

# 論文 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動の予測に関する検討

谷田貝 敦\*1・二戸 信和\*2・宮澤 伸吾\*3

**要旨:** 低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、初期の材齢における自己収縮で膨張ひずみを示す。従来考慮されなかった膨張成分の自己収縮の予測式について膨張成分を考慮して低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動の予測を検討した。低発熱・収縮抑制型高炉セメントの収縮速度の係数は低熱ポルトランドセメントの係数と一致した。膨張の計算値は材齢 1.5 日で最大となり、最大の膨張ひずみは  $80\sim 100\times 10^{-6}$  程度となった。自己収縮と膨張ひずみを重ね合わせにより低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動を近似できた。

**キーワード:** 自己収縮, 膨張ひずみ, 予測式, 高炉セメント, マスコンクリート

## 1. はじめに

マスコンクリート構造物において温度ひび割れを抑制することは必要とされており、ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合した低発熱セメントの普及が拡大している。しかし、高炉セメントを用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントより断熱温度上昇量が同等または高くなる場合がある。

高炉スラグ微粉末の比表面積の低下と高炉セメントの  $\text{SO}_3$  量の増加により、高炉セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量と自己収縮の抑制が可能となった<sup>1)</sup>。これらの知見を用いて、高炉セメント B 種の JIS 規格の範囲内で化学成分と比表面積を調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメントを提案した<sup>2)</sup>。また、低発熱・収縮抑制型高炉セメントを実構造物に適用して、そのひび割れ低減効果について実証してきた<sup>3)</sup>。

一般にマスコンクリート構造物では、温度応力解析により事前に温度ひび割れの予測を行うことが一般的であり、温度応力解析では自己収縮の影響を考慮して解析を行う。低発熱・収縮抑制型高炉セメントの自己収縮は初期の材齢で膨張側の値を示す<sup>4)</sup>。しかし、自己収縮の予測式として代表的なものに JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>5)</sup>があるが、この予測式においては初期の材齢で膨張することが考慮されていない。したがって、条件によっては温度ひび割れの予測を正確に行えない場合が生じる。

そこで、本研究では、これまで把握してきた膨張および自己収縮ひずみのデータを用いて JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>5)</sup>に示される既存式を参考にして膨張成分を考慮した予測式の構築を目的とし、低発熱・

収縮抑制型高炉セメントの膨張および自己収縮の挙動評価を行った。

## 2. 検討プロセス

### 2.1 実験方法

#### (1) 自己収縮の測定方法

自己収縮試験は JCI 自己収縮研究委員会の方法に従って行った。ひずみの測定は埋込型ひずみ計（弾性係数： $40\text{N/mm}^2$ ）により行った。

#### (2) 使用材料及び配合

使用したセメントは JIS 規格範囲内において化学成分及び比表面積を調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメント（比表面積： $3380\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{SO}_3$  量：3.8%、スラグ量：58%）である。対象の水セメント比は、40%、45%、50%および 55%であり全 72 個のデータについて検討を行った。また、対象のコンクリートは、混和剤に AE 減水剤を使用し、細骨材には、川砂、山砂、硬質砂岩砕砂または石灰石砕砂を使用し、粗骨材は、石灰石砕砂または硬質砂岩砕砂を用いた。なお、本試験の範囲では、骨材の岩種がコンクリートの膨張・収縮挙動に及ぼす影響は明確に認められなかったため、体積変化の検討は、岩種による区別せずに行った。

#### (3) 環境温度

コンクリートの膨張および自己収縮ひずみの測定は、 $20^\circ\text{C}$ 一定の環境下と、最高温度が  $40^\circ\text{C}$ または  $60^\circ\text{C}$ となるように温度履歴を想定したマスコンクリート相当の環境下で行った。温度ひずみの補正は、熱膨張係数の実測値がある場合は実測値を、実測値がない場合は  $10\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用いて行った。

\*1 (株) デイ・シイ 技術センター 材料研究開発課 修士 (工学) (正会員)

\*2 (株) デイ・シイ 技術センター 材料研究開発課係長 博士 (工学) (正会員)

\*3 足利工業大学 工学部 都市環境工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

## 2.2 推定方法

### (1) 推定方法の概念

低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、SO<sub>3</sub>量が多く、エトリンガイトの生成により初期材齢において膨張ひずみが生じる。また、JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>5)</sup> (JCI 指針) において、膨張コンクリートの温度応力解析に用いるひずみは、図-1 に示す模式図のように、自己収縮と膨張ひずみを重ね合わせて用いている (式(1))。低発熱・収縮抑制型高炉セメントについても膨張コンクリートと同様に、膨張ひずみと自己収縮ひずみをそれぞれ定式化する。すなわち、膨張コンクリートの膨張ひずみ予測式 (式(2)) および JCI 指針の自己収縮ひずみ予測式 (式(6)) を用いることとし、式中の諸係数を実験データに基づいて決定した。なお、JCI 指針に示される膨張コンクリートの膨張ひずみの予測式においては、膨張ひずみの終局値  $\varepsilon_{ex,\infty}$  及び膨張ひずみの進行特性を表す係数  $a_{ex}$ 、 $b_{ex}$  は、セメントの種類で決定されている。しかし、3. 結果および考察で述べるが、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張ひずみの予測においては水セメント比との関係で整理する必要が生じたため、式 (3) から式 (5) を構築することとした。

$$\varepsilon_{total}(t_e) = \varepsilon_{ex}(t_e) + \varepsilon_{sh}(t_e) \quad (1)$$

ここに  $\varepsilon_{total}$ : 有効材齢  $t_e$  の膨張および自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{ex}(t_e)$ : 有効材齢  $t_e$  の膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$\varepsilon_{sh}(t_e)$ : 有効材齢  $t_e$  の自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}\right\}\right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ex,\infty} = \alpha_1 \exp\{\beta_1(W/C)\} \quad (3)$$

$$a_{ex} = \alpha_2 \exp\{\beta_2(W/C)\} \quad (4)$$

$$b_{ex} = \alpha_3 \exp\{\beta_3(W/C)\} \quad (5)$$

ここに  $\varepsilon_{ex,\infty}$ : 膨張ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )

$a_{ex}$ 、 $b_{ex}$ : 膨張ひずみの進行特性を表す係数

$t_{ex,0}$ : 膨張開始時点の有効材齢 ( $t_{ex,0}=0.4$ )

$\alpha_i$ 、 $\beta_i$ : 定数 ( $i=1$  から 3)

W/C: 水セメント比

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \cdot \varepsilon_{sh,\infty} \cdot \left[ 1 - \exp\left\{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}\right\}\right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_{sh,\infty} = \alpha_4 \exp\{\beta_4(W/C)\} \quad (7)$$

$$a_{sh} = \alpha_5 \exp\{\beta_5(W/C)\} \quad (8)$$

$$b_{sh} = \alpha_6 \exp\{\beta_6(W/C)\} \quad (9)$$

ここに  $\eta_c$ : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数 ( $\eta_c=1.0$ )

$\varepsilon_{sh,\infty}$ : 自己収縮ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )

$t_{e,set}$ : 凝結の始発材齢 ( $t_{e,set}=0.4$  日)

$a_{sh}$ 、 $b_{sh}$ : 自己収縮の進行特性を表す係数

$\alpha_i$ 、 $\beta_i$ : 定数 ( $i=4$  から 6)

### (2) 膨張ひずみの終局値の決定

膨張ひずみの終局値  $\varepsilon_{ex,\infty}$  は、最大膨張材齢時において、実験値の最大膨張ひずみとなるように調整し比較検討した。なお、計算値の最大膨張材齢は図-2 に示す最大膨張材齢のヒストグラムより  $t_e=1.5$  日とした。

### (3) 膨張速度に関する係数の決定

膨張ひずみの速度については、式(4)に示す、膨張ひずみの進行特性を表す係数  $a_{ex}$  および  $b_{ex}$  を変化させ計算値と実験値との膨張速度が近くなるように決定した。このとき、 $t_e=1.5$  日のひずみを 1.00 とした場合を膨張比として、実験値と計算値を比較検討した。

### (4) 自己収縮の終局値の決定

自己収縮の終局値  $\varepsilon_{sh,\infty}$  は、材齢 91 日における実験値と計算値を比較して決定した。なお、材齢 91 日で評価を行った理由は、91 日が実験値の最終測定材齢であることが多いためである。

### (5) 自己収縮の速度に関する係数の決定

自己収縮の速度については、式 (8) および式 (9) において、進行特性を表す係数に低熱ポルトランドセメント ( $a_{sh}: \alpha_5=2.4$ ,  $\beta_5=-6.5$ ,  $b_{sh}: \alpha_6=0.12$ ,  $\beta_6=2.7$ )<sup>5)</sup> および高炉セメント B 種 ( $a_{sh}: \alpha_5=3.7$ ,  $\beta_5=-6.8$ ,  $b_{sh}: \alpha_6=0.25$ ,  $\beta_6=2.5$ )<sup>5)</sup> を用いた場合の検討を行った。このとき、材齢 91 日における自己収縮ひずみを 1.00 とした場合の自己収縮比により、実験値と計算値を比較検討した。なお、実験値は最大膨張材齢以降の収縮ひずみを、計算値は  $t_e=1.5$  日以降の収縮ひずみで比較検討を行った。

### (6) 自己収縮の終局値の温度依存性

自己収縮の終局値の温度依存性は、最高温度が 20°C、40°C および 60°C となる環境下において同一配合のコンクリートを対象に検討を行った。自己収縮の進行に及ぼす温度の影響は式(5)の有効材齢で評価することとした。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (10)$$

ここに  $t_e$ : 有効材齢

$\Delta t_i$ : 温度が T(°C)である期間の日数

$T_0$ : 1°C

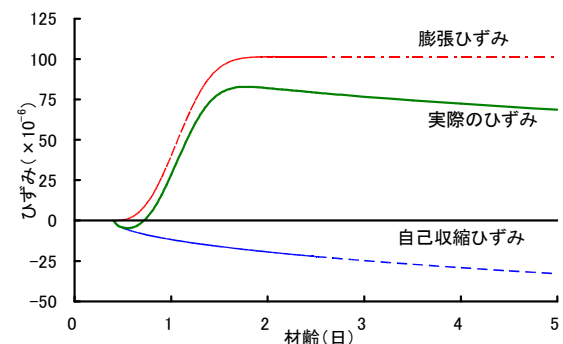


図-1 膨張ひずみと自己収縮ひずみの推定模式図

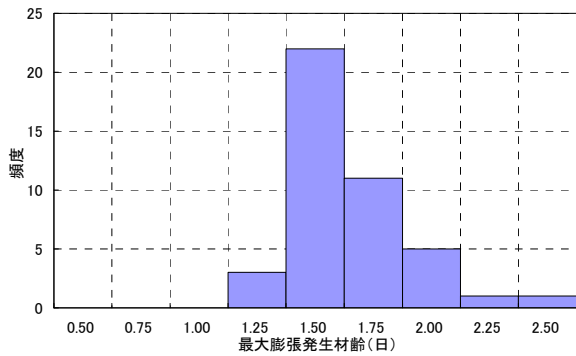


図-2 最大膨張材齢のヒストグラム

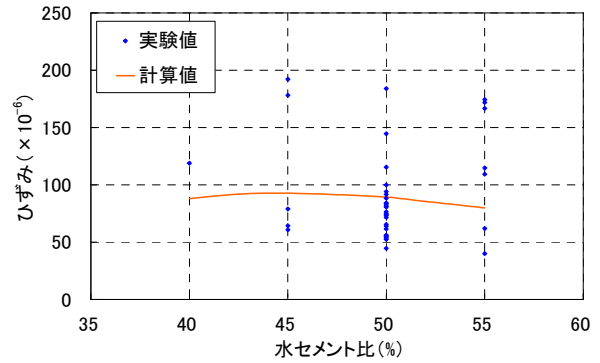


図-3 最大膨張ひずみと水セメント比の関係

### 3. 結果および考察

#### 3.1 膨張ひずみの終局値

2.2 推定方法で示した予測式の各係数を実験値に基づいて決定する。実験値は、膨張と収縮が含まれているため、本検討では、膨張と収縮を重ね合わせた計算値で検討を行った。

図-3 に水セメント比と最大膨張ひずみの関係を示す。また、図-3 には、 $t_e=1.5$  日におけるひずみの計算値を示している。最大膨張材齢におけるひずみの実験値は、 $50\sim 200 \times 10^{-6}$  の膨張ひずみであった。これらの実験値の平均と  $t_e=1.5$  日における計算値が概ね一致するように、膨張ひずみの算定式として式 (3) を用いることとする。このときの式 (3) の係数は  $\alpha_1=590$ 、 $\beta_1=3.2$  となった。

#### 3.2 膨張の速度の検討

図-4 から図-6 に水セメント比 45%、50%および 55% の膨張比の実験値および計算値を示す。実験値は、いずれの水セメント比においても、材齢 1 日から 2 日で最大膨張ひずみが生じており、材齢 1.5 日が最も多い。また、膨張ひずみは、初期にごく少量ではあるが収縮し、その後膨張するケースも存在した。

JCI 指針では、膨張ひずみの進行を表す関数である式 (2) 中の係数  $a_{ex}$  および  $b_{ex}$  はセメントの種類ごとに与えられている。低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張ひずみについては、水セメント比の影響も考慮する必要が認められたので、係数  $a_{ex}$  および  $b_{ex}$  の算定式として式 (4) および式 (5) を用いることとする。このときの式 (4) の係数は  $\alpha_2=29.0$ 、 $\beta_2=4.8$ 、式 (5) の係数  $\alpha_3=0.70$ 、 $\beta_3=2.5$  となった。

#### 3.3 自己収縮の終局値の検討

図-7 に水セメント比と材齢 91 日におけるひずみの実験値を示す。図-7 には、材齢 91 日における計算値も合わせて示す。実験値は、水セメント比が小さくなるに従い収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。これらの実験値の平均値と計算値が材齢 91 日において概ね一致するように、自己収縮ひずみの終局値の算定式として式 (7) を用いることとする。このときの式 (7) の係数は  $\alpha$

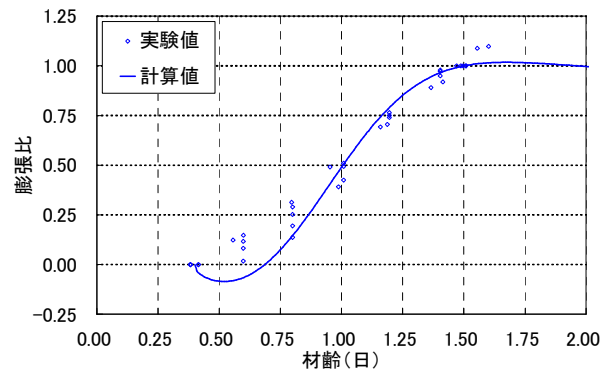


図-4 膨張比 (W/C=45%)

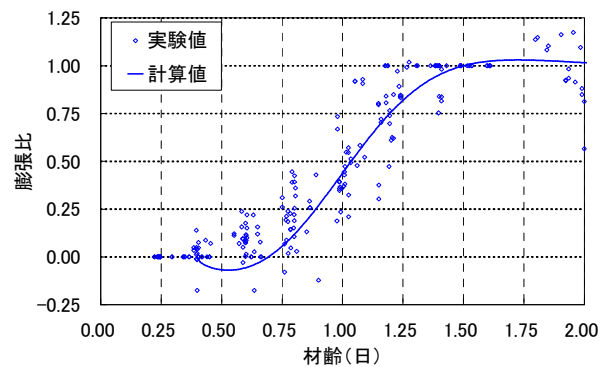


図-5 膨張比 (W/C=50%)

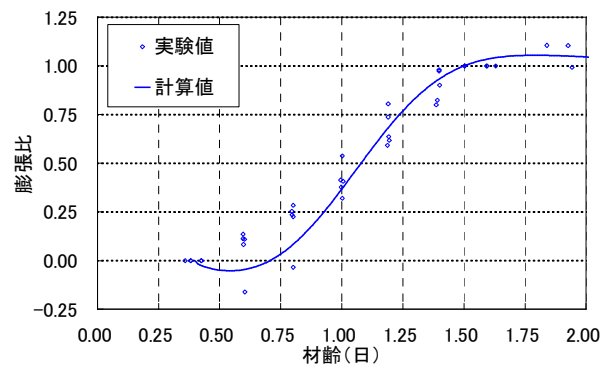


図-6 膨張比 (W/C=55%)

$\alpha_4=2640$ 、 $\beta_4=4.4$  となった。

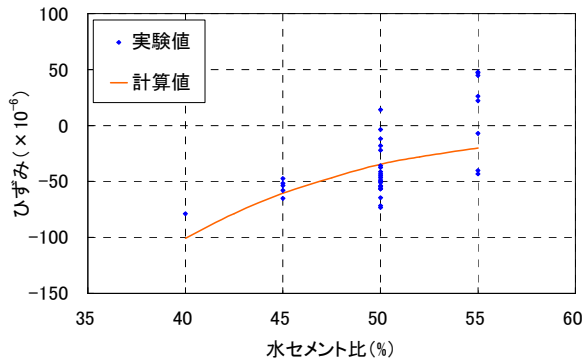


図-7 材齢 91 日の収縮ひずみと水セメント比の関係

### 3.4 自己収縮の速度の検討

図-8 から図-10 に水セメント比 45%, 50%および 55%の自己収縮比の実験値および計算値を示す。図中の計算値は、自己収縮の進行特性を表す係数  $a_{sh}$  および  $b_{sh}$  の値として、JCI 指針に示されている低熱ポルトランドセメント (L) および高炉セメント B 種 (BB) の係数を用いて算出したものである。実験値は、いずれの水セメント比においても緩やかな収縮挙動であり、高炉セメント B 種を用いた係数より低熱ポルトランドセメントの係数を用いた収縮挙動に近い傾向が認められた。よって、式 (8) の係数は  $\alpha_5=2.4$ ,  $\beta_5=-6.5$ , 式 (9) の係数  $\alpha_6=0.12$ ,  $\beta_6=2.7$  となった。

### 3.5 実測値との比較

図-11 から図-14 に水セメント比 40%, 45%, 50%および 55%の膨張および自己収縮ひずみの実験値を示す。また、同図には、前項まで検討した計算値を示す。実験値と計算値の膨張および収縮挙動は概ね近似されている。しかし、実験値と計算値も自己収縮は材齢 1 年で収束していない。図-15 に JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>5)</sup> に示される BB と低発熱・収縮抑制型高炉セメントの近似式で算出した有効材齢 6 ヶ月の計算結果と水セメント比の関係を示す。有効材齢 6 ヶ月以前であれば BB の自己収縮より小さくなっている。また、本検討での得られた実測値が最大で 1 年までなので、本近似式の適用範囲を材齢 1 年以内とした。

本研究で得た近似式を下記に示す。

$$\varepsilon_{total}(t_e) = \varepsilon_{ex}(t_e) + \varepsilon_{sh}(t_e) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}\right\}\right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ex,\infty} = 590 \exp\{-3.2(W/C)\} \quad (3)$$

$$a_{ex} = 29.0 \exp\{-4.8(W/C)\} \quad (4)$$

$$b_{ex} = 0.70 \exp\{2.5(W/C)\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \cdot \varepsilon_{sh,\infty} \cdot \left[ 1 - \exp\left\{-a_{sh}(t_e - t_{e,ser})^{b_{sh}}\right\}\right] \quad (6)$$

$$\varepsilon_{sh,\infty} = 2640 \exp\{-4.4(W/C)\} \quad (7)$$

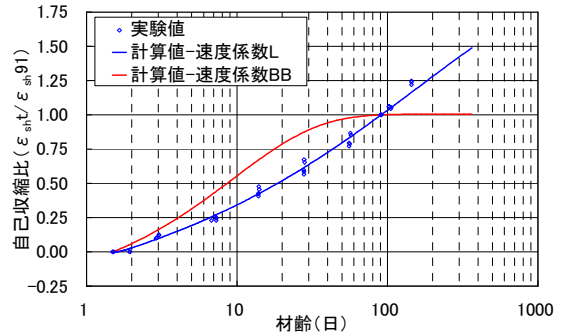


図-8 自己収縮比 (W/C=45%)

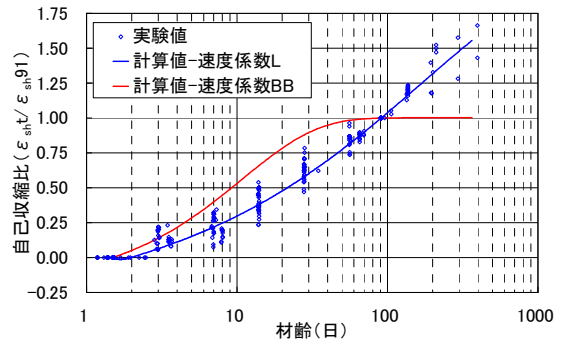


図-9 自己収縮比 (W/C=50%)

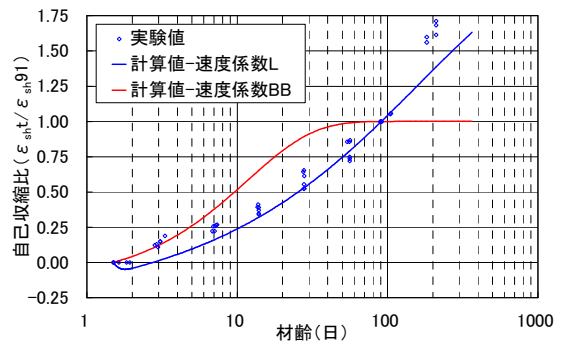


図-10 自己収縮比 (W/C=55%)

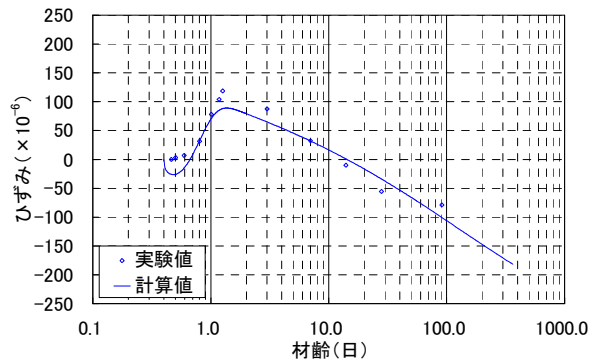


図-11 実験値と計算値の比較 (W/C=40%)

$$a_{sh} = 2.4 \exp\{-6.5(W/C)\} \quad (8)$$

$$b_{sh} = 0.12 \exp\{2.7(W/C)\} \quad (9)$$

ここに式中の記号は、2.2 推定方法を参照。

### 3.6 自己収縮の温度依存性

図-16 に水セメント比が 45%~55%について、最大膨

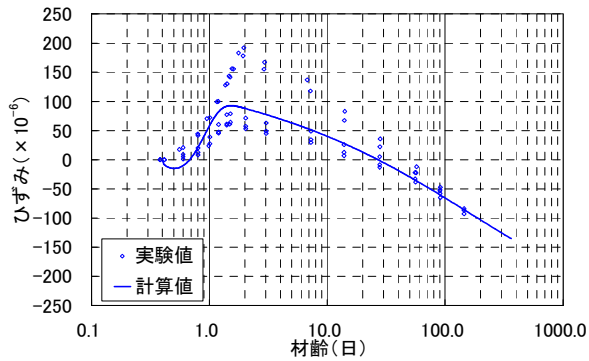


図-12 実験値と計算値の比較 (W/C=45%)

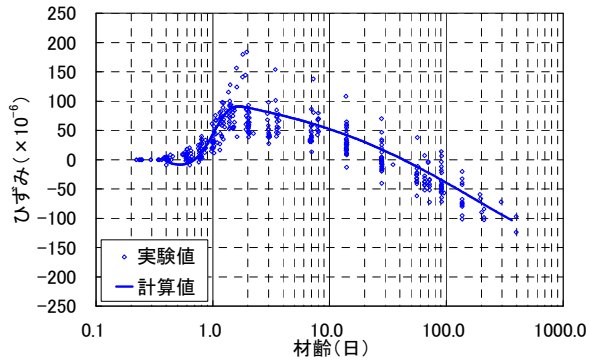


図-13 実験値と計算値の比較 (W/C=50%)

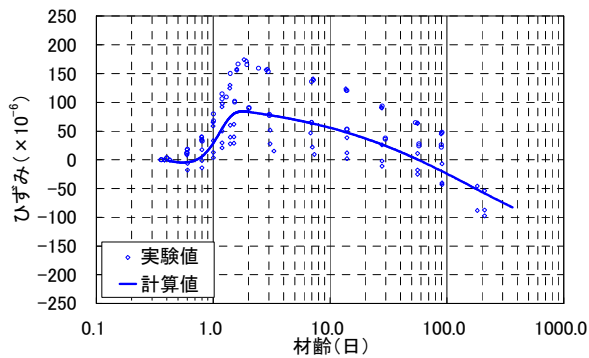


図-14 実験値と計算値の比較 (W/C=55%)

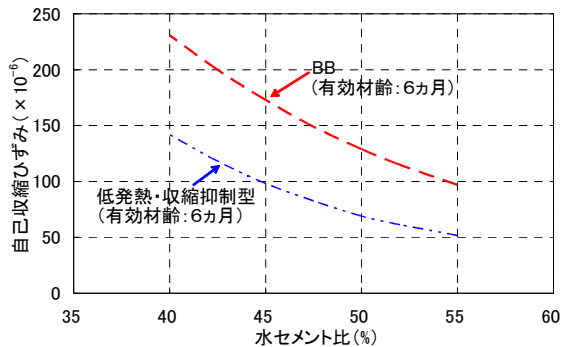


図-15 自己収縮ひずみの計算値

張時から有効材齢 42 日までの自己収縮ひずみと温度履歴の最高温度との関係を示す。実験値は、最高温度の違いによらずほぼ一定もしくは、20℃一定の場合が最も取

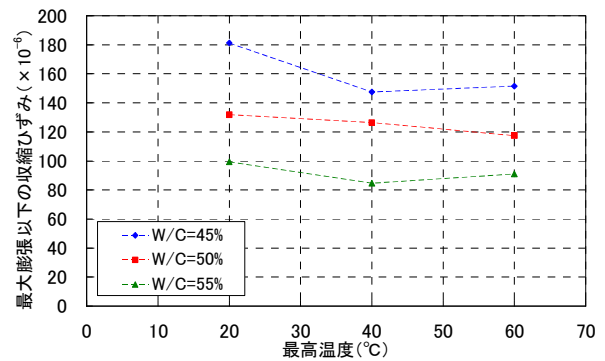


図-16 最高温度と収縮ひずみの関係 (有効材齢 42 日)

縮ひずみが大きくなっている。従って、低発熱・収縮抑制型高炉セメントでは、コンクリート温度が高いほど自己収縮ひずみの終局値が大きくなる高炉セメント B 種に見られる温度依存性の傾向<sup>5)</sup>は認められなかった。

#### 4. 一軸拘束応力による膨張・自己収縮の近似式の検証

##### 4.1 検証の概要

著者らは既報<sup>9)</sup>において、低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートについて、マスコンクリートを想定した温度条件下で一軸拘束応力試験(図-17)を実施し、その実験結果に基づいて拘束応力の発生状況について検討した。本研究では、膨張および自己収縮ひずみの算定式(式(1))を用い、文献<sup>9)</sup>の一軸拘束応力試験をモデル化(図-18)して FEM 温度応力解析を実施し、拘束応力の解析結果と実測値との比較検討を行った。

FEM 温度応力の解析条件は、W/C=55%とし、圧縮強度は実験値を用い、静弾性係数は、圧縮強度の関係式<sup>5)</sup>を用いた。また、熱膨張係数は  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とし、膨張および自己収縮は、本研究で得た予測式(式(1))を用いた。クリープ特性を考慮するためのヤング係数の低減係数  $\phi$  は、最高温度までは  $\phi=0.20, 0.25, 0.30$  および  $0.42$  とし、最高温度以降は  $\phi=0.65$  とした。

モデル化した拘束体は、実験に使用したインバー鋼を模擬した。インバー鋼は、熱膨張係数が  $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、静弾性係数は、 $150\text{kN}/\text{mm}^2$  である。熱伝達率は、一般的な鋼材の  $51.3\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$  を採用した。解析モデルは発熱しないものとし、外部より温度を与えて、実験環境の温度履歴を再現した。なお、解析モデルと実験に用いた拘束体の形状は異なるが、鉄筋比は実験体で 5.51%、解析モデルは、5.52%である。

##### 4.2 温度応力解析結果

図-19 にコンクリート温度の実験値と解析結果を示す。実験値および解析値ともに同様な温度履歴となっている。

図-20 に拘束応力の実験値と解析結果を示す。膨張お



よび自己収縮ひずみの近似値を用いた温度応力解析では、クリープ係数の違いで最大圧縮応力や引張応力に違いが認められた。クリープ係数が最高温度までが 0.42<sup>5)</sup>、最高温度以降が 0.65<sup>5)</sup>の場合では、他のクリープ係数を用いた場合と比べて圧縮応力が大きくなった。このため、従来のクリープの低減係数を用いた温度応力解析では、引張り応力を過小評価となることが認められた。また、最高温度までのクリープの低減係数を変化させた結果、

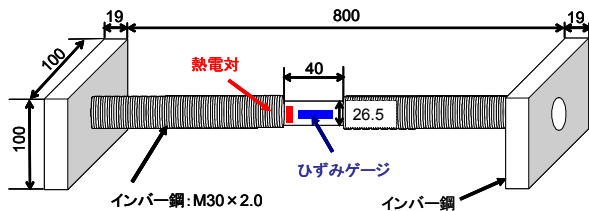


図-17 一軸拘束応力試験装置

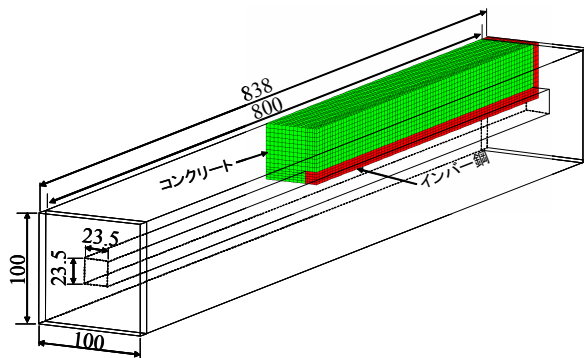


図-18 一軸拘束応力を模擬した解析モデル

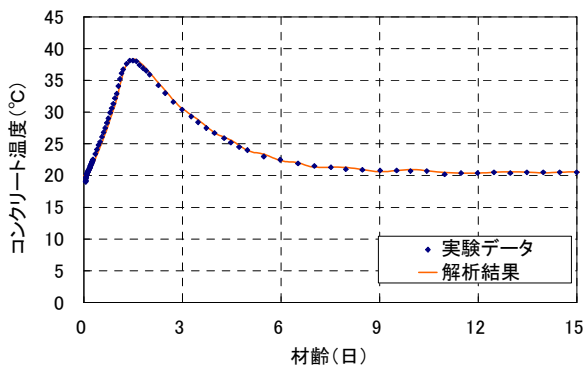


図-19 温度解析結果

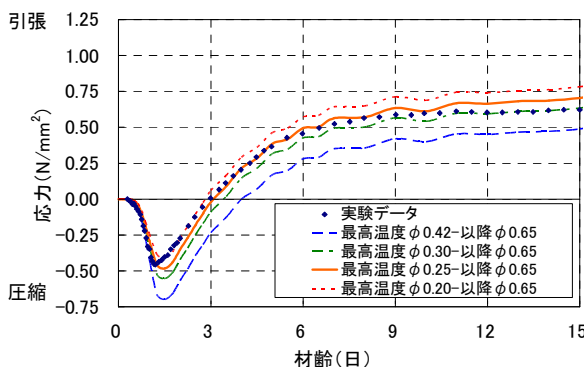


図-20 実測の拘束応力と応力解析の比較

0.25~0.30 の係数を用いることで実測の拘束応力を概ね評価できた。

## 5. まとめ

初期材齢で膨張ひずみを示す低発熱・収縮抑制型高炉セメントについて、自己収縮の予測式の膨張成分を考慮して膨張・収縮挙動の予測を検討した。

- (1) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの収縮速度の係数は低熱ポルトランドセメントの係数と一致した。
- (2) 膨張は材齢 1.5 日で最大となり、最大の膨張ひずみは  $80 \sim 100 \times 10^{-6}$  程度となった。
- (3) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの自己収縮の終局値の温度依存性は、終局値に温度依存性がある高炉セメント B 種と傾向が異なった。
- (4) 自己収縮と膨張ひずみを重ね合わせて用いることにより低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動を近似できた。

## 参考文献

- 1) 二戸信和, 大澤友宏, 鯉渕清, 宮澤伸吾: 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と  $SO_3$  の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.121-126, 2008.6
- 2) 二戸信和, 羽原俊祐, 菅野智晴, 鯉渕清: トータルな性能を評価したマスコンクリート用高炉セメントの検討, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.255-261, 2008.2
- 3) 廣島明男, 二戸信和, 大友健, 宮澤伸吾: スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメントを使用したコンクリートの壁状構造物内部での体積変化とひび割れ制御, 第 60 回セメント技術大会講演要旨集, pp.238-239, 2006.5
- 4) 二戸信和, 廣島明男, 大友健, 宮澤伸吾: スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメント B 種を用いたコンクリートの特性, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.231-238, 2006.2
- 5) 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
- 6) 谷田貝敦, 宮澤伸吾, 廣島明男, 大友健: マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメント種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.675-680, 2007.6