

論文 10 年間海洋環境下に暴露した三成分系低発熱セメントを用いたコンクリートの性質

迫田 恵三*1・山根 千学*2・竹田 宣典*3

要旨：本研究は、B 種高炉セメントにフライアッシュを添加した三成分系セメントを用いた高流動コンクリートと、比較のため普通コンクリート、高炉セメントなどを用いたコンクリートを温暖地域の海上大気中、海中の海洋環境下に、10 年間暴露した結果についての報告である。測定項目としては圧縮強度、動弾性係数、単位容積質量、中性化深さ、塩分含有量および細孔分布である。その結果、三成分系セメントを用いた高流動コンクリートの 10 年暴露後の圧縮強度は、他のセメントを用いたコンクリートより大きく、また、遮塩効果が大きい結果となった。

キーワード：三成分系低熱セメント、海洋環境、圧縮強度、中性化、塩分含有量、耐久性

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは、耐久性の面からだけでなく構造物の美観の観点からも重要な問題として、材料や施工面からも研究されてきた。マスコンクリートの温度ひび割れ対策がその代表的なものであるが、そのうち材料面からの対策としてはセメントが主なものとなっている。このセメントを利用した低発熱化では、クリンカー化合物の C_2S を多くした高ビーライトセメントの使用と高炉スラグ、フライアッシュを用いた三成分系セメントが挙げられる。これらの低発熱セメントを用いた構造物は、本四架橋や東京湾横断道路および地中構造物でも広く用いられている。また、これらのセメントを用いたコンクリートの耐久性についても幾つか報告されているが^{1), 2), 3), 4)}、海洋環境下に長期間暴露した結果についての報告は少ない。

そこで本研究では、三成分系セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での耐久性を明らかにすることを目的に 10 年間の海洋暴露実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、B 種高炉セメント（密度 3.04g/cm^3 ）、B 種高炉セメントにフライアッシュを添加した三成分系セメント（密度 2.80g/cm^3 ）を用いた。混和材はシリカフューム（密度 2.20g/cm^3 、平均粒径 $0.15\mu\text{m}$ ）、石灰石微粉末（密度 2.73g/cm^3 、比表面積 $5400\text{cm}^2/\text{g}$ ）、フライアッシュ（密度 2.22g/cm^3 、比表面積 $2800\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。細骨材は木更津産山砂（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 1.97% ）、粗骨材は碎石（表乾密度 2.64g/cm^3 、吸水率 0.64% 、 $G_{\text{max}20\text{mm}}$ ）を使用した。

2.2 配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。配合 No.1 と No.3 では普通ポルトランドセメントを使用し、その他の配合は B 種高炉セメントを使用した。配合 No.4, 5 は高流動コンクリートにした。

*1 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 工博（正会員）

*2 東海大学大学院 海洋工学専攻（正会員）

*3 ㈱大林組 技術研究所 土木構造・材料研究室 工博（正会員）

表－1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
				C	SF	LF	FA	W	S	G	WR	SP	SPA
No. 1	50	—	48	330	—	—	—	165	866	948	0.83	—	—
No. 2	50	—	48	330	—	—	—	165	859	942	0.83	—	—
No. 3	58.9	50	48	280	50	—	—	165	852	935	—	7.26	—
No. 4	50	—	51.8	330	—	170	—	165	845	792	—	—	10
No. 5	50	33	51.8	330	—	—	170	165	808	792	—	—	9.25

SF:シリカフェーム LF:石灰石微粉末 FA:フライアッシュ WR:AE 減水剤 SP:高性能減水剤 SPA:高性能 AE 減水剤

2.3 供試体

供試体の寸法は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を使用した。

2.4 養生方法および暴露方法

暴露前の供試体の性質を求めるために脱型後 28 日間標準養生を行った。供試体の暴露は、表－2 に示すように清水市の清水港外港防波堤上とその防波堤脇の水深 11m の海中で行った。清水市は温暖な地域として知られ、年間平均気温は 17℃で冬季平均気温は 5℃であり、氷点下になることは稀である。また、年間の降水量は 2700mm と日本の平均降水量を上回っている。防波堤上の暴露環境は、防波堤全面に消波ブロックが設置されており、気象条件によっては波しぶきを受ける。海中の暴露環境は平均海水温度 18.4℃、塩素量は 18.6‰、pH8.29 である。

2.5 測定項目および測定方法

表－3 に測定項目、測定方法を示す。測定は暴露前の材齢 28 日、暴露後 1 ヶ月、暴露 10 年で行った。海中に暴露した供試体は回収後、単位容積質量、圧縮強度試験直前まで海水に浸漬した。塩化物イオン量の分析は、コアドリルを用いてコンクリート側面から 0～20mm 間隔で粉末状の試料を採取して行った。

3. 実験結果および考察

3.1 細孔容積

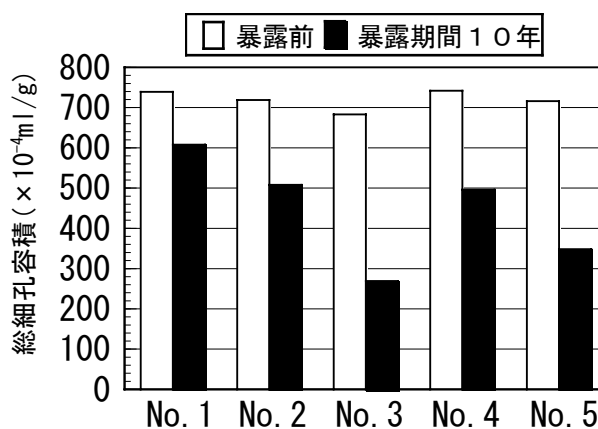
水銀圧入法によって求めた総細孔容積の結果を図－1 に示す。図では暴露前の材齢 28 日の結果と 10 年間海中に暴露した結果を表してある。

表－2 暴露環境

暴露場所	環境区分	環境条件
静岡県清水市 防波堤上・下 年平均気温 17.0℃ 年間降水量 2700mm	海上大気中 防波堤上	L. W. L+2.5m の位置 強風時に波し ぶきを受ける
	海中 水深 11.0m	平均海水温度 18.4℃ pH8.29

表－3 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法
細孔容積	水銀圧入法を用いて測定
単位容積質量	円柱供試体の質量を容積で除し算定
圧縮強度	円柱供試体を暴露終了後、付着物を除去し、JIS A 1108 に準じ試験実施
中性化	コンクリート破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、変色しない深さを測定
塩化物イオン量	塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法(硝酸銀溶液)による全塩分定量分析



図－1 暴露前と暴露後の細孔容積

配合の違いによる材齢 28 日での総細孔容積の差異は少ないが、暴露 10 年では配合による差異が大きくなっている。暴露 10 年では配合 No. 1 の普通セメントを用いたものの総細孔容積が最も大きく配合 No. 3 のシリカフュームや配合 No. 5 の三成分系セメントを用いたものは少なくなっている。また、配合 No. 1 の場合には材齢 28 日から暴露 10 年までの総細孔容積の変化が少なく、これに対して、シリカフュームや三成分系セメントを用いたものの変化は大きいことが図からも明らかである。図-2~6 は暴露前と 10 年暴露後の細孔径ごとの細孔容積変化を示す。全体的には 100nm 超える細孔半径での変化は少ないが、10 から 100nm 付近の細孔容積の変化が顕著である。特に高炉セメント、シリカフュームおよび三成分系セメントを用いた場合、その傾向は明らかでありこれらの材料の特徴が現れている。

3.2 単位容積質量

コンクリートの単位容積質量の結果を図-7 に示す。海洋環境下でのコンクリートの単位容積質量に及ぼす要因は、海上大気中では乾湿の繰り返し、凍結融解作用などが考えられる。他方、海中では各種の塩類の作用により、コンクリートからの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出やエトリンガイトの生成による膨張などが考えられる。海上大気中に暴露したコンクリートは、配合にかかわらず暴露前より暴露後の単位容積質量が低下している。その低下の割合は、0.4 から 2.1% の範囲となっているが、三成分系のセメントを用いたものは 0.4% と変化が少ない。これは暴露地である清水市の年間降水量が平均 2700mm と多いことから海上大気中でも水和が進み、供試体が緻密化したことが原因と考えられる。海中に暴露した結果を図-8 に示す。海中に暴露したものは配合 No. 3 を除いて暴露前より単位容積質量は増加している。その増加の割合は最大 1.3% となっている。配合 No. 1 の普通ポルトランドセメントを用いたものと配合 No. 5 の三成分系セメン

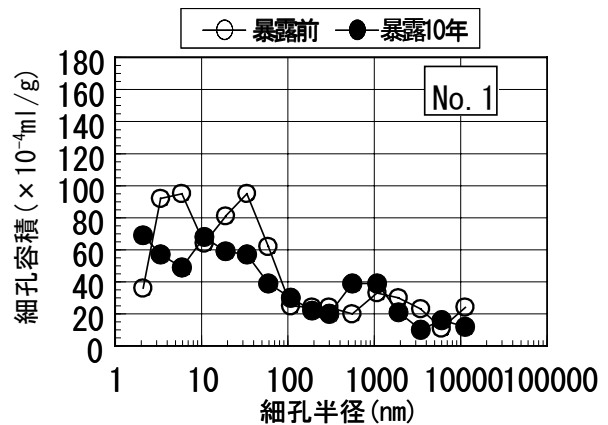


図-2 暴露前と暴露後の細孔容積 (No. 1)

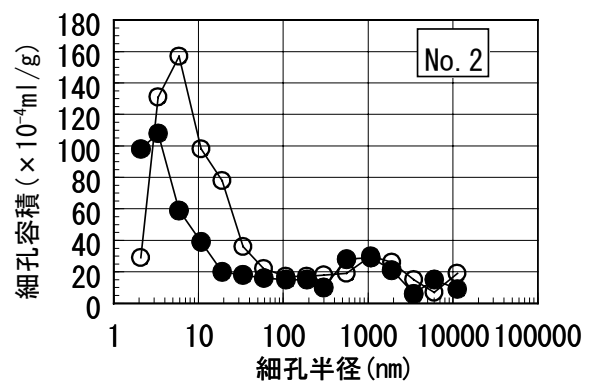


図-3 暴露前と暴露後の細孔容積 (No. 2)

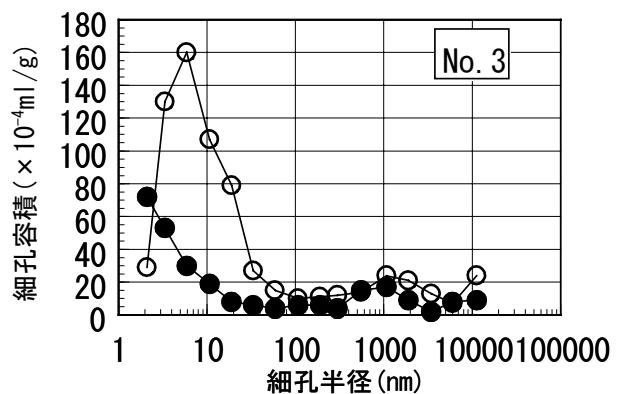


図-4 暴露前と暴露後の細孔容積 (No. 3)

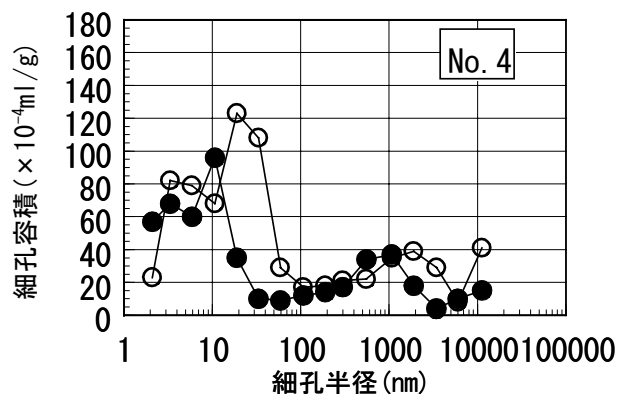


図-5 暴露前と暴露後の細孔容積 (No. 4)

トを用いたものを比較すると、後者の方の変化率が大きい。これは三成分系セメントを用いた場合、暴露前の水和が充分でなく、暴露後は潜在水硬性やポズラン反応が影響したことが原因と考えられる。

3.3 圧縮強度

海上大気中に暴露したコンクリートの圧縮強度の結果を図-9に示す。暴露10年の圧縮強度は配合の如何にかかわらず、暴露前の強度より大きくなっている。これは降雨によって水和作用が進んだことと、凍結融解作用などの強度低下に及ぼす要因が少ないことが原因と考えられる。普通ポルトランドセメントと三成分系セメントを比較すると、後者の方の強度増加割合が約30%大きくなっている。海中に暴露した結果を図-10に示す。海中に暴露した場合、普通ポルトランドを用いた配合No.1の強度が暴露前より約24.8%低下している。これに対して、高炉セメントを用いたものや三成分系セメントを用いたものは、暴露前より強度が増加している。特に三成分系セメントを用いたものは、強度の増加割合が最も大きく、その増加割合は64%になっている。これらの原因については、配合No.1のコンクリートは、海水の化学作用を最も受け易く、三成分系セメントは潜在水硬性やポズラン反応による耐海水性が影響したものと考えられる。

3.4 動弾性係数

海上大気中に暴露したコンクリートの動弾性係数の結果を図-11に示す。配合No.5の三成分系セメントを用いたもの以外は、動弾性係数は暴露前の値より低下している。これは図-7に示したようにすべての配合の単位容積質量が暴露前の値より低下しており、その結果コンクリートの動弾性係数が低下したものと考えられる。三成分系セメントを用いたものは、暴露前の動弾性係数の値が最も小さい。すなわち、この時点での水和が十分でなかったことと、その

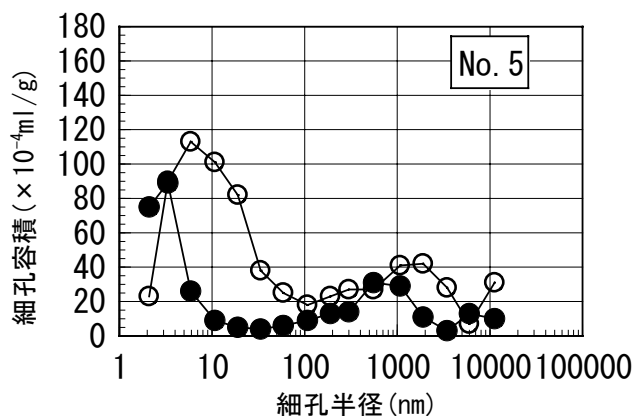


図-6 暴露前と暴露後の細孔容積(No. 5)

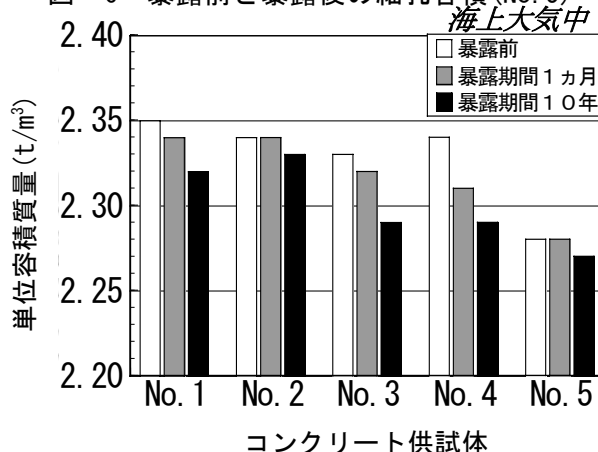


図-7 海上大気中に暴露した単位容積質量

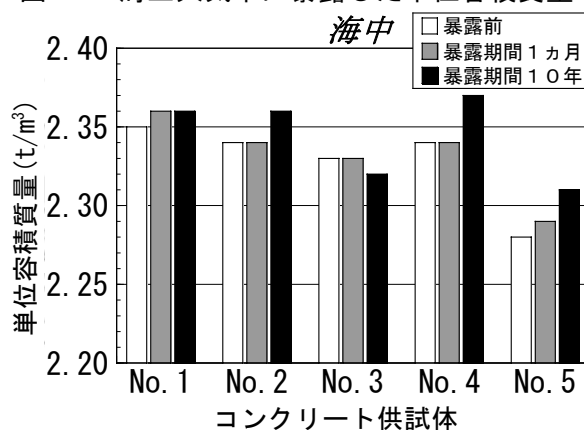


図-8 海中に暴露した単位容積質量

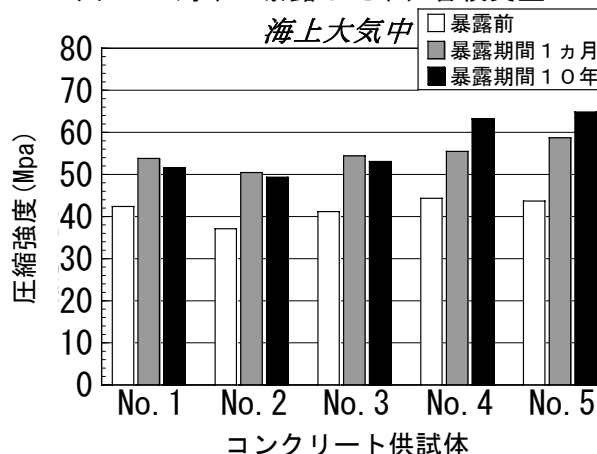


図-9 海上大気中に暴露した圧縮強度

後の暴露年数の経過とともに水和が進んだことが原因と考えられる。海中に暴露した動弾性係数の結果を図-12に示す。海中に暴露した場合には、配合にかかわらず暴露前の値より10年後では大きくなっている。配合No.1のポルトランドセメントと配合No.5の三成分系セメントを用いたものを比較すると、前者は3.4%の増加に対して、後者は20.2%の増加となっている。動弾性係数の結果からも三成分系セメントの耐海水性が明らかである。

3.5 中性化深さ

海上大気中に10年間暴露したコンクリートの中性化深さを図-13に示す。一般に高炉セメントなどの混合セメントは、普通ポルトランドセメントに比較して中性化深さは大きくなると言われている。海上大気中に暴露したために降雨の影響によって、全体的には中性化深さは小さくなっている。配合で比較すると、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの中性化深さが最も小さい。また、配合No.5の三成分系セメントを用いたものの中性化が小さいのは、潜在水硬性やポズラン反応によってコンクリートが緻密化し、二酸化炭素の浸透が少なかったことが原因と考えられる。シリカフュームを用いた配合No.3の中性化深さが突出しているのは、この配合の普通ポルトランドセメントの量が少ないことと、水結合材比が50%と大きいことが原因と考えられる。

3.6 塩化物イオン量

海上大気中に10年間暴露したコンクリートの塩化物イオン量の結果を図-14に示す。図中のコンクリートの表面からの深さ1cmは、表面から2cmまでの深さを表している。防波堤上に暴露した供試体は、この場所では時々波しぶきを受ける。表面から2cmまでで塩分量が最も多いのは配合No.1のポルトランドセメントを用いた場合である。三成分系セメントの表面付近での塩分量が多いが、高炉セメントを用いた場

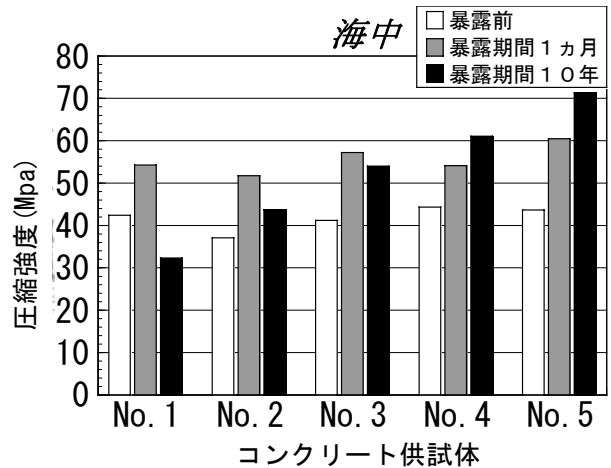


図-10 海中に暴露した圧縮強度

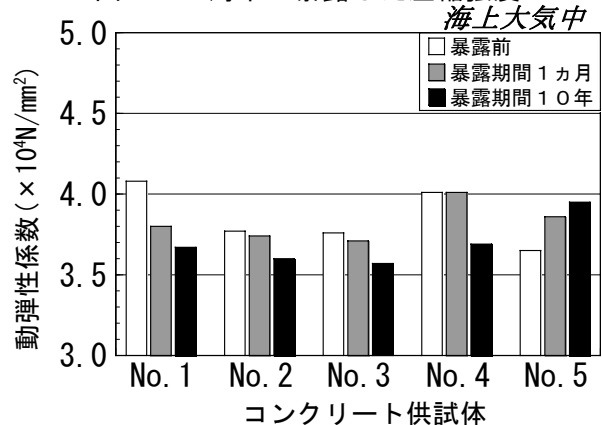


図-11 海上大気中に暴露した動弾性係数

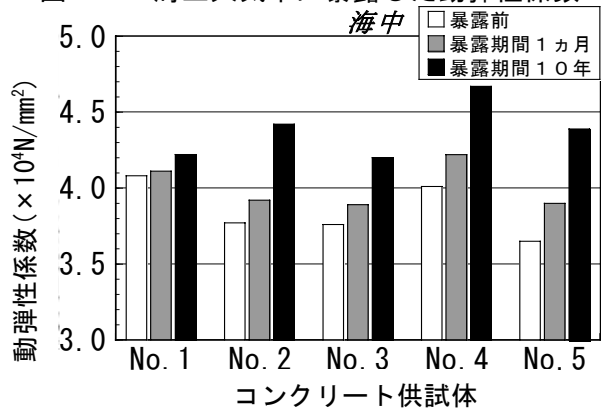


図-12 海中に暴露した動弾性係数

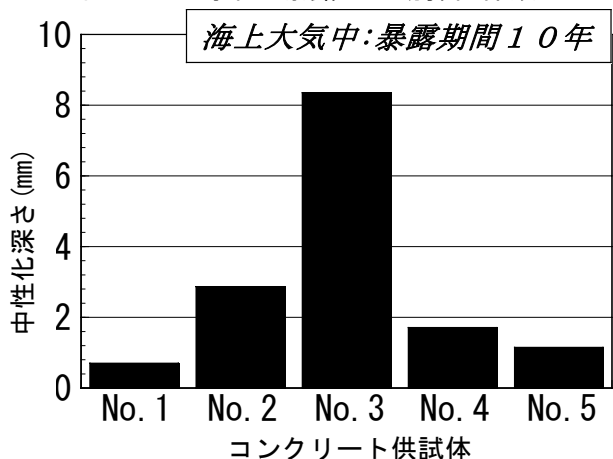


図-13 暴露10年後の中性化深さ(海上大気中)

合の表面塩分量が多くなることは知られていることである。しかし、三成分系セメントを用いたものは表面からの深さが深くなるほど塩化物イオン量は少なくなっている。水深 11m の海中に暴露した場合の塩化物イオン量の結果を図-15 に示す。海上大気中に暴露した結果と同様、水深に関わらず配合 No. 1 の普通ポルトランドを用いた場合の塩化物イオン量が多い結果となった。また高炉セメントを用いた No. 2 の塩化物イオン量は 0~2cm の表層部で多い結果となっている。これに対して、配合 No. 3 のシリカフューム、配合 No. 4 の高炉セメントと石粉、および配合 No. 5 の三成分系セメントを用いたものは、深さ 3cm (2~4cm) において暴露 10 年経過しても 0.5% 以下の塩化物イオン量となっている。これはシリカフュームや高炉スラグの潜在水硬性、フライアッシュのポゾラン反応によるコンクリートの緻密化による遮塩性が現れたものと考えられる。

4. まとめ

高炉セメントにフライアッシュを添加した三成分系セメントの海洋環境下における耐久性を明らかにすることを目的に 10 年間の暴露実験を行った結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 三成分系セメントを用いた場合の 10 年暴露の総細孔容積は、普通ポルトランドセメントを用いたものより小さい。
- 2) 三成分系セメントを用いた場合の圧縮強度は、暴露前と比較して海上大気中で 1.34 倍、海中で 1.64 倍となった。
- 3) 三成分系セメントを用いた場合の中性化深さは、暴露 10 年で 2mm 以下と小さく、普通ポルトランドセメントと同程度であった。
- 4) 三成分系セメントを用いた場合の塩化物イオン量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合より少ない。

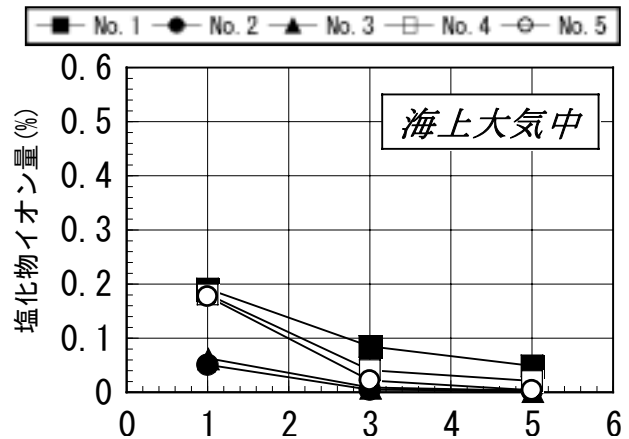


図-14 コンクリート中の塩化物イオン量

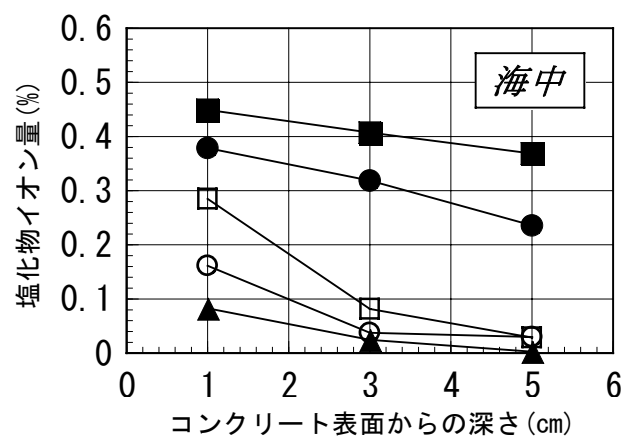


図-15 コンクリート中の塩化物イオン量

参考文献

- 1) 鳴瀬浩康・田中一也・川上学・轟木詳千：各種低発熱セメントを用いた高強度高流動コンクリートの耐久性状, セメント・コンクリート論文集, No. 52, 1998, pp532-539
- 2) 竹村英樹・大塚昭男・守分敦郎・福手勤：各種低発熱セメントを用いたマスコンクリートの耐久性について, セメント・コンクリート論文集, No. 48, 1994, pp548-553
- 3) 曾根徳明・藤山修・谷村充：暴露条件の相違が低発熱セメントを用いたコンクリートの中性化に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文, No. 48, 1994, pp512-517
- 4) 落合光雄・原田修輔・内田美生・片山哲哉：超低発熱セメントを用いたコンクリートの耐久性について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, 1991, pp689-694