

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：31103

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760410

研究課題名（和文） 水分移動及び表層劣化の影響を考慮した凍結融解環境における
塩化物イオン浸透予測

研究課題名（英文） Chloride Penetration into Concrete under Freezing- Thawing
Environment Consider of Water Movement and Deterioration of
Surface Layer

研究代表者

迫井 裕樹（SAKOI YUKI）

八戸工業大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：30453294

研究成果の概要（和文）：本研究では，積雪寒冷地域におけるコンクリートの複合劣化を検討することとし，特に，凍結融解作用及び凍害に伴う表層劣化が硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透性に及ぼす影響について検討を行った。本研究の範囲内において，凍害による表層劣化の程度の違いが塩化物イオン浸透性に及ぼす影響は少ないと判断されるものの，凍結融解作用を受けることにより，通常の温度条件下よりも塩化物イオン浸透性が促進されることが把握された。

研究成果の概要（英文）：This study is to examine the combined deterioration of concrete in cold region. Especially, this study is to examine the influence of freezing- thawing action and deterioration of surface layer of concrete due to freezing- thawing action on the chloride penetration into concrete. From the results of this study, it was found that the chloride penetration into concrete under freezing- thawing environment became higher compare with that under constant temperature condition, however, it was judged that the influence of scaling of concrete on chloride penetration was low.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート，耐久性，複合劣化，塩化物イオン浸透性，凍結融解作用

1. 研究開始当初の背景

寒冷地域におけるコンクリート構造物はその環境の特徴から凍結融解作用による凍害劣化および塩化物イオン浸透による鉄筋腐食を受けやすい環境にある。特に，凍結防止剤などの塩化物が存在する環境下では，凍結融解との複合作用により劣化が促進され，表層コンクリートの劣化（スケール）が顕在化してきている。さらに劣化が進行した段階では，外部劣化因子からの保護層として

のかぶり（表層部）コンクリートの機能が完全に低下し，内部鉄筋の腐食による複合劣化が多数報告されている。

凍結融解作用による凍害と塩化物イオン浸透性およびそれに伴う鉄筋腐食に関する検討はこれまでも多く行われているが，それらの多くは，塩化物イオンが存在する環境下での凍結融解抵抗性に主眼を置いたものであり，凍結融解環境がコンクリートへの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響を検討した

ものは少ないのが現状である。

さらに、凍結融解に伴う表層劣化及び塩化物イオン浸透性は、コンクリートの表層品質に大きく影響を受ける。コンクリートの表層品質は、その養生条件(養生方法,養生期間)や表面含浸材・断面修復材等の使用により異なる。寒冷地域のコンクリート構造物の塩化物イオン浸透性予測において、水分移動、表層劣化の程度が及ぼす影響とともに、劣化前後の表層品質を併せて検討することが非常に重要となる。これらによって、寒冷地域におけるコンクリートの適切な劣化予測が可能となり、将来の合理的な維持管理(計画)につながるものと考えられる。

今後、寒冷地域におけるコンクリートの合理的な維持管理を行うためには、凍害・塩害による複合劣化のメカニズム解明および定量的評価が必要であると考えられる。特に実環境においては、凍結温度(最低温度)や凍結持続時間などが地域によって異なることから、それらをパラメータとしたコンクリートの塩化物イオン浸透性について検討を行い、更なる知見を蓄積することが必要であると考えられる。

2. 研究の目的

上述の背景より、本研究では、寒冷地域のコンクリート材料を対象として、凍結融解温度条件およびそれに伴う表層コンクリートの劣化程度が硬化コンクリートへの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響を検討することを目的とし、以下の点について検討を行った。

(1) 凍結融解条件がコンクリート中への塩化物イオン浸透性に及ぼす影響：表層劣化が生じる以前のコンクリートにおいて、種々の凍結融解条件(凍結速度,凍結温度(最低温度)など)と作用する溶液濃度の違いが塩化物イオン浸透性に及ぼす影響について、実験的に検討を行った。

表 - 1 凍結融解温度条件

条件No.	凍結温度 []	温度勾配 (降下時) [/h]	最低温度 到達時間 [h]
条件	-10	-10	3
条件		-20	2
条件	-20	-10	4
条件		-6.67	6
最高温度: 20 最低温度保持時間: 3時間 昇温時温度勾配: 10 /h 最高温度保持時間: 1時間			

(2) 凍結融解環境下におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす表層品質の影響：養生条件(養生期間)の違い及びケイ酸塩系表面含浸材を用いることによるコンクリート表面の品質の程度が、凍結融解環境におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響について検討を行った。

(3) 凍結融解作用に伴う表層劣化がコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響：凍結融解作用により生じた表層劣化(スケール)の程度が塩化物イオン浸透性に及ぼす影響について、電気泳動法(定常状態)を用いて検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 凍結融解条件がコンクリート中への塩化物イオン浸透性に及ぼす影響：

本実験では、セメント、細骨材、粗骨材、混和剤としてそれぞれ、普通ポルトランドセ目と、石灰岩砕砂、石灰岩砕石および AE 剤を用いた。配合は、水セメント比(W/C)を55%一定とし、目標スランプおよび目標空気量をそれぞれ、 $8.0 \pm 1.0\text{cm}$ 、 $5.0 \pm 1.0\%$ とした。

上記配合によりコンクリートを作製し、打設後 24 時間で脱型、材齢 28 日まで水中養生を行った。供試体寸法は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体から湿式コンクリートカッターを用いて、 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ に整形し、これを試験用供試体として用いた。 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ に整形した供試体の打設底面を試験面とし、試験溶液を溜めるための堤を防水アルミテープを用いて作製した。また試験面以外の面は、試験期間中の乾燥の影響を防ぐことを目的とし、シリコン系接着剤によりシールした。その後、表 - 1 に示す各温度条件下において暴露を行い、所定の期間(凍結融解サイクル: 60 サイクル)暴露後、コンクリ

表 - 2 実験条件

水セメント比 [%]	45, 55, 65
暴露開始材齢 [日]	7 ¹ , 14 ¹ , 28
暴露期間 [日]	14 ² , 28, 56
温度条件	・温度一定(20) ・凍結融解(+20 ~ -20) (1サイクル/日)
表面含浸材	ケイ酸塩系表面含浸材 塗布 / 無塗布

1: W/C = 55%のみ

2: 材齢 7, 14日のみ

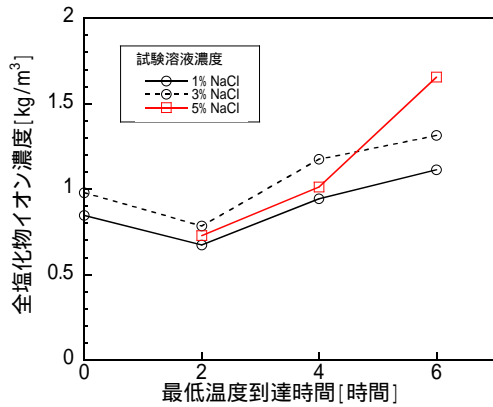


図 - 1 全塩化物イオン濃度に及ぼす最低温度到達時間の影響

ート中の全塩化物イオン濃度分布の測定を行った。なお、暴露期間中の試験溶液は、NaCl 溶液とし、その濃度は 1、3 および 5% とした。全塩化物イオン濃度の測定は、所定の暴露期間終了後の供試体の試験表面から、乾式コンクリートカッターを用いて、10mm 間隔でサンプルを採取し、JCI SC-5 に準じて、電位差滴定法により測定を行った。

また各温度条件において、凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング片を採取し、スケーリング量の測定を行った。

(2) 表面含浸材を用いたコンクリートの凍結融解環境における塩化物イオン浸透性：

本実験の実験条件を表 - 2 に示す。

本実験で用いた材料および供試体寸法は、前述の(1)と同一のものを用いた。配合は、単位水量を一定とし、水セメント比(W/C)を 45、55 および 65% の 3 水準とした。いずれの W/C においても、ケイ酸系表面含浸材を塗布したものおよび無塗布のものを作製した。試験開始材齢は、28 日を標準とし、W/C = 55% についてのみ、材齢 7 および 14 日の検討を行った。また、温度条件は、温度一定(20℃)環境および凍結融解環境(+20℃ ~ -20℃, 1 サイクル/日)の 2 条件を設定した。暴露期間は、いずれの W/C に対しても、28 および 56 日とし、W/C = 55% に対してのみ、暴露 14 日の検討も行った。なお、試験溶液は、いずれの条件においても、3% NaCl 溶液とした。

所定の期間終了後の供試体中の全塩化物イオン濃度分布および凍結融解環境への暴露期間中のスケーリング量の測定については、前述の(1)と同様とした。

(3) 凍結融解作用によりスケーリングが生じたコンクリートの塩化物イオン浸透性：

本実験で用いた使用材料は前述(1)と同一である。コンクリートの配合は、単位水量

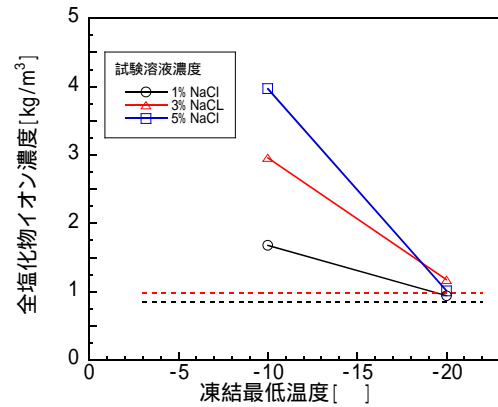


図 - 2 全塩化物イオン濃度に及ぼす最低温度の影響

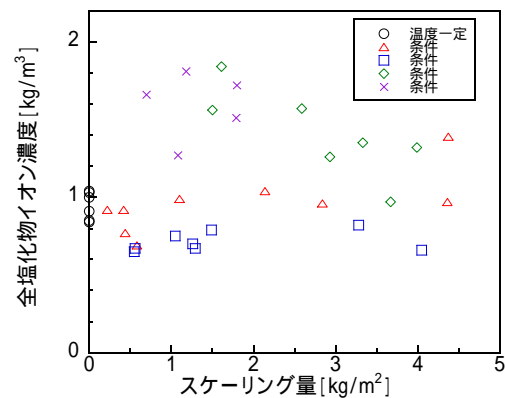


図 - 3 凍結融解 60 サイクル終了時における全塩化物イオン濃度とスケーリング量の関係

を一定とし、WC = 45、55 および 65% の 3 水準とした。供試体は、100×200 mm の円柱供試体とし、打設後 28 日間の水中養生を行った。所定の養生期間終了後、供試体中央 100mm から厚さ約 50mm の円盤を切り出し、試験体とした。

100×50 mm の供試体上面周辺に防水アルミテープを用いて試験溶液(3%NaCl 溶液)を溜めるための堤を作成し、+20℃ ~ -20℃, 1 サイクル/日の凍結融解環境において目標スケーリング量に達するまでスケーリングを生じさせた。なお目標スケーリング量は、0 (スケーリング無し)、0.5、1.0、1.5 および 2.0kg/m² とした。凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング量の測定を行い、目標スケーリング量に達した後、JSCE - G 571 電気泳動法(定常状態)により塩化物イオン浸透抵抗性の測定を行った。

4. 研究成果

(1) 凍結融解条件がコンクリート中への塩

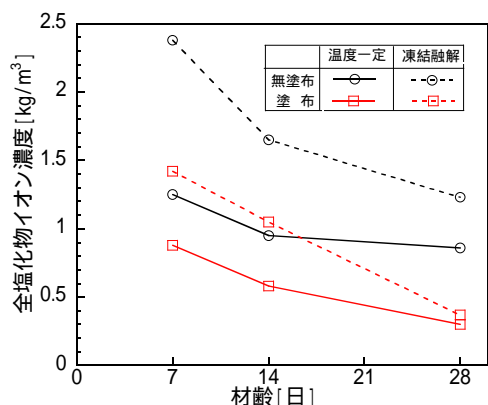


図 - 4 全塩化物イオン濃度に及ぼす材齢の影響（暴露期間：56日）

化物イオン浸透性に及ぼす影響：

図 - 1 に、試験表面から 11~20mm 位置における全塩化物イオン濃度と最低温度到達時間の関係を示す。なお、図中の最低温度到達時間 0 時間は、温度一定環境における全塩化物イオン濃度を示している。図 - 1 より、最低温度到達時間が 2 時間するとき、いずれの試験溶液濃度においても、温度一定環境の場合よりも低い値を示すものの、最低温度到達時間の増加に伴い、全塩化物イオン濃度が増加する傾向を示すことが明らかとなった。これは、凍結速度違いにより、コンクリート中の未凍結水量が異なることに起因するためと考えられる。

図 - 2 には、試験表面から 11~20mm 位置における全塩化物イオン濃度と凍結時の最低温度の関係を示す。図中の波線は、温度一定環境における全塩化物イオン濃度を示している。これより、本研究の範囲内では、最低温度が高いものほど、全塩化物イオン濃度が高い値を示すことが明らかとなった。これは前述と同様にコンクリート中の未凍結水量の違いに起因するものと考えられる。温度勾配が一定であるとき、最低温度が高いものほど、未凍結水量が多くなり、全塩化物イオン濃度も高い値を示すものと考えられる。

図 - 3 には、凍結融解 60 サイクル終了時におけるコンクリートの試験面から 11~20mm 位置での全塩化物イオン濃度とスケール量の関係を示す。これより、いずれの温度条件においてもスケール量の増加に伴う顕著な全塩化物イオン濃度の変化は認められないことが把握された。これより、凍結融解環境におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性は、凍結融解作用に伴うスケール量の影響よりも、凍結融解条件による影響が大きいことを示唆するものと考えられる。

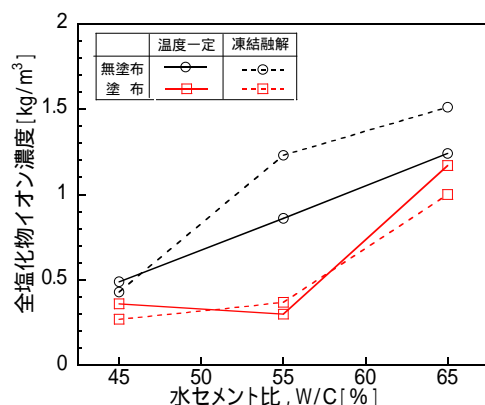


図 - 5 全塩化物イオン濃度に及ぼす水セメント比の影響
(材齢：28日，暴露：56日)

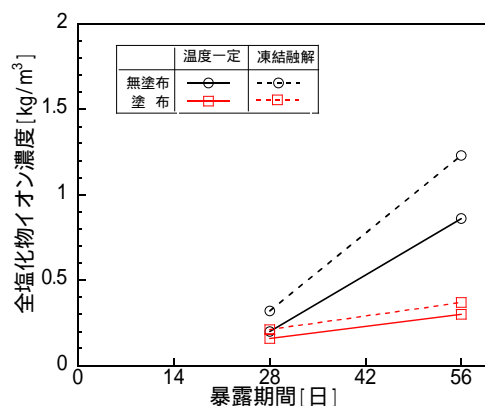


図 - 6 全塩化物イオン濃度と暴露期間の関係（材齢：28日）

(2) 表面含浸材を用いたコンクリートの凍結融解環境における塩化物イオン浸透性：

図 - 4 に全塩化物イオン濃度と材齢の関係の一例を示す。図は、W/C=55%，暴露期間 56 日におけるコンクリートの試験面から 11~20mm の結果である。これより、含浸材の塗布の有無によらずいずれも、材齢の増加に伴い、全塩化物イオン濃度が減少することが確認された。また含浸材の塗布の有無によらず、いずれの材齢においても、温度一定環境における全塩化物イオン濃度よりも、凍結融解環境におけるそれが高い値を示すことが明らかとなった。つまり、凍結融解作用を受けることにより、温度一定環境と比較して、塩化物イオンがより内部まで浸透することが明らかとなった。ただし、暴露環境の違いによる全塩化物イオン濃度の差は、材齢の増加に伴い、小さくなることが明らかとなった。

図 - 5 には、試験面から 11~20mm 位置における全塩化物イオン濃度と水セメント比

の関係を示している。これより、両者の間には、温度条件、含浸材の塗布の有無によらず、一般的に知られる傾向を示すことが確認された。つまり、水セメント比の増加に伴い、全塩化物イオン濃度が増加する傾向を示すことが確認された。また、温度条件の違いに着目すると、一部低い値が確認されるものの、温度条件の違いによる全塩化物イオン濃度の差は、概ね一定であることが把握された。

暴露期間の増加に伴う全塩化物イオン濃度の経時変化を図-6に示す。これより、含浸材の有無、温度条件の違いによらず、暴露期間の増加に伴い、全塩化物イオン濃度が増加することが確認されるとともに、含浸材の有無によらず、凍結融解環境における全塩化物イオン濃度は、温度一定環境におけるそれよりも高い値を示すことが把握された。さらに、暴露期間の増加に伴う全塩化物イオンの増加割合は、含浸材を用いないコンクリートの凍結融解環境下へ暴露した際に最も高くなる傾向を示すことが明らかとなった。

(3) 凍結融解作用によりスケーリングが生じたコンクリートの塩化物イオン浸透性：

図-7に、電気泳動法から得られた実効拡散係数とスケーリング量の関係を示す。検討開始以前、スケーリング量の増加に伴い実効拡散係数は増加し、また、スケーリング量が一定の値以上になった際に拡散係数の急激な増加が示されると予想していたが、これに反して、いずれのコンクリートにおいても、スケーリング量の増加に伴う実効拡散係数の顕著な変化は認められないことが明らかとなった。つまり、凍結融解環境下においてコンクリート中への塩化物イオンの浸透が促進される原因として、凍結融解作用に伴う表層劣化の程度が及ぼす影響は少ないものと判断される。

以上の(1)～(3)の結果より、凍結融解環境下におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性は、主として、凍結融解に伴う外部からの水分の移動および、コンクリート内部での未凍結水の移動とそれに伴う塩化物イオンの濃縮現象に起因するものと推察される。

また表面含浸材を用いた場合、無塗布のものと比較して塩化物イオン浸透性は抑制されるものの、凍結融解環境においては、普通コンクリート同様に、温度一定環境における

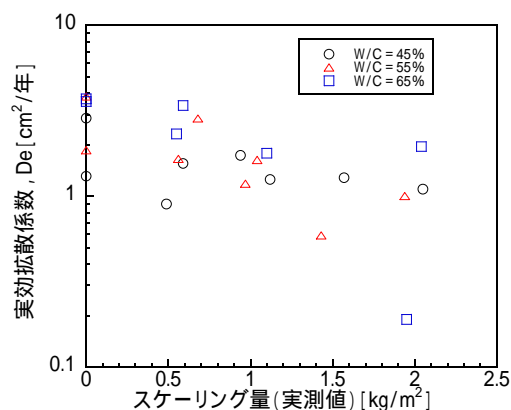


図-7 実効拡散係数に及ぼすスケーリング量の影響

それよりも高い値を示すことが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計4件)

太田晃博, 佐藤宇泰, 渡邊浩平, 迫井裕樹, 阿波稔: コンクリートの塩化物イオン移動性に及ぼす凍結融解作用の影響, 土木学会第66回年次学術講演会, pp.511-512, 2011.9.7-9, 愛媛大学

迫井裕樹, 阿波稔, 月永洋一, 菅原隆: 凍結融解環境下におけるコンクリートの塩化物イオン浸透性, 第38回セメント・コンクリート研究討論会, pp.99-102, 2011.11.18, 松山市立子規記念博物館

迫井裕樹, 阿波稔, 太田晃博, 渡邊浩平: スケーリングを生じたコンクリートの塩化物イオン浸透性, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2012.3.3, 秋田大学

永坂未来, 市川達朗, 渡邊浩平, 迫井裕樹, 阿波稔: 凍結融解作用を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透性, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013.3.9, 東北大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

迫井 裕樹 (SAKOI YUKI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 30453294