

電気炉酸化スラグのコンクリート用骨材への利用

UTILIZATION OF ELECTRIC ARC FURNACE OXIDIZING SLAG AS CONCRETE AGGREGATES

森野奎二*・洲上榮治**・酒井 誠***

by Keiji MORINO, Eiji FUCHIGAMI and Makoto SAKAI

1. はじめに

電気炉酸化スラグの近年の生産量は年間約 270 万トンであり、その約 90%が何らかの形で利用されている。しかし、その用途は付加価値の低い土木仮設工事用や道路用などであり、また、逆有償の形で用いられている例も多く、有効に利用されているとは言い難い。従って、付加価値の高いスラグ製品の開発が電気炉製鋼業における課題の一つとなっている。

一方、建設工事に使われる骨材は、我が国で年間約 9 億トンが必要とし、そのうちコンクリート用骨材として約 4 億トンが使われている。このように大量に使われる骨材には資源枯渇・確保、環境保護などの問題があり、従来から使用している砂利、砂、碎石などの天然資源の他に、いろいろな産業廃棄物・副産物を活用する必要がある。このような背景から、電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材とすることは有意義であり、そのための基礎的研究を数年前から実施してきた¹⁻⁷⁾。

骨材原料用の電気炉酸化スラグとしては、冷却条件の異なる 3 種のスラグ、すなわち急冷スラグ、水冷スラグ（半急冷スラグ）、徐冷スラグと、他にスラグ中の鉄分を除去した改質スラグについても同様に冷却条件の異なる 3 種類が対象となる。しかし、改質スラグについては、目下、改質水冷スラグ骨材のみである。

本報告では、これら 4 種の電気炉酸化スラグ骨材を用いて作製したコンクリートの力学的性質（強度、ヤング係数など）、耐久性（膨張率測定、外観など）、及び急冷スラグ他一部のスラグ骨材を用いて実施している長期海岸暴露実験の中間試験結果などについて述べる。

2. 電気炉酸化スラグ骨材の問題点

製鋼スラグは転炉スラグと電気炉スラグに大別され、さらに電気炉スラグは酸化スラグと還元スラグに分けられる。これらのスラグには遊離石灰 ($f\text{-CaO}$)、遊離マグネシア ($f\text{-MgO}$) あるいは γ 型ダイカルシウムシリケート ($\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) が含まれ、水和により膨張・崩壊するためにコンクリート用骨材として利用するには不相当とされてきた。

近年、このうちの電気炉酸化スラグについては製鋼法の改善がなされ、遊離石灰などの含有量が少なくなり、コンクリート用骨材として活用できる可能性が増した。しかし、実用化するには実際のコンクリートに使用したときの耐久性に対する検証が必要不可欠であり、膨張量、ひび割れ、強度などを長期間にわたって観察・測定する必要がある。

3. 電気炉酸化スラグ骨材の構成鉱物と化学組成

一般的な電気炉酸化スラグの構成鉱物を表 1 に、使用したスラグ骨材の構成鉱物を表 2 に、化学組成の一例を表 3 に示す。表 1 の遊離石灰 ($f\text{-CaO}$)、遊離マグネシア ($f\text{-MgO}$)、不安定鉱物 ($\gamma\text{-C}_2\text{S}$) などは極微量である。たとえば 61 事業所より採取した 62 試料の分析結果では、 $f\text{-CaO}$ は 0.0155-0.3685% で平均 0.1116%、 $f\text{-MgO}$ は 0.0009-0.0152%、平均 0.0037% であった。表 3 の化学組成のうち鉄分が約 30%と多いことが、この骨材の特徴の一つであり、そのために比重が大きく、また中には骨材表面の鉄分が錆びて(水酸化鉄、褐鉄鉱)、骨材表

表 1 一般的な電気炉酸化スラグの構成鉱物

主 要 構 成 鉱 物	ダイ・カルシウムシリケート相 $\beta\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)$
	ウスタイト相 (Fe, Mg, Ca, Mn)O
	カルシウムアルミネート ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$)
不 安 定 鉱 物 (微 量)	遊離石灰 ($f\text{-CaO}$)
	遊離マグネシア ($f\text{-MgO}$)
	ダイカルシウムシリケート ($\gamma\text{-}2\text{CaO}_2\cdot\text{SiO}_2$)

* 愛知工業大学工学部土木工学科教授 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

** 中部鋼鉄株式会社事業開発部長

*** 中部鋼鉄株式会社事業開発担当

面が汚れたように見える場合がある。このことは天然岩石骨材の場合でも同様で、例えば古生層のホルンフェルス化した砂岩砕石などには、そこに含まれている硫化鉄（黄鉄鉱、硫化鉄鉱など）が酸化して骨材表面が褐色になることは、しばしば見られる現象である。砂岩砕石が通常は問題なく使われているが、まれにこれを問題視することもあり、その場合と同様の対処が必要になる。一般的には問題になる場合はほとんど無いようである。

表2 使用した電気炉酸化スラグ骨材の構成鉱物

主 要 構 成 鉱 物 急 冷、 水 冷、 徐 冷、 改 質 い ず れ も 同 じ	ウスタイト (FeO)
	マグネタイト (Fe ₃ O ₄)
	マグネシオフィライト (MgO・Fe ₂ O ₃)
	アイアンクロマイト (FeO・Cr ₂ O ₃)
	スピネル鉱物 (MgFeAlO ₄)
	ゲーレンナイト (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)
不 安 定 鉱 物 (微 量)	珪酸塩ガラス
	遊離石灰 (f. CaO)
	遊離マグネシア (f. MgO)
	ダイカルシウムシリケート (γ -2CaO ₂ ・SiO ₂)

表3 使用した電気炉酸化スラグ骨材の化学組成の一例

骨材 種類	化 学 組 成 (wt%)														
	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	f. CaO	f. MgO	T. Fe
急冷	19.81	12.60	7.77	2.44	13.51	31.78	5.21	2.06	0.37	0.392	0.011	95.95	0.066	0.001	32.73
水冷	17.55	14.56	6.52	5.39	32.19	6.09	9.41	3.05	0.43	0.293	0.011	95.49	0.040	0.001	29.27
徐冷	19.31	17.22	7.67	3.93	26.71	4.15	12.14	3.32	0.42	0.325	0.014	95.21	0.078	0.002	23.70
改質	19.20	17.00	6.68	2.65	31.70	7.83	9.75	1.53	0.78	0.348	0.044	97.51	0.055	0.003	30.00

4. 電気炉酸化スラグ骨材を用いた コンクリートの強度性状

4. 1 実験方法

(1) 使用材料

電気炉酸化スラグ骨材の比重、吸水率及び粒径判定実積率の代表例を表4に示す。急冷スラグは球状を呈した細骨材のみであり、水冷、改質（水冷の鉄分を除去したもの）、スラグ骨材は細・粗骨材に破碎したものである。スラグ塊はジョークラッシャによって破碎し、1回破碎と2回破碎を行っている。粒径判定実積率は、1回破碎では粗骨材 53.3～56.3%，細骨材 49.9～53.2%，2回破碎では粗骨材 57.6～58.6%，細骨材 53.2～54.6%であり、2回破碎ではいずれもコンクリート用砕石、砕砂の基準値（砕石 55%以上、砕砂 53%以上）をジョークラッシャのみの破碎でも満たしている。更に形状を改善することは可能である。急冷スラグ（粒化スラグ）は球状を呈した細骨材であるが、表4の値は形状が悪い結果となっている。これは JIS 規格試験に使う粒径は 5-2.5mm であり、この範囲の形状は砕石のように角張っているからである。実際に使う 2.5mm 以下の粒度範囲では球形を呈しており、その実積率は 60%以上を示すものである。砂岩砕石・砕砂（ともに愛知県産）はスラグ骨材と比較するために用いた。表5はスラグ骨材の破碎及びすり減り試験結果であるが、いずれにおいても良質骨材の値を示している。

比重については前述のように含有鉄分に支配され、絶乾比重が 3.6～4.1 で、岩石骨材に比べ相当大きい。吸水率は 1.2 以下であり高品質である。

骨材粒度は表6に示すように土木学会標準粒度範囲の中央付近の粒度に調整し、砂岩砕砂は標準粒

度範囲内にある砂岩砕砂をそのまま使用した。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を、減水剤は高性能 AE 減水剤（主成分：ポリアルキルアリルスルホン酸塩）を用いた。

表4 電気炉酸化スラグ骨材の比重・吸水率
及び粒径判定実積率

骨材の種類		表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)	粒径判定実積率	
						破碎回数 (%)
急冷スラグ	細骨材	3.81	3.79	0.56	破碎なし	55.8
水 冷 スラグ	粗骨材	3.70	3.67	0.73	1	56.3
	細骨材	3.84	3.80	1.09	2	57.6
徐 冷 スラグ	粗骨材	4.08	4.05	0.64	1	53.2
					2	54.6
	細骨材	4.02	3.99	0.87	1	53.6
					2	58.0
改 質 スラグ	粗骨材	4.05	4.03	0.44	1	49.9
					2	53.2
	細骨材	4.00	3.95	1.16	1	53.3
					2	58.6
砂岩砕石	粗骨材	2.67	2.65	0.74	1	52.1
砂岩砕砂	細骨材	2.61	2.59	0.90	2	53.7
						市販製品 60.0
						市販製品 55.7

表5 電気炉酸化スラグ骨材の破碎試験
及びすり減り試験結果

試験の種類	試験条件	試験結果(%)			
		改質スラグ	水冷スラグ	徐冷スラグ	砂岩砕石
破碎試験	粒 径 15~10mm	12.6	13.4	7.2	8.9
すりへり 試験	粒度区分:C 15~5mm	14.9	16.6	15.6	12.4

注)スラグは2回破碎を行った試料を使用した

(2) 実験方法

作製したはコンクリートの配合の概略を表7に示す。モルタルの配合はコンクリートの粗骨材を除いた状態のものである。

圧縮試験は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ (モルタルは $\phi 5 \times 10\text{cm}$) の供試体を使用し、曲げ強度は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体を使用し三等分載荷とした。標準試験は 20°C 水中養生とし海岸暴露試験 ($15 \times 15 \times 53\text{cm}$ 供試体使用) は 28 日間標準養生した後に海岸に設置した。強度と同時にヤング係数(ゲージ長 60mm)も測定した。

表6 使用骨材粒度

粗 骨 材		細 骨 材	
粒度範囲 (mm)	比 率 (%)	粒度範囲 (mm)	比 率 (%)
20~15	30	5.0~2.5	10
15~10	30	2.5~1.2	20
10~5	40	1.2~0.6	25
		0.6~0.3	25
		0.3~0.15	15
		0.15~	5

4. 2 電気炉酸化スラグ骨材 使用コンクリートの強度

図1に水セメント比別、骨材別の圧縮強度試験結果を示す。細・粗骨材に同種のスラグ骨材を用いたコンクリートの強度はいずれも砂岩の場合よりも大きくなっている。処理方法の違いによる強度差は、1回破碎では水冷、徐冷、改質とも $W/C=65\%$ において若干の相違が見られるだけでその他の配合の結果ではみられない。また、図2に示すように細骨材に急冷スラグ(粒化スラグ)を使用した場合は、3処理方法とも $W/C=35\%$ で若干強度差が見られるが、その他では処理方法や破碎回数の違いによる強度差はほとんどみられない。急冷スラグ(粒化スラグ)細骨材と砂岩粗骨材の組み合わせでは、細・粗骨材とも砂岩を使用した場合よりも $14.4 \sim 9.3\text{MPa}$ 強度が増加している。

表7 コンクリートの配合の概略

水セメント比 C/W (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
25	37	148	592	598 ~ 921	1045 ~ 1591	5.92
35	39	152	434	677 ~ 1043	1087 ~ 1655	4.34
45	41	156	347	737 ~ 1136	1085 ~ 1658	3.47
55	43	160	291	789 ~ 1215	1073 ~ 1634	2.91
65	45	164	252	835 ~ 1286	1048 ~ 1595	0

注) シ-ズ2の配合は $W/C=30, 40, 50, 60\%$

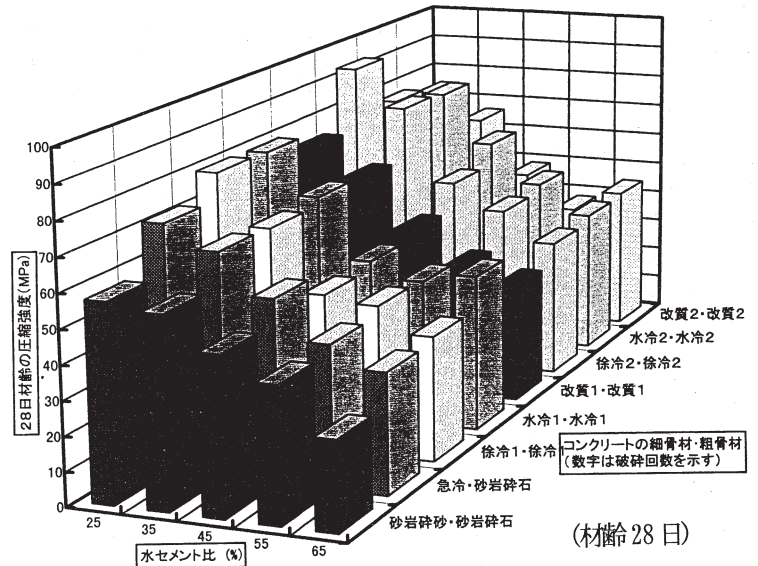


図1 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度

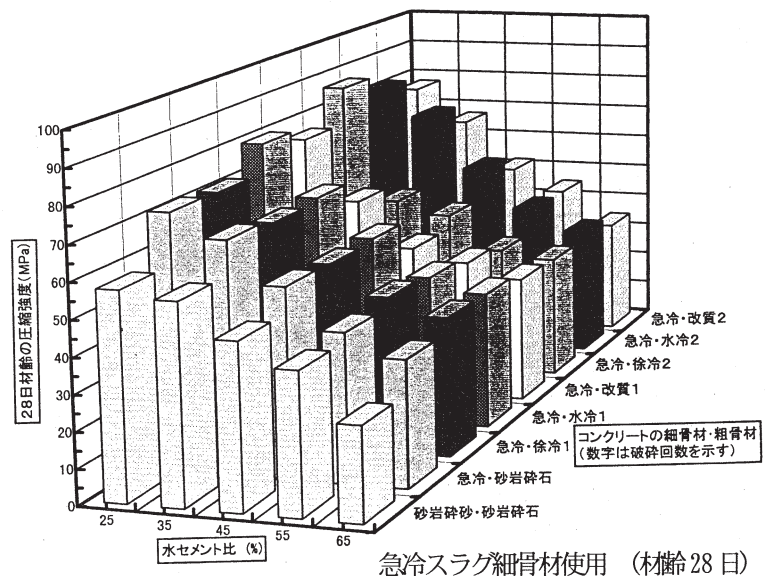


図2 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度

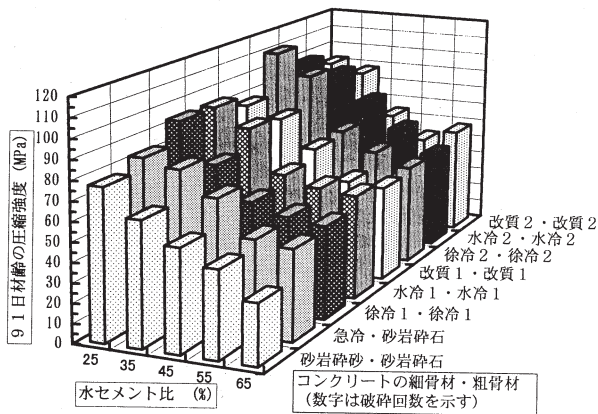


図3 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度
(材齢91日)

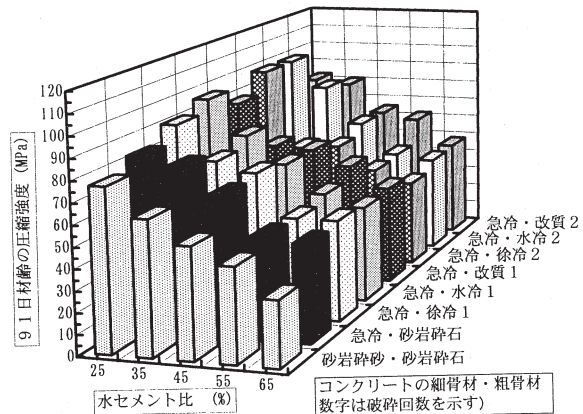


図4 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度
急冷スラグ細骨材使用 (材齢91日)

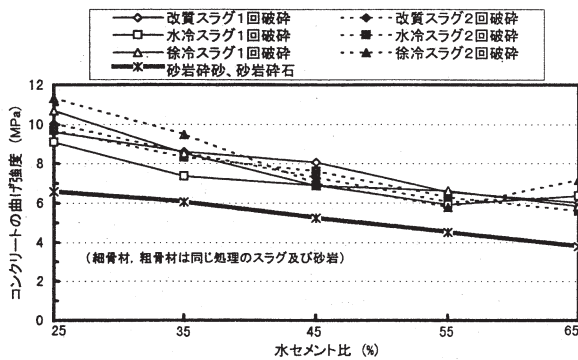


図5 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの曲げ強度
(材齢28日)

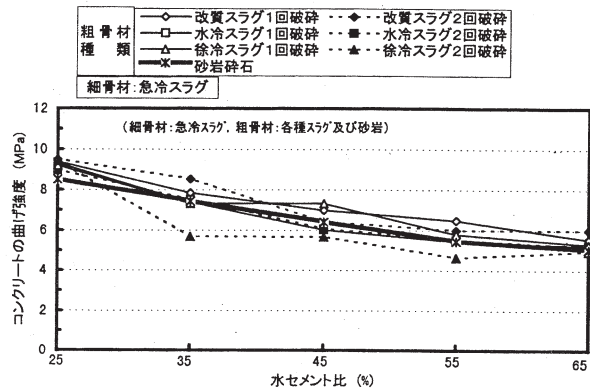


図6 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの曲げ強度
急冷スラグ細骨材使用 (材齢28日)

図3、図4に91日材齢の圧縮強度を示す。

図5は水セメント比別の曲げ強度試験結果であり、同一種類の細・粗骨材を組み合わせたコンクリートは、破碎回数の違によってスラグの種類間で強度差はみられず、また細骨材に急冷スラグ(粒化スラグ)を用いた図6の場合でも同様に3種類の粗骨材間には差はみられなかった。

図7は配合表以外に $W/C=30, 40, 50, 60\%$ の結果も加えたコンクリートの全平均圧縮強度である。図では、各スラグ種類別の強度は、1回破碎では水冷 53.0, 徐冷 53.3, 改質 55.4MPa, 2回破碎は同順で 58.1, 59.6, 59.0MPa であり、スラグの処理方法の違いによる強度差はほとんどないが、1回破碎よりも2回破碎の方が大きくなっている。ワーカビリティは1回破碎よりも2回破碎の方が良いことは自明であるが、強度上からもよいといえる。

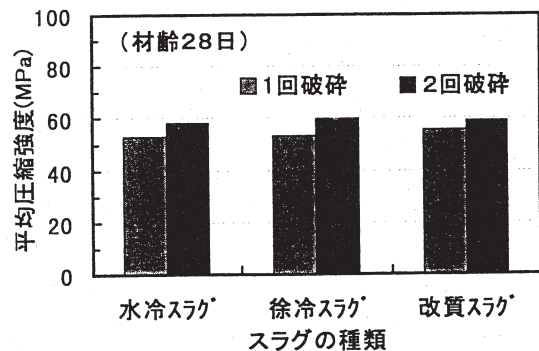


図7 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの平均圧縮強度
(材齢28日)

4. 3 普通及び高炉セメントを用いたスラグ骨材コンクリートの強度比較

普通ポルトランドセメント以外に高炉セメント（B種）を使用してモルタル及びコンクリートを作製し、その強度比較を行った。図8（28及び91日強度）に示すようには、セメントの種類間の圧縮強度比較では、スラグ骨材の種類によってその強度差を示す傾向に変動があり、概して、セメントの種類による強度差は無いといえる。細・粗骨材に同種のスラグ骨材を用いたコンクリート強度は、いずれのセメントを用いても砂岩使用の場合よりも大きくなっている。曲げ強度試験結果は図9（28日強度）のように、明らかに高炉セメント使用コンクリートの方が高い強度を示している。

スラグ骨材間のコンクリート強度比較では、高炉セメント使用ではほとんど差はないが、普通セメント使用では若干の相違が見られる。しかし、その強度順位が普通セメント使用モルタルの強度順位と一致していないので、スラグの処理方法の相違によってコンクリート強度に優劣が生じるとまではいえない。

4. 4 スラグ骨材コンクリートの強度とヤング係数の関係

図10にコンクリート強度とヤング係数の関係を示す。図では、コンクリート強度とヤング係数との間には正の相関関係がみられる。また図11に示すようにW/C=55%において骨材種類別に詳細にみると、スラグ骨材使用コンクリートのヤング係数は砂岩骨材使用コンクリートよりも大きい。さらに図中の強度とヤング係数をプロットした各点において、91日材齢ではすべての点が右上方へシフトしており、それぞれにおいて順調な伸びがみられる。

28日強度			91日強度		
記号	細骨材	粗骨材	記号	細骨材	粗骨材
□	改質スラグ	改質スラグ	■	改質スラグ	改質スラグ
△	水冷スラグ	水冷スラグ	▲	水冷スラグ	水冷スラグ
○	徐冷スラグ	徐冷スラグ	●	徐冷スラグ	徐冷スラグ
×	砂岩砕砂	砂岩砕砂	×	砂岩砕砂	砂岩砕石
*	急冷スラグ	砂岩砕石	※	急冷スラグ	砂岩砕石

(W/C:55%、2回破砕スラグ使用)

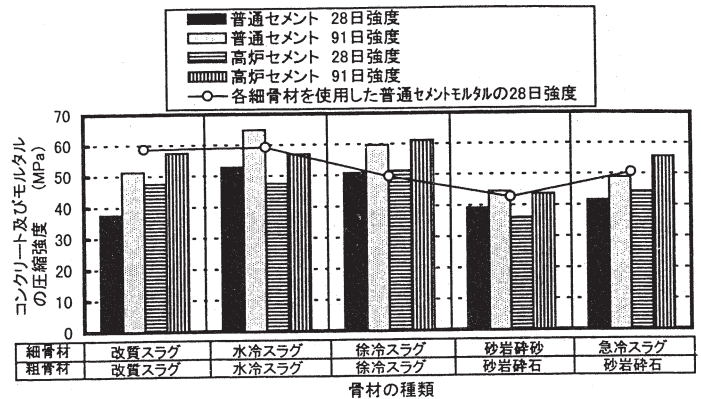


図8 電気炉酸化スラグ骨材モルタル及びコンクリートの圧縮強度比較
(W/C:55%、2回破砕スラグ使用)

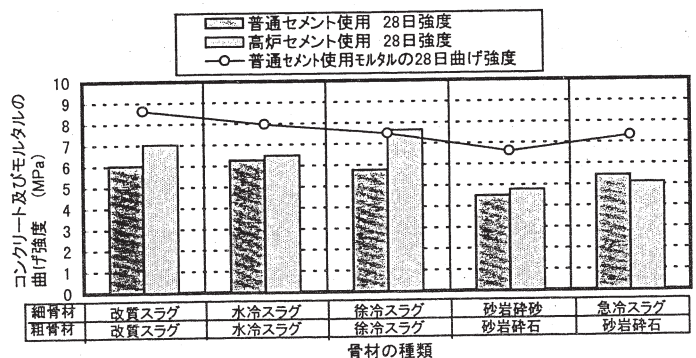


図9 電気炉酸化スラグ骨材モルタル及びコンクリートの曲げ強度比較
(W/C:55%、2回破砕スラグ使用)

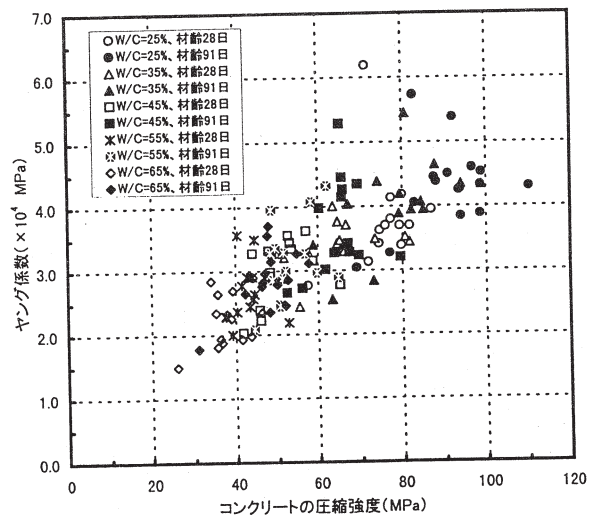


図10 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係

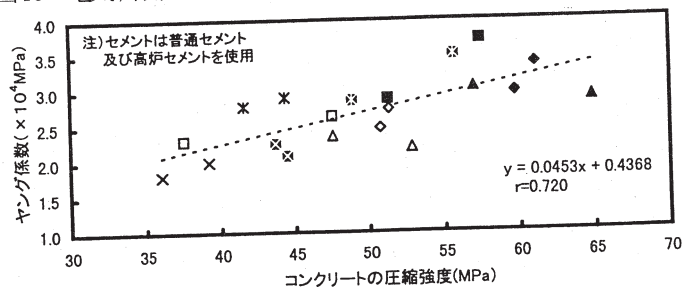


図11 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係

4. 5 スラグ骨材コンクリートの耐久性

(1) 膨張率測定

スラグ骨材 3 種の比較用として大井川川砂、瀬戸珪砂及び砂岩砕石(愛知県産)を用いた。コンクリートの長さ変化測定は、JIS A 1129 コンクリートの長さ変化試験方法に準じて行い、 $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱形供試体を用いて、ダイヤルゲージ方法により計測した。ただし、供試体の貯蔵は湿度 100% の状態(下面に水を張り、湿空中の供試体を湿布で覆う)で行った。これは、本研究ではスラグ中の不安定物質の水和による膨張をできるだけ厳しい条件で把握したいからである。

モルタルの長さ変化は、JIS A 5308 レディーミクストコンクリート、付属書 8 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法、 $4 \times 4 \times 16$ cm 供試体使用)の手法を応用した。この骨材は、水和膨張の危険性があるだけであってアルカリ骨材反応とは無縁のものであるが、膨張の危険性のチェックという点では同じであるから用いた。したがって、アルカリ(Na_2O , K_2O)を添加して Na_2O 等価量で 1.2% にする調整はしていない。モルタルの配合も骨材比

重の大きな差を考慮して、骨材/セメント比を容積比として行った。

コンクリートの長さ変化測定結果を図 12 に示す。図において、膨張の全くみられないものは、急冷スラグと砂岩、珪砂と砂岩の組み合わせである。水冷スラグと徐冷スラグの場合ではやや膨張が認められる。水冷、徐冷の両スラグ細骨材を安定な砂岩砕石と組み合わせた場合においても極微量膨張している。しかし、15 ヶ月以降では横這いになっており、これ以上の膨張はなさそうである。

図 13 のモルタルでも同様の膨張がみられており、膨張率はわずかではあるが、この両スラグにおいては、膨張傾向を示している。しかし、コンクリート同様、膨張率は低く 4 年間で 0.04% 程度以下であり、ほぼ横這いであり、ほとんど問題は無いといえそうである。なお、アルカリ骨材反応おける判定では 6 ヶ月で 0.1% の膨張がみられなければ反応性なしとしている。しかし、この値は本研究と反応メカニズムが全く異なっているので、参考にはならない。水和による膨張の判定値はないので長期の計測が必要で、さらに測定は継続中である。

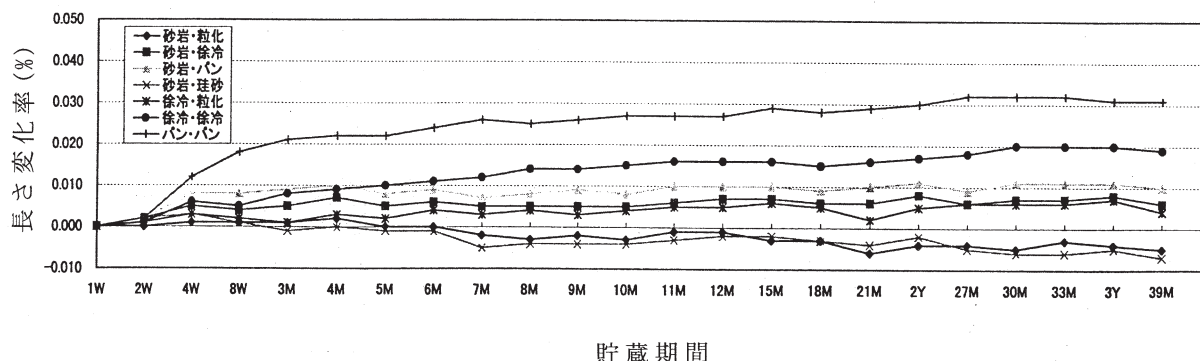


図 12 コンクリートの長さ変化測定結果

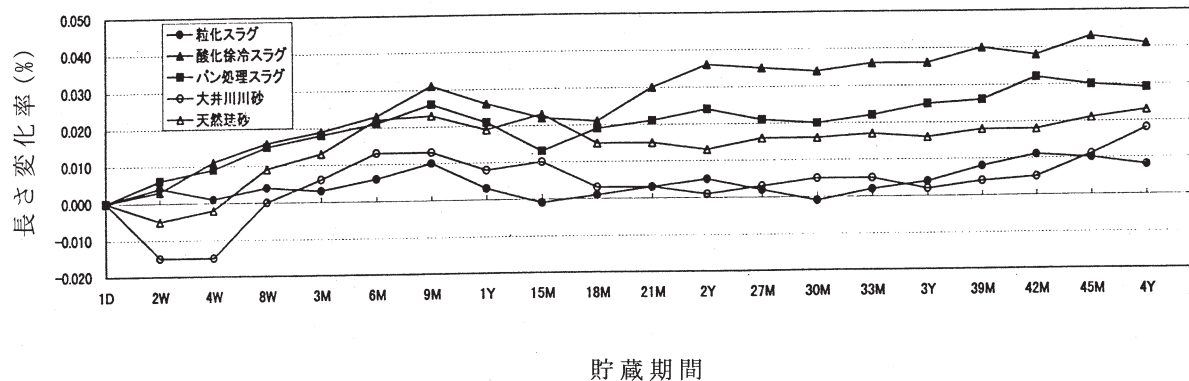


図 13 モルタルの長さ変化測定結果

(2) 海岸暴露したスラグコンクリートの状態

供試体は写真1に示すように、満潮時に海中にあり、干潮時には海上にあるような位置に設置し、海水による種々の影響を受けやすい状況にした。つまり、この設置場所は外海側で波浪の激しい所であり波による衝撃や砂による摩耗、乾湿繰返し、温度変化及び海水成分の影響などを受ける。これらの状況下にある供試体について、外観観察、内部の顕微鏡観察、強度試験を行っている¹⁾。

写真2に示すように海岸に2年間暴露したスラグ骨材使用コンクリート及びモルタル(写真3)にひび割れ、剥離などの異常は認められていない。波浪に曝されていない箇所には写真4に示すように海洋生物が著しく付着しており、生物に有害な物質はスラグ骨材から溶出していないといえる。

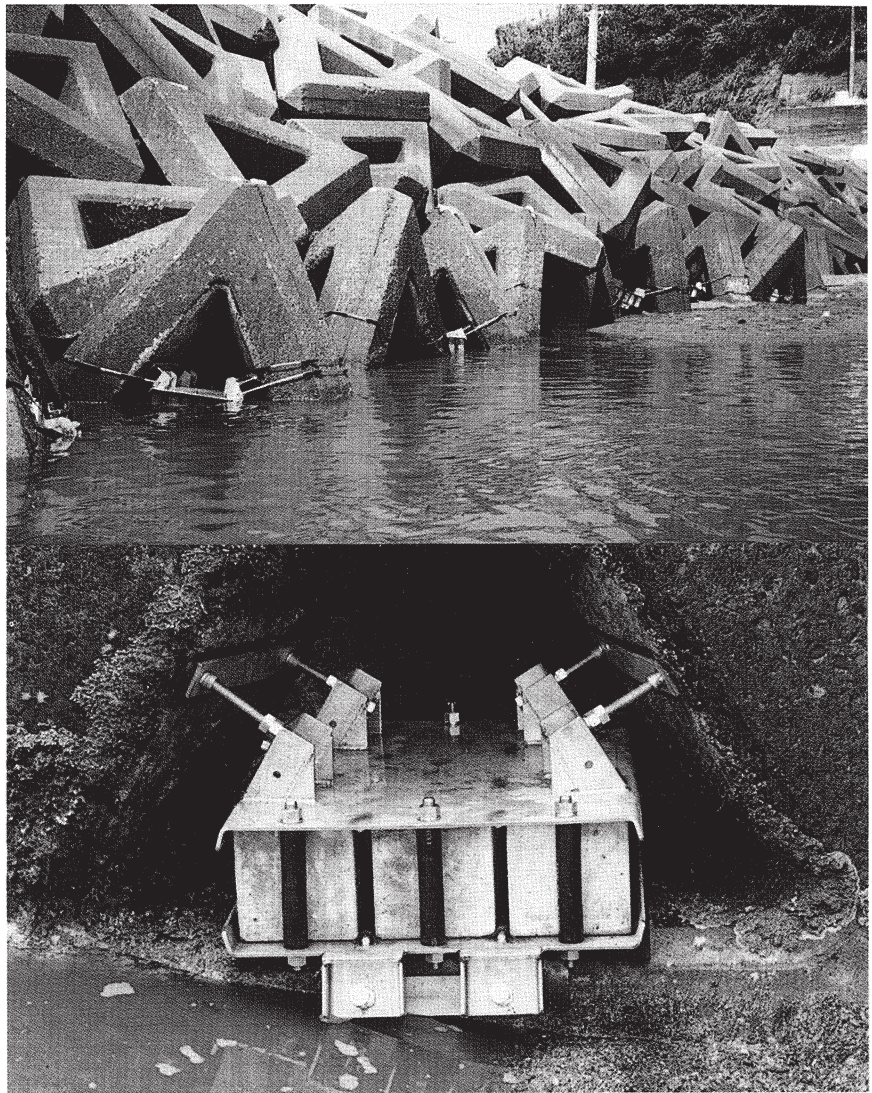


写真1 電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの海岸暴露状況



破断面



外観

写真2 海岸暴露2年後の電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの状況

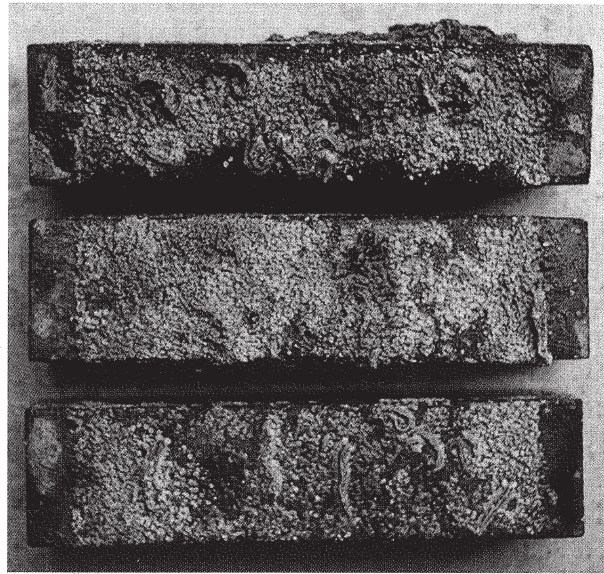
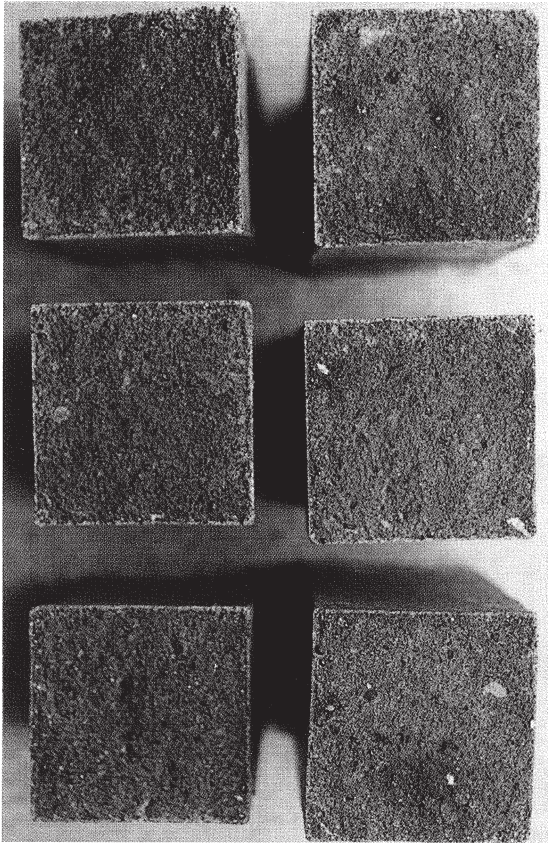


写真4 海岸暴露2年後の電気炉酸化スラグ骨材使用モルタルに付着した海洋生物

写真3 海岸暴露2年後の電気炉酸化スラグ骨材使用モルタルの破断面

5. まとめ

冷却条件の異なる4種の電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として用いたときの強度や耐久性を調べた結果では、以下のことが明らかとなった。

(1) 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの強度は、急冷、水冷、徐冷及び改質スラグのいずれにおいても、岩石骨材使用コンクリートに劣らない。

(2) 短期間の結果からの推論ではあるが、電気炉酸化スラグ骨材のうち急冷スラグ骨材を用いたコンクリートの耐久性は、強度及びヤング係数の経時変化、膨張量測定結果、外観及びびびり割れ観察結果から判断して、問題はないといえる。その他のスラグ骨材においては、力学的性質は問題ないが、耐久性に関しては安全性確保のために長期計測を続けることが望ましい。

謝辞：本研究の一部は（財）鉄鋼業環境保全技術開発基金の平成7年度及び8年度助成金によった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの耐海水性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、No. 1、pp. 355-360 (1997)
- 2) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの耐久性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 393-398 (1996)
- 3) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：冷却方法の異なる各種電気炉酸化スラグのコンクリート用骨材としての適用性、セメント・コンクリート論文集、No. 49、pp. 114-119 (1995)
- 4) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：電気炉酸化スラグのコンクリート用骨材としての適用性について、セメント協会、セメント・コンクリート論文集、No. 48、pp. 310-315 (1994)
- 5) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：電気炉酸化急冷および徐冷スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質、資源・素材学会、建設用原材料、Vol. 4、No. 1、pp. 2-9 (1994)
- 6) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質、コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp. 319-324 (1994)
- 7) 森野奎二、淵上榮治、服部裕治：球状化した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、資源・素材学会、建設用原材料、Vol. 3、No. 2、pp. 27-34 (1993)

(1998年1月13日受付 2月12日受理)