

論文

[1144] 低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの諸特性と温度ひびわれ抑止効果

正会員○曾根徳明（小野田セメント セメント・コンクリート 研究所）

正会員 山崎満雄（小野田セメント セメント・コンクリート 研究所）

古田誠剛（小野田セメント セメント・コンクリート 研究所）

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は長大橋の基礎、LNG地下式貯蔵タンクの底版、原子力発電所のタービン基礎等に代表されるようにますます大型化の傾向にある。これら構造物においてはコンクリートの温度上昇により温度ひびわれが発生する可能性があり、温度ひびわれ制御対策の検討は構造物の機能性維持からきわめて重要な課題である。各種、温度ひびわれ対策のうち低発熱性のセメントを用いてコンクリートの温度上昇を低減することは基本的かつ効果的な手段である。低発熱性のセメントとしては中庸熱セメントが一般的であるが高炉セメントも使用される事例が多い。しかし、高炉セメントは必ずしも発熱の低減が達成できないとの報告[1]もある。

本研究はマスコンクリート用セメントとして高炉セメントの低発熱化を目的に開発した、低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの基本的な特性を従来の高炉セメントを用いた場合と比較検討し、また、大型モデル実験によって温度ひびわれ抑止効果について検証したものである。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

本研究は以下に示す2項目について検討したものである。

I. 低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの基本的力学特性の把握

低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮・引張強度、弾性係数、発熱特性、クリープ特性を従来の高炉セメントB種を用いた場合と比較検討した。

II. 低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの温度ひびわれ抑止効果の検証

実際の構造物を想定した大型モデル試験体によって、温度ひびわれ制御効果を確かめた。

2. 2 使用材料

(1) セメント

実験に用いたセメントは低発熱型高炉セメント（以下、LBBと略記）である。本セメントは高炉セメントB種の規格に合致しかつ特性を損なわず低発熱性を達成するため適切な素材混合率、粉末度を選定し、普通セメントに粉末度3500cm²/gの高炉スラグ粉末を60%混合したものである。

表-1、表-2にセメントの化学成分、物理的性質を示す。表には従来の高炉セメントB種（高炉スラグ粉末混合率は45%、以下、BBと略記）の性質も併記した。表によれば、LBBの強さは材令28日以降ではBBと同等であるが、水和熱はいずれの材令でも約10cal/g小さい。

表-1 セメントの化学成分

セメント	化 学 成 分 (%)								
	Igloss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
LBB	0.3	0.2	28.4	10.2	1.4	51.6	3.5	2.8	98.4
BB	0.8	0.1	27.2	9.2	1.6	54.1	3.7	2.2	98.9

表-2 セメントの物理的性質

セメント	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝結水量 (%)	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	7日	28日	91日
L B B	2.96	3700	31.0	3-37	5-37	91	175	398	551	56.9	69.9	75.6
B B	3.02	3830	30.1	3-16	4-38	130	224	425	569	66.9	81.2	85.5

(2) 骨材

細骨材には小笠産陸砂(比重2.60, F M2.60, 吸水率1.53%)を、また、粗骨材には岩瀬産碎石(2005、比重2.64, F M6.65, 吸水率0.72%)を用いた。

(3) 混和剤

実験に使用した混和剤はA E減水剤(リグニン系、標準型)である。

2. 3 配合および練りまぜ

(1) 配合

コンクリートの配合はスランプ12cm, 空気量:4%とし、練上り温度を5, 20, 30℃、単位セメント量を260, 300, 340 kg/m^3 に変え、単位水量は所定のスランプが得られるように試的に定めた。

(2) 練りまぜ

練りまぜには強制練りミキサ(容量50ℓ)を使用した。練りまぜは空練りを30秒行った後、混和剤を溶解した練り混ぜ水を注水し、90秒間で練り上げ、直ちに各種コンクリート試験に供した。

2. 4 試験方法

強度試験はJ I Sに準拠して実施した。断熱温度上昇試験装置は空気循環式のものであり、試料は約50ℓである。クリープ試験装置はバネ式(最大容量50トン)であり、載荷重はロードセルでモニターした。試験には単位セメント量300 kg/m^3 のコンクリートを用い、材令2日および28日で載荷した。載荷応力は圧縮強度の1/3である。大型モデル実験には生コンプラントで製造したコンクリートを用いた。試験体は沈埋トンネルのケーソン壁部(厚さ1.8m)を想定した2面放熱モデルである。

3. 結果および考察

3. 1 基本的力学特性に関する検討

(1) フレッシュコンクリートの性状

表-3にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。結果によれば単位水量はL B Bの方がB Bに比べ、1~4 kg/m^3 少ない。また、L B Bの凝結時間はB Bと同程度かわずかに短い。特に低温環境下において両者の差は増大する傾向を示す。

表-3 配合およびフレッシュコンクリートの性質

セメント	温度 (℃)	C (kg/m^3)	W (kg/m^3)	W/C (%)	s/a (%)	凝結時間(h-m)		カープ 強度 (%)
						始 発	終 結	
L B B	5	260	157	60.4	43.2	16-58	26-31	4.5
		300	158	52.7	42.2	16-41	26-00	4.2
		340	161	47.4	41.2	16-19	25-04	3.9
	20	260	161	61.9	43.2	8-30	12-42	3.4
		300	162	54.0	42.2	8-05	12-25	3.3
		340	163	47.9	41.2	7-57	11-54	3.2
	30	260	163	62.7	43.2	5-33	7-59	2.2
		300	163	54.3	42.2	5-00	7-41	1.9
		340	165	48.5	41.2	4-42	6-50	1.7
B B	5	260	160	61.5	44.0	18-21	30-31	4.8
		300	162	54.0	43.0	17-46	29-46	4.4
		340	162	47.6	42.0	17-22	29-01	4.1
	20	260	164	63.1	44.0	8-40	12-40	3.7
		300	165	54.7	43.0	8-25	12-23	3.1
		340	165	48.2	42.0	8-15	12-10	2.9
	30	260	167	64.2	44.0	5-29	8-05	2.9
		300	167	55.7	43.0	5-12	7-35	2.4
		340	167	49.1	42.0	5-02	7-03	2.1

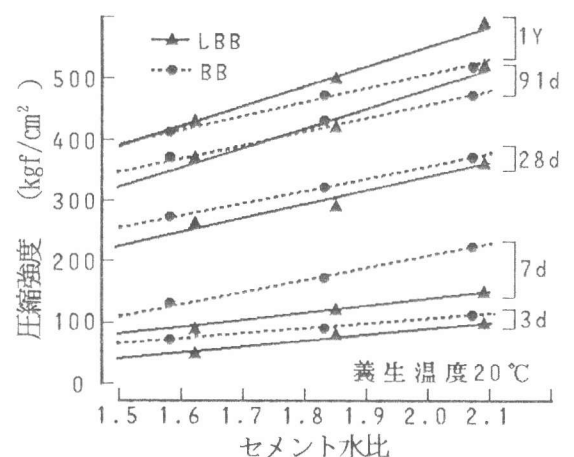


図-1 セメント水比と強度との関係

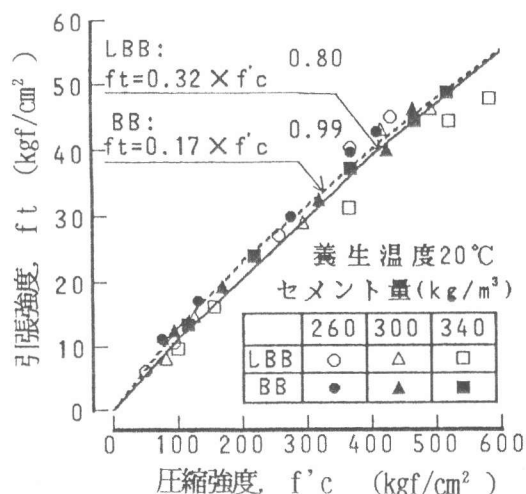


図-2 圧縮強度と引張強度との関係

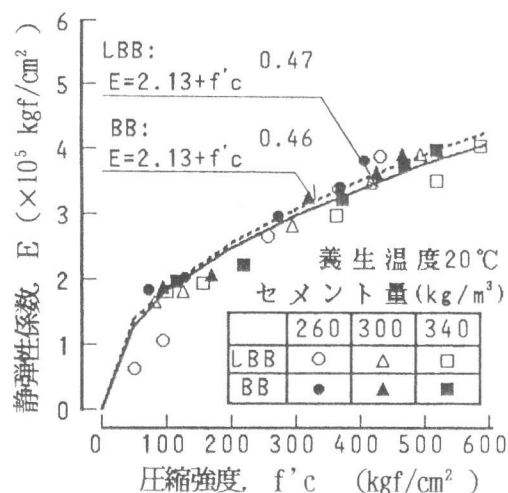


図-3 圧縮強度と静弾性係数との関係

(2) 強度特性

図-1 にセメント水比と強度の関係を示す。図によれば材令によって傾向が異なる。すなわち、LBBの強度は、材令28日まではBBに比較して、若干小さいが、長期では逆に増大傾向を示し、この傾向は水セメント比が小さい程、顕著であることも認められた。また、図は養生温度が20°Cの場合であるが5および30°Cについても同傾向にある。高炉セメントは長期強度の増進割合が大きい[2]とされているがLBBでは一層、顕著である。

図-2 は圧縮強度と引張強度の関係を示したものである。図によれば水セメント比を相違させても両者の関係は大略同一の曲線で回帰できると言える。また、同一圧縮強度について比べればBBの方がLBBより多少大きい傾向にあるが有意な差ではなく、いずれのセメントもコンクリートの圧縮強度100~600 kgf/cm²の範囲では、引張強度は圧縮強度の約1/10と考えられる。

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。両者の関係も図-2の、圧縮強度と引張強度との関係と同様に配合のいかにかわらず、圧縮強度が求められれば一義的に定まると考えられる。セメントの差異が及ぼす影響も明確にはできない。

養生温度の影響を明確にするためマチュリチーと強度との関係を求めた。図-4に両者の関係を示す。図は水セメント比を同一の条件で比較するため、表-3に示した配合の試験結果から水セメント比50%の場合の強度を推定して求めたものである。図によれば養生温度が30°Cの場合には多少、両者の関係が逸脱、すなわちマチュリチーの増加に伴う強度増進割合が減少する傾向を示すが養生温度5~30°Cの範囲においては、総じてマチュリチーの対数と圧縮強度とは直線的関係にあると言える。図において、マチュリチーと強度との関係を詳細に検討すれば、LBBを用いたもののほうがBBを用いたものよりもマチュリチーの増加に伴う強度発現が大きい。この原因については前述、図-1の結果を考え合わせれば高炉スラグ粉末の活性の差異によるものと考えられる。すなわち、BBに用いた高炉スラグ粉末(比表面積:4130cm²/g)の活性度指数は材令28日、91日ではそれぞれ、103%、115%であるのに対し、LBBに用いた高炉スラグ粉末

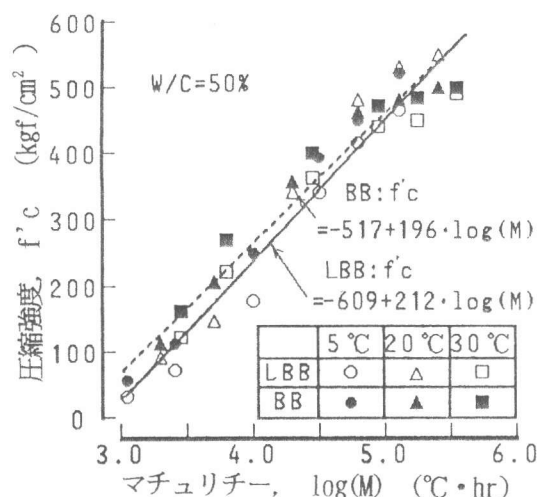


図-4 マチュリチーと圧縮強度との関係

(比表面積: $3520\text{cm}^2/\text{g}$) ではそれぞれ99%、113%であって比表面積の小さいものが長期における増進割合が大きい。

以上、要するにLBBを用いたコンクリートの強度発現性および弾性的性質はBBと大略、同様であると考えられる。

(3) 発熱特性

表-4に断熱温度上昇試験結果を示す。表によれば、LBBとB

表-4 断熱温度上昇試験結果

セメント	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	C (kg/m^3)	回帰係数*1		セメント	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	C (kg/m^3)	回帰係数*1	
			Q_{∞}	r				Q_{∞}	r
LBB	5	260	38.62	0.172	BB	5	260	41.61	0.249
		300	42.61	0.191			300	46.60	0.264
		340	50.11	0.193			340	53.52	0.282
	20	260	34.58	0.608		20	260	38.49	0.597
		300	37.95	0.622			300	43.44	0.630
		340	44.71	0.633			340	50.82	0.685
	30	260	31.92	0.877		30	260	38.95	0.846
		300	35.05	0.907			300	42.10	0.958
		340	41.11	0.922			340	49.13	1.013

*1 $T = Q_{\infty} \cdot (1 - \exp(-rt))$ の Q_{∞} , r

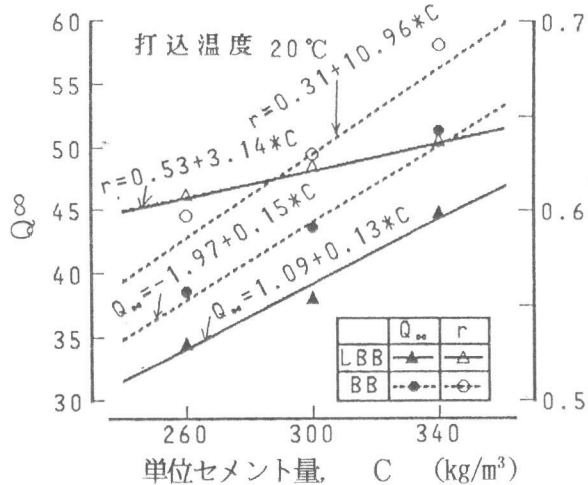


図-5 単位セメント量と断熱温度上昇特性

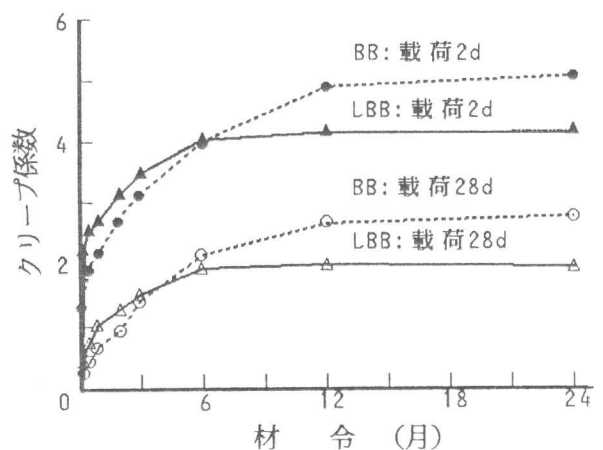


図-6 クリープ係数の経時変化

Bにおいて同一のセメント量、練上り温度の場合を比べれば、LBBはBBよりも最終上昇温度 (Q_{∞}) が3~8 $^{\circ}\text{C}$ 程度低く、低減の割合は練上り温度 5, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ ではそれぞれ、約7%, 11%, 17%であって、練上り温度が高いほど温度上昇の低減効果大きい。マスコン用セメントとしては勿論、強度発現性も良好であるものが望ましい。そこで、単位セメント量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、練上り温度 20°C について材令91日の強度と Q_{∞} との比を求めると、BBでは $9.8\text{kgf}/\text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、LBBでは $11.0\text{kgf}/\text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ と大きく、LBBはマスコンクリート用のセメントとして適していると言える。図-5に単位セメント量と Q_{∞} 、rとの関係を示す。図によれば、セメント量の変化が Q_{∞} におよぼす影響は大略同じであるが、rに対してはBBの方が影響を受けやすいと言える。特にセメント量の大きな配合においてはLBBはBBに比べ、比較的緩やかに温度上昇し、最終上昇温度も小さく、このことからLBBは高強度を必要とし部材厚の比較的小さいマスコン構造物用のセメントとして適していると言える。

(4) クリープ試験結果

図-6にクリープ係数の経時変化を示す。試験中の載荷重は一定に保持し、クリープ係数は所定材令におけるクリープひずみを載荷時の弾性ひずみで除して算出した。なお、本来、マスコンを対象としたクリープ試験は湿潤状態で試験すべきであるが両者のセメント比較という観点からRH 50%の乾燥環境下で実施した。図によればLBBのクリープ係数はBBに比べ初期では幾分大きい材令6月以降においては逆に小さい。たとえば、LBBでは、載荷材令28日の場合、BB

のクリープ係数は材令 1 年、2 年では 2.64, 2.85 であるのに対し、LBB では 1.95, 1.99 と小さい。同様の傾向は載荷材令 2 日の場合にも認められる。

3. 2 温度ひびわれ抑止効果の検証

低発熱型高炉セメントの温度ひびわれ抑止効果を検証するために大型モデル実験を実施した。試験体は沈埋トンネル壁部(厚さ 1.8m)を想定し、4 面を厚さ 20cm の断熱材で覆い壁厚方向にのみ放熱する、長さ 3.6m、高さ 1.2m、厚さ 1.8m

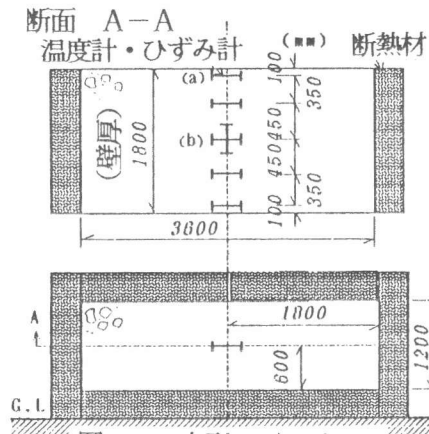


図-7 大型モデル試験体

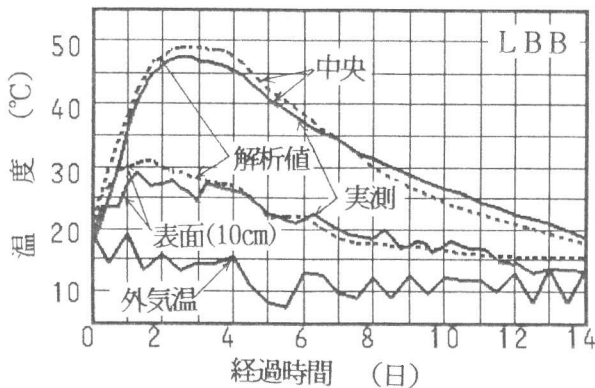


図-8 温度の経時変化 (LBB)

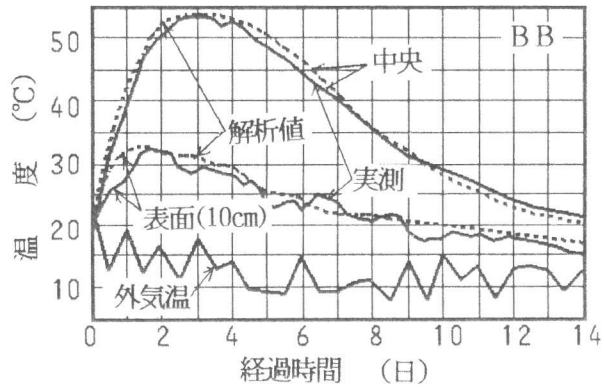


図-9 温度の経時変化 (BB)

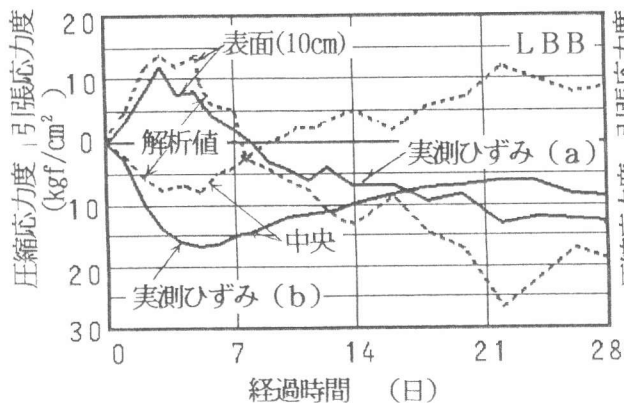


図-10 温度応力の経時変化 (LBB)

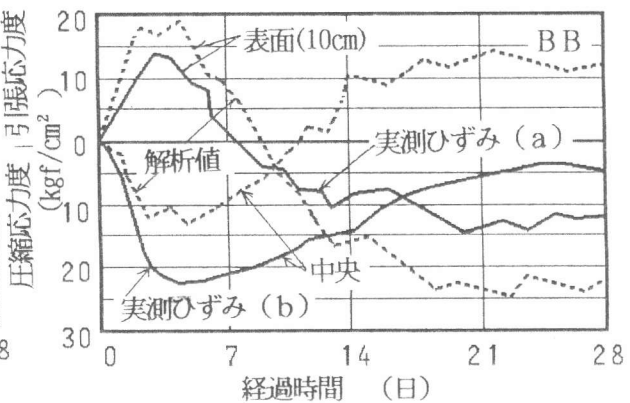


図-11 温度応力の経時変化 (BB)

の 2 面放熱モデルである。試験体内部には放熱面より 0.1m, 0.35m および 0.9m の位置にひずみ計および熱電対を埋設した(図-7)。

実験に用いたコンクリートは、セメントに LBB および BB を用い、生コン工場のプラントで製造されたものであり、温度ひびわれ発生に対し過酷な条件とするため単位セメント量を 350 kg/m^3 とした。スランプ 12cm, 空気量 4% とし、粗骨材には石灰石碎石を用いている。

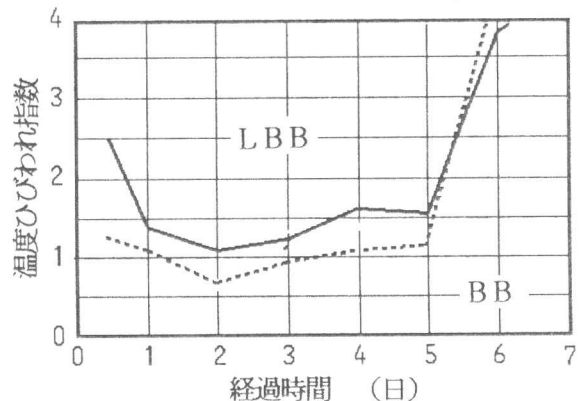


図-12 温度ひびわれ指数の経時変化

実験は11月中旬に行い、コンクリートの打設温度はLBBおよびBBの場合、それぞれ15.5℃および17.0℃であった。解析に用いたコンクリートの断熱温度特性は表-4に示したコンクリートと使用材料、配合が異なるため、同一材料を用いたコンクリートについて断熱温度上昇試験を実施し確認した。練上り温度20℃の結果によれば、LBBおよびBBの断熱温度上昇式(表-4に示した回帰式)の定数はそれぞれ、 $Q_{\infty}=42.66$ 、 $r=0.771$ および $Q_{\infty}=52.73$ 、 $r=0.773$ であり、解析にはこれらの値を打設温度の補正をして用いた。

図-8、9に計算による推定温度と実測温度を表面部(表面より10cm)および中央部(表面より90cm)について示した。結果によれば両者ともに推定温度と実測温度が良く一致している。図-8はLBBを用いた場合であるが試験体中央部の最高実測温度は打設後2.50日で47.8℃、上昇温度は30.6℃であった。これに対して、BBの場合には、打設後2.75日で53.4℃、上昇温度は35.7℃でありBBを用いた場合の方が5.1℃高い。図-10、11にFEMによる温度応力の算出結果と実測ひずみから求めた温度応力の結果を示す。表面近傍についてみれば応力の推移は両者同様の傾向が認められるが、中央部では実測ひずみから算出した応力には反転が認められない。この原因については明確にできないが、材令5日程度の初期の圧縮応力度を過大に評価したことによるものと推察される。したがって、内部拘束が卓越すると考えられる試験体の状況を考慮すればFEM解析によって算出した応力度がより信頼性が高いと判断される。FEM解析の結果によれば、最大引張応力度は両者ともに、材令5日程度において表面部で発生しているが、LBBおよびBBを用いたものではそれぞれ14.9 kgf/cm²および19.8 kgf/cm²であり、BBの方が大きい。図-12にFEM温度応力解析値より求めた温度ひびわれ指数の経時的变化を示す。結果によればいずれも材令2日で表面近傍において温度ひびわれ指数が最小値を示すが、LBBでは1.07であるのに対して、BBでは0.71と小さい。なお、試験体表面を詳細に観察したところ、BBの場合には材令約3日において、試験体のほぼ中央に温度応力によると思われる縦方向のひびわれが発見されたがLBBでは発見できなかった。以上のごとく、本試験体では外部拘束の影響を十分に考慮できなかったが比較的高い強度を必要とするマスコンのひびわれ対策用のセメントとしてLBBが適していることが実験によって立証できた。

4. まとめ

研究の範囲より得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

- (1)低発熱型高炉セメントの水和熱は高炉セメントB種より、約10 cal/g 小さい。
- (2)低発熱型高炉セメントコンクリートの断熱上昇温度は高炉セメントコンクリートより7～17%程度小さく、かつ、上昇温度1℃あたりの強度が大きい。
- (3)低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの温度ひびわれ制御効果に関して大型実験により確かめられた報告は少ないが、壁状コンクリート構造物を想定した大型モデル実験によって、本セメントは温度ひびわれの抑制に効果的であることが実験によって確かめられた。

参考文献

- 1) 柳田 力ほか：高炉水砕スラグ粉末を用いたコンクリートの品質に関する一試験，コンクリート工学，Vol.15，No.4，pp.20-26，1977.4
- 2) コンクリート委員会報告 F-17：各種セメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告，セメント協会，1967.4