

## 暴露試験による低アルカリ性コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討

(独) 日本原子力研究開発機構 正会員 ○小林 保之  
 同上 中山 雅  
 (株)大林組 正会員 竹田 宣典  
 同上 正会員 松田 武

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は、300m 以深の地下深部に建設されることから、支保工や覆工、あるいはグラウトなどセメント系材料の使用が不可欠であることが想定される。一方、セメント系材料に含まれる高アルカリ成分が地下水に溶出し、pH が上昇すると緩衝材（ベントナイト）や岩盤の変質、オーバーパックの腐食形態に影響を与える可能性があることから、処分施設の長期性能評価の不確実性が增大することが懸念されている。このような背景から、セメントからの溶出液の pH を 11 以下に抑えることができる低アルカリ性セメントの開発が国内外を含め進められており<sup>1)</sup>、日本原子力研究開発機構では、HFSC(Highly Fly ash contained Silica fume Cement)を開発した。HFSC は、ポゾラン反応による  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の消費および低 Ca/Si の CSH（ケイ酸カルシウム水和物）の生成により低アルカリ化を指向したものであり、ポゾラン材料のポルトランドセメント置換率を 50%以上に高めていることを特徴とする<sup>2)</sup>。本件は、HFSC を用いたコンクリートの塩化物イオンの浸透および鉄筋の腐食挙動について暴露試験に基づく検討結果について報告するものである。

### 2. 実験概要

HFSC は、普通ポルトランドセメント (OPC) にシリカフェーム(SF)とフライアッシュ (FA) を加えており、その混合比率は、SF と FA を OPC の 50%以上、かつ SF を結合材中の 20%としたものである<sup>2)</sup>。これまで、結合材の比率 (OPC : SF : FA) を 4:2:4, 3:2:5, 2:2:6 とし、吹付けや覆工コンクリートへの適用性について検討してきた<sup>2)</sup>。本検討では、溶出液の pH が早期に低下する HFSC226 を対象に、腐食性環境として厳しい海洋環境下において暴露試験を行い、コンクリート中の塩化物イオン量および鉄筋腐食について調査した。

試験に使用したコンクリートの配合を表-1 に示すが、比較のため OPC のみを用いた配合も併せて表-1 に示す。なお、水結合材比については、高流動コンクリートとしての使用を想定しているため、30%と一般のコンクリートと比べ低くなっている。鉄筋腐食用の供試体は、 $\phi$  13mm

の鉄筋（みがき棒鋼）を円柱供試体内 ( $\phi$  100mm×H200mm) に図-1 に示すよう埋設し、塩化物イオン量測定用の供試体 ( $\phi$  150mm×H200mm) については無筋とした。養生方法は、HFSC226 については 7 日間 50℃にて温水養生を行った後、20℃で水中養生を行い、OPC については、20℃の標準養生のみとした。91 日間の養生を経た後、飛沫帯および海中の 2 種類の暴露環境で、6 年間の海洋暴露試験を行った。

表-1 試験に用いたコンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				水	結合材 : B			砂 S	砂利 G	高性能 AE 減水剤	AE 剤
					OPC	SF	FA				
OPC	30	55	4.5	165	550	—	—	877	732	8.25	0.0165
HFSC 226	30	55	4.5	165	110	110	330	807	673	12.65	0.165

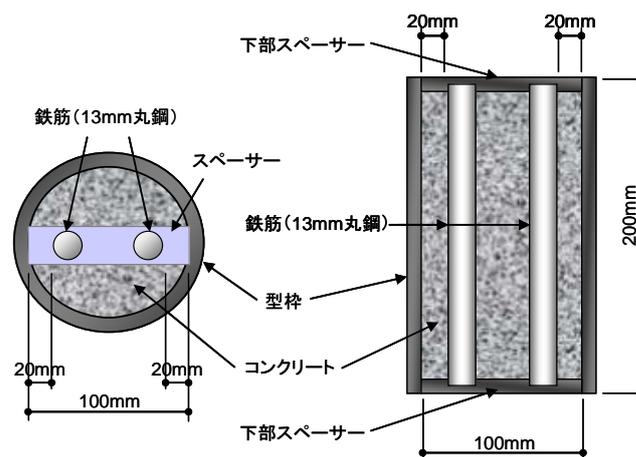


図-1 鉄筋腐食用供試体の作製概要

キーワード 暴露試験, 鉄筋腐食, 低アルカリ性コンクリート, ポゾラン反応, 塩化物イオン

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 地層処分研究開発部門 TEL 029-282-1133 (代表)

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 塩化物イオン量分布

図-2 に暴露後 6 年経過した供試体の表面からの塩化物イオン量の分布を示す。測定方法は JCI-SC5 に従い、全塩化物イオン量を測定した。同図より、HFSC226 の塩化物イオン量は OPC と比べ、海中、飛沫帯いずれにおいても非常に少ない結果となった。一般に、コンクリート中の塩化物イオンは、細孔溶液中の各種イオン ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 等) と電気的な平衡を保持しながら液相に存在するものと、フリーデル氏塩として固相へ固定化されるものがあるとされており、pH が低くなると後者の塩化物イオン量が減少することが室内促進試験結果により報告されている<sup>3)</sup>。HFSC226 は OPC の含有量の関係から、上記イオン量が少なく、また、別途実施したペースト供試体の浸出試験によれば、浸出液の pH は、11 以下となっていること<sup>2)</sup>などから、コンクリート中に存在できる塩化物イオン量が減少し、このような傾向になったと判断される。

#### (2) 鉄筋腐食の経時変化

図-3 に HFSC226 中に埋設した鉄筋の腐食面積率と、図-4 に腐食減量の経時変化を示す。腐食面積率は、発錆面積を測定面積で除したものであり、腐食減量率は、クエン酸二アンモニウム溶液にて除錆後の鉄筋質量を試験開始前の鉄筋質量で除したものである。図-3 より、HFSC226 では暴露後 1 年目から腐食が生じ、腐食面積率が経年により増大しているのに対し、図-4 の腐食減量は暴露後 1 年以降あまり変化していないことが分る。すなわち、腐食は進行しているが、質量減少に結びつくような腐食には至っていないといえる。また、外観上、孔食のような局所的な腐食は認められず表層部の腐食がほとんどであった。このような腐食形態と図-2 に示した塩化物イオンの浸透状況、および浸出液の pH を合わせて勘案すると、HFSC226 中の鉄筋は低い pH により不動態化しにくいいため、塩化物イオン量に関係なく腐食が生じたが、一般のコンクリートの塩害で観察されるような不動態皮膜の破壊による局所的な腐食は生じなかったものと推定される。

### 4. まとめと今後の課題

本暴露試験結果によれば、HFSC226 中に浸透した塩化物イオン量は OPC のみの場合よりも少ないが、鉄筋腐食が早期に開始した。一方、腐食形態は、鉄筋の表層部に広がる腐食が支配的で局所的なものはほとんど確認されなかった。これらの要因としては、HFSC226 中の OPC 含有量が少ないことやポズラン反応による pH 低下により鉄筋が不動態化しにくいことが考えられる。この結果から、HFSC226 中の鉄筋腐食の評価では、潜伏期が存在せず進展期から開始していると捉えることもできる。今後は、腐食ひび割れの発生時期を適切に予測するため、かぶりコンクリート中を浸透、拡散する水分や酸素などの影響を考慮した鉄筋の腐食モデルを構築することともに、HFSC を使用する場合の水結合材比の上限値やかぶり厚さの設定、鉄筋径の選定など、設計上の留意点を整理しておくことが必要であると考えられる。

**参考文献** 1) 例えば, J.L. GARCÍA, et al.: Design of low-pH cementitious materials based on functional requirements, R&D on LOW-pH CEMENT FOR A GEOLOGICAL REPOSITORY 3rd WORKSHOP, pp.41~47, 2007

2) 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 分冊 2 工学技術の開発, pp.4-16~4-26, 2005

3) 入矢桂史郎ほか: フライアッシュ含有シリカフェームコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.199-204, 2005.

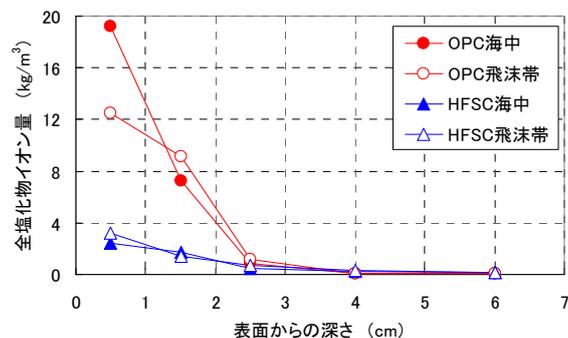


図-2 塩化物イオン量の分布

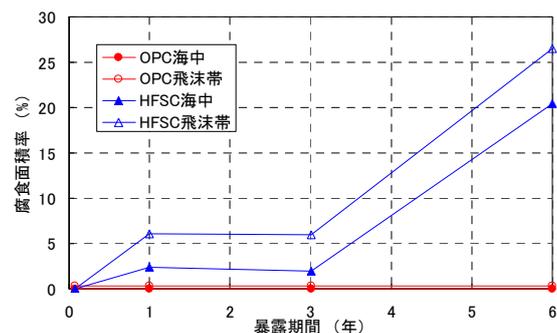


図-3 鉄筋の腐食面積率の経時変化

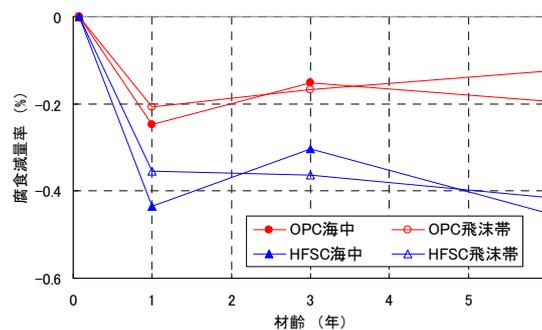


図-4 鉄筋の腐食減量の経時変化