

V-193

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱条件下における強度発現特性

北海道開発局 開発土木研究所

正会員 渡辺 宏

北海道開発局 開発土木研究所

正会員 堺 孝司

1. まえがき 最近、コンクリート構造物の多様化、大型化および通年施工化が見られ、低温環境下において低発熱であると同時に高強度なコンクリートが要求されるようになってきた。そこで著者らは、これまでこのようなコンクリートの開発に向けて、高炉スラグ高微粉末を用いた低発熱・高強度コンクリートに関する研究を行ってきた。しかし、これらのコンクリートの断熱条件下における強度発現については検討がなされていなかった。そこで、本研究では、断熱温度上昇試験におけるコンクリート温度と同じ温度で養生した供試体を用いて圧縮強度試験を実施し、断熱条件下におけるコンクリートの強度発現特性について検討を行った。

2. 実験概要 セメントは、粉末度が $3,270\text{cm}^2/\text{g}$ の中層熟ポルトランドセメントを用いた。高炉スラグ微粉末は、粉末度が $4,140, 8,690$ および $16,120\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた。石膏は二水石膏を用い、スラグ粉末度が $4,140\text{cm}^2/\text{g}$ では SO_3 で2%添加し、 $8,690$ および $16,120\text{cm}^2/\text{g}$ ではそれぞれ4%添加した。骨材は、苫小牧市樽前産の海砂（比重2.79、吸水率0.91%、 $\text{FM}2.74$ ）と、小樽市見晴産の碎石（ $G_{\text{max}} 25\text{mm}$ 、比重2.67、吸水率1.86%）を用いた。高性能AE減水剤は芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物を主成分とする遅延型のものを使用した。合わせて、空気量調整のためAE助剤を用いた。コンクリートの練混ぜは、容量 100L のパン型強制練りミキサーを用い、練り混ぜ時間は全材料投入後3分とした。コンクリートの配合を表-1に示す。目標スランブおよび目標空気量はそれぞれ $8\pm 1\text{cm}$ および $3.5\pm 1\%$ とした。コンクリートの練り混ぜ温度は 20°C とし、養生温度は、 20°C 、 5°C および断熱温度上昇試験におけるコンクリート温度（断熱温度）とした。養生は、何れも供試体作成直後から脱型までの1～2日間を封かん養生とし、その後材令3日、7日、28日、および91日の試験時まで水中養生を行った。圧縮強度試験用の供試体寸法は $\phi 10\times 20\text{cm}$ とした。断熱温度上昇試験用の供試体寸法は $\phi 44\times 29\text{cm}$ であり、試験装置は空気循環式のものを用いた。細孔分布の測定は水銀圧入法により行い、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は示差熱分析により求めた。測定試料は強度試験終了後のものを用い、測定結果は硬化ペースト当たりで整理した。

3. 実験結果および考察 図-1に、断熱温度上昇試験結果を示す。スラグ粉末度が大きいほど、材齢1日前後における断熱温度上昇量（ $Q_{(t)}$ ）は大きくなるが、材齢1.5日以降においてはスラグ粉末度が $4,140\text{cm}^2/\text{g}$ の場合の方が $8,690\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の場合よりも大きくなった。これは、粉末度が大きいスラグほど初期に著しい水和が起り発熱が大きくなるが、その後の発熱が抑制されることを示すものである。

図-2に、 20°C 養生および断熱養生した場合の圧縮強度（ f_c ）と材齢の関係を示す。断熱養生の場合の強度発現は 20°C 養生の場合と異なり、初期の強度発現が大きくなった。この傾向は、粉末度が大きくなるほど顕著となり、スラグ粉末度が $16,120\text{cm}^2/\text{g}$ の場合の f_c は材齢1日において $53\text{kgf}/\text{cm}^2$ となった。材齢28日において、スラグ粉末度が $8,690\text{cm}^2/\text{g}$ 以下の断熱養生の場合の f_c は、 20°C 養生の場合とほぼ同じとなったが、スラグ粉末度が $16,120\text{cm}^2/\text{g}$ で断熱養生した場合の f_c は、 20°C 養生で材齢91日におけるものよりも大きくなった。このように、断熱養生の強度発現特性は、スラグ粉末度の大きさによって異なった。圧縮強度と積算温度

表-1 コンクリートの配合

スラグ 粉末度 (cm^2/g)	スラグ 置換率 (%)	石膏 添加率 (%)	高性能 ¹⁾ AE 減水 剤(%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				水 W	結合 材B	細骨 材S	粗骨 材G	SP ²⁾ (kg)	AE ³⁾ (ml)	
4,140	60	2	1.4	130	371	798	1107	5.19	18.6	
8,690		4	1.9	116	331	828	1147	6.29	18.2	
16,120			2.5	117	334	825	1144	8.35	26.7	

1) 添加量を示し、これは、コンクリートが分離を起こさない範囲で最大量とした。 2) 高性能AE減水剤 3) AE剤

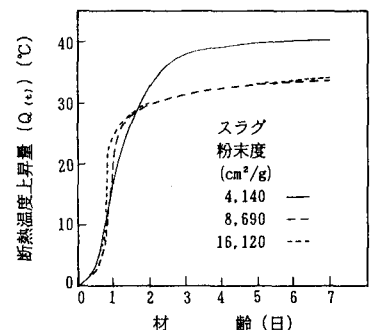


図-1 断熱温度上昇試験結果

の関係においても、断熱養生の強度発現特性は、スラグ粉末度の大きさによって異なった。

図-3に、断熱養生の圧縮強度と断熱温度上昇量の関係を示す。スラグ粉末度が

大きいほど断熱養生の f_c は大きくなっており、粉末度の大きいスラグほど小さな発熱で大きな強度を発現できることが分かる。この現象は、スラグ粉末度が16,120 cm^2/g の場合に顕著に現われ、材齢

1日における f_c は533 kgf/cm^2 と、短時間で著しい強度発現が起こっているのに拘らず、 $Q_{(t)}$ は25 $^\circ\text{C}$ と小さな発熱量であった。

図-4に、細孔径分布を示す。断熱養生では、スラグ粉末度が4,140 cm^2/g の場合、細孔半径が1.5~2.7 μm の範囲の細孔容積が増加し、4.7~15 μm のものが減少した。また、8,690 cm^2/g 以上の場合、1.5~15 μm のものが減少した。

図-5に、圧縮強度と総細孔量の関係を示す。総細孔量が減少すると f_c は増加し、同一総細孔量であってもスラグ粉末度が大きくなると f_c は大きくなることがわかる。断熱養生の場合の総細孔量は、高温履歴の養生であるにも拘らず、その量が20 $^\circ\text{C}$ 養生の場合よりも少なくなった。しかし、総細孔量の減少の割には f_c の増加はそれほど大きなものとはならなかった。

図-6に、硬化ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を示す。材齢3日以降における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の経時変化は小さく、粉末度が大きいスラグほどその量は少なくなった。断熱養生の場合の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は、20 $^\circ\text{C}$ 養生の場合よりも少なくなり、両者の差はスラグ粉末度が4,140 cm^2/g の場合の方が8,690 cm^2/g の場合よりも大きくなっている。このことは、スラグ粉末度が4,140 cm^2/g の場合の方が8,690 cm^2/g の場合よりも温度依存性が高いことを示している。スラグ粉末度が16,120 cm^2/g の場合、材齢1日における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は同定されなかったが、断熱養生における材齢1日の f_c は533 kgf/cm^2 と著しく大きくなった。このように、スラグを用いたコンクリートの断熱養生下における水和形態は、粉末度の違いによって大きく異なることが明らかとなった。

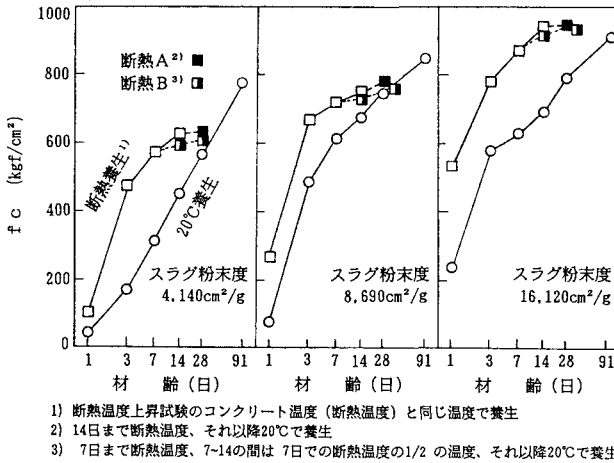


図-2 圧縮強度 (f_c) と材齢の関係

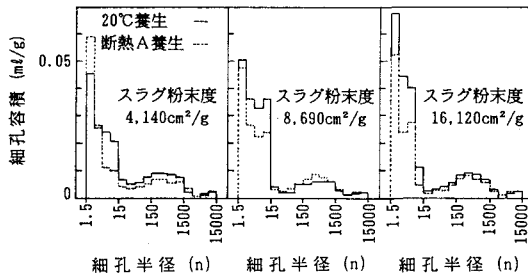


図-4 細孔径分布

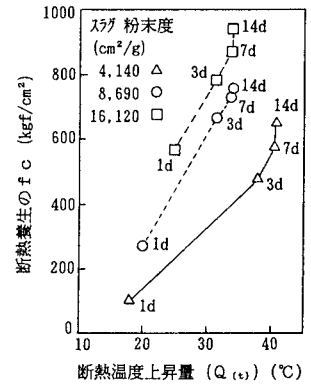


図-3 断熱養生の圧縮強度 (f_c) と断熱温度上昇量 ($Q_{(t)}$) の関係

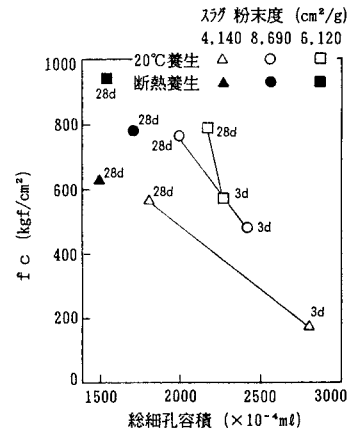


図-5 圧縮強度 (f_c) と総細孔容積の関係

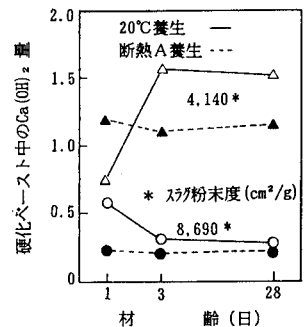


図-6 硬化ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量