

# 多数の地質リスク（膨張性地山，地すべりほか）が想定される

## 地山における山岳トンネル詳細設計

日本工営株式会社 ○清水 葉 平  
日本工営株式会社 横山 真 一 郎  
日本工営株式会社 藤原 勇 輝  
日本工営株式会社 山本 啓 介  
日本工営株式会社 田中 秀 輝

### 論文要旨

近年，福岡市地下鉄工事での陥没事故や，リニア中央新幹線建設工事での水利問題等により顕著化するトンネル工事に関わる地質リスクに対し，調査・設計段階で適切な対応を図り，事業の安全性や効率性等を確保することが求められている。

本稿では，坑口部の地すべりや地山の膨張性など多数の地質リスクが想定される地山における新設山岳トンネル(NATM)の詳細設計時において，各種リスクへの対応を図った成果ならびに知見について述べる。具体的には起点側坑口付近で確認された地すべりブロックに対し，追加調査・観測により地すべり性状を把握の上，三次元安定解析による坑口検討を実施した。一般部を中心に熱水変質作用を受けた火山岩が分布し，X線回析試験や浸水崩壊度試験等により膨張性地山と判断され，掘削時の内空変位抑制効果が期待できる掘削工法ならびに補助工法を選定した。

キーワード：山岳トンネル設計，地質リスク，キャップロック構造，地すべり，膨張性地山

### まえがき

山岳トンネルは地中の線状構造物であることから，トンネル全線にわたり詳細な事前調査を実施することが難しい。また，トンネル周辺の地質性状や地下水の状況は複雑で不均質であり，その不確実性が大きな課題である。このような地質の不確実性は，事業全体におけるコスト増大や，事業の遅延，人的被害の発生など，安全性や効率性に関するリスク要因となる。そのため，計画段階より地質の不確実性とその影響を正しく認識したうえで，調査・設計を実施し，施工時のリスク要因を極力低減することが必要である。

近年，福岡市地下鉄工事での陥没事故や，リニア中央新幹線建設工事での水利問題など，山岳工法(NATM)に関する社会的影響，ならびに注目度が増しており，地質リスクを適切に評価し，事業の安全性や効率性等を確保することが求められている。そのような情勢を踏まえ，国土交通省ならびに土木研究所より令和2年3月に「土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン」<sup>1)</sup>が策定され，今後さらに地質リスクへの対応の重要性が高まるものと思われる。

本稿では，新設山岳トンネル(NATM)詳細設計段階において，事前に想定されていた地質リスクに対し，適切な調査・設計によるリスクへの対応を行った成果，ならびに知見について共有することを目的とする。

### 1. 業務概要

本業務の対象トンネルは，山陰近畿自動車道「竹野道路」に位置する延長445.0mの山岳トンネルである。竹野道路は，広域高規格道路として，災害時，大雪時の安全な交通を確保するとともに，公立豊岡病院へのアクセス向上，観光の促進，地域産業の活性化を目的とした整備路線である。

表1 業務概要

業務名	(国)178号 竹野道路 トンネル詳細設計業務(5号トンネル)
発注者	兵庫県 但馬県民局 豊岡土木事務所 竹野道路課
業務項目 (概要)	【当初項目】 ・トンネル詳細設計 1式 ・ボーリング調査(トンネル) N=6本(鉛直4本，水平2本) ・弾性波探査 1式
	【提案実施項目】 ・電気探査(比抵抗二次元探査) 1式 ・室内試験(粉末X線回析試験(不定方位法)，陽付交換容量試験(CEC試験)，浸水崩壊度試験) 1式 ・ボーリング調査(トンネル) N=2本(鉛直：BV-5，6) ・ボーリング調査(地すべり) N=2本(鉛直：BV-7，7') ・地すべり観測(孔内傾斜計，水位計) 1式 ・地すべり三次元解析・詳細設計 1式 等

### 2. 業務着手段階における地質リスク

本路線では，過年度業務にて地質リスク検討業務が実施されており，本業務での調査・設計に際して以下の地質リスクに対し留意する必要がある。

(1) キャップロック構造による地質構造把握の困難性  
地表地質踏査により、当該地山は北但層群(比較的軟質)の上部に玄武洞玄武岩(硬質)が分布する「キャップロック構造」をなすことが想定された。キャップロック構造は、地山上部層と下部層の地質特性の違いにより、地質工学的特徴が大きく異なる構造を指し、一般的なトンネル地質調査手法である弾性波探査での調査精度の確保が困難である。そのため、下部の北但層群(トンネル計画高付近)の地質構造、ならびに断層や貫入岩等の弱層の推定が課題であった。

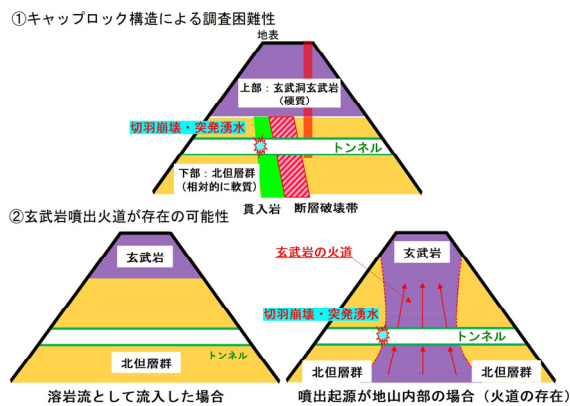


図1 キャップロック構造地山における地質リスク

(2) 起点側坑口付近の地すべり地形

起点側坑口付近の斜面において、防災科学技術研究所による地すべり地形分布図にも記載がある地すべり地形が判読されている。そのため、坑口切土やトンネル掘削による地すべり土塊への影響が課題であった。

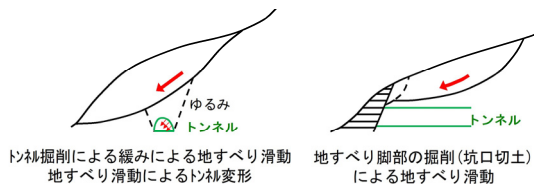


図2 地すべり部のトンネル施工における地質リスク

(3) 変質帯の分布

地表地質踏査により終点側坑口付近で流紋岩の変質帯が確認されている。一般に変質帯は岩質の脆弱化が進行しているほか、膨張性鉱物の含有リスクもあることから、切羽崩壊や地山の押し出し、盤ふくれ等の要因となる可能性があり、それらへの対応が課題であった。

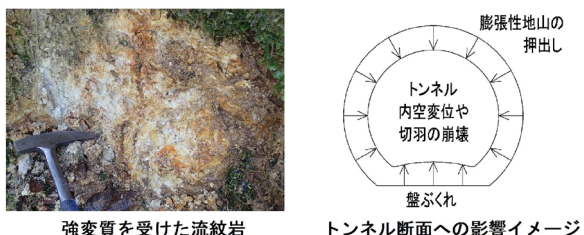


図3 変質帯のトンネル施工における地質リスク

### 3. キャップロック構造を踏まえたトンネル地質調査

(1) 調査方法

玄武岩の地質工学的特性や層厚、トンネル計画高付近の北但層群の地質構造、断層や貫入岩に起因する弱層の把握を目的に、表2に示す複数の地質調査手法の組合せによるトンネル地質調査を実施した。

表2 本業務で実施したトンネル地質調査項目

手法	目的
地表地質踏査	・玄武岩や下部層(北但層群)の分布(露頭)状況、断層破砕帯の確認。
ボーリング調査	・玄武岩の分布範囲中央部における鉛直ボーリング(BV-6:提案実施)にて、玄武岩の地質工学的特性や層厚、北但層群の地質構造、および玄武岩噴出火道の存在有無の確認。 ・他鉛直・水平ボーリングにて、トンネル計画高付近の地質構造の確認。
弾性波探査(トモグラフィ解析)	・地山の弾性波速度により、地山性状(硬さ、風化・亀裂状況等)や断層等の弱層の確認。 ※キャップロック構造の場合、下部層の地質構造の把握が困難である。
電気探査(比抵抗二次元探査)	・キャップロック構造の影響を受けない電気比抵抗分布により、下部層分布状況、断層破砕帯等の弱層の分布、地下水状況等の確認

(2) 調査結果

本トンネルの地質構造について、複数の地質調査手法を的確に組合せることで、以下の通り把握できた。

① ボーリング調査結果(BV-6)により、地山頂部に分布する玄武岩(Gba)の岩相は、上部の新鮮堅硬で亀裂が発達する「塊状部」と、下部の脆く一部土砂状を呈する「自破砕部」に区分された(図4)。また、電気探査で得られた比抵抗値とコア状況からも同様の相関が認められた。玄武岩の自破砕部が広く分布することから、キャップロック構造による弾性波速度層の逆転は生じず、北但層群の弾性波速度値を評価することができた。

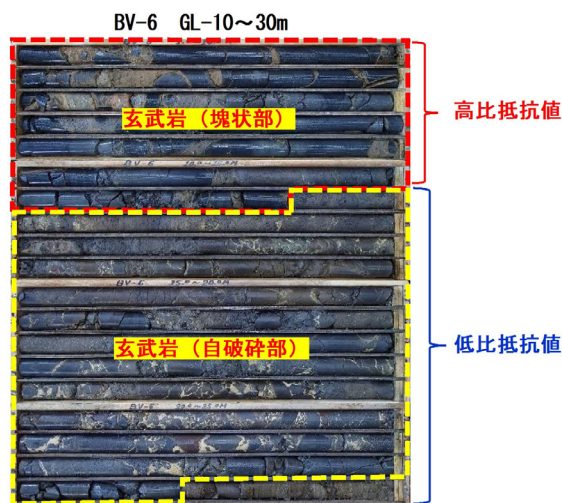


図4 BV-6 玄武洞玄武岩(Gba)の岩相状況

- ② BV-6 ならびに各種物理探査により、懸念された火道については確認されなかった。比抵抗二次元探査では、塊状部が最大 1,000Ω/m 程度の高比抵抗地を示す一方、自破碎部は土砂部や一部の粘土薄層による低比抵抗値(100Ω/m 程度)が検出され、岩相と比抵抗値の関係性が指摘された。一軸圧縮強度は、塊状部で 316.0MN/m<sup>2</sup> と非常に硬質であった。ただし、いずれの岩相の玄武岩もトンネル切羽断面およびトンネル計画高+1.5D の範囲には出現しない。
- ③ トンネル計画高付近は、北但層群の砂岩泥岩礫岩互層(Hal)の上位に流紋岩(Hrhy)ならびに松脂岩(Hrhy-p)が分布する。流紋岩ならびに松脂岩は、熱水反応に伴い粘土化した白色変質部(第5章参照)と、新鮮な非変質部に区分できた。非変質部の流紋岩は、一軸圧縮強度が平均 30.9MN/m<sup>2</sup> と中硬質で、弾性波速度が 3.4~3.6km/s 程度と比較的良好な地山と評価された。
- ④ 地形判読により複数のリニアメントが確認され、ボーリング調査や物理探査によりトンネルに影響する3つの断層の存在が示唆された。その内 F3 断層は、弾性波探査トモグラフィ解析による速度コンターの落ち込み、ならびに電気探査による比抵抗値のギャップから、測点 No.13 付近において終点側へ高角度に傾斜する断層破碎帯が推定された(図5)。

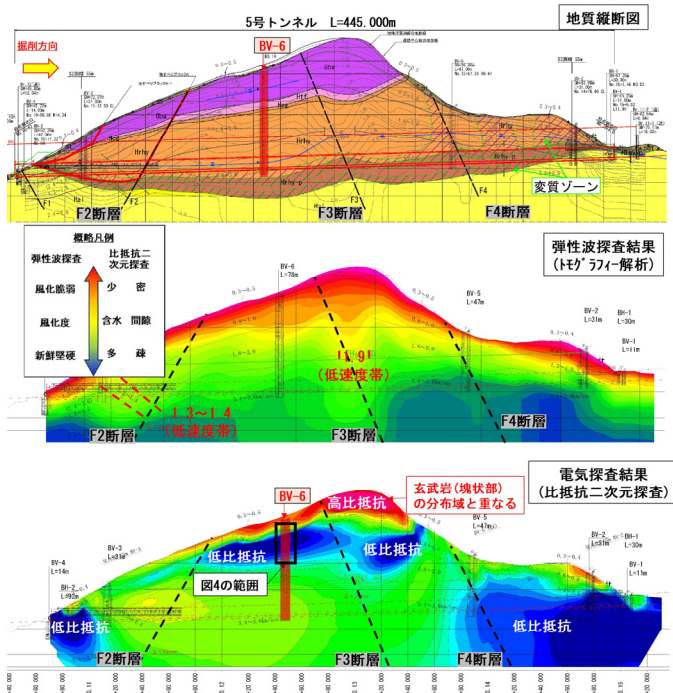
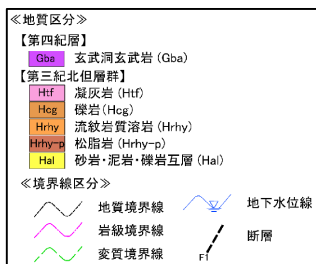


図5 調査結果縦断面図

#### 4. 起点側坑口付近の地すべりへの対応

##### (1) 地すべり調査・観測

ボーリング調査に先立ち、机上による地形判読、及び地表地質調査を実施した。その結果、当該地山中央部の山稜において、起点側に傾斜する幅約 300m の明瞭な滑落崖と地すべりブロックが認められた(Aブロック)。さらに、この地すべりブロック側部において、複数の小規模な地すべりブロック(A-1、A-2ブロック)が確認された(図6)。このうちA-1ブロックは起点側トンネル坑口付近に位置し、トンネル施工による不安定化を招く恐れがある。A-1ブロックが滑動した場合、A-2ブロックの不安定化に加え、末端抵抗領域を除荷されたAブロックの滑動を誘発するリスクが懸念された。



図6 当該トンネル周辺の地すべり

そのため、トンネル軸線が通過するA-1ブロックを対象に、地すべりブロック範囲、すべり面深度や性状、土質定数の把握等を目的に地すべり調査を行った(図7)。調査の結果、トンネル掘削の影響範囲内(2D ※D:掘削径)に地すべりブロックが位置することが確認された。トンネル掘削による緩み影響範囲が地すべり滑動を誘発する可能性があるため、地すべりへの緩み影響を考慮した地すべり安定解析を実施の上、地すべりを考慮した坑口検討を行う必要があると判断した。

また、地すべり調査と併せて、調査孔を用いた孔内傾斜計(BV-7)、ならびに地下水位観測に(BV-7')による地すべり観測を実施している。本業務での観測期間(2023.8~2024.3)において明瞭な地すべり変動は確認されていないが、地すべり滑動による事業リスクを勘案し、各事業段階における継続的な地すべり観測計画を立案している。

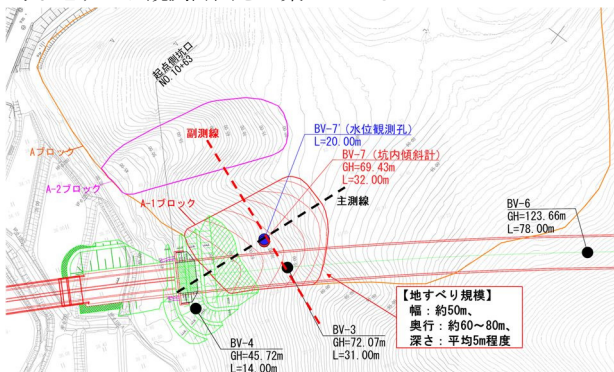


図7 A-1ブロック地すべり調査結果

(2) 地すべり対策を踏まえた坑口位置選定

A-1 ブロックの影響が懸念される起点側坑口計画について、地すべり対策案とそれに適するトンネル坑口案の組合せにより坑口位置を決定した(図8)。

まず1次選定として、地すべり対策工検討を行った。今回の場合、トンネル軸線と地すべりのすべり方向が斜交していることから、トンネル掘削に伴う地山の緩みによるすべり面強度の低下を三次元的に反映し、合理的かつ効果的なトンネル掘削による影響解析が可能な三次元安定解析(修正Hovland法)が有効であると考え、検討手法に採用した。地すべり対策工は、抑制工として押さえ盛土工、抑止工として垂直縫地工、アンカー工を抽出し、トンネル掘削により低減した安全率に対し、計画安全率1.2を満足する必要抑止力を算出の上、各対策工の対策規模・規格を選定した(図9)。

次に1次選定で選定した各種地すべり対策工を踏まえ、トンネル坑口位置比較検討(2次選定)を行った。坑口位置は、地すべり対策工ですべりに対する安全率を確保した上で、坑口切土による地すべり末端部の掘削を生じない位置を基本に比較案を抽出した。比較検討の結果、施工性、維持管理性、経済性の観点で優位となる、第1案:押さえ盛土案(No10+63.0)を選定した(表3)。押さえ盛土について、標準勾配での押さえ盛土では、トンネル延長が長くなり隣接橋台への影響が懸念されるほか、押さえ盛土区間のトンネル掘削には掘削範囲の改良を要する。そのため、ソイルセメントによる急勾配盛土を採用することで、地すべり対策工規模の削減やトンネル延長の短縮により、約1億円のコスト縮減が図れた。

起点側坑口部の押さえ盛土による地すべり対策に加え、A-1ブロック直下のトンネル掘削となるため掘削補助工法を計画した。補助工法は、トンネル掘削に伴う地山の緩みに起因した地すべり誘発抑制、ならびにトンネル切羽の安定化を目的として地山先行変位抑制効果のある長尺鋼管先受け工を地すべりブロック貫通までの区間で計画した。

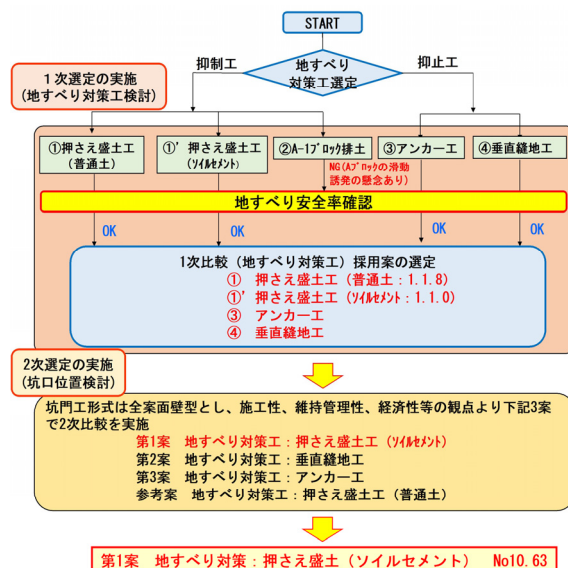


図8 地すべりを踏まえた起点側坑口計画検討フロー

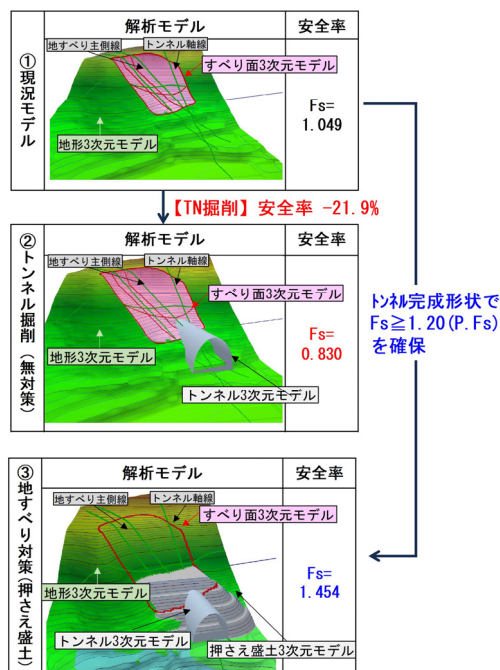


図9 三次元安定解析の結果

表3 起点側坑口位置比較表

	第1案: 押さえ盛土工(ソイルセメント) No. 10+63 (±0.0m)	第2案: 垂直縫地工 No. 10+65 (-2.0m)	第3案: アンカー工 No. 10+65 (-2.0m)	第4案: 押さえ盛土工(普通土) No. 10+48 (+15.0m)
概要図				
地すべりへの影響	掘削前に押さえ盛土を施工するため、地すべり土塊の安定性を確保 ・坑口仮設切土が生じるが、地すべり土塊への影響を回避	掘削前に垂直縫地工を施工するため、地すべり土塊の安定性を確保 ・坑口仮設切土が生じるが、地すべり土塊への影響を回避	掘削前にアカー工を施工するため、地すべり土塊の安定性を確保 ・坑口仮設切土が生じるが、地すべり土塊への影響を回避	掘削前に押さえ盛土を施工するため、地すべり土塊の安定性を確保 ・坑口仮設切土が生じるが、地すべり土塊への影響を回避
施工性	他家と比べ大がかりな仮設工は不要であり施工性が良い。	仮設足場が必要で、縫地幅数が膨大であり施工性に劣る。	仮設足場が必要で、アカー打設を起伏に富む現況斜面で行うため施工性に劣る。	他家と比べ大がかりな仮設工は不要であるが、トンネル掘削範囲の改良が必要
維持管理性	盛土斜面が発生するが維持管理は容易。	縫地幅数が膨大であり変状管理等の維持管理面に劣る。	アカーの点検や緊張管理等、定期的な維持管理が必要で、維持管理面で劣る。	盛土斜面が発生するが維持管理は容易。
経済性	◎	△	○	△
評価	◎ (選定)	-	-	-

## 5. トンネル計画高付近で出現する変質帯への対応

### (1) 変質帯の分布範囲と性状

変質帯の分布状況について、ボーリング結果ならびに地表地質踏査により、流紋岩(Hrhy)と砂岩泥岩礫岩互層(Hal)に挟まれた松脂岩(Hrhy-p)を中心に、層厚10~20m程度でトンネルルートに沿うように分布すると推定した(図13)。

この変質帯は、熱水により形成されたものと推定され、肉眼では鮮やかな灰白~淡緑灰色を呈し、粘土化が著しく進行している。一軸圧縮強度は1.41 MN/m<sup>2</sup>と小さく、軟質で指圧により容易に変形する状態である(図10)。変質帯がトンネル計画にあたる測点No.12+80~No.14の区間では地山強度比が2以下となり、掘削に伴うスクィージング(地山の押出し)が生じる可能性のある地山であることが示唆された。

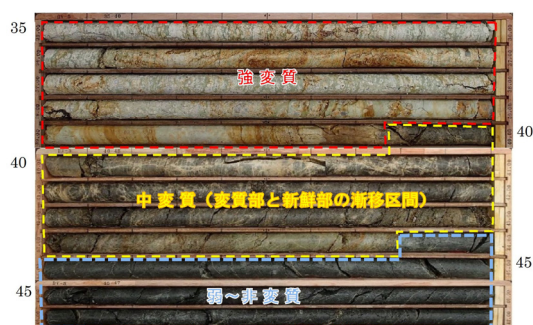


図10 BV-5松脂岩(Hrhy-p)の変質状況

### (2) 室内試験による地山の膨張性評価

膨張性鉱物(スメクタイト)の含有の有無およびスレーキング特性を把握するために、X線回折試験、CEC試験、浸水崩壊度試験を実施した。各試験結果より、本トンネルに分布する流紋岩と松脂岩の変質帯では、普遍的にスメクタイトが含まれていることが明らかとなったほか、浸水崩壊度試験ではD判定とスレーキングによる岩石の脆弱性が指摘された。

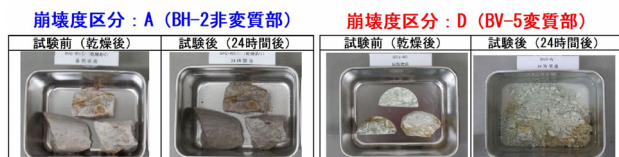


図11 浸水崩壊度試験結果

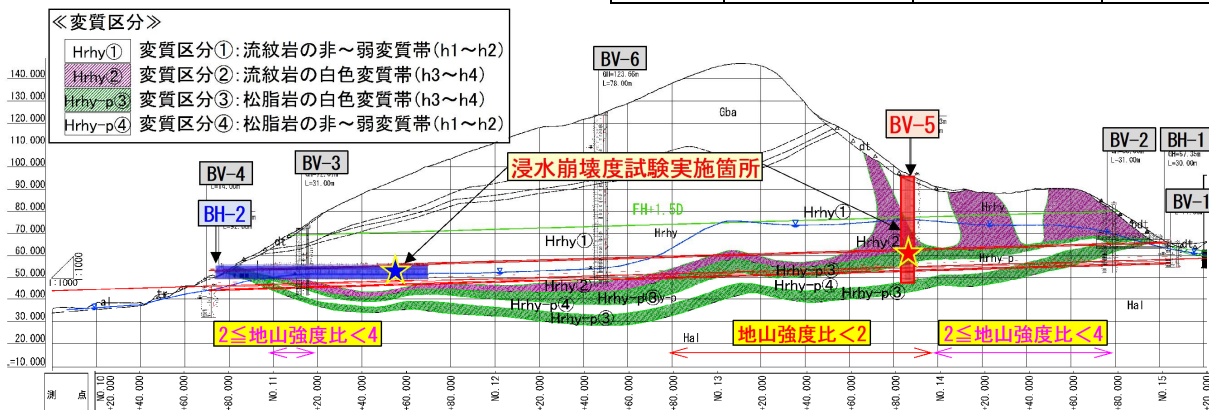


図13 変質帯分布縦断面図

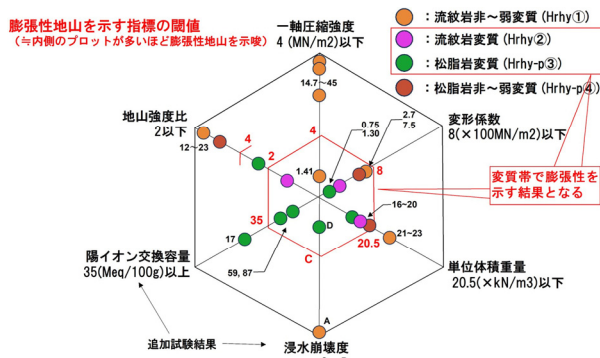


図12 当該地山における膨張性判定結果

### (3) 膨張性地山区間における設計

膨張性地山区間における施工時ならびに供用後のリスクとして以下3点を抽出し、それらへのリスク低減に資する設計を行った。

- 掘削に伴い地山周辺に生じた応力が地山強度を超過し、地山が塑性流動化するスクィージング現象による内空断面縮小、ならびに支保構造の破壊
- 膨張性鉱物が吸水膨張するスウェリング現象による掘削時の影響、ならびに供用後における長期的な地山の劣化や地下水位の変化によるインバートの破壊
- 切羽崩壊による作業員の被災

表4 類似事例の収集結果

トンネル名	地質	掘削工法	主な対策工
盃山トンネル(Ⅱ期線) H14.3	流紋岩(変質あり) 流紋岩質凝灰岩 玄武岩	上半先進バンカット工法	長尺鏡ぶれ 鏡吹付コンクリート 長尺鋼管先受工 インバート底面吹付 インバート鋼製ストラット
城山トンネル H30.9	新第三紀泥岩 凝灰岩 ※浸水崩壊度D	補助バン付全断面掘削工法(早期閉合)	長尺鏡ぶれ 鏡吹付コンクリート 長尺鋼管先受工 インバート底面吹付 インバート鋼製ストラット
佐野トンネル R3.10 ※近傍TN	白色凝灰岩 未固結礫岩 泥岩	上半先進バンカット工法 ※一部下半仮インバート早期閉合を併用	長尺鏡ぶれ 鏡吹付コンクリート 長尺鋼管先受工 注入式先受け インバート底面吹付(上半, 下半)

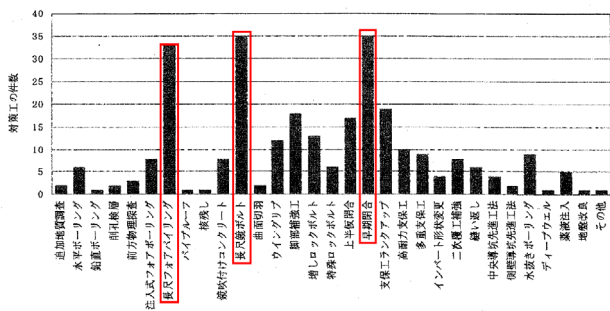


図 14 膨張性地山における施工段階の対策工<sup>2)</sup>

設計は、標準支保パターンを用いた標準的な設計を基本に、近傍トンネルや類似地質の施工事例(表4, 図14)等を参考に、「インバートを含めた支保の剛性を高めること」、「早期閉合を行うこと」、「地山を極力緩めないこと」を基本原則とし、膨張性地山におけるリスク低減を図った。

- ① 変形余裕量を考慮した DII パターンを採用するとともに、供用後の長期的な耐久性向上を目的にインバート剛性ストラットを計画(図15)。
- ② 地山変位や内空変位抑制として、早期に全断面を閉合する「補助ベンチ付全断面工法+一次インバート早期閉合」を採用(図16)。
- ③ 長尺鋼管先受け工や長尺鏡ボルトを採用し、先行変位の抑制を図るとともに、切羽付近の施工安全性を確保。

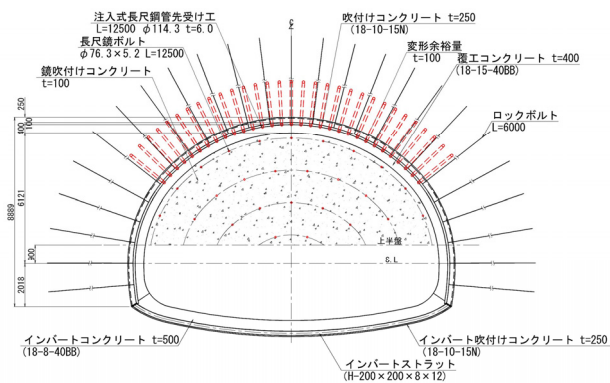


図 15 膨張性地山区間の支保パターン

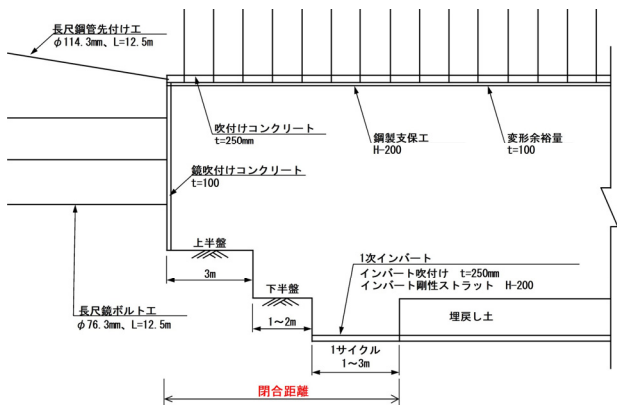
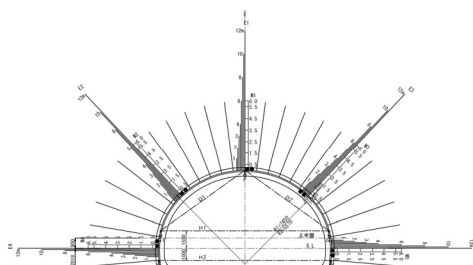


図 16 早期閉合

前述した通り、本業務では標準支保パターンを用いた標準的な設計を基本に、近接トンネルや類似地質の施工事例を参考に設計を行っている。そのため、施工時の地山状況の観察や計測工結果を主体とした調査結果に基づく総合的に適切な地山の評価を行い、地山の条件に最も適した支保パターンにて施工することが重要であると考えた。したがって、本業務において図17に示すB計測を立案するとともに、前方地山の予測精度向上を目的に施工段階における先行ボーリング、坑内弾性波探査、各種削孔検層等の切羽前方探査を提案することで、施工時のリスク要因の低減し、事業の安全性や効率性確保に資する当初設計を行った。



測定項目	記号	数量	備考	
計測工A	坑内観察調査	—	全延長	
	内空変位測定	H1~H2	2測線	
		D1~D2	2測線	
	天端沈下測定	F	1ヶ所	
計測工B	脚部沈下測定	G1~G4	4ヶ所	
	地中変位測定	E1~E5	5ヶ所	
	ロックボルト軸力測定	M1~M5	5ヶ所	L=6.0m
	吹付コンクリート応力測定	●	5ヶ所	
	鋼7支保工応力測定	■	5ヶ所	

図 17 膨張性地山区間の計測計画

## 6. まとめ

業務着手段階において設計分野、地質・地盤分野、防災分野等の各専門技術者によるリスク把握を行うとともに必要に応じた追加調査等を提案することで地質リスクとその特性を正しく認識することができた。その結果、フロントローディングとして設計段階で地質リスクに対して綿密に対応し、施工時の安全性確保、ならびに事業遅延リスクの回避を図った。

今後の展望として、更なる地質リスクマネジメント体系の整備と技術の向上に取り組む必要があると考える。本業務で得た知見を基に、他業務への展開を図りたい。

## 謝 辞

本業務の遂行にあたりご指導・ご鞭撻いただいた関係者の皆様、ならびに本論文の投稿に際し、ご快諾頂きました兵庫県 但馬県民局 豊岡土木事務所 竹野道路課の皆様へ厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン, R.2.3.30
- 2) 公益社団法人 土木学会：トンネルライブラリー-32 実務者のための山岳トンネルのリスク低減対策, R2.5