

岩塊除去後のシールドマシンの再発進

—北海道新幹線、羊蹄トンネル（比羅夫）他工区—

北海道新幹線建設局 後志建設事務所 ニセコ企画担当グループ 櫻井 高志

1. はじめに

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）は、工事実施計画が平成24年6月に認可され、現在整備を進めている。羊蹄トンネル（比羅夫）工区は、平成31年4月からSENS（シールドを用いた場所打ち支保システム）による施工を開始し順調に掘進していたが、令和3年7月初旬に坑口から約3.4km地点の掘進途中で、緻密で硬質かつ巨大な岩塊群に遭遇し、掘進停止に追い込まれた。そのため、トンネル本坑からNATMによる小断面トンネルを掘削し、シールドマシン前方に回り込み、令和5年3月に岩塊群を除去し、令和5年11月に再発進した。

本発表では、岩塊除去後のシールドマシンの再発進に当たり検討した内容を報告する。

2. 羊蹄トンネル（比羅夫）の概要

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）の線路延長約212kmのうち、羊蹄トンネルは、北海道虻田郡ニセコ町から同郡倶知安町に至る延長9,735mの新幹線複線断面トンネル（図-1）であり、起点方の有島工区（延長4,166m）と終点方の比羅夫工区（延長5,569m）の2工区で施工している。

本トンネルは羊蹄山西側の裾野に位置し、周辺の地層は羊蹄山の噴火活動に伴って形成された複雑な岩屑なだれ堆積物で構成され、豊富な地下水を有した地質であり、トンネルを地下水位以下で構築することになる。（図-2）



図-1 羊蹄トンネル位置図

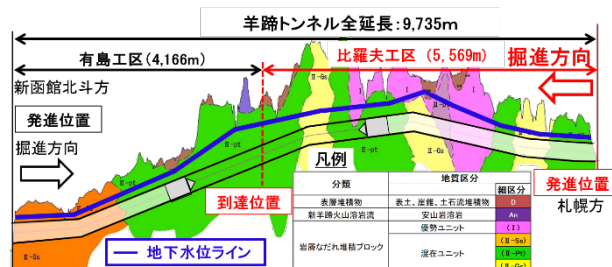


図-2 羊蹄トンネル地質縦断図

3. SENS 採用経緯

当初の調査では、深層部で比較的地質が良いことに加えて、遮水層が存在すると想定されたことから、NATMによる掘削を計画していた。

その後、詳細な200m毎の地質調査等を実施し、計画を深度化したところ、ルート上には未固結の地質が分布していることが明らかとなり、切羽の自立が困難であると判断した。また、地下水位が高く透水係数が大きいことが確認され、トンネル周辺の大規模な地下水位低下を懸念し、シールドマシン（写真-1）を用いた、SENSによる掘削工法を採用した。



写真-1 羊蹄トンネル（比羅夫）のシールドマシン

4. 岩塊除去までの経緯

令和3年7月に坑口から約3.4km地点の2263リングでカッターが回転不能となり、シールドマシンは停止した。地質調査ボーリングを実施した結果、10mを超える安山岩岩塊層が確認された。その一軸圧縮強度はコンクリートの約5倍の150N/mm²と非常に硬質であった。当初、径1m程度の岩塊が存在するもののシールドマシン

に取り込めると想定していたが、その想定から大きくかけ離れた岩塊に遭遇したことが明らかとなった。現地の地質条件や施工性等を踏まえて、地上部から除去する方法や停止位置から約430m離れた立坑からの NATM 迎え掘りによる方法等について比較検討した結果、本坑から小断面 NATM トンネルを迂回掘削する案を採用し(図-3)、岩塊群を除去した。

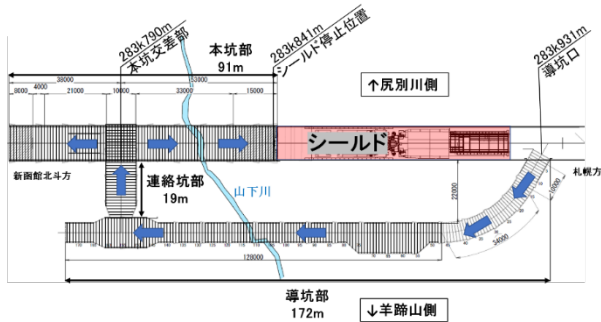


図-3 岩塊撤去のための NATM 掘削ルート

5. 掘進再開の課題及び対応

5-1 長期間停止による胴締め

シールドマシンは2年4か月もの長期間停止していたため、その間に地山が緩むことによる胴締めが懸念された。胴締めが発生すると掘進停止前と比較して、大きな推力が必要となり、その推力がマシンの装備能力を超過すると、最悪の場合シールドマシンを再発進させることが不可能となる。そのため、胴締めの影響を確認することとした。

(1) 前胴の縁切り

本工区で採用しているシールドマシンは中折れジャッキの前後で前胴(約5m)と後胴(約7m)に分かれている。まずは中折れジャッキを伸長させ、前胴部分を地山と縁切りできるか確認することとした。なお、本工区で採用しているシールドマシンの中折れジャッキの装備能力は112,000kNである。前胴の縁切り実施フローは次のとおりである。

- ① 中折れジャッキを10mm伸長させる。
- ② 中折れジャッキを問題なく10mm伸長させる場合、さらに中折れジャッキを50mm伸長させる。
- ③ 中折れジャッキを10mm伸長させない場合、シールドマシンと周辺の地山間を削孔し、胴締めを緩和させ、中折れジャッキを50mm伸長させる。

前胴の縁切りの結果を表-1に示す。10mm及

び50mmの伸長は問題なく完了し、前胴5m縁切りさせるのに必要な総推力は約32,000kNという結果が得られた。本工区で採用しているシールドマシンの延長は約12mであるため、約75,000kNの推力が必要と試算された。本工区で採用しているシールドマシンの推進ジャッキの装備能力は135,000kNであるため、装備能力の約56%の推力でマシン全体の縁切りが可能であると判断した。

表-1 前胴縁切り時の結果

ストローク (mm)	総推力 (kN)	装備能力に対する割合	ジャッキ伸長油圧 (MPa)
10	24,298	22.1%	7~8
20	31,816	29.0%	9~12
30	31,573	28.8%	9~12
40	27,816	25.3%	8.5~9.5

(1) テスト掘進

前胴の縁切り掘進の結果を基に、テスト掘進することとした。岩塊群に遭遇し停止したのは、2263リングの掘進途中であったため、テスト掘進では、マシン全体を縁切りして再発進した際に問題なく掘進できるかの確認に加え、2263リングの掘進を完了させることとした。

通常のシールド工法では推進ジャッキでセグメントを押し進めるための反力を得るが、SENSでは一次覆工コンクリートを打設するための型枠(内型枠)を押し進めており、内型枠と一次覆工コンクリートの付着力が推進するための反力を生み出している。胴締めの影響により、通常の掘進より大きな推力が生じると、付着が切れ、内型枠が後方に滑ることが懸念された。万が一、内型枠が後方に滑ってしまうと、以降の掘進が不可能となることから、内型枠の後方への滑りの対応策として、以下の2点の対策を実施した。

1) 内型枠後方にH鋼材の設置

(1)に記載した75,000kN程度の推力であれば計算上付着が切れることはない。しかし、シールドマシンが停止してから、近傍では重機による導坑の掘削、ブレイカーや破碎材を使用した岩塊の除去を行っており、それらの振動が影響を与え、付着力が減少している可能性があった。そのため、万全を期するため、内型枠最後部にH鋼材を一次覆工コンクリートにアンカーで固定し、万が一の内型枠の後方への滑りに備えた(写真-2)。



写真-2 内型枠後方に設置したH鋼材

2) 内型枠応力計測による掘進管理

内型枠にひずみ計を設置し、掘進時に内型枠に作用する応力を算定した。設置箇所は切羽側から3リングごとに設置し、坑口側から8リング目の2250リングを管理リングとした。このリングを管理リングとした理由は、このリングより切羽側の内型枠の付着が切れてしまうと、残り7リングの付着力では十分な推力を得られないことが計算上判明したためである。

また、管理リングにおける応力上限を25N/mm²とした。この値は隣接工区の有島工区において、初期掘進の際に内型枠の後方への滑りが確認された際に、対策を取ったうえで再掘進を行った時に計測された最大応力を基としている。

3) テスト掘進の結果

テスト掘進に要した総推力の結果を図-4に示す。最大推力は掘進直後の77,000kNで装備推力の約57%に達した。試算では75,000kNだったためほぼ想定通りの結果となった。内型枠の最大応力は15N/mm²と基準値の約60%とこちらも想定範囲内で掘進を完了させた。懸念された胴締めが再発進に与える影響は些少であることを確認し、また内型枠を後方に滑らせることなく地山とシールドマシンの縁切り確認を完了した。

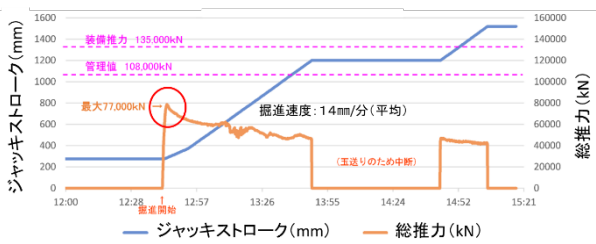


図-4 テスト掘進の際に要した総推力

5-2 NATM区間の埋め戻し

再発進後はNATM区間(岩塊除去区間)をシールドマシンが通り抜けていくことから、NATM掘削に当たっては支保工がシールドマシンの掘進に支障しないようにSENS掘削断面より片側300mm程度大きい設計とした。SENSは一次覆工コンクリートをテール部で打設しながら掘進していくため、NATM支保工とシールドマシンの間に空間があると、一次覆工コンクリートが切羽側に回り込む恐れがあったため、NATM区間は埋戻すこととした。埋戻しにあたってはシールドマシンで掘削可能な強度の材料で埋め戻すこと、可能な限り早く掘進を再開するために、9,000m³もの大空間を効率よく施工可能な材料を選定するよう検討を行った。埋戻し材料は経済性、施工性についても考慮し、4つの材料を選定した。各材料の埋め戻し範囲を図-5、選定した材料の特徴を表-2に示す。

改良土は選定した4つの材料の中で一番経済的に有利であったため、可能な限り改良土で埋め戻すこととした。この際坑内で重機を用いた埋戻しとなり、空頭の制限を受けるため、埋戻し範囲はNATM天端から3mまでとした。重機による埋戻しが困難であったトンネル上部は、流動性があり、坑内から圧送による打設が可能な流動化処理土で埋め戻すこととした。連絡坑付近は拡幅断面となっており、坑内から流動化処理土を圧送しても充填不足となる恐れがあったため、地上から本坑に流し入れるようにして充填することとした。地上のヤードが非常に狭隘であったため、プラントが大きな流動化処理土ではなく、小規模なプラントで施工可能なセメント・ベントナイトを選定した。ただし、流動化処理土より高価なため、使用箇所は連絡坑との交差部に限定して使用した。マシン前面については、再発進時の推力低減、カッタービットの負荷低減のため、シールド工事に使用される加泥材を埋戻し材料として選定した。加泥材充填は埋戻しの最後に行ったため、坑内からではなくマシン側からの充填となった。また、セメント成分を含んだ埋戻し材料が長期間、チャンバの中に滞留することによる固結を回避する目的もあった。

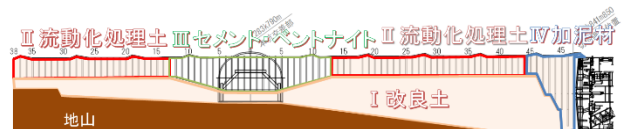


図-5 NATM区間の埋戻し計画

表－２ NATM 区間 埋戻し材料

	改良土	流動化処理土	セメント・ペントナイト (CB)	加泥材
材 料	セメント/掘削土	セメント/砂/水/気泡	セメント/水/ペントナイト	可塑状充填材
メリット	安価に埋戻し	流動性があり施工しやすい	エアだまり回避	シールド工事で多用マシンから注入可能
デメリット	重機での施工 空間制約あり	エアだまり 充填不足	地上からボーリング 大口調達困難 (北海道)	割高

5－3 再発進後の施工管理

再発進直後は通常の地山ではなく NATM 区間を掘進することとなるため、以下の2点を掘進管理のポイントとして検討を実施した。

(1) シールドマシンの方向制御方法

NATM 区間の上半は埋戻し材でシールドマシンによる掘削が容易であるが、下半については地山であり、掘進不可となる岩塊がないことは事前に確認しているものの硬質であるという状況のため、上半と下半で強度が異なり、シールドマシンが地山に乗り上がることが懸念された。乗り上がりの対策として、掘進速度を通常の毎分 20mm～25mm よりも遅めの毎分 15 mm 以下として、確実に地山部分を掘削すると共に、ピッチング計を監視し、乗り上げ傾向が確認された場合は、コピーカッターで地山部分を掘削することとした。なお、当該箇所は 5‰ の下り勾配であるため、掘進速度があまりにも遅くなるとマシンが前傾姿勢になるため、適宜中折れジャッキを使用し、方向を修正することとした。

(2) 切羽土圧・コンクリート打設圧の管理

一般区間における SENS 掘進の管理基準値は停止時のチャンバ土圧を基準として設定する。しかし、NATM 区間は支保部材が土圧を受け持ったため、停止時のチャンバ土圧を基準とすることはできない。そのため、現地の土被りや地質を考慮した理論上計算される静止土圧を基準土圧として、表－3 の通り管理基準値を設けた。また、一般区間では一次覆工コンクリートを確実に打設するため変動圧を 100kPa と設定しているが、NATM 区間では支保部材があるため、一般区間よりも一次覆工コンクリートの打設圧が高まりやすい状況となる。打設圧が急激に高まると一次覆工コンクリートが切羽側に回り込む可能性が高まるため、一般区間よりも変動圧を 30kPa とし厳しく管理することとした。

表－３ NATM 区間と一般区間の管理基準値

	NATM区間(今回)		一般区間(土被り1.0D以上)	
	管理下限値	管理上限値	管理下限値	管理上限値
切羽圧	静止土圧	静止土圧+30kPa	停止時土圧+予備圧20kPa	下限値+変動圧30kPa
コンクリート打設圧	切羽圧上限値	下限値+変動圧30kPa	切羽圧上限値+予備圧20kPa	下限値+変動圧100kPa

5－4 岩塊調査

再発進後の掘進区間について、再び掘進を停止させるような岩塊がないか調査を実施した。

既往の弾性波探査よりも受信点を増加させ、高密度弾性波探査を実施し、岩塊リスクの高い箇所を4箇所に絞り込んだ。この箇所に対して鉛直コアボーリング、水平ボーリングを実施し、①中間立坑（発進坑口より 3,845m 付近）から 70～80m 終点側にあたる位置②到達立坑位置付近においてシールドマシンの掘進に支障する岩塊が確認された。それぞれの位置において岩塊除去方法を検討し①は BG 工法、②は NATM 掘削により岩塊を除去した。(写真－3)



写真－3 (左) BG 工法による岩塊撤去 (右) NATM による岩塊撤去

6. まとめ

5. に記載した対策を実施し、令和 5 年 11 月 27 日、実に 2 年 4 か月ぶりに比羅夫工区の掘進を再開させた。懸念されていたシールドマシンの乗り上げ傾向は見られたが、適宜中折れジャッキを使用して方向制御しながら慎重に掘進を進め、NATM 区間を無事通り抜けることができた。NATM 区間通過後も順調に掘進を進捗させ、現在は中間立坑にて今後の掘進に向けてビット交換などのマシンメンテナンスを実施している。再発進にあたり有識者の方々を初め多くの方々に様々なご助言をいただき、掘進再開および中間立坑に到達することができた。この場を借りてお礼申し上げる。