

塩分作用化にあるコンクリートの凍結融解時の内部における長さ変化

維持管理工学研究室 水原有貴

1. 研究背景と目的

コンクリートのスケーリング劣化は塩化物イオンの作用により促進されることが知られている。塩分作用下におけるスケーリング劣化メカニズムについては、種々の説が提唱されている¹⁻⁴⁾が、未だ説明されておらず、そのいくつかはコンクリート内部で長さ変化が生じることに関係している。

そこで本研究では、供試体の深さの異なる3カ所にひずみゲージと熱電対を埋設し、凍結融解繰り返し中のひずみと温度を取得することで、凍結融解に伴う内部の長さ変化を測定する方法を提案する。コンクリート内部の挙動がスケーリング劣化に与える影響を明らかにし、塩分作用下におけるコンクリートのスケーリング劣化メカニズムの解明に寄与することを目的とする。

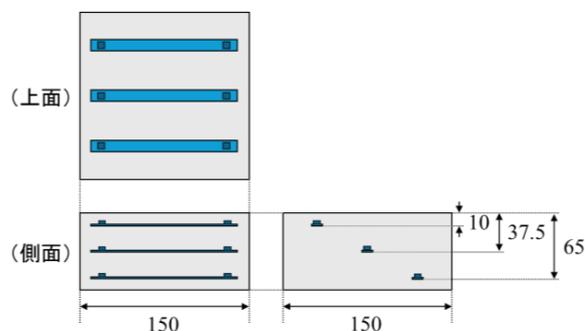


図-2.1 供試体概要 (mm)



写真-2.1 埋設ひずみゲージと熱電対

2. 実験概要

2.1 供試体概要

モルタル、コンクリートの W/C は、特記のない限り、すべて 0.6 である。供試体寸法は 150mm × 150mm × 75mm とし、RILEM CDF 法に従って、打設後 1 日で脱型、材齢 7 日まで 20°C で水中養生、材齢 28 日まで気中養生を行った。一部の供試体には図-2.1 に示すように型枠底面から 10mm, 37.5mm, 65mm に防水を施したひずみゲージ及び熱電対を埋設した。供試体内部にひずみゲージを定着させるため、写真-2.1 に示すようにひずみゲージ及び熱電対を、コンクリートの熱膨張係数に近い熱膨張係数を持つ薄型のステンレスリボンの両端にナットを溶接したものに貼り付けた。

2.2 凍結融解試験

RILEM CDF 法に準拠して凍結融解試験を行

った。材齢 28 日で打設時底面と仕上げ面以外の 4 面に対して防水処理を施した供試体が 5 ± 1mm 浸るように NaCl 3% 溶液を入れ、20°C の恒温室で 7 日間の事前浸漬を行った。その後、同様に溶液に浸漬した状態で凍結 4 時間、凍結保持 -20°C で 3 時間、融解 4 時間、融解保持 20°C で 1 時間を 1 サイクルとして、60 サイクルの凍結融解繰り返しを行った。その間、埋設したひずみゲージと熱電対から 5 分毎に数値を取得した。また、6 サイクル毎にスケーリング片をろ過により採取し、乾燥後スケーリング量を測定した。

2.3 実験シリーズ

(1) 塩水と淡水

同配合のモルタル供試体を 10 体作製した。事前浸漬時及び凍結融解試験時、5 体は 2.2 の通りに NaCl 3% 溶液に浸漬 (以下、塩水供試体) し、

5 体は水道水（以下，淡水供試体）に浸漬した。各 2 体は内部 3 か所にひずみゲージ及び熱電対を埋設した。

(2) 空気量

空気量を 2%（以下，Air2%供試体）及び 11%（以下，Air11%供試体）としたモルタル供試体を各 5 体作製した。各 3 体は内部 3 か所にひずみゲージ及び熱電対を埋設した。

(3) 水セメント比

水セメント比 0.4（以下，W/C=0.4 供試体）及び 0.5（以下，W/C=0.5 供試体）としたモルタル供試体を各 3 体，水セメント比 0.6 のモルタル供試体を 4 体（内 3 体は以下，W/C=0.6 供試体）作製した。W/C=0.4, 0.5, 0.6 供試体すべての内部 3 か所にひずみゲージ及び熱電対を埋設した。水セメント比 0.6 の供試体 1 体には内部 3 か所に遠藤らの研究⁵⁾で使用されたモールドひずみゲージを埋設した（以下，参考論文⁵⁾ゲージとする）。

(4) 粗骨材の有無

粗骨材ありのコンクリート供試体（以下，コンクリート供試体）を 3 体，粗骨材なしのモルタル供試体（以下，モルタル供試体）を 6 体作製した。全供試体の内部 3 か所にひずみゲージ及び熱電対を埋設した。

3. 結果と考察

3.1 スケーリング量

凍結融解 60 サイクルの累積スケーリング量を図-3.1 に示す。W/C=0.6 供試体は凍結融解 42 サイクル時点までの累積スケーリング量である。比較のため，W/C=0.4, 0.5 供試体，参考論文⁵⁾ゲージ供試体の累積スケーリング量 42 サイクル時点の位置に線を引いている。

実験シリーズ (1)

塩水供試体は，淡水供試体に比べてスケーリング量が著しく多くなった。試験溶液の塩分はスケーリング劣化に影響を与えることを確認した。

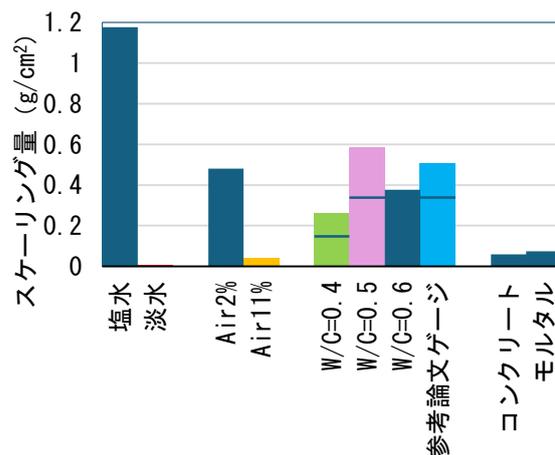


図-3.1 累積スケーリング量

実験シリーズ (2)

空気量が小さい方が，スケーリング量は著しく多くなった。モルタルの空気量の違いはスケーリング劣化に影響を与えることを確認した。

実験シリーズ (3)

W/C=0.4 供試体は W/C=0.5, 0.6 供試体に比べてスケーリング量は少なく，W/C=0.5 供試体と W/C=0.6 供試体は同程度スケーリングした。実験シリーズ (1), (2) と比較すると小さな差ではあるが，水セメント比の違いはスケーリング劣化に影響を与えることを確認した。

実験シリーズ (4)

コンクリート供試体とモルタル供試体は同程度スケーリングした。本研究においては，粗骨材の有無はスケーリング量に影響を与えなかった。

3.2 内部ひずみと温度の関係

5 分毎に取得した内部ひずみと温度の経時変化のデータの代表として，コンクリート供試体 1 の深さ 10mm における 6 サイクルまでの計測結果を図-3.2 に，内部ひずみと温度の関係の代表として，Air2%供試体 1 の結果を図-3.3 に示す。供試体内部は温度が増加すると膨張し，減少すると収縮した。また，凍結融解を繰り返すにつれ，膨張していく傾向にあった。これはすべての供試体の 3 か所すべての深さにおいて，凍結融解 60 サイクルまで同様の結果が得られた。水分の凍結の影響を受けて供試体が膨張していき，凍

結融解繰返しにより元の状態に戻らずに劣化していく様子を，本研究の計測方法により捉えることができたと考えられる。

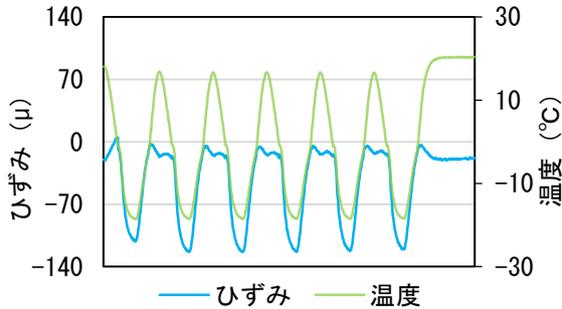


図-3.2 コンクリート1 供試体内の温度とひずみ (10mm)

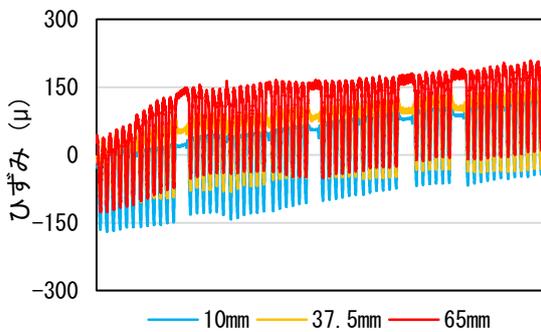


図-3.3 Air2%供試体1の内部ひずみと温度の関係

前述のひずみのデータは，熱膨張係数 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の物質において温度変化に対する膨張・収縮がおおよそ 0 となるように補正されている。これを考慮し，結果から算出した熱膨張係数の平均を実験シリーズごとに図-3.4，図-3.5，図-3.6，図-3.7 に示す。ここで示す値は代表として，凍結融解 1 サイクル目の凍結工程から 2 サイクル目の凍結工程までの数値から算出したものである。0°C 以上ではほとんどコンクリートの熱膨張係数と一致した。0°C 以下ではコンクリートの熱膨張係数の 2 倍程度の値を示した。これは水分の凍結の影響を受けたためと考えられる。実験シリーズ (3) では水セメント比が小さいほど 0°C 以下における熱膨張係数が小さい傾

向にあった。水セメント比が小さい供試体は緻密であるため，水分の移動が生じにくく，内部ひずみが発生しにくかったと考えられる。W/C=0.4 供試体は W/C=0.5, 0.6 供試体に比べ，スケールリング量が少ないことから，引張強度の影響もあると考えられるが，内部ひずみの発生とスケールリング劣化抵抗性には関係があることが確認された。また，NaCl3% 溶液に浸漬して凍結融解試験を実施したほとんどの供試体で，深さ 10mm におけるひずみは比較的収縮側に，深さ 65mm におけるひずみは比較的膨張側にあった。

3.3 スケールリング劣化メカニズムに関する考察

① 浸透圧説：塩分濃度が低い部分から凍結が進むことで生じた，空隙ごとの濃度差による水分の移動によりコンクリートを劣化させるという説。

本研究の結果から，温度が低下することにより凍結し，塩分濃度差が生じやすい深さ 10mm 位置が比較的収縮側にあったことから，説明が可能である。

② 氷層のクリープによる説：コンクリート内部で形成された氷層が，塩分の作用により大きく収縮するといった表層の挙動がコンクリートを劣化させるという説。

氷の熱膨張係数はコンクリートに比べて非常に大きく，本研究の結果から，深さ 10mm 位置では凍結工程において形成された浸漬溶液の氷層に追従して温度の低下と共に収縮したと考えることで説明が可能である。

③ Glue-Spall theory：溶液が凍結する際に塩分を排除しながら凍結することにより形成されるブラインポケットが，温度低下により破壊して発生した引張応力によりコンクリートを劣化させるという説。

塩分濃度が高いと考えられ，温度低下が伝わりやすい深さ 10mm 位置で，ブラインポケットの破壊による引張応力が生じやすいと考えることで，説明が可能である。

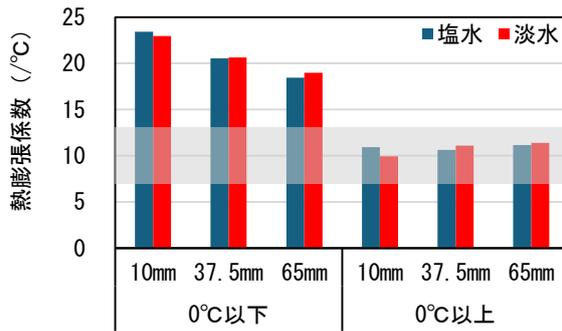


図-3.4 実験シリーズ (1) の平均熱膨張係数

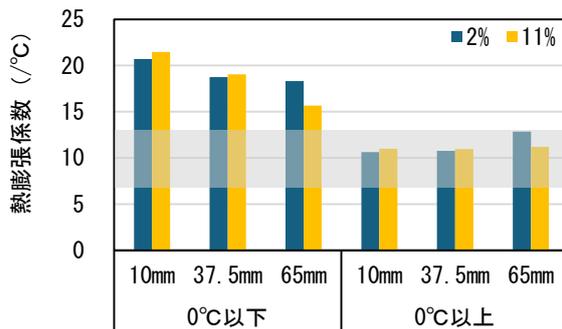


図-3.5 実験シリーズ (2) の平均熱膨張係数

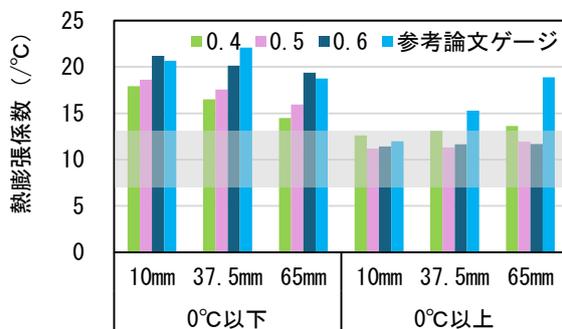


図-3.6 実験シリーズ (3) の平均熱膨張係数

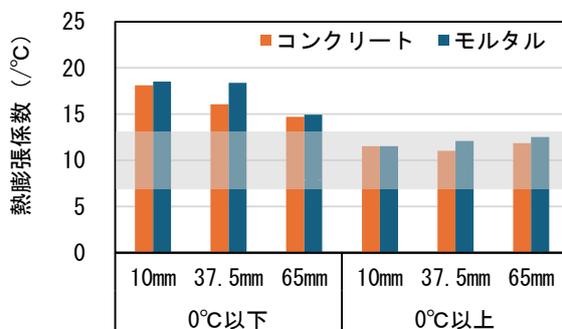


図-3.7 実験シリーズ (4) の平均熱膨張係数

4. まとめ

本研究では、塩分作用下にあるコンクリートの凍結融解時の内部における長さ変化の計測方法及び、スケーリング劣化メカニズムについて検討し、以下のような知見が得られた。

- (1) 本研究の測定方法により、凍結融解時に供試体が水分の影響を受けて膨張・収縮し、劣化していく様子を捉えることができる。
- (2) 本研究の測定方法では、複数の供試体を比較することにより、その共通点から凍結融解時のコンクリートやモルタル内部の挙動を大まかに捉えることは可能であると考えられる。
- (3) 水セメント比が小さいモルタルは緻密であり、水分の移動が生じにくいことから、内部ひずみが発生しにくく、スケーリング劣化しにくい傾向にあると考えられる。
- (4) 本研究の結果から、塩分作用下にあるコンクリートの劣化メカニズムは、浸透圧説、氷層のクリープによる説、Glue-Spall theoryの説明が可能である。

5. 参考文献

- 1) 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書 (案), pp.参 2-2 - 参 2-4, 平成 29 年 5 月
- 2) 遠藤裕丈：なぜ、塩化物水溶液はコンクリートの凍害劣化を促進させるのか？, 北海道開発土木研究所月報, No.582, 2001 年 11 月
- 3) 小山田哲也, 羽原俊祐：コンクリートのスケーリング抑制対策の実験的検討, コンクリート工学, Vol.56, No.5, 2018.5
- 4) 片平博, 古賀裕久：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, 2020
- 5) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018