

押し出し性地山(蛇紋岩)の掘削時の挙動について

藤澤 勉¹・牧 正²・梶山孝司²

¹東日本高速道路(株)株式会社 北海道支社 千歳工事事務所 (〒066-0037 北海道千歳市新富1-2-14)

²前田建設工業株式会社 北海道支店 (〒064-8552 北海道札幌市中央区南11条西11丁目2-1)

穂別トンネル(延長 4,300m)は、北海道横断自動車道のうち夕張 IC より約 20km 東側に位置し、押し出し性地山である蛇紋岩が分布している神居古潭変成帯を東西に貫くことになる。延長が長いので、供用時の緊急避難路として、避難坑が本坑と平行に 30~50m の離隔で計画され、本坑の調査坑として蛇紋岩が分布していると想定された西側より先行掘削を行った。

本文は、この西側より先行掘削している穂別トンネル西避難坑において、蛇紋岩掘削時の挙動について述べる。

キーワード: NATM, 膨張性地山, 蛇紋岩

1. はじめに

北海道横断自動車道(道東道)夕張 IC~十勝清水 IC 間は延長約 81km で、図-1 に示すように道央を東西に結び、現在、上り線側を暫定 2 車線で施工中である。

そのルートは、芦別岳(標高 1,727m)、夕張岳(標高 1,668m)を経てハッタオマナイ岳(標高 1,021m)へと南北方向へ伸長する夕張山地の南端部を通過する。

穂別トンネルは夕張 IC より約 20km 東側に位置し、延長は 4,300m の長大トンネルで、道路供用時の緊急避難路として、図-2 に示す人道用の避難坑が将来予定されている下り線本坑の断面内に施工される。一方、最大土被りが 400m あり、押し出し性地山といわれる蛇紋岩の分布が予想されたため、調査坑を兼ね、避難坑を西側(穂別トンネル西避難坑 L=2,150m)より先行して掘削(NATM, 全断面掘削, レール工法)を行った。

本文は、穂別トンネル西避難坑の蛇紋岩掘削時の状況と計測結果について述べる。

2. 穂別トンネルの地形・地質概要

図-3 に穂別トンネル西避難坑の縦断図および蛇紋岩出現位置を示す。

地形は、起点側(西側)と中央部~終点側とで明瞭な違いがみられ、起点側と中央部が急峻な山地地形を呈するのに対し、終点側は緩やかな丘陵状地形となっている。蛇紋岩が分布しているのは、西側から中央部であり、蛇紋岩部の隆起によって急峻な地形が形成されたものと考えられる。地表においても蛇紋岩が露頭しているのがみられ、その箇所では地



図-1 位置図

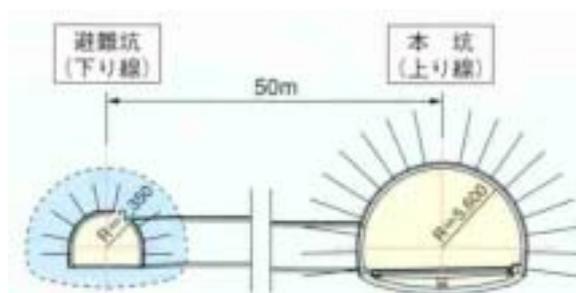


図-2 本坑と避難坑

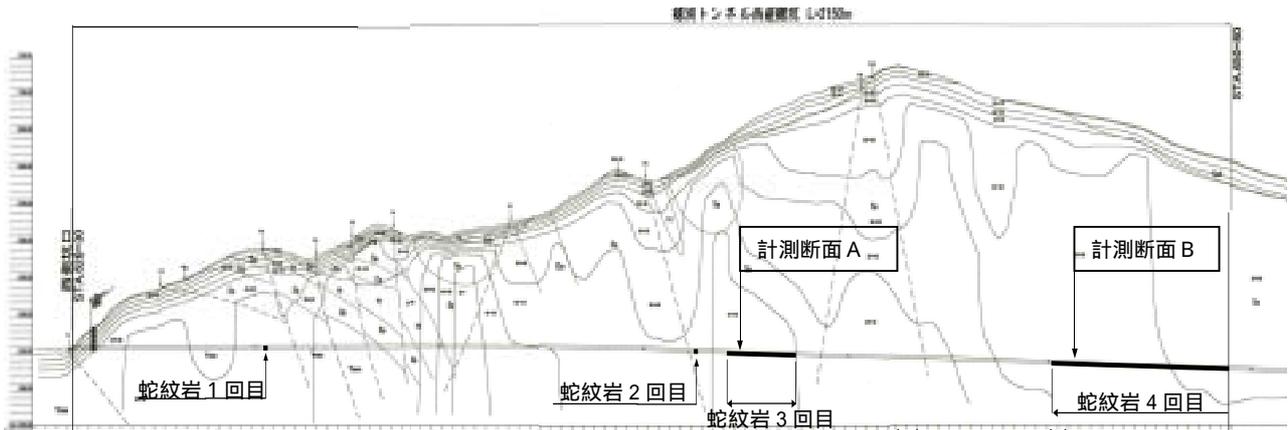


図 - 3 穂別トンネル西避難坑縦断面図

表 - 1 蛇紋岩の出現位置，性状および支保パターン

	坑口からの距離	土被り	蛇紋岩分布長	分布長詳細	蛇紋岩の性状	支保パターン	断面形状	鋼アーチ支保工		吹付コン厚さ(m)		ロックボルト本数	
								上下半	仮ハート	上下半	仮ハート	L=2m	L=3m
1回目	360m付近	130m	約10m	9m	葉片状部分的に粘土状	E -1-K-P	A	H-100	無し	0.12	0.12	11本	
2回目	1,160m付近	260m	約10m	約10m	塊状-葉片状	D -1-B-P	A	H-100	無し	0.12	0.12	11本	
3回目	1,220m付近	290 ~ 350m	約135m	40m	葉片状(脈状に粘土状が介在)	E -3-K-P	A	H-100	H-100	0.12	0.20(H)	11本	
						E -4-K-P	A	H-100	H-100	0.15(H)	0.20(H)	7本(天端部)	6本(側壁部)
						E -5-K-P	B	H-150	H-150	0.20(H)	0.20(H)	7本(天端部)	6本(側壁部)
				30m	塊状-葉片状	D -3-B-P	A	H-100	H-100	0.12	0.12	11本	
				65m	葉片状(脈状に粘土状が介在)	E -5-K-P	B	H-150	H-150	0.20(H)	0.20(H)	7本(天端部)	6本(側壁部)
4回目	1,820m付近	340m ~ 280m	330m以上	200m	葉片状(脈状に粘土状が介在)	E -6-K-P	B	H-150	H-150	0.20(H)	0.20(H)	7本(天端部)	6本(側壁部)
						E -1-K-P	B	H-150	H-150	0.25(SH)	0.25(SH)	5本(天端部)	10本(側壁部)
				130m	葉片状中に硬岩が転石状に分布	E -1-K-P	B	H-150	H-150	0.25(SH)	0.25(SH)	5本(天端部)	10本(側壁部)

(H):高強度 (SH):鋼繊維高強度

すべり地形をなしている。全体に小水系の発達が見られるが、ルートを横断するような大川はみられない。

地質は、中生代白亜紀中部蝦夷群泥岩，貫入岩類（蛇紋岩およびドレライト），中生代白亜紀～ジュラ紀日高累層群ハッタオマナイ層，新第三紀中新世滝の上層および第四紀堆積物によって構成され，中部蝦夷層群・貫入岩類・ハッタオマナイ層・滝の上層が基盤をなし，これらを覆って段丘堆積物や崖錐堆積物等が分布する。貫入岩類である蛇紋岩は地下のマントルを構成していたかんらん岩が蛇紋岩化作用を受けながら地殻中を上昇してきたものであり，付加体堆積物（日高累群）を持ち上げ，蝦夷層群を分断して上昇したものと考えられる。

掘削中に出現した蛇紋岩を試験した結果，スメクタイトといった膨張性鉱物は含まれておらず，膨張性の主要因は，掘削に伴う応力解放による体積膨張（亀裂開放）と応力の再配分による塑性変形・せん断破壊による押し出し性の現象と考えられる。

表 - 2 蛇紋岩性状の目安

蛇紋岩性状	区分の目安
粘土状	岩塊といった形状を保持できず，握れば粘土のように変形する。
葉片状	岩塊として形状を一時的には保持するが，手で簡単に碎ける。層状の亀裂が多く，亀裂面で簡単に剥離する。
塊状	岩塊として形状を保持し，ハンマーの軽い打撃で割れる程度以上の硬質な蛇紋岩。

3. 穂別トンネル西避難坑の掘削概要

(1) 蛇紋岩の出現位置と蛇紋岩の性状

蛇紋岩は，西側より 2,150m 区間で 4 回出現しており，1 回目と 2 回目は 10m 程度でなくなり，3 回目は約 140m，4 回目は約 330m 分布している（図-3）。なお，4 回目の蛇紋岩出現区間は工区境となっているため，どの程度まで分布しているかは，今のところ不明（東側より避難坑掘削中）である。最大土被り 400m 地点では出現しなかったが，3,4 回目は土被り 350m 程度となっている。

出現位置によって、蛇紋岩の性状は異なるが、おおむね表-1のようにまとめられる。なお、表-1の蛇紋岩性状の項目は、表-2の示す区分を目安とした。粘土状の蛇紋岩は塊状や葉片状の周囲に脈状に介在している場合が多く、まれに部分的に現れる時もあった。塊状や葉片状の蛇紋岩は、亀裂面が鏡肌状でニスを施したような輝きがあり、粘土状介在箇所あるいは鏡肌の箇所では肌落ちや崩落が発生した。また、坑口より2,050m付近から葉片状の蛇紋岩中に硬岩（玄武岩）が混入するようになり、硬岩の抜け落ちが発生し、それに伴って天端の崩落が発生した場合もあった。約20m²程度の小断面であったが、天端や鏡面の自立性が悪く、鏡吹付を行いながらの掘削と補助工法（フォアポーリング、鏡ボルト）を併用して、切羽の崩落防止を行った。

表-3は、3回目の蛇紋岩が出現した時に葉片状部で行った孔内水平載荷試験結果である。試験は掘削面より3m離れた位置のため、掘削により緩められた状態での地山物性値である。これらの試験結果は、掘削の影響を受けた地山ではあるが、非常に小さい値となっており、自然状態での物性値を測定・比較していないが、掘削による地山の緩み具合は非常に著しいと推察される。

(2) 蛇紋岩部の支保パターンについて

膨張性や押し出し性地山の場合において、トンネルに作用する膨張圧に対抗するため、トンネル形状は円形に近いほど構造的に有利であるが、避難坑の建築限界および計測結果から本坑への設計・施工を考慮して、避難坑掘削形状は図-4に示す形状A、Bの2種類とした。形状Aは仮インバート部の曲率が大きく馬蹄形に近い形状で、形状Bはその曲率を小さくし円形に近づけた。支保パターンはこれらの形状を基に、掘削状況や土被り・蛇紋岩の性状、計測結果や支保部材の変状状況に合わせて、選定していった（表-1）。

1回目および2回目は蛇紋岩出現区間が10m程度と短く、1回目は土被り130m、2回目は塊状蛇紋岩であったため、内空変位が大きく発生した箇所があったが、形状Aのパターンでトンネルは安定を保った。

3回目の蛇紋岩出現時は、鋼アーチ支保工 H-100、吹付コンクリート厚さ12cm（仮インバートは高強度、厚さ20cm）、形状AのE-3-K-Pで、すぐにE-4-K-Pパターン（形状A、鋼アーチ支保工 H-100、高強度吹付コンクリート厚さ15cm（仮インバート厚さ20cm）に変更したが、仮インバート両端部で吹付コンクリートのクラックおよび隆起現象（盤ぶ

表-3 孔内水平載荷試験結果（葉片状蛇紋岩）

降伏応力 (KN/m ²)	変形係数 (KN/m ²)	粘着力 (KN/m ²)	内部摩擦角 (°)
200.4	5,620	79.6	10.4

掘削面より3m離れた位置での測定値

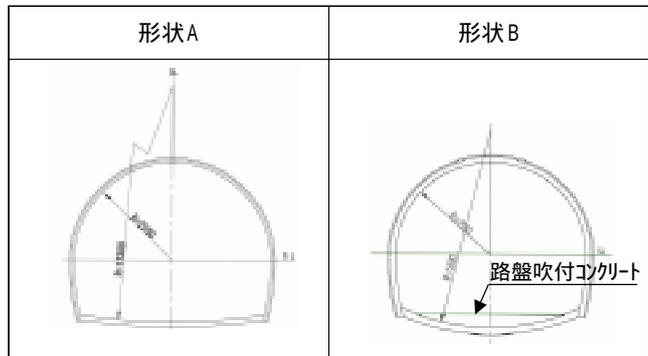


図-4 避難坑の形状

くれ）が発生し、形状BのE-5パターンにランクアップした。その後、塊状蛇紋岩主体となり形状AのD-3（発破掘削）、再び葉片状となったのでE-5パターンに戻した。

4回目の蛇紋岩出現時は、肌落ちや崩落が多く発生するようになり、E-5パターンに補助工法（フォアポーリング、鏡ボルト）を適用したパターン（E-6）としたが、吹付コンクリートのクラック等の変状や内空変位が大きいため、E-1パターンにランクアップした。

4. 蛇紋岩部の計測結果

3回目と4回目の蛇紋岩出現時、葉片状部でB計測（地中変位、支保部材応力測定）を実施し、3回目を計測断面A、4回目を計測断面Bとする（図-3）。支保パターンは、計測断面AがE-4、計測断面BがE-1で、計測断面Bの方がより剛な支保構成となっている。図-5は計器配置図で、ロック

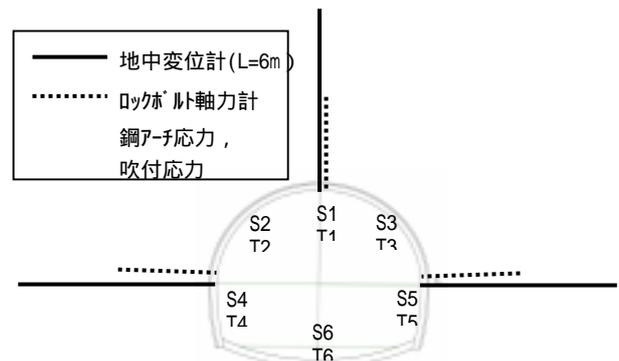


図-5 計器配置図

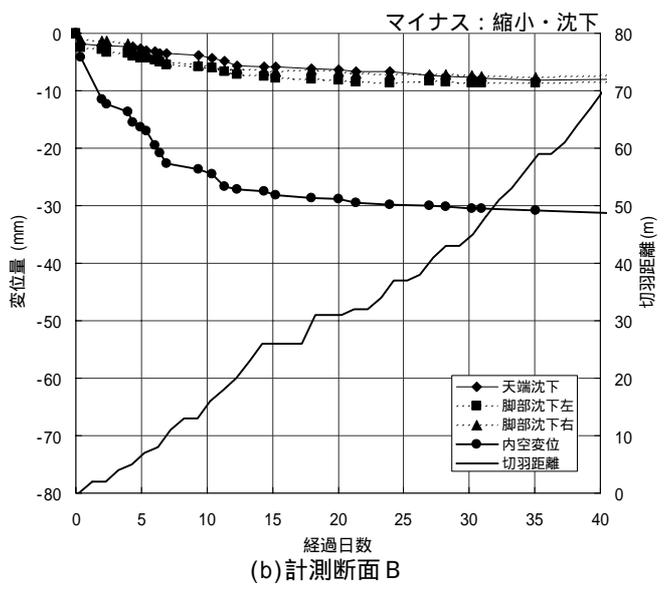
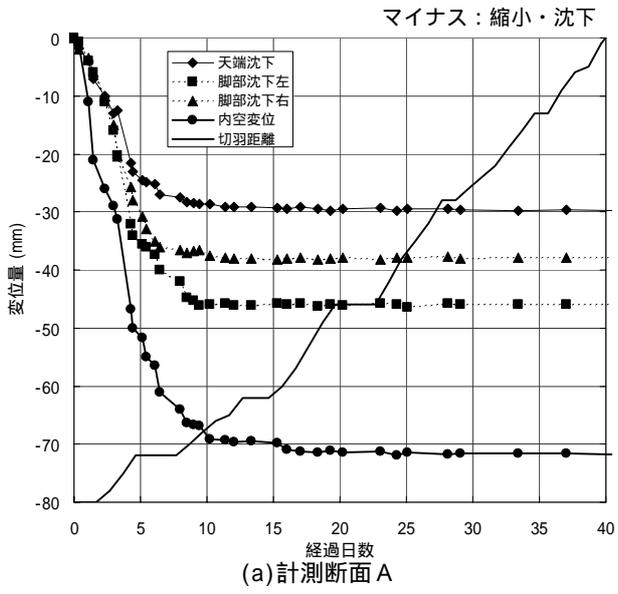


図-6 A計測（内空変位・天端脚部沈下）結果

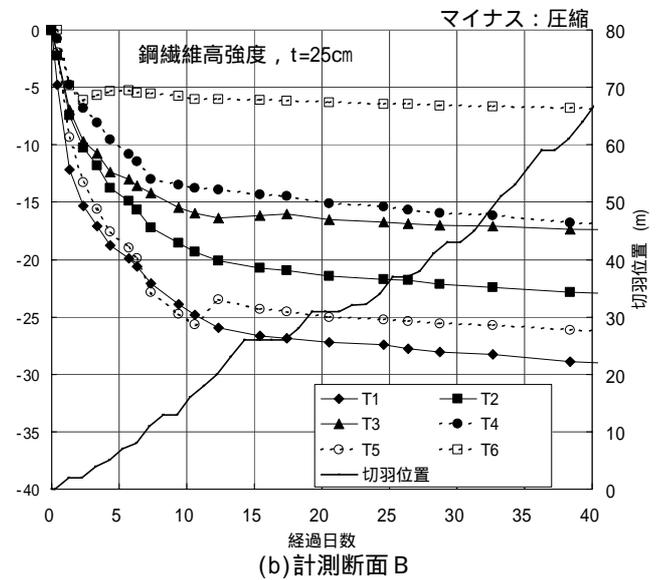
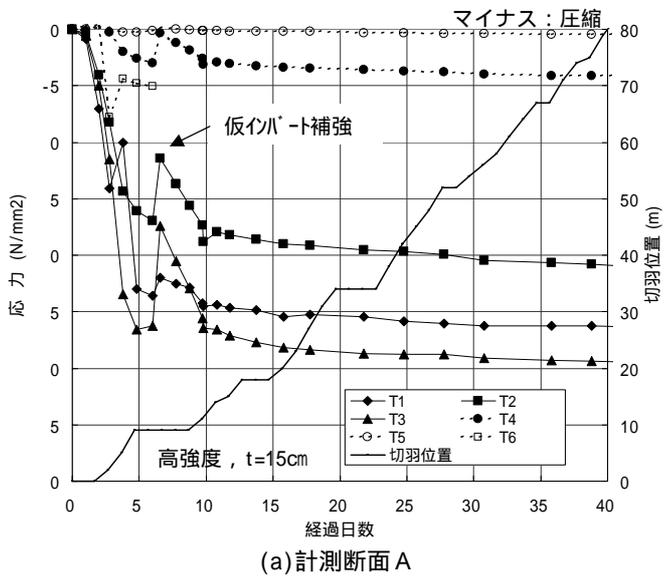


図-7 吹付コンクリート応力測定結果

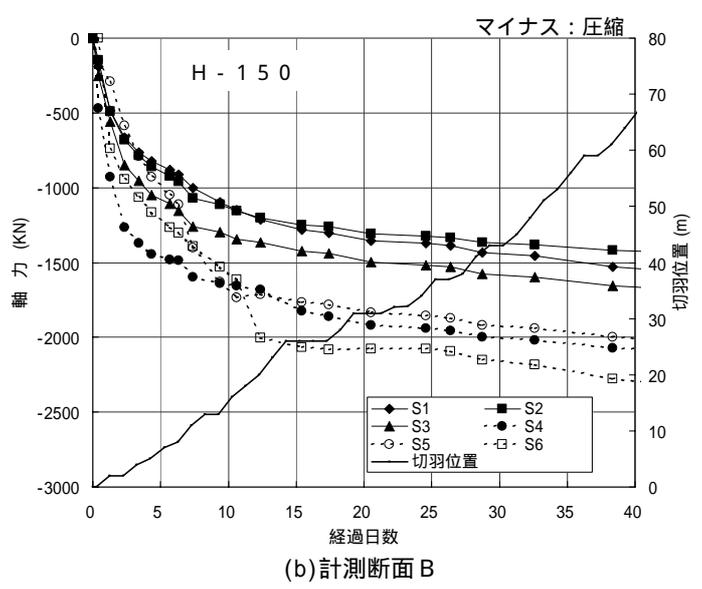
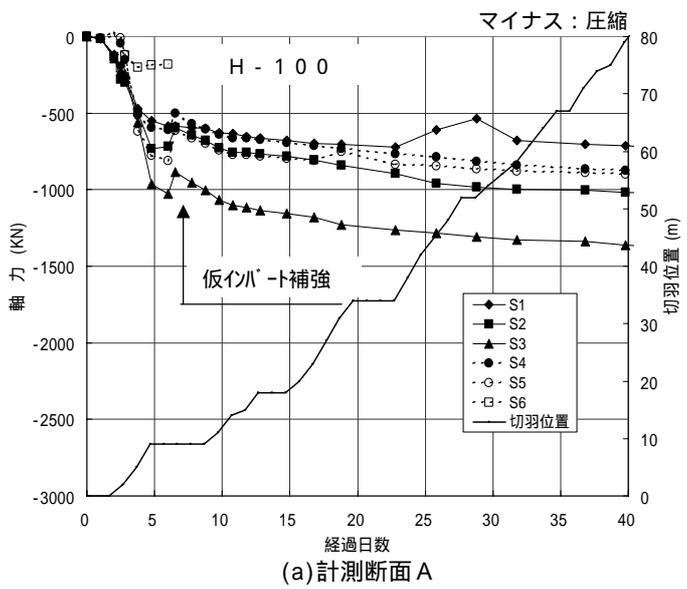


図-8 鋼アーチ支保工軸力測定結果

押し出し圧によってトンネルが縦長に潰されながら全体的に沈下している変形挙動である。そのため、天端部は突き上げられ、仮インバート部は隆起現象が発生した。

- ・計測断面 B の方は、上記計測断面 A のような現象はみられず、天端と脚部はほとんど同じ沈下量である。

(2)吹付コンクリート応力測定結果

図-7 に各計測断面の測定結果を示し、以下にまとめる。なお、計測断面 A の T6 (仮インバート部) は補強時に撤去している。

- ・計測断面 A は、天端から肩部の T1~T3 の応力が大きく、下半側壁部の T4 および T5 は極端に小さくなっており支保工としての機能が發揮されていない。
- ・計測断面Bの上下半部のT1~T5は、15~30N/mm²の応力が発生しており、上下半部で計測断面Aのように極端に応力が小さい箇所はない。
- ・計測断面BのT6が他より小さい応力となっているのは、路盤吹付コンクリート(仮インバートと同時施工 図-4)によって、T6の位置だけ部材厚が厚く応力が分散したためであると考えられる。

(3)鋼アーチ支保工軸力測定結果

図-8に各計測断面の測定結果を示し、以下にまとめる。なお、計測断面AのS6(仮インバート部)は補強時に撤去している。

- ・計測断面Aは、吹付応力のような下半側壁部の極端に小さい箇所はない。
- ・計測断面AのH-100に対して、計測断面BはH-150であるため、鋼アーチの負担は大きくなっている。

(4)地中変位・ロックボルト軸力測定結果

図-9に各計測断面の測定結果を示し、以下にまとめる。なお、地中変位は区間ひずみでまとめ、ロックボルト軸力とともに分布図とした。測定値は経過日数40日に最も近いデータをプロットした。

- ・両断面とも天端の区間ひずみ・ボルト軸力は、深度1~2mで圧縮側の値で天端部が上方へ突き上げられる挙動となっており、ロックボルト先端部より上方の区間ひずみは引張り側となっている。
- ・両断面とも側部の区間ひずみ・ボルト軸力は引張りとなっており、内空変位が大きく仮インバート隆起が発生した計測断面Aはロックボルト先端前後で局部的に大きな区間ひずみが発生している。
- ・両断面ともロックボルト軸力は大きく、トンネルが変形するのを抑制する効果が發揮されている。

また、トンネル壁面に近づくほど地山区間ひずみは大きくなると推察されるが、ロックボルトの効果により、そのようなひずみの増大を抑制している。

5.まとめおよび考察

計測断面Aは土被り約300mでE-4パターン、計測断面Bは土被り約340mでE-1パターンでほぼ同様な葉片状蛇紋岩部での計測結果の比較を行った。

計測断面Aは、内空変位が大きくトンネルが縦長に押し潰される変形、吹付コンクリートの支保効果がみられない箇所(側壁)、ロックボルトの先端部付近で局部的に大きな地山ひずみが発生し、支保部材同士の相互作用による支保効果うまく發揮されていない。その結果として、最も形状・支保の脆弱な仮インバートで隆起といった変状が発生した。仮インバートの形状をAからBに補強した後は、安定した状態となり、インバート形状の効果が伺われる。

一方、計測断面Bは、支保構成が剛で側壁部のロックボルト長がL=3mと長く、トンネルが円に近い形状であるためか、支保部材は過不足無く最大限に近い効果が發揮され、トンネル周辺の地山ひずみも0.5%程度に収まり、ほぼ安定状態を保っている。ただし、大きな支保部材の応力や軸力が発生しているので、ほぼ限界に近い状態と考えられる。また、当地の蛇紋岩において、トンネルを安定させるためには、地山ひずみを0.5%以内に抑える必要があると考えられる。

6.おわりに

膨張性や押し出し性地山の場合には、過去の実績等を参考に支保パターン等を選定し、そのパターンの妥当性は、掘削しながら、観察や計測をして初めて判断できる。当避難坑も、土被りや蛇紋岩の性状、計測結果より、試行錯誤しながら支保パターンを選定してきたが、地山と支保構成が不釣り合いなときは計測断面Aのように変状が発生してしまう。

当避難坑の実績を今後の押し出し性地山の一事例として、小断面ではあるが、参考していただければ幸いです。

最後に、穂別トンネル西避難坑を掘削するにあたり多くのご指導を賜りました関係各位の皆様には厚く御礼申し上げます。