

# 低土被り区間のトンネル施工の問題と対策

## くまさか —熊坂トンネル—

九州支店	土木工事部	大塚 正
東京土木支店	土木工事部	伊東高士
東京土木支店	土木工事部	太田有一
大阪支店	土木工事部	小林正憲

**概要：**熊坂トンネルは、上信越自動車道 豊田飯山 IC～信濃町 IC 間の四車線化に伴い建設されるトンネルである。本トンネルの特徴は、①新潟県側坑口から 200m 付近に最小土被り 6.6m の低土被り区間（土被り 2D（D:掘削径）以下を指す。）が出現する。②地質年代が新しく、地質構成が複雑である。③供用中の I 期線との最小中心離隔が 30m の近接施工の 3 点が挙げられる。本工事の低土被り区間切羽安定対策は、当初設計では全区間、充填式フォアパイリングによる先受け工であったが事前調査・検討で I 期線への影響を抑制するため最小土被り部の切羽安定を更に図る必要がある結果となった。対策として先行変位・地表面沈下抑制効果を併せ持つ注入式長尺鋼管フォアパイリング（AGF 工法：All Ground Fasten）を提案の主軸として、その他の追加補助工法も含め、切羽評価と多様な計測手法を活用し安全性・経済性を追求したトンネル施工に取り組んだものである。

**Key Words：**低土被り，NATM，AGF，近接施工，グラウンドアーチ，NJD

## 1. はじめに

熊坂トンネルは、図-1 および図-2 に示すように長野県中野市北西部に位置する斑尾山南山麓の標高 500m 付近を東西方向に通過する延長 801m の II 期線トンネルである。地質は、図-3 に示すように新第三紀層の大川層および第四紀層の飯綱火砕岩層からなりほぼトンネルの中間地点が層境となっている。岩相は、砂岩・礫岩・泥岩およびそれらの互層・凝灰岩が主体である。地層は、ほぼ全線に亘りトンネル軸に対して 45° の方向に延び（走向）、傾斜は 80°程度と著しく褶曲している。当初設計では、トンネル施工に重要な地山判定基準となる弾性波速度は 0.5～2.3km/sec と遅く、地山固結度が低いことを示しており、トンネル施工では難航が予想される D 地質と判断している。掘削工法は NATM(New Austrian Tunneling Method)の上半先進ベンチカット工法である。

本トンネルの低土被り区間は、延長 70m で弾性波速度 0.5～1.8km/sec の大川層の風化帯に位置する。掘削状況から判断して、そこではトンネル掘削時にグラウンドアーチの効果（周辺地山の支保効果）が期待できず、また II 期線掘削に伴う地山緩みが I 期線へ作用する影響が懸念されたために当初設計の先受け工を照査した。本稿では、追加変更した掘削方法・支保構造・補助工法を採用する過程で抽出した問題点および実施工にあたり実施した対策、計測手法の選定・計測結果の施工へフィードバックした結果について報告する。



大塚正



伊東高士



太田有一



小林正憲

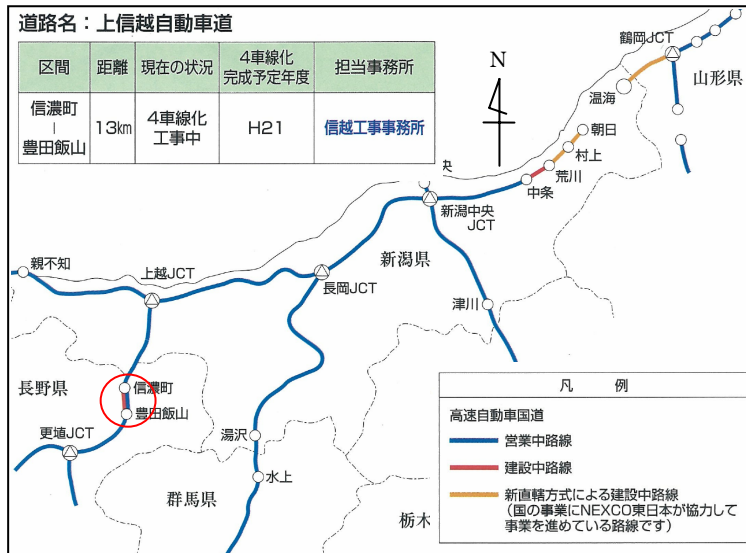


図-1 新潟支社管内建設路線図

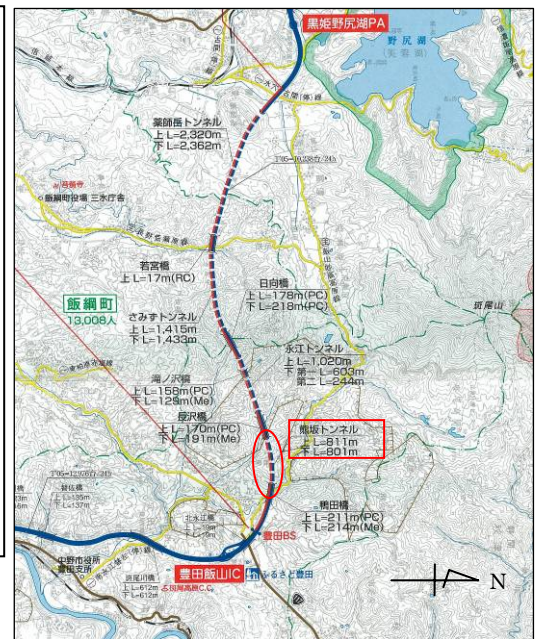


図-2 熊坂トンネル位置図

2. 概要

本トンネル工事の概要を以下に示し、地質平面縦断図を図-3に示す。

工事名	上信越自動車道 熊坂トンネル工事
工事場所	長野県中野市大字永江地内
発注者	東日本高速道路株式会社 新潟支社
施工者	(株) ピーエス三菱・北野建設 (株) 共同企業体
工事内容	延長 L=974m トンネル (機械掘削: 最大掘削断面積 104.8m <sup>2</sup> ) 延長 801m 本線土工 174m , 下部工 (橋台) 1基
工期	平成 17 年 6 月 22 日 ~ 平成 19 年 12 月 8 日

低土被り区間の概要

種別	当初	変更
インバート コンクリート	インバートコンクリート(50cm)	1次吹付けインバート(15cm) +インバートコンクリート(35cm)
補助工法	充填式フォアパイリング @19.5本/m (D25 L=3m ΣN=1,365本)	注入式長尺鋼管フォアパイリング @19本/1シフト (φ114.3 L=12.5m ΣN=57本) 充填式フォアパイリング @19.5本/m (D25 L=3m ΣN=1,122本)
地質調査工	なし	ボーリング (N=2孔 L=14m, L=9m)
地下水等対策工	なし	水抜きボーリング(φ75 L=24m ΣN=8本) 地表面水の排水トレンチ
計測工	II期線内空変位	II期線内空変位, I期線内空変位 地表面沈下, 地中変位観測, 地下水位測定





### 3.2 熊坂トンネル施工実績 (I期線およびII期線既施工部) から類推される問題点

①I期線坑内調査結果より低土被り部には覆工コンクリートアーチ部・側壁部では縦断方向にクラックが確認できる。また付近にはトンネル横断方向にもクラックがあり、湧水がある。変状状況写真を写真-1に、低土被り部覆工コンクリート調査結果を表-1に示す。

このような状況から覆工背面の地盤劣化が考えられるため掘削で発生した緩みがI期線へ達した場合、覆工変状がさらに進行する可能性がある。

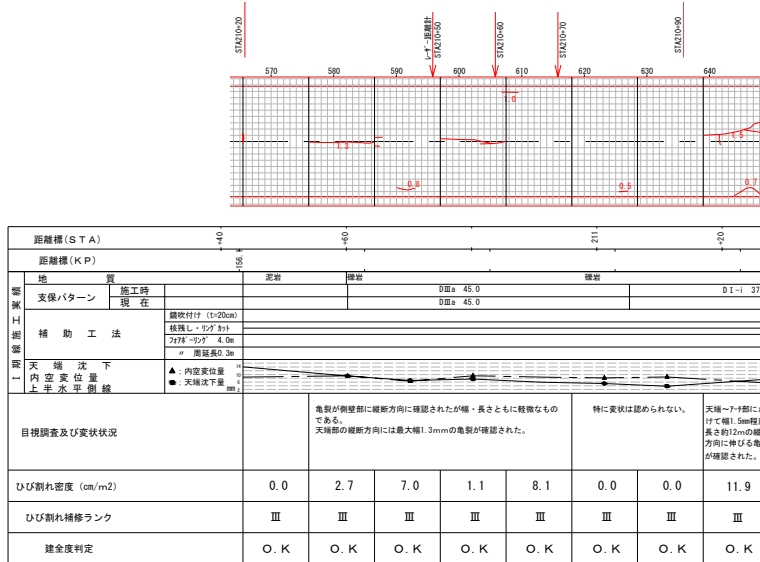


表-1 I期線低土被り区間の覆工調査結果



写真-1 I期線覆工変状状況

②I期線掘削施工中において大川層の砂質シルト岩層で天端崩落が発生している。同地層の出現が予測される低土被り区間では崩落に繋がる可能性がある。

③着手前に実施したボーリング調査結果から地山の風化が顕著な未固結地山と判断できる。沢底部は崩落土により埋積しており真の土被り (トンネル天端上方の地山厚) が 4m 程度である。さらに地下水位はトンネル天端から+3m 上方に位置し、地下水位内での掘削となり集中湧水等の厳しい地質条件下にあり I期線崩落の再現が懸念される。

④地形から考察すると、I期線と同様に低土被り部は U 字形の沢地のため、降水時の地表水が浸透し易く、トンネル施工時の切羽へ直接影響し安定を損なう危険性がある。

⑤沢部がトンネル横断方向に傾斜しているため偏圧を受けやすい状況下にあり、その点も I期線同様の問題である。

### 3.3 土被りが小さくグランドアーチの期待し難い地山の問題点

①グランドアーチが期待できないためトンネル掘削時に発生する周辺地山の緩み領域が拡大し地表面に達する大きな緩み荷重となった場合、トンネル覆工に著しい土圧がかかると同時に、地表面陥没が発生する可能性が極めて高い。

②切羽の自立性不良による掘削作業の危険性。

## 4. 低土被り区間対策工の施工方針

以上の各問題点から「II期線の地山を掘削で必要以上に緩ませたり、崩落等が発生させた場合、低土被りの不安定な地山応力状態では I期線へ影響が及ぶ」と判断し、問題を未然に防止するためには「地下水の影響も含めたトンネル地質予測と状況に応じた対応策の比較検討と選定」を予め行うことが重要という結論に達した。そのため補助工法の採用方針は、II期線の進行毎に評価する切羽状況・地質状況に計測結果、切羽前方の地質予測およびI期線の地質・変位データを総括的に判断し安全性を十分に確保した上でコスト面でも効果的な補助工法を実施する方針とした。

4.1 掘削方法・補助工法

掘削方法，補助工法については，地質予測，切羽鏡面安定，地表面沈下・内空変位の変位抑制対策を組み合わせ対処する．組み合わせ施工例の概念図を図-5に示す．

地質予測方法

- ① 水抜きボーリングを実施する際，削岩機の削孔速度および排出スライムから地山の硬軟および地質を判定する．
- ② ボーリングを沢中心線上で，II期線軸の上流部と下流部の2箇所実施し，既設ボーリングデータとI期線データ（表-2）も併せて地質予測の基礎データを取得する．

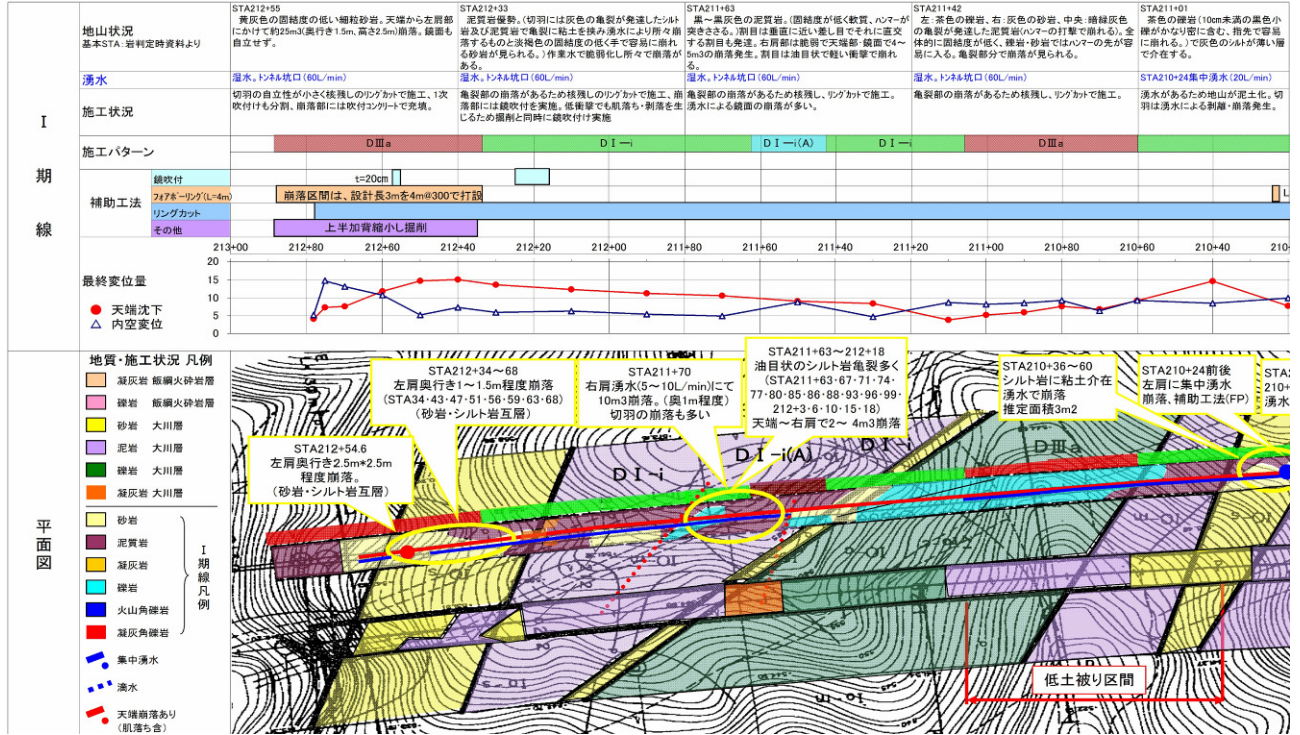


表-2 I期線施工時データ

切羽鏡面安定対策

- ① 切羽の安定性を図るために，リングカットを採用し，切羽状況により高強度吹付けコンクリートを使用した鏡吹付けを行う．
- ② ロックボルト，フォアパイリング施工時に使用する削孔水は，1サイクルあたり最低5m<sup>3</sup>は使用する．切羽に直接作用する使用水量を減らすことが切羽への悪影響の回避に繋がるためNJD（Non Jamming Drilling）工法（泡削孔）を使用する．
- ③ 高強度吹付けコンクリート（表-3）の1次吹付けの採用で初期材齢強度を高め拘束性の向上による切羽安定対策および変位抑制を複合的に図る．
- ④ リングカット・鏡吹付けコンクリートだけでは切羽崩落が進行する場合，注入式鏡ボルト（FBE工法：Face Bolt for Environment）を追加し，切羽鏡面の安定性向上を図る．
- ⑤ 注入式フォアパイリングによる部分的な地山不良箇所の限定改良．

凡例・基準強度

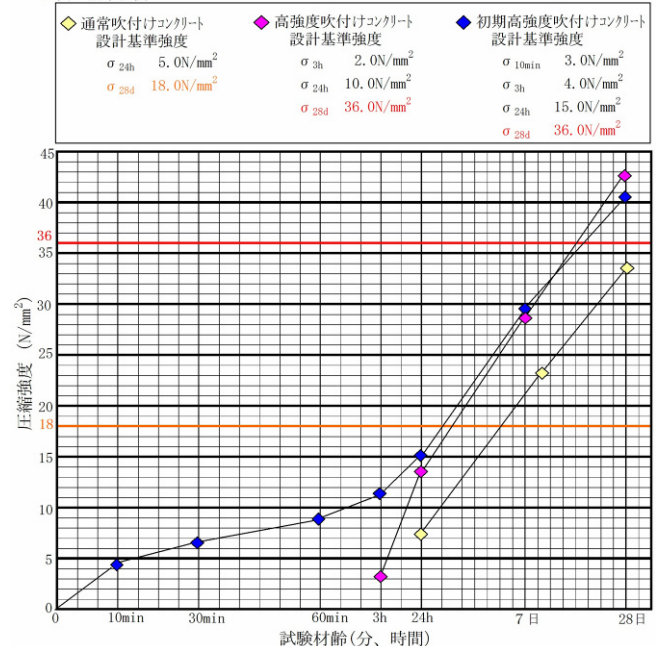


表-3 吹付けコンクリートの若材齢強度



### 地表面沈下・内空変位の変位抑制対策

- ① 注入式長尺鋼管フォアパイリング (AGF) による先受けで先行変位抑制・緩み土塊の支持・崩落抑止を図る。地質・地下水状況を考慮しつつ最小施工量は3シフトと考え変位状況が管理基準値 II (表-5 参照) を超える場合は追加打設を行う。
- ② インバートを施工する際、上半掘削時の天端沈下・内空変位の初期変位速度が大きく、管理している変位推定式 (表-8 参照) と違う状況を示した場合高強度吹付けコンクリート (t=15cm) による当該区間の早期閉合を行う (吹付けインバート)。但し、初期変位速度が通常パターンと判断できた場合においても通常吹付けコンクリート (t=15cm) で早期閉合を図る。
- ③ 天端沈下、内空変位の初期変位速度が大きく、通常の変位推定式と違う状況を示した場合、高強度吹付けコンクリートによる上半仮吹付けインバート (t=15cm) で支保沈下抑止を図る。

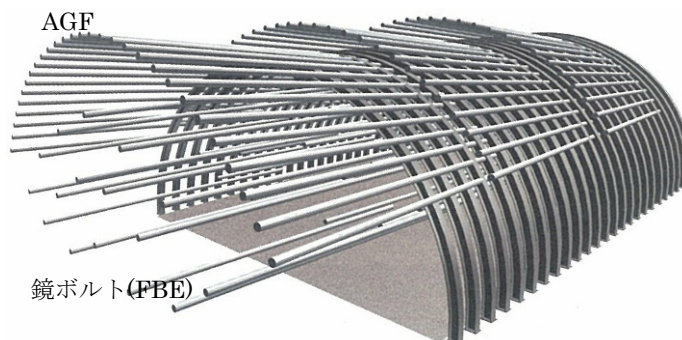


図-5 AGFと鏡ボルトの施工概念図(ジェオフロンテ研究会 補助工法選定上の要点より)

## 4.2 地下水位対策工

可能な限り低土被り区間の地下水位を施工前に低下させ、トンネル掘削時の湧水影響を低減することが必要。

- ① 切羽前方へ水抜きボーリングを実施し事前に水位低下を図る。
- ② 沢部滞水箇所への排水トレンチ設置による地表水の浸透軽減を図る。

## 4.3 計測工

トンネル施工にあたり計測工は、周辺地山の挙動把握、実施している支保構造の効果や妥当性の判断、I期線トンネルなどへの影響を把握することなどトンネルの安定性を確認するために必要性が非常に高いものであり、表-4の方針で進めた。

表-4 計測工

観測項目	数量	観測内容	備考
II期線坑内変位観測	5m 毎	坑内天端沈下・内空変位を5m 間隔で2回/日計測。	3次元計測
地表面沈下観測	53箇所	5m メッシュのグリッドを基本形として、各交点の測量を行い、掘削に伴う地表面沈下および水平変位を経時的に計測。	3次元計測
地下水位変動観測	5箇所	沢底中軸となる STA210+60 ラインにそって、II期線を跨ぐ形で地下水位観測を経時的に計測。併せて降水量観測を実施し、地下水変動の基礎資料も収集。	
地中変位観測	1孔	I・II期線の間中に設置し、孔内傾斜計により微量な地中変位を経時的に計測。II期線掘削によって生じる地中変位が直接的にI期線に影響を与えているかを判断する。	孔内傾斜計
I期線内空変位観測	3箇所	I期線への影響を直接的に監視するためにI期線側壁に設置したレーザー距離計で経時的に覆工コンクリートの挙動を計測。	自動計測

当工事の計測工で採用している管理基準は、II期線施工に先立って、地質状況やI期線施工実績等から設定したものである。これまでのII期線の施工実績からはほぼ妥当な基準値と判断している。また、II期線坑口部での計測データ(坑内変位・地表面沈下・地中変位)とI期線内空変位データからトンネル覆工の変形が弾性限界内にあることを示したことが確認されている。それ故に、当初の管理基準を引き続き用いることとする。計測工の蓄積データによる変位量推定式は、随時見直しを図る方法を採用する。計測項目は、トンネル天端沈下・内空変位量(表-5)、地表面沈下量(表-6)、I期線トンネル内空変位(表-7)で管理基準値項目を満たすものとした。その他の日常管理は、地下水位、孔内傾斜計によるI期線~II期線間の変動測定を実施する。

表-7 I期線内空変位管理基準値

内空変位 (mm)	管理レベル		
	I	II	III
	1	2	3

※: I期線計測データによる FEM 解析結果による

表-5 支保パターン別管理基準値

項目・支保パターン		管理レベル		
		I	II	III
天端沈下 (mm)	DIIIa	15	22	32
	DI-b	16	23	31
	DI-L	20	29	39
内空変位 (mm)	DIIIa	30	44	64
	DI-b	16	24	32
	DI-L	39	59	78

※: 直接ひずみ制御法(桜井春輔)・吹付けコンクリート破壊ひずみ法による

表-6 地表面沈下量限界値

土被り (D:掘削径)	管理レベル (限界値: mm)		
	I	II	III
~0.5D	26	39	53
0.5D~1.0D	20	30	40
1.0D~1.5D	13	20	26
1.5D~2.0D	8	12	16
2.0D~	5	8	10

※: 山岳トンネルの地表沈下防止および不良地盤対策に関する調査研究報告(島田隆夫)による

### 5. 実施施工概要

施工は、多種の計測工を組み合わせた監視体制のもと慎重に進めた。地表面沈下および内空変位の先行変位を効果的に抑制し、トンネル掘削による地山の緩み範囲を小さくするための補助工法は AGF を採用することとし、延長は最小土被り部を含む 27m (3 シフト) を行った。掘削時の鏡面安定対策は、リングカット、通常吹付けコンクリートによる鏡吹付け、NJD、水抜きボーリング(写真-4)・地表面排水トレンチ設置(写真-5)を採用した。低土被り区間の早期閉合は、区間を 5 サイクルに分割し上下半掘削の進捗に応じて下半切羽との最小ベンチ長 3m までインバートコンクリートを打設し進めた。



写真-4 水抜きボーリング

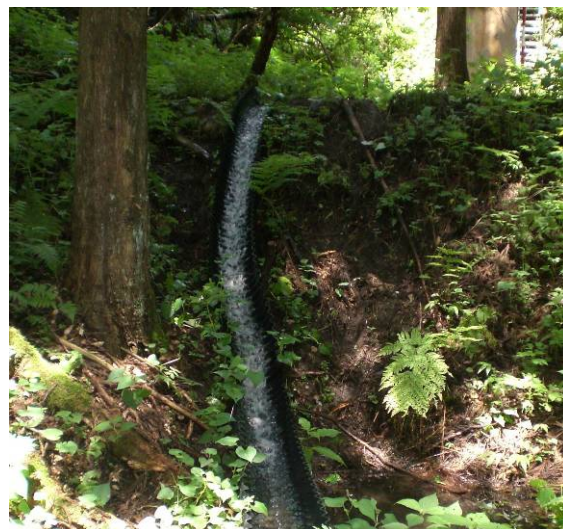
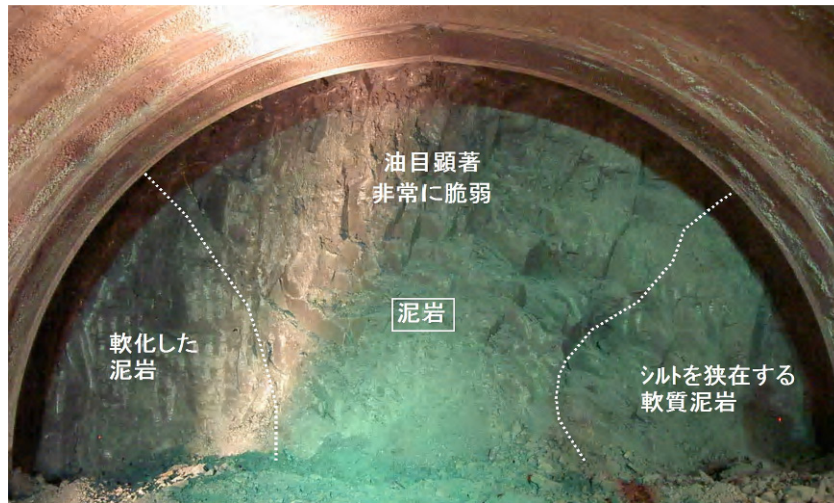


写真-5 排水トレンチ

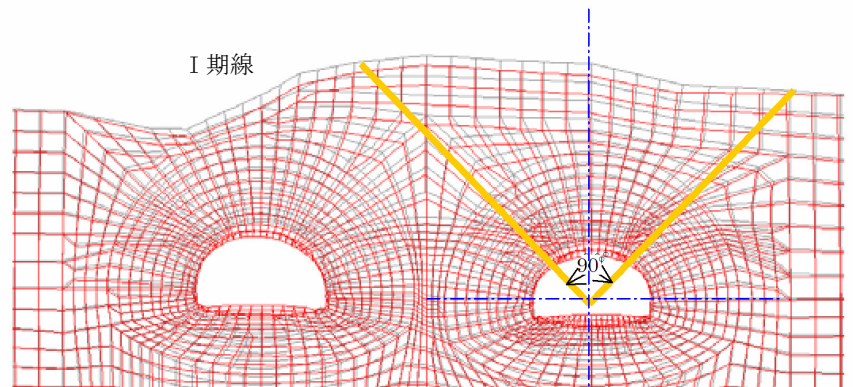


切羽地質は油目が顕著で非常に脆弱な泥岩（写真－6）や亀裂間隔が小さく風化が進行した砂岩層が主体の中に薄層の砂礫層を狭在するものであった。肌落ち等切羽自立不良の対策としてリングカットを採用した。ロックボルトおよびフォアパイリング打設の削孔作業水が切羽に及ぼす影響を減らすため NJD 工法による対応を行った。これは砂質系小礫箇所等の削孔時の孔壁閉塞対策としても有効な対策工法となった。



写真－6 切羽写真

補助工法である AGF は、先受け範囲を事前の FEM 解析結果（図－6）により当初予定した写真－6 に示す 120° 打設（鋼管φ 114.3 L=12.5m N=27 本/シフト）から写真－7 に示す 90° 打設（鋼管φ 114.3 L=12.5m N=19 本とした。標準断面図を図－10、90°AGF 断面図を図－11 に示す。実施にあたり特に初期変位速度と地表面沈下データを重視し、施工管理を行った。



図－6 地山解析結果

1シフト当たり約 400 万円低減の 3シフト施工のため 1,200 万円のコスト低減を図った。



写真－6 通常(坑口区間施工)の AGF 工法(120°)



写真－7 低土被り部の AGF 工法(90°)



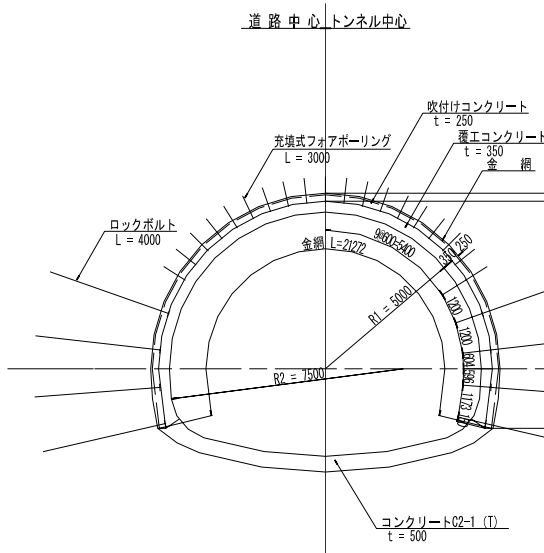


図-7 標準断面図

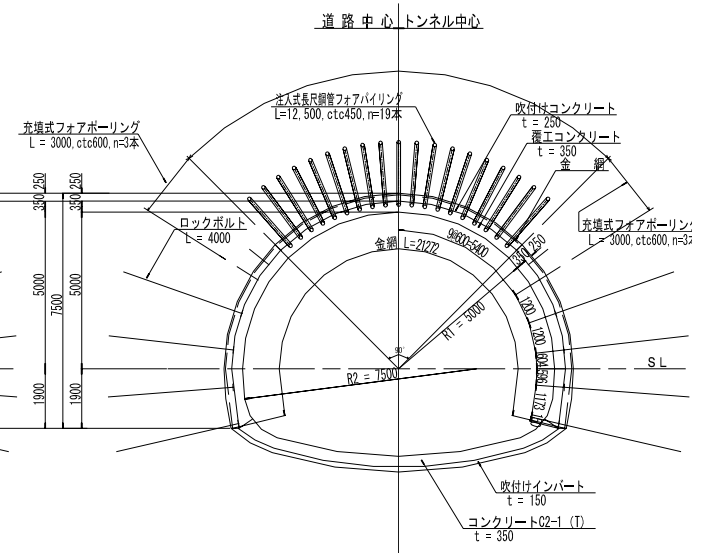


図-8 90° AGF 断面図

インバート掘削時の変位抑制対策で早期閉合するため今回、第二東名高速道路の 200m<sup>2</sup> 以上の大断面掘削に用いられている高強度吹付けコンクリート ( $\sigma = 36\text{N/mm}^2$ , 材齢 3 時間  $\geq 2\text{N/mm}^2$ , 材齢 1 日  $\geq 10\text{N/mm}^2$ ) を初期変位抑制のため、吹付けインバートとして施工フロー (表-8) に取り入れたが、AGF 実施効果により、顕著な変位発生はなく通常の吹付けコンクリート ( $\sigma = 18\text{N/mm}^2$ , 材齢 1 日  $\geq 5\text{N/mm}^2$ ) を使用した。

計測工では、施工方針とおりの観測体制を執り進めた。各計測位置図 (図-9) および結果を下記に示す。

①II 期線坑内変位観測

最小土被り位置での最大天端沈下量が 6.8mm (表-9)、区間最大は 14.2mm で管理基準値 I 以内での収束を確認。

②地表面沈下観測

最小土被り位置での最大沈下量が 12.0mm (表-10)、区間最大は 19.4mm で管理基準値 I 以内での収束を確認。

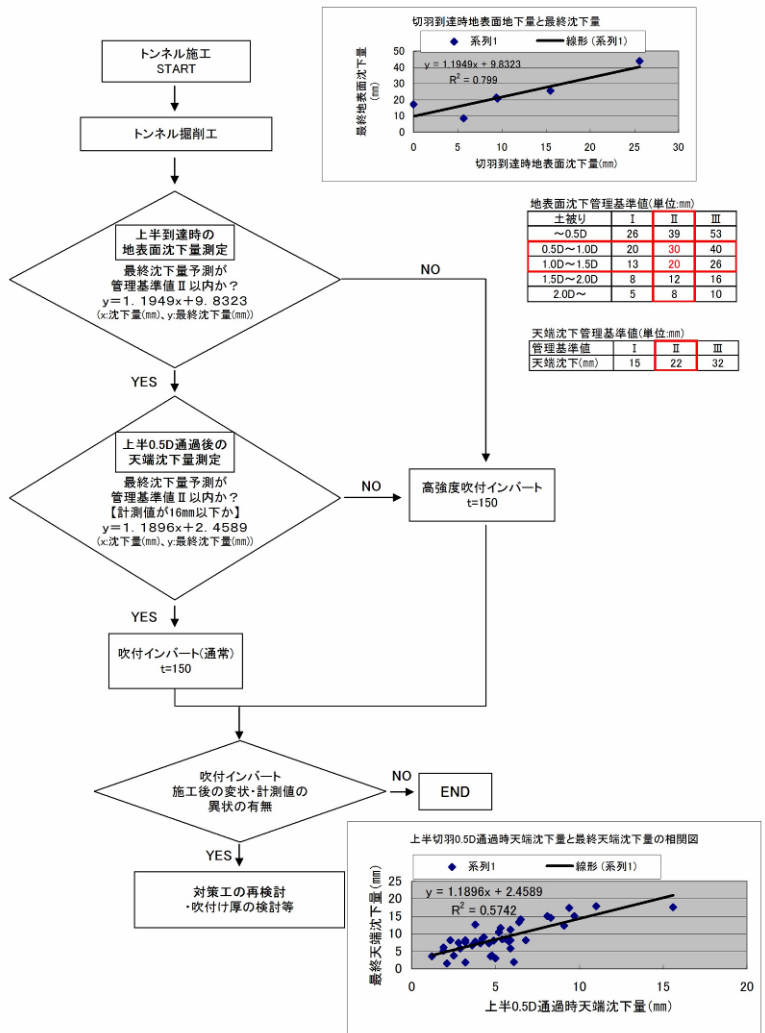


表-8 高強度吹付けインバート施工フロー

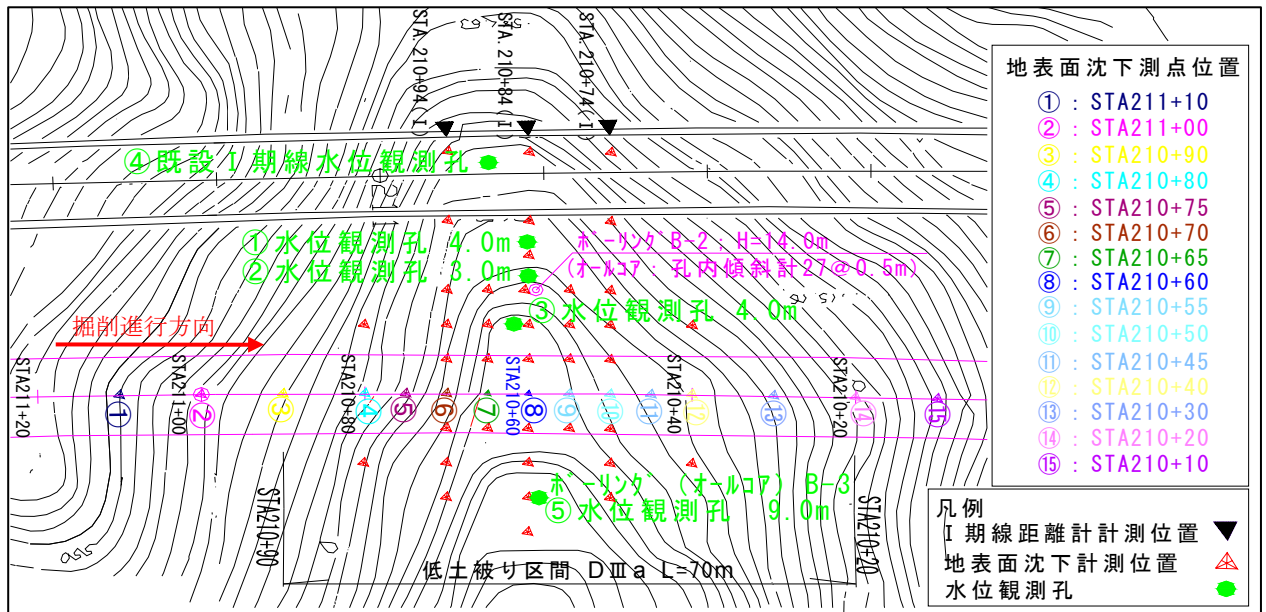


図-9 計測位置図

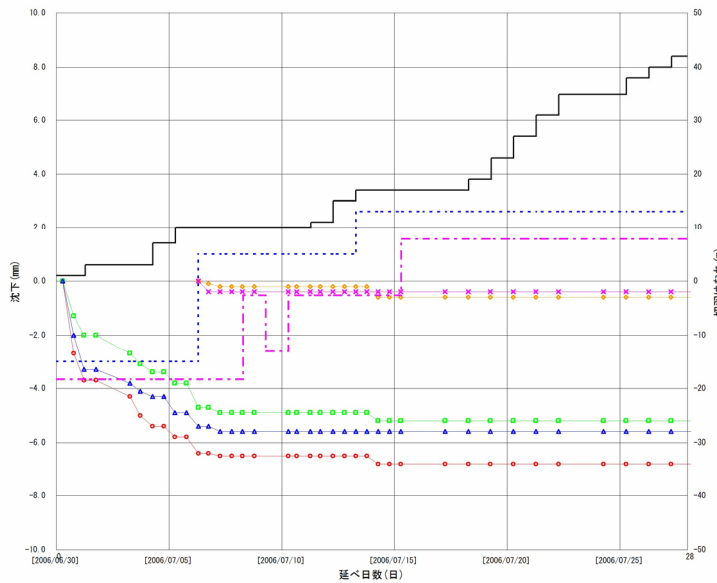


表-9 II期線坑内変位天端沈下経時変化図

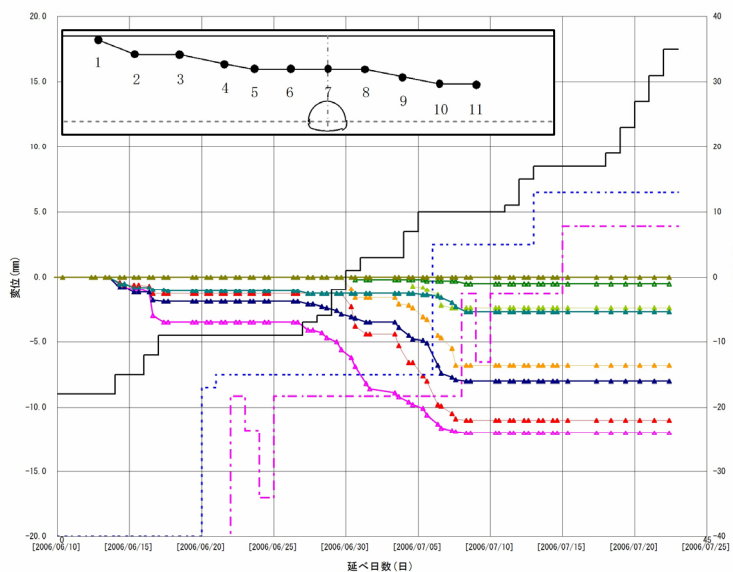
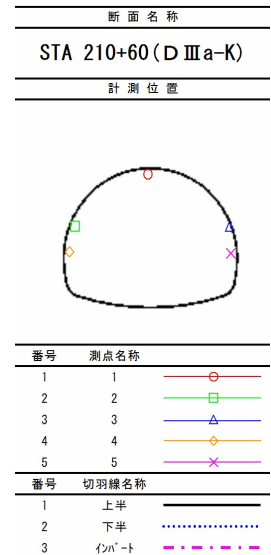
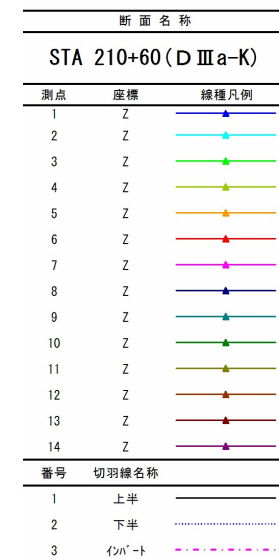


表-10 地表面沈下経時変化図





③地下水水位変動観測

施工による地下水位の異常変動はなかった。浅層域での水位上昇及び坑内湧水量の増加については、施工が梅雨時期で降水量が多かったため影響を受けたと判断できる。最下流に位置する水位観測孔⑤では他孔と比較して変動幅が大きく、地下水が別系統であることを示す結果となっている。(表-11)

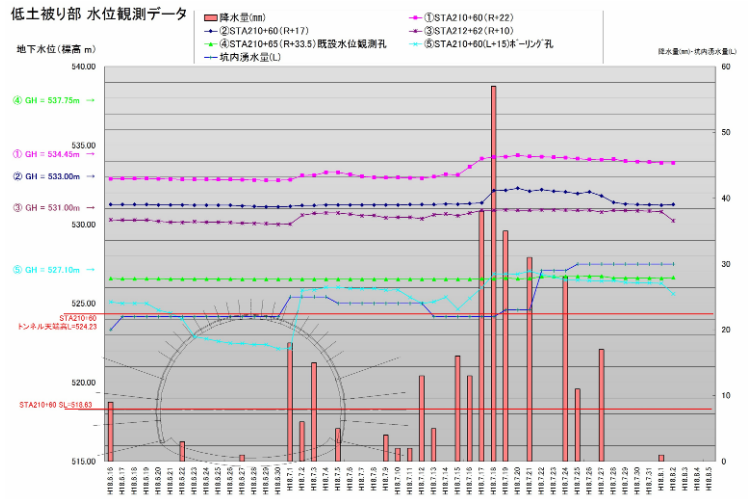


表-11 地下水水位経時変化図

④地中変位観測

孔内傾斜計による水平変位測定結果で見ると横断方向ではII期線側に地中で5.5mm、縦断方向は1.4mm(表-12)と微量な変位を観測し、地山内にII期線掘削による影響が現れたがI期線への影響は無かった。地山の緩みを極力抑えた施工結果と捉えることができる。

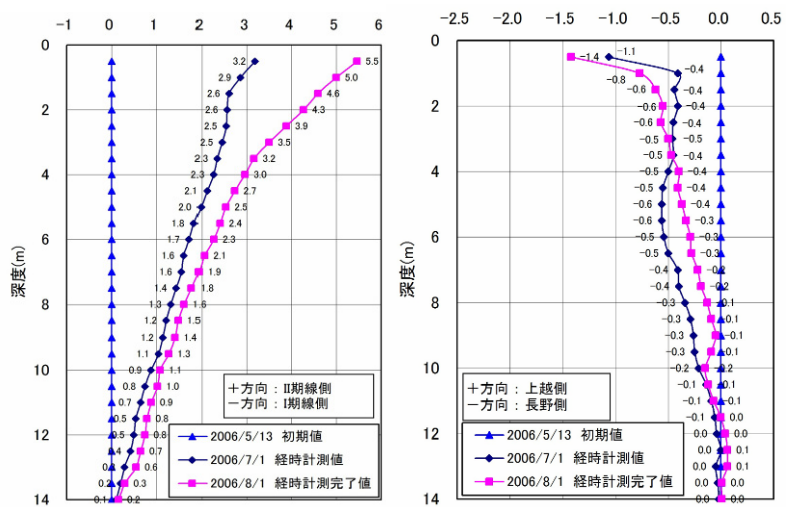


表-12 地中変位経時変化図

⑤I期線内空変位観測

I期線覆工コンクリートの目視確認による変状およびクラックの進行は特に観察されなかった。レーザー距離計のデータについても移動平均で整理した結果、管理レベルI(1mm)以内の計測値(図-13)を示した。結論としてI期線への緩みを発生させずに掘削を完了したと判断できる。

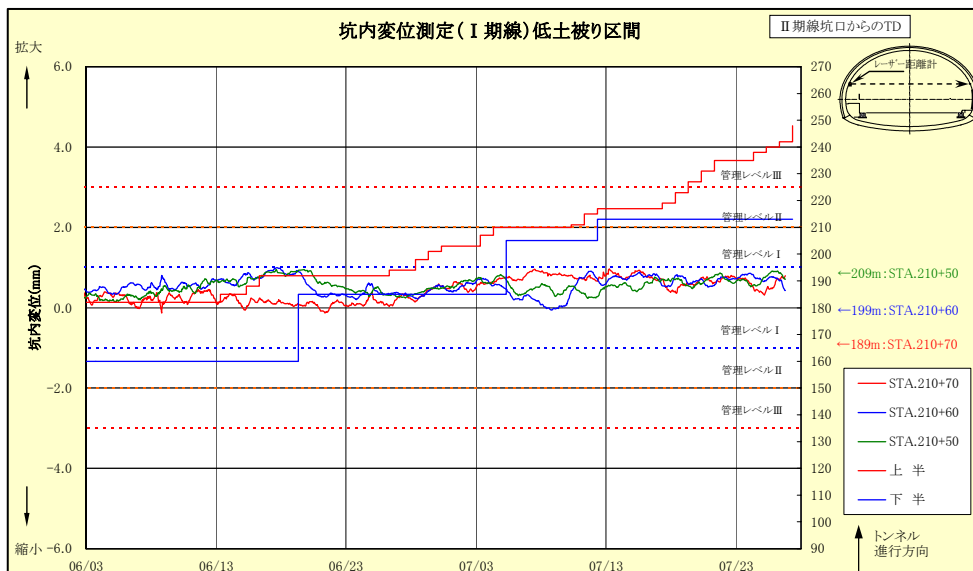


表-13 I期線内空変位観測経時変化図

## 6. まとめ

今回、供用線が近接する低土被り区間の施工について報告した。施工に関しては、AGFおよびインバートの早期閉合が十分な効果を示しており、補助工法も必要最小限程度の採用で工費低減の目的は達成した。FEM解析をもとに低土被り部のAGF鋼管の打設角度を120°から90°に変更したことについて施工結果および計測結果から問題は見られず、FEMによる地山解析がトンネル掘削に伴う挙動予測の有効な手法の1つであることを示した。計測に管理基準値を設定し、管理するとともにII期線掘削データを随時、最終変位予測式に反映させることで補助工法の妥当性や施工の安全性を十分に確保した。問題点は早期閉合を重視するために施工日数が30日程度増加した点である。今後の課題としては、地山および変位状況を把握した上で掘削進度を下げない施工法の選択が必要であると考えられる。

現在、私達建設業の環境下では何よりもコスト縮減が強く求められている。今回の施工事例は、単独トンネルであれば従来の安全性を主眼とした補助工法併用施工に対し、II期線トンネルの特徴であるI期線掘削時の地質・水・変位・変状データという情報を最大限活用することでコスト低減を図りつつ低土被り区間を施工したものである。供用線および施工の安全性を十分に検討し日々の検証を行ってきた結果、顕著な挙動を発生させずに当該区間を掘削することが出来、平成19年4月に無事トンネル貫通を迎えることができた。本報告が同種工事の参考となれば幸いである。



写真-8 新潟県側坑口を望む



写真-9 長野側（貫通側）坑口を望む

## 謝辞

本トンネルを施工するにあたり、ご指導ご協力頂いた東日本高速道路株式会社(株)、(株)高速道路総合技術研究所の関係者各位ならびに地質照査・解析についてご尽力頂いた技術研究所 地盤研グループ 皆川GLにこの場をおかりして深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説
- 2) ジェオフロンテ研究会：補助工法選定上の要点，2005.11
- 3) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法(AGF工法)技術資料(四訂版)，2002.11
- 4) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法(AGF工法)実態調査に基づく設計パターン(案)，1997
- 5) ジェオフロンテ研究会：山岳トンネルにおける湧水処理工法，2002.11