

支保剛性の材齢変化を考慮した山岳トンネル支保工の力学的挙動に関する一考察

(独) 土木研究所 正会員 ○淡路動太・砂金伸治・日下敦・河田皓介

1. はじめに

近年、トンネル建設の合理化を図る目的で、一掘進長の延伸や高速掘進などが検討されてきている。こうしたケースでは、掘削後の早い段階で若材齢時の吹付けコンクリートに大きな応力が作用する可能性があることになる。そこで、本稿では吹付けコンクリートの材齢変化を考慮した支保剛性を用いて簡単な理論計算を行い、トンネル掘削初期における支保工の力学的挙動について考察を行った。

2. 支保剛性の材齢変化を考慮した簡易計算

(1) 概要

支保剛性の材齢変化を考慮するために、各掘削ステップで吹付けコンクリートのヤング係数を求め、鋼アーチ支保工との合成支保部材としての剛性を求める。地山は D I 相当¹⁾の弾性体とし、土被り $h=60\text{m}$ で半径 $r=5\text{m}$ の円形トンネルを掘削するモデルを採用する。計算に用いた地山物性値を表-1、計算条件を表-2、支保部材仕様を表-3、鋼アーチ支保工の物性値を表-4 に示す。なお、以下の計算では、すべて圧縮側を正とする。

(2) 吹付けコンクリートの材齢変化のモデル化

吹付けコンクリートの各材齢における基準強度を表-3 に示す。吹付けコンクリートは標準強度(N18)、高強度(H36)、および材齢 1 日未満で高強度(H36)と同程度の強度発現を持ち、最終強度は標準強度(N18)と同程度となる初期高強度(H18)の 3 パターンを設定した。材齢 $t=1\sim 28$ 日では σ_1 と σ_{28} の間で対数近似を行い、材齢 $t=3h\sim 1$ 日では σ_{3h} と σ_1 の間で線形近似を行うことで一軸圧縮強度 $fc(t)$ を定めた。吹付けコンクリートのヤング係数 $Ec(t)$ は、材齢 $t=1$ 日以降を建築学会構造基準式に従い $Ec(t) = 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{fc(t)}$ で換算し、材齢 1 日未満は線形増加するものと仮定し、 $Ec(t) = Ec(1) \cdot t$ で換算を行った。計算に用いた吹付けコンクリートの一軸圧縮強度の材齢変化を図-1、ヤング係数の材齢変化を図-2 に示す。

(3) 応力解放過程のモデル化

ここでは側圧係数 $\alpha = 1$ の等方的な初期応力 P_0 がトンネル掘削に伴って解放されるものと仮定する。応力解放率 $\beta = 0.4$ として $\beta \cdot P_0$ が支保工設置前に解放され、残りの $(1 - \beta) \cdot P_0$ が地山と支保工で分担されるものとする。支保工と地山に作用する応力は、トンネル掘削の三次元的な効果を考慮し、切羽距離 $x=20\text{m}(=4r)$ までの間で順次、図-3 に示す解放応力 $P(x)$ にしたがって作用するものとする。

(4) 支保部材の発生する応力の計算

支保工は吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成部材として、各材齢 t における支保剛性 $Kcs(t)$ を以下の式で求める。

$$Kcs(t) = \frac{Ac \cdot Ec(t) + As \cdot Es}{r}$$

表-1 地山物性値

地山等級	単位体積重量 γ [kN/m ³]	変形係数 E [GPa]	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G [GPa]
D I	22	0.500	0.35	0.185

表-2 円形トンネルモデルの計算条件

土被り h [m]	初期応力 P_0 [kPa]	トンネル半径 r [m]	側圧係数 α	応力解放率 β
60	1320	5	1	0.4

表-3 吹付けコンクリートの仕様

	名称	吹付けコンクリート一軸圧縮強度 σ_{3h} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_{28} [MPa]	断面積 Ac [m ²]	サイクル長 dc [m]
標準コンクリート	N18	1	5	18	0.15	1
高強度コンクリート	H36	2	10	36	0.15	1
初期高強度コンクリート	H18	2	10	18	0.15	1

表-4 鋼アーチ支保工の物性値

名称	材質	弾性係数 Es [GPa]	断面積 As [m ²]	降伏応力 fy [MPa]	降伏時歪 ϵ_y [μst.]	建込み ds [m]
H-125	SS400	205	3.00×10^{-3}	245	1195	1

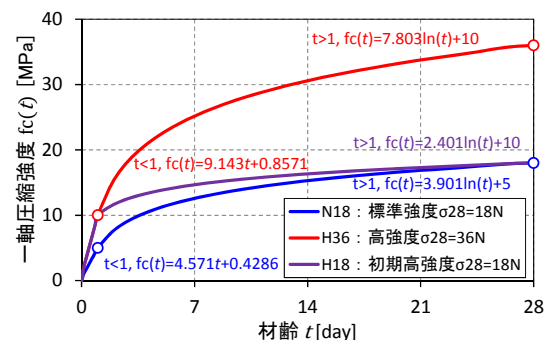


図-1 各材齢の吹付けコンクリート一軸圧縮強度

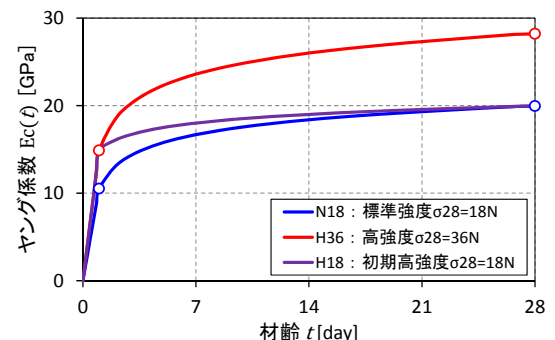


図-2 各材齢の吹付けコンクリートヤング係数

キーワード 山岳トンネル、支保剛性の材齢変化、支保内圧、高強度吹付けコンクリート

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (独) 土木研究所 道路技術研究グループ TEL: 029-879-6791

切羽距離 $x=1$ を初期値として、支保を設置してから $3h(=0.125\text{day})$ 後に次の掘削を開始すると仮定し、サイクルタイム Ch [h/m] に応じて、各ステップの材齢を $t[\text{day}] = 24Ch \times (x-1) + 0.125$ で換算する。これらを用いて、周方向の軸ひずみ $\varepsilon(x)$ 、吹付けコンクリート応力 $\sigma_c(x)$ 、鋼アーチ支保工応力 $\sigma_s(x)$ および支保内圧 $P_{cs}(x)$ は以下の式で求められる。

$$\varepsilon(x) = \sum_{k=2}^x \frac{P(k) - P(k-1)}{2G + Kcs(t)}$$

$$\sigma_c(x) = \sum_{k=2}^x Ec(t) \{ \varepsilon(k) - \varepsilon(k-1) \}, \quad \sigma_s(x) = Es \cdot \varepsilon(x)$$

$$P_{cs}(x) = \frac{Ac \cdot \sigma_c(x) + As \cdot \sigma_s(x)}{r}$$

3. 計算結果と考察

図-4 に吹付けコンクリート応力に関する計算結果を示す。サイクルタイムの速いケース ($Ch=4[\text{h/m}]$) では、サイクルタイムの遅いケース ($Ch=12[\text{h/m}]$) に比べて吹付けコンクリートの剛性が低い段階で掘削を行うため、全般的に発生応力が小さくなっている。ただし、標準強度 (N18) と高強度 (H36) では、 $Ch=12[\text{h/m}]$ に比べて $Ch=4[\text{h/m}]$ のケースで、吹付けコンクリートの各掘削段階の軸圧縮耐力 (一軸圧縮強度) に対する応力の発生率 (図-5) が高くなっている。このことは、急速施工等で吹付けコンクリートが若材齢のうちに掘削を進めると、吹付けコンクリートの発生応力は小さくなるが圧縮耐力には近付きやすいことを示唆している。

吹付けコンクリートの初期剛性が高くなるケース (H18, H36) では、標準強度 (N18) に比べて吹付けコンクリートの発生応力が高くなっている (図-4)。一方、図-6 に示す鋼アーチ支保工応力の挙動は、初期剛性の高い H18, H36 に比べて、N18 における鋼アーチ支保工の発生応力が相対的に高くなっており、標準強度 (N18) の吹付けコンクリートの軸力分担率が低くなる傾向が認められる。しかし、最終強度が異なる H18 と H36 を比較すると吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工のいずれの発生応力も、ほぼ同程度である (図-4, 図-6)。つまり、支保工に作用する応力は掘削初期が主であるため、その後の剛性の違いは吹付けコンクリートの発生応力への影響を小さいと考えられる。同様に、図-7 に示す地山特性曲線と支保内圧の関係を見ると、初期剛性の高い H18, H36 では支保内圧曲線の傾きが標準強度に比べて高くなり、軸方向ひずみを抑制する効果が認められるが、H18 と H36 の違いは顕著ではない。すなわち、支保工応力および支保内圧の挙動は掘削初期段階の支保剛性が支配的であり、最終的な支保剛性の影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

支保剛性の材齢変化を考慮したトンネル掘削による支保部材の応力挙動に関する簡易計算を行い、掘削初期段階の支保剛性が支保工の力学的挙動に支配的であることが確認された。ただし、実現現象でのトンネル作用応力や材齢変化は複雑であること、吹付けコンクリートの初期強度発現は圧縮耐力だけでなく、地山との付着性を確保し岩塊の抜け落ちを防止する効果等も期待されていることから、今後は実測データや数値解析等による総合的な評価を行い、掘削初期の支保工の役割について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル，1998。

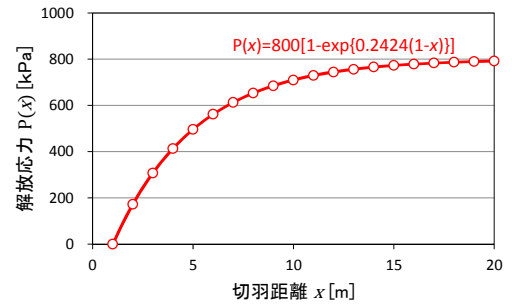


図-3 切羽距離と载荷応力の関係

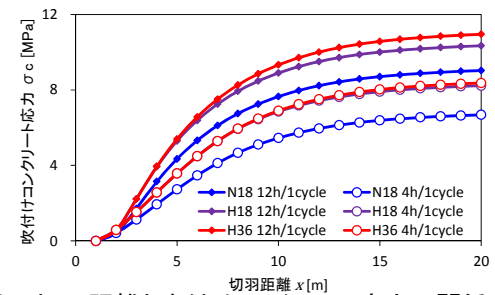


図-4 切羽距離と吹付けコンクリート応力の関係

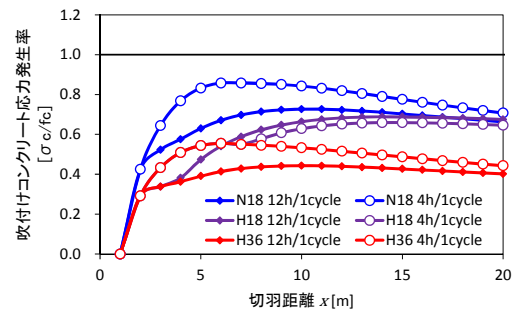


図-5 吹付けコンクリートの応力発生率

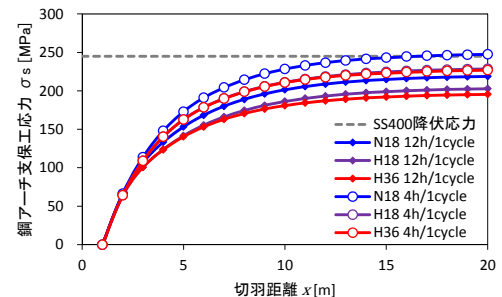


図-6 切羽距離と鋼アーチ支保工応力の関係

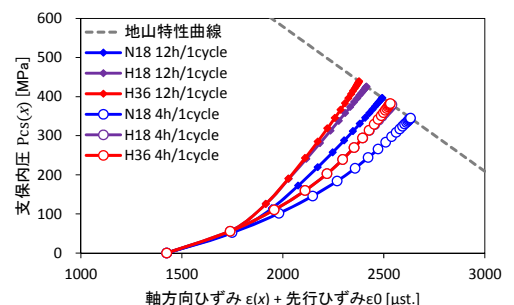


図-7 地山特性曲線と支保内圧の関係