

論文 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

梅木 真理^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・松元 淳一^{*4}

要旨：本研究では，小型高炉の炉頂から排出される高炉ガスを洗浄，集塵した超微粉末ダストである高炉フュームの有効活用を目的として，高炉フュームを混和材として用いたコンクリートの物理・化学的特性，強度発現性，塩分浸透性などの基礎的特性を把握することを試みた。その結果，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，塩化物イオンの浸透に対する抵抗性向上を目的としたコンクリート混和材料として利用可能であることを確認した。

キーワード：高炉フューム，高炉スラグ微粉末，圧縮強度，電気泳動試験，塩分浸透

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CO₂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¹⁾²⁾。

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，得られた超微粒粉末ダスト（以下，高炉フュームと称す）の有効活用が望まれている。この高炉フュームについては，コンクリート用混和材として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こうと併せて使用することにより，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と報告されている³⁾。しかしながら，その明確な設計手法は提案するには至っておらず，また，耐久性に関する性能も十分に把握されていない。

そこで本研究では，高炉フュームの物理・化学的特性を把握すると共に，高炉フュームを用いたコンクリートの強度発現特性ならびに効果的な配合手法についての実験的検討を行った。さらに，耐久性に関しては，電気泳動試験によって塩分浸透特性を把握し，海洋環境下における性能を評価することを試みた。

2. 高炉フュームの物理・化学的特性

本研究で検討した高炉フュームは，高炉から排出された炉塵灰そのものと，炭鉱ボタ，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の2種類である。表-1に炉塵灰および人工灰それぞれの密度およびブレンの測定結果を示す。また，比較用に高炉スラグ微粉末の結果についても併せて示す。なお，密度は「セメントの密度試験方法(JIS A 1109-1999)」で，ブレンについては「セメント物理試験 JIS R 5201-1997」で試験を行った。炉塵灰および人工灰のいずれの高炉フュームも，密度は高炉スラグ微粉末に比べ幾分か小さいものの，ブレン値は大きく，極めて細かい材料であることが分かる。

次に，レーザ回折・散乱式粒度分布測定装置 LA-920 により測定を行った炉塵灰ならびに人工灰の粒度分布を図-1にそれぞれ示す。いずれの灰についても搬入口ットごとに測定を行ったが，炉塵灰では，測定ごとに粒度分布に差が見られたのに対して，人工灰については，ほぼ

表-1 物理試験結果

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
炉塵灰	2.63	6250
人工灰	2.70	7300
高炉スラグ微粉末	2.90	4180

*1 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)

*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 大成建設(株) 博士(工学) (正会員)

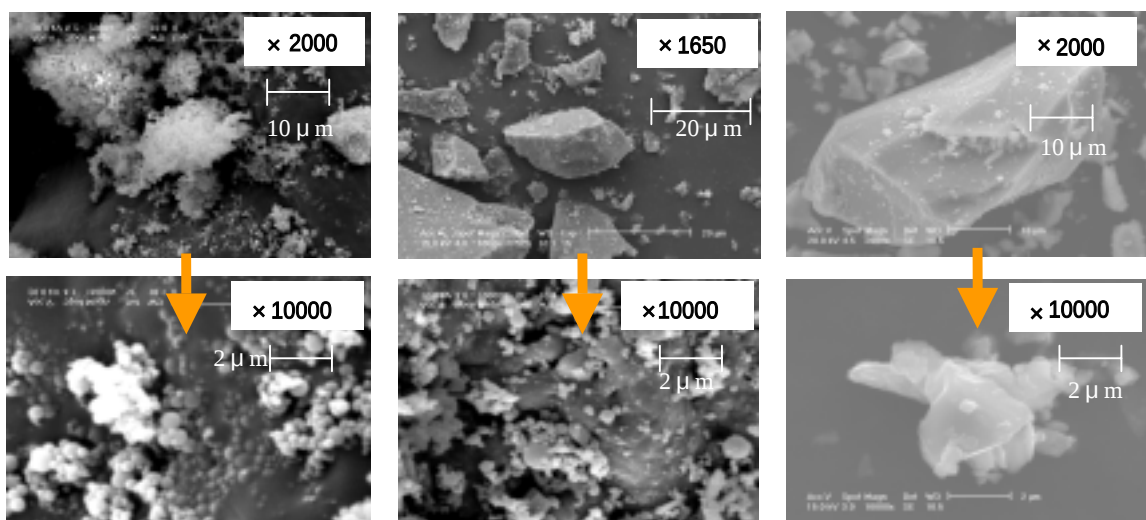


写真 - 1 炉塵灰，人工灰および高炉スラグ微粉末の SEM 画像

同様の粒度分布を示し，ばらつきの少ない材料であった。

なお，写真 - 1 に，炉塵灰および人工灰と比較用の高炉スラグ微粉末の低真空走査型電子顕微鏡による SEM 画像を示す。炉塵灰の粒子は球形であったのに対し，人工灰の粒子は，角ばっている様子が認められた。しかしながら，10000 倍に拡大すると炉塵灰のような丸みを帯びた形状のものも確認された。一方，高炉スラグ微粉末では 10000 倍に拡大しても角ばった形状を示した。

次に，表 - 2 には，炉塵灰ならびに人工灰の化学組成を蛍光 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_2 が多く， CaO は少なく，また，両

者を比較すると，人工灰では，炉塵灰に比べて SiO_2 および Al_2O_3 の量が少なく， CaO の量が多いという特徴が見られた。

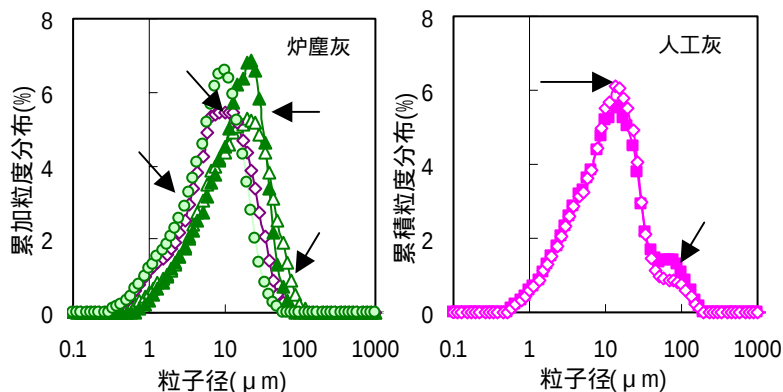


図 - 1 炉塵灰および人工灰における粒度分布

表 - 3 モルタル供試体の示方配合

W/B (%)	ペースト 容積比	材料混合比 OPC:BFS:BFF	石こう 添加率(%)	単位量 (kg/m ³)						フロー (mm)
				W	C	BFS	BFF	S	SP	
50	0.45	20:60:20	3	266	107	320	107	1452	0.25%	180
			5							186
			7							197
		20:40:40	3	264	106	212	212			188
			4							192
			5							182
			6							184
			7							193

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

表 - 2 蛍光 X 線による成分含有量分析結果 (単位: Wt%)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	MnO	Na_2O
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

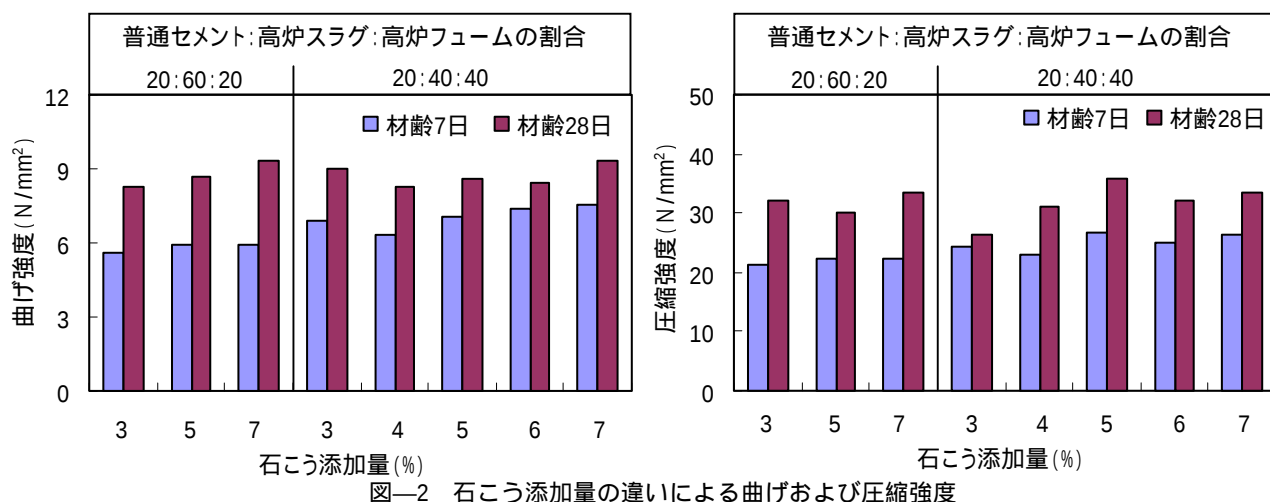
3. 高炉フェームコンクリートの強度発現性

3.1 石こう添加量に関する予備検討

(1) 実験概要

曲げおよび圧縮強度試験には，水結合材比(以下，W/B) 50%として表 - 3 に示す配合で作製した $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の

モルタル供試体を用いた。配合決定に際しては，ペースト容積を一定にし，目標フローが $190 \pm 10 \text{ mm}$ となるように定めた。使用材料としては，高炉フェームとしては密度 $2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，ブレン値 $7300 \text{ cm}^2/\text{g}$ の人工灰を用い，セメントとしては，普通ポルトランドセメント(密度 $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$)，高炉スラグ微粉末については，密度 $2.90 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，



目標ブレン値 4000cm²/g のもので石こう無添加のものを使用した。また、細骨材としては富士川産川砂（密度 2.64g/cm³，吸水率 1.76%）を用いた。なお、モルタルの流動性を調整するため、高性能 AE 減水剤（以下、SP と称す）を粉体量の 0.25% 添加した。

結合材の構成比（以下、材料混合比と称す）としては、結合材中の普通セメントの比率を 20% 一定とし、高炉フュームの比率を 20% ならびに 40% の 2 種類とした。また、石こうに関しては、無水石こうを使用し、高炉フュームに対する内割り添加とし、粉体量の 3～7% の範囲でそれぞれ練り混ぜ時に添加して供試体を作製した。なお、モルタルは打設 2 日後に脱型し、その後水温 20 の恒温水槽で水中養生を行った。

(2) 試験結果および考察

石こう添加量の異なった供試体の材齢 7 日および 28 日における曲げ強度ならびに圧縮強度を図 - 2 に示す。これより、曲げ強度では、材齢 7 日の場合、石こう添加量が多くなるにつれ、強度が増す傾向も認められたが、材齢 28 日では、添加量の如何に拘らずほぼ同程度であった。これに対して、圧縮強度について見てみると、多少ばらつきはあるものの、材齢の如何に拘らず、石こう添加率 5% 程度で圧縮強度が概ね最大となっていることから、以下の検討では、石こう添加率を高炉フュームの内割り 5% とした。

3.2 高炉フューム混入量に関する検討

(1) 実験概要

実験に用いた供試体は、水結合材比（以下、W/B）50%

表 - 4 炉塵灰および人工灰を使用したコンクリートの示方配合

W/B (%)	s/a (%)	高炉 フューム 種類	結合材の 材料混合比	石こう 添加率 (%)	単位量 (kg/m³)							スラン プ (cm)	電気泳動 試験	
			OPC:BFS:BFF		W	C	BFS	BFF	S	G	SP			
50	45	—	OPC	—	175	350	-	-	824	1004	0.10%	8.5	—	
			BB			175	175	-	810	993	0.15%	9.5	—	
		炉塵灰	50:40:10			140	175	35	818	996	0.25%	8.0	—	
			40:50:10				175	35	817	995	0.25%	9.5	—	
			40:40:20				140	70	816	994	0.5%	10.0	○	
			30:40:30				140	105	815	992	0.5%	7.5	—	
			30:50:20			105	175	70	815	993	0.5%	11.0	—	
			30:60:10				210	35	816	994	0.25%	9.5	—	
			20:40:40				70	140	140	813	990	0.65%	7.5	○
			20:50:30			175		105	813	990	0.5%	7.0	—	
			20:60:20			210		70	814	991	0.5%	11.0	○	
			20:70:10			245		35	815	992	0.25%	7.0	—	
			10:60:30			35	210	105	812	989	0.5%	7.0	—	
			10:70:20				245	70	813	990	0.5%	11.0	—	
			人工灰			40:40:20	5	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

として表 - 4 に示す配合で作製したコンクリート供試体である。配合決定に際しては、単位水量と細骨材率を一定とし、目標スランプ値 $9 \pm 2\text{cm}$ とし配合を定めた。

使用材料としては、セメント、高炉スラグ微粉末、細骨材および混和剤については 3.1 と同様なものとし、高炉フュームに関しては、炉塵灰および人工灰の 2 種類について検討を行った。なお、石こう添加量に関しては、いずれの高炉フュームの場合も、先ほどの検討結果より無水石こうを使用し、内割りで 5% とした。ただし、今回入手した炉塵灰については、事前の検討ですでに 5% 程度の石こうが含まれていることが確認されたため、今回の検討では、練り混ぜ時の添加は行わなかった。また、粗骨材には、鹿児島県始良産砕石（密度 2.55g/cm^3 、吸水率 0.93%）を用いた。

実験に用いた供試体の水準は、炉塵灰の場合、材料混合比として結合材中の炉塵灰の比率は 10% ~ 30%、普通セメントは 10% ~ 50%、高炉スラグ微粉末は 40% ~ 70% の範囲内でそれぞれ混合した計 12 種類とした。一方、人工灰では、その混合比率を 20% および 40% に定めた計 3 種類のコンクリートで検討を行った。また、比較用に普通ポルトランドセメント使用コンクリート（以下、OPC）および普通セメントの 50% を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリート（以下、BB）についても同時に作製し試験を行った。

圧縮強度ならびに静弾性係数の試験方法については、「コンクリートの圧縮強度試験方法（JIS A 1108-2006）」および「コンクリートの静弾性係数試験方法（JIS A 1149-2001）」のそれぞれに準拠し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、所定の材齢（7 日、28 日、91 日、半年、1 年）ごとに試験を行った。なお、養生方法は、水温 20 の恒温水槽で水中養生を行った。

（2）試験結果および考察

一例として、結合材中の炉塵灰の比率を 30% と固定して、作製した高炉フューム使用コンクリートの圧縮強度の経時変化を図 - 3 に示す。初期材齢 7 日の場合について見てみると、結合材中のセメント比率が 20% および 30% の高炉フュームコンクリートは、OPC 供試体に比べ強度は小さくなるものの、BB 供試体よりは大きくなる傾向が認められた。これは、高炉フューム特有の材齢初期での水和反応あるいはフィラー効果に起因するものと考えられ、高炉セメントコンクリートの初期強度の改善として十分な効果があると考えられた。また、材齢 1 年の圧縮強度では OPC 供試体とほぼ同程度となり、長期的な強度増進も見込まれたが、BB 供試体と同等となるまでには至らなかった。一方、セメント比率を 10% に固定した場合には、材齢が進むに従い、強度の増加は認められるものの、その強度は他に比べて著しく小さく、これ

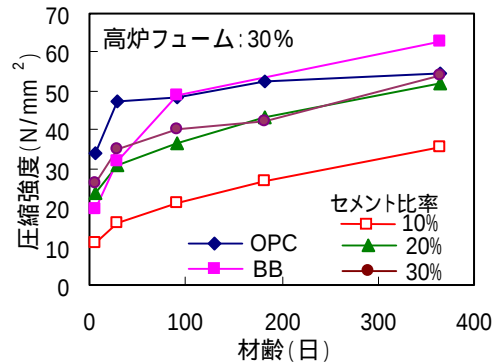


図 - 3 結合材中の高炉フュームの比率を 30% とした供試体の圧縮強度の経時変化

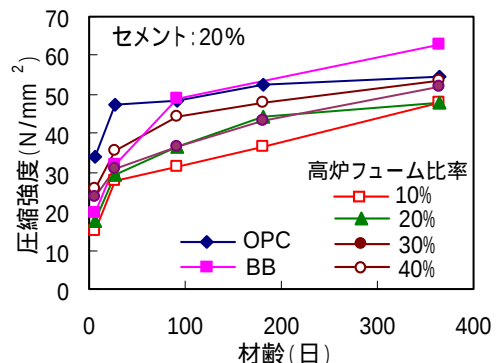


図 - 4 結合材中のセメント比率を 20% とした供試体の圧縮強度の経時変化

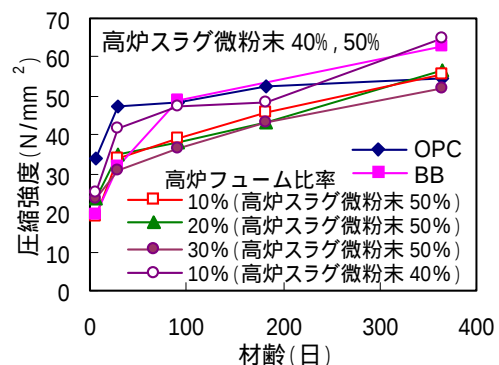


図 - 5 高炉スラグ微粉末の比率を 50% とした場合の圧縮強度の経時変化

は、セメントが少ないために水和反応等に必要なアルカリが不足していたものと予想された。

図 - 4 に結合材中のセメント比率を 20% として作製した高炉フュームとして炉塵灰を使用したコンクリート供試体の圧縮強度の経時変化を示した。高炉フューム混入量が多いほど圧縮強度が大きくなる傾向が認められ、先ほどの図 - 3 と同様、長期的に見ると OPC 供試体とほぼ同程度の値を示した。ここで、高炉フューム比率 30%（セメント + 高炉フューム：高炉スラグ微粉末 = 50 : 50）では、高炉スラグ微粉末置換率 50%（セメント：高炉スラグ微粉末 = 50 : 50）と高炉スラグ微粉末量は同量であるにも拘らず、高炉フュームを混入した場合の方が、材齢 7 日程度の初期強度は大きく、高炉フューム特有の凝結終了時の急速な二次水和が起こっていることが示唆された。

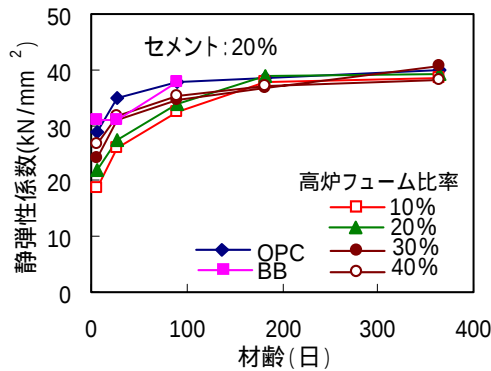


図 - 6 セメントの比率を 20%とした場合の静弾性係数の経時変化

次に、図 - 5 には、結合材中の高炉スラグ微粉末の比率を 50%と固定した場合における、高炉ヒューム（炉塵灰）使用コンクリートの圧縮強度の経時変化を示した。また、比較用に、高炉スラグ微粉末の 10%を高炉フュームで置換した供試体の結果も併せて示した。高炉スラグ微粉末単独（BB 供試体）の場合、初期強度は OPC 供試体に比べ小さいものの、材齢 91 日になると OPC 供試体と同程度となり、その後は OPC 供試体より強度は大きくなる。その一方で、高炉フュームを混入した供試体については、図 - 4 に示したセメント比を一定とした場合ほどの高炉フューム混入量の違いによる強度の差は認められない。また、高炉フュームを混入したものはいずれも、BB 供試体に比べ初期強度の改善効果が認められる。ただし、その後、一時的に強度発現性が遅くなる傾向も認められることから、高炉フューム使用の場合には、その初期反応の過程で、コンクリートの長期強度の発現に寄与する高炉スラグの潜在水硬性を阻害する何らかの影響がある可能性もある。そこで、高炉スラグ微粉末 10%を高炉フュームで置換した供試体（高炉スラグ微粉末 40%）の場合を見てみると、BB 供試体よりも初期強度は大きく、さらに、BB 供試体と同等の長期の強度発現性も有しており、1 年経過後の圧縮強度では、BB 供試体より幾分か大きくなる結果を示した。

以上のことから、高炉フューム使用コンクリートの強度特性は、材料混合比のバランスによって異なるものの、高炉フュームの混入量が多い方が、初期強度の改善効果が顕著であり、今回の強度試験結果を総合すると、結合材中のセメント比が 20%以上、高炉スラグ微粉末比が 40%以下の条件で、コンクリートの強度発現性が良好となると考えられた。

なお、一例として、結合材中のセメント比率 20%で作製した供試体の静弾性係数の経時変化を図 - 6 に示す。これより、高炉フュームを用いた場合でも、圧縮強度の増加に伴って、静弾性係数も大きくなる傾向が認められ、材齢半年以降では、高炉フューム量の違いによる静弾性

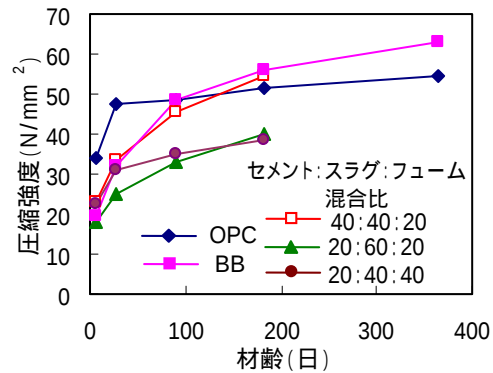


図 - 7 人工灰高炉フュームを用いた場合の圧縮強度の経時変化

係数の差はほとんどなく、また、OPC コンクリートともほぼ同程度となる結果を示した。

図 - 7 には、人工灰を用いたコンクリートの圧縮強度の経時変化を示した。材齢半年までの結果ではあるものの、炉塵灰使用の場合と同様、結合材中の高炉スラグ微粉末比 40%程度とし、高炉フューム比率を小さくした場合、強度発現が BB 供試体と同様に早くなる傾向にあった。ただし、いずれの材料混合比においても炉塵灰を使用した場合ほどの初期強度の改善効果は確認できなかったことから、強度を確保する上で最適となる配合、材料混合比などは炉塵灰とは異なる可能性もあり、今後、さらに検討が必要である。

4. 電気泳動試験による塩分浸透性の評価

(1) 実験概要

電気泳動試験用供試体は、水結合材比 50%の炉塵灰あるいは人工灰を用いたコンクリートを先ほどの表 - 4 に示す配合で作製した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とした。供試体は、初期水中養生 28 日後、厚さ 5cm に切断し、試験面以外の円周面をエポキシ樹脂によりコーティングしたものをを用いた。

試験装置の概要を図 - 8 に示す。溶液は、陰極側には、0.5mol/l の NaCl 水溶液を、陽極側には 0.3mol/l の NaOH 水溶液を用いた。また、電極材としては、陰極、陽極側ともにチタンメッシュを用いた。通電中は、陽極側と陰極側よりそれぞれ溶液をサンプリングし、電位差滴定装置により各溶液層の塩化物イオン濃度を測定した。

(2) 試験結果および考察

一例として、W/B50%における結合材中の炉塵灰あるいは人工灰の混合比率を 20%として作製した供試体に電気泳動試験を行った場合の陽極側における塩化物イオン濃度の経時変化を図 - 9 に示す。なお、比較用として、以前著者らが行った OPC および BB 供試体（BFS のブレン値 $4000\text{ cm}^2/\text{g}$, $8000\text{ cm}^2/\text{g}$ ）の場合についても併せて示す。炉塵灰使用のコンクリートは、通電開始 35 日経過

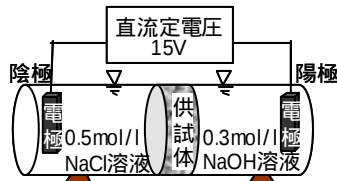


図-8 試験装置概要

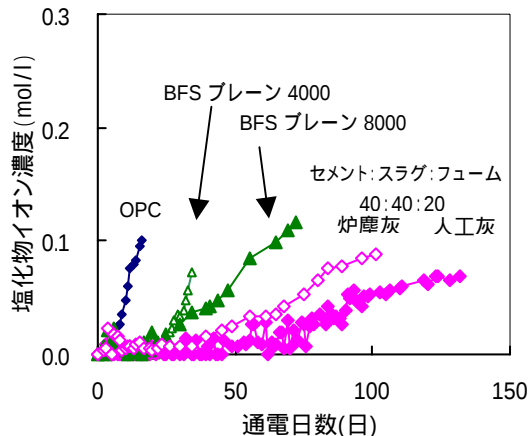


図-9 陽極側における塩化物イオンの経時変化

後から塩化物イオンの移動が認められ、他の OPC コンクリートや BB コンクリート (BFS のブレーン値 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$) より遅くなることから、塩化物イオン浸透抵抗性が高いと推察できる。一方、人工灰を用いた場合、塩化物イオンは通電開始 55 日から陽極側に認められ、さらに移動速度が遅くなる状況を示した。図-10 には、炉塵灰ならびに人工灰を用いたコンクリートの電気泳動試験結果から算出した実効拡散係数を示した。材料混合比および高炉フュームの種類の如何に拘わらず、高炉フュームを用いたコンクリートの実効拡散係数は普通コンクリートだけではなくブレーン値 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ あるいは $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末使用コンクリートよりも小さく、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は極めて高かった。一方、高炉フュームの種類による塩化物イオン浸透抵抗性は人工灰の方が若干高いことも確認された。

5.まとめ

本研究では、産業廃棄物である高炉フュームを用いたコンクリートの基礎的特性を把握するため、基礎物性、強度特性ならびに塩分浸透特性について実験的検討を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 高炉フュームは極めて細かい球形の材料であり、 SiO_2 を多く含有していることを確認した。
- (2) 高炉フュームを用いたコンクリートに添加する最適な石こう添加量については、本研究の範囲内では、強度発現性の観点から高炉フューム量に対して内割り 5% が妥当である。
- (3) セメントと高炉スラグ微粉末が併用されるコンクリ

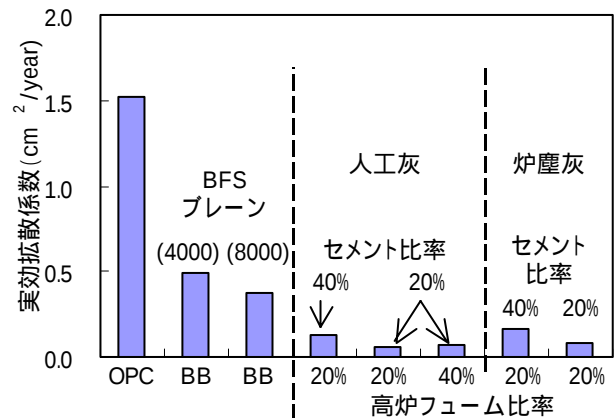


図-10 電気泳動試験結果から算出した実効拡散係数

ートに高炉フュームを使用することで、問題点の 1 つである初期強度が改善できる。また、この傾向は、高炉フュームの混入量が多いほど顕著であった。

- (4) 高炉フュームの強度特性として、結合材中のセメント比が 20% 以上、高炉スラグ微粉末比が 40% 以下で長期にわたって強度発現が良好となる傾向が認められたが、この傾向は、高炉フュームの種類によっても異なるようであるため、使用結合材料の成分等まで考慮した材料混合比バランスが存在する。
- (5) 高炉フューム使用コンクリートは、高炉フュームの種類、材料混合比および強度発現性の如何に拘わらず、塩化物イオン浸透抑制効果は顕著であり、実効拡散係数は、普通コンクリートの約 $1/10$ 、高炉スラグ微粉末使用コンクリートの約 $1/3$ 程度であった。

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複合劣化に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 27, No.1, pp.163-168, 2005
- 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) 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