

## FSコンクリートの港湾RC構造物への適用性評価

伊藤 正憲\* 早川 健司\* 大橋 潤一\*\*

**要約:** FSコンクリートは細骨材に石炭灰と蒸気エージング処理した製鋼スラグを、粗骨材に高炉スラグを使用した天然骨材を全く使用しないコンクリートであり、各研究機関で研究が進められている。しかし、FSコンクリートの港湾RC構造物への適用性について検討した報告は少ない。本研究では、中部地区から副産した石炭灰とスラグを対象とし、FSコンクリートの海洋環境下における適用性を評価するため、強度発現性状、塩化物イオン浸透性状、鉄筋の防食性についての検討、および海水に対する影響を評価するため溶出試験を実施した。その結果、海洋環境下での強度発現性状は普通コンクリートと同等であり、また塩分の浸透抑制効果が期待できるため、港湾RC構造物にも十分適用可能であることが確認できた。なお、本研究は、FSコンクリートを新たな建設材料として適用することを目的として設立された「FSコンクリート研究会」配合・耐久性ワーキンググループにおいて行なった実験の一部である。

**キーワード:** FSコンクリート、製鋼スラグ、フライアッシュ、圧縮強度、膨張抑制、塩化物イオン、鉄筋腐食、pH

目次:	1.はじめに	3.実験結果
	2.実験概要	4.まとめ

## 1. はじめに

近年、地球温暖化、資源の枯渇など環境問題が課題となっている。石炭火力発電所からは年間約1千万トンの石炭灰(以下、フライアッシュ)が、製鉄所からはスラグが年間約3.7万トン発生している。これらの多くは、セメント原料、道路用路盤材や埋戻し材として利用されているが、より一層の有効利用方法の開発が望まれている。

このような背景のもと、産業副産物であるフライアッシュやスラグを利用した新しいリサイクルコンクリートである「FSコンクリート」の研究開発が、運輸省第二港湾建設局や(株)沿岸環境開発資源利用センターを中心として進められてきた。

FSコンクリートとは、フライアッシュ(FA)、製鋼スラグ(SS)および高炉スラグ(GS)を使用したコンクリートであり、天然骨材を一切使用していないものである。その中で、製鋼スラグは、コンクリート用骨材として用いた場合膨張崩壊を起こす可能性があることから、コンクリート標準示方書などではその使用が禁止されていた材料である。しかし、十分に蒸気エージング処理した製鋼スラグをフライアッシュとともに使用することにより、その膨張を抑制できることが最近の研究で示され<sup>1),2)</sup>、無筋構造物である護岸構造物や消波ブロックなどに利用され始めている<sup>3)</sup>。

そこで、本研究は、FSコンクリートのさらなる用途の拡大を目的に、海洋環境下のRC構造物への適用性評価として強度発現性状、塩化物イオン浸透性状、鉄筋の防食性、pH等について検討したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

FSコンクリートの使用材料を表1に、普通コンクリートの使用材料を表2にそれぞれ示す。なお、混和剤はリグニンスルホン酸系のAE減水剤、および空気量調整剤を使用した。また、製鋼スラグは、新日本製鐵(株)名古屋製鐵所から発生している溶銲予備処理スラグを破碎、ふるい分けしたものを図1に示す蒸気エージング設備により前処理したものである。なお、水浸膨張率とはJIS A 5015に準拠して試験したもので、製鋼スラグ中に含まれる膨張原因となる鉱物の量の多さを表わしている。

表1 FSコンクリートの使用材料

材料	種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	入手先	備考
セメント	普通ポルトランド*	C	3.16	宇部三菱セメント	
細骨材	フライアッシュ	FA	2.20	中部電力碧南火力発電所	非JIS品(原粉)
	製鋼スラグ*	SS	2.54	新日本製鐵名古屋製鐵所	水浸膨張率0.2%
粗骨材	高炉スラグ*	GS	2.49		

表2 普通コンクリートの使用骨材

材料	種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	入手先	適用
細骨材	普通細骨材	NS	2.60	八王子産砕砂	N1
			2.59	掛川産山砂	N2
			2.63	木更津産山砂	N3
粗骨材	普通粗骨材	NG	2.65	八王子産碎石	N1
			2.64	津久井産碎石	N2
			2.70	鳥形山産碎石	N3

\* 土木研究室 \*\* 生産技術本部

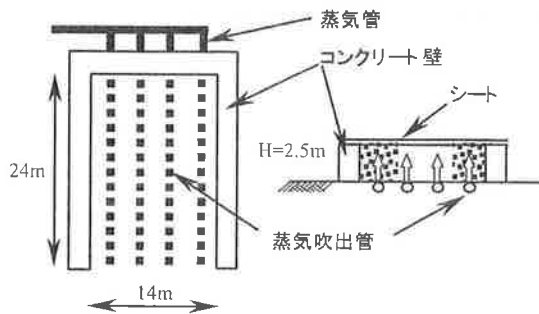


図 1 製鋼スラグの蒸気エージング設

写真 1~3 に製鋼スラグ、フライアッシュ、高炉スラグを示す。

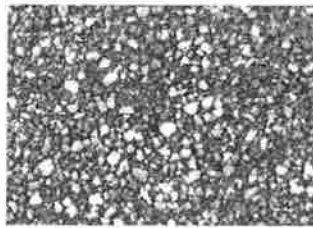


写真 1 製鋼スラグ



写真 2 フライアッシュ

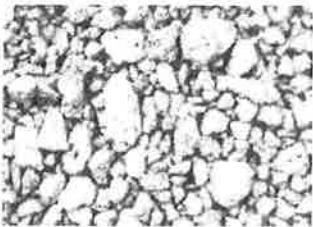


写真 3 高炉スラグ

## 2.2 配合

表 3 に配合表を示す。コンクリートの目標ランプは  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  とした。配合の考え方は、以下のとおりである。

- (1) 単位セメント量は基準強度  $24\text{N/mm}^2$  を得るため、配合選定を行い、良好なワーカビリティが得られる配合について強度を確認し  $250\text{kg}$  した。
- (2) フライアッシュ(FA)は細骨材として考えた。
- (3) FA 単位量は、製鋼スラグ(SS)単位量の容積比で 40%(FS2)、30%(FS1)、50%(FS3)と変化させた。
- (4) 比較用普通コンクリートは、N1；28 日圧縮強度が FS コンクリートと同程度( $24\text{N/mm}^2$ )の配合、N2；溶出試験用であり、単位水量が FS2 と同程度の配合、N3；28 日圧縮強度  $30\text{N/mm}^2$  以上を期待した配合の 3 種類である。

表 3 配合表

種類	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )						混和剤		
				W	C	細骨材			粗骨材		Ad1*	Ad2*
						NS	SS	FA	NG	GS		
普通 コンクリート	N1	67.5	49.3	167	248	910			954		1.00	
	N2	64.5	49.0	172	269	885			939		0.50	2A
	N3	55.0	48.0	155	282	897			997		0.25	2A
FS コンクリート	FS1	66.0		165			693	180		885		8A
	FS2	69.2	50.0	173	250		636	221		875	0.50	10A
	FS3	72.4		181			587	255		865		12A

\*Ad1: AE 減水剤 (セメント×%) Ad2: 空気量調整剤 (1A: C×0.003%)

## 2.3 練混ぜ方法

実験室でのコンクリートの練混ぜは、100 リットルの強制パン型ミキサを使用した。FS コンクリートの練混ぜ手順は、セメントおよび細骨材を投入して 30 秒間空練りし、次に練混ぜ水（混和剤含む）を投入した後 60 秒間練り混ぜてモルタルを作成し、最後に粗骨材を投入して 90 秒間練り混ぜた。普通コンクリート N2, N3 の場合は、実機のプラントの実績を考慮して粗骨材を投入してからの練混ぜ時間を 60 秒とし、FS コンクリートに比べて 30 秒間短かく設定した。また、普通コンクリート N1 は、生コンクリート工場(JIS 工場)で練り混ぜたものである。

## 2.4 試験方法

表 4 に実施した試験項目、方法および実施材齢を示す。

表 4 試験方法と材齢

試験名	基準	材齢
圧縮強度試験	JIS A 1108	標準水中; 材齢 7, 28, 91 日, 半年, 1 年,
ヤング係数試験	JSCE-G502	海洋環境下; 材齢 1 年
急速塩化物イオン透過性試験	AASHTO T-277	標準水中養生 N1, FS2; 材齢 10 ヶ月 N3; 材齢 1 年 試験体: $\phi 10 \times 5\text{cm}$
塩化物イオン量測定		JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠。 $\phi 10\text{cm}$ 供試体の深さ方向 1cm ごと 5cm まで測定。海水曝露のみ対象、材齢 10 カ月
鉄筋腐食試験		直径 10cm の円柱供試体に $\phi 9\text{mm}$ 鉄筋をかぶり厚 1cm と 2cm で設置。 材齢 1 年で割裂した供試体より鉄筋を採取し、透明シートに腐食範囲を写し取り、画像解析ソフトにより鉄筋の面積率を測定 (図 11 参照)
溶出試験 (pH 測定)		$\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、対象 N2, FS2、実験室内、屋外に材齢 1 ヶ月まで放置、その後、2 倍の容積の海水に曝露、以降、適時 pH 測定し、曝露期間 45 日間まで実施

## 2.5 養生(曝露)条件

養生(曝露)条件は、①  $20^\circ\text{C}$  標準水中養生、②  $20^\circ\text{C}$  海水養生、③ 干満帯曝露、④ 飛沫帯曝露とした。②~④の海

洋環境下での曝露試験は、神奈川県横須賀市の運輸省港湾技術研究所内の曝露試験場で行った。使用した海水は横須賀市の久里浜湾から採取したものである。曝露した供試体は、材齢約1ヵ月まで標準水中養生とし、その後各条件に曝露した。

一方、FS コンクリート利用手引書<sup>4)</sup>(以下、手引書)によると、FS コンクリートは製鋼スラグの膨張による影響を受けると言われており、この影響が生じるには長期間を要するため、オートクレーブ養生によってスラグの水和反応を促進させた後に圧縮強度試験を行い、スラグの膨張の影響を確認しなければならないとしている。そこで、材齢2日で180℃、10気圧のオートクレーブ養生を行い、材齢14日(気乾養生)で強度試験を実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 強度性状

##### 3.1.1 圧縮強度

図2に材齢1年までの材齢と圧縮強度の関係を示す。FS コンクリートは、初期の強度発現が若干遅れる傾向にあるものの、材齢28日圧縮強度は28~30 N/mm<sup>2</sup>程度となり、設計基準強度を十分満足する強度が得られた。また、材齢1年では、FS1~FS3の平均で50.3N/mm<sup>2</sup>であった。

図3に材齢7日強度を1とした場合の各材齢における圧縮強度比を示す。強度の増加は、N3が材齢1年で約1.8倍であったのに対し、FS コンクリートは材齢6ヶ月で約2.7倍、材齢1年では約3倍と長期に渡って強度が増加する傾向にあった。このようにFS コンクリートが長期に渡り強度増加した理由としては、製鋼スラグの膨張抑制効果を期待し、細骨材として混入したフライアッシュのポズラン反応によるものと考えられる。この影響により、製鋼スラグに対するフライアッシュの混合割合の違い(FS1~FS3)についても、フライアッシュの単位量の多いFS3が最も強度が増加し、少なくなるに従い増加割合は小さくなる傾向であった。

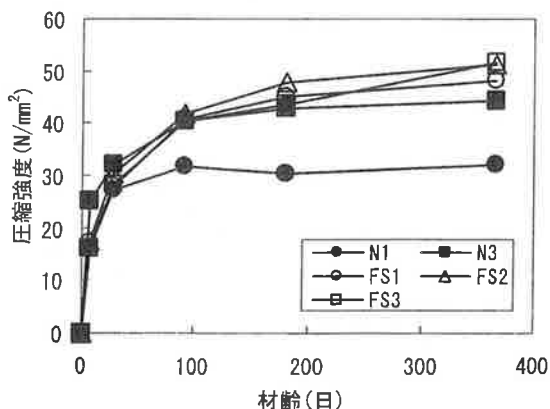


図2 材齢と圧縮強度の関係

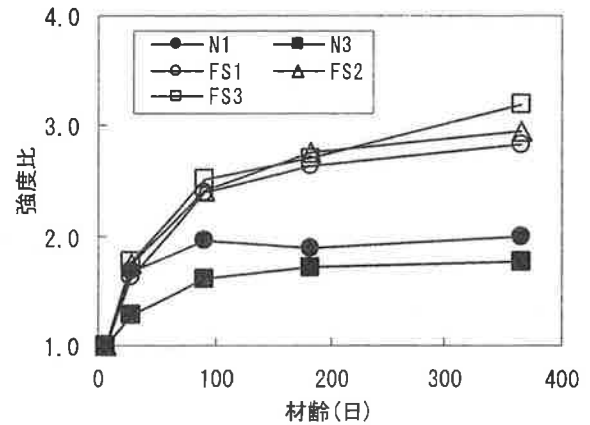


図3 材齢7日強度を「1」とした場合の強度比

##### 3.1.2 ヤング係数

図4に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。前述した様に、FS コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートに比べて長期にわたり増加する傾向にあった。しかし、ヤング係数は、その様な増加傾向は見られず、同じ強度の普通コンクリートと比較した場合、FS コンクリートの方が若干小さくなり、また、土木学会推定式より小さな値であった。

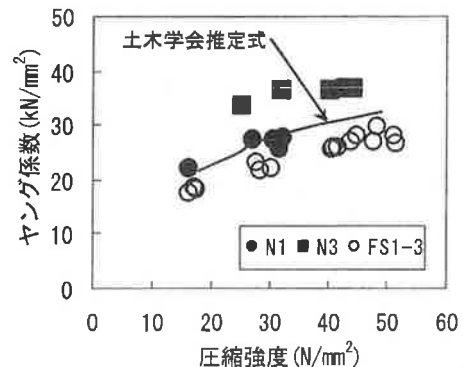


図4 圧縮強度とヤング係数の関係

### 3.2 スラグの膨張抑制効果

図5に製鋼スラグに対するフライアッシュの配合質量比(FA/SS)と標準水中養生した供試体の材齢28日圧縮強度に対するオートクレーブ養生後の圧縮強度の伸び率( $\sigma_{t-1}/\sigma_{28}$ )の関係を示す。なお、図中には手引書のデータ(凡例:○)も合わせて示す。何れのFS コンクリートも製鋼スラグの膨張による強度の低下は認められず、強度の伸び率は1.28~1.60程度となり、FA/SSが大きいほど伸び率が大きくなった。

手引書ではフライアッシュが製鋼スラグの1/4~1/5(0.20~0.25)程度以上であれば、膨張抑制効果が期待できるとしている。今回のFS コンクリートも(FA/SS)が0.25~0.43であることより、供試体表面にポップアウト現象等は認められず、製鋼スラグの膨張がフライアッシュにより十分抑制できていることが確認できた。

一方、手引書のデータと今回のデータを対象としてそれぞれ回帰させた直線の勾配が若干異なっている。これは、同じFA/SSであっても、蒸気エージング処理による水浸膨張率が手引書の製鋼スラグは0.49%であったのに対し、今回対象とした製鋼スラグは0.20%と小さかったため、製鋼スラグ中の未反応鉱物による膨張力が小さく、その分強度に及ぼす影響が少なくなり、よって、伸び率が大きくなったものとする。このようにコンクリートの材料として製鋼スラグを使用する場合には、十分な蒸気エージング処理を施し、製鋼スラグ中の膨張原因物質である未反応 $\beta$ - $C_2S$ や遊離マグネシア等の未反応鉱物の水和反応を促進させ、その量を少なくしておくことが重要である<sup>1),2)</sup>。

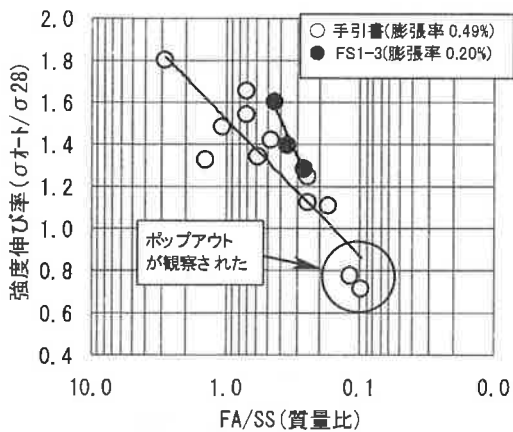


図5 FA/SSと強度の伸び率の関係

### 3.3 海洋環境下における特性

#### 3.3.1 圧縮強度

図6に海洋環境下に曝露した各コンクリートの材齢1年における圧縮強度を示し、また、図中には標準水中養生した供試体の圧縮強度を1とした場合の各曝露条件の強度割合を示す。標準水中養生した供試体と比較すると、海水中に曝露した場合には、普通およびFSコンクリートともに圧縮強度は約20%低下する傾向にあり、飛沫帯、干満帯に曝露した場合には、約5~10%低下する傾向にあった。この様に、普通とFSコンクリートでは各条件下で若干の差はあったが、FSコンクリートが前述の様に長期的に強度を発現するコンクリートであることを考えると、海洋環境下での強度発現性状は普通コンクリートとほぼ同等であると考えられる。

#### 3.3.2 ヤング係数

図7に海洋環境下に曝露した各コンクリートの材齢1年におけるヤング係数を示し、図中には標準水中養生した供試体のヤング係数を1とした場合の各曝露条件の割合を示す。FSコンクリートのヤング係数は、前述したように比較的強度のN1と同程度となり、また、標準水中養生に対する各条件下の低下割合も10%以下となり、普通コンクリートとほぼ同じような傾向であった。

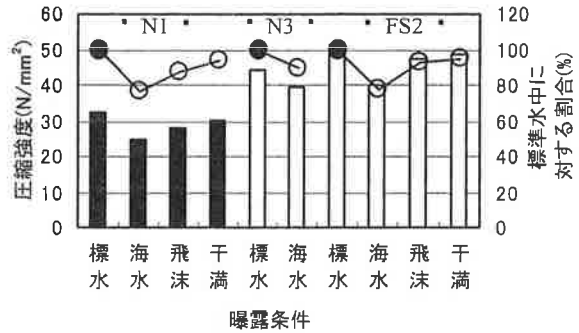


図6 海洋環境下における圧縮強度

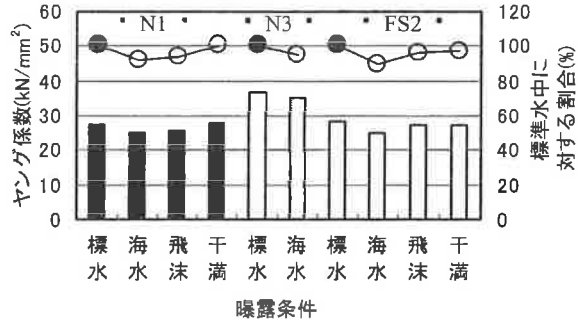


図7 海洋環境下におけるヤング係数

#### 3.3.3 塩化物イオン透過性

図8に急速塩化物イオン透過性試験の結果である通電時間と電流量の関係を示す。塩化物イオンの透過性をAASHTOの判定表(表5)より評価すると<sup>9)</sup>、材齢1年の圧縮強度がFSコンクリートの約6割程度であったN1は6時間後の電流量が約6000クーロンで[High]、同じく強度が約9割程度であったN3が約2600クーロンで[Moderate]の評価であった。一方、FSコンクリートの電流量は800クーロン以下であり、その透過性は[Very Low]の判定結果となった。このことから、FSコンクリートは塩化物イオンの透過性が非常に低い、言い換えると遮塩性が高いコンクリートであると考えられる。

表5 塩化物イオン透過性の評価

電流量(クーロン)	塩化物イオン透過性	備考
4000~	High	高W/C(>0.6)普通セメント使用
2000~4000	Moderate	中W/C(0.4~0.5)普通セメント使用
1000~2000	Low	低W/C(<0.4)普通セメント使用
100~1000	Very Low	ラテックス混入コンクリート

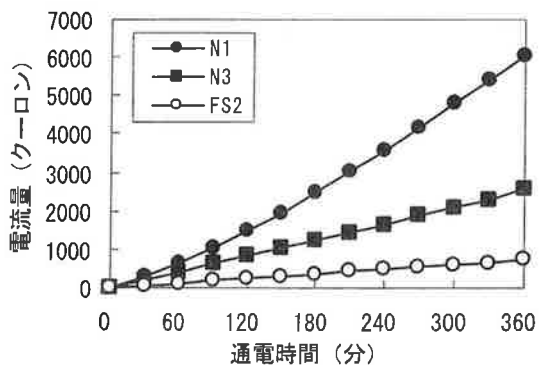


図8 通電時間と電流量の関係

### 3.3.4 鉄筋の腐食

3.3.3 において記述したとおり実験室レベルの試験では、FS コンクリートは遮塩性の高いコンクリートであることが確認できた。さらに本研究では、実際の海洋環境下においても塩分の浸透量が少なく、また、鉄筋の防食性能に優れる材料であるかを以下の様に確認した。

#### (1)海水曝露供試体による塩分量測定

図9に海水に曝露した供試体から深さ方向に採取した試料による全塩分の分析結果を示す。FS コンクリートは混合セメント系のコンクリートによくみられるような塩分の分布状況であった。すなわち、表面部分での塩分量が若干大きく、しかし、内部に含有する塩分の量は普通コンクリートよりも少なくなっていた。

このように、実際の海洋環境レベルでの試験結果からも、FS コンクリートは内部への塩分浸透性が普通コンクリートに比べて低い、遮塩性の高いコンクリートであることが確認できた。

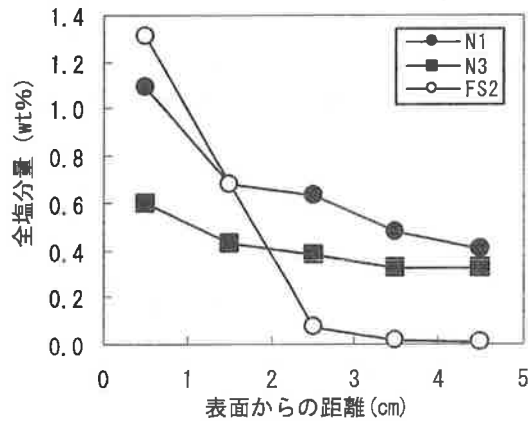


図9 供試体表面からの距離と全塩分量の関係

#### (2)有筋供試体による鉄筋の腐食試験

図10に曝露した有筋供試体の概要を示す。図11に各海洋環境下に曝露した「かぶり1cm」および「かぶり2cm」で供試体中に設置した鉄筋の腐食面積率を示す。なお、試験は材齢約1ヶ月で曝露開始、材齢1年で試験を行った。一般的に言われているように鉄筋の腐食は、「海水中」<「干満帯」<「飛沫帯」の順で進行しており、また、かぶり1cmの方が2cmよりも進行していた。

FS コンクリートの供試体中に設置した鉄筋の腐食は、飛沫帯に曝露した供試体中の鉄筋のみで進行しており、かぶり1cmの鉄筋の腐食面積率でも10%程度であり、N1の約半分しか進行しておらず、それ以外の環境では進行していなかった。一方、普通コンクリート中の鉄筋は、干満帯、飛沫帯で腐食が進行しており、特にFS コンクリートでは全く腐食が進行しなかった干満帯においても進行していた。

前述の塩分量の測定結果から考えると、かぶり1cmの部分では、FS2 および N1 ともにほぼ同程度の塩分量と

なっていることから、腐食の程度も同程度となることも考えられる。しかし、試験では普通コンクリートの方がFS コンクリートよりも腐食が進行していた。これには、塩分以外の要因である酸素供給量、水分等が影響していると考えられる。

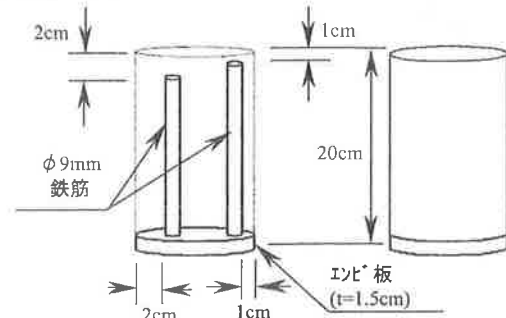


図10 鉄筋腐食試験 試験体概要

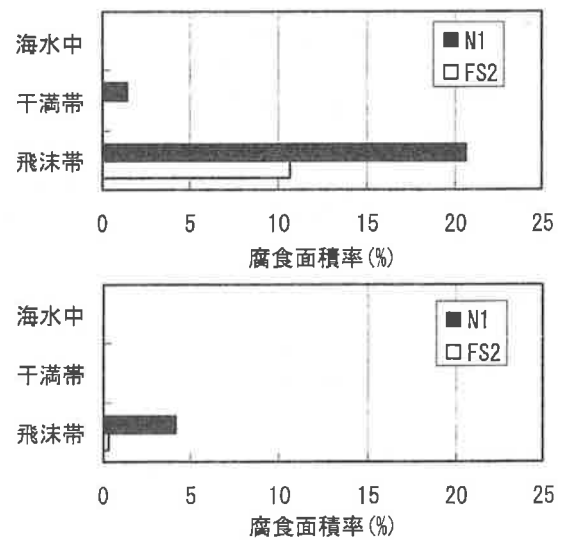


図11 各曝露条件における鉄筋の腐食面積率

### 3.3.5 溶出

溶出試験は、N2, FS2 の各コンクリートを材齢2日で脱型後、屋内および屋外に試験体を1ヶ月間放置し、その後、容積比で2倍の海水に浸し、所定日数において海水のpHを測定した。図12に海水浸漬日数とpHの関係を示す。なお、試験に使用した久里浜湾から採取した海水のpHは8.0程度である。屋内放置した試験体と比較すると、FS コンクリートは普通コンクリートよりもpHが若干低く、溶出量が少なくなった。一方、屋外放置した試験体と比較すると、FS コンクリートが屋内放置した試験体と同程度のpHであったのに対し、普通コンクリートは、風雨などの影響を受けて屋外放置の試験体の方がpHは低くなった。このように、FS コンクリートは、前述の遮塩性に優れることなども考慮すると、ペースト部分が緻密化し、海水への溶出が普通コンクリートよりも少なくなると考える。しかし、細孔構造などについて検討していないことから、今後詳細に検討していきたい。

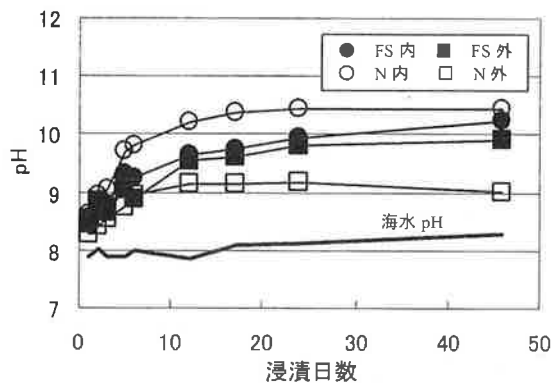


図 12 海水浸漬日数と pH の関係

#### 4. まとめ

FS コンクリートの海洋環境下の RC 構造物への適用性を評価するため、各種の実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) FS コンクリートの圧縮強度は、フライアッシュのポゾラン反応により長期に渡り増進し、材齢 1 年で約 50N/mm<sup>2</sup> であり、また、長期における強度の伸び率は、フライアッシュの使用量が多いほど高くなった。
- (2) 材齢 2 日でオートクレーブ養生した結果、強度低下は認められず、今回対象とした FS コンクリートは製

- 鋼スラグの膨張が抑制されていることが確認された。
- (3) FS コンクリートのヤング係数は、普通コンクリートに比べて小さくなった。
- (4) 各種の海洋環境下において曝露試験を実施した結果、FS コンクリートの海水の作用による強度特性の変化は普通コンクリートと同等であった。
- (5) 急速塩化物イオン透過性試験および塩化物イオン含有量の測定結果より、FS コンクリート内部への塩化物イオンの浸透は普通コンクリートに比べて小さくなった。
- (6) 海洋環境下に曝露し鉄筋の腐食状況を確認した結果、FS コンクリートの腐食面積率は、普通コンクリートより小さく、鉄筋の防食性能に優れている結果であった。
- (7) 溶出試験の結果、FS コンクリートの海水へ溶出は、普通コンクリートと同等以下と考えてよい。

以上のように、FS コンクリートの強度特性、塩分浸透性、溶出に関して検討した結果、海洋環境下での強度発現性状は普通コンクリートと同等であり、また塩分の浸透抑制効果が期待でき、さらに、環境への負荷も低減できることから、海洋環境下の RC 構造物にも十分適用可能な材料であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、FS コンクリートを鉄筋コンクリート構造物へ適用することを目的に設立された「FS コンクリート研究会(委員長；名古屋大学 田辺教授)」の成果の一部を取りまとめたものである。参加企業各社の関係者、運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室の皆様、(株)沿岸環境開発資源利用センターの堀井氏には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)川端秀和ほか：製鋼スラグを使用したモルタルの膨張とその抑制(1) モルタルの物理的性質，第 54 回セメント技術大会講演要旨，pp.260-261，2000.5
- 2)中田英喜ほか：製鋼スラグを使用したモルタルの膨張とその抑制(2) モルタルの膨張に及ぼす水和反応の影響，第 54 回セメント技術大会講演要旨，pp.262-263，2000.5
- 3)林 恒一郎，篠原勝次，澤木裕紀：天然骨材を全く使用しない FS コンクリートの開発，セメント・コンクリート，pp.28-33，No.630，1999.8
- 4)(株)沿岸環境開発資源利用センター：FS コンクリートの利用手引書，1998.11
- 5)Neal S. Berke., Donald W. Pfeifer：Protection Against Chloride-Induced Corrosion, Concrete International, pp.45-55, 1988.12
- 6)大賀宏行，ロバート・ダグラス・フートン：急速塩化物透過性試験によるセメント系硬化体中の塩化物移動現象の評価，生産研究，pp.29-32，46 巻，7 号，1994.7
- 7)FS コンクリート研究会：リサイクル資源を利用したコンクリートの開発 調査研究報告書，2000.4

## STUDY ON APPLICATION OF FS CONCRETE TO THE HARBOR STRUCTURE

M.Ito, K.Hayakawa, and J.Oohashi

Up until today it has been stated in concrete standard specifications and other documents that steelmaking slag that is produced in iron works should not be used as concrete aggregates because it contains uncertain minerals. However, recent studies show that if steelmaking slag processed with steam is used with fly ash its expansion can be controlled. But, the report by the evaluation under the marine environment is little.

This is a report on blast furnace slag and steelmaking slag. This also reports on the strength, sea water-resistance, elution of concrete mixed with fly ash but without natural aggregates FS concrete.