

論文 種々の環境・荷重作用を受けたコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する研究

大塚 邦朗*1・忽那 惇*2・網野 貴彦*3・岩波 光保*4

要旨: コンクリートの塩分浸透抵抗性は、セメントの種類や配合、施工条件、さらには構造物の立地環境等によって大きく異なる。本研究では、コンクリートの塩分浸透抵抗性に影響を与える環境作用として海水、温度、湿度、荷重、風、乾湿繰返しに着目し、異なる条件下に暴露した材齢 6 ヶ月のコンクリート試験体を用いて、種々の環境・荷重作用がコンクリートの塩分浸透抵抗性に与える影響を塩化物イオンの実効拡散係数、塩分浸透深さにもとづいて実験的に検討した。その結果、セメント種類と水セメント比の他に、温度、軸圧縮力、乾湿繰返しにおける乾燥時間によっても塩分浸透抵抗性は影響されることがわかった。

キーワード: 塩分浸透抵抗性、実効拡散係数、塩分浸透深さ、環境作用、荷重作用

1. はじめに

コンクリート構造物の設計段階で行われる塩害耐久性の照査では、コンクリート標準示方書(以下、示方書)

【設計編】¹⁾等に基づく「コンクリート表面における塩化物イオン濃度」および「塩化物イオンの見かけの拡散係数」を用いる。前者は、塩化物イオン供給量の大きさを表すパラメータとされているが、後者はコンクリートの品質で決まるパラメータとされており、示方書ではセメントの種類と水セメント比の2つから推定できる方法が示されている。しかしながら、コンクリートの施工条件や施工後の環境によってコンクリートの品質は変化するため、実際の構造物では設計で想定したとおりに塩害は進行しない場合が多い。

そこで本研究では、コンクリートの塩分浸透抵抗性に影響を与える可能性のある環境作用として、海水、温度、湿度、風、乾湿繰返し、荷重作用として軸圧縮応力の影響に着目し、種々の環境下に暴露したコンクリート試験体の材齢 6 ヶ月において、種々の環境・荷重作用がコンクリートの塩分浸透抵抗性に与える影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 検討シリーズ

表-1に実験ケースを示すが、表中の配合条件は表-2に示すとおりである。また、後述するシリーズに該当する実験ケースを、表中の右欄に示した。なお、各シリーズにおいて、特に断りがない場合は、普通ポルトランドセメント、W/C=0.5の条件にて実験を行っている。図-1に示すように養生終了後、実験環境に暴露した。

(1) シリーズ I (大気)

本シリーズでは、温度 20°C、相対湿度 60%の大気中に暴露した同一の条件で、セメント種類(普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメントB種(BB)、低熱高炉セメントB種(LBB))と水セメント比(0.4, 0.5, 0.6)の違いを比較した。

(2) シリーズ II (海水)

本シリーズでは、温度 20°Cの海水中に暴露した同一の条件で、シリーズ I と同様、セメント種類(普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメントB種(BB)、低熱高炉セメントB種(LBB))と水セメント比(0.4, 0.5, 0.6)の違いを比較した。

(3) シリーズ III (温度)

本シリーズでは、打込み温度および養生温度 5, 20, 35°Cの3条件で比較した。なお、暴露期間中の相対湿度は 60%一定とした。

(4) シリーズ IV (湿度)

本シリーズでは、相対湿度 60%と 95%の2条件で比較した。なお、暴露期間中の温度は 20°C一定とした。

(5) シリーズ V (軸圧縮力)

本シリーズでは、コンクリートに作用する柱部材等を想定して軸圧縮応力の違いについて比較した。軸圧縮応力は、型枠を取り外した材齢 2 日目から鋼製治具で試験体を挟み込み、ボルトの締付けにより軸圧縮応力 0.5N/mm²または 1.0N/mm²となるように荷重を作用させた。なお、ボルトによる締付力は、長期暴露によってリラクゼーションにより低下することが考えられたので、ボルトにひずみゲージを設置してひずみ値を常時モニタリングすることにより管理した。なお、暴露期間中の環

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 東亜建設工業(株)技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 研究員 (正会員)

*3 東亜建設工業(株)技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ リーダー 博士 (工学) (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験ケース

シリーズ	配合条件			水中養生		環境条件						実験		
	セメント種	W/C	ケース名称	温度(°C)	期間(日)	打込温度(°C)	軸圧縮力(N/mm ²)	大気中			乾湿繰返し 浸漬時間- 乾燥時間	海中 温度(°C)	塩化物イオンの 実効拡散係数	塩分浸透 深さ
								温度(°C)	湿度(%)	風				
I	N	0.4	N40-20	20	3	20	0	20	60	無	—	—	○	○
II								—	—	—	20	○	—	
III								—	—	—	20	○	—	
I~VII								—	—	—	20	○	—	
IV		0.5	N50-20	20	3	20	0	20	60	無	—	—	○	○
VII									95	無	—	—	○	—
VII									—	—	—	—	○	—
VII								—	0.5h-5.5h	—	—	○	—	
II								—	1.5h-4.5h	—	—	○	—	
VI								—	3.0h-3.0h	—	—	○	—	
VI								—	—	—	20	○	—	
V								屋外	無有	—	—	○	○	
V								—	—	—	—	○	○	
III								—	—	—	—	○	○	
I	0.6	N60-20	20	3	20	0	20	60	無	—	—	○	○	
II							—	—	—	20	○	—		
I	BB	0.5	BB50-20	20	5	20	0	20	60	無	—	—	○	○
VII								—	—	—	—	○	—	
VII								—	0.5h-5.5h	—	—	○	—	
VII								—	1.5h-4.5h	—	—	○	—	
II								—	3.0h-3.0h	—	—	○	—	
I	LBB	0.5	LBB50-20	20	5	20	0	20	60	無	—	—	○	○
II								—	—	—	20	○	—	

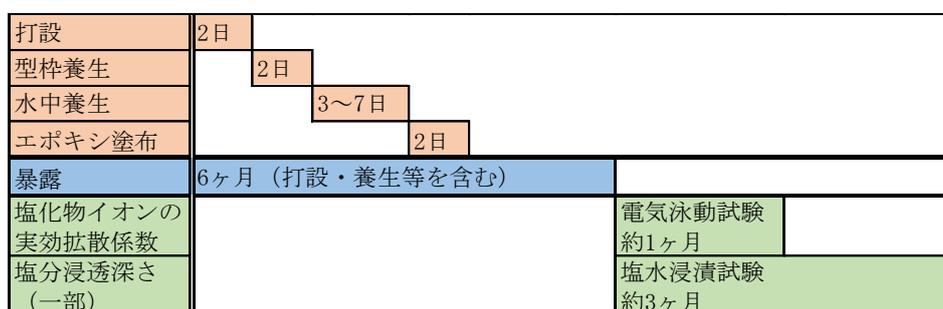


図-1 実験の手順

境は20°C, 60%相対湿度一定とした。

(6) シリーズ VI (風)

本シリーズでは、風の有無の影響を比較することを目的として、風作用を受ける試験体はそのまま、風的作用を受けない試験体は試験体を防風ネット3枚で覆った状態で、風雨の影響を受ける屋外に暴露した。

(7) シリーズ VII (乾湿繰返し)

本シリーズでは、乾湿繰返しの影響を把握することを目的として、3%NaCl 水溶液中への浸漬時間と乾燥時間をパラメータとした検討を行った。なお本実験では、海洋環境における実際の潮の干満(2周期/日程度)を考慮して、1周期を12時間となるように設定した。このシリーズではセメント種類(普通ポルトランドセメント(N), 高炉セメントB種(BB))の影響も比較した。

2.2 試験体および実験方法

本研究に使用したコンクリート試験体を図-2に示す。

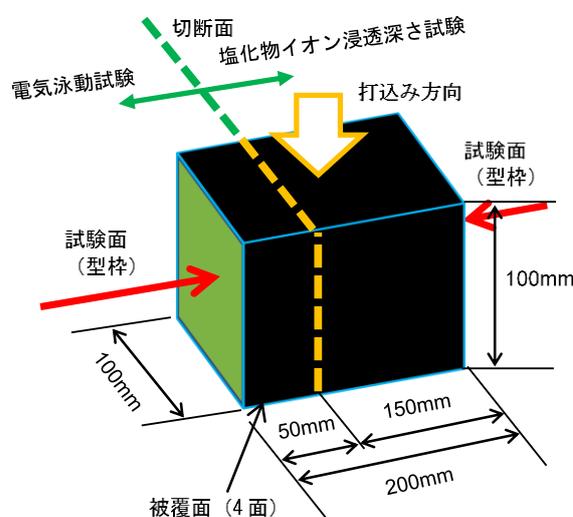


図-2 試験体概要

表-2 コンクリート配合

配合名称	配合条件					単位量 (kg/m ³)					
	セメントの種類	W/C	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W	C	S	G	A _{d1}	A _{d2}
N40	N	0.4	41	8.0 (±2.5cm)	4.5 (±1.5%)	169	423	698	1,039	2.54	2.54
N50		0.5	43			157	314	784	1,075	1.88	1.88
N60		0.6	45			155	258	844	1,067	1.55	1.55
BB50	BB	0.5	42			153	306	769	1,098	1.84	2.45
LBB50	LBB	0.5	42			153	306	769	1,098	1.84	2.45

N：普通ポルトランドセメント（比重 3.16），BB：高炉セメント B 種（比重 3.04），LBB：低熱高炉セメント B 種（比重 2.98），S：君津産山砂（表乾比重 2.61），G：北海道十勝郡岩手町産砕石 2005（表乾比重 2.70），A_{d1}：AE 減水剤標準形（I 種），A_{d2}：AE 剤（I 種）

試験体はすべてのシリーズにおいて同一寸法の 100×100×200mm とし、コンクリートの打込み方向に対して側面の型枠面（2 面）を試験面（暴露面）とした。なお、試験体は表-1 に示す各ケースに対して 2 体作製した。また、表-2 に示す配合のコンクリートを各ケースに対して打ち込み、材齢 2 日で型枠を取り外した後に試験面以外の 4 面をエポキシ樹脂にて被覆した。

その後、約 6 ヶ月間暴露した後に、図-2 に示すように、試験体を厚さ 50mm と 150mm に切断し、以下の試験を行った。

(1) 塩化物イオンの実効拡散係数

厚さ 50mm の試験片を用いて JSCE-G 571-2013 に準拠し電気泳動試験を行い、塩化物イオンの実効拡散係数を求めた。なお、以降の結果に示す実効拡散係数は、各ケース 2 体の平均値で整理している。

(2) 塩分浸透深さ

表-1 のうち、約 6 ヶ月間大気中に暴露したケースについて、図-2 の厚さ 150mm の試験片を 20℃ の 3%NaCl 溶液中に 3 ヶ月間浸漬した。浸漬後、試験体を割裂し、割裂した断面に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧して塩分浸透深さを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ I（大気）

大気中に暴露したシリーズ I における試験体の実効拡散係数、塩分浸透深さを図-3、図-4 に示す。

W/C=0.5 でセメント種類について比較すると、N の実効拡散係数は BB、LBB よりも大きくなった。また、セメント種類 N で W/C について比較すると、W/C が大きくなるほど実効拡散係数は大きくなった。

一方、塩分浸透深さでは、W/C=0.5 でセメント種類について比較すると、違いはほとんど見られなかった。また、セメント種類 N で W/C について比較すると、W/C が大きくなるほど浸透深さは大きくなった。セメント種類の違いによって塩分浸透深さに差がなかったことは実効拡散係数の結果と矛盾している。そこで、BB や LBB は中性化の影響が複合した可能性を想定して中性化深さを

を確認した。その結果、BB では約 3.2mm、N は 1.2mm であり、BB のほうが中性化は進行している状況であったが、この程度の中性化深さの違いが塩分浸透深さに影響した可能性は考えにくい。既往の文献²⁾によれば、塩化物イオンのコンクリート中への浸透は、濃度拡散だけでなく水の移流も強く影響することが示されている。本実験では、湿度 60%RH の乾燥環境に約 6 ヶ月間暴露して 3%NaCl 水溶液に浸漬させたため、今回の塩分浸透深さの測定結果には、乾燥したコンクリート表層部への移流による影響が多く含まれているものと推察される。なお本実験は、今後も継続して長期材齢に対する検討を行う予定であるので、塩分浸透深さについては、その際に浸漬方法や評価方法について検討することとしたい。

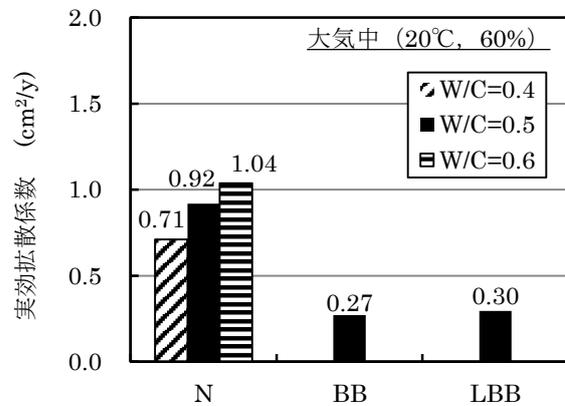


図-3 シリーズ I（大気中）の実効拡散係数

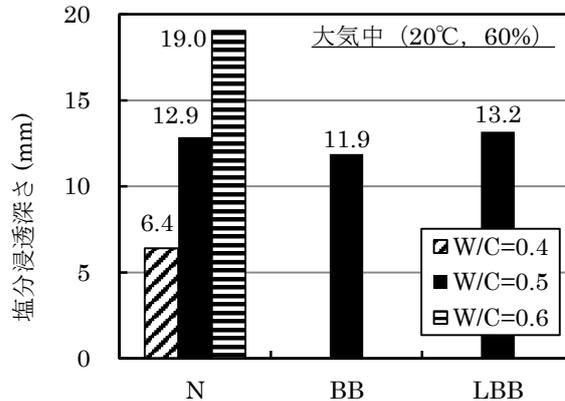


図-4 シリーズ I（大気中）の塩分浸透深さ

3.2 シリーズ II (海水中)

海水中に暴露した試験体について、実効拡散係数を図-5に示す。

W/C=0.5でセメント種類について比較すると、Nの実効拡散係数が最も大きく、BBが最も小さくなった。セメント種類NでW/Cについて比較すると、W/Cが大きくなるほど実効拡散係数は大きくなった。この結果は大気中のものと同様の傾向である。なお、大気中における実効拡散係数と比較すると、セメント種類N、W/C=0.6を除くすべてのケースにおいて、実効拡散係数は海水中のほうが小さくなった。海水中に長期暴露した試験体のほうが水和反応はより進行することから、この結果は妥当と考えられる。なお本実験は、今後も継続して長期材齢に対する検討を行う予定であるので、セメントN、W/C=0.6のケースについては、その際に再度確認したい。

3.3 シリーズ III (温度)

打込み温度・養生温度を変化させたケースにおける実効拡散係数、塩分浸透深さを図-6、図-7に示す。

これによると、打込み温度および養生温度が高いほど、実効拡散係数、塩分浸透深さともに大きくなった。この理由としては、水和反応は低温であるほど緩やかに反応し、高温では急激に反応することから、コンクリートの細孔は低温では密、高温では粗になったためと考えられる。既往の研究^{3) 4)}においても、今回の結果と同様の傾向が示されている。

3.4 シリーズ IV (湿度)

20℃一定で、相対湿度を変化させたケースにおける実効拡散係数、塩分浸透深さを図-8、図-9に示す。

これによると、実効拡散係数、塩分浸透深さとも相対湿度95%の場合よりも60%のほうがわずかながら大きくなった。既往の研究⁴⁾において、相対湿度が高くなると水和生成物の密実性が大きくなることが報告されており、このことが実効拡散係数、塩分浸透深さに影響を与えたものと考えられる。

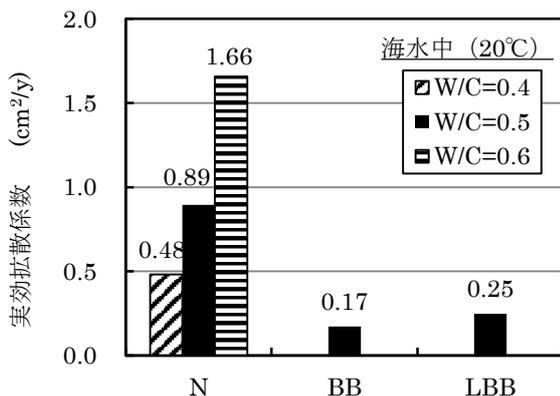


図-5 シリーズ II (海水中) の実効拡散係数

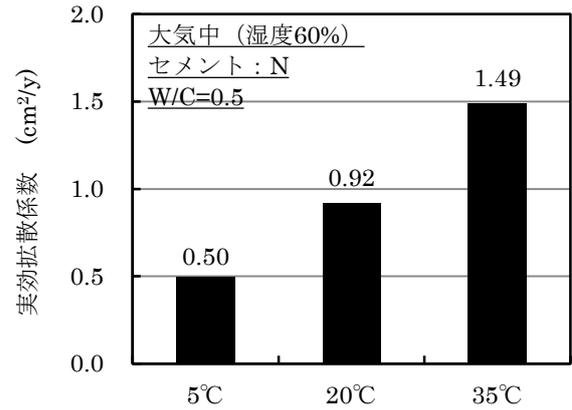


図-6 シリーズ III (温度) の実効拡散係数

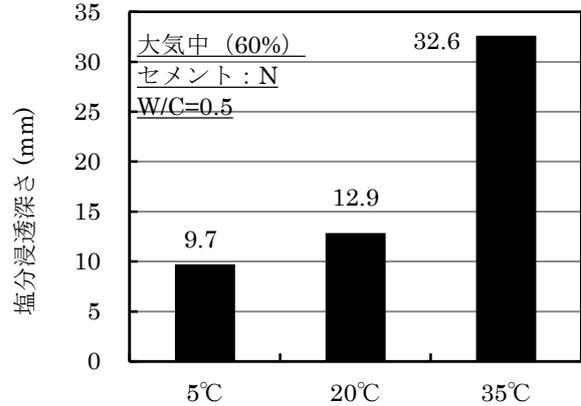


図-7 シリーズ III (温度) の塩分浸透深さ

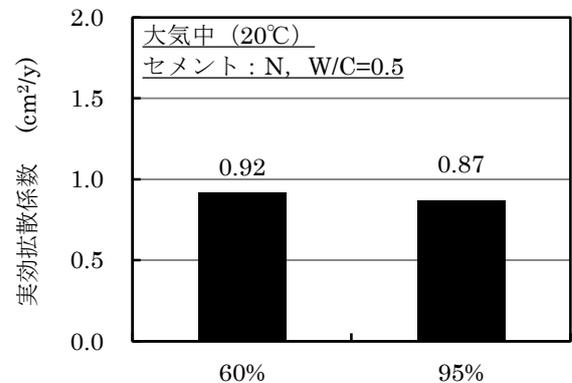


図-8 シリーズ IV (湿度) の実効拡散係数

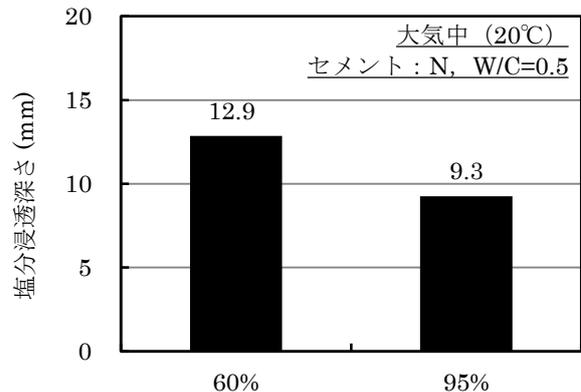


図-9 シリーズ IV (湿度) の塩分浸透深さ

3.5 シリーズ V (軸圧縮応力)

軸圧縮力を作用させたケースにおける実効拡散係数、塩分浸透深さを図-10、図-11 に示す。

この結果によれば、軸圧縮応力が大きくなるほど実効拡散係数は小さくなった。一方、塩分浸透深さは軸圧縮応力 0.0N/mm^2 および 0.5N/mm^2 でほとんど違いは認められなかったが、 1.0N/mm^2 では大きくなった。

実効拡散係数の結果に基づけば、軸圧縮力を長期間作用させたことによってクリープが進行して、コンクリートの細孔構造が緻密になったことが理由として考えられる。しかしながら、クリープによる緻密化が理由と考えた場合、塩分浸透深さも同様の傾向を示すはずである。このように、実効拡散係数と塩分浸透深さの結果に違いが見られたのは、前述のとおり、塩分浸透深さの結果に 3%NaCl 水溶液浸漬後の塩水の移流による影響が含まれてしまったことが理由と考えられる。

3.6 シリーズ VI (風)

風の作用の有無における実効拡散係数、浸透深さを図-12、図-13 に示す。これによれば、実効拡散係数、塩分浸透深さとも、風の有無による違いはなく、本実験の範囲では、風の作用による影響を確認できなかった。

3.7 シリーズ VII (乾湿繰返し)

乾湿繰返しを与えたケースにおける実効拡散係数を図-14 に示す。

これによると、乾湿繰返しを受けたものは大気中と海水中に暴露したもの比べて実効拡散係数が大きくなった。この結果から乾湿繰返しが影響を与えたと考えられる。浸漬時間-乾燥時間について比べると、乾燥時間が長いほど、N、BB ともに実効拡散係数は大きくなる様子がみられた。なお、既往の研究⁵⁾によれば、乾燥によって C-S-H の構造の空隙の粗大化が生じることが指摘されている。今回の結果においても、乾燥時間が長いケースほど実効拡散係数が大きくなる傾向と一致していると思われる。

また、セメント種類について比べると、N では値が大きくなるが、BB ではほとんど違いがなかった。

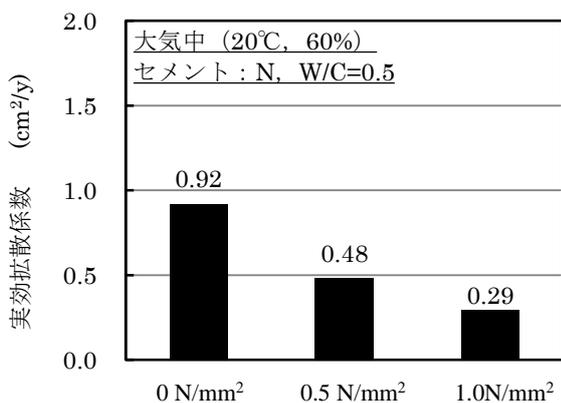


図-10 シリーズ V (軸圧縮力) の実効拡散係数

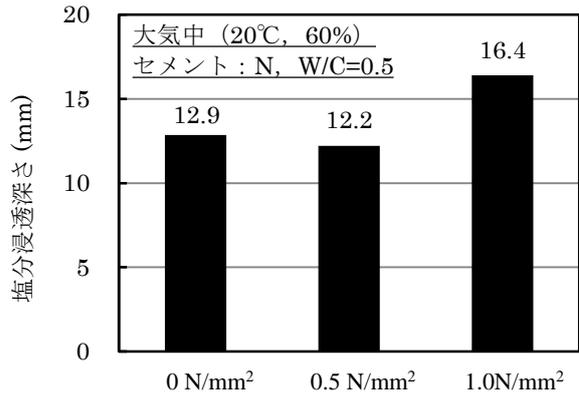


図-11 シリーズ V (軸圧縮力) の塩分浸透深さ

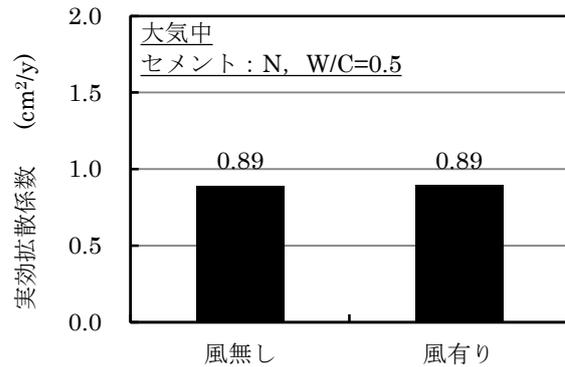


図-12 シリーズ VI (風) の実効拡散係数

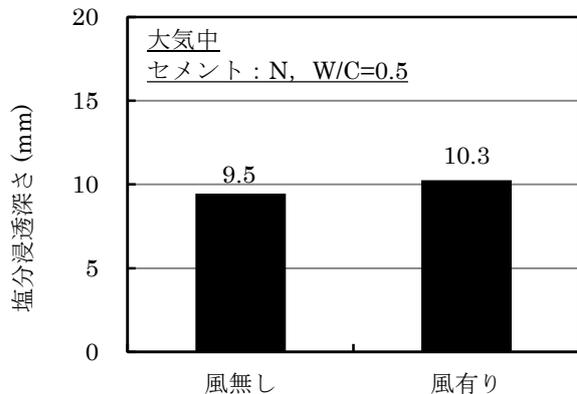


図-13 シリーズ VI (風) の塩分浸透深さ

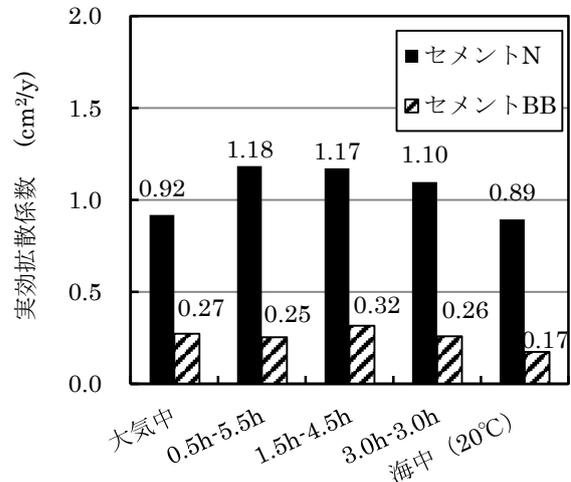


図-14 シリーズ VI (乾湿繰返し) の実効拡散係数

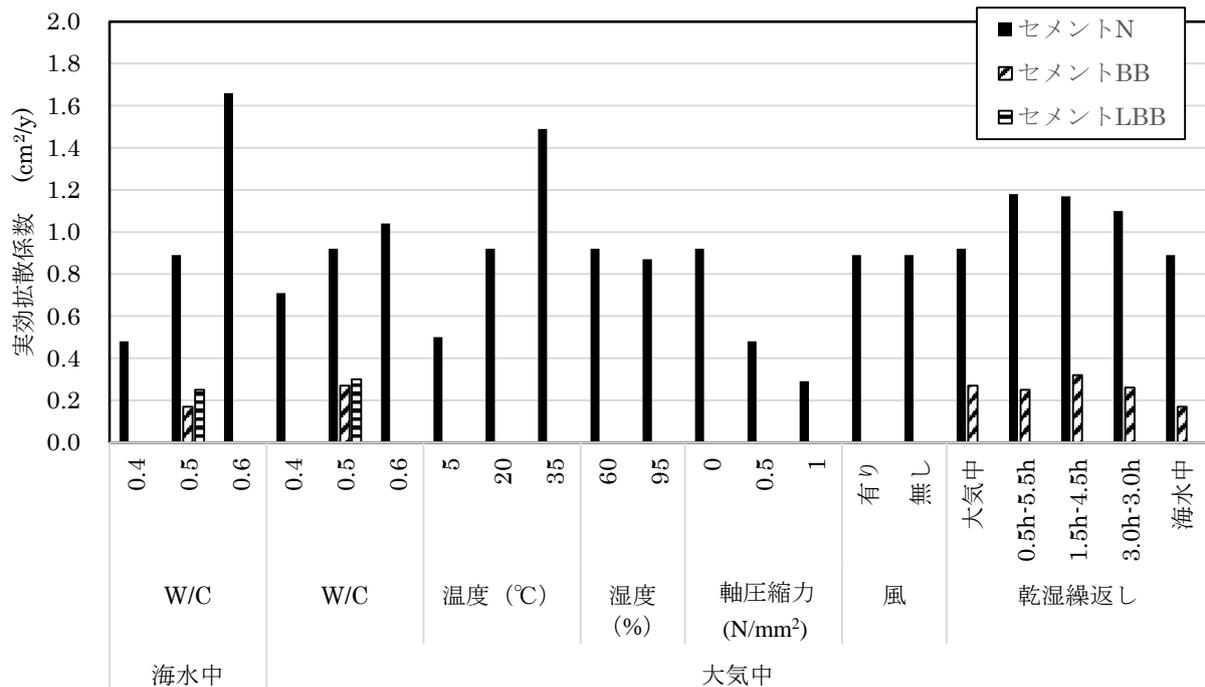


図-15 全シリーズの実効拡散係数

3.8 実効拡散係数に影響する主な要因

図-15に、全シリーズの実効拡散係数をまとめる。これによると、実効拡散係数に影響する要因としては、示方書で考慮されているセメント種類と水セメント比の他に、温度、軸圧縮応力、乾湿繰返しにおける乾燥時間の影響も同等レベルあるいはそれ以上にあることがわかった。今後も本研究を継続して材齢の影響等も検討する予定であるが、データをより蓄積して、塩化物イオン拡散係数推定式の高度化を図りたいと考えている。

4. まとめ

本研究では、種々の環境・荷重作用を受けたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を検討した。その結果、本研究の範囲内で以下の結論を得た。

- 1) 打込み温度、養生温度が大きくなると、実効拡散係数と塩分浸透深さは大きくなった。
- 2) 相対湿度が低くなると、実効拡散係数、塩分浸透深さともに大きくなる傾向が見られたが、相対湿度の違いによる影響は他の要因と比較して大きくないと考えられた。
- 3) コンクリートに作用する軸圧縮応力が大きいほど、実効拡散係数は小さくなった。
- 4) 風の影響は塩分浸透抵抗性にはほとんど影響を与えなかった。
- 5) 乾湿繰返しは実効拡散係数に影響を与える。また、乾燥時間が長いほど、実効拡散係数は大きくなった。

なお本稿では、材齢6ヶ月における試験結果を示したが、今後も実験を継続し、更なる長期材齢に関するデータ収集を行う予定としている。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012
- 2) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.725-730，2003
- 3) 社団法人セメント協会：セメントの種類および水セメント比を要因とした塩化物イオン浸透性，コンクリート専門委員会，委員会報告ダイジェスト版，pp.63-66，2011
- 4) 伊藤一聡，岸利治，魚本健人：種々の養生温度下で形成されたセメント硬化体の空隙構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.489-494，2002
- 5) 須田裕哉，佐伯竜彦，斎藤豪：温度・湿度の変化がC-S-Hの組成および密度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文種，Vol.67，pp.157-164，2013
- 6) 青野義道，松下文明，柴田純夫，濱幸雄：乾燥および乾湿繰返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.993-998，2007