

論文 低発熱セメントを用いたコンクリートの収縮

宮澤伸吾*1・松村仁夫*2

要旨：比表面積の異なる高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを含む低発熱混合セメント、高ビーライト系セメントおよび普通ポルトランドセメントを用いた普通強度コンクリート（設計基準強度 27N/mm²）および高強度コンクリート（設計基準強度 60N/mm²）の自己収縮ひずみおよび乾燥条件下における収縮ひずみを測定し、各種セメントの収縮特性の比較検討を行った。

キーワード：収縮、自己収縮、乾燥収縮、低発熱セメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

1. まえがき

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを含む混合セメントは、その低発熱特性を利用してマスコンクリート用のセメントに大量に使用されている。また、最近ではこれらの混合セメントは資源の有効利用・省エネルギーと合わせ、地球温暖化に対する炭酸ガス発生抑制型セメントとして再び注目されるようになり、今後さらに使用量が増加するものと考えられる。

一方マスコンクリートのひび割れ制御においては水和熱による体積変化をもとに検討が行われてきたが、水結合材比が小さい場合は自己収縮の影響も考慮する必要があることが最近指摘されている[1]。

以上のような観点からこれら混合セメントを主体にコンクリートの収縮特性の比較検討を行った。

2. 実験概要

表-1 に使用材料である普通ポルトランドセメント (NC)、高ビーライト系セメント (LC)、高炉スラグ微粉末 (BS4、BS6)、石膏 (AG) およびフライアッシュ (FA) の化学成分、比表面積 (ブレン) を示した。NC、LC についてはボーグ式より求めた C₂S 量を併記した。2 成分および

表-1 使用材料

	成 分 (%)														ブレン (cm ² /g)	C ₂ S (%)
	強熱 減量	不溶 残分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Total		
NC	0.8	0.1	21.1	5.2	3.3	64.2	2.1	2.0	0.34	0.37	0.30	0.09	0.07	99.9	3460	18.7
LC	0.5	-	26.8	2.4	2.3	64.0	0.6	2.2	0.15	0.35	0.11	0.15	0.07	99.6	3310	53.3
BS4	0.1	-	34.4	13.4	0.4	41.8	6.8	-	0.21	0.28	1.19	0.02	0.31	98.9	4440	-
BS6	0.0	-	34.6	13.5	0.3	42.0	6.8	-	0.22	0.23	1.20	0.02	0.33	99.2	6260	-
AG	0.9	-	-	-	-	30.8	-	57.2	-	-	-	-	-	-	3840	-
FA	1.0	-	49.2	23.8	5.9	11.0	2.1	0.5	2.69	0.89	1.21	0.63	0.07	99.0	2670	-

*1 足利工業大学助教授 工学部土木工学科、博士 (工学) (正会員)

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科 (正会員)

び3成分系混合セメントの混合割合を表-2に示した。AGは混合セメント中のSO₃量が2.0%となるように混合し(NC+AG):(BS)の混合比は同一とした。なお、NCは混合材を含まないものを用いた。細骨材としては君津産山砂(比重2.60, 吸水率1.70%, 粗粒率2.77)、粗骨材としては奥多摩産石灰石質碎石(比重2.68, 吸水率0.58%, 粗粒率6.62, 最大寸法20mm)を使用した。

表-2 セメントの混合割合

セメントの種類	混合割合(%)				BSのブレン	比重
	NC	BS	AG	FA		
B4	37.9	60.0	2.1	0	4000	3.00
B6					6000	3.00
B4F20	29.6	48.0	2.4	20	4000	2.78
B6F20					6000	2.78
B6F10	33.8	54.0	2.2	10	6000	2.89

表-3は、コンクリートの配合、フレッシュコンクリートの試験結果および凝結試験結果を示したものである。設計基準強度は27N/mm²(シリーズA)および60N/mm²(シリーズB)の2水準とした。ただし、基準材齢を普通ポルトランドセメントでは28日とし、混合セメントおよび高ビーライト系セメントについては91日とした。また、一部のセメントでは、単位セメント容積を同一とした配合(シリーズC)で収縮特性の比較を行った。

自己収縮ひずみの測定は、日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」[2]に従い、凝結の始発を基準として行った。ただし、普通強度コンクリートについては凝結直後の自己収縮は極めて小さく無視できると考えられるので[3]、凝結試験は行わず材齢1日を長さの基準とした。

また、材齢7日まで標準養生を行ったコンクリート供試体を用いて、温度20℃、相対湿度60%の条件下で乾燥収縮試験を行った。

表-3 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

シリーズ	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 C×%	空気量 (%)	スランプフロー (cm×cm)	スランプ (cm)	練上り温度(℃)	凝結時間(時間:分)	
				W	C	S	G						始発	終結
A	B4	59.4	46.0	152	256	865	1045	0.25	3.3	—	7.5	26.8	—	—
	B6	65.0	46.4	154	237	876	1045	0.25	3.5	—	7.5	27.1	—	—
	B4F20	52.6	45.7	144	274	852	1045	0.25	4.5	—	7.0	23.0	—	—
	B6F20	58.9	46.2	146	248	871	1045	0.25	3.5	—	6.5	22.5	—	—
	B6F10	62.0	46.3	150	242	875	1045	0.25	3.0	—	9.0	29.0	—	—
	NC	56.0	46.1	160	286	850	1025	0.25	2.9	—	6.5	29.5	—	—
	LC	65.0	47.6	156	240	902	1025	0.25	3.5	—	7.0	30.5	—	—
B	B4	31.0	41.8	160	516	682	980	1.20	4.9	61.0×64.0	23.5	22.7	14:30	17:45
	B6	34.5	42.2	160	463	708	1000	1.15	3.0	56.5×56.0	23.5	23.3	16:00	20:15
	B6F20	30.1	40.5	160	531	640	992	1.10	3.5	63.0×64.0	25.0	26.0	18:00	21:45
	B6F10	32.1	41.5	160	498	677	985	1.10	3.6	58.5×56.5	25.0	26.2	12:00	15:00
	NC	31.4	43.0	160	510	714	976	2.20	2.0	58.5×60.5	25.0	22.5	10:15	12:45
	LC	38.0	47.0	160	421	818	951	1.70	2.3	60.5×59.0	25.5	21.2	07:00	09:30
C	B6F10	30.7	40.0	160	520	645	997	1.20	4.5	56.5×57.5	24.0	25.6	13:30	18:15
	NC	28.1	40.0	160	569	645	997	2.45	2.5	57.5×56.5	24.0	26.2	09:00	11:30
	LC	27.6	40.0	160	580	645	997	1.90	4.0	58.5×59.0	25.0	24.8	09:00	11:50

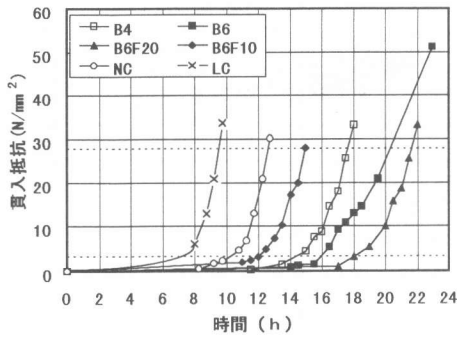


図-1 凝結試験結果 (シリーズB)

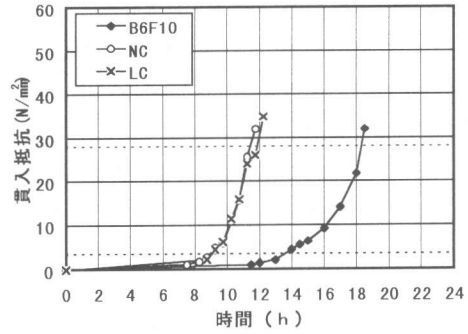


図-2 凝結試験結果 (シリーズC)

3. 結果および考察

図1, 2はコンクリートの凝結試験結果を示したものである。高強度コンクリートのシリーズBおよびCにおいては、凝結の始発を基準として自己収縮ひずみの測定を開始した。

図3, 4は標準養生したコンクリートの圧縮強度試験結果を示したものである。前述したように、シリーズAおよびBでは設計基準強度を同一にして収縮特性の比較を行うこととしたので、材齢91日(普通セメントの場合のみ材齢28日)における圧縮強度は各シリーズで概ね同一となっている。ただし、図5(シリーズC)では単位セメント容積を一定としているので強度レベルは異なっている。

図6~8はシール供試体のひずみすなわち自己収縮ひずみの測定結果を示したものである。シリーズAでは、普通セメントと比較すると二成分系および三成分系セメントの自己収縮ひずみは若干大きくなった。しかし、フライアッシュを混入することにより自己収縮が若干減少した。

シリーズBでは、二成分系および三成分系セメントは長期材齢における自己収縮ひずみは普通セメントとほぼ同等であったが、材齢1日以前の自己収縮ひずみは著しく小さくなった。著者らの報告によると同一水結合材比で比較すると高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど自己収縮は大きい傾向にあるが[3]、同一設計基準強度で比較すると、4000~6000cm²/gの範囲では比表面積の影響は認められなかった。すなわち、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど強度発現が良好なことから水結合材比が大きく設定されるため、比表面積と水結合材比の影響が相殺されたためと考えられる。

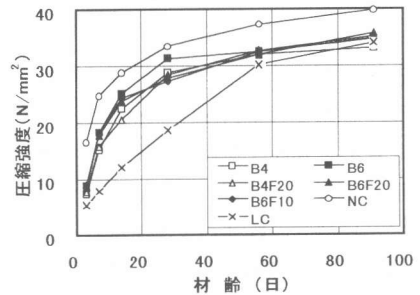


図-3 圧縮強度試験結果(シリーズA)

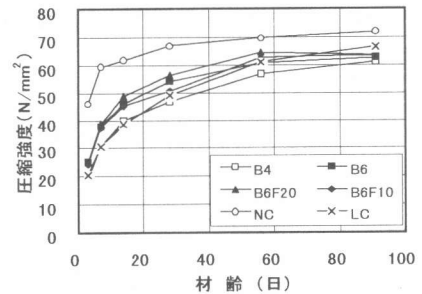


図-4 圧縮強度試験結果(シリーズB)

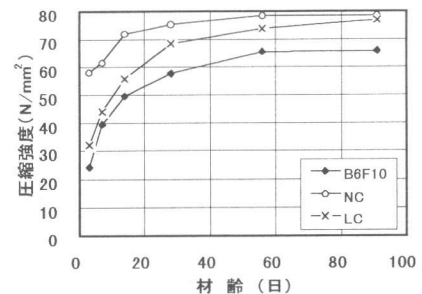


図-5 圧縮強度試験結果(シリーズC)

図8は、容積配合を同一として比較したものを示しているが(シリーズC)、自己収縮ひずみの大きさは高ビーク系セメント<三成分系セメント<普通セメントとなった。自己収縮に及ぼす骨材量の影響は、硬化後についてはある程度予測可能であるが[4]、凝結直後の初期材齢も含めて検討する必要がある。

なおマスコンクリートのひび割れ性状は自己収縮と温度収縮の両者に影響を受けるので、各セメントの発熱特性も合わせて今後検討する必要がある。

コンクリートの自己収縮ひずみは、普通セメントを用いた場合でもセメントや骨材により若干差が生じると推測される。従って、以上の実験結果はこのようなばらつきを含めて判断する必要がある。著者らは普通セメントについて自己収縮ひずみの予測式を提案し、既往の実測データに対して±40%以内の誤差で予測できることを報告している[2]。そこで、普通セメントの代表値として以下の予測式による計算値を用い、各種低発熱セメントの実験値と比較検討した。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \varepsilon_{c0}(W/B) \beta(t) \quad (1)$$

ただし、 $0.2 \leq W/B \leq 0.5$ の場合

$$\varepsilon_{c0}(W/B) = 3070 \exp \{-7.2(W/B)\} \quad (2)$$

$0.5 < W/B$ の場合

$$\varepsilon_{c0}(W/B) = 80 \quad (3)$$

$\beta(t)$ は式(4)により求めるものとする。

$$\beta(t) = 1 - \exp \{-a(t-t_0)^b\} \quad (4)$$

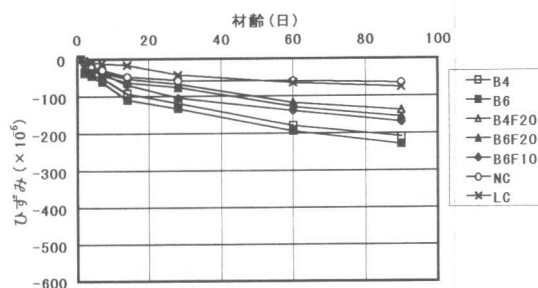


図-6 自己収縮ひずみ(シリーズA)

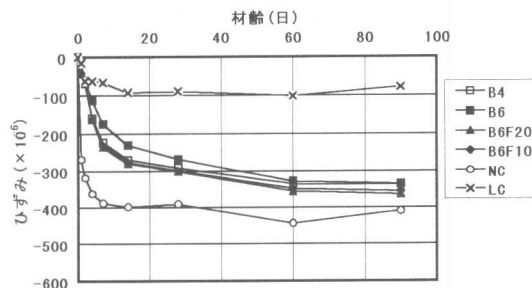


図-7 自己収縮ひずみ(シリーズB)

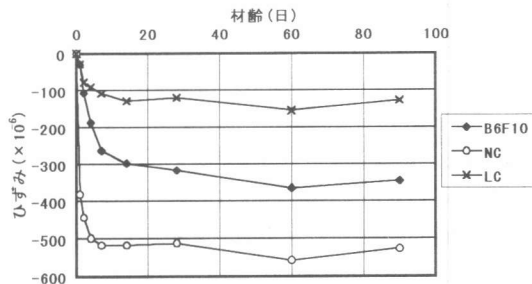


図-8 自己収縮ひずみ(シリーズC)

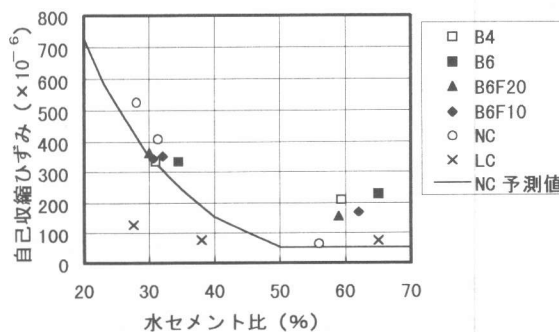


図-9 水セメント比と自己収縮の関係

ここに、

$\varepsilon_c(t)$: 材齢 t における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

γ : セメント及び混和材の種類の影響を表す係数(普通ポルトランドセメントの場合 $\gamma=1.0$)

$\varepsilon_{c0}(W/B)$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$) , $\beta(t)$: 自己収縮の進行を表す関数

W/B : 水結合材比, a, b : 定数 (文献[2]参照), t_0 : 凝結の始発 (日), t : 材齢 (日)

図9は、水セメント比と自己収縮ひずみの実測値および式(1)による普通セメントの予測値の関係を材齢91日について示したものである。本研究における普通セメントの実測値は式(1)による予測値とほぼ一致している。いずれのセメントも水セメントが小さくなるほど自己収縮が大きくなっているが、高ピーライト系セメントは水セメント比の影響が著しく小さかった。二成分系および三成分系セメントは

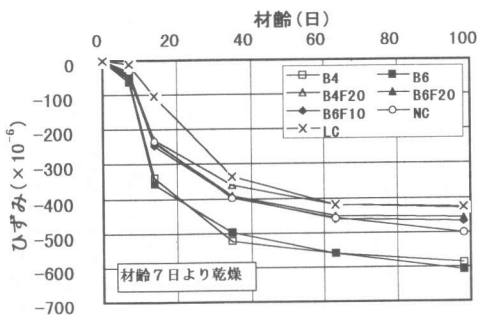


図-10 乾燥条件下での収縮(シリーズA)

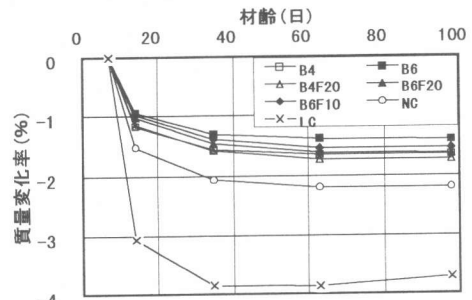


図-13 質量変化率(シリーズA)

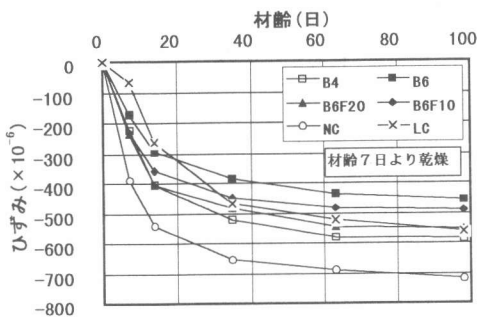


図-11 乾燥条件下での収縮(シリーズB)

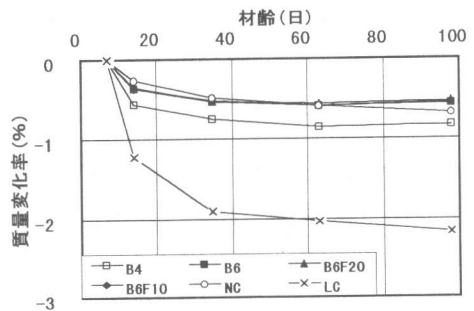


図-14 質量変化率(シリーズB)

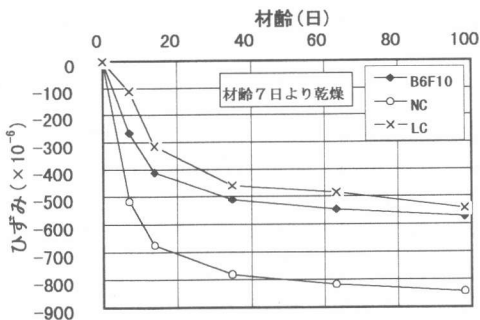


図-12 乾燥条件下での収縮(シリーズC)

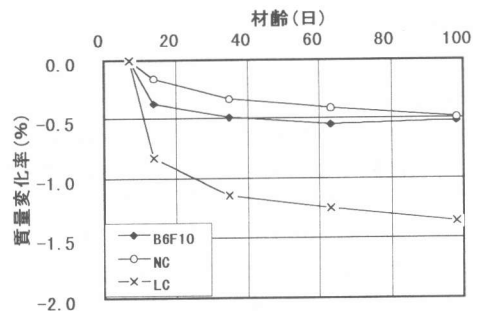


図-15 質量変化率(シリーズC)

水セメントが高い領域で自己収縮が普通セメントより大きくなるが、水セメントが小さい領域では普通セメントとほぼ同程度であるといえる。

コンクリートが乾燥を受ける場合の収縮には、自己収縮と乾燥収縮が含まれる。乾燥開始以前の自己収縮と乾燥開始以降の収縮を重ね合わせた結果を図10～12に示す。また、乾燥開始後の質量変化率を図13～15に示す。図16および17は自己収縮と乾燥収縮に単純な重ね合わせが成り立つと仮定して、各収縮の割合を示したものである。普通強度コンクリートの場合は、乾燥開始後に収縮が著しく増加しており、乾燥収縮の影響が卓越することを示している。二成分系および三成分系セメントの乾燥開始後の収縮は普通セメントの場合と同程度か若干小さい。

高強度コンクリートの場合は、二成分系、三成分系、普通セメントの場合に全収縮に占める自己収縮の割合が大きくなったが、高ビーライト系セメントについては乾燥収縮が大きくなった。すなわち、高ビーライト系セメントと比較して二成分系および三成分系セメントは自己収縮が大きいが、乾燥収縮が小さいため全収縮は同等以下であった。

4. まとめ

本研究の範囲内では、二成分系および三成分系セメントを用いた高強度コンクリートの自己収縮は、同一の設計基準強度で比較すると高ビーライト系セメントより大きく、普通セメントより小さくなり、また乾燥条件下での収縮は普通セメントおよび高ビーライト系セメントと同程度かそれ以下である。なお低発熱セメントのひび割れ抵抗性は、発熱特性やクリープ特性も合わせて検討する必要がある。

謝辞

本研究にあたり第一セメント(株)の御協力を得たことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] E. Tazawa et al.: Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Int. RILEM Symp. on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp. 221-228, 1994
- [2] 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996. 11
- [3] 三浦智哉，田澤栄一，宮澤伸吾，保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vo1. 17, No. 1, pp. 359-364, 1995. 6
- [4] 田澤栄一，宮沢伸吾：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-24, pp. 43-52, 1994. 11

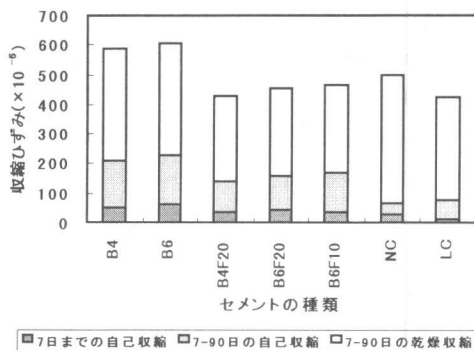


図-16 各収縮の割合 (シリーズA)

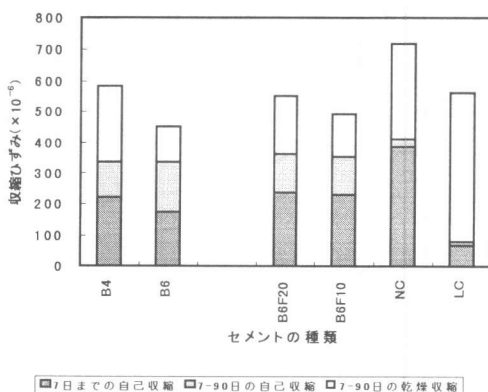


図-17 各収縮の割合 (シリーズB)