

凍害によるコンクリートのひび割れ伝播に関する研究 Study on Crack Propagation in Concrete by Frost Damage

小山田 哲也, 羽原 俊祐
Tetsuya Oyamada, Shunsuke Hanehara

岩手大学
Iwate University

6種類の凍結防止剤溶液を用いてコンクリートを凍結融解させ、凍結防止剤の種類により表面剥離の程度が相違することが明らかとなった。この違いのコンクリート中に伝播したひび割れを、CT 技術を用いて可視化し、スケーリング劣化現象の原因について検討しようとした。その結果、ナトリウム塩およびカルシウム塩では、ひび割れは表面に沿って伝播することが分かった。一方、カリウム塩は内部へのひび割れが確認できた。

キーワード： スケーリング劣化、微細ひび割れ、連行空気、ひずみ分布、引張応力

背景と研究目的：

コンクリートのスケーリング劣化とは、凍結融解によりコンクリートの表面がフレーク状に剥げ落ちる劣化現象である。近年、スパイクタイヤの規制による交通安全を確保のために散布される凍結防止剤がスケーリング劣化を促進することが報告され[1]、岩手県をはじめとする東北地方で多く顕在化しており、国土交通省東北地方整備局では、予防対策を通知している[2]が、肝腎の劣化メカニズムが整理されていない状況にある。

筆者らは、凍結防止剤溶液内で凍結融解させた 8 mm 程度の立方体の小片モルタル（コンクリートから粗骨材を取り除いたもの）を切断して SEM 画像を解析するなど、微細ひび割れの発生に基づき表面劣化現象の原因を試みた。その結果、凍結防止剤として塩化ナトリウム溶液を使用した場合には、外部にひび割れが進展して表層剥離が発生することを明らかにした。また筆者が UC Berkeley P. Monteiro 教授と ALS の Beamline 8.3.2 において行った放射光 X 線 CT 測定による内部構造観察によれば、切断面でない内部のひび割れ伝播が確認できた。その観察例として凍結防止剤によるモルタル内部のひび割れ伝播挙動の違いを比較した結果を図 1 に示す。画像は 4 種類（塩化ナトリウム、酢酸ナトリウム、塩化カルシウム、酢酸カルシウム）の凍結防止剤溶液中で凍結誘拐させた断面サイズが約 $7 \times 7 \text{ mm}^2$ の角柱形状のモルタル試験片の断層像で、横の列で凍結防止剤の陰イオンの違いを、縦の列で陽イオンの違いを比較している。この測定を行った実験条件は、

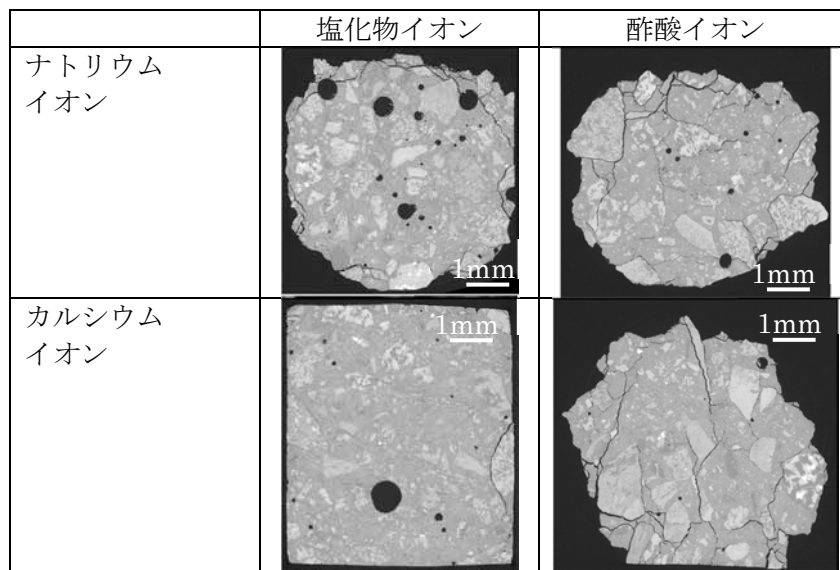


図 1. これまでの研究の CT 画像

X線エネルギーは 36 keV、取得した画像データの解像度は 4.4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、観察視野の水平幅は 8.3 mm である。1 データあたり 406 枚の透過画像を取得し、断層像に再構成した。これらの図が示すように、凍結防止剤に塩化物イオンを用いたものでは外周のひび割れが卓越して破壊に至るのに対し、酢酸イオンを用いた凍結防止剤の場合には、内部へのひび割れが多く発生して破壊に至ることが明らかとなった。これらの結果から小片モルタルの破壊状態から、コンクリートの表面剥離の原因解明が出来る可能性が示唆された。そこで本研究では、この現象の詳細を検討するため、SPring-8 の施設で CT 技術を用いて凍結融解試験後の供試体を観察し、ひび割れ伝播と劣化程度を比較し、視覚的確証を得ることとした。

実験概要：

(1) コンクリートのスケーリング量

セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は 50% とし、空気量は 4.5 ± 1.5% とした。コンクリートは材齢 1 日で水中養生を開始し、28 日後に外周部をシリコン樹脂で止水してスケーリング試験を実施した。本実験では、ASTM C 672 に準拠した凍結融解試験を行い、モルタル供試体のスケーリング量を評価した。凍結防止剤としては、陰イオンでは、塩化物、酢酸を、陽イオンではナトリウム、カリウム、カルシウムをそれぞれ組み合わせた 6 種類を使用した。

使用した 6 種類の凍結防止剤の濃度はすべて 3 mass% とした。供試体を -20°C の冷凍庫内で 16 時間、20°C の室内で 8 時間を 1 サイクルとした環境に晒し、10 サイクルまで行った。5 サイクルごとに劣化した表面の剥離物をブラシで軽く掻きとり、濾紙上に採取して溶液を水で洗い流し、105°C で一日間乾燥させ、得られた剥離物質量を測定してスケーリング量とした。本研究では 10 サイクル後の単位面積当たりの剥離物の質量（スケーリング量を試験面の表面積で除したもの）で評価した。

(2) 小片モルタルの質量損失率

供試体は AE 剤を用いたモルタルとし、(1) のコンクリートから粗骨材を取り除いた配合を計算して単独で練り混ぜて成形した。実験に供した試験片は、4×4×16 cm の JIS モルタル供試体を、材齢 28 日まで水中養生を行った後、ダイヤモンドカッターで 1 辺が 8 mm になるように切断して作製した。

凍結融解試験は、試験片 1 組 3 粒（約 4 g）を、容量 100 ml のポリプロピレン容器に入れ、溶液と試料の質量比を 10 : 1 とし、フタをして行った。使用した 6 種類の凍結防止剤の濃度は 3 mass% とした。容器に入れた供試体に対し、-20°C の冷凍庫内で 12 時間、15°C の室内で 12 時間を 1 サイクルとし、1、3、5、7、10、15、20 回の凍結融解繰返しを与えた。所定のサイクルの後、ろ紙 (5B) にて試料を分離し、純水で洗浄した。分離した試料は 40°C にて 24 時間乾燥した後 2.5 mm ふるいで分級した。スケーリング抑制効果については、ふるい上に残った試料の質量の残存率により評価した。1 回の測定には上記試料を 3 組使用し、3 組のうちの中央値を使用して試験前質量からの質量の残存率を求めた。このようにして得られた質量残存率から、式[1]を用いてスケーリング耐久性指標（SDI と記す）を求め、定量的な評価指標とした。

質量残存率が 40% 以上の場合

$$\text{SDI} = 10 \text{ サイクル時の質量残存率 (\%)}$$

質量残存率が 40% 未満の場合

$$\text{SDI} = P \times N / M \text{ (\%)} \quad [1]$$

$$P = 40 \text{ (\%)}$$

N: 質量残存率 40% に達した時のサイクル数 (回)

M: 試験終了を予定しているサイクル数 (回)

(本試験の場合には M=10 (回))

(3) X線 CT 測定

(2) で行った小片凍結融解試験で質量を測定した小片モルタルの内、平均的な破壊が生じている供試体を 1 粒観察した。X線 CT の測定条件は以下の通りである。

X線のエネルギーは 36 keV とした。このときモノクロメータ結晶は表面の方位が <111> のシリ

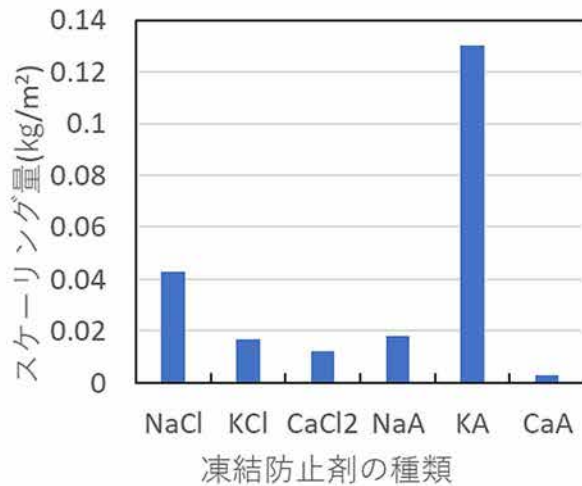


図 2. コンクリートのスケーリング

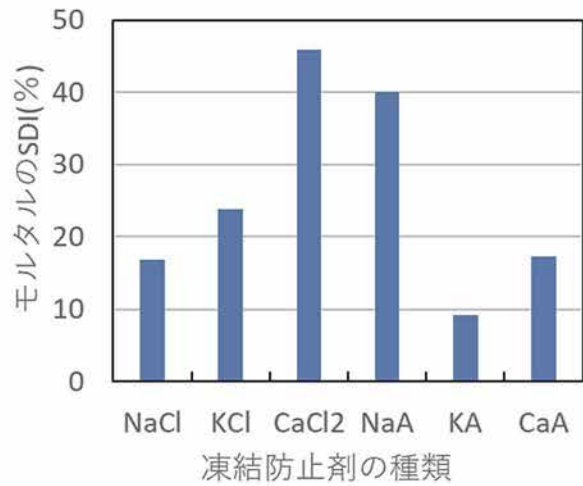


図 3. 小片モルタルの SDI

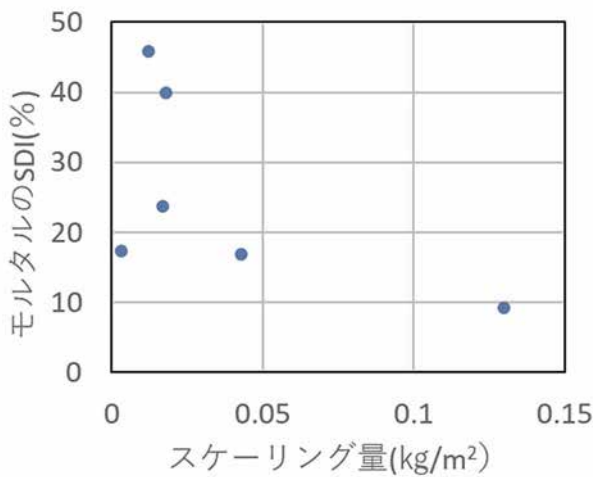


図 4. スケーリング量と SDI の関係

コン単結晶であり、回折指数は 111 であった。なお、高調波を除去するための全反射ミラーは用いていない。

検出器には浜松ホトニクス社のイメージングユニット AA40 と CCD カメラ C4880-41S を組み合わせて用いた。この検出器で使用した 1 次レンズと 2 次レンズの焦点距離はそれぞれ 50 mm と 105 mm であった。蛍光体は厚さ 10 μm の P43(Gd₂O₂S: Tb)を用いた。この検出器構成での実効的な画素サイズは 2.86 μm であった。また、視野サイズは横 12 mm および縦 3.3 mm であった。X線の屈折の効果を利用し、微細な亀裂を検出するために試料と検出器の距離を 40 mm とした。

CT の測定は、試料を 0.16 度回転させるたびに試料の透過像を測定し、それを 0 度から 180 度の角度範囲で繰返し行った。それぞれの透過像測定の際の露光時間は 1 s とした。透過像を 20 回測定する度に試料を光軸から退避して、試料なしの X 線像を測定した。

CT 断面像の再構成はフィルタードバックプロジェクションで行った。

結果および考察：

コンクリートの 10 サイクルまでのスケーリング量を図 2 に示す。横軸には、凍結防止剤の種類を示しており、スペース短縮のため、酢酸化物の酢酸イオン (CH₃CO₂⁻) を A として示している。スケーリング量とは前述のように表面剥離量であり、この値が多い程、劣化したことを意味する。この結果から、使用した凍結防止剤の種類により、スケーリング量は異なる。塩化物イオン系の凍結防止剤では、陽イオンの違いによる傾向は Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ であった。一方、酢酸イオン系では、ナトリウムイオンとカルシウムイオンの酢酸化物については塩化物と同じ傾向 (Na⁺ > Ca²⁺) を示しているが、カリウムイオンのスケーリング量が突出している。陰イオンの違いによるスケーリング量の傾向については、これらの結果からは系統的な類推が難しいと考えられる。

小片モルタルを各凍結防止剤水溶液中で凍結融解させた結果から SDI を算出した。結果を図 3 に示す。SDI は値が小さい程、劣化が大きく生じたことを示す。最も劣化が大きかったのは酢酸カリウムの場合であり、図 2 を裏付ける結果となった。これら SDI の結果は、小片モルタルの結果であり、図 2 のコンクリートのスケーリング量を反映している必要がある。両者の関係を比較

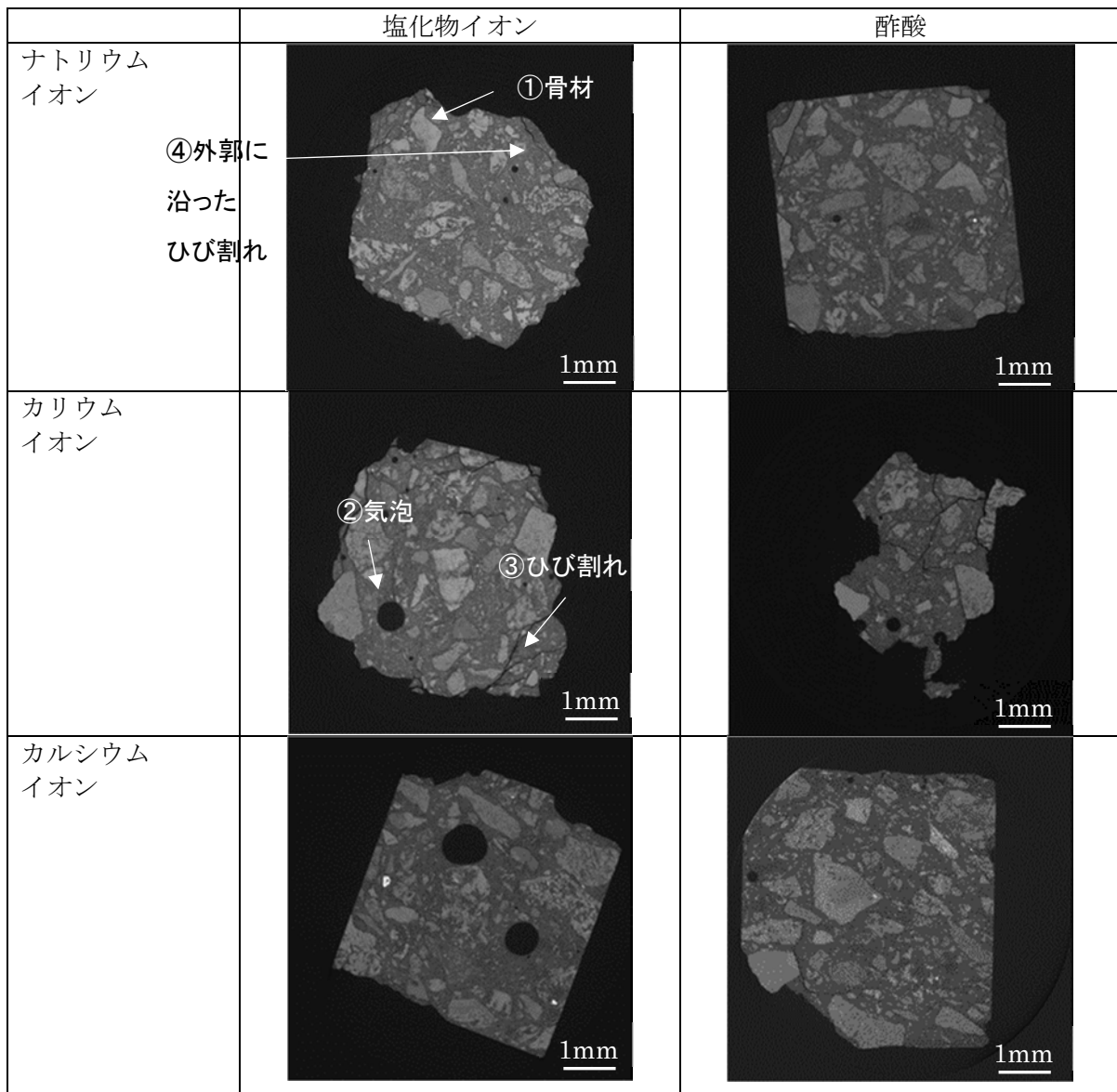


図 5. 各種凍結防止剤溶液中で凍結融解した供試体の CT 画像

したのが、図 4 である。試験方法や供試体の大きさには違いがあるものの、両者には概ねスケールリング量が多くなれば、SDI が低下するという相関関係が認められる。したがって、本実験の小片モルタルは、コンクリートに実際に発生すると考えられるスケールリング劣化を評価する供試体として妥当であり、検討する CT 画像に適する供試体であると言える。

図 5 には、各種凍結防止剤溶液中でコンクリート凍結融解作用を施した小片の CT 画像を示す。6 枚の画像の色の分布は物質の密度の分布を反映しており暗色になるほど密度が小さく、明色になるほど密度が大きいことを示している。黒は空隙部分で、全体を覆っている灰色の部分にセメント硬化体であり、内部の白みがかかった部分が細骨材を示している。小片は 1 辺が約 8 mm の立方体であり、これを溶液中で凍結融解させているため、これらの図の四方から劣化が進行する。概ね図 3 を代表する供試体であり、酢酸カリウムは、劣化が大きい。

図 1 で示した先行研究の知見から、塩化物系の凍結防止剤の場合には表面に沿ったひび割れが多く発生し、酢酸化合物系の凍結防止剤では内部へのひび割れの発生が多いことを予想したが、陰イオンでの内部あるいは周辺部へのひび割れ伝播の特徴は、本実験では確認できなかった。このように図 1 とは結果が乖離しているが、本実験の結果を基にして考察を加えることとした。

図 5 には、供試体の CT 画像を示す。形状と色の別に 4 つに大別でき、薄い灰色が図中の①に代表される骨材、丸い黒色が気泡、線状の黒が日ひび割れ、全体がセメントペーストである。図中の CT 画像の詳細を確認するとまず、カリウム塩の凍結防止剤でのみ、陰イオンの種類によらず内部へのひび割れが見られた (図中③) が、それ以外では内部ひび割れは確認できなかった。ナトリウ

ム塩では、図中の矢印に示すようないずれの陰イオンの場合にも外郭の表面に沿ったひび割れの発生が確認でき、劣化は薄層の剥離により生じていることが分かった。カルシウム塩も程度は小さく、ひび割れは全体には見られないものの、外郭の表面の隅角部が欠落しているところから判断すると、薄層の剥離が生じた後の状態を観察している可能性が高い。

以上の傾向は図1の過去の知見のみならず、事前に行った図2、3のスケーリング試験の結果とも整合していない。これはサンプリングの際、スケーリング劣化が進行していない部分を採取したことが原因と考えられ、スケーリング劣化の平均的な状態を反映できていないと考えられる。

ひび割れの伝播があった場合には、速やかな剥離があるものと考えられるが、いずれも表面剥離が認められなかった供試体であり、内部のひびわれも観察できないことから、個々の考察は割愛することとした。

今後の課題：

構造物の微視的組織の観察に基づくコンクリートの劣化原因の検討を行うため、スケーリング試験を実施して、X線CT測定による観察を行った。X線CT測定では、内部組織の弛緩の観察を試みたが、ナトリウム塩とカルシウム塩にはひび割れが確認されなかった。ただしこれまでの知見とは相違しており、供試体のサンプリングの方法に問題があったものと考えられる。

コンクリート構造物は均質な破壊を伴わず、表面剥離は均一ではなく、局所的な劣化となることが結果に影響を与えている可能性があり、微視構造での結果を明確にできるような実験系を考える必要があると考えられる。

参考文献：

- [1] 庄谷征美, 月永洋一, コンクリート工学, **42**(12), 3 (2004).
- [2] 東北地方整備局道路部 HP : http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/190329_shiryou.pdf