

大土被りの蛇紋岩地山における 最善管理型二重支保の設計と施工

山田浩幸^{1*}・高橋俊長²・大村修一³・高田 篤³

¹ 正会員 (株) 鴻池組 土木技術部 (山岳トンネル担当) (〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

² 東日本高速道路(株) 千歳工事事務所 (〒066-0037 千歳市新富1-2-14)

³ 鴻池・飛島共同企業体 穂別トンネル西工事事務所 (〒054-0201 北海道勇払郡むかわ町穂別稲里 418-5)

* E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

穂別トンネルは全長L=4,323mの山岳トンネル工事であり、大土被り(250m以上)の蛇紋岩区間の本坑の施工にあたり、避難坑の施工実績に基づく再現解析と本坑に関する予測解析を実施して、加背割り、補助工法、支保パターンについての検討を行った。その結果、支保構造の安定を図る目的から、トンネル構造としては「最善管理型二重支保」という新しい考え方を導入し、一次支保工にも耐力を残した状態で二次支保を設定するものとし、その目安を許容ひずみ0.5%に設定した。

塊状と葉片状が混在する未固結な蛇紋岩地山での施工では、切羽安定確保の目的から補助工法の採用は必須と考え、周辺地山の一体化を図る目的で長尺リング補強工と長尺鏡ボルトによる補強を実施した。

Key Words : *mountain tunnel, large overburden, serpentine rock, optimum double support system, auxiliary method*

1. はじめに

穂別トンネルは全長L=4,323mの山岳トンネル工事であり、西工事ではその内、延長L=1,951mをNATMで掘進中である。トンネルの地質はメランジュと呼ばれる岩石種の異なる岩体(泥岩、緑色岩、蛇紋岩)が複雑に関係した地質構造を呈しており、硬軟も様々である。

特に土被りの大きい区間(土被り250m以上)において蛇紋岩(塊状、葉片状)が出現し、先行して施工された避難坑の蛇紋岩区間において大きな変位や支保変状を生じていたため、本坑の支保構造に関しては、避難坑の施工実績に基づき、数値解析的な手法も取り入れて、加背割り、補助工法、支保パターンの検討を行った。

その結果、支保構造の安定を図るためには、二重支保構造によるいなし工法の採用が必要と考えられたが、一次支保の状態での安定性に課題があり、トンネル構造としては「最善管理型二重支保」という新しい考え方を導入し、一次支保工に耐力を残した状態で二次支保を設置するものとし、その目安を地山ひずみで0.5%とした。

塊状と葉片状が混在する未固結な蛇紋岩地山における掘削では、切羽安定確保の目的から、補助工法の採用は必須であり、周辺地山の一体化を図る目的で長尺リング補強工と長尺鏡ボルトによる補強を実施した。



写真-1 蛇紋岩切羽状況



写真-2 トンネル施工状況

2. 適用トンネルの概要

穂別トンネルは、道東自動車道(北海道横断自動車道)の夕張IC～占冠ICの間に位置しており、全長L=4,323mの山岳トンネル工事である。西工事ではそのうち、西側の延長L=1,951mをNATMで掘進中である。トンネルの地質はメランジュと呼ばれる岩石種の異なる岩体が複雑に関係した地質構造を呈しており、硬軟も様々であった。今回の報告は、その内、蛇紋岩部分での検討結果である。トンネル位置を図-1に、工事概要を表-1に示す。

表-1 工事概要

工事名称	北海道横断自動車道 穂別トンネル西工事	
工事場所	北海道勇払郡むかわ町穂別長和	
工期	平成18年3月～平成21年3月 (その1) 平成21年3月～平成23年10月 (その2)	
発注者	東日本高速道路㈱	
施工者	鴻池・飛鳥特定建設工事共同企業体	
工事内容	延長	L=1,951m (道路土工L=12m含む)
	断面	掘削断面積A=85.0㎡ (DI) ,130㎡ (EII)
	施工法	NATM
	掘削方式	発破工法、機械掘削 (EII)
	掘削工法	E I, E IIパターン (上半先進ベンチカット工法) (E IIは最善管理型二重支保構造) C II, D I, D II, D IIIパターン (補助ベンチ付き全断面工法)
	補助工法	天端安定対策: 長尺鋼管フォアリング [®] (坑口) 長尺リング補強工 (E II) 注入式フォアボルト [®] 鏡面の安定対策: 長尺鏡ボルト、核残し 長尺鏡補強工 (E II) 脚部の安定対策: 脚部補強ボルト、仮インパト

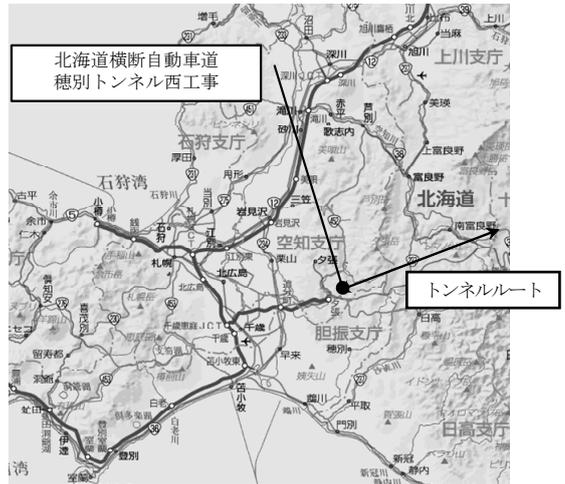


図-1 トンネル位置

3. 穂別トンネル西避難坑工場の施工状況

調査坑としての位置づけで先行施工された避難坑は延長L=2,150m、掘削断面は19㎡～26㎡ (小断面) であり、施工方法はNATM、全断面掘削工法、レール方式 (地山状況に応じて発破・機械掘削) であった。なお、図-2に示すように施工時に蛇紋岩は4回出現し、掘削延長2,150mのうち約500m分布していた。土被りが250m以上ある箇所では押ししや盤ぶくれといった支保の変状が発生し、支保剛性の向上 (支保エランクアップ、高強度吹付けコンクリート、鏡ボルト) により対応していた。

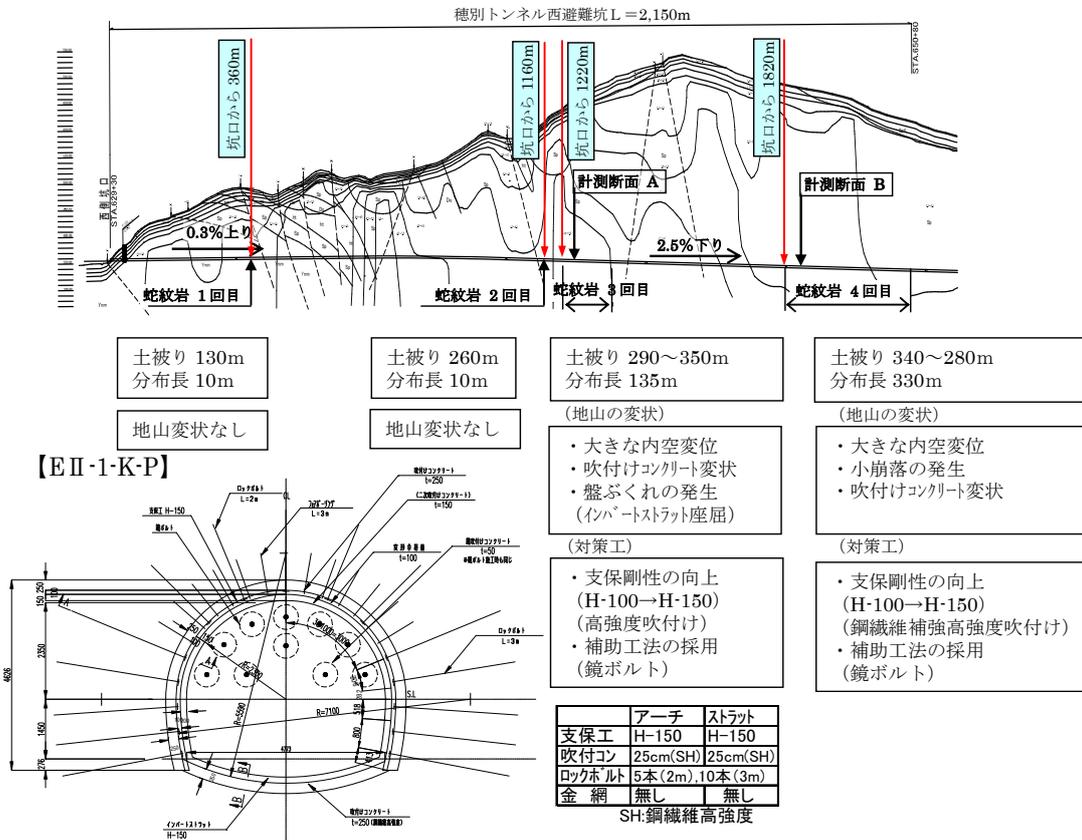


図-2 避難坑における蛇紋岩区間施工実績のまとめ¹⁾

とりわけ、3回目の蛇紋岩区間では、写真-3に示す大きな内空変位、吹付けコンクリートの変状、盤ぶくれが発生したため、支保剛性を上げ、EII-1-Kパターン+鏡ボルトにて施工したが、吹付けコンクリートのクラックや内空変位が比較的大きかったため、吹付けコンクリートの種別を鋼繊維高強度吹付けコンクリートに変更している。なお、蛇紋岩の地山試料試験結果から膨張性鉱物は含まれていないことを確認しており、蛇紋岩特有の潜在亀裂の進展によるゆるみの増大が大きな変位発生の原因と考えられる。



写真-3 避難坑変状状況 (STA. 641+75.1)

4. 本坑支保構造の検討

(1) 検討方針

検討はFEM解析（非線形弾性モデル）により行い、検討断面としては、避難坑施工実績を参考にして、本坑でも蛇紋岩の分布長の長く出現することが想定された避難坑3回目蛇紋岩区間を対象とした。まず再現解析により避難坑の計測データに基づき地山定数を逆算し、その地山定数を用いて予測解析により本坑での支保構造の安定性を評価した。

(2) 地山物性の評価

解析に用いた地山物性は、旧日本道路公団のトンネル数値解析マニュアルに基づき基本物性を設定し、同種地質（道央道嵐山トンネル）の実績²⁾、避難坑の試験値を参考にして設定した。

最終的には、表-2に示すとおり、避難坑の内空変位計測結果や実際の避難坑の変状状況、切羽（鏡面）の状況等と照合しながら最適であると判断したケースの物性値（変形係数等）を予測解析に用いた。

(3) 再現解析結果と分析

図-3は、解析結果（再現解析）と計測値を比較したものである。変位量としては解析結果のほうが若干小さくなったが、変位モードとしてはいずれの結果に関しても全体的に縮みながら沈下している状況であり、良く一致していることが分かる。

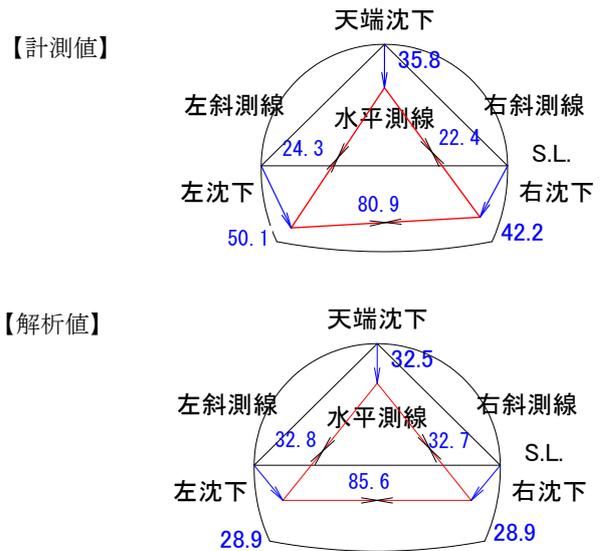


図-3 解析値と計測値の比較 (変位モード)³⁾

表-3に解析結果と避難坑で実施した計測結果（地中変位計の結果）の比較（変位）を示した。これらの結果から、緩み領域に関しても比較的良好一致が見られたことから、今回採用した地山物性値が妥当であると判断した。

表-3 解析値と計測値の比較 (変位)³⁾

		解析値	計測値
緩み領域	天端	1.0m	1.5~2.5m
	左側	2.2m	1.0~2.0m
	右側	2.2m	2.0~3.0m
変形モード	天端	32.5mm	35.8mm
	水平	85.6mm	80.9mm

表-2 解析に用いた地山物性値³⁾

項目	変形係数 MPa、N/mm ²	ポアソン比	単位体積重量 kN/m ³	粘着力 MPa、N/mm ²	内部摩擦角 deg	引張強度 MPa、N/mm ²
採用物性値	150	0.34	24	0.2	30	0.04
G6 (DII相当)	150	0.35	21	0.2	30	0.04
嵐山試験値	—	0.34	24	—	—	—

■はG6 (DII相当)を採用、■は嵐山試験値を採用

(4) 本坑予測解析結果と分析

再現解析の結果得られた地山物性値を用いて本坑施工時の支保構造の検討を行った。本坑予測解析に関しては、再現解析同様、非線形弾性解析を用いた。

表-4 に検討ケースを示し、表-5 には二重支保工による解析結果（解放率 40:50:10）の 1 例を示した。

解析結果からは、変位量、支保発生応力ともに許容値内に収まるのは二重支保構造による施工のみとなった。なお、ケース①、②、⑧は施工が困難と判断した。

表-4 本坑予測解析（検討ケース）³⁾

検討ケース
①全断面（補助工法無し）
②上半、下半、インバート（補助工法無し）
③全断面（二重支保同時施工）
④全断面（二重支保：二次支保設置時解放率 10%）
⑤全断面（二重支保：二次支保設置時解放率 15%）
⑥全断面（アチ 2m 改良 D=4,500N/mm ² ）
⑦全断面（アチ 6m 改良 D=3,000 N/mm ² ）
⑧全断面（全周改良, D=4,500N/mm ² ）

なお、鋼製支保工に関しては図-4に示すとおり、鋼材の特性から降伏点（440Mpa）に至った時点で歪みだけが大きくなり、見かけの応力は大きくなるが、実際には作用荷重は吹付けコンクリートの方へ流れることとなる。

したがって、トンネルの支保部材のうち、鋼製支保工（高規格支保工）と吹付けコンクリート（高強度）の荷重分担に関して図-4に示すように、鋼製支保工の設計値（終局値）を超過する発生応力を吹付けコンクリートの設計値（終局値）で分担可能かどうかで照査した。

表-5、表-6に予測解析結果の一部を示した。

表-5 検討結果（変位量）³⁾

検討ケース	①天端沈下	④上半内空変位	⑦下半内空変位	判定
①	89.1	62.1	-9.2	○
②	202.6	330.0	289.5	×
③	43.9	21.8	-36.9	○
④	68.7	63.9	-0.1	○
⑤	67.1	59.9	-3.6	○
⑥	66.4	-1.3	-17.6	○
⑦	46.6	15.3	9.7	○
⑧	19.6	14.2	11.0	○

表-6 検討結果（吹付け発生応力）³⁾

検討ケース	①天端部	②右肩部	③左肩部	④インバート部	判定
①	46.4	47.2	47.0	43.8	×
②	47.6	37.5	37.2	13.3	×
③	22.8	22.6	22.6	18.5	△
④	4.7	4.6	4.6	3.8	○
⑤	7.0	7.0	7.0	5.7	○
⑥	14.4	16.7	16.5	52.1	×
⑦	12.1	16.5	16.4	53.8	×
⑧	9.6	11.8	11.8	5.6	△ (X)

凡例
 符号：正が圧縮応力
 許容値
 設計値：吹付け 13.5 Mpa (許容応力)
 終局値：吹付け 36 Mpa (設計基準強度)

△：終局値内に収まり許容値の考え方によっては成立

不可
 終局応力以内
 設計値以内

表-5 本坑予測解析（解放率 40:50:10）

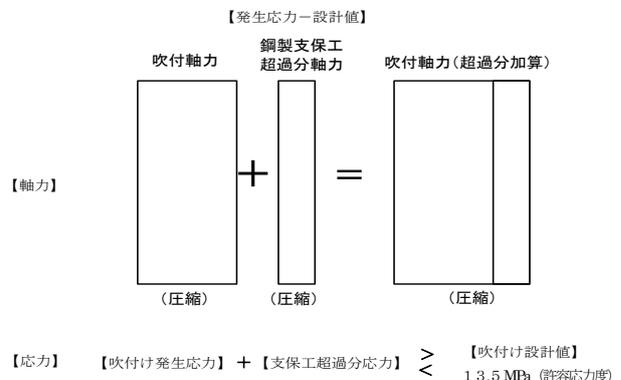
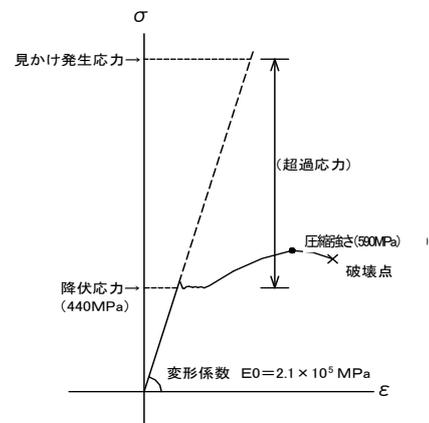
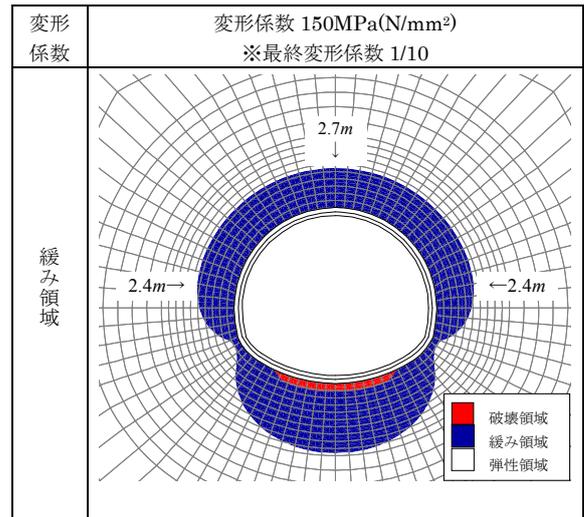


図-4 トンネル支保の荷重分担³⁾

□内は成立の可能性のあるケース

(5) 支保構造の選定と対策工の方針

本坑予測解析の結果を踏まえて、本坑の支保構造の選定と対策工の方針に関して図-5に示すとおりとした。ここで、本トンネルでは従来の「いなし工法：一次支保では変位を許容して二次支保でしっかり押さえる」の考え方を発展させ、綿密な計測管理による「最善管理型二重支保構造」として一次支保にも耐力を残した状態で二次支保を設定するものとし、その目安を地山ひずみ0.5%に設定した。

5. 蛇紋岩区間の施工実績

(1) 最善管理型二重支保工の施工

二重支保の施工は以下に示すサイクルで実施した。

- ①補助工法の施工
- ②上半掘削一次支保2基施工
- ③上半掘削二次支保2基施工
- ④下半片側2基掘削一次支保工
2基施工
- ⑤下半片側二次支保工2基施工
- ⑥インバート掘削一次、二次ストラット同時施工

なお、トンネルの全断面閉合を早期に実現する目的でサイクル向上のための促進案として、トンネル施工設備（ドリルジャンボ、吹付け機械、吹付けプラント）を2セット準備することで結果的にトンネル切羽離れ8mで全断面閉合を完了した。

(2) 計測結果の分析

ここでは、蛇紋岩区間（EIIパターン）において実施した計測工 A、計測工 B の結果を示し、支保構造の安定性に関する評価結果を示す。

a) 計測工 A 測定結果と評価

図-6 に EIIパターン（STA. 640+98.71）における計測工 A の結果を示し、以下に概要をまとめた。

- ①初期剛性（高規格鋼製支保工）を用いることで初期変位速度が20mm/日程度に収まった。
- ②二次支保（HH-150）設置後も収束傾向が見られず、早期のインバートストラット+吹付けコンクリートによる全断面閉合が必要と判断された。
- ③現時点で内空変位は133.1mmとなっており、当初設定した変形余裕量（150mm）内に収まっている。

全体的な経時変化の挙動は、EII（高規格支保工による二重支保工の採用）により、初期変位速度は抑制されているが、二次支保（HH-150）設置後もトンネルの変位収束は見られず、インバートストラットを用いた全断面閉合実施後に変位は収束傾向が見られた。

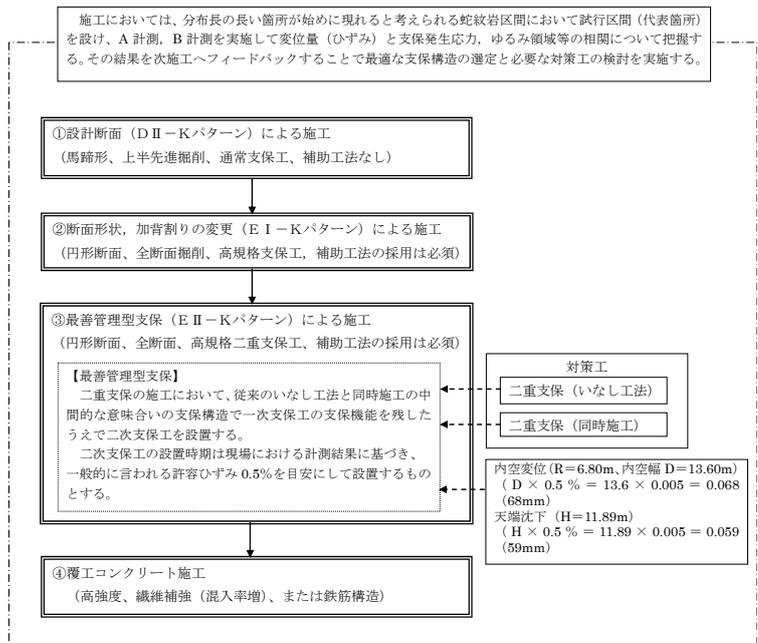


図-5 最善管理型による二重支保選定と対策工の方針³⁾



写真-4 最善管理型二重支保の施工状況

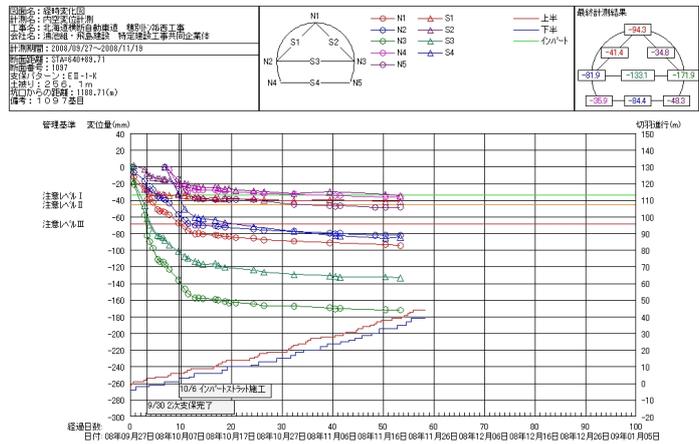


図-6 計測工 A 経時変化（STA. 640+98.71：EIIパターン）³⁾

b) 計測工 B 測定結果

支保工応力（鋼製支保工、吹付け応力）に関しては、予測解析結果で想定されたように鋼製支保工の発生応力は一次、二次ともアーチ部で全体的に圧縮状態となり、発生応力自体は結果的に降伏点を越えている箇所がある。また、吹付けコンクリートの発生応力に関しては、一次、二次とも当初設定した許容値（設計値：13.5N/mm²）

内で収束傾向が見られており、トンネル構造の安定性は確保されていると考えられる(図-7)。

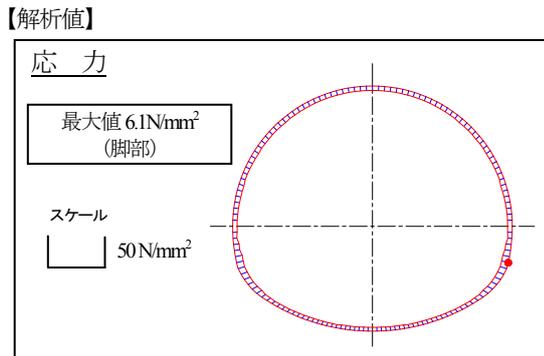
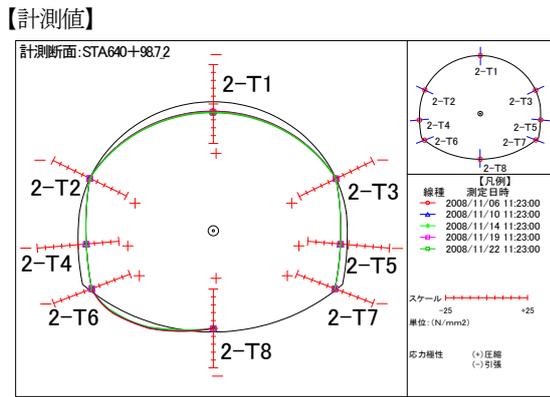


図-7 計測値と解析値の比較(二次支保吹付け)³⁾

伏点を越えた大きな発生応力を示したが、吹付けコンクリートの発生応力は許容値(設計値: 13.5N/mm²)以内に収まっており、トンネル構造の安定性は確保されていると考えられる。今後、さらに 350m を越える大きな土被りを有する蛇紋岩区間が控えており、これまでの施工実績の分析を進め、施工上の工夫により全断面閉合の早期実現に向けて取り組むとともに、工期内でのトンネル完成に向けて安全に留意して施工を進める所存である。

最後に、本工事の施工にあたっては、北海道支社管内トンネル施工技术検討委員会において、委員長である北海道大学工学部三上教授はじめ、各委員の方々の貴重な助言を頂いた。最後に紙面を借りて厚く感謝の意を表したい。



写真-4 補助工法完了状況³⁾

6. まとめ

土被りが 250m を越える大土被り蛇紋岩地山での施工というこれまで施工実績のない特殊条件におけるトンネル工事において、数値解析を用いた支保構造の検討により、一次支保にも耐力を残した上で二次支保を施工するという、最善管理型二重支保構造を採用して蛇紋岩区間 L=156m の施工を完了した。補助工法として長尺リング補強工および長尺鏡ボルトを併用することにより地山を一体化することで初期変位速度の抑制が図れた。また、支保構造の安定に関しては、予測解析で想定していたとおり、鋼製支保工に関しては、一次、二次支保工とも降

参考文献

- 1) 相山孝司: 蛇紋岩特有の押し出し性地山の掘削時の挙動について、(社)日本トンネル技術協会、第60回施工体験発表会(山岳)講演集、pp33-40, 2007.
- 2) 稲葉英憲, 西谷直人, 手塚洋, 新田訓弘: 神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る(その2)道央自動車道 嵐山トンネル、トンネルと地下、pp15, 1989.
- 3) 山田浩幸, 佐々木正博, 大村修一, 高田篤: 土被りの大きい脆弱地山(蛇紋岩)におけるトンネル設計と施工に関する一考察、2009トンネル技術研究発表会、pp81-92, 2009.

A STUDY ON DESIGN AND CONSTRUCTION OF OPTIMUM MANAGING DOUBLE SUPPORT IN SERPENTINE ROCK WITH LARGE OVERBURDEN

Hiroyuki YAMADA, Toshihisa TAKAHASHI, Syuichi OMURA,
and Atsushi TAKADA

The Hobetsu tunnel has a total length of 4,323m and now is under construction by using NATM. The tunnel is located in complex rock masses, which are called melange (compound of mudstone, green rock, and serpentine rock), among which, large deformation was confirmed in the sections composed of serpentine rock with large overburden (over 300m). The adoption of auxiliary method in the tunnel construction was considered necessary to ensure the stability of cutting face and support structure. This paper presents the design of the support structure (double support pattern) in the weak ground (serpentine rock) with overburden over 250m, and the assessment of the measurement results during construction.