

吹付けコンクリートの時間依存性を考慮した支保設計手法の検討

大成建設（株） 土木設計部 正会員 〇田島 幸之輔・長田 翔平・幅下 大地・志村 和宏・大塚 勇

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、等価弾性係数（みかけのヤング係数）を使用した評価¹⁾（以下、「従来法」と呼称）を行っているのが現状である。本稿では、吹付けコンクリートの材齢に応じた剛性やクリープ特性といった時間依存性を考慮した三次元逐次掘削解析による支保設計手法（以下、「提案法」と呼称）を用いて、実トンネルの挙動を再現することにより、提案法の妥当性を評価した。また、提案法により、トンネル掘削における地山物性値や初期応力、施工方法などの諸条件に応じた適切な等価弾性係数を提案する。

2. 吹付けコンクリートの時間依存性を考慮した支保設計手法

提案法における吹付け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-1）を採用する。粘弾性パラメータは既往研究²⁾を参考に、図-2 に示す近似曲線および粘性係数 η にて剛性発現・粘性挙動を評価する。三次元逐次掘削解析は有限差分法の解析コード FLAC3D, ver7 を用いる。

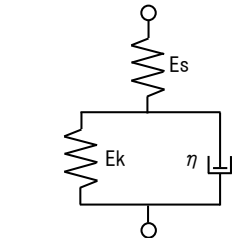


図-1 力学モデル概念図

3. 実トンネルの再現解析

実トンネル 5 現場（表-1）の変位計測結果および吹付けコンクリート応力計測結果をもとに、従来法および提案法により再現解析を実施した。再現解析結果を図-3 に示す。なお、地山物性および側圧係数は変位計測結果に基づいた事前の逆解析により同定した。

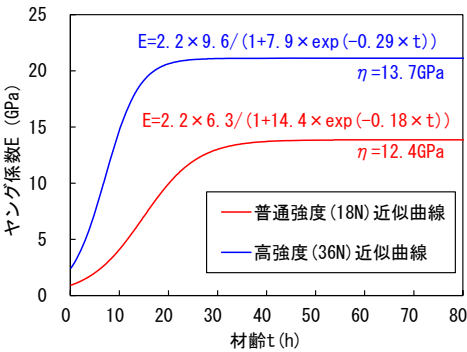


図-2 ヤング係数の時間変化

表-1 再現解析の対象トンネル

トンネル種別	A トンネル	B トンネル	C トンネル	D トンネル	E トンネル
トンネル径 (m)	15.5	12.4	10.9	6.4	4.7
地山の弾性係数 (MPa)	28	900	23,000	890	4,000
側圧係数	1.10	1.20	1.94	0.63	1.00
土被り (m)	38	36	650	22	350

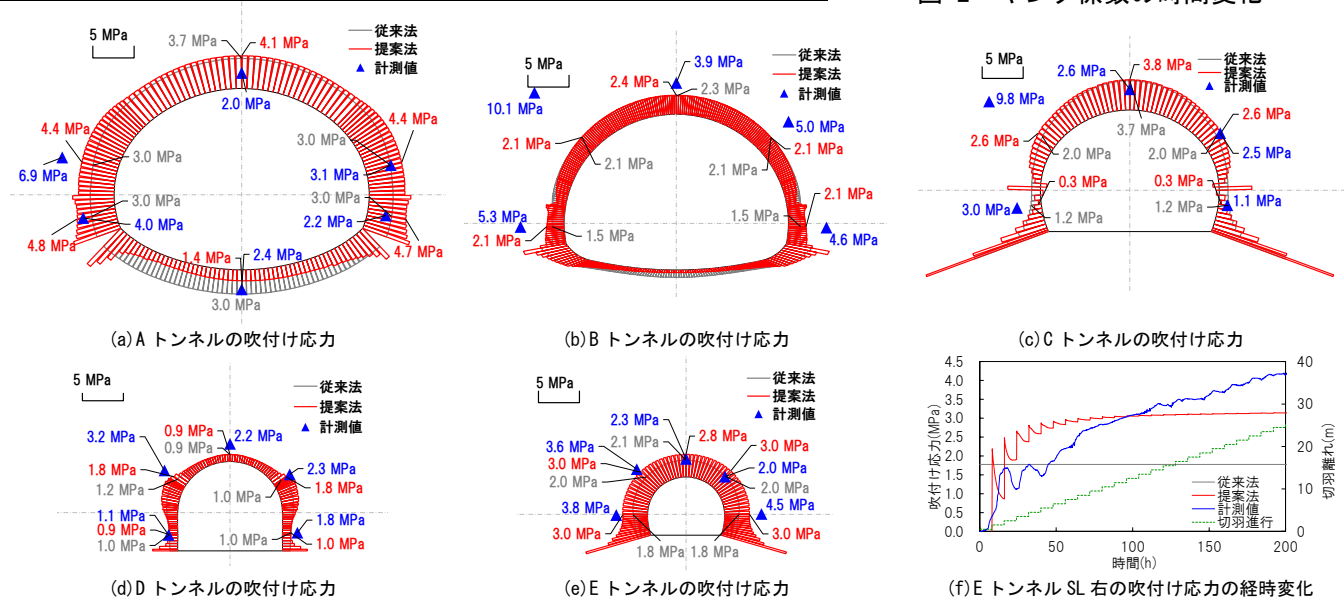


図-3 再現解析結果

キーワード 山岳トンネル，吹付けコンクリート，粘弾性，応力緩和

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 T E L 03-5381-5296

再現解析の結果、従来法に比べて、提案法の方が吹付けコンクリート応力は大きい傾向であり、計測値とも比較的整合しているが、提案法が一概に計測値を再現できているとは言えない結果となった。これは、図-3(f)に示すように、切羽が十分離れた後も吹付け応力の増加傾向が見られるため、解析では表現できない地山のクリープ現象によるものと考えられる。ただし、提案法は計測値に見られる吹付けコンクリートの硬化過程における応力緩和挙動を評価できている。提案法は従来法では評価できない硬化初期の挙動を再現できる有用な手法である。

4. 諸条件に応じた適切な等価弾性係数の提案

提案法は吹付け応力を硬化初期から忠実に再現できる解析手法であるが、多くの解析パラメータを必要とし、三次元モデルのため解析時間を要する。実務においては二次元モデルで等価弾性係数を用いた従来法による比較的短時間で検討可能な解析手法で吹付け応力を評価できることが望まれる。しかし、吹付けコンクリートの等価弾性係数は一意に定まるもの¹⁾ではなく、地山物性値や初期応力、施工方法などの諸条件により適切に設定することが望ましいと思われる。そこで、提案法を用いて、トンネル径や土被り、地山の変形係数、サイクルタイム、吹付けコンクリート強度に対してパラメトリックスタディを実施し、その結果から諸条件に応じた適切な等価弾性係数を提案する。

パラメトリックスタディに用いる解析モデルを図-4、諸条件を表-2に示す。解析モデル中央位置の吹付け応力最大値／累積ひずみ＝等価弾性係数（図-5）と整理し、全ての解析結果を近似式によりフィッティングする。パラメトリックスタディの結果、等価弾性係数の近似式は下式で整理した。

$$E_c = E_{cfin} \times \exp(\alpha \times T^\beta) \quad T: \text{サイクルタイム (h)}$$

$$E_{cfin} = 2900(18N \text{ の場合}) \text{ or } 3700(36N \text{ の場合})$$

$$\alpha = \frac{-412}{D^{1.3} \times E^{0.405}} \quad D: \text{トンネル径 (m)} \\ E: \text{地山の弾性係数 (MPa)}$$

$$\beta = 1.07 \times 10^{-4} \times E + (0.056 \times D - 1.4)$$

解析結果より整理した諸条件における等価弾性係数の大小関係を図-6に示す。時間依存性を考慮した提案法による解析結果では、トンネル径、地山の変形係数、サイクルタイム、吹付けコンクリート強度が大きいほど等価弾性係数は大きくなり、土被りによる差はなかった。これらは、図-7に示すように、吹付けコンクリート硬化初期の応力緩和傾向が大きいいため、最終ひずみに対して硬化初期に作用するひずみが相対的に大きいほど応力緩和の影響が支配的になることにより、等価弾性係数が小さくなると考えられる。以上より、等価弾性係数の近似式はトンネル径、地山の変形係数、サイクルタイム、吹付けコンクリート強度の関数とすることで、トンネル掘削における諸条件に応じた適切な等価弾性係数を設定することができる。

5. まとめ

本稿では、再現解析から時間依存性を考慮した提案法の妥当性評価を行い、諸条件に応じた適切な等価弾性係数を提案した。今後は施工データを蓄積・分析し、支保設計の合理化に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル，2002。
- 2) 谷卓也ら：トンネル吹付けコンクリートの支保効果に関する検討，土木学会第63回年次学術講演会，3-321，2008。

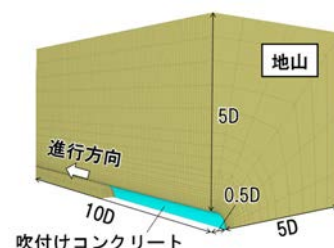


図-4 解析モデル図

表-2 諸条件

条件	小	中	大
D: トンネル径 (m)	5	10	15
H: 土被り (m)	10	50	200
E: 地山の弾性係数 (MPa)	150	1000	5000
T: サイクルタイム (h)	6	12	24
F: 吹付けコンクリートの設計基準強度 (N/mm ²)	-	18	36

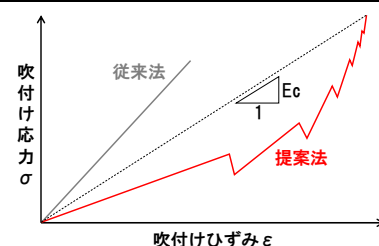


図-5 等価弾性係数の整理方法

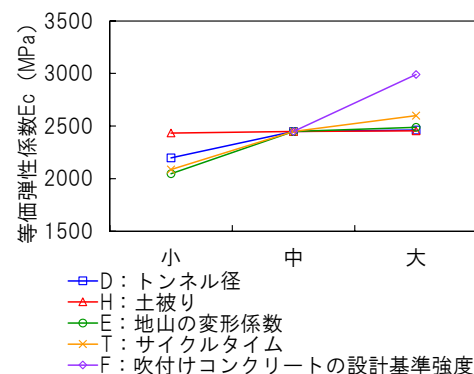


図-6 諸条件における等価弾性係数の大小関係

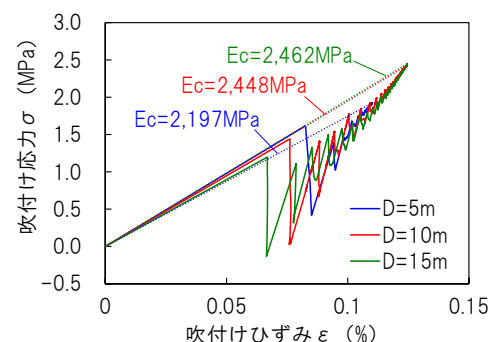


図-7 応力-ひずみ関係の比較