

論文 海洋環境曝露試験による海水練り鉄筋コンクリートの耐久性に関する研究

新村 亮*1・谷田部 勝博*2・竹田 宣典*3

要旨: 高炉セメント, フライアッシュ, 浚渫砂と海水用特殊混和剤を使用した海水練りコンクリートによる鉄筋コンクリート供試体などを海洋飛沫帯, 海中に約 5 年間曝露し, 耐久性の評価を行った。鉄筋には普通鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した, エポキシ樹脂塗装鉄筋には全く腐食が生じなかった。また, 海水用特殊混和剤には腐食速度を低減する効果が認められた。また, 海中では普通鉄筋でもほとんど腐食は進行しなかった。さらに, オートクレーブによる腐食促進試験との比較も行った。一方で海水, フライアッシュ, 海水用特殊混和剤の使用により, 長期強度の増進, 塩分浸透・中性化の抑制効果も認められた。

キーワード: 海水練りコンクリート, 鉄筋腐食, 曝露試験, 樹脂塗装鉄筋, 長期強度, 塩分浸透

1. はじめに

海水練りコンクリートは離島, 被災地, また, 海外の乾燥地帯など真水の入手の困難な地域でのコンクリートの施工への活用が期待される。一方で海水練りコンクリートは強度発現が早い, 海水の使用により長期の強度の増加が阻害されるなど, 強度や耐久性, また, 施工性上の問題が指摘されている¹⁾。

一方で高炉スラグ微粉末やフライアッシュ, 海水用特殊混和剤等を使用することで, これらの問題が解消されるという研究が進んでいる²⁾。しかし, 海水練りコンクリートは港湾用のブロックや舗装等の無筋コンクリートの施工には活用されているが³⁾, 海水は鉄筋の腐食を促進することから, 鉄筋コンクリートへの適用は行われていない。しかし, 真水が貴重な地域でのインフラの整備やレアメタル等の海洋資源開発など, 洋上や離島の工事へは海水練り鉄筋コンクリートの適用が有望である。

本研究では高炉スラグ微粉末やフライアッシュ, 海水用特殊混和剤に加え, 現地で入手しやすい海底の浚渫砂を使用した海水練り鉄筋コンクリート等の供試体を, 約 5 年間海洋環境に暴露し, 鉄筋の腐食状態, コンクリートの強度, 塩分浸透や中性化等の調査を行った。鉄筋には普通鉄筋に加え, エポキシ樹脂塗装鉄筋も使用した。また, オートクレーブによる腐食促進試験を行い, 実環境との比較を行った。

2. 試験方法

2.1 使用材料

試験に使用した材料を表-1 に示す。セメントには高炉セメント B 種を使用した。フライアッシュの品質は材齢 28 日の活性度指数 (78%) 以外は JIS A6201 のフ

表-1 使用材料

種類	記号	物性, 産地等
上水	W	東京都清瀬市上水道
海水		茨城県茨城県那珂郡東海村沿岸で採取, 塩化物イオン濃度 1.9%
高炉セメント B 種	C	密度 3.04g/cm ³ , 日立セメント社製
フライアッシュ	FA	密度 2.17g/cm ³ , 常陸那珂火力発電所産原粉
陸砂	S1	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.83%, 粗粒率 2.75, 茨城県常陸大宮産
浚渫砂	S2	表乾密度 2.60g/cm ³ , 粗粒率 0.90, 茨城県鹿島港浚渫砂
碎石	G	表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.45%, 粗骨材最大寸法 20mm, 茨城県笠間市産
海水用特殊混和剤	AN	亜硝酸カルシウム系, 液体, 密度 1.30g/cm ³
AE 減水剤 (標準型)	WR	ポリカルボン酸系化合物
AE 助剤	AE	カリウム塩

ライアッシュ II 種の規格値を満足している。海水用特殊混和剤は海水練りコンクリートの強度, 水密性等の品質改善を目的に添加した²⁾。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合条件を表-2 に, コンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの配合は次の 3 配合とした。フライアッシュは細骨材を置き換えて使用し, 浚渫砂はフレッシュ性状に影響のない程度で使用した⁴⁾。

- ①基本配合 (24-10-20BB) 上水使用
- ②海水+フライアッシュ(FA)+浚渫砂 40%(S2)
- ③海水+特殊混和剤(AN)+フライアッシュ(FA) +浚渫砂 40%(S2)

*1 (株)大林組 生産技術本部技術第一部上級主席技師 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 生産技術本部技術第一部課長 (正会員)

*3 広島工業大学 工学部環境土木工学科教授 工博 (フェロー会員)

2.3 試験方法

(1) 試験項目

試験項目の一覧を表-4 に示す。

(2) 透水試験

φ150×150mm の供試体を1配合につき2本作製し、材齢28日で透水試験を実施した。供試体は材齢28日まで20℃室内での封緘養生とした。

透水試験では5N/mm²の水圧を48時間加圧し、流出水が得られた場合にはアウトプット法により、流出水が得られなかった場合には、浸透深さからインプット法により透水係数を求めた。

(3) 鉄筋腐食量試験

供試体は茨城県那珂郡東海村沿岸の護岸上の海水飛沫帯環境と神奈川県横須賀市の港湾空港技術研究所内の海水水槽内に暴露した。飛沫帯では材齢1ヶ月で暴露を開始し0.6, 1.4, 4.8年経過時に、海中では材齢4ヶ月で暴露を開始し1.2, 4.6年経過時に角柱供試体から鉄筋を

研り出し、鉄筋表面の腐食面積率と JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準じ、鉄筋の腐食生成物をクエン酸二アンモニウム溶液で除去した後、錆除去後鉄筋質量を測定し、試験前鉄筋質量から減少した質量を求め、鉄筋の質量減少率を求めた。曝露状況を写真-1, 2 に示す。鉄筋コンクリート曝露供試体の寸法は幅100mm×高さ100mm×長さ400mmとし、表面のシール処理は行わず、6面とも外気、または海水に接するものとした。また、一部の供試体には曲げ試験機によってあらかじめ曲げひび割れを発生させ、鉄筋の発錆状況を比較した。曲げ載荷は材齢3日に行い、幅0.2mm程度のひび割れを発生させた。

またエポキシ樹脂塗装については、施工時に塗装に軽微な損傷が発生しうることを想定し、鉄筋のリップの塗装を3mm×3mmの範囲で除去し、エポキシ樹脂塗装の損傷による発錆の有無を確認した。供試体の形状を図-1に示す。

(4) 塩化物量試験

各配合につきφ100×200mmの供試体を2本作製し、飛沫帯に曝露し、飛来塩分の浸透を測定した。材齢7日で供試体は1面を残しエポキシ樹脂でシールし、曝露期間1.4年、4.8年において深さ方向の塩化物イオン量分布を、JIS A 1154:2012「塩化物イオン電極を用いた電位差測定法」により測定した。

表-2 コンクリートの配合条件

項目	目標値
スランブ	10±2.5cm
空気量	4.5±1.5%
粗骨材最大寸法	20mm

表-3 コンクリートの配合・フレッシュコンクリート試験結果

	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤(C×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	FA	S1	S2	G	AN*1	WR	AE		
1	基本配合 (上水使用)	53.8	44.0	161	299	—	783	—	1040	—	0.80	0.004	10.0	4.8
2	海水+FA+S2		42.9	166	309	30	435	294	1043	—	1.10	0.013	11.0	4.2
3	海水+FA+AN+S2		42.0	166	309	30	435	294	1043	15.8	1.20	0.011	11.5	4.5

*1 単位水量と置き換えて使用

表-4 試験項目一覧

項目	養生・環境条件	供試体
スランブ, 空気量, コンクリート温度試験	20℃室内	
圧縮強度試験	20℃封緘 (材齢7~91日試験用)	φ100mm×200mm
	7日間封緘後, 室内気中, 材齢1ヶ月から飛沫帯曝露 (材齢180日以後試験用)	
透水試験	20℃封緘 (材齢28日で試験)	φ150mm×150mm
鉄筋腐食量試験	7日間封緘後, 室内気中, 材齢1ヶ月から飛沫帯曝露	□100mm×100mm×400mm (ひび割れなし, あり), 普通鉄筋, エポキシ樹脂塗装鉄筋
	7日間封緘後, 室内気中, 材齢4ヶ月から海中曝露	□100mm×100mm×400mm (ひび割れなし) 普通鉄筋, エポキシ樹脂塗装鉄筋
塩化物量試験	7日間封緘後, 室内気中, 材齢1ヶ月から飛沫帯曝露	φ100mm×200mm
中性化試験	7日間封緘後, 室内気中, 材齢1ヶ月から飛沫帯曝露	φ100mm×200mm
鉄筋促進腐食試験	試験開始まで20℃封緘	φ100mm×200mm



写真-1 飛沫帯曝露状況（曝露開始時）



写真-2 海中曝露状況（曝露開始時）

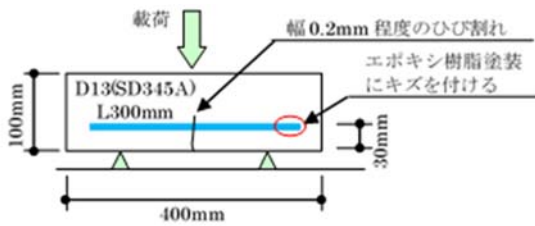


図-1 曝露供試体（ひび割れあり）

(5) 中性化試験

φ100×200mmの飛沫帯曝露供試体の中性化深さ測定を、JIS A 1152：2011「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して測定した。供試体は、長軸方向に割裂した後、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、図-2に示す位置で中性化深さを測定した。

(6) 鉄筋促進腐食試験

JCI-SC2 オートクレーブ法に準拠し、加熱・加圧を繰り返すことで促進劣化させて鉄筋の発錆状況を測定した。繰り返し工程は経年約50年に相当する17回と100年に相当する33回とした⁵⁾。供試体はφ100×200とし、内部にL=150mmの鉄筋を設置した。図-3に加熱・加圧サイクルを示す。

3. 試験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリート試験

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3に示す。海水、フライアッシュを使用した配合では単位水量、AE減

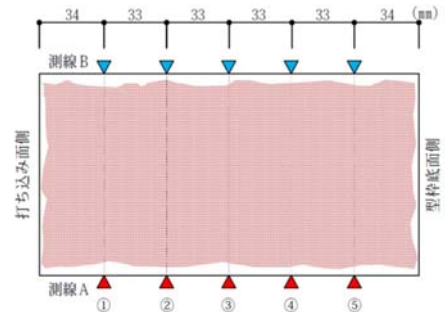
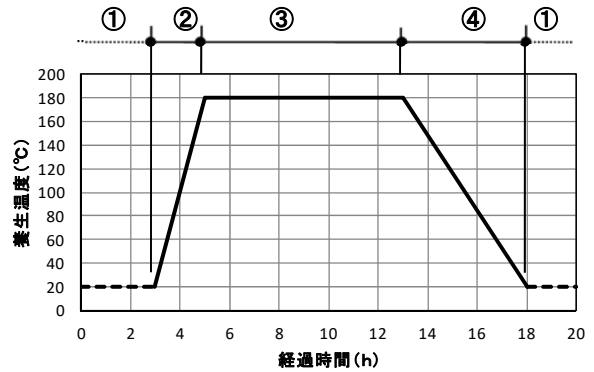


図-2 中性化深さ測定位置



- ①室温
- ②80°C/h以下の速度で180°Cまで上昇
- ③180°C、10気圧で8時間保持
- ④②よりも緩やかに室温まで降下

図-3 オートクレーブ法の加温サイクル

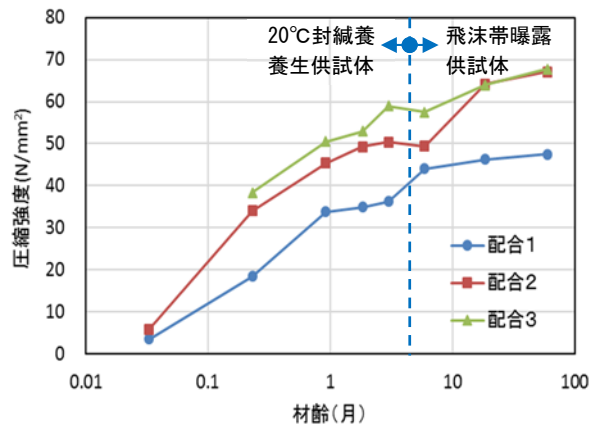


図-4 圧縮強度試験結果

水剤、AE助剤を増量することにより目標値を満足した。

3.2 圧縮強度試験

図-4に材齢と強度の関係を示す。材齢91日までは20°C室内封緘養生の結果であり、材齢180日以後は曝露供試体の結果である。真水練りの配合1に比べて、海水とフライアッシュを使用した配合2は材齢91日で約40%強度が高く、特殊混和剤を使用した配合3は約60%高くなった。飛沫帯曝露供試体の強度は緩やかに増加し、材齢5年では配合2、3の強度は配合1に比べて約40%高かった。ただし、配合1と2は同等の強度であった。この

様に海水とフライアッシュを使用したコンクリートは長期でも強度は増加し、低下を生じることはなかった。

3.3 透水試験

材齢 28 日での透水試験結果を表-5 に示す。配合 1, 2 はアウトプット法で透水係数を求められたが、配合 3 は流出水が得られなかったため、浸透深さからインプット法により透水係数を算出した。

配合 1 の透水係数に比べて、配合 2 は約 1/2, 配合 3 は 1/70 となった。この様に海水、フライアッシュの使用により組織が緻密化することで、透水係数が低下し、さらに、特殊混和剤の使用により高炉スラグ微粉末やフライアッシュの硬化反応が促進されることで、組織が緻密化し透水係数が低下したものと考えられる。

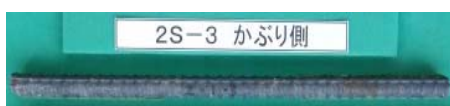
3.4 鉄筋腐食量試験

鉄筋腐食量試験結果のうち、飛沫帯で 4.8 年間曝露した普通鉄筋の腐食状況の一部を写真-3 に、飛沫帯で曝露した普通鉄筋の鉄筋腐食面積率・質量減少率を図-5~8 に示す。なお、海中曝露ではいずれの配合の普通鉄筋・エポキシ樹脂塗装鉄筋にも、腐食は認められなかった。

飛沫帯・ひび割れなしのケースでは、曝露期間 4.8 年では、配合 2 では腐食面積率は 4%程度であったが、配合 1, 3 とも腐食面積率は 0 であった。ひび割れありのケースでは腐食面積率、質量減少率とも曝露期間に応じて

表-5 透水試験結果

配合	透水係数(m/sec)	試験方法
1	3.9×10^{-11}	アウトプット法
2	1.8×10^{-11}	アウトプット法
3	5.0×10^{-13}	インプット法



配合 2 ひび割れなし



配合 1 ひび割れあり



配合 2 ひび割れあり



配合 3 ひび割れあり

写真-3 鉄筋腐食状況

(飛沫帯, 普通鉄筋, 曝露期間 4.8 年)

増加し、腐食量はいずれの曝露期間でも配合 2 が最も大きかったが、配合 3 は配合 1 の同等以下であった。海水の使用は鉄筋の腐食を促進するが、特殊混和剤の使用により、鉄筋腐食の進行を真水練りと同等以下にすることができるものと考えられる。

飛沫帯曝露のエポキシ樹脂塗装鉄筋ではひび割れあり・なしのいずれの供試体でも腐食はまったく生じることはなかった。また、樹脂塗装のキズ部にも腐食が生じることはなく、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用により海水

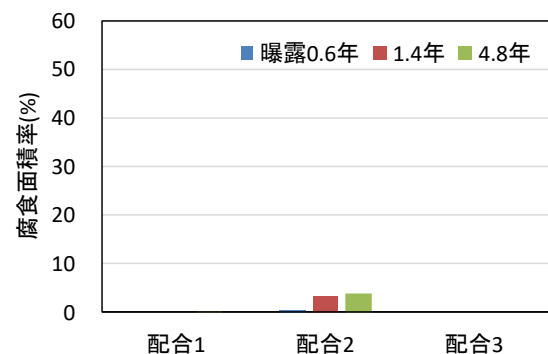


図-5 鉄筋腐食面積率測定結果
(飛沫帯, 普通鉄筋, ひび割れなし)

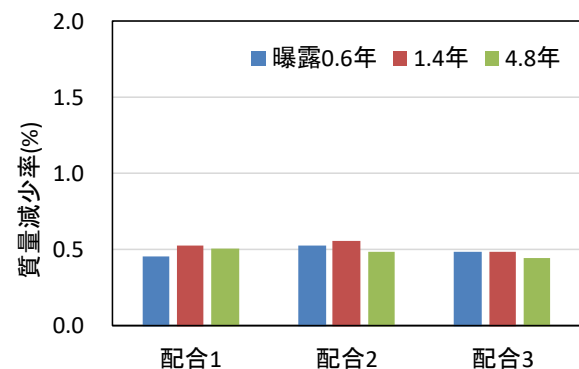


図-6 鉄筋質量減少率測定結果
(飛沫帯, 普通鉄筋, ひび割れなし)

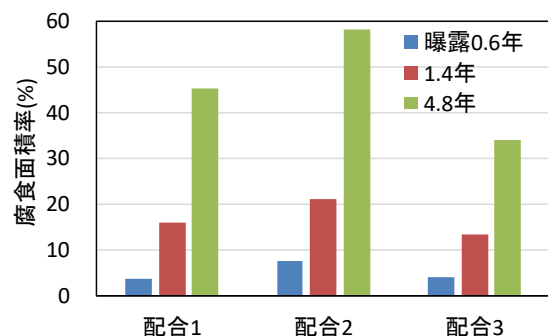


図-7 鉄筋腐食面積率測定結果
(飛沫帯, 普通鉄筋, ひび割れあり)

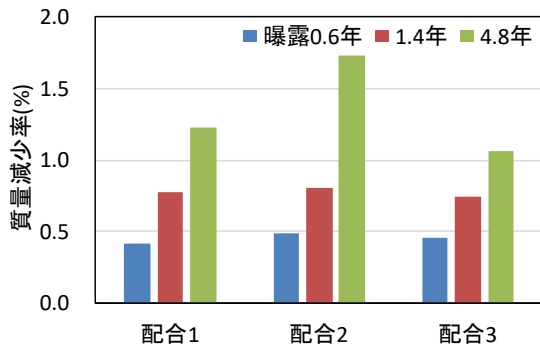


図-8 鉄筋腐食面積率測定結果
(飛沫帯, 普通鉄筋, ひび割れあり)

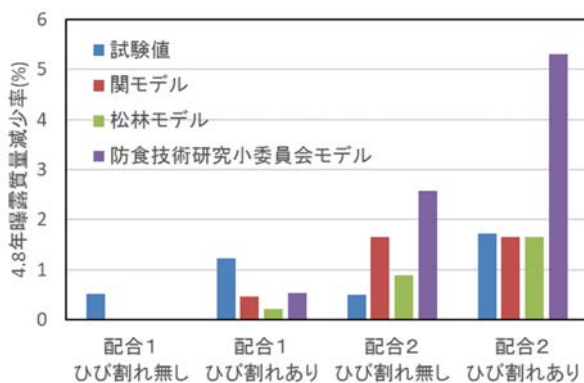


図-9 鉄筋腐食質量減少率の試験値とモデル推定値の比較 (飛沫帯, 4.8年)

を使用しても鉄筋の腐食を防止できるものと考えられる。

配合1と2の普通鉄筋供試体の飛沫帯での腐食質量減少率の試験値と関⁶⁾、松林⁷⁾、防食技術研究小委員会⁷⁾の3モデルの推定値との比較を図-12に示す。関モデルは酸素の拡散速度から腐食速度を理論的にモデル化したものであり、松林モデルは水セメント比、塩化物イオン量、鉄筋かぶりをパラメータにした実験式であり、防食技術研究小委員会モデルは塩化物イオン濃度、温度をパラメータにした実験式である。配合2はフライアッシュも考慮して、水結合材比を49%とした。配合1ではいずれのモデルも試験値よりも小さい値であったが、配合2では松林モデルが比較的適合していた。

3.5 塩化物量試験結果

飛沫帯で1.4年、4.8年曝露した供試体の塩化物イオン濃度分布測定結果を図-10、11に示す。

塩化物イオン濃度試験結果より塩化物イオン濃度拡散係数と表面塩化物イオン濃度を拡散解析により求めた。解析結果を表-6に示す。配合1の拡散係数に比べて、配合2は約62~37%、配合3は38~27%となり、曝露期間が長いほど拡散係数は小さくなった。この様に海水、フライアッシュの使用により拡散係数は減少し、さらに、

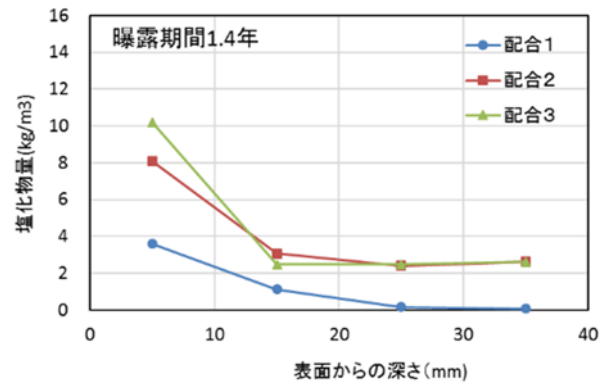


図-10 塩化物量試験結果 (曝露 1.4年)

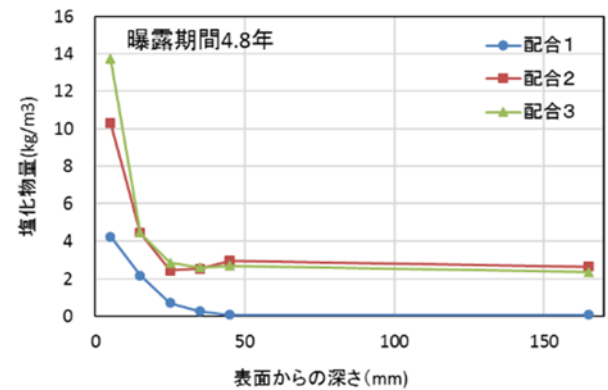


図-11 塩化物量試験結果 (曝露 4.8年)

表-6 塩化物量拡散解析結果

期間 (年)	配合	表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)	拡散係数 (cm²/年)	初期塩化物イオン濃度 (kg/m³)
1.4	1	6.0	0.40	0.0
	2	9.8	0.25	2.5
	3	16.5	0.15	2.5
4.8	1	5.6	0.30	0.0
	2	12.0	0.11	2.6
	3	19.5	0.08	2.6

特殊混和剤の使用により減少することから、組織が緻密化されていることがわかった。なお、土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾から求めた拡散係数は0.210 (BB, W/C53.8%)であり、これに比べても海水・フライアッシュを使用したコンクリートの拡散係数は小さくなった。また、海水を使用した配合2、3の鉄筋かぶり深さ(23.5mm)での塩化物量は2.1~2.3kg/m³と高いにも関わらず、ひび割れなしの供試体の鉄筋の腐食は軽微であった。

3.6 中性化試験結果

中性化深さ測定結果と試験結果から求めた中性化速度係数を表-7に示す。配合1の中性化速度係数に比べて、配合2は同等であったが、配合3は60%となった。この様に、海水、フライアッシュを使用しても中性化速度は

表-7 中性化深さ測定結果と中性化速度係数
(飛沫帯, 中性化期間 4.95 年)

配合	中性化深さ(mm)	中性化速度係数 (mm/√年)
1	2.2	0.99
2	2.2	0.99
3	1.4	0.63

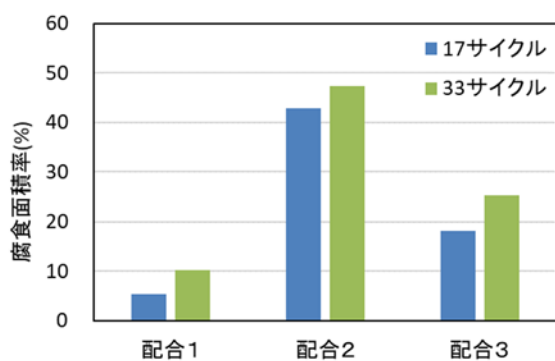


図-12 鉄筋腐食促進腐食試験結果 (普通鉄筋)

真水練りと同等であり、特殊混和剤の使用により中性化速度は減少することがわかった。なお、土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾から求めた中性化速度係数は2.0mm/√年となり、いずれの配合の中性化速度係数もこれより小さくなった。

3.7 鉄筋腐食促進試験結果

腐食促進試験結果のうち、普通鉄筋の結果を図-12に示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋は全く腐食が生じなかった。真水を使用した配合1の腐食面積率に比べて、海水・フライアッシュを使用した配合2では8.1~4.6倍、特殊混和剤を使用した配合3では3.4~2.5倍であった。17サイクルに比べて、33サイクルの方が配合間の差は小さくなる傾向にあった。

促進試験でもエポキシ樹脂塗装鉄筋の防食効果、海水用特殊混和剤による腐食抑制効果が確認できた。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 海水を使用し、フライアッシュを細骨材置換して使用したコンクリートでは長期材齢でも強度は緩やかに増加し、真水練りコンクリートよりも強度は高くなる。
- (2) 海水を使用してもひび割れがなければ、海水飛沫帯でも鉄筋腐食は軽微である。
- (3) 海水用特殊混和剤を使用することで、海水を使用し、ひび割れが入っていても、鉄筋腐食の進行を遅らせることができる。

- (4) 海中では海水を使用したコンクリートでも鉄筋腐食はほとんど進行しない。
- (5) 海水を使用してもエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用することで、コンクリートのひび割れや樹脂塗装にキズがある状態でも、鉄筋腐食を防ぐことができる。
- (6) 海水とフライアッシュ、海水用特殊混和剤の使用により、コンクリートが緻密化されて塩化物や二酸化炭素の侵入が抑制できる。

なお、本研究の遂行に当たり、港湾空港技術研究所山路徹様、東京電力常陸那珂火力発電所の皆様には長期に渡り多大なるご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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、日本コンクリート工学会、pp.93-103、2014.9
- 2) 竹田宣典、石関嘉一、青木茂、入矢桂史郎：海水および海砂を使用したコンクリート（人工岩塩層）の開発、コンクリート工学、Vol.49、No.12、pp.17-22、2011.12
- 3) 新村 亮 竹田宣典：海水を利用した高耐久コンクリートの開発と今後の展望、機能材料、第36巻、第3号、pp.59-68、2016.3
- 4) 谷田部勝博、新村亮、石関嘉市：海水・海砂、フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現性状、土木学会第67回年次学術講演会、pp.V-427-428、2012.9
- 5) 武若耕司、小林一輔：オートグレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.161-164、1981
- 6) 関博、松井邦人、松島学、金子雄一、田畑裕：コンクリート構造の寿命予測に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.569-574、1990.7
- 7) コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）成果報告書（その2）、土木学会、コンクリート技術シリーズ、No.99、pp.17、2009.10
- 8) コンクリート標準示方書〔設計編〕、土木学会、pp.153-164、2018.3