

論文

[1186] 高炉スラグの置換率がコンクリートの諸物性に与える影響

正会員○中島規道 (三井建設 技術研究所)

矢沢修一 (東京理科大学)

竹田 満 (三井建設 技術研究所)

正会員 竹内 光 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

高炉スラグ微粉末 (以下、高炉スラグと略称する) は、高炉セメントとして幅広い用途に用いられているが、その発熱量が比較的小さい特性を生かし低発熱型セメントの構成材料としても用いられている。現在は、多成分型セメントとしてフライアッシュなどの混和材と共に用いられているが、高炉スラグをさらに積極的に利用し高置換率で用いれば、高炉スラグのみを混和材として使用する事も十分可能だと思われる。しかしながら、有効な発熱量の低減効果を得るためには特に大きな置換率で使用する必要があり、初期強度が低下し施工の能率が低下するなどの欠点もまた顕著になってくる。そのため、高炉スラグを混入したコンクリート (以下、高炉スラグコンクリートと略称する) における相反する効果の相互関係を明確に把握する必要があると考えられる。

本研究では、凝結硬化性状、発熱性状、および強度発現性状に与える高炉スラグの置換率および打設温度の影響を実験的に比較検討し、高炉スラグコンクリートの有効性の評価を試みたものである。

2. 実験概要

2.1 試験水準および試験方法

試験水準は、高炉スラグの置換率を 0、40、60、80% の 4 水準、打設および養生温度を 10、20、30℃ の 3 水準の計 12 水準とした (表-1 参照)。それぞれの水準について凝結硬化速度試験、断熱温度上昇試験、圧縮強度試験の 3 種類の試験を中心として行った。この 3 種類の実験は、相互の比較を行うために配合および環境条件など可能な限り同一条件となるように留意して行うものとした。

凝結硬化試験は、ASTM C 403 に準じてプロクター貫入抵抗試験をコンクリートの打設温度に等しい恒温恒湿室内で行った。

断熱温度上昇試験は、空気循環式の試験機を用いて行った。なお、測定に用いた供試体は φ450×400 (mm) の大きさである。

圧縮強度試験用供試体は、恒温恒湿室内で作成し脱型可能な材令まで同室内で湿潤養生し、脱型後は直ちに打設温度に等しい養生槽において所定の材令まで水中養生を

表-1 試験水準

置換率 s/(c+s) (%)	打設温度 (℃)		
	10	20	30
0	○	○	○
40	○	○	○
60	○	○	○
80	○	○	○

表-2 強度試験用供試体の養生方法
および試験材令

	打設 温度	試験材令 (日)							
		1	2	3	7	14	28	56	91
水中養生	10℃	* 湿潤 10℃水中							
	20℃	20℃水中							
	30℃	30℃水中							

*: 脱型可能な材令まで打設温度に等しい恒温恒湿室内で湿潤養生

行った。供試体の養生方法および試験を実施する材令を表-2に示す。

2.2 使用材料

本試験で用いた使用材料を表-3に示す。高炉スラグの反応性は、その化学的性質や粉末度によって大きく異なるため、それらを変更する事によりコンクリートの性状を改善する試みもなされている。しかしながら、本試験では高炉スラグの水準を1種類とし、現在高炉セメントなどに一般的に用いられている高炉スラグと同程度の粉末度のものを用いている。

2.3 配合

配合は、置換率およびAE減水剤量を除いた配合条件を全ての水準で同一とした。置換率および打設温度の変化によるコンシステンシーの調整はAE減水剤量により調整した。コンクリートの示方配合を表-4に示す。また、各水準の打設コンクリートのAE減水剤の添加量を表-5に示す。高炉スラグによる粘性の増加の影響を全てAE減水剤により調整しているため置換率の高い水準では、標準使用量より大きめの添加量となっている。

3. 凝結硬化速度試験結果

高炉スラグの置換率および打設温度が凝結硬化速度に与える影響について始発時間の変化を図-1に、終結時間の変化を図-2にそれぞれ示す。なお、始発時間および終結時間は貫入抵抗値がそれぞれ35(kgf/cm²)および280(kgf/cm²)となったときの時間である。

置換率の増加による始発時間の遅延効果は打設温度10℃の水準において若干認められるものの、その他の打設温度ではほぼ同一の始発時間となった。それに対し、温度の低下にとまなう

表-3 使用材量

区分	種類および仕様
セメント	普通ポルトランドセメント ブレン値 3260 (cm ² /g)、比重 3.16
混和材	高炉スラグ微粉末 ブレン値 4250 (cm ² /g)、比重 2.89
細骨材	川砂 (茨城県霞ヶ浦産川砂) 比重 2.56、FM 2.66、吸水率 2.106
粗骨材	碎石 (茨城県笠間産) 比重 2.66、FM 6.53、吸水率 0.479
混和剤	AE減水剤 (標準型)、AE補助剤 オキシカルボン酸系

表-4 示方配合

置換率 (%)	Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	AIR (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤	
						W	C	Sg	S	G		
0	20	12	53.5	45.0	4.0		318	0				*
40						170	191	127	785	1009		
60							127	124				
80							64	254				

*: 試験水準によりAE減水剤量を変化させスランプ、空気量を調整する。

表-5 打設コンクリートのAE剤添加量

置換率 (%)	AE減水剤			AE補助剤		
	打設温度 (℃)			打設温度 (℃)		
	10	20	30	10	20	30
0	1.25	1.29	1.50	0.58	0.37	0.50
40	1.20	1.33	1.57	0.80	0.50	0.70
60	1.30	1.60	1.63	1.05	0.78	0.90
80	1.50	1.70	1.70	1.00	0.80	1.10

*: セメント重量に対する百分率 (%)

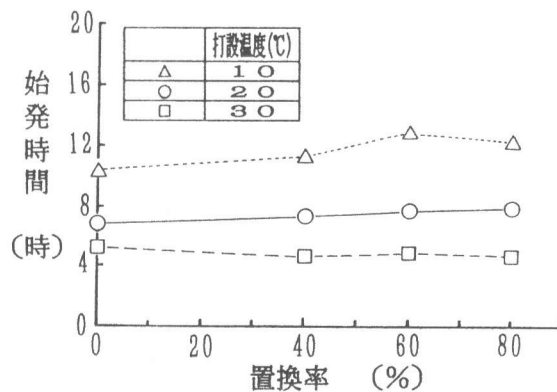


図-1 凝結始発時間

始発時間の遅延は大きく、始発時間に対する影響は置換率よりも打設温度が卓越している事が認められる。

終結時間は、置換率が増加すると遅延し、その変化率も大きくなる傾向が認められた。また、同様に打設温度の低下によっても遅延し、その変化率も大きくなる傾向が認められた。その結果、高置換率、低温打設と2つの影響の重複する置換率80%・打設温度30℃の水準では打設後36時間と極めて大きな遅延を示した。これは高炉スラグの反応性が小さく低温の影響を受け易い事に加え、結合材中のセメント量が少ないためAE減水剤の相対的な添加量が大きくなったことも遅延効果として働いたためであると考えられる。また、これらのことから低温条件下で高置換率の高炉スラグコンクリートを用いた場合、施工能率が低下し問題となるが、この終結時間の遅延を抑制するためには、その変化率の大きさから置換率を適度な値まで減少させる方法が有効な手段となると思われる。

4. 断熱温度上昇試験結果

打設温度20℃における高炉スラグの置換率がコンクリートの発熱性状に与える影響を図-3に示す。置換率の増加にともない最高温度上昇量が減少し、上昇速度も小さくなった事が認められる。また、置換率40%においては、温度上昇量は低下しないものの、発熱速度は低下する特徴的な挙動を示している。

上記の結果を含め各水準の試験結果を比較するためコンクリートの発熱特性を現す式としてJCI指針による特性式(1)を採用し、終局断熱温度上昇量：Kおよび上昇速度： α を最小2乗法により回帰定数として求めた。

$$T = K (1 - \text{EXP}(-\alpha \cdot t)) \dots (1)$$

T：温度上昇量

K：終局断熱温度上昇量

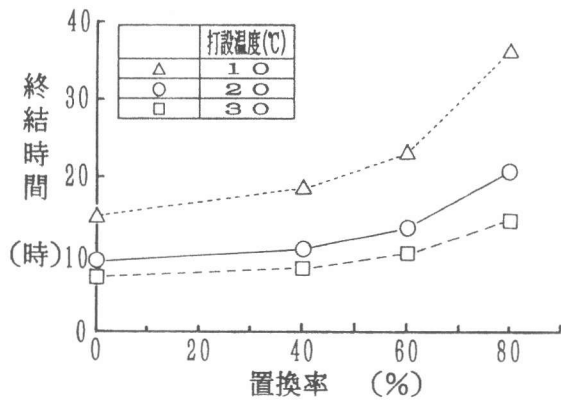


図-2 凝結終結時間

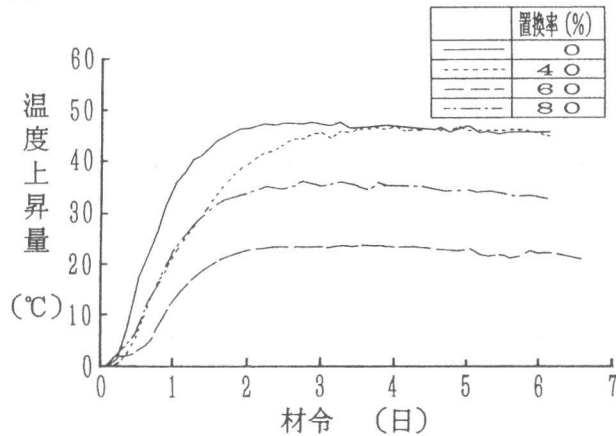


図-3 断熱温度上昇試験結果

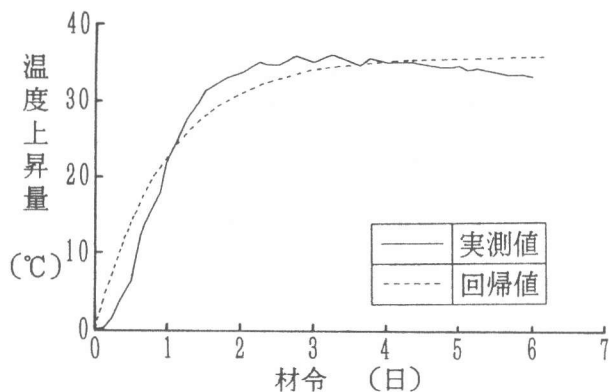


図-4 回帰値と実測値の関係

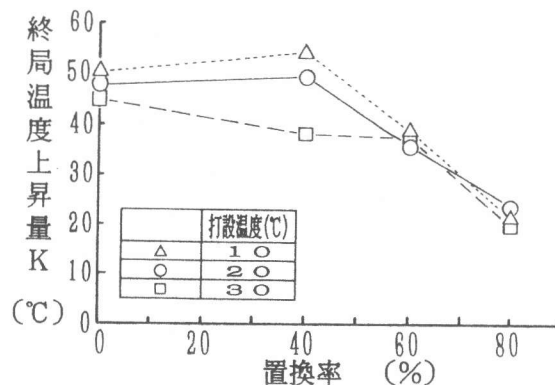


図-5 終局温度上昇量

α : 発熱速度
 t : 材令 (日)

回帰式と実測値の関係の一例を置換率60%・打設温度20℃について図-4に示す。また、求められた終局断熱温度上昇量: Kおよび上昇速度: α を図-5および図-6にそれぞれ示す。

置換率 0%および40%の水準の終局断熱温度上昇量はほぼ同一の値であるが、置換率60%以上において大きく温度上昇量の低下を示す事が認められた。特に置換率80%の水準の終局断熱温度上昇量は、置換率 0%の水準に比べの約50%と大幅な低減効果を示し、発熱量低減に極めて有効である。また、本実験においては高置換率における打設温度の影響は認められず、置換率の影響が卓越した結果となった。 上昇速度は、打設温度30℃の水準に例外が認められるものの、置換率40%において低下し、その後の置換率の増加による変化はむしろ若干の増加傾向として認められる。この傾向には、試験方法および回帰方法の特性が少なからず影響していると思われるものの、40%~60%程度の低置換率においても発熱速度が小さい事から、中小規模の放熱状態の比較的良好な構造物などにおいては、極端に高置換率の高炉スラグコンクリートを用いなくても十分打設コンクリートの温度上昇を抑制できるものと考えられる。また、打設温度が上昇速度におよぼす影響は大きく、凝結硬化性状と異なり、高温の影響を特に受ける事が認められる。

5. 強度試験結果

高炉スラグの置換率がスラグコンクリートの圧縮強度発現性状に与える影響を打設・養生温度20℃について図-7に示す。置換率が大きくなるほど初期材令に生じる強度低化は大きくなり、その後の強度増進も遅れていることが認められる。

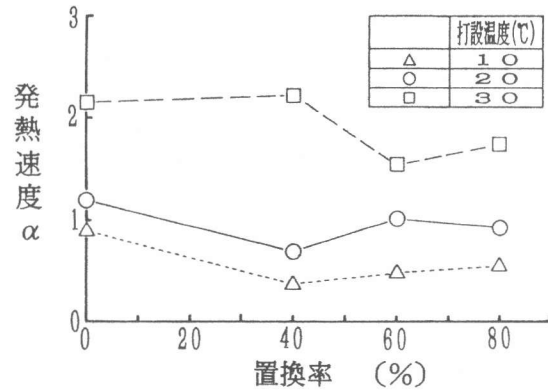


図-6 発熱速度

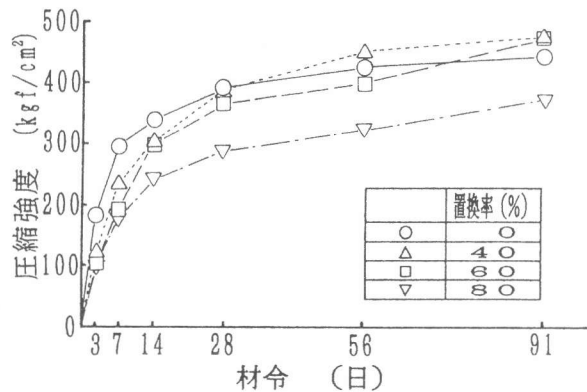


図-7 圧縮強度の経時変化

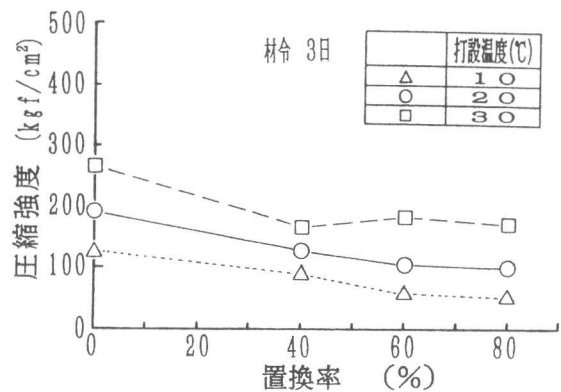


図-8 材令 3 日の圧縮強度

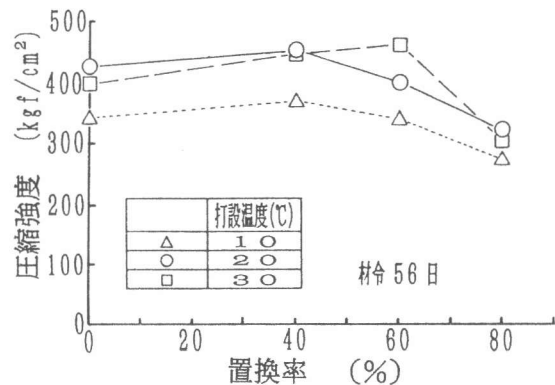


図-9 材令 56 日の圧縮強度

材令3日および56日における置換率および打設・養生温度が強度発現に与える影響について図-8および図-9にそれぞれ示す。材令3日における強度は、打設・養生温度30℃の水準に例外が認められるものの、置換率の増加と打設温度の低下にともないほぼ平行に低下しており、初期材令においては、どちらの影響も顕著に現れている。

材令56日における置換率40%および60%の強度は、置換率0%と同等もしくはそれ以上の強度を示しており、高炉スラグによる長期強度の増進効果により初期強度の低下が解消されている。

それに対し、置換率80%の強度はいずれの打設・養生温度においても低下しており、初期材令に生じた強度差を解消しにくい事を示している。また、同様に打設・養生温度の影響としては、10℃の水準は強度の発現が遅れている事が認められ、十分な強度を得るためにはさらに長期材令を必要とする事が示されている。なお、材令91日における各水準の圧縮強度を表-6に示す。本試験においては、置換率80%・打設温度10℃と20℃の水準、および置換率0%・打設温度10℃の水準の3水準を除き置換率0%、打設温度10℃の水準の材令28日強度とほぼ同等な強度を得る事ができた。

6. 高炉スラグの温度上昇量低減効果

6.1 温度上昇量と凝結時間の関係

高炉スラグコンクリートの諸特性を直接的に比較するために、置換率ではなくそれに応じた温度上昇量として比較を行った。なお、温度上昇量としては、断熱温度上昇試験により得られた最大値を用いた。最高温度上昇量と凝結終結時間の関係を図-10に示す。温度上昇量の低下量と凝結終結時間はほぼ平行な直線関係が認められる。温度上昇量の低下により凝結時間が急増する傾向は認められず、置換率として比較する場合に比べ緩和された傾向となっている。

6.2 温度上昇量と圧縮強度の関係

最高温度上昇量と材令3日における圧縮強度の関係を図-11に示す。置換率0%の水準に対するわずかな温度上昇量の低下によっても初期強度の低下は生じ、それ以上の温度上昇量の低下による変化は、比較的になくなってきている。この傾向により高炉スラグを高置換率で用いる事は、

表-6 材令91日の圧縮強度

置換率 s/(c+s) (%)	打設温度 (℃)		
	10	20	30
0	357	443	425
40	420	477	* 446
60	389	470	* 460
80	297	373	338
基準強度	390		

置換率 0%
打設温度 20℃
材令 28日

単位: kgf/cm²

*: 材令56日の値

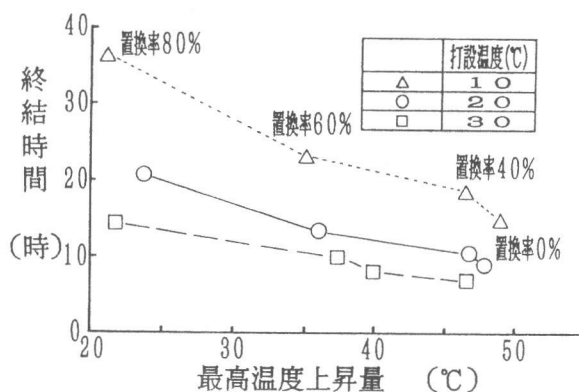


図-10 温度上昇量と凝結時間の関係

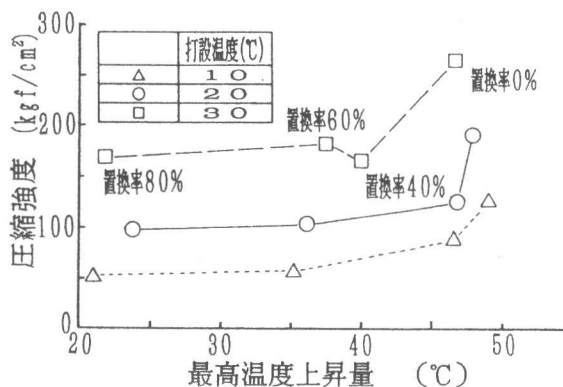


図-11 温度上昇量と初期圧縮強度の関係

初期強度の低下に比べ温度上昇量の低減効果を大きく得られると考えられるため有効な発熱量低減方法であると思われる。

7. おわりに

本試験は、高炉スラグを混入したコンクリートの発熱量の低減効果を凝結硬化性状および強度発現特性との相互関係をふまえて評価しようと試みたものであり、本研究で得られた結果をまとめると以下の通りとなる。

- 1) 高炉スラグの置換率が大きくなるにつれて凝結終結時間は増加し、その増加率は置換率が大きくなるほど大きい。また、その程度は打設温度が低い程顕著となる。この結果、置換率80%、打設温度10℃の水準の凝結終結時間は36時間と極めて大きくなり、置換率0%・打設温度20℃の約3倍となった。
- 2) 高炉スラグを置換率60%以上で用いると温度上昇量を低減させる事が出来る。また、置換率80%においては、普通セメントの約50%の温度上昇量となった。
- 3) 高炉スラグコンクリートの材令3日における初期強度は置換率の増加によりほぼ直線的に低下する。また、打設温度10℃および打設温度20℃における置換率0%水準に対する置換率80%の水準の圧縮強度は約50%となる。
- 4) 置換率80%・打設温度10℃および20℃の水準、また、置換率0%・打設温度10℃の水準を除き材令91日までに置換率0%・打設温度10℃の水準とほぼ同等な強度となる。
- 5) 温度上昇量の低減効果と凝結終結時間の間には直線的な関係が認められる。
- 6) 温度上昇量の低減効果と初期強度低下の間の関係は比較的小さく、この点から高炉スラグを高置換率で用いる事は有効である。

これらにより高炉スラグ微粉末を高置換率で用いる事が、発熱量低減に有効である事が確認できた。しかしながら、本研究においては粉末度、化学成分等の高炉スラグの品質の影響、および単位結合材量、水-結合材比等の配合の影響にたいする検討を行っていないため不十分な部分も数多く残されている。この点に関しては今後の課題として実験を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 小林一輔・魚本健人・島文雄：高炉水砕スラグ粉末のコンクリート混和材としての使用方法に関する研究、コンクリート工学、Vol. 17, No. 5, pp. 10-18, 1979
- 2) 三浦率彦・十河茂幸・芳賀孝成：超微細な高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凝結効果性状と環境温度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11, No. 1, pp. 349-354, 1989
- 3) 篠崎裕生・竹田満・竹内光：コンクリートの断熱温度特性に関する一考察、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、pp456-457, 1991