

トンネル工事における脆弱な地山に対する 掘削補助工法の選定、評価

中下 千太郎¹・森山 剛義²・奥山 敏幸³・竹江 仁⁴・藤田 修⁵

松江国道事務所 ⁵所長 ⁴副所長 ³建設専門官 ²専門官 ¹係員（〒690-0017松江市西津田2-6-28）

静間仁摩道路は、松江国道事務所が整備する山陰道のうち、島根県大田市静間町から島根県大田市仁摩町大国に位置する延長7.9kmの区間である。五十猛（いそたけ）トンネルは、この区間のうち、延長L=1,082mの2車線の道路トンネルである。本トンネルは、設計で想定していた以上に地山の状態が脆弱で、多数の掘削補助工法を併用しながら掘削を行った。特に、起点側坑口付近では、泥質凝灰岩で強度の小さい脆弱な地山が出現し、幾度も天端崩落や切羽崩落が発生している。また、一部の区間では天端変位が増大し、初期変位速度が通常の5～10倍であり、1日で計測工Aの管理レベルⅡ（23mm）を超過する箇所もあった。本稿は、このような脆弱な地山に対する掘削補助工法の選定経緯および評価について述べるものである。

キーワード 山岳トンネル、脆弱地山、掘削補助工法、切羽前方調査、調査ボーリング

1. 工事概要

整備中の静間仁摩道路（延長7.9km）は、島根県大田市静間町から島根県大田市仁摩町大国に位置し、五十猛トンネルは延長L=1,082mの2車線の道路トンネルである。平成30年5月よりトンネル掘削工事に着手し、約20ヶ月の掘削を行い、令和2年3月に貫通した。

表-1にトンネル施工概要を示す。

表-1 トンネル施工概要

工 事 件 名		静間仁摩道路 五十猛トンネル工事
工 事 場 所		島根県大田市五十猛町地内
工 期		平成29年8月23日～令和3年1月31日
設 計 者		（株）エイト日本技術開発
施 工 者		大成建設（株）
トンネル諸元	岩 種	安山岩、凝灰岩
	トンネル延長	1,082m
	内空断面積	62.78㎡（インバート無） 69.16㎡（インバート有）
	掘削方式	発破掘削、機械掘削
	掘削工法	補助ベンチ付全断面工法 上半先進ベンチカット工法
	掘削補助工法	鏡吹付けコンクリート 注入式長尺鋼管フォアパイルリング 注入式長尺鋼管鏡ボルト 注入式短尺鏡ボルト 注入式フォアボーリング 一次吹付けインバート

2. 地質概要

地質縦断図を図-1に示す。本トンネルは、最大土被り約40mと、全体的に土被りが薄いトンネルである。このうち、起点側坑口360m区間は、1.0D～1.5D（D：トンネル径、 $D \approx 12\text{m}$ ）程度の小土被りが連続する区間であり、当初設計段階からグラウンドアーチの形成が困難な脆弱な地山であることが想定されていた。同区間においては、過去に地すべりの発生が設計段階で確認されており、トンネル掘削に伴う変状に対し、インバートによる早期閉合など対策が必要となる可能性があることや、調査ボーリングなどの切羽前方調査の実施が望ましいことなどが謳われている。

本トンネルの周辺地域は、過去に火山活動が盛んであったため、地質も火山の影響を受けたものが主体である。地質縦断図（図-1）によれば、岩種は流紋岩質凝灰角礫岩（Kib）、安山岩質火砕岩（Kan）、安山岩質貫入岩（An）により構成されていることがわかる。

一方、実際に起点側を掘削した時の切羽観察結果から、泥質凝灰岩と呼ばれる強度の小さい脆弱な地山が大半を占めており、天端崩落や切羽崩落が断続的に発生する脆弱な岩質であることが確認できる。細かい亀裂が脈状に入っており、その亀裂面に粘土が挟まっているため、亀裂を境に滑るように崩落するのが特徴である。湧水がある場合には崩落が止まらないことも多々あり、掘削作業には細心の注意が必要であると判断できる。想定以上の脆弱地山に対し、掘削補助工法などの技術を活用して、このような脆弱地山をいかに安全に掘削していくか、受注者および有識者を交えて度々検討を重ねた。

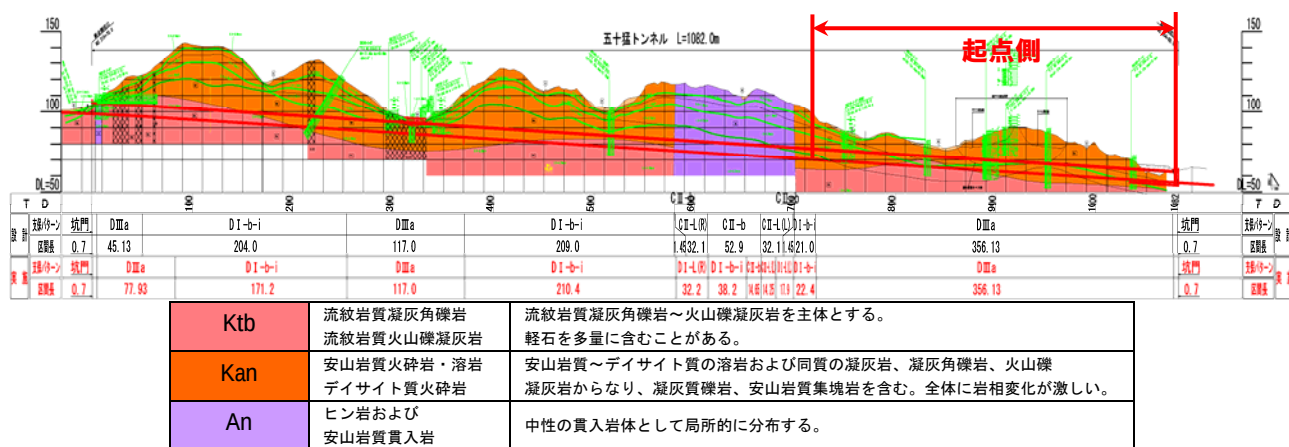


図-1 地質縦断面図

3. 施工上の課題

本トンネル施工における、脆弱で地山を安全に掘削するための課題として、(1) 切羽前方地山の事前把握、(2) 効果的な掘削補助工法の選定、(3) 変位増大区間への対策工を考えた。

(1) 切羽前方地山の事前把握

前述のとおり、起点側においては、設計段階の地質調査結果の想定以上に脆弱な地山が出現した。この地山を安全に掘削するため、詳細な切羽前方の地質情報の取得が必要であった。不良地山出現の事前把握はもちろん、前方の湧水の有無なども確認することができれば、地山の変化への備えと、変化時の迅速な対応が可能となる。

施工中に坑内から行う地質調査手法として先進ボーリング調査などが挙げられるが、地質調査は得られるデータが豊富である反面、大掛かりな機械設備と作業時間を必要とし、調査中は掘削作業を休止せざるを得ない。

当工事では、これによる工事工程の遅延を避けたいため、掘削作業を極力妨げず、迅速かつ簡便な調査手法を選択することが課題となっていた。

(2) 効果的な掘削補助工法の選定

起点側は、主に泥質凝灰岩で構成されており、時折、火山礫凝灰岩などの異なる岩質が部分的に出現したり、亀裂の粗密が変化するなど、岩相の変化に富んでいた。これにより、天端崩落や切羽崩落が発生し、その崩落の規模も刻々と変化する状況であった（図-2、図-3）。

天端崩落や切羽崩落を抑止し、地山の安定化を図るため、その場の状況に応じた効果的な掘削補助工法を選定することが課題となっていた。

(3) 変位増大区間への対策工

起点側のTD=760m（TD=Tunnel Distance、トンネル掘削距離を意味する）付近の地点においては、坑内変位計測結果のうち、沈下量の初期変位速度がこれまでの計測結果よりも明らかに大きい傾向を示していた。計測から、通常での初期変位速度は沈下量2～5mm/日であったのに対し、本地点では23mm/日と、初期変位速度が通常の5～10倍程度で推移していることが明らかとなった。数値は計測開始から約1日で計測工Aの管理レベルⅡ（23mm）を超過しており、変位抑制対策を講ずることが課題となっていた。



図-2 切羽崩落状況（TD=750m付近）



図-3 切羽崩落状況（TD=760m付）

4. 課題解決策と結果

(1) 切羽前方調査ボーリング

本トンネルの特性上、地山状況が刻々と変化することから、簡易的なものであっても切羽前方の情報を継続して入手することが必要である。このため、定期的に「切羽前方調査ボーリング」を実施することとしている。この調査は、ドリルジャンボにより切羽の3か所（左・中央・右）に延長約30mの削孔（図-4）を行い、この区間のデータを取得・分析するものである。

この調査手法で取得できたデータは、削孔速度・削孔水の色と量・くり粉の状態（削孔した際に孔から出る岩片）・湧水の有無の4つである。データは簡素なものではあるが、現場にある機械・人員で容易に実施可能であり、ボーリング作業開始からデータ分析までを半日程度で完了することができる。本トンネルでは、週末の閉所直前のタイミングなどを利用して調査を行い、工事工程に与える影響を最小限としている。表-2に使用機材の概要を示す。

切羽前方調査ボーリングでは、L=3mのロッドを順次継ぎ足しながら約30mの削孔を実施する。ロッド1本あたりの削孔に要する時間をストップウォッチで計測し、3m区間の平均削孔速度Vを計算する。仮にL=3mのロッド1本あたりの削孔時間が90秒であったとすると、

$$\text{平均削孔速度 } V = 90(\text{sec}) / 3(\text{m}) = 30(\text{sec/m}) \quad \cdots(1)$$

すなわち、1mあたりの削孔に要する時間は30秒となる。この数値の大小により、地山の硬軟を判断する。なお、地山が軟質であるほど削孔に要する時間が少なくなる（早く削孔できる）ためVは小さくなり、硬質であれば所要時間が多くなるためVは大きくなる。臨床トンネル工学研究所の報告書⁹⁾によれば、削孔速度に基づく地山の硬軟の判断指標として表-3が提案されている。

下表のとおり、30(sec/m)を下回る数値が見られた場合には、地山は「危険」な状況であり、補助工法が必要と判断できる。本トンネルにおいては、この判断指標を採用して、前方地山の硬軟の評価を行った。

切羽前方調査ボーリングのデータと掘削後に得られたデータを並べたものが図-6である。上段から地質縦断面図、設計・実施支保パターン、実施した掘削補助工法と変状対策工、切羽前方調査ボーリングの削孔速度、坑内変位計測結果（切羽離れ1D時点の値）、切羽評価点を並べたものである。各グラフとも、上方に点がある場合は地山が安定、下方の場合は地山が不良を示す傾向となるよう整理をした。赤線で図示した区間が起点側である。なお、削孔水の色やくり粉は短区間で変化しており表現が複雑であること、湧水については大量湧水等が見られなかったことから、地山判定から外した。以下に考察を

述べる。

- ・起点側手前の①部（TD=690m付近）において、削孔速度の急激な低下を捉えた。事後の掘削での切羽評価点も低下傾向であった。
- ・②部（TD=705～740m付近）においては、削孔速度30(sec/m)以下が連続しており、表-3の判断指標では掘削は「危険」であった。このため、掘削補助工法が必要と判断される地山の出現と予測できる。実際に、TD=707mでは5m³程度の鏡面崩落が発生した。

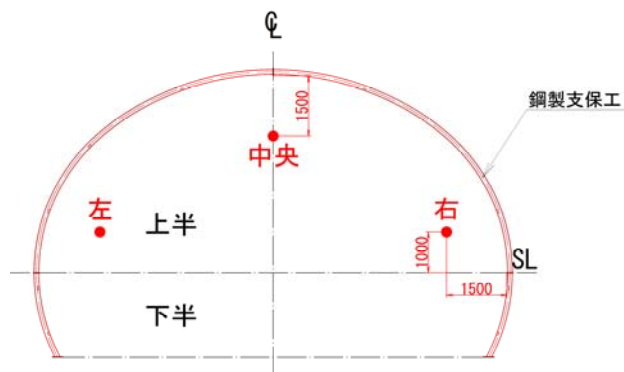


図-4 切羽前方調査ボーリング位置

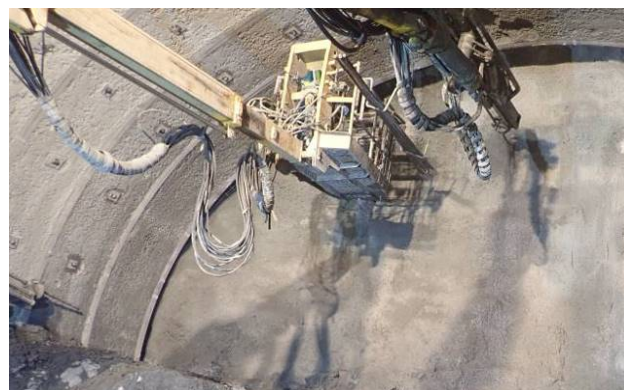


図-5 切羽前方調査ボーリング施工状況

表-2 使用機材の概要

使用機材	ドリルジャンボ
ドリフター	210kg
ビット	φ 64mm
ロッド	3m×9本程度
フィード圧	5MPa(原則一定)

表-3 削孔速度—地山の硬軟の関係⁹⁾

岩 質	掘 削	判断基準
低強度層	危 険	30(sec/m) 以下
軟 質	注 意	30～60(sec/m) 程度
中・硬質	概ね安定	60(sec/m) 以上

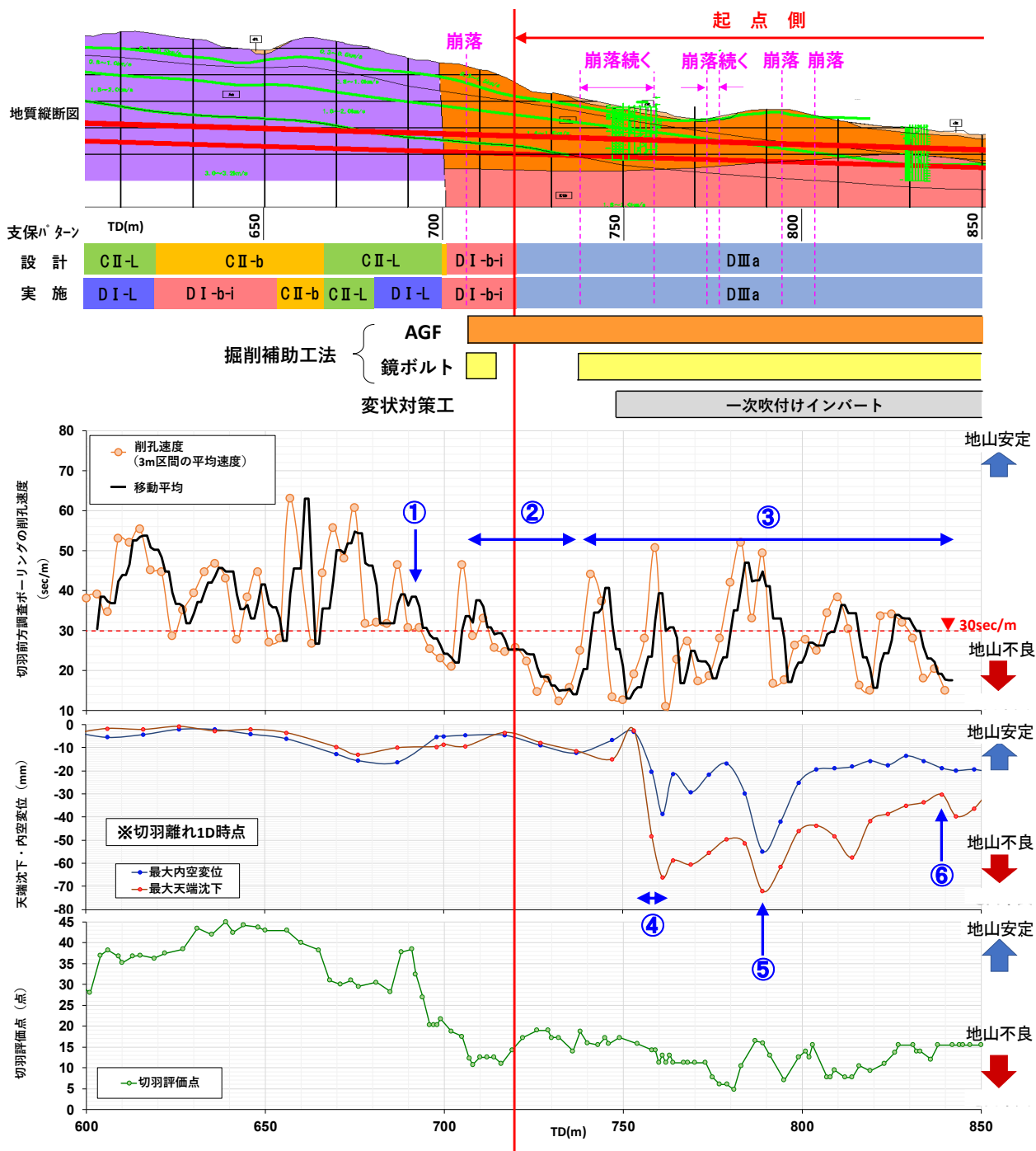


図-6 切羽前方調査ボーリング結果と掘削データ

・③部 (TD=740～840m付近) では、削孔速度のばらつきが大きいですが、34データのうち21データ (62%) が削孔速度30(sec/m)以下を下回っていること、切羽評価点も上昇傾向にないことから、総じて不良な地山が続くものと判断できる。

図-6のように、切羽前方調査ボーリングデータと掘削後の取得データを並べてみると、削孔速度はある程度前方の地山のトレンドを示しているように考察できる。ノイズ成分のようなデータもあるが、前方地山の状況を大まかに把握するには有用であったと判断できる。

(2) 掘削補助工法の選定

本トンネルにおいて検討した掘削補助工法について、下記で解説する。

a) 天端部の安定対策

天端部における安定確保および先行変位抑制を目的とした掘削補助工法として、注入式フォアポーリングや注入式長尺鋼管フォアパイリング (以下、AGF) などの技術がある。

注入式フォアポーリングは、L=3mの中空のボルトを切羽前方に打設し、注入材を圧入することで改良体を形

成し地山補強を図る工法である（図-7）。AGFは、約12mの鋼管を打設し注入材を圧入することで鋼管と注入材が一体となった改良体を形成し、天端および切羽の安定化、ならびに先行変位の抑制を図る工法である（図-8）。注入式フォアポーリングは局所的・短期的な崩落の場合、AGFは大規模・連続的な崩落の場合に適用するのが一般的である。

b) 切羽の安定対策

切羽の安定対策を目的とした掘削補助工法としては、鏡吹付けコンクリートや鏡ボルト工（以下、鏡ボルト）（図-9）などが挙げられる。

上記に述べた掘削補助工法を組み合わせ、不良地山の天端崩落や切羽崩落を最小限にとどめるため、掘削補助工法の選定フローチャートを作成した（図-10）。掘削補助工法の組み合わせは、のフローチャートに則り選定している。

このフローは、切羽観察結果にベースを置くものであるが、実際の掘削補助工法の決定にあたっては、切羽前方調査ボーリングの結果も参考にしている。例えば、削孔速度に目立った変化がなければ、同様の掘削補助工法の継続検討を行っている。

なお、施工本数、施工位置・間隔、注入量などについては、切羽観察結果および手前で施工した注入結果をベースに選定を行っている。

このように、地山状況に応じ、掘削補助工法の組み合わせや施工本数・注入量を見直すことで、効率的な天端崩落・切羽崩落の抑止と、施工費用の低減を目指した。

当該トンネルは鏡吹付けコンクリート（ $t=5\text{cm}$ ）を実施したにも関わらず、切羽が自立せず切羽前方から2m程度の崩落が数回発生している。このため、崩落した際は吹付けコンクリートを併用し掘削を行っている。

対策工として短尺鏡ボルトがあるが、前述のような崩落の場合には、短尺ボルトでは剛性が低く効果が期待できない。また、切羽状況から今後も同様の崩落が発生する可能性があったことから、フローでは鏡ボルトが必要となる場合は長尺ボルトを選定することとしている。

(3) 変位増大抑制対策

図-6の④部において、切羽1D離れ時点での天端沈下・内空変位が急激に増大している。TD=761m地点では約1日で計測工Aの管理レベルⅡ（23mm）を超過した。過去の地すべりの発生を踏まえ、変状対策工選定フローチャート（図-11）に従い、変状対策工を実施している。まず、増しロックボルトによる対策工を行い（図-12）、変位の収束が確認できなかったため、切羽を止め、一次吹付けインバートの施工を行い早期閉合を図った（図-13）。一次吹付けインバートについては、次に述べる施工上の工夫を行っている。

① 本設インバート施工時に取り壊しを行うと、再度変位が増大する懸念があるため、一次吹付けインバー

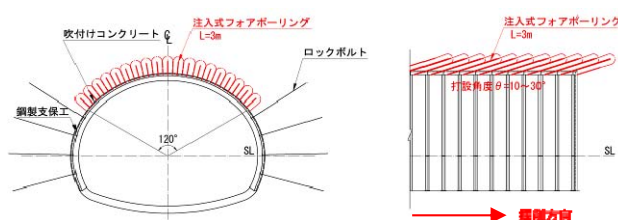


図-7 注入式フォアポーリング施工例²⁾

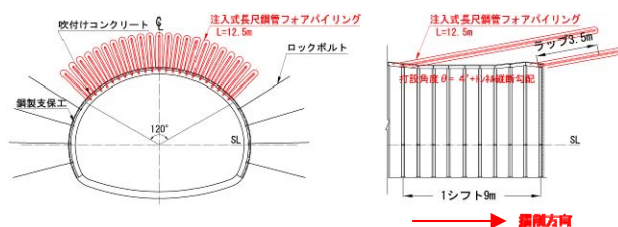


図-8 AGF施工例²⁾

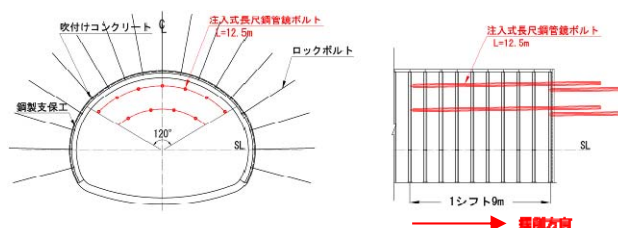


図-9 鏡ボルト施工例²⁾

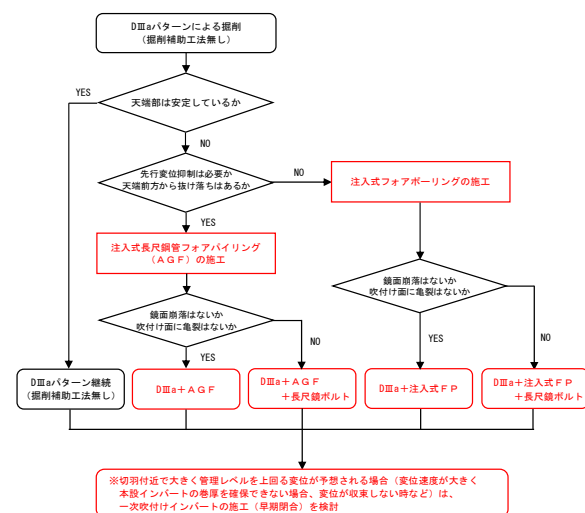


図-10 掘削補助工法選定フローチャート

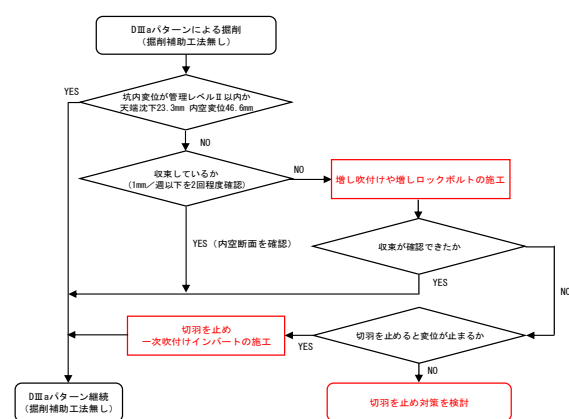


図-11 変状対策工選定フローチャート

トを本設インバートの一部として扱っている。なお本トンネルでは、呼び強度 36N/mm^2 の高強度吹付けコンクリートを採用しており、本設インバートの 18N/mm^2 を上回るため、必要な強度は担保されている。

- ② 下半の鋼製支保工の足元まで吹付けコンクリートを密着させることで、鋼製支保工から一次吹付けインバートに確実に軸力が伝達するように配慮している。
- ③ 一次吹付けインバート施工中に切羽崩落が発生する可能性があることから、安全を考慮し、上半からの離れが約 1D になってから、掘削・吹付・埋戻しを 2m ずつ計 6～8m 区間毎に実施している。

坑内変位計測結果の例として、TD=758m における沈下量の経時変化を示す（図-14）。増しロックボルト施工を行っても沈下が収束しなかったため、一次吹付けインバートを施工している。仮に一次吹付けインバートを施工しなかった場合の沈下量のイメージを①線、実際の沈下量の傾向を②線に示す。一次吹付けインバート施工後は沈下が緩やかに推移していることがわかる。その先の区間についても一次吹付けインバートによる早期閉合を継続実施することで、図-6 に示す⑤部（TD=789m）の最大沈下量 72mm をピークに次第に減少に転じている。⑥部（TD=839m）では、初期変位速度は依然大きかったものの、天端沈下量を 30mm 程度まで抑えることができた。吹付けインバートによる変位増大抑制効果が最大限に発揮されたためであるものと考察する。

4. おわりに

本トンネルでは、設計で想定されていた以上の脆弱な地山が出現し、相次ぐ天端崩落や切羽崩落の発生、変位増大区間の出現など、難題が重なるトンネル工事である。しかし、掘削補助工法や変状対策工を適用したことにより、無事故無災害でトンネル掘削を終えることができた。

この結果は我々発注者だけでなく、受注者及び有識者と一体となって幾度も議論・検討を重ねたことで、導き出したものである。

本トンネルで実施した対策事例が、同様の脆弱地山が想定されるトンネル現場への参考の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 技術研究部会 トンネル補助工法委員会 平成22年～23年度活動報告書, NPO法人 臨床トンネル工学研究所, 2012.3
- 2) 2016年制定 トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, 公益社団法人 土木学会, 2016.8

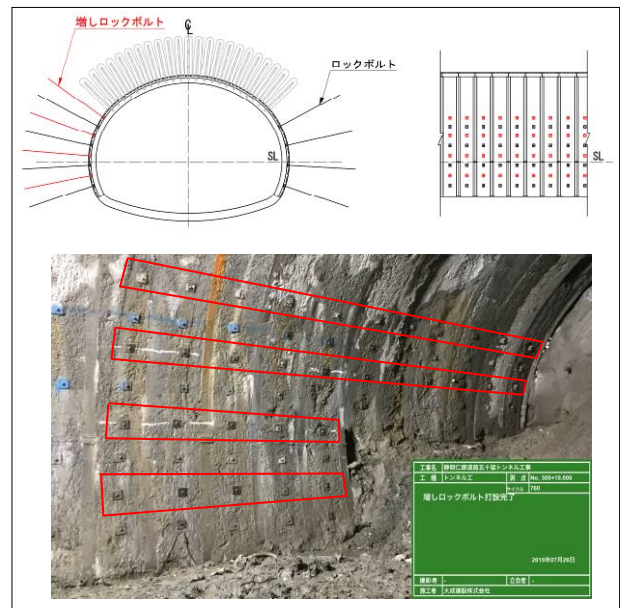


図-12 増しロックボルト

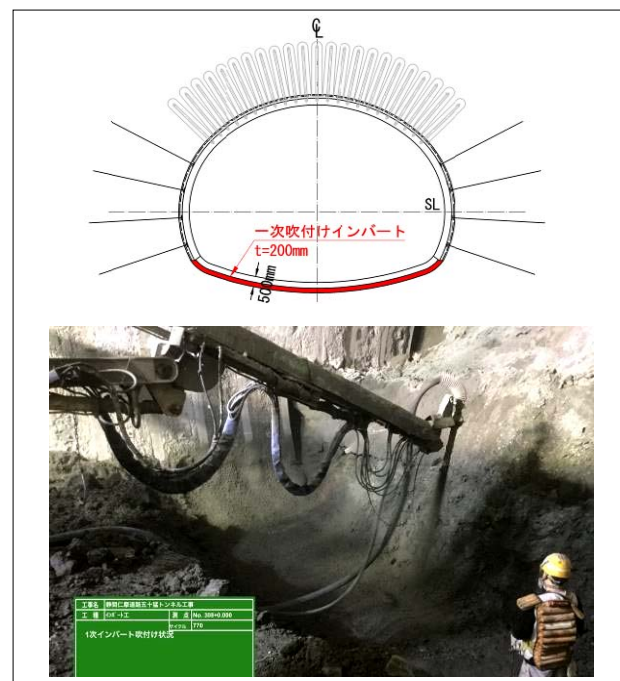


図-13 一次吹付けインバート

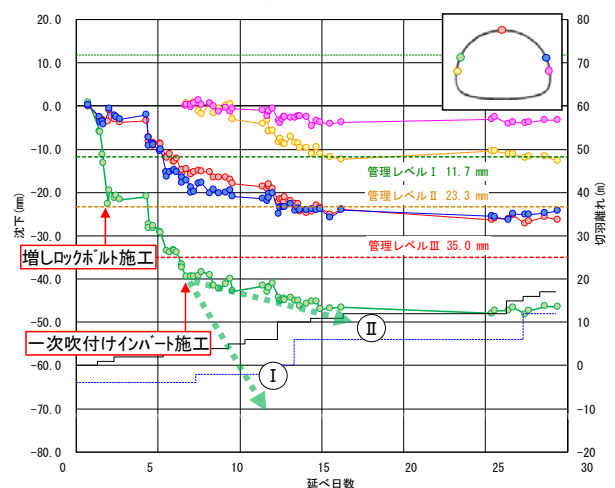


図-14 坑内変位計測結果 (TD=758m)