

# 論文 電気炉酸化スラグ骨材の特殊コンクリートへの実用化

森野 奎二\*1・洲上 榮治\*2・酒井 誠\*3

**要旨:**電気炉酸化スラグ骨材を護岸用消波コンクリート、放射線遮蔽コンクリート、充填コンクリートなどの特殊なコンクリートに用いた場合の適用性について検討した。そのために、海岸曝露、実構造物への試験施工を行ない、施工性、強度および耐久性を調べた。その結果、順調に施工でき、強度は所定強度を満足し、耐久性においては2年の途中経過時ではあるが問題は認められなかった。

**キーワード:**電気炉酸化スラグ、スラグ骨材、海岸曝露、強度、耐久性、施工

## 1. はじめに

筆者らは、電気炉酸化スラグ骨材のコンクリートへの適用性を目的としてスラグ骨材の物理化学的性質並びにスラグ骨材使用コンクリートの強度および耐久性などについて基礎的な研究を重ねてきた<sup>1~7)</sup>。また、実用構造物での試験施工として、工場内のコンクリート舗装道路、床、擁壁などを造り、その他にコンクリート二次製品を製造し、各地に設置してきた<sup>3), 6)</sup>。このたび電気炉酸化スラグ骨材を用いて、護岸用コンクリートブロック、放射線遮蔽コンクリートおよび充填コンクリートなどの実構造物を造り、施工性並びに耐久性について検討した。これらの特殊コンクリートを選んだ理由は、それらに求められる性能に対してスラグ骨材を利用することが表-1に示すように利点となるからである。

## 2. 護岸用消波コンクリート

### 2.1 モルタルの海岸曝露試験

外的条件を受けやすい小型のモルタル供試体(4×4×16 cm)を用いて海岸曝露試験を実施した。用いた骨材は、電気炉酸化スラグのうち、急冷スラグ、水冷スラグと改質水冷スラグである。なお、改質水冷スラグは、金属鉄をなくすために、熔融スラグ中に吹酸し、金属鉄を鉄酸化物に変えたうえ水冷処理したものである。(以下、改質スラグという。)比較用として長良川川砂を用いた。

試験に用いたスラグ骨材の化学組成を表-2、比重および吸水率を表-3、配合および実測フロー値を表-4に示す。骨材の粒度は、JIS A 5011 5 mm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、モルタル脱型後20±2℃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ヶ月貯蔵した後、波浪が激しく、潮の干満差が大きい漁港外海既設の三角中空ブロッ

表-1 特殊コンクリートの必要性能と電気炉酸化スラグ骨材利用の利点

コンクリートの種類	必要な性能	電気炉酸化スラグ骨材の特徴
護岸用消波コンクリート	重量	比重が大きい：約3.8
放射線遮蔽コンクリート	放射線遮蔽	鉄分が多い：全鉄約35%
充填コンクリート	流動性	球形*である：実積率約68%

\*急冷スラグ骨材

\*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㈱事業開発部スラグ製品開発担当部長

\*3 中部鋼鉄㈱事業開発部スラグ製品開発担当

表-2 海岸曝露モルタル・コンクリート試験に用いたスラグ骨材の化学組成

種類	化学組成 (wt%)													f.CaO	f.MgO	T.Fe
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Total				
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	

クにステンレス製の装置で固定し曝露した。この供試体について外観観察、曲げ、圧縮強度および中性化試験を行った。強度試験結果を図-1に示す。図で1年経過後の強度が6ヶ月強度より低いものが多いが、この結果については再実験・再検討が必要であると考えている。ただし、前年度に行った結果<sup>7)</sup>では強度低下がみられていない。また、今回のモルタル外観には生物の付着がみられたが、外観・内部ともにひび割れ等の異常は顕微鏡観察でもみられなかった。中性化試験結果でも材齢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。

## 2.2 コンクリートの海岸曝露試験

コンクリートの海岸曝露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。

試験に用いたスラグ骨材の化学組成は前述のモルタルと同様である。配合およびスランプ、空気量、単位容積質量を表-5に示す。配合は、

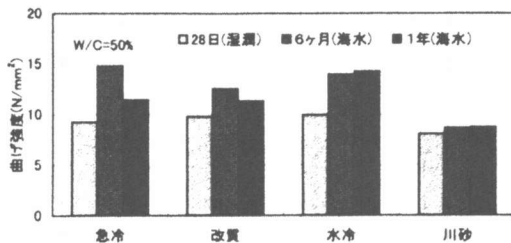


図-1 海岸曝露した電気炉酸化スラグ骨材モルタルの強度の骨材別経時変化

表-5 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	細骨材	粗骨材	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (×C%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )
					水	セメント	細骨材	粗骨材				
急冷スラグ	改質スラグ		50	41.5	127	255	1140	1610	0.40	4.5	4.1	3.24
急冷スラグ	砂岩碎石				127	255	1140	1170	0.40	5.0	3.9	2.79
長良川川砂	砂岩碎石				140	280	768	1137	1.25	5.0	4.6	2.36

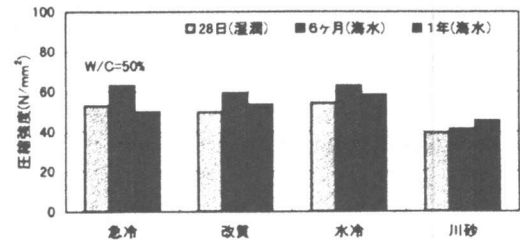
表-3 使用材料の種類および性質

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)		

表-4 モルタルの配合および実測フロー

種類	W/C (%)	s/c (vol%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			フロー値 (mm)
			水	セメント	細骨材	
急冷スラグ	50.0	4.0	240	480	2244	208
改質スラグ					2304	124
水冷スラグ					2505	132
長良川川砂					1556	127

消波コンクリートブロックに使われている一般的なものにした。供試体は 15×15×53 cm として、モルタルと同じ方法で曝露した。外観観察では、スラグ骨材および川砂使用のいずれのこ



ンクリートにも材齢2年経過後生物の付着があるが、摩耗や亀裂などの損傷はみられず、また内部の顕微鏡観察でも異常はみられなかった。曲げ強度の試験結果を図-2に示す。図で2年経過でも、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大きくなっている。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、また流動性がよく密実なコンクリートができることによるものと思われる。

### 3. 放射線遮蔽コンクリート

病院の放射線治療センター棟の屋根および壁全体に放射線遮蔽を目的として急冷スラグ骨材を用いたコンクリートを打設した。

#### 3.1 配合設計

用いた材料の諸性質を表-6、骨材の粒度分布を表-7、スラグ骨材の化学組成を表-8に示す。設計基準仕様は、圧縮強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 15 cm、粗骨材最大寸法 20 mm、空気量 4.5%、気乾単位容積質量 2.5kg/l 以上である。試験練りは、急冷スラグ使用量を細骨材容積率の 100%および 90%の 2 配合とした。試験練りのコンクリートの配合を表-9に示す。

#### 3.2 フレッシュコンクリートのワーカビリティ

フレッシュコンクリートのスランプ、空気量およびブリーディング量を表-10に示す。表で急冷スラグを 100%用いたものも、急冷スラグ 90%用いたものも設計基準仕様を満足している

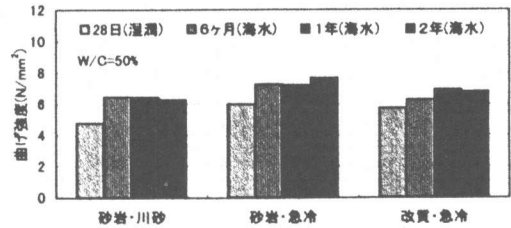


図-2 海岸曝露した電気炉酸化スラグ骨材コンクリートの曲げ強度

表-6 放射線遮蔽および充填コンクリートに用いた材料の諸性質

材料	種類	比重	粗粒率	実積率 (%)
セメント	高炉セメントB種	3.04	—	—
細骨材	急冷スラグ	3.74	2.93	68.1
	山砂(笠原)	2.57	2.71	67.3
粗骨材	碎石 2005(廿原)	2.65	6.74	—
混和剤	A E減水剤	放射線遮蔽コンクリートに使用		
	高性能A E減水剤	充填コンクリート使用		

表-7 放射線遮蔽および充填コンクリートに用いた骨材の粒度分布

粒度(mm)	細骨材		粗骨材	
	急冷スラグ <sup>*</sup> (%)	山砂 (%)	粒度(mm)	碎石 (%)
10-5	0	0	25-20	4
5-2.5	13	15	20-15	20
2.5-1.2	24	19	15-10	46
1.2-0.6	25	19	10-5	30
0.6-0.3	23	24	5-2.5	0
0.3-0.15	11	15	2.5以下	0
0.15以下	4	8		

表-8 放射線遮蔽および充填コンクリートに用いたスラグ骨材の化学組成

化学組成 (wt%)												
CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Total	T.Fe
19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.70	1.97	0.42	0.332	0.030	97.77	30.26

表-9 放射線遮蔽コンクリートの配合

急冷スラグ <sup>*</sup> 使用率 (vol%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)
			水	セメント	細骨材		粗骨材	
					天然	急冷スラグ <sup>*</sup>		
100	49.1	49.9	150	305	0	1316	935	1.0
90	51.4	49.9	149	290	90	1197	943	1.0

表-10 放射線遮蔽フレッシュコンクリートの試験結果

急冷スラグ 使用率 (vol%)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	コンクリート温度 (℃)
100	49.1	49.9	17.5	5.0	0.14	22
90	51.4	49.9	17.5	4.9	0.09	21

表-11 放射線遮蔽コンクリートの強度

急冷スラグ使用率 (vol%)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
	材齢 7 日	材齢 28 日
100	23.4	43.5
90	21.1	39.9
基準値	—	24 以上

が、急冷スラグ 90%使用のものが、ブリーディングの値が小さい。これは表-7で山砂の粒度に細粒が多いために保水性や分離抵抗性が高まったことによるものと思われる。

### 3.3 硬化コンクリートの試験結果

試験練りに用いたコンクリートでφ 10×20 cmの円柱形供試体を作製し、材齢 7 日および 28 日で圧縮強度試験を行った。その結果を表-11に示す。表で急冷スラグを 100%および 90%用いたコンクリートのいずれも設計基準強度の 24N/mm<sup>2</sup> よりもはるかに高い値となっているが、これは骨材を替えたことによるもので、そのまま高い値がよいという施主の意向によるものである。

### 3.4 放射線遮蔽コンクリートの打設

壁面が 1,200 mm、屋根面が 1,200~1,400 mm 厚のコンクリートを急冷スラグ 90%配合のコンクリートで打設した。壁面の一部に若干のジャンカが見られたが、全体にみて良好なコンクリートの仕上がりであった(写真-1)。

### 4. 充填コンクリート

内径 460 mm φ×高さ 22,650 mmの建築物の柱の芯材として、形状のよい急冷スラグ細骨材を用いて鋼管充填コンクリートを打設した。施工は、鋼管下端部からの圧力注入工法と上端部からのトレミー管注入工法によって行った。

#### 4.1 配合設計

用いた材料の諸性質、骨材の粒度分布および急冷スラグ骨材の化学組成等は、先の表-6、表-7および表-8に示している。施工に先立ち、配合設計圧縮強度を 50N/mm<sup>2</sup>、スランブフロー値を 55 cm、空気量を 3%として試験練りを実施した。試験練りのコンクリートの配合を

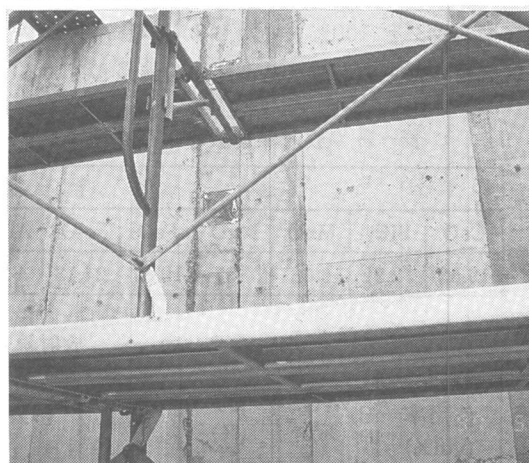
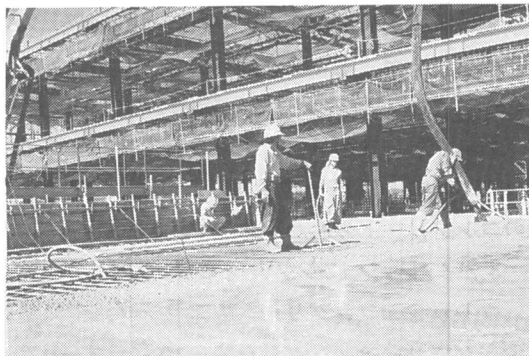
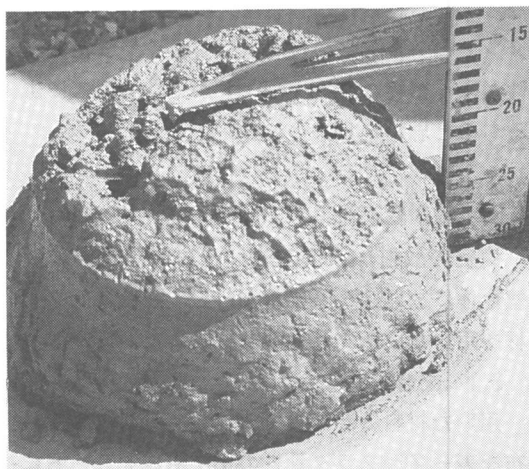


写真-1 放射線遮蔽コンクリートの打設および仕上がり状況

表-12 充填コンクリートの配合

急冷スラグ 使用率 (vol%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)
			水	セメント	細骨材		粗骨材	
					天然	急冷スラグ*		
100	35	49	165	471	0	1164	858	2.0
70	35	49	170	486	242	823	864	1.8

表-13 充填フレッシュコンクリートの試験結果

急冷スラグ 使用率 (vol%)	W/C (%)	s/a (%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	コンクリートの状態
100	35	49	66.5×65.0	2.7	14.0	砂利が若干浮き上がり、分離ざみ
70	35	49	55.0×54.0	2.6	14.5	砂利の浮き上がりが、ほとんど見られず良好
設計基準値	-	-	55±5	3.0±1.5	-	

注：スランプフロー値は、生コン工場から現場打設まで10分間かかるので10分後の測定値とした

表-12に示す。表の配合については、ブリーディングを抑制する目的で単位セメント量を大きくしたが、粉体量の増加を目的としているので、高炉セメントB種を用いた。混和剤には、高性能AE減水剤を用いた。鋼管充填コンクリートであるため、乾・湿繰り返しや凍害の恐れが少ないため、空気量は3%とした。試験練りは、急冷スラグの使用量を細骨材容積率100%および70%の2配合とした。

#### 4.2 フレッシュコンクリートのワーカビリティ

フレッシュコンクリートのスランプフローおよび空気量を表-13に示す。表より細骨材に急冷スラグを100%用いたものは、砂利の浮き上がりが若干生じ分離傾向がみられスランプフロー値が基準値より大きすぎた。これに対し、山砂を30%混合したものは、砂利の浮き上がりが少なく、分離が改善された(写真-2)。フレッシュコンクリートのブリーディングおよび凝結試験結果を表-14に示す。表で急冷スラグ100%および70%配合のものともに設計基準値を十分満足している。

#### 4.3 硬化コンクリートの試験結果

試験に用いたコンクリートでφ10×20cmの圧縮強度、ヤング係数試験用供試体および10×10×40cmの長さ変化試験用供試体を作製した。圧縮強度、ヤング係数試験用供試体は、20±2℃の標準水中養生を行い、材齢7日および28日で測定した。その結果を表-15に示す。

表-14 ブリーディングおよび凝結試験結果

急冷スラグ 使用率 (vol%)	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	凝結試験結果	
		始発時間 (h-m)	終結時間 (h-m)
100	0.0	16-00	22-00
70	0.0	15-30	19-40
設計基準値	0.3以内	20時間以内	-

表-15 充填コンクリートの強度およびヤング係数

急冷スラグ使用率 (vol%)	材齢7日		材齢28日	
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
100	48.9	44.6	79.3	44.6
70	49.6	45.7	73.1	45.7
基準値	-	20以上	50以上	20以上

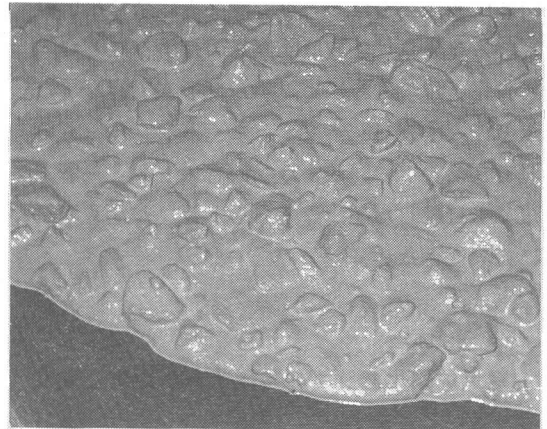


写真-2 充填コンクリートの状態

表で圧縮強度およびヤング係数とも標準値を満足している。長さ変化試験用供試体は材齢7日まで20±2℃の標準水中養生を行った後、温度20±2℃、湿度60±5%の恒温恒湿室にて保存し、保存期間1週、4週、8週、3ヶ月および

6ヶ月で供試体の収縮率を測定した。保存期間中の収縮率の状態を図-3に示す。図で収縮率は保存期間28日目では、急冷スラグ100%配合のもので $4.029 \times 10^{-4}$ 、急冷スラグ70%のもので $3.681 \times 10^{-4}$ であった。また6ヶ月目では、急冷スラグ100%のもので $6.181 \times 10^{-4}$ 、急冷スラグ70%のもので $5.860 \times 10^{-4}$ であり、保存期間6ヶ月における収縮率基準値 $8 \times 10^{-4}$ を満足している。

#### 4.4 鋼管充填コンクリートの打設

柱のFL+1,200mmに設置した140mmφの圧力注入孔付きの吹上管へピストン型ポンプ車より5インチの圧送管を通して送り、内径460mmφ×高さ22,650mmの無筋鋼管に注入した。注入時間は3分間を目標とし、打設中は先端部に浮きを取り付けたスチールテープを柱頭部からたらし、注入高さを逐次確認し、ポンプ操作者と連絡をとりあって注入速度を加減した。圧力注入コンクリートは、フロー値が大きいためコンクリート自体が水平を保ち均等に打ち上がっていくためバイブレータは使用しなかった。また、コンクリートの沈下対策として、基準どおり柱頭部に内径270mmφ×400mm高さの余盛用仮設ピースを取り付け300mm高さの余盛りをした。打設完了時の遮蔽はピンバルブ形式で行なった。圧力注入本数45本でまったくトラブルなく打設できた。なお同じような配合でトレミー管工法でも打設したが、こちらもトラブルなく順調に打設できた。

#### 5. まとめ

- (1)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生かして護岸用コンクリートブロックの海岸曝露試験並びに放射線遮蔽建築物および急冷スラグの粒子形状のよいことを生かして鋼管充填柱のコンクリート打設を行った結果、コンクリート強度、施工性などは良好であり、コンクリートへの適用性の可能性が高いことが認められた。
- (2)比重が大きく、粉体が少ない急冷スラグ細骨

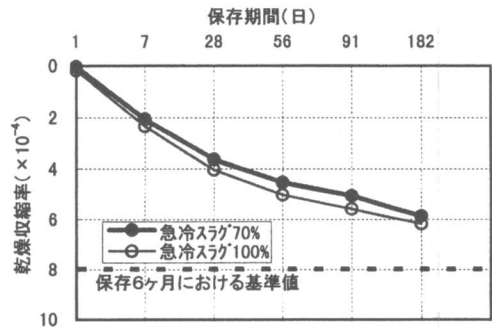


図-3 充填コンクリートの乾燥収縮率

材には、細目砂を10%程度以上混合使用する方が保水性がよくブリーディングが抑制される。  
(3)海岸曝露のモルタル・コンクリートには生物の付着がみられ、有害物は溶出していないことが明白であった。

#### 参考文献

- 1) 森野奎二・中尾仁二・洲上榮治・榊原健司：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・洲上榮治・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・洲上榮治・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・洲上榮治・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・洲上榮治・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・洲上榮治・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
- 7) 森野奎二・洲上榮治・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