

論文 凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布頻度の影響に関する基礎実験

遠藤 裕丈^{*1}・安中新太郎^{*2}

要旨：凍結防止剤が散布される寒冷環境下の道路におけるコンクリートの凍害（スケーリング、相対動弾性係数）進行予測技術の開発に向け、凍結防止剤の散布頻度が凍害の進行に及ぼす影響を調べる基礎実験を行った。散布がスケーリングに及ぼす影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴う融雪水の塩分濃度の変化もあわせて考慮し、予測を行う必要がある。一方、相対動弾性係数に及ぼす散布頻度の影響は、AE 剤が用いられているコンクリートについては小さいものの、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長いコンクリートは影響を受ける可能性が高く、適切な予測の実施が求められる。

キーワード：凍結融解、凍結防止剤、散布頻度、スケーリング、相対動弾性係数

1. はじめに

寒冷地には凍害劣化や、凍・塩害による複合劣化が進行したコンクリート構造物の事例が多い。昨今の厳しい財政事情下で今後、コンクリート構造物の合理的な維持管理の進め方を検討するためには、こうした劣化を予測する技術の開発が求められている。

なお、ひとことに寒冷地と言っても、冬期における寒冷環境の厳しさは地域によって異なる。もちろんコンクリートの配合も一様ではなく、様々なコンクリートが多様な寒冷環境下に曝されている。合理的な劣化予測技術を開発するには、これら種々の条件が劣化の進行に及ぼす影響を詳細に整理する必要がある。例えば、凍結防止剤が散布される道路橋のコンクリート部材における凍害の進行は、凍結防止剤の散布量や散布方法と関係があると考えられるが、具体的な因果関係は未だ不明な点が多く、散布量との定量的な関連づけにより劣化予測を行うことは現時点では困難¹⁾とされている。

そこで、凍結防止剤が散布される寒冷環境下でのコンクリートの凍害進行予測技術の開発に向け、凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布頻度の影響などを調べるための基礎実験を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合・材料

供試体のコンクリート配合を表-1 に示す。セメントは寒冷地で広く使用される普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種の 2 種類とした。水セメント比は内陸部における最大値である 55%²⁾とした。細骨材は苫小牧市錦岡産海砂（表乾密度 2.67g/cm³、絶乾密度 2.65g/cm³、吸水率 0.87%、粗粒率 2.80、除塩処理済み）、粗骨材は小樽市見晴産碎石（表乾密度 2.67g/cm³、絶乾密度 2.64g/cm³、吸水率 1.66%、粗粒率 7.04）を使用した。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。

土木学会コンクリート標準示方書によると、寒冷地で AE コンクリートの使用が原則となったのは昭和 42 年³⁾からで、それ以前の示方書では「AE コンクリートを用いるのが望ましい」とのみ記載され、原則とはなっていない⁴⁾。そのため、供用年数が長いコンクリート部材の一部は AE コンクリートではない可能性があるため、AE 剤を使用しないケースも設けた。AE 剤を使用する場合の空気量は内陸部で一般的な 4.5±1.5%²⁾とした。

2.2 供試体

図-1 に供試体を示す。供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱とした。打設後、材齢 7 日まで湿布養生を行った後、材齢 28 日まで恒温恒湿室（温度 20℃、湿度 60%）に静置した。静置期間中に発泡スチロールを使用して高さ 10mm、幅 5mm の枠を作製し、材齢 21 日にエポキシ樹脂とシリコーンを用いて枠を打設面（100mm×400mm、以下、試験面と記す）に据え付けた。

2.3 凍結融解試験

凍結融解試験は材齢 28 日から開始した。劣化因子が部材の一面から供給される実際の状態を模擬し、ここでは ASTM C 672 を参考に、試験面に試験水を深さ 6mm 張って 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を与えた。ASTM C 672 では-18℃で 16 時間、23℃で 8 時間の 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を与えることになっているが、冬期における環境の厳しさが地域により異なることに着目し、ここでは北海道で最も厳しい最低気温に相当する-40℃⁵⁾で 16 時間、23℃で 8 時間の凍結融解作用を与えるケースも設けた（表-1）。

試験水は淡水と凍結防止剤に見立てた濃度 3%の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）の 2 種類を準備した。試験水の張り方は図-2 に示すように、散布の機会が全くない路線を想定した常時淡水を使用するケース、散布がほぼ毎日行われる路線を想定した常時塩水を使用するケース、散布の頻度に幅がある路線を想定し、塩水

*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

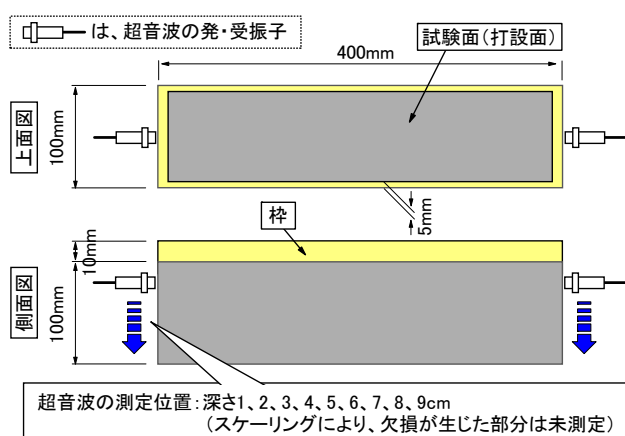
表－1 コンクリート配合と圧縮強度および凍結融解試験における温度・時間

記号※	コンクリートの配合条件							材齢 28 日 圧縮強度 (MPa)	凍結融解試験に おける温度・時間
	使用 セメント	水セメン ト比(%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤※※		
			水	セメント	細骨材	粗骨材			
N-n-18	普通 ポルト ランド セメント	55	158	287	872	1058	不使用	47.0	凍結：-18℃で 16 時間 融解：23℃で 8 時間 (1 日 1 サイクル)
N-a-18			150	273	864	1057	使用	38.0	
N-n-40			158	287	872	1058	不使用	47.0	凍結：-40℃で 16 時間 融解：23℃で 8 時間 (1 日 1 サイクル)
N-a-40			150	273	864	1057	使用	38.0	
B-n-18	高炉 セメント B 種		155	282	875	1058	不使用	35.7	凍結：-18℃で 16 時間 融解：23℃で 8 時間 (1 日 1 サイクル)
B-a-18			147	267	865	1058	使用	33.0	
B-n-40			155	282	875	1058	不使用	35.7	凍結：-40℃で 16 時間 融解：23℃で 8 時間 (1 日 1 サイクル)
B-a-40			147	267	865	1058	使用	33.0	

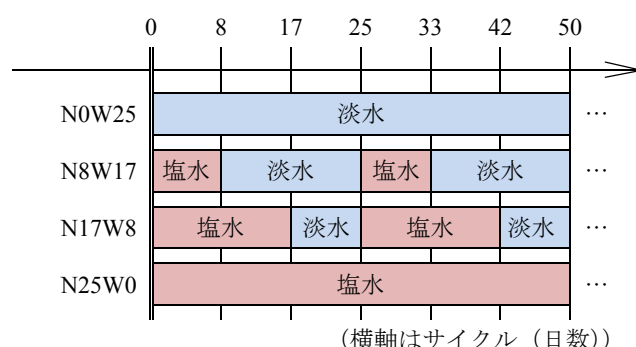
※) コンクリート配合の記号は、セメントの種類 (N, B), AE 剤の使用有無 (n, a), 凍結融解試験における凍結温度の絶対値 (18, 40) の組み合わせで構成。

※※) 使用した AE 剤の種類, 使用量は以下の通り

- ・ AE 減水剤：成分はリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
使用量(ml/m³)=セメント量(kg/m³)×2.5ml/kg
- ・ AE 助剤：成分は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤で, 1%希釈溶液として使用
使用量 (1%希釈溶液) (g/m³)=セメント量(kg/m³)×2.5(g/kg/A)×1.7~2.3(A)
上記の式における単位「A」は, 目標空気量によって定まる値 (配合試験により決定)



図－1 供試体



記号：25 サイクル周期で試験水の張り方を決めていることをふまえ, 25 サイクルあたりの塩水 (N) を張る日数と淡水 (W) を張る日数の組み合わせで構成。

図－2 試験水の張り方

8 日間→淡水 17 日間→…を繰り返すケース, 塩水 17 日間→淡水 8 日間→…を繰り返すケースの 4 ケースとした。

2.4 測定内容

凍結融解試験は 300 サイクルまで行うこととし, 25 サイクルおきにスケーリング量と相対動弾性係数の測定を行った。スケーリング量と相対動弾性係数ともに測定値は供試体 3 個の平均とした。また, 3 個のうち 1 個でも劣化が著しく進行し, 測定が困難となった時点で試験を終了することとした。

スケーリング量は試験面から剥離片を採取し, 110℃で乾燥させた後, 剥離片の質量を測定して求めた。

相対動弾性係数は超音波測定器を使用して求めた。図－1 に示す要領で供試体の両側面 (100×100mm) に超音

波の発・受振子をあてて深さ 10, 20, …, 90mm 位置の超音波伝播速度を測定し, 式(1)⁶⁾, (2)からそれぞれの測定深さに対する相対動弾性係数を求めた。

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

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

ここに, E_{dn} は n サイクル後の動弾性係数(GPa), V_n は n サイクル後の超音波伝播速度(km/s), RE_d は n サイクル後の相対動弾性係数(%), E_{d0} は凍結融解を受けていないコンクリートの動弾性係数(GPa)である。一般に E_{d0} は 0

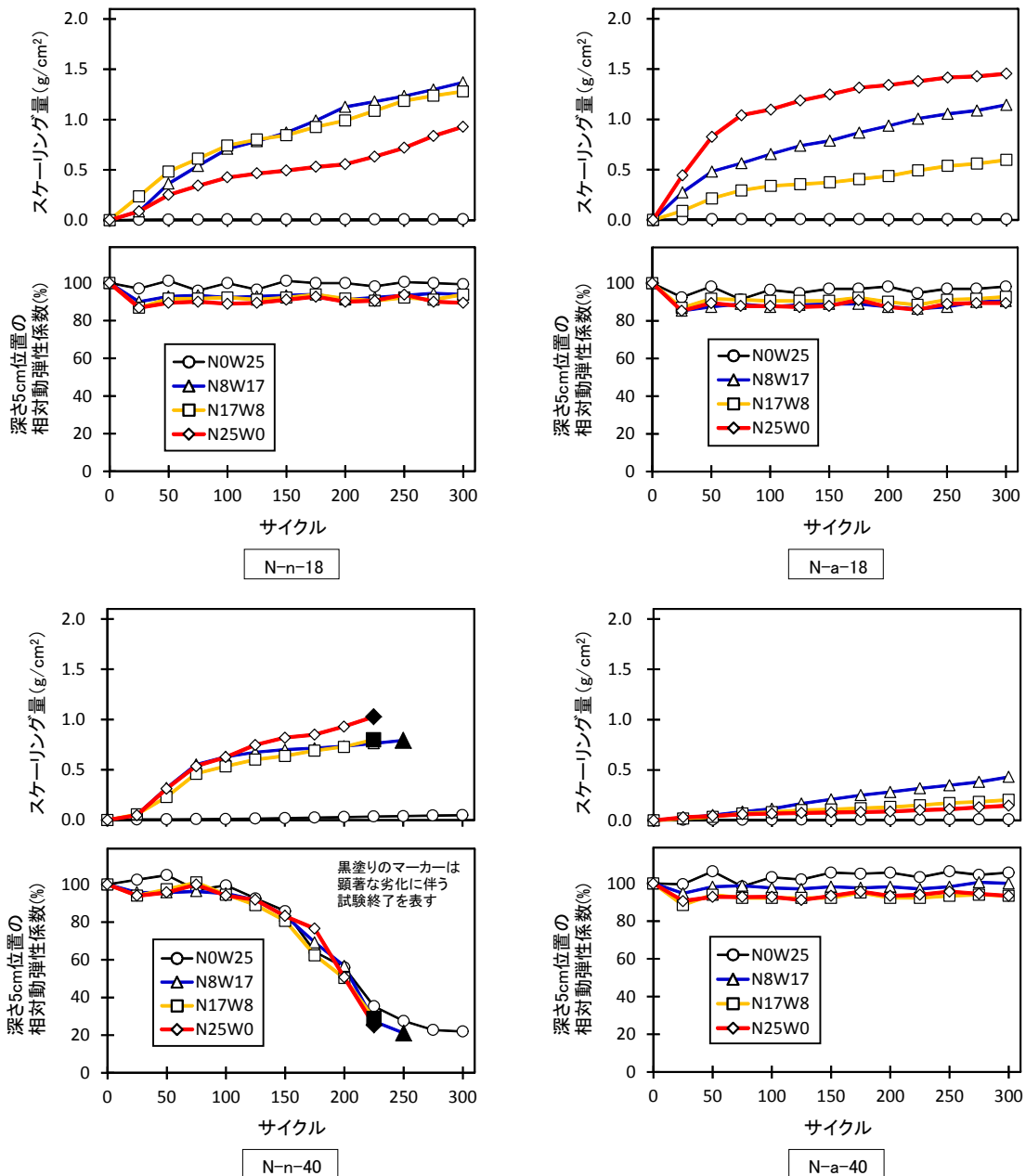


図-3 スケーリングおよび相対動弾性係数の推移（普通ポルトランドセメント使用）

サイクル，すなわち凍結融解試験前の供試体の測定値が使用されるが，ここでは水和反応の過程が動弾性係数に及ぼす影響を極力排除する理由から，別途製作した供試体を，試験水の張り方のみ図-2 にならい，凍結融解試験期間と同じ期間中，温度 20℃，湿度 60%の一定下に存置した後，測定した動弾性係数を E_{a0} として用いた。

3. 実験結果・考察

3.1 凍害の進行状況

図-3 に普通ポルトランドセメントを使用した供試体のスケーリングと相対動弾性係数の推移を示す。相対動弾性係数は代表して供試体中心の深さ 5cm の値を示した。淡水のみの N0W25 と塩水を使用した N8W17・N17W8・

N25W0 を比較すると，スケーリングは N-n-18，N-a-18，N-n-40，N-a-40 のいずれも淡水のみの N0W25 が明らかに小さい結果となった。一方，相対動弾性係数は N-n-40 以外は 85% 以上の値で推移した。N-n-40 は塩水の使用有無を問わず，相対動弾性係数が 150 サイクル以降，経時的に大きく低下し，塩水を使用した供試体は 225～250 サイクルにおいて試験面に張った試験水が供試体の側面に発生した亀裂から漏れ出す程の顕著な劣化に至ったため，試験を途中で終了させた。

図-4 は高炉セメント B 種を使用した供試体の結果である。図-3 と同様に，スケーリングは N0W25 が最も小さかった。相対動弾性係数は B-a-18，B-a-40 が 85% 以上の値で推移したのに対し，B-n-18，B-n-40 はいずれの供

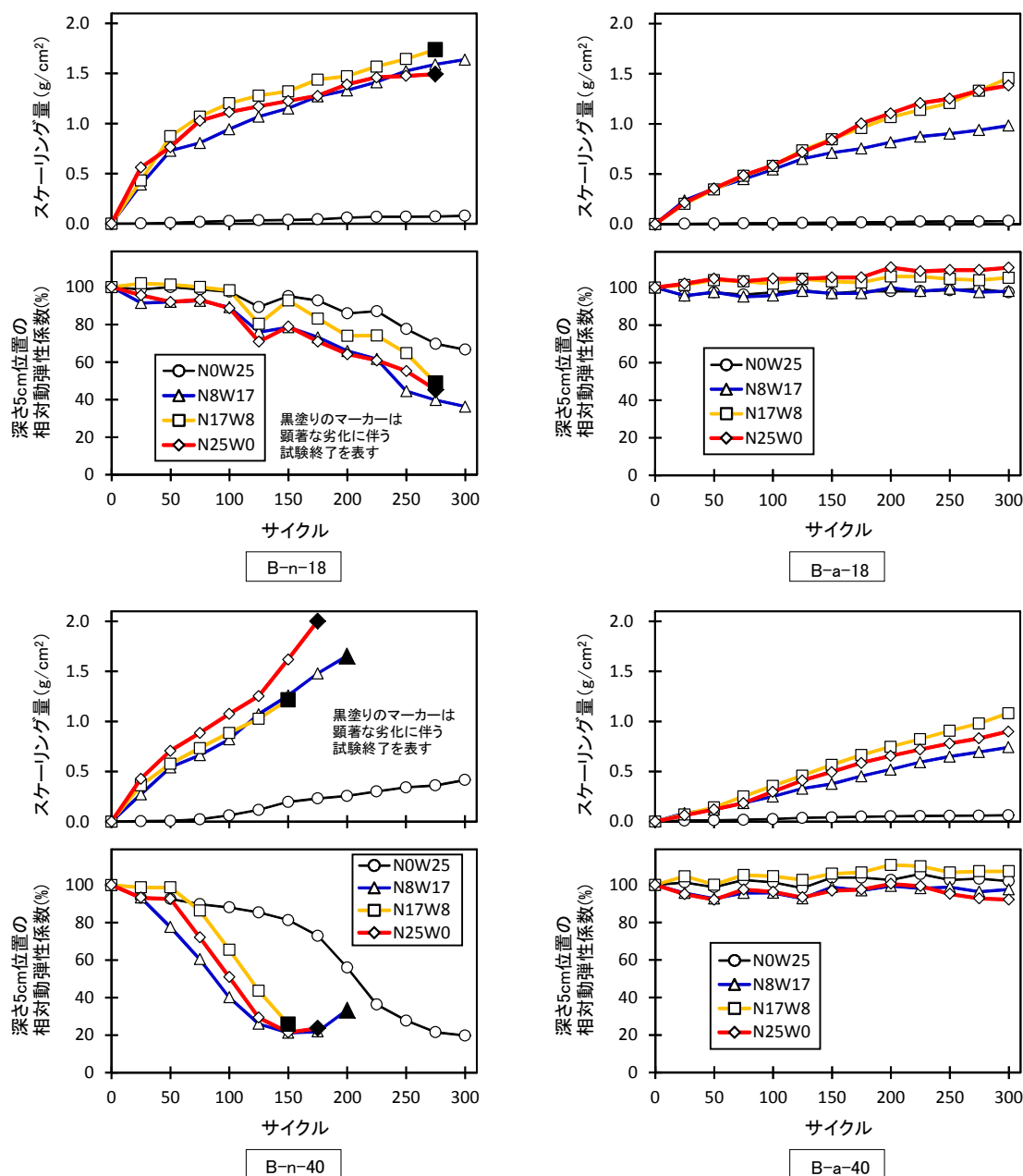


図-4 スケーリングおよび相対動弾性係数の推移（高炉セメント B 種使用）

試体においても値の低下が確認され、塩水を用いた供試体は B-n-18 の N8W17 以外は試験途中で終了に至った。

図-5 は 150 サイクル目における供試体内部の相対動弾性係数の分布を示している。最終の 300 サイクル目ではなく、途中の 150 サイクル目のデータを用いた理由は、試験が最も早く終了に至ったのが B-n-40 の N17W8 で、その終了時期が 150 サイクル目であり、150 サイクル目までは全ての供試体で測定が行われ、同一サイクルでの比較が可能なデータが揃っているためである。

AE 剤不使用の供試体に着目すると、普通ポルトランドセメントを使用した場合、最低温度を -18°C に設定したものは相対動弾性係数がさほど低下しなかったものの、 -40°C に設定したものは表面に近い測定位置ほど相対動

弾性係数の低下が大きいことが確認された。高炉セメント B 種を使用した場合、 -18°C に設定したものは表面に近い測定位置ほど大きな相対動弾性係数の低下がみられ、 -40°C に設定したものは全体的に低下が確認された。最低温度が低くなるほど凍結水量が増大し、膨張圧が高まること、特に AE 剤を使用しない場合はこの影響が顕著に表れる⁷⁾ことは広く知られている。相対動弾性係数に及ぼす最低温度の影響は、この知見と良く対応している。また、最低温度が同じ場合は高炉セメント B 種を用いた方が相対動弾性係数の低下は大きかった。一般に高炉スラグ微粉末が混入された高炉セメントは透水しにくく、水密性も高まる⁸⁾ことから、凍害によって発生したひび割れを介して内部に侵入・蓄積された凍結余剰水は、普

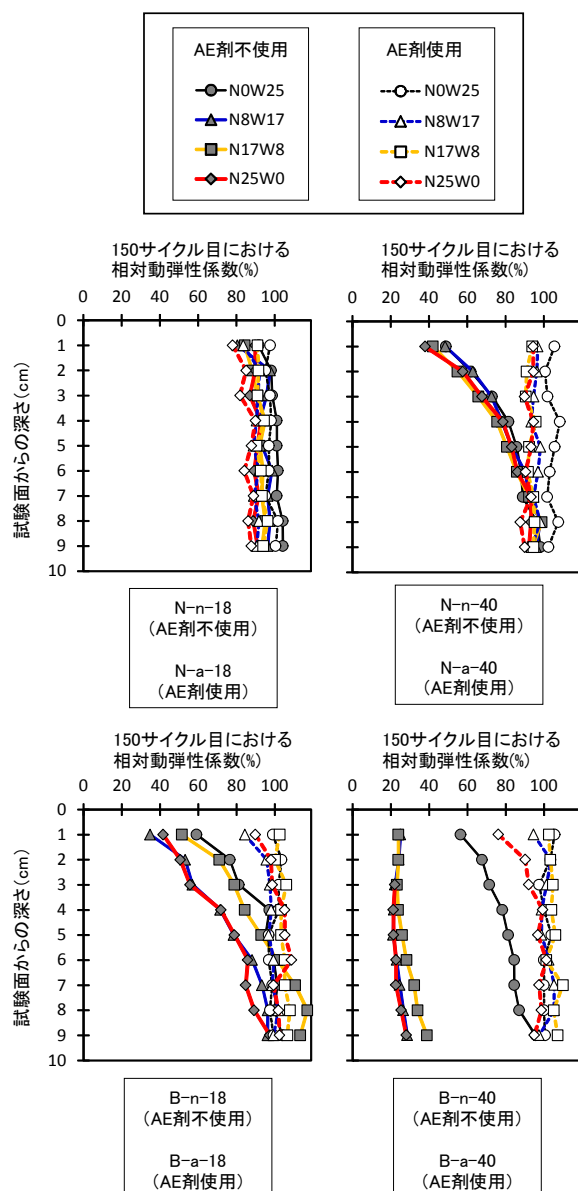


図-5 相対動弾性係数の分布 (150 サイクル目)

通ポルトランドセメントを用いた場合に比べるとコンクリート組織を流動しづらく、流動の際に大きな水圧が発生し、相対動弾性係数の大きな低下に至ったと考えられる。高炉セメント B 種を用いた供試体をみると、相対動弾性係数の低下は塩水を用いたケースで顕著に表れていた。これは塩水が内部に供給されたことで、凍結の際に大きな膨張圧を引き起こす浸透圧⁹⁾が発生した可能性を示唆する。

一方、AE 剤を使用した供試体は塩水の使用有無にかかわらず相対動弾性係数の低下は小さかった。スケーリングについても図-3, 4 で示したように、N-n-18, N-a-18 の N25W0 のみ AE 剤の効果が表れなかったが、それ以外のすべての供試体では AE 剤を使用した方がスケーリング量が少なかった。散布環境下での凍害予測に際し、AE 剤の使用有無は重要な指標と言える。

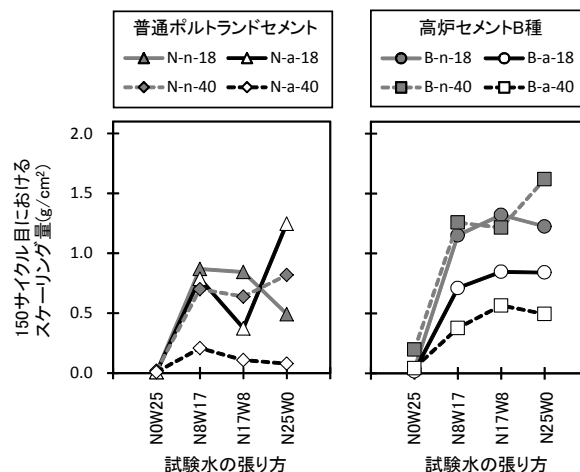


図-6 散布頻度がスケーリングに及ぼす影響 (150 サイクル目)

3.2 散布頻度がスケーリングに及ぼす影響

図-6 は散布頻度がスケーリングに及ぼす影響を示している。図-5 同様、スケーリング量は 150 サイクル目のデータを使用した。N0W25 と N8W17 を比較すると、スケーリング量は N8W17 の方が明らかに大きいことがわかる。一方、N8W17, N17W8, N25W0 をみると、セメント種別、AE 剤有無、最低温度のそれぞれのケースでばらつきはあるものの、試験水の張り方毎にみると、スケーリング量がほぼ同程度と言える。N8W17 が塩水の供給を受ける期間は N25W0 の 3 割程度であるが、今回の実験では濃度 3%の塩水が繰り返して供給される場合、塩水と接する期間が全期間の 3 割程度でもスケーリングは大きく進行することが確認された。スケーリングの促進に繋がる表層の亀裂は短期間で急速に形成されることが伺える。

今回の実験では試験面に張る塩水の濃度を常時 3%としているが、実際の路面は凍結防止剤を含む融雪水の塩分濃度が急速に変化しやすく¹⁰⁾、必ずしも常時一定とは限らない。スケーリングが最も促進されやすい塩水の濃度は約 3%¹¹⁾とされ、散布回数が多いほど融雪水の塩分濃度が高い状態は長く続きやすく、スケーリングの進行にも影響すると思われるが、今回の実験のようにコンクリートに作用する塩水の濃度が常に 3%の環境下では、繰り返される散布の回数がわずかでも大きなスケーリングに至ることが示された。このように、スケーリングに及ぼす凍結防止剤散布の影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴うコンクリートへ供給される融雪水の塩分濃度の変化もあわせて考慮した上で予測を行う必要があると言える。

3.3 散布頻度が相対動弾性係数に及ぼす影響

図-7, 8 は散布頻度が相対動弾性係数に及ぼす影響を、それぞれ測定深さ 1cm, 5cm について示したものである。

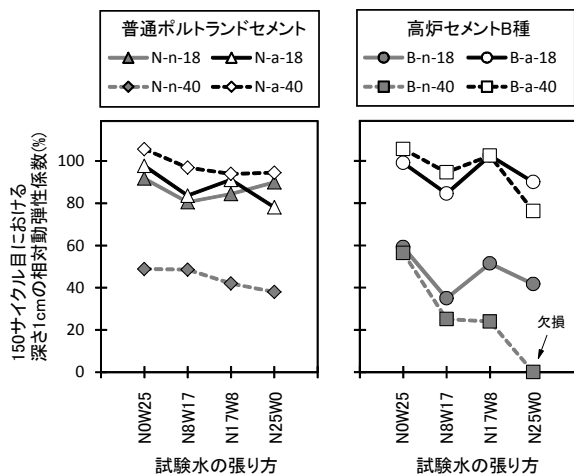


図-7 散布頻度が深さ 1cm の相対動弾性係数に及ぼす影響（150 サイクル目）

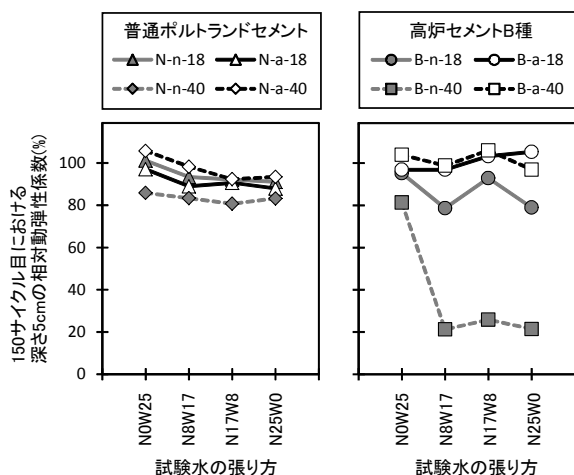


図-8 散布頻度が深さ 5cm の相対動弾性係数に及ぼす影響（150 サイクル目）

前節と同様に、ここでも 150 サイクル目のデータを使用した（スケーリングによって深さ 1cm のコンクリート組織が欠損に至った一部の供試体における深さ 1cm の相対動弾性係数は 0% と表示している（図-7））。

AE 剤を用いた供試体に着目すると、深さ 1cm は塩水を張った方がばらつきはあるが値は低下しているように見受けられる。一方、深さ 5cm をみると、塩水の使用有無を問わず、値が 90～100% 前後であった。なお、N8W17、N17W8、N25W0 の 3 者をみると前節同様、散布回数との関係は明確ではなかった。このことから、凍害に及ぼす塩分の影響は表層付近に集中的に及んでいることがわかる。

これに対し、AE 剤を用いていない場合は、散布回数との関係は明確でないものの、高炉セメント B 種を用いた供試体で塩分による相対動弾性係数の低下への影響が表れている。さらに、普通ポルトランドセメントを用いた供試体では 150 サイクル目の段階では明確でないが、

図-3 で示したように試験が途中で終了する等、塩分の影響を受けている。以上のことから、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長い部材については特に散布の影響を受ける可能性が高く、適切な劣化予測に基づく対応が求められる。

4. まとめ

凍結防止剤が散布される寒冷環境下でのコンクリートの凍害進行予測技術の開発に向けて、凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布頻度の影響を調べる基礎実験を行った。本実験で得た成果を以下に示す。

- (1) スケーリングに及ぼす散布の影響は、単に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴う融雪水の塩分濃度の変化を考慮して予測を行う必要がある。
- (2) 相対動弾性係数は、AE 剤が使用されていない可能性のある供用年数が長い部材では散布の影響を強く受ける可能性が高く、適切な劣化予測に基づく対応が求められる。

参考文献

- 1) 北海道開発局道路設計要領，第 3 集橋梁，第 2 編コンクリート，p.3-コ 7-5，2016.4
- 2) 文献 1)，p.3-コ 2-4
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書解説【昭和 42 年版】，p.32，1967.7
- 4) 土木学会：昭和 31 年土木学会制定コンクリート標準示方書解説，p.26，1958.12
- 5) 気象庁アメダス
- 6) 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
- 7) 山下英俊：コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究，北海道大学学位論文，p.116-121，1999.3
- 8) 依田彰彦：技術フォーラム「資源の有効利用とコンクリート」（第 5 回）高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34，No.4，pp.72-82，1996.4
- 9) Pigeon, M. and Pleau, R. : Durability of Concrete in Cold Climates, E&FN SPON, pp.16-17, 1995.
- 10) 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
- 11) Verbeck, G. J. and Klieger, P. : Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin, No.150, pp.1-13, 1957.