

断層群を有する長大山岳トンネルの 施工リスク低減に向けた取り組み

弓削 慎一¹・柏木 亮²

¹ 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北陸新幹線建設局 敦賀工事事務部 工事第五課
(〒914-0047 福井県敦賀市東洋町1番15号)
E-mail: yuge.shi-i5xb@jrtr.go.jp

² 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北陸新幹線建設局 敦賀工事事務部 工事第五課
(〒914-0047 福井県敦賀市東洋町1番15号)
E-mail: kashiwagi.ryo-p55b@jrtr.go.jp

北陸新幹線(金沢・敦賀間)で最長の新北陸トンネルは脆弱な地山状況や突発湧水を含む難工事が予測される中、厳しい工程、建設コスト削減の社会的要請を背景に安全かつ高品質なトンネル工事が求められている。これらの課題を踏まえ、新北陸トンネルのそれぞれの工区において、複数の切羽前方探査を組合わせて断層帯の位置、性状を捉え対策工へ反映させることで全6工区において無事に掘削を完了することができた。本稿では、開業までに軌道・電気等の設備工事が必要となる長大山岳トンネルのリスク低減に向けた工程管理の取り組みとして、全貫通まで約6年を要した全6工区の施工結果を報告する。

Key Words: fault zone, long mountain tunnel, cutting face, core boring, electromagnetism method

1. はじめに

北陸新幹線は東京都を起点とし、長野市付近、富山市付近、小浜市付近を経由して大阪市に至る延長約690kmの路線で、1973(昭和48)年に整備計画が決定された。現在建設中の北陸新幹線(金沢・敦賀間)については、2012(平成24)年6月に国土交通大臣より工事実施計画(その1)認可を受け、2017(平成29)年10月に軌道・建築・電気・機械などの開業設備工事に係る工事実施計

画(その2)認可を受けており、2023(令和5)年度末の完成に向けて、建設工事が進められているところである。

新北陸トンネルは現在建設中の区間では最長のトンネルであり、北陸新幹線としては、長野県飯山市と新潟県上越市を結ぶ飯山トンネルに次ぐ2番目の長さとなっている(図-1)。

新北陸トンネルの地質は、大半の区間において美濃帯に属す古生代～中生代ジュラ紀の堆積岩で構成されており、砂岩、粘板岩(頁岩)、チャート及び緑色岩類などの岩石、地層が発達している(図-2)。また、最大土被りが500mを越える箇所や多くの断層を伴うことにより層理面が複雑に変化し、亀裂が卓越する区間の出現が予想され、特に南条山地と敦賀湾東縁山地を分ける活断層である柳ヶ瀬断層帯は、甲楽城断層、山中断層、柳ヶ瀬断層で構成されており¹⁾、これらの断層は新北陸トンネルと近接するJR北陸本線の北陸トンネルやNEXCO北陸自動車道の敦賀トンネルでも確認され、脆弱な地山がトンネル工事を困難にしたとの記録が残っている²⁾。

このような地質条件をもつトンネルにおいては、急激な地山状況の変化が、切羽の安定化へ与える影響が大きいため、入念な前方探査により切羽前方の地山状況を十分に把握する必要がある。

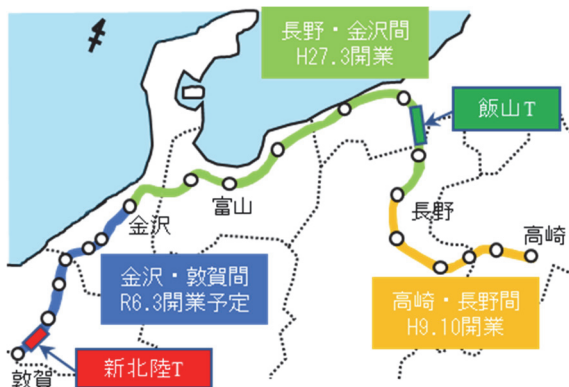


図-1 新北陸トンネル位置図

また、金沢―敦賀間の早期開業に向けて本トンネルの完成が重要なクリティカルパスと位置付けられた。本稿では、開業までに軌道・電気等の設備工事が必要となる長大山岳トンネルのリスク低減に向けた工程管理の取組みについて、全貫通まで約6年を要した全6工区の施工結果を基に報告する。

2. 工事概要

長大山岳トンネルの工区割については、取付道路等の地理的条件、維持管理方法、事前調査を踏まえた工事難易度、工事期間、経済性等を加味して検討した。その結果、本坑は最長5km程度、斜坑は5箇所で最長700m程度となる全6工区の工区割で施工することとなった。

(1) 清水工区

最も金沢方に位置し、唯一本坑から掘削を開始した工区で、トンネル延長は2,480m、敦賀方面に向かって上り4%で掘削する計画とした。事前調査結果から前半(448km～449.5km)の地質は、砂岩と粘板岩の互層、後半(449.5km～450.5km)は粘板岩及び砂岩混在岩の互層、土被りは最大で200m程度で、貝谷川付近では断層も予測された。

(2) 奥野々工区

金沢方から2番目に位置し、下り斜坑298m掘削後、本坑を4,880m施工する工区で敦賀方面に向かって上り8.2%で掘削する計画とした。地質は、砂岩、粘板岩や

チャートを主体とし、断層破碎帯、脆弱区間や突発・多量湧水等が想定された。また、土被りは30m～最大500m超であり、国道305号や奥野々川と土被り約30mで交差する。そのため高圧地下水や、チャート層では亀裂が発達しているため、亀裂内に蓄積した帯水による突発湧水の発生が予測された。

(3) 大桐工区

金沢方から3番目に位置し、下り斜坑483m掘削後、本坑を3,605m施工する工区で敦賀方面に向かって上り8.2%で南越前町と敦賀市の境界まで掘削する計画とした。地質は、砂岩・粘板岩を主体とした地山が連続または貫入岩が狭在し、断層が断続的に現れ、地質性状の著しい変化が予想された。また、土被りは80m～最大で440mとなり、北陸自動車のトンネル2本と離隔約40mで交差する。柳ヶ瀬断層帯や亀裂内に蓄積された水により、多量の湧水が予測された。

(4) 葉原工区

金沢方から4番目に位置し、下り斜坑557m掘削後、本坑を4,495m施工する工区で金沢方面に向かって上り15%で南越前町と敦賀市の境界まで掘削する計画とした。前半(461.5km～463.5km)の地質は、砂岩・粘板岩を主体とした堅固な地質で、後半(459km～461.5km)は土被り430mで強風化した花崗岩で突発湧水も想定された。

(5) 田尻工区

金沢方から5番目に位置し、下り斜坑712m掘削後、本坑を2,170m掘削する工区で、金沢方面に向かって上

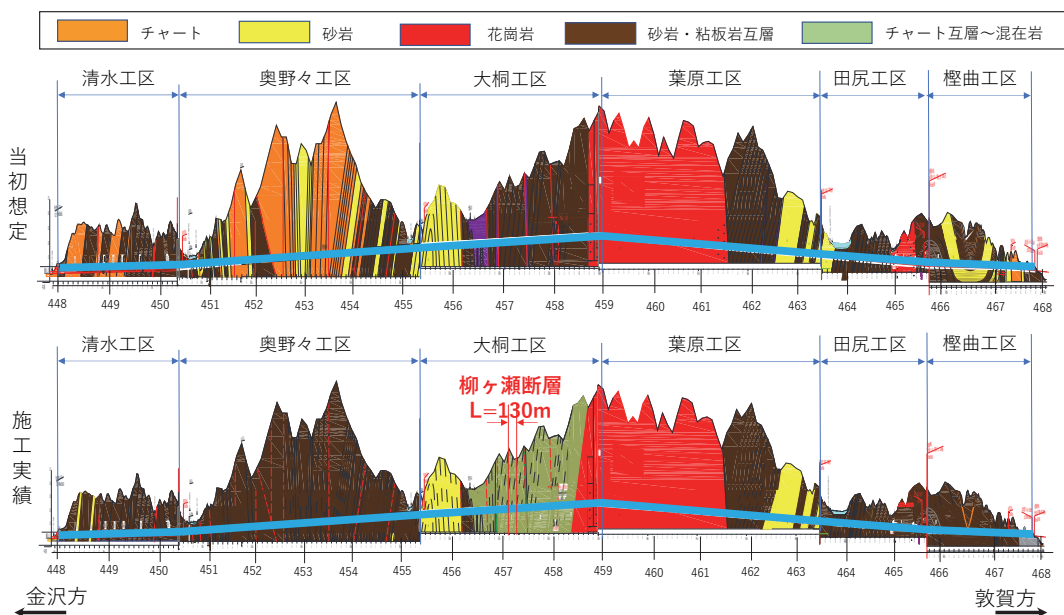


図-2 地質縦断面図

り15%で掘削する計画とした。前半(465km~465.5km)の地質は、粘板岩を主体とした強風化花崗岩とウツロギ峠断層の存在が懸念された。後半(463.5km~464km)の地質は混在岩で地山風化も想定された。

(6) 樫曲工区

最も敦賀方に位置し、上り斜坑 284m 掘削後、本坑を 2,130m 掘削する工区で、金沢方面に上り 4%で、敦賀方面に下り 4%で掘削する計画とした。地質は、粘板岩と砂岩の互層で、軟弱な地層であり、多量湧水も想定された。

3. 課せられた課題

北陸新幹線(金沢・敦賀間)は、平成 27 年 1 月の政府・与党申合せにおいて、沿線地方公共団体の最大限の取組みを前提に、完成・開業時期を 3 年前倒しすることとされたことから、工程が厳しい中、各工区で地山の脆弱区間や断層破碎帯、高圧地下水などの課題を抱えている中で、工事を完了させる必要があった。つまり長大トンネルであるがゆえ切羽停止に伴う工程遅延リスクが高い中、掘削を迅速に完了させることが第一の使命であったわけである。

したがって、新北陸トンネルの施工にあたっては、事前に複数の調査を併用することで、地山状態を把握しつつ、掘削及び補助工法を効果的に選択できるよう検討することとした。

4. 各工区の事前探査結果と地山状況の比較

(1) 清水工区

切羽に発破孔を設け、後方の受信機で発破の弾性波を測定する TSP 探査を行った。湧水が多い区間および TSP 探査で地質不良と判定された区間では、地盤直下の比抵抗分布を求める電磁波探査(FDEM 法)を併用した。また、断層が想定される区間については、中尺コアボーリング(PS-WL 工法)を L=100m 行い、コア採取を行った。

事前調査の結果としては、断層の存在は確認できなかったものの、粘板岩・砂岩・凝灰岩の互層で、劣化が激しく岩としての性状を保てない地層と判断した。

また、掘削実績としては、粘板岩を主体とした砂岩混在岩になっており、破碎箇所も多数あった。449km993m の位置(写真-1)では断層も確認できた。

(2) 奥野々工区

反射面の位置や湧水の存在を推定するため、TSP 探査を実施した。また、前方地山の等級を評価するために、中尺ノンコア削孔検層(150m ごと)と短尺ノンコア削孔検層(50m ごと)をそれぞれ実施した。

450km250m~450km265m の区間において、TSP 探査の結果では、P 波速度 V_p の変動、反射面の密集が確認され、総合的な評価としては、多亀裂なチャートと軟質な砂岩粘板岩の互層の境界付近で、不安定な地山と

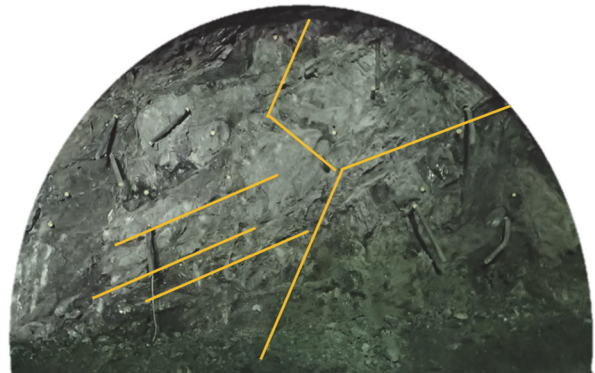


写真-1 切羽状況 (449km993m 付近)

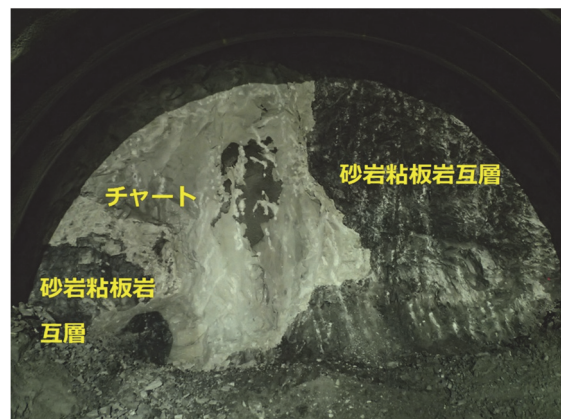


写真-2 切羽状況 (453km260m 付近)

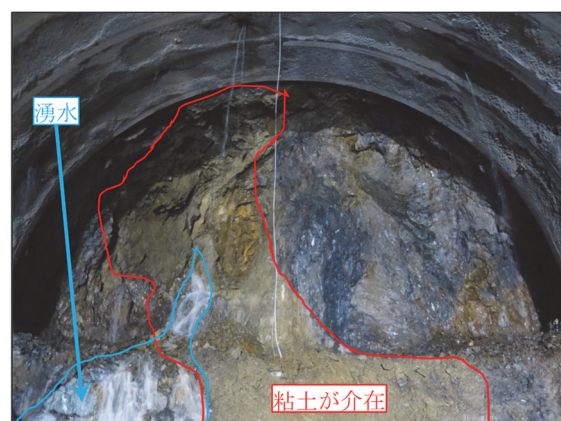


写真-3 切羽状況 (457km107m)

予測した。

掘削実績としては、多亀裂チャートの地山（写真-2）であり、少量の湧水の影響で、切羽面の自立性が悪い状況であったが、支保パターンの変更と核残し掘削の実施に加え、中尺ノンコア削孔検層による水抜き効果により、施工時の切羽湧水を 20L/min 程度に抑えることができた。

(3) 大桐工区

脆弱層や層境付近で、トンネル側壁からの発破振動を受信して地山状況を把握する弾性波トモグラフィ探査（反射法）を実施し、多量湧水が予測される地点では電磁波探査（FDEM 法）を実施した。さらに柳ヶ瀬断層帯掘削においては、地山や湧水状況の詳細把握と水位低下を目的とした中尺コアボーリング（PS-WL 工法）³⁾を追加した。

457km100m 付近において、弾性波トモグラフィ探査により、速度域の低下が見られたため、コアボーリングによりコア状況の確認を行った結果、亀裂質で粘土を介在するコアが採取されたことに加え、コアが採取できなかった箇所があったため、断層破碎帯と判断した。

掘削実績としては、亀裂質で粘土を介在した地山（写真-3）であったが、事前調査の結果を踏まえて、確実な水抜きと先受け工の実施により、断層破碎帯部を切羽の崩落や縫返し等なく施工することができた。

(4) 葉原工区

強風化した花崗岩、突発湧水が予測される地層に対し、ドリルジャンボによる短尺ノンコア削孔検層や水抜きボーリングで水位低下を図り、湧水対策とした。

事前調査の結果としては、花崗岩優勢で、粘土化した岩を介在し、不安定な状況と予測した。さらに 460km878m の削孔検層で、1,500L/min の大量湧水も観測された。

掘削実績としては、敦賀方からの約 1,800m 区間では、砂岩・粘板岩を主体とした堅硬な地質であった。その後の約 2,700m 区間では、全面花崗岩で一部劣化が見られる粘土層が介在し、密着力は弱くブレーカで簡単に落ちる地層であった。

(5) 田尻工区

水位低下を図るための削孔検層、断層位置を特定するための中尺コアボーリング（PS-WL 工法）及び多量湧水が予測される地点では電磁波探査（FDEM 法）を実施した。

事前調査の結果としては、粘板岩を主体とし、一部に輝緑凝灰岩を介在し、亀裂質・破碎質な地山と予測し、破碎帯である可能性を示唆した。

掘削実績としては、多亀裂な地山で大部分が粘板岩で、亀裂部に粘土が介在する状況であったが、全体的に破碎質であり、先受工と注入式鏡ボルトを採用し、無事掘削したもののウツロギ峠断層区間の特定には至らなかった。

(6) 檜曲工区

表-1 地山と湧水量の計画と実績（湧水量は各工区の最大値）

工区	地山の範囲	当初想定 (地質・切羽湧水量)	実績 (地質・切羽湧水量・坑内湧水量)
清水	449km970m ～450km190m	亀裂の多い粘板岩 最大 1,600L/min	粘板岩と砂岩の互層（破碎複数、断層あり） 約 200L/min 約 2,100L/min
奥野々	453km250m ～453km265m	多亀裂なチャートと軟質な砂岩 粘板岩互層 最大 2,800L/min	多亀裂チャートと砂岩粘板岩の互層 約 300L/min 約 5,600L/min
大桐	456km720m ～457km105m	砂岩・粘板岩の互層主体で緑色 岩が混入 最大 2,500L/min	亀裂質で粘土を介在する 約 5,000L/min 約 10,800L/min
葉原	461km400m ～461km500m	花崗岩優勢で粘土化した岩介在 最大 6,100L/min	全面花崗岩（劣化が見られる粘土層介入） 約 2,500L/min 約 10,700L/min
田尻	464km800m ～465km100m	粘板岩主体（亀裂質・破碎質） 最大 300L/min	大部分が粘板岩（多亀裂、粘土が介在） 約 1,150L/min 約 3,100L/min
檜曲	466km940m ～467km92m	粘板岩・砂岩主体（破碎質） 最大 300L/min	風化した粘板岩の互層（大きな亀裂あり） 約 250 L/min 約 1,300L/min

水抜き効果及び切羽前方の地質分布を早期に把握し対策検討を行うことを目的とした水抜ボーリング、切羽前方穿孔探査（DRISS）及び多量湧水が予測される地点では電磁波探査（FDEM法）を実施した。

事前調査の結果としては、採取したボーリングコアから粘板岩及び砂岩を主体とした破碎質な地質であると予測した。

掘削実績としては、灰色と茶色に風化した粘板岩の互層で、割れ目の大きな亀裂も見られたことから、補助工法を併用して慎重に掘削を行った。

5. 施工結果

様々なリスクに対し効果的な対策を検討・実施した結果、新北陸トンネルは2014年6月に奥野々工区着手後、約6年を経た2020年7月に葉原工区・田尻工区の工区境にて全貫通に至った。トンネル全体の工程管理および各工区の施工結果について、その概要を総括する。

(1) 全体工程管理

新北陸トンネルの全体工程（図-3）より、本坑掘削期間については、当初工程と実績工程に大きな差異がない

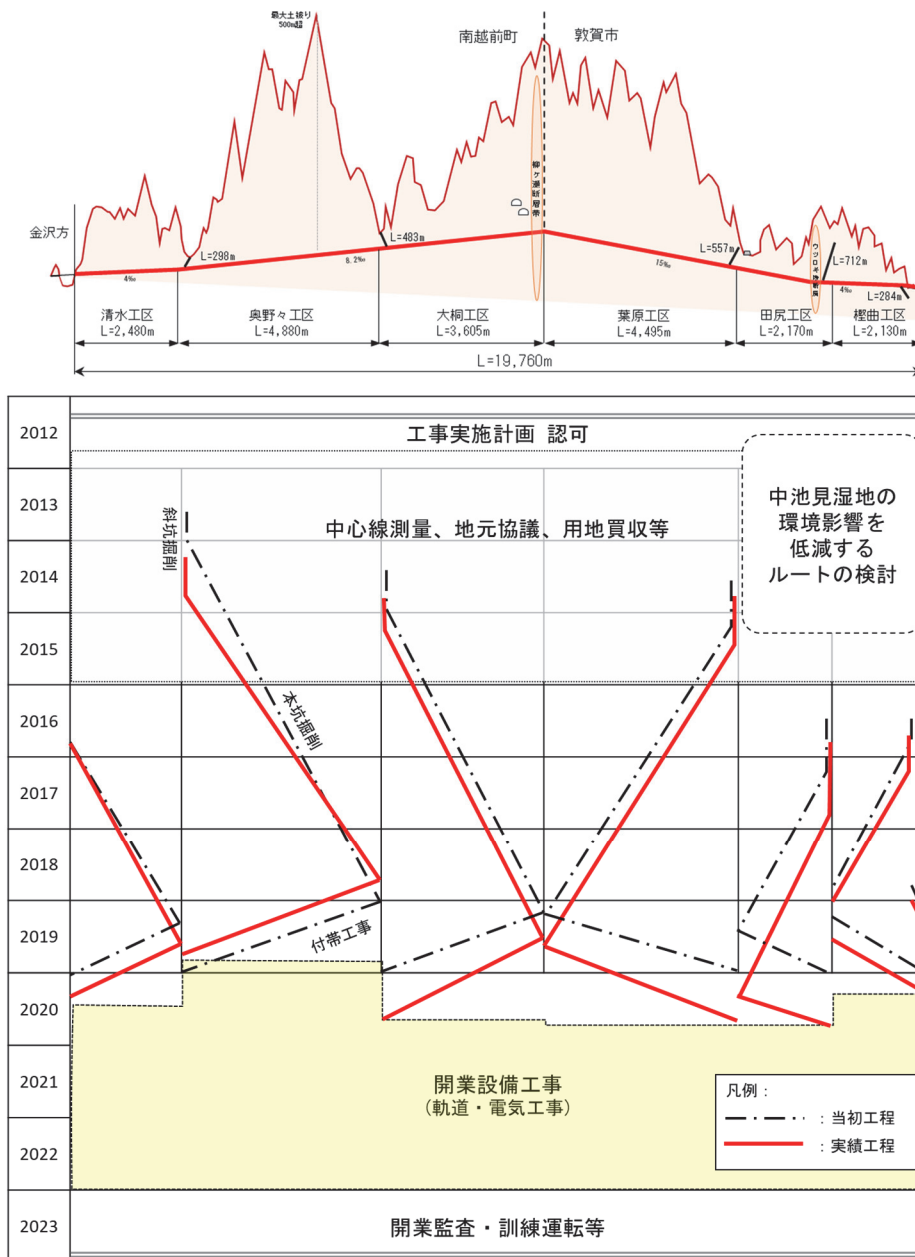


図-3 新北陸トンネル工程表

ことがわかる。特に奥野々工区は想定よりも早期に本坑掘削を終えることができた。一方で、工事着手前、斜坑掘削期間、附帯工事については想定よりも期間を要しており、下記のような理由が挙げられる。

- ・進入路、工事ヤード、発生土活用、等々の地元協議に不測の時間を要した。
- ・斜坑の変状対策等に想定を上回る時間を要した。
- ・スラブ軌道の路盤工等付帯工事は、使用できる斜坑等進入路が1箇所の場合、片押し施工となり非常に効率が悪く、特に大桐・葉原工区では想定を上回る時間を要した。

今後の長大山岳トンネルの計画に当たっては、上記問題点について留意して進める必要がある。

一方、新幹線建設特有である軌道・電気等の開業設備工事については、全工区の工事完了後、両坑口から順々に延伸して整備する施工方法が一般的であったが、昨今の社会情勢等を鑑み少しでもリスク回避する必要があったため、斜坑を用いてレールや軌道スラブを搬入・敷設することや、軌道工事前に電気設備工事を実施する等、工程遅延リスクを回避する取組みを実施した。

(2) 清水工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破工法により掘削した。発破作業の危険性リスクを低減するため、通常使用する電気雷管ではなく導火管付雷管を採用し、迷走電流や漏電等の危険性を回避した。また、ずり搬出にはベルトコンベアを設置し、ダンプ走行に伴う危険性や路盤の泥濘化及び走行時の粉じんなどを抑制し作業環境の改善を図った。掘削途中の粘板岩地山では、切羽が通り越してからの泥濘化が進み、縫い返しを行った区間や、鏡が返ってくるため切羽に補強ボルトを打設する区間等もあったが、適切な補助工法等を選択することにより施工を完了した。

(3) 奥野々工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破により掘削した。ずり搬出は、坑内の作業環境の改善を図り、施工の安全性を高めるため、ベルトコンベアを採用した。トンネル全線にわたり、切羽前方 150m を調査できる中尺ノンコア削孔検層及び弾性波探査、短尺ノンコア削孔検層など併用して実施し、これらの探査情報を活用し安全に施工を完了した。また、覆工コンクリートは、流動性の高い高充填コンクリートを全線にわたり採用し、コンクリートの充填性、均一性を向上させることで品質の向上を図った。

(4) 大桐工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破により掘削

した。ずり搬出は坑内の作業環境改善を図り、ベルトコンベアを採用した。断層破碎帯や亀裂内に蓄積された水により多量の湧水が発生したため、地質調査を兼ねた中尺ボーリング (100m)、ドリルジャンボによる水抜孔 (30m)、清濁分離排水を実施した。また、北陸自動車道敦賀トンネルの直下を最小離隔 43m で近接施工を実施した。高速道路への影響予測として、近接度区分の判定、FEM 解析による影響予測、高速道路の事前調査と計測実施とともに、長尺鋼管鏡ボルト等の適切な補助工法を選定・実施することで高速道路に有害な影響を与えることなく施工を完了した。

(5) 葉原工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破により掘削した。幅 750mm の幅広ベルトコンベアを使用したズリ出しにより施工サイクルの向上を図った。461km680m～463km480m (約 1,800m) の区間では、砂岩・粘板岩を主体とした堅硬な地質で、最大月進は 186m を記録した。その後の 458km985m～461km680m (約 2,700m) 区間は花崗岩区間で土被りは最大で 430m、強風化した脆弱な粘土、突発湧水と闘いながらの施工であった。地山不良箇所においては、一次インバートや長尺鋼管先受け工等の補助工法を採用し、湧水に対してはドリルジャンボによる短尺ノンコア削孔検層、水抜きボーリング (L=120m) を全線で行い、前方の水位低下を図りながら切羽での安全性向上と品質確保に努め、施工を完了した。

(6) 田尻工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破により掘削した。ずり出しは 30 t ダンプによるタイヤ方式を採用した。事前調査で懸念されていた 464km900m～465km400m (約 500m) 区間のウツロギ断層と強風化花崗岩帯では、地山不良がみられたものの長尺鋼管先受け工と注入式鏡ボルトを採用し無事通過した。さらに 463km700m～464km050m (約 350m) 区間は土被り 40m の圃場直下であり、地山風化が顕著で路盤の泥濘化が激しかったが、長尺鋼管先受け工、鏡ボルト及び一次インバートを施工して良質材で置き換えること等により、施工を完了した。

(7) 檜曲工区

掘削工法は補助ベンチ付全断面工法で発破により掘削した。ずり出しは 30 t ダンプによるタイヤ方式を採用した。敦賀方出口部には、土被り 2m 以下の小土被り部が 4 箇所 (約 280m) あり、改良土で事前に保護盛土を施工した後に掘削を行った。土砂地山であったため、地表面への影響を未然に防止し施工を完了した。

6. 結論

本稿では、新北陸トンネルにおいて「断層における脆弱な地山」、「クリティカルな工程」を念頭に置いた、各工区での事前調査によるリスク低減策について述べた。得られた結論を下記に示す。

- (1) ロングレンジの対策として、清水・奥野々・大桐工区において弾性波トモグラフィ探査 (TSP 探査) により、急激な地質変化を掘削前に把握することで、大小の破碎帯を確認できた。(最大 150m レンジ)
- (2) ミドルレンジの対策として、全工区においてノンコアボーリング (水抜きボーリング含む) 及び電磁波探査 (FDEM 探査) により、帯水状況などを掘削前に把握できた。(50m~100m レンジ)
- (3) ショートレンジの対策として、奥野々・大桐・葉原・檜曲・田尻工区において削孔検層や切羽前方穿孔探査により、地山の硬軟などを推定し、地山等級を予測した。(約 30m レンジ)

- (4) 上記のとおり、レンジの異なる各種前方探査結果に湧水予測技術を組み合わせ、評価することにより、事前に不良地山の状況を高い精度で予測することができた。

現在、新北陸トンネルは掘削及び覆工は完了しており、軌道及び電気工事に移行している。今後も北陸新幹線 (金沢・敦賀間) の開業に向けて安全に工事を進めていく。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯の長期評価について，2004.1
- 2) 磯谷佑介：敦賀地区のトンネル群，北陸自動車道，トンネルと地下，Vol.6，No.10，pp.43-49，1975.10.
- 3) 中本大悟，吉森佑介，柏木亮，石濱茂崇，青木宏一：断層群における前方地山予測と施工，トンネル工学研究発表会講演集，No.30，pp.1-7，2020.

(2022. 8. 26 受付)

EFFORT TO REDUCE THE CONSTRUCTION RISK OF LONG AND MASSIVE MOUNTAIN TUNNEL WITH FAULT ZONES

Shinichi YUGE and Ryo KASHIWAGI

The longest shin Hokuriku tunnel in Hokuriku Shinkansen(Kanazawa-Tsuruga)is expected to be difficult construction including weak ground conditions and occurrence of unanticipated water, against a background of severe process and social request of construction cost reduction Safe and high quality tunnel construction is required.Based on these problems, plural exploration into the ground ahead of the cutting face , we used the combined approach in districts of each of the Shin Hokuriku tunnel to collect data of the faults that lay ahead and to identify their locations and characteristics , which were reflected in devising preventive measures.These approaches were shown to be very useful resulting in successful tunnel construction of all districts.This paper reports results of 6 districts that took about 6 years before all completed as an approach for the risk reduction of long mountain tunnel in process management ahead of the opening of Shinkansen.