

移動型三次元形状計測システムの現場活用事例

東急建設株式会社	正会員	○池田 直広
東急建設株式会社	正会員	遠藤 健
東急建設株式会社	非会員	田野井淳一

1. はじめに

三次元形状計測器を用いた施工管理の高度化は、建設施工の自動化を目指すためには避けて通れない課題である。また、ICT 技術の有効活用は、施工管理の効率化を実現する手段の一つとして注目を集めている。そこで、移動型三次元形状計測システムを用いることで施工管理の高度化・効率化が実現した活用事例を紹介する。

2. 開発の背景

三次元形状計測器は、20 年程前から三脚型が市場に出回り始め、建設工事現場への適用が試みられてきた。しかし、導入コストが大きい、トンネルや鉄道といった細長い形状の構造物では、機器の移設時間がかかる等の問題があり、普及は進んでいなかった。そこで、比較的安価なレーザレンジファインダと各種計測器を組み合わせ、安価で計測効率の高い移動型の三次元形状計測器を開発した。

本計測器は、国土交通省建設技術研究開発助成制度の助成を受けて開発した。図 1 に開発した三次元形状計測器の外観写真を示す。



図 1 三次元計測器概観写真

3. 計測概念・システム概要

本三次元形状計測器は、台車に搭載した二次元レーザレンジファインダにより断面形状を連続的に計測しながら移動することによって対象物の三次元形状を取得する。台車の位置座標は、自動追尾トータルステーションによって常時計測され、これと二次元レーザレンジファインダによって計測した断面形状を組み合わせることで、公共座標系における三次元形状とする。また、台車の向きおよび傾きを三軸ジャイロで計測したデータで補正する。図 2 に三次元形状計測器の計測概念図を示す。

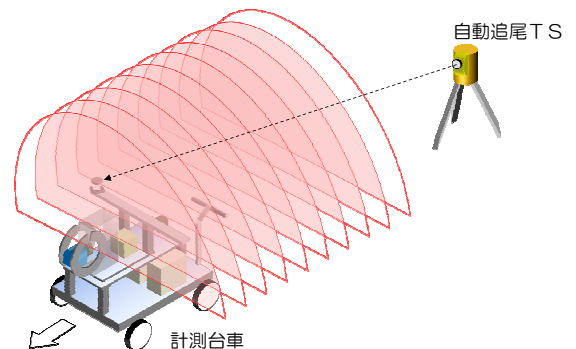


図 2 計測概念

台車に搭載したパソコンの画面上では、計測結果がリアルタイムで表示される仕様になっている。計測と同時にその結果を鳥瞰図・平面図・断面図等の形式で表示できる。計測対象物の設計データをあらかじめ入力しておく、設計と計測データの差異を算出し、差異の大きさに応じてデータ表示色を変化できる。これにより、計測結果の設計差異を直感的に把握することができ、その場で即座に施工指示ができる。図 3 にリアルタイム評価システムの概要図を示す。

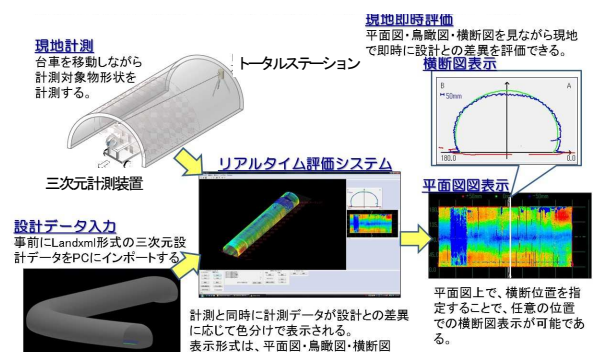


図 3 リアルタイム評価システム概要

キーワード 三次元形状、レーザスキャナ、リアルタイム施工管理、現場適用事例、鉄道改良工事

連絡先 〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名 3062-1 東急建設株式会社 技術研究所 建設 ICT グループ

TEL 042-763-9516

4. 新設トンネル計測性能確認事例

本システムは、トンネル施工管理で移動型三次元形状計測器を用いることで、現場計測効率の向上が実現できると想定して開発した。本項では、新設トンネルにて作業性および計測精度の確認を目的として実験を実施した事例について述べる。¹⁾

(1) 現場概要

島根県雲南市に位置する延長 425m の二車線道路トンネルで計測性能確認実験を実施した。縦断勾配は 2.207～2.904%，平面線形は起点側から約 145m がクロソイド，以降は直線であった。実験は、覆工の打設終了後、路盤の整形まで完了した時期に実施した。

(2) 実験概要

作業性および計測精度の確認を目的として実験を実施した。評価方法は下記に示す通りである。

① 作業性の確認

トンネル中間付近にトータルステーションを設置し、全線の計測が一回で行えるかどうかについて確認した。また、市販の 3D スキャナによる計測を合わせて行い、全線の計測に要する時間を比較した。計測状況を図 4、5 に示す。

② 計測精度の確認

市販のスキャナによる計測値を基準として移動型三次元形状計測器による計測値を確認した。

(3) 実験結果の評価

移動型三次元形状計測器では、全線の計測を一回の台車走行で完了することができた。台車とトータルステーションの距離は最大で 200m 程度となったが、台車の自動追尾に問題は生じなかった。要した時間は準備工を除いて約 15 分で、移動速度は約 2km/h であった。一方、市販のスキャナによる計測には 8 測点の盛替えで数時間を要しており、これと比較して大幅に時間短縮が可能であることを確認できた。

得られた鳥瞰図を図 6 に示す。市販のスキャナでは計測器直上の計測が不可能であるため、その箇所計測密度が疎になっている事が分かる。一方、移動型三次元形状計測器では、断面方向を計測しながら連続移動するため一定の計測密度となっている。

市販のスキャナによる計測値を基準とし

て、そこからの差分を求めて移動型三次元形状計測器による計測値の評価を行った。移動型三次元形状計測器による計測値は 23mm 程度の計測誤差を有していた。現在、搭載している 2D レーザレンジファインダのシステム誤差が ±15mm (カタログ値) であることから、現状としては妥当な数字と考えられる。このことから、2D レーザレンジファインダを高精度のものに入れ替えることで精度向上が期待できると判断できる。



図 4 計測状況（三次元形状計測システム）



図 5 計測状況（市販レーザスキャナ）

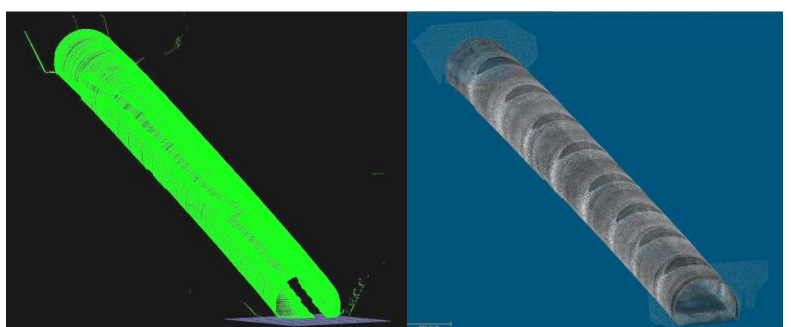


図 6 鳥瞰図

(左：三次元形状計測システム、右：市販の 3D スキャナ)

5. トンネル修復工事における適用事例

本システムの特徴として、リアルタイム計測処理を行うことで、施工管理から指示へのフィードバック時間を短縮し、効率的な施工が実現できる。本項以下では、施工管理から指示への時間を短縮し、効率的な施工を実現した事例について述べる。²⁾

(1) 工事概要と施工の問題点

本活用事例は、トンネル延長約 50m の既設トンネルを補修するため、トンネル吹付け面の内側にプレキャストコンクリートの覆工板を設置し、裏込め充填する工事であった。

覆工板設置前に、凹凸の激しい吹付け面を計測し、プレキャストコンクリートが設置可能な空間が確保されているかを確認した。図 7 に既設トンネル計測状況を示す。



図 7 既設トンネル計測状況

(2) 適用事例

図 8 に計測結果の平面展開図を示す。空間確保の基準から支障している区間の表示色を変化させて表示することで、支障度合いを現地で確認できるようにした。

この計測結果を現地で確認し、その場で天端付近および側部のはつり作業範囲を指示して、はつり作業を実施した。計測と同時に設計との差異が確認できるので、現地でリアルタイムな指示、確認が可能となるため、今後このような維持補修工事を実施する際には工期短縮に貢献することが期待できる。

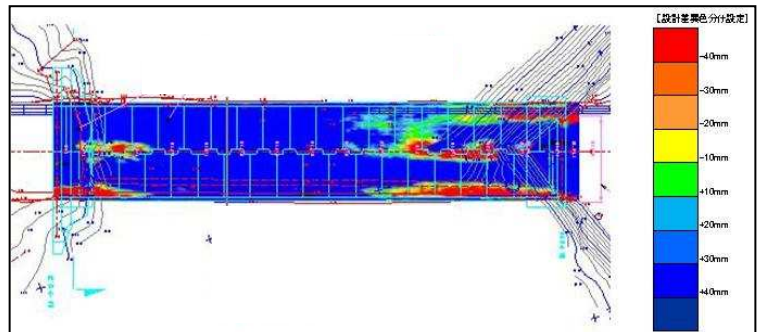


図 8 既設トンネル計測結果平面展開図

(3) 効果と今後の課題

本システム導入により、空間確保の確認ツールとして効果を発揮することが確認できた。今後の課題としては、現場職員でも簡易に利活用できるように、操作性の容易さを向上させることが必要である。

6. 鉄道改良工事における適用事例

供用中の鉄道改修工事は、夜間終電後の限られた時間内でしか作業ができないため、リアルタイム計測処理を行うことで、施工管理から指示への時間短縮を実現した本システムの適用が期待できる工種である。本事例では、現場作業終了後に毎日実施される鉄道建築限界点検作業をターゲットにして開発を進めていた適用事例について報告する。

(1) 工事概要と施工の問題点

本工事の適用目的は、施工中の軌道切替工事において、切替前に仮設構造物が切替後の新設線の建築限界に支障する危険性が高いかを確認し、切替時の仮設構造物撤去範囲を決定するものであった。

この工事区間には、 $R=200, 400\text{m}$ の曲線区間が存在し、縦断曲線もあるため各断面で建築限界が変化する線形であった。そこで、2.5m 間隔で横断形状を定義した三次元設計データを事前に作成した。図 9 に作成した鉄道建築限界三次元表示例を示す。

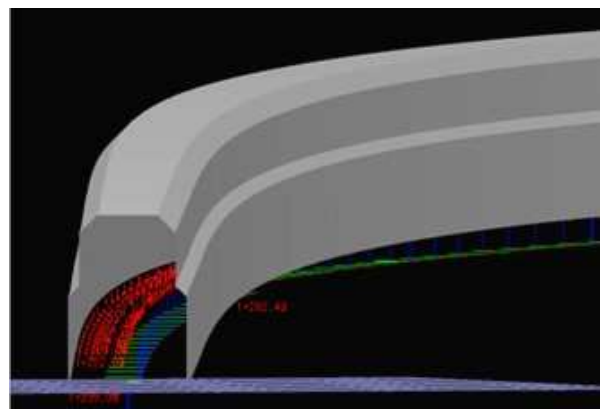


図 9 鉄道建築限界三次元表示例

（２） 適用事例

本システムは、事前に設計データを作成することで、計測と同時に建築限界が色分け表示されるため、現地では表示画面と支障物と見比べて建築限界との離隔を確認することが可能であった。そのため、迅速に切替え当夜に撤去すべき仮設構造物を判断することが可能であった。

図 10 に鉄道建築限界計測状況を、図 11 に当夜撤去が望ましいと判断された建築限界付近の仮設物状況写真を示す。

この結果から、限界付近の仮設構造物（桁受けチャンネル、限界離隔 30mm～100mm）を切替え当夜に撤去することを決定した。

（３） 効果と今後の課題

現行での建築限界確認作業は、軌道上に建築限界定規を走行させて確認するが、本システムを導入することで、人の手の届かない高い位置での建築限界離隔確認が容易に行える等のメリットが高い。

また、事前に三次元形状データを作成することで、現地では迅速に建築限界の確認作業を行うことができる等のメリットは大きい。しかし、事前の建築限界データ作成作業に工数を必要とした。今後は、BIM/CIM 等の三次元設計データを有効に活用する仕組みづくりが必要であると考ええる。



図 10 鉄道建築限界計測状況

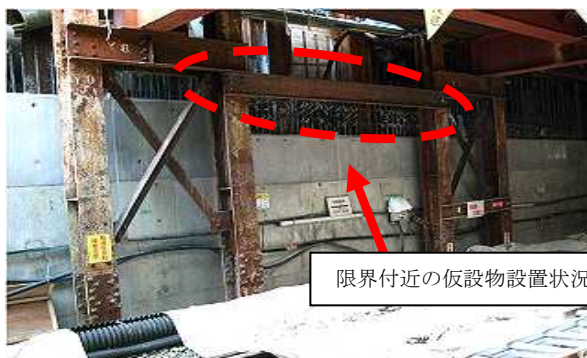


図 11 建築限界付近の仮設物設置状況

8. まとめと今後の展望

（１） まとめ

移動型三次元形状計測システムを開発し、現場導入効果を確認した。以下に、確認できた効果を列記する。

- ・ トンネルや鉄道のような細長い形状の土木構造物では、三脚型の三次元レーザスキャナより本システムを用いた計測の方が計測効率が高く、計測密度を一定に保ちやすい。
- ・ リアルタイム評価システムを用いることで、施工管理から指示までのフィードバック時間が短縮され、工期短縮、施工効率改善に寄与できる工種がある。
- ・ 本システムの普及拡大には、システム操作の容易性の向上と適用工種拡大に向けた取り組みが必要である。
- ・ 三次元設計データの利活用等の連携による事前準備作業の削減が必要となる。

（２） 今後の展開

今後の展開としては、BIM/CIM データの利活用方法および BIM/CIM データへのフィードバック方法を検討する。トンネル工事においては、操作の容易性の向上に向けた改良、鉄道建築限界測定作業においては、軌道計測データから自動で建築限界設計値を算出する機能を開発する予定である。

参考文献

- 1) 池野谷尚史他：三次元形状計測システムによる山岳トンネルの出来形計測，第 66 回土木学会年次学術講演会，2011
- 2) 池田直広他：三次元形状計測システム「RaVi」の現場活用事例の紹介，電力土木，2013 年 11 月号，2013

都市部における超近接無導坑メガネトンネルの建設と新技術の導入効果

(株)鴻池組 土木事業本部 技術部 正会員 ○山田 浩幸
(株)鴻池組 広島支店 土木部 大槻 文彦
(株)鴻池組 大阪本店 土木部 木村 圭吾

1. はじめに

名塩八幡トンネルは、交通渋滞の解消および交通の安全確保・周辺環境の改善などを目的として計画された一般国道 176 号名塩道路事業（全延長 L=10.6km）のうち、先行して整備を進めた第一工区 L=1.4km 区間に位置する延長 L=242m、上下線 2 本（4 車線）の山岳トンネルである。

本トンネルは、都市部での施工のため、制約された用地の中で上下線の離隔が約 1m の超近接メガネトンネルで計画され、無導坑方式により掘削を行った。また、トンネル全区間にわたり小土被り（最大土被りが 22m）であり、起点側坑口は住宅密集地域で高速道路に近接し、中間部直上には神社が位置し、終点側では集合住宅（マンション）に約 20m で近接しているなど、重要施設に近接した施工であった。

本報告では、都市部における超近接メガネトンネルという特殊断面のトンネルの施工結果と、より確実な安全管理、品質確保および環境保全の目的で実施した新技術や技術開発に関する事例の紹介とその効果に関する検証結果について報告する。



写真-1 トンネル施工状況

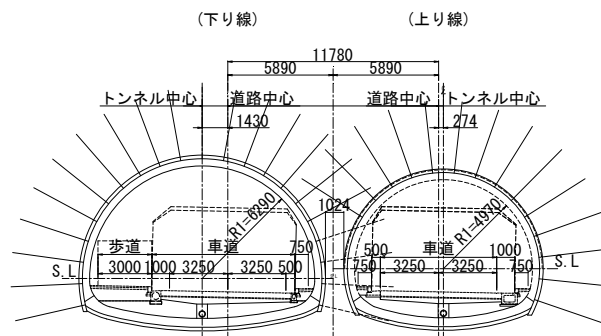


図-1 トンネル標準断面

表-1 工事概要

工 事 名 称		名塩道路 八幡トンネル工事
工 事 場 所		兵庫県西宮市塩瀬町名塩南之町地区～東之町地区
工 期		平成25年2月～平成27年6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	L=288m（トンネル延長L=242m、上下線）
	断 面	掘削断面積A=87㎡（上り線）,117㎡（下り線） 超近接無導坑メガネトンネル
	施 工 法	NATM
	掘削方式	機械掘削
	掘削工法	DⅢハターン（早期閉合） DⅠハターン（早期閉合）
	補助工法	天端安定対策：多段式長尺鋼管フォアパイリング 注入式フィアポーリング 鏡面の安定対策：鏡吹付、鏡ボルト 脚部の安定対策：脚部補強工（フットパイル）

2. 適用現場の概要

2.1 工事概要

都市部で計画された名塩道路八幡トンネル工事は、トンネル北側は、起点側で住居密集地域、終点側は集合住宅（マンション）に近接し、トンネル南側には中国自動車道が並走しており、トンネル上部には西宮名塩八幡神社が位置しているという重要施設に挟まれた地理的制約のため、上下線の最小離隔が約 1m（最小部分 82cm）で近接した「超近接メガネトンネル」の構造で建設された（図-1、写真-1）。

また、トンネルの施工は、昼夜で行うため、起点側では騒音対策として防音ハウスを設置した。

さらに、上部に近接する重要構造物への影響（地表面沈下）を抑制する目的で早期閉合や補助工法の採用を行った。

なお、上下線相互の緩みの影響を抑制する目的で左右のトンネルの切羽離れを 100m 確保して併進した。

表-1 に工事概要を示す。

キーワード 山岳トンネル、近接施工、数値解析、補助工法、計測管理

連絡先 〒409-2101 山梨県南巨摩郡南部町楮根 2948 株式会社 鴻池組 土木事業本部 技術部 TEL 0556-64-8322

2.2 地形・地質概要

トンネルの地質は、図-2 に示す地質平面・縦断図のとおり、神戸層群の砂岩・礫岩の互層で、設計では比較的良好な地山で、一軸圧縮強度はおおむね $10\sim 20\text{ MN/m}^2$ 、最大値が 23.1 MN/m^2 であることから、インバート早期閉合時の施工性を考慮してツインヘッドによる機械掘削が計画されていた。

しかしながら、実際の切羽は、写真-2、3 に示すように、砂岩、礫岩層内に人頭大から 2 m の硬質の玉石 (100 MN/m^2 以上) を含んでおり、D I 区間においては、切羽全体が硬質な状態であった。

地形的には高速道路に近接した起点側坑口部は偏圧地形となっており、坑口から約 30 m 付近に沢地形が見られた。なお、地層の傾斜は $8\sim 10^\circ$ 北落ちで高速道路から見るとすべり目の状況であった (写真-4)。

一方、終点側では、一部トンネルが露出する部分があり、ソイルセメントによる押え盛土を施工した (写真-5)。また、近接するマンション建設時の造成時の盛土上に公園が建設されており、複雑な地形となっていた。

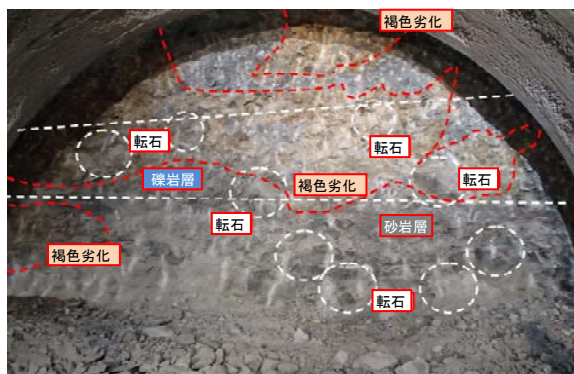


写真-2 切羽状況 (上り線沢部通過時)



写真-3 硬質玉石 (上り線沢部通過時)

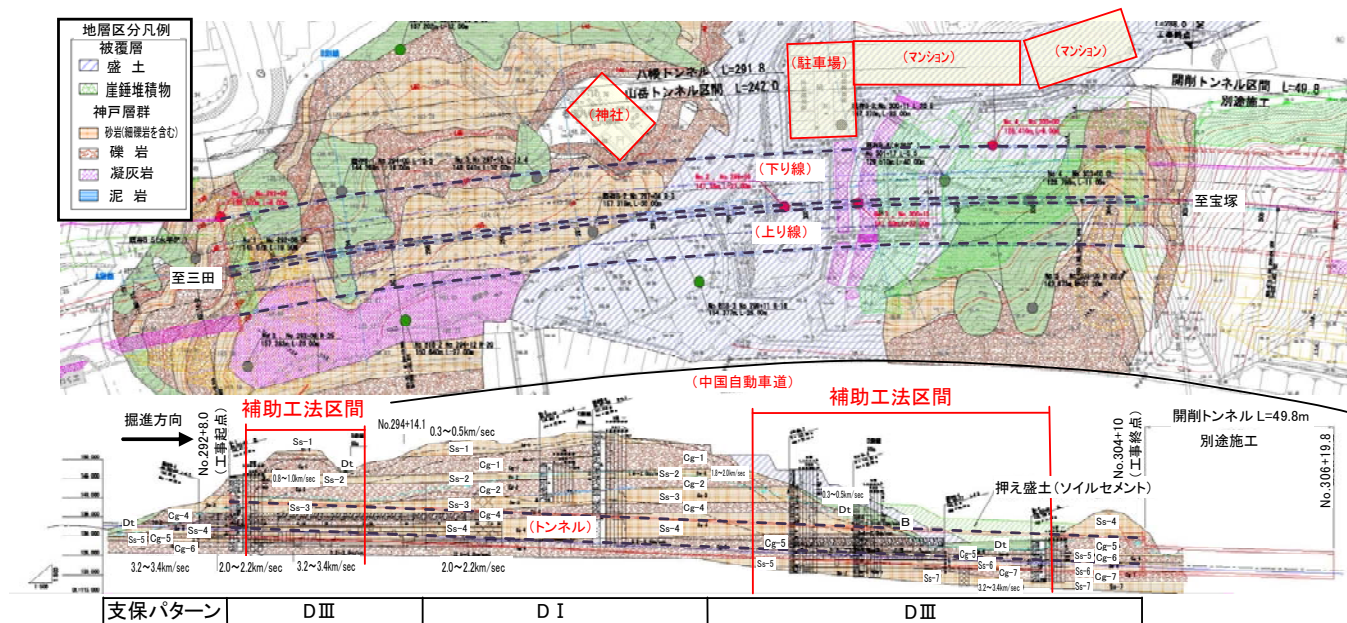


図-2 地質平面・縦断図¹⁾



写真-4 起点側全景



写真-5 終点側押え盛土施工状況

2.3 メガネトンネルの施工方法

トンネルの掘削は事前の数値解析結果を参考にして、断面の大きな下り線（宝塚行）を先進し、約 100m の切羽離れを確保して上り線（三田行）を併進させた。

また、全線にわたり小土被り（2D 以下：D は下り線トンネル幅：約 14m）であること、重要構造物に近接した施工であるため、地表面沈下抑制の目的でインバートストラットを用いた早期閉合による掘削を行った。

施工手順を図-3 に示す。さらに、前述の硬質の玉石（一軸圧縮強度 100 MN/m² 以上）を含む地山状況の下で、当初設計のツインヘッドでは掘削が困難となったため、下り線では掘削機械として大型ブレーカ 2 台（3.0t 級、1.3t 級）を使用し、断面の小さな上り線では、岩盤破碎剤を併用した。

起点側坑口部および終点側盛土部分に関しては、地表面沈下対策として緩み抑制効果の高い多段式長尺鋼管フォアパイリング（φ114.3mm, L=13.5m, @900mm, 14 本, 5m 掘削毎打設）と注入式ポーリングにより地山変状（地表面沈下）の抑制を図った。なお、図-4 に示すメガネトンネル特有の課題である干渉部の補強に関しては、先進坑の切羽状況をふまえ、区間を限定して地盤改良（注入改良）により後進坑（上り線）が到達する前に先進坑（下り線）側から実施した（写真-6）。

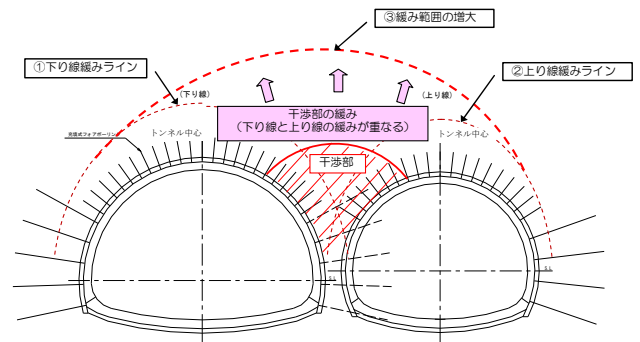


図-4 メガネトンネル緩みのメカニズム 1)

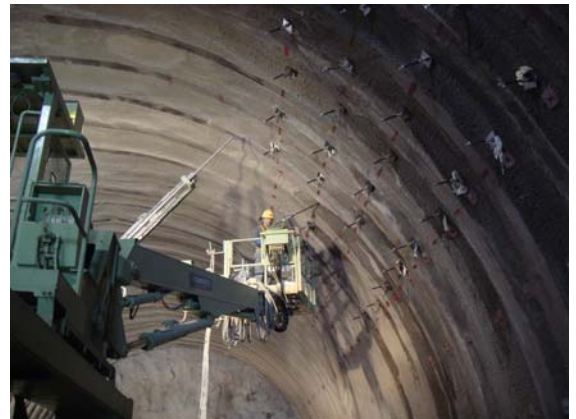


写真-6 干渉部補強工実施状況（下り線） 2)



補助ベンチ付全断面工法（インバート早期閉合）
・トンネル構造体としての安定性を早期に確保
（内空変位・沈下の抑制・緩み領域の抑制）

○施工ステップ（1サイクル）

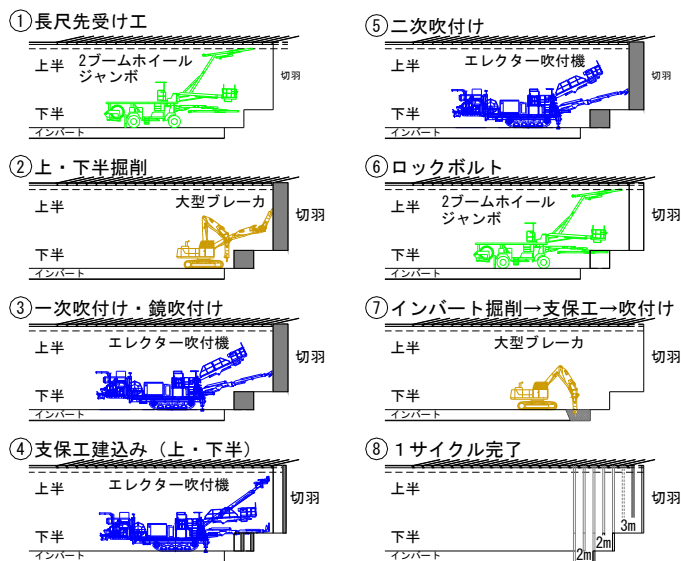


図-3 インバート早期閉合および掘削状況 1)



先進坑掘削状況（D I パターン）



芯抜き状況（ガンサイザー使用）



後進坑掘削状況（D I パターン）

3. 施工上の課題と新技術の適用

以上述べた本トンネルの周辺環境条件および地形・地質状況を踏まえた上で、都市部における重要施設に近接したメガネトンネル（特殊断面）の施工にあたり、施工上の課題として以下の事項が懸念された。

- ①特殊断面トンネル掘削時の安定性確保のための新技術の導入
- ②硬質玉石混じりの地山における効率的な機械掘削の実施
- ③覆工コンクリートの品質確保に向けた新技術の導入

それぞれの課題に対する対策とその効果に関して以下に述べる。

3.1 トンネル掘削時の安全管理

中国道に近接する切土施工時の計測システムとして、切土作業時およびトンネル掘削時の中国道近傍斜面、坑口部斜面、中間部地山などの挙動をリアルタイムで監視し、中国道の通行車両や作業員の安全を確保する目的から、計測結果を現地で見える化できるよう工夫した。なお、作業員に対する安全研修により、計測値とその表示色との関係に基づく安全性の確認方法を説明し、作業員自ら安全性を確認して作業できるよう指導した。

図-5に計測位置平面図を示し、写真-7に計測管理状況を示した。なお、計測結果の概要は以下のとおりである。

(1) 地表面伸縮測定結果

図-6に示すとおり、地すべり伸縮計のデータについても管理値（5mm/10日）以内で収まった。

計測結果が光の色で表示されるため、作業員の聞き取り結果でも作業時の安全管理に有効であることが検証できた。

切土時には結果的には緑色（安定）からの変化はなかったが、斜面に近接する上り線掘削時には一番上部の伸縮計が赤色（3mm伸び）、盛土部の伸縮計が水色（3mm圧縮）に変化した。



写真-7 起点側切土計測管理状況²⁾

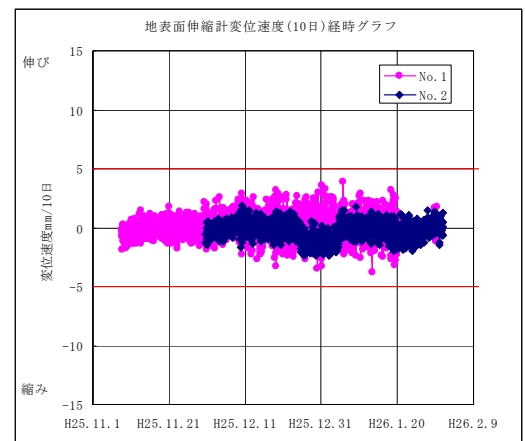


図-6 伸縮計測定結果²⁾

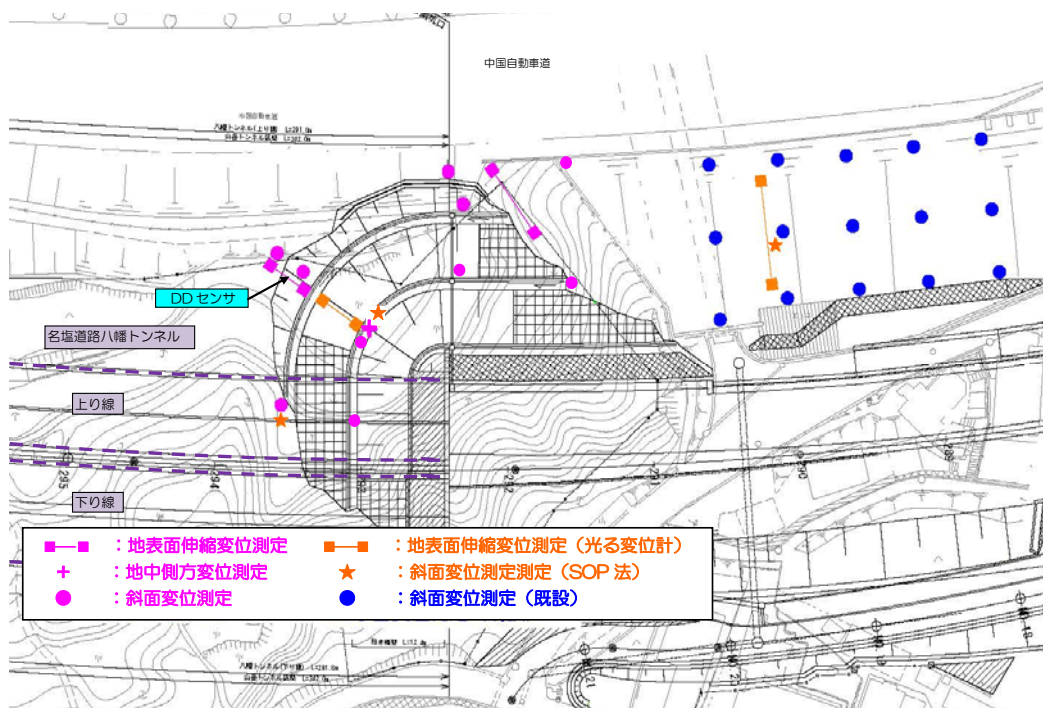


図-5 計測位置平面図（起点側坑口部）²⁾

(2) トンネル施工時の計測管理

トンネル坑内および地表面沈下の測定に自動計測システムを導入するとともに、事務所にてリアルタイムに確認できる計測統合管理システムを構築した。

トンネル掘削時はトンネル相互の影響度合いを確認しながら慎重な施工を実施した。システム内では管理基準値の注意レベルⅠ～Ⅲをそれぞれ緑色、黄色、赤色に設定し、基準を超えた箇所と値がひと目で確認できるよう工夫した（図-7）。また、メガネトンネル特有の課題である中間地山（干渉部）の安定性の確認のために光る変位計を設置し、作業員が現地でリアルタイムに確認できるように工夫した（写真-8）。

図-8に内空変位の経時変化の一例を示す。

本トンネルでは、メガネトンネルという特殊性を考慮して、早期閉合（切羽から7mでインバートストラットによる全断面閉合）を実施していたこともあり、上下線相互の影響としては、上り線の切羽が10m（1D）まで接近した時点より影響（先行変位）が見られ、インバート閉合後は、速やかに収束に移行していくことが分かる。地表面沈下に関しても、神社の社殿付近の傾斜角が $0.13 \times 10^{-3} \text{rad}$ と管理レベルⅠ（ $0.15 \times 10^{-3} \text{rad}$ ）以下で収まった。

3.2 硬質玉石混じり地山における効率的な機械掘削の実施

(1) 機械掘削の概要

前述のとおり、硬質の玉石を含む地山条件のため当初計画されていたツインヘッドによる掘削が困難となった。

しかしながら、周辺環境への配慮から火薬が使用できないことから、掘削方式は機械掘削のままであったが、掘削機械を大型ブレイカ（3t、1.3t）に変更した（写真-9）。

また、後進坑である上り線の施工では、写真-10に示すとおり、設計の掘削サイクルタイムを確保するために、芯抜き部分に非火薬岩盤破砕剤（ガンサイザー）を併用してサイクルタイムの向上を図った。

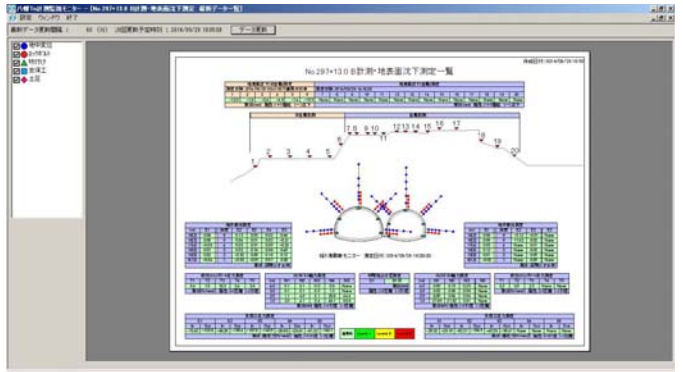


図-7 統合管理システム 管理画面²⁾



写真-8 干渉部監視状況（光る変位計）²⁾

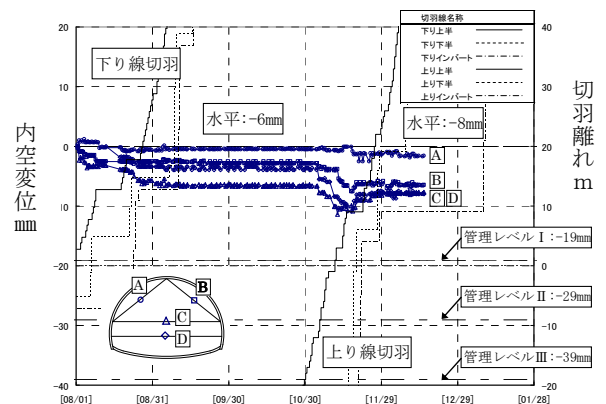


図-8 トンネル内空変位 経時変化²⁾



写真-9 下り線掘削状況（3.0t級+1.3t級併用）



写真-10 上り線掘削状況（岩盤破砕剤+3.0t級併用）

(2)掘削工程の検討

硬質地山における掘削効率を高める目的から、工期短縮に関する工法検討を実施した。

先進坑（下り線）に関しては、断面が大きい大型ブレーカの能力及び2台併用について比較した。

一方、標準の断面である後進坑（上り線）に関しては大型ブレーカの併用が困難であるため、芯抜きに岩盤破砕剤の併用を検討した。なお、岩盤破砕剤の採用効果に関しては、岩盤破砕剤による破砕の影響範囲（3m×3m）の地山の弾性波速度を1/2としてサイクルタイムの見直しを行った。

表-2に各支保パターンにおける検討結果一覧を、表-3に工程の比較結果について示した。

これらの検討結果より、設計工程を基本として、硬質地山での工期短縮案として、前述の断面の大きい先進坑では、大型ブレーカ2台（1.3t+3.0t）を併用し、断面の小さい後進坑では、芯抜き部分に非火薬の岩盤破砕剤（ガンサイザー）により自由面を形成し、大型ブレーカ（3.0t）による掘削を実施した。

以上の結果、発破作業ができない都市部のトンネル工事において、機械の組み合わせや岩盤破砕剤の併用により掘削効率の向上が図れた。

(3) CIMによる切羽前方地質予測

前述の地質状況のもとでのトンネル掘削にあたり、安全管理および工程管理の上では、切羽前方地質予測が重要であった。

本トンネルでは、①地層がほぼ水平（8～10度北落ち）であったこと、②トンネル設計のために比較的多くのボーリングデータがあったこと、③メガネトンネルであるため先進坑（下り線）の切羽データが後進坑（上り線）へ速やかにフィードバックできるといった理由からCIM（三次元地質モデル）を適用した。

既存の地質データに基づき、既製のプログラム（GEORAMA）を用いて三次元地質モデルを作成した。

施工時には、先進坑（下り線）の切羽観察結果を用いてモデルの修正（当初想定地質の検証）を行い、トンネルの施工とともに精度を高め、後進坑（上り線）の施工に反映させた。図-9に当初の三次元地質モデルを示し、図-10に三次元地質モデルに基づく断面図の推定結果について示す。

これらの切羽前方地質予測に基づき、施工においてはトンネルの天端に未固結な礫岩層が見られる箇所では天端安定のための補助工法（多段式長尺鋼管フォアパイリング）を採用した。

CIM(三次元地質モデル)は言わば、地質の見える化であり、工程管理や対策工の適用判断の合理化にも寄与したものと考えられる。

表-2 掘削工程一覧²⁾

《下り線》		区間長 (m)	進行長(m)		工程	
支保パターン			1日当たり	1ヶ月当たり	(日)	(月)
DIS-d	①設計	75	1.6	32.2	46.9	2.3
	②実施(1.3t)		1.0	21.3	75.0	3.5
	③実施(3.0t)		1.3	25.9	57.7	2.9
	※②,③併用		1.6	33.0	46.6	2.3
DIII-d	①設計	12	1.4	29.4	8.6	0.4
	②実施(1.3t)		0.9	19.9	13.3	0.6
	③実施(3.0t)		1.2	23.9	10.0	0.5
	※②,③併用		1.5	30.7	8.2	0.4
合計	①設計	87			55.4	2.7
	②実施(1.3t)				88.3	4.1
	③実施(3.0t)				67.7	3.4
	※②,③併用				54.7	2.7

《上り線》		区間長 (m)	進行長(m)		工程	
支保パターン			1日当たり	1ヶ月当たり	(日)	(月)
DIS-u	①設計	75	1.8	37.3	41.7	2.0
	②実施(1.3t)		1.3	26.5	57.7	2.8
	③実施(3.0t)		1.6	31.5	46.9	2.4
	③+ガンサイザー		1.6	33.5	46.9	2.2
DIII-u	①設計	12	1.6	33.7	7.5	0.4
	②実施(1.3t)		1.2	24.6	10.0	0.5
	③実施(3.0t)		1.4	28.7	8.6	0.4
	③+ガンサイザー		1.4	30.4	8.6	0.4
合計	①設計	87			49.2	2.4
	②実施(1.3t)				67.7	3.3
	③実施(3.0t)				55.4	2.8
	③+ガンサイザー				55.4	2.6

表-3 掘削工程の比較

(比較工程)		00	05	10	15	20	25	30	35	40	45	計
①設計												2.7
②実施(1.3t)												4.1
③実施(3.0t)												3.4
※②,③併用												2.7

(比較工程)		00	05	10	15	20	25	30	35	40	45	計
①設計												2.4
②実施(1.3t)												3.3
③実施(3.0t)												2.8
③+ガンサイザー												2.6

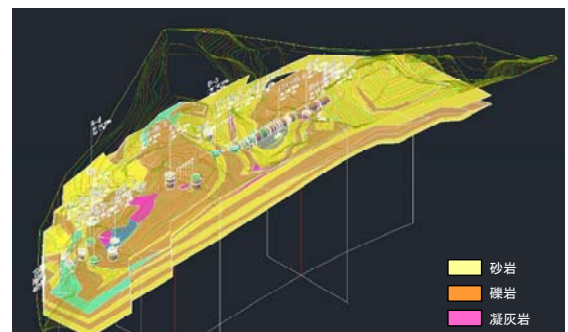


図-9 三次元地質モデル

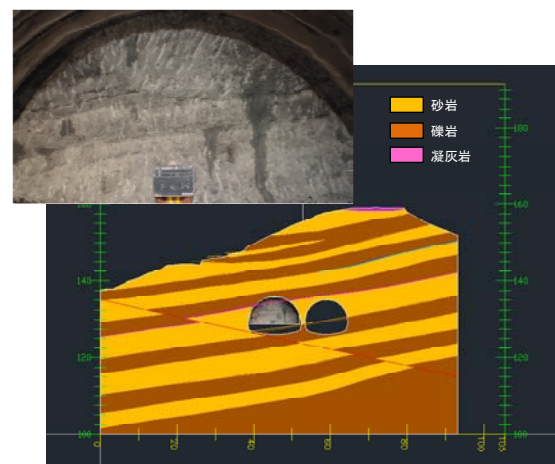


図-10 三次元地質モデルによる断面図

3.3 覆工コンクリートの品質確保

本トンネルは、超近接メガネトンネルという特殊断面であることから、覆工コンクリートの補強鉄筋が複鉄筋構造であった。また、掘削工程の関係から覆工コンクリートの打設時期が冬季となった。

そこで、覆工コンクリートの更なる品質向上を目指して

- ①補強鉄筋にユニット鉄筋を採用
- ②FRP セントルの採用
- ③覆工打設時の圧力管理

といった新しい技術を導入した。

以下にそれぞれの技術の導入効果について示す。

(1) ユニット鉄筋の採用

トンネル坑口部の長期安定性を図るために、坑口部の覆工コンクリートには、単鉄筋構造（ $\phi 19\text{mm}$ ）で補強鉄筋が設計されることが一般的であるが、本トンネルでは、メガネトンネルという特殊断面であること、土被りが小さいことを考慮し、上下線の両坑口の覆工コンクリートの補強鉄筋が複鉄筋構造（ $\phi 22\text{mm}$ ）で設計されていた。

この補強鉄筋の組立てにおいて工期短縮および品質の向上を図るために、工場で製作したユニット鉄筋による施工を行った（図-11）。ユニット鉄筋の採用により、①工場生産のため高い品質が確保できる、②作業性が向上する、③現場検査の簡素化等の効果が期待できる。実際に現場で適用した結果、補強鉄筋自体の施工精度（配筋ピッチ、形状等）の確保ができ、配筋検査の簡素化が図れた。

なお、本トンネルの平面線形が曲線であったため、妻部では調整のため一部バラ鉄筋の組立てが必要となったが、現場での鉄筋組立作業においては、天端上向きの配筋作業という苦渋作業が軽減できた。さらに、鉄筋組立の専門業者の人材確保が困難な状況の中、専用の把持装置を使用することにより、熟練作業員でなくとも配筋作業が可能であった（写真-11）。

(2) FRP セントルの使用

一般に、冬季にコンクリートを打設する場合、外気温が低いため、打設後初期のコンクリート強度が十分に発現していない時期に、急激な温度降下に伴う引張り応力が発生し、ひび割れ発生の原因になる懸念がある。そのため、打設後に保温養生を行い、徐々に外気温まで下げていくことが重要となる。そこで以下の特長を有する FRP フォームを導入した（写真-12）。

- ①鋼製型枠に比べ熱伝導率（ $0.3\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ：鋼製の $1/150$ ）が低く、保温効果があるため初期強度発現に有利となる。
- ②離型性に優れ、型枠ケレン作業時間が大幅に減少することとなり、工期短縮に寄与できる。
- ③透過性を有しているため、コンクリートの打設状況が目視確認でき、空洞の発生等を防止することができる。

導入による保温効果の確認のために温度計測を実施した。

図-12 にメタルフォームを使用した場合の内部温度履歴と本トンネルでの内部温度履歴を示す。

なお、打設温度が異なるため、温度の差を補正している。



図-11 ユニット鉄筋 工場製作状況¹⁾



写真-11 ユニット鉄筋 現場組立状況



写真-12 FRP セントル 工場組立状況

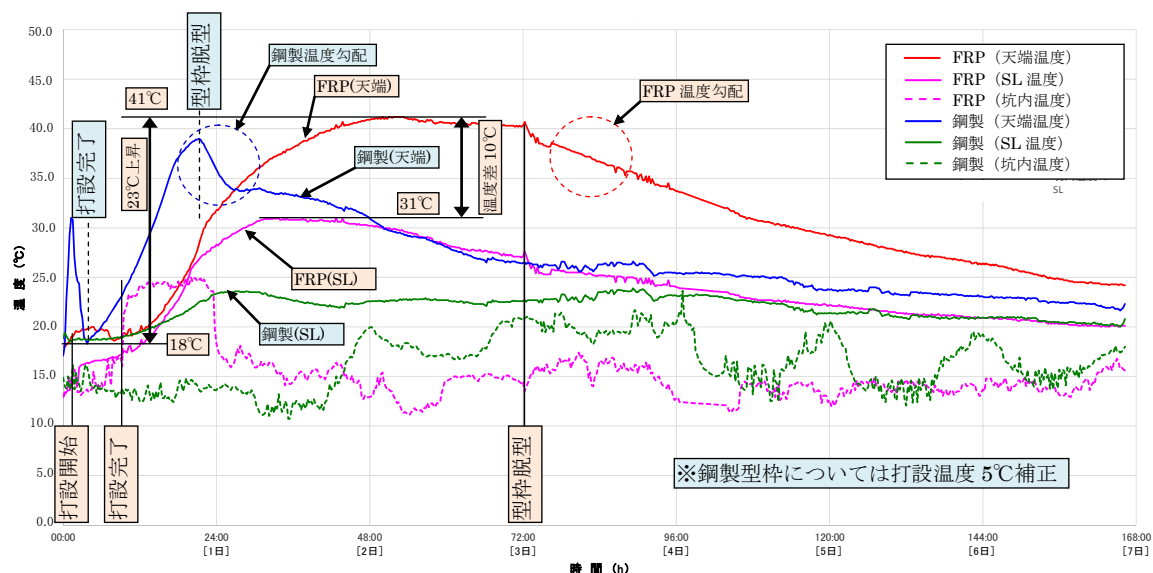


図-12 覆工打設時温度測定結果（経時変化）

図-12 から、養生条件の違い等で多少の差異は考えられるが、型枠脱型後の覆工コンクリートの温度履歴がメタルフォームに比較して緩やかに降下しており、FRP フォームの保温効果が検証できた。

覆工打設時に FRP セントルに過度の圧力が作用すると FRP フォームの破損の原因となるため、型枠に作用する圧力を管理する目的で LEC（光るデータコンバータ）を用いて作業員が容易に確認できる「計測結果の見える化技術」の適用を実施した。天端のコンクリート打設口付近に圧力計を設置し、打設圧に応じて LEC の色を変化させた（写真-13）。圧力の管理値と発光色は、FRP フォームの強度試験結果をふまえ、管理値（閾値）として 0～4kN を緑色、4～10kN を黄色、10kN 以上を赤色で表示した。セントル圧力管理の見える化により、セントルに過度の圧力が作用することを防止でき、打設終了時期（充填管理）の判断にも有効に利用することができた。



写真-13 FRP セントルと圧力管理の見える化

4. おわりに

本トンネルは、昭和 60 年に計画決定され、約 30 年の時を経て実現したものである。地域住民の悲願であった交通安全確保と渋滞緩和といった課題を解決するものであり、名塩八幡トンネルを含む第一工区の開通後は、地域の安全、生活環境は飛躍的に改善された（写真-14）。今後、都市部での山岳トンネルの施工が増加し、種々の厳しい条件下でのトンネル掘削が想定される。今回の報告が同種工事の参考となれば幸いである。



写真 14 トンネル供用状況²⁾

参考文献

- 1) 谷口大樹, 木村圭吾: 名塩道路八幡トンネル～超近接無導坑めがねトンネルの施工について～, 平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会, 施工・安全管理対策部門: No. 19, pp. 1-6, 2015. 6.
- 2) 高祖亮一, 山田浩幸, 大槻文彦, 木村圭吾: 都市部における超近接無導坑メガネトンネルの建設—国道 176 号名塩道路八幡トンネル工事—, 平成 27 年度施工技術報告会, pp11-20, 2016. 2.