

論文 温度ひび割れ抵抗性に及ぼす低熱セメントおよび混和材料の影響

松永篤^{*1}・山根昌浩^{*2}・竹田宣典^{*3}・十河茂幸^{*4}

要旨：低熱セメントおよび混和材料の種類が温度ひび割れ抵抗性に及ぼす影響について実験的に検討した。実験には、コンクリートの温度変化に伴う軸方向の変形を打設直後から拘束することにより、部材内部の状態を模擬的に再現する装置を用いた。コンクリートの強度および断熱温度上昇量が同等であっても、スラグ混合の二成分系セメントに比べて、三成分系セメントのほうが、さらにフライアッシュ混合の二成分系セメントや高ビーライトセメントのような強度発現および発熱が緩やかなセメントのほうが温度ひび割れ抵抗性に優れることが明らかになった。

キーワード：温度ひび割れ、拘束型枠、高ビーライトセメント、混和材料

1. はじめに

近年、コンクリートの温度ひび割れ対策として、高ビーライトセメントや高炉スラグ微粉末、フライアッシュを多量に混合した二成分系・三成分系の低熱セメントが開発され、大型の土木構造物に適用されている[1]。温度応力・温度ひび割れに影響する因子としては、コンクリートの発熱特性、強度、剛性、クリープ特性があり、多くの研究がなされている[2]。また、セメントの水和に伴う自己収縮が影響するとの報告もなされている[3]。しかし、これらの低熱セメントは、鉱物組成や混和材料の種類・量の違いにより発熱特性および強度発現性が大きく異なるが、それらの性質の違いが温度ひび割れ抵抗性に及ぼす影響は明かにされていない。

本研究は、低熱セメントおよび混和材料の種類が温度ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討したものである。ここでは、コンクリートの温度変化に伴う軸方向の変形を打設直後から拘束することにより、部材内部の発熱状態および外部拘束状態を再現する装置[4]を用い、コンクリートの硬化過程での諸物性の変化の影響を全て取入れた状態でひび割れ抵抗性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用したセメントは、高ビーライトセメント(LC)、LCに高炉スラグ微粉末を混合した二成分系の低熱高炉セメント(BBL、BCL)、LCにフライアッシュを混合した二成分系の低熱フライアッシュセメント(FBL、FCL)、ベースセメントがLCあるいは中庸熱の三成分系セメント(LBF、MBF)であり、それらの配合割合を表1に示す。セメントおよび混和材料の物性と鉱物組成を表2に示す。骨材は、細骨材として福岡県産海砂(比重2.55、吸水率1.45%、F.M.2.70)を、粗骨材として山口県産硬質砂岩碎石(最大寸法20mm、比重2.70、吸水率0.56%、

*1 宇部興産(株)セメント事業部開発部 主任研究員、工修(正会員)

*2 宇部興産(株)セメント事業部開発部 研究員、工修

*3 (株)大林組技術研究所土木第三研究室 研究員、工修(正会員)

*4 (株)大林組技術研究所土木第三研究室 主任研究員、工博(正会員)

表1 セメントの配合割合

記号	セメント		混和材	
	高ヒート	中庸熱	高炉スラグ	フライアッシュ
LC	100	-	-	-
BBL	50	-	50	-
BCL	30	-	70	-
FBL	85	-	-	15
FCL	75	-	-	25
LBF	40	-	40	20
MBF	-	25	55	20

F.M. 6. 61) を使用した。また、混和剤はナフタレン系高性能 A E 減水剤を使用した。

配合およびフレッシュコンクリートの性質を表3に示す。なお、単位水量は、A E 減水剤を使用し、単位

セメント量および細骨材率一定の条件で粗骨材最大寸法を40mmとした時に、スランプが5cmとなるように決定した。

2. 2 温度ひび割れ試験方法

温度ひび割れ試験装置の拘束型枠は、図1に示す J I S 原案「コンクリートの水和熱による温度ひびわれ試験方法(案)」に準じたものである。試験は、拘束型枠を温度可変槽内に静置し、温度解析により求めた厚さ1.5mの壁の中心部の温度履歴を与えた。拘束鋼管のひずみから供

試体の応力を、埋込み型ひずみ計により供試体の温度およびひずみを測定した。このときの拘束鋼管内の循環水の温度は、20℃一定とした場合(シリーズ I) および供試体のみかけの拘束率を大きくするため打設12時間後から0.05℃/hrで上昇させた場合(シリーズ II) の2種類とした。さらに、シリーズ II では供試体の中央部断面積をシリーズ I の76%にした。供試体の型枠には内側にビニルシートを張り供試体が封緘状態になるようにした。型枠底板は厚さ2mmの鋼板とし、ビニルシートと鋼板の間に厚さ0.1mmのテフロンシートを2枚挿入して付着の影響を極力小さくした。側板は厚さ50mmの発泡ポリスチレンとし、打設1日後に脱型した。

また、線膨張係数測定用の無拘束供試体(寸法: 100×100×300mm、型枠: 厚さ25mmの発泡ポリスチレン+ビニルシート)、圧縮強度および引張強度測定用の供試体を温度可変槽内に静置した。

3. 試験結果および考察

3. 1 コンクリートの性質

標準養生および温度可変槽内の封緘養生(以下、槽内封緘養生)による圧縮強度と積算温度との関係の例を図2に示す。標準養生の強度発現性はセメントの種類により大きく異なり、LCおよびFCLの場合には、BCLやLBFの場合に比べて材齢28日までの強度発現性は低いもののその後の強度増進は非常に大きい。LBFはフライアッシュが20%も混合されているにもかかわらずBCLと同等以上の強度発現性を示す。一方、材齢91日強度は310~370kgf/cm²の間にあり、

表2 セメントおよび混和材の物性と鉱物組成

種類	比重	ブレン比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成(%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
高ヒートセメント	3.23	3380	27	52	3	12
中庸熱セメント	3.20	3150	43	34	4	12
高炉スラグ	2.88	5400	-	-	-	-
フライアッシュ	2.24	3760	-	-	-	-

表3 配合およびフレッシュコンクリートの性質

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×wt%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
LC	55.8	40	145	260	749	1190	2.0%	6.5	6.6
BBL					745	1183	1.0%	6.5	4.4
BCL					742	1178	1.0%	5.0	3.4
FBL	54.6		142		747	1188	1.8%	5.5	5.1
FCL	52.3		136		749	1190	1.8%	4.0	4.1
LBF	51.2		133		701	1185	1.1%	3.0	4.3
MBF	51.5		134		701	1188	1.0%	3.5	4.4

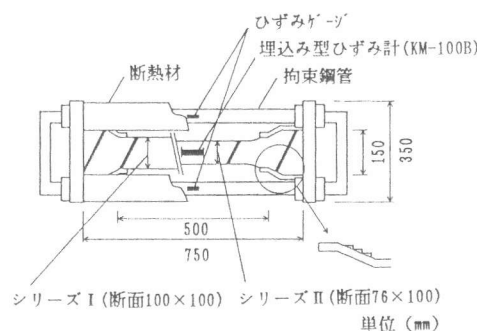


図1 試験装置

セメントの種類の違いによる差は小さい。また、槽内封緘養生の場合には、BCLおよびLBFでは積算温度の小さい範囲においては標準養生よりも強度は高いが、BCLでは $7 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ 、LBFでは $10 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ になると養生方法による差が認められなくなる。しかし、LCおよびFCLでは、積算温度 $20 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$ 程度までの範囲では標準養生よりも強度が高い傾向を示す。なお、BBL、FBLおよびMBFの場合は省略したが、それぞれBCL、FCLおよびLBFと同様の強度発現性を示す。

練上り温度 20°C における断熱温度上昇曲線を図3に示す。セメントの一部を混和材で置換することにより最高温度上昇量は小さくなる。温度上昇速度は混和材の種類により大きく異なり、FBLおよびFCLの場合にはベースセメントのLCと同様に1~1.5日まではかなり急な温度上昇を示すが、その後緩やかになり約2週間で最高温度に達する。混和材として高炉スラグを用いたBBL、BCL、LBFおよびMBFの場合には、初期の急な温度上昇が2~3日まで継続し、約1週間と短期間で最高温度に達する。

温度ひび割れ試験に用いたFEM温度解析結果の例を図4に示す。温度の推移は断熱温度上昇量および温度上昇速度の影響を大きく受け、LCおよびFCLの場合には、BCLやLBFに比べて温度上昇および温度降下速度が小さい傾向にある。

3. 2. 温度ひび割れ抵抗性

(1) シリーズ I : 拘束鋼管内水温一定の場合

拘束供試体の発生応力と拘束供試体の引張強度（槽内封緘養生強度）および強度－発生応力比の推移を図5に示す。材齢14日以降は温度降下速度が非常に小さく、ひび割れの発生の可能性が少ないと考えられたので、この時点で試験を打ち切った。FCLは強度－発生応力比がLCおよびBCLに比べて約1.5倍大きく、ひび割れに対する安全性が高いと考えられる。

温度とひずみとの関係を図6に、拘束ひずみ（無拘束ひずみと拘束供試体ひずみとの差）と応力との関係を図7に示す。これらの図において、最高温度付近までの圧縮応力増加区間（区間1）および温度降下時の引張応力増加区間（区間2）の2つの区間に分けて、温度とひずみの関係の直線部分を回帰し、その傾きとして線膨張係数（ α_f ）および拘束供試体ひずみ変化率（ α_r ）を、また、拘束ひずみと応力の関係の直線部分を回帰し、その傾きとして有効弾性係数（ K_e ）を求めた。これらを用いて拘束率（ $K_x = (\alpha_f - \alpha_r) / \alpha_f$ ）

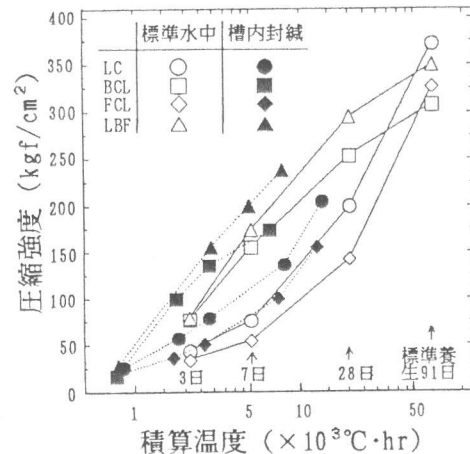


図2 積算温度と圧縮強度との関係

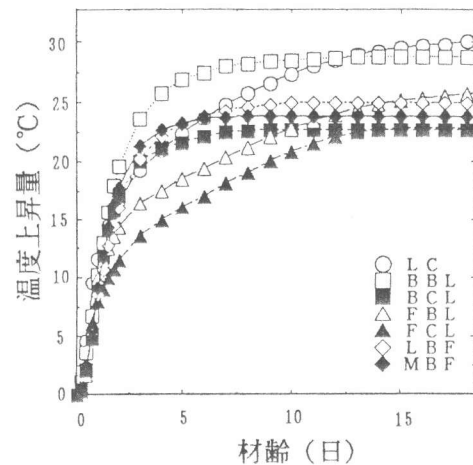


図3 断熱温度上昇曲線

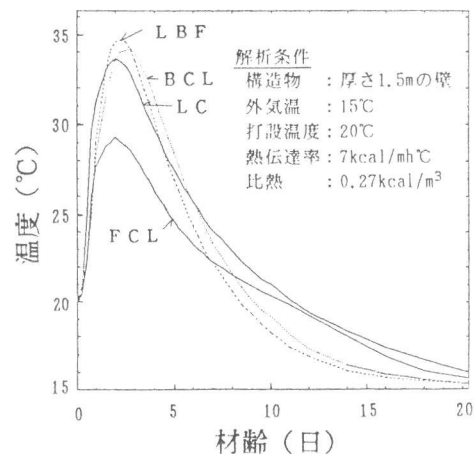


図4 温度解析結果

およびクリープ係数 ($K_{cr} = E_c / K_k - 1$) を求めた。これらの特性値の一覧を表4に示す。

拘束率は、いずれのセメントも区間1のほうが区間2に比べて大きく、また、コンクリート強度が低いセメントほど大きい。

クリープ係数は区間1に比べて区間2ではかなり小さい。LCおよびFCLのクリープ係数は、BCLに比べて圧縮応力増加時の区間1では小さいが、引張応力増加時の区間2では逆に大きくなる傾向を示しており、これは温度応力に対して有利な挙動と考えられる。 K_k は、ある時間間隔での拘束ひずみと応力との変化率として求められるものであり、ここではそれを直線回帰したが、応力の高い領域では拘束ひずみと応力の関係は直線から若干ずれ、実際には K_k が小さくなる傾向が認められる。また、 K_k にはセメントの水和とともに自己収縮等が影響しており、さらにクリープ係数の算出には引張でなく圧縮試験による割線弾性係数 E_c を採用していることも影響していると考えられる。これらについてはさらに検討する必要があると考えられる。

(2) シリーズII：拘束鋼管内水温を上昇させた場合

温度とひずみとの関係の例を図8に、拘束ひずみと応

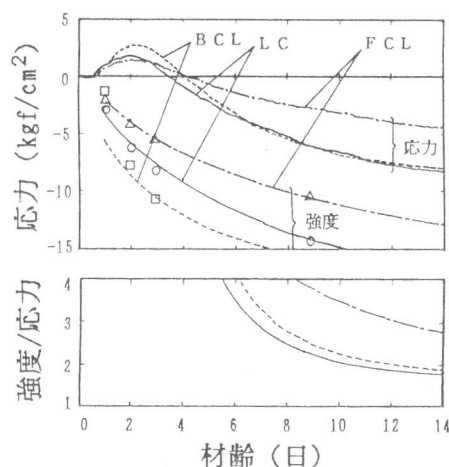


図5 応力、強度-応力比の推移

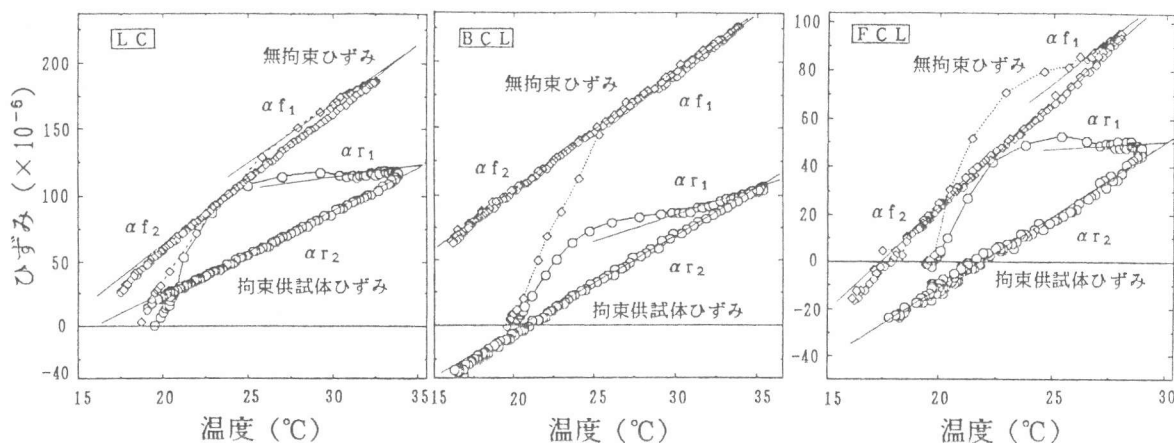


図6 温度とひずみとの関係 (シリーズI)

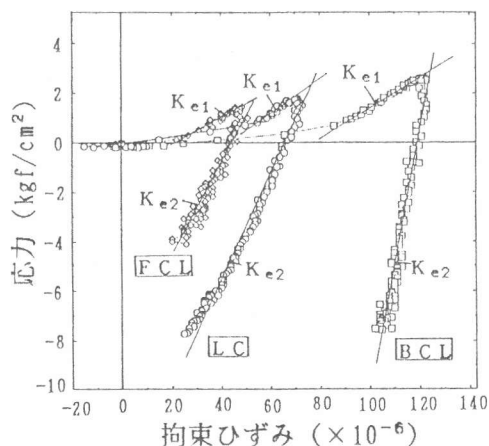


図7 拘束ひずみと応力との関係 (シリーズI)

表4 温度ひび割れ試験特性値(シリーズI)

区間	項 目	LC	BCL	FCL
1	α_f ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	9.10	9.75	7.23
	α_r ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	0.97	3.61	0.16
	K_k	0.89	0.63	0.98
	K_e ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	0.63	0.60	0.52
	$E_c^{1)}$ ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	1.32	1.38	1.01
	K_{cr}	1.10	1.30	0.94
2	α_f ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10.4	9.09	9.13
	α_r ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	6.53	7.67	5.70
	K_k	0.37	0.16	0.38
	K_e ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	1.72	4.89	1.77
	$E_c^{2)}$ ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	2.36	2.46	1.99
	K_{cr}	0.37	-0.50	0.12

注 1) 最高温度上昇時の弾性係数

2) 材齢13日の弾性係数

力との関係の例を図9に示す。また、温度ひび割れ試験の特性値を表5に示す。

なお、ここでは引張応力増加区間を初期の拘束供試体ひずみが直線となる区間

(区間2-1)と、ひび割れ近くの拘束鋼管の温度上昇にともなう引張ひずみが卓越することにより直線の傾きが小さくあるいは負になる区間(区間2-2)にわけて検討した。また、シリーズIと同式により求めた K_x は、コンクリートと拘束鋼管の剛性によって定まる拘束率とは異なり、拘束鋼管の温度上昇による引張変形の影響を含んでいるた

め、以下この K_x をみかけの拘束率という。

区間1では、初期強度発現の低いセメントほどみかけの拘束率は小さく、またクリープ係数は大きくなっており、シリーズIとは逆の傾向にある。

区間2-1では、初期強度発現性の低いLCおよびFBLではみかけ上完全拘束となり、FCLではみかけの拘束率が100%を超え、温度低下による収縮ひずみよりも拘束鋼管の温度上昇による伸びひずみのほうが大きい状態となっている。ひび割れ発生近くの区間2-2においては、BBLおよびBCLの場合のみかけの拘束率は区間2-1と同等であるが、それ以外のセメントでは区間2-1よりも大きい。クリープ係数は、

区間2-1および区間2-2のいずれも、LC、FBLおよびFCLの場合は、BBL、LBF、MBFやシリーズIと同様にBCLに比べて大きい傾向が認められる。混和材としてフライアッシュを用いた場合には、高炉スラグを用いた場合に比べて温度降下時のクリープ係数が大きくなる傾向にあり、温度応力の発生に対して有利であると考えられる。

ひび割れ発生時の諸物性を表6に示す。ひび割れ発生日数は7.7~9.1日とセメントの種類により大きな違いは認められない。しかし、実構造物では、区間2において拘束率が100%を超えること、すなわち拘束供試体ひずみ変化率が負になることや途中から拘束率が上昇することは考えられない。従って、BBLおよびBCL以外のセメントの場合には、みかけの拘束率を最大100%で途中からの変化をなくすような制御を行えばひび割れ日数は長くなるものと考えられる。なお、

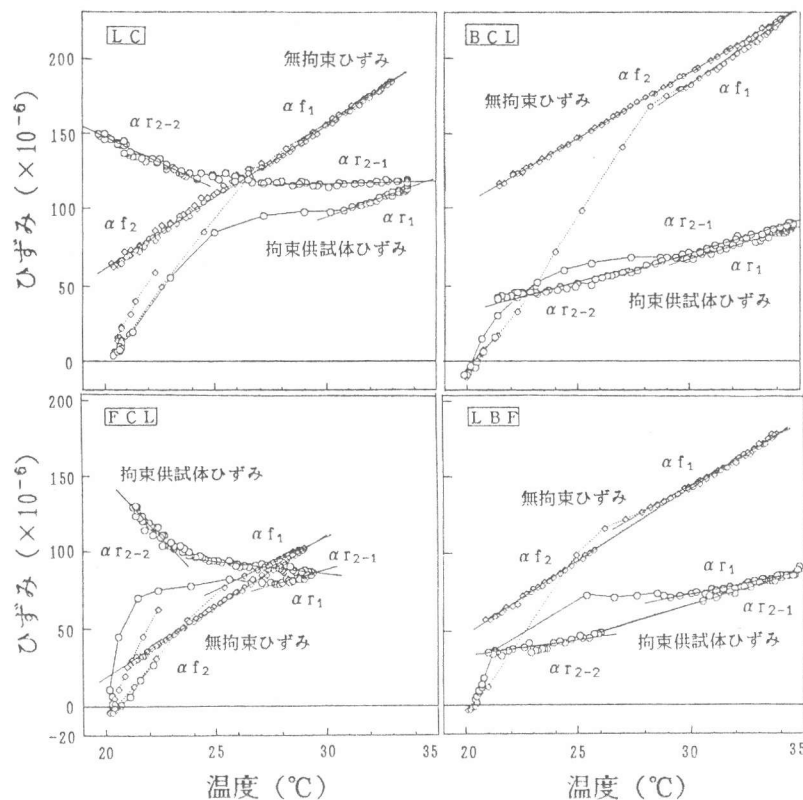


図8 温度とひずみとの関係(シリーズII)

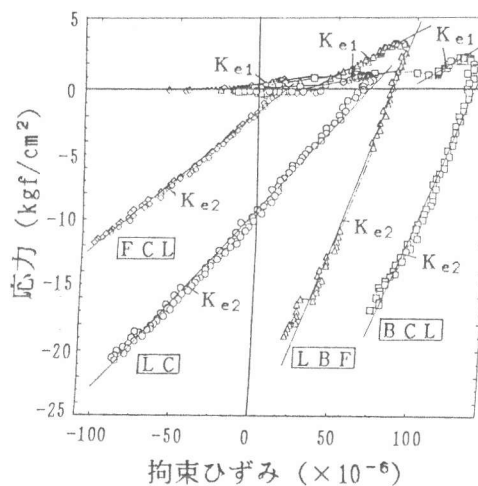


図9 拘束ひずみと応力との関係(シリーズII)

本試験装置によるこうした制御はデータを逐次確認しながら拘束鋼管内の水温を調整することになり高い精度は望めないと考えられたので、みかけの拘束率を上げるための拘束鋼管内の水温上昇速度は一定にした。さらに、区間1においては、実構造物の拘束状態に近いと考えられるシリーズIとは逆の傾向になっていることから、初期強度発現

性の低いセメントほどひび割れに対して不利な条件になっていると考えられる。これらのことを考慮すれば、区間2-1から区間2-2にかけてみかけの拘束率の変化率が最も大きいセメントが温度ひび割れ抵抗性に優れると考えられ、それは低熱フライアッシュセメントであり、次いでLC、三成分系セメント、低熱高炉セメントの順になる。コンクリートの性質として、強度および断熱温度上昇量が同等であっても、初期強度発現および発熱が緩やかなセメントのほうが温度ひび割れに対する抵抗性に優れると考えられる。

4 結論

壁状構造物の温度履歴を与え、拘束率を2種類に変化させた温度ひび割れ抵抗性試験によれば、混和材としてフライアッシュを用いた場合には、高炉スラグを用いた場合に比べて温度降下時のクリープ係数が大きく、温度応力に対して有利である。低熱フライアッシュセメント、高ピーライトセメント、三成分系セメント、低熱高炉セメントの順に温度ひび割れ抵抗性が高いと判断され、コンクリートの強度および断熱温度上昇量が同等であっても初期強度発現および発熱が緩やかなセメントのほうが温度ひび割れに対する抵抗性に優れる結果となった。

参考文献

- 1) 糸日谷淑光、後藤英夫、十河茂幸：巨大アンカレイジをつくる、セメント・コンクリート No. 561、pp. 30-43、1993. 11
- 2) 例えば、日本コンクリート工学協会「マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム」論文集、1982. 9
- 3) 那須清吾：低発熱型コンクリートの耐ひび割れ特性とその評価方法、本四技報、Vol. 18、No. 70、pp. 2-15、1994. 4
- 4) 仕入豊和、青柳征夫、川瀬清孝：コンクリートのひびわれ試験方法(案)、コンクリート工学、Vol. 23、No. 3、pp. 40-49、1985. 3
- 5) 田澤栄一、宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集 No. 502/V-25、pp. 43-52、1994. 11

表5 温度ひび割れ試験特性値(シリーズII)

区間	項 目	LC	BBL	BCL	FBL	FCL	LBF	MBF
1	α_f ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	9.44	10.1	10.0	7.69	6.48	8.66	8.73
	α_r ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5.14	4.21	4.32	2.68	3.65	2.61	4.98
	K_k	0.46	0.58	0.57	0.65	0.44	0.70	0.43
	K_e ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	0.30	0.87	0.69	0.24	0.20	0.63	1.00
	$E_c^{1)}$ ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	1.32	1.68	1.38	0.81	1.01	1.96	1.96
	K_{cr}	3.40	0.93	1.00	2.38	4.05	2.11	0.96
2-1	α_f ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10.0	10.3	8.92	10.4	9.44	9.65	11.4
	α_r ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	0.29	5.40	4.89	0.07	-1.56	4.23	7.09
	K_k	0.97	0.48	0.45	0.99	1.17	0.56	0.38
2-2	α_f ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	9.88	10.3	8.92	10.4	9.44	9.65	11.4
	α_r ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-6.78	5.40	4.62	-3.77	-15.3	2.67	5.31
	K_k	1.69	0.48	0.48	1.36	2.62	0.72	0.53
	K_e ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	1.48	2.92	2.84	1.21	1.04	2.96	3.24
	$E_c^{2)}$ ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	2.31	2.68	2.51	1.92	2.16	2.75	2.81
	K_{cr}	0.56	-0.08	-0.12	0.59	0.98	-0.07	-0.13

注 1) 最高温度上昇時の弾性係数
2) ひび割れ発生時の弾性係数

表6 ひび割れ発生時の諸物性(シリーズII)

記号	引張強度 F_t (kgf/cm^2)	破断応力 σ (kgf/cm^2)	σ/F_t	材齢 (日)
LC	14.4	17.6	1.22	8.92
BBL	20.0	19.6	0.98	9.14
BCL	16.7	16.8	1.01	7.73
FBL	11.7	14.3	1.22	8.48
FCL	10.5	11.8	1.12	8.88
LBF	21.9	19.6	0.89	8.65
MBF	21.2	21.4	1.01	8.58