

大断面トンネル交点部の設計と施工

(独)鉄道・運輸機構 正会員 平手 和, 正会員 樋口哲哉
(株)大林組 正会員 ○小山武志, 正会員 大供和男, 正会員 秋好賢治

1. はじめに

北陸新幹線は、高崎・長野間を平成9年10月に、長野・金沢間を平成27年3月に各々開業し、金沢・敦賀間（路線延長約125km）を平成24年6月に工事実施計画の認可を受け、着工している。同区間で最長の新北陸トンネル（延長約20km）のうち、奥野々工区では本坑（延長4,880m）取付け用作業坑として延長298mの斜坑を下り勾配で計画し、平成26年6月より掘削を開始している。この斜坑と本坑との交点部は、供用中の電気設備が配置されることから、標準断面よりも大きな拡幅断面となる。本稿では、この大断面トンネル交点部の掘削方法、数値解析による設計、実施工・計測結果について述べる。

2. 技術的課題と解決策

トンネル掘削に伴い応力集中する交点部を早く安全に経済的に施工するという技術的課題に対して、①地山条件に応じた適切な掘削方法を選定し、②数値解析により合理的かつ簡便に設計し、③設計・施工の妥当性を適切に計測管理することで解決することとした。解決策の具体を以下に示す。

3. 掘削方法

交点部の地山が不良の場合や斜坑が本坑に斜交する場合では、(A)斜坑断面で本坑内にカーブ進入後に断面を徐々に拡大し、交点部を最終形状で切り戻す掘削方法（図-1上）が採用されることが多い。この方法はトンネルの安定性が高い反面、仮設支保部材を撤去するため不経済かつ工期が掛かる。当該交点部は直交形状で土被り厚が約45mあり、事前の地質調査ならびに斜坑切羽からの前方探査の結果より比較的堅硬な地山（古生代～中生代、CM～CH級の頁岩）が分布すると予想された。そこで、(B)斜坑終点から交点部の最終形状に合わせて余裕をもった天端高さで本坑内を真っ直ぐ進入後に、本坑の本設支保工と斜坑側欠損部の補強工を施工し、本坑側壁を最終断面で左右に切り開いて一括掘進する方法（図-1下）を採用した。この方法の要点は、切り開き時に地山応力が集中する交点部の補強支保工（図中の紫色）の安定性を確保することである。

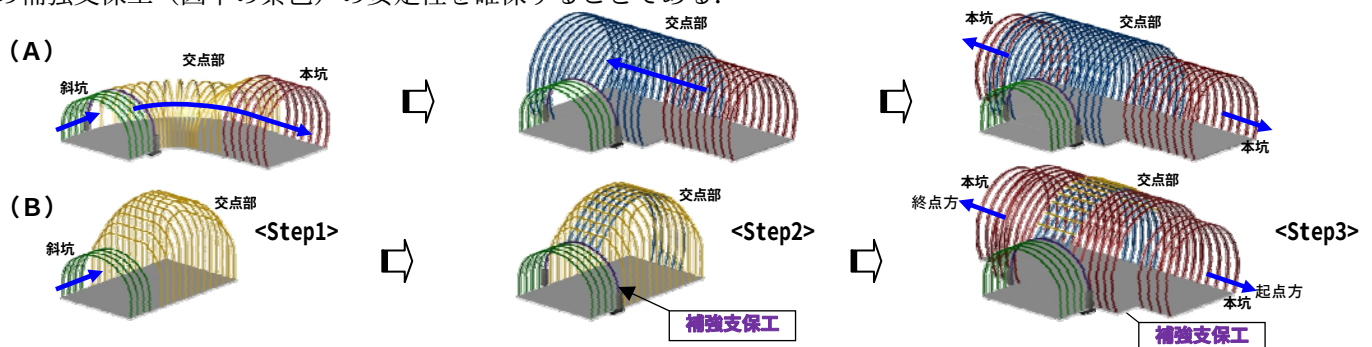


図-1 交点部の掘削順序（上：(A)従来の方法、下：(B)今回採用した方法）

4. 数値解析による設計

図-1下のStep1に示す順次上方へ拡大する仮設支保工（図中の橙色）は二次元FEM解析で、Step2の本坑本設支保工（図中の青色）と取合い部の補強支保工は地盤反力を考慮した骨組構造解析で、許容応力度法により設計した。

1) 仮設支保工（二次元FEM解析）

当該交点部の地質縦断図と最寄りの地質調査ボーリング結果、およびその地山等級（岩種R₅）に応じた機構の標準値^{1),2)}を参考に設定した地山物性値を表-1に、解析モデルを図-2に示す。地盤を線形弾性体にモデル化した逐次掘削解析の結果、各支保工（鋼製支保工H-150@1m、吹付けコンクリートt=125mm、ロックボルトD22×L=3m）の

キーワード トンネル交点部, 応力集中, 数値解析, 一括掘進, 補強工, 鋼製支保工応力

連絡先 〒919-0215 福井県南条郡南越前町奥野々87 (株)大林組 新北陸トンネルJV工事事務所 TEL0778-47-8140

応力はすべて許容応力度未満であり、局所安全率が1.0～1.5の領域は両隅踏前部の壁面から深さ0.5mであった。

2) 斜坑側欠損断面の本設支保工（骨組構造解析）

交点部の掘削に伴う応力再配分により、地山応力の集中の割合は単一トンネルと比べて、交差角90°では「1.6倍」となることが光弾性実験結果³⁾より得られている。そこで、上記1)FEM解析で発生する地山応力の60%分が、図-1下のStep3本坑掘削により交点部に付与されるものとする。

ここでは、斜坑側が欠損する本設支保工断面の天端沈下量が、上記1)FEM解析結果の60%分と合致する鉛直荷重を繰り返し計算より算出した（図-3）。解析の結果、各支保工（鋼製支保工 H-150@1m、吹付けコンクリート $t=200$ mm）の応力は許容応力度未満であり、斜坑側の支保工端部の鉛直反力は44.9kNであった。

3) 補強支保工（骨組構造解析）

取合い部の補強支保工（鋼製支保工 H-150×1 基、根固めコンクリート $0.5 \times 0.5 \times H=1.8$ m）は、対称性から半断面でモデル化し、上記2)の鉛直反力を荷重として作用させた（図-4）。解析の結果、両部材は許容応力度未満であった。

5. 施工・計測の結果

斜坑は全断面工法で、交点部と本坑はベンチカット工法で発破掘削した。交点部の掘削・支保工・補強工の完了後、仮設支保工を切り毀しながらの本坑掘削状況を写真-1に示す。交点部の地山は予想通り比較的堅硬で湧水も少なく、切羽は概ね安定していた。本坑拡幅部（I_{N-2-1}パターン）の計測A結果（天端沈下・内空変位量）は、交点部中央で27mmと15mm、両端とともに8mmであった。一方、交点部掘進時の仮設支保工断面の計測A結果（天端沈下・内空変位量）は8mmと23mmであり、FEM解析結果（1.8mmと4.0mm）の約5倍であった。

図-5に示す取合い部の補強鋼材発生応力の経時変化より、本坑掘削に従い地山応力が鋼材に集中していく様子が判る。その最大値は天端（内空側）と右側壁（地山側）ともに約125N/mm²（圧縮）であり、骨組構造解析結果（各々96.1と100.7N/mm²）と概ね整合している。また、取合い部の天端沈下量は10.5mmであり、解析値の8.0mmと概ね整合している。以上より、交点部の三次元挙動を、採用した掘削方法に準じた二次元モデルの組合せで簡便に解析したが、最も重要な取合い部補強支保工の挙動を比較的精度良く予測できた。

6. まとめ

斜坑着工後、大断面形状に変更となった斜坑と本坑の交点部につき、地山条件に合致した適切な施工方法を採用した。トンネル掘削に伴う応力集中によりトンネルおよび周辺地山が不安定化しやすい交点部の補強工を、数値解析により合理的かつ簡便に設計した。あらかじめ立案した観察・計測計画に基づき、慎重に管理しながら掘削を行った結果、安全かつ経済的に交点部を施工できた。今後、本検討成果が類似工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) (独)鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説、2008年4月（2014年5月 一部改訂）
- 2) (公財)鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル、2002年5月
- 3) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネルの坑内交差部の設計・施工に関する研究報告書、1985年2月

表-1 地山物性値

単位体積重量(γ)	26.8kN/m ³
変形係数(E)	3.74E+3MN/m ²
ポアソン比(ν)	0.3
粘着力(C)	1.00E+3kN/m ²
内部摩擦角(ϕ)	45°
初期側圧係数(K_0)	0.93
地盤バネ定数(K)	9.40E+5kN/m ³

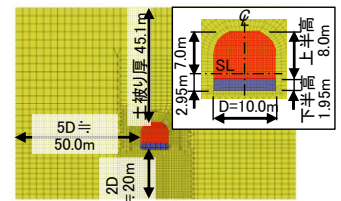


図-2 FEM解析モデル

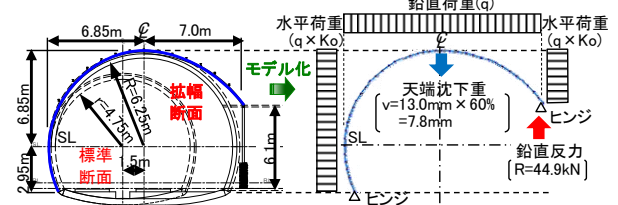


図-3 骨組構造解析モデル(本設支保工)

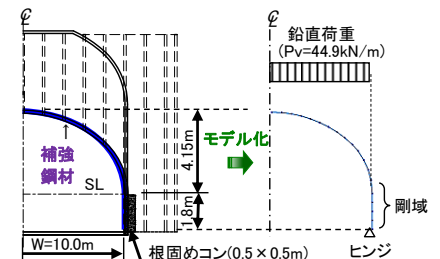


図-4 骨組構造解析モデル(補強支保工)



写真-1 交点部掘削状況

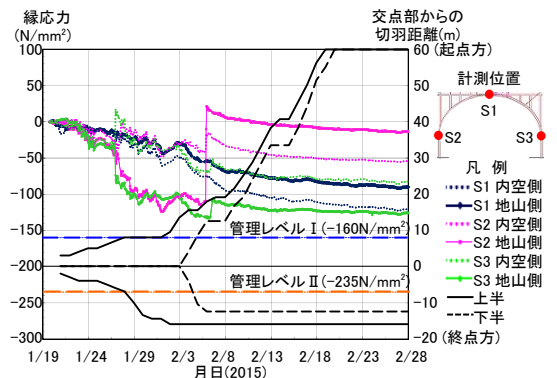


図-5 補強鋼材発生応力の経時変化