

# 論文 海洋環境下に曝された高炉フュームを用いたコンクリートの 耐久性に関する検討

梅木 真理<sup>\*1</sup>・武若 耕司<sup>\*2</sup>・山口 明伸<sup>\*3</sup>・江口 康平<sup>\*4</sup>

要旨：著者らは、小型高炉の炉頂から排出される高炉ガスを洗浄し、集塵した超微粉末ダストである炉塵灰高炉フュームの有効活用を目的として、炉塵灰高炉フュームを用いたコンクリートの性能を検討しており、これまでに、炉塵灰高炉フュームを用いることによって、従来の高炉セメントコンクリートの初期強度を改善できることを確認している。そこで本研究では、炉塵灰高炉フュームに加えて、新たに開発された人工灰高炉フュームを使用したコンクリートの海洋環境下における性能を把握することを試み、その結果、いずれの高炉フュームを用いたコンクリートも塩害環境下において十分な耐久性を有していることを確認した。

キーワード：高炉フューム、高炉スラグ微粉末、塩分浸透、鉄筋腐食

## 1. はじめに

環境破壊や環境汚染が世界的な問題として認識されて久しく、近年では各種分野において環境問題への取り組みが活発になりつつある。コンクリートの分野においてもゼロエミッションを目指した産業廃棄物等の再生材料が推奨されているが、そのためには、当然ながら建設材料としての性能を満足している必要がある。例えば、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物は、普通ポルトランドセメントに比べ、石灰石の使用やCO<sub>2</sub>の排出量を低減できることから、コンクリート用混和材料として最近特に利用が進められているが、これらの材料は耐久性向上の観点から見ても塩害対策やアルカリ骨材反応対策、さらには、著者らの検討結果より「塩害と炭酸化」あるいは「塩害とASR」の複合劣化環境でも極めて有効であることが分かっている<sup>1)2)</sup>。

一方、中華人民共和国では小型高炉の炉頂から排出されるガスによる環境汚染の問題が新たに発生しており、いずれは我が国にも影響を及ぼすことが懸念される。したがって、現在では排出されるガスを洗浄し、集塵するシステムが開発され、得られた超微粉末ダスト(以下、炉塵灰高炉フュームと称す)の有効活用が望まれている。この炉塵灰高炉フュームについては、コンクリート用混和材として活用するために幾つかの検討がなされており、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末および石膏と併せて使用することにより、炉塵灰高炉フュームの急速なボゾラン反応による材齢初期での強度発現と高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による長期強度の増進を併せ持つ配合設計が可能であることや耐硫酸性に優れた材料であることが報告されている<sup>3)4)</sup>。

ただし、中国における炉塵灰高炉フュームの産出量は、鉄鋼製造状況の地域的あるいは技術的な変化により大きく変動するため、その安定供給性の確保が懸念されている。そこで、近年、炉塵灰高炉フュームと同様の組成となるように炭坑ボタ、炭質頁岩、石灰灰等を原料とし製造した人工灰高炉フュームの開発が併せて進められている。この炉塵灰高炉フュームおよび人工灰高炉フュームの耐久性に関する性能については、未だ十分に把握されていないのが現状である。

そこで本研究では、炉塵灰高炉フュームおよび人工灰高炉フュームを用いたコンクリートの海洋環境下における性能を把握するために、干満帯および海中部環境において1年間の曝露実験を実施し、解体調査を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

実験に用いた供試体は、水結合材比(以下、W/Bと称す)を50%として、図-1に示すような10cm×10cm×40cmの角柱供試体にかぶり厚を2cmおよび3cm位置に鉄筋を2本ずつ埋設したコンクリート供試体とした。なお、圧縮強度試験用供試体についても同時に作製した。供試体形状は10×20cmの円柱供試体とした。作成した供試体の配合を表-1に示す。なお、配合の決定に際しては、単位水量を一定とし、目標スランプ値を9±2cmとして配合を定めた。

使用材料について示す。高炉フュームは、高炉から排出された炉塵灰高炉フュームと、炭坑ボタ、炭質頁岩、石灰灰等を原料とし人工的に炉塵灰と同様の組成のものを製造した人工灰高炉フュームの2種類である。炉塵灰

\*1 株式会社 ハルテック (正会員)

\*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

\*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (正会員)

表 - 1 示方配合

W/B (%)	s/a (%)	高炉フューム種類	結合材の材料混合比 OPC:BFS:BFF	石こう添加率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランブ (cm)
					W	C	BFS	BFF	S	G	SP	
50	45	炉塵灰	OPC	5	175	350	-	-	815	1000	0.10%	8.5
			BB			175	175	-	810	993	0.15%	9.5
			40:40:20			140	140	70	816	994	0.50%	9.0
			20:60:20			70	210	70	814	991	0.50%	8.0
		人工灰	40:40:20			140	140	70	806	989	0.18%	9.5
			20:40:40			70	140	140	802	984	0.22%	9.5
			20:60:20			70	210	70	804	987	0.18%	9.0

OPC: 普通ポルトランドセメント BFS: 高炉スラグ微粉末 BFF: 高炉フューム

高炉フュームについては密度 2.63g/cm<sup>3</sup>, プレーン値 6250cm<sup>2</sup>/g のものを人工灰高炉フュームについては密度 2.70g/cm<sup>3</sup>, プレーン値 7300cm<sup>2</sup>/g のものを使用した。なお, いずれの高炉フュームにおいても, 無水石こうを内割りで 5% 添加している。

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm<sup>3</sup>), 高炉スラグ微粉末としては密度 2.90g/cm<sup>3</sup>, 目標プレーン値 4000cm<sup>2</sup>/g のものを, 細骨材としては富士川産川砂

(密度 2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.76%) を使用した。また, 粗骨材に鹿児島県始良産砕石 (密度 2.55g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.93%) を用いた。混和剤は, ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。表 - 2 には, 炉塵灰ならびに人工灰高炉フュームの化学組成を蛍光 X 線装置 (XRF) により測定した結果を示す。両者に含まれる化学成分を普通ポルトランドセメントや高炉スラグ微粉末と比較すると, SiO<sub>2</sub> が多く, CaO は少なく, また, 高炉フュームどうしを比較すると, 人工灰高炉フュームでは, 炉塵灰高炉フュームに比べて SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の量が少なく, CaO の量が多いという特徴が見られた。なお, 結合材は, 普通ポルトランドセメント (OPC), 高炉スラグ微粉末 (BFS), 高炉フューム (BFF) の 3 成分系とし, それらの材料混合比は, 過去に著者らが行なった炉塵灰高炉フュームコンクリートの圧縮強度試験結果を基に配合を選定した<sup>3)</sup>。なお, 比較用として, 普通コンクリート (以下, OPC と称す) および, 普通セメントに高炉スラグ微粉末 50% 置換したもの (以下, BB と称す) についても併せて検討した。

作成した供試体は, 打設 2 日後に脱型し, 20 の水中で 28 日間養生後, 供試体の両端から 5cm 区間, および鉄筋の露出部分をエポキシ樹脂にて被覆を行い, 曝露試験を実施した。また, 圧縮強度試験については, 「コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108-2006)」に準拠し実施した。

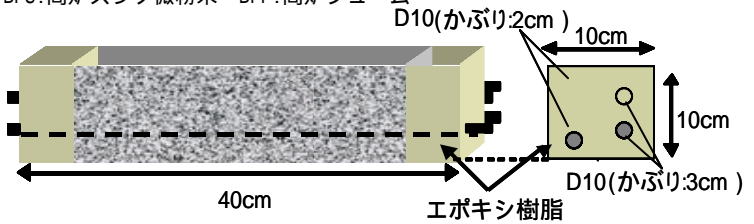


図 - 1 供試体形状

表 - 2 蛍光 X 線による成分含有量分析結果 (単位: Wt%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O
普通ポルトランドセメント	20.99	5.26	2.67	65.21	2.13	2.05	0.56	0.35	0.06	0.26
高炉スラグ微粉末	22.70	14.20	0.43	46.80	0.33	1.76	0.31	0.67	0.33	0.13
炉塵灰	38.90	14.00	5.23	23.50	5.47	4.50	7.42	0.08	0.20	0.35
人工灰	32.70	10.90	2.71	37.80	8.65	4.79	1.09	0.78	0.23	0.23



写真 - 1 曝露場写真

## 2.2 曝露環境

曝露環境は鹿児島県鹿児島市谷山港南に設けた曝露場であり, 干満帯, 海中部の 2 環境である。曝露場の状況を写真 - 1 に示す。なお, 海中部は L.W.L (大潮平均干潮面) を基準として -0.8m の位置にあり, 年間を通じて海中に没している。干満帯は L.W.L から 1.5m の位置にあり, 干潮と満潮による乾湿繰り返しを受ける環境となっている。曝露期間は 5 年間で予定しており, 本論文は, 干満帯および海中部における曝露 1 年後の調査結果に基づいたものである。

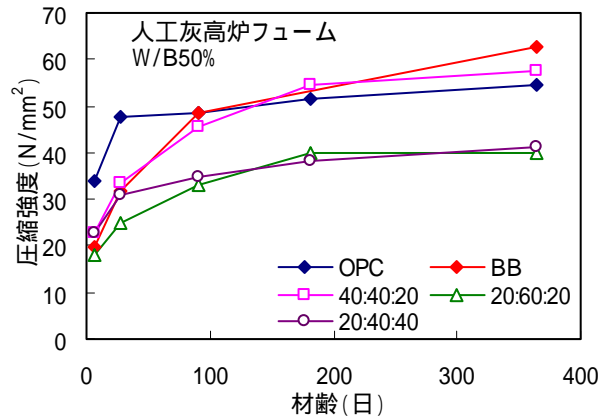
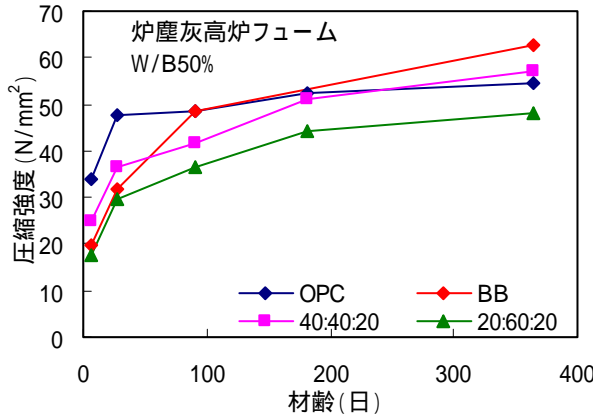


図 - 2 W/B50%の炉塵灰および人工灰における圧縮強度の経時変化

### 3. 結果および考察

#### (1) 圧縮強度特性

W/B50%における初期水中養生を行った供試体の圧縮強度の経時変化を図 - 2 に示す。いずれの高炉フュームを用いた場合も、OPC : BFS : BFF = 40 : 40 : 20 配合比では、BB 供試体とほぼ同程度の強度発現性を示しており、特に炉塵灰高炉フュームの場合には、材齢初期における強度改善効果も確認された。しかしながら、人工灰高炉フュームを使用した OPC : BFS : BFF = 20 : 40 : 40 あるいは 20 : 60 : 20 のように OPC が 20% と少ない配合比では、材齢 91 日以降の長期強度が炉塵灰高炉フューム使用したコンクリートに比べ低下する結果となり、特に人工高炉フュームでその傾向が顕著となった。

#### (2) 中性化進行状況

図 - 3 は、干満帯および海中部に 1 年間曝露したコンクリートの中性化深さをフェノールフタレイン法により測定した結果である。OPC および BB 供試体では中性化はみられなかったのに対し、炉塵灰あるいは人工灰高炉フュームを使用した供試体は中性化しやすい傾向を示した。しかし、OPC : BFS : BFF = 40 : 40 : 20 とした供試体では、他の高炉フューム使用コンクリートに比べ、中性化速度は遅くなる傾向を示した。高炉フュームの種類による違いをみると、曝露 1 年の時点では、炉塵灰高炉フュームの方が人工灰高炉フュームに比べて中性化の進行が遅くなる結果となった。また、コンクリート内部の pH 分布状況を調べた結果の一例として、干満帯に 1 年間曝露を行った供試体における pH 分布を図 - 4 に示す。なお、pH の測定は、コンクリートの粉末試料重量 0.35g と蒸留水を混合して全試料重量を 30g とし、スターラーで 24 時間攪拌して可溶性イオンを溶出させることによって行った<sup>5)</sup>。鉄筋位置であるかぶり 2 および 3cm 位置において、OPC 供試体では pH が 12 程度、BB 供試体では 11.8 程度の値を示したのに対し、人工灰高炉フュームを用いた場合には、pH11.3 ~ 11.7 程度と低い値を示した。ただ

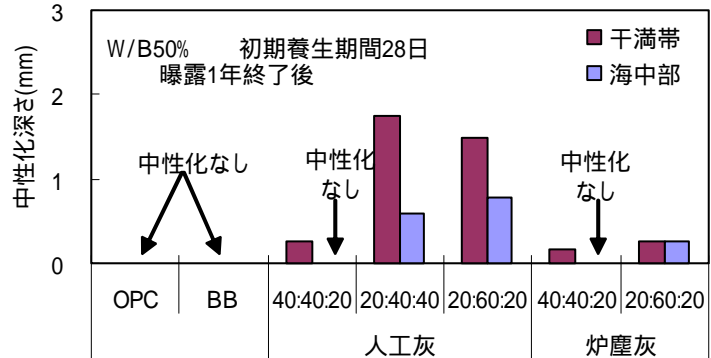


図 - 3 中性化深さ

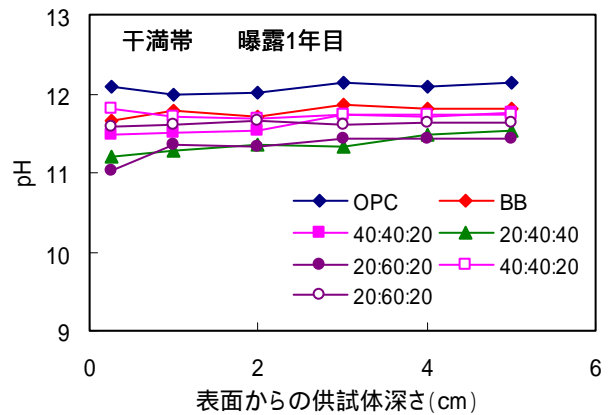


図 - 4 曝露 1 年終了後の pH 分布(干満帯)

し、炉塵灰高炉フュームを使用したコンクリート中の pH は人工灰高炉フュームを使用した場合よりも若干高い値を示していた。

#### (3) 塩化物イオン浸透特性

図 - 5 に各曝露環境における全塩化物イオン量分布を示す。なお、測定方法は、土木学会規準の JSCE G573 2003 に準じた<sup>6)</sup>。OPC 供試体についてみると、干満帯および海中部において、供試体表面から深さ 3 cm 位置の塩化物イオンの浸透量は  $0.48 \text{ kg/m}^3$  および  $0.97 \text{ kg/m}^3$  であったが、深さ 2 cm では  $1.99 \text{ kg/m}^3$  および  $2.87 \text{ kg/m}^3$  であり、腐食発生限界量とされる  $1.2 \text{ kg/m}^3$  を超える塩化物イオン量が確認された。一方、BB 供試体では、塩化

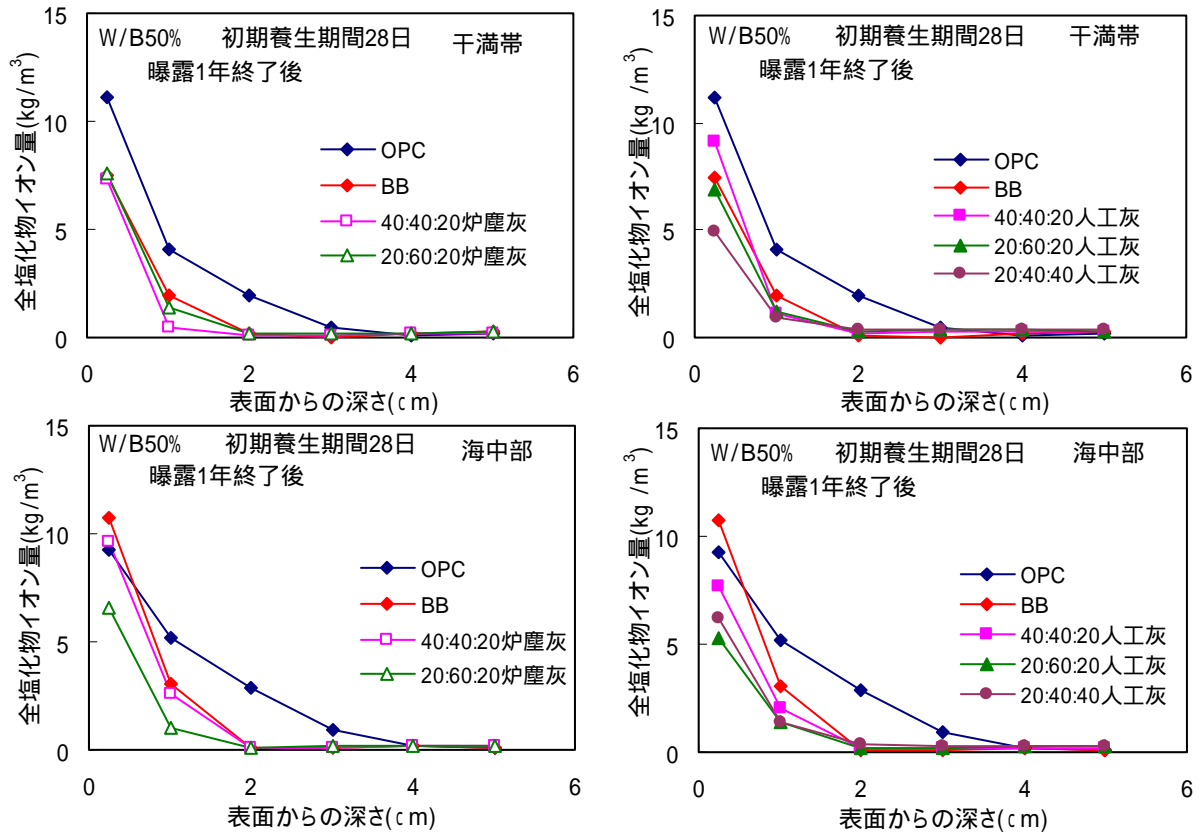


図 - 5 干満帯および海中部における各供試体の全塩化物イオン量分布

物イオン浸透は供試体表面から2cmまでしか認められず、既往の研究結果同様、OPC 供試体に比べ極めて少ない結果となった。また、炉塵灰および人工灰高炉フェームを用いたコンクリートは、BB 供試体と同程度あるいはそれ以上の高い遮塩性を示し、高炉フェームを高炉スラグ微粉末に併用することで、BB 供試体以上に塩化物イオンの浸透を抑制できることが確認された。

図 - 5 の結果を基に、各コンクリートの曝露 1 年後の表面塩化物イオン量と見かけの塩化物イオン拡散係数を推定した結果を表 - 3 および図 - 6 に示す。なお、算出方法は、土木学会規準 JSCE G573 2003 に準拠し、全塩化物イオン量分布を Fick の拡散第 2 方程式の解で最小二乗近似させることにより求めた<sup>7)</sup>。このうち表面塩分量は、コンクリートが同じ場合、海中部と干満帯でほぼ同程度か、若干干満帯で大きくなる傾向を示した。また、高炉フェームを使用したコンクリートでは、普通セメントの混入率 40% の場合が 20% よりも相対的に表面塩分量が大きくなる傾向にあった。

見かけの塩化物イオン拡散係数については、高炉フェームの種類や混入量の違いによる塩化物イオン抵抗性の差はみられず、いずれの高炉フェームを使用してもコンクリートの拡散係数は、OPC 供試体に比べ 1/3

~1/8 程度となり、BB 供試体と比較しても小さい値となることが確認された。

(4) 鉄筋の腐食状況

干満帯および海中部に 1 年間曝露した供試体の鉄筋腐食面積率を図 - 7 に示す。まず、干満帯に曝露した供試体について見てみると、OPC 供試体のかぶり 2cm 位置に

表 - 3 表面塩化物イオン量

供試体		表面塩分量(kg/m <sup>3</sup> )	
		干満帯	海中部
-	OPC	13.3	10.2
-	BB	10.0	14.3
炉塵灰	40:40:20	12.5	12.9
	20:60:20	9.8	9.8
人工灰	40:40:20	13.9	10.4
	20:60:20	10.0	7.2
	20:40:40	7.1	8.6

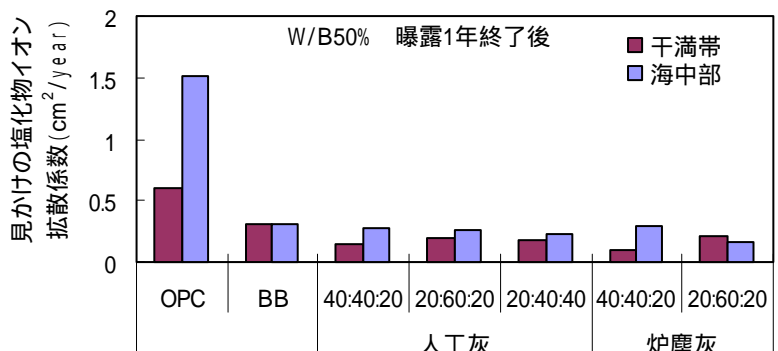


図 - 6 干満帯および海中部における見かけの塩化物イオン拡散係数

おける鉄筋に著しい腐食がみられた。また、BB 供試体では僅かではあるが腐食が確認された。これに対して、OPC : BFS : BFF = 40 : 40 : 20 とした供試体では、高炉フェームの種類にかかわらず、腐食は確認されなかった。ただし、高炉フェームを使用したその他の配合のコンクリートでは、図 - 5 に示すように鉄筋位置に塩化物イオンはほとんど浸透していないにも拘らず、若干の腐食が発生した。これは、図 - 4 で示したように曝露 1 年後の高炉フェーム供試体のかぶり 2cm 位置での pH 値が 11.3 程度まで低下していたことから、これらの高炉フェーム供試体内部の鉄筋は、少量の塩化物イオンでも、容易に腐食する状況にあったと推察される。また、炉塵灰高炉フェームと人工灰高炉フェームを用いた場合を比較すると、僅かではあるが、人工灰高炉フェームを用いた場合の方が、腐食しやすい傾向にあり、これも、人工灰高炉フェームを用いた方が中性化の進行が速くなることと関連していると考えられた。一方、海中部の鉄筋腐食状況をみると、OPC 供試体において、5%程度の腐食が発生していたのに対し、BB 供試体ならびに、炉塵灰あるいは人工灰高炉フェームを使用した供試体では、点錆び程度の腐食しか確認されなかった。これらの供試体の塩化物イオン分布が干満帯と海中部で大きな差が無いことを考慮すれば、高炉スラグ微粉末や高炉フェームを使用する場合の塩害劣化の進行は、中性化との複合劣化の可能性の有無の影響を受けると考えられた。

(5)自然電位の経時変化

一例として干満帯に曝露している供試体のかぶり 2cm 位置における鉄筋自然電位の経時変化を図 - 8 に示す。鉄筋の自然電位の測定は、JSCE-E-601-2000「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準拠して行った。結合材として、OPC 単独あるいは、結合材比 OPC : BFS : BFF = 40 : 40 : 20 としたものを除く各供試体では、曝露開始直後から鉄筋自然電位の卑変が認められたが、その後、いずれの電位も一旦、貴に移行する傾向を示した。ただし、曝露 1 年が経過した時点では、高炉フェームコンクリートの場合はいずれも、鉄筋電位は 0mV (V.S. 飽和 Ag/AgCl) 付近を推移しているのに対し、BB 供試体では腐食発生基準とされる -230mV 以下とはなっていないものの、大きく卑変し、

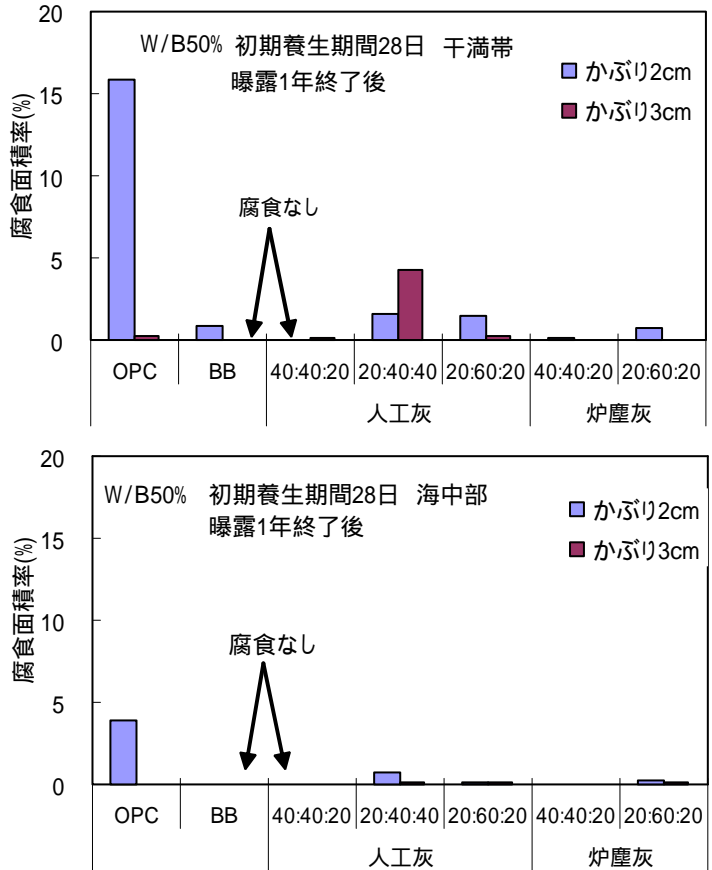


図 - 7 鉄筋腐食面積率

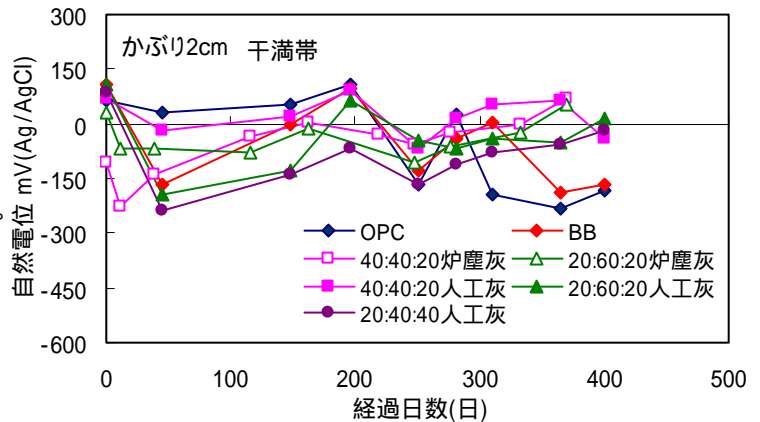


図 - 8 干満帯におけるかぶり 2cm 位置の鉄筋自然電位の経時変化(W/B50%)

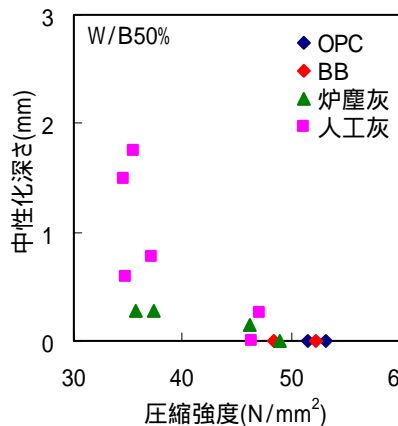


図 - 9 圧縮強度と中性化深さの関係

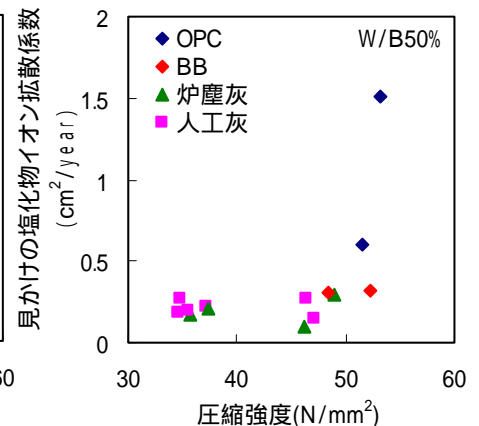


図 - 10 圧縮強度と見かけの塩化物イオン拡散係数の関係



OPC 供試体では-230mV を下回る電位となり、鉄筋腐食の進行が予想された。これら自然電位の結果は、OPC や BB 供試体については実際の腐食状況と概ね一致しているが、高炉フュームを用いた場合には、従来の判定基準では、自然電位による鉄筋腐食の予測は難しいといえる。

#### (6) 耐久性と圧縮強度の関係

コンクリートの品質として重要な圧縮強度を指標として、曝露 1 年終了時の劣化進行状況と圧縮強度の関係について検討した。なお 評価の対象とした圧縮強度は、各環境における曝露 1 年終了時の強度である。

圧縮強度と中性化深さの関係を図 - 9 に示す。高炉フューム使用コンクリートは中性化の進行が相対的に速いものの、ある程度以上の強度が確保できれば中性化の進行速度は抑制される傾向が認められた。また、人工灰高炉フュームにおいてこの傾向が顕著であった。

図 - 10 に圧縮強度と見かけの塩化物イオン拡散係数の関係を示す。高炉フューム使用コンクリートは、圧縮強度が低い場合でも塩化物イオン抵抗性は極めて高く、強度に拘らず遮塩性に優れていた。また、図 - 11 には内部鉄筋の腐食面積率と圧縮強度の関係を示す。データ数は少ないが、OPC 供試体において、強度の大小に拘らず鉄筋に腐食が生じている状況がみられたのに対し、BB 供試体、炉塵灰および人工灰高炉フューム供試体はともに、強度が低い程腐食しやすい状況が明確にみられた。

#### 4. まとめ

本研究では、産業廃棄物である炉塵灰高炉フュームあるいは人工灰高炉フュームを用いたコンクリートを海洋環境の干満帯および海中部に 1 年間曝露し、その解体調査から、以下の結論が得られた。

- (1) 炉塵灰あるいは人工灰の高炉フュームを用いたコンクリートは、中性化に対する抵抗性は普通コンクリートに比べて劣るが、強度を適切に確保した材料混合比であれば、高炉スラグ微粉末使用コンクリートと同程度まで中性化を抑えられる。また、中性化の進行は、若干ではあるが、人工灰高炉フュームを使用した場合のほうが炉塵灰高炉フュームに比べて早くなる。
- (2) 高炉セメントのように普通セメントと高炉スラグ微粉末が使用されるコンクリートに炉塵灰あるいは人工灰の高炉フュームをさらに添加することで、塩化物イオンの浸透抵抗性をさらに向上させる効果が認められた。
- (3) 高炉フュームを用いたコンクリートの鉄筋腐食抑制効果は、普通コンクリートに比べて極めて高く、高炉スラグ微粉末使用(高炉セメント B 種相当)コンクリートと同程度の鉄筋腐食抑制性能を有する材料である。
- (4) 普通セメント：高炉スラグ微粉末：高炉フューム＝

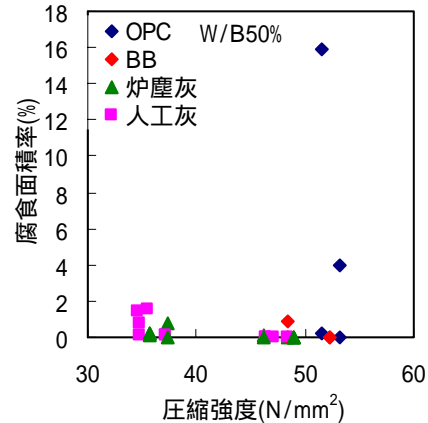


図 - 11 圧縮強度と鉄筋腐食面積率の関係

40 : 40 : 20 と設定して作製したコンクリートが、鉄筋腐食抑制効果と合わせて初期強度ならびに長期強度の何れもが優れ、最適であると考えられた。

#### 謝辞

本研究は、(株) 柏木興産との共同研究により実施した研究の一部である。関係者各位に心より感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 松元淳一ほか;高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物の塩害と炭酸化の複合劣化機構に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol. 65, No. 3, pp.378-391, (2009) .
- 2) 松元淳一ほか;塩害と ASR の複合劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの抑制効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 30, No.1, pp.639-644, 2008
- 3) 梅木真理ほか;高炉フュームを用いたコンクリートの物理特性と耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 31, No.1 pp.193-198, 2009
- 4) 松本匡司ほか;混和剤混入による耐硫酸モルタルの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27, No.1, pp.883-888, 2005
- 5) 審良善和ほか;コンクリート構造物の酸性雨劣化機構に関する研究,土木学会論文集, No.774/V-65, pp.73-82, 2004.11
- 6) 土木学会編;コンクリート技術シリーズ, No.55, コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, pp.91-92, 2003
- 7) 土木学会基準「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(JSCE-G573-2003), 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.19-22, 2004.8