凍害下における結氷条件と塩分浸透がモルタルの空隙構造に及ぼす影響

Influence of Ice Formation and Chloride Ion Penetration Environment on Pore Structure of Mortar under Freeze-Thaw

北海道大学工学部　○学生員　渋谷　啓太 (Keita Shibuya)
北海道大学大学院工学研究院　正員　橋本　勝文 (Katsufumi Hashimoto)
北海道大学大学院工学研究院　フェロー　横田　弘 (Hiroshi Yokota)

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地では，部材表面にスケーリングやポップアウトを生じる凍害がコンクリート構造物の劣化現象として問題となっている．また，冬季の路面管理の一環で散布する塩化ナトリウムや塩化カルシウムなどの凍結防止剤には，一般的に塩化物イオンが含まれている．これにより凍結防止剤由来の塩化物イオンがコンクリート中に浸透し，塩害を引き起こす．このように積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は凍害と塩害の複合的な劣化作用を受けるが，このような状況下での塩分浸透メカニズムは解明されておらず，知見が少ないのが現状である．

また，実環境下ではコンクリート中への塩化物イオン浸透は一次元的とは限らず，橋台座面のように塩化物イオンが二次元的に浸透することが多い．このとき，構造物の上面には塩化物イオンを含む融雪水が滞留し結氷を伴うことで，凍害と塩害の進行に影響を与える．しかし，このような二次元の塩化物イオン浸透およびコンクリート表面の結氷を考慮した凍害と塩害の複合劣化に関する論文はきわめて少ない．凍害によるコンクリートの劣化が塩化物イオンの拡散係数に影響を与えることも知られており，積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の適切な維持管理のためには，これらの影響を踏まえた精度の高い予測が必要である．

本研究では，凍結融解作用を受けるモルタルへの塩化物イオンの二次元的な浸透性状を把握するために，塩分供給を受ける供試体の細孔構造に及ぼす凍害の影響について検討した．特に，作用水中の塩化物イオン濃度と，二つの浸透面における塩化物イオンの供給条件の影響を考察した．塩化物イオンは主にセメントペーストに浸透するため，その濃度分布は測定範囲における骨材の割合に影響される [1)]．そのため，本研究では塩化物イオンの浸透をより詳しく把握するため，モルタルの供試体を使用した．塩化物イオンが供給される二つの作用面は，NaCl 水溶液との接触を伴う供試体上面と，NaCl 水溶液への浸漬試験によって塩化物イオンの供給のみを受ける供試体側面とした．これにより，実際の構造物において生じる凍結融解作用および塩化物イオンの浸透を模擬した．細孔構造の評価については，水銀ポロシメーターを用いて水銀充填にあたる加圧過程，水銀排出にあたる減圧過程のデータにより細孔径の大きさおよび分布を得た．

2. 試験概要

作製したモルタルの配合は W/C を 0.5，S/C を 2.7 とし，セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は最大粒径 2.5mm の川砂を使用した．100mm×100mm×400mm の角柱モルタルを作製し，水中養生 21 日，気中養生 7 日の後に 1 辺が 100mm の立方体を切り出した．図-1 に，供試体の概要を示す．立方体供試体の 6 面のうち，2 面を隣り合うように残し，他の 4 面にシリコン樹脂を塗布した．供試体上部となる面には NaCl 水溶液を滞留させるため，発泡ポリエチレン材で高さ 10mm の土手を設置した．凍結融解試験の温度変化は-30～30℃であり，1 サイクルあたりの時間は 12 時間である．12 サイクルごとに凍結融解試験室から供試体を取り出し，室温で NaCl 溶液に 24 時間浸漬させた．その後，供試体を凍結融解試験室内に戻し，上記の凍結融解サイクルを施した．これを繰り返し，凍結融解サイクル数が 100 サイクルとなるまで試験を行った．凍結融解試験中は供試体上部の土手に質量濃度 1%，3%，5%の NaCl 水溶液を滞留させ，コンクリート表面での結氷を再現するなど，実構造物に近い状態を模擬した．凍結融解試験を終えた供試体は二つの浸透面を残すように縦 50mm×横 50mm×厚さ 10mm に切り出した．切り出した供試体の側面と上面にあたる部分から 1 辺が 10mm の立方体を切り出し，24 時間の真空乾燥により絶乾状態の供試体を得た．

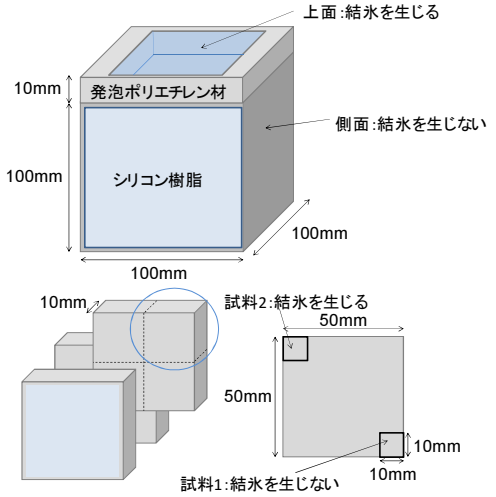

図-1 供試体概要

3. 実験試験結果

供試体の細孔構造について，水銀ポロシメーターを用いて得られた細孔径と累積細孔容積および細孔容積それぞれの関係を図-2（図中の数字は試料名を表す）に示す．

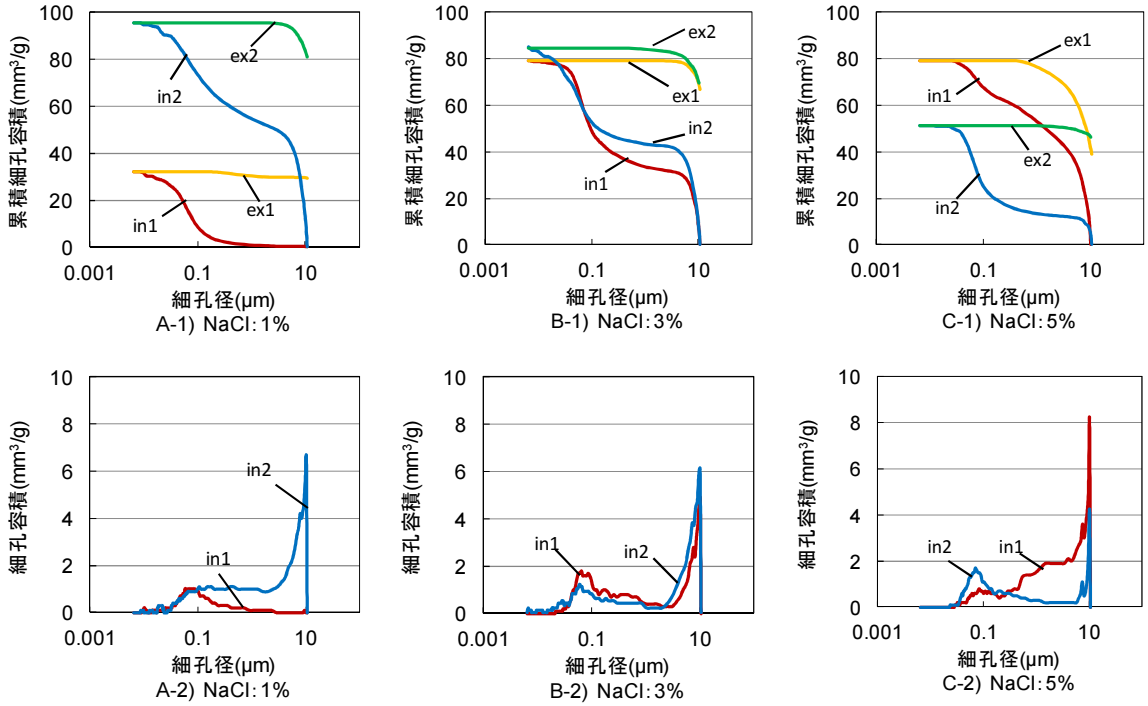

図-2 細孔径と累積細孔容積，細孔容積の関係（in：加圧過程，ex：減圧過程）

また，細孔容積の図は加圧過程のみを示している．

3.1　作用水中の塩分濃度の影響

塩分濃度 1%の場合には，側面（試料 1，結氷なし）より上面（試料 2，結氷あり）の細孔量が多く，0.1μm より大きな細孔が多いことが分かる．これは，結氷による組織の脆弱化の影響が大きいためと考えられる．

塩分濃度 3%の場合には，側面と上面ともに同様の細孔容積分布を示し，どちらも他の塩分濃度と比較して細孔量が多い．既往の研究 [2] によると，塩分濃度が 2～4%のときに凍害による劣化が著しく促進されることが分かっている．そのため，この供試体においても，塩化物イオンの浸透と凍結融解作用が同時に組織の脆弱化を引き起こしたことが推察される．

塩分濃度 5%の場合には，他の場合と異なり上面の細孔量や 0.1μm 以上の細孔が少ないことが分かる．これは，塩分濃度が高いために供試体上面において結氷せず，スケーリングなどの凍害による組織の脆弱化を抑制したことによるものだと考えられる．これに対して，側面においては 0.1μm 以上の細孔量が著しく増えていることがわかる．これは，凍害促進の要因として，作用水の塩分濃度が高いほど，細孔溶液中の濃度差が原因で生じる浸透圧の影響が大きくなることを示している．

3.2　結氷条件の影響

結氷を生じる上面のみの結果に着目すると，塩分濃度が低い場合には細孔量が多く，大きな細孔径が占める割合も大きいが，濃度が高くなるにつれて細孔量は少なくなり，小さい細孔の占める割合が大きくなる．これより，結氷を生じる塩分浸透面において，細孔構造の変化に大きく影響するのはコンクリート表面の結氷による力学的作用であると考えられる．一方で側面については，塩分濃度が低い場合には細孔量が少なく細孔径の小さなものが多いが，濃度が上昇するにつれて細孔量が増加し，大きな細孔が増える傾向にある．これより，結氷を生じない浸透面において細孔構造に大きく影響を与えるのは細孔溶液中の塩分濃度差による浸透圧であると考えられる．

本研究において，塩分濃度が 3%では，上面と側面は概ね同じ細孔構造の変化をしていることから，上記の力学的作用と浸透圧の影響がともに大きかったものと推察される．

4. まとめ

本論文における主要な結論は以下のとおりである．

1. 結氷を生じる塩分浸透面では，塩分濃度が低いほど，水分の凍結による力学的作用が細孔構造に大きな影響を与える．
2. 結氷を生じない塩分浸透面では，塩分濃度が高いほど，細孔溶液中の濃度差が引き起こす浸透圧が細孔構造に大きな影響を与える．
3. 本研究の範囲内では，塩分濃度 3%の場合に力学的作用と浸透圧の両者の影響が大きくなる．

本研究は JSPS 科研費（24760345）の助成を受けたものである．

参考文献

1) 水田真紀，岡本享久，小川彰一，森寛晃：塩化物イオン濃度プロファイル測定への小径コア試験と EPMA 法の適用について，コンクリート工学年次論文集，Vol30，No.1，2008
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.582，2011