

都市部における既設廃線隧道に近接した 山岳トンネルの設計と施工に関する一考察

山田 浩幸¹・大槻 文彦²・平松 丈³・森岡 大智⁴・浦本 康仁⁵

¹ 正会員 (株) 鴻池組 大阪本店 城山トンネル工事 (〒669-1136 兵庫県西宮市名塩木之元 1845-1)

E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

² (株) 鴻池組 大阪本店 城山トンネル工事 (〒669-1136 兵庫県西宮市名塩木之元 1845-1)

E-mail:ohtsuki_fh@konoike.co.jp

³ (株) 鴻池組 大阪本店 城山トンネル工事 (〒669-1136 兵庫県西宮市名塩木之元 1845-1)

E-mail:hiramatsu_jo@konoike.co.jp

⁴ (株) 鴻池組 大阪本店 城山トンネル工事 (〒669-1136 兵庫県西宮市名塩木之元 1845-1)

E-mail:morioka_di@konoike.co.jp

⁵ 近畿地方整備局 兵庫国道事務所 (〒650-0042 神戸市中央区波止場町 3-11)

E-mail:uramoto-y86iq@mlit.go.jp

城山トンネルは、都市部における延長 $L=311\text{m}$ 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号に近接して施工する。トンネルの高度な設計・施工技術が必要になることから、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。本稿では、設計時の技術協力業務の概要と本坑と交差する旧JR廃線隧道の閉塞工およびトンネルの施工状況について報告する。

Key Words: Mountain Tunnel, Neighboring Construction, Numerical analysis, Auxiliary method, Early Contractor Involvement system

1. はじめに

一般国道 176 号名塩道路は、地域の交通混雑の緩和、異常気象時の通行規制区間の解消、交通安全の確保を目的とした兵庫県西宮市山口町から兵庫県宝塚市栄町に至る延長 10.6km の 4 車線化工事である。

そのうち、城山トンネルは、延長 311.0m の山岳トンネルで、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 (以下旧 JR 隧道と称す) 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 号に近接して施工する (図-1)。

本トンネルでは、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行う ECI 方式が採用された。今回、設計時の技術協力業務の概要と施工が完了している旧 JR 隧道の閉塞工およびトンネルの施工状況について報告する。

2. 工事の概要

(1) 地形・地質概要

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 $L=50\text{m}$ 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、



図-1 計画鳥瞰図¹⁾

地質は傾斜した基盤岩状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図-4に示すように、硬質な凝灰岩の分布が想定されている。

(2) 施工概要

表-1に工事概要を示す。本坑掘削に先立ち、旧JR隧道の閉塞工を施工した。本坑掘削では、起点側坑口部分は、ソイルセメントによる盛土区間が50m続き、地山境界部分(L=38m)では、小口径長尺鋼管フォアパイリング、吹付けインパート（ストラット有り）が、旧JR隧道との交差部分(L=115m)に関しては、長尺鋼管フォアパイリングが計画されていた。

実際の施工では、盛土区間については、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を採用し、長尺鏡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。

3. ECIの概要と技術協力業務

(1) ECIの概要

城山トンネルは現道(国道176号)の北側に武庫川、南側には狭隘な急傾斜地を挟んでJR福知山線、また急傾斜地の頂上部に関西電力鉄塔が近接する位置に計画されている。また、約115mにわたり、旧JR隧道が本坑の上部に接するように位置している(図-2)。

以上の立地条件より、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（優先交渉権者）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。

優先交渉権者選定から契約締結までの流れは、図-3に示す通りである。

表-1 工事概要

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3年3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
延 長	L=311m
断 面	掘削断面積A=80.9㎡ 2車線道路トンネル
施 工 法	NATM
掘削方式	機械掘削（大型ブレイカ）
掘削工法	DⅢバターン、DⅢバターン（補助工法併用）
工 事 内 容	天端安定対策： ①長尺鋼管フォアパイリング (L=12.5m, φ114.3mm, @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, φ76.3mm, @450mm, 打設間隔5m) ③注入式フォアボーリング (L=3.0m, φ24mm, @600mm, 打設間隔1m) ④長尺鏡ボルト（鋼管） (L=9.0m, φ76.3mm, @1,500mm, 打設間隔6m) 鏡面の安定対策：鏡吹付（t=50mm） 脚部の安定対策：吹付けインパート（t=250mm）

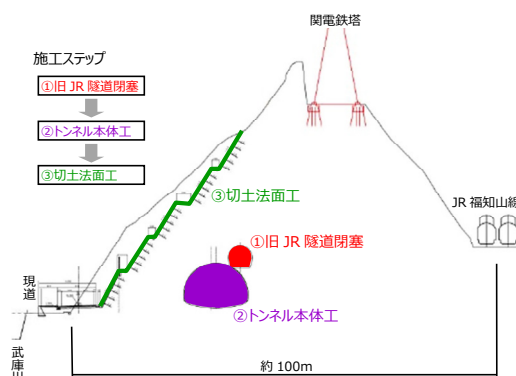


図-2 計画断面図²⁾

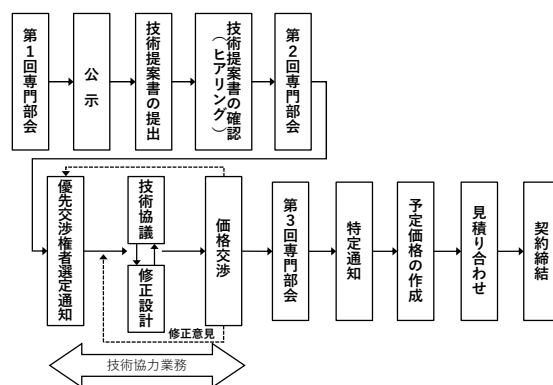


図-3 契約者決定の流れ¹⁾

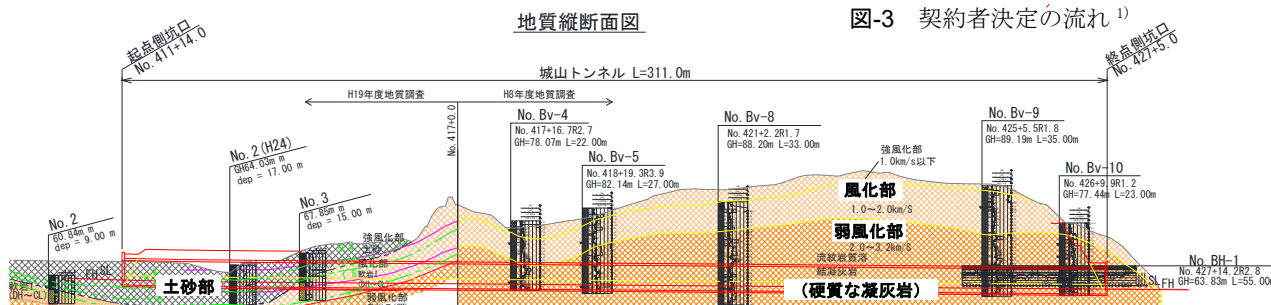


図-4 地質縦断面図¹⁾

(2) 技術協力業務

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は、「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するとともに、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していくことが必要だと考えられた。

そのため、技術協力業務開始時より、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-5）。3次元モデルでトンネルと旧JR隧道との交差状況を正確に確認することで経済的な補助工法の設計ができた。

変位予測にあたっては、BIM/CIMモデルを用いた3次元FEM解析により、本トンネル計画地山の特徴である小土盛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、各施設管理者との関係機関協議においても活用した。

また、旧JR隧道の閉塞方法や切土工事の施工方法、およびリスクを想定した計測管理等の仕様については、発注者・設計者・優先交渉権者による合同現地確認での意見交換時、地質調査結果の意見交換時、BIM/CIMモデルを活用した問題抽出時にリスクを洗い出したうえで、優先交渉権者の技術提案をさらにブラッシュアップし、表-2の通り設計および価格に反映した。

さらに、BIM/CIMモデルの活用および3次元FEM解析に基づく覆工コンクリートの薄肉化、補助工法範囲の削減等のコスト削減提案については、学識経験者に施工上問題がないことを確認した上で、優先交渉権者が技術・経験を踏まえて実現可能と判断し、設計および価格に反映した。

検討の結果、旧JR隧道の閉塞工における川側のロックボルト長を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、ロック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（図-6）。

隧道交差区間115m間では、3次元モデルによりトンネルと旧JR隧道との交差状況を詳細に把握した。これにより、トンネル上部で交差する旧JR隧道との位置関係に合わせて、長尺鋼管フォアパイリング（φ114.3mm、L=12.5m@0.45m、9mシフト）をトンネル上半90°・105°・120°と3段階で変化させて経済性に配慮しつつ、旧JR隧道の荷重によるトンネルへの影響を合理的に低減する計画とした（図-7）。



図-5 BIM/CIM モデル（地盤情報反映）¹⁾

表-2 ブラッシュアップ結果一覧表¹⁾

①旧JR隧道への緩み抑制対策	
当初	修正
裏込注入工（エアモルタル） エアモルタル バラスト	裏込注入工（可塑性モルタル） エアミルク バラスト撤去 ロックボルト φ114.3mm×3.0m ねじり降伏 耐力176.5kN以上
・充填性を考慮し、バラストを撤去を行う。 ・煉瓦積み隙間に多く、充填性と圧送性が優れているエアミルクを採用 ・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	
②防災機能向上による法面構造の変更	
当初	修正
	頂部平切りカット
・切土により法面上部が更に急峻となり将来的に不安定化する恐れがある為、頂部平切りカットを行った。	
③表面緑化可能な切土法面の風化防止対策	
当初	修正
法面保護工⇒植生基材吹付(t=5cm)	植生基材吹付 t=3cm ラス工(法面タイプ) φ20 50×50 連続繊維補強土造成工 t=300 排水・保肥材 LAGリーン 2個/m 鉄筋挿入工 ジオファイバー 表面排水材 (TACメンブレン) ジオピン L=200 1.8本/m
・地元からの緑化要望があった為、試験施工により施工担保が取れば、ジオファイバー工法を採用する。 ・独立受圧板によるアンカー、鉄筋挿入の逆巻工法により、小規模での崩壊を抑制	
④施工時における国道176号への落石対策	
当初	修正
落石防護柵	①簡易落石防護柵 (イーゼット) ②、③落石防護柵 ④L型ガード 仮橋
・切頂部の平切り時に、JR側への落石が懸念される為、斜面中に防護柵を設置 ・高所での切土作業が発生する為、大型の防護柵が必要な事から、仮橋に鋼矢板専用工具を用いる事で、短期での設置可能である為、仮橋に設置 ・切土時の下り線本線に対する落石対策として、現道沿いにL型ガードを設置	

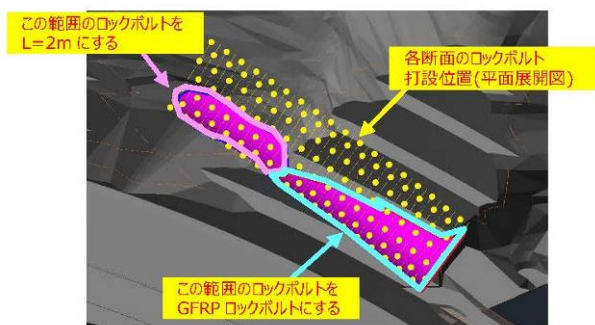


図-6 ロックボルト補強工 検討結果²⁾

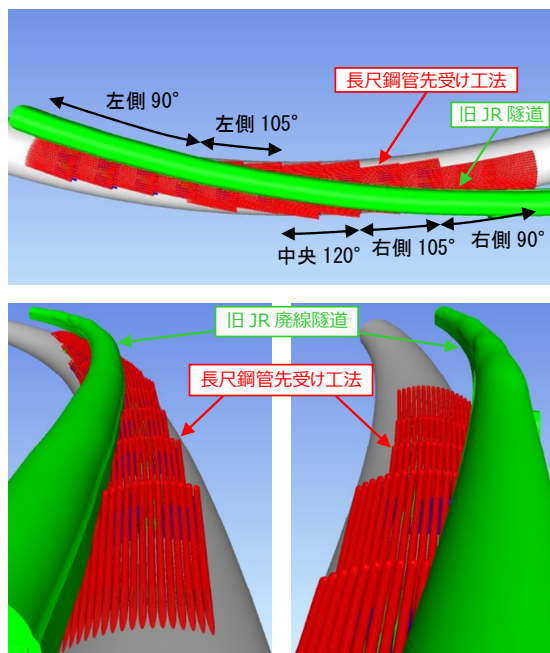


図-7 廃線隧道交差部 補助工法 3次元モデル³⁾

4. 施工状況

(1) 旧JR隧道閉塞工の施工

写真-1に本坑と交差する旧JR隧道の対策前の状況を示す。覆工は煉瓦積みで部分的にモルタル吹付により補修がなされていた。下半は石積みであった。

本トンネルの施工上の課題の1つである旧JR隧道の閉塞方法については、前述の表-2に示すとおり、本坑トンネル施工に配慮して、以下のゆりみ抑制対策を講じた。

- 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乗荷重の低減を図る。
- 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。

また、トンネル閉塞工の補強ロックボルト施工においては、BIM/CIMモデルによる確認で川側のロック



写真-1 旧JR隧道対策前

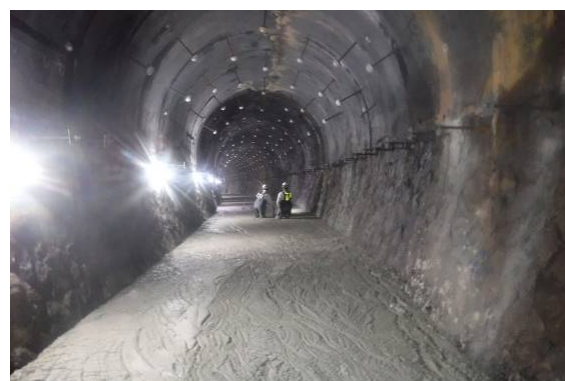


写真-2 トンネル閉塞工（エアミルク充填状況）²⁾

ボルト長を3mから2mに変更し、将来の切土部分との干渉部はロックボルトの材質をGFRPとした。

さらに、旧JR隧道坑口から115mの区間のうち、地山の劣化が著しくロックボルト孔壁が自立せず、削孔が困難となった区間の198本について、自穿孔ロックボルトを採用した。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-2）。

(2) トンネルの施工と補助工法

起点側坑口部のソイルセメント盛土区間（トンネル延長L=50mまで）では、既存盛土の上部にトンネルの土被りを確保する目的で土被り4m程度のソイルセメントが施工されていたが、トンネル切羽においては、天端上部に1m程度被る程度であり、側壁については脆弱で未固結な地山であり、掘削時に小崩落を繰り返す状況であった（写真-3）。

切羽の安定を確保する目的で、当初設計（ECI）で検討・採用されていた小口径長尺鋼管フォアパイリングを施工したが、鋼管間（@45cm）からの中抜けが見られたため、鋼管間に注入式フォアポーリングにより補助注入を行った。トンネルの坑内変位及び地表面沈下が注意レベルIIIを超えた坑口から18m区間で吹付けインパートによる早期閉合を施工した。

ソイルセメント盛土区間を過ぎて盛土と地山の干渉区間においては、比較的硬い地山が右側脚部踏まえ付近から出現してきたものの、未固結な地山の範囲が側壁から天端へ移動し、鏡面の押出し等も発生したため、長尺鋼管鏡ボルトを追加施工した。

未固結な地山部分では、鏡吹付けの裏面からの地山の流出が見られたため、吹付けコンクリートの施工を併用した分割施工を実施した（写真-4）。

No.73（TD73m）付近では、地山と盛土の境界部分から地山の流出（約70m³）を生じ、地表面の表層の滑落等も見られた（写真-5）。

この状況を受けて地山と盛土の境界部分に前方斜め部分（45°前方）に注入式フォアポーリングを追加して境界部分の補強を行った。その後、写真-6に示す小口径長尺鋼管フォアパイリング+注入式フォアポーリングを基本とした補助工法を併用して掘削を継続し、地山が良好となった切羽右側から徐々に補助工法の施工範囲を縮小し、支保No.88（TD88m）からは、当初設計通りのDIIIaパターンによる掘削を実施した。地山が良好になってからは、4tブレーカを導入し、2tブレーカと併用して使用し、工期短縮を図った（写真-7）。

支保No.99（TD99m）からは旧JR廃線隧道交差区間に入り、旧JR隧道を支える目的で長尺鋼管フォアパイリングを交差範囲に応じて変化（90°・105°・120°）と変化させながら施工を進め、7月末現在、支保No.171（TD171m）の掘削を完了した。

以上述べた補助工法の施工に関しては、ECIにおける地山干渉部での補助工法の検討結果を踏まえ、発注者、設計者、施工者の三者で課題と対策に関する認識が共有され、現場で準備できていた補助工法材料を速やかに適用して地山の状況に応じた追加対策を行うことで、脆弱かつ未固結な地山の掘削を無事終えることができた。



写真-4 分割施工実施状況



写真-5 地山流出状況（支保 No. 73 : TD73m）



写真-6 補助工法施工状況



写真-3 切羽状況（支保 No. 44 : TD44m）



写真-7 トンネル掘削状況（2 t 級+4 t 級）

5. おわりに

トンネル工事は、2019年9月末に旧JR隧道の閉塞工を完了し、起点側の盛土区間においては、脆弱で未固結な地山状態の下、補助工法の併用による掘削を強いられたものの、2020年7月末現在、上半171m、下半162mの掘削を完了している。

今回のECI方式による設計に関して、BIM/CIMを用いた検討と施工における課題と対策工について、発注者、設計者および施工者の三者で認識を共有することにより、発注者のリーダーシップの下、施工者の経験・知識を踏まえた当初設計の照査が可能となった。さらに、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。

また、施工においてはECIにおける検討結果に基づく補助工法の採用等、現場で準備できている資材を用いて迅速な対応ができた。

今後、交差部の施工（写真-8）が約40m残っており、TD180m付近では、地表の鉄塔に近接した掘削となる。綿密な計測管理はもとより、BIM/CIMの3次元地質モデルを用いた3次元予測解析等の結果も踏まえて作業の安全には留意して施工を進める所存である。



写真-8 トンネル掘削状況（支保 No. 167：TD167m）

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74回土木学会年次学術講演会，投稿中，2020.

(2020. 8. 7 受付)

A STADY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE MOUNTAIN TUNNEL WHICH APPROACHED THE ABANDONED RAILROAD TUNNEL IN URBAN AREA

Hiroyuki YAMADA, Fumihiko OHTSUKI, Joh HIRAMATSU and Yasuhito URAMOTO

Shiroyama tunnel is mountain tunnel of length 311m in urban area. There is Muko-gawa river on the north side and JR Fukuchiyama-Line is located in the south side, and abandoned railroad tunnel and Kansai Electric Power steel tower approach the new tunnel upper part. Because high level tunnel design and constructing technology is needed, a constructor cooperated technologically from a design cycle. Technological cooperation and constructing-type of a technological suggestion and negotiations system (ECI: Early Contractor Involvement system) were adopted on the design for tunnel. The outline of technological cooperation work when designing and the constructing situation of the tunnel are described.