

論文 海洋環境下におけるシリカフェームコンクリートの力学的特性、塩分浸透及び鉄筋腐食に関する実験的研究

中村 裕^{*1}・小林 忠司^{*2}・米田 正彦^{*3}・前田 直己^{*4}

要旨：蒸気養生を施したシリカフェームコンクリートを海洋環境下に10年間暴露し、コンクリートの曲げ強度、圧縮強度、動弾性係数、塩化物浸透深さ、中性化深さ及び鉄筋腐食状況に関して調査した。その結果、シリカフェームを混和することは塩化物イオンの浸透の抑制に有効ではあるが、鉄筋腐食の抑制に関しては水セメント比の影響を受けること、また水セメント比を小さくすることは塩化物イオンの浸透や鉄筋腐食の抑制に有効であること等が実験的に明らかになった。

キーワード：海洋環境、シリカフェームコンクリート、力学的特性、塩分浸透、鉄筋腐食

1. はじめに

海岸付近の環境下では、飛来する塩分による鉄筋コンクリート構造物の劣化が問題となっている。例えば日本海沿岸を通る国道7号線沿いの鉄筋コンクリート橋は塩害により建設後約30年程で橋の架け替えが余儀なくされ、現在塩害に対して高い抵抗性を備える鉄筋コンクリート橋の建設が進められている¹⁾。

コンクリートの塩分浸透を抑制する目的として JASS 5やコンクリート標準示方書では、水セメント比の最大値を定めている。またシリカフェームを混和することでシリカフェームのマイクロファイラー効果やポゾラン反応による内部構造の緻密化が塩分浸透を抑制する効果があるとの報告がある^{2),3)}。しかしながら、シリカフェームの混和に関しては水酸化カルシウムの消費によるアルカリの低減やそれに起因する塩化物イオンの固定能力の低減、さらにはプラスチックひび割れの生じやすさ等の理由から鉄筋腐食に対する抵抗性に懸念が持たれている⁴⁾。加えて海洋環境下におけるシリ

カフェームコンクリートの長期暴露性状に関する報告もあまり多くない。

本研究では水セメント比とシリカフェーム混和率を変えたコンクリートの海洋暴露試験を行い、それらの力学的特性や塩化物浸透に関する経時変化を実験的に把握すると共に鉄筋腐食に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

使用した材料は以下の通りである。普通ポルトランドセメント(比重:3.16)、岩手県米里産安山岩砕砂(比重2.78, 粒径:5mm以下)、岩手県米里産安山岩砕石(比重2.80, 粒径:5~15mm)、ノルウェー産シリカフェーム(比重:2.20, 比表面積:15~20m²/g)、ナフタレン系高性能減水剤(品名:マイティー150, 固形分:42%, 比重:1.21)。尚、シリカフェームの化学組成を表-1に示す。

*1 (株)前田先端技術研究所MKプロジェクトチーム副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 前田製管(株)営業推進部次長 工博(正会員)

*3 (株)前田先端技術研究所MKプロジェクトチーム主席研究員

*4 前田製管(株)代表取締役社長

2.2 コンクリートの配合

水セメント比が30%及び50%の2水準、シリカフューム混和率が0%、10%及び20%の3水準、合計6水準の供試体を作製した。配合を表-2に示す。尚、表中の水セメント比は、減水剤の水量を含めて求めている。

2.3 供試体の作製及び養生

容量50リットルの強制練りミキサーを用いて空練り1分、本練り4分（普通コンクリートの本練りは3分）とし、10x10x40cmの鋼製型枠に打設した。そして、1日湿空（20℃、80%R.H.）養生後、蒸気養生（昇温速度20℃/h、80℃-3h保持）を行った。ただし、シリカフューム無混和のコンクリートでは、蒸気養生の保持条件を65℃-4hとした。その後、屋内に静置し材齢5週~6週目に各種試験を実施すると共に暴露所定地に供試体を設置した。また、各シリーズにつき2本の供試体を作製した。

2.4 供試体の設置状況

山形県酒田市酒田北港内の防波堤に設置したスリット状のコンクリートボックス内に供試体を縦置きに固定した（図-1参照）。

2.5 試験時期

暴露を開始してから1、3及び10年目に供試体を引き上げ、供試体表面についた貝や藻を取り除き、約2週間屋内で乾燥させた後、次項に示す試

験を行った。ただし、暴露10年目の試験に関しては、海上から引き上げてから室内に1年半放置した後に行った。

2.6 試験項目

(1)外観観察

供試体の表面性状及びひび割れの有無等を目視により観察した。

(2)動弾性係数

JIS A 1127に準じて、たわみ振動による動弾性係数の測定を行った。

(3)曲げ強度

JIS A 1106に準じて行った。

(4)圧縮強度

曲げ試験後の折片を用いJIS A 1114に準じて行った。

(5)塩化物イオン浸透深さ

イタリア規格「UNI 7928」に準じて曲げ試験後の破断面に0.1%フルオレッセインナトリウム水溶液噴霧後、0.1N硝酸銀水溶液を噴霧した。そして白変した部分を1辺当たり2箇所、計8箇所測定し、それらの平均値を塩化物イオンの浸透深さとした。尚、この方法における変色境界域での可溶性塩化物イオン量は、セメント重量当たり0.15%程度とされる⁵⁾。

(6)中性化深さ

曲げ試験後の破断面にフェノールフタレイン

表-1 シリカフュームの化学組成(%)

SiO ₂	C	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃
90.3	1.29	2.33	1.17	0.40	1.84	1.99	0.52

表-2 配合

配合名	設計 空気量 (%)	設計 スランブ (cm)	W/C (%)	SF/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
						W	C	SF	S	G		SP
										5-10	10-15	
30-0	2.0	10±2.5	30	0	45	144	500	0	836	515	515	11.1
30-10				10		131	465	46.5				15.4
30-20				20		119	433	86.6				19.6
50-0			50	0		190	381	0				1.22
50-10				10		176	360	36.6				6.72
50-20				20		165	341	68.2				9.89

1%アルコール溶液を噴霧し、呈色反応を示さない無色の部分の深さを、塩化物イオンの浸透深さを測定した方法と同様な方法で測定し、それらの平均値を中性化深さとした。

(7)鉄筋の腐食状況及び腐食面積率

図-2に示すように10x10x40cmの角柱供試体の内部にかぶり厚さが15mm及び30mmとなるよう直径9mmの丸鋼を設置した（以下、これをRC供試体と記す）。そして暴露10年経過後かぶり側のコンクリートを取り除いて鉄筋の腐食状況を撮影し、鉄筋腐食面積率を求めた。鉄筋腐食面積率はエポキシ樹脂が塗布されていない鉄筋の投影面積に対する錆の投影面積の割合として求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 供試体の外観観察

暴露3年目において水セメント比50%の供試体上面にペースト部の浸食が認められた。特にシリカフューム無混和の場合にそれが顕著であった。一方、水セメント比30%においてはペーストの浸食は認められなかったものの表面に亀甲状の微細なひび割れが認められた。暴露10年目では水セメント比30%においてもペースト部の浸食が認められたが、水セメント比やシリカフューム混和率の違いによる浸食の程度の差は認められなかった。また、供試体表面には確認できるひび割れや欠損は見られなかった。

RC供試体の暴露10年目においては、鉄筋を固定するためのプラスチック製スペーサーの先端が供試体表面に現れており、そこを起点として発生したと思われるひび割れが確認された。また、供試体表面にはそのひび割れの内部から染みだしたと思われる錆び汁が付着していた。この傾向は水セメント比50%で顕著であった。

3.2 動弾性係数

暴露材齢と動弾性係数との関係を図-3に示す。水セメント比及びシリカフューム混和率に拘わらず、材齢に伴って動弾性係数は漸増する傾向を示す。しかし、水セメント比50%については水セメント比30%に比べて暴露3年目以降の伸びは

表-3 各材齢における試験項目

試験項目	暴露前 (材齢5週~6週)	暴露期間		
		1年	3年	10年
外観観察	○	○	○	○
動弾性係数	○	○	○	○
曲げ強度	○	○	○	○
圧縮強度	○	○	○	○
塩化物浸透深さ	-	○	○	○
中性化深さ	-	-	-	○
鉄筋腐食状況及び腐食面積率	-	-	-	○

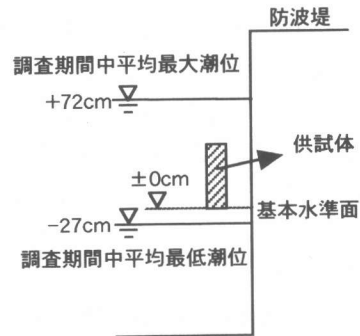


図-1 供試体の設置状況

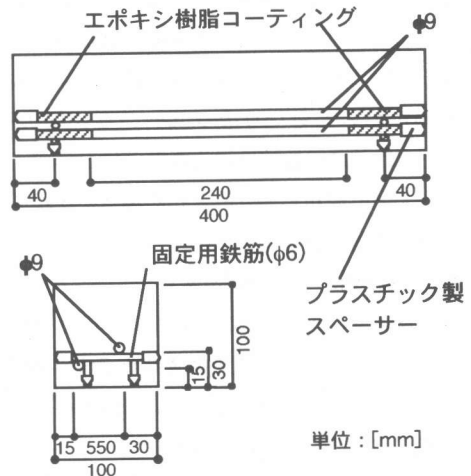


図-2 RC供試体の配筋図

小さい。またいずれの水セメント比においてもシリカフューム無混和のものは材齢に伴う増加割合が大きく、暴露1年目以降でシリカフュームを混和したものよりも高い値を示す。また、暴露3年

目に水セメント比30%の一部の供試体表面に微細なひび割れが確認されたものの動弾性係数の低下が見られないことからコンクリート内部での損傷は少ないものと推察される。

3.3 曲げ強度

暴露材齢と曲げ強度との関係を図-4に示す。水セメント比30%ではいずれの暴露材齢においてもシリカフュームを混和したものの方が混和しないものよりも高い曲げ強度を示す傾向にある。一方水セメント比50%では、暴露材齢1年及び3年目ではシリカフューム無混和のものの方が高い曲げ強度を示す傾向にあるが、暴露10年目ではシリカフューム混和率を20%とした場合に高い曲げ強度を示した。尚、暴露1年及び3年目に曲げ強度が暴露前よりも低下したことは、供試体表面の微細ひび割れの存在や試験時の含水率等が影響していると考えられる。

3.4 圧縮強度

暴露材齢と圧縮強度との関係を図-5に示す。水セメント比30%では暴露1年目まではシリカフューム混和率の増大に伴って圧縮強度が増加する傾向を示したが、暴露3年目以降においてはシリカフューム混和率の違いが圧縮強度に与える影響は小さい。水セメント比50%では、いずれの暴露材齢においてもシリカフューム混和率0%と10%とではその圧縮強度に大きな差はないが、シリカフューム混和率を20%とした場合に圧縮強度を増大させる効果が高い。

3.5 塩化物イオンの浸透深さ

暴露材齢と塩化物イオンの浸透深さとの関係を図-6に示す。ただし、変色境界域での可溶性塩化物イオン濃度は大凡 $0.51\sim 0.75\text{kg/m}^3$ と予想される。水セメント比50%の場合は、シリカフューム混和率0%及び10%のものは暴露10年目において全断面に塩化物イオンが浸透している。それと比較して水セメント比30%のものは塩化物イオンの浸透深さは小さい。またいずれの水セメント比の場合にもシリカフューム混和率の増大に伴って塩化物イオンの浸透深さは小さくなる傾向を示す。特に水セメント比50%の場合には、シリカ

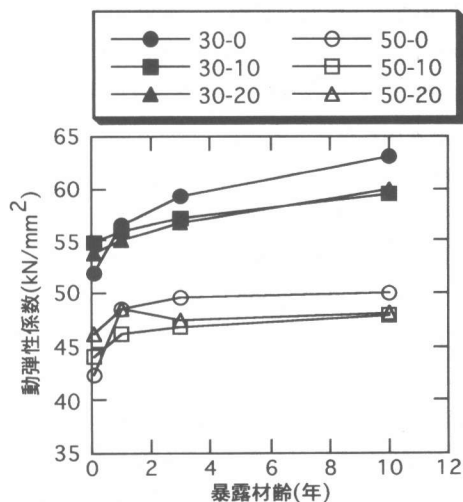


図-3 暴露材齢と動弾性係数との関係

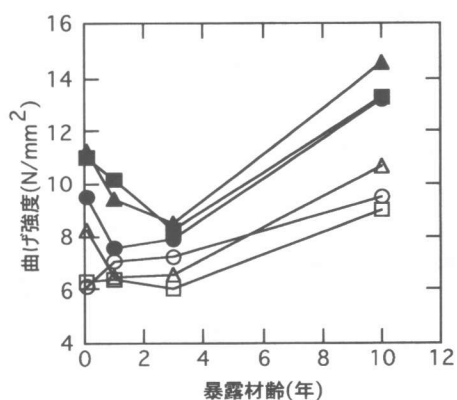


図-4 暴露材齢と曲げ強度との関係

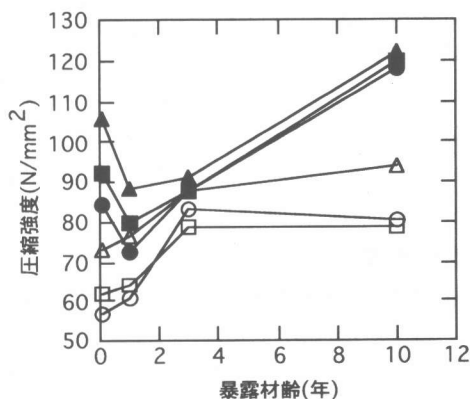


図-5 暴露材齢と圧縮強度との関係

フュームの混和率を20%とすると塩化物イオンの浸透を大きく抑制することが認められた。

3.6 中性化

水セメント比30%におけるシリカフューム混和率0%及び10%では中性化は見られなかったもののシリカフューム混和率20%では最大で1mm程度の中性化深さが認められた。一方、水セメント比50%では、いずれのシリカフューム混和率において最大2mm程度の中性化深さが認められた。以上から中性化深さはかぶり厚さに比べて極めて小さいため、中性化が鉄筋の腐食に与える影響は少ないものと考えられる。

3.7 鉄筋の腐食状況及び腐食面積率

鉄筋の腐食状況を図-7に、腐食面積率を図-8に示す。本実験では3.1に記述したようにRC供試体の両端付近には0.3mmを越えるひび割れが発生しているものもあり、特に水セメント比50%でその傾向が顕著であった。これはプラスチック製スパーサーとコンクリートとの付着切れやその周囲でのコンクリートの収縮等の原因で微細なひび割れが発生し、そこから塩化物イオンの浸透・拡散が促進されたためと考えられる。そして鉄筋とコンクリートとの界面に形成される多孔質な遷移帯を塩化物イオンが浸透し、その結果鉄筋の両端から腐食が進行したものと推察される。また鉄筋端部にはエポキシ樹脂を塗布したものの、固定用鉄筋も含めて腐食がかなり進行しているのが認められた。

水セメント比30%のかぶり厚さ15mmにおける腐食面積率は、シリカフューム混和率10%で最大となった。また、シリカフューム無混和のものとしてシリカフューム混和率20%のものとの間にも明確な差はみられないことから、低水セメント比ではシリカフュームの混和が鉄筋腐食の抑制に与える影響は少ないものと考えられる。一方、水セメント比50%では、かぶり厚さに拘わらずシリカフューム混和率の増大に伴い鉄筋の腐食面積率が小さくなっていることが分かる。これはシリカフュームを混和することによって鉄筋とコンクリートとの界面特性が改善されたためと考えられる。

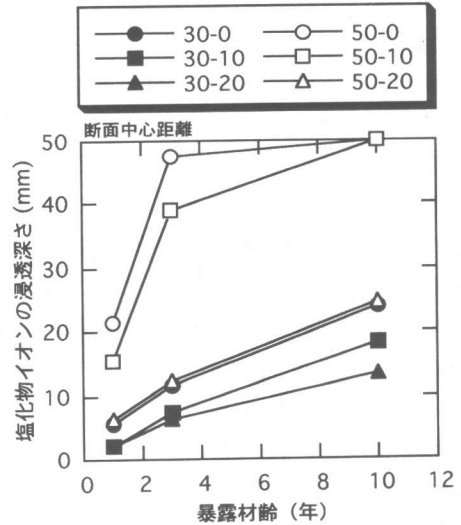


図-6 暴露材齢と塩化物イオンの浸透深さとの関係

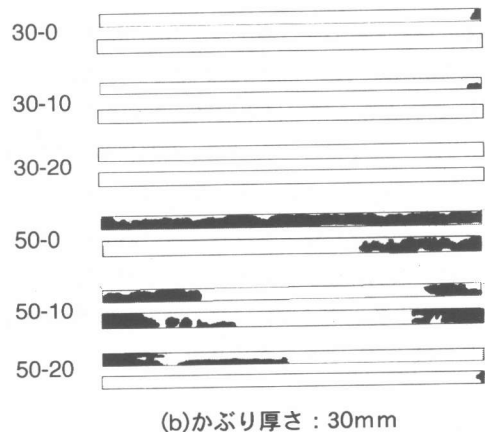
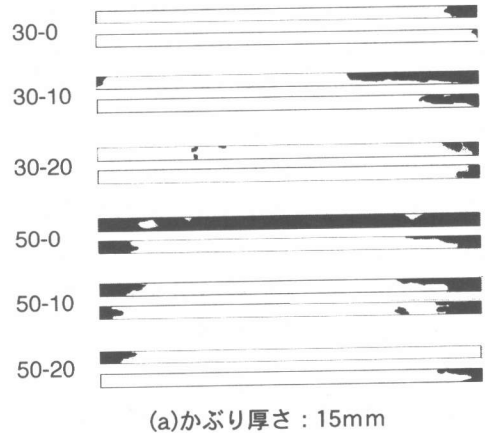


図-7 鉄筋の腐食状況

4. まとめ

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 暴露10年目において水セメント比及びシリカフューム混和率に拘わらず、供試体上部にペーストの浸食が認められた。また、鉄筋を内部に設置した供試体にはスペーサーを起点とするひび割れとそこから染み出た錆び汁が認められた。
- (2) 動弾性係数は水セメント比やシリカフューム混和率に拘わらず暴露材齢の経過に伴い増加する傾向を示した。しかし、水セメント比50%では暴露3年目以降の伸びが小さい。
- (3) 曲げ強度に関して、水セメント比30%では暴露材齢に拘わらずシリカフュームを混入したものの方が高い曲げ強度を示した。水セメント比50%ではシリカフューム混和率が曲げ強度に与える影響は暴露材齢によって異なる。
- (4) 圧縮強度に関して、水セメント比30%では暴露3年目以降においてシリカフューム混和率の違いが圧縮強度に与える影響は小さい。水セメント比50%では、暴露材齢に拘わらずシリカフューム混和率を20%とした場合に高い圧縮強度を示す。
- (5) 塩化物イオンの浸透深さは、水セメント比に拘わらずシリカフューム混和率の増大に伴って小さくなった。また、水セメント比を30%とすることは塩化物イオンの浸透深さを小さくする上で有効である。
- (6) 暴露10年目における中性化深さは水セメント比30%では殆ど認められなかった。水セメント比50%ではいずれのシリカフューム混和率において最大2mm程度の中性化深さが認められた。
- (7) 鉄筋の腐食面積率は水セメント比が低い方が小さいこと、またシリカフューム混和率の影響は水セメント比の大きさによって異なり、水セメント比50%の場合には、シリカフューム混和率の増大に伴い鉄筋の腐食面積率を低減させるものの、水セメント比30%の場合には鉄筋の腐食を抑制する効果は小さいこと等が確認できた。

謝辞

本試験を行うに当たりコンクリート暴露場所の借用

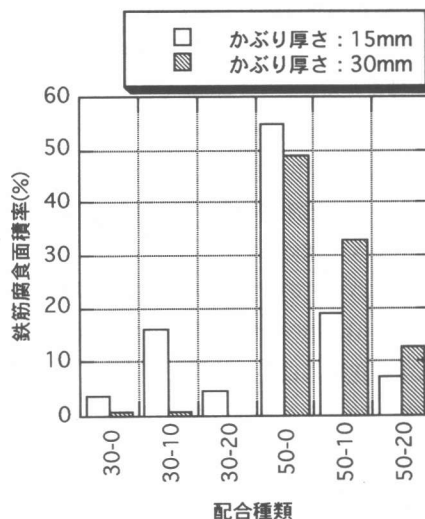


図-8 鉄筋の腐食面積率

をご許可頂くと共に御指導を賜りました東京工業大学大学院 大即信明教授並びに運輸省港湾技術研究所、(社)セメント協会及び運輸省第一港湾建設局酒田港湾工事事務所の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西川和廣, 塚田幸宏, 上坂康雄, 山本幹雄: 日本海沿岸に架けられたコンクリート橋の塩害対策, 橋梁と基礎, 2000-1, pp.29-36, 2000.
- 2) 鳥居和之, 川村満紀: 種々のポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.489-494, 1990.
- 3) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三: シリカフュームを用いたコンクリートの海洋環境下における耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.97-102, 2000.
- 4) 田中健治郎: シリカフュームを用いたコンクリートの耐久性, 「シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム 講演論文報告集, コンクリート技術シリーズ, 土木学会, pp.103-108, 1993.
- 5) 大即信明: 硝酸銀噴霧法によるセメント硬化体の塩化物イオン量の意味, 東工大 土木工学科研究報告, No.42, pp.11-18, 1990.