

# 論文 長期屋外暴露試験におけるコンクリートの強度と表層品質に及ぼす海水養生の影響

田中 亮一\*1・山路 徹\*2・網野 貴彦\*3・小池 賢太郎\*4

**要旨:** 本稿では、海水をコンクリートの養生水として使用した場合の影響を把握する目的で、7日間の海水および水道水による湿潤養生を施したコンクリート供試体を室内および海上大気中に約5年間暴露して、各種試験を実施した。その結果、水道水養生に比べて海水養生によって塩化物イオン、マグネシウムイオンおよび硫酸イオンの浸透深さは大きくなるものの、コンクリート表面付近のビッカース硬さおよび透気係数に大きな違いはなかった。また、高炉セメントB種を用いた場合には塩化物イオン等の浸透を抑制でき、海水養生がコンクリート品質に与える影響はごく表層に限られることが確認された。

**キーワード:** 海水養生, 塩化物イオン, 浸透深さ, 表層品質, 高炉セメントB種

## 1. はじめに

淡水の入手が困難な沖防波堤や遠隔離島、被災時の緊急復旧工事等では、水資源の有効活用、淡水の運搬に伴う費用増や脱炭素への貢献等の観点から、現地で調達可能な海水を利用することが有効と考えられる。コンクリート工事における水の利用としては、生コンクリートを製造するための練混ぜ水や養生水等があるが、国内においてそれらに海水が利用されることはほとんどない。これは、国内では上水道水等の淡水の入手が容易であることが一因と考えられるが、コンクリート中に設置される鋼材の腐食を防止するためと考えられる。

海水を練混ぜ水として使用することは各種規準類<sup>1),2)</sup>で一般に禁止されているが、練混ぜ水に海水を使用した施工事例は比較的多く<sup>3)</sup>、海水練りコンクリートの品質は水道水練りコンクリートと比べて初期の強度発現が大きいこと<sup>4)</sup>、物質の透過に対する抵抗性は同程度となること<sup>5)</sup>等の報告がある。一方、養生水に海水を使用した過去の記録はほとんどないが、材齢28日におけるコンクリートの品質への影響は、水道水で養生した場合と比べて圧縮強度は同程度で<sup>6)</sup>、表層の総細孔空隙量は高炉スラグ微粉末を混和した場合には減少すること<sup>7)</sup>等の報告がある。しかし、長期経過後のコンクリートの品質に関する知見は現状多くない。

そこで本研究では、養生水に海水を用いたコンクリートの品質への影響を把握する目的で、7日間の海水および水道水による湿潤養生を施したコンクリート供試体を用いて、室内および海上大気中に所定期間の暴露後に各種試験を実施した。本稿では、コンクリートの品質を確認した結果を示し、海水養生の適用性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリート配合

本実験で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)と高炉セメントB種(密度3.04g/cm<sup>3</sup>)の2種類を使用し、練混ぜ水には水道水を、骨材には山砂(表乾密度2.60g/cm<sup>3</sup>)と碎石(最大寸法20mm, 表乾密度2.70g/cm<sup>3</sup>)を、混和剤にはAE減水剤・標準形を用いた。表-1には供試体作製時のフレッシュ性状と材齢28日の圧縮強度(標準養生)を合わせて示している。

### 2.2 コンクリート供試体

コンクリート供試体は150×150×150mmの立方体と、100×100×400mmの角柱体とし、打込みは2層に分けて合板型枠内に詰め、各層ごとで突き棒を用いて締め固めた。型枠取外しまでは天端面を封緘養生し、打込みから約24時間後に型枠を取り外した。なお、コンクリートの

表-1 コンクリートの配合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			W	C	S	G	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
N	50.0	43.5	168	336	770	1038	2.69	14.5	4.0	21	47.1
BB		43.2			759		1.69				3.8

\*1 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 主任研究員 博(工) (正会員)

\*2 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域長 博(工) (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(工) (正会員)

\*4 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域 主任研究官 博(工) (正会員)

練混ぜおよび供試体の作製は 20±2℃の恒温室で行った。

### 2.3 供試体の養生条件

コンクリート供試体の養生条件を表-2 に示す。養生水として海水と水道水の2種類を用いて、いずれの場合も、型枠を取り外した直後から水温 20±2℃で7日間の水中養生を行った。なお、海水は東京湾で採取したものを使用している。

### 2.4 養生終了後の供試体暴露環境と実験ケース

養生終了後のコンクリート供試体は、打込み時の天端面を上向きにして、海上大気中および温度 20±2℃・湿度 60±5%の恒温恒湿室の2つの環境に約5年間暴露した。なお、海上大気中の暴露環境は、飛来塩分が約 17mg(NaCl)/m<sup>2</sup>/日<sup>8)</sup>で作用する条件であった。コンクリート供試体の配合、養生条件および養生終了後の暴露環境で整理した実験ケースを表-3 に示す。

### 2.5 試験項目

所定期間の暴露後に実施した各種試験を表-4 に示す。各種試験は供試体の側面に対して行った。なお、角柱供試体から採取したコアを用いて圧縮強度試験を、立方体供試体を用いてそれ以外の試験を実施した。

#### (1) 圧縮強度

海水養生がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を把握する目的で、暴露1年後の角柱供試体の側面から直径約50mmのコアを3本採取し、両端面を研磨して圧縮強度試験を行った。

#### (2) 表面生成物

養生水および暴露環境によらず暴露1年後の供試体表面で白くなっている箇所があり、海上大気中に暴露した海水養生供試体で顕著な白い生成物が確認された。そこで、白い生成物を特定する目的で、水掛かりがない BB-SW-20 供試体を用いて、供試体切断面の表面付近2箇所に対して走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察を行い、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) によって元素の同定を行った。

#### (3) 各種元素の濃度分布

海水養生によるコンクリート内部の影響を把握する目的で、電子線マイクロアナライザ (EPMA) による各種元素 (Cl, Mg, S, Ca) の面分析を供試体切断面で行った。なお、暴露5年後の BB-SW-20 の結果において、塩化物イオンが内部で濃縮している状況が確認されたため、暴露5年後の供試体では中性化深さも測定した。

#### (4) ビッカース硬さ

コンクリート表面付近の強度の確認を目的として、測定面を#500の耐水紙で研磨した後、ビッカース硬さ試験を実施した。硬さ測定は、試験力 2.942N、保持時間 5 秒の試験条件にて、供試体側面からの深さ方向で測定深度 0.4, 0.6, 0.9, 2.0, 3.0, 5.0, 10, 15mm に対して行い、

表-2 養生条件

記号	養生水	養生期間	養生方法
SW	海水	7日間	20℃水中
TW	水道水	7日間	20℃水中

表-3 実験ケース

記号	セメント種類	養生条件	養生終了後の供試体暴露環境
N-SW	N	SW	海上大気中(屋外の飛来塩分作用環境)
N-TW		TW	
BB-SW	BB	SW	屋内(温度 20±2℃・湿度 60±5%環境)
BB-TW		TW	
BB-SW-20		SW	屋内(温度 20±2℃・湿度 60±5%環境)
BB-TW-20		TW	

表-4 試験項目

確認項目	試験方法	試験位置	試験材齢
圧縮強度	JIS A 1107	供試体側面からコア採取	1年
表面生成物	SEM 観察・EDS 分析	供試体側面の表面付近	1年
元素 (Cl, Mg, S, Ca) 濃度分布	JSCE-G574	供試体側面からの深さ方向	8日 1年 5年
中性化深さ	JIS A 1152	供試体側面からの深さ方向	5年
ビッカース硬さ	JIS Z 2244	供試体側面からの深さ方向	8日 1年 5年
透気係数	トレント法	供試体側面	0.5年 1年 5年

各測定深度あたり 20 点の硬さ測定値の平均値で評価した。

#### (5) 透気係数

コンクリート表層の透気性を確認する目的で、トレント法による透気試験を行った。測定は供試体の4側面で実施し、4箇所の測定値の平均値で評価した。

## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度

コア供試体による圧縮強度試験の結果を図-1 に示す。なお、コア供試体の直径は粗骨材最大寸法の約 2.5 倍で JIS A 1107 の規定を満足していないが、3本の試験結果にばらつきは少なかった。コンクリートの配合や暴露環境の違いによらず、海水養生と水道水養生の圧縮強度は同程度であった。コア供試体の両端面は研磨によって仕上げたため、後述するが表面付近のビッカース硬さの低下

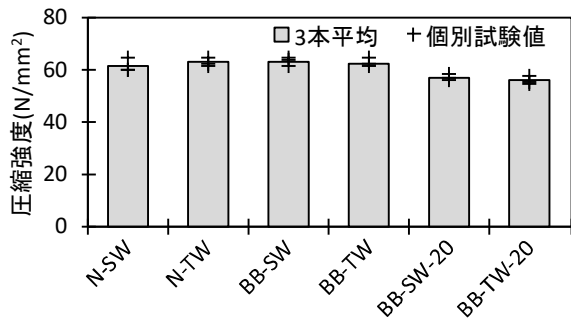


図-1 圧縮強度

範囲や Ca 溶脱範囲は除去してしまい、そのことにより海水養生と水道水養生の結果が同程度になった可能性がある。しかし、海水養生により懸念される変質の影響は内部のコンクリートには影響していなかったと考えられる。屋内暴露の圧縮強度は海上大気中暴露より小さいが、乾燥によって水和反応が阻害されたためと考えられる。

### 3.2 表面生成物

供試体表面の白い生成物を中心とした SEM 観察画像を写真-1 に示す。2 箇所を観察画像において白い生成物の形状が異なっていたが、EDS 分析の結果から図中の丸印箇所 1-1 および 2-1 の暗灰色部の主な元素は Mg と O であったことから、これは水酸化マグネシウムと考え

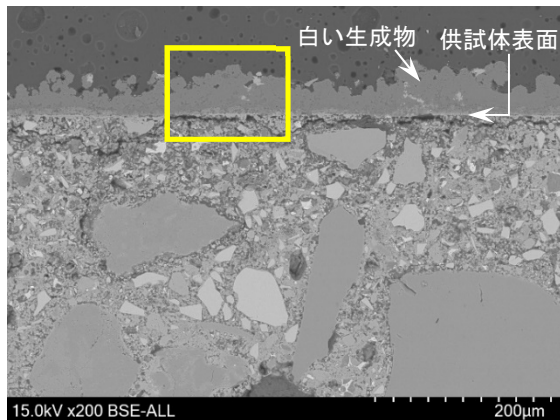
られた。また、白い生成物の大部分を占める暗灰色部の内部には 1-2 や 2-2 のような明灰色の針状結晶が見られ、EDS 分析の結果から Ca と O および C が含まれていたことから、これは炭酸カルシウムと考えられた。なお、コンクリート表層部の暗灰色の粒子状物質 1-3 および 2-3 を EDS 分析したところ、Si と Mg が主な元素であり、Ca の小さなピークが確認された。このことから、海水に含まれるマグネシウムイオンがコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して、水酸化マグネシウムが生成されたものと推察される。また、供試体表面付近のコンクリート部でやや暗い部分が多く見られ、コンクリート表面が全体的に粗な組織になっている様子が伺えた。

### 3.3 各種元素の濃度分布

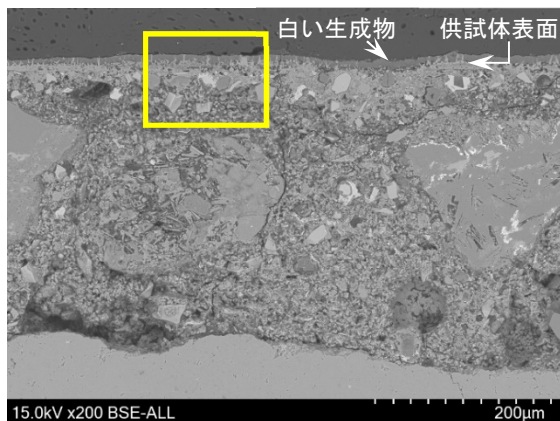
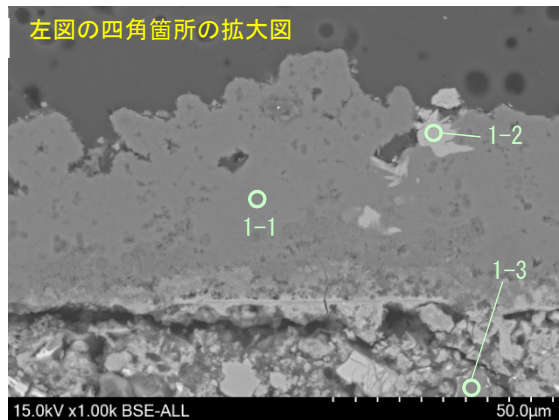
EPMA による面分析結果から得た各種元素の濃度分布を図-2 に示す。なお、Cl は表面からの深さ 40mm までの範囲で元素での質量濃度で、Mg, S, Ca については表面からの深さ 5mm までの範囲で酸化物としての質量濃度で示している。

#### (1) Cl

図-2 左列の海上大気中に暴露したケースにおける Cl の浸透深さに着目すると、海水養生によって初期に Cl が浸透した影響と、それに暴露後の飛来塩分の影響が加わ



(a) 観察画像その 1



(b) 観察画像その 2

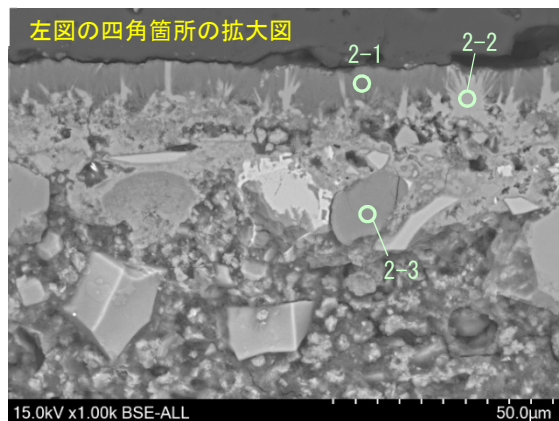


写真-1 SEMによる観察画像 (BB-SW-20, 暴露1年後)

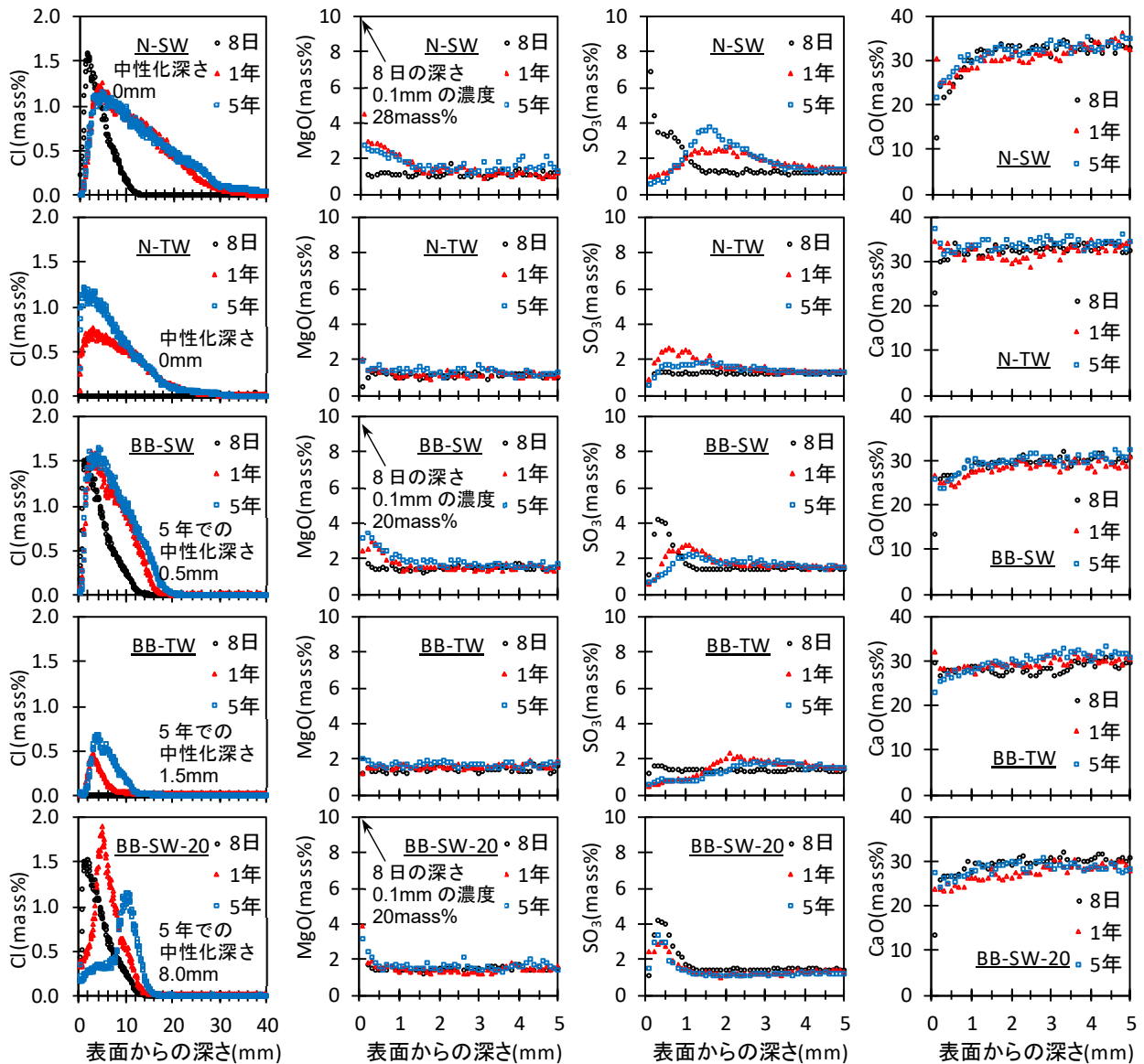


図-2 EPMAによる各種元素の濃度分布 (左: Cl, 中左: Mg, 中右: S, 右: Ca)

ったことにより、Clの浸透深さは水道水養生に比べて海水養生のほうが大きくなっている状況が確認された。普通ポルトランドセメントを用いた場合の浸透深さは、養生水の違いによらず暴露1年までの間で大きく増加しているが、暴露1年から5年にかけては大きな変化は見られなかった。一方、高炉セメントB種を用いた場合は普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて暴露1年までの間の浸透深さの変化は小さく、暴露1年から5年にかけての変化は海水養生では若干増加、水道水養生では海水養生よりも変化が大きい状況が確認された。これは、水道水養生の場合は暴露1年時点での浸透深さが小さかった影響と考えられる。

表面付近のCl濃度を見ると、水道水養生のケースでは配合の違いによらず暴露1年から5年にかけて濃度上昇が確認された。これは、外部からの塩分浸透の影響と考えられる。一方、海水養生のN-SWでは初期から暴露1

年までの間に濃度低下が見られるが、暴露1年から5年にかけてはほとんど変化が見られなかった。初期に高い濃度となったのは、海水養生により直に海水に触れた影響で、その後暴露1年までの間に低下したのは普通ポルトランドセメントを用いた配合では拡散係数が大きいことにより内部への拡散が顕著なためと考えられる。また、暴露1年後以降の表面付近の濃度が変わらなかったのは、N-TWの5年後とほぼ同じとなっていることから、飛来塩分によるCl供給量と内部への拡散量が平衡状態になったためと考えられる。BB-SWでは、初期から暴露1年までの間でわずかに濃度上昇が見られた。初期の濃度が高いのはN-SWと同様に海水に触れた影響であるが、初期から暴露1年までの間の上昇は飛来塩分によるCl供給量よりも高炉セメントB種を用いた配合の拡散係数が小さいことにより内部への拡散が抑制されたためと考えられる。

屋内に暴露した BB-SW-20 については、時間経過とともに Cl が内部に移動している状況が確認された。暴露 5 年後の中性化深さを測定したところ、8.0mm であったことから、海水養生によって初期に浸透した Cl の内部への濃度拡散とともに、中性化深さの増加に伴って内部に Cl が移動したものと考えられる。

以上より、本実験の屋外暴露環境である飛来塩分が約  $17\text{mg}(\text{NaCl})/\text{m}^2/\text{日}$  程度の条件下、すなわちコンクリート標準示方書の式<sup>10</sup>で換算すればコンクリート表面における塩化物イオン濃度  $1.9\text{kg}/\text{m}^3$  程度の環境下であれば、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの場合、海水養生を施しても塩化物イオンの浸透深さは 20mm 程度である。このことから、かぶり 50~70mm 以上<sup>11</sup>が一般的な港湾構造物では、水セメント比 50%程度であれば鉄筋コンクリート構造物であっても海水養生を適用できる可能性が見い出せた。ただし、飛来塩分作用環境下で中性化が複合する場合には、高炉セメント B 種を用いた配合では中性化の進行が速くなるので、鉄筋コンクリート構造物では維持管理において注意が必要と考えられる。

## (2) Mg, S, Ca

図-2 中左列の MgO の濃度分布を見ると、海水養生を施したケースでは初期にごく表面付近で濃度が高くなり、時間経過とともに内部に浸透するものの、暴露 1 年から暴露 5 年にかけての変化は小さかった。また、浸透深さは高炉セメント B 種を用いた場合のほうが小さかった。一方、水道水養生を行ったケースでは濃度分布にほとんど変化はなかった。

図-2 中右列の SO<sub>3</sub> の濃度分布からも海水養生によって初期から表層付近の濃度が高くなり、時間の経過とともに内部に浸透し、浸透深さは普通ポルトランドセメントを用いた場合のほうが大きい様子が確認された。なお、屋内暴露のケースにおいては、海水養生により浸透した SO<sub>3</sub> の時間経過による濃度変化はほとんどなかった。一

方、水道水養生を行ったケースにおいては若干内部に浸透している状況が確認された。なお、SO<sub>3</sub> 濃度が高い範囲では Cl 濃度が低く、MgO 濃度が高い範囲では SO<sub>3</sub> 濃度が低くなっており、既往の知見<sup>12</sup>と合致した。

図-2 右列の CaO の濃度分布からは、海水養生によって表面付近の濃度が小さくなり、普通ポルトランドセメントを用いた場合で深さ 1.5mm 付近まで、高炉セメント B 種を用いた場合で深さ 1.0mm 付近まで濃度の低下が確認された。一方、水道水養生では表面付近における顕著な濃度低下は認められなかった。

以上より、海水養生によって表面付近で Mg 濃度が高く、Ca 濃度が低下していた結果は、3.2 節で示した EDS 分析の結果に対する考察と合致した。また、SEM で観察したコンクリート表面付近の粗な状況は、Ca が海水養生によって溶脱した影響と考えられる。

## 3.4 ビッカース硬さ

ビッカース硬さ試験の結果を図-3 に示す。なお、深さ 5mm 以深の測定値は深さ 5mm での測定値とほとんど変わらなかったため、本図では深さ 5mm までの結果を示している。いずれのケースにおいても、表面付近でビッカース硬さの低下が確認されており、海水養生のほうがその低下量が若干大きい様子が伺える。ただし、その低下が見られた範囲は、表面から 1~2mm 程度の範囲であることから、海水養生による影響はごく表層のみに限定されていたと考えられる。

## 3.5 透気係数

透気係数の測定結果を図-4 に示す。なお、海上大気中に暴露した供試体の測定時のコンクリート表面水分率は、暴露 0.5 年後で 4.9~5.2%、暴露 1 年後および 5 年後で 5%以下であり、養生水の種類による違いはほとんどなかった。また、屋内暴露供試体の表面水分率は 4%前後であった。

海上大気中に暴露したケースの結果をみると、暴露 0.5

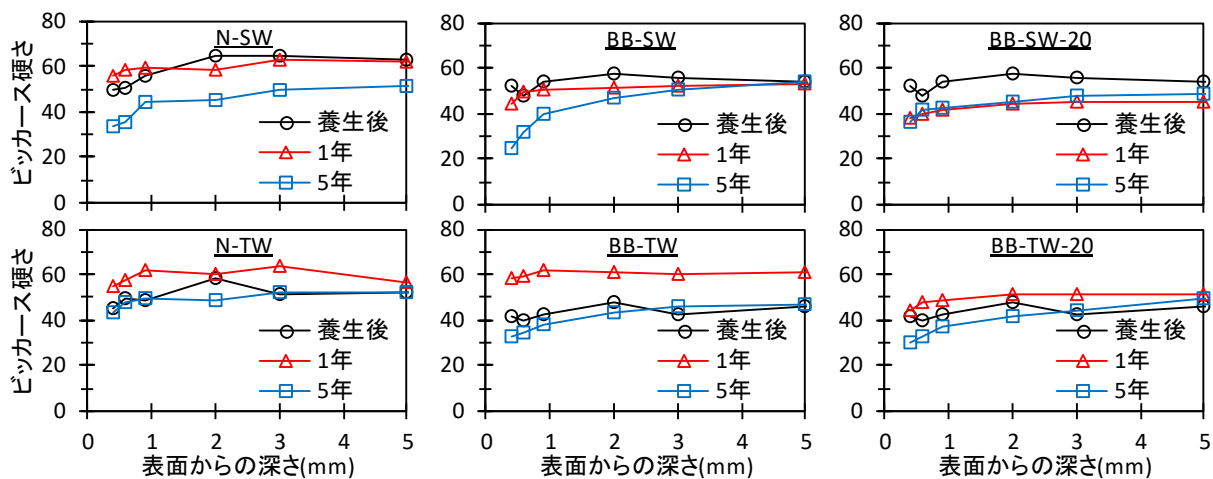


図-3 ビッカース硬さ

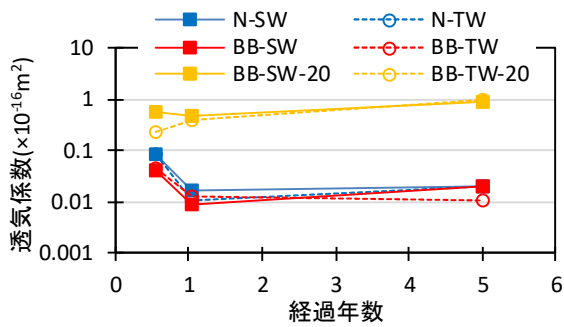


図-4 透気係数

年から1年後の間で透気係数の低下が見られるが、暴露1年後と5年後の透気係数はほぼ同程度であった。これは、暴露1年までの間では表層の緻密化が進行し、その後は表層品質に変化がなかったためと考えられる。一方、屋内暴露のケースでは時間経過とともに若干透気係数は増加しており、屋外暴露のケースに比べて透気係数は大きかった。これは、屋内暴露供試体は雨掛かりがないため乾燥し、水和反応に伴う緻密化が阻害された影響と考えられる。すべての暴露環境で養生水の違いで比較すると、コンクリートの配合によらず透気係数の値にほとんど違いはなかった。このことから、海水養生が表層の透気性に与える影響はほとんどないと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、養生水に海水を用いた場合の影響を把握する目的で、7日間の海水および水道水による湿潤養生を施したコンクリート供試体を約5年間暴露して各種試験を実施し、海水養生の適用性について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 海水養生がコンクリート内部の強度に及ぼす影響はほとんどなかった。
- 2) 海水養生によって初期に浸透した塩化物イオンは、外部から浸透して増加する塩化物イオンや中性化の進行に伴ってコンクリート内部に拡散することが確認された。
- 3) 海水養生によってマグネシウムイオンや硫酸イオンが浸透するが、その浸透深さは小さく、高炉セメントB種を用いることで普通ポルトランドセメントを用いるよりも浸透深さを抑制できることが確認された。
- 4) 海水養生によってごく表面のCaは溶脱するが、Ca濃度の低下範囲は高炉セメントB種を用いた配合のほうが普通ポルトランドセメントを用いた配合よりも抑制できることが確認された。
- 5) 飛来塩分が約17mg(NaCl)/m<sup>2</sup>/日程度の環境条件下で、高炉セメントB種を用いた水セメント比50%程度の配合であれば、海水養生を施しても塩化物イ

オンの浸透深さは20mm程度であった。このことから、かぶり50~70mm以上が一般的な港湾構造物で海水養生を適用できる可能性が見い出せた。

#### 謝辞

本研究の試験結果の考察にあたり、静岡理工科大学の西田教授に多数のご助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.44-45，2018.3
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.484，2018.5
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート分野における海水の有効利用に関する研究委員会報告書，pp.5-58，2014.9
- 4) 竹中寛，末岡英二，小山広光，清宮理：海水および海砂を用いた高流動コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1792-1797，2014
- 5) 西田孝弘，大即信明，小原弘毅：練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.685-690，2013
- 6) 幸田圭司，渡邊裕輝，皆川浩，久田真：海水養生を施した若材齢のコンクリートの圧縮強度および水分逸散性に関する検討，土木学会東北支部技術研究発表会，V-40，2012
- 7) 幸田圭司，宮本慎太郎，皆川浩，久田真：養生水として海水を用いたコンクリートの若材齢における物性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.718-723，2014
- 8) 港湾空港技術研究所ホームページ参照：<https://www.pari.go.jp/about/facilities/exposure.html>（閲覧日：2022年12月27日）
- 9) 青山實伸，有馬直秀，北川勝明，川村満紀：中性化領域における塩分移動メカニズムに関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.817-822，2013
- 10) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，pp.164，2018.3
- 11) 参考文献2)，pp.598-599，2018.5
- 12) 山路徹，審良善和，濱田秀則，山田一夫：海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討，土木学会論文集E，Vol.66，No.1，pp.21-37，2010.2