

# 技術提案交渉方式 名塩道路城山トンネル工事 の施工成果について

山田 浩幸

株式会社鴻池組 本社土木技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1 本町南ガーデンシティ)

生瀬トンネルは、都市部における延長L=311mの山岳トンネルである。北側に武庫川、南側にJR福知山線、計画トンネル上部に旧JR廃線隧道や関西電力鉄塔を有する急傾斜地に位置し、供用中の国道176号に近接した施工となった。本トンネルを取り巻く厳しい施工条件下での施工にあたり、課題の解決のために施工者の高度な技術と経験を取り入れることのできる技術提案交渉方式の技術協力・施工タイプ（ECI方式）が採用された。本報告では、ECIにおける対策工の設計とトンネルの施工成果について報告する。

キーワード 山岳トンネル, 近接施工, ECI, 数値解析, 補助工法

## 1. はじめに

国道176号名塩道路は、慢性的な渋滞の解消と交通の安全確保を目指して、4車線化事業として1985（昭和60）年に事業化された。整備延長10.6kmのうち現在7.2km（暫定2車線改良済みを含む）が供用済みである。

名塩道路城山トンネル工事として施工した生瀬トンネルは、都市部における延長L=311mの山岳トンネルである。

図-1および図-2に示すとおり、北側に武庫川、南側にJR福知山線、計画トンネル上部に旧JR隧道や関西電力鉄塔を有する急傾斜地に位置し、供用中の国道176号に近接した施工となった。

このような厳しい施工条件下の下、トンネルの高度な設計・施工技術が必要になるため、設計段階から施工者が参画し、施工の実施を前提として設計に対する技術協力をを行う技術提案交渉方式の技術協力・施工タイプ（ECI方式）が採用された。

また、終点側坑口部においては、トンネルの暫定供用（トンネル交互通行）時に交差点改良の関係から歩道の一部（終点側L=37m区間）のスペースが車道と干渉するため、歩行者用の人道トンネルが追加発注となった。

なお、トンネル工事に関しては、令和4年9月末に無事完了したが、引き続き国道176号側の法面安定化対策として、国道176号に沿った切土工事が随意契約にて現在施工中である。

本稿では、技術提案交渉方式の技術協力・施工タイプ（ECI方式）における対策工の設計とトンネル工事の施工成果について報告する。

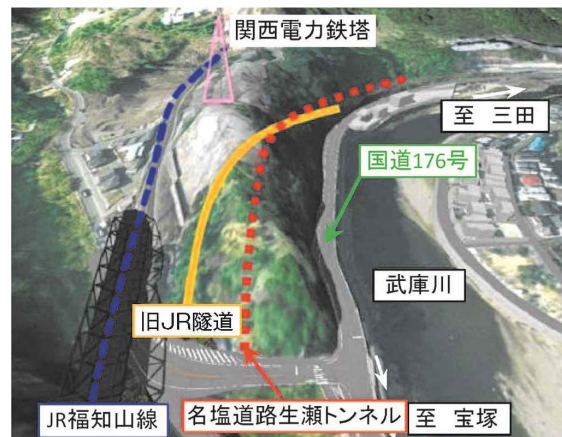


図-1 計画鳥瞰図<sup>1)</sup>一部修正

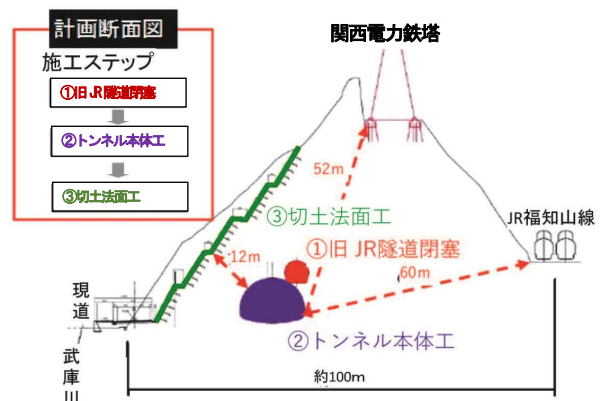


図-2 計画断面図 (No. 421+0.4)<sup>1)</sup>一部修正

## 2. 工事概要

### (1) 地形、地質状況

起点側坑口部については、土被り確保のためソイルセメントによる盛土がL=50m 施工されていた。トンネルと地形との関係は斜面平行型であり、地質は傾斜した基盤岩上に転石を多く含む崖錐堆積物が厚く堆積していた。

起点側盛土区間の地山は、未固結で自立しない状態であり、掘削時に度々小崩落を繰り返す状況であった。また、トンネル中間部より終点側にかけては潜在亀裂を有する硬質な溶結凝灰岩が分布していた。図-3 に地質縦断面図を示す。

### (2) 施工概要

表-1 に工事概要一覧を示す。ECI における対策工の検討により、設計時に起点側地山境界部分 (L=38m) に関しては、小口径長尺鋼管フォアパイリング、吹付けインバート (ストラット有り) が、旧 JR 隧道に関しては本坑の掘削を見据えて比重の軽いエアミルクにて閉塞した上で、旧 JR 隧道との交差区間 (L=115m) 及び鉄塔近接区間では、長尺鋼管フォアパイリングが計画された。

また、人道トンネルの施工に関しては、小断面トンネル (A=17.4 m<sup>2</sup>) のため、硬質地山において非火薬岩盤破碎工法を採用した。さらに、トンネル MR による遠隔臨場システムの導入等 DX 技術の活用による生産性向上への取り組みを実施した。

また、技術協力業務における旧 JR 隧道の閉塞方法やトンネル掘削時の鉄塔への影響、およびリスクを想定した計測管理等の仕様については、BIM/CIM モデルに基づく地山モデルを用いた 3 次元 FEM 解析の結果をふまえ、本トンネル計画の特徴である小土被り偏圧地形下におけるトンネル掘削および切土の影響の予測を行い、その結果を対策工の検討に反映した。以下に ECI における技術協力業務において実施した対策工の検討結果と実際の現場での施工状況について述べる。

表-1 工事概要一覧

工事名称	名塩道路 城山トンネル工事	
工事場所	兵庫県西宮市塩瀬町城山地先	
工期	平成31年3月～令和4年9月	
発注者	国土交通省 近畿地方整備局	
施工者	株式会社 鴻池組	
工事内容	延長	本坑トンネルL=311m、人道トンネルL=37m
	断面	①2車線道路トンネル：掘削断面積A=80.9m <sup>2</sup> ②人道トンネル：掘削断面積A=17.4m <sup>2</sup>
	施工法	NATM
	掘削方式	機械掘削 (大型ブレーカ)、非火薬岩盤破碎
	掘削工法	本坑：DⅢパターン、DⅢパターン (補助工法併用) 人道：DⅠrパターン、DⅠr (補助工法併用) DⅢr
	補助工法	天端安定対策： ①長尺鋼管フォアパイリング (L=12.5m, φ 114.3mm, @450mm, 打設間隔9m) ②小口径長尺鋼管フォアパイリング (多段式) (L=13.5m, φ 76.3mm, @450mm, 打設間隔5m) ③注入式フォアポーリング 本坑：(L=3.0m, φ 24mm, @600mm, 打設間隔1m) 人道：(L=2.0m, φ 24mm, @600mm, 打設間隔1m) 鏡面の安定対策：鏡吹付 (t=50mm) 脚部の安定対策：吹付けインバート (t=250mm)

## 3. 施工上の課題と対策工の検討

事業を円滑に進める上で、施工上の課題を解決するために、「国道 176 号」, 「JR 福知山線」, 「関西電力鉄塔」の各施設に対し、トンネル工事および切土法面工事による変動挙動を設計段階から高い精度で予測し、施工時には情報化施工により各施設管理機関との事前協議に基づく制約条件を確実に管理することが必要だと考えられた。そこで、図-4 に示す BIM/CIM モデルの作成を行い、地質状況の反映および計画構造物と既存近接構造物について干渉の確認を行った。

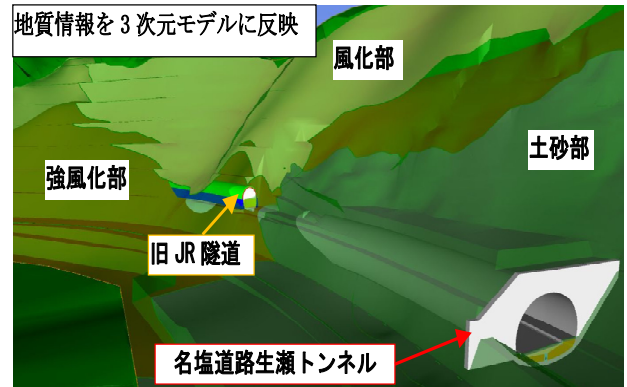


図-4 BIM/CIM モデル (地盤情報反映) ①一部修正

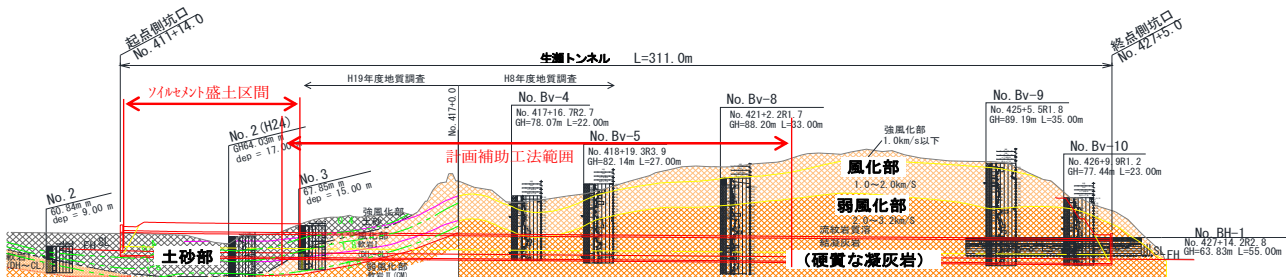


図-3 地質縦断面図 ①一部修正

(1) 起点側坑口部盛土区間の施工

前述のとおり、起点側地山境界部分 (L=38m) に関しては、小口径長尺鋼管フォアパイリング、吹付けインバート (ストラット有り) が計画されていた。

しかしながら、盛土区間の施工については、トンネル切羽上部の範囲がソイルセメントで改良されていたものの、大部分は未固結で自立しない状態であり、側壁や天端からの小崩落を繰り返す状況であった。

そのため、掘削時には、ECI で検討されていた地山境界部での補助工法 (小口径長尺鋼管フォアパイリング) を採用し、注入式フォアポーリングや長尺鋼ボルトの追加施工を行うことで切羽の安定を確保して掘進した。

(2) 旧 JR 隧道交差区間の施工

旧 JR 隧道交差区間の施工では、本坑掘削に先立ち旧 JR 隧道において以下に示すゆるみ抑制対策を実施した。

なお、技術協力業務において施工者が提案した対策工をブラッシュアップし、設計及び工事価格に反映した。

- ①トンネル底部にあるバラストを撤去する。
- ②充填材料をエアモルタルからエアミルクに変更し、充填性を高めるとともに本坑トンネルへの上載荷重の低減を図る。
- ③アーチ部、側壁部にロックボルトを打設し、エアミルクとの一体化と吊り下げ効果を図る (表-2)。

図-5 に示すように川側のボルト長を 3m から 2m に計画変更するとともに、将来的に切土法面から露出する範囲においては、ボルトの材質を切土作業時に切断しやすい GFRP ボルトに計画変更した。

表-2 対策工ブラッシュアップ結果一覧表<sup>2)</sup>

①旧JR隧道への緩み抑制対策	
当初	修正
<p>裏込注入工 (エアモルタル)</p> <p>エアモルタル</p> <p>バラスト</p>	<p>裏込注入工 (可塑性モルタル)</p> <p>エアミルク</p> <p>バラスト撤去</p> <p>ロックボルト L=3000mm×φ3.0mm ねじり降伏/耐力176.5kN以上</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 充填性を考慮し、バラストを撤去を行う。</li> <li>・ 煉瓦積みにも隙間が多く、充填性と圧送性が優れているエアミルクを採用</li> <li>・ 計画トンネル掘削時に分離構造である。アーチ部・側壁部にロックボルトを打設</li> </ul>	

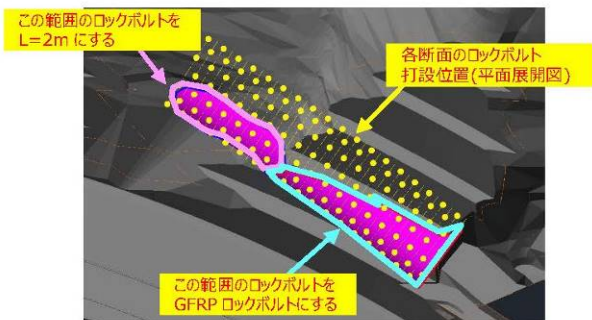


図-5 ロックボルト補強工 検討結果<sup>2)</sup>

トンネル閉塞工の補強ロックボルト施工においては、旧 JR 隧道坑口から 115m の区間の内、地山の劣化が著しくロックボルト孔壁が自立せず、ボルトの削孔が困難となった箇所では自穿孔ボルトを 198 本採用した。その他の工事についてはほぼ計画どおり施工を完了した (写真-1)。

写真-2 に旧 JR 隧道と本坑の交差状況の一例を示す。

本坑掘削時には、旧 JR 隧道が交差する区間では、対策工として旧 JR 隧道を支えるように長尺鋼管フォアパイリングを施工した。また、地質の変化等で不測の事態の発生が懸念されたため、旧 JR 隧道において先行沈下測定を実施するとともに、本坑掘削時の補助工法の削孔データを用いた切羽前方探査 (DRISS) により前方地山状況を把握し、旧 JR 隧道を支える目的から、図-6 に示すとおり、BIM/CIM モデルに基づき、本坑と旧 JR 隧道の位置関係を考慮して地山状況に合わせて長尺鋼管フォアパイリングの施工を実施した。なお、切羽前方探査では、写真-3 に示すとおり、長尺鋼管フォアパイリング (φ114.3mm) 施工時の削孔データを用いて前方地山の地質確認と補助工法の必要性を評価した。

事前にエアミルクで充填した旧 JR 隧道部分に関しては、穿孔エネルギーが 25 J/cm<sup>3</sup> 以下の赤色を示す部分が多く、旧 JR 隧道の範囲から外れた部分に関しては、概ね 100 J/cm<sup>3</sup> 以上の高い値を示した (図-7)。



写真-1 トンネル閉塞工 (エアミルク充填状況)<sup>2)</sup>



写真-2 旧 JR 隧道出現状況<sup>2)</sup>

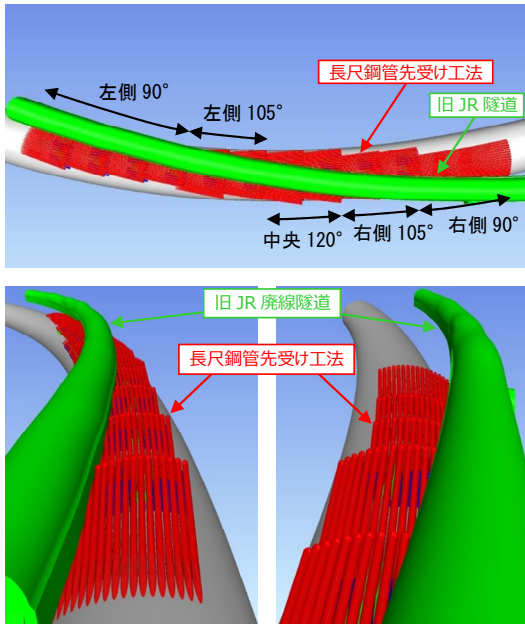


図-6 旧 JR 隧道交差区間 補助工法 3次元モデル<sup>3)</sup>

また、トンネル切羽が旧 JR 隧道交差区間に到達する前に、2次元 FEM 解析により計測結果に基づく再現解析を行い、地山物性値や解析モデルの同定を実施した。

その後、トンネル掘削の施工ステップを考慮した3次元解析による予測解析によりゆるみ範囲の見直しを行うとともに、交差区間施工時の影響や補助工法の妥当性を評価した。再現解析結果では、図-8 に示す通り、弱風化層の範囲がトンネル部分を占めており、弱風化層の範囲が若干狭くなった。また、表-3 に示すとおり物性値を当初(上表)、風化層と設定した層は強風化程度(軟岩相当)とし、風化層(軟岩II~中硬岩)、弱風化層(中硬岩)、未風化層(硬岩)で再設定(下表)を行った。予測解析の結果では、図-9 に示すように肩部 0.5D 範囲ぐらいに掘削の影響により若干の塑性域が見られた。

坑内計測の結果では、天端沈下の最大が 7.4mm (管理値注意レベルII : 23mm) 内空変位の最大が 3.0mm (管理値注意レベルII : 38mm) であり、交差区間全般において管理値の 1/3~1/10 で収まっており、変位モード的には、天端沈下卓越のひしゃげモードであった。

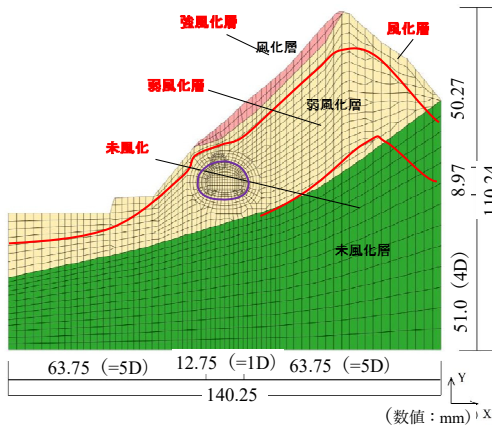


図-8 再現解析による地層構成 (旧 JR 隧道交差区間)<sup>4)</sup>



写真-3 切羽前方探査実施状況<sup>3)</sup>

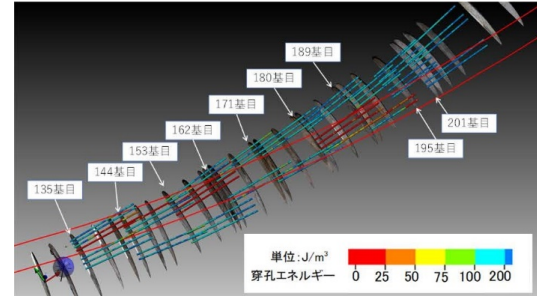


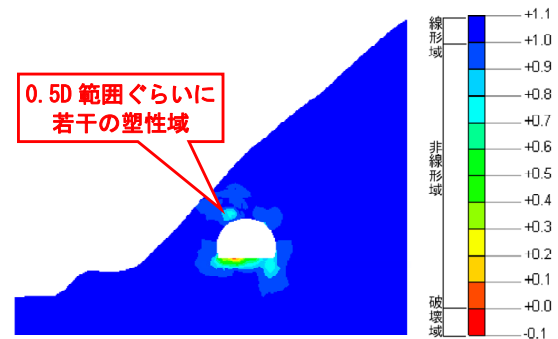
図-7 切羽前方探査結果 (旧 JR 隧道交差区間)<sup>4)</sup>

表-3 地山物性値同定結果<sup>4)</sup>

層名	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
風化層	19	30,000	0.4	100	30
弱風化層	26	220,000	0.3	400	32
未風化層	26	410,000	0.3	450	34



層名	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
盛土	19	3,500	0.4	30	35
強風化層	22	50,000	0.4	100	30
風化層	26	220,000	0.3	400	32
弱風化層	26	600,000	0.3	450	34
未風化層	26	1,300,000	0.3	1,250	40



地質	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	変形係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)
風化層	26.0	50,000	400	32
弱風化部	26.0	360,000	450	34
未風化部	26.0	1,000,000	1,250	40

図-9 3次元予測解析結果 (旧 JR 隧道交差区間)<sup>4)</sup>

(3) 鉄塔近接区間の施工

鉄塔近接区間では、鉄塔への影響を抑制する目的で山側の影響範囲に限定した長尺鋼管フォアパイリングを施工した。

また、トンネル切羽が鉄塔近接区間に到達する前に2次元 FEM 解析により計測結果に基づく再現解析を行い、地山物性値や解析モデルの同定を行った後、トンネル掘削の施工ステップを考慮した3次元解析による予測解析により鉄塔への影響や補助工法の妥当性を評価した。

再現解析の結果、未風化層の範囲がトンネル部分まで占め、弱風化層、強風化層とも範囲が狭くなった。

予測解析の結果では、図-10に示すとおり、トンネルの塑性域はほとんど見られないが、沈下に伴い地表部が一部塑性化することが想定された。

対策工としての長尺鋼管フォアパイリングは施工するが、地質の急変等で不測の事態の発生が懸念されることから、鉄塔への影響を詳細に把握する目的で表-4に示す鉄塔計測工を実施した。

トンネル掘削時には、予測解析の結果とほぼ一致して比較的良好な地山が出現し、長尺鋼管フォアパイリングの先受け効果も確認された。また、図-11、図-12に示すように、鉄塔への影響を24時間体制で監視し、WEBを用いた統合管理システムにより関係者が情報共有するといった綿密な計測管理を行った。

表-5に鉄塔基礎の許容変位量を示す。

管理基準値としては、送電鉄塔（関西電力）の重要性を鑑み、より重みのある管理基準として、鉄塔基礎部は鉛直方向、水平方向ともに6.0mm（1/1,200）とし、周辺地盤の沈下量に関しては許容値の80%の20mmと設定した。なお、図-11に鉄塔根開き、基礎沈下および周辺地盤計測の概要図を示す。

掘削時の計測結果は鉛直方向で最大0.1mm、水平方向で0.3mm、周辺地盤が0.1mmと小さな値で収束した。

また、坑外地中水平変位に関しては、鉄塔通過時から斜面GL-0.0mからGL-2.0mの斜面表層部分において、川側への変位（変位速度0.2mm/10日）が見られたが、管理基準値（変位速度1.0mm以上/10日）と比べて非常に小さく、トンネル施工（本坑掘削、インバート掘削）により鉄塔に影響を与えることなく施工を完了した。

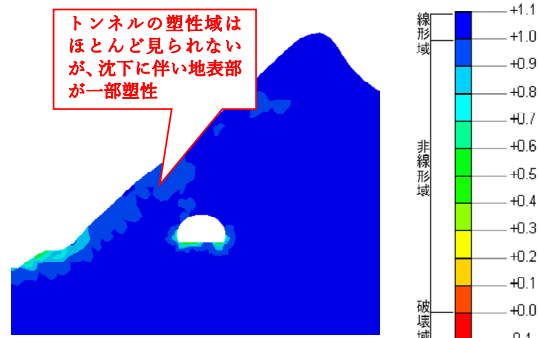


図-10 3次元予測解析結果（鉄塔近接区間）<sup>5)</sup>

表-4 鉄塔計測工一覧<sup>5)</sup>

計測対象	計測項目	計測目的	使用計器
鉄塔	根開き (相対変位)	トンネル掘削時の鉄塔への影響(根開き・相対沈下量)を計測し、計測値と管理値と比較検討することにより、構造物の安全性を確認する。	(鉛直変位) トータルステーション 計測点:4点 (水平変位) 伸縮計:4測線
鉄塔 周辺地盤	3次元変位 (絶対変位)	トンネル掘削時の鉄塔周辺地盤への影響(3次元変位)を計測し、地盤の挙動を把握する。	トータルステーション 計測点:4点
気温	外気温	外気温と各計測値との相関関係を把握し計測値を補正することを目的として設置する。	熱電対
坑外地中 変位計測	多段式傾斜計 測定	トンネル掘削時の地中の挙動を把握し、地滑りの兆候を把握する。	多段式傾斜計 10台@2m
地表面沈下 B計測	3次元変位 測定	鉄塔近傍斜面に地表面測点を設け、斜面挙動を把握する。	トータルステーション 計測点数:9点

表-5 鉄塔基礎の許容変位量<sup>5)</sup>

	鉛直方向変位	水平方向変位	絶対(許容) 沈下量
許容変位量	6.0mm(1/1200)	9.0mm(1/800)	25mm

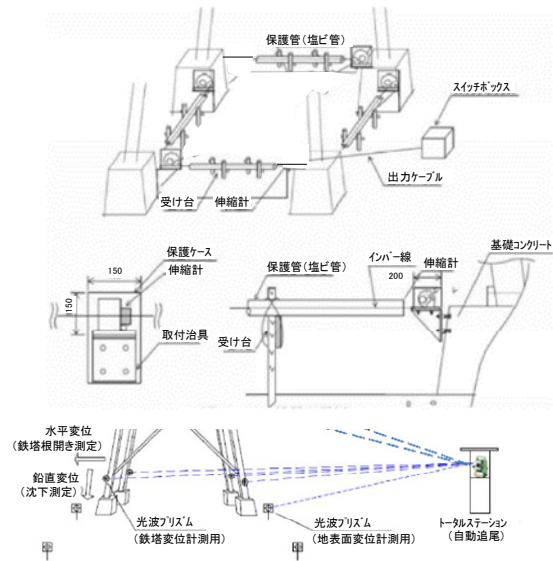


図-11 鉄塔根開き、基礎沈下および周辺地盤計測<sup>5)</sup>

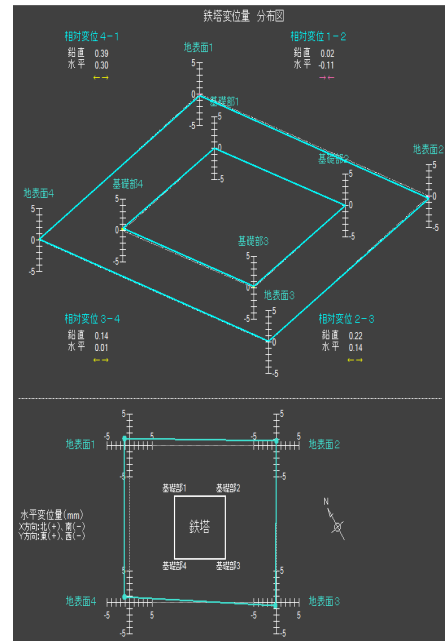


図-12 統合管理システム WEB 表示例

## 4. ECI の導入効果と課題

ECI 方式による設計・施工に関して以下にまとめる。

- ①設計では、BIM/CIM を用いた影響検討や予測解析結果を踏まえた対策工の検討において、発注者、設計者および施工者の三者で課題に関する認識を共有できた。
- ②発注者のリーダーシップの下、施工者の技術と経験を踏まえた当初設計の照査が可能となった。
- ③関係機関協議や地元説明において、BIM/CIM を活用し、設計者、施工者の同行により合意形成が図れた。
- ④学識経験者へ意見聴取ができる体制の構築が可能となり、高度な技術的課題であっても、学識経験者の意見を踏まえた適切な設計を実施することができた。
- ⑤ECI の検討において想定していなかった起点側坑口部の脆弱な地山における施工において、設計時の検討結果を参考に最適な補助工法により迅速な対応ができた。一方、今回の工事では、ECI 方式の課題として以下の事項が考えられる。
- ①検討内容によっては設計と積算がほぼ同時に進むため十分な検討期間が確保できなかった。
- ②施工者の提案を設計に反映することで工事費が膨らむため、三者による協議によるブラッシュアップが必要。
- ③ECI の中で課題とする項目に関して、十分な事前調査や施工条件等の検討が必要。

## 5. おわりに

ECI 方式による設計・施工を行うことで当初想定していた施工上の課題について効果的な対策が取れた。

旧 JR 隧道交差区間においては、本坑掘削前にエアミルクによるトンネル閉塞工を実施した上で、旧 JR 隧道における先行沈下測定や本坑施工時の補助工法削孔データを用いた切羽前方予測および 3 次元 FEM 予測解析結果等を参考に L=115m の施工を無事完了した。

また、TD180m 付近の鉄塔近接区間における施工では、24 時間体制の綿密な計測管理はもとより、3 次元予測解析等の結果や補助工法の効果もあり、特に問題もなく施工を終えることができた。

ECI 方式の採用により、厳しい施工条件ではあったが、BIM/CIM や 3 次元予測解析結果に基づく近接構造物への影響や対策工の検討、学識経験者の意見を踏まえた設計と施工の実施、関係機関協議や地元説明における合意形成が円滑に図れたものと考えている。

さらに、今回の施工では、起点側盛土区間における補助工法の検討、終点側切土工事や人道トンネルの施工といった追加工事への対応についても ECI により形成された信頼関係をもとに、速やかな対応が取れた。

写真-4 に終点側坑口付近の状況を示す。

トンネル工事完了後、随契契約により切土工事が継続中であるが、南側に供用中の JR 福知山線に近接した上部鉄塔付近での頂部平切り部施工時の落石防護対策や国道 176 号に近接する急峻な法面での工所用道路の確保や落石対策、重機足場の確保が困難な片切り掘削や中硬岩掘削の施工における工程検討といった課題がある。

これらの課題に対する対策については、施工条件に応じて工区を分割し、適用工法や施工時の計測管理手法について城山法面 ECI の中で検討を完了している。

今回の報告が同種条件における山岳トンネルの設計・施工に関して参考になれば幸いである。

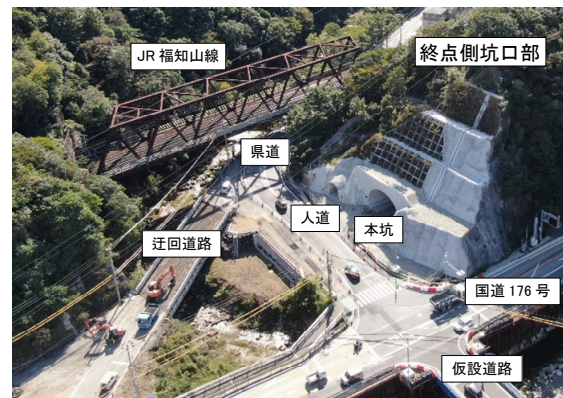


写真-4 終点側坑口部全景

謝辞：ECI による設計・施工に関する検討において、専門部会の京都大学 大西名誉教授、神戸大学 都市安全研究センター 飯塚教授、施工技術総合研究所 真下所長はじめ関係者の方々に貴重なご意見を頂きましたこと深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 中野陽平：技術提案交渉方式 名塩道路城山トンネル工事の取り組みについて、近畿地方整備局研究発表会論文集、イノベーション部門Ⅱ No.2, pp.1-6, 2019.
- 2) 山田浩幸, 平松 丈, 森岡大智, 浦本康仁：都市部における既設廃線トンネルに近接した山岳トンネルの施工に関する一考察, 第 55 回地盤工学研究発表会, 23-8-2-05, 2020.
- 3) 山田浩幸, 平松 丈, 森岡大智, 浦本康仁：都市部における既設廃線トンネルに近接した山岳トンネルの設計と施工に関する一考察, 第 75 回土木学会年次学術講演会, VI-431, 2020.
- 4) 山田浩幸, 大槻文彦, 平松 丈, 浦本康仁：既設廃線トンネルと本坑交差部の施工における設計・施工に関する一考察, 第 56 回地盤工学研究発表会, 12-7-1-05, 2021.
- 5) 山田浩幸, 大槻文彦, 平松 丈, 森岡大智, 大森功一：既設廃線隧道及び鉄塔に近接した山岳トンネルの施工と対策に関する一考察, トンネル工学報告集 第 31 巻, I-3, pp.1-6, 2021.