

論文 高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式

宮澤 伸吾^{*1}・佐藤 良一^{*2}・杉山 淳司^{*3}

要旨：マスコンクリートの温度応力解析を行うことを想定し、高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を構築することを目的とし、4種類の市販の高炉セメントB種を用いたコンクリートについて、20℃条件下および高温履歴条件下で自己収縮試験を実施した。得られた実測値に基づいて、部材の温度履歴の影響を考慮した実用的な高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を提案した。

キーワード：高炉セメント、マスコンクリート、自己収縮、予測式、高温履歴

1. はじめに

マスコンクリート構造物の温度ひび割れの制御において温度応力解析を行う場合には、入力値としてのコンクリートの物性値を正確に把握することが重要である。断熱温度上昇量や強度発現については、コンクリート標準示方書¹⁾に予測式が示されており、JCI研究委員会報告書²⁾にも、新しい知見に基づいた予測式が提案されている。一方、自己収縮については、各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの予測式が提案されているが^{2),3),4)}、高炉セメントについては実験データが少ないのが現状である。特に、高温下における自己収縮特性については、異なる一定温度条件下や断熱条件下での実験結果に基づいた予測式の提案^{5),6)}がなされているが、マスコンクリート構造物を想定した温度履歴条件下での自己収縮特性については、不明な点が多いのが現状である。

本研究では、マスコンクリートの温度応力解析に用いることを前提とした、高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を構築することを目的とする。市販の4種類の高炉セメントB種を用いて、20℃条件下およびマスコンクリートを想定した高温履歴条件下においてコンクリートの自己収縮ひずみを測定し、高温履歴の

影響を考慮した自己収縮ひずみの実用的な予測式を提案する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには、市販の4銘柄の高炉セメントB種(BB(A), BB(B), BB(C)およびBB(D))を用いた。これらの高炉セメントB種の試験結果は表-1に示すとおりであり、特にマスコンクリート向けに低熱化を図ったものではなく、一般的な高炉セメントB種である。なお、高炉スラグの分量は40～45%である。

細骨材には、鬼怒川産川砂(表乾密度2.60 g/cm³、吸水率2.30%、粗粒率2.70)を使用し、粗骨材には葛生産砕石(硬質砂岩、最大寸法20mm、表乾密度2.64 g/cm³、吸水率0.60%)を使用した。

混和剤としては、W/C=55%およびW/C=45%の場合は、AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体)およびAE助剤を使用し、W/C=30%の場合は高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)および消泡剤を使用した。W/C=55%およびW/C=45%の場合は、目標スランプ10±2.5cm、目標空気量4.5±1%とし、スランプの調整は単位水量により行った。水セメント比30%の場合

表-1 高炉セメントB種の試験結果

銘柄	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	水量 (%)	凝結 (h-m)		安定性	圧縮強さ (N/mm ²)			化学成分 (%)			
				始発	終結		3d	7d	28d	MgO	SO ₃	強熱減量	塩化物イオン
BB(A)	3.04	3970	29.2	2-29	4-00	良	23.1	34.4	63.1	3.20	1.90	1.05	0.009
BB(B)	3.04	3730	28.4	2-49	4-09	良	22.4	37.6	63.8	2.95	1.77	1.15	0.010
BB(C)	3.04	3700	29.4	2-50	4-25	良	21.5	36.0	63.9	2.95	2.21	1.74	0.012
BB(D)	3.02	3740	28.7	2-40	4-05	良	18.9	31.9	58.7	3.40	2.13	1.37	0.015

*1 足利工業大学 工学部都市環境工学科教授 博(工学) (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

*3 足利工業大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (正会員)

は、目標スランプフロー $50\pm 7.5\text{cm}$ 、目標空気量 $2.0\pm 1\%$ とし、スランプフローの調整は高性能 AE 減水剤の添加率により行った。

試験に用いたコンクリートのスランプ(スランプフロー)および空気量はいずれも目標範囲内であり、 $W/C=55\%$ および $W/C=45\%$ の場合は、単位水量は $169\sim 175\text{kg/m}^3$ であった。 $W/C=30\%$ では単位水量は 160kg/m^3 であり、高性能 AE 減水剤の添加率は、銘柄により $1.3\sim 1.5\%$ であった。

2.2 試験方法

(1) 自己収縮

表-2 に、試験水準を示す。シリーズ I では、自己収縮に及ぼす高炉セメント B 種の銘柄、水セメント比および高温履歴の影響を検討した。高炉セメント B 種として BB(A)、BB(B)、BB(C)および BB(D)の 4 銘柄を使用し、水セメント比を 55% 、 45% および 30% とした。高温履歴条件下における自己収縮試験では、断熱材として発泡スチロール(厚さ 200mm 、発泡率 60%)を用いた内寸法 $400\times 400\times 400\text{mm}$ の簡易断熱型枠を使用した(高温①)。

シリーズ II では、高温履歴における温度範囲が自己収縮に及ぼす影響を検討するために、セメントとして BB(A)を使用し、水セメント比は 55% とした。部材最小寸法の特に大きい場合の温度履歴(厚さ 4m の壁部材の中心温度を断熱温度上昇量に基づいて FEM 解析により推定)を想定し、 $400\times 400\times 400\text{mm}$ 供試体を温度可変室に設置し、温度履歴を与えた(高温②)。また、シリーズ I と同様の簡易断熱型枠を用いた自己収縮試験(高温①)も合わせて行った。

シリーズ I および II において、高温履歴条件下での自己収縮試験では、 $400\times 400\times 400\text{mm}$ 供試体中心部において鉛直方向のひずみを測定した。 20°C 条件下での自己収縮試験では、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ 供試体を使用し、JCI 自己収縮研究委員会の方法⁷⁾に準じて行なった。ただし、自己収縮ひずみの測定は、いずれの条件についても埋込型ひずみ計(弾性係数 40N/mm^2)により行なった。

供試体の個数は、高温履歴条件下(高温①および高温②)では各水準につき 1 個、 20°C 条件下では各水準につき 2 個とした。

(2) 圧縮強度

$\phi 100\times 200\text{mm}$ 供試体を用い、高温履歴条件(高温①)および 20°C 水中養生の 2 種類の養生条件について圧縮強度試験を行なった。高温①では、自己収縮試験と同様の簡易断熱型枠に供試体を設置し、供試体の隙間に発泡スチロールビーズを挿入した。試験材齢は 1, 2, 3, 5, 7, 28 および 91 日とした。供試体の個数は、高温履歴条件下では各水準につき 2 個、 20°C 条件下では各水準につき 3 個とした。

表-2 自己収縮試験における試験水準

シリーズ	W/C (%)	温度履歴	セメントの銘柄			
			BB(A)	BB(B)	BB(C)	BB(D)
I	55 45 30	20°C	○	○	○	○
		高温①	○	○	○	○
II	55	20°C	○			
		高温①	○			
		高温②	○			

(3) 熱膨張係数

20°C 条件下での自己収縮試験を終了した供試体($100\times 100\times 400\text{mm}$)を用い、材齢 3 ヶ月以上経過した時点で、温度範囲 $20\sim 60^\circ\text{C}$ における熱膨張係数の測定を行った。全面シールされた供試体を温度可変室に設置し、供試体中心部の温度が雰囲気温度と一致するように、温度変化速度は $1^\circ\text{C}/\text{hour}$ とし、 5°C 間隔で一定温度を 5 時間保持した後にひずみの測定を行った。

(4) 凝結試験

20°C 条件下で凝結試験を行い、始発を自己収縮の起点とした。高温履歴条件下での自己収縮の起点は、 20°C 条件下での始発と同一の有効材齢とした。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1～図-3 は、 20°C 条件下および高温履歴条件下(高温①)における圧縮強度試験結果を示したものである。図中には、コンクリート標準示方書式¹⁾および JCI マスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する研究委員会式²⁾による予測値も示している。 $W/C=30\%$ の場合は、高炉セメント B 種の銘柄により圧縮強度のばらつきが大きくなっているが、 $W/C=45$ および $W/C=55\%$ の場合は、これらの評価式により圧縮強度の推定が可能である。

3.2 熱膨張係数

コンクリートの熱膨張係数の試験結果を表-3 に示す。

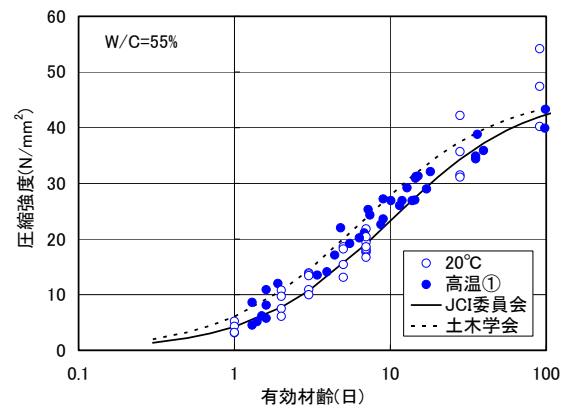


図-1 圧縮強度試験結果 ($W/C=55\%$, 20°C , 高温①)

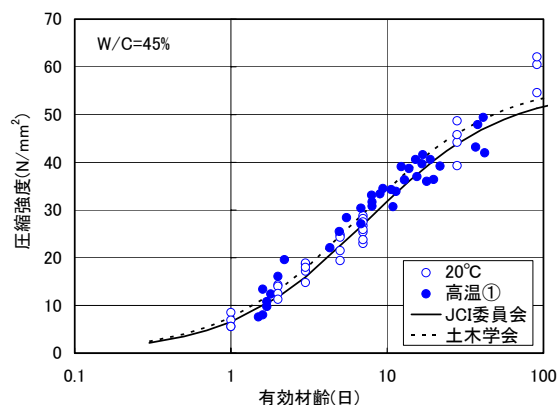


図-2 圧縮強度試験結果 (W/C=45%, 20°C, 高温①)

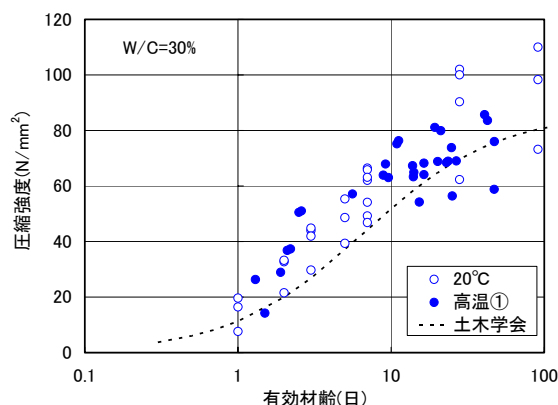


図-3 圧縮強度試験結果 (W/C=30%, 20°C, 高温①)

表-3 コンクリートの熱膨張係数の試験結果

W/C	セメント	熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
		温度上昇時	温度降下時	平均
55%	BB(A)	8.6	12.0	10.3
	BB(B)	10.7	10.9	10.8
	BB(C)	11.1	12.5	11.8
	BB(D)	10.4	14.0	12.2
45%	BB(A)	9.3	13.5	11.4
	BB(B)	10.5	10.9	10.7
	BB(C)	11.9	14.2	13.0
	BB(D)	10.7	14.0	12.4
30%	BB(A)	9.1	13.1	11.1
	BB(B)	10.8	11.2	11.0
	BB(C)	10.7	13.4	12.0
	BB(D)	10.1	13.3	11.7

いずれの水セメント比においても、熱膨張係数は温度上昇時よりも温度降下時の方が大きく、その差は最大で $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であった。本研究では、自己収縮試験結果の整理において温度補正を行なう際に、各配合・各銘柄について、温度上昇時と温度降下時の熱膨張係数の平均値を用いた。温度上昇時と温度降下時の平均値で比較すると、高炉セメント B 種の銘柄による熱膨張係数の差は、

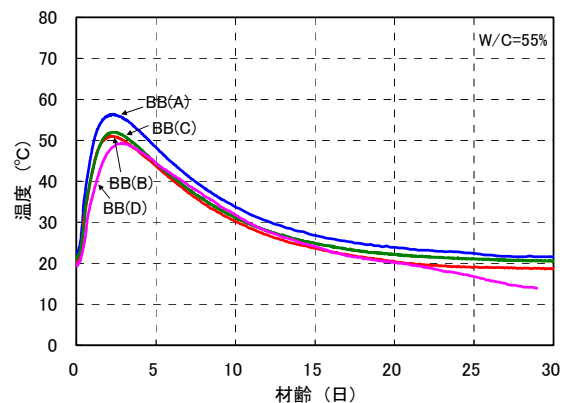


図-4 コンクリート温度の経時変化(W/C=55%, 高温①)

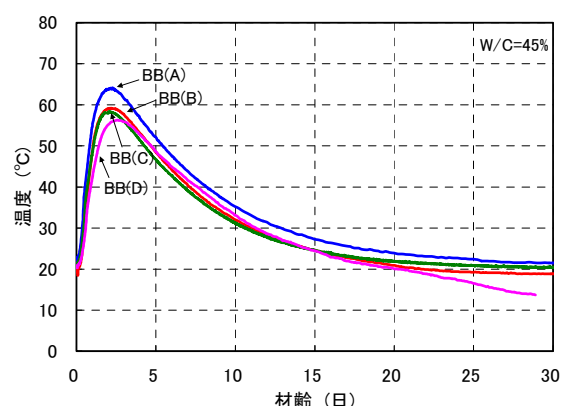


図-5 コンクリート温度の経時変化(W/C=45%, 高温①)

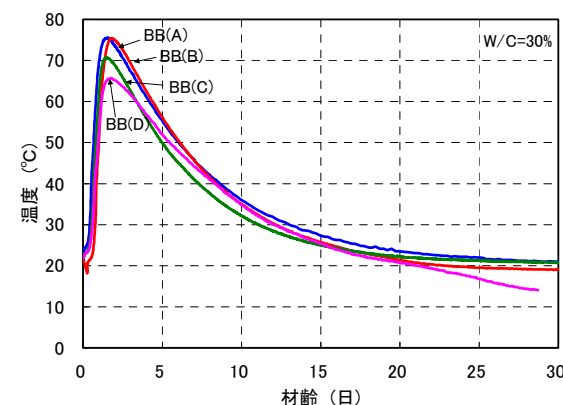


図-6 コンクリート温度の経時変化(W/C=30%, 高温①)

W/C=55%および 45%で約 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、W/C=30%で約 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

3.3 自己収縮(シリーズ I)

図-4~6 は、高温履歴条件下(高温①)における自己収縮試験用供試体の中心部の温度履歴を示している。高炉セメント B 種の銘柄により、温度上昇量の最大値で約 5°C の差が認められたが、簡易断熱型枠の特性や試験室の温度が試験水準により若干異なっており、これらが試

験結果に影響を及ぼしていることが考えられる。

図-7～9は、有効材齢(本研究では式(4)より算出)と自己収縮ひずみの関係を示しており、図-10は、試験期間が最も短いケースに合わせて、有効材齢 45 日時点における自己収縮ひずみを示したものである。いずれの条件においても、水セメント比が小さいほど、自己収縮ひずみが大きくなっている。20℃条件下においては、 $W/C=55\%$ および $W/C=45\%$ の場合の銘柄による差は $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 程度と小さく、既往の報告⁸⁾と同様の結果となっているが、 $W/C=30\%$ では約 200×10^{-6} と大きくなっている。なお、既往の研究⁹⁾によれば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでも、水セメント比が小さい場合に、自己収縮ひずみのばらつきが大きいことが認められている。従って、自己収縮に及ぼす銘柄の影響については、セメントの種類によらず、今後の検討課題であると考えられる。

高温履歴条件下では、20℃条件下の場合に比べて、いずれの水セメント比においても自己収縮ひずみが大きくなっている。特に、若材齢における自己収縮ひずみの増加速度が、高温履歴を受けることにより大きくなっている。自己収縮ひずみに及ぼす高温履歴の影響の程度は高炉セメント B 種の銘柄により異なっている。

3.4 自己収縮(シリーズⅡ)

高炉セメント B 種として BB(A)を用い、 $W/C=55\%$ のコンクリートについて、広範囲な温度履歴条件下(20℃、高温①、高温②)で自己収縮試験を行った。図-11は、自己収縮試験用供試体の中心部の温度履歴の測定値を示している。最高温度は、高温①では 48℃、高温②では 69℃であった。

図-12は、有効材齢と自己収縮ひずみの関係を示したものである。20℃条件下については、シリーズⅠの結果も合わせて示してある。有効材齢 80 日で比較すると、温度が高いケースほど自己収縮ひずみが大きくなっている。また、若材齢における自己収縮ひずみの増加速度も、温度が高いケースほど速くなっている。なお、このように高温履歴を受けると自己収縮ひずみが増大する傾向は、普通ポルトランドセメント等の高炉セメント以外の場合にも報告されている^{5),6)}。

温度条件が自己収縮ひずみに及ぼす影響は、高温②が最高温度に達する材齢 5 日程度以前において明確に現われており、それ以降の材齢においては、いずれの温度条件についても自己収縮ひずみの経時変化は小さい。従って、既往の研究に報告されているように⁵⁾、自己収縮ひずみの増加速度および最終値は、最高温度(温度履歴におけるピーク温度)により評価できるものと考えられる。

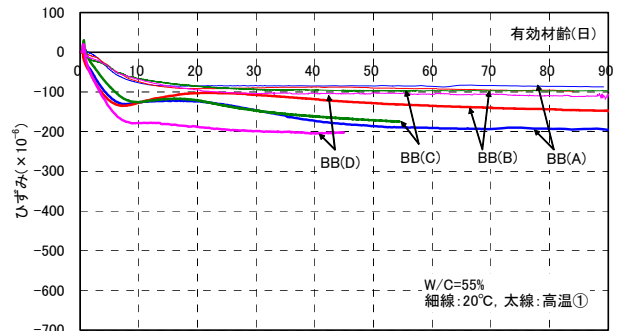


図-7 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=55\%$)

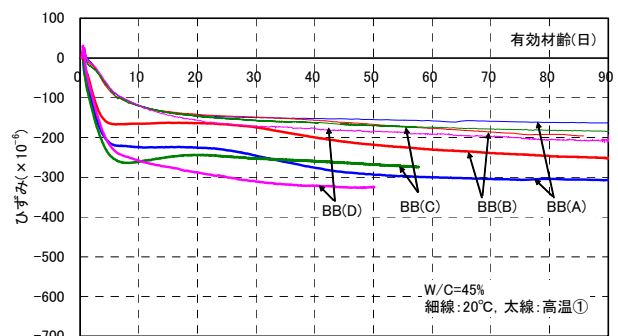


図-8 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=45\%$)

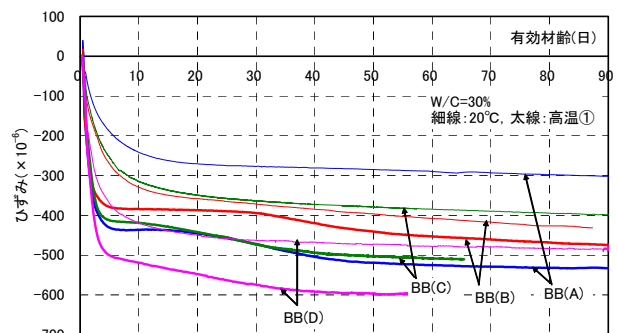


図-9 自己収縮ひずみの経時変化($W/C=30\%$)

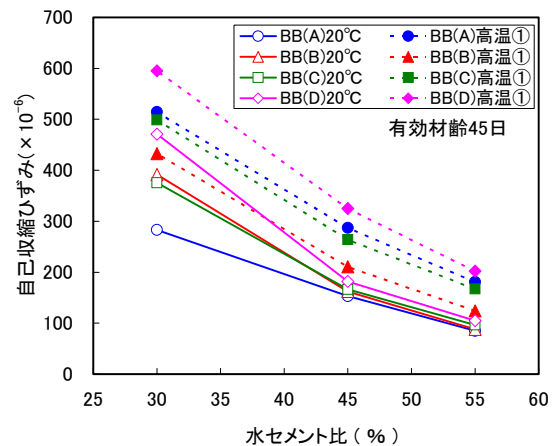


図-10 水セメント比と自己収縮ひずみの関係

4. 高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみ予測式

本研究における自己収縮ひずみの実測値に基づいて、コンクリート標準示方書の予測式(式(1)～式(4))⁴⁾を高炉セメントB種に適用できるように修正して、以下のように提案する。

$$\varepsilon_a(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{ao} \cdot \beta_a(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ao} = 3070 \exp\{-7.2(W/C)\} \quad (2)$$

$$\beta_a(t) = 1 - \exp\left\{-a(t-t_0)^b\right\} \quad (3)$$

$\varepsilon_a(t)$: 材齢 t 日における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\beta_a(t)$: 自己収縮ひずみの経時変化を表す関数

γ : セメントの種類を表す係数(普通ポルトランドセメントの場合, $\gamma=1.0$)

ε_{ao} : 自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$)

W/C: 水セメント比

a, b : 自己収縮の進行速度を表す係数

t : 材齢 (日), t_0 : 凝結の始発 (日)

t および t_0 はコンクリートの有効材齢(日)であり、コンクリートの温度によって次式で補正した値を用いる。

$$t, t_0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (4)$$

Δt_i : 温度が $T^\circ\text{C}$ である期間の日数 (日)

$T(\Delta t_i)$: 期間 Δt_i における温度($^\circ\text{C}$) $T_0=1^\circ\text{C}$

自己収縮ひずみの最終値 ε_{ao} については、式(1)中の γ の値を変化させても、 20°C 条件下での実測値に近似しなかったため、式(2)中の係数を修正することとした。また、高温履歴を受ける場合は、最高温度が高いほど自己収縮ひずみの最終値が増大する傾向が認められたため(図-12 参照)、最高温度 $T_{\max}$ の関数を式(2)に付加することとした。以上のことから、高炉セメントB種を用いた場合の自己収縮ひずみの最終値は式(5)により算出することとする。

$$\varepsilon_{ao} = 2350 \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \times \left[1 - \exp\left\{-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\max} - 20)^4\right\}\right] \quad (5)$$

$T_{\max}$: コンクリートの最高温度($^\circ\text{C}$)

自己収縮ひずみの増加速度については、最高温度 $T_{\max}$ が高いほど速くなり、高温履歴の影響を有効材齢のみで評価することは困難である(図-7～図-9, 図-12 参照)。そこで、著者らが既に提案している式(3)中の係数 a および b の算定式¹⁰⁾に、最高温度 $T_{\max}$ の関数を付加し、式(6)および式(7)を提案する。ただし $20^\circ\text{C} \leq T_{\max} \leq 70^\circ\text{C}$ とする。

$$a = 3.7 \exp\{-6.8 \times (W/C)\} \times (0.060 T_{\max} - 0.20) \quad (6)$$

$$b = 0.25 \exp\{2.5 \times (W/C)\} \times (-0.0075 T_{\max} + 1.15) \quad (7)$$

図-13 および図-14 は、 20°C 条件下での自己収縮ひずみの実測値と提案式による予測値を示したものであ

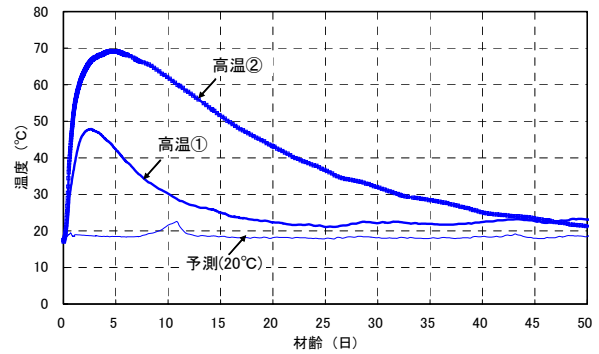


図-11 コンクリート温度の経時変化 (W/C=55%, BB(A))

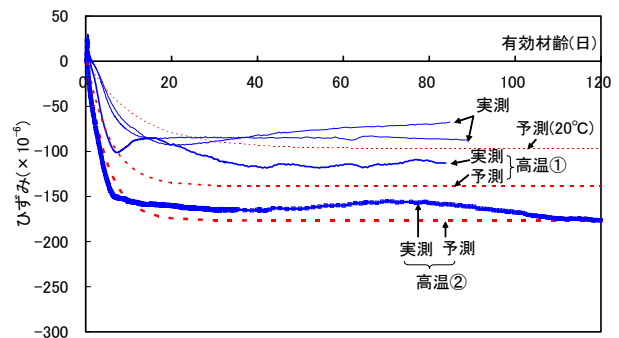


図-12 自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較 (W/C=55%, BB(A))

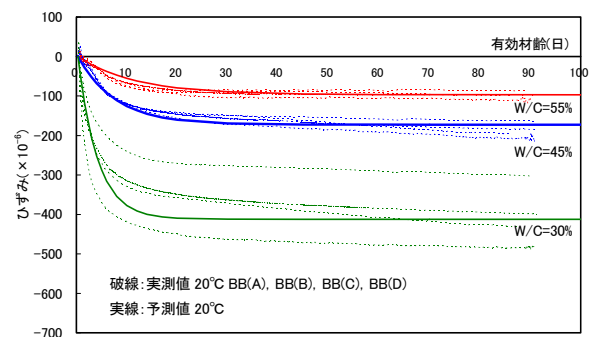


図-13 自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較 (20°C)

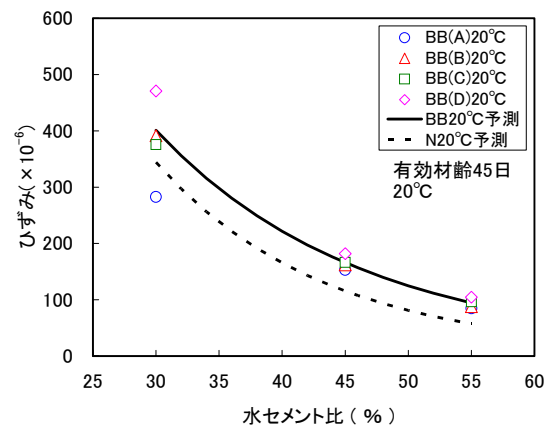


図-14 自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較 (20°C)

る。W/C=55%および45%の場合は、本提案式により、実測値と予測値は概ね一致しているが、W/C=30%の場合は予測誤差が大きくなるケースが認められる。図-14には、比較のために、コンクリート標準示方書の予測式(式(1)～式(4)による)により求めた普通ポルトランドセメントに対する予測値を合わせて示した。高炉セメントB種を用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較すると若干大きくなる傾向が認められる。

図-15は、最高温度 $T_{\max}$ と自己収縮ひずみの関係を示している。広範囲の温度履歴条件下(20℃、高温①、高温②)で試験したBB(A)に着目すると、 $T_{\max}$ が50℃程度で $T_{\max}$ の増加とともに自己収縮ひずみが著しく増大するが、 $T_{\max}$ が55℃と69℃とでは自己収縮ひずみの差は比較的小さい。このような特徴が提案式により評価されている。自己収縮ひずみの経時変化に対する提案式の適合性を図-12に示す。

以上のことから、本研究により提案した予測式により、高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみを概ね推定できると考えられる。ただし、本予測式は、W/Cが55%程度のコンクリートで、部材の最高温度が70℃程度以下の場合に適用できる。なお、コンクリート温度が20℃程度であれば、W/Cが30～55%の場合にも適用できる。

今後、広範囲な材料・配合および温度条件について、予測式の精度の検証を行うことが必要である。

5. まとめ

高炉セメントB種を用いたコンクリートについて、20℃条件下およびマスコンクリートを想定した高温履歴条件下で自己収縮ひずみを測定し、実験結果に基づいて自己収縮ひずみの予測式を提案した。本研究の範囲内で明かになった事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 高温履歴条件下では、20℃条件下の場合と比較して、コンクリートの自己収縮ひずみの増加速度および最終値が大きくなる。
- (2) 高温履歴を受ける場合は、20℃条件下の場合と比較して、高炉セメントB種の銘柄による自己収縮ひずみの差が大きくなる。
- (3) 高炉セメントB種を用い、水セメント比が55%程度のコンクリートについて、高温履歴(最高温度が70℃程度以下)を受ける場合の自己収縮ひずみの予測式を提案した。

謝辞

本報告の実験データは、日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度ひび割れ制御指針改定委員会(委

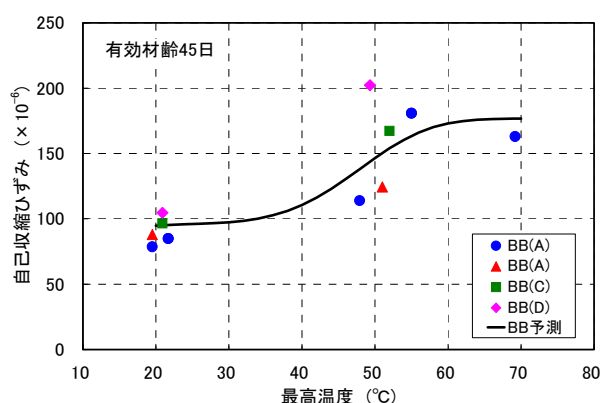


図-15 自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較 (W/C=55%)

員長：広島大学教授 佐藤良一)の活動の一環として実施された共通試験(実施機関：(株)宇部三菱セメント研究所、新日鐵高炉セメント(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)、足利工業大学)によるものである。また自己収縮予測式の構築にあたり、委員会活動を通じて貴重なご意見をいただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年度制定、コンクリート標準示方書(施工編)，2002.3
- 2) 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に関する研究委員会報告書，2006.6
- 3) 田澤栄一，宮澤伸吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究：土木学会論文集，No.571/V-36，pp.211～219，1997.6
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(構造成能照査編)，2002.3
- 5) 大友健ほか：各種セメントを使用したコンクリートの異なる温度条件下での自己収縮特性，第57回セメント技術大会講演要旨，pp.176-177，2003.5
- 6) 中里剛，鳴瀬浩康：各種セメントの自己収縮ひずみ予測式の一提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.453-458，2004.6
- 7) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996.11
- 8) 久保征則ほか：高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.763-768，1997.6
- 9) 宮澤伸吾：自己収縮の機構および予測法，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.27-33，2005.5
- 10) 川合雅弘ほか：コンクリートの自己収縮ひずみの予測式に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.491-496，2003.7