

J R 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—

函館開発建設部函館道路事務所第2工務課 ○中川由輝
函館開発建設部函館道路事務所第2工務課 山田剛史
清水・宮坂・森川特定建設工事共同企業体 大久保証一郎

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図り、地域間交流の活性化及び重要港湾函館港、拠点空港函館空港等への物流の効率化等の支援を目的とした延長10.0kmの高速自動車国道である。大沼トンネル本坑峠下工区(函館側)は、J R 函館本線の軌道直下を通過するため、沈下抑制対策としてパイプルーフ工法を採用している。現在、試験施工として鋼管2本の打設が完了している。本稿では、パイプルーフの施工計画、および施工状況について報告する。

キーワード：トンネル掘削補助工、JR軌道、パイプルーフ工

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(延長約10 km)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となる延長6,976.6mの道路トンネルとなる。また、北海道開発局では初となる避難坑を有する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、J R 函館本線の軌道が近接している。また、このJ R 軌道の直下(土被り約17m)を通過することになる。

地質や地山条件に応じた対策工を選定することが施工上の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J R 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。



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

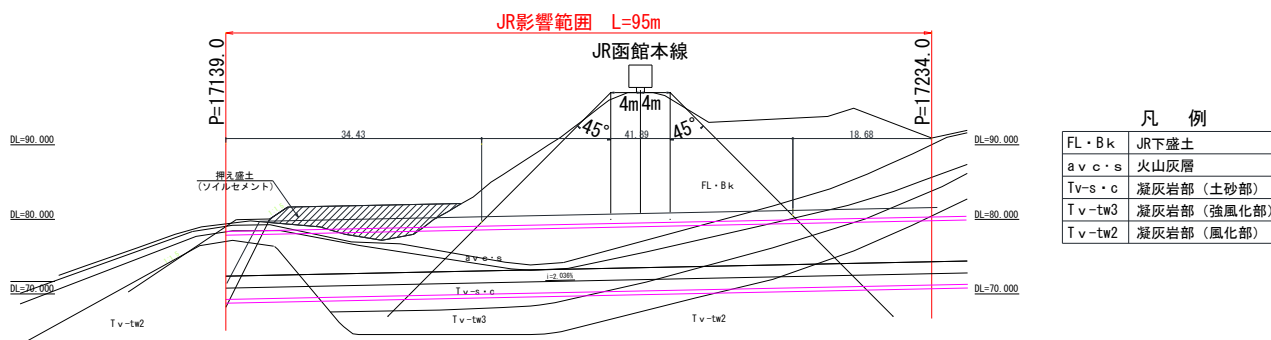


図-2 対象範囲

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	北海道縦貫自動車道七飯町大沼トンネル峠下工区工事
工事場所	北海道亀田郡七飯町字仁山
受 注 者	清水・宮坂・森川特定建設工事共同企業体
請 負 金	4,148,925,000円（税込）（第1回設計変更）
工事概要	工事延長：L=4,285.0m 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=974.4m（NATM、機械掘削） インバート工：L=789.5m パイプルーフ工：一式 残土処理工（整地）：93,400m ³

3. 施工条件

(1) 地質概要

図-3にトンネル坑口近傍の地質縦断面図、図-4に地質横断面図を示す。

J R軌道直下は上層からJ R軌道構築時に造成された盛土、火山灰、凝灰岩（土砂部）、凝灰岩（強風化部）で構成されている。また、坑口部と盛土の間の小土盛り部には押え盛土として、ソイルセメントによる改良盛土が施工されている。

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である。また、凝灰岩類は当該丘陵部のほぼ全域に分布する基盤岩類であり、火山噴出物により構成され風化の程度により分類されている。

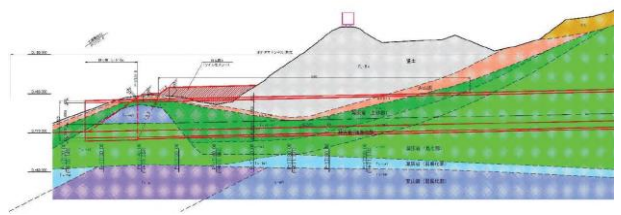


図-3 地質縦断面図

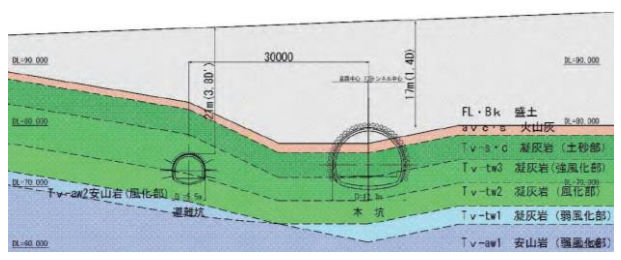


図-4 地質横断面図

(2) 計測管理

計測項目および数量一覧を表-2に、計器配置図を図-5～6に、管理基準一覧を表-3に示す。なお、管理基準値は軌道計測および地表面沈下計測（横断2測線）（表-2の赤枠）のみ設け、その他の計測については参考値とし、想定外の変状が生じた際の原因分析に使用するものとした。地表面沈下計で設定した管理基準値は事前に実施した予測計算により得られた、軌道部における想定最大変位の2.5倍を管理レベルⅢ（嚴重注意値）とし、その70%を管理レベルⅡ（要注意値）、40%（想定最大変位）を管理レベルⅠ（注意値）としている。各段階における対策については、表-4に示す。

表-2 計測項目および数量一覧

担当区分	計測項目	計測器	本坑
JR北海道	軌道計測	軌道変位測定器	1測線 (90m)
北海道開発局	地表面沈下計測	三次元測量	横断2測線 (83m、83m)
			縦断1測線 (30m)
	地中傾斜計測	多段式傾斜計	1本 (9m)
	地中水平傾斜計測	地中水平傾斜計	1本 (38m)

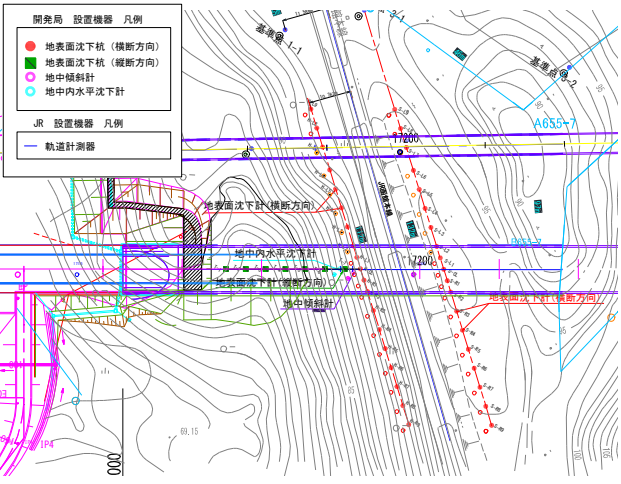


図-5 計器配置図（平面図）

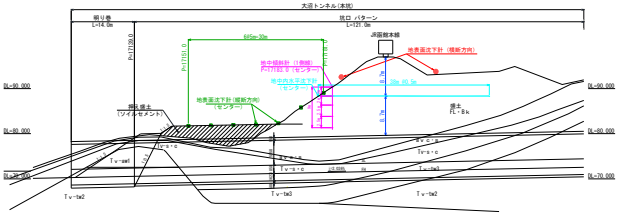


図-6 計器配置図（縦断面図）

表-3 管理基準一覧

項目	軌道計測					項目	地盤変位計測 (単位: mm)	
	軌間	水準	高低	通り	平面性		地表面沈下計 (横断)	参考値
想定最大変位						想定最大変位	±14.8	±33.0
整備目標値	+6.4	±7	±7	±7	—	注意値 (管理レベルⅠ)	±14.8	±33.0
警戒値	—	—	±10	±10	±12	要注意値 (管理レベルⅡ)	±25.9	±57.7
整備基準値	+14	平面性による	±15	±15	±18	厳重注意値 (管理レベルⅢ)	±37.0	±82.5

表-4 対策工一覧

管理体制	函館開建
通常体制	・地表面沈下計 (横断) の計測管理 (1回/4h)
注意体制 (整備目標値超過) (管理レベルⅠ超過)	・作業員への注意強化 ・地表面地盤の現地確認を行う ・変状要因の推定 (地表面沈下計 (縦断), 地中内水平沈下計の確認) ・対策工を検討 ・地盤沈下計測管理体制強化 (1回/3h)
要注意体制 (警戒値超過) (管理レベルⅡ超過)	・工事一時中断の要否を検討する ・地表面地盤の現地確認を行う ・変状要因の分析 (最終変位の予想) ・対策工の実施 ・地盤沈下計測管理体制強化 (1回/2h)
厳重注意体制 (整備基準値超過) (管理レベルⅢ超過)	・工事の一時中止 ・地表面地盤の現地確認を行う ・変状原因の究明 ・施工方法の見直しを行う ・地盤沈下計測管理体制強化 (1回/1h)

(3) 坑口切土

トンネル掘削に先立ち、坑口部の切土掘削 (1:0.5) を実施したところ、切土中央部から非常に硬質な地山が出現し、バックホウによる掘削が困難な状況となった (写真-2)。このため、大型ブレーカによる掘削に切り替えたが、掘削中に最大寸法2m程度の巨礫 (写真-3) が数多く出現した。また、切土掘削完了後の掘削面からも多くの巨礫が確認された (写真-4)。

このことから、パイプルーフ掘進時においても巨礫の出現が懸念され、掘削が困難な状況となることが想定された。



写真-2 硬質地山掘削状況



写真-3 巨礫出現



写真-4 坑口切土完了状況

4. パイプルーフの仕様

(1) 工法の選定

パイプルーフの施工方法として、オーガ掘削鋼管推進工法 (以下、オーガ式) と、泥水式掘進工法 (以下、泥水式) があるが、オーガ式は掘削された土砂をスクリー状になった本体を回転させることで外へ搬出する (図-7) ことから、当該盛土のような不均質かつ固結度の低い地盤の場合、切羽面の保持が難しく地表面へ影響を与えるリスクが考えられる。

これに対し、泥水式は泥水の圧力により切羽の安定を保ちながら掘削するため、先述のリスクが少ない。また、転石や玉石を含む地盤においても適応可能であり、掘進機の引き戻しも可能なため、到達立坑も必要としない。推進延長も100m以上可能で、方向制御もリアルタイムに対応が可能なため、高い施工精度の確保が可能である。以上のことから、泥水式を採用することとした。掘進機を写真-5に示す。

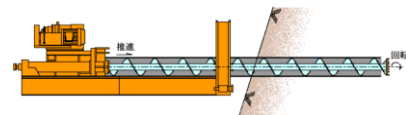


図-7 推進工 (オーガ式)



写真-5 泥水式掘進機

(2) 鋼管径の選定

写真-2、写真-3、写真-4に示したように、パイプルーフを施工するにあたり、地山内部に巨礫を多く含むことが想定される。巨礫の硬さ、大きさによっては掘削が困難となり、掘進不可能に陥る可能性も否定できない。

一般に、礫により掘進が困難な場合には、鋼管内部に作業員が立ち入り、人力によって撤去される。そのため鋼管内部で人が作業できる最小径（Φ800mm）以上とする必要がある。

以上のことから、本工事では鋼管径をΦ812.8mm、厚さt=12mmとすることとした。なお、施工範囲は上下半の範囲とし、打設本数は25本とした（図-8）。

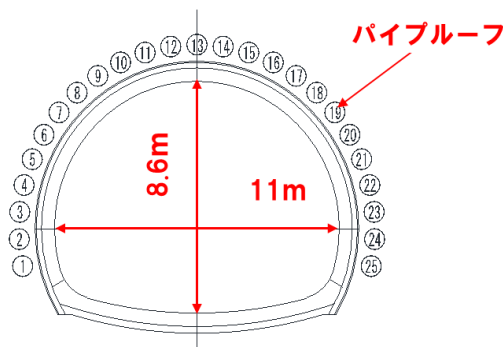


図-8 パイプルーフ配置図

(3) 設備全体概要

写真-6にパイプルーフ工法の設備全体を示す。掘進機は反力壁との間に配置されたジャッキにより推進力を得て地山を掘削する。掘削された土砂は泥水と共に泥水処理機へ排出され、土粒子と泥水に分離される。土粒子は残土として一時仮置き場へ搬出され、泥水は再度掘進機へ送水される。泥水の濃度は清水により調整され、余剰泥水は余剰泥水槽に貯蔵されたのち、汚泥として産廃処理される。

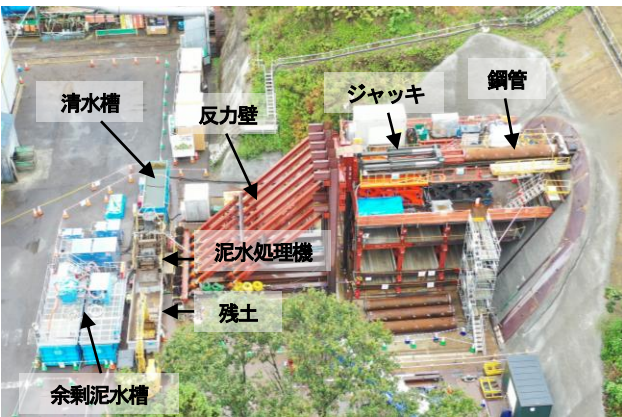


写真-6 設備全体写真

5. FEM解析による地表面沈下予測

(1) 解析条件

FEM解析に使用する解析モデルを図-9に、地山物性値を表-5に、構造物物性値を表-6に、パイプルーフ等価剛性値を表-7に示す。なお、地山物性値は隣接する避難坑掘削時に得られた計測結果をもとに再現解析を行い、地山物性値の同定を行った。また、本坑掘削時は早期閉合を前提とした解析ステップを採用している。

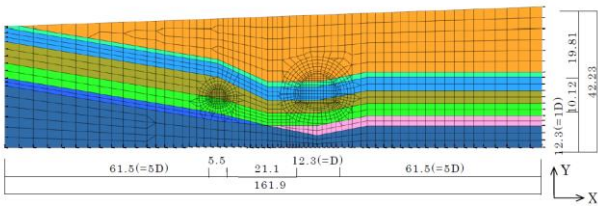


図-9 解析モデル（単位：m）

表-5 地山物性値一覧

層名	単位体積重量 γ (kN/m^3)	変形係数 E (kN/m^2)	ポアソン比 ν	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (deg)
FL・Bk	17.0	2,500	0.40	0.0	25.0
avc・s	16.0	12,500	0.40	36.0	10.0
Tv-s・c	18.0	6,900	0.40	15.0	25.0
Tv-tw3	18.5	6,900	0.40	15.0	35.0
Tv-tw2	20.4	46,000	0.40	100.0	37.0
Tv-tw1	20.9	424,995	0.35	500.0	40.0
Tv-aw1	21.1	110,222	0.40	153.5	37.4
Tv-aw2	18.9	47,374	0.40	102.0	33.8

表-6 構造物物性値一覧

構造物	仕様	要素寸法	変形係数 E (KN/m^2)	断面積 A (m^2)	断面2次 I (m^4)	断面係数 Z (m^3)
本坑	吹付けコンクリート	t=20cm 36N/mm ²	トラス要素	6.0×10 ⁵	0.20	—
	鋼7チ支保工	HH-154 @1.0m	ビーム要素	2.1×10 ⁵ (4.2×10 ⁷)	47.19×10 ⁻⁴	2.000×10 ⁻³ 260×10 ⁻⁴
	ロックボルト	l=4.0m @1.0m	トラス要素	2.1×10 ⁵	4.46×10 ⁻⁴	—
避難坑	吹付けコンクリート	t=10cm 18N/mm ²	トラス要素	4.0×10 ⁵	0.10	—
	鋼7チ支保工	H-125 @1.0m	ビーム要素	2.1×10 ⁵ (4.2×10 ⁷)	30.00×10 ⁻⁴	839×10 ⁻⁵ 134×10 ⁻⁴
	ロックボルト	l=2.0m @1.0m	トラス要素	2.1×10 ⁵	5.07×10 ⁻⁴	—

表-7 パイプルーフ等価剛性値一覧

対象地山	地山変形係数 E_g (MN/m^2)	鋼管変形係数 (MN/m^2)	等価剛性 E (MN/m^2)	摘要
FL・Bk	2.5	210,000.0	6,340.0	
avc・s	12.5		6,350.0	
Tv-s・c	6.9		6,340.0	
Tv-tw3	6.9		6,340.0	

(2) 解析結果

FEM解析の結果を図-10に示す。パイプルーフを施工した後、早期閉合を行いながらトンネルを掘削した際に軌道10m区間当りの高低変位は4.77mmとなり、軌道計測の整備目標値である±7mmに対し、70%以下となる結果を得た。

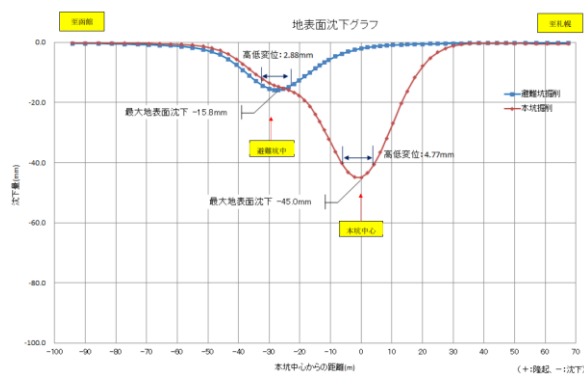


図-10 FEM解析結果

6. 試験施工

(1) 施工条件

現在施工を完了したパイプルーフ2本(図-8, ⑫⑬)は、試験施工の位置づけで次の条件下で施工を行った。

【1本目：図-8, ⑬】

- 施工位置はJR軌道に対して最小土被りとなる天端部とする。
- 軌道中心から4mの位置から45度ラインの区間(図-11)については、線路閉鎖時間(23:00～2:00の3時間)に施工を行う。それ以外の区間においては、列車間合い(23:00～6:00の7時間、うち列車8本×通過時間6分=48分は作業不可)の施工を行う。
- 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、図-12)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、という手順で行う。

【2本目：図-8, ⑫】

- 1本目施工時の変位計測結果等を検証し、JR軌道への影響が想定範囲内であれば、掘削位置に関係なく列車間合いでの施工とする。

なお、12月～3月の冬季期間は、JR軌道において不測の事態が生じた場合、バラストが凍結して軌道補修ができないため、パイプルーフの掘進作業は行えない。

今年度施工したパイプルーフ2本の変位計測結果を検証し、問題がなければ、来年度は24時間施工とする予定である。

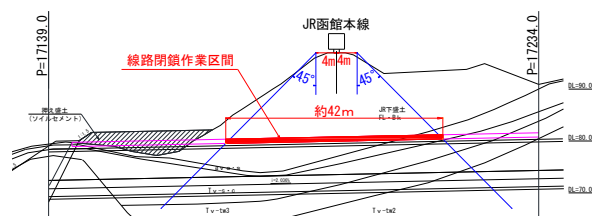


図-11 線路閉鎖時間での作業範囲

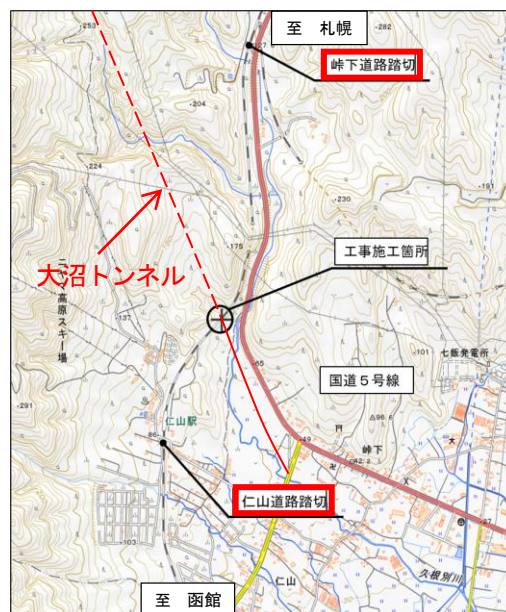


図-12 踏切監視員配置位置図

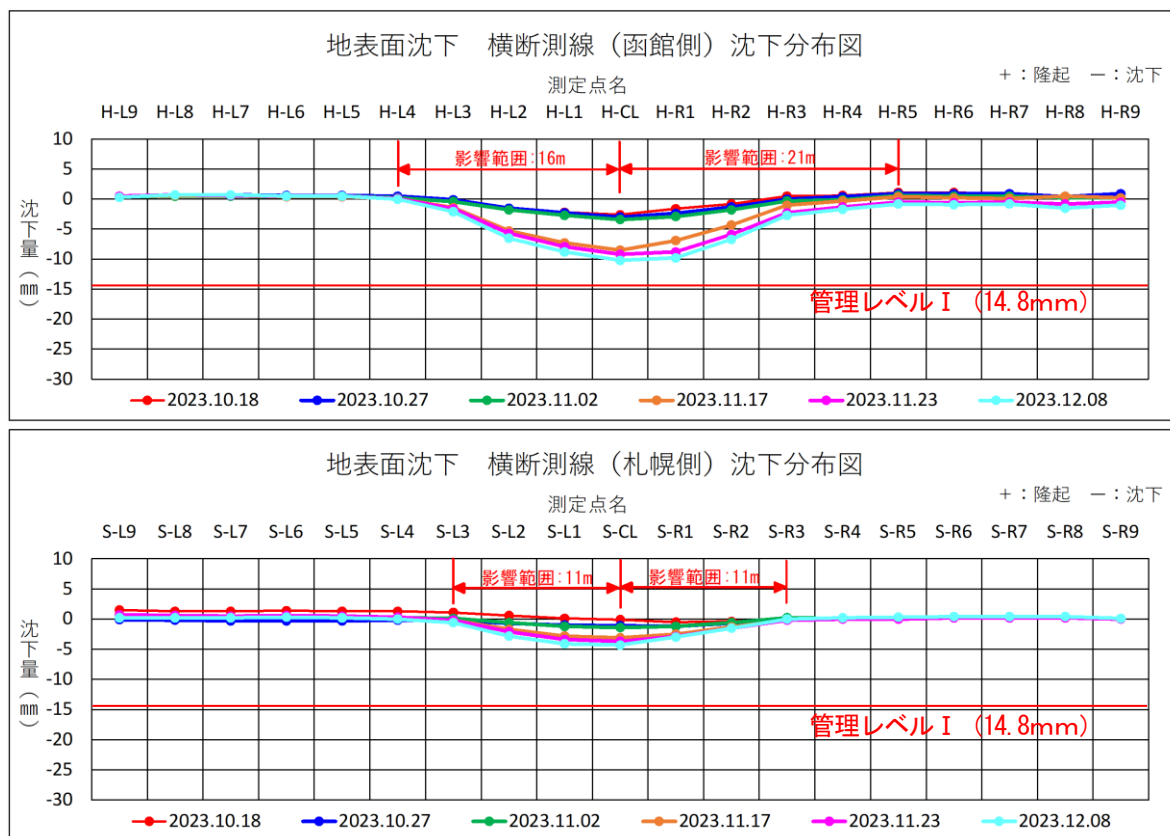
(2) 施工結果

a) 施工実績

掘進速度は押え盛土(ソイルセメント)では15～30mm/min程度と時間を要したが、盛土および凝灰岩(土砂部)、凝灰岩(強風化部)では概ね50～70mm/minと倍以上になった。また、施工精度は鋼管先端部において、1本目(No.13)は右10mm、高さ22mm(平均：右24mm、高さ31mm)、2本目(No.12)は左36mm、高さ8mm(平均：左20mm、高さ8mm)と精度良く施工することができた。

b) 計測結果

図-13に横断測線の地表面沈下分布図を、図-14にJR軌道における高低差の計測結果を示す。地表面沈下について札幌側に対し函館側の沈下量が大きくなっているが、札幌側は計測点のターゲットが平面上に設置されているのに対し、函館側は斜面に設置されていることに起因すると推察される。また、1本目に対して2本目の方が変位が大きくなっているが、いずれの測点も管理レベルI(地表面沈下：14.8mm以下)を下回っている。JR軌道の高低差計測結果についても、いずれの測点も整備目標値(7mm/10m)以内の計測値となった。



（—2023年10月27日：1本目施工完了、—2023年11月23日：2本目施工完了）

図-13 地表面沈下

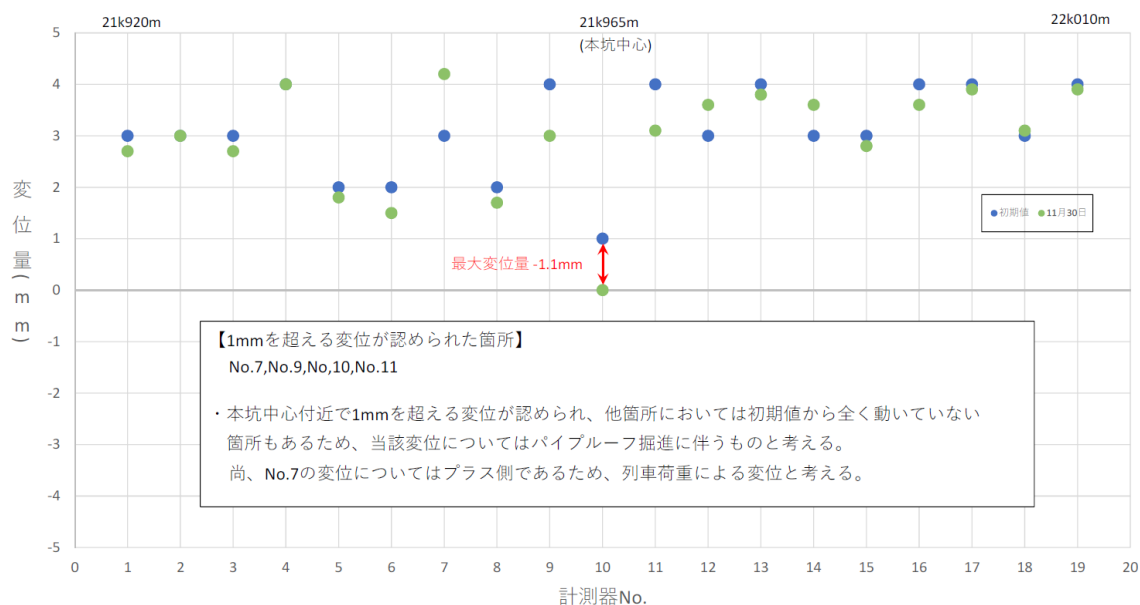


図-14 JR 軌道 高低差計測結果

7. おわりに

今年度のパイプルーフ工は25本中2本の施工にとどまったが、巨礫出現による掘進の停止などトラブルに遭遇することなく、高い掘進精度で施工することができた。また、各計測結果をみても、J R 軌道への影響を最小限

としながら施工することができた。しかしながら、パイプルーフの打設位置によって発生する変位は異なるものと考えられたため、今後の施工についても細心の注意を払いつつ実施する所存である。

また、最終的な計測結果をもとにトンネル掘削が与える J R 軌道への影響が事前予測に対して妥当かどうか、更なる検証が必要である。