

# 低発熱・低収縮型高炉セメントB種の初期ひび割れ低減効果

## Effects for Reducing Initial Cracking

by Low-heat and Low-shrinkage Type Portland Blast Furnace Slag Cement Class-B

田畑美紀<sup>\*1</sup> 寺澤正人<sup>\*1</sup>

Miki Tabata Masato Terazawa

佐藤友厚<sup>\*1</sup> 川里麻莉子<sup>\*1</sup>

Tomohiro Satou Mariko Kawasato

【キーワード】 低発熱・低収縮型高炉セメントB種 初期ひび割れ 膨張ひずみ 自己収縮ひずみ 温度依存性

### 1. 研究の目的と概要

低発熱・低収縮型高炉セメントB種（以後「LBB」と呼ぶ）は、高炉セメントB種（以後「BB」と呼ぶ）のJIS規格範囲内で、高炉スラグ置換率の増加と比表面積の減少を行うことで水和発熱を低減し、さらにSO<sub>3</sub>含有量を増加して初期膨張を増大させることで収縮を低減させる材料である。当社の適用事例においても良好な結果が得られているように、初期ひび割れ低減効果が期待できることや、環境負荷低減型材料であるため、近年では適用例が増えつつある。一般にコンクリートの膨張収縮特性には温度依存性があるとされるが、LBBの膨張収縮特性における温度依存性に関する研究事例や、その特性を考慮した温度応力解析による効果の検証事例は少ない。

本研究では、LBBの初期ひび割れ低減効果を検証することを目的として、はじめに数種の温度環境下においてLBBの膨張収縮特性把握試験を実施した。さらにその結果を基に初期膨張特性と自己収縮特性の温度依存性を定式化した上で、温度応力解析を実施した。

### 2. 膨張収縮特性把握試験<sup>1)</sup>

#### 2.1 試験法概要

一般的に膨張収縮ひずみの測定には10×10×40cmの供試体がいられるが、この供試体寸法では断面内の温度分布が一定ではないと考えられる。これに対して、断面内の温度分布差をより小さくするために2×10×40cmの薄板形状供試体<sup>2)</sup>を使用して、LBBの初期膨張特性と自己収縮特性における温度依存性を把握することとした。試験は、20、30および50℃のコンクリート温度環境下で実施することとし、ひずみの測定は、供試体断面中央、表面から深さ10mmの位置に配置したモールドゲージ（標点距離60mm、直径4mm）を用いて1時間ピッチで自動計測した。コンクリートの温度は、ひずみ測定位置において測定した。試験に供するコンクリートの配合は、水セメント比55%、単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>、単位水量165kg/m<sup>3</sup>とした。なお、材料として、LBB（高炉スラグ置換率55%、比表面積3290cm<sup>2</sup>/g、SO<sub>3</sub>含有量3.43%）、陸砂（君津産）、砕石（八王子産）、水道水、AE

減水剤標準形を使用した。

### 2.2 試験結果

計測した全ひずみから、コンクリートの熱膨張係数を10μ/Cと仮定して、温度ひずみを除去した「初期膨張+自己収縮」ひずみ測定結果を図-1に示す。本図から、①いずれのコンクリート温度においても、材齢1日程度において初期膨張のピークを迎え、それ以降は自己収縮により収縮側にひずみが増加する。

②最大膨張ひずみ（膨張ひずみのピーク値）、膨張速度および自己収縮増加速度には、コンクリート温度毎に値が異なる「温度依存性」がある。

の2点が確認できる。

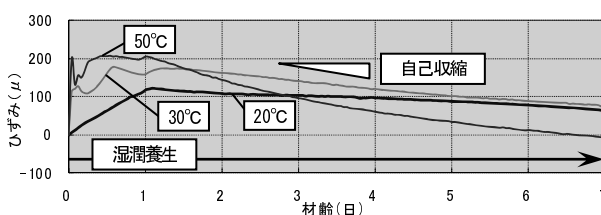


図-1 「初期膨張+自己収縮」ひずみ計測試験結果（膨張：+、収縮：-）

### 3. 膨張収縮特性の定式化

LBBの初期ひび割れ低減効果を解析的に検証するために、試験結果を基に膨張収縮特性の定式化を行った。

#### 3.1 初期膨張特性の定式化

初期膨張特性は、

①JCI指針<sup>3)</sup>の参考資料に提示されている膨張材の膨張ひずみ予測式を参考にして、LBBの初期膨張過程を式(1)で表す。そして、試験で得られた材齢1日までの初期膨張過程にフィッティングするように、試験したコンクリート温度毎に式(1)の各係数を求める。

②求められた式(1)の各係数とコンクリート温度間の関係を対数回帰によって求める。

③上記①、②によって任意のコンクリート温度に対する各係数を求めて、「初期膨張ひずみ曲線」を設定する。という手順で定式化した。本手順によって設定した「初期膨張ひずみ曲線」を図-2に示す。

$$\varepsilon_{ex}(t) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t - t_{ex,0})^{b_{ex}}\right\} \right] \quad \text{式(1)}$$

$\varepsilon_{ex}(t)$  : 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 ( $\mu$ )  
 $a_{ex}, b_{ex}$  : 膨張ひずみの進行影響係数  
 $t_{ex,0}$  : 膨張開始材齢 (日) → 試験結果より 0 日とする

### 3.2 自己収縮特性の定式化

試験により得られた材齢 1 日以降の LBB の自己収縮増加速度とコンクリート温度の関係を図-3 に示す。両者は高い相関性をもって線形関係にあることが認められることから、LBB の自己収縮特性を以下の式(2)および式(3)によって表現するものとして定式化した。

$$\text{材齢 1 日まで: } \Delta\varepsilon/t = 0 \quad \text{式(2)}$$

$$\text{材齢 1~7 日: } \Delta\varepsilon/t = -0.9171 \times T_c + 9.4954 \quad \text{式(3)}$$

$\Delta\varepsilon/t$  : 自己収縮増加速度 ( $\mu$ /日)

$T_c$  : コンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

3.1 に示した方法によって設定した「初期膨張ひずみ曲線」と 3.2 に示した自己収縮予測式によって求められる「初期膨張+自己収縮」ひずみ予測計算値と、試験値を比較した例を図-4 に示す。計算値は試験値を良好に表現していることから、ここで行った定式化の妥当性が確認される。

### 4. 解析による初期ひび割れ低減効果の検証

LBB の初期膨張特性と自己収縮特性の温度依存性を 3. で示した定式化により考慮して 3 次元 FEM 温度応力解析を実施し、その解析結果を BB の解析結果と比較することで、LBB の初期ひび割れ低減効果を検証した。

解析は、

- ①解析対象構造を、厚さ 1.0m のスラブに打設される、厚さ 1.0m、高さ 3.0m、誘発目地間隔 4.0m の壁体とする。
- ②LBB および BB の配合は、試験に供した配合

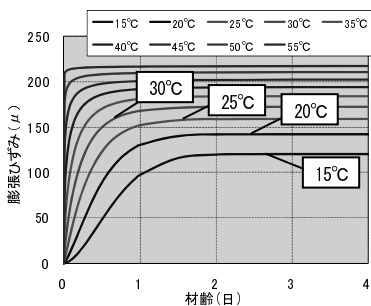


図-2 初期膨張ひずみ曲線

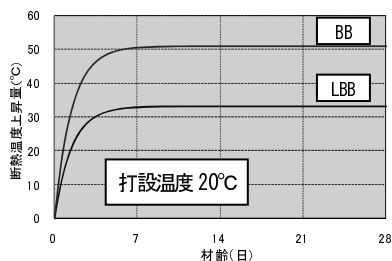


図-5 解析用断熱温度上昇曲線

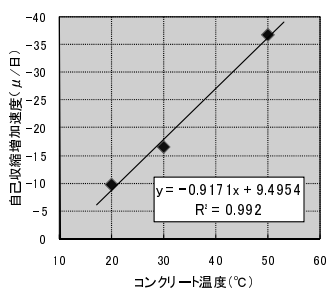


図-3 自己収縮増加速度とコンクリート温度の関係

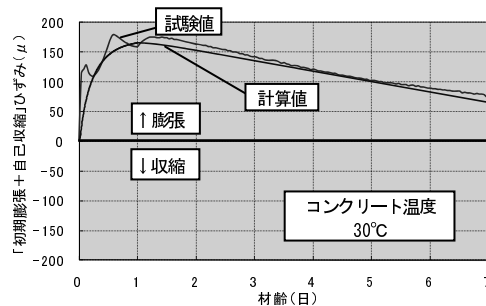


図-4 定式化の妥当性検証例

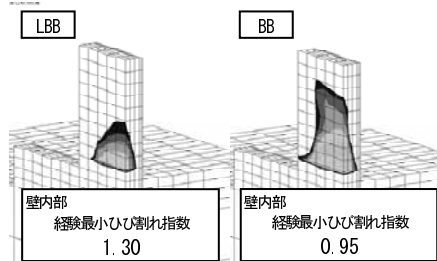


図-6 LBB と BB の経験最小ひび割れ指数分布の比較 (1/4 モデル表示)

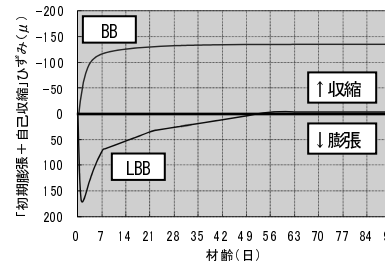


図-7 経験最小ひび割れ指数発生点の「初期膨張+自己収縮」

( $W/C=55\%$ ,  $C=300\text{kg/m}^3$ ) と同値とする。

- ③LBB の断熱温度上昇量は、別途実施した簡易断熱温度上昇試験結果によって妥当と評価したメーカー資料式により、BB は示方書<sup>4)</sup>掲載式により算定する(図-5)。
- ④LBB の圧縮強度発現には別途実施した圧縮強度試験結果を反映する。BB は示方書<sup>4)</sup>掲載式にて算定する。両者とも強度算定において温度依存性を考慮する。
- ⑤BB の自己収縮ひずみは JCI 指針<sup>3)</sup>掲載式にて算定することとし、その他は示方書<sup>4)</sup>に準拠して実施した。

解析結果の例として、春打設(打設温度  $20^{\circ}\text{C}$  想定)時の経験最小ひび割れ指数分布を図-6 に示す。LBB では、外部拘束によって壁内部に発生する最小ひび割れ指数が BB に比較して大きく改善され、初期ひび割れ低減効果が高いことが確認できる。これは水和発熱が低く、温度応力が小さいことに加え、図-7 に示すように LBB の初期膨張が、自己収縮による収縮側へのひずみ増加を圧縮側へと補償することによるものであると判断される。

### 5. まとめ

LBB のひび割れ低減効果に関して以下の知見を得た。

- 1) LBB の膨張収縮特性の温度依存性を定式化し、試験値との比較によってその妥当性を確認した。
- 2) 膨張収縮特性を考慮した温度応力解析により、LBB の初期ひび割れ低減効果が確認された。

### 【参考文献】

- 1) 田畑 昭夫: 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.
- 2) 寺澤 昭夫: 薄板形状供試体を用いたコンクリートの収縮特性測定試験の試行, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, V-444, 2009.9.
- 3) 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, 2008.11.
- 4) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2007.3.