

中庸熱セメントを基材としたスラグ混和コンクリートの温度応力に関する検討

太平洋セメント(株) 正会員 ○三谷 裕二 森 寛晃 大野 拓也
法政大学 正会員 溝渕 利明

1. はじめに

CO₂ 削減等の環境負荷低減に向けた取組みの一環として、セメント・コンクリートに副産物を有効利用するための研究が進んでいる。高炉セメントについては、スラグ分量を B 種範囲の上限程度まで増やすことで、低発熱性を高めたものが実用化されている¹⁾。

筆者らはこれまでに、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強度・断熱温度上昇・自己収縮特性などについて検討してきた²⁾。本研究では、実構造物の拘束・温度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(以下、TSTM)により、当該コンクリートの温度ひび割れ抵抗性を評価するとともに、試験結果を基に温度応力解析に用いる見かけのヤング係数について検討した。

2. 実験概要

使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2 に示す。M に高炉スラグ微粉末を内割りで 60%混和し、さらに結合材中の全 SO₃ 量が 3.0%となるように無水石こう(天然)を添加したコンクリート(MB60)、比較用として M、BB をそれぞれ単独で用いたコンクリートについて検討した。AE 減水剤(リグニンスルホン酸系)の添加率は B×0.25%で一定とし、スランプ 10±2.5cm、空気量 4.5±1.0%と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。

TSTM 試験体の概要を図-1 に示す。試験体の寸法は 150×150×1000mm であり、試験体の側面に設置した変位計を用いて試験体の変形を測定した。

TSTM 試験体には、壁状のマスコンクリート部材(厚さ 2m、高さ 4m、長さ 10m)の 3 次元 FEM 温度解析より算出した部材中心位置における温度履歴を与えた。なお、温度解析で入力した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)」に準拠した試験による測定値を用い、その他の物性値は、JCI「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」³⁾を参考に設定した。

拘束試験体は、標点間(標点間距離:750mm)の変形がゼロとなるような完全拘束状態で制御し、ひび割れが発生するまでの応力を測定した。

3. 実験結果および考察

TSTM 試験体の温度履歴を図-2、TSTM 拘束試験体にひび割れが発生するまでの応力履歴を図-3 に示す。MB60、M、BB のひび割れ発生材齢は、10.7、10.9、5.9 日であり、MB60 は M とほぼ同等、BB の約 2 倍であった。

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-4 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、113、64×10⁻⁶であり、これを引張限界ひずみ(引張伸び能力)と仮定すると、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。

図中には、応力と拘束ひずみが概ね線形関係にある区間、すなわち、温度上昇時における(i)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、温度降下時における(iii)圧縮応力が減少して応力がゼロになるまでの

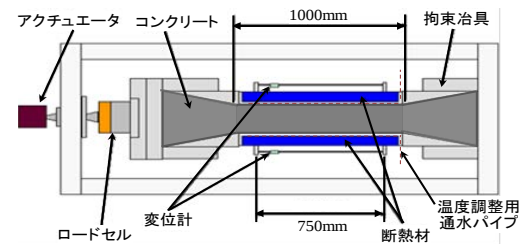
表-1 使用材料

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
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	茨城県桜川市産砕石(砕石 2005)/ 表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:0.66%

表-2 コンクリートの配合

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

【拘束試験体】



【無拘束試験体】

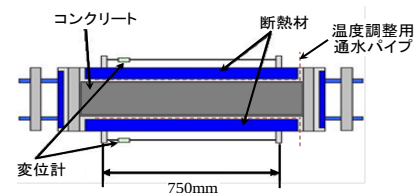


図-1 TSTM の概要図

キーワード：中庸熱セメント、高炉スラグ微粉末、温度ひび割れ、温度応力、一軸拘束試験、見かけのヤング係数
〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所 TEL043-498-3893

区間, および (iv) 引張応力が生じる区間, の4つの区間における回帰直線および傾きを併記している。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。MB60 の見かけのヤング係数は, (ii) から (iii) までの区間において, M, BB より大きい結果であった。また, 配合によらず, 圧縮応力が減少する区間 (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あるものの, MB60 と M は (iv) 区間の見かけのヤング係数が (iii) 区間より小さくなるのに対して, BB では反対に大きくなった。この点については, 圧縮応力下と引張応力下のクリープ特性の違いなどの観点から, 詳細な検討が必要と考えられる。

円柱供試体による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)を表-3に示す。円柱供試体のヤング係数は, TSTM 試験体と同一の温度条件下における圧縮強度の実験値を基に, 既往の実験²⁾で得られたヤング係数と圧縮強度の関係式より算出した。MB60 と M のヤング係数比は, 材齢とともに増加し, (iii) 区間で 0.9~1.0 程度となった後, 引張応力が生じる (iv) 区間で 0.7~0.8 程度まで減少した。一方, BB のヤング係数比は (iv) 区間まで増加し, MB60 および M と傾向が異なった。また, 本検討によるヤング係数比と JCI ひび割れ制御指針³⁾で提示している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。

TSTM 試験による応力履歴について, 実験値と解析値を比較した結果を図-5に示す。解析には, TSTM 無拘束試験体のひずみ, 円柱供試体によるヤング係数, 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。いずれの配合も, 解析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, 温度履歴下における圧縮~引張の応力挙動を良く評価していた。

4. まとめ

中庸熱セメントを基材として高炉スラグ微粉末を60%混和したコンクリートについて, 温度ひび割れ抵抗性は BB より明確に大きく, M と同程度の可能性があること, ヤング係数比(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, M とほぼ同等であることを示した。

【参考文献】

- 1) 二戸信和ほか: 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) 森寛晃ほか: 中庸熱ポルトランドセメントをベースとするスラグ混和コンクリートの諸物性, 土木学会第70回年次学術講演会, V-485, pp.969-970, 2015
- 3) 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

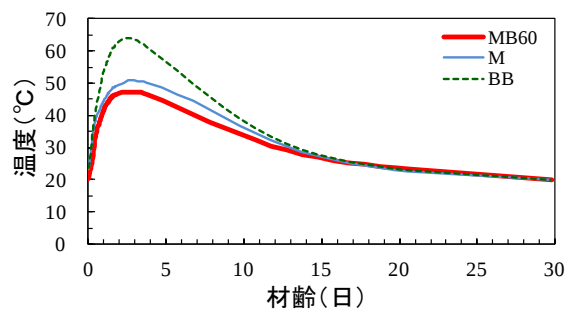


図-2 TSTM 試験体の温度履歴

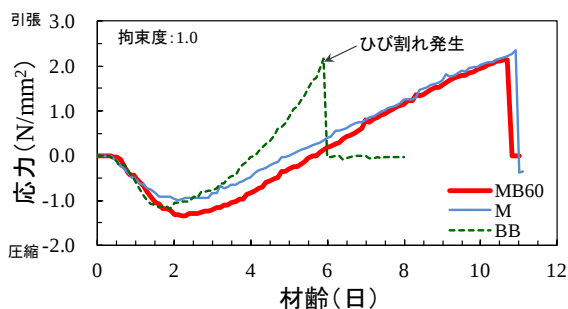


図-3 TSTM 拘束試験体の応力履歴

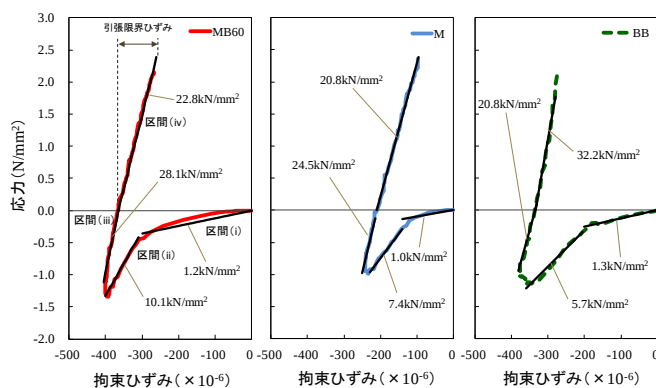


図-4 応力と拘束ひずみの関係

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

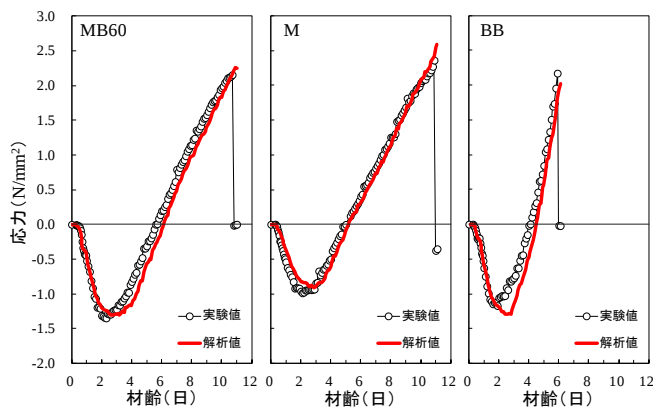


図-5 応力の解析結果