

報告

[1044] 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの諸性質について

正会員○ 島崎信明 (住金鹿島鉱化(株))  
 牧野芳久 (住友金属工業(株))  
 関口正夫 (住金鹿島鉱化(株))  
 金谷光秀 (八洋コンクリートコンサルタント)

1. はじめに

高炉スラグ微粉末(以下, BFS)を用いたコンクリートの報告は数多くあるが高強度, 高粉末度, 蒸気養生および耐久性に関連するものは少ない。高強度コンクリートにBFSを用いた場合の強度特性や乾燥収縮, 促進中性化等の硬化コンクリートの諸性質について調べた。コンクリートの配合は土木用, 二次製品用, および建築用に対応させBFSを普通ポルトランドセメント(以下, OPC)に対し, 25%~75%置換した。コンクリートの水セメント比(以下, W/C)は27%~55%で行い, 養生は標準養生と蒸気養生の2通りとした。そして強度, 乾燥収縮, 凍結融解抵抗性, 促進中性化, 透水性, 耐酸性などの特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料はOPC, BFS, 混和剤および粗骨材, 細骨材である。これらの物性を表1~表5に示す。BFSはシリーズIでは試験用ミルで粉碎, 分級して作製した。シリーズIIおよびIIIでは通常製品(4000 cm<sup>2</sup>/g)を分級して7000 cm<sup>2</sup>/g, 9000 cm<sup>2</sup>/g品を得た。

表-1 高炉スラグ微粉末の物性

シリーズ	I									II			III	
サンプル名称	2000	2500	3000	3500	4000	6000	8000	10000	4000	7000	9000	4000	7000	
粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	1940	2320	2890	3640	4030	6290	8440	10160	4030	6880	9010	4390	7430	
平均粒径 (μm)	25.4	22.5	15.3	11.5	11.1	5.6	3.8	2.9	10.0	5.6	3.9	9.4	5.1	
※	7日	45	48	66	69	74	90	116	135	66	86	112	65	93
SAI	28日	78	79	102	104	114	116	142	155	102	126	133	103	126
(%)	91日	85	91	91	105	114	127	136	145	112	127	140	127	127

※SAI: Slag Activity Index. OPCに対する微粉末50%置換のモルタル強度比(W/C=50%)。

表-2 OPCの物性

シリーズ	I・II	III
比重	3.15	3.16
粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	3320	3180
標準軟度水量 (%)	27.5	27.6
始発時間 hr-min	2-20	2-27
終結時間 "	3-15	3-40
3d	160	160
モルタル強度 7d	265	257
(kgf/cm <sup>2</sup> ) 28d	415	417

表-3 骨材の物性

骨材の種類別	細骨材		粗骨材		
	シリーズ	I・II	III	I・II	III
最大粒径	5mm	5mm	20mm	20mm	20mm
表乾比重	2.63	2.62	2.68	2.64	2.64
吸水率	0.65%	1.64%	0.56%	0.60%	0.60%
粗粒率	2.52	2.64	6.58	6.64	6.64

表-4 結合材の化学成分 (%)

種類	O P C			B F S		
	I	II	III	I	II	III
CaO	64.6	64.1	63.0	42.4	42.9	42.5
MgO	1.8	1.7	1.6	6.0	6.2	5.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	5.7	4.8	14.0	14.0	13.7
SiO <sub>2</sub>	21.1	21.4	21.4	33.0	32.7	33.0
SO <sub>3</sub>	2.1	2.1	2.0	0.0	0.0	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.3	3.3	2.9	0.7	0.4	0.3
Ig. loss	0.9	0.8	1.0	<0.1	<0.1	<0.1
R <sub>2</sub> O			0.57	0.50	0.54	0.48

表-5 混和剤の内容

シリーズ	使用混和剤の主な内容
I	1. A E 減水剤：リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体 2. 空気量調整剤
II	高性能減水剤：高縮合トリアジン系化合物
III	1. 高性能 A E 減水剤：ポリカルボン酸エーテル系の複合物 2. 空気量調整剤

2. 2 試験内容

シリーズ I は B F S の置換率を 50%一定にして粉末度と強度との関係を調べた。スランブは 8 cm 空気量は 4.5% を目標にして標準養生と蒸気養生を行った。蒸気養生の昇温速度は 20°C/h 最高温度 65°C で 3 時間保持した。シリーズ II では高性能減水剤を用いて W/C を小さくして高強度コンクリートとしての B F S の強度特性について置換率、粉末度を変えて調べた。W/C は 27% と 35% で行った。そして蒸気養生後に細孔径分布と凍結融解抵抗性を測定した。シリーズ III では単位水量を 165 kg/m<sup>3</sup>一定として W/C は 35%、45%、55%、スランブ 18 cm、空気量 3.5% で B F S の粉末度、置換率を変えた場合のコンクリートの強度、細孔径分布、凍結融解抵抗性、乾燥収縮、透水性、耐酸性との関係を調べた。

3. 結果と考察

3. 1 コンクリートの配合を表 6 ~ 表 8 に示した。

表-6 シリーズ I コンクリートの配合

結合材の種類		OPC	2000	2500	3000	3500	4000	6000	8000	10000	・スランブ 8±1 cm
単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C= 45%	158	160	150	151	150	151	150	153	153	・空気量 4.5±1%
	W/C= 55%	158	160	153	151	151	151	150	151	153	
細骨材率 (%)	W/C= 45%	42	42	43	42	42	42	40	40	40	・BFS 置換率 50%
	W/C= 55%	44	44	44	44	42	42	42	42	42	

・混和剤添加率 C×0.25%

表-7 シリーズ II コンクリートの配合とフロー試験結果

結合材の種類		OPC	4000		7000			9000		・混和剤添加率 C×3%(W/C=35%) C×4%(W/C=27%)
B F S 置換率 (%)			25	50	25	50	75	25	75	
単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C= 27%	150	140	135	140	135	135	140	135	・空気量 1.5±0.5%
	W/C= 35%	146	140	130	138	130	130	138	130	
細骨材率 (%)	W/C= 27%	30	30	28	29	28	28	29	28	
	W/C= 35%	38	38	38	38	38	38	38	38	
フ ロー (mm)	W/C= 27%	204	298	570	480	500	550	213	550	
	W/C= 35%	300	315	490	318	367	560	374	350	

表-8 シリーズⅢ コンクリートの配合

結合材の種類		OPC	4000		7000			
BFS置換率 (%)		----	30	50	15	30	50	70
混和剤添加率 (%)	W/C= 35%	1.0	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7
	W/C= 45%	1.0	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7
	W/C= 55%	1.2	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9
細骨材率 (%)	W/C= 35%	44	44	43	44	44	43	43
	W/C= 45%	46	46	46	46	46	46	46
	W/C= 55%	48	48	48	48	48	48	48

・スラブ 18±2.5 cm  
 ・空気量 3.5±1%  
 ・単位水量 165 kg/m<sup>3</sup>

BFSをコンクリート混和材として使用するとシリーズⅠ、Ⅱのように減水剤一定条件では単位水量を低減できる傾向があった。シリーズⅢは単位水量一定でBFSを置換するほど高性能減水剤の使用量は減ずることが出来、3シリーズいずれの場合でもBFSによって単位水量を低減出来ることが確認された。(表6～表8)

### 3.2 OPCの強度特性

標準養生、蒸気養生いずれの場合もW/Cが小さいほど強度は大きい傾向にあり、蒸気養生した場合も同様であった。(図1)

### 3.3 BFSの強度比

BFSをOPCと一部置換した場合の強度特性をOPCを100%とした強度比で図2から図5に示した。

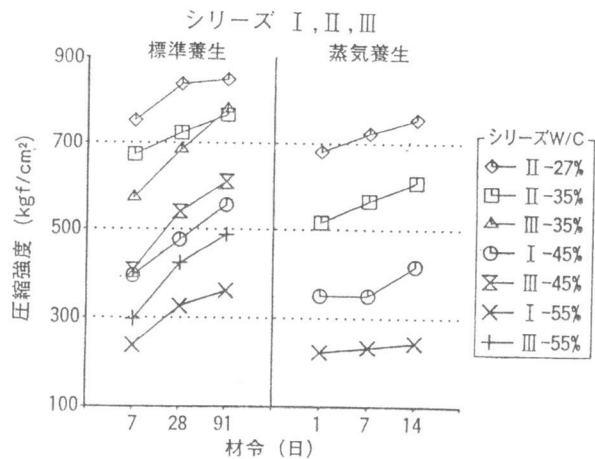


図-1 OPCのコンクリート強度特性

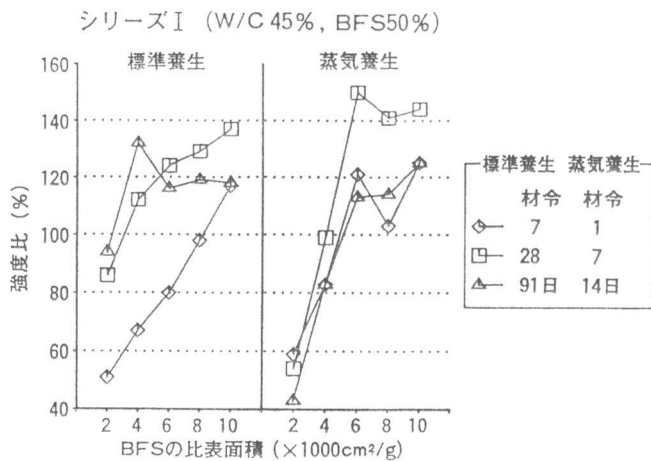


図-2 W/C=45%のBFS粉末度と強度比との関係(置換率50%一定)

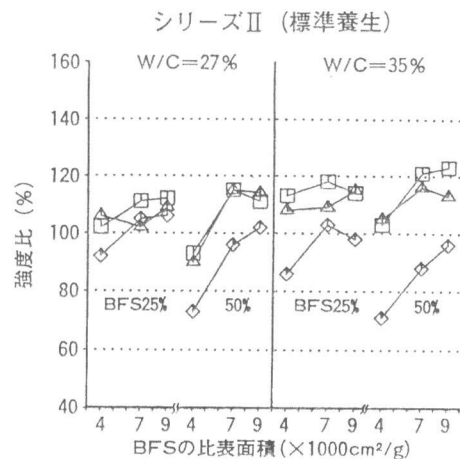


図-3 標準養生の高強度コンクリートでのBFS粉末度と強度比の関係

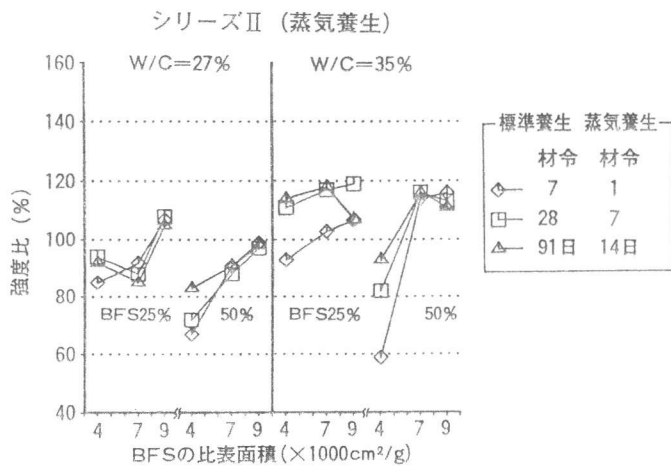


図-4 蒸気養生の高強度コンクリートでの BFS 粉末度と強度比の関係

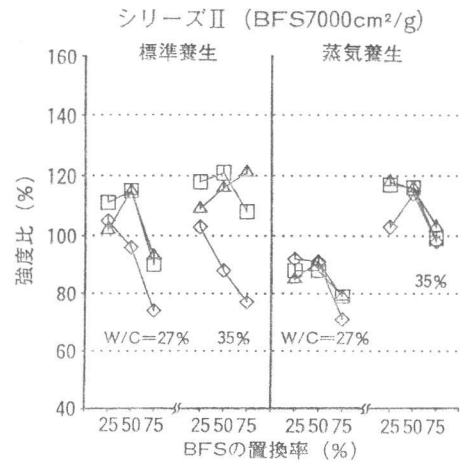


図-5 高強度コンクリートにおける BFS 置換率と強度比の関係

(1) 標準養生 材令初期(7日)では BFS の置換率を 50%一定条件で粉末度と強度比には直線関係が見られ、材令が進むに従って強度比は 110%~120%一定になる傾向があった。 BFS コンクリートの強度特性は W/C が 27% から 45% までの範囲では同様な傾向を示し、特に大きな違いは見られなかった。(図 2 左, 図 3)

BFS の置換率を 25% から 75% まで変化させると初期材令では置換率増加に従って強度比はほぼ直線的に低下したが材令 28 日以降では差はほとんど無かった。(図 5 左)

#### (2) 蒸気養生

BFS の粉末度が大きいほど強度比は大きくなる傾向が見られるが 6000 cm<sup>2</sup>/g ~ 10000 cm<sup>2</sup>/g の範囲ではほぼ横這いになっており、その差異は小さくなっていった。これは標準養生の長期材令の強度発現パターンと類似していた。(図 2 右)

W/C を小さくすると強度比はやや低下する傾向があった。(図 2 右, 図 4)

BFS の置換率を変化させると 25% ~ 50% では大差が無かったが 75% では強度比は低下した。(図 5 右)

### 3.4 BFS を用いたコンクリートの諸特性

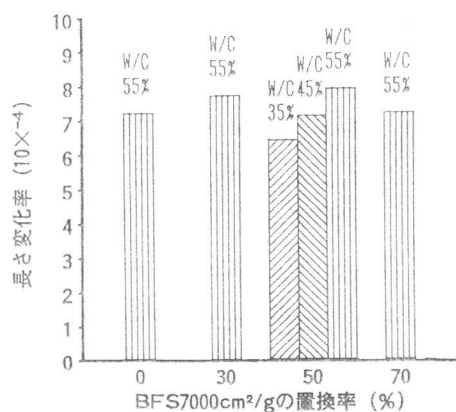


図-6 BFS を用いたコンクリートの置換率, W/C と乾燥収縮の関係

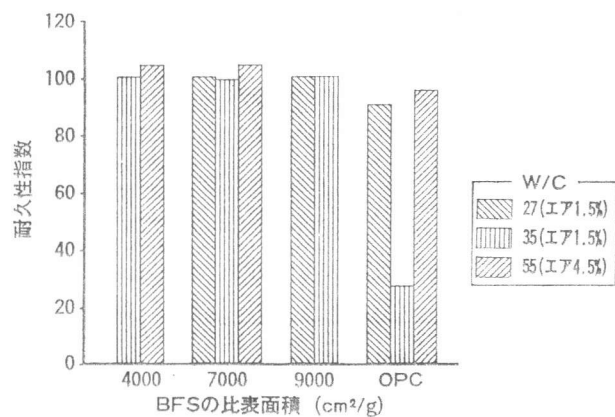


図-7 急速凍結融解抵抗性における BFS の置換効果

(1) 乾燥収縮 材令3ヶ月迄の結果を図6に示した。BFSの粉末度を7000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 、置換率を30%~70%で単位水量を一定とした場合、乾燥収縮による長さ変化率は、W/Cが小さいほど小さくなる傾向があった。W/Cが55%一定の場合、BFSはOPCと同等の長さ変化率を示した。(図6)

(2) 凍結融解抵抗性 ASTM C 666に従って急速凍結融解におけるコンクリートの抵抗性試験を実施した。その結果では空気量を3.5%に調整したシリーズIII(標準養生)ではBFSの有無によらずいずれも耐久性指数は100%近くで高かった。これは微細な連行空気が適切に作用したものと考えられる。一方、空気量を調整しなかったシリーズII(蒸気養生)ではOPCでW/Cが35%にも関わらず耐久性指数が27%と低かったが、BFSを50%置換することによって耐久性指数は100%近くに改善する効果が認められた。(図7)

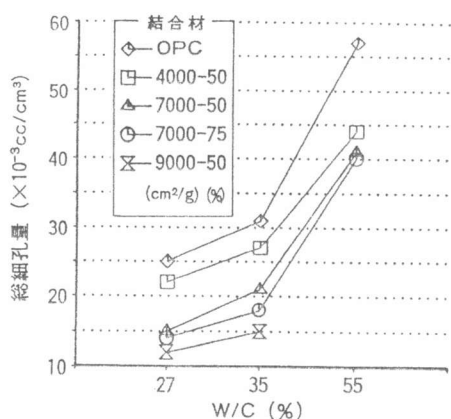


図-8 BFSを用いたコンクリートの総細孔量測定結果

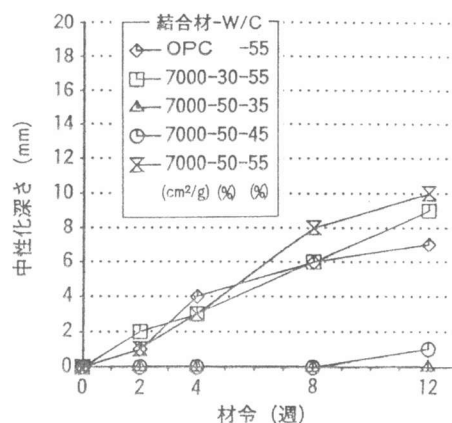


図-9 BFSコンクリートの促進中性化試験結果 (試験材令3ヶ月)

(3) 細孔径分布 細孔径分布を測定した結果、標準養生ではBFSの粉末度を高くするほど、また置換率を大きくするほど総細孔量は減少する傾向があった。またW/Cを低くすると著しく総細孔量は減少した。蒸気養生をした場合も同様の傾向が認められた。これはセメント粒子間に高粉末度のBFSが入る充填効果と、セメントの水和過程で発生する水酸化カルシウムと反応して水和物を形成する効果によるものと考えられる。(図8)

(4) 促進中性化 促進中性化試験を3ヶ月間実施した。試験条件はCO<sub>2</sub>濃度5%、温度30℃湿度60%である。中性化深さはW/Cが55%でOPCは6mmであったが、BFSを30%~50%置換した結果では7~10mmとなっていた。W/Cを45%、35%とした場合では中性化深さは0mmであり、高強度コンクリートではBFSの中性化はほとんど無いものと思われる。(図9)

(5) 透水性 インプット法(1.5気圧、48時間)で水の透水係数を求めた結果、OPCと較べてBFSは置換率を大きくするほど、粉末度を高くするほど透水係数は小さくなり水密性を向上させることが確認された。(図10)

(6) 耐酸性 コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)によって、硫酸5%水溶液を用いて3ヶ月間、耐酸性について調べた。相対動弾性係数はOPCもBFSも同等であり、差異は見られなかった。質量変化率ではOPCが15%減少したのに対してBFSは4000 cm<sup>2</sup>/g、7000 cm<sup>2</sup>/gいずれも50%置換したものは変化が認められなかった。最近、酸性雨によってコンクリートが劣化した例が報道されているが、BFSはこのような化学的浸食に対して有効なものとなり得ると考えられる。(図11)

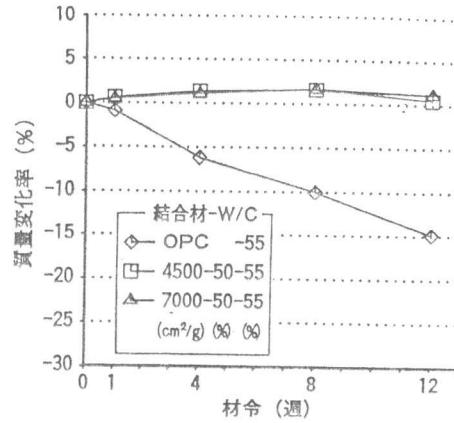
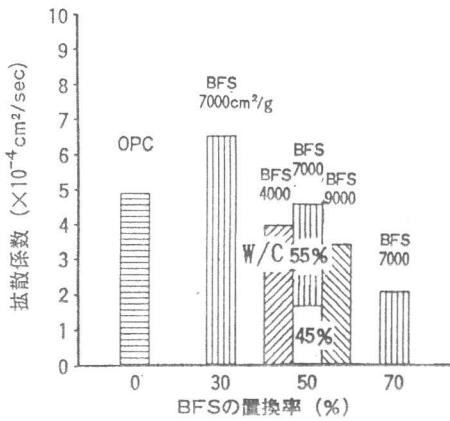


図-10 BFSを用いたコンクリートの透水性 図-11 BFSコンクリートの耐酸性

#### 4. まとめ

BFSを高強度コンクリート用混和材として用いた場合、本試験の範囲でまとめると以下のようになる。

- (1) 標準養生ではBFSの粉末度と初期のOPCを100%とした強度比は比例関係があり、中長期の強度はOPCに対して20%程度増加する傾向が見られた。
- (2) 蒸気養生では、6000 cm<sup>2</sup>/g以上のBFSはOPCに対して同等以上の強度を示すことが認められた。
- (3) 空気量を調整しない蒸気養生で、BFS(4000 cm<sup>2</sup>/g以上の粉末度)を50%置換した場合、凍結融解抵抗性を改善する効果が認められた。
- (4) BFS(7000 cm<sup>2</sup>/g)は標準養生で、乾燥収縮、凍結融解抵抗性がOPCと同等であり透水性、耐酸性については改善されることが確認された。また中性化についてはW/Cが35%から45%の高強度コンクリートではほとんど見られなかった。

#### [謝辞]

本試験のサンプル作製に際して、日立セメント(株)研究開発部の皆様にご協力を頂きまして深く御礼申し上げます。

[参考文献] 今橋 太一, 笠井 英志, 奥 彰次; 蒸気養生を施した高炉スラグ微粉末添加コンクリートの諸性状, 第44回セメント技術大会講演集, p.p. 200-205, (1990)