

論文 凍害の進行に及ぼす水の塩分濃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: 寒冷地におけるコンクリート製の道路構造物の凍害の進行は、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不明な点が多い。スケーリングは水の塩分濃度が3%のときに最も発生しやすいとされるが、路面水の塩分濃度は経時的に変化しやすく、常時一定とは限らない。そのため、塩分濃度0~3%の範囲において凍害に及ぼす塩分濃度の影響を調べた。その結果、塩分濃度が高いとコンクリート表面に固着する氷の収縮ひずみが増加し、スケーリングも多く発生することが確認できた。また、塩分濃度の範囲が0.5%以下では濃度の増加量が小さくてもスケーリング量は大きく増加することもわかった。
キーワード: 凍結融解, 塩分濃度, スケーリング, ひずみ, 相対動弾性係数

1. はじめに

寒冷地では冬期間、車両走行の安全性を確保するため、凍結防止剤が散布されている。その一方で、道路構造物においては、凍結防止剤によるコンクリート部材の凍害事例が報告されている¹⁾。

今後は限られた予算で、コンクリート構造物を合理的に維持し、使用による恩恵を最大化することが求められる。そのためには適切な劣化予測技術に基づく最適な維持管理計画を立案する必要がある。凍結防止剤によるコンクリート部材の凍害の進行は、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²⁾とされている。

このことに鑑み、著者らは現在、凍結防止剤が含まれる融雪水の供給を受けるコンクリート構造物の適切な維持管理手法の構築・体系化に向け、コンクリートの凍害の進行に及ぼす凍結防止剤の散布環境の影響を調べている。これまでの研究で、凍害形態の一つであるスケーリングに及ぼす散布環境の影響は、単純に散布回数だけでは説明できず、散布回数の増減に伴い、コンクリートへ供給される融雪水の塩分濃度の変化を考慮する必要があることを明らかにした³⁾。

スケーリングに及ぼす水の塩分濃度の影響は、3%のときに最も大きくなることは広く知られている⁴⁾。しかし、実際の路面では、融雪水の塩分濃度は3%以下の範囲で経時的に変化しやすく⁵⁾、常時一定とは限らない。このため、凍結防止剤の散布環境の影響を評価するには、塩分濃度が0~3%の範囲でコンクリートの凍害の進行を定量的に明らかにする必要がある。しかし、この濃度範囲に着目した評価の事例は少ない。

そこで、凍結防止剤が散布される環境下におけるコンクリートの凍害進行予測技術の開発の一環として、水の

表-1 コンクリート配合

水セメント比 (%)	使用セメントの種類	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55	普通	145	264	879	1067
	高炉B	145	264	875	1062

・普通：普通ポルトランドセメント
 ・高炉B：高炉セメントB種

塩分濃度と凍害の進行の関係を調べる基礎実験を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合・材料

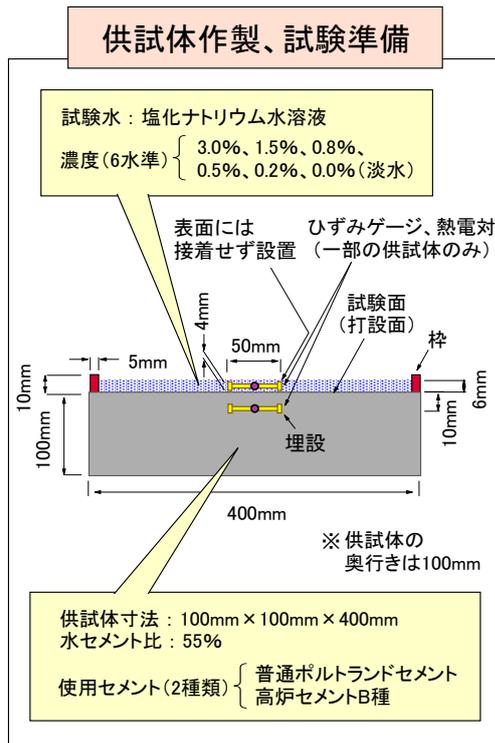
実験を行う供試体のコンクリート配合を表-1に示す。水セメント比は北海道の内陸部の鉄筋コンクリート構造物の最大値とされる55%⁶⁾とした。使用するセメントは、汎用性の高い普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)と高炉セメントB種(密度3.05g/cm³)の2種類とした。細骨材は苫小牧市錦岡産の海砂(表乾密度2.72g/cm³, 絶乾密度2.69g/cm³, 吸水率1.28%, 粗粒率2.81, 除塩処理済), 粗骨材は小樽市見晴産の碎石(表乾密度2.68g/cm³, 絶乾密度2.64g/cm³, 吸水率1.52%, 粗粒率7.04)を使用した。粗骨材の最大寸法は25mmとした。目標スランプは8±2.5cm, 目標空気量は4.5±1.5%とした。混和剤は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)を使用した。

2.2 供試体

図-1に示すように、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日まで温度20℃, 湿度60%の恒温恒湿室に静置した。この静置期間に発泡スチロール板を使用して高さ10mm, 幅5mmの枠を作製し、材齢21日にエポキシ樹脂接着剤とシリコン充填材を用いて、この枠を打

*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)

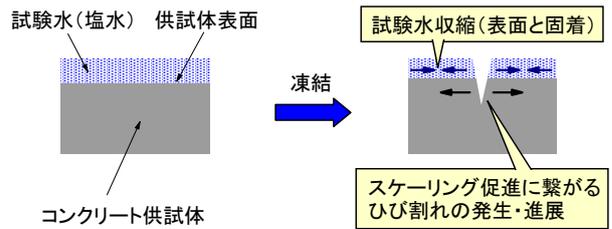
*2 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)



図一 実験の流れ

設面（100mm×400mm，以下，試験面と記す）に据え付けた。

塩水によるスケーリングの促進に関して，Valenzaらは図一2に示すように，コンクリート表面に形成される塩分を含む氷層が大きく収縮することにより，コンクリート表面近傍に引張応力が作用し，これにより極表層に発生した亀裂が発達し，大きなスケーリングに至るとい



図一2 Valenzaらが提唱する塩水によるスケーリング促進メカニズムの概念⁷⁾



写真一1 凍結融解試験の様子

メカニズムを提唱している⁷⁾。そこで，このメカニズムに基づく塩水とコンクリートとの境界面近傍の挙動把握の試みとして，一部の供試体において，表面と深さ10mmにひずみゲージと熱電対を設置した。

2.3 凍結融解試験

材齢28日から凍結融解試験を開始した。図一1に示すように，ここでは実構造物で想定されるコンクリート部材の一面に融雪水が供給される状態を模擬し，ASTM C 672に準じて試験面に試験水を深さ6mm張って凍結融解作用を与えることとした。試験水は凍結防止剤が含まれる融雪水に見立てた塩化ナトリウム水溶液とし，濃度は3.0%，1.5%，0.8%，0.5%，0.2%，0.0%（淡水）の6水準とした。

写真一1は凍結融解試験の様子である。試験は，所定の温度，時間をセットすることで，凍結と融解の繰り返しが空調運転により自動で行われる実験室で行った。凍結融解サイクルは，ASTM C 672にならい，凍結工程16時間，融解工程8時間の1日1サイクルとした。凍結温度は，ASTM C 672では-18°Cとされているが，凍結防止剤の散布形態だけでなく，最低気温も地域によって異なることを考慮し，ここでは-18°Cに加えて，北海道で最も厳しい最低気温に相当する-40°C⁸⁾の2条件で試験を行うこととした。融解温度はASTM C 672に準じて23°Cに統一した。

2.4 測定

凍結融解試験を300サイクルまで行い，25サイクルご

とにスケーリング量と相対動弾性係数を測定した。測定値は供試体 3 個の平均とした。表面近傍の挙動把握については、普通ポルトランドセメントを使用し、凍結温度を -18°C に設定した供試体のうち、代表して試験水の濃度が 3.0%と 0.0%のケースにおいて行った。

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

相対動弾性係数は周波数が 28kHz の超音波測定器を使用して求めた。供試体の両側面に超音波の発・受振子をあて、深さ 10, 20, …, 80, 90mm 位置の超音波伝播速度を測定し、式(1)⁹⁾、(2)から各深さの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 サイクル、すなわち凍結融解試験前の測定値が使用されるが、動弾性係数の増進に及ぼす試験期間の水和反応の影響を極力排除するため、ここでは同じ濃度の試験水を張り、同じ期間 (n 日)、温度 20°C 、湿度 60%の環境に存置した供試体の動弾性係数を E_{d0} とした。

3. 実験結果・考察

3.1 スケーリング量の推移

図-3 にスケーリング量の推移を示す。普通ポルトランドセメントを使用した場合、スケーリング量が最も少なかったのは濃度 0.0%であったが、最も多かったのは濃度 3.0%ではなく 0.8%であった。濃度 0.2~3.0%の範囲ではスケーリング量と濃度の関係が明確ではなかった。一方、高炉セメント B 種を使用した場合はスケーリング量と濃度の序列が概ね対応し、300 サイクル終了時のスケーリング量が最も多かったのは濃度 3.0%であった。

使用セメントの違いに着目すると、高炉セメント B 種の方がスケーリング量は多かった。これは、既報¹⁰⁾の傾向と一致する。

3.2 スケーリングの発生挙動についての考察

図-4 はコンクリート供試体の表面から深さ 10mm における温度ひずみ曲線で、ここでは凍結融解 1 サイクル目のデータを代表して示している。濃度 3.0%と 0.0%のいずれも、コンクリート表層は 0°C から -18°C にかけて約

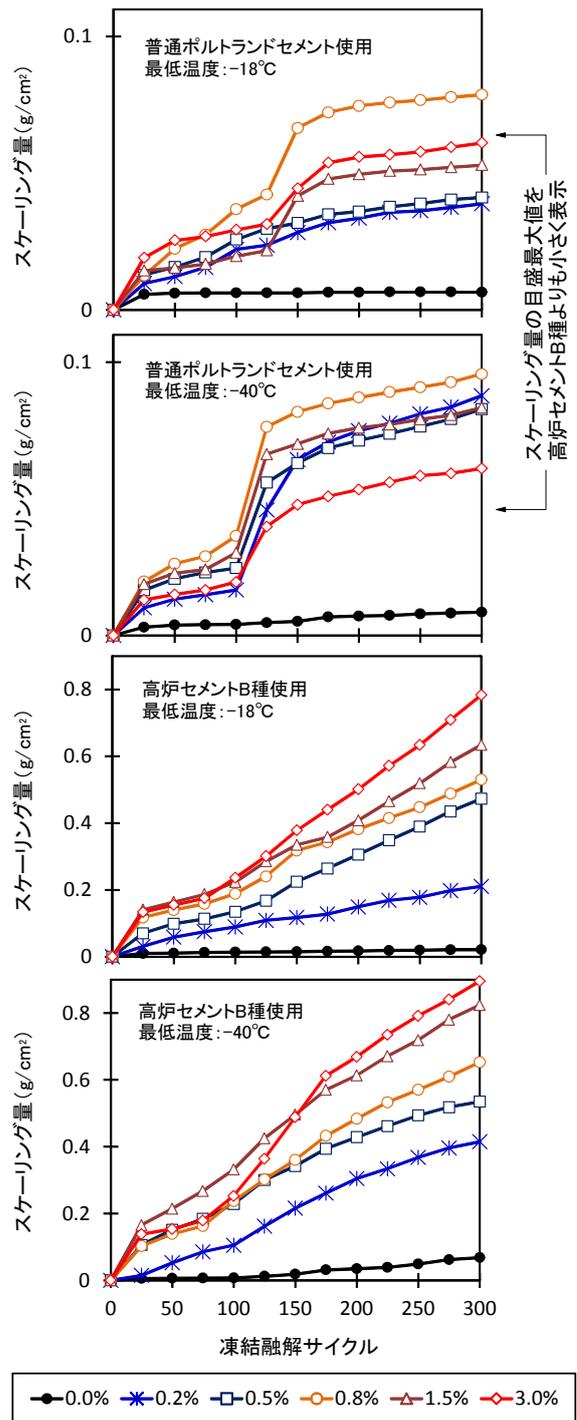


図-3 スケーリング量の推移

$100\mu\text{m}$ 収縮し、 $0\sim-18^{\circ}\text{C}$ における供試体軸方向の線膨張率は約 $5.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

次に、凍結した試験水の膨張収縮挙動の測定結果について述べる。はじめに、ひずみゲージと試験水を接触させず、ひずみゲージにのみ凍結融解試験と同じ温度変化を 2 サイクル与え、ひずみゲージ単独の挙動を調べた(図-5)。ひずみゲージの線膨張率は約 $40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。次に、このひずみゲージをコンクリート供試体の表面に接着せずに置き、濃度 3.0%、0.0%の試験水を張った状態

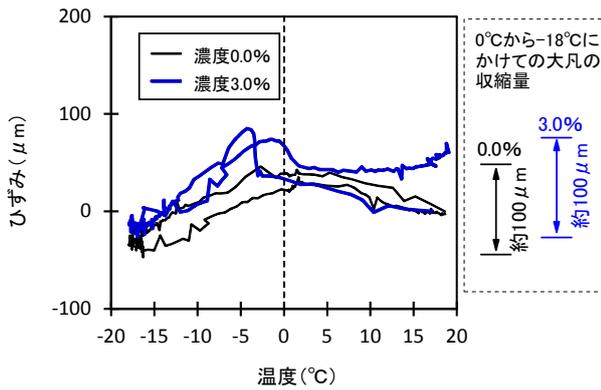


図-4 深さ 10mm の温度ひずみ曲線 (普通ポルトランドセメント使用, 最低温度-18°C, 1 サイクル目)

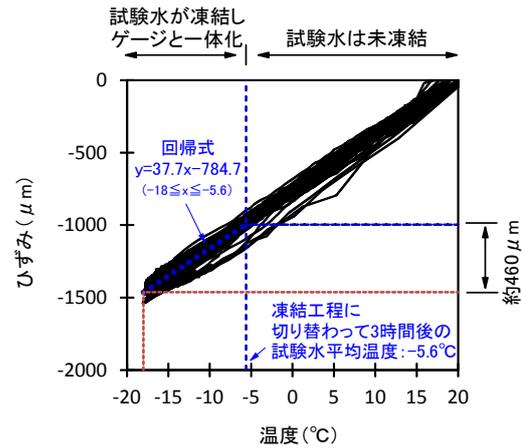


図-7 濃度 3.0% の試験水を張った状態で凍結融解を与えたときの供試体表面のひずみゲージの挙動

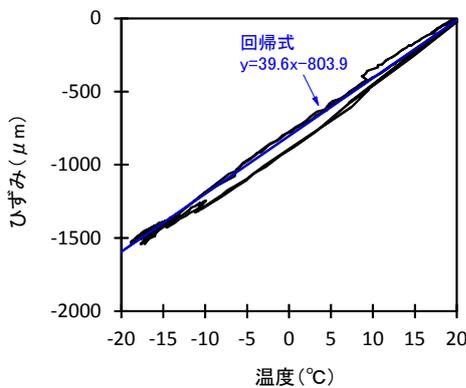


図-5 ひずみゲージ単独の挙動 (凍結融解試験と同じ温度下の気中にひずみゲージのみ曝した状態)

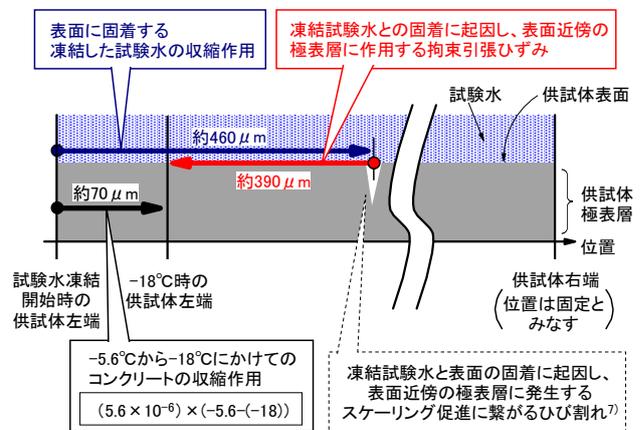


図-8 濃度 3.0% における表面近傍の挙動のイメージ

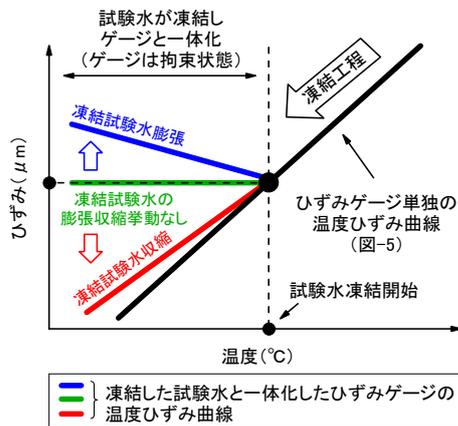


図-6 試験水を張った状態で凍結融解を与えたときの供試体表面のひずみゲージの挙動イメージ

で凍結融解を与え、ひずみデータを取得した。凍結した試験水に膨張収縮が生じると、図-6 に示す赤線、緑線、青線のようなイメージのグラフが得られる。

図-7 は濃度 3.0% の試験水を張った状態で凍結融解を与えたときの供試体表面に置いたひずみゲージの挙動である。ここでは凍結融解試験開始から 42 サイクルまでのデータを示した。宮本ら¹¹⁾は濃度 3.0% の場合、本実験に

近い-20°C の環境では 3 時間後に溶液が完全凍結する実験結果を示している。これに鑑みると、凍結工程に切り替わって 3 時間後に試験水が完全に凍結し、ひずみゲージは凍結した試験水を傷めることなく試験水と一体化して挙動したと考えられる。図より凍結した試験水は-5.6°C (凍結工程に切り替わって 3 時間後の平均温度) から-18°C にかけて約 460μm 収縮することとなり、コンクリート収縮量との差は図-8 より約 390μm となる。

図-9 は濃度 0.0% の試験水を張った状態で凍結融解を与えたときの供試体表面に置いたひずみゲージの挙動である。このケースでは淡水を使用しているため、0°C 以下ではひずみゲージと凍結した試験水が一体化している。凍結工程の 0°C 付近で膨張ひずみが確認された。これは、淡水凍結時の特徴の一つである 9% の体積膨張¹²⁾を示している。その後は緩やかな収縮を呈し、図をみると多くのデータは-18°C で-1000μm 前後の値を記録した後、融解工程へ移行している。図-5 よりひずみゲージは 0°C で約-800μm の値を示していることから、凍結した試験水は 0°C から-18°C にかけて約 200μm を中心に幅を持った収縮となっている。前述の濃度 3.0% のケースと同様に考察す

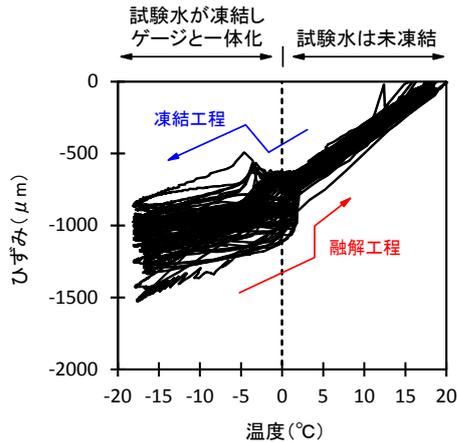


図-9 濃度 0.0%の試験水を張った状態で凍結融解を与えたときの供試体表面のひずみゲージの挙動

ると、凍結した試験水の収縮ひずみとコンクリート自体の収縮ひずみ (100 μm (図-4)) の差は 100 μm 前後となった。

今回の実験では、凍結した試験水の収縮に起因し、試験水と固着する表面近傍の極表層に作用する拘束引張ひずみは濃度 0.0%に比べて濃度 3.0%の方が約 3.9 倍大きい結果となった。これは、濃度 3.0%の方が表面の極表層にひび割れが発生する確率が高いことを示唆し、図-3 の実験結果とも対応する。

3.3 試験水の濃度とスケーリング量との関係

図-10は試験水の濃度と 300 サイクル目のスケーリング量の関係を示している。区間により 2 つの直線で回帰したところ、普通ポルトランドセメントを使用した場合のスケーリング量は、濃度 0.0~0.2%間では濃度に比例して増加しているが、0.2~3.0%間ではスケーリングに及ぼす濃度の影響はほとんどみられなかった。高炉セメント B 種を使用した場合のスケーリング量は、濃度 0.0~0.5%間では濃度に比例して大きく増加した。0.5~3.0%間でも比例関係は続いているが、増加の割合は前者の方が大きかった。

3.2 において、スケーリングに影響を及ぼす、コンクリート表面に作用してひび割れの要因となる凍結した試験水による拘束ひずみは、濃度 0.0~3.0%の範囲では濃度が高い方が大きいことを確認したが、図-10の結果は、この特徴が最も顕著に表れる濃度の範囲は 0.0~0.5%であることを示している。このことは、0.5%以下の濃度が小さい範囲では、濃度の増加量が小さくてもスケーリングは大きく促進される場合があることを意味しており、凍結防止剤散布路線では原則、散布量を問わず、スケーリング抑制対策工を施すことが望ましいものと考えられる。図-11は最低温度が-18 $^{\circ}\text{C}$ と-40 $^{\circ}\text{C}$ の同じ配合、濃度、サイクル同士のスケーリング量を比較したものである。この図から、最低温度が低い地域ほど対策工の検討が必

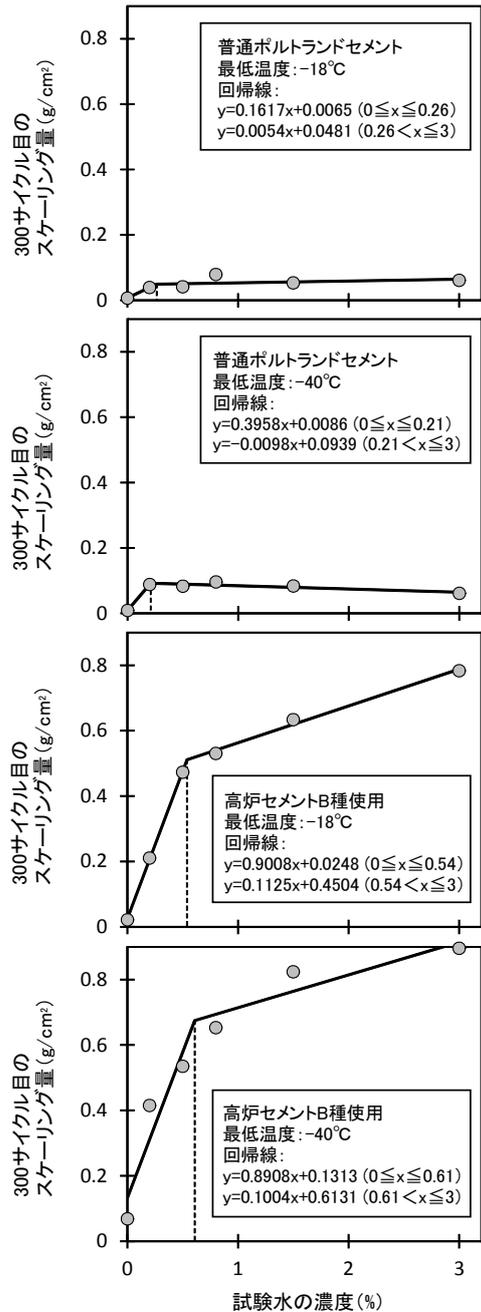


図-10 試験水の濃度と 300 サイクル目のスケーリング量の関係

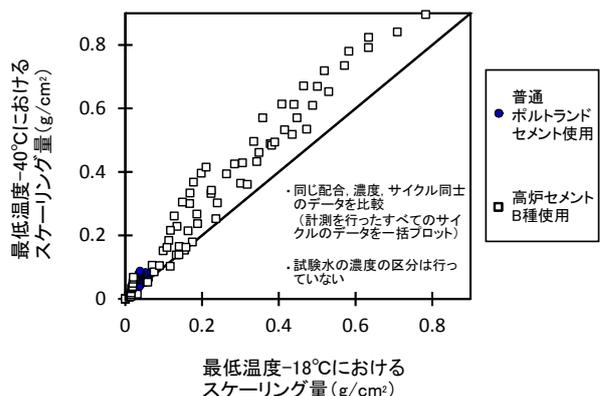


図-11 スケーリングに及ぼす最低温度の影響

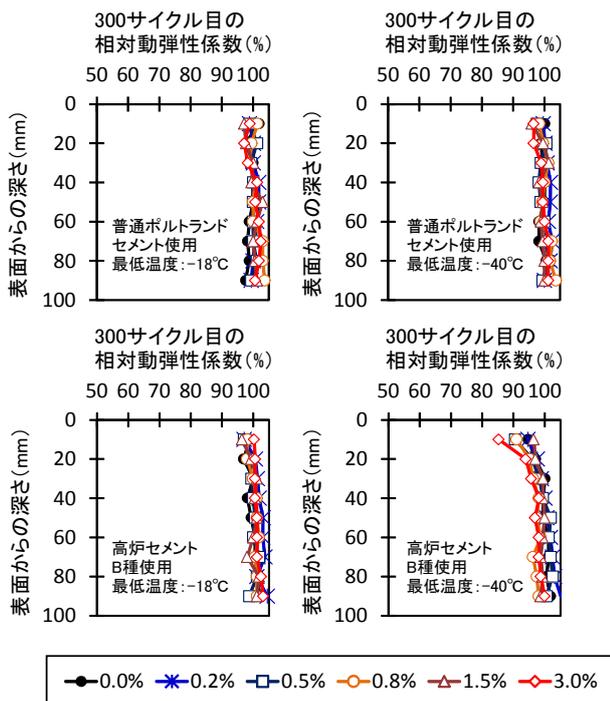


図-12 300 サイクル目の各深さの相対動弾性係数

要と言える。

今回は最低温度が -18°C 以下の地域を想定した検討を行ったが、寒冷地には年間最低気温が $0\sim-18^{\circ}\text{C}$ の間の地域も多く存在している。今後は、最低気温を $0\sim-18^{\circ}\text{C}$ の範囲に設定した環境条件下においても検討を進めていきたい。

3.4 相対動弾性係数

図-12 は試験水との境界のコンクリート面からの深さ別の相対動弾性係数で、ここでは300 サイクル目の結果を代表して示す。高炉セメントB種を使用した最低温度 -40°C の環境下では深さ10mm位置の相対動弾性係数の低下がやや大きい。そのほかについてはAEコンクリートを使用していることもあり、相対動弾性係数の低下は小さかった。

4. まとめ

凍結防止剤が散布される環境下での最適なコンクリート構造物の維持管理計画の立案に資する凍害進行予測技術の開発に向け、凍害の進行に及ぼす水の塩分濃度の影響を調べる基礎実験を行った。なお、塩分濃度は $0\sim 3\%$ の範囲を検討対象とした。今回の実験で得た成果を以下に示す。

(1) 濃度 0.0% に比べて、濃度 3.0% の方が凍結した試験水

の収縮に起因し、試験水と固着する表面近傍の極表層に作用する拘束引張ひずみは約3.9倍大きく、表面の極表層にひび割れが発生する確率が高い。

(2) スケーリング量は全体的に塩分濃度が高いほど大きい傾向にある。なお、この特徴が最も顕著に表れる濃度の範囲は $0.0\sim 0.5\%$ であり、凍結防止剤の散布が少なくともスケーリングが大きく促進されるおそれがあり、最低温度が -18°C 以下となるような凍結防止剤散布路線では原則、散布量を問わずスケーリング抑制対策工を施すことが望ましい。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：融雪材によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書，1999.11
- 2) 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7-5，2017.4
- 3) 遠藤裕丈，安中新太郎：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.823-828，2017.7
- 4) Verbeck, G. J. and Klieger, P. : Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin, No.150, pp.1-13, 1957.
- 5) 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
- 6) 文献2)，p.3-コ2-4
- 7) Valenza II, J. J. and Scherer, G. W. : Mechanism for Salt Scaling, J. Am. Ceram. Soc., Vol.89, No.4, pp.1161-1179, 2006.
- 8) 気象庁アメダス
- 9) 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
- 10) 遠藤裕丈：凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法に関する研究，北海道大学博士学位論文，2011.3
- 11) 宮本修司，佐藤圭洋，徳永ロベルト：凍結防止剤の室内凍結試験について—凍結防止剤の種類，濃度及び温度と氷の凍結状態との関係—，第52回（平成20年度）北海道開発技術研究発表会，2009.2
- 12) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」，技報堂出版，p.23，1988.2