

## トンネル吹付けコンクリートの支保効果に関する検討

大成建設 正会員 ○谷 卓也, 青木 智幸, 小川 豊和, 武田 均  
北海道大学大学院 藤井 義明

### 1. はじめに

山岳トンネルの主要な支保部材である吹付けコンクリートは、時間とともに硬化が進み地山からの変形を受けながら強度を発現している。しかし、数値解析による設計検討では、等価な線形弾性係数（みかけのヤング係数）を使用した評価を行っているのが現状である。筆者らは、これまで吹付けコンクリートの支保効果をより詳細に調べる目的で、若材齢時の強度試験や多段階載荷・応力緩和試験を実施してきた<sup>1)</sup>。本報では、吹付けコンクリートの応力緩和および硬化挙動を表現できるモデルを作成し、標準的な2種の吹付けコンクリート（表-1 参照）によるトンネルの支保効果について、解析的な検討を行った結果について報告する。

### 2. 若材齢吹付けコンクリートの粘弾性モデル

若材齢の吹付け供試体により、多段階載荷・応力緩和試験を実施した結果<sup>1)</sup>を図-1に示す。試験開始時の材齢は普通強度 ( $f_{ck}=18\text{N/mm}^2$ ) で 4.2 時間、高強度 ( $f_{ck}=36\text{N/mm}^2$ ) で 4.8 時間である。各載荷段階の応力緩和現象を表現できる力学モデルとして、図-2に示す三要素粘弾性モデルを採用する。

各載荷段階のせん断弾性係数  $G^H$  は、別途実施した材齢毎の一軸圧縮試験より求めたヤング率とポアソン比の変化より決定している。図-3に、材齢の進行に伴う  $G^H$  の変化を示す。これを、(1)式のロジスティック関数により近似した曲線を、同図に合わせて破線で示す。

$$G^H(t) = \frac{a^H}{1 + b^H \exp(-c^H t)} \quad \dots \dots (1)$$

三要素粘弾性モデルを数値解析の構成モデルに組み込むに当たり、ひずみ増分-応力増分関係において粘性挙動はせん断変形成分のみで考慮し、体積変形成分は弾性的に挙動するものとした。ポアソン比は一定とし、せん

表-1 吹付けコンクリートの配合

設計基準強度	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)	急結材 (C×%)
				W	C	S	G	FA		
18N/mm <sup>2</sup> (普通)	15	58	61	209	360	1001	689	89	-	8
36N/mm <sup>2</sup> (高強度)	10	45	70	203	450	979	660	-	1.0	8~10

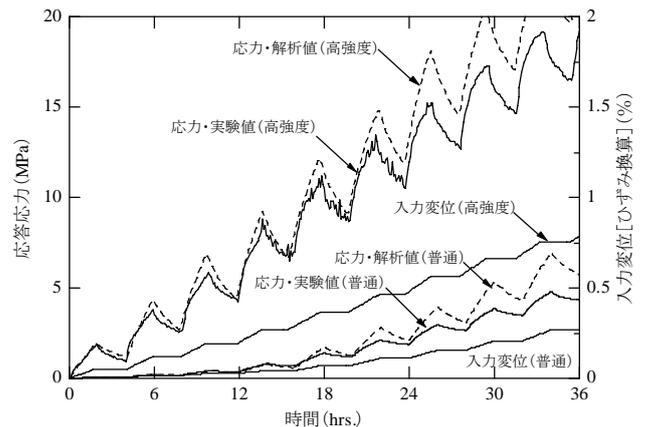


図-1 多段階応力緩和試験結果と試験結果のシミュレーション

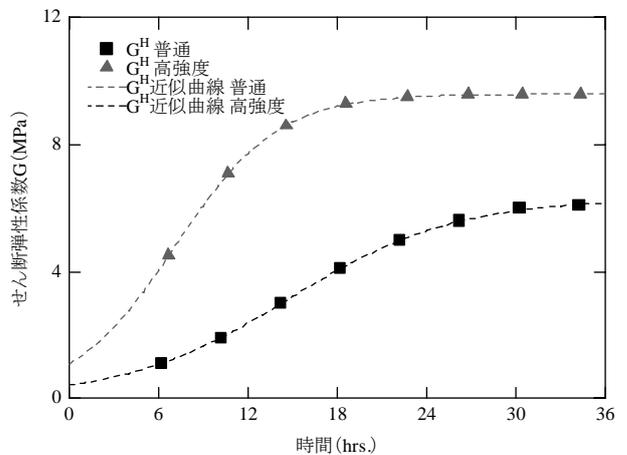


図-3 せん断弾性係数と関数近似

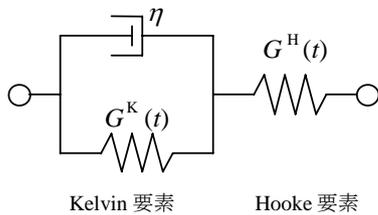


図-2 係数が時間変化する3要素粘弾性モデル

表-2 吹付けコンクリートモデルのパラメータ

	$\nu$	$a^H$	$b^H$	$c^H$	$\eta$ (GPa)	$\alpha$ ( $G^k/G^H$ )
普通	0.1	6.3	14.4	0.18	12.4	0.36
高強度	0.1	9.6	7.9	0.29	13.7	0.25

断弾性係数  $G^H$  を材齢により(1)式で変化させた(したがって、体積弾性係数も比率で変化する)。Kelvin 要素のせん断弾性係数  $G^K$  は  $G^H$  に対する比率  $\alpha$  で変化するものとし、粘性係数  $\eta$  は一定とした。この条件で数値シミュレーションを行った結果を図-1 に、使用したパラメータを表-2 に示す。図-1 より、普通強度および高強度吹付けコンクリートともに硬化と応力緩和過程を表現できており、24 時間までは特に良好にシミュレーションできている。

### 3. 数値解析による支保効果の検討

2章で検討した吹付けコンクリートの力学モデルを用いて、トンネル吹付けコンクリートの支保効果を、二次元平面ひずみ解析により検討した。解析には有限差分法解析コード FLACv5.0 を用いた。解析メッシュを図-4 に示す。支保は吹付け(厚さ 20cm)のみを考慮し、初期応力は土かぶりを 200m, 側圧係数 1.0 として均一に与えた。地山は弾性体とし、DI 級の不良地山を想定してヤング係数を 500MPa, ポアソン比を 0.35 とした。切羽からの距離に応じた掘削解放率<sup>2)</sup>を表-3 のように設定し、1 サイクル 6 時間として掘削を模擬した。

解析結果を図-5 に示す。72 時間における高強度と普通強度の材料の違いによる変位量の差は 2mm 程度であった。高強度のケースでは変位が抑制されている分、応力が大きい結果となっており、変位量に応じた大小関係といえる。両材料ともに掘削直後の応力緩和挙動が表現されており、高強度の方が普通と比較してその傾向がやや大きい。また、72 時間では高強度が普通強度と比較してほとんど同程度の壁面変位となる一方で、軸応力は 50%程度大きい値となっている。高強度吹付けの発現強度が普通吹付けの 2.7 倍であることが 72 時間材齢における一軸圧縮試験で確認されている。これを考慮すると、高強度吹付けは普通強度吹付けと比較して高い安全率を確保しているといえる。さらに、材齢 72 時間時点の応力と変位/半径=ひずみから換算した等価な吹付けのヤング係数を算出すると、普通で 1.94GPa, 高強度で 3.24GPa であり、一般に用いられている見かけのヤング係数である 4GPa と比較して小さい。このことは、実際の吹付けコンクリートは変形を吸収する能力(靱性)が想定よりも高い可能性を示唆している。

### 4. まとめ

室内試験により若材齢の吹付けコンクリートの粘弾性挙動を把握し、その挙動を表現できる係数時間依存型の 3 要素の粘弾性モデルを用いて、吹付けコンクリートの支保効果を検討した。その結果、高強度吹付けコンクリートは普通強度のものと比較して変形吸収能が高く、かつ、発生応力に対する耐力の余裕が大きいことなどが分かった。今後は、弾塑性地山など種々の変形挙動を呈する地山について、各地山に適した吹付け材料の特性や適用性など、より詳細な検討を進めていきたい。

#### <参考文献>

- 1) 谷卓也, 青木智幸, 他: トンネル吹付けコンクリートの若材齢時の変形挙動に関する研究, 土木学会論文集(投稿中)。
- 2) Panet, M.: Time-Dependent Deformation in Underground Works. Proceedings of the 4th ISRM Congress, Vol.3, pp. 279-289, 1979.

表-3 切羽離れと掘削解放率および吹付けの材齢

切羽離れ(m)	掘削開放率(%)	材齢(hrs.)
1	50.0	1
2	62.4	7
3	71.7	13
4	78.7	19
5	84.0	25
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮

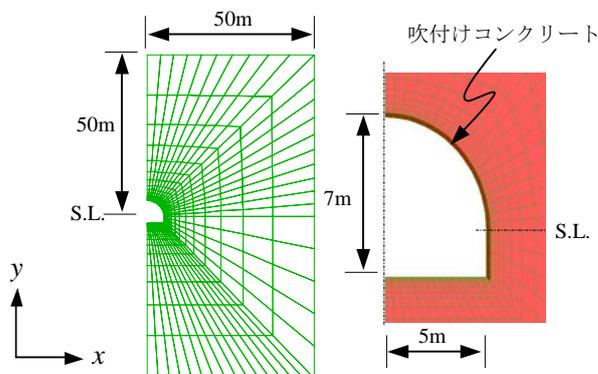


図-4 解析メッシュ

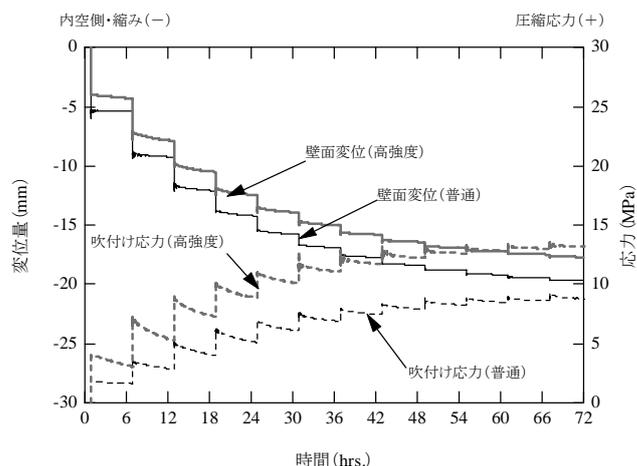


図-5 解析結果