

論文 化学成分を調整した高炉セメント B 種の膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積の影響

谷田貝 敦*1・二戸 信和*2・宮澤 伸吾*3

要旨:本研究では、高炉スラグ微粉末の混入量を 40%および 60%, SO₃ 量を 4%とした高炉セメントにおいて、高炉スラグ微粉末の比表面積を 3340 cm²/g から 4820 cm²/g の範囲とした場合において、20°C環境および温度履歴下における膨張および収縮ひずみの挙動評価を行った。高炉スラグ微粉末の比表面積を小さくすることで、初期材齢での膨張ひずみは大きくなり、自己収縮ひずみも小さくなった。自己収縮ひずみの温度依存は、高炉スラグ微粉末の比表面積を小さくすることで緩和された。既往の収縮予測式に高炉スラグ微粉末の比表面積の係数を加えることで実験値を評価することができた。

キーワード: 自己収縮, 膨張ひずみ, 予測式, 高炉スラグ微粉末, 比表面積, 温度履歴

1. はじめに

我が国におけるセメントの使用比率は、ポルトランドセメント系が約 75%を占め、残りの約 25%が混合セメントである。混合セメントは、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等で置き換えるため、CO₂ の排出抑制に寄与する。また、CO₂ の排出抑制のみならず、資源の有効利用の観点から今後、混合セメントの積極的な利用が重要な課題となってくる¹⁾。

高炉セメントは、化学抵抗性の向上、アルカリシリカ反応や水和熱の抑制が期待できる。しかし、高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントと比べて断熱温度上昇量が同等以上となり、自己収縮も大きくなる場合がある。自己収縮においては、高温環境下において特に大きくなることが知られている。したがって、高炉セメントの水和発熱や自己収縮について注意が必要なマスコンクリート構造物に対して広く活用するためには、これらの問題が障害となっている。そこで著者らは、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²⁾、実構造物に適用して、温度ひび割れ低減効果について実証してきた。

マスコンクリート構造物では、温度応力解析により温度ひび割れの予測を行うことが一般的である。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が、低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、材齢初期に膨張ひずみが生じる³⁾ため、JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁴⁾に代表されるような膨張成分を含まない既存式では適切に評価することが困難な場合がある。そこで著者らは、高炉スラグ微粉末の比表面積を 3000 cm²/g 程度とした低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張および自己収縮ひずみについて評価し、高炉スラグ微粉末の混入量(20%~70%)および SO₃ 量 (2.0%~5.0%) を変数とした膨張および自己収縮ひずみの予測式を提案した⁵⁾⁶⁾。しかし、この予測式では、高炉スラグ微粉末の比表面積による影響を考慮していない。そこで本研究では、膨張および自己収縮ひずみに及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積の影響に着目して膨張および自己収縮ひずみの挙動評価を行った。すなわち、高炉スラグ微粉末の比表面積が異なる高炉セメント

表-1 使用材料

区分	諸物性
セメント	普通ポルトランドセメント[OPC] (密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3330 cm ² /g)
混和材	高炉スラグ微粉末[BS1] (密度: 2.91g/cm ³ , 比表面積: 3320 cm ² /g)
	高炉スラグ微粉末[BS2] (密度: 2.91 g/cm ³ , 比表面積: 4820 cm ² /g)
	無水石こう[AG] (密度: 2.91g/cm ³ , 比表面積: 4500 cm ² /g)
細骨材	鬼怒川産 川砂[S1] (密度 2.63g/cm ³ , 粗粒率 2.68, 吸水率 1.93%)
粗骨材	栃木産 硬質砂岩砕石[G] (最大寸法 20 mm, 密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.63%)
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
AE 助剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

*1 (株) デイ・シイ 技術部 技術開発チーム 修士 (工学) (正会員)

*2 (株) デイ・シイ 技術部 技術開発チーム 主務 博士 (工学) (正会員)

*3 足利工業大学 創生工学科 建築・社会基盤学系 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 化学成分 (%)

区分	ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
OPC	0.95	21.07	5.54	3.08	63.29	1.99	2.46	0.45	0.36	0.30	0.29	0.07
BS1	0.03	33.96	14.64	0.30	42.58	5.97		0.25	0.33	0.61	0.01	0.36
BS2	0.2	34.25	14.83	0.35	42.18	5.91		0.21	0.33	0.59	0.02	0.34
AG	1.1	1.0	0.3	0.1	40.3	0.2	57.1					

表-3 コンクリートの配(調)合

No	区分 BS比表面積-BS置換率-SO ₃ 量	W/C (%)	s/a (%)	単位量 kg/m ³							Ad (B×%)
				W	B				S	G	
					OPC	BS1	BS2	無水石こう			
1	OPC	40	42.7	165	413				740	998	1.0
2	BB		43.2	159	242		152	4.0	757	998	1.0
3	BS3340-40-4		43.2	159	227	152		18.6	756	998	1.0
4	BS3340-60-4		43.6	155	138	228		21.5	769	998	1.0
5	BS4080-40-4		43.2	159	227	76	76	18.6	756	998	1.0
6	BS4080-60-4		43.6	155	138	114	114	21.5	769	998	1.0
7	BS4820-40-4		43.2	159	227		152	18.6	756	998	1.0
8	BS4820-60-4		43.6	155	138		228	21.5	769	998	1.0

表-4 フレッシュ性状試験および凝結試験結果

No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)	20°C環境下		温度履歴	
				始発	終結	始発	終結
				時-分	時-分	時-分	時-分
1	10.5	3.6	24.0	5-20	6-50	5-55	7-30
2	12.0	3.7	24.0	5-05	7-00	5-00	7-40
3	14.5	4.2	24.0	5-50	8-25	6-40	9-05
4	14.0	3.8	23.0	6-10	8-30	6-35	9-35
5	12.5	4.2	23.5	5-30	6-40	6-40	8-55
6	14.5	3.9	23.5	5-30	8-00	6-10	10-10
7	14.0	3.8	23.5	5-25	7-40	6-25	8-55
8	13.0	4.2	23.0	5-30	7-40	6-10	9-20

の膨張および自己収縮の挙動評価を行うために 20°C環境および温度履歴を与えてひずみの測定を行った。ひずみの測定結果から、2012年に提案した膨張および自己収縮の予測式⁶⁾を参考にして高炉スラグ微粉末の比表面積を考慮した予測式の開発を試みた。

2. 検討プロセス

2.1 実験概要

(1) 使用材料及び配合

使用材料を表-1に化学成分を表-2に示す。試製した高炉セメントの母体には、普通ポルトランドセメント(OPC)を用い、高炉スラグ微粉末は、比表面積が3340 cm²/g (BS1) および4820 cm²/g (BS2) の2種類を用いた。また、セメント中のSO₃量を調整するために無水

石こうを用いた。細骨材には、鬼怒川産の川砂を、粗骨材は、栃木産の硬質砂岩砕石を用いた。混和剤にAE減水剤を使用した。

実験に用いたコンクリートの配(調)合を表-3に示す。水セメント比は、40%とし、スランブを12±2.5 cm、空気量を4.5±1.5%とした。結合材は、試製した高炉セメントおよび普通ポルトランドセメントとし、試製した高炉セメントは、高炉スラグ微粉末の比表面積が4820 cm²/g、4080 cm²/g、3320 cm²/gとなるように調整した。なお、高炉スラグ比表面積を4080 cm²/gとした水準は、高炉スラグ微粉末BS1とBS2を1:1で混合した。試製した高炉セメントの高炉スラグの割合は40%および60%とし、SO₃量は4.0%となるよう無水石こうを添加した。また、比較のために高炉スラグ微粉末の比表面積が4820 cm²/

g, 高炉スラグの割合が 40%, SO₃ 量を 2.0% に調整した通常の高炉セメント B 種 (BB) 相当品も用いた。

(2) 熱膨張係数試験

コンクリートの熱膨張係数試験は, JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁴⁾ に示されている試験方法を参考にして温度変化速度を 1°C/時間とし, 5°C 間隔で 5 時間一定温度を保持した後にひずみの測定を行った。測定に用いた温度履歴は 20°C から 70°C の範囲とした。なお, 測定は, 20°C 環境下で材齢 91 日まで測定した自己収縮供試体を用いた。

(3) 自己収縮の測定方法

自己収縮試験は JCI コンクリートの自己収縮研究委員会報告書⁷⁾ を参考にして行った。ただし, ひずみの測定については埋込型ひずみ計 (弾性係数: 40N/mm²) を用いた。各水準に対して供試体は 2 個作製し, その平均を用いて膨張・収縮の挙動評価を行った。

(4) 環境温度

コンクリートの膨張および自己収縮ひずみを測定した温度環境の水準を表-5 に温度履歴を図-1 に示す。温度環境は, 20°C 一定, 最高温度を 50°C および 70°C とする温度履歴とした。ただし, 高温履歴を与えた水準は, 表-5 の No.3 から No.5 および No.7 とした。

2.2 推定方法

低発熱・収縮抑制型高炉セメントでは, SO₃ 量による膨張成分を考慮するために図-2 の模式図のように膨張および自己収縮のそれぞれの予測式を構築し, これらを重ね合わせることにした⁹⁾。この予測式は, 比表面積が 3000 cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末を用いた高炉セメントにおいて高炉スラグ微粉末の混入量を 20% から 70%, SO₃ 量を 2.0% から 5.0% に変化した場合を適用範囲とした。提案した式を下記の式 (1) から式 (10) に示す。

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

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

$$\varepsilon_{ex,\infty} = (2.51 \cdot BS + 156 \cdot SO_3 - 125) \exp\{-3.2(W/C)\} \quad (3)$$

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

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

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

$$\varepsilon_{sh,\infty} = (-1.29BS^2 + 108 \cdot BS + 141 \cdot SO_3 + 929) \exp\{-4.4(W/C)\} \quad (7)$$

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

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

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

ここに $t_{e,set}$: 凝結の始発材齢 (有効材齢 0.4 日), $t_{ex,0} = t_{e,set}$

W/C: 水セメント比

BS: 高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

表-5 温度環境の水準

No	環境温度		
	20°C	50°C	70°C
1	○		
2	○		
3	○	○	○
4	○	○	○
5	○	○	○
6	○		
7	○	○	○
8	○		

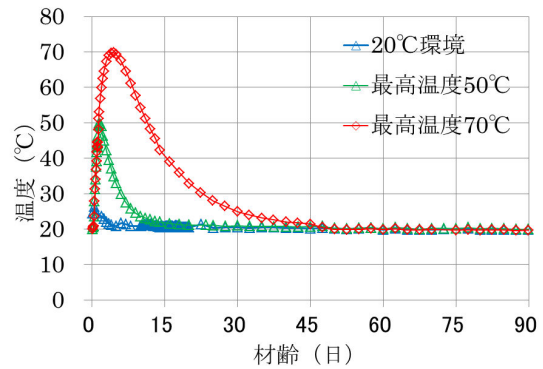


図-1 実験に用いた温度履歴

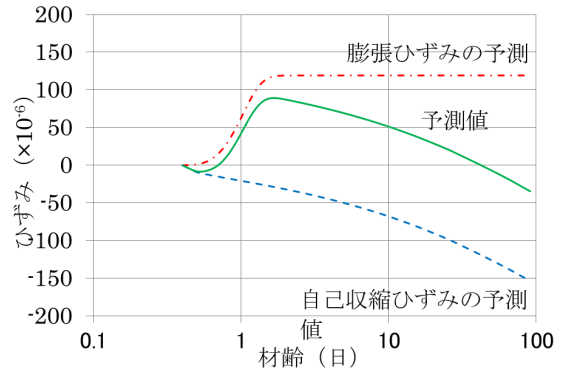


図-2 膨張ひずみと自己収縮ひずみの模式図

SO₃: SO₃ 量 (%)

$\varepsilon_{total}(t_e)$: 有効材齢 t_e 日におけるひずみ

$\varepsilon_{ex}(t_e)$: 有効材齢 t_e 日における膨張ひずみ

$\varepsilon_{ex,\infty}$: 膨張ひずみの終局値

a_{ex}, b_{ex} : 膨張ひずみの進行特性を表す係数

$\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e 日における自己収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値

a_{sh}, b_{sh} : 自己収縮ひずみの進行特性を表す係数

η_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 (1.00)

t_e : 有効材齢

Δt_i : 温度が T(°C) である期間の日数

T_0 : 1°C

本研究では、高炉スラグ微粉末の比表面積が $3340 \text{ cm}^2/\text{g}$ から $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ の範囲における膨張および自己収縮ひずみの予測を行うために既往の予測式(式(1))の調整を試みた。すなわち、 20°C 環境下で測定した実験値に対し式(1)を用いて最小二乗法によりフィッティングを行い各試験水準の膨張及び自己収縮の終局値を求めた。求めた膨張及び自己収縮の終局値に対する高炉スラグ微粉末の比表面積及び混入量の影響を式(3)および式(7)に反映させて終局値の予測式を構築した。ただし、フィッティングを行う際に用いた膨張及び自己収縮ひずみの進行特性を表す予測式(式(2)および式(6))には、式(4)式(5)、式(8)および式(9)の既存の予測式から求めた進行特性を表す係数を使用した。また、高炉セメントの温度依存の評価については、3.5に示す式(12)にJCIマスコンクリートのひび割れ制御指針⁴⁾に示される自己収縮ひずみの温度増分の関数を適用して評価を行った。なお、以降に示す実験値は、膨張および自己収縮ひずみ両方の成分を有するため、図中の計算値は式(1)により求めた ϵ_{total} とする。

3. 結果および考察

3.1 フレッシュ性状および凝結試験結果

表-4 にフレッシュ性状および凝結試験結果を示す。フレッシュ性状はいずれも目標を満足した。

3.2 熱膨張係数試験結果

図-3 に熱膨張係数と高炉スラグ微粉末の比表面積の関係について示す。高炉スラグ微粉末の比表面積によらず熱膨張係数は同様であったが、混入量が増加することで熱膨張係数が大きくなる傾向が認められた。また、高炉スラグ微粉末の比表面積が $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、混入量が40%の水準に着目してみると SO_3 量を4.0%とすることで2.0% (BB) の場合と比べて小さくなった。

3.3 最大膨張ひずみに及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積および混入量の影響

図-4 に高炉スラグ微粉末の混入量を40%および60%とした試作高炉セメントの高炉スラグ微粉末の比表面積と最大膨張ひずみの関係を示す。高炉スラグ微粉末の比表面積が $3340 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合では、高炉スラグ微粉末の混入量が40%において約 100×10^{-6} 、混入量が60%において約 125×10^{-6} の最大膨張ひずみとなった。一方で、高炉スラグ微粉末の比表面積が $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合では、高炉スラグ微粉末の混入量が40%において約 75×10^{-6} の、混入量が60%において約 100×10^{-6} の最大膨張ひずみとなった。高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど最大膨張ひずみは直線的に小さくなることが認められた。高炉スラグ微粉末の比表面積と最大膨張ひずみの関係は直線近似が可能と考えられる。また、同一の比表面積のとき、高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるほど最大膨張ひず

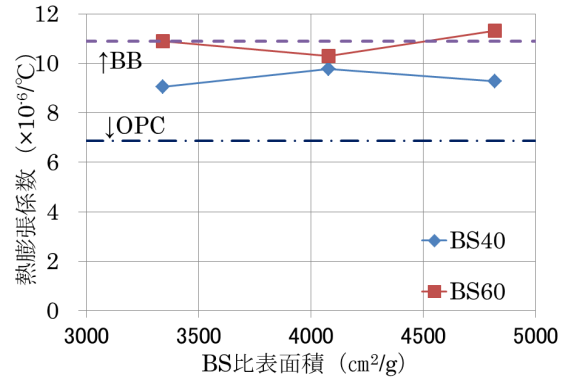


図-3 熱膨張係数と BS 比表面積の関係

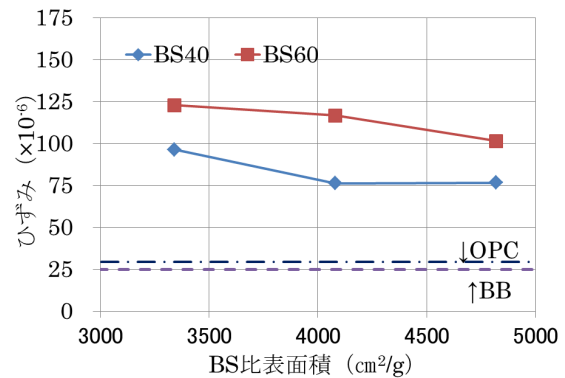


図-4 最大膨張ひずみと BS 比表面積の関係

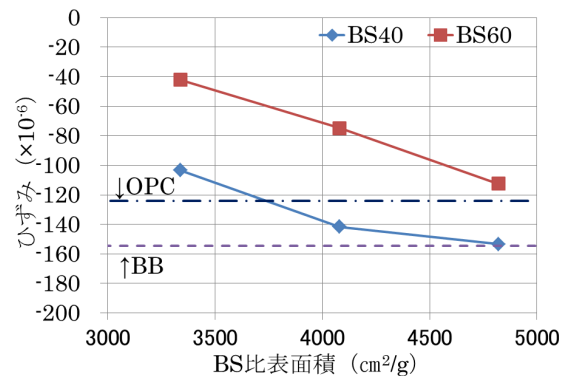


図-5 材齢91日の自己収縮ひずみと BS 比表面積の関係

みは大きくなった。そこで、膨張ひずみは高炉スラグ微粉末の比表面積の一次式で評価できると仮定して、実験値とのフィッティングにより既存の式(3)の拡張を行った。高炉スラグ微粉末の比表面積を考慮した膨張ひずみの終局値を表す式(11)は、3.5に示すこととする。

3.4 自己収縮ひずみに及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積および混入量の影響

図-5 に高炉スラグ微粉末の混入量を40%および60%とした試作高炉セメントの高炉スラグ微粉末の比表面積と材齢91日における自己収縮ひずみの関係を示す。高炉スラグ微粉末の比表面積が $3340 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合では、高炉スラグ微粉末の混入量が40%において約 100×10^{-6} 、混入

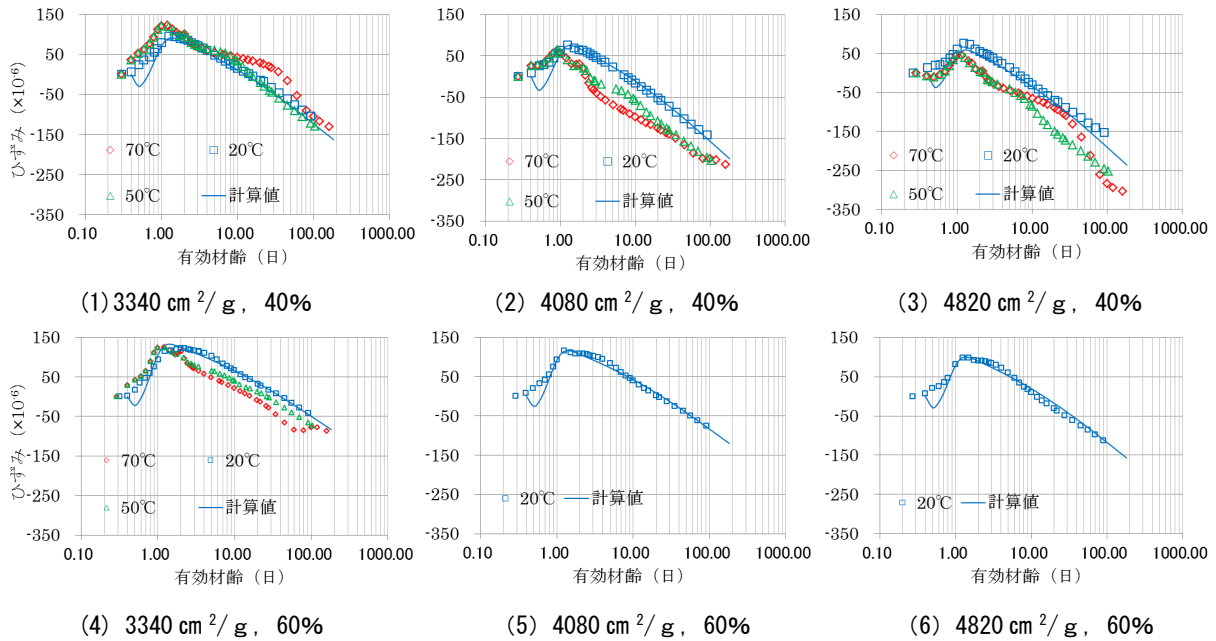


図-6 実験値と計算値の比較

量が 60%において約 50×10^{-6} の自己収縮ひずみとなった。一方、高炉スラグ微粉末の比表面積が $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ 混入量が 40%では、高炉セメント B 種と同程度の約 150×10^{-6} の自己収縮ひずみとなった。高炉スラグ微粉末の比表面積が $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、混入量が 60%では、普通ポルトランドセメントよりも小さく、約 110×10^{-6} の自己収縮ひずみとなった。高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど直線的に自己収縮ひずみは大きくなることが認められた。したがって、高炉スラグ微粉末の比表面積と自己収縮ひずみの関係は直線近似が可能と考えられる。また、同一の比表面積のとき、高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるほど自己収縮ひずみは小さくなった。そこで、自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末の比表面積の一次式で評価できると仮定して、実験値とのフィッティングにより既存の式(7)の拡張を行った。高炉スラグ微粉末の比表面積の要素を加えた膨張ひずみの終局値を表す式(12)は、3.5に示すこととする。

3.5 実測値との比較

図-6 に高炉スラグ微粉末の比表面積および混入量を変化させた場合の膨張および自己収縮ひずみの実験値および計算値を示す。実験値は、環境温度を 20°C 環境下、最高温度を 50°C および 70°C とした温度履歴を与えた場合の結果を示している。また、計算値は、式(1)に用いる膨張および自己収縮の終局値に式(11)および式(12)を適用し、進行特性を表す係数に式(4)、式(5)、式(8)および式(9)を適用して求めた。同図より、20°C 環境下では、本研究で提案した膨張および自己収縮の終局値(式(11)および式(12))を適用することで、既存の予測式(式(1))にて実験値を評価することが可能である。一方、温度履歴

を与えた実験値と計算値を比較した場合、高炉スラグ微粉末の比表面積が $3340 \text{ cm}^2/\text{g}$ では環境温度にかかわらず計算値は実験値を概ね評価できた。しかし、高炉スラグ微粉末の比表面積が $4080 \text{ cm}^2/\text{g}$ および $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ では、環境温度が高くなると、実験値は計算値よりも大きくなっており、自己収縮ひずみの終局値に対し温度依存の関数を設ける必要が認められた。

以上の検討結果から、高炉スラグ微粉末の混入量を 40% および 60% とし、 SO_3 量を 4.0% とした場合において高炉スラグ微粉末の比表面積を $3340 \text{ cm}^2/\text{g}$ から $4820 \text{ cm}^2/\text{g}$ とした範囲では、環境温度が 20°C であれば、既往の予測式に高炉スラグ比表面積の影響を考慮した膨張および自己収縮の終局値の近似式(式(11)および式(12))を適用することで概ね評価可能である。なお、JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁴⁾の報告によると市販の高炉セメント B 種であっても銘柄の違いにより自己収縮ひずみは若干異なる。したがって、予測式の精度向上を図るために高炉スラグ微粉末やベースセメントの成分の違いに関しては今後の検討課題である。

$$\varepsilon_{ex,\infty} = (-0.049 \cdot S_{BS} + 5.51 \cdot BS + 575) \exp\{-3.2(W/C)\} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{sh,\infty} = (0.312 \cdot S_{BS} - 1.29 \cdot BS^2 + 108 \cdot BS - 382) \exp\{-4.4(W/C)\} \quad (12)$$

ここに W/C : 水セメント比

BS : 高炉スラグ微粉末の置換率(%)

S_{BS} : 高炉スラグ微粉末の比表面積 (cm^2/g)

SO_3 : SO_3 量(%)

$\varepsilon_{ex,\infty}$: 膨張ひずみの終局値

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値

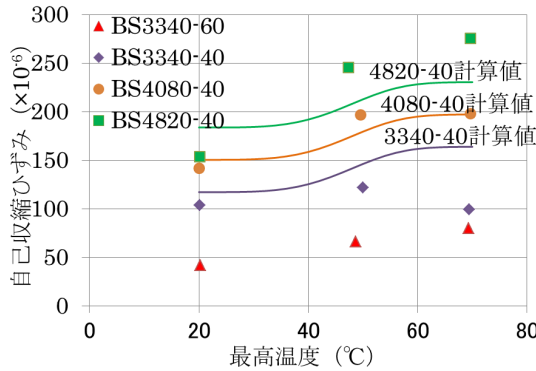


図-7 最高温度と有効材齢91日の自己収縮ひずみの関係

3.6 高炉セメントの自己収縮ひずみに及ぼす最高温度の影響

図-7に最高温度と有効材齢91日の自己収縮ひずみの関係を示す。なお、図中の計算値は、20°C環境下における自己収縮ひずみの終局値(式(12))にJCIマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁴⁾に示されている高炉セメントB種の自己収縮ひずみの温度増加分の関数である式(13)を適用して ε_{total} (式(1))を求めた値である。

$$\varepsilon_{sh,\infty,Tmax} = \varepsilon_{sh,\infty} + 80 \times \left[1 - \exp\left[-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4\right] \right] \quad (13)$$

ここに $\varepsilon_{sh,\infty, Tmax}$: ある最高温度となった場合の自己収縮ひずみの終局値

T_{max} : コンクリートの最高温度 ($20^\circ\text{C} \leq T_{max} \leq 70^\circ\text{C}$)

実験値において高炉スラグ微粉末の比表面積が3340 cm²/gと小さい場合では、温度増加にともなう自己収縮の増加は小さかった。一方、高炉スラグ微粉末の比表面積が4080 cm²/gのとき最高温度が70°Cとなると、20°C環境より収縮ひずみが約50×10⁻⁶大きくなった。また、比表面積が4820 cm²/gのときでは、最高温度が70°Cとなると、20°C環境より収縮ひずみが約125×10⁻⁶大きくなった。高炉スラグ微粉末の比表面積を小さくすることで収縮ひずみの温度依存性が小さくなることが認められた。

また、計算値と比較すると高炉スラグ微粉末の比表面積を3340 cm²/gとした場合では、実験値よりも計算値が大きくなり、比表面積を4080 cm²/gとした場合では、実験値と計算値は比較的良好な相関が認められた。比表面積を4820 cm²/gとした場合では、実験値よりも計算値が小さくなった。したがって、高炉スラグ微粉末の比表面積に合わせた温度依存の関数を構築する必要がある。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末の混入量を40%および60%とし、SO₃量を4.0%とした高炉セメントにおいて、高炉スラグ微粉末の比表面積を3340 cm²/gから4820 cm²/gの範囲とした場合の膨張および自己収縮の挙動評価を行った。本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- (1) 熱膨張係数は、高炉スラグ微粉末の比表面積によらず同様であったが、混入量が増加することで大きくなる傾向が認められた。
- (2) 最大膨張ひずみは、高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるほど、比表面積が小さくなるほど大きくなり、これらの要因の一次式で評価が可能と考えられる。
- (3) 自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど大きくなることが認められ、高炉スラグ微粉末の比表面積の一次式で評価が可能と考えられる。
- (4) 高炉スラグ微粉末の比表面積および混入量を変数とした本予測式を用いることで概ね評価可能であることが認められた。
- (5) 高炉スラグ微粉末の比表面積を小さくすることで自己収縮ひずみが温度条件で増大する傾向が緩和されることが認められた。

参考文献

- 1) 坂井悦郎：エコマテリアルとしての混和材，コンクリート工学，Vol.45，No.5，pp.56-59，2007
- 2) 二戸信和ほか：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度とSO₃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
- 3) 二戸信和ほか：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
- 4) 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
- 5) 谷田貝 敦ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.497-502，2011
- 6) 谷田貝 敦ほか：低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率およびSO₃量の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.382-387，2012
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会 報告書，2002.9