

論文 凍結融解作用を受けるコンクリートの塩化物浸透性と鉄筋腐食

今野 竜也*1・阿波 稔*2・庄谷 征美*3・月永 洋一*4

要旨：一般に、凍結融解作用によるコンクリート構造物の性能低下は、表層部におけるひび割れやスケーリングの発生に伴う有効なコンクリート断面（かぶり）厚さの減少や鉄筋腐食により進行すると考えられている。そこで本研究は、凍結融解作用を受ける鉄筋コンクリートの塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食について基礎的な検討を行うことを目的としたものである。研究の結果、凍結融解作用およびスケーリングの発生はコンクリート中への塩化物イオン浸透性を高める一因となることを明らかにした。さらに、その塩化物イオンの浸透と鉄筋腐食との関連性について考察を加えた。

キーワード：凍結融解, スケーリング, 塩化物イオン, 鉄筋腐食

1. はじめに

寒冷地におけるコンクリート構造物は、その気候的な条件から凍害劣化を受けやすい環境にある。一般にコンクリートの凍結融解による劣化は、コンクリート表層部におけるひび割れの発生や、スケーリング、ポップアウトに代表されるような、有効なコンクリートの断面厚さ（かぶり）の減少として特徴づけられる。

特に、近年ではスパイクタイヤの規制に伴う塩化物の大量散布から、凍結融解作用を受けやすい環境下にあるコンクリート構造物は、凍害と同時に塩害（鉄筋腐食）などの複合劣化を引き起こす可能性が極めて高いと言える。

しかしながら、凍結融解環境下において、コンクリート中に塩化物イオンが浸透・拡散するメカニズムについては不明な点が多く、凍結融解が主要因となるような複合劣化（鉄筋腐食）の機構についても十分に解明されているとはいえない。

そこで本研究は、種々の温度条件下における塩化物イオン浸透試験を実施し、凍結融解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について基礎的な検討を行った。さらに、

凍結融解作用によりスケーリングが生じた鉄筋コンクリート中への塩化物イオンの浸透性と鉄筋腐食との関連性について実験的に明らかにすることを目的としたものである。

2. 凍結融解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

2.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

本実験に用いたセメントは早強ポルトランドセメント（密度 3.13g/cm³）である。細骨材として石灰岩砕砂（密度 2.69g/cm³, F.M.2.73, 吸水率 1.01%）、粗骨材として最大寸法 20mm の石灰岩碎石（密度 2.71g/cm³, F.M.6.94, 吸水率 0.32%）を使用した。

コンクリートの示方配合を表-1に示す。本試験では、水セメント比 50%、空気量を 5%一定とした。

(2) 実験供試体および方法

実験に用いた供試体は、100×100×400 mm（7日間の水中養生後、7日間の気中養生）の角柱供試体から図-1に示すような100×100×100 mmの試験片を作成した。供試体の一側面（底面側）

*1 八戸工業大学院 工学研究科土木工学専攻 博士前期課程（正会員）

*2 八戸工業大学助教授 工学部環境建設工学科 博士（工学）（正会員）

*3 八戸工業大学教授 工学部環境建設工学科 工博（正会員）

*4 八戸工業大学教授 工学部建築工学科 博士（工学）（正会員）

表-1 コンクリート示方配合

| Gmax (mm) | W/C (%) | 目標 スランプ (cm) | 目標 空気量 (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|-----------|
| | | | | | W | C | S | G | AE剤 |
| 20 | 50 | 8.0 | 5.0 | 42 | 160 | 320 | 777 | 1081 | C × 0.03% |

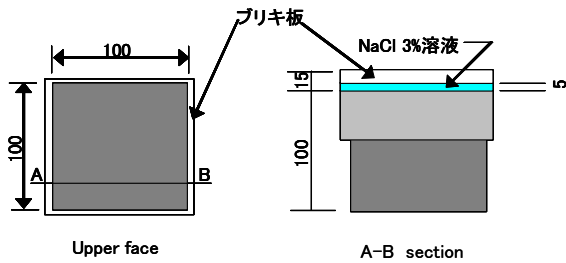


図-1 供試体概略図 (mm)

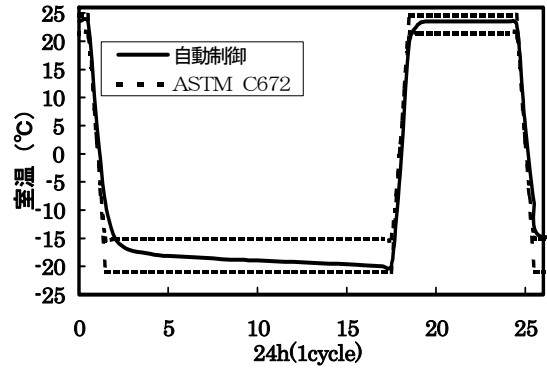


図-2 凍結融解条件

から塩化物イオンを浸透させるため、供試体表面に堤を設置した。そして、NaCl 3%水溶液を試験水として浸透試験を開始した。

また、塩化物イオンの浸透試験時の温度条件は、ASTM C 672 に示される温度履歴と同様に 24 時間で +20°C から -20°C までの凍結融解サイクル(図-2)を自動制御により実施するケース、さらに温度 0°C および 20°C 一定としたケースの 3 種類とした。なお、何れの温度条件下においても相対湿度は 60% 一定とした。

試験開始 28 日後 (ASTM の温度履歴を受けるケースは、28 サイクルに相当)、JSCE-G572「浸せきによるコンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法 (案)」に準じて全塩化物イオンの濃度分布と拡散係数を測定した。

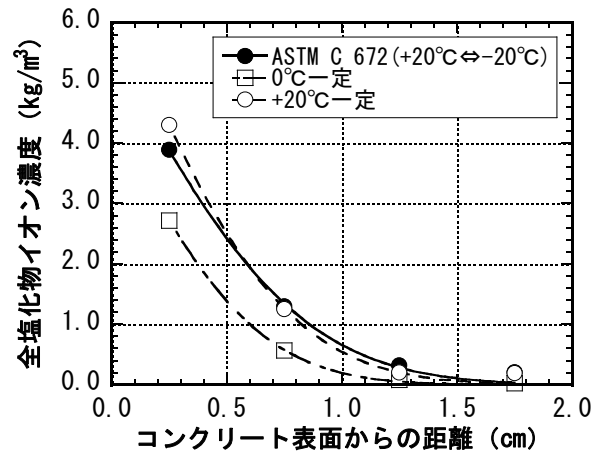


図-3 全塩化物イオン濃度 (28 日)

2.2 実験結果および考察

種々の温度条件下において実施したコンクリートの塩化物イオン浸透試験の結果を図-3 に示す。また、供試体のスケーリング量および塩化物イオンの濃度分布より算出された拡散係数を表-2 に示す。これらの結果より、温度 0°C 一定で塩化物を浸透させた供試体は、20°C 一定で浸透させた供試体と比べて、塩化物イオンの浸透速度が小さくなる傾向が見られた。一般に、濃度拡散におけるコンクリート中のイオンの移動速度はアレニウス則に従い温度に依存す

表-2 見掛けの拡散係数

| 温度条件 | スケーリング量 (kg/m ²) | 拡散係数 D _{ap} (cm ² /年) |
|---------------------------|---------------------------------|--|
| ASTM C 672 (+20⇄-20°C) | 0.01 | 2.66 |
| 0°C一定 | 0.00 | 1.59 |
| 20°C一定 | 0.00 | 2.19 |

ることが知られており²⁾、低温になるほどイオンは移動 (拡散) し難くなる。したがって、低温環境下に曝される ASTM の温度履歴を受けたケースは、塩化物イオンの駆動力が濃度勾配のみであれば、本来なら温度 20°C 一定のケース

表-3 コンクリートの示方配合

| Gmax (mm) | W/C (%) | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|-----------|---------|-------------|-----------|---------|--------------------------|-----|-----|------|------------|
| | | | | | W | C | S | G | AE剤 |
| 20 | 65 | 8.0 | 5.0 | 43 | 159 | 245 | 825 | 1102 | C × 0.008% |

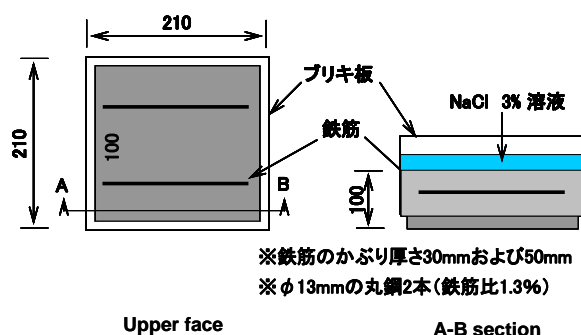


図-4 スケーリング供試体概略図 (mm)

よりも浸透速度が小さくなることが予測される。しかしながら、凍結融解作用 (ASTM の温度履歴) を受けたコンクリートの塩化物イオン浸透性は、ほとんどスケーリングが生じていないにも関わらず温度 20℃一定で塩化物イオンを浸透させたコンクリートとほぼ同レベルにあることが確認される。

この現象は、凍結融解作用を受けるコンクリート中のイオンの移動速度は、濃度差によって生じる駆動力だけでは一義的に決定されないことを示唆するものである。

また、凍結融解作用を受けるコンクリート内部では、その過程で塩化物イオンの濃縮や種々の水圧(移動圧)が発生することとなり、ASTM の温度履歴(凍結融解作用)を受けたケースは、このようなコンクリート中での塩化物イオンの濃縮や種々の水圧による未凍結水の移動が塩化物イオンの駆動力を高め、浸透速度が増加したものと思われる。

以上の結果より、凍結融解作用を受けるコンクリート中での塩化物イオンの移動は、濃度勾配による駆動力に加えて、細孔内での氷晶の生成と成長に起因した塩化物イオンの濃縮や溶媒の移動も駆動力となるものと推察される。

スケーリング試験期間 (凍結融解有) サイクル



図-5 塩化物の供給条件

3. 凍結融解作用を受ける鉄筋コンクリートの塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食

3.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

本実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³) である。細骨材および粗骨材は前章 2. で用いた骨材と同一のものを使用した。

コンクリートの示方配合を表-3 に示す。本試験では、水セメント比 65%、空気量を 5%一定とした。

(2) スケーリング試験

スケーリング試験は、ASTM C 672 に準拠して行った。供試体は 210×210×100mm の平供試体 (図-4) とし、試験対象面を底面とした。供試体にはφ13mm の丸鋼を 2 本配置し、かぶり厚さは 3cm および 5cm の 2 ケースとした。また、試験水には NaCl 3% 水溶液を使用した。なお、試験対象面 (劣化面) 以外からの物質移動を防ぐため、他の供試体側面をシーリングし試験を開始した。スケーリング量の評価は、1 サイクル 24 時間とし (図-2)、7 サイクル毎に 301 サイクルまで実施した。

コンクリートのスケーリング試験期間中における塩化物の供給条件は、図-5 に示すように、凍結融解環境下において、塩化物が継続して供給される条件 (ケース A) および、4 日間の塩

化物供給の後、3日間塩化物を供給しない状態を繰り返す条件(ケースB)の2ケースとした。

試験開始後、凍結融解 105, 154, 210 および 301 サイクルに達したコンクリート供試体中における、全塩化物イオン濃度分布と鉄筋の腐食面積率を測定した。

(3) 塩化物イオン濃度分布および鉄筋腐食面積率の測定

コンクリート中における塩化物イオン濃度の測定は、JSCE-G572 に準拠して行い、全塩化物イオンの濃度分布を求めた。

鉄筋の腐食面積率測定は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して行い、所定の凍結融解サイクルに達した時点で供試体を解体し鉄筋を取り出した。鉄筋に生じた錆の状況を透明シートに複写し、精密面積線長測定器(プランメーター)で腐食面積を測定した。そして、鉄筋の表面積で除して腐食面積率を算出した。

3.2 実験結果および考察

(1) スケーリング試験結果

鉄筋コンクリート供試体のスケーリング試験結果を図-6に示す。この図に見られるように鉄筋コンクリート供試体は、無筋コンクリート供試体と比べて、スケーリングの発生量が大きく増加した。また、鉄筋のかぶり厚さがより小さな供試体ほど、スケーリングが増大する傾向が確認された。かぶり厚さ3cmとした供試体の場合は、かぶり厚さ5cmとした場合と比べて、0.2kg/m³程度スケーリングの増加が見られた。

高水セメント比(本実験では65%)のコンクリートにおいては、塩化物(塩化ナトリウム)の使用による凍結過程でのコンクリート表面の急激な温度低下に起因した収縮ひずみが増大することが確認されている³⁾。鉄筋コンクリート供試体のスケーリング量が増加した原因として、その収縮ひずみを内部鉄筋が拘束したことによる内部二次応力の影響やブリーディングの発生による初期欠陥の影響などが考えられる。しかしながら、今後さらに詳細なメカ

▲ A-3cm(継続供給) △ B-3cm(断続供給)
 ■ A-5cm(継続供給) □ B-5cm(断続供給)
 ◆ A-無筋(継続供給) ◇ B-無筋(断続供給)

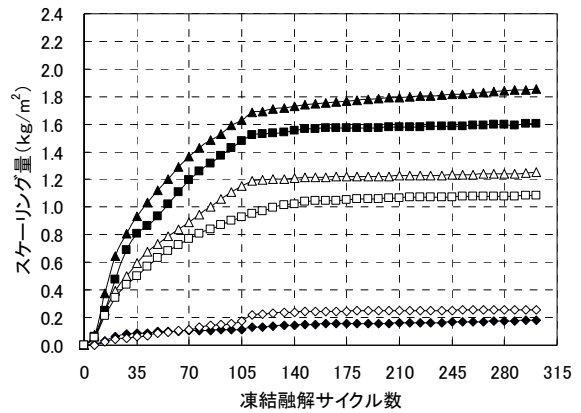


図-6 スケーリング試験結果

ニズムの検証を行う必要がある。

また、鉄筋を配置した供試体の場合、塩化物を継続的に供給した供試体は、断続的に供給した供試体と比較して、スケーリングの発生が著しく多くなる傾向にある。これは、継続的に塩化物を供給したケースでは、劣化の過程でより多くの塩化物がコンクリート中に浸透し、表面の塩化物イオン濃度が比較的高くなったことによるものではないかと考えられる。

一方、無筋コンクリート供試体ではスケーリングの発生は少なく、塩化物を継続的に供給したケースと断続的に供給したケースともに、大きな差が見られなかった。これは、無筋コンクリートの場合、発生したスケーリング量が少なく、結果として塩化物の供給条件による影響が生じ難いためと思われる。

さらに、凍結融解回数が105サイクル付近を超えると、何れの条件においてもコンクリートのスケーリングの発生が緩やかになる傾向が観察される。これは、塩化物が長い期間(サイクル)供給されたため、供試体の極表面部の塩化物イオン濃度が高まり、凍結水量が低下したことによるものと考えられる。

(2) 鉄筋コンクリート供試体の塩化物イオン濃度分布

図-7は凍結融解105サイクル時点における

コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を示したものである。この図に見られるように、塩化物イオンを継続的に供給し、かつ鉄筋のかぶり厚さが小さな条件ほど、つまり発生したスケーリング量が多いコンクリート供試体ほど内部により多くの塩化物イオンが浸透しているのが確認される。これは、塩化物の作用を受けるコンクリート表層部の凍害劣化は、表面部のスケーリング現象だけでなく内部損傷も引き起こしていることを示唆するものである。

図-8 は凍結融解 154 サイクル時点におけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を示したものである。この図に見られるように、凍結融解 105 サイクル時点の濃度分布と比較して、コンクリート表面から 5~15mm 位置における塩化物イオン濃度が約 1.2kg/m^3 増加する傾向にある。これは、凍結融解の繰り返しが効率の良いポンプのように作用し、常温では吸収されない量の水が吸収されることとなり、外部からの水(塩化物溶液)がコンクリート中に浸入する、「Micro-Ice-Lens Formation」や凍結過程における細孔内での氷晶の生成に伴う塩化物イオンの濃縮などによるものと考えられる。

図-9 は、凍結融解 301 サイクル時点におけるコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を示したものである。この図に見られるように、凍結融解 301 サイクル時点では、塩化物イオンの浸透速度が比較的低い条件である断続的に塩化物を供給した鉄筋コンクリート供試体および無筋コンクリート供試体において、表面から 25~35mm 位置の塩化物イオン濃度が約 1.2kg/m^3 増加し、より内部まで塩化物イオンが浸透した。そして、継続的に塩化物イオンを供給したコンクリート供試体の濃度分布により近づく傾向にあることが確認される。

これらの結果は、凍結作用により生じた種々の未凍結水の移動や塩化物イオンの濃縮が大きな駆動力となり、コンクリート内部に形成された凍結フロントに向かって塩化物イオンが強制的に移動する現象を示していると考えら

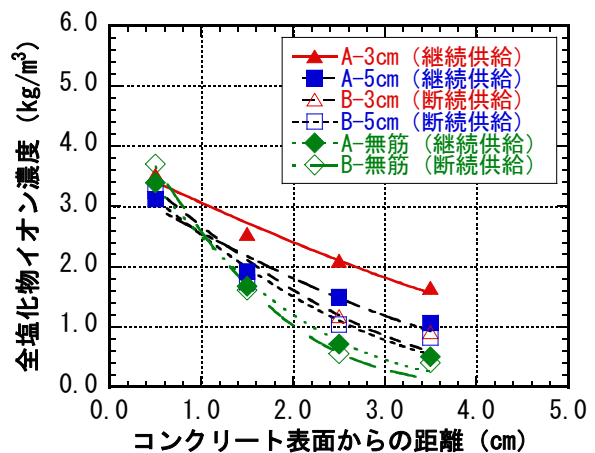


図-7 全塩化物イオン濃度(105 サイクル)

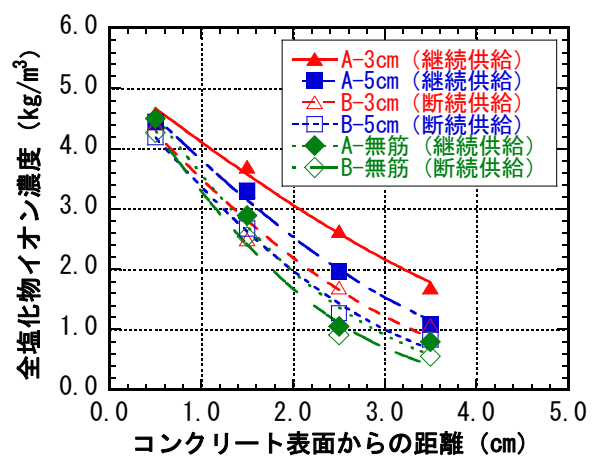


図-8 全塩化物イオン濃度(154 サイクル)

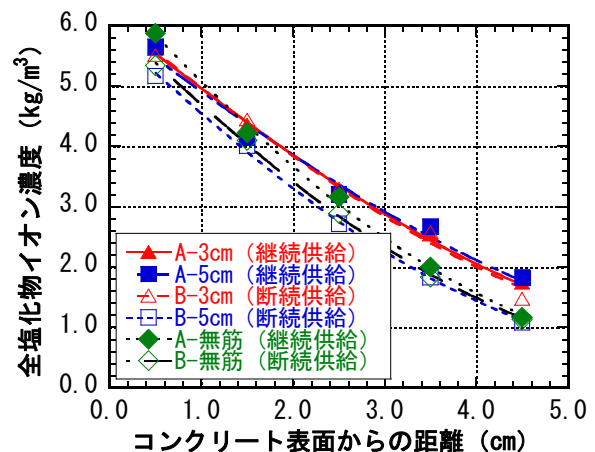


図-9 全塩化物イオン濃度(301 サイクル)

れる。さらに、その凍結フロントまでの移動速度はコンクリートの凍結融解作用によるスケーリング劣化度や内部損傷度に大きく依存するものと思われる。

(3) 鉄筋の腐食面積率測定結果

凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリート供

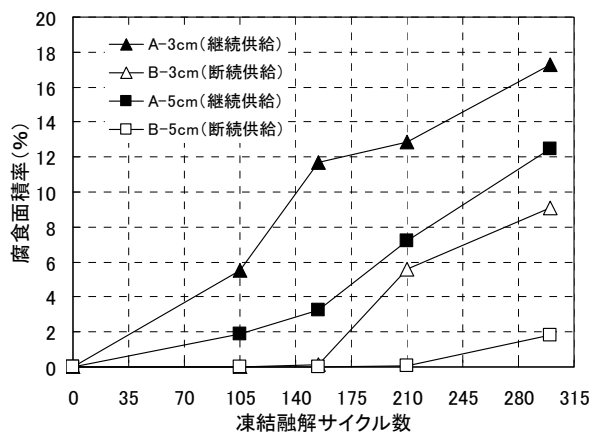


図-10 鉄筋腐食面積率測定結果

試体の腐食面積率の測定結果を図-10に示す。この図より、塩化物イオンが継続的に供給され、凍結融解作用による損傷度が大きなコンクリート供試体ほど鉄筋の腐食開始が速くなる傾向にある。また、その腐食開始時期は、凍結融解作用によるコンクリート内部での塩化物イオン濃度の増加とほぼ一致し、ばらつきが見られるものの鉄筋表面位置での全塩化物イオン濃度が $0.8 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ 付近を超えると腐食が開始するものと思われる。

4. まとめ

本研究は、凍結融解作用を受ける鉄筋コンクリートの塩化物イオン浸透性と鉄筋腐食について基礎的な検討を行うことを目的としたものである。実験の範囲内で以下のことが言える。

- 1) 凍結融解作用を受けるコンクリート中での塩化物イオンの移動は、濃度勾配により生じる駆動力だけでなく、凍結過程での塩化物イオンの濃縮や種々の水圧に起因した未凍結水（溶媒）の移動などにも大きく影響を受けるものと考えられる。
- 2) 塩化物を継続的に供給し、かつかぶり厚さが小さな鉄筋コンクリート供試体ほど、多くのスケーリングが発生する傾向にあることが分かった。
- 3) コンクリートのスケーリング劣化が進展している凍結融解 105 サイクル時点では、発

生したスケーリング量が大きな供試体ほど、塩化物イオンの浸透速度が増大する傾向にあることが分かった。さらに、塩化物の作用を受けるコンクリート表層部の凍害劣化は、表面部のスケーリング現象だけではなく内部損傷も引き起こしているものと考えられる。

- 4) スケーリング劣化の進行が緩やかになる、凍結融解 105 サイクル以降、塩化物イオン濃度は、そのコンクリートの劣化度に応じた速度で表面部から内部へ徐々に増加することが分かった。これは、凍結融解作用により、コンクリート内部に形成された凍結フロントに向かって塩化物イオンが強制的に移動する現象を示していると考えられる。
- 5) 鉄筋の腐食開始時期は、凍結融解作用によるコンクリート内部での塩化物イオン濃度の増加とほぼ一致し、ばらつきが見られるものの鉄筋表面位置での全塩化物イオン濃度が $0.8 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ 付近を超えると腐食が開始するものと思われる。

参考文献

- 1) 庄谷 征美・月永 洋一：東北地方のコンクリート構造物の凍害について、コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004
- 2) 横関 康祐・渡邊 賢三・林 大介・坂田 昇・大即 信明：水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料の塩化物イオン拡散係数予測モデル, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.131-142, 2003
- 3) 庄谷 征美・月永 洋一・阿波 稔・原 忠勝：塩化物の影響を受けるコンクリートのスケーリング発生過程における歪み挙動に関する2, 3の検討, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.370-375, 2000
- 4) Max J. Setzer, Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, 193-201, 2001