

コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす 塩水の濃度と最低温度の影響

小沢拓弥・片平 博・古賀裕久

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性に関しては、古くから様々な研究が行われている。その結果、耐凍害性を有する良質な骨材を使用し、コンクリート中に4.5%程度の空気量を混入することで高い耐凍害性が得られることが分かっているため、これに従って配合設計を行うのが一般的である。

しかし、近年、従来の方で耐凍害性を確保したコンクリートでも、沿岸部や凍結防止剤散布地域では、塩化物の影響によってスケーリング劣化が促進されることが分かかってきて、課題となっている。スケーリング劣化とは、凍結融解によってコンクリート表面のセメントペースト部分がフレーク状に剥離する現象である。例えば、写真-1に示す橋台では、伸縮装置から凍結防止剤を含む路面排水が流下し、コンクリートのスケーリング劣化が著しく促進されることで、断面欠損が見られた。

新設のコンクリート構造物を設計する際や、既設のコンクリート構造物を維持管理していく上で、どの程度の気象条件、塩化物の供給条件でスケーリングが発生するかを明確にする必要がある。そこで、塩水の最低温度と濃度をパラメータとした凍結融解試験を実施することで、これらがスケーリング劣化に与える影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体の製作方法

コンクリートのスケーリング劣化では表面のペースト部分の品質が特に影響するため、試験体は粗骨材を除いたモルタルで製作した。モルタルの配合を表-1に示す。使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 、表中ではOPC）、細骨材には川砂（絶対密度 2.53g/cm^3 、吸水率1.60%、粗粒率2.67）を用いた。水セメント比は55%、砂セメント比は3.2とした。また、スケーリング劣化を促進させる目的から、AE剤

を使用せず、目標空気量を3%と低く設定した。練り混ぜたモルタルで $40\times 40\times 160\text{mm}$ の角柱を製作し、これを分割（ $40\times 40\times 80\text{mm}$ ）して用いた。

養生は、2か月以上の十分な水中養生（水温 20°C ）を行った後、凍結融解試験の前に気温 20°C 相対湿度60%の空气中で1週間乾燥させた。圧縮強度、曲げ強度を測定した結果、3体の平均値はそれぞれ 62.7N/mm^2 、 8.9N/mm^2 であった。

2.2 凍結融解試験の方法

塩水を用いた凍結融解試験の概要を図-1に示す²⁾。凍結融解試験は、試験水（塩水または淡水）で満たしたポリプロピレン製の容器に2体に分割したモルタル試験体を入れ、冷凍庫と水槽（ 20°C ）へ交互に静置することで凍結融解作用を与えた。塩水には、凍結防止剤として広く用いられる塩化ナトリウムを溶かした溶液を用いた。また、本検討では、試験水の温度管理が重要となるため、 1°C 刻みで温度設定ができる冷凍庫を使用し、試



写真-1 橋台側面の状況¹⁾

表-1 モルタル試験体の配合

セメントの種類	水セメント比	砂セメント比	目標空気量
OPC	55%	3.2	3%

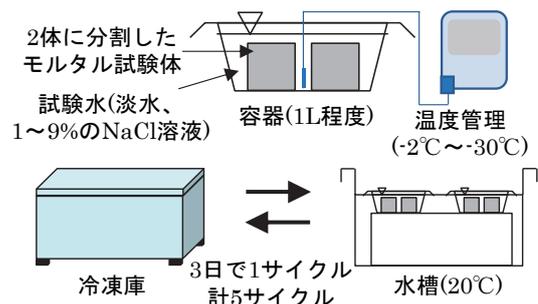


図-1 凍結融解試験の方法

Effect of Salt Water Concentration and Minimum Temperature on Concrete Scaling

験水の温度を管理した。

凍結融解のサイクル数は5回とし、表面からスケーリングによって剥離した試料の質量を測定して、モルタル試験体の表面積で除すことによりスケーリング量 (g/cm²) を算出した。また、試験終了時に外観を撮影して、ペースト部分の剥離状況を観察した。

2.3 試験水の条件

塩水の凍結は、塩化ナトリウムの存在により凝固点降下が生じ、濃度によって凍結する温度が異なる。図-2に、塩化ナトリウムの凝固点曲線³⁾を示す。例えば、塩水の温度が-3℃のとき、5%濃度の塩水では氷が析出し始めるが、10%濃度の塩水では凝固点が約-7℃であるため、液体のままである。この塩水の濃度による凝固点の変化とスケーリング劣化の関係が整理できるよう次に示す試験水の条件とした。

試験水の条件一覧を表-2に示す。試験水は、最低温度を-2℃から-30℃までの8水準、濃度を0%から9%までの4水準、これらを組み合わせた合計32水準とした。凍結防止剤が散布された路面水

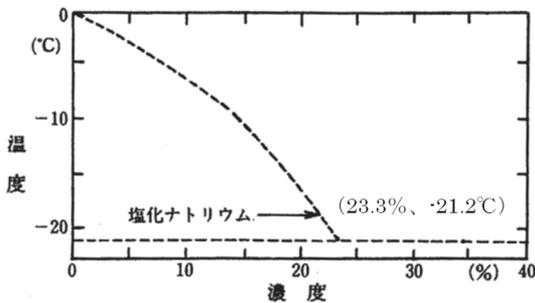


図-2 塩化ナトリウムの凝固点曲線³⁾に加筆修正

表-2 試験水の条件一覧

試験水	値	水準
最低温度(°C)	-2、-4、-6、-8、 -10、-15、-20、-30	8
濃度(%)	0(淡水)、1、3、9	4

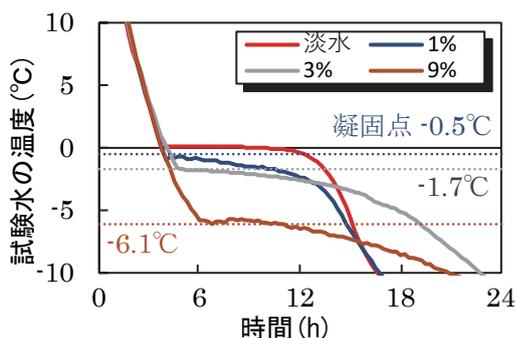


図-3 試験水の温度履歴の例 (最低温度-15℃)

の濃度は、散布直後で約5~6%になることが報告されている⁴⁾。路面から排水される過程で稀釈・濃縮されることを想定して、濃度の範囲を1%から9%とした。そして、最低温度の範囲は、濃度が9%の場合では、凝固点が約-6℃となることを考慮し、凝固点付近の-2℃から-10℃までの範囲を2℃刻みと細かく設定した。図-3に、測定した試験水の温度履歴を示す。凝固点付近で温度低下の鈍化が確認できる。

3. 実験結果

3.1 試験水の最低温度とスケーリング量の関係

試験水の最低温度とスケーリング量の関係を図-4に示す。試験水に淡水を用いた場合は、いずれの最低温度でもスケーリングが生じなかった。

一方で、試験水が塩水(濃度が1%から9%)の場合は、最低温度が-4℃から-30℃の範囲でスケーリングが生じた。塩水を用いた場合のスケーリング量は、-4℃から-10℃の範囲で値が急激に増加し、-10℃より低い温度範囲では、変化が比較的小さい傾向にあった。なお、スケーリング量が急激に増加した最低温度は、既往研究⁵⁾とも概ね整合する結果であった。

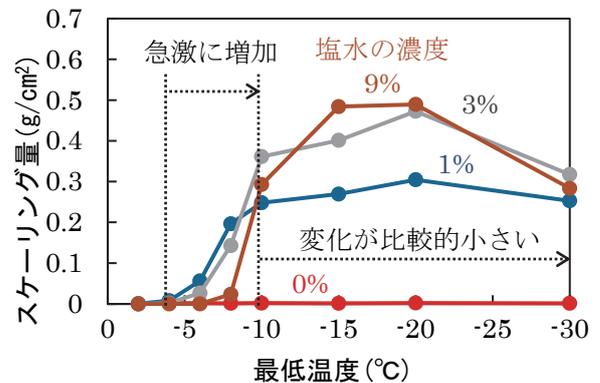


図-4 試験水の最低温度とスケーリング量の関係

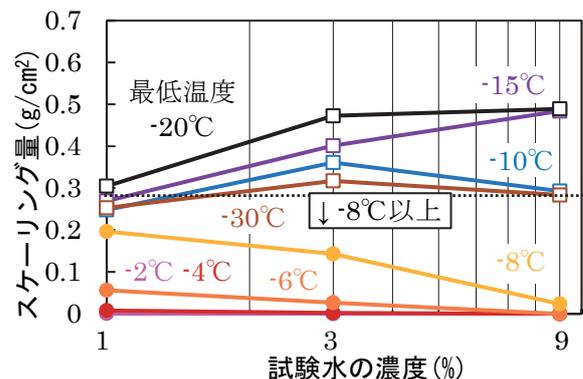


図-5 塩水の濃度とスケーリング量の関係

3.2 塩水の濃度とスケーリング量の関係

試験水に塩水を用いた場合の濃度とスケーリング量の関係を図-5に示す。スケーリング量は、最低温度が-8℃以上では、濃度が1%で最も大きく、濃度が9%で最も小さくなる傾向を示した。一方で、最低温度が-10℃以下では、濃度が1%ではやや小さく、濃度が3%または9%で大きくなる傾向を示した。

3.3 外観観察

試験終了時（5サイクル）のモルタル試験体の外観写真と、表面から剥離した試料を図-6に示す。ここでは、最低温度の低下にしたがって、スケーリング量が急増した範囲の-6℃と-10℃、スケーリング量の変化が比較的小さかった範囲の-15℃について比較した。

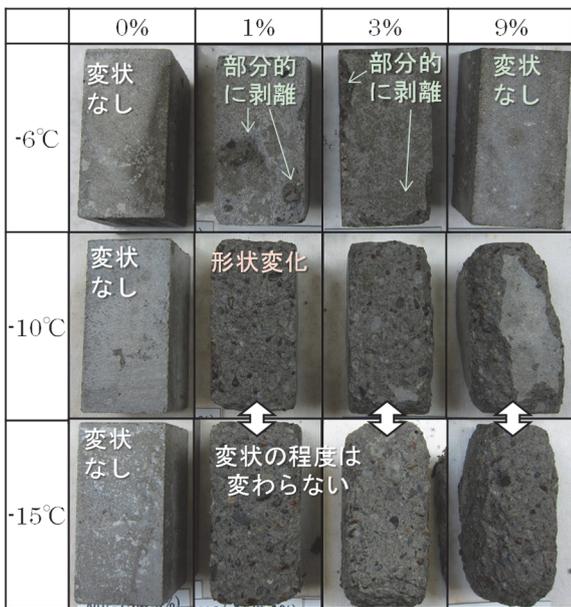
試験水の最低温度が-6℃で濃度が1%または3%の場合では、モルタル試験体の表面が部分的に剥離（それぞれ18.0g、8.5g）しているが、最低温度が-6℃で濃度が9%の場合では、外観に変状が

確認できなかった。これらの試験体のスケーリング量は0.00g/cm²から0.06g/cm²の範囲にあるが、塩水の濃度差による変状の差が大きい。

一方で、最低温度が-10℃の場合は、いずれの濃度のモルタル試験体も形状が変化するほど表面が剥離（それぞれ79.4g、115.6gおよび93.7g）した。これらの試験体のスケーリング量は0.25g/cm²から0.36g/cm²と幅があるが、いずれの試験体も形状が変化するほど表面が剥離しているという点ではスケーリング劣化の程度に差がない。同様に、最低温度が-15℃の場合でも、いずれの試験体も形状が変化するほど表面が剥離しているという点ではスケーリング劣化の程度に差がないものと考えられる。

4. 考察

試験水の最低温度が-4℃から-10℃までの範囲で、スケーリング量が急増する理由について、塩化ナトリウムの凝固点に関係していると考察する。前述のとおり、温度低下に伴い塩水は、純水のようにある一定の温度で全てが凍結するのではなく、塩水中の純水に近い部分から氷が析出し始めて、



-6℃	0.5g	18.0g	8.5g	0.0g
-10℃	0.6g	79.4g	115.6g	93.7g
-15℃	0.4g	86.2g	128.4g	154.9g

(b) 表面から剥離した試料（質量を併記）

図-6 外観写真

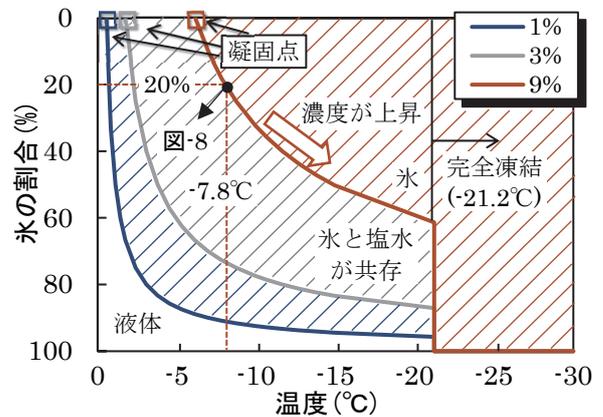


図-7 1%から9%の塩水を冷却した時の氷の割合



図-8 試験水の凍結過程の目視観察

残留する塩水が濃縮していくことで、氷と残留する塩水の割合も変化すると考えられている。この温度低下による塩水と氷の割合を文献³⁾を参考に作成し図-7に示す。図-7より、塩水の濃度が高いものほど氷が析出する温度が低いことがわかる。このため、塩水の濃度が高いものほどスケーリングが生じる温度が低かったものと考えられた。

塩水が凍結する過程について、目視観察で確認した状況を図-8に示す。図-8は、試験水の濃度が9%、温度が-8℃の条件において、試験水を撮影した様子である。また図-7に、図-8の温度と氷の割合を点線で併記した。この条件では、試験水はシャーベット状で、振動させると動きがみられるような状況であった。しかし、温度を-10℃にすると、試験水は振動させても動かなかった。図-7に示すように、図-8の状態では氷の割合が約20%であるが、温度低下により試験水中の氷の割合が増加したためと考えられる。これらの温度でのスケーリング量に着目すると最低温度が-8℃のとき0.02g/cm²であったのに対し、最低温度が-10℃になった時には0.29g/cm²と急激に増加した。

このように、今回試験した塩水の濃度が9%の場合において、シャーベット状の氷の発生から試験水全体が一体の氷のように凍結する状態まで変化した時、スケーリング量が急激に増加したのと考えられたが、現時点では定性的な評価にとどまっており、この現象の解明は今後の課題である。

5. まとめ

スケーリング劣化に及ぼす塩水の濃度と最低温度の影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 試験水が淡水の場合は、スケーリングが生じなかったが、塩水(塩化ナトリウム溶液)の場合は、濃度に関わらずスケーリングが生じた。
- (2) 塩化ナトリウムの凝固点降下の影響に関連し

て、本実験の塩水の濃度(1~9%)では、試験水の最低温度が-4℃以上は、スケーリングが生じなかった。さらに最低温度が低下すると、塩水の濃度が高いものほど、スケーリングが生じる温度も低かった。

- (3) 試験水の最低温度が-10℃以下になると、試験水の濃度にかかわらず試験体の形状が変化するほどのスケーリングが生じた。このときのスケーリング量は0.25g/cm²以上であった。

塩水の濃度によって凝固点が変わるので、塩水の濃度と最低温度の条件、スケーリング量の関係は複雑であった。しかし、実環境においては、路面水等の濃度をコントロールすることは困難であるため、コンクリートが置かれる環境の最低温度に着目することが重要である。本実験の範囲において、スケーリング劣化は、最低温度が-4℃以上では生じないが、最低温度が-10℃以下になると塩水の濃度に関わらず顕著に促進された。以上の知見は、既設のコンクリート構造物を維持管理していく上で、参考になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 田中良樹ほか：道路橋桁端部の漏水対策に向けて～路面排水下におけるコンクリートコアの凍害暴露試験～、土木技術資料、第59巻、第1号、pp.52~53、2017。
- 2) 片平博ほか：スケーリング劣化のメカニズム解明に向けた基礎的実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、pp.653~658、2020。
- 3) 社団法人日本建設機械化協会：除雪・防雪ハンドブック(除雪編)、2005。
- 4) 青山實伸ほか：凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.807~812、2004。
- 5) 羽原俊祐ほか：ソルトスケーリングにおよぼす冷却最低温度と凍結防止剤濃度及びモルタル配合の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.69、pp.433~439、2015。

小沢拓弥



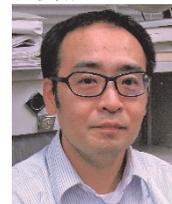
土木研究所 先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 研究員
OZAWA Takumi

片平 博



土木研究所 先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 特任研究員
KATAHIRA Hiroshi

古賀裕久



土木研究所 先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr. KOGA Hirohisa