

論文 北海道の凍結防止剤散布環境下での凍害暴露実験 2 冬までの評価

遠藤 裕丈*1・安中新太郎*2・高木 典彦*3

要旨： 冬期の車両走行安全性を確保するため、凍結防止剤が散布される寒冷地の道路橋ではコンクリート部材の凍害が懸念される。一般に、コンクリートの耐凍害性は実験室での促進試験で評価される。しかし、耐凍害性を適切に評価するには、現場の環境と実験室の環境の関係を明らかにする必要がある。そこで、北海道の道路橋の下で、コンクリートの凍害の進行と凍結防止剤の散布形態や気温変動など環境因子との関係を明らかにするための暴露実験を行っている。暴露 2 冬までに得た結果を整理した結果、凍結防止剤散布車の出動回数と日最低気温はスケーリングの進行を評価する上で重要な指標である等の知見を得た。

キーワード： 凍結融解, 凍結防止剤, 暴露実験, スケーリング, 相対動弾性係数

1. はじめに

冬期間、走行車両の安全性を確保するために凍結防止剤が散布される寒冷地の道路橋ではコンクリート部材の凍害、特にコンクリート表面に固着した塩分を含む水のクリープ¹⁾等によるスケーリングの促進が懸念される。凍結防止剤散布下で凍結融解作用を受けるコンクリートの耐凍害性は、ASTM C 672²⁾など実験室内での促進試験によって評価されるのが一般的である。しかし、現場環境による影響と実験室の環境による影響の関係が明確でなければ、耐凍害性を適切に評価することはできない。

そこで、コンクリートの凍害の進行と凍結防止剤の散布形態や気温変動などの環境因子の関係を明らかにするため、冬期に凍結防止剤の散布が行われている北海道の道路橋の下でコンクリートの暴露実験を行うこととした。暴露実験は現在も継続中であり、今年で 3 年目になる。本論文は、これまでの暴露 2 冬までに得た結果について評価したものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の配合を表-1に示す。水セメント比は 45, 55, 65%, 使用するセメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種とした。細骨材は苫小牧市錦岡産の海砂 (表乾密度 2.72g/cm³, 吸水率 1.28%, 粗粒率 2.81, 除塩処理済), 粗骨材は小樽市見晴産の碎石 (表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.52%, 粗粒率 7.04) を使用した。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。スランブと空気量の目標値は各々 8±2.5cm, 4.5±1.5% とし, AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体) と AE 助剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤) で調整した。各配合には、使用するセメントの種類と水セメント比を組み合わせた記号を付した。供試体寸法は 100mm

表-1 供試体の配合

| 記号 | 水セメント比 (%) | 使用セメントの種類 | 単位量 (kg/m ³) | | | | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|------|------------|--------------|--------------------------|------|-----|------|-----------|---------|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | | |
| NP45 | 45 | 普通ポルトランドセメント | 150 | 333 | 810 | 1066 | 9.7 | 5.0 |
| NP55 | 55 | | 145 | 264 | 879 | 1067 | 9.2 | 4.6 |
| NP65 | 65 | | 150 | 231 | 925 | 1037 | 10.1 | 4.1 |
| BB45 | 45 | 高炉セメント B 種 | 148 | 329 | 809 | 1065 | 9.0 | 4.8 |
| BB55 | 55 | | 145 | 264 | 875 | 1062 | 9.5 | 4.6 |
| BB65 | 65 | | 147 | 226 | 928 | 1040 | 9.7 | 4.3 |

スランブと空気量は実測値



図-1 暴露箇所 (A 橋, B 橋, …, T 橋の 20 橋)³⁾

×100mm×400mm とした。打設後、常温下で湿布養生を 7 日間行い、その後は暴露開始まで温度 20℃, 湿度 60% の恒温恒湿室に静置した。なお、打設日から 1 冬目の暴露を開始する日までの間隔は 28 日以上空けている。

2.2 暴露箇所

暴露箇所を図-1、各箇所の環境を表-2に示す。ここでは道央、道南、道北地方の国道の道路橋の中から環境に偏りのないよう、また、現場での作業性も勘案し、表中の 20 橋を暴露箇所に選定した。各橋における凍結防止剤散布車の出動回数は、往復散布 1 回 (往路と復路で 1 回ずつ散布) を出動 1 回とすると 8~481 回/年である。凍結防止剤の種類は、塩化ナトリウムもしくは塩化カルシウムである。凍結融解日数は、最高気温 0℃以上で最

*1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)

*3 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 研究員

表-2 暴露箇所の環境

| 橋 | 凍結防止剤散布車 出動回数 (回/年) | 年間の凍結融解 日数 (日/年) | 11月～4 月の日最低 気温の平均(°C) | 橋 | 凍結防止剤散布車 出動回数 (回/年) | 年間の凍結融解 日数 (日/年) | 11月～4 月の日最低 気温の平均(°C) |
|---|---------------------------|------------------------|-----------------------------|---|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| A | 8 | 80 | -9.1 | K | 91 | 88 | -5.7 |
| B | 9 | 71 | -9.7 | L | 184 | 85 | -6.3 |
| C | 34 | 117 | -4.3 | M | 176 | 80 | -6.9 |
| D | 25 | 73 | -7.8 | N | 157 | 88 | -6.3 |
| E | 25 | 71 | -9.0 | O | 395 | 117 | -9.4 |
| F | 18 | 78 | -3.7 | P | 158 | 120 | -5.3 |
| G | 59 | 90 | -10.3 | Q | 148 | 97 | -3.5 |
| H | 72 | 89 | -5.1 | R | 170 | 103 | -5.0 |
| I | 57 | 90 | -9.4 | S | 481 | 90 | -9.0 |
| J | 107 | 73 | -7.8 | T | 447 | 61 | -8.4 |

※表の数値は、暴露1冬目(2016.11.1～2017.4.30)と暴露2冬目(2017.11.1～2018.4.30)を集計した値の平均



写真-1 暴露の様子

低温度0°C未満の日を凍結融解1日と計上すると61～120日/年であった。11月～4月の日最低気温の平均は-3.5～-10.3°Cであった。

2.3 暴露方法

写真-1に暴露の様子を示す。路面への供試体の設置は走行車両の障害となるため、暴露は道路橋の排水管の真下で行った。はじめに、排水管の真下の敷地に単管パイプで組み立てた架台を設置した。そして、架台に供試体を載せ、排水管の出口から流れ落ちる凍結防止剤を含む路面の融雪水を供試体と与えた。排水管出口から供試体までの距離については、距離が短いと供試体表面に雪が積もったときに排水管出口が雪で塞がれ、路面の排水性に影響を及ぼす恐れがあり、路面管理上の理由から、ある程度の距離を持たせた。融雪水を与える面は打設面とし、打設面以外の5面はエポキシ樹脂でコーティングした。ここでは写真-2に示すように養生テープを使用して打設面に高さ約10mmの枠を設け、流れ落ちる融雪水を供試体の打設面全体に行き渡らせ、特定の供試体だけが集中的に損傷することのないように配慮した。

2.4 測定

暴露開始から1冬および2冬経過後にスケーリング深さと超音波による相対動弾性係数の測定を行った。

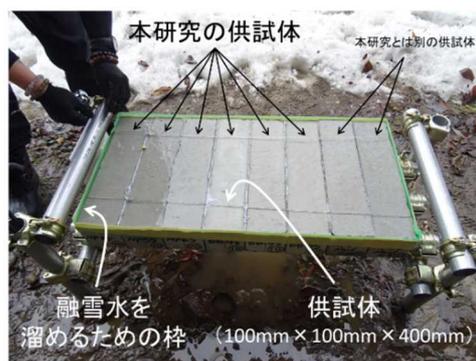


写真-2 供試体の設置状況



写真-3 スケーリング深さの測定状況

(1) スケーリング深さ

写真-3にスケーリング深さの測定装置と測定状況を示す。測定は装置に備わっている先端の尖ったφ4mmのステンレスの棒を供試体の表面にあて、棒の先端がスケーリングで凹んだ部分に入り込んだときの下方への棒の移動量からスケーリング深さを求めるものである。装置にはφ4mmのステンレスの棒が6mm間隔で9本配置されており、測定はこれらを用いて供試体端部から50, 100, …, 350mm位置の7箇所で行い、計63点の測定値の平均(以下、平均スケーリング深さと記す)を求めた。

(2) 超音波による相対動弾性係数

写真-4に測定状況を示す。相対動弾性係数は周波数28kHzの超音波測定器を使用して求めた。ここでは、供試体の側面に超音波の発・受振子をあてて超音波伝播速度を測定し、式(1)⁴⁾、(2)から深さ10, 50, 80mmにおける相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (1)$$

$$RE_{dn} = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 E_{dn} は n 冬経過後の動弾性係数(GPa)、 V_n は n 冬経過後の超音波伝播速度(km/s)、 RE_{dn} は n 冬経過後の相対動弾性係数(%), E_{d0} は劣化を受ける前のコンクリートの動弾性係数(GPa)である。なお、ここでは、暴露期間



写真-4 超音波による相対動弾性係数の測定状況

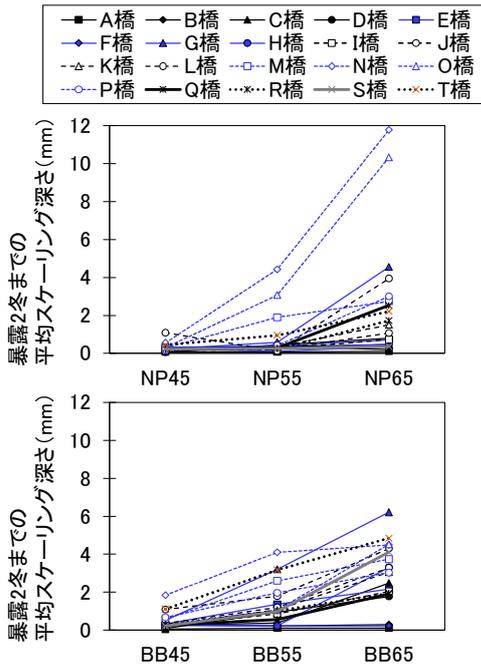


図-2 水セメント比と平均スケール深さの関係

中のコンクリートの水和反応の進行による動弾性係数の増進が相対動弾性係数の評価に及ぼす影響を極力排除するため、健全な状態と考えられる供試体の最深位置である深さ90mmのn冬経過後の動弾性係数を E_{a0} とした。

3. 実験結果・考察

3.1 平均スケール深さに及ぼす水セメント比および使用したセメントの種類の影響

図-2に水セメント比と暴露2冬までの平均スケール深さの関係を示す。橋ごとにみると、水セメント比が大きいほど平均スケール深さは大きくなる傾向がみられる。その一方で水セメント比が65%でも平均スケール深さが少ない供試体も一部で確認され、スケール深さの程度は暴露環境によって異なることがわかった。

図-3はセメントの種類の違いが暴露2冬までの平均スケール深さに及ぼす影響を示している。全体的に、高炉セメントB種を使用した方が平均スケール深さは大きい傾向にあった。しかし一方で、普通ポルトラン

縦軸と横軸はいずれも、暴露2冬までの平均スケール深さを表し、単位はmm

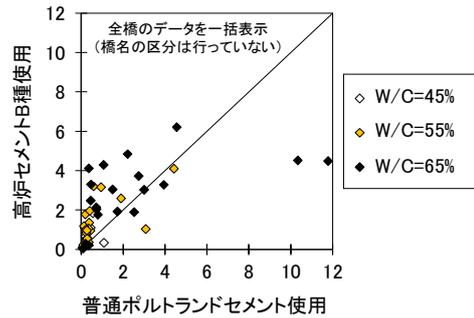


図-3 セメントの種類の違いが平均スケール深さに及ぼす影響

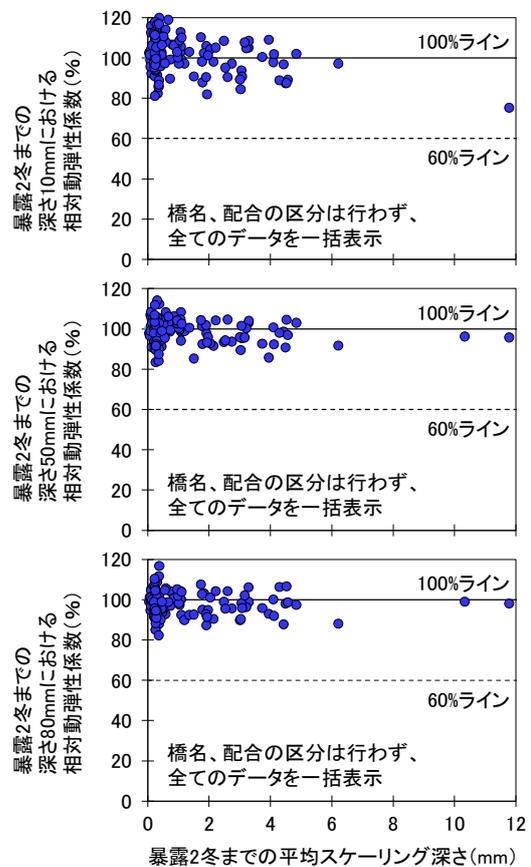


図-4 平均スケール深さと深さ10mm, 50mmおよび80mmの相対動弾性係数の関係

ドセメントを使用した供試体では高炉セメントB種を使用した供試体にみられない平均スケール深さが10mmを越えるケースも2箇所で見られ、それらはいずれも水セメント比65%で、高炉セメントB種を使用した場合に対し約3倍の平均スケール深さとなっていた。

3.2 平均スケール深さと相対動弾性係数の関係

図-4は暴露2冬までの平均スケール深さと深さ10, 50, 80mmの相対動弾性係数の関係を示している。なお、スケールリングによって表面が10mm以上欠損した

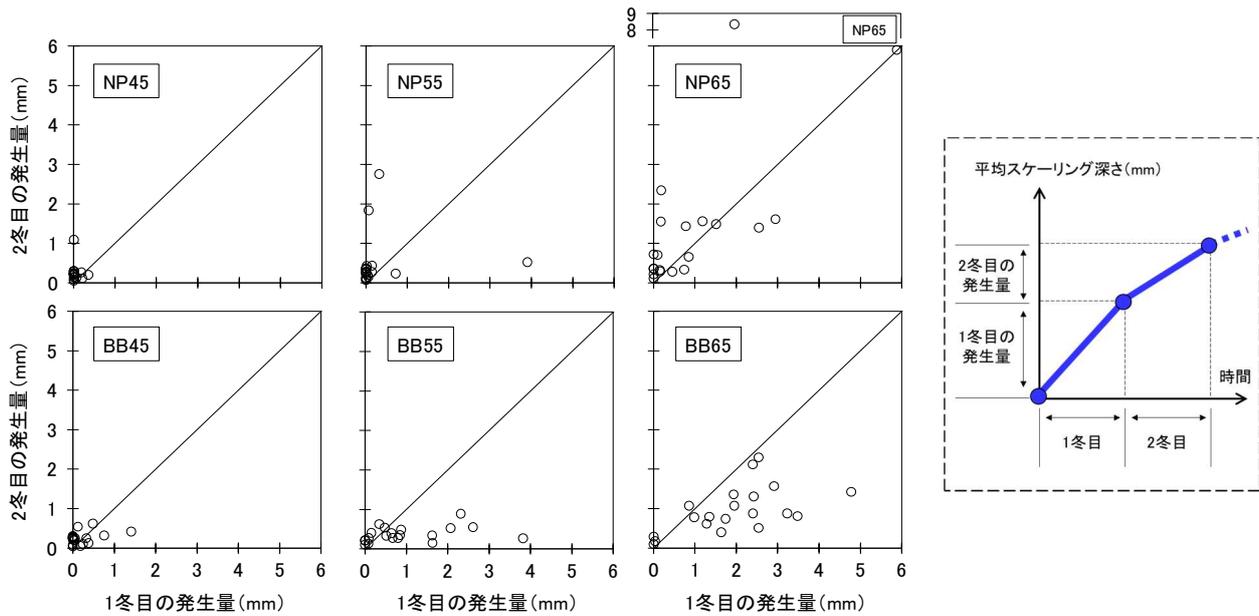


図-5 1冬目と2冬目のスケーリングの進行の違い

供試体では深さ 10mm の相対動弾性係数は測定していない。スケーリングの進行につれて相対動弾性係数が低下する傾向は確認されず、相対動弾性係数はいずれの供試体も 80%以上であった。3.1 でスケーリングは水セメント比と対応することを述べたが、図-4 は、スケーリングは多くてもフレッシュコンクリートの空気量が 4.1～5.0% (表-1) 確保されているのであれば、凍害による内部ひび割れの進展は抑えられることを説明している。

3.3 暴露 1冬目と2冬目のスケーリングの進行の違い

(1) スケーリングの進行状況

図-5 は暴露 1冬目、2冬目のスケーリングの進行の違いを示している。高炉セメント B 種を使用した供試体は 1冬目の方がスケーリングは多く発生していた。一方、普通ポルトランドセメントを使用した場合は、1冬目、2冬目ともにスケーリングが少ない供試体が多かったが、水セメント比が 55、65%の一部の供試体において 2冬目にスケーリングが多く発生する結果が得られた。

写真-5 は、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 65%における暴露 2冬までの平均スケーリング深さが最も大きかった N 橋の下に暴露した供試体の 1冬、2冬経過時の外観を示している。表面は概ね全面的にスケーリングしており、一部だけが集中的に激しく損傷している様子はみられなかった。高炉セメント B 種を使用した供試体は、1冬が経過した時点でほぼ全面がスケーリングしている。なお、粗骨材の顕著な露出はみられない。一方、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 55、65%の供試体をみると、1冬経過時はスケーリングが発生していない健全な面も残っているが、大きなスケーリングも部分的に発生している。この部分

| | 1冬経過時 | 2冬経過時 |
|------|-------|-------|
| NP45 | | |
| NP55 | | |
| NP65 | | |
| BB45 | | |
| BB55 | | |
| BB65 | | |

写真-5 N 橋の下に暴露した供試体の外観

では 2冬目もさらにスケーリングが進行している。加えて、水セメント比が 65%の供試体については粗骨材が全面に露出し、端部には角欠けもみられる。しかし、水セメント比が同じ 65%でも、高炉セメント B 種を使用した 2冬経過時の供試体については、打設面のスケーリングは進行しているものの、端部の角欠けの程度は普通ポルトランドセメントを使用した供試体に比べると小さい。

(2) スケーリングの進行に関する考察

打設面は、供試体の中で最も脆弱な面である。著者らは既往の室内実験で、高炉セメント B 種を使用するとコンクリート内部の透水性が低くなり、打設面の表層に供給された塩水は深部へ流動しにくくなることから、表層に未凍結水が集中して水圧が高まるためスケーリングが促進されやすいという結果を得ている⁵⁾。このことから、

高炉セメントB種を使用した供試体は1冬目に脆弱な表層が早期にスケーリングしたために、1冬目の方がスケーリングが多いという結果になったと考えられる。

また、著者らは既往の室内実験で、普通ポルトランドセメントを使用した場合、コンクリート内部の透水性は比較的高いため、塩水が深部へ流動しやすい状態になりスケーリングは促進されにくい、その場合でもコンクリート内部で水分が飽和状態のときは深部への塩水の流動性が滞り、一転して表層に未凍結水が集中し、コンクリート組織全体に水が多く含まれていることも相まってスケーリングが増大するという実験結果も得ている⁵⁾。このことから、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比55、65%の供試体は、1冬目に部分的に大きくスケーリングした範囲のコンクリート組織が劣化によって飽和しやすい品質状態に変化し、2冬目に大きなスケーリングに至ったと考えられる。

なお、この劣化形態は、普通ポルトランドセメントを使用したすべての供試体で確認されたわけではない。しかし、環境が異なるために遅れて顕在化する可能性もあることから、今後もスケーリングの進行を注視したい。

3.4 凍結防止剤散布車の出動回数と平均スケーリング深さの関係

図-6に凍結防止剤散布車の出動回数と暴露2冬までの平均スケーリング深さの関係を示す。出動回数が概ね50回/年未満の環境では、出動回数が多いほど平均スケーリング深さは増加する傾向にある。しかし、出動回数が50回/年以上の環境では明確な比例関係はみられない。

最低気温にもよるが、一般にスケーリングが進行しやすい塩水の濃度は3%前後⁹⁾とされている。また、凍結防止剤の散布を終えた路面の融雪水の塩分濃度は急速に低下しやすい⁷⁾ことも知られている。このことから、凍結防止剤散布車の出動回数が50回/年以上の現場における路面の融雪水は、スケーリングが進行しやすい塩分濃度が持続しやすいと言える。

3.5 凍結融解日数と平均スケーリング深さの関係

図-7に年間あたりの凍結融解日数と暴露2冬までの平均スケーリング深さの関係を示す。3.4に鑑み、凍結防止剤散布車の出動回数を50回/年未満・以上に分けて整理した。凍結融解日数が同じでも平均スケーリング深さが乖離しているものが多く、ばらつきが大きい。このことから、年間あたりの凍結融解日数のみではスケーリ

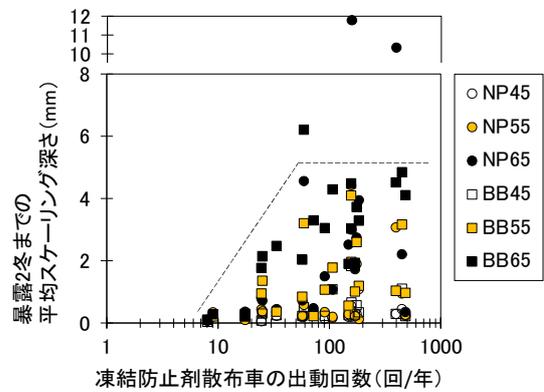


図-6 凍結防止剤散布車の出動回数と平均スケーリング深さの関係

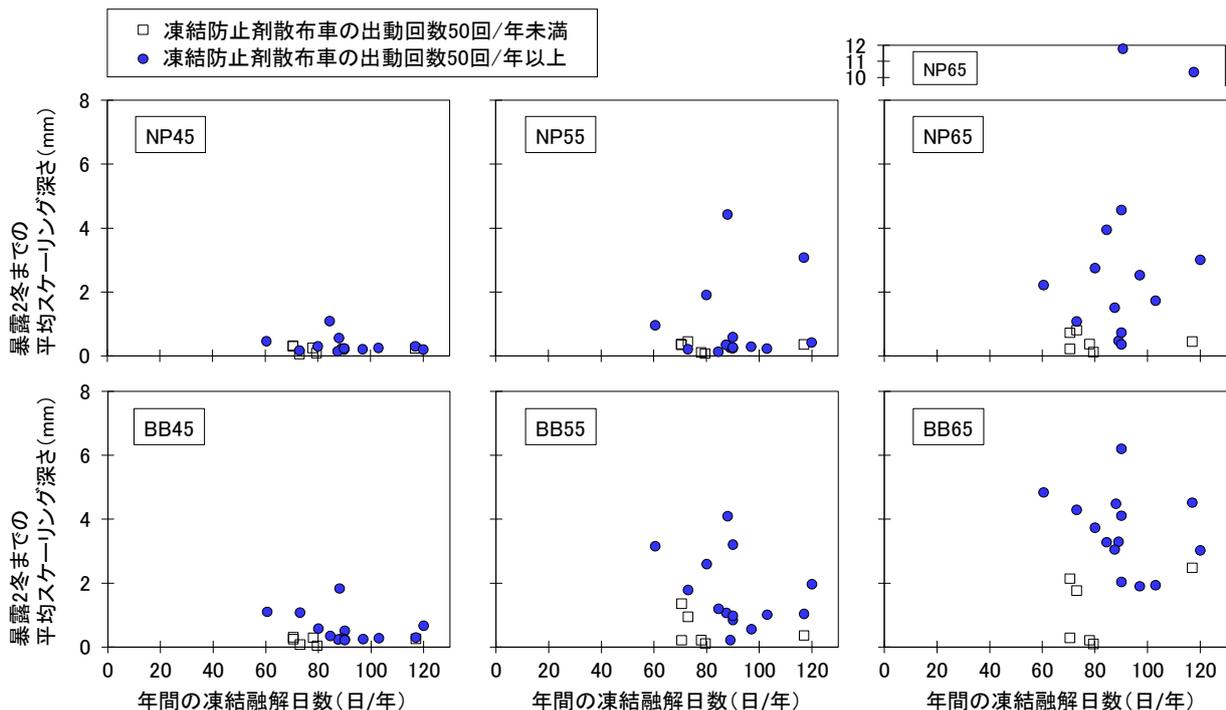


図-7 年間あたりの凍結融解日数と平均スケーリング深さの関係

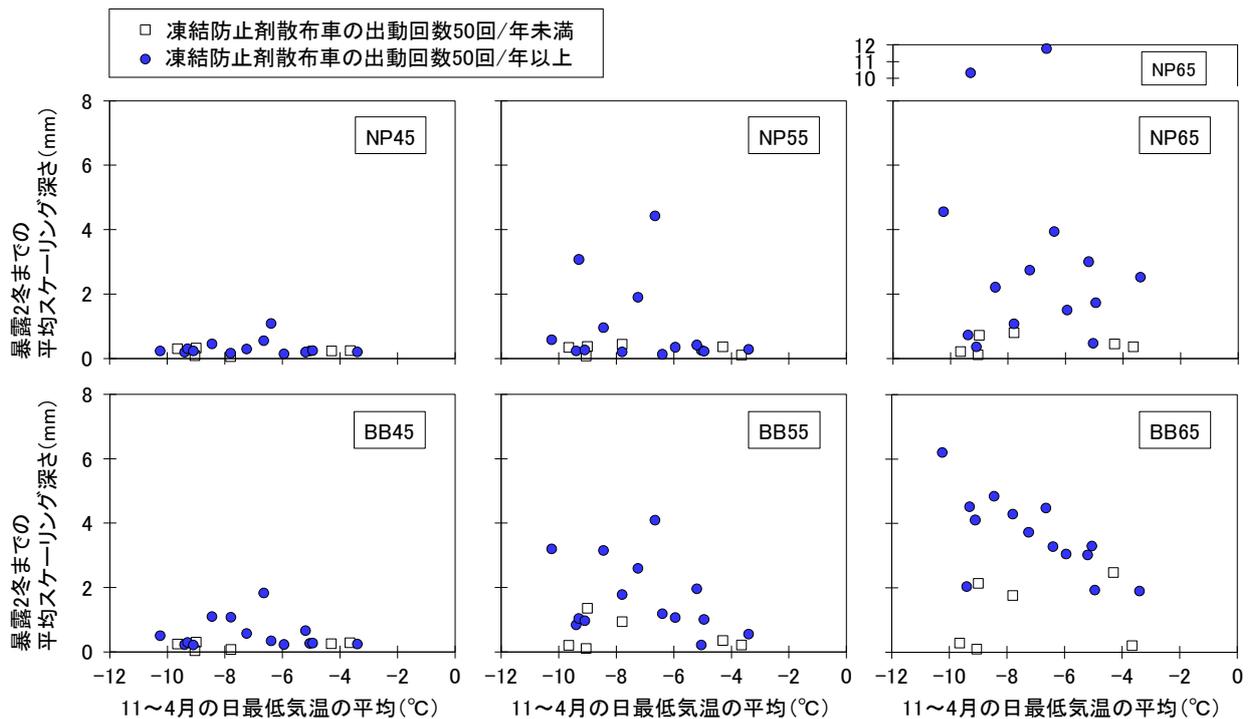


図-8 11月～4月における日最低気温の平均と平均スケーリング深さの関係

ングに及ぼす環境の影響は適切に評価できないと言える。

3.6 日最低気温の平均と平均スケーリング深さの関係

図-8は11月～4月における日最低気温の平均と暴露2冬までの平均スケーリング深さの関係を示している。出動回数が50回/年以上のプロットに着目すると、スケーリングが進行しやすい高炉セメントB種を使用した供試体では、日最低気温の平均が低い地域ほど平均スケーリング深さが大きい右肩下りの傾向が得られた。普通ポルトランドセメントを使用した場合も、ばらつきはみられるものの、日最低気温が低い地域において大きな平均スケーリング深さを示した供試体が確認された。

このことから、年間あたりの凍結融解日数が61～120日/年の地域では、日最低気温が低いほど、コンクリートに供給された凍結防止剤を含んでいる融雪水が発する凍結水圧は大きく、スケーリングは促進しやすいと考えられる。スケーリングの進行に及ぼす環境因子として、凍結防止剤散布車の出動回数と日最低気温は重要な指標であることがわかった。この知見は、地域ごとに異なる冬期環境、散布形態にあわせた弾力的な配合設計の実現および対策要否の判定に資すると考えている。しかしながら、まだ2冬目の評価であり、今後も追跡調査を続けてデータを積み重ねる必要がある。

4. まとめ

冬期に凍結防止剤の散布が行われている北海道内の道路橋の下での暴露実験2冬目までに得た知見をまとめると以下ようになる。

- (1) スケーリングの程度は配合や環境によって異なる。一方、相対動弾性係数の低下は極めて軽微であった。
- (2) 凍結防止剤散布車の出動回数と日最低気温は、スケーリングの進行を評価する上で重要な指標である。

参考文献

- 1) Valenza II, J. J. and Scherer, G. W. : Mechanism for Salt Scaling, J. Am. Ceram. Soc., Vol.89, No.4, pp.1161-1179, 2006.
- 2) American Society for Testing and Materials : Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- 3) 国土地理院
- 4) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博 : 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 名和豊春 : スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.348-365, 2010.9
- 6) Verbeck, G. J. and Klieger, P. : Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin, No.150, pp.1-13, 1957.
- 7) 佐野弘 : 定置式凍結防止剤自動散布装置の研究開発, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第14号, 第1編調査研究報告, pp.20-27, 2001.7