

小土被り・偏圧地形・近接施工の条件下の山岳トンネルの施工

(株)竹中土木 大阪本店 技術・設計部 正会員 ○鶴窪 誠司

(株)竹中土木 技術・生産本部 正会員 市川 晃央

(株)竹中土木 三日ノ浦トンネル作業所 木山 一成, 板東 稔治, 西尾 泰三, 上野 貴志

長崎県五島振興局上五島町支所 建設部建設課 高西 正人

1. はじめに

長崎県三日ノ浦トンネル工事の発進側（終点側）坑口は、脆弱な崖錐が流れ盤のように堆積し、坑口から20mの断層破碎帯部のトンネル直上約9.5mには供用中の国道384号が横断している。また、到達側（起点側）坑口から約50mは、沢地を埋戻した盛土の上に国道384号が横断している。国道384号は長崎県上五島町を周遊している主要幹線道路であり、路線バスやスクールバス、緊急車両が通行し、当該地域には迂回路はなく、トンネル掘削に伴う大きな沈下や崩落により車両等の通行不可や交通事故を発生させてはならない。そのため、国道の沈下抑制の基準値は20mmと厳しく、国道沈下を抑える対策工の計画およびリアルタイム計測管理が重要であった。また、民家や集落が近接することから周辺環境対策が重要であった。

2. 工事概要

工 事 名：一般国道384号道路改良工事

（（仮称）三日ノ浦トンネル）

発 注 者：長崎県五島振興局上五島支所

施 工 者：竹中土木・なかはら・大坪特定建設工事共同企業体

施工場所：長崎県南松浦郡新上五島町三日ノ浦郷～相河郷

工 期：2015年3月18日～2017年8月31日

工事内容：トンネル延長794m、内空断面積約56m²

掘削工法：NATM 機械掘削および発破掘削



図-1 施工位置図

3. 地形・地質の概要

トンネル施工地周辺の地層は五島層群であり、主に砂岩、泥岩、砂岩泥岩互層である。その基盤岩を覆って、山裾の斜面や谷地形部には崖錐が分布している。地質縦断面図を図-2に示す。

- ・発進側坑口部は、厚い崖錐を伴う流れ盤斜面であり、崖錐のN値は4～19程度の未固結な礫混じり粘土状であり、硬質の礫と粘土が混在する（写真-1）。また、国道の直下は断層破碎帯が分布し、破碎された悪い性状の地山である。（写真-2）
- ・到達側坑口部は、左右に沢地形が入り込んでおり、その沢地を埋戻した盛土は、粘着力は小さく、N値は3～6程度の礫混じり砂質粘土や礫混じり砂質シルトである。また、盛土の下層の花崗閃緑岩の表面部は沢水の影響により風化・軟質化されている。（写真-3）
- ・トンネルが掘削される地山の西側斜面には、崖錐が分布する緩やかな斜面が広がっており、この斜面付近には集落が点在している。（図-3）

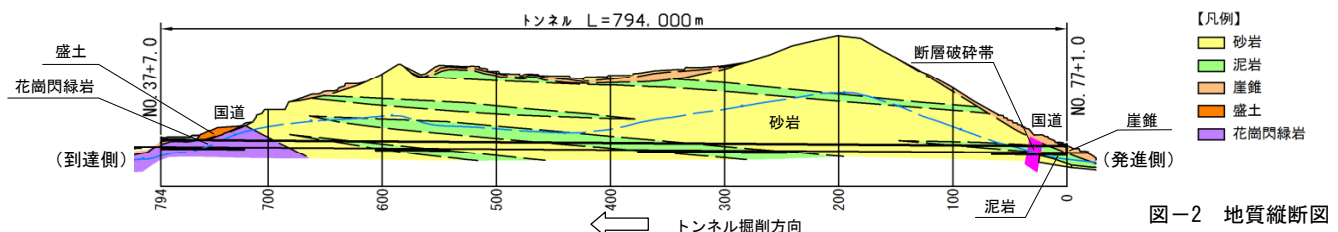


図-2 地質縦断面図

キーワード 山岳トンネル, 小土被り, 偏圧地形, 近接施工, 補助工法, 環境対策

連絡先 〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4丁目1-13 (株)竹中土木 大阪本店 技術・設計部 TEL 06-6252-4564

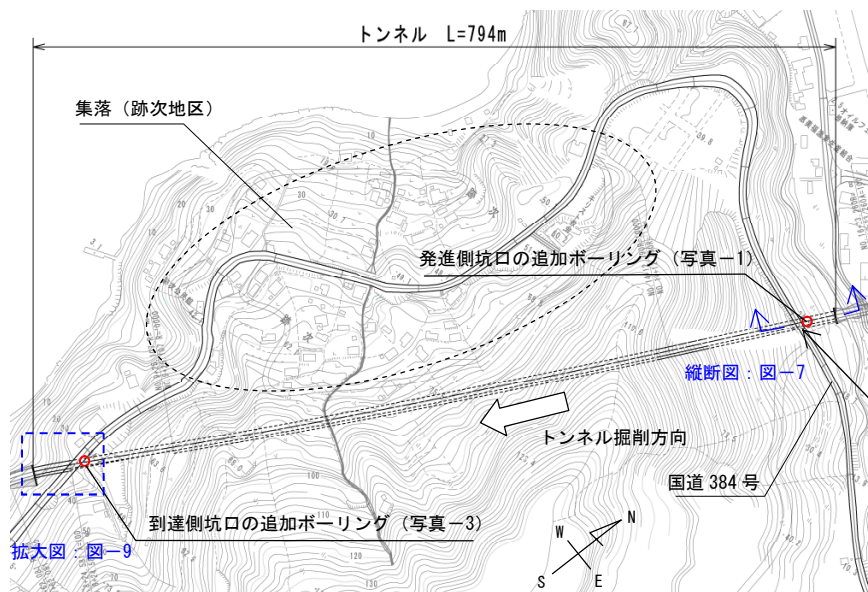


図-3 平面図および追加ボーリングの位置図

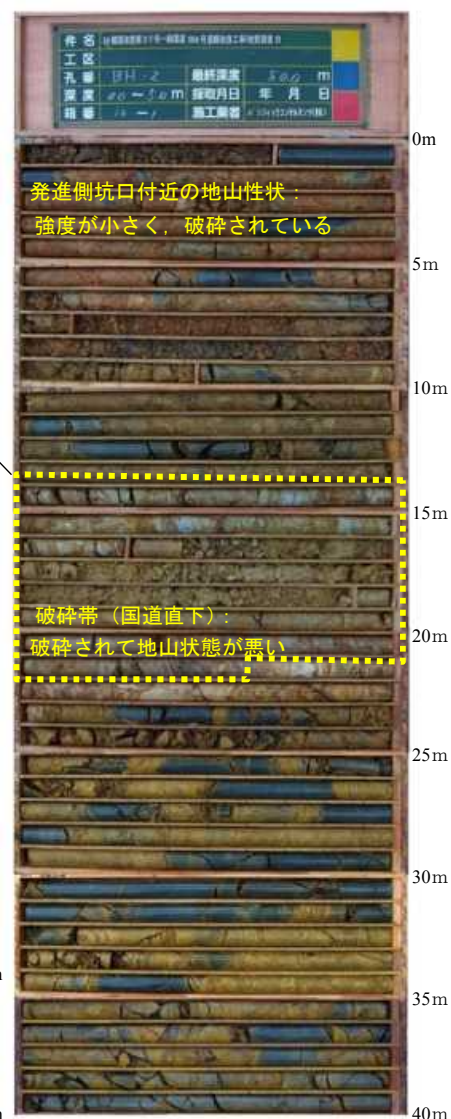


写真-2 発進側坑口の水平ボーリングのコア写真



写真-3 到達側坑口の追加ボーリングのコア写真



写真-1 発進側坑口の追加ボーリングのコア写真

4. 発進側坑口部のトンネル施工

発進側坑口部は、追加ボーリングの結果、当初よりも脆弱な礫混じり粘土主体の未固結地山であることが判明した (写真-1)。このことから、坑口切土の安定性に悪影響を及ぼすことが考えられた。また、トンネルと国道が交差している部分には断層破碎帯が分布しており (写真-2)、トンネル掘削に伴う地山のゆるみによる国道沈下が懸念された。そこで、以下の項目について対策工を検討した。

- ・ 坑口切土法面の安定対策
- ・ 坑口部のトンネル切羽の安定対策
- ・ 国道の沈下抑制対策

一部掘削した地山面 (写真-4) や追加ボーリングの結果 (写真-1) に基づき、坑口切土法面については、法面勾配を 1:0.5 から 1:0.7 に変更し、鉄筋挿入工 (ロックボルト) による斜面安定対策を計画した (図-4)。また、坑口部は、切羽安定照査により補助工法を計画し (図-5)、国道影響範囲は、FEM 解析²⁾により補助ベンチ付き全断面工法による早期閉合および補助工法を計画した (図-6)。



写真-4 発進側坑口の状況

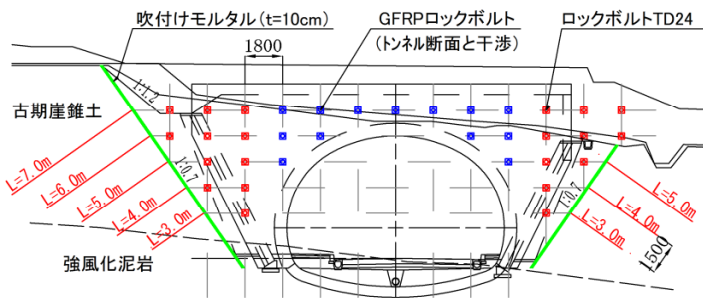
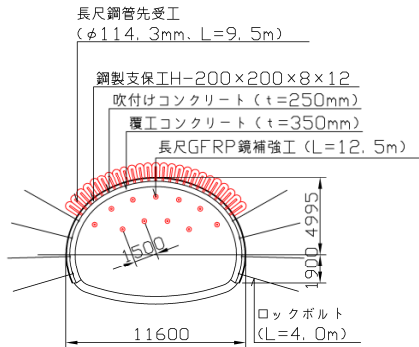


図-4 坑口切土の斜面安定対策工

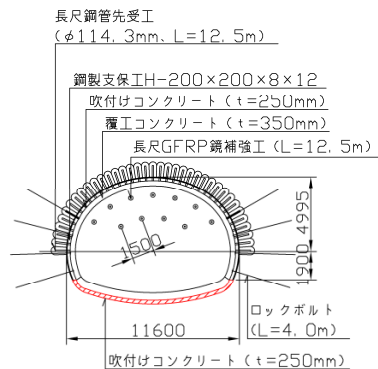


写真-5 早期閉合の施工状況



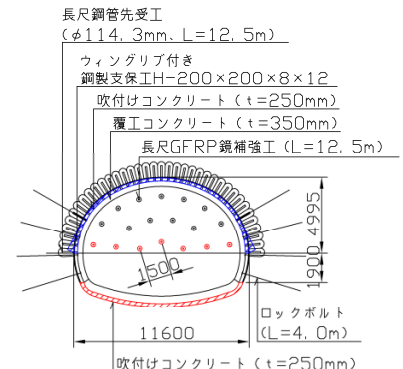
<A断面>

図-5 坑口部の断面図



<B断面>崖錐部

図-6 国道影響範囲の断面図



<C断面>断層破砕帯部

(1) 国道直下のトンネル施工における沈下抑制対策

国道の沈下抑制対策として、長尺鋼管先受け工と長尺鏡補強工の補助工法と補助ベンチ付き全断面工法による早期閉合を実施した。なお、ベンチ長は3mを基本とした。また、本区間の吹付コンクリートは、高強度吹付コンクリート（設計基準強度 36N/mm²、t=250mm）を施工し（写真-5）、鋼製支保工にはウィングリブ付きを採用し、支保工の足元にはコンクリート製の皿板を設置した。

(2) 計測工

トンネル掘削に伴う地中の先行変位を測定するために、国道の発進側坑口側に層別沈下計（写真-6）を設置し、地表面沈下を測定するためにトンネル掘削の影響範囲にプリズムを設置し、自動追尾 TS システムによるリアルタイム計測を実施した。（写真-7）

また、管理基準値による計測管理体制を計画することで、供用中の国道の不測の事態の未然防止に備えた。国道沈下の管理基準値は 20mm であり、FEM 解析による予測沈下量 17mm の 50% を 1 次管理値とし、75% を 2 次管理値、100% を 3 次管理値とした。

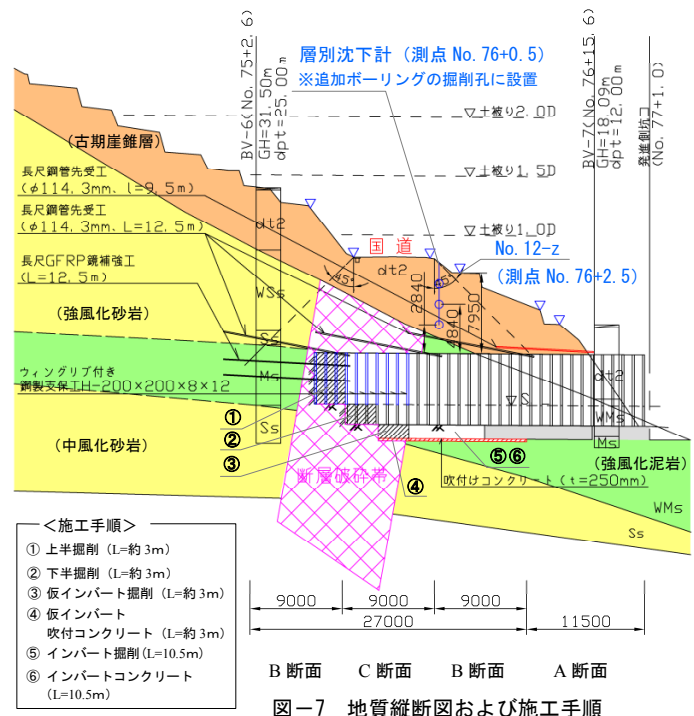


図-7 地質縦断面図および施工手順



写真-6 層別沈下計の設置



写真-7 国道の計測状況

(3) 対策工の効果

計測地点 No.12-Z（測点 No.76+2.5，土被り 7.95m）の地表面沈下は，切羽到達までに約 3mm の先行沈下が発生し，仮インバートにより閉合するまでに約 7 mm 沈下した．早期閉合することで，その後の沈下傾向は緩やかになり，収束に向かい，1 次管理値を超過した程度で収めることができた（図－8）．

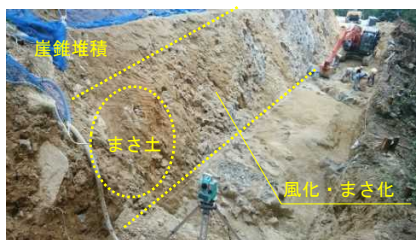
5. 到達側坑口部のトンネル施工

到達側坑口付近のトンネル区間は，風化花崗閃緑岩により形成された沢地に盛土を造成した土地であり，国道がトンネル掘削方向と約 40 度の角度で交差している（図－9）．

また，ブロック積擁壁の基礎コンクリートがトンネル掘削により一部欠損する状況であり，擁壁の変位に伴い擁壁背面の盛土にゆるみが生じ，国道の安定性，道路交通に悪影響を及ぼすことが懸念された．さらに，擁壁の坑口側は，風化花崗閃緑岩の上層に大小様々な転石が混入した未固結土が堆積しており（写真－8），坑口から 75m の地形・地層構成，地質性状を的確に評価し，最適な対策工を計画することが重要であった．そこで，以下の項目について対策工を計画した．

- ・ 坑口部の切羽の安定対策
- ・ 国道の沈下抑制対策

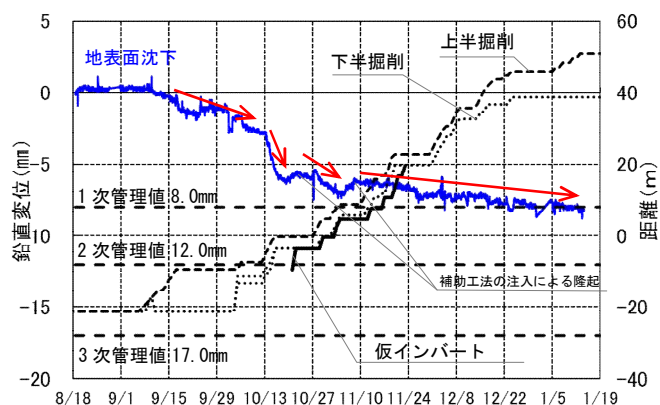
抱き擁壁施工時の掘削法面の性状（写真－9）や追加ボーリングの結果（写真－3）を考慮した補助工法の修正設計を実施した．



写真－9 抱き擁壁掘削法面

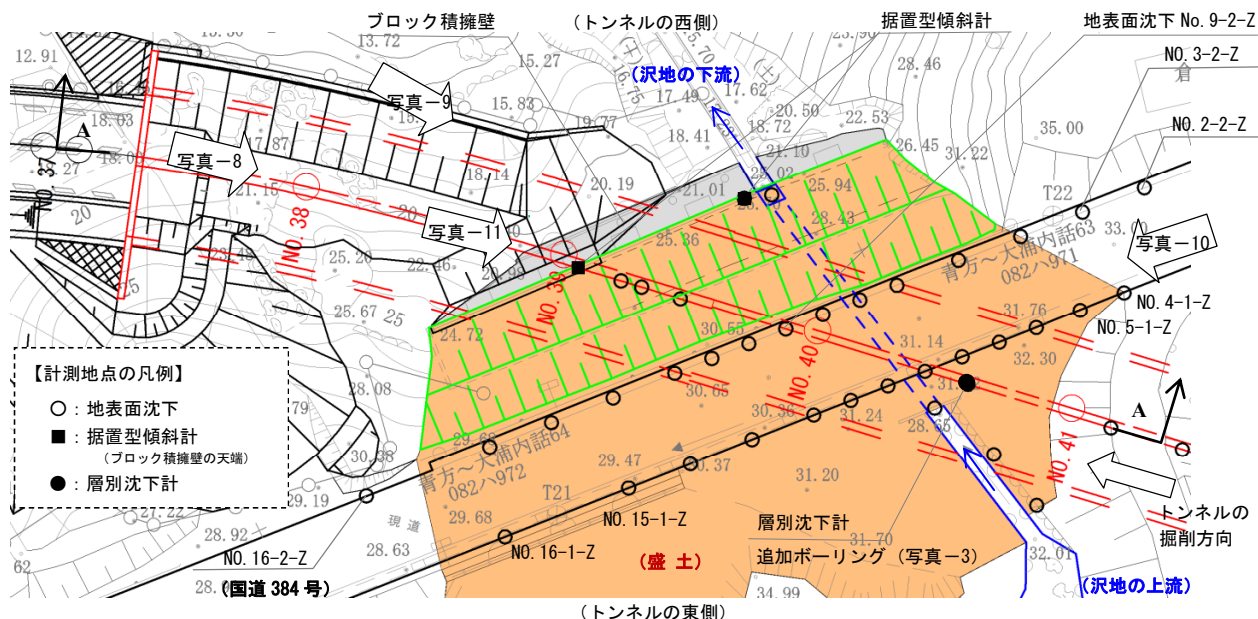


（上）伐採後掘削前、（下）抱き擁壁掘削前
写真－8 到達側坑口の転石の混入状況



図－8 地表面沈下（No. 12-Z）の計測結果

また，ブロック積擁壁および国道の計測計画を実施し，坑口部は，切羽安定照査により補助工法を計画した．



図－9 到達側坑口付近の平面図および計測地点の配置

※A-A 縦断面：図－10，図－11

(1) 国道直下のトンネル施工における沈下抑制対策

到達側坑口部のトンネルは、土被り 10.8m で国道直下を掘削する。追加ボーリングにより、地層構成と盛土と風化花崗閃緑岩の変形係数を確認し、国道の沈下影響を検討した。

a) 追加調査結果による詳細な地層構成の把握

当初、既往ボーリング BV-1 (図-10) により、国道直下の地質を上層から盛土層、崖錐堆積層、花崗閃緑岩 CM 級、風化花崗閃緑岩 CL 級、花崗閃緑岩 CM 級が分布していると想定していた。追加ボーリングの結果、盛土は、当初よりも脆弱な礫混じり粘土主体であり、トンネル天端付近の地山は風化花崗閃緑岩 D 級であることが判明した。当初の地質縦断面図を図-10 に、追加調査後の地質縦断面図を図-11 に示す。また、当初設計時と追加調査後の土質および変形係数の比較を表-1 に示し、主な相違点を以下に記す。

- ・ 国道下の盛土は、当初、想定していた変形係数の 2 分の 1 程度の変形係数であった。
- ・ 崖錐堆積層の直下層の花崗閃緑岩は D 級であった。
- ・ 風化花崗閃緑岩 CL は、当初、想定していた変形係数の 10 分の 1 程度の変形係数であった。

表-1 国道直下の土質および変形係数の比較

No.	当初設計時		追加調査後	
	地 質	変形係数 (MN/m ²)	地 質	変形係数 (MN/m ²)
1	盛土	3.5	盛土、溪床堆積層	1.9
2	崖錐堆積層	3.0		
3	花崗閃緑岩 CM	1000	風化花崗閃緑岩 D	30
4	風化花崗閃緑岩 CL	250	風化花崗閃緑岩 CL	30
5	花崗閃緑岩 CM	1000	花崗閃緑岩 CM~CH	1000

b) 国道の沈下影響の検討

追加調査の結果、トンネルの直上には当初設計時に想定していた強度よりも弱い風化花崗閃緑岩 D 級、CL 級が分布しており、トンネル掘削に伴う国道沈下の影響が懸念された。そこで、地層の変化と変形係数を考慮して補助工法を修正設計した。FEM 解析の国道沈下の予測値が管理基準値 20mm を超過する区間には、長尺鋼管先受工 (AGF-Tk 工法：端末管事前撤去型 AGF 工法) を計画した。修正した補助工法の配置図を図-11 に示し、当初設計の補助工法に対する修正設計の内容を表-2 に示す。

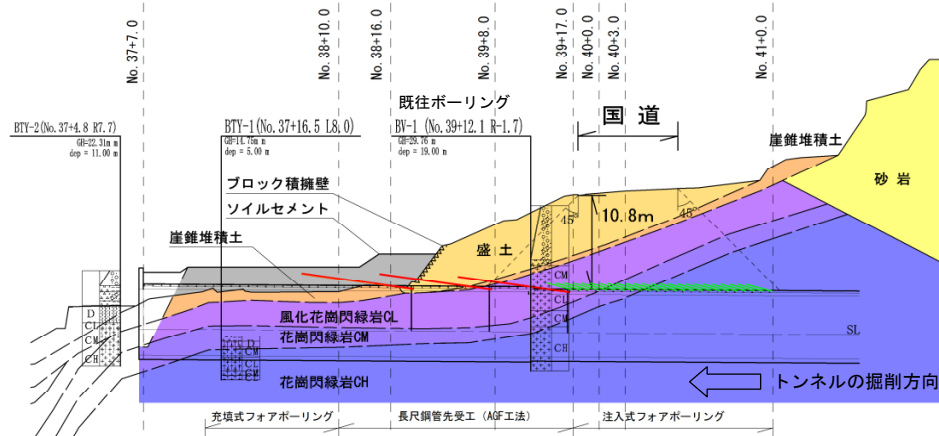


図-10 当初設計時の地質縦断面図および補助工法の配置図

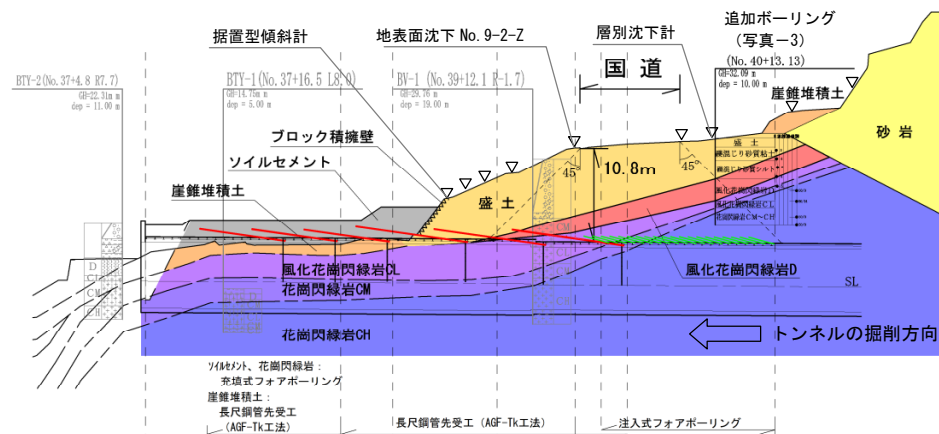


図-11 追加調査後の地質縦断面図および補助工法（修正後）の配置図

表-2 当初設計の補助工法に対する修正設計の内容

当初	測点	No.37+7.0～No.38+10.0	No.38+10.0～No.39+17.0		No.39+17.0～No.41+0
	補助工法	充填式フォアポーリング	長尺鋼管先受工（AGF 工法） 3 シフト 27m		注入式フォアポーリング 23 シフト 23m
修正	測点	No.37+7.0～No.38+10.0	No.38+10.0 ～No.38+16.0	No.38+16.0 ～No.40+3.0	No.40+0～No.41+0
	補助工法	・ソイルセメント、花崗閃緑岩の範囲： 充填式フォアポーリング ・崖錐堆積土の範囲： 長尺鋼管先受工（AGF-Tk 工法※）	長尺鋼管先受工 （AGF-Tk 工法※） 1 シフト 6m	長尺鋼管先受工 （AGF-Tk 工法※） 3 シフト 27m	注入式フォアポーリング 20 シフト 20m
	代表断面図				
備考	トンネルの掘削方向				

※ AGF-Tk 工法：端末管事前撤去型 AGF 工法（NETIS No.CB-150001-A）

(2) 計測工

発進側坑口と同様に、地中の先行変位と国道の地表面沈下を自動追尾 TS システムによりリアルタイム計測を実施した（写真-10）。また、トンネル掘削に伴い擁壁が変位した場合、擁壁と連動して背面の盛土にゆるみが発生し、国道の沈下影響を及ぼす懸念があったため、擁壁天端に据置型傾斜計を設置し、盛土にはプリズムを設置し、計測を行った

（写真-11）。また、管理基準値による計測管理体制を計画することで、供用中の国道の不測の事態の未然防止に備えた。国道沈下の管理基準値は 20mm であり、基準値の 50% を 1 次管理値とし、75% を 2 次管理値、100% を 3 次管理値とした。

(3) 対策工の効果

計測地点 No.9-2-Z（測点 No.39+17.0、土被り 10.8m）の地表面沈下は、上半切羽が測点 No.40+1（計測地点の 4m 手前）付近から沈下が始まり、切羽が計測地点の直下に到達するまでに約 6mm の先行沈下が発生した。さらに、上半切羽が計測地点の直下を通過後も沈下は進み、6m 進んだ段階で 11mm 程度に収束する傾向になった（図-12）。

しかしながら、測点 No.39+8.0 付近の上半掘削の段階で、右側面部から想定外に出現したもたれ擁壁の裏込め砕石が坑内に流出し（写真-12）、地表面沈下は 20mm 程度まで進行した。そこで、地表面沈下を抑制するために、裏込め砕石の流出防止対策、天端安定対策、切羽安定対策（表-3）を追加し、最終沈下量を 30mm 程度で収束させることができた。

図-13 に、国道の坑口側の地表面沈下の計測結果（No.1-2-Z～No.16-2-Z）を示す。

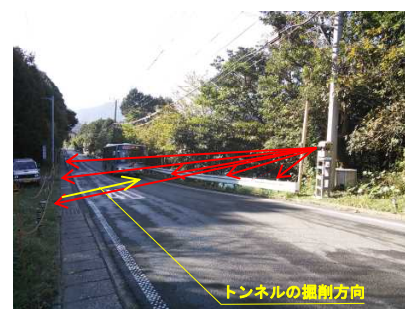
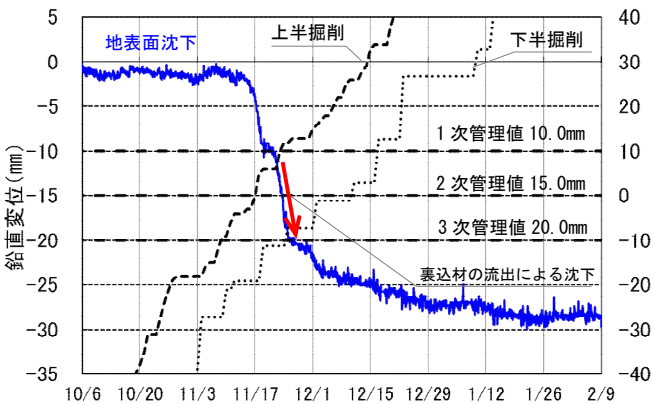


写真-10 国道の計測状況

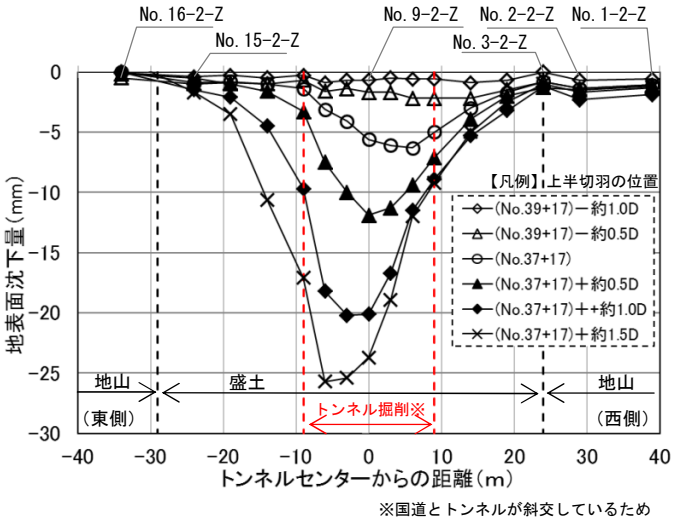
写真-11 ブロック積擁壁および
国道盛土の計測状況

写真-12 もたれ擁壁の裏込め砕石の流出状況（測点 No. 39+8 付近）

国道とトンネル掘削方向が約 40 度の角度で交差しており、トンネル西側の計測地点が東側の計測地点よりも先に切羽に近づくことから、トンネル西側の地表が先行沈下する傾向であった。また、トンネル掘削範囲から離れた計測地点 No.1-2-Z～No.3-2-Z, No.16-2-Z は地山の上に設置した計測地点であり沈下量が小さいが、盛土部分は沈下量が大きく発生していることがわかる。



図－12 地表面沈下（No. 9-2-Z）の計測結果



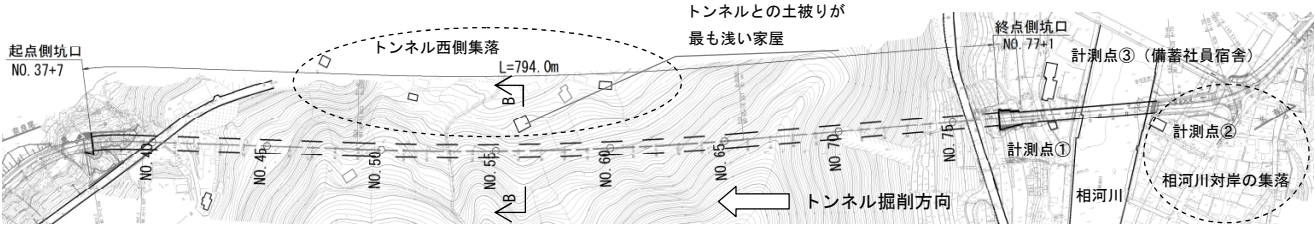
図－13 地表面沈下（No. 1-2-Z～No. 16-2-Z）の計測結果

表－3 もたれ擁壁の裏込め砕石の流出に対する沈下抑制対策

測点	No.38+18～No.39+6	No.39+0～No.39+4	No.39+4～No.39+10	No.39+2～No.39+8
施工場所	天端	切羽 (裏込め砕石が存在する範囲)	右肩	右側側面 (裏込め砕石が流出した箇所)
対策	空洞充填による天端安定対策	切羽安定対策	ゆるみ領域の地山安定対策 および空洞充填対策	裏込め砕石の流出防止対策 および空洞充填対策
補助工法	注入式フォアポーリング, L=3m 13.25 本/断面×8 断面=106 本	注入式 GRP 鏡補強バルト, L=3m, 16 本	注入式フォアポーリング, L=3m (打設角度 60 度), 12.5 本/断面×6 断面=75 本	長尺鋼管先受工 (AGF) 工法, L=6m, 4 本
施工状況				
備考	トンネルの掘削方向			

6. 周辺環境対策

トンネルと近接した集落の位置関係を図－14 に示す。トンネルのほぼ全線にわたって、住居等の保安対象物件が点在している。発進側坑口より 80mの地点から到達までの 714mの区間は発破掘削を行う計画であり、発破による発進側坑口付近の集落やトンネルの西側集落への悪影響が懸念された。なお、騒音の管理目標値は、昼間は 100dB、夜間は 70dB であった。



図－14 トンネルと近接した集落の位置関係

※B-B 断面図：図－15

(1) 発進側坑口付近の集落への対策

発破騒音が坑口付近の周辺集落の生活環境に悪影響を及ぼすことが懸念された（写真－13）。そこで、坑口付近に二重の防音扉等（表－4）を完備することで、周辺集落への騒音影響を低減する計画とした。発破初期段階には、計測地点①の騒音レベルは 100dB、計測地点②は 85dB、計測地点③は 74dB であり、昼間発破による施工を行った。その後、騒音レベルが 70dB 以下に低減することを確認し、昼夜発破による施工を開始した。



写真－13 発進側坑口の近接した集落

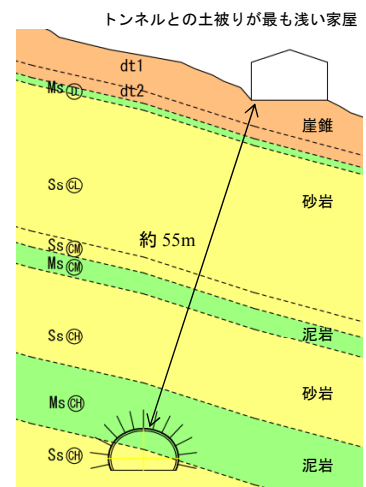
表－4 発進側坑口付近の防音設備

対策	防音扉の二重化による発破騒音の低減		敷鉄板による ダンプ走行 騒音の低減	仮囲い、 As 舗装 による工事 騒音の低減	防音壁による工事騒音の低減	
設置場所	坑内	発進側坑口	坑口前 0～30m	坑口前 20m～70m	坑口前 70m～130m (橋の上)	坑口前 130m～190m (相河川の対岸)
設置状況						
備考	トンネル掘削方向					

(2) トンネル西側集落への対策

西側集落はトンネルに近接して点在しており、トンネル発破が地山を伝達して西側集落の生活環境に悪影響を及ぼすことが懸念された。そこで、発破初期段階（TD80m）に、試験発破により、DS 電気雷管、導火管付き雷管（i-ded）、電子遅延式電気雷管（EDD）の騒音レベルおよび振動レベルを測定し、近接した家屋とトンネルの離隔の関係から各家屋の騒音レベル、振動レベルを推定した。

トンネルとの土被りが最も浅い家屋（測点 No.56+3 付近、図－15）について、夜間の管理目標値 70dB を確保するために、導火管付き雷管（i-ded）による発破掘削を行った。騒音レベル、振動レベルとも 60dB 程度であり問題のない値だった。



(B-B 断面)

図－15 近接した家屋とトンネルの位置関係

7. おわりに

発進側、到達側坑口の国道直下の低土被り掘削について、事前に追加調査を実施し、解析等を用いた評価により、最適な対策工を計画した。さらに、地中変位や地表面沈下のリアルタイム計測により、地山の挙動を捉えながら施工した。また、防音扉の二重化、坑口付近の防音壁や制御発破等の環境保全対策を実施した。これらの対応により、住民の生活基盤である国道の安全性や近接した集落の生活環境を確保しながら、無事にトンネル掘削を完了することができた。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006.7
- 2) 真下英人・水川雅之・日下敦：トンネル早期閉合効果に関する解析的検討，トンネル工学報告集第 17 巻，pp.35-41，2017.11
- 3) 勝田つかさ・大島基義・川田淳：小土被り未固結砂礫土層を上下線近接で掘る一新名神高速道路 神峰山トンネル，第 76 回施工体験発表会（山岳），日本トンネル技術協会，平成 27 年 6 月