

地盤の熱的問題

7. 地盤の凍結と凍上

7.2 道路の凍上被害と対策

久保 宏 (くぼ ひろし)

北海道開発局開発土木研究所 所長

7.1 地盤の凍結と凍上のメカニズム

(4月号に掲載)

7.2.1 はじめに

寒冷地での舗装道路あるいは砂利道とそれに付帯するトンネル、擁壁、歩道、のり面などの土木構造物は、土や岩の中に発生する凍上現象によって時として大きな被害を受けることがある。土の凍上現象による道路の被害は、地域的には北海道全域と東北地方の青森県や岩手県などがその主なところとなるが、温暖な地域とされているところでも山岳地帯のように冬期間低温気象にさらされる地域では起こり得る現象である¹⁾。しかし、積雪地域において冬に除雪が全く行われない山岳道路では道路上の雪が一種の断熱材の役目を果たすので、寒気が地中に入りにくくなり凍上による被害はほとんど発生しない。したがって、歩道や自転車道の冬期間の除雪は完全には行われないことが多い。

道路の凍上は、路床土中に生じたアイスレンズ状の霜柱が寒気の入ってくる方向に成長することによって路面が隆起する現象と定義づけられている²⁾。土中の霜柱が冷却される方向に膨張することからトンネルの巻立て(側壁)は寒気の入るトンネルの中心軸方向に押し出され、巻立て部には水平方向の力が働くことになる。また、のり面の凍上はその面に垂直に生じてくる。凍上による道路の破壊形態としては路床土中の霜柱で生じた路面での凍上が道路の横断方向に不均一に発生し、ほぼ中央で最大となるために舗装道路のセンターラインに沿って縦断方向の大きな亀裂となって現れるのが一般的である。この凍上被害には、冬期間の道路の除雪形態と舗装の新設時の施工ジョイントが密接な関係をもっている。

道路の中央には舗装施工時にジョイントとなり、その水平方向の引張り強度が他の部分よりも小さくなるためである。

凍上現象による道路のもう1つの破壊形態としては、春期に地中の霜柱が融解することによって起こる路床・路盤支持力の低下が原因となるものである³⁾。砂利道においては噴泥現象を起こし交通途絶の原因となる。

これらの凍上現象に起因する道路の被害を防止するためには、凍上機構をよく理解し、それを支配する要素の土質、気温、土中水などについて十分な調査をする必要がある⁴⁾。特に、道路等の土木構造物の凍上対策を検討するとき、凍上を起こしやすい土まで凍結が達するかどうか、その深さを推定することが重要である。また、道路の付帯構造物にあってはその背面の地盤が凍上を起こしやすいものであるかどうかの検討が必要になる。その地域における寒さに基づく凍結深さの推定とその深さの土の凍上性の判断が凍上調査の重要なポイントになる。

凍上による道路の被害を防止する対策工法としては、置換工法、断熱工法、安定処理工法などが用いられてきたが、我が国の道路で主として用いられているものは、その経済性、施工性、信頼性などの面から冬期間に最大となる凍結深さの約7割を凍上を起こしにくい粒状材料で置き換える置換工法である⁵⁾。しかし、最近、良質な置換材料の入手が困難となってきたことから断熱工法などの特殊な対策工法も多く採用されるようになってきた。

寒さの厳しい地域の道路舗装の設計と施工に当たっては、既設舗装の凍上被害の実態と凍上に関する要素を十分に調査するとともに、道路舗装の厚さを決めるための基本となる凍結深さの算定と置き換えるべき材料の品質の吟味が不可欠となる。

講 座



写真-7.2.1 凍上による舗装のクラック

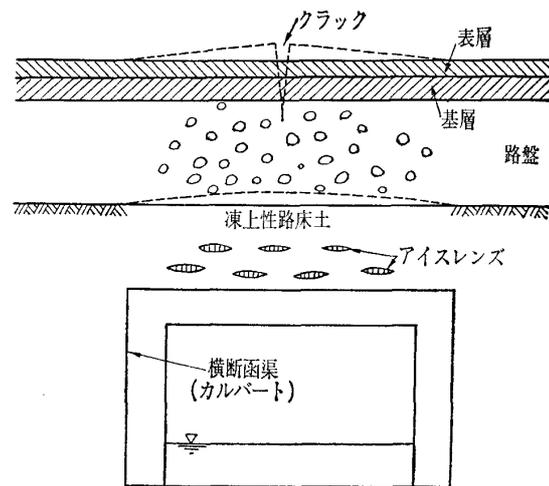


図-7.2.1 道路横断函渠での凍上被害の概念図

7.2.2 道路の凍上被害

1) 道路舗装

凍上による道路舗装の被害は、路面での凍上量が主として道路の横断方向に不均一に生じ、ほぼ中央で最大となるために道路の中央線付近に大きなクラックとなって現れる。写真-7.2.1は、道路舗装における凍上被害の一例である。道路の横断方向の不均一な凍上は、道路の路肩付近が堆雪によって舗装構造が冬の寒い時期に断熱される。これに対して、中央部分は自動車のタイヤによって路面上の雪氷が除かれ、その断熱効果が失われ、凍結深さと凍上量が路肩部分より大きくなり、舗装面に曲げ引張り応力が生じて破壊される。アスファルト舗装におけるこの種の破壊は、道路の中央付近の施工ジョイントとも一致するために道路の延長方向に生ずるのがその大きな特徴である。

また、土かぶりの比較的浅い横断函渠やパイプで、その埋戻し材料が凍上を起こしやすい土の場合には横断構造物の内側から寒気が入って冷却され、ほかの部分より凍上量が大きくなって道路の横断方向に路面に凸形の出張りを伴ったクラックが生ずることがある。これは冬期間における自動車の高速走行にとって非常な危険性をもたらすものとなる。図-7.2.1は、道路の横断函渠部分での凍上被害の概念を示す。

凍上現象による道路舗装のもう1つの破壊として

は、春期に地中の霜柱が融解することによって起こる路床・路盤支持力の低下によるものがあげられる。春の融雪期には路床土中の霜柱からなる氷層が主として地表面から溶けてその付近の土層は飽和状態となる。特に、この融解水はまだ下層に残っている凍結層にはばまれて地下に浸透しにくい。更に、一度土中に多数の氷層が生成されると融解後は密度も小さくなるので、この部分の支持力は著しく低下する。このような状態のときに道路の路面上を多くの重車両が通ると、舗装用アスファルト層あるいはセメントコンクリート版の下面の引張り応力と路床土上面の垂直ひずみが増大し、限界値を越えたときには舗

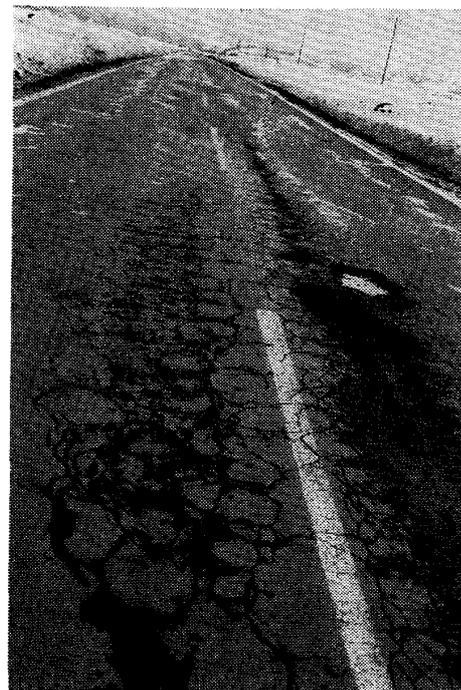


写真-7.2.2 春の融雪期の支持力低下によるきつ甲状ひびわれ

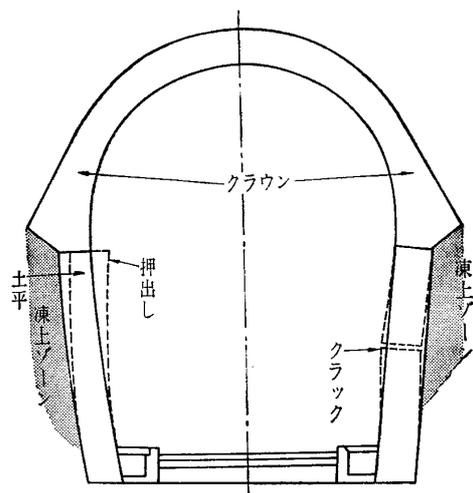


図-7.2.2 トンネルでの凍上被害の例

装は破壊する。アスファルト舗装の場合には写真-7.2.2に示すように、路面のわだち部分にきつ甲状のひびわれが生ずるとともに沈下が起こる。

2) トンネル等の付帯施設

寒冷地にあるトンネルのコンクリート覆工もときとしてその背面の岩石の凍上現象によって被害を受けることがある。図-7.2.2に示すようなトンネルの凍上被害は、コンクリート覆工背面の岩石が泥岩や頁岩で代表される軟質の場合に起きやすい。寒気がトンネルの坑口から入るために、その延長が100m以下の比較的短いものに凍上被害が出ることが多い。この凍上被害の特徴は、冬の厳寒期にコンクリート覆工の土平とクラウンの接続部分あるいは土平の中央の水平部分がトンネルの中心方向にはらみ出してくることである。トンネルの凍上被害はその機能を失ってしまうほど致命的であるため、トンネル覆工背面の岩石が凍上性でそこまで凍結が及ぶ恐れのあるときには凍上防止対策が必要となる。

トンネルのコンクリート覆工背面の岩石が凍上性であるかどうかは、その岩石の室内凍上試験によって判定されるが、次に示す岩石は一般に凍上を起こすとされている⁹⁾。

- ① 軟質で細粒な泥質岩または凝灰質岩である。
- ② 比重が2.0以下と小さく、かつ吸水量が20%以上である。
- ③ 風化作用を受けて破砕されているもの。

道路に付帯して設置されている電柱やパイル状の構造物が地盤の凍上によって引き上げられることがある⁷⁾。図-7.2.3に示すように電柱とその周辺の

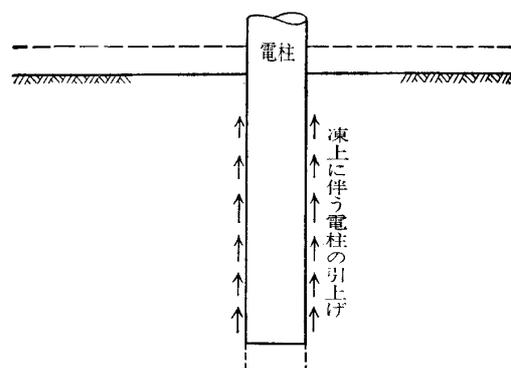


図-7.2.3 周辺地盤の凍上現象による電柱の被害

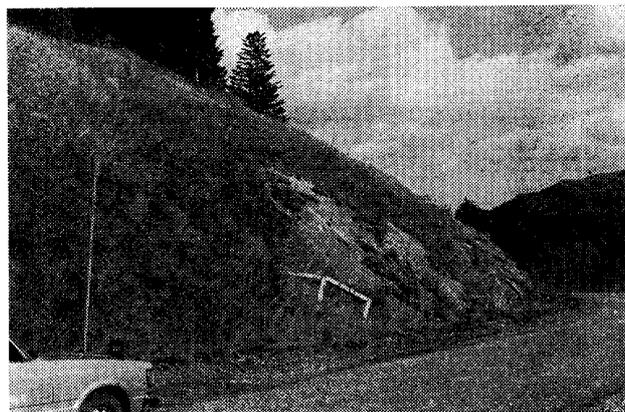


写真-7.2.3 凍上によるのり面崩壊の例

土が冬期間付着し、地盤の凍上とともに冷却される方向に引き上げられる。春の融雪期には周辺地盤は元の位置にもどるのに対して電柱は引き上げられた状態で固定され、次の凍結期に再び同じ現象によって引き上げられて倒壊に至ることがある。

3) のり面

積雪寒冷地にある道路の切土のり面は、冬期間の凍上現象、春の融雪期での凍結融解作用と融雪水の影響で崩壊することがある(写真-7.2.3)。切土のり面の崩壊原因のうち、全体の約40%が凍結融解作用によって発生しているという調査結果もあるので十分な対策が必要である⁹⁾。切土のり面の崩壊には、融雪水の流出量に関係する背後地の勾配、日照による融雪、凍結融解作用と関連するのり面の向きなども関係するが、地山の土、地質、切土高さ、のり面勾配が対策上の主要な要素となっている。

7.2.3 凍上調査

寒冷地の道路にあって、凍上被害の恐れのあるところでは凍上現象を支配する要素の土質、気温、地中水、上載圧などについて調査し、対策のための資

講 座

料とする必要がある。同時に凍上調査では道路を想定した地盤の凍結深さと凍上量も求める。

1) 土質

凍上対策の上で土質の調査は極めて重要である。土質の調査は道路ルートについて適当な間隔で予想される凍結深さまでボーリングを行う。土質に関する調査項目は、土層各層の粒度組成、密度、含水比、比重などが最低限必要である。もし道路の計画路線に平行して既設の道路や鉄道がある場合には、それらの建設時の土質調査結果とその後の凍上被害の有無を調べるとともに、トンネル、擁壁、側溝、のり面などの土木構造物についても調べておくとよい。また、代表的な土質については凍上試験を行う⁹⁾。

凍上を支配する土質の要素として、土の含水比や土粒子の大きさが現実には重要視される¹⁰⁾。凍上被害には少なくとも土の粒度組成のうちシルト・粘土分の量が関係する。シルト・粘土分の少ない砂、砂利、砕石などは凍上を起こさないことが実験的に確かめられている。しかし、北海道に広く分布する火山灰質土の中には、微粒分と吸水量が多いのにほとんど凍上を起こさないものがある。火山灰を凍結の及ぶ範囲に使用するときには、洗い試験によるシルト以下の含有量や強熱減量試験による有機物含有量の測定や凍上試験を行って、その火山灰が凍上を起こさないことの確認が必要である⁹⁾。

2) 気温

気温の調査は、道路での凍上現象の有無を推定するときに重要で、特に地盤の凍結深さを推定するうえで必要となる。地盤の凍結深さを支配する最大の要素として、現地での地表面温度があるが、実用的には近くの気温観測所のデータをもってこれに代えている。また、山岳道路などで気温観測所がないときには最寄りの現場事務所や測候所のデータを用いる。この場合、現地と観測所との標高差について気温の補正をするが、道路の凍結深さの推定には標高差が100m高くなるに従って1日の平均気温が0.5℃低くなるとしている。気温の観測は、晩秋の1日平均気温が0℃以下となる少し前くらいから始め、翌春0℃以下とならない時期まで継続して行う。

3) 地中水

地下水位の調査は、凍上現象における水の補給を支配するものとして重要であり、土質調査と同時に

行われることが多い。初期含水比の大きい土は、小さいものに比べて一般に凍上量は大きくなる。

地下水位は地盤の凍上量に大きな影響を与える。凍上量は粒度の粗い透水性の高い土では、もし載荷圧力が小さく無視できる程度ならば地下水位までの距離の2乗に反比例する¹¹⁾。道路の路床土として一般的なシルト質土の場合は、ほぼ地下水位までの距離に反比例して凍上量は小さくなる。シルト分と粘土分がそれぞれ13%と14%で残りが砂分の混合土による地下水位と凍上量の室内実験において、地下水面までの距離が2m以上になると凍上は発生しないという研究成果もある¹²⁾。また、地下水位までの土質条件も凍上発生の有無は大きな影響を与えることが経験から明らかにされている。

4) 上載圧

道路の路床土に発生した霜柱が成長するときに舗装体を押し上げるほどの大きな力が生ずる。野外での凍上性地盤での実験によると最大10~20tf/m²の大きさになることが分かっている¹⁰⁾。しかし、土中の霜柱発生部分にかかる上載圧が大きいほど凍上量は小さくなる。上載圧と凍上量の関係を室内実験によって求めたものに、我が国では高志の式がある¹⁰⁾。土の凍上率、荷重、凍結進行速度との間には次式が成立し、上載圧は凍結面へ向かう水分移動速度を減少させることになる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{V_0}{V}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

ξ : 凍上率(凍上量と凍結土の凍結前の厚さとの比)

σ : 上載圧 (kgf/cm²)

V : 凍結進行速度 (mm/h)

ξ_0, σ_0, V_0 : 実験から得られる定数

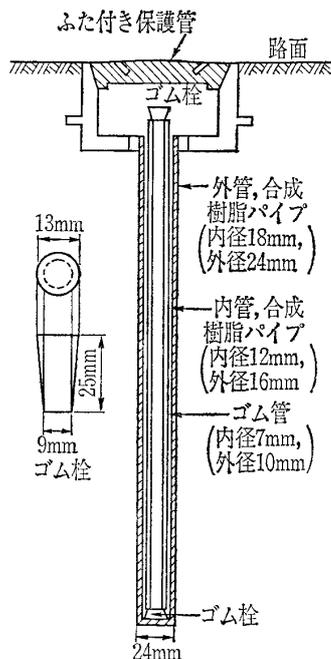
5) 凍結深さと凍上量

地盤の凍結深さは、土質、土中の霜柱発生程度、日射量、積雪量などによって大きく変化するが、これらのほかに路面の色、舗装の種類、地形や被覆状態などによっても変わる。一般に高速道路や空港舗装、あるいはトンネルのような構造物の凍上対策には、2月から3月の凍結深さが最大となる時期に地中温度を実測して凍結深さを求めるとよい。

実測によって凍結深さを求める方法としては、次のようなものがある。㊸メチレンブルー凍結深度計を利用する方法(写真—7.2.4)、㊹地中に测温抵抗



写真—7.2.4 メチレンブルー凍結深度計



$$(L/K)_{\text{eff}} = \frac{2}{X^2} \left\{ L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2K_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{2K_2} \right) + \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{K_1} + \frac{d_2}{K_2} + \dots + \frac{d_n}{2K_n} \right) \right\}$$

ここに,

- z : 凍結深さ (cm)
- F : 凍結指数 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)
- λ : 補正係数
- $X = d_1 + d_2 + \dots + d_n$: 予想凍結深さ (cm)
- d_n : 予想凍結深さ内の各層の厚さで d_1 は最上層の厚さ (cm)
- K_n : 各層の熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- L_n : 各層の融解潜熱 ($\text{cal}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

凍上量は、凍結前後の地盤面の高低差であり、地中に生じた霜柱状の氷晶厚の総和にほぼ等しい。道路舗装面での凍上量の測定は、冬期間動かない基準点から凍結前に

路面に設置しておいた基準点の標高をレベルによって行うとよい。メチレンブルー凍結深度計の保護管をもとに凍上量を求めるときには次式による。

$$\Delta h = h_g' - h_g \dots\dots\dots(3)$$

ここに,

- Δh : 保護管付近の凍上量 (cm)
- h_g' : 凍結深さ測定時の路面の標高 (cm)
- h_g : 凍結前の路面の標高 (cm)

7.2.4 凍上対策工法

凍上現象は、土質、温度、地中水などの要因が同時に満足されたときに起こる。したがって、これらの要因のうち少なくとも1つ以上を除去することによって凍上被害を防止することができる。道路の凍上対策工法としては、凍上性の土を凍上を起しにくい材料で置き換える「置換工法」、路盤の下に断熱層を設けて凍上性の路床土の温度低下を少なくし凍上量を減少させる「断熱工法」、セメントや石灰などを凍上性の土に添加混合してその性質を変化させるか、または凍結温度を下げる「安定処理工法」などが一般的である。このうち現在、主として用いられているのは、予想される凍結深さ内にある凍上性の土を凍上を起しにくい粗粒材料で置き換える置換工法である。

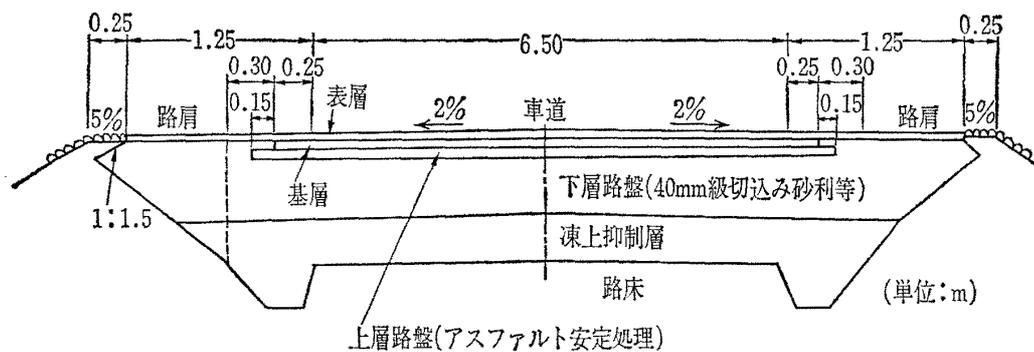
断熱工法は凍結深さが大きく、しかも交通量が比較的少なく、かつ良品質の置換材料が得にくい場合に用いられる。また、この工法は道路や空港舗装で

体温度計や熱電対を埋設する方法、◎厳寒期に調査孔を掘削して地中の温度と土の凍結の様相を観測する方法。一般には一度設置しておけば冬の観測が容易なメチレンブルー凍結深度計による方法が用いられる。道路に設置された凍結深度計は、冬期間凍上によって上昇するので凍結前に路面の標高を、付近の冬期間不動の基準点からレベルで測定しておく必要がある。

凍結深さは各種の要素によって大きく変化するので、計算だけによって精度の高いものを求めることは困難である。しかし、これを熱伝導論的に扱って計算しようとする一般的なものに静水で氷層厚を求める Stefan (ステファン) および Neumann (ノイマン) の式を簡易化した修正 Berggren (ベルグレン) の式¹³⁾があり、砂利道や一般の道路舗装の凍結深さの推定に用いられている¹⁴⁾。また、この簡易式は地盤の一部に断熱材やアスファルト混合物のような非含水性のものやセメントコンクリートから成る舗装構造に適用しても実用上は問題がないことが分かっている¹⁵⁾。しかし、コンクリートや断熱材の厚さが大きくなると、実際の凍結深さと異なった値を示すことがあるので注意する必要がある。

実際の道路舗装のように表層、基層、路盤、路床など多層からなる場合の凍結深さの推定には一般に次式が用いられている¹⁵⁾。

$$z = \lambda \sqrt{\frac{172800F}{(L/K)_{\text{eff}}}} \dots\dots\dots(2)$$



図一7.2.4 北海道における国道の標準的な横断面

大きな輪荷重があまり通らない路肩部分にのみ適用されることがある。安定処理工法は、路床土質が粘質土または砂質土からなり、軟弱な場合に置換工法と併用して選ばれることもある。

1) 置換工法

道路の凍上対策工法としての置換工法において、凍上性の土を掘削して凍上を起こしにくい材料で置き換えるときに、どんな品質の粗粒材料をどれだけの深さまで置換するかが問題となる。すなわち、置換工法における厚さと置換材料の品質を決めなければならない。図一7.2.4は北海道における国道の標準的な横断面を示す¹⁶⁾。

(a) 置換え厚さの決め方

置換工法における道路の置換え厚さは、北海道のような寒さの厳しいところでは過去の実績と経済的な理由から、最大凍結深さの約70%まで低減した値まで粗粒材料で置換すればよい。しかし、実際の道路設計で、凍結深さに対する置換え厚さは比較的温暖な地域の約100%から北海道の帯広地区の約60%までと各地域で変化しており、その地方の調査結果と経験に基づいて決められることが多い。

このようにして決めた置換え厚さと凍結深さを考慮しないで求めた表層、基層、路盤の合計である舗装厚さを比較し、置換え厚さの方が大きい場合には、その差だけ凍上を起こしにくい砂、火山灰、切込み砂利などの材料を路盤の下に、凍上抑制層として加える。路床が軟弱な場合には20cm程度の砂の遮断層を凍上抑制層の下にさらに加えることもある。

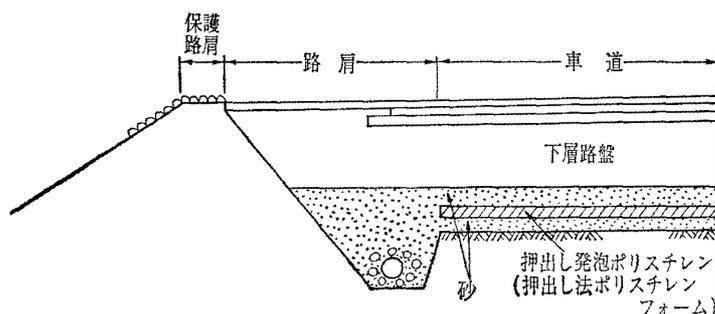
(b) 置換材料の品質

置換工法での粗粒材料は、下層路盤や凍上抑制層などその使用する目的に応じて必要な品質

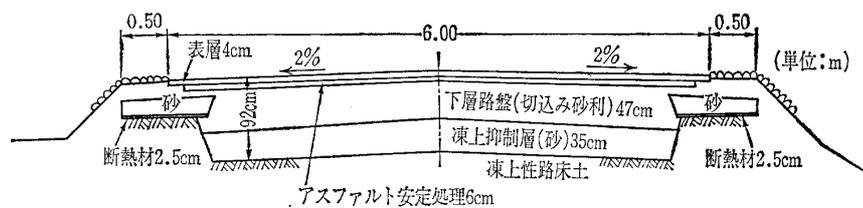
と規格に合致すると同時に、それ自体が凍上を起こさないものであることが必須の条件になる。凍上を起こしにくい材料であるかどうかは、室内での凍上試験によって判断できるが、置換材料の種類に応じて次のようなものとするのが望ましい¹⁷⁾。

- ① 砂：0.074 mm ふるいを通過するものが6%以下
- ② 切込み砂利：全試料について0.074 mm ふるいを通過するものは、4.76 mm ふるいを通過する量に対して9%以下
- ③ 切込み碎石：全試料について0.074 mm ふるいを通過するものは、4.76 mm ふるいを通過する量に対して15%以下
- ④ 混合切込み砂利碎石：全試料について0.074 mm ふるいを通過するものは、4.76 mm ふるいを通過する量に対して12%以下
- ⑤ 火山灰(火山礫を含む)：室内での土の凍上試験¹⁸⁾に合格したもの。ただし、凍上試験結果の判定が要注意のもののうち、0.074 mm ふるい通過量が20%以下であり、強熱減量が4%以下であれば使用することができる。

置換材料のこれらのシルト以下微粒分限界値を越えたものは現地において直ちに凍上の影響があるとは限らない。現地での施工の実態からある程度の許



図一7.2.5 凍上対策としての断熱工法の例



図一7.2.6 断熱工法による道路路肩部の凍上対策

容値が含まれているからである。実際に現地に置換した材料は時間の経過とともにそのシルト以下含有量が、搬入時のものよりかなり多くなる。施工中あるいはそれ以降に外部から自動車のタイヤとともに微細粒子が搬入されたり、路床や路肩から泥水として侵入したりすることが増加する原因である。

2) 断熱工法

道路の凍上被害を防止するために断熱材を使用するとき、その材料の必要な条件は熱伝導率が小さいことによって断熱効果があり、その効果が長く持続し、耐荷力・耐水性が大で、かつ経済的であることである。これらの条件を満足する材料は、板状の押し発泡ポリスチレン（押し発泡ポリスチレンフォーム）であり、北海道においては20年以上の実績がある。

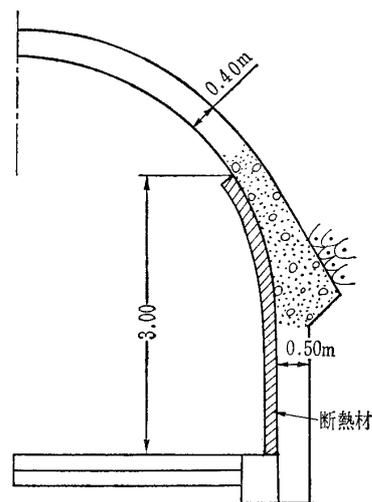
(a) 道路舗装の場合

道路舗装の断熱工法においては、凍結が路盤から凍上性の路床土へ侵入するのを抑制するために図一7.2.5に示すように断熱層は路盤と路床の間に設けられることが多い。この場合、断熱層の上の路盤の施工過程で注意しなければならないことは、路盤材料の搬入および締固め機械等による断熱材の破損と粗粒材の圧入の危険性である。その対策は断熱材の上に数 cm の砂と 20~30 cm の砂利層をまき出して転圧することである。

また、図一7.2.6に示すように交通量の少ない在来砂利道の路肩部分のみに断熱材を設置して舗装し、道路の路盤の拡幅を伴わない経済的な断熱工法も最近では採用されるようになった¹⁹⁾。

(b) トンネルの場合

トンネルの凍上対策は、その完成断面における予想凍結深さを求め全厚を凍上を起こしにくい粗粒材にする置換工法が一般的である。しかし、最近では図一7.2.7で示すようにトンネルの坑口付近のコンクリート覆工の表面に断熱材を張り付けて凍上性



図一7.2.7 トンネルのコンクリート覆工表面に断熱材を設置しての凍上対策

の岩盤に凍結を浸入させない工法を採用している²⁰⁾。

コンクリート覆工表面の断熱材の厚さは、その地区の冬の寒さに応じて背面の凍上性の岩に凍結が及ばないように決められる。

7.2.5 おわりに

寒冷地での道路舗装の凍上対策に関する調査研究は、北海道の道路を中心に昭和26年ころから継続して実施されてきた。最近では青森県など東北地方でも現地での試験調査が行われている。これらの結果をもとにそれぞれの地域で一応の基準が設定されるまでになっている。特に、地盤の凍結深さの算定法と凍上対策工法などについては温暖地域の山岳地帯にも適用し得るものと考えられる。

現在広く用いられている道路の凍上対策としての置換工法は、最近、良質な砂利、砂などの置換材料の枯渇化によってその採用が困難になりつつある。その対策として、今まで経済性や施工性の面から問題とされていた断熱工法や安定処理工法などの特殊工法についても再検討してみる必要がある。

参考文献

- 1) 久保 宏：道路舗装の凍上とその対策，土と基礎，Vol. 29, No. 2, pp. 9~14, 1981.
- 2) 土質工学会：土質工学用語辞典，p. 43, 1985.
- 3) 河野文弘：寒冷地における路床・路盤，土と基礎，Vol. 20, No. 6, pp. 19~25, 1972.
- 4) 土質工学会：土の凍結—その制御と応用—，土質基礎工学ライブラリー，pp. 95~110, 1982.

講座

- 5) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，pp. 16～17，1988.
- 6) 星野 寔：岩石の凍上性について，土木試験所報告，No. 60，pp. 45～50，1973.
- 7) Phukan, A.P.E.: Preventing Measures against Frost Action in Soils, International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp. 749～769, 1989.
- 8) 佐々木晴美：寒冷地ののり面保護工，土木技術資料，Vol. 22, No. 8, pp. 18～30, 1980.
- 9) 日本道路協会：道路土工，道路排水工指針，pp. 203～208，p. 155, 1979.
- 10) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版，pp. 4～6，1982.
- 11) Beskow, G: Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, the Swedish Geological Society, No. 375, pp. 32～56, 1947.
- 12) 瓦川善三・若槻良行・伊藤 譲：道路の凍上対策に関する研究（その2）—凍上に及ぼす地下水位の影響—，第24回土質工学研究発表会講演集，pp. 1053～1054，1989.
- 13) Aldrich, H.P.: Frost Penetration below Highway and Airfield Pavement, Bul. 135 HRB, 1956.
- 14) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究，土木試験所報告，No. 26，pp. 10～22，1962.
- 15) 久保 宏：積雪寒冷地舗装の凍上対策，土木学会誌，64(2)，pp. 10～16，1979.
- 16) 北海道開発局：昭和63年度道路工事設計基準，pp. 19～22，1988.
- 17) 北海道開発局：昭和63年度道路河川工事仕様書，pp. 19～21，1988.
- 18) 日本道路協会：道路土工，道路排水工指針，pp. 203～208，1979.
- 19) Kubo, H. and Sakaue, T.: Control of Frost Penetration in Road Shoulders with Insulation Boards, TRB 1089 Geotechnical Engineering, pp. 132～137, 1986.
- 20) Takeichi, K. and Kubo, H.: Study on Preventing Measure against Frost Action of Existing Road Tunnels with Insulation Method, International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Vol. 2, pp. 721～730, 1989.