

[11] 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡組織について

正会員 小林 正 几 (法政大学)

正会員 〇田 中 弘 (法政大学)

1. まえがき

最近においては骨材資源の枯渇化の問題が深刻化するにともない、高炉スラグを骨材として活用するための開発が活発に進められ、とくにこれを細骨材として利用するための量産態勢の整備や、品質を標準化するための検討が急速に行われている。一方、この種の細骨材をコンクリートに用いた場合の諸性状については、これまでに多くの研究報告がなされており、品質の実態は相当に明らかにされてきたので、一般のコンクリート工事に利用しえる見通しはかなり高まってきたといえる。しかし、この高炉急冷スラグ砂に関する開発研究は、比較的最近に開始されたものであるため、本格的に実用化するためには、未解明の問題点もいくつか残されていると思われる。本報告は、高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの耐久性について検討するため、わが国で本格的に生産されている代表的な8種のを対象として、コンクリートの気泡組織について調べ、これと凍結融解に対する抵抗性との関連性について実験的に検討した結果を示し、A Eコンクリートとして用いる場合の問題点について論じようとするものである。

表 1. 実験に用いた高炉急冷スラグ砂の品質

区 種 分 別	細 骨 材		比 重		吸水率 %	洗い 試験 損失 %	単位容 積重量 kg/l	実積率 %	粒 度							備 考		
	製 造 会社	名 称 工場	表 乾	絶 乾					ふるいを通過するものの百分率									
									5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15				
高 炉 急 冷 ス ラ グ 砂	A	a	S ₁	2.70	2.68	0.79	6.1	1.604	59.9	2.83	100	96	68	31	15	8		
		B	b	S ₂	2.79	2.74	1.71	2.1	1.657	57.1	2.79	100	92	63	29	14	7	
	C	c ₁	S ₃	2.72	2.68	1.48	2.9	1.637	61.1	3.18	99	87	59	26	9	3	インペラプレーカ	
		c ₁	S ₄	2.76	2.68	3.10	1.6	1.684	64.8	2.47	100	99	85	43	18	8	ロードミル	
		c ₂	S ₅	2.71	2.69	0.75	3.8	1.604	59.6	2.32	100	100	92	48	19	9		
	D	c ₃	S ₆	2.87	2.85	0.58	3.4	1.820	63.8	2.83	100	94	67	34	16	6		
		d ₁	S ₇	2.73	2.72	0.43	4.4	1.734	63.8	2.69	99	93	70	40	21	9		
	風 砕 砂	C	c ₄	S ₈	2.94	2.93	0.25	8.9	1.834	62.5	1.98	100	98	85	60	39	20	破 碎
			c ₅	S ₉	2.92	2.92	0.10	4.0	1.926	66.0	2.96	100	98	54	31	20	10	破 碎・非破 碎
		規格案(1978)		—	2.5<	3.5>	7>	1.45<	—	—	90~	80~	50~	25~	10~	2~		
	川砂(鬼怒川)	7	2.57	2.49	2.42	3.3	1.661	66.2	2.89	99	87	67	40	14	4			

2. 使用材料および試験方法

2.1 高炉急冷スラグ砂

実験に用いた高炉急冷スラグ砂は神戸製鋼社(神戸), 住友金属社(和歌山), 新日本製鉄社(君津, 名古屋, 広畑), 中山製鋼社(船町)において生産された7種の水砕砂, および新日本製鉄社(堺)の2種の風砕砂である。風砕砂は破碎処理により粒度調整されたもの, およびこれ

に破碎処理を行っていないものを等量づゝ混合したものである。物理試験の結果は表1に示すようであった。

2.2 セメント, 骨材およびA E剤

実験に使用したセメントは小野田セメント社製普通ポルトランドセメントである。骨材は一般のコンクリート工事に用いられている清浄かつ堅硬な良質のもので, 粗骨材は岩瀬産の碎石(比重2.61, 吸水率1.29%), また細骨材は鬼怒川産の川砂である。川砂の試験結果は表1に示すようであった。A E剤には山宗化学社のヴェンソルを使用した。

2.3 コンクリートの配合および試験方法

実験に用いたコンクリートは, 一般の構造物におけるものを目安とし, 粗骨材最大寸法を25mm, 水セメント比を55%, またスランブを5~7cmとし, 単位水量および細骨材率は試験の対象としたコンクリートのワーカビリティが同じくなるように試的に定めた。空気量は10%までの範囲で, それぞれ4種に相違させた。コンクリートの配合は表2に示すようであった。

まだ固まらないコンクリートの空気量はローリング法によって測定した。硬化したコンクリートの気泡組織は

シリンダー供試体を切断して入念に平滑に仕上げた断面について、立体顕微鏡を用いて視察測定した。

コンクリートの凍結融解試験は、 $10 \times 10 \times 40$ cmのはり供試体の周囲に水をめぐらし、 -18°C ～ 4.5°C の範囲で1サイクルを約3時間とした促進試験によって行った。

3. コンクリートの気泡組織

3.1 エントラップドエアーの量および気泡の粒径分布

高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートのエントラップドエアーについて試験した結果は表2に示すようであった。これによれば、エントラップドエアーの量はまだ固まらない状態と硬化した後とでほとんど差はないが、種類によってかなり相違し、川砂の場合にくらべてかなり大きいことが認められた。すなわち、風砕砂においては2.0%であり、川砂の2.1%とくらべほとんど同じであるが、水砕砂では2.7～4.7%の範囲にあり、平均3.7%であった。

これらの気泡間隔係数は、川砂の場合659 μ 、また風砕砂においては517～593 μ であり、一般のAEコンクリートの場合にくらべかなり大きい。水砕砂においても、エントラップドエアーの量が多いものは気泡間隔係数が小さい傾向も見受けられるが、いずれも相当に大きく、382～707 μ の範囲にあって、平均値は552 μ を示した。

また、これを気泡の粒径分布からみると、エントラップドエアーの多い高炉急冷スラグ砂の場合においても、川砂のAEコンクリートの場合に比較すれば、小さい粒径のものがきわめて少ないことが示された。すなわち、たとえばエントラップドエアーの多い S_1 の高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートにおいて、100 μ 以下の微細な気泡の数は7300 $\%_{\text{cm}}$ 程度であるのに対し、川砂を用いて空気量をこれとほとんどかわらない値としたAEコンクリートでは28000 $\%_{\text{cm}}$ にも達している。

高炉急冷スラグ砂のうち水砕砂を用いた場合、川砂の場合にくらべてエントラップドエアーの量がいちじるしく大きくなることのある理由については不明であるが、比重、吸水率、洗い試験損失量、実積率等の違いによる影響はないようであった。しかし、図1に示すように1.2～0.6mmのサイズが多いほどエントラップドエアーの量が增大する傾向にあることが認められた。このように、砂中の中砂部分が多い場合、エントラップドエアーが

表2 実験に用いたコンクリートの配合および気泡組織

細骨材		コンクリートの配合				気泡組織			
種別	名称	W	S/a	ウイソル	空気量	空気量	気泡間隔	気泡の数 $\%_{\text{cm}}$	
		Kg/ m^3	%	g/ m^3	%	%	係数 μ	総数	100 μ >
高炉急冷水砕砂	S_1	192	46	—	4.7	4.1	447	9100	7300
		190	44	6	5.5	5.7	332	11800	6300
		186	44	17	6.6	6.1	304	20700	11500
		180	43	26	7.8	5.9	270	35200	25000
	S_2	197	46	—	3.7	3.3	641	2600	1200
		197	45	7	4.4	4.7	532	7700	5600
		194	43	16	6.2	5.3	399	27400	18800
		183	43	22	7.7	6.6	279	22500	16500
	S_3	205	47	—	3.4	2.4	742	3800	2800
		194	44	10	4.6	4.7	423	8900	5900
		197	44	20	5.4	5.0	338	15800	9300
		179	42	22	8.5	8.2	202	33400	24800
	S_4	183	44	—	4.0	4.3	469	4100	1600
		185	43	5	4.3	4.1	446	5200	2000
		180	41	14	5.9	5.9	257	17100	12100
		178	41	23	8.0	7.6	217	33100	16000
	S_5	193	44	—	3.9	3.9	478	5700	3400
		190	43	6	4.8	4.7	405	19200	12400
		179	41	21	7.1	7.3	284	28200	20200
		174	40	25	8.3	7.9	231	36400	28100
	S_6	190	46	—	2.7	2.2	707	2800	1700
		188	44	6	4.0	4.7	432	5700	2400
		181	44	18	5.7	5.1	281	29700	20200
		166	41	31	7.3	6.3	229	27500	21600
S_7	185	45	—	3.7	3.7	382	9800	7000	
	183	42	6	4.4	3.9	362	13500	9400	
	187	42	20	6.3	6.2	261	25200	16200	
	180	41	30	6.8	6.7	241	25700	19300	
風砕砂	S_8	189	42	—	2.0	2.6	512	6000	4500
		169	37	27	4.1	4.7	217	28000	22500
		168	37	39	5.6	5.4	188	43500	34500
		151	36	50	6.8	6.7	190	48900	40900
	S_9	172	43	—	2.0	1.9	593	3400	2300
		161	40	15	4.8	4.2	305	22100	17800
		161	38	27	6.2	5.9	237	32300	25300
		141	37	36	9.7	9.6	137	51800	41900
川砂	γ	174	43	—	2.1	2.3	659	3600	1200
		153	41	13	4.3	4.6	319	15200	10600
		154	38	18	5.0	4.9	245	36300	28200

多くなることは一般の川砂、砕砂などにおいてもいくぶんは認められる傾向ではあるが、増加の割合がかなり大きいことからみて、水砕砂によっては起泡性の可溶性成分が微量に含まれていることも考えられる。

3.2 エントレインドエアーの気泡の粒径分布

高炉急冷スラグ砂を用い、AE剤の使用量を調節することによって、空気量を各種に相違させたコンクリートの気泡組織について測定した結果は表2に示すとおりであり、気泡の粒径分布を4種の細骨材のものについて例示すれば図2のようであった。

試験の結果によれば、空気量を増加させるにともない高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートにおいて気泡の数が増大する傾向は川砂の場合とほとんど同じようであるが、苛酷な気象条件にさらされるコンクリートに対して一般にすゝめられている空気量のエントレインドエアーを連行させた場合と同じ程度の気泡の粒径分布をえるための空気量は、高炉急冷スラグ砂の種類によってかなり異なることが認められた。すなわち、たと

えば図2によれば、空気量を5.0%とした川砂の場合では凍結融解に対する抵抗性を向上させるのに著しい効果を発揮すると考えられる100μ程度以下のサイズは約28000/cm³であるが、このように多数の微細な気泡が連行されている空気量は、エントラップドエアーの量が2.7%および2.0%の水砕砂S₀および風砕砂S₀ではそれぞれ5.7%および4.8%であるのに対し、エントラップドエアーが4.7%の水砕砂S₁では7%以上になっていることが示された。

高炉急冷スラグ砂を用いたAEコンクリートの気泡の粒径分布について詳しく検討した結果によれば、エントレインドエアーが少なく表われたS₀あるいはS₀のものにおいては、300μ程度以上のサイズがきわめて少ないが、エントレインドエアーが多くなったS₁のようなものでは大きい気泡が相当に連行されていることも認められた。実験

は継続中であり、断定的なことは云えないが、エントラップドエアーの多く表われる高炉急冷スラグ砂においては、AEコンクリートの気泡中にエントラップドエアーに類する気泡がそのままかなりの程度とり込まれるものと考えられる。

コンクリートに対して凍結融解に対する抵抗性を十分に付与させるに必要な気泡間隔係数については、まだわが国では明確な基準は設けられていないが、混和剤の品質判定にあたり250μ程度とすることを示した報告もあ

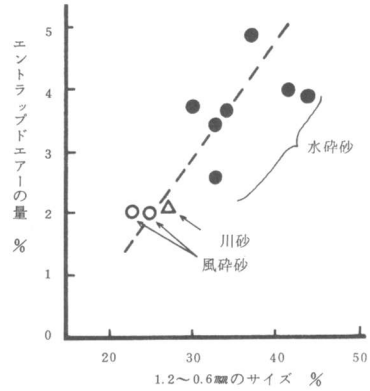


図1 エントラップドエアーの量と砂中の1.2mm～0.6mmのサイズの量との関係

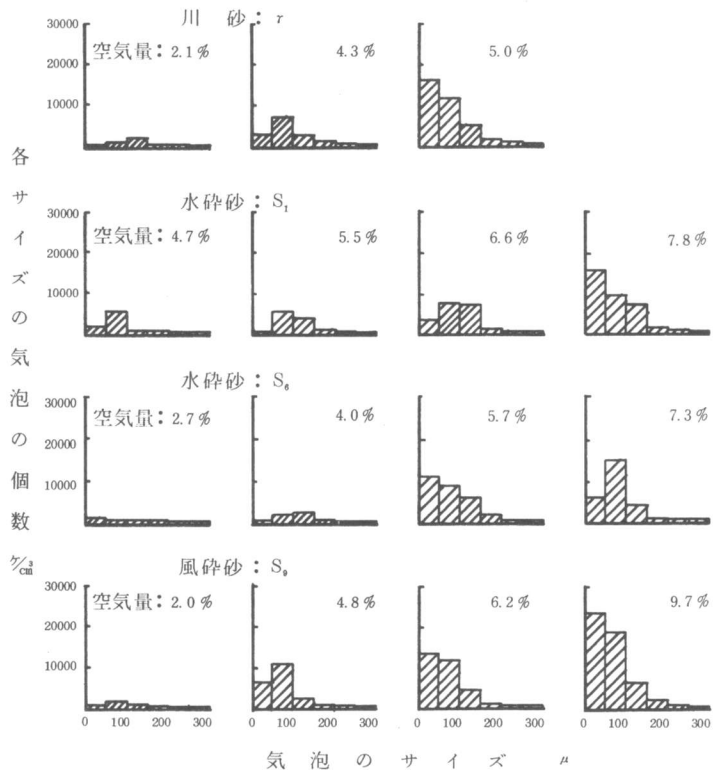


図2 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡粒径分布

り、一般にすゝめられている5%の空気量(粗骨材最大寸法25mm)のコンクリートで良質なAE剤を用いた場合、気泡間隔係数はおゝむね250 μ 以下となっている。したがって、これらのことを考慮すれば高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの配合設計においても、空気量選定の一つの目安として気泡間隔係数をこの程度の値とするようにすることも適当なことと思われる。

図4は気泡組織試験の結果より、各種高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートにおいて250 μ の気泡間隔係数をえるに要する空気量を示したものであるが、これによれば、川砂を用いたコンクリートにおいては空気量は5%程度とすればよいが、水砕砂の場合にはある程度空気量を増加させる必要があり、大部分の水砕砂では6.5%程度であるが、一部においては8%程度となるものもある。風砕砂は川砂の場合と同様5%程度でよいようである。

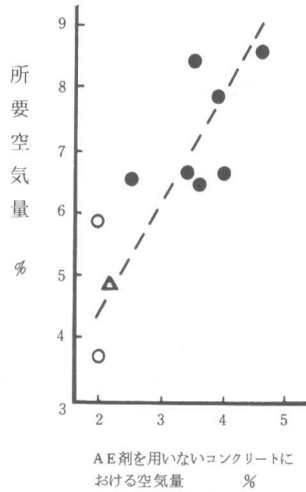


図4 AE剤を用いないコンクリートにおける空気量 % 気泡間隔係数を250 μ とするに要する空気量

4. 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性

高炉急冷スラグ砂を用い、水セメント比およびスランプを一定に保ちながら、空気量を各種に相違させてつくったコンクリートの凍結融解試験の結果は表3に示すごとくであった。これによれば、AE剤を用いないコンクリートにおいて、エントラップドエアーの多い水砕砂ではAE剤を用いない川砂の場合にくらべ、いくぶん凍結融解に対する抵抗性は大きい傾向にあるが、エントラップドエアーの効果はきわめて小さい。AEコンクリートとした場合には、いずれも空気量の増大にともない、凍結融解に対する抵抗性は著しく増加し、空気量を適切に選定すれば、川砂の場合と同等の抵抗性がえられることが示された。高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数との関係は図3に示すようであり、両者の間にはかなり密接な関連性のあることが認められた。

5. むすび 実験の範囲内より高炉急冷スラグ砂は川砂を用いる場合にくらべ、コンクリート中に大粒の気泡が多く含まれる傾向にあるが、空気量をいくぶん増量させれば凍結融解に対して同等の抵抗性を付与させることは十分可能であるといえる。

本研究は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として実施したことを付記し、謝意を表します。研究にあたり、実験に精励された法政大学工学部土木工学科コンクリート実験室の方々に対し深謝致します。

表3 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

細骨材 種別 名称	空気量 %	気泡間隔 係数 μ	動弾性係数 %			
			100	200	マイク 300	
高炉急冷 スラグ 砂	S ₁	4.7	447	89	65	—
		5.5	332	94	74	—
		6.6	304	100	89	79
		7.8	270	98	88	84
水砕砂	S ₈	3.4	742	76	54	—
		4.6	423	77	57	—
		5.4	338	92	83	80
		8.5	202	94	90	88
風砕砂	S ₆	2.7	707	84	50	—
		4.0	432	66	55	—
		5.7	281	97	80	75
		7.3	229	96	87	84
川砂	S ₇	3.7	382	83	56	—
		4.4	362	86	67	51
		6.3	261	89	76	78
		6.8	241	92	89	90
川砂	R	2.1	659	74	54	—
		4.3	319	98	83	79
		5.0	245	95	95	92

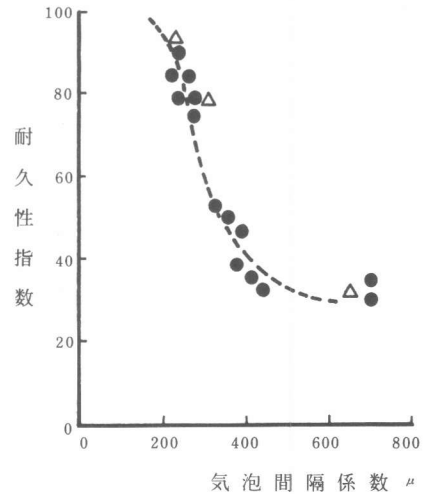


図3 高炉急冷スラグ砂を用いたコンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数との関係