

主要地方道宇治木屋線じゅうぶざん鷲峰山トンネル の施工について

松尾 真希

京都府 山城北土木事務所 道路計画課 (〒610-0331京都府京田辺市田辺明田1) .

京都府南部の山城地域に位置する主要地方道宇治木屋線の鷲峰山トンネルは、複雑な地質構造における最適な支保パターンを選定するため、複数の先方探査技術やAI技術を用いた評価手法を取り入れ、工事における安全性・経済性の両立を図った。また、工事施工時に発生した事象を受けて、今後想定される断層破碎帯付近の体制充実を図るなどの取り組みを行った。

本稿では、これらの取組事例について紹介する他、活用した評価手法の有効性を検討する。

キーワード 山岳トンネル、先行ボーリング、弾性波探査、AI、事象事例

1. はじめに

京都府南部の山城地域に位置する主要地方道宇治木屋線は、宇治市宇治橋西詰を起点に綴喜郡宇治田原町を経由し、相楽郡和束町木屋に至る道路であり、相楽東部地域と京都市域を結ぶ最短ルートである等、地域内の南北アクセス軸の形成を担う重要な路線である。

事業区間である綴喜郡宇治田原町南から相楽郡和束町別所に至る現道(大打峠)区間の約3.6kmは、写真-1に示すとおり、道路幅が狭く、急カーブが連続しており、普通車の離合も困難な交通の難所(幅員5.5m以下が8割以上)であることから、図-1のとおり本区間をバイパス道路で結ぶことにより、安全で円滑な走行を確保する他、異常気象時における道路の信頼性向上や地域産業・観光の振興に寄与するものと考えている。また、整備中の新名神高速道路が綴喜郡宇治田原町内を通過し、新たにインターチェンジが設置される予定であることから、京都府南部地域のアクセス性が向上する他、京都・大阪・名古屋といった大都市との近接性が大幅に改善され、広域的な道路ネットワークの整備効果を京都府南部地域全体に波及させることが可能となる。



写真-1 大打峠の交通現状

2. 事業概要

(1) 事業計画

路線名：主要地方道宇治木屋線

延長：L=3.6km (うち、トンネルL=約3.0km)

幅員：W=7.5m (標準部)、W=7.0m (トンネル部)

(図-2)

内空断面：47.23m²

道路等級：第3種第3級

計画交通量：4,000台/日 (令和12年予測交通量)

設計速度：50km

事業区間：2017年～2025年 (予定)

総事業費：C=122億円

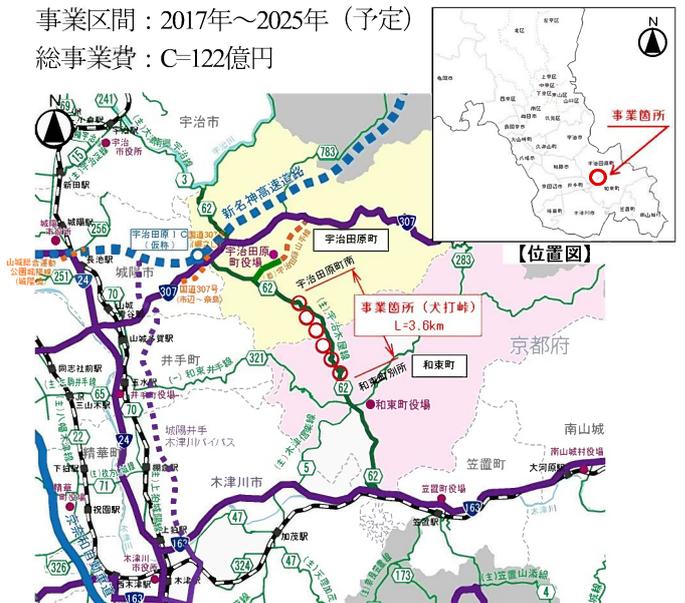


図-1 周辺道路網図

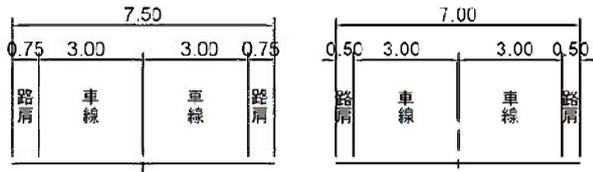


図-2 幅員構成

(2) トンネル部の地質調査結果と支保パターン

本工事の着手に先立ち、事前の地質調査として、①地表地質踏査、②坑口部におけるボーリング調査、③弾性波調査を実施した。これらの調査結果から、図-3の地質縦断面図のとおり、トンネル計画線沿いに断層破碎帯が計9箇所確認されており、トンネル掘削時の突発湧水や不良地山の出現による切羽崩壊、支保工の異常変状が生じるリスクが懸念された。

また本トンネルは、領家変成岩類丹波I型地層群に分類される頁岩とチャートで構成され、弾性波調査等の結果から支保パターンは、図-3の「当初」に示すとおり、C I～D IIIで設計したが、実際は、頁岩の風化が進行し薄い片状に分離している箇所が広範囲に分布している等により、図-3の「変更」に示す安全性と経済性の両立を図った支保パターンに変更する必要が生じた。

3. 適切な地山等級の把握への取り組み

(1) 岩盤判定委員会の開催

トンネルに作用する荷重や地山の挙動等については、周囲の条件が多様なことや地質構造が複雑なこともあり、現段階では理論的解明が必ずしも十分ではない。本事業の当初設計における支保パターンもあくまでも限られた事前調査結果から設計しているため、工事にあたっては、実際の地山状況を総合的に解析し、設計の妥当性を確認しながら進めることが重要であった。

本事業においては、「トンネル地山等級判定マニュアル(試行案)(平成18年9月試行案の改訂版)平成28年7月近畿地方整備局道路部道路工事課」¹⁾を参考に、①設計上の支保パターン変化点、②切羽観察結果から判断される地山等級と実施中の支保パターンが合致しなくなった地点、③同じ支保パターンが50m以上続いた地点、④発注者、施工業者のいずれかが岩盤判定を必要とした地

点にて、岩盤判定委員会を開催し、適切な地山等級を確認しながら工事を進めた。

また岩盤判定委員会においては、①これまでの施工状況や切羽状況(地山、湧水等)の報告、②トンネル坑内の切羽において、抜け落ち、切羽の変化方向等の観察(写真-2)、評価を実施し、図-4に示す切羽観察表に切羽評価点を記入、③切羽評価点を集計し、評価者(発注者3名)全員の平均点を算出。の順に協議を行い、今後の支保パターンを決定する流れで進めた。



写真-2 岩盤判定委員会の状況写真

切羽観察表 [全岩質共通]

1. 切羽基礎情報		2. 切羽観察記録		3. 評価項目・区分	
トンネル名:	大井トンネル(仮称)	詳細区分: 観察地点の地山の状況と挙動		評価区分	
観察年月日:	令和2年1月1日	(A) 切羽の状況	1. 変状	1. 火災	火災量
調査者:	無	(B) 岩盤強度	2. 崩壊から破砕状態が認められる	2. 火災量	1.0kg/m以上
坑口からの距離:	m	(C) 圧縮強度	3. 崩壊から破砕状態が認められる	3. 砂礫当り	砂礫当り(10kg/m)
土盛り高さ:	m	(D) 風化変質	4. 崩壊から破砕状態が認められる	4. D相当	D相当(10kg/m)
地盤地形:		(E) 割れ目の傾度	5. 崩壊から破砕状態が認められる	5. 0.6kg/m以下	0.6kg/m以下
地名:		(F) 割れ目の形状	6. 崩壊から破砕状態が認められる	評価区分	
湧水状況:	(切羽) 湧水量: L/min 色: 湧水箇所: (切羽全体) 湧水量: L/min 色:	(G) 割れ目の形状	7. 崩壊から破砕状態が認められる		
		(H) 湧水	8. 崩壊から破砕状態が認められる		
		(I) 水による劣化	9. 崩壊から破砕状態が認められる		
		切羽のある方向性(切羽をみか)	10. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	11. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	12. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	13. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	14. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	15. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	16. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	17. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	18. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	19. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	20. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	21. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	22. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	23. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	24. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	25. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	26. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	27. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	28. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	29. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	30. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	31. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	32. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	33. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	34. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	35. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	36. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	37. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	38. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	39. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	40. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	41. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	42. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	43. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	44. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	45. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	46. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	47. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	48. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	49. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	50. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	51. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	52. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	53. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	54. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	55. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	56. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	57. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	58. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	59. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	60. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	61. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	62. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	63. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	64. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	65. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	66. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	67. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	68. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	69. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	70. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	71. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	72. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	73. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	74. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	75. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	76. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	77. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	78. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	79. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	80. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	81. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	82. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	83. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	84. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	85. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	86. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	87. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	88. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	89. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	90. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	91. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	92. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	93. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	94. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	95. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	96. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	97. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	98. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	99. 崩壊から破砕状態が認められる		
		崩壊する方向性(切羽をみか)	100. 崩壊から破砕状態が認められる		

図-4 切羽観察表

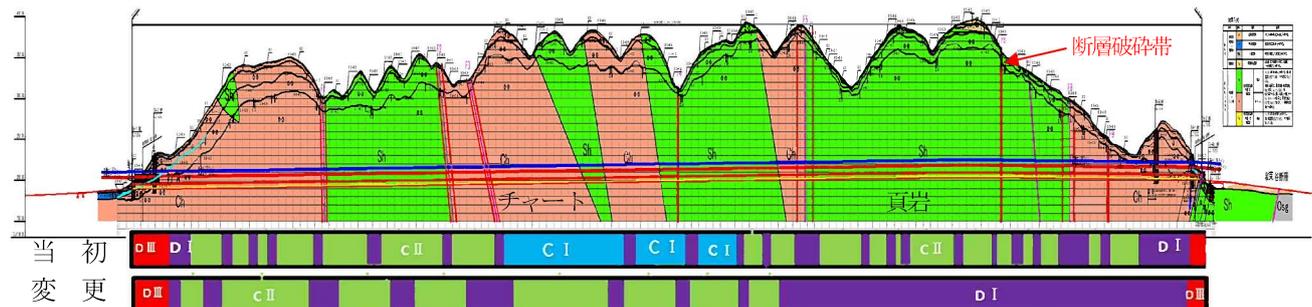


図-3 地質縦断面図及び支保パターン図

(2) 先方探査技術の活用による地山等級評価の精度向上

a) 実施概要

掘削箇所の支保パターンを選定するには、切羽の適切な評価は勿論のこと、今後発現すると見込まれる切羽前方の地質状況を高精度で調査し、正確に把握・分析することが重要であることから、本事業においては、先行ボーリング及び坑内弾性波探査を実施し、岩盤判定委員会での判断に反映させることとした。

先行ボーリング（中尺ノンコア削孔検層）とは、**図-5**、**写真-3**に示す一例のとおり、削孔に要した水圧ハンマーの打撃エネルギー値から前方地山等級を評価するとともに、断層破砕帯等の不良地山を高精度に把握することが可能な技術である。また、ボーリング孔を使用して前方湧水計測を行い、前方の湧水状況を正確に把握することも可能である他、前方地山の水抜きにも効果があった。

坑内弾性波探査とは、**図-6**に示す一例のとおり、弾性波速度の異なる物性値の境界面で反射した反射波から、反射境界面の位置と、P波・S波の速度分布を把握できる技術である。これにより、亀裂などの不連続面の集中箇所や低速度帯による断層破砕帯出現位置等を確認することが可能となった。

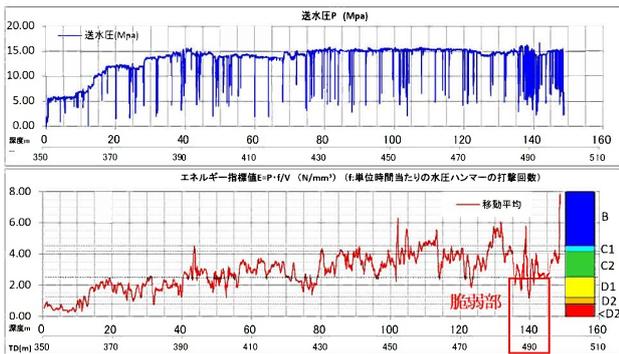


図-5 中尺ノンコア削孔検層解析結果



写真-3 先行ボーリングの実施状況

b) 実施内容の評価

先方探査と実際の切羽の相関性を調査するため、a)実施概要で示した先行ボーリング及び坑内弾性波探査において、ともに脆弱部と懸念されたTD約490m地点における切羽の評価状況を比較した。

実際の切羽は、**写真-4**に示すとおり、左肩部は亀裂間隔も広く比較的安定しているものの、天端部及び右肩部に風化変質による局所的な強度低下が見られ、亀裂間隔も5cm程度と細かく、軽微な肌落ちが生じる状況であることから、支保パターンは先方探査結果と同様、DIが妥当であり相関性が見られる結果となった。

また、延長方向においても実際の脆弱部は、約10m程度継続したことからも、一定の相関関係が見られる結果となった。

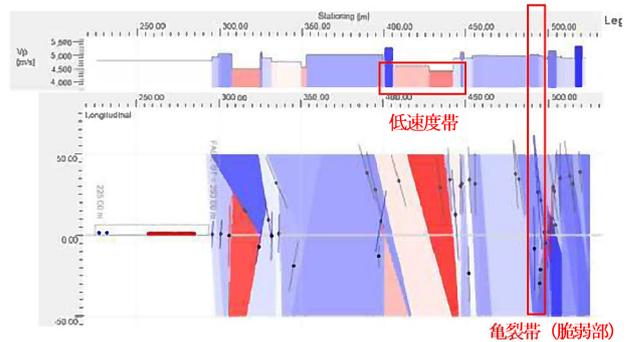
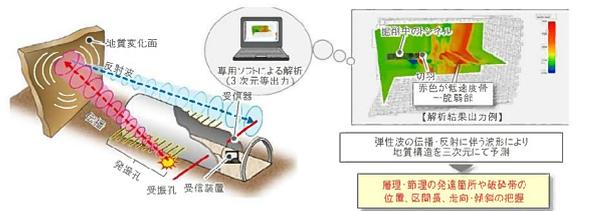


図-6 坑内弾性波探査解析結果



写真-4 切羽(TD489.1m)状況写真

(3) AIを活用した切羽判定によるバラつき評価の軽減

a) 実施概要

切羽観察にあたり、目視による観察結果と共に、AIによる切羽評価システムを採用した。これにより岩盤判定委員会における評価のバラつきが軽減され、切羽評価精度の向上を図ることが可能となった。

b) 実施内容の評価

AIによる切羽評価システムと目視による評価を比較するため、AIによる切羽評価システムを活用せず、岩盤判定委員会を実施したところ、目視においても天端、左肩、右肩で、**図-7**と同様の評価「3」となり、相関性がうかがえる結果となった。

ただし、岩盤判定委員会との比較回数を重ねた結果、写真の角度や照度が起因し、亀裂間隔や圧縮強度の評価結果が目視とAIによる切羽評価システムに差が生じる場面があったことから、AIによる切羽評価システムを活用する上では、撮影時の照度基準や撮影距離・角度の基準を記したマニュアルを作成し、相関性が高い条件を前提とした上で、活用することが重要であると考えます。

(4) 統合穿孔支援システムを活用した安全対策

a) 実施概要

油圧ホイールジャンボを使用した装薬・ロックボルトの穿孔時に**図-8**の一例のとおり、1切羽ごとの全穿孔データを解析し、切羽直前の前方及び周囲地山状況を把握した。調査は、穿孔速度とエネルギーから地山の評価を行うため、脆弱部の位置を切羽が出現する前に正確に把握することができ、作業員の安全性向上に寄与した。

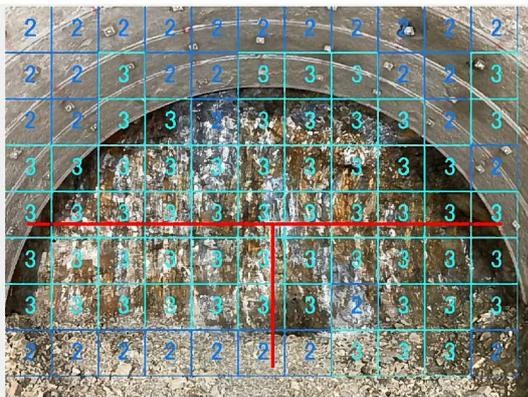


図-7 AI評価図

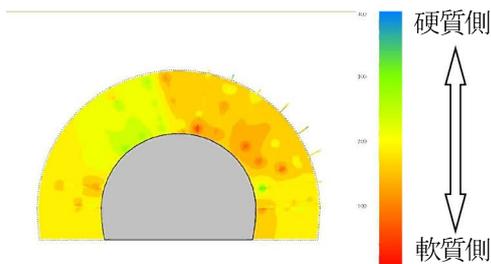


図-8 先行エネルギー分布表示図

4. 工事施工時に発生した事象とその対応

(1) 崩壊状況

- ・崩壊箇所：TD457.3～460.9m地点
→断層破砕帯予定箇所-50m
- ・崩壊時の支保パターン：CII-b
- ・崩壊時の切羽状況：切羽安定、湧水なし、下半未施工
- ・崩壊規模：最大1.5mの右肩部からの土砂流出(写真-5)
- ・当時の状況：コソク作業時に作業員が既設支保工の押し出しが進行していることに気づき、作業員全員が切羽から退避。人的被害なし。

(2) 原因究明

崩壊部の背面を対象とした追加ボーリングを実施した結果、**図-9**に示すとおり、崩壊箇所背面にDI相当となる弱層部が薄く介在していることが判明。崩壊原因は、断層破砕帯であるF1断層が想定よりも早期に出現し、かつ角度を持っていたことから、事前の先方探査では支保工背面部の弱層を見抜くことができなかった。

(3) 復旧方法

変状箇所のノンプリズム計測の結果、変状の進行がないことを確認したことから、崩壊箇所下半部の押え盛土を設置の上、崩壊箇所復旧(鋼アーチ支保工再設置、崩壊箇所の吹付充填、注入式フォアポーリングによる支保工背面地山の改良)を実施し、掘削の再開を指示した。



写真-5 支保崩壊状況写真

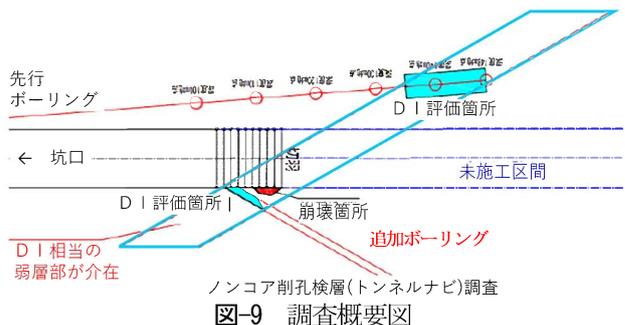


図-9 調査概要図

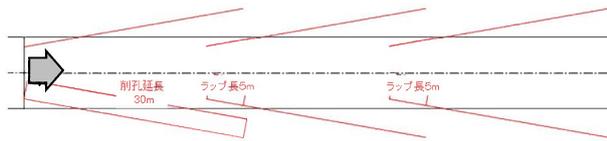


図-10 調査イメージ図

(4) 今回を踏まえた今後の対応策

断層破碎帯であるF1断層が想定よりも約50m早期に出現し、かつ角度を持っていたことを踏まえ、今後の掘削時に以下の対応策をルール化した。

①これまでの先方探査に加え、断層破碎帯予定区間及び前後50m区間においては、図-10に示すとおり、ドリルジャンボを使用したトンネルナビを切羽左右2箇所を実施し、トンネルの前方のみならず側方の地山状態を確認した上で、施工を進めることとした。

②20～30mごとの計測断面としていたA計測を断層破碎帯予定区間では5mごと、前後50m区間は10mごとに設定。これにより、介在的な弱層部を早期に確認することが可能となり、作業員の安全性が向上した。

③A計測による観測結果が管理値を超過した際は、写真-6に示す一例のとおり、トンネル側壁に設置したパトライトで警報し、直ちに作業員に周知の上、円滑な退避を助長するシステムを構築した。

④切羽作業時は、写真-7に示す一例のとおり、切羽監視員による監視を行い、切羽等に異常が発生した場合は、電子ホイッスルもしくはポイントリーダーにて直ちに作業員に退避を促すルールを設定した。

(5) 考察

上述の対応策を講じた結果、断層破碎帯と見られるF2断層以降の箇所においても、安全を確認しながら確実に施工することができ、大きな不良地山の出現による切羽崩壊、支保工の異常変状等が発生することなく、無事に掘削を完工させることができた。

特に断層破碎帯は、F1断層同様、全般的に当初想定箇所よりも早期に出現する傾向があったことから、事前のトンネルナビによる側方の地山状態の確認は、いち早く断層破碎帯の位置・角度を正確に把握することにつながり、支保パターンの適切な選定や安全性向上に大きく寄与したと考える。



写真-6 パトライト設置状況写真

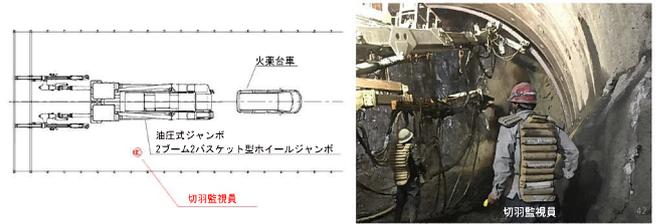


写真-7 切羽監視員配置状況写真

5. おわりに

本稿では、適切な地山等級の把握及び工事施工時に発生した事象とその対応への取組み等について紹介した。

適切な地山等級の把握への取組みについては、岩盤判定委員会の評価における精度向上や作業員の安全性向上等に有効な手段であり、これにより支保パターン選定における経済性と安全性の両立を図ることが可能となった。

また、工事施工時に発生した事象とその対応策については、同様の事象が生じた際の対応方法等については、本稿が今後のトンネル工事施工を行う技術者の一助になれば幸いである。

謝辞： 鷲峰山トンネルの工事を安全に施工いただいた大林・岡野・協栄特定建設工事共同企業体の方々をはじめ、工事にご協力いただいた全ての関係者の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 近畿地方整備局道路部道路工事課：トンネル地山等級判定マニュアル（試行案）（平成18年9月試行案の改訂版）