

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

- フライアッシュを 60%混合したシリカフェームコンクリート中での鉄筋の腐食挙動 -

入 矢 桂史郎 竹 田 宣 典
十 河 茂 幸 上 垣 義 明

(本 社 土 木 技 術 本 部 構 造 技 術 部)

Corrosion of reinforcing bars in low alkalinity concrete

Corrosion behavior of re-bars in Silica fume concrete containing 60% fly ash

Keishiro Iriya Nobufumi Takeda
Shigeyuki Sogo Yoshiaki Uegaki

Abstract

Cementitious materials are one of candidates in radioactive waste repositories such as TRU waste, which contains long-life nuclides with half-lives of more than several thousand years. Since repositories become highly alkaline due to cement pore water from Ordinary Portland Cement, bentonite and rock are expected to be altered. Although low alkalinity cement with a pH below 11.0 has been developed, re-bars may be corroded and the durability of members may gradually decrease. This study assesses the transportation of chloride ion and corrosion of re-bars. It is concluded that re-bars in low alkalinity cement will corrode slightly without chloride ion due to its lower alkalinity, but that corrosion will accelerate if chloride ion contains.

概 要

数万年以上の長半減期の核種を含む放射性廃棄物を処分するにあたって、セメント系材料をバリア材として使用することが検討されている。しかし、普通ポルトランドセメントを用いた場合には周辺を高アルカリ性環境とし、ベントナイトなど他のバリア材料を変質させる可能性がある。そのため、セメント浸出水の pH を 11.0 以下にした低アルカリ性セメントが必要となり、筆者らはポゾランを高含有した低アルカリ性セメントを開発し実用化研究を進めてきた。しかし、コンクリート構造物は鉄筋など鋼材を補強材として使用するため、この環境下では鉄筋が腐食する可能性がある。本研究は、フライアッシュを 60%混合した pH11 程度の低アルカリ性コンクリート中の塩化物イオン浸透特性と低アルカリ環境での鉄筋腐食特性の両方を塩分浸透促進試験により調査し、水結合材比 60%の普通コンクリートと水結合材比 30%の低アルカリ性コンクリートでは鉄筋の腐食面積率はあまり差がないものの、低アルカリ性コンクリートは塩化物イオンが浸透しなくても鉄筋の腐食が生じやすいとの結論を得た。

1. はじめに

数万年以上の長半減期の核種を含む放射性廃棄物の処分施設は地下深部に建設し、人工的に核種の移行を封じ込める人工バリアと天然の岩盤で構成する天然バリアの組み合わせによる多重バリアシステムにより、放射性核種を生物圏から隔離するコンセプトが採用されている。人工バリア材料としては、処分施設作業時の力学的性能に着目したセメント系材料と膨潤に伴う自己シール性とコロイドなどのフィルトレーションに優れたベントナイトとの複合バリアの検討が行われている¹⁾。

しかし、セメント系材料が数千年以上の長期にわたりベントナイトや岩盤と接触するとその浸出水が示す高い pH (12.5 以上) の影響によりベントナイトや周辺岩盤を変質させることが懸念されている^{2), 3)}。

筆者らは、普通ポルトランドセメント (以下 OPC) にフライアッシュ (以下 FA) やシリカフェーム (以下 SF) などのポゾラン材料を 50%以上置き換えることによって、セメント間隙水の pH を 11 以下にした低アルカリ性セメント HFSC (Highly Fly ash contained Silica fume Cement) を開発し、実用上一般の混合セメントと同じように土木構造物に適用できることを示した⁴⁾。しかし、HFSC は、pH11 程度の低アルカリ性を呈するために、これを用いたコンクリート中に補強材として使用される鉄筋などの鋼材表面に不動態皮膜の保護性が低下し、腐食が早期に生じる恐れがある。土木あるいは建築で使用されるコンクリート中での鉄筋腐食挙動についての研究は多いが、その多くは健全なコンクリート (pH12.5 以上) および中性化したコンクリート (フェノールフタレンの反応域 pH10.5 以下) のものがほとんどで、ここで対象とし

た pH11 程度の高アルカリ環境下での鉄筋の腐食を研究した事例はほとんどない。

本研究では、同一水結合材比の OPC と HFSC を用いたコンクリートを作製し、塩分濃度や鉄筋のかぶり、ひび割れなどをパラメータとした塩分浸透促進試験を実施して、HFSC コンクリート中の鉄筋腐食挙動について実験的研究を行った。

2. HFSC の低アルカリ性と鉄筋腐食挙動

2.1 HFSC 硬化体浸出の低アルカリ性

2.1.1 浸出水の pH 測定方法 ここでセメントの浸出水とは、セメント硬化体と化学的に平衡状態に達した水と定義する。一般には水の動きが非常に遅い条件下のコンクリート中の間隙水がこれに相当する。

浸出水の pH 測定用の試料の作製方法は、水結合材比 40% のセメントペーストを混練し、容器にセメントペーストとアルミナボールを入れ、分離を防ぎ完全に水和させるように配慮して、50rpm 程度で回転させて 20 で 28 日間養生した。その後、容器から取り出し 0.5mm 以下に微粉砕し、20 で液固比（重量比）2:1 の条件で蒸留水に浸漬攪拌し、化学的平衡状態を確認した後に pH を測定した。

2.1.2 ポズラン混入率と pH の関係 HFSC ではポズラン混入率によって浸出水の pH の低下速度が異なる。HFSC のポズラン混入率を OPC:SF:FA の比を HFSC のあとにつけて表し、20%:20%:60% であれば HFSC226 と略記する。HFSC 硬化体では、SF の使用量を増せば pH は低下するが、施工に必要な流動性を確保する上では 20% が上限と考えられる。また、OPC 量を増して FA の量を低減させると圧縮強度は高くなるが、浸出水の pH の低下速度は遅くなる。Fig.1 に HFSC226, 325, 424 のセメント硬化体における pH の低下傾向を示す。HFSC226 が最も早く pH が低下しており、100 日程度で目標とする 11 以下になるのがわかる。

ここでは、低アルカリ性コンクリート中での鉄筋の腐

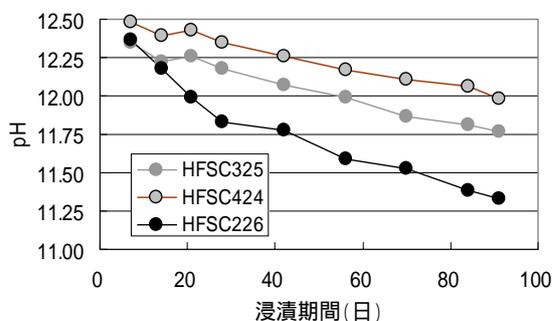


Fig. 1 HFSC の種類と pH
Relationship between Types of HFSC and pH

食挙動の観点から pH の低下速度を優先し HFSC226 中での鉄筋の腐食挙動を実験的に評価した。

2.2 pH11.0 の溶液中での鉄筋の腐食挙動

鉄筋は OPC 硬化体中などの高アルカリ環境下では表面に不動態被膜を形成し、腐食しにくくなる。pH を変化した溶液中での鉄の腐食速度と pH の関係を求めた Whitman らの研究成果によれば、pH4.0 ~ 10.0 範囲では腐食速度 0.2mm/年程度の一定の腐食速度であるが、pH が 10 より大きくなると腐食速度は徐々に小さくなり、OPC の浸出水の pH である 13 以上の環境ではほとんど腐食が進行しない結果が示されている⁵⁾。すなわち、一般的に中性化といわれる領域は pH10.5 以下であり、その領域でのコンクリート中の鉄筋腐食についての研究成果は数多くなされている。HFSC が示す pH11 程度の低アルカリ環境での研究成果は少ないので、ここでは鉄筋の腐食促進試験を実施してこの環境下での腐食について評価した。

3. HFSC コンクリート中での鉄筋腐食促進試験

3.1 試験のパラメータ

OPC と HFSC を使用し、高強度と普通強度の 2 種類を想定した水結合材比 (30% および 60%) のコンクリートで鉄筋腐食促進試験を実施することにより、HFSC の塩化物イオン浸透特性と鉄筋腐食特性に及ぼす塩水濃度の影響、かぶりの影響、ひび割れの有無および幅の影響について、塩分浸透促進試験による評価を行った。促進試験の実施において、供試体中に鉄筋を埋め込み外側から塩分を浸透させて鉄筋の腐食状況を調査するのが一般的である。しかしコンクリートの遮塩性はかなり高く、水結合材比 (W/C) 30% のコンクリートでは徐々にしか塩化物イオンが浸透しないことが想定される。本実験では、塩化物イオンが鉄筋まで到達しない状況をも想定し、塩化物イオンが最初から存在する状態での腐食状況についての検討も加えた。Table 1 に試験の組み合わせを示す。

3.2 使用材料と配合

Table 1 塩分浸透促進試験の組み合わせ
Parameters of Accelerating Corrosion Test

試験名	セメントの種類	水セメント比 (%)	固定条件	パラメータ
塩水濃度	OPC	30	かぶり 25mm	人工海水濃度 50・100%・飽和
		60		
かぶり	HFSC	30	塩水濃度 100%	かぶり 15・25・35mm
		60		
ひび割れ幅	OPC	30	塩水濃度 100%	ひび割れ幅 0.2・0.5・1.0mm
		60		
初期塩分 (塩分練込み)	HFSC	30	かぶり 25mm	水道水 人工希釈水
		60		

鉄筋腐食促進試験に使用したコンクリートには、HFSC(OPC:SF:FA = 20%:20%:60%)とそれとの比較対象として OPC の二種類のセメントを用いた。コンクリートに使用した材料と供試体に埋め込んだ鉄筋の仕様を Table 2 に示す。コンクリートは、高強度コンクリートとして W/C30%のもの通常の強度のコンクリートとして W/C60%を選定した。前者については、高流動コンクリート(スランプフロー65cm)として、後者については通常のコンクリートの仕様(スランプ 12cm)とした。コンクリートには流動性を得るために、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(商品名:HS700)を使用した。ここではセメントの違いによる鉄筋の腐食挙動の把握に主眼を置いているので、HFSC と OPC では、セメントと水の単位量を合わせて、骨材の部分でセメントの密度差を調整した。コンクリートの配合を Table 3 に示す。

3.3 促進試験方法

3.3.1 促進方法と鉄筋腐食の考え方 促進試験は、コンクリート練混ぜ後 28 日間標準養生し、その後 3 日間 50 の人工海水(金属腐食試験用:ASTM D1141-90 に準拠)に浸漬した後、4 日間 50 ,60%RH の室内で乾燥させるものとした。湿潤から乾燥までの 7 日間を 1 サイクルと称し、全部で 13 サイクル(試験期間 91 日)の繰り返しを行った。高温と乾燥湿潤の繰り返しにより表面に塩分が濃縮されるので、塩化物イオンの浸透が加速され、鉄筋の腐食は温度と水分の供給により加速される。

3.3.2 供試体の形状寸法 塩化物イオン量測定用の供試体は、直径 15cm × 高さ 15cm の円柱供試体を使用した。上面の 1 面を残して周辺をエポキシ樹脂でコーティングし、1 面からの塩分浸透性を評価できるようにした。鉄筋の腐食を調査する供試体は、10cm × 10cm × 20cm の直方体で、Fig. 2 に示すように上面から所定の位置(25mm

を基本とし 15mm, 35mm)に鉄筋が埋め込まれ、上面のみを残して他の 5 面は十分厚くエポキシ樹脂で被覆している。ひび割れ形成は、供試体中央にセルロイド板をコンクリート打設時に埋め込み、硬化後引き抜くことによつて、所定の幅のひび割れを形成した。

3.3.3 塩分浸透と鉄筋腐食の試験方法 コンクリート中の塩分分析は、JCI-SC5(硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法)に準じて行い、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩分の測定を行った。なお、測定位置は、切断カッターの厚み等からできる最小厚さ 1cm とし、表面から 0~1.0cm, 1.0~2.0cm, 2.0~3.0cm, 3.0~4.0cm のスライスとした。

鉄筋の腐食面積率の測定は、13 サイクル終了後鉄筋を取り出し、長さ方向の中心から 5cm ずつ計 10cm の部分について行った。測定は透明なシートを鋼材に当て、発錆している部分を写し取り、その面積の合計を mm²単位で記録した。なお、単色で均一な薄いさび層の場合は発錆部分と認めなかった。鋼材の発錆面積率は、下式により求めた。

$$\text{腐食面積率}(\%) = (\text{発錆面積} / \text{測定面積}) \times 100$$

測定面積: 鋼材の長さ方向の中心から 5cm ずつ計 10cm の全表面積

腐食減量については、発錆面積を測定後の鉄筋をクエン酸アンモニウム 10% 水溶液に浸漬し、除錆処理を行ったのち、水洗・乾燥後に質量を測定し、下式により腐食減量率を算出した。

$$L = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100$$

L: 腐食減量率 (%)
 Mo: 打設前の鉄筋質量 (mg)
 M: 除錆後の鉄筋質量 (mg)

腐食試験を行った供試体の pH の測定は、鉄筋を取り出した際の供試体から粗骨材を取り除き、液固比 2:1 の条件で蒸留水に浸漬した後、pH の時間変化がなくなったこ

Table 2 使用材料
Materials in Accelerating Test

材料の種類	メーカー・産地	密度 (g/cm ³)	備考
OPC	太平洋セメント	3.16	
SF	エルケム	2.20	
FA	中電碧南	2.38	最大粒径 20 μ
細骨材	静岡県小笠	2.59	陸砂 F.M.2.77
粗骨材	茨城県岩瀬	2.64	砕石 F.M.6.5
高性能 AE 減水剤	フローリック	1.07	HS700H
鉄筋			磨き鋼棒直径 13mm

Table 3 コンクリートの配合
Mix Proportion of Concrete

記号	セメント	W/C	目標スランプまたはフロー	s/a	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	HS700 (% × C)
OPC30	OPC	30.0	65 ± 5	55.0	165	550	877	732	1.65
OPC60		60.0	12 ± 2.5	48.0	165	275	883	988	0.70
HFSC30	HFSC	30.0	65 ± 5	55.0	165	550	807	673	3.00
HFSC60		60.0	12 ± 2.5	48.0	165	275	854	953	1.35

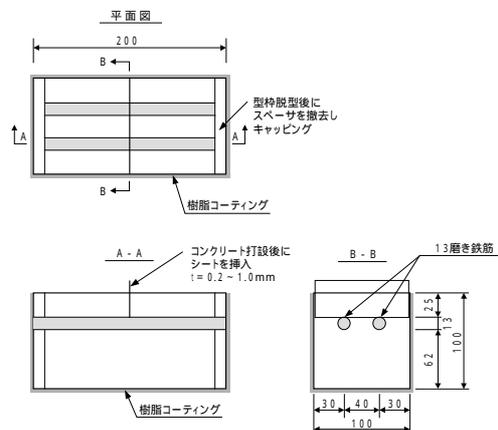


Fig. 2 鉄筋腐食試験供試体
Specimen of Corrosion Accelerating Test

とを確認してから pH を記録した。総細孔率は pH を測定した試料の一部を使用して、水銀圧入法により測定した。総細孔率は次式により算出した。

$$\text{総細孔率 (\%)} = \text{細孔容積} \times \text{かさ密度} \times 100$$

3.4 試験結果

3.4.1 塩化物イオン浸透深さ 塩化物イオン濃度 1.8% の人工海水と塩化物イオン濃度 2.7% の人工海水（以下、飽和人工海水）の条件での、促進試験後の塩化物イオン濃度の分布を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。W/C60% で OPC と HFSC を比較すると、両コンクリートともに表面部の塩化物イオンの浸透量の差はほとんどないが、OPC の方が HFSC より内部の浸透量は少なくなる傾向がみられる。W/C30% では、表面において OPC の方が HFSC より浸透量が大きい大きな差は認められない。この結果から、腐食試験の鉄筋位置 25mm において、W/C60% では OPC、HFSC とともに OPC で鉄筋腐食が生じるとされている塩化物イオン量 1.2kg/m³ を超えていることがわかる。また、W/C30% では、表面から 15mm において 0.5kg/m³ 以下の少量の塩化物イオン量で、鉄筋位置まで塩化物イオン

は達していない。

一般にシリカフュームをセメントの内割で使用すると、遮塩性が著しく向上するといわれている⁶⁾。本実験においては、HFSC のようにフライアッシュを多量に含んでいる場合には、ポゾランによる遮塩性向上の効果は W/C が大きい場合には認められたが、小さい場合には顕著には認められなかった。

3.4.2 ひび割れが無い状態での鉄筋の腐食性状 塩化物イオン濃度 1.8% の促進試験により得られた鉄筋の腐食面積率を Fig. 5 に示す。W/C30% の OPC では、かぶり 25mm と 35mm については、塩化物イオンが鉄筋まで OPC における鉄筋の腐食が開始する塩化物イオン量に達していないので腐食していない。しかし、同じ W/C30% の HFSC では、OPC とほぼ同様の塩化物イオン量が鉄筋に到達していないにもかかわらず、かぶり 25mm と 35mm の鉄筋は腐食していた。また、塩化物イオンが鉄筋まで到達している W/C60% では、OPC および HFSC とともに鉄筋は腐食しているが、HFSC の方の腐食面積率が大きく、ほぼ全面が腐食している。またいずれの場合も、鉄筋位置が表面に近いほど腐食面積率が大きくなっている。

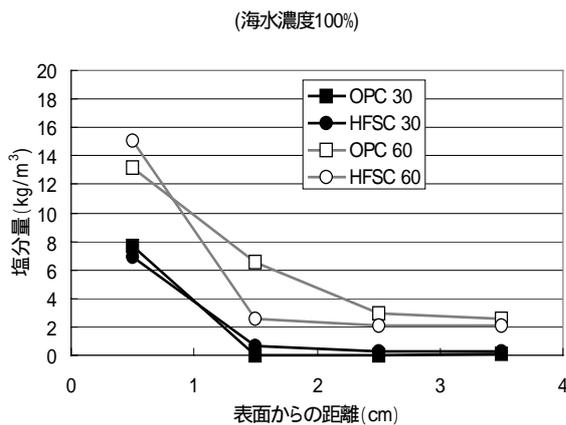


Fig. 3 塩化物イオン濃度分布 (塩化物イオン濃度 1.8%)
Distribution of Chloride Ion Concentration

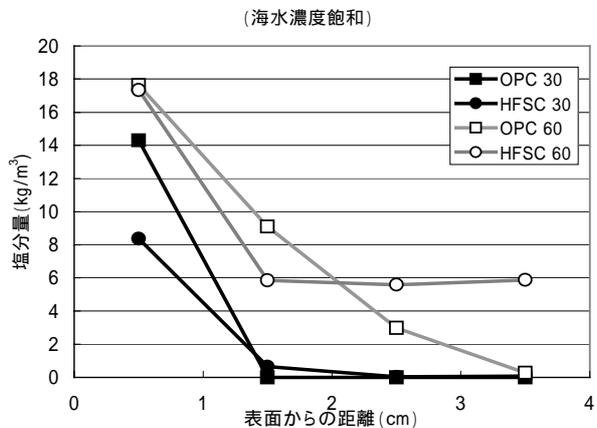


Fig. 4 塩化物イオン分布 (塩化物イオン濃度 2.7%)
Distribution of Chloride Ion Concentration

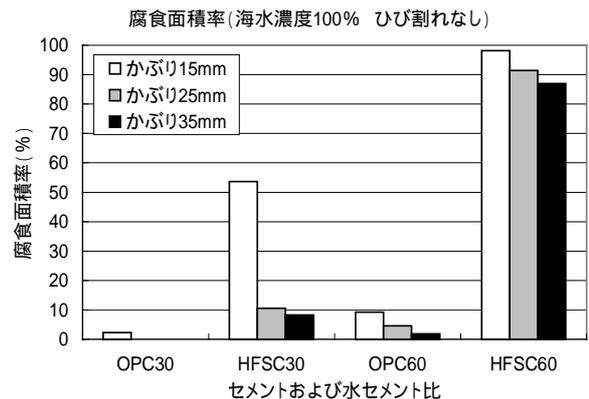


Fig. 5 腐食面積率 (塩化物イオン濃度 1.8%)
Ratio of Corrosion Area (Chloride Ion Concentration is 1.8%)

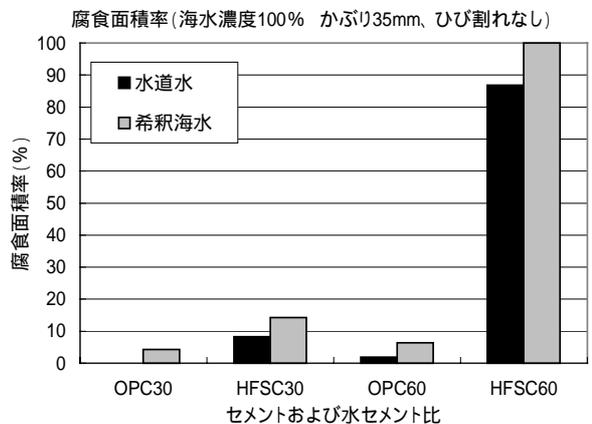


Fig. 6 腐食面積率 (塩化物イオンの存在の有無)
Ratio of Corrosion Area (Saline Mixture)

次に塩化物イオンが鉄筋に到達した場合の影響について、Fig. 6に塩化物イオン濃度0.6%の希釈海水でコンクリートを混練した場合と水道水を使用した場合の比較を示す。希釈海水で混練した場合は、OPCもHFSCも腐食しているが、HFSCの腐食面積率が大きい。また、W/Cが大きいと腐食面積率が大きい結果となった。

塩化物イオン濃度1.8%で鉄筋位置を変えた試験における鉄筋の腐食減量率の測定結果をFig. 7に示す。試験結果は腐食面積率の測定結果とほぼ同じ傾向にある。しかし試験期間が短くあまり大きな腐食減量には至らなかったために、いくらかの誤差を含んでいると思われる。

3.4.3 ひび割れがある状態での鉄筋の腐食性状 塩化物イオン濃度1.8%で鉄筋位置25mmの供試体において、ひび割れ幅を変化させた試験を行い、鉄筋の腐食面積率を測定した。その結果をFig. 8に示す。いずれの場合もひび割れは幅が増大するにしたがって、腐食面積率が大きくなっている。

4. 考察

4.1 HFSCの緻密性と遮塩性の検討

4.1.1 圧縮強度 Table 4に試験開始材齢である28日と試験終了材齢である119日の標準養生供試体の圧縮試験結果を示す。HFSCの圧縮強度はOPCに比べて低く、特にW/C60%では10N/mm²であった。強度が低い理由として、HFSC226ではフライアッシュを60%混合しているため、ポゾラン反応に必要な水酸化カルシウムが不足し、それによるC-S-Hゲルによってコンクリートの間隙を十分に充填することができない。このため、コンクリート組織自体がポーラスになっているのではないかと考えられる。

4.1.2 総細孔率 W/C30%の供試体について、試験を終了した材齢119日の供試体から試料を採取し、総細孔率を測定した結果をTable 5に示す。総細孔率はHFSCのほうが5%程度大きく、W/Cが30%であってもOPCに比べポーラスである。HFSCの圧縮強度がOPCに比べて低いことと関連していると思われる。

4.1.3 HFSCの遮塩性 HFSCではSFや粒径20μ以下のFAなど粒径のOPC粒子に対して細かい材料を使用しているために組織が緻密化し、遮塩性が高まるのではないかと考えられた。しかし、結果はTable 5に示すように総細孔率は大きくなり、さらに塩化物イオンの浸透深さも、同一W/CのOPCに比べ同等という結果であった。総細孔率が大きい理由は、HFSCではポゾランの含有量がセメント全体の80%に達しており、アルカリ量が不足し全てのFAが水和に寄与していないことから、ポーラスになっていると考えられる。強度的にもHFSCがOPCに比べ低いことから、上記の推論は裏付けられる。ここで、HFSC中のFAがどの程度反応しているかを推定するために、HFSCにおいてFAを結合材としないでW/Cを算出して、セメント水比と圧縮強度の関係を求めた。Fig. 9にその

結果を示す。HFSCのW/C30%では91日を除いてほぼ線形関係があることがわかる。すなわちHFSC226では、91日以降でかつW/Cが小さくないとFAが圧縮強度向上には寄与しないという結果となった。次に、HFSCのW/C30%とOPCのW/C60%は圧縮強度がほぼ同じレベルにあり、細孔率は同等と推定されるが、遮塩性はHFSCの方が大きい結果

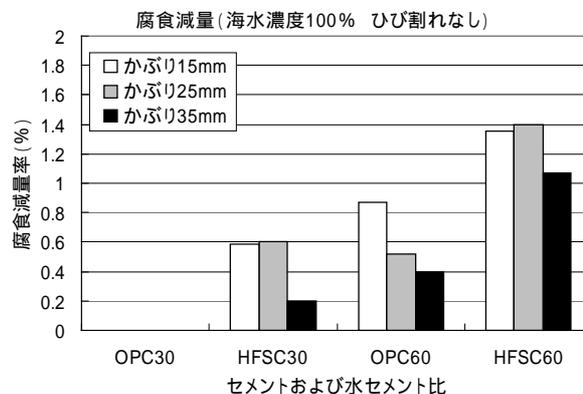


Fig. 7 腐食減量率 (塩化物イオン濃度1.8%)
Weight Loss Due to Corrosion

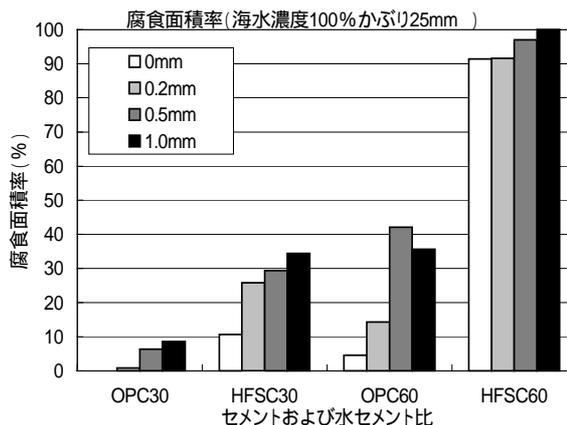


Fig. 8 腐食面積率 (ひび割れを有する場合)
Corrosion Area Due to Cracking Effect

Table 4 試験時の圧縮強度
Compressive Strength During Corrosion

セメントの種類	W/C(%)	圧縮強度(N/mm ²)	
		28日 (試験開始)	119日 (試験終了)
OPC	30	88.9	99.3
HFSC		33.8	54.5
OPC	60	34.2	42.3
HFSC		6.3	10.5

Table 5 総細孔率とpH
Porosity and pH

セメントの種類	W/C(%)	総細孔率 (%)	pH
OPC	30	12.46	12.70
HFSC		17.20	11.05

となっている。これはさきに述べた SF や FA などの微粒分ボゾランが鉱物的に遮塩性に寄与しているためと考えられる。

4.2 HFSC における鉄筋腐食の検討

4.2.1 pH HFSC の pH は試験終了後で 11 程度であり、試験中もボゾラン反応は持続し pH が低下していることを考えると、供試体中の鉄筋は試験中、pH11.5~11.0 の環境に置かれたのではないかと推測される。

4.2.2 ひび割れがない場合 強度的に同じレベルにある HFSC の W/C30% と OPC の W/C60% の試験結果を比較して両セメント中での鉄筋腐食性状について比較検討した。供試体の鉄筋位置は、深さ 15mm, 25mm, 35mm であるが、すべての同じ深さ位置での侵入塩分量は、OPC の W/C60% に比べて HFSC の W/C30% は少ない。しかし、鉄筋の腐食面積率はすべての同じ深さ位置で HFSC の方が大きい。また、HFSC では浸透塩分濃度が高くなる表面部で急激に腐食面積率が增大している。OPC では、塩分浸透量が少ないかぶり 35mm ではほとんど腐食が進んでいないが、HFSC のかぶり 35mm では腐食が進行している。HFSC ではコンクリート間隙水の pH が 11.0 程度と低いために、塩株対音量が低くても鉄筋が腐食しやすい環境にある。一方 OPC では pH が高く鉄筋の不動態で保護性が HFSC と比べ高いので、塩化物イオンがある程度高くても、腐食は進行しない。以上から、OPC の W/C60% と HFSC の W/C30% は強度的には同じレベルであるが、コンクリート内部の鉄筋の腐食メカニズムは異なることが示唆される。

4.2.3 ひび割れを有する場合 W/C60% の OPC と W/C30% の HFSC について比較検討する。ひび割れ幅の影響を比較した試験結果は、OPC と HFSC がほぼ同じような腐食面積率となっている。しかし、細かく見ると以下の点に相違が見られる。HFSC では、ひび割れがない場合と幅 0.2mm での腐食面積率が OPC に比べて大きい。OPC ではひび割れ幅が小さいケースでは腐食がほとんど進行していないが、HFSC ではひび割れ幅が小さくても腐食が進行しやすくなる。HFSC では pH が低い分、ひび割れが発生した場合、鉄筋を保護する能力が OPC に比べ低いと考えられる。

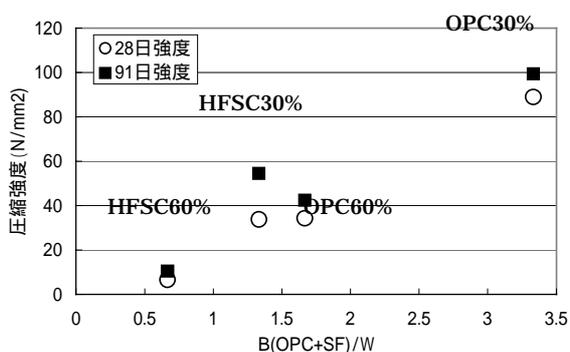


Fig. 9 セメント水比と圧縮強度
Cement Water Ratio and Compressive Strength

5. 結論

フライアッシュを 60% 用いた pH が 11 程度の低アルカリ性コンクリート中での鉄筋腐食に関する促進試験の結果から、次のことが明らかになった。

- 1) HFSC226 の W/C60% のコンクリートは、28 日材齢の強度が 10N/mm² と小さく、かつ、塩化物イオンの存在の有無に係わらず鉄筋の腐食が生じる。
- 2) HFSC226 の遮塩性は、W/C 一定の条件で比較して、W/C60% では、OPC より大きい。しかし、W/C30% では OPC とほぼ変わらない。
- 3) HFSC226 の W/C30% と OPC の W/C60% のコンクリートの鉄筋の腐食面積率にはあまり差がなかった。しかし、腐食のメカニズムから見ると HFSC は低アルカリ性の影響で塩分が浸透しなくても腐食するのに対して、OPC は塩化物イオンがある程度浸透しないと腐食しない結果であった。

以上から、フライアッシュ 60% 含有した低アルカリ性コンクリートは鉄筋コンクリート構造に使用する場合、W/C30% 以下のコンクリートとし、防錆処置をするか酸素の供給を低減させ腐食速度を小さくするため、かぶりを大きくする、等の処置が必要である。

謝辞

本研究は、核燃料サイクル開発機構の委託研究⁷⁾として(株)大林組が実施したものである。ここに謝意を表する。

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) 大和田仁，他：アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動，JNC TN8400 2000-027，2000.8
- 4) 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.63~70，2003.1
- 5) Whiteman.W., et al. : "Effect of hydrogen-Ion concentration on the submerged corrosion of steel", Industrial Engineering Chemistry, Vol.16, No.7, 99.665-670, 1924
- 6) 鳥居和之，他：種々のボゾランを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食状況，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12, No.1, pp.489-494，1990
- 7) 大林組：低アルカリ性コンクリートの実用性および変質評価，サイクル機構委託研究報告書，JNC TJ8400 2002-038，2002