

論文

[1048] 断熱温度上昇下における高ビーライトセメントの強度発現性に関する研究

長岡誠一*1・水越睦視*2・黒田保*3・小野成子*4

1. はじめに

近年、マスコンクリートにおける温度ひびわれの抑制を目的として、クリンカー鉱物のうち水和熱の小さいビーライト(C₂S)の構成比率を中庸熱セメントよりもさらに多くした高ビーライト型低発熱セメント(以下、高ビーライトセメントという)が開発され、実用化されつつある。

しかし現在、わが国においては諸外国規格における「低発熱ポルトランドセメント」に相当する規格がないため、呼び名をはじめとしてC₂S量、水和熱、圧縮強さ等はセメントメーカーにより各社各様の状況にある。

筆者らは、実生産可能なセメントにおいて、温度ひびわれの抑制に最も有効であると考えられるビーライト含有量を把握するために、実機により生産されたC₂S量の異なる4種類のセメントを用いて、C₂S量とコンクリートの諸性質の関係についての検討を行ってきた[1]。その結果、温度ひびわれ抵抗性の指標の1つと考えられる圧縮強度/断熱温度上昇量の関係は、若材令ではC₂S量が多くなると小さくなるが、長期材令においてはC₂S量が多くなるほど大きくなることが明らかになった。しかし、ここで評価した圧縮強度は標準養生での値であって、実構造物における温度履歴とは異なる条件下でのものである。したがって、温度履歴を考慮した強度発現性により、温度ひびわれ抵抗性を評価する必要があると考えられる。

本研究は、断熱温度上昇下におけるC₂S量の異なる4種類のセメントを用いたコンクリートの強度発現性ならびに水和状況を明らかにし、高ビーライトセメントのマスコンクリートへの適用性について検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用したセメントは、C₂S量がそれぞれ75、60、45、30%を目標に実機キルン(生産能力300t/hour)で焼成・製造したポルトランドセメント4種類である。セメントの鉱物組成を表-1に、物理的性質を表-2に示す。

骨材は、細骨材には海砂(香川県室木産、比重2.55、吸水率1.58%、粗粒率2.63)を、粗骨材には碎石2005

(大阪府高槻産、比重2.69、吸水率0.79%、粗粒率6.78)を使用した。また、混和剤にはリグニンスルホン酸系のAE減水剤およびAE助剤を使用した。

表-1 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
B-75	5.2	74.7	1.7	12.2
B-60	20.0	59.0	3.5	11.9
B-45	33.5	44.2	6.1	10.0
B-30	46.6	27.1	9.2	9.1

*1 大阪セメント(株)中央研究所副主任研究員(正会員)

*2 大阪セメント(株)中央研究所研究員、工修(正会員)

*3 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

*4 大阪セメント(株)中央研究所研究員

表-2 使用セメントの物理的性質

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間(h-m)		圧縮強さ (kgf/cm ²)				水和熱 (cal/g)		
			始発	終結	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日
B-75	3.28	2.970	5-30	8-05	4	7	63	246	-	24.1	34.5
B-60	3.25	3.180	2-40	4-50	47	72	220	457	35.4	48.8	64.7
B-45	3.21	3.320	2-50	4-35	110	170	340	495	47.5	59.3	75.7
B-30	3.16	3.200	2-20	3-30	168	265	420	461	-	78.0	90.0

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、

表-3 実験に使用したコンクリートの配合

水セメント比55%、目標スランプ8cm、目標空気量4%として試験練りにより決定した。実験に使用したコンクリートの配合を表-3に示す。

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				AE減水剤 (C%)	AE助剤 (c%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材		
B-75	55	42	168	305	750	1089	0.25	0.3
B-60			164	298	758	1089		0.2
B-45			165	300	752	1095		0.3
B-30			165	300	753	1092		0.2

2.3 試験項目および方法

(1)断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は、空気循環式の断熱温度上昇試験装置を用いて、φ40×40cm（容量約50ℓ）のコンクリート試料により行った。

(2)圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108により行った。なお、供試体の養生は標準養生および断熱温度上昇試験装置に付属する追従養生層内、すなわちそれぞれのセメントにおける断熱温度上昇量下での気中養生（湿度90%以上）（以下、断熱養生と略す）とした。また、断熱養生下における強度試験の材令は、それぞれのセメントにおいてマチュリティーが標準養生の3日、7日、14日および28日と同等になる材令とした。

(3)水和解析

強度試験後の供試体を粗砕して粗骨材を取り除き、2.5～5mmの粗粒を細孔径分布測定用試料として直ちにD-dryを行った。さらに、細孔径分布測定用試料を微粉碎して、示差熱量分析用試料とした。細孔径分布の測定は水銀圧入式ポロシメータにより行い、示差熱量分析はTG-DTAを行った。

3. 実験結果および考察

3.1 断熱温度上昇量

断熱温度上昇試験結果を表-4および図-1に示す。C₂S量の増加とともに、断熱温度上昇量および温度上昇勾配は小さくなる。このため、標準養生における3日、7日、14日および28日に相当するマチュリティーが得られるまでの時間はC₂S量により異なり、表-5に示すようになる。

表-4 断熱温度上昇試験結果

セメントの種類	C ₂ S量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	温度上昇量 (°C)	回帰式における係数	
				T=K(1-e ^{-αt})	
				K	α
B-75	74.7	305	24.4	24.56	0.178
B-60	59.0	298	37.1	35.08	0.353
B-45	44.2	300	43.5	42.13	0.631
B-30	27.1	300	50.4	50.40	0.972

表-5 断熱温度上昇下における試験材令

標準養生材令	標準養生と同一マチュリティになるまでの時間			
	B-75	B-60	B-45	B-30
3日 (2160°C・h)	55	49	46	40
7日 (5040°C・h)	119	101	92	78
14日 (10080°C・h)	223	186	166	141
28日 (20160°C・h)	409	341	308	267

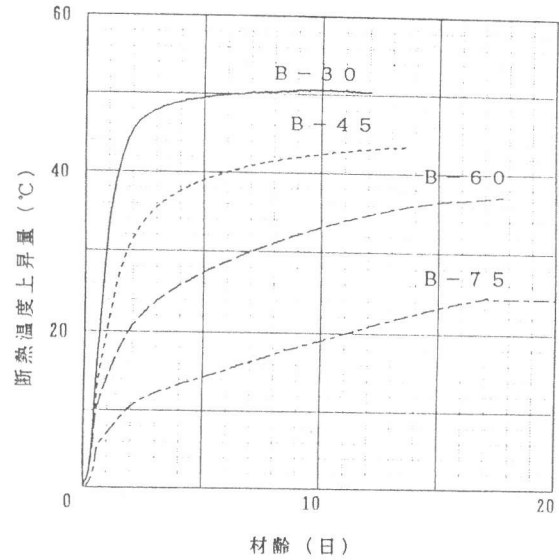


図-1 断熱温度上昇曲線

3. 2 強度発現性

標準養生および断熱養生下における強度発現性状を図-2に示す。

標準養生における強度発現は、C₂S量の増加にともない大きく遅れている。例えば、材令3日あるいは7日程度では、水セメント比が55%と同じであるにもかかわらずC₂S量が約15%多くなると圧縮強度は50~110 kgf/cm²低くなっている。しかし、材令の経過にともなう強度増進はC₂S量が多いほど大きくなっており、材令91日ではC₂S量約75%のB-75以外のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度は同程度となっている。

断熱養生下における強度発現状況も標準養生の場合と同様の傾向であるが、C₂S量が少なくなるとマ

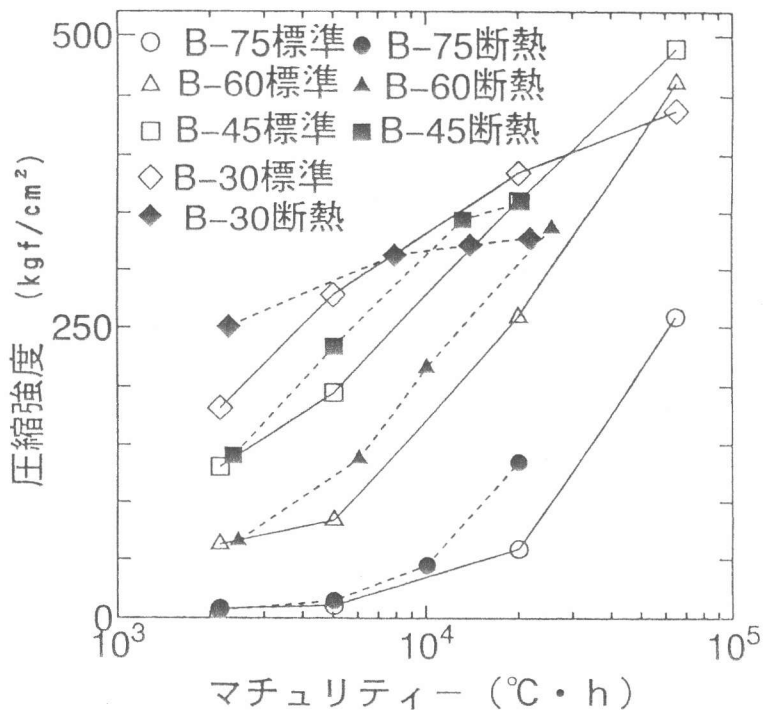


図-2 各セメントの強度発現性状

チュリティーの増加に対する強度の増進割合が標準養生の場合に比べて顕著に低下している。逆に、C₂S量が多いセメントでは標準養生の場合と同等もしくはそれ以上に強度が増進する、すなわち熱履歴を受けた場合においても良好な強度増進を示している。このため、断熱養生した場合は、B-75以外のセメントを用いたコンクリートの圧縮強度はマチュリティー20000°C・h (標準養生

の材令28日程度に相当)程度でほぼ同じ値となっている。しかしながら、C₂S量の最も多いB-75では、この程度のマチュリティーでは他のセメントの1/2以下の強度しか発現していない。

標準養生と断熱養生した場合の圧縮強度を同一マチュリティーで比較すると、マチュリティーが20000°C・h程度と非常に小さい範囲においてはC₂S量が少ないもの、すなわちC₃S量が多いものでは断熱養生下における強度の方が標準養生に比べて高くC₃Sの強度発現における温度依存性が大きいことを示す結果となっており、C₂Sの水和が他のセメント鉱物に比較し温度依存性が高いという報告(2)(3)と一致しない結果となっている。これは、これらの報告では材令を基準に評価しており、マチュリティーによる評価をしていないためと考えられる。一方、マチュリティーが大きくなった場合は、C₂S量が多いと断熱養生下における強度は標準養生に比べて高くなるようである。

次に、図-3にC₂S量と断熱温度上昇量1°C当たりの圧縮強度(以下、断熱比強度と略す)との関係を示す。

温度ひびわれ抵抗性の指標の一つと考えられる断熱比強度は、標準養生においては若材令ではC₂S量が多くなると小さくなるが、材令の経過にともなう伸びはC₂S量の多いものほど大きく、材令91日ではC₂S量が多いものほど値が大きくなっている。一方、断熱養生した場合は、傾向は標準養生の場合と同じであるが、C₂S量の多いものは材令の経過にともなう伸びが標準養生の場合に比べて顕著に小さくなっている。このた

め、標準養生における材令28日に相当するマチュリティー20000°C・h程度ですでにB-60が最も大きな値を示している。

したがって、断熱温度上昇下における強度発現性および断熱比強度から、C₂S量60%程度のセメントが実用的で最も温度ひびわれ抵抗性に優れるものと考えられる。

3. 3 Ca(OH)₂生成量

示差熱量分析により求めたCa(OH)₂量を図-4に示す。

けい酸カルシウム系セメント組成鉱物の水和率を推定するための有力な指標の一つとされているCa(OH)₂量は、C₂S量の多いB-60では断熱養生と標準養生でマチュリティーが等しい場合にはほぼ同じ値となっている。一方、C₂S量の少ないB-30では断熱養生を行った方が標準養生の場合に比べて多くなっている。

この結果は、C₂S量が少なくなる、すなわちC₃S量が多くなると、マチュリティーが同じで

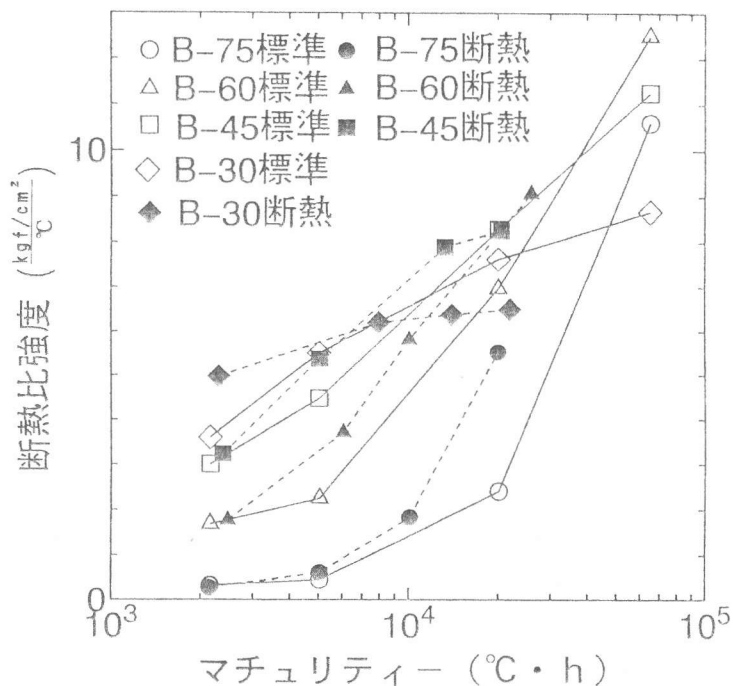


図-3 C₂S量と断熱比強度の関係

あっても断熱養生を行った方が標準養生の場合に比べて水和の進行が速くなることを示しており、強度試験の結果と一致している。

3. 4 細孔径分布

細孔径分布測定結果の代表例を図-5に示す。

C_2S 量が最も少ない、すなわち C_3S 量が最も多いB-30では、材齢に関係なく断熱養生の場合の細孔径分布が標準養生の場合に比べて大きい側にシフトし、また全細孔量も大きくなっており、既往の報告[4]と一致する結果となっている。一方、 C_2S 量の多いB-60では、細孔径は断熱養生と標準養生でほぼ同じ分布を示しており、これも既往の報告[5]と一致する結果となっている。

細孔径分布測定結果より、 C_2S 量が少なくなると断熱養生においては温度の上昇速度が速く、さらに上昇温度も高く水和がより高温で進行するため、水和速度は速いが緻密な組織の硬化体は得られないようである。一方、 C_2S 量が多い場合、水和が低温で進行するため標準養生の場合と同等の組織が形成されるようである。このため、 C_2S 量が少なく

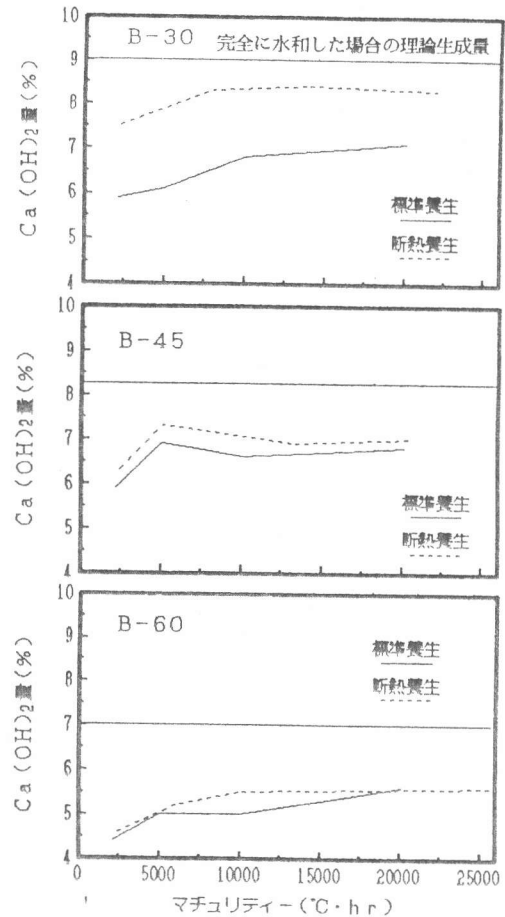


図-4 $Ca(OH)_2$ 生成量測定結果

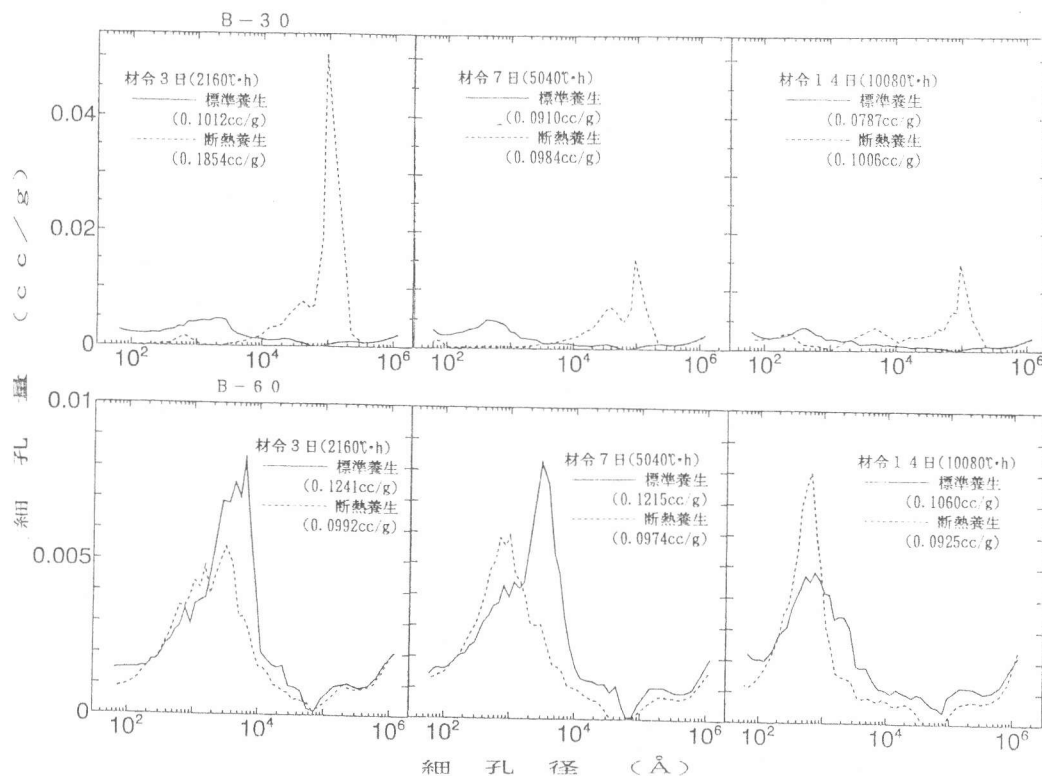


図-5 細孔径分布測定結果の一例

なると、断熱養生におけるマチュリティーの増加に対する強度の増進割合が標準養生の場合に比べて低下したと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると、次のようである。

- (1) 標準養生における強度発現は、セメント中の C_2S 量の増加にともない大きく遅れるが、材令の経過にともなう強度増進は大きくなる。
- (2) 断熱温度上昇下における強度発現性も標準養生の場合と同様の傾向であるが、 C_2S 量の多いセメントでは材令の経過にともない標準養生の場合と同等以上に強度が増進するのに対し、 C_2S 量の少ないセメントでは強度増進割合が顕著に低下する。
- (3) 断熱温度上昇量 $1^{\circ}C$ 当たりの圧縮強度は、標準養生、断熱養生とも若材令においては C_2S 量の増加とともに小さくなるが、材令の経過にともなう増加の割合は C_2S 量が多い方が大きく、長期材令では C_2S 量が多い方が値が大きくなる。また、材令の経過にともなう増加の割合が C_2S の多い方が大きくなる傾向は、断熱養生においてより顕著である。
- (4) $Ca(OH)_2$ 生成量から推定される水和率は、マチュリティーが等しい場合、 C_2S 量が少ないセメントでは標準養生に比べ断熱養生の場合の方が高くなる。一方、 C_2S 量が多いセメントでは、標準養生と断熱養生で同程度である。
- (5) 断熱養生を行った場合の硬化体の細孔径分布は、 C_2S 量が少ないセメントでは標準養生に比べ粗い側にシフトする。一方、 C_2S 量の多いセメントでは標準養生の場合と同程度である。

参考文献

- 1) 長岡誠一：高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの基礎的性状、ビーライトセメント・コンクリートの現状、第294回学振76委員会、パネル討論会、1993.7
- 2) 浅賀喜与志ほか：低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 58-63、1991
- 3) 加藤和巳ほか：断熱温度上昇過程におけるセメントの強度発現性、第45回セメント技術大会講演集、pp. 122-127、1991
- 4) 曾根徳明ほか：断熱上昇温度養生下におけるコンクリートの強度発現に関する検討、第46回セメント技術大会講演集、pp. 914-919、1992
- 5) 五十畑達夫ほか：各種セメントの養生温度と硬化体組織、セメント・コンクリート論文集、No. 44、pp. 46-51、1990