

[1016] 高炉水砕スラグ微粉末を用いたモルタル及び コンクリートの諸特性

正会員 ○中村信行 (日本鋼管鉄鋼研究所)
 正会員 坂井正美 (日本鋼管鉄鋼研究所)
 鯉淵 清 (第一セメント技術開発室)
 石川陽一 (第一セメント技術開発室)

1. まえがき

現在、高炉水砕スラグ粉末 (以下スラグという) は高炉セメントに使われているものも含め、ブレン値で 約4000 cm^3/g 程度のものが一般的に使用されている。これは昭和30年代頃に行なわれたスラグの粉砕性の研究とコンクリートの強度発現に及ぼす粉末度の研究から、ブレン値が4000以上では粉砕エネルギーが極端に大きくなること、またブレン値が大きくなっても長期強度の発現にあまり寄与しないことなどが明らかにされたためと思われる。^[1,4]

しかし、最近の研究で通常のスラグ粉末の生産方式の中に分級工程を取り入れることにより、従来よりも省エネルギー的に微粉末が得られることがわかり、その利用について前報ではモルタル供試体による耐塩素透過性、水セメント比30% (圧縮強度 600~800 kgf/cm^2 程度) の高強度コンクリートの強度、耐透水性等の各種性能を示し、微粉末スラグの効果が大きいことを明らかにした。^[1,2] 本報は一般に広く使われている水セメント比が50~60%の範囲のコンクリートについて、スラグ微粉末が圧縮強度、弾性係数、乾燥収縮、中性化、耐透水性等の各種性能に及ぼす効果を明らかにする目的で研究を行なったものである。

2. 実験概要

実験は2つのシリーズに分けて実施した。

2.1 シリーズ1 モルタル強度試験

前報^[1]では普通ポルトランドセメントの

一部を微粉末スラグに置き換えて、スラグ置換率と圧縮強度の関係を求め、ブレン値4000~8000 cm^3/g の間では材令28日で40%置換の強度が最も大きいことを明らかにした。今回はブレン値の違いが圧縮強度に与える影響をさらに明らかにする目的で、分級方式により製造したスラグ10種類 (ブレン値約4000~16000 cm^3/g) についてスラグ置換率40%を一定にし、JIS R 5201に規定されているモルタル配合 (W/C=0.65) により圧縮強度試験を実施した。セメントは表2に示す普通ポルトランドセメントを、スラグは表1に示す化学成分のものを、細骨材は標準砂を使用した。またスラグはどの粉末度でも分級による化学成分の変化は見られなかった。

表1 スラグの化学成分 (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
35.7	13.2	0.5	41.3	6.4

表2 使用材料

材 料	記 号	比重	粉末度 (cm^3/g)	備 考
普通セメント	OPC	3.16	3160	通常出荷品, スラグ量 4%, SO ₃ 2.0%
標準スラグ	OR	2.90	4060	通常出荷品
微粉末スラグ	VF	2.90	7570	標準スラグを分級したもの
減水剤	Pz70	1.25	—	P社製 A E 減水剤
空気連行剤	AE303	—	—	P社製 A E 補助剤 (1%水溶液)
粗骨材	G	2.68	FM=6.67	相模川産: 砕石=6:4, 5~20mm
細骨材	S	2.61	FM=2.74	相模川産: 千葉産=4:1, 0~5mm

2.2 シリーズ2 コンクリートの各種特性

(1) 使用材料

使用材料を表2に示したが、スラグは標準(OR)と微粉末(VF)の2種類とした。

(2) コンクリートの配合と混練方法

水セメント比は60, 55, および50%の3水準とし、スラグの置換率は0, 20, 40, および60%の4水準とした。目標スランブは 20 ± 2 cm, 目標空気量は 4 ± 1 %とし、試し練りの結果、表3に示す配合を定めた。なおコンクリートの混練は、50ℓ容量強制練ミキサーを使用し、3分間練りとした。

(3) コンクリートの各種試験

- まだ固まらないコンクリートの試験； スランブおよび空気量はそれぞれ JIS A 1101, JIS A 1128によった。
- 圧縮強度試験； 供試体は $10\phi \times 20$ cm, 養生は20℃標準水中養生として JIS A 1108 に準じて試験を行なった。材令は7, 28, 91日、6ヶ月および12ヶ月とし、試験は1材令3本行ないその平均値を採った。
- 割裂引張強度試験； 養生および供試体は圧縮試験と同様とし、JIS A 1113に準じて試験を行なった。試験はW/C=55%で28, 91日の2材令とした。
- 静弾性および動弾性試験； 材令91日および12ヶ月の圧縮試験用供試体を用い、静弾性係数はひずみゲージにより応力-ひずみ曲線を求め、その最大応力度の1/3点における割線弾性係数とした。動弾性係数は共振縦振動数より求めた。
- 透水試験； $15\phi \times 30$ cmの供試体を材令91日まで20℃標準水中養生し、その後20℃の

表3 コンクリートの配合および試験結果

No	スラグ粉末の種類	スラグ粉末の置換率 (%)	W/C (%)	S/a (%)	1 m ³ 当たりの使用材料							まだ固まらないコンクリートの性質			
					水 (kg)	セメント (kg)	砂 (kg)	砂利 (kg)	砕石 (kg)	Pz70 (ℓ)	AE303 (ℓ)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単重 (kg/m ³)	温度 (℃)
1	微粉末 (VF)	0	60	45.5	172	287	828	611	407	0.718	0.430	20.0	5.5	2285	20.0
2		20	〃	45.1	〃	〃	819	614	409	〃	0.574	19.8	5.1	2296	21.0
3		40	〃	44.7	〃	〃	810	617	412	〃	0.861	20.2	4.3	2313	20.5
4		60	〃	44.3	〃	〃	801	620	414	〃	1.148	19.5	4.1	2296	20.0
5		0	55	43.8	172	313	788	623	415	0.782	0	20.0	3.9	2326	21.5
6		20	〃	43.4	〃	〃	778	625	417	〃	0.313	19.9	4.6	2298	21.0
7		40	〃	43.0	〃	〃	769	628	419	〃	1.096	20.5	4.8	2296	21.0
8		60	〃	42.6	〃	〃	760	631	421	〃	1.565	19.0	4.1	2311	20.0
9		0	50	42.1	172	344	746	632	422	0.860	0	19.2	3.7	2330	21.5
10		20	〃	41.7	〃	〃	737	635	423	〃	0.344	19.3	4.0	2328	21.0
11		40	〃	41.3	〃	〃	728	637	425	〃	1.032	20.2	3.8	2323	21.0
12		60	〃	40.9	〃	〃	719	640	426	〃	1.548	17.1	3.5	2323	20.0
13	標準 (OR)	20	60	45.1	170	283	823	617	411	0.708	0.566	19.7	4.7	2308	22.5
14		40	〃	44.7	168	280	817	623	415	0.700	1.120	19.5	4.3	2311	21.5
15		60	〃	44.3	166	277	812	629	419	0.692	1.524	19.5	4.4	2308	21.0
16		20	55	43.4	170	309	782	628	419	0.772	0.618	19.9	4.0	2332	22.0
17		40	〃	43.0	168	305	777	634	423	0.762	1.220	19.3	4.6	2311	20.5
18		60	〃	42.6	166	302	771	640	427	0.755	1.812	18.6	5.3	2277	20.0
19		20	50	41.7	170	340	741	638	425	0.850	0.680	19.5	4.0	2326	22.0
20		40	〃	41.3	168	336	735	644	429	0.840	1.344	19.5	4.9	2306	21.5
21		60	〃	40.9	166	332	729	649	433	0.830	1.826	19.9	4.1	2316	21.0

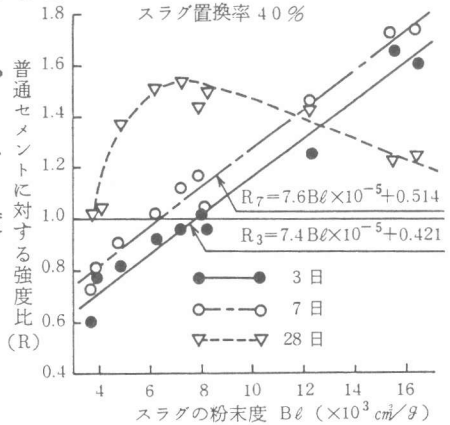
- 恒温室に1週間放置してからインプット法による透水試験^[6]を行なった。水圧は15kgf/cm²とし48時間保持してから供試体を割裂し、浸透深さを測定し拡散係数を算出した。
- f) 乾燥収縮試験； JIS A 1129に準じホイットモアひずみ計を用いて測定した。供試体は10×10×40cmの角柱とし、打設後24時間で脱型し、材令7日まで標準水中養生を行なったのち基長を測定し、以後20℃、60%RHの気乾条件下で1年間にわたり測定した。
- g) 中性化試験； 乾燥収縮試験に供した試験体を材令1年後にカッターで切断し、破断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。

3. 実験結果および検討

3. 1 スラッグの粉末度がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響

図1にその結果を示した。縦軸は普通セメントに対する圧縮強度比を示し、横軸はスラッグの粉末度を示す。これよりセメントの40%をスラッグで置換したモルタルの3日、7日強度はスラッグの粉末度と直線関係にあり、粉末度が大きくなるほど強度発現は大きい。

それに対して28日強度ではブレン値7000cm³/g程度で最大値を示し、それより粉末度が大きくなると強度発現が低下してゆく。これは粉末度が大きいと初期の水和反応が速く進むため、スラッグの特徴でもある長期的な反応持続性が低下してゆくためと思われる。ボールミルだけでスラッグを粉砕する従来方式で製造された



微粉末ではブレン値7000でも28日強度が増進しない 図1 スラッグ粉末度とモルタル圧縮強度比という報告^[3,5]の原因が分級方式で製造した今回のものよりも、同じ粉末度でも粒径が荒い部分から細かい部分まで広い領域で分布するためと推察できる。

なお、今回の結果から普通セメントの強度を3日材令で上回るには粉末度を8000cm³/g以上、7日材令から上回るには約6500cm³/g以上必要と考えられる。

3. 2 スラッグ微粉末を混和したコンクリートの諸特性

(1) コンクリートの配合およびまだ固まらないコンクリートの性質

配合および試験結果を表3に示す。次に微粉末スラッグを用いたコンクリートの特性について以下に示す。

a) 単位水量； 標準スラッグを用いたコンクリートの単位水量は、従来の知見どおり置換率20%増毎に単位水量を2ℓ減じ得た。一方、微粉末スラッグの場合は、予備試験練りの結果、単位水量を減らせないことがわかり本試験ではスラッグの置換率およびW/Cに関係なく、普通コンクリートと同じ単位水量(172 kg/m³)で試験した。その結果、微粉末スラッグを60%まで置換しても普通コンクリートとほぼ同じスランプが得られた。

b) 細骨材率； 標準スラッグと同様に置換率20%増につき0.4%減じて、ワーカビリティの良いコンクリートが得られた。

c) 減水剤の使用量におよぼす影響； 減水剤は標準添加量である単位セメント量の0.25%の使用でスラッグ置換率およびW/Cに関係なく所要のスランプが得られたため、微粉末スラッグが減水剤の使用量に及ぼす影響は無いと思われる。

d) 空気連行剤の使用量に及ぼす影響； 標準スラッグと同様に置換率の増加と共に添加量が

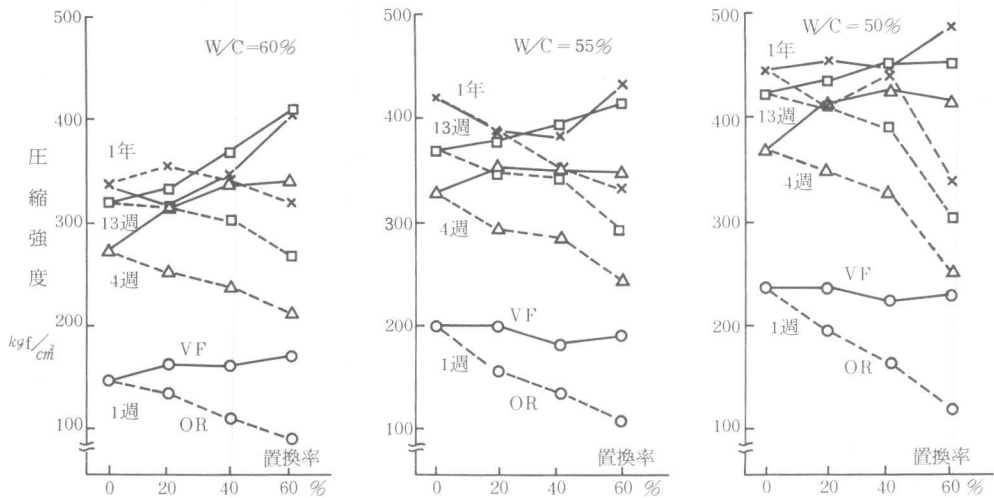


図2 スラグ置換率とコンクリート圧縮強度

増え、その補正量は標準スラグと同程度と考えられる。

(2) コンクリートの圧縮強度に及ぼすスラグの影響

a) スラグ置換率と圧縮強度； スラグ置換率と圧縮強度の関係を図2に示した。標準スラグを用いたコンクリートの強度はいずれの水セメント比においても置換率の増加と共に強度は低下する。また、材令が長くなると共に強度低下の割合は小さくなるが、材令91日でも普通コンクリートの強度に及ばない。このように通常のスラグ粉末を用いたコンクリートの強度は同一 W/Cの場合、普通コンクリートの強度より低くなるため、実使用にあたってはW/Cを補正した配合で使用しているのが現状である。それに対して、微粉末スラグを置換した系の材令7日強度は置換率60%でも強度低下は無く、普通コンクリートとほぼ同等の強度を発現する。材令28日を越えると、どの置換率でも普通コンクリートの強度を大幅に上回る。また強度の増加率はW/Cの大きい方が顕著である。

b) セメント水比とコンクリートの圧縮強度； 図3に圧縮強度とC/Wの関係を示し、表4にその直線回帰式を示した。微粉末スラグの最適置換率は材令により異なり、おおむね材令7日で20%、28日で40%、91日で60%である。

(3) 割裂引張強度

図4に圧縮強度と引張強度の関係を示した。微粉末スラグによる引張強度

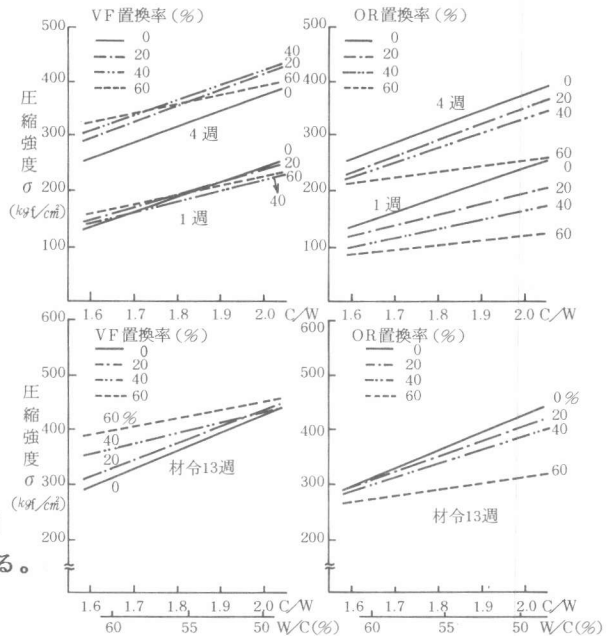


図3 セメント水比とコンクリート圧縮強度

表4 $\sigma - C/W$ の直線回帰式 ($\sigma = a + b * C/W$)

スラグの種類	置換率(%)	7日			28日			91日			6月			1年		
		a	b	R	a	b	R	a	b	R	a	b	R	a	b	R
微粉末(VF)	0	-283	261	.984	-210	292	.990	-223	324	.999	-150	282	1.00	-215	334	.987
	20	-205	221	.999	-169	290	.939	-168	300	.999	-131	280	.996	-359	408	.998
	40	-164	192	.990	-115	266	.942	64	182	.999	-204	330	.991	-167	305	.993
	60	-121	174	.993	60	164	.940	176	136	.941	184	135	.971	-18	205	.992
標準(OR)	20	-178	186	.996	-245	297	.999	-150	278	.993	164	103	.879	94	159	.972
	40	-154	158	.999	-213	272	.997	-131	261	.999	2	186	.923	-182	306	.929
	60	-44	81	.980	41	107	.913	98	105	.991	259	29	.573	129	107	.913

σ ; 圧縮強度(kgf/cm²) R; 相関係数

の増進は圧縮強度ほど顕著に現われず、普通コンクリートと同等と考えられる。

(4) 弾性係数

図5に圧縮強度と静弾性係数の関係を、図6に静弾性係数と動弾性係数の関係を示した。スラグを混和したコンクリートの弾性係数は普通コンクリートと同様に扱って良いと考えられる。

(5) 耐透水性

図7に試験結果を示す。微粉末スラグを用いたコンクリートの拡散係数は普通コンクリートより非常に小さく、20%置換でも耐透水性は著しく向上する。

(6) 乾燥収縮

図8にスラグ置換率と乾燥収縮率の関係を示す。初期材令時の収縮率は標準スラグに比べて微粉末スラグの方が大きく、かつ置換率が高いほどその差が顕著である。しかし、一年時の

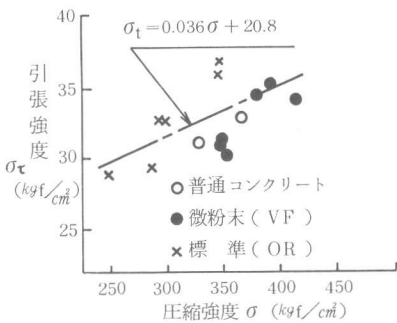


図4 圧縮強度と引張強度

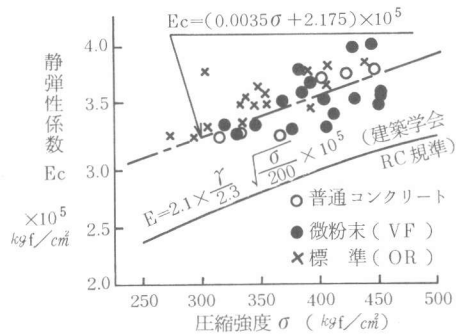


図5 圧縮強度と静弾性係数

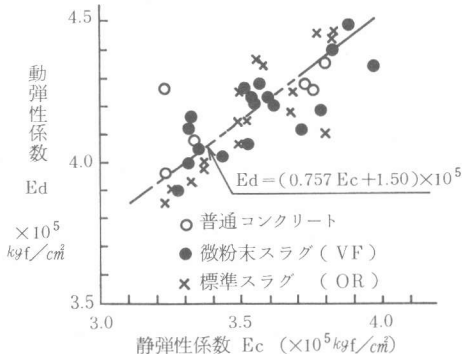


図6 静弾性係数と動弾性係数

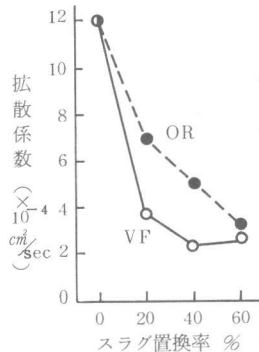


図7 スラグ置換率と拡散係数

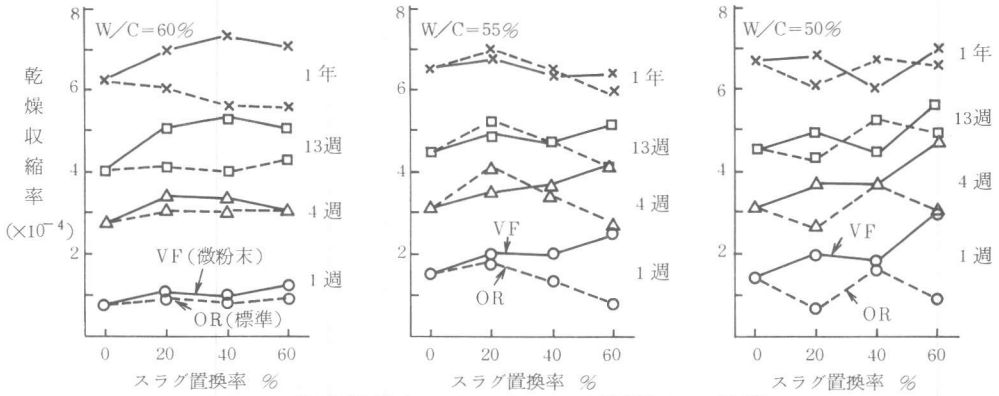


図8 乾燥収縮率に及ぼすスラグ置換率の影響

収縮率は、 $W/C=60\%$ の系を除いてスラグの粉末度および置換率に関係なく普通コンクリートと同程度である。

(7) 中性化

図9に W/C と中性化深さの関係を示す。一般にスラグはセメントの水和によって生じる水酸化カルシウムと反応するため、中性化のスピードが速いことが知られている。今回の結果も W/C が大きいほど、またスラグの置換率が大きいほど中性化深さが大きい。しかし、微粉末スラグの場合は標準スラグに比べてかなり小さく、置換率20%では普通コンクリートと同等である。

4. 結論

通常のスラグ粉末を分級することによって得られる微粉末スラグをモルタル及びコンクリートの混和材として使用した場合について検討を加えた。その結果、モルタルの28日材令時ではブレン値約 $7000\text{cm}^3/\text{g}$ で最大圧縮強度が得られることを示した。さらに、 $W/C=50\sim 60\%$ 、スランプ 20cm 、空気量 4% の範囲のコンクリートの配合、強度特性、乾燥収縮、中性化等の各種特性を明らかにした。

[参考文献]

- [1] 中村、坂井、鯉淵、石川；高炉水砕スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの研究、第八回コンクリート工学年講、pp.289-292、1986
- [2] Nakamura et al.; Properties of High-Strength Concrete Incorporating Very Finely Ground Granulated Blast Furnace Slag, FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, ACI SP-91, pp.1361-1372, 1986
- [3] 田中太郎；高炉滓の粉末度と強度発現性に関する一考察、日本セメント技術協会、水滓委員会報告、1956.4
- [4] 佐藤、金谷、重田；高炉スラグの品質が高炉セメントの品質に及ぼす影響、セメント・コンクリート、No.183, 1962
- [5] Koibuchi et al.; Properties of very fine blast furnace slag prepared by classification, Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, 1986.
- [6] 村田二郎；コンクリートの水密性の研究、土木学会論報、第77号、1961.11

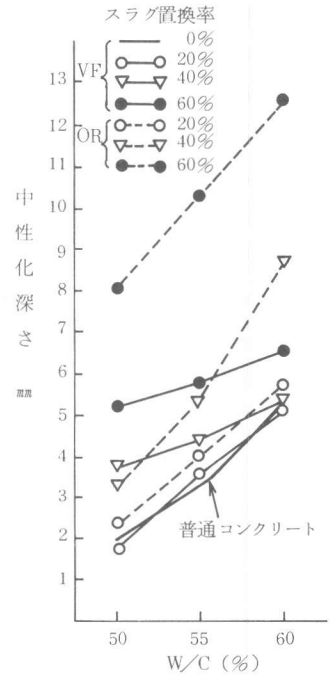


図9 中性化深さ