

産業副産物を有効利用したコンクリートの 海洋構造物への適用に関する研究

RESEARCH ON APPLICABILITY OF CONCRETE WITH BY-PRODUCTS TO MARINE CONCRETE STRUCTURES

審良善和¹・岩波光保²・山路徹¹・中野松二³・濱田秀則⁴
Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI, Shoji NAKANO
and Hidenori HAMADA

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究チーム
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム (同上)

³正会員 ショーボンド建設株式会社 工事技術部 (〒160-0004大阪府大阪市城東区永田3-12-15)

⁴正会員 博(工) 九州大学大学院 教授 (〒160-0004福岡市西区元岡744)

This report examined quality and durability of concrete utilizing by-products that used steel-making slag, fly ash and blast furnace slag. This concrete is called FS concrete. FS concrete has expansiveness by the reaction with water. Therefore, performance of fresh concrete and hardened concrete has still a lot of uncertain parts. In this study, the applicability to marine concrete structures was evaluated by examining stability and durability of FS concrete. From the result, 1) Stability of FS concrete decreases by the powdering rate's increasing. 2) Durability of FS concrete on chloride-induced deterioration is high. 3) It was considered that FS concrete was possible to apply concrete structures under marine environment if stabilized steel-making slag that gave atmospheric aging and steam aging was used as fine aggregate.

Key Words : *Steel-making slag, fly-ash, by-products concrete, chloride-induced deterioration, stability performance of concrete*

1. はじめに

現在, 天然骨材の枯渇や骨材採取による環境破壊の防止などの理由から, リサイクル材料や代替材料の利用拡大が望まれている. コンクリート用骨材としてのスラグ系骨材の利用については, 高炉スラグ骨材, 銅スラグ骨材およびフェロニッケルスラグ骨材などの安定性の高いものに関しては JIS A 5011 によって規格化されており, 利用拡大に向けた研究開発が行われている¹⁾²⁾.

本研究は, 産業副産物である製鋼スラグ, フライアッシュを細骨材として, また, 高炉スラグを粗骨材として有効利用した, 天然骨材を全く使用しないコンクリート (以下, FS コンクリートと呼ぶ) の海洋構造物への適用可能性について検討を行うものである. ここで, 製鋼スラグは, 製鋼工程で排出されるスラグであり, 粗鋼 1t あたり 130kg~150kg 生成される. 製錬炉の種類により転炉スラグ, 電気炉スラグに分類され, その他に溶銑予備処理スラグなども含まれる. 本研究で用いる製鋼スラグは, 膨張

性を有する化学的に不安定な転炉スラグおよび溶銑予備処理スラグなどである. なお, 電気炉酸化スラグのみ JIS 規格化されており, それ以外のものは非 JIS 品となる.

製鋼スラグ骨材内部には, 遊離石灰 (Free-CaO) や珪酸二カルシウム β 型 (β -C₂S) などの不安定鉱物が存在するため, コンクリート内部または外部から浸入する水との反応によって膨張する. このため, 安定性を確保するためには, 骨材膨張を抑制するための何らかの対策が必要となる. この膨張抑制を目的にポズラン反応性を有するフライアッシュを代替骨材の一部とみなし混入することが, FS コンクリートの特徴の一つである.

FS コンクリートも含めて, これまでに製鋼スラグのコンクリート用骨材または固化体への適用に関する技術開発は精力的に行われており, その成果も取りまとめられている³⁾⁴⁾⁵⁾. しかしながら, 製鋼スラグの品質がコンクリートの安定性に及ぼす影響や, フライアッシュによる製鋼スラグの膨張抑制効果の程度などは十分に解明されていないのが現状であり, 海洋構造物への適用を考える場合には, FS

表-1 実験に使用した製鋼スラグの品質

記号	種類	混合比	粉化率 (%)	水浸膨張比 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	エージング方法
SS-A	溶銑予備		0.14	0.21	3.42*	3.63*	3.95	大気3ヶ月+蒸気3日
SS-B	溶銑予備		0.44	0.46	3.47*	3.06*	4.10	大気3ヶ月
SS-C	溶銑予備		0.30	0.62	3.79*	2.38*	4.10	大気1ヶ月
SS-D	溶銑予備		0.3		3.51	4.30	3.72	蒸気
SS-E	溶銑予備+転炉	I:G=9:1	1.0		3.43	4.04	3.65	大気
SS-F	溶銑予備+転炉	J:G=2:1	2.5		3.46	3.59	3.30	なし+大気
SS-G	転炉		6.9		3.02	5.09	3.15	大気
SS-H	溶銑予備		0.40	0.34			3.13	大気3ヶ月
SS-I	溶銑予備		0.3		3.48	3.91	3.71	大気
SS-J	溶銑予備		0.3		3.68	2.84	3.37	なし
SS-K	転炉			0.37	3.04	4.54	2.98	蒸気

※JSCE-C506-2003「電気抵抗法によるコンクリート用スラグ骨材の密度および吸水率試験方法」による。

表-2 実験で使用したフライアッシュの品質

記号	強熱減量 %	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	45μふるい残分 μ	二酸化けい素 %	フロー値比 %	湿分 %	MB吸着量 g/g	活性度指数% 28日, 91日
FA-A	2.0	2.53	3580	22	47	105	0	0.24	83, 95
FA-B	3.7	2.16	3990	33	57.6	101	0	0.51	81, 95
FA-C	5.7	2.17	3670	22	56.1	99	0	0.61	82, 95

コンクリートの安定性および耐久性を評価する必要がある。そこで、本研究では、製鋼スラグおよびフライアッシュの品質を変化させた FS コンクリートの安定性について検討し、製鋼スラグのコンクリート骨材としての利用可能性について評価した。また、FS コンクリートの強度特性や塩化物イオンの浸透特性などについて検討し、海洋コンクリート構造物への適用可能性について検討した。

2. 使用材料

(1) FSコンクリート用材料

a) 製鋼スラグ

製鋼スラグは、水和反応を起こし膨張破壊を起こすことがあるため、現在は、屋外に数ヶ月暴露する大気エージングおよび短期間に安定化する蒸気エージングを施すことによってスラグの膨張を抑制し安定化を図る技術が確立されている。

実験に使用した製鋼スラグを表-1 に示す。検討では 11 種類の品質の異なる製鋼スラグを用いた。また、製鋼スラグの粒度分布の一例を図-1 に示す。製鋼スラグの特徴としては、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」で規定されたコンクリート用骨材の基準値よりも粗粒分が多い傾向にある。また、表乾密度は、鉄分を含むことから 3~4g/cm³と高く、吸水率も 3%以上と高い骨材となる。したがって、いずれの場合も JIS A 5005 の規定外の低品質骨材となる。また、骨材の形状もスラグ骨材特有の角張ったものであるため、天然骨材を用いたコンクリートに比べワーカビリティは低下する可能性がある。本検討では、産業副産物を効率よく利用できるコンクリートを目指すため粒度調整等は行わず、このまま用いることとした。

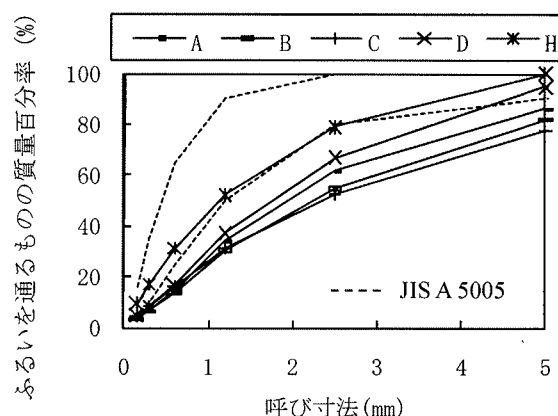


図-1 製鋼スラグの粒度分布

b) フライアッシュ

実験に用いたフライアッシュを表-2 に示す。フライアッシュは、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」で規定されるⅡ種およびⅢ種に相当するものを用いた。なお、本研究では、フライアッシュを細骨材の一部とみなして用いる。

c) その他の材料

セメントには、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，ブレン値 3300cm²/g）および高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³，ブレン値 3890cm²/g）を用いた。また、粗骨材として、2 種類の高炉スラグ粗骨材（A: 表乾密度 2.52 g/cm³，吸水率 2.2%，B: 表乾密度 2.57 g/cm³，吸水率 2.9%）を用いた。また、混和剤として、ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を、空気量調整剤としてフライアッシュ用の AE 剤を使用した。

(2) 普通コンクリート用材料

比較用として用いた普通コンクリートの使用材料は、セメントとして普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，ブレン値 3300cm²/g）および高炉

セメント B 種（密度 3.04g/cm^3 ，ブレン値 $3890\text{cm}^2/\text{g}$ ）を，細骨材として静岡県大井川産陸砂（表乾密度 2.57g/cm^3 ，粗粒率 2.59）を，粗骨材として東京都八王子産碎石 2005（表乾密度 2.67g/cm^3 ）を用いた．また，混和剤として標準型の AE 減水剤，空気量調整材として AE 剤を用いた．

3. 製鋼スラグの品質がFSコンクリートの安定性に及ぼす影響

写真-1 に，製鋼スラグの種類を変えた使用材料で表-3 に示す配合のもと作製したコンクリートを用いて，骨材の膨張を促進させるためにオートクレープ養生（ 180°C ，10 気圧，24 時間）させた後の外観を示す．なお，製鋼スラグの品質は粉化率⁵⁾によって示した．ここで，粉化率は，骨材の膨張量を示す指標で，製鋼スラグ水和固化体で用いられている方法である．粉化率は製鋼スラグ粒個々の膨張破壊を照査でき，工業的に計量不可能な free-CaO や free-MgO 粒の存在量に代わる指標となるものである．粉化率が大きくなるに従ってコンクリート表面のポップアウトの量が多くなっていることが分かる．粉化率が 0.3% の供試体においては，ポップアウトが少し確認された程度であったが，粉化率 6.7% の供試体においては，オートクレープ養生中の骨材の膨張によって供試体が破壊した．このことから，製鋼スラグを使用するにあたっては，エージング処理によってある程度安定化させた製鋼スラグを適切に使用する必要があることが分かる．

ポップアウトはコンクリート表層部分における骨材の異常膨張によって生じたものであり，コンクリート内部の膨張の程度を定量的に評価したものではない．しかし，ポップアウトと同様な骨材膨張がコンクリート内部でも生じていると仮定すれば，コンクリートの安定性の指標としてポップアウトを用いることができる．そこで，骨材の膨張の程度を定量化するため，表-3 に示す配合のもと，製鋼スラグおよびフライアッシュの種類を変化させたコンクリートを作製し，オートクレープ養生および 80°C 水中養生（28 日間）によって促進養生させた供試体を用いてコンクリートの安定性について評価した．図-2 にポップアウト面積率と製鋼スラグの粉化率との関係を示す．ここで，ポップアウト面積率は，養生後のコンクリート表面をトレースし，ポップアウトした面積を求め，供試体表面積あたりの比として求めたものである．フライアッシュの品質に関係なく，製鋼スラグの粉化率が大きくなるに従ってポップアウト面積率も線形的に増加する傾向が認められる．ポップアウト面積率はコンクリート表層の骨材の膨張の程度を評価しているものであるが，コンクリート内部の骨材も同様な膨張が生じているとすれば，その膨張圧がコンクリートに生じていることになる．遊離石灰が水和し水酸化カルシウムに変

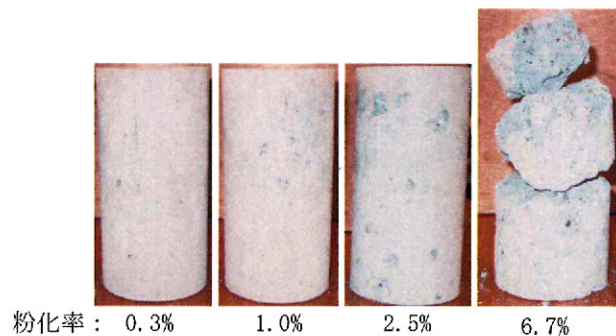


写真-1 オートクレープ養生後の供試体表面状況

表-3 FSコンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	ss/s*1 (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)
10 ± 2.5	70	70	52	170

*1 細骨材容積中に占める製鋼スラグの容積比

(製鋼スラグ：フライアッシュ=7：3)

*2 目標空気量は， $4.0 \pm 1.5\%$ または $5.0 \pm 1.5\%$

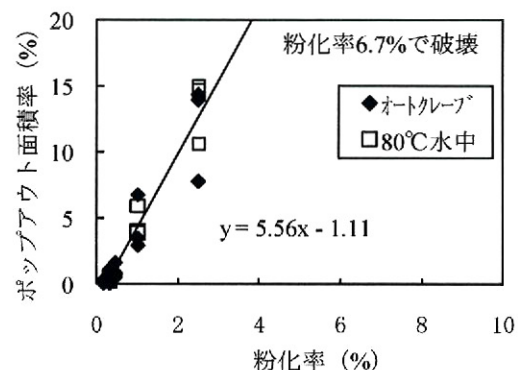


図-2 粉化率とポップアウト率の関係

化した場合，その体積は約2倍程度に膨張することになるため，コンクリート内部の膨張圧は非常に大きくなると予想される．したがって，安定なコンクリートを製造するためには，極力ポップアウトしない品質の製鋼スラグを使用することが望ましいと考えられる．今回の試験結果によって得られた粉化率とポップアウト率との関係は式(1)で表せる．

$$A = 5.56x - 1.11 \quad (1)$$

ここに， A ：促進養生後のポップアウト率(%)， x ：粉化率(%)である．今回の結果からは，ポップアウトを許容しない安定なコンクリートを製造する必要がある場合の製鋼スラグの粉化率は0.2%以下とする必要があることが分かる．ただし，図-2 は促進養生後のポップアウトの状態を評価したものであり，製鋼スラグのもつ膨張程度の最大値を評価したものである．したがって，実環境下で長期的なフライアッシュとのポゾラン反応によって，その膨張量は低下する可能性もある．

図-3 に3年間 20°C 水中に養生させたFSコンクリートのポップアウト面積率と製鋼スラグの粉化率の関係を示す．なお，図中には，得られた結果から

ポップアウトの速度を求め、それ以降、同様な速度でポップアウトが進行すると仮定した場合の 50 年後および 100 年後のポップアウト面積率についても併せて示す。この結果、促進養生させた場合にコンクリートが破壊に至った粉化率 6.7%の製鋼スラグを使用したコンクリートも、ポップアウト面積率は 0.1%と非常に小さな値となった。いずれの製鋼スラグを用いたコンクリートもポップアウトがなくなることはなかったが、図-2 と比較すると全供試体の平均で 1/200 程度まで低下した。これは、時間の経過とともに徐々に製鋼スラグ中の遊離石灰は水和し水酸化カルシウムを生成するが、一方でフライアッシュによるポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費されたためであると推察される。いずれにしても、製鋼スラグは、図-2 のように高温環境にある場合は非常に膨張性の高い骨材であるが、一般的な使用環境下（20℃程度）においてはその膨張性は非常に小さいと考えられる。

製鋼スラグに SS-G を、フライアッシュに FA-C を用いた FS コンクリートを塩害環境に 2 年間暴露した供試体を用いて、製鋼スラグ細骨材周辺のセメントペースト中のフライアッシュのポゾラン反応の状態を EPMA (Electron Probe Micro Analyser) による微視的面分析（400×400 μm）により検討した。測定はフライアッシュの主成分であるケイ酸（SiO₂）やポゾラン反応時に消費されるカルシウム（Ca）などの元素分布をもとに行った。製鋼スラグ骨材とペーストの界面からの距離とその位置の未水和フライアッシュ量の関係を図-4 に示す。なお、ペースト中のフライアッシュはどの位置も一様であると仮定し検討した結果である。この結果、製鋼スラグ界面からの距離が離れるにしたがって未水和のフライアッシュが増加していることが分かる。これは、製鋼スラグから溶出される水酸化カルシウムがフライアッシュのポゾラン反応に寄与していることを意味していると考えられる。配合から推定したフライアッシュ量と比較すると骨材周辺のフライアッシュによって骨材の膨張を抑制していることが分かる。この膨張抑制機構によって、ある程度反応性のある製鋼スラグを使用した場合も FS コンクリートの安定性は確保されることが考えられる。ただし、骨材の膨張性が完全に停止しているとは考えられず、適用される環境（環境温度や水の供給など）によって大きく変化する可能性がある。これについては今後の課題とする。

4. FSコンクリートの強度特性

表-4 に示す配合のもと作製したコンクリートの材齢 7 日、28 日および 91 日のセメント水比（C/W）と圧縮強度の関係を図-5 に示す。一般的に普通コンクリートはセメント水比と比例関係にあるが、FS コンクリートも同様に比例関係が認められ

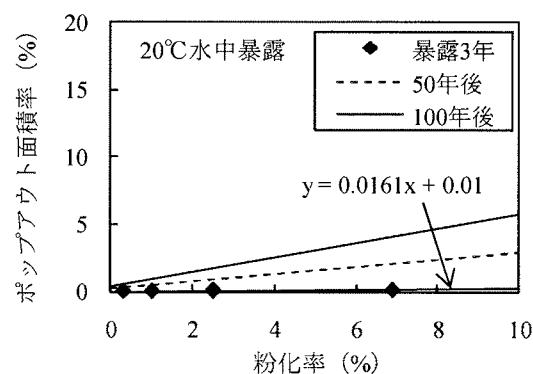


図-3 粉化率とポップアウト率の関係

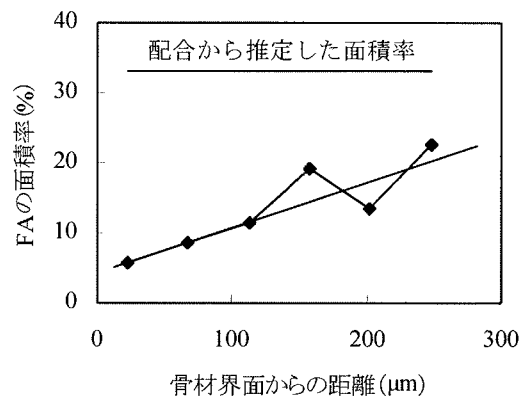


図-4 製鋼スラグ骨材界面からの距離と未水和フライアッシュ面積率の関係

表-4 FSコンクリートの配合

スランプ (cm)	W/C (%)	ss/s*1 (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)
10±2.5	60~90	70	50	185

- *1 細骨材容積中に占める製鋼スラグの容積比
(製鋼スラグ：フライアッシュ=7：3)
- *2 目標空気量：4.0±1.5%
- *3 使用材料：普通ポルトランドセメント，SS-I（製鋼スラグ），FA-B（フライアッシュ）

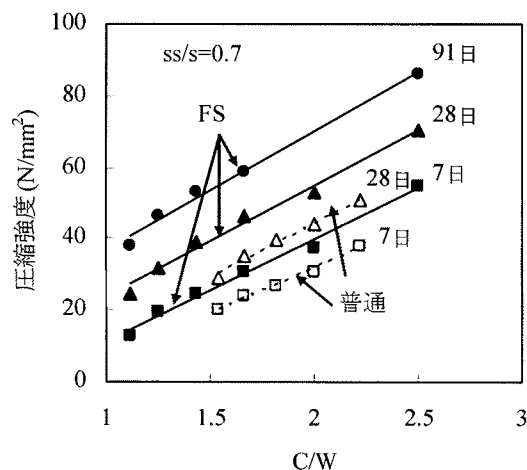


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

た。今回の実験結果における関係式は、普通コンクリートの場合が式（1）に、FS コンクリートの場合が式（2）となった。

$$\sigma_{28} = 30.0 (C/W) - 15.7 \quad (2)$$

$$\sigma_{28} = 31.1 (C/W) - 7.5 \quad (3)$$

ここに、 σ_{28} ：材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm²)， C/W ：セメント水比である。普通コンクリート，FS コンクリートともに直線式の傾きは 30N/mm² 程度となり，FS コンクリートは普通コンクリートと同等であると考えられる。ただし，FS コンクリートの場合，細骨材としてフライアッシュを多量に混入しているため，そのポゾラン反応によって，同一セメント水比の圧縮強度はおよそ 8N/mm² 程度増加した。

フライアッシュによる圧縮強度増加の効果を確認するため，表-5 に示す配合のもと作製した FS コンクリートの製鋼スラグ細骨材容積比 (ss/s) と圧縮強度の関係を図-6 に示す。この結果， ss/s と圧縮強度の関係にも比例関係が認められ， ss/s が大きくなるにしたがって強度が低下した。これは，製鋼スラグ容積の増加に伴い細骨材中のフライアッシュ量が減少するため，フライアッシュのポゾラン反応による強度増加が減少したためであると考えられる。

これらの結果から，FS コンクリートの場合，セメント水比および製鋼スラグ細骨材容積比と圧縮強度の関係をjいて配合強度を算定することが可能であると考えられる。配合強度は式(4)で示すことができる。

$$\sigma_{28} = 31.1 \cdot (C/W) - 33 \cdot (ss/s) + 15.6 \quad (4)$$

ここに， σ_{28} ：材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm²)， C/W ：セメント水比， ss/s ：細骨材中の製鋼スラグの容積比である。このように強度推定を定式化できることは，配合設計を行う際に有効である。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7 に示す。なお，この結果は，表-3，表-4 および表-5 に示した配合の FS コンクリートである。圧縮強度が 60N/mm² 以下 (材齢が 91 日までの結果) の静弾性係数は土木学会提案値⁶⁾よりも若干低い値となるが，60N/mm² 以上 (材齢 2 年の結果) の静弾性係数は大きな値を示した。若干のばらつきは認められるが，本検討で用いた製鋼スラグおよびフライアッシュの品質内であれば，土木学会提案値と同等の性能を有すると考えられる。

5. FSコンクリートの海洋環境下における耐久性

表-1 および表-2 に示した製鋼スラグおよびフライアッシュを用いて，表-6 に示す配合で作製した FS コンクリートを，飛沫帯および海中部を想定した自然海水を用いた屋外暴露試験場に 2 年間暴露し，海洋環境下における耐久性を確認した。

暴露 2 年後の FS コンクリートの外観を写真-2 に示す。FS コンクリートは，製鋼スラグを大量に使

表-5 FSコンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	ss/s*1 (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)
10±2.5	70	60~100	50	185

*1 細骨材容積中に占める製鋼スラグの容積比

*2 目標空気量：4.0±1.5%

*3 使用材料：普通ポルトランドセメント，SS-I (製鋼スラグ)，FA-B (フライアッシュ)

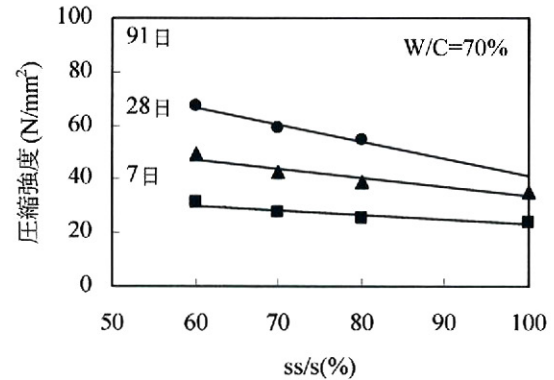


図-6 製鋼スラグ細骨材容積比 (ss/s) と圧縮強度の関係

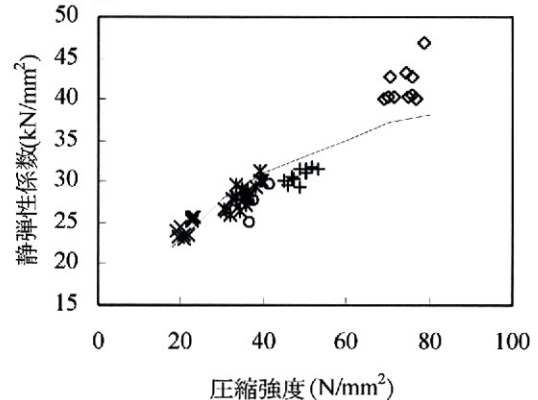


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-6 FSコンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	ss/s*1 (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)
10±2.5	70	70	52	170

*1 細骨材容積中に占める製鋼スラグの容積比

(製鋼スラグ：フライアッシュ=7：3)

*2 目標空気量は，4.0±1.5%または5.0±1.5%

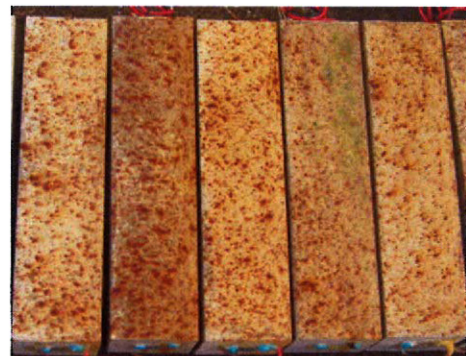


写真-2 FSコンクリートの外観 (暴露2年，飛沫帯)

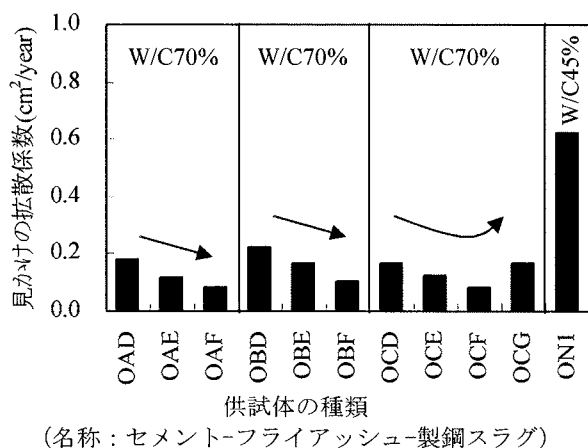


図-8 見かけの拡散係数

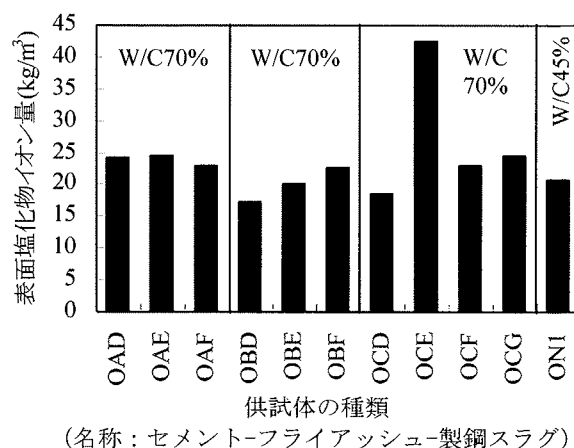


図-9 表面塩化物イオン量

用したコンクリートであるため、製鋼スラグ中に残留している鉄が腐食するため、コンクリート表面が錆で覆われることになる。特に、飛沫帯などの腐食環境に暴露される場合は、写真のように骨材中の鉄の腐食が顕著に現れる。鉄の腐食は、その腐食生成物の影響で、コンクリート表層部から徐々に剥離し、部材の断面減少が生じる可能性がある。また、美観も一般的なコンクリートと比較して低いと考えられる。したがって、腐食環境に施工する場合は、あらかじめ磁選によって鉄を十分に除去した製鋼スラグを使用した方が望ましいと考えられる。

次に、FS コンクリート中への塩化物イオンの拡散性状を確認するため、暴露2年後の供試体を用いて、見かけの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度を測定した。飛沫帯を想定した試験場に暴露した供試体の全塩化物イオンの見かけの拡散係数を図-8に、表面塩化物イオン濃度を図-9に示す。なお、比較用に水セメント比(W/C)が45%の普通コンクリートの結果も併せて示す。

FS コンクリートの見かけの拡散係数は、普通コンクリートに比べ非常に小さな値となった。したがってFS コンクリートは、塩化物イオンの浸透抵抗性が非常に高いと考えられる。また、FS コンクリートの見かけの拡散係数は、製鋼スラグの粉化率が大きくなるにしたがって、低下する傾向が認められた。ただし、粉化率が6.9%と非常に大きな場合には、見かけの拡散係数は大きくなる傾向を示した。このことから、粉化率の違いによってFS コンクリート内の微細組織は変化し、粉化率2.5%までは緻密化に働き、それ以上になると骨材膨張に伴う微細なひび割れ等が生じるものと推察される。表面塩化物イオン濃度は、多少のばらつきはあるが、いずれの場合も同程度となった。

いずれの場合もW/C70%と非常に大きな水セメント比であるが、W/C45%の普通コンクリートと比べても塩化物イオンのコンクリート中への浸透抵抗性が高く、海洋コンクリート構造物への利用に適したコンクリートであると考えられる。

6. まとめ

本研究では、産業副産物である製鋼スラグ、フライアッシュおよび高炉スラグを有効利用した天然骨材を全く使用しないコンクリート(FSコンクリート)の海洋構造物への適用性について評価することを目的に、FSコンクリートの安定性や強度特性および海洋環境下における耐久性について検討を行った。その結果、製鋼スラグの品質によってコンクリートの安定性は異なるが、製鋼スラグの品質を粉化率によって評価することができることが確認された。現在一般に実施されている大気エージングまたは蒸気エージングによってある程度安定化した製鋼スラグを使用すれば、FSコンクリートは海洋環境下のコンクリート構造物に適用可能であると考えられる。FSコンクリートは、塩化物イオンの浸透抵抗性も非常に高く、構造物の高耐久化にもつながると思われる。ただし、80℃温水養生などのように高温な環境に曝される場合には、水和反応が促進されるため、コンクリートの安定性が損なわれる可能性もある。これは今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会スラグ細骨材コンクリート研究小委員会編：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー92，1998.
- 2) 土木学会コンクリート委員会フェロニッケルスラグ細骨材研究小委員会編：フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針（案），コンクリートライブラリー78，1994.
- 3) 沿岸環境開発資源利用センター：FSコンクリート利用手引書，1998
- 4) 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所：FSコンクリートの技術資料，2005.
- 5) 沿岸技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル（改訂版）－製鋼スラグの有効利用技術－，沿岸開発技術ライブラリーNo.28，2008.
- 6) 土木学会：2007年度制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.4，2007.