

超高強度吹付けコンクリートの変形特性を適用した解析手法に関する一考察

長田 翔平¹・横畑 友幹²・大塚 勇³
谷 卓也⁴・川口 哲生⁵・水野 史隆⁶

¹正会員 大成建設株式会社 土木設計部 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail: ngtsuh00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 土木設計部 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail: ykhyuk00@pub.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 土木設計部 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail: ohtsuka@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 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)
E-mail: takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

⁵正会員 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)
E-mail: kwgto00@pub.taisei.co.jp

⁶正会員 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)
E-mail: mznhmt00@pub.taisei.co.jp

脆弱な地山や高い地圧が作用する山岳トンネル工事では、導坑先進工法や支保工を二重に用いる等の対策が採用されてきた。当社で開発した超高強度吹付けコンクリートは、材齢 28 日で実強度が一軸圧縮強さで 100N/mm^2 に達し、従来の対策を代替する手段になり得る。しかし、超高強度吹付けコンクリートによる支保構造を設計するための解析手法が確立されていない。そこで本稿では、超高強度吹付けコンクリートの若材齢時における圧縮強度試験および多段階応力緩和試験を実施し、そこで得た挙動を解析的に再現することで解析パラメータの評価を試みた。さらに、超高強度吹付けコンクリートの剛性発現およびクリープ特性を考慮した 3 次元逐次掘削解析を実施し、解析パラメータの妥当性の確認を行った。

Key Words: *ultra-high strength, shotcrete, numerical analysis, stress relaxation, visco-elastic*

1. はじめに

山岳トンネル工事で用いる吹付けコンクリートは、掘削に伴って生じる地山の変形や外力による圧縮せん断等に抵抗するために施工する支保工の一部として用いられ、掘削したトンネルの変形度合いに応じ、適切な強度の吹付けコンクリートが使用される。これまでの、普通強度として設計基準強度 18N/mm^2 、高強度として設計基準強度 36N/mm^2 の吹付けコンクリートが用いられているのが現状である。そのため、脆弱な地山や高い地圧が作用する厳しい条件下での施工では、導坑先進工法や支保工を二重に用いる等の対策が必要となり、施工時の作業効率の低下や安全性の確保が重要な課題となっていた。

当社で開発した吹付けコンクリートは、材齢 28 日で

実強度が一軸圧縮強さで 100N/mm^2 に達し（「超高強度吹付けコンクリート」と呼称）、従来の吹付けコンクリートと比較して、若材齢時から高い強度を発揮する一方で、若材齢時の弾性係数は比較的抑制される性状を有する。したがって、超高強度吹付けコンクリートを用いた支保工の適用は、強大な地圧に抵抗する耐力を有し、かつ、柔軟な変形性能によって必要耐力を低減できる効果があるため、従来の対策を代替する手段になり得ると考えている。

冒頭で述べた厳しい条件下における支保設計では、解析的な手法を用いるのが一般的であるが、超高強度吹付けコンクリートによる支保構造を設計するための解析手法が確立されていないのが現状である。解析手法を確立するためには、超高強度吹付けコンクリートの剛性やク

リーブ特性といった変形特性について、材齢に応じたこれらの特性の変化を適正に把握し設計に反映することが重要である。

以上より本稿では、超高強度吹付けコンクリートの若材齢時における圧縮強度試験および多段階応力緩和試験を実施し、そこで得た挙動を解析的に再現することで超高強度吹付けコンクリートの解析パラメータの評価を試みた。さらに、超高強度吹付けコンクリートの剛性発現およびクリープ特性を考慮した3次元逐次掘削解析を実施し、解析パラメータの妥当性の確認を行った。

2. 若材齢超高強度吹付けコンクリートの試験

(1) 試験の概要

超高強度吹付けコンクリートの材齢に応じた剛性発現を把握するため圧縮強度試験を実施し、若材齢時のヤング係数を求めた。また、粘弾性特性の時間変化データを取得するため多段階応力緩和試験を実施した。多段階応力緩和試験は、トンネルの掘削過程で吹付けコンクリートが段階的に、地山からの変位を受ける状態を模擬するものであり、一定速度の载荷と载荷変位の保持を繰り返す試験²⁾である。

今回実施した試験のうち、本稿で扱う配合は表-1に示すものであり、ベースコンクリートで供試体を作製し、寸法は直径 100mm、高さ 200mm の円柱とした。モールド管への打設および養生は 20℃に保たれた恒温室内で行い、脱型が可能となり次第、直ちに試験を行った。ベースコンクリートとした理由は、将来的に、吹付け供試体との比較により、簡易な粘弾性特性評価手法を確立したためである。配合 A は超高強度吹付けコンクリート相当、配合 B は従来の高強度吹付けコンクリート相当である。

多段階応力緩和試験の概要を図-1に示す。多段階応力緩和試験は、容量 500kN の油圧式サーボ型材料試験機を用いて、材齢 14 時間経過時から 4 時間毎に载荷を行った。なお、試験の詳細は、水野ら³⁾、川口ら⁴⁾の文献を参照されたい。

(2) 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮強度試験は、多段階応力緩和試験の各载荷時の材齢に合わせて実施した。一軸圧縮強度試験より得られた材齢毎の圧縮強度およびヤング係数を図-2、図-3に示す。ヤング係数は JIS A 1149 に従い算出した割線弾性係数とした。若材齢時における圧縮強度およびヤング係数の径時変化は、対数関数として良い近似が得られる結果となった。

表-1 吹付けコンクリートの示方配合

配合	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	混和剤	繊維
配合 A：超高強度 ($\sigma_{sk}=100\text{N/mm}^2$)	192	1064	722	458	10.6	2.25
配合 B：高強度 ($\sigma_{sk}=36\text{N/mm}^2$)	202	450	1025	688	6.75	2.25

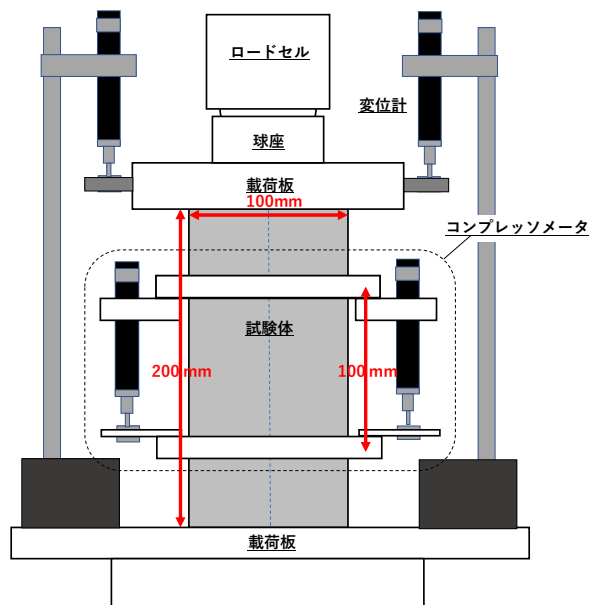


図-1 多段階応力緩和試験の概要

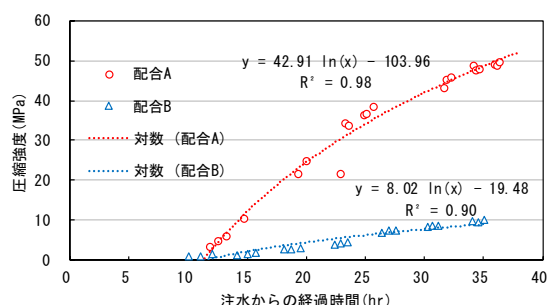


図-2 圧縮強度の時間変化

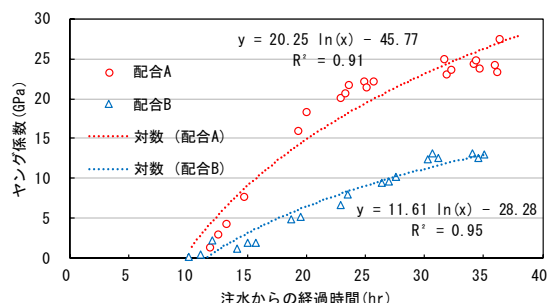


図-3 ヤング係数の時間変化

(3) 多段階応力緩和試験の载荷条件

多段階応力緩和試験は前述した通り、一定速度の载荷（変位付加）と载荷変位の保持を繰り返す試験であるため、一般的な強度試験と異なり、あらかじめコンクリートの応力状態を想定し、破壊しないよう変位量を設定する必要がある。初期载荷時に破壊に至らない载荷ひずみは、図-2、図-3の一軸圧縮強度試験結果から、材齢14時間での圧縮強度をヤング係数で除して、安全係数として0.8を乗じて求め、配合Aで0.11%以下、配合Bで0.055%以下とする必要がある。本稿では、トンネル掘削時に吹付けコンクリートに作用するひずみを以下に示す方法で仮定し、実験での変位量を決定した。

まず変形係数 5GPa、ポアソン比 0.25、単位体積重量 25kN/m³の弾性地山を仮定し、等方等圧下の円形トンネル（直径 10m）の坑内変位を、以下に式(1)に示す円孔理論解⁹より算出する。

$$u = \frac{a(1+\nu)\gamma h}{E} \quad (1)$$

ここに、

- u : 坑内変位 (mm)
- a : トンネル径 (m)
- ν : 地山のポアソン比
- γ : 地山の単位体積重量 (kN/m³)
- h : 土被り (m)
- E : 地山の変形係数 (kPa)

式(1)より算出した坑内変位を、以下に示す式(2)でひずみに変換する。

$$\varepsilon = \left(\frac{u}{a}\right) \times 100 \quad (2)$$

ここに、

- ε : トンネル壁面でのひずみ (%)
- u : 坑内変位 (mm)
- a : トンネル径 (mm)

式(2)はトンネル掘削に伴う全ひずみであり、別途3次元逐次掘削解析により求めた地山の特性曲線から、直径10mのトンネルを掘進長1mとして5回掘進までの各変位割合を算定し、式(2)の全ひずみに変位割合を乗じることで1掘進毎の対応ひずみを算出した。表-2に土被り600mおよび300mでの1掘進毎の変位割合と対応ひずみを示す。掘進1回目での対応ひずみが土被り600mで配合Aの破壊ひずみ以下、土被り300mで配合Bの破壊ひずみ以下となっていることが分かる。

以上より、本実験では配合Aについては土被り600mを想定、配合Bについては土被り300mを想定したひずみ相当を図-4に示す载荷変位として設定する。なお、付与する変位は試験機の精度を考慮し設定している。

表-2 1掘進毎の変位割合と対応ひずみ

掘進回数 (支保設置後)	変位割合 (%)	【土被り 600m】 対応ひずみ (%)	【土被り 300m】 対応ひずみ (%)
1回目	27.3	0.102	0.051
2回目	19.3	0.072	0.036
3回目	12.5	0.047	0.023
4回目	9.1	0.034	0.017
5回目	5.7	0.021	0.011
全変位 (参考)	100	0.375	0.188

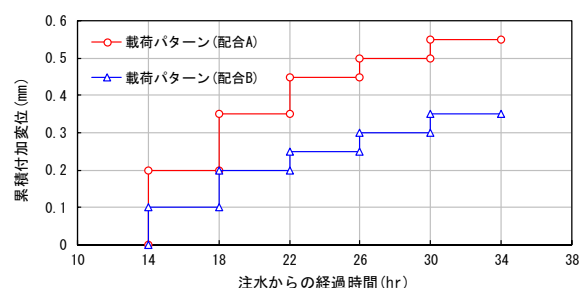


図-4 多段階応力緩和試験の载荷パターン

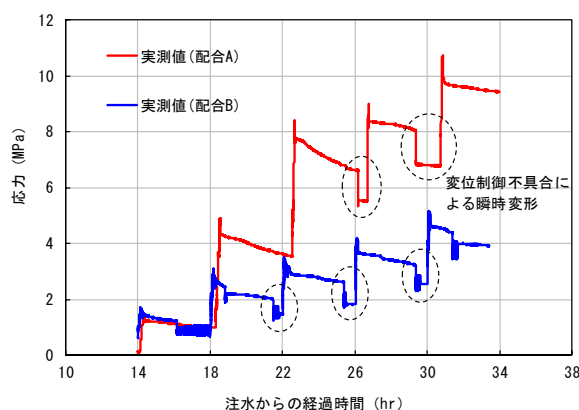


図-5 多段階応力緩和試験の結果

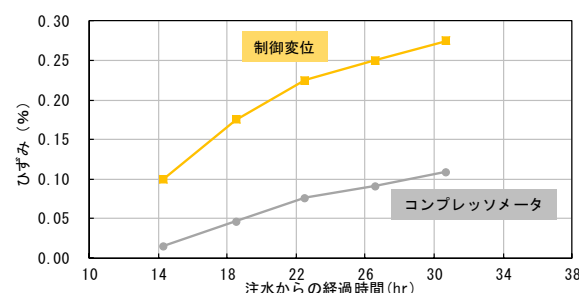


図-6 変位計測より求めたひずみ比較（配合 A）

(4) 多段階応力緩和試験結果

多段階応力緩和試験の結果を図-5に示す。载荷に伴う弾性的な挙動と変位保持中の応力緩和現象がみてとれる。なお、変位保持中に瞬間的に応力が低下している箇所があるが、これは変位制御不具合によるもので、瞬時変形

として評価することとし、補正等を行っていない。

また、配合 A の変位計測から求めた各载荷ステップにおける試験体のひずみを図-6 に示す。ひずみの評価は、試験機の剛性や供試体端面の影響が小さいと考えられるコンプレッソメータでの計測結果を採用し、試験体は弾性領域にあるものとみなし、後述する粘弾性特性の評価を行うこととした。

3. 多段階応力緩和試験の再現解析

(1) 解析条件

多段階応力緩和試験の再現解析の条件について述べる。解析コードは FLAC3D.ver6 を用いており、解析モデルは、図-7 に示す通りである。境界条件は、底面を完全拘束、上面は水平変位拘束としている。

コンクリートの力学モデルは、ばねとダッシュポットにより応力緩和と挙動が表現可能な粘弾性モデル（図-8）を採用した。解析ステップは、多段階応力緩和試験と同様に、4 時間ごとに変位付加と変位保持を繰り返すものとしている。再現解析では、図-3 より、変位付加時のヤング係数 E_s 、 E_k を求め、4 時間ごとに物性変更することで剛性発現を模擬している。 E_s は瞬時の応力変化を表すばねのヤング係数、 E_k は応力緩和を表すばねのヤン

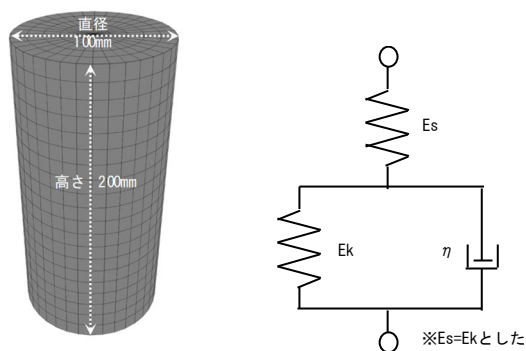


図-7 再現解析モデル図 図-8 力学モデル概念図

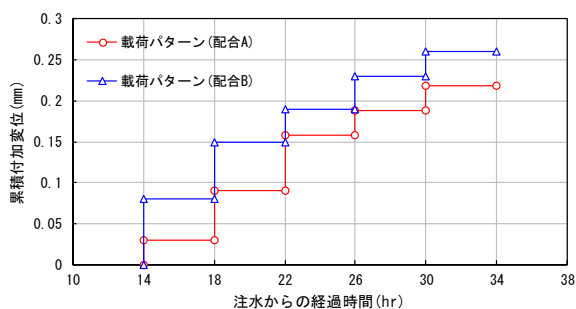


図-9 再現解析で付加する変位

グ係数であり、ここでは $E_s = E_k$ とした。したがって、再現解析において操作するパラメータは、粘性係数 η のみである。なお、粘性係数 η は、簡易的に一定の値としている。コンプレッソメータの計測結果から推定した再現解析で付加する変位を図-9 に示す。

(2) 再現解析結果

多段階応力緩和試験を粘弾性モデルで再現した結果を図-10、図-11 に示す。粘性係数 η は、谷ら⁹⁾の文献を参考に配合 A は $50 \text{ GPa} \cdot \text{hr}$ 、配合 B は $10 \text{ GPa} \cdot \text{hr}$ とした。また、粘弾性モデルの結果に対する比較として、配合 A の条件で、力学モデルを粘性挙動を考慮しない弾性体とした場合の結果（参考）も併せて示す。

粘弾性モデルの場合、変位付加の初期段階では、解析値と実測値が比較的良好一致を示している。後半の段階では、応力緩和傾向は、解析値と実測値で概ね類似しているが、応力の大きさは、解析値の方が大きくなる傾向となった。この要因は、特定できていないが、採用した力学モデルがコンクリートの塑性変形を考慮していない

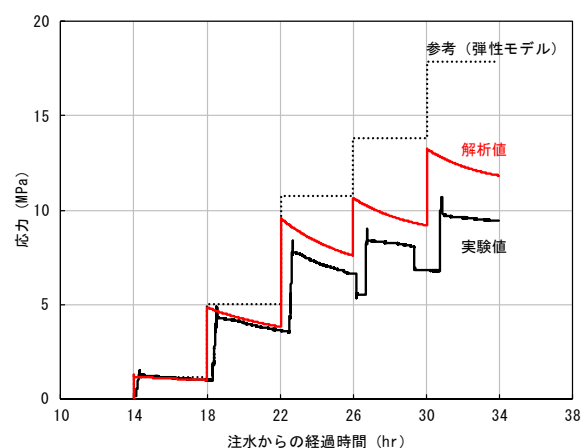


図-10 再現解析結果（配合 A）

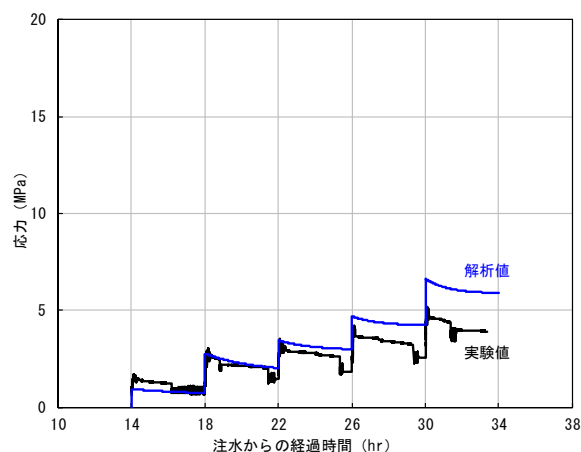


図-11 再現解析結果（配合 B）

ためと考えられる。一方，弾性モデルの場合は，解析で算定した応力が実測値を大きく上回る結果となる。したがって，吹付けコンクリートの挙動を解析的に表現するためには，図-8のような粘弾性モデルを仮定するか，あるいは，一般的な手法と同様に弾性体とし，粘性挙動も考慮した等価弾性係数を用いることが妥当であると言える。

4. 変形特性を反映した3次元逐次掘削解析

(1) 解析条件

前項により多段階応力緩和試験を比較的良好に再現できた力学モデルを用いて，円形トンネル掘削時における吹付けコンクリートの支保効果を3次元逐次掘削解析により検討した。解析には再現解析同様に有限差分法の解析コードFLAC3D.ver6を用い，吹付けコンクリートに粘弾性モデルを適用した。

解析条件を表-3に示す。円形トンネルの直径は10m（掘削外径），初期地圧は土被り200m相当の4.0MPa，側圧係数は1.0とした。支保部材は吹付けコンクリート（厚さ20cm）のみとした。地山は弾性モデルとし，表-4に示す物性値を用いた。解析ケースは，吹付けコンクリートのモデルとして設計基準強度の異なる配合A（超高強度吹付けコンクリート相当），配合B（従来の高強度吹付けコンクリート相当）の2種類に対し，粘弾性モデルと弾性モデルの2種類を想定した合計4ケースとし

表-3 解析条件

円形トンネル径	10m
初期地圧	4.0MPa
側圧係数	1.0
吹付けコンクリート厚さ	20cm

表-4 地山の物性値

ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 ν
1.0	0.3

表-5 吹付けコンクリートの物性値

解析ケース		粘性係数 η (GPa・hr)	ヤング係数 E_s, E_k (GPa)
配合A：超高強度 ($\sigma_k=100\text{N/mm}^2$)	粘弾性 モデル	50	表-6中に示す
	弾性 モデル	-	
配合B：高強度 ($\sigma_k=36\text{N/mm}^2$)	粘弾性 モデル	10	
	弾性 モデル	-	

た。各ケースの吹付け支保の物性値を表-5，表-6に示す。吹付けコンクリートの粘性係数 η は再現解析で決定した値を用いた。

解析モデルを図-12に示す。地山と吹付けコンクリートはソリッド要素を用いた。解析はモデル延長100mのうち80m地点まで全断面掘削し，モデル延長中央の50m地点での壁面変位および吹付け応力を抽出する。トンネルの掘進長は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，材齢試験のベ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。急結剤を添加した吹付けコンクリートによる室内試験²⁷⁾では，材齢6時間以下でヤング係数が1.0GPa以上発現している。そのため，数値解析を行う際

表-6 吹付けコンクリートの切羽離れに応じたヤング係数

切羽離れ (m)	材齢 (hr)	配合A 超高強度 ヤング係数 E_s, E_k (GPa)	配合B 高強度 ヤング係数 E_s, E_k (GPa)
1	6	1.0	0.1
2	12	4.5	0.6
3	18	12.8	5.3
4	24	18.6	8.6
5	30	23.1	11.2
・	・	・	・
・	・	・	・
i	$\sigma_i = 6i$	$20.25 \ln \sigma_i - 45.77$	$11.61 \ln \sigma_i - 28.28$
・	・	・	・
・	・	・	・
28	168	58.0	31.2
29	174	58.7	31.6
$30 \leq$	$180 \leq$	59.4	32.0

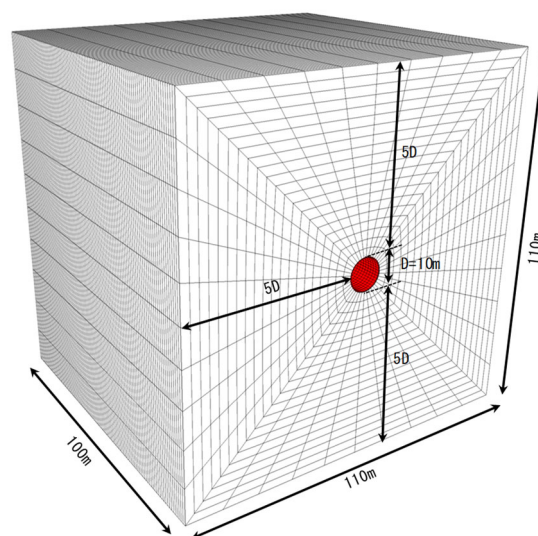


図-12 3次元逐次掘削解析モデル図

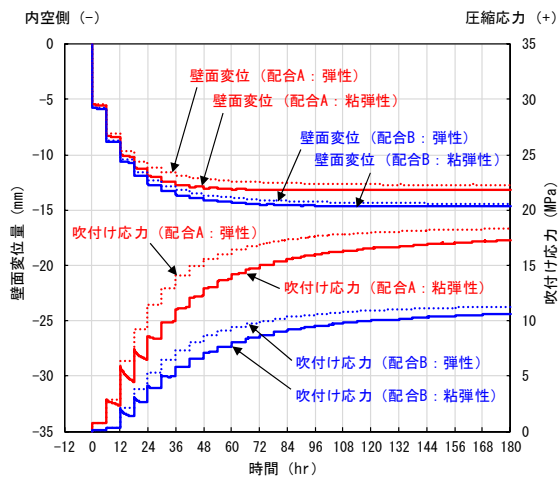


図-13 3次元逐次掘削解析結果

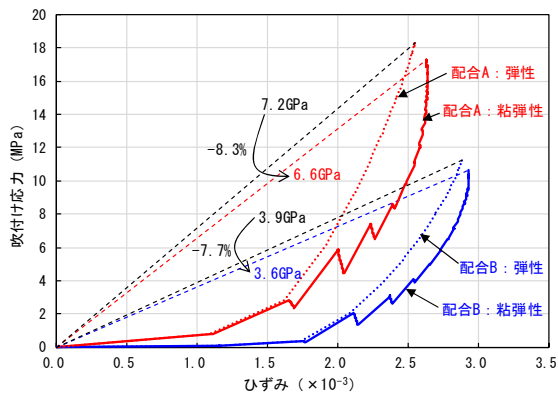


図-14 吹付けコンクリートの応力ひずみ関係の比較

には吹付け打設時（材齢 6 時間）のヤング係数 E_s , E_k は、配合 A で 1.0GPa, 配合 B で 0.1GPa とし、材齢 12 時間以降のヤング係数はベースコンクリートの室内試験による図-3 の対数関数を用いて設定した。

(2) 3次元逐次掘削解析結果

吹付けコンクリートの剛性発現およびクリープ特性を考慮した 3 次元逐次掘削解析の結果を図-13 に示す。粘弾性モデルの場合、材齢 30 時間（切羽離れ 5m）までの応力緩和傾向が大きく、同時に壁面変位が増加している。これは時間経過に伴う吹付けコンクリートによる支保内圧の減少により、その減少分を地山が負担したものと考えられる。また、材齢 30 時間（切羽離れ 5m）以降では時間経過とともに吹付け応力が微増しており、これは前述した切羽側の変形を受けたものと考えられる。粘弾性モデルと弾性モデルの比較では、粘弾性モデルの方が吹付け応力が小さく、壁面変位が大きいため、吹付けコンクリートのクリープ特性を考慮しないことは吹付け応力の過大評価、壁面変位の過小評価となる可能性を示

唆している。

また、3 次元逐次掘削解析から得られた吹付けコンクリートの応力ひずみ関係を図-14 に示す。切羽が十分離れた（3D 以上）位置での吹付け応力の最終値を累積ひずみで割った値を等価弾性係数とみなし、図中に示した。粘弾性モデルの場合、等価弾性係数は配合 A で 6.6GPa, 配合 B で 3.6GPa となった。配合 B の等価弾性係数は設計指針類⁸⁾⁹⁾に記載の値（4.0GPa や 3.4GPa）と同程度であり、超高強度吹付けコンクリートとして配合 A の等価弾性係数の値の妥当性を確認できたと考える。また、弾性モデルの等価弾性係数と比較すると、配合 A, 配合 B ともに粘弾性モデルの等価弾性係数は 1 割程度小さい。これはクリープ特性を考慮しない等価弾性係数の低減度合の 1 つの目安になると考える。

5. まとめ

本稿では、超高強度吹付けコンクリートの若材齢時における圧縮強度試験および多段階応力緩和試験を実施し、そこで得た挙動を解析的に再現することで超高強度吹付けコンクリートの解析パラメータの評価を試みた。さらに、超高強度吹付けコンクリートの剛性発現およびクリープ特性を考慮した 3 次元逐次掘削解析を実施し、解析パラメータの妥当性の確認を行った。

得られた結論を以下に示す。

- 1) 若材齢時の一軸圧縮強度試験により、超高強度吹付けコンクリートの一軸圧縮強度とヤング係数の経時変化を把握することができた。
- 2) 多段階応力緩和試験により、超高強度吹付けコンクリートの応力緩和現象を捉えることができた。
- 3) 多段階応力緩和試験の再現解析により、応力緩和現象を比較的良好に再現できる粘弾性パラメータを決定した。
- 4) 吹付けコンクリートの挙動を解析的に表現するためには、粘弾性モデルを仮定することが妥当である。
- 5) 数値解析において、吹付けコンクリートのクリープ特性を考慮しないことは、吹付け応力の過大評価、壁面変位の過小評価となる可能性がある。
- 6) 超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数を提案し、設計指針類から妥当性を確認した。
- 7) クリープ特性を考慮しない等価弾性係数の低減度合の目安を示した。

今後は、超高強度吹付けコンクリートを適用した実トンネルの計測データを収集し、モデル化方法や解析パラメータの妥当性を検証することで、超高強度吹付けコンクリート支保の設計技術の確立に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) H.Takeda, T.Kawaguchi, H.Yoshimoto, S.Fujiwara, K.Sato: Material properties and construction performance of ultra-high strength sprayed concrete, ITA WTC 2019 Congress and 45th general assembly, pp.3162-3171, 2019.
- 2) 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 Vol.128, pp.113-120, 2012.
- 3) 水野史隆, 川口哲生, 横畑友幹, 谷卓也: $\sigma_c=100\text{N/mm}^2$ 吹付けコンクリートのベースコンクリートによる多段階応力緩和試験, 土木学会第76回年次学術講演会, 2021. (投稿中)
- 4) 川口哲生, 武田均, 谷卓也, 水野史隆, 横畑友幹: 極若材齢における超高強度吹付けコンクリートの圧縮強度とヤング係数の発現性, 土木学会第76回年次学術講演会, 2021. (投稿中)
- 5) Kastner, H (金原弘訳): トンネルの力学, 森北出版, 1974.
- 6) 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講演論文集, pp.79-84, 2007.
- 7) 川口哲生, 武田均, 佐藤圭, 蓑宮芳和: 超高強度吹付けコンクリート(T-HPSC[®]100)の開発, 大成建設技術センター報, 第53号, pp.09-1-09-6, 2020.
- 8) 日本道路公団: トンネル数値解析マニュアル, 2002.
- 9) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008.

(2021. 8. 6 受付)

STUDY ON NUMERICAL ANALYSIS METHOD APPLYING DEFORMATION PROPERTY OF ULTRA-HIGH STRENGTH SHOTCRETE

Shohei NAGATA, Yuki YOKOHATA, Isamu OTSUKA,
Takuya TANI, Tetsuo KAWAGUCHI and Fumitaka MIZUNO

For construction of NATM tunnels in weak ground or under high ground pressure, drift advancing method or double support system have been adopted. Ultra-high strength shotcrete which is developed by our company has a uniaxial strength of 100 N/mm^2 after 28 days and can replace the conventional measures mentioned above. However, numerical analysis method for the design of tunnel supports using ultra-high strength shotcrete has not been established. In the paper, we conducted uniaxial compression tests and multi-step stress relaxation tests of ultra-high strength shotcrete at early-age and evaluated analytical parameters by reproducing the observed behavior in numerical analysis. In addition, we confirmed validity of the analysis parameters by performing three-dimensional excavation analysis reflecting stiffness development with time and creep characteristics of ultra-high strength shotcrete.