

低アルカリコンクリートの鉄筋腐食ひび割れの予測に関する研究

竹田 宣典 入矢 桂史郎 人見 尚
小西 一寛 栗原 雄二
(本社 原子力本部)

Prediction of Crack due to Corrosion of Reinforcing Bar in Low Alkali Concrete

Nobufumi Takeda Keishiro Iriya Takashi Hitomi
Kazuhiro Konishi Yuji Kurihara

Abstract

Steel-reinforced low alkaline concrete containing pozzolan has been examined for application in high level radioactive waste disposal. Marine exposure examinations a period of six years were performed for concrete with 30% water-cement ratio, and the reduction in its compressive strength, the intrusion depth of chloride ions, and the corrosion of the reinforcing bar were investigated. On the basis of these results, the progress of corrosion of the reinforcing bar and the outbreak time of a corrosion crack in the reinforcing bar were predicted. The following results are obtained. 1) There was no decrease in the compressive strength of the test pieces during the marine exposure examinations. 2) There was little penetration of the chloride ions in comparison with ordinary Portland cement. 3) Although the corrosion of the reinforcing bar commenced at an early stage with a little quantity of chloride ion intrusion, the progress over the period of six years was extremely small. 4) The corrosion rate of the reinforcing bar in groundwater including sea water was estimated as 0.30~0.55 mg/(cm²·year). In the case of a reinforcing bar with a thickness of 100 mm and diameter of 22 mm, the outbreak time of the reinforcing corrosion crack was predicted as 50~100 years after construction.

概 要

高レベル放射性廃棄物処分場に適用が検討されているポズランを多く含む低アルカリ性セメントを用いた鉄筋コンクリートの適用性を評価することを目的として、水セメント比30%のコンクリートについて、6年間の海洋暴露試験を行い、圧縮強度、塩化物イオン侵入、鉄筋腐食などの経時変化を調査した。また、これらの結果に基づき、海水起源の地下水を有する環境下で、鉄筋腐食の進行および腐食ひび割れ発生時期の予測を行った。その結果、下記のことが明らかになった。1) 6年間の海洋環境下における圧縮強度の低下はない。2) 塩化物イオンの侵入量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて少ない。3) 鉄筋腐食は塩化物イオンの侵入がなくても開始するが、暴露6年までの進行は遅い。4) 海水起源の地下水中における低アルカリ性セメントを用いたコンクリート中の鉄筋の腐食速度は0.30~0.55mg/(cm²・年)程度と予測され、かぶり100mm、鉄筋径22mmとした鉄筋コンクリート構造物に用いる場合、50~100年後に鉄筋腐食に起因したひび割れが発生すると予測される。

1. はじめに

放射性廃棄物を地下深部に処分する施設の建設が検討されているが、処分対象の放射性廃棄物の評価期間は10万年程度にも及ぶことから、この期間内に施設内に放射性廃棄物を封じ込めることが求められている。

放射性廃棄物を封じ込め、生物圏から隔離する方策については、天然の岩盤で構成される「天然バリア」とセメント系材料やベントナイトなどで構成される「人工バリア」からなる多重バリアシステム構想が検討されている。人工バリアに用いられる材料としては、施設の操業時に必要な力学的特性と核種移行の遮断性を有するセメント系材料と、高い膨潤性と外力作用時における優れた自己変形性能を有するベントナイトからなる複合バリア

が検討されている¹⁾。

しかし、このベントナイトとセメント系材料が接触して構築される場合、セメント系材料中のアルカリ成分に起因して浸出する高pH水の影響により、長期的に、ベントナイトが変質し、優れた自己変形性能が失われることや、岩盤構成物質を溶解、変質させ、水みちなどが形成されることが懸念されている²⁾。

そこで、筆者らは、ベントナイトや周辺岩盤への影響を抑制するセメント系材料として、普通ポルトランドセメントにシリカフューム、フライアッシュなどのポズラン材料を混合を使用した低アルカリ性セメント(Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement, 以下HFSC)を開発し、その適用性について検討を行ってきた^{3)・4)}。しかし、HFSCを鉄筋コンクリート構造物へ適用する場合、

Table 1 コンクリートの配合
Mix Proportion of Concrete

配合名	W/C (%)	s / a (%)	目標 空気量 (%)	目標 フロー値 (mm)	単位量 (kg/m ³)						
					水	OPC	シリカ フェーム	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材	高性能AE 減水剤
OPC100	30	55	4.5±1.0	650±50	165	550	0	0	877	732	8.25
HFSC226	30	55			165	110	110	330	807	673	12.65

Table 2 使用材料
Propertities of Materials

材 料	品 名	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
混和材	シリカフェーム 「ELKEMマイクロシリカGRADE983U」	密度2.20 g/cm ³
	フライアッシュ 「ONODAスーパーフロー20」	密度2.38 g/cm ³
粗骨材	岩瀬産砕石 5号砕石と6号砕石を7:3に混合	表乾密度2.64 g/cm ³
細骨材	小笠産陸砂	表乾密度2.60 g/cm ³
混和剤	ポリカルボン酸高性能AE減水剤 「サンフローHS700」	

コンクリート中が低アルカリ環境であることにより、鉄筋の保護機能が低下し、腐食が早期に進行することが懸念される⁵⁾。

これまで、筆者らはHFSCの鉄筋コンクリートへの適用性を把握するために、HFSCコンクリート中の鉄筋腐食について検討してきたが⁶⁾、本研究では、鉄筋を含んだHFSCコンクリートの6年間の海洋暴露試験を行い、圧縮強度、塩化物イオンの侵入、鉄筋腐食の経時変化を調査した。また、これら結果に基づき、海水起源の地下水環境における鉄筋腐食の進行および腐食ひび割れの発生時期の予測解析を行った。比較のため、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートについても、暴露試験および予測解析を行った。

2. 海洋暴露試験方法

2.1 使用材料および配合

海洋暴露試験を行ったコンクリートの配合をTable 1に示す。コンクリートは、セメントとしてHFSCと普通ポルトランドセメント(OPC)を用いたものの2種類とした。いずれも、水セメント比を30%とし、高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートとした。スランプフローは650±50mmとした。

使用材料をTable 2に示す。HFSCは、OPC、シリカフェーム(SF)、フライアッシュ(FA)の混合比を20%、20%:60%としたセメントを用いた。本報告では、OPCを用いたコンクリートをOPC100、HFSCを用いたコンクリートをHFSC226と記述する。

2.2 供試体

鉄筋の腐食測定用の供試体は、Fig.1に示すように、鉄筋を含む円柱状コンクリートとし、直径100mm、高さ200mmの円柱型枠中に、直径13mmのみがき鉄筋をかぶり

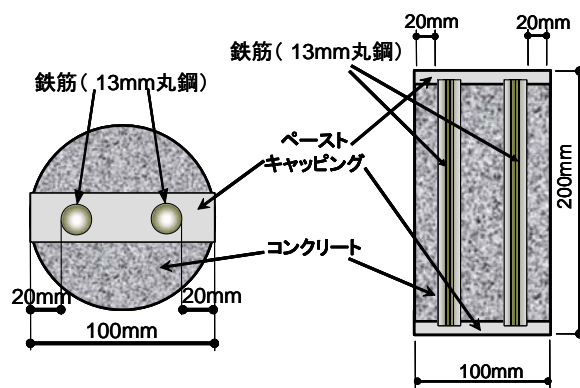


Fig.1 鉄筋コンクリート供試体の形状・寸法
Shape and Size of Reinforced Concrete Specimens

20mmの位置に設置したものとした。供試体上下部のスペーサを除去した後、水セメント比30%以下のペーストにより、鉄筋端部のキャッピングを行った。圧縮強度試験用供試体は、直径100mm、高さ200mmの円柱状とした。塩分浸透試験用供試体は、直径150mm、高さ150mmの円柱状とし、塩化物イオンが1方向から侵入するように、側面と底面をエポキシ樹脂により塗装した。

OPC100は、水中養生(20℃)を行い、HFSC226は、ポズラン反応を促進させ、水酸化カルシウムとシリケート水和物への水和を促すために、60℃の温水養生を7日間行った後、水中養生を行った。各供試体を材齢91日まで水中養生した後、海洋暴露試験を開始した。

2.3 暴露環境条件

暴露試験場の環境条件をTable 3に示す。暴露試験場は、静岡県清水港沖の防波堤(海岸線より約500m)とし、環境区分は潮の干満作用を受ける「飛沫帯」と水深11mの「海中」とした。

2.4 測定項目および測定方法

測定項目および測定方法を Table 4 に示す。暴露後 1 年, 3 年, 6 年経過した時点において, 供試体を回収し, 圧縮強度, 塩化物イオンの侵入量, コンクリート中のカルシウム (Ca) と塩化物イオン (Cl⁻) の分布およびコンクリート中の鉄筋の腐食について測定を行った。圧縮強度供試体は, 塩分の侵入速度が速いと想定される「飛沫帯」のみに暴露した。深さ 20mm 毎に試料を採取し⁷⁾, 塩化物イオン量は電位差滴定法により測定し, コンクリート中の Ca と Cl⁻ の分布は EPMA により測定した。

また, 塩化物イオンの侵入量分布より, Fick の拡散方程式の解 (式(1)) に表面塩化物イオン量 (C₀) と見掛けの拡散係数 (D_c) を最小二乗法フィッティングすることにより求めた。

$$C = C_o \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{B}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

- C : 任意の塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- C₀ : 表面での塩化物イオン濃度 (kg/m³)
- D_c : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/s)
- t : 時刻 (s), B : 表面からの距離 (cm), erf : 誤差関数

3. 海洋暴露試験結果

3.1 圧縮強度

6 年間の暴露後の圧縮強度の経時変化を Fig. 2 に示す。OPC100, HFSC226 の圧縮強度は, 暴露後 6 年間においても緩やかに増加している。暴露 3 年後から暴露 6 年後までの圧縮強度の増加率は OPC で 5.7%, HFSC226 で 6.7% であり, HFSC226 の海洋環境下における長期的な強度の増進は OPC と大差ないと考えられる。

3.2 塩化物イオン侵入量

暴露6年後までの塩化物イオン侵入量の分布の変化を Fig. 3 に示す。OPC100は暴露期間に伴い, 表面部分の塩化物イオン量は増加し, 塩化物イオンが拡散により侵入していることが認められるが, HFSC226は暴露期間の経過に伴い塩化物イオン量の増加する傾向は見られなかった。また, 暴露6年後における塩化物イオン侵入量の分布を Fig. 4 に示す。深さ3cmまでのHFSC226の塩化物イオン侵入量は, 海中, 飛沫帯いずれにおいても, OPCに比べて, かなり少ない。

これらのことより, HFSCを用いたコンクリートは, 塩化物イオンの侵入過程において, Caの溶脱が起きている可能性や, OPCを用いたコンクリートとは塩化物イオンの固定化能力に差異がある可能性などが考えられる。

暴露6年後の試料における塩化物イオン侵入量の分布より求めた表面塩化物イオン量 (C₀) と見掛けの拡散係数 (D_c) をTable 5に示す。HFSC226のC₀は, OPC100の10

Table 3 暴露環境条件
Environmental Condition at Exposure Position

区分	環境条件	
海中	年平均気温 : 16°C	堤内側 水深約11m
飛沫帯	年間降水量 : 2360mm	堤内側 L.W.L (Low Water Level) と H.W.L (High Water Level) の間

Table 4 測定項目および測定方法
Measurement Items and Methods

測定項目	測定方法	
圧縮強度	JIS A 1108	
全塩化物イオン含有量	JCI-SC5「塩分の簡易分析方法 (電位差滴定法)」	
鉄筋腐食面積率	測定範囲 : 中央部100mm	JCI-SC「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)」
鉄筋腐食減量	測定範囲 :	(案)
含有元素の分布	EPMA (日本電子社製マイクロアナライザー) を用いたCl, CaOの面分析	

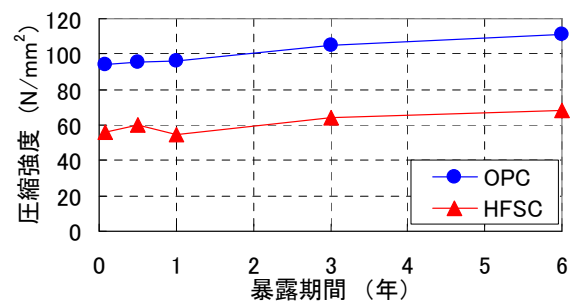


Fig.2 圧縮強度の経時変化
Changes in Compressive Strength over Time

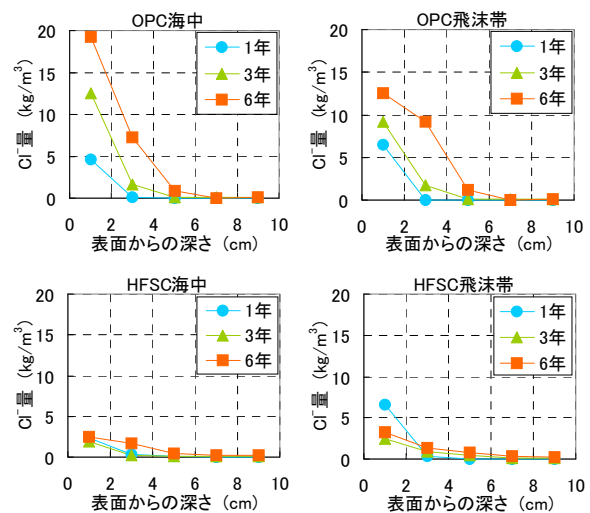


Fig. 3 塩化物イオン侵入量分布の変化
Changes in Chloride Ion Content Distribution over Time

～25%程度であり、HFSC226のDcは、海中においてはOPC100の2倍程度、飛沫帯ではほぼ同等であった。

3.3 鉄筋腐食

鉄筋の腐食面積率の経時変化を Fig. 5 に、腐食減量率の変化を Fig. 6 に示す。OPC100 では、腐食面積率および腐食減量率ともに極めて少ない。一方、HFSC226 では暴露1年後より腐食が認められ、暴露6年で海中および飛沫帯ともに20%を超える腐食面積率となったが、腐食減量率は0.4%程度で極めて小さかった。また、Fig. 6 より、HFSC226 中の鉄筋の腐食減量率は、暴露1年以降6年後までの増加は少なく、腐食の進行は極めて遅いことが認められた。HFSC226 中の鉄筋の腐食の形態は、孔食は認められず、表層部のみの錆であった。

塩化物イオンの侵入量から、OPC100 は暴露6年において、鉄筋近傍の塩化物イオン量が 0.9～1.2kg/m³ 程度となっても腐食は発生していないが、HFSC226 はコンクリートの pH が低いいため、塩化物イオンがほとんど侵入していない時期から、鉄筋腐食が開始すると考えられる。また、HFSC226 の暴露1年以降における腐食の進行が極めて遅い理由として、W/C が30%と低く、腐食の進行に必要な水分と酸素の侵入が少ないためと推察される。

3.4 カルシウムおよび塩化物イオンの分布

コンクリート中の含有元素を測定できる電子線マイクロアナライザ (EPMA) より求めた暴露6年後の海中におけるCaOおよび塩化物イオン (Cl⁻) の分布をFig. 7に、飛沫帯におけるCaOおよびCl⁻の分布の結果をFig. 8に示す。

これらの画像分析より得られたCl⁻の深さ方向の分布をFig. 9に、CaOの深さ方向の分布をFig. 10に示す。EPMAによる観察では、暴露6年においてCa濃度が低下している深さは、海中部、飛沫帯のいずれにおいても、OPCでは表面より1～2mm程度の範囲であるが、HFSC226では表面より10～20mm程度の範囲である。Caの溶脱範囲は、OPC100では表面部のみであるが、HFSC226では深くまで認められる。

また、HFSC226 においてCl⁻が多く侵入している範囲とCaが溶脱している範囲ほぼ一致していることから、Cl⁻とCa²⁺の相互作用が影響しているものと推察される。HFSC226 では、侵入したCl⁻が水和物中のCa²⁺と反応してCaCl₂などの可溶性の生成物に変化した可能性や、水和物中のCa²⁺が溶脱した結果、Cl⁻の固定化能力が低下した可能性などが考えられる。

4. 腐食ひび割れ発生時期の予測

4.1 解析方法

4.1.1 HFSC226中の鉄筋の腐食ひび割れ 海洋暴露試験の結果より、HFSC226は、pHが低いため、塩化物イオンがほとんど侵入していない状態において鉄筋腐食が開始していることから、HFSC226の鉄筋の腐食速度は、式(2)

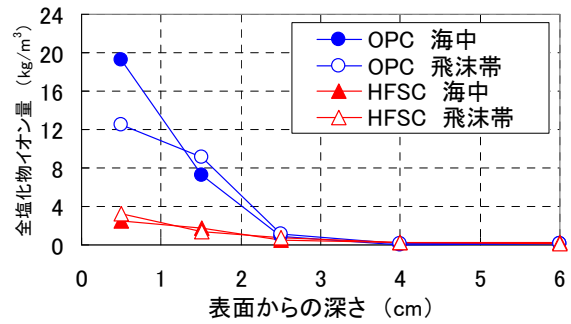


Fig.4 暴露6年後の塩化物イオン侵入量分布
Chloride Ion Penetration after 6 Years of Exposure

Table 5 表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数
Surface Chloride Ion Concentration and
Appearance Diffusion Coefficient

配合名	環境	表面塩化物イオン量 Co (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 Dc (×10 ⁻⁹ cm ² /s)
OPC100	海中	27.4	4.6
	飛沫帯	16.8	9.4
HFSC226	海中	3.2	11.0
	飛沫帯	3.9	9.0

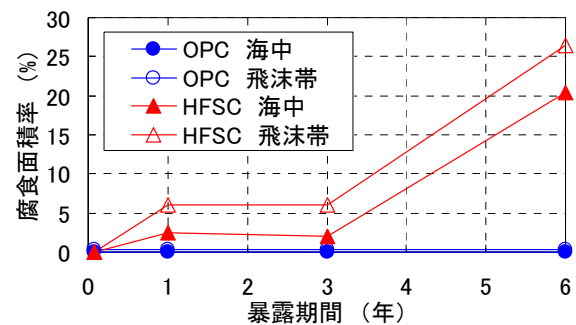


Fig.5 鉄筋腐食面積率の経時変化
Progress of Corroded Area Ratio of Steel Bar

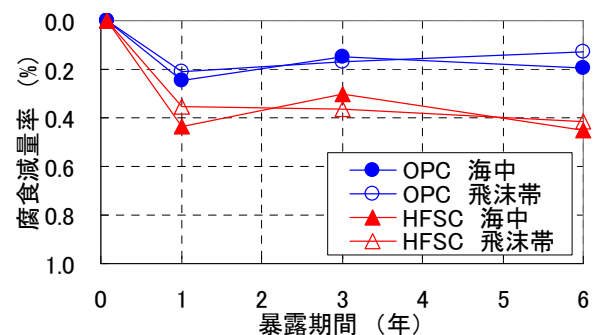


Fig.6 腐食減量率の経時変化
Progress of Mass Loss due to Steel Bar Corrosion

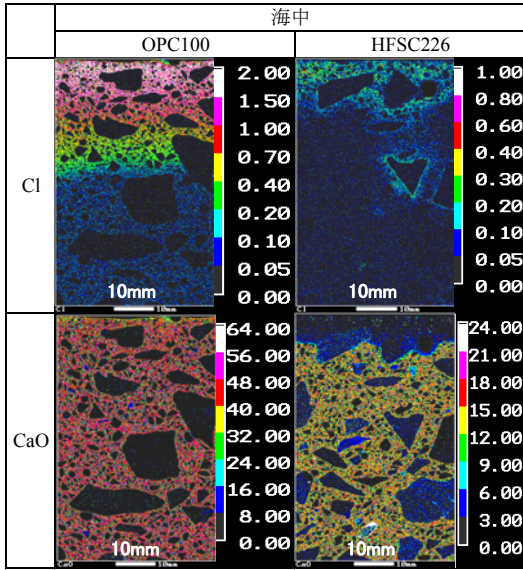


Fig.7 EPMAによるClおよびCaO分析結果 (海中)
Cl and CaO Content in EPMA (Undewater)

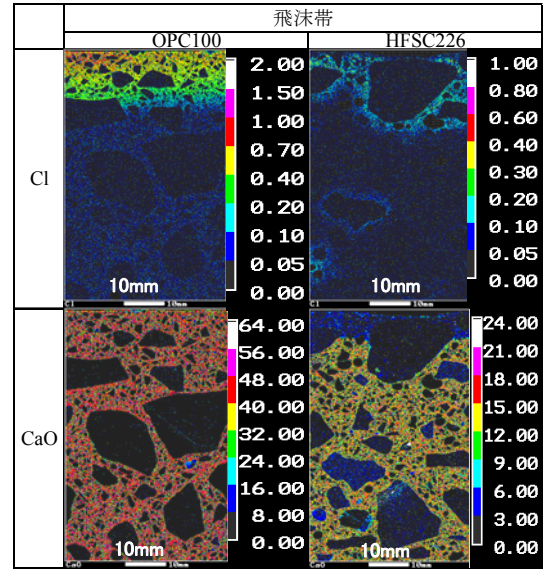


Fig.8 EPMAによるClおよびCaO分析結果 (飛沫帯)
Cl and CaO Content in EPMA (Splash Zone)

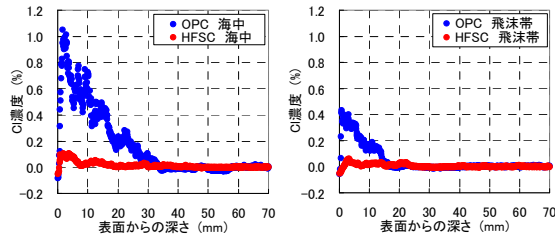


Fig.9 EPMAによるCl分布の分析結果
Distribution of Chloride Ion in EPMA

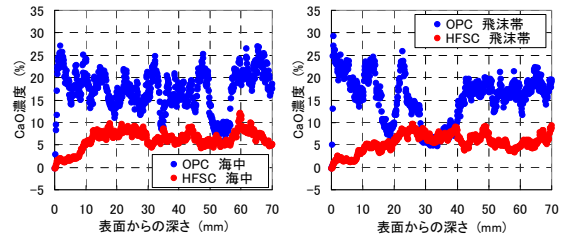


Fig.10 EPMAによるCaO分布の分析結果
Distribution of CaO in EPMA

を用い、鉄筋の腐食減量率の増加量から、1年当たりの腐食量で評価した。

HFSC226 では海中、飛沫帯のいずれにおいても、鉄筋の腐食量は暴露1年までは急速に増加するが、暴露1年以降は、その増加割合は極めて緩やかになる傾向がある。そこで、HFSC226 の腐食速度を、暴露1年までと暴露1年以降に区別して求めた。

$$R = \frac{W_r \times \Delta W}{A_r} \quad (2)$$

- R : 1年当たりの腐食量 (mg/(cm²・年))
- W_r : 長さ1cm当たりの鉄筋重量 $W_r = V_r \times \rho$ (mg)
- V_r : 長さ1cm当たりの鉄筋体積 (cm³)
- ρ : 鉄の単位体積重量 (=7.85×10³ mg/cm³)
- ΔW : 鉄筋腐食減量率の増加量 (%)
- A_r : 長さ1cm当たりの鉄筋の円周面積 (cm²)

また、鉄筋腐食によるひび割れの発生時期の予測には、ひび割れを発生させるのに必要な鉄筋腐食量を厚肉円筒理論⁸⁾により求めた。鉄筋腐食によって膨張圧が発生し、コンクリートに引張応力が発生し、コンクリートの引張強度を超える時に、腐食ひび割れが発生すると考えた。

ひび割れ発生時の鉄筋の腐食深さ (Δx) は、式(3)により計算される⁸⁾。式(4)に示すように、腐食深さに鉄の単位体積質量を乗じたものが、ひび割れ発生時の単位面積当たりの鉄筋腐食量 (W_{cr}) となり、予測される鉄筋腐食量が W_{cr} に等しくなったとき、ひび割れが発生するとした。

$$\Delta x = \frac{\alpha \times \sigma t}{E_c \times d^{1/3}} \left\{ \frac{1-(a/b)^2}{2(a/b)^2} \right\} \left\{ \frac{1+(a/b)^2}{1-(a/b)^2} + \nu c + \frac{E_c}{E_s} (1-\nu s) \right\} \quad (3)$$

- Δx : ひび割れ発生時の鉄筋の腐食深さ (m)
- a : 鉄筋半径 (m), b : 鉄筋半径+かぶり (m)
- σ t : コンクリートの引張強度 (N/mm²)
- E_c : コンクリートの弾性係数 (N/mm²)
- E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²)
- ν c : コンクリートのポアソン比
- ν s : 鉄筋のポアソン比
- α : 腐食生成物の体積膨張率

$$W_{cr} = \Delta x \times \rho \quad (4)$$

- W_{cr} : ひび割れ発生時の単位面積当たりの腐食量 (mg/cm²)
- ρ : 鉄の単位体積質量 (=7.85×10³ mg/cm³)

4.1.2 OPC中の鉄筋の腐食ひび割れ 6年間の暴露試験では、OPC100中の鉄筋に腐食は見られなかった。OPC等のpHが高いセメントを用いたコンクリートでは、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾などでは、塩化物イオン濃度が1.2 kg/m³程度になると腐食が開始するとしていることから、OPC100では鉄筋位置の塩化物イオン濃度が1.2 kg/m³となった時点から腐食が開始すると想定し、式(1)を用いて塩化物イオン侵入量を予測した。また、ひび割れ発生までの鉄筋腐食速度 (Fr) は、関らが提案した式(5)を用いて求めた¹⁰⁾。鉄筋腐食量 (R) は、式(6)に示すように腐食速度を時間積分することにより求めた。腐食ひび割れ発生に必要な筋腐食量は、HFSC226と同様に厚肉円筒理論により求めた。

$$F_r = \frac{K_r}{K_o} \cdot \frac{C}{A} \left(K \cdot D_o \cdot \frac{dS}{dx} \right) \quad (5)$$

$$R = \int_0^T F_r \cdot dt \quad (6)$$

- Fr : 鉄筋腐食速度 (kg/(m²・s))
- Kr, Ko, K : 定数
- Do : 水中の溶存酸素の拡散係数 (m²/s)
- S : 鉄筋位置での酸素濃度 (kg/m³)
- C/A : アノードとカソードの面積比 = $\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot t)$
- t : 腐食開始後の経過時間 (年)
- α, β : 係数 $\alpha=10, \beta=0.05$
- T : 経過時間 (s)
- x : 表面からの距離 (m)

4.2 解析条件

腐食ひび割れの予測解析に用いた物性値および定数をTable.6に示す。かぶりが100mmの位置に、16mm, 22mm, 29mm および 36mm の径の鉄筋があるコンクリート構造物を想定して、腐食ひび割れの発生時期を予測した。

海水起源の地下水環境における塩化物イオン濃度を7000mg/l (0.7%)とした場合¹¹⁾、OPC100の表面塩化物イオン濃度(Co)は、海中の塩化物イオン濃度(約1.8%)の約1/3であることから、Table.5に示す暴露試験から得られた値の1/3と仮定し9.1kg/m³とした。

また、見掛けの拡散係数(Dc)は、暴露試験結果の値を用いた。圧縮強度は暴露6年後の値を用い、弾性係数はNew RC提案式¹²⁾より求め、引張強度は土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾に示される式(7)を用いて計算した。

$$\text{引張強度} = (\text{圧縮強度})^{2/3} \times 0.23 \quad (7)$$

4.3 腐食ひび割れの発生時期の予測

4.3.1 塩化物イオンの侵入 鉄筋位置の塩化物イオン量の予測値をFig.11に示す。OPC100中の塩化物イオン

Table 6 解析に用いた物性値および定数
Physical Properties and Coefficients for Analysis

項目		OPC100	HFSC226
鉄筋	かぶり	100 mm	
	径	16, 22, 29, 36 mm	
	弾性係数Es	210,000 N/mm ²	
	ポアソン比vs	0.3	
コンクリート	圧縮強度	111 N/mm ²	68.3 N/mm ²
	引張強度	5.31 N/mm	3.84 N/mm ²
	弾性係数Ec	40,510 N/mm ²	31,209 N/mm ²
	ポアソン比vc	0.2	
腐食生成物の体積膨脹率α		3.2	
式(5)における定数	Kr	5.55×10 ⁻⁴ g/c	
	Ko	8.29×10 ⁻⁵ g/c	
	K	0.018	
	α	10	
	β	0.05	
水中の溶存酸素の拡散係数D0		1.5×10 ⁻⁸ m ² /s	

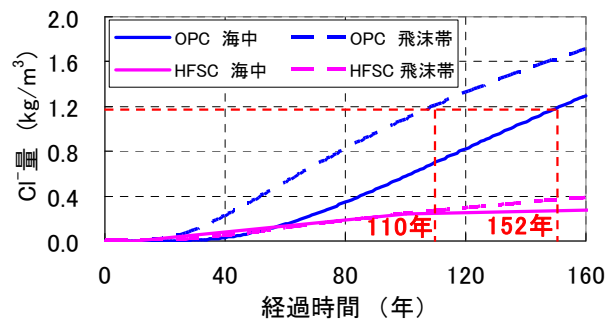


Fig.11 鉄筋位置における塩化物イオン量の予測値
Estimated Chloride Ion Content at Reinforcing Bar

ン侵入量が1.2kg/m³になるまでの年数は、見掛けの拡散係数の値として、海中暴露の値を用いた場合152年後、飛沫帯暴露の値を用いた場合110年後と予測される。

4.3.2 腐食速度 HFSC226の腐食減量率の経時変化をFig.12に示す。鋼構造物の腐食速度のように¹³⁾、暴露1年以降の1年当たりの腐食減量率の増加割合から腐食速度を求めた。HFSC226の暴露1年までと暴露1年以降における腐食速度をTable.7に示す。また、式(5)より求めたOPC100の腐食速度の経時変化をFig.13に示す。

HFSC226中の鉄筋の腐食速度は、0.30~0.55mg/(cm²・年)程度と予測される。OPC100中の鉄筋の腐食速度は、6年間で20~0.1 mg/(cm²・年)の範囲で、時間経過に伴い変化すると予測される。

4.3.3 腐食ひび割れ発生時の腐食量 厚肉円筒理論に基づき、式(6)より求めた腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量をTable.8に示す。ひび割れ発生時の鉄筋腐食量は、HFSC226のほうがOPC100に比べて若干大きく、いずれも鉄筋径が大きくなると、少ない鉄筋腐食量で腐食ひび割れが生じると予測される。

4.3.4 腐食ひび割れ発生時期 Table 7 に示す HFSC226 中の鉄筋の腐食速度から求めた鉄筋腐食量とひび割れ発生時期を Fig. 14 に示す。鉄筋径が大きい程、腐食ひび割れの発生時期は早くなる。たとえば、径が 22mm の鉄筋をかぶり 100mm の位置に使用した場合、海中における腐食速度を用いた場合には 99 年後にひび割れが発生し、飛沫帯にける腐食速度を用いた場合に 56 年後にひび割れが発生すると予測される。

一方、OPC100 中の鉄筋の腐食速度から求めた鉄筋腐食量とひび割れ発生時期を Fig. 15 に示す。横軸は腐食開始時からの経過年数を示しているが、鉄筋径が大きい程、腐食開始からひび割れが発生するまで時期は早くなる。

OPC100 では、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m³ に達するまで鉄筋は腐食しないと仮定しており、Fig. 11 に示すように、海中における見掛けの拡散係数を用いた場合、腐食開始は 152 年後となり、飛沫帯における見掛けの拡散係数を用いた場合、腐食開始は 110 年後となる。たとえば、径が 22mm の鉄筋を用いた場合は、いずれも腐食開始から 7 年後にひび割れが発生すると予測されることから、海中では暴露後 159 年において、飛沫帯では 117 年後において腐食ひび割れが発生すると予測される。

HFSC226 および OPC100 中の鉄筋径と腐食ひび割れ発生時期の予測値との関係を Table 9 に示す。鉄筋径によって異なるが、OPC では、建設後概ね 110~150 年程度で塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食によるひび割れが発生するが、HFSC226 では、建設後 30~150 年程度で鉄筋腐食によるひび割れが発生すると予測される。海中における暴露試験は、酸素供給量が少ない条件であり、飛沫帯における暴露試験は酸素供給量が多い条件であることから、いずれの環境における腐食速度を用いるかによって、腐食ひび割れの発生時期の予測値に幅が生じる。

このように、地中部における塩化物イオン侵入量や酸素供給量によって、腐食ひび割れの発生時期は異なると考えられる。すなわち、OPC100 では環境条件によって塩化物イオンの侵入量が異なり、HFSC226 では環境条件によって腐食速度が異なるが、腐食ひび割れの発生時期は、概ね Table 9 に示す範囲にあると予測される。酸素供給量が少ない地中部の環境条件は、海中暴露に近いと仮定すると、HFSC226 を用いた場合、直径 16~32mm の範囲の鉄筋を使用した場合、建設後 50 年間は、鉄筋腐食によるひび割れは発生しないと予測される。また、いずれのセメントを用いた場合も、細径の鉄筋を用いた方が、鉄筋腐食によるひび割れの発生時期は遅くなると予測される。

5. まとめ

低アルカリ性セメント (HFSC) を用いた鉄筋コンクリートの海中及び飛沫帯における 6 年間の暴露試験の結果、HFSC 中の鉄筋腐食の進行は、通常用いられる高アルカリ性のセメント中とは異なることが明らかになった。以下に本研究で明らかになった事項を示す。

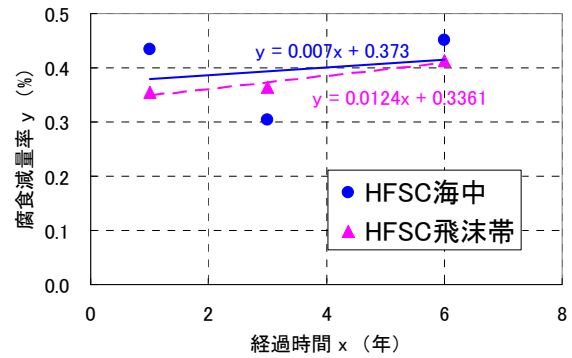


Fig.12 HFSC226 の腐食減量率の経時変化
Changes in Mass Loss due to Corrosion in HFSC226

Table 7 HFSC226の鉄筋腐食速度
Corrosion Rate of Reinforcing Bar in HFSC226

環境	暴露1年まで (mg/(cm ² ・年))	暴露1年以降 (mg/(cm ² ・年))
海中	18.74	0.302
飛沫帯		0.535

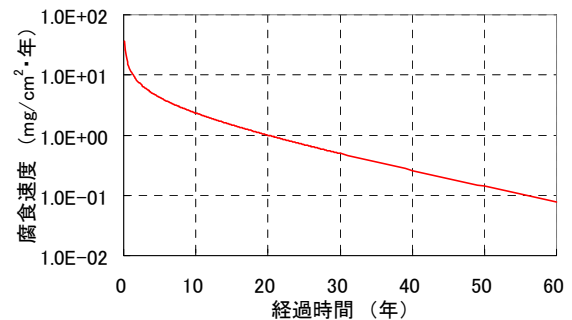


Fig.13 OPC の腐食速度の経時変化
Estimated Corrosion Rate in OPC100

Table 8 ひび割れ発生時の鉄筋腐食量
Amount of Corrosion of Reinforcing Bar
in time of Cracking

配合	鉄筋径	ひび割れ発生時の鉄筋腐食量 (mg/cm ²)
HFSC 226	D16	62.5
	D22	48.1
	D29	39.1
	D32	33.5
OPC100	D16	68.1
	D22	52.5
	D29	42.5
	D32	36.5

- 1) 6年間の海洋環境下における圧縮強度の低下はない。
- 2) 塩化物イオンの侵入量は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて少ない。
- 3) 鉄筋腐食は、塩化物イオンの侵入がほとんどない早期に開始するが、腐食の進行は遅い。
- 4) 海水起源の地下水中環境における鉄筋の腐食速度は $0.30 \sim 0.55 \text{ (mg/cm}^2 \cdot \text{年)}$ と予測され、かぶり 100 mm 、鉄筋径 22 mm の構造物に用いる場合、建設後 $50 \sim 100$ 年後に鉄筋腐食に起因したひび割れが発生すると予測される。

以上のことから、高レベル放射性廃棄物の処分施設において、低アルカリ性セメント (HFSC) を用いた鉄筋コンクリートを使用する場合、建設後 50 年程度は鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れが発生しないと予測され、細い径の鉄筋を使うことでひび割れの発生時期を遅らせることができる可能性が示された。

本報告における解析では、初期の腐食の進行程度が腐食ひび割れの発生時期に大きく影響することや、かぶりが小さい場合の腐食速度を用いた予測であることから、初期段階の腐食の進行やかぶりが腐食速度に及ぼす影響について、さらに検討する必要がある。また、鉄筋腐食進行モデルの構築や水セメント比、かぶり、鉄筋径など設計方法などについても検討する必要があると考える。

謝辞

本研究は、(独)日本原子力研究開発機構 (JAEA) の委託研究として、(株)大林組が実施したものです。ここに深謝致します。また、図表作成などにご協力頂きました(株)KSK 桑江ひとみ氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会：TRU 廃棄物処分概念検討書, JNC TY1400 2000-001, 2000. 3
- 2) 久保博, 他：ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究, 地盤工学会誌, 1998. 10
- 3) 入矢桂史郎, 他：ボゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発, 大林組技術研究所報 No. 66, pp. 63~pp. 70, 2003. 1
- 4) 入矢桂史郎他：低アルカリ性コンクリートの実用性と変質評価, JNCTJ8400 2002-038 (2002a)
- 5) Whiteman. W., et al. : "Effect of Hydrogen-Ion Concentration on the Submerged Corrosion of Steel", Vol. 16, No. 7, 99. 665-670, 1924
- 6) 入矢桂史郎, 他：低アルカリ性コンクリート中における鉄筋の腐食挙動に関する研究, 大林組技術研究所報 No. 67, pp. 1~pp. 6, 2003. 1
- 7) 土木学会規準「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法 (案)」 (JSCE-G 572-2007)
- 8) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書 (Ⅲ), 1996. 10
- 9) 土木学会 コンクリート標準示方書 [設計編], 2008. 3

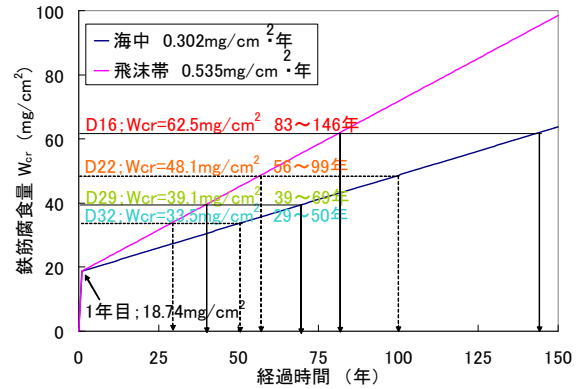


Fig.14 HFSC226 の鉄筋腐食量とひび割れ発生時期
Amount of Corrosion of Reinforcing in HFSC226 and Year of Crack Outcast

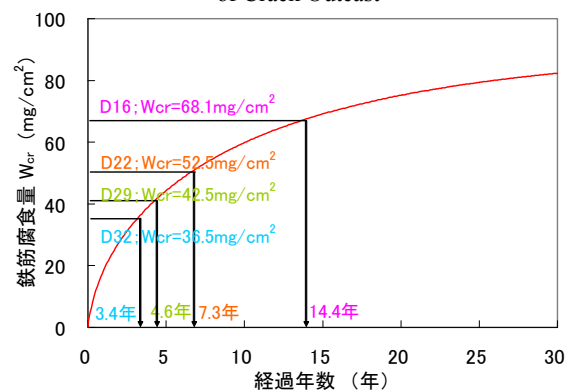


Fig.15 OPC100 の鉄筋腐食量とひび割れ発生時期
Amount of Corrosion of Reinforcing in OPC100 and Year of Crack Outcast

Table 9 腐食ひび割れの発生時期の予測値
Estimated Crack Occur years due to Corrosion of Reinforcing

配合名	鉄筋径	ひび割れ発生時期の予測値 (年)
HFSC 226	D16	83~146
	D22	56~99
	D29	39~69
	D32	29~50
OPC100	D16	124~166
	D22	117~159
	D29	114~156
	D32	113~155

- 10) 関博他：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.12-1, 1990
- 11) 入矢桂史郎他：幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究 (Ⅲ), JNCT5400, 2003-002 (2003a)
- 12) (財)国土開発技術センター：平成4年度 New RC 研究開発概要報告書, 高強度コンクリート分科会性能評価WG, ヤング係数の評価式, 1993. 3
- 13) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食マニュアル, 1986. 3