

論文 鉄道コンクリート構造物の凍害と環境要因に関する分析

千頭 啓司*1・上原 元樹*2・森 淳子*3・岸 利治*4

要旨：従来の凍害危険度マップで同様の危険度に分類される地域の鉄道コンクリート構造物において、凍害発生状況が異なる原因をコンクリートの各種物性と環境要因の観点から調査した。その結果、凍害未発生区間と凍害発生区間との間のコンクリートの物性において大きな差は認められず、いずれのコンクリートも耐凍害性は低かった。一方、気象庁の長期観測値から推定した構造物各地点における気象値と凍害発生程度を調査した結果、冬期平均気温と冬期日照時間が凍害変状数と関係していることが分かった。従って、凍害発生の有無は従来の凍害危険度マップでは表されない環境要因が影響していることが分かった。

キーワード：凍害, 空気量, 耐久性指数, 気泡間隔係数, 気象解析

1. はじめに

凍害は寒冷地に発生する代表的な変状であり, JR 東日本でも、寒冷地に位置する東北地区において凍害が多く確認されている¹⁾。一方で、1982年に開業した東北新幹線(大宮・盛岡間)と上越新幹線(大宮・新潟間)では、同時期に同様の設計基準で建設され、従来の凍害危険度マップ²⁾で同様の危険度に分類されているが、凍害が多く確認されているのは、東北新幹線の一部区間のみである。上越新幹線では散水消雪が凍結を防止し、凍害を抑制している可能性があるが、原因は明確でない。

本論文では、東北新幹線の一部区間でのみ凍害が多く発生している原因を検討するため、実構造物からコンクリートコア試験体(以下、試験体とする)を採取し、各種物性を調査した。また、凍害発生程度に影響する環境要因を調査した。本論文ではその結果を示す。

2. コンクリートの物性調査

東北新幹線の凍害発生区間におけるコンクリートの物性は調査済みのため¹⁾、東北新幹線と上越新幹線の凍害未発生区間から試験体を採取し、凍害発生区間との物性の相違を検討した。また、建設年度が比較的新しい区間の新幹線構造物からも試験体を採取し、比較検討した。物性調査は、凍結融解試験、空気量および気泡間隔係数測定試験を行った。

2.1 コンクリートコア試験体採取

調査対象構造物の一覧を表-1と表-2に示す。図-1に示すように、試験体はラーメン高架橋または単純桁のスラブ上面から採取した。凍害未発生区間の東北新幹線および上越新幹線(以下、分類Aとする)と建設年が新しい区間の東北新幹線盛岡以北および北陸新幹線(以下、分類Bとする)から試験体を採取した。

表-1 調査対象構造物(分類A)

試験体名称	東北1	東北2	上越1	上越2	上越3
線区(新幹線)	東北	東北	上越	上越	上越
構造種別	高架橋	単純桁	単純桁	高架橋	高架橋
建設年 (試験体採取時 までの経年)	1978 (42)	1980 (40)	1980 (40)	1979 (41)	1979 (41)
凍害危険度 ²⁾	1~2	1~2	1~2	1~2	1~2
水セメント比 (%)	49.0	52.0	53.0	48.4	48.4
設計基準強度 (N/mm ²)	27.0	24.0	24.0	27.0	27.0
目標空気量(%)	4.0±1.0	4.0±1.0	4.0±1.0	4.0±1.0	4.0±1.0

表-2 調査対象構造物(分類B)

試験体名称	東北3	東北4	B-北陸1	B-北陸2
線区(新幹線)	東北	東北	北陸	北陸
構造種別	高架橋	高架橋	高架橋	高架橋
建設年 (試験体採取時 までの経年)	2008 (14)	2008 (14)	1996 (26)	2011 (11)
凍害危険度 ²⁾	2	2	3	1~3
水セメント比 (%)	53.0* ¹⁾	53.0* ¹⁾	53.0* ¹⁾	53.0* ¹⁾
設計基準強度 (N/mm ²)	24.0	24.0	24.0	24.0
目標空気量(%)	4.5±1.5	4.5±1.5	4.5±1.5	5.5±1.5

*1 詳細な配合は不明なため設計条件上の最大水セメント比を記載



図-1 試験体採取状況

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 修士(工学)(正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士(工学)(正会員)

*3 (株) 工学気象研究所 博士(環境科学)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学)(正会員)

2.2 凍結融解試験

JISA 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法（水中凍結融解試験方法）に準じて、採取した直径約75mm×高さ約150mmのコンクリートコアを各3本用いた。経年による表面部の劣化を考慮するために、表面部は切断しなかった。また、試験開始の4日前から温度20℃の水中に浸漬した。凍結・融解の繰返しを300サイクルもしくは相対動弾性係数が試験前の60%未満になるまで継続し、耐久性指数を算出した。なお、この試験は100mm×100mm×400mmの角柱試験体用の試験であるが、今回は円柱試験体を用いるため、本試験では次の工夫を加えた。円柱試験体では、4隅の隙間が大きくなり、水圧が過剰にかかる、または均等に作用しなくなることが想定されたため、図-2に示すように、4隅に面木を入れた。また、JISA 1127では動弾性係数を算出する一次共鳴振動数の測定において、たわみ振動を使用するが、本試験体ではコンクリート表面に凹凸があるほか、試験中にスケーリングが著しく進行した場合、安定した測定を行うことが難しくなることが想定されたため、縦振動による一次共鳴振動数から動弾性係数を求めた。



図-2 面木配置状況

2.3 空気量および気泡間隔係数測定

コンクリートの耐凍害性に影響する空気量および気泡間隔係数を、ASTM C 457「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメーターと空気量の測定方法」に準じて測定した。採取コアから直径約75mm×高さ約10mmの試料を切り出し、据置型気泡間隔係数測定装置により各2本測定した。

3. 環境要因による凍害発生程度の評価

凍害発生程度には、コンクリート自体の耐凍害性だけでなく環境要因が関係することから、気象庁の長期観測値から東北・上越新幹線が開業した1982年以降40年間の各地点における気象値を約1kmメッシュ（以下、メッシュ気象値と呼ぶ）で推定し、推定した気象値と凍害変状数との相関を検証した。

3.1 JR 東日本管内全域におけるメッシュ気象値の推定

(1) 気象要素と作成範囲

表-3に作成したメッシュ気象値を推定するために用いた各種条件を示す。気象要素は、凍害に関係すると推定した、気温・日照時間・降水量・降雪水当量・湿度とした。

表-3 メッシュ気象値推定に用いた各種条件

項目	内容
気象値推定期間	1982年～2021年 (9月～翌6月)
時間間隔	1時間間隔※
格子間隔	約1km (全国標準地域メッシュ3次メッシュに準拠)
作成エリア	JR 東日本の全線路を含むエリア
気象要素	気温・日照時間・降水量・ 降雪水当量・湿度

※1982～1990年の湿度のみ3時間間隔

(2) メッシュ気象値の作成方法

表-3に示す気象要素について、気象庁観測点のデータ³⁾から、変分法を用いてメッシュの中心点での値を推定した。気温、日照時間、降水量は、気象官署およびアメダス地点の毎時データを基に、メッシュ中央点での気象値を推定し、メッシュ気象値とした。ただし、2006年1月からの降水量に関しては、推定値よりも精度の高い解析雨量データを用いた。さらに、降水量のうち、雪として降った量を示す降雪水当量を算出した。また、相対湿度は気象官署のみで測定されているため、気象官署のデータを用いて推定した。

(3) 気象統計値の作成

40年間のメッシュ気象値を平均した値を気象統計値とした。また、12月から2月を冬期とし、その間のメッシュ気象値を冬期平均気象統計値とした。作成した冬期平均気温の例を図-3に示す。これはJR 東日本管内における40年間の冬期平均気温を分布図として視覚化したものである。図中の○は、東北新幹線と上越新幹線の橋りょう位置を示している。○が無い箇所は、トンネルや土工設備がある区間になっている。

3.2 橋りょう毎の凍害変状数算と気象値

(1) 橋りょう毎の凍害変状数

凍害変状数は、橋りょう上面に生じている変状を対象とし10km毎に集計した。これは、気象値と相関を検証するには、ある程度のエリアで変状数を平均化した方が、相関が出やすいと考えたからである。また、詳細な変状の規模が明確でないため、変状箇所を1箇所として集計している。図-4に東北新幹線の変状数を、図-5に上越新幹線の変状数を示す。東北新幹線では170km付近から凍害が確認され、470km付近が最も多く、上越新幹線ではキロ程110km付近で少数の凍害が確認されている。

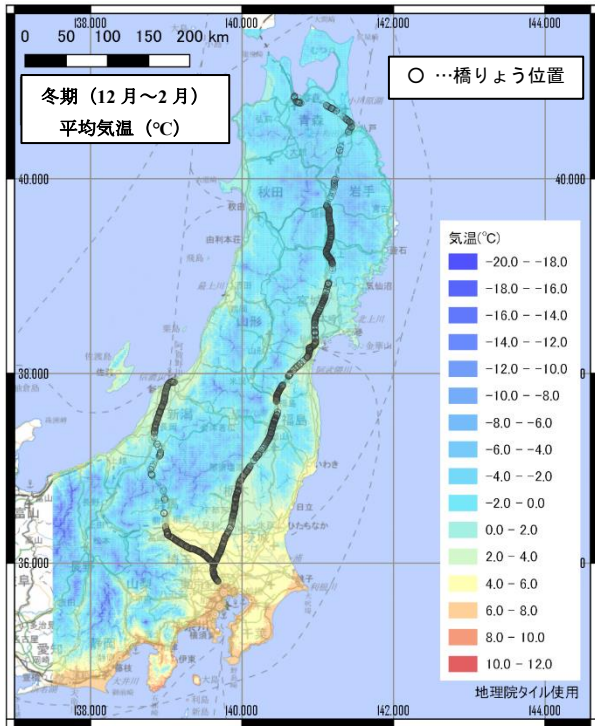


図-3 冬期平均気温（40年間）

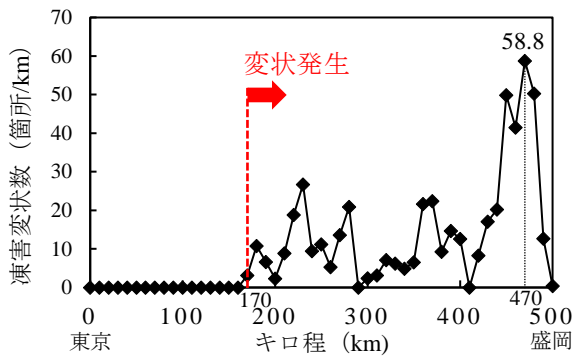


図-4 凍害変状数（東北新幹線）

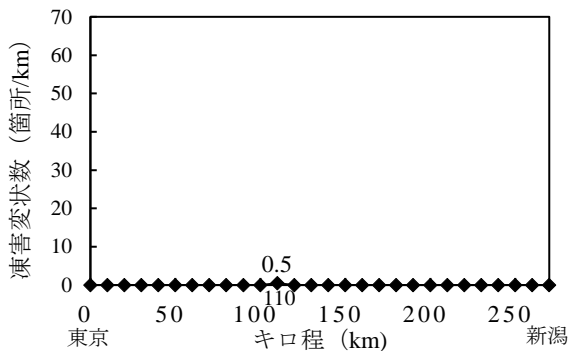


図-5 凍害変状数（上越新幹線）

(2) 橋りょう毎の気象値

作成したメッシュ気象値を用いて、橋りょう毎に気象値を抽出した。気象値の抽出には地理情報システム QGIS⁴⁾を用いた。橋りょう毎の気象値を抽出する際の位置基準は、それぞれの橋りょうの始点（東京方の端）と

した。図-6 にメッシュと中心点、橋りょう始点位置を示す。前述したように気象値はメッシュ中心点（図中の×）について作成しており、橋りょうの始点（図中の○）が含まれるメッシュの気象値を各橋りょうの気象値とした。メッシュ内で大きく標高が異なる場合は、橋りょう始点位置とメッシュ中心点で気象値が異なることになる。新幹線の場合、山岳域はトンネルであり、標高に大きく差があるところは少ないと想定されるが、トンネル間の橋りょうはメッシュ中心点と気象値が異なる場合がある。

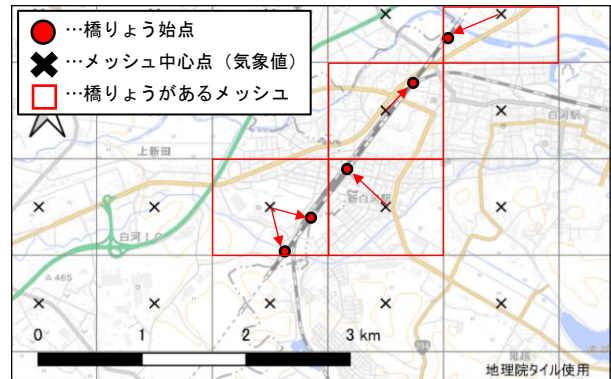


図-6 メッシュと橋りょうの位置

4. コンクリートの物性調査結果

4.1 凍結融解試験結果

図-7 に表-1 における分類 A の凍結融解サイクル毎の相対動弾性係数および耐久性指数を示す。なお、図にはコンクリート試験体 3 本の平均値を記載している。分類 A のコンクリートでは、凍結融解試験の規定サイクル数である 300 サイクルまで破壊しなかった試料は、東北 2 の 1 種類のみであった。それ以外、4 試料の耐久性指数は一般的に耐凍害性があると判断される 60 より低い値を示している。また、凍害による被害がほとんど生じていない上越新幹線の構造物から採取した試料は、いずれも東北新幹線の試料に比べて早期に試験が終了している。図-8 に分類 B の凍結融解サイクル毎の相対動弾性係数および耐久性指数を示す。分類 B のコンクリートでは、いずれの試料も凍結融解試験の規定サイクル数である 300 サイクルまで破壊せず、耐久性指数は 60 より高い値を示した。なお、分類 B のコンクリートは分類 A と比較して施工時から耐凍害性が高い可能性もあるが、経年が浅いことから、凍結融解の履歴を受けている回数が少ないため、耐久性指数が高く出やすい可能性も考えられる。

以上の結果から、東北・上越新幹線で凍害が発生していない区間のコンクリートは、東北 2 以外は凍害が発生している区間と同程度の耐凍害性であることが分かった。また、建設年度が新しい区間の東北新幹線盛岡以北および北陸新幹線は耐凍害性が高いことが分かった。

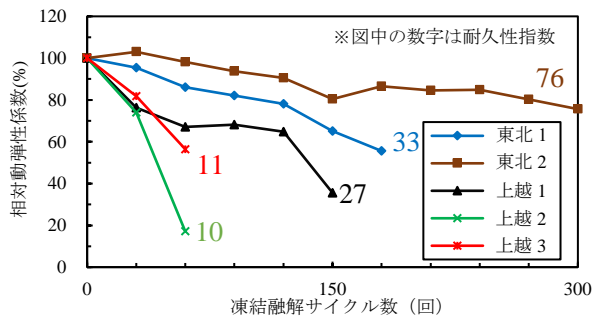


図-7 凍結融解試験結果 (分類 A)

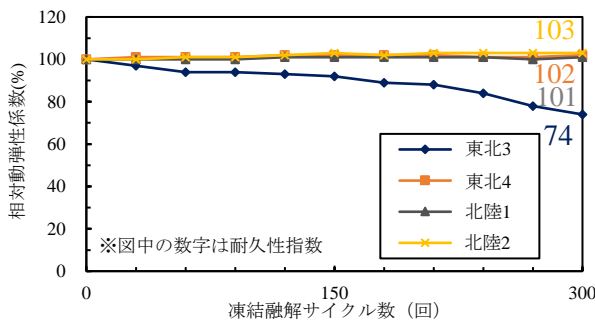


図-8 凍結融解試験結果 (分類 B)

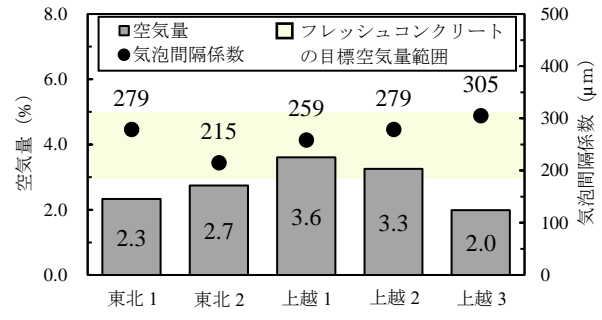


図-9 空気量と気泡間隔係数 (分類 A)

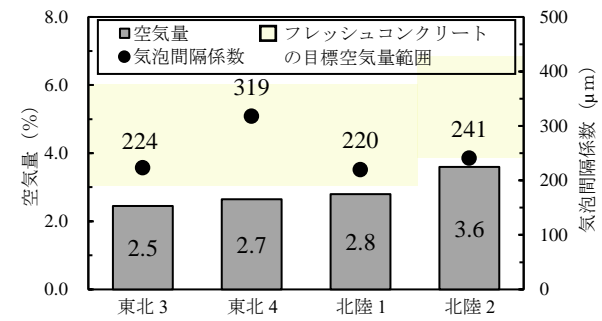


図-10 空気量と気泡間隔係数 (分類 B)

4.2 空気量および気泡間隔係数測定結果

図-9 に分類 A の空気量と気泡間隔係数の測定結果 (試験体 2 本の平均値) を示す。分類 A のコンクリートにおいて上越 1 と上越 2 の空気量は、設計上の空気量下限値である 3% を上回っていたが、それ以外は下回っていた。なお、耐久性指数が 60 より高かった東北 2 でも、空気量は 2.7% であった。また、優れた耐凍害性が期待できるとされている気泡間隔係数 200~250 μm 以下の値を示したのは⁵⁾、東北 2 のみであった。空気量が少なく、気泡間隔係数が大きい傾向は凍害発生区間から採取されコンクリートと同様の結果であった¹⁾。

図-10 に分類 B の空気量と気泡間隔係数の結果を示す。分類 B のコンクリートでは、全ての試料で設計上の空気量下限値を下回っていた。また、気泡間隔係数が、200~250 μm 以下の値を示したのは、東北 3、北陸 1、北陸 2 であった。なお、本試験で測定された空気量は、硬化後における現時点のコンクリートを測定したものであり、施工時における空気量との関係については、練り混ぜ時の空気量が不明なため直接比較はできない。しかし、実構造物コンクリートにおいて測定された空気量は、設計上の下限値よりも低いものが 9 試料中 7 試料確認され、空気量が少ない傾向は凍害が発生している区間から採取されたコンクリートと同様であった¹⁾。フレッシュコンクリートに対して硬化コンクリートの空気量が必ずしも一致せず、硬化後では 3% 程度低下する例も確認されている⁶⁾。このことから、当該コンクリートの低い空気量は、練り混ぜ時のフレッシュコンクリートの空気量が規格範囲内に収まっていたとしても起こり得ることである。

4.3 耐凍害性 (耐久性指数) の評価

図-11 に空気量と耐久性指数との関係を、図-12 に気泡間隔係数と耐久性指数との関係を示す。なお、検討には過去に実施した同様の調査結果¹⁾も加えて検討を行った。空気量と耐久性指数では正の弱い相関が、気泡間隔係数と耐久性指数では負の相関が確認された。気泡間隔係数は、従来の研究からも耐凍害性と相関があるとされており、本試験においても同様の結果が得られた。

一方で、耐凍害性と空気量は相関がやや低く、空気量だけでは説明ができない結果も多いため、より詳細に分析した。ここで、気泡直径 1.00mm 以上の空気量は耐凍害性に寄与しないとされており、気泡直径が 0.30mm あるいは 0.15mm より小さい空気量が耐凍害性に対する寄与が大きいと言われている⁶⁾。そこで、空気量を気泡直径で分類し、耐久性指数との関係を調べた。図-13 に分類した空気量と耐久性指数から求めた相関係数を示す。この図は横軸にグループの気泡直径最大値を示しており、例えば横軸が 1.00mm の場合は、気泡直径 0~1.00mm の空気量グループであることを示している。ここで、気泡直径 0~0.10mm のグループで最も耐久性指数との相関が高くなった。図-14 に気泡直径 0~0.10mm の空気量と耐久性指数との関係を示す。0~0.10mm の空気量が多いほど耐久性指数が高い傾向を示し、0.4% 以上で高い耐凍害性 (耐久性指数 60 以上) を有すると推察された。

以上、耐凍害性を評価する手法を検討した結果、気泡間隔係数に加えて気泡径が 0~0.10mm の範囲の空気量を評価することにより、コンクリートの耐凍害性 (耐久性指数) を精度良く評価できることが分かった。

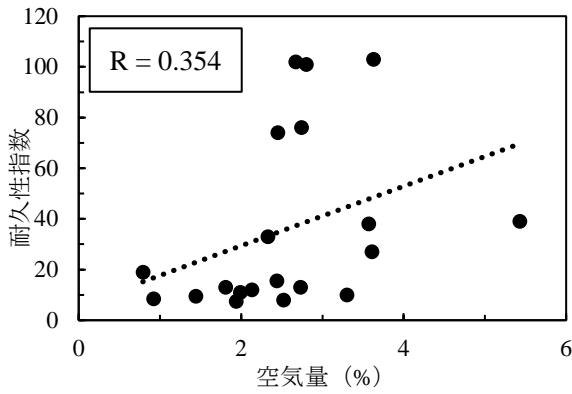


図-11 空気量と耐久性指数

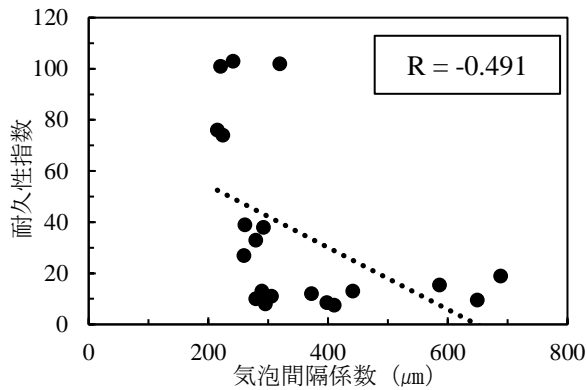


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数

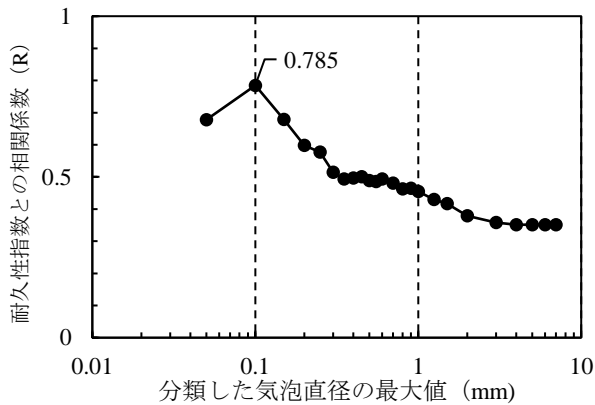


図-13 分類した気泡直径毎の空気量と耐久性指数との相関係数

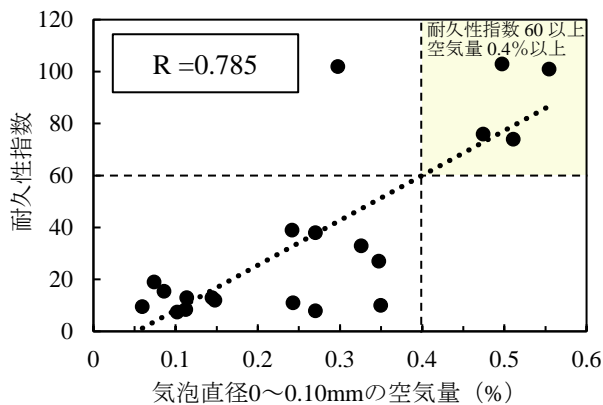


図-14 空気量 (0~0.10mm) と耐久性指数

5. 環境要因による凍害発生程度の評価結果

5.1 冬期平均気温時間・冬期平均日照時間と凍害変状数

凍害を発生させる要因として気温が重要であることから、図-15に示すように冬期平均気温と凍害変状数関係を分析した。3℃以下で凍害が発生し始めることが分かる。また 0℃を境に凍害が増加することが分かる。一方で、3℃以下でも凍害が発生していない箇所も存在していることが分かる。そこで、凍害を発生させる要因として水分供給条件も重要であることから、図-16に示すように、冬期平均日照時間と凍害変状数の関係を分析した。

冬期平均日照時間が470時間以上、または230時間以下では、凍害が発生していないことが分かる。これは、日照が多い場所では、気温が高く、さらに晴れが多いため凍害を発生させる原因である水分の供給が少なく、凍害が発生しないためと考えられる。一方で、氷点下の気温下でも日射があれば融解が発生し凍結融解回数が増加するが、日照が少ない場所では凍結が継続することにより、凍害が発生しにくくなると考えられる。

また、凍害が発生している範囲の中で、凍害変状数が増加している箇所があることが分かる。この箇所は冬期平均気温が0℃以下にあり、気温が低下すると凍害変状数が増加する傾向にあることが分かった。上越新幹線では散水消雪が凍害を抑制している可能性も考えられていたが、気温と日照による環境要因によっても凍害発生条件を説明できることが分かった。

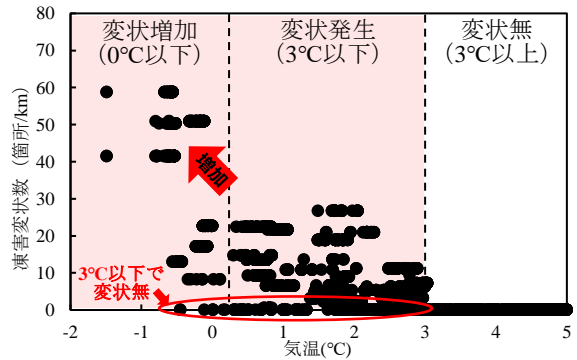


図-15 冬期平均気温と凍害変状数

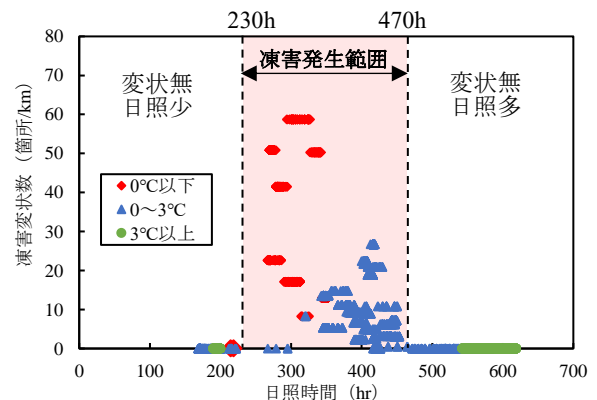


図-16 冬期平均日照時間と凍害変状数

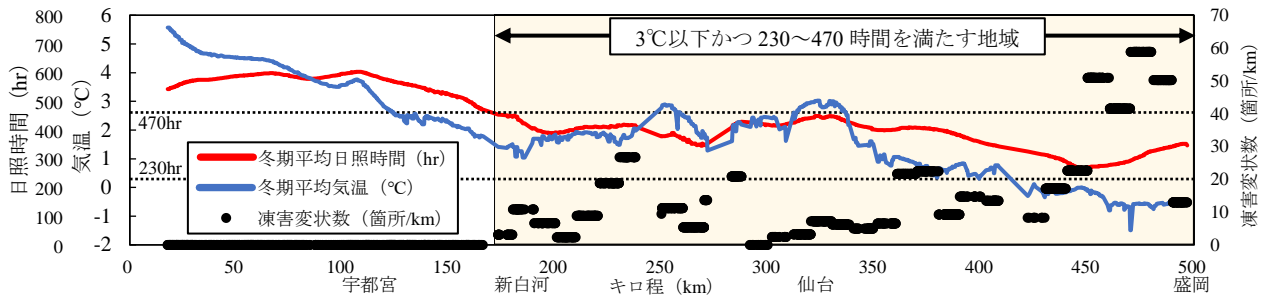


図-17 縦断面図（東北新幹線）

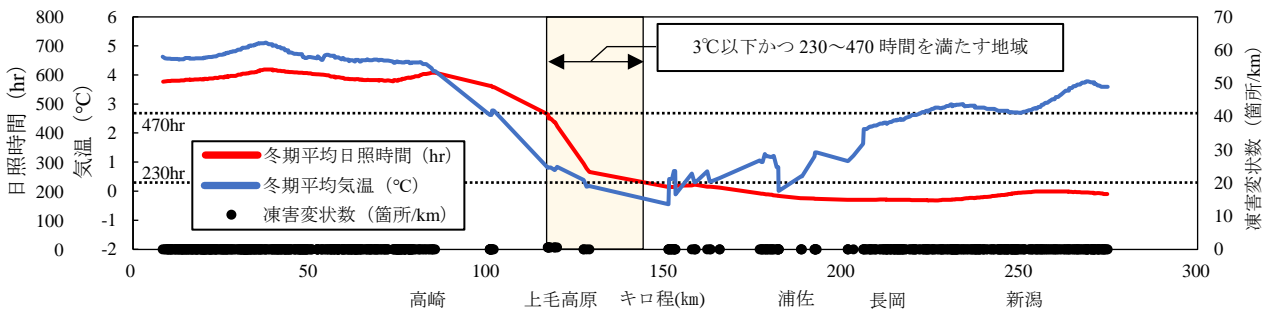


図-18 縦断面図（上越新幹線）

5.2 縦断面図による分析

冬期平均気温、冬期平均日照時間と凍害変状数の関係を示した縦断面図を示す。図-17に東北新幹線の縦断面図を、図-18に上越新幹線の縦断面図を示す。凍害変状数をプロットしていない箇所はトンネルなどのコンクリート橋りょうが無い区間であり、上越新幹線はトンネルが多く存在するためプロットされていない箇所が多い。

東北新幹線では、約170kmから冬期平均気温が3°C以下かつ冬期平均日照時間が470時間以下となり凍害が発生し始める。また、425km付近から冬期平均気温が0°Cを下回る区間があり、より気温が低下する450km以降から凍害変状が増加していることが分かる。

上越新幹線では、唯一凍害確認されている区間は、冬期平均日照時間が約470時間であったが、気温は低いものの凍害が発生する日照時間（冬期平均気温が3°C以下かつ冬期平均日照時間が230~470時間）に該当する区間は少なく、凍害が発生しにくいことが分かる。また上記に該当する区間はトンネルが多く、橋りょうが少ないことも凍害変状が少ないことに影響している可能性も考えられる。

以上のことから、冬期平均気温、冬期日照時間は凍害との相関が高いことが分かった。従って、凍害の有無はコンクリート自体の耐凍害性だけでなく、従来の凍害危険度マップでは表されない環境要因が影響していることが分かった。今回は冬期の凍結融解作用に着目し、気象と凍害変状数の関係を検証したが、夏期における乾湿の影響などを加味した気象解析も実施し、凍害変状数との関係を検証する予定である。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 凍害未発生区間の各種物性を調査した結果、凍害発生区間と同様に耐凍害性は低かった。
- (2) 耐凍害性は、気泡間隔係数と0.10mm以下の気泡直径を有する空気量と相関が高いことが分かった。
- (3) 気象庁の長期観測値から推定した気象値と凍害発生程度を調査した結果、冬期平均気温と冬期日照時間が関係しており、従来の凍害危険度マップでは表されない環境要因が影響していることが分かった。

参考文献

- 1) 菅原寛文, 廣田元嗣: 寒冷地に位置する高架橋の劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No. 2, pp.1219-1224, 2017
- 2) 長谷川寿夫, 洪悦郎: コンクリートの凍害に及ぼす外的要因の影響とわが国の凍害危険度, 北海道大学工学部研究報告, 第92号, pp.59-67, 1979
- 3) 気象庁: <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/ctrn/> (閲覧日: 2023年12月7日)
- 4) QGIS: <https://www.qgis.org/ja/site/> (閲覧日: 2023年12月7日)
- 5) 濱幸雄ら: コンクリートの凍害メカニズムと気泡の役割・制御, コンクリート工学, Vol.56, No. 5, pp.431-435, 2016
- 6) 坂田昇ら: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012