

非定常熱伝導解析によるスラブ軌道てん充層の凍害範囲の評価

高橋 貴蔵* 三澤 祥文** 齊藤 成彦***

Study on Frost Damage Area of Slab Track Filling Layer

Takatada TAKAHASHI Yoshifumi MISAWA Shigehiko SAITO

Some slab tracks have sustained frost damage due to repeated freezing and thawing in their filling layers. Previous studies have shown that frost damage extends further at the corners than at the sides; however, the underlying cause remains unclear. In this study, we conducted temperature variation tests and unsteady heat conduction analyses using the finite element method. The results showed that heat transfer from the side and end faces of the slab track expands the freezing area at the corners.

キーワード：スラブ軌道，てん充層，CA モルタル，凍害，非定常熱伝導解析

1. はじめに

スラブ軌道は図 1 に示すようにレールを固定した軌道スラブをてん充層で支える構造である。てん充層には、一般にセメントアスファルトモルタル（以下、「CA モルタル」とする）が用いられている。1970 年代～1980 年代に敷設された寒冷地のスラブ軌道の一部では、外部に露出しているてん充層の外周部でスケーリングと考えられる劣化が生じている他に、軌道スラブ-てん充層間の隙間や CA モルタルの圧縮強度の低下が確認されている¹⁾。これらの劣化や隙間の原因の一つとして、凍結融解作用の影響が考えられている。

これまでの調査により凍害によるてん充層の劣化や隙間の範囲はレールに平行する側面よりも隅角部の周囲で広いことが確認されている。この原因として隅角部の周囲は軌道長手方向と横断方向の温度の影響により凍結融解を受ける範囲が広いと想定されているものの、これまで隅角部に着目したてん充層の温度の伝達に関する検討は行われていなかった。

そこで、本研究ではスラブ軌道の一部を模擬した試験体に対する温度変化試験を行うとともに、有限要素解析を用いた温度変化のシミュレーションを実施した²⁾。さらに、実寸法のスラブ軌道の有限要素解析モデルを作成し、凍害を受ける可能性があるてん充層の範囲について検討を行った²⁾。

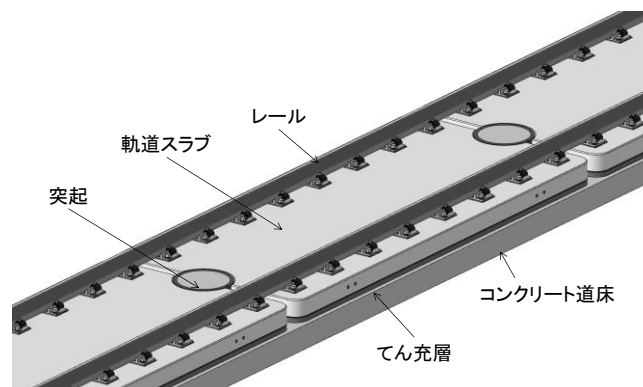


図 1 スラブ軌道の概略図

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

** 元 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

*** 山梨大学大学院

2. スラブ軌道試験体の温度変化試験

2.1 スラブ軌道試験体および試験方法

スラブ軌道試験体（以下、「試験体」とする）の形状および寸法を図2に示す。試験体は恒温室内に設置することが可能な寸法とし、スラブ軌道の片側でかつレール締結装置2箇所分の大きさとした。ここで、試験体のレールに平行する面を側面、レールを横断する面を端面とする。実際のスラブ軌道で露出面とならない試験体の各部に対して断熱材を設置し、外部から熱伝達される範囲が実際のスラブ軌道と同等となるようにした。てん充層には、整備新幹線のトンネル区間や温暖地の明かり区間で使用されているCAモルタルを用いた³⁾。使用したCAモルタルの一部には異なる材料も含まれているが、配合や空気量の基準は凍害が生じているCAモルタルと同様であり、耐凍害性や熱伝導率等の熱特性は概ね同等と考えられる。

温度変化試験はCAモルタルの圧縮強度が十分に発現した後に実施した。温度変化は恒温室の設定温度を制御することで与え、日射の影響は考慮していない。温度変化試験では、新幹線沿線の寒冷地を想定し、恒温槽の温度を5℃→-10℃→5℃と変化させる条件を5回繰り返した。5℃から-10℃への低下および-10℃から5℃への上昇に要する時間は、一日の気温変化を再現することを目的として、それぞれ15時間および9時間とした。具体的には、14時から翌日5時までの15時間で気温が低下し、その後9時間で気温が上昇することを想定した。

試験体の温度を測定するため、図3に示す通りてん充層の内部の上面から5mm下の位置に熱電対を設置した。熱電対については、隅角部から45度方向を「45度方向」、側面中央から横断方向を「横断方向」としてグループ分けした。なお、試験体の上面、側面および端面にも熱電対を設置し、得られた温度については「3章」に示すシミュレーションに用いた。

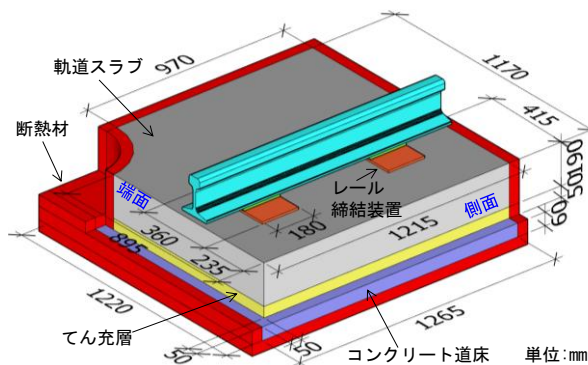


図2 スラブ軌道試験体の形状および寸法

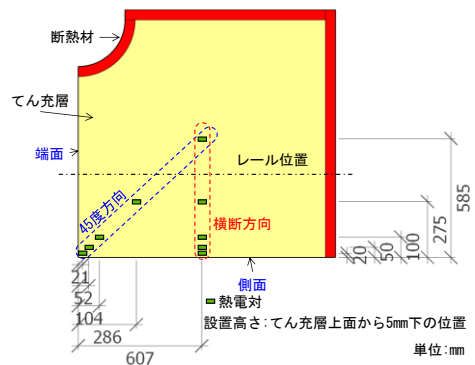


図3 てん充層内部の熱電対の配置の配置図

2.2 てん充層内部温度

てん充層内部の温度変化を図4に示す。図4にはてん充層側面および端面で測定した温度も併せて示している。ここで、45度方向における側面からの奥行きが20mm地点については、熱電対の不具合により温度を測定することができなかったため、図4に示していない。

45度方向および横断方向ともに、側面からの奥行きが深くなるほど、最高・最低温度の絶対値が小さくなった。5回目の温度の降下-上昇時におけるてん充層内部の最低温度と側面からの距離の関係を図5に示す。45度方向と横断方向で最低温度を比較すると、45度方向の方が低くなった。45度方向のてん充層の温度は、側面および端面からの熱伝導の影響を受けたためと考えられる。

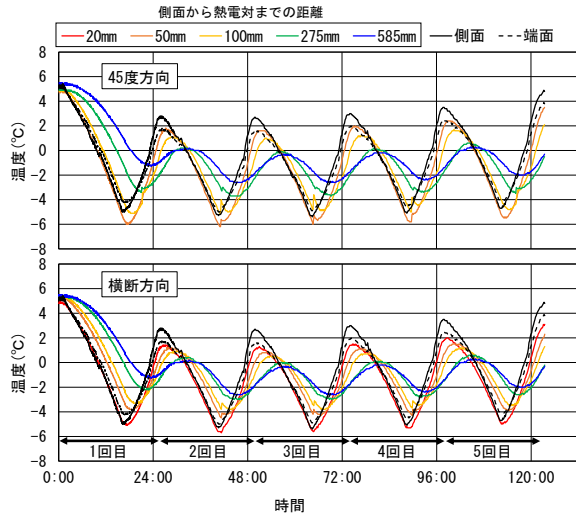


図4 てん充層内部の温度変化

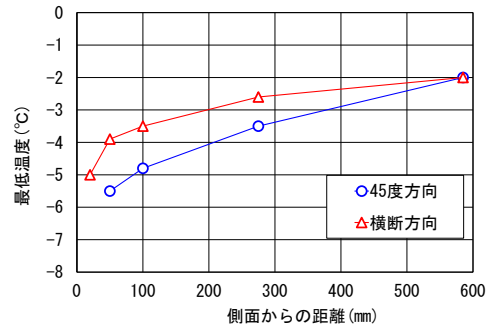


図5 最低温度と側面からの距離の関係

3. 温度変化試験のシミュレーション

3.1 スラブ軌道試験体の解析モデルおよび解析条件

試験体のてん充層の温度変化を評価するために有限要素法による3次元非定常熱伝導解析を実施した。有限要素解析にはLS-DYNA (V971R9.3.1)を用いた。解析に用いたコンクリート(軌道スラブ、鉄筋コンクリート版)およびCAモルタルの熱特性を表1に示す。CAモルタルの熱伝導率は、迅速熱伝導率計を用いた熱線法により測定した値を用いた²⁾。CAモルタルの線膨張係数は、角柱供試体(100×100×400mm)に対する温度変化試験で得られた結果に基づいて設定した⁴⁾。コンクリートの熱伝導率および比熱は、李らが実施した平衡含水率と熱伝導率の関係に関する研究⁵⁾を参考に、ここでは解析を試行して決定した。また、コンクリートおよびCAモルタルの密度は、それぞれ2.4g/cm³および1.7g/cm³とした。

解析モデルおよび温度の入力面を図6に示す。図6に示す解析モデルの各表面には温度変化試験で得られた試験体の各表面中央で測定された最低温度および最高温度に基づいて設定した温度を、解析モデルの各表面全面に与えた。

表1 コンクリートおよびCAモルタルの熱特性

	熱伝導率 (W/m/K)	比熱 (J/g/K)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /K)
コンクリート	3.6	1.15	10
CAモルタル	0.355~0.551 (40℃~40℃)	1.05	-2℃以上: 20 -2℃未満: 100

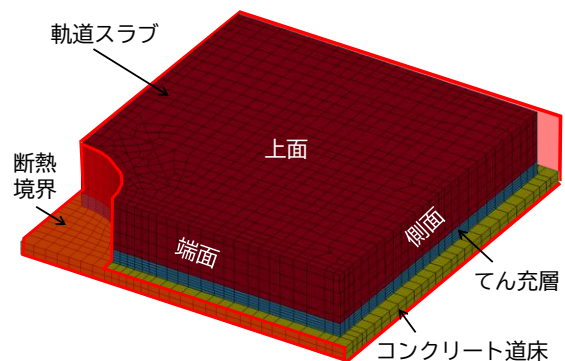


図6 解析モデルおよび温度の入力面

3.2 解析結果および考察

温度変化試験および有限要素解析で得られたてん充層の温度変化を図7に示す。温度変化3回目における側面および端面からの奥行き50mm地点における45度方向の最低温度は、有限要素解析と試験で2℃程

度の差が生じたものの、他の地点においては概ね同程度の結果となった。本解析では、試験体の各表面中央で測定した温度を、解析モデルの各表面に一様に適用した。このため、特に隅角部では実際の温度と差が生じた可能性がある。この温度入力の違いが、45度方向における有限要素解析と試験の間に見られた2°C程度の差の要因と考えられる。なお、軌道スラブの支持状態に影響を与えるてん充層の劣化深さは約200mmとされており⁶⁾、本解析で温度差が生じる範囲は側面からの距離100mm以内に限定されることから、本解析モデルをてん充層内部の凍害範囲の検討に用いた。

図8に62hから65h時点のてん充層上面の温度分布を示す。図中にはCAモルタルの凍結温度⁷⁾とされている-2°Cの境界線も示した。ここで、65hはてん充層上面の温度が最低になる時間である。隅角部周囲でCAモルタルが凍結する範囲は側面や端面よりも広がった。側面と端面の両面から伝わる温度の影響によって隅角部周囲で温度が低下する範囲が広がったと考えられる。したがって、営業線に敷設されているスラブ軌道のてん充層において隅角部周囲の凍害範囲が広い理由の一つとして、隅角部周囲の凍結範囲が側面や端面と比べて広いと推察される。

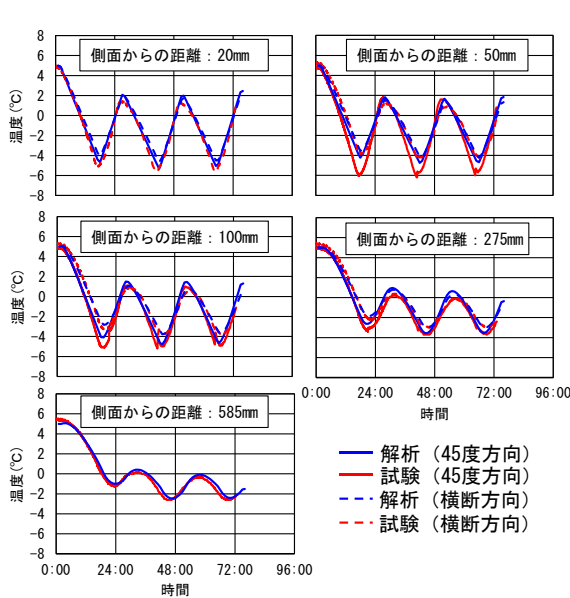


図7 温度変化試験および有限要素解析で得られたてん充層の温度変化

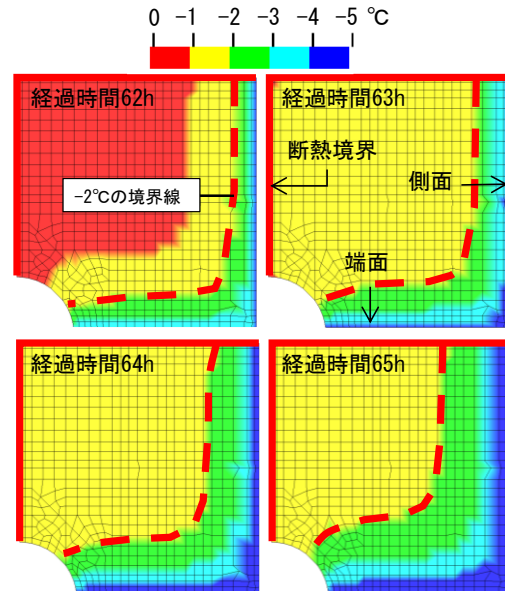


図8 有限要素解析で得られたてん充層上面の温度分布

4. スラブ軌道てん充層の凍結範囲

4.1 スラブ軌道の解析モデルおよび解析条件

スラブ軌道てん充層の凍結範囲に与える気温の影響を検討するため、新幹線で用いられている実寸法の解析モデルを作成し、有限要素法による3次元非定常熱伝導解析を実施した。解析モデルの寸法を図9に示す。なお、解析モデルは1/2対称モデルとした。軌道スラブの形状と配筋は設計図⁸⁾に示されているものと同じとした。解析モデルにおいててん充層の厚さは、標準的な厚さである50mmとした⁹⁾。材料特性は3章と同じとした。

非定常熱伝導解析では、スラブ軌道表面に与える温度を、図10に示す上面(軌道スラブ上面、コンクリート道床上面)および側面・端面(軌道スラブ側面、軌道スラブ端面、てん充層側面、てん充層端面、コンクリート道床側面)に分けて入力した。入力した温度パターンは、営業線のスラブ軌道で測定した軌道スラブ上面およびてん充層側面で実測した値¹⁰⁾に基づくものとし、図11に示すように気温に対して温度差お

よび時間差を与えた。なお、上面の最低温度および側面の最高温度は、それぞれ気温の最低温度および最高温度と同じになるように設定している。上面に比べて側面の温度変化が小さいのは、日射量が異なること¹¹⁾等が影響していると考えられる。側面の最低温度が気温よりも高い理由として、上面は夜間に熱を大気へ放射しやすい一方、側面は大気への放射が少ないこと、また周囲からの輻射熱の影響を受けること等が考えられる。入力する温度パターンの元となる気温を表2に示す。最高気温は+5℃で一定とし、最低気温は-6, -9, -12℃の3種類とした。

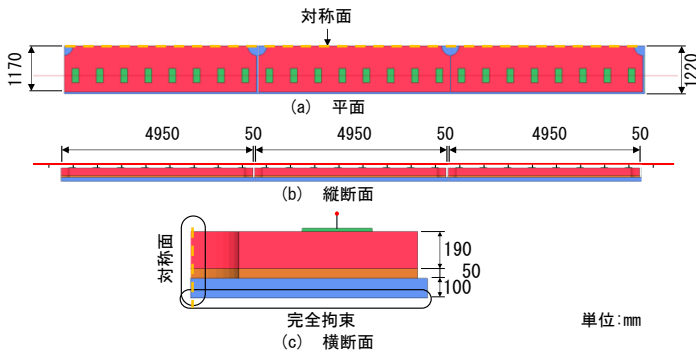


図9 解析モデルの寸法

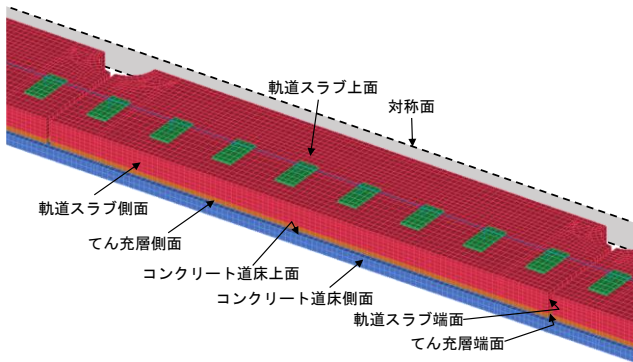


図10 温度の入力面

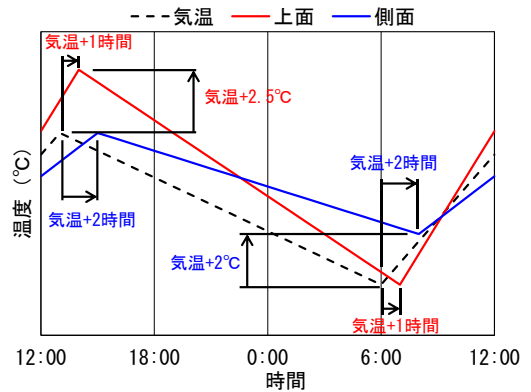


図11 解析に入力する温度パターン

表2 解析ケース

	最高気温(°C)	最低気温(°C)
CASE1	+5	-6
CASE2		-9
CASE3		-12

4.2 スラブ軌道てん充層の最低温度

てん充層上面の要素のうち、図12に示すE1-1~E2-3の6要素に対する温度の経過時間変化を図13に示す。なお、てん充層側面から各要素中心までの距離は、図12に示した通り25mm、250mmおよび380mmである。

図13より、E1-1~E2-3の6要素の温度は、てん充層側面からの距離が遠くなるほど、最低温度は高くなり、温度がピークとなる時間は遅くなった。この結果は、2章に示した試験体に対する温度変化試験と同様であった。

E1-1~E2-3の6要素における最低温度と最低気温との関係を図14に示す。また、E2-2の温度が最低となる8hにおけるてん充層の温度コンターを図15に、スラブ軌道横断面の温度コンターを図16に示す。ここで、図15は図17に示す3層に要素分割したてん充層における中間層の下面の温度コンターであり、図16はE2-1~E2-3の位置におけるスラブ軌道横断面の温度コンターである。

図14より、てん充層側面から同じ距離にある要素の温度を比較すると、隅角部周囲のE1-1~E1-3は中央に位置するE2-1~E2-3より低くなった。図15の温度コンターから分かるように、実寸法のスラブ軌道てん充層においても、てん充層の側面および端面から伝わる温度の影響により、隅角部周囲の温度の方が

低くなり、CA モルタルが凍結する -2°C の範囲が広がったと考えられる。

同じく図 14 より、入力する温度が低いほど、てん充層の温度も低くなった。したがって、最低気温が低い寒冷な地域ほど、てん充層の温度が低下する範囲が広がるため、凍害を受ける可能性がある範囲も広くなると考えられる。なお、凍害は凍結と融解の繰り返しによって発生すると考えられていることから、凍害を受ける範囲の予測には最高温度に関する検討も必要になる。

図 15 より、CASE2 および CASE3 では全てのてん充層の温度が CA モルタルの凍結温度である -2°C よりも低くなった。図 16 に示すように軌道スラブ上面から伝わる温度の影響により、てん充層の内側の温度も低下したと考えられる。そのため、てん充層内部においても凍害が生じる可能性があると考えられる。



図 12 てん充層上面の温度評価位置

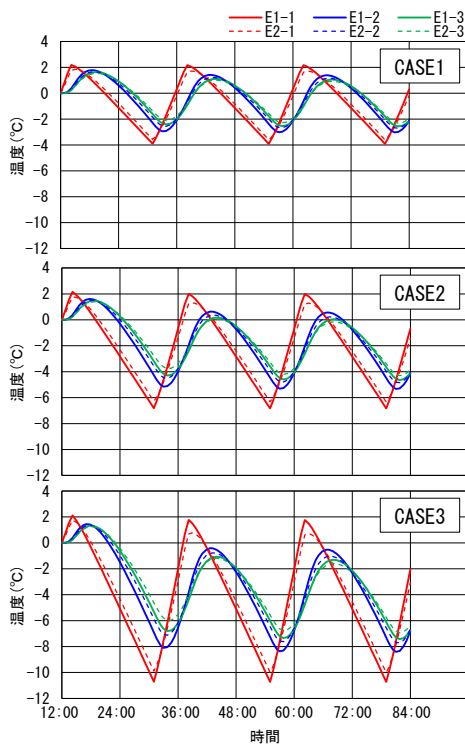


図 13 てん充層上面の温度変化

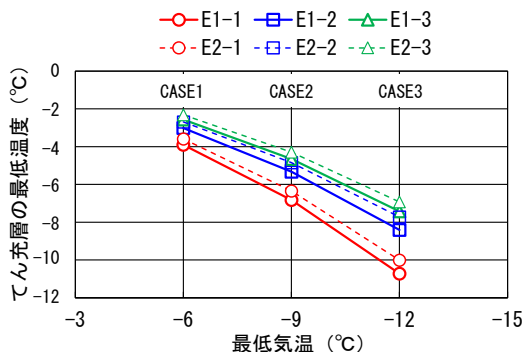


図 14 てん充層上面の最低温度

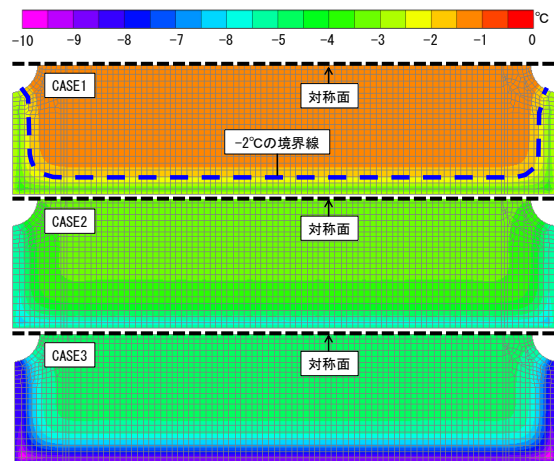


図 15 てん充層の温度コンター (81h)

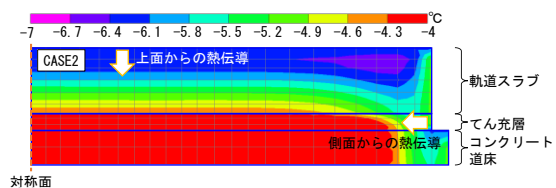


図 16 スラブ軌道横断面の温度コンター (81h)

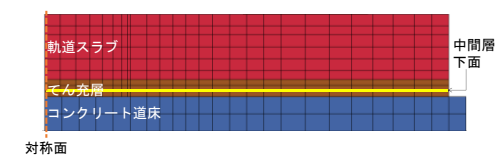


図 17 てん充層の温度コンターの出力面

5. まとめ

凍害によるてん充層の劣化範囲が側面よりも隅角部で広がる原因を推定するため、てん充層の凍結範囲に関する検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) スラブ軌道試験体に対する温度変化試験を行い、てん充層の隅角部と側面の温度を比較した結果、測定を行った全ての点において隅角部の温度の方が低くなった。
- 2) 有限要素解析を用いて温度変化試験をシミュレートした結果、スラブ軌道試験体に対する試験結果を概ね再現できることを確認した。側面と端面の両面から伝わる温度の影響によって隅角部周囲の凍結範囲が広がることがわかった。
- 3) 実寸法のスラブ軌道の解析モデルに対する非定常熱伝導解析を行った結果、実寸法のスラブ軌道においてもてん充層の隅角部周囲で凍結範囲が広がることがわかった。また、寒冷な地域ほど凍害を受ける範囲が広がる可能性があること、さらに、軌道スラブ上面から伝わる温度の影響により、てん充層内部でも凍害が生じる可能性があることを示した。

なお、本論文は文献2を再構成したものである。

文献

- 1) 高橋貴蔵, 小滝康陽, 洲上翔太, 板倉真理佳: てん充層の劣化状態が軌道スラブの応答に与える影響に関する基礎的研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.22, pp.115-121, 2018
- 2) 高橋貴蔵, 三澤祥文, 斎藤成彦: スラブ軌道てん充層の凍害範囲に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.2, I 219- I 226, 2023
- 3) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 軌道関係工事標準示方書, pp.23, 2006
- 4) 三澤祥文, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: 寒冷地における CA モルタルの温度変化の影響に関する基礎的検討, 年次学術講演会講演概要集, Vol.76, V-107, 2021
- 5) 李在永, 原田和典: 高強度コンクリートの平衡含水率と熱伝導率の測定, 日本建築学会近畿支部研究報告集環境系, Vol.51, pp.109-112, 2011
- 6) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 長沼光: スラブ軌道てん充層の疲労寿命に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.619-624, 2015
- 7) 原田豊, 鳥取誠一, 板井則之, 野戸崇治: 耐凍害性セメントアスファルトモルタルの開発に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.12008, 1982
- 8) 日本国有鉄道東京第二工事局: 東北新幹線工事誌雀宮・黒川間, pp.854, 1984
- 9) 佐々木直樹: 新幹線のスラブ軌道, 日本鉄道施設協会, pp.198, 1978
- 10) 三澤祥文, 高橋貴蔵, 稲葉紅子: スラブ軌道てん充層の凍結融解回数の推定に関する検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.26, pp.105-112, 2022
- 11) 秋田宏, 尾坂芳夫: 日射を受けるコンクリート壁の温度分布に関する考察, 土木学会論文集, Vol.378, V-6, pp.147-155, 1987