

線路下を横断する山岳トンネル工法の補助工法の選定

東日本旅客鉄道（株） 東北建設プロジェクトマネジメントオフィス 正会員 ○田村 将基
 東日本旅客鉄道（株） 東北建設プロジェクトマネジメントオフィス 正会員 大塚 隆人
 東日本旅客鉄道（株） 東北建設プロジェクトマネジメントオフィス 正会員 丸子 文之

1. はじめに

当社では小土被りの線路下横断工において山岳トンネル工法を適用した事例がない。列車の安全・安定輸送を確保し、線路下で山岳トンネルの掘進を可能とするための最適な補助工法について、FEM 解析及び、土被り、地質条件、施工実績等を総合的に勘案し、検討した内容について報告する。

2. 地質条件

今回検討を行う箇所を地質条件を図-1、図-2 に示す。下り線交差部はトンネル天端付近に岩層なだれ堆積層が確認された。上り線交差部はトンネル天端付近に花崗閃緑岩や清水町層の砂岩が確認された。

岩層なだれ堆積層については、ボーリング調査を実施しているものの、物性値のばらつきが大きい層（地質調査の結果からN値4~50以上）であり、地質の評価

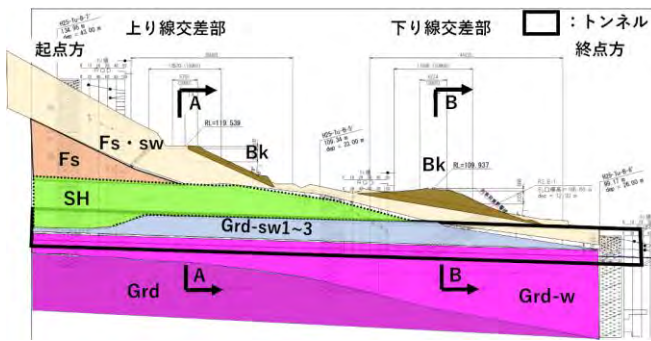


図-1 地質縦断面図

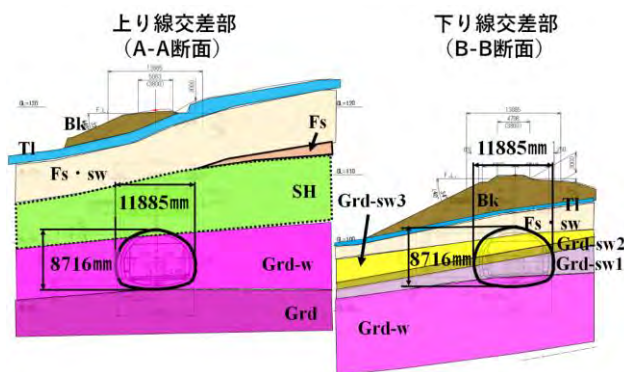


図-2 地質断面図

が非常に困難であった。そこで、なだれ堆積層の均質化・一体化を図るべく、列車影響を受ける範囲については薬液注入工法を実施することとした。

3. 解析による検討

トンネル直上の軌道への影響を、二次元有限要素解析（以下、FEM 解析）により確認を行った。

3-1 解析条件

地山・支保工物性値と解析ケースを表-1~表-3、図-3 に解析モデルを示す。解析領域は境界条件による影響が無視できる範囲として、トンネル側方に5D（D：掘削径）、下方に1Dの幅を確保する。

解析手法として、CASE1、CASE2 は一般的な等価剛性モデルを用い、CASE3 では長尺鋼管先受工により、上載荷重を支持する効果を再現するため、線形骨組解析に

表-1 地山物性値

層名	単位堆積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 D (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	備考
①Bk (盛土)	17.0	42,500	0.35	0.0	35	
②TI (岩層堆積物)	14.0	7,500	0.35	18.0	0.0	
③Fs・sw (岩層なだれ堆積層 強風化部)	19.2	76,000	0.35	90.2	20.4	
④Fs・sw (改良地盤) (岩層なだれ堆積層 強風化部)	19.2	76,000	0.35	196.0	20.4	一軸圧縮強度 $q_c=900kN/m^2$ (改良地盤)
⑤Fs (岩層なだれ堆積層)	19.3	1,768,000	0.30	278.1	21.10	
⑥SH (清水町層)	17.8	1,864,000	0.30	228.8	21.00	
⑦Grd-sw3 (花崗閃緑岩 強風化部)	18.0	50,400	0.35	0.0	30.0	
⑧Grd-sw2 (花崗閃緑岩 強風化部)	19.0	100,800	0.35	0.0	35.0	
⑨Grd-sw1 (花崗閃緑岩 強風化部)	19.7	152,000	0.35	73.5	22.3	
⑩Grd-w (花崗閃緑岩 風化部)	20.0	352,000	0.30	96.6	27.7	
⑪Grd (花崗閃緑岩 弱風化~未風化部)	26.9	3,184,000	0.25	1,500.0	37.5	

表-2 支保工物性値

構造物	仕様	要素モデル	変形係数 E (kN/m ²)	断面積 A (m ²)	断面2次 I (m ⁴)	断面係数 Z (m ³)
吹付けコンクリート	t=25cm 18 N/mm ²	トラス要素	3.4×10^6	0.25	—	—
鋼アーチ支保工	NH-200 @1.0m	ビーム要素	2.0×10^8	63.53×10^{-4}	$4,720 \times 10^{-8}$	472×10^{-6}

表-3 解析ケース

	CASE1	CASE2	CASE3
解析手法	等価剛性	等価剛性	ばね設定
補助工法	パイプルーフ (180° 配置)	長尺先受鋼管 (120° 配置) + 薬液注入	長尺先受鋼管 (120° 配置) + 薬液注入
等価剛性変形係数	32,000,000kN/m ²	710,000kN/m ²	—
ばね	—	—	24,938kN/m・本

キーワード 営業線直下 トンネル tunnel underpass

連絡先 〒980-8580 宮城県仙台市青葉区五橋一丁目1番1号

より鉛直ばね値を算出し、FEM 解析モデルに組み込んだ（以下、ばねモデルという）。線形骨組解析モデルを図-4 に示す。トンネル縦断方向に長尺鋼管先受が地山を支える効果を考慮するため、鋼管 1 本に対する弾性支承上の梁モデルから切羽位置での沈下量から算出したばね定数を鋼管が地山を支える効果として設定した。

3-3 FEM 解析結果

解析結果は当社の軌道整備基準値（工事を中止，必要により徐行又は列車の抑止を手配しなければならない状態）の 15 mm以内を判断基準とした。表-4 に FEM 解析結果を示す。CASE1, 3 は軌道部の最終沈下量が 13.3 mm, 1.1 mm と基準値以内に収まった。CASE2 は軌道部の最終沈下量が 27.2 mm と基準値を超過した。

4. 補助工法選定

補助工法選定結果を図-5, 図-6 に示す。

①下り線交差部

当該交差部は土被りが 8m 程度(約 1D)と小さく、トンネル天端付近に岩屑なだれ堆積層が確認された。このような土被り、地質条件下において、営業線直下を山岳工法で施工した事例はない。一方、線路下横断工事においては、パイプルーフを用いた営業線直下での施工実績が多数ある。補助工法については、堆積土層で長尺鋼管先受工法を施工した場合、土被りの薄さから、施工時の肌落ちや崩落が地表陥没を引き起こし、列車影響に直結しやすいと想定される。

そこで列車運行の安全性を確保すべく、土被り、地質、FEM 解析結果、施工実績等を勘案し、薬液注入+パイプルーフ(120° 配置)を採用することとした。なお、注入範囲は、トンネル側壁部を含む門形とし、地山の均質化によるトンネル天端安定対策に加え、パイプルーフ施工範囲の縮小(180° →120°)により施工自体のリスク低減および施工時の沈下対策としての効果も期待する。

②上り線交差部

当該交差部は、土被りが 16m 程度(約 2D)、トンネル天端付近が花崗閃緑岩や清水町層の砂岩であり、下り線交差部に比べ、土被りは厚く、地質条件も良い。なお、パイプルーフを下り線側から延長して推進する場合には、掘進延長が長くなるため施工自体が困難となり、工期が長期間となることが懸念される。

そこで土被り、地質、FEM 解析結果を勘案し、薬液注入+長尺鋼管先受(120° 配置)を採用することとした。

薬液注入範囲はトンネル上部の岩屑なだれ堆積層とし、長尺鋼管先受と共にトンネル天端安定対策を期待する。

5. おわりに

本稿で紹介した検討内容の報告が、今後の類似工事の参考になれば幸いである。

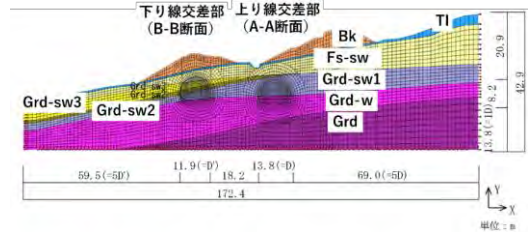


図-3 解析モデル図

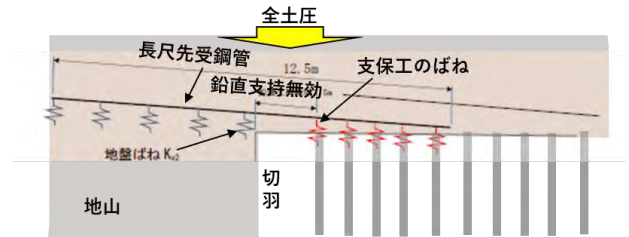


図-4 梁モデル図

項目	CASE1 パイプルーフ工法(等価剛性)	CASE2 長尺鋼管先受工法(等価剛性)+ 薬液注入工法	CASE3 長尺鋼管先受工法(ばね設定)+ 薬液注入工法
略図			
軌道部最大変位(沈下量)	13.3mm	27.2mm	1.1mm
変形係数	パイプルーフ(180° 配置) : 32,000,000kN/m ²	長尺鋼管先受(120° 配置) : 710,000kN/m ²	長尺鋼管先受(120° 配置) : 24,938kN/m・本

表-4 FEM 解析結果

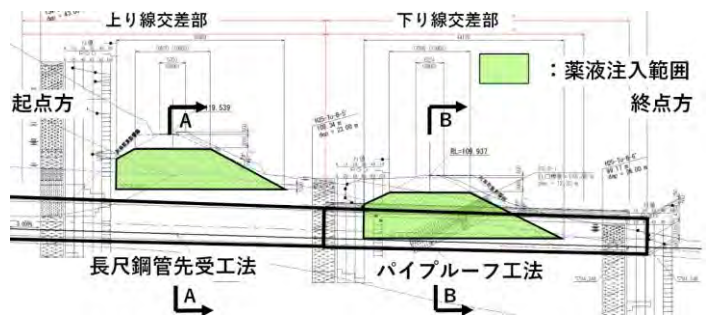


図-5 選定結果縦断図

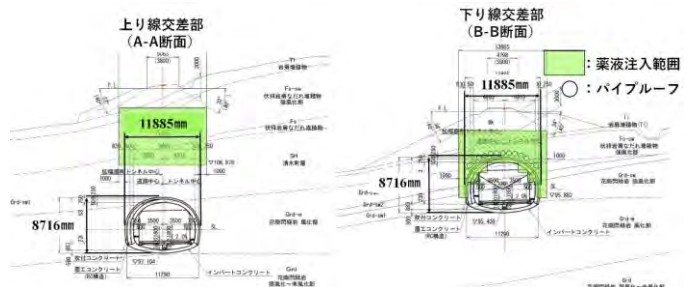


図-6 選定結果断面