

論文 中庸熱セメントを基材とした高炉スラグ混和コンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討

三谷 裕二^{*1}・森 寛晃^{*1}・東 洋輔^{*1}・溝渕 利明^{*2}

要旨: 中庸熱ポルトランドセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末を 60%、無水石こうを結合材中の全 SO₃ 量が 3%となるように混和したコンクリートの温度ひび割れ性状について、実構造物レベルの温度・拘束条件を模擬できる一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置を用いて実験的に検討した。その結果、当該コンクリートのひび割れ発生材齢および引張限界ひずみは一般の高炉セメント B 種を用いた場合より明確に大きく、中庸熱ポルトランドセメントを単独で用いた場合とほぼ同程度の温度ひび割れ抵抗性を有する可能性を示した。

キーワード: 中庸熱ポルトランドセメント, 高炉スラグ微粉末, 温度応力, 温度ひび割れ, 一軸拘束試験

1. はじめに

近年、環境負荷低減や低炭素化を指向した取組みとして、セメント・コンクリートに高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物を効果的に利用するための研究が広く行われている。

高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと称する）を用いるセメントについては、JIS 規格（JIS R 5211 高炉セメント）の B 種の範囲内で化学成分や高炉スラグの比表面積を調整・選定した低発熱型高炉セメントの研究が進み、マスコンクリートの温度ひび割れ対策として適用されている^{1), 2)}。また最近では、高炉スラグの分量を C 種の範囲以上に高めたセメントの検討も行われている^{3), 4)}。

しかしながら、この種の高炉セメントに関する検討の多くは、普通ポルトランドセメントを基材としたものであり、低発熱系のポルトランドセメントを基材とした場合の知見はほとんどないのが実情である。そこで筆者らは、中庸熱ポルトランドセメントを基材とし、高炉スラグを混和したコンクリートについて、高炉スラグの比表面積や混和割合が断熱温度上昇特性、強度特性および自己収縮特性などに及ぼす影響を実験的に検討するとともに、それらの物性値を用いたマスコンクリート部材の 3 次元 FEM 温度応力解析により、各処方での温度ひび割れ抵抗性を比較・評価した。その結果、中庸熱ポルトランドセメントを基材として高炉スラグを混和したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを基材としたものより断熱温度上昇および自己収縮が明確に小さく、それによって温度ひび割れ抵抗性が高くなる可能性が示唆された⁵⁾。

本研究では、既報の解析による評価結果を検証することを目的に、実構造物の温度条件や拘束条件を模擬できる一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置

(Temperature-Stress Testing Machine)^{6), 7)}を用いて、中庸熱ポルトランドセメントを基材とした高炉スラグ混和コンクリートの温度ひび割れ抵抗性を実験的に評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。セメントには、市販品の中庸熱ポルトランドセメント（以下、M と称する）および高炉セメント B 種（以下、BB と称する）を用いた。ま

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	M	中庸熱ポルトランドセメント／ 密度: 3.21g/cm ³ , SO ₃ : 2.10%, 比表面積: 3210cm ² /g
	BB	高炉セメント B 種／密度: 3.04g/cm ³ , SO ₃ : 2.17%, 比表面積: 3800cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BFS	密度: 2.91g/cm ³ , SO ₃ : 0.26%, 比表面積: 4450cm ² /g
天然無水石こう	AH	密度: 2.83g/cm ³ , SO ₃ : 54.4%, 比表面積: 3930cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂／ 表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 1.50%
粗骨材	G	茨城県桜川市産碎石(碎石 2005)／ 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率: 0.66%
混和剤	AD	AE 減水剤／リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE	空気量調整剤／アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配(調)合

配(調)合名	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)						
		W	B (結合材)				S	G
			M	BB	BFS	AH		
MB60		156	112	0	187	13	810	1019
M	50.0	158	316	0	0	0	808	1016
BB		160	0	320	0	0	801	1008

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第2研究部 TBC チーム 工修 (正会員)

*2 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

た、高炉スラグには比表面積が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 級のものを用いた。

2.2 コンクリート配(調)合

コンクリートの配(調)合を表-2に示す。Mに高炉スラグを内割りで60%混和し、さらに結合材中の全 SO_3 量が3.0%になるように天然無水石こうを添加したコンクリート(MB60)、比較用としてM、BBを単独で用いたコンクリートについて検討した。配(調)合条件は、水結合材比50%、細骨材率45%、AE減水剤の添加率 $B \times 0.25\%$ (B:結合材量)とし、目標スランプ $10.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\% \pm 1.0\%$ になるように、単位水量および空気量調整剤の添加量を調整した。コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ(公称容量100L)を用いて、 20°C の恒温室内で行った。

2.3 TSTM試験

一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置(以下、TSTMと称する)の概要図を図-1に示す。試験体の寸法は $150 \times 150 \times 1000\text{mm}$ (拘束試験体は拘束部を含めると 1500mm)であり、試験体の両側面に設置した変位計(標点間距離:750mm)を用いて試験体の変形を測定した。

TSTMの試験体には、各配(調)合を用いたマスコンクリート部材の内部を想定した温度履歴を与えた。すなわち、厚さ2m、高さ4m、長さ10mの壁部材の3次元FEM温度解析より求めた部材中心位置における温度履歴とした。温度解析で用いる断熱温度上昇特性には、JCI-SQA3「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」に準拠して行った試験による測定値を用い(図-2)、その他の物性値については、日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」⁸⁾(以下、ひび割れ制御指針と称する)を参考にして設定した。通水パイプに流す水温を調整することにより、試験体の温度が所定の温度履歴となるように制御した。

拘束試験体は、標点間の変形がゼロになるような完全拘束状態(拘束度1.0)で制御し、その拘束条件下におけるひび割れ発生までの応力挙動を測定した。

また、TSTM試験体と同一の温度履歴で制御した恒温槽内で養生した円柱供試体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を用いて、圧縮強度(測定方法:JIS A 1108)を測定した。

3. 実験結果および考察

TSTM試験体の温度履歴を図-3に示す。いずれの配(調)合においても、初期温度 20°C から温度が上昇し、材齢2.5日程度で最高温度に達した後、材齢30日程度で 20°C まで温度が低下する履歴となった。最高温度はMB60、M、BBでそれぞれ 47.4°C 、 50.9°C 、 64.1°C であり、MB60はMより 3.5°C 、BBより 16.7°C 低かった。

TSTM無拘束試験体の材齢初期におけるひずみを図-4に示す。このひずみは、温度変化にともなう温度ひずみと自己収縮ひずみの双方が含まれたものである。

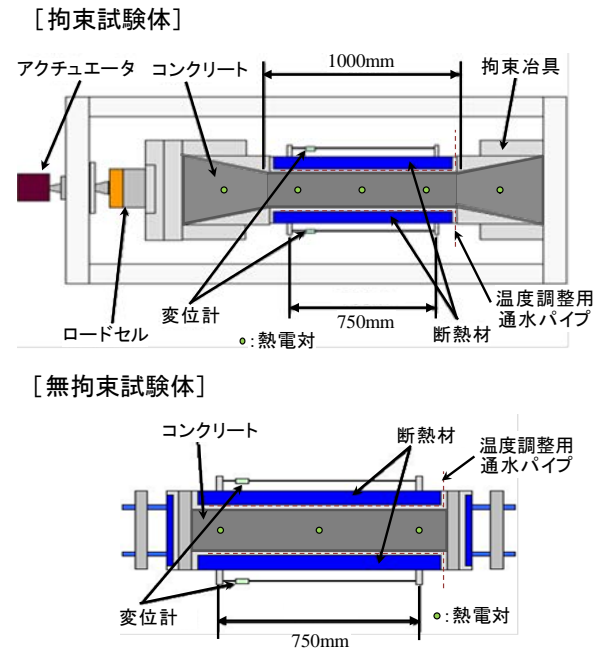


図-1 TSTM試験の概要図

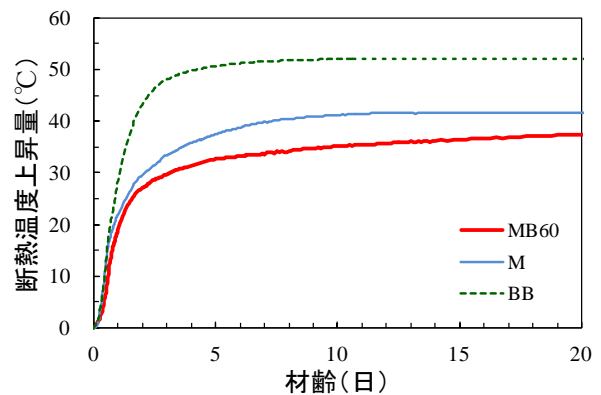


図-2 断熱温度上昇特性

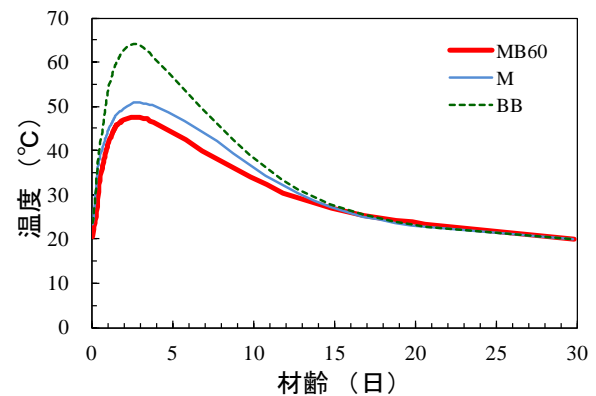


図-3 TSTM試験体の温度履歴

MB60 は、M および BB と比較して温度上昇量が小さいにもかかわらず、温度上昇時に生じる膨張ひずみが最も大きくなっており、この要因としては、SO₃ 量を高めた高炉スラグ混和コンクリートの研究で報告されている⁹⁾、エトリンガイト生成による初期膨張の影響が考えられる。図-5 は、図-4 のひずみから温度ひずみを差し引いて算出した自己収縮ひずみを示したものである。ここで、温度ひずみを求めるための熱膨張係数は、高炉スラグを用いている MB60 および BB は $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、M は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。MB60 の自己収縮ひずみは材齢初期に約 100×10^{-6} 膨張しており、これは筆者らが行った既往の研究⁵⁾と同様の結果であった。ただし、寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の試験体（中心に埋込型ひずみ計を設置）で測定した既往の実験では、初期の膨張後に収縮ひずみが生じたのに対して、本実験では収縮ひずみがほとんど見られなかった。この点については、TSTM 試験体における中央部と端部の温度差（本実験では最大 3°C 程度）や偏心（本実験では 2 つの変位計の差が最大 0.05mm 程度）などの影響が考えられるため、今後の検討課題としたい。

TSTM 拘束試験体にひび割れが発生するまでの応力履歴（正：引張、負：圧縮）を図-6 に示す。ひび割れが発生した材齢（以下、ひび割れ発生材齢と称する）は、MB60、M、BB でそれぞれ 10.7 日、10.9 日、5.9 日であり、MB60 は M とほぼ同等で、BB より明らかに遅れる結果であった。なお、ひび割れ発生材齢は、試験体に生じていた引張応力が急激にゼロ付近まで低下した時点とした。

応力の挙動を見ると、温度上昇時に生じる圧縮応力の最大値は、MB60、M、BB でそれぞれ $1.35, 0.99, 1.17\text{N}/\text{mm}^2$ であり、無拘束試験体に生じた膨張ひずみの大小関係と対応していた。一方、ひび割れ発生材齢における引張応力は MB60、M、BB でそれぞれ $2.15, 2.36, 2.17\text{N}/\text{mm}^2$ であり、配（調）合による顕著な差は認められなかった。図中には、TSTM 試験体と同一の温度条件下における圧縮強度の結果（図-7）を基に算出した割裂引張強度を併記している。圧縮強度は、実験値を式（1）で回帰して定め、割裂引張強度は、本実験と同一の材料を用いた既往の実験⁵⁾より得られた割裂引張強度と圧縮強度の関係式（式（2））を用いて算出した。ひび割れ発生材齢における応力強度比（引張応力/割裂引張強度）は、配（調）合による差はなく、 $0.7 \sim 0.75$ の範囲内であった。

$$f'_c(t) = \frac{t - t_0}{a + b \cdot (t - t_0)} \quad (1)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：圧縮強度（ N/mm^2 ）、 t ：材齢（日）、 t_0 ：凝結始発材齢（日）、 a および b ：圧縮強度の発

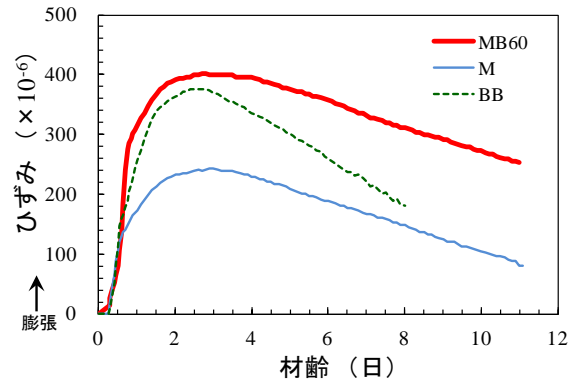


図-4 TSTM 無拘束試験体のひずみ

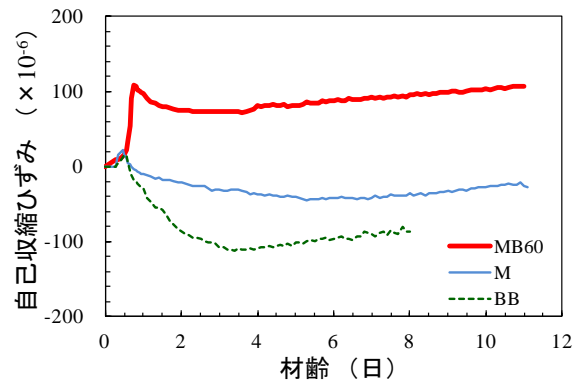


図-5 TSTM 無拘束試験体の自己収縮ひずみ

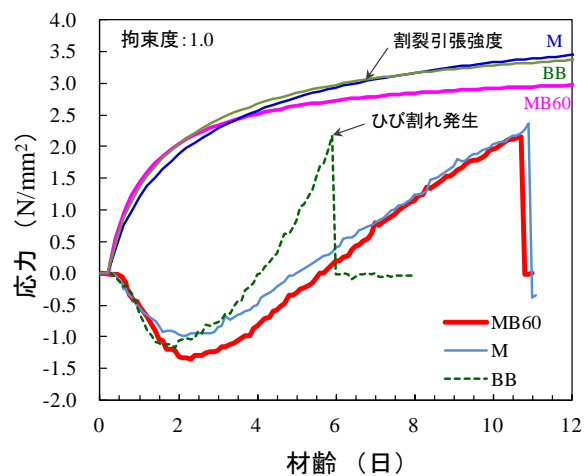


図-6 TSTM 拘束試験体の応力履歴

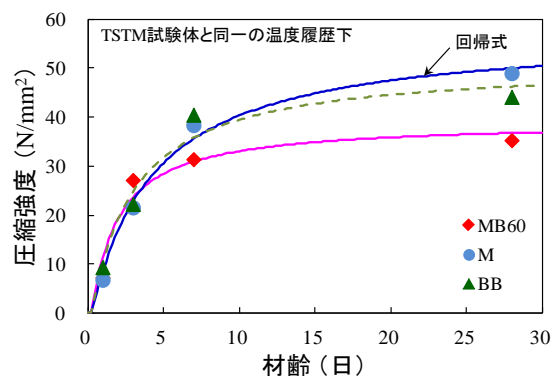


図-7 圧縮強度

現を表す係数

$$f_r = 0.29 f_c^{0.66} \quad (2)$$

ここに、 f_r : 割裂引張強度 (N/mm²), f_c : 圧縮強度 (N/mm²)

応力と拘束ひずみ (拘束試験体のひずみ (=完全拘束なのでゼロ) と無拘束試験体のひずみの差) の関係を図-8 に示す。引張応力が生じる区間における拘束ひずみの変化量は、MB60, M, BB でそれぞれ 100×10^{-6} , 113×10^{-6} , 64×10^{-6} であった。このひずみを引張限界ひずみ (引張伸び能力) と仮定した場合、MB60 のひび割れ抵抗性は、M より若干小さいものの、BB より明確に大きいと考えられる。

図-9 は、配(調)合ごとに、応力と拘束ひずみに概ね線形関係が認められる区間、すなわち、(i) 温度上昇時における拘束ひずみの増加に対して圧縮応力の増加が小さい区間、および (ii) 圧縮応力が大きく増加する区間、(iii) 温度降下時で圧縮応力が減少して応力がゼロになるまでの区間、および (iv) 引張応力が生じる区間の 4 つの区間について、その回帰直線および傾きを示したものである。この傾きは、拘束条件下における弾性ひずみとクリープひずみの双方が考慮された見かけのヤング係数と考えられるものである。なお、本実験における区間 (i) は、MB60, M, BB でそれぞれ材齢 0.8, 0.5, 0.6 日程度までの期間に相当していた。

温度上昇時の圧縮応力が大きく増加する区間 (ii) から温度降下時の圧縮応力が減少する区間 (iii) において、MB60 の見かけのヤング係数は M, BB より大きかった。また、配(調)合によらず、圧縮応力が減少してゼロになるまでの区間 (iii) と引張応力が生じる区間 (iv) で見かけのヤング係数が変化する傾向が認められるものの、MB60 と M は引張応力が生じる区間 (iv) で見かけのヤング係数が小さくなるのに対して、BB は大きくなる結果であった。これらについては、各配(調)合の若材齢におけるクリープ特性、および圧縮応力下と引張応力下のクリープ特性の差異¹⁰⁾などの観点から、詳細に検討することが必要であり、今後の検討課題としたい。

円柱供試体によるヤング係数および見かけのヤング係数の経時変化を図-10、円柱供試体のヤング係数に対する見かけのヤング係数の比 (以下、ヤング係数比と称する) を表-3 に示す。円柱供試体によるヤング係数は、前述の割裂引張強度と同様に、TSTM 試験体と同一の温度条件下における圧縮強度を基に、既往の実験⁵⁾より得られたヤング係数と圧縮強度の関係式 (式 (3)) を用いて算出した。なお、回帰直線の傾きを算出した期間における見かけのヤング係数は一定値とした。

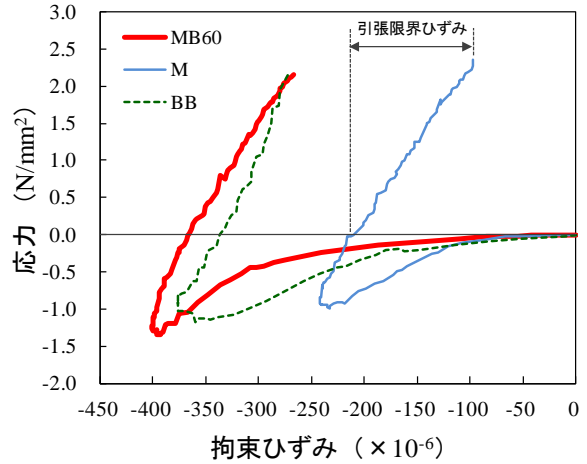


図-8 応力と拘束ひずみの関係

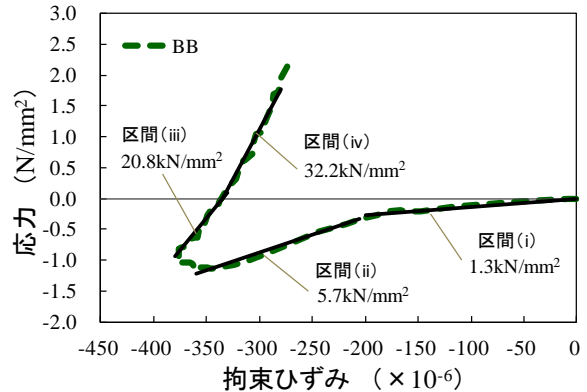
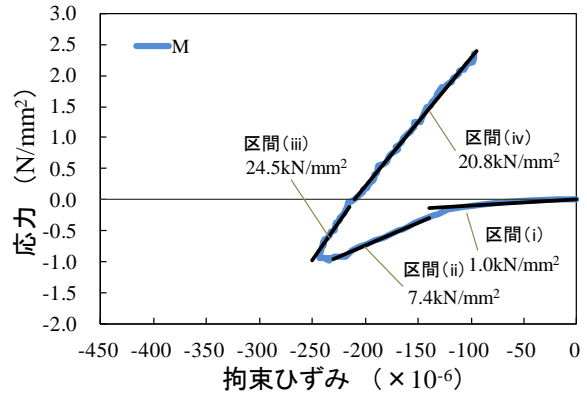
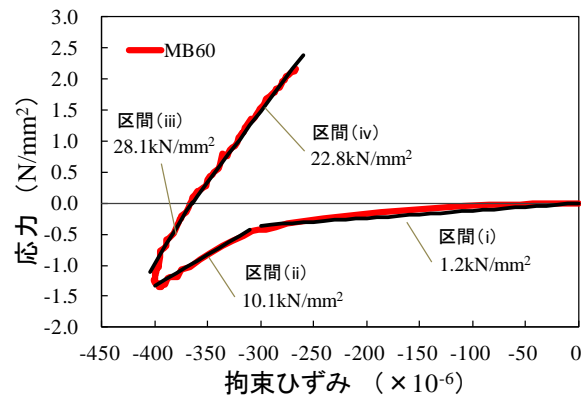


図-9 見かけのヤング係数(応力と拘束ひずみの関係)

$$E_c = 6.85 f_c^{0.42} \quad (3)$$

ここに、 E_c :ヤング係数 (kN/mm²), f_c :圧縮強度 (N/mm²)

MB60 と M のヤング係数比は、材齢とともに増加し、温度降下時の圧縮応力が減少する区間で 0.9~1.0 程度となった後、引張応力が生じる区間で 0.7~0.8 程度まで減少しており、既往の研究と同様の傾向であった^{11), 12)}。一方、BB のヤング係数比は引張応力が生じる区間まで増加しており、MB60, M と傾向が異なった。

また、本検討によるヤング係数比とひび割れ制御指針⁸⁾で提示されているクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数 (温度上昇時: 0.42, 温度降下時: 0.65) を比較すると、配(調)合によらず、総じて温度上昇時は小さく、温度降下時は大きい傾向が認められた。

図-11 は、TSTM 試験の応力挙動について、実験値と計算値を比較したものである。計算には、TSTM 無拘束試験体のひずみ、円柱供試体の圧縮強度に基づくヤング係数、およびクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数として表-3 に示したヤング係数比を用いた。いずれの配(調)合においても、計算値は圧縮応力が最大となる材齢が実験値より若干遅れているものの、温度上昇から温度降下までの応力挙動を概ね良く評価していた。

4. まとめ

中庸熟ポルトランドセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末を 60%、無水石こうを結合材中の全 SO₃ 量が 3% となるように混和したコンクリートの温度ひび割れ抵抗性について、温度応力シミュレーション装置 (TSTM) を用いて実験的に検討した。以下に得られた結果をまとめて示す。

- (1) 壁部材内部を想定した温度履歴下における温度ひび割れ発生材齢は、高炉セメント B 種より明確に遅く、中庸熟ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同等であった。
- (2) 温度上昇時に生じる圧縮応力は、高炉セメント B 種や中庸熟ポルトランドセメントを用いた場合より大きく、その要因としては、SO₃ 量を高めたことによる初期膨張の影響が考えられる。
- (3) 温度ひび割れ発生材齢における応力強度比 (引張応力/割裂引張強度) は 0.7 程度であり、セメント種類による顕著な差はなかった。
- (4) 引張限界ひずみ (引張応力下におけるひび割れ発生まで拘束ひずみ) は、中庸熟ポルトランドセメントより若干小さいものの、高炉セメント B 種より明確に大きかった。

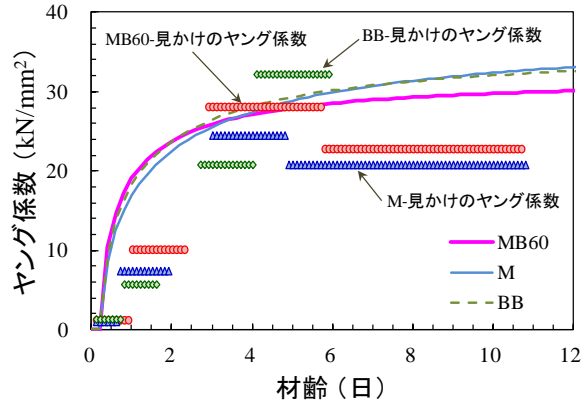


図-10 ヤング係数の経時変化

表-3 ヤング係数比

	MB60	M	BB
区間 (i)	0.10	0.12	0.13
区間 (ii)	0.46	0.40	0.29
区間 (iii)	1.03	0.90	0.77
区間 (iv)	0.78	0.67	1.10

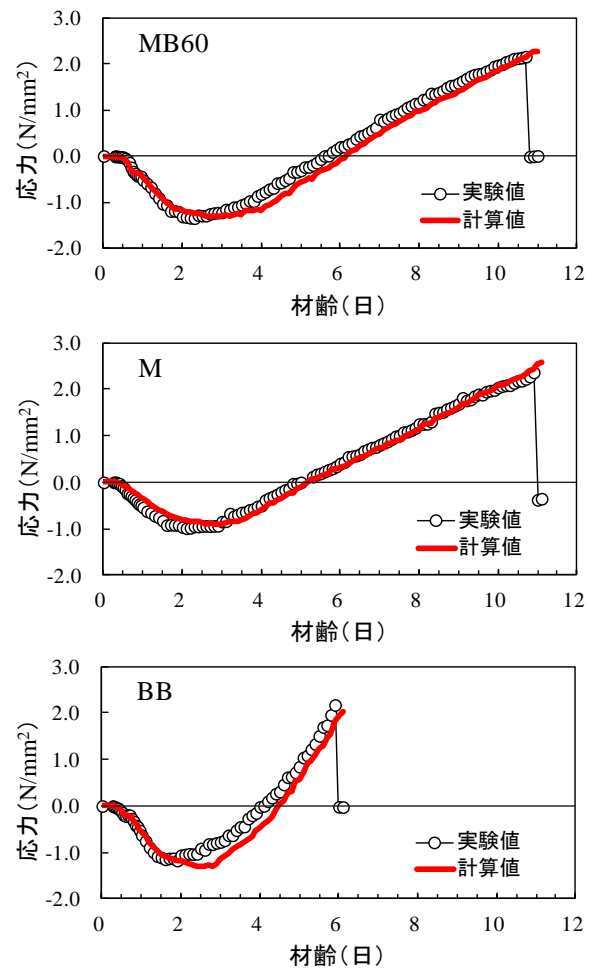


図-11 応力の解析結果

- (5) 応力と拘束ひずみの関係より算出した見かけのヤング係数と円柱供試体によるヤング係数の比は、中庸熱ポルトランドセメントとほぼ同程度であった。

参考文献

- 1) 二戸信和, 鯉淵清, 大友健, 宮澤伸吾: 高炉セメントの特性を活かす低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの性能と実施工, セメント・コンクリート, No.722, pp.10-16, 2007
- 2) 檀康弘, 竹内一真, 伊与田岳史: 低発熱型高炉セメント B 種の歴史とその性能, セメント・コンクリート, No.733, pp.17-23, 2008
- 3) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂・ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 4) 閑田徹志, 稲葉洋平, 石関浩輔, 小島正朗: 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1720-1725, 2014
- 5) 東洋輔, 森寛晃, 三谷裕二, 谷村充: 中庸熱セメントを基材とするスラグ混和コンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1141-1146, 2015
- 6) Springerschmid, R., et al. : Thermal Stresses in Mass

Concrete : A New Testing Method and The Influence of Different Cements, Quinzieme Congres des Grands Barrages, Lausanne, Commission Internationale Des Grands Barrages, pp.57-72, 1985

- 7) 溝淵利明, 横関康祐, 信田佳延: 一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1051-1056, 1998
- 8) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.46-56, 2008
- 9) 谷田貝敦, 二戸信和, 宮澤伸吾: 化学成分を調整した高炉セメント B 種の膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.523-528, 2013
- 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書・論文集, pp.37-52, 2001
- 11) 江渡正満, 丸山久一, 野添秀昭: マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, pp.27-34, 1999
- 12) 小田部裕一, 鈴木康範, 稲葉洋平, 溝淵利明: 温度応力の抑制対策に対する材料評価方法に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1113-1118, 2002