

一般国道236号野塚防災事業における雪崩シミュレーションを用いた対策工検討事例について

帯広開発建設部 道路設計管理官付

○若林 翔梧

結城 哲哉

本田 拓斗

一般国道236号に位置する野塚トンネルにおいて、平成30年3月にトンネル坑口背後の沢より湿雪雪崩が発生し、堆積物が道路上に到達したことで電気設備の損傷被害が起きている。この事象を踏まえ防災事業が立ち上がり、雪崩対策工についての検討を進めているところであるが、検討に際し雪崩現象の解析シミュレーションを用いた対策工検討を実施したため、その事例を報告する。

キーワード：防災、雪崩対策、シミュレーション

1. はじめに

一般国道236号野塚防災事業は、北海道広尾郡広尾町から浦河郡浦河町を結ぶ路線の雪崩等による危険箇所の解消を図り、道路の安全な通行の確保を目的とした延長3.1kmの防災対策事業である（図-1）。本稿では、事業化の経緯、対策検討上の課題、野塚トンネル工区のシミュレーションを用いた検討状況等について報告する。

当該路線における平成20年度から平成29年度にかけての10年間で発生した通行止めは累計34回・1,060時間であり、平成9年度開通後の平成10年度から平成19年度まで

の10年間と比較すると通行止め回数は約3倍・時間は約5倍に増加している。そのうち、被災による通行止め要因の約5割が雪崩によるもの（図-2）であり、10年間毎の気象状況を比較すると冬期の平均気温は上昇傾向・平均降雪量も増加傾向であることから、気象条件の変化によって雪崩による通行止めが発生しやすい状況にあったと考えられる（図-3(1)・(2)）。また、平成30年3月には降雨の影響で湿雪雪崩が発生し大量の雪崩堆積物が道路上に到達、約2週間の通行止めとなった。これら事象への対応のため、有識者による検討会を開催し、議論した結果を踏まえ平成31年度に防災対策事業として事業化した。

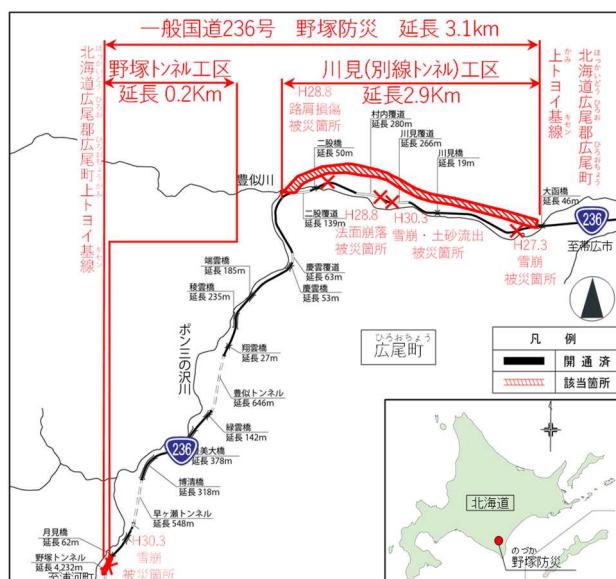


図-1 事業位置及びH30.3までの大きな被災位置



図-2 過去10年間毎の通行止め状況比較と要因内訳

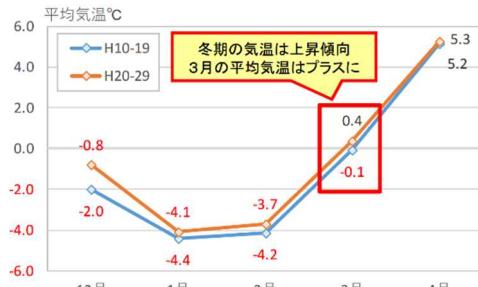


図-3(1) 過去10年間毎の平均気温の変化

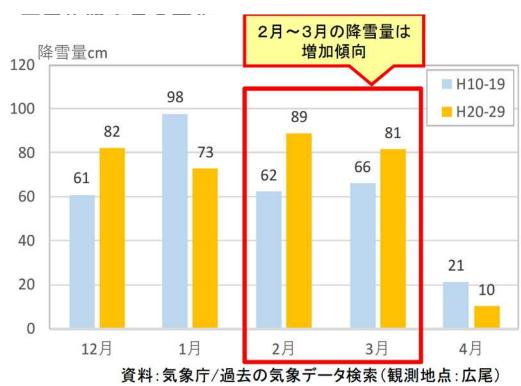


図-3(2) 過去10年間毎の降雪量の変化



写真-1(2) H30.3 雪崩発生状況

2. 防災対策検討上の課題

(1) 平成30年3月発生雪崩について

平成30年3月8日19時から翌日3月9日11時かけて連続雨量239mmを観測した野塚トンネル坑口付近の沢にて湿雪雪崩が発生、大量の雪崩堆積物が道路上へ押し寄せトンネルの電気室に損傷を与えるとともに道路を覆い、約2週間の通行止めとなった。雪崩の発生箇所は標高約1,200mの位置と想定され、延長約1,100mの距離を下りながら土砂や立木を巻き込み、トンネル横を流れるポンガニ二の沢川へ到達すると先行流下した雪崩がトンネル坑口背後の斜面を乗り越え道路上へ堆積し、後続流下したものは河川上に堆積した（写真-1(1)・(2)）。

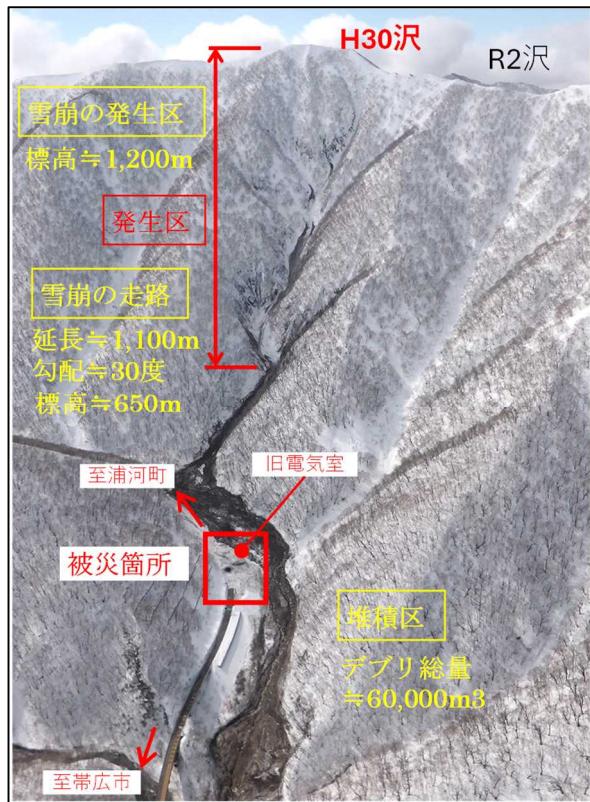


写真-1(1) 雪崩発生箇所(H30沢)と被災箇所の位置関係

(2) 令和2年3月発生雪崩について

令和2年3月4日19時から翌日3月5日8時にかけ40cmの降雪量を観測した野塚トンネル坑口付近にて、坑口横の沢（R2沢）より表層雪崩が発生し道路上に雪崩が堆積、道路照明柱2本が損傷した。雪崩の発生箇所は標高約1,100mの位置と想定され、延長約700mの距離を下り河川を乗り越え道路上へ到達した（写真-2(1)・(2)）。発生時の気温は氷点下4.8°Cであり、雪崩堆積物の状況からも乾雪表層雪崩であったことが判明した。道路構造本体の大きな損傷は確認されなかった。

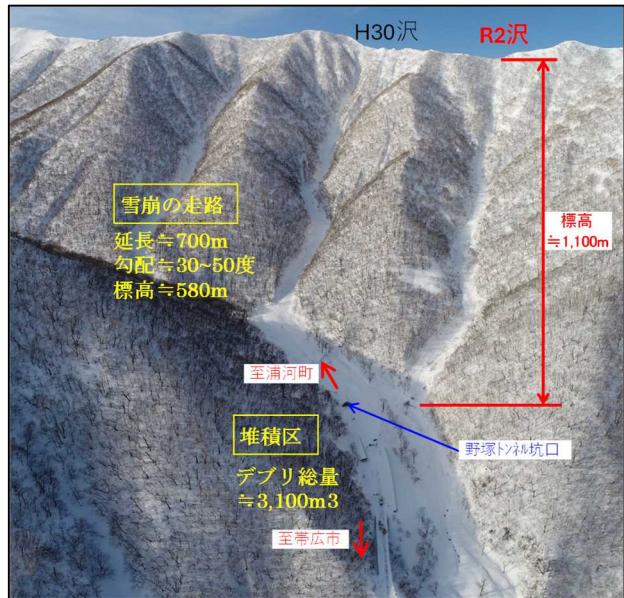


写真-2(1) 雪崩発生箇所(R2沢)と被災箇所の位置関係



写真-2(2) R2.3 雪崩発生状況

(3) 雪崩対策工法について

雪崩対策工法は大きく分けて「雪崩予防工」と「雪崩防護工」に分かれる。雪崩予防工は雪崩発生範囲に予防柵等の構造物を設置するが、本件では斜面規模が延長約1,100mかつ発生箇所の標高が約1,200mと大きく、設置及び維持管理が困難である。一方、雪崩防護工は雪崩堆積範囲に防護擁壁等を設置する工法であり、本事業における候補案としては「①スロープ案」「②待受け擁壁+減勢工」「③側壁補強工」が考えられた（図4）。

これら工法の採用に際しては、雪崩が衝突する衝撃力に耐えうる規模の構造とする必要があり、地形的条件や気象条件を考慮した発生規模での検討が求められる。そのため、H30沢及びR2沢それぞれの雪崩の再現シミュレーションを作成することで雪崩の衝撃力を検証するとともに、候補案の採用可能性や対策施工範囲の検討を行うこととした。シミュレーションによる検討は令和元年度から実施しており、その内容について次章より報告する。

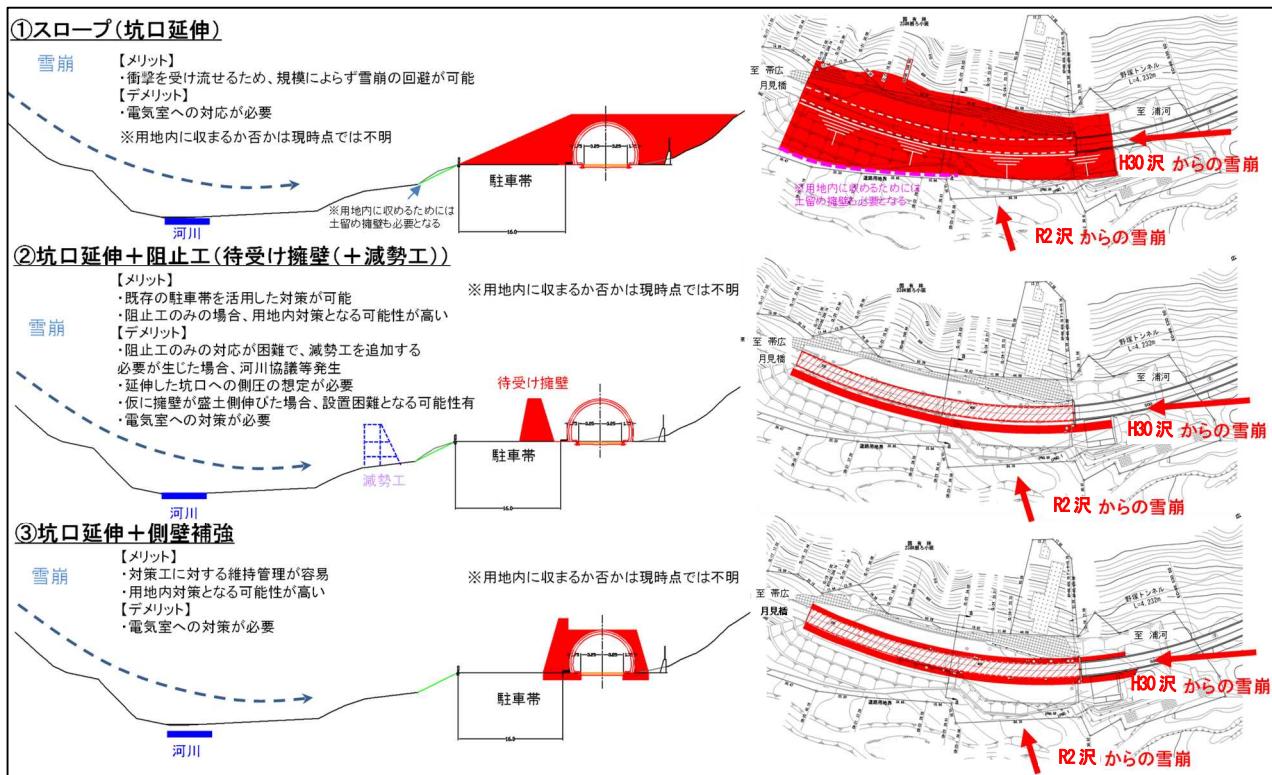


図4 雪崩対策工候補案（令和元年時点）

3. シミュレーションを用いた検討状況

(1) 雪崩シミュレーションモデルの概要

雪崩解析では、雪崩の運動に関するパラメータを設定する必要があるが、雪崩の種類やモデル間でパラメータのばらつきが大きく、一意的に決定することが困難であるため、実際に発生した雪崩事象を再現できるよう試行解析を行うことで、再現性の高いモデルパラメータを設定した。また、試行解析より得られたパラメータを基に対策後の解析を行うことで、対策工の検討、評価を行うこととした。なお、雪崩シミュレーションについては幾つかの系統のシミュレーションが開発されているが、本解析では雪崩の拡がりを3次元的に評価でき、対策工設置時の解析も可能な3次元流体モデル（MPS法によるモデル）を用いることとした（表-1）。

表-1 雪崩シミュレーションの手法

雪崩モデル	モデル概要	本業務への適用性
1次元流体モデル	<ul style="list-style-type: none"> ●雪崩物性：流体、質点、剛体を仮定 ●代表モデル：Voellmy、Perlaなど ●出力：速度 ●計算量：極めて小 	流下経路を事前に設定する必要があり、流下経路や雪崩の広がりを解析することは不可。
質点モデル (準2次元)	<ul style="list-style-type: none"> ●雪崩物性：質点（雪崩中心） ●代表モデル：質点モデル ●出力：流下経路、速度、雪崩質量 ●計算量：小 	流下経路や雪崩の質量を解析できるが、雪崩（デブリ）の広がりを解析することは不可。
3次元流体モデル	<ul style="list-style-type: none"> ●雪崩物性：流体（粒状体） ●代表モデル：TITAN2D、MPS法（粒子法）等 ●出力：流下経路、雪崩の3次元形状、速度 ●計算量：中～大 	流下経路や雪崩の拡がりを解析可能。MPS法等の粒子法では3次元的な形状の変化も解析可能。雪崩モデルの主流。
個別要素法モデル (3次元)	<ul style="list-style-type: none"> ●雪崩物性：雪粒子 ●代表モデル：DEM（個別要素法） ●出力：流下経路、雪崩の3次元形状、速度 ●計算量：極めて大 	雪粒子一つ一つの動きを解析するため計算量が大きい。主に土砂の分野で用いられ、雪崩への使用実績は少ない。

(2) 令和元年度の検討状況

令和元年度における検討では、実際に発生したH30沢の雪崩事象の再現解析を行うことにより、雪崩シミュレーションの妥当性の確認や、再現性の高い解析条件（流动に関するパラメータ）の検討を行い、シミュレーションによる再現解析結果を基に、雪崩災害時の雪崩の速度や最大厚さ、衝撃力などの推定を行った。

内部摩擦角や粘着力といった流动に関するパラメータを計7パターン用意し解析したところ、実際の発生状況と酷似しているシミュレーション結果となる条件が確認できた（表2・図5）。

表2 採用した流动に関するパラメータ

項目	数値
積雪深（雪崩発生層厚）	174cm（H30.3雪崩発生時の野塚テレメータ）
内部摩擦角	10°
底面摩擦角	3°
粘着力	0.01Pa
雪の取込	無し（全層雪崩のため）

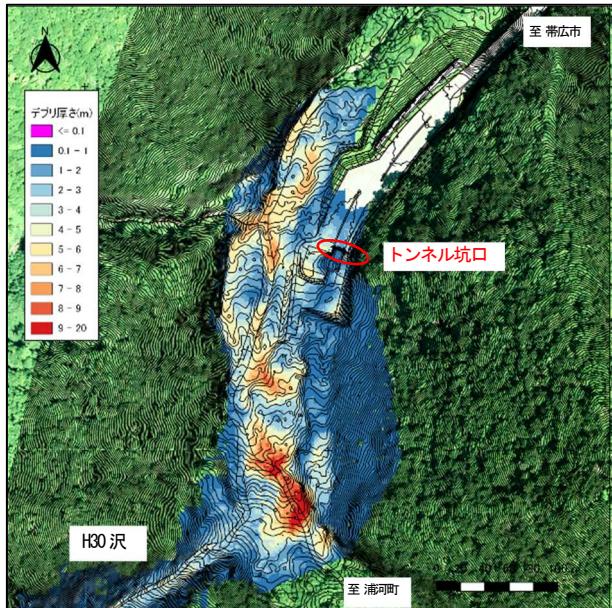


図5 雪崩範囲・厚さのシミュレーション結果(R1年)

(3) 令和3年度の検討状況

令和3年度における検討では、令和元年度に確認出来的たパラメータを用いてH30沢及びR2沢で発生した規模の雪崩に対して、雪崩解析を実施し対策工が効果を發揮するか否かを確認した。なお、令和元年度のシミュレーションにおいてR2沢からの雪崩による衝撃力が最大800kN/m²～900kN/m²になると想定され、この衝撃に耐えうる重力式擁壁工の構造は高さ約20m・底面幅約15mが必要となることから、「②待受け擁壁+減勢工」「③側壁補強工」の採用は難しいと判断し、「①スロープ案」にて対策工の効果を検証した。

対策工のシミュレーション条件として30年確率積雪深の315cmでの全層雪崩が発生したものとして検証した結果、H30沢からの雪崩はスロープ案で対応可能となったが、R2沢からの雪崩には対応できないことが確認された（図6(1)・(2)・図7(1)・(2)）。

結果、H30沢からの雪崩はスロープ案で対応可能となったが、R2沢からの雪崩には対応できないことが確認された（図6(1)・(2)・図7(1)・(2)）。

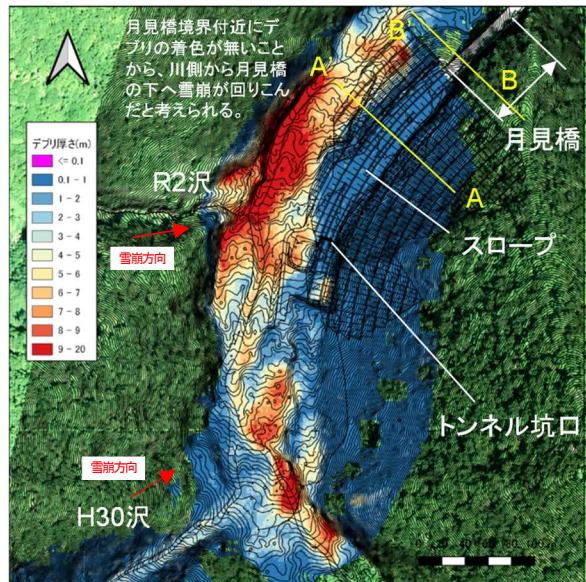


図6(1) H30沢からの雪崩シミュレーション結果(R3年)

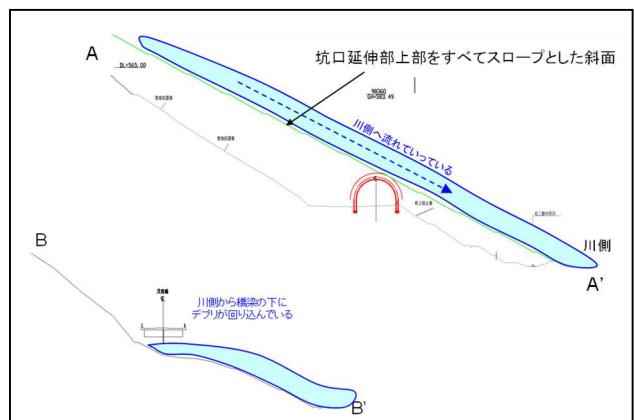


図6(2) H30沢雪崩シミュレーション結果断面イメージ図(R3年)

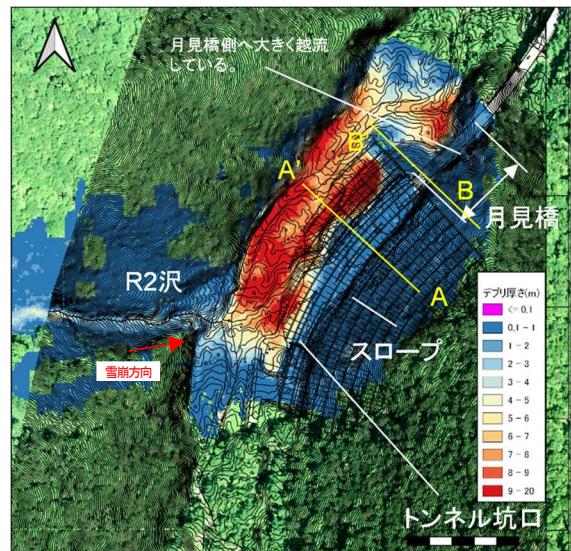


図7(1) R2沢からの雪崩シミュレーション結果(R3年)

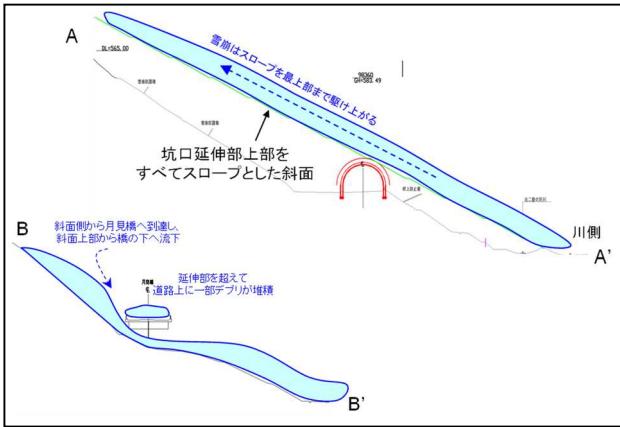


図-7(2) R2沢雪崩シミュレーション結果断面イメージ図(R3年)

(4) 令和5年度の検討状況

令和元年度及び令和3年度に実施したシミュレーションでは雪崩の流动方向や到達範囲を評価したが、算出された雪崩速度は30m/s程度であり、この数値は全層雪崩の一般値である20m/sを逸脱していた。これは到達範囲に対する再現性を重視したパラメータを用いたためであり、この結果を踏まえた衝撃力の算定では雪崩対策工の規模が過大となる恐れがあると考えられた。要因としてはパラメータの一つである底面摩擦角を過小評価していることが挙げられたため、設定値を見直したところ全層雪崩では道路上に雪崩が到達しないことが確認された。については、パラメータを再設定し雪崩対策工を検討することとした（表-3）。

表-3 再設定した流动に関するパラメータ

発生箇所		H30沢	R2沢
雪崩分類		乾雪表層雪崩 湿雪表層雪崩	乾雪表層雪崩
雪崩本体	粘着力	0	0
	内部摩擦角	3°	3°
底面抵抗	動摩擦係数	0.01	0.01
	流动係数	2000	2000
始動積雪深		160cm	75cm
流下層厚		+0.225m/100m	+0.225m/100m

再設定したシミュレーション条件で雪崩の衝撃力を確認したところ100KN/m²程度となったことから、令和3年度の候補案として上がっていた待受け擁壁での対策工の採用が可能となった。このことから、再度の雪崩再現解析結果を踏まえ、令和3年度での検討時の課題であったスロープを越流して道路上へ到達する雪崩への対応として、雪崩を受け止める防護擁壁と雪崩を河川下流へ受け流す誘導擁壁とを組み合わせた対策工を候補案としてシミュレーション解析を実施することとした（図-8）。

解析の結果、H30沢からの雪崩に対しては誘導擁壁の設置によって、雪崩がトンネル坑口に向かって越流することなく河川を下っており、道路上へ雪崩が堆積しないことが確認できた（図-9）。また、R2沢からの雪崩に対

しても防護擁壁の設置によって、雪崩が河川を乗り越え道路上に到達することはなく河川内に留まっており、対策工として機能していることが確認できた（図-10）。

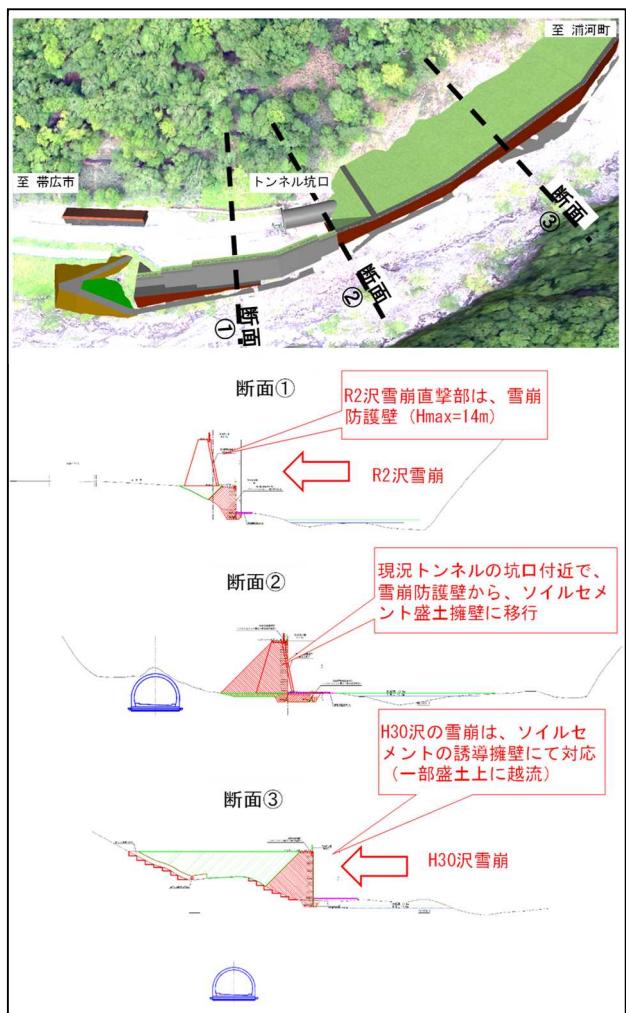


図-8 擁壁工による雪崩対策案 (R5年)

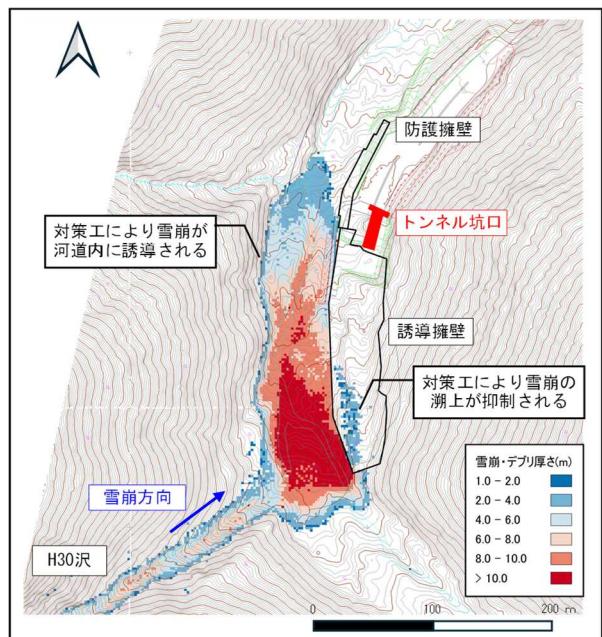


図-9 H30沢からの雪崩シミュレーション結果(R5年)

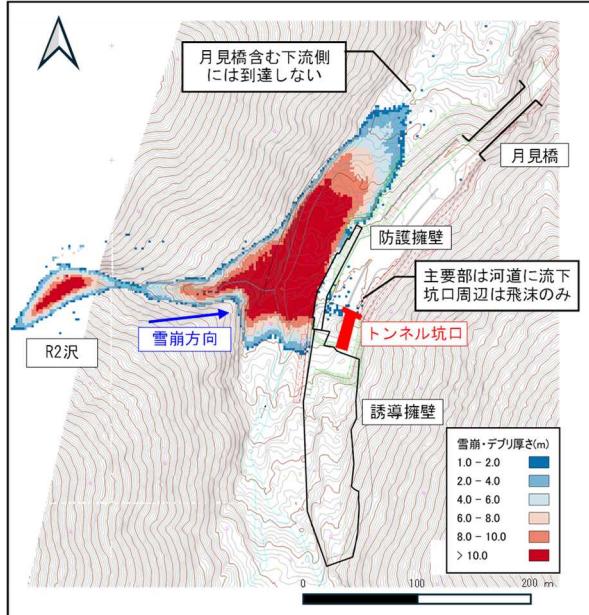


図-10 R2沢からの雪崩シミュレーション結果(R5年)

(5) 令和6年度の検討状況

本事業区間では、H30沢及びR2沢以外の箇所でも雪崩や法面崩壊が発生しており、別線トンネルによる被災区間の回避が計画されている。掘削によって発生する残土量は約215,000m³であることから、事業全体として効率的な土配計画を考える必要があった。令和6年度の検討では、令和3年度の候補案であったトンネル坑口延伸+スロープ案と令和5年度で対策効果が確認された誘導擁壁+防護擁壁案を組み合わせた対策工(図-11)を立案しシミュレーション解析することで、残土の有効活用と雪崩対策との両立を図れるか検証した。

なお、擁壁工の使い分けについては、解析の結果を踏まえ雪崩が衝突する範囲は衝撃に耐えうる「鋼矢板併用ソイルセメント擁壁」、雪崩が衝突しない範囲は施工性・経済性に優れる「補強土壁」を採用している。また、スロープ盛土の厚さはトンネル本体の応力計算及びFEM解析の結果から、土圧と積雪荷重に耐えうる安全な範囲で決定している。

H30沢及びR2沢の両方の沢から雪崩が連続発生した場合でのシミュレーションも実施した結果、R2沢単独雪崩及びH30沢・R2沢連続発生時においてはスロープ盛土部へ最大10m程度の堆積が見込まれるもの、いずれの

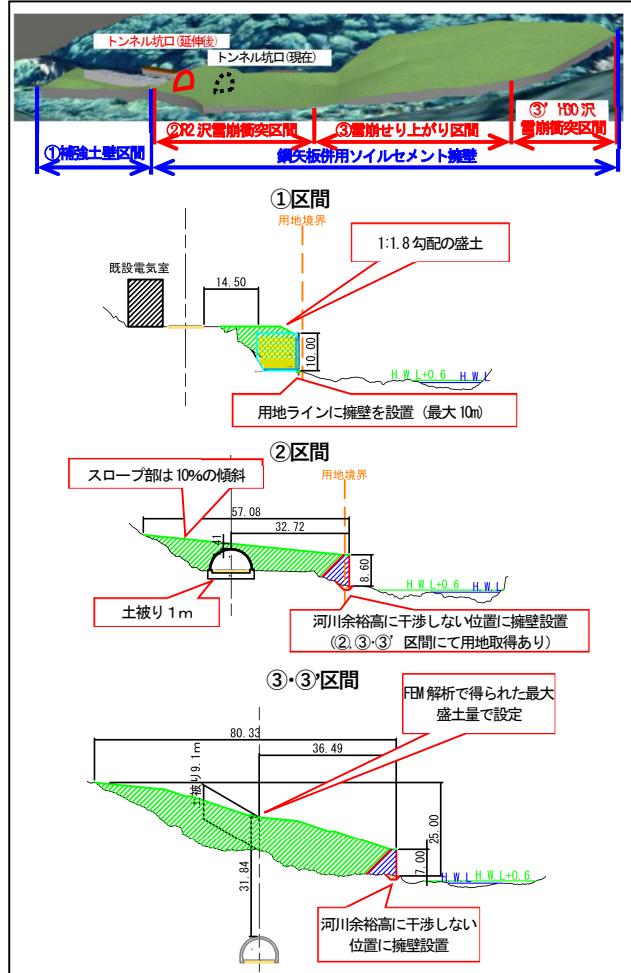


図-11 坑口延伸+スロープと擁壁の併用案(R6年)

条件においても雪崩が道路上に堆積しないことが確認された(図-12)。

4.まとめ

令和6年度までは雪崩による衝撃力を考慮した対策工比較検討を進めてきた。今後は対策工実施に向けた詳細工法の設計や施工時の国道通行止めを極力回避できる計画検討に取り組み、雪崩等による危険を解消し道路の安全な通行が確保されるよう尽力していきたい。

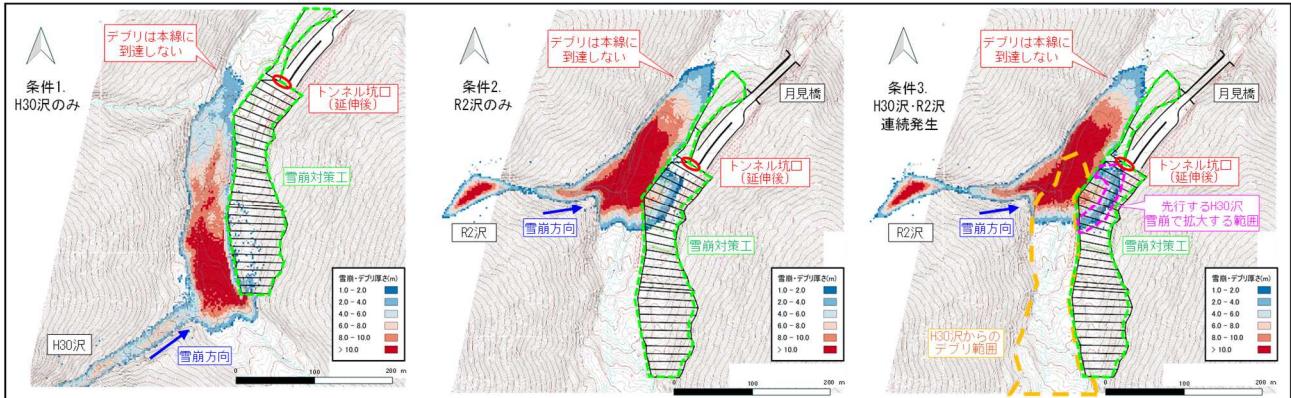


図-12 H30沢・R2沢の雪崩シミュレーション結果(R6年)