

切土のり面の断熱凍上対策について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○御厩敷 公平
林 宏親
佐藤 厚子

北海道のような寒冷地における切土のり面は、凍結融解による表層地盤の脆弱化や、表層地盤の凍上と融解沈下、さらに、融雪水の大量供給等により、のり面の変状や崩壊が発生している。そこで、切土のり面の凍上を防止し、対策後の維持管理の低減を目指し寒冷地切土のり面への断熱凍上対策について検討を行っている。

本稿では、断熱凍上対策の施工箇所における現地計測結果を踏まえて、切土のり面の凍上対策について紹介する。

キーワード：切土のり面、凍上対策、維持管理

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地の切土のり面は、冬期間に地盤が凍結・凍上し、融解期に表層部の泥ねい化や融雪水または降雨による水の進入により、表層崩壊が発生している。多くは表層の崩壊であるため、山崩れ、崖崩れ、あるいは一般に土砂崩れと言われている斜面崩壊と比べて重大な問題となることは少ない。しかし、崩壊土砂が道路機能に影響を及ぼす可能性があり、のり面高所で崩壊が発生する可能性を考えると大きなリスクを抱えているといえる。

本稿では、北海道で用いられる凍上対策を紹介するとともに、その特徴や現地計測結果を踏まえた対策工について述べる。また、寒地土木研究所で研究開発を行った新たな切土のり面の凍上対策技術を紹介する。

2. 特殊ふとんかご

凍上現象とは、寒気により地盤内に凍結面が進行する過程において、凍結面付近に土中水が集められ数mmから数cmの氷晶（アイスレンズ）の形成を繰り返しながら幾重にも成長することによって、冷却面（地表面）に向かって地盤が膨張することである。図-1²⁾に示すように斜面では地盤の凍上は斜面に垂直な方向に生じるが、融解期には凍上した地盤は重力により鉛直方向に融解沈下する。よって、凍上融解が繰り返される表層地盤は脆弱化し、春先の融雪水や降雨時の雨水の浸透により表層崩壊が発生しやすい状態となる³⁾。

その対策として、のり面の湧水処理を目的としたのり面被覆用の特殊ふとんかご（一般的なサイズは幅1.0m×奥行2.0m×厚さ0.25mで、鉄線で編まれた直方体内に粗粒材が中詰材として詰められているもの）を敷設してい

る例が数多くあり、北海道においては崩壊後の応急対策として使用頻度は高い³⁾。また、特殊ふとんかごを設置することで、地山の温度の低下が抑制されることが確認されている⁴⁾。

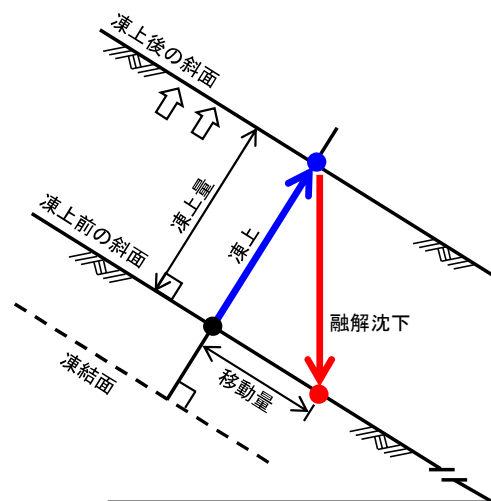


図-1 凍上と融解沈下によるのり面の挙動²⁾



写真-1 特殊ふとんかごの変状事例

凍上対策の考え方は、凍上の3要素といわれる「温度」、「水分」、「土質」のうち、どれか1つの要素を除外することが基本⁹⁾となっている。

特殊ふとんかごは切土のり面表層を非凍上性の材料で置換する効果に加え、中詰材により切土のり面への寒気の進入を抑制する断熱効果もあるが、粗粒材を中詰材とする厚さ0.25mの構造では、礫材の熱伝導率が比較的大きいことから、寒気による背面地山への凍結面の進入を完全に防止することはできていない⁴⁾。凍上性が高い地山の場合には凍上と融解沈下の繰り返しにより、写真-1に示すように中詰材の移動による空隙の発生や特殊ふとんかごが波打つような変状が発生することがある。

ただし、特殊ふとんかごは、凍上および融解によるのり面の上下の動きに追従することで、その排水機能が損なわれず、効果の持続を期待する工法であるため、前述の変状はある程度許容されるものともいえる。しかし、凍上を繰り返し受けた背面土の状態は容易に点検することができず、長期的な安定性については不明な点が多い。また、設置や補修作業においても高所かつ斜面での人力施工に頼ることも多く、施工性や安全性に課題が挙げられる。

3. 断熱特殊ふとんかご

(1) 対策工の基本構造

先述の特殊ふとんかごの凍上対策としての課題に対し、凍上の3要素である温度に着目し、断熱による凍上対策に特化した特殊ふとんかご（断熱特殊ふとんかご）の施工事例が近年見られてきた。基本的構造を図-2に示す。特殊ふとんかごの下部に断熱材（土木資材として一般的なEPSもしくはXPSなど）が敷設または内包され、必要に応じ排水材も併用される。断熱材の厚さは施工箇所の気象条件により設定することになる。中詰材の厚さは一般的な特殊ふとんかごと同様に25cmとすることが多い。

特殊ふとんかごと同様に雨水や融雪水は中詰材で受け止めつつ速やかに排水することで、のり面の侵食を防止する。断熱材は地山への寒気の進入を防止し、地山からの湧水や滲出水に対しては、必要に応じ排水材を敷設することで対応可能である。

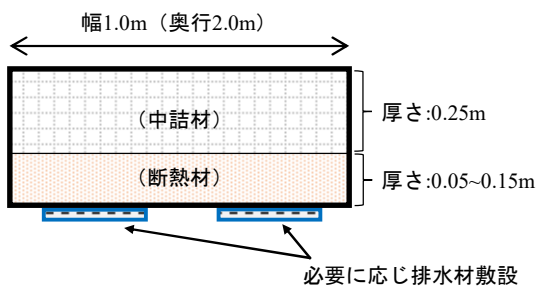


図-2 断熱特殊ふとんかごの基本構造

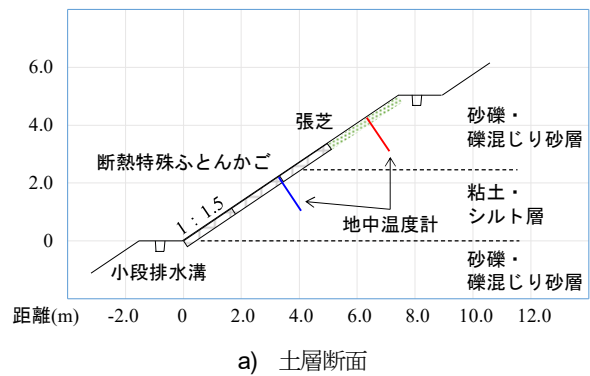
(2) 現地計測箇所

断熱特殊ふとんかごの凍上対策効果を検証するため、国道232号と国道272号の2箇所の切土のり面において現地計測を行った。これらの計測箇所は、過去に凍上に起因したのり面クラックや、のり肩部の変状またはのり面の表層崩壊が発生しており、補修の際に凍上対策として断熱特殊ふとんかごを施工した箇所である。

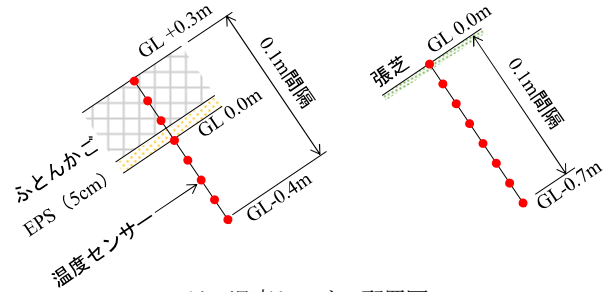
(3) 国道232号⁶⁾

a) 対策工と計測器設置の概要

国道232号の計測断面の概略を図-3に、現地施工状況を写真-2に示す。切土のり面を形成する地山は、図-3 a)に示すように凍上性を有する粘土・シルト層と砂礫・礫混じり砂層で形成されている。



a) 土層断面



b) 温度センサー配置図

図-3 国道232号の計測断面の概略

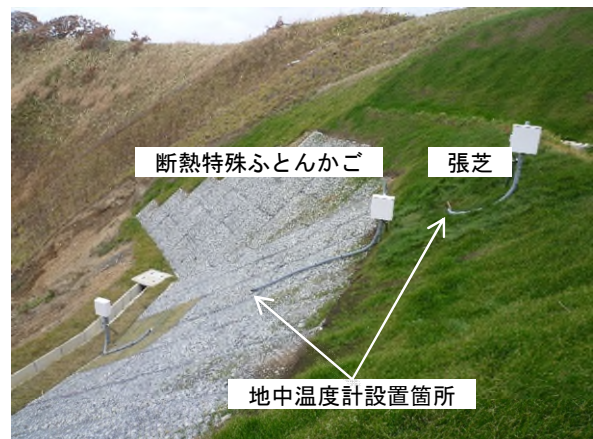


写真-2 施工状況

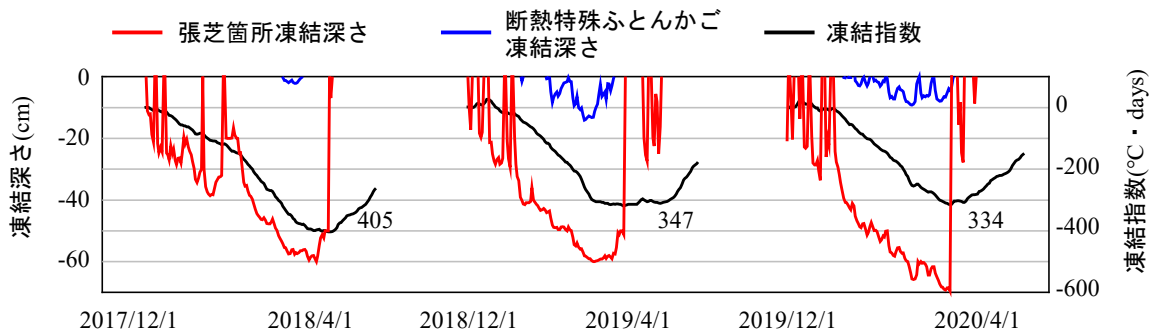


図-4 2017年～2020年の地盤の凍結深さと凍結指数

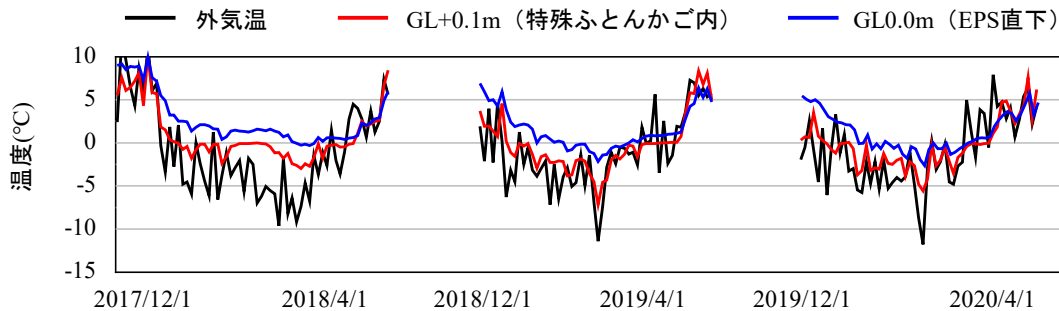


図-5 断熱特殊ふとんかご箇所における2017年～2020年の温度

対策箇所は、のり面表層を発泡プラスチック系断熱材のひとつであるポリスチレンフォーム断熱材 (EPS) により被覆後に、特殊ふとんかごが敷設された。特殊ふとんかごの規格は幅1.0m×奥行2.0m×厚さ0.25mで、中詰材は80mm級の切込砕石が使用された。断熱材として厚さ5cmの透水性 (透水係数: $2.0 \times 10^{-3} \text{m/sec}$) のEPSが使用されたため、排水材は不使用となっている。

地中温度の計測のため、図-3 b)に示すように特殊ふとんかご内または地山に深度0.7mまで0.1m間隔で温度センサーを設置した。対策箇所の温度センサーはGL+0.1m～GL+0.3mが特殊ふとんかご内、GL0.0mがEPS直下 (地山表層) に該当する。

b) 現地計測結果

2017年から2020年の地盤の凍結深さと凍結指数を図-4に示す。地盤の凍結深さは、地中温度計測結果よりマイナス温度となる最大深度を示しており、図中には外気温から算出した各年の凍結指数を記載している。この期間の凍結指数は334-405°C・daysとなっている。張芝箇所の各年の最大の凍結深さは60cm～70cmとなった一方で、断熱特殊ふとんかご施工箇所の最大の凍結深さは2cm (2017年～2018年)、14cm (2018年～2019年)、9cm (2019年～2020年) となった。断熱特殊ふとんかごにおける2017年から2020年のGL+0.1m (特殊ふとんかご内) とGL0.0m (EPS直下) の温度を図-5に示す。GL0.0mの温度は冬期においても0°C以上またはGL+0.1mよりも高い温度を維持しており、EPSの断熱効果が確認された。これらの現地計測結果から、断熱特殊ふとんかごにより

凍結深さがかなり抑制されたといえる。

なお、当該現場は2013年に施工をしており、2022年10月の調査時には、目視によるかごの変形や損傷は確認されていない。よって、切土のり面は長期的に安定を保っているといえる。

(4) 国道272号

a) 対策工と計測器設置の概要

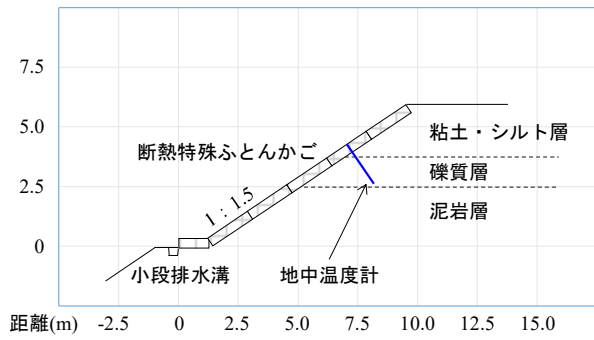
国道272号の計測断面の概略を図-6に示す。切土のり面を形成する地山は、図-6 a)に示すように凍上性を有する粘性土層、礫質層と風化泥岩層から形成されている。

対策箇所は、のり面表層に排水材 (幅0.3m) を設置後に断熱特殊ふとんかごが敷設された (写真-3参照)。先述の国道232号とは異なり、ここでは幅1.0m×奥行2.0m×厚さ0.40mの特殊ふとんかご内に断熱材として厚さ15cmのXPSが使用された。

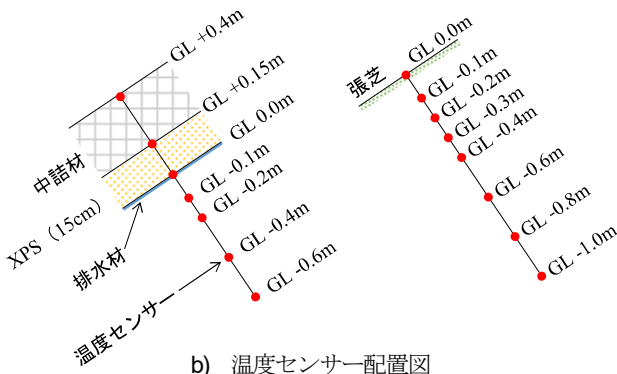
地中温度の計測のため、図-6 b)に示すように特殊ふとんかご内または地山に深度1.0mまで温度センサーを設置した。対策箇所の温度センサーはGL0.0mがXPS直下 (地山表層) に該当する。なお、張芝箇所の温度センサーは断熱特殊ふとんかごの影響を受けないように対策範囲から4m離れた位置とした (写真-4参照)。

b) 現地計測結果

2020年12月から2021年4月までの温度計測結果を図-7に示す。外気温から算出した凍結指数は523.7°C・daysのため、先述の国道232号 (凍結指数334-405°C・days) よりも寒冷な条件であるといえる。張芝箇所は図-7 a)に



a) 土層断面 (断熱特殊ふとんかご)



b) 温度センサー配置図

図-6 国道 272 号の計測断面の概略



写真-3 断熱特殊ふとんかご施工の様子

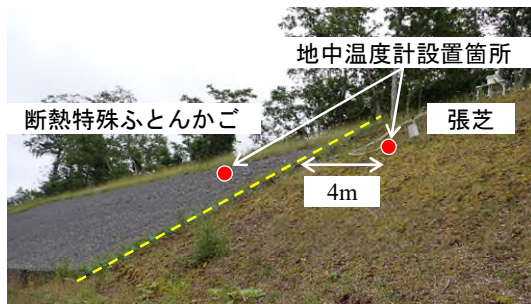


写真-4 現地計測箇所全景

示すとおり、冬期にGL-0.6mまで地中温度が0°Cを下回る結果となった一方で、断熱特殊ふとんかご施工箇所は図-7 b)に示すとおり、GL0.0m (XPS直下) 以深の温度は冬期においても0°Cを下回ることはなく、対策工の効果が発揮されていることを確認した。また、対策工の厚さは0.4m (図-6 b)参照) のため、張芝箇所のGL-0.4mと断熱特殊ふとんかご施工箇所のGL0.0mは、のり面表層か

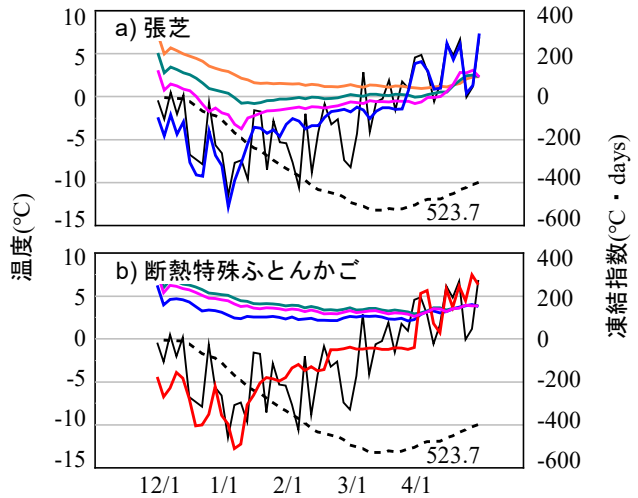
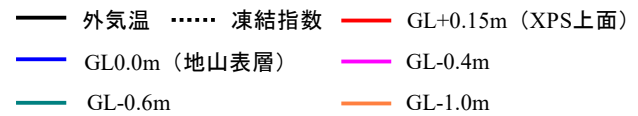


図-7 2020年12月から2021年4月の温度計測結果

らの深さが等しい。12月中旬から4月上旬にかけて張芝箇所のGL-0.4mではマイナス温度が確認されたものの、断熱特殊ふとんかご施工箇所は張芝箇所よりも3°C~6°C高く、前述のとおり冬期においても0°Cを下回ることにはなかった。対策効果の確認に加えて、図-7 b)のGL+0.15m (XPS上面) とGL0.0m (地山表層) の温度の比較から、XPSの断熱効果が確認された。

(5) 断熱特殊ふとんかごの課題

以上より、断熱特殊ふとんかごはのり面の凍上対策としての効果が高いことが伺える。その一方で、断熱材を使用するため、気象条件によっては単位面積当たりの費用が特殊ふとんかごの2倍程度要するという試算結果もある。

また、特殊ふとんかごと断熱特殊ふとんかごの両工法の課題として、斜面での人力作業が必要なことによる、作業員の安全性が挙げられる。その他、かごの敷設、中詰材などの投入、かごの緊縛といった作業は、切土工の後に行うため、柔軟な工程を組むことが難しいことも挙げられる。

4. ワンパック断熱フトン籠⁷⁾

現在、寒地土木研究所では、切土のり面の凍上対策に関して、先述の課題を踏まえつつ長期的な安定性を考慮し、断熱に着目した検討を進めている。

図-8は、先述の特殊ふとんかごよりもかごのサイズを小型化しつつ、中詰材、断熱材、排水材をすべて内包した「ワンパック断熱フトン籠」の基本構造である。先述の断熱特殊ふとんかごと同様に、①のり面の凍結・凍

上防止、②地山からの滲出水の処理、③雨水や表面水による侵食防止、の3つの対策効果が期待される。さらに、写真-5、6に示すように事前に平場で作製のうえ重機で吊り上げてのり面に設置ができること、作製作業は切土工と同時進行が可能であることから、特殊ふとんかごなどに対し、安全性と施工性の向上を図った凍上対策技術

である。

上記の他にも、解析を用いて気象条件（特に凍結指数）に応じて解析結果より断熱材の厚さを簡易に設定する手法について検討を進めている^{8) 9)}。

5. まとめ

北海道のような寒冷地の切土のり面で発生する凍上現象の対策技術として、本稿では、「特殊ふとんかご」、「断熱特殊ふとんかご」、「ワンパック断熱フトン籠」を紹介した。

特殊ふとんかごは、北海道においてのり面の崩壊後の応急対策として使用頻度が高く、設置による地山の温度の低下抑制効果も確認されている。しかし、気象条件によっては寒気による背面地山への凍結面の進入を完全に防止できないことも確認されている。

断熱特殊ふとんかごは、凍上の3要素である温度に着目し、特殊ふとんかごの下部に断熱材が敷設または内包

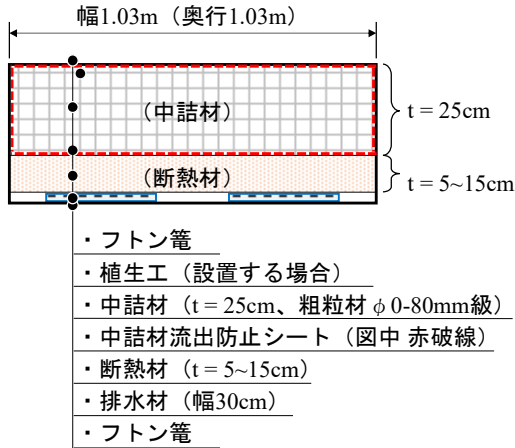


図-8 ワンパック断熱フトン籠の基本構造

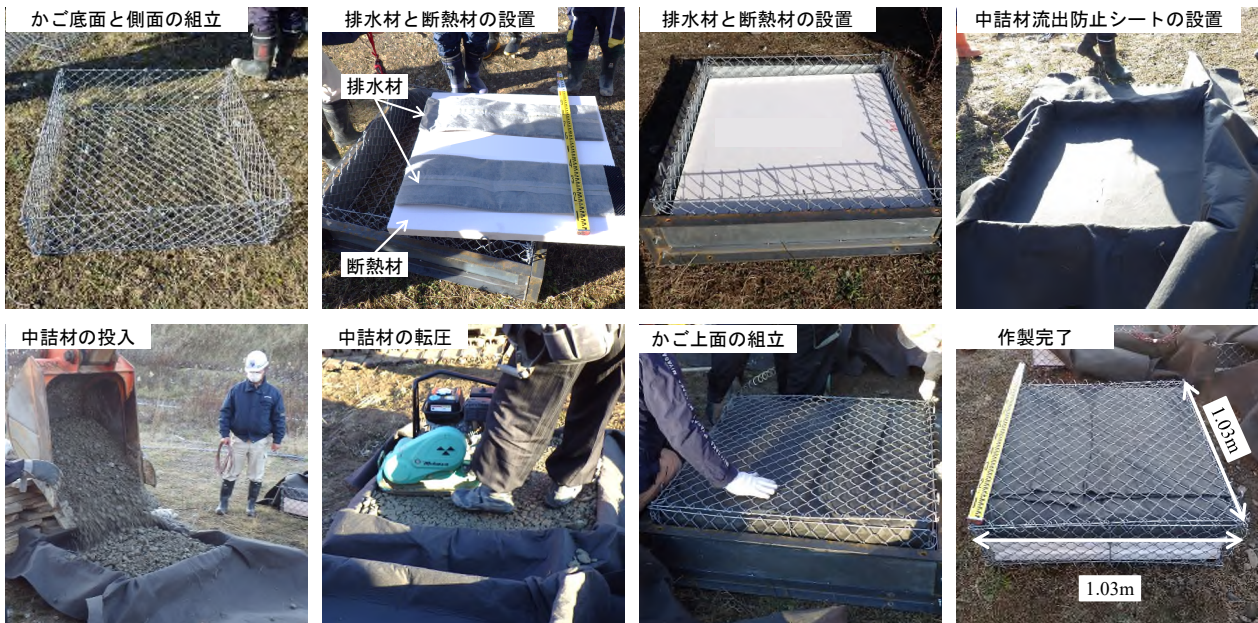


写真-5 ワンパック断熱フトン籠の作製工程



写真-6 ワンパック断熱フトン籠の吊り上げおよびのり面設置の様子

された対策工法である。地山への寒気の進入を防止し、凍上の発生を抑制または凍上を発生させないことで切土のり面の安定を長期的に保つ工法である。対策工の有効性について本稿で紹介したとおりである。

ワンパック断熱ふとんかごは、断熱特殊ふとんかごの性能に加え、安全性と施工性の向上を図った凍上対策技術である。特徴は、かごのサイズを小型化しつつ、中詰材、断熱材、排水材をすべて内包した構造であること、事前に平場でかごを作製のうえ重機で吊り上げてのり面に設置ができること、作製作業は切土工と同時進行が可能なことである。

今後も様々な気象条件、現場条件のもと試験施工や効果の検証を続ける予定である。

今回紹介した工法に限らず、現場や気象の条件に応じた切土のり面凍上対策技術が考案され、広がりを見せることを期待している。

謝辞：本研究の遂行にあたり、国土交通省北海道開発局留萌開発建設部羽幌道路事務所、釧路開発建設部釧路道路事務所のご協力で現地計測を実施することができました。ここに関係者のみなさまに厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 公益財団法人 地盤工学会 北海道支部 凍上対策工の調査・設計法に関する研究委員会：斜面の凍上対策の調査・設計マニュアル（案）、2016.
- 2) 上野邦行、芮大虎、中村大、伊藤陽司、山下聡、鈴木輝之：植生保護工の凍結・融解過程における挙動特性、地盤工学ジャーナル、Vol.5、No.3、413-424.
- 3) 公益社団法人 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針（平成21年度版）、pp183-187、2009.
- 4) 佐藤厚子、西本聡：北海道で施工される特殊ふとんかごの凍上抑制効果について、地盤工学会北海道支部技術報告集、No.52、pp15-18、2012.
- 5) 社団法人 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー23 土の凍結—その制御と応用—、1982.
- 6) 佐藤厚子、畠山乃、山木正彦：被覆による切土のり面の凍結抑制効果、土木学会北海道支部論文集、No.77、C-01、2021.
- 7) （国研）寒地土木研究所 寒地技術推進室HP：開発技術の紹介 重点普及技術 ワンパック断熱フトン籠、<https://chouseikan.ceri.go.jp/data.jsp?database=ChouseikanGIJU&id=8>（2022年12月27日）.
- 8) 山木正彦、畠山乃、佐藤厚子、池田淳、飯塚孝之、中村剛：凍上対策のための熱伝導解析に関する一検討、土木学会北海道支部論文報告集、No.77、C-021、2021.
- 9) 御厩敷公平、山木正彦、林宏親、佐藤厚子：のり面凍上対策のためのワンパック断熱フトン籠の試験施工および熱伝導解析による対策効果の検証、第15回地盤改良シンポジウム論文集、05-02、pp199-206、2022.