

[20] 高炉水砕スラグ砂の混合砂コンクリートへの適用実験研究

正会員 ○依田 彰彦 (足利工業大学)

正会員 横室 隆 (足利工業大学)

正会員 大平 光洋 (足利工業大学)

1. まえがき

製鉄所から副産される高炉水砕スラグ砂(以下、水砕砂と呼ぶ)は、コンクリート用細骨材として単独でも使用できるが、粒形が川砂と比較して多少角ばっているために川砂コンクリートに比較して水砕砂コンクリートは

- a. 単位水量は2~7%程度多く必要とする。
- b. ブリージング量は15~35%程度多くなる。
- c. 入念な打ち込み・締固めが必要である。

など若干の問題点がある。一方、海砂、陸砂、山砂、砕砂も単独で使用するとすると、塩分、有機不純物、粘土塊量、洗い試験によって失われる量などが問題になる。

本研究はコンクリート用細骨材として単独使用では多少の問題点を有する骨材を混合することによってその問題を解決しようと試みたものである。

本稿では水砕砂に川砂、海砂、陸砂、山砂、砕砂を30、50、70%混合した細骨材(表1参照)と川砂利に碎石、高炉スラグ碎石を30、70%混合した粗骨材(表2参照)とを組合せた、いわゆる混合骨材コンクリート(ここでは便宜上、混合砂コンクリートと呼ぶ)の調査および基本的性質について究明したものを取りまとめたものである。なお、本研究は社日本鉄鋼連盟コンクリート用高炉スラグ細骨材標準化研究委員会の研究の一環として実施したものである。

表 1 使用細骨材の組合せと品質

NO	細骨材の組合せ(%)						表乾比重	吸水率(%)	単位容積重量(kg/ℓ)	洗い試験によって失われる量(%)	粘土塊量(%)	有機不純物(%)	塩分(%)	ふるいを通るものの重量百分率(%)						粗粒率(f.m)	JASS 5 での品質の級			
	水砕砂 S <sub>1</sub>	川砂 r	海砂 m	陸砂 ℓ	山砂 P	砕砂 C								5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		1	2	3	外
														5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		1	2	3	外
1	100	-	-	-	-	-	2.72	2.2	1.59	1.6	-	うすい	-	100	97	72	36	13	4	2.78	○			
2	70	30	-	-	-	-	2.69	2.4	1.61	1.7	-	うすい	-	100	96	72	40	16	4	2.74	○			
3	70	-	30	-	-	-	2.69	1.9	1.61	1.3	-	うすい	-	100	96	77	44	13	3	2.72	○			
4	70	-	-	30	-	-	2.69	2.1	1.64	1.8	0.6	うすい	-	100	93	72	42	13	3	2.77	○			
5	70	-	-	-	30	-	2.64	2.4	1.55	2.5	0.7	うすい	-	100	96	72	40	18	4	2.70	○			
6	70	-	-	-	-	30	2.68	2.1	1.59	1.5	-	うすい	-	100	95	68	35	14	4	2.84	○			
7	50	50	-	-	-	-	2.67	2.6	1.63	1.8	-	うすい	-	100	95	73	42	18	4	2.68	○			
8	50	-	50	-	-	-	2.68	1.7	1.63	1.2	-	うすい	0.01	100	96	81	50	13	3	2.57	○			
9	50	-	-	50	-	-	2.68	2.1	1.68	1.9	1.0	うすい	-	100	89	66	37	14	4	2.90	○			
10	50	-	-	-	50	-	2.60	2.6	1.52	3.2	1.2	うすい	-	99	95	73	43	21	5	2.64		○		
11	50	-	-	-	-	50	2.66	2.1	1.60	1.4	-	うすい	-	100	94	66	35	15	5	2.85	○			
12	30	70	-	-	-	-	2.65	2.7	1.68	1.8	-	うすい	-	100	94	73	44	21	4	2.64	○			
13	30	-	70	-	-	-	2.66	1.5	1.64	1.0	-	うすい	0.014	100	96	83	56	12	3	2.50		○		
14	30	-	-	70	-	-	2.66	2.0	1.71	2.0	1.3	うすい	-	99	86	64	38	14	4	2.95			○	
15	30	-	-	-	70	-	2.55	2.8	1.49	3.7	1.7	うすい	-	99	94	74	45	24	5	2.59			○	
16	30	-	-	-	-	70	2.63	2.0	1.60	1.4	-	うすい	-	100	92	63	34	15	5	2.91	○			
17	-	100	-	-	-	-	2.62	2.9	1.67	1.9	-	うすい	-	100	93	73	48	24	4	2.58	○			
18	-	-	100	-	-	-	2.63	1.2	1.66	0.7	-	うすい	0.02	100	95	89	63	12	2	2.39		○		
19	-	-	-	100	-	-	2.63	1.9	1.76	2.2	1.9	うすい	-	99	81	60	38	14	4	3.04			○	
20	-	-	-	-	100	-	2.47	3.0	1.44	4.6	2.4	うすい	-	98	92	74	50	29	5	2.52				○
21	-	-	-	-	-	100	2.59	1.9	1.60	1.2	-	うすい	-	100	90	59	33	16	5	2.97	○			

## 2. 使用材料

### a. セメント

普通ポルトランドセメント(C社、N社、S社のものを等量混合した。)

### b. 細骨材

① 水砕砂 S<sub>3</sub>

② 川砂 r(鬼怒川産)

③ 海砂 m(高萩市付近産)

④ 陸砂 l(熊谷市付近産)

⑤ 山砂 P(足利市付近産)

⑥ 砕砂 c(珪岩質、足利市付近産)

### c. 粗骨材

① 川砂利 R(鬼怒川産)

② 碎石 C(珪岩質、足利市付近産)

③ 高炉スラグ砕石 S

### d. 水

水道水(足利市)

### e. 表面活性剤

AE減水剤 Pa(F社製品)

f. 細骨材の組合せおよびその品質を表1～表3に示す。

g. その他の使用材料の品質を表4～表6に示す。

## 3. 実験の内容および項目ならびに方法

### 3.1 調査表案出のためのコンクリートの単位水量および粗骨材のかさ容積を求めするためのスランブ実験

使用する細骨材の粗粒率および使用する粗骨材の実積率に応じて\*3細骨材を組合せ、所定の水セメント比のセメントペーストを加え、スランブ実験を行い、調査表案作成の基礎資料とした。なお、所定の水セメント比とは50、60、70%である。

### 3.2 調査表案の確認と基本的性質の究明

前項で案出したコンクリートの調査表を確認するとともに、主な調査\*4についてワーカビリティ、スランブ、空気量、ブリージング量、圧縮強度、静弾性係数を究明し、強度算定式などを確立した。

3.1～3.2項の実験の方法を表7に示す。

表2 使用粗骨材の組合せと品質

NO	粗骨材の組合せ(%)			絶対比重	表乾比重	吸水率(%)	単位容積重量(kg/ℓ)	実積率(%)	ふるいを通るものの重量百分率(%)						最大寸法(mm)	JASS 5でいう品質の級		
	川砂利R	碎石C	高炉スラグ砕石S						25	20	15	10	5	2.5		1級	2級	3級
	I	100	-	-	2.52	2.57	1.8	1.65	65.5	100	95	80	41	2	0	20	○	
II	70	30	-	2.55	2.59	1.5	1.62	63.4	100	96	78	40	2	0	20	○		
III	70	-	30	2.50	2.56	2.3	1.59	63.6	100	95	80	38	2	0	20		○	
IV	30	-	70	2.44	2.52	3.1	1.52	62.3	100	94	81	33	3	0	20		○	
V	-	100	-	2.60	2.63	1.0	1.54	59.2	100	98	74	37	2	0	20	○		
VI	-	-	100	2.41	2.50	3.7	1.46	60.6	100	94	82	30	3	2	20		○	

表3 使用水質(足利保健所報告)

色度	濁度	水素イオン濃度(pH)	蒸発残留率(ppm)	塩素イオン(ppm)	過マンガン酸カリウム消費量(ppm)
5度以下	2度以下	7.0	290	13.0	1.5

表4 水砕砂S<sub>3</sub>の化学成分(%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	T.S	SO <sub>3</sub>
33.92	14.20	41.48	6.63	0.23	0.69	0.787	0.012

表5 使用セメントの化学成分(%) (各社報告)

	ig.loss	insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
C社	0.5	0.1	22.1	5.0	3.2	65.0	1.3	1.8	99.0
N社	0.5	0.2	22.0	5.1	3.0	64.9	1.3	2.2	99.2
S社	0.5	0.0	22.3	5.2	3.1	64.8	1.5	1.7	99.1

表6 使用セメントの物性(各社報告)

	比重	ブレン重(cml/g)	凝結			安定性	フロー(mm)	圧縮強さ(kg/cm <sup>2</sup> )		
			水量(%)	始発(h)	終結(h)			3日	7日	28日
C社	3.17	3200	27.5	2-24	3-33	良	261	149	245	418
N社	3.16	3160	28.0	2-47	4-14	良	257	136	232	402
S社	3.16	3310	25.8	2-35	3-43	良	256	138	236	410

表7 実験\*1の項目ならびに方法

項目	方法
ワーカビリティ	スランブ試験におけるコンクリートの状態から判定した。
スランブ	JIS A1101(コンクリートのスランブ試験方法)による。
空気量	JIS A1128(まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法[空気室圧力方法])による。
ブリージング量	JIS A1123(コンクリートのブリージング試験方法)に準じた。ただし容器は15φ×30cm金属製を用い、内高12cmまでコンクリートを打込んだ。
圧縮強度	JIS A1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)によって供試体を作り圧縮強度実験は、JIS A1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)による*2。なお、材令は7、28、91日、1年
静弾性係数	圧縮強度の測定時にコンプレッションメーターを用いて歪を測定し、最大荷重の点における点の静弾性係数を求めた。

(注) \*1 コンクリートの練りまぜには、容量約50ℓの強制攪拌ミキサーを用いた。

\*2 圧縮強度試験はS社製100トン電子管式万能試験機による。

\*3 日本建築学会「コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案」の基本的考えによる。

\*4 水セメント比50、60、70%。スランブ18±2.5cm。空気量は3～6%。

#### 4. 実験結果

紙面の都合上、一例を図1～図6および表8に示す。

#### 5. 結果の検討

##### 5.1 混合砂としての有用性

粒形が多少角ばっている水砕砂に粒形が丸味を帯びている川砂、海砂、陸砂、山砂を混合使用すると粒形が改善される。

その上、海砂の場合は含有塩分濃度を、また陸砂、山砂の場合は有機不純物や粘土塊量を確実に薄めることができるので混合砂として使用することは有用である。

##### 5.2 混合砂コンクリートの単位水量および粗骨材のかさの容積

水砕砂に他の細骨材を種々組合せ、A E減水剤を併用したコンクリートの単位水量および粗骨材のかさ容積は水砕砂単独の場合と、ほぼ同じである(図1参照)。

##### 5.3 混合砂コンクリートの調査表の確認と基本的性質

###### a. ワークビリーチー

前項で案出した調査表に基づいたコンクリートは所定のワークビリーチーが得られた。同表(紙面の都合上省略)は細骨材率±2.5%、単位水量±3 kg/m<sup>3</sup>、粗骨材のかさ容積±0.035 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の範囲で十分用いられることが確められた。なお、実用上では互いに粒形が角ばっている水砕砂と砕砂との組合せは、できるだけさけた方がよい。

###### b. ブリージング量

混合砂コンクリートのブリージング量は骨材の組合せによって若干の差違がみられた(図2～図6参照)。

しかし、いずれの場合もJASS 5で提唱している“常用”コンクリートの0.5cc/cm<sup>3</sup>の限度値を満足している。

①細骨材のちがいがによるブリージング：川砂に比較して海砂、水砕砂、砕砂は短時間に多く、山砂は時間の経過とともにブリージング量が増大する傾向にある。

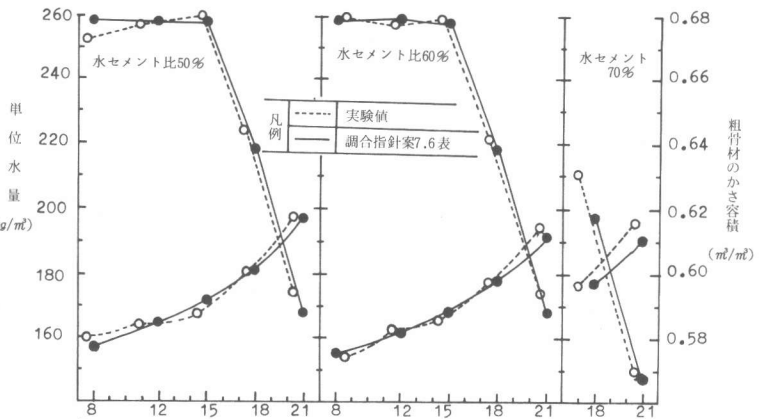


図1 スランプと単位水量、スランプと粗骨材のかさ容積との関係の一例  
セメント：普通ポルトランドセメント 表面活性剤：A E減水剤  
細骨材：水砕砂70%、川砂30% 粗骨材：川砂利100%  
f・m：2.7 最大寸法：20mm

表8 実験結果の一例

NO	細骨材の混合割合 (%)					実際に得られた		細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材のかさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	ワーカビリーチー	ブリージング量 (cc/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				弾性係数 (dfs/3 × 10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )				
	水砕砂	川砂	海砂	陸砂	山砂	水セメント比 (%)	**空気量 (cm <sup>3</sup> )						7日	28日	91日	1年	7日	28日	91日	1年	
	Si	r	m	l	P	C	(%)						(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	100	-	-	-	-	60	175	4.0	422	178	0.609	良	Q29	171	258	340	344	213	267	309	319
2	70	30	-	-	-	60	190	4.2	414	178	0.616	良	Q28	176	264	345	348	216	271	316	317
3	70	-	30	-	-	60	195	4.0	413	178	0.618	良	Q32	180	256	325	330	221	267	301	310
4	70	-	-	30	-	60	180	4.0	422	178	0.609	良	Q26	168	287	341	347	235	284	306	319
5	70	-	-	-	30	60	175	4.0	413	178	0.618	良	Q29	188	251	322	326	224	273	286	287
6	70	-	-	-	30	60	175	4.0	422	178	0.609	良	Q28	191	282	339	352	234	281	292	318
7	50	50	-	-	-	60	195	4.0	413	178	0.618	良	Q26	182	279	345	353	232	282	298	318
8	50	-	50	-	-	60	195	4.1	403	179	0.623	良	Q34	167	261	308	319	229	287	296	307
9	50	-	-	50	-	60	190	4.1	432	178	0.698	良	Q25	186	276	348	352	233	284	311	326
10	50	-	-	-	50	60	175	4.1	413	178	0.618	良	Q30	183	259	320	341	240	257	292	308
11	50	-	-	-	50	60	165	4.0	432	178	0.598	良	Q28	197	299	349	375	225	277	298	320
12	30	70	-	-	-	60	195	4.0	403	179	0.627	良	Q24	168	269	308	329	216	269	284	310
13	30	-	70	-	-	60	195	4.0	394	179	0.637	良	Q35	156	264	299	309	227	288	290	305
14	30	-	-	70	-	60	195	4.0	432	178	0.598	良	Q25	183	268	311	335	219	272	291	310
15	30	-	-	-	70	60	175	4.1	403	179	0.627	良	Q29	166	242	273	286	216	260	274	300
16	30	-	-	-	70	60	195	4.0	432	178	0.598	良	Q26	178	279	327	337	234	263	290	311
17	-	100	-	-	-	60	195	4.0	403	179	0.627	良	Q29	177	295	344	356	227	274	302	317
18	-	-	100	-	-	60	195	4.0	384	179	0.647	良	Q38	164	244	297	306	217	248	288	300
19	-	-	-	100	-	60	190	4.0	432	178	0.598	良	Q25	190	305	346	375	224	287	315	319
20	-	-	-	-	100	60	165	4.0	394	179	0.637	良	Q32	165	235	269	279	206	255	274	295
21	-	-	-	-	100	60	180	4.0	442	177	0.589	良	Q24	222	307	356	356	240	287	309	319

(注) \* 表面活性剤 (A E減水剤) 量はセメント重量に対して0.2%添加した。\*\*骨材修正係数を除いた値。

②粗骨材のちがいによるブリージング量

川砂利と比較して砕石、高炉スラグ砕石の順に多い傾向にあるが大差ではない。

③水セメント比のちがいによるブリージング量

水セメント比70%が最も多く、以下60%、50%の順であるが、大差ではない。

④水砕砂の混合割合によるブリージング量

水砕砂 100%と比較して川砂を30、50、70%混合するにつれてブリージング量は低減する。

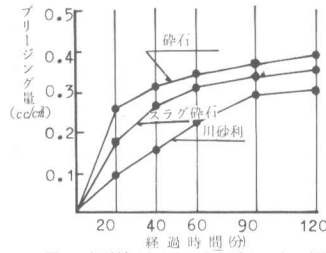


図3 粗骨材のちがいによるブリージング量 (粗骨材:水砕砂100% W/C 60%)

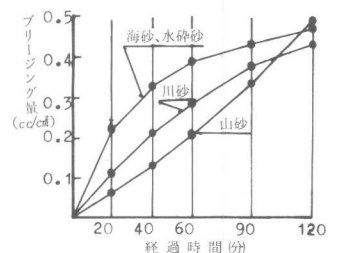


図2 細骨材のちがいによるブリージング量 (粗骨材:川砂利100% W/C 60%)

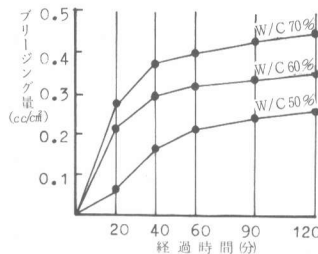


図4 W/Cのちがいによるブリージング量 (粗骨材:川砂利100%,細骨材:水砕砂100%)

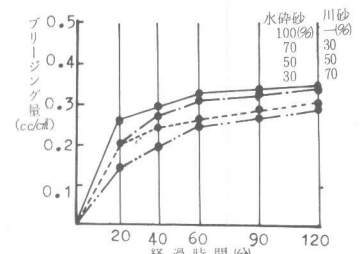


図5 水砕砂の混合割合によるブリージング量 (粗骨材:川砂利100%, W/C 60%)

c. 圧縮強度

混合砂コンクリートの圧縮強度は骨材の組合せによって若干の差違がみられた。

①細骨材の組合せによる圧縮強度のちがいをみると、水砕砂が多く混合されているコンクリートほど短期材合強度は、わずかながら小さく、長期材合強度は大きくなる。この理由は短期では角ばっている水砕砂のためにコンクリート中の空隙が若干多いが、長期になると水砕砂表面とセメントペーストとの化学反応によって空隙が逆に小さくなるものと思われる。

②粗骨材の組合せによる圧縮強度のちがいをみると、高炉スラグ砕石(100%)、砕石(100%)が比較的高く川砂利(100%)は平均的、混合粗骨材が比較的低い傾向にあった。このことから骨材を混合する場合は空隙を小さくするような組合せをする必要があるといえよう。

③本実験結果から求めたセメント水比(C/W)と材令28日圧縮強度( $F_{28}$ )との強度の関係式を(1)~(2)式に示す。

④ $F_7$ と $F_{28}$ との関係式は図6を参照されたい。

d. 静弾性係数

混合砂コンクリートの静弾性係数は、従来の普通コンクリートの値と同程度であり、日本建築学会RC構造計算規準に示されている推定式( $E=2.1 \times 10^4 \times (\frac{r}{2.3})^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{200}}$  (kg/cm<sup>2</sup>)) によって表わすことができることを確認した。

6. 結論 粒形が多少角ばっている水砕砂はコンクリート用細骨材として単独使用もできるが、川砂、海砂山砂などの粒形が丸味を帯びているものとJASS 5で提唱している細骨材の品質規定範囲で混合使用すれば、細骨材としての粒形が改善され、また海砂の場合は塩分濃度を、陸砂・山砂の場合は有機不純物、粘土塊量を薄めるなど細骨材の品質改善に役立ち、これらの細骨材を種々の粗骨材とを組合せたコンクリートの調合方法および基本的性質は従来の普通コンクリートと大きな差違のないことが明確になった。

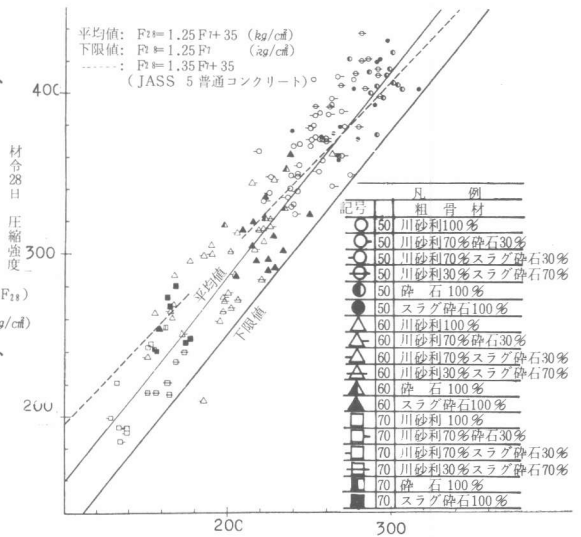


図6 材令7日圧縮強度と材令28日圧縮強度との関係

$$F_{28} = 274 C/W - 170 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ (平均値)} \dots\dots(1)$$

$$F_{28} = 274 C/W - 208 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \text{ (95\%信頼率)} \dots\dots(2)$$