

蛇紋岩地帯におけるトンネル支保構造の検討について

旭川開発建設部 士別道路事務所 ○林 貴博
佐藤 秀史
橋本 忠幸

一般国道40号 音威子府村 音威子府トンネル工事では、トンネル全長2,699mの内約4割に相当する1,015mの区間にて、蛇紋岩が出現すると想定されている。蛇紋岩は、塊状、角礫状、葉片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、本トンネルでは、強度特性の異なる多様な蛇紋岩が出現することが想定されている。本論文ではこれらの地山条件に応じたトンネル支保構造について、変形係数と土被りに着目した新たな選定方法の検討及び掘削の状況について、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、音威子府トンネルは、南東に位置する起点側のトンネルである（図-1参照）。

(2)音威子府トンネルの地質概要

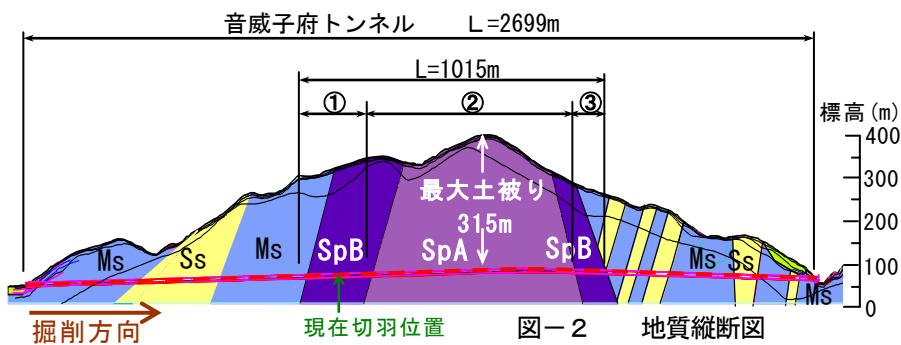
音威子府トンネルの基盤地質は、上部蝦夷層群西知良内層の泥岩、中部蝦夷層群佐古丹別層の砂岩およびそれらに貫入した蛇紋岩である。この蛇紋岩は、北海道中軸部神居古潭構造帯の一部であり、風化が著しい。

蛇紋岩の特徴として、非常に脆弱で膨張性があり、近年各企業者が蛇紋岩区間を施工したトンネルでは、施工中から大きな変位が発生するなど多くの工事において難航した経緯がある。

トンネル縦断を図-2に示す。



図-1 音威子府バイパス全体図



凡 例		
SpA	角礫状蛇紋岩	
SpB	葉片状蛇紋岩	
Ms	泥岩	
Ss	砂岩	
地質	区間	土被り (m)
蛇紋岩①	①	230~270
蛇紋岩②	②	270~315
蛇紋岩③	③	175~200

2. 既往工事実績

蛇紋岩トンネルの挙動は、土被りと強度特性のうち変形係数に依存すると考えられている。また、地山を緩めると変位が大きくなり、収束にも長期間を要する。これらを克服した近年の類似工事の支保構造を以下に示す。

(1) 一般国道275号 幌加内トンネル¹⁾

幌加内トンネルでは、一次支保構造のみとし、早期閉合（上半仮閉合およびインバート吹付閉合）を実施している。

表-1 幌加内トンネル支保構造

支保構造	アーチ	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H200(SS400)
		鋼製支保工間隔	0.9m
	インバート	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H200(SS40)
掘削工法		ショートベンチカット工法	
補助工法		鏡ボルト、鏡吹付、長尺先受工、増しロックボルト	
地山条件	最大土被り	120m	
	変形係数	1.0 × 10 ⁵ kN/m ²	

(2) 北海道縦断自動車 穂別トンネル²⁾

穂別トンネルでは、一次と二次の二重構造（二重支保）とし、早期閉合を実施している。

表-2 穂別トンネル支保構造

支保構造	アーチ：1次側	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H200(SS590)
		鋼製支保工間隔	1.0m
	アーチ：2次側	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H150(SS590)
		鋼製支保工間隔	1.0m
	インバート：1次側	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H150(SS590)
	インバート：2次側	吹付コンクリート強度	36N/mm ²
		鋼製支保工規格	H150(SS590)
掘削工法		補助ベンチ付全断面工法	
補助工法		鏡ボルト、鏡吹付、長尺先受工	
地山条件	最大土被り	350m	
	変形係数	1.5 × 10 ⁵ kN/m ²	

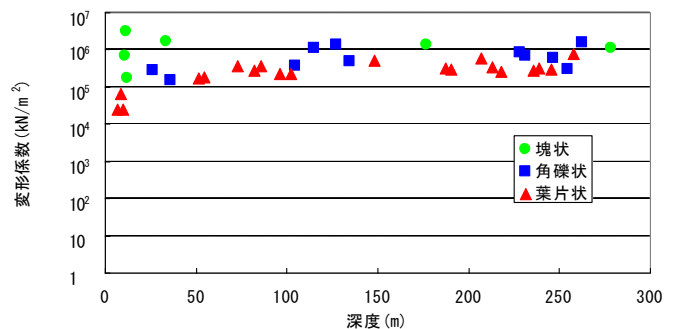
3. 地山定数の設定

一般に蛇紋岩は、その性状から塊状、角礫状、葉片状、粘土状等に分類される。塊状蛇紋岩は、火成岩同様に節理系が発達した塊状岩であり、角礫状蛇紋岩は、塊状蛇紋岩が細粒化し、角礫・砂状を呈する。葉片状蛇紋岩は源岩の節理系が消滅し、片状構造であり、粘土状蛇紋岩は、水を含有すると粘土状を呈する。

音威子府トンネルでは蛇紋岩の性状把握を目的に地上より調査ボーリングを実施した。その結果から得られた物性値を以下に示す。

(1) 変形係数と土被りの関係

角礫状蛇紋岩と葉片状蛇紋岩は、深度方向への変形係数の増加が認められるが、塊状蛇紋岩は深度と変形係数



形態別に変形係数を整理すると、塊状 > 角礫状 > 葉片状の順となる。葉片状蛇紋岩は、せん断応力による細かなせん断面が密に発達し、それらの不連続面に沿ってすべり、容易に崩壊するため変形係数が小さい。

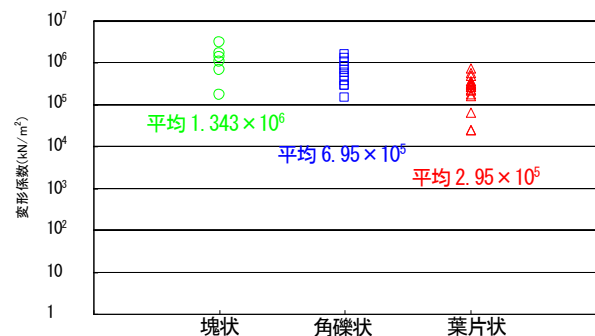


図-4 変形係数と形態の関係

(3) 地山定数の設定

調査ボーリングの結果、トンネル掘削区間には主に角礫状蛇紋岩と葉片状蛇紋岩が分布している。この結果に基づき、角礫状蛇紋岩と葉片状蛇紋岩を対象として、深度に対する変形係数の近似曲線を求めた(図-5、6)。次に各区間の平均的な土被りを近似曲線に代入し、変形係数の代表値を設定した。設定した値は表-3のとおり。なお地質の蛇紋岩①~③は、図-2中の①~③の各区間の地質を示す。

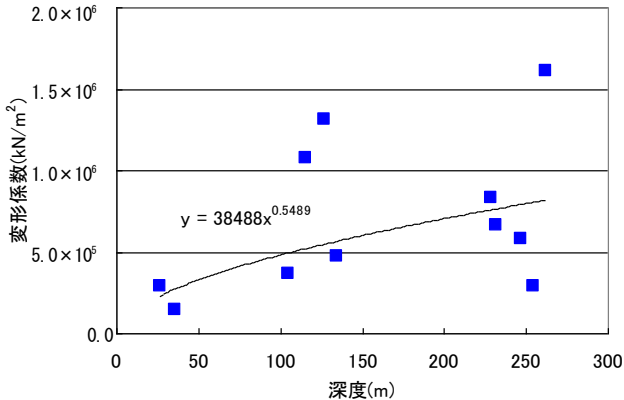


図-5 変形係数と土被りの関係 (角礫状)

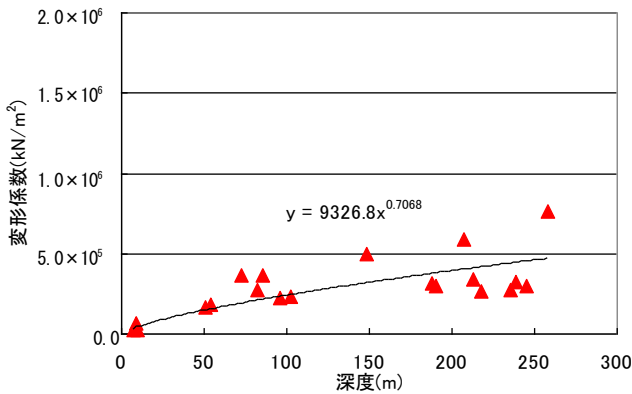


図-6 変形係数と土被りの関係 (葉片状)

表-3 変形係数と土被りの関係

地質	形態	土被り (m)	変形係数 (kN/m ²)
蛇紋岩①	葉片状	230~270	4.70×10 ⁵
蛇紋岩②	角礫状	270~315	8.70×10 ⁵
蛇紋岩③	葉片状	175~200	3.80×10 ⁵

4. 解析手法

ボーリング調査から得られた変形係数などの地山物性値に基づき、トンネル支保パターンを検討した。検討は、二次元 FEM 解析を用い、支保の健全性が確保できる支保構造の選定を行った。地山物性値には、音威子府トンネル地質調査業務で設定された値(表-3)と、変形係数のばらつきを考慮した物性値(リスク物性値、表-4)の2種を用いた。

表-4 リスク物性値

地質	形態	土被り (m)	変形係数 (kN/m ²)
蛇紋岩①	葉片状	230~270	3.00×10 ⁵
蛇紋岩②	角礫状	270~315	3.15×10 ⁵
蛇紋岩③	葉片状	175~200	3.10×10 ⁵

(1) 解析モデル

検討に使用した解析モデルを図-7に示す。解析範囲は掘削の影響が及ばない範囲までとし、トンネル直径(D)に対して、左右がそれぞれ5D、上部は土被り相当、下部は4Dとした。

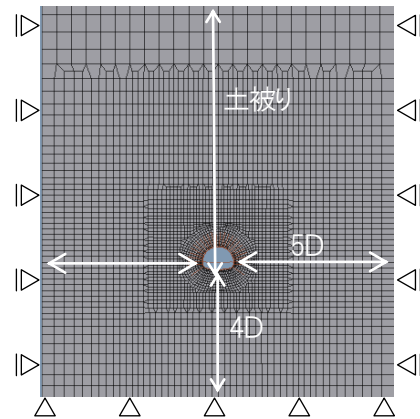


図-7 解析モデル

(2) 解析手法

ベンチ長 20mとして掘削する場合(早期閉合)には図-8に示す解析ステップを、ベンチ長を 5mとし、切羽直近にて上下半とインバートの掘削(超近接早期閉合)を行う場合には図-9に示す解析ステップを採用する。さらに解析モデルの土被りを 315m、270m、200mの3ケースとし、合計6ケースの解析を実施した。

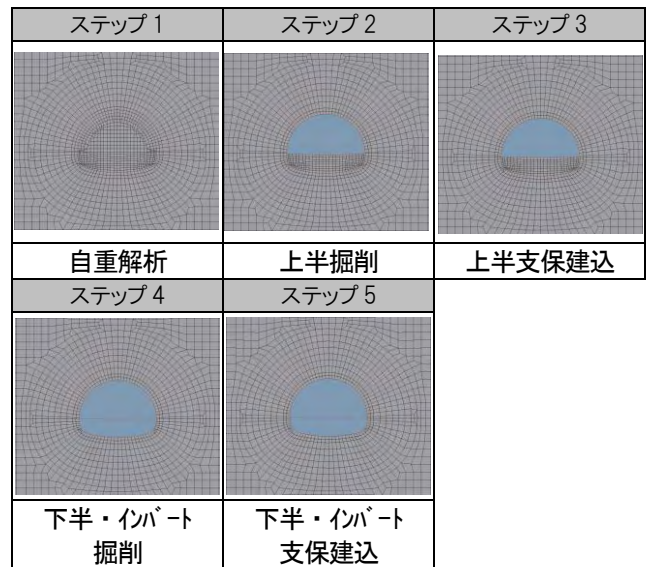


図-8 解析ステップ(早期閉合)

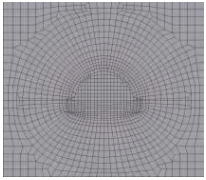
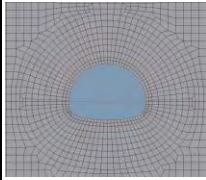
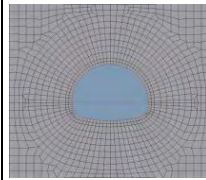
ステップ1	ステップ2	ステップ3
		
自重解析	上半・下半・インバート掘削	上半・下半・インバート支保建込

図-9 解析ステップ (超近接早期閉合)

(3) 解析過程における応力分担

解析においては鋼製支保工に実際の降伏強度 ($2.4 \times 10^5 \text{kN/m}^2$) 以上の応力が発生することがあるため、応力が降伏値を超えた場合、鋼製支保工が負担出来なかった応力 (超過応力) を吹付けコンクリートと周辺地山に負担させることを表現できる、応力-ひずみ関係を用いた (図-10)。

過程A	鋼材の発生応力が降伏応力に満たない場合、ひずみの増加に伴い発生応力も直線的に増加
過程B	鋼材が降伏応力に達した後は、鋼材の剛性を低下させて降伏応力を保持

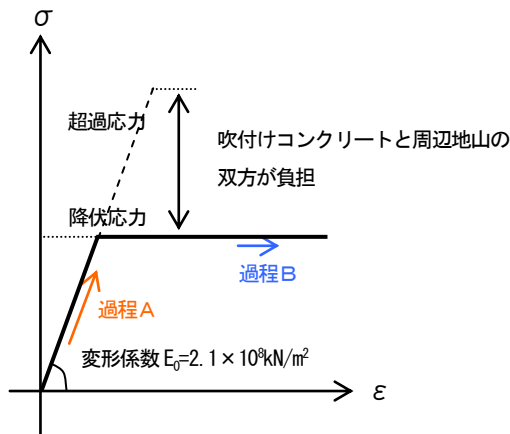


図-10 鋼製支保工の応力-ひずみ関係

5. 解析結果

(1) 指標の設定 (P値)

解析結果から、吹付けコンクリート応力や内空変位量は、土被りに比例するとともに、地盤の変形係数に反比例する傾向を確認した。そこで、独自に土被り荷重を地盤の変形係数で除した式①に示す無次元量をP値と定義し、これをトンネル支保耐力と地山条件とを関連付ける指標とした。このP値が大きいほど、吹付けコンクリートの発生応力や内空変位量が大きくなり、より耐力の高い支保が必要となる。

$$P = \frac{\gamma \times H}{E} \quad \dots \text{式①}$$

$\gamma (\text{kN/m}^3)$: 地山の単位体積重量
 $H (\text{m})$: 土被り
 $E (\text{kN/m}^2)$: 地盤の変形係数

簡便のため、P値に応じた照査基準を満足する支保構造を選定できるように、P値と支保構造に関するノモグラムを作成した。

(2) 支保仕様選定

解析結果をもとにして、吹付けコンクリート応力と内空変位の照査結果を、P値を基準にして整理した結果を図-11と図-12に示す。なお地盤物性の非線形性に起因して、トンネル変位と発生応力の関係が土被り250mを境として異なるため土被り250m以上の照査結果と250m未満の照査結果を分離した。

この結果、下図ⅡとⅢを比較して明らかとなり、同じ支保構造であっても、より早期に閉合した方が変位抑制効果の高いことが確認出来た。



図-11 P値と支保仕様の関係 (土被り 250m 以上)

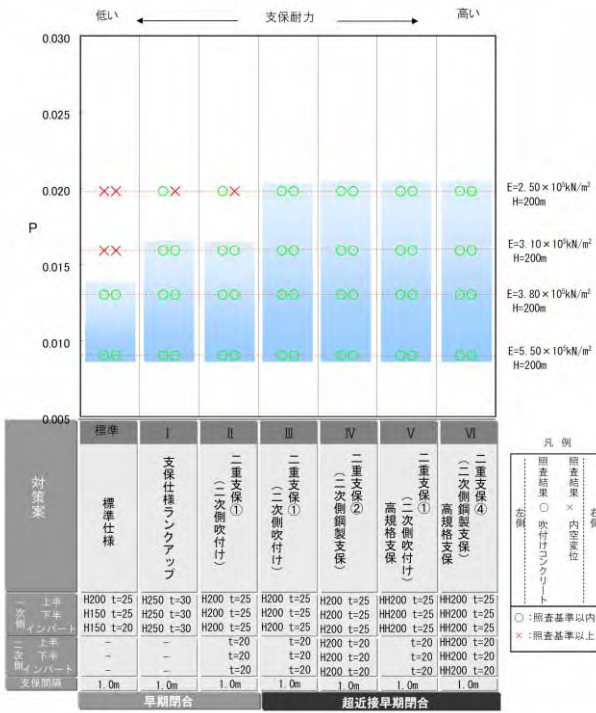


図-1 2 P値と支保仕様の関係
(土被り 250m 未満)

6. 先進ボーリング

(1) コア状況

施工時の先進ボーリングのコア写真を写真-1に示す。岩相は暗緑色を呈し、葉片状となる蛇紋岩を主体とし、塊状蛇紋岩および粘土状蛇紋岩を伴う。塊状蛇紋岩は源岩のかんらん岩組織を残し、きわめて硬質であるが、葉片状蛇紋岩は、片状構造が顕著であり、短柱状コア部でも片状の破壊を起こし、滑落性が強い。粘土状蛇紋岩は粘土化が著しく塊状蛇紋岩や葉片状蛇紋岩を角礫状に取り込んでいる。

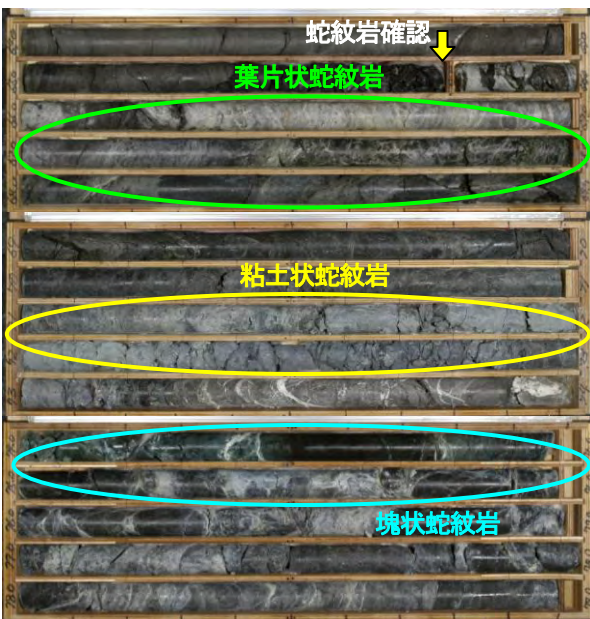


写真-1 先進ボーリングコア

(2) 変形係数

先進ボーリング時においては、孔壁の崩壊により孔内水平載荷試験が実施出来なかったため、岩盤の物理・力学特性を把握する目的で、室内岩石試験を実施した。試験項目は、一軸圧縮強度試験、超音波測定、見かけ比重試験の3項目である。試験結果を表-5に示す。

試験から得られた弾性係数を図-1 1 のノモグラムに適用可能か検証する。トンネル支保の安定性を考慮して、主体となる葉片状蛇紋岩のうち、弾性係数が最小となる値 ($5.91 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$) でP値を計算すると $P=0.010$ となる。P値が適用範囲内になることから支保構造の検討に図-1 1 のノモグラムの適用可能である。

表-5 岩石試験結果

形態	土被り (m)	P 波伝播速度 V_p (km/s)	一軸試験による静弾性係数 E_{50} (kN/m ²)	岩盤の静弾性係数 E (kN/m ²)
塊状	250	2.956	7.02×10^5	8.75×10^5
		2.715	4.79×10^5	7.08×10^5
葉片状	250	2.793	4.23×10^5	5.91×10^5
		3.273	1.33×10^6	1.35×10^6
		4.178	3.52×10^6	2.20×10^6
		4.016	4.35×10^6	2.94×10^6

7. 施工

(1) 支保仕様

トンネル掘削は、予測解析で検討したケースのうち、変形係数 $5.91 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ と土被り 250m 以上に相当するので、式①から $P=0.010$ となる。このP値は、図-1 1 に当てはめると○で示す位置になることから、「二重支保① (二次側吹付け)」で施工を開始した。適用した支保パターンを図-1 3に示す。

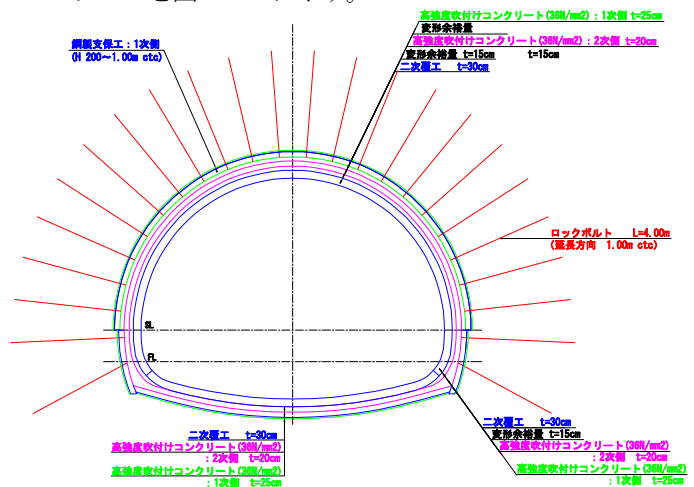


図-1 3 標準支保パターン
(二重支保① (二次側吹付け))

また、補助工法として注入式長尺フォアパイリング（AGF）と長尺鏡ボルトを採用した（図-14）。

補助工法を採用した理由は、以下のとおりである。

- ① 蛇紋岩は、塊状、葉片状、粘土状が混在しており、地山を緩めるとグラウンドアーチが形成されず、過去の事例からも、地山を緩めないことが重要である。
- ② 音威子府トンネルにおいても蛇紋岩同様、鏡肌を有する泥岩区間の施工において、度重なる切羽・天端崩落により地山が緩んだ際、その変位を抑制するために様々な方策を施したが、地山の緩みを改善するために長期間を費やした。
- ③ 蛇紋岩は滑石を介在することにより、岩片の付着がないことから、安全上も配慮が必要である。

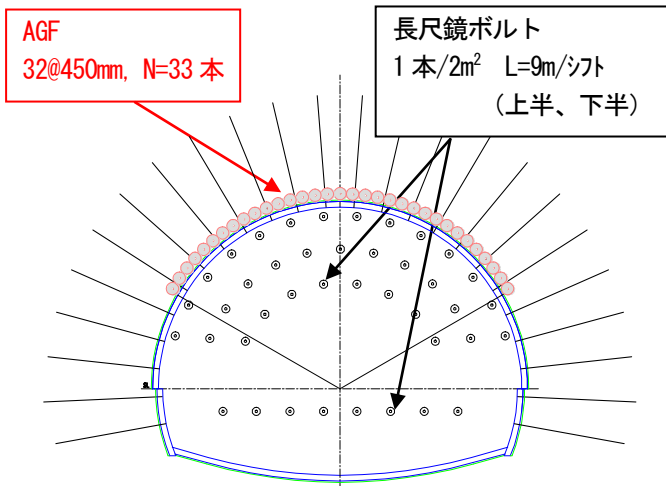


図-14 標準支保パターン（補助工法）

(2) 計測

蛇紋岩区間を対象とした支保パターンの妥当性を検証するために、計測Bを計画している。

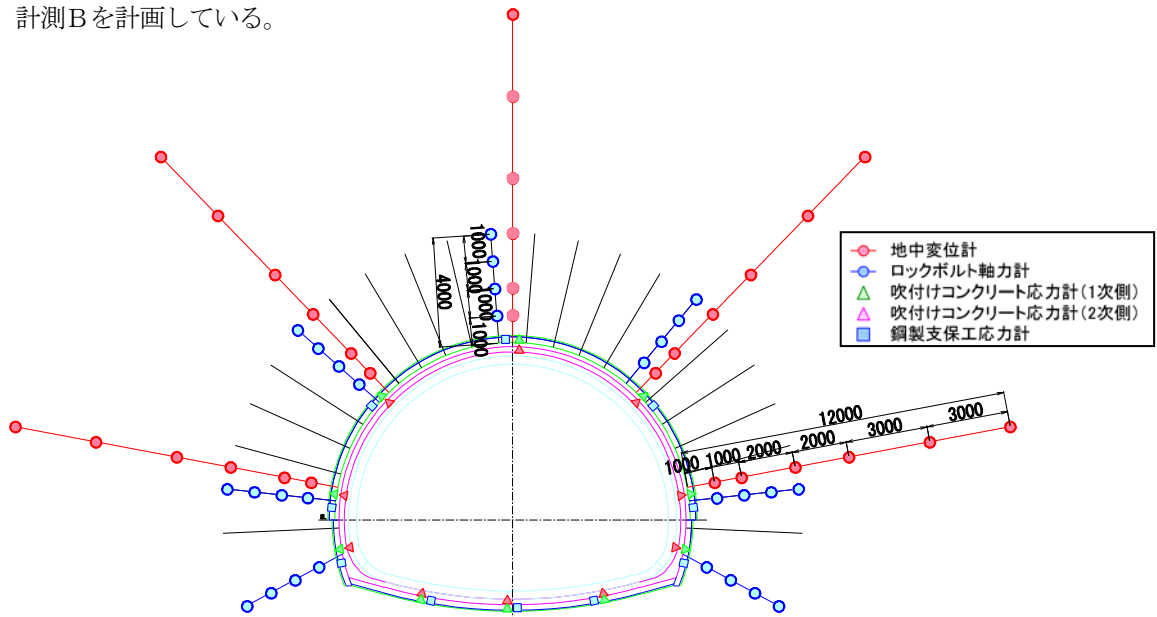


図-15 計測B計器配置

掘削中の地山の挙動（計測A）や支保の効果（計測B）を計測することにより、支保構造や施工方法を検証する。計画している計器の配置を図-15に示す。

(3) 逆解析

計測で得られたデータを用いた逆解析を予定している。これにより、地山の変形係数を求めることが出来るため、先進ボーリングで得られた変形係数との相関が判明し、P値を用いた支保構造の選定の確度が向上する。

8. まとめ

蛇紋岩の特性を考慮した支保パターンを検討し、現在施工を開始した。蛇紋岩は一度緩ませると、長期間変位し続けるという過去の事例を参考にし、地山を緩ませないことで、変位を早期に収束させる支保構造とした。参考とした施工事例では鋼製支保工を二重に補強する重厚な構造となっているが、本トンネルでは、吹付コンクリートのみによる補強とした支保パターンを適用した。

今後は、切羽観察や計測データを蓄積し、支保パターンの再検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 桜井司：蛇紋岩地山におけるトンネル施工について—一般国道275号深川市幌加内トンネルにおける蛇紋岩地山の変位挙動と対応について（事例報告）—、トンネル技術研究発表会、pp81-92、2009.2
- 2) 高橋俊長：蛇紋岩地山を早期閉合と二重支保で変位制御—北海道横断自動車道穂別トンネル西工事—、トンネルと地下、pp7-18、2010.5