

# 若材齢の力学特性変化を考慮したトンネル吹付けコンクリートの支保効果に関する研究

谷 卓也<sup>1\*</sup>・小川 豊和<sup>2</sup>・青木 智幸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

<sup>2</sup>国際圧入学会（〒108-0075 東京都港区港南2-4-12 港南YKビル9階）

\*E-mail: takuya.tani@sakura.aisei.co.jp

山岳トンネルの主要な支保部材の一つである吹付けコンクリートは、打設直後から変形を受けながら硬化し、地山の変形挙動に大きく影響を与える。著者らは実施が困難であった材齢一日未満の若材齢吹付けコンクリートの試験方法を確立し、クリープ特性を含む変形特性や強度特性の時間変化を明らかにしてきた。また、応力緩和とクリープを表現できる3要素の時変数型粘弾性モデルを提案し、これを吹付けコンクリートの力学モデルとして適用した数値解析により吹付けコンクリートの支保効果を評価してきた。

本論文では、現場打設の若材齢吹付けコンクリートの試験結果を反映した不良地山条件を含む数値解析を行い、高強度吹付けコンクリートの優位性が示された検討結果について述べる。

**Key Words :** support effect, young-aged shotcrete, mountain tunnel, stress relaxation test

## 1. はじめに

山岳トンネルの支保部材として用いられる吹付けコンクリートは、打設後の硬化過程において地山からの変形を受けながら支保効果を発揮する特殊な支保部材である。通常の施工では、打設直後から1日までの初期材齢時に地山からの変位のほとんどを受ける。そのため、トンネルの支保効果を精度良く評価するには、この若材齢時の吹付けコンクリートの変形特性を考慮した検討が必要である。しかしながら、若材齢の吹付けコンクリートの力学特性とその時間変化に関する研究例は極めて少ない。

一般の構造物に用いられるコンクリートについては、若材齢の材料を対象として、自己収縮や乾燥収縮、温度の影響による体積変化の他、クリープ特性を求めるための研究がみられる。例えば岡本ら<sup>1)</sup>はクリープ特性について、材齢2～7時間を「極若材齢」と呼び、一軸圧縮強さの35%と60%においてクリープ試験を行い、その力学特性の時間変化を明らかにしている。一方、トンネルの支保部材として用いられる吹付けコンクリートについては、支保効果の評価精度の向上を目的として、変形特性の変化を考慮した解析検討が行われている<sup>2),3)</sup>。ただし材齢24時間未満の材料については、早期に高い剛性が得られる特殊な吹付けコンクリートの試験<sup>4)</sup>を除いては、力学特性が材料試験により十分に明らかになっていると

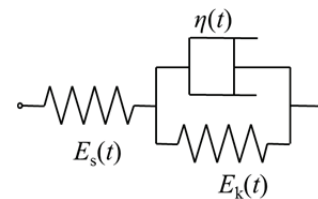


図-1 支保効果の検討に用いる時変数型粘弾性モデル

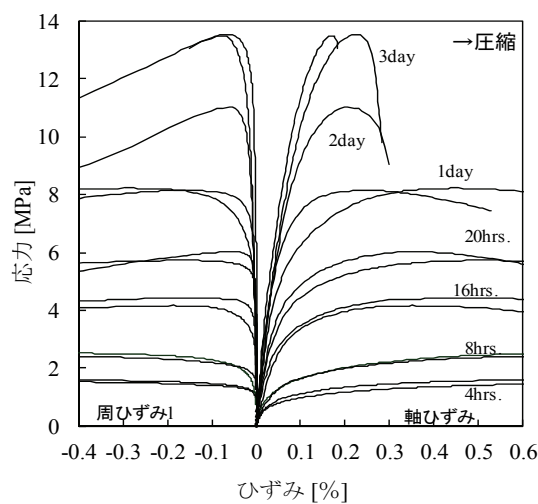
は言い難い。実際に強度が十分に発現していない材料での供試体作製および試験の実施は非常に困難であり、土屋ら<sup>5)</sup>による材齢1日からのコア抜き供試体による一軸圧縮強さとヤング係数の検討の他には、一軸圧縮試験から変形特性を評価した例は僅かである<sup>6),7),8)</sup>。

そこで筆者らは、若材齢の吹付けコンクリートについて、粘弾性的な挙動を含む変形特性を求めるための試験方法を開発してきた<sup>9)</sup>。さらに、この変形特性の時間変化を表現できる時変数型粘弾性モデル（図-1参照）について、モデルを構成する要素の各係数の値を多段階応力緩和試験で求める方法を示すとともに、数値解析検討によりこの力学モデルの実効性を明らかにしてきた<sup>10)</sup>。

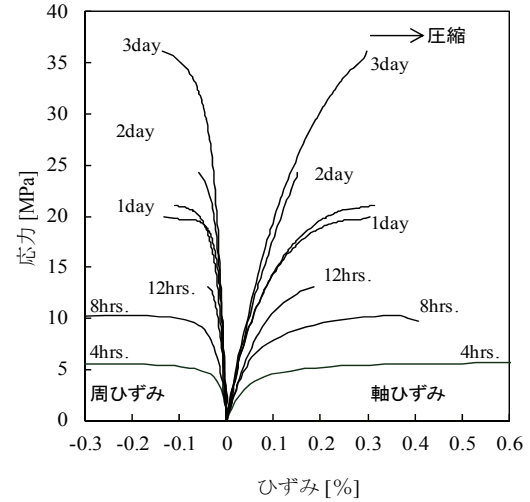
本論文では異なる3つの岩盤等級の地山を設定し、吹付けコンクリートの材齢の進行に伴う変形特性の時間変化を時変数型粘弾性モデルで表現したトンネル逐次掘削解析を行い、高強度吹付けコンクリート（設計基準強度 36 N/mm<sup>2</sup> [MPa]、以降「高強度吹付け」）と普通吹付け

表-1 吹付けコンクリートの配合

| 設計<br>基準強度   | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |     |    | 混和剤<br>(C×%) | 急結材<br>(C×%) |
|--------------|------------|------------|-------------------------|-----|------|-----|----|--------------|--------------|
|              |            |            | W                       | C   | S    | G   | FA |              |              |
| 普通 (18 MPa)  | 58         | 61         | 209                     | 360 | 1001 | 689 | 89 | —            | 8            |
| 高強度 (36 MPa) | 45         | 70         | 203                     | 450 | 979  | 660 | —  | 1.0          | 8~10         |



(a) 普通吹付け



(b) 高強度吹付け

図-2 一軸圧縮試験による応力～ひずみ関係 (図中の時間表示は試験時の材齢)

コンクリート（設計基準強度18 N/mm<sup>2</sup> [MPa]、以降「普通吹付け」）による支保効果の差異について述べる。なお、吹付けコンクリートと同じ配合で急結剤を用いずに作成したベースコンクリートについては、材齢24時間未満に実施した一軸圧縮試験および多段階応力緩和試験で得られた変形挙動を、図-1の時変数型粘弾性モデルを組み込んだ数値解析で表現できることを確認している<sup>1)</sup>。

本論文では、現場で打設された材齢24時間未満の吹付けコンクリートを供試体として一軸圧縮試験および多段階応力緩和試験を実施し、既往の検討<sup>3)</sup>と同じ手法でトンネル吹付けコンクリートの支保効果を検討した結果について述べる。

## 2. 吹付けコンクリートの力学モデル

### (1) 若材齢吹付けコンクリートの力学特性

表-1に示す2種の配合の吹付けコンクリートを用いて材齢が4時間から3日までの供試体について試験を実施した。一軸圧縮試験からは、図-2に示す応力とひずみの関係を得た。図から材齢の進行に伴い強度および変形特性が変化していることが分かる。一軸圧縮強さとヤング係数について、材齢の進行に伴う各力学特性の変化を図-3および図-4に示す。各図から普通吹付けと高強度吹付け

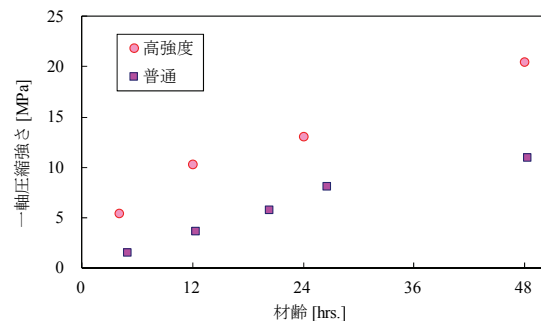


図-3 一軸圧縮強さの時間変化

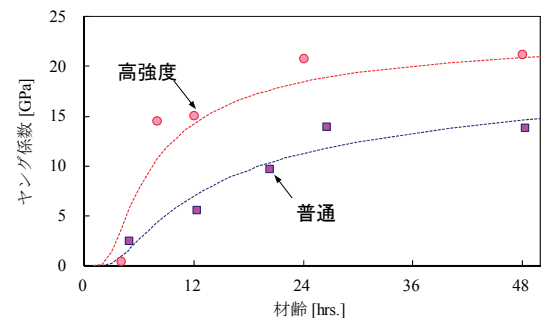


図-4 ヤング係数の時間変化

とでは、若材齢時の強度およびヤング係数の大きさが異なることが分かる。以降、若材齢時の試験では、所定材齢時の一軸圧縮強さを超えない範囲で変形特性を把握するための多段階応力緩和試験を実施した結果を述べる。

表-2 時変数型粘弾性パラメータの評価結果

|        | 材齢   | $E_k$                     | $E_s$                     | $\eta$                         |
|--------|------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
|        | hrs. | $\times 10^3 \text{ MPa}$ | $\times 10^3 \text{ MPa}$ | $\times 10^3 \text{ MPa-hrs.}$ |
| 普通吹付け  | 6.1  | 1.1                       | 0.5                       | 2.4                            |
|        | 10.1 | 1.9                       | 2.3                       | 7.7                            |
|        | 14.0 | 3.0                       | 3.6                       | 15.1                           |
|        | 18.0 | 4.1                       | 3.6                       | 12.5                           |
|        | 22.1 | 5.0                       | 2.3                       | 13.9                           |
|        | 26.2 | 5.6                       | 2.2                       | 17.3                           |
|        | 29.8 | 6.0                       | 2.1                       | 15.1                           |
|        | 33.7 | 6.1                       | 2.0                       | 14.0                           |
| 高強度吹付け | 6.7  | 5.3                       | 6.9                       | 10.9                           |
|        | 10.7 | 25.6                      | 11.4                      | 28.4                           |
|        | 14.6 | 39.3                      | 15.5                      | 54.7                           |
|        | 18.6 | 73.7                      | 20.8                      | 78.5                           |
|        | 22.7 | 84.9                      | 22.3                      | 81.4                           |
|        | 26.8 | 147.4                     | 25.2                      | 184.9                          |
|        | 30.5 | 162.8                     | 30.3                      | 153.0                          |
|        | 34.3 | 180.3                     | 36.0                      | 145.4                          |

## (2) 時変数型粘弾性モデルによる変形特性の評価

図-1に示した吹付けコンクリートのモデルは、粘弾性的な性質と、その性質が材齢とともに変化していく2つの性質が表現できる。基本となるレオロジーモデルは、応力緩和とクリープを同時に表現でき、かつモデルの要素数も3と少ないシンプルな力学モデルである。各係数の材齢の進行に伴う変化については、汎用解析コードに容易に組み込めるような後述の連続関数を用いる。

## (3) 多段階応力緩和試験と変形特性の評価方法

図-5の上段に示すようなトンネル掘削による地山の変形を模擬した階段状の変位を与える多段階の応力緩和試験を行うと、図-5の下段のような応力応答線図が得られる。図-6には普通吹付けと高強度吹付けの多段階応力緩和試験で得られた応力とひずみの関係を示す。図中の破線は通常の一軸圧縮試験から得られた一軸圧縮強さの発現特性を連続関数でフィッティングした結果を示している。試験開始時の材齢は普通吹付けで4.2時間、高強度吹付けで4.8時間である。

既往のベースコンクリートによる多段階応力緩和試験と同様の方法<sup>10)</sup>を用いて、吹付けコンクリートの試験結果から表-2に示す粘弾性モデルのパラメータを評価した。 $E_k$ 、 $E_s$ 、 $\eta$ は、一定の値を取らず時間の進行による変化を示しているため、時間変化を表す関数として、式(1)と式(2)に示すような連続関数<sup>12)</sup>を採用し数値解析に適用する。

$$\alpha(t_e) = \exp \left[ - \left\{ \ln \left( 1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right\}^b \right] \quad (1)$$

$$E(\alpha) = E_{cte} \cdot \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^a \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$ は水和反応度、 $t_e$ はコンクリートの有効材齢、 $E_{cte}$ は $\alpha$ が1の時の弾性係数、 $t_1$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $\alpha_0$ は定数である。

多段階応力緩和試験結果から評価した時変数型粘弾性モデルの各要素の係数と、式(1)と式(2)により時間変化を連続関数でフィッティングした結果を表-3および図-7に示す。後述の数値解析では、図-7中の近似曲線として示した関数から力学モデルの各要素の材齢進行に伴って変化する係数値を得る。近似関数の定数については、普通吹付けと高強度吹付け共に、18時間までの値について最小二乗法を用いて値を求めた。はじめに普通吹付けについて、 $\alpha_0$ と $t_1$ については0.2および1.0と定

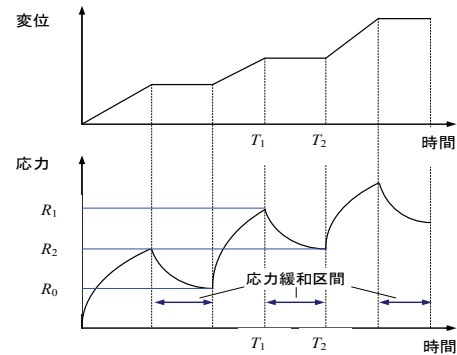
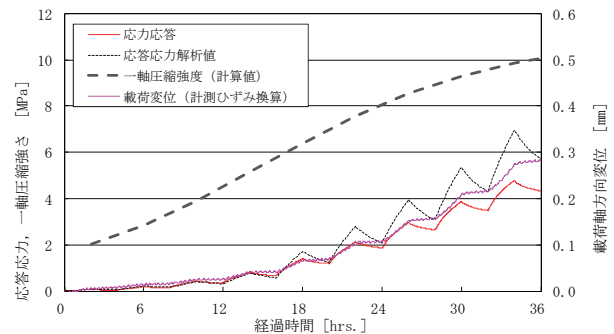
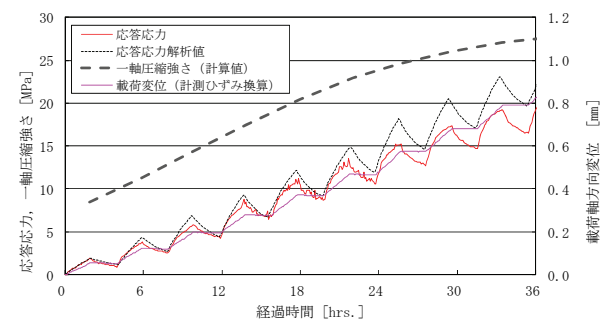


図-5 多段階応力緩和試験の荷重パターンと応力応答

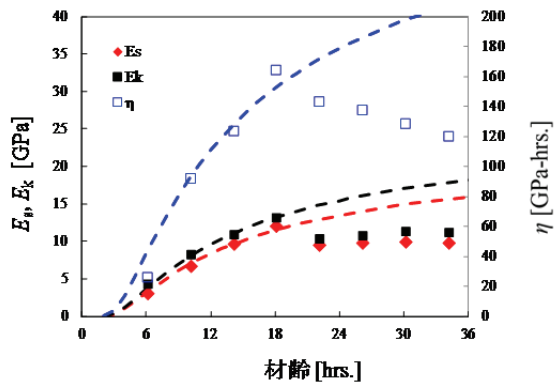


(a) 普通

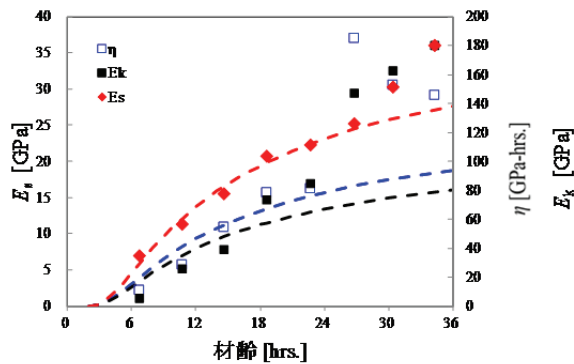


(b) 高強度

図-6 多段階応力緩和試験による応力～ひずみ関係



(a) 普通吹付け



(b) 高強度吹付け

図-7 時変数型粘弾性モデルの各要素の係数の時間変化

めた上で、 $a$ 、 $b$ の各係数と、水和が完了した時点における係数（式(2)の $E_{\infty}$ に相当する係数）を求めた。高強度吹付けについては、普通吹付けで求めた $a$ 、 $b$ の値をそのまま採用した。

### 3. 数値解析

#### (1) 解析条件

若材齢の吹付けコンクリートの变形特性について、時変数型粘弾性モデルを用いて円形坑道掘削時における吹付けの支保効果を二次元の数値解析により検討した。解析には有限差分法の解析コードFLACを用い、吹付けのモデルとして採用した時変数型粘弾性モデルを、FLACのFISH言語を用いて組み込んだ。

トンネルは直径は10 mの円形坑道とし、初期地圧は土かぶり100 m相当の2.5 MPa、側圧係数は1.0とした。吹付けコンクリート支保は切羽離れ1mで付加し、厚さ20 cmとした。鋼製支保工やロックボルトは考慮していない。解析ケースは、吹付けコンクリートの普通吹付け、高強度吹付けを2種を想定し、表-4に示す3種の地山条件を想定した合計6ケースとした。

2次元の数値解析においてはトンネルの進行に伴う地

表-3 各係数の評価結果

|     |        | $\alpha_0$ | $a$  | $b$   | $t_1$<br>(hrs.) | $E_{\infty}, \eta_{\infty}$<br>( $\alpha=1$ ) |
|-----|--------|------------|------|-------|-----------------|-----------------------------------------------|
| 普通  | $E_k$  | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 35.1                                          |
|     | $E_s$  | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 30.7                                          |
|     | $\eta$ | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 406                                           |
| 高強度 | $E_k$  | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 160                                           |
|     | $E_s$  | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 55.2                                          |
|     | $\eta$ | 0.2        | 6.57 | -1.98 | 1.0             | 187                                           |

表-4 解析に用いた地山の物性値

| 岩盤等級 | 変形係数<br>[MPa] | ポアソン比 | 密度<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
|------|---------------|-------|----------------------------|
| C    | 1000          | 0.30  | 22.0                       |
| DI   | 500           | 0.35  | 22.0                       |
| DII  | 150           | 0.40  | 22.0                       |

表-5 切羽離れと掘削解放率および材齢

| 切羽からの距離 |         | 応力解放率 $\beta$<br>[%] |
|---------|---------|----------------------|
| [m]     | D(=10m) |                      |
| 1       | 0.1     | 49.9                 |
| 2       | 0.2     | 62.4                 |
| 3       | 0.3     | 71.7                 |
| 4       | 0.4     | 78.7                 |
| 5       | 0.5     | 84.0                 |
| ⋮       | ⋮       | ⋮                    |
| 19      | 1.9     | 99.7                 |
| 21      | 2.0     | 99.8                 |
| 20<     | 2.0<    | 100                  |

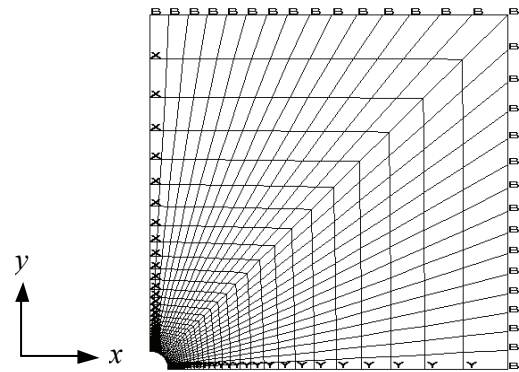
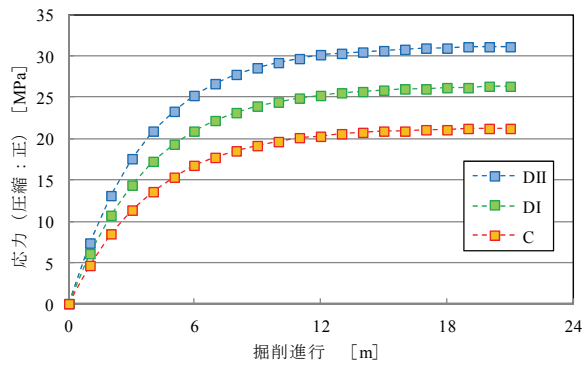


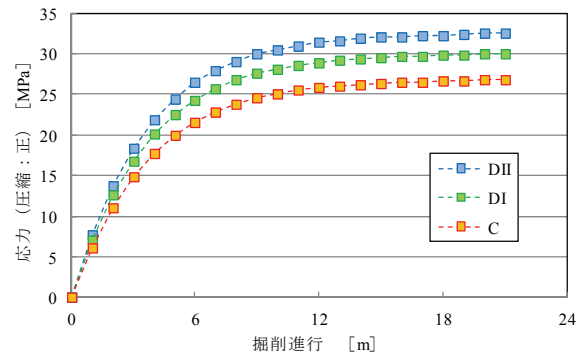
図-8 解析に用いたメッシュ

山変形の3次元的效果を、表-5に示すような切羽からの距離に応じた掘削解放率<sup>4)</sup>を設定し掘削を模擬した。また対称性を考慮し、図-8に示すような1/4対称とした。地山と吹付けコンクリートにはソリッド要素を用い、それぞれ弾性モデルと時変数型粘弾性モデルを適用した。

なお掘削長は1 m、1サイクルを6時間とすることで、日進行を4 mとした

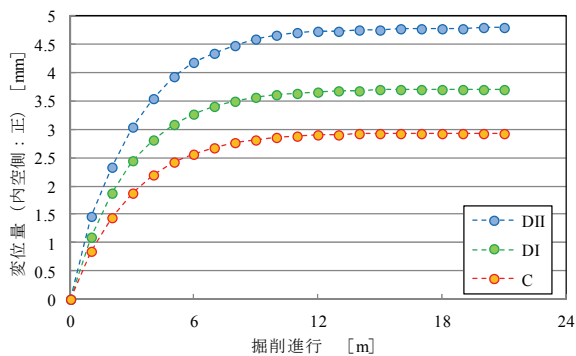


(a) 普通

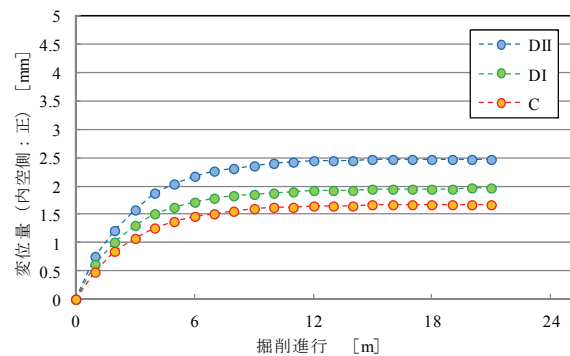


(b) 高強度

図-9 吹付け応力（解析結果）



(a) 普通



(b) 高強度

図-10 壁面変位（解析結果）

## (2) 解析結果

解析結果を坑道壁面の変位量と吹付け応力について整理し、地山等級がC, DI, DIIの場合について、図-9と図-10に示す。図-9の吹付け応力については、普通と高強度で同様な傾向をであり、値も大きく異ならない。一方、図-10の壁面変位については、高強度の方が普通と比較して値が小さく、変位が抑制されて高強度吹付けの支保効果が大きいことが分かる。地山の変形量と比較して吹付けコンクリートのクリープが十分小さければ、図-4に示した一軸圧縮試験によるヤング係数の評価結果とも整合的な結果といえる。また、普通吹付けについては、発生した応力は設計基準強度を超えているが、高強度吹付けについては、最も不良な地山条件であるDII級の地山においても設計基準強度は超えなかった。

## 4. まとめ

本論文では、これまで実施が困難であった材齢24時間未満の吹付けコンクリートについて一軸圧縮試験を実施し、試験結果として応力～ひずみ関係を示した。また、

同一バッチの供試体により多段階応力緩和試験を平行して実施し、若材齢からの吹付けコンクリートのクリープ変形を含む変形特性の時間変化を把握できることを確認した。さらに時間依存性を示す変形特性を考慮した数値解析を実施し、普通吹付けと高強度吹付けの支保効果の差異について示し、評価結果から高強度吹付けの地山の变形抑制や発生応力に対する優位性を確認した。

以下、本論文における現場打設の吹付けコンクリートの若材齢の変形特性の評価および支保効果の検討と、これまでの研究から判明している課題についてまとめる。

### (1) ベースコンクリートと吹付けコンクリートの差異

吹付けコンクリートのベースコンクリートについて行った既往の検討結果<sup>10)</sup>と比較すると、2章および3章で評価検討を行った吹付けコンクリートについては、普通吹付けと高強度吹付けの支保効果に有意な差がみられた。高強度吹付けについては、これまでの研究<sup>10), 11)</sup>では地山変位抑制については顕著な効果はないとの結果が得られていた。ただ、支保耐力のという観点では、普通吹付けよりも設計基準強度が高いため余裕があり有利であるという結論であった。実際、ベースコンクリートによる検討では、コンクリートの種別に依らず最終変位量や発生

応力に顕著な差は見られなかったが、今回の吹付けコンクリートによる検証では、高強度吹付けに変位抑制効果が確認できた。

この結果の差異については、急結剤の添加の有無により差異が生じた可能性もあるが試験数も少なく理由は定かではないため、今後も継続して検討を行いたい。

## (2) 時変数型粘弾性モデル

前述したが、掘削に伴うトンネルの変形は切羽に近い程大きく、吹付けコンクリートの支保効果を正確に評価するためには、打設直後の若材齢からの変形特性の把握と数値解析への適用が重要である。提案する3要素の時変数型粘弾性モデルの有効性については、吹付けコンクリートの試験結果を反映した2章および3章の数値解析検討においても確認できた。各要素の係数の時間依存性を表す関数については、材齢1日程度までの時間変化のみならず3日材齢まで精度良シミュレートできるようにしたいと考えている。また、時間依存性のみならず応力依存性により係数が変化している可能性も考えられるため、クリープ試験等の材料試験による検証も考えている。

以上に述べた課題の他、開発した手法により種々の変形挙動を呈する地山について、その地山特性に適した吹付け材料に要求される仕様（剛性や強度の発現特性、等）を明らかにしていきたい。その成果を元に配合の決定や新しい吹付け材料の開発や採用を行い、合理的な支保の適用による施工コストの削減、後期短縮等に貢献したい。

## 参考文献

- 1) 岡本寛昭, 遠藤孝夫: 持続荷重を受ける極若材齢コンクリートの変形予測に関する研究, 土木学会論文集, No.396/V-9, pp.69-77, 1988.
- 2) 土屋敬: トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究, 土木学会論文集, III-4, pp.31-40, 1985.
- 3) 久武勝保: 膨張性トンネルにおける鋼繊維補強高強度吹付けコンクリートの支保効果, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.99-106, 2002.
- 4) 中谷篤史, 高橋圭一, 熊坂博夫, 岩崎昌浩, 寺島勲: 若材齢時に載荷を受けた吹付けコンクリートの力学特性について, トンネル工学論文集, Vol.17, pp.21-30, 2007.
- 5) 土屋敬, 井上寛美, 安田憲彰: 吹付コンクリートの早期材令における諸性質, 鉄道技術研究所速報, No.82-36, 1982.
- 6) 吉田弥智, 柴田実, 須藤英明: 高炉セメントを用いた吹付けコンクリートの諸性状について, 土木学会第39回年次学術講演会, V-46, pp.91-92, 1984.
- 7) 瀬崎満弘, 岐部哲朗, 市川康明, 川本脩万: 吹付コンクリートの強度と変形特性に関する研究, 材料, Vol.38, No.434, pp.1336-1340, 1991.
- 8) Golser, J., Galler, R., Schubert, P. and Rabensteiner, K.: Shotcrete in tunnel design, Shotcrete for Underground Support 7, pp.180-188, 1995.
- 9) 谷卓也, 青木智幸, 小川豊和, 武田均, 藤井義明: 若材齢トンネル吹付けコンクリートの変形特性に関する研究, Journal of MMIJ, No.128(3), pp.113-120, 2012.
- 10) 谷卓也, 小川豊和, 武田均, 青木智幸, 藤井義明: 若材齢の剛性変化を考慮したトンネル吹付けコンクリートの支保効果に関する検討, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp.79-84, 2007.
- 11) Tani, T., Aoki, T., Ogawa, T. and Fujii, Y.: Consideration on the tunnel supporting effectiveness of shotcrete with a time-dependent viscoelastic model, *Proc. of Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, pp.1969-1974, 2014.
- 12) Onken, P., Rostásy, F.: Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang, *DafStbHeft449*, Berlin:Beuth-Verlag, 1995.

## STUDY OF TUNNEL SUPPORT EFFECTIVENESS OF YOUNG-AGED SHOTCRETE BY CONSIDERATION OF VARYING MECHANICAL CHARACTERISTICS WITH TIME

Takuya TANI, Toyokazu OGAWA and Tomoyuki AOKI

The authors have been pointing out the importance of change in mechanical properties of shotcrete with time within an age period younger than 24 hours after application, since shotcrete is one of the most important support materials in mountain tunnelling. A series of uniaxial compression and stress relaxation tests were carried out to estimate deformation and strength characteristics of early-age shotcrete. The effectiveness of shotcrete as tunnel support was evaluated using a viscoelastic model with the variable coefficients with time which represent the aging of concrete based on the characteristics obtained in the laboratory tests. Numerical analysis was then executed using the model proposed.