

# 論文 循環流動層ボイラー灰と高炉スラグ微粉末を結合材とした硬化体の高強度化と耐久性

長谷川 諒\*1・山下 紘太郎\*2・佐川 孝広\*3・濱 幸雄\*4

**要旨:** 本研究では、循環流動層ボイラー灰(CFB 灰)と高炉スラグ微粉末(BFS)を結合材とした硬化体の高強度化および耐久性について検討している。水酸化カルシウムを CFB 灰に外割りで 6%, 工業用無水石膏を CFB 灰に内割りで 2.5%混入し、比表面積 6000 cm<sup>2</sup>/g の BFS を用い、CFB 灰と BFS の質量比を 75 : 25, 水結合材比を 40%, 高性能 AE 減水剤使用量を結合材に対して 4%, 練混ぜ時間を 5 分とした条件で作製した場合に、適度なワーカビリティを有し、28 日強度で 40N/mm<sup>2</sup>以上の硬化体を得られた。また、セメントモルタルと比べ中性化抵抗性は低い、耐凍害性は同程度で、耐硫酸塩性は優れていることを確認した。

**キーワード:** 循環流動層ボイラー灰, 高炉スラグ微粉末, 圧縮強度, 凍結融解抵抗性, 中性化, 耐硫酸塩性

## 1. はじめに

東日本大震災および東電原発事故以降、わが国では脱原発の流れが加速するとともに電力の安定供給が危惧されており、将来的には自然エネルギー、再生可能エネルギーの開発・普及が求められている。しかし、直近の対策としては火力発電、大規模工場の自家発電の重要性が増し、それにともない石炭灰の発生量が増加することが予想される。特に、大規模工場で自家発電施設として利用されている循環流動層ボイラー (CFB) は、燃焼効率の良さ、環境保護の観点からも関心が高まっているが、発生する石炭灰は一般的なフライアッシュ (FA) とは組成、性状が異なり、JIS 規格外の灰の排出増加へとつながる。しかしながら、それらの利用方法は現段階では確立されておらず、一般のコンクリート用混和材料としての有効利用は困難である<sup>1)</sup>。CFB は固体粒子を流動化して燃焼する方法であり、発生する CFB 灰は微粉炭燃焼ボイラーと比較して、低温で燃焼させ、同時に石炭に含まれる硫黄成分を石灰 (CaCO<sub>3</sub>) により脱硫を行うことから、FA とは組成、性状が異なる。

既往研究において著者らは、CFB 灰と高炉スラグ微粉末を結合材とした硬化体を作製し、CFB 灰と高炉スラグ微粉末の質量比が 75 : 25 の条件で 20N/mm<sup>2</sup>程度の 28 日強度が得られること、養生温度、CFB 灰の品質の違いが圧縮強度および細孔構造に与える影響は小さく、養生温度、水結合材比の影響はセメントモルタルと同様であることを明らかにしている。また、耐久性については凍結融解抵抗性、塩分浸透抑制効果、中性化抵抗性はセメントモルタルと同様に水結合材比が小さくなるほど向上し、耐硫酸塩性はセメントモルタルよりも優れているが中性

化抵抗性が低いことを明らかにしている<sup>2)</sup>。さらに、CFB 灰のガラス化率、鉱物組成を粉末 X 線回折 (XRD) / リートベルト法により測定し、CFB 灰は通常の FA と異なり、蒸気の炉内脱硫の影響により CaO (Lime), 無水石膏 (Anhydrite), 水酸化カルシウム (CH) 等の Ca 塩が存在することを示した上で、CFB 灰-高炉スラグ微粉末系結合材では、CFB 灰中のこれら Ca 塩が高炉スラグ微粉末の刺激剤として作用することで、セメントを用いずとも 20N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を持つ硬化体を得られることを明らかとした<sup>3)</sup>。

しかし、セメントモルタルに代わる硬化体としてその用途を検討するうえで、圧縮強度 20N/mm<sup>2</sup>程度では十分とは言えず、より高強度な硬化体の作製条件の検討は意味のあることと考える。そこで本研究では、CFB 灰の品質変動の確認と結合材としての特徴付けを行うとともに、CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の高強度化を目的として、水酸化カルシウムおよび無水石膏の添加による効果、高炉スラグ微粉末比表面積の影響および高性能 AE 減水剤の使用量、練混ぜ時間が圧縮強度に及ぼす影響について検討を行い、その結果を踏まえて作製した高強度の CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の力学性状と凍結融解抵抗性、耐硫酸塩性、中性化抵抗性などの耐久性についてセメントモルタルと比較検討を行っている。

## 2. 実験概要

### 2.1 CFB 灰のキャラクターゼーション

本研究では、北海道内の製紙工場から排出される CFB 灰のうち、採取年月の異なる 9 種類および比較用 FA の物理試験結果および XRD / リートベルト法によるガラ

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建築社会基盤系専攻 博士前期課程 (学生会員)

\*2 鴻池組 (株) 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

\*3 日鐵住金セメント (株) 製品開発部 博士 (工学) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 教授 博士 (工学) (正会員)

ス化率、鉱物組成の測定を行った。

物理試験は JIS A 6201 (コンクリート用フライアッシュ) に準じ、強熱減量、密度、45 $\mu$ m 残分、ブレン比表面積、フロー値比、メチレンブルー吸着量および活性度の測定を行った。XRD の測定は Panalytical 製 CubiX Pro を、リートベルト解析は SIROQUANT Ver3.0 をそれぞれ用いた。

## 2.2 CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の高強度化と耐久性実験

### (1) 使用材料

CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の結合材として、CFB 灰 (2010 年 10 月採取) と比表面積 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  と 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ微粉末を使用した。細骨材は再生骨材 (表乾密度 2.60 $\text{g}/\text{cm}^3$ , 吸水率 1.78%), 陸砂 (表乾密度 2.67 $\text{g}/\text{cm}^3$ , 吸水率 1.57%) を使用した。また、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (SP), AE 剤 (アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤), 水酸化カルシウム試薬および工業無水石膏を用いた。

### (2) 実験計画及び方法

表-1 に実験要因を、表-2 に調合表を示す。No.1~7 では、W/B=60%での高強度化を目的として、無水石膏および水酸化カルシウムの添加、高炉スラグ微粉末比表面積の影響についての検討を行った。その中で最も高強度となる水酸化カルシウムと無水石膏の添加率、高炉スラグ微粉末比表面積の条件を選定し、No.8~13 では SP を用いた W/B=40%の硬化体を作製するための SP 使用量および練混ぜ時間の最適条件を決定するために、フレッシュ性状、圧縮強度、細孔構造の測定を行った。なお、無水石膏は CFB 灰に対し内割混入、水酸化カルシウムは外割混入とした。さらに、No.8~13 の結果を踏まえて、高炉スラグ微粉末比表面積 6000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 、無水石膏 :2.5%、水酸化カルシウム:6%、SP:4%、練混ぜ時間 5 分として、耐久性を考慮して目標空気量を 4%とした高強度 CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 (No.14) と W/C が 40%と 60%のセメントモルタル (No.15, 16) を作製し、力学性状試験と耐久性試験を行った。

圧縮強度試験は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱供試体を用い、材齢 3, 7, 28, 91 日で JIS A 1108 に準じて試験を行った。

凍結融解試験は、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  の角柱供試体を用い、JIS A 1148 A 法に準じて、材齢 28 日まで水中養生を行った後、最低温度 $-18^\circ\text{C}$ 、最高温度  $5^\circ\text{C}$ の凍結融解を 1 日 6 サイクルの条件で繰り返し、質量および 1 次共鳴振動数を測定した。

促進中性化促進試験には  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱供試体を用い、試験体周囲をブチルゴムで被覆し、JIS A 1153 に準じて促進中性化試験を行い、0, 1, 4, 8 週において中性化深さの測定を行った。

硫酸浸漬試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を用いて、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」<sup>4)</sup>を参考に、硫酸水溶液の濃度を 5%とした溶液に浸漬し、溶液が設定濃度を保つように管理しながら、適宜、外観観察と質量変化率の測定を行った。

細孔構造の測定は、試験体を 5mm 角の立方体に切断し、アセトンに 24 時間浸漬し水和を停止させた後、試料を真空状態でドライアイスの水蒸気圧 ( $-78^\circ\text{C}$ , 0.5 $\mu\text{Hg}$ ) で D-dry 乾燥を 1 日間行った試料を用いて、水銀圧入ポロシメータを用いて測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 CFB 灰のキャラクタリゼーション

表-3 に CFB 灰および FA の物理試験結果を示す。CFB 灰は FA と比較して強熱減量が大きく、フロー値比が小さく、メチレンブルー吸着量が大きい傾向にあった。

図-1 には CFB 灰、FA および高炉スラグ微粉末の粒度分布測定結果の例を示す。図中には各材料のブレン比表面積を記載した。図示されるように、各材料の粒度分布形状は大きく異なり、工業的に粉砕・分級を行う高炉スラグ微粉末と比較して、CFB, FA はブロードな粒度分

表-1 実験要因

No.	W/B (%)	配合						養生		測定項目		
		結合材	細骨材	無水石膏 (B × wt.%)	水酸化カルシウム (B × wt.%)	SP (%)	練混ぜ時間 (min)	目標空気量 (%)	温度 (°C)		条件	
1	60	CFB:BFS(75:25) BFS:4000 $\text{cm}^2/\text{g}$	再生骨材	-	-	1	4	-	20	水中	フレッシュ性状 圧縮強度	
2				2.5								
3				5								
4				7.5								
5				10								
6				-								6
7				CFB:BFS(75:25) BFS:6000 $\text{cm}^2/\text{g}$								-
8	40	CFB:BFS(75:25) BFS:6000 $\text{cm}^2/\text{g}$	再生骨材	2.5	6	4	4.5	4 $\pm$ 1%	20	水中	フレッシュ性状 圧縮強度 細孔構造	
9							5					
10							6					
11							4					
12							5					
13	6											
14	40	CFB:BFS(75:25) BFS:6000 $\text{cm}^2/\text{g}$	再生骨材	2.5	6	4	5				フレッシュ性状 圧縮強度 凍結融解 硫酸浸漬 中性化試験 細孔構造 静弾性係数	
15	60	OPC	陸砂	-	-	-	4	-	-	-	-	
16												

表-2 調合表

No.	W/B (%)	セメント [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	CFB [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	高炉スラグ微粉末 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	無水石膏 [B × wt.%]	水酸化カルシウム [B × wt.%]	水 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	細骨材 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	SP [%]	AE剤 [%]	練混ぜ時間 [min]	空気量 [%]		
1	60	682	-	-	-	-	348	1160	1	-	4	-		
2													435	-
3													421	2.5
4													406	5
5													392	7.5
6													377	10
7	435	145 (6000)	-	-	6	1125	1160	-	-	-	-			
8	40	622	-	-	-	-	256	1280	4	0.05	5	4.5		
9												0.5		
10												6	0.6	
11												4	0.7	
12												4	0.4	
13	5	0.5												
14	40	423	159 (6000)	2.5	6	255	1273	4	0.05	5	3.6			
15	60	600	-	-	-	-	273	1365	-	0.01	4	3.9		
16	60	600	-	-	-	-	360	1201	-	-	4	4		

布形状であった。このように粒度分布が大きく異なる材料間でブレン比表面積の値を直接比較することはほとんど意味を持たず、ブレン比表面積は同一材料間での相対比較を行う物性値であると考えられる。

表-4 に CFB 灰および FA の鉱物組成およびガラス化率を示す。CFB 灰中に含まれる不活性な結晶相はいずれも二酸化ケイ素 (Quartz) が主体であり、ガラス化率は概ね 50%程度であった。また、表中に黄色で示す高炉スラグ微粉末や CFB 灰のポゾラン反応の刺激剤となる Ca 化合物である Lime, 無水石膏, 水酸化カルシウム, 炭酸カルシウム (Calcite) の含有量にはやや幅があり、これらを CaO として合算すると表中の右端に示すように 3-9%程度の範囲にあった。

CFB 灰-高炉スラグ微粉末系結合材における CFB の役割は、高炉スラグ微粉末の刺激剤としての作用と CFB 灰のガラス相のポゾラン反応相としての作用の 2 つである。この観点で表-4 を見ると、CFB 灰中のガラス化率はいずれも 50%程度で大きな差はない。また、CFB 灰のガラス相の塩基度は、高炉スラグ微粉末よりは小さいが FA よりは大きく、FA のポゾラン反応よりも活性が高い<sup>3)</sup>。さらに、高炉スラグ微粉末の刺激剤としての作用については、CaO 量にやや差があることから、CFB 灰の品質変動の影響を受けることも考えられる。しかし、既往の研究において CFB 灰-高炉スラグ微粉末の混合比率によらず硬化体の圧縮強度は同程度となったことから、CFB 灰の品質変動が硬化特性に及ぼす影響は小さく、例えば CFB 灰中の Ca 塩量に応じて CFB 灰-高炉スラグ微粉末の混合比率を変化させること等で、CFB 灰の品質によらず同等の硬化特性となることが考えられる。

### 3.2 CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の高強度化

図-2 に無水石膏添加率が圧縮強度に及ぼす影響を示す。無水石膏添加率 2.5%において 3, 28, 91 日強度において圧縮強度が高い結果となった。

図-3 に水酸化カルシウムおよび高炉スラグ微粉末比表面積が圧縮強度に及ぼす影響を示す。水酸化カルシウムを 6%混入することで、材齢 28 日以降、高い圧縮強度となる結果となった。高炉スラグ微粉末の反応にはアルカリの刺激が必要であり、CFB 自体が有するアルカリ刺

激剤の量は十分ではないと言える。また、高炉スラグ微粉末比表面積を 6000cm<sup>2</sup>/g とすることで、7 日強度以降から高炉スラグ微粉末比表面積 4000 cm<sup>2</sup>/g と比べて明らかに圧縮強度が高くなる結果となった。比表面積が大きくなることで高炉スラグ微粉末が反応しやすくなり強度が高くなったと考えられる。以上の結果より、無水石膏添加率は 2.5%、水酸化カルシウムは 6%混入し、高炉スラグ微粉末比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g とすることで、高強度化することができることを確認した。

図-4 および図-5 に SP 使用量と練混ぜ時間がフロー値、圧縮強度に及ぼす影響を示す。SP 使用量が多く、練混ぜ時間が長いほど流動性が向上する結果となった。また、SP 使用量が多くなる凝結遅延が起り、初期強度が小さくなる傾向が見られた。しかし、SP 使用量、練混ぜ時間によらず、材齢 28 日で約 40N/mm<sup>2</sup>、91 日で約 50N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を得ることができた。以上のように、

表-3 CFB 灰および FA の物理試験結果

CFB sample	Ig.loss (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	45μm residue (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Flow ratio (%)	MB (mg/g)	Activity index (28d)
2010-07	11.8	2.46	20	8100	57	0.26	76
2010-10	10.1	2.53	19	8390	59	0.46	89
2010-11	9.7	2.48	25	7900	59	0.67	76
2010-12	10.3	2.42	24	8080	57	0.63	80
2011-01	9.8	2.52	22	8680	60	0.62	99
2011-02	8.8	2.55	23	8420	60	0.71	77
2012-10	11.2	2.37	29	6390	60	0.64	63
2012-11	9.7	2.53	27	7960	58	0.83	88
2012-12	8.2	2.48	29	7510	59	0.65	100
FA	3.2	2.24	14	3770	98	0.32	99

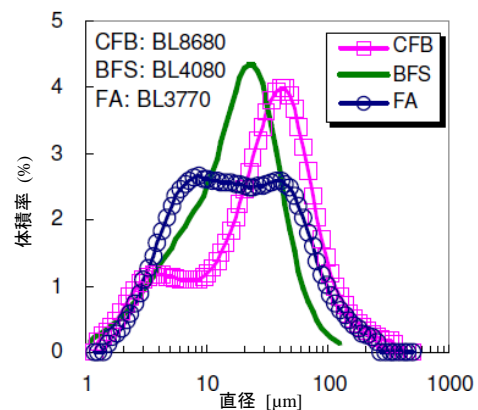


図-1 CFB, FA および高炉スラグ微粉末の粒度分布の例

表-4 CFB 灰および FA の鉱物組成およびガラス化率

CFB sample	Mineral composition determined by Rietveld method (%)										Irritant as CaO (%)	
	Quartz	Anorthite	Hematite	Gehlenite	Albite	Mullite	Lime	Anhydrite	CH	Calcite		Glass
2010-07	25.0	4.7	1.4	1.5			0.4	1.8	4.8	0.9	47.6	5.3
2010-10	20.3	5.6	1.3	2.1			2.5	2.4	2.4	0.9	52.3	5.8
2010-11	18.9	6.4	1.8	2.3			2.0	3.6	6.1	1.8	47.5	9.1
2010-12	19.5	7.6	1.1	1.2			4.7	2.1	1.3	0.3	51.9	6.7
2011-01	20.5	7.6	1.5	1.3			3.1	2.8	4.4	0.7	48.2	8.0
2011-02	21.4	5.0	1.3	1.5			3.8	3.1	4.6	0.6	49.9	8.9
2012-10	21.4	4.6	1.4	1.2	1.4	6.4	2.4	1.2		0.8	48.0	3.3
2012-11	21.8	4.7	1.9	1.7			5.2	3.0		1.5	50.4	7.3
2012-12	22.6	4.9	1.2	1.0	1.3	3.9	4.9	1.2			50.7	5.4
FA	6.6		1.3			6.9					82.0	

CFB 灰と高炉スラグ微粉末（比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g）の質量比を 75:25, W/B=40%とし, 無水石膏添加率を 2.5%, 水酸化カルシウムを 6%, SP を 4% 混入することで, セメントを用いずに CFB 灰-高炉スラグ微粉末系結合材だけで高強度な硬化体の作製が可能であることを確認した。

### 3-3 高強度 CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の空隙構造と耐久性

図-6 および図-7 に CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の細孔構造の測定結果を示す。図-6 は SP 使用量および練混ぜ時間影響を示しているが, SP 使用量, 練混ぜ時間によらず細孔直径 20nm 付近で極めて高いピークが存在する結果となっており, 総細孔量の違いは細孔直径 10~20nm のピークの細孔量に依存している。

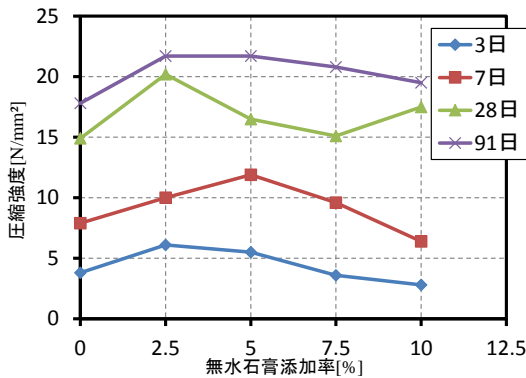


図-2 無水石膏添加率が圧縮強度に及ぼす影響

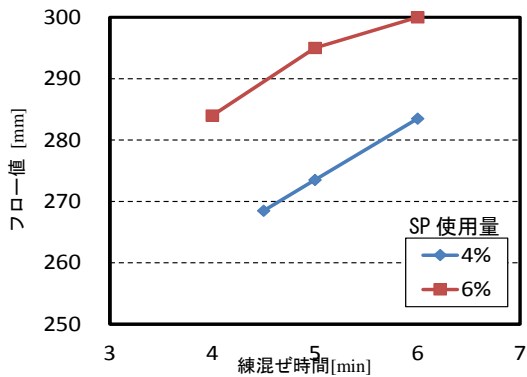
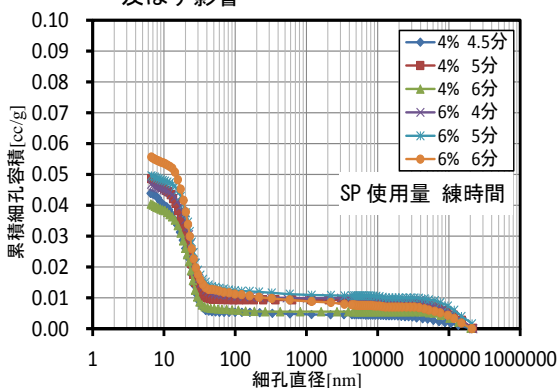


図-4 SP 使用量及び練混ぜ時間がフロー値に及ぼす影響



(a) SP 使用量及び, 練混ぜ時間別累積細孔容積

また, 図-7 は高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 および W/C=40%と 60%のセメントモルタルの細孔構造を比較したものであるが, No. 14 では図-6 と同様に細孔直径 20nm の細孔径に高いピークを示しているのに対して, セメントモルタルの場合は幅の広いブロードなピークを示し, その範囲は 10~100nm となっている。また, CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体の総細孔量は同じ水比 (40%) で比べるとセメントモルタルよりも多くなっているが, 60%のモルタルよりは少ない。

図-8 に高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とセメントモルタル No.15, 16 の圧縮強度を比較して示す。CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 は W/C=60%のモルタル No.16 よりも高い圧縮強度結果となった。

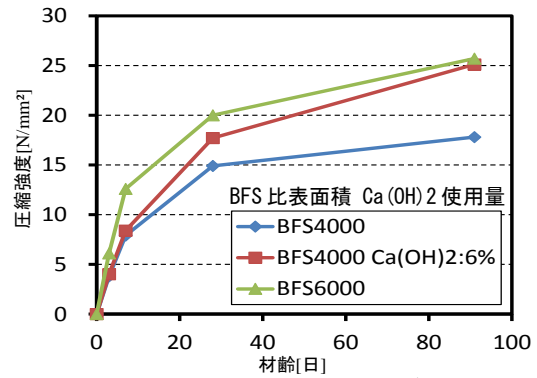


図-3 水酸化カルシウム及び高炉スラグ微粉末比表面積が圧縮強度に及ぼす影響

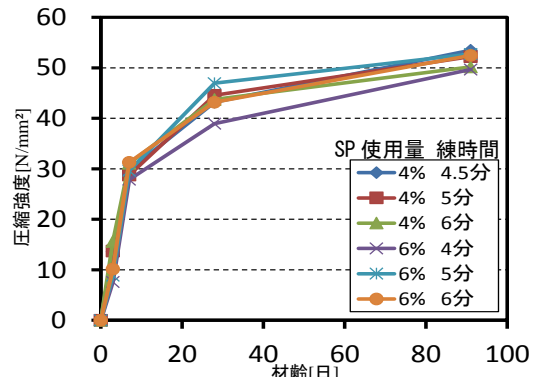
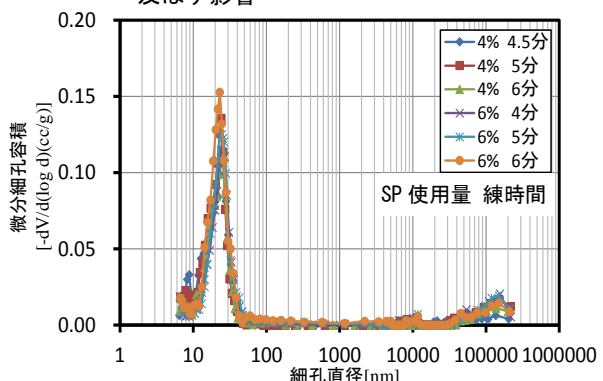


図-5 SP 使用量及び練混ぜ時間が圧縮強度に及ぼす影響

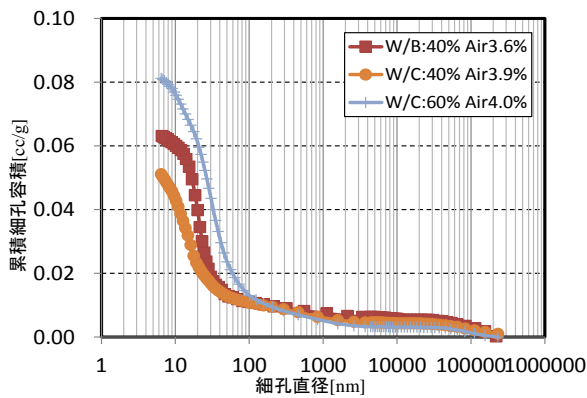


(b) SP 使用量及び, 練混ぜ時間別微分細孔容積

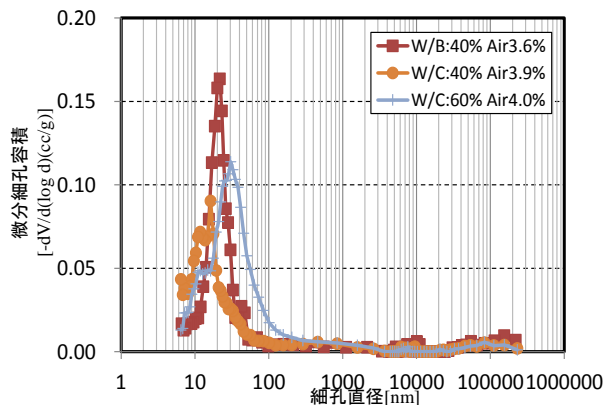
図-6 SP 使用量及び, 練混ぜ時間が微分細孔容積に及ぼす影響

図-9 に高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とセメントモルタル No.15, 16 の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体とセメントモルタルの圧縮強度と静弾性係数の関係は概ね一致している。

図-10 に高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とセメントモルタル No.15, 16 の凍結融解試験における相対動弾性係数の変化を示す。試験体の空気量はすべて4%程度であり差がなかったにもかかわらず、W/C=60%のセメントモルタル No.16 は初期段階から大きく劣化した。CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とW/C=40%のセメントモルタルは良好な耐凍害性を示した。



(a) 累積細孔容積



(b) 微分細孔容積

図-7 高強度 CFB 灰-高炉スラグ微粉末硬化体およびセメントモルタルの微分細孔容積

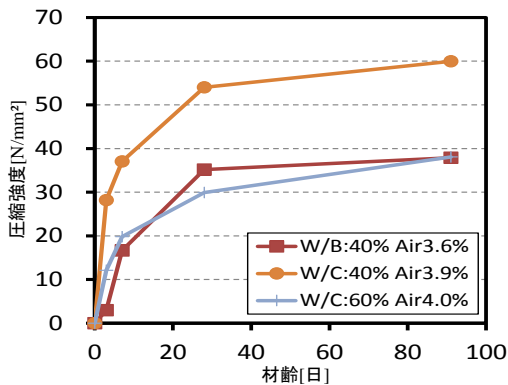


図-8 CFB 灰-BFS 系硬化体及びセメントモルタルの圧縮強度の比較

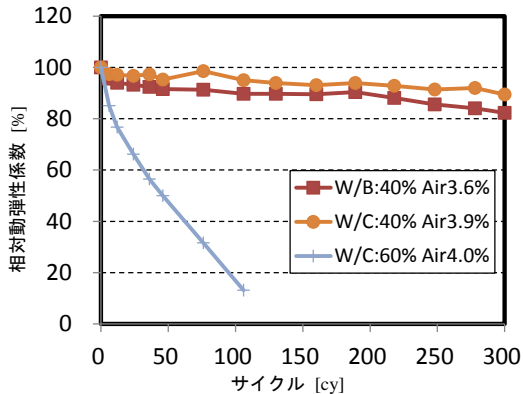


図-10 凍結融解試験における相対動弾性係数の変化

図-11 に高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とセメントモルタル No.15, 16 の硫酸浸漬試験における質量変化率の経時変化を示す。また、写真-1 に硫酸浸漬供試体の外観を示す。セメントモルタルでは W/C によらず表面剥離が進行する劣化を示しているのに対して、CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体は健全であることがわかる。また、モルタルでは W/C=40%の方が60%よりも劣化が大きくなったが、この理由については不明であるが、これと同様の結果を示す既往研究<sup>5)</sup>も存在する。

図-12 に高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体 No.14 とセメントモルタル No.15, 16 の促進中性化試験結果を示す。CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体は基

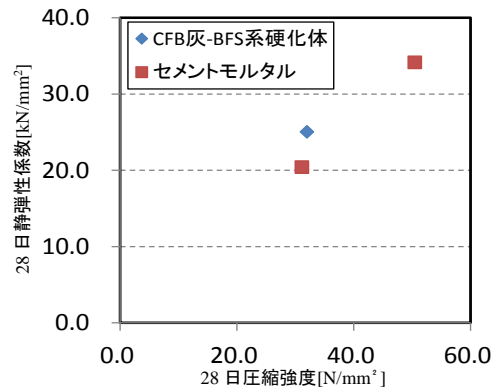


図-9 CFB 灰-BFS 系硬化体及びセメントモルタルの圧縮強度及び静弾性係数の比較

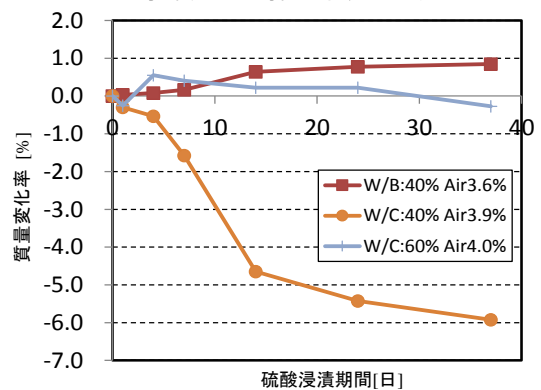


図-11 硫酸浸漬試験における質量変化率の経時変化

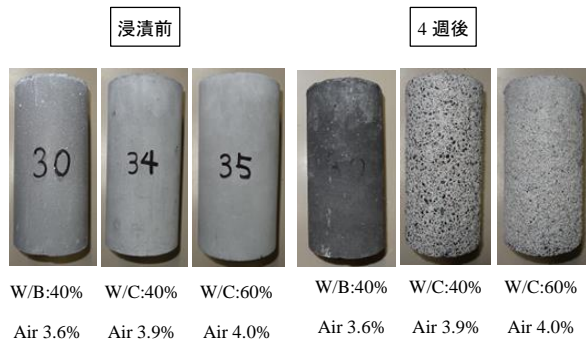


写真-1 硫酸浸漬供試体外観

本的にアルカリ源がなく PH は低い。また、外添している水酸化カルシウムは高炉スラグ微粉末の刺激剤として働き、水和の進行とともにアルカリは低下する。したがって、中性化抵抗性を期待することはできない。

#### 4. まとめ

本研究では、CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体のキャラクタリゼーションと高強度化のための条件の選定及び、高強度硬化体の耐久性評価を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) CFB 灰のガラス化率は概ね、50%程度で大きな差異はなく、ポズラン反応の刺激剤となる Ca 塩の量にはやや差異が認められた。
- 2) CFB 灰-高炉スラグ微粉末の混合比率によらず硬化体の圧縮強度は同程度となった既往研究の結果と併せると、CFB 灰の品質変動が硬化特性に及ぼす影響は小さいといえる。
- 3) 無水石膏を CFB 灰に対する内割り 2.5%、高炉スラグ微粉末の比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g、水酸化カルシウムは CFB 灰に対する外割り 6%、SP は結合材量に対して 4%、練混ぜ時間は 5 分の条件とすることで適度なワーカビリティを有し、28 日強度で約 40N/mm<sup>2</sup>、91 日強度で約 50N/mm<sup>2</sup> の硬化体を得られることを確認した。
- 4) 高強度化した CFB 灰-高炉スラグ微粉末系硬化体は、セメントモルタルと比較して、中性化抵抗性は劣るが、耐凍害性、耐硫酸性は同等以上である。

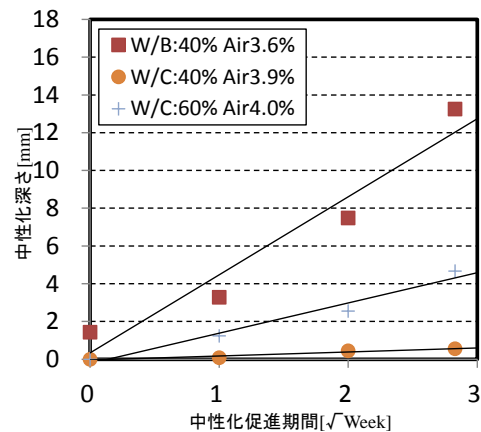


図-12 中性化深さと中性化促進期間の関係

謝辞

本研究の実施にあたり、ノーステック財団「研究開発助成事業」の補助を受けた。記して深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 山下紘太郎, 高山長基, 濱幸雄: 循環流動層ボイラー灰を混入したモルタル・コンクリートの基礎性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.219-220, 2011
- 2) 山下紘太郎, 佐川孝広, 岸本嘉彦, 濱幸雄: 循環流動層ボイラー灰と高炉スラグ微粉末を結合材とした硬化体の強度性状と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1579-1584, 2013
- 3) 佐川孝広, 柏熊一輝, 山下紘太郎, 濱幸雄: 循環流動層ボイラー灰-高炉スラグ微粉末硬化体の強度発現と水和反応, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, PP.298-299, 2012
- 4) JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法)」コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.59-62, 1985
- 5) 田中齊, 榎田佳寛, 鹿毛忠継: 硫酸および硝酸によるコンクリートの化学的腐食進行速度に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1185-1190, 2008