

小土被りで高速道路と交差する 山岳トンネルの施工

森本 恭弘¹・竹村 和晃²・若林 功起³

¹正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局 工事調整部 管理課
(〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西 1-1)

E-mail: morimoto.yas-f2s4@jrtr.go.jp

²独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局 長万部鉄道建設所
(〒049-3521 北海道山越郡長万部町字長万部 450-6)

E-mail: takemura.kaz-4a46@jrtr.go.jp

³正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局 長万部鉄道建設所
(〒049-3521 北海道山越郡長万部町字長万部 450-6)

E-mail: wakabayashi.kok-xx7g@jrtr.go.jp

北海道新幹線、国縫トンネルは延長 1,290m の山岳トンネルで、途中重要構造物である道央自動車道(以下、高速道路)と最小約 7.4m の土被りで交差する。高速道路交差部には礫岩や砂、粘土を主体とする固結度の低い層が分布し、掘削中の切羽の安定が確保できない可能性があった。そこで、高速道路交差部と類似した土被り、地質条件の箇所にて交差部の掘削を想定した試行施工を行い、得られた施工結果から交差部の施工計画を立案し、施工に臨んだ。その結果、高速道路に影響を与えることなく高速道路交差部の施工を完了した。

Key Words: NATM, low soil cover depth, unconsolidated soil, crossing with expressway, trial construction

1. はじめに

北海道新幹線、国縫トンネルは北海道長万部町地内に位置する延長 1,290m の山岳トンネル(新青森起点 224km320m~225km610m)であり、途中重要構造物である道央自動車道(以下、高速道路)と最小約 7.4m の土被りで交差する(図-1)。高速道路交差部には礫岩や砂、粘土を主体とする固結度の低い層が分布していることが想定され、これらの層を掘削することにより、地上の高速道路の路面沈下や陥没が発生する恐れがあった。当該高速道路は札幌地区と道南地区を結ぶ社会的重要度の極めて高い路線であり、路面沈下や陥没が発生すると社会に甚大な影響を与えてしまうため、慎重な掘削が求められた。そこで、交差部の掘削に先立ち、交差部と類似した土被り、地質条件の箇所にて試行施工(以下、トライアル施工)を行い、得られた施工結果を考察して高速道路交差部の施工計画に反映し、施工に臨むこととした。

2. 国縫トンネルの概要

図-2に国縫トンネル全体の地質縦断図を示す。トンネル本坑に出現する主な地質は、円礫・砂・粘土が主体の第四紀更新世中位段丘堆積物 Tr2、礫岩・砂岩が主体の新第三紀鮮新世瀬棚層 Pl-1、浮石質凝灰角礫岩・凝灰岩・砂質泥岩が主体の新第三紀中新世黒松内層 Umt・Umv、頁岩・泥岩が主体の新第三紀中新世八雲層 MM、礫・砂・粘土が主体の第四紀完新世崖錐堆積物 Dt を想定しており、Tr2、Pl-1は固結度が低いと想定していた。



図-1 国縫トンネル位置図

3. 高速道路との交差条件

図-3に高速道路交差部付近を拡大した地質縦断面図を示す。最小土被り7.4mで高速道路と交差する計画であり、N値が10以下で固結度が低いTr2層が土被りの多くを占めると想定していた。また、交差部付近で事前に実施した鉛直ボーリングから、地下水位がトンネル断面内に位置すると想定された。

図-4に高速道路交差部の現地状況写真を示す。高速道路は表層に分布するTr2層を切土することで構築しており、車道幅は13mである。高速道路と国縫トンネルの交差角度は高速道路方向に対して約35°と浅く、交差延長は225km160m～同270mの110m区間である。

4. トライアル施工

新幹線トンネルと高速道路との交差土被りが7.4mであること、加えて固結度の低い地山を掘削することから、

トンネル掘削時の高速道路の路面沈下や陥没が発生する恐れがあった。そこで、交差部の掘削を想定したトライアル施工を交差部と類似した土被り、地質条件の箇所として選定した225km470m～同530m間の延長60m区間で行った。得られた施工結果を踏まえて交差部の施工に向けた課題を抽出して分析し、各課題に対する対策工を検討して交差部の合理的な施工計画を立案し、安全かつ確実に掘り進めることを目指した。

(1) 施工計画

表-1にトライアル施工区間における支保パターン及び掘削補助工一覧を、図-5に掘削補助工の概要図を示す。支保パターンは、鋼製支保工H150、吹付けコンクリート最小厚20cm、ロックボルトは側壁部に上半2本、下半4本とした。また固結度の低い層を掘削するため、天端の安定を目的にアーチ部120°の範囲に注入式長尺鋼管先受工(AGF、径114.3mm、L=12.5m@45cm、N=25本)、鏡の安定を目的に注入式長尺鏡ボルト(径76.3mm、L=12.5m@1.5m、N=11本)をそれぞれ縦断方向に9mピ

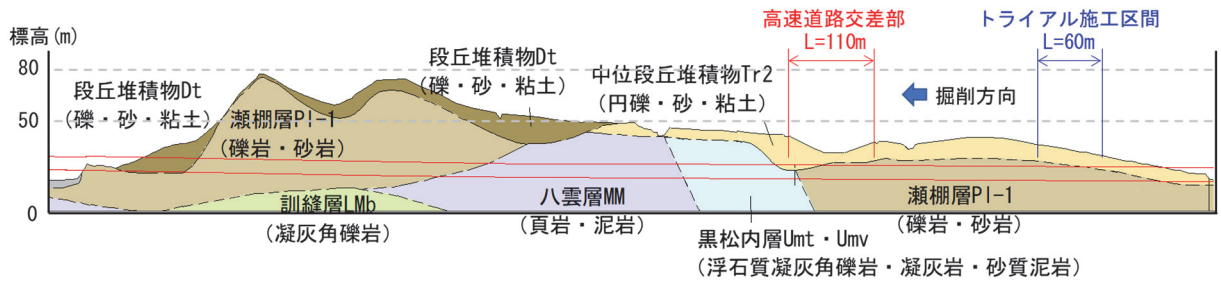


図-2 国縫トンネル全体地質縦断面図

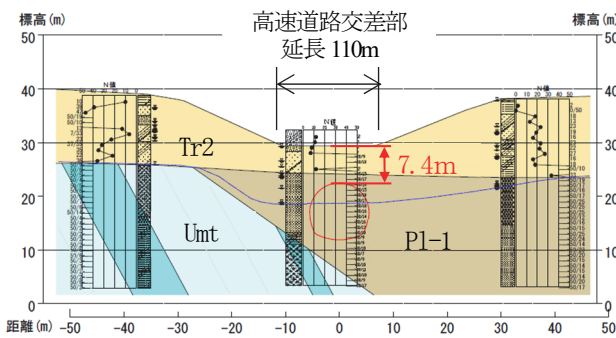


図-3 高速道路交差部の地質状況



図-4 高速道路交差部の現地状況

表-1 トライアル施工区間における支保パターン及び掘削補助工一覧

支保パターン	鋼製支保工	H150(上下半)
	ロックボルト	L=3.0m 上半2本, 下半4本
	吹付けコンクリート	最小厚 20cm
掘削補助工	注入式長尺鋼管先受工(AGF)	L=12.5m@9.0m(ctc45cm) 120°範囲 N=25本
	注入式長尺鏡ボルト	L=12.5m@9.0m(ctc1.5m) N=11本
	一次インバート	t=200mm
	吹付けコンクリート	

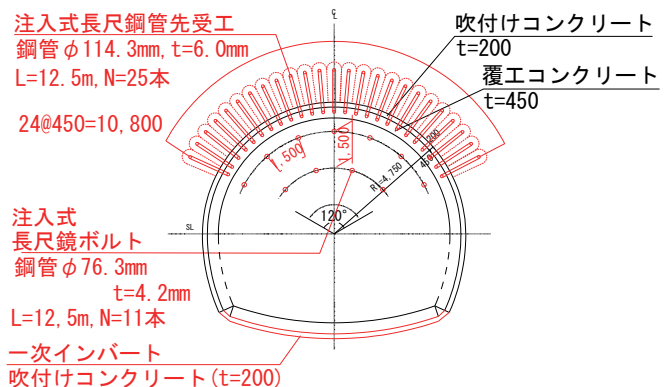


図-5 トライアル施工区間における掘削補助工概要図

ッチで打設する計画とした。更に、変位対策としてトンネル断面を早期に閉合することを目的に、一次インバート（吹付けコンクリート $t=200\text{mm}$ ）を施工することとし、トライアル施工区間及び高速道路交差部についてはミニベンチカット工法（ベンチ長 $L=4\text{m}$ ）で掘削を行うこととした。なお、トライアル施工区間では月曜日～木曜日は掘削を行い、金曜日に一次インバートを打設、土曜日・日曜日を養生期間とし、月曜日に埋め戻しを行った後に掘削を再開するサイクルとした。

図-6にトライアル施工区間における計測点位置図、表-2に施工管理値、表-3に計測頻度を示す。地表面の管理限界値 30mm は高速道路管理者の要領¹⁾から、坑内変位計測頻度は（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構が定める設計施工標準²⁾に準じて設定し、地表面沈下は線路方向に 5m ピッチ、坑内の天端沈下・水平内空変位は線路方向に 10m ピッチで計測を行った。地表面沈下量の各施工管理値を超過した場合の対応として、 10mm 未満では施工継続、 10mm 超過時は計測頻度を強化、 20mm を超過した場合は一時掘削を中断し原因究明及び追加対策を実施、 30mm を超過した場合は掘削を中止して追加対策を再検討、実施することとした。

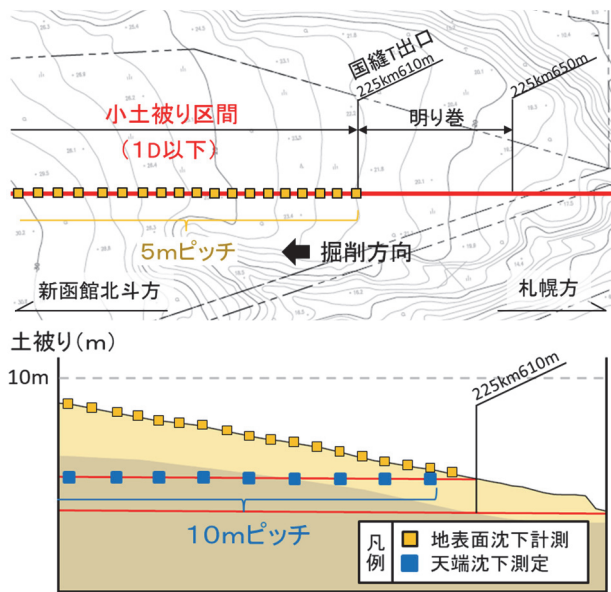


図-6 トライアル施工区間の計測点

(2) 施工結果

a) 切羽状況、地質実績

図-7に切羽観察記録から作成したトライアル施工区間付近の実績地質縦断図を示す。終点方では切羽上半の上半分に固結度の低い $\text{Tr}2$ 層の粘性土が連続して出現した。一方、上半の下半分は、 $225\text{km}540\text{m}$ 付近から $225\text{km}515\text{m}$ 付近までは PI-1 層の砂礫層が、 $225\text{km}515\text{m}$ 付近から $225\text{km}477\text{m}$ 付近までは PI-1 層の礫層が、以降は比較的固結度の高い PI-1 層の砂層が多くを占めた。全体的な分布としては、 $225\text{km}520\text{m}$ 付近からは PI-1 層が切羽全面を占めると想定していたが、実際には $\text{Tr}2$ 層が暫く切羽天端部に出現したままトライアル施工区間を通過し、 $225\text{km}466\text{m}$ 付近で切羽全面を PI-1 層が占め、当初想定以上に $\text{Tr}2$ 層が厚く堆積する地山が続いた。

図-8に $225\text{km}530\text{m}$ における切羽写真を示す。天端部に $\text{Tr}2$ 層の粘性土（黄褐色）、右肩から左 S.L 部に向かい $\text{Tr}2$ 層の粘性土（灰色）が確認された。また上半の下半分には PI-1 層の砂礫層が確認された。切羽からの湧水は滲水程度であったが、 $\text{Tr}2$ 層は固結度が低く、時間経過とともにゆるみが生じていた。なお、地質は一様に切羽の右側から左側へと傾斜していた。

図-9に上半根足部から天端にかけてのトンネル周囲の

表-2 トライアル施工区間の施工管理値

計測項目	1次管理値	2次管理値	3次管理値	管理限界値
地表面沈下量	10mm未満	10mm	20mm	30mm
天端沈下量	10mm未満	10mm	20mm	-
水平内空変化量	20mm未満	20mm	40mm	-

表-3 トライアル施工区間の計測頻度

頻度	坑内変位測定位置と切羽の離れ	坑内変位速度
2回/1日	1D未満	10mm/日以上
1回/1日	1~2D未満	5~10mm/日
1回/2日	2~5D未満	1~5mm/日
1回/1週	5D以上	1mm/日以下

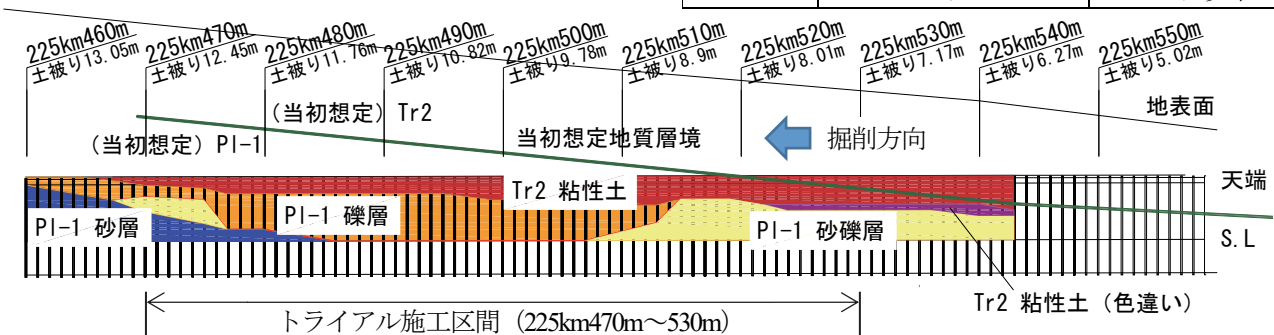


図-7 トライアル施工区間付近の地質縦断図（実績）

地質分布を表す地質展開図を示す。終点方は天端付近に Tr2 層の粘性土または礫層が分布しており、上半根足部は PI-1 層の砂礫層が占めていた。225km480m 付近からは上半根足部より PI-1 層の砂層が出現した。

b) 変位量の計測結果

図-10から図-12にトライアル施工区間における地表面沈下量、トンネル坑内の沈下量（天端沈下量，SL部沈下量），水平内空変位量の時系列変化の代表として，225km530mの結果を示す。

図-10 について，横軸を計測開始からの経過日数とし，プロット付き折れ線が変位量，グラフ下方から伸びる折れ線は紺が上半切羽，紫が下半切羽，赤が一次インバートの進行であり，右の縦軸「切羽進行」のゼロを通過したとき「当該キロ程を切羽が通過した」または「一次インバートの施工が完了した」ことを示し，縦の黒破線で示している。

地表面沈下は，切羽到達前に地表面が隆起する傾向が見られた。小土被りであるため AGF の注入圧により地表が押し上げられたものと考えられ，高速道路交差部施工時は地表面隆起を低減する対策を採用するべきであると考えた。図-11 より，上半切羽通過後のトンネル坑内の沈下が顕著である傾向があることがわかる。225km530m において沈下の収束値は 16mm であるが，先述の地表面隆起も含めると 2次管理値の 20mm に近い変位が生じていることとなる。従って，交差部施工に当たっては上半切羽通過後の変位を抑制する対策も併用することで収束値を低減させる必要があると考えた。

次にトンネル坑内の沈下について，上半切羽通過後の変位が顕著であり，下半切羽通過後も変位が進行した。

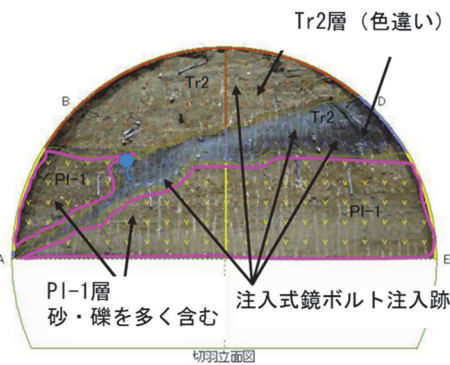


図-8 トライアル施工区間の切羽写真 (225km530m)

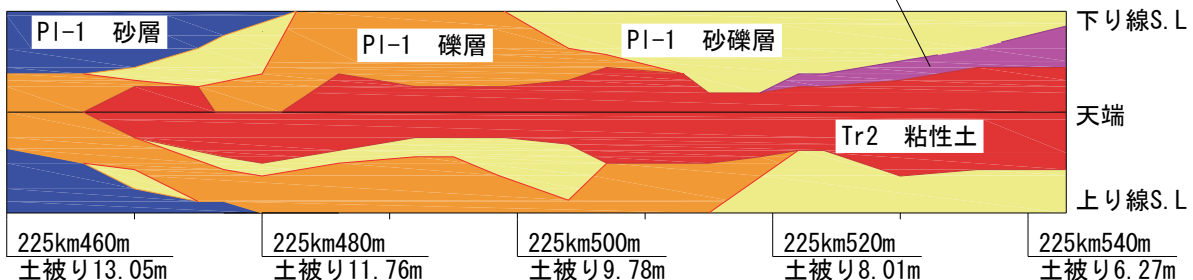


図-9 トライアル施工区間の地質展開図 (実績)

水平内空変位についても同様の傾向が見られ，上半切羽通過後の変位を抑制する対策により収束値を低減させる必要があると考えた。

c) 計測結果に基づく考察

変位の初期勾配から最終変位量を予測することで，トンネル掘削作業の早期の段階で必要な変位対策を行うこ

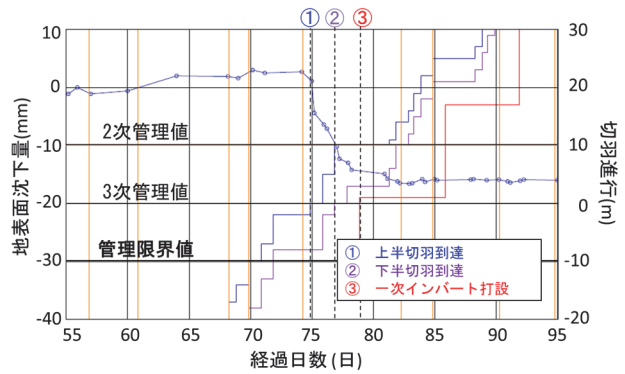


図-10 地表面沈下量 (225km530m)

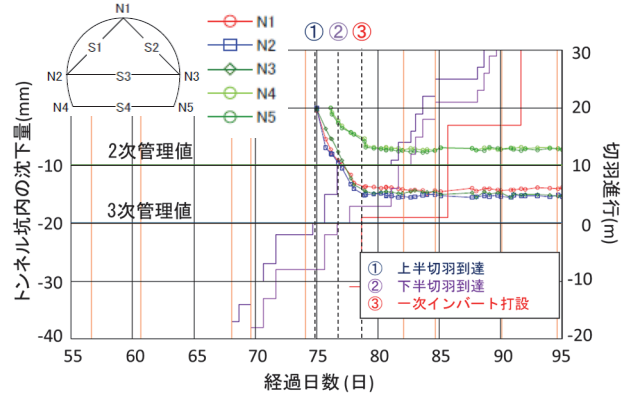


図-11 天端・SL部沈下量

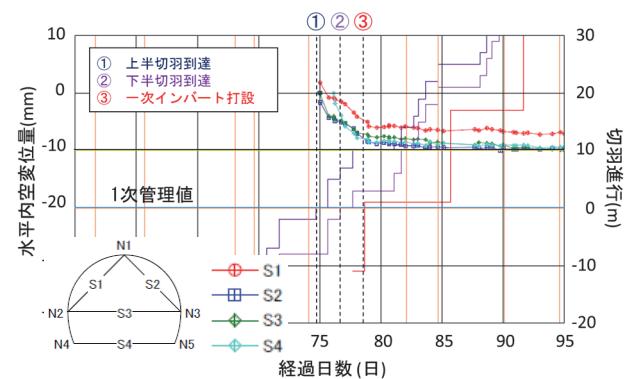


図-12 水平内空変位量 (225km530m)

とが可能となると考え、変位の初期勾配と最終変位量との関係性を検証した。図-13 に地表面沈下量の初期勾配と収束値の関係を示す。ここでは各キロ程において上半が切羽の5m手前に到達した時と切羽が5m進んだ時の変位速度を初期勾配として整理した。勾配が-1.5mm/mより小さい場合は勾配が大きいほど沈下量が大きい結果となったが、勾配が-1.5mm/mより大きい場合は勾配に関係なく、沈下量の収束値が約18mm程度であった。勾配が1.5mm/mより大きい箇所は出口方坑口に近接した土被り5m以下で、上半を固結度の低いTr2層が占めていたことが変位速度の増大に寄与し、結果的に土被り5mが変位特性の境界となった可能性がある。

このように、地表面沈下量の勾配と収束値の間に相関性が見られ、交差部施工時にもこの相関性を基に変位傾向を分析することが望ましいと考えた。

5. 高速道路交差部の施工

(1) 施工計画

表-4 にトライアル施工から変更する支保パターン及び掘削補助工について、整理したものを示す。地表面隆起及び先行変位の抑制、掘削後の変位抑制、脚部沈下対策、早期閉合による変位抑制対策について、目的毎に整理した。具体的には、地表面隆起及び先行変位の抑制としてはAGF打設長の短縮(12.5m→9.5m)及び縦断方向の打設ピッチの縮小(9m→6m)により地表面とAGF先端の離隔を確保しつつ改良体全体の剛性を高めることとした。掘削後の変位抑制としては鋼製支保工のランクアップ(H150→H200)により剛性の向上を図り、脚部沈下対策としては根足部の吹付けコンクリート及び支保工の連

結、早期閉合による変位抑制対策としては一次インバートの施工時期を早める(週末に一括施工→上下半3m掘削後に都度施工)こととした。図-14 に掘削補助工法の概要図を示す。

高速道路交差部の計測計画として、図-15 に計測点の配置計画を、表-5 に計測管理値を示す。交差部付近の高速道路車道部、そして道路の切土法面、法肩に計測点を設け、トータルステーション(TS)により切土法面をプ

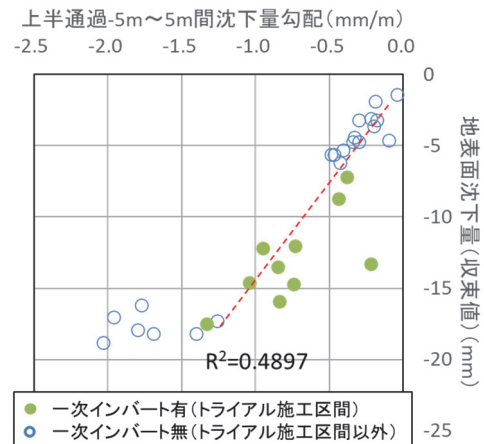


図-13 地表面沈下量の勾配と収束値の関係

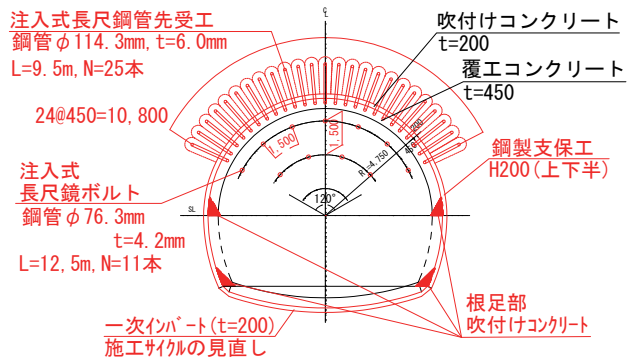


図-14 高速道路交差部の掘削補助工概要図

表-4 トライアル施工区間と高速道路交差部の掘削補助工の比較

	トライアル施工		高速道路交差部	
	対策工	施工結果	対策工	目的
注入式長尺鋼管先受工 (AGF)	L=12.5m@9.0m (ctc45cm) 120°N=25本	切羽到達前に地表面隆起が見られた	L=9.5m@6.0m(ctc45cm) 120°N=25本	地表面隆起の抑制 (先行変位の抑制)
鋼製支保工	H150(上下半) 1.0mピッチ	上半切羽通過後の変位が顕著	H200(上下半) 1.0mピッチ	掘削後の変位抑制
脚部吹付けコンクリート	—	砂質土地盤の過去事例と同様、沈下卓越型である	支保工内面から根足部を覆うように施工 上半掘削後と下半掘削後に都度施工	脚部沈下対策
支保工の連結	—		支保工同士を鋼材で連結 (PL-22×200×3000)	
一次インバート	t=200mm 週末に一括施工	切羽に近い箇所では早期閉合が必要	t=200mm 上半・下半を3m掘削後に都度施工	施工時期を早めて早期併合を促進

リズム、車道部をノンリズムで計測した。またトータルステーションによる計測を補完する目的で層別沈下計を車道脇に設けて計測を行った。施工管理値はトライアル施工から一部変更し、地表面沈下量の1次管理値を10mm、2次管理値を15mmとした。地表面沈下量が10mmを超過した場合は計測頻度の強化、15mmを超過した場合は原因究明及び追加対策の実施、20mmを超過した場合は一時掘削を中断した上で原因究明及び追加対策の実施、管理限界値の30mmを超過した場合は掘削を中止し、必要により高速道路の通行止め措置を行うこと

とした。

(2) 施工結果

a) 切羽状況、地質実績

図-16 に切羽観察記録から作成した高速道路交差部の実績地質縦断面図を示す。225km203m 付近までは当初想定通り切羽全面に PI-1 層が出現しており、中でも225km260m まで天端付近に砂層が、225km227m 以降は礫層が出現し、それ以外の部分はシルト混じりの砂層であった。また、このシルト混じりの砂層は色が異なっていたが、シルトの含有分や粒径の違いを触手により微かに認識できる程度の違いのみで、明確な特性の違いは確認できなかったが、根足部に出現したシルト混じりの PI-1 層の方が僅かに固結度が高かった。その後、225km180m 付近まで継続して PI-1 層が切羽全面を占めており、225km180m 付近より起点方では根足部より凝灰岩・砂質泥岩を主体とする Umv 層が出現し、その後は浮石質凝灰角礫岩を主体とする Umt 層が占める結果となった。また結果的に当初想定していた Tr2 層は交差部終点まで確

表-5 高速道路交差部の計測管理値 (赤字が変更項目)

計測項目	1次管理値	2次管理値	3次管理値	管理限界値
地表面沈下量	10mm	15mm	20mm	30mm
天端沈下量	10mm	15mm	20mm	-
水平内空変化量	20mm	30mm	40mm	-

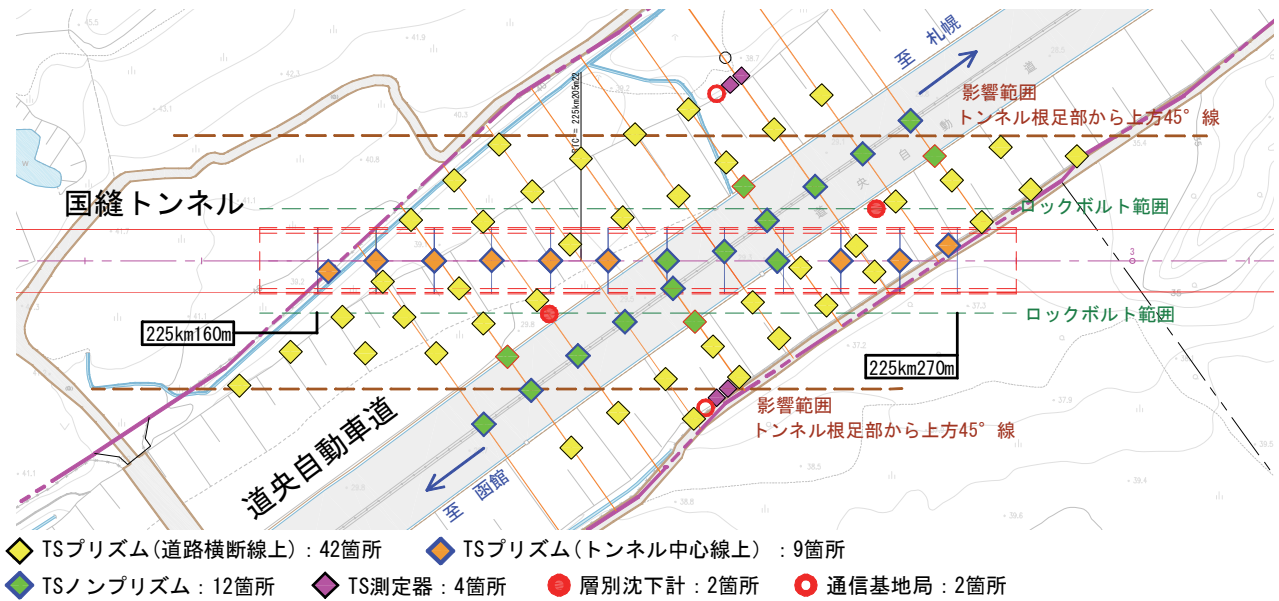


図-15 高速道路交差部の計測点

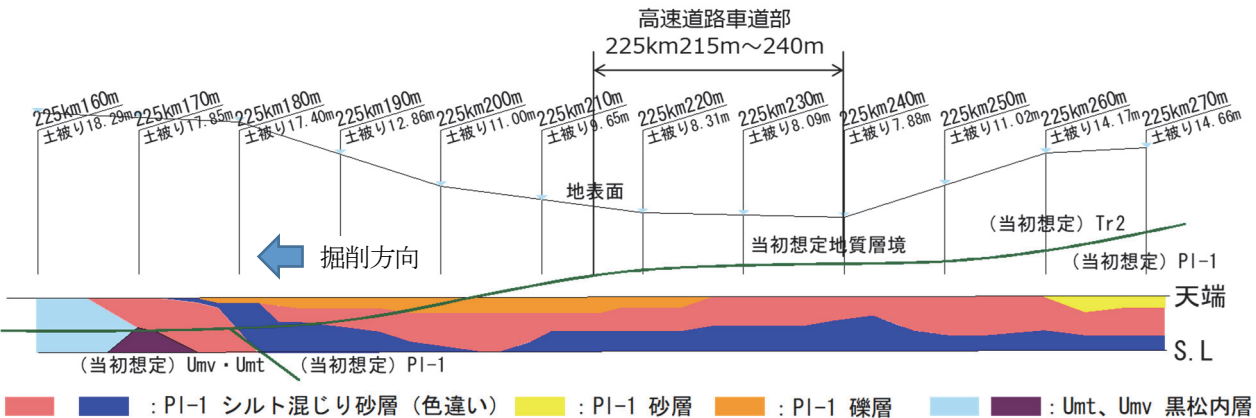


図-16 高速道路交差部の地質縦断面図 (実績)

認められず、当初想定以上にPI-1層が厚く堆積していた。

図-17に高速道路車道部直下の225km239mの切羽写真を示す。上半切羽全面を色違いのシルト混じりのPI-1層が占めていたが、根足部を中心に分布していた灰色の層が上半の多くを占めた。また、この箇所を中心に切羽から30L/min程度の湧水が確認され、他の箇所よりも多かった。これは切羽到達直前の降雨による影響と思われる。また湧水ポイントはいずれも灰色の層であり、ゆるみが発生して一部で小規模な肌落ちが確認された。なお、地質はトライアル施工区間と同様に切羽の右側から左側へと傾斜していた。

図-18に地質展開図を示す。交差部施工開始当初は天端付近に砂層のPI-1層が225km260mまで出現し、次に色違いのシルト混じり砂層が切羽全面を占めたが、225km227m付近から礫層のPI-1層が天端部に出現した。その後はUmv層及びUmt層が上半根足部から出現し、最終的にはUmt層が切羽全面を占めた。

b) 変位量の計測結果

図-19から図-21に高速道路交差部の計測点の中で最も土被りが小さい225km240mにおける地表面沈下量、トンネル坑内の沈下量（天端沈下量、S.L部沈下量）、水平内空変位量の時系列変化を示す。

地表面沈下については、切羽通過の10m程度（およそトンネル掘削幅に等しい）前から先行変位が始まり、3～4mmの沈下が生じたが、トライアル施工区間よりも沈下量が小さくなった。また、いずれの箇所でも切羽到達前の隆起は見られず、トライアル施工区間で確認されたAGFの注入圧による影響はなく、これは、打設長を短縮したことによる地山改良による効果だと考えられる。下半切羽到達後または一次インバート施工後に収束傾向を示し、収束値は9.1mmと1次管理値の10mm未満であ

った。

トンネル坑内の沈下については、上半切羽通過後に変位が進行し、その後下半切羽通過後または一次インバート施工後に収束傾向を示した。また収束値も天端沈下6.6mm、S.L部沈下7.6mmと、いずれも1次管理値の10mm未満であった。

水平内空変位については、変位量はトンネル内の沈下よりも小さかったが、傾向としてはトライアル施工時と同様であり、上半切羽通過後に変位が進行し、その後下半切羽通過後または一次インバート施工後に収束傾向を示す結果となった。また収束値も4.0mmと1次管理値の20mm未満であった。

その他の計測点においても、各計測項目の収束値は全て1次管理値未満であり、高速道路への影響を最小限に抑えて掘削を完了することができた。

c) トライアル施工区間との比較

図-22、23に地表面隆起量に関するトライアル施工区間の施工結果との比較を示す。トライアル施工区間ではキロ程毎の結果にばらつきが認められるが、トライアル施工区間に比べて高速道路交差部では地表面隆起量が低

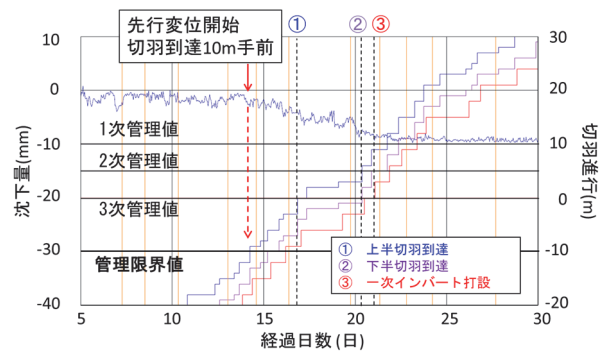


図-19 地表面沈下量 (225km240m)

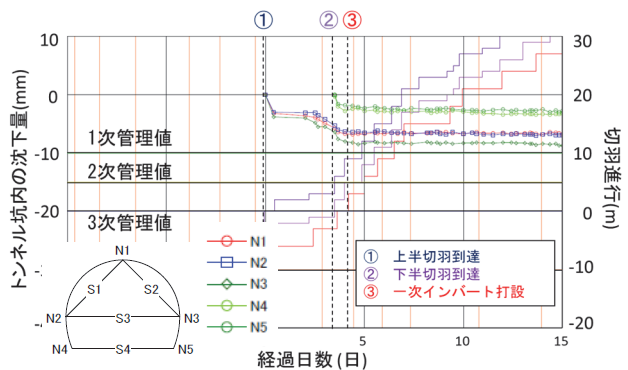


図-20 天端・S.L部沈下量 (225km240m)

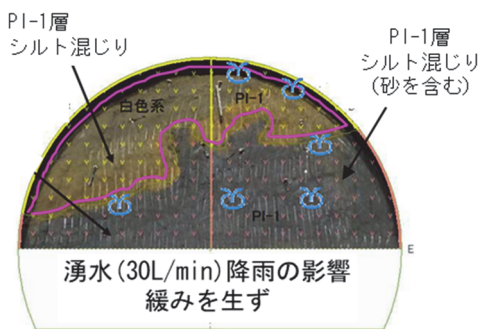


図-17 高速道路交差部切羽写真 (225km239m)

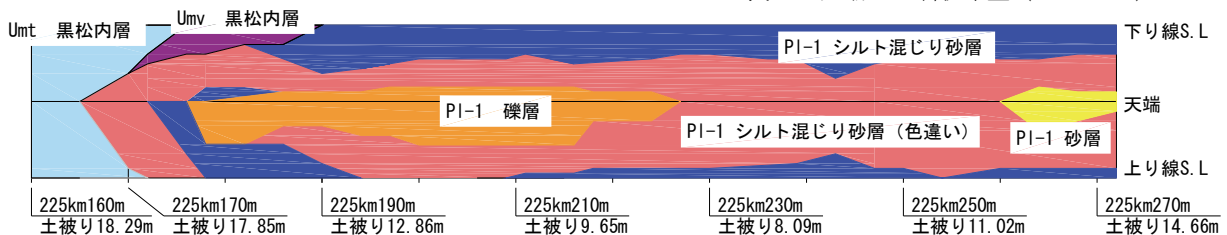


図-18 高速道路交差部の地質展開図 (実績)

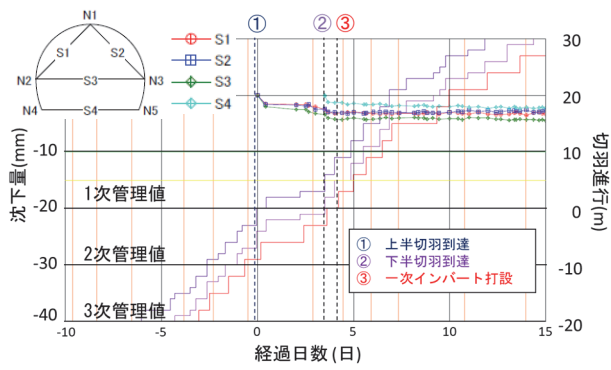


図-21 水平内空変位量 (225km240m)

減された。この結果からも AGF 打設長の短縮による地山改良効果を確認することができた。

図-23 に地表面沈下の初期勾配の比較を示す。ここでもトライアル施工区間と同様、各キロ程において上半が切羽の 5m 手前に到達した時と切羽が 5m 進んだ時の変位速度を初期勾配として整理した。いずれもばらつきがあるものの、平均値で評価するとトライアル施工区間に比べて高速道路交差部の方が初期勾配が小さくなっており、これは、鋼製支保工のランクアップの他、AGF による地山改良効果により掘削前後の地山の緩みを抑制したことによるものと考えられる。

6. まとめ

高速道路直下を小土被りで掘削するに先立ち、高速道路交差部と類似した施工条件の箇所にてトライアル施工を行い、施工結果を変位速度などの観点から分析して高速道路交差部の施工計画を検討し、高速道路交差部を施工した。その結果、重要構造物である高速道路への影響を最小限に抑えて掘り抜くことができ、検討した対策工の妥当性も確認できた。本稿が同様の施工事例において参考になれば幸甚である。

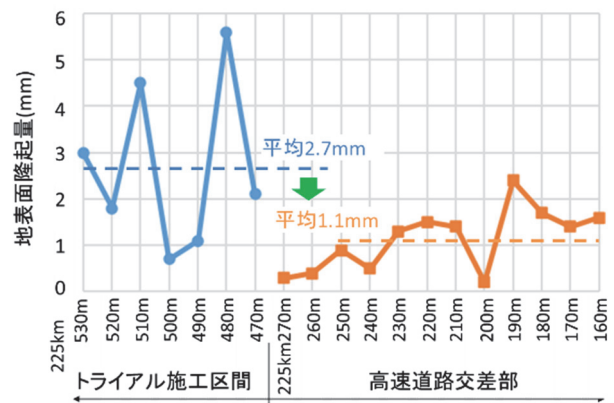


図-22 地表面隆起量の比較

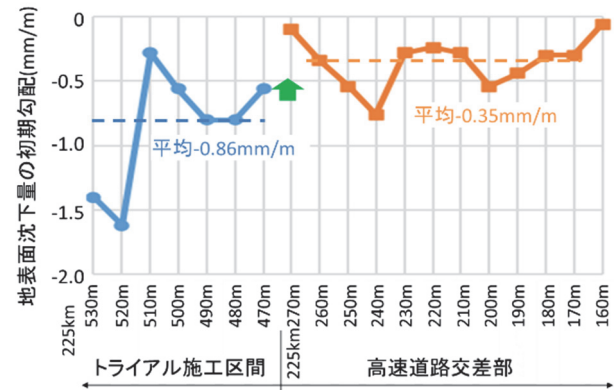


図-23 地表面沈下量の初期勾配の比較

謝辞：本施工に際し、「北海道新幹線、新函館北斗・札幌間トンネル施工技術委員会」及び「同委員会幹事会」の委員、幹事を初めとした関係者の皆様に多数のご助言を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社，保全点検要領構造物編，2017。
- 2) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構，山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp.279，2008。

(2022. 8. 26 受付)

CONSTRUCTION OF MOUNTAIN TUNNEL CROSSING WITH EXPRESSWAY IN LOW SOIL COVER DEPTH

Yasuhiro MORIMOTO, Kazuaki TAKEMURA and Koki WAKABAYASHI

Kunnui Tunnel in Hokkaido Shinkansen bullet train is a mountain tunnel with 1,290 meters length, and this tunnel crosses with Do-o Expressway with 7.4 meters soil cover depth. The crossing area has unconsolidated soil which consists of gravel, sand and clay, and it may make difficult to excavate the area safely. Therefore, before excavating expressway crossing area, we conducted trial construction at the area with the same conditions about soil cover depth and geology as the expressway crossing area, and we made a plan of excavation in expressway crossing area. As a result, we finished excavating the crossing area without impacts on the expressway.