

凍上および凍結融解に耐久性のある道路のり面構造に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：佐藤厚子、安達隆征、山田充

【要旨】

寒冷地の道路のり面は、冬期にかけて凍上・凍結融解作用を繰り返すことにより、表層部がゆるみ春先の融雪期に土砂崩壊に至ることが多く、道路の安全性が問われている。また、道路のり面に設置された排水施設、のり枠などの道路のり面構造物が、凍上により年々変状をきたし、その都度補修を行っている現状がある。このため、寒冷地にふさわしい道路のり面構造やコストを抑えたのり面安定対策工が求められている。

本研究では、道路のり面および道路のり面構造物の凍上被害メカニズムを把握し、道路のり面の凍上対策、寒冷地にふさわしいのり面の構造・緑化について提案する。

キーワード：のり面、凍上、凍結深さ、凍上力

1. はじめに

寒冷地の道路のり面では、凍上・凍結作用を繰り返し受けることにより、のり面の崩壊や切土のり面の小段に設置される小段排水溝の破損被害が生じ、これらの被害が北海道各地から報告されている。

本研究は、凍上によるのり面変状の要因を解明し、のり面崩壊の対策を検討するため、小段排水溝の変状メカニズムの把握、積雪によるのり面の断熱効果の検討、凍上対策としての特殊ふとんかごの有効性の検討を行った。

2. 地盤の凍上¹⁾

地盤の凍上は、図-1 に示すように、気温の低下によって地盤の表面温度が低下し、地盤中に凍結面(0°C等温面)ができる。このとき、土中の未凍土側から水分が凍結面に向かって移動していき、凍結面に集まった水分が凍結するときに土粒子表面から氷が分離する。この氷が薄い層を成長させて地盤を押し上げる。このような氷の層を形成する現象を氷晶分離、形成された氷の層をアイスレンズと呼ぶ。このように、凍結面に移動した水分の氷晶分離によるアイスレンズの発生が凍上発生メカニズムであり、アイスレンズの膨張により発生する力を凍上力と呼び、凍結面に対して垂直方向に作用する。

以上のように、アイスレンズの形成が凍上発生メカニズムそのものであるが、基本的なメカニズムは極めて複雑であり、未だ物理化学的にも十分に解明されていないのが

現状である²⁾。

のり面の凍上対策は、図-2 に示すように大きく2つ考えられる。ひとつは凍上自体を起こさないようにすることである。凍上は「土質、水、気温」の3つの要素のすべての条件を満たしたときに起こる。言い換えれば、この3要素のうちの一つでも欠くことができれば、凍上は起こらない³⁾。もうひとつは、凍上による圧力(凍上力)を受けてもフレキシブルに変形し、その力を回避することである。

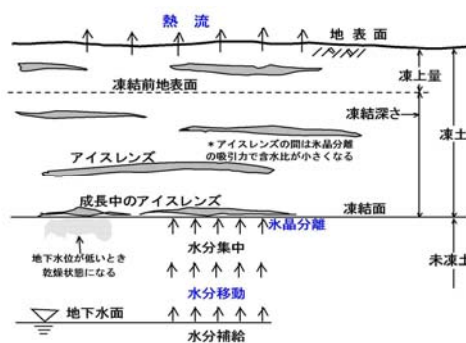


図-1 地盤の凍上機構¹⁾

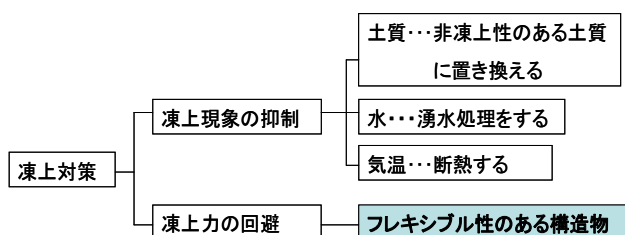


図-2 凍上被害を防ぐための方法

3. 小段排水溝に関する研究

3.1 凍上力を回避する凍上対策

のり面の安定や維持管理のためにのり面の中腹部に設置される小段は、平地やのり面に比べ、寒気が多方向から入りやすい形状になっている。そのため、小段に設置される小段排水溝は凍上の影響を受けやすい⁴⁾。また、切土のり面の小段排水溝はフレキシブル性に乏しいコンクリート製品を使用していることが多い⁵⁾ので、フレキシブル性に乏しく、凍上力を回避することができず、凍上被害の対象になりやすい⁶⁾。

小段排水溝の凍上被害状況を写真-1、2に示す。切土のり面の小段排水溝に及ぼす凍上力の影響評価と、凍上被害を軽減する排水構造を確立するために、フレキシブル性のある小段排水構造による試験施工を実施し、地中温度計測と凍上量測定器を設置した。

3.2 試験施工の概要

図-3に示す箇所にて凍上力を回避するフレキシブル性のある排水構造を用いた小段排水溝を施工し、地中温度と凍上量を計測した。H21年度に「低温・少雪」地域である訓子府、陸別で、H22年度に「高温・少雪」地域である苫小牧の現場試験フィールドで実施した。表-1に試験施工箇所のn年確率凍結指数⁸⁾を、表-2に土質の基本物性値を示す。訓子府と陸別は、北海道内では凍結指数が高い地域である。地山の土質は、訓子府と陸別は粒度による凍上性判定法⁹⁾によれば凍上性のある土質、苫小牧は凍上性判定試験により、凍上性が中位であると判定された。

3.3 試験施工断面

従来のU型トラフに加え、2種類のフレキシブル性のある排水構造断面で試験施工を行った。図-4にそれぞれの断面図と設置状況を図-5に計器の設置位置を示す。写真-3は、凍上量測定器と地中温度計の設置状況である。

①縦断暗渠型小段排水溝

フレキシブル性のある縦断暗渠管を小段の山側に設置し、のり面からの湧水と表面水を処理する。表面水は小段を2%の逆勾配にすることで処理する。谷側の地山を張芝で保護する。

表-1 試験施工のn年確率凍結指数⁸⁾(°C・day)

	n年確率凍結指数		気象特性
	n=10	n=20	
訓子府	1010	1080	低温・少雪
陸別	1250	1320	低温・少雪
苫小牧	370	410	高温・少雪



写真-1 切土法面の小段の凍上被害 1



写真-2 切土法面の小段の凍上被害 2



図-3 道内各地の主要な気象特性と試験施工箇所 (文献7の図に加筆)

表-2 土質の基本物性値

試料名	訓子府	陸別	苫小牧
自然含水比(%)	32.72	27.26	46.98
土粒子の密度(g/cm ³)	2.726	2.743	2.470
液性限界(%)	55.45	56.60	N.P.
塑性限界(%)	29.91	29.61	N.P.
塑性指数(%)	25.54	26.99	N.P.
礫(%)	42.2	37.3	22.8
砂(%)	26.1	32.4	51.4
シルト(%)	5.0	7.6	
粘土(%)	26.7	22.7	25.8
土質分類	細粒分質砂質礫(GFS)	細粒分質砂質礫(GFS)	火山灰質粘性土(SVG)

数字の単位は mm

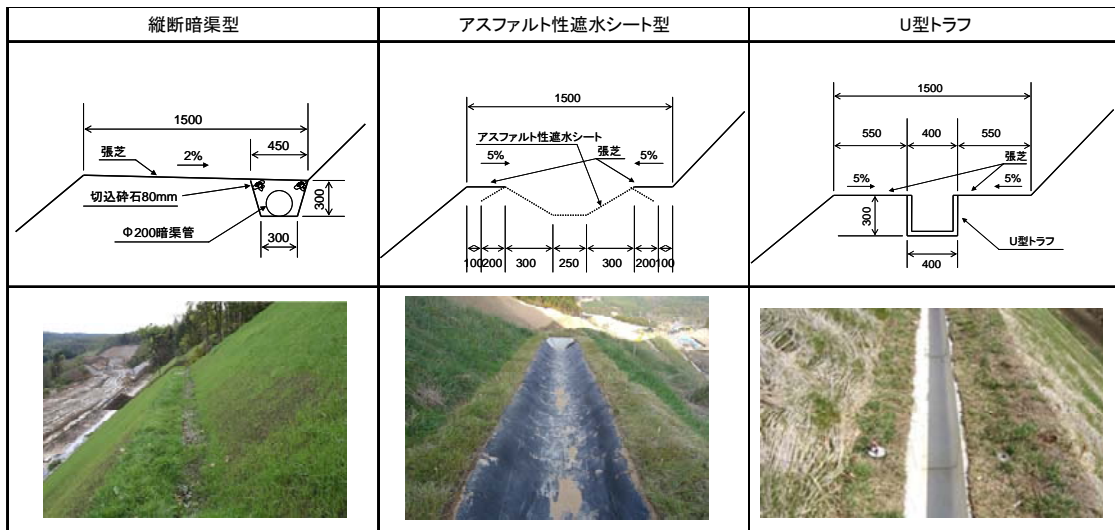


図-4 小段排水溝の試験施工断面

数字の単位は mm

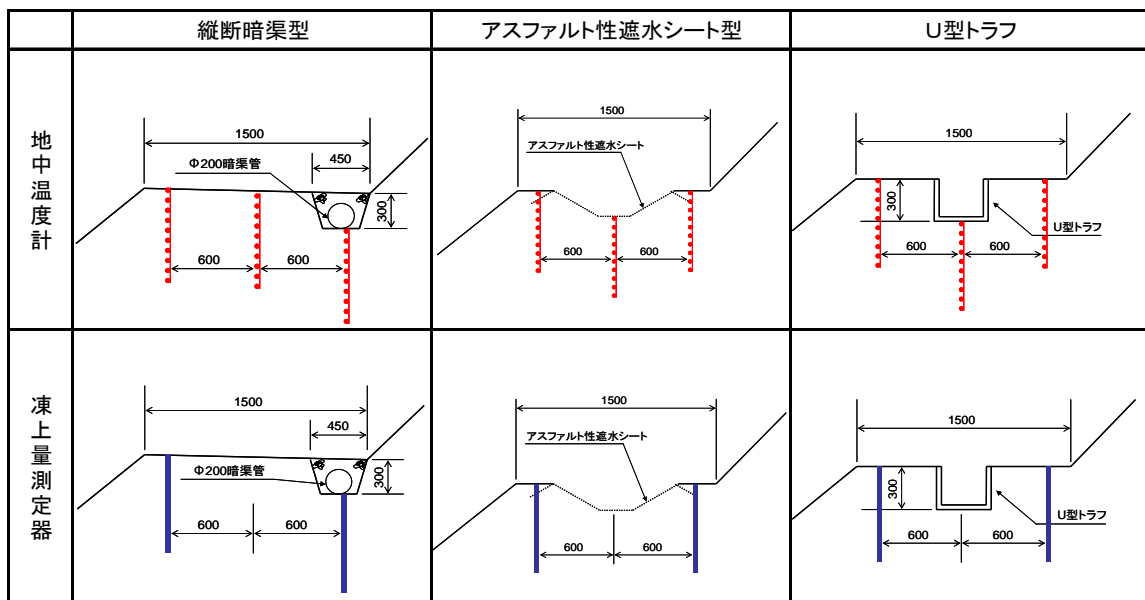


図-5 計器設置位置

②アスファルト性遮水シート型小段排水溝

フレキシブル性のあるアスファルト性遮水シートを小段の中央に設置し、小段に 5%の勾配を付けて表面水を処理する。両側の地山を張芝で保護する。

③U型トラフ

従来の U 型トラフを小段の中央に設置し、小段に 5%の勾配を付けて表面水を処理する。両側の地山を張芝で保護する。

3.4 地中温度の推移

図-6 に、訓子府、陸別における地中温度計測結果から求めた凍結面の挙動を示す。なお、凍結深さは小段面を



写真-3 計器設置状況

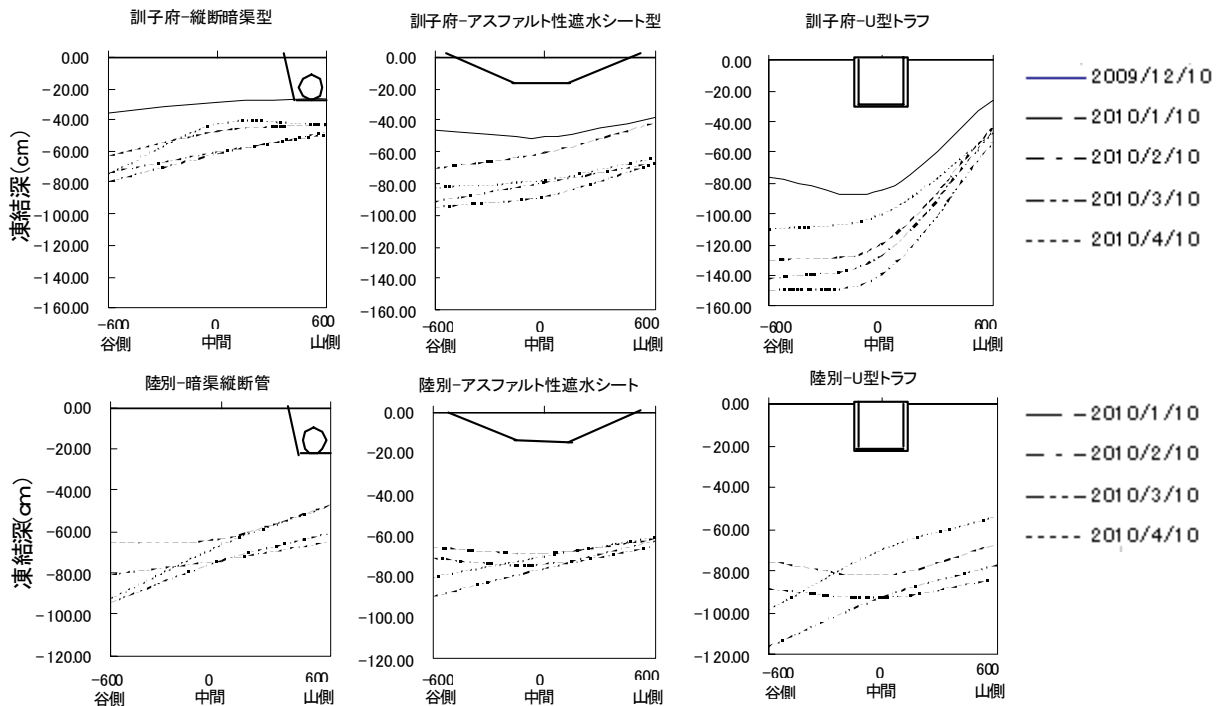


図-6 凍結面の推移 (訓子府・陸別)

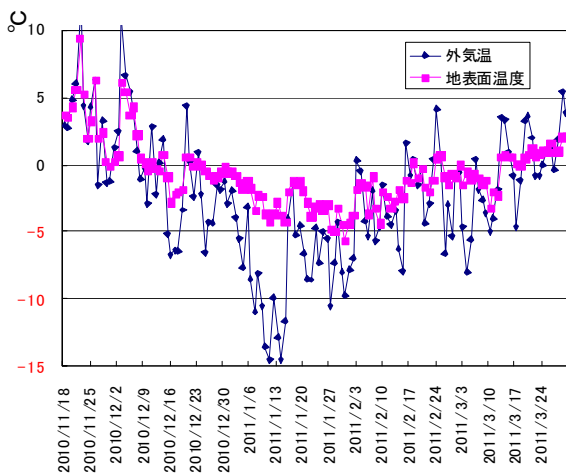


図-7 外気温と地表面温度

0 としている。この図から、凍結が進行した段階では、
法面から入る寒気の影響で、山側、中間、谷側の順に凍
結深さは深くなる。アスファルト性遮水シート型や縦断
暗渠型は、U型トラフに比べ、凍結深さが浅くなる。最
大凍結深さでアスファルト性遮水シートは34%、縦断暗
渠管は53%浅くなった。U型トラフでは内空から入る寒
気の影響が大きいと思われる。

次に苦小牧の地中温度計の計測結果から凍結進行期に

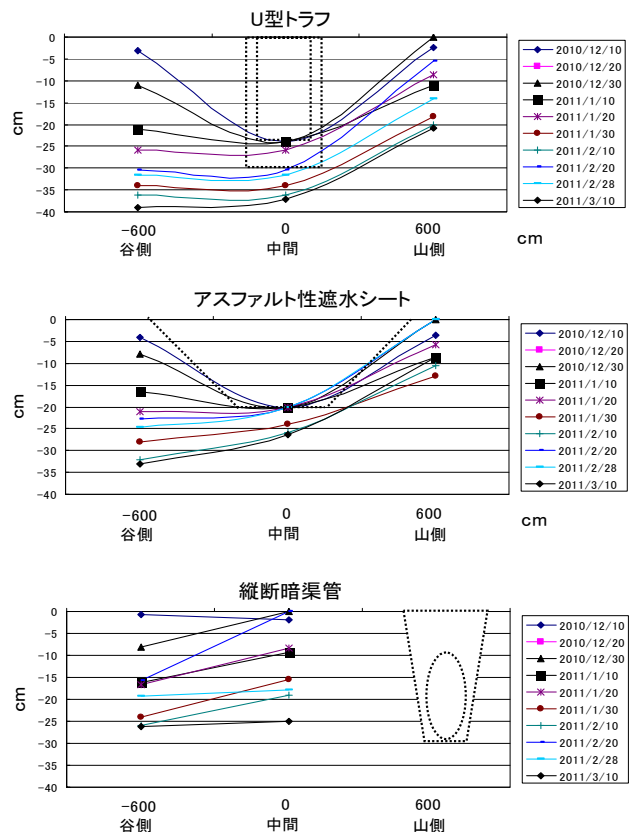


図-8 凍結進行期の凍結面の推移(苦小牧)

表-3 各材料の熱伝導率(W/m·K)

材料		熱伝導率(W/m·K)
火山灰質粘性土	凍土	0.754
	未凍土	1.254
切込砂利	凍土	2.534
	未凍土	2.491
コンクリート		0.938
アスファルト性遮水シート		0.223
雪		0.261

着目した凍上力が小段排水溝に及ぼす影響を評価した。図-7に外気温と地表面温度の推移を、図-8に苫小牧で実測した凍結面の推移を示す。この図から、谷側からの寒気の影響により、山側より谷側のほうが凍結の進行が速いことがわかる。また、縦断暗渠型、アスファルト性遮水シート型、U型トラフの順に凍結の進行が速く、凍結深さが深くなることわかる。これは排水溝の内空から入る寒気の影響によるものだと考えられる。縦断暗渠型の山側については、暗渠管より深いところに地中温度計を設置したため、地中温度がマイナスにならず、それより浅いところでの凍結深さを求めることができなかった。以上のことから、アスファルト性遮水シートや縦断暗渠管による小段排水溝は、U型トラフに比べ、最大凍結深さを抑制することができる。

3.5 二次元FEMによる熱伝導解析(苫小牧)

小段箇所の断面を縦横10cmのサイズで、2,162メッシュに分割した温度分布を日単位で表し、凍結面の詳しい挙動を求めた。解析に用いた熱伝導率を表-3に示す。火山灰質粘性土と切込砂利については、凍土と未凍土に分けて、Kerstenの実験式¹⁰⁾により求めた。コンクリートと雪は、一般的な熱定数¹¹⁾を用い、アスファルト性遮水シートは、実測により求めた。また、積雪を考慮した気温として、地表面温度を用いて解析を行った。

図-9に、二次元FEM熱伝導解析による凍結面の推移を示す。図より、実測した図-8と同様に、縦断暗渠型、アスファルト性遮水シート型、U型トラフの順に凍結の進行が速く、凍結深さが深くなることわかる。さらに、凍結進行期の凍結面の推移について、U型トラフとアスファルト性遮水シートで明確な違いが現れた。U型トラフは、排水溝の側面付近から凍結が進行する。また、のり面から入る寒気の影響により、その側面付近の凍結部分は、山側より谷側のほうが広く、深くなるので、それに伴い、U型トラフ周りの凍結面は、U型トラフを非対称に囲む形になる。このことから、凍上力は凍結面に對

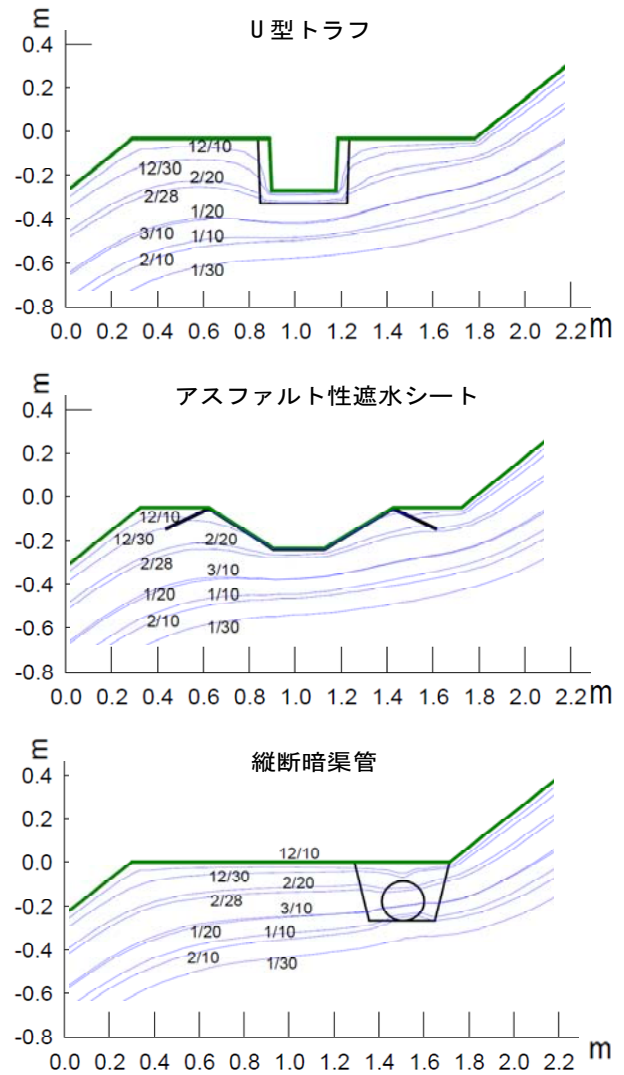


図-9 二次元FEM解析による凍結面の推移(苫小牧)

して垂直に作用するので、凍上力はトラフの側面に作用することになる。

一方、このような現象はアスファルト性遮水シートには見られなかった。この原因は二つあると考えられる。一つは排水溝の側面形状の違いである。U型トラフの側面は鉛直に近いので、多方向(排水溝の側面と地盤)から寒気にさらされる部分が現れる。一方、アスファルト性遮水シートの側面は水平に近いので、排水溝の側面からの寒気の影響は少ない。もう一つは、熱伝導率の違いである。U型トラフの熱伝導率は、アスファルト性遮水シートの熱伝導率の約4倍あり、アスファルト性遮水シートに比べ、寒気が入りやすい材料である。

排水溝のない平坦な構造の縦断暗渠型については、地表面から入る寒気の影響だけなので、山側から谷側に単純に凍結深さが深くなる凍結面が現れた。このことから、縦断暗渠管に及ぼす凍上力は、鉛直に近い方向にのみ作

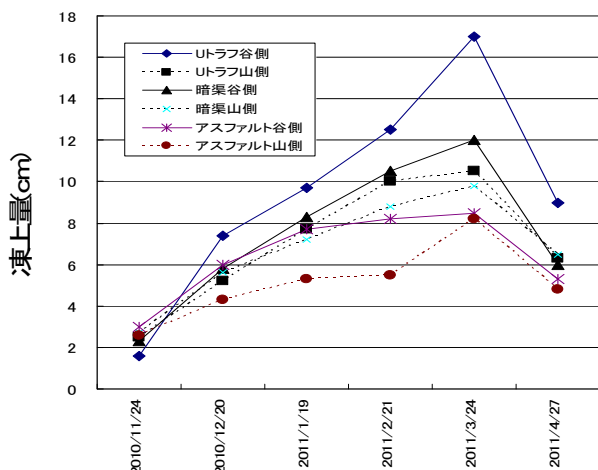


図-10 凍上量の推移(苫小牧)

用するものと考えられる。

以上のことから、アスファルト性遮水シートや縦断暗渠管による小段排水溝は、U型トラフに比べ、排水溝自体に作用する不均一な凍上力の影響が少ないと言える。言い換えれば、排水溝の断面形状が平坦であれば、不均一な凍上力の影響を受けづらくなると言える。

3. 6 凍上量の推移

図-10 に、苫小牧における凍上量計測結果を示す。この図から、のり面から入る寒気の影響で、谷側は山側に比べ、凍上量が大きいことがわかる。また、アスファルト性遮水シート型や縦断暗渠型は、U型トラフに比べ、凍上量が小さい。これは、排水溝から入る寒気の影響が少なく、熱伝導率が低いためであると思われる。このことから、凍結深さと同じ結果が現れ、凍上量は凍結深さに連動し、凍結深が深いほど、凍上量が大きくなるのがわかる。

以上のことから、アスファルト性遮水シートや縦断暗渠管による小段排水溝は、U型トラフに比べ、凍上量を抑制できることがわかった。

3. 7 地表面温度と凍結深さ

図-11 に、苫小牧のU型トラフ部の地表面温度の累計と凍結深さおよび地表面からの融解深さを示す。この図から、地表面温度の累計の増加が大きい2月中旬までは凍結深さが大きくなっていくことがわかる。その後、地表面温度の累計の増加が小さくなる3月中旬までは、凍結深さが上下する。3月中旬に地表面温度の累計の増加が止まると、地表面および地中の両方から融解が進行し、凍結領域は急激に消失する。小段の谷側では、3月中旬の融解期に、一時凍結領域が残存することがわかる。

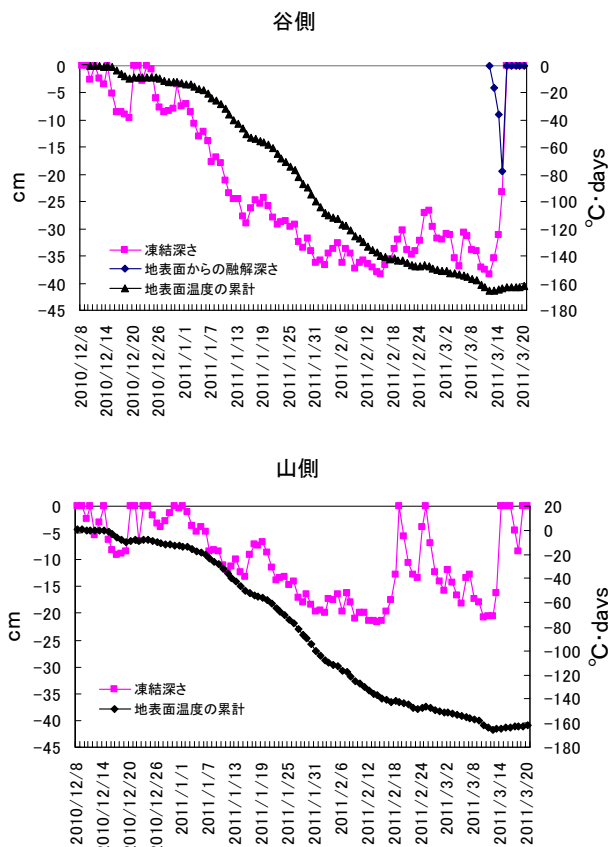


図-11 地表面温度の累計と凍結および融解深さ

3. 8 小段排水溝に及ぼす凍上力の影響評価

以上の試験施工計測結果や熱伝導解析結果から、凍結進行期に着目したU型トラフに及ぼす凍上力の影響を考察し図-12に示す。

① 凍結前

気温が下がると地盤に寒気が入り込む。コンクリートトラフやコンクリートシールは、未凍土より熱伝導率が高いため、寒気が入り易い。

② 凍結進行期

寒気が土中に入ると、地盤が凍結し、地盤中に凍結面が形成される。未凍土側からの水分が凍結面付近に集まり、アイスレンズが成長する。凍結面に対して垂直方向に作用する凍上力がコンクリートトラフやコンクリートシールに作用し、変位を与える。

凍結進行期では、トラフの側面から入る寒気の影響で、トラフの側面付近の未凍土から凍結し、トラフの周辺を囲むように凍結面が形成される。また、のり面から入る寒気の影響で、トラフの山側より谷側のほうが凍結深さが深く、凍結部分が広くなり、トラフを囲む凍結面は山側と谷側で非対称になる。このことから、トラフの山側

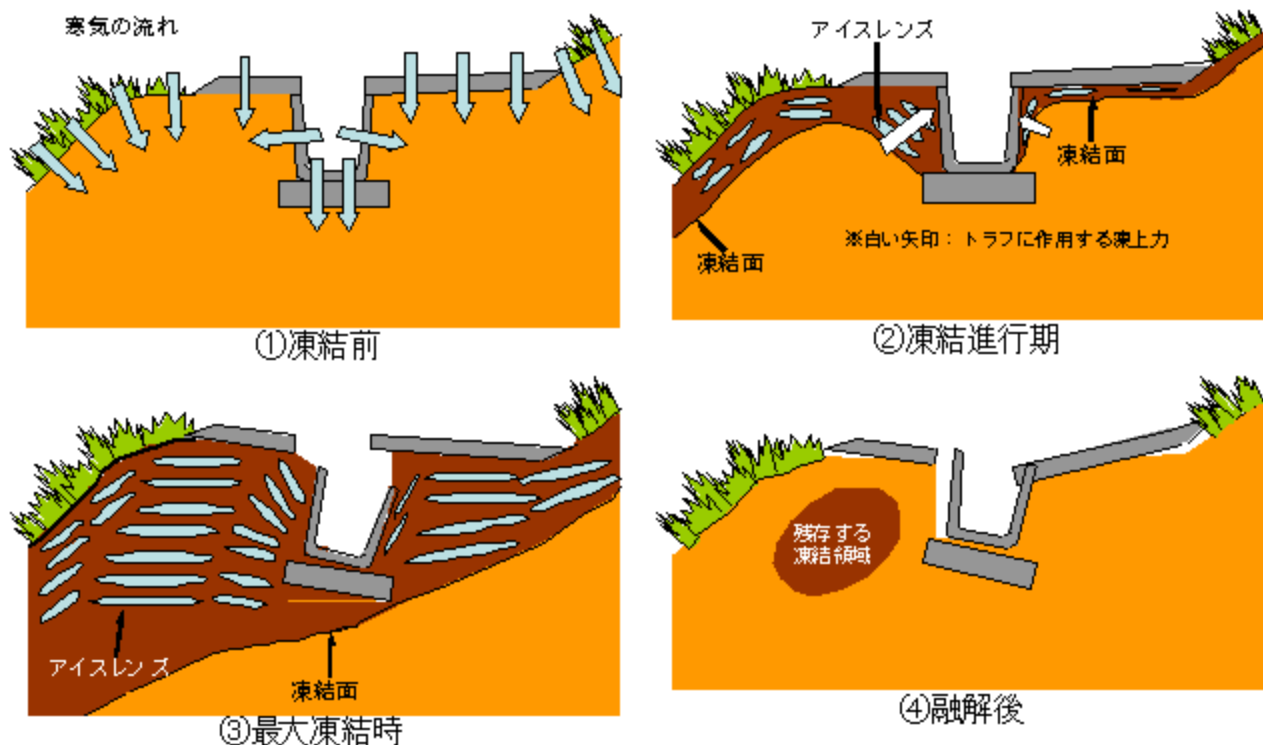


図-12 U型トラフに及ぼす凍上力の影響評価

より谷側のほうが、アイスレンズの発生領域が大きくなるため、図のように、トラフを山側から谷側に押す凍上力より、谷側から山側に押す凍上力のほうが大きくなるので、トラフが山側に傾く変位現象が起きる。

③ 最大凍結時

凍結面がU型トラフの底面より下がると、のり面からの寒気の影響で、凍結面は谷側に行くにつれ、緩やかに深くなるので、地盤を押し上げる方向に凍上力が働き、コンクリートトラフやコンクリートシールは鉛直に近い方向に押し上げられ、最大凍結時で最大変位になると推測される。

④ 融解後

春先の融雪時期に入ると、アイスレンズは溶け、小段全体が脆弱化し、凍結領域は谷側の一部だけに残存する。押し上げられたコンクリートトラフやコンクリートシールは、傾きを保ったまま、自重により鉛直に下がる。場合によっては、②～③の段階で、変位だけではなく、破損をもたらすこともある。

以上のように、切土のり面の小段で凍上が起こる場合、U型トラフは凍結進行期に、非対称な凍結状態により山側に傾くことがわかった。このことは、実際の現象として、写真-1、2で確認されている。



写真-4 小段排水溝の防草効果

3.9 小段排水溝の防草効果

フレキシブル性のある小段排水溝を凍上対策として用いた結果、実際に凍上による被害が見られなかった。アスファルト性遮水シートに限っては、凍上対策の他に防草効果を確認できた。写真-4は、U型トラフとアスファルト性遮水シートを小段排水溝として同時期に設置してから2年経過した状況である。U型トラフ部よりアスファルト性遮水シート部の草が生えていないことがわかる。シートの両端の根入れ部分が、植物の根の成長の妨げになると考えられる。また、小段全体をほぼ覆うため、防草シートの役割を果たしているものと考えられる。このことから、維持管理対策の上においても、アスファルト性遮水シートを用いた小段排水溝は有効であると言える。

4. のり面こう配と積雪深および凍結深さに関する検討

4.1 凍結深さを低減する対策

切土のり面が冬期の凍結、春期の融解により崩壊することを抑制する方法として、雪の断熱効果が期待できる。そこで、寒地土木研究所苫小牧施工試験フィールドにおいて、図-13に示す天端幅4~5m、高さ1.5m、こう配1:1.0、1:1.2、1:1.5、1:1.8、1:2.0の盛土を積雪が少なく雪の断熱効果の影響を最も受けにくい南向きに施工した。

盛土材料の凍上性は中位であり¹²⁾凍上性を排除できない。各盛土について、降雪期がある12月下旬から融解する3月まで積雪深を測定するとともに、気温および地表面から深さ方向に10cmごとに地中温度を測定した。

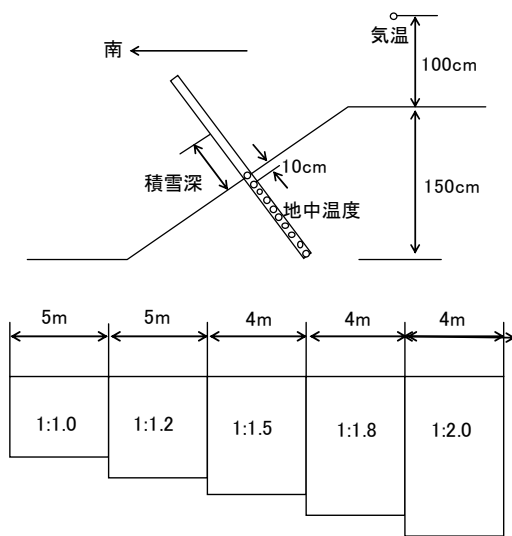


図-13 盛土の仕様および計器設置位置

4.2 のりこう配と積雪深

盛土の積雪深を図-14に示す。盛土箇所ののり面の積雪が観測されたのは、12月27日からであった。のりこう配が緩いほど積雪深が大きく、のりこう配が急なほど積雪した雪が融解するまでの時間は短かった。2月21日には、のりこう配1:1.0で積雪が0となり、3月1日ではのりこう配1:1.8、1:2.0以外ではのり面が露出している状態となった。

4.3 のりこう配と積雪深

盛土の凍結深さを積雪深とともに図-15に示す。図には、真冬日を「|」で示した。のりこう配1:1.0、1:1.2では、1月11日の計測まで積雪深が20cm未満でありのり面が凍結していた。その後、積雪深が大きくなると凍結深は10cm程度の一定を保ち、積雪深が30cm以下にな

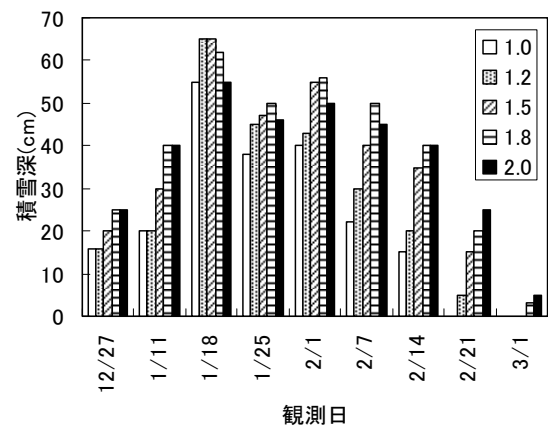


図-14 盛土の積雪深

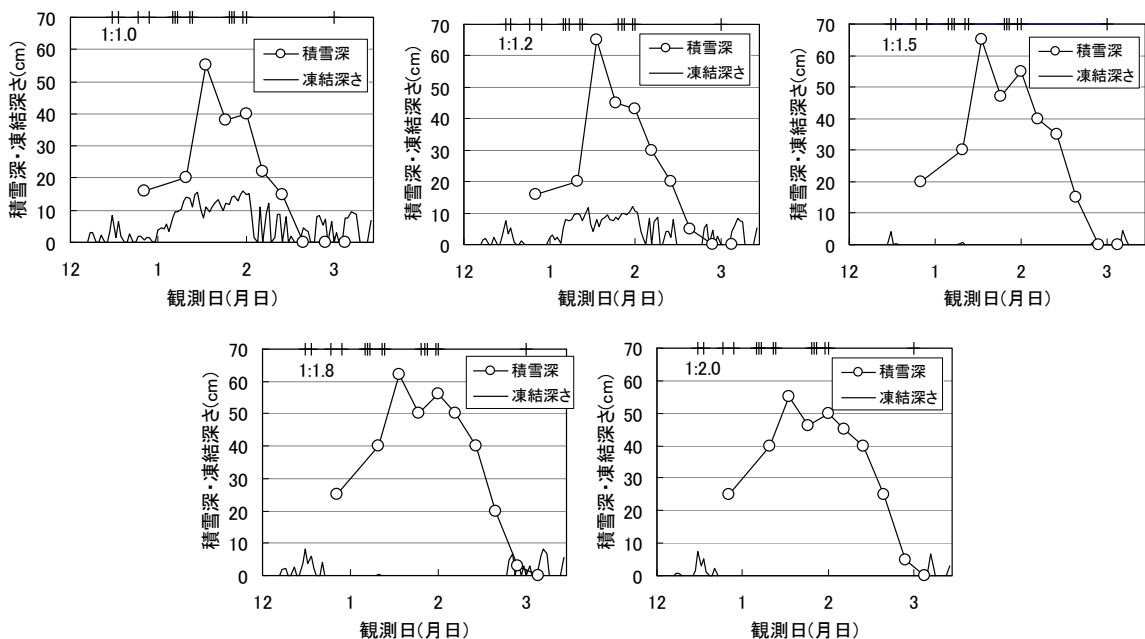


図-15 盛土の凍結深さ

ると凍結深が浅くなったり深くなったりを繰り返し、3月中旬に凍結深さが0となった。これに対し、のりこう配 1:1.5、1:1.8、1:2.0 では、12月中旬および3月上旬の積雪がない時期をのぞいて冬期間はほとんど凍結しなかった。これは、のり面が凍結する前に積雪深が大きくなり、雪が断熱材となったためと考えられる。一般に積雪深が 20cm 未満では地中の温度は気温の影響を受け地盤が凍結しやすくなる。積雪深が 20cm 以上になると雪の断熱効果が大きくなり、気温の影響を受けなくなり、凍結深はこれ以上大きくならない。文献 12 によると積雪が融解してくると、気温の影響を受けるとあるが、2月中旬以降も積雪深が大きいため、のり面は凍結しなかったものと考えられる。これより、のりこう配が 1:1.5 以下の緩こう配になるとのり面が凍結する前に積雪深が大きくなり、のり面の凍結抑制に効果があると考えられる。

また、各年度の積雪深が 20cm に達するまでの積算寒度と土谷らが提案した雪の下の最大凍結深さ¹³⁾を表-4 に示す。最大凍結深さの計算値は実測値より 1~2cm 小さいがほぼ一致している。この地域では、積算寒度(F_{20})が $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 以下であれば、のり面は凍結しなかった。なお同じ材料による盛土の凍結深さは、雪の影響を排除した状態で約 60cm¹⁴⁾(凍結指数 $600^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$)であり、雪の断熱効果は大きい。

4. 4 盛土の積雪深と凍結深さ

積雪があった場所について積雪深と凍結深の関係を求め図-16 に示す。図中点線で囲んだ箇所は凍結したあとに積雪が 20cm 以上になった箇所である。これをのぞくとおおむね積雪深が 20cm 以上になると凍結深さは 2cm 以下になり既往の報告¹⁵⁾と合致していた。

表-4 のりこう配と最大凍結深さ

こう配	積算寒度 $F_{20}(^{\circ}\text{C}\cdot\text{days})$	最大凍結深さ $D_{\text{max}}(\text{cm})$	
		計算値	実測値
1:1.0	32.08	14.0	16.0
1:1.2	19.32	10.9	12.2
1:1.5	0.98	2.5	4.4
1:1.8	7.52	6.8	8.3
1:2.0	4.11	5.0	7.5

$$D_{\text{max}} = \alpha \sqrt{F_{20}} \quad \alpha = 2.48$$

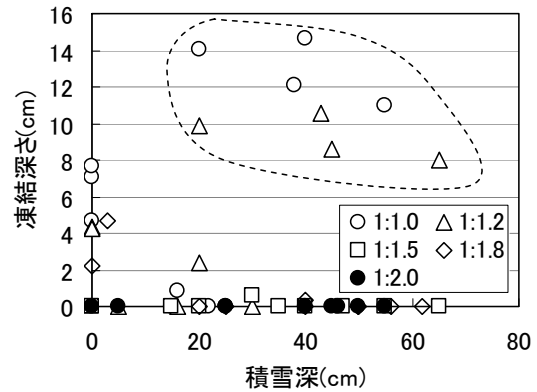


図-16 盛土の積雪深と凍結深さ

4. 5 のり面こう配と積雪深および凍結深さに関するまとめ

この計測結果より雪の断熱効果が期待できる積雪深は 20cm 程度であり、のり面が凍結する前にこれを確保できるのりこう配は 1:1.5 であるといえる。今後は、のり面の向き、植生の有無に関する調査を実施する必要がある。

5. 凍上対策としての特殊ふとんかごの有効性の検討

5. 1 凍上による変状を抑制する効果

北海道では、凍上により被災した切土のり面の復旧対策として、特殊ふとんかご(図-17)により、のり面を覆う方法が施工される場合が多い。特殊ふとんかごには、透水性の高い礫材を詰めるので、春先の融雪水やのり面への湧水を排水できる機能があること、のり面の凍上性材料を非凍上性材料に置換できることから、凍上 2 要因のうちの水、土質の 2 つを排除でき、凍上を抑制する効果がある。さらに、凍上および凍結融解によるのり面の上下の変動に追随する構造になっているので、凍上および凍結融解の作用を受けても大きくのり面が被災することがないと考えられる。そこで、実際に切土のり面に特殊ふとんかごを設置し、地盤の凍結深さや凍上による特殊

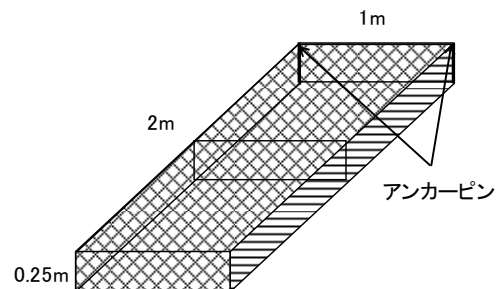


図-17 特殊ふとんかご

ふとんかごの変状について確認しその適用性を調べた。

北海道の3箇所(訓子府、昆布刈石、幌加内)に特殊ふとんかごを設置した。いずれも地山は、粘性土で背面からの湧水が多い箇所では10m程度の切土である。各箇所に標準的な厚さである25cm、これよりも薄い15cm、これよりも厚い35cmの特殊ふとんかごを設置した。かごの内部、および地盤内の温度とともに、かごを設置していない箇所の地中温度、地上から1mの位置の気温を測定した。また、特殊ふとんかごの変状として、かごの上下、中心部、長さアンカーピンの長さを測定した。

5.2 気温と地表面温度

特殊ふとんかご設置箇所の気温と厚さの異なる特殊ふとんかごの底面の温度として訓子府の例を図-18に示す。地盤気象庁のホームページ¹⁶⁾によると、特殊ふとんかご設置箇所に近い北見市では2010年は12月中旬から降雪が確認されている。降雪前の12月上旬くらいまでは気温と特殊ふとんかごの底面温度は、ほぼ同じであったが、雪が降り出した12月上旬ころから、気温よりもふとんかご底面の温度が高くなっていった。特殊ふとんかごの底面の温度は、厚さ15cm、25cm、35cmと厚くなるほど地表面の温度は高くなっている。他の昆布刈石、幌加内でも同様であった。

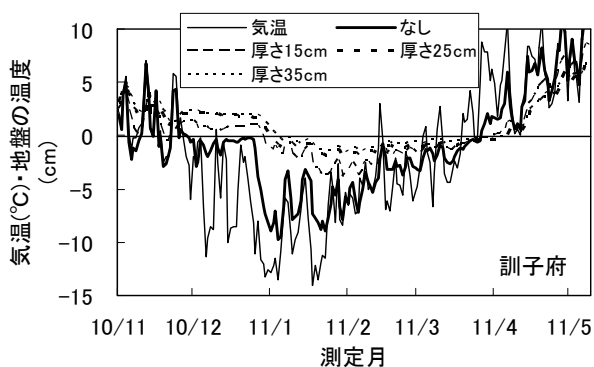


図-18 特殊ふとんかごを設置した箇所の気温と地表面温度

5.3 凍結深さ

特殊ふとんかご設置箇所の凍結深さとして訓子府の例を図-19に示す。特殊ふとんかごを設置していない箇所の凍結深さは2011年1月中旬から70cmで示しているが、センサーをこれ以上設置していないため、実際は、さらに大きな凍結深さであったと推測される。特殊ふとんかごを設置していなかった箇所では、図の傾向から見ると最も凍結深さが大きいと考えられる。訓子府では、特殊

ふとんかごの金網の内側に2重の張芝があり、5~6cm程度草の根を含んだ土で覆われていることから、植物の断熱効果により特殊ふとんかごを設置していない箇所よりも凍結深さが小さくなったものと考えられる。訓子府では、特殊ふとんかごの厚さが25cmで最も凍結深さが小さかった。昆布刈石でも同様な傾向が見られた。幌加内では、かごを設置しない箇所とかごの厚さが35cmで若干凍結したが、15cmと25cmでは凍結しなかった。幌加内は北海道内でも特に積雪が多い地域であることから、特殊ふとんかごを設置した箇所は、冬期間雪に覆われ、雪の断熱効果によりほとんど凍結しなかったものと思われる。

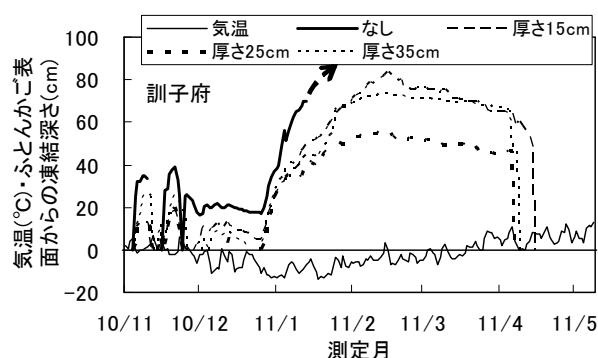


図-19 特殊ふとんかごの凍結深さ(訓子府)

次に、Aldrichによる修正 Berggren の式¹⁷⁾により地盤の凍結深さを計算し実測値と比較した(表-5)。地山の密度が不明であったため、地山材料を砂質土として計算した。凍結指数と凍結期間は実測値の平均とした。実測値は全ての箇所で特殊ふとんかごを設置する方が凍結深さは小さくなっていった。計算値では、特殊ふとんかごを設置することにより凍結深さが大きくなっている。ふとんかごの中の碎石の熱伝導率が高いためと考えられる。実測値では、全ての箇所で厚さが25cmの特殊ふとんかごの凍結深さが一番小さくなっていった。ふとんかご表面の凍結指数がふとんかごの厚さにより若干ではあるが異なっており、これが、凍結深さに影響したものと考えられる。計算では、地山の土質や密度をほとんど考慮していないため、実測値と精度の良い一致は見られなかったが、おおよその傾向が確認できた。

今回の計測では、特殊ふとんかごは、置換効果により、地盤の凍結を抑制できることがわかった。また、適当なかごの厚さは、15、25、35cmの中では、現行の仕様である25cmが妥当である。

表-5 計算値と実測値の凍結深さの比較

施工箇所	かごの厚さ (cm)	計算凍結 深さ(cm)	センサーによる実 測凍結深さ(cm)	凍結指数(°C・days)		凍結期間(日)	
				計算に使用	実測値	計算に使用	実測値
訓子府	0	45.0	70 以上	354.5	406	120.8	131
	15	48.7	68.6		383		129
	25	52.0	55.7		301		105
	35	55.7	73.4		328		118
昆布刈石	0	30.9	65	135.7	96	84.7	71
	15	36.5	55 以上		194		100
	25	39.0	55		117		83
	35	41.5	58		-		-
幌加内	0	5	20	6.4	1	10.3	3
	15	-	なし		14		14
	25	-	なし		0.7		2
	35	-	20		10		22

5. 4 のり面の凍結融解状況

地山および特殊ふとんかご設置箇所の地盤の中の凍結融解状況を図-20 に示す。訓子府で厚さ 35cm の特殊ふとんかごを設置した箇所である。気温がマイナスになるころから凍結融解をくり返し 12 月下旬から設置箇所は凍結した状態になる。その後気温が低下する 1 月下旬までは急激に凍結し、気温がマイナスの時期の凍結深さはあまり大きくなり、その後 3 月下旬までの 3 か月間は地山は凍結した状態となる。3 月下旬に気温の上昇とともに地表面から融解しはじめ、少し遅れて地盤の下方から融解しはじめる。凍結する速度より、融解する速度が大きい。融解時期に地盤中に凍結した部分が残る。

凍結した土砂がのり面の中に残された状態で、周辺からの雪解け水の流入や、降雨があると、凍結した土砂は水分を吸収しないので、凍結した土砂の周辺に水がたまりやすくなり、のり面が崩壊する危険性があると考えられる。

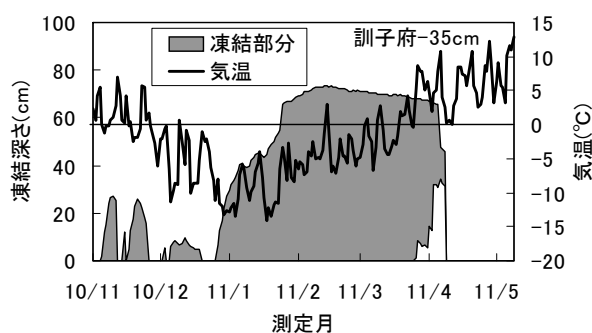


図-20 特殊ふとんかごの凍結融解状況

5. 5 特殊ふとんかごの形状変化

特殊ふとんかごを設置した箇所が凍結・凍上するとアンカーピンが抜け上がる現象や、形状が変化する場合がある¹⁸⁾。そこで、設置した箇所ではかごの形状変化を確認した。また、設置した箇所においてそれぞれの特殊ふとんかごの幅と長さおよびアンカーピンの金網からの位置を測定した。図-21 にそれぞれの測定結果を示す。かごの幅は上段と下段で若干大きくなる傾向にあるが、変化の量が小さい。かごの長さは幅の変化よりも大きい、一定の傾向は見られない。また、アンカーピンは測定値では、多少高さが変化しているが一定の変化は認められない。施工から 1 年が経過した状態では変状というよりは測定誤差の範囲に入るような測定値であり、今後の状況を確認したい。

5. 6 特殊ふとんかごに関するまとめ

特殊ふとんかごに関する実験結果により次のことがわかった。

- ① 斜面に特殊ふとんかごを施工することにより、地表面の温度が高くなり、凍結深さが小さくなる。これより、特殊ふとんかごを設置すると、置換、排水の効果が期待でき、凍上に対する被害の抑制が可能となる。
- ② 凍上対策として特殊ふとんかごを設置する場合の適切な厚さがあり、今後のデータの蓄積と計算式により提案できる可能性がある。
- ③ 施工性や凍上抑制効果としてのかごの厚さは、現行の仕様が適切であるが、今後継続調査する必要がある。

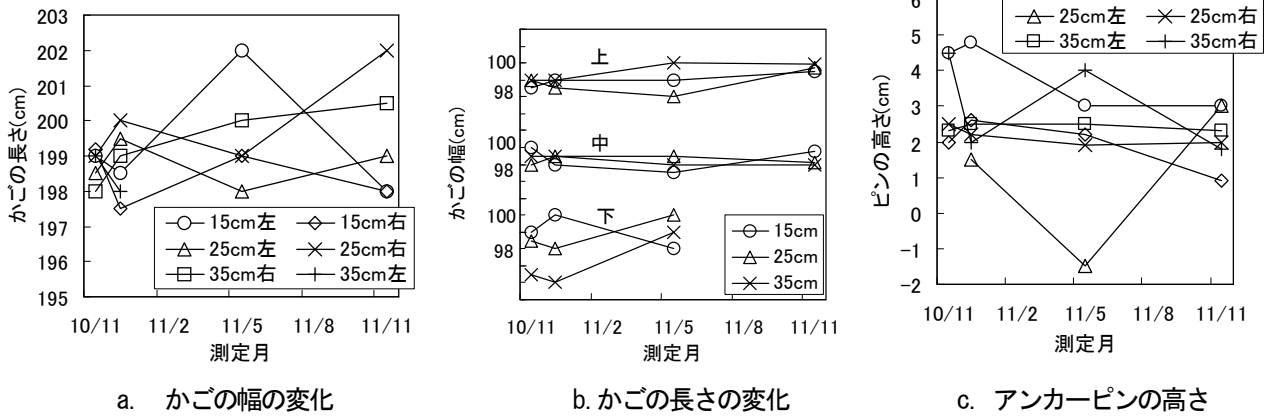


図-21 特殊ふとんかごの時間経過による変状

6. 植物と積雪によるのり面の断熱効果

道路のり面の凍上被害を軽減する手法として、植生や雪の断熱効果が有効であると考えられている¹⁹⁾。そこで、盛土のり面を張芝で緑化し、地表および地中の温度を測定し、植生無しの箇所と比較した。

6.1 試験方法

寒地土木研究所苫小牧施工試験フィールドにおいて、植生および積雪による断熱効果を確認するために、粘性土質礫質砂を用いて図-22 に示す試験盛土を構築し、東西南北の4方位の各のり面に、張芝と植生なしの区画を設置した。1区画は幅1m、長さ3.5mである。また、のり面の高さによる積雪の影響を確認するため、図-23 に示すように天端幅4m、高さ1.5m、こう配1:1.5の盛土を南向きに施工し、図-22 の南向きのり面と比較した。盛土材料は、明確な最大乾燥密度を得ることのできない火山灰質土で、トラフィカビリティ試験によるコーン指数が3000kN/m²以上の施工性が良好な材料である。凍上性は中位であり²⁰⁾凍上性を排除できない。それぞれの区画の中心部の地表面、地表面から10cmごとに深さ90cmまで、銅コンスタンタン熱電対を設置し1時ごとに温度を自動計測した。各のり面について、降雪がある12月上旬から融解する3月まで積雪深を測定した。積雪深は、1週間に1回、人力であらかじめ盛土のり面に垂直に設置した板の目盛りより測定した。各盛土の条件と測定項目を表-6に示す。なお、雪氷部門では重力方向の雪の深さを積雪深と表現するが、のり面の凍結は図-23 に示すようにのり面に垂直な方向を積雪深とした。

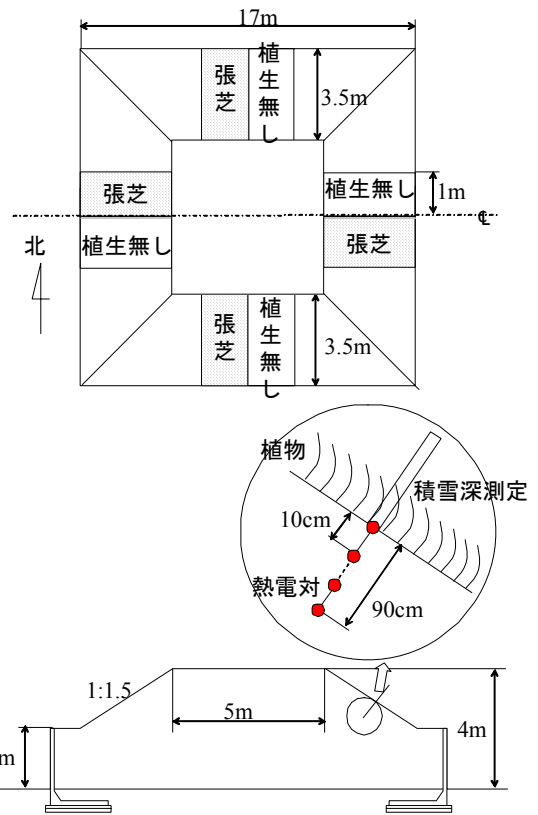


図-22 No.1~4 のり面の仕様および計器設置位置

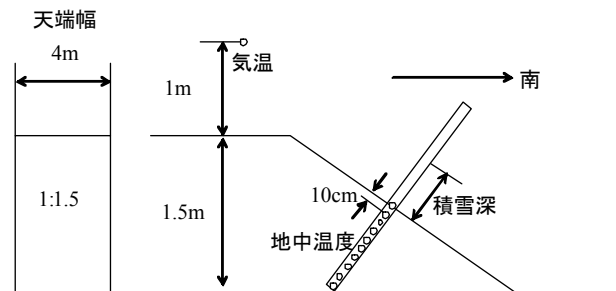


図-23 No.5 盛土の仕様および計器設置位置

表-6 盛土条件と測定項目

盛土No.	1	2	3	4	5
のり面の向き	北	東	南	西	南
のり尻の高さ(m)	2	2	2	2	0
盛土の土質	粘性土質礫質砂			火山灰質土	
凍上性	-			中位	
温度	熱電対(測定間隔1時間)				
積雪深	定規(測定間隔1週間)				

6. 2 試験結果

6. 2. 1 のり尻の高さ2m 盛土ののり面の向きと積雪深

盛土の積雪深を図-24に示す。2010年12月27日に盛土箇所へののり面の積雪を確認した。試験を行った地点に近い苫小牧のアメダスデータ²¹⁾によれば、2010年12月23日からの降雪が2011年3月6日まで融解することなく積もっていた。測定箇所では、積雪の観測日である2010年12月27日より早い段階で積雪があったと思われる。写真-5には2010年12月27日の積雪状況を示す。

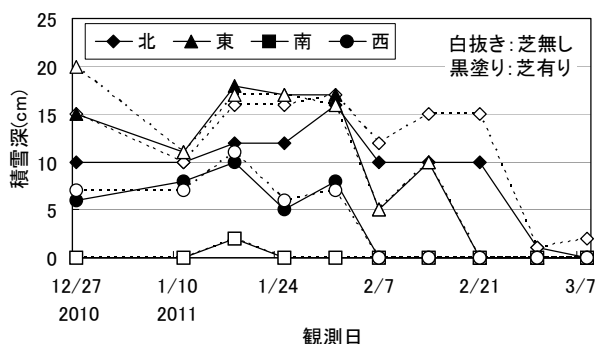


図-24 のり面の向きと積雪深



北向きのり面

東向きのり面



南向きのり面

西向きのり面

写真-5 のり面の積雪状態(12月27日)

東、北、西、南の順に積雪量は小さくなっている。苫小牧のアメダスデータでは、2010年12月23日から2010年12月26日の風向は南西方向であったことから、風下となる東向きおよび北向きのり面の積雪が大きくなったものと思われる。過去のデータ²²⁾によれば、この箇所では、北、東、西、南の順に日射量が大きかった。今回も同様な日射量であったと考え、北向きのり面で積雪量が多く、南向きのり面の積雪量が小さくなる。

北向き以外では、芝の有無にかかわらず積雪深は同じ値であったが、北向きでは芝がない方が、芝のある方よりも積雪深が大きくなった。

6. 2. 2 のり尻の高さ2m 盛土の測定箇所の凍結指数

測定箇所における気温と地表面の凍結指数を表-7に示す。気温の凍結指数は、南、東、西、北向きの順に大きく、東向きと西向きはほぼ同程度であった。苫小牧地方の凍結指数²³⁾は、10年確率で370°C・day、20年確率で410°C・dayであるが、これより少し小さい。

地表面の凍結指数は、気温の凍結指数の1/3から1/8であった。これは積雪による断熱効果によるものと考えられる。また、すべてののり面の向きで芝ありの方が芝なしよりも凍結指数は大きかった。特に、北向きのり面の地表面の凍結指数は、芝の有無で大きく異なり、芝ありで最大となった。図-24では、北向きのり面の芝なしで測定開始日に15cmの積雪深があり、その後も気温が低い時期である2月下旬まで15cmの積雪があった。このため、北向き芝なしの凍結指数が非常に低くなったと考えられ、積雪量が凍結指数に大きく影響したと言える。

表-7 測定箇所の凍結指数

方向	芝	気温	地表面
北	あり	352.5	137.1
	なし		13.8
東	あり	325.2	39.8
	なし		22.7
南	あり	308.9	50.4
	なし		48.5
西	あり	332.9	56.6
	なし		50.0

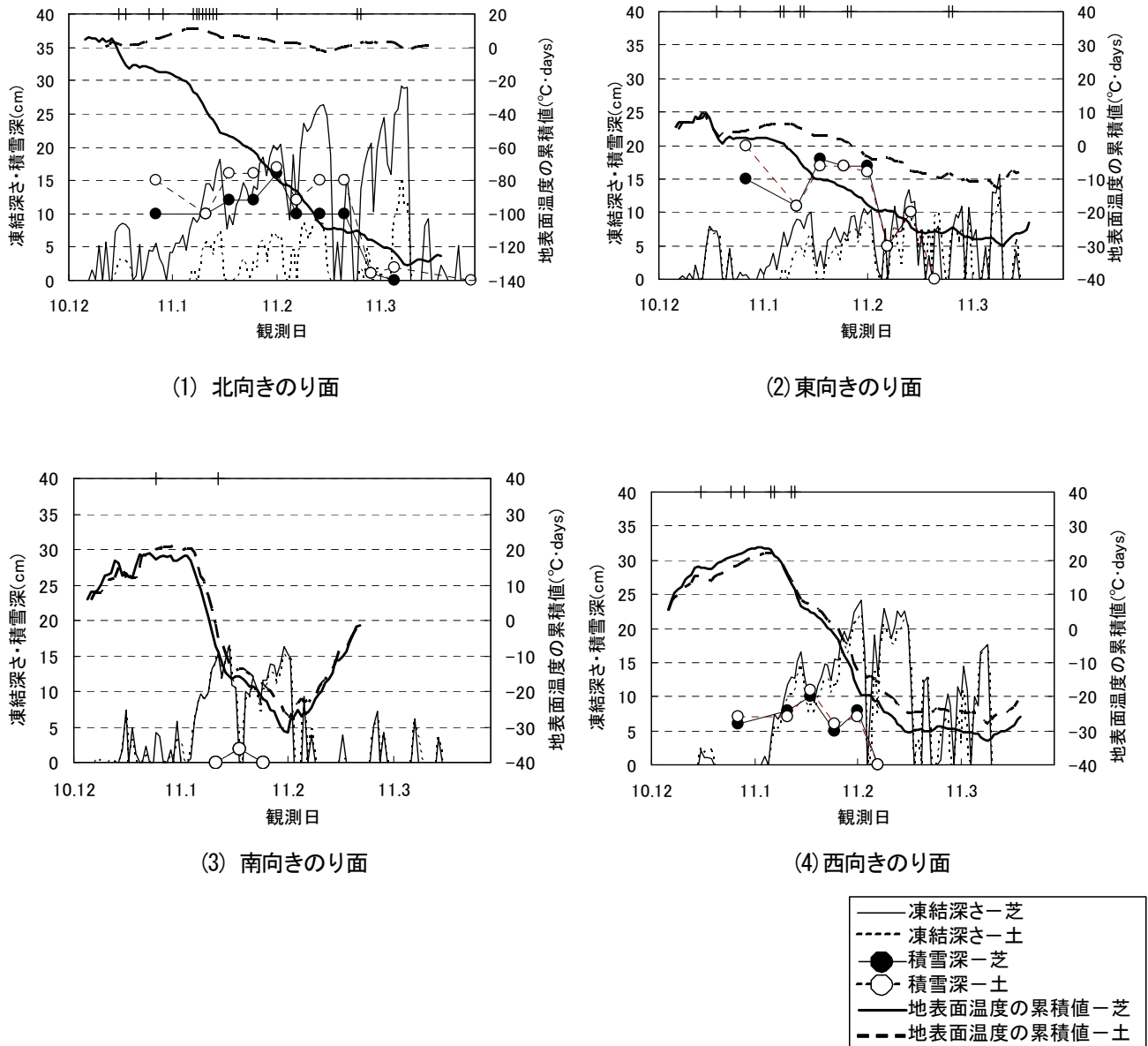


図-25 のり面の向きと凍結深さおよび積雪深

6. 2. 3 のり戻の高さ2m 盛土の凍結深さ

各方向の盛土の凍結深さを積雪深、地表面温度の累計値とともに図-25 に示す。図には真冬日を「|」で示した。南、東、西、北向きの順で凍結深さは大きくなっている。南向き、西向きのり面では、芝の有無に関わらず、地表面温度の累計値、凍結深さおよび積雪深はほぼ等しい。北向きのり面と東向きのり面では凍結深さと積雪深はいずれも芝ありの方が芝なしよりも大きくなっている。

北向きのり面では、芝ありでは、苫小牧のアメダスデータによる降雪開始日である2010年12月23日にすでに5cm程度凍結しており、その後、積雪量が10cm程度であった時に急激に気温が低下し、凍結深が大きくなった

ものと思われる。芝なしでは、2010年12月23日の時点では地盤は凍結しておらず、その後芝ありよりも5cm多い15cmの積雪量であったことから、芝ありほど凍結が進まなかったものと思われる。

他のり面では、凍結深さと積雪深は、芝ありと芝なしでほぼ同じであった。

以上より、今回の箇所では、のり面の凍結深さは芝の有無の影響はほとんどなく、積雪の時期や積雪量が大きく影響したと言える。今回の観測では、芝による堆雪効果が確認できなかった。



高さが2mののり面 高さが0mののり面
写真-6 高さの異なるのり面の積雪状態(12月27日)

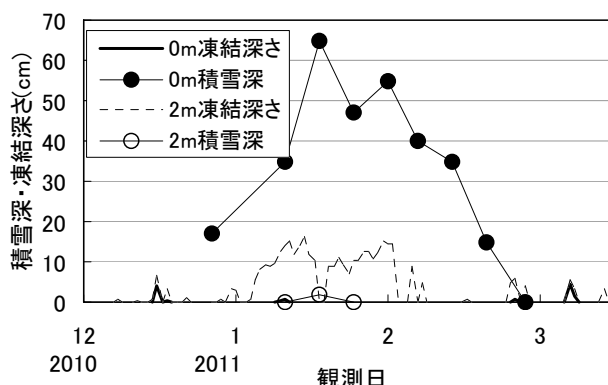


図-26 のり面の高さ(0mと2m)と積雪深および凍結深さ

6. 2. 4 のり面の高さ(0mと2m)と積雪深および凍結深さ

南向きのり面で、盛土のり尻の高さが0mと2mの場合について積雪深と凍結深の関係性を求め図-26に示す。

写真-6には2010年12月27日ののり面の積雪状態を示す。のり面の高さが高い2mののり面では、冬期間ほとんど積雪が確認されなかったのに対し、のり面の高さが低い0mののり面では、積雪の観測日である2010年12月27日から2月中旬の厳冬期間20cmまで程度以上の積雪があった。風は地面の摩擦を受けるため、一般的に上空では強く地表に近づくにつれて弱くなるとされている⁹⁾ことから、のり面の高さが高い2mののり面では、厳冬期間には15cm程度の凍結深さであった。一方、のり面の高さが低い0mののり面では、積雪が確認される前および融解後に5cm程度の凍結深さがあったが、厳冬期間にはほとんど地盤は凍結しなかった。このことから、のり面の高さが低いと積雪深は大きくなって凍結深さが小さくなり、のり面の高さが高いと積雪深は小さくなって凍結深さが大きくなると言える。

6. 3 植物と積雪によるのり面の断熱効果のまとめ

今回の測定箇所では、植物と積雪によるのり面の断熱効果の測定結果より、次のことがわかった。

- ① 積雪による断熱効果により、地表面の凍結指数は、気温の凍結指数の1/3から1/8である。

- ② のり面の凍結深さは芝の有無より積雪の時期や積雪量が大きく影響する。
- ③ のり尻の高さが低いと積雪深は大きくなって凍結深さが小さくなり、のり尻の高が高いと積雪深は小さくなって凍結深さが大きくなる。

7. まとめ

凍上および凍結融解に耐久性のある道路のり面構造について、現場計測とその解析を行った結果を次にまとめる。

- ① 切土のり面の小段では、山側、中間、谷側の順に凍結深さは深くなり、凍結深さが深いほど、凍上量が多くなることから、凍上量も多くなる。
- ② 切土のり面の小段で凍上が起こる場合、凍結進行期に非対称な地盤の凍結により、U型トラフの側面に凍上力が作用し、U型トラフは山側に傾く。
- ③ アスファルト性遮水シートや縦断暗渠管による小段排水溝は、U型トラフに比べ、最大凍結深さ、凍上量を抑制することができ、排水溝自体に作用する不均一な凍上力の影響が少ないと言える。
- ④ 雪の断熱効果が期待できる積雪深は20cm程度以上であり、のり面のこう配が1:1.5より緩くなると積雪深が大きくなり、のり面の凍結抑制の効果を期待できる。
- ⑤ 斜面に特殊ふとんかごを施工することにより、置換、断熱の効果が期待でき、凍上に対する被害の抑制が可能となる。凍上対策としての特殊ふとんかごには適当な厚さがあり、今後のデータの蓄積と計算式により提案できる可能性がある。

8. 今後の課題

今回の研究による切土のり面の小段排水溝に及ぼす凍上力の影響評価から、小段排水溝の凍上被害を回避するためには、材料のフレキシブル性に加え、断面構造の平坦性が重要であることがわかった。今後は、平坦性のある構造を用いた小段排水溝の長期に渡る凍上の影響を確認するために、凍上被害の経年的な調査が必要である。また、他ののり面構造物においても同様の解析を行えば、各のり面構造物に及ぼす凍上力の影響を評価できると考えられるので、今後、実際に凍上被害を受けているのり面構造物についても、検討する必要がある。

また、のり面の向き、植生の有無と凍上の関係を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工要綱、p.200、2009.
- 2) (社)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、p.14、2010.
- 3) (社)地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p.83、2009.
- 4) (社)日本道路協会：切土工・斜面安定工指針、p.172、2009.
- 5) 外塚信、豊田邦男、水野津与志、佐藤幸久、萬隆：寒冷地における切土のり面小段工の凍上対策に関する検討、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第46号、pp.291-296、2006.
- 6) (社)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、p.4、2010.
- 7) 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.
- 8) (社)土質工学会：土の凍結、pp.116-117、1994.
- 9) (社)日本道路協会：道路土工要綱、pp.382-383、2009.
- 10) (社)地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p.35、2009.
- 11) (社)地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p.38、48、2009.
- 12) (社)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、p.14、2010.
- 13) 土谷富士夫：気候変動が土の凍結深さ及びその特性に及ぼす影響、土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム、地盤工学会、2001.10
- 14) 渡邊栄司、西本聡、泉澤大樹：実験土槽を用いた屋外凍上試験について、北海道開発土木研究所月報№616号、2004.9
- 15) 地盤工学会：土の凍結—その理論と実際—、1994.6
- 16) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 17) 日本道路協会：道路土工要綱(平成21年度版)、2009.6
- 18) 地盤工学会北海道支部：斜面の凍上被害と対策のガイドライン、2010
- 19) 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—、地盤工学会北海道支部、2009.12
- 20) 地盤工学会：凍上量測定のための凍上試験方法、凍上性判定のための凍上試験方法、地盤材料試験の方法と解説、pp.226-258、2009.11
- 21) 気象庁：過去の気象データ検索、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 22) 佐藤厚子、西本 聡、鈴木輝之、中村 大：植物によるのり面の断熱効果、第65回年次学術講演会、2010.9
- 23) 日本道路協会：道路土工要綱、p.383、2009.6
- 24) 気象庁：設置高さによる風速の変化、
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/c2.htm#高さによる風速変化

A STUDY ON ROAD SLOPE STRUCTURES RESISTANT TO FROST HEAVING AND FREEZE-THAW ACTION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2008-2011

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

Author : NISHIMOTO Satoshi

SATO Atsuko

ADACHI Takayuki

YAMADA Mitsuru

Abstract : There is concern about the safety of road slopes in cold regions since repeated frost heaving and frost-thaw action in winter loosen the surface layer and often cause landslides in the spring thawing season. In addition, drainage facilities, crib works and other road slope structures need to be repaired yearly as they are deformed due to frost heaving. Therefore, road slope structures suited to cold regions and low-cost slope stabilization measures are required.

This study identifies the mechanism of frost heaving damage to road slopes and slope structures, and presents measures against frost heaving on road slopes and slope structures/greening suitable for cold regions.

Key words : slope, frost heaving, frost penetration depth, frost heaving force