

論文 低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究

竹田宣典*¹・松永 篤*²・近松竜一*³・十河茂幸*⁴

要旨：高性能A E減水剤を用いて水結合材比を低減した高強度・高流動コンクリートのひび割れ抵抗性を高めるためには、温度収縮や自己収縮の低減が重要な課題となる。前報¹⁾では、各種結合材を用いた高強度・高流動コンクリートの硬化後の基礎物性について検討し、低熱ポルトランドセメントと膨張材の組合せが低収縮化に有効であることを示した。本論文では、この低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートを対象として、温度ひび割れ試験やマスブロック試験体による各種計測を実施し、ひび割れ抵抗性の改善効果を定量的に明らかにした。

キーワード：低熱ポルトランドセメント、膨張材、低収縮化、温度ひび割れ試験

1. はじめに

一般に、コンクリートに要求される基本的な性能は、フレッシュ時の施工性と硬化後の強度、耐久性に大別することができる。最近では、混和材料の開発に相まって、これらの高性能化に関する研究が活発に行われている。とりわけ、高性能A E減水剤の開発に伴い、コンクリートの高流動化や高強度化が容易に実現できるようになった。高流動コンクリートは、締固め不要の自己充填性を有する高施工性コンクリートであり、工期短縮や省力化、作業環境の改善など、施工の合理化を図る有用な手段として、広く実用化されている²⁾。また、高強度化に関しても、設計基準強度が60N/mm²以上の高強度コンクリートの適用事例が増加しており、構造物レベルでコア圧縮強度が115N/mm²の超高強度コンクリートの実績も報告されている³⁾。

これらの水結合材比の小さい高強度・高流動コンクリートは、密実な硬化組織の形成により各種の外来劣化因子の浸透が抑制され、潜在的には優れた耐久性を有していると考えられる。

しかしながら、単位結合材量の増加が発熱量の増大を伴い、温度ひび割れが生じやすい傾向にある。また、結合材の水和反応に伴って自己収縮が顕在化し、乾燥作用を受けない封緘条件下でも収縮量が増大する傾向にあることも明らかになっており⁴⁾、高強度・高流動コンクリートのひび割れ抵抗性を高めるためには、温度収縮および自己収縮の低減が重要な課題といえる。

以上の観点から、前報¹⁾では、高強度・高流動コンクリートの収縮特性に及ぼす各種結合材の影響を調べ、低熱ポルトランドセメントと膨張材の組合せが低収縮化に有効であることを明らかにした。一方、温度収縮や自己収縮などの硬化過程の収縮特性を包括したコンクリートのひび割れ抵抗性を評価する方法についても検討を進めてきた^{5)・6)・7)}。本論文は、これら既往の研究成果を踏まえ、低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートを対象に温度ひび割れ試験やマスブロック試験による各種計測を実施し、ひび割れ抵抗性の改善効果について検証を加えたものである。

*1 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）

*2 宇部興産 建設資材事業本部 技術開発部 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 研究員 工修（正会員）

*4 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鉱物組成および品質試験結果一覧

セメント		鉱物組成 (%)				密度 (g/cm ³)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (N/mm ²)				水和熱 (J/g)		
種類	記号	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
低熱	LP	17	62	3	11	3.24	3410	3.4	6.1	22.0	48.5	164	216	270
中庸熱	MP	36	42	4	12	3.22	3170	9.2	13.6	34.6	54.3	239	304	340
高炉B	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条件および示方配合

種類	配合条件			W/P	W/(C+EX)	s/a	単位量 (kg/m ³)					SPA (P%)	
	配 合 度 (N/mm ²)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)				W	P			S		G
								C	EX	LF			
W ₀	≥80	60±5	4±1	29.0	33.0	49.0	175	530	0	70	737	789	1.5
W ₁								500	30	70			

注) W : 水, C : セメント, EX : 膨張材, LF : 石灰石微粉末, SPA : 高性能A E 減水剤

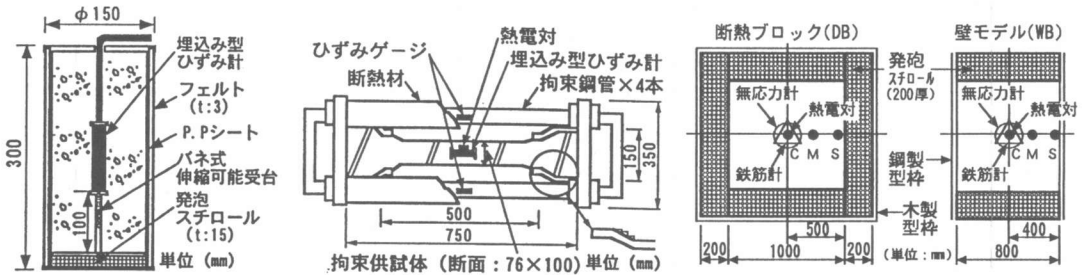


図-1 自己収縮(膨張)試験体 図-2 温度ひび割れ試験装置 図-3 各種マスブロック試験体

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは、ピーライト量が62%の低熱ポルトランドセメント(以下、低熱セメントと略記)、中庸熱ポルトランドセメント(以下、中庸熱セメントと略記)および高炉セメントB種(以下、高炉B種と略記)を使用した。(表-1参照)。

混和材は、収縮補償のためにCSA系膨張材(密度2.93g/cm³、ブレン値2760cm²/g)を用い、粉体増量材として石灰石微粉末(密度2.71g/cm³、ブレン値5600cm²/g)を使用した。

細骨材は、海砂(表乾比重2.55、粗粒率2.61)、粗骨材は、碎石(最大寸法20mm、表乾比重2.63、粗粒率6.60、実積率59%)を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能A E 減水剤を用いた。

高強度・高流動コンクリートの配合条件および示方配合を表-2に示す。水結合材比は33%、単位結合材量は530kg/m³とした。また、単位粗骨材量は0.300m³/m³、各種結合材と石灰石微粉末を併せた単位粉体量は600kg/m³に設定した。試験コンクリートは、各種セメントを単独で用いた3種類(種別W₀)、低熱セメントに膨張材を併用した1種類(種別W₁)の計4種類とした。

2.2 実験方法

練混ぜは、室内試験ミキサ、実機ミキサとも二軸強制練りタイプを用いた。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秒練り混ぜた。

圧縮強度供試体は、材齢3日で脱型後、所定材齢まで標準養生した。断熱温度上昇特性は、

空気循環式の試験装置を用いて測定した。自己収縮(膨張)特性は、20℃封緘で無拘束条件下のコンクリートひずみを埋込み型ひずみ計により測定した(図-1参照)。なお、自己収縮(膨張)ひずみは凝結始発時を基点とし、熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度補正を行った。

温度ひび割れ試験は、JIS 原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準拠した⁹⁾。試験装置の概要を図-2に示す。温度可変槽内に拘束供試体を設置し、2次元のFEM解析で求めた厚さ0.8mの壁モデル中心部の温度履歴を与え、拘束鋼管ひずみから拘束応力、埋込み型ひずみ計より拘束ひずみを求めた。なお、拘束鋼管は、拘束率を大きくするために、JIS 原案仕様より肉厚を増したもの(4.9mm)を用い、鋼管内の循環水温は20℃の一定とした。マスブロック試験体の概要を図-3に示す。放熱条件が異なる2種類の試験体内に各種計器を設置し、無拘束状態のひずみ挙動を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 各種結合材を用いたコンクリートの基礎物性(強度, 発熱, 収縮特性)

各種結合材を用いた高強度・高流動コンクリートの強度発現特性を図-4に示す。低熱セメントを用いた場合は、初期材齢での強度発現が小さいものの、材齢7日以降の強度増進が顕著であり、材齢91日時点ではいずれのセメントを用いた場合も $80\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の高強度が得られた。また、低熱セメントに膨脹材を併用した場合は、強度発現が若干遅延する傾向が認められた。

コンクリートの断熱温度上昇特性を図-5に示す。温度上昇速度は、材齢24時間以降、セメントの種類による顕著な差異が生じ、低熱セメント、中庸熱セメント、高炉B種の順に大きくなった。終局断熱温度上昇量は最大で約 12°C の差が認められた。また、膨脹材の併用により発熱速度、発熱量とも若干増加する結果となった。放熱の影響が大きい薄肉部材では、発熱速度の小さい低熱セメントほど、温度上昇が抑制され、

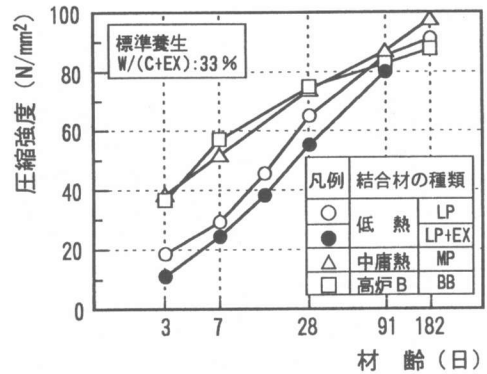


図-4 コンクリートの強度発現特性

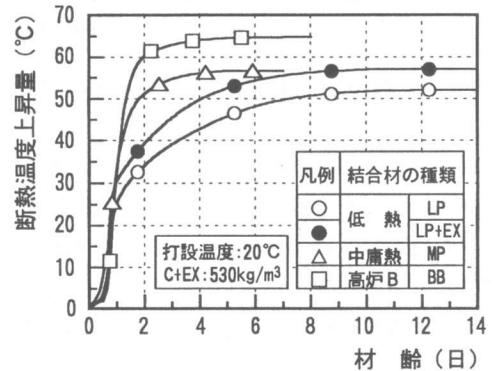


図-5 コンクリートの断熱温度上昇特性

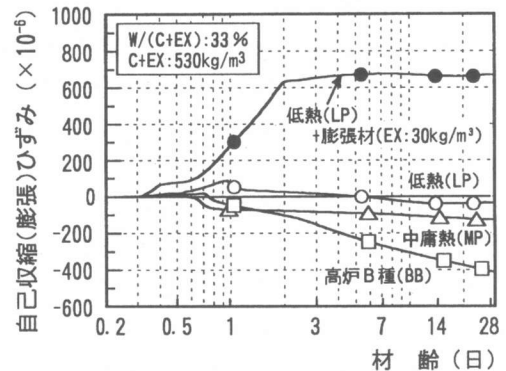


図-6 コンクリートの自己収縮(膨張)特性

温度ひび割れの低減に有利であると考えられる。

各種結合材を用いたコンクリートの自己収縮(膨張)ひずみの推移を図-6に示す。高炉B種や中庸熱セメントを用いた場合は、材齢の経過とともに収縮ひずみが漸増したのに対し、低熱セメントを用いた場合は、材齢7日程度まではひずみが膨張域にあり、材齢28日時点でも収縮

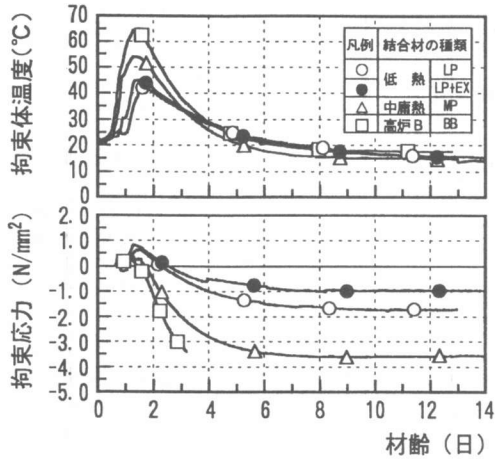


図-7 拘束試験体の温度，拘束応力の推移

が極めて小さい結果となった。また，低熱セメントに膨張材を併用した場合，若材齢時に導入された膨張ひずみが長期にわたって保持される結果となり，前報で報告したように，低熱セメントと膨張材の組合せによって良好な収縮補償効果が得られることが明らかとなった。

3.2 温度ひび割れ試験による評価

前述の各種結合材を用いた計4種類のコンクリートについて温度ひび割れ試験を実施した。

温度ひび割れ試験における各種拘束供試体の温度および発生拘束応力の推移を図-7に示す。また，図-7に示した各供試体毎のデータを温度と拘束応力の関係で図-8に示す。

各供試体の温度履歴は，断熱温度上昇試験結果(図-5参照)をもとにFEM解析より求めた厚さ0.8mの壁中心部に相当する温度履歴である。温度上昇量は，使用したセメントの種類により最大で約20℃の差が生じ，温度上昇量が大きいものほど温度降下速度も大きくなっている。

温度上昇過程において導入される圧縮応力は，膨張材を用いた場合が最も大きく，セメントの種類に起因した温度上昇量による顕著な差は生じていない(図-7参照)。このため，温度上昇量が大きいセメントを用いた場合ほど，温度降下過程での発生引張応力が増大する結果となり，特に高炉B種を用いた場合には，試験開始から

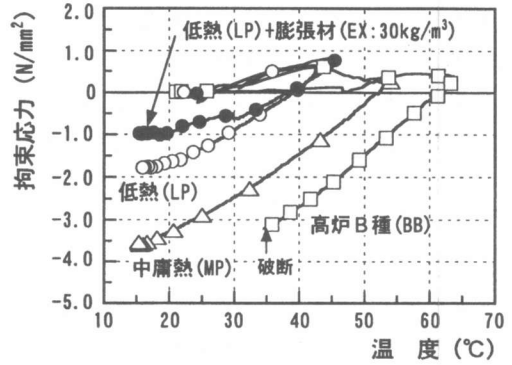


図-8 拘束供試体の温度と拘束応力の関係

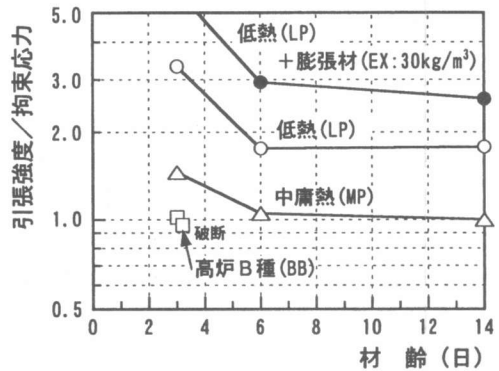


図-9 拘束応力に対する引張強度比率の推移

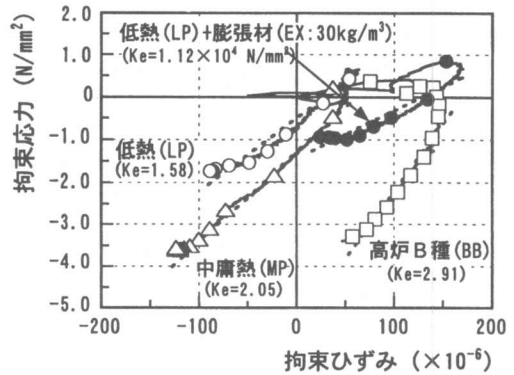


図-10 拘束供試体のひずみと応力の関係

約77時間で供試体が破断した(図-8参照)。

各ケース毎の拘束供試体と同一の温度履歴を与えた引張強度の拘束応力に対する比率(以下，ひび割れ抵抗性指数と呼称)の推移を図-9に示す。ひび割れ抵抗性指数は，高炉B種，中庸熱セメント，低熱セメントの順に大きく，膨張材を用いた場合は2.5以上の値が確保された。

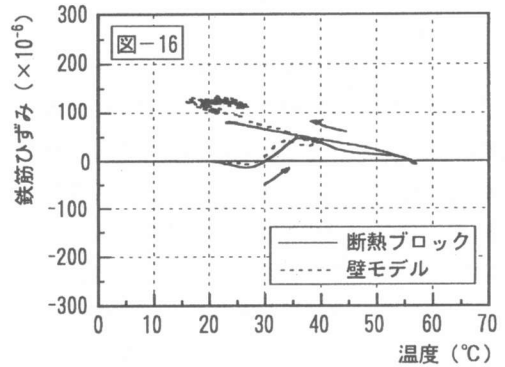
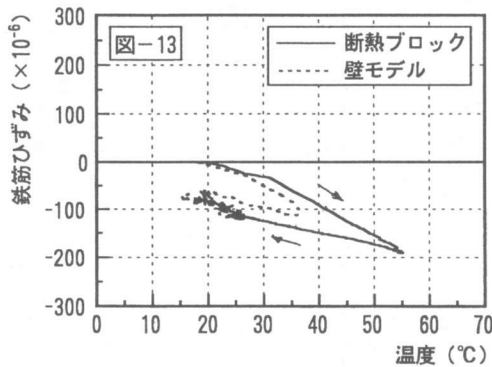
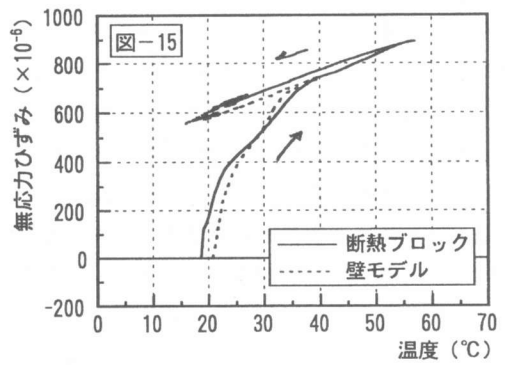
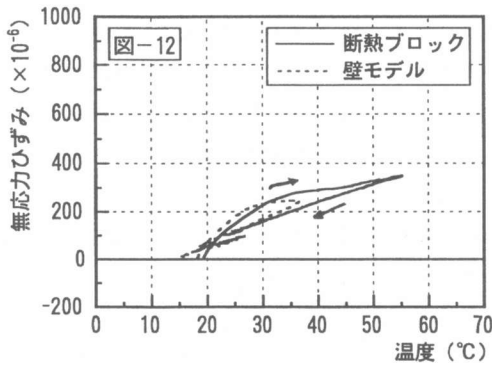
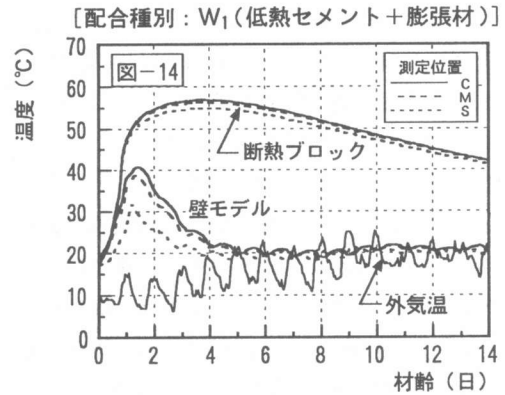
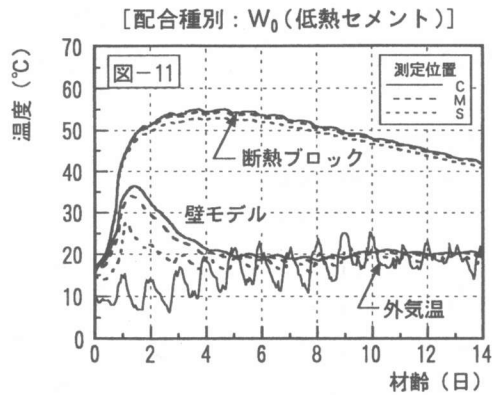


図-11~16 各種マスブロック試験体における温度、無応力ひずみ、鉄筋ひずみの履歴

上述の試験結果を拘束ひずみ（無拘束および拘束供試体のひずみ量の差）と拘束応力の関係により整理した結果を図-10に示す。温度変化や自己収縮の小さいセメントを用いた場合ほど、拘束ひずみの減少に伴う引張応力の増加率が小さくなる傾向が認められた。この傾向は、温度降下域におけるみかけの有効弾性係数（図-10中に併記）の減少として表現されており、低熱セメントと膨張材の組合せによってひび割れ抵抗性が大幅に改善されたものと評価できる。

3.3 マスブロック試験による評価

低熱セメントを単独で用いた場合（種別 W_0 ）、低熱セメントと膨張材を用いた場合（種別 W_1 ）の2種類の高強度・高流動コンクリート配合を対象として、断熱マスブロック試験体と壁モデル試験体（0.8m厚）を作製し、コンクリートの発熱特性、無拘束条件下でのひずみ挙動を調べた。

各試験体の温度の推移、無応力容器に埋設した埋込み型ひずみ計と鉄筋計による各ひずみの履歴をコンクリート種別毎に図-11~16に示す。

断熱ブロック試験体の温度上昇量は約40℃、壁モデル試験体の温度上昇量は約21～23℃で、前述の結果と同様、膨張材を用いることにより発熱が若干大きくなる傾向が認められた。

各試験体の無応力ひずみに着目すると、低熱セメントのみを用いた場合には、試験体が安定温度に達した時点における残留ひずみが約 $30\sim 50\times 10^{-6}$ であるのに対して、膨張材を併用した場合は、初期の温度上昇過程において膨張ひずみが著しく増大する挙動を示し、約 600×10^{-6} の残留ひずみが生じる結果が得られた。一方、無拘束状態のコンクリート中に埋設した鉄筋計においても、鉄筋ひずみの履歴は膨張材の有無により異なった挙動を示し、残留ひずみ量には約 200×10^{-6} の差が生じた。これらの結果は、膨張材の使用による収縮補償効果が無拘束条件下での残留ひずみ量を指標として相対的に評価できることを示すものと考えられる。

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) 温度ひび割れ試験によれば、硬化時の水和に伴う発熱および自己収縮の影響を含めたひび割れ抵抗性は、ひび割れ抵抗性指数(拘束応力に対する引張強度の割合)や温度降下過程でのみかけの有効弾性係数を指標として評価できる。
- (2) マスブロック試験体の無応力計や鉄筋計の残留ひずみ値により、温度履歴の影響を含めた自己収縮(膨張)量の相違を相対評価できる。
- (3) 高強度・高流動コンクリートのひび割れ抵抗性を改善する上で、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。今回の実験

結果では、これらの結合材を用いた場合のひび割れ抵抗性指数は、2.5以上の値が確保できた。

参考文献

- 1) 近松竜一ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp. 169-174, 1997. 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) 青木茂ほか：超高強度・低発熱連壁コンクリートの実施工における壁体の硬化特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp. 273-278, 1996. 6
- 4) 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
- 5) 松永篤ほか：自己収縮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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp. 1287-1292, 1996. 6
- 6) 竹田宣典ほか：水和熱による温度履歴が高強度コンクリートの自己収縮応力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp. 1417-1422, 1997. 6
- 7) 十河茂幸ほか：各種低発熱セメントを用いたコンクリートの硬化に伴う体積変化，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 934-935, 1992. 9
- 8) 仕入豊和ほか：コンクリートのひび割れ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol. 23, No. 3, pp. 40-49, 1985. 3