

大沼トンネル避難坑の施工について

ー熱水変質を受けた低強度地山と多量湧水への対応ー

函館開発建設部 函館道路事務所 第2工務課 ○宮澤 駿
函館開発建設部 函館道路事務所 第2工務課 高橋 民雄
大林・岩田地崎・森川特定建設工事共同企業体 岡崎 雄一

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(仮称)は延長約7kmの長大トンネルのため避難坑が計画されている。本稿では、トンネル本坑に先立ち施工を行っている避難坑の施工状況と本坑施工における今後の課題について報告するものである。

キーワード：小断面山岳トンネル、低強度地山、多量湧水、円形二重支保

1. はじめに

北海道縦貫自動車道 七飯～大沼は、連絡機能の強化を図り、地域間交流の活性化や物流効率化等の支援を目的とした図-1に示す七飯IC(仮称)から大沼公園ICまでの10.0kmの事業である。この事業には約7kmのトンネル区間が含まれており、大沼トンネル(仮称)は北海道開発局では初となる避難坑を有する長大トンネルである。

大沼トンネル避難坑は全長7,041.8mであり、起点側(函館市側)と終点側(札幌市側)の両側から掘削を行っている。避難坑は本坑より先行して施工することで地質や施工情報を把握するとともに本坑

設計へのフィードバックが可能となるため、本坑工事のリスク低減を図るパイロットトンネルとしての役割を担っている。

本稿では、終点側にあたる西大沼工区の施工に伴い、発生した事象および対策工について報告するとともに、現在施工に着手している本坑工事で生じる可能性のある課題について報告する。

2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。工事は2期に分かれており、掘削延長は1期工事が2,069.9m、2期工事が1,293.9mで、合計延長は3,363.8mとなっている。

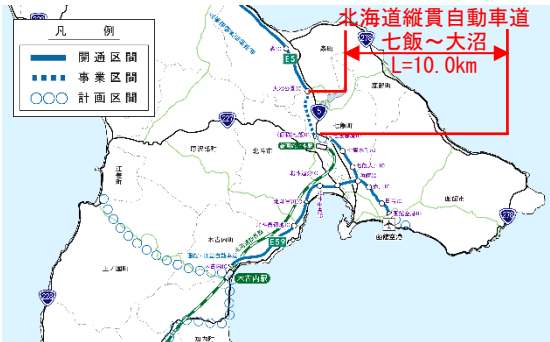


図-1 事業位置図

表-1 工事概要

工事名称	北海道縦貫自動車道 七飯町 大沼トンネル避難坑 西大沼工区新設工事
発注者	国土交通省 北海道開発局 函館開発建設部
施工者	大林・岩田地崎・森川JV
施工場所	北海道亀田郡七飯町
工期	(1期) 2018年1月24日～2021年4月30日 (2期) 2021年4月29日～2025年3月19日
請負金額	(1期) ¥3,683,950,000(税抜) (2期) ¥3,784,900,000(税抜) ※2023年9月時点
主要工種	トンネル工(小断面NATM)※レール方式
諸元	掘削延長: 3,363.8m 掘削断面積: 標準部: 20m ² 、拡幅部: 40m ²

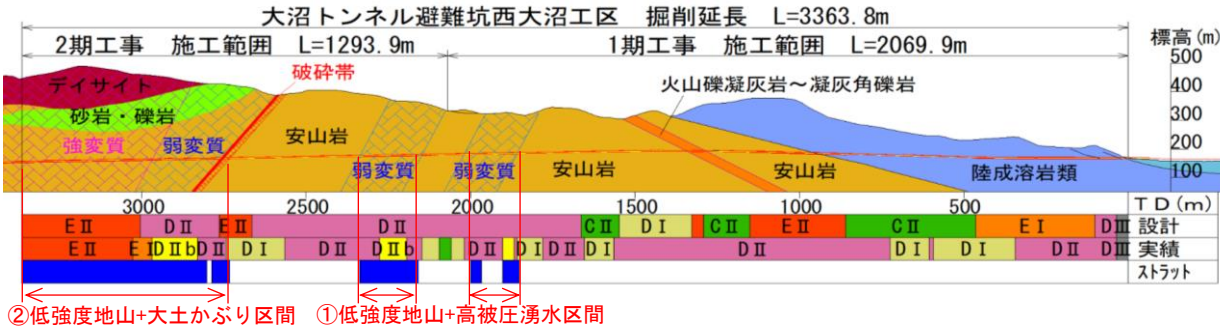


図-2 地質縦断図および支保パターン

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

長距離かつ小断面のため、ずり出し方式はレール方式を採用している。地質縦断面図と支保パターンを図-2に、各支保パターンの諸元を表-2に示す。トンネル周辺の地山は新第三紀の峠下火山砕屑岩類であり、熱水変質作用により粘土化や珪化を受けた脆弱な地質が広く分布する。また、TD=1,300mに火山礫凝灰岩～凝灰角礫岩層が分布し、坑口側の上位には非変質帯である陸成溶岩類が、下位には変質を受けた安山岩が分布することが想定されていた。そのため当初設計でも、円形断面であるEパターンが設定されており、最も重い支保パターンとして円形二重支保となるEIIパターンまで想定されていた。

TD=1,800～2,400mの区間では、熱水変質作用により粘土化した地質と高被圧湧水に対し、水抜きボーリングに加えて、DIIbパターン（馬蹄形、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）を採用し、インバートストラットによる早期閉合を実施することで対応した。TD=2,800m以降の強変質安山岩区間では、低強度地山と土被りが300m以上と大きくなることからEIパターン（円形、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）を採用したが、内空変位の増大によりEIIパターン（円形二重支保、高規格支保工、高強度吹付コンクリート）に変更し対応した。

3. 低強度地山および高被圧湧水区間

(1) 発生事象と地山状況

低強度地山および高被圧湧水区間で発生した事象を写真1～3に示す。TD=1,850m以降から切羽面に



写真-1 鏡面の押出し



写真-2 天端の抜け落ち

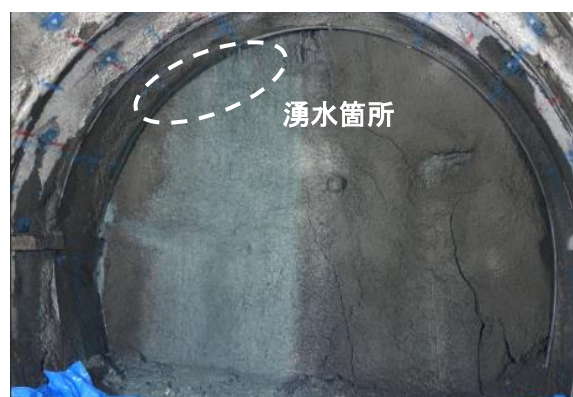


写真-3 突発湧水

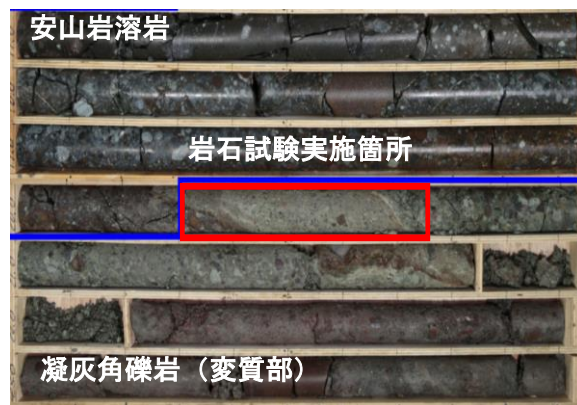


写真-4 凝灰角礫岩(変質部)コア

表-2 支保パターン諸元

支保パターン	断面形状	一掘進長	鋼製支保工	吹付コンクリート	ロックボルト	溶接金網	変形余裕量	
							全断面	インバート
CII	馬蹄形	1.2m	NH100	普通強度18N/mm ²	2m×9本	上半のみ	-	-
DI	馬蹄形	1.0m	NH100	普通強度18N/mm ²	2m×11本	上半のみ	-	-
DII	馬蹄形	1.0m	NH100	普通強度18N/mm ²	2m×11本	全周	-	-
DIIb	馬蹄形	1.0m	HH108	高強度36N/mm ²	3m×11本	全周	10cm	-
EI	円形	1.0m	HH108	高強度36N/mm ²	3m×13本	全周	10cm	10cm
EII	円形	1.0m	HH108(二重)	高強度36N/mm ²	4m×13本	全周(1次側のみ)	10cm	10cm

表-3 岩石試験結果および地山定数

弾性波速度 Vp (km/s)	超音波速度 vp (km/s)	一軸 圧縮強度 σc (N/mm ²)	単位 体積重量 γt (kN/m ³)	亀裂係数 K (%)	地山定数			スメクタイト 含有量 (wt. %)
					準岩盤圧縮強度 σc* (N/mm ²)	変形係数 Es* (N/mm ²)	地山強度比 α*	
1.0	1.3	0.2	18.9	25.0	0.1	26	0.1	87

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

脆弱な粘土層が出現し始め、鏡面の押出しや天端部の抜け落ちが発生した。加えて、切羽面から突発湧水が発生し、粘土層の奥に被圧した帯水層の分布が確認されたため掘削を一時中断した。ボーリングコア写真と岩石試験結果を写真-4、表-3に示す。地質は熱水変質を受けた凝灰角礫岩であり、地山強度は低く、スメクタイト含有量は87 wt.%と膨張性の指標となる30 wt.%を超過するなど著しい膨潤性を有していた。

(2) 高被圧湧水への対策

対策工の内容を図-3に示す。高被圧湧水への対策として、ドリルジャンボによる小口径長尺鋼管水抜きを実施した。鋼管にはスリット加工が施されており、粘土層区間での孔壁の保持と粘土分の流出によるゆるみ領域の拡大を防ぎながらの排水を可能としている。なお、鋼管の打設位置は湧水が切羽に回らないよう、掘削断面内ではなく切羽から3m程度後方の側壁でSLより低い位置を基本とした。

また、長尺鋼管先受け工と長尺鏡ボルト工を天端の抜け落ちや鏡面の押出しによる地山のゆるみ抑制と地山改良を目的に追加した。

加えて、脚部沈下と地山の膨張に対する早期的な支保の安定性の確保を目的に、支保パターンをランクアップさせ、鏡面から3m(0.6D)程度の位置でインバートストラットによる早期閉合を実施した。

(3) 対策工の効果

小口径長尺鋼管水抜きによる湧水量は合計2.3t/minとなり、水抜きボーリングの孔口で水圧

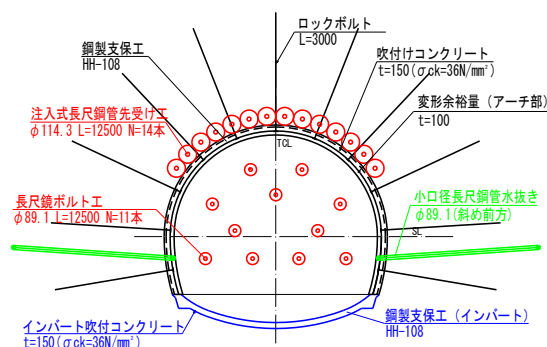


図-3 対策工の内容(DIIbパターン)

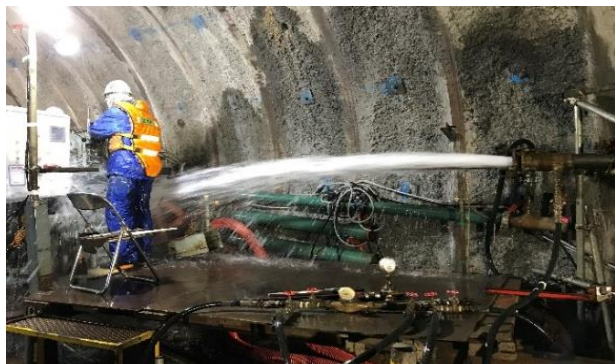


写真-5 TD=1,980m 多量湧水(3t/min)

を計測した結果、湧水圧は最大で0.5MPaであった。また、補助工法の追加と支保パターンのランクアップ、ストラットの追加により内空変位を管理レベルⅠ以下に抑え、湧水圧は掘削再開時には0.1MPa以下まで低減でき、高被圧地下水による切羽の崩壊もなく、無事脆弱な粘土区間の掘削を終えることができた。

またTD=1,980mやTD=2,300m地点においても、同様にコアボーリングにて厚さ5~15m程度の粘土層の分布が確認され、粘土層が遮水層となるためにその奥に高被圧湧水の分布が想定された。地下水圧による切羽の崩壊や支保の変状を防ぐために、切羽が粘土層に到達する前に再度コアボーリングによる地質の調査を行い、上記と同様の対策工を実施した結果、切羽の崩壊や大きな変状はなく安全に掘削できた。

各位置での水抜きボーリングの状況を写真-5、6に示す。TD=1,980m地点ではコアボーリングで3t/min、TD=2,300m地点では小口径長尺鋼管水抜きで3t/minの多量湧水が確認され、事前の水抜きと前方探査の追加により、早期に地質性状の把握を行ったことで、高被圧地下水による切羽崩壊を防ぐことができた。

4. 低強度地山および大土かぶり区間

(1) 発生事象と地山状況

TD=2,800mから地質の変化と変位量の増加に伴い、順次支保パターンをDII→DIIb→EIとランクアップさせ、TD=2,970mから当現場では初となる円形一重支保EIパターンにて掘削を進めていた。

EIパターン区間のA計測の結果を図-4に示す。インバートストラットによる早期閉合前の内空変位が顕著であり、管理レベルⅡを超過し管理レベルⅢに近い値まで推移した。支保においては吹付けコンクリートのクラックやロックボルトのプレートの変形等が発生した。

また、早期閉合実施以降の補助工法として、増しロックボルトや鋼材による鋼製支保工の連結などを実施したが、切羽後方の脚部においては切羽離れ10D(50m)以降も収束に至らず、ロックボルトや鋼



写真-6 TD=2,300m 多量湧水(3t/min)

製支保工の破断が発生した。低強度地山区間の切羽状況と支保の変状状況を写真-7～9に示す。

これらの計測結果や支保変状を受け、対策工として円形二重支保であるEIIパターンの採用を決定した。しかし、レール方式による小断面NATMでの二重支保の採用事例は少なく、閉合距離の設定や二次支保の構築時期を含めた適切な施工方法を選定することが課題となった。

坑内から実施したコアボーリングの状況と岩石試験結果を写真-10、表-4に示す。地質は熱水変質を受けた安山岩溶岩であり、岩石組織を残すものの大部分が粘土化していた。一軸圧縮強度は 0.6N/mm^2 と指圧でつぶれる程度であった。粘土化部では地山強度比は0.1と1を大きく下回る値となっている。なお、スメクタイト含有量は $8\text{wt.}\% < 30\text{wt.}\%$ と低く、膨潤性は低い結果であった。

(2) 円形二重支保の適切な施工方法の選定

二重支保の適用にあたり、現場の施工条件、施工事例およびFEM解析から最適な施工ステップを選定することとした。しかし、二次支保を構築するタイミングは、二重支保に求める効果の違いによって切羽からの距離には現場ごとに大きな幅がある。

一つ目の構築方法としては、一次支保での地山のゆるみと変位を許容し、地山の応力を解放する“いなし効果”を得た後に、二次支保を構築する方法である。地山をある程度ゆるませることを前提としているため、二次支保の施工は切羽から2D～5D程度と比較的大きい傾向にある。

二つ目の構築方法としては、地山のゆるみを最小限に抑え、切羽近傍で早期に二次支保を構築する方法である。二次支保の施工は2D以内と小さい傾向にある。

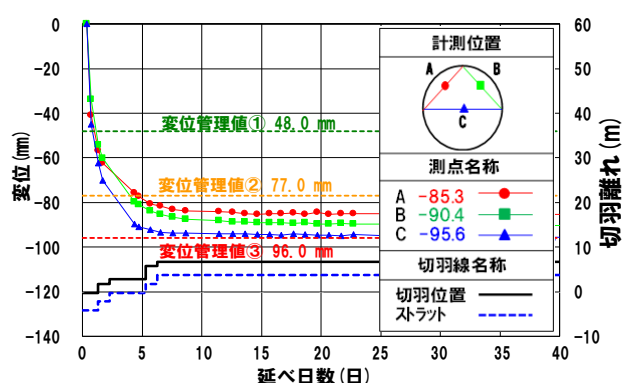


図-4 A計測結果 (EIIパターン区間)



写真-7 切羽状況 (TD=2, 978m)



写真-8 ロックボルトの破断



写真-9 鋼製支保工の変形



写真-10 安山岩溶岩 (熱水変質) コア

表-4 岩石試験結果および地山定数

区間	変質の程度	弾性波速度 V_p' (km/s)	超音波速度 V_p' (km/s)	一軸圧縮強度 σ_c (N/mm^2)	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	亀裂係数 K (%)	地山定数			スメクタイト含有量 (wt. %)
							準岩盤圧縮強度 σ_{c*} (N/mm^2)	変形係数 E_s* (N/mm^2)	地山強度比 $\alpha*$	
1	弱	2.1	4.1	26.4	24.6	74.1	13.4	356	1.9	-
2	強	2.1	0.7	0.6	23.1	0.0	0.6	356	0.1	8

いなし効果には二次支保への荷重が減る効果があるとされているが、周辺地山にゆるみを生じさせており、本坑掘削でさらにゆるみが拡大する可能性がある。また、早期施工の方が地山のゆるみを小さくすることができるため、安全面でも有利であること、レール方式によるレールの盛替え作業において二次支保を切羽近傍で構築した方がレールの撤去や再設置による手間が少なく、サイクル向上と支保の早期構築が期待できることなどの理由から、本工事では早期の二次支保構築を主に検討することとした。

(3) FEM解析による検証

最適な施工方法を選定するために、FEM解析による検証を実施した。三次元解析時の検証ケースを図

-6、EⅡパターンの支保諸元を表-6、支保パターン図を図-7、三次元解析の結果を表-7に示す。すべてのケースにおいて一次支保の変位量と応力は同程度であるのに対し、二次支保の変位量と応力は二次支保の構築時期が遅くなるほど小さく、いなし効果が確認される。鋼製支保工応力においては、すべてのケースで一次支保は降伏点に達しているのに対し、ケース②と③の二次支保は降伏点以下である。吹付コンクリート応力においては、一次支保ではケース③では設計基準強度 36N/mm^2 を超えている一方、二次支保では全ケースで許容応力度 13.5N/mm^2 以下である。

以上のことから、ケース①→②→③と二次支保の構築時期が切羽から離れるほど、二次支保の負担が小さいことが確認されるが、二次支保構築時期が

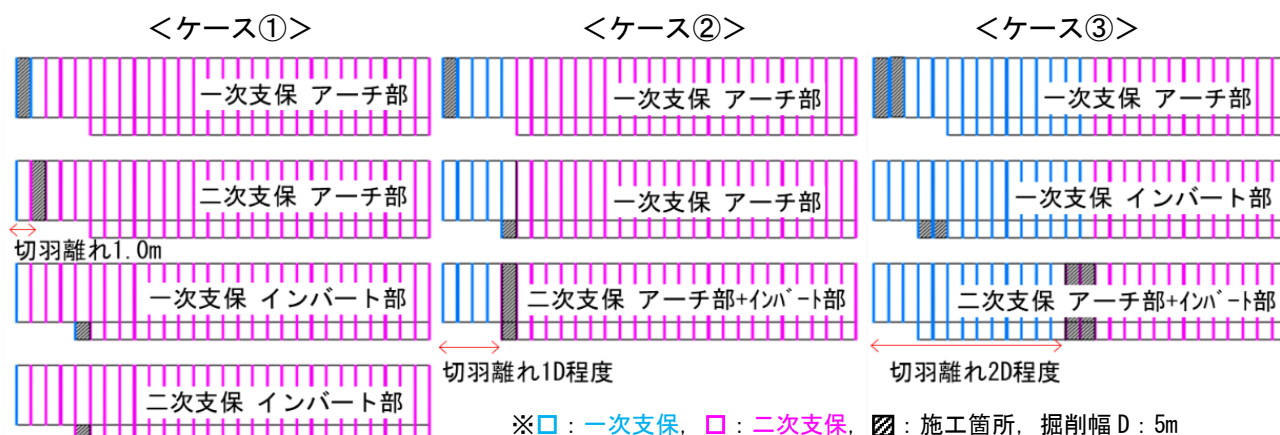


図-6 三次元解析 検証ケース（一次支保による閉合距離はすべて 1D 程度）

表-6 EⅡパターン支保諸元

断面形状	円形
一掘進長	1.0m
鋼製支保工	HH108(二重)
吹付コンクリート	高強度 36N/mm^2 1次側 15cm 2次側 10cm
ロックボルト	4m×13本
溶接金網	全周(1次側)
変形余裕量	10cm
掘削補助工法	AGF、長尺鏡ボルト

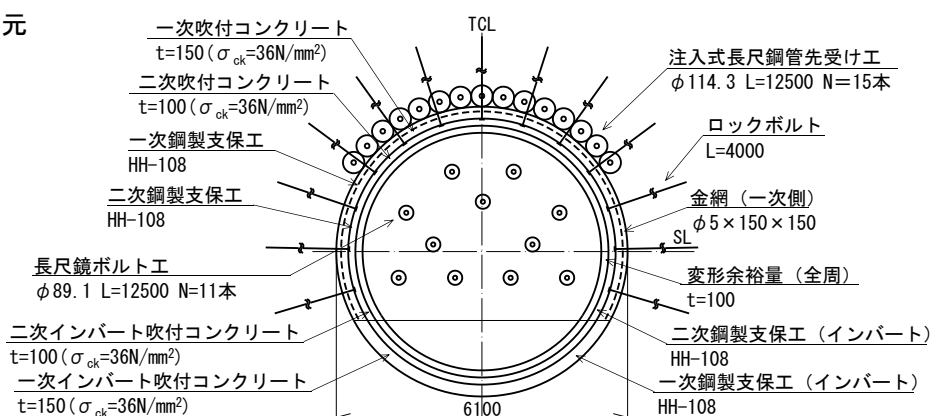


図-7 EⅡパターンの支保パターン図

表-7 三次元解析結果

検証 ケース	閉合距離	一次支保				二次支保			
		天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)	支保工応力 (N/mm^2)	吹付応力 (N/mm^2)	天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)	支保工応力 (N/mm^2)	吹付応力 (N/mm^2)
		[一: 沈下]	[一: 沈収縮]	[降伏点 440]	[設計基準強度 36]	[一: 沈下]	[一: 沈収縮]	[降伏点 440]	[許容応力度 13.5]
ケース①	1.0m	-40.2	-76.4	-440	-32.5	-26.9	-31.2	-440	-13.4
ケース②	1D程度	-41.4	-83.4	-440	-35.5	-11.3	+0.2	-439	-6.6
ケース③	2D程度	-43.6	-86.4	-440	-37.9	-1.0	-0.1	-29.9	-0.6

2D 程度のケース③では、一次支保の鋼製支保工降伏後の吹付けコンクリートの負担が大きくなることから、二次支保構築時期が 1D 程度のケース②が最適と判断した。

(4) 対策工の効果

二重支保区間の支保の妥当性を確認するために、A 計測に追加して B 計測を実施した。施工状況を写真-11 に、A 計測と B 計測の結果を図-8、表-8 に示す。図より、一次支保施工後の初期変位は大きいですが、インバートストラットによる閉合+二次支保構築後に変位速度は大幅に減少し、切羽離れ 3D 以内で収束を確認できた。B 計測からも閉合前の一次側の鋼製支保工は降伏応力を超過しているが、二次支保はすべて許容応力内に収まっていた。前述した FEM 解析と同様に、一次鋼製支保工は降伏応力に到達しているが、二次支保は許容応力以下に収まっており、採用した支保構造および施工方法での妥当性を確認できた。



写真-11 円形二重支保施工状況

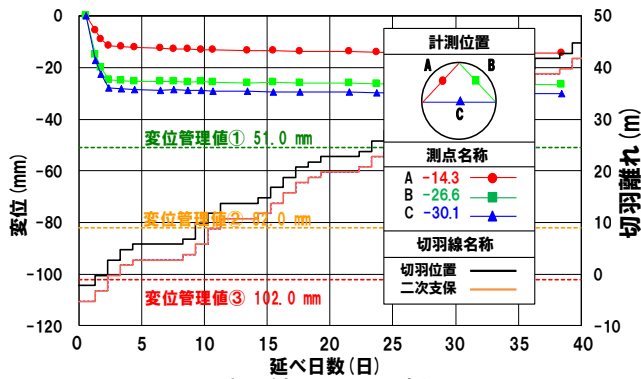


図-8 A 計測結果 (EII パターン区間)

表-8 B 計測結果 (EII パターン区間)

単位: N/mm²

位置	一次支保			二次支保		
	鋼製支保工		吹付 コンクリート 応力	鋼製支保工		吹付 コンクリート 応力
	縁応力 (外側)	縁応力 (内側)		縁応力 (外側)	縁応力 (内側)	
	降伏応力440		許容応力度 13.5	降伏応力440		許容応力度 13.5
天端	-440	440	9.9	77	283	1.9
右側壁	244	360	6.9	234	271	11.9
左側壁	196	169	6.9	176	-15	6.2
インバート	37	219	10.2	176	301	13.0

MIYAZAWA Shun, TAKAHASHI Tamio, OKAZAKI Yuichi

5. 本坑工事における課題

避難坑工事から想定される本坑工事での課題を以下に示す。

(1) 掘削断面の増加による変位量の増加

本坑の掘削断面は約 80m² と避難坑掘削断面の 4 倍となるため、同一地山であっても切羽の安定性は低下し、支保の変位量が増加することが想定される。そのため、円形二重支保区間においてはインバートストラットによる閉合や二次支保の構築時期について十分に検討する必要がある。

(2) 本坑掘削による避難坑支保の変状

本坑と避難坑の離隔がトンネルセンターで 30m と比較的近い位置関係にあることから、低強度地山区間においては本坑および連絡坑の掘削による周辺地盤の変形により、避難坑の支保への影響が発生することが懸念される。

(3) 突発湧水の発生

本坑施工においても避難坑施工時と同様に、突発湧水が発生する恐れがある。避難坑が水抜きボーリングの役割を担っているため、規模は小さくなると想定されるが、突発湧水の発生による切羽や支保の変状がないよう、十分に注意する必要がある。

6. まとめ

今回、低強度地山区間での小断面山岳トンネルの掘削において発生した事象および対策工について報告した。

① 想定されていない区間での多量湧水に対しては、ボーリングや小口径長尺鋼管による水抜きを実施することで切羽断面内からの湧水量を減少させ、切羽の安定性を確保することができた。とくに小口径長尺鋼管による水抜きは、掘削を進めながら切羽周辺の水抜きができる対策として非常に効果的であった。

② 大土かぶり区間では、事例がほとんどない小断面での二重支保の施工において、二次支保の構築時期を 1D 程度とした方法を採用した。その結果、地山のゆるみを可能な範囲で抑えつつ、二次支保を許容応力以下に抑えることができた。また、各種施工機械を切羽から 1D~2D 程度で据えることで作業を二次支保施工済み区間で行うことが可能になり、施工性と安全性の両面から非常に有効であった。

上記の結果、2018 年 6 月から約 6 年かけて、無事掘削を終えることができた。今回の避難坑トンネルを施工するに当たって直面した事象は本坑工事においても生じる可能性があると考えられるため、避難坑での施工事例を本坑掘削に活用していきたいと考えている。