

[1001] フェロアロイスラグのコンクリート用粗骨材としての利用に関する基礎的研究

○正会員 杉 田 修 一 (八戸工業大学工学部)

正会員 庄 谷 征 美 (八戸工業大学工学部)

正会員 菅 原 隆 (八戸工業高等専門学校)

1. まえがき

近年の我国におけるコンクリート用河川産天然骨材の枯渇の問題は、きわめて重大な問題となっている。細骨材および粗骨材の何れについても同様であり、この解決のために種々の方策が検討されている。碎石、砕砂および海砂等の自然産材料に依拠するもの、また、鉄の精錬過程から排出されるスラグの有効利用についても過去、多くの研究が蓄積、推進され、利用についての指針〔4〕も提示されていることは周知の通りである。また、近年、コンクリート構造物の解体によって生ずるコンクリート廃棄物の量も年々多くなり、単なる廃棄物としてばかりでなく、有効利用の一環としてコンクリート用骨材として再生を計る研究も活発に行なわれている。

これら産業副産物の一つとしての非鉄金属の精錬時に排出される非鉄金属スラグをコンクリート用骨材として有効利用を計る研究が活発に行なわれるようになってきた。細骨材〔2〕および粗骨材の何れについても研究されているが、本論文においては、フェロアロイスラグとして、乾砕処理されたフェロクロムスラグ、風砕処理および乾砕処理されたフェロニッケルスラグを粗骨材として使用したコンクリートの物性について、短・長期的試験、凍結融解試験等を行なったので、その成果を取りまとめて報告する。

2. 実験概要

2. 1. 使用材料

使用したフェロアロイスラグの化学成分を表-1に示し、それらの物理的性質を表-2に示す。表-2には比較用粗骨材として用いた砂利および碎石（以下においてSGと記す）、細骨材（以下においてRSと記す）として用いた川砂の性質も併せて示している。

各スラグの特徴を述べる。Crは化学成分とSiO₂、MgOを30%強、Al₂O₃20%強、T.Crを3%含有しており、形状はSGに類似しているが、表面には比較的大きな気泡が観察されるが、組織は固く、物理的性質もSGに近い。KGは化学成分としてSiO₂50%強、MgO34%、T.Fe6%弱含有しており、形状はCrを比較するとやや悪く、不規則性が大きく、表面の凹凸が比較的大きく、微細な気泡が観察され、吸水率、すりへり減量、BS破碎値および安定性の何れも比較的大きな値を示している。HGは化学成分としてKGとほぼ同様の

表-1. フェロアロイスラグの化学成分

	T.Ni	T.Fe	SiO ₂	MgO	CaO	S	T.Cr	Al ₂ O ₃
KG:フェロニッケル乾砕	0.069	5.79	53.45	33.95	0.99	0.029	0.87	2.49
HG:フェロニッケル風砕	0.055	3.46	56.05	34.20	1.09	0.061	0.84	2.25
Cr:フェロクロム乾砕	—	1.79	31.39	32.06	4.15	0.401	2.98	22.53

表-2. 使用骨材の物理的性質

骨材の種類及び記号の説明		比重	吸水率 (%)	FM	単重 (kg/ℓ)	すりへり (%)	BS破砕 (%)	安定性 (%)
粗骨材	RG:川砂利	2.66	1.06	6.78	1.66	19.8	13.8	7.8
	SG:砕石 (輝緑岩)	2.95	1.11	7.10	1.76	21.9	13.6	4.9
	SG:砕石 (安山岩)	2.70	0.62	7.05	1.65	14.0	—	0.5
	KG:フェロニッケル乾砕	2.72	2.42	6.75	1.56	32.2	23.7	7.8
	HG:フェロニッケル風砕	2.73	1.61	6.30	1.36	36.3	37.4	1.4
	Cr:フェロクロム乾砕	3.06	0.84	6.79	1.87	15.9	13.6	1.0
細骨材	RS:川砂	2.58	1.10	2.51	1.70	—	—	4.8

成分を含有しているが、形状は三種のスラグ中、最も不規則で小球が数個ずつ団結したような形状を示し、物理的性質のうち、すりへり減量およびBS破砕値は最も大きく、実績率は最も小さい値を有しており、組織は比較的軟質である。

セメントは普通ポルトランドセメントおよびNaOHを添加しアルカリ度を1.2%に高めた高アルカリセメントをスラグ骨材の長期安定性を把握する目的で使用した。

混和剤はAE剤を使用した。〔1〕

2. 2. 配合

スランプおよび空気量の目標値はそれぞれ 8 ± 2 cmおよび 5 ± 1 %である。

最適細骨材率は各スラグについてVB試験により決定したが、試験練りによる目視の結果と ± 2 %の範囲で適合した。HGを除きCr、KGはSGとほぼ同程度の細骨材率となった。図-1にその例を示す。

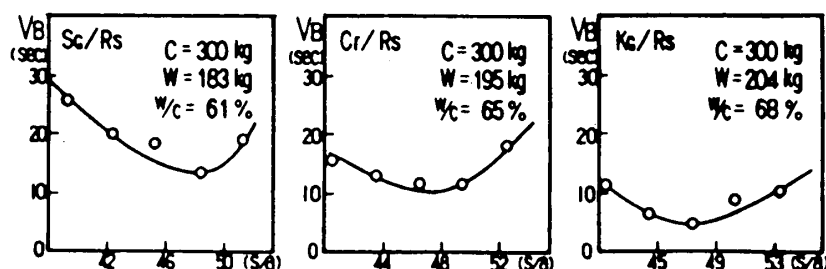


図-1. 最適細骨材率

表-3はSGの場合を基準とした各スラグ使用の場合の単位水量を比較したものである。粗骨材最大寸法はHGのみ20mm、他はすべて25mmであるが、HG使用の場合はこの最大寸法の相違を考慮してもなお単位水量の増加の著しいことが明らかであり、粒形、実績率の低さと関連すると考えられる。〔1〕

表-3. 所要単位水量比

sl.:8cm, W/C=55%, SG/RS, 単位水量 Plain 190kg/m³, AE 168kg/m³

	SG	スラグ配合比 100%			スラグ配合比 50%		
		Cr	KG	HG	Cr	KG	HG
Plain	100	107	109	116	100	106	111
AE	100	107	108	117	104	106	111

使用した配合の種類を表-4に示す。シリーズIは普通のセメントを用いたコンクリートの短期的物性を、シリーズIIはセメントとして普通・早強・高炉・フライアッシュセメントの四種類を用いたスラグコンクリートの物性変化を短期および長期(365日)にわたり観測し、シリー

ズⅢはスラグコンクリートの長期安定性の把握を主たる目的とした配合で、高アルカリセメントの使用を中心にして、水中浸漬および屋外暴露条件の試験を730日まで行なった。

2. 3. 実験項目と方法

表-4中に主たる実験項目を示している。圧縮・引張強度試験は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱形供試体、曲げ強度試験は $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱形供試体をそれぞれ作成した。弾性係数はコンプレッソメーターを使用して求めた。他にシュミットハンマーによる表面硬度、パンジットによる超音波伝播時間、乾燥収縮ひずみ、クリープひずみおよび中性化深さを測定した。〔1〕

凍結融解試験方法について述べる。供試体は $7.5 \times 10 \times 40$ cmの角柱形供試体を一種類につき三本ずつ作成し、材令14日まで標準養生を行なった。試験はASTM-C666の方法に準じて気中凍結水中融解方式で行なった。凍結(+4.4℃~-17.8℃)は

3時間以内、融解(-17.8℃~+4.4℃)は1時間以内となるようにセットし1サイクルかけた後、質量、共振周波数および超音波伝播時間を測定した。これらの値を基準として30サイクル毎に試験槽内における供試体の位置、上下を代えて300サイクルまで測定した。〔3〕

3. 実験結果

3. 1. フレッシュコンクリートの性質

1) 凝結時間

練り上りコンクリートを21℃の室内においてプロクター貫入抵抗試験を行なった。

SG使用の場合、W/C=40%で始発6h-09m、終結7h-50m、W/C=70%でそれぞれ6h-45m、8h-15mであったが、各スラグを使用した場合もこれと大差ない結果が得られたので、骨材成分とペースト中のアルカリ成分などとの反応による凝結性状の変化はないものと考えられる。〔1〕

2) ブリージング

ブリージング率の測定結果を図-2に示す。SG<Cr<KG<HGの順に大きくなっている。骨材の表面性状あるいは表-3に示されている単位水量等と関連していると考えられる。〔1〕

表-4. 配合の種類

シリーズ	配				合						実 験 項 目
	種 類	W/C			普 通	早 強	高 炉	フ ラ イ	アルカリ度		
		40	55	70					N	NH	
I	SG/RS	*	*	*	*						コンクリートの短期強度物性にスラグ骨材の及ぼす影響を調べ、併せて経済性等も検討するため、SG/RSを基準配合としてスラグの5割混入と単味使用について、材令 3日、7日、28日における圧縮強度、引張強度、曲げ強度を測定した。
	KG/RS	*	*	*	*						
	(5KG+5SG)/RS	*	*	*	*						
	HG/RS	*	*	*	*						
	(5HG+5SG)/RS	*	*	*	*						
	Cr/RS	*	*	*	*						
II	SG/RS	*	*	*	*	*					セメントを普通、早強、高炉、フライアッシュセメントと4種類を使用した場合に、スラグコンクリートの物性変化の挙動を検討するため、材令 28日、224日、365日において圧縮強度、引張強度、弾性係数を測定した。
	KG/RS	*	*	*	*	*	*				
	HG/RS	*	*	*	*	*	*				
		*	*			*	*				
	Cr/RS	*	*	*	*	*	*				
		*	*			*	*				
III	RG/RS		*		*				*	*	スラグ成分中に起因する不安定な挙動が懸念され、スラグ使用コンクリートの長期安定性を把握するため、スラグ混入率及びセメント中のアルカリ度を変えて、水中浸漬ならびに屋外暴露試験を、材令 7日、28日、91日、180日、365日、730日において圧縮強度、引張強度、弾性係数を測定した。
	KG/RS		*		*				*	*	
	(7KG+3RG)/RS		*		*				*	*	
	(3KG+7RG)/RS		*		*				*	*	
	HG/RS		*		*				*	*	
	(7HG+3RG)/RS		*		*				*	*	
	(3HG+7RG)/RS		*		*				*	*	
	Cr/RS		*		*				*	*	
	(7Cr+3RG)/RS		*		*				*	*	
	(3Cr+7RG)/RS		*		*				*	*	
	SG/RS		*		*				*	*	
	(5KG+5SG)/RS		*		*				*	*	
	(5HG+5SG)/RS		*		*				*	*	
	(5Cr+5SG)/RS		*		*				*	*	

3. 2. 硬化コンクリートの短期的性質

1) 圧縮強度

図-3に圧縮強度～セメント水比の関係を示す。水セメント比 $W/C=40\%$ の場合はSGと各スラグはほぼ同程度の圧縮強度を示しているが、 W/C の増加と共にSGに比較してそれは低下している。更に、圧縮強度 σ_c を単位セメント量 C で除した値 σ_c/C を求め、SG使用の場合を基準

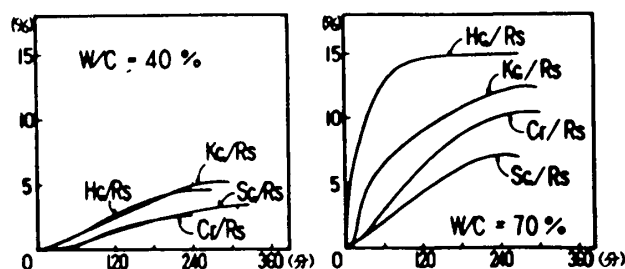


図-2. フリージング率

として比較したものが表-5である。これによれば、骨材間の差異が比較的明瞭に示されているといえる。この格差は骨材自身の性質と図-2に示されているようなフリージングの影響が大きいと考えられる。〔1〕

2) 引張強度および曲げ強度

図-4に脆度係数～圧縮強度の関係を示す。SGの場合と比較してCrの場合が比較的脆度係数が小さく、他のスラグの場合はSGと同程度と考えてよい。

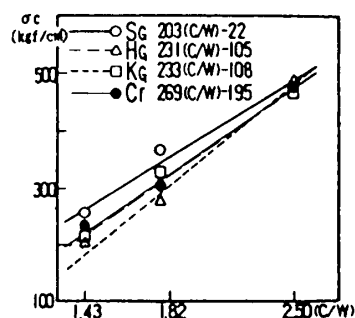


図-3. 圧縮強度～セメント水比

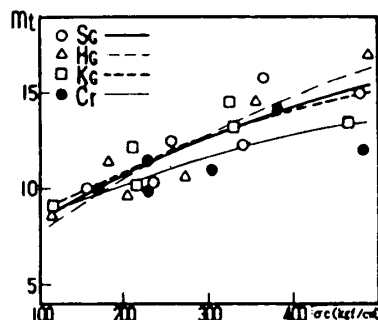
図-5に圧縮強度/曲げ強度～圧縮強度の関係を示す。CrはSGとほぼ同程度の曲げ強度と考えてよいが、KGおよびHGはSGに比較して10～20%小さい。〔1〕

表-5. 圧縮強度・単位セメント量比

W/C	40%	55%	70%
SG	100	100	100
Cr	94.4	77.4	86.3
KG	85.0	81.0	76.8
HG	85.5	62.5	67.8

3) 弾性係数

$W/C=55\%$ の場合について、材令7、28、91日において測定した静弾性係数を図-6に示した。各材令においてSGに比較してCrは大きく、KGおよびHGは小さい。スラグ自身の弾性係数の相違によるものと考えられる。〔1〕



4) 乾燥収縮およびクリープ

図-7に乾燥収縮曲線、図-8にクリープ曲線を示し、何れも100日までの測定結果である。乾燥収縮ひずみは $SG < Cr < HG < KG$ の順に大きくなっているが、単位ペースト量で除して比較すると長期的にはKGが20～30%他に比べて大きく、その他の差は少ない。

クリープひずみは $Cr < SG < HG < KG$ の順に大きくなっているが、クリープ係数を求めるとKGは100日で2.4程度、SGは3となり、SGのクリープ係数より小さくなった。これはKG自身の弾性係数がSGのそれと比較してかなり低い

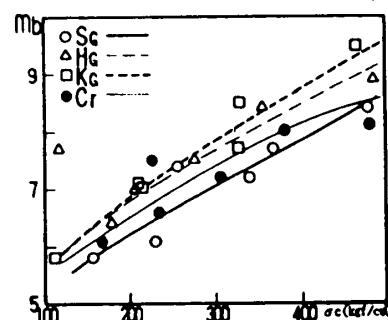


図-5. 圧縮・曲げ強度比～圧縮強度

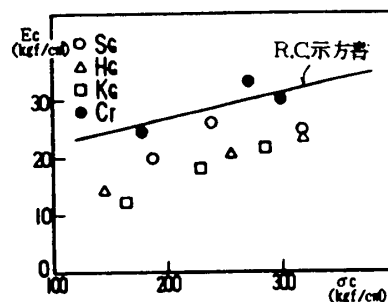


図-6. 弾性係数～圧縮強度

と想定されることによるものである。HGについてもその物理的性質から考えて同様の傾向が期待されるのであるが、KGと異なった結果となったのはHGは単位ペースト量の多いことが見かけ上あらわれていると考えられる。〔1〕

5) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験を行なったコンクリートの種類、耐久性指数および14日圧縮強度を表-6に示す。プレーンコンクリートの場合には碎石と川砂を用いたSG/RS:45P(空気量1.4%)が比較的耐久性を有しているにすぎない。他のプレーンコンクリートは凍結融解作用を受けた

直後から劣化を始め、凍結膨張による無数のひびわれを発生した。特に打込み上面はブリージングの影響と考えられるが、骨材界面におけるモルタルあるいはセメントペーストとの付着切れによる剥離が数多く見られた。AEコンクリートの場合には、このような現象は300サイクルの試験終了後においても殆ど観察されず、十分な耐久性を有していることがわかる。

表-7には実験を行なった供試体の中から12種の配合について、300サイクル試験後の供試体を切断し顕微鏡観察の結果から求めら

れた空気量、比表面積および気泡間隔係数の計算結果を示している。

図-9には耐久性指数と気泡間隔係数の関係が示されている。この図からは気泡間隔係数を300 μ m以下とすることにより、耐久性指数を90%以上とすることができ、十分耐久的なコンクリートが得られることがわかる。

図-10には耐久性指数と空気量の関係が示されている。この図からは空気量2.5%以上のAEコンクリートとすることにより、90%以上の耐久性指数が得られ、凍結融解作用に対して十分耐久的なコンクリートの得られることを示している。〔3〕

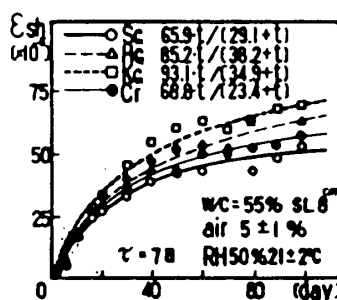


図-7. 乾燥収縮ひずみ

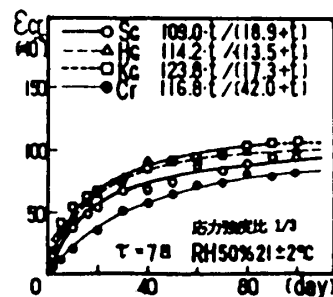


図-8. クリープひずみ

表-6. 凍結融解試験用コンクリート

コンクリートの種類	W/C (%)	air (%)	DF (%)	σ14	コンクリートの種類	W/C (%)	air (%)	DF (%)	σ14
SG/RS	45P	1.4	44	396	HG/RS	45P	1.2	15	471
	55P	1.8	17	284		55P	1.5	8	337
	55AE	4.3	100	294		55AE	2.8	100	303
	55AE	6.2	99	261		55AE	4.8	90	319
	65AE	6.3	100	175		65AE	5.7	101	209
KG/RS	45P	0.9	15	402	(5HG+5SG)/RS	55AE	4.3	100	297
	55P	1.0	17	281					
	55AE	2.0	99	282					
	55AE	5.3	100	296					
	65AE	5.8	103	174					
(5KG+5SG)/RS	55AE	3.4	100	312	Cr/RS	45P	1.1	11	427
						55P	1.1	13	303
						55AE	3.7	95	263
						55AE	4.5	100	304
						65AE	6.0	103	186
					(5Cr+5SG)/RS	55AE	5.0	96	289

P: プレーンコンクリート
AE: AEコンクリート
DF: 耐久性指数
σ14: 14日圧縮強度 (Kg/cm²)

表-7. 気泡組織に関する諸量

コンクリートの種類		気泡組織			D.F. (%)	コンクリートの種類		気泡組織			D.F. (%)
		air (%)	S.S.A (m ² /m ³)	S.F. (μm)				air (%)	S.S.A (m ² /m ³)	S.F. (μm)	
SG/RS	45P	1.44	10.1	881	44	Cr/RS	45P	0.97	10.3	1032	11
	55P	1.01	14.5	694	17		55P	3.40	12.5	479	13
	55AE	3.53	21.9	254	100		55AE	2.32	30.7	226	95
	55AE	4.37	38.9	130	99		55AE	5.19	36.4	133	100
KG/RS	55AE	2.55	27.3	249	99						
	55AE	2.52	14.4	476	100						
HG/RS	55AE	4.06	23.2	244	100						
	55AE	4.73	31.6	167	90						

S. S. A: 比表面積
S. F.: 気泡間隔係数
D. F.: 耐久性指数

4. 結論

以上の実験により得られた結論をまとめると次のようになるであろう。

1) 使用した非鉄金属スラグの化学成分は、高炉スラグのそれと比較して、 MgO 、 SiO_2 、 $T.Fe$ は多く、 CaO が少なく、 Al_2O_3 はフェロニッケルは少なく、フェロクロムは多い。

2) 使用したスラグの化学成分は、セメントの凝結時間に影響しない。

3) 高水セメント比になるにしたがい、各スラグ間のブリージング特性に差が生じ、碎石に比べて何れも大きい。

4) 圧縮強度は低水セメント比においては骨材間の差はあまりないが、高水セメント比においてはその差が明瞭である。さらに単位セメント量当りの圧縮強度で比較すると、低水セメント比においても骨材間の格差があり、何れも碎石に比べて低い。

5) 静弾性係数はフェロクロムが最も高く、 $R.C.$ 示方書の規定とよく一致するが、他は約30%程度小さい。

6) 凍結融解抵抗性は従来から、気泡間隔係数が $250\mu m$ 以下のAEコンクリートとすることにより耐久性が得られるといわれているが、本実験においてもほぼこれと同様の結論が得られ、このようなAEコンクリートとすることにより、非鉄金属スラグコンクリートの場合十分耐久的なコンクリートとすることができる。

7) 使用したスラグの実用性については長期試験の結果を勘案し、判断すべきものとする。

なお、スラグのエージング効果、スラグコンクリートの長期的性質等についても結果を得ているが紙面の都合で割愛し、別の機会に稿を改めて報告したい。

参 考 文 献

〔1〕 杉田修一、庄谷征美、村井浩介、フェロアロイスラグを粗骨材として用いたコンクリートの諸性質について、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部、p. p. 9-10、昭和60年9月

〔2〕 秋山淳、山本泰彦、コンクリート用細骨材としてのフェロニッケルスラグの利用、土木学会論文集V、No 366/V-4、p. p. 103-112、1986-2

〔3〕 菅原隆、庄谷征美、杉田修一、非鉄金属スラグコンクリートの耐久性について、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第5部、p. p. 437-438、昭和61年11月

〔4〕 土木学会、高炉スラグ碎石コンクリート設計施工指針(案)、昭和53年5月

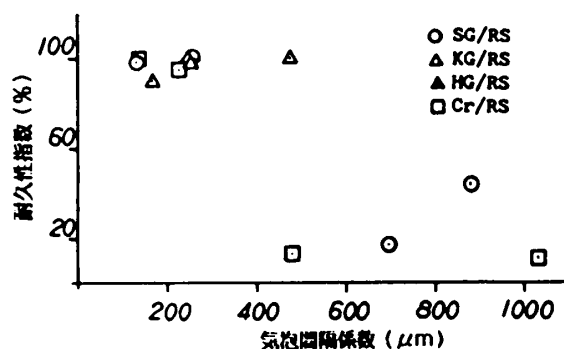


図-9. 耐久性指数-気泡間隔係数

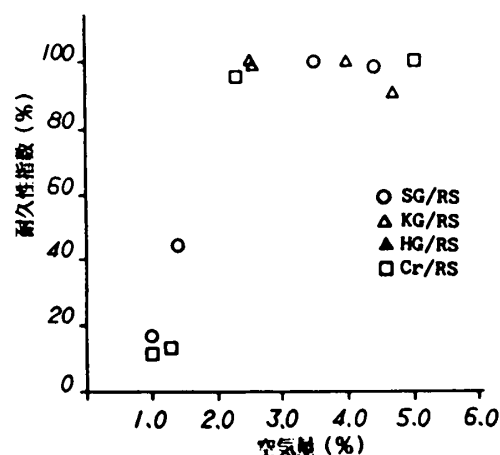


図-10. 耐久性指数-空気量