

## 論文 コンクリートの強度・発熱に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響

渡辺 宏\*1・堺 孝司\*2

要旨：これまで開発されてきた高強度コンクリートあるいは低発熱コンクリートが有する発熱や初期強度発現に関する性能を高めることを目的に、本研究では、高炉スラグ高微粉末の効果について広範な検討を行った。その結果、低発熱形ポルトランドセメントと高炉スラグ高微粉末を組み合わせることで、初期強度発現に優れた低発熱・高強度コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。また、コンクリートの強度は、20nm～2 $\mu$ mの範囲の細孔容積と良い相関があることがわかった。

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

高炉スラグ微粉末は、セメント用混和材として重要な役割を果たしてきた。高炉スラグを用いたコンクリートの大きな特徴として、適切なセメント置換率による水和熱の抑制、長期にわたる強度発現、あるいは耐久性の向上などが認められてきた。しかしながら、現在一般的に用いられている高炉スラグの粉末度はブレン比表面積で3,500～4,500cm<sup>2</sup>/g程度のものであり、高微粉末を用いた場合についての情報は極めて少ない。

一方、最近ではコンクリートの性能に高度な要求がなされるようになってきた。例えば、低発熱性、高強度あるいは高流動性などである。低発熱性についてはビーライト系セメントの開発により[1]、また高強度や高流動性については高性能AE減水剤を利用した低水セメント比の実現[2]により従来よりかなり高性能なコンクリートが得られている。しかしながら、これらのコンクリートは、それぞれ初期強度発現や発熱に関して十分満足できる性能とは言い難い。

これらの背景に基づいて、本研究では、低発熱・高強度コンクリートを実現するための一つの試みとして、コンクリートの強度・発熱特性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響について検討した。また、コンクリートの強度と細孔構造の関係についても考察した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

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、高炉スラグ微粉末（以降、スラグと呼ぶ）とシリカフェームを用いた。表-1および表-2に、それぞれ使用材料およびセメントの鉱物組成を示す。石膏は二水石膏を用い、SO<sub>4</sub>で4%添加した。図-1にスラグの粒度分布を示す。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。コンクリートの目標スランプおよび空気量はそれぞれ8±1cmおよび3～4±1%とした。

#### 2.2 実験方法

コンクリートの練混ぜには、容量100リットルのパン型強制練りミキサを用い、練り混ぜ時

\*1 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室副室長（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）

間は全材料投入後3分とした。  
 コンクリートの練り混ぜ温度は20℃とし、養生温度は20℃、5℃および断熱温度とした。圧縮強度試験には、φ10×20cmの供試体を用い、試験材齢は、3日、7日、28日および91日とした。断熱温度上昇試験の供試体寸法はφ44×29cmである。細孔分布の測定試料はφ10×20cmの供試体内部のコンクリートより採取し、水銀圧入法により測定し、その結果は硬化ペースト当りで整理した。

表-1 使用材料

セメント	中庸熟ポルトランドセメント 3,270cm <sup>2</sup> /g* 低熟ポルトランドセメント 3,270cm <sup>2</sup> /g*
高炉スラグ微粉末	4,120cm <sup>2</sup> /g* 8,690cm <sup>2</sup> /g* 16,120cm <sup>2</sup> /g* 2.91** 2.90** 2.87**
シリカフューム	200,000cm <sup>2</sup> /g* 2.2**
石膏	二水石膏
細骨材	苫小牧市樽前産海砂 比重 2.68 吸水率 1.17% FM 2.67
粗骨材	小樽市見晴産砕石 比重 2.68 吸水率 1.58%
高性能AE減水剤	芳香族アミノスルホン酸高分子化合物
AE助剤	ロジン系

\* : プレーン比表面積 \*\* : 比重

3. 実験結果および考察

3.1 単位水量

図-2に、単位水量と水結合材比の関係を示す。水結合材比が小さくなると、添加できる高性能AE減水剤の量が多くなり、単位水量は減少した。図-3は、単位水量とス

表-2 セメントの鉱物組成

セメントの種類	鉱物組成 (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
中庸熟ポルト	43	33	5	11
低熟ポルト	27	52	4	11

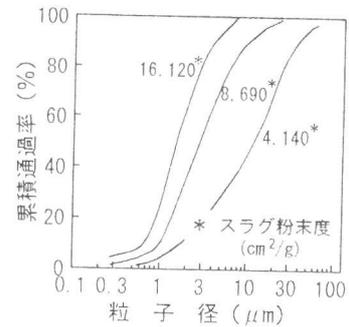


図-1 スラッグの粒度分布

表-3 コンクリートの配合および養生温度

水結合材比 (%)	空気量 (%)	セメントの種類	スラッグ粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	スラッグ置換率 (%)	石膏添加率 (%)	シリカフューム置換率 (%)	高性能AE減水剤添加率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						養生温度
									水 W	結合材 B	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤	AE助剤 (ml)	
40	4.0	中庸熟	8.690	50	4	10	2.0	43	117	293	852	1.132	5.86	16.1	20℃
				60	2	0	1.4	130	371	798	1.107	5.19	18.6	20℃.断熱	
			4.140	50	4	10	1.4	127	363	802	1.111	5.08	18.2	20℃	
				60		0	1.9	116	331	828	1.147	6.29	18.2	20℃.断熱	
			8.690	50	4	10	1.9	116	331	824	1.144	6.29	16.6	20℃.5℃	
				60		0	2.5	117	334	825	1.144	8.35	26.7	20℃.断熱	
			16.120	60	4	10	2.5	115	329	826	1.145	8.23	24.7	20℃.5℃	
				60		0	1.4	128	366	800	1.107	5.12	20.1	20℃	
35	3.5	低熟	4.140	50	2	0	1.9	117	334	825	1.144	6.35	18.4	20℃	
				60		10	1.9	115	329	826	1.145	6.25	16.5	20℃.5℃	
			8.690	50	4	0	1.9	115	329	826	1.145	6.25	16.5	20℃.5℃	
				60		0	2.5	116	331	828	1.147	8.28	28.1	20℃	
			16.120	60	4	0	2.5	116	331	828	1.147	8.28	28.1	20℃	
				60		10	2.5	114	326	829	1.147	8.15	26.1	20℃.5℃	
30	3.0	中庸熟	8.690	50	5	10	2.2	41	109	363	806	1.163	7.99	20.0	20℃

ラグ粉末度の関係を示す。スラグ粉末度が大きくなると、高性能AE減水剤の添加量が多くなり、単位水量は減少し、スラグ粉末度が4,140cm<sup>2</sup>/gと16,120cm<sup>2</sup>/gの場合の単位水量の差は最大で14kg/m<sup>3</sup>にも上った。しかしながら、シリカフェームの有無およびセメントの種類が単位水量に及ぼす影響は比較的少なく、最大で数kg/m<sup>3</sup>であった。

### 3.2 圧縮強度

図-4は、中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を、スラグ粉末度およびシリカフェーム置換率を変数として表したものである。何れの場合も、スラグ粉末度が大きい程、圧縮強度は増加し、とくに材齢3日において顕著となり、スラグ粉末度が16,120cm<sup>2</sup>/gの場合の圧縮強度は、最大57N/mm<sup>2</sup>となった。スラグ粉末度が4,140cm<sup>2</sup>/gの場合にはシリカフェームの影響はほとんどないが、粉末度が大きくなるとシリカフェームを用いた方が圧縮強度が小さくなる傾向がある。

図-5は、圧縮強度と材齢の関係を、スラグ粉末度とセメントの種類を変数として表したものである。何れの粉末度においても、中庸熱ポルトランドセメントを用いたものが、低熱ポルトランドセメントを用いたものより大きな強度発現となった。それらの強度差は、材齢の経過に伴って拡大する傾向を示した。

図-6に、圧縮強度と材齢の関係を、水結合材比を変数として表したものである。水結合材比が小さい程、圧縮強度は増加し、材齢91日における最大強度は、水結合材比が30%の場合で97.2N/mm<sup>2</sup>となった。

図-7は、スラグ粉末度が8,690cm<sup>2</sup>/gの場合の圧縮強度に及ぼす養生温度の影響を、セメントの種類を変数として示したものである。養生温度が5℃の場合、材齢3日における圧縮強度は20℃養生の場合と比べて著しく小さくなったが、材齢7日までの間に極めて大きな強度回復があり、材齢91日では20℃養生の場合とほぼ同じ強度発現となった。20℃養生の場合と同様に5℃養生の場合も中庸熱ポルトランドセメントを用いたものが、低熱ポルトランドセメントを用いたものより大きな強度発現となった。図-8は、スラグ粉末度が16,120cm<sup>2</sup>/gの場合の圧縮強度に及ぼす養生温度の影響を8,690cm<sup>2</sup>/gの場合との比較において示したものである。

以上のように、スラグ粉末度の増大はコンクリートの強度を著しく大きくし、特に低温および初期材齢における強度発現が顕著となることが明らかとなった。

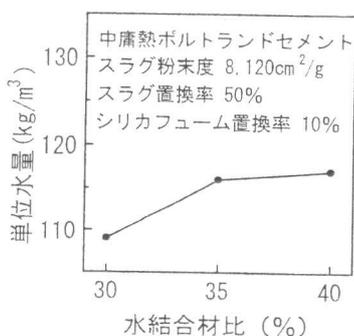


図-2 単位水量と水結合材比の関係

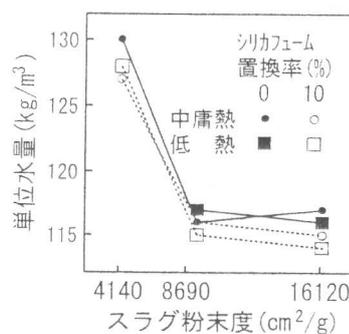


図-3 単位水量に及ぼすスラグ粉末度の影響

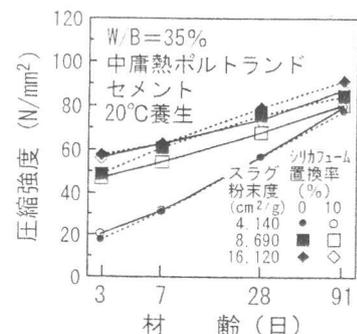


図-4 圧縮強度に及ぼすスラグ粉末度の影響

### 3.3 断熱温度上昇量

図-9は、断熱温度上昇量に及ぼすスラグ粉末度およびセメントの種類の影響を示す。断熱温度上昇量は、試験開始後1.5~2日程度までは、スラグ粉末度が大きいほど大きくなったが、それ以降においてはスラグ粉末度が4,140cm<sup>2</sup>/gの場合の方がスラグ粉末度が8,690cm<sup>2</sup>/g以上の場合よりも大きくなった。これは、粉末度の大きいスラグほど初期に著しい水和が起こ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。低熱ポルトランドセメントを用いた場合の終局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のそれよりも小さく、その差はほぼ7~9℃であった。

図-10は、断熱温度上昇量に及ぼすシリカフューム置換率の影響を示したものである。試験開始後1日程度までは、シリカフュームを用いた場合の断熱温度上昇量は用いない場合よりも大きくなった。このように、シリカフュームを用いることにより、初期の水和を促進させ発熱量が大きくなることが示された。しかし、終局断熱温度上昇量は、シリカフュームを用いた場合が用いない場合よりも小さくなった。

図-11は、断熱温度上昇量に及ぼす水結合材比の影響を示したものである。水結合材比を40%から30%にすると、結合材量が70kg/m<sup>3</sup>増加したにも拘わらず、終局断熱温度上昇量の増加量は2℃程度と極めて小さなものであった。

以上のように、低発熱形ポルトランドセメントとスラグ高微粉末を組み合わせることで

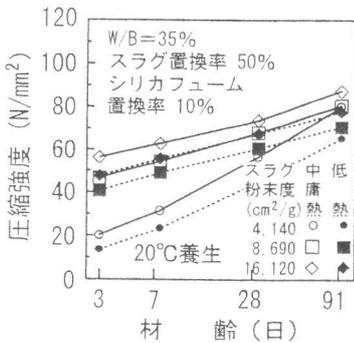


図-5 圧縮強度に及ぼすセメントの種類の影響

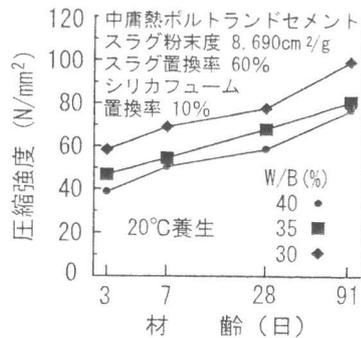


図-6 圧縮強度に及ぼす水結合材比の影響

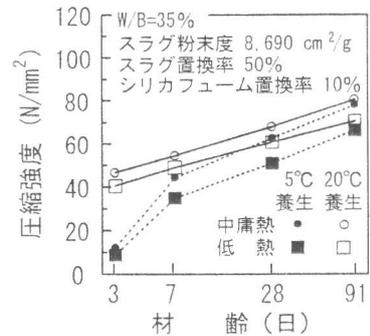


図-7 圧縮強度に及ぼす養生温度の影響

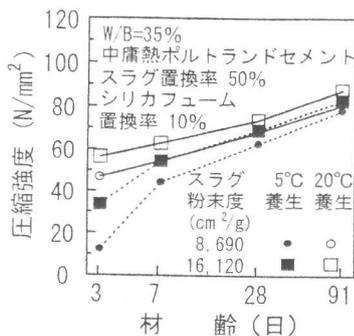


図-8 圧縮強度に及ぼす養生温度の影響

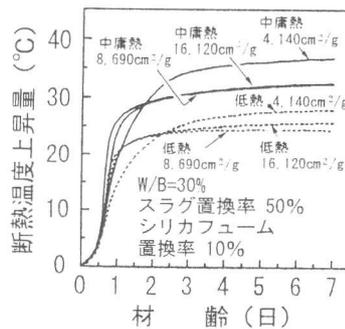


図-9 断熱温度上昇量に及ぼすスラグ粉末度およびセメントの種類の影響

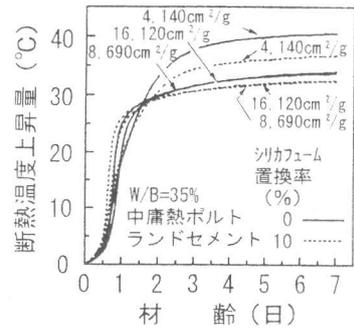


図-10 断熱温度上昇量に及ぼすシリカフューム置換率の影響

により断熱温度上昇量を著しく低下させることができることが明らかとなった。

### 3.4 圧縮強度と断熱温度上昇量の関係

図-12は、圧縮強度と終局断熱温度上昇量の関係を、スラグ粉末度とシリカフェーム置換率を変数として示したものである。何れの場合も、スラグ粉末度が大きい場合の方が、終局断熱温度上昇量を小さくし、圧縮強度を大きくする傾向を示した。また、シリカフェームは同じ強度を得るのに必要な終局断熱温度上昇量を低下させることができる。

### 3.5 細孔構造

図-13は、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合の細孔径分布に及ぼすスラグ粉末度の影響、および細孔容積と圧縮強度との関係を示したものである。スラグ微粉末が大きくなると細孔径分布は小さな細孔径の方へシフトし、材齢28日では小さな細孔径のものが著しく増加する。図-13(c)に示すように、スラグ粉末度が大きくなると圧縮強度が大きくなり、この強度増加に対応する細孔径の範囲は20nm~2μmであると言える。5nm~20nmおよび3nm~5nmの範囲の細孔量は増加しているが、これらの細孔は圧縮強度に影響しないことがわかる。図-14は、低熱ポルトランドセメントと粉末度が8,690cm<sup>2</sup>/gのスラグを用いた場合のシリカフェームの影響を示したものである。シリカフェームを用いると細孔量が増加することがわかる。この結果は、シリカフェームの水和がスラグと同じレベルで起こらないことを示すものと思われる。

図-15は、細孔分布に及ぼす水結合材比の影響を示したものである。水結合材比が小さくなるにしたがって細孔分布が細孔径の小さな方へシフトしている。図-16は、材齢の増加に伴う細孔分布の変化を示したものである。

内川ら[3]は、ある領域の細孔容積が圧縮強度と相関があることを指摘している。図

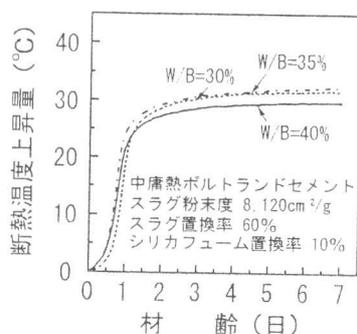


図-11 断熱温度上昇量に及ぼす水結合材比の影響

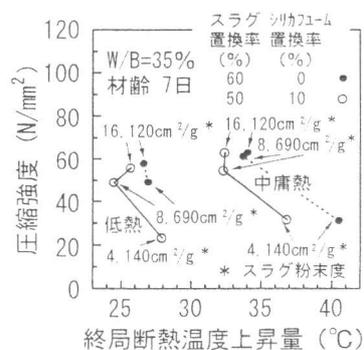


図-12 圧縮強度と終局断熱温度上昇量の関係に及ぼすシリカフェームの影響

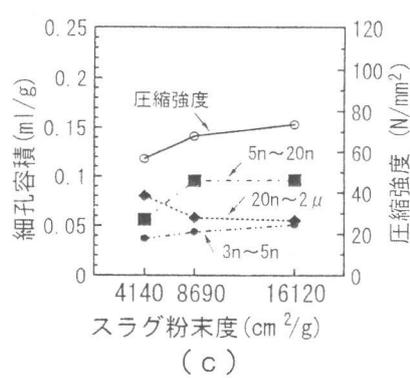
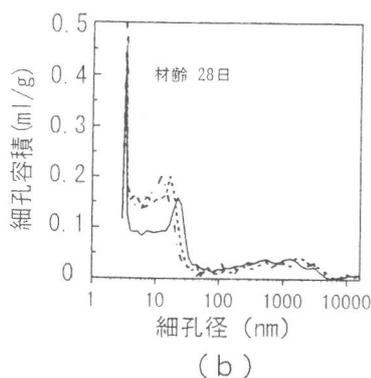
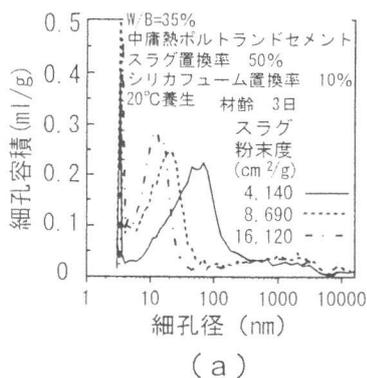


図-13 スラグ粉末度の影響

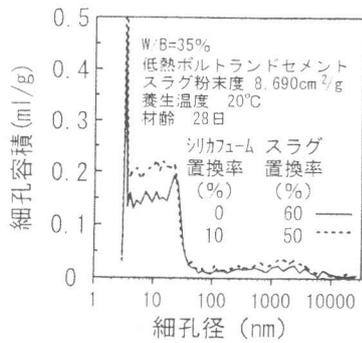


図-14 細孔径分布に及ぼすシリカフューム置換率の影響

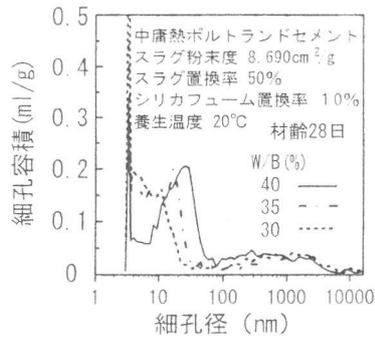


図-15 細孔径分布に及ぼす水結合材比の影響

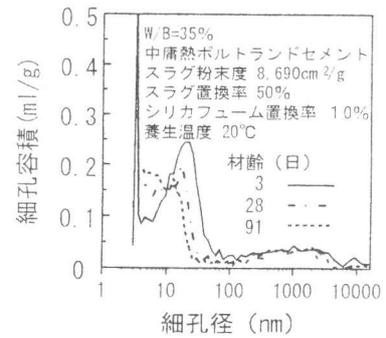


図-16 細孔分布の経時変化

図-17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径3nm~2μmおよび20nm~2μmの範囲の細孔容積の関係を示す。細孔径が3nm~2μmの範囲の場合、圧縮強度と細孔容積の関係は、スラグ粉末度が4.140cm<sup>2</sup>/gの場合と8.690cm<sup>2</sup>/g以上の場合では異なったものとなった。これに対して、細孔径が20nm

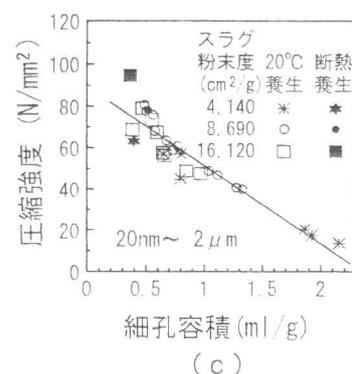
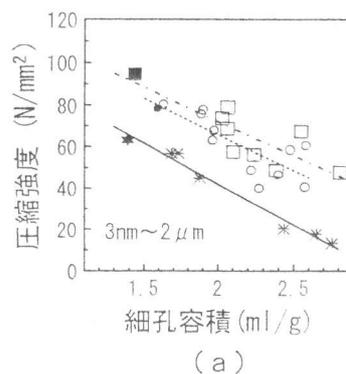


図-17 圧縮強度と細孔容積の関係

~2μmの範囲の場合には、スラグ粉末度によらずほぼ同じ関係とみなせることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 高炉スラグ粉末度を大きくすると、コンクリートの単位水量を著しく低減することができる。
- (2) 高炉スラグ高微粉末を用いることにより、従来のものと比べて、低温環境および初期材齢において著しい強度発現があり、断熱温度上昇量が極端に小さなコンクリートの製造が可能である。
- (3) シリカフューム10%置換は、初期の水和を促進させる。
- (4) コンクリートの強度は、20nm~2μmの範囲の細孔容積と良い相関がある。

#### 【参考文献】

- [1] 中野錦一：概説／超低発熱セメント、セメント・コンクリート、No.563、pp2-12、1994.1
- [2] 友澤史紀、阿部道彦、榊田佳寛：高強度コンクリートの開発、コンクリート工学、vol.32、No10、pp.11-19、1994.10.
- [3] 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.