

原松原線トンネル工事における地質調査結果と施工時の差異に係る考察および対策工について

濱田 大輔¹

¹滋賀県 湖東土木事務所 道路計画課(〒522-0071滋賀県彦根市元町4-1)

原松原線トンネル工事は、付加体(丹波帯)が分布する丘陵地を全長1,135mのトンネル構造により通過する計画であり、2020年1月より掘削を開始し、2022年3月に貫通したところである。

工事区間に分布する付加体(丹波帯)の特徴を踏まえ、事前設計段階から支保選定および補助工法の範囲を決定していたものの、想定以上の脆弱層が多数存在した。このことから崩落を防ぐための補助工法のほか、一部区間においては、著しい内空変位の増大に伴う対策の施工等、当初の見込みを大幅に超える対策工が必要となった。本論文では、事前の地質調査結果と実施工との差異に係る考察および想定外の地質に対する対策工について発表するものである。

キーワード 付加体(丹波帯)、補助工法、内空変位

1. はじめに

(1) 事業概要

原松原線は、国道8号と国道306号の交差点である外町交差点の渋滞対策として通過交通をバイパスさせることを目的に計画されている(図-1-1)。

(2) 地形・地質概要

事業地は、佐和山から連なる丘陵地が平坦化され、起点側ではトンネル上部に「アウトドアレジャー施設」、終点側にかけては「ゴルフ場」となっている。その直下をトンネルが通過するため、地表への影響を考慮して発破掘削ではなく、全線機械掘削で計画されている。

本トンネルの通過部の地質は、古中生代に構成された「付加体(丹波帯(美濃帯))」が分布しており、主に砂岩、泥岩、砂泥互層から構成されている。

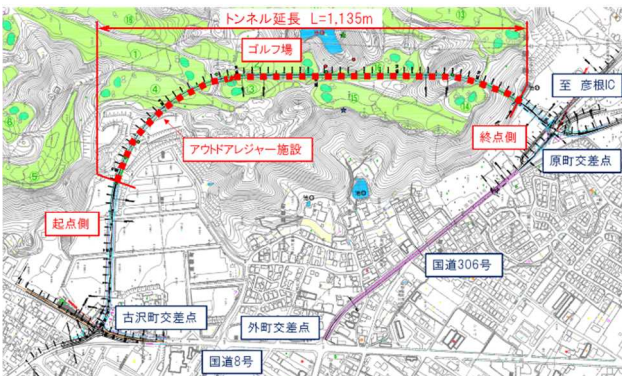


図-1-1 原松原線位置図

付加体とは海溝やトラフにおいて海洋プレートが沈み込む際に海洋底の堆積物が陸側に押し付けられ多くの逆断層で積み重なったクサビ上の断面をもつ堆積物であり、ヘアクラックが形成されていることが多く、トンネル施工では崩壊等が発生しやすい。

トンネル区間の内、起点～No.13間には混在岩(砂岩優勢)、No.13～終点側には混在岩(チャート優勢)が分布する。混在岩には潜在的な亀裂が形成され、掘削等による応力解放時には地質境界等の割れ目沿いに崩壊する機会が多いとされている(図-1-2)。

また、トンネル東側にマンガン鉱床跡が分布しており、マンガン鉱床の一部は、黄鉄鉱などの硫化鉱物を含む可能性があることから、当トンネル付近においても層状マンガン鉱床が存在する可能性があり、自然由来重金属(ヒ素)汚染の可能性が懸念される。

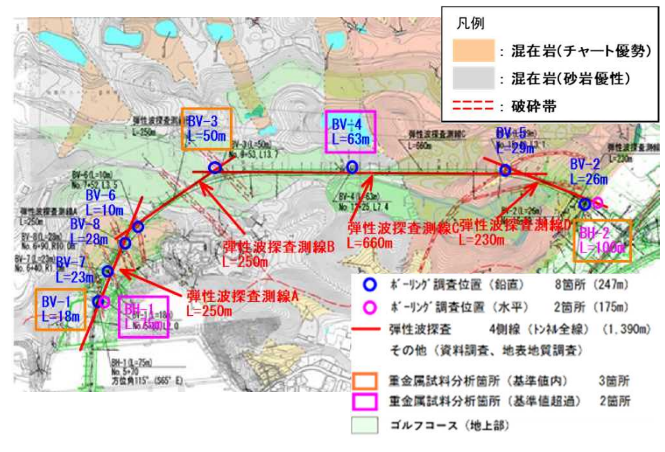


図-1-2 原松原線地質概要および調査位置図

2. 当初の調査・設計方針

(1) 事前調査概要

1.(2)に挙げた懸念を踏まえた設計検討を行うため、基準に基づき、図-1-2および表-2-1に示す事前調査を実施している。実施すべき調査に関しては全て実施しており、特に中間部では、破碎帯や代表地質の変化点の状況を確認するため6箇所を鉛直ボーリングを実施している。

表-2-1 実施調査一覧表

調査区間	地表地質調査	弾性波探査	ボーリング調査			速度検層
			区間全体	坑口(基点側)	坑口(終点側)	
区間全体で実施	区間全体で実施	区間全体で実施	鉛直:1~2本 水平:1本 (100~200mまたは安定するまで)	鉛直:1~2本 水平:1本 (100~200mまたは安定するまで)	鉛直:地質的に問題があると考えられる箇所	ボーリング箇所
区間全体で実施	区間全体で実施 (割線B区はスタッキング法による)	区間全体で実施	鉛直:1本 水平:1本(75m)	鉛直:1本 水平:1本(100m)	鉛直:6本 (代表地質の中間部および破碎帯や地形変化点)	鉛直:6本 各ボーリング孔で実施
	基準に基づき実施	基準に基づき実施	基準に基づき実施	基準に基づき実施	基準に基づき実施	基準に基づき実施

※基準:近畿地方整備局設計便覧(第3版)、道路トンネル技術基準(構造編)・同解説

(2) 事前調査まとめ

トンネル直上に営業中のゴルフ場やアウトドアレジャー施設があるといった地表の制約条件がある中においても、基準に基づいた調査を実施しており、加えて掘削対象地質が付加体であることに留意した追加調査も行っていることから、当初の調査は十分に実施されており、設計は妥当であったと判断できる。

また、重金属(ヒ素)による汚染については、破碎部において黄鉄鉱が濃集していることが多いことから、事前調査および専門家の意見も踏まえ破碎帯では基準を超過するものとしたことについても妥当であったといえる。

このことから、当初の調査・設計方針は妥当であったと判断できた。

3. 当初の地質調査結果と実際の掘削結果との差異

(1) 当初設計概要

計画高1.5D(D:掘削外径)上方の弾性波探査速度および近傍のボーリングコアにより設計支保CII-bパターンを基本として選定し、弾性波探査速度の落ち込みが見られる箇所については、破碎影響を考慮してより剛な支保としてDI-bパターンを選定した。

(2) 実際の掘削結果

実際の掘削においては、混在岩に潜在的に粘性土が介在しており、掘削に伴う応力解放による亀裂開口により地山が脆弱化し、天端の抜け落ち、鏡面の押出し等が随所で発生したため、当初設計に比べて多くの箇所でも補助工法を追加実施することとなった。

支保パターンについても当初設計において、より剛なDIパターンとしたが、地山状況および計測結果から、さらに剛なDIIパターンへと見直しが必要な箇所が生じた。

また、重金属(ヒ素)についても、当初想定した破碎帯以外の区間からも出現し基準超過重金属含有土処分についても大幅な追加対策が必要となった。

図-3-1ならびに表-3-1に補助工法の実施箇所と重金属含有土処分量の比較を示す。

表-3-1 補助工法と重金属含有土処分量の比較

	チャート優勢混在岩(基質:頁岩) 区間延長415m		砂岩優勢混在岩(基質:頁岩) 区間延長720m	
	補助工法	重金属	補助工法	重金属
当初	139m	22m	199m	118m
	34%	5%	28%	16%
変更	297m	138m	545m	444m
	72%	33%	76%	62%
差	158m増 (当初比2.1倍)	116m増 (当初比6.3倍)	346m増 (当初比2.7倍)	326m増 (当初比3.8倍)

6月末時点、見込み含む

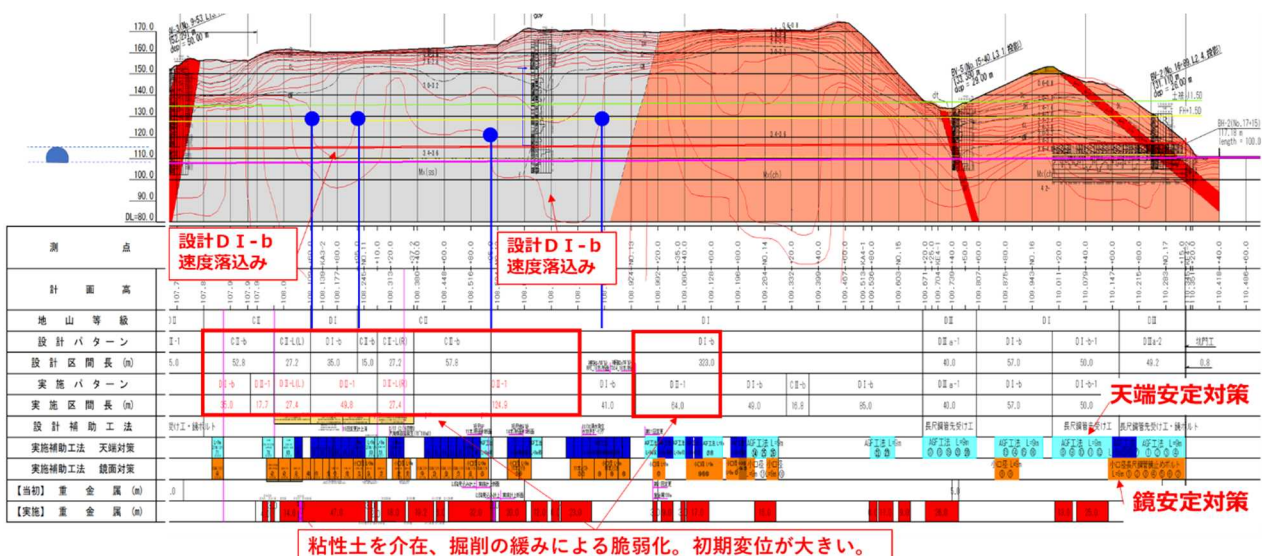


図-3-1 補助工法実施箇所および重金属含有土分布(地質縦断面図)

4. 想定外の地質に対する対策工

(1) 概要

3.(2)に記載したように想定以上に脆い層の存在により支保パターンの変更や補助工法(天端・鏡)の追加の他にも、図4-1の対策1・2・3の箇所においては、変位(内空変位・天端沈下)の増大が認められた。

対策1・2の箇所においては、変位の増大が対策3ほど大きくはなく、補強ロックボルトおよび本設インバートの先行実施による早期閉合にて変位の収束を図った。

対策3の箇所においては、図4-2に示すように天端沈下で160mmと非常に大きな変位が急激に生じており、対策1・2同様に補強ロックボルトによる対策を行ったものの、変位収束傾向が見られなかったことから、対策工の再検討を行った。

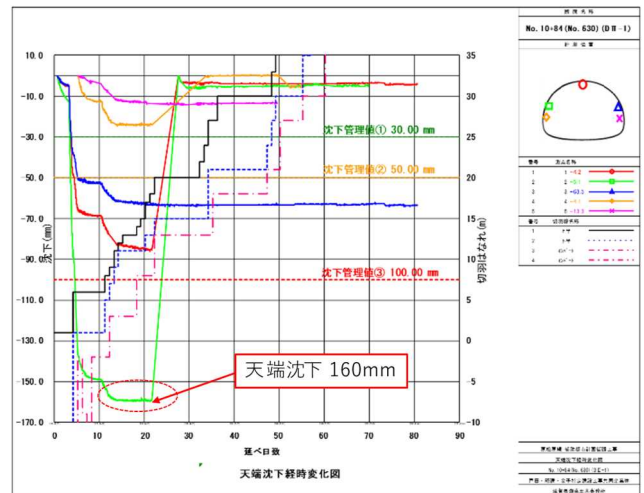


図4-2 天端沈下経時変位図

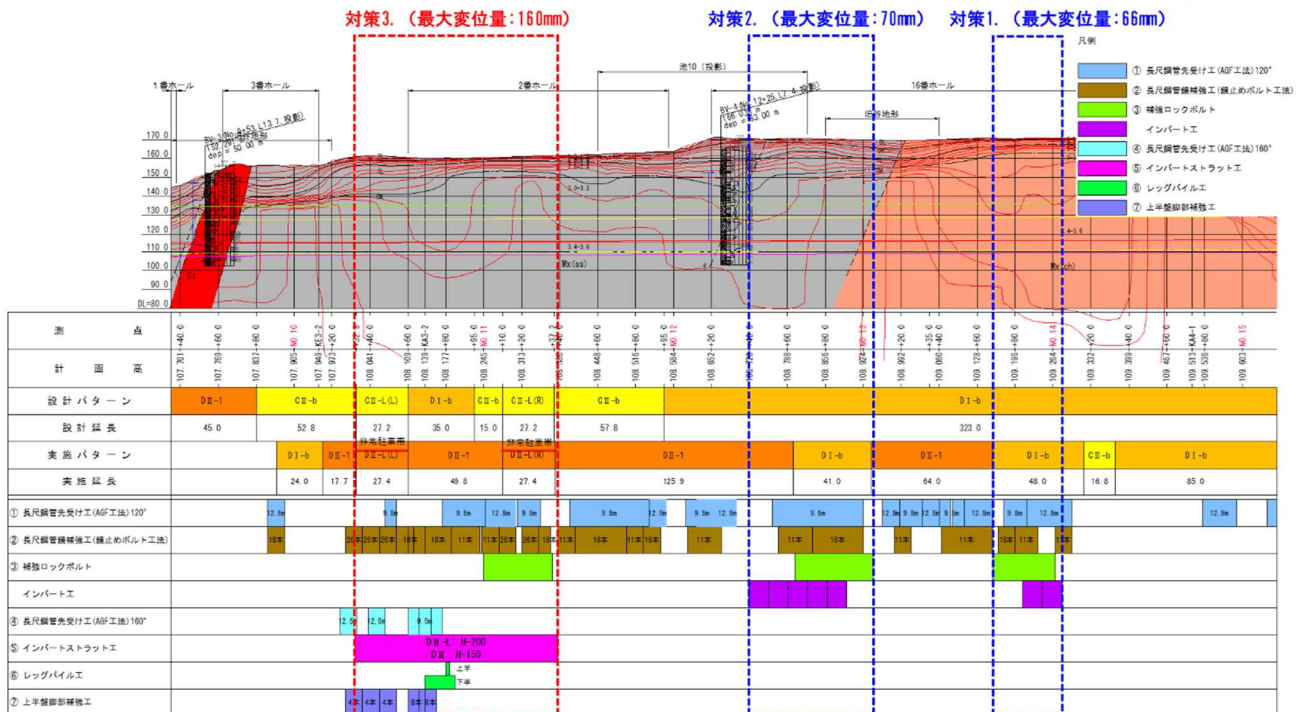


図4-1 対策工実施箇所(地質縦断図)

(2) 変位増大時のトンネル坑内の変状

対策3実施箇所におけるトンネル坑内の変状としては、ロックボルトの変形および吹付けコンクリートのクラックが発生し、発生箇所はトンネル両肩部に集中している。図4-3に変状展開図、写真4-1に変状写真を示す。



写真4-1 ロックボルト変状写真

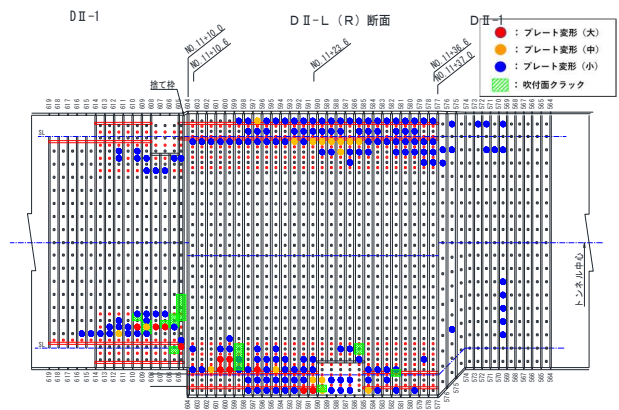


図4-3 変状展開図

(3) 対策工の検討・実施

対策3実施箇所における変状の特徴として、大きく

- a) 変形余裕量を超える内空変位・天端沈下の発生
- b) 掘削と同時に急激な変位の増大
- c) トンネル変状は両肩部に集中が、挙げられる。

a)については、内空変位・天端沈下量が増大することに伴うトンネル崩壊の恐れがある。そのため、早期に変位を抑制する必要がある。早期閉合が有効であると考え、図44に示す対策工のうち一次インバート(インバートストラット)を施工することとした。

この際、掘削方法についても上半先進工法では上半と下半が離れることとなり、一次インバートによる閉合時には既に変位が増大していることから、上下半の距離を3m、一次インバートまでを上半から5mとなるようミニベンチカット工法で早期に閉合することとした。

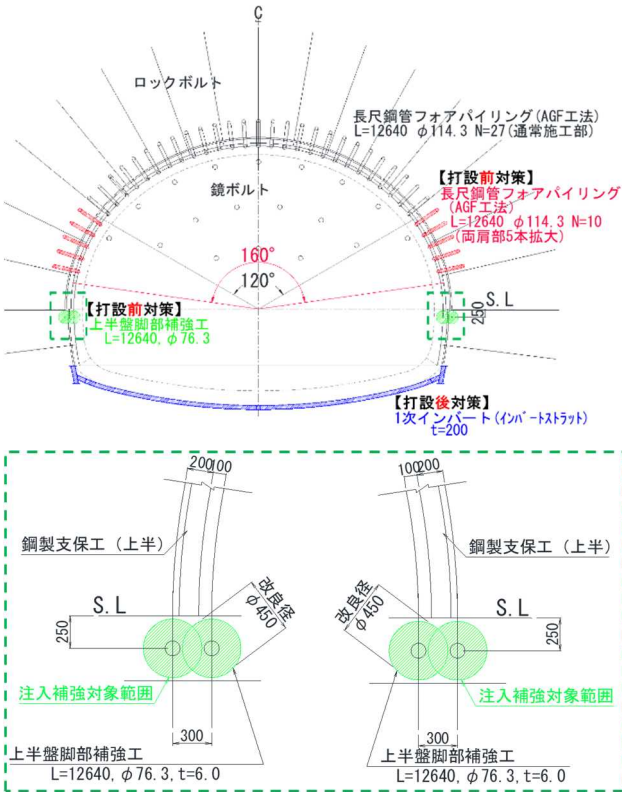


図44 対策工

b)については、掘削と同時にトンネル内側への内空変位の増大、天端沈下の増大が見られることから、変位を確認してから対策工の実施では遅いと考え、図44に示す対策工のうち、上半盤脚部補強工を行うこととした。

具体的には、上半盤掘削前に、上半鋼製支保工下部に鏡ボルトで使用する鋼管を打設し、シリカレジンによる地山の改良を行うことで上半盤脚部の剛性を向上させ、沈下対策を行った。

c)については、ロックボルトの変形・吹付けコンクリートのクラックが天端部ではほとんど見られず、両肩部に集中していることから、掘削時の天端の崩落対策として実施している補助工法(AGF)により天端部の緩みの範囲が抑制されることで、天端部には地山側からトンネル内側への力の発生を抑制していると考え、補助工法(AGF)の実施範囲を図44に示すように、120° から160° に拡大施工することにより、両肩部の緩みの範囲を抑制させることとした。

(4) 対策工の効果

前節で記載した、掘削方法の見直しならびに一次インバート施工による早期閉合、トンネル掘削範囲周辺を既存の補助工法を応用適用した。その結果として、上半盤脚部の沈下対策、両肩部の緩み抑制対策を実施することにより、ロックボルト・吹付けコンクリートへの変状を発生させることなく、内空変位・天端沈下量を減少させることができた。(表4-1)

表4-1 対策工の効果比較

測点	切羽距離 (m)	内空変位量 (mm)	天端沈下量 (mm)	切羽安定対策工				
				AGF120°	鏡ボルト	AGF160°	上半盤脚部補強工	インバートストラット
No.10+79.0 支保No.635	2	28	50	○	○	○	○	○
No.10+87.0 支保No.647		15	11	○	○	○	○	○
No.10+84.0 支保No.630	7	85	138	○	○	○	○	○
No.10+73.0 支保No.641		35	21	○	○	○	○	○

5. その後の対策方針(対策3実施以降)

(1) 地質状況

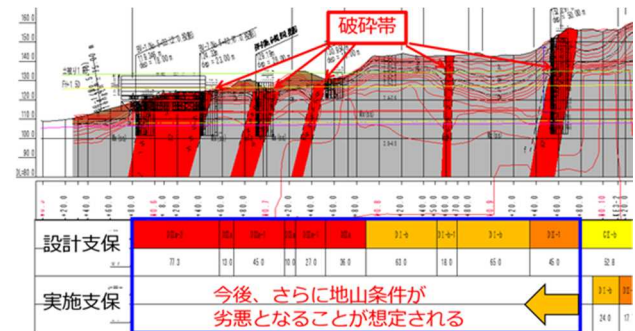


図5-1 今後の地質状況(地質縦断面図)

図5-1に示すように、起点側坑口部にかけて複数の断層破碎帯が事前調査から確認されており、弾性波探査速度も全体的に低くなっていることから、今後さらに地山条件が劣悪化することが想定された。

(2) 対策工の検討フロー

当現場においては、地質の不連続性が卓越していることから、切羽の挙動や支保の変状を注視し、鏡面の押出し・天端の崩落等により掘削が困難な場合においては、必要に応じて掘削施工時の安全確保を目的として適切に補助工法を実施することとした。

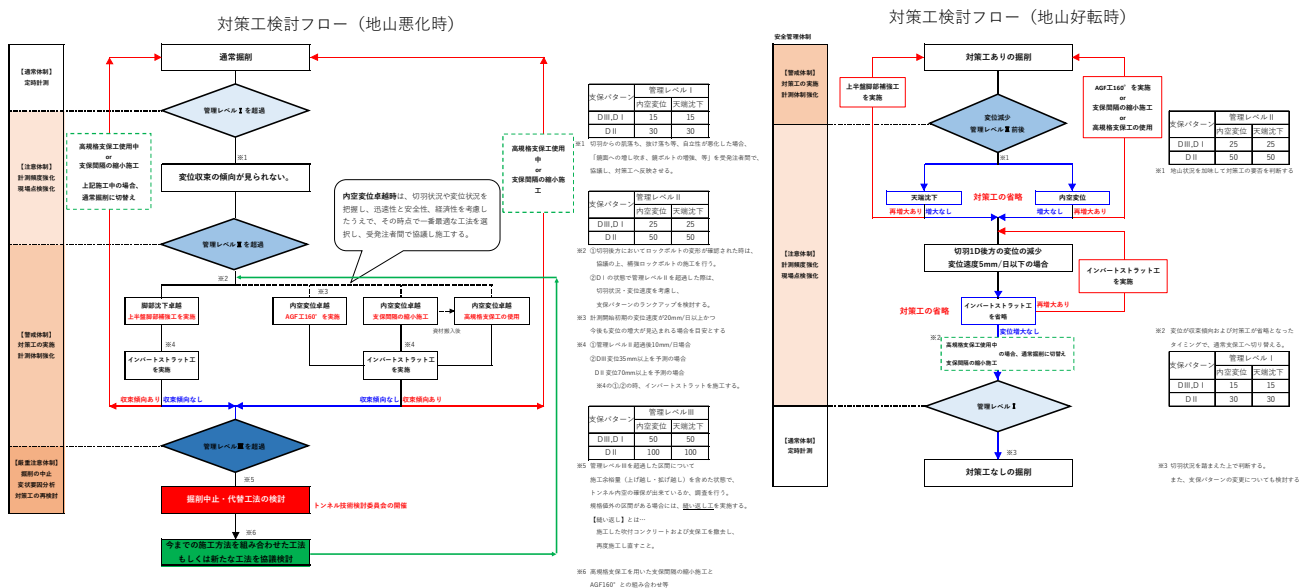


図-5-2 対策工フロー図

ただし、上記事象に加え、内空変位・脚部沈下が卓越する場合においては、図-5-2の対策工検討フローを基本とし、切羽面をはじめ坑内の状態などに応じ、安全性を最優先に最適な対策工を実施した。

通常、対策工検討フローとしては、地山悪化時を想定して立案するものであるが、行政として安全第一のなか、経済性への配慮も不可欠であることから、地山好転時に対しても検討フローを立案し実行することとした。

6. 技術検討委員会の設置・評価

本トンネルにおける事前調査・設計・対策工に対して、トンネル・地盤・行政の各専門分野の外部委員により構成された『原松原線トンネル技術検討委員会』を設置し検証を行うこととなった。

なお、本県の事業において今回のように外部委員からなる委員会を設置することは稀であり、国交省事業においても、計画段階で実施することはあるものの、施工中の工事において実施することは、ほとんどないのではないか、とのことであった。

委員会においてトンネル坑内、掘削ズリ、計測データおよび対策工に関して検証を行っていただいた結果、それぞれの段階において適切であったことを確認した。委員会における評価を表-6-1に示すとともに、以下に要約を記す。

a) 当初の調査・設計

地表の制約条件があるなか、基準に基づき必要な調査が実施されており、加えて、付加体であることに留意した追加調査も実施しており、調査結果をもとに設計も標

準通りに進められていることから、当初の調査・設計は妥当である。

重金属含有土を破碎帯において見込んだ当初計上区間についても、専門家の意見も聴取した上でのものであり妥当である。

b) 当初の地質調査結果と実施工の差異

当工事区間が付加体の中でも極めて悪い側の様相を呈しており、地質が複雑に入り乱れていることや、応力解放に伴う緩みの程度を事前に正確に推定することは困難であることから、当初の想定と実施工に差異が生じたことは、やむを得ないものである。

c) 想定外の地質に対する対策工

掘削時に判明する地山の性状に対して、指針で示す頻度以上の観測・計測を行い、地山状況に適した対応を柔軟に行いながら、安全性・経済性も考慮し、適切な工法にて対処している。

d) その後の対策方針(対策3実施以降)

本トンネル工事での施工実績を踏まえて精査された対策工検討フロー(図-5-2)は、安全性・施工性(品質)・経済性を総合的に考慮したうえで最適な補助工法や支保構造を選択するものであり、妥当である。

上記a)~d)といった意見をいただき、構築した対策工検討フローに基づき、工事を実施している。

しかし、トンネルの特性から、蓄積されたデータを注視することと合わせて、より一層の地山やトンネル坑内の変状に対する観測や常時監視は必須であることから、本現場においては坑内カメラを設置し、常時切羽状況の確認・記録を行った。

表-6-1 委員会における評価

項目	評価
当初の調査・設計の内容	<ul style="list-style-type: none"> 地表の制約条件がある中でも、基準に基づいた調査が行われており、加えて、付加体であることに留意した追加調査も実施されている。調査結果をもとに設計についても標準どおりに進められており、当初の調査設計は妥当であったと考える。 重金属含有土の処分を破砕帯において見込んだことは、事前のボーリング調査結果に加えて、専門家の意見も聴取した上でのものであり、妥当な考え方であったと言える。
当初の地質調査結果と実際の掘削結果との差異に係る考察	<ul style="list-style-type: none"> 掘削結果から、当工事区間の地質は付加体の中でも極めて悪い側の様相を呈していると考えられ、基準に基づく事前調査結果から、硬質部と軟質部が互層構造を成し地質が複雑に入り乱れていることや、掘削に伴う応力開放により生じるゆるみの程度を正確に推定することは困難であり、当初の想定と実際に差異が生じたことはやむを得ないものとする。
想定外の地質に対する対策工の内容(工法・設計変更)	<ul style="list-style-type: none"> 掘削時に判明する地山の性状をこまめに観察・計測しながら、状況に適合した対応を柔軟に行い、安全性や経済性を確保することが重要であり、当工事においても、指針で示されている頻度以上で計測を行い、発生した事象に対し適切な工法にて対処されていると考える。 重金属含有土の処理についても、こまめに溶出量の検査を行い、処分が必要なズリは適切に処分するとともに、かつ、余分な処分が生じないように取り組まれていると考える。
トンネル施工に係る今後の見通し 地質状況と対策工	<ul style="list-style-type: none"> 引き続きこまめに観察・計測を続け、データを蓄積すること。 これまでの施工実績を踏まえて精査された対策工検討フロー(案)は、安全性・施工性(品質)・経済性を総合的に考慮した上で最適な補助工法や支保構造を選択するものであり、妥当と考える。 安全なトンネル施工となるよう、蓄積したデータを注視しながら、対策工検討フロー(案)に基づき対策の要否を判断すること。 今後、今まで以上に悪い地質状況となり、対策案を改めて検討する必要がある場合は、本委員会に意見を求められたい。

7. 今後の事業への活かし方

文献調査段階にて付加体と考えられ、事前調査で得られた地質資料において潜在亀裂が確認された場合は、応力解放に伴う緩みが大きく生じる恐れがあり、地質をより高リスクに評価することを検討する必要がある。

さらに粘土層も確認されるなどした場合は、より安全に施工するための対策工が必要となることに留意すべきである。

付加体の範囲、地質資料における潜在亀裂や粘土層の有無によっては、標準的な設計とした場合には、実施工との間に大きな乖離が生じる可能性があることから、当工事の実績を参照し、地質をより高リスクに評価することも検討し、トンネル区間全体の地山等級や補助工法の要否を慎重に判断する必要がある。

また、重金属については、破砕帯以外にも基準値を超えて、地山全体に分布している恐れがあることにも留意すべきである。

当現場で得られた知見をもとに、設計段階において、地山等級や補助工法の要否を慎重に判断することに加え、トンネル区間全体で補助工法の実施箇所および重金属含有土の想定範囲を指定することなく、見込み数量として発注することも、当初設計と実施工の乖離を小さくするためには有効ではないかと考える。

8. おわりに

「トンネルは掘ってみないとわからない」と言われているが、ある講演会では「調査数を増やせば全てが解決できるというのは幻想であり、掘ってみてもわからないことはある」とも言われている。

今後の本県でのトンネル事業に際しては、本工事で得られた知見を活かし、掘ってみないとわからない範囲を極力小さくできるよう事前調査結果と向き合い、より精度の高い設計に繋げていけるよう精進してまいりたい。

本トンネルにおいては、低土被り区間(DⅢ)に入った2021年12月にも最大内空変位39mm、天端沈下51mmと若干大きい変位が生じたものの、対策工フローに基づき掘削を進め、2022年3月4日に無事に貫通を迎えることができた。

今後はインバート及び覆工施工がメインとなるが、引き続き安全第一で竣工に向けて進めて参りたい。

謝辞: 本トンネル工事を進めるにあたり、原松原線トンネル技術検討委員会の委員の皆様には貴重なご意見・ご指導を頂いた。また、本論文の執筆にあたり株式会社エイト日本技術開発ならびに戸田昭建金子JVから技術的なアドバイス、施工資料を提供頂いた。ここに、深く謝意を表する。