

崖錐地形に設けるトンネル坑口の設計検討

くにしま のりゆき
國島 範行¹

¹ 中部地方整備局 高山国道事務所 工務課（〒506-0055 高山市上岡本町 7-425）

国道 41 号船津割石防災は、平成 25 年 7 月に落石事故が発生するなど、落石・崩落災害の危険性のある箇所が 10 箇所存在しており、これを回避するために延長 3.1km の局所改良事業を行い、通行規制区間の短縮と道路交通の安全確保を図るものである。

同事業の総延長の約 7 割を占めるトンネル区間（船津割石トンネル）のうち、トンネル起点側坑口部は厳しい地形・地質条件（未固結な崖錐地形に斜交、大土被り、偏土圧条件下）かつ既存のコンクリート擁壁直下での施工となるため、パイプルーフ工法を計画した。本稿は、地山および既存コンクリート擁壁の変位に留意した、トンネル坑口部における設計検討結果を報告するものである。

キーワード：崖錐地形、パイプルーフ、大土被り、偏土圧断面、アンダーピニング

1. はじめに

国道 41 号船津割石防災は岐阜県飛騨市神岡町船津地区を起点とし、同割石地区を終点とする延長 3.1km の路線である。そのうちトンネル区間は 2.3km であり総延長の約 7 割を占め、落石危険箇所や土砂災害危険区域が連続している（図-1）。起点側は現道の国道 41 号に接続可能な箇所が限定され、トンネル坑口部は未固結な地山と斜交する線形計画（交差角 約 35 度）である（図-2）。



図-1 路線概要と設計箇所

2. 厳しい地形・地質条件

トンネルの起点側坑口部は、現在観光鉄道施設として利用されている旧神岡鉄道軌道敷を低土被りで通過し、背後に位置する高さ約 15m のコンクリート擁壁（多段もたれ式）直下を通る計画である（写真-1）。

また、トンネル起点側坑口部は崖錐地形をなし、岩屑

崩堆積物（df 層）からなる未固結な地山であり、転石・砂礫が多く混在、マトリックス（礫間充填物）は粗砂・細礫主体の不均一な地盤であった（写真-2）。そのため、未固結な地山やこれを保持する擁壁に変位が生じることにより、斜面全体の安定を損なうことが懸念された。



写真-1 起点側坑口部の地形状況

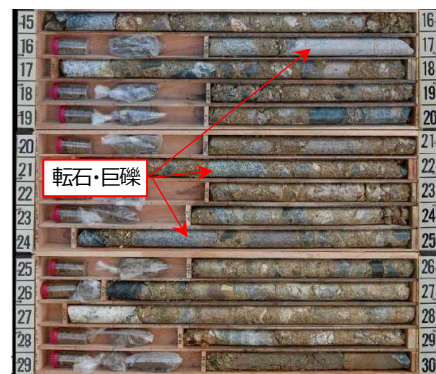


写真-2 コア写真（トンネル計画位置付近、df 層）

3. トンネル施工方法の決定

船津割石トンネルの大半は NATM 工法で施工されるが、起点側坑口部（L=95m）では軌道敷を低土被りで施工すること、未固結な地山でありアーチアクションが形成されないこと、既存コンクリート擁壁の沈下が懸念されることから、NATM 工法の採用は困難であった。

また、開削工法を採用した場合、既存擁壁の撤去が不可欠となるが、転石・巨礫が緩く積もった地盤であり、地形を改変した際にこれらを撤去すると、施工時に斜面崩壊を引き起こすリスクが懸念された。

以上の理由から、未固結地山において地表面の変位を制御可能であり、擁壁のアンダーピニング効果を有し、トンネルを非開削で施工可能であることから、大型箱型函渠をパイプルーフ工法により施工する計画とした。

4. 仮設工設計

(1) 計画上の課題と全体仮設計画

①大土被りとなる斜面と斜交し、著しい偏土圧状態における施工となるため、このような厳しい条件に対して仮設部材の安全性を確保する必要があった。

また、前述したように、パイプルーフの設計におい

ても、②既存コンクリート擁壁および③未固結な地山全体の安定を確保することが要求された。

上記の課題①～③を踏まえた仮設工に関する検討を行い、図-2 および図-3b に示す通り仕様を決定した。

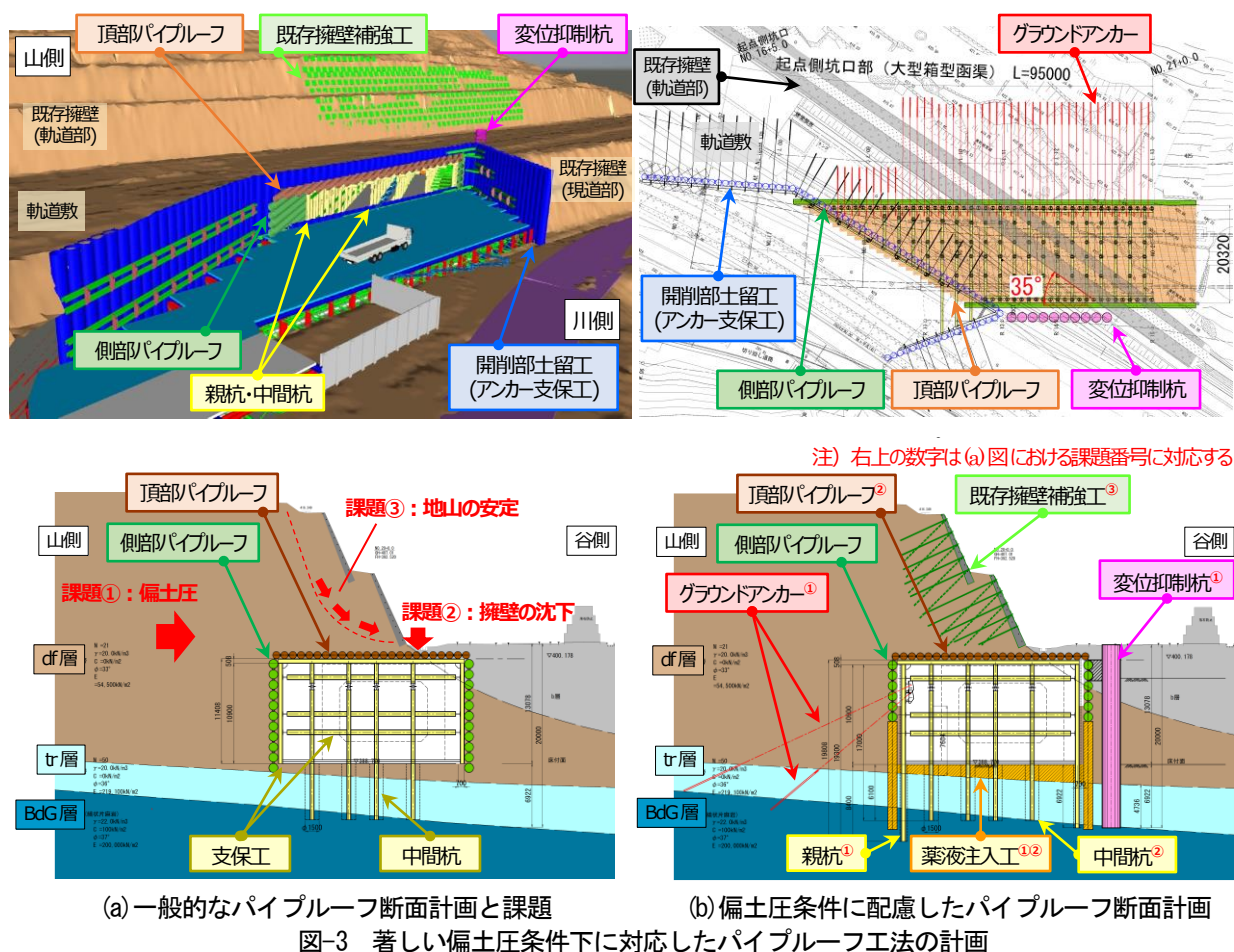
(2) 偏土圧に対する仮設部材の安全性確保【課題①】

パイプルーフ工法は盛土部など、左右の土圧が釣り合い状態となる条件下において多く用いられ、内部支保工は根入れを省略することが一般的である（図-3a）。

ところが、本現場においてパイプルーフは斜面および擁壁と約 35° で平面交差するため、内部掘削時に仮設部材が著しい偏土圧による影響を受ける。今回の条件において試算を実施したところ、山側から谷側へ倒れるように大変形が生じ、構造が安定しない結果を得た。

そこで、側部の内部支保工を高剛性の親杭に変更して十分な根入れ長を確保、グラウンドアンカーを追加して反力を負担させるとともに、谷側の受働抵抗を増大させるために変位抑制杭（大口径鋼管杭）を設置することで、偏土圧に対する仮設構造の安定化を図った（図-3b）。

なお、高剛性の親杭の採用にあたり、狭小空間であり施工上の制約から親杭サイズには限度があったため、パイプルーフ内部に薬液注入工を計画し、受働土圧を確保することにより親杭応力を低減した（図-3b）。



(3) 既存コンクリート擁壁の安定確保【課題②】

a) 既存コンクリート擁壁の諸元と問題点

トンネルと交差する擁壁は昭和 40 年竣工の多段積みもたれ式擁壁（飛騨市管理）であり、前面勾配 3 分 5 厘、最大壁高 8.5m（下段）、上下合わせた総壁高は 15m を超える大規模な構造物である（図-4）。

これら構造諸元や、下段擁壁の主働崩壊領域内に上段擁壁が位置しており、上段擁壁の重量が下段擁壁に影響を及ぼす可能性を有する点などは、現行基準である「道路土工・擁壁工指針（平成 24 年度版）」に不適合な構造物であり、トンネル施工時に生じる変位により不安定となることが懸念された。

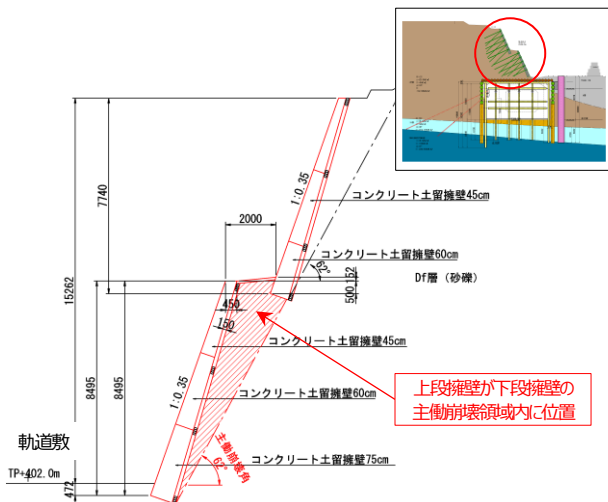


図-4 既存コンクリート擁壁の断面図（軌道部）

b) 許容変位量の設定

パイプルーフ工法によるアンダーピニングを計画し、直接基礎構造物における近接施工時の管理基準値の事例¹⁾を参考に、内部掘削時における脚部沈下量を 10mm 以下に抑制することを目標とした。

c) 解析手法の決定

パイプルーフの設計計算は、これまで一端固定梁モデルによる計算が用いられてきた。しかし、今回の設計では、以下の理由から大規模土留の設計に用いられる弾塑性設計手法を採用し、パイプルーフの設計計算に用いることとした。

- ① 未固結地山および既存コンクリート擁壁の変位量を精度よく評価でき、現場管理に活用できる。
- ② 切羽部の掘削、親杭・中間杭並びにアンカー打設等の施工手順を、逐次解析手法により考慮できる。
- ③ 中間杭とパイプルーフ鋼管根入れ部地盤の反力比率等を、梁-ばねモデルにより正確に評価できる。また、同様の理由により、パイプルーフ鋼管に生じる断面力及び仕様を正確に求めることができる。

d) 弾塑性法による部材仕様の決定と補助工法

弾塑性法によるパイプルーフの設計モデルを図-6 に示す。従来手法では切羽付近の地盤抵抗を無視して設計が行われてきたのに対し、弾塑性法では切羽付近の根入れ地盤が塑性化する場合においても地盤反力を考慮することができるものである。

本現場では土被りが大きく、既存コンクリート擁壁との離隔が小さいため、鋼管サイズに制約があった（φ 800）。そのため、パイプルーフの内部を薬液注入工法による改良を計画することで、切羽部の掘削勾配を 75° として設計スパンを短縮した（図-3b）。

また、パイプルーフ根入れ部（塑性領域）について、地盤の緩みに配慮しつつ地盤抵抗を考慮するため、薬液注入工による改良効果を期待した円弧すべり計算を行い、施工時（短期）の安全率 1.05 を満足する上限荷重を求め、これを弾塑性計算における最大の地盤反力度とした。

以上の計算手法により、中間杭に作用する反力を正確に算定し、既存コンクリート擁壁に対して十分なアンダーピニング効果を有する仮設工を計画した（図-3b）。

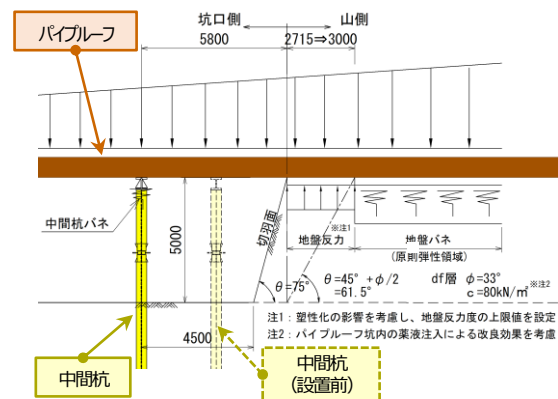


図-6 パイプルーフのモデル化（弾塑性法）

e) 既存擁壁変位量の算定

上記計算モデルによる縦断計算から求めた既存擁壁脚部における鉛直変位量は 7.8mm と推定され、設計の目標値である 10mm 以下を満足する結果を得た（図-5）。

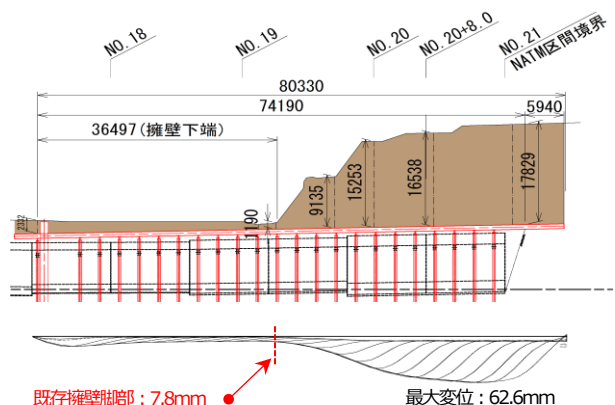


図-5 既存擁壁脚部におけるパイプルーフの変位量

(4) 地山全体の安全性確保【課題③】

a) 地山の現況状態と問題点

パイプルーフ工法による内部掘削に伴う地山全体の安全性を評価するため、円弧すべりに対する照査を実施した。掘削に伴う地山のゆるみによる起動力の増加と、掘削に伴う除荷による抵抗力の低下に着目し、図-7 に示す Case-1、Case-2 のすべり面に対して照査を行った。

照査の結果、既存コンクリート擁壁下端を包括するすべり面 (Case-1) において、現況安全率が 1.0 程度と十分でない結果を得た。

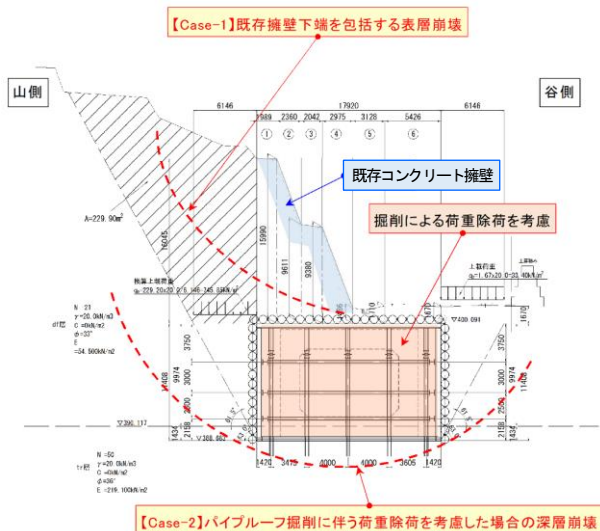


図-7 パイプルーフ内部掘削時における地山の安定照査

b) 対策工法の決定

掘削に伴う既存コンクリート擁壁および斜面が崩壊することを防ぐため、事前に補強対策工を計画することとした。補強対策工は擁壁背面の円弧すべりに対する補強を主目的とし、グラウンドアンカーと鉄筋挿入工の比較検討を行った。

検討の結果、定着位置が短くパイプルーフとの干渉を回避できることに加えて、張力管理が不要であり、長期にわたり安定した補強効果得られ、供用後においてもトンネル坑口の背後斜面の安定を保つことで道路の安全性向上に寄与する鉄筋挿入工を採用した (図-3b)。

c) 対策工の設計

補強対策工の設計は円弧すべりに対して行い、施工期間が長期間に及ぶこと、供用後における対策効果を期待することから、斜面安定対策工における長期の安全率である 1.20 を確保する計画とした。

5. 施工手順の検討

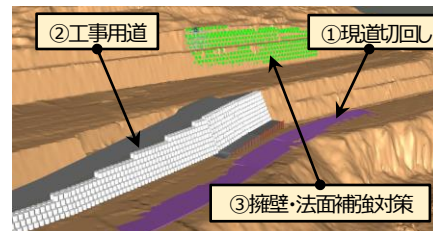
本工事は坑口部と、パイプルーフ坑内における施工に大別される。工事全体として必要な期間が長期に及ぶことから、坑口部を 1 期工事、パイプルーフ坑内部を 2 期工事とした 2 段階施工による計画を立案した。

坑口部の施工 (1 期) は、工事の進捗により観光鉄道施設の営業に及ぼす影響を最小限に留めるため、軌道部に乗り入れる工事用道路を整備し、軌道部における施工を先行して完了する計画とした (図-8)。

パイプルーフ坑内の施工 (2 期) では観光施設を供用しながらの施工となる。軌道および既存コンクリート擁壁に生じる変位を抑制するため、上半掘削時に親杭、中間杭を施工した後、下半を掘削する計画とした (図-9)。

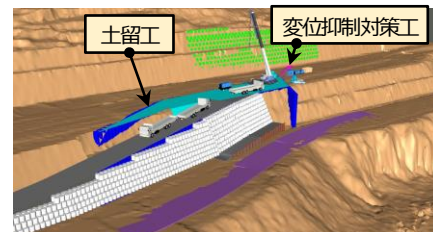
STEP-1: 準備工、既存擁壁補強工

- ① 現道切回しによるヤード確保
- ② 工事用進入路を施工 (現道と軌道敷を接続)
- ③ 擁壁・法面補強対策工



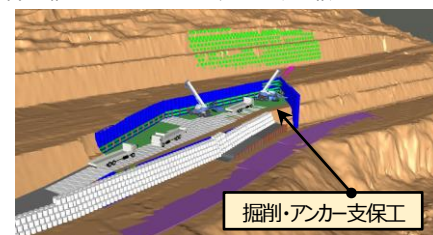
STEP-2: 土留工・変位抑制対策工

いずれも自走式回転圧入工法により施工



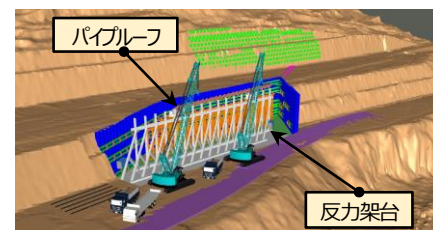
STEP-3: 開削部 (立坑部) 掘削・アンカー支保工

函渠工構築およびパイプルーフ発進立坑を兼用



STEP-4: パイプルーフ工 (頂部・側部)

立坑内に反力架台・掘進用架台を構築して施工



観光鉄道施設休業期間

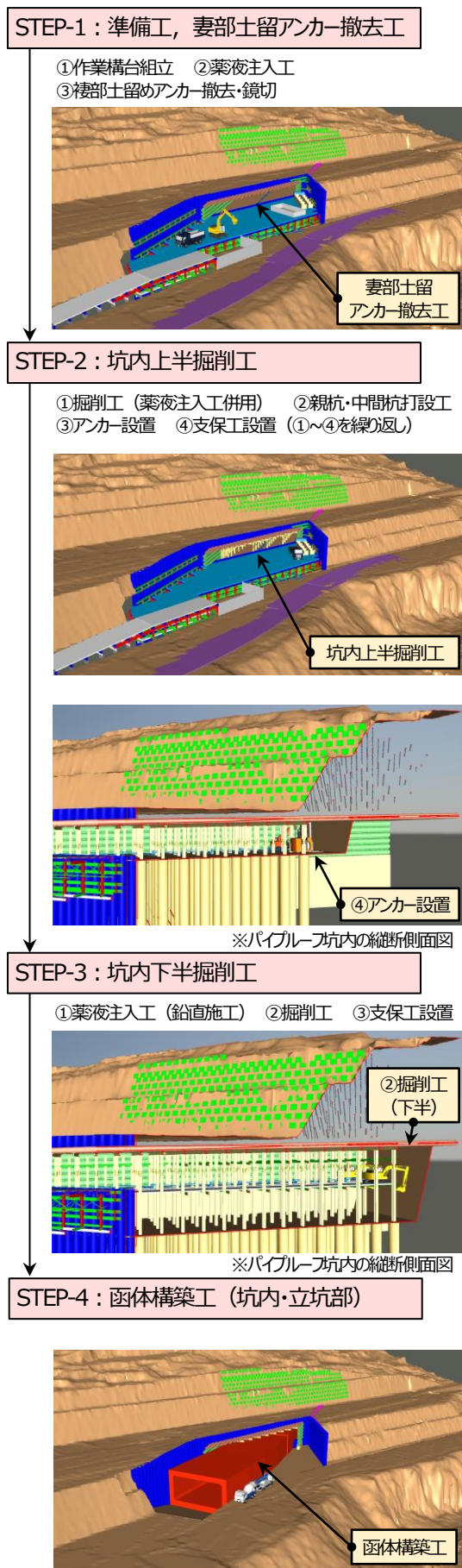


図-9 起点側坑口部における施工順序図（2期工事）

6. おわりに

本稿は，山岳地帯の大土被り・偏土圧条件下において，パイプレンを用いた非開削工法に対して，既存擁壁の変位に配慮した設計を行った．大規模仮設工の設計に用いられる弾塑性設計手法を準用し，地盤の塑性化状態を考慮して鋼管の応力状態や変位を精度良く求め，設計の容易さ・汎用性と設計品質を両立した計画を提案した．

本業務の設計事例が，大土被り，偏土圧，近接構造物と交差し，未固結地山に斜交するといった山岳トンネル工法による施工が困難な厳しい条件下において，トンネルを計画・設計する際の参考となれば幸いである．

一方，このような設計・施工計画は前例に乏しいものであり，工事発注にあたっては施工者独自の高度で専門的なノウハウや工法を求める技術提案・交渉方式の採用など，慎重に発注方式を検討することが望まれる．

参考文献

- 1) 地中構造物の建設に伴う近接施工指針，平成 11 年 2 月，（一社）トンネル技術協会