

論文 断熱温度上昇下における高炉スラグ高微粉末を用いた コンクリートの強度と細孔構造

渡辺 宏*¹・堺 孝司*²・若杉伸一*³

要旨：高炉スラグ高微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇下における強度発現特性および細孔構造に及ぼすセメントの種類およびスラグ粉末度の影響について検討を行った。その結果、高炉スラグ高微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇下における強度発現は、材齢 1日において著しくなり、材齢91日においても20℃養生の場合よりも大きかった。細孔構造も20℃養生の場合より緻密化した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、断熱温度上昇量、圧縮強度、細孔構造

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（以下、スラグと略称）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。合わせて、断熱温度上昇下において、スラグの粉末度が強度発現に及ぼす影響について検討を行った。その結果、断熱温度上昇下におけるスラグを用いたコンクリートの水和形態および強度発現特性は、スラグ粉末度によつて大きく異なることが明らかとなった[1]。

本研究は、新たに、低水結合材比と低熱セメントを考慮し、スラグを用いたコンクリートの断熱温度上昇下における強度発現特性および細孔構造に及ぼす影響について検討を行ったものである。

表-1 使用材料

セメント	中庸熱ポルトランドセメント 3,210cm ² /g* 低熱ポルトランドセメント 3,240cm ² /g*
高炉スラグ微粉末	8,690cm ² /g* 16,120cm ² /g*
シリカフューム	200,000cm ² /g*
石膏	二水石膏
細骨材	苫小牧市樽前産海砂 比重 2.67 吸水率 1.17 FM 2.60
粗骨材	小樽市見晴産碎石 比重 2.68 吸水率 1.17
高性能A E減水剤	芳香族アミノスルホン酸高分子化合物
A E助剤	ロジン系

* ブレーン比表面積

表-2 セメントの鉱物組成

セメントの種類	鉱物組成(%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
中庸熱ポルト	43	34	5	11
低熱ポルト	28	51	3	11

*1 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室主任研究員（正会員）
*2 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室長、工博（正会員）
*3 日鉄セメント株式会社研究開発部

2. 実験概要

2. 2 使用材料および配合

使用材料を表-1に、セメントの鉱物組成を表-2に示す。セメントは、中庸熱ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントを用いた。混和材としてはスラグとシリカフェームを用いた。混和剤は、高性能AE減水剤とAE助剤を用いた。表-3に、コンクリートの配合を示す。

s/aは41%とし、目標スランプおよび目標空気量はそれぞれ 8 ± 1 cm および 3 ± 1 %とした。モルタルの配合は、表-3に示すコンクリートの配合から粗骨材を除いたものとした。

2. 3 実験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。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、練混ぜ時間は全材料投入後 3分とした。コンクリートの練混ぜ温度は20℃とした。養生は、何れも供試体作成直後から脱型までの1日間を封かん養生とし、その後材齢 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が、養生温度は、20℃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。圧縮強度試験用の供試体寸法は $\phi 10 \times 20$ cmとした。細孔分布および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の測定試料は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体より採取し、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

3. 1 コンクリートの断熱温度上昇量

図-1に、コンクリートの断熱温度上昇試験結果を示す。中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合、スラグ粉末度が大きくなると若干断熱温度上昇量が大きくなった。低熱ポルトランドセ

表-3 コンクリートの配合

配合 記号	水結合 材比 (%)	セメン トの 種 類	スラグ 粉末度 (cm^2/g)	高性能 減水剤 添加率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)					
					水 W	結合材 B	細骨材 S	粗骨材 G	SP ¹⁾ (kg)	AE ²⁾ (ml)
M 8	30	中庸熱	8,690	2.2	108	360	809	1,166	7.92	36.0
M16				2.8	109	363	806	1,163	10.16	72.6
L16		低熱	16,120	2.8	108	360	809	1,166	10.08	72.0

スラグ置換率：50%、シリカフェーム置換率：10%、石膏添加率：4%

1) 高性能AE減水剤 2) AE助剤

表-4 試験項目および試験方法

試 験 項 目	試 験 方 法
圧 縮 強 度 試 験	J I S A 1 1 0 8 ($\phi 10 \times 20$ cm)
断 熱 温 度 上 昇 試 験	空気循環式 (供試体寸法： $\phi 44 \times 29$ cm)
簡易断熱温度上昇試験	断熱試験槽 (供試体寸法： $\phi 20 \times 22$ cm)
細 孔 分 布 測 定	水銀圧入法
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量測定	示差熱分析

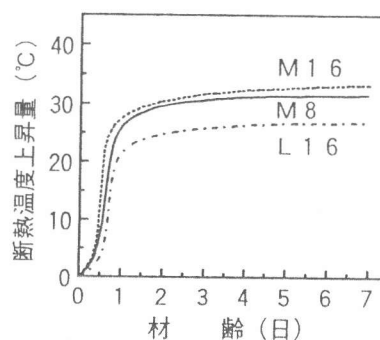


図-1 断熱温度上昇試験結果

メントを用いた場合の断熱温度上昇量は、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合よりも試験開始直後から小さく、スラグ粉末度が $16.120\text{cm}^2/\text{g}$ の場合の終局断熱温度上昇量の差は 6.5°C であった。

3.2 強度発現

図-2に、圧縮強度と材齢の関係を示す。

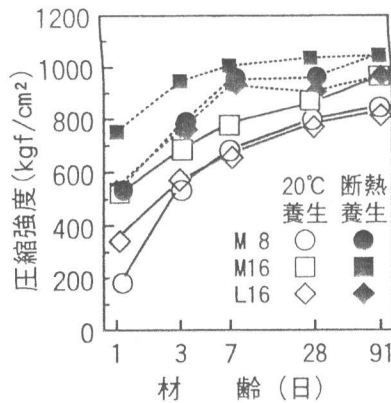


図-2 圧縮強度と材齢の関係

材齢1日における断熱養生の場合の強度発現は 20°C 養生の場合よりも大きくなり、とくに、スラグ粉末度が $8690\text{cm}^2/\text{g}$ の中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合に顕著となった。断熱養生の場合の材齢の経過に対する圧縮強度の増加は、材齢7日まで大きかったが、その後は小さなものとなった。しかし、材齢91日においても、断熱養生の場合の圧縮強度は 20°C 養生の場合よりも大きなものであった。図-3に示す圧縮強度と積算温度の関係においても、断熱養生の場合の強度発現は 20°C 養生の場合よりも大きなものとなった。図-4に、断熱温度上昇量と圧縮強度の関係を示す。中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合、スラグ粉末度が大きい方が圧縮強度が大きくなっている。これは、粉末度が大きいスラグを用いた方が小さな発熱で大きな強度発現となることを意味する。低熱ポルトランドセメントを用いた場合の断熱温度上昇量に対する圧縮強度の増加割合は、材齢3日までは中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同じものとなった。

3.3 モルタルの発熱特性

モルタルを用いた簡易断熱温度上昇試験結果を図-5に示す。コンクリートの断熱温度上昇量と同様に、モルタルの簡易断熱温度上昇量は粉末度が大きい方が大きくなり、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の方が中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合よりも小さくなった。

モルタルの簡易断熱温度上昇量を微分して求めた断熱温度上昇速度の経時変化を図-6に示す。中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合、温度上昇速度のピークまでの時間は粉末度の大きいスラグを用いた方が早くなり、ピーク高さも大きくなった。低熱ポルトランドセメントを用いた場合の温度上昇速度のピークまでの時間は、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合よりも遅くなり、ピーク高さも小さくなった。ピーク時における温度上昇速度は短い時間で大きく変

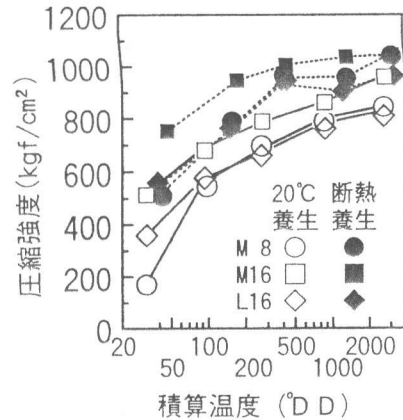


図-3 圧縮強度と積算温度の関係

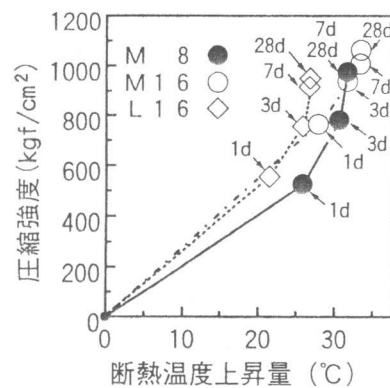


図-4 圧縮強度と断熱温度上昇量の関係

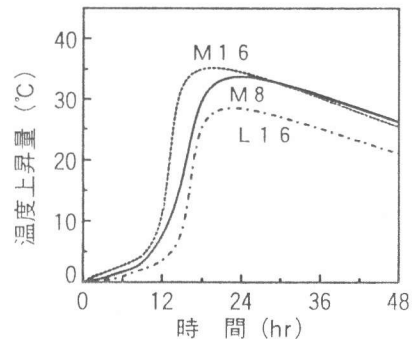


図-5 モルタル簡易断熱温度上昇量

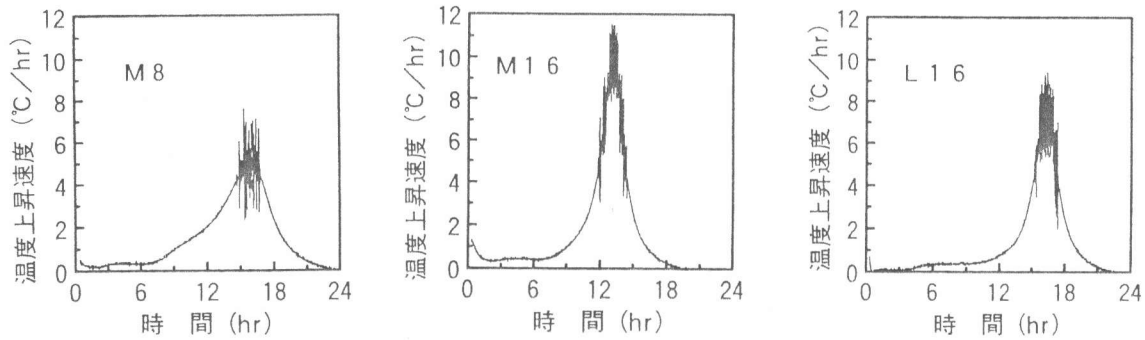


図-6 モルタル簡易断熱温度上昇速度

化し、スラグ粉末度が大きい方がその変化量は大きくなった。また、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の方が中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合よりもその変化量は小さくなった。図-7に、中庸熱ポルトランドセメントと粉末度が16, 120cm²/gのスラグを用いた場合についてこの部分を拡大したものを示す。温度上昇速度は分単位で著しく変化しており、激しい水和反応が起きていることがわかる。

3. 4 細孔径分布

図-8に細孔径分布を示す。材齢3日における断熱養生の場合の細孔径分布は、全体に20℃養生の場合よりも小さな細孔半径の方に变化し、大きな細孔径の細孔容積が減少している。細孔径分布の小さな細孔半径の方への変化は、粉末度が大きい方が顕著となった。材齢28日における細孔径分布のピークは、何れも細孔半径1.5nm付近であった。また、断熱養生の場合の細孔容積は20℃養生の場合よりも細孔半径2nm~10nmの範囲で減少している。図-9、10に、細孔半径範囲別細孔容積を示す。材齢3日においては、断熱養生の場合の細孔半径1.5nm~2.5nmの範囲の細孔容積は20℃養生の場合よりも増大し、2.5nm~10nmおよび10nm~1μmの範囲の細孔容積は減少している。スラグ粉末度が大きな場合、この特徴は顕著となった。材齢28日においては、中庸熱ポルトランドセメントを用いた断熱養生の場合の細孔容積は何れの細孔半径の範囲においても20℃養生の場合よりも減少した。このような現象は、スラグ粉末度が大きい方が顕著となっている。低熱ポルトランドセメントを用いた断熱養生の場合の細孔容積は、20℃養生の場合よりも細孔半径1.5nm~2.5nmの範囲では増大したが、2.5nm~10nmおよび10nm~1μmの範囲では減少している。低熱ポルトランドセメントを用いた場合と中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合を比較すると、後者の細孔容積がほぼすべての領域において前者より小さくなっている。このように、コンクリートの細孔構造の緻密化が進むと大きな径の細孔容積が減少し、小さな径の細孔容積が増加する。さらに、緻密化が進むと何れの径の細孔容積も減少する。

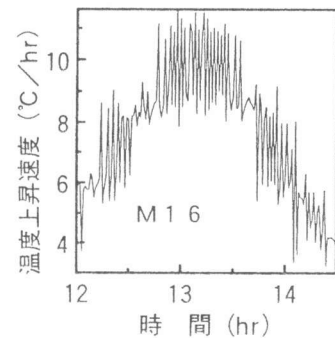


図-7 モルタル簡易断熱温度上昇速度(拡大)

図-11~13は、材齢3日および28日のデータに基づく圧縮強度と細孔容積の関係を示す。図-11は細孔半径1.5nm~1μmの範囲の細孔容積と圧縮強度の関係を示すが、断熱養生の場合の関係と20℃養生の場合の関係とは若干異なるようである。w/c=50%で高炉セメントを用いた場合、圧縮強度は細孔半径10nm~1μmの範囲の細孔容積と相関が高いと言われており[2]、本実験におけるこの範囲の細孔容積と圧縮強度の関係から断熱養生の場合と20℃養生の場合とを比較す

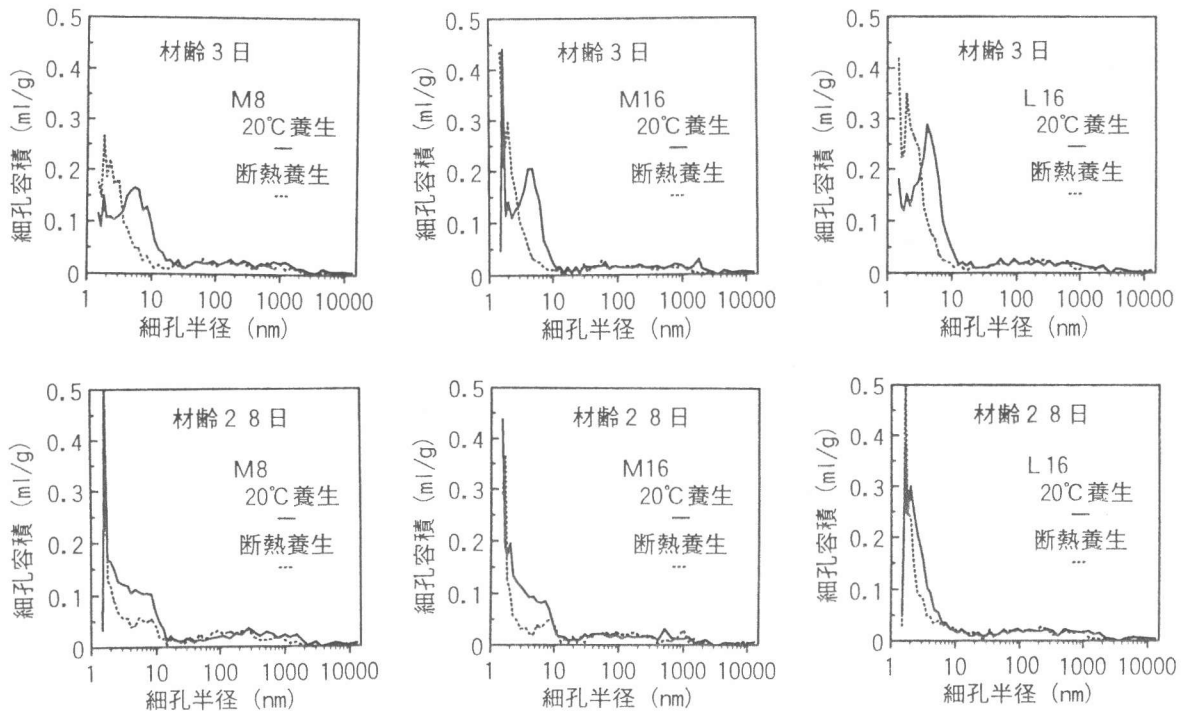


図-8 細孔径分布

ると図-12に示すように、両者の関係は異なり、何れも相関係数が小さかった。これに対して、細孔半径 2.5nm~1 μ m の範囲の圧縮強度と細孔容積の関係は、図-13に示すように、断熱養生の場合および20 $^{\circ}$ C養生の場合の何れのデータもほぼ同一線上にあり、これらの相関は高かった。

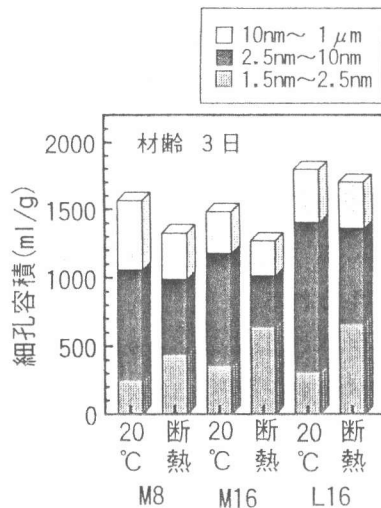


図-9 各種細孔半径の細孔容積

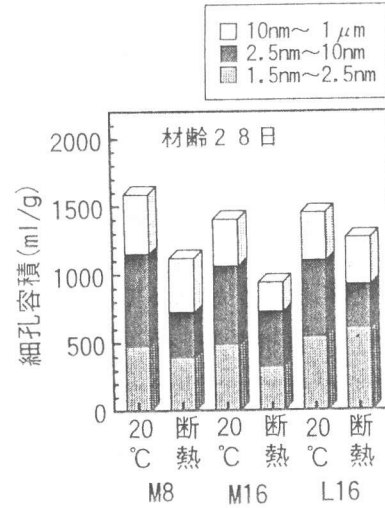


図-10 各種細孔半径の細孔容積

3.5 Ca(OH)₂ 量 硬化ペースト中のCa(OH)₂ 量を図-14に示す。

中庸熱ポルトランドセメントを用いたスラグ粉末度8,690cm²/gの場合、20 $^{\circ}$ C養生ではCa(OH)₂ 量の経時変化はほとんどなかったが、断熱養生ではCa(OH)₂ 量は経時的に少なくなり、材齢28日において同定されなかった。粉末度が 16,120cm²/gのスラグを用いた場合には、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントの何れの場合にもCa(OH)₂ は材齢 1日から同定されなかった。このように、スラグを用いたコンクリートは、Ca(OH)₂ 量が極めて少ないものとなるが、このような状況下においてもコンクリートは著しい強度発現となることが明らかになった。なお、Ca(OH)₂ 量が同定されなかったコンクリート供試体にフェノールフタレインを吹き付ける

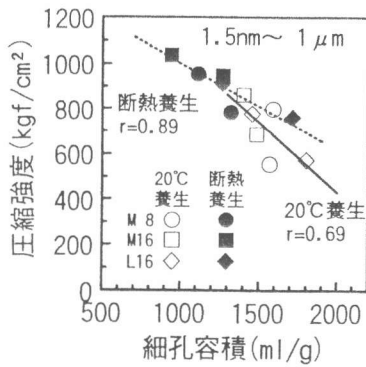


図-1 1 圧縮強度と細孔容積の関係

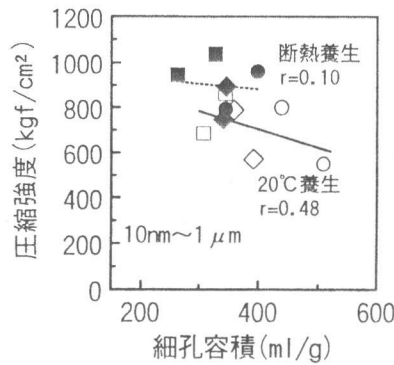


図-1 2 圧縮強度と細孔容積の関係

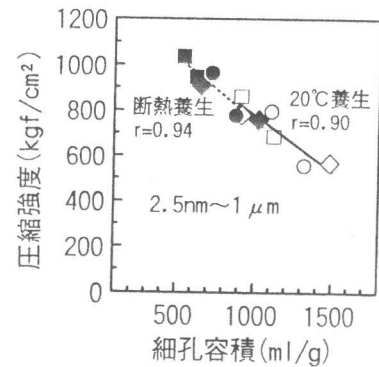


図-1 3 圧縮強度と細孔容積の関係

と、その面は赤く変色した。したがって、このコンクリートのpHは10以上あると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

(1) 断熱養生の場合の強度は、材齢 1日および91日の何れにおいても20℃養生の場合より大きくなった。単位断熱温度上昇量に相当する強度は、粉末度の大きいスラグを用いた方が大きくなったが、セメントの種類が異なってもほぼ同じものであった。

(2) モルタル簡易断熱の温度上昇速度のピークまでの時間は、粉末度の大きいスラグを用いた方が早くなり、ピーク高さも大きくなった。また、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の温度上昇速度のピークまでの時間は、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合よりも遅くなり、ピーク高さも小さくなった。ピーク時における温度上昇速度は分単位で著しく変化しており、激しい水和反応が起こっていることが考えられる。

(3) 中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートを断熱養生した場合、スラグ粉末度が大きくなるとコンクリートの細孔構造が緻密化した。中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合の細孔容積は、ほぼすべての細孔領域において、低熱ポルトランドセメントを用いた場合より小さくなった。また、細孔半径 2.5nm~1µm の範囲の細孔容積と圧縮強度は線形関係にあり、これらの相関は高かった。

(4) スラグを用いた場合の硬化ペースト中のCa(OH)₂量は極めて少ないものとなった。このような現象は、スラグ粉末度が大きい場合に著しいものとなった。

【参考文献】

- 1) 渡辺宏・堺孝司：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性、土木学会第49回年次学術講演会V、pp.386-387、1994.9
- 2) 内川浩・羽原俊祐・沢木大介、混合セメント及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響、セメントコンクリート論文集No.44、pp.330-335、1990

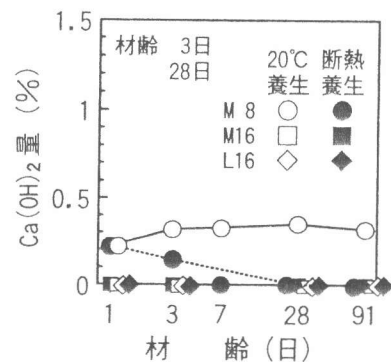


図-1 4 Ca(OH)₂量