

論 文

[1042] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐海水性

正会員 近田孝夫（新日鐵化学 高炉セメント技術センター）

正会員 檀 康弘（ 同上 ）

正会員○堀 健治（ 同上 ）

正会員 長尾之彦（ 同上 建材本部セメント部）

1. まえがき

近年、高炉スラグ微粉末（以下スラグ：記号E s）は、コンクリートの耐久性改善や水和熱の低減を目的として需要が増加している。また微粉碎されたスラグは、高強度コンクリート用の混和材としての検討も進められている。しかしながら、高粉末度のスラグを使用したコンクリートの耐久性についての報告は少ない。一方、蒸気養生したコンクリートにおいては、長期強度の増進が小さいことなどから、その耐久性が問題視される場合もあり、さらに高粉末度の高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの性状に関する報告は少ない。¹⁾²⁾ 本報告は、粉末度の異なるスラグを使用したコンクリートについて、標準養生および蒸気養生した場合の水密性や高水圧下での塩分浸透抵抗性等の耐海水性を検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

試験に供したスラグは、比重2.90塩基度1.92で、粉末度は4000, 6000, 8000cm²/g の3種類とした。セメントは比重3.15で粉末度3200cm²/g² の普通ポルトランドセメント（以下普通セメント：記号N）を使用した。細骨材は比重2.62、粗粒率3.18の川砂、粗骨材は最大寸法20mm、比重2.72、粗粒率6.67の碎石を使用した。混和剤は標準形のAE減水剤を使用し、空気量の調整にAE助剤を用いた。

2. 2 養生条件

養生は、標準養生と蒸気養生の2種類とした。蒸気養生条件は、前置き2時間、昇温速度は20°C/hとし、最高温度および最高温度保持時間は45°C - 3 hとした。蒸気養生終了後の供試体は7日間水中養生した後20°C R.h. 60%の室内で養生した。本試験では円柱供試体以外に、60×60×60cmのブロックを蒸気養生によって作成し、材令28日で採取したコアについても試験を行った。

2. 3 配合条件

標準養生の場合の配合は、W/Cを52%、s/aを44.5%でそれぞれ一定とし、目標スランプ12±2.5cm、目標空気量は4±1%とした。また蒸気養生の配合については、W/Cを34.5%、s/aを37.0%とし、目標スランプ3±1cmとした。ただしスラグを用いたコンクリートでは、粉末度6000cm²/gのものを用いて試し練りを行い配合を決定し、他の粉末度についてはこれと同一配合とした。なお結合材中のスラグ置換率は50%である。

2. 3 試験項目

(1) 圧縮強度試験：試験材令は3, 7, 28, 91日とし、蒸気養生の場合は、材令1日でも試験を行つた。コア供試体については、コア採取時（材令28日）の強度を測定した。

(2) 透水試験：本試験ではインプット法を用い、コンクリート表面より透水させた。透水試験の供試体は $\phi 10 \times 10\text{cm}$ の円柱である。標準養生の供試体については、材令28日間水中養生後14日間 20°C R.h. 60%の室内に放置した気乾状態で試験に供した。また蒸気養生の供試体については標準養生と材令が同一となる42日より試験を開始した。コア供試体については材令28日でコアを採取した後14日間室内に放置し試験に供した。試験時の水圧は 6kgf/cm^2 、加圧期間は5日間とした。

(3) 海水浸透試験：本試験に用いた海水浸透装置の概要を図-1に示す。3) 供試体は $\phi 10 \times 65\text{cm}$ の円柱で、透水試験と同一の養生を行った後に試験に供した。海水は人工海水とし JIS A 6205 鉄筋コンクリート用防せい剤の付属書1に示された成分に調整されたものを用いた。供試体は鋼製の円筒管内に入れ、側面からの海水の浸透の無いよう供試体と円筒管の隙間にパラフィンロジンを充填した。試験時の海水圧は 6kgf/cm^2 とした。加圧は圧縮窒素ボンベを

用い、1次レギュレータで 10kgf/cm^2 に減圧した後、2次レギュレータで 6kgf/cm^2 に調整して行った。加圧期間は3ヶ月間とした。加圧後の供試体を割裂して加圧面からの塩素イオンの浸透深さをフルオレセインナトリウムを散布して確認し、塩素イオンの浸透状況をエネルギー分散型電子線マイクロアナライザ(EPMA)で観察した。また、この供試体を深さ方向に 1cm づつ切断し、全塩分量(NaCl換算)の分析を行った。

(4) 細孔径分布の測定：透水試験に供したコンクリート中のモルタルを採取し、水銀圧入式ポロシメータで細孔径分布を測定した。

3. 試験結果

3. 1 フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状を表-1に示す。スラグの粉末度が高くなるに従い、ブリージング率が小さくなかった。

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状

	セメント	Es粉末度 (g/cm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ ^a (cm)	air (%)	フリージング ^b (%)
					W	C	S	G	混和剤			
標準養生	N	---	52.0	44.5	165	317	810	1047	C x0.25%	12.2	3.0	5.8
	Es50	4000			162	312	810	1047	C x0.25%	11.1	3.8	4.9
		6000			162	312	810	1047	C x0.25%	12.0	3.7	2.2
		8000			162	312	810	1047	C x0.25%	12.2	3.9	1.4
蒸気養生	N	---	34.5	37.0	138	400	673	1191	C x0.25%	2.5	3.5	3.2
	Es50	4000			138	400	668	1183	C x0.25%	2.5	3.7	2.6
		6000			138	400	668	1183	C x0.25%	2.7	3.6	1.4
		8000			138	400	668	1183	C x0.25%	2.5	3.5	0.9

表-2 圧縮強度試験結果

セメント	Es粉末度 (g/cm ²)	標準養生				蒸気養生				コア	
		3日	7日	28日	91日	1日	3日	7日	28日	91日	
N	----	145	262	425	510	268	358	405	503	579	477
Es50	4000	115	218	388	512	230	311	367	488	567	449
	6000	142	271	433	564	280	380	432	528	601	----
	8000	158	285	443	560	309	402	446	533	598	----

圧縮強度試験結果を表-2に示す。

またスラグ粉末度と強度の関係を図-2に示す。

養生や材令にかかわらず、圧縮強度はスラグ粉末度が高くなるほど大きくなっている。標準養生では、普通セメントと比較すると $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを使用したものは強度が小さいものの、材令28日では同等となり、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ としたものは初期は普通セメントと同等、長期では上回る強度が得られた。同じく $8000\text{cm}^2/\text{g}$ では初期より普通セメントを上回る強度が得られた。蒸気養生では、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ や $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを使用した場合には材令1日で普通セメントを上回る強度が得られた。コアの強度は、蒸気養生した供試体の強度よりも小さくなつた。

3.2 透水試験結果

透水試験で得られた拡散係数を図-3に示す。なお、拡散係数は①式で計算した。⁴⁾

$$\beta^2 = \alpha \frac{Dm^2}{4t\xi^2} \quad \dots \quad ①$$

ここに β^2 : 拡散係数(cm^2/sec)、 Dm : 平均浸透深さ(cm)、 t : 加圧した期間(sec)、 α : 加圧した時間に関する係数、 ξ : 水圧の大きさに関する係数である。

養生方法にかかわらず、スラグを使用したコンクリートの拡散係数が小さく、スラグの粉末度を $4000\text{cm}^2/\text{g}$ から $6000\text{cm}^2/\text{g}$ と高くすると拡散係数はさらに小さくなつた。しかし、 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ と $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合の差異は、わずかであった。

蒸気養生したコンクリートは、標準養生の場合と比較すると拡散係数は大きいが、普通セメント単味と比較してスラグ使用コンクリートでは、蒸気養生した場合の拡散係数の増大の程度が小さい。すなわちスラグを使用すると、コンクリートの水密性が改善され、蒸気養生を行つた場合にもその効果が發揮される。

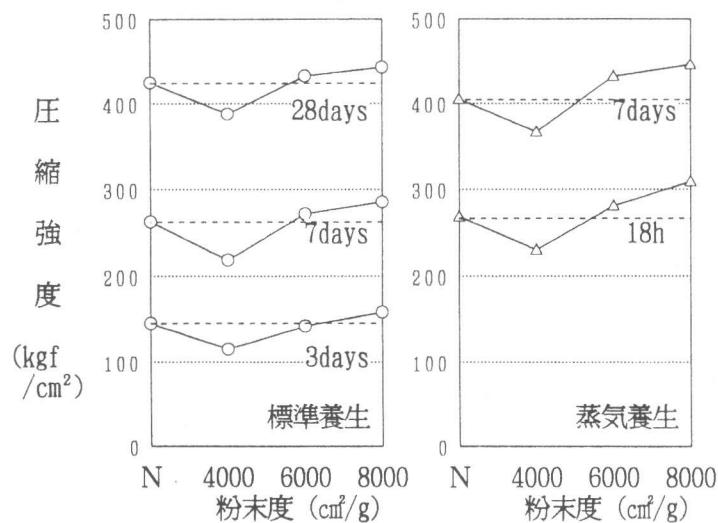


図-2 粉末度と圧縮強度の関係

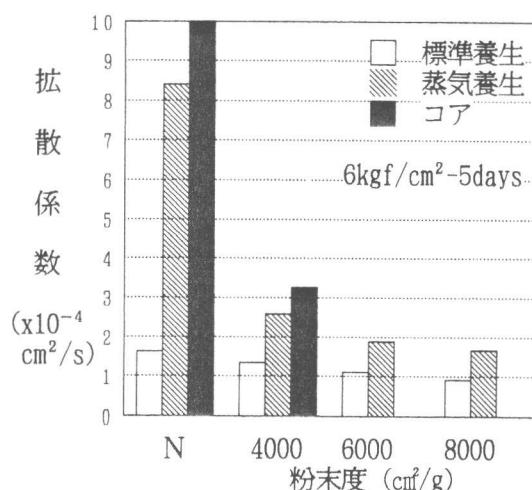


図-3 拡散係数に及ぼす養生の影響

コア供試体による拡散係数は、円柱供試体の場合に較べるとやや大きくなる傾向にあるが、スラグを使用すると確実に拡散係数は小さくなり、水密性改善の効果が認められる。

3.3 海水浸透試験

海水浸透試験後の加圧面からの深さと塩分量(NaCl換算)の関係を図-4に示す。また、蒸気養生を行った場合の、普通セメント単味と粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを使用したコンクリート中の、塩素イオンの分布状況をEPMAで観察した結果を写真-1に示す。

養生方法にかかわらずスラグ使用コンクリートが普通セメント単味の場合と比較して、同一深さでの塩素イオン量が少なくなっている。また写真-1でも確認されるように、塩素イオン浸透深さは、スラグ使用の場合には小さい。

スラグの粉末度と塩素イオン最大浸透深さを図-5に示す。また、水の拡散係数と塩素イオン最大浸透深さの関係を図-6に示す。

スラグ粉末度が高くなると塩素イオン最大浸透深さは小さくなる。また、拡散係数と塩素イオン最大浸透深さには、相関関係が認められ、水が浸透しにくければ塩素イオンも浸透しにくいといえる。

透水試験と海水浸透試験結果

から、スラグ使用コンクリートでは未使用のものに較べ、水および塩分を透過しにくくなることが確認できた。また水および塩分浸透抵抗性は、粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを用いた場合よりも、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ や $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを用いた場合がより改善される。

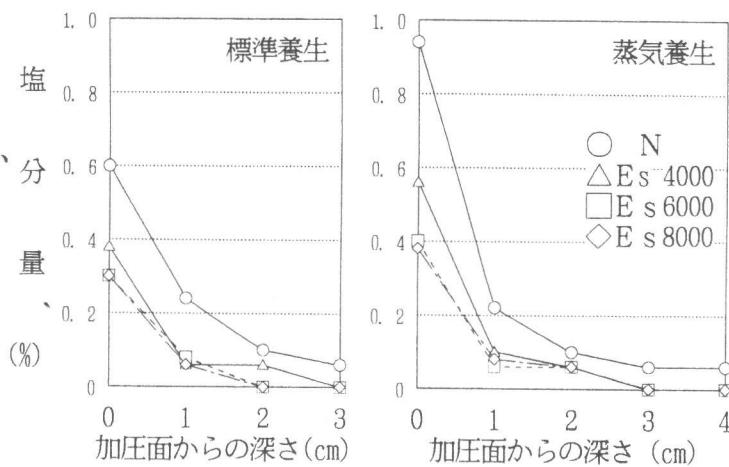


図-4 塩分浸透量

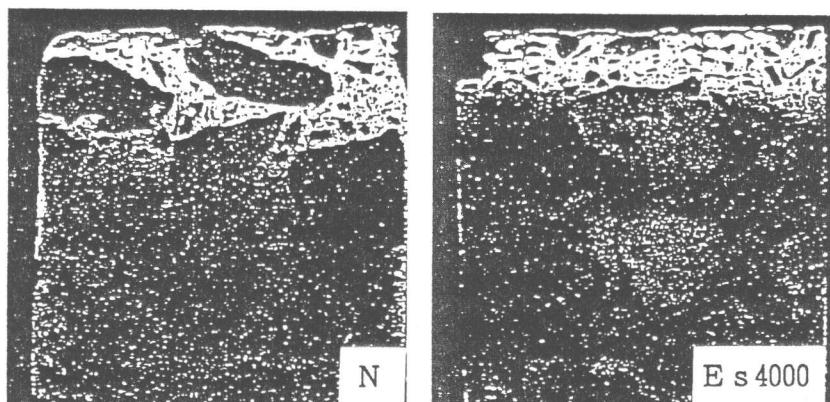


写真-1 EPMA観察写真(各 $4\times 4\text{cm}$)

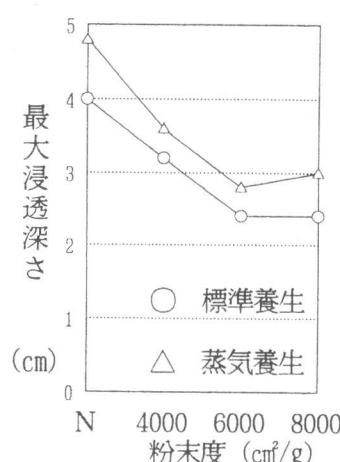


図-5 粉末度と塩素イオン最大浸透深さの関係

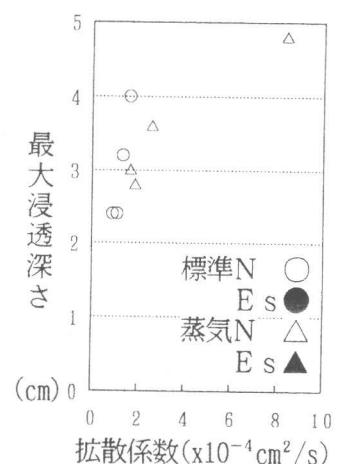


図-6 拡散係数と塩素イオン最大浸透深さの関係

3.4 細孔径分布測定結果

透水試験および海水浸透試験結果の裏付けとして、モルタル硬化体中の細孔径分布を測定した。スラグ粉末度と全細孔量および平均細孔径の関係を図-7に示す。

標準養生の場合は、スラグ粉末度が高くなると全細孔量が少なく、平均細孔径も小さくなつた。一方蒸気養生の場合には、スラグ粉末度が高くなると平均細孔径は小さくなるが、全細孔量は同程度であった。

図-8に、蒸気養生の場合の $4000\text{cm}^2/\text{g}$ と $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを用いた場合の細孔径分布を示す。

スラグ粉末度が高くなることで大きなポアが減少して小さなポアが増加している。そのため平均細孔径は小さくなるものの、全細孔量は変化していないことがわかる。

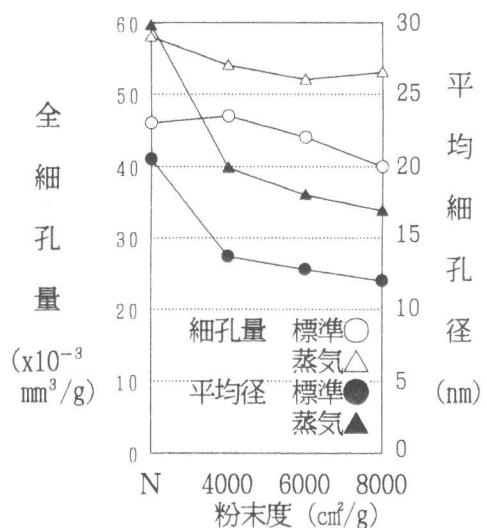


図-7 粉末度と細孔径分布

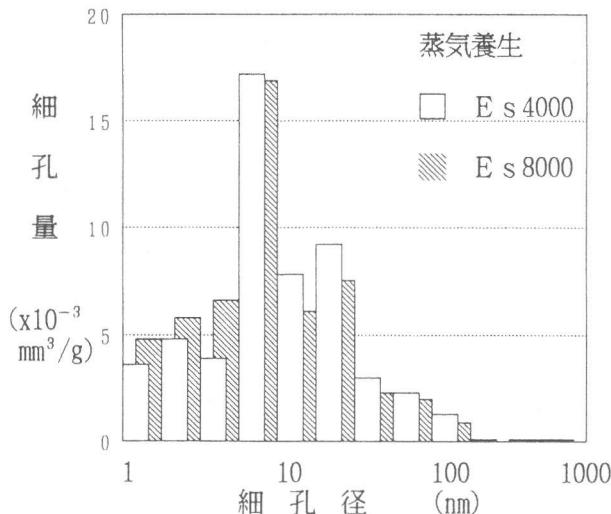


図-8 細孔径分布 (E_s 4000およびE_s 8000)

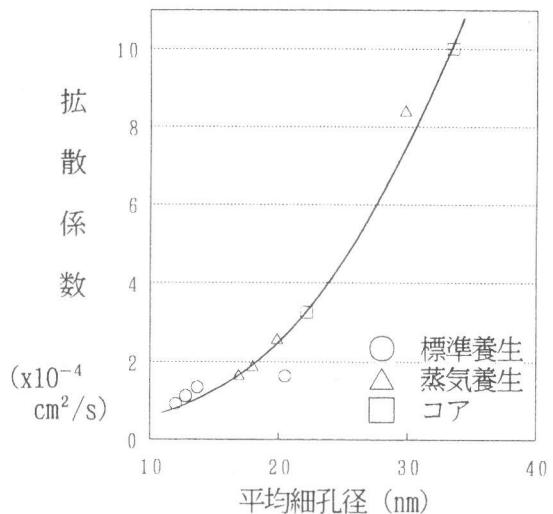


図-9 平均細孔径と拡散係数

図-9に平均細孔径と拡散係数の関係を示す。図に示すように、平均細孔径と拡散係数の相関は高く、全細孔量は同程度でも、平均細孔径が小さいことが、水密性や塩素イオン浸透抵抗性を改善する一つの要因であるといえる。

4. 耐久性の検討

透水試験結果より水の浸透予測を行った。①式で示される拡散係数の算定式において、浸透時間(t)を目的変数として解くと②式のようになり、これより水圧を 10kgf/cm^2 とした場合に5, 10, 15cmの深さまで水が浸透する時間を求めた。その結果を表-3に示す。

$$t = \left(\frac{D m^2}{4 \cdot \xi^2 \cdot \beta^2} \right)^{\frac{1}{4}} : \alpha = t^{\frac{3}{4}} \quad \dots \quad ②$$

これより、例えば蒸気養生の場合に水が10cm浸透するのに要する期間は、普通セメントの場合には1.26年であるのに対し、スラグ添加の場合には、粉末度 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合9.94年、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$

で17.3年であり $8000\text{cm}^2/\text{g}$ では21.3年となっている。他の養生条件の場合にも混入の場合には

表-3 水の浸透予測 (年、一部 d:日)

セメント	Es粉末度 (g/cm^2)	標準養生			蒸気養生			コア		
		5cm	10cm	15cm	5cm	10cm	15cm	5cm	10cm	15cm
N	----	1.96	22.2	91.8	41d	1.26	5.21	30d	339d	3.84
Es50	4000	2.77	31.3	129	320d	9.94	41.1	214d	6.64	27.4
	6000	3.85	43.5	180	1.53	17.3	71.5	----	----	----
	8000	5.44	61.6	255	1.88	21.3	88.0	----	----	----

同一深さまで水が浸透するのに要する時間がかなり長くなつておき、水密性の向上にはスラグの使用が有効であると考えられる。また塩素イオンの浸透深さが拡散係数と相関が高いことから考えると、塩分の浸透に対しても一定深さまで浸透するのに要する期間は、普通セメントに対してスラグを用いることでかなり長くすることが可能であると考えられる。

5.まとめ

普通ポルトランドセメントの50%を、粉末度の異なる高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートについて実験した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグを用いたコンクリートでは、養生方法にかかわらず初期材令から強度発現性が良好で、材令7日では普通セメントを上回る強度が得られる。また、粉末度が高くなると強度発現性も増大する。
- (2) スラグを用いることで拡散係数が小さくなり、水密性が向上する。拡散係数はスラグ粉末度が高くなると小さくなる傾向にあるが、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ と $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグでは、顕著な差異は認められなかった。
- (3) スラグを混入したコンクリートでは、塩素イオン浸透深さが小さくなり、塩分浸透抵抗性が向上する。
- (4) 水密性および塩分浸透に対する抵抗性の向上には、コンクリート組織中の平均細孔径が影響しており、スラグ使用コンクリートでは平均細孔径が普通セメントの約1/2程度であった。

以上のことから、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換することで、標準養生・蒸気養生いずれの場合にも、水や塩素イオンの浸透に対して抵抗性を有する耐久的なコンクリートを得ることが判明した。

〔参考文献〕

- 1)今橋太一 他:蒸気養生を施した高炉スラグ微粉末添加コンクリートの諸性状、第44回セメント技術大会 講演集、pp200～205、1990
- 2)檀 康弘 他:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性、セメントコンクリート論文集、NO.45、セメント協会、1991
- 3)増田 隆 他:高海水圧作用下におけるRCセメントの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp609～614、1990
- 4)村田二郎:コンクリートの水密性の研究、土木学会論文集、第77号、1961、11