塩化物イオンのコンクリートへの浸透・拡散に関する乾燥・湿潤条件の影響

コンクリート　塩化物イオン　促進試験　浸透・拡散　拡散係数 金子　　樹＊ 彦根　俊海＊＊

小熊　悠暉＊＊ 阿部　道彦＊＊＊

　＊　：（株）長谷工コーポレーション　技術研究所，　＊＊：工学院大学建築学科4年

＊＊＊：工学院大学建築学部　教授　工博

１．はじめに

　鉄筋コンクリート構造物の劣化要因の1つとされる「塩害」は、海岸地域を中心に広く問題視され、構造物の耐久性能、構造性能を低下させる。

　建築における塩害の多くは、海からの潮風とともに運ばれる飛来塩分（塩化物イオン）が建物表面に付着し、コンクリート内へ浸透・拡散するもので、鉄筋位置まで侵入すると鉄筋の不動態被膜を破壊して腐食しやすい状態となる。

　このような外来型の塩害では、コンクリート内に浸透・拡散する塩化物イオンを抑制することが重要となるが、塩化物イオンの浸透・拡散性状には不明な点が多い。

　そこで、昨年度はコンクリートへの浸透・拡散性状を評価するための促進試験方法について実験研究を行い、塩化物イオンの浸透・拡散には乾湿繰返し試験における乾燥・湿潤日数の割合が影響することを明らかにした。1）

　本研究では昨年に引き続き、外来型の塩害を想定し、侵入した塩化物イオンがコンクリート内を浸透・拡散する乾燥・湿潤条件の影響について実験を行った。

2．実験概要

表1　環境条件一覧

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 条件 | | 乾湿シリーズ | | 乾燥シリーズ | | 湿潤シリーズ | | 中性化シリーズ | | | 乾湿 |
| 記号 | | 20A | 20B | 20C | 20D | 20E | 20F | 20G | 20H | 20I | 50A |
| 温度 | | 20℃ | | | | | | | | | 50℃ |
| 乾湿日数＊1  (／サイクル) | 乾燥 | 3日 | | 7日 | | 0日 | | 3日 | | 7日 | 3日 |
| 湿潤 | 4日 | | 0日 | | 7日 | | 4日 | | 0日 | 4日 |
| 湿潤時浸漬水 | | 塩水 | 水道水 | － | | 塩水 | 水道水 | 塩水 | 水道水 | － | 塩水 |
| CO2濃度 | | 大気 | | 大気 | | － | | 5.0％ | | | 大気 |
| 浸透面＊2 | | 開放 | | 開放 | 封緘 | 開放 | | 開放 | | | 開放 |

＊1　1サイクルは7日間とする。

＊2　浸透面の”封緘”は初期浸透終了の10C時にエポキシ樹脂にて浸透面にシール処理を施す。

　本実験では、あらかじめ予備促進を行ってコンクリート表面より塩化物イオンを浸透・拡散させた供試体について表1に示す10条件における塩化物イオンの浸透・拡散性状を検討した。

　塩化物イオン量の測定は、予備促進終了後にこれらの環境条件で5、10および20サイクルで行う。この内、本論文では5サイクルまでの結果について報告する。

　それぞれの環境条件は、乾燥状態では20℃、60％R.H.、湿潤状態では20℃、NaCl 3％水溶液への浸漬を基本とした。また、乾湿繰返しの日数は昨年度の実験結果より乾燥3日、湿潤4日を1サイクルとした。1）

　環境条件は、乾湿シリーズ、乾燥シリーズ、湿潤シリーズ、中性化シリーズに大別できる。

　乾湿および湿潤シリーズでは浸漬水として塩水と塩分をほとんど含まない水道水を使用し、乾燥シリーズでは浸透面を開放またはエポキシ樹脂による封緘処理とした。また、中性化シリーズは20A、20B、20Cの乾燥状態を20℃、60％R.H.、CO2 5.0％の促進中性化装置内で行った。

　なお、予備促進は50℃における乾湿繰返し（50A）で10サイクルとした。

3．使用材料およびコンクリートの調合

　セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm3、比表面積：3316cm2/g、塩化物イオン量：0.021％）を、骨材は大井川産陸砂（絶乾密度：2.52 g/cm3、吸水率：2.04％、F.M.：2.82）と青梅産硬質砂岩砕石2005（絶乾密度2.64 g/cm3、吸水率：0.64％、実積率：62％）を使用した。練混ぜ水は東京都八王子市の上水道水（塩化物イオン量：4.9mg/L2））を、化学混和剤はリグニンスルフォン酸系AE減水剤を使用した。

表2　コンクリートの調合と試験結果

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| コンクリートの計画調合 | | | | | | |
| W/C | s/a  （％） | | 単位量（kg/m3） | | | |
| W | C | S | G |
| 0.55 | 48.2 | | 173 | 315 | 846 | 937 |
| コンクリート試験結果 | | | | | | |
| フレッシュ  コンクリート | | | コンクリート密度（kg/m3） | | 圧縮強度  （N/mm2） | |
| スランプ（cm） | | 空気量（％） | 4w水中 | 1w水中+3w気中 | 4w水中 | 1w水中+3w気中 |
| 20.5 | | 4.0 | 2306 | 2251 | 35.6 | 36.0 |

　表3にコンクリートの調合およびコンクリート試験結果を示す。コンクリートの調合は水セメント比0.55で目標スランプ18cm、目標空気量4.5％とし、粗骨材かさ容積は0.57m3/m3、AE減水剤使用量はセメント質量×0.25％とした。

4．供試体の作製および試験方法

　塩化物イオン浸透試験用の供試体は、寸法10×10×40cmとし、鋼製型枠を用いて成型し、翌日に脱型した。脱型後の供試体は標準水中養生を行い、材齢1週で水揚げ、4週まで上記室内にて20℃気中養生を行った後、予備促進10サイクルを行った。

　図1に供試体の取扱い方法を示す。供試体は材齢4週までの気中養生中に長手方向に3分割し、塩化物イオン浸透面とする供試体の打設時底面以外の5面についてエポキシ樹脂を用いてシール処理した。



図2　促進期間と質量変化率

　塩化物イオン量の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、電位差滴定法により全塩化物イオン量を測定した。分析は浸透面より10mmずつ、深さ40mmまで行った。分析試料の採取は、乾式コンクリートカッターで10mmの厚さにスライスした後、エポキシ樹脂付着部分を除去、150μmのふるいを通過するまで微粉砕とした。

5．実験結果

5.1　質量変化



図1　供試体の取扱い方法

　図2に供試体の質量変化率を示す。質量変化率は乾湿切替え時に測定した供試体質量を各条件開始時の質量で除して百分率で表した。なお、以降において記号Nは予備促進10サイクルを示すものとする。

質量は、期間の経過に伴い湿潤シリーズの20E、20Fは増加、乾燥シリーズの20C、20Dは減少、乾湿シリーズの20A、20Bは増加したが、湿潤シリーズに比べ増加量は少なかった。

中性化シリーズでは、それぞれ乾湿シリーズ、乾燥シリーズの同条件のものと同様の傾向であった。

　また、温度の異なる20Aと50Aでは、20Aは期間にともない増加したのに対し、50Aは減少した。

5.2　全塩化物イオン量

5.2.1　測定深さと全塩化物イオン量

図3に浸透面からの距離と全塩化物イオン量を示す。なお、浸透面からの距離は、深さ0～10mmより採取した試料を5mm、10～20mmからを15mmのように35mmまでとした。

全塩化物イオン量は浸透面からの距離が深くなるほど小さくなる。また、浸透面からの深さ15mm以上では、全ての条件で予備促進Nに比べて塩化物イオンが大きかった。

乾湿シリーズでは、浸漬水に水道水を使用した20Bで表層の全塩化物イオン量は少なかった。浸漬水を塩水とした20Aでは、5mmの塩化物イオン量は多いが、25mm以上では浸漬水が水道水の20Bと比べて少なかった。

乾燥シリーズでは、浸透面を開放した20Cと封緘とした20Dでは、5mmでは差がみられるが15mm以上では同程度であった。



　　　　　　　図3　浸透面からの距離と全塩化物イオン量　　　　　　　　　図4　予備促進との全塩化物イオン量の差

湿潤シリーズでは、浸漬水に水道水を使用した20Fは塩水を使用した20Eに比べて5mmでは全塩化物イオン量が少なかった。しかし、15mm以上で大きくなった。

中性化シリーズでは、5サイクルでの中性化深さは0mmであり、それぞれ乾湿シリーズ、乾燥シリーズと同じ傾向であった。

5.2.2予備促進との全塩化物イオン量の差

図4に浸透面からの距離と予備促進Nとの全塩化物イオン量の差を示す。

乾湿シリーズでは、浸漬水に塩水を用いた20A、50Aは浸透面からのすべての距離でNに比べて全塩化物イオン量が多い。また、15mm以上では、20A、50AともにNとの差が小さくなっているのに対し、20Bでは差が大きくなっている。

乾燥シリーズでは、20C、20Dともに15mm以上で全塩化物イオン量がわずかに多くなった。

湿潤シリーズでは、5mmまではNに比べ全塩化物イオン量は少ないが、それ以上では多く、距離が増すに連れてNとの差も大きくなった。

5.2.3 累積全塩化物イオン量

　図5に予備促進10サイクルを基準とした深さ40mmまでの累積全塩化物イオン量を示す。

予備促進後も塩化物イオンの供給を受け続けた50A、20A、20E、20Gの累積全塩化物イオン量は多かった。

浸漬水に水道水を使用した20B、20Hは累積全塩化物イオン量の差が少なかったが、湿潤シリーズの20Fは多かった。

　20Eは最も塩化物イオンの供給が多かったが、累積全塩化物イオン量は全体と比べても多くなかった。

5.3拡散係数と表面塩化物イオン量

拡散係数および表面塩化物イオン量は鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説をもとに以下の式から最小二乗法等を用いて算出した。



ここに、C(xi,t)：サイクルt、深さxiにおける塩化物イオン量（kg/m3）、C0：浸透面の塩化物イオン量、xi：浸透面からの距離（mm）、D：見かけの拡散係数（cm2/サイクル）、t：サイクル数（サイクル）、erf：誤差関数

なお、材齢は予備促進の期間を含み、今回報告する5サイクルでは15サイクルとして算出した。



図5　予備促進を基準とした累積全塩化物イオン量の比



図6　見かけの拡散係数D



図7　浸透面の塩化物イオン量

　　　　　　　図2　浸透面からの距離と全塩化物イオン量

　図6に拡散係数、図7に浸透面の全塩化物イオン量を示す。

　拡散係数は、同じ乾湿繰返し環境であるが、温度の異なる20A、50Aでは高い温度で促進をしていた50Aの方が大きかった。また、乾湿、湿潤、中性化シリーズにおいて、浸漬水を水道水にした20B、20F、20Hがそれぞれのシリーズ内で最も大きかった。

　浸透面の塩化物イオン量は、乾湿、湿潤、中性化シリーズにおいて、浸漬水に塩水を用いた20A、20E、20Cがそれぞれのシリーズ内で最大となった。また、浸漬水に水道水を用いた20B、20F、20Hはそれぞれ最も小さかった。

6.まとめ

1. 質量変化率は期間の経過に伴い、乾湿および湿潤シリーズでは増加、乾燥シリーズでは減少、中性化シリーズでは、乾燥、乾湿シリーズと同じ傾向であった。
2. 全塩化物イオン量は浸漬水に水道水を用いた場合、表層では他の促進環境に比べ小さくなるが、浸透面からの距離が増すにつれて大きくなった。
3. 全塩化物イオン量は表層部では条件により差があるが、深さ15mm以上ではすべての条件で予備促進よりも大きくなった。
4. 拡散係数は、浸漬水に水道水を用いた場合に大きくなった。また、浸透面の塩化物イオン量は、浸漬水に塩水を用いたものが大きくなり、水道水を用いたものは小さくなった。

参考文献

1. 金子樹、阿部道彦：コンクリートへの塩化物イオン浸透促進試験における乾湿繰返し条件の影響に関する実験、日本建築学会学術講演梗概集（東海）A-1、pp.483-484、2012.9
2. 東京都水道局：平成23年度　東京都水道局水質資料集、2012