

# 論文 低熱高炉セメントの特性試験と温度ひび割れ抑制効果の解析的評価

田畑 美紀\*1・川里 麻莉子\*2・佐藤 友厚\*2・寺澤 正人\*3

**要旨:** 低熱高炉セメントは高炉スラグの置換率, 比表面積および SO<sub>3</sub> 含有量を調整することで, 通常の高炉セメント B 種よりも高い温度ひび割れ抑制効果を有している。これまで低熱高炉セメントに関していくつかの既往研究があるが, その特性を解析に取り込む手法に関して検討した事例は少ない。本研究は温度応力解析を実施する場合に必要ないくつかの特性に関して室内試験を実施した上で, 低熱高炉セメントの特性を実情に近い形で表現可能な解析定数の設定法を検討した。また検討した解析定数の設定法を適用して試験を実施し, 低熱高炉セメントの温度ひび割れ抑制効果を評価した。

**キーワード:** 低熱高炉セメント, 温度ひび割れ, 初期膨張, 自己収縮, 温度依存性

## 1. はじめに

低熱高炉セメント(以後「LBB」と示す)は, JIS R 5211 高炉セメント B 種(以後「BB」と示す)の規格値内で, 高炉スラグの置換率を増大させ, また比表面積を小さくすることで水和発熱を低減し, さらに SO<sub>3</sub> 含有量の増加によって初期膨張を導入して収縮を低減することで, 温度ひび割れ抑制を図ったセメントである。しかしその適用事例は多くはないため, 実施工において確実なひび割れ抑制を実現するためには, 設計・施工段階の温度ひび割れ検討において, LBB の特性を適切に解析に取り込み, 効果を予測した上で, 最適な打設・養生方法を計画する必要があると考えられる。一方, これまで LBB に関してはいくつかの研究事例があり, 例えば LBB の断熱温度上昇特性, 力学特性および耐久性などについて検証した研究事例として曾根らの研究<sup>1)</sup>がある。また, 一般的に初期膨張・自己収縮特性には温度依存性があるとされるが, LBB の初期膨張・自己収縮特性の温度依存性に着目した研究事例として, 高温履歴下における膨張収縮ひずみ挙動を検証した大友らの研究<sup>2)</sup>などがある。しかし, LBB の特性を適切に解析に取り込む手法に関する検討事例は未だ少ない。本研究では, 温度応力解析の実施に必要な解析定数のうち, LBB の特性を主に表現する水和発熱特性, 圧縮強度ほかの力学特性および初期膨張・自己収縮特性に関して室内試験を実施した上で, LBB の特性を実情に近い形で表現可能な解析定数の設定法を検討した。さらに, その方法を適用して試験を実施して, LBB の温度ひび割れ抑制効果を評価した。

## 2. 室内試験

### 2.1 試験概要

試験対象とする特性項目は LBB を使用したコンクリートの水和発熱特性, 力学特性および初期膨張・自己収縮特性とし, 一部の項目に関しては BB を使用したコンクリートに対しても比較のために試験を実施した。

#### (1) 試験配合および使用材料

試験に使用するコンクリートの配合は, 表-1 に示す配合とした。なお, 使用材料を同表に併記する。

#### (2) 水和発熱特性試験

目標練上り温度を 20°C±2°C としてコンクリートを作製した後, 気温 20°C 相対湿度 60%RH の環境下において 図-1 に示すような簡易断熱温度上昇試験装置内にコンクリートを打設して容器を密閉し, コンクリートの中心温度を材齢 14 日まで測定した。試験完了後に 3 次元 FEM 非定常熱伝導解析を適用して同定解析を実施し, 断熱温度上昇曲線を同定した。解析モデルを 図-2 に示す。また, 解析に使用した熱特性値を同図に併記する。なお, 試験は LBB, BB 両者に対して実施した。

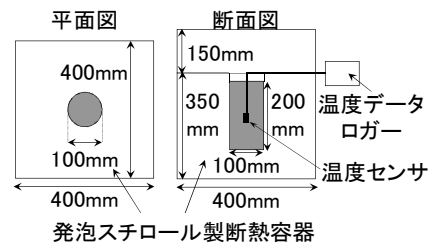


図-1 簡易断熱温度上昇試験装置概要図

表-1 試験に使用したコンクリートの示方配合および使用材料

セメント種類	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							使用材料					
					W	C	S	G1	G2	AE 減水剤	W	C			S	G	AE 減水剤
												スラグ置換率	比表面積	SO <sub>3</sub> 含有量			
LBB	15	4.5	55	45.5	165	300	809	602	401	C×0.8%	水道水	55%	3290cm <sup>2</sup> /g	3.43%	陸砂・君津産	碎石・八王子産 G <sub>max</sub> =20mm	標準形
BB							812	604	402			40~45%	3750cm <sup>2</sup> /g	2.04%			

\*1 飛島建設 (株) 土木事業本部 土木技術部 設計グループ 工修 (正会員)

\*2 飛島建設 (株) 土木事業本部 土木技術部 設計グループ

\*3 飛島建設 (株) 土木事業本部 土木技術部 設計グループ課長 (正会員)

### (3) 力学特性試験

力学特性として表-2 に示す項目に対して試験を実施した。試験材齢は 5, 7, 28 日とし、供試体は試験材齢まで標準水中養生 (20℃) にて養生した。なお、BB に対しては圧縮強度試験のみ実施した。

### (4) 初期膨張・自己収縮特性試験

LBB の特性を実情に近い形で解析に取り込むためには、初期膨張・自己収縮特性を適切に考慮する必要があると考えられる。初期膨張・自己収縮の温度依存性の考慮方法としては有効材齢の関数として扱う方法など種々のものがあるが、本研究では、後述するようにいくつかの温度毎に整理された一定コンクリート温度下における初期膨張・自己収縮データを基にして、ひずみ増分を重ね合わせて温度履歴に応じた初期膨張・自己収縮挙動を考慮する方法を検討することとした。これに関して、一定コンクリート温度下における初期膨張・自己収縮変化を測定するには、水和発熱による温度上昇、コンクリート温度が静置する環境温度に一致して安定するまでの時間および断面内の温度差分布による内部応力の影響などを極力小さくするのがよいと判断した。

図-3 は、膨張・収縮ひずみ測定試験に多く利用される 10×10×40cm の供試体 (以後「一般供試体」と示す) と供試体厚さを 20mm と薄くした薄板形状供試体 (2×10×40cm)<sup>3)</sup> に対して 3 次元 FEM 非定常熱伝導解析を実施して得られた供試体の温度変化予測例である。本図によれば、薄板形状供試体を使用した場合には一般供試体を用いた場合に比較して、水和発熱による温度上昇がより小さく、コンクリート温度が安定する時間がより短い。また、断面内温度差もより小さいことが分かる。このことより、本研究においては初期膨張・自己収縮ひずみを薄板形状供試体を用いて測定することとした。

供試体は試験水準毎に 2 体ずつ作製し、1 体には埋設型ひずみゲージ (寸法 φ4×70mm (標点距離 60mm), 剛性 2,500N/mm<sup>2</sup>), もう 1 体には温度センサを図-4 に示すように供試体断面中央部に設置した。なお、ひずみゲージを設置した供試体については、材齢初期の膨張収縮挙動を拘束しないように、型枠内面にテフロンシートを貼り付け、長手方向両端部には緩衝材を設置した上でコンクリートを打設し作製した。コンクリートのひずみおよび温度は、型枠を含む供試体全周を塩化ビニリデンシート (ラップ) で覆い封緘養生を継続した材齢 7 日までの期間 (本試験においては材齢 7 日以降においてラップを外して別途、乾燥収縮過程でのひずみ測定を実施した。この結果については、文献 4) に示す) においてロガーにより 1 時間ピッチで計測した。試験水準は、目標コンクリート安定温度 20℃, 30℃および 50℃の三水準とし、水準 20℃は目標練上り温度 20℃の供試体を 20℃の環境

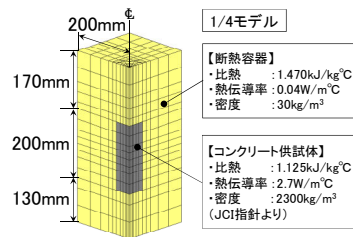


図-2 解析モデル図

表-2 力学特性試験項目および準拠試験規格

試験項目	準拠試験規格
圧縮強度	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」
引張強度	JIS A 1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」
静弾性係数	JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」

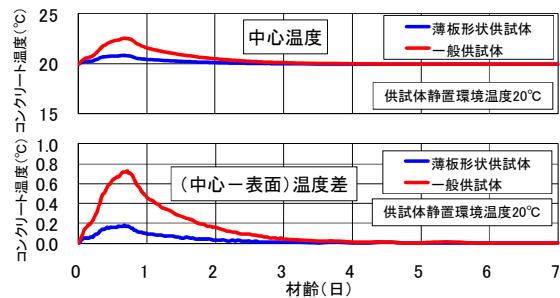


図-3 供試体温度変化予測例

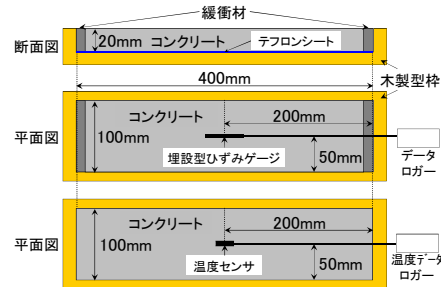


図-4 薄板形状供試体概要図

下に、水準 30℃は同 30℃の供試体を 30℃の環境下に、水準 50℃は同 30℃の供試体を 50℃の環境下に静置して計測を実施した。

## 2.2 室内試験結果および特性の解析への考慮法の検討

### (1) 水和発熱特性 (熱特性)

図-5 に同定された断熱温度上昇曲線を、図-6 に同定された断熱温度上昇曲線を用いて求めた解析値と試験値の比較図を示す。図-5 に示すように LBB は BB に比較して水和発熱抑制効果が認められる。また同図には、メーカー技術資料<sup>5)</sup> に示される予測式による断熱温度上昇曲線を併記しているが、同定された曲線と技術資料の曲線はほぼ同値である。したがって、本研究で適用した断熱温度上昇特性の求め方は妥当であり、解析にて水和発熱特性を実情に近い形で考慮するためには、簡易断熱温度上昇試験を実施し、その結果を基にして同定した断熱温度上昇曲線を解析に使用することが望ましいと判断される。なお、同定解析において解析値が試験値を良好に表現していることから、LBB に対する温度解析を実施する場合には、図-2 において示した熱特性値 (比熱

表-3 力学特性試験結果一覧

項目	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )			静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )		
	5日	7日	28日	5日	7日	28日	5日	7日	28日
LBB	13.0	13.6	23.7	1.15	1.26	1.98	2.08×10 <sup>4</sup>	2.18×10 <sup>4</sup>	2.41×10 <sup>4</sup>
BB	13.3	16.1	29.6	—	—	—	—	—	—

および熱伝導率)を解析定数として使用しても良いと考えられる。

(2) 力学特性

力学特性試験結果を、表-3に示す。

(a) 圧縮強度

本研究では 20℃環境下での圧縮強度のみを得ており、強度発現の温度依存性を検討するには不十分であるため、温度依存性を考慮しない「2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】」(土木学会 以後「示方書」と示す)に示される圧縮強度推定式を参考にした式(1)を解析に適用することとした。これに対して、表-3に示すように LBBはBBよりも圧縮強度発現が遅いことから、示方書に示されるBBの推定式の係数は適用できないと考えられるため、推定値と試験値がフィッティングするように推定式の係数 a, b を同定した。図-7に同定した係数を用いた圧縮強度推定値と試験値の比較を示す。また、同定した係数 a, b を同図中に併記する。推定値は、試験値を良好に表現していることから、解析実務においては式(1)と同定した係数 a, b を用いて圧縮強度を推定し、解析に考慮すればよいと判断される。ただし、より解析精度を向上させるためには、事前に若材齢も含めて複数材齢において圧縮強度試験を実施し、硬化原点をも考慮した圧縮強度推定式を用いるのが望ましいと思われる。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a + bt} f'_c(28) \quad (1)$$

ここに、 $f'_c(t)$ : 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、t: 材齢 (日)、a, b: セメントの種類に応じた係数、 $f'_c(28)$ : 材齢 28 日における圧縮強度試験値 (N/mm<sup>2</sup>)

(b) 引張強度・静弾性係数

図-8にLBBの圧縮強度と引張強度、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同図には、示方書ならびに「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」(JCI 以後「JCI指針」と示す)に示される推定式による値を併記しているが、引張強度、静弾性係数ともに、示方書による推定値よりもJCI指針による推定値の方が、より精度よく試験値を表現している。したがって、実務解析においてLBBの特性をより実状に近い形で表現するには引張強度および静弾性係数をJCI指針の推定式により推定し、解析に考慮するのがよいと考えられる。

(3) 初期膨張・自己収縮特性

(a) 初期膨張・自己収縮ひずみ測定試験結果

薄板形状供試体を用いて計測したコンクリート温度

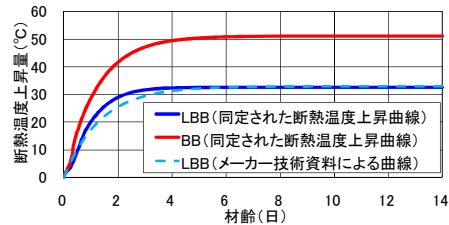


図-5 同定された断熱温度上昇曲線

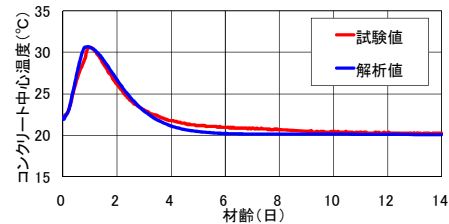


図-6 LBBのコンクリート温度解析値と試験値の比較

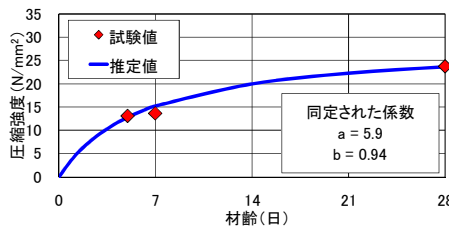


図-7 LBBの圧縮強度試験値と推定値の比較

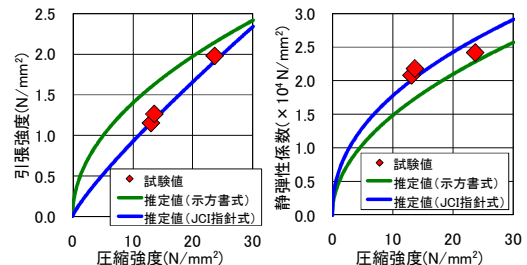


図-8 LBBの圧縮強度と引張強度、静弾性係数の関係

計測結果を図-9に、計測した全ひずみから温度ひずみ成分を除去(JCI規準 JCI-SAS2などを参考に熱膨張係数を 10μ/℃として実施)した「初期膨張+自己収縮」ひずみ(以後「体積ひずみ」と示す)の計測結果を図-10示す。図-9に示すように、各水準とも水和発熱による温度上昇は小さく抑えられ、コンクリート温度は最も長い場合においても材齢1日程度までには安定温度となっている。したがって、2.1(4)に示した薄板形状供試体を使用する目的が満足されていると判断できる。一方、図-10に示すように、いずれの試験水準とも材齢1日程度で膨張ひずみのピークを迎え、それ以降は自己収縮によって収縮側に転じている。また、コンクリート温度が高いほど、膨張ひずみの増加速度・ピーク値および自己収

縮の増加速度が大きくなる傾向が示されており、LBBの初期膨張・自己収縮特性には温度依存性があることが確認される。

(b) 初期膨張特性の解析での考慮方法の検討

本研究では、温度依存性がある初期膨張特性を解析にて考慮する方法として、一定のコンクリート温度毎に膨張ひずみ増加曲線（以後「基本膨張ひずみ曲線」と示す）を設定し、解析計算区間のコンクリート温度に応じた膨張ひずみ増分を求め、これを重ね合わせて温度履歴に応じた膨張ひずみの進行を考慮する方法を検討することとした。基本膨張ひずみ曲線は、JCI 指針に示される膨張ひずみ推定式を準用した式(2)で表現するものとし、各コンクリート安定温度毎のひずみ（材齢1日程度までのひずみ）計測値にフィッティングするように各係数  $a_{ex}$ 、 $b_{ex}$  および  $\varepsilon_{ex,\infty}$  を同定した。図-11 にコンクリート安定温度と同定した各係数の関係を示すが、同定された各係数と安定温度には比較的高い相関性がみられる。したがって本研究で試験したコンクリート温度に対する各係数は、図-11 に示す回帰曲線により求めることができると判断される。図-12 に、図-11 に示す回帰曲線を用いて最終的に求められる代表的なコンクリート温度に対する基本膨張ひずみ曲線を示す。なお、温度履歴に応じた膨張ひずみは、これらの基本膨張ひずみ曲線から膨張ひずみ増分を求め、これを重ね合わせるにより算定できる。膨張ひずみ増分の求め方には、コンクリート温度が一定と仮定できる計算区間を考え、前区間でのコンクリート温度を  $T_1$ 、終了材齢を  $t_n$ 、次区間ではそれぞれ  $T_2$ 、 $t_{n+1}$  として、図-13 に示すように、 $T_2$  の基本膨張ひずみ曲線上の C 点のひずみ（=前区間での最終膨張ひずみ）とその点から  $\Delta t$ （= $t_{n+1}-t_n$ ）材齢後の D 点のひずみまでを次区間の膨張ひずみ増分とする「ひずみ硬化則」と、 $T_2$  の基本膨張ひずみ曲線上の  $t_n$  から  $t_{n+1}$  までの増分を次区間の膨張ひずみ増分とする「時間硬化則」があるが、その選択の検討に関しては後述の(d)に示す。

$$\varepsilon_{ex}(t) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t)^{b_{ex}}\right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{ex}(t)$ ：材齢  $t$  における膨張ひずみ（ $\mu$ ）、 $\varepsilon_{ex,\infty}$ ：膨張ひずみの終局値（ $\mu$ ）、 $a_{ex}$ 、 $b_{ex}$ ：セメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数

(c) 自己収縮特性の解析での考慮方法の検討

図-10 に示すように、材齢1日程度以降の自己収縮卓越領域における自己収縮ひずみの増加の程度はコンクリート安定温度に応じて変化している。自己収縮ひずみ増加速度（最大膨張ひずみと材齢7日におけるひずみ差を材齢で除した値）とコンクリート安定温度との関係を図-14 に示すが、自己収縮ひずみ増加速度とコンクリート安定温度には比較的高い相関性があることが確認で

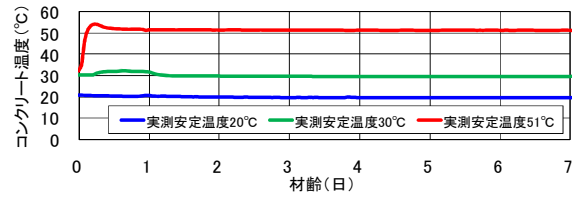


図-9 コンクリート温度計測結果

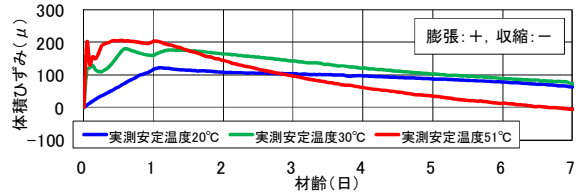


図-10 体積ひずみ計測結果

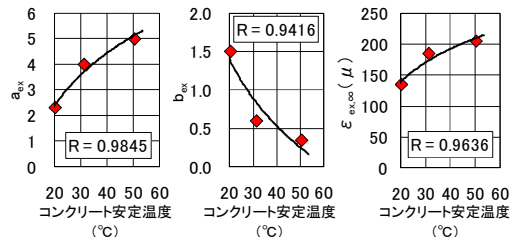


図-11 同定した各係数  $a_{ex}$ 、 $b_{ex}$ 、 $\varepsilon_{ex,\infty}$

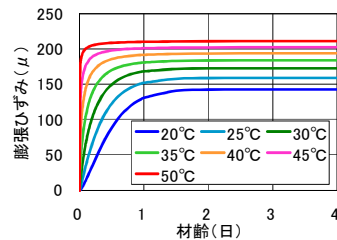


図-12 代表的なコンクリート温度に対する基本膨張ひずみ曲線

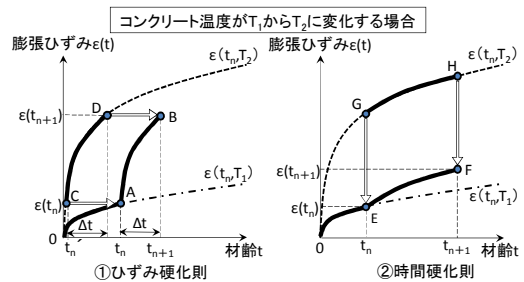


図-13 温度履歴下での膨張ひずみ算定方法

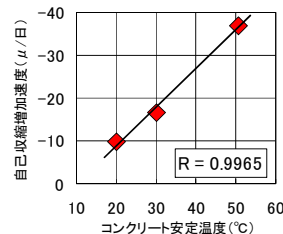


図-14 コンクリート安定温度と自己収縮ひずみ増加速度の関係

きる。したがって実務解析においては、材齢1日以降においては解析ステップ間のコンクリート温度から図-14 に示す回帰曲線により自己収縮ひずみ増加速度を求め、これに解析ステップ間の増分時間を乗算して自己収

縮ひずみ増分を求めて解析に取り込むことにより、材齢1～7日のLBBの自己収縮特性を比較的よい精度で考慮することが可能と判断される。

(d) 初期膨張・自己収縮特性の温度依存性考慮方法の妥当性について

前記(b)および(c)に示したLBBの初期膨張・自己収縮特性の解析への考慮方法の妥当性を検討するため、薄板形状供試体を3次元FEMモデルにてモデル化し、(b)および(c)に示した考慮方法を適用して、温度応力解析を実施した。図-15にコンクリート温度が30℃から51℃に変化した供試体での、体積ひずみの試験値と解析値の比較を示す。初期膨張ひずみの算定方法に「ひずみ硬化則」を適用した場合の解析値と試験値は、良好な一致性を示しており、検討した初期膨張・自己収縮特性の解析での考慮方法は妥当であり、初期膨張ひずみの算定方法としては「ひずみ硬化則」が適切であると判断される。

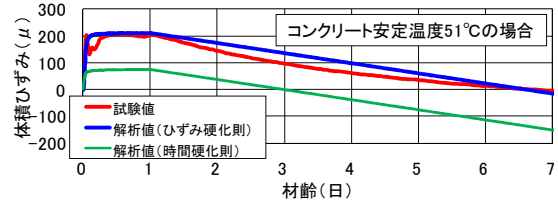


図-15 体積ひずみの試験値と解析値の比較

表-4 解析条件一覧

解析条件項目	LBB	BB
施工場所/打設時期	東京/春打設 (壁部4月)	
解析期間	壁打設後1年間	
壁部打設温度	22℃ (打設日外気温+5℃)	
養生条件	壁側面：木製型枠(熱伝達率8W/m <sup>2</sup> °C)7日間設置の後、養生なし(熱伝達率14W/m <sup>2</sup> °C) 壁側面[保温養生]：保温養生(熱伝達率6W/m <sup>2</sup> °Cを想定)7日間設置の後、養生なし(熱伝達率14W/m <sup>2</sup> °C) 壁天端：7日間湛水養生(熱伝達率8W/m <sup>2</sup> °C)の後、養生なし(熱伝達率14W/m <sup>2</sup> °C)	
熱伝導率	2.7W/m°C (JCI 指針一般値の平均値)	
比熱	1.125kJ/kg°C (JCI 指針一般値の平均値)	
密度	2300kg/m <sup>3</sup> (一般値)	
ポアゾン比	0.2 (JCI 指針一般値)	
熱膨張係数	10 μ/°C (2.2(3)(a)において、計測した全ひずみから温度ひずみ成分を除去するために用いた値)	10 μ/°C (LBBとの熱膨張係数の差による影響は考えずLBBと同一とした)
断熱温度上昇特性	室内試験を基に同定した各断熱温度上昇曲線	
圧縮強度発現特性	式(1)および室内試験を基に同定した各係数を適用し、式(1)の材齢 t を便宜的に有効材齢 t <sub>e</sub> に置き換えることにより温度依存性を考慮	JCI 指針に示される推定式を適用し、有効材齢により温度依存性を考慮
引張強度特性	JCI 指針に示される推定式	
静弾性係数特性	JCI 指針に示される推定式	
クリープ特性	JCI 指針に示される静弾性係数補正係数の適用	
初期膨張特性	室内試験を基に求めた基本膨張ひずみ曲線を適用し、ひずみ硬化則により温度依存性を考慮	考慮しない
自己収縮特性	室内試験を基に求めたコンクリート温度に応じた自己収縮ひずみ増加速度	JCI 指針に示される推定式

3. 温度応力解析による LBB の温度ひび割れ抑制効果の評価

3.1 解析条件

基礎版上に構築される厚さ 1m、誘発目地間隔 4m、高さ 3m の壁状構造物に LBB および BB をそれぞれ適用した場合を想定して、3次元 FEM 温度応力解析を実施し、両者の壁部解析結果を比較することにより LBB の温度ひび割れ抑制効果の評価した。なお、LBB に関しては BB に比べて、初期膨張の影響により内部拘束ひび割れ発生の確率が高まる可能性が考えられたため、基本解析条件である木製型枠よりも熱伝達率を低下させた保温養生を併用して、壁内部と表面部の温度差低減を図った場合についても解析を実施した。使用されるコンクリートの配合は、本研究の室内試験で使用したコンクリートの配合(表-1 参照)と同様とし、また打設温度は水和発熱特性試験時の練上り温度と同様であると仮定した。LBB の水和発熱特性、強度特性および初期膨張・自己収縮特性は本研究での室内試験値および考慮方法を適用して解析した。圧縮強度発現特性については、ここでは温度依存性を考慮するために、式(1)の材齢 t を便宜的に有効材齢 t<sub>e</sub> に置き換えた。また、2.2(3)(c)に示した自己収縮の考慮方法では室内試験実施の都合から、材齢7日までの考慮方法のみを示した。本解析では材齢7日以降の自己収縮に関しては、メーカーの技術資料<sup>5)</sup>のデータを基にして自己収縮ひずみを増加速度を、材齢7～21日-2.5(μ/日)、材齢21～56日を-1.05(μ/日)と設定した。また、BBの自己収縮はJCI指針の推定式によったが、自己収縮推定値の増加は材齢56日程度でほぼ収束したことから、これを参考としてLBBの自己収縮考慮を材齢56日までとしても問題はないと考えた。その他の解析条

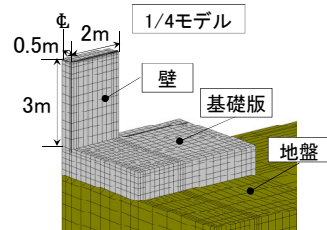


図-16 解析モデル

表-5 壁部解析値一覧

	経験最高温度発生点		経験最小ひび割れ指数発生点			
	壁中央部		壁内部		壁表面部	
	経験最高温度(°C)	経験最小ひび割れ指数	経験最高温度(°C)	経験最小ひび割れ指数	経験最高温度(°C)	経験最小ひび割れ指数
LBB	41.25	2.06	35.92	1.20	27.91	1.33
LBB (保温養生)	42.30	2.06	36.41	1.17	29.46	1.39
BB	50.66	1.77	43.03	0.98	31.98	1.86

件を表-4に示すが、原則的にJCI指針に準拠した。解析モデルを図-16に示す。

3.2 解析結果および温度ひび割れ抑制効果の評価

表-5に壁各部の解析結果を示す。保温養生を施した場合でも、LBBはBBに比べ経験最高温度が8℃程度小さくなった。これはLBBの水和発熱抑制効果によるものといえる。壁内部の経験最小ひび割れ指数に着目すると、LBBはBBよりも最小ひび割れ指数が大きな値となり、「温度ひび割れ発生確率50%」とされる1.0を上回る結果となった。これは図-17に示す壁内部の経験最小ひび

割れ指数発生点のひずみ履歴が示すように LBB では水和発熱抑制効果によるコンクリート最高温度の低下に伴う温度ひずみ降下量の低減と、初期膨張が以後の自己収縮ひずみを補償する効果により、全収縮ひずみ量が小さくなり発生引張応力が軽減したことによるものと判断される。一方、壁表面部のひび割れ指数に着目すると、LBB については最小ひび割れ指数 1.0 を確保するものの、BB よりも小さい値となった。これは、材齢初期の温度内部拘束応力が大きい時期に、LBB では温度依存性がある初期膨張により、図-18 に示すような、表面部に引張応力を増加させる体積ひずみ差が発生することで、BB よりも大きな内部拘束引張応力が生じたことによると判断される。しかし、保温養生を行うことで指数が向上することから、適切な保温養生の実施によって、ひび割れ発生確率を低減することが可能であると判断される。

#### 4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 室内試験によって以下が確認された。
  - ・LBB は BB に比較して高い水和発熱抑制効果がある。
  - ・LBB の初期膨張・自己収縮特性には温度依存性がある。
- (2) 室内試験結果を基にして、LBB の特性を実情に近い形で表現可能な解析定数の設定法を検討した結果、以下の方法によれば、良好な精度での解析が可能であると判断した。
  - ・水和発熱特性は、簡易断熱温度上昇試験を実施した上で、試験結果を基にして同定した断熱温度上昇曲線により考慮する。
  - ・圧縮強度発現は BB よりも遅いことから、事前に若材齢も含めた複数材齢において圧縮強度試験を実施し、試験結果を基にして圧縮強度推定式を設定し、その推定式を圧縮強度発現特性として解析に使用する。
  - ・引張強度および静弾性係数は、JCI 指針に示される推定式を用いて推定する。
  - ・初期膨張特性は、コンクリート温度毎に設定した基本膨張ひずみ曲線より求めた膨張ひずみ増分を、「ひずみ硬化則」を適用して算定する方法により考慮する。
  - ・材齢 7 日までの自己収縮特性は、コンクリート温度の関数として表した自己収縮ひずみ増加速度に、解析ステップ間の増分時間を乗算して求めた自己収縮ひずみ増分により考慮する。
- (3) 上記(2)に示す方法で LBB の特性を考慮した温度応力解析結果から、LBB の温度ひび割れ抑制効果を以下のように評価した。
  - ・LBB は、水和発熱抑制効果および初期膨張により外部拘束による温度ひび割れに対して良好なひび割れ抑制効果を有する。

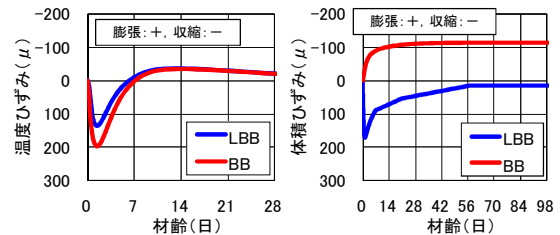


図-17 壁内部の経験最小ひび割れ指数発生点における解析ひずみ履歴

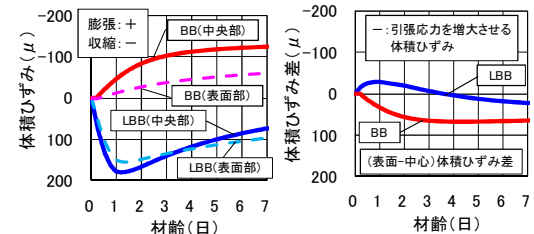


図-18 壁中心部と表面部の解析体積ひずみ履歴

- ・LBB は、断面内温度差による温度ひずみ差に、温度依存性のある初期膨張による体積ひずみ差が加わることで、BB よりも内部拘束応力による表面ひび割れ発生の確率が高まる。しかしながら、適切な保温養生を実施することで温度内部拘束を抑制し、表面ひび割れ発生確率を低減できる。

本研究では、室内試験およびその結果を用いた試験解析を通じて LBB の評価を行ったが、実構造での検証は実施していない。したがって、実構造での計測等によって本研究結果の妥当性確認等を実施する必要があると判断される。また、LBB の材齢 7 日以降の自己収縮挙動、若材齢特性(硬化原点など)や強度発現の温度依存性などに関する調査や乾燥収縮を含めた収縮ひび割れに対する抑制効果検討についても、継続研究が必要と考えている。

謝辞：本研究において、新日鐵高炉セメント(株)様より、LBB の試料や技術資料の提供など多大なご尽力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 曾根徳明, 山崎満雄, 古田誠剛：低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの諸特性と温度ひび割れ抑止効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.827-832, 1991.6
- 2) 大友 健ほか：収縮を抑制した高炉セメント B 種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用, 大成建設技術センター報, 第 38 号, 2005
- 3) 寺澤正人, 田畑美紀, 川里麻莉子, 鈴木基行：薄板形状供試体を用いたコンクリートの乾燥収縮特性測定試験, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-146, 2010.9
- 4) 田畑美紀, 川里麻莉子, 佐藤友厚, 寺澤正人：低発熱・低収縮型高炉セメント B 種の膨張収縮特性把握試験, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V-147, 2010.9
- 5) 新日鐵高炉セメント株式会社：技術資料 新日鐵低熱高炉セメント B 種