

数値解析を用いた青函トンネル先進導坑の変状予測および追加対策工に関する検討

(公財) 鉄道総合技術研究所
(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

正会員 ○大原 勇, 野城一栄, 嶋本敬介
橋本浩市, 小原雄一, 谷口恵一

1. はじめに

青函トンネルの吉岡先進導坑 2k070m 付近 (図 1, 以下, 当該区間) では, 2013 年頃から路盤の隆起が, 2014 年以降に内空変位の急激な進行が確認され, 2016 年にストラットが, 2017 年にロックボルトが施工された (図 2). 以降, 内空変位は抑止されているものの, ストラット軸力については, 許容応力までは十分な余裕はあるが, 軸力の増加が続いている. ストラット軸力の増加はストラットが有効に機能していることを示すものではあるが, 青函トンネルの重要性に鑑み, 当該区間に対し長期的に生じうる変状を予測するとともに, 変状再開のリスクに対し十分なゆとりをもって備えるために, 今の時点からトンネルの変状の進行を完全に抑止するための抜本的な追加対策工の検討を行った.

2. 解析手法

解析は, 解析コード FLAC3D を用いた「地山劣化モデル」²⁾により行った. 地山劣化モデルでは, 地山の強度 (c , ϕ) を低下させることによりトンネル周囲の地山が破壊に至り, 地山の応力が再配分されることでトンネルや周辺地山の変形を表現できる.

解析モデルを図 3 に示す. 天端の鉛直荷重が土被り 240m+水圧 50m 相当となるように解析領域上面に荷重を与え, 側面, 底面をローラー支持とした. 地山の物性は一様とし, Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾完全塑性体として Solid 要素でモデル化した. 解析に用いた地山物性値を表 1 に示す. 地山物性値の設定にあたっては, 過去の解析条件をベースとしつつ, 内空変位計測および最新の計測データ (特にストラット軸力) を再現できる条件を事前に探索した (同定解析). 同定解析と計測の比較を図 4 に示す. 対策工施工後に地山の強度の低下速度が緩やかになると仮定したうえで, ストラット施工による内空変位の抑止, ロックボルトによるストラット軸力の増加を再現できた. 吹付けコンクリートは一軸圧縮強度 18MPa 相当の物性をもつひずみ軟化材料として, Solid 要素でモデル化した. 鋼製支保工および既設ストラットは Beam 要素, ロックボルトは Cable 要素でモデル化し, 物性値は実際に使用されている部材の規格値を参考に設定した.

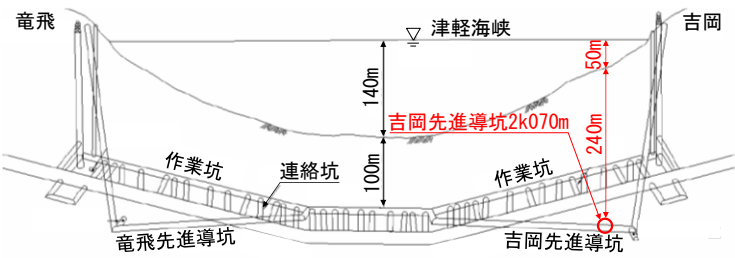


図 1 吉岡先進導坑 2k070m の位置

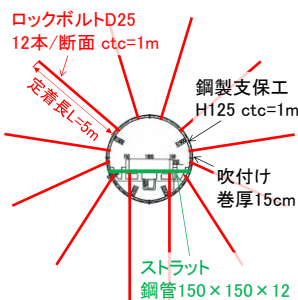


図 2 対策工の断面

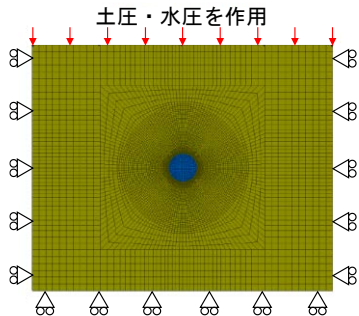


図 3 解析モデル

表 1 解析に用いた地山物性値

部位	物性	単位	物性値
地山	一軸圧縮強度	σ_c MPa	2.15※
	単位体積重量	γ kN/m ³	20
	弾性係数	E MPa	50
	ポアソン比	ν -	0.3
	せん断強度	c MPa	0.62
	内部摩擦角	ϕ °	30

※地山強度比0.4相当 (掘削時の応力解放率: 70%)

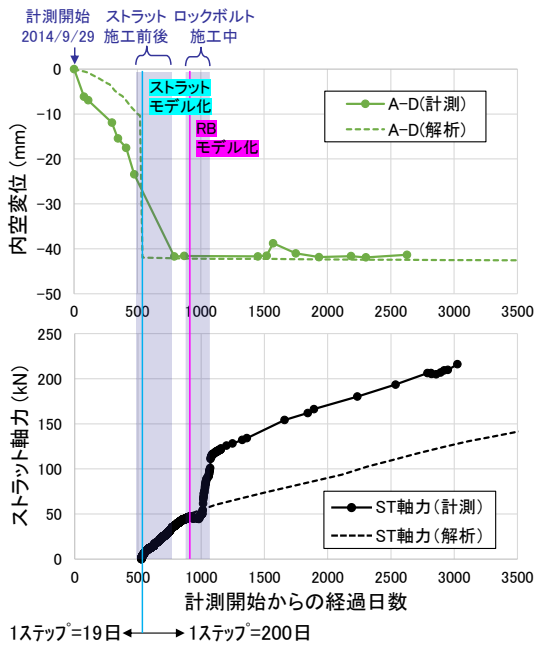


図 4 解析結果と計測の比較 (同定解析)

キーワード 海底トンネル, 維持管理, 数値解析, 土圧

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 トンネル TEL: 042-573-7266

3. 解析結果

(1) 長期予測解析

同定解析の条件でそのまま地山を劣化させた場合（図5の破線）、地山の強度を十分に低下させてもトンネルの変形は最大70mm程度であり、既設ストラットの軸力も許容値に対し余裕がある結果となった。これは、トンネルが円形で、支保工が有効に機能し、外力に対し強固な構造であるためと考えられる。一方、現地の状況として、座屈箇所や鋼材の腐食の進行が見られることから、今後も鋼製支保工が有効に機能するかどうか明確な確証が無い。したがって、生じうる最も危険な状況として鋼製支保工の機能の喪失を追加仮定し、長期予測解析を実施した。ここで、鋼製支保工はリングとして機能するものであり、1箇所でも機能を失えば全機能が失われると考えられることから、鋼製支保工の機能の喪失は、鋼製支保工の全要素の弾性係数を0とすることで表現した。

長期予測解析の結果を図5の実線に示す。鋼製支保工の機能喪失後、肩部（B-C 測線）を中心に内空変位が増加しているほか、既設ストラット軸力が350kN程度で頭打ちになって以降、内空変位が加速している。これは、肩部が大きく破壊してストラットに荷重が伝達されなくなった（＝ストラットが機能しなくなった）ためと考えられる。

(2) 追加対策工の検討

仮に当該区間で長期予測解析と同様の変状が生じた場合、急激に変状が進行し、対策工検討のための時間的猶予が無い場合も想定される。そこで、そうした状況に対し十分なゆとりをもって備えるために、変状の進行を完全に抑止する抜本的な追加対策工を「既設ストラットの中詰め＋肩部ストラットの追加＋隔壁」（表2）として解析的検討を実施した。解析結果を図6に示す。地山の強度が十分に低下した場合でも、隔壁が地山からの側圧をストラットに伝達することで軸力が増加（＝ストラットが機能）し、変位を抑止できていることが分かる。

4. まとめ

吉岡先進導坑 2k070m では、過去に変状を生じ、対策工が施工され内空変位の進行は抑止されているが、変状再開のリスクに対し十分なゆとりをもって備えるために、今の時点からトンネルの変状の進行を完全に抑止するための抜本的な追加対策工の検討を行った。

参考文献

- 1) 三谷憲司, 岡田竜夫, 野城一栄, 今泉光智哲: 開業33年を経た青函トンネルにおける計測の結果と評価, トンネルと地下, Vol.52, No.10, pp.837-847, 2021.
- 2) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.

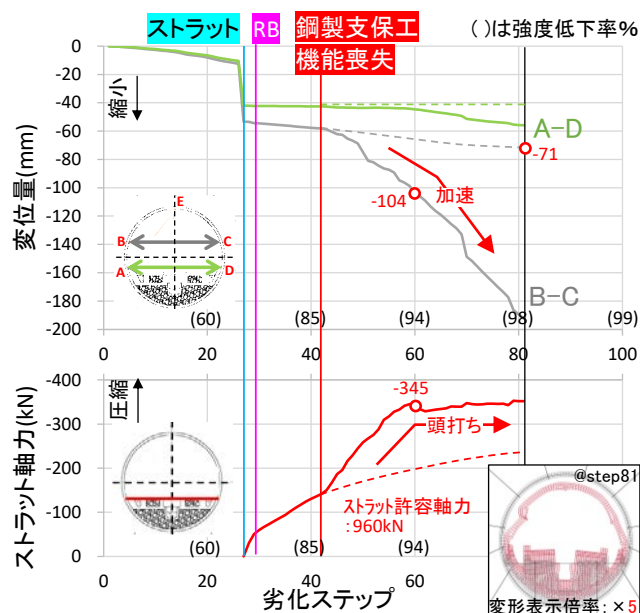


図5 解析結果（破線：同定解析/実線：長期予測解析）

表2 追加対策工のモデル化

項目	モデル化方法
既設ストラットの中詰め	既設ストラット内にモルタルが詰まっていると想定し、等価なEA, EIをBeam要素の物性値として入力
肩部ストラットの追加	肩部ストラット（H200）をBeam要素でモデル化
隔壁	奥行方向に1/2の分布（例：隔壁幅1m, 離隔1m）を想定し、吹付けコンの物性値のうちEA, EIを1/2にしたSolid要素でモデル化

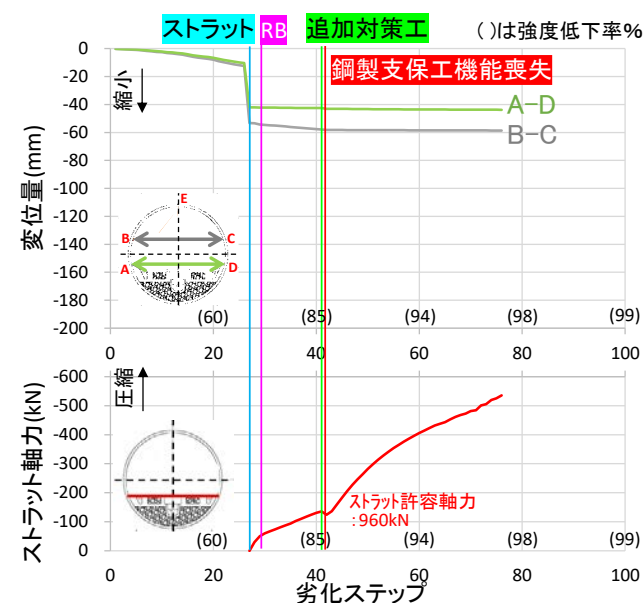


図6 解析結果（追加対策工の検討）