

膨張材を用いた高炉セメントコンクリートの温度応力

足利工業大学 学生会員 ○杉山 淳司

足利工業大学 正会員 宮澤 伸吾

(株)デイ・シイ 非会員 鯉渕 清

大成建設(株) 正会員 大友 健

1. はじめに

高炉セメント B 種および低発熱・収縮抑制型高炉セメントに膨張材を混入したコンクリートの温度応力特性について実験および解析を実施し、膨張材による温度ひび割れ抑制効果について検討することを目的とした。すなわち、マスコンクリートを想定した温度履歴条件下において、コンクリートの自己膨張・自己収縮、割裂引張強度、ヤング係数を実験により把握した。また、高温履歴条件下においてコンクリートの一軸拘束試験を実施して応力発生状況を把握した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには、高炉セメント B 種(BB)および JIS 規格範囲内において高炉スラグ比表面積を小さくし、SO₃ 量を約 4% に調整し、高炉スラグ置換率 58%とした低発熱・収縮抑制型高炉セメント (LBB) を用いた。混和材として石灰系膨張材 Ex-1 および Ex-2 をセメントに対して内割りでそれぞれ 20kg/m³ および 30kg/m³ 混入した。水セメント比、単位水量および AE 剤添加率は、膨張材混入の有無によらず同一とした。表-1 にコンクリートの配合を示す。

2.2 実験方法

熱膨張係数が小さいインバー鋼(ヤング係数：150kN/mm²，線膨張係数：0.6×10⁻⁶/°C)を用いて図-1 に示すような拘束体

を作製し、これを型枠の一部として 100×100×800mm の供試体を作製し、硬化過程において、コンクリートの変形が拘束されたときに発生する応力を求めた。この際、断熱温度上昇量の実測値(表-1、式(1))を用いて、FEM 温度解析により壁厚 0.8m の壁状構造物に相当する温度履歴を求め、温度可変槽にてその温度履歴を供試体に与えた。なお、自己収縮試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験、引張強度試験についても拘束応力試験と同様の温度履歴条件下で行った。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^s)\} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

図-2 に想定した温度環境の一例として、拘束応力試験における供試体中心部の温度(熱電対により測定)を示す。ただし、膨張材混入による温度上昇量の変化は無視し、ベースのセメントが同じであれば同一の温度履歴を与えることにした。なお、セメントが BB のケースでは、試験層の温度設定の不備により、凝結始発または終結時以前で想定温度とならず最大で 39°C までの温度上昇が認められた。

3. 実験結果および考察

3.1 自己膨張・自己収縮および拘束応力

図-3 は拘束応力の測定結果を示す。圧縮応力の発生開始材齢は、表-1 に示す通りであり、膨張材 Ex1 および Ex2 を混入することにより圧縮応力の発生材齢は、無置換のものより遅くなっている。膨張材を置換したものについては、無置

表-1 コンクリートの配合、凝結時間および圧縮応力の発生開始材齢、ヤング係数の補正係数

セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							断熱温度上昇 特性			凝結時間		圧縮応力 の発生 開始材齢 (時-分)	最高温度 時の材齢 (日)	ヤング係数の 補正係数 $\phi(t)$	
			W	C	Ex-1	Ex-2	S	G	Ad	Q_{∞} (°C)	γ	s	始発 (時-分)	終結 (時-分)			最高 温度前	最高 温度後
BB	55	45.7	163	296	---	---	828	996	0.74	43.6	0.63	1.21	4-40	6-30	6-50	3.32	0.5	0.8
BB+Ex1				276	20	---	829	996		42.4	0.82	1.42	5-50	8-50	7-10	3.29	0.3	0.8
BB+Ex2				266	---	30	827	994		40.2	0.9	1.22	6-50	9-30	7-30	3.23	0.2	1
LBB		45.4	154	280	---	---	838	1019	0.70	32.9	0.97	1.25	7-40	12-00	7-40	2.2	0.2	1
LBB+Ex2				260	---	20	837	1018		30.6	1.13	1.45	8-50	12-50	9-30	2.28	0.1	0.5

キーワード：膨張材，マスコンクリート，拘束応力，自己収縮，自己膨張

連絡先: 〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1 足利工業大学 T E L: 0284-62-0605 E-mail: smiyazaw@ashitech.ac.jp

換に比べ引張応力が低減しているのが分かる。LBB に置換したものより、BB に置換したもののほうが引張応力の低減効果が高いことが分かる。

図-4 に高温履歴条件下における自己膨張・自己収縮の経時変化を示す。同図では、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ としている。BB に膨張材を混入した場合、Ex1 と Ex2 で膨張ひずみは異なっているが、図-3 に示したように、引張応力低減効果は同程度であった。

3.2 見かけの有効ヤング係数

土木学会コンクリート標準示方書では、マスコンクリートの簡便な温度応力計算の方法として、クリープによるコンクリートの剛性低下を考慮した有効ヤング係数を用いる方法が提案されている。拘束試験結果を用い、コンクリートの有効ひずみ〔(拘束供試体のひずみ)-(無拘束供試体のひずみ)〕の増分に対する拘束応力の増分比を「見かけの有効ヤング係数($E_e(t)$)」として求めた。その結果を図-5 に示す。なお、同図には式(2)による近似値も示している。

$$E_{ef}(t_e) = \Phi(t_e) \cdot E_c(t_e) \quad \cdots (2)$$

$$E_c(t_e) = E_c(t_a) \exp \left\{ S_e \left[1 - \left(\frac{t_a - t_0}{t_e - t_0} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad \cdots (3)$$

$E_e(t_e)$: 有効材齢 t_e における見かけの有効ヤング係数

$\Phi(t_e)$: ヤング係数の補正係数(表-1 参照)

$E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるヤング係数(kN/mm^2)

S_e : 係数 t_e : 有効材齢(日)

t_a : 基準材齢(材齢 14 日)の有効材齢(日)

t_0 : 圧縮応力の発生開始有効材齢(日)

なお、表-1 の BB と LBB の補正係数 $\Phi(t)$ は既往の研究による。ヤング係数の補正係数の切り替えは最高温度で行った。いずれのセメントにおいても、温度上昇時において見かけの有効ヤング係数が著しく小さくなっている。膨張効果を有する LBB、混和材を置換したものの見かけのヤング係数は、若材齢時において他のセメントに比べ小さいことが認められた。また、膨張材 Ex1 および Ex2 を用いた場合についても若材齢における有効ヤング係数は小さくなっている。

4. まとめ

マスコンクリート構造物を想定した拘束応力試験により、硬化過程でコンクリートが拘束を受けた場合の圧縮応力の発生開始材齢は、膨張材の有無によらず凝結の始発と終結の間にある。また、LBB を用いた場合および BB または LBB に試作膨張材を混入した場合は、初期材齢における見かけの有効ヤング係数が BB を用いた場合と比べて、温度上昇時で小さくなる。

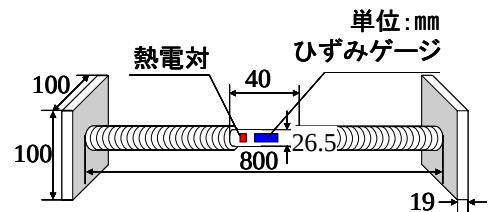


図-1 拘束器具

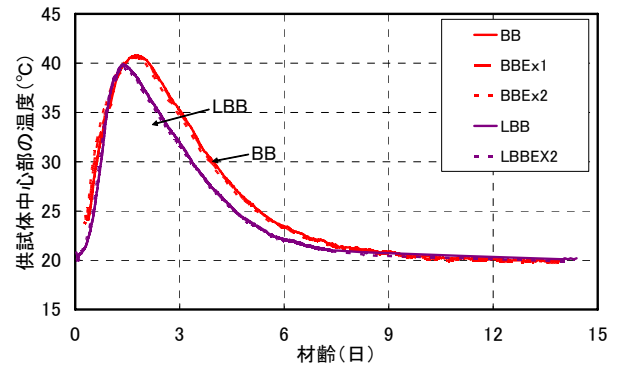


図-2 供試体中心部の温度履歴の測定値

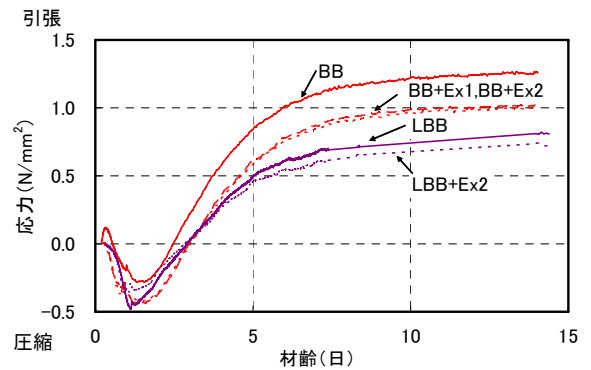


図-3 拘束応力の経時変化

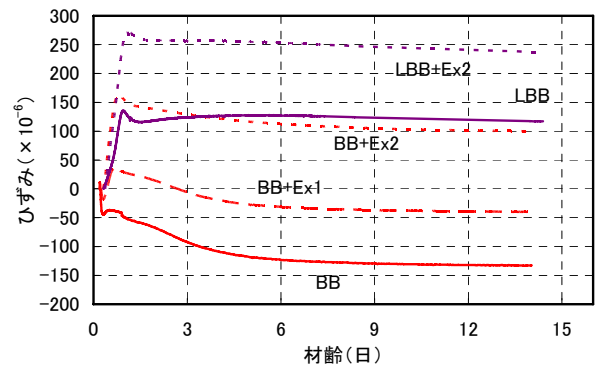


図-4 自己膨張・自己収縮の経時変化

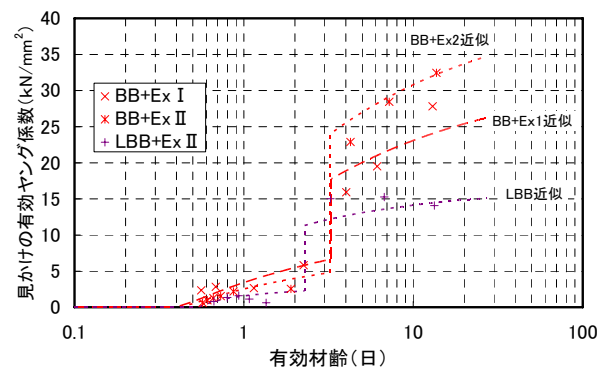


図-5 見かけの有効ヤング係数と有効材齢の関係