

論文 自己収縮特性の異なる混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性

松永篤^{*1}・米田俊一^{*2}・竹田宣典^{*3}・十河茂幸^{*4}

要旨: コンクリート部材内部の温度および拘束条件を打設直後から模擬的に再現する装置を用いた実験により、セメント用混和材の種類が高強度コンクリートの温度ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討した。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合した場合には、自己収縮の影響により、温度上昇域にあるもかかわらず拘束供試体の膨張ひずみおよび圧縮応力の増加からの反転、減少、さらに温度降下域での収縮ひずみおよび引張応力の増大が認められ、混和材を用いない場合に比べてひび割れ発生日数が短く、温度ひび割れ抵抗性が小さくなることを明らかにした。

キーワード: 温度ひび割れ、拘束型枠、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

1. はじめに

コンクリートのひび割れ発生に影響を及ぼす主要因として、温度応力および乾燥収縮応力の他に、最近の研究によって、自己収縮応力が指摘されるようになった[1]。自己収縮はコンクリートの配合、セメントの種類、混和材の種類の影響を受け、一般に、セメント用混和材として、高粉未度の高炉スラグを用いると自己収縮は大きくなり、フライアッシュを用いると逆に小さくなると報告されている[2]、[3]。また、これらの混和材の種類の違いによりコンクリートの発熱特性および強度発現性も異なるが、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十分に明らかにされていない。

そこで、コンクリート部材内部の温度および拘束条件を模擬的に再現する装置[4]を用い、混和材の種類が高強度コンクリートの温度ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには、高ビーライトセメント ($C_2S = 52\%$ 、 $C_3S = 27\%$ 、比重3.23、比表面積3380 cm^2/g) を使用した。セメント用混和材には、高炉スラグ微粉末 (比重2.88、比表面積5400 cm^2/g) およびフライアッシュ (比重2.24、比表面積3760 cm^2/g) を使用し、それらの置換率は、高炉スラグ微粉末の場合50%および70%、フライアッシュの場合25%とした。骨材として、細骨材には福岡県産海砂 (比重2.55、吸水率1.45%、F.M. 2.70) を、粗骨材には山口県産硬質砂岩碎石(最大寸法20mm、比重2.70、吸水率0.56%、F.M. 6.61) を使用した。また、混和剤にはポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性質を表1に示す。配合は、水結合材比

*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 グループリーダー、工博(正会員)

*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 コンクリートの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 (mm)	空気量 (%)
			W	C 高ビーライト	S スラグ	G フライアッシュ			
LC	30.0	43	165	550	-	-	712	991	1.6
				275	275	-	696	969	1.2
				165	385	-	702	975	0.9
				413	-	137	689	964	1.6

を30%、単位結合材量を550kg/m³の一定とし、混和剤の添加量によりスランプフローを調整した。

2. 2 自己収縮測定方法

試験は20°Cの恒温室内で行い、供試体寸法を10×10×30cmとした。型枠には、拘束の影響を極力小さくするため、底板として厚さ2mmの鋼板の上に厚さ0.1mmのテフロンシート2枚を敷いたもの、および側板として厚さ25mmの発泡ポリスチレン板を使用した。また、供試体は型枠の内側にビニルシートを敷いた中にコンクリートを打設することにより封緘状態とした。温度およびひずみの測定は、供試体中央部に埋設した熱電対および埋込み型ひずみ計により行った。なお、埋込み型ひずみ計には、打設初期からのコンクリートのひずみを測定するために見かけの弾性係数が約39.2N/mm²と非常に小さいものを使用した。

2. 3 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JIS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、図2に示す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拘束供試体の応力を、熱電対および埋込み型ひずみ計により、それぞれ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、拘束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0.08°C/hrで上昇させた。なお、拘束鋼管以外の拘束を極力低減するため、型枠には、底板として厚さ2mmの鋼板の上に厚さ0.1mmのテフロンシートを敷いたもの、および側板として厚さ50mmの発泡ポリスチレン板を使用した。また、型枠の内側にビニルシートを敷いた中にコンクリートを打設することにより拘束供試体が封緘状態になるようにした。側板は打設1日後に外した。温度可変槽内には、上述の自己収縮測定用供試体と同様の無拘束供試体、圧縮強度(弾性係数)および引張強度測定用の供試体(Φ10×20cm)も静置した。試験は、各配合とも2回実施した。

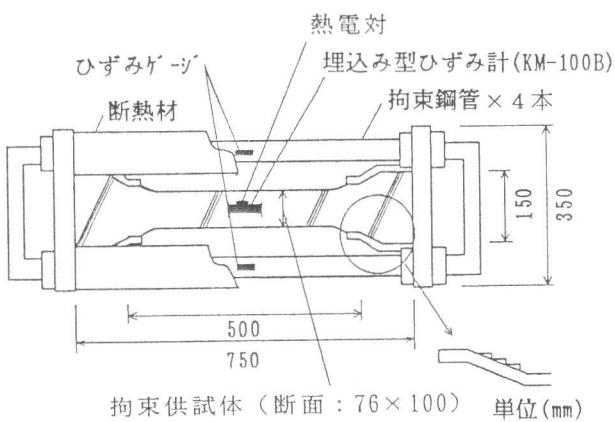


図1 温度ひび割れ試験装置

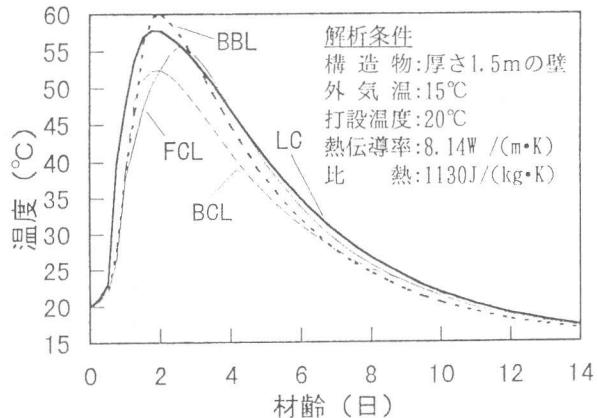


図2 温度ひび割れ試験に用いた温度履歴

3. 試験結果および考察

3. 1 自己収縮測定結果

図3に、20°Cにおける自己収縮ひずみの測定結果を示す。高炉スラグ微粉末を混合したBCLは初期に膨張を示すがその後の収縮量が大きく、混和材を用いないLCに比べて材齢14日時点では34%大きくなつた。一方、フライアッシュを混合したFCLはLCに比べて自己収縮ひずみが小さく、材齢14日で20%小さくなつた。

3. 2 温度ひび割れ試験結果

(1) 温度ひび割れ抵抗性

拘束鋼管のひずみより求めた拘束供試体の拘束応力および引張強度（温度可変槽内静置供試体による封緘養生強度）の推移を図4に示す。また、拘束供試体のひび割れ発生材齢およびひび割れ発生時のコンクリートの性質を表2に示す。

ひび割れ発生材齢は、LCが最も長く、次いでFCL、BBL、BCLの順になり、混和材を用いた場合に短くなる傾向を示した。いずれのセメントの場合も拘束供試体の破断位置はほぼ供試体中央であり、破断応力は引張強度の0.9程度であった。

同様のセメントを用いたセメント量が260kg/m³の場合には、FCLはLCや高炉セメント系に比べてクリープ係数が大きくなり、温度ひび割れ抵抗性に優れる傾向が得られた[5]が、本実験結果ではフライアッシュを用いることの効果が認められなかった。

(2) 自己収縮の影響

無拘束供試体および拘束供試体の温度とひずみとの関係を図5に示す。また、同図には無拘束供試体をひび割れ試験後に20°Cで材齢28日まで養生してから、温度可変槽内で10°C→60°C→10°Cの温度変化を与えて求めた線膨張係数(α_e)より計算される温度とひずみとの関係を併記した。無拘束供試体の場合、温度上昇域においては、いずれのコンクリートも、極初期に線膨張係数による計算ひずみに比べて、計測ひずみの増加割合が大きくなる区間が認められたが、その後は計算ひずみに比べて計測ひずみの増加割合が小さくなつた。混和材を用いたFCL、BBLおよびBCLでは、コンクリート温度が上昇しているにもかかわらず計測ひずみが減少し、この傾向は高炉スラグ微粉末を混合したBBLおよびBCLの場合に顕著であった。温度降下域においては、

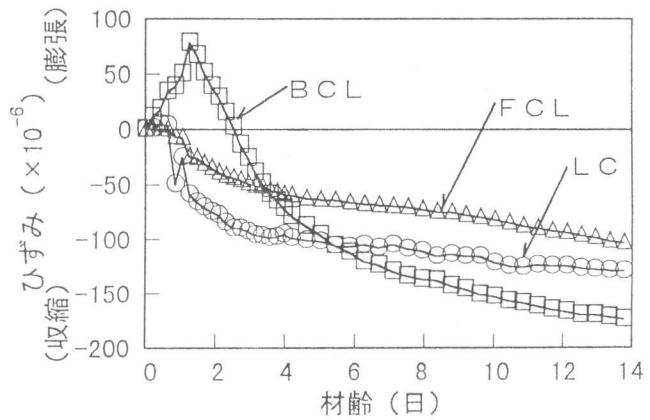


図3 自己収縮ひずみの推移(20°C)

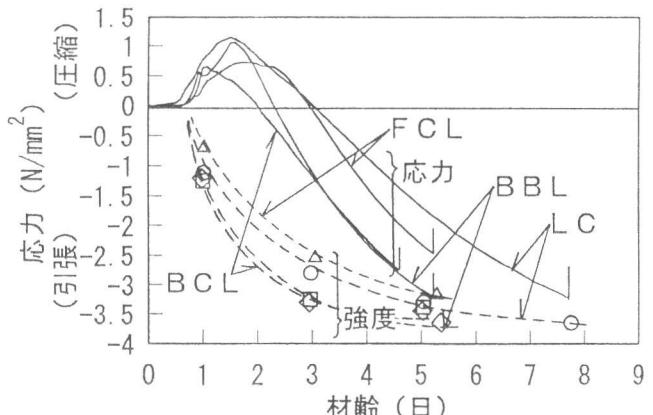


図4 拘束応力および引張強度の推移

表2 ひび割れ発生時の材齢およびコンクリートの性質

記号	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	破断応力 σ (N/mm ²)	σ / f_t	材齢 (日)
LC	60.4	3.48	3.50	3.16	0.90	8.0
BBL	68.4	3.47	3.59	3.24	0.90	5.4
BCL	55.5	3.47	3.29	2.83	0.86	5.1
FCL	55.1	3.42	3.39	3.00	0.88	6.0

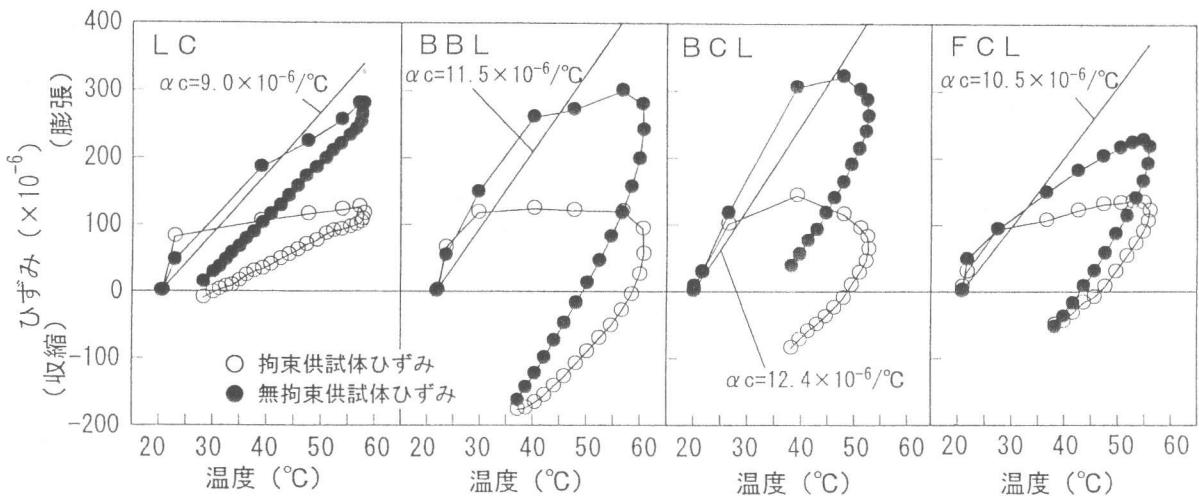


図 5 溫度とひずみとの関係

L C の場合は計算ひずみと同等のひずみの減少傾向を示したのに対して、F C L 、B B L およびB C L の場合には、計測ひずみの減少傾向のほうが大きくなつた。拘束供試体においても、同様に混和材使用の場合には温度上昇域にもかかわらずひずみが減少する傾向を示した。また、図 6 に拘束供試体の拘束応力と温度との関係を示すが、上述のひずみの場合と同様に混和材を使用した場合には、コンクリート温度が上昇しているにもかかわらず、圧縮応力の減少が認められた。セメント量 260kg/m^3 の場合には、若材齢での膨張ひずみが大きくなる区間を除けば、温度と無拘束供試体のひずみにはほぼ直線関係が成り立つことが認められた[5]ことから、高強度配合におけるこのような現象は自己収縮によるものと考えられる。以上のように、高強度配合の発生応力に及ぼす自己収縮の影響は極めて大きく、このために混和材を用いた場合の温度ひび割れ抵抗性が小さくなつたものと考えられる。

図 7 に、温度ひび割れ試験時の無拘束ひずみと線膨張係数による計算ひずみとの差（計算自己収縮ひずみ）および 20°C で計測した自己収縮ひずみを積算温度と

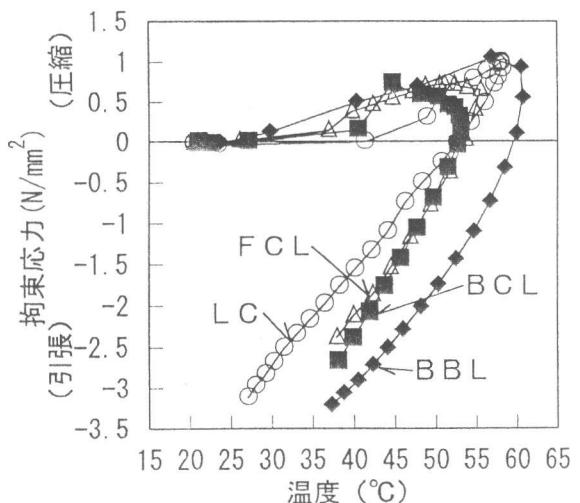


図 6 拘束応力と温度との関係

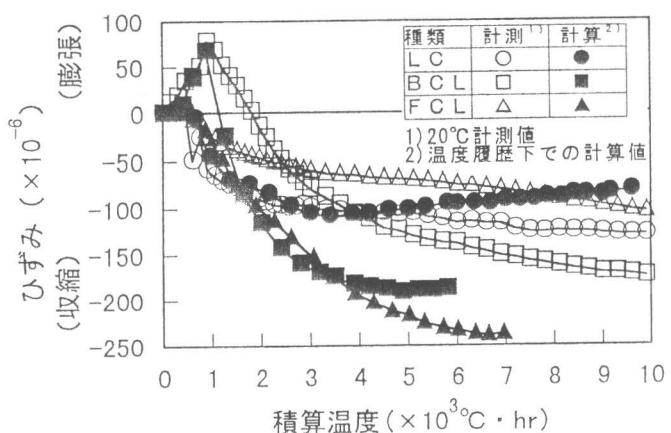


図 7 積算温度と自己収縮ひずみとの関係

の関係で示す。ここで、極若材齢での膨張ひずみが計算ひずみよりも大きくなる区間は、線膨張係数の違いやひずみ計の追随性を考慮して自己収縮が無いものとした。これによれば、L C の場合には、両ひずみがほぼ一致した。これに対して、B C L では計算自己収縮ひずみが初期に大きく、自己収縮が促進される傾向が認められた。F C L では、積算温度にかかわらず計算自己収縮ひずみが大きく、また、L C に比べても大きくなっていることから、高温履歴を受けることにより収縮が増大し、前述の20°Cにおける傾向とは異なる結果が得られた。このように、混合材を用いた場合には、自己収縮ひずみは積算温度で整理できない結果となった。なお、自己収縮が積算温度で整理できるとする報告[6]もあり、混合材を使用した場合の自己収縮の温度依存性に関しては、今後さらに検討を要すると考えられる。

(3) クリープの影響

温度ひびわれ試験時の無拘束ひずみと線膨張係数からの計算ひずみとの差を温度履歴を受けた場合の自己収縮ひずみとし、拘束供試体には温度応力の他、自己収縮応力が作用すると考えて、力のつり合いおよびひずみの状態を次式のように仮定した。

$$A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_e = A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

$$\varepsilon_e + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_r = \alpha_c \cdot \Delta T_c + \varepsilon_a \quad (2)$$

ここに、 A_c : コンクリートの断面積、 E_c : コンクリートの弾性係数

A_s : 拘束鋼管の断面積、 E_s : 拘束鋼管の弾性係数、 ε_e : 弹性ひずみ

ε_s : 拘束鋼管ひずみ、 ε_{cr} : クリープひずみ、 ε_r : 拘束供試体ひずみ

α_c : コンクリートの線膨張係数、 ΔT_c : 温度変化量、 ε_a : 自己収縮ひずみ

有効弾性係数(K_e)をクリープ(ϕ)による剛性低下と考え、式(1)、式(2)より、

$$K_e = E_c / (1 + \phi) \quad (3)$$

$$K_e = \sigma_r / (\varepsilon_e + \varepsilon_{cr}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_e + \varepsilon_{cr} = \alpha_c \cdot \Delta T_c + \varepsilon_a - \varepsilon_r \quad (5)$$

ここに、 σ_r : 拘束応力 ($A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s / A_c$)

拘束ひずみ ($\varepsilon_e + \varepsilon_{cr}$) と拘束応力との関係を図8に示す。いずれのセメントの場合も、圧縮応力減少区間から引張応力増加区間ににおいて拘束ひずみと拘束応力にはほぼ直線関係が成り立った。この関係を最小2乗法で回帰した場合の直線の傾きとして有効弾性係数(K_e)を求めるとき、L C の場合 $2.82 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、B B L の場合 $2.49 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、B C L の場合 $3.04 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、F C L の場合 $2.72 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であった。また、式(3)により求めたクリープ係数を図9に示す。クリ

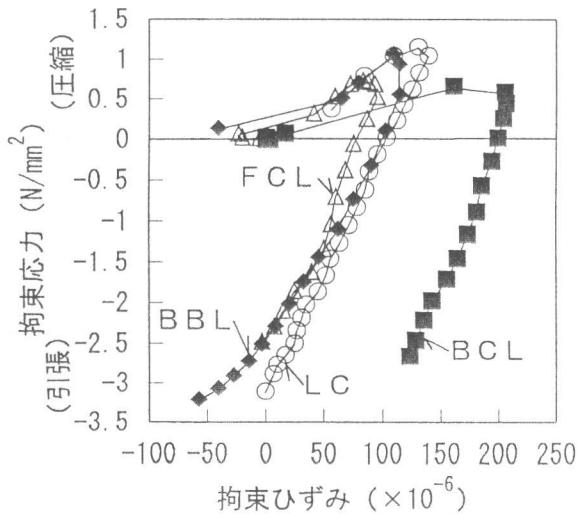


図8 拘束ひずみと拘束応力との関係

ープ係数はひび割れ発生時において、0.13～0.39であり、混和材の種類による明確な違いは認められなかった。

4.まとめ

セメント用混和材として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた高強度コンクリートの自己収縮試験および温度ひび割れ試験により、以下の結果を得た。

(1) 温度ひび割れ試験におけるひび割れ発生

材齢は、L Cが最も長く、次いでF C L、B B L、B C Lの順になり、混和材を用いた場合に短くなる。

(2) フライアッシュの混合により、20°C養生では自己収縮が小さくなるが、高温履歴を受けると逆に増大する傾向にある。また、高炉スラグの場合には、高温履歴を受けると自己収縮が促進されて初期に大きくなる傾向にある。

(3) 温度ひび割れ試験において、混和材を用いた場合には、自己収縮の影響により、温度上昇域にもかかわらず拘束供試体の膨張ひずみおよび圧縮応力の増加からの反転、減少が認められ、さらに温度降下域においては収縮ひずみおよび拘束引張応力の増大が認められる。

(4) 拘束応力と拘束ひずみとの関係から求めた引張応力区間の有効弾性係数は $2.49 \sim 3.04 \times 10^4 N/mm^2$ 、ひび割れ発生時のクリープ係数は0.13～0.39である。

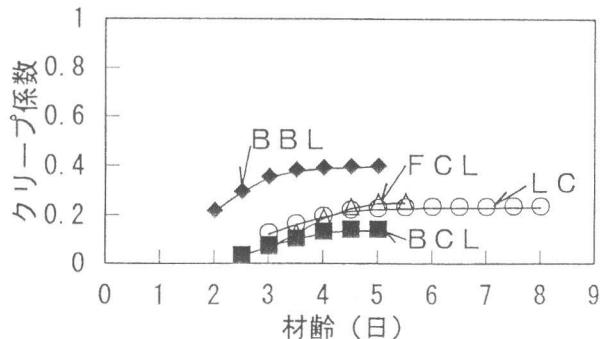


図9 クリープ係数

参考文献

- [1] 宮澤伸吾、田澤栄一、佐藤剛、佐藤克俊：鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 57-62、1993
- [2] 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
- [3] 近松竜一、竹田宣典、鎌田文男、十河茂幸：結合材の種類がコンクリートの硬化収縮に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 15、No. 1、pp. 543-548、1993
- [4] 住入豊和、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] 松永篤、山根昌浩、竹田宣典、十河茂幸：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、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 17、No. 1、pp. 1145-1150、1995
- [6] 筋野晃司、田澤栄一、宮澤伸吾、保明淳二：マスコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす自己収縮の影響、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 17、No. 1、pp. 1139-1144、1995