

蛇紋岩地帯におけるトンネル支保構造の 検討について—施工報告①—

旭川開発建設部 士別道路事務所 第3工務課 ○齋藤 宏樹
掛田 浩司
橋本 忠幸

現在、一般国道40号の音威子府バイパス事業では、音威子府トンネル工事 (L=2,699m) と音中トンネル工事 (L=4,686m) を施工中であり、合計約1,495mの蛇紋岩帯を掘削する計画である。蛇紋岩は、塊状、角礫状、葉片状および粘土状の形態に区分され、個々の形態により強度特性が大きく異なる特徴を有しており、各々に適した支保パターン及び掘削補助工法で施工を進めている。本論文ではこのような強度特性の異なる多様な蛇紋岩のトンネル掘削において、計測結果を基に支保構造の検討過程をとりまとめ報告するものである。

キーワード：蛇紋岩、支保構造

1. はじめに

(1) 音威子府バイパスの概要

一般国道40号は、旭川市を起点に、稚内市に至る延長約250kmの幹線道路である。このうち音威子府バイパスは、雪崩による特殊通行規制区間を解消し、道路交通の定時性、安全性向上や現道の交通事故低減を目的とした総延長約19kmの一般国道のバイパス事業である。

音威子府バイパスでは、トンネルを4本計画しており、音威子府トンネル(L=2,699m)は南東に位置する起点側のトンネル、音中トンネル(L=4,686m)はバイパス事業区間の中央に位置するトンネルである (図1-1参照)。

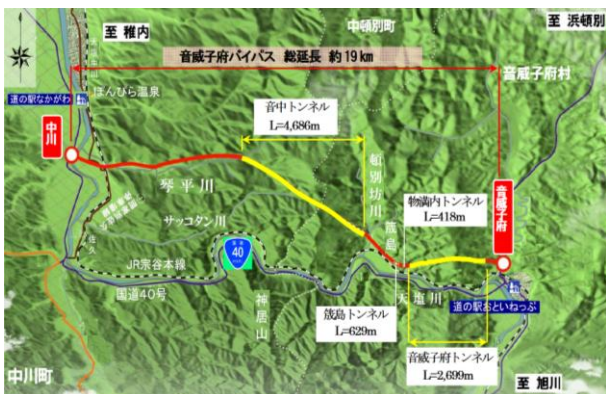


図1-1 音威子府バイパス全体図

(2) 音威子府トンネル及び音中トンネルの地質

両トンネルの基盤地質は、上部蝦夷層群西知良内層の泥岩、中部蝦夷層群佐古丹別層の砂岩・泥岩、空知層群の緑色岩およびそれらに貫入した蛇紋岩である。音威子

府トンネルは蛇紋岩と西知良内層の泥岩で主に構成され、音中トンネルは蝦夷層群の泥岩、空知層群の緑色岩類と蛇紋岩で構成されている。蛇紋岩は大きな塑性地圧が発生するため、トンネル工事が難渋する例が多いことで知られている。音威子府トンネルならびに音中トンネルの先進ボーリングでは塊状、角礫状、葉片状、粘土状の蛇紋岩が出現しており、各々に適した支保パターン選定を計測結果に基づき設定し施工を行っている。音威子府トンネルでは平成22年6月より掘削を開始し、平成24年11月末現在L=1,428m(蛇紋岩412m)の施工を完了している。また、音中トンネルでは平成22年9月より掘削を開始し、11月末現在L=1,931m(蛇紋岩187m)の掘削を完了している。音威子府トンネル、音中トンネルの地質縦断を図1-2および図1-3に示す。

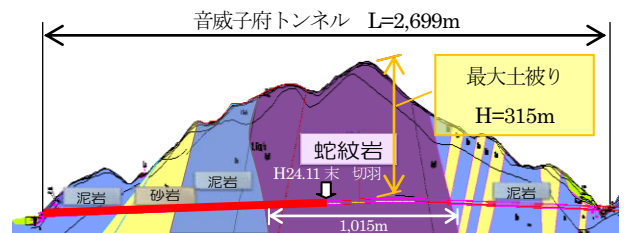


図1-2 地質縦断図 (音威子府トンネル)

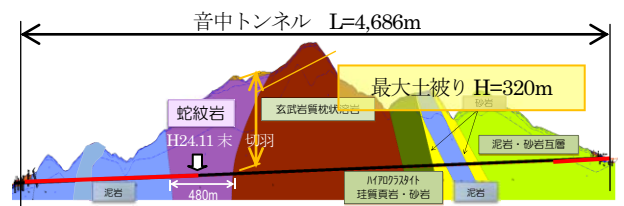


図1-3 地質縦断図 (音中トンネル)

2. 蛇紋岩帯へのアプローチ(音威子府トンネル)

本工事では安全で安定した蛇紋岩帯の掘削方法の確立を目指して、既往の施工実績や地質調査結果を基に、以下のフローに従い、トンネル支保仕様の設定を行った。¹⁾

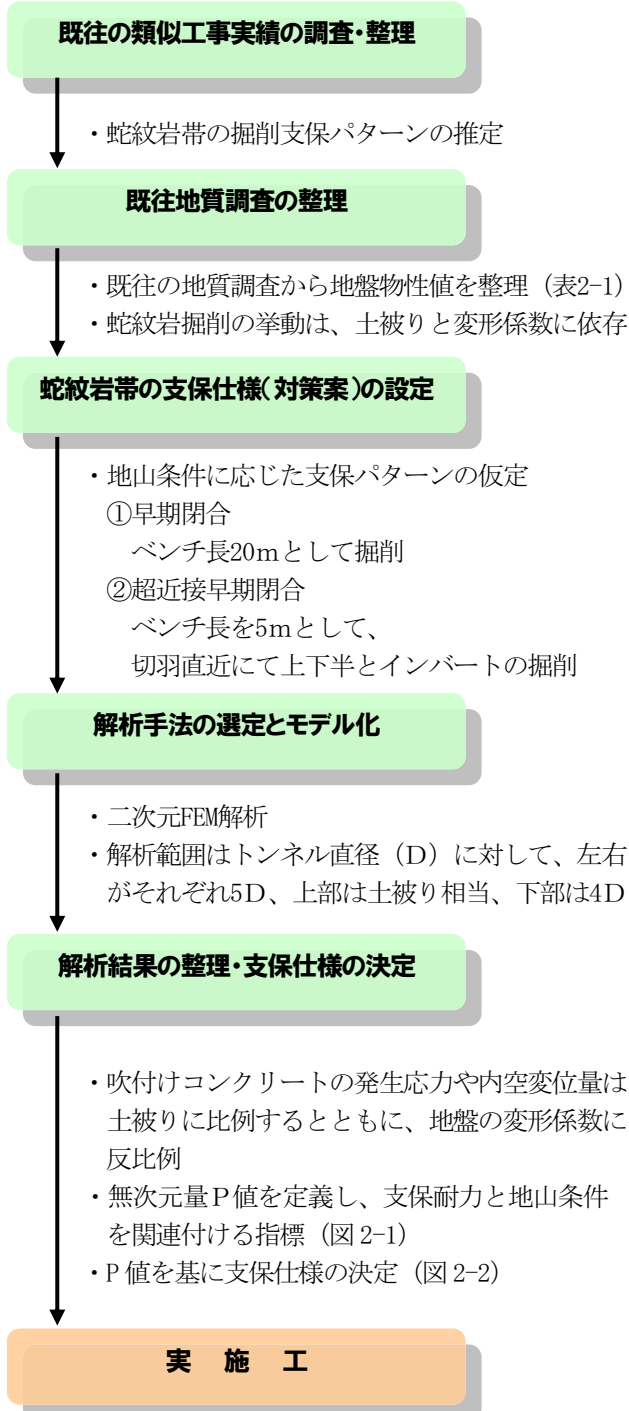
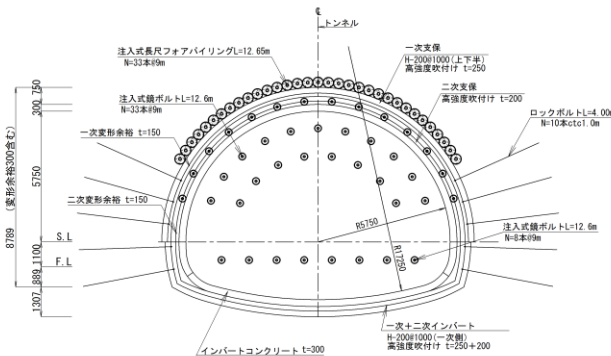
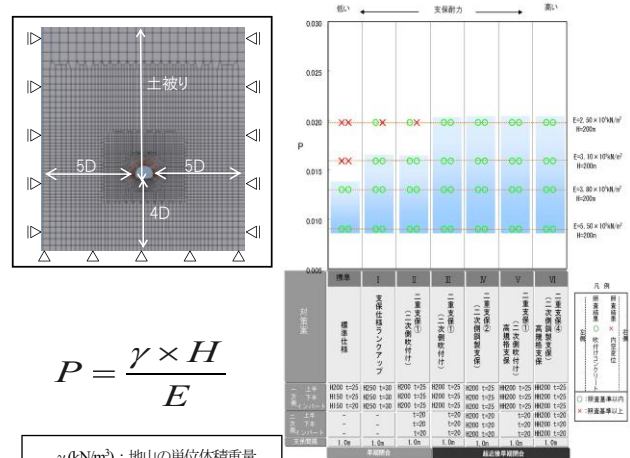
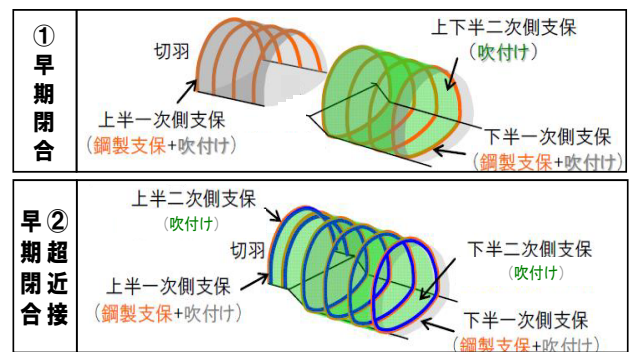


表 2-1 既往トンネルの施工実績

工事名	支保構造	地山条件	
		最大土被りH(m)	地盤変形係数 E (KN/m ²)
穂別トンネル※1	二重支保	350m	1.5×10 ⁵
幌加内トンネル※2	通常支保	120m	1.0×10 ⁵

※1 北海道横断自動車道穂別トンネル西工事
※2 一般国道275号深川市幌加内トンネル



3. 計測結果

両トンネルの蛇紋岩区間において、当初選定した支保パターンの妥当性を検証するために計測工Bを実施した。図3-1に計器配置図、表3-1に計測条件を示す。

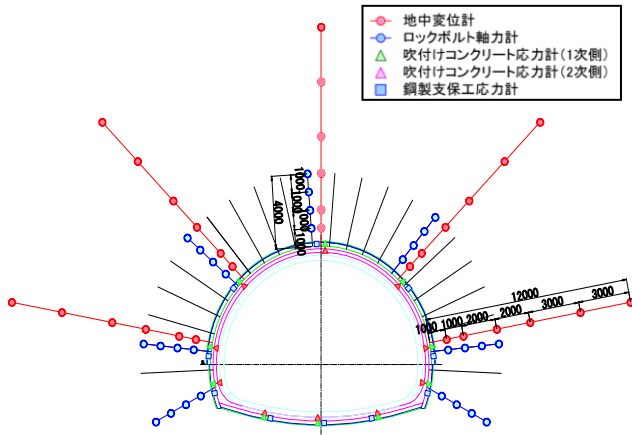


図3-1 計測工B配置図

表 3-1 計測条件

	音威子府トンネル	音中トンネル
支保構造	E II (1)	
蛇紋岩形態	塊状～葉片状 (塊状主体)	葉片状～粘土状 (葉片状主体)
計測位置 (TD)	1, 072m	1, 344m
土被り	H=250m	H=203m
吹付け厚	1次側: $t_1=25\text{cm}$ 、2次側: $t_2=20\text{cm}$	
鋼製支保工	H200 (SS400)	1次側のみ設置
ロックボルト長	L=4.0m (TD24)	

図3-2～図3-5に音威子府トンネル、図3-6～図3-10に音中トンネルで得られた計測工Bの結果を示す。また、図3-11～図3-12に音中トンネルにおける計測工Aの結果を示す。それぞれの計測結果から以下の知見が得られた。

(1) 音威子府トンネル

①一次吹付けコンクリート応力は天端～上半肩部で比較的大きな応力が発生している ($10\sim 26\text{N/mm}^2$)。これは側圧が大きく、局所的な曲げ作用によるものと思われる。全測点で設計基準強度 ($f'_{ck} = 36\text{N/mm}^2$) の許容範囲内で収まっている (図3-2)。

②二次吹付けコンクリート応力の発生応力レベルは全測点で低く (6N/mm^2 以下)、測点による差異はほとんどみられない。一次支保の段階で一次吹付けコンクリートと鋼製支保工によってトンネルの安定化が図られた、と考えられる (図3-3)。

③鋼製支保工軸力は全体に圧縮側となり、天端～上半肩部で設計基準強度 $N=1, 334\text{KN}$ ($H=200$ 、 $N=210\text{N/mm}^2 \times 63.53\text{cm}^2 \times 10^{-1}$) を大きく超過する。

④鋼製支保工曲げモーメントは全測点において、設計基準強度 $M=99\text{KN}\cdot\text{m}$ ($H=200$ 、 $M=210\text{N/mm}^2 \times 472\text{cm}^3 \times 10^{-3}$) 内で収まっている (図3-4)。

⑤掘削影響深度は壁面から16m程度発生 (緩んでいる) している (図3-6)。

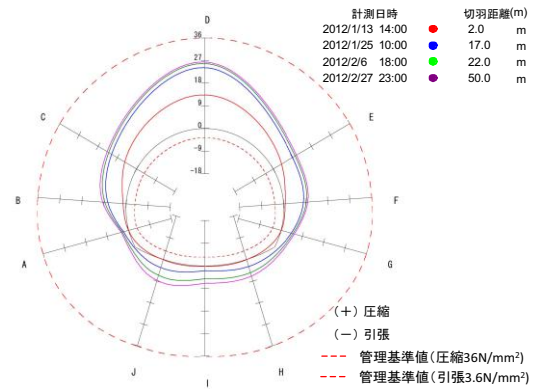


図3-2 吹付け応力分布図 (一次側)

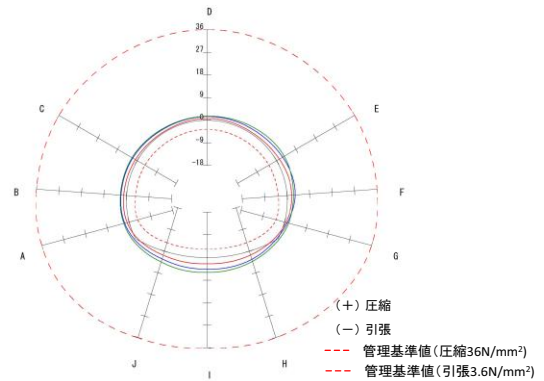


図3-3 吹付け応力分布図 (二次側)

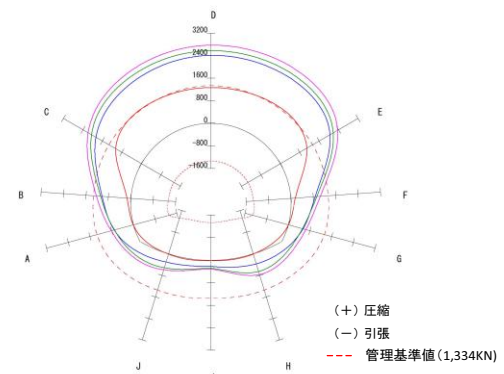


図3-4 鋼製支保工軸力分布図

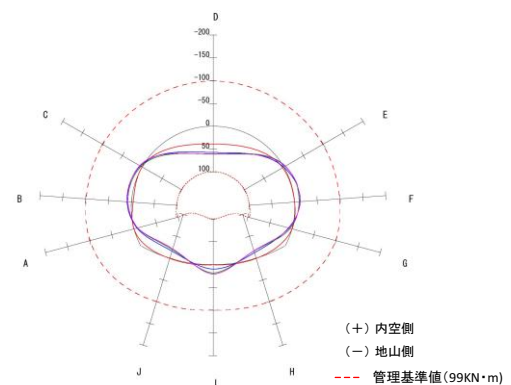


図3-5 鋼製支保工曲げモーメント分布図

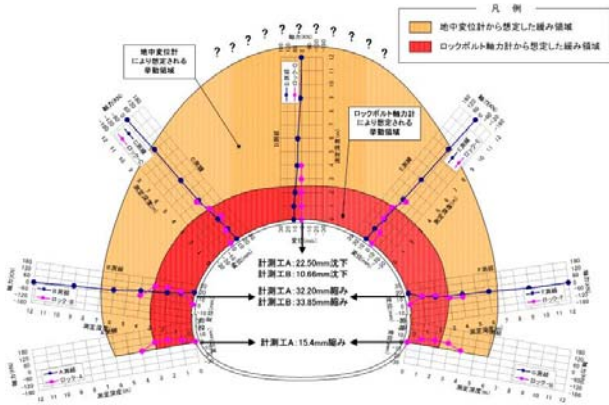


図3-6 地中ひずみ（緩み範囲）測定結果

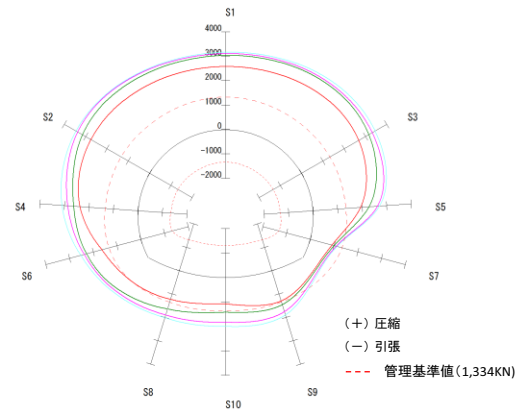


図3-9 鋼製支保工軸力分布図

(2) 音中トンネル

- ①吹付けコンクリート応力は断面閉合後に大きく増加する傾向を示す（図3-7～図3-8）。一次側の最大値は 34.7N/mm^2 (T8) と設計基準強度 ($f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$) の許容範囲内に収まっているが、非常に高い応力となっている。
- ②鋼製支保工軸力は全体に圧縮側となっているものの設計基準強度1,334kN (H-200) を大きく超過する (図3-9)。
- ③鋼製支保工応力の地山側と内空側との差異が著しいため、曲げモーメントが大きく発生している (図3-10)。
- ④掘削影響深度は壁面から12m程度発生 (緩んでいる) している (図3-11)。
- ⑤天端沈下、内空変位ともに断面閉合後に変位速度は急激に低下し、断面閉合後約18mで収束傾向を示す (図3-12、図3-13)。

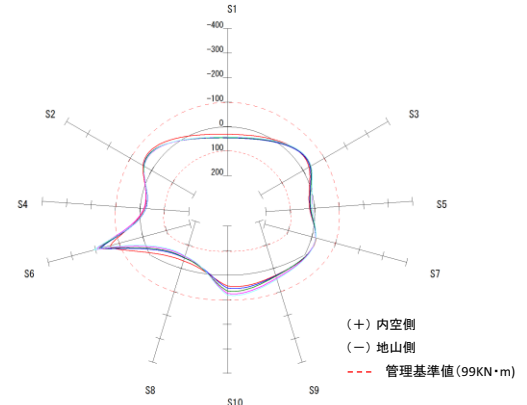


図3-10 鋼製支保工曲げモーメント分布図

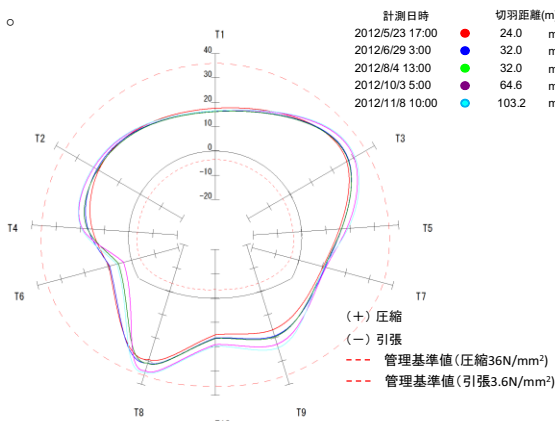


図 3-7 吹付け応力分布図（一次側）

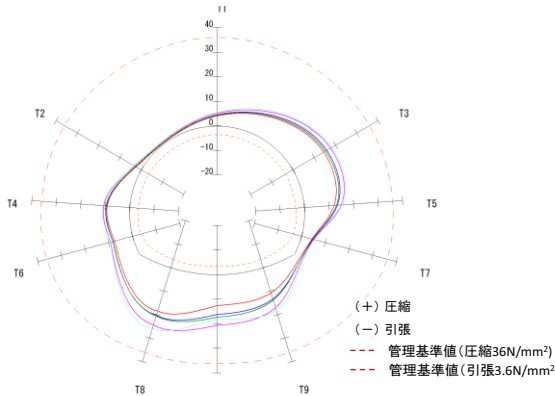


図 3-8 吹付け応力分布図（二次側）

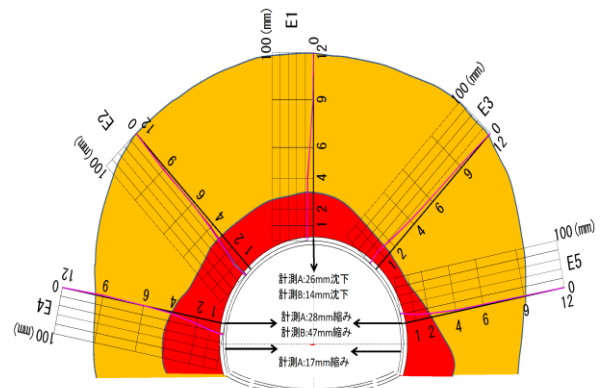


図3-11 地中ひずみ測定結果

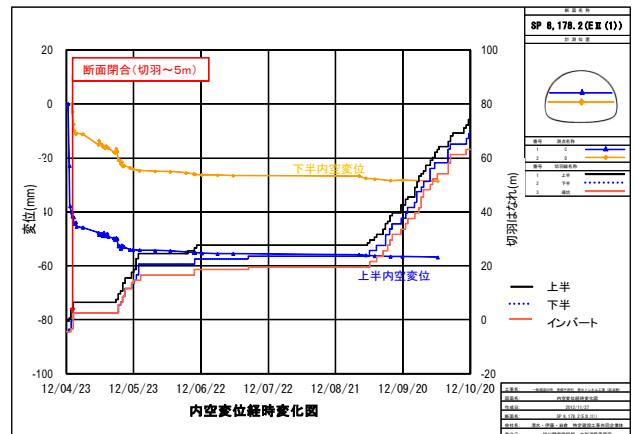


図 3-12 変位測定結果

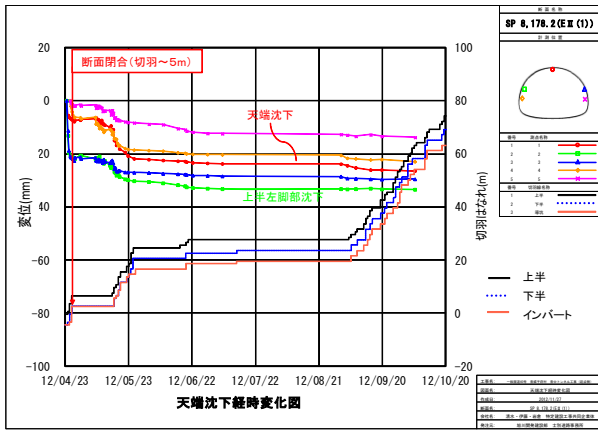


図3-13 沈下測定結果

4. 支保構造の見直し

(1) 音威子府トンネル

音威子府トンネルでは変形係数を指標とする数値解析によって作成された選定フロー（P値を用いたノモグラム）で決定した支保パターンで施工を開始したが、前述の計測結果から支保耐力に十分な余裕をもってトンネルの安定化が達成されていることが確認された。このことから、段階的に支保軽減を図ることとした。当初支保との比較表を表4-1に、軽減後の支保構造を図4-1に示す。

表 4-1 支保構造比較表

支保パターン名	当初 E II (1)	軽減後 E 0 (2)
鋼製支保工	上半H200 下半H200 インバートH200	上半H200 下半H150 インバートH150
吹付け種別	高強度 (36N/mm ²)	普通 (18N/mm ²)
吹付け厚	一次側: 25cm 二次側: 20cm	一次側: 25cm 下半、インバート: 20cm (二次側なし)
変形余裕量	一次側: 15cm 二次側: 15cm	一次側: 35cm (増吹付余裕20cm含む)
閉合距離	切羽~5m	切羽~12m
インバート半径	3.0 × R [※]	
ロックボルト長	L=4.0m (TD24)	
AGF	33本	
注入式長尺鏡ボルト	上半33本 下半 8本	上半21本

※Rは上半半径を示す。

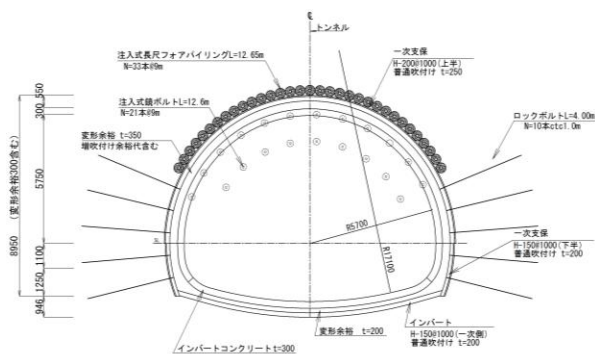


図 4-1 支保構造図 (E0 (2))

(2) 音中トンネル

音中トンネルは音威子府トンネルで検討された選定フローに基づき施工を開始したが、施工段階の先進ボーリングにおいて既存の選定フローの適用外となる蛇紋岩帯を確認した。そこで音威子府トンネルでの計測実績より推定作用土圧を算出し、作用土圧に見合った支保設計をする手法を用いて、不良地山の施工に見合った支保構造（重装化）とすることとした²⁾。

当初支保との比較表を表4-2に重装化後の支保構造を図4-2に示す。

表 4-2 支保構造比較表

支保パターン名	当初 E II (1)	重装化後 E II (2)
鋼製支保工	上半H200 下半H200 インバートH200	上半H200 下半H200 インバートH200
吹付け種別	高強度 (36N/mm ²)	高強度 (36N/mm ²)
吹付け厚	一次側: 25cm 二次側: 20cm	一次側: 25cm 二次側: 20cm
変形余裕量	一次側: 15cm 二次側: 15cm	一次側: 15cm 二次側: 15cm
閉合距離	切羽~5m	切羽~8m
インバート半径	3.0 × R [※]	1.5 × R [※]
ロックボルト長	L=4.0m (TD24)	
最大水平変位量 (mm) (A計測)	140mm	210mm
AGF	33本	
注入式長尺鏡ボルト	上半33本 下半 8本	上半33本

※Rは上半半径を示す。

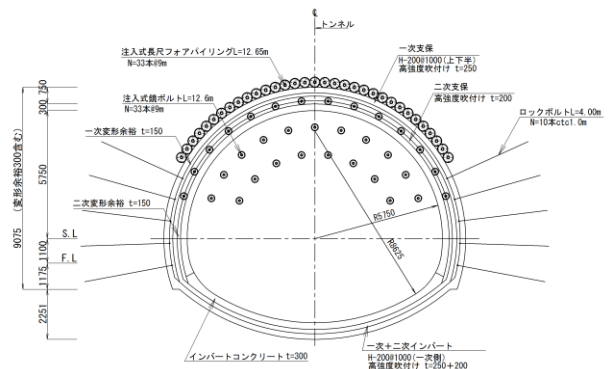


図 4-2 支保構造図 (E II (2))

音威子府トンネル、音中トンネルの支保構造見直し後の計測結果を図4-3~図4-5に示す。これより、両トンネルともに吹付けコンクリート応力は設計基準強度内に収まっている (図4-3、図4-4)。鋼製支保工軸力は上半部 (H-200) で設計基準強度N=1, 334KN (H-200) を大きく超過するが下半・インバート部 (音威子府トンネル: H-150、音中トンネル: H-200) では設計基準強度内に収まっている (図4-5)。上半部では設計基準強度を超過するものの吹付け応力が急増することはない、鋼製支保工に座屈や破断などは見られない。また、重層化後の支保パターン (E II (2)) における天端沈下・内空変位の初期変位速度は当初支保パターン (E II (1)) よりも小さいことが確認された。これらのことから、現状の蛇紋岩地山に対してはトンネルの安定化が十分に図れているといえる。

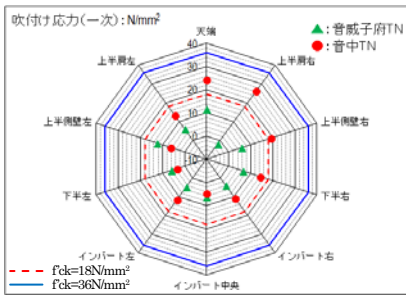


図 4-3 吹付け応力測定結果 (一次側)

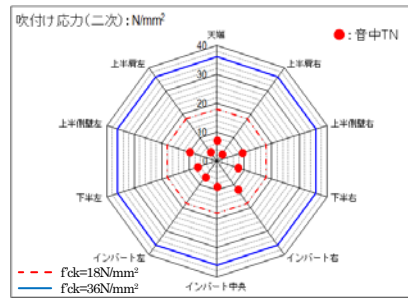


図 4-4 吹付け応力測定結果 (二次側)

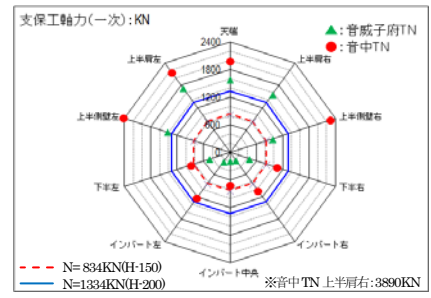


図 4-5 鋼製支保工軸力測定結果

5. 補助工法の効果に関する考察

蛇紋岩区間を対象とした支保パターンでは、前方地山天端部の先受け、および鏡面の補強を目的として注入式長尺先受工（以下、AGF工法）ならびに注入式長尺鏡ボルト工を採用している（図4-1、図4-2参照）。両トンネルでは、それらの支保効果を確認する目的で計測を行った。図5-1に補助工法計器配置図を示す。

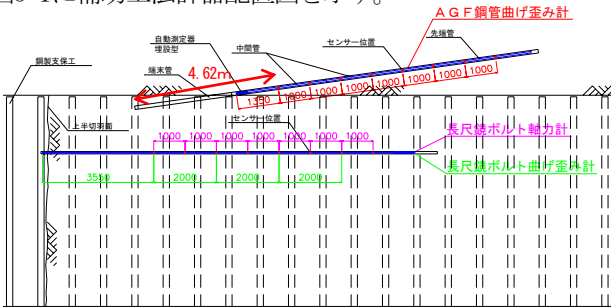


図5-1 補助工法計器配置図

以下に本計測結果より得られた知見を示す。

- ① AGF鋼管の曲げ応力は、切羽が計測位置の7m手前付近に近づいた時点で発生し始め、2～3m手前で応力が急激に増加する。発生応力は最大で134.9N/mm²となり、設計基準強度（235N/mm²）以内に収まっている（図5-2）。
- ② 鏡ボルト鋼管の曲げ応力は、切羽が計測位置の5m手前付近に近づいた時点で発生し始め、1～2m手前で応力が急激に増加する。発生応力は最大で194N/mm²となり、設計基準強度（235N/mm²）以内に収まっている（図5-3）。

①、②より掘削における地山の緩みは切羽前方3～5m付近で顕著となることが推測される。また、切羽近傍は地山が塑性化し、切羽側下方へ押し出すため、曲げ応力が増大したものと推測される。当該箇所での掘削時の崩落、支保の変状等が確認されなかったことから、AGF工法、注入式長尺鏡ボルト工法が有効に作用していることが確認できた。

これら補助工法その他、切羽近傍（1D以内）での早期閉合を採用することで、地山を極力緩ませないで変位抑制を図ることにつながっている（図3-11、図3-12）。

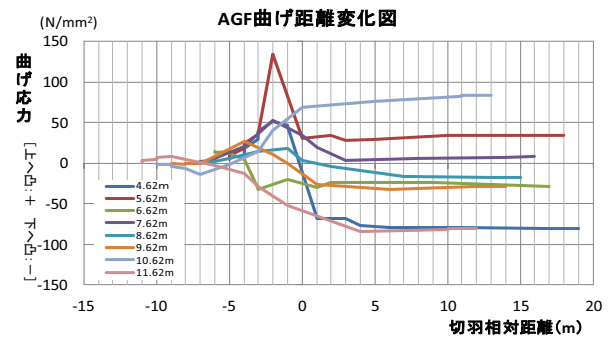


図5-2 AGF鋼管曲げ応力測定結果

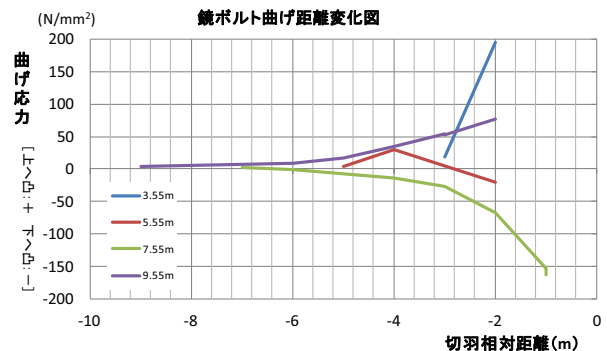


図5-3 長尺鏡ボルト鋼管曲げ応力測定結果

6. まとめ

これまでの蛇紋岩掘削を通して現在のところ縫返しなどの手戻り作業は発生しておらず、計測結果を適切に設計・施工に反映していることが確認できた。しかし、本工事における蛇紋岩の形態は非常に変化に富んでおり、また他の貫入岩も確認されていることから今後の施工に注意を要すると考えている。蛇紋岩帯突破まで合理的かつ経済的な施工を目指し工事を遂行していく所存である。

参考文献

- 1) 林貴博・佐藤秀史・橋本忠幸：蛇紋岩地帯におけるトンネル支保構造の検討について，第55回（平成23年度）北海道開発技術研究発表会，2012.2
- 2) 小川澄・楠本太：早期閉合の効果を施工事例および数値解析より検討，トンネルと地下，Vol. 43，2012.4