第69回（2025年度）　北海道開発技術研究発表会論文

ＪＲ軌道直下における大沼トンネル本坑（峠下工区）の施工について
―パイプルーフによるＪＲ軌道の沈下抑制効果―

函館開発建設部函館道路事務所第２工務課　○池田　尚太郎
函館開発建設部函館道路事務所第２工務課　　伊藤　功陽
清水・宮坂・森川特定建設工事共同企業体　　大久保　征一郎

北海道縦貫自動車道七飯～大沼は、高速ネットワークの拡充による道央圏と道南圏の連絡機能の強化を目的とした10.0kmの高速自動車国道であり、そのうち7㎞はトンネルを新設する。JR函館本線の軌道直下を通過する大沼トンネル本坑（峠下工区）において、沈下抑制対策としてパイプルーフ工を施工した。本稿では、JR軌道影響区間（坑口から95m）の本坑掘削の施工結果と沈下抑制効果について報告するものである。

キーワード：軌道直下、沈下抑制、パイプルーフ

1.　はじめに

大沼トンネル（仮称）は、北海道縦貫自動車道七飯～大沼間に位置する高規格道路トンネル（**図-1**）で、完成すると道内最長の延長6,976.6mの道路トンネルとなる。

写真-1に示すように、本トンネル函館側の峠下工区（施工延長3,560m）の坑口近傍には、JR函館本線の軌道が近接しており、トンネルはこの軌道直下を土被り約17mで通過する。施工にあたっては、地質や地山条件に応じた対策工を選定することが留意点として挙げられており、トンネルの掘削に起因する軌道沈下量を極力小さくすることが求められた。このため掘削に先立ち補助工法として剛性の高いパイプルーフ工法が採用された。パイプルーフの施工延長については、トンネル掘削がJR軌道へ与える影響範囲を包含する形で延長95mを対象（**図-2**）とした。

本稿では、パイプルーフ2本の試験施工に関する過年度の報告[1]に引き続き、パイプルーフの本施工および軌道影響区間での本坑の掘削状況について報告する。

図-1　大沼トンネル（仮称）位置図

写真-1　峠下工区トンネル坑口

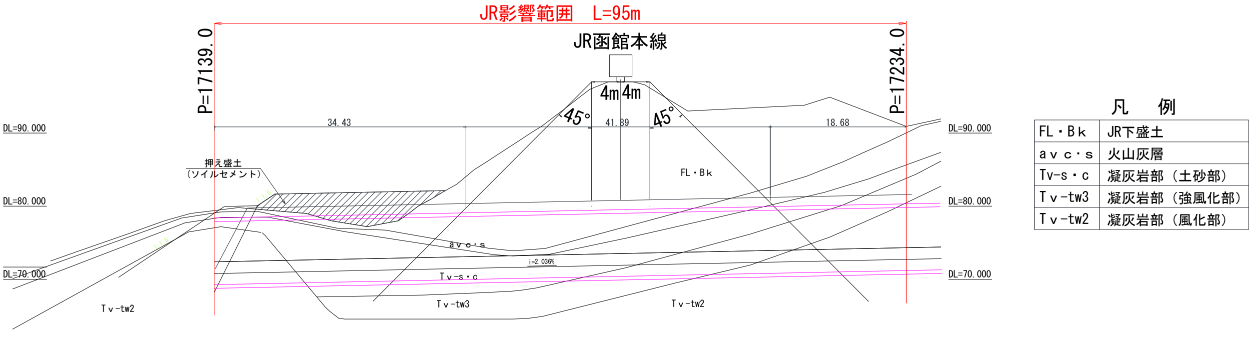


図-2　対象範囲

IKEDA Shotaro, ITO Koyo, OKUBO Seiichiro

2. 工事概要

本工事の工事概要を**表-1**に示す。

表-1　工事概要

工事名	北海道横断自動車道七飯町 大沼トンネル峠下工区工事 （2025年2月21日～2025年11月17日） 北海道横断自動車道七飯町 大沼トンネル峠下工区新設工事 （2025年10月1日～2028年10月2日）
工事場所	北海道亀田郡七飯町字仁山
工事 概要	峠下工区 トンネル延長：L=3,560.0m （幅員：SL=11.0m） （内空断面積：A=77.5m^2） 掘削工：L=1,679.4m（NATM、機械掘削） インバート工：L=1,160.4m パイプルーフ工：一式

3. パイプルーフの施工について

(1) 地質概要

図-3にトンネル坑口近傍，およびJR軌道周辺の地質縦断図、**図-4**にJR軌道における地質横断図を示す。

JR軌道直下は上層からJR軌道構築時に造成された盛土（以下、JR盛土）、火山灰、凝灰岩（土砂部）、凝灰岩（強風化部）で構成されている。盛土は礫混じりシルト質砂、礫混じり砂質シルトから構成され、一部に腐植物・腐植土が混じり不均質な地質である。

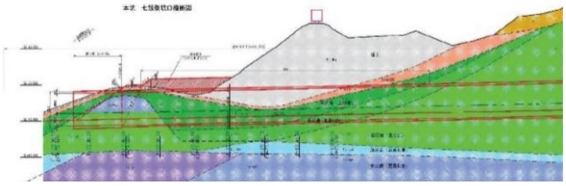


図-3 地質縦断図

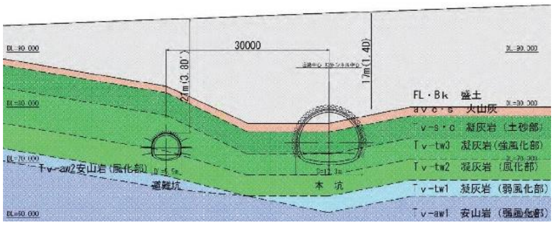


図-4 地質横断図

(2) 仕様検討

パイプルーフの仕様設計について以下の点を考慮し、仕様を決定する必要があった。

・不均質かつ固結度の低いJR盛土に対し、切羽を確実に保持できること。

・長距離掘進に対して高い施工精度が確保できること。

・硬岩の出現により掘進不可能になった場合でも人力によって対処することができること。

以上のことから、泥水式掘進機（**写真-2**）による推進工法が採用された。管径の仕様はΦ812.8mm、肉厚ｔ=12mm とし、鋼管内部で人が作業できる最小径とした。パイプルーフ配置図を**図-5** に示す。

写真-2　泥水式掘進機

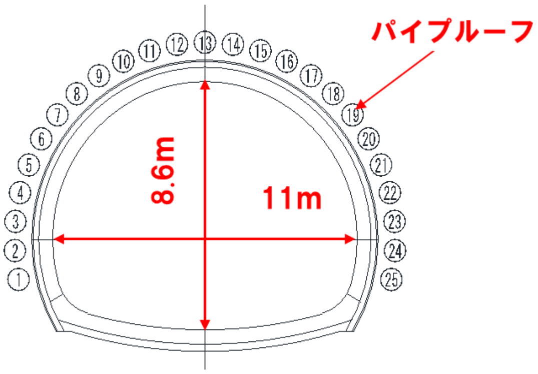


図-5　パイプルーフ配置図

(3) 計測計画と管理基準値の設定

パイプルーフ施工時のJR軌道周辺の挙動を把握するため、JR軌道直上およびJR盛土法面（掘進横断方向）、トンネル直上（掘進縦断方向）にて変位計測を実施した。鉄道近接マニュアル[2]によると、「10m弦の軌道変位を計測して管理することが基本」とされており、パイプルーフ施工時の管理基準値については、JR軌道の整備目標値である10m弦の相対変位-7mmが採用されていた。

JR軌道位置での変位については、Jefferyの理論解を用いて算出したところ、最大で-14.8mmの沈下が予測された。この時の相対変位は-0.9mmと非常に小さかったため、-14.8mmの2.5倍（-37.0mm）が厳重注意値（管理レベルⅢ）とし、その0.4倍が注意値（管理レベルⅠ）、0.7倍が要注意値（管理レベルⅡ）として管理することになり、それぞれの管理レベルに応じた具体的対策（計測頻度、監視体制、施工中断（地盤調査）など）が設定された。

(4) 試験施工の実施と管理基準値の妥当性の検証

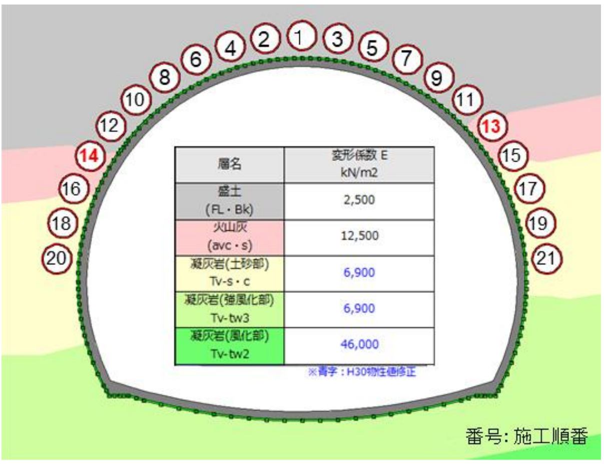
パイプルーフ掘進がJR軌道に与える影響を把握するため、土被りの最も小さいNo.13と隣接するNo.12の2本で試験的に施工することとした（**図-5**）。試験施工は線路閉鎖時間（23:00～2:00の3時間）及び列車間合いにより行われ、列車間合いの作業一時中止命令は、施工場所か

ら最も近い踏切（札幌側と函館側の2か所）に監視員を配置、警報機が鳴り始めたら無線連絡し、掘進作業を中止させる、という手順で行われた。

試験施工の結果、パイプルーフ2本の施工に対し、JR軌道位置での最大変位は-3.6mmとなり、設定した管理基準値に対し十分安全な値となった。また、JR軌道周辺の地山に変状は確認されず、列車の運行に支障をきたすような事象は見られなかった。なお、本項の内容の詳細については、先行報告[1]を参照されたい。

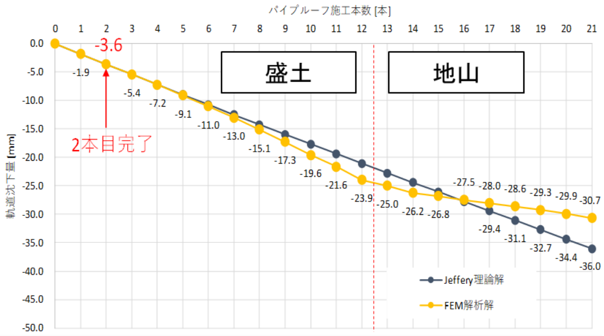
(5) 管理基準値の見直し

Jefferyの理論式による沈下予測は、エクセル等の表計算ソフトで容易に計算できる反面、単一地層による単純計算となるため、実測値との間に乖離が生じてしまう恐れがあった。そこで、地山の非線形性を考慮した数値解析が可能なFEM解析を実施することにした。地質モデルは隣接する避難坑の施工実績を反映し、図-6の通りとした。なお、応力解放率は試験施工による沈下量の実測値（2本施工した段階で-3.6mm）を採用し、30%とした。



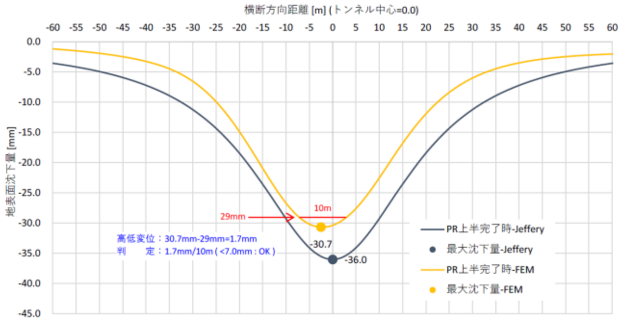
図–6　FEM解析に用いる地質モデル

FEM解析の結果とJeffery理論解との比較を図–7に示す。Jeffery理論解ではパイプルーフ施工が進むにつれて沈下量が線形的に増加するのに対し、FEM解析では、JR盛土（図–6、グレーの箇所）から地山の地層へと変わるトンネル肩部（図–6、⑬,⑭）から沈下量の減少傾向が緩やかになることがわかる。

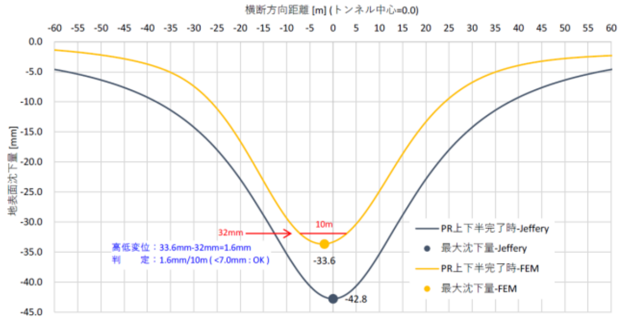


図–7　Jeffery理論解とFEM解析との比較

また、JR軌道から最も土被りが大きく、地山部分での施工となる下半のパイプルーフの補強効果について、今回のFEMモデルを用いて検証した（図–8、図–9）。実証の結果、パイプルーフを上半のみ施工した場合は最大変位が-30.7mm、10m弦の相対変位が-1.7mmだったのに対し、上下半施工した場合は最大変位が-33.6mm、10m弦の相対変位が-1.6mmとほぼ同程度であった。このことから、下半部分については想定通りの地山が確認されるのであれば、パイプルーフの省略が可能であることが示唆された。



図–8　地表面沈下分布予想（上半のみ施工）



図–9　地表面沈下分布予想（上下半施工）

(6) 本施工の実施

本施工はトンネル天端から脚部に向けて行った。施工箇所は2か所同時併進とし、昼夜施工で施工を進めた。

2024年5月上旬から施工を開始し、同11月上旬に上半部の施工を完了した。構台の盛替や掘進不能による再施工等なども含め、6か月で19本（約3本/月）のペースで施工を行うことができた（写真–3）。

写真–3　パイプルーフ施工状況

IKEDA Shotaro, ITO Koyo, OKUBO Seiichiro

(7) 計測結果と施工本数の見直し

図-10にJR軌道の沈下量の実測値とFEM解析値の比較を示す。実測値においても、沈下曲線に変曲点が現れており、FEM解析の再現性の高さを確認することができた。しかしながら、最終結果は-19mmであり、昨年度施工分（-3.6mm）を考慮しても-22.6mmとFEM解析結果である-30.7mmより小さい値となった。

図-11にパイプルーフ施工時に排土されたスライムから推定した地質展開図を示す。FEM解析断面は、トンネル上部が盛土で覆われていたが、実際の盛土の分布は坑口側にあり、軌道位置ではほぼ地山が主体となっていることがわかる。このことが、FEM解析値より実際の沈下量が小さかった要因として考えられる。また、最下段のパイプルーフのスライムにおいて、JR盛土は確認されず、全て地山部に入っていることがわかる。

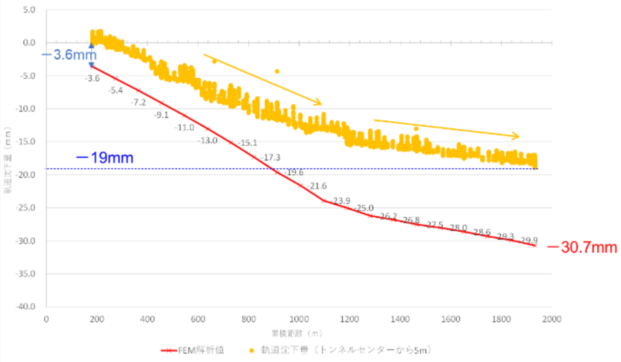


図-10　実測値とFEM解析値との比較

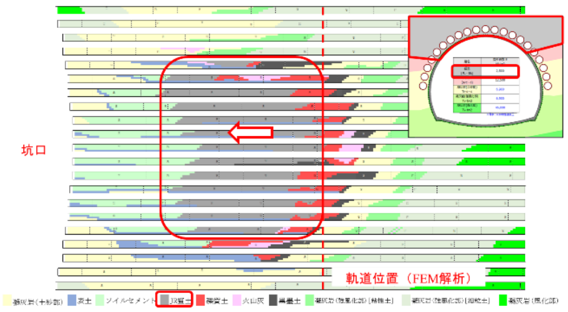


図-11　地質展開図（施工時のスライムから推定）

以上の結果より、下半のパイプルーフ(4本)の施工は省略することとなったが、トンネル掘削に先立ち、トンネル坑内からの変状抑制対策を事前に立案することとなった。詳細は次章に述べる。

(8) 中詰工の実施

将来的にパイプルーフの鋼管が腐食して変形し、JR軌道に影響を及ぼすことがないよう、鋼管内の中詰工を行った。充填材として、軽量で流動性に優れ、狭い空洞などにも充填しやすいエアミルクを使用した（設計基準強度1.0 N/mm^2）。

4. トンネル掘削について

(1) トンネル坑内管理基準値の設定

トンネル構造物の安定性と安全性を確認するとともに、設計・施工の妥当性を評価し、トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動、支保部材の効果、周辺構造物への影響等を把握するために、トンネル坑内の天端沈下、および内空変位の計測を実施する。管理基準値を設定する方法として、地山の特性値の一つである限界ひずみから求めることとし、その値と対応について**表-2**に示す。

表-2　管理基準値とその対応

管理レベル	設定基準		対応
	天端沈下	内空変位	
I	1/3×Ura -24㎜	2/3×Ura -48㎜	［注意体制］ ・観察・計測頻度強化 ・現場点検作業員への注意強化
II	2/3×Ura -48㎜	4/3×Ura -96㎜	［要注意体制］ ・観察・計測体制の強化 ・管理基準値からの最終変位予測 ・対処対策工の実施
III	Ura -72㎜	2×Ura -144㎜	［厳重注意体制］ ・切羽掘削の全面停止 ・変位要因、傾向の解析 ・支保パターン、対策工の再検討

(2) トンネル補助工法の検討

前述のとおり、パイプルーフの下半部については施工を省略していることから、トンネル掘削に伴い想定以上の変位が発生した場合、トンネル坑内から有効な変状対策を遅滞なく実施することができるよう、事前に対策を立案する必要があった。**図-12**に各管理レベルにおける対策工を示す。具体的な対策は以下の通りである。

① 想定される地山については安全側を考慮し、坑口から土砂（凝灰岩強風化部等を含む）として取り扱い、【標準案①】ロックボルトは施工せず、【標準案②】注入式長尺鋼管先受け工を施工する（**図-13**）。なお、施工開始場所は坑口より2mの位置とする。

② 管理レベルⅠの値を超過し、変位速度より管理レベルⅡの値を超過する見込みがあると判断されたとき、【補助工法②】早期閉合（閉合距離0.5D）＋長尺鏡ボルトを施工する（**図-14**）。

③ 管理レベルⅡの値を超過したとき、切羽掘削を一時中断し、その計測地点から前後5m（合計10m）の範囲において、【補助工法③】サイドパイル工（**図-15**）を施工する。その後、切羽を再開する際は【標準案②】注入式長尺鋼管先受け工に代わって【補助工法④】薬液注入工を施工する。なお、【補助工法②】は継続して施工する。

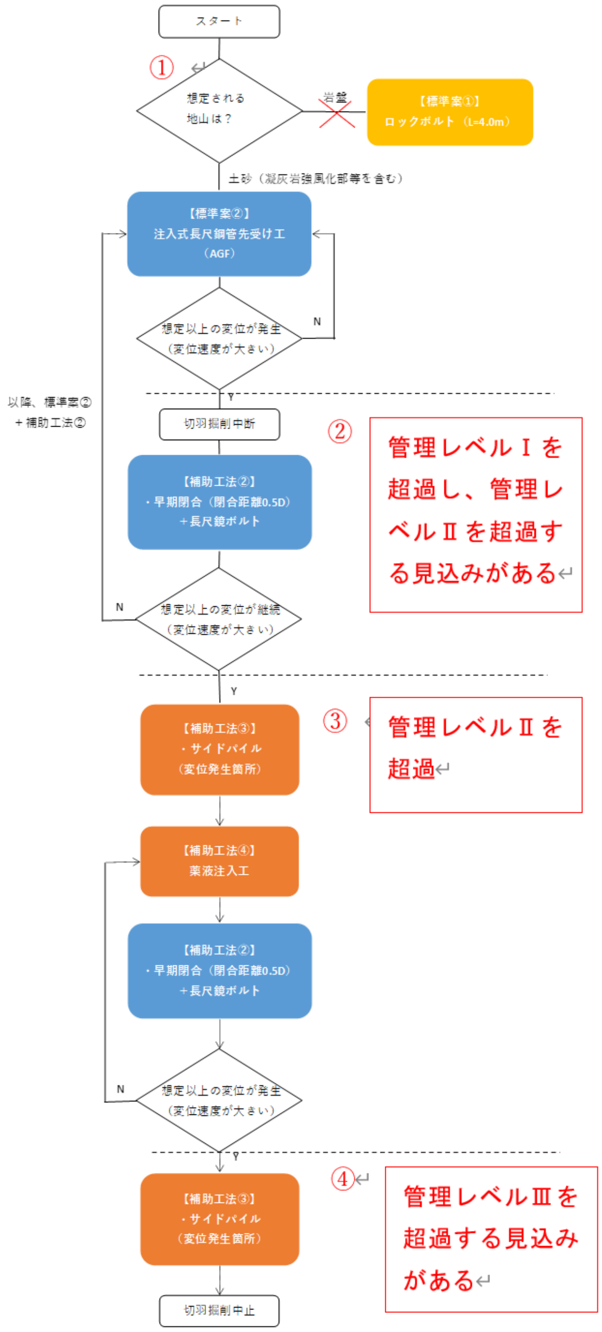


図-12　トンネル補助工法

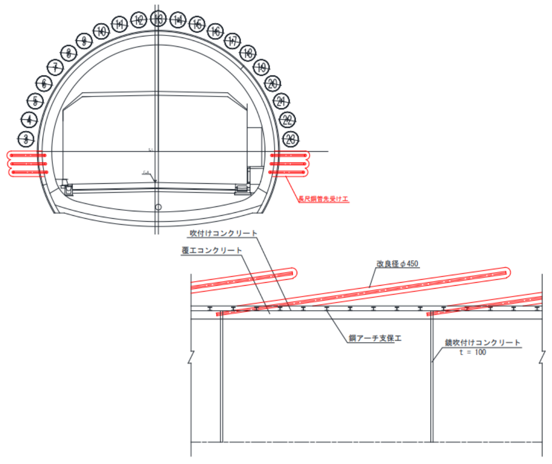


図-13　注入式長尺鋼管先受け工(AGF)（下半部）

④　変位速度より管理レベルⅢの値を超過する見込みがあると判断されたとき、切羽掘削を一時中断し、その計測地点から前後5m（合計10m）の範囲において、【補助工法③】サイドパイル工を施工する。その後、管理レベルⅢの値を超過したとき、必要に応じて変位抑制対策を速やかに実施する。

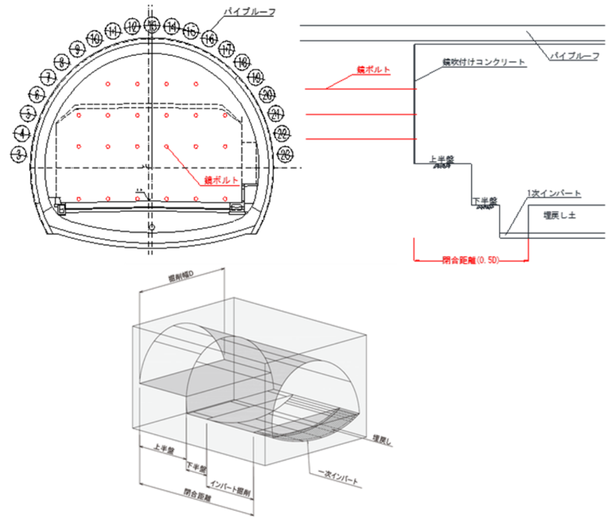


図-14 早期閉合(閉合距離0.5D)および長尺鏡ボルト

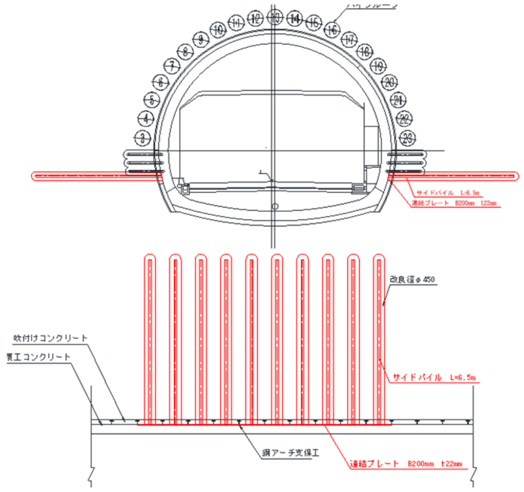


図-15 サイドパネル工

(3)　トンネル掘削に伴う坑内変位および軌道変位

図-11に示した地質展開図のとおり、JR軌道直下より坑口側では不安定なJR盛土が切羽天端部に見られた。そのため、掘削時にはパイプルーフの鋼管下部の土砂が落下する可能性を考慮し、鋼管まですべて除去することとした（写真-7）。また、対策方針に従い、注入式長尺鋼管先受け工も坑口より2mの位置から実施した。

写真-7 パイプルーフ鋼管下部の土砂除去状況

坑口から33m（軌道直下から23m坑口側）では、下半掘削中に鏡吹付けが崩落する事象が発生した（**写真-8**）。天端沈下および内空変位をもとに管理する**図-12**のフローチャートには該当しない事象だが、対策として、【補助工法②】鏡ボルトN＝15本、閉合距離0.5Dの早期閉合を実施した（**図-14, 写真-9**）。

写真-8　切羽崩落

写真-9　早期閉合（閉合距離0.5D）施工状況

坑口から40mの天端沈下が増大し（**図-16**）、管理レベルⅠを超えて管理レベルⅡに近づいた際には、事前に立案した対策工よりも安全側で【補助工法③】サイドパイル施工（**図-15、写真-10**）を実施した。この結果、天端沈下の速度が緩やかとなり、結果として管理レベルⅡに到達することなく施工を完了することができた。

また、JR軌道位置においても沈下量の計測が実施された。軌道沈下量の計測限界値（-24mm）までの余裕（-19mm）が少なくなることが見込まれた（**図-17**）際には、事前にJRと協議のうえ、計測機器の調整および軌道整備を行うことで、沈下量の観測を継続し、円滑にトンネル掘削を継続できた。

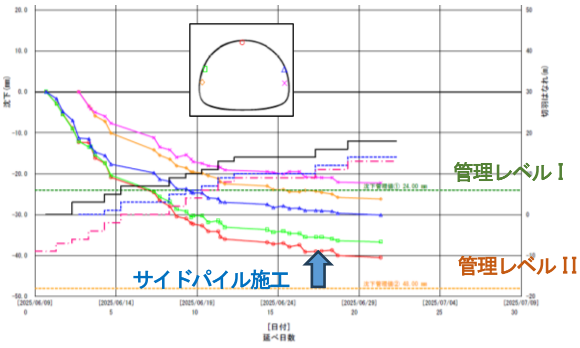


図-16　天端沈下計測（TD40m）

写真-10　サイドパイル施工完了全景

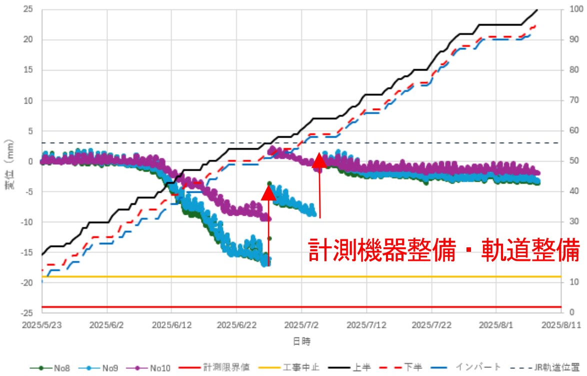


図-17　JR軌道位置における沈下計測

令和7年4月に坑口付けを行い、5月よりトンネル掘削を本格的に開始。不安定な切羽に対し、様々な補助工法を併用しながら慎重に掘削を進め、8月にJR軌道影響範囲95mのトンネル掘削を完了した。

5.　おわりに

今回のような、不均質な地山における長距離のパイプルーフの施工は実績が少なく、様々な施工上のリスクが考えられた。しかしながら、発注者、JR北海道、受注者が密に協議を行い、一つずつ課題を解決してきた。令和5年2月の着工から令和7年9月のJR軌道影響区間の変位収束確認まで、合計34回もの協議を行っている。大沼トンネル峠下工区本坑の坑口部掘削がJR軌道に支障を与えることなく、高い精度で不具合なく突破できたことは、これらの協議の賜物と考えており、関係者の方々には心より感謝申し上げる。

今後、類似した施工条件による沈下抑制対策があった際の計画や施工検討の一助となれば幸いである。

参考文献

1) 中川由輝, 山田剛史, 大久保征一郎：ＪＲ軌道直下における大沼トンネル本坑（峠下工区）の施工―パイプルーフによる沈下抑制―, 第 67 回 北海道開発技術研究発表会論文
2) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, pp. 219-222

IKEDA Shotaro, ITO Koyo, OKUBO Seiichiro