

鋼製支保工の降伏時における剛性低下を考慮した支保設計事例

鹿島建設株式会社 正会員 ○北村 義宜 山岸 隆史 横尾 敦

1. はじめに

土被りが大きくかつ脆弱な地山を掘削すると、応力再配分によりトンネル周辺地山の塑性化が進展し、トンネル支保部材に多大な荷重が作用する。このとき、鋼製支保工と吹付けコンクリートの発生断面力がそれぞれ降伏強度および耐力を超過すれば、トンネルに変状が発生する。しかし鋼製支保工が降伏しても吹付けコンクリート軸力が耐力より低く、かつ変形が小さい状況が保たれれば、トンネルの安定性は確保できる。

本文では鋼製支保工が降伏し剛性低下を起こした場合に、吹付けコンクリートおよび地山に応力が再分配される状況を模擬したトンネル挙動の予測手法を提案し、この手法を用いて支保設計を実施した事例を紹介する。

2. 鋼製支保工が降伏する場合のトンネル挙動予測手法

FEM によるトンネル掘削解析にて鋼製支保工が降伏する際の挙動予測手法は表 1 に示す 3 種に大別される。これらの手法のうち C:鋼製支保工の剛性低下 が鋼製支保工降伏時におけるトンネル挙動を精度よく再現することができる。

表 1 鋼製支保工が降伏する場合のトンネル挙動予測手法

評価手法	A:降伏超過応力の非考慮	B:降伏超過応力の吹付け負担	C:鋼製支保工の剛性低下 (今回提案)
支保評価の考え方	鋼製支保工の降伏超過応力および剛性低下による吹付けコンクリートへの影響を無視する	鋼製支保工の剛性低下は考慮しないが、降伏超過応力を手計算で吹付けコンクリートに直接負担させる	鋼製支保工の剛性低下を考慮し、降伏超過応力を吹付けコンクリートと周辺地山に分担させる
応力・ひずみの評価 鋼製支保工			
配分イメージ 降伏超過応力 鋼製支保工			
評価方法の特徴	吹付け 鋼製支保工の降伏超過応力を吹付けコンクリートに負担させないため、吹付け応力が過小評価される	吹付け 鋼製支保工の降伏超過応力すべてを吹付けに負担させるため、吹付け応力は過大評価される	吹付け 鋼製支保工の降伏超過応力の一部を地山が負担することを考慮できるため、適切な吹付け応力が求められる
	トンネル 鋼製支保工は降伏応力超過後も剛性が不変のため、トンネル変形量も過小評価する	トンネル 鋼製支保工は降伏応力超過後も剛性が不変のため、トンネル変形量も過小評価する	トンネル 鋼製支保工降伏後における剛性低下を考慮するため、適切な変形量が求められる
	×	△	○

3. 鋼製支保工の剛性低下を考慮した支保設計

北海道開発局 一般国道 40 号音威子府トンネル工事では、土被り 200～315m の区間に蛇紋岩が出現し、支保部材に大きな荷重が作用すると想定された。そこで鋼製支保工の剛性低下を考慮した FEM 解析を実施し、合理的な支保パターンを選定した。

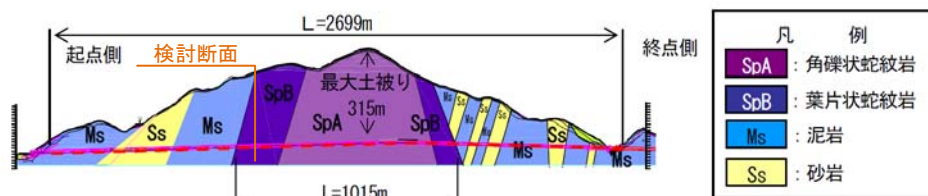


図 1 地質縦断面図

キーワード：FEM 解析, 鋼製保工の降伏, 剛性低下, 蛇紋岩

連絡先：〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 Tel：03-6229-6614 Fax：03-5561-2156

図 2 に示す二重支保工の設置を模擬し、図 3 に示す解析ステップを用いて吹付けコンクリート応力と坑内変位量を求めた。本検討で用いた解析用物性値を表 2～4 に示す。

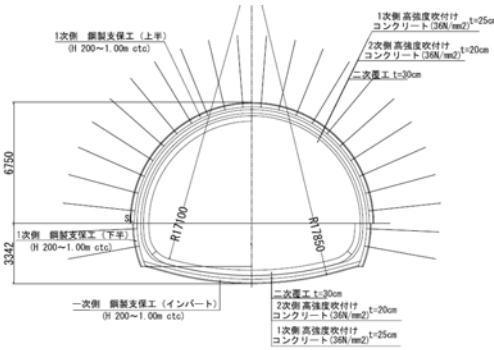


図 2 採用した支保パターン

表 2 地盤物性値 (地質調査結果に基づく設定値)

土被り H(m)	変形係数 E (kN/m ²)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン 比 ν ₀	粘着力 C(kN/m ²)	内部 摩擦角 φ(°)	側圧 係数 K ₀
270	3.00×10 ⁵	24.7	0.33	400	20	1.0

表 3 吹付けコンクリート物性値

吹付け厚 t(cm)	設計基準強度 f'ck(N/mm ²)	変形係数 E(kN/m ²)	ポアソン比 ν	断面積 A(m ²)
25	36	6.00×10 ⁶	0.2	0.25
20				0.2

表 4 鋼製支保工物性値

部材	変形係数 E(kN/m ²)	ポアソン比 ν	断面積 A(m ²)	断面二次 モーメントI(m ⁴)	降伏応力 σ _{sy} (kN/m ²)
H-150	2.10×10 ⁸	0.3	3.965×10 ⁻³	1.62×10 ⁻⁵	2.4×10 ⁵
H-200			6.353×10 ⁻³	4.72×10 ⁻⁵	

解析結果を表 5 に示す。吹付けコンクリート発生応力と坑内変位量が照査基準を満足する結果が得られたため、同支保パターンにて蛇紋岩区間の施工を開始した。

4. 再現解析による挙動予測手法の検証

現地計測結果をもとに地盤変形係数、側圧係数および上半一次支保設置時 (ステップ 3) の掘削解放率をパラメータとした FEM 解析を実施し、鋼製支保工の剛性低下によるトンネル挙動の再現性を確認した。

① 鋼製支保工軸力および吹付け応力の測定結果

鋼製支保工軸力の測定結果を図 4 に示す。天端付近で 2600kN の軸力 (発生応力約 400N/mm²) に相当するひずみが発生しており、鋼製支保工は降伏しているものと判断される。一方、表 6 に示すように吹付け応力は設計基準強度を下回っており、支保の健全性は確保されている。

② 再現解析結果

表 7 に示す条件に変更して解析を行ったところ、表 8 に示すようにトンネル変形量と吹付けコンクリートの発生応力を精度よく再現することができた。

5. まとめ

本報告ではトンネル支保部材に大きな荷重が作用して鋼製支保工が降伏する場合には、鋼製支保工の剛性低下を考慮した FEM 解析を実施することで、合理的な支保パターンの選定が可能であることを示した。本報告が同種工事の参考となれば幸いである。

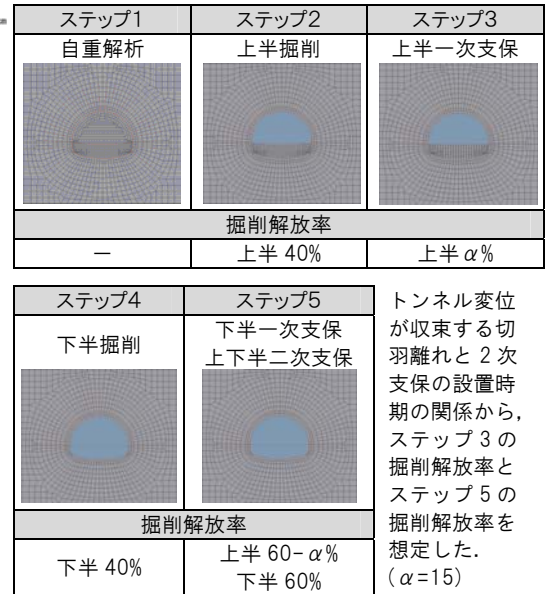


図 3 解析ステップ

表 5 解析結果と照査基準の比較

吹付け応力 (N/mm ²)	一次側	二次側	照査基準
	33	22	36 (設計基準強度)
鋼製支保工 応力 (N/mm ²)	一次側	照査基準	
	240 (降伏)	240 (鋼材降伏応力)	
坑内変位量(mm)			
天端沈下	内空変位	照査基準	
57	134	天端沈下 75 内空変位 150	限界ひずみの 平均値より算定

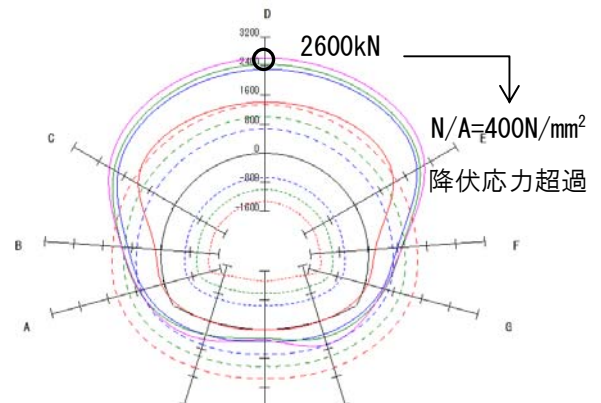


図 4 鋼製支保工軸力測定結果

表 6 吹付け応力測定結果

吹付けコンクリート応力計測値(N/mm ²)	
一次側最大	二次側最大
16.9	2.0

表 7 再現解析より推定した解析条件

土被り H(m)	変形係数 E (kN/m ²)	側圧係数 K ₀	掘削解放率 α
250	13.3×10 ⁵	0.96	55

表 8 推定解析結果と計測結果の比較

天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)	吹付け応力(N/mm ²)	
		一次側	二次側
22 (22)	32 (32)	15.3 (16.9)	2.4 (2.0)

上段: 推定解析結果 下段: 現地計測結果