

トンネルの断熱つらら防止工の開発

岡田 勝也 (国士舘大学理工学部都市ランドスケープ学系 教授)

過酷な労働に支えられた寒冷地トンネル

明治から昭和初期に建設された古いトンネルに入った多くの方は、頭上のアーチ部からポタポタと落ちてくる地下水によってレールが輝いているのに気づきます。このような漏水は寒冷地にあっては凍結します。

寒冷地トンネルのアーチ部から浸出する漏水は、図1に示すように、“つらら”となり、通常は一晚でも十分成長し、列車の運転にも影響を及ぼすのが常でした。廃棄トンネルにおいて成長した巨大な“つらら”を、図2に示します。

また、図1のように、側壁に沿って流れ落ちる漏水は側水となり、作業員の歩行を妨げ、軌道を覆うほどに成長すると列車の走行安全性に重大な影響を及ぼします。このように、降雪地のほとんどで悩まされてきた“つらら”と側水に対して、1970年代までは、一番列車の走行する前の未明に人力によるつらら落とし作業や側水の削水作業、除水作業という過酷な労働に支えられて、列車の運転を行ってきたのが実態でした。寒冷地のトンネル保守ではこれらが重要な作業で、その作業期間は北海道の内陸部では実に150日に達するトンネルもありました。

さらに、極寒冷地になると、凍結は覆工背面以深の地山にまで及び、地山の凍結、凍上を起こさせ、図1に示すように、覆工にクラックや押し出しなどの変状を発生させ、ついにはトンネルの改築や廃棄に追い込むことにもなりました。このような凍上は、トンネル覆工背面にだけ起こるものではなく、路盤凍上をも引き起こし、軌道の不整を誘発して、軌道の維持管理も困難にしました。

トンネルの側壁が季節的に動く

新得山トンネルは延長1682mの単線1号型トンネルで、1966年に建設されたコンクリート造(インバート)です。建設後まもなく、トンネル出口から150m間で、側壁とアーチ部が最大100mmの食い違いが生じました。側壁には水平方向に最大10mm程度の開口クラックが伸びました。地質は変成岩(ホルンヘルス)ですが、変状の激しい坑口付近は扇状地堆積物の礫混じり砂やシルトでした。この地方の積算寒度は650℃ days程度でしたから、凍結深度は容易に覆工(厚さ50cm)の背面地山に到達していたこととなります。

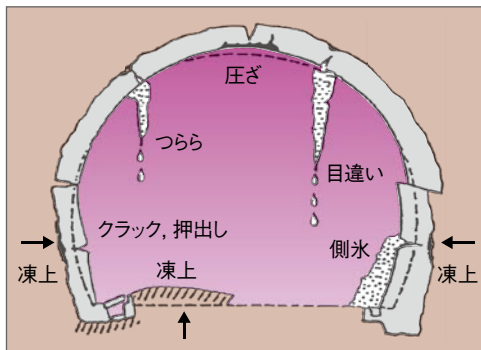


図1 寒冷地トンネルにおける変状の概念図



図2 鍾乳石のようにトンネルアーチ部から成長したつらら

このような典型的な地山の凍上による覆工の押し出し現象を左右覆工の相対変位として時系列的に描いてみますと、図3のようになります。凍上期間は約4か月でしたが、冬期には変状が進み、トンネルの内空側へ30~40mm程度押し出されました。夏期には相対変位はほとんど元に戻るといった季節的な変動を繰り返し、月平均気温が低下すると相対変位量は大きくなりました。

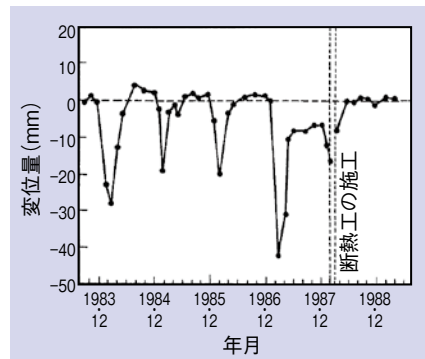


図3 左右の側壁間距離(相対変位)の経時変化

幅10cmもの水平クラックがトンネルを走る

初山別トンネルは1954年に竣工した延長270mのトンネルで、地質は段丘堆積層で、砂、砂礫、粘土の互層になっており、粒度分析の結果、凍上性を有する土質に分類されました。

上述の新得山トンネルと同様に、側壁が冬期にトンネル内空側に押し出され、夏には戻るという変状を繰り返し、場所によっては残留変位が累積する所もありました。しかも、このトンネルでは、図4に示すように、側壁の上下がヒンジとなり、側壁背面地山の凍上圧によって、側壁中央に線路方向



図4 側壁中央をトンネル軸に沿って走るクラック

に長い水平クラックが発生し、これは夏には閉じるという現象が発生しました。さらにアーチ天端には圧座による剥離やクラックが現れました。

またトンネルの坑口付近では“つらら”にも悩まされました。段丘礫層を貫通しているために、地下水の供給も多く、“つらら”の成長は非常に早く、冬期の日常のメンテナンスに難渋させられました。

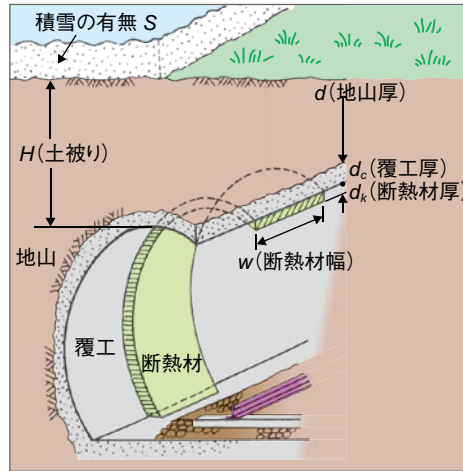


図5 既設トンネル用の断熱つらら防止工の概念図

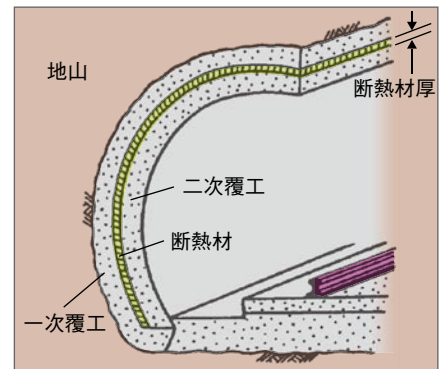


図6 新設トンネル用の断熱二重巻工法の概念図

断熱処理によるつらら・凍上防止工を開発する

(1) トンネルの凍害防止工法の選定には？

トンネルの凍害防止工法の選定には、トンネル内気温、漏水温度、漏水量などの条件と共に、地山の凍上性を勘案する必要があります。冬期に外気温が氷点下に達しても、凍結に達しない位置に漏水防止工を施工すれば、つらら防止工を施工する必要はありません。凍結の及ばない覆工背面と地山の間に砂層を介在させるとか、透水性ブロックを施工するという置換工法は、古くから先人によって工夫され施工されてきました。

このような漏水防止工では“つらら”や凍上を防止できない場合には、積極的な凍害防止工法を計画する必要があります。

これには加熱工法と保温工法があります。前者の代表的なものとして電熱線によるもの等が開発されましたが、電気配線のある場所など局所的条件に限られ、普及はしませんでした。

保温工法の代表的なものに、断熱工法やヒートパイプ工法があり、北海道や東北などの寒冷地の多くのトンネルで、“つらら防止工”あるいは凍上防止工として、その効果を発揮しました。

(2) 既設トンネル改良のための表面断熱工法とは？

この断熱工法は1960年代末に中山トンネルの改築で試験的に行われました。時を同じくして、第二小繫トンネル、大間越トンネルでも施工されました。本格的な温度測定を伴う施工は、1975年の工事中的上羽幌トンネルと、1977年の活線下で施工された初山別トンネルでした。

既設トンネル用の断熱方法は、図5の概念図に示すように、覆工表面に断熱材を設置し、地山の熱を冬期にトンネル内空になるべく放出しないことによって、断熱材の背面を氷点以上に保持しようとする工法です。

上述の上羽幌トンネルなどに対する熱伝導・熱伝達解析によって、断熱材の厚さと幅 (W , d_h)、土被りの影響 (H)、積

雪の有無 (S)、トンネル坑口からの距離などを含めた、表面断熱工法の設計チャートが提案されました。さらに、列車火災の問題も考慮し、断熱材の火災実験を行って防火コートなどの設計細目も決定されました。

これに基づいて、多くの寒冷地トンネルにこの表面断熱工法が施工されました。上述の新得山トンネルでも、断熱材厚さ50mmの表面断熱工法が施工されました。その結果、図3に示すように、左右側壁の相対変位は施工した翌年にはゼロなり、凍上による側壁の押し出しは皆無になりました。

(3) 新設トンネル用の断熱二重巻工法とは？

既設トンネル用の表面断熱工法をさらに発展させ、NATMの工程に組み入れた断熱二重巻工法も1970年代後半に蘭法華トンネル、新直別トンネルで施工され、メンテナンス・フリー・トンネル建設の先駆けとなりました。この工法は、図6のよう一次覆工と二次覆工の間に断熱材を設置する工法であり、この工法に適用できる断熱材の設計チャートも提案されました。

1990年初めに施工された、延長5595mの単線2号型の滝里トンネルでは、トンネル延長方向のトンネル内気温の振幅減衰を考慮して、断熱材厚さを坑口から奥に行くにしたがって、42mm～0mmまで、しだいに薄くする経済的な施工が実現しました。

あともがき

真冬の未明に人力で行う“つらら落とし”という厳しい労働環境の改善を目指して、JNRが世界に先駆けて開発したトンネルの断熱つらら防止工法は、メンテナンスフリーの環境を作り出しただけでなく、トンネル構造の安全性を確実にできることになりました。この工法によって寒冷地の多くのトンネルがこの恩恵を受けることになりました。