

設計・施工の一体的連携による 設計最適化への取り組み ーECI方式を活用した能越道鷹ノ巣山1号トンネルの事例ー

櫻井 彰¹・本澤 太志¹・小島 公平¹・坂口 莉緒¹・渡部 恭平²

¹能登復興事務所 工務第二課 (〒926-0046 石川県七尾市神明町ロ12番地2NTTビル3階)

²道路部 道路計画課 (〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町1丁目1番地1号)

一般国道470号能越自動車道輪島道路(Ⅱ期)の鷹ノ巣山1号トンネルでは、2024年能登半島地震及び奥能登豪雨により地形条件が大きく変化し、既往設計の見直しが必要となった。本業務では、官民連携により事業促進を図るPPP(Public Private Partnership)と、施工者が設計段階から技術協力を行うECI方式(Early Contractor Involvement)を一体的に活用し、砂防事業や橋梁設計との調整及び施工者知見の設計反映を行った。その結果、橋台一体型坑門構造により約5.2か月の工程短縮を図り、トンネル補助工法の合理化により約90百万円のコスト縮減を見込んだ。本稿では、ECI方式により施工成立性を確認した設計最適化の取り組みを報告する。

キーワード PPP, ECI方式, 山岳トンネル, 設計最適化, 能登半島地震

1. はじめに

一般国道470号能越自動車道は、石川県能登地域と富山県西部地域を結ぶ高規格幹線道路網を形成する路線であり、地域間の連携強化による地域の活性化に寄与する重要な道路である。輪島道路(Ⅱ期)は、その一部として石川県輪島市内で整備が進められている(図-1)。

こうした中、2024年能登半島地震及び奥能登豪雨では、能登地域の道路ネットワークが大きな影響を受け、災害時における代替路や緊急輸送路を確保する重要性が改めて認識された。これにより、輪島道路(Ⅱ期)は、従来から期待される高規格幹線道路としての整備効果に加え、災害時のリダンダンシーを確保し、復旧・復興を支える道路としての必要性が一層高まっている。鷹ノ巣山1号トンネルは、同区間に位置する延長1,458.5mの山岳トンネルである。

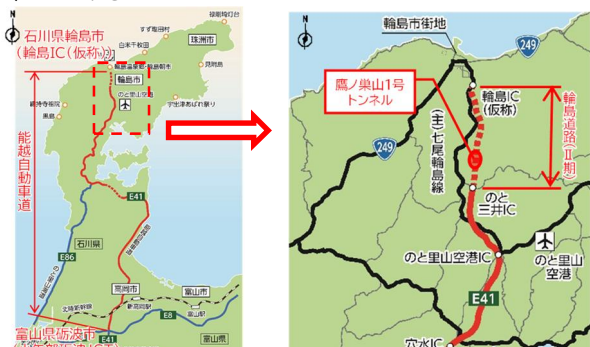


図-1 輪島道路(Ⅱ期)位置図

また、当該災害により、鷹ノ巣山1号トンネル周辺では地形条件が大きく変化した(写真-1)。特に起点側坑口部では、大規模な斜面崩壊に伴う崩積土の堆積が確認され、地すべりブロック直下でのトンネル施工、猿谷高架橋A2橋台との近接施工、さらに別途実施される砂防事業との調整が必要となった。

このような条件下では、既往設計をそのまま適用することは困難であり、施工段階での手戻りや工程遅延を回避するため、施工方法や仮設計画を設計段階から反映した検討が必要であった。そこで本業務では、輪島道路(Ⅱ期)事業全体のPPPによる事業監理と、鷹ノ巣山1号トンネルについて、施工者が設計段階から技術協力を行う「技術協力・施工タイプ」によるECI方式を活用した修正設計を一体的に実施した(図-2)。



写真-1 起点側坑口部周辺の被災状況

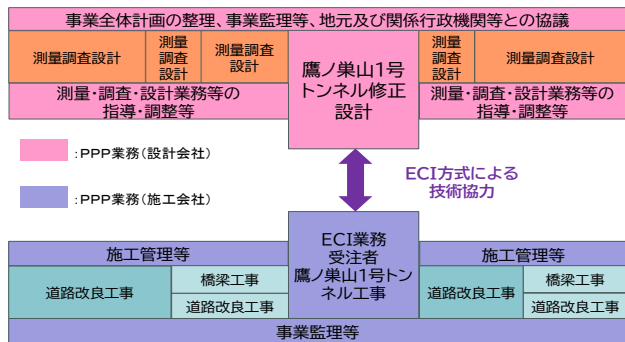


図-2 PPPとECIを一体的に実施した概要

事業監理では、砂防事業と道路事業における橋梁設計及びトンネル設計の関係者間で設計・施工条件を共有し、ECI方式による修正設計では、施工者からの技術提案を、施工性、安全性、経済性及び工程短縮の観点から評価し、有効な提案を設計に反映した。これにより、事業全体として施工可能な構造計画及び施工計画の具体化を図った（図-3）。

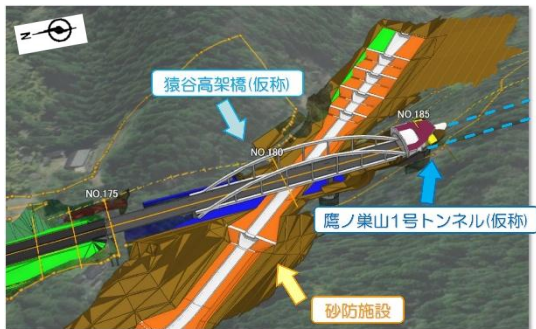


図-3 起点側坑口部における道路・砂防事業の関係

2. 設計上の課題

(1) 起点側坑口部の課題

起点側坑口部は、崩積土が厚く堆積する地すべりブロック末端部に位置するとともに、猿谷高架橋A2橋台と近接する条件であった。そのため、坑口付け切土を最小化しながら橋梁施工との整合を図り、トンネル坑口の安全性を確保できる構造が求められた。

また、災害後の道路構造物として、将来的な表層崩壊や土砂流出に対して坑口を閉塞させない対策が必要となった。このため、従来の坑門構造にとどまらず、橋梁構造物との取り扱いを含めた総合的な構造検討が求められた（図-4）。

(2) 崩積土堆積区間の課題

起点側坑口部周辺には偏圧状態の崩積土が分布しており、掘削時のトンネル天端沈下、地表面沈下及び変位抑制が重要な課題であった（図-5）。被災を踏まえた設計

修正案1)（以下「修正設計案」という）では側壁導坑による地質確認と事前に地山改良を行う補助工法が計画されていたものの、施工期間の長期化や施工性の低下に課題があった。

このため、施工性と安全性を両立する新たな補助工法及び施工計画の検討が必要であった。特に、崩積土堆積区間では2次元FEM解析及び3次元FEM解析により、支保構造と補助工法の妥当性を確認する必要があった2), 3)。

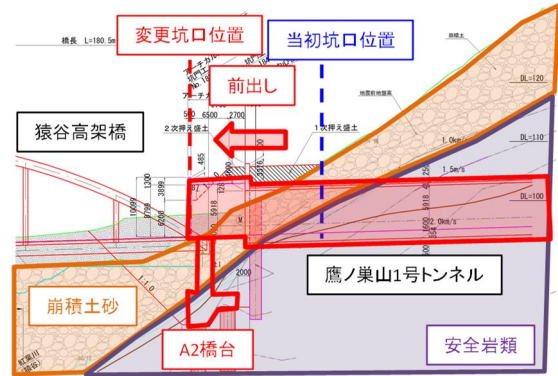


図-4 起点側坑口部の設計上の課題

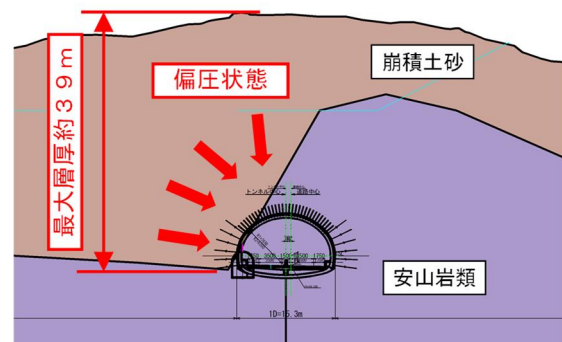


図-5 崩積土堆積区間の課題

(3) 砂防事業等との調整課題

起点側坑口部周辺では、別途、砂防事業による地すべりブロック全体の安定対策が進められており、トンネル施工、橋台施工及び砂防事業との施工時期、施工ヤード、工事用道路の利用が近接・重複する条件であった。

そのため、道路事業と砂防事業の役割分担、施工時期、施工範囲及び施工条件を明確にし、事業間で整合を図ることが課題となった（図-6）。

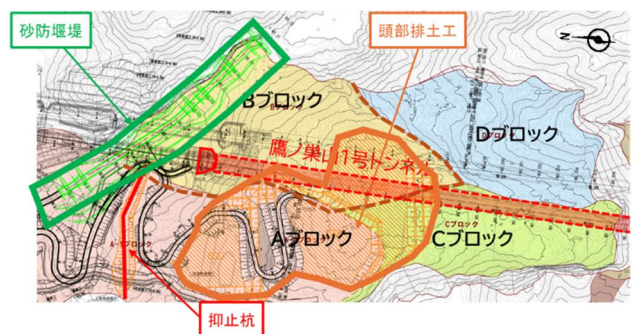


図-6 起点側坑口部における砂防事業対策

(4) 従来方式で想定された課題

従来の設計・施工分離方式では、設計完了後に施工者が参画するため、施工段階で初めて施工方法、施工ヤード、施工機械、仮設構造物等の課題が顕在化する可能性がある。本トンネルでは、崩積土内での坑門工施工、橋台施工との近接、鋼管杭施工及び砂防事業との調整が必要であり、設計後に施工条件を再調整する場合、設計変更や工程遅延が生じるおそれがあった。

このため、施工者の知見を設計段階から取り込み、施工成立性を事前に確認できる仕組みが必要であった。

3. ECI方式による設計最適化

(1) ECI協議の進め方

本業務では、発注者、設計者、施工者が協議を重ねながら設計条件、施工条件及び施工リスクを共有した。協議では、起点側坑門工、補助工法、トンネル掘進方向、橋梁設計との取り合い、砂防事業との施工調整等を段階的に確認し、施工者からの技術提案について、施工性、安全性、経済性及び工程の観点から評価した。

そのうえで、事業全体として有効と判断される提案を抽出し、構造計画、仮設計画及び施工計画へ反映することで、設計と施工を一体で最適化した。

(2) 坑門構造の最適化

修正設計案では、起点側坑口部において深礎杭、側壁導坑及び大断面坑門による構造を検討していた（図-7）。しかし、当該箇所は崩積土が厚く堆積する地すべりブロック末端部に位置し、さらに猿谷高架橋 A2 橋台と近接することから、崩積土内での大断面施工、橋台施工との取り合い、坑口閉塞対策を同時に成立させる必要があり、施工性、工程遅延及び安全性に課題があった。

これに対し ECI 協議において施工者から、地表面から施工可能な連続鋼管杭を活用し、橋台と坑門を一体化した明り巻き構造とする提案がなされた（図-8）。

採用案では、鋼管杭を橋台施工時の土留工及び完成後の抑止杭として兼用し、明り巻き工を猿谷高架橋 A2 橋台で支持することで、大規模掘削を回避しつつ坑口閉塞対策と橋梁施工との整合を図った。さらに、橋台で明り巻き工を支持する構造とすることで、坑門工単独で支持力を確保するための深い掘削を不要とし、施工手順の簡素化と施工時安全性の向上を図った。

また、鋼管杭を地表面から施工することで、崩積土内での側壁導坑施工を回避でき、施工時の安全性向上にも寄与した。その結果、下部工着手までの工程が 18.8 か月から 13.6 か月となり、約 5.2 か月の工程短縮を見込んだ（表-1）。

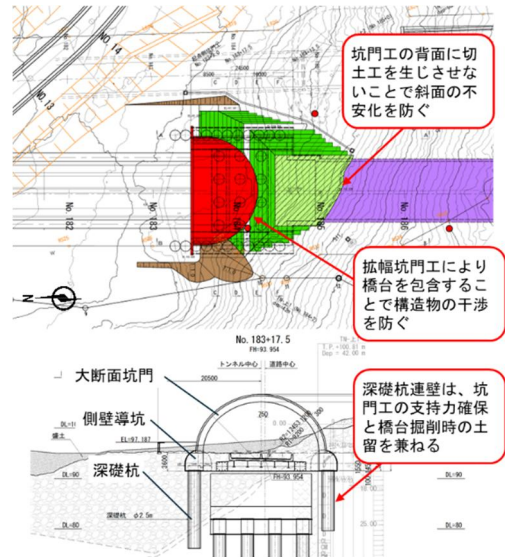


図-7 修正設計案による坑門工概略図

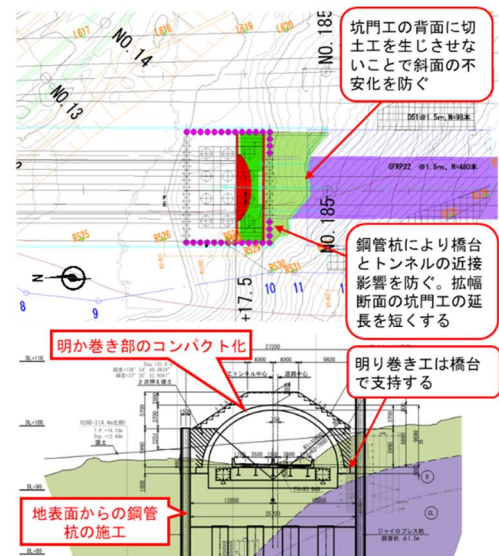


図-8 ECI 提案による坑門工概略図

表-1 修正設計案と ECI 提案による坑門工比較結果

	修正設計案（提案前）	ECI業務での技術提案	
構造性	・深礎杭上に、橋台を包含する拡幅大断面を剛結させる構造であり、耐震上の課題が残る ・拡幅大断面と標準断面部との妻部背面は安定性検証が必要 ・橋台を包含する拡幅断面を支持する支保構造に課題が残る	・明り巻き部の耐震照査により、L2地震動の場合も、せん断補強筋で対応可能 ・妻壁位置には恒久構造物の鋼管杭を打設するため、安全性を確保できる ・明り巻きに作用する荷重は覆工厚 80cm で構造上成り立つ	△ ○
施工性	・崩積土が堆積する地山に内空幅 23m の大断面を施工する必要がある ・深礎杭構築のために側壁導坑を別途掘削する必要がある	・内径の小さい明り巻き工を、地表面から施工可能であるため、安全性が高い ・横断方向に打設する鋼管杭の切断は可能である	△ ○
安全性	・崩積土砂の 2 次移動が発生した場合でも深礎杭により坑門工は支持されている	・坑門工周辺に打設する鋼管杭が防護壁としての役割を有するため、安全性は高い	○ ○
工事工程	【下部工着手までの必要工程】 18.8ヶ月（+5.2ヶ月）	【下部工着手までの必要工程】 13.64ヶ月	△ ○
経済性	・ 594,552 千円 （-4,138 千円）	・ 598,690 千円 （± 0 千円）	○ △
評価			○（採用）

(3) 補助工法の最適化

崩積土堆積区間では、偏圧状態の崩積土により掘削時の天端沈下、地表面沈下及び支保工応力の増加が懸念された。修正設計案では、地質確認及び地山安定対策として側壁導坑を先行施工し、側壁導坑内から地山へ注入材を注入して緩みを抑制する注入式フォアポーリングを実施するとともに、本坑からトンネル前方地山へ鋼管を打設して先受けするAGF工法を120°範囲で施工する補助工法を検討していた（図-9）。この案は地質確認の確実性に優れる一方、側壁導坑を別途施工する必要があるため、工程の遅延、経済性及び施工性の低下に課題があった。

これに対しECI協議において施工者から、前方探査を併用し、本坑からAGF工法を150°範囲で施工するとともに、掘削後早期に鋼製支保工等により断面を閉合して地山変位を抑制する早期断面閉合の提案がなされた（図-10）。これにより、地質確認機能を前方探査に置き換え、本坑からの補助工法で施工を完結できる計画とした。

提案工法については、2次元FEM解析及び3次元FEM解析により地表面沈下、天端沈下、吹付コンクリート応力等を照査し、必要な安定性を確保できることを確認した。また、鋼製支保工については高規格化により対応する計画とした。これにより、側壁導坑を省略しながら施工性と安全性を確保し、崩積土区間80m当たり約90百万円のコスト縮減及び約14日の工程短縮を見込んだ（表-2）。

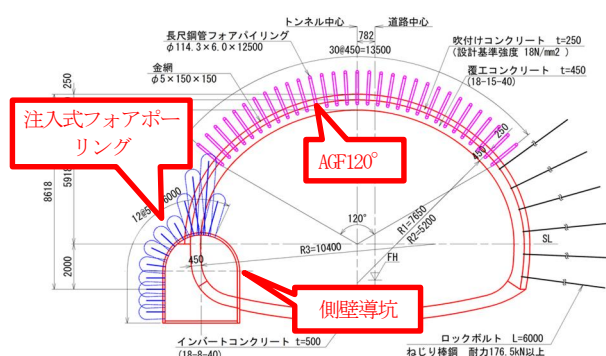


図-9 修正設計案による補助工法概略図
(側壁導坑+AGF120°+注入式FP)

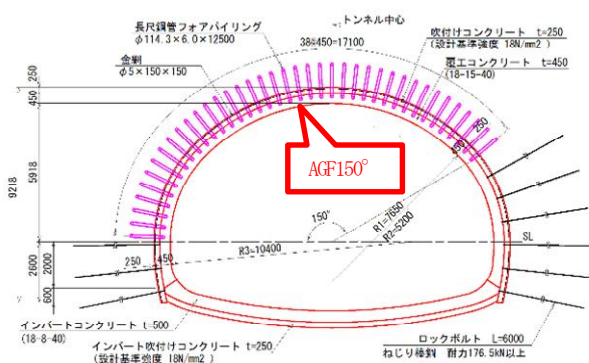


図-10 ECI提案による補助工法概略図
(早期断面閉合+AGF150°+前方探査)

表-2 修正設計案とECI提案による補助工法比較結果

	修正設計案（提案前）	ECI業務での技術提案	
構造的性	通常支保工では許容値を超過するため、高規格の支保工が必要	通常支保工では許容値を超過するため、高規格の支保工が必要	○
施工性	【トンネルの施工性】側壁導坑を別途施工する必要がある 【リスクへの対応性】側壁導坑により直接地質状況が把握できるため、確実性が高い	【トンネルの施工性】本坑のみ施工するため、設計案より優れる 【リスクへの対応性】前方探査により地質状況を把握しながら掘削を行うため、設計案と同等	○ ○
工程	トンネルL=80m当り：40日 (+14日)	トンネルL=80m当り：26日 (±0日)	○
経済性 (直工費)	トンネルL=80m当り：316,936千円 (+94,340千円)	トンネルL=80m当り：222,596千円 (±0千円)	○
評価		○（採用）	

(4) 起点側坑口部全体工程の調整

起点側坑口部周辺では、道路事業によるトンネル・橋梁施工と、砂防事業による地すべり対策工が近接して実施されるため、施工時期、施工範囲、施工ヤード及び工事用道路の調整が必要であった。

このため、本業務ではPPPによる事業監理において、道路事業と砂防事業で実施すべき対策を整理し、関係者間で設計・施工条件を共有した。

そのうえで、市ノ瀬地区全体として施工が成立するよう、砂防事業の地すべり対策工、猿谷高架橋A2橋台施工、坑口部の鋼管杭施工及びトンネル掘削の工程を整理した全体工程表を作成した（表-3）。これにより、ECI方式で得られた施工者提案を、砂防事業や橋梁設計との調整を踏まえた実施可能な施工計画へ反映することができた。

表-3 市ノ瀬地区全体工程表

事業	構造物	項目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目
道路事業	黒ノ巣山1号トンネル	垂直縫地工	工事用道路造成	先行掘削→垂直縫地工			
		起点側坑口部	準備工	先行掘削	鋼管杭施工	坑口部構築	
		トンネル掘削・構築	終点側からのトンネル掘削			地すべり対策下のトンネル掘削	設備・構築
	猿谷高架橋	A1橋台・P1橋脚	導入路施工				
砂防事業	砂防堰堤	本体工・床固工	基礎掘削	本体			
		集水井・排水工					
		鋼管杭工					
	地すべり対策						

(5) BIM/CIMを活用した施工成立性の確認

ECI方式による施工者からの技術提案の妥当性確認を目的として、BIM/CIMを活用した4). 起点側坑口部では、トンネル本体、坑門工、鋼管杭、抑止杭、垂直縫地工及び猿谷高架橋を統合した3次元モデルを設計当初から作成し、施工ステップや構造物相互の取り合いを可視化した（図-11）。

これにより、橋台一体型坑門構造や鋼管杭施工におけ

る施工上の課題を関係者間で共有し、施工手順や構造物相互の取り合いを設計段階で確認することができた（図-12）。

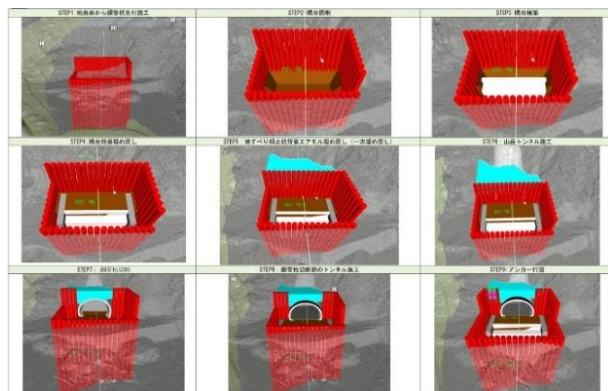


図-11 BIM/CIMを活用した施工ステップの可視化

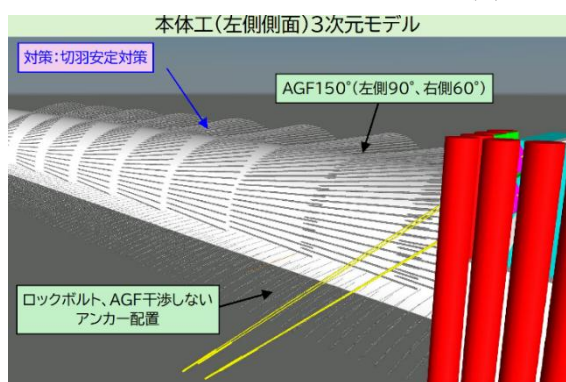


図-12 BIM/CIMを活用した施工成立性の確認

4. ECI方式による効果

(1) 工程・コスト縮減効果

ECI方式の活用により、施工段階で顕在化し得る課題を設計段階で抽出し、施工者の知見を反映した合理的な設計が可能となった。

特に、連続鋼管杭の内側で橋台と坑門を一体化する構造を採用することで、施工時の手戻りリスクを回避し、修正設計案で課題となっていた坑門構造及び補助工法について、施工性、安全性、工程及び経済性の観点から総合的に最適化することができた。

(2) 施工リスク低減効果

ECI方式では、施工者の知見を設計段階から反映したことで、施工時に想定されるリスクを事前に把握することができた。例えば、鋼管杭施工では硬質岩盤への貫入が課題となる可能性があり、必要に応じて先行削孔を実施すること、また崩積土堆積区間では前方探査結果に応じて補助工法の打設範囲を確認することとした。

さらに、地すべりブロック直下の掘削では、地表面沈

下、地中側方変位、地下水位等を計測しながら施工を行う計画とした。これにより、施工時の地山挙動を把握し、必要に応じて支保構造や補助工法の妥当性を確認することで、施工リスクの回避を図った。

(3) PPPとの一体実施による事業推進効果

本業務では、PPPによる事業監理とECI方式による修正設計を一体的に実施したことで、トンネル設計における施工者からの技術提案を、砂防事業や橋梁設計との調整を踏まえた計画として反映できた。

特に起点側坑口部では、砂防事業による地すべり対策、猿谷高架橋A2橋台、トンネル坑門工及び鋼管杭が相互に影響するため、個別設計の最適化だけでは施工上の整合を確保することが困難であった。本業務では、事業監理により関係者間で施工条件を共有し、ECIで得られた施工者提案を事業全体の工程や施工順序へ反映した。

これにより、砂防事業や橋梁設計との調整を踏まえた実施可能な施工計画を具体化した点も本業務の成果である。

5. おわりに

本業務では、能登半島地震及び奥能登豪雨により大きく変化した設計条件に対し、PPPによる事業監理とECI方式による修正設計を一体的に実施し、設計と施工を総合的に検討した。その結果、橋台一体型坑門構造の採用、補助工法の合理化、施工計画の最適化及びBIM/CIMによる施工成立性の確認を行い、工程短縮と施工リスク低減の両立を図った。

本事例は、災害後の不確実な設計条件下において、PPPによる事業監理とECI方式による施工者の知見及び技術を設計段階から取り込み、設計・施工の一体的連携により、構造計画、補助工法及び施工計画を総合的に最適化した事例である。特に、橋台一体型坑門構造という特殊構造を施工可能な計画として具体化した点に加え、砂防事業・橋梁設計との調整を含めて事業全体の施工成立性を高めた点は、今後の復興事業や難条件下の社会資本整備におけるECI方式の有効性を示すものである。

今後は、引き続きPPPによる施工段階の事業監理を活用し、複数工事が錯綜する起点側坑口部周辺における円滑な調整と現場監理により、工期内の完了を目指す。

参考文献

- 1) 株式会社建設技術研究所：R6 能越道他事業監理・鷹ノ巣山1号トンネル修正設計業務報告書
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準・同解説
- 3) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針
- 4) 国土交通省：BIM/CIM活用ガイドライン