

低発熱型高炉セメントと流動化剤を用いたコンクリートの性質について

芳賀孝成 十河茂幸

Properties of Superplasticized Concrete with Low Heat Blast-Furnace Slag Cement

Takashige Haga Shigeyuki Sogo

Abstract

Recently, superplasticizers have been used to control cracks, to improve concrete properties like durability, and to make concrete more workable. Although there are many papers concerning superplasticized concrete using ordinary types of cement, only a few have dealt with low-heat-type blast-furnace slag cement.

This paper presents the basic properties of superplasticized concrete with low-heat blast-furnace slag cement which is expected to be used extensively in the future. Comparisons were made between properties of superplasticized concrete with low-heat blast-furnace slag cement, ordinary blast-furnace slag cement and ordinary portland cement. It was found that the superplasticized concrete with low-heat blast-furnace slag cement was sufficiently workable, developed necessary long-term strength and generated less heat of hydration.

概 要

ここ数年来、流動化コンクリートはひびわれの低減、耐久性の向上などのコンクリートの品質、ならびに施工性の改善を目的として使用されており、これらに関する研究も多くなしているが、混合セメントを用いた流動化コンクリートに関する研究は少ない。

この報告は、マスコン用セメントとして今後需要が増大すると思われる低発熱型の高炉セメントを用いた流動化コンクリートの基礎的性質を調べたもので、従来型高炉セメントや普通ポルトランドセメントを用いたものについても試験を行ない比較検討した。この結果、低発熱型高炉セメントを用いたものは、ワーカビリティがよく、長期的な強度発現が期待できるうえ、温度上昇量もかなり低減できることがわかった。

1. まえがき

近年、構造物の大型化、施工の急速化に伴い、コンクリート構造物に温度ひびわれが発生することが多くなっている。温度ひびわれが懸念されるコンクリート構造物の築造に際しては、材料・配合・設計・施工各方面における対策が総合的に検討されるが、まだ十分にその理論が確立されておらず、確実な対策ができないのが現状である。

一方、ここ数年来、流動化コンクリートは、ひびわれ低減、耐久性の向上および温度上昇量の減少などのコンクリートの品質向上、ならびに施工性の改善に使用されており、その効果も十分に認められてきた。

この研究は、マスコンクリートの温度応力緩和に効果的と考えられる低発熱型の高炉セメントを用いた流動化コンクリートの基礎的性質を調べ、従来型の高炉セメントや普通ポルトランドセメントとの比較検討をしたもので、これらの実験結果を報告する。

2. 使用材料

使用したセメントは低発熱型高炉セメントB種（スラグ量55%、第一セメント(株)製）、従来型の高炉セメントB種（第一セメント(株)製）および普通ポルトランドセメント（日本セメント(株)製）でそれらの物理・化学的性質を表-1、2に示す。

細骨材は千葉産の山砂を用い、粗骨材は静岡産の川砂

産地 種類	粗骨材		細骨材
	60%	40%	
最大寸法(mm)	25	20	5
比重	2.66	2.68	2.62
粗粒率	6.83	6.58	2.86
吸水率(%)	0.37	0.34	1.62
実積率(%)	65.9	63.8	69.0

表一3 使用骨材の性質

利と山口産の石灰石砕石を6:4で混合したものを使用した。それらの性質を表一3に示す。

混和剤にはベースコンクリートに遅延型 AE 減水剤 (ポゾリスNo.8), 流動化剤としては高縮合芳香族スルホン酸塩系複合物(ポゾリスNP-10)を用いた。

3. 試験方法と内容

100l 可傾式ミキサ (無段可変変速器付) を用いて, 全材料投入後通常の高速回転 (25 rpm) で連続して3分間ベースコンクリートを練り混ぜた後, ただちに低速回転 (4.5 rpm) で15分間アジテートしてから, 流動化剤を所要量添加し, 再び高速回転で1分間練り混ぜた。

流動化後の時間経過に伴うスランプ低下試験では, 流動化剤添加攪拌後低速回転で30分, 60分, 90分までアジテートした状態でスランプ, 空気量などの測定を行なった。なお, ブリージングと凝結試験も行なった。

硬化コンクリートの試験としては, 圧縮強度試験, 静弾性係数試験, 乾燥収縮試験, および断熱温度上昇試験を行なった。

コンクリートの配合条件と試験項目をそれぞれ表一4, 5に示す。

4. 結果と考察

4.1. まだ固まらないコンクリートの性質

(1) ワーカービリティ

表一4に示す配合条件で試し練りを行なって決定したコンクリート配合とまだ固まらないコンクリートの試験結果を表一6に示す。

この結果, ベースコンクリートの所要コンシステンシーを得るのに必要な単位水量は, 普通ポルトランドセメント, 従来型高炉セメントB種, 低発熱型高炉セメントB種の順に減少し, また, 練り上り温度が高くなると増加する傾向にあった。しかし, 一般に認められている値 (練り上り温度が10℃高くなると3~5%増加) より小さかった。

品名	比重	粉末度		凝結					強サ (kg/cm ²)							
		ブレン (cm ² /g)	88μ (%)	温度 (°C)	湿度 (%)	水量 (%)	始発 (時分)	終結 (時分)	曲				圧縮			
									3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日
普通ポルトランドセメント	3.17	3,140	1.2	20.2	90	27.5	2-50	3-56	29	44	69	75	128	220	418	471
高炉セメントB種	3.05	3,490	0.9	20.2	90	27.8	3-35	4-38	23	36	65	83	92	179	401	518
低発熱型高炉セメントB種	3.02	3,720	0.9	20.0	90	28.0	3-52	4-55	22	34	69	84	76	154	365	527

表一1 セメントの物理試験結果

品名	化学成分 (%)											成分係数				溶解熱 (Cal/g)		水和熱 (Cal/g)	
	強熱減量 Loss	不溶残分 Insol	シリカ SiO ₂	アルミナ Al ₂ O ₃	酸化鉄 Fe ₂ O ₃	酸化マンガン MnO	酸化カルシウム CaO	マグネシウム MgO	無水硫酸 SO ₃	硫化物イオウ S	合計 Total	水硬率 H.M.	固形率 Al ₂ O ₃	固形率 SiO ₂	固形率 Fe ₂ O ₃	7日	28日		
普通ポルトランドセメント	0.4	0.1	21.6	5.6	2.8	—	63.8	2.3	2.1	—	98.7	2.08	3.9	2.6	2.0	621.6	72.8	85.2	
高炉セメントB種	1.0	0.6	26.8	9.4	2.0	0.4	53.6	3.8	1.5	0.4	99.5	—	—	—	—	610.3	61.2	79.2	
低発熱型高炉セメントB種	1.2	0.9	28.8	10.2	1.8	0.6	50.5	4.1	1.1	0.5	99.7	—	—	—	—	603.9	56.5	70.4	

表一2 セメントの化学分析結果

セメントの種類	目標練り上り温度 (°C)	設計基準強度 (kg/cm ²)	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	混和剤
普通ポルトランドセメント	5	240	60	流動化前 12±1	5±1	ベースコンクリートポゾリスNo.8
高炉セメントB種	20			流動化後 20±1		
低発熱型高炉セメントB種	30					

表一4 コンクリートの配合条件

コンクリート温度	セメントの種類	流動化剤 (ベ-ス NP-10)	スランプ, ブリージング 空気量, 凝結時間 練り上り温度	圧縮強度, 静弾性係数					乾燥収縮	断熱温度上昇
				20°C養生		同温度養生				
				7日	28日	91日	28日	91日		
5°C	普通セメント	○	○	◎	●	●	●	—	—	○
	高炉B種	○		◎	●	●	—	●	—	○
	低発熱型高炉B種	○		◎	●	●	—	●	—	○
20°C	普通セメント	○	○	◎	●	●	—	—	○	
	高炉B種	○		◎	●	●	—	—	○	
	低発熱型高炉B種	○		◎	●	●	—	—	○	
30°C	普通セメント	○	○	◎	●	●	●	—	—	○
	高炉B種	○		◎	●	●	—	●	—	○
	低発熱型高炉B種	○		◎	●	●	—	●	—	○

※ ◎は圧縮強度のみ ●は圧縮強度と静弾性係数を測定。
 ※※ 同温度養生とは練り上り温度と同温度で所定材令まで養生。
 ※※※ 断熱温度上昇試験ではコンクリート温度5°Cのケースは10°Cで行なった。

表一5 試験項目

(2) 流動化剤の添加量

スランプ 12±1 cm のベースコンクリートを 20±1 cm に流動化するために必要な流動化剤の添加量は, セメントの種類が異なってもほぼ同等であった。しかし, コンクリート温度が高くなるほど所要の添加量が少なくなり, コンクリート温度 5°C, 20°C, 30°C でそれぞれセメント重量 (C) × 0.55%, 0.45%, 0.40% であった。

(3) 空気量

流動化剤添加後の空気量は図一1のように, セメントの種類にはあまり影響されないが, 温度によって若干影

コンクリート温度			5℃					20℃					30℃													
コンクリート配合	セメントの種類	W/C (%)	S/a (%)	単位重量(kg/m³)				減水量 ポゾリス No.8 C×%	流動化剤 NP-10 C×%	単位重量(kg/m³)				減水量 ポゾリス No.8 C×%	流動化剤 NP-10 C×%	単位重量(kg/m³)				減水量 ポゾリス No.8 C×%	流動化剤 NP-10 C×%					
				C	W	S	G			C	W	S	G			C	W	S	G							
また固まらないコンクリートの性質	普通ポルトランドセメント	60	46.7	260	156	883	1027	0.25	0.55	265	159	877	1020	0.25	0.45	270	162	872	1015	0.25	0.40					
	高炉セメントB種			255	153	885	1029	0.25	0.55	255	153	885	1029	0.25	0.45	260	156	880	1023	0.25	0.40					
	低発熱型高炉セメント			252	151	888	1033	0.25	0.55	251	151	888	1033	0.25	0.45	257	154	882	1026	0.25	0.40					
また固まらないコンクリートの性質	普通ポルトランドセメント	練り直後	経時	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)						
				始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結			
				15分後	添加前	16.0	5.8	6.0	—	—	—	14.5	4.9	20.5	—	—	—	14.8	5.2	29.0	—	—	—	—	—	—
				15分後	添加後	13.5	5.3	6.0	—	—	—	12.5	4.4	21.0	—	—	—	12.9	4.7	29.0	—	—	—	—	—	—
				30分後	添加後	20.0	5.1	6.5	0.096	15-10	20-35	20.5	4.2	21.0	0.121	6-45	8-35	20.7	4.7	29.0	0.061	4-20	5-50			
				30分後	添加後	18.5	4.6	6.5	—	—	—	19.6	3.0	21.0	—	—	—	14.5	4.5	29.0	—	—	—	—	—	—
	60分後	添加後	15.5	3.9	5.5	—	—	—	14.0	3.1	21.0	—	—	—	6.9	3.7	29.5	0.022	4-20	5-35						
	90分後	添加後	13.0	3.8	6.0	0.056	14-15	20-00	11.5	4.8	21.0	0.052	6-30	8-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	高炉セメントB種	練り直後	経時	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)						
				始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結			
				15分後	添加前	15.0	5.3	5.0	—	—	—	15.0	5.0	19.5	—	—	—	14.5	5.0	29.0	—	—	—	—	—	—
				15分後	添加後	13.0	4.9	5.5	—	—	—	12.5	4.8	19.0	—	—	—	12.8	4.4	29.5	—	—	—	—	—	—
				30分後	添加後	20.0	4.8	6.0	0.103	15-50	23-45	20.5	4.5	18.5	0.091	6-30	10-15	20.0	4.3	29.5	0.059	3-50	5-35			
				30分後	添加後	17.5	4.0	5.0	—	—	—	18.0	3.4	19.5	—	—	—	13.8	3.7	29.5	—	—	—	—	—	—
	60分後	添加後	16.0	3.7	5.0	—	—	—	14.3	3.1	19.0	—	—	—	8.5	4.3	29.5	0.022	4-20	5-40						
	90分後	添加後	12.0	3.6	5.5	0.064	15-15	23-20	9.8	4.2	19.0	0.064	6-45	10-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	低発熱型高炉セメントB種	練り直後	経時	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ブリージング量 (cc/cm³)	凝結時間 (h-m)						
				始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結	始発	終結			
15分後				添加前	16.0	5.2	5.5	—	—	—	14.5	5.6	19.5	—	—	—	14.6	5.3	28.5	—	—	—	—	—	—	
15分後				添加後	13.5	4.9	5.5	—	—	—	13.0	5.0	19.5	—	—	—	12.5	5.0	29.0	—	—	—	—	—	—	
30分後				添加後	21.0	4.8	5.5	0.111	16-30	24-35	21.0	4.6	19.5	0.076	6-50	10-10	20.3	5.0	29.0	0.053	4-45	6-05				
30分後				添加後	19.5	4.3	5.0	—	—	—	18.5	3.2	19.5	—	—	—	12.0	4.0	29.0	—	—	—	—	—	—	
60分後	添加後	16.5	4.0	5.0	—	—	—	13.0	3.2	19.5	—	—	—	5.7	3.7	29.0	0.035	4-45	6-30							
90分後	添加後	14.0	3.7	5.0	0.064	16-20	24-20	8.0	3.6	19.5	0.052	7-00	10-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—				

表一六 まだ固まらないコンクリートの試験結果一覧

響され、コンクリート温度が低い場合に減少する傾向が認められた。

(4) ブリージング

流動化コンクリートのブリージング量は表一六に示すように、セメントの種類による顕著な差異はなく、コンクリート温度が高くなる程減少し、また、流動化後アジテートしたコンクリートのブリージング量は流動化直後より減少することが認められた。

(5) 凝結時間

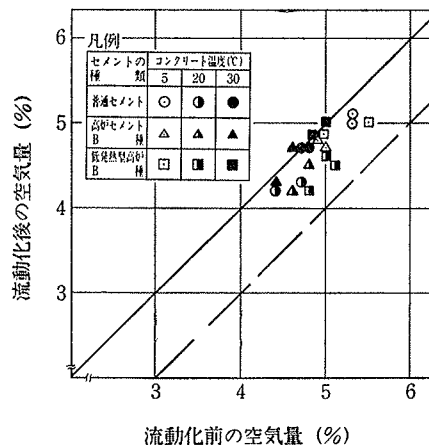
コンクリート温度20℃の時と比較すると、5℃の時の凝結時間は普通セメント、従来型高炉セメント、低発熱型高炉セメントの順に始発で8.5~9.5hr、終結で12~14.5hr 遅延され、30℃の時には始発で2.5~2hr、終結でそれぞれ2.5、4.5および3.0hr程度促進された。

低発熱型高炉セメントはいずれの温度の場合も普通セメントより遅延されるが、この度は温度が低い程顕著であり、30℃では大差はなかった。また、流動化後アジテートしたコンクリートの凝結時間は加水時を基準とすれば流動化後アジテートしないものとはほぼ等しかった。

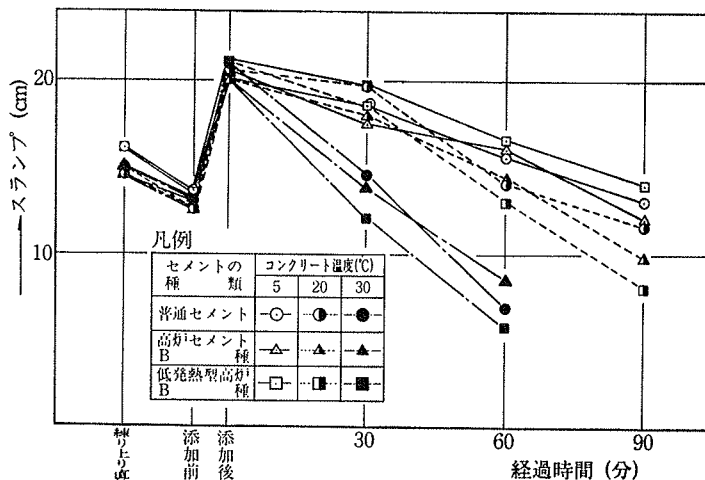
(6) スランプおよび空気量の経時変化

時間経過に伴うスランプ低下は図一に示すようにセメントの種類による差異は認められず、コンクリート温度が高くなる程スラン

プ低下が早くなる傾向が認められた。特に30℃では顕著であった。一方、時間経過に伴う空気量の低下量はいずれのセメントにおい



図一 流動化前後の空気量



図二 流動化コンクリートのスランプの経時変化

てもほぼ同等であり、経過時間30, 60, および90分後でそれぞれ0.1~1.3および1.1~1.3%程度であった。

4.2. 硬化コンクリートの性質

(1) 流動化剤が圧縮強度に及ぼす影響

図-3はベースコンクリートと流動化コンクリートの圧縮強度を比較したものである。コンクリート温度、セメントの種類および養生条件などに関係なく、流動化コンクリートの圧縮強度はベースコンクリートに較べて同等ないしそれ以上の値が得られた。

(2) セメントの種類が圧縮強度に及ぼす影響

図-4は、練上りと養生温度が20℃の場合の強度発現性状を示したものである。材齢7日と28日の強度は、い

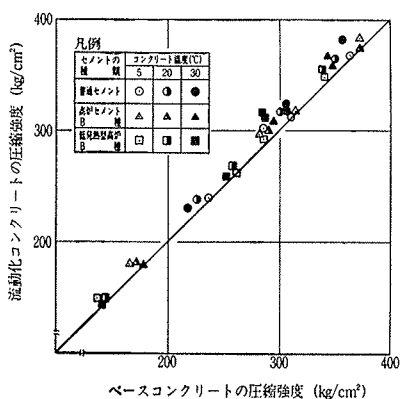


図-3 流動化前後の圧縮強度の比較

ずれのコンクリート温度の場合も普通セメント、高炉セメント、低発熱型高炉セメントの順に小さくなっているが、材令91日ではほとんど同等の強度が得られた。

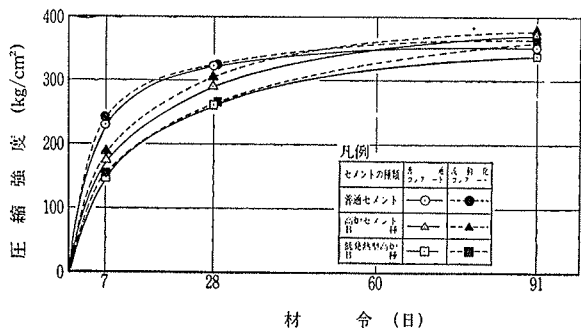


図-4 各種コンクリートの強度発現性状

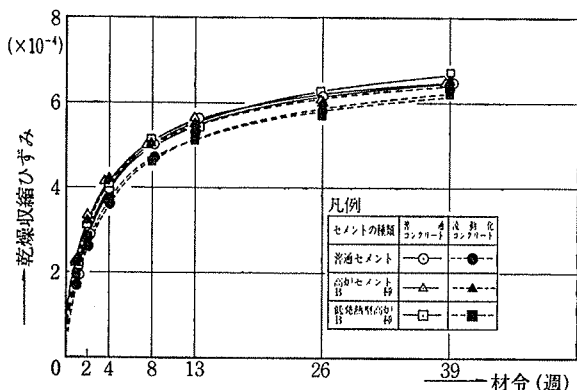


図-5 各種コンクリートの乾燥収縮ひずみ

(3) 圧縮強度に及ぼすアジテートの影響

全般的に、アジテートを経験したコンクリートの圧縮強度は、流動化直後に採取したものより若干大きく、その増加率は約6%であった。しかし、セメントの種類とコンクリート温度による差異は認められなかった。

(4) 静弾性係数

流動化後の静弾性係数は、圧縮強度と同様にセメントの種類と温度等に関係なく、流動化前より同等かもしくはそれ以上であった。

(5) 乾燥収縮

図-5に乾燥収縮試験結果を示した。この結果よりセメントの種類による乾燥収縮の顕著な差は認められないが、流動化コンクリートの乾燥収縮が、ベースコンクリートと比較して若干小さくなる傾向が認められた。

4.3. 断熱温度上昇量

コンクリートの断熱温度上昇試験結果を図-6, 7および表-7に示す。表-7における Q_0 , α 値は式(1)のコンクリートの断熱温度上昇式に近似する値である。

$$T = Q_0(1 - e^{-\alpha t}) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、T: 断熱温度上昇量 (°C)

Q_0 : 最高温度上昇量 (°C)

α : 温度上昇係数

t: 材令 (日)

この実験では、水セメント比と目標スランプを一定にしたため、各温度、使用セメントによって単位セメント量が異なる。したがって断熱温度上昇量は乗数K (単位セメント量当りの温度上昇量) によって比較する。また、温度上昇勾配は α (温度上昇係数) によって比較できる。図-8は、各配合別にK値, α 値を示したものである。セメントの種類による影響をみると、普通セメントと高炉セメントの最高温度上昇量はほとんど同等で、低発熱型高炉セメントはこれより5~8°C小さい。また、温度上昇係数(α)は従来型高炉セメントと低発熱型高炉セメントがほぼ等しく、普通セメントよりかなり小さいこ

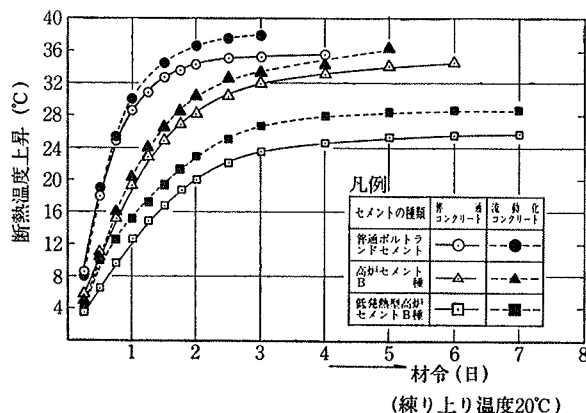


図-6 各種コンクリートの断熱温度上昇曲線(20°C)

とがわかる。

練上り温度が高くなると、図-8、表-7に示すように温度上昇は速くなるが、逆に最高温度上昇量は小さくなる傾向が認められた。このことは各セメントについて同様の傾向を示している。

普通コンクリートと流動化コンクリートを比較した場合、今回の実験においては流動化コンクリートの方が上昇勾配が若干小さくなる様な傾向も認められたがほとんど大差はなかった。

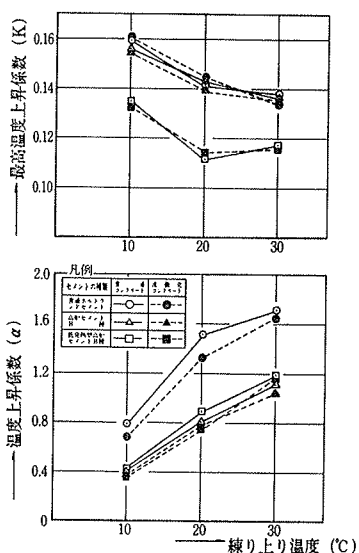


図-8 断熱温度上昇諸定数

5. まとめ

以上の結果を要約すると次の通りである。

(1) 低発熱型高炉セメントは所要のコンシステンシーを得るのに必要な単位水量が、普通セメント、従来型高炉セメントと比較して若干少なく、同一水セメント比の場合、単位セメント量を低減できる。

(2) セメントの種類が異なっても流動化剤の効果やコンクリート温度がコンクリートの性状に及ぼす影響には大差がなかった。

(3) 低発熱型高炉セメントは、従来型高炉セメントより初期材令での強度発現が若干遅いが、材令91日程度ではほぼ同等となり、長期強度はむしろ大きくなるのが期待できる。

(4) 流動化剤はセメントの種類が異なっても、その効果は大差なく、添加前のコンクリートと比較して圧縮強度、静弾性係数は同等もしくは若干増加する。また乾燥収縮は若干減少する傾向が認められる。

(5) 低発熱型高炉セメントの温度上昇勾配は普通セメントより小さいが、従来型高炉セメントとほぼ同等である。しかし、同一セメント量における最高温度上昇量は

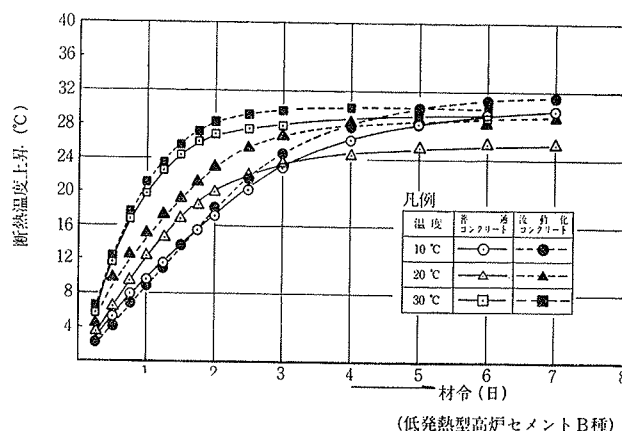


図-7 断熱温度上昇曲線 (低発熱型高炉セメント)

セメントの種類	打込み温度 (°C)	水セメント比 (%)	普通コンクリート					流動化コンクリート				
			単位セメント量 C (kg/m³)	最高温度に達する時 Q (hr)	最高温度上昇 Q (°C)	最高温度上昇係数 K (°C/kg/m³)	温度上昇係数 a	単位セメント量 C (kg/m³)	最高温度に達する時 Q (hr)	最高温度上昇 Q (°C)	最高温度上昇係数 K (°C/kg/m³)	温度上昇係数 a
普通ポルトランドセメント	10	60	242	120	38.4	0.159	0.78	252	120	40.3	0.160	0.67
高炉セメント B種			233	216	36.3	0.140	0.41	243	240	37.7	0.144	0.38
低発熱型高炉セメント B種			225	264	30.3	0.137	0.41	245	264	32.3	0.134	0.39
普通ポルトランドセメント	20	60	255	96	35.6	0.156	1.50	272	72	39.1	0.155	1.32
高炉セメント B種			245	144	35.0	0.143	0.81	262	120	36.7	0.140	0.80
低発熱型高炉セメント B種			233	168	25.9	0.136	0.88	258	168	29.3	0.135	0.74
普通ポルトランドセメント	30	60	260	72	35.7	0.135	1.70	270	120	36.2	0.132	1.64
高炉セメント B種			250	120	34.0	0.111	1.11	260	120	35.1	0.114	1.04
低発熱型高炉セメント B種			247	144	28.8	0.117	1.17	257	144	29.8	0.116	1.16

$$* K = \frac{Q}{C}$$

表-7 断熱温度上昇試験結果一覧

普通セメント、従来型高炉セメントよりかなり小さく、マスコン用のセメントとしての効果は大きい。

(6) 流動化剤の温度上昇に与える影響はほとんどなく、同一セメント量であれば、最高温度上昇量も温度上昇勾配もほとんど同等と思われる。

6. あとがき

低発熱型高炉セメントは発熱が少なく、流動性が良好でかつ長期的に強度増進が期待できる材料であり、マシンなコンクリート構造物用に適している。また、流動化剤と組み合わせることによってコンクリートの温度上昇をさらに抑えることが可能となり、今後大いに期待できるとと思われる。

最後に、本実験を進めるにあたり、日本セメント(株)、研究所、第一セメント(株)、日曹マスタービルダーズ(株)中央研究所の皆様にご多大な御協力をいただいたことに感謝の意を表します。