1 - k_p^2}{k_p - k_{ps}} \cdot \left(\frac{R}{a} \right)^{k_p + k_{ps}} - \frac{k_p k_{ps} + 1}{k_p + k_{ps}} + \frac{\nu}{1 + \nu} \right\} \quad \text{式(2)}$$

$$k_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

$$k_{ps} = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$$

G: せん断弾性係数、ν: ポアソン比、P₀: 初期地圧、P₁: 内圧、q_u = 2c cos φ / (1 - sin φ): 一軸圧縮強さ、ψ: ダイラタンシー角

上式のP_iは、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を合わせた支保剛性K_{cs}の薄肉円筒支保工が、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。

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

$$K_{cs} = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{a} \quad \text{式(4)}$$

U_0 : 支保工設置前の先行変位 (ここでは応力解放率 α を仮定し αP_0 の応力が解放された時の変位量として求める)、 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

式(1)~(4)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、内空変位、および支保工応力を計算することが可能となる。

3.2 測定データを用いた劣化速度の同定

ここでは、Aトンネルで得られたクリープ変位速度の経時変化データ (図-4) を用いて、地山劣化モデル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算条件を表-1に示す。同定解析には各測定区間において異なる測定時間、初期応力、および支保剛性を持つ22点の測定結果を用いている。ここでは、地山の強度定数の低下を粘着力 c の低減で表現することとし、内部摩擦角 ϕ はAトンネルで得られている値を参考として、10度で固定している。また、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している。 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500kPaから20%までの劣化を想定し、

最終粘着力として100kPaを設定した。なお、検討の複雑化を避けるため、ここでは $\psi=0$ として、ダイラタンシーは考慮していない。以上の条件のもと、式(1)~(4)を用いて変位速度を計算し、最も測定値との誤差が小さくなる c の劣化速度関数を求めた。

3.3 結果と考察

図-5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を再現していると考えられる。ただし、同定対象とした測定データは比較的初期段階で変位速度の大きいデータを主としている。このため、経過時間が60日を超えるような変位速度データが不足しているため、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となっている。経過時間が60日以上微小なクリープ変位を精度よく再現することが目的の時には、この期間の測定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。

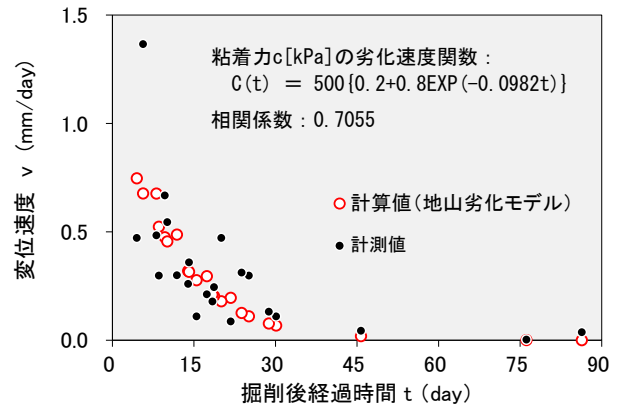


図-5 トンネル内空断面のクリープ変位速度の測定結果と地山劣化モデルによる計算結果の比較

表-1 地山劣化モデル計算条件一覧

		計測区間		
		I	II	III
トンネル半径	a (m)	6.80	6.85	6.85
初期地圧	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_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	E_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

表-2 切羽到達9日後から1年後までの計算結果

		計測区間		
		I	II	III
増分内空変位量	$\Delta 2U$ (mm)	6.80	5.34	5.35
総内空変位量	$2U$ (mm)	91.84	96.31	96.06
増分変位発生率	$\Delta U/U$ (%)	7.40	5.54	5.57
増分吹付けコンクリート 応力	$\Delta \sigma_c$ (MPa)	3.00	2.34	2.34

表-2に同定された遷移クリープ挙動を用いて計算された掘削9日後から1年後までの内空変位の増分量と、その総内空変位量に対する割合、および吹付けコンクリート応力の増分量に関する計算結果を示す。このように、本簡易計算手法を用いることで、増分内空変位量および増分吹付けコンクリート応力の概略値を推定することができる。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）の計算値は90～100mmであるのに対して、実際に得られた計測値の平均は92mmとなり良い一致を示すが、計測値の分布は39～172mmと基本的にバラつきが大きいいため、実際に総内空変位量を推定する際には注意が必要である。

本同定結果により、時間依存性挙動における総変位量に対する増分変位の割合は約10%前後、吹付けコンクリートの増分応力はおよそ2～3MPaと推定することができる。この評価結果を用いれば、現在の支保工の将来的な安定性や覆工への土圧の作用レベルを判断する材料の一つとすることができると考えられる。

以上のように、本研究で示した簡易評価手法を用いれば、日常管理として実施しているトンネル断面の内空変位における測定結果から、迅速に時間依存性挙動を評価でき、例えば、覆工に発生する応力の想定が可能となることが期待される。このことは、施工の早期の段階で、予め覆工の補強が必要か否かの判断が容易になる可能性があるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、山岳トンネル工事で一般的に実施されている内空変位測定を用いて、掘削停止期間

中の変位データに着目し、時間依存性挙動を抽出する方法、得られた測定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った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 掘削進行に伴う変形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、測定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できる。
- 2) 地山劣化モデルの理論解を用いた簡易評価手法は、遷移クリープ挙動を示すトンネルに対して、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、現場の測定データをより迅速に評価し、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の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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Salencon, J. : Contraction quasi-statique d'une cavite a symetrie spherique ou cylindrique dans un milieu elastoplastique. Annales Des Ponts Et Chaussees, No. 4, pp. 231-236, 1969

淡路動太



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員、現清水建設(株)土木技術本部、博(理)
Dr. Dohta AWAJI

砂金伸治



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム上席研究員、博(工)
Dr. Nobuharu ISAGO

日下 敦



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員
Atsushi KUSAKA

河田皓介



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム専門研究員、現(株)オリエンタルコンサルタンツ関西支店国土技術部
Kosuke KAWATA