

# 論文 高炉スラグ高含有コンクリートの自己収縮ひずみ

中本純次\*1・戸川一夫\*2・宮川豊章\*3・藤井學\*4

**要旨：** 高炉スラグ高含有コンクリートの自己収縮ひずみに与えるスラグ粉末度、置換率および高性能AE減水剤の影響について検討した。材齢経過に伴う自己収縮ひずみの増加割合はスラグ置換率が高くなれば大きくなるが、材齢初期に生じる自己膨張ひずみも増加し、材齢0.5年で最大 $330 \times 10^{-6}$ 程度の自己収縮ひずみを生じる。自己収縮ひずみに与えるスラグ微粉末の影響は粉末度が異なればかなり変化し、材齢0.5年における自己収縮ひずみは、粉末度 $8160 \text{cm}^2/\text{g}$ の場合スラグ無置換の1.5～1.85倍であるが、 $4040 \text{cm}^2/\text{g}$ の場合はスラグ置換率にかかわらずスラグ無置換よりも小さい。

**キーワード：** 自己収縮、自己膨張、高炉スラグ微粉末、粉末度、置換率

## 1. はじめに

著者らは、省エネルギーや二酸化炭素発生量の低減および資源のリサイクル化等をはかるために、高炉スラグ高含有コンクリートの有効利用に関して検討を行ってきている。従来、コンクリートの自己収縮ひずみは高々 $100 \times 10^{-6}$ 程度とされてきた[1]。近年、田澤ら[2][3]により、高性能AE減水剤や混和材を混入して水セメント比を小さくすると非常に大きな自己収縮を生じ、構造物のひび割れ解析等に考慮が必要であることが指摘されるとともに、自己収縮に与えるセメント種類や鉱物組成の影響についても明らかにされつつある。高炉スラグ微粉末が自己収縮ひずみに与える影響については、高炉スラグを混入すると自己収縮ひずみが増大するとの報告[4][5][6]と、スラグ微粉末を高置換した場合でも通常の水セメント比の範囲であれば自己収縮はほとんど生じないとの報告[7]がある。本研究は、高炉スラグ高含有コンクリートを汎用コンクリートとして実用化をはかるための一環として自己収縮特性を明らかにするものである。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には徳島県那賀川産の川砂(比重 2.61、吸水率 1.70%、粗粒率 2.89)、粗骨材には和歌山県由良産の硬質砂岩碎石(比重 2.61、吸水率 1.10%、最

表-1 高炉スラグ微粉末の化学成分

記号	粉末度 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	比重	化 学 成 分 (%)					
			$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$
4B	4040	2.89	32.8	13.6	0.2	42.4	5.8	2.0
8B	8160	2.89	33.0	13.6	0.2	42.1	6.0	2.0

\* 1 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科助教授 (正会員)

\* 2 和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科教授、工博 (正会員)

\* 3 京都大学大学院 工学研究科助教授 土木工学専攻、工博 (正会員)

\* 4 京都大学大学院 工学研究科教授 土木工学専攻、工博 (正会員)

大寸法 20 mm)を用いた。粗骨材は、使用に際して、5~13 mmと 13~20 mmをそれぞれ 50% ずつ混合使用した。使用した高炉スラグ微粉末の物理的性質ならびに化学組成を表-1に示す。混和剤は、リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体のAE減水剤(AEW)、ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体の高性能AE減水剤(SP)および変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするAE助剤(AE)をそれぞれ使用した。

## 2.2 コンクリートの配合

AE減水剤を用いたAEコンクリートシリーズにおいては、基準コンクリートのスランブを 8 cmとし、単位結合材量・水結合材比を同一としているため、各コンクリート間のスランブは若干変化(6~10 cm)している。高性能AE減水剤を用いたSPコンクリートシリーズについては、単位結合材量同一・スランブ同一・圧縮強度同一[8]として、所要の目的を達成するためにSP量を調整した。各種コンクリートの配合を表-2および表-3に示す。なお、フレッシュコンクリートの空気量は、全実験を通じて $4.5 \pm 0.5\%$ である。

表-2 AEコンクリートの配合

配合 記号	W/ (C+BF) (%)	BF/ (C+BF) (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	BF	S	G	AEW*	AE**
AE0	57	0	160	280	0	817	1044	2.80	2.30
AE4B70	57	70	160	84	196	811	1036	2.80	3.80
AE4B85	57	85	160	42	238	809	1034	2.80	4.20
AE4B95	57	95	160	14	266	808	1032	2.80	4.60
AE8B70	57	70	160	84	196	811	1036	2.80	4.20
AE8B85	57	85	160	42	238	809	1034	2.80	4.60
AE8B95	57	95	160	14	266	808	1032	2.80	5.00

\* : 4 倍液、\*\* : 100 倍液

表-3 SPコンクリートの配合

配合 記号	W/ (C+BF) (%)	BF/ (C+BF) (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	BF	S	G	SP*	AE**
SP0	46.4	0	142	306	0	791	1096	3.67	0
SP8B70	50	70	153	92	214	772	1070	3.21	2.00
SP8B85	45	85	137	46	260	787	1090	4.59	4.00
SP8B95	33	95	101	15	291	827	1143	7.65	12.00

\* : 原液、\*\* : 100 倍液

## 2.3 供試体の作成およびひずみの測定

自己収縮供試体は 10×10×40 cmとし、鋼製型枠にコンクリートを打設した。型枠の拘束による影響を除くため型枠内面にポリエステルフィルムを敷き、さらに、拘束の影響が大きいと思われる底面部にはポリエステルフィルムと型枠との間にテフロンプレート挿入した。また、打設後供試体からの水分の逸散を避けるため、打設直後からコンクリート打設上面をポリエステルフィルムで覆い、さらに湿布で覆った。なお、供試体は打設直後から温度 20±1℃、相対湿度 95

±2%の恒温恒湿室に静置し、材齢 24 時間で脱型を行った。材齢 24 時間で脱型した供試体は、直ちにアルミ箔粘着テープで供試体を全面シールした。供試体は、さらにビニールシートで封緘し、温度 20±1℃、湿度 60±2%の恒温恒湿室内に静置した。当初、供試体を湿布で覆ったが、質量変化を考慮して〔9〕、材齢 21 日以後は取り除いた。長さ変化は、コンタクトゲージを用いて測定した。長さ測定はすべての配合について注水後 5 時間から開始し、この時点での長さを基長とした。

### 3. 実験結果および考察

図-1～図-3は、各種コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を示している。高炉スラグ高含有コンクリートの自己収縮ひずみは、スラグ粉末度や置換率、さらには混和剤種類によりかなり異なることが明らかである。スラグ高含有コンクリートに関しては、混和剤種類に関わらずコンクリートのひずみはまず膨張側に生じ、材齢の経過に伴って自己収縮ひずみが増加することから収縮側に転じる。スラグ無置換コンクリートについては、材齢初期から自己膨張を生じることなく収縮側にあり、材齢 3～5 日程度までは、収縮ひずみの増加が大きい。それ以後はスラグ置換コンクリートに比して小さい。田澤ら〔6〕は、材齢 120 日におけるセメントペーストの自己収縮ひずみは、スラグ置換率 50～70%で最大となり、90%では無置換より小さくなると報告しているが、本実験では配合条件により若干異なり一定の傾向は認められない。

図-4は、コンクリートの自己膨張ひずみとスラグ置換率の関係を示している。測定間隔が 1 日であり、いずれの配合についても材齢 2 日では収縮を開始していることから、材齢 1 日のひずみが見かけ上最大自己膨張ひずみを表わす。前述のように、AE0 および SP0 ともにすでに材齢 1 日で収縮側にあり、スラグ置換率が増加すれば自己膨張ひずみは増加することが明らかである。また、スラグ粉末度 4040 と 8160c m<sup>2</sup>/g を比較すると、自己膨張ひずみはいずれの置換率においても前者の方が大きい。これは、本実験では基長をすべて注水後 5 時間としているが、スラグ含有コンクリートの凝結は後者の方が早く、さらに置換率

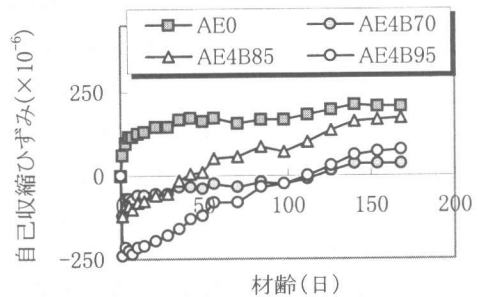


図-1 コンクリートの自己収縮ひずみ

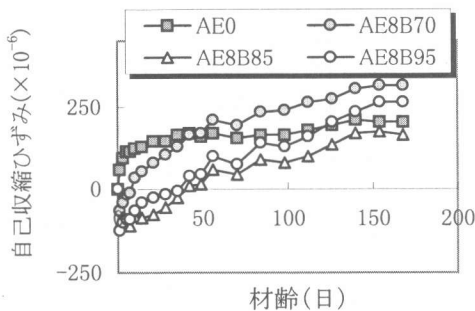


図-2 コンクリートの自己収縮ひずみ

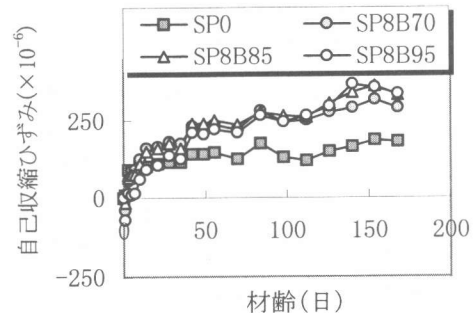


図-3 コンクリートの自己収縮ひずみ

の増加により早くなる[10]ことから、後者については基長測定以前に既にある程度の自己膨張ひずみが生じていたためと考えられる。SPコンクリートの材齢1日における自己膨張ひずみはAEコンクリートの半分程度であるが、これは水和が遅延しているためと考えられる。

図-5は、材齢0.5年における自己収縮ひずみとスラグ置換率の関係を示している。SPコンクリートの自己収縮ひずみは、スラグ置換率が増加すれば直線的に増加することが認められ、スラグ置換率95%のSP8B95が $330 \times 10^{-6}$ と最も大きな自己収縮ひずみを生じている。これは表-3に示すようにスラグ置換率の増加につれて水結合材比が小さくなっているためと考えられる。なお、水結合材比が低下すると自己収縮ひずみは増加する[11]ので、このことを考慮すれば、SPコンクリートにおいても水結合材比が同一の場合、スラグ置換率が増加しても自己収縮ひずみは大きく増大することはないことも考えられるが、今後明らかにしたいと考えている。また、SPコンクリートについては、高性能AE減水剤の添加により自己膨張が遅れるために、水結合材比の低下による自己収縮ひずみの増加は自己膨張ひずみによってある程度相殺されていると考えられる。同じ粉末度 $8160\text{cm}^2/\text{g}$ のAE8Bシリーズについては、置換率70%において最も大きく、スラグ置換率が増加すればむしろ減少する傾向が認められる[6]。これは、スラグ置換率が70%を超えると、平均細孔径ならびに全細孔量が増加するため[12]であると考えられる。粉末度 $4040\text{cm}^2/\text{g}$ については、スラグ置換コンクリートの方が無置換のものより小さく、スラグ置換率が増加すれば、自己収縮ひずみはむしろ小さくなる傾向にある。これは、図-4に示すように自己膨張ひずみ量が大きく影響していると考えられる。

図-6は、材齢1日の最大自己膨張後の収縮ひずみとスラグ置換率の関係を示している。自己膨張後の自己収縮ひずみは、粉末度および混和剤種類にかかわらず、無置換より置換した場合に大きく、AE4B70の場合を除いていずれも $300 \sim 425 \times 10^{-6}$ 程度の範囲にある。

図-7～図-9は、試験期間中の供試体の質量変化を示している。自己収縮は水分の逸散や、温度変化、外力に起因する変化は含まれないと定義[1][13]されており、また測定期間中の供試体の質量変化率は、0.2% [9]あるいは0.05% [13]以下でなければならないとされているため、試験期間中の質量変化に関する報告は少ない[7]。本研

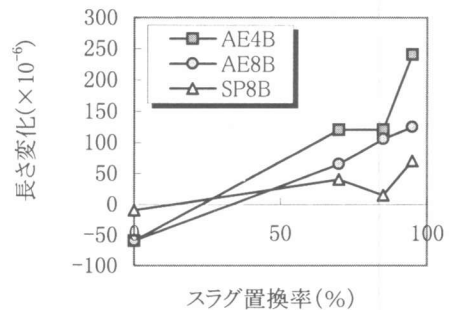


図-4 材齢1日における自己膨張ひずみ

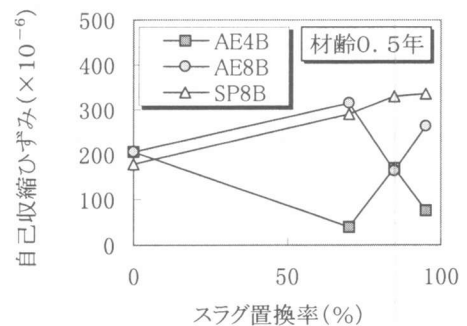


図-5 自己収縮ひずみとスラグ置換率との関係

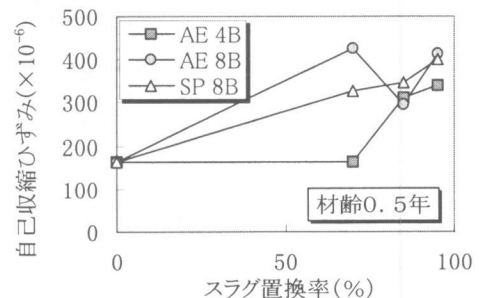


図-6 自己膨張後の自己収縮ひずみとスラグ置換率との関係

究では質量変化について若干考察した。材齢初期においては、供試体を湿布で覆っていたことから質量増加が認められた。質量変動の制限値 0.2% [9]の1/2程度に近づいたことから、材齢21日で湿布を除去したが、以後暫く質量の増加が認められたが後に減少をはじめた。前述のようにAE4B70の材齢経過に伴う自己収縮ひずみの増加量が他の置換率に比して著しく小さくなったのは、図-7に示すように吸水量が多くなったことが一因とも考えられる。また、自己収縮試験終了時にアルミ箔テープを外して、接着剤部分の含水率を測定したところ、全アルミ箔テープ質量の3.1%であった。このことから、アルミ箔テープの樹脂部分により供試体の水分の吸着や環境との水分のやり取りがある程度行われることになると思われる。

質量変化率と自己収縮ひずみとの関係の一例をAE8Bシリーズについて、図-10にプロットしている。細孔構造やコンクリート強度により収縮力や収縮ひずみが増加する[14][15]ことから一概にはいえないが、逸湿過程における収縮ひずみと質量変化の傾きは吸湿過程におけるそれより大きいことが認められるので、水分の逸散による乾燥収縮の影響が若干含まれていることも考えられる。なお、本実験では質量変化は脱型直後の材齢1日から測定しているが、高炉スラグ高含有コンクリートは、スラグ置換率や粉末度により、吸湿・逸湿状態がかなり異なることから、脱型前の湿布養生における吸湿の程度も自己収縮ひずみに影響を与えていることも考えられる。

#### 4. 結論

注水後5時間を基長とした高炉スラグ高含有コンクリートの自己収縮ひずみに関する本研究結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 高炉スラグ高含有コンクリートの材齢0.5年における最大自己収縮ひずみは  $330 \times 10^{-6}$  程度であった。

(2) 高炉スラグ高含有コンクリートの材齢経過

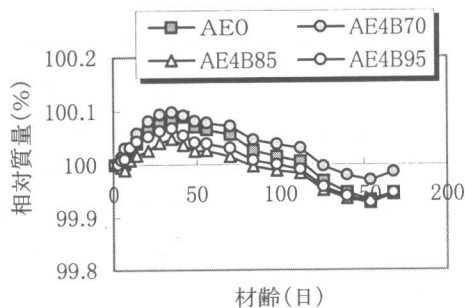


図-7 試験期間中の供試体の質量変化

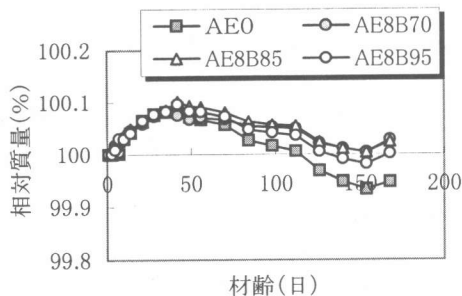


図-8 試験期間中の供試体の質量変化

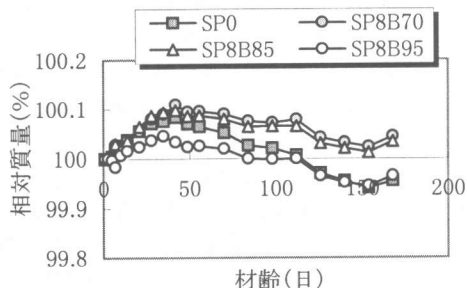


図-9 試験期間中の供試体の質量変化

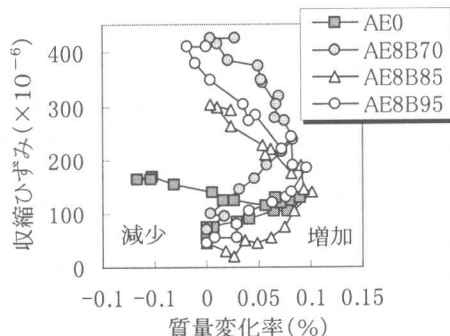


図-10 材齢1日を基準とした質量変化率と収縮ひずみとの関係

に伴う自己収縮ひずみの増加割合は、スラグ置換率が高くなれば大きくなる反面、材齢 1 日に生じる自己膨張ひずみもスラグ置換率の増加とともに増加する。

(3) 自己収縮ひずみに与えるスラグ微粉末の影響は、粉末度が異なればかなり変化する。材齢 0.5 年における自己収縮ひずみは、粉末度  $8160\text{cm}^2/\text{g}$  の場合スラグ無置換の 1.5~1.85 倍であるが、 $4040\text{cm}^2/\text{g}$  の場合は置換率にかかわらずスラグ無置換よりも小さい。

(4) 自己膨張終了後の材齢経過に伴う収縮ひずみの増加量は、スラグ置換率の増加につれて増加し、材齢 0.5 年で最大で  $425 \times 10^{-6}$  程度である。

(5) 高炉スラグ高含有コンクリートの自己収縮ひずみに与える A E 減水剤および高性能 A E 減水剤の影響の違いは明確ではないが、高性能 A E 減水剤を用いたコンクリートの材齢 1 日における自己膨張ひずみは、A E 減水剤を用いたコンクリートのそれに比してかなり小さい。

(6) 水分の逸散を防ぐために用いたアルミ箔テープの粘着用樹脂部分をとおして、水分の吸着・逸散が若干おこるようである。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究 A(1)「コンクリート構造物のリサイクルシステム」(代表者東京大学教授岡村甫)によった。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

1. Harmer E. Davis: Autogenous Volume Changes of Concrete, Proceedings of the 43rd Annual Meeting, ASTM, pp.1103-1110, 1940
2. 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛、小西謙二郎:コンクリートの自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.1, pp.561-566, 1996
3. 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛:自己収縮におよぼすセメントの化学組成の影響、セメントコンクリート論文集、No.47, pp.528-533, 1993
4. 流龍成、山下雄三、池田明、鈴木康範:高炉スラグ系低発熱形セメントを用いたコンクリートの自己収縮、土木学会第 49 回年次学術講演会、pp.702-703, 1994
5. 十河茂幸、近松竜一、鎌田文男、仙名宏:各種低発熱セメントを用いたコンクリートの硬化に伴う体積変化、土木学会第 47 回年次学術講演会、pp.934-935, 1992
6. 橋本聖三、田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛、三浦智哉:セメントペーストの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、土木学会第 46 回年次学術講演会、pp.424-425, 1991
7. 森本博昭、高井茂信、棚橋和夫、小柳洽:高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮、セメントコンクリート論文集、No.49, pp.600-603, 1995
8. 中本純次、戸川一夫、岡沢智、木虎久人:高性能 A E 減水剤を用いた高炉スラグ高含有コンクリートの中性化および発熱特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.307-312, 1994
9. 自己収縮委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.29-38, 1996
10. 中本純次、戸川一夫:高炉スラグ高含有コンクリートのブリーディングおよび凝結特性に関する研究、平成 8 年度関西支部年次学術講演概要、V-33-1, 2, 1996
11. 三浦智哉、田澤栄一、宮沢伸吾、保利彰宏:コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.359-364, 1995
12. 富澤年道:高粉末度スラグ・高含有セメントに関する基礎的研究、京都大学学位論文、1994
13. 自己収縮委員会報告書、コンクリート工学協会、1996 年 11 月
14. 平尾宙、内川浩、羽原俊祐:硬化セメントペーストの湿度及び硬化体構造の変化と自己収縮、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.705-710, 1996
15. 岡本修一、松岡康訓:細孔構造からみたセメントペーストの自己収縮に関する一考察、土木学会第 49 回年次学術講演会、pp.1018-1019, 1994