# 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

谷 卓也1\*・小川 豊和<sup>1</sup>・武田 均1・青木 智幸1・藤井 義明2

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1) <sup>2</sup>北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム専攻(〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目) \*E-mail: takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

標準的に使用される2つの設計強度(普通,高強度)の吹付けコンクリートのベースコンクリートについて、地山の変形に相当する微小な変位速度下での一軸圧縮試験および応力緩和試験を行った. コンクリートの挙動については粘弾性モデルを仮定したが、試験結果からはモデルの係数に時間依存性があることが示唆された. そのため、時間の経過による粘弾性モデルの係数の変化を水和反応度を考慮した式で与え、実施した試験のシミュレーションを行った. その結果、材齢1日までの若材齢におけるコンクリートの変形挙動を良く表現できることが分かった. これらの成果を数値解析に適用してトンネル支保効果の検討を行い、2種の強度の異なるコンクリートの支保効果について調べた.

# Key Words : tunnel support, NATM, shotcrete, early age concrete, uniaxial compression test, stress relaxation test, time-dependent deformation

#### 1. はじめに

近年、トンネルの急速施工を目的として、材齢10分で 3N/mm<sup>2</sup>以上の強度を発現する吹付けコンクリートが開 発され、トンネル施工に用いられている<sup>1)</sup>.また、変形 が大きい膨張性地山の施工においては、ある程度の変形 を許容して地山を安定化させる二重支保が採用され、そ の最適な施工方法についての検討も行われている<sup>2)</sup>.

山岳トンネルで支保部材として用いられる吹付けコン クリート(以降「吹付け」と称する)は、地山の変形を 受けながら硬化するという特殊な条件下にある.そのた め、打設後の早い時期に強度とともに弾性係数(ヤング 率)を発現するような材料を支保部材として用いた場合、 僅かな地山の変形でも破壊する状況が想定される.二重 支保については、一重目の支保で変形をある程度許容す ることから、強度は低くても弾性係数の小さいコンクリ ートが有利となる条件も考えられる.いずれの場合も地 山の変形挙動に応じた最適な吹付け支保を設計するため には、切羽の進行による地山の変形が最も大きい、打設 直後の若材齢時における強度および変形特性の把握が必 要となる.

吹付けの物性についてはこれまで多くの研究例がある が、吹付けの弾性係数としては打設直後からの剛性の変 化やクリープ変形を全て考慮した見かけのヤング率<sup>3</sup>が 採用されることが多い.また、材齢および応力レベル、 ピーク強度後のひずみ軟化特性を考慮した検討例<sup>4</sup>もあ る.しかしながら、硬化過程のコンクリートに継続して 変形を与え、変形特性を実験的に評価して数値解析に反 映した例はみられない.そのため、地山の特性や吹付け 材料の性質等の条件によっては、支保の安全率が適切に 見積もられていない可能性もある.

本研究では、材齢一日までの若材齢供試体の強度およ び変形特性を、通常の一軸圧縮試験により確認した.ま た、材齢が約6時間経過した供試体に一定の微小な変位 速度で継続的に変形を与え、材齢や載荷速度の違いによ る強度特性や変形特性の変化を実験的に把握した.その 結果、支保効果の検討にはコンクリートの粘性的な挙動 が表現できる力学モデルが必要であると考え、スプリン グとダッシュポットから構成される三要素の線形粘弾性 モデルを仮定した.さらに、トンネル掘削を模擬した階 段状の変位を与える応力緩和試験を実施して、モデルを 構成する各要素の弾性係数と粘性係数を求め、各要素の 係数の値が、時間の経過に伴って変化することを確認し た.そこで、水和反応度を表す式を用いて、仮定した粘 弾性モデルの係数を材齢に応じて与えられるようにし、 実施した試験結果を反映できるようにした.

以上の成果により、係数時間依存型の粘弾性モデルを 用いて、吹付けの支保効果を数値解析により検討した. 吹付けの条件としては、弾性係数を一定とした場合と係 数時間依存型の粘弾性モデルを用いた場合、吹付けの設 計強度を変えた場合について検討し、これらの違いが地 山の変位量や吹付け応力に与える影響について考察した.

# 2. 力学モデルの検討

### (1) 微小な変位速度による一軸圧縮試験

材齢が約6時間を経過した供試体について、地山の変 形を模擬した微小なひずみ速度(3.6, 1.8, 0.9%/day)に よる一軸圧縮試験を行った.図-1に応力~ひずみ線図を 示す<sup>5</sup>.載荷応力がピークに達するまでの時間は普通

(設計基準強度18N/mm<sup>2</sup>) コンクリートで8~38時間, 高強度(設計基準強度36N/mm<sup>2</sup>) コンリートで10~34時 間であった.応力とひずみの関係をみると,応力がピー クに達するまでの同じひずみ量に対しては,載荷速度の 遅い試験ほど応力が大きい.これは載荷中に試験体の弾 性係数の値が増加しているためと考えられる.普通と高 強度を比較すると,同じ載荷速度でほぼ同程度のひずみ 量でピークとなるが,高強度の方が普通よりピーク時の 応力が大きい.次に,材齢8,12,24時間において通常 のひずみ速度(0.3%/min)で実施した一軸圧縮試験から 得られた応力とひずみの関係を図-2に示す.図-2から, 材齢の進行により,応力のピーク(図中ピークを△で表 示)の値が高くなるとともにピーク時点でのひずみが小 さくなる傾向がみられた.

以上の結果から、載荷速度および材齢の両者の影響に より、強度や変形性に差が生じることが分かった.その ため、若材齢のコンクリートの変形性を考慮するには、 粘弾性的な性質と、その性質が材齢とともに変化してい く性質を表現できるモデルが必要であることが分かった.

#### (2) 吹付けの力学モデルとパラメータの決定

吹付けの力学的な挙動を表現するモデルとして、図-3に 示すような一次元の粘弾性モデルを仮定した.さらに、低 速度の一軸圧縮試験と同一の試験体を用いて図-4(a)に示す ような地山の変形を模擬した階段状の変位を与える応力緩 和試験を行い、粘性的な挙動を確認した.

この吹付け支保の粘弾性モデルに対しては、図-4(b)に示 す応力緩和区間に対して各要素のパラメータを決定した. 図-3に示した粘弾性モデルは、正規化したひずみと応力の 関係として式(1)と式(2)で表すことができる<sup>9</sup>.

$$\varepsilon + p_1 \dot{\varepsilon} = q_0 \,\sigma + q_1 \,\dot{\sigma} \tag{1}$$

$$p_1 = \frac{\eta}{E_2}, \quad q_0 = \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2}, \quad q_1 = \frac{\eta}{E_1 E_2}$$
 (2)



図-1 三種類の載荷速度による一軸圧縮試験で得られた 応力とひずみ関係



図-2 若材齢試験で得られた応力とひずみ関係



σ:応力, ε:ひずみ

E: 瞬時応力変化を表わすバネの弾性係数



**図-3** 粘弾性モデル





図-5 パラメータの決定

ここに $\sigma$ は応力,  $\epsilon$ はひずみ,  $E_i$ は瞬時の応力変化を 表すバネの弾性係数,  $E_i$ は応力緩和を表すバネの弾性係 数,  $\eta$ は応力緩和を表すダッシュポットの粘性係数であ る.  $\epsilon$ および $\sigma$ の上のドットについては時間に関する微 分を意味する. さらに, ステップ関数H(t)を用いて, ひ ずみを一定とした場合の応力緩和を式(3)のように表す. ただし $\epsilon_0$ は, 応力緩和開始時ひずみの値である.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 H(t) \tag{3}$$

式(1)と式(3)はラプラス変換およびその逆変換により 式(4)のように表すことができる.

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0}{q_0} \left( \frac{q_0 p_1}{q_1} - 1 \right) \exp\left( -\frac{q_0}{q_1} t \right) + \frac{\varepsilon_0}{q_0}$$
(4)

また,図-4に示した応力緩和区間について,実験値を 片対数でプロットすると図-5のようになり,その関係式 は(5)式で表現できる.

$$\ln (R - R_1) = \ln A - B(t - T_1)$$
 (5)

ここに、 $R: 応力応答, R_1: 時間 t=T_1 での応力値, A, B:$ 定数, t: 経過時間 ( $T_1 \le t \le T_2$ )である. Aは無次元, Bは時間の逆数の次元を有する. 式(5)により図-5でフィッティングした直線の傾きから係数Bを,切片から係数Aを決定することができる. さらに式(5)は式(6)の形に変形できる.

$$R = A \exp[-B(t - T_1)] - R_1$$
(6)

式(4)と式(6)を比較することにより,応力緩和試験の 結果から求めたA, B,  $R_1$ により,粘弾性モデルの各係 数 $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta$ を式(7)で決定することができる.

$$E_1 = \frac{A + R_1}{\varepsilon_0}, \quad E_2 = \frac{R_1 (A + R_1)}{A \varepsilon_0}, \quad \eta = -\frac{(A + R_1)^2}{A B \varepsilon_0} \quad (7)$$



図-7 材齢と評価パラメータの関係

表-1 応力緩和試験で評価したパラメータ

	緩和開始時刻 hrs.		$E_1$	$E_2$	η
			GPa	G₽a	GPa-hrs.
	<i>t</i> 1	1.4	0.4	0.5	0.8
	t 2	5.3	1.5	1.9	2.1
	t 3	9.2	3.0	4.6	6.4
普通 コンクリート	t 4	13.2	3.2	3.8	3.8
	t 5	17.0	3.7	5.0	4.6
	t 6	21.0	5.5	7.5	8.7
	t 7	24.8	5.2	7.0	7.8
	t 8	28.7	5.1	5.6	5.9
高強度 コンクリート	t 1	1.5	0.6	0.8	1.2
	t 2	5.4	2.2	2.5	3.0
	t 3	9.3	3.0	3.2	3.3
	t 4	13.2	4.8	5.7	7.9
	t 5	17.0	5.7	5.6	7.8
	t 6	20.9	6.6	6.2	8.4
	t 7	24.8	7.2	7.6	10.6
	t 8	28.6	7.2	6.0	9.1

普通と高強度のコンクリート供試体を用いた応力緩和 試験から得られた,時間-入力変位および応答応力の関 係を,図-6に示す.また,試験結果に基づき上述の方法 で評価した粘弾性モデルのパラメータを表-1に示す.

## (3) 係数の時間依存性

表-1に示したE<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, ηは,一定の値を取らず時間や 応力の影響を受けていると考えられる.一例として,普 通コンクリートの応力緩和試験で評価した値を材齢毎に プロットした結果を図-7に示す.図-7には図-2に示した 若材齢試験で評価した弾性係数(50%接線ヤング率)も 合わせて示す. 材齢および変形が進むと値の増加傾向が 小さくなり、さらに進むと減少傾向になることから、ピ ーク強度に近づくにつれて塑性的な変形およびその影響 が生じていることが推察される. また, 普通コンクリー トについては、材齢が12時間程度までは緩やかな下に凸 の曲線を示し、24時間以降は一般的に示される対数曲線 の形をした発現特性を示していることが分かる. 高強度 コンクリートについても同様であり、この傾向は、瀬崎 らっによる吹付けの硬化時間と強度・剛性の評価結果と も整合的である.よって、式(8)と式(9)に示すような水 和反応度を用いた連続関数<sup>®</sup>により、試験結果のフィッ ティングを行った. 普通と高強度コンクリートの若材齢 試験結果から評価した弾性係数を,図-8に示す.図中に はフィッティングの際に求めた式(8)および式(9)の定数 の値も示す.

$$\alpha(t_e) = \exp\left[-\left\{\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right\}^b\right]$$
(8)  
$$E(\alpha) = E_{cte} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0}\right)^a$$
(9)

ここに、αは水和反応度、t<sub>b</sub>はコンクリートの有効材 齢、E<sub>cc</sub>はαが1の時の弾性係数、t<sub>b</sub>, a, b, a<sub>b</sub> は定数である. なお、図-8に示したフィッティングで決定した材料を 支保部材として用いた場合、材齢1日までは地山の変形 量や支保の発生応力に、普通と高強度のコンクリート間 で大きな差は生じないと考えられる.それ以降の材齢で は、普通コンクリートの弾性係数が高強度コンクリート の弾性係数より小さくなるため、変形量は普通コンクリ ートの方が大きくなり、逆に支保応力は高強度コンクリ ートで大きくなることが予想される.さらに、普通と高 強度の各コンクリートの弾性係数が、4GPaと8GPaで打 設直後から一定で変化しないとした場合、実験的に得ら れたコンクリートの弾性係数は、若材齢では弾性係数一 定の場合と比較して小さいため、変形量は大きく、支保 応力も小さいことが予想される.

# (4) 試験結果のシミュレーション

各係数の時間依存性を考慮した粘弾性モデル(「係数時間依存型粘弾性モデル」と称する)により,微小なひずみ速度下での一軸圧縮試験と応力緩和試験のシミュレーションを行った.その結果を図-9と図-10に示す. 図-9には普通コンクリート供試体を用いて行った2種のひずみ速度(0.86,0.07%/day)による一軸圧縮試験結果も合わせて示した.図-10には,普通コンクリートで行った応力緩和試験結果のみを示した.試験結果のシミ



図-10 応力緩和試験のシミュレーション

ュレーションでは、粘弾性モデルの各係数の時間による 変化を式(8)と式(9)で与えた.係数  $E_1$ については、式(8) と式(9)の定数項  $E_{cte}$ の値として図-8の表中に示した普通 コンクリートの値 12.9GPa を用いた.その他の係数  $E_2$ ,  $\eta$ については、それぞれ表-1の普通コンクリートの  $E_2$ ,  $\eta$ の最大値を式(9)の  $E_{cte}$ に代入し、式(8)の定数項と式(9) の $\alpha_0$ の値は  $E_1$ と同様に図-8中の表に示した値を用いた.

図-9 では、当該材齢における一軸圧縮強度に対し変 形によって発生する応力が十分に小さい範囲で、試験結 果を良く表現できていることが分かった.応力緩和試験 試験結果のシミュレーション結果を示した図-10 におい ても、試験時間 15 時間(載荷開始が材齢 7.2 時間)まで は、比較的良好に試験結果を表現できた.ただし、一軸 圧縮強度に対して応力レベルが高い範囲では、採用した

円形坑道径	10 m
初期地圧	2.5 MPa
側圧係数	1.0
吹付けコンクリート厚さ	20cm

<b>表-3</b> および地山の物	性値
--------------------	----

ヤング率	ポアソン比	単位体積重量
E (MPa)	ν	$\gamma (kN/m^3)$
500	0.35	22.0

表4	吹付けの物性値
1X T	- Y I I I V Y Y Y J I I I I I I I I I I I I I I I I

解析ケース		$E_1(\alpha = 1)$ GPa	$E_2(\alpha=1)$ GPa	$\eta$ ( $\alpha$ =1) GPa-hrs.
普通	粘弾性モデル	12.9	7.5	8.7
	弹性係数一定	E <sub>普通</sub> :4 GPa		
高強度	粘弾性モデル	19.6	7.6	10.6
	弹性係数一定	I	Eame : 8 GP	a

モデルが塑性変形を考慮していないため、試験結果と乖 離しているもの考えられる.

# 3. 数值解析

#### (1) 解析条件

若材齢時の時間依存性挙動を表現できる力学モデルを 用いて、円形坑道掘削時における吹付けの支保効果を二 次元平面ひずみ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 して採用した係数時間依存型粘弾性モデルを、FLACに 組み込まれているFISH言語を用いて適用した.

解析条件を表-2に示す.円形坑道の直径は10m(吹付け付加後),初期地圧は土かぶり100m相当の2.5MPa, 側圧係数は1.0とした.支保部材は吹付け(厚さ20cm) のみとした.解析ケースは,吹付けのモデルとして係数 時間依存型粘弾性モデルと弾性係数一定の2種,設計基 準強度の異なる配合(普通,高強度)を2種を想定した 合計4ケースとした.地山は不良地山を想定し,表-3に 示す物性値を,各ケースの吹付け支保の物性値について は表-4に示す値を用いた.なお,表-4中の係数E」につい ては,図-8に示した材齢試験の結果により決定した値で ある.また,表-5に示すように,切羽からの距離に応じ た掘削解放率<sup>9</sup>を設定し,掘削を模擬した.解析では対 称性を考慮し,図-11に示すような1/4対称の断面とし, 地山と吹付けにはソリッド要素を用いた.

## (2) 掘進速度および吹付け支保の条件

掘削長は1mとし、1サイクルを6時間で日進行を4mと した. 吹付け支保は切羽離れ1mで付加した. なお、係 数時間依存型粘弾性モデルの係数を決めた材齢試験のべ

表-5 切羽離れと掘削解放率および材齢

切羽離れ		掘削解放率β	材齢
m	D (=10m)	%	hrs.
1	0.1	49.9	6
2	0.2	62.4	12
3	0.3	71.7	18
4	0.4	78.7	24
5	0.5	84.0	30
•		•	•
			•
	•		
19	1.9	99.7	42
20	2	99.8	48
21 <	2<	100	54





ースコンクリートには、急結剤が添加されていないため、 実際の吹付けとは打設直後の状況が異なる. ベースコン クリートによる室内試験では、材齢6時間から脱型が可 能(試験体が自立する状態)であったため、数値解析を 行う際には吹付け打設時を室内試験による材齢の6時間 として検討した.

#### 4. 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,図-12と図-13に示す.以下,解析結果について,変位量と応力の傾向および特徴を述べる.

# (1) 壁面変位

図-12に示すように、係数時間依存型粘弾性モデルに ついては、高強度と普通のコンクリートの種別による最 終変位量に顕著な差は見られない.ただし、約80時間ま では、高強度コンクリートの方が変位量が大きい.これ は、図-8に示した若材齢時の弾性係数の大小関係(高強 度<普通)の影響と考えられる.一方、弾性係数一定の 解析結果では、終始普通コンクリートの方が変位量が大 きく、解析に用いたコンクリートの弾性係数の大小に応 じた結果と言える.

#### (2) 吹付け応力

図-13に示すように、係数時間依存型粘弾性モデルでは、最終の吹付け応力はほぼ同じ値となっている.このとき、変位量もほぼ同じ値である.ただし、約80時間までは普通コンクリートの方が応力が大きく、変位量の結果と整合的である.一方、弾性係数一定のケースでは、解析に用いたコンクリートの弾性係数の大小に応じ終始弾性係数の大きい高強度コンクリートの方が普通コンクリートと比較して応力が大きかった.

若材齢時の応力の発生状況に着目すると, 吹付けを付加(切羽位置 1m)して最初の掘削(切羽位置 2m)で, 弾性係数一定の場合の応力の増加が顕著である.係数時間依存型粘弾性モデルでは 2~3MPaの応力が発生しているのに対し,弾性係数一定の場合には高強度コンクリートで 5MPa以上, 普通コンクリートで 4MPa以上と大きな応力が生じている.早期に弾性係数が大きくなる材料を使用した場合,地山の変形が大きいと吹付けに発生する応力が急増する可能性を示唆している.

#### 5. おわりに

数値解析結果に基づき,高強度吹付けが有する力学的 性質についてまとめる.

高強度吹付けは、地山変位抑制に対する効果は顕著で ないものの、支保耐力の向上という点で普通吹付けより も有利である.言い換えれば、高強度吹付けは、地山の 変形に良く追従し、変位量が同程度である場合には、普 通吹付けよりも発生応力が耐力に対して余裕が大きいこ とから、不良地山にも適した支保部材であると言える.

今後は、様々な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の材料特性や適用性について、 より詳細な検討を進めていきたい.

#### 参考文献

- 1) 田中健一, 森直樹:初期高強度吹付けを用いたNATM新支 保パターン,トンネルと地下, Vol.34, No.10, pp779-788, 2003.
- 2) 剣持三平,竹津英二,青木智幸,森田隆三郎,白旗秀紀: 膨圧性泥質岩地山におけるトンネルの多重支保工の効果,土 木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp312-325, 2006.
- 3) 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.
- 4) 久武勝保:膨張トンネルでの高強度鋼繊維補強吹付けの有効性、トンネルと地下、Vol.35、No.2, pp.41-47, 2004.
- 5) 谷卓也,武田均,青木智幸,小川豊和:硬化過程で変形を 受けるトンネル支保部材を想定した若材齢コンクリートの 一軸圧縮試験,資源・素材学会平成 18 年度春季大会講演要 旨集,pp.97-98,2006.
- 6) 赤井浩一:土木工学大成 7,土質力学特論, p.14, 森北出版, 1974.
- 瀬崎満弘,岐部哲朗,市川康明,川本朓万: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.
- Onken, P., Rostásy, F.:Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk bei früh einsetzendem Temperaturzwang, *DafStbHeft449*, *Berlin:Beuth-Verlag*, 1995.
- Panet, M.: Time-Dependent Deformation in Underground Works, *Proceedings of the 4th ISRM Congress, A.A.Balkema*, Vol.3, pp.279-289, 1979.

# A STUDY ON THE SUPPORT EFFECT OF EARLY AGE SHOTCRETE

# Takuya TANI, Toyokazu OGAWA, Hitoshi TAKEDA, Tomoyuki AOKI and Yoshiaki FUJII

A series of uniaxial compression and stress relaxation tests were carried out to estimate deformation and strength characteristics of an early-age concrete. The effectiveness of shotcrete as tunnel support was evaluated using a visco-elastic model with the variable coefficients which represent the aging of concrete based on the characteristics obtained in the labolatory tests. Numerical analyse excuted using the model propsed. The results showed that the high-strength shotcrete was effective than standard one in weak rocks.