

積雪寒冷地における切土のり面の崩壊危険度評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：林宏親、佐藤厚子、野上敦、山田充

【要旨】

積雪寒冷地の切土のり面は、凍上および融解作用を繰り返すことにより、構造物が変状をきたすため、凍上に起因する地盤の変状を予測した効率的・効果的な対策技術の開発が早急に求められている。

そこで、本研究では、切土のり面の崩壊や構造物の変状を防止し、安全確保と維持管理コスト削減を図るため、凍上に起因するのり面安定構造物の崩壊メカニズムの解明と対策工について検討を行った。

本報告では、グラウンドアンカー・地山補強土工・切土のり面における凍上力・凍上量の実測を行ったほか、凍上による変状抑制対策についての研究成果を得たので報告する。

キーワード：グラウンドアンカー、地山補強土工、凍上、凍結深さ、凍上力

1. はじめに

積雪寒冷地の道路切土のり面は、凍上および融解作用を繰り返すことにより表面部がゆるみ、春先の融雪期に崩壊に至ることがある。しかし、この対策は崩壊後の対応にとどまっており、供用中の道路の安全性が問われている。このため、切土のり面を新設する場合、凍上に起因する地盤の変状を考慮した効率的・効果的な対策技術の開発が早急に求められている。また、既設のり面に施工されたのり面安定構造物が凍上により変状し、そのたびごとに補修している現状がある。

以上のことから、凍上に起因する切土のり面の崩壊およびのり面安定構造物の機能低下などの被害の軽減、維持管理コストの削減に資するため、凍上による地盤の変状を考慮した効率的・効果的な対策技術、点検手法や崩壊危険度評価方法の提案、さらに新設のり面を施工する場合の凍上対策工を提案するため、各種調査を行ったものである。

2. 研究方法

本研究では、のり面安定工としてグラウンドアンカー、地山補強土、小段排水、特殊ふとんかごを取り上げ、それぞれについて、凍上による変状メカニズム、対策工などを示す。

3. グラウンドアンカー・地山補強土工における凍上力

3.1. 概要

グラウンドアンカー工法、地山補強土工法は、不安定

切土法面の永久安定工法として、国内で多く用いられている。しかしながら、寒冷地においては、地盤の凍上現象が原因であると推測される変形・破損などの被害事例¹⁾があり、深刻な問題となっている。一方、グラウンドアンカー、地山補強土工の設計^{2,3)}では、地盤の凍上もたらす凍上力を見込む手順は見当たらず、この点に関しては考慮していないのが現状である。このため、地盤工学会北海道支部において 2011 年 4 月に設立された「凍上対策工の調査・設計法に関する研究委員会」では、「グラウンドアンカー、地山補強土に作用する凍上力をどのように見込むべきか」ということが検討課題として挙げられている。その解決策の入口として、まず「実際にどの程度の凍上力が作用するのか」ということを把握することが、委員会内では共通認識となっているといえる。また、小野^{4,5,6)}がグラウンドアンカー、地山補強土工における凍上力の算定方法を試案的に示した中においても、「凍上量や凍上力の実測データとの比較事例が非常に少ないので、実測データを増やしてゆく必要がある」としている。

以上のことを背景とし、本研究では、凍上対策工を提案する前段において、グラウンドアンカーの許容最大荷重や地山補強土工の降伏荷重に対し、どの程度の凍上力が作用しているのかを把握するために、諸条件（土質、植生、積雪）が異なるグラウンドアンカーおよび地山補強土工に作用する凍上力、受圧板の変位量、地盤の凍上量などを実際に現地計測し、その結果について報告する。なお、凍上力の計測について、実際は頭部の受圧板にか

かる引張荷重の増分を計測している。凍上力は拘束された構造体に作用する力⁴⁾なので、この荷重増分が地盤の凍上に起因する凍上力に相当すると考えて良いと推論する⁴⁾。

3.2 凍上被害メカニズムとその事例

グラウンドアンカーや地山補強土工に凍上力が作用することにより生じる被害のメカニズムとその事例⁴⁾について述べる。

3.2.1 グラウンドアンカー

図-1は、グラウンドアンカーが凍上力で変状する場合の概念図である。法面・斜面上に凍上現象が生じた場合、地盤を持ち上げる凍上力が、コンクリート法枠などの受圧構造物や頭部の受圧板に伝わり、それらと一体となっているアンカーの引張材に力が作用する。

グラウンドアンカーの引張材(主にPC鋼より線)は、未凍結層に定着させているため、凍上現象が発生した場合、凍上した地盤が受圧構造物を持ち上げる力(凍上力)によってアンカーは伸び、荷重増加が生じる。凍上現象

の進行により、受圧構造物や頭部の受圧板の変形・破損、アンカーの破断や引抜け等の被害が生じる可能性がある。

写真-1(1)は、アンカーが破断して緊張力が解放したことにより、表面の化粧コンクリートを突き破って飛び出した被害事例である。

また、凍上・融解現象の繰返しによる表層崩壊や地耐力の低下によって受圧構造物が沈下すると、アンカーの伸び量が小さくなり、それに伴ってアンカーの引張荷重が低下する。写真-1(2)のように、アンカー荷重が解放されてアンカー頭部が受圧構造物から浮き上がる場合もある。

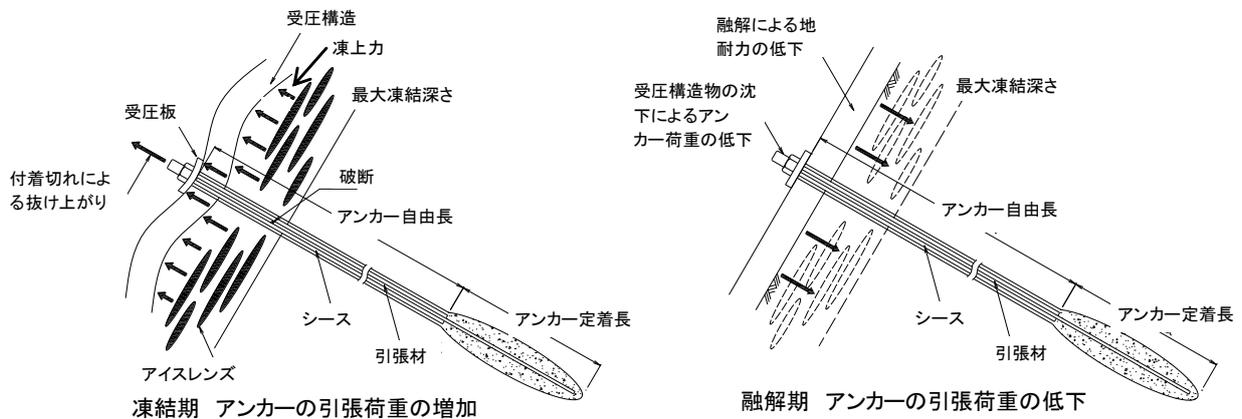
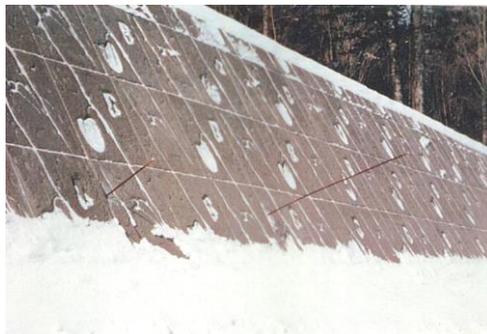


図-1 グラウンドアンカーが凍上力で変状する場合の概念



(1)



(2)

写真-1 グラウンドアンカーの被害事例

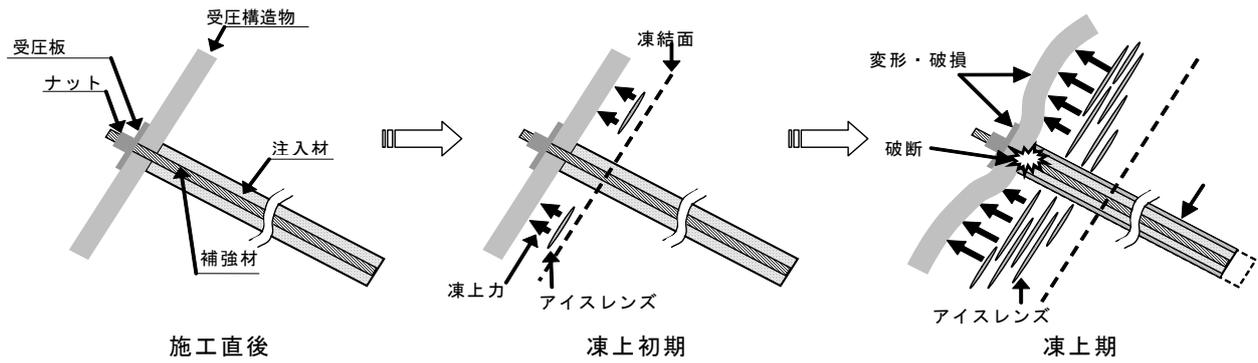


図-2 地山補強土工が凍上力で変状する場合の概念



写真-2 地山補強土工の被害事例¹⁾

3.2.2 地山補強土工

図-2 は、地山補強土工が凍上力で変状する場合の概念図である。法面・斜面上に凍上現象が生じた場合、地盤を持ち上げる凍上力が、コンクリート法枠などの受圧構造物や頭部の受圧板に伝わり、それらと一体となっている補強材に力が作用することになる。この発生機構は、グラウンドアンカーと同じである。凍上現象による凍上力が補強材の許容引張耐力や地山・注入材の付着力を上回った場合、補強材は定着部の付着切れにより抜け上がることがある。また、受圧構造物や頭部の受圧板にも変形・破損が現れる。写真-2 は、地山補強土工と併用されるコンクリート法枠が、凍上によって被害を受けたと推定される事例である。コンクリート法枠の梁の中央部付近にクラックが発生している。他にも頭部の受圧板が変形している状況が現場で確認されている。

3.3 グラウンドアンカー・地山補強土工における凍上力の現地計測

2012年11月から2013年5月にかけて、北海道内のグラウンドアンカー、補強土壁工の施工現場において各計測を行った。計測は図-3に示すように、凍上被害の多い

「低温・少雪」地域⁹⁾である北海道白糠町大曲と北海道斜里町岩尾別で行った。北海道白糠町大曲では、グラウンドアンカーと補強土壁工での計測を行い、それぞれの計測箇所を「白糠①」、「白糠②」とする。北海道斜里町岩尾別では補強土壁工での計測を行い、その計測箇所を「知床」とする。3つの計測箇所におけるグラウンドアンカーと地山補強土工の諸元と土質の基本物性値を、表-1と表-2にそれぞれ示す。また、各箇所の計測器の設置状況を写真-3、写真-4、写真-5にそれぞれ示す。



図-3 現地計測箇所⁹⁾

表-1 グラウンドアンカーと地山補強土工の諸元

	白糠①	白糠②	知床
計測年度	H24	H24	H24
対象構造物	グラウンドアンカー工	地山補強土工	地山補強土工
法面の向き	南向き	北向き	南向き
植生基盤材	有り(厚さ5cm)	なし	なし
アンカー自由長(m)	7.5	-	-
アンカー定着長(m)	3.5	-	-
PC鋼より線本数(本)	2	-	-
PC鋼より線の径(mm)	12.7	-	-
鉄筋(SD345)の長さ(m)	-	4	4
鉄筋(SD345)の径(mm)	-	19	32
コンクリート法枠の幅(cm)	50	20	法枠なし
コンクリート法枠の間隔(cm)	300	単体法枠	法枠なし
初期荷重(kN)	200	27	3
アンカーの許容最大荷重(kN)	280	-	-
補強材の降伏荷重	-	88	247

表-2 土質の基本物性値

試料名	白糠①	白糠②	知床
自然含水比(%)	23.06	17.52	17.27
土粒子の密度(g/cm ³)	2.672	2.667	2.657
礫(%)	43.0	0.4	58
砂(%)	29.4	37.9	22.1
シルト(%)	10.4	38.1	13.7
粘土(%)	17.2	23.5	6.2
均等係数	1419	53	524
細粒分含有率(%)	27.6	61.6	19.9
土質分類	細粒分質砂質礫 (GFS)	シルト(低液性限界) (ML)	細粒分質砂質礫 (GFS)



写真-3 白糠①の計測値の設置状況



写真-4 白糠②の計測器の設置状況

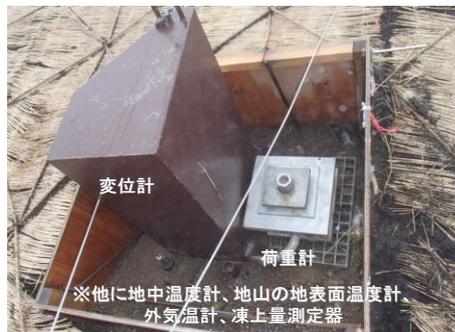


写真-5 知床の計測器の設置状況

次に、各計測についての概要を説明する。

3.3.1 受圧板に作用する荷重計測(凍上力)

グラウンドアンカーや地山補強土工に作用する凍上力を把握するために、受圧板にかかるアンカーまたは補強材の引張荷重を計測した。白糠①では800kNまで計測できるディスクセンサー型荷重計(DST800)を、白糠②と知床では500kNまで計測できるセンターホール型荷重計(BL-50TB)をそれぞれ用いて、1時間毎に自動計測した。

3.3.2 受圧板の変位計測

受圧版にかかる荷重と変位の関係を把握するために、引張・圧縮両用ひずみゲージ式変位計(DTJ-A-200)を用いて、1時間毎に自動計測した。

3.3.3 地盤の凍上量計測

拘束された構造物の変位と、拘束のない地盤の凍上量を比較するために、白糠①と白糠②では概ね週に1回、凍上量測定器を用いて計測した。知床では最大凍上量だけを凍上量測定器により計測した。

3.3.4 地盤の凍結深さの計測

凍上量や凍上力に影響を及ぼす凍結深さを把握するために、白糠①と白糠②ではメチレンブルーによる凍結深度計を用い、概ね週に1回計測した。また、知床では地

中温度計(TMC50-HD)を用いて、地中温度を1時間毎に自動計測し、凍結深さを求めた。

3.3.5 積雪深の計測

地山の表面温度や凍結深さに影響を及ぼす積雪深を把握するために、白糠①と白糠②で概ね週に1回、積雪深度計を用いて計測した。知床では冬期間通行止めとなるため、計測は行えなかった。

3.3.6 地山の表面温度の計測

外気温、植生基材の厚さ、積雪深から影響される地山の表面温度を把握するため、地中温度計(TMC50-HD)を用いて、1時間毎に自動計測した。

3.3.7 外気温の計測

各計測箇所での凍結指数を把握するため、温度計(TR-71U)により、1時間毎に自動計測した。

3.4 計測結果と考察

白糠①、白糠②、知床において、積雪深、凍結深さ、凍上量、地山の表面温度の計測結果、受圧板に作用する荷重の増加量(凍上力)、受圧板の変位量についての計測結果を、図-4、図-5、図-6にそれぞれ示す。また、これらの結果から求めた各計測の最大値と、外気温の計測結

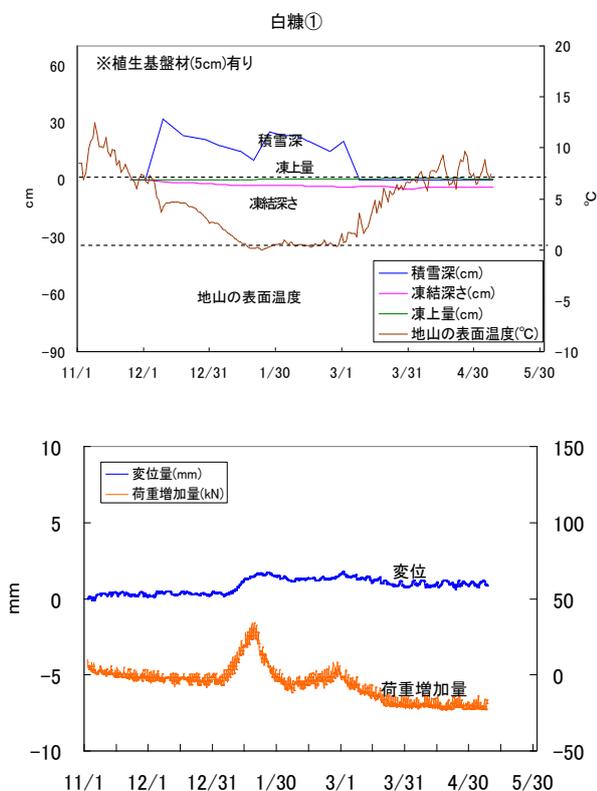


図-4 白糠①の各計測結果

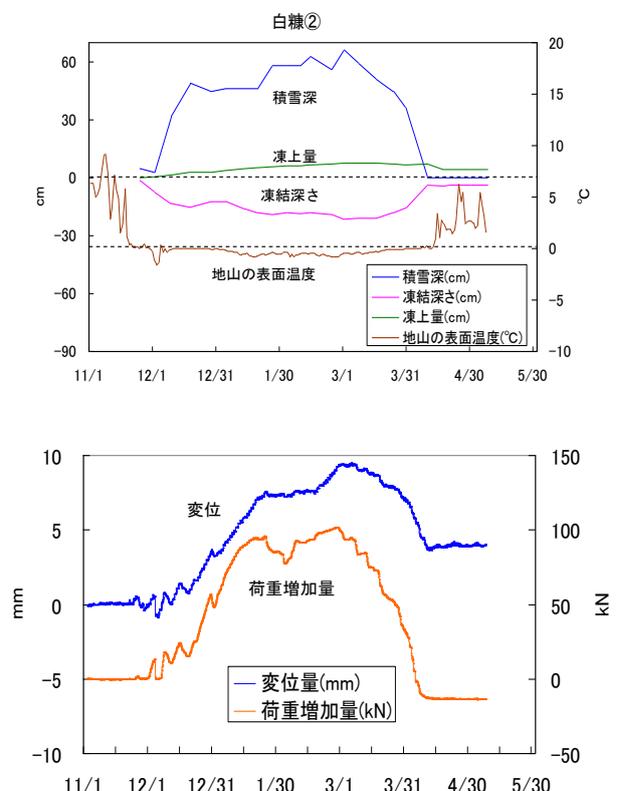


図-5 白糠②の各計測結果

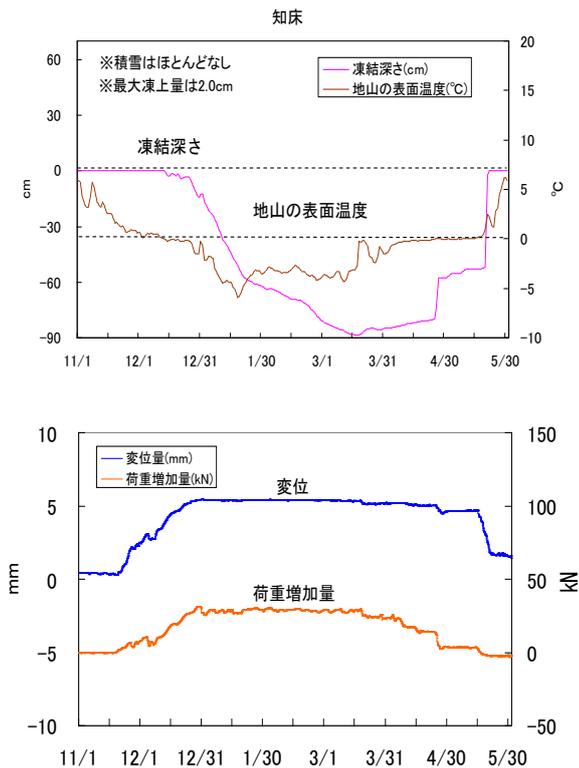


図-6 知床の各計測結果

果から求めた凍結指数を表-3 に示す。

3.4.1 植生基盤材と積雪深が地山の地表面温度や凍結深さに与える影響

写真-6、写真-7、写真-8 は、白糠①、白糠②、知床の3月上旬の積雪状況を示している。法面が南向きの白糠①では積雪がほとんどなく、北向きの白糠②では積雪があることがわかる。表-3 より、各箇所とも凍結指数が $1,100^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以上であるが、積雪には断熱効果があることから、積雪が少ないほど、地山の表面温度は低くなり、凍結深さは深くなると考えられている。しかし、図-4、図-5、図-6 から、積雪が白糠②より少ない白糠①のほうが、地山の表面温度は高く、凍結深さは浅くなった。この逆転現象は、白糠①に植生基盤材を 5cm 吹付けているからであると推察される。また、知床では、冬期間通行

止めになる箇所であることから、積雪深を測定することはできなかったが、維持業者より提供のあった写真-8 から、風通しの良い南向きの法面であるため、ほとんど積雪がないことがわかった。このため、地山の表面温度は、白糠①、白糠②よりも低く、凍結深さも深くなっている。

表-3 から、凍結深さの最大値は、植生基盤材と積雪のある白糠①で 4.9cm 、積雪のある白糠②で 21.2cm 、積雪がほとんどない知床で 88.9cm あり、知床に比べ白糠①では 94.5% 、白糠②では 76.2% 小さくなる。温度条件が凍結深さに最も影響を与えられられることから、この3か所の凍結指数は同じぐらいの値なので、地山の表面が同じ条件であれば、同程度の凍結深さであると推測される。このことから、植生基盤材と積雪には断熱効果があり、凍結深さを抑制する働きがあると考えられる。また、積雪深が 20cm 程度で植生基盤材を 5cm 吹付けている白糠①のほうが、積雪深が 60cm 程度の白糠②より、最大凍結深さが 76.9% 小さい。このことから、 5cm の植生基盤材は 40cm 程度の積雪よりも断熱効果があり、凍結深さを軽減できる可能性があるといえる。

3.4.2 凍結深さが凍上量や凍上力に与える影響

図-4、図-5、図-6 から、白糠②は知床に比べ、凍結深さが浅いにもかかわらず、凍上量、凍上力が大きい結果になった。これは、凍上現象が温度条件だけに拘束されるものではないことを裏付けており、表-2 の土質条件から、白糠②は知床に比べ、凍上現象が起きやすい細粒分の含有率が高いことが原因であると推察される。また、知床では、暗渠管による湧水処理対策を施しており、水の供給が白糠②より少ない可能性があることも、この結果の要因であると推察される。

3.4.3 凍上量と受圧板の変位量について

拘束された構造物の変位は、拘束のない地盤の凍上量に比べ小さくなる。表-3 から、最大凍上量に対する受圧板の最大変位の割合は、1~3割程度になった。

3.4.4 受圧板の変位量と凍上力の実測値

図-5 から、受圧板の変位量と、受圧板にかかる荷重増加量(凍上力)は、同じ挙動を示すことがわかる。グラウ

表-3 凍結指数と各計測の最大値

	白糠①	白糠②	知床
凍結指数($^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$)	1142	1154	1178
最大積雪深(cm)	32.0	66.0	ほとんどなし
最大凍結深さ(cm)	4.9	21.2	88.9
最大凍上量(mm)	8.0	77.0	20.0
最大変位(mm)	1.8	9.5	5.2
最大変位/最大凍上量 $\times 100(\%)$	22.5	12.3	26.0
最大荷重増加量(kN)	34	102	31
最大荷重(kN)	234	129	34

ンドアンカーを用いた白糠①では、最大変位量が 1.8mm で最大荷重増加量は 34kN に、地山補強土工を用いた白糠②では、最大変位量が 9.5mm で最大荷重増加量は 102kN に、同じく地山補強土工を用いた知床では、最大変位量が 5.2mm で最大荷重増加量は 31kN になった。この結果から、白糠①のグラウンドアンカーにおいては、植生基盤材の断熱効果により、凍上現象が顕著に現れなかったものと考えられる。一方、地山補強土工において、白糠②では土質の細粒分含有率が高いことから、知床では凍結深さが深いことから、凍上現象が顕著に現れたものと考えられる。



写真-6 白糠①の積雪状況



写真-7 白糠②の積雪状況



写真-8 知床の積雪状況

3.4.5 アンカーの許容最大荷重や補強材の降伏荷重に対する実測結果

表-1、表-3 から以下のことがわかった。

白糠①のグラウンドアンカーにおいては、アンカーの許容最大荷重 280kN に対し、最大荷重は 234kN になった。このことから、最大変位量が 1.8mm で、初期荷重 200kN から許容最大荷重までの増加量 80kN の 42.5% に達した。

地山補強土工においては、白糠②では補強材の降伏荷重 88kN に対し、最大荷重は 129kN に、知床では補強材の降伏荷重 247kN に対し最大荷重は 34kN になった。白糠②では、最大変位量が 9.5mm で、最大荷重が補強材の降伏荷重の 146.5% にもなっていた。

3.5 まとめ

今回の現地計測結果を以下にまとめた。

- ① 植生基盤材と積雪には断熱効果があり、凍結深さを抑制する働きがある。特に、5cm の植生基盤材は 40cm の積雪よりも断熱効果があり、最大凍結深さを軽減できる可能性がある。
- ② グラウンドアンカー、地山補強土工における拘束された構造物の変位は、拘束のない地盤の凍上量に比べ 1～3 割程度になった。
- ③ 凍上に起因する凍上力の作用により、グラウンドアンカーでは、最大変位量が 1.8mm で、最大荷重が許容最大荷重までの増加量の 42.5% に達した。
- ④ 凍上に起因する凍上力の作用により、地山補強土工では、最大変位量が 9.5mm で、最大荷重が補強材の降伏荷重の 146.5% になった。

4. 凍上による変状抑制対策

4.1 連続繊維補強土工を用いた凍上被害対策

地山補強土工法は、不安定切土法面の永久安定工法として、国内で多く用いられているが、寒冷地においては、地盤の凍上現象が原因であると推測される変形・破損などの被害事例⁹⁾があり、深刻な問題となっている。その被害対策として、連続繊維補強土を用いた施工事例¹⁰⁾がある。そこで、連続繊維補強土の断熱効果を確認するために地山の表面温度や凍結深さを計測した。

4.1.1 凍上被害対策工

連続繊維補強土工は、非凍上性材料となる砂質土を主体として構成されており、表層を非凍上性材料で被覆することで、凍上の緩和に寄与するものと考えられている^{10), 11)}。今回の施工では、写真-9 のように地山法面に 20cm の厚さで吹き付けている。



写真-9 連続繊維補強土工の状況

4.1.2 現地の事前調査

凍上要因についての事前調査を以下に示す。

1) 現地の土質は、細粒分質砂質礫に分類され、細粒分含有率は19.9%である。2) 湧水処理対策として法面に遮断排水を設けている。3) 風通しの良い地形のため、積雪がほとんどないことが確認されている。

4.1.3 現地計測の概要

北海道の知床峠付近において、前述した地山補強土工の凍上被害対策が実施され、2012年11月から2013年5月にかけて計測を行った。

連続繊維補強土の断熱効果を確認するために、地山の地表面温度と地中温度を測定した。

4.1.4 現地計測の結果と考察

図-7 に地山の表面温度を、図-8 に凍結深さをそれぞれ示す。これらの図から、凍結期において、連続繊維補強土がある方が地山の表面温度は高くなり、凍結深さが浅くなることから、このことから、連続繊維補強土には断熱効果があることが確認された。

連続繊維補強土がない地山の表面温度での凍結指数が1178°C・days、凍結深さが90cm 近くになったことから、断熱効果のある積雪の影響を受けずに、地山に寒気が入ったと考えられる。



図-7 地山の表面温度

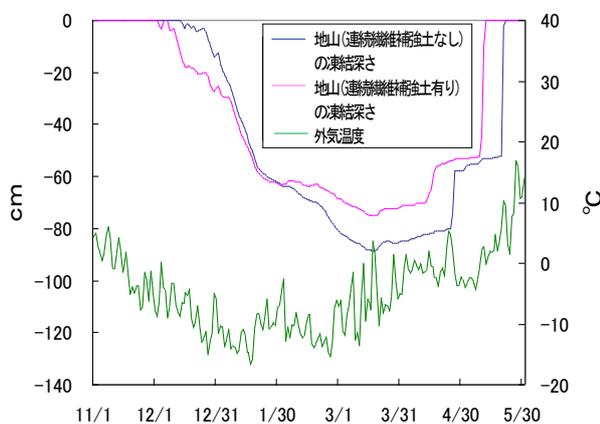


図-8 凍結深さ

4.1.5 まとめ

今回の現地計測結果から、凍上被害対策について以下に示す。

連続繊維補強土には断熱効果があり、凍結深さを軽減することから、凍上現象を緩和させ、凍上被害を軽減できると推察される。

4.2 断熱効果を期待した小段排水溝による凍上被害対策効果

切土法面の安定や維持管理のために法面の中腹部に設置される小段は、平地や法面に比べ、寒気が多方向から入りやすい。特に小段に設置されるU型トラフは、谷側のり面およびトラフ開口部からの寒気の影響が大きいため、凍上被害の対象になりやすい。これまでの研究¹³⁾で、凍結面が小段排水溝を囲み非対称に形成されることにより、小段排水溝は不均一な凍上力を受け、山側へ傾く凍上被害メカニズムが明らかになっている。そこで、本研究では、凍結面の非対称性を抑制するために、断熱効果を期待した小段排水溝を試験施工し、その有効性を検討した。

4.2.1 試験施工の概要

凍結面の非対称性を評価するために、断熱効果を期待した各小段排水溝の試験施工を実施し、地中温度を計測した。

4.2.2 試験施工箇所と土質の凍上性

2011年度に、「低温・少雪」地域である北海道釧路町の道路切土法面で試験施工を実施した。表-4は、試験施工箇所における土質の基本物性値を示している。凍上性判定のための土の凍上試験方法¹⁴⁾(JGS0172-2009)により求めた凍上速度から、凍上性が高い土質であると判定された。

表-4 土質の基本物性値

試料名		釧路
自然含水比(%)		63.5
土粒子の密度(g/cm ³)		2.641
液性限界(%)		64.4
塑性限界(%)		40.0
塑性指数 Ip		24.4
礫(%)		0
砂(%)		13
シルト(%)		47
粘土(%)		40
土質分類		シルト(高液性限界)(MH)
凍上	凍上速度(mm/h)	0.57
	凍上性判定 ¹¹⁾	高い

4.2.3 試験施工断面の概要

図-9 にそれぞれの断面図と設置状況を示す。

①一般型

断熱材を入れていない一般的なU型トラフで、小段に5%の勾配を付けて表面水を排水溝で処理し、両側の地山を張芝で保護する。

②側面断熱材型

U型トラフの谷側の側面に厚さ5cmの断熱材（JIS規格；JIS A 9511 A-XPS-B-2B, 熱伝導率；0.034(W/m・K)）を付設する。小段に5%の勾配を付けて表面水を排水溝で処理し、両側の地山を張芝で保護する。

③底面断熱材型

U型トラフの底面に厚さ5cmの断熱材(同上)を付設する。小段に5%の勾配を付けて表面水を排水溝で処理し、両側の地山を張芝で保護する。

④山側シフト型

U型トラフを横断方向に山側へシフトし、小段に5%の勾配を付けて表面水をトラフで処理する。小段の地山は張芝で保護する。排水溝から法面までの地山の厚さの増加による断熱効果を期待している。

4.2.4 地中温度計と計測方法

側面および底面断熱材型は排水溝の中心から谷側と山側に60cm離れた2箇所、山側シフト型は排水溝の中心から谷側に60cm離れた小段の中間とさらに谷側に60cm離れた2箇所に、地中温度計を深さ方向に10cm間隔で設置した(図-9)。また、一般型においても両断熱材型と同様の箇所で計測を行った。いずれも、地中温度を1時間毎に自動計測により求めた。

4.2.5 試験結果と考察

地中温度の計測結果から、凍結深さを求め、断熱効果

を期待した小段排水溝の耐凍上性について考察する。

(1) 断熱材を使用したU型トラフの耐凍上性

図-10 に、地中温度計測から求めた各U型トラフの凍結深さの推移を示す。断熱材型と一般型では、一般型、底面断熱材型、側面断熱材型の順に、谷側と山側の凍結深さの差が小さくなることがわかる。図-11 は、断熱材型と一般型について、谷側と山側における凍結深さのそれぞれ断熱材型と一般型について、谷側と山側における凍結深さのそれぞれの平均値と、それらの差を図-10 から求めたものである。谷側と山側の凍結深さの平均値の差は、一般型で6.82cm、側面断熱材型で-0.86cm、底面断熱材型で3.38cmになった。値が0に近づくほどU型トラフ周りの凍結面は対称に近づくことになる。このことから、側面断熱材型の凍結面はほぼ対称になると考えられる。一方、底面断熱材型は一般型に比べてその差が50%以下となった。このことから、凍結面の非対称性が一般型に比べて緩和されたことになる。

表-5 は、断熱材型において、一般型に対する凍結深さの平均値の軽減率を示している。この表から、谷側の凍結深さの平均値は、一般型に比べて、側面断熱材型は約28.7%、底面断熱材型は約7.9%軽減できた。側面断熱材型においては、断熱材がU型トラフの内空から谷側の地盤に入る寒気の影響を抑制する役割を果たしていると言える。一方、山側の凍結深さの平均値は、一般型に比べて、側面断熱材型は約4.9%軽減し、底面断熱材型は約4.2%増加した。山側には断熱効果が発揮されなかったことがわかる。

凍結面の非対称性の緩和により、U型トラフに作用する凍上力が均等に作用するので、U型トラフが傾く凍上被害軽減の可能性はある。

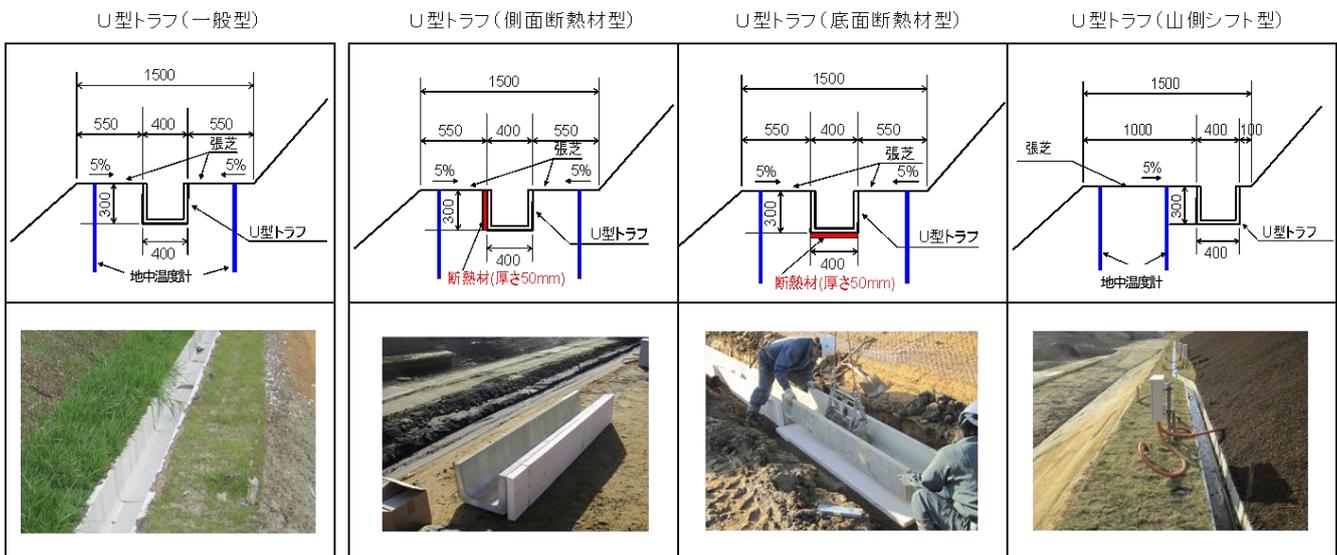


図-9 試験施工断面図

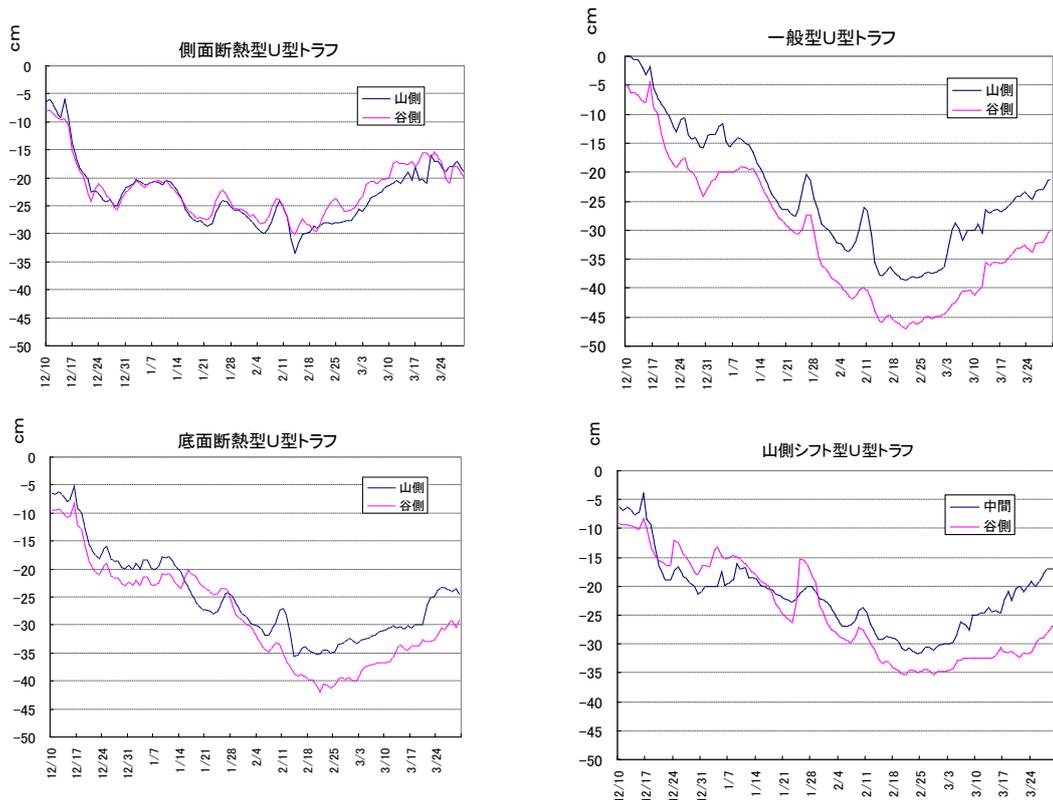


図-10 凍結深さの推移

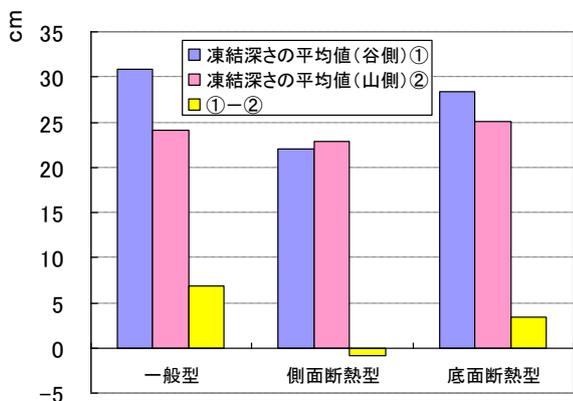


図-11 断熱材型と一般型における谷側と山側の凍結深さの平均値とその差

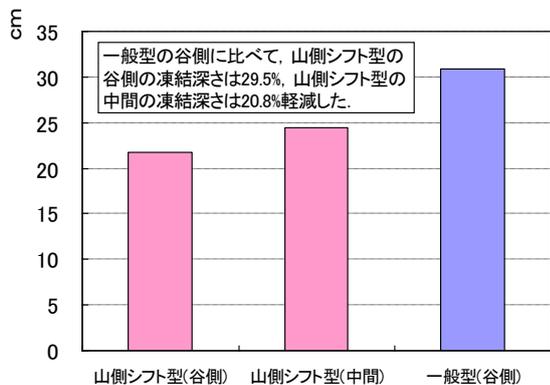


図-12 山側シフト型と一般型の凍結深さの平均値

表-5 断熱型における一般型に対する凍結深さの平均値の軽減率

	谷側	山側
側面断熱型(%)	28.7	4.9
底面断熱型(%)	7.9	-4.2

(2) 山側にシフトしたU型トラフの耐凍上性

図-10 から、山側シフト型の谷側と中間の地中温度計による凍結深さは、一般型の谷側の凍結深さに比べ、浅くなるのがわかる。図-12 は、山側にシフトしたU型トラフの谷側と中間、一般型のU型トラフの谷側の凍結期間における凍結深さの平均値を示したものである。これより、山側シフト型の凍結深さの平均値は、従来のU型トラフの谷側に比べて、谷側で約 29.5%、中間で約 20.8%軽減された。これは、山側シフト型の谷側の地盤においては、一般型の谷側と比較して、U型トラフから離れているため、U型トラフの内空から入る寒気の影響を軽減したからと考えられる。また、山側シフト型の中間の地盤は、一般型の谷側と比較して、法面から離れているため、法面からの寒気の影響を軽減したからと考えられる。このことは、U型トラフから法面までの地山の厚さによる断熱効果が発揮されたと考えられる。

4.2.6 まとめ

- ① 側面断熱材型は、排水溝を囲む凍結面がほぼ対称になる。
- ② 底面断熱材型は、側面断熱材型ほどではないが一般型U型トラフに比べて排水溝を囲む凍結面の非対称性を緩和できる。
- ③ 山側シフト型U型トラフは、一般型U型トラフに比べ、地盤の凍結深さを軽減できる。

4.3 断熱材を併用した特殊ふとんかごによる切土のり面の凍上対策

切土工事でのり面の安定性を図る目的で特殊ふとんかごを設置する現場について、凍上による変状の可能性が予測されたので、試験的に特殊ふとんかごに断熱対策を施工し、地中の温度を計測して断熱効果を確認した。

4.3.1 試験条件

(1) 地山の土質

地山の土質の基本物性値を表-6に示す。この材料の熱伝導率は $1.128\text{W/m}\cdot\text{K}$ であり、一般的な土砂と比較すると同等な土質である¹⁵⁾。また、この材料について粒度分布による凍上性判定¹⁶⁾をすると、砂質シルトで非常に凍上しやすい土質である。

表-6 地山の基本物性 (熱物性値)

乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.281
含水比 W_n (%)	39.90
熱伝導率 λ ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$)	1.128
土質分類	砂質シルト

(2) 施工

断熱対策として、特殊ふとんかごに断熱材を施工した。断熱材は写真-10 に示すように透水性を有する発泡スチロール (EPS) であり、その基本物性値を表-7 に示す。一般的な断熱材と同様に熱伝導率は非常に小さい。断熱対策は特殊ふとんかごの上面に施工することが適切であるが、EPS は紫外線の影響を受けること、非常に軽量であること、また特殊ふとんかごに密着しないことが考えられたことから、特殊ふとんかごの下面に設置した。また、一般的に切土のり面は保護のため緑化を行う。この施工現場では、EPS の効果を確認するため、EPS を設置した箇所でも特殊ふとんかごの上に張芝による緑化を行った。断面図と状況写真について図-13 および写真-11 にそれぞれ示す。

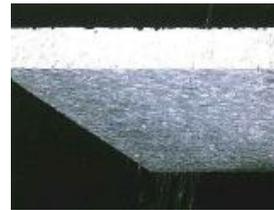
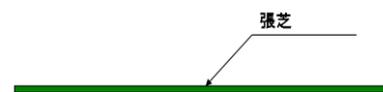


写真-10 透水性を有する EPS

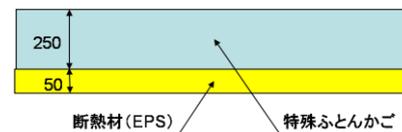
表-7 EPS の基本物性値¹⁷⁾

密度 (kg/m^3)	25
空隙率 (%)	25
熱伝導率 λ ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	0.039
透水係数 (cm/sec)	0.2

①地山 (張芝のみ)



②特殊ふとんかご+断熱材



③張芝+特殊ふとんかご+断熱材

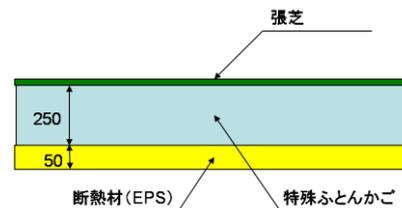


図-13 断面図 (単位 : mm)



写真-11 試験施工の状況写真

(3) 計測

各箇所において、地表面（特殊ふとんかご上面より2cm上側）と地表面から深さ70cmまでの10cm間隔で全8カ所の温度をデータロガ（TR-71U）により1時間ごとに自動計測した。計測期間は平成25年11月から平成26年4月および平成26年11月から平成27年4月までの2冬期間である。なお、検討するにあたり1時間ごとの温度データを1日平均に換算して取りまとめた。

4.3.2 結果

各年度における特殊ふとんかご下のEPS直下およびEPSを設置しない張芝のみの箇所では張芝の下から深さ30cmでの計測日と温度の変化を図-14と図-15にそれぞれ示す。なお、各図には平均気温もあわせて示す。平成25年度では特殊ふとんかご+EPSの場合、一部0℃以下となった時期があり地山の凍結が発生した。しかし、特殊ふとんかご+EPS+張芝の場合では、平成25、26年度で一度も温度が0℃以下とならず地山は凍結することがなかった。測定した3種類の中では張芝のみの地山

の温度が最も低くなった。これより、張芝のみの場合と比較してEPSにより温度低下が抑制され、特殊ふとんかご+EPS+張芝ではさらに温度低下抑制効果が顕著であった。このことからEPSの断熱効果は大きいといえる。また、施工2年が経過しても張芝は枯死することがなくのり面の凍結を抑制できたといえる。

また、各年度の凍結深さと凍結指数（日平均気温の累積値）を図-16、図-17にそれぞれ示す。凍結指数は250～400℃・daysとなったが、平成25年度の特殊ふとんかご+EPSの箇所においては一時的に凍結が確認された。しかし、平成25および26年度の特殊ふとんかご+EPS+張芝の箇所において凍結はほとんど発生しなかった。一方、張芝のみの箇所では凍結指数が大きくなるほど凍結深さも大きくなることが確認された。

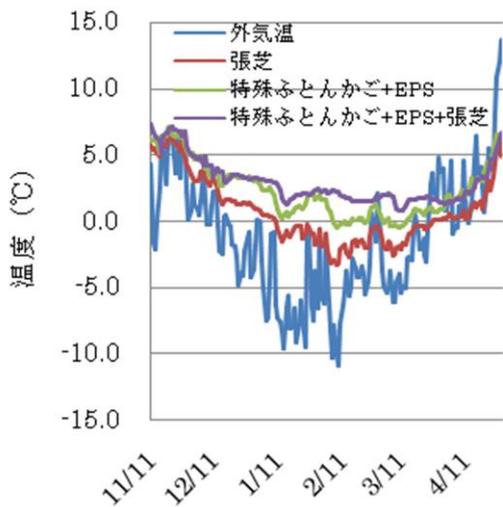


図-14 平成25年度の温度

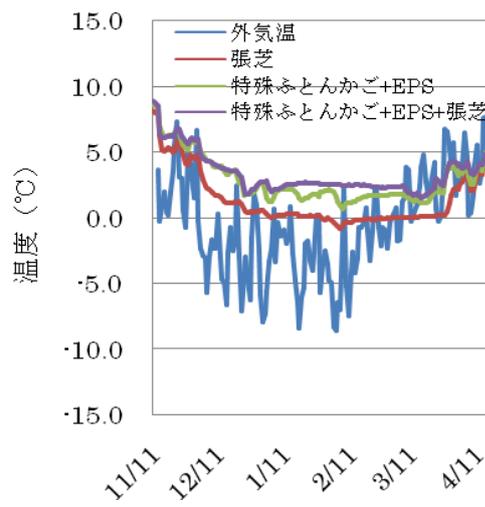


図-15 平成26年度の温度

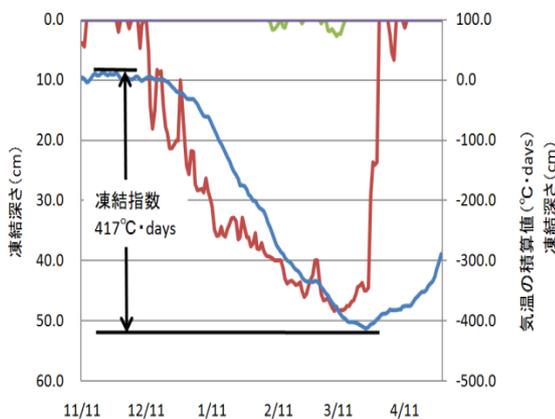


図-16 平成25年度の地山の凍結深さと凍結指数

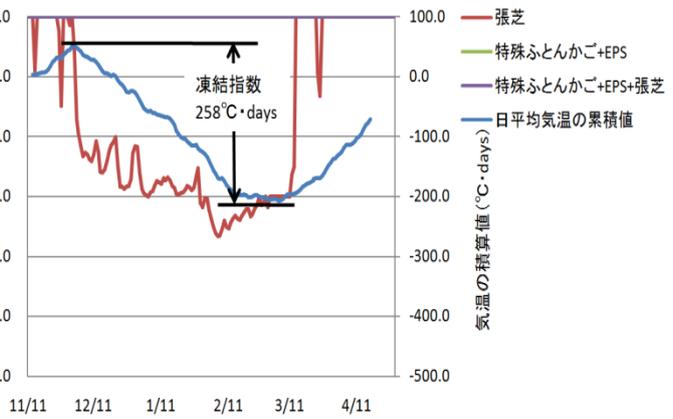


図-17 平成26年度の地山の凍結深さと凍結指数

4.3.3 まとめ

今回は断熱材を併用した特殊ふとんかごを試験的に設置し、地山内の温度を計測して地山の凍結について調査した。地山（張芝のみ）の箇所と断熱材を併用した特殊ふとんかごの箇所の温度を比較した場合、断熱材を併用した特殊ふとんかごのほうが地山の温度低下が抑制された。また、断熱材を併用した特殊ふとんかごの上に張芝を施工した場合、より温度低下抑制効果が現れ、地山はほとんど凍結することがなかった。

5. まとめ

本研究により次のことが明らかになった。

- ① 植生基盤材と積雪には断熱効果があり、凍結深さを抑制する働きがあり、最大凍結深さを軽減できる可能性がある。
- ② グラウンドアンカー、地山補強土工における、凍上に起因する凍上力および変位について確認した。
- ③ 連続繊維補強土には断熱効果があり、凍結深さを軽減することから、凍上現象を緩和させ、凍上被害を軽減できる可能性がある。
- ④ 小段排水溝には、トラフ背面土に非対称な凍上力が働き、小段排水施設を変状させる場合があるが、この対策として、側面断熱材型、底面断熱材型、山側シフト型U型トラフの採用により、一般型U型トラフよりも、地盤の凍結深さを軽減できる。
- ⑤ 切土のり面の凍上対策として、断熱材を併用した特殊ふとんかごをのり面に設置することにより、地山の温度低下が抑制されることが確認された。

参考文献

- 1) 公益社団法人 地盤工学会北海道支部：斜面の凍上被害と対策に関する研究委員会：斜面の凍上被害と対策のガイドライン、2010.
- 2) 公益社団法人 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説、2012.
- 3) 公益社団法人 地盤工学会：地山補強土工法設計・施工マニュアル、2011.
- 4) 小野丘：グラウンドアンカーに作用する凍上力の算定方法、公益社団法人 地盤工学会北海道支部技術報告集第 49 号、pp. 213-218、2009.
- 5) 小野丘：地山補強土工における凍上力の算定方法、公益社団法人 地盤工学会北海道支部技術報告集第 52 号、pp. 9-14、2012.
- 6) 小野丘：グラウンドアンカーに作用する凍上力の算定事例、公益社団法人 地盤工学会北海道支部技術報告集第 53 号、

pp. 241-246、2013.

- 7) 公益社団法人 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p. 5、2009.
- 8) 日本道路公団 北海道支社札幌技術事務所：ライラック 15 号 凍上特集、2003.
- 9) 公益社団法人 地盤工学会北海道支部：斜面の凍上被害と対策に関する研究委員会：斜面の凍上被害と対策のガイドライン、2010.
- 10) 山内章、田原浩二、庄司宣可：凍上性地質に対応した法面対策について、第55回北海道開発技術発表会、2012. 2
- 11) 財団法人 土木研究センター：法面保護用連続繊維補強土「ジオファイバー工法」設計・マニュアル、2009. 4
- 12) 三上登ら：連続繊維補強土による法面基盤の耐凍上性、第44回地盤工学会研究発表会、2009. 8
- 13) 安達隆征、西本聡、佐藤厚子：凍結進行期に着目した小段排水溝に及ぼす凍上力の影響評価、第 52 回地盤工学会北海道支部年次技術報告会 pp. 1-8、2012.
- 14) (社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 二分冊の 1 pp. 230-234、247、2009.
- 15) 社団法人 日本道路協会：道路土工要綱、2009. 6
- 16) 社団法人 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学-凍上被害とその対策-、2009. 12
- 17) 株式会社 J S P 発泡ポリスチレン製排水材チップドレンカタログ

A STUDY ON FAILURE RISK ASSESSMENT FOR CUT SLOPES IN COLD SNOWY REGIONS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Cold-Region Construction Engineering
Research Group (Geotechnical)

Author : HAYASHI Hirochika

SATO Atsuko

NOGAMI Atsushi

YAMADA Mitsuru

Abstract : Cut slopes in cold snowy regions tend to undergo deformation from frost heave and repeated freeze-thaw. Such phenomena have prompted the need for efficient, effective countermeasures and for the prediction of frost-heave deformation on cut slopes. Toward preventing cut slope failure and deformation and reducing maintenance costs while maintaining safety, this study clarified the mechanism of failure of slope stabilizing structures caused by frost heave and examined countermeasures to such failure.

This paper reports on the results of onsite measurements of frost-heave force and amount at locations with ground anchoring works, at locations with earth reinforcement works, and at cut slopes, and it reports on the results of study on countermeasures to slope deformation from frost-heave.

Key words : ground anchoring, earth reinforcement work, frost heave, depth of frost penetration, frost heave force