

# 論文 高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究

近松竜一<sup>\*1</sup>・竹田宣典<sup>\*1</sup>・三浦律彦<sup>\*2</sup>・十河茂幸<sup>\*3</sup>

**要旨**：高強度・高流動コンクリートの高耐久化を図るために、温度収縮や自己収縮を極力低減してひび割れ抵抗性を高めることが重要である。そこで、各種セメントや膨張材を用いた高強度・高流動コンクリートを対象に、強度、発熱、体積変化など硬化後の基礎物性を調べ、特に低収縮化の観点から効果的な結合材の組合せについて検討した。その結果、低熱ポルトランドセメントは、強度発現が緩慢となる反面、温度収縮や自己収縮が小さく、膨張材の併用による収縮補償に対しても有効であることを明らかにした。

**キーワード**：高強度、高流動、低熱ポルトランドセメント、膨張材、自己収縮

## 1. はじめに

高減水性混和剤の開発に伴い、低水セメント比のコンクリートが比較的容易に製造できるようになり、設計基準強度が  $60N/mm^2$  以上の高強度コンクリート[1] や打込み時の締固め作業を必要としない自己充填性を有する高流動コンクリート[2] が実用に供されている。

高強度・高流動コンクリートは、密実な硬化体の形成により外部からの各種劣化因子の浸透が抑制され、潜在的には高い耐久性能を有する反面、セメント量の増加に伴って発熱量が増大し、温度ひび割れが生じやすい傾向にある。また、水セメント比の低減とともに、セメントの水和に起因した自己収縮現象が顕在化し、外部への水分の逸散がない封緘状態でも著しい収縮を生じる場合がある[3] ことも報告されている。したがって、高強度・高流動化とともに高耐久化の観点からは、ひび割れ抵抗性を高める上でコンクリート自体の低収縮化が重要な課題であるといえる。

本論文は、各種セメントや膨張材を用いた高強度・高流動コンクリートを対象として、強度、発熱、体積変化など硬化後の基礎的物性を調べ、低収縮化の観点から効果的な結合材の組合せについて検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料

セメントは、普通、中庸熱、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用した。最近では、低発熱化を意図したビーライト含有量の多いセメント[4] が開発されており、本実験でもビーライト量の異なる 5 鋼柄を使用した。これらセメントの品質試験結果を表-1 に示す。

混和材は、収縮補償の観点から CSA 系膨張材を用いた。また、高流動化に伴う分離抵抗性を確保するために石灰石微粉末(密度  $2.71g/cm^3$ 、ブレーン値  $5600cm^2/g$ )を使用した。細骨材は、海砂(表乾比重 2.55、粗粒率 2.57、実績率 65.0%)、粗骨材は碎石( $G_{max}20mm$ 、表乾比重 2.63、粗粒率 6.49、実績率 59.0%)を用い、混和剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

\*1 大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員、工修（正会員）

\*2 大林組技術研究所 土木第三研究室 副主任研究員、工修（正会員）

\*3 大林組技術研究所 土木第三研究室 室長、工博（正会員）

表-1 実験に用いた各種セメントの構成化合物組成および品質試験結果一覧

セメント種類		構成化合物組成 (%)				密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	プレーン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	圧 縮 強 さ (N/mm <sup>2</sup> )				水 和 热 (J/g)		
種 類	記 号	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF			3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
低 熱	LP-1	17	62	3	11	3.24	3410	3.4	6.1	22.0	48.5	164	216	270
	LP-2	21	60	3	10	3.24	3130	4.1	6.1	27.8	56.5	185	265	326
	LP-3	24	57	2	10	3.23	3350	5.6	8.7	23.2	51.0	194	258	310
	LP-4	29	54	3	8	3.22	3400	7.7	12.0	32.6	58.5	212	273	318
	LP-5	27	52	4	11	3.23	3240	6.9	10.3	32.6	55.8	216	284	325
中庸熱	MP	36	42	4	12	3.22	3170	9.2	13.6	34.6	54.3	239	304	340
普 通	NP	55	20	9	9	3.16	3200	16.2	26.3	41.9	51.5	321	378	401
高炉B種	BB	-	-	-	-	3.04	3720	12.1	21.1	42.5	56.4	287	345	367

表-2 高強度・高流動コンクリートの配合概要

配 強 度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	W/P	W/(C+EX)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						W	P	SPA	
						W	C+EX	LF	
≥ 80	55±10	4±1	29.0	33.0	49.0	175	530	70	9.0

備考) EX : 膨張材, LF : 石灰石微粉末, SPA : 高性能AE減水剤

## 2.2 コンクリートの配合

高強度・高流動コンクリートの配合概要を表-2に示す。水結合材比は33%、単位結合材量は530kg/m<sup>3</sup>と一定とした。また、単位粗骨材量は0.300m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>、各種の結合材と石灰石微粉末を併せた単位粉体量は600kg/m<sup>3</sup>に設定した。

## 2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを用い、各種粉体、骨材を投入して30秒空練りした後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を加えて90秒間練り混ぜた。

練上り15分後において、フレッシュコンクリートの品質を確認し、各種試験用供試体を採取した。

強度試験用供試体は、材齢3日で脱型後、所定材齢まで標準養生し、JIS A 1108に準拠して圧縮強度を測定した。また、一部の配合では養生条件を変えた場合も試験した。

各種セメントを用いたコンクリートの発熱特性測定には、空気循環式の断熱温度上昇試験装置ならびに図-1に示す簡易型断熱温度上昇試験装置を使用した。

コンクリートの自己収縮(膨張)は、図-2に示す供試体を用い、20°C封緘条件で無拘束状態におけるコンクリートのひずみを埋込み型ひずみ計により材齢28日まで測定した。また、一部の配合では、JIS A 6202-参考1に準じて一軸拘束膨張率を測定した。乾燥収縮特性は、試験開始材齢を28日、91日の2水準とし、JIS A 1109に準じて試験した。

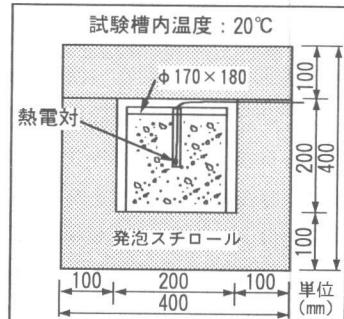


図-1 簡易型断熱温度上昇試験装置

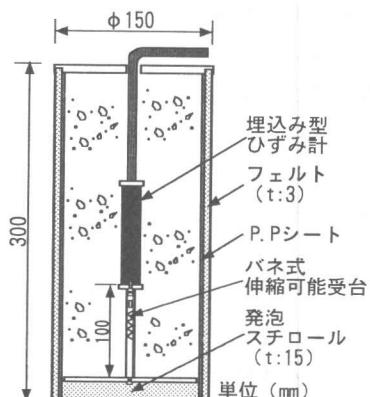


図-2 自己収縮(膨張)測定用供試体

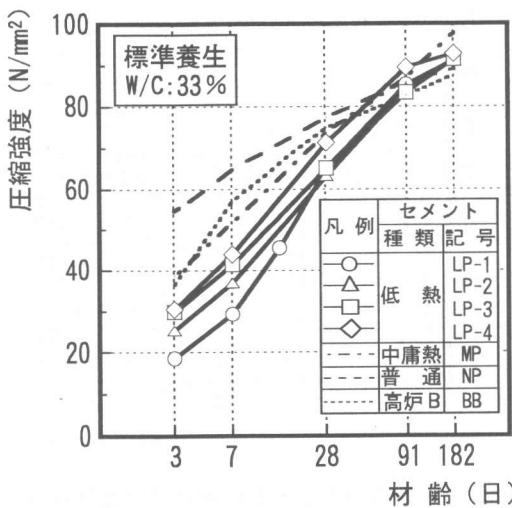


図-3 各種コンクリートの強度発現特性

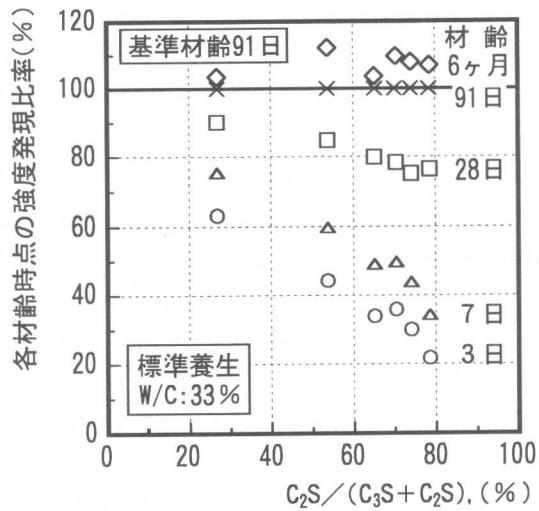


図-4 セメント構成化合物組成と強度発現比率

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 強度発現特性

各種セメントを用いた高強度・高流動コンクリートの強度発現特性を図-3に示す。同一水セメント比配合とした場合、材齢91日強度は、いずれのセメントを用いた場合もほぼ同等で  $80\text{N/mm}^2$  以上の高い強度水準が得られているが、材齢の経過に伴う強度発現特性はセメントの種類により著しく相違する傾向が認められる。

図-3の結果をもとに、各ケース毎に材齢91日強度を基準として各材齢時点の強度発現比率を算出し、セメントの構成化合物の組成割合との関係で整理した結果を図-4に示す。ポルトランドセメン

トの種類により構成化合物中の間隙相成分や合計量が異なるため、特に強度への影響が大きいと考えられるビーライトおよびエーライト成分比で整理した結果、強度発現比率と良好な相関関係が認められた。特に、材齢 7 日までの若材齢ではビーライト成分比の増加とともに強度発現比が大きく低下する傾向にあるが、材齢の経過に伴い強度発現比率の相違は小さくなっている。

最もビーライト量の多いセメントを用いた場合の強度発現特性に及ぼす養生条件の影響について整理した結果を図-5に示す。養生温度が一定( $20^\circ\text{C}$ )の場合、若材齢時点で乾燥状態に供した場合ほど長期的な強度増進が阻害される傾向が認められる。特に、標準養生供試体と同等の強度を確保するためには、初期の湿潤養生期間を材齢28日程度まで長く設定するか、湿潤養生期間が短い場合には湿潤養生終了後も外部へ水分が逸散しないように封緘状態に保つ必要があり、低熱ポルトランドセメントの適用に際しては施工時の養生に十分に配慮する必要があると考えられる。

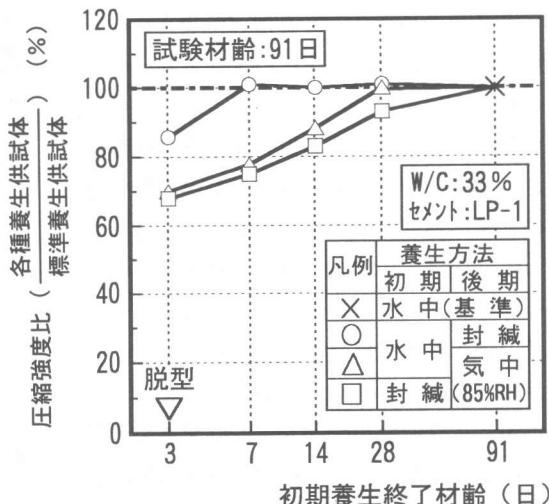


図-5 養生方法による強度発現特性の相違

### 3. 2 発熱特性

各種セメントを用いた高強度・高流動コンクリートの断熱温度上昇特性を図-6に示す。

同一単位セメント量で比較した場合、断熱条件下でのセメントの種類による発熱特性の相違は、終局断熱温度上昇量よりも温度上昇速度に顕著な差が生じ、ビーライト含有量が多いポルトランドセメントを用いた場合ほど、発熱速度が小さく、材齢の経過とともに緩やかに温度が上昇する結果が得られた。

簡易型断熱温度上昇試験装置による発熱試験結果を図-7に示す。

図-7によれば、前述したセメントの種類による発熱速度の相違は、温度上昇量や温度上昇または降下速度の差として表され、ビーライト量の多いセメントを用いた場合ほど、温度上昇が抑制され、温度降下速度が小さくなる傾向が認められた。

低熱ポルトランドセメントは、発熱速度が小さく効率的なポストクーリングが期待でき、特に、薄肉部材に高強度コンクリートを適用する場合には、温度ひび割れの低減に有利となるものと考えられる。

### 3. 3 自己収縮特性

自己収縮測定用供試体の温度変化を図-8に示す。試料の量が少なく、恒温養生条件での測定のため、材齢2日以降の供試体温度は約20°Cとほぼ一定であるが、若材齢時にはセメントの水和に伴って凝結の始発直後からセメントの種類により約5~15°C程度の温度変化が生じる結果となった。

そこで、この温度変化を生じた若材齢時の自己収縮ひずみの算出に際しては、始発時点の温度を基準に、熱膨張係数を $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ と仮定して温度補正を行うことにした。

各種セメントを用いた高強度コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図-9に示す。

自己収縮ひずみは、C<sub>3</sub>A量が少ないポルトランドセメントを用いた場合ほど小さくなり、既往の実験結果[3]と同様の傾向が得られた。

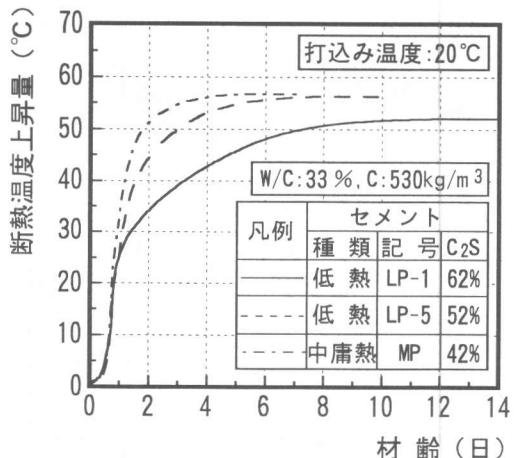


図-6 各種コンクリートの断熱温度上昇特性

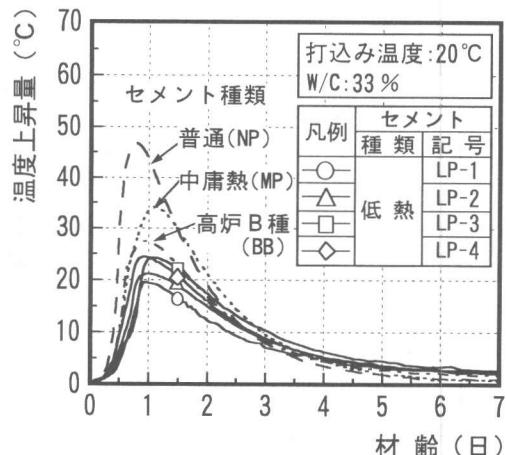


図-7 簡易型断熱温度上昇試験での発熱特性

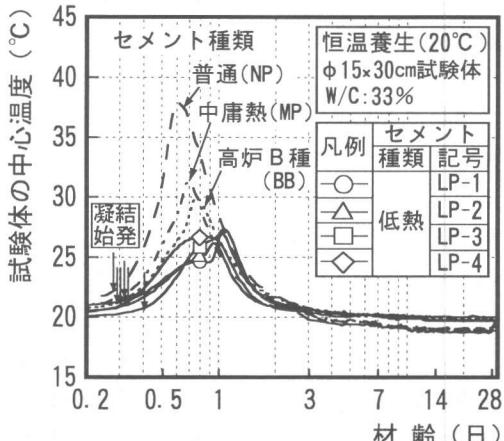


図-8 自己収縮測定用供試体の温度変化

また、低熱ポルトランドセメントを用いた場合は、材齢 7日までは収縮が生じておらず、逆に、若材齢時の温度ひずみの補正誤差では説明がつかないほど顕著な膨張ひずみを示す場合も認められた。一方、高炉セメントB種を用いた場合には、自己収縮ひずみが材齢の経過とともに漸増し、材齢28日時点では最も大きい収縮量となった。

### 3.4 各種膨張特性

各種セメントに膨張材を併用した場合の自己膨張ひずみの経時変化を図-10に示す。

普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種に膨張材を併用した場合、若材齢時には自己膨張ひずみが生じるもの、前述の膨張材を用いない場合の結果と同様に材齢の経過とともに収縮側へ移行する結果となった。

一方、低熱ポルトランドセメントを用いた場合は、ビーライト量が多いものほど自己膨張ひずみ量が増大し、これらの膨張ひずみが長期にわたって保持される傾向が認められた。

単位結合材量を一定とし、各種セメントを単独または膨張材と併用したコンクリートの一軸拘束膨張ひずみを単位膨張材量との関係で整理し、図-11に示す。

同一膨張材量で比較した場合、低熱ポルトランドセメントを用いた場合の一軸拘束膨張ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも大きく、無拘束条件下における自己膨張特性と同様の結果が得られた。

これらの結果は、膨張材による硬化コンクリートの収縮補償効果が、併用するセメントの種類により相当に異なることを示しており、低収縮化に対しては、温度収縮や自己収縮が小さい低熱ポルトランドセメントと膨張材の併用が効果的であると考えられる。

なお、図-10に示した高炉セメントB種を用いた場合の自己膨張ひずみの材齢に伴う減少挙動に関しては、逆打ち用膨張コンクリートの多軸拘束膨張試験結果[5]においても同様の傾向が示されており、自己収縮特性と

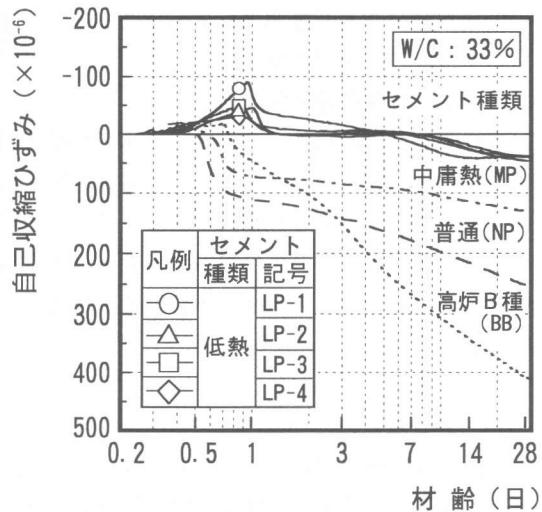


図-9 自己収縮ひずみの経時変化

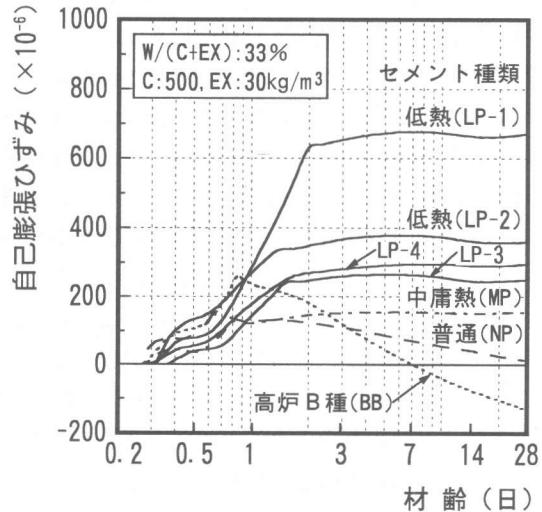


図-10 自己膨張ひずみの経時変化

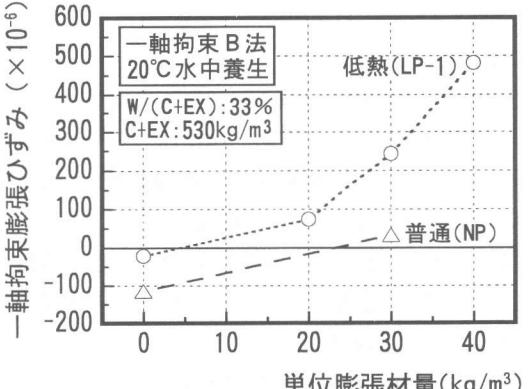


図-11 単位膨張材量と一軸拘束膨張ひずみ

の関連が高いことが推測されるが、この点についてでは今後の検討課題である。

### 3. 5 乾燥収縮特性

乾燥収縮試験結果を図-12に示す。乾燥収縮量は、試験を開始するまでの水中養生期間が長い場合ほど小さい傾向にあるものの、強度水準がほぼ同等の条件であればセメントの種類による収縮量の差異は小さいことが認められた。

### 4.まとめ

本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 外部への水分の逸散がない無拘束条件下でのコンクリートの自己収縮ひずみは、セメントの構成化合物のうち  $C_3A$  量が少ないポルトランドセメントを用いた場合ほど小さい傾向にあり、若材齢時に膨張挙動を示す場合もある。高炉セメントB種を用いた場合には、自己収縮ひずみが材齢の経過に伴い漸増する傾向にある。

(2) 普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントB種に膨張材を併用した場合、若材齢時に生じた自己膨張ひずみが経時に減少する傾向を示す。一方、低熱ポルトランドセメントの場合には、ビーライト量が多いものほど自己膨張量が大きく、長期にわたって保持される傾向にある。

(3) 膨張材による硬化コンクリートの収縮補償効果は、併用するセメントの種類により相違し、同一膨張材量で比較した場合、自己収縮が小さいセメントほど膨張量が増大する傾向にある。

(4) 放熱の影響が大きい薄肉部材に高強度コンクリートを適用する場合には、発熱速度が小さい低熱ポルトランドセメントを用いれば、打込み後の温度上昇量が抑制されるとともに温度降下速度も緩慢になり、温度ひび割れの低減に対して有利となる。

(5) 各種ポルトランドセメントを用いた場合の強度発現特性は、セメント構成化合物中の  $C_3S$  および  $C_2S$  量の割合と良好な相関が認められた。標準養生した場合、材齢 7 日までの強度発現はビーライト量の多いセメントほど小さいものの、材齢 91 日時点ではセメントの種類によらずほぼ同等の強度水準に達する。低熱ポルトランドセメントを用いる場合、所要の強度水準を確保するためには湿潤養生期間を極力長く設定するなど乾燥防止に対して十分に配慮する必要がある。

### 【参考文献】

- [1] 例えば、渕田安浩ほか：高強度コンクリートの実構造物における硬化性状の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 303-308、1996. 6
- [2] 例えば、三浦律彦ほか：過密配筋をクリアした巨大タンク底版の急速施工、セメントコンクリート、No. 558、pp. 71-76、1993. 8
- [3] 例えば、自己収縮研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学協会、1996. 11
- [4] 例えば、名和豊春：高ビーライト系セメントの現状、コンクリート工学、Vol. 34、No. 12、pp. 16-25、1996. 12
- [5] 北村八朗ほか：逆打ち用ハイパフォーマンスコンクリートに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 101-106、1992. 6

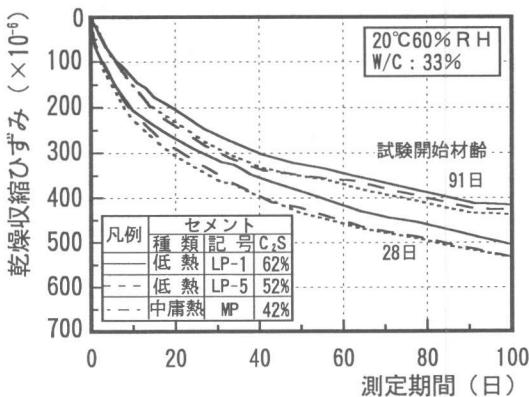


図-12 乾燥収縮試験結果