

[21] 高炉風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

本研究は2つの実験を行なった。先ず実験1では3銘柄の高炉水砕スラグ砂(以下、水砕砂と呼ぶ)と0.6mm以上しか製造できない球形状の高炉風砕スラグ砂(以下、風砕砂と呼ぶ)を砕いて細目部分を補てんしたものに川砂または海砂を50%混合した細骨材を用いたコンクリートの基本的性質の究明、および実験2では球形状そのまの風砕砂に水砕砂などを粒度ごとに混合した細骨材を用いたコンクリートの基本的性質の究明を行なった。

2. 実験1

2.1 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 S₃②水砕砂 S₁₄③水砕砂 S₁₃④風砕砂 S₉ (0.6mm以上の球形状の

ものしか製造できない風砕砂を細目部分を補てんするために、わざわざこまかく砕いたもの)

⑤川砂 r (鬼怒川産)

⑥海砂 m (高萩市付近産)

c. 粗骨材

川砂利 R (鬼怒川産)

d. 水

水道水 (足利市)

e. 表面活性剤

AE減水剤 Pa (F社製品)

f. 使用材料の品質の一例

表1～表2に示す。

2.2 実験の項目と方法

表3に示す。

2.3 実験結果

表4および図1～図4に示す。

2.4 結果の検討

a. 混合砂コンクリートの調査

表1 使用細骨材の組合せと品質

		細骨材の組合せ(%)			表乾比重	吸水率(%)	単重位置積量(kg/L)	洗よれいつる試験にむく(%)	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)
		水砕砂	川砂 r	海砂 m							5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
水砕砂 S ₃	1	100	-	-	2.72	2.2	1.59	1.6	うすい	-	100	97	72	36	13	4	2.8
	2	50	50	-	2.67	2.6	1.63	1.8	うすい	-	100	95	73	42	18	4	2.7
	3	50	-	50	2.68	1.7	1.63	1.2	うすい	Q01	100	96	81	50	13	3	2.6
水砕砂 S ₁₄	4	100	-	-	2.64	2.0	1.59	0.8	うすい	-	100	99	75	39	18	9	2.6
	5	50	50	-	2.65	2.5	1.63	1.3	うすい	-	100	96	74	44	21	7	2.6
	6	50	-	50	2.65	1.4	1.63	0.7	うすい	Q01	100	97	82	51	15	6	2.5
水砕砂 S ₁₃	7	100	-	-	2.70	1.6	1.56	2.5	うすい	-	100	93	66	33	16	7	2.8
	8	50	-	50	2.67	1.2	1.61	1.6	うすい	Q01	100	94	78	48	14	5	2.6
風砕砂 S ₉	9	100	-	-	2.90	1.1	1.77	5.2	うすい	-	100	97	61	31	18	9	2.8
	10	50	50	-	2.76	2.0	1.72	3.5	うすい	-	100	95	68	40	21	7	2.7
	11	50	-	50	2.77	0.9	1.72	3.0	うすい	Q01	100	96	75	47	15	6	2.6
川砂 r	12	-	100	-	2.62	2.9	1.67	1.9	うすい	-	100	93	73	48	24	4	2.6

表3 実験 *1 の項目と方法

実験項目	実験方法
(イ)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。
(ロ)スランブ	JIS A 1101によった。
(ハ)空気量	JIS A 1128によった。
(ニ)凝結	ASTM C 403によった。
(ホ)ブリージング量	JIS A 1123によった。
(ヘ)圧縮強度	10φ×20cmの金属製型わくを用い、JIS A 1132によって供試体を作り圧縮強度試験は、JIS A 1108によった。
(ト)静弾性係数	圧縮強度の測定時にコンプレッソメーターを用いて歪を測定し、最大荷重の場における点の静弾性係数を求めた。
(チ)引張強度	10φ×20cmの金属製型わくを用い、JIS A 1132によって供試体を作り、引張強度試験は、JIS A 1113によった。
(リ)付着強度	縦15×横15×高さ30cmの金属製型わくを用い、JIS A 1132によって供試体を作り、付着強度試験はASTM C234によった。
(ス)曲げ強度	10×10×40cmの型わくを用い、JIS A 1132によって供試体を作り、曲げ強度試験は、JIS A 1106によった。
(ハ)乾燥収縮	JIS A 1129のコンパレータートによった。なお供試体はJIS A 1132によって作った。
(ヲ)重量	乾燥収縮量の測定時に1gまで測られる天秤を用いて行った。
(ワ)中性化深さ及びコンクリート中のみかき鉄筋のさびの発生	2本のみがき鉄筋10×10×40cmの型わくを用い、JIS A 1132によって2本のみがき鉄筋を埋込んだ(かぶり厚さ2cm、3cm)供試体を作った。 養生としては、材令7日まで水中、材令7日から28日まで屋内空気に置いた。中性化深さ及びコンクリート中のみかき鉄筋のさびの発生は材令28日を起点として屋外に置き、材令1年にて測定した。

(注) *1 コンクリートの練り混ぜには容量約50ℓの強制攪拌ミキサーを用いた。
また強度試験機はS社製100トン電子管式万能試験機を用いた。

表2 水砕砂・風砕砂の化学成分(%) (各社報告)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	MnO	TiO ₂	T.Fe	T.S	SO ₃
水砕砂 S ₁	33.92	14.20	41.48	6.63	0.23	0.69	-	-	0.787	0.012
水砕砂 S ₁₁	32.90	14.47	38.80	7.15	0.24	0.71	2.33	0.81	0.926	0.014
水砕砂 S ₁₂	33.00	14.20	41.10	6.60	0.29	-	-	-	0.920	0.050
風砕砂 S ₁	32.50	14.90	40.60	6.55	-	1.2.	1.41	0.39	1.14	-

表案に基づいた本実験は水砕砂に混合した場合でも、風砕砂に混合した場合でもコンクリートのワーカビリティはすべて良好であった(表4参照)。

b. 混合砂コンクリートのブリーディング量は、骨材の組合せによって若干差違がみられたが(水砕砂、風砕砂、海砂は川砂より、早く出る)、すべてが JASS

水砕砂 風砕砂	粗骨材の組合せ (%)			粗骨材	圧縮強度 (kg/cm ²)		静弾性係数 (cEs ^{1/2} ×10 ³ kg/cm ²)			引張強度 (kg/cm ²)		付着強度 (kg/cm ²)				曲げ強度 (kg/cm ²)		
	水砕砂	川砂	海砂		200	300	20	25	30	25	30	上端筋		下端筋		49	50	51
												80	90	100	110			
水砕砂 S ₁	1	100	-	-														
	2	50	50	-														
	3	50	-	50														
水砕砂 S ₁₁	4	100	-	-														
	5	50	50	-														
	6	50	-	50														
水砕砂 S ₁₂	7	100	-	-														
	8	50	-	50														
	9	100	-	-														
風砕砂 S ₁	10	50	50	-														
	11	50	-	50														
	12	-	100	-														
川砂 r	12	-	100	-														

図1 コンクリートの力学的性質

凡例 材令 7日28日91日

5で提唱している“常用”コンクリートの0.5cc/cm³の限度値を満足している。

c. 混合砂コンクリートの凝結時間は比較用の川砂(100%)・川砂利・AE減水剤コンクリートと大きな差違がない。

d. 混合砂コンクリートの圧縮強度の発現傾向は従来、報告されている水砕砂コンクリートとほぼ同じである。

e. 混合砂コンクリートの圧縮強度と静弾性係数は日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準で提唱している、次の(1)式で表示することができる。 $E=2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{r}{2.3}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{200}} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(1)$

f. 混合砂コンクリートの引張強度の絶対値は川砂(100%)・川砂利・AE減水剤コンクリートより若干小さいようであるが、ぜい度係数で比較すると同じである(材令28日で約10)(図2参照)。

g. 鉄筋と混合砂コンクリートの付着強度は、絶対値も、付着強度に対する比も川砂(100%)・川砂利・AE減水剤コンクリートよりやや大きい(材令28日で上端筋が約0.3Fc)(図3参照)。

h. 混合砂コンクリートの曲げ強度は絶対値も、曲げ強度に対する圧縮強度の比も川砂(100%)・川砂利・AE減水剤コンクリートよりやや大きい(材令28日で0.18Fc~0.20Fc)(図4参照)。

表4 コンクリートの諸性質

		細骨材の組合せ (%)			粗 骨 材	水 セ メ ン ト 比 (%)	目 ン 標 ス ラ (mm)	実際に得られた		細骨 材率 (%)	単位 水量 (kg/m³)	粗骨材 のかさ 容 積 (m³/m³)	ワ リ チ ー カ ビ	凝 結 (時一分)		ブリー ジ ン グ 量 (cc/cm³)	乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)			重量(%)		平均中 性化深 さ (mm)	鉄 筋 の さ び の 発 生 状 況
		水砕砂	川砂	海砂				スラン プ (cm)	* 空気量 (%)					始発	終結		7日 + 28日	7日 + 91日	7日 + 1年	7日 + 91日	7日 + 1年		
水砕砂 S ₁	1	100	-	-	川 砂	60	18	19.5	4.2	42.2	178	0.609	良	5-20	7-10	0.31	-4.6	-6.3	-9.4	-3.4	-4.9	2.6	さびなし
	2	50	-	-		60	18	18.0	4.1	41.3	178	0.618	良	5-20	7-00	0.26	-3.8	-5.6	-7.3	-3.4	-4.3	2.3	"
	3	50	-	50		60	18	19.0	4.1	40.3	179	0.627	良	5-10	7-00	0.37	-5.4	-8.1	-9.5	-3.3	-4.3	2.8	"
水砕砂 S ₄	4	100	-	-		60	18	19.0	3.8	41.3	178	0.618	良	5-00	7-10	0.30	-5.9	-7.3	-8.8	-4.1	-5.0	2.6	"
	5	50	50	-		60	18	20.0	4.1	40.3	179	0.627	良	5-10	7-10	0.37	-5.8	-8.3	-9.4	-3.7	-4.7	2.4	"
	6	50	-	50		60	18	20.0	4.1	39.4	179	0.637	良	5-00	7-00	0.28	-5.1	-7.8	-8.5	-3.4	-4.1	2.7	"
水砕砂 S ₅	7	100	-	-		60	18	19.5	3.9	42.2	179	0.609	良	4-50	7-10	0.21	-4.8	-8.5	-9.6	-4.0	-5.0	2.6	"
	8	50	50	-		60	18	20.0	4.1	40.3	178	0.627	良	4-50	6-50	0.28	-4.1	-6.8	-8.3	-3.2	-4.7	2.7	"
風砕砂 S ₁	9	50	-	50		60	18	19.5	4.0	42.2	178	0.609	良	5-00	7-20	0.31	-3.0	-5.9	-6.9	-3.9	-4.3	1.8	"
	10	100	-	-		60	18	20.5	4.2	41.3	178	0.616	良	5-00	7-20	0.33	-5.2	-8.0	-9.5	-3.5	-4.4	1.5	"
川砂 r	11	50	50	-		60	18	20.5	4.0	40.3	179	0.627	良	4-40	7-10	0.39	-4.9	-7.8	-8.4	-3.7	-4.0	2.0	"
	12	-	100	-		60	18	20.5	4.0	40.3	179	0.627	良	5-30	7-20	0.34	-5.4	-8.7	-9.7	-4.0	-5.0	2.9	"

[注] *E減水剤(AE減水剤)量はセメント重量に対して0.2%添加した。また値は骨材修正係数を除いたもの。

[文献] 1) 高砂 水砕 スラ砂の混合砂コンクリートへの適用実験研究参照。

i. 混合砂コンクリートの自由乾燥収縮量は重量減少量とともに比較用の川砂(100%)・川砂利・A E 減水剤コンクリートよりやや小さい(表 4 参照)。

j. 混合砂コンクリートの材令 1 年における中性化深さは比較用の川砂(100%)・川砂利・A E 減水剤コンクリートと同程度か、若干小さいようである。またコンクリート中の鉄筋のさびの発生は、いずれの場合にも認められなかった(以上表 4 参照)。

k. 以上実験 1 の結果を総括すると水砕砂および球形の風砕砂をこまかくしたものに他の細骨材を混合したコンクリートの基本的性質は川砂コンクリートと大きなちがいが無いといえる。

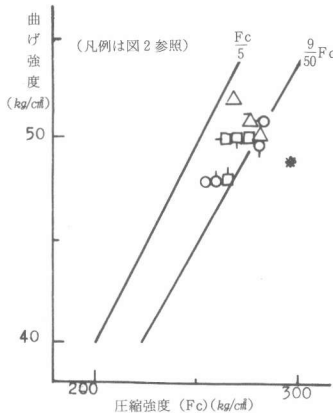


図 4 圧縮強度と曲げ強度との関係

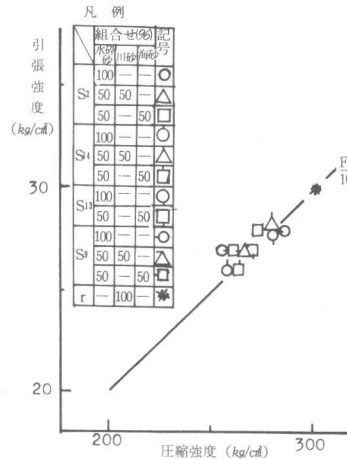


図 2 圧縮強度と引張強度との関係

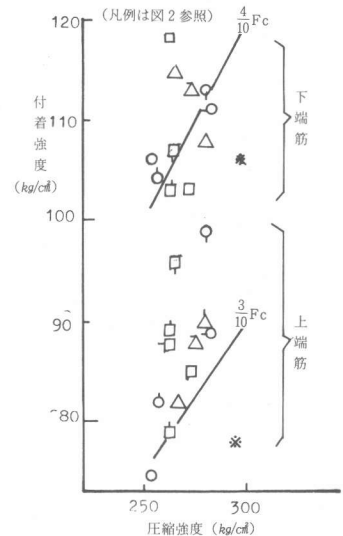


図 3 圧縮強度と付着強度との関係

3. 実験 2 (紙面の都合上、一例を示す)

3.1 使用材料

a. セメント

実験 1 に使用したものと同一セメントを用いた。

b. 細骨材

- ① 水砕砂 S_3
- ② 風砕砂 S_8 (0.6mm 以上の球形状)
- ③ 海砂 m (高萩市付近産)

c. 粗骨材

川砂利 R (鬼怒川産)

d. 水：水道水(足利市)

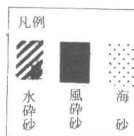


表 5 使用細骨材の組合せと品質の一例

	細骨材の粒度分布(%)						表乾 比重	吸水 率(%)	単位 容積 重量 (kg/ℓ)	洗い 損失 量(%)	有機 不純 物	塩 分(%)	粗 粒 率	骨*3 材の 級
	フルイ目の大きさ(mm)													
	2.5 以下	2.5 〜1.2	1.2 〜0.6	0.6 〜0.3	0.3 〜0.15	0.15 以下								
	10	20	28	20	16	6								
1	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	2.73	2.2	1.58	2	うすい	0	270	1級
16	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	2.81	1.7	1.69	2	うすい	0	270	1級
17	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	2.82	1.6	1.75	2	うすい	0	270	1級
18	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	2.86	1.2	1.81	2	うすい	0	270	1級
22	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	斜線	2.62	2.9	1.67	2	うすい	0.065	270	1級
23	点線	点線	点線	点線	点線	点線	2.65	2.7	1.65	2	うすい	0.064	270	1級
24	点線	点線	点線	点線	点線	点線	2.72	2.3	1.61	2	うすい	0.056	270	1級

(注) * JASS 5 による

e. 表面活性剤：A E 減水剤 Pa (F 社製品) f. 使用材料の品質：表 5 に示す。他は紙面の都合で省略する。

3.2 実験の項目と方法 ワーカビリチー、スランプ、空気量、ブリージング量、圧縮強度、静弾性係数、引張強度乾燥収縮、重量変化の各項目に対して表 3 に示す実験方法によって究明した。

3.3 実験結果 一例を表 6 および図 5 に示す。

3.4 結果の検討 風砕砂に水砕砂を混合したコンクリートについて種々検討した結果、次のことがいえよう。

a. コンクリートのワーカビリチーはすべて良好であった。風砕砂は粒が球形状であるため、所定のワーカビリチーを得るのに単位水量が水砕砂(100%)コンクリートに比較して 2~3% 減することができる。その他の調査上の補正として粗骨材のかき容積を $0.02 \sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 減、細骨材率を 2% 程度増すとよい。

b. コンクリートのブリージング量は水砕砂(100%)コンクリートに比較して少ない。とくに風砕砂の混合量が多くなると少なくなる。また水セメント比のちがいをみると、水セメント比が大きいほどブリージング量は多い。

c. コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、引張強度は水砕砂(100%)コンクリートと同程度である。本実験結果から

表6 混合砂コンクリートの基本的性質の一例 (注) 凡例は表5参照

細骨材の粒度分布(%)							粗骨材	水セメント比(%)	目標スラング(%)	実際に得られたスラング(%)	細骨材率(%)	単位水量(kg/m ³)	粗骨材のかさ容(m ³ /m ³)	ワーカビリティ	ブリージング量(cc/cm)					乾燥収縮(×10 ⁻⁴)					重量変化(%)			
NO	フルイ目の大きさ(mm)														20分	40分	60分	90分	120分	7日+28日	7日+91日	7日+26週	7日+28日	7日+91日	7日+26週	7日+26週	7日+26週	7日+26週
	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15																						
10	20	28	20	16	16	16	50	18	190	3.9	399	180	0.611	良	Q04	0.08	0.11	0.13	0.13	-25	-50	-54	-16	-21	-22			
16							50	18	180	3.0	401	179	0.611	良	Q01	0.05	0.08	0.12	0.16	-17	-46	-48	-11	-18	-18			
17							50	18	195	4.2	402	179	0.611	良	Q03	0.05	0.07	0.09	0.12	-21	-41	-43	-14	-20	-20			
18							50	18	205	3.0	370	171	0.655	良	Q02	0.04	0.08	0.12	0.18	-38	-66	-70	-20	-26	-30			
22							50	18	210	3.0	369	176	0.650	良	Q02	0.04	0.06	0.09	0.12	-39	-64	-74	-16	-24	-28			
23							50	18	195	3.4	377	179	0.636	良	Q04	0.11	0.17	0.24	0.25	-38	-54	-58	-27	-36	-38			
24							60	18	200	3.1	398	180	0.640	良	Q21	0.29	0.32	0.33	0.34	-39	-52	-56	-21	-29	-33			
16							60	18	185	4.3	420	177	0.611	良	Q13	0.16	0.19	0.22	0.23	-21	-42	-45	-16	-22	-22			
17							60	18	185	3.0	421	176	0.611	良	Q13	0.15	0.18	0.20	0.21	-21	-51	-52	-20	-23	-27			
18							60	18	210	3.0	423	174	0.611	良	Q13	0.15	0.16	0.17	0.18	-17	-42	-44	-18	-24	-24			
22							60	18	210	3.0	403	179	0.627	良	Q06	0.12	0.18	0.25	0.33	-25	-64	-74	-27	-31	-38			
23							60	18	205	3.3	403	179	0.672	良	Q03	0.12	0.19	0.30	0.32	-39	-56	-59	-23	-30	-35			
24							60	18	195	5.0	417	179	0.613	良	Q07	0.13	0.17	0.22	0.32	-30	-56	-57	-20	-27	-29			
16							70	18	185	6.0	452	177	0.592	良	Q08	0.17	0.25	0.32	0.36	-25	-44	-47	-23	-28	-30			
17							70	18	190	5.0	451	176	0.592	良	Q08	0.17	0.26	0.29	0.32	-20	-49	-51	-23	-32	-33			
18							70	18	190	4.1	452	175	0.592	良	Q10	0.21	0.25	0.26	0.26	-22	-43	-46	-27	-36	-36			
22							70	18	205	1.7	423	178	0.620	良	Q03	0.13	0.26	0.33	0.36	-34	-62	-64	-25	-32	-35			
23							70	18	210	3.5	423	178	0.620	良	Q08	0.18	0.29	0.36	0.39	-33	-62	-72	-25	-36	-38			
24							70	18	200	5.8	430	178	0.613	良	Q21	0.29	0.32	0.33	0.34	-39	-52	-56	-21	-28	-33			

風砕砂に水砕砂を混

合したコンクリート

の強度算定式を求め

た(2)~(3)式参照)。

$F_{28} = 300C/W - 260$

(kg/cm^2) (平均値)……(2)

$F_{28} = 1.35F_7$ (kg/cm^2)

……(3)

d. コンクリート

の乾燥収縮量は水砕

砂(100%)コンクリー

トよりも若干小さい。

また重量変化も小さ

い。

4. 結論

粗目しか製造でき

ない球形状の風砕砂

NO	細骨材の粒度分布(%)						粗骨材	水セメント比(%)	目盛(%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	静弾性係数 (cEs1/3×10 ⁴ kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	
	フルイ目の大きさ(mm)												
	5 ~2.5	2.5 ~1.2	1.2 ~0.6	0.6 ~0.3	0.3 ~0.15	0.15 以下							
	10	20	28	20	16	6				300	400	2.5 3.0	25 30 35
16							川砂利	50	18				
17													
18													
22													
23													
24													
1													
16							川砂利	60	18				
17													
18													
22													
23													
24													
16							川砂利	70	18				
17													
18													
22													
23													
24													

図5 コンクリートの力学的性質の一例

(注) 粒度分布の凡例は表5、力学的性質の凡例は図1参照

く砕砂して粒度を調整し、あえて単独のコンクリート用細骨材として用いるよりも、球形状で粗目の風砕砂に細目の水砕砂、川砂または海砂などと混合使用することによって高炉風砕スラグ砂はコンクリート用細骨材として十分使用できる。いいかえると本研究結果から高炉風砕スラグ砂は粒が球形状しているので、コンクリートの所定のワーカビリティを得る場合、単位水量が少なくすみ、乾燥収縮量の小さい、品質の高いコンクリートが得られることが明確になった。

本研究は財団法人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。