北海道新幹線におけるトンネル凍害対策（断熱材厚さの検討）について

鉄道・運輸機構*)　正会員○鳥井宏之　米澤豊司　南 邦明
北海道大学大学院**) フェロー　三上　隆

１．はじめに

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）のトンネル群は，寒冷地に位置し，積算寒度（凍結指数）が大きく，トンネルの凍害が懸念される．山岳トンネル設計施工標準[1)]では積算寒度が 500℃･日を超える場合には凍害対策を検討すると記載されているが具体的な方法は示されていない．一方，土構造標準[2)]では，切土補強土壁の凍害対策として断熱材による対策法が示されている．そこで，北海道新幹線のトンネルでは，凍害対策として土構造標準と同様の考えで覆工背面地山に対する断熱工の検討を行った．本報告では，トンネル覆工凍害対策の検討フローを示したうえで，断熱材の厚さの算定法について述べる．

２．トンネル凍害対策の検討の流れ

図1に全体の検討の流れを示す．地山の凍上の検討においては，まず気象・地質状況を実際の調査や既存資料等から分析し，凍結・凍上の可能性を判断する．凍結・凍上の可能性がある場合には対策工を検討する．対策工には種々の方法があるが，硬質ウレタン断熱材の吹付け，あるいは貼付けによる方法がよく用いられており，鉄道構造物においても適用実績が多いため，これを用いることにした．

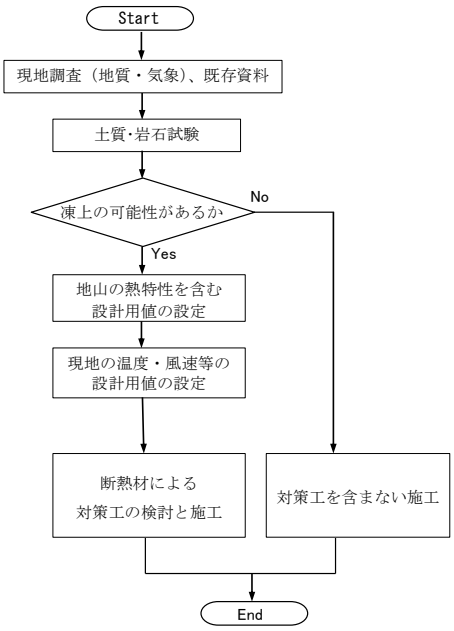

図 1　トンネル覆工凍害対策検討フロー

３．覆工背面地山凍上の可能性の判定

覆工背面地山の凍上は，次の三つの条件が同時に満たされたときにその現象が起こるため，まず，この条件にトンネル地山が適合しているか否かを検討する．この条件に適合する場合には，いずれか一つの条件を回避することで凍結・凍上の防止対策とする．

① 地山の土質が細粒であること．
② 地山の水の補給が十分なこと．
③ 地山の温度が 0℃以下になること

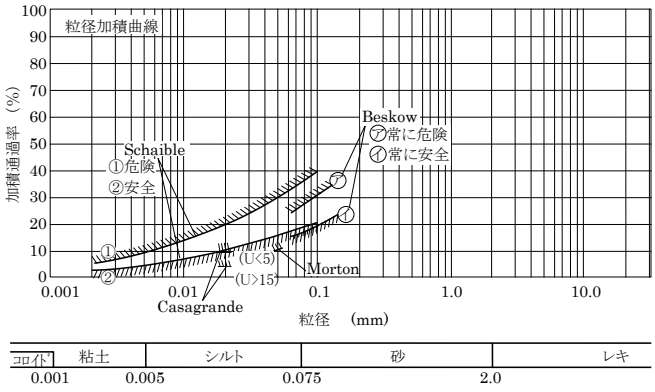

図 2　未固結地山の凍上性判定[3)]

北海道新幹線は寒冷地に属するため，③については多くのトンネルの場合，覆工表面から地山のある深さまでは 0℃以下になるものと考えられる．また，②の地山の水の補給がまったく無いことはほとんどなく，完全な回避はほぼ困難と考えられる．①については，凍上を起こす可能性がある土質・岩質であるかを事前に調べることで，ある程度判断できる．凍上性の地山（土壌）であるか否かの判定は，地山が未固結である場合には，**図 2** に示すように粒径による判定[3)]を用いた．岩石が主体となるような地山が固結している場合には，凍上性地山であるか否かの判定は，**表 1** に示す山岳トンネル設計施工標準[1)]に準じることとした．

表 1　固結地山の凍上性判定基準[1)]

特定の指標	凍上しやすい条件
一軸圧縮強さ*1	5N/mm² 以下
乾燥密度	1.5g/cm³ 以下
飽和湿潤密度*2	2.0g/cm³ 以下
含水比	25%以上
細粒分含有率*1	20%以上

＊1　最も有効な判定指標
＊2　炉乾燥後 24 時間水浸した試料の密度

キーワード：トンネル，断熱工，凍害対策
連絡先：*) 〒060-0002　北海道札幌市中央区北2条西1　TEL 011-231-3491　FAX 011-231-3500
**)〒060-0808　北海道札幌市北区北8条西5丁目　TEL 011-716-2111　FAX 011-706-2432

４．断熱材厚さの算定

4-1 検討対象とするトンネルにおける各種条件

図1において，凍上の可能性があると判断された地山の場合，その対策として断熱材の施工を考える必要がある．ここではAトンネルを対象に断熱材厚さを試算した．

表2に気象条件を示す．ここでの積算寒度は岩井法による100年確率値である．また，**表3**は各材料の設計用値であり，コンクリートの熱伝導率は東北新幹線での現地計測および検証解析から得られた数値である．また，地山の各数値は，坑口付近のボーリング調査により得られた値である．

表 2 気象条件

年平均気温 (℃)	温度年振幅 (℃)	積算寒度 (100 年確率) (℃･days)
8.1	15.63	586

表 3 各種設計用値

地 質	地山 (粘性土)	コンクリート	断熱材
乾燥密度ρ_d (g/cm^3)	1.35	2.35	0.0025
含水比 w (%)	40	11.4	1.6
熱伝導率 K (W/m･K) (cal/cm^3･sec･℃)	1.2	2.2	0.036
熱容量 Q (cal/cm^3･℃)	0.6345	0.6004	0.000455
融解潜熱 L (cal/cm^3)	43.2	0	0.0032

4-2 凍結深さの検討による断熱材厚さの算定

多層系地盤の凍結深さZ はAldrich[4]による修正Berrgrenの式(1)を用いた．

$$Z=\lambda\sqrt{\frac{172800\cdot F}{(L/K)_{\mathrm{eff}}}}=C\cdot\sqrt{F} \qquad (1)$$

$Z=d_1+d_2+\cdots\cdots+d_n$：凍結深さ（cm），$\lambda=f(\mu,\tau)$：体積熱容量に関する無次元補正係数，$K$：熱伝導率（cal/cm･sec･℃），$F$：地表面の積算寒度（℃･day），$L$：潜熱（cal/cm^3）である．

$$(L/K)_{\mathrm{eff}}=\frac{2}{Z^2}\left\{L_1d_1\left(\frac{d_1}{2K_1}\right)+L_2d_2\left(\frac{d_1}{K_1}+\frac{d_2}{2K_2}\right)\quad+\cdots\cdots+L_nd_n\left(\frac{d_1}{K_1}+\frac{d_2}{K_2}+\cdots\cdots+\frac{d_n}{2K_n}\right)\right\} \qquad (2)$$

図3に示すように，トンネルの内空側から覆工コンクリート厚さd_1=30cm，吹付けコンクリート厚さd_3=15cm，地山d_4（粘性土）とする．計算で凍結深さが覆工背面地山に達する場合には，対策工として断熱材を覆工コンクリートと吹付けコンクリート間に施工し，凍結深さが覆工背面地山に達しなくなる断熱材厚さd_2を算定する．手順としては，まず仮想の凍結深さZ'を設定し，**表2**および**表3**の各設計用値を式(1)に代入して，計算された凍結深さZと仮想凍結深さZ'が一致するまで繰り返し収束計算を行うことで，凍結深さZを求めた．

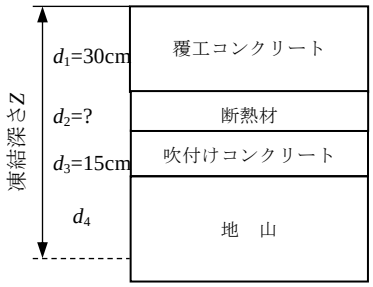

図3 計算断面模式図

4-3 断熱材厚さの算定結果

断熱材を考慮せず（d_2=0cm）に凍結深さを計算するとZ=77cmであった．凍結深さは，覆工コンクリート厚さ30cmと吹付けコンクリート厚さ15cmの合計厚さ45cmよりも32cm深い位置の地山内部に達することを示しており，断熱材を考慮する必要がある結果となった．そこで，断熱材の厚さを考慮して繰り返し計算を行うと，凍結深さZが48.3cmで，断熱材厚さd_2=3.3cmの時に凍結深さが地山に達しない結果となった．なお，Aトンネルにおける断熱材の設計厚さは切り上げで4.0cmとした．

５．まとめ

本報告では，北海道新幹線におけるトンネル覆工への凍害対策の検討フローを示し，切土補強土壁における既往の研究成果を応用し，トンネル覆工断熱材厚さを試算した．ただしここでは，トンネル坑口付近の諸条件を用いて計算しており，トンネル坑内の気温は坑口部から離れることにより上昇する傾向がある．このため，断熱材のトンネル延長方向の必要施工長さについては，この温度上昇も考慮して検討する必要がある．これについては，別報[5]で報告することとする．

【参考文献】

1) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008.4.
2) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物等設計標準（土構造物），2007.1.
3) 北川修三、川上義輝：寒冷地でのトンネル変状と地山の凍上性、鉄道技術研究報告、No.1301,1985.
4) Aldrich,H.P :Frost penetration below highway and airfield pavements, Highway Research Board Bulletin 135,pp.124~149,1956
5) 南 邦明，鳥井宏之，前田洸樹，松長 剛，畠山幸佑，三上 隆:北海道新幹線におけるトンネル凍害対策（断熱材延長の検討）について，第70回土木学会年次学術講演会概要集，2015.9