

風砕粒状化した電気炉スラグの細骨材としての物理的特性とコンクリート配合

西日本工業大学 正会員 沼田 晉一

1. はしがき

電気炉による製鋼精錬時の酸化期に発生するスラグは、過剰の石灰分が存在するのが一般であって、よって遊離石灰に富むことが多い。しかし、製鋼方法によっては SiO_2 13%, CaO 20%, MgO 4%, 酸化鉄 (FeO , Fe_2O_3) 44%, MnO 6%, Al_2O_3 9%, と石灰分が少なく酸化鉄に富むスラグで操業することがある。この種のスラグは、膨張作用を起こすような不安定な鉱物相は含まれておらず、風砕により急冷粒状化したものは FeO よりも酸化の程度が高い Fe_2O_3 が増加して、より安定な骨材となることが示されている¹⁾。

風砕急冷粒状化スラグ（以下、風砕スラグという）は球状の形状をして、比重は3.6程度あって一般の砂よりも大きい。この種の製鋼スラグを細骨材としてコンクリートに用いると、単位水量が減じうが水セメント比が55%前後の場合は、比重差による材料分離が起こる²⁾。しかし、 W/C が小さいとき²⁾や低 W/C において高流動化したコンクリート³⁾は、十分なワーカビリティを有していて、実用的な細骨材となる。

本研究は、風砕スラグ細骨材の形状について考察し、有用な範囲のサイズ構成について検討したものである。

2. 単粒度の粒群の骨材特性の調査

風砕スラグと比較対象の海砂を5~2.5mm, 2.5~1.2mm, 1.2~0.6mm, 0.6~0.3mmおよび0.3~0.15mm, とふるいの最大最小の寸法比が2となるように粒群に分けて物性の調査を行った。これは、比重・吸水率および実積率がどのように異なっているかを調査するためのものである。Powers⁴⁾は、水中軽装法による実積率試験（実積率 G とする）からLoudonの角張り係数 $1/\psi_L$ を、 $1/\psi_L = 1 + 4.44(G_o - G)$, $G_o = 0.580$ と求める計算式を提案している。それで実積率の試験方法は、JISの標準棒突き法によるほか、ASTM C 29に規定するショベル気中軽装法とLoudonのショベル水中軽装法について実施した。風砕スラグは0.15~0.3mmにおいて球とみなされるので、その気中及び水中軽装実積率から $G_o = 0.590$ とした。気中と水中実積率では、風砕スラグでは前者が大きな値であって、海砂ではその逆となる。海砂は大きい粒に貝殻が多く含まれ、粒形は目視でもよくない。角張り係数は気中実積率と水中実積率の両方で計算し、水中の結果はかっこ内に示した。目視結果では、風砕スラグの1.2mm以下は球に近いので、気中実積率による角張り係数の方が妥当と考えられる。

表-1 単粒度の細骨材の試験結果

粒群 # i	粒群(mm)	風砕スラグ						海砂					
		表乾 比重 ρ_{SSD}	吸水率 Q (%)	実積率 $G \times 100$ (%)			$1/\psi_L$	表乾 比重 ρ_{SSD}	吸水率 Q (%)	実積率 $G \times 100$ (%)			$1/\psi_L$
				棒突き	気中	水中				棒突き	気中	水中	
1	0.15~0.3	3.72	0.33	62.1	58.9	58.9	1.004	—	—	—	—	—	—
2	0.3~0.6	3.69	0.30	61.5	58.9	58.9	1.004	2.54	2.26	58.2	53.0	55.6	1.266 (1.151)
3	0.6~1.2	3.61	0.80	60.9	58.2	56.3	1.036 (1.120)	2.53	2.25	58.0	53.3	54.8	1.253 (1.186)
4	1.2~2.5	3.57	1.94	59.5	57.3	54.4	1.075 (1.204)	2.58	1.00	56.1	51.0	53.7	1.355 (1.235)
5	2.5~5	3.39	4.06	58.3	56.3	53.1	1.120 (1.262)	2.57	1.20	56.3	51.4	50.9	1.337 (1.360)

風砕スラグを粉碎し0.075mm以下とした場合の真比重は $\rho_t = 3.73$ であった。もし風砕スラグ粒子の内部気孔が外部と連通する開気孔だけから構成されていれば、絶乾比重 ρ_a と吸水率 Q (%)の関係は次のようになる。

$$\rho_a = \rho_t \frac{1 - Q/100}{1 + (\rho_t - 1)Q/100} = -1.366 + \frac{5.096}{1 + 0.0273Q}$$

試験結果は図-1に示すように、この曲線関係上に存在する。したがって、風砕スラグの気孔は閉気孔をほとんど含まないと言える。耐久的なコンクリートを得る細骨材としては、風砕スラグの吸水率はJIS A 5005などの規定と同じく3%以下とすべきと考えられる。粒径2.5~5mmのものは、この点で望ましくなく、かつ粒形の点からも好ましくない。

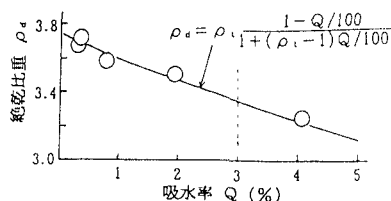


図-1 単粒度風砕スラグの吸水率と絶対乾比重

2.5mm以下に粒度調整した風砕スラグ (FM=2.48, $\rho_{ssD}=3.64$, $Q=0.83\%$, $G=65.9\%$) と5mm以下の海砂 (FM=2.60, $\rho_{ssD}=2.56$, $Q=1.73\%$, $G=63.6\%$) を細骨材とし、砕石2005 (FM=6.62, $\rho_{ssD}=2.73$, $Q=0.55\%$, $G=59.6\%$) を粗骨材として、AE減水剤を用いたスランブ8cm、空気量4.5%のコンクリートを強制二軸ミキサによって造った。ワーカビリティの判断は、通常のスランブ形状・こて仕上げ性などのほか、旧ASTM C124のφ76cmフローテーブルでのフローの形状の最大最小の比が1.05程度を超えないことを判断に追加して最適細骨材率を求めた。

表-2 試験練りの結果

W/C (%)	海砂コンクリート							風砕スラグコンクリート							減水率 (%) ($(W_{\text{混}} - W_{\text{水}}) / W_{\text{混}} \times 100$)
	s/g (%)	b/b ₀	W (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	フロー比		s/g (%)	b/b ₀	W (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	フロー比		
40	37.6	0.649	184	7.1	4.9	1.05		31.7	0.762	164	8.5	4.0	1.03		11
45	39.8	0.657	181	7.0	4.0	1.05		33.8	0.761	161	8.5	4.2	1.05		11
50	40.7	0.654	179	7.8	4.9	1.03		35.1	0.762	156	7.5	4.5	1.05		13
55	41.6	0.653	179	7.2	5.0	1.03		> 細骨材の材料分離が大きく配合不能							—
65	44.0	0.636	170	7.5	5.0	1.02									—

風砕スラグはFMが海砂よりも0.12小さいだけであるが、その単位粗骨材容積 b/b_0 は海砂のものよりも著しく大きくなっており、示方書のFM補正則が成立していない。この点に関し沼田⁵⁾は、骨材の粒度を粒群別に分けて、その大きさを粗骨材は対数荷重平均粒径 $D_0 = 10^{\sum p_i \log D_{0i}}$ 、細骨材は荷重体積平均粒径 $d_v = (\sum p_i d_{0i}^3)^{1/3}$ に代表させて単位粗骨材容積を導く式を提案している (p_i : 粒群の割合, D_{0i} 及び d_{0i} : 粒群 i の対数平均粒径)。この関係は次の通りである:

$$\frac{d(b/b_0)}{d(d_v)} = -\frac{3}{D_0} (b/b_0)^{4/3}$$

この場合は、粗骨材は $D_0=10.61\text{mm}$ 、細骨材は、海砂では $d_v=1.511\text{mm}$ 、風砕スラグは $d_v=1.075\text{mm}$ である。上式の積分定数には、細骨材の角張り係数を考慮した比表面積やW/C比及び骨材に固着するペースト膜厚などが関係する。この海砂の粒度を変えた一連の試験結果から、W/C=0.45において $b/b_0=0.897-0.155 \times d_v$ の関係がある。比重、実積率などが異なる風砕スラグに $d_v=1.075\text{mm}$ としてこの関係を代入すると、 $b/b_0=0.730$ となる。この値は実際の配合割合の値よりもやや小さいが、比重が大きいために同一スランブであっても、単位容積重量が大きくなるコンクリートの同一スランブのものは、実際は一般のものよりも固練りであることを考慮すれば妥当な値と言える。

4. まとめ

風砕スラグは、2.5mmを超える粒を取り除いて細骨材に富配合のコンクリートに使用すれば、単位水量が少ない良質のコンクリートを造り得るとみられる。配合特性は、コンクリートの比重差がコンシステンシーに及ぼす影響を除けば、一般の場合とあまり変わらない。

参考文献

- 1) 森野奎二ほか: セメント・コンクリート論文集 No.48, pp.310-315, 1994
- 2) 沼田 晋一ほか: セメント・コンクリート論文集 No.48, pp.304-309, 1994
- 3) 出光 隆ほか: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.161-166, 1993
- 4) T.C.Powers: Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc., pp.33-34, 1968
- 5) 沼田 晋一: 西日本工業大学紀要 理工学編第25巻, 1995 (投稿中)