

[15] 高炉水砕砂の適正利用に関する実験的研究

正会員 ○吉 田 弥 智 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 梅 原 秀 哲 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 赤 井 登 (名古屋工業大学工学部)
 竹 内 正 信 (名工建設静岡支店)

1. まえがき

年々、河川産の骨材の枯渇が進み、良質の天然骨材の入手が困難となってきている。特に細骨材の供給は不足し、海砂、山砂、砕砂等が使用されている。一方、鉄鉱石から銑鉄を製造する際に副産物として生産される高炉スラグを利用することは、産業副産物の活用であり、省資源、省エネルギーの点から考えてみても意義があると思われる。高炉スラグの中でも高炉水砕は、J. I. S. にも規定され、天然細骨材の代用として期待されているが、天然砂を用いたコンクリートと比較して、粒形が悪く、骨材表面がガラス質のためつぎの点で劣っている。

(i) 同・スランブを得るのに単位水量が多くなる。(ii) エントラップドエアが多い。(iii) ブリージング量が多くなる。

本研究は、混和材として、水砕粉および砕石工場で廃棄されている岩粉を添加することによって、これらの問題点を改善するとともに、その最適使用量を求めることを目的とするものである。

2. 実験の概要

水砕粉および岩粉を、種々の量添加した水砕砂コンクリートを、水砕砂および岩粉を添加しない天然砂および水砕砂コンクリートと、各特性(スランブ、空気量、ブリージング、圧縮強度、乾燥収縮、耐久性)について実験を行ない、比較し、その特性を明らかにしたものである。

2-1 使用材料

セメントは普通セメントを使用した。粗骨材および細骨材の物理的特性は表-1に示す通りである。水砕砂はF.M. 2.2, 2.5, 2.8の3種を用い、天然砂は、揖斐川砂と木曽川砂を重量比で、それぞれ3:7, 1:1, 3:1に混ぜ合わせ、水砕砂と同じF.M. 2.2, 2.5, 2.8とした。水砕粉は新日鉄化学工業K.K.、戸畑製造所製、岩粉は骨材プラントより洗浄廃棄された微粉子をアトリッションマシンとボールミル等で微粉末状にしたものである。微粉末の物理的性質と、化学組成は表-2, 表-3に示

表-1 使用骨材の物理的性質

種 類	粗粒率(%)	比重	単位容積		吸水率(%)	乾燥率(%)	含 水 率(%)	含 雑 物(%)
			(t/m ³)	(kg/m ³)				
天童川砂利	6.96	2.65	1.08	1.73	66.0	0.0	—	
揖斐川砂	3.19	2.59	1.66	1.76	69.1	2.2	合格	
木曽川砂	1.77	2.55	2.17	1.46	58.5	0.3	合格	
水砕砂(F.M.2.2)	2.15	2.67	1.00	1.60	60.5	5.2	合格	
水砕砂(F.M.2.5)	2.48	2.69	1.62	1.48	56.6	3.2	合格	
水砕砂(F.M.2.8)	2.74	2.58	1.68	1.36	53.5	1.2	合格	

表-2 微粉末の物理的性質

種 類	項 目	比 重	粉末度 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント		3.15	3300
岩 粉		2.65	3050
水 砕 粉		2.91	3890

表-3 微粉末の化学組成

種 類	組成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
岩 粉		94.51	1.24	0.85	0.03	—	0.21	0.02
水砕粉		34.0	15.3	0.7	41.2	6.2	—	—

表-4 F.M. 2.2の水砕砂を使用したコンクリートの配合

W/C (%)	種 類 (%)	細骨材率 (%)	コンクリート 1 m ³ に用いた材料 (kg/m ³)							試 験 値		
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 P	水和剤 Cx(ml)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	
55	P/N	0	34.0	332	171	604	1215	0	7.5	17.0	3.5	2,302
		8	36.5	320	176	667	1151	0	3.0	17.7	4.1	2,315
		16	36.5	330	182	662	1142	53	5.0	17.5	4.0	2,369
		32	36.5	340	187	634	1094	101	7.0	19.3	4.2	2,356
	(水)	24	36.5	331	182	596	1030	143	9.0	18.4	5.2	2,282
		40	36.5	355	195	572	988	183	11.0	17.7	4.2	2,293
		40	36.5	377	207	542	935	217	13.0	17.8	4.4	2,276
		8	36.5	317	174	635	1096	51	7.0	18.0	5.5	2,272
	P/S	16	36.5	337	185	607	1047	97	7.0	16.5	4.9	2,272
		24	36.5	351	193	583	1006	140	9.0	17.5	4.5	2,272
		32	36.5	368	203	552	953	177	11.0	17.5	4.8	2,252
		40	36.5	389	214	524	905	210	13.0	17.1	4.6	2,241
65	P/N	0	36.0	271	176	646	1188	0	7.0	18.0	3.8	2,281
		8	38.5	273	177	719	1109	0	3.0	19.5	4.9	2,278
		16	38.5	277	180	709	1093	57	3.5	18.2	4.0	2,315
		32	38.5	281	183	696	1072	111	4.5	18.4	4.2	2,343
	(水)	24	38.5	295	192	659	1016	158	6.0	18.2	4.1	2,320
		40	38.5	304	196	638	983	204	7.5	17.7	4.2	2,326
		40	38.5	312	203	605	938	243	9.0	18.4	4.3	2,303
		8	38.0	239	179	679	1147	0	7.0	18.0	4.7	2,244
	P/S	0	40.5	251	188	750	1094	0	3.0	18.0	4.0	2,283
		8	40.5	253	190	732	1067	59	4.0	18.6	4.0	2,300
		16	40.5	259	195	713	1039	114	5.0	19.2	4.2	2,319
		32	40.5	263	198	690	1006	166	7.5	19.5	4.3	2,322
(水)	24	40.5	263	198	659	961	211	10.0	18.8	4.5	2,292	
	40	40.5	267	200	631	921	252	13.0	17.6	4.4	2,272	
	8	40.5	238	179	713	1040	57	5.0	17.3	6.0	2,227	
	16	40.5	244	183	693	1010	111	6.0	18.1	5.7	2,241	
P/S	24	40.5	240	180	682	994	164	6.0	19.2	5.2	2,259	
	32	40.5	276	207	636	927	203	7.0	17.5	4.0	2,249	
	40	40.5	271	204	607	885	243	9.5	16.5	5.7	2,210	

表-5 F.M. 2.5 の水砕砂を使用したコンクリートの配合

W/C (%)	種 類 (%)	細骨材率 (%)	コンクリート 1 m ³ に用いた材料 (kg/m ³)						試 験 値			
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	珪石 P	実積率 Cx(m)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	
55	P/N	0	35.5	311	171	633	1184	0	8.0	18.0	3.7	2,299
		8	38.0	311	188	668	1073	0	3.0	19.3	5.1	2,270
		16	38.0	347	191	653	1048	53	4.0	17.0	4.3	2,292
		24	38.0	360	198	626	1006	102	5.0	17.0	4.0	2,292
	(水)	32	38.0	363	199	597	950	143	7.0	18.0	5.2	2,262
		40	38.0	372	205	564	905	180	8.5	18.3	5.9	2,227
		40	38.0	384	211	538	864	215	10.0	17.8	6.0	2,213
		40	37.5	274	178	685	1177	0	6.5	18.0	3.9	2,315
65	P/S	0	40.0	289	188	719	1063	0	2.5	17.8	5.2	2,259
		8	40.0	292	190	705	1041	56	3.0	19.1	4.4	2,283
		16	40.0	295	192	679	1003	109	4.5	19.0	4.6	2,278
		24	40.0	292	190	652	964	156	6.0	19.2	6.0	2,253
	(水)	32	40.0	303	197	629	930	201	7.0	18.6	5.3	2,261
		40	40.0	329	214	599	886	240	8.0	19.2	4.2	2,268
		40	39.5	246	184	729	1152	0	5.0	18.0	3.0	2,310
		40	42.0	258	194	753	1025	0	2.5	19.0	5.8	2,230
75	P/S	8	42.0	242	182	743	1011	59	3.5	18.0	5.8	2,238
		16	42.0	249	187	726	988	116	4.5	19.0	5.1	2,266
	(水)	24	42.0	248	186	689	938	165	5.5	19.0	6.0	2,227
		32	42.0	257	192	663	902	212	6.5	19.5	5.9	2,227
40	42.0	263	197	652	886	261	7.5	18.0	5.3	2,259		

す通りである。粗骨材の最大寸法は 25mm である。

(以下 N:天然砂, S:水砕砂, P:微粉末と表す)

2-2 コンクリートの配合

水セメント比を 55%, 65%, 75% の 3 種とし、水砕粉、岩粉は細骨材に対する重量比 (P/S) で 0, 8,

16, 24, 32, 40% を添加した。水砕砂は粒形が悪いので、ワーカビリティを同一にするために、天然砂を用いた場合に比較して s/a を 2.5 倍大きく定めた。すべてのコンクリートはスランプ 18±1.5cm, 空気量は天然砂コンクリート 4±1%, 水砕砂コンクリート 5±1% とした。配合は F.M. 2.2 の細骨材を用いたコンクリートは表-4 に、F.M. 2.5 は表-5, F.M. 2.8 は表-6 に示す通りである。

3. 実験の結果および考察

3-1 単位水量

同一スランプを得るための単位水量の変化は、W/C が大きいほど微粉末による減水効果が大きく、粗粒率が大きいほど (実積率が小さいほど) 減水効果が大きい。これは水砕粉、岩粉共同様であった。水砕粉および岩粉は比重が異なるため、体積比 (P/S (V)) を考え、実積率と P/S (V) との関係は、W/C=55% の場合図-1 に、W/C=75% の場合図-2 に示すようになった。図中の + は単位水量の増加、- は減少を示す。点は実験を行なった位置を示す。実積率が小さく、W/C が大きいコンクリートの場合、減水効果が大きい理由として、

- (i) 水砕砂の実積率の低さ (天然砂に比較して同一 F.M. で約 4~10% ほど低い) が微粉末の混入により、実積率が上昇するため
- (ii) 微粉末がセメント粒子を分散させ、セメントの流動性を増すため
- (iii) 微粉末の混入によりプラスチック性を増し、水砕砂とセメントペーストとの付着が良くなるため、と考えられる。しかしながら、実積率の大きい水砕砂で W/C が小さい場合、(i) の効果があまりなく、微粉末の添加によ

表-6 F.M. 2.8 の水砕砂を使用したコンクリートの配合

W/C (%)	種 類 (%)	細骨材率 (%)	コンクリート 1 m ³ に用いた材料 (kg/m ³)						試 験 値				
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	珪石 P	実積率 Cx(m)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)		
55	P/N	0	37.0	302	166	668	1160	0	8.0	17.5	3.8	2,305	
		8	39.5	340	187	662	1011	0	3.0	19.4	5.6	2,230	
		16	39.5	325	179	657	1034	52	3.5	18.0	5.5	2,247	
		24	39.5	331	182	645	1015	103	4.5	18.5	4.4	2,276	
		32	39.5	331	182	614	966	147	6.0	19.0	5.9	2,241	
		40	39.5	345	190	599	942	192	7.5	18.0	4.8	2,266	
		40	39.5	356	196	573	902	229	9.5	18.0	5.0	2,257	
		40	39.5	322	177	650	1023	52	3.5	18.0	6.0	2,224	
	(水)	16	39.5	329	181	641	1008	103	4.5	17.7	4.8	2,261	
		24	39.5	332	182	600	944	144	6.0	16.8	6.0	2,201	
		32	39.5	358	197	586	922	188	6.0	17.2	4.3	2,251	
		40	39.5	376	207	558	879	223	7.0	18.7	4.1	2,244	
		P/S	0	30.0	263	171	712	1144	0	7.5	17.5	3.8	2,289
			8	41.5	290	189	708	1025	0	3.0	18.5	5.8	2,211
			16	41.5	282	183	711	1030	57	3.0	17.1	4.3	2,264
			24	41.5	283	184	698	1010	112	3.5	17.0	4.1	2,289
32	41.5		292	190	696	935	207	5.5	19.4	4.3	2,260		
40	41.5		295	192	622	901	249	7.5	19.5	4.8	2,258		
40	41.5		334	175	750	1109	0	7.0	19.8	4.2	2,268		
40	43.5		289	217	740	987	0	3.0	19.5	4.0	2,234		
75	P/S	8	43.5	272	204	723	964	58	3.5	19.5	4.6	2,221	
		16	43.5	256	192	712	949	114	4.0	19.3	5.4	2,222	
		24	43.5	245	184	692	923	166	4.5	18.6	6.0	2,210	
		32	43.5	253	190	678	905	217	5.0	17.1	5.1	2,244	
		40	43.5	265	199	647	863	259	6.0	17.4	5.1	2,234	
		8	43.5	258	194	722	962	58	3.5	19.0	6.0	2,193	
		16	43.5	245	184	715	953	114	4.0	18.2	5.9	2,211	
		24	43.5	253	190	693	924	166	4.0	17.2	5.0	2,227	
	(水)	32	43.5	261	196	671	896	215	4.5	17.1	4.2	2,238	
		40	43.5	266	199	645	881	268	5.0	18.2	4.4	2,239	

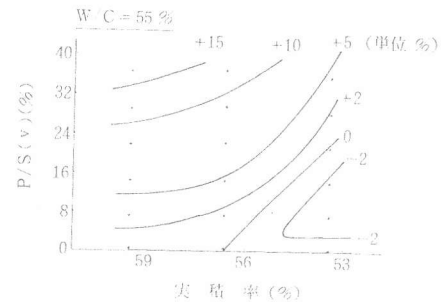


図-1 単位水量の増減率 (W/C=55%)

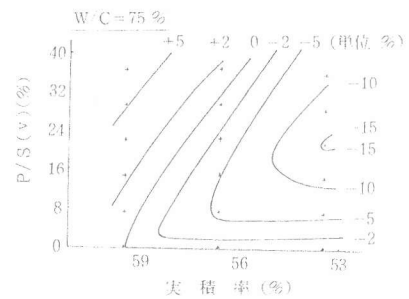


図-2 単位水量の増減率 (W/C=75%)

り、骨材の表面積が著しく増大し、単位水量が増加するものである。

3-2 プリージング

水砕砂を使用したコンクリートは、プリージングが非常に大きい欠点がある。F.M. 2.2の水砕砂を用いたコンクリートでは天然砂に比較して W/C=55%で約2倍であった。図-3、図-4は水砕砂の F.M. 2.8を用いたコンクリートのプリージング率を示したものである。水砕粉、

岩粉を混入した場合、8%程度混入するだけでプリージング率は約1/2となり、16%程度以上混入すると天然砂を用いたコンクリートと同等かそれ以下となる。一般に水砕砂はガラス状で保水能力が小さく、それを改善するのに F.M. を小さくしたものをを用いるが、同一 F.M. の天然砂に比較するとプリージングが約2倍程度となる。しかし微粉末を混入することにより、セメントペースト中の水分が微粉末表面に吸着して、プリージングが小さくなる。微粉末の量がある限度までは大幅に改良されるが、それ以後の減少は小さいものになる。

フレッシュコンクリートの性質は、水砕粉、岩粉共同じような傾向を示していることが、実験の結果より確かめられた。

3-3 圧縮強度

水砕砂コンクリートの圧縮強度の結果は W/C=55% の場合表-7に、W/C=75% の場合表-8に示す通りである。供試体はすべて、 $\phi 10 \times 20$ cmとし、水中養生で行なった。微粉末を混入しない場合の水砕砂コンクリートを100として、比で表したものである。

W/C=55% のコンクリートにおいては、F.M. 2.2, F.M. 2.8共に水砕粉の混入量の増加に伴って強度は3~5割増加している。一方岩粉の添加の場合、F.M. 2.2の場合、P/S=16%で強度が10~15%増加し、F.M. 2.8ではすべての添加量において、10%程度強度が増加する。W/C=75%の場合、F.M. 2.2, F.M. 2.8共に大幅な強度の増加を示す。

また岩粉を混入した場合も、特に F.M. 2.8 のように実積率の小さい水砕砂を用いた場合、強度の増加が著しく、P/S=16%で40~60%増加している。水砕粉を混入した場合、強度が増加するのはコンクリートの性質が改善されることにもよるが、水砕粉の水硬性のため単位セメント量が増加したと同じ結果になったものと考えられる。岩粉を混入した場合においては、水硬性がないため強度の増加は(1)プリージングが少なくなり骨材とセメントペーストとの付着が良くなること、(2)微粉末の影響でセメント粒子が分散され、水和が進むこと、(3)実積率が増加し、緻密なコンクリートが出来るため、と考えられる。これらの効果は、W/Cが大きいほど、また水砕砂の実積率が小さいほど大きい。またその添加量の最適値があることも確かめられた。

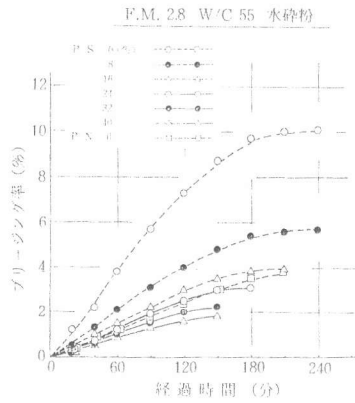


図-3 水砕粉を添加した場合のプリージング率

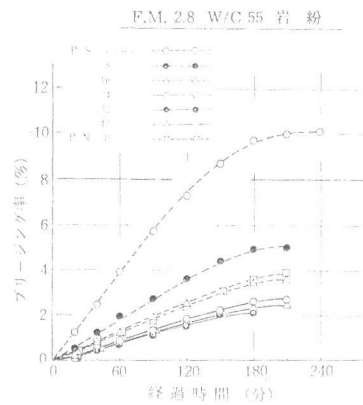


図-4 岩粉を添加した場合のプリージング率

表-7 圧縮強度比 (W/C=55%)

W/C (%)	種類 (%)	F.M. 2.2			F.M. 2.8		
		7.11	28.11	91.11	7.11	28.11	91.11
55	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	P/S: 8	1.12	1.17	1.21	1.13	1.02	
	16	1.21	1.07	1.25	1.38	1.46	
	(水) 24	1.30	1.43	1.25	1.29	1.38	1.35
	32	1.38	1.52	1.32	1.31	1.35	1.35
55	40	1.35	1.52	1.35	1.30	1.35	1.30
	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	P/S: 8	0.98	1.09	1.08	0.95	0.98	0.99
	16	1.18	1.15	1.09	1.01	1.05	1.01
	(岩) 24	1.01	0.99	0.92	1.05	1.05	0.99
32	1.01	0.95	0.93	1.19	1.07	1.08	
40	0.94	0.91	0.86	1.20	1.14	1.05	

表-8 圧縮強度比 (W/C=75%)

W/C (%)	種類 (%)	F.M. 2.2			F.M. 2.8		
		7.11	28.11	91.11	7.11	28.11	91.11
75	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	P/S: 8	1.35	1.48	1.31	1.34	1.41	1.50
	16	1.65	1.86	1.68	1.72	2.06	2.01
	(水) 24	1.81	2.00	1.72	1.98	2.40	2.67
	32	2.21	2.10	1.82	2.77	2.06	2.36
75	40	2.15	2.24	1.78	2.50	3.03	2.93
	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	P/S: 8	1.24	1.16	1.06	1.11	1.21	1.30
	16	1.11	1.22	1.14	1.60	1.54	1.37
	(岩) 24	1.62	1.28	1.17	1.80	1.67	1.52
32	1.40	1.16	1.05	1.64	1.57	1.42	
40	1.35	1.05	1.01	1.67	1.60	1.45	

3-4 付着強度

付着強度試験は、日本コンクリート工学協会の試験方法(案)によって行なった。試験結果は、図5～図8に示す通りになった。この図において、○：水砕粉 □：岩粉

—：同一 F.M.の天然砂を示す。いずれの場合も、水砕粉を使用した場合、付着強度比が改善される。この理由はブリージングの減少と、水砕粉による強度の増加によるものである。岩粉を混入した場合、図6のように最適添加量で、特に上端筋の付着強度が改善されることが認められた。これは、ブリージングの減少によるものと考えてよい。

4. まとめ

以上の結果により、水砕粉、岩粉を混入することにより、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートとも、その特性が改善されることが認められた。

最適の微粉末の添加量を考える場合、単位水量が最も少ない場合が、他の性質も改善されることが認められた。今、W/C=55%、W/C=75%の場合について、使用水砕砂の実積率と最適添加量の関係を図に示すと、図9、図10となる。図中の斜線は、圧縮強度、付着強度が低下する範囲を示したものである。

いずれの場合においても、最適添加量は

$$P/S(V) = -A \times (\text{使用水砕砂の実積率}) + B$$

で表される。

使用する水砕砂、微粉末の物理的特性、水セメント比等が異なると、係数、A、Bは当然異なる。図9、図10はその一例を示したものである。W/Cが大きいほど、水砕砂の実積率が小さいほど、微粉末の最適添加量は増加することになる。

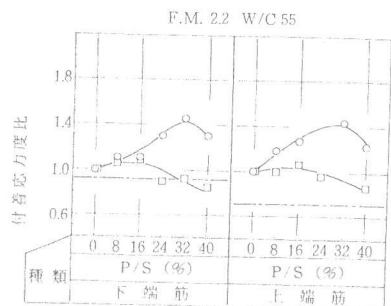


図-5 添加量-付着応力度比の関係 (F.M. 2.2 W/C 55)

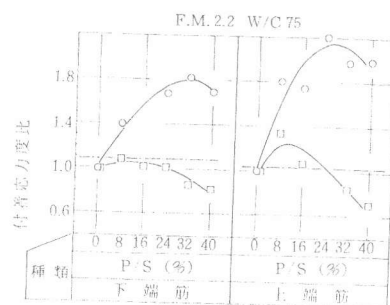


図-6 添加量-付着応力度比の関係 (F.M. 2.2 W/C 75)

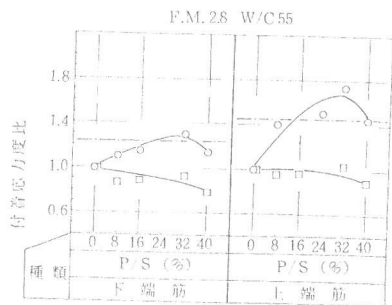


図-7 添加量-付着応力度比の関係 (F.M. 2.8 W/C 55)

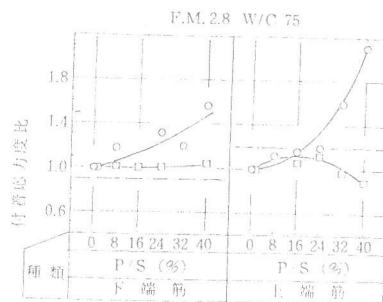


図-8 添加量-付着応力度比の関係 (F.M. 2.8 W/C 75)

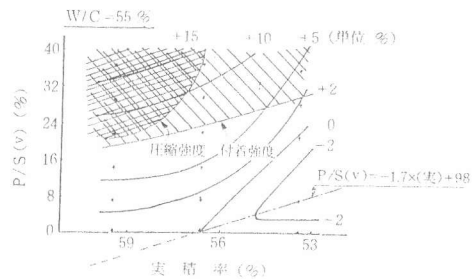


図-9 最適添加量-実積率の関係 (W/C=55%)

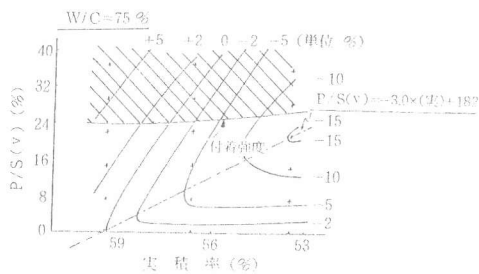


図-10 最適添加量-実積率の関係 (W/C=75%)