

押し出し性地山のトンネルにおける円形支保工の適用

—北海道新幹線、渡島トンネル(南鶴工区) —

1. はじめに

渡島トンネルは北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）の最も起点方に位置する延長約32.7kmの山岳トンネルであり、完成すれば国内最長の山岳トンネルとなる。（図-1）7工区に分けて施工しており、渡島トンネル（南鶴）工区は、起点方から4工区目、掘削延長3,900mの工区となっている（図-2）。

南鶴工区は渡島半島南部に位置しており、新第三紀の堆積岩が広く分布している。堆積岩類は形成されてからの期間が短いとトンネル掘削時に崩れやすく、大きな地山変位が生じやすいことが知られている。同時に南鶴工区周辺は火山活動や断層活動が活発な地域に位置していることから、火山活動に伴う熱水変質やマグマの

北海道新幹線建設局
北斗建設事務所 土木担当グループ 幸谷 勇作
貫入により複雑で軟弱な地質になりやすい。これらの地質的な特徴から、南鶴工区では事前に地山状況を把握することが困難であった。

掘削開始後、脆弱化した新第三紀の堆積岩類（八雲層泥岩）や、火山活動によって形成された貫入岩（流紋岩・粗粒玄武岩）が熱水変質を受けて脆弱化した地質が切羽に出現した。これらの地質の特性を複数の指標を用いて比較したところ、例えば、切羽から採取した試料を24時間浸水させて泥濁化の程度を判定する浸水崩壊度試験では、24時間後に「完全に泥濁化」と判定されるなど、塑性流動や吸水膨張が生じやすい押し出し性の地山であると判定された（写真-1）。以上のように、南鶴工区では事前に想定しづらかった押し出し性地山の出現によりトンネル掘削が難航し、トンネル全体の工程に影響を及ぼす状況となっており、安定的に掘削を進めていくことが重要な課題となっていた。

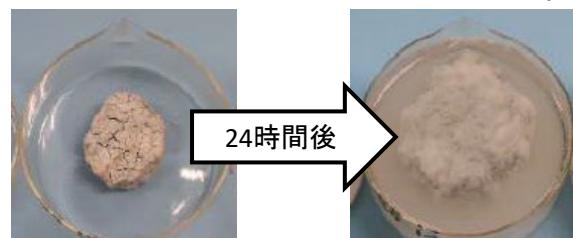


写真-1 浸水崩壊度試験結果

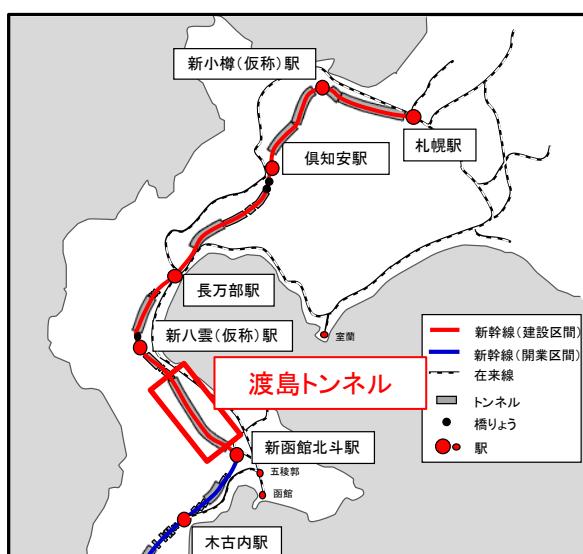


図-1 渡島トンネル位置図

2. 押出し性地山区間の掘削難航

2-1 押出し性地山区間の掘削実績

南鶴工区はNATM工法を採用して補助ベンチ付き全断面掘削で掘削を進めていたが、切羽に

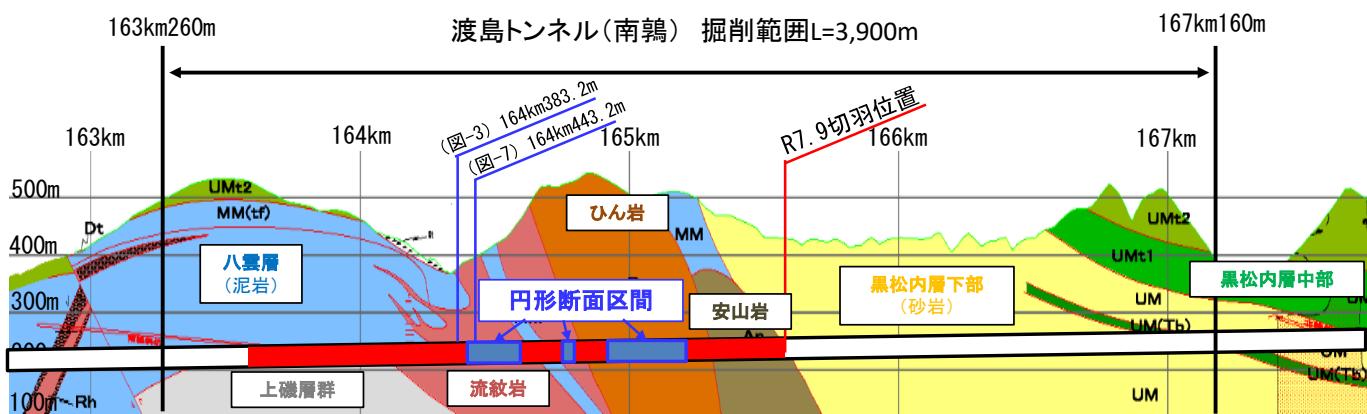


図-2 渡島トンネル（南鶴）当初想定地質縦断図

押出し性の地山が出現して以降、鋼製支保工のランクアップに加えて、鋼製ストラット有りの一次インバートを用いた早期閉合を実施した。また、ロックボルトの長さ、本数の変更、支保工の連結、上半・下半仮インバート閉合、サイドパイルなど複数の補助工法を組み合わせて実施したが、内空変位速度を低減する効果が一定程度あったものの、変位が収束して安定するまでの効果は無かった。特に下半の内空変位は建込み直後から大きく閉合後も長期間増大し続けて収束せず、最大 283 mm を記録した。

例として新青森起点 164km383.2m 地点の天端沈下・内空変位計測結果を示す（図-3）。この地点は貫入岩である流紋岩が切羽の全体を占めており、鋼製支保工は通常の 125H から 2 ランクアップした 200H を使用した馬蹄形断面として、鋼製ストラット有りの一次インバート及び支保工の連結を施工して掘削していた。計測結果から、下半支保工の計測点（内空変位②）が建込み直後から内側に大きく変位し、一次インバートを閉合しても変位が続いていることがわかる。内空変位②は切羽が 60m 離れるまで変位が続き、最終的には 124mm の変位を計測して設計内空断面を確保できない状態となつた。

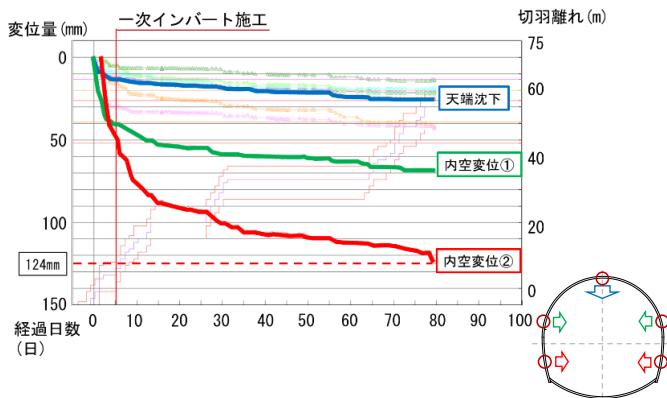


図-3 164km383.2m地点の変位計測結果

このように内空変位が増大すると、トンネル坑内では、吹付けコンクリートの損傷やロックボルト座金の変形、下半鋼製支保工の隅角部の変形が生じ、一部の区間では設計内空断面が確保できず縫返しを行う必要があった。縫返しとは掘削時に設置した支保工を撤去・再設置する作業のことであり、本坑掘削を停止して行う必要があるため安定的な掘削進行を確保することができない状況となった。

2-2 押出し性地山区間の課題

押出し性地山区間は、掘削後の内空変位が大きく、一次インバートによる断面閉合後も変形が長期間継続した結果、設計内空断面を確保できず、縫返しにより工程遅延が発生することが課題となっていた。この原因追究のため押出し性地山区間の物性値を用いて、変位量を再現するモデルを作成して数値解析を行ったところ、下半支保工でトンネル内空側に凸の変位が生じた（図-4）。これは実際に縫返し箇所で発生した変位状況に一致している。解析では下半支保工と隅角部に応力が集中し、地山からの圧力を円滑に伝達できていないこともわかった。

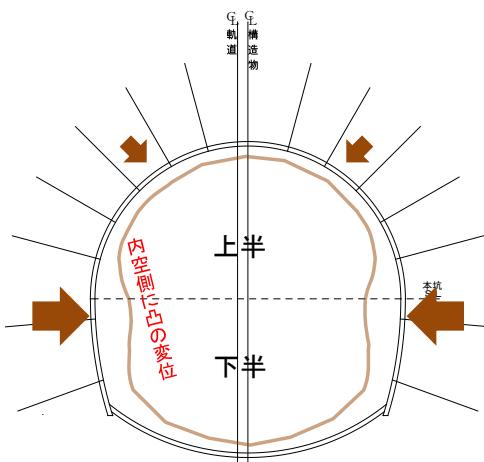


図-4 支保工の変形状況（イメージ）

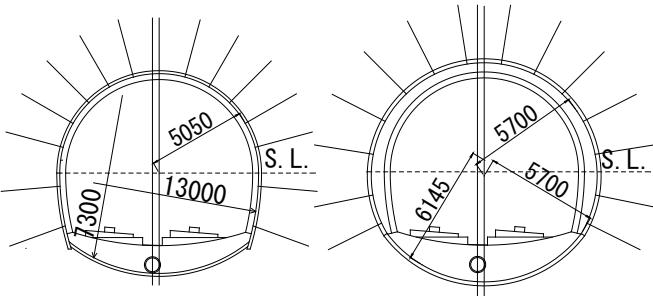
そのため、下半支保工にかかる地山からの圧力で大きな変形が生じ、支保工全体が不安定化したこと、下半支保工や隅角部に応力が集中し、弱点のみに集中して作用しているため支保工の機能を活かせていないこと、という2点の問題点を解消するために押し出し性地山に適した形に支保工を見直すこととなった。

3. 地山に適した支保工の検討

押出し性地山区間の課題を解消すべく支保工形状の再検討を行った。過去の他工区で同様な地質に対してどのような掘削方法が有効であったかの調査検討及び、南鶴工区の掘削実績から特に下半支保工の曲率半径を見直し、よりスムーズに軸力が伝わる形状としてはどうか、という観点からの検討も行った。

同種地質での工事事例として、渡島半島で熱水変質作用を受けた貫入岩を掘削した北海道縦貫自動車道大沼トンネル避難坑が挙げられる。

脆弱な貫入岩の地山に対して馬蹄形断面を円形に変更し、更に円形二重支保工として掘削を実施し、高い有効性を確認している。他にも青函トンネルや北越北線鍋立山トンネルでも円形支保工が採用されており、断層破碎帯や粘土質の脆弱な地山での掘削実績が確認できた。高耐力支保工や多重支保工の採用についても検討したが、上記の同種地質での実績を参考に、工程確保のため調達性・施工性を重視して検討した結果、円形支保工を深度化することとなった。



図－5 馬蹄形・円形支保工断面比較

実際に採用した円形支保工は、支保工の曲率半径を上半・下半・インパートでできるだけ等しくなるよう断面を設定した(図－5)。掘削方法はそれまでと同様に補助ベンチ付き全断面掘削として、一次インパートによる早期閉合を行うこととした(写真－2)。



写真－2 円形支保工施工状況

4. 円形支保工の掘削実績

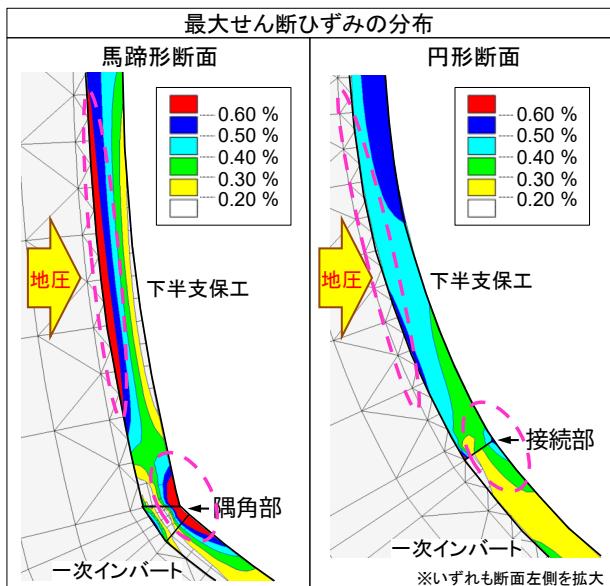
押出し性地山が継続する区間で、支保工を円形支保工に変更して掘削を進めたところ、変位は平均して馬蹄形断面区間の4～5割にまで低減される結果となった。以下で馬蹄形と円形での施工の比較検討結果について述べる。

4-1 数値解析による効果予測

馬蹄形断面の変状を再現した数値解析モデルに、円形断面を適用して馬蹄形断面と円形断面

の比較を行った。同じ解析条件で比較したところ、円形断面の方が馬蹄形断面より内空変位量が約60%に低減され、変形モードも下半支保工のトンネル内側への押出しが抑制される結果となった。

馬蹄形断面では下半支保工で内空側に凸の変形が生じていたが、その付近の応力分布と最大せん断ひずみの分布を解析すると、下半支保工の地山側と、一次インパートストラットと接合される隅角部の内空側で応力集中が生じていた。また、応力集中箇所では0.6%を超える最大せん断ひずみが発生している結果となり、下半支保工の地山側からの地圧を支保工全体に円滑に伝達できていないことがわかった。一方、円形断面では下半支保工の曲率半径や一次インパートストラットとの接続部の形状を変更したことにより、応力集中が緩和されることがわかった。支保工の軸力伝達性が向上したことにより、下半支保工の地山側や一次インパートとの接続部では最大せん断ひずみが0.5%以下となることが見込まれた(図－6)。地山の最大せん断ひずみ分布についても解析したところ、馬蹄形断面に比べて円形断面の方がトンネル周辺地山の変形・ゆるみの発生を低減できる結果となった。



図－6 最大せん断ひずみ分布解析結果

以上から、円形断面の採用で応力伝達が改善し変形抑制が見込めるという予測ができたため、実際に円形支保工に変更して掘削を行うこととした。

4-2 内空変位量と変位傾向

ある円形断面（新青森起点 164km443.2m 地点）の天端沈下・内空変位の計測結果を図-7 に示す。下半の変位（内空変位②）は抑制され、一次インバート施工後の変位も 20mm 以下と安定している。また、一次インバートの施工後は切羽離れ約 45m で変位の収束が確認された。馬蹄形断面の計測結果（図-3）と比較すると、下半の変位量の減少が大きく、閉合後早期に収束することがわかる。

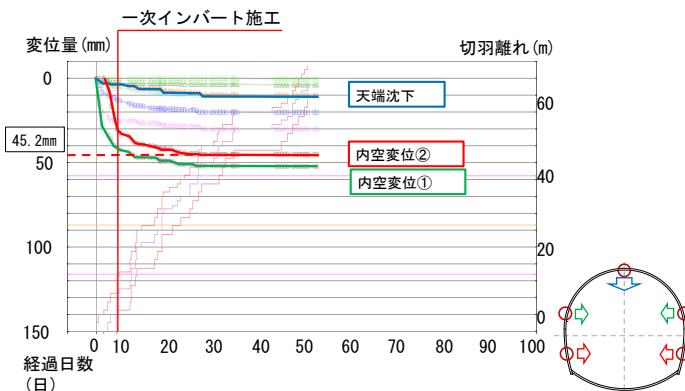


図-7 164km443.2m 地点の変位計測結果

複数断面で変位量を比較すると、馬蹄形では下半測線の内空変位量（内空変位②）が 100mm を超える断面が複数生じ、天端沈下よりも内空変位量が大きくなる傾向にある。円形では内空変位量が 100mm を超える断面は発生せず、全体的に変位量は低減された（図-8）。同様に収束性についても、複数断面での比較で円形断面では一次インバート施工後に変位が収束し安定していた。円形断面の採用により、それまでの馬蹄形での施工区間と比較して内空変位量が低減され、収束性が改善したことがわかった。

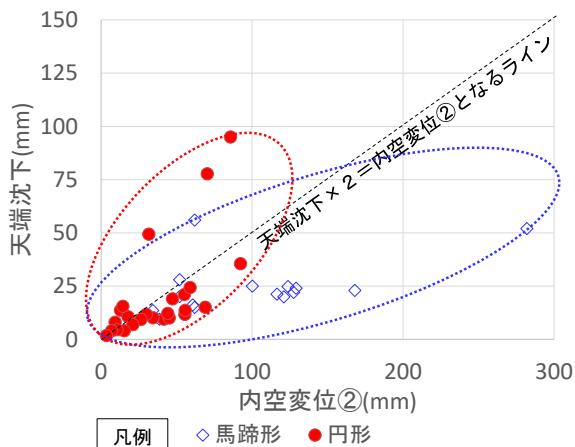


図-8 馬蹄形と円形の内空変位量比較

4-3 縫返しの発生状況

比較の対象とした馬蹄形区間 100m についてでは内 76%で縫返しが発生したが、円形支保工で施工した 120m 区間では掘削後支保工に大きな変状は発生せず、縫返しは発生しなかった。掘削断面積の増加により掘削に要する時間は増加したもの、縫返しによる掘削停止が生じなかったため、結果的には円形区間では安定的な掘削進行を確保することができた。

5. まとめ

渡島トンネル（南鶴）工区では押出し性の地山により掘削後の内空変位が大きく、一次インバートによる早期閉合を実施しても変位が止まらない状況が続いていたが、円形支保工を採用した結果、下半支保工の応力伝達を改善し、内空変位を抑制することができた。また円形支保工の採用により、トンネル周辺地山のゆるみを低減することができ、応力集中が緩和されて変位が閉合後早期に収束することが確認できた。

馬蹄形の区間では、内空変位が大きい箇所で設計内空断面を確保できず、縫返しが発生し工程遅延が発生していたが、円形支保工に変更後は、変位量が減少したため縫返しが生じず、安定的な掘削進行を確保することができた。

今後の課題としては、円形支保工への変更判断基準が挙げられる。現状では地質の状況、支保工の変状状況、内空変位計測結果を総合的に判断して円形支保工の採用を判断しているが、安定的な掘削進行を実現するためには、円形採用による工期・費用増と縫返しリスクを天秤にかけ、タイムリーに支保パターンの変更判断を行う必要がある。そのためには機を逃さず、かつ変更範囲が必要最小限となるような円形支保工への判断基準の設定が必要であるため、馬蹄形・円形両区間の施工実績を整理して判断基準について検討していきたい。

最後に、トンネル掘削にあたって多数のご指導・ご助言を頂いた北海道新幹線トンネル施工技術委員会の委員の皆様と、工事において多大なるご協力を頂いている工事受注者、協力会社、地元関係者の皆様に、この場を借りて厚く御礼申し上げる。

