

[1018] 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの発熱特性

正会員 阪本好史 (新日鐵化学高炉セメント技術センター)
 富沢年道 (新日鐵化学高炉セメント技術センター)
 近田孝夫 (新日鐵化学セメント部)
 正会員 ○長尾之彦 (新日鐵化学高炉セメント技術センター)

1. まえがき

高炉スラグ微粉末 (以下、スラグ粉末と記す) は、普通ポルトランドセメントと工場で混合した高炉セメントとして広く利用されてきたが、コンクリート用の混和材料としての利用方法についても以前より数多くの研究報告がなされ実用化されつつある。しかしながら、スラグ粉末の諸要因がセメントコンクリートの性質におよぼす影響を検討したものは少ない。本報告は、スラグ粉末混和材料として用いた場合の発熱特性を明らかにするため、石コウ添加の有無、粉末度、置換率および温度条件を変えた場合のセメントの水和熱とコンクリートの断熱温度上昇試験を行ったものである。

2. 使用材料

(1) スラグ粉末は表1に示す7種類のものを用いた。すなはち、スラグ粉末の粉末度が発熱特性におよぼす影響については、同一水砕スラグ (S10) を工場実機ボールミルで粉砕した粉末度の異なる4種類のスラグ粉末を用いた。スラグ置換率と石コウ添加の有無の影響については、工場で粉砕した石コウ無添加のスラグ粉末 (S20) とそれに石コウ (CaSO4 2H2O、一級試薬) をSO3で2%になるように添加したスラグ粉末 (S2G)、および工場で粉砕した石コウ添加スラグ粉末 (S3G) を用いた。

(2) 普通ポルトランドセメント：3銘柄を等量混合したものを用いた。その性質を表-1に示す。

(3) 骨材：細骨材は海砂 (比重 2.57, 吸水率 1.77%, 粗粒率 2.75) を、粗骨材は最大粗骨材寸法 20mmの碎石 (比重 2.72, 吸水率 0.45%, 粗粒率 6.57) を使用した。

(4) 混和剤：AE減水剤としてボゾリスN0.70を、AE助剤として303Aを使用した。

(5) その他の材料：水和熱、微小熱の練り混ぜ水は、蒸留水、NaOH(0.5N, 2.0N 試薬) を使用した。

表-1. セメント, スラグ粉末の化学成分と物理的性質

試料名	記号	石こうの有無	化学成分 (%)										塩基度	ガラス化率 (%)	粉末度 cm ² /g	活性度指数	
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	7日				28日	
高炉スラグ微粉末	S10	無	33.2	15.7	0.9	42.4	6.2	1.1	0.0	0.25	0.25	1.94	98	2200	0.48	0.89	
			3250	0.52	0.91												
			3800	0.56	0.99												
			4300	0.66	1.11												
	S20	無	33.5	14.6	0.9	42.2	6.2	1.2	0.1	0.27	0.28	1.88	98	3640	0.63	1.04	
	S2G	有	33.5	14.6	0.9	42.2	6.2	1.2	2.0	0.27	0.28	1.88	98	3640	0.69	1.04	
S3G	有	32.7	12.7	1.6	41.5	6.3	0.8	2.0	0.16	0.35	1.85	98	4280	0.73	1.03		
普通ポルト	N	-	21.6	5.4	3.1	63.8	1.6	0.4	2.0	0.29	0.31	-	98	3200	* 242	* 397	

注) *はモルタル圧縮強さ (kg/cm²)

表-2. コンクリートの配合

スラグ粉末の種類	打込み温度 (°C)	置換率 (%)	粉末度 (cm ² /g)	水セメント比 W/C (%)	置骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/ \bar{m}^3)					温和剤	測定結果		
						水	セメント	スラグ粉末	細骨材	粗骨材		スランプ (cm)	空気量 (%)	
S20	20	0	3640	57.0	45.2	171	300	—	807	1034	750 (1A)	12.0	4.4	
		10		57.0	45.2	171	270	30	804	1034	750 (1A)	12.0	3.8	
		30		56.7	45.2	171	210	90	804	1031	750 (1A)	12.5	4.0	
	10	55.3		45.0	166	150	150	802	1039	750 (2A)	13.0	4.3		
	20	56.0		45.1	168	150	150	802	1034	750 (2A)	12.5	3.8		
	30	56.7		45.2	170	150	150	802	1028	750(2.5A)	11.5	3.6		
S2G	20	10	3640	56.7	45.2	170	270	30	806	1034	750 (1A)	12.5	4.0	
		30		56.7	45.2	170	210	90	804	1031	750(1.5A)	13.0	4.1	
		50		56.0	45.1	168	150	150	804	1034	750 (2A)	13.0	3.9	
S10	20	50	3640	2200	55.7	45.1	167	150	150	804	1034	750 (2A)	12.5	3.8
		3800		56.0	45.1	168	150	150	802	1034	750 (2A)	12.5	3.8	
		4300		56.0	45.1	168	150	150	802	1034	750 (2A)	12.0	3.7	

3. 実験方法

(1) 水和熱: JIS R 5203「セメントの水和熱測定方法 (溶解熱法)」に準じ、普通ポルトランドセメントにスラグ粉末を混入した試料とスラグ粉末単味を0, 5N, 2, 0NのNaOH水溶液で反応させた場合の水和熱を測定した。養生温度は10, 20, 40°Cである。また、参考として一部の試料について、カロリメーターによる微小熱量の測定とX線解析を行った。

(2) 断熱温度上昇: 空気循環式断熱温度上昇試験機を用いて材令14日まで測定した。打込み時のコンクリート温度は10, 20, 30°Cとした。コンクリートの配合を表-2に示す。

4. 結果および考察

4.1 水和熱

(1) スラグ粉末の置換率

表-1に示した3種類のスラグ粉末を普通ポルトランドセメントに混入した場合のスラグ粉末の置換率と水和熱の関係を図-1に示す。スラグ粉末の種類にかかわらず、置換率が大きくなると各材令とも水和熱は低下する傾向にあり低下の割合は材令初期ほど大きくなった。スラグ粉末の種類による水和熱の差異は置換率が大きいほど、材令初期ほど大きくなった。同一スラグ粉末(S20, S2G)でみると、材令7日では石コウを添加したものの方が無添加のものより水和熱は大きいが、多少のバラツキはあるものの材令の経過につれて差は小さくなるようであ

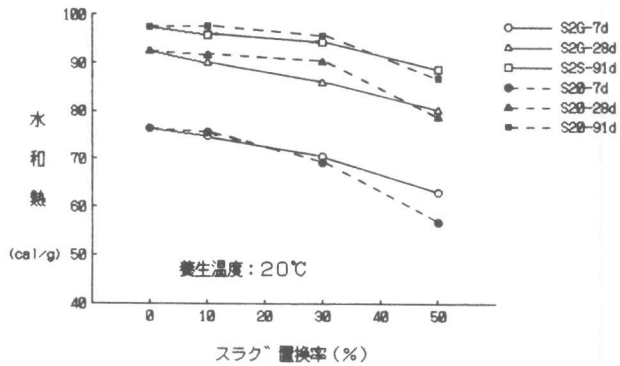


図-1. スラグ粉末の置換率と水和熱の関係

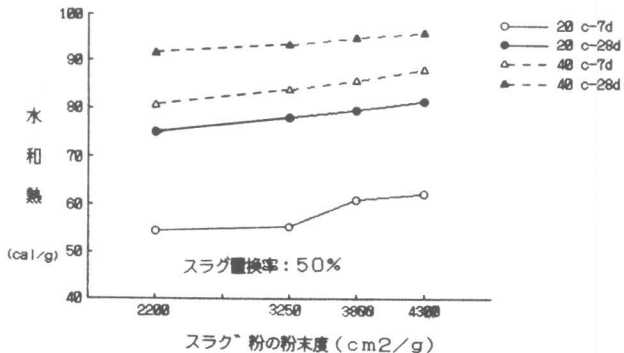


図-2. スラグ粉末の粉末度と水和熱の関係

る。これは、石コウの普通ポルトランドセメントに対する作用と一般にいわれているスラグ粉末への促進作用によるものであろう。また、この傾向は表-1に示す活性度指数でもみられる。

(2) スラグ粉末の粉末度

スラグ粉末の置換率が50%の場合のスラグ粉末の粉末度と水和熱の関係を図-2に示す。スラグ粉末の粉末度が大きくなるほど水和熱は増加する傾向にあり、その増加の割合は養生温度が高いほど材令初期ほど大きかった。

スラグ粉末を0.5N, 2.0NのNaOH水溶液で反応させた場合の水和熱測定結果を図-3, 図-4に示す。普通ポルトランドセメントと混合した場合と同様にスラグ粉末の粉末度が大きくなるにつれて水和熱は増加した。しかし、各材令の水和熱は異なっており、0.5Nの場合養生温度20℃の7日と28日および40℃の7日の水和熱がほぼ等しく、40℃の28日では比較的大きくなっている。一方、2.0Nの場合は0.5Nの場合より相対的に水和熱が大きく、養生温度の影響もほとんど認められなかった。

図-5, 図-6に普通ポルトランドセメントと混合した試料とスラグ粉末をNaOHで刺激した試料の微小熱測定結果とX線回折

図の一例を示す。図-5より、材令2日の発熱量は普通ポルトランドセメントをスラグ粉末で50%置換すると、普通ポルトランドセメント単味の約60%に減少した。一方、スラグ粉末をNaOHで刺激した場合には、材令2日の発熱量は普通ポルトランドセメントよりも大きくなり、スラグ粉末の反応が促進されていることが分かる。以上のことから、2.0Nの場合(図-4)に養生温度の影響がほとんど認められなかったのは、その反応促進作用が極初期において非常に大きかったため、以後の水和反応

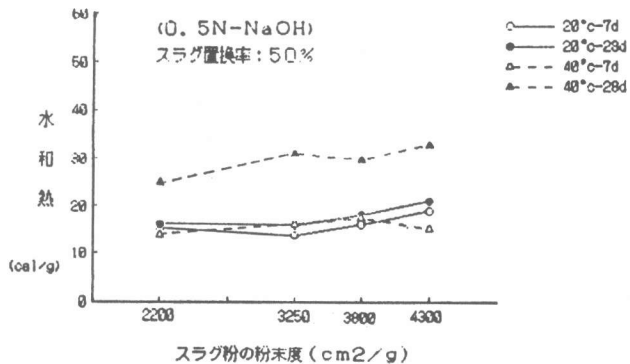


図-3. NaOHで刺激したスラグ粉末の水和熱

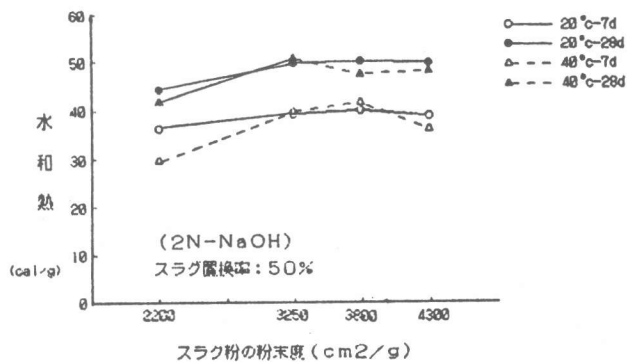


図-4. NaOHで刺激したスラグ粉末の水和熱

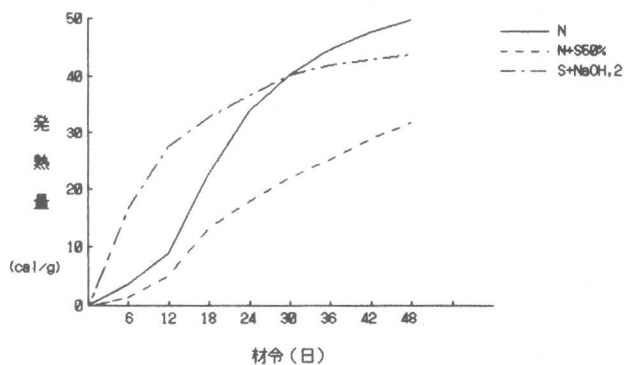


図-5. 微小熱測定結果

に何らかの影響をおよぼしたものと考えられる。また、X線回折結果では未反応のスラグ粉末は $2\theta = 30^\circ$ 付近でなだらかな凸型を示すのみでガラス質であることが分かるが、NaOHでアルカリ刺激したものは水和生成物と考えられるピークが顕れる。これは、Regourd (1) やNarang (2) らが報告している C-S-H, C₂ASH₈, C₄AH₁₃ の水和物を示すものであろう。

(3) 温度条件

養生温度と水和熱の関係を図-7に示す。養生温度が高いほど水和熱は大きくなる傾向にあり、材令91日においてもこの傾向が認められる。また、石コウ無添加のスラグは石コウを添加したものに比べて養生温度の影響が多少大きい傾向を示した。

4. 2断熱温度上昇

(1) スラグ粉末の置換率

単位結合材量 300 Kg/m^3 、打込み温度 20°C におけるスラグ粉末の置換率が異なる場合の断熱温度上昇試験結果を図-8に示す。断熱温度上昇は水和熱と同様にスラグ粉末の置換率が増えるに従って低下する傾向にあり、石コウを添加したスラグ粉末は無添加のものに比べて断熱温度上昇は大きかった。

断熱温度上昇測定結果を、一般によく用いられる断熱温度上昇曲線式(式1)に近似して求めた最終断熱温度(K)、曲線係数(r)とスラグ粉末の置換率の関係を図-9に示す。

$$Q = K(1 - e^{-rt}) \dots (式1)$$

Q: 断熱温度上昇(°C), e: 自然対数の底, t: 材令(日)

スラグ粉末の置換率が増加するにしたがってKとrはほぼ直線的に減少し、本試験結果では置換率50%の場合、普通ポルトランドセメントに比べてKが約 10°C 、rが約0.2低下した。また、石コウを添加したスラグ粉末は無添加のものに比べてK、rとも大きい傾向にあるようである。置換率50%でrの値が石コウ添加、無添加ともほぼ等しいのは、水和熱の傾向からみて測定誤差によるものと考えられる。

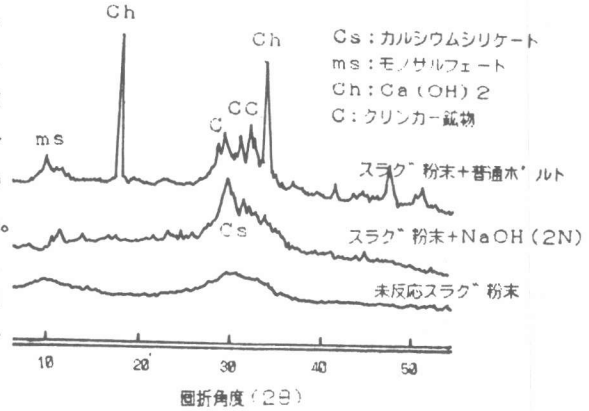


図-6. 粉末X線回折図

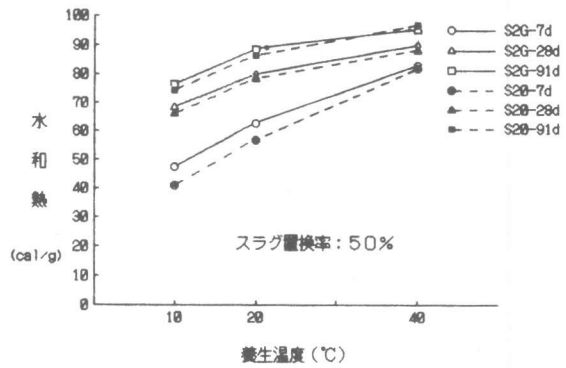


図-7. 養生温度と水和熱の関係

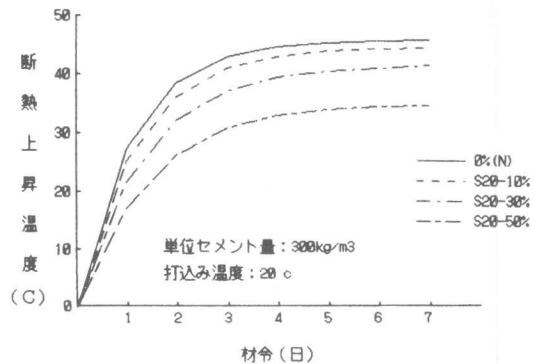


図-8. 断熱温度上昇試験結果

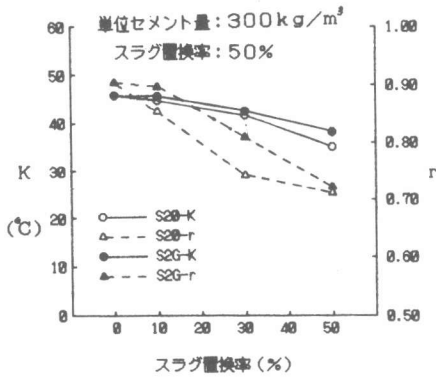


図-9. スラグ粉末の置換率と K, r の関係

(2) スラグ粉末の粉末度

スラグ粉末の粉末度と K, r の関係を図-10 に示す。スラグ粉末の粉末度が大きくなるに従って、K, r はほぼ直線的に増加し、粉末度 500 cm²/g につき、K が約 1°C, r が約 0.04 増加した。

(3) 温度条件

打ち込み温度と K, r の関係を図-11 に示す。打ち込み温度が上昇するにつれて r は増加し、スラグ粉末や普通ポルトランドセメントの水和反応が活発化していることがうかがえる。しかし、K は打ち込み温度が上昇するにつれてわずかに減少する傾向にあり、水和熱の場合と異なっている。本試験結果では、打ち込み温度が 10°C 高いごとに K は約 0.3°C 減少し、r は約 0.07 増加した。

4.3 部材モデルの温度履歴

スラグ粉末の品質や温度条件の違いが、コンクリート構造物の温度上昇にどの程度影響をおよぼすかを検討するために、部材厚 1m, 外気温度 (打ち込み温度) 20°C, 熱拡散係数 0.08 m²/day の条件でコンクリート部材の温度履歴を計算した。温度履歴の算定には Schmidt 法を用い、部材の上面および下面 (一次元) で放熱するものと仮定した。結果を図-12, 図-13, 図-14 に示す。

普通ポルトランドセメントは、部材中心部の最高温度が約 26°C であるが、粉末度 3640 cm²/g のスラグ粉末で 50% 置換することにより、石コウ無添加の場合約 17°C, 石コウ添加の場合約 19°C まで低減することができる。また、最高温度到達後の温度低下速度も緩やかであり、温度応力の低減に有効であるものと考えられる。

スラグ粉末の粉末度が 4300 cm²/g の場合、部材中心部の最高温度は約 19°C、2200 cm²/g の場合約 14

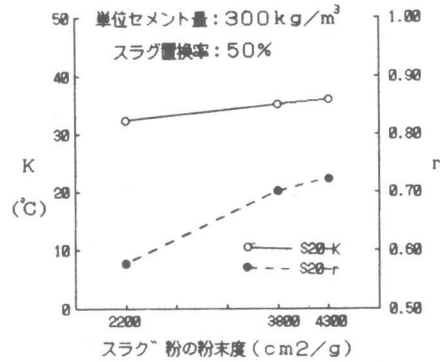


図-10. スラグ粉末の粉末度と K, r の関係

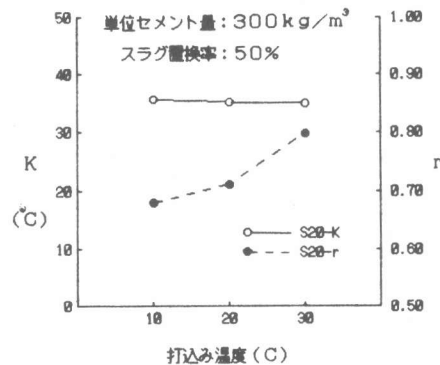


図-11. 打ち込み温度と K, r の関係

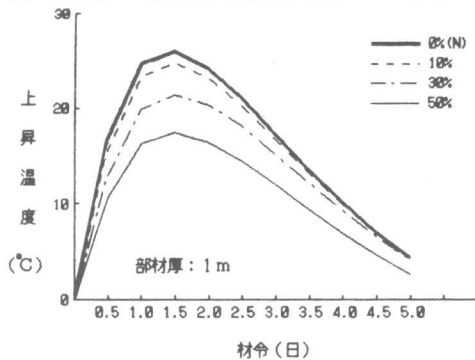


図-12. 温度履歴算定結果 (その1)

普通ポルトランドセメントは、部材中心部の最高温度が約 26°C であるが、粉末度 3640 cm²/g のスラグ粉末で 50% 置換することにより、石コウ無添加の場合約 17°C, 石コウ添加の場合約 19°C まで低減することができる。また、最高温度到達後の温度低下速度も緩やかであり、温度応力の低減に有効であるものと考えられる。

℃であり、最高温度は粉末度 500cm³/gにつき約1℃変動する。

現在、一般コンクリート用として使用されているスラグ粉末の粉末度は約 4000 ±500 cm³/gであるので、通常のスラグ粉末の場合、部材厚1m程度の構造物では、粉末度の影響はほとんど無視できるものと考えられる。しかし、部材厚が大きい構造物や高粉末度のスラグ粉末を用いる場合にはそのコンクリートの温度特性を調べる必要がある。

打込み温度が高い場合には、部材中心部の最高温度は大きくなる傾向にあるが、その影響の程度は10℃につき約1～2℃であり、計算結果では意外に小さな値となった。しかし、部材厚や直射日光による材料温度の上昇等で、影響がより大きくなる可能性が考えられるので、打込み温度の管理は充分に行う必要がある。

5. まとめ

石コウ添加、無添加および粉末度の異なるスラグ粉末を用いた水和熱、断熱温度上昇試験を行った結果、以下のことが分かった。

- 1) スラグ粉末の置換率の影響は大きく、置換率が増えると発熱量は大幅に低減される。
- 2) 石コウを添加したスラグ粉末は、無添加のものに比べて発熱量は大きい。
- 3) スラグ粉末の粉末度が大きくなると、発熱量は増加する。

参考文献

- [1] M. REGOURD: Structure and behavior of slag portland cement hydrates, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. I. III-2/10 26
- [2] K. C. NARANG and S. K. CHOPRA: Studies on Alkali Activation of BF, Steel and Alloy slags, Silicates Industriels 1983/9

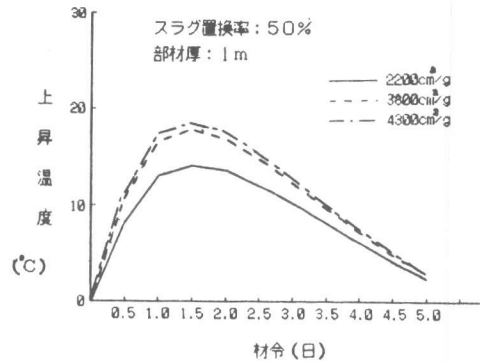


図-13. 温度履歴算定結果(その2)

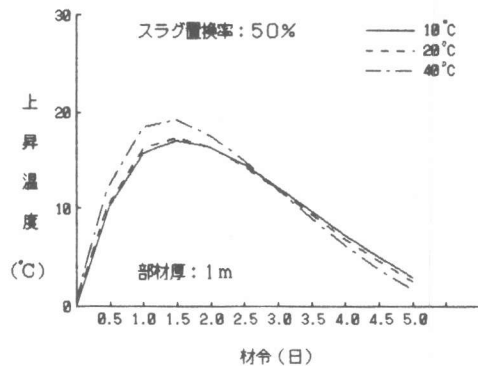


図-14. 温度履歴算定結果(その3)