

脆弱地山における神社・鉄塔近接施工時の補助工法の設計と施工に関する一考察

山田 浩幸¹・安田 裕輔²・村島 雅征³・宮下 邦彦⁴

¹ 正会員 (株) 鴻池組 本社土木事業本部 技術部 (〒409-2101 山梨県南巨摩郡南部町楮根 2948)
E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

² (株) 鴻池組 東京本店 (〒409-2101 山梨県南巨摩郡南部町楮根 2948)
E-mail: yasuda_ys@konoike.co.jp

³ (株) 鴻池組 東京本店 (〒409-2101 山梨県南巨摩郡南部町楮根 2948)
E-mail: murashima_my@konoike.co.jp

⁴ 関東地方整備局 甲府河川国道事務所 地域防災調整官 (〒400-8578 山梨県甲府市緑が丘 1 丁目 10-1)
E-mail: miyashita-k8310@mlit.go.jp

楮根第3トンネルは、現在建設中の中部横断自動車道の一部、延長L=165mの山岳トンネル工事である。トンネル直上には、土被り約30mで神社と高压鉄塔が近接しており、当初設計では、近接区間は比較的良好な地山が想定されていたが、追加調査（鉛直、全線水平ボーリング）の結果により、かなり脆弱であることが判明した。そこで、地山条件の変更に伴うトンネル設計の見直しを行い、補助工法を駆使して掘削を進めた。その結果、最も厳しい鉄塔の管理基準値（相対沈下3.5mm）以内の3.4mmで収まった。今後、同種条件のトンネルの施工に参考となる補助工法の施工および計測管理手法について述べる。

Key Words: Mountain Tunnel, Neighboring Construction, Numerical analysis, Auxiliary Method, Monitoring measurements

1. はじめに

楮根第3トンネルは、現在建設中の中部横断自動車道の一部、国土交通省が直轄する延長 L=165mの山岳トンネル工事である。

トンネル直上には、土被り約30m（2D：Dはトンネル幅）で神社と高压鉄塔が近接し、慎重な施工が必要であった（写真-1）。

当初設計では、比較的良好な地山が想定されていたが、工事当初は、坑口切土時に斜面崩壊や切羽崩壊等の変状が続き、地表面への影響も大きかったため、追加調査結果を行ったところ、トンネル全体がかなり脆弱な地山であることが判明した。

そこで、地山条件の変更に伴う数値解析結果に基づき、補助工法の検討を含むトンネル設計の見直しを行い、掘削時には、計測結果に基づき補助工法を駆使して掘削を進めた。

本稿では、施工時のトンネルの設計変更と補助工法の施工および計測管理手法について報告する。

2. 工事の概要

(1) 地形・地質概要

トンネルの地質は富士川層群身延累層の砂岩・泥岩互層であり、泥岩優勢層ではスレーキングが著しく脆弱となる特徴を持っていた。また、地形的には両坑口付近では過去にすべりを生じ、すべり土塊が堆積したような地すべり跡が点在していた。



写真-1 トンネル施工状況¹⁾

(2) 施工概要

本トンネルの工事概要を表-1に示す。

トンネル施工当初、坑口付け時に斜面崩壊が発生し、トンネルの掘削開始後も小崩落や鏡面の崩壊(写真-2)が見られたため、切羽安定のための補助工法(小口径長尺鋼管フォアパイリング, 長尺鏡ボルト)を併用して施工を進めていた。

トンネル掘削が26m進んだ時点で、掘削の緩みに伴い50mmを超える大きな地表面沈下を生じ、既施工区間の吹付けコンクリートに変状(写真-3)を生じた。そのため、切羽を一旦休止し、地層分布と地山物性を確認する目的で追加地質調査を実施した。

その結果、トンネル全体的に脆弱な地山であり、地山物性値も設計より小さいことが判明した。

以上のことから、数値解析に基づく近接構造物への影響検討と必要な補助工法の選定を行い、トンネル設計の見直しを行った。

表-1 工事概要

工 事 名 称		中部横断楯根第3トンネル工事
工 事 場 所		山梨県南巨摩郡南部町楯根地先
工 期		平成26年1月～平成28年11月
発 注 者		国土交通省 関東地方整備局
施 工 者		株式会社 鴻池組
工 事 内 容	延 長	L=165m
	断 面	掘削断面積A=105.7㎡（盤下げ含む） 2車線道路トンネル
	施 工 法	NATM
	掘削方式	機械掘削（ロードヘッダ）
	掘削工法	DⅢパターン（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 （L=13.5m, 15.5m, φ114.3mm, @900mm, 打設間隔5m） 注入式フォアボーリング （L=4.0m, φ25mm, @600mm, 打設間隔1m）
		鏡面の安定対策：鏡吹付（t=50mm） 長尺鏡ボルト （L=12.5m, φ76mm, @2m, n=5本/断面）
		脚部の安定対策：脚部補強工（レッグパイル） （L=3.5m, φ114.3mm, 4（6）本/断面）



写真-2 切羽崩落状況(支保 NO. 26)

(3) 施工上の課題

トンネル坑口部における施工状況や支保変状を受け、施工上の課題としては以下の事項が懸念された。

- ・脆弱な地山におけるトンネルの安定性確保
- ・トンネル直上近接構造物への影響防止
- ・工事工程の遅延

それぞれの課題に対する対策について以下に詳細を述べる。

3. トンネル設計の見直しと補助工法の検討

(1) 地山条件と変状原因の分析

検討に当たっては、地山条件(地層分布、地山物性値)を再確認するために追加地質調査(水平ボーリング全線、鉛直ボーリング4本)を実施してトンネル変状の要因について分析した。

図-1にボーリング位置と地層分布を示す。

地山条件としては、当初の地質調査結果と比較すると脆弱な層が厚く、物性値についても多数の孔内試験およびコアの室内試験から、②、③層の粘着力Cが1オーダー小さいことが分かった。また、変形係数に関しても、②層は半分程度であった。

したがって、坑口部のトンネル変状の原因として

- ・終点側坑口部には想定以上に破碎されて固結度の著しく小さい地山が厚く分布しており、グラウンドアーチが形成されず、トンネル掘削に伴い緩み領域が拡大した。
- ・トンネル脚部の地山も想定以上に悪く、地耐力が不足したため、脚部が沈下した。
- ・緩み荷重の増大に伴い、トンネルの変形(脚部沈下沈下)が進行し、トンネル上部の地山が共下がりして、坑内天端沈下相当の地表面沈下を生じた。ものと考えられる。

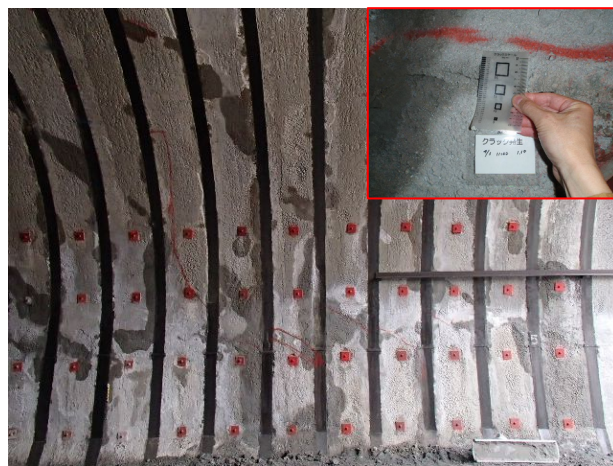


写真-3 支保変状(吹付ひび割れ)状況

(2) 数値解析 (FEM) に基づく対策工の検討

以上の追加地質調査に基づく数値解析により周辺地山の安定性や近接構造物への影響を予測するとともにトンネル設計の見直しを行い、補助工法の検討を含む施工パターンの修正を行った。

設計時には高压鉄塔への影響を二次元FEMの線形解析で検討している。今回、地層の分布と地山物性値を見直し、トンネル掘削による高压鉄塔への影響に関して、トンネル掘削時の実挙動に近いとされる非線形解析によって検討を行った。

なお、鉄塔の管理基準項目および許容値は、

- ① 鉄塔脚間の水平方向相対変位 (1/800以内)、
- ② 鉄塔脚間の鉛直方向相対変位 (1/1,200以内)、
- ③ 鉄塔基礎の鉛直方向絶対変位 (25mm以下)

である。

検討結果を表-2および表-3に示す。

当初設計では、②が許容値に近いものの、いずれもOKとなっている。それに対して、地山物性値を見直した結果では、①と③が許容値を上回る結果となった。

このことより、対策工の検討が必要となった。

検討においては、トンネルを掘削始点である工区終点側より、パターン①下半既施工区間、パターン②上半既施工区間、パターン③終点側斜面下区間、パターン④中間部、パターン⑤起点側斜面下区間の5つに区分した。各パターンの違いを表-4に示す。

トンネル上部の近接構造物（鉄塔）の許容値を考慮して、当初設計支保パターンで安定を保てるかどうか、安定を保てない場合、必要な対策工について検討を行った。

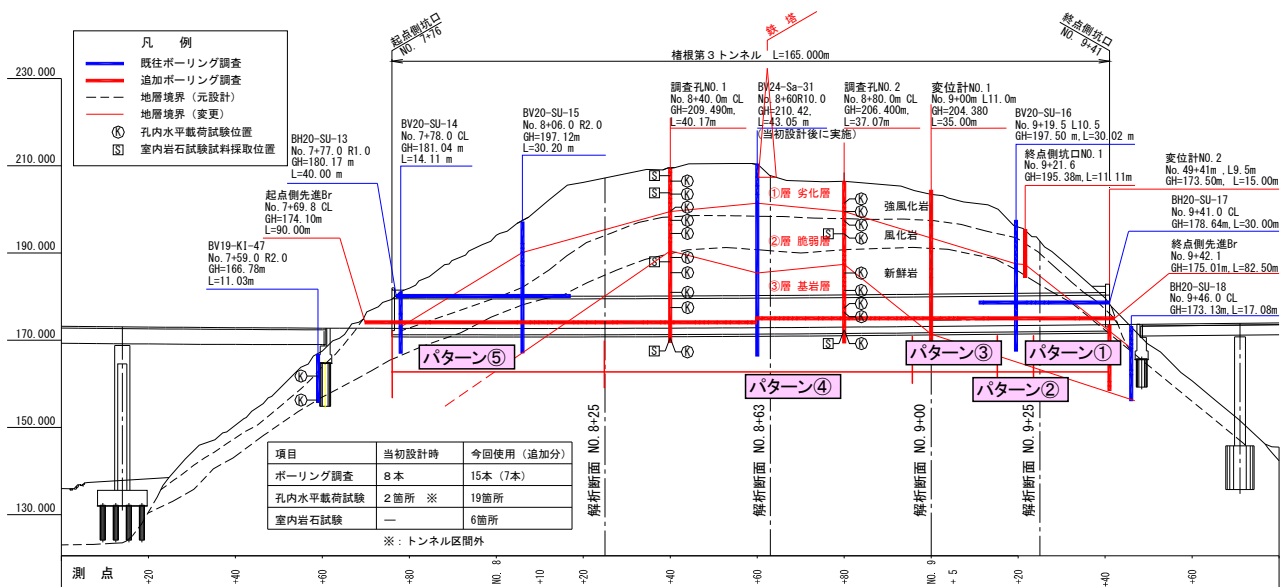


図-1 追加調査位置と地層分布

表-2 当初設計における FEM 解析結果

方向	鉄塔基礎左端(A) (mm)	鉄塔基礎右端(B) (mm)	許容値	判定	鉄塔脚間 相対変位量	許容値	判定
水平方向	10.1	12.3	---	---	1/3666	1/800	OK
鉛直方向	-6.8	-11.5	25	OK	1/1420	1/1200	OK

表-3 今回の FEM 解析結果

方向	鉄塔基礎左端(A) (mm)	鉄塔基礎右端(B) (mm)	許容値	判定	鉄塔脚間 相対変位量	許容値	判定
水平方向	21.0	20.3	---	---	1/6000	1/800	OK
鉛直方向	-26.3	-34.4	25	OUT	1/519	1/1200	OUT

検討項目は、これまでの施工実績を考慮して、天端安定性、鏡面安定性、脚部安定性の3項目とした。

検討の手順は、土木学会トンネルライブラリー「山岳トンネルの補助工法-2009-」を参考にして、図-2に示す検討フローに基づき実施した。

表-4および図-3に検討に基づく施工パターンを、図-4、5に解析結果の検討結果の一例を示す。

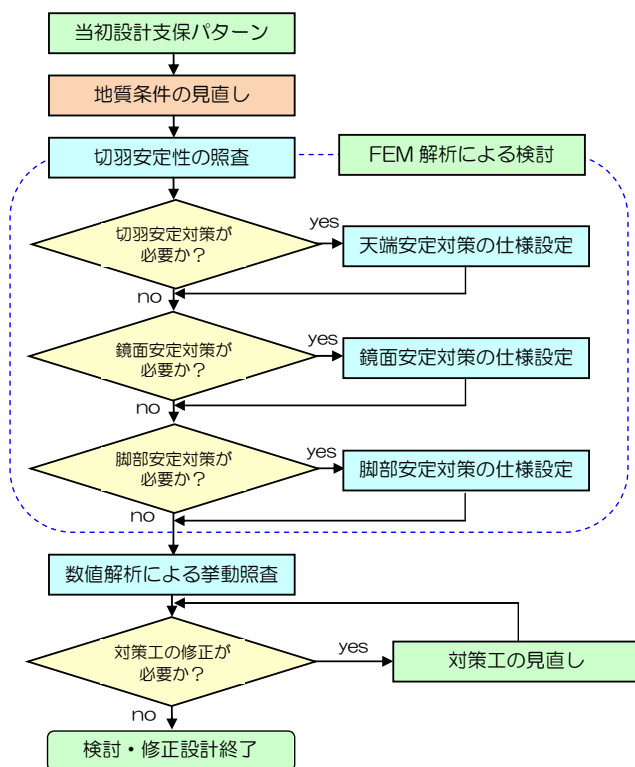


図-2 対策工の検討フロー

表-4 対策工の検討結果¹⁾

施工パターン	施工状況	天端対策	脚部(沈下)対策	鏡面対策
パターン1		小口径(φ76.3)長尺鋼管 FP	レグパイプ(L=3.5m)片側2本	なし
パターン2	下半完了	(天端 120° L=12.5@5m)	レグパイプ(L=3.5m)片側3本	長尺鏡ボルト11本 L=9.0m(2シフト)
パターン3	上半完了	長尺鋼管 FP(L=15.5m@9m) (天端 160°)	レグパイプ(L=3.5m)片側3本	長尺鏡ボルト5本 L=12.5m@9m
パターン4		長尺鋼管 FP(L=12.5m@9m) (天端 180° 範囲)	レグパイプ(L=3.5m)片側2本	長尺鏡ボルト5本 L=12.5m@9m
パターン5	未掘削	長尺鋼管 FP(L=15.5m@9m) (天端 160°)	レグパイプ(L=3.5m)片側2本	長尺鏡ボルト5本 L=12.5m@9m

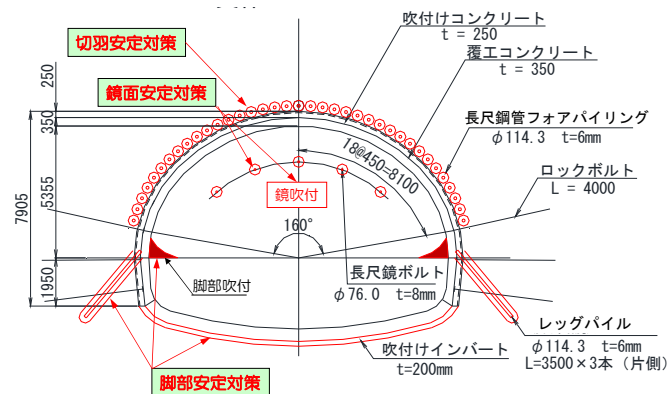


図-3 施工パターン（パターン3）¹⁾

数値解析の結果から、図-4、5に示す周辺地山が弾性領域で、絶対沈下量25mm、相対変位（鉛直3.5mm、水平5.2mm）に収めるために以下の補助工法を選定した。

- ①天端安定対策：長尺鋼管FP（フォアパイリング）（L=12.5m、近接部L=15.5m）
- ②鏡面安定対策：長尺鏡ボルト（L=9.0m）
- ③脚部安定対策：レグパイプ（L=3.5m、斜め前方打設）

補助工法の施工範囲（天端施工範囲、長さ）や規模（打設本数）に関しては、解析によるケーススタディと経済性の検証結果をもとに設定した。

また、施工時の対策として、支保の剛性を高め、変位抑制を図る目的で、吹付けインバートによる早期閉合を基本とし、計測結果を参考に上半切羽から5m後方で閉合しながら掘進する計画とした。

中間部の近接施工区間においては、プレロードシールドによる沈下抑制対策を実施した。

なお、使用する吹付けコンクリートに関しては、初期にトンネル支保の剛性を高める目的から、瞬結吹付けコンクリート（ σ_{3h} ：5N/mm²以上）を使用した。さらに、鉄塔側では独立基礎を一体化することを目的に鉄塔基礎周辺にコンクリートの床版（幅5.5m、厚さ30cm）を構築し、鉄塔基礎頭部で連結した。

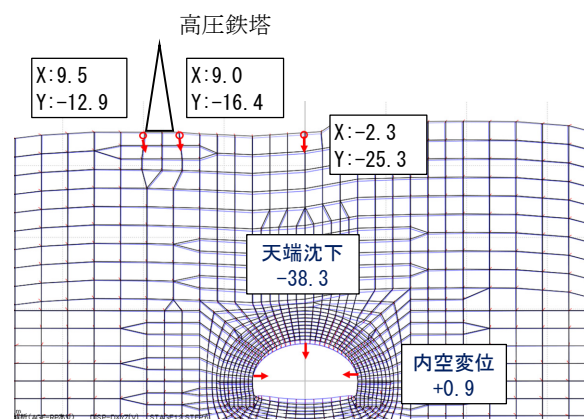


図-4 変位分布（No. 8+63：鉄塔直下）

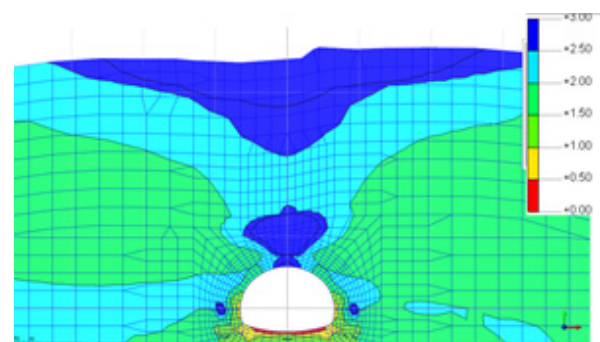


図-5 周辺地山の安全率分布（No. 8+63：鉄塔直下）

4. トンネルの施工

(1) 周辺環境対策

トンネルの掘削工法は周辺に近接する住居や寺院への騒音・振動対策として機械掘削とし、トンネル始点から80m間は昼間1方施工で実施した(写真-4)。

工事用道路としての栈橋については仮舗装によりガタつきによる騒音防止を図り、坑口周りやズリ仮置き場については仮設テントで覆い、防音仕様の仮囲いに吸音マットを取り付けた(写真-5)。

上記の対策による効果として、施工時の騒音測定により無対策に比べて18dBの低減効果を確認した。

(2) 補助工法の施工

a) 天端安定対策

天端安定対策としては前述のとおり、長尺鋼管フォアパイリングを採用した。

注入材に関しては、確実な地山注入改良効果を得る目的で設計のセメント系注入材をウレタン系注入材に変更した。

施工当初(パターン3)はL=12.5mの鋼管を9mピッチで37本(施工範囲160)打設していたが、ラップ



写真-4 掘削状況 (ロードヘッド)



写真-5 終点側坑口部 騒音対策

部分で天端の肌落ちが多く、天端が不安定になる状況が見られたため、パターン4(44本、施工範囲180°)では図-6に示すように、通常12.5mの鋼管長を1m長くして、L=13.5mの鋼管を5mピッチに半分(22本)打設することで切羽前方に千鳥にラップさせる多段式とした。

このことにより、天端からの肌落ちが少なくなり、サイクルの短縮にも寄与した。

b) 鏡面安定対策

長尺鏡ボルトは5本/1断面の計画であったが、トンネル出口側では亀裂の走向がすべり目となり、核が岩塊状にすべる現象が生じたため段階的に打設本数を増やし、最大で9本(3列)打設した。

c) 脚部安定対策

脚部対策としてレッグパイルを採用したが、片側3本/1間斜め前方に打設する必要があるため、鋼管同士の干渉が懸念されたため、打設位置と角度を決めるために鋼製ガイドを作成し、打設位置と方向を合わせることで作業の効率化に寄与した(写真-6)。また、頭部には反力キャップを設置して吹付けと一体化することにより押し抜きせん断破壊を防止した。



写真-6 レッグパイル打設状況

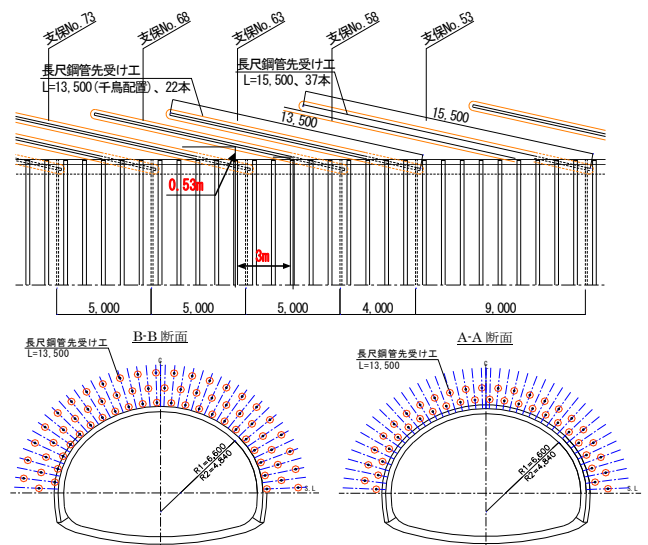


図-6 長尺鋼管打設パターン (多段式)

(3) 計測管理

a) 計測管理計画

前述のとおり、トンネル中間部の地表には送電中の高圧鉄塔および神社が近接しており、追加対策工を実施した後にこれらの近接構造物への影響を把握する目的で以下に示す追加計測を実施した（図-7）。

- ①鉄塔の根開き（水平変位，鉛直変位）（鉄塔基礎部）
- ②鉄塔の絶対沈下量（鉄塔基礎部）
- ③神社の絶対沈下量（周辺地盤部四隅）
- ④トンネル直上地盤の鉛直変位

図-8に示すとおり、トンネル直上及び鉄塔のラインに5mピッチで地表面沈下測定用の測点を設置し、鉄塔及び神社の基礎（4隅）には沈下測点（三次元測定用プリズム）を設けた。

また、地表面のすべり挙動を把握する目的で地すべり伸縮計を4測線設置し、地中の変位分布を確認する目的で地中傾斜計を2箇所設置した。なお、計測工の管理基準値が小さいため、近接構造物における計測器に関しては、鉛直には水盛式沈下計（分解能0.1mm）を、水平変位はワイヤー式変位計（分解能0.025mm）を採用した。

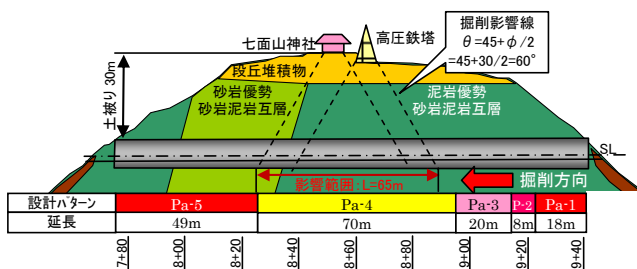


図-7 トンネル掘削による近接構造物 影響範囲

計測管理システムに関しては、自動計測システムを導入し、トンネル掘削時は、現場付近に設置する計測物置内のパソコンによる自動制御，自動収録するとともに、モバイル通信回線を使用して現場事務所へ計測データを転送することにより、常設モニターにて1回/時間の頻度でリアルタイムに変位量を監視する統合管理システムとした。これにより、掘削時の地表面への影響および管理値超過の有無を確認し、必要な追加対策を速やかに実施する情報化施工が可能となった。

なお、図-9に計測結果に基づく追加対策検討フローを示す。

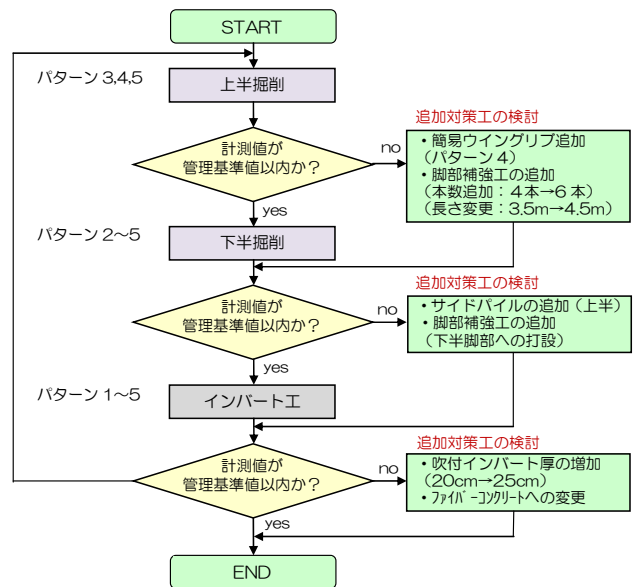


図-9 計測結果に基づく追加対策検討フロー¹⁾

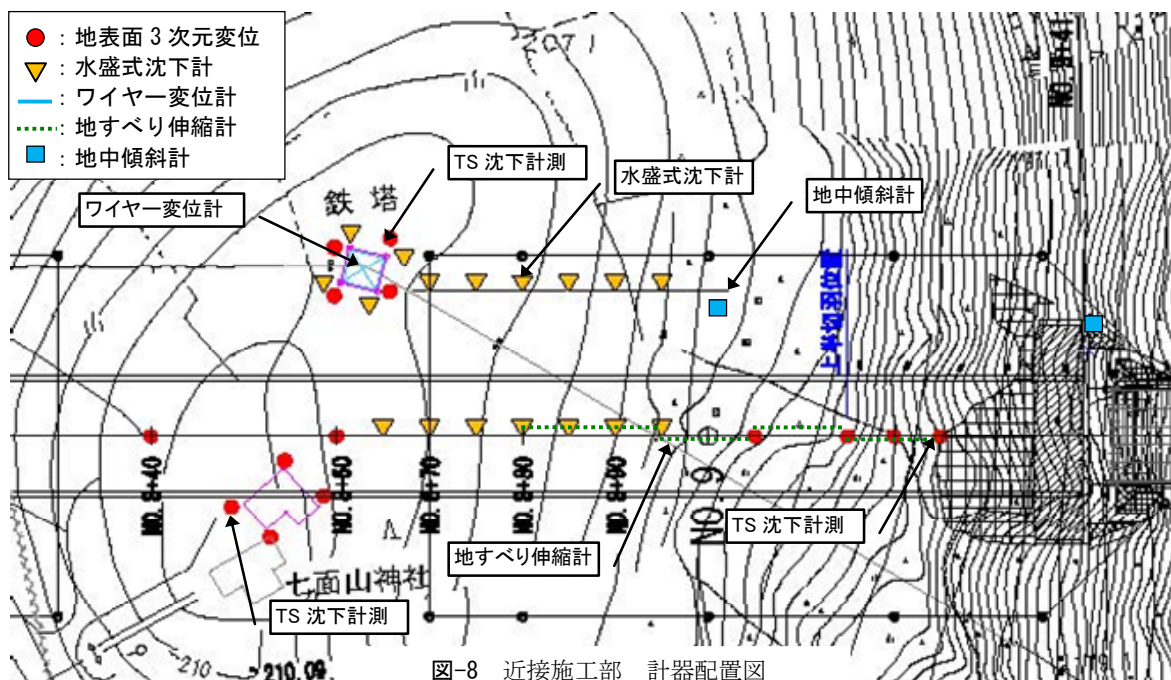


図-8 近接施工部 計器配置図

表-5に近接構造物における管理基準値一覧を示す。

なお、鉄塔基礎の根開き（相対変位）は、実測の鉄塔基礎頭部脚間の離れ $L=4.148\text{m}$ を考慮して求めた脚部間の相対変位である（鉛直1/1200, 水平1/800）。

b) 計測結果

i) 坑内計測結果

図-10に天端沈下と内空変位の相関（トンネル直上）を示す。本トンネルは、天端沈下が卓越した変位モードとなっていることが分かる。また、坑口斜面付近（パターン①～③）では、斜面の影響を受けて注意レベルⅢを超える大きな沈下量が発生しているが、近接区間（パターン④）では補助工法の効果により、トンネル直上の地表面沈下は50mm以下に収まっている。

ii) 地表面沈下測定結果

図-11に近接施工区間の経時変化を示す。先行変位は概ね3D（39m）付近から生じており、その後、切羽の進行とともに沈下量が増大し、インバート施工時の影響も最大で10mm程度発生している。

しかしながら、坑口部分では斜面の影響もあり、100mm程度の沈下量であったのに対して、絶対値では50mm以下で収まっており、補助工法の効果が確認された。

なお、切羽離れ2D以降は収束傾向が見られる。

表-5 近接構造物における管理基準値一覧

計測対象	計測項目	許容値	注意レベルⅠ 許容値の1/2	注意レベルⅡ 許容値の2/3	注意レベルⅢ 許容変位量
鉄塔	根開き 鉛直方向相対変位	3.5mm	1.7mm	2.3mm	3.5mm
	根開き 水平方向相対変位	5.2mm	2.6mm	3.4mm	5.2mm
	絶対沈下量	25mm	12mm	16mm	25mm
神社	鉛直変位	25mm	12mm	16mm	25mm

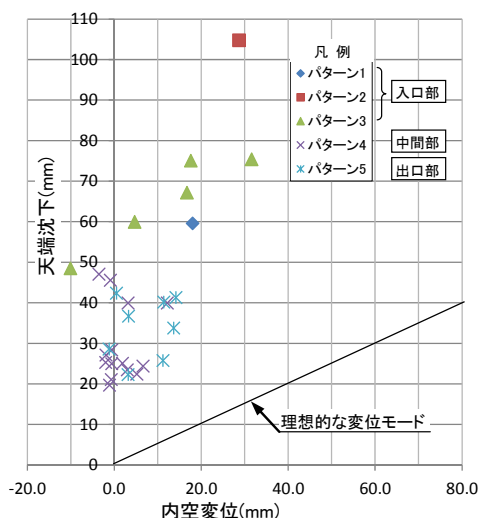


図-10 計測結果（天端沈下と内空変位の相関）

iii) 近接構造物

前述のとおり、トンネル直上の近接構造物に関しては、慎重な計測管理が必要となったが、鉄塔の根開き（相対変位）については、上半切羽が鉄塔直下の時に水平変位が最大で0.7mm（注意レベルⅠ以下）、鉛直変位が2.5mm（注意レベルⅡ～Ⅲ）となった。

なお、切羽の進行とともに相対変位も増大し、最大で3.4mm/3.5mmであった。

解析結果と比較すると、地表面沈下は、上半切羽が鉄塔直下の時点で、トンネル直上が21.3mm（実際）/25.3mm（計算）、鉄塔ラインが7.3mm（実際）/16.4mm（計算）であった。

図-12に施工時に導入した統合計測管理システムの結果（上半切羽：鉄塔直下）を示す。

(4) 新技術の適用

a) 安全の見える化

トンネル施工に伴う上部斜面の挙動をリアルタイムで監視し、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した（写真-7）。

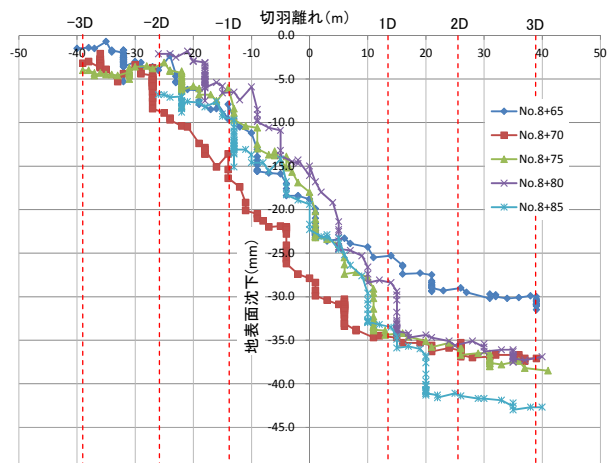


図-11 計測結果（地表沈下経時変化）

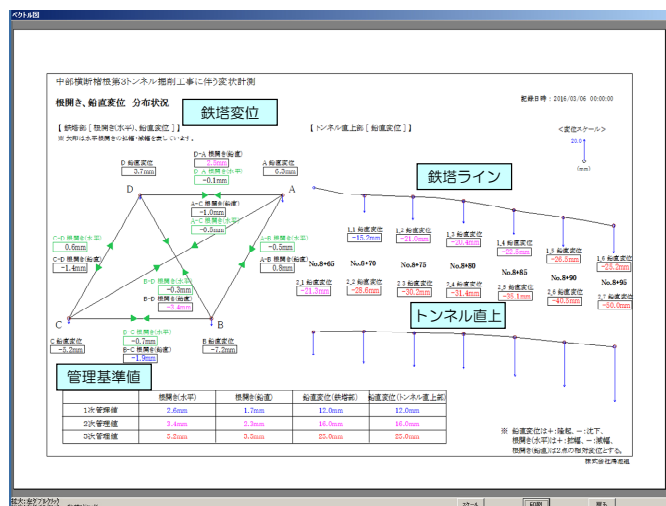


図-12 統合管理システム（上半切羽：鉄塔直下）¹⁾

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。また、トンネル坑内では、支保変状部や大型箱抜き部の施工時に変位を直接光の変化で把握できるように光る変位計を設置した。

ｂ）CIMによる切羽前方地質予測

既存の地質調査結果に加え、追加実施したトンネル全線にわたる水平ボーリングと鉛直ボーリングの結果に基づき、地質構造の推定を行い、三次元地質モデルを構築し、トンネル掘削時に得られた切羽状況により三次元地質モデルを随時修正することにより切羽前方の地質状況を把握することができた。

本トンネルの地山は、砂岩・泥岩の互層で設計に比べて全体的に脆弱な状態で、直上に小土被りで近接する鉄塔があったことから、切羽安定対策としての補助工法の適用範囲の判断に活用できた(写真-8)。

5. おわりに

トンネルの施工は2016年7月末現在、覆工コンクリートの施工中であり、L=136.5m完了している。

今回、施工時に脆弱な地山であることが判明し、補助工法を含むトンネル設計の見直しを行った。

その結果、小土被りで高圧鉄塔および神社に近接するという厳しい施工条件において、地山挙動に応じた適切な補助工法を選定し、綿密な計測管理に基づき施工を進めたことにより、近接構造物への影響(基準値内で収束)を最小限に抑えた施工ができた。

また、安全の見える化やCIMによる切羽前方地質予測といった新技術の適用により、工事中の安全性が向上した。今回の報告が今後の同種工事に参考になれば幸いである。



写真-7 安全の見える化実施状況

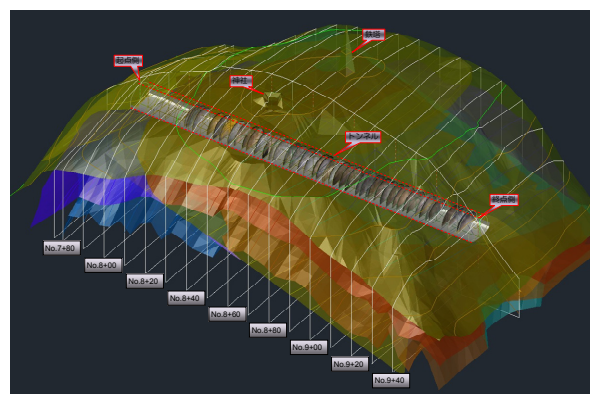


写真-8 CIM (三次元地質モデル)

参考文献

- 1) 山田浩幸, 安田裕輔, 村島雅征, 宮下邦彦: 脆弱地山での神社・鉄塔直下における補助工法の設計と施工に関する一考察, 第71回土木学会年次講演会, pp.829-830, 2016.

(2016. 8. 5 受付)

A STUDY ON DESIGN AND CONSTRUCTION FOR AUXILIARY METHOD OF THE TUNNEL WHICH APPROACHED A SHRINE AND STEEL TOWER AT FRAGILE GROUND

Hiroyuki YAMADA, Yusuke YASUDA, Masayuki MURASHIMA, Kunihiko MIYASHITA

Kazone 3rd tunnel is the part of the Chubu Crossing Highway which is being built at present and the length of the tunnel is L=165m. A shrine and a steel tower are approaching by about 30 m overburden.

The tunnel design was reconsidered based on a numerical value analysis result and consideration of auxiliary method(Early closure, leg reinforcement, long length steel pipe fore-piling, and long length face bolt) was conducted in a destination of stability of a face and influential prevention to an approach structure with change in the ground condition. The risk which is at the time of tunnel constructing by using careful measurement management and appropriate auxiliary method is evaded and tunnel excavation has been completed.