

令和元年6月24日現在

機関番号：31103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18131

研究課題名(和文)実環境を想定した寒冷地コンクリートの塩化物イオン浸透メカニズム

研究課題名(英文)The mechanism of chloride ion penetration of concrete in cold region assuming actual environment

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・准教授

研究者番号：30453294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、実環境を想定したコンクリート中への塩化物イオン浸透性について検討を行ったものである。凍結融解作用や乾湿繰返し、あるいは、事前に塩化物イオンが浸透したコンクリートを対象として、種々の環境作用が複合的に作用した際のコンクリート中への塩化物イオン浸透性について検討を行った。

種々の環境作用を複合的に作用することにより、コンクリート表層に劣化(損傷)が顕在化していなくても、硬化体内部への塩化物イオン浸透性が促進される結果が得られ、これは硬化体内部での水(未凍結水)の移動に伴う移流の影響が大きいことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、コンクリート構造物の耐久性向上および維持管理の重要性が高まっている。一方で、寒冷地域におけるコンクリート構造物は、凍結融解作用や乾湿繰返し、融雪剤の散布に起因する塩化物イオンの浸透とそれに伴う鉄筋の腐食など、種々の環境作用が複合的に作用することによって、早期劣化が生じている。これらの維持管理において、環境作用を考慮した劣化予測が必要不可欠となる。本研究課題の成果は、環境作用を考慮したコンクリート中への塩化物イオン浸透性を検討したものであり、既存構造物の耐久性予測・維持管理計画の立案において基礎的資料となり得るものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, the chloride ion penetration into concrete that assumed the actual environment was examined. For the concrete received various environmental action, like a freezing- thawing, drying- wetting or pre-penetration of a chloride ion into concrete, the chloride ion penetration into concrete that received several environmental action and its mechanism were examined in this study.

From the result of this study, it was found that the chloride ion penetration into concrete that was subjected to environmental action was accelerated compare with that of normal condition, even though the surface deterioration did not occurred. It is considered that this phenomenon is due to move the water in hardened concrete. This result means that the influence of the water movement in hardened concrete according to environmental action does not ignore for the deterioration prediction of concrete in cold region.

研究分野：コンクリート材料

キーワード：コンクリート 複合劣化 耐久性 凍結融解 塩化物イオン浸透性

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地域におけるコンクリート構造物は、その気象的特徴から冬季においては凍結融解作用に伴う表層劣化あるいは硬化体のゆるみ（ひび割れ）など凍害を生じやすい環境にある。さらに近年では、飛来塩分や凍結防止剤に起因する塩化物イオンの影響を受け、凍害と塩害の複合劣化が顕在化し大きな問題となっている。凍害と塩害の複合劣化に関する検討は既往研究において多く行われているが、凍結融解作用そのもの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について検討したものは少ないのが現状である。近年、凍結融解作用がコンクリート中への塩化物イオン浸透に及ぼす影響について種々検討が行われているが、いまだ不明な点が多いのが現状である。

研究代表者らの既往研究において、凍結融解環境下での塩化物イオン浸透性は、一般的な試験条件化におけるそれと比較して促進されることを示しているが、その詳細なメカニズム解明には至っていないのが現状である。さらに、実環境を想定した場合、凍結融解が作用する以前の乾湿作用あるいは、硬化体内部における塩化物イオン濃度勾配なども影響するものと想定されるが、それらに関する検討は少ないのが現状である。

積雪寒冷地域におけるコンクリートの維持管理・劣化予測において、現状の拡散方程式に基づく塩化物イオン浸透予測では十分でなく、種々の環境作用に起因する硬化体内部での水分の移動を含めた劣化予測手法の確立が望まれる。前述の影響を検討することにより、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、将来の維持管理（計画）につながるものと考えられる。

2. 研究の目的

上述の背景より、本研究では、寒冷地域におけるコンクリート材料を対象として、実環境を想定した種々の環境作用を受けるコンクリート中への塩化物イオン浸透性を明らかにすることを目的として、以下の点について検討を行った。

(1) 硬化体内部に生じた塩化物イオン濃度勾配が凍結融解環境における塩化物イオン浸透性に及ぼす影響：

実構造物を想定したとき、建設後供用期間中の凍結防止剤の散布あるいは飛来塩分等により、凍結融解作用を受ける前に硬化体中に塩分浸透が生じていることが想定される。事前に塩分浸透を生じることにより、凍結融解作用時の凍結水量やスケール劣化の程度が変化することが想定され、凍結融解環境下での塩分浸透性も変化することが考えられる。

そこで、凍結融解作用を受ける以前の塩分浸透の有無が凍結融解環境下におけるコンクリート中への塩分浸透性に及ぼす影響を把握することを目的として、実験的検討を行った。

(2) 凍結融解作用と乾湿繰返し作用がコンクリート中への塩化物イオン浸透に及ぼす影響：

凍結融解作用が受けることにより、コンクリート中への塩化物イオン浸透が促進されることが研究代表者の既往研究により示されている。一方で、乾湿繰返しに伴う水分移動によって、塩化物イオンがより浸透することなどが既往研究において報告されている。これら凍結融解作用と乾湿繰返し作用が複合的に作用することにより、コンクリート中への塩化物イオン浸透がより促進されることが懸念される。

そこで、凍結融解作用と乾湿繰返し作用の複合作用がコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響を明らかとすることを目的として、実験的検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 硬化体内部に生じた塩化物イオン濃度勾配が凍結融解環境における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、混和材としてそれぞれ、普通ポルトランドセメント、石灰岩砕砂と天然砂の混合砂、石灰岩砕石、AE 剤、減水剤を用いた。コンクリートの配合は、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。

供試体は、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体とし、打設 24 時間後に脱型を行った。脱型後、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ に切断・整形したものを試験体として用いた。切断・整形した試験体は、試験面を除く 5 面をシリコンでシールした後、材齢 7 日まで水中養生を行った。

ここで、実験条件（暴露条件）を表-1 に示す。塩化物イオン濃度勾配を生じさせる試験体

表-1 試験条件

事前浸透の有無	暴露環境	暴露期間
事前浸透 有	凍結融解 (+20°C~-20°C)	1ヶ月
	20°C一定	3ヶ月
事前浸透 無	凍結融解 (+20°C~-20°C)	5ヶ月

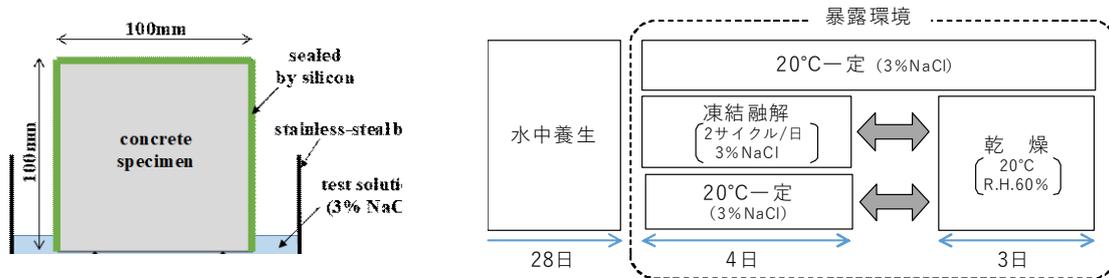


図-1 供試体設置状況

図-2 試験条件

については、3%NaClを試験溶液として材齢91日まで事前浸透を行った。また、その他の試験体は、同一材齢まで一般水道水による養生を継続した。材齢91日経過後、各試験体を凍結融解環境(+20°C~-20°C, 2サイクル/日)あるいは温度一定環境(20°C一定)において、図-1に示す方法により、塩分浸透試験を実施した。なお、凍結融解環境に暴露する試験体については、スケーリング量の測定も行った。

所定の期間、各環境下に暴露した後、試験面から10mm間隔で50mm位置まで切断し、硝酸銀滴定法により、各深さ位置における全塩化物イオン濃度の測定を行った。得られた全塩化物イオン濃度分布より、見掛けの拡散係数及び表面塩化物イオン濃度を算出した。

(2) 凍結融解作用と乾湿繰返し作用がコンクリート中への塩化物イオン浸透に及ぼす影響

本実験で用いた材料、配合は(1)と同一である。供試体は100mm×100mm×400mmの角柱供試体として、打設24時間後に脱型を行い、100mm×100mm×100mmに切断・整形をした後、材齢28日まで水中養生を行った。養生期間中に試験面(打設底面)を除く5面をシリコンによりシールした後、試験に供した。

図-2に本実験の暴露条件を示す。本実験における環境条件は、①+20°C~-20°Cの温度範囲で12時間1サイクルとする凍結融解を4日間(8サイクル)行った後、3日間乾燥させる条件、②20°C一定の環境下で4日間塩分浸透を行った後、3日間乾燥させる条件、さらに比較のため、③20°C一定環境下で塩分浸透を行う条件の3条件を設定した。なお、凍結融解および塩分浸透を実施する際の試験体の設置状況は、図-1と同一である。

前述の条件において6ヶ月間暴露を行い、1ヶ月ごとに全塩化物イオン濃度の測定を行った。全塩化物イオン濃度の測定箇所および測定方法は、前述の(1)と同様である。また、凍結融解環境に暴露する試験体については、スケーリング量の測定も行った。

4. 研究成果

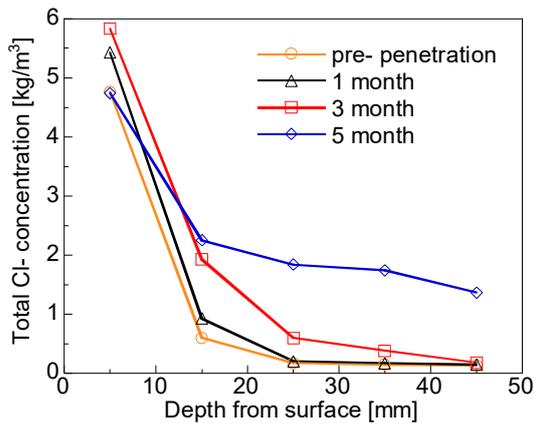
(1) 硬化体内部に生じた塩化物イオン濃度勾配が凍結融解環境における塩化物イオン浸透性に及ぼす影響

図-3(a)~(d)に各暴露環境における全塩化物イオン濃度分布を示す。事前浸透の無い条件(c)および(d)において、凍結融解作用を受ける場合の全塩化物イオン濃度分布は、温度一定環境におけるそれと比較して、高い濃度を示すことが明らかとなった。特に、試験面から10mm以内の位置において、暴露開始初期の濃度増加が著しいことが確認された。暴露期間の延長に伴う全塩化物イオン濃度の変化に着目すると、表面10mm以内の濃度は大きく変化しないのに対して、10mm以深の全塩化物イオン濃度の増加が確認され、凍結融解作用を受けることにより、より内部まで塩化物イオンが浸透していることが確認された。

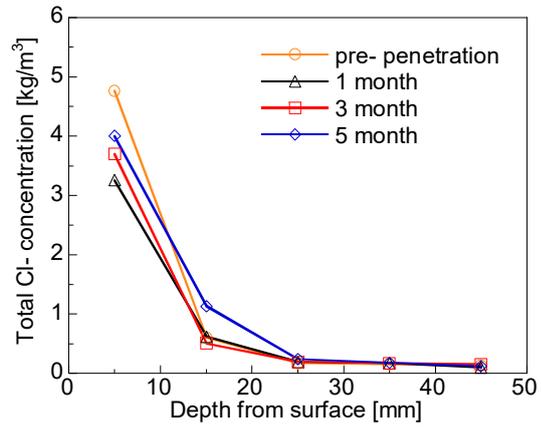
事前浸透により硬化体内部に塩化物イオン濃度勾配が生じているコンクリート((a)および(b))に着目すると、事前浸透後に20°C一定環境で塩分浸透試験を実施した場合は、明確な塩化物イオン濃度の増加は認められないものの、事前浸透後に凍結融解作用を受けた試験体では、高い濃度を示すことが確認された。つまり、事前浸透を行っていない試験体と同様の傾向を示すことが確認された。ただし、事前浸透後に凍結融解作用を受けた場合、特に、暴露期間が長期に渡ると、より深い位置でも高い全塩化物イオン濃度を示し、より深部まで塩化物イオンが浸透することが明らかとなった。

ここで、試験表面から0~10mm位置および、11~20mm位置における全塩化物イオン濃度の関係を図-4に示す。事前浸透の有無によらず、20°C一定環境で暴露した試験体は、0~10mm位置における濃度の増加に伴い、11~20mm位置における濃度が増加する傾向を示すことが確認される。一方、凍結融解作用を受けた場合、事前浸透の有無によらず、暴露初期には、0~10mm位置の濃度はほぼ変化せず、11~20mm位置における濃度が増加することが明らかとなった。さらに暴露を延長すると、0~10mm位置の濃度が減少し、11~20mm位置の濃度が増加するといった傾向を示すことが明らかとなった。

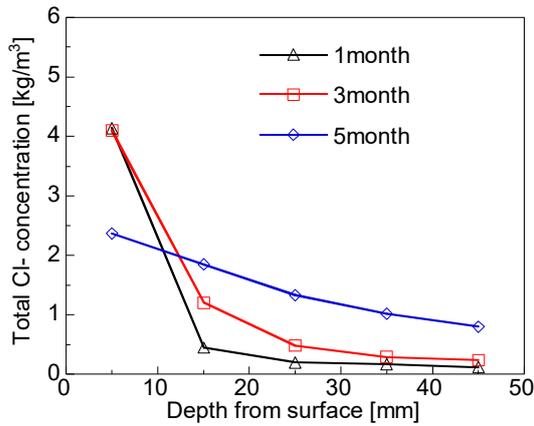
これらの結果より、凍結融解作用を受ける環境下でのコンクリート中への塩化物イオン浸透は、通常の拡散現象のみでなく、凍結融解作用に伴う硬化体内中の未凍結水の移動やそれに伴う硬化体内部での塩化物イオンの濃縮が生じているものと推察される。



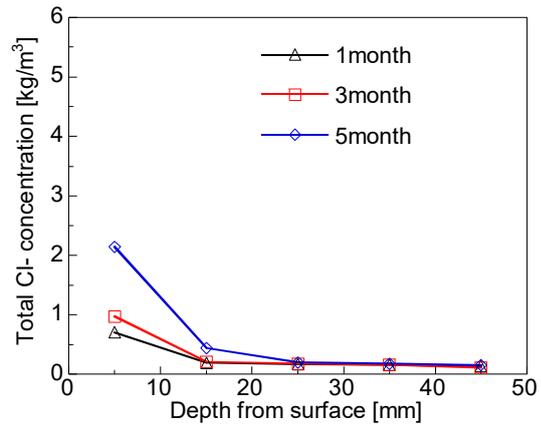
(a) 事前浸透有り－凍結融解環境



(b) 事前浸透有り－20°C一定環境



(c) 事前浸透無し－凍結融解環境



(d) 事前浸透無し－20°C一定環境

図-3 各条件における全塩化物イオン濃度分布

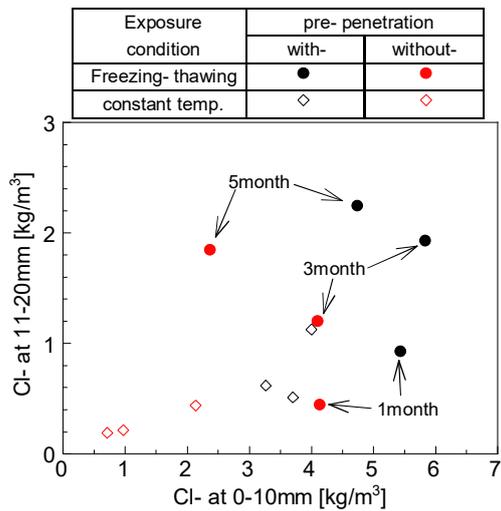


図-4 0～10mm および 11～20mm における全塩化物イオン濃度の関係

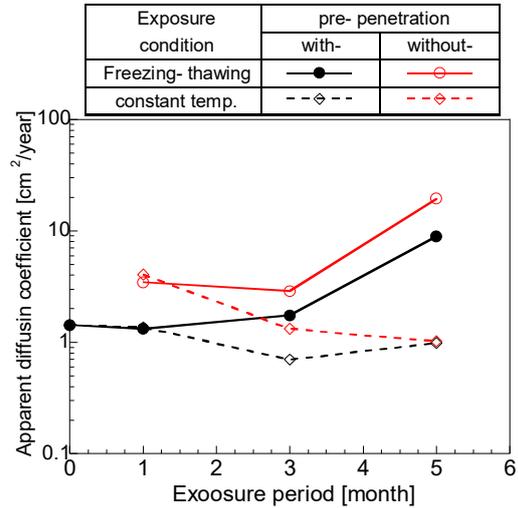


図-5 見かけの拡散係数の経時変化

図-5 に、得られた全塩化物イオン濃度分布より算出した見かけの拡散係数の経時変化を示す。これより、温度一定環境における見かけの拡散係数は、事前浸透の有無によらず、一定あるいはやや減少する傾向を示すのに対して、凍結融解作用を受けた場合、暴露期間に伴い、見掛けの拡散係数が増加することが明らかとなった。なお、ここで拡散係数を算出する際、暴露期間は、凍結工程を含む全暴露時間を用いて算出したものであり、凍結時にイオンが拡散・移動しないことを考慮すると、見掛けの拡散係数はより高い値を示すこととなる。

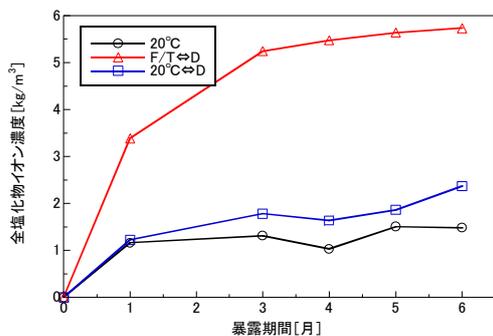


図-6 0~10mm 位置における全塩化物イオン濃度の経時変化

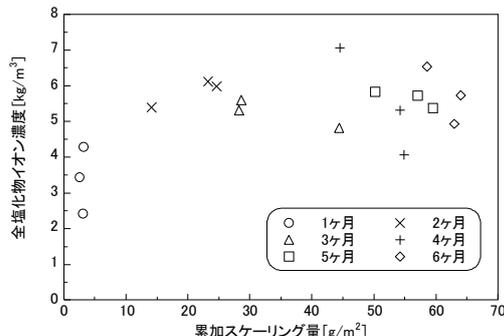


図-7 0~10mm 位置における全塩化物イオン濃度とスケーリング量の関係

(2) 凍結融解作用と乾湿繰返し作用がコンクリート中への塩化物イオン浸透に及ぼす影響

凍結融解作用と乾湿繰返し作用を受けたコンクリート中の表面から 0~10mm 位置における全塩化物イオン濃度の経時変化を図-6 に示す。これより、20°C一定環境において塩分浸透を実施した場合、暴露初期に全塩化物イオン濃度は増加を示すものの、その後は暴露期間が延長されても、顕著な変化は示さず、ほぼ一定の濃度を示すことが確認された。また、乾湿繰返し作用のみを受けた試験体の全塩化物イオン濃度は、暴露開始初期においては、20°C一定環境における全塩化物イオン濃度と同程度であるものの、その後暴露期間の延長に伴い、徐々に増加する傾向を示し、暴露 6 ヶ月では、温度一定環境と比較して、約 1.4 倍程度の全塩化物イオン濃度を示すことが明らかとなった。これは主として、乾湿繰返し作用による塩化物イオンの濃縮と吸水に伴う硬化体内部での水分移動の影響に起因するものと推察される。一方で、凍結融解作用と乾湿繰返し作用を複合的に受ける場合、暴露開始初期の全塩化物イオン濃度の増加は、他の条件と比較して著しいことが明らかとなった。さらに、その濃度は、暴露期間の延長に伴い増加し、暴露 6 ヶ月では、温度一定環境における全塩化物イオン濃度と比較して、約 3~5 倍程度と非常に高い値を示すことが明らかとなった。これは、前述の乾湿繰返し作用に伴う塩化物イオンの濃縮と水分移動のみでなく、凍結融解作用に伴う外部からの水分の移動、硬化体内部での未凍結水の移動とそれに伴う塩化物イオンの移動、凍結融解作用に伴う表層劣化の影響であると考えられる。

ここで、図-7 に凍結融解作用受ける条件での 0~10mm 位置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示す。これより、スケーリング量 20~25g/m² 程度までは、スケーリング量の増加に伴う全塩化物イオン濃度の増加が著しいもの、その後は、スケーリング量の増加に伴う全塩化物イオン濃度の増加は確認されず、5~7kg/m³ 程度のほぼ一定となることが確認される。ここで示すスケーリング量は非常に軽微なものであることから、本実験で示す全塩化物イオン濃度の増加は、スケーリングの影響は少なく、環境作用に伴う水分移動が大きく影響を及ぼすものと考えられる。

以上本研究では、実環境を想定し、凍結融解作用、乾湿繰返し作用およびそれらの複合作用によるコンクリート中への塩化物イオン浸透性について実験的検討を行った。一連の実験結果より、環境作用を考慮した塩化物イオン浸透性は、一般的に実施されている温度一定環境における拡散現象に基づく塩分浸透のみでなく、凍結融解作用時に生じる硬化体内での未凍結水の移動を含む、環境作用に起因した水分移動を考慮することが必用であることが明らかとなった。さらに、本研究の範囲内で、凍結融解と乾湿繰返しが複合的に作用する場合、一般的な場合の 3~5 倍となり、環境作用を考慮した劣化予測の重要性が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① Y. SAKOI, M. ABA and Y. TSUKINAGA: Influence of Chloride Ion Concentration Gradient on Chloride Ion Penetration under Freezing- Thawing Environment, The International Federation for Structural Concrete 5th International *fib* Congress 2018, 2018,
- ② 滝田大陽, 迫井裕樹, 阿波稔, 月永洋一: 凍結融解環境下における塩分浸透性に及ぼす乾湿繰返しの影響, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-313, pp. 625-626, 2018
- ③ 水口真人, 迫井裕樹, 阿波稔, 月永洋一: 事前に塩分浸透を受けたコンクリートの凍結融解環境における塩分浸透性, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-314, pp. 627-628, 2018

〔図書〕(計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。