平成22年度

凍上被害を回避する切土小段排水の検討と凍上メカニズムについて

寒地土木研究所　寒地地盤チーム　○安達　隆征
西本　聡
佐藤　厚子

近年、切土小段排水の破損被害が特に「低温・少雪」の地域で見られる。寒冷地での切土小段排水の破損の多くは、凍上や凍結融解が原因であることが考えられるが、指針や要領などでの取り扱いが確立されていないため、十分な対応ができていない状況である[1)]。

そこで、新たな排水構造を用いて切土小段排水の凍上被害を防ぐことを試みると共に、切土小段の凍上メカニズムについて明らかにした。

キーワード：凍上、切土小段排水、凍結深さ

１．はじめに

凍上被害を防ぐためのアプローチとしては２つ考えられ、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要素がある条件を満たしたときに起こる。言い換えれば、この３要素のうちのひとつでも欠くことができれば、凍上は起こらない[2)]。この中で最も現実的なのが、水を排除することである。そこで、湧水処理の機能を有した切土小段排水構造（縦断暗渠型）を検討し、試験施工を実施した。

もうひとつのアプローチは凍上が起きても、その被害を最小限に食い止めるということである。これは凍上による圧力（凍上力）を受けてもフレキシブルに変形し、かつ、排水機能を保てるものでなくてはならない。切土小段排水にはコンクリート製品が使用されている[3)]が、フレキシブル性に乏しいので、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。そこで、コンクリート製品を使用しない小段排水構造（アスファルト性遮水シート型）を検討し、試験施工を実施した。これらの小段排水構造と従来のコンクリート小段排水の凍上メカニズムを把握するために、試験施工を行い、目視観測や計器測定を行った。

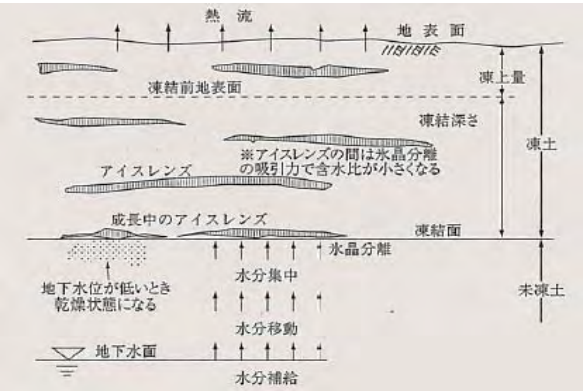


図-１　地盤の凍上機構[4)]

本報告は、目視観測結果と計器測定結果から、切土小段の凍上メカニズムについて報告するものである。

写真-１　切土小段の凍上被害（コンクリートシールあり）
U型トラフが山側に傾き、コンクリートシールが破損している。

写真-２　切土小段の凍上被害（コンクリートシールなし）
U型トラフが山側に傾き、ズレが生じている。

Takayuki Adachi,Satoshi Nishimoto,Atsuko Satou

２．凍上のメカニズムと地域性

（１）　凍上のメカニズム

切土小段排水の凍上被害状況を**写真−１、２**に示す。

地盤中の凍上メカニズムは、**図−１**のように説明できる。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℃等温面）ができる。そのとき、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は氷晶分離、形成された氷の層はアイスレンズと呼ばれる。このような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のメカニズムである。

以上のように、アイスレンズの形成が凍上発生の機構そのものであるが、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[4]。

（２）　凍上被害の地域性と分布

図−２は、道内各地の主要な気象特性[5]、**表−１**は、試験施工箇所のｎ年確率凍結指数[6]を示している。積雪寒冷地域における凍上発生の特徴は、「低温･少雪」で多くの発生が見られるが、「低温・多雪」では少ない傾向にある。これは､凍上発生条件に積雪が密接に作用していると考えられるためである。その理由は､積雪は空気をたくさん包み込んでいることで断熱材の役割を果たし､凍上の３要素のうちの「気温」を抑制することで、凍上の発生が抑えられているからである。

３．試験施工の概要

切土小段の凍上メカニズムの解明と、凍上被害を軽減できる構造を確立するために、道内５箇所で切土小段排水を試験施工し、凍上量測定器と地中温度計を設置した。

（１）　試験施工設置箇所

図−２に試験施工箇所を示す。H20年度に、「高温・中雪」の北斗、「高温・少雪」の日高、「低温・多雪」の留萌の３箇所、H21 年度に、「低温・少雪」の訓子府、陸別の２箇所に設置した。

（２）　試験施工断面

従来のＵ型トラフに加え、２種類の新たな断面で試験施工を行った。**表−２**にそれぞれの断面図と設置状況を示す。

①縦断暗渠型小段排水

水処理によるアプローチとして、法面からの湧水と降雨や融雪水による表面水を縦断暗渠管で処理する。

②アスファルト性遮水シート型小段排水

凍上被害を回避するアプローチとして、凍上被害を受けづらいフレキシブル性のあるアスファルト性遮水シートを表面水処理として用いる。

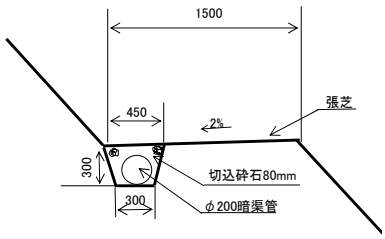
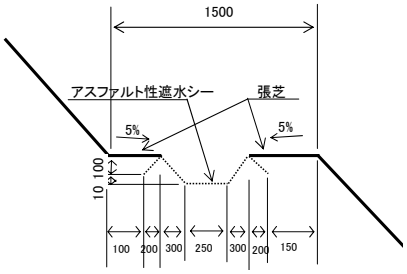
図−２　道内各地の主要な気象特性と試験施工箇所
（文献５の図に加筆）

表−１　試験施工箇所のｎ年確率凍結指数[6] (℃･day)

	n年確率凍結指数		気象特性
	n=10	n=20	
北斗(函館)	340	400	高温･中雪
留萌	520	570	低温･多雪
日高	640	710	高温･少雪
訓子府(北見)	1010	1080	低温･少雪
陸別	1250	1320	低温･少雪

表−２　切土小段の試験施工断面図と設置

数字の単位はmm

縦断暗渠型	アスファルト性遮水シート型
	

Takayuki Adachi,Satoshi Nishimoto,Atsuko Satou

（３）　調査方法

切土小段の凍上メカニズムを解明するために、目視観測と計器測定を行った。

①目視観測調査

２冬期経過した北斗、日高、留萌に関して、小段の変状、排水機能、植生状況を調査した。

②計器測定調査

表−３に各試験施工箇所における計器設置箇所を示す。地中温度計は訓子府、陸別の２箇所で設置した。

・地中温度計

凍上のメカニズムを知るためには、凍結面の挙動を把握する必要がある。それは図−1 で説明したように、凍結面の位置(凍結深)は、アイスレンズの発生と密接な関わりがあるためである。凍結面は地盤中の温度が０℃となる点を結んだ面のことをいい、地中温度計で自動観測により求める。

・凍上量測定器

凍結深と凍上量の関係を把握するため、凍上量測定器により、凍上量を測定する。

写真−３は、凍上量測定器と地中温度計の設置状況である。また、表−４は計器の設置位置を示している。

地中温度計（表−４の赤い箇所）は、縦断暗渠型、アスファルト性遮水シート型、U型トラフのそれぞれに、谷側、中間、山側の３箇所設置した。

凍上量測定器（表−４の青い箇所）は、縦断暗渠型では谷側に１箇所、アスファルト性遮水シート型、U型トラフでは、谷側と山側に２箇所設置した。

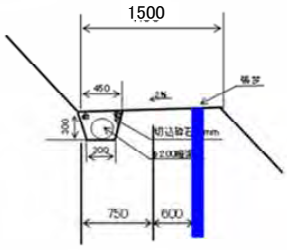
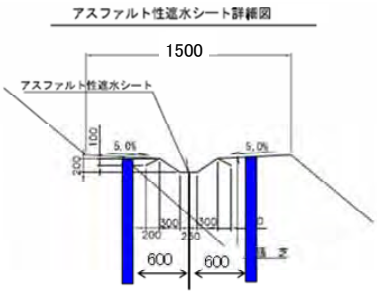
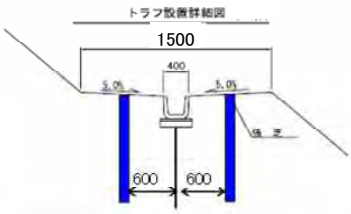
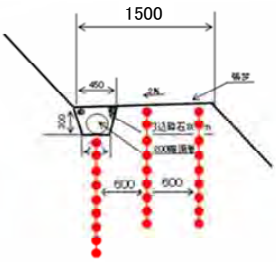
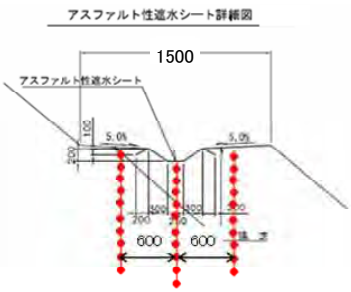
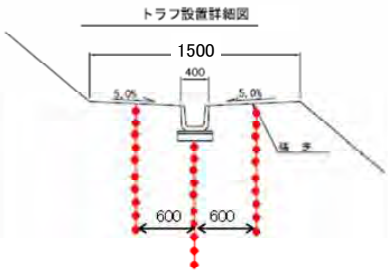
写真−３　計器設置状況

表−３　計器設置箇所

箇所	施工年度	縦断暗渠型		アスファルト性遮水シート型		U型トラフ	
		凍上量計測	地中温度計測	凍上量計測	地中温度計測	凍上量計測	地中温度計測
北斗	20	○		○			
日高	20	○		○		○	
留萌	20	○		○		○	
訓子府	21	○	○	○	○	○	○
陸別	21	○	○	○	○	○	○

表−４　計器設置位置

数字の単位はmm

	縦断暗渠型	アスファルト性遮水シート型	U型トラフ
凍上量測定器			
地中温度計			

Takayuki Adachi,Satoshi Nishimoto,Atsuko Satou

表-５　目視観測結果（２冬期経過後）

	縦断暗渠型			アスファルト性遮水シート型			U型トラフ		
	小段変状	排水機能	植生状況	小段変状	排水機能	植生状況	小段変状	排水機能	植生状況
北斗	なし	良好	良好	なし	良好	良好	なし	良好	良好
日高	なし	良好	良好	なし	良好	良好	なし	良好	良好
留萌	なし	良好	良好	なし	良好	良好	なし	良好	良好

写真-４　２冬期経過後のアスファルト性遮水シート型

写真-５　２冬期経過後の縦断暗渠型

４．試験結果と考察

（１）　目視観測

２冬期経過した北斗、日高、留萌の目視観測結果を**表-５**に示す。また、アスファルト性遮水シート型の２冬期経過後の状況を**写真-４**に、縦断暗渠型の２冬期経過後の状況を**写真-５**示す。いずれも、小段の変状はなく、排水機能と植生の繁茂状況は良好であったが、後述するように、北斗、日高、留萌では、２冬期ともほとんど凍上は発生しなかったため、凍上に対する効果は明らかにできなかった。しかしながら、縦断暗渠型やアスファルト性遮水シート型も、U型トラフに代わって、切土小段排水としての機能を保てることがわかった。

（２）　地中温度計測

図-３に「低温・少雪」の訓子府、陸別における地中温度計測結果から求めた凍結深の推移を示す。**図-４**に凍結深を結んだ凍結面の推移を示す。
なお、凍結深は小段面を０としている。
これらの図から次のことが言える。
①山側、中間、谷側の順に凍結深は深くなる。
　法面から寒気が入るため、谷側に近づくにつれ、凍結深が深くなるものと

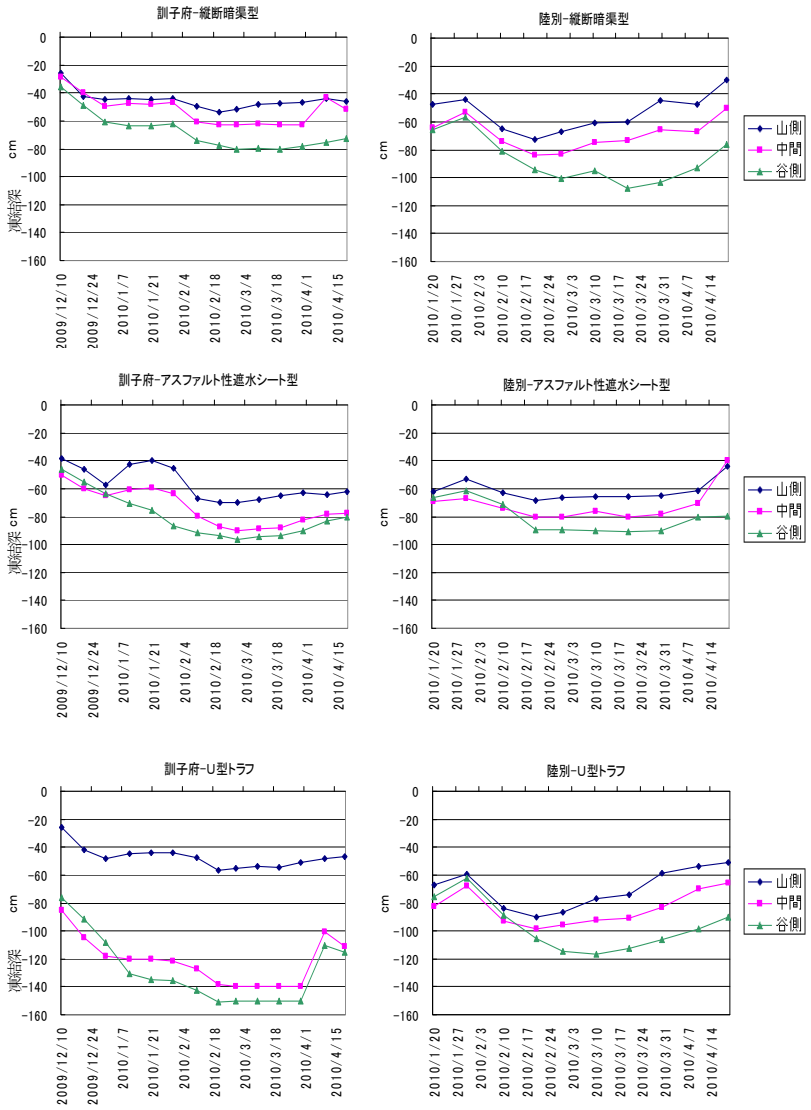


図-３　凍結深の推移

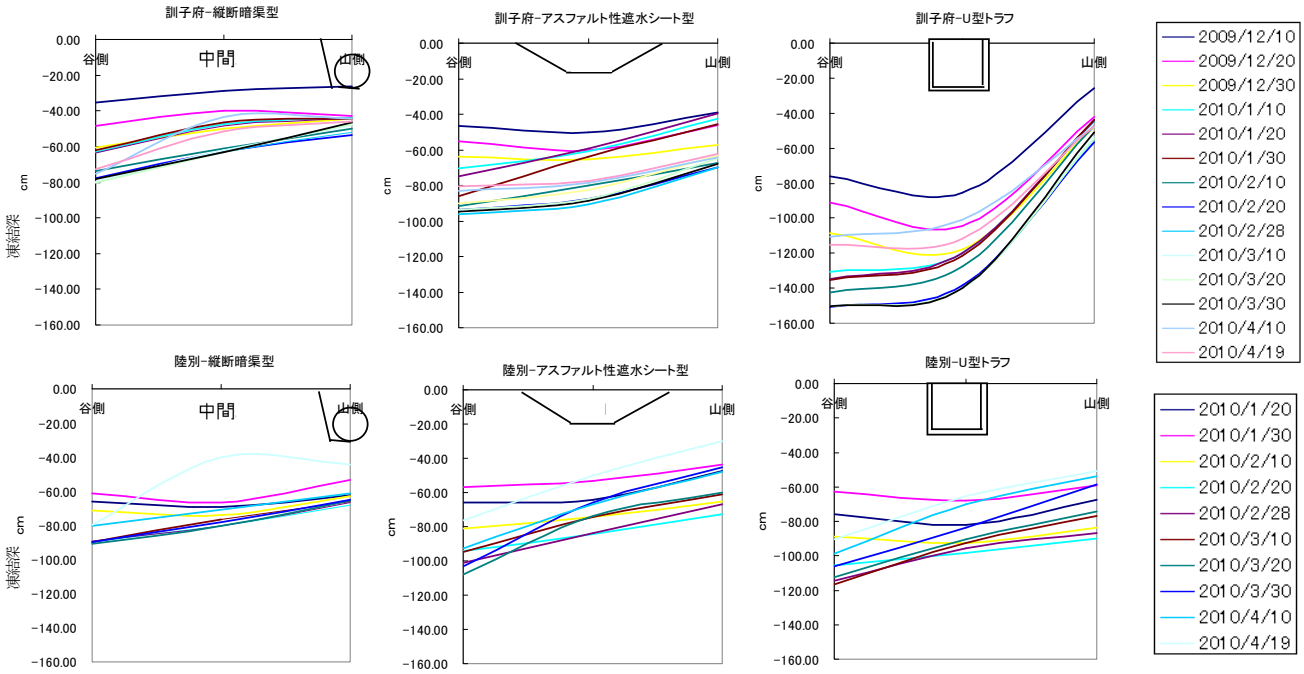


図-4　凍結面の推移

考えられる。

ただし、U型トラフやアスファルト性遮水シート型の初期段階においては、谷側より中間のほうが凍結深が深くなる。これは中間にある排水部から寒気が入るためだと思われる。初期段階ではこのような現象が起こるが、一定の深さまで凍結深が下がると、山側、中間、谷側の順に凍結深は深くなる。

②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、凍結深が浅くなる。最大凍結深で 34～53%減となった。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。

（3）　凍上量計測

「高温・中雪」の北斗、「高温・少雪」の日高、「低温・多雪」の留萌では、凍上量は微量で、凍上はほとんど起こらなかった。

一方、「低温・少雪」の訓子府では、**図-5**に示す凍上量測定結果が現れた。また、陸別は設置時期が工事工程の関係から厳寒期であったため、設置時期にはすでに凍上が起こっていたと思われ、正確な凍上量を求めることができなかった。

図-5の結果から、次のことが言える。

①谷側は山側に比べ、凍上量が多くなる。法面から入る寒気の影響であると推測される。

②U型トラフは、アスファルト性遮断シート型や縦断暗渠型に比べ、凍上量が多くなる。U型トラフ内空から入る寒気の影響であると推測される。

③凍上量は凍結深と同じ挙動を示し、凍結深が深いほど、凍上量が多くなることがわかる。

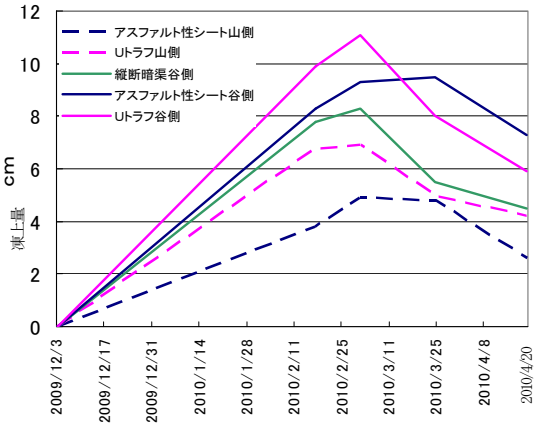


図-5　凍上量の推移(訓子府)

以上のことから、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、凍上による影響が少ないと思われる。

5．切土小段の凍上メカニズムについて

以上の試験結果から、切土小段の凍結深と凍上量の関係がわかった。そこで、切土小段のU型トラフにおいて、凍上被害のメカニズムを推測した(**図-6**)。

①凍結前

気温が下がると寒気が入り込む。特にコンクリートトラフやコンクリートシールは熱伝導率が高いため、寒気が入り易い。

②凍結進行時

寒気が地中に入ると、凍結面を形成する。凍結面付近では、地中の水分がアイスレンズを形成する。アイスレ

ンズが成長し、発生させる力(凍上力)は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。

凍結進行時では、谷側は山側に比べ凍結面が深くなる。これは、谷側法面からの寒気の影響が大きいためである。アイスレンズは凍結面に平行して成長していくため、このときのトラフに作用する力は，凍結面に垂直に働き、図に示すベクトル方向となる。一方、山側は凍結面が浅いためにアイスレンズの発生は少なく、トラフに作用する力は小さい。

③最大凍結時

②凍結進行時のトラフに作用する力から、トラフは山側に傾く変位現象が起きる。

最大凍結時に向かうにつれ、山側も谷側と同様にアイスレンズが発生し、地盤を押し上げコンクリートシール変位与える。このときが、最大凍上量となり、地盤の最大変位量となる。

④融解後

春先の融雪時期に入ると、地表面から徐々にアイスレンズは溶け、小段全体が脆弱化する。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、自重により垂直に下がろうとする。したがって、コンクリートトラフやコンクリートシールは完全に元の位置に戻らず、そのまま山側に傾きを伴ってしまう。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、切土小段で凍上が起こる場合、U型トラフは山側に傾くことがわかった。このことは、**写真-１、２**が裏付けている。

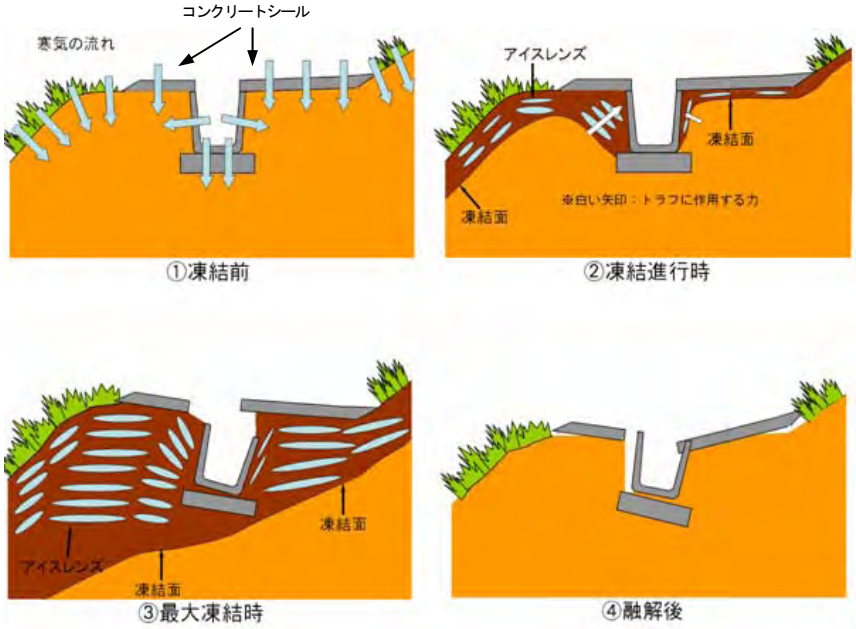


図-６　切土小段におけるU型トラフの凍上被害メカニズム

６．まとめ

切土小段排水の目視観測結果、計器計測結果から以下のことがわかった。

①縦断暗渠型やアスファルト性遮水シート型は、切土小段排水としての機能を保てる。

②切土小段では、山側、中間、谷側の順に凍結深は深くなり、凍上量も多くなる。

③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、凍結深が浅くなり、凍上量が軽減される。

④凍結深が深いほど、凍上量が多くなる。

⑤切土小段で凍上が起こる場合、U型トラフは山側に傾く。

７．今後の課題

今回の試験結果で、アスファルト性遮水シート型や縦断暗渠型は、切土小段排水としての役割を果たすことがわかった。しかし、実際に凍上に追随することが可能かどうかについては、調査を継続する必要がある。

８．おわりに

今回の研究で、切土小段の凍上メカニズムがある程度解明できた。凍上対策としては、まだ課題はあるが、耐凍上性のある切土小段の計画や設計の参考になれば幸いである。

最後に、現場試験施工に協力して頂いた、現場施工に携わる北海道開発局の職員などの皆様に深く感謝の意を表したい。

参考文献

１）(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.

２）(社)地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学、p. 83、2009.

３）(社)日本道路協会：切土工・斜面安定工指針、p. 172、2009.

４）(社)日本道路協会：道路土工要綱、p. 200、2009.
(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.

５）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.

６）(社)日本道路協会：道路土工要綱、pp. 382-383、2009.