

「のり面の凍上対策に関する手引き（案）」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

深田 愛理

山木 正彦

北海道などの積雪寒冷地では、凍上や凍結融解による地盤変状が問題となり、切土のり面でも多数の変状が報告されている。そこで、のり面の凍上・凍結融解対策の検討に資することを目的として、対策の要否判定手法および断熱材を併用したふとんかご工の適用範囲、設計・施工方法を整理した手引き（案）を作成したため、その概要を紹介する。

キーワード：凍上・凍結融解、切土のり面、手引き

1. はじめに

北海道に代表される積雪寒冷地においては、融雪期に道路盛土および切土のり面に大小の変状が多発しており、道路管理上の重要な課題となっている。これらの変状は、冬期の凍上および凍結に伴うのり面表層の劣化、融雪期における多量の融雪水や降雨の浸透、さらに凍上や堆雪によりのり面内部からの排水が阻害されることなど、複数の要因が複合的に作用して発生するものである。

本報告は、積雪寒冷地における今後ののり面保護工による凍上対策の検討に資することを目的として、従来工法である「特殊ふとんかご工」に加え、断熱材を併用したふとんかご工（断熱ふとんかご工およびワンパック断熱ふとんかご工）を選定可能とするため、凍上・凍結融解対策の要否判定方法を整理した「のり面の凍上対策に関する手引き（案）」の概要を紹介するものである。

2. 凍上対策の考え方

凍上現象とは、寒気の侵入により地盤内の凍結面が進行する過程で、凍結面付近に未凍結層から土中水が異動・集積し、数mmから数cmの氷晶（アイスレンズ）が形成・成長することで、地盤が冷却面（地表面）方向にへ膨張する現象である。

凍上対策の基本は、凍上の3要素とされる「温度、水分、土質」のうち、すくなくとも1つを凍上が生じない条件にすることである¹⁾。この考え方に基づき、凍上対策としては以下の工法が適用される。

- ・ 断熱工法（温度条件に着目）：断熱材を設置することにより凍結の侵入を抑え、凍上性地盤が凍結しないようにする工法である。

- ・ 遮水工法（水分条件に着目）：凍結面への水分供給を遮断し、アイスレンズの形成・成長を抑制することで凍上を防止する工法である。
- ・ 置換工法（土質条件に着目）：舗装分野で広く採用されており、凍結指数から算定される理論最大凍結深さに対して、置換率（70~100%）を設定し、その範囲を非凍上性の材料で置換える工法である。

3. 特殊ふとんかご工および断熱ふとんかご工の対策効果の検証

(1) 概説

特殊ふとんかご工は、凍上および凍結融解に伴うのり面の上下変位に追随できる構造を有しており、その機能が損なわれにくい。また、融雪期に発生する多量の融雪水や、のり面に浸出する地下水を効率的に処理できることから、崩壊後の復旧工として広く採用されている。

さらに、特殊ふとんかご工の凍上・凍結融解対策工としての効果向上を目的に、特殊ふとんかご工と地山の間に断熱材を設置し、のり面への寒気侵入を抑制する「断熱ふとんかご工」が考案された。

(2) 対策効果の検証例

北海道内のある切土のり面において、凍上に起因したのり面クラックや表層の崩壊後の対策として、特殊ふとんかご工および断熱ふとんかご工が施工されている。工法の選定にあたっては、現地でアイスレンズが確認され、土質が砂質シルト～シルト質細粒砂で凍上性を有すると判断された箇所については断熱ふとんかご工を適用した。一方、主として湧水処理を目的とした箇所には特殊ふとんかご工が施工された。

特殊ふとんかご工の施工箇所では、標準規格であるW1.0m×L2.0m×0.25mが採用された。断熱ふとんかご工で

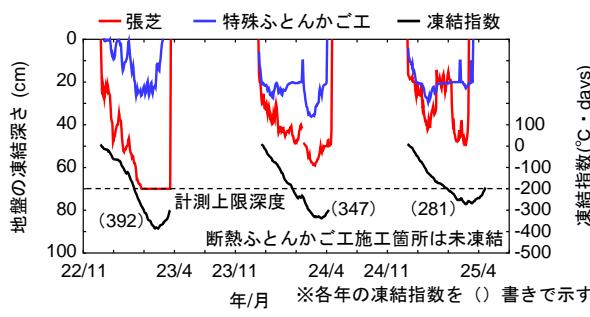


図-1 凍結深さの計測結果

は、特殊ふとんかご工と地山の間に厚さ5cmの断熱材が設置された。使用された断熱材の熱伝導率は0.036(W/m·K) (カタログ値) であり、一般的な押出発泡ポリスチレン(XPS)と同程度である。

図-1に張芝、特殊ふとんかご工および断熱ふとんかご工の各施工箇所における地盤の凍結深さの計測結果を示す。図中には各年の凍結指数を括弧書きで併記した。なお、断熱ふとんかご工施工箇所では、計測期間中に地盤の凍結は確認されなかった。最大凍結深さを比較すると、張芝>特殊ふとんかご工>断熱ふとんかご工の順となった。特殊ふとんかご工施工箇所では、張芝施工箇所と比較して凍結深さは低減するものの、一冬あたり20~30cm程度の凍結が生じていた。このことから、凍結指数が約400°C·days程度となる条件下では、地山に凍結履歴が残ることになる。

凍上性が高い地盤では、凍上・凍結融解の影響が及んだ深度まで地盤が脆弱化することが報告されている²⁾。本検討箇所でも、仮に特殊ふとんかご工施工箇所の地盤が高い凍上性を有していた場合、表層20~30cmが脆弱化していた可能性があると考えられる。一方、断熱ふとんかご工施工箇所では地盤が未凍結であり、断熱材により地盤への寒気の侵入を有効に遮断できたと考えられる。この結果から、断熱ふとんかご工の凍上抑制効果が確認された。

4. ワンパック断熱ふとんかご工

前述のとおり、断熱ふとんかご工は凍上対策として有效であることが確認されている。しかし、特殊ふとんかご工および断熱ふとんかご工に共通する課題として、斜面での人力作業が多く、作業員の安全確保が難しい点が挙げられる。さらに、かごの敷設、中詰材の投入(断熱ふとんかご工では断熱材の設置も含む)、かごの緊縛、アンカーピンの打設といった作業は、切土工後に順次行う必要があるため、施工工程を柔軟に調整しにくいという問題もある。

これらの課題に対応するため、図-2に示すように、かごの作製作業を平地で行い、その後重機による吊上げ設

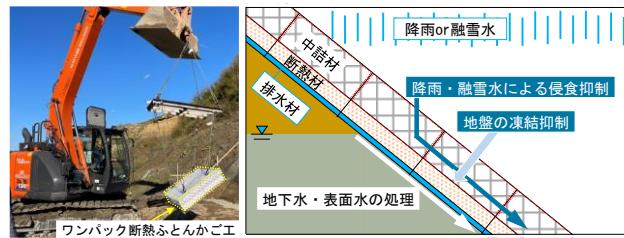


図-2 ワンパック断熱ふとんかご工の吊上げ状況(左)
および対策効果の概要(右)

置を可能とする「ワンパック断熱ふとんかご工」を開発した。本工法は、のり面保護工として以下の3点の効果が期待される。

- ①のり面の凍結および凍上の防止
- ②地山からの滲出水処理
- ③雨水・表面水によるのり面表層の浸食防止

加えて、かごの作製を平場で行い重機により設置できること、作成工程を切土工と並行して進められることから、安全性および施工性が大幅に向上する。これらより、ワンパック断熱ふとんかご工は特殊ふとんかご工と比較して凍上・凍結融解対策の効果を高めるとともに、施工上の課題を改善したのり面保護工であるといえる。

5. 凍上・凍結融解対策の要否判定手順

(1) 凍上・凍結融解対策の要否判定フロー

本手引き(案)は、崩落した切土のり面に対する対策工法の選定を対象としている。特に、特殊ふとんかご工による湧水等の対策では十分な効果が得られない箇所を想定し、断熱による凍上・凍結対策工法を選定可能とする目的としている。

凍上・凍結融解対策の要否判定フローを図-3に示す。
以下に、各判定条件における検討内容を示す。

(2) 気象条件・現場条件 「地盤の凍結が始まる時期に、積雪による断熱効果を期待できない場所か」

一般に、積雪が断熱材として機能するためには、積雪深が約34~50cm程度必要とされている³⁾。また、地盤の凍結および凍上の開始時期は、日平均気温が連続して0°Cを下回り始める時期と概ね一致する⁴⁾。したがって、積雪による断熱効果の有無は、「凍結および凍上の開始時期」と「積雪深が50cmに達する時期」を比較して判断する必要がある。

以上を踏まえ、気象条件・現場条件に関する判定基準を次のように整理した。

【判定基準(気象条件・現場条件)】

- ・ 積雪深が50cmに達する前に、日平均気温が連続して0°C未満となる場合(この場合、寒気はすでに地盤に侵入しているため、積雪による断熱効果は期待で

- きない) ⇒ 判定: 「Yes」
- ・積雪深が50cmに達した後に、日平均気温が連續して0°C未満となる場合(積雪による断熱効果が期待できる) ⇒ 判定: 「No」

なお、積雪による断熱効果が期待できる場合、自然条件により無費用で凍上対策が得られるため、極めて経済的な条件といえる。しかし、斜面上の積雪は風の吹き溜まり・吹き払いの影響により縦断方向に大きく変動する。また、同一箇所であっても斜面方位による日射量の違いや風向の影響で年ごとの積雪状況が変化することが多い。さらに、気象観測点データによる推定値と、実際の斜面上の積雪深にはしばしば差が生じるため、設計へ反映させることは難しい。以上の理由から、積雪による断熱効果を確実に「あり」と判断できるケースは、実際にはごく限られる。

(3) 凍結指數

「対策検討箇所の凍結指數 $F \geq 400^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ か」

過去に報告された切土のり面の変状および対策工に関する調査結果^{5), 6)}より、変状が確認された際の凍結指数を参考とし、本手引き(案)では凍結指數 $F \geq 400^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ を判定値として採用した。

凍結指數とは、日平均気温が氷点下となる連続期間の「日平均気温の累積値」であり、設計時に判定値と比較するための採用方法として、以下の2通りが考えられる。

①確率年に基づく凍結指數の採用

近年はAMeDAS等の気象観測データが整備されており、設計上の確率年に基づく凍結指數を算定する方法が合理的である。アスファルト舗装やコンクリート舗装の設計期間が20年に移行している^{7), 8)}ことから、20年確率凍結指數($F_{20\text{年}}$)を用いるケースが増加している。したがって、切土のり面における対策検討でも、近傍の観測データを用いて、設計上の確率年 n に対応する n 年確率凍結指數を推定し、判定値と比較する方法が有効である。

②2000年度の凍結指數を用いる方法

一方、本選定フローの目的は、凍結指數を厳密に算定することではなく、地山の凍上性を簡易に評価し、現場で実用的に活用できる手法とすることにある。そこで、設計時の凍結指數として2000年度の値を用いる方法を提案する。

図-4は、北海道内160地点の過去50年間の凍結指數を確率年に換算し、その平均値を示したものである⁹⁾。こ

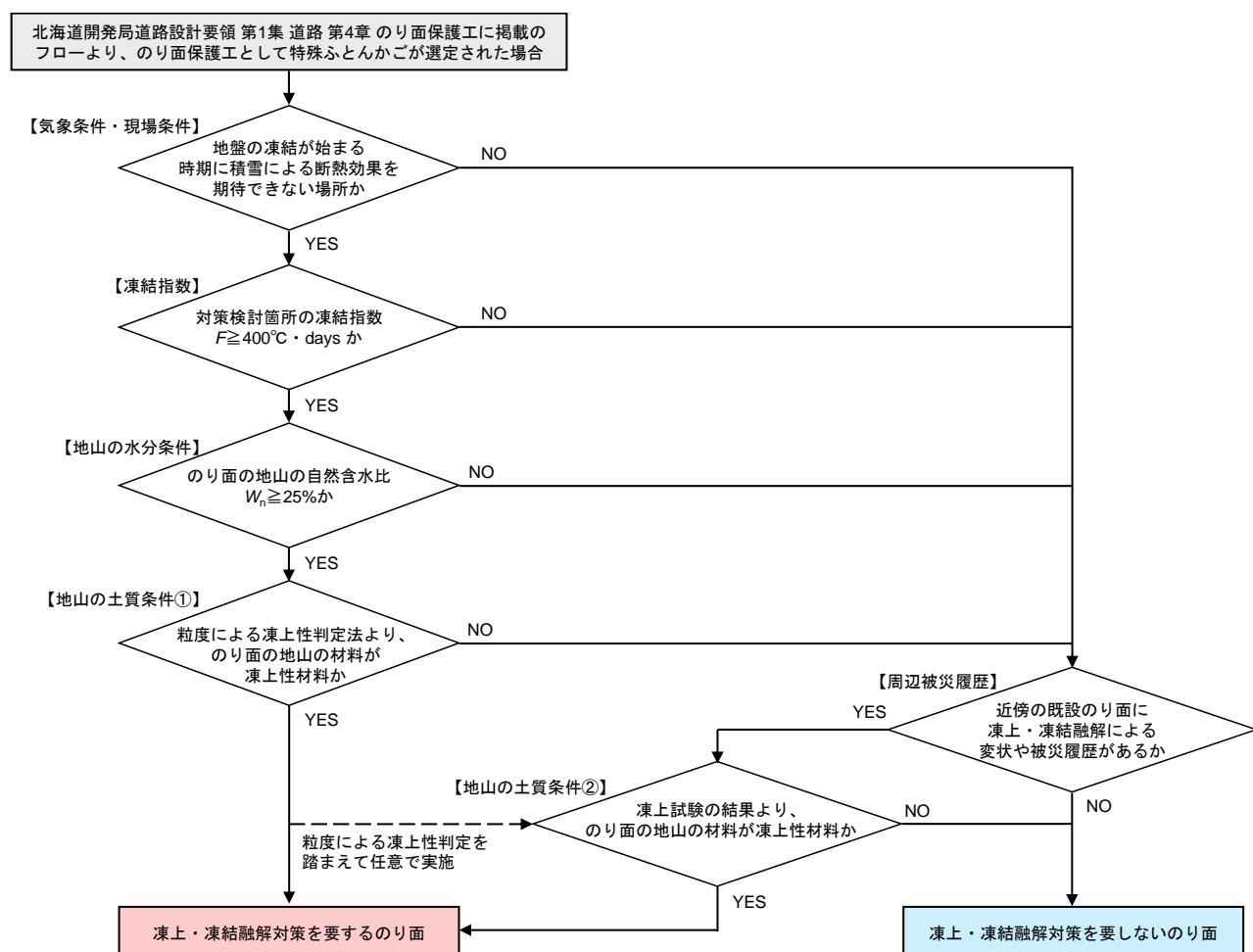


図-3 凍上・凍結融解対策の要否判定フロー

の図から、北海道では1960～1980年代にかけて寒冬が多く発生していたものの、1990年以降はその頻度が低下し、2000年度が最も寒冬であったことがわかる。したがって、対策検討箇所では、近傍のAMeDAS等の観測データから得られる2000年度の凍結指数を用い判定値と比較すれば問題ないといえる。ただし、直近の観測データで2000年度を上回る凍結指数が得られている場合には、その値を採用する。

以上を踏まえ、凍結指数による判定条件を以下のように整理した。

【判定条件（凍結指数）】

- ・ 対策検討箇所の凍結指数 $F \geq 400^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ の場合
⇒ 「Yes」
- ・ 対策検討箇所の凍結指数 $F < 400^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ の場合
⇒ 「No」

(4) 地山の含水比条件

「のり面の地山の自然含水比 $W_n \geq 25\%$ か」

土の含水比は、凍上性を評価する上で最も重要な要因の一つである。凍上が発生するためには、凍結面に水分が供給されることが不可欠である。

地下水位が高く、十分な水分供給がある場合の凍上は「閉式凍上」と呼ばれ、一般に凍上量が大きい。一方、水分供給源が近くになくとも、土自体の含水比が高い場合には、保水している水分の移動により凍上が生じる（閉式凍上）。閉式凍上は一般に凍上量が小さいとされている。

横田ら¹⁰⁾の大型凍結実験土槽を用いた試験によれば、土の含水比が25%未満では閉式凍上はほとんど生じないことが示されている。このため、本手引き（案）では、地山の自然含水比が25%以上か否かを凍上対策の要否を判断する基準とした。

【判定条件（自然含水比）】

- ・ のり面地山の自然含水比 $W_n \geq 25\%$ の場合 ⇒ 「Yes」
- ・ のり面地山の自然含水比 $W_n < 25\%$ の場合 ⇒ 「No」

なお、のり面地山の自然含水比は、計測深度、時期、日射条件などによって変動し得る。特に凍上と関係が深いのは秋期～初冬期の含水状態であるため、試料採取はこの時期に行うことが望ましい。また、自然含水比のば

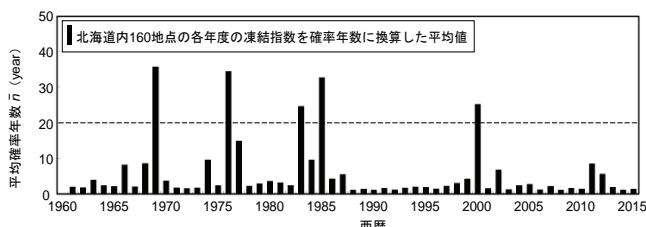


図-4 北海道における寒冬の発生頻度⁹⁾

らつきを考慮し、複数箇所（異なる深度）からの採取を基本とする。

(5) 地山の土質条件① 「粒度による凍上性判定法より、のり面の地山の材料が凍上性材料か」

一般的に実施される土の粒度試験結果を用いて、図-5に示す粒度による凍上性判定方法¹¹⁾に基づき、地山材料の凍上性を簡易に評価する。この判定図では、以下のように分類される。

- ・ 領域4および領域3 ⇒ 非凍上性材料
- ・ 領域2 ⇒ 毛管上昇高さが1m以下であれば非凍上性材料
- ・ 領域1 ⇒ 凍上性材料（ただし領域1Lでは透水係数が小さく、凍上量は比較的小さい）

岩倉ら¹²⁾は、この粒度判定法を用いて、のり面保護工に変状が発生した斜面と、変状が発生していない斜面の粒度分布を整理し、変状発生斜面では必ず領域1または2を通過している一方、変状がない斜面では領域1・2を通過しないものが多いことを報告している。

これらの知見を踏まえ、本手引き（案）における凍上性判定は次のとおりとする。

【判定条件（粒度による凍上性判定）】

- ・ 領域1または2を通過する場合
⇒ 「Yes」：凍上性材料
- ・ 領域1・2を通過せず、領域3・4のみを通過する場合
⇒ 「No」：非凍上性（または凍上性が低い）材料

(6) 地山の土質条件② 「凍上試験の結果より、のり面の地山の材料が凍上性材料か」

地山が土砂の場合

地盤工学会基準 JGS0172-2020 「凍上性判定のための土の凍上試験方法」¹³⁾に基づく評価が最も確実である。この試験では、直径100mm、高さ50mmの供試体を用い、上下端面の温度を厳密に制御し、一定速度で凍結させる。

図-6に示すように、試験では経過時間に対する凍上量が得られ、そこから凍上速度 (U_h) 算定する。判定基準は図中に示すとおりである。例えば、図-6の試験結果

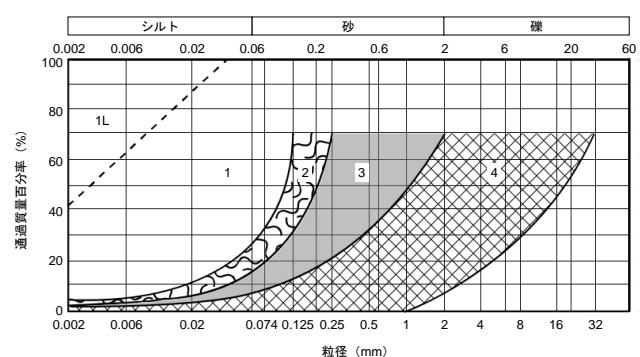


図-5 粒度による凍上性判定法¹¹⁾

($U_b=0.75\text{mm/h}$) は、凍上性が高いと判断される。本手引き（案）では、凍上速度 0.1mm/h 以上の場合は「凍上性材料」と判定する。また、粒度判定の結果を踏まえ、必要に応じて凍上試験を実施することを推奨する。特に、火山灰土は、粒度のみでは非凍上性材料と判定される場合があるが（細粒分だけでは評価できない）、本試験では正確に評価できるため有効である。

地山が岩石（岩盤）の場合

図-7に示す中村らによる固形岩石の凍上性判定フロー¹⁴⁾に基づいて評価する。この方法では、一般的な岩石の強度試験結果を用いて凍上性の有無を簡便に判定できる。堆積岩で強度低下度が10%以上の場合は凍上性岩石と判定される。さらに湿潤状態における引張強さが 1MPa 未満であれば凍上性が高いと判定される。

一方、対象岩石がスレーキングしやすく、容易に土砂

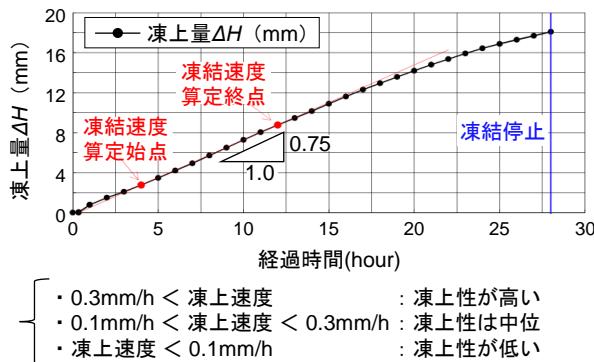


図-6 JGS法の凍上試験結果例

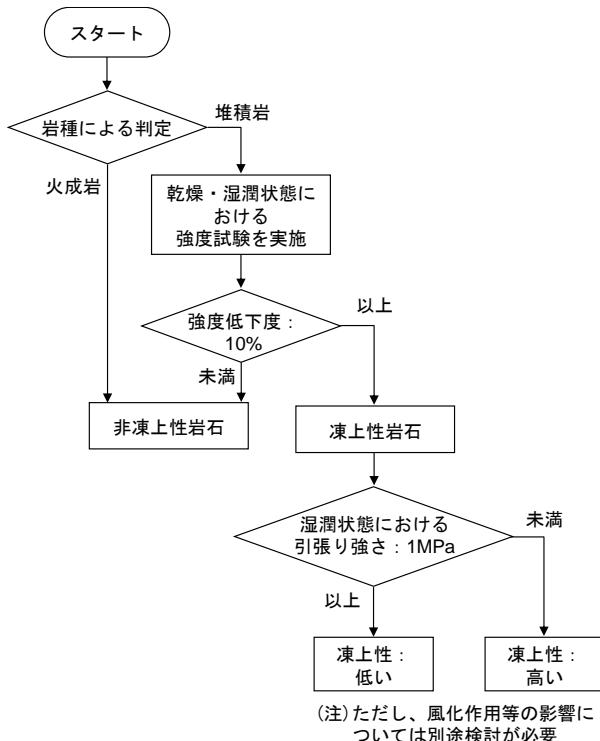


図-7 固形の岩石の凍上性判定フロー¹⁴⁾

化する場合には、スレーキング試験等により土砂化した材料を用い、前述の「土砂の場合」と同様に判定してよい。

以上の考え方に基づき、のり面地山の材料の凍上性判定を以下のように整理した。

【判定条件（凍上試験および岩石の凍上性判定）】

地山が土砂の場合

- 地盤工学会基準（JGS 0172-2020）による凍上試験で、凍上速度 $\geq 0.1\text{mm/h}$ の場合 ⇒ 「Yes」：凍上性材料
- 凍上試験で、凍上速度 $< 0.1\text{mm/h}$ の場合 ⇒ 「No」：非凍上性（または凍上性が低い）材料

地山が岩石（岩盤）の場合

- 中村らの判定フロー¹⁴⁾により凍上性：高い ⇒ 「Yes」
- 中村らの判定フロー¹⁴⁾により凍上性：低い ⇒ 「No」

（7）周辺被災履歴 「近傍の既設のり面に凍上・凍結融解による変状や被災履歴があるか」

近傍の既設のり面における凍上・凍結融解による変状や被災履歴の有無は、凍上対策の要否を判断するうえで重要な評価要素である。

本手引き（案）では、気象条件・現場条件、凍結指數、地山の水分条件、地山の土質条件①の各判定によって凍上・凍結融解対策が「不要」と判断された場合であっても、近傍の既設のり面に凍上・凍結融解に起因する変状または被災履歴が認められる場合には、当該箇所でも将来的に凍上の3要素（温度、水分、土質）が満たされる可能性がある。そのため、地山の土質条件②の判定に従い、対策の要否を再評価することとする。

また、近傍の既設のり面で凍上・凍結融解に起因すると考えられる変状や被災履歴が確認された場合には、現地踏査の実施が望ましい。現地踏査では、変状が認められたのり面の土質条件、地下水位、日射条件などが対象箇所と同様であるのかを確認し、最終的な対策要否を判断する。

さらに、既設のり面や地山の露頭部の観察により、凍上現象そのものを直接確認できる場合には、必ずしも材料試験による判定を行う必要はない。この場合、試験を行わずとも凍上・凍結融解対策が必要と判断してよい。なお、凍上が確認された際には、霜柱状・霜降状・コンクリート状などの凍上様式や、アイスレンズの発生状況が分かるように、写真やスケッチ等により記録を残すことが重要である。

6. 凍上・凍結融解対策工法の選定

（1）凍上・凍結融解対策を要するのり面の対策工法

地山に凍上性が認められる場合、従来型の特殊ふとんかご工のみでは凍上・凍結融解作用によりかごの変状や

崩壊が生じるおそれがある¹⁵⁾。このため、従来型特殊ふとんかご工に断熱材を併用した断熱ふとんかご工を採用することが推奨される。さらに、高所作業やクレーン作業が必要な条件下では、かごを平坦地で製作し、そのまま吊上げ設置が可能なワンパック断熱ふとんかご工の採用も検討される。

ワンパック断熱ふとんかご工は、かごの製作を平坦地で行うため、切土工と並行して施工可能であり、施工効率の向上が期待できる。また、斜面での作業が低減されることから、安全性の向上にも寄与する。

断熱ふとんかご工およびワンパック断熱ふとんかご工の設計では、断熱材の厚さを適切に設定することが重要である。断熱材厚さの検討手順は紙面の都合により割愛するが、詳細は「のり面の凍上対策工法に関する手引き(案)」本編を参照されたい。

さらに、上記2工法のほかにも、のり面の凍上・凍結融解対策工¹⁶⁾が考案されており、現地条件に応じて断熱工法、遮水工法、置換工法を適切に選択または組み合わせることが重要である。

(2) 凍上・凍結融解対策を要しないのり面の対策工法

凍上・凍結融解対策が不要と判断された場合には、従来の特殊ふとんかご工をのり面保護工として採用する。

7.まとめ

本報告で紹介した手引き(案)は、発注者を含め、のり面保護工の設計や調査に携わる関係者が、北海道のような積雪寒冷地におけるのり面の凍上・凍結融解問題を定量的に評価し、対策工の選定に反映できることを目的として作成したものである。本手引き(案)が、従来以上に安全かつ効率的な道路インフラの維持管理に資することが期待される。

本手引き(案)は、寒地土木研究所 寒地地盤チームのホームページからダウンロード可能である(URLは下記を参照)。また、新たな知見や技術動向を踏まえ、内容の改訂および充実に継続して取り組む予定である。ついては、本手引き(案)を使用した際の意見や感想があれば、今後の改善のためにも寒地地盤チームまで連絡いただけたとありがたい。

<https://jiban.ceri.go.jp/>

謝辞：本手引き(案)の作成にあたり、現場の提供にご協力いただきました北海道開発局関係者の皆様、および貴重なご助言を賜りました関係者の皆様に、末筆ながら心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会北海道支部 地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学—凍上被害とその対策—、pp.3-5、pp.83-143、2009.
- 2) 御厩敷公平、山木正彦：凍結融解による強度低下を考慮した切土のり面の安定解析、第36回日本道路会議、論文番号4031、2025.
- 3) 社団法人事質工学会：土質基礎工学ライブラリー23 土の凍結－その理論と実際－（第1回改訂版）、pp.91-94、1994.
- 4) 鈴木輝之、沢田正剛、林啓二：地盤の自然凍上と地下水条件に関する実験的研究(2)、土質工学会北海道支部技術報告集第32号、pp.61-68、1992.
- 5) 林啓二、原靖、松田圭大：断熱材を用いた切土のり面の凍上対策、第50回地盤工学研究発表会、pp.135-136、2015.
- 6) 深田愛理、御厩敷公平、林宏親：道東地域での凍上による法面変状事例の分析結果、地盤工学会北海道支部技術報告集、第64号、pp.9-18、2024.
- 7) 積雪寒冷における道路舗装の長寿命化と予防保全に関する検討委員会：断熱工法を用いた既設アスファルト舗装の凍上対策に関する設計・施工マニュアル（案）、2025.
- 8) 北海道土木技術会舗装研究委員会コンクリート舗装小委員会：積雪寒冷におけるコンクリート舗装の設計・施工に関する手引き（案）、2017.
- 9) 公益社団法人地盤工学会北海道支部 気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害リスクに関する研究委員会：気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム発表論文集、pp.委-10-委-12、2017.
- 10) 横田聖哉、三嶋信雄、三浦清一：地下水位を考慮した実用的な凍上量の設定法、土木学会論文集、No.574/VI-36、pp.21-31、1997.
- 11) ISSMFE TC-8 : Grain size distribution as a frost susceptibility criterion of soil, VTT Symposium, Vol.1, pp.29-32, 1989.
- 12) 岩倉徹、神原孝義、小野岳、佐藤厚子、佐々木裕一、谷藤義弘：寒冷地における斜面の土の凍上性判定方法に関する考察、北海道土木技術会土質基礎研究委員会、第12回技術報告会土質基礎に関する「寒冷地特有の問題と対策」技術報告会、pp.33-39、2014.
- 13) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説〔第一回改訂版〕一二分冊の一、pp.253-272、2020.
- 14) 中村大、後藤隆司、川口貴之、伊藤陽司、山下聰、山崎新太郎：岩石の凍上性判定に関する一考察、地盤工学会北海道支部技術報告集、第53号、pp.247-254、2013.
- 15) 公益社団法人地盤工学会北海道支部 北海道の地盤と防災技術に関する研究委員会：北海道の地盤と防災、pp.134-135、2022.
- 16) 川口貴之、中村大、松田圭大、中川一真、DASHDONOG Odkhuu、原田道幸、川俣さくら：ジオセルを用いた複層式のり面保護工の断熱性能に関する検討、ジオシンセティックス論文集、第37巻、pp.55-62、2022.