

斜交型坑口における斜め支保工でのトンネル貫通について The tunnel Breakthrough using skewed arch supports in the skew portal on the slope

河原 博*	原島 大**
Hiroshi Kawahara	Masaru Harashima
柳沢 一俊***	諏訪 至****
Kazutoshi Yanagisawa	Itaru Suwa

要 約

当該トンネルの貫通側坑口の地形は急峻な尾根地形を呈しており、斜面はトンネル軸心方向に対し28°の角度がついている典型的な斜面斜交型の坑口であった。また、トンネル坑口と付近を通る工事用道路の高低差は約20mあり、トンネル施工基面までのアクセスは、実質不可能であった。

一般的には、貫通に先立って貫通側坑口の坑口付け（切土、保護盛土、置換基礎等）を行い、その後トンネルを掘削・貫通させるが、当該トンネルはこのような施工方法が困難な条件であったため、貫通方法について、工程・経済比較を重ねた結果、「斜め支保工方式」を採用して貫通させた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 斜め支保工採用の背景
- § 4. 貫通方法の選定
- § 5. 施工結果
- § 6. 起点側坑口工の選定
- § 7. まとめ

なる。

本稿で報告する起点側（貫通側）坑口部の地形は、急峻な尾根地形を呈し、斜面はトンネル軸線方向に対して28°の角度がついている典型的な斜面斜交型の坑口である。さらに、トンネル坑口施工基面までのアクセスは、実質不可能であった。このようなアクセス不可能なトンネル坑口における貫通方法について、工程・経済比較を重ねた結果、「斜め支保工方式」を採用して貫通させた。

§ 1. はじめに

国道289号は、新潟県新潟市を起点として福島県いわき市に至る総延長304.4kmの本州を横断する一般国道である。

このうち、新潟県三条市から福島県南会津郡只見町に至る県境部分は、実際の距離は八里しかないが、その険しさのため一里が十里にも感じられたことから古来「八十里越」と呼ばれている（図-1参照）。

7号トンネルは、延長約950mの道路トンネルである。本トンネルの施工場所は、日本有数の豪雪地帯のため毎年12月から翌年5月上旬までは冬季休工期間となるため、実質施工可能な期間は6ヶ月程度となる。このため、契約工期を確保するためには、工程管理が非常に重要に



図-1 7号トンネル位置図

* 関東土木(支)八十里トンネル(出)(現:計画課)
 ** 関東土木(支)八十里トンネル(出)(現:湯船原(出))
 *** 関東土木(支)八十里トンネル(出)(現:本社土木計画部)
 **** 土木設計部設計二課(現:土木計画部技術課)

§2. 工事概要

2-1 トンネル諸元

延長：952 m
 掘削断面積：55～74 m²
 掘削工法：補助ベンチ付全断面掘削工法
 上半先進ベンチカット工法
 掘削方式：発破および機械掘削方式

2-2 地形・地質概要

本トンネルは、五十嵐川の最上流部である大谷川の右岸に位置する。大谷川は深いV字谷を刻んで直立に近い河岸側壁を形成し、比較的急峻な山岳地形を呈している。近辺には大小の地すべり地形がみられる。起点側坑口は岩盤が露出した急峻な細尾根であり、大きな斜面から派生した小尾根にあたる。

トンネルの地質は、新生代新第三紀中新世中期の酸性～中性火山砕屑岩類（グリーンタフ）を主体とする津川層である。この津川層は主に流紋岩質凝灰岩と、軽石質凝灰岩（グリーンタフ）からなり、軽石質凝灰岩の下部には泥岩や砂岩・細粒凝灰岩を挟み、上部においても成層した細粒凝灰岩が分布する。また、多量の流紋岩と少量の安山岩が貫入し、安山岩の一部は凝灰岩堆積と同時期に形成された溶岩も見られ、この古い溶岩としての安山岩は凝灰岩と同様にグリーンタフ変質を受けている（図-2参照）。

止の観点から優位である。

しかし、坑口から下部を通る工事用道路までの高低差が約20mあり、当初計画では置換基礎（L=21m）、抱き擁壁（L=35m）、補強盛土（V=1,300m³）、明かり巻コンクリート（L=8m）が計画されていた（図-3参照）。このような計画の中、トンネル掘削は以下の理由で終点側から掘削を開始することになった。

- ①工事用道路から坑口へのアクセスが困難である。
- ②起点側の詳細な施工方法が設計で確定していない。
- ③トンネルの早期完成を目指しており、掘削の着手を早めたい。

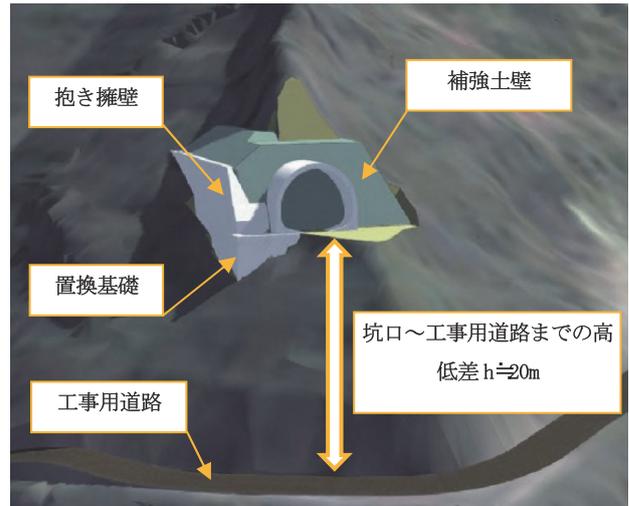


図-3 起点側坑口部完成形（当初計画）

§3. 斜め支保工採用の背景

3-1 起点側坑口の当初計画

本トンネルの起点側坑口部の地形は、斜面斜交型で尾根から派生した瘦せ尾根に位置し、「尾根部進入型」の坑口となる。地山は塊状の凝灰岩で構成され、この凝灰岩は、軽石質凝灰岩を主体に細粒凝灰岩が狭在し、凝灰岩中に安山岩の小規模貫入岩が分布する。本トンネルの縦断勾配は、起点側から終点側に向けて、4.2～4.8%の上り勾配で計画されていた。一般にトンネルは上り勾配で掘削する方が坑内仮設備、および水没等のトラブル防

3-2 起点側坑口の課題

- 起点側坑口の課題は以下の3点があげられた。
- ①等高線交差角が30～40°（斜面斜交型）（図-4,5参照）で、さらに下半盤に地山がなく偏土圧が作用し易いため、通常の全断面での貫通は困難である。
 - ②契約工期内に完成させるためには、最終年の冬季休工前に貫通させる必要がある。
 - ③貫通が遅れて越冬すると、トンネル掘削機械と仮設備が返納できず、機械・仮設備費が増大する。
- これらの解決策として、次章で述べるⅠ案とⅡ案の貫通方法について、比較・検討を行った。

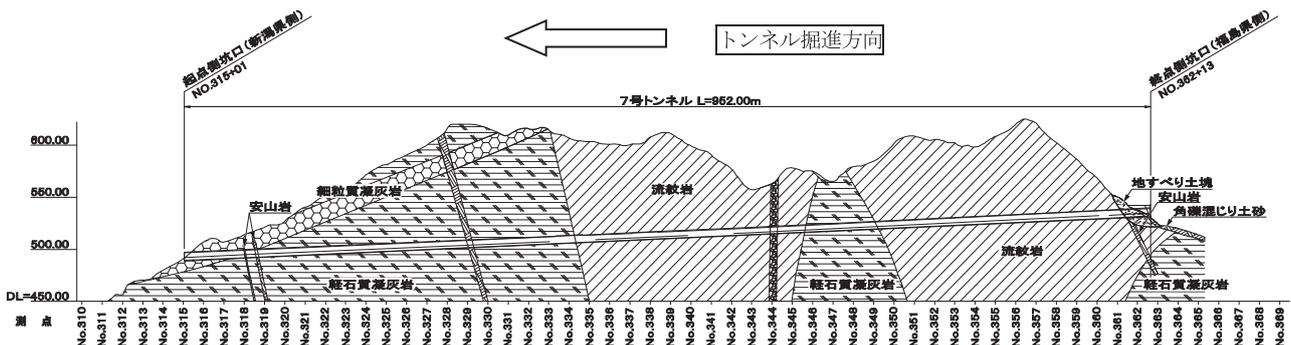
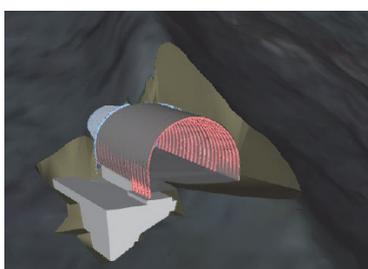
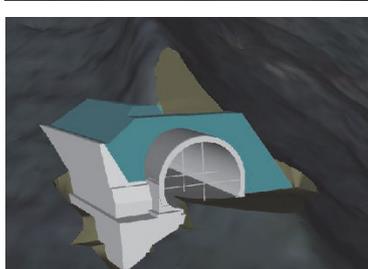
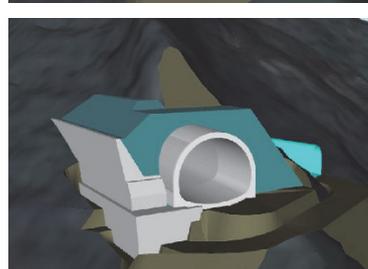


図-2 7号トンネル地質縦断図

§4. 貫通方法の選定

貫通方法の比較・検討結果を表-1に示す。

表-1 貫通方法の比較・検討

案	I案(斜め支保工案)	II案(導坑案)
施 工 ス テ ッ プ	 <p>ステップ① 斜め支保工で 仮貫通</p>	 <p>ステップ① 導坑貫通・ 工事用道路造 成</p>
	 <p>ステップ② 盤下げ掘削・ 置換基礎床付</p>	 <p>ステップ② 坑口切土・ 置換基礎床付</p>
	 <p>ステップ③ 置換基礎コン クリート打設</p>	 <p>ステップ③ 置換基礎・ 抱き擁壁コン クリート打設</p>
	 <p>ステップ④ 坑口切土・ 標準支保工で 全断面貫通</p>	 <p>ステップ④ 補強土壁によ る保護盛土</p>
	 <p>ステップ⑤ 抱き擁壁・ 補強土壁によ る保護盛土</p>	 <p>ステップ⑤ 全断面貫通・ 導坑閉塞</p>
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> 斜坑口の採用で、標準断面仮貫通→坑口処理→本貫通が可能である。 従来の掘削機械で施工が可能でII案よりも工期が短く、工事費も安価である。 年度内に貫通が可能となり、次年度に他業者が施工する橋梁下部工への影響を最小限にできる。 	<ul style="list-style-type: none"> I案と比較して従来工法で貫通できるため掘削が容易である。 新工種(導坑)が発生し、小断面専用掘削機械・設備が必要となり、工期・工費ともに増大する。 トンネル貫通後、導坑のエアモルタル等での閉塞、工事用道路の原形復旧が必要である。
評価	○	△

4-1 I案（斜め支保工案）の施工ステップ

I案（斜め支保工案）の施工ステップは以下の通りである。各ステップは表-1中のステップに対応する。

- ①貫通点より2m手前まで標準支保工により掘削を進める。以降は、標準断面より一回り大きい斜め支保工を用いて、掘削方向に向かって右側0.5m、左側1.0mと左右異なる掘進長で上半を掘削する。右肩部から貫通した後、重機がトンネルの外に出ることができる最小幅（3.5m）で下半を掘削する。
- ②貫通点の下半盤と置換基礎床付盤に高低差（3m）があるため、坑内より右側半分を盤下げし、斜路を造成（延長L = 25m、下り勾配18%）する。盤下げした区間については、下半支保工を継ぎ足す。
- ③置換基礎を施工する。坑口切土法面の1m手前まで斜め支保工の内側に標準支保工を建込む。
- ④重機足場を造成し、坑口を切土し、残りの標準支保工を建て込んで全断面貫通させる。
- ⑤抱き擁壁・補強土壁による保護盛土を施工する。

4-2 II案（導坑案）の施工ステップ

II案（導坑案）の施工ステップは以下の通りである。各ステップは表-1中のステップに対応する。

- ①本坑掘削を一旦停止し、掘削方向に向かって左側に導坑で貫通（導坑の底盤高は本坑下半盤高とする、延長L = 27.5m、勾配9%）し、工事用道路を造成してから、坑口上部を切土する。
- ②工事用道路を延伸し、置換基礎・抱き擁壁のための法面掘削・床付を行う（工事用道路の縦断勾配が14.5%となるため、不整地運搬車にて土運搬する）。
- ③置換基礎・抱き擁壁を施工する（生コン供給のための配管が長距離となり閉塞が懸念される）。
- ④補強土壁による保護盛土を施工する。
- ⑤本坑掘削を再開し、全断面貫通する。工事用道路の原形復旧と導坑の閉塞を行う。

以上、貫通方法2案について比較・検討した結果、表-1に示した通りI案（斜め支保工案）を採用した。

4-3 斜坑門の施工事例

既往の文献¹⁾によると、図-4に示すように、斜坑門の位置関係を整理するパラメータとして、トンネル軸線の直角方向と斜面の平均的な等高線方向とのなす角である「等高線交差角」と、斜坑門とのなす角である「斜角」について定義されている。

図-5に斜坑門の代表的施工事例の結果を元に収集された、等高線交差角と斜角との関係を示す。この図から以下の3点が考察される。

- ①等高線交差角よりも大きな斜角を持つ斜坑門事例は見当たらない（地山側に追い込んだ坑門側にさらなる地山の掘削が必要となり、斜坑門施工の目的がなくなる

ため）。

- ②等高線交差角20°未満では斜坑門の採用がない（トンネルがほぼ斜面に直交しているため、特に斜坑門を採用しなくても大きな切土、基礎工などが発生しないため）。
- ③等高線交差角が40°以上の事例では、斜角は40°未満となる（斜角を大きくとることによる坑門工の大型化ならびに走行環境の悪化を避けるため）。

これらより、斜坑門の斜角の採用実績は概ね30°程度までであり、この角度は切土、基礎工の施工規模の縮小効果と坑門工の大型化の施工コストの均衡点となることを示していると推察される。

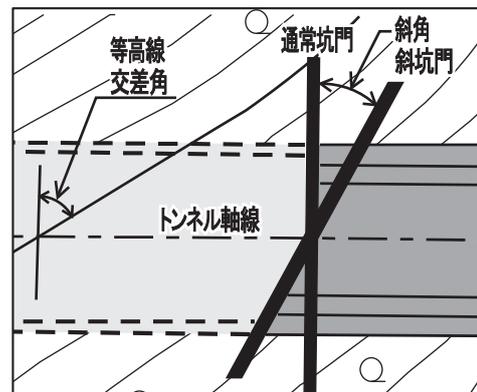


図-4 等高線交差角と斜角について¹⁾に加筆

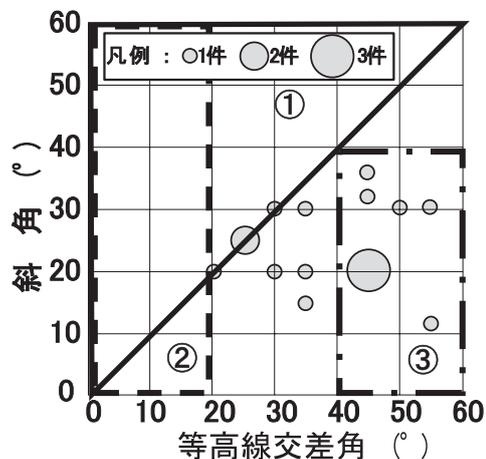


図-5 等高線交差角と斜角の関係¹⁾に加筆

4-4 斜め支保工の安定性評価と標準支保工の施工

斜め支保工施工時のトンネルの安定性は、以下のように評価した。

- ①坑口部の地山は、詳細設計時のボーリングと追加ボーリングより、崖錐層の堆積が50cmと薄く、岩盤等級がCLからCM級（N値>50）と良好であるため、支保工脚部の支持力は十分確保できる。
- ②この区間では、土被りが小さい急峻な尾根地点（トンネル背面の地山が薄い）で貫通するため、トンネルには大きな偏圧は作用しにくい。

- ③トンネル断面が小さいため（上半単心円 R = 4.45 m）、斜め支保工は極度な扁平断面にならない。
 - ④一次支保工の状態越冬するため、一次支保工に積雪荷重（設計積雪深 h = 4.5 m）を考慮したフレーム計算を実施し、鋼製支保工と吹付コンクリートの発生応力度が許容応力度以下であることを確認した。
 - ⑤坑口背面の切土法面（1：0.5）の安定解析を実施し、十分な安全率を確保できることを確認した。
- さらに、吹付コンクリートの品質確保、防水工の施工性、補強鉄筋の構造、及び当該区間の支保工の剛性アップを考慮して、貫通後の斜め支保工内側に標準支保工を構築する設計（二重支保工構造）とした。斜め支保工と標準支保工の離隔は 100 mm 確保した（図-6、7 参照）。

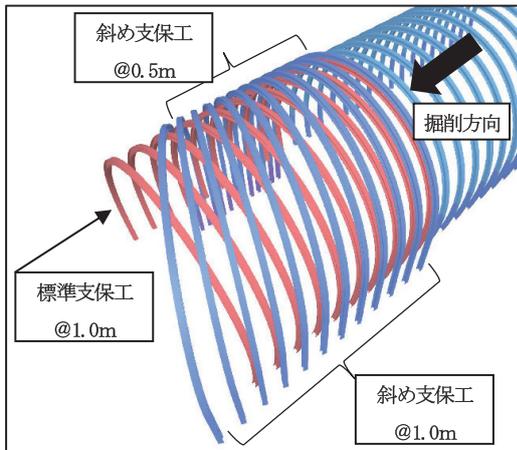


図-6 斜め支保工と標準支保工の二重支保構造

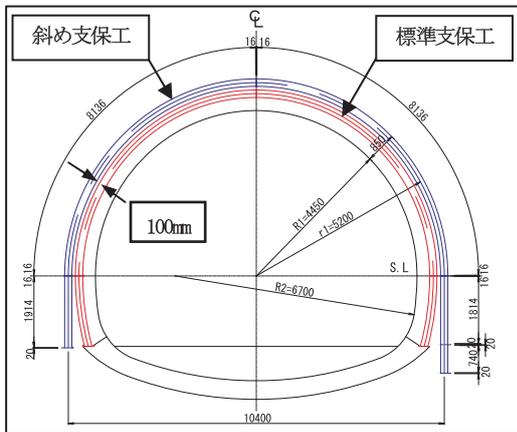


図-7 斜め支保工加工図

§5. 施工結果

起点側坑口の施工は、冬季休止期間前に斜め支保工 12 基と、内側の標準支保工 10 基を建て込んだ段階で越冬を迎えることとなった（表-1 における I 案のステップ③まで）。そのため、積雪荷重によるトンネルの不安定化が懸念された。

そこで、冬期休止期間中のトンネルの変形挙動を把握するため、斜め支保工設置 2 基目の断面に A 計測断面

を設定した。越冬前後の変形量は以下に示すとおり小さく、二重支保構造が効果的であったと考える。また、地表面沈下測定も実施していたが、測定結果は機器の誤差程度であった。

- ①内空変位量
越冬前：0.2 ~ 2.7 mm 越冬後：0.8 ~ 4.0 mm
増加量：0.6 ~ 1.3 mm
- ②天端沈下量
越冬前：0.1 ~ 1.3 mm 越冬後：1.5 ~ 3.1 mm
増加量：1.4 ~ 1.8 mm

§6. 起点側坑門工の選定

当該トンネルは前述の通り貫通方法として、「斜め支保工」を採用し、トンネルの安定を確保して越冬を迎えることができた。しかし、越冬後に施工が必要な坑門工の当初計画は、抱き擁壁と補強土壁による盛土でトンネルを保護するものであり、その施工量の多さから工程遅延のリスクが懸念された。そこで、このリスクを回避するための代替案を考案し冬季休止期間中に三者（発注者・設計者・施工者）で比較・検討を実施した。その対象工法は下記の 2 案であり比較検討結果を表-2 に示す。

- I 案：「抱き擁壁 + 補強土壁（保護盛土） + 緑化」
- II 案：「エアモルタル（保護盛土） + 緑化」

表-2 に示す I 案は、トンネルを坑内から貫通させるために必要な保護盛土である（当初計画の形状）。一方、II 案は完成後のトンネルを保護するのに必要最低限の保護盛土である。その結果、斜め支保工により早期に貫通させたことにより、I 案に比較して大幅に施工量を減らすことが可能となり、施工性・経済性の面で大きく優位であるため II 案を採用する結果となった。

§7. まとめ

本トンネルでは、斜め支保工（斜角 28°）で安全に貫通させることができた（写真-1, 2 参照）。トンネル完成まで全体で約 2 ヶ月の工期短縮となり、越冬前に掘削用機械や仮設備を返納できたことで、施工費も縮減できた。

また、斜め支保工での貫通事例は非常に少なく、施工上の問題点を抽出することと、事細かく施工ステップを考慮した貫通方法のシミュレーションには多大な時間を要した。

このように非常に困難な施工条件のもと、安全にトンネルを貫通させることができた要因は、上述の事前準備はもとより、坑口周辺の地山条件が岩盤等級 CL から CM 級（N 値 > 50）と非常に良好であったためと考える。したがって、一般的に考えられる地質的に弱層が存在し、

表-2 起点側坑門工比較・検討結果

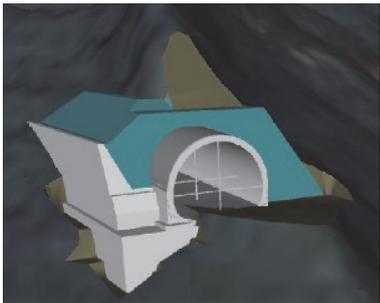
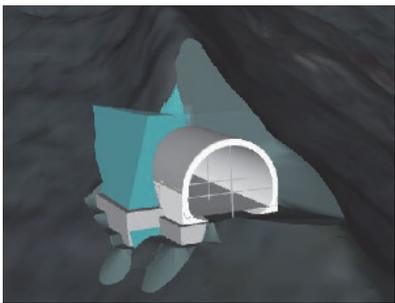
案	I 案:抱き擁壁と坑門まわりを緑化する案	II 案:エアモルタルと坑口付け面を緑化する案
完成形		
施工性	<ul style="list-style-type: none"> 坑口部の側方の盛土は保護盛土として、基礎工等の規模の抑制を図った計画である。 盛土材はソイルセメントとし、坑門工側方の土留めを抱き擁壁とすることにより、置換基礎の幅がII案より若干狭くなる。 坑門工正面を恒久的な緑化を目的に補強土壁としていることから、II案に対して、坑門工の延長が3m長くなり、置換基礎の規模も大きくなるため、施工性は劣る。 <p style="text-align: right;">△</p>	<ul style="list-style-type: none"> 坑口部の側方の盛土はエアモルタルによる保護盛土として、基礎工等の規模の抑制を図った計画である。 トンネル部の保護盛土をエアモルタルとすることから、I案に対して坑門工の延長を3m短くできることに加え、抱き擁壁を無くすと共に既往の計画に対して置換基礎の規模を小さくしたため、施工性は優位である。 <p style="text-align: right;">○</p>
景観性	<ul style="list-style-type: none"> 坑門工正面を補強土壁にしていることから、緑化が可能である。 <p style="text-align: right;">○</p>	<ul style="list-style-type: none"> 坑門工周辺をエアモルタルとするため、NETIS 登録されている「プランツソイル工法」を用いれば緑化は可能となるが、積雪地であるため、恒久的な緑化が懸念される。 <p style="text-align: right;">△</p>
経済性	<p style="text-align: center;">1.87 (II案を1とした)</p> <p style="text-align: right;">△</p>	<p style="text-align: center;">1</p> <p style="text-align: right;">○</p>
総合評価	<p>【メリット】坑門工正面を補強土壁としていることから緑化に対しては良好である。</p> <p>【デメリット】工種(ソイルセメント、抱き擁壁、補強土壁等)が多いため施工性が劣り、工費も増加する。</p> <p style="text-align: right;">△</p>	<p>【メリット】工種が少なく施工性は良好であり、経済性にも優れる。</p> <p>【デメリット】積雪地に対する恒久的な緑化に対して事例が少ない。</p> <p style="text-align: right;">○</p>



写真-1 越冬前貫通状況



写真-2 トンネル完成

その弱層に沿って侵食が進んだ複雑な地形が発達している坑口や、斜面崩壊跡地、地耐力不足が懸念されるような坑口への本施工方法の適用は、更に慎重な検討が必要であると考えられる。

本稿が今後施工される同様の地形・地質条件のトンネル坑口部の設計・施工を行う上での一助になれば幸いです。

ある。

参考文献

- 1) 進士正人, 辻田彩乃, 中川浩二: 山岳部のトンネル坑口における斜め坑門の適用性, トンネルと地下 第35巻5号, pp31~38, 2004