論文　電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの耐久性

森野 奎二[*1]・渕上 榮治[*2]・服部 裕治[*3]

要旨：電気炉製鋼法の近年の改善により、不安定物質の含有が解消の方向にある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目的として行った一連の基礎研究結果では、実用化の可能性があることが明らかとなった。実用に供するための実構造物に対する耐久性調査として、２～５年前に試験施工された実用コンクリート構造物や工場製品について、異常膨張によるひび割れやポップアウトの有無などの外観観察、コア強度試験、中性化試験などを行った。その結果、使用スラグ骨材においては、そのコンクリートに変状、劣化などは認められなかった。

キーワード：電気炉酸化スラグ、骨材、耐久性、コンクリート強度、中性化

１．はじめに

近年の電気炉製鋼法の改善により不安定物質の含有が解消の方向にある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[1～5]。その一連の研究結果では、実用化の可能性があることが明らかとなった。しかし、この種の骨材を実際に使用する場合には、異常膨張などによる劣化が懸念され、実構造物に対する耐久性の検討が必要になる。そこで本研究では、数年前からこの電気炉酸化スラグ骨材を用いて試験的に製造してきたコンクリート工場製品、あるいは試験施工してきた実用コンクリート構造物について、ひび割れの有無などの外観観察をするとともに、コアを採取し強度試験、中性化試験、顕微鏡観察などを行い、この骨材を用いたコンクリートの耐久性について検討した。

２．コンクリート工場製品

電気炉酸化スラグに分類される急冷スラグ細骨材と水冷スラグ粗骨材[6]を用いたコンクリートの耐久性を調査するために、表１に示すコンクリート工場製品を作製し、それぞれの用途に併せて使用してきた。例えば、すりへり作用を受ける玄関アプローチや凍結融解作用を受ける寒冷地など用途、環境などが異なる各所に設置した。1992年前半までの最も初期に作製した磨きコンクリート製品には、スラグ粗骨材に含まれていた鉄分の酸化による錆汁が付着して汚れがみられたが、磁力選鉱によって鉄分の除去がなされた1992年後半以降の骨材を使用したコンクリートには汚れはみられなくなった。その他、ひび割れ、ポップアウトなどのコンクリートの劣化と見做しうるような異常はすべての製品に認められなかった。

３．実用コンクリート構造物

電気炉酸化スラグの中では最も早くから活用化研究を行ってきており、その性質が明らかにな

＊１　愛知工業大学教授　工学部土木工学科、理博（正会員）
＊２　中部鋼鈑㈱事業開発部スラグ製品開発担当部長
＊３　中部鋼鈑㈱事業開発部スラグ製品開発担当

っている急冷スラグ細骨材を用いて造った実用コンクリート構造物の種類・諸性状を表2-1、表2-2に一覧表にて示す。このほかにも建物床、岸壁荷役クレーンアンローダー用バランサーなどの使用例もある。またこの骨材の特徴である大きな比重(3.6)を活用することを目的として作製した供試体(消波ブロック対象)の海水浸漬実験も実施中である。このようにコンクリートの施工時期や使用条件などはそれぞれ異なるが、現時点ではひび割れ、ポップアウト、変色など外

表1 コンクリート工場製品主要施工実績

No.	施工時期	製品名 ※1 形状・寸法(mm)	所在地・使用箇所 ※2	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) W	C ※3	S	G ※4	混和剤	強度 (N/mm²)	外観 ('96.1現在)
1	'91.1	磨きｺﾝｸﾘｰﾄ平板 300w×300ℓ×30t	名古屋市中川区 玄関アプローチ	26.0	50.0	193	740	977	1104	14.8	曲げ 7.43	ひび割れ,ポップアウトなどの異常なし
2	'92.5	ベンチ 脚:400w×1200ℓ×200h 台座:400w×400ℓ×400h	名古屋市中川区 ビル玄関アプローチ	25.0	50.0	155	627	1110	1200	12.5	—	錆汁による変色あり ひび割れ,ポップアウトなどの異常なし
3	'92.5	テーブル 板:φ800×120t 台座:400w×400ℓ×400h スツール φ400×200h	愛知県知多郡武豊町 庭園用	25.0	50.0	155	627	1110	1200	12.5	—	ひび割れ,ポップアウトなどの異常なし
4	'92.6	笠木 297w×280ℓ×145h×50t	鎌倉市 境界塀	25.0	50.0	200	815	919	994	16.3	—	〃
5	'92.7	建築用ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 390ℓ×190h×100t	名古屋市中川区 工場建屋腰壁	36.9	95.0	118	320	2554	134	2.8	圧縮 ※5 14.7	〃
6	'92.9	建築用ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 390ℓ×190h×100t	名古屋市中川区 工場建屋腰壁	36.9	95.0	118	320	2554	134	2.8	圧縮 ※5 14.7	〃
7	'92.10	磨きｺﾝｸﾘｰﾄ製看板 1100w×700d×1000h 磨きｺﾝｸﾘｰﾄ積みﾌﾞﾛｯｸ 300w×300ℓ×300h	岐阜県郡上郡高鷲村 寒冷地山荘看板	25.0	50.0	155	627	1110	1200	12.5	—	〃
8	'92.10	磨き建築用ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 390ℓ×190h×100t	岐阜県郡上郡高鷲村 寒冷地山荘機械室遮音用外壁	36.9	95.0	118	320	2554	134	2.8	圧縮 ※5 14.7	〃
9	'93.2	磨きｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 400w×800ℓ×200h 磨きｺﾝｸﾘｰﾄ平板 400w×800ℓ×20t	名古屋市中川区 ゴルフ練習場クラブハウス階段及び玄関アプローチ	25.0	50.0	155	627	1110	1200	12.5	—	〃
10	'94.2	磨きｺﾝｸﾘｰﾄ平板 400w×400ℓ×20t	名古屋市中村区 ビル玄関アプローチ	25.0	50.0	155	627	1110	1200	12.5	—	〃
11	'94.10	建築用ｺﾝｸﾘｰﾄﾌﾞﾛｯｸ 390ℓ×190h×100t	名古屋市中川区 工場建屋腰壁	36.9	95.0	118	320	2554	134	2.8	圧縮 14.1	〃

※1 w:幅、ℓ:長さ、t:厚み、h:高さ　※2 屋外使用　※3 No.5,No.6,No.8,No.11は普通ポルトランドセメント、それ以外は白色ポルトランドセメント　※4 最大寸法:No.5,No.6,No.8,No.11は10mm、その他は15mm
※5 No.5,No.6,No.8は'92.4製造の同一ロットコンクリートで施工時期のみ異なる

表2-1 急冷スラグ細骨材を用いたコンクリート構造物の施工実績

No.	施工時期	使用箇所 ※1	設計基準強度 (N/mm²)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) W	C ※2	S 急冷	S 天然	G	混和剤 ※3	急冷スラグ細骨材混合率 (vol%)
1	'92.10	道路	34.3	8	4.0	25	47.0	42.3	151	321	759	232	1085	3.210	70
2	'93.7	集塵機基礎	20.6	18	4.5	25	62.0	48.2	162	261	744	356	983	2.811	60
3	'93.9	排水地下水槽	20.6	12	4.5	25	58.0	46.0	153	264	713	341	1019	0.528	60
4	'93.9	産業廃棄物処理養生槽	20.6	18	4.5	25	62.0	48.2	162	261	744	356	983	2.811	60
5	'93.10	加熱炉基礎	20.6	18	4.5	25	58.0	48.0	162	279	727	346	964	0.558	60
6	'94.7	ドライヤー基礎	20.6	18	4.5	25	62.0	49.0	162	261	1263	0	974	2.811	100
7	'95.3	看板基礎	23.5	8	4.5	25	55.4	48.3	144	260	1271	0	1009	2.600	100

※1 No.1,No.2,No.4,No.6,No.7:屋外に施工、No.3,No.5:屋内に施工
※2 No.1,No.2,No.4,No.6:普通ポルトランドセメント、No.3,No.5,No.7:高炉セメントB種
※3 No.1,No.3,No.5,No.7:AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物)、No.2,No.4,No.6:AE減水剤(オキシカルボン酸塩)

表2-2 急冷スラグ細骨材を用いたコンクリート構造物の調査結果

No.	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m³)	圧縮強度 (N/mm²) ※1 7日	28日	1年	2年	3年	ヤング係数 (×10⁴N/mm²) 1年	2年	3年	中性化深さ (mm) 1年	2年	3年	外観 ('96.1現在)
1	8.0	5.1	2.62	34.6	46.7	53.8	−	56.3	−	−	−	0.3	−	1.2	ひび割れ、ポップアウト、変色などの異常なし
2	20.0	4.6	2.57	17.9	25.0	−	※2 41.0	−	−	※2 3.09	−	−	※2 0.0	−	〃
3	12.0	4.5	2.55	14.7	32.1	−	−	−	−	−	−	−	−	−	〃
4	19.0	4.6	2.60	17.5	26.3	−	26.9	−	−	2.80	−	−	2.3	−	〃
5	17.5	4.6	2.50	15.1	32.4	26.5	26.5	−	2.91	2.93	−	0.3	6.6	−	〃
6	18.5	4.9	2.67	17.4	24.0	−	−	※3 30.1	−	−	※3 3.29	−	−	−	〃
7	8.0	4.3	2.74	20.5	38.1	−	−	−	−	−	−	−	−	−	〃

※1 材齢7日,28日は20±2℃水中養生、材齢1年以降はコア供試体　※2 材齢18ヶ月　※3 材齢30ヶ月

観上の異常は認められなかった。以下は表2-1、表2-2に示した道路、産業廃棄物処理養生槽及び加熱炉基礎コンクリートについて詳細に記す。

3．1 道路舗装コンクリート

鋼片運搬用トレーラーや鉄屑運搬車など総重量50ｔ以上の重車両が通行する工場内交差点を天然骨材のみ用いたコンクリートと、天然骨材に急冷スラグ細骨材を60%混合させたコンクリートを区分して厚さ25cmのコンクリート舗装をし、その耐久性について調査した。使用材料の性質を表3、配合を表4に示す。コンクリート打設後1年及び3年経過時に、急冷スラグ混合コンクリートから12ヶ所、比較用の天然骨材コンクリートから6ヶ所それぞれコアを採取した。採取コアのコンクリートの表面側から約3cm位までを中性化深さ測定用試片とし、残りの部分を切断、研磨しφ10×20cm供試体として圧縮強度試験を行った。中性化深さは日本建築学会、コンクリートの促進中性化試験方法(案)とし、圧縮強度はJIS A 1107、JIS A 1108とした。コア採取位置を図1に、試験結果を表5及び図2に示す。

表3 道路舗装コンクリートに使用した材料の性質

材料	種類	比重	粗粒率	実積率(%)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	−	−
細骨材	急冷スラグ	3.60	2.75	−
	町屋川、長良川川砂	2.58	2.78	−
粗骨材	町屋川、揖斐川砂利 員弁砕石	2.66	−	62.5
混和剤	AE減水剤	ﾘｸﾞﾆﾝｽﾙﾎﾝ酸化合物(急冷スラグに使用) ｵｷｼｶﾙﾎﾞﾝ酸塩　(天然骨材に使用)		

表4 道路舗装コンクリートの配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) 水	ｾﾒﾝﾄ	細骨材 急冷ｽﾗｸﾞ	天然	粗骨材	混和剤
急冷ｽﾗｸﾞ	47.0	42.3	151	321	759	232	1085	3.210
天然骨材	49.0	41.7	162	331	−	746	1075	3.310

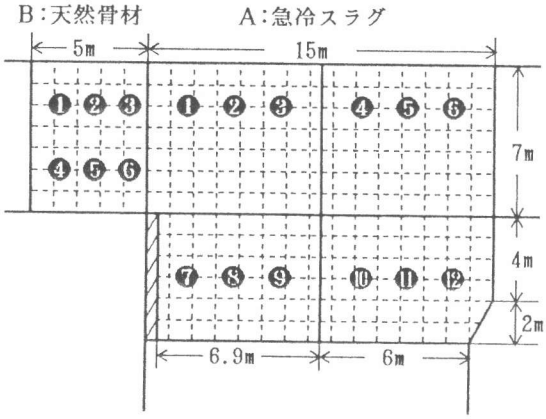


図1 道路舗装コンクリートのコア採取位置

図2で圧縮強度は急冷スラグ混合コンクリートについては、打設から3年経過後においても強度の伸びがみられ、また、中性化深さについては、天然骨材、スラグ骨材使用コンクリートの両者ともほぼ同じ位の値であり同等であるといえる。重車両が頻繁に走行したにもかかわらず、コンクリート表面に普通コンクリートに劣るような異常はみられなかった。これらの結果より、施工から3年経過後のスラグ使用コンクリートの耐久性に問題は認められなかった。

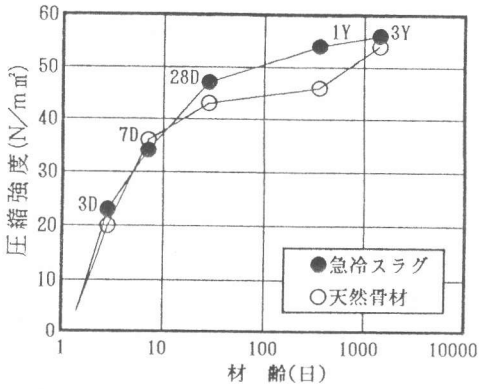


図2 道路舗装コンクリート
コア強度の経時変化

3．2　産業廃棄物処理養生槽

電気炉製鋼過程で発生する産業廃棄物を薬剤処理するための養生槽を急冷スラグ細骨材使用コンクリート(急冷スラグ60%、天然40%)によって施工した。使用材料の性質を表6、配合を表7に示す。施工から2年経過後、図3に示す位置から壁に対して垂直方向にコアを採取し、圧縮強度、ヤング係数(土木学会、コンクリートの静弾性試験法(案))、中性化深さ及び外観目視観察を行った。その結果を表8及び図4に示す。図4で圧縮強度は材齢28日までは20±2℃標準水中養生、材齢2年では気中養生のコア供試体であるが強度低下はみられず問題はない。ヤング係数は初期材齢のデータがないので比較はきでないが、実測値が2.80×10^4N/mm²となり強度からみて問題はなさそうである。中性化深さは、薬剤処理材との接触面側から測定した。コアの採取位置によって中性化深さに差があるが、これは薬剤(硫酸、硫化ソーダなど)による反応生成ガスの影響によるものと思われる。外観観察では骨材の膨張などによるひび割れ、ポップアウト等の異常はみられなかった。これらの結果より施工から2年経過後の時点ではコンクリートの耐久性に問題は認められなかった。

表5 道路舗装コンクリートコアの試験結果

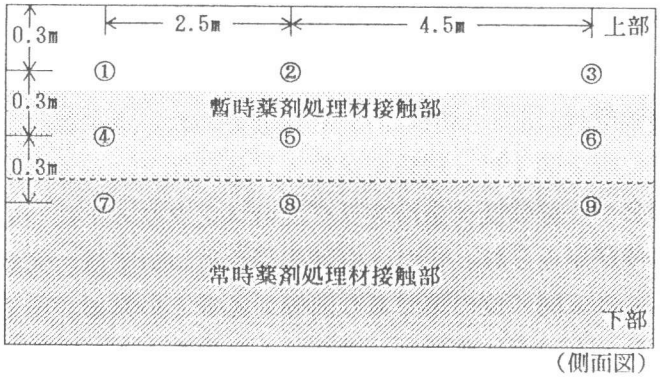
種類	記号		材齢1年 圧縮強度(N/mm²)	材齢1年 中性化深さ(mm)	材齢1年 単位容積質量(t/m³)	材齢3年 圧縮強度(N/mm²)	材齢3年 中性化深さ(mm)	材齢3年 単位容積質量(t/m³)
急冷スラグ	A	1	53.0	0.4	2.65	55.0	1.3	2.60
		2	62.2	0.3	2.65	59.2	1.0	2.63
		3	61.6	0.4	2.63	61.3	1.1	2.59
		4	50.7	0.2	2.62	51.8	1.0	2.58
		5	52.5	0.4	2.59	56.6	1.4	2.58
		6	44.9	0.4	2.62	52.3	1.3	2.58
		7	55.9	0.4	2.61	58.2	1.0	2.63
		8	50.4	0.5	2.58	59.6	1.2	2.62
		9	55.5	0.4	2.62	52.1	1.4	2.62
		10	43.5	0.2	2.60	51.8	1.0	2.62
		11	61.5	0.2	2.64	62.3	1.3	2.62
		12	53.3	0.3	2.61	55.1	1.5	2.61
	平均値		53.8	0.3	2.62	56.3	1.2	2.61
	標準偏差		5.82	0.1	0.02	3.67	0.2	0.02
天然骨材	B	1	45.7	0.4	2.35	54.1	1.3	2.36
		2	33.9	0.4	2.35	53.0	1.5	2.35
		3	35.3	0.4	2.35	48.3	1.5	2.37
		4	54.0	0.5	2.40	56.8	1.7	2.40
		5	50.0	0.3	2.39	55.1	1.2	2.39
		6	55.5	0.6	2.37	57.1	1.6	2.36
	平均値		45.7	0.4	2.37	54.1	1.5	2.37
	標準偏差		8.47	0.1	0.02	2.95	0.2	0.02

表6 産業廃棄物処理養生槽に用いた材料の性質

材料	種類	比重	粗粒率	実積率(%)	使用割合(vol%)
セメント	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	3.15	—	—	—
細骨材	急冷スラグ	3.63	2.75	—	60
	町屋川川砂	2.60	2.77	—	40
粗骨材	町屋川、揖斐川砂利員弁砕石	2.67	—	62.5	—
混和剤	AE減水剤(オキシカルボン酸塩)				

表7 産業廃棄物処理養生槽の配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³) 水	セメント	細骨材 急冷ｽﾗｸﾞ	細骨材 天然	粗骨材	混和剤
62.0	48.2	162	261	744	356	983	2.811



(側面図)

図3 産業廃棄物処理養生槽のコア採取位置

３．３　加熱炉基礎

鋼片加熱炉の基礎として急冷スラグ細骨材を60％混合させたコンクリートを打設した。この加熱炉は液化石油ガスバーナー焚きで炭酸ガス濃度と雰囲気温度が高く、このコンクリートには中性化や骨材劣化の促進試験的な意味あいも含まれると考えられる。このコンクリートに用いた材料の性質を表９、配合を表１０に示す。打設後１年及び２年経過時にコア供試体を採取し、前述と同様の試験を行った。コア供試体は地下5.4mの機械保全用通路から図５に示すように採取した。試験結果を表１１及び図６に示す。コア供試体の圧縮強度及びヤング係数は、材齢１年と２年でほぼ同じであったが、28日強度より低い。この原因は材齢28日の供試体が水中養生であるのに対し、材齢１年及び２年の供試体は温度が高い屋内の気乾状態のコア供試体であるためと思われる。中性化深さについては図５の採取位置と表１１の試験結果とを対比すると、採取位置によって中性化深さに差が生じている。この原因は、加熱炉の構造及び操業条件が図５に示すようにA、B部：予熱帯－鋼片挿入口側、C部：加熱帯－開口部なし、D部：均熱帯－鋼片抽出口側となっていることから、雰囲気の炭酸ガス濃度及びコンクリート温度に差があったためであろうと思われる。冬期の日中３時間の測定結果のみではあるが１５分間隔で炭酸ガス濃度及びコンクリート温度を測定した。その測定結果は表１１のとおりであり、それぞれ492～436ppm、15～23℃であった。またこの時の外気の炭酸ガス濃度平均値は395ppm、外気温度平均値は9℃であり、強風下での測定であったがかなりの差がでており無風時の夏期には高濃度かつ高温であろうと推測される。なお結果の材齢１年から

表８　産業廃棄物処理養生槽の試験結果

No.	材齢２年			
	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	中性化深さ (mm)	単位容積質量 (t/m³)
1	28.7	2.72	5.0	2.62
2	29.2	3.09	5.1	2.60
3	26.0	2.80	5.2	2.65
4	24.3	2.77	2.4	2.64
5	25.6	3.10	1.3	2.59
6	27.5	2.56	2.0	2.58
7	24.7	2.88	0.0	2.58
8	29.5	2.77	0.0	2.60
9	26.4	2.52	0.0	2.57
平均値	26.9	2.80	2.3	2.60
標準偏差	1.83	0.19	2.1	0.03

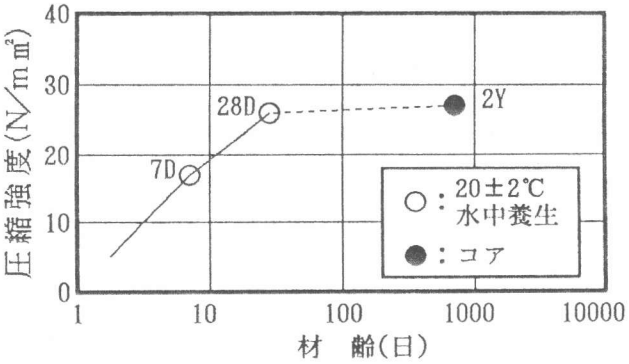


図４　産業廃棄物処理養生槽の圧縮強度

表９　加熱炉基礎コンクリートに用いた材料の性質

材料	種類	比重	粗粒率	使用割合(vol%)
セメント	高炉セメントB種	3.04	－	－
細骨材	急冷スラグ	3.60	合成	60
	町屋川川砂	2.58	2.80	40
粗骨材	町屋川川砂利	2.64	合成	40
	養老砕石2005	2.64	7.30	60
混和剤	ＡＥ減水剤(オキシカルボン酸塩)			

表１０　加熱炉基礎コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						
		水	セメント	細骨材		粗骨材		混和剤
				急冷スラグ	天然	砂利	砕石	
58.0	48.0	162	279	727	346	386	578	0.558

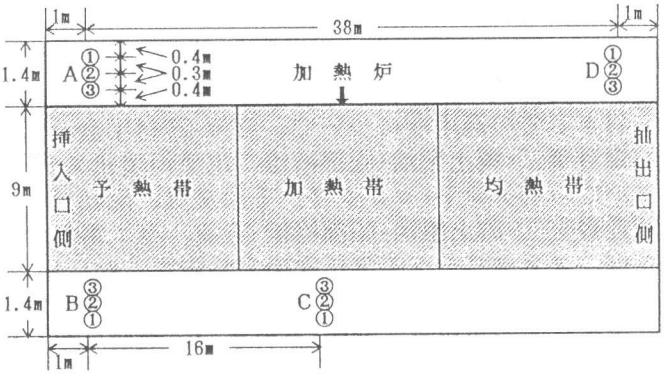


図５　加熱炉基礎コンクリートのコア採取位置

表１１ 加熱炉基礎コンクリートの試験結果

記号	材齢１年				材齢２年				使用条件	
	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	中性化深さ (mm)	単位容積質量 (t/m³)	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	中性化深さ (mm)	単位容積質量 (t/m³)	炭酸ガス濃度 (ppm)	コンクリート温度 (℃)
A－1	29.0	3.04	0.8	2.53	27.9	2.69	9.9	2.51	474	17
－2	29.7	2.76	0.0	2.51	29.2	2.78	9.4	2.47		
－3	29.9	2.97	0.0	2.48	28.9	2.70	8.4	2.48		
平均値	29.5	2.92	0.3	2.51	28.7	2.72	9.2	2.49		
B－1	22.4	2.75	0.5	2.47	23.4	3.04	9.5	2.45	436	15
－2	23.2	2.84	0.8	2.43	25.6	2.92	6.7	2.49		
－3	22.4	2.78	0.8	2.46	24.6	2.92	8.2	2.44		
平均値	22.7	2.79	0.7	2.45	24.5	2.96	8.1	2.46		
C－1	27.1	3.13	0.3	2.43	23.7	2.85	4.3	2.56	449	20
－2	24.9	2.44	0.0	2.55	23.2	2.89	5.2	2.48		
－3	31.4	3.49	0.1	2.57	25.0	3.05	5.9	2.57		
平均値	27.8	3.02	0.1	2.52	24.0	2.93	5.1	2.54		
D－1	28.5	2.99	0.0	2.47	29.8	3.07	2.8	2.48	492	23
－2	25.3	2.84	0.3	2.57	29.8	3.20	4.5	2.49		
－3	24.3	2.88	0.0	2.51	27.0	3.02	4.2	2.46		
平均値	26.0	2.90	0.1	2.52	28.9	3.10	3.8	2.48		
全平均値	26.5	2.91	0.3	2.50	26.5	2.93	6.6	2.49	463	19
標準偏差	3.02	0.24	0.3	0.05	2.45	0.15	2.3	0.04	－	－

２年の間に中性化に大きな差が生じたのは、加熱炉の操業時間が材齢１年までにくらべ材齢１年から２年が約５倍あったことに原因があると思われる。コンクリートコアの観察でも構造物の外観観察同様ひび割れ、変色などの異常はみられなかった。施工から２年経過時点での調査ではあったが、構造物の設置環境からみて、かなり長期間後の調査に匹敵したのではないかとも思われる。

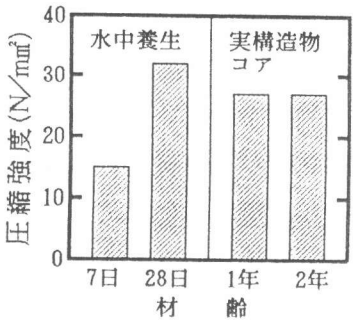


図６ 加熱炉基礎コンクリートの圧縮強度

４．まとめ

電気炉酸化スラグ骨材(急冷スラグ細骨材)を用いたコンクリートの耐久性について調べた結果、以下のことが明らかとなった。

（１）電気炉酸化スラグ骨材(急冷スラグ細骨材)を用いたコンクリート実構造物やコンクリート製品の２年及び３年にわたる外観観察では、ひび割れ、ポップアウト、変色などの異常はみられず、また、コア強度、ヤング係数、中性化試験による診断結果でも健全な普通骨材使用コンクリートと比べ遜色がなく、耐久性上の問題は認められなかった。

（２）上記のような一般的な環境下でのコンクリートの他に、耐久性の促進試験的な意味あいのある加熱炉基礎コンクリートの調査診断でもひび割れ、強度低下などの異常はみられなかった。

（３）コンクリート表面を研磨し骨材を露出させ、変状の検出を容易にした磨きコンクリート製品の最長５年間の観察結果をはじめその他の製品にも劣化は認められなく、このスラグ骨材は安定のようであった。

【参考文献】

[1]森野奎二・中尾仁二・渕上榮治・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・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