

報 告

[1057] 我が国水砕スラグ及びこれを加工した高炉スラグ微粉末の品質

正会員 沼田晋一（新日本製鐵建材開発技術部）

正会員 千賀平造（神戸製鋼所スラグ建材部）

正会員 近藤佳宏（日本鋼管スラグ部）

正会員○長尾之彦（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

1. まえがき

熔融高炉スラグを急冷した水砕スラグは、その大部分がガラス質であり潜在水硬性を有している。この水砕スラグを粉碎した高炉スラグ微粉末（以下スラグ微粉末と記す）は、ポルトランドセメントと混合しコンクリートの結合材として広く使用されている。我が国の水砕スラグの品質調査結果としては、建設省土木研究所、（財）土木研究センター、鐵鋼スラグ協会の共同研究¹⁾があり、水砕スラグは製鉄所が変わっても化学成分の差異が小さく安定していること、アルカリ骨材反応抑制に有効であること等が報告されている。しかし、水砕スラグの品質がモルタル、コンクリートの強度性状等におよぼす影響を幅広く調査した例は見受けられない。

本調査は、昭和62年夏期に生産された全国15製鉄所の水砕スラグの品質を調べ、これらを粉碎したスラグ微粉末を用いたモルタルおよびコンクリートの性状、特にフレッシュコンクリートの性状および強度性状について比較検討したものである。

なお、本報告は鐵鋼スラグ協会の共同試験の一部をまとめたものであり、発表を許可された関係者および実験に多大な協力を頂いた住友セメント(株)、第一セメント(株)の関係者に感謝申し上げます。

2. 調査方法

2. 1 調査対象スラグ

調査を実施したスラグは国内の15製鉄所の水砕スラグ16種類であり、試料のサンプリングは昭和62年8月に行なった。16種類の水砕スラグは全てその被粉碎性、スラグ微粉末の物理試験、化学分析およびモルタル試験を実施した。また、その中の4銘柄および市販のスラグ微粉末については、コンクリート試験も実施した。

2. 2 スラグ微粉末の試製方法

16種類の水砕スラグはチューブミルで目標比表面積（3500, 4500, 5500 cm^2/g ）となるように粉碎した。なお、下記に示すとおりモルタル試験用とコンクリート試験用では粉碎方法が異なる。

(1) モルタル試験用スラグ微粉末の製造方法

100～110℃で恒量となるまで乾燥した試料30kgを、チューブミル（内容積100 ℓ ，鋼球52.7kg）に投入し、回転数57rpm.で目標比表面積 $\pm 100\text{cm}^2/\text{g}$ になるまで粉碎した。

(2) コンクリート試験用スラグ微粉末の製造方法

試料75kgをチューブミル（内容積446 ℓ ，鋼球285kg）に投入し、回転数35rpm.で目標比表面積 $\pm 100\text{cm}^2/\text{g}$ になるまで粉碎した。製造ロットの差異がなくなるまで試料の量を確保するため2ロット分をチューブミル（鋼球なし）で約30分混合した。

2. 3 試験方法

2. 3. 1 水砕スラグの被粉碎性およびスラグ微粉末の性質

(1) 被粉碎性

100 ～110 ℃で恒量となるまで乾燥した試料 5 kgを試験用チューブミル (φ500×ℓ500mm) に鋼球 (52.7kg) と共に投入し、回転数57rpm. で目標比表面積になるまでの時間を測定した。比表面積算出に必要な比重は全て2.90と仮定した。

(2) スラグ微粉末の性質

試験項目は化学分析 (JIS R 5202および鐵鋼スラグ協会蛍光X線分析素案)、湿分 (JIS R 6201)、ガラス化率 (X線法)、モルタル圧縮強さ (JIS R 5201)、活性度指数 (土木学会基準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格 (案)」)、水和活性度 (ASTM C 1073 に準じた方法) である。

化学分析および湿分の測定は被粉碎性試験で得られた比表面積 3 水準のスラグ微粉末を等量混合した試料について、モルタル圧縮強さ、活性度指数、水和活性度は比表面積 3 水準の各々のスラグ微粉末について試験を実施した。モルタル圧縮強さ試験および活性度指数試験に使用した普通ポルトランドセメントの性質を表-1に示す。

2. 3. 2 コンクリート試験

コンクリート試験は I, II の 2 シリーズについて実施した。表-2に各シリーズの概要を示す。なお、使用材料および試験項目は以下のとおりである。

表-1 普通ポルトランドセメントの性質

比重	粉末度 (cm ² /g)	凝 結			圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)				化 学 成 分 (%)							
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	3 日	7 日	28 日	91 日	ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.16	3190	27.9	2-32	3-49	132	257	419	459	0.7	0.1	22.2	5.1	2.8	64.8	1.4	2.0

表-2 コンクリート試験の概要

シリーズ	目 的	水砕スラグの種類	スラグ粉末度 (cm ² /g)	スラグ置換率 (%)	配 合 条 件				試 験 項 目
					水結合材比 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	
I	水砕スラグの種類が強度発現性に及ぼす影響	B, E, F, H (4種類)	3 5 0 0 4 5 0 0 5 5 0 0	0 4 0 5 0 7 0	5 0	8 ± 1.5	4 ± 1	—	スランブ 空気量 圧縮強度 (標準養生: 3, 7, 28, 91日)
II	スラグ微粉末コンクリートの配合の検討	スラグ微粉末市販品 (1種類)	4 2 8 0	0 4 0 5 0 7 0	5 0	—	4 ± 1	1 4 0 1 5 0 1 6 0 1 7 0 1 8 0	スランブ 空気量 ブリージング

(1) 使用材料

各シリーズの材料は、スラグ微粉末以外は全て同一のものを使用した。普通ポルトランドセメントはモルタル試験で使ったものと同じである。細骨材は川砂（大井川産、比重2.62、吸水率1.78%、FM.2.69）を、粗骨材は砕石（栃木県硬質砂岩、粗骨材の最大寸法20mm、比重2.67、吸水率0.55%、FM.6.82）を使用した。混和剤はリグニンスルホン酸塩系AE減水剤（標準形）を使用した。

(2) コンクリート試験項目

試験項目はスランパ（JIS A 1101）、空気量（JIS A 1118またはJIS A 1128）、ブリージング（JIS A 1123）、圧縮強度（JIS A 1108）である。

3. 結果および考察

3. 1 水砕スラグの品質と被粉砕性

(1) 水砕スラグの化学成分およびガラス化率

水砕スラグの化学分析結果および粉末度3500 μm /gのスラグ微粉末のガラス化率を表-1に示す。水砕スラグの主成分である SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO および塩基度（ $b = \text{C} + \text{M} + \text{A} / \text{S}$ ）の範囲および平均は、昭和59年に実施した「高炉水砕スラグ品質調査」²⁾の結果と大差なく、我が国の水砕スラグの化学成分は安定しているといえる。また、塩基度は1.84~2.00、Sは0.57~0.96%、 MgO は5.57~8.66%、ig. lossは0.3%以下、湿分は0.1%以下の範囲にあり、いずれも土木学会の「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格（案）」の規準を満足しており、製鉄所が異なっても我が国の水砕スラグの化学成分は一定範囲にあることが明らかになった。

ガラス化率は95.5~99.7%の範囲にあり、平均値は99.0%であった。炉外水砕のD'を除いた炉前水砕スラグだけについてみると平均値は99.3%で、全て98.3%以上と高いガラス化率を有している。

表-1 水砕スラグの化学成分

項目 製鉄所	化 学 成 分 (%)															塩基度 b	ガラス 化 率 (%)
	強熱 減量	不溶 残分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	MnO	TiO_2	S	Na_2O	K_2O	Cl	湿分	R_2O		
A	0.1	0.00	33.46	14.50	42.00	6.66	0.48	0.55	0.91	0.57	0.21	0.43	0.001	0.0	0.49	1.89	99.7
B	0.0	0.00	32.22	14.76	42.76	6.11	0.35	0.27	1.96	0.96	0.16	0.29	0.003	0.0	0.35	1.97	98.5
C	“+”	0.14	31.98	14.53	41.70	7.63	1.45	0.21	1.10	0.75	0.20	0.25	0.001	0.0	0.36	2.00	99.7
D	0.0	0.01	32.88	14.44	42.46	6.40	0.33	0.50	1.93	0.80	0.20	0.28	0.002	0.0	0.38	1.93	98.3
D'	0.0	0.00	33.14	13.89	44.07	6.23	0.33	0.31	1.16	0.82	0.20	0.21	0.001	0.0	0.34	1.94	95.5
E	0.0	0.00	33.66	13.73	41.40	7.23	0.39	0.32	1.93	0.76	0.18	0.24	0.004	0.0	0.34	1.85	99.8
F	0.0	0.00	33.14	14.16	42.31	7.56	0.42	0.38	0.97	0.70	0.16	0.35	0.003	0.0	0.39	1.93	99.5
G	“+”	0.11	33.14	12.93	42.61	6.61	0.60	0.71	1.51	0.93	0.23	0.27	0.006	0.0	0.41	1.88	99.6
H	0.0	0.15	32.76	14.60	41.85	7.22	0.75	0.21	1.03	0.83	0.14	0.22	0.003	0.0	0.28	1.94	98.8
I	0.3	0.07	33.46	13.49	43.81	5.57	0.41	0.39	0.65	0.68	0.15	0.36	0.004	0.1	0.39	1.88	99.6
J	0.0	0.03	32.44	13.71	41.40	7.20	0.48	0.40	1.51	0.93	0.41	0.41	0.004	0.0	0.68	1.92	99.0
K	0.0	0.01	33.62	12.99	42.31	7.50	0.51	0.28	1.43	0.79	0.21	0.31	0.003	0.0	0.41	1.87	99.3
L	“+”	0.56	33.50	13.35	42.31	6.09	2.57	0.28	0.75	0.76	0.20	0.39	0.001	0.0	0.46	1.84	99.0
M	0.1	0.00	33.26	13.82	41.10	8.66	0.51	0.75	0.88	0.57	0.18	0.28	0.004	0.0	0.36	1.91	99.0
N	0.0	0.03	33.08	14.68	41.85	6.23	0.53	0.33	1.58	0.83	0.24	0.29	0.003	0.0	0.43	1.90	99.4
O	0.1	0.02	33.48	13.32	42.46	7.45	0.36	0.32	0.74	0.71	0.20	0.31	0.006	0.0	0.40	1.89	99.6
平均値	0.05	0.071	33.08	13.93	42.28	6.90	0.65	0.39	1.25	0.77	0.20	0.31	0.003	0.0	0.40	1.91	99.0
σ_{max}	0.09	0.14	0.50	0.61	0.80	0.79	0.58	0.16	0.45	0.11	0.061	0.066	0.0016	—	0.09	0.043	1.04
市販品	1.6	1.2	32.3	13.2	41.1	6.8	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	1.89	—

(2) 被粉碎性

各目標粉末度における粉碎時間測定結果を図-1に示す。水砕スラグの種類による粉碎時間の差異は、粉末度4500 cm^2/g 程度まではあまり認められないが、粉末度5500 cm^2/g ではその差が大きくなった。この場合、水砕スラグの単位容積質量と粉碎時間に相関が認められ、単位容積質量が大きくなるほど粉碎時間は長くなった。本調査で実施したように、一定容積のチューブミルに一定重量の試料を投入し、バッチ式で粉碎した場合にはミル内の試料の充填率が被粉碎性に影響をおよぼしていることが考えられる。また、水砕スラグのその他の性質と被粉碎性との関係は明確でなかった。

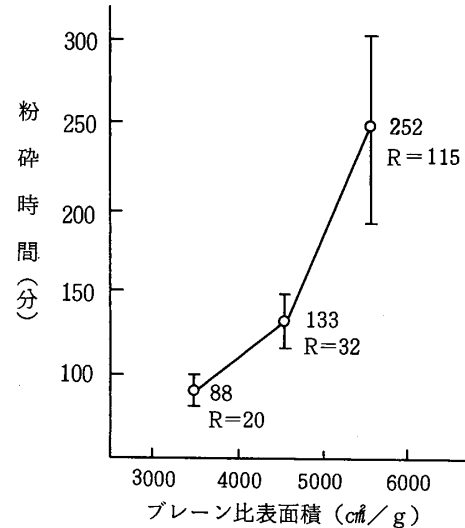


図-1. スラグ粉末度と粉碎時間

3. 2 モルタルによるスラグ微粉末の強度発現性

各スラグ微粉末のモルタル圧縮強さ、活性度指数、水和活性度試験結果を図-2～図-4に示す。いずれの試験方法においても、スラグ微粉末の粉末度が増大するほど強度発現性は増加する傾向にあった。モルタル圧縮強さ、活性度指数 (SAI) では、スラグ微粉末の粉末度の影響は材令7日、28日に顕著で、材令91日になると影響は小さくなった。

本調査では水砕スラグの塩基度が強度発現性に及ぼす影響は認められなかった。

また、炉外水砕 (D') も含めてガラス化率が強度発現性に及ぼす影響は殆んど認められなかった。これは、我が国の水砕スラグの塩基度、ガラス化率の製鉄所間の差が小さいこと、ある一定以上の塩基度、ガラス化率を有していれば強度発現性におよぼす影響は小さいこと等が原因と考えられる。

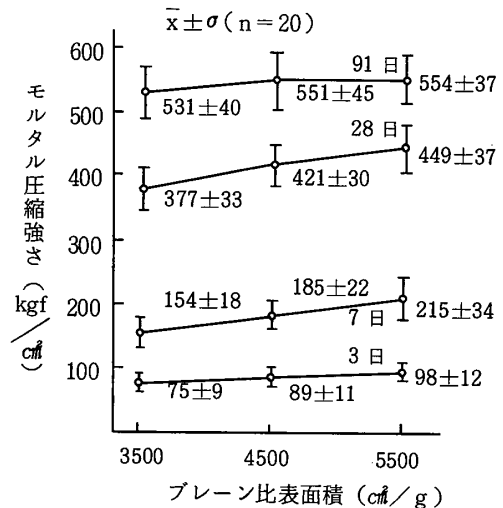


図-2. スラグ粉末度とモルタル圧縮強さ

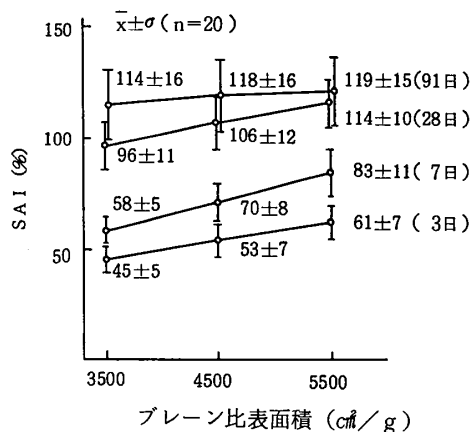


図-3. スラグ粉末度と活性度指数

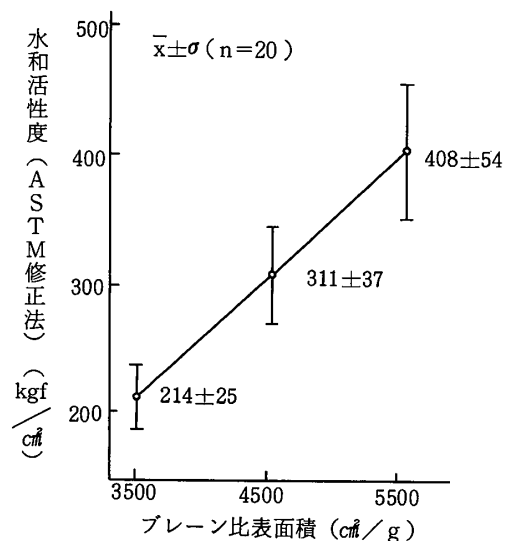


図-4. スラグ粉末度と水和活性度

3. 3 コンクリート試験

(1) フレッシュコンクリートの性状

同一水結合比における単位水量とスランプの関係を図-5に示す。従来の報告³⁾と同様に、スラグ置換率が大きくなるほど、単位水量は小さくしてよいことが確認された。

同一水結合材比におけるスラグ置換率と最適な単位粗骨材容積 (b/b_0) の関係を図-6に示す。スラグ置換率が大きくなるほど、最適単位粗骨材容積 (b/b_0) は大きくできることがわかった。

図-7に単位水量一定におけるブリージング試験結果を示す。スランプ一定の場合、スラグ置換率が大きくなるほど単位水量が減少するためブリージング率は減少するが、単位水量一定においてもブリージング率は減少傾向にあった。(2) 圧縮強度に及ぼすスラグ微粉末の置換率、粉末度の影響

スラグ微粉末を使用したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-8に示す。スラグ微粉末の粉末度が $3500\text{cm}^3/\text{g}$ の場合、スラグ微粉末の置換率が増加するほど初期材令の圧縮強度は低くなり、材令28日または材令91日で各置換率とも普通ポルトランドセメントとほぼ同等となった。スラグ微粉末の粉末度が $5500\text{cm}^3/\text{g}$ の場合、材令28日、材令91日では置換率が増加するほど圧縮強度は大きくなる傾向にあった。

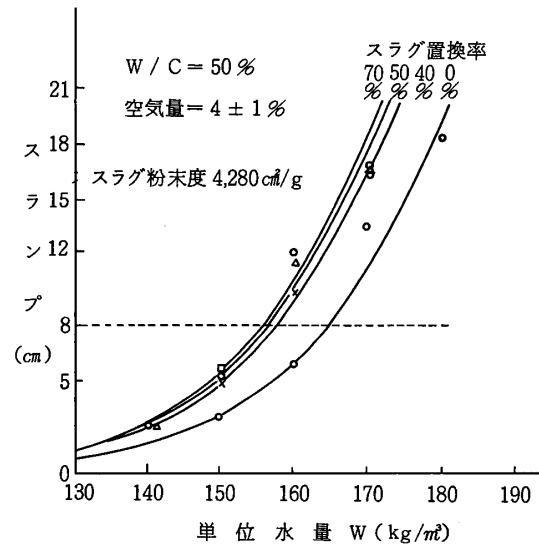


図-5 スラグ置換率別単位水量とスランプの関係 (シリーズ II)

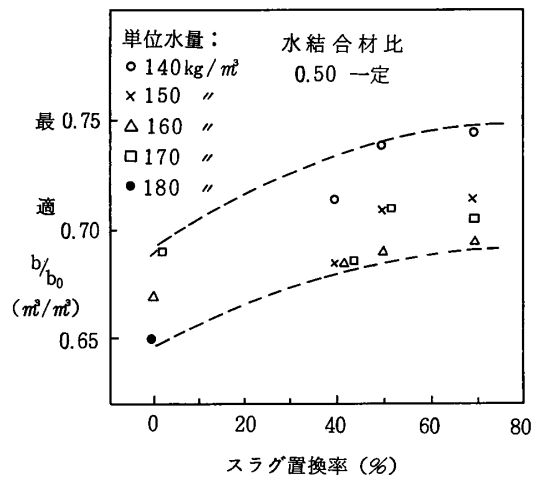


図-6 スラグ置換率と最適 b/b_0 (シリーズ II)

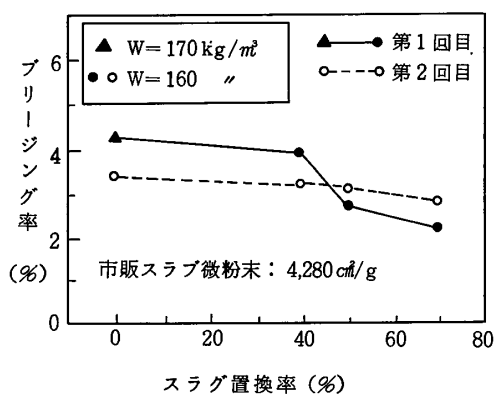


図-7 コンクリートのブリージング試験結果 (シリーズ II)

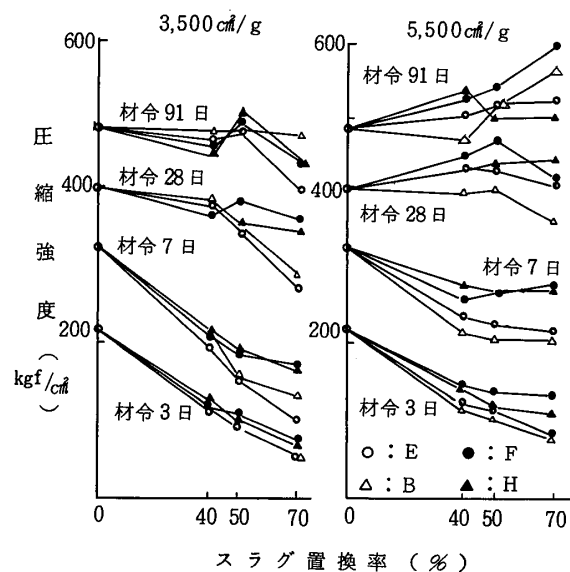


図-8 コンクリートの圧縮強度試験結果 (シリーズ I)