

論文 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

森野 奎二^{*1}・渕上 榮治^{*2}・服部 裕治^{*3}

要旨：電気炉酸化スラグを海洋コンクリート用骨材として利用することを目的として、耐海水試験が実施されている。実験では、電気炉酸化スラグ骨材のうちの、急冷および水冷スラグ骨材を用いてモルタルおよびコンクリートを作製し、それらを波浪の激しい海岸に設置して、外観観察、内部の顕微鏡観察、中性化、強度およびヤング係数の経時変化を調べた。そして、従来より問題視されている遊離石灰や不安定鉱物などによる変状やその他の耐久性上の問題が認められるかどうかについて検討した結果、材齢1年の途中経過では、変状は認められなかった。

キーワード：電気炉酸化スラグ、骨材、海洋コンクリート、耐海水試験、強度

1. はじめに

筆者らは、電気炉酸化スラグをコンクリート用骨材として利用することを試みてきた[1~6]。その結果、実用化の可能性があることが明らかとなった。その用途としては、電気炉酸化スラグ骨材の比重や硬度の大きいことを活かして、消波コンクリートブロックをはじめ、護岸、漁礁などの海洋コンクリートへの利用が有効であると考えられる。そこで、本研究ではこの骨材の海水に対する抵抗性を調べることを目的とした。実験では、海岸の波打ち際にこの骨材を用いたモルタルおよびコンクリート供試体を曝露して、外観観察、内部の顕微鏡観察、中性化、強度およびヤング係数の経時変化を調べた。そして、従来より問題視されている遊離石灰や不安定鉱物などによる変状やその他の耐久性上の問題が認められるかどうかについて検討した。

2. 試験に用いた電気炉酸化スラグについて

2. 1 試験に用いた電気炉酸化スラグの種類

電気炉酸化スラグは、冷却条件の違いにより表-1のように急冷、水冷、徐冷の3種類に分類してきたが[5]、今回はこれらに加えて改質水冷スラグを用いた。これはスラグ中の金属鉄をなくすために溶融スラグ中に吹酸し、金属鉄を強制酸化させたうえ水冷処理したものである。なお冷却方法によって改質水冷スラグ、改質徐冷スラグなどができるが、今回は改質水冷スラグ（以下、改質スラグという）を試験に用いた。

表-1 スラグの冷却条件の違いによる分類

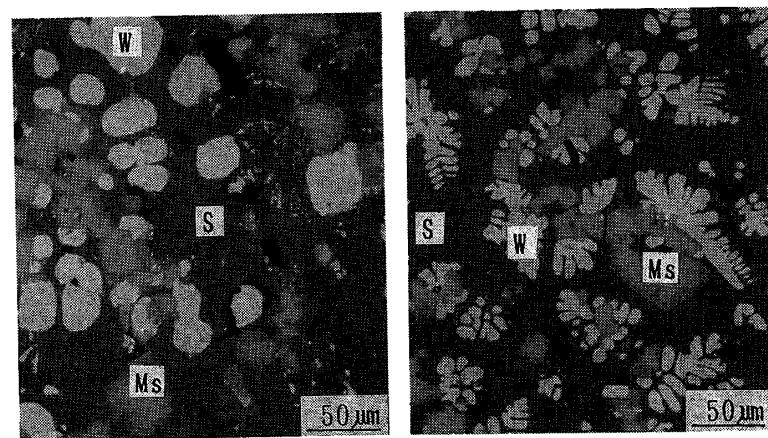
スラグの種類	冷却条件	骨材の種類	備考
電気炉急冷スラグ	溶融スラグ状態から約200℃まで急冷したもの	細骨材	
電気炉水冷スラグ	赤熱状態(約800℃)から急冷したもの	細骨材・粗骨材	改質したもの→改質水冷スラグ
電気炉徐冷スラグ	溶融スラグを約200℃まで自然冷却したもの	細骨材・粗骨材	改質したもの→改質徐冷スラグ

*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)事業開発部スラグ製品開発担当部長

*3 中部鋼鉄(株)事業開発部スラグ製品開発担当

2. 2 鉱物組成
改質スラグの鉱物組成について金属顕微鏡観察、EPMAによる鉱物相の定量分析、X線回折法による分析を行った。用いたスラグの化学組成を表-2に、金属反射顕微鏡観察結果を写真-1に、EPMAによる鉱物相の定量分析結果を表-3に、X線回折図を図-1に示す。この結果より、主要な鉱物組成は Wustite(FeO)、Gehlenite(Ca₂Al₂SiO₇)、Kirschsteinite(CaFeSiO₄)と非晶質珪酸塩であり、不安定な鉱物(f-CaO, γ -C₂S)は認め



W : ウスタイト(Mn,Mg を固溶する FeO)
Ms : スピネル鉱物(Cr を固溶する MgFeAlO₄)
S : スラグ(Ca₂Al₂SiO₇ や CaFeSiO₄ 等)

写真-1 改質スラグの金属反射顕微鏡写真

表-2 鉱物組成解析に用いた改質スラグの化学組成

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
19.2	17.0	6.68	2.65	31.7	7.83	9.75	1.53	0.78	0.348	0.044	97.51	0.055	0.003	30.0

表-3 EPMAによる鉱物相の定量分析結果

鉱 物 相	化 学 組 成 (wt%)									
	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Total	CaO/SiO ₂
ウスタイト	85.0	2.5	—	0.6	0.6	10.3	—	1.0	100.0	—
スピネル鉱物	20.1	0.9	—	29.9	2.9	4.1	41.6	0.3	99.8	—
スラグ	21.6	35.5	20.4	13.2	1.5	5.6	—	0.3	98.1	1.74

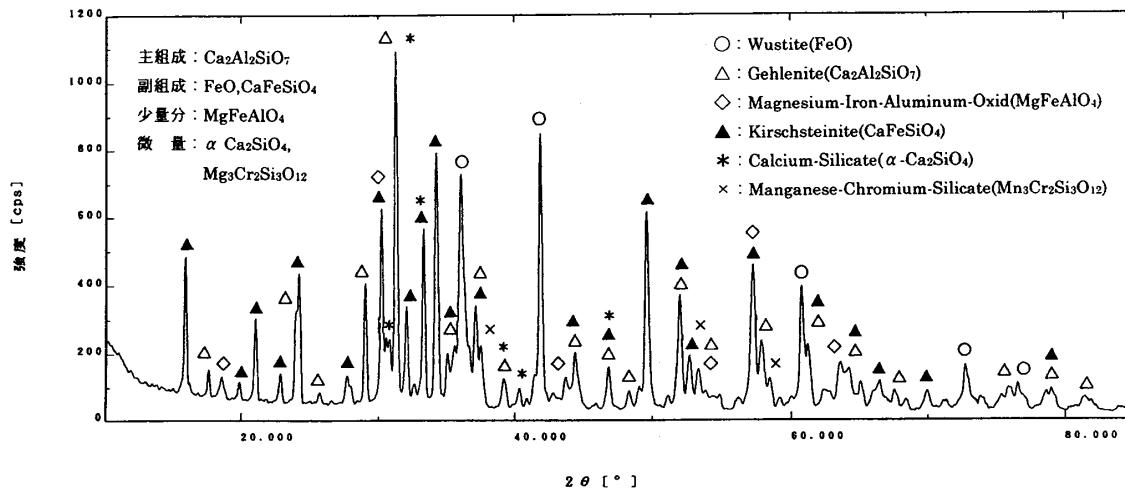


図-1 改質スラグのX線回折図

表-4 水浸膨張試験に用いた電気炉急冷スラグの化学組成

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
19.28	12.70	6.88	3.05	15.52	29.86	6.86	2.46	0.49	0.424	0.015	97.54	0.076	0.002	32.95

表-5 貯蔵用海水の主なイオンの濃度 (単位:g/l)

Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	CO ₃ ²⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
18.600	2.600	0.056	0.120	10.400	1.200	0.370	0.390

られなかった。なお急冷スラグおよび徐冷スラグについてはすでに報告[4]しているとおり、その主要な鉱物組成は Wustite(FeO)、Magnetite(Fe₃O₄)、Iron Chromite(FeO·Cr₂O₃)、Magnesio Ferrite(MgO·Fe₂O₃)と非晶質珪酸塩である。

3. 骨材の海水水浸膨張試験

電気炉酸化スラグを用いたモルタルおよびコンクリートの耐海水試験を行うための予備試験として、骨材自体の海水に対する安定性をみるため海水水浸膨張試験を行った。

粒度は JIS A 5011 5 mm高炉スラグ細骨材の規格範囲に調整し、海水は愛知県知多郡豊浜町突堤にて採取したものを用いた。試験方法は、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に準じて行い、貯蔵水には海水を用いた。貯蔵方法は、貯蔵水の入った水槽に骨材を入れたモールドを沈め、貯蔵水の温度が 80±3°C になってから 6 時間経過後、水槽内で自然放冷させる。この操作を 1 日 1 回 30 日間繰り返し、貯蔵水の蒸発分は蒸留水で補給した。試験に使用した電気炉急冷スラグの化学組成を表-4、貯蔵用海水の主なイオンの濃度を表-5、試験結果を表-6 に示す。結果では、水浸膨張比は 0.0% でありこのスラグ骨材の膨張は全く認められなかった。また、試料の外観観察においても変色、粉化等の変状は認められなかった。

4. モルタルおよびコンクリートの耐海水試験

4. 1 モルタルの耐海水試験

電気炉酸化スラグのうち急冷スラグ、改質スラグと非改質水冷スラグを用いて作製したモルタルの耐海水試験を行った。比較用として長良川川砂を用いた。試験に用いたスラグの化学組成を表-7 に、比重および吸水率を表-8 に、配合および実測フロー値を表-9 に示す。表-9 で最初にフロー一定 (180±10 mm) で配合したが、急冷スラグを用いたモルタルは急冷スラグの粒形が球形

表-6 水浸膨張試験結果

項 目	測定値・計算値
水浸前の乾燥密度	2.501(g/cm ³)
水浸前の湿潤密度	2.701(g/cm ³)
水浸後の乾燥密度	2.501(g/cm ³)
水浸後の湿潤密度	2.836(g/cm ³)
水浸前の含水比	8.0(%)
水浸後の平均含水比	13.4(%)
水浸膨張比	0.0(%)
貯蔵用海水の Cl ⁻ 濃度	18.600(g/l)
採取時	18.600(g/l)
16 日目	18.300(g/l)
30 日後	18.300(g/l)

表-7 耐海水試験に用いたスラグの化学組成

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
急冷スラグ	18.4	13.5	8.30	4.01	18.4	23.8	8.54	3.36	0.63	0.339	0.027	99.31	0.064	0.003	30.9
改質スラグ	19.2	17.0	6.68	2.65	31.7	7.83	9.75	1.53	0.78	0.348	0.044	97.51	0.055	0.003	30.0
水冷スラグ	23.1	9.72	5.41	2.09	41.8	10.9	3.34	1.84	0.37	0.330	0.022	98.92	0.080	0.003	40.8

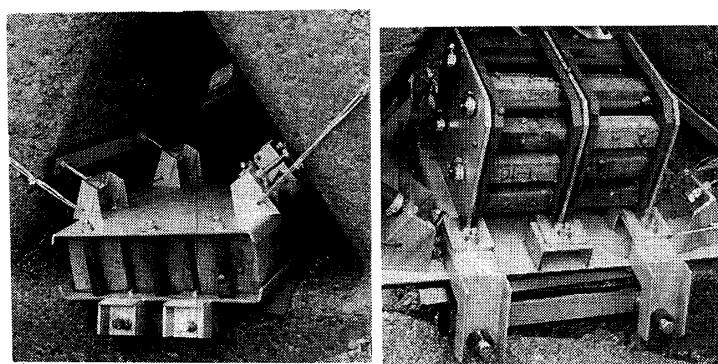
表-8 使用材料の種類および性質

種別	種類	比重	吸水率(%)
細骨材	急冷スラグ	3.69	0.82
	改質スラグ	3.79	0.93
	水冷スラグ	4.12	1.07
	長良川川砂	2.56	1.41
粗骨材	改質スラグ	3.70	0.56
	砂岩碎石	2.69	0.48
セメント	高炉セメントB種	3.03	—
混和剤	A E 減水剤(リグニンスルホン酸化合物)		

であるため、W/Cが46.0%になり、その他のもののW/C64~68%に比較し小さくなるため、W/C65%水準の比較をする目的で、急冷スラグを用いたモルタルについてW/C65%配合のものを追加した。また単位量には、空気量を加えていない。なお、骨材の粒度はJIS A 5011 5mm高炉スラグ細骨材の規格の中央の粒度に調整した。試験方法は供試体寸法4×4×16cmのモルタルを作製し、脱型後、20±2°C恒温室に湿度100%近い状態(容器の下面に水を張り、湿空中の供試体を湿布で覆う)で1ヶ月間貯蔵した後、ステンレス製の型枠に供試体をはめ込み、三重県志摩町和具漁港内にある既存の三角中空ブロックに、写真-2に示すように曝露した。供試体は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曝露し、海水による種々の影響を受けやすい状況にした。つまり、この曝露場所は外海側で波浪の激しいところ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、曲げ、圧縮強度および中性化試験を行った。比較用として20±2°C恒温室に湿度100%近い

表-9 モルタルの配合および実測フロー値

種類	W/C (%)	s/c (vol%)	単位量(kg/m³)			フロー値(mm)
			水	セメント	細骨材	
モルタル	4.0	50.0	218	473	2310	177
			283	433	2118	260
			292	427	2149	184
			283	433	2365	185
	5.0	50.0	279	436	1477	182
					2244	208
					2304	124
					2505	132
					1556	127



コンクリート(15×15×53cm)

モルタル(4×4×16cm)

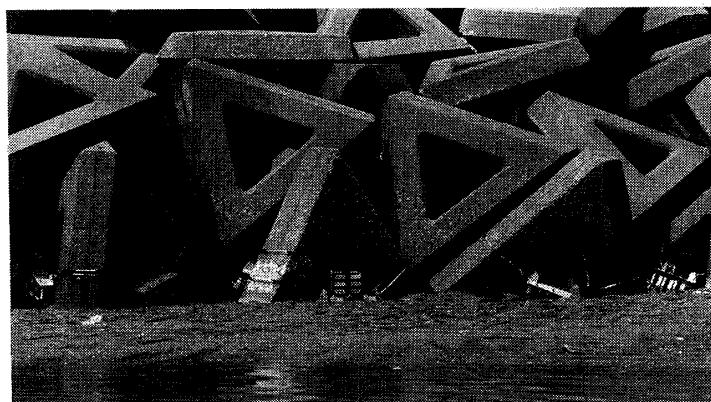
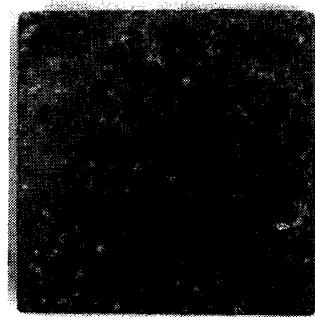
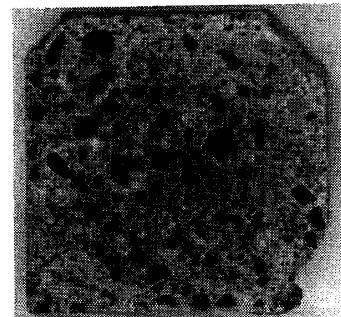


写真-2 耐海水試験の供試体設置状況



急冷スラグ細骨材



長良川川砂

写真-3 1年間浸漬後の破断面の状況

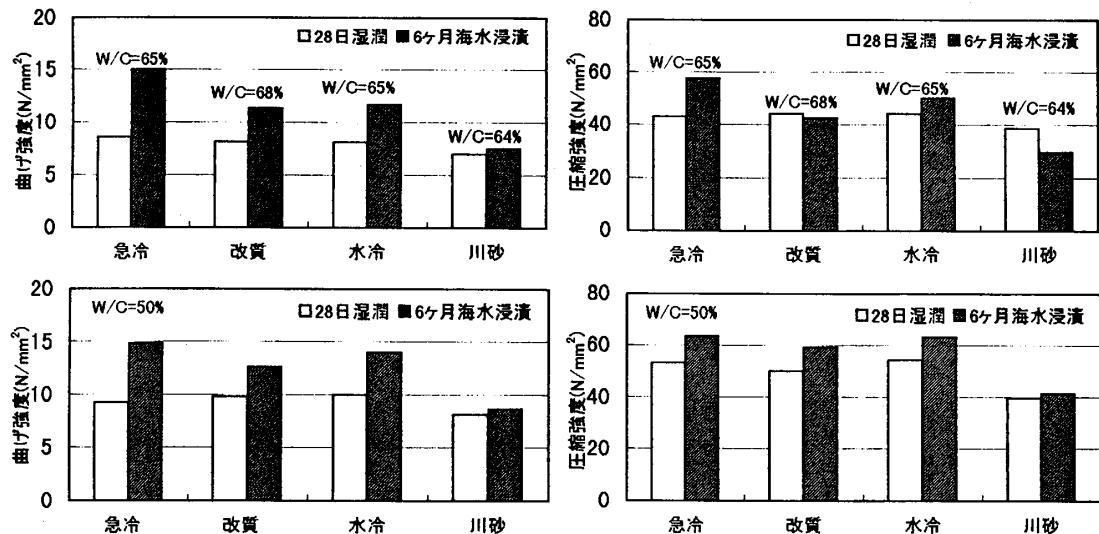


図-2 各種細骨材のモルタル強度(水セメント比一定)

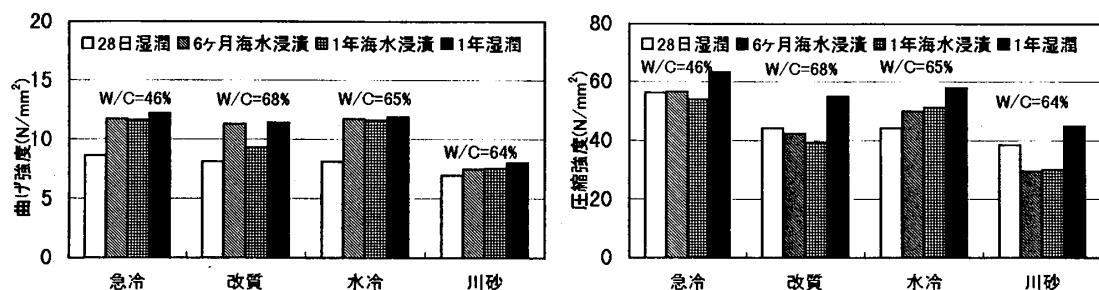


図-3 各種細骨材のモルタル強度[フロー値(180±10 mm)一定]

状態で貯蔵し、材齢1年で曲げおよび圧縮強度試験を行った。写真-3にみられるように長良川川砂を用いたモルタルは、角部が欠け、表層部に変色がみられたが、電気炉酸化スラグ骨材を用いたモルタルは全く損傷および変色はみられなかった。また内部の顕微鏡観察でも異常は見られなかった。これらの供試体の強度試験結果を図-2、図-3に示す。図においてW/Cを50%および64～68%とした場合、またフロー値を180±10 mmと一定にした場合にも、双方とも各材齢について長良川川砂よりも電気炉酸化スラグの方が曲げ、圧縮強度が高く、特に急冷スラグの強度が高くなっている。それに比べて川砂を用いたモルタルの強度は低い。これは川砂が急冷スラグよりは骨材自体の強度が低く、また骨材表面の凹凸も少ないと想われる。なおこの値は損傷部を除いた断面で求めた値で補正済みである。中性化試験結果は、材齢1年ではどの供試体にも中性化はほとんど進行していなかった。

4. 2 コンクリートの耐海水試験

コンクリート耐海水試験に用いたスラグ骨材は、細骨材に急冷スラグ、粗骨材に改質スラグ、比較用コンクリートには長良川川砂、砂岩碎石を用いた。用いたスラグ骨材の化学組成を表-7、比重および吸水率を表-8、配合およびスランプ、空気量、単位容積質量を表-10に示す。配合は一般的に消波コンクリートブロックに使われているものにした。表-10で細骨材に急冷スラグを用いたもので、混和剤が少ないのは、急冷スラグの粒形が球形でスランプが良くなるためである。供試体寸法は15×15×53cmとし、モルタルと同じ方法で曝露した。所定材齢で外観観察、曲げ強度および中性化試験を行った。同時に20±2°C恒温室に湿度100%近い状態で貯蔵したものについて、材齢1年で曲げ強度、材齢28日と1年で圧縮強度(Φ15×30cm)およびヤング係数測定を行った。

表-10 コンクリートの配合およびスランプ、空気量、単位容積質量

種類	G _{Max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (×C%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)
				水	セメント	細骨材	粗骨材				
急冷スラグ	40	50	41.5	127	255	1140	1610	0.40	4.5	4.1	3.24
急冷スラグ				127	255	1140	1170	0.40	5.0	3.9	2.79
長良川川砂				140	280	768	1137	1.25	5.0	4.6	2.36

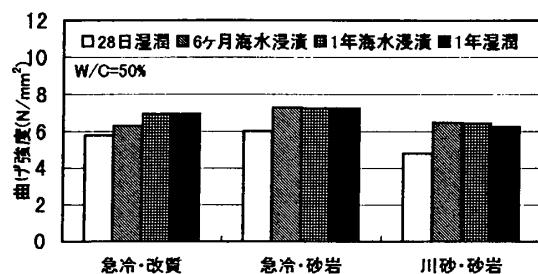


図-4 コンクリートの曲げ強度

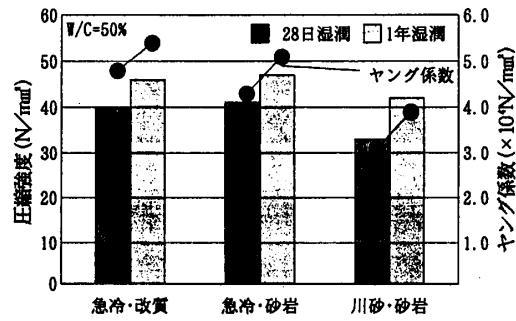


図-5 コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

外観観察では、モルタルの場合と異なり川砂使用の場合でも、スラグ使用の場合と同様材齢1年経過後において、摩耗や亀裂などの損傷はみられなかった。また内部の顕微鏡観察でも異常は見られなかった。強度およびヤング係数の測定結果を図-4、図-5に示す。図では、細骨材に長良川川砂を用いたものより、急冷スラグ骨材を用いたものの方が曲げ、圧縮強度およびヤング係数のいずれにおいても大きな値となっている。これは急冷スラグ骨材ではセメントペーストとの付着状態がよく、流動性がよく密実なコンクリートができ、また骨材比重が大きいためにコンクリート質量が大きくなることなどによると思われる。

5. まとめ

電気炉酸化スラグの特徴である比重と硬度の大きいことを活かして消波コンクリートブロックをはじめ、護岸および漁礁などの海洋コンクリートへの適用性を調べるために耐海水試験を行った。海岸の波打ち際に曝露した供試体において、6ヶ月～1年経過では、外観、質量、強度、耐摩耗性において天然骨材よりも電気炉酸化スラグ骨材の方が良好であった。しかし、これは中間結果であり、更に長期の実験を続ける予定で、3、5、10年およびそれ以降の試験ができるように、多数の供試体を同場所に曝露している。

【参考文献】

- [1] 森野奎二・中尾仁二・渕上榮治・榎原健司：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
- [2] 森野奎二・渕上榮治・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・コンクリート論文集、No.48, pp.310-315, 1994
- [3] 森野奎二・渕上榮治・服部裕治・吉兼亨：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの諸性質、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.319-324, 1994
- [4] 森野奎二・渕上榮治・岩部安喜・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
- [5] 森野奎二・渕上榮治・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
- [6] 森野奎二・渕上榮治・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