

フライアッシュコンクリートの耐久性評価に関する研究

(株)四国総合研究所	土木技術部	馬越	唯好
四国電力(株)	土木建築部	武田	啓二
四国電力(株)	土木建築部	楠瀬	康公

キーワード： フライアッシュ
高炉セメント
耐久性
中性化抵抗性
耐塩害性

Key Words : fly ash
blast-furnace cement
durability
resistance to carbonation
resistance for salt damage

Study on Durability Evaluation of Concrete Using Fly Ash

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Tadayoshi Bakoshi

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Engineering Department

Keiji Takeda, Yasutomo Kusunose

Abstract

Though it is known the resistance for salt damage of concrete using fly ash is higher than that of normal concrete without fly ash, the resistance for salt damage of concrete using blast-furnace cement which is broadly used in public works with fly ash almost never has quantitative evaluation case now. If it is confirmed the resistance for salt damage of concrete using blast-furnace cement with fly ash is higher, it increases the potential for using blast-furnace cement with fly ash in public works, such as harbor structures. And we can achieve to expand further effective utilization of fly ash.

In construction such as harbor structures, use of concrete using fly ash is expected to delay corrosion of internal rebar, to reduce the maintenance costs, and to contribute to reduction of life-cycle costs of structures.

In this study, we conducted the evaluation experiments, resistance to carbonation, penetration resistance of chloride ion, resistance to rebar corrosion of concrete using blast-furnace cement with fly ash, and considered the durability evaluation of the concrete.

1. はじめに

四国電力㈱では、石炭火力発電所からの副産物である石炭灰が年間約 30 万t発生しており、その約 1/2 はセメント原料として利用されている。また、石炭火力発電所から排出される石炭灰の 9 割を占めるフライアッシュ(以下「FA」)を資材として有効利用する技術の開発が重要な課題となっている。

FAの有効利用技術として、瀬戸内海における海砂の採取禁止、天然の骨材資源の枯渇化や自然環境の保全の観点から、FAを細骨材の一部に代替使用したコンクリートの長期材齢強度、耐凍害性、水密性等について調査し¹⁾、実施工への適用性試験²⁾を実施した。また、強熱減量が高く、JIS 規格に適合しないFAの増加対策として、未燃カーボン量の多いFAを使用したコンクリートの性状調査³⁾や道路擁壁工事の実構造物施工⁴⁾等を行ってきた。FAの更なる有効利用を目的として、粉体系の高流動コンクリートへの適用性⁵⁾について調査した。さらに最近では、トンネル工事におけるリバウンドが少ない吹付けコンクリートや水中不分離性コンクリートへの適用⁶⁾などコストダウンを可能とする技術開発がある。

FAを混和したコンクリートは、通常のコンクリートに比べて耐塩害性が高いことは知られている⁷⁾が、公共工事で幅広く使用されている高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の耐塩害性に関する定量的な評価事例は殆どないのが現状である。このため、高炉セメントにFAを混和したコンクリートが、耐塩害性に優れていることを確認できれば、港湾構造物など公共工事で使用される可能性が高くなり、FAの更なる有効利用拡大を図ることができる。

また、港湾構造物等にFAコンクリートを使用することにより、内部にある鉄筋の腐食を遅らせ、その結果、維持管理費を低減することができ、構造物のライフサイクルコスト低減に寄与することが期待される。

本研究では、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の中性化に対する抵抗性、塩化物イオンの浸透抵抗性および鉄筋腐食に対する抵抗性に関する試験を実施するとともに、コンクリートの耐久性評価について考察した結果について報告する。

2. コンクリートの配合と圧縮強度

2.1 使用材料および配合条件

本研究で使用した材料を表-1 に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用し、FAは、四国電力㈱橋湾発電所産の JIS A 6201 に適合するⅡ種およびⅣ種を使用した。

配合条件は、粗骨材の最大寸法 20mm、水結合材比 55%とし、目標スランブおよび目標空気量は運搬時のロスを考慮して、9.0cm、5.0%に設定した。

FAの種類と置換率については、現場で一般に使用されているⅡ種・Ⅳ種灰と 10～20%のFA置換率を基に決定した。

以上を踏まえ、FA種別ごとに、セメント代替や細骨材代替の各種代替材として混和した効果を比較するため、FA無混和、Ⅱ種内割置換(セメントの内割で、セメント置換)、Ⅱ種外割置換(セメントの外割で、細骨材置換)、Ⅳ種外割置換とした。セメントの種類、FAの置換率によって設定したコンクリート配合を表-2 に示す。

表-1 使用材料

材 料	種類・性質など
セメント	普通ポルトランドセメント(N) 密度:3.16g/cm ³ , プレーン値:3,210cm ² /g
	高炉セメントB種(BB) 密度:3.02g/cm ³ , プレーン値:3,780cm ² /g
フライアッシュ	JIS A 6201Ⅱ種フライアッシュ 密度:2.33g/cm ³ , プレーン値:4,150cm ² /g
	JIS A 6201Ⅳ種フライアッシュ 密度:2.20g/cm ³ , プレーン値:1,750cm ² /g
細骨材	砕砂(石灰岩砕砂) 密度:2.68g/cm ³ , FM:2.80
粗骨材	砕石2005(石灰岩砕石) 密度:2.70g/cm ³ , FM:6.60
混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

配 合	セメント	FAⅡ種		FAⅣ種		スランブ (cm)	W/(C+Fc) (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						AE減水剤
		内割	外割	内割	外割				セメント	フライアッシュ		水	細骨材	粗骨材	
	C					内割Fc	外割Fs	W	石灰岩砕砂	石灰岩碎石					
N-FA無混和	N	0	0	0	0	9.0	55	44.0	273	0	0	150	847	1088	C×1.0%
N-Ⅱ種内割20		20	0		0			41.0	210	52	0	144	793	1153	
N-Ⅱ種外割20		0	20		0			39.0	300	0	126	165	581	1145	
N-Ⅳ種外割20		0	0		20			39.0	309	0	118	170	575	1131	
BB-FA無混和	BB	0	0		0			43.0	269	0	0	148	828	1104	
BB-Ⅱ種内割20		20	0		0			40.0	206	52	0	142	775	1172	
BB-Ⅱ種外割20		0	20		0			38.0	296	0	123	163	566	1161	
BB-Ⅳ種外割20		0	0		20			37.0	305	0	112	168	545	1166	

2.2 圧縮強度発現

圧縮強度試験は JIS A 1132 および JIS A 1108 に準じて実施した。所定の材齢まで標準養生を行ったコンクリートの材齢 7 日, 28 日, 91 日における圧縮強度試験結果を図-1 に示す。

高炉セメントB種(BB), 普通ポルトランドセメント(N)とも, FA無混和に比べてⅡ種内割は, 圧縮強度が減少した。これはセメントの内割配合であり, 単位セメント量が減少するためと考えられた。

FA無混和に比べてⅡ種外割, Ⅳ種外割は, 圧縮強度が増加した。これは, 単位セメント量はほぼ同じであり, FA混和によるマイクロファイラー効果とポゾラン反応によるものと考えられた。また, Ⅳ種外割よりⅡ種外割の方が, 強度が増加する傾向が見られた。これはⅣ種に比べて, Ⅱ種の方がブレン比表面積が大きいことから, マイクロファイラー効果がより大きく働いたことによるものと考えられた。

FAの同一混和条件では, 高炉セメントB種と普通ポルトランドセメントを比較すると, ほぼ同程度の強度発現が見られた。

3. コンクリート組織の緻密化

3.1 コンクリートの細孔構造

(1) 細孔径分布の測定

コンクリート組織の緻密化について定量的に把握するため, 水銀圧入式ポロシメータを用いて, コンクリート内部の細孔径分布の測定を実施した。

コンクリート試料は, 所定の材齢まで 20℃水中養生を行った $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて, 5mm 以下に粉碎し, モルタル部分のみを取り出し, アセトンに数日間浸漬させ水和反応を止めた後, 4 日間の D-dry 乾燥を行い試料とした。

(2) 細孔径分布測定結果

材齢 7 日におけるモルタル試料の細孔径分布測定結果を図-2(a)に示す。

細孔径が $0.05 \mu\text{m}$ 以上の細孔容積を比較すると, Ⅱ種内割が最も大きく, 次にFA無混和, Ⅳ種外割, Ⅱ種外割の順に小さくなる傾向が見られた。

細孔容積が最大ピークとなる細孔径は, 普通ポルトランドセメントを用いた場合, 高炉セメントを用いた場合とも, $0.03 \mu\text{m} \sim 0.05 \mu\text{m}$ 程度となった。

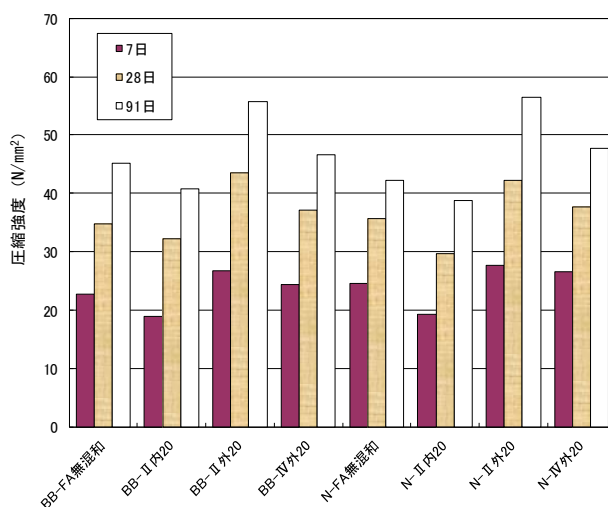


図-1 圧縮強度試験結果

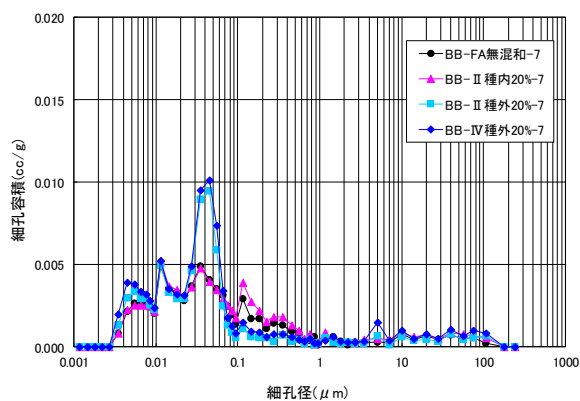
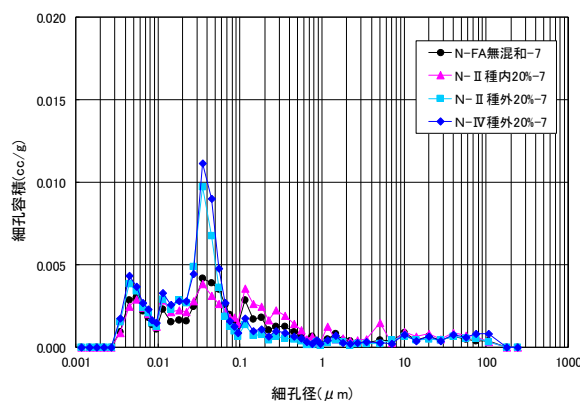


図-2(a) 細孔径分布測定結果(材齢 7 日)

材齢 91 日におけるモルタル試料の細孔径分布測定結果を図-2(b)に示す。

細孔径が $0.05 \mu\text{m}$ 以上の細孔容積を比較すると、FA 無混和が最も大きく、次にⅡ種内割、Ⅳ種外割、Ⅱ種外割の順に小さくなる傾向が見られた。

細孔容積が最大ピークとなる細孔径は、普通ポルトランドセメントを用いた場合は $0.02 \mu\text{m} \sim 0.04 \mu\text{m}$ となり、高炉セメントを用いた場合は $0.01 \mu\text{m} \sim 0.04 \mu\text{m}$ となった。ピークとなる細孔径は、FA 無混和、Ⅱ種内割、Ⅳ種外割、Ⅱ種外割の順に小さくなった。

材齢の経過とともに、細孔容積がピークとなる細孔径は小径側にシフトしており、コンクリート内部の組織が緻密化することが確認された。

3.2 ポゾラン反応性の検討

(1) 示差熱重量分析試験の方法

ポゾラン反応の可能性について検討するため、示差熱重量分析試験装置を用いて、モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率を測定した。

コンクリート試料は、5mm 以下に粉砕し、モルタル部分のみを取り出し、アセトンに数日間浸漬させ水和反応を止めた後、さらに $150 \mu\text{m}$ 以下に微粉砕・ふるい分けし、 40°C 炉乾燥させたものを試料とした。

(2) 示差熱重量分析試験結果

材齢 7 日、28 日、91 日におけるモルタル試料を用いた示差熱重量分析試験から得られた TG-DTA 曲線を解析し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を算出した結果を図-3 に示す。

コンクリート中のセメントの水和反応の進行に伴い、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は生成され増加する。

FA 無混和の場合、水和反応の進行に伴い、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率は材齢とともに増加する結果となった。

Ⅱ種内割の場合、材齢 28 日、91 日における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率が材齢 7 日と変化しない結果となり、水和反応に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量とポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量とがほぼ同量になったためと考えられた。

Ⅳ種外割の場合、材齢 91 日以降ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が増加するため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率が減少したと考えられた。

Ⅱ種外割の場合、材齢 28 日以降ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が増加するため、それ以降の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率は減少したと考えられた。

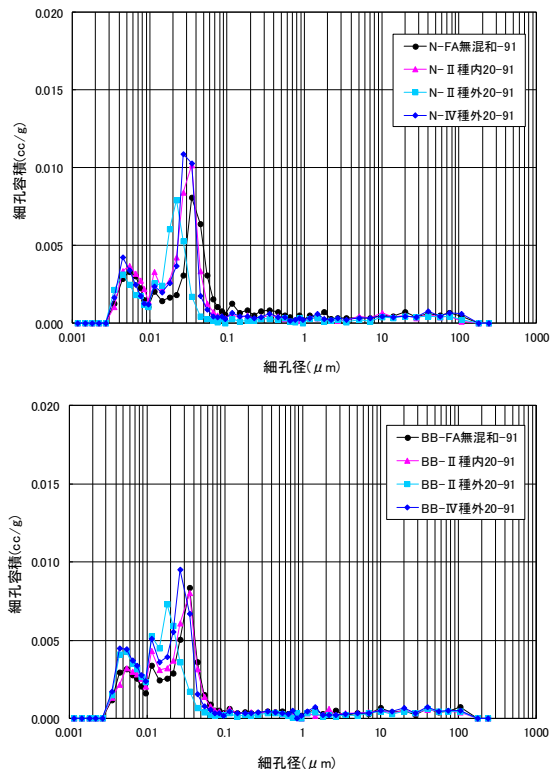


図-2(b) 細孔径分布測定結果(材齢 91 日)

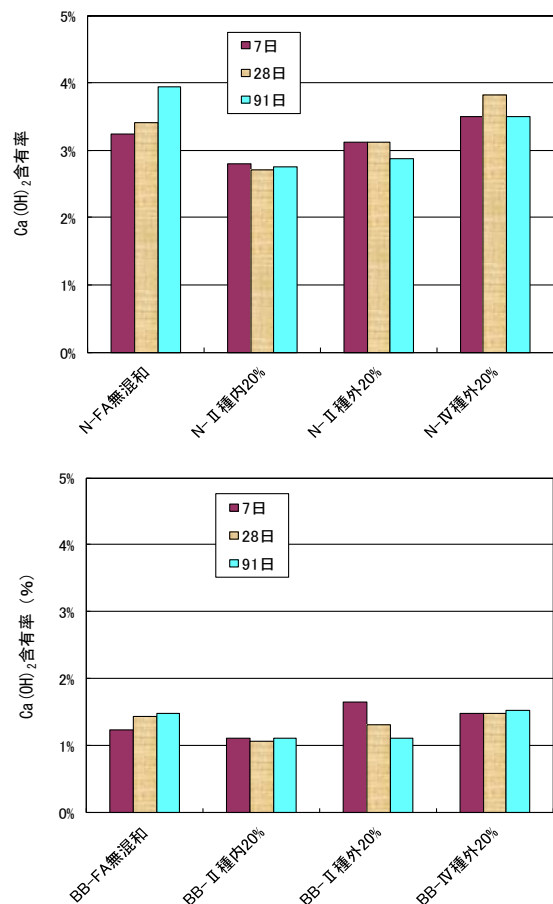


図-3 示差熱重量分析試験結果

したがって、FAを混和したコンクリートでは、FA無混和に比べて、FAによるポズラン反応が起きており、材齢28日以降の長期強度が増進したと考えられた。

4. 促進中性化試験

4.1 促進中性化試験の方法

中性化に対する抵抗性を確認するため、CO₂濃度5%の促進中性化試験⁸⁾を実施した。

コンクリート供試体は、断面が1辺10cmの正方形で、長さを40cmとした。供試体は型枠を脱型した後、材齢4週まで温度20±2℃の水中で養生を行った。材齢4週後、温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室において、材齢13週まで養生した。中性化の促進条件は、温度20±2℃、相対湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%とした。

4.2 促進中性化試験結果

促進日数と中性化深さの関係を図-4に示す。

Ⅱ種内割の場合、FA無混和より中性化深さは大きくなるものの、Ⅱ種外割、Ⅳ種外割の場合には、FA無混和より中性化深さは小さくなり、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。

また、Ⅳ種外割よりもⅡ種外割の方が、中性化深さは小さく、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。

高炉セメントに比べて普通ポルトランドセメントの方が、同じ材齢における中性化深さは小さく、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。これは、高炉セメントにはセメントの内割で高炉スラグが30～60%入っているため、セメント量が少ない上に、高炉スラグの水硬反応により水酸化カルシウムが消費されpHが低下する時期が早くなるためと考えられた。

高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも中性化抵抗性が低下するものの、FAを外割りで混和することにより、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保できることが確認された。

5. 塩化物イオンの浸透抵抗性

5.1 屋外暴露試験

(1) 屋外暴露試験の方法

コンクリート構造物の耐久性の検討を行う際には、通常供試体を自然の海洋環境に置き、コンクリートの品質変化を調査する方法⁹⁾が行われる。

FAコンクリート構造物に対する耐塩害性の長期評価を行うため、実海域において、港湾構造物を模擬し、実構造物寸法に近い大型供試体を用いた屋外暴露試験を実施した。

平成24年1月、表-2に示す8配合のコンクリート供試体(150cm×100cm×50cm)を作製し、上面と底面の2面を除く、4面をエポキシ樹脂塗料で被覆した後、28日間気中養生を行った。写真-1に示すように、大型供試体を平成24年2月に火力発電所構内の護岸前面海域の干満帯部に設置し、屋外暴露試験を開始した。

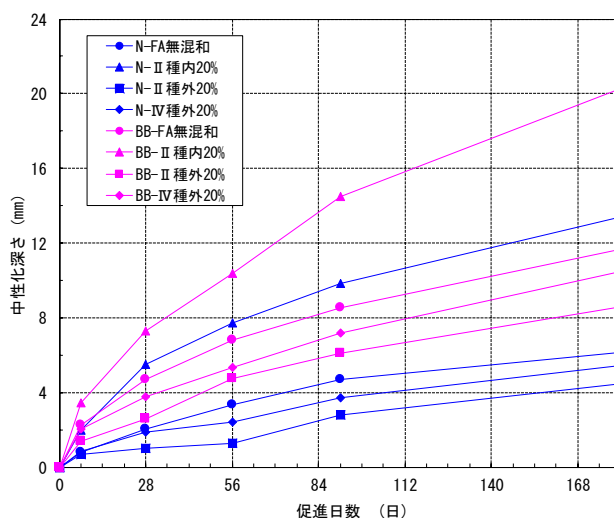


図-4 促進日数と中性化深さの関係



写真-1 屋外暴露試験状況(干満帯)

(2) 屋外暴露試験結果

屋外暴露試験に供したコンクリート供試体からコア（ ϕ 10cm×50cm）を採取して、深さ方向の塩化物イオン濃度の測定を行った。その際、塩化物イオン濃度がより高くなると考えられる底面側のコアを用いた。

屋外暴露供試体のコンクリート表面からの距離と全塩化物イオン量の関係から、見かけの拡散係数を回帰分析により求めた。屋外暴露試験の配合ごとの見かけの拡散係数を図-5 に示す。

高炉セメントを使用したコンクリートに FA を混和した場合の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも小さく、塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

Ⅱ種外割、Ⅳ種外割の配合では、見かけの拡散係数は FA 無混和よりも小さく、Ⅱ種外割、Ⅳ種外割は塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

Ⅳ種外割よりも、Ⅱ種外割の方が見かけの拡散係数が小さい傾向が見られた。これはⅡ種の方がブレン比表面積が大きいことから、組織が緻密になるためであると考えられた。

FA 無混和に比べて、Ⅱ種外割、Ⅳ種外割の方が見かけの拡散係数が小さく、Ⅱ種外割、Ⅳ種外割は塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

浸漬試験の見かけの拡散係数は、屋外暴露試験の結果とほぼ同じ傾向になることを確認した。

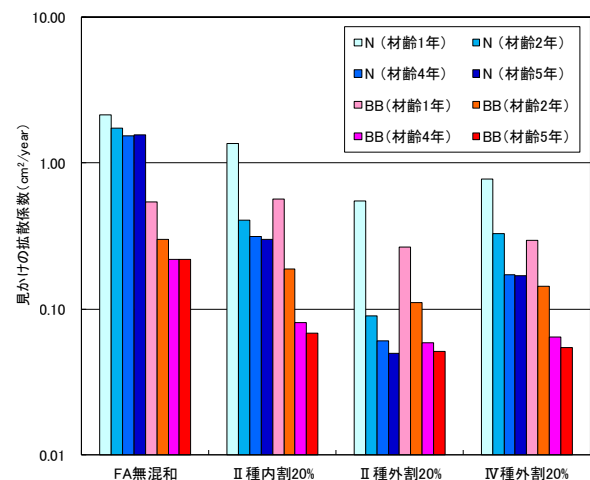


図-5 屋外暴露供試体の見かけの拡散係数

5.2 浸漬試験

(1) 浸漬試験の方法

室内で実施できる耐塩害性の促進試験として、塩水への浸漬試験を実施した。浸漬試験では、直径 10cm、高さ 15cm の円柱供試体を作製し、前処理として、以下の処理を行った。

- ・ 12 時間乾燥させた後、打込み側の 1 面を残し、他の 1 面・円周面をエポキシ樹脂で被覆。
- ・ 被覆したエポキシ樹脂が硬化するまで 4 日間放置した後、温度 20℃ の水中で 24 時間以上保存。

供試体を温度 20±2℃、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に完全に浸漬する。浸漬試験の実施状況を図-6 に示す。

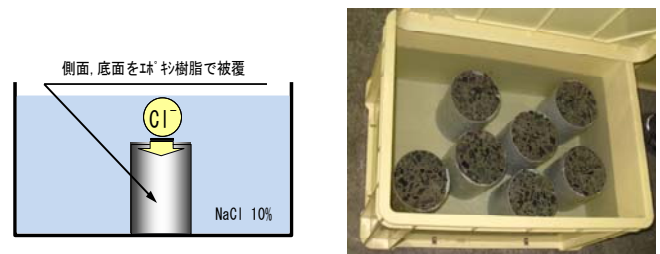


図-6 浸漬試験の実施状況

(2) 浸漬試験結果

浸漬試験の結果得られた深さ方向の塩化物イオン濃度の分布から、塩化物イオンの見かけの拡散係数を求め、図-7 に示す。

高炉セメントを使用したコンクリートに FA を混和した場合の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも小さく、塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

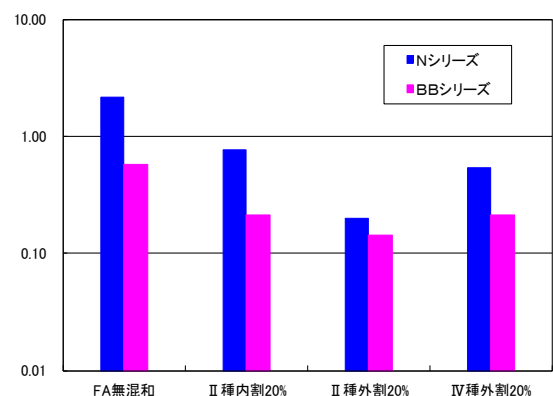


図-7 浸漬試験供試体の見かけの拡散係数

6. 鉄筋腐食に関する検討

6.1 塩害による構造物の劣化過程

塩害によるコンクリート構造物中の鋼材腐食の劣化過程を図-8に示す。構造物の使用期間により、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられる。

潜伏期には塩分の浸入・蓄積が進み、鋼材が腐食を開始し、進展期における内部ひび割れの進展により、コンクリート表面での腐食ひび割れ発生に至る。

通常のコンクリートに比べて、鋼材の腐食開始時期やコンクリート表面の腐食ひび割れ発生時期がより遅くなることによって、耐塩害性に優れていると定量的に評価することができる。

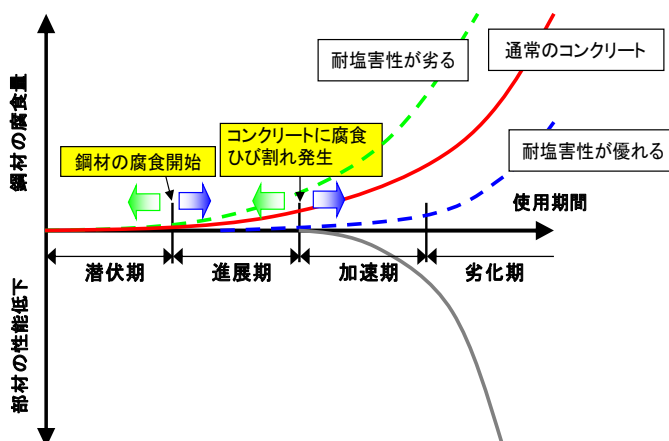


図-8 塩害による鋼材腐食の劣化過程

6.2 自然電位の連続計測

従来のコンクリート標準示方書(2007年)によれば、コンクリート中の鉄筋腐食開始時の塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 とみなしてよいとされてきた。¹⁰⁾

しかし、鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から腐食発生限界塩化物イオン濃度が求まる場合は、その値を用いることを原則とする¹¹⁾ことから、実験により腐食発生時における塩化物イオン濃度を求めることとした。

塩化物添加量を 0.6kg/m^3 、 0kg/m^3 とした供試体を作製し、図-9に示すように、上面と底面以外の側面4面をエポキシ系樹脂で被覆し、塩化ナトリウム10%水溶液に浸漬して、6個の供試体の自然電位を連続計測した。

自然電位が急激に低下した時点を、腐食開始と判定し、同時にコンクリート供試体を割裂し、かぶり面側の内部の鉄筋が腐食を開始していることを確認した。腐食発生状況の観察から、鉄筋のリブの部分に腐食が見られた。これは、リブの凹凸によってコンクリートと鉄筋の付着面に空隙ができやすいためと考えられた。

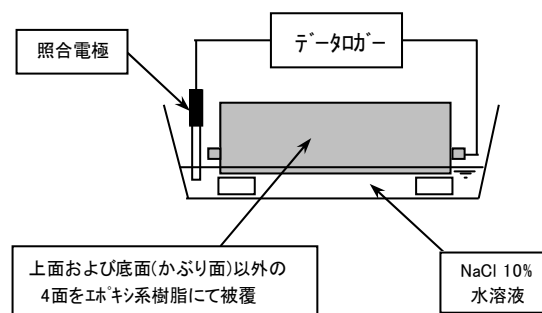


図-9 自然電位の連続計測方法

6.3 腐食発生限界塩化物イオン濃度の算定

自然電位が低下した供試体について、浸透深さ方向の塩化物量を分析し、浸漬期間から腐食発生時の塩化物イオン濃度を算出した。

各供試体について、深さごとの塩化物イオン濃度分布から、見かけの拡散係数を求めた。

見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を用いて、自然電位が低下した浸漬日数におけるかぶり位置での塩化物イオン濃度を、次のFickの拡散方程式の解の式により計算した。

Fickの拡散方程式の解の式

$$C(X, t) = C' + (C_0 - C') \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dct}} \right) \right\}$$

$[Dc: \text{見かけの拡散係数}, C_0: \text{表面塩化物イオン濃度}, C': \text{初期塩化物イオン濃度}, X: \text{かぶり}, t: \text{供用期間}]$

Fickの拡散方程式の解を用いて算定した腐食発生限界塩化物イオン濃度を表-3に示す。

Fickの拡散方程式の解により計算した腐食発生限界塩化物イオン濃度を統計処理して求めた平均区間推定(信頼度95%)の値は、塩化物添加量 0kg/m^3 の配合で 1.79kg/m^3 であり、塩化物添加量 0.6kg/m^3 の配合で 1.90kg/m^3 となった。

コンクリート標準示方書(2013年)¹¹⁾に準拠して、普通ポルトランドセメントを用いた場合で、水セメント比55%の時の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、 1.75kg/m^3 となり、ほぼ同程度の値となることを確認した。

表-3 腐食発生限界塩化物イオン濃度の算定

配合	塩化物 添加量 (kg/m ³)	供試体 番号	自然電位 低下時の浸 漬日数(日) t	鉄筋 かぶり (cm) X	見かけの 拡散係数D _c (cm ² /年)	表面塩化物 イオン濃度C ₀ (kg/m ³)	初期塩化物 イオン濃度C' (kg/m ³)	腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m ³)		
								Fick式	平均区間推定	示方書
N-FA 無混和	0.0	5	223	2.83	3.368	12.09	0	1.97	1.79	1.75
		6	264	2.89	3.945	10.47	0	2.37		
		2	273	3.16	3.261	12.97	0	1.98		
		4	283	2.95	3.318	10.48	0	2.03		
		1	290	3.15	3.545	11.61	0	2.14		
		3	428	3.11	3.176	12.76	0	3.25		
	0.6	1	211	3.08	2.640	16.12	0.48	1.70	1.90	
		6	240	3.00	3.096	12.63	0.48	2.15		
		5	254	2.91	2.631	14.51	0.48	2.28		
		2	267	3.04	3.021	15.27	0.48	2.68		
		4	278	3.06	2.741	13.73	0.48	2.26		
		3	331	3.11	3.024	13.68	0.48	2.92		
N-II種 内割	0.6	1	725	2.53	0.506	16.77	0.48	1.70	—	1.67
N-IV種 外割	0.6	3	747	2.88	0.506	29.46	0.48	1.80	—	—
		2	923	2.96	0.473	22.86	0.48	1.73		
		6	1162	2.91	0.469	25.43	0.48	2.78		
		5	1339	2.97	0.455	25.63	0.48	3.10		
BB-FA 無混和	0.6	5	1190	2.95	0.407	23.34	0.48	2.09	—	1.67

6.4 腐食開始後の鉄筋の腐食速度

鉄筋が腐食を開始した後の腐食速度について検討するため、腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えた内在塩分量を含んだコンクリート供試体を作製し、腐食速度を求めた。

内在塩分量を 3kg/m³、5kg/m³とした供試体を 6 個作製し、材齢 28 日まで封かん養生した後、分極抵抗法により腐食速度(質量損失速度)を測定した。

屋外暴露した供試体の各材齢における配合ごとに腐食速度を測定した結果を図-10 に示す。

高炉セメントの方が普通ポルトランドセメントに比べて、0.4～0.8 倍程度に腐食速度は減少する傾向が見られ、II 種外割、IV 種外割の腐食速度は、FA 無混和の場合の 0.2～0.6 倍、0.3～0.6 倍程度に減少する傾向が見られた。内在塩分量 5kg/m³の方が 3kg/m³に比べて 1.5～14 倍程度腐食速度は増加する傾向が見られた。屋外暴露した供試体の腐食速度は、配合ごとにほぼ一定値に収束する傾向が見られた。

環境条件の違いで比較すると、屋外暴露の方が、室内気中養生に比べて、腐食速度は増加する傾向が見られたが、これは屋外暴露の場合には、降水に伴う水の供給による影響が現れたためと考えられた。

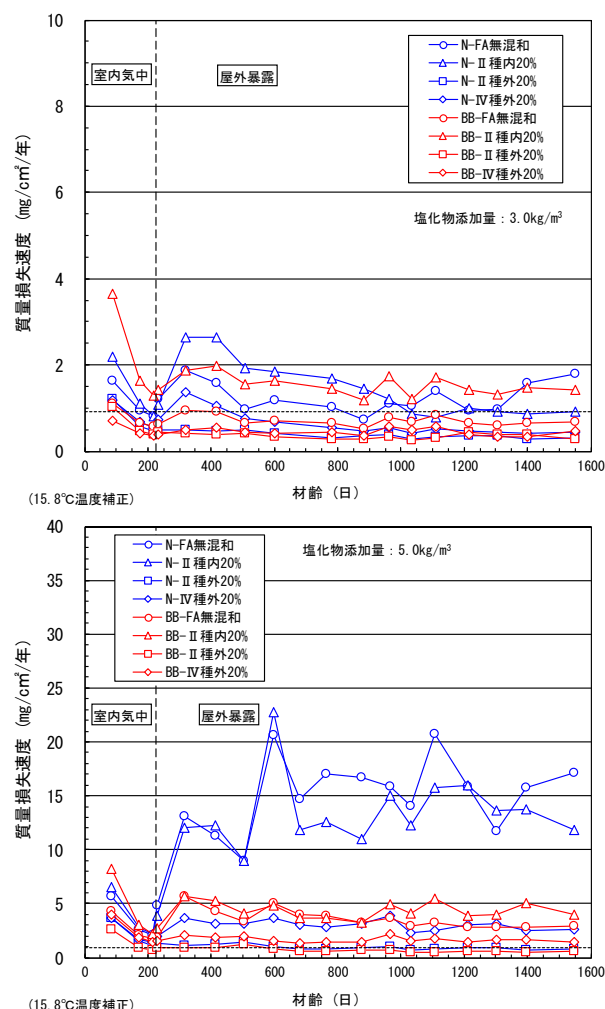


図-10 腐食開始後の鉄筋の腐食速度

6.5 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量

コンクリート表面に腐食ひび割れが発生した時の鉄筋の腐食量を求めるため、促進腐食環境下で、供試体に腐食ひび割れを発生させ、その時点の鉄筋の腐食量を求めた。内在塩分量を 5kg/m^3 とし養生期間 1 カ月の供試体を作製し、促進腐食試験を実施した。環境条件は、温度 70°C 、相対湿度 90% の高温高湿環境下で、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生するまで実施した。

腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量を算定した結果の一例を表-4 に示す。

表-4 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量

配 合		腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量 (mg/cm^2)
N	FA無混和	68.1
	II 種内割	62.1
	II 種外割	48.9
	IV 種外割	50.1
BB	FA無混和	46.1
	II 種内割	44.7
	II 種外割	51.8
	IV 種外割	54.8

7. 耐久性評価に関する検討

港湾構造物にFAコンクリートを使用する場合の鉄筋のかぶりを最小 5cm とした。

塩化物イオンの見かけの拡散係数および腐食発生限界塩化物イオン濃度から、鉄筋の腐食が開始するまでの期間(潜伏期の期間)を算出し、腐食開始後の腐食速度および腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量から、腐食ひび割れ発生までの期間(進展期の期間)を算出した。配合別の潜伏期・進展期の計算結果を図-11 に示す。

潜伏期・進展期の期間はII 種外割が最も長く、次にIV 種外割、II 種内割、FA無混和の順に短くなる傾向が見られた。

したがって、普通ポルトランドセメントを用いた場合、高炉セメントを用いた場合も、FA無混和に比べて、FAを混和した場合の方が耐塩害性が向上し、II 種内割、IV 種外割、II 種外割となるにしたいが、耐塩害性が高くなることが確認された。

8. ライフサイクルコストの試算

港湾構造物の例として、RCケーソン式岸壁を対象としてライフサイクルコストの検討を行った。

RCケーソン式岸壁の建設工事費は、国土交通省における工事实績を参考にしている土木学会四国支部の「四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」¹²⁾の工事費を参考に、170,000 千円/函と設定した。

FAコンクリートを使用する際は、生コン発注先のプラントにおいてFAの貯蔵サイロ等の準備がなく、材料費が高価となる場合について検討した。

コンクリート構造物の耐久性評価に関する検討結果から、普通コンクリート(FA無混和)、FAコンクリートは、配合によって耐用年数が異なることが分かった。

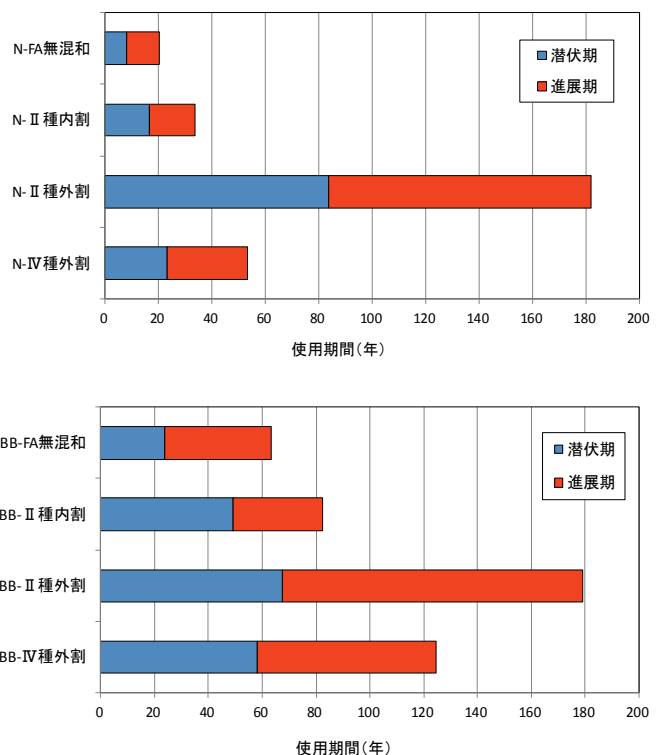


図-11 配合別の潜伏期・進展期の計算結果

両者のライフサイクルコストを比較するには、耐用年数が異なるため、建設工事費で直接比較することはできず、現在価値の年経費で比較することとした。

建設工事費の単年あたりのLCC(ライフサイクルコスト)を図-12に示す。FAコンクリートは初期コストが高額となるが、供用終了までの期間が長いことから、単年度あたりのライフサイクルコストで比較すると、普通コンクリートよりも安価となることが確認された。

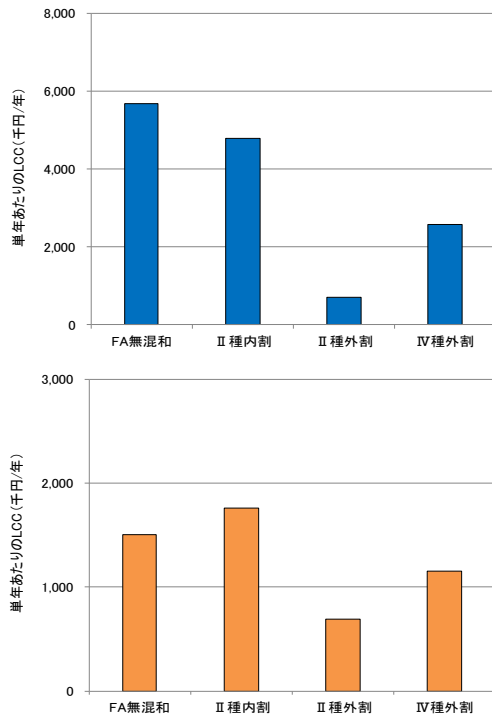


図-12 単年あたりのライフサイクルコストの試算結果

9. まとめ

高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合のコンクリートに関する試験・耐久性について考察した結果得られた知見は、以下のとおりである。

- ・細孔径分布から、材齢の経過とともに、ピークとなる細孔径は小径側にシフトし、コンクリート内部の組織が緻密になることが確認された。
示差熱重量分析からは、FAを混和したコンクリートでは、FA無混和に比べて、FAによるボゾラン反応が起きており、材齢 28 日以上の長期強度が増進した。
- ・促進中性化試験からは、高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものよりも中性化抵抗性が低下するものの、FAを外割りで混和することにより、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保できる。
- ・屋外暴露試験からは、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなり、II種外割、IV種外割の配合では、FA無混和よりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなる。
- ・耐久性評価からは、FA無混和に比べて、FAを混和した配合の方が耐塩害性が向上し、II種内割、IV種外割、II種外割となるにしたがい、耐塩害性が高くなることが分かった。

今回の実験結果より、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合、コンクリートの耐塩害性がさらに改善できることが明らかになった。

以上のことから、港湾構造物にFAコンクリートを使用することにより、鉄筋の腐食を遅らせ、その結果、トータルの維持管理費を低減することができ、構造物のライフサイクルコスト低減に貢献することが期待される。

【参考文献】

- 1)馬越唯好，河野清，山地功二，川崎真治：非JIS灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp349-354，1997
- 2)馬越唯好，濱崎修：非JIS灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp133-138，1998
- 3)馬越唯好，大内泰志，村上俊夫：強熱減量の異なるフライアッシュを多量に使用したコンクリートの性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.52，pp314-319，1998
- 4)馬越唯好，橋本親典，山地功二：Ⅲ種フライアッシュを多量に用いたコンクリートの実構造物施工，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp139-144，1999
- 5)馬越唯好，富加見徳治，武田啓二：フライアッシュを多量使用した高流動コンクリートの基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp865-870，2000
- 6)日本コンクリート工学会四国支部：フライアッシュコンクリートの耐久性評価研究委員会報告，pp169-174，2013
- 7)土木学会，循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，コンクリートライブラリー132，pp129-136，2009
- 8)下岡直哉，馬越唯好，上田隆雄，宮田啓志：フライアッシュコンクリートの塩害および中性化に対する評価について，平成 25 年度土木学会四国支部技術研究発表会，第V部門，pp303-304，2013
- 9)竹田宣典ほか：種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究，土木学会論文集，No.599，pp91-104，1998.8
- 10)土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp114-115，2007
- 11)土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp173-176，2013
- 12)土木学会四国支部：四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針，pp139-143，2016