

寒冷地のれんがトンネルの劣化を予測する



嶋本 敬介
Keisuke Shimamoto
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員



浦越 拓野
Takuya Urakoshi
防災技術研究部
地質研究室
主任研究員



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室長

はじめに

日本の鉄道は明治5年(1872年)の新橋・横浜間の開業以降、明治期に全国の主要な幹線網がおおむね建設されており、明治39年度(1906年度)には路線延長は8,047キロに到達しています¹⁾。

この時代、建設費が高いトンネルは避けられる傾向にはありましたが、鉄道の特性上、急勾配や急曲線に弱いため、トンネルも多く建設さ

れています。明治期に建設されたトンネルの覆工(掘削面を覆う部材)は、れんが積みあるいは石積みで構築されており、アーチ部に関してはほぼ全てのトンネルでれんがが使用されています。れんがトンネルは、寒冷地にも多く存在し、現在も適切な維持管理のもと、多くが供用されています(図1)。

一方、寒冷地のれんが造のトンネルでは、漏水が凍結することにより、れんがの母材や目地

図1 供用中のれんがトンネル



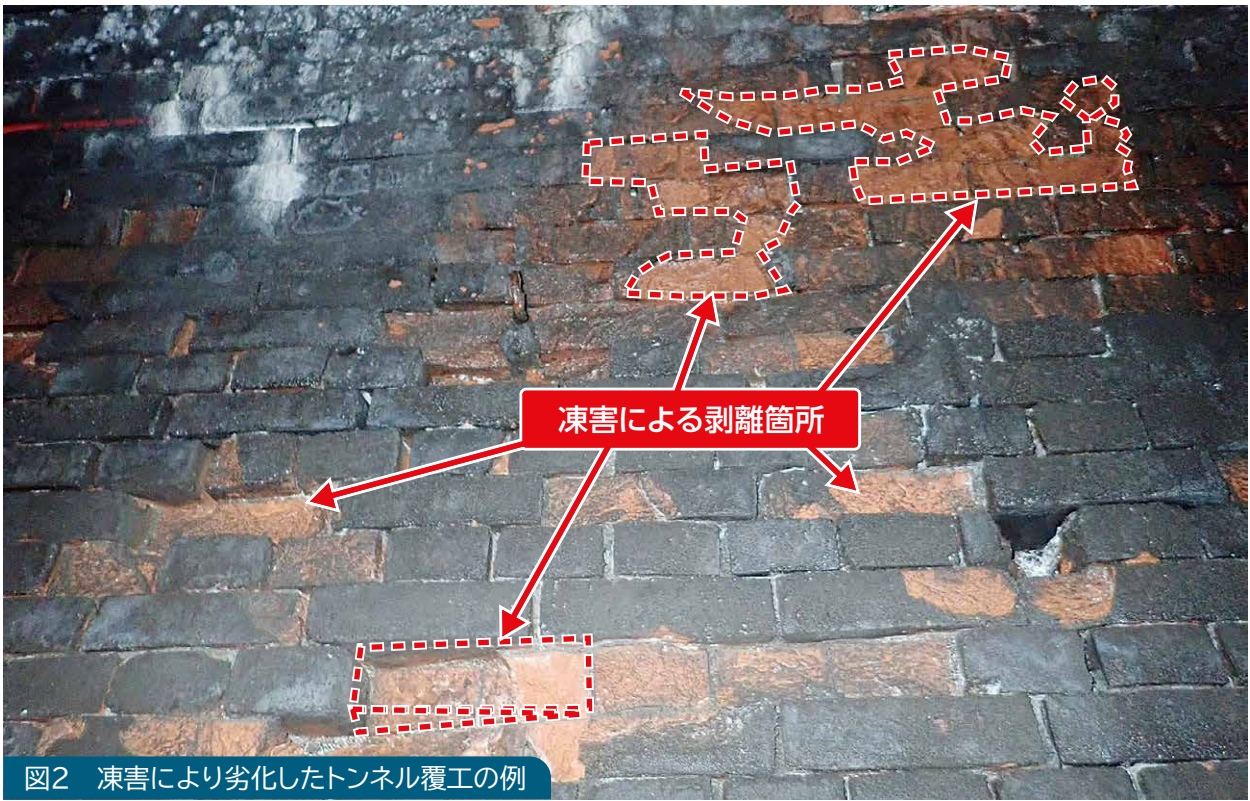


図2 凍害により劣化したトンネル覆工の例

が劣化して、剥落につながる場合があります。ここでは、寒冷地のれんがトンネルの維持管理の現状と、アメダス気温データを活用した将来的な劣化の進行の予測技術について紹介します。

寒冷地にあるトンネルの維持管理

寒冷地にあるトンネルでは、覆工表面の水分が凍結と融解を繰り返すことで、覆工材料が劣化し、剥離・剥落に至ることがあります。れんがは、多孔質で吸水率が大きいいため、とくに凍

結融解の影響を受けて劣化しやすい材料です。

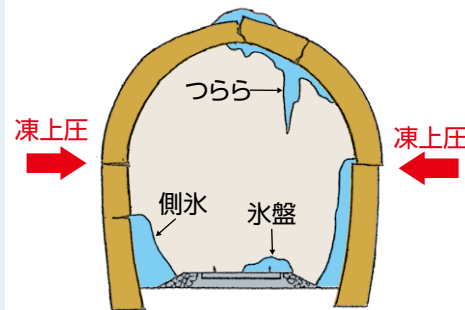
このような変状は、水分の凍結が原因なので、凍害とよばれます。[凍上圧](#)、[つらら](#)、[側水](#)、[氷盤](#)といった変状も、水分の凍結により発生しますが、一般に「れんがの凍害」といった場合、凍結融解による劣化を指すこと多いことから、以降では、これを凍害とよぶこととします。

図2に凍害による剥離が見られるトンネル覆工の例を示します。黒っぽい部分は剥離していない箇所であり、オレンジ色の部分は表面が剥

コラム「凍上圧、つらら、側水、氷盤」

凍上圧は地盤の凍結、つらら・側水・氷盤は漏水の凍結により発生します。図Iにこれら変状の模式図と写真を示します。特につらら対策は維持管理上の大きな負担となっています。おおむね1980年以降に建設されたトンネルは、NATMにより建設されているため漏水が少なく、かつ寒冷地では断熱二重巻覆工とされており、つららが問題となることはありませんが、それ以前に建設されたトンネルでは、漏水箇所がつららとなり、列車の安全な運行に影響を与えます。断熱材付き防水板を設置することでつららを防げますが、つらら発生箇所は日々変化するため、ピンポイントの対策では効果が薄く、地域によっては冬季はほぼ毎日、始発までの夜間作業でつらら落としをする必要があります。

図I つらら、側水の例 2)



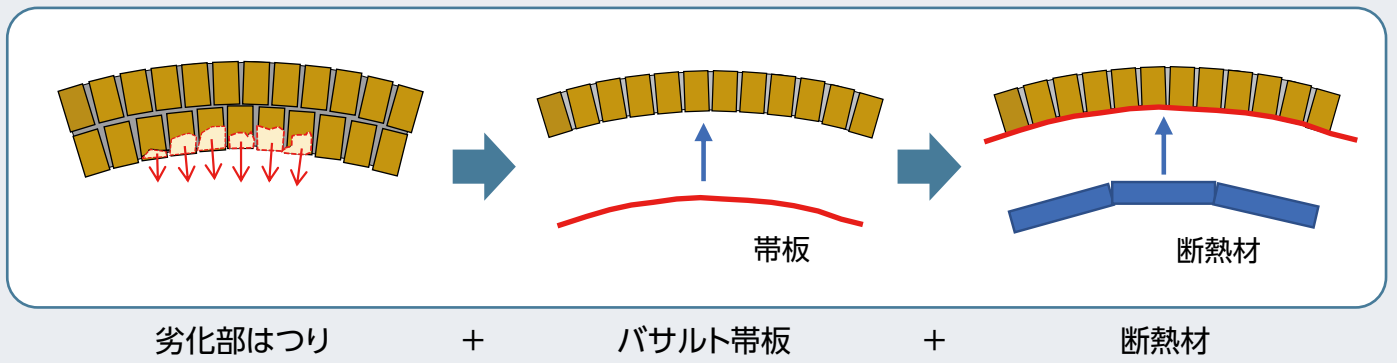


図3 狭小断面れんがトンネルにおける断熱材施工のイメージ図

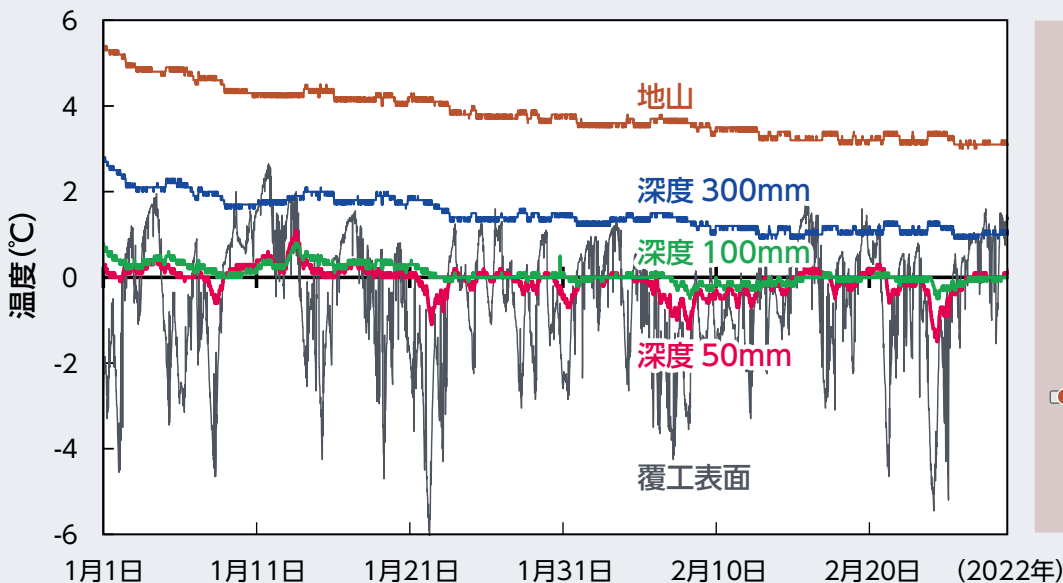
離し、検査で叩き落された箇所です。このようにれんがの表面から、目地もろとも剥離しています。劣化初期ではこのように剥離するれんがと剥離しないれんががまばらに存在します。これは漏水の状況やれんがの品質のばらつきが影響しているものと考えられます。れんがトンネルの劣化は、何もしなければ徐々に進行します。こういった変状がアーチ部で見られる場合には、剥離片が列車に当たる可能性が考えられるため、何らかの対策が必要となります。

対策としては、吹付けモルタルによる漏水対

策を兼ねた剥落対策工が過去に実施されている場合も多くあります。ただし、経年と共に覆工－吹付けモルタル間の付着が弱くなり、吹付けモルタルに浮きが発生して、維持管理上の課題となっているケースも多くあります。

その他の対策としては断熱材付き防水板の設置も行われます。これにより劣化の進行は収束しますが、れんがトンネルは建設年代が古く、狭小単線断面が多いため、防水板を設置するだけの建築限界に対する余裕が確保できない場合もあります。そのような場合には、図3に

図4 れんがトンネル覆工の温度測定結果



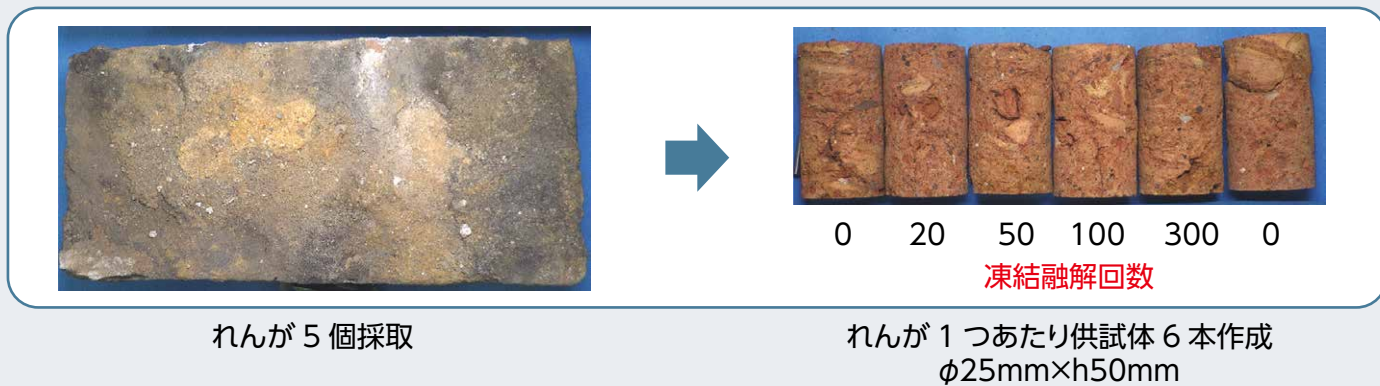


図5 供試体の作製

示すイメージ図のように、れんが1層をはつり、**バサルト帯板**® 接着により内面を補強した上で、断熱材付き防水板を施工するケースもあります³⁾。

れんがトンネル覆工の劣化メカニズム

(1) 温度測定

凍害が認められるれんがトンネル(Aトンネル)において、覆工にコアリングを行い、覆工内および地山の温度分布を熱電対により測定しました(図4)。これより、浅い深度ほど凍結融

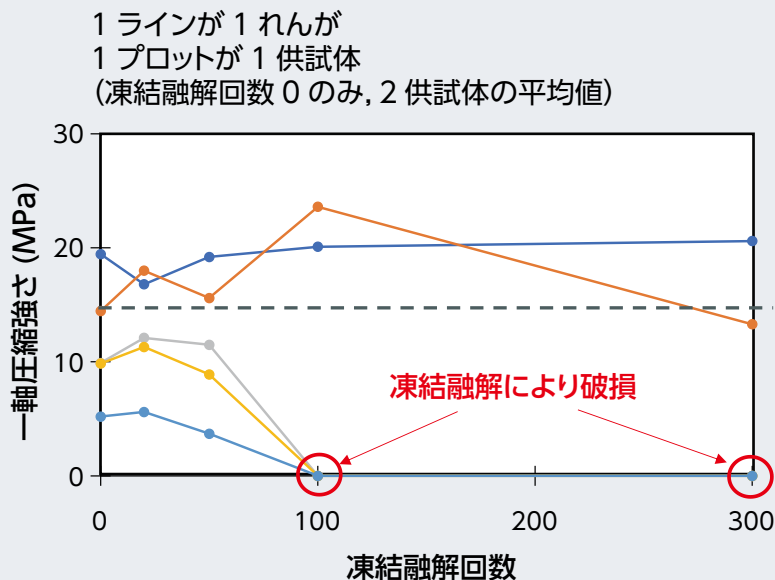
解の回数が多く、深部では温度変化が穏やかであることがわかります。このため、表面から徐々に薄く剥離する現象が発生するものと考えられます。

(2) 凍結融解試験

続いて、れんがに対して、凍結(-18℃)と融解(5℃)を繰り返す試験(凍結融解試験)を実施しました。Aトンネルより採取したれんが1つあたり6つの供試体(φ25mm, h=50mm)を作製しました。図5に記載の回数の凍結融解を実施後、一軸圧縮試験を実施することで、凍結融解回数と強度の関係を整理しました。

試験結果を図6に示します。1本の線が1つのれんがブロックから作製した6供試体の試験結果です。これより、一軸圧縮強さが15MPa程度以下のれんがについては、凍結融解回数100回の供試体および300回の供試体で破壊しました。一方で

図6 凍結融解回数と強度の関係



バサルト帯板

玄武岩由来のFRP (Fiber Reinforced Plastic) です。原料を高温で溶融して糸状にすることにより原糸を生成し、原糸を樹脂に含浸し板状に押し出し成形することによりFRPを成形します。鋼材と比べ軽量で、線膨張係数がコンクリートと同等、非腐食性、絶縁性といった特長を持ちます。

おおむね15MPa程度以上のれんが供試体では、300回の凍結融解繰り返し作用を与えても、明瞭な強度低下傾向は認められませんでした。

破壊の発生状況としては、はじめにれんがの細粒分が流出し、次に粒状の小片が分離し、最終的には凍結融解前から存在した微小なクラックが開口して破壊していました。

この結果より、もともとの強度が低い低品質のれんがは、凍結融解作用により破壊に至りやすいこと、剥落は、徐々に強度が低下して発生するというのではなく、ある時期に亀裂が発生して剥離し、剥落に至ることがわかりました。

なお、本試験では凍結融解繰り返し回数と、れんがの吸水率、超音波伝播速度、反発硬度の

関係を試験しましたが、いずれも明瞭な劣化傾向は認められませんでした。

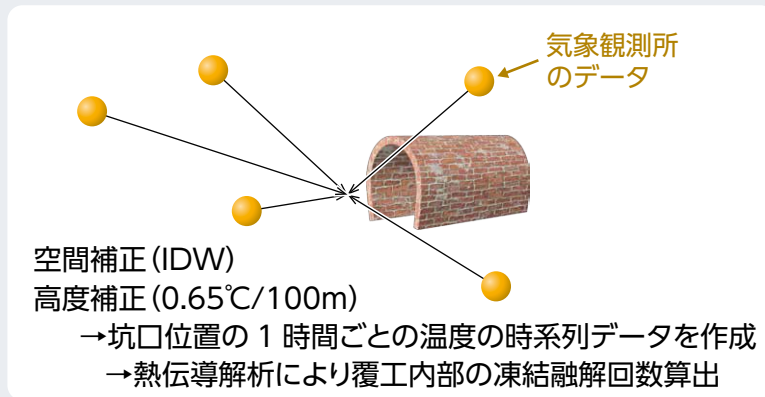
(3) 推定される劣化メカニズム

以上の結果から、凍害によるれんがの劣化メカニズムとしては以下が考えられます。

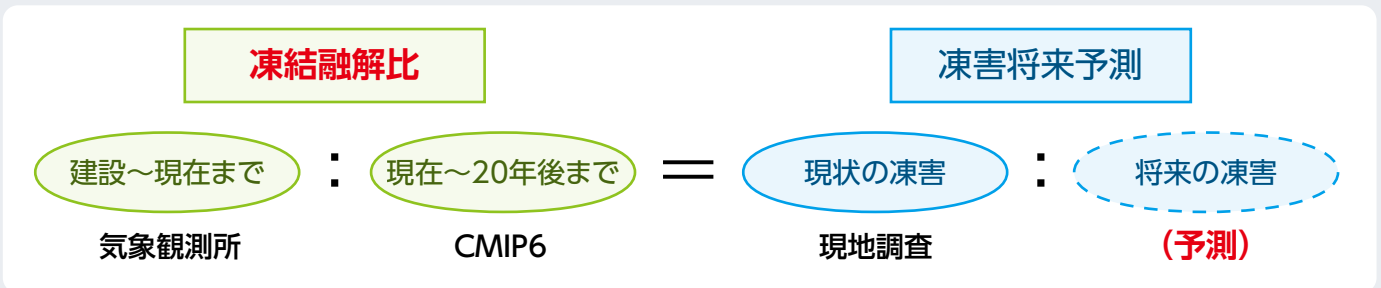
- ①水は氷となる際に約9%の体積膨張するため、れんが内の粗部（大きな間隙）周辺にて間隙水が凍結することで機械的な破碎が生じて粒状の小片が流出する。
- ②さらに進展するとれんが片の分離につながり、最終的にはクラックが伸長して剥離に至る。

れんがは吸水率が大きいものほど強度が低い傾向にあり、低品質であるといえます。特にそ

図7 将来の凍害の予測法の考え方



凍結融解回数の「これまで」と「これから」の比が将来の凍害程度と対応すると仮定



CMIP6

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 6 次影響評価報告書のための解析に用いられた将来の温暖化予測の気候モデル相互プロジェクトを指します。CMIP6には複数の気候モデルとさまざまな要因からなる平均気温上昇を想定したシナリオが存在します。本検討では凍結融解回数の変化をみるため、中間的な気温上昇シナリオであるSSP 2-45を選択し、気候モデルは気象庁気象研究所のMRI-ESM2.0を採用しました。

のような低品質のれんがが使用され、繰り返しの凍結融解作用を受ける環境である場合、凍害を生じやすくなるものと考えられます。

れんがトンネルの凍害予測法

凍害を受けるトンネルでは、近年劣化（剥離）が収まってきているトンネルが見られる一方、逆に劣化が進行していると考えられるトンネルも存在します。これは、凍害が、気温が低い程発生するものではなく、凍結融解を繰り返す回数と関係があることによるものと考えられます。

そこで、気象観測所のデータ、温暖化予測の気候モデル相互プロジェクト（[CMIP6](#)[※]）のデータを用いて、トンネル坑口位置の1時間ご

との温度の時系列データを作成し、そのトンネルの将来の凍害を予測するモデル（[図7](#)）を作成しました。

凍害予測モデルでは、トンネル完成後から現在までの凍結融解の年平均回数と、現在から将来20年間の凍結融解回数の年平均回数を求め、その比を凍結融解比として整理します。ここで、凍結融解回数は、れんがが0℃以上の温度から0℃よりも小さい温度となり、また0℃以上に戻って1回とカウントします。

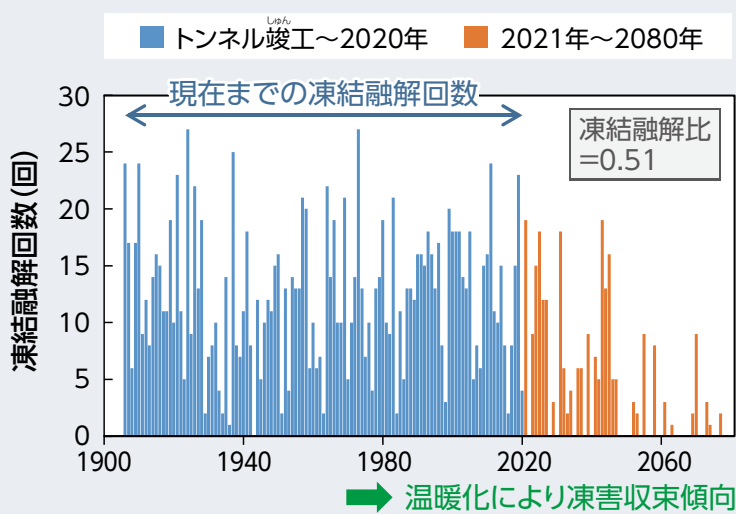
凍結融解比、現状の健全性、れんがの品質、漏水状況を組み合わせることで今後の凍害を予測することができます。

凍結融解比の計算結果の一例を[図8](#)に示します。このように、温暖化により将来的に凍結融解回数が減るトンネルがある一方で、凍結融解回数が増える場合もあることがわかります。

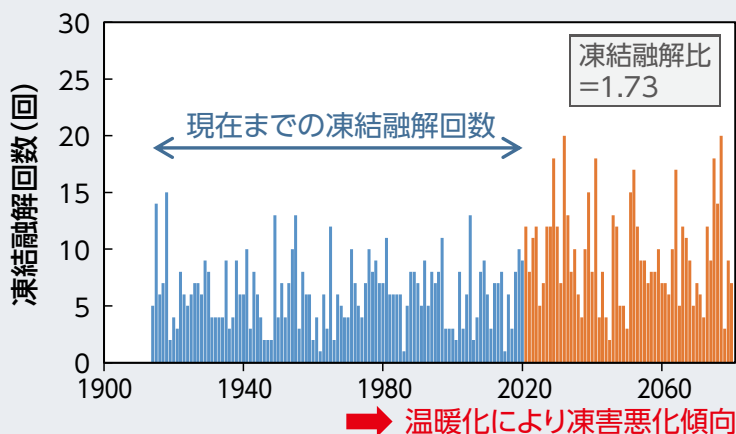
おわりに

鉄道トンネルは自動車が走る道路トンネルと比べて歴史が古く、現在でも多くのれんがトンネルが供用されています。進行性の劣化現象は、経年とともに状況が悪化するため、適切な措置が必要となります。ここで紹介した凍害予測法は、凍害を受けるれんがトンネルの個別検査段階の将来予測に活用できるものと考えております。[RRR](#)

図8 凍結融解回数のこれまでの実績と今後の予測



(a)トンネル 1



(b)トンネル 2

文献

- 1) 国土交通省：日本鉄道史，<https://www.mlit.go.jp/common/000218983.pdf>（入手日：2023/8/25）
- 2) 鉄道総合技術研究所：トンネル補修・補強マニュアル，2007
- 3) 新原元樹，浅井慎平：バサルト繊維プレート（BFP）と防水断熱板（PG板）を併用した対策工法，日本鉄道施設協会誌，No.666，2022