論文 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

谷田貝 敦*1·二戸 信和*2·宮澤 伸吾*3

要旨:本研究では,低発熱・収縮抑制型高炉セメントの高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃量を変化させた 場合の高炉セメントの膨張および自己収縮ひずみの挙動の評価を行った。膨張ひずみは,SO₃量の増加に伴い, 最大膨張ひずみは大きくなり,高炉スラグ微粉末の置換率が多いほど SO₃量の増加に伴う影響は顕著であった。 収縮ひずみは,高炉スラグ微粉末の置換率 40%程度が最も大きく,置換率の増減に伴いひずみは小さくなった。 高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃量の影響を考慮した低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張および自己 収縮の予測式を構築ができた。

キーワード:自己収縮,膨張ひずみ,予測式,低発熱・収縮抑制型高炉セメント,マスコンクリート

1. はじめに

地球環境に対する配慮や資源の有効活用の観点から, 建設業界においても2成分系や3成分系などの混合セメ ントの積極的な利用が増えている。

混合セメントは,化学抵抗性の向上,アルカリ骨材反 応や水和熱の抑制が期待でき,マスコンクリートに使用 される。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 等以上になり,自己収縮も大きくなる場合がある。そこ で,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¹⁾,実構造物に適用して,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事前 に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²⁾ため, JCI マスコンクリートのひび割れ制御指 針 2008³⁾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,低発熱・収縮抑制型高炉セメント(高炉スラグ微 粉末の比表面積:3380 cm²/g,高炉スラグ微粉末の置換 率:58%, S0₃量:3.8%)を対象として膨張ひずみを考慮 した自己収縮の予測式を提案した⁴⁾。

しかし, 膨張および自己収縮ひずみの挙動の予測に及ぼ す高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃ 量の影響が明確 になっていない。そこで本研究では, 比表面積が 3000cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末に着目し, 置換率および SO₃ 量を 変化させた場合の低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張 および自己収縮ひずみの挙動評価を行った。提案した低発 熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮ひずみの予測式 ⁴⁾を高炉スラグ微粉末置換率および SO₃ 量の影響を考慮し た予測式の拡張を試みた。

2. 検討プロセス

2.1 実験概要

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: 3360 cm ² /g)
混和材	高炉スラグ微粉末[BS] (密度:2.91g/cm ³ ,比表面積:3180 cm ² /g)
	無水石こう[AG] (密度: 2.91g/cm ³ , 比表面積: 3560 cm ² /g)
細骨材	陸砂[S1] (密度 2.60g/cm ³ 、粗粒率 2.35,吸水率 2.04%)
	石灰石砕砂[S2](密度 2.64g/cm ³ 、粗粒率 3.64, 吸水率 1.68%)
粗骨材	石灰石砕石[G](密度 2.69g/cm ³ 、粗粒率 6.62,吸水率 0.62%,実績率 60%)
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

表一1 使用材料

*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)

区分	目標	目標	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)							٨E	
					W	結合材(B)			S1	52	C	AE jative 호비	AE BD SU
	~)//	王义重	(70)	(70)	vv	OPC	BS	AG	51	52	G	顺小响	助刑
BS20%-SO32.0%	18±2.5 cm		40	41.4	172	354.1	75.4	0.49	555	141	- 1017		
BS20%-SO ₃ 3.5%				41.4	172	342	75.7	12.31	555	141		B × 1.0(%)	
BS20%-SO35.0%				41.3	172	329.8	76.1	24.12	554	141			D
BS40%-SO ₃ 3.5%		4.5 + 1.50/		41.8	168	243.6	160.7	15.75	564	143			в
BS60%-SO32.0%		8±2.5 cm 4.5±1.5%		42.4	163	160.1	239.7	7.7	578	147			×
BS60%-SO33.5%				42.4	163	148.6	240	18.9	578	147			0.002(76)
BS60%-SO ₃ 5.0%				42.3	163	137	240.4	30.1	578	147			
BS70%-SO ₃ 3.5%				43.1	158	101.5	273.5	20.07	595	151			

表-2 示方配合

(1) 使用材料及び配合

使用材料を表-1 に示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを用いた。混和材には、比表面積が 3180 cm²/gの高炉スラグ微粉末および無水石こうを用いた。 細骨材には、山砂および石灰石砕砂を使用し、粗骨材は、 石灰石砕石を用いた。また、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示方配合を表-2 に示す。 水セメント比は、40%とした。結合材には、普通ポルト ランドセメント、高炉スラグ微粉末および無水石こうを 用いて、高炉スラグ微粉末は 20%から 70%の範囲で変化 させ、無水石こうについては SO3 量換算で 2.0%から 5.0% の範囲で変化させた。なお、SO3 量を 3.5%とし、高炉ス ラグ微粉末の置換率を変化させた実験ケースにおいては、 同一ロットの材料を用いて再度試験を行ったが試験結果 は平均値で示した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、JISA1108に従って行った。測定材齢は7日、28日および91日とした。

(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⁵⁾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。各配合に対して供試体は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の測定は、 20℃,湿度60%一定の環境下で測定を行った。

2.2 推定方法の概念

JCI マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008³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。そこで,著者らはこの手



図-1 膨張ひずみと自己収縮ひずみの推定模式図

法を基に 2011 年に低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨 張および自己収縮の予測式を提案した⁴⁾。提案した式を 下記の式(1)から式(10)に示す。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

n_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;:有効材齢

- *∆t_i*:温度が T(℃)である期間の日数
- $T_0: 1^{\circ}\mathrm{C}$

本研究では、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの高炉 スラグ微粉末の置換率および SO₃量を変化させた場合に も適用できるように既往の予測式(式(1))の拡張を行っ た。すなわち高炉スラグ微粉末の置換率と SO₃量を変化 させた各条件の実験値について式(1)によるフィッティ ングを行った。ただし、ひずみの進行特性を表す、式(4)、 式(5)、式(8)および式(9)はそのまま用いることとし、式 (3)及び式(7)における膨張ひずみおよび収縮ひずみの終 局値を最小二乗法により求めた。このようにして得られ た膨張ひずみ及び収縮ひずみの終局値は、高炉スラグ微 粉末の置換率および SO₃量の関数として定式化すること とした。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 に各種成分のセメントを使用したコンクリート の圧縮強度を示す。材齢7日においては、高炉スラグ微 粉末の置換率によらず、SO3量が多くなるほど圧縮強度 が大きくなる傾向が認められた。また、高炉スラグ微粉 末の置換率は、大きくなるほど圧縮強度が小さくなった。 従って、本試験の範囲では、SO3量が5%以下であれば SO3量が大きいほど初期材齢の改善が期待できる。材齢 28日以降は、SO3量にかかわらず同程度の強度結果とな った。一方、高炉スラグ微粉末の置換率の影響について は、置換率が大きくなるほど、強度が小さくなった。

3.2 膨張および収縮の進行速度の検討

本検討においては、膨張及び収縮の進行特性を既往の 予測式⁴⁾で評価可能であると仮定し、今回の実験値を用 いて予測精度の検証を行った。すなわち、式(4)、式(5)、 式(8)および式(9)から求められる進行特性に関する係数 を用いて式(1)により実験値の評価を行った。

(1)膨張速度の検討

図-3 に膨張比の実験値および計算値を示す。なお、 同図の計算値は、 t_e =1.5 日のひずみを 1.0 とした膨張比と して示す。いずれの結合材においても、材齢 1 日から 2 日の材齢初期で最大膨張ひずみが生じた。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。

本予測式における膨張の進行特性を表す係数 a_{ex} およ び b_{ex} は、既往の予測式 4である式(4)および式(5)を適用 することとした。本予測式は、材齢1日程度で膨張比 1.0 に到達する挙動は概ね評価できたが、到達過程のひずみ の挙動を十分に評価できず、今後の課題である。

(2) 自己収縮速度の検討

図-4 に自己収縮比の実験値と計算値を示す。なお、 同図では、材齢91日における自己収縮ひずみを1.0とし た場合の自己収縮比とした。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。いずれの結合材においても、同様な 収縮挙動を示しており、収縮速度に及ぼす高炉スラグ微 粉末の置換率および SO3量の影響は認められなかった。

本予測式における収縮の進行特性を表す係数 *a_{sh}* および *b_{sh}* は既往の予測式 ⁴⁾である式(8)および式(9)を適用す







ることとした。いずれの場合においても計算値は実験値の収縮挙動を概ね評価できた。

3.3 最大膨張ひずみに及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率 および SO₃量の影響

図-5 に SO₃ 量と最大膨張ひずみとの関係を示す。SO₃ 量が 2.0%では,高炉スラグ微粉末の置換率によらず膨張 ひずみは認められず,SO₃ 量が 3.5%では,40×10⁶から 55×10⁶の膨張ひずみが生じた。SO₃ 量が 5.0%では 60× 10⁶から 150×10⁻⁶と膨張ひずみが生じた。いずれの高炉 スラグ微粉末の置換率においても SO₃ 量の増加に伴い膨 張ひずみが大きくなる傾向が認められた。また,高炉ス ラグ微粉末の置換率が大きいほど,SO₃ 量の増加に伴う 最大膨張ひずみの傾きが大きくなった。

図-6 に高炉スラグ微粉末の置換率と最大膨張ひずみ との関係を示す。SO3量が2.0%および3.5%においては、 高炉スラグ微粉末の置換率の増減にかかわらず最大膨張 ひずみは同程度であった。一方でSO3量が5.0%において は、高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると最大膨張ひ ずみが大きくなった。いずれの場合においても高炉スラ グ微粉末の置換率と最大膨張ひずみの関係は1次式で近 似が可能であると考えられる。

したがって、SO₃量および高炉スラグ微粉末の置換率 と最大膨張ひずみの関係は,直線近似が可能であること が認められた。そこで,最大膨張ひずみの予測式の構築 においては,最大膨張ひずみと高炉スラグ微粉末の置換 率および SO₃量の関係について重回帰分析を行った。既 存の式(3)に高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃量 の係数を設けた式(11)で膨張ひずみの終局値を評価する こととした。

$$\varepsilon_{ex,\infty} = (2.51 \cdot BS + 156 \cdot SO_3 - 125) \exp\{-3.2(W/C)\}$$
(11)





および SO₃量の影響 図-7に SO₃量と材齢 91 日における自己収縮ひずみの 関係を示す。いずれの高炉スラグ微粉末の置換率におい ても SO₃量が大きいほど自己収縮ひずみが小さくなる傾 向が認められた。SO₃量が大きくなると、初期材齢時の 最大膨張が大きくなり、結果として自己収縮ひずみが小 さくなった。また、SO₃量の増加に伴い自己収縮は直線 的に小さくなっており、高炉スラグ微粉末の置換率によ り傾きは異なるが、1 次式においてその関係を評価する ことが可能であると考えられる。

図-8に高炉スラグ微粉末の置換率と材齢91日における自己収縮ひずみの関係を示す。SO3量3.5%に着目する

と高炉スラグ微粉末の置換率が40%のときに自己収縮ひ ずみが最大となり,置換率が40%から増減することによ り自己収縮ひずみが小さくなった。田澤ら^のが行ったセ メントペーストによる自己収縮試験結果では,高炉スラ グ微粉末の比表面積が4060 cm²/gと8360 cm²/gにおい て置換率が70%程度で自己収縮が最大となっている。一 方で,比表面積が2900cm²/gの高炉スラグ微粉末を用い た場合においては,置換率が50%程度で最大となってい る。また,宮澤ら⁷⁾が行ったコンクリートの自己収縮試 験結果では,置換率40%以上において置換率の増加に伴 い自己収縮は小さくなっている(図-8白抜き凡例参照)。

このように、高炉スラグ微粉末の比表面積が3000cm²/g 程度と小さい場合には、高炉スラグ微粉末の置換率と自 己収縮ひずみの関係が比表面積の大きな高炉スラグ微粉 末と比べて異なる。高炉スラグ微粉末の置換率が40%以 下と小さい場合には普通ポルトランドセメントに起因す る自己収縮ひずみが卓越すると考えられ、高炉スラグ微 粉末の置換率40%以上の場合では比表面積が小さい高炉 スラグ微粉末に自己収縮が抑制されることが表れたと考 えられる。

したがって、自己収縮ひずみの予測式を構築するため に SO₃ 量と自己収縮の関係については、高炉スラグ微粉 末の置換率によらず、SO₃ 量が増加すると自己収縮が小 さくなるような1次式で評価することとした。高炉スラ グ微粉末の置換率の影響は、置換率 40%で自己収縮が最 大となるため、SO₃ 量によらず置換率 40%が自己収縮の最 大となると仮定して2次式で評価することとした。以上 の手法を用いて既存の式(7)に高炉スラグ置換率および SO₃ 量の係数を加えた式(12)において自己収縮ひずみの 終局値を評価した。

 $\varepsilon_{sh,\infty} = (-1.29BS^2 + 108 \cdot BS + 141 \cdot SO_3 + 929) \exp\{-4.4(W/C)\} (12)$

3.5 実測値との比較

図-9 に高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃ 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。図-10 に各種水セメント比における低 発熱・収縮抑制型高炉セメント(高炉スラグ微粉末の比 表面積:3380 cm²/g,高炉スラグ微粉末の置換率:58%, SO₃量:3.8%)の膨張および自己収縮ひずみの実験値⁵⁾ と本研究で提案した予測式の計算値を示す。

条件によっては予測値の精度が十分でない場合があった。また, SO3 量が 5.0%では実験値の膨張および収縮 挙動の近似精度は低下したが,それ以外においては概ね 近似されている。SO3 量が 2.0%と少ない実験値において は,初期膨張ひずみは認められないが,この場合につい ても本予測式で近似可能であった。実験ケースの少ない 水準については更にデータを収集して予測精度の向上が 今後の課題である。



図-8 材齢 91 日のひずみと BS 置換率の関係

図-10 は既往の実験データ⁴⁾を用いて,本研究の提案 式の予測精度を検証した結果を示したものである。本研 究で新たに提案した式(11)および式(12)を用いて低 発熱・収縮抑制型高炉セメントの自己膨張及び自己収縮 ひずみを概ね予測できた。

以上のことから比表面積 3000 cm/g²程度の高炉スラグ 微粉末を用い,置換率 20%から 70%および SO 3量 2.0% から 5.0%の高炉セメントを用いたコンクリートの自己 膨張・収縮ひずみは次の近似式で概ね評価可能である。 以下に今回の検討で得られた予測式を示す。

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

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

$$\varepsilon_{ex,\infty} = (2.51 \cdot BS + 156 \cdot SO_3 - 125) \exp\{-3.2(W/C)\}$$
(11)

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

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

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

$$\varepsilon_{sh,\infty} = (-1.29BS^2 + 108 \cdot BS + 141 \cdot SO_3 + 929) \exp\{-4.4(W/C)\} (12)$$

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

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

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

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)

BS:高炉スラグ微粉末の置換率(%)

SO3: SO3量(%)



4. まとめ

比表面積が 3000 cm²/g 程度の高炉スラグ微粉末を用い た低発熱・収縮抑制型高炉セメントにおいて高炉スラグ微 粉末の置換率を 20%から 70%に, SO₃ 量を 2.0%から 5.0% に変化させ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) 最大膨張ひずみは、SO3 量の増加に伴い大きくなり、 高炉スラグ微粉末の置換率が多くなるほど SO3 量に よる影響が顕著に表れた。
- (2) 自己収縮は、SO3量が多くなるほど小さく、高炉スラ グ微粉末の置換率 40%で最大となった。置換率 40% より置換率が増減することで自己収縮は減少した。
- (3) 膨張・自己収縮の速度は、2011年に提案した予測式 と同一の速度係数で膨張・収縮の速度を評価した。
- (4) 最大膨張ひずみは、高炉スラグ微粉末および SO3量の 1 次式で表される。自己収縮の終局値は、高炉スラグ 微粉末置換率の2次式、SO3量の1次式で表される。 2011年に提案した予測式に高炉スラグ微粉末置換率 および SO3量の係数を追加により、高炉スラグ微粉末 置換率および SO3量を変化させた場合においても膨張 および収縮の終局値を評価することが可能となった。
- (5) 高炉スラグ微粉末の置換率および SO₃ 量の影響を考 慮した低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張およ

び自己収縮の予測式を構築ができた。

参考文献

- 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
- 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
- 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) 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
- 5) 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
- 田澤栄一ほか:セメント系材料の自己収縮に及ぼす 結合材および配合の影響,土木学会論文集, No.502V-25, pp.43-52, 1994.11
- 7) 宮澤伸吾ほか:高炉セメントの自己収縮および断熱 温度上昇量に関する研究,セメント・コンクリート 論文集, No.58, pp.154-159, 2004