

3. 技術的課題とその対応について

3. 技術的課題とその対応について (課題①閃緑岩が貫入した地質構造)

課題①への対応

トンネル地山の地質調査解析の方針、地質条件が類似するトンネルの施工実績を参考とする施工時留意事項の提示

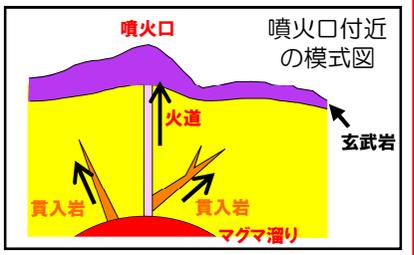
【技術的課題】

- 蘇武トンネルの切羽崩壊は、「地下水を保有した貫入岩」の分布と「断層破碎帯」の分布が原因であることを確認。
- 城崎道路周辺に二見山の噴火口が存在し、計画ルートの上層には、玄武岩が分布することから、城崎道路においても、「地下水を保有した貫入岩」「断層破碎帯」の分布が想定され、トンネル掘削時に突発湧水、切羽崩壊が発生する危険性がある。
- 「キャップロック構造」をなす地山は、トンネルの地質調査で一般的に用いられる弾性波探査の適用が困難となるため、切羽安定性に影響する断層や貫入岩等の弱部推定が課題となる。

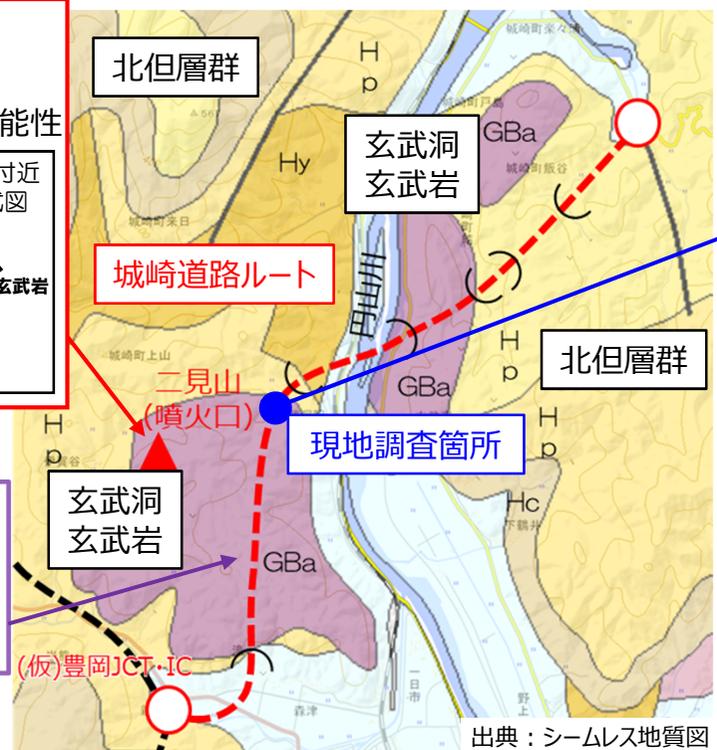
＜城崎道路周辺の地質分布および噴火口位置＞

【凡例】※基盤岩 GBa 玄武洞玄武岩 HCgl 円礫岩 HBPY 火山礫凝灰岩

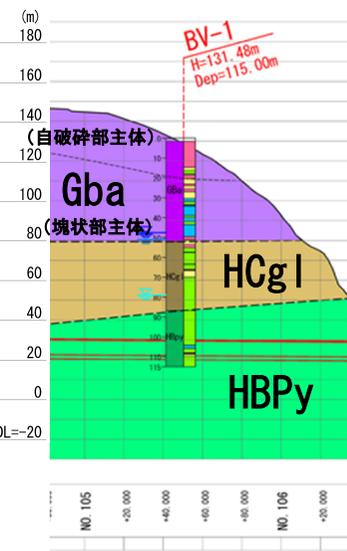
文献※による噴火口位置
(※日本の火山, 産業総合研究所)
北但層群を貫く貫入岩が、
トンネル付近に存在する可能性



柱状節理 (連続性の高い割れ目) の発達した玄武洞玄武岩は、亀裂の多い貫入岩と同様に地下水を保有しやすい特性を有する



出典：シームレス地質図



＜現地調査結果より＞

- 玄武洞玄武岩が上部に分布する「キャップロック構造」を確認。
- 北但層群は、円礫岩と火山礫凝灰岩に大別され、いずれも割れ目の少ない硬質な岩盤を主体とする。
- 玄武岩は高透水性を示すが、円礫岩・火山礫凝灰岩の透水性は低い。
- 地下水分布は、深度47m(玄武岩内)最終水位は深度78.9mに分布。

＜城崎道路事業実施時の懸案事項＞

- 北但層群は、割れ目の少ない硬質な岩盤が主体をなし、透水性は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ (m/s) で難透水性を示す。
- 北但層群内には、白～褐色脈が散見され、一部には脈に沿って変質を伴う箇所が確認されたことから、周辺に断層や貫入岩などが分布する可能性が高く、**不確定な要素が大きい**

凡例	
GBa	玄武洞玄武岩
Hp	北但層群豊岡累層(流紋岩～デイサイト凝灰角礫岩および凝灰岩)
Hc	北但層群豊岡累層(礫岩および砂岩)
Hy	北但層群八鹿累層(安山岩質凝灰角礫岩・玄武岩および流紋岩溶岩)

<衛星情報を活用したリモートセンシングの活用事例について>

データの種類	水平分解能	適用例	概要
合成開口レーダーデータ (PALSARなど)	10~100m程度	岩相分類(礫岩・砂岩層の識別等)	・地表面の凹凸や地形の特徴を把握。・微地形抽出、岩相境界の推定が可能。
		地盤沈下・地すべりのモニタリング	・SAR画像を対象に時系列解析を行い、地盤の変動状況を把握。
マイクロ波散乱計データ(AMSRなど)	250~1000m程度	土壌水分量の把握(地下水分布推定)	・土壌水分量をもとに、水源の分布を推定。

<新技術について>

手法	適用事例	技術的特長	適用性について
弾性波 トモグラフィー	・トンネル地山調査 ・ダム基礎岩盤調査 ・コンクリート健全性評価	・ボーリング孔を利用した弾性波探査方法 ・複雑な地質構造や断層破砕帯など、速度層分布が不規則な箇所への適用性が高い	解析が困難なキャップロック構造を有する地域であるため、地表+地下の情報を用いた解析手法を適用し、弾性波速度分布を精度良く求める。
電磁気探査 (MT法)	・断層・破砕帯・変質帯・湧水箇所の調査 ・温泉の源泉調査	・人工または自然の電磁場変動を利用 ・深度数十~数百mにある断層・破砕帯・変質帯・湧水箇所の位置や規模が抽出可能	地下水に関連する情報として、比抵抗値を広域および深部まで取得するため、電磁気探査手法を適用し、集水範囲・経路などの水理地質構造を明らかにする。
放射能探査	・地質境界や断層、破砕帯の存在確認	・地下に伏在する開口性の裂か部で特有の核種のγ線量が高くなる場合があることを利用し、活断層・破砕帯分布や地下水・温泉等の賦存状況等の抽出可能	地山内の地下水流動を把握するため、地下水等に含まれる微量の放射性元素に着目した探査を実施し、地下水の動きが顕著な箇所や地下水が滞留する箇所(断層等)の推定を行う。
環境DNA (細菌叢解析)	・環境アセスメントなどの生物調査 ・地下水のトレーサ解析	・水中に浮遊する細胞や組織の断片からDNAを抽出・分析することで、地下水流動の指標とすることが可能	トンネル周辺の地下水と二見水源の湧水について、環境DNAを指標とした対比を行い、トンネル掘削と水源への影響を検討する。
トリチウム 試験	・地下水流動時間分析	・地下水中の放射性同位体のトリチウム濃度を利用 ・地下水流動時間の分析可能	トリチウム濃度から地下水の滞留時間を求め、二見水源までの広域的な流動形態を明らかにし、トンネル掘削の影響を検討する。

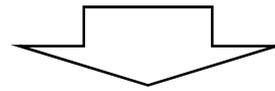
<特異な地質条件を踏まえた道路(トンネル)の維持管理>

城崎道路地質条件	該当箇所	BIM/CIM活用による効率化
地すべり移動性地山斜面災害	一部坑口は不安定化の可能性あり	①設計、施工データの管理引継 ・竣工図、地質縦断図(支保パターン) ・切羽観察記録 ・計測工 ②予防保全対策 ・覆工目地部へのシート対策など ③初期値の確保 ・壁面画像撮影や点群データによるデータ取得(経時変化確認) ・MIMM、レーザー計測等の新技術活用(高精度) ④計測機器 ・OSV技術の活用(R178 穴見トンネルで実施中) ⑤確実な維持管理サイクルの実施 ・点検、補修、更新
断層破砕帯熱水変質帯	可能性あり(詳細は不明)	
高水圧大湧水	可能性あり(玄武岩,岩脈が分布した場合)	

3. 技術的課題とその対応について（課題①閃緑岩が貫入した地質構造）

【検討会指摘事項】

- 断層破碎帯や湧水発生の状態には様々なケースがあるため、トンネルのリスクマネジメントにおいては、細心の注意を払う必要がある。
- 城崎道路は、噴火口(二見山)が近く、火道・貫入岩が存在し、かなり複雑な地質構造になっている可能性があることに留意して調査する必要がある。
- 複数調査の組合せについては、既存の手法だけでなく、衛星情報を活用するなど、新しい手法も含めた検討をお願いしたい。
- 特異な地質条件を踏まえた、道路(トンネル)の維持管理での留意点は？



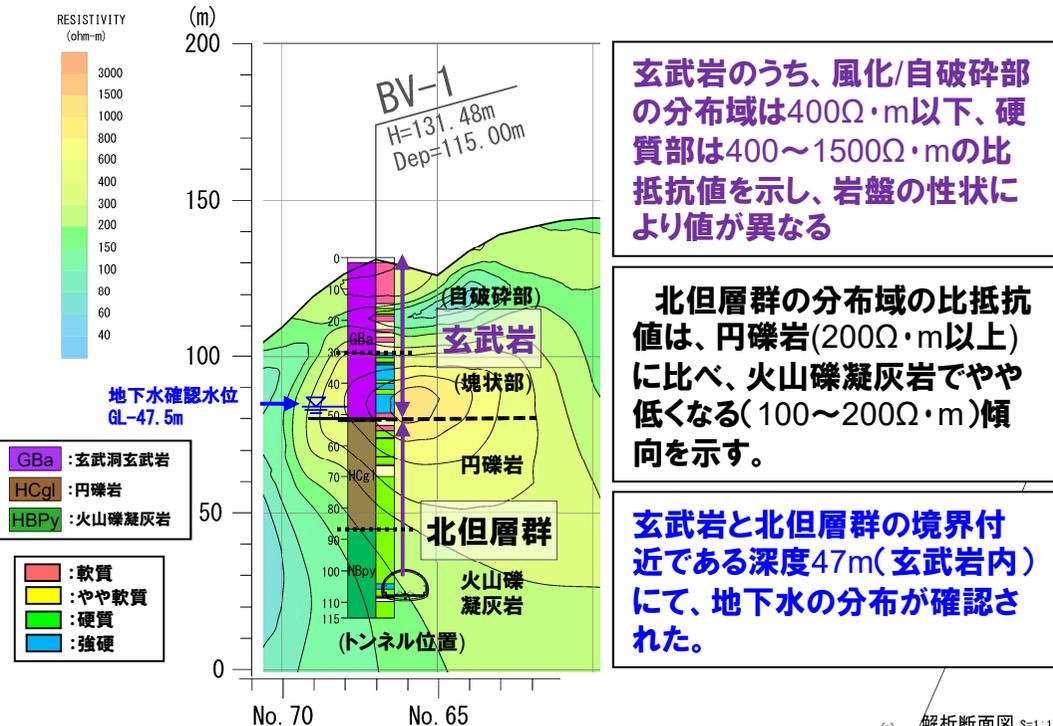
【対応方法(案)】

- 既存の調査手法以外にも、新技術の調査方法も積極的に活用し、複数の地質調査手法により、城崎道路周辺の広域的な地質構造(貫入岩・断層破碎帯の分布)を把握する。近傍トンネルの施工事例を踏まえながら、岩種別のリスク分析を行い、リスクマネジメントを計画する。
地質調査手法:ボーリング調査、弾性波探査、電気探査、ボアホールカメラ観測、速度検層、電磁波探査、トモグラフィ探査、リモートセンシング、地表地質踏査 など
- 複数の調査結果から取得した地質情報からトンネル区間の地質分布、地質構造を総合的に解釈し、地山評価へ適切に反映。その際には、噴火口(二見山)が近く、複雑な地質構造になっていることに留意する。
- 施工時の留意点として、事前調査での貫入岩・断層破碎帯の把握には限界があるため、施工時の先進ボーリングも活用し、岩盤状況の把握、断層・貫入岩の分布把握を行い、複数の補助工法(AGF工法・長尺鏡ボルト等)を組み合わせる。
- 維持管理については、施工データ(支保パターン、計測結果など)、竣工時の状況を初期値として整理し、維持管理時の基礎資料とする。また、レーザー計測点検による変状監視やBIM/CIM活用などを検討する。

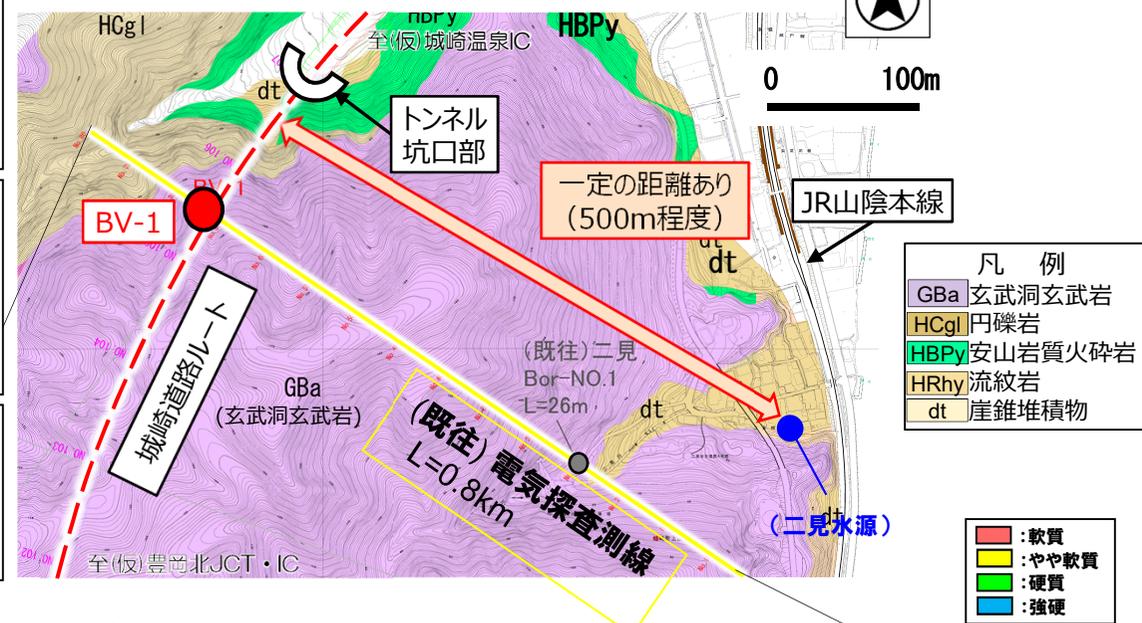
課題②への対応: 地下水流動を規制する水理地質構造の三次元的な把握および二見水源地への影響の評価方法の検討

【技術的課題】

- トンネル区間と水源地(約2,600世帯に配水)が近接するため、トンネル掘削により水源の湧水量・水質への影響が想定される。
- 二見水源地への影響を検討するためには、水源周辺の水理地質構造を明らかにするとともに、その集水域を把握し、トンネル位置および深度・地山の透水性状などを詳細に把握する必要がある。



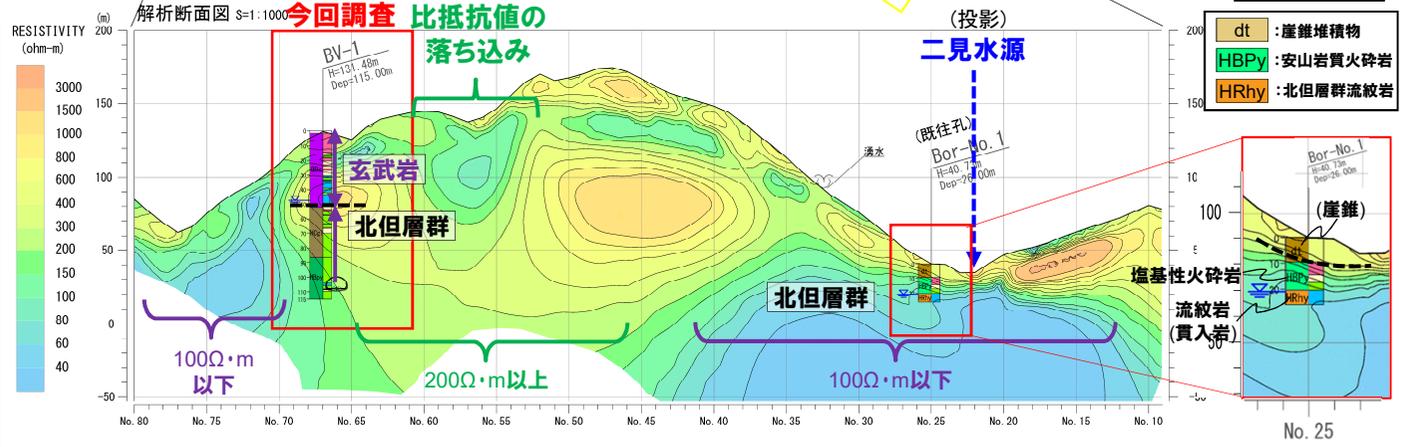
＜二見水源地とトンネルの位置図＞



＜トンネル～水源に至る比抵抗分布＞

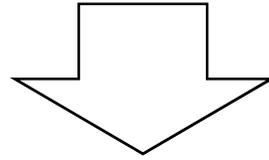
- 調査箇所 (BV-1) から二見水源地方向にて実施された既往の電気探査の結果から、トンネル付近および二見水源地までの間で、比抵抗分布が区間により大きく異なることが確認されている。
- トンネル周辺の地山は、比抵抗分布に影響を与える各種要素 (地質分布、岩盤性状、地下水分布など) が不均一である。

トンネル～二見水源にかけての地質分布・構造が複雑である可能性が高いため、地下水の分布・流動径路を明らかにするには、広域な範囲を対象とした調査・検討が必要。



【検討会指摘事項】

- 山陰近畿自動車道（香住IC～余部IC）のトンネルでは、調査を実施した上で、工事を実施したが、用水利用に支障を来し、地域との合意形成に苦労したという事例があるので、できるだけ事前に情報を収集し、地域へ説明していく必要がある。



【対応方法(案)】

- トンネル掘削による水源への影響を詳細に把握するために、**複数の調査手法（ボーリング調査・電気探査等）による多角的な情報から**地質分布・構造、地下水の分布・流動径路を正確に把握し、**水理地質構造（3次元）を確認する。**
- トンネル掘削時における影響を精度良く求めるため、**広域（水利用、集水面積に関連する範囲）で3次元浸透流解析を実施する。**
- 地山の透水性状や地下水分布を把握するため、**透水試験や地下水のモニタリング（水位・流量・水質等の測定）を実施する。**
- 上記の検討の結果、影響が発生する場合は、地下水への影響を低減する対策を実施する。**また、その対応について、地域と協議しながら、事業を実施していく。**

※青字は第1回技術検討会の指摘事項に対する検討結果を反映した事項

3. 技術的課題とその対応について (課題③河川内における厚い軟弱地盤)

課題③への対応: 近接事業の城崎大橋における課題を調査し、城崎道路で想定される困難な要因検討

【技術的課題】

- 近接事業(兵庫県)である城崎大橋では、厚い軟弱地盤・限られた非出水期での施工により、台船による施工を行っており、城崎道路でも台船による施工を行うことが想定される。
- 城崎大橋において、支持層までの間で、詳細設計時のボーリング調査結果で確認されていなかった風化岩が出現し、追加ボーリングと工法変更を行うこととなった。そのため、城崎道路では設計段階での的確な地質条件の確認が必要。
- 城崎道路の渡河部は、豊岡盆地が狭まる狭窄部に位置し、既存の各種調査結果から橋梁の支持層となる地盤(主に基盤岩)が深まっており、かつ河川や谷地形の発達などにより傾斜、複雑な地形をなし、支持層分布に不陸がある可能性がある。

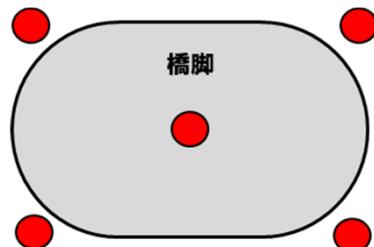
【検討会指摘事項】

- 城崎大橋にて工法変更が発生しており、詳細な調査を行い、設計に反映させる必要がある。

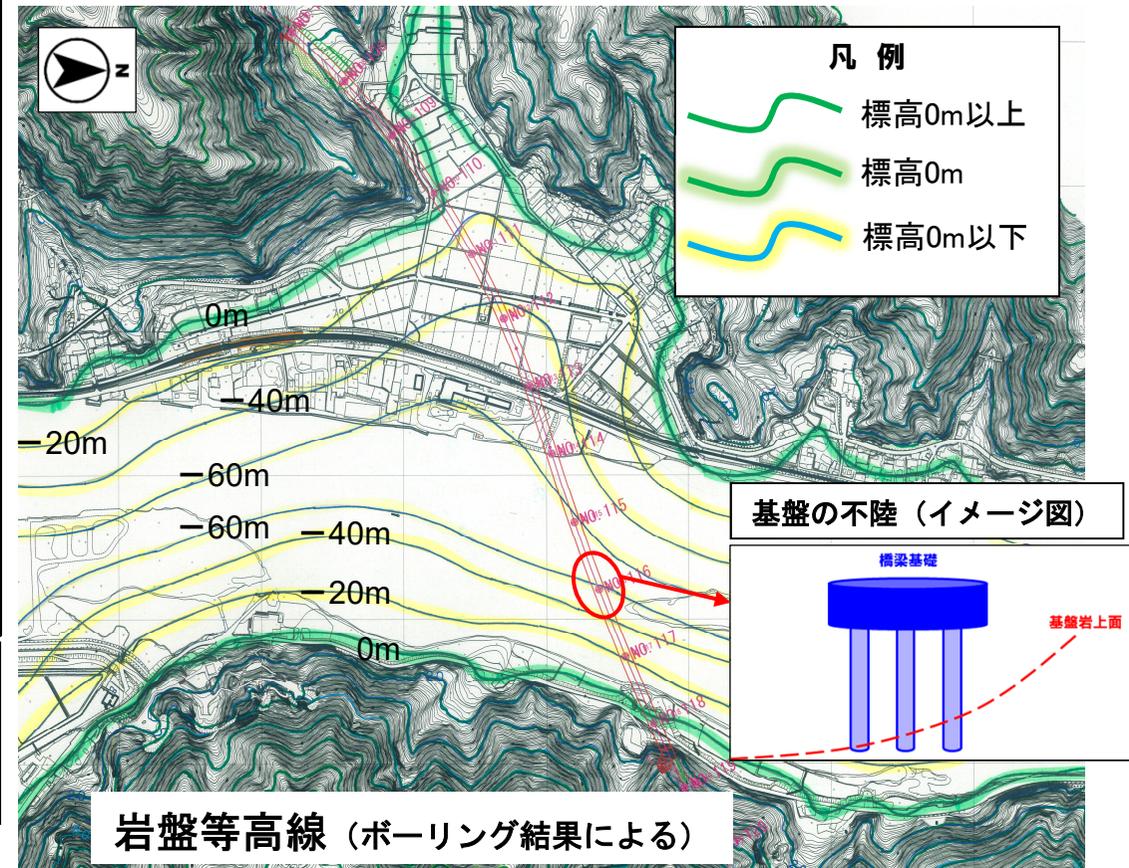
【対応方法(案)】

- 橋脚部の支持層分布に不陸がある可能性を考慮し、支持層の分布は計画箇所を含め面的な把握が必要とされる。そのため、**橋脚箇所は複数(最低5本を想定)のボーリングにより支持層を面的に把握した上で、適切な工法を選定する。**
- また、対象箇所周辺で実施された既存の地質情報も参考とした支持層分布を整理し、設計精度の向上を図る。

<ボーリング調査位置(案)>



ボーリングは、基盤の不陸を把握するため、四隅と中央に配置することを基本とする



岩盤等高線 (ボーリング結果による)

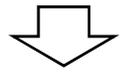
● 渡河部における支持層(基盤岩)分布傾向

- ▶ 計画路線周辺における既存のボーリング等の情報から、橋脚の支持層と想定される基盤岩は、深度30~50m付近に分布する可能性が高い
- ▶ この支持層の分布は、右岸側では背後斜面と同様に急傾斜を示すと考えられるが、左岸側では幅広い谷地形の発達から比較的緩やかな傾斜を示すものと推定される。
- ▶ 対象区間では、支持層分布の深度や傾向が場所により異なることが想定されることから、詳細な調査が必要とされる。

※青字は第1回技術検討会の指摘事項に対する検討結果を反映した事項

課題④への対応:2号トンネル坑口部における地形・地質状況を概査し、地すべり等リスクを提示
【技術的課題】

- ・ 円山川右岸の本線ルート坑口付近は、北但層群(流紋岩)の上部に玄武洞玄武岩が分布。
- ・ 坑口の北側斜面には、広範囲に崩落した岩屑～土砂からなる崖錐堆積物が分布。
- ・ 坑口およびその周辺には、崩壊跡地形が多数確認される。
- ・ そのため、坑口付近の地山は、崩落を生じやすい地山条件にあり、トンネル掘削に伴いトンネル坑口付近の地すべりや岩盤崩落する可能性が考えられる。



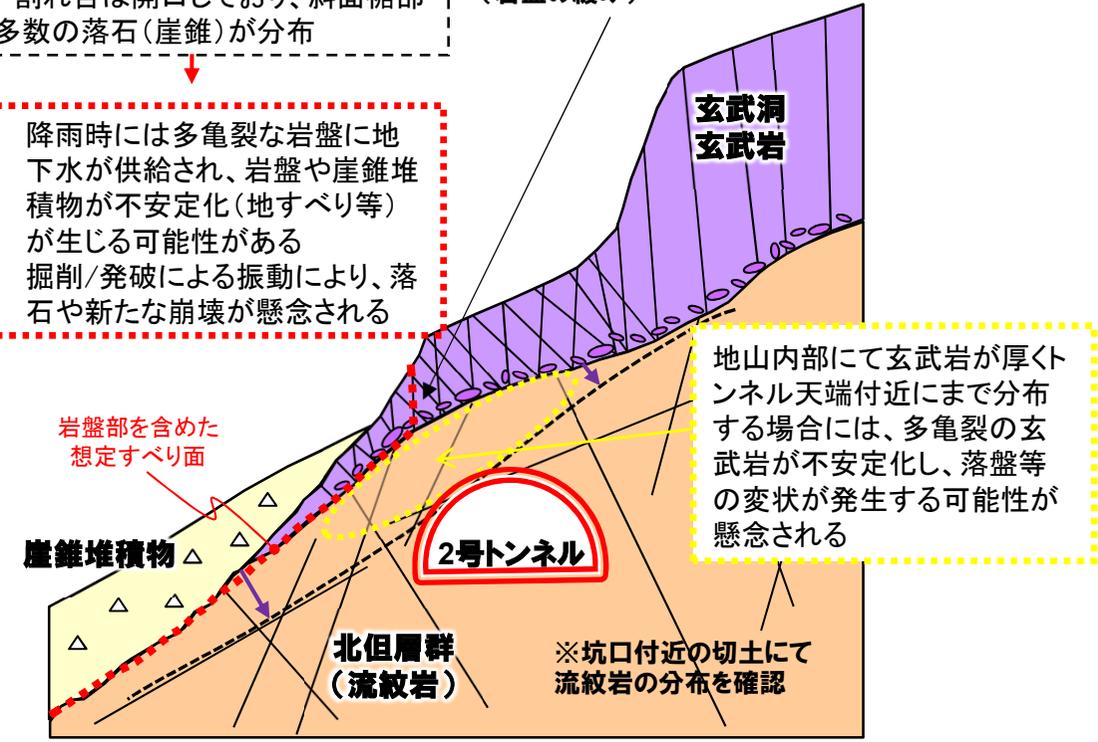
【対応方法(案)】

- ・ トンネル坑口付近の岩盤性状を面的に把握した上で、地すべり対策工・落石対策工の施工を行う。
- ・ 岩盤崩落が想定される場合には、複数の補助工法(AGF工法・長尺鏡ボルト等)を組み合わせる施工を行う。

【坑口付近の地質分布】
 地表部の露岩では、柱状節理の発達した硬質な岩盤が発達
 → 割れ目は開口しており、斜面裾部に多数の落石(崖錐)が分布

降雨時には多亀裂な岩盤に地下水が供給され、岩盤や崖錐堆積物が不安定化(地すべり等)が生じる可能性がある
 掘削/発破による振動により、落石や新たな崩壊が懸念される

割れ目が開口し不安定(岩盤のゆるみ)



2号トンネル坑口付近の模式断面図



露岩拡大
 一部は割れ目が開口し、石積み状となる(岩盤のゆるみ)



柱状節理が発達する硬質な玄武岩の急崖
 → 割れ目傾斜は不規則(水平方向もあり)

玄武洞玄武岩
 (割れ目開口、岩盤のゆるみ※)

玄武岩礫が分布
 (崩壊・落石)

2号トンネル坑口付近の露岩状況

3. 技術的課題とその対応について (課題⑤地域固有の貴重な自然環境)

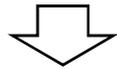
課題⑤への対応:コウノトリに対する橋梁設計、施工時の配慮事項の提示

【技術的課題】

- 城崎道路周辺には、コウノトリ飛翔空間や玄武洞、ラムサール条約湿地等、地域固有の貴重な自然環境が存在。
- 「円山川水系自然再生計画」の保全・再生箇所(ひのそ島)に近く、山陰海岸国立公園内でもあることから、配慮が必要。

【検討会指摘事項】

- 城崎大橋も工法変更に伴い、工事の騒音が増大したという問題もあったため、城崎道路でも自然環境やコウノトリの環境に悪影響を及ぼさない工法を検討する必要がある。
- 総合評価での企業提案事項ではなく、事業者で最適な構造・施工方法をあらかじめ検討する必要がある。



【対応方法(案)】

- 円山川の景観保全やコウノトリをはじめとする野生動植物の生息環境の保全に努めるため、以下の対応を検討。
 - 橋梁設計時には、景観に配慮した色の選定(但馬道路景観マスタープランに準拠)やコウノトリ飛翔に配慮した橋梁上の構造物の少ない橋種選定、ロードキル対策(衝突防止柵)等を検討。
 - 工事実施の際は、野生動植物の生息環境への影響を低減させるための騒音・振動対策を検討。
- 事業者で最適な構造・施工方法をあらかじめ検討。

※青字は第1回技術検討会の指摘事項に対する検討結果を反映した事項

<コウノトリ>



出典：ラムサール条約湿地円山川下流域・周辺水田パンフレット

<城崎道路が国立公園内を通過>



<北近畿自動車道 日高豊岡南道路における衝突防止策>



●北近畿豊岡自動車道

八鹿日高道路の騒音対策

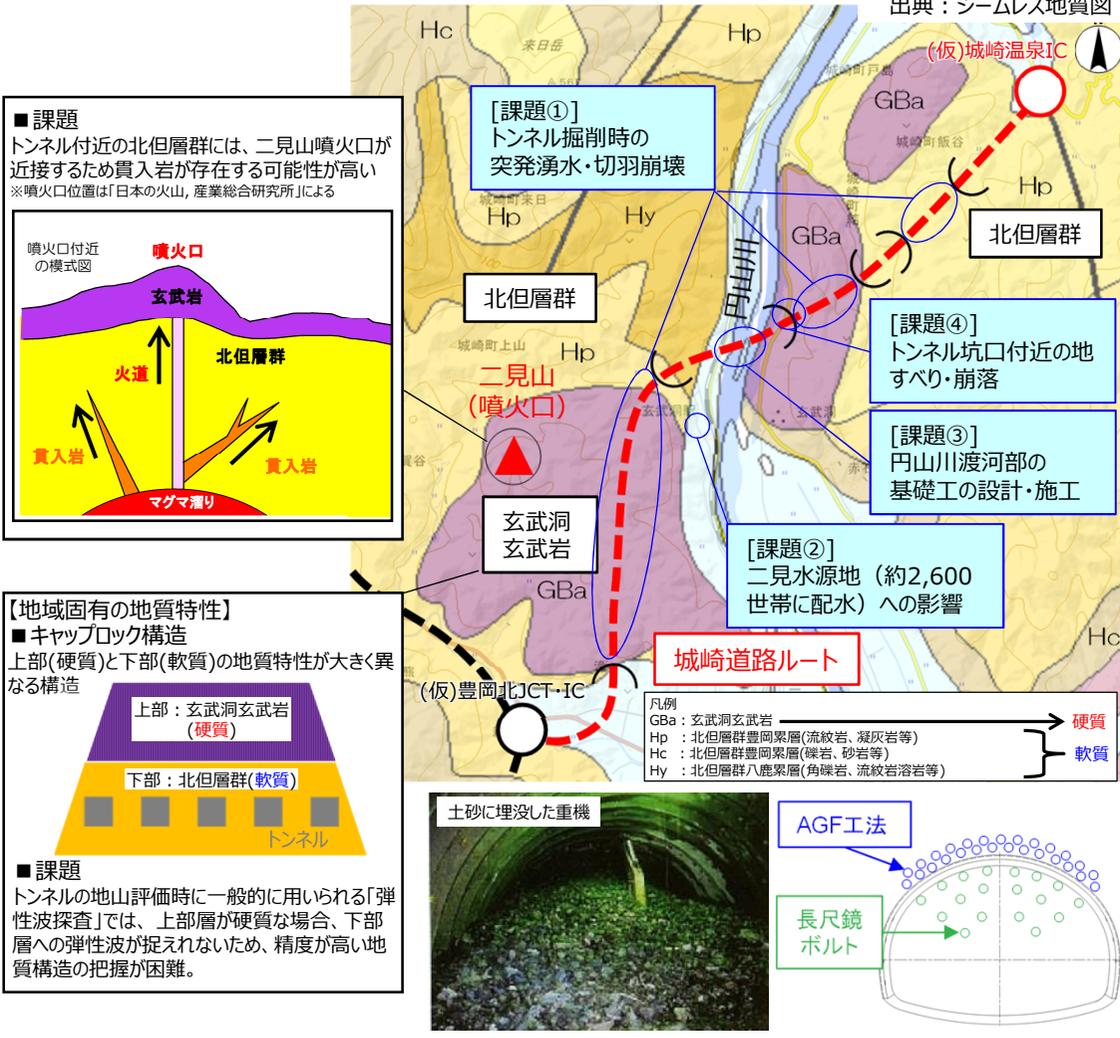
- 営巣地への影響を低減させるため、繁殖に及ぼす影響が懸念される範囲内での繁殖期における施工を避けた。

4. とりまとめ

技術的課題

- 周辺地域には、地域固有の地質特性(キャップロック構造)があり、玄武岩等の貫入岩や断層破碎帯が分布する可能性が高く、円山川渡河部では、厚い軟弱地盤や橋脚の支持層の傾斜が想定される。さらに、円山川右岸のトンネル坑口周辺には、崩壊跡地が多数存在する。また、計画ルート上のトンネルに近接して、約2,600世帯に配水する二見水源地が存在。
- 上記の地形・地質的な特徴から、トンネル掘削時の突発湧水、切羽崩壊、二見水源地への影響や支持層の傾斜が想定される円山川渡河部での基礎工の設計・施工、円山川右岸側のトンネル坑口付近の地すべり・岩盤崩落に留意しながら事業を進める必要がある。
- 以上のことより、本区間は詳細な調査を実施したうえで、高度な技術力を活用することにより事業実施が可能となる。

【城崎道路ルートでの技術的課題】



課題①:トンネル掘削時の突発湧水・切羽崩壊
 計画ルート周辺には二見山の噴火口があることから、貫入岩・断層破碎帯が分布する可能性が高く、トンネル掘削時に突発湧水・切羽崩壊が生じる危険性がある。また、現地調査により、上部に玄武洞玄武岩が分布する「キャップロック構造」であることを確認。「キャップロック構造」は、下部層の北但層群を弾性波探査で精度良く把握することが困難なため、貫入岩・断層破碎帯等の推定が課題。

⇒ 調査設計段階において、トモグラフィ、電気探査等の複数の調査手法を的確に組み合わせ、地質構造(貫入岩・断層破碎帯の分布)の詳細な把握が必要。
 ⇒ トンネル掘削時には、先進ボーリングを実施し、貫入岩・断層破碎帯を確認したうえで、複数の補助工法(AGF工法・長尺鏡ボルト等)を組み合わせた施工が必要。

課題②:二見水水源地源地への影響
 トンネル区間と(約2,600世帯に配水)が近接するため、トンネル掘削による水枯れが懸念。
 ⇒ トンネル掘削による水源地への影響を把握するために、3次元かつ広域的な水理地質構造の把握に向けた詳細な地質調査を実施し、調査結果によっては、トンネル掘削時に地下水への影響を低減する対策が必要。

課題③:円山川渡河部の基礎工の設計・施工
 円山川渡河部は、厚い軟弱地盤、橋脚支持層の傾斜が想定される。下流側の兵庫県事業の橋梁では、設計時に支持層を面的に把握できていなかったことによる、施工時の工法変更が発生しており、基礎工の設計・施工が課題。

⇒ 1橋脚あたり、複数(5箇所以上)のボーリング調査を実施し、支持層を面的に把握したうえで、適切な工法の選定が必要。

課題④:トンネル坑口付近の地すべり・岩盤崩落
 円山川右岸のトンネル坑口周辺には、崩壊跡地が多数存在し、トンネル坑口付近の地すべり・岩盤崩落が懸念。
 ⇒ 坑口付近の岩盤性状を面的に把握したうえで、地すべり対策工・落石対策工の施工が必要。
 ⇒ 岩盤崩落が想定される場合には、複数の補助工法(AGF工法・長尺鏡ボルト等)を組み合わせた施工が必要。

<周辺トンネルでの事故事例(切羽崩壊)> <複数補助工法の組み合わせ事例>