

論文

[1051] 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質

森野 奎二^{*1}・渕上 榮治^{*2}・服部 裕治^{*3}・吉兼 亨^{*4}

1. はじめに

スラグがコンクリート用骨材として、JIS化されているのは、高炉スラグ粗骨材・細骨材およびフェロニッケルスラグ細骨材の3種類である。製鋼スラグについては不安定な鉱物相から構成されているので、コンクリート用骨材として不適当とされている。しかし、近年電気炉製鋼法の設備ならびに操業方法の改善が進んだ結果、酸化スラグについては、従来問題視された不安定鉱物相の含有が全体として解消の方向にある。

そこで筆者らは、電気炉酸化スラグをコンクリート用細骨材として利用することを試みた。電気炉製鋼スラグにもいろいろなものがあるが本報告では、その付加価値を高めるために球状化した電気炉酸化スラグについて検討したものである。

2. 球状化した電気炉酸化スラグについて

2.1 製造方法

電気炉製鋼スラグはその発生過程により、酸化精錬期に生成する酸化スラグと還元精錬期に生成する還元スラグとに分けられる。本研究では前者の酸化スラグを既に実用化されている方法で球状化したものを使用した[1]。このスラグ細骨材の製法は、電気炉より排出される熔融状態の酸化スラグを高速回転する羽根付きドラムに注入し、はじき飛ばされたスラグは表面張力により球状化し、ミストスプレーによって雰囲気温度を下げて球状のまま固化させる方法である。これを10mmのふるいにかけて、ふるい下を製品とする。以下これを粒化スラグと称する。

2.2 粒化スラグの特徴

(1) 形状・粒度分布

粒化スラグには粒径2.5mm以上の中にはやや角張ったものが見られるが、写真1に示すように、ほとんどのものが球形である。その表面にはひびわれは全くみられず、川砂と同等もしくは、それ以上の微細な凹凸が存在し、セメントとの付着性が良い。粒度分布は JIS A 5011 5mm高炉スラグ細骨材の規格範囲内にある[2]。

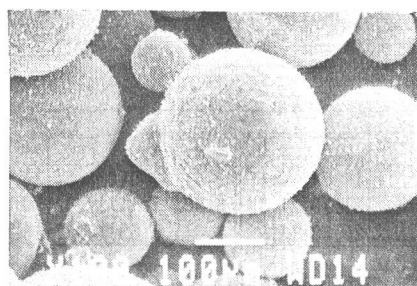


写真1 粒化スラグの外観

(2) 化学組成

粒化スラグの化学組成の測定結果を表1に示す。また $f.CaO$ (遊離石灰)と $f.MgO$ (遊離マグネシア)については、製造直後の粒化スラグについて3ロット分析したが、その他はこれより $f.CaO$ 、 $f.MgO$ が残存しやすい酸化徐冷スラグについて分析を行い、その結果を表2に示す。表では、エ

*1 愛知工業大学教授 工学部土木工学科、理博(正会員)

*2 中部鋼鉄(株)総合企画室事業推進チーム専門部長

*3 中部鋼鉄(株)総合企画室事業推進チームスラグ開発グループ

*4 大有建設(株)常務取締役技術本部長、技術士(正会員)

ージングを全く行っていないにもかかわらずf.CaO、f.MgOはほとんどのものが0.1%以下である。

(3) 鉱物組成

粒化スラグの化学組成ならびに粒径の違いによる鉱物組成の違いの有無、単粒子内部の組織の均一性などを調査した。試料は、次のような基準で選んだ。その化学組成を表3に示す。

イ) スラグ量が少ないもの(T.Feが高いもの; No.1) ハ) 塩基度(CaO/SiO₂)が高いもの(No.3)

ロ) スラグ量が多いもの(T.Feが低いもの; No.2, No.3) ニ) CaO、MgOが多いもの(No.2, No.3)

なおT.Fe(全鉄)とは、下記に示すような粒化スラグ中の構成鉱物の鉄分とガラス質部分の鉄分を鉄換算で合計した含有率である。

微細組織を反射型光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、X線マイクロアナライザーで、鉱物組成分析をX線回折装置で行った。その代表例として試料No.1のものを写真2、図1に示す。その結果、次のことが確認できた。

① 単粒子の表面と中心部における鉱物組織にほとんど差はなく、微細結晶とガラス質の均一な混合組織になっている。異なる粒子においても同様であった。

② 全試料に共通して存在する構成鉱物は、MgOを含んだWustite(FeO)、およびMgOを含んだMagnetite(Fe₃O₄)、Iron Chromite(FeO·Cr₂O₃)、Magnesio Ferrite(MgO·Fe₂O₃)および非晶質スラグであり、試料により含まれ方に違いが認められる鉱物はRankinite(3CaO·2SiO₂、試料No.1, No.3)、Gehlenite(2CaO·Al₂O₃·MgO·SiO₂、試料No.3)およびMelilite(4CaO·Al₂O₃·MgO·3SiO₂、試料No.2)である。したがって、不安定鉱物の存在は認められなかった。

表1 粒化スラグの化学組成の分布

	化 学 組 成 (%)												
	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	Total	T.Fe
平均値	19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.40	1.97	0.42	0.332	0.030	97.77	30.26
最大値	25.39	21.86	6.87	7.41	31.54	44.69	15.21	3.03	0.70	0.472	0.084	98.51	44.25
最小値	10.97	8.20	4.36	2.04	13.00	9.88	4.06	1.27	0.25	0.198	0.008	96.64	20.56
標準偏差	3.38	2.99	0.72	1.44	4.91	8.50	3.08	0.37	0.12	0.065	0.020	0.59	9.42

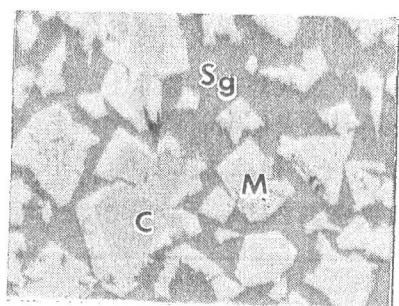
試料数; 22、試料採取期間; 3ヶ月

表2 酸化スラグの
f.CaO, f.MgO(wt%)

種類	試料No.	f.CaO	f.MgO
粒化スラグ	1	0.013	0.002
	2	0.050	0.001
	3	0.062	0.001
酸化徐冷スラグ	1	0.105	0.002
	2	0.056	0.003
	3	0.046	0.001
	4	0.049	0.001
	5	0.046	0.001
	6	0.101	0.001
	7	0.060	0.001
	8	0.084	0.002
	9	0.076	0.002
	10	0.111	0.001
平均値(n=10)		0.073	0.002

表3 鉱物組成調査用粒化スラグの化学組成

	化 学 組 成 (%)												
	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	Total	T.Fe
No.1	15.64	8.92	4.61	2.04	31.54	28.21	4.89	1.91	0.25	0.310	0.041	98.36	44.25
No.2	21.19	21.86	6.53	7.41	17.82	9.88	10.71	2.02	0.57	0.304	0.011	98.30	20.76
No.3	25.39	13.96	6.04	5.53	14.37	13.42	13.11	1.95	0.57	0.393	0.023	97.74	20.56



反射型光学顕微鏡写真 X500
M: Magnetite, C: Iron Chromite,
Sg: スラグ(非晶質)

写真2 粒化スラグの微細組織

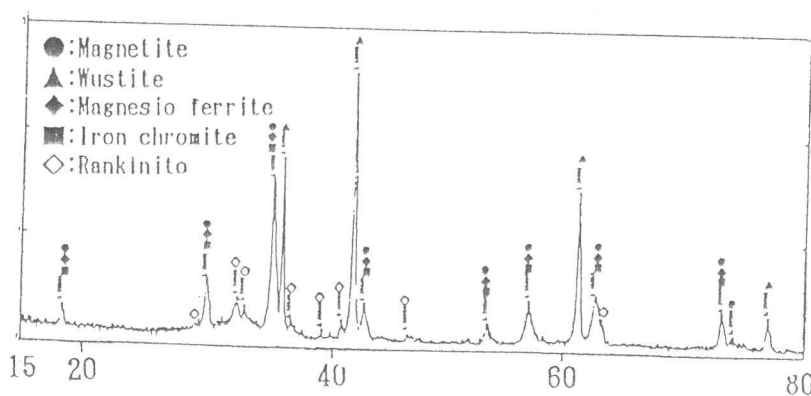


図1 粒化スラグのX線回折図

(4) 比重・吸水率

粒化スラグの比重・吸水率などの測定結果を表4に示す。粒化スラグの比重は含有鉄分に支配され、一般骨材よりかなり大きい[2]。比重が大きいことが不利になる場合があるが、重量コンクリートなどがたやすく得られる利点もある。

(5) 溶出試験

有害物質の溶出試験を環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる有害重金属等の検定方法」に定められた方法で行ったが、いずれの値も規制基準値よりはるかに小さい値となっており問題ない[2]。

(6) 硬さ試験

ビッカース硬さの測定結果は755(方解石109、正長石795)であった。モース硬さでは6程度で正長石と同じ硬さであり、様々な鉱物によって構成される天然の骨材より硬めである[2]。

(7) 水浸膨張試験

製造1週間後の粒化スラグを用いて80℃水浸膨張試験(JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグ 附属書2 鉄鋼スラグの水浸膨張試験方法)を行った。その結果、膨張は全く観察されなかった。このことは化学組成や鉱物組成からもわかるように不安定鉱物をほとんど含んでいないためであろう。

(8) アルカリシリカ反応性試験

アルカリシリカ反応性の有無を確認するため、JIS A 5308 レディーミクストコンクリート 附属書8 骨材のアルカリシリカ反応性試験(モルタルバー法)を行った。粒化スラグのほかに、天然骨材として天然珪砂、大井川川砂を使用し比較した。試験結果は材齢1年で膨張率0.01%程度であり、非反応性の天然骨材とほぼ同じ挙動を示し、アルカリ反応性のない骨材であると認められた。

表4 粒化スラグの物理的性質の分布

	飽乾比重	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)	実積率 (%)	粗粒率
平均値	3.52	3.65	1.30	2.42	68.6	3.03
最大値	3.69	3.80	2.94	2.60	72.6	3.39
最小値	3.27	3.34	0.66	2.24	63.5	2.55
標準偏差	0.10	0.14	0.52	0.10	1.9	0.19

試料数; 22、試料採取期間; 3ヶ月

3. コンクリート強度試験

3.1 天然骨材との比較試験

粒化スラグを細骨材としてコンクリート供試体を作製し、曲げおよび圧縮強度を測定した。なお、比較のため大井川川砂も使用した。粒度は JIS A 5011 5mm高炉スラグ細骨材規格範囲の中央の粒度に調整した。配合を表5に、圧縮強度試験結果を図2に、曲げ強度試験結果を図3に示す。図から粒化スラグを用いたコンクリートは、最も良質な骨材の一つといわれている大井川産の川砂使用の場合と同程度の強度発現を示し、モルタルの強度試験結果[2]と合わせて、細骨材として強度上問題のないものであるということが出来る。

表5 コンクリートの配合(kg/m³)

No.	W/C (%)	s/a (%)	水	普通ポルトランドセメント	細骨材		
					粒化スラグ	大井川川砂	粗骨材 砂岩碎石
1	45	—	135	300	1297	—	1014
2	55	—	165		1243	—	972
3	45	48	135		—	915	1014
4	55	—	165		—	877	972

混和剤; ナフタリンスルホン酸・ホルマリン高縮合物塩を所定量使用

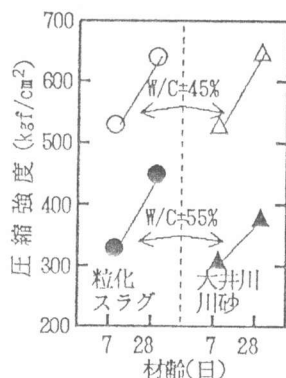


図2 圧縮強度試験結果

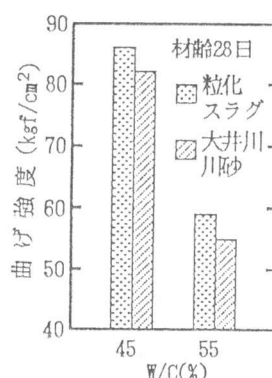


図3 曲げ強度試験結果

3. 2 天然骨材との混合骨材による試験

粒化スラグと天然骨材とを絶対容積比で 6:4 および 7:3 で混合した細骨材を使用し、コンクリートを作製した。配合とスランプ、空気量試験結果を表 6 に示す。また使用材料の性質を表 7 に、圧縮強度試験結果を図 4 に示す。図より強度発現が順調であり、モルタル強度試験結果[2]と合わせて、実用上問題ないといえる。

表 6 コンクリートの配合とスランプ、空気量試験結果(kg/m³)

No	粒化スラグ 混入率(vol%)	W/C (%)	s/a (%)	水	セメント	細骨材		粗骨材		混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
						川砂	粒化スラグ	川砂利	砕石			
1	80	58	48	153	284	341	713	407	612	0.528	12.0	4.5
2	60	58	48	162	279	348	727	388	578	0.558	17.5	4.6
3	70	58	48	160	276	261	853	385	578	0.552	19.0	4.5

混和剤；オキシカルボン酸塩

表 7 混合骨材コンクリートの使用材料の性質

材料名	産地など	比重	粗粒率	使用割合(vol%)
セメント	U社製高炉セメント B種	3.04	—	—
粗骨材 (最大寸法25mm)	町屋川・川砂利	合成	合成	40
	養老・砕石	2.64	7.30	60
細骨材	町屋川・川砂	2.58	合成	40
	粒化スラグ	3.60	2.80	60
混和剤	オキシカルボン酸塩	1.07	—	—

4. コンクリート実用化試験

4. 1 試験方法

実用化試験の方法として重交通道路においてコンクリート舗装を行った。なお比較のため粒化スラグコンクリートと天然骨材コンクリートとを図 5 のように打ち分けた。施工断面を図 6 に、コンクリートの配合を表 8 に、使用材料の内容を表 9 に示す。

1 年経過後、試験舗装区間の粒化スラグおよび天然骨材を用いたコンクリートについて、表 10 に示す路面調査とコア試験およびコアの鉱物化学的調査を行った。

4. 2 試験結果

(1) 路面調査

1 年経過後で、路面の摩耗が少なく、路面調査各項目とも粒化スラグコンクリートと天然骨材コンクリートと比較し、差はみられなかった。

表 8 実用化試験コンクリートの配合(kg/m³)

種類	配合	W/C (%)	s/a (%)	水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤	空気量 (%)
						普通骨材	粒化スラグ			
粒化スラグ	47.0	42.3	151	321	232 (30vol%)	759 (70vol%)	—	1085	0.642	5.1
天然骨材	49.0	41.7	162	331	746	—	—	1075	0.662	4.4

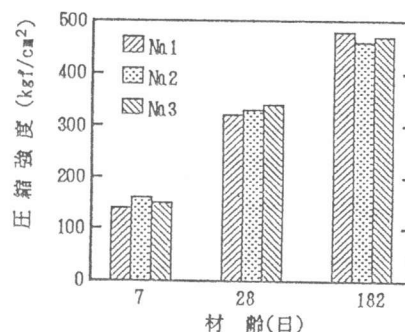


図 4 コンクリートの圧縮強度試験結果

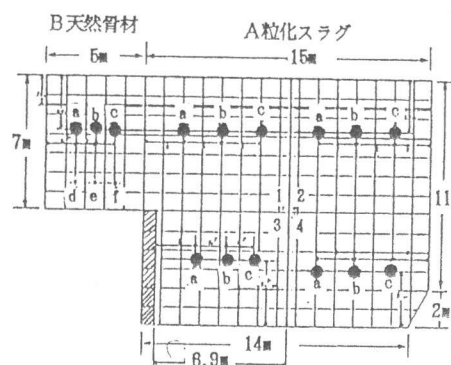


図 5 施工平面・コア採取位置図

表 9 コンクリート実用化試験に用いた使用材料の性質

材料名	産地など	比重	粗粒率	実積率 (%)	R ₂ O (%)
セメント	U社製普通ポルトランドセメント	3.15	—	—	0.69
粗骨材(最大寸法25mm)	町屋川・揖斐川 川砂利, 員弁砕石	2.66(表乾)	—	62.5	—
細骨材	粒化スラグ	C社製	3.60(表乾)	2.75	—
	天然骨材	町屋川・長良川 川砂	2.58(表乾)	2.78	—
混和剤	リグニンスルホン酸化合物 オキシカルボン酸	(粒化スラグに使用) (天然骨材に使用)			

25cm 表層(コンクリート)

5cm 上層路盤(砕石)

下層路盤

30cm (セメント安定処理)

路床

図 6 施工断面図

(2) コア試験

コアは、中性化深さ測定後、上、下部で切断し研磨仕上げのうえ、強度試験その他の物性試験供試体とし、切断片を鉱物化学的調査試片とした。

(a) 物性試験

圧縮強度、静弾性係数、単位容積質量および中性化深さの測定結果を表11に示す。施工当時から圧縮強度の経年変化を図7に示す。図のように粒化スラグコンクリートは天然骨材コンクリートよりも長期材齢の圧縮強度の伸びが大きく、504~610kgf/cm²と高い強度を示し、材齢1年以後も圧縮強度が増加する傾向がみられる。図8に粒化スラグコンクリートと天然骨材コンクリートとの応力-ひずみ曲線を示す。この図から求めた静弾性係数は、粒化スラグコンクリートのほうが天然骨材コンクリートより約33%大きい。ここで、建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準・解説に記載の $E=4300 \times \gamma^{1.5} \times \sigma_B^{0.5}$ ただし、 E ：ヤング係数(kgf/cm²)、 γ ：気乾単位容積質量(t/m³)、 σ_B ：圧縮強度(kgf/cm²)の式に、表11記載各相当値を代入して試算すると、粒化スラグコンクリートの計算値は 4.27×10^6 kgf/cm²、実測値 4.23×10^6 kgf/cm²、天然骨材コンクリートの計算値 3.40×10^6 kgf/cm²、実測値 3.17×10^6 kgf/cm²となり、よく一致する。このことから粒化スラグコンクリートの静弾性係数が大きくなった原因はコンクリート強度および単位容積質量が大きいためといえる。中性化

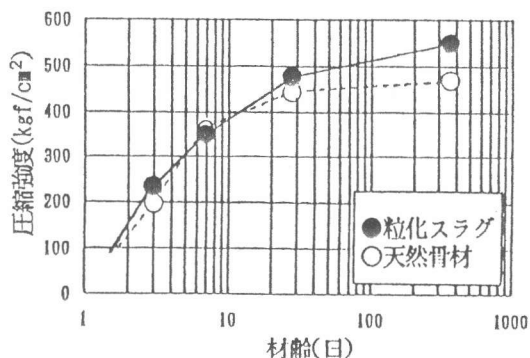


図7 コンクリート圧縮強度の増進

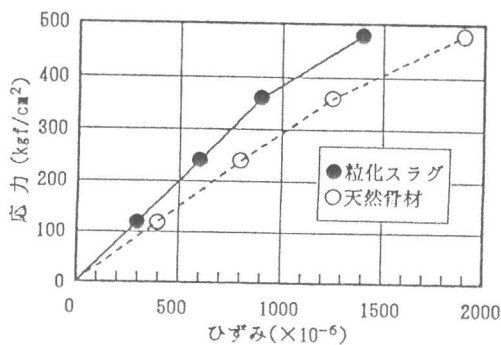


図8 応力-ひずみ曲線

表10 路面調査、コア試験の内容

種別	試験名	内容	測定数
路面調査	ひび割れ観察	①ひびわれ ②摩耗状況 ③ポンピングの有無 ④目地および隅角、端部の損傷状況	230m ²
	表面粗度	砂拡散方法	4×3=12点
	すべり抵抗	DFテスター	4×3=12点
	わだち掘れ	横断凹凸量測定	5×2=10点
コア試験	圧縮強度試験	JIS A 1107, 1108による圧縮強度測定 (φ10×20cm)	6×3=18点
	静弾性試験	土木学会、コンクリートの静弾性係数試験方法(案)(JSCE-1988)による。(φ10×20cm)	6×3=18点
	密度測定	JIS A 1107 および締め固めたアスファルト混合物の密度試験方法を準用。	6×3=18点
	中性化深さ測定	日本建築学会コンクリートの促進中性化試験方法(案)の中性化深さ試験方法による。	6×3=18点

表11 コア物性試験結果

種類	調査箇所	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	単位容積質量 (t/m ³) (湿潤状態)	中性化深さ (mm)
粒化スラグ	A-1	a 541	3.60	2.65	0.4
		b 635	3.94	2.65	
		c 629	3.66	2.63	
	A-2	a 517	4.14	2.62	0.3
		b 536	3.98	2.59	
		c 458	4.26	2.62	
	A-3	a 570	4.91	2.61	0.4
		b 514	3.56	2.58	
		c 566	5.09	2.62	
	A-4	a 444	4.54	2.60	0.2
		b 628	4.37	2.64	
		c 544	4.76	2.61	
天然骨材	B	平均値 548	4.23	2.62	0.4
		標準偏差 59.8	4.94	—	
		変動係数(%) 10.9	0.12	—	
		a 466	3.47	2.35	
		b 346	3.58	2.35	
		c 360	2.86	2.35	
	B	d 551	2.91	2.40	
		e 510	3.15	2.39	
		f 566	3.04	2.37	
		平均値 467	3.17	2.37	
		標準偏差 86.4	2.71	—	
		変動係数(%) 18.5	0.09	—	

深さは、いずれの供試体でも0.3~0.4mmであり両骨材ともほとんど中性化していないといえる。

(b) 鉱物化学的調査

実用化のための試験施工として屋外に打設してあったコンクリート舗装板から材齢1年後にコアを採取し、そのコアの内部の状態を走査電子顕微鏡によって観察した。とくに注意して観察した点は、粒化スラグが異常な膨張を起こしていないか、また、セメント水合物と反応してASRのような骨材周辺に異常なひびわれを起こしていないかなど、コンクリート骨材として長期にわたって安定な骨材であるかどうかを調べることにあった。

観察結果は、骨材およびその周辺に何ら異常はみられなく普通のコンクリートと同様な組織を呈していた。骨材とセメントペーストとの付着状態に関しても、骨材表面に微視的な凹凸があり、付着の良好な岩種(砂岩など)に相当する良好な付着状態であり、強度が順調に発現したのも、この点にあったといえそうである。これらの状態の一例を写真3に示す。

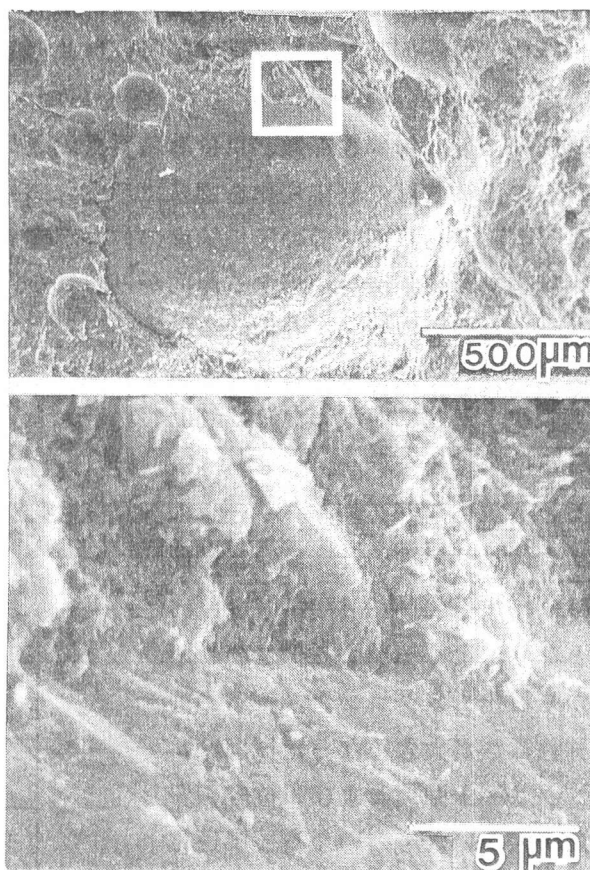


写真3 材齢1年コンクリートコアの
走査電子顕微鏡写真

5. まとめ

球状化した電気炉酸化風砕スラグ(粒化スラグ)をコンクリート用細骨材として活用するためにに行った研究の結果、以下のことが明らかとなった。

①粒化スラグの主な構成鉱物はMgOを含んだ Wustite(FeO) および Magnetite(Fe_3O_4)、Iron Chromite($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) であり、一般に問題視されている γ -Dicalcium Silicate($\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) などの不安定鉱物は認められない。また従来の電気炉酸化スラグと比較してCaO成分が少なく、遊離石灰、遊離マグネシアもほとんど含まれていない。また、水浸膨張試験やアルカリ反応性試験結果など総合的に判断して、従来から問題視されている膨張、崩壊は起こらないといえる。なおまた、有害物質の溶出も認められない。

②粒化スラグ細骨材を用いてコンクリートの実用化試験を行い、1年経過後コアを採取し、圧縮強度試験、静弾性試験、中性化深さの測定、電子顕微鏡観察を行った結果、天然細骨材を用いたコンクリートと比較し、同等あるいはすぐれている面もみられ、コンクリート骨材としての使用の可能性が認められる。が、安定性を一層確実なものにするため、さらに長期間についても検討中である。

【参考文献】

- [1]肥後桂介・出光 隆・山崎竹博：球状化した製鋼スラグのコンクリート用骨材としての利用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.161-166、1993
- [2]森野奎二・中尾仁二・淵上榮治・榊原健司：球状化電気炉酸化スラグのコンクリート用細骨材としての適用性について、建設用原材料、Vol.3、No.2、pp.27-34、1993