

佐野トンネル坑口における 白色凝灰岩と地すべり地形への対応について

山岡 晋¹・寺田 哲也²

¹豊岡河川国道事務所 計画課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

²滋賀国道事務所 工務課 (〒520-0803滋賀県大津市滝が丘4-5)

佐野トンネルは、2024年9月23日に開通した豊岡道路のトンネルの一つである。トンネル坑口部の施工において、切土時における法面崩壊やトンネル施工時における天端崩落、覆工コンクリートのひび割れ発生等問題が生じた。本稿は、佐野トンネル坑口部における施工時に発生した課題とその対策について報告するものである。

キーワード 法面変状、トンネル施工、坑口対策

1. はじめに

豊岡道路（延長約2.0km）は、北近畿豊岡自動車道（延長約73km）を構成する道路で2024年9月23日に開通した。

北近畿豊岡自動車道は、豊岡市から丹波市に至る自動車専用道路で京阪神都市圏と連結を深めることによる但馬地域の活性化や、冬季積雪時や洪水等の災害時における円滑な交通確保を目的としている。

今回開通した豊岡道路の佐野トンネルは、2022年3月に工事着手したが、坑口部の法面崩壊、トンネル掘削時の天端崩落、さらに覆工コンクリートのひび割れが発生する等工事が難航した。

これらの要因となったのが、この豊岡地域に分布する白色凝灰岩と風化した礫岩であり、またトンネル坑口付近においては過去に発生した地すべり地形が確認されている不安定な地山であったことが挙げられる。

本稿は2024年秋の開通に向けて、施工業者・設計コンサルタント・学識経験者・発注者が一丸となって難題に取り組んだ過程をとりまとめたものである。

北近畿豊岡自動車道では、延伸事業として豊岡道路（Ⅱ期）事業を本格的に着手しており、今回課題となった白色凝灰岩等の地層が同様に分布することからも、今後の検討に資する資料として報告する。

2. 佐野トンネルの概要

(1) 佐野トンネルの工事概要

佐野トンネルは延長189m、内空断面積74m²、地山区分を坑口部、DⅢ、DⅡの3パターンとしたトンネルであり、掘削方式はNATM（上半先進掘削）を採用している。

(2) 地質の概要

地質は、礫岩、砂岩、酸性火山岩、火砕岩類からなる新生代新第三紀中新世の北但層群豊岡類層に属する「礫岩および砂岩」の分布域に位置しており、今回法面変状が発生した佐野トンネル南側坑口は、地山が風化した「強風化礫岩」が広く分布し、全体的にDL～DH級の土砂状で、粘土分～砂分を含む角礫分を主体とした地層である。また、大きな地すべり地形であることも確認されている。

豊岡地域に分布する豊岡累層には白色凝灰岩の薄層が含まれており、この白色凝灰岩は掘削によるゆるみや応力解放、含水量の変化によって粘土化し強度低下を起こすため、掘削完了後に法面崩壊が発生する事例が報告されている。



写真-1 佐野トンネルで確認された白色凝灰岩



写真-2 切土施工中の県道での法面崩壊

(3) 工事の経緯

工事着手から法面変状が発生し、対策を完了するまでの経緯を表-1のとおり示す。

表-1 工事着手から対策完了までの経緯

2022年3月	南側坑口切土工事着手
2022年5月	切土の法面に白色凝灰岩確認
2022年7月	追加地質調査 坑口からトンネル掘削方向への白色凝灰岩の連続的な面的分布を確認
2022年10月～ 2024年5月	道路防災ドクター打合せ 追加地質調査 坑口部の前出し・押え盛土の検討 法面の恒久対策（地すべり対策）の検討
2022年12月	トンネル掘削開始
2022年12月～	トンネル天端・切羽崩壊 坑口部法面崩落
2023年8月	トンネル掘削完了
2024年3月	覆工コンクリート完了 覆工コンクリートにクラック発生 坑口部法面の変状確認
2024年3月～ 2024年6月	法面对策（グラウンドアンカー等）施工 地下水位低下方策施工 施工後法面変状収束
2024年8月	佐野トンネル完成
2024年9月	豊岡道路供用 トンネル坑口部のモニタリング開始

3. 法面局部崩落・トンネル変位の発生と対応

(1) 坑口法面崩落

明かり掘削する坑口部の地山は風化した礫岩が土砂化していることに加え、地下水位が高く、至る箇所から湧水が発生し、局所的な法面崩壊が生じていた。さらに、切土法面には地すべりの原因となる白色凝灰岩が確認された。

白色凝灰岩の分布が不明であったため、追加の地質調査ボーリングを実施した結果、坑口部に厚い白色凝灰岩の層がトンネル掘削方面に2層分布していることが判明した。

この状況で坑口付を行うと大規模な法面崩壊を誘発する恐れがあったため、計画していた坑口位置よ

り15m手前からトンネル支保工を組み立て法面の土塊を残したままトンネル掘削に着手した。

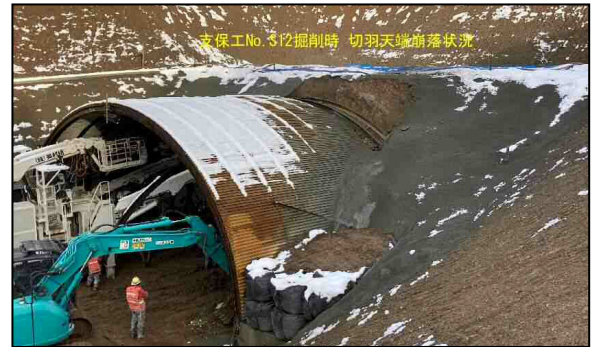


写真-3 トンネル坑口の15m前出しの状況

(2) トンネル掘削時における崩落・変位について

白色凝灰岩と未固結な土砂が分布する不安定な地山でのトンネル掘削は、切羽の崩落や内空変位が著しく発生し困難を極めた。その対応として上半を先進させて加背を小さくし、切羽の安定性を確保した。トンネル補助工法も実施していたが、切羽の天端崩落の発生や鏡面の押し出しが顕著であったため、当初設計では千鳥に配置していた多段式長尺鋼管先受工のピッチを細かくして連続的に配置する工法に変更し、また注入式フォアポーリングを追加、鏡面には長尺鋼管鏡ボルトを施工した。結果、当初設計でトンネル延長の約3割で計画していた掘削補助工法を全線で施工することとなった。

しかし、上半掘削時に大きな天端・脚部沈下が確認され、トンネル内空断面を確保できなくなる可能性があったため、鋼製支保工の上げ越し量を当初計画の30mmから80～100mmへと増やした。

また、沈下抑制対策として上半仮インバートをトンネル延長の約7割の区間で実施、下半掘削時はトンネル全線の鋼製支保工の左右側壁部に平鋼（PL-200, t=22mm）を溶接固定し、上からロックボルトを打設することで変状の影響範囲外である地山深部の支保工との一体化を図った。



写真-4 掘削時における沈下抑制対策

トンネル坑口部は地すべり地形で工事による地山への影響が特に懸念されたため、挙動の確認を強化するため地表変位計や地中変位観測用のパイプひずみ計及び地下水位計を設置し、地すべりの兆候を自動観測した。なお、作業員の安全確保のため、変位量が一定の基準に達した場合に作動する警鳴装置を設置し、緊急避難できる体制を整えた。

結果、トンネル延長189mと比較的延長が短いトンネルであったが、掘削の施工で約8か月もの期間を要した。

(3) 坑口部の法面对策について

トンネル坑口部は、未固結の土砂山であることに加え追加の地質調査において白色凝灰岩の分布が確認される等非常に不安定な地山である。追加の地質調査データに基づく解析を行った結果、当初設計のまま施工した場合、法面設計で必要とされる安全率を確保できないことが判明した。

一方で、白色凝灰岩を起因とする法面崩壊の対策は、分布状況や物性値の強度低下等から対策に慎重を要するため、過去の崩壊事例や対策を参考に検討を進めるものの、重要な高規格幹線道路の安全性を確保するため、学識経験者の助言を受けながら進めることにした。

学識経験者との相談の上、今後の対応方針として決まったのは次の3点である。

①崩壊メカニズムについて

- ・過去の崩壊事例から、流れ盤になっている白色凝灰岩の層をすべり面とした椅子型すべりを想定して検討を行う。

②白色凝灰岩の分布について

- ・白色凝灰岩がある地層は極力改変を抑えるべきである。
- ・白色凝灰岩は連続層ではなく点在している可能性があるため、白色凝灰岩を想定した設計を行うと過大になる場合があり、白色凝灰岩の分布を明らかにするための追加地質調査が必要である。

③物性値（粘着力、せん断抵抗角）について

- ・白色凝灰岩の強度について、過去の崩壊事例における崩壊前後の地質調査に基づく物性値データや現地の状況、スレーキング試験結果等から、切土による上載荷重除去による著しい応力低下が確認されている、ため粘着力を0kN/m²とする。
- ・風化した礫岩についても、白色凝灰岩と同様に上載荷重除去による強度低下が確認されたため、調査データに基づき、粘着力については低減係数をK=0.75、せん断抵抗角の低減係数をK=0.8の定数を設定し、佐野トンネル坑口付近の地質デ

ータの物性値に低減率を乗じて設定する。

これらの方針に基づきトンネル坑口付近の設計を以下のとおり進めた。

a) 坑口の設計について

地山崩壊の恐れがあったため、計画していた坑口位置より15m手前から支保工を組み立てトンネル掘削に着手している。学識経験者の意見を踏まえ、地山の改変を極力抑えるため、施工着手した15m手前の位置をそのまま坑口位置とし、15m延伸した支保工に押え盛土（D=3.4m）を施工することで、背面の脆弱な地山滑り崩壊を抑制し、地山の安定化を図った。

工法検討にあたっては、この他にも抑止杭案等もあったが、コストや当時の工事施工状況、トンネル直上部でのトンネル本体への影響や効果等を比較し、トンネル延伸案（押え盛土案）とグラウンドアンカーを併用する案が総合的に優位となったため採用した。

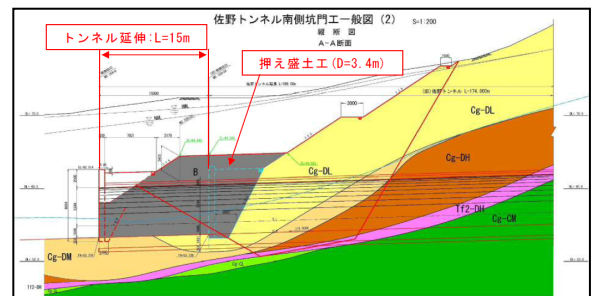


図-1 トンネル坑口の延伸と押え盛土工

b) 坑口部を含む周辺法面一体の設計について

坑口部における白色凝灰岩の存在は確認されていたが、白色凝灰岩の分布と連続性について、既存データだけでは把握できなかったため、追加地質調査を実施した。

得られた白色凝灰岩の分布状況等の特性から、坑口周辺の法面を8ブロックに分けて対策を検討した。

解析に適用する物性値については、上述した上載荷重除去時の強度低下を想定した低減率を乗じ、白色凝灰岩の層をすべり面とした椅子型すべりによる安定解析を実施した。

結果、8ブロックの内4ブロックで法面安定指標上必要とする安全率1.2を下回るためグラウンドアンカーが必要となる結果となった。

グラウンドアンカーについては、その打設方向が法面変位の方向が異なった場合、抑止力が低下するため、アンカー打設方向や打設角度に配慮して設計を行った。

また、グラウンドアンカー施工範囲以外においても現地調査を行った結果、切土後の法面に常態的に

湧水が確認された箇所には、表層崩壊の対策として法枠工を施工する設計とした。

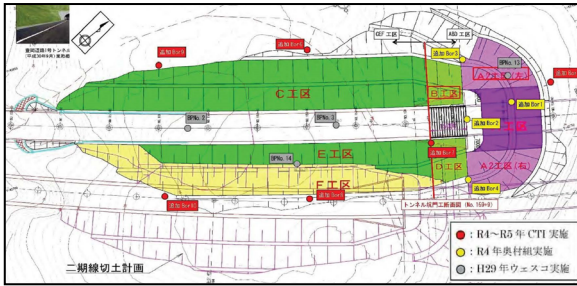


図-2 法面のブロック割り

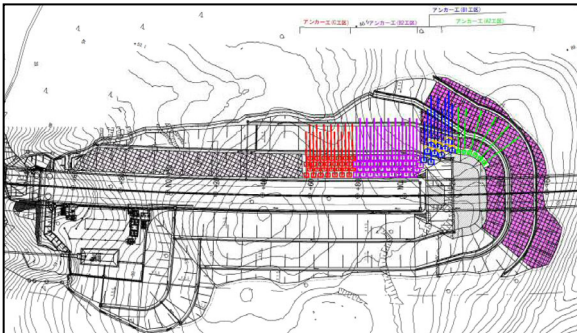


図-3 アンカー工平面図

(4) 覆工コンクリートのクラックについて

2023年8月にトンネル掘削が完了し、トンネルの内空変位も落ち着いたため、2023年11月に覆工コンクリートの施工に着手した。法面変状が発生した南側坑口とは反対の北側坑口から着手し、覆工と南側の坑門工が2024年3月14日に完成した。

ところが完成の翌日、トンネル内の覆工コンクリートのうち南側坑口から2つ目と3つ目のブロックにおいて、左側壁面にトンネル北側に向かってクラックが多数発生した。

地すべり方向側のトンネル壁面にクラックが発生したことで、壁面以外にも坑口法面に施工した側溝にも複数クラックが発生し、設置していたパイプひずみ計の値からも地山の挙動に変状があったことは明らかであったことから、要因分析と対応を早急に求められる緊急事態となった。

クラック発生時は、法面对策で計画していた「押え盛土+グラウンドアンカー」の内、押え盛土は2023年11月に完成していたが、グラウンドアンカーは未着手だったため早急に施工する準備を整えた。

要因分析として施工中継続していたパイプひずみ計の値や地下水位データを整理し、地山の変位方向や地下水位の観測地点毎の時系列データからクラックが入った左側壁面の地山が地すべり方向に変位している兆候がみられ、地下水位においても同様に左側の地山の水位が2024年1月頃から急激に高くなっ

ていることが確認された。

地下水位の上昇は、このトンネル坑口付近が沢部で水が集まる地形であるため、冬期に積もった雪が溶けて地下水位が高くなっていることが原因の一つと考えられた。学識経験者に相談の上、取り急ぎトンネルへの応力負荷を軽減するために地下水位を低下させる対策に着手した。

内容としては、地下水位の上昇が確認された箇所に向けて放射状に水抜きボーリング33本（最大で1本あたり延長44m）を打設した。施工業者の尽力により、クラックが発生した3月15日から僅か1週間後に工事着手し、4月上旬までに全て施工を完了することができた。排水量は多いときで1分間あたり約50Lにもなった。

この水抜きボーリングの効果もあって、施工後から地下水位が低下し、これに伴い地山の挙動や覆工コンクリートのクラックの進行も収束した。

3月下旬から着手したグラウンドアンカーの施工についても地山の早期安定を図るため施工体制を拡充し、複数班で施工することで当初予定していた7月の完成を5月に前倒し完成することができた。

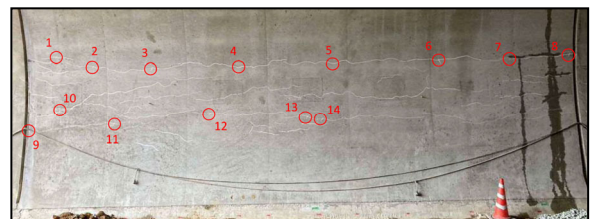


写真-5 覆工コンクリートのクラック

(5) モニタリングについて

完成直後の法面における長期の安定した健全性を客観的に判断できるデータが少ないことから、学識経験者から今回の水抜きボーリングによる地下水位低下対策やグラウンドアンカーによる法面对策の検証に関する意見を頂いた。

結果、道路の開通後において法面のモニタリングを実施することにした。モニタリングの項目については表-2のとおりであり、モニタリング期間は3年とした。

表-2 モニタリングの項目と頻度

観測対象	計測機器及び手法	計測値	頻度
のり面	地表 ①地盤伸縮計	地表移動量	リアルタイム
	②地表面傾斜計	地表移動量	リアルタイム
	③移動杭測量 (光波測量)	地表移動量	1回/月
	地中 ④孔内傾斜計	地中移動量	1回/月
	⑤地下水位計	地下水位	リアルタイム
構造物	アンカー ⑥センターホール型荷重計 温度計	緊張力	1回/月(※)
	トンネル ⑦クラックゲージ	亀裂の変位	リアルタイム

(※)異常時発生時はリアルタイムに移行

管理基準については関係図書や過去の実績等を参考に設定し、注視が必要となる基準（管理基準①）と何らかの対策が必要となる基準（管理基準②）を設けた。特に道路通行そのものが危険と判断する基準として、地盤伸縮計が1時間4mm以上を2時間計測した場合とし、即座に通行止めするものとした。

表-3 モニタリングの管理基準

(注視が必要となる基準)		
計測器及び手法	管理基準値①	計測頻度
移動杭測量	移動量2mm/月	1回/月
アンカー荷重計	残存引張力が80%未満 設計アンカー力を越えた状態が継続	1回/月
クラックゲージ	ひび割れが3mmを越えた場合	リアルタイム
(対策が必要となる基準)		
計測器及び手法	管理基準値②	対 策
地盤伸縮計	1mm/日、10mm/月 1時間4mm以上を2時間連続	対策工検討 通行止め

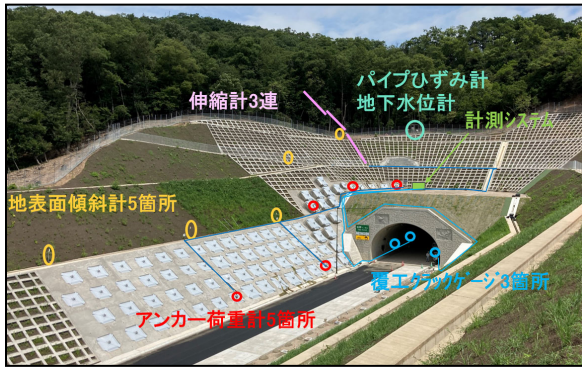


写真-6 佐野トンネル坑口付近のモニタリング

4. 今後の設計についての留意事項

豊岡道路は、2024年9月に無事開通することができた。今後は北近畿豊岡自動車道の最後の事業区間である豊岡道路(Ⅱ期)事業（延長約5.1km）を進めていく。

既に地質調査や予備設計を進めているが、豊岡道路と同様に法面崩壊の要因となる白色凝灰岩や風化礫岩の存在が確認されている。今回の佐野トンネルのように工事着手しからの対応では安全面において地すべりや地山崩壊等のリスクが非常に大きく、また設計見直しによる手戻りや工事工程の遅延等現場の負担が大きい。

今回の事案も踏まえてリスク回避に向けた設計を進めていく必要があり、豊岡道路(Ⅱ期)においては、2022年度に「凝灰岩設計施工マニュアル」を作成している。10ブロックある切土区間を調査し得られた地質データや地形の特性から地質のリスクランク付けを行っており、最もリスクの高いAランクのブロックにおいては、何らかの対策が必要となる。

一方で、今回の件で学識経験者からいただいた意

見の一つである「白色凝灰岩の連続性と面的な分布の確認」については、予備設計時点の調査では把握できていないため、Aランクのブロックにおいて追加調査を実施する必要がある。

また、対策工法を検討するにあたっての安定解析に用いる白色凝灰岩の物性値について、極度の強度低下を考慮し、粘着力を $C=0\text{kN/m}^2$ としたが、せん断力については佐野トンネル坑口も含めて既に変状が起きてからの対策検討であったため、崩壊発生安全率を $F_s=0.95$ として逆解析によるせん断角度を採用していた。

豊岡道路(Ⅱ期)事業においては、これから実施する追加調査で得られた白色凝灰岩の供試体を使って繰り返し一面せん断試験を実施し、せん断力の強度低下も見込んでより現況地山の応力解放後の実態に近い形で安定解析を進めていく計画である。また、工事中の安全確保として施工手順やモニタリング計画も設計段階で計画していく。

工事着手後の現場での負担を極力減らし、かつ過度な対策にならないようこれまでの経験を活かして地質調査をしっかりと行い必要な対策を実施していきたい。

5. おわりに

佐野トンネルは2022年3月に工事着手し、2024年8月に舗装や照明等の設備も含めてようやく完成した。豊岡道路は豊岡中心市街地に繋がる区間であり、豊岡を訪れる人への玄関口として佐野トンネル壁面には豊岡市を象徴するコウノトリをデザインしている。2024年9月6日に佐野トンネルの完成を記念して近隣の小学生を招き完成除幕式を開催し、2024年9月23日に豊岡道路は無事開通することができた。



写真-7 佐野トンネルの完成除幕式

今回の佐野トンネル坑口の問題を乗り越えられたのは、貴重なご意見・ご指導を賜りました学識経験者の皆様や対策を講じた施工業者、設計コンサルタントの皆様と連携し一丸となって取り組んだ結果である。携わった関係者の皆様には心から敬意と感謝の意を表すとともに、今回の件で得た知見が今後の同様の事業計画における対策の一助となれば幸いである。