

超高強度吹付けコンクリートの変形特性に関する解析的検討

大成建設（株）土木設計部 正会員 ○横畑 友幹・中野渡 博道・大塚 勇
大成建設（株）技術センター 正会員 谷 卓也・川口 哲生・水野 史隆

1. はじめに

大土被りで低強度の地山にトンネルを掘削する場合、大きな変位や支保工の破壊が生じる懸念があり、多重支保工や導坑先進工法などの対策を余儀なくされることがある。当社で開発した超高強度吹付けコンクリート¹⁾は、材齢28日で圧縮強度 100N/mm^2 に達することから、これを用いた支保工の適用は、従来の対策を代替する手段になり得ると考えている。ただし、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には、従来用いられている剛性変化やクリープ変形を考慮した等価弾性係数²⁾を改めて評価することが重要であるように思われる。本稿では、吹付けコンクリートを粘弾性体と仮定し、多段階応力緩和試験³⁾の挙動を有限差分解析により再現することで、粘弾性パラメータの評価を試みた。さらに、トンネル掘削時に吹付けコンクリートに生じる応力ひずみ関係から、超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数算定に関する検討を行った。

2. 多段階応力緩和試験の再現解析の条件

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、試験方法は、谷ら³⁾の既往研究を参考としている。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成している。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いためである。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。また、別途、材齢ごとの圧縮強度試験を実施している。試験の詳細は、水野ら⁴⁾川口ら⁵⁾の文献を参照されたい。

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-1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挙動が表現可能な粘弾性モデル（図-2）を採用した。解析ステップは、試験⁴⁾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。図-3に材齢毎の圧縮強度試験より得られたヤング係数（割線弾性係数）と材齢の関係を示す。これらの関係は、対数関数として良い近似が得られる。再現解析では、同図より、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。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。

表-1 配合表

配合	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	混和材	繊維
配合A: 超高強度 ($\sigma_{c3} = 100\text{N/mm}^2$)	192	1064	722	485	10.6	2.25
配合B: 高強度 ($\sigma_{c3} = 36\text{N/mm}^2$)	202	450	1025	688	6.75	2.25

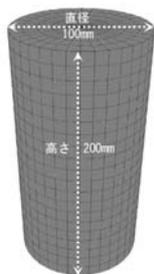


図-1 再現解析モデル図

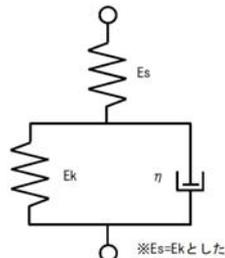


図-2 力学モデル
概念図

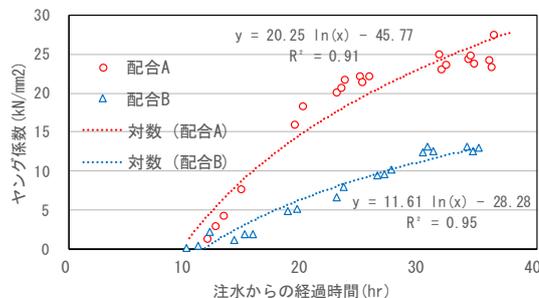


図-3 ヤング係数の時間変化

キーワード 超高強度吹付けコンクリート, 応力緩和, 粘弾性, 有限差分解析

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル) 大成建設株式会社 TEL 03-5381-5296

なお、粘性係数は、簡易的に一定の値としている。再現解析で付加する変位を図-4に示す。

3. 再現解析の結果および等価弾性係数算定に関する検討

(1) 多段階応力緩和試験の再現解析の結果

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-5, 6に示す。粘性係数は、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、こ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い一致を示している。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、コンクリートの破壊の影響等が考えられる。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-2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。

(2) 超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数算定に関する検討

ここまでの結果を基に、超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数算定に関する検討を行った。はじめに、初期地圧 4.0MPa （土被り 200m 相当）、変形係数 1.0GPa 、ポアソン比 0.3 の弾性地山に直径 10m のトンネルを素掘り掘削した際の壁面ひずみを 3次元逐次掘削解析で求めた。次に、図-1のモデルに、このひずみを与え、吹付けコンクリートに発生する応力を求めた。本検討では、このようにして求めた応力の最終値を累積のひずみで割った値を等価弾性係数とみなした。切羽進行は $6\text{hr}/\text{m}$ （=変位保持期間）と仮定し、吹付けコンクリートの粘弾性パラメータは、再現解析で評価した値としている。図-7に各配合の吹付けコンクリートの応力ひずみ関係を示す。配合 A は 10.4GPa となり、配合 B は 4.8GPa となる。配合 B は設計指針類²⁾に記載の値と同程度であり、配合 A は超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数の値として目安となると考える。

4. まとめ

本稿では、多段階応力緩和試験の再現解析を行い、その結果を基に、超高強度吹付けコンクリートの等価弾性係数算定に関する検討を行った。今後、実トンネルで計測データを収集し、吹付けコンクリートのモデル化方法とパラメータ評価に関する妥当性を検証したい。

参考文献

- 1) H. Takeda et. al: Material properties and construction performance of ultra-high strength sprayed concrete, ITA WTC 2019 Congress and 45th general assembly, pp. 3162-3171, 2019
- 2) 日本道路公団: トンネル数値解析マニュアル, p. 12, 2002. 3
- 3) 谷ら: 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. 128pp. 113-120, 2012
- 4) 水野ら: $\sigma_c=100\text{N}/\text{mm}^2$ 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)
- 5) 川口ら: 超高強度吹付けコンクリートの極若材齢における圧縮強度とヤング係数の発現特性, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021 (投稿中)

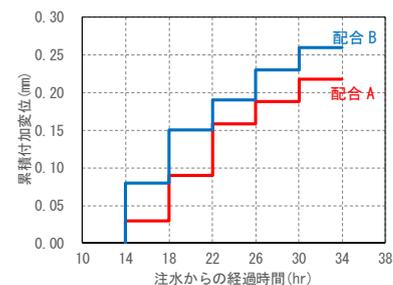


図-4 荷重パターン

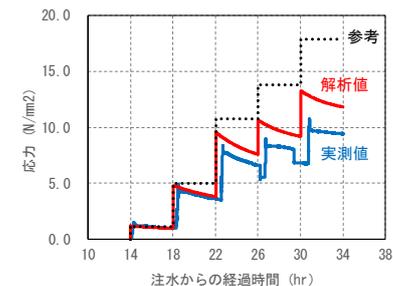


図-5 再現解析結果 (配合 A)

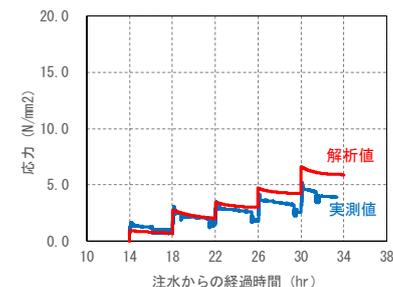


図-6 再現解析結果 (配合 B)

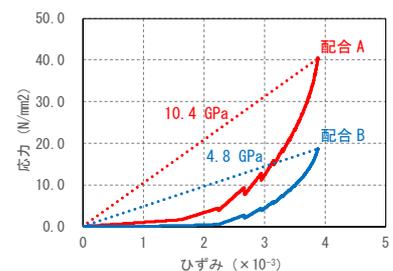


図-7 吹付けコンクリートの
応力ひずみ関係の比較