

## 論文 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

三浦 智哉\*1・田澤 榮一\*2・宮澤 伸吾\*3・保利 彰宏\*4

**要旨：**高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの自己収縮について実験的に検討を行った。その結果、水結合材比の低下、高粉末度の高炉スラグ微粉末の混入により自己収縮は大幅に増大した。また、自己収縮ひずみは長さ変化に関する既往の複合則を適用することにより推定できることを示した。

**キーワード：**自己収縮、高炉スラグ微粉末、粉末度、複合則、収縮低減剤

## 1 まえがき

セメントの水和反応に起因するコンクリートの体積減少は Autogenous Shrinkage(自己収縮)として知られているが、従来のコンクリートについては長さ変化にして  $100 \times 10^{-6}$  程度とされ[1]、構造物のひび割れ解析などには無視されてきた。しかし、高性能減水剤およびシリカフェームを用いて水結合材比を小さくすると、コンクリートの自己収縮は著しく増大することが明らかにされた[2]。また、粉末度の高い高炉スラグ微粉末を用いると自己収縮は増大し、置換率が 50~70% で最大となることがセメントペーストを用いた実験から明らかになっている[3]。

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの自己収縮特性を明らかにすることを目的として、水結合材比および高炉スラグ微粉末の粉末度を要因とし実験的に検討したものである。また、コンクリートの乾燥収縮に関して提案されている複合則の自己収縮に対する適用性および自己収縮の低減方法についても検討した。

## 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および低発熱ポルトランドセメント ( $C_2S : 56\%$ )、混和材料として粉末度の異なる高炉スラグ微粉末 (40G0, 5920, 8010 $cm^2/g$ ) (BS)、高性能 AE 減水剤 (SP)、AE 減水剤 (WR) および AE 助剤 (AE) を使用した。また、自己収縮低減を目的として収縮低減剤 (アルキレンオキシド系) (AS)、を使用した。粗骨材には流紋岩質砕石 (最大寸法 20mm, 比重 2.67, 吸水率 0.87%)、細骨材には風化花崗岩系山砂 (比重 2.57, 吸水率 1.99%) を使用した。コンクリートの配合は表 1 に示すように  $W/(C+BS)=0.2, 0.3, 0.4$  とし、高炉スラグ微粉末の置換率は 50% とした。

## 2.2 供試体の製作・養生・測定方法

供試体寸法はセメントペーストの場合  $4 \times 4 \times 16cm$ 、コンクリートの場合  $10 \times 10 \times 40cm$  とし、図 1 に示すような鋼製型枠に試料を打設した。水分の逸散を防ぐためにコンクリート仕上げ面にはポリエステルフィルムを敷き、さらに湿布で覆った。また、型枠による拘束を防ぐため、型枠

\*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

\*2 広島大学教授 工学部第四類 (建設系), 工博 (正会員)

\*3 広島大学助手 工学部第四類 (建設系), 工博 (正会員)

\*4 広島大学 工学部第四類 (建設系)

表1 コンクリートの配合

Name	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )									Slump (cm)	Flow (cm)	Air (%)	Tem. (°C)	Com.* (kgf/cm <sup>2</sup> )	E* (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
			C	BS	W	S	G	SP	WR	AE							
N20	20	31	800	—	160	452	1044	4.80	—	—	—	55.0×56.0	3.3	23.0	748	4.64	
BS20(4000)	20	31	400	400	160	442	1022	4.08	—	—	—	65.0×70.0	2.4	22.5	703	4.27	
BS20(6000)	20	31	400	400	160	442	1022	3.84	—	—	—	65.0×65.0	2.0	23.5	760	4.06	
BS20(8000)	20	31	400	400	160	442	1022	3.60	—	—	—	65.0×60.0	2.1	21.7	851	4.69	
N30	30	37	567	—	170	590	1044	1.13	—	—	19.5	—	3.0	21.5	574	4.09	
BS30(4000)	30	37	284	284	170	582	1029	0.91	—	—	21.0	—	2.1	23.0	488	3.78	
BS30(6000)	30	37	284	284	170	582	1029	0.85	—	—	20.5	—	2.3	21.5	594	3.89	
BS30(8000)	30	37	284	284	170	582	1029	0.79	—	—	19.0	—	2.3	21.5	607	4.57	
N40	40	40	450	—	180	655	1021	—	2.70	—	12.5	—	4.1	20.5	398	3.50	
BS40(4000)	40	40	225	225	180	649	1011	—	1.80	0.023	9.0	—	2.8	20.0	393	3.43	
BS40(6000)	40	40	225	225	180	649	1011	—	1.80	0.023	10.0	—	3.0	18.0	452	2.96	
BS40(8000)	40	40	225	225	180	649	1011	—	2.03	0.036	10.0	—	3.4	18.0	525	3.90	

\*28days

内面にポリエステルフィルムを敷き、さらに型枠底面とポリエステルフィルムの上にテフロンシート(厚さ 0.1mm)を敷いた。供試体は打設後 20±2°C, 95±5%R.H.の室内に静置し、供試体両端にセットした鋼製プラグにスプリング圧の小さいダイヤルゲージを接着させ、練り混ぜ直後からのひずみの測定を材齢 24 時間まで行った。ここでスプリングを除去したダイヤルゲージを用いたのはダイヤルゲージの測定圧によりプラグが移動するのを防ぐためである。材齢 24 時間で脱型し、直ちにアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)により供試体全面をシールし、両側面にコンタクトチップを貼り付け、さらに、継ぎ目の多い箇所にはブチルゴム系のテープでシールした。

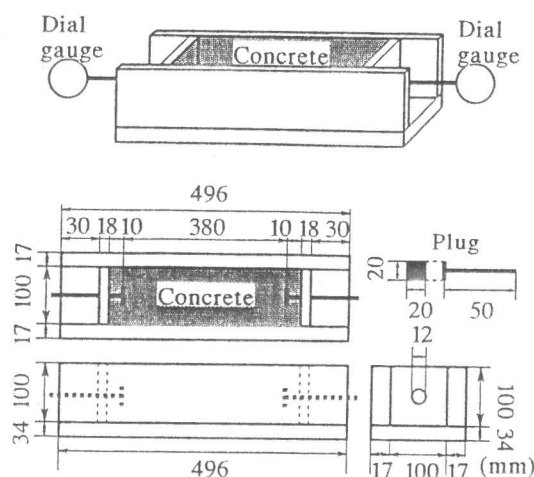


図1 自己収縮ひずみの測定方法

### 3 結果および考察

#### 3.1 自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響

図2は高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮ひずみの測定結果である。下側のグラフが示すように、水結合材比が小さく、高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いた場合、材齢初期から大きな自己収縮が生じている。特に、 $W/(C+BS)=0.2$ で粉末度の大きな高炉スラグ微粉末を用いた場合、材齢1日までに $250 \times 10^{-6}$ 、材齢3カ月で $700 \times 10^{-6}$ もの自己収縮を生じている。

自己収縮に及ぼす水結合材比の影響を図3に示す。いずれの配合においても水結合材比の低下に伴い自己収縮が増大しているのがわかる。図4に自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の粉末度の影響を示す。いずれの水結合材比においても粉末度の増加に伴い自己収縮が増大しているのがわかる。これは、水結合材比の低下および高粉末度の高炉スラグ微粉末の混入がコンクリートの組織を緻密化し、間隙水に生じるメニスカスの曲率半径小さくなったため、自己収縮が大きくなったものと思われる。また、自己収縮が生じる材齢についての検討を行うために凝結試験を行っ

た。その結果を図5に示す。これより、 $W/(C+BS)=0.2$ でBS(8000)を用いた場合、自己収縮は始発時以前から大きく進行しているのがわかる。

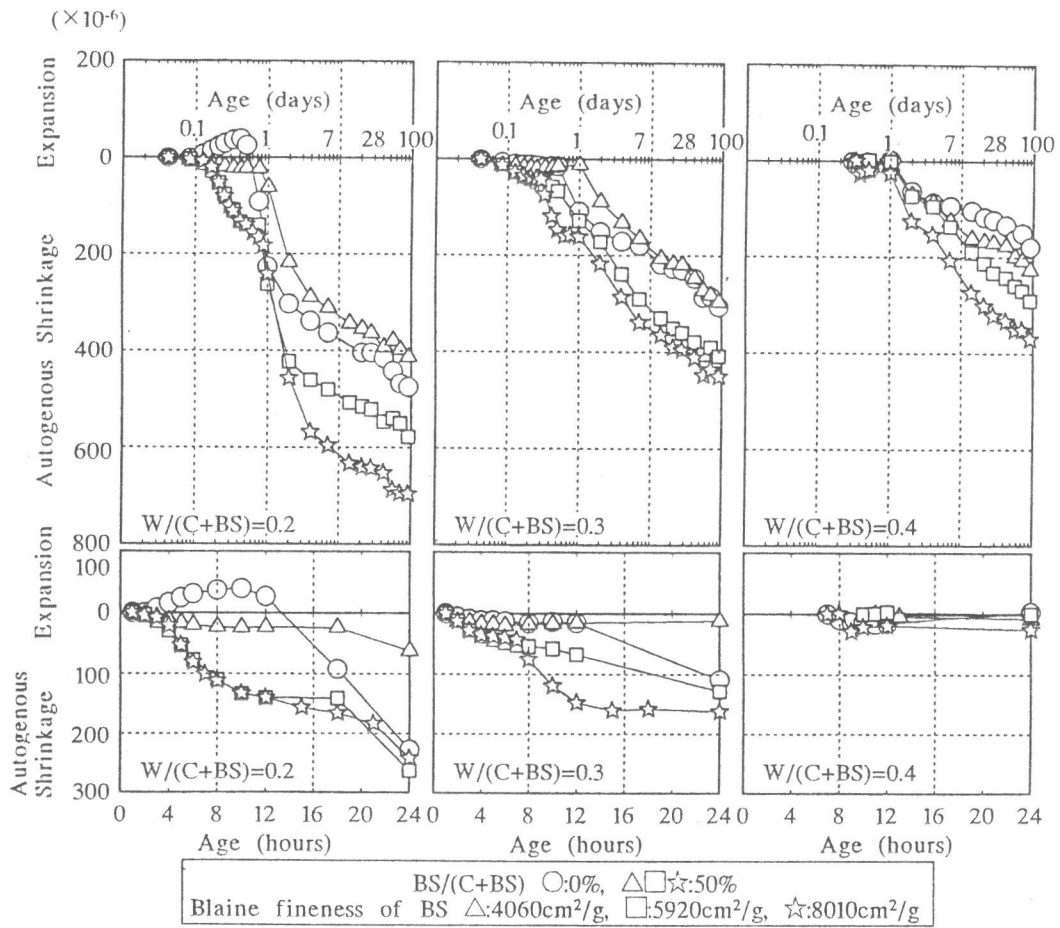


図2 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮

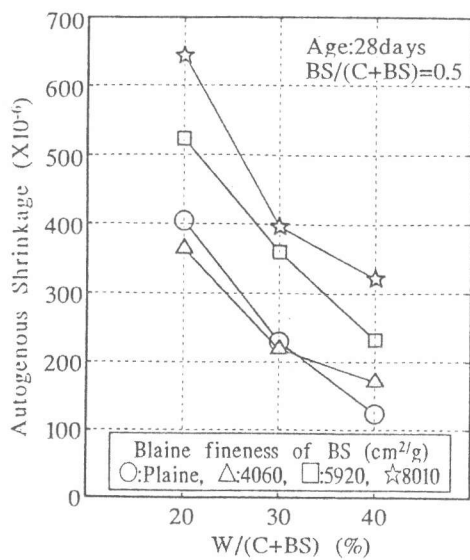


図3 自己収縮に及ぼす水結合材比の影響

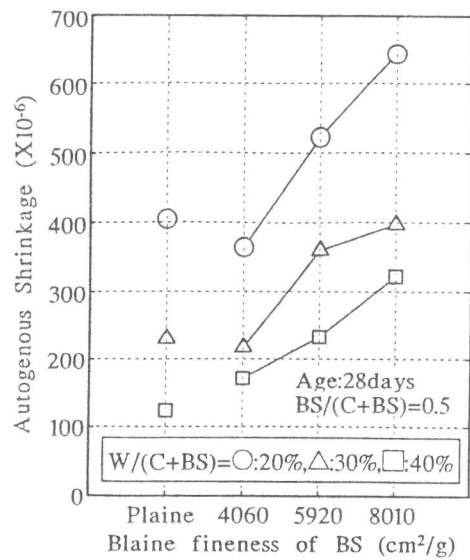


図4 自己収縮に及ぼすBSの粉末度の影響

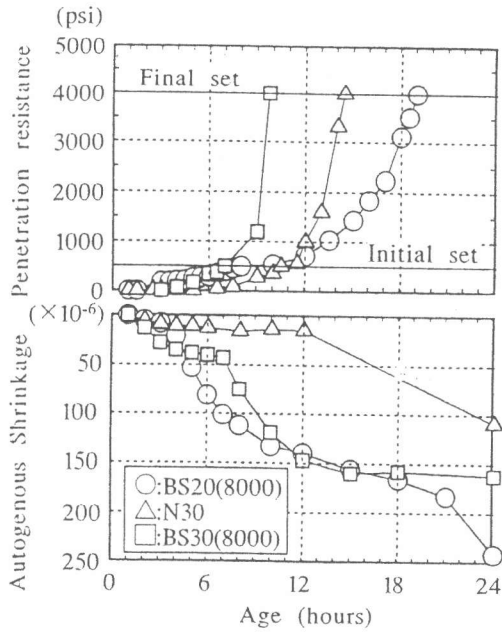


図5 凝結時間と自己収縮の関係

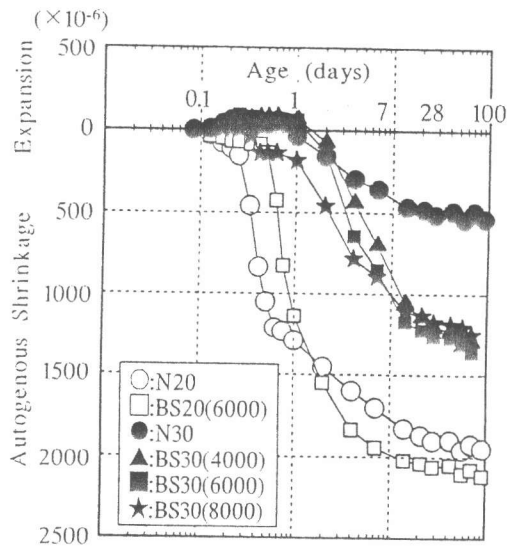


図6 セメントペーストの自己収縮

### 3.2 既往の複合則の適用性

コンクリートの自己収縮について複合則を用いて検討するために、ここではコンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と考えた。コンクリートの乾燥収縮に関して骨材の拘束効果を考慮したモデルが従来より種々提案されているが、これらはいずれもほぼ同一の予測値を与えることが確認されている。ここでは、Hobbs[4]により提案されている(式3)を自己収縮についても適用できるか否かについて検討を行った。なお、参考のため直列モデル(式1)および並列モデル(式2)により予測値の最大値および最小値を示した。以上の式の誘導において骨材の収縮は0とした。

$$\epsilon_c / \epsilon_p = 1 - Va \tag{式1}$$

$$\epsilon_c / \epsilon_p = (1 - Va) / \{(Ea / Ep - 1)Va + 1\} \tag{式2}$$

$$\epsilon_c / \epsilon_p = \frac{(1 - Va)(Ka / Kp + 1)}{1 + Ka / Kp + Va(Ka / Kp - 1)} \tag{式3}$$

- ここに、
- $\epsilon_c$  : コンクリートの自己収縮ひずみ
  - $\epsilon_p$  : セメントペーストの自己収縮ひずみ
  - $Va$  : 骨材の体積濃度
  - $Ea$  : 骨材の静弾性係数 ( $7.29 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )
  - $Ep$  : セメントペーストの静弾性係数
  - $Ka$  : 骨材の体積弾性係数 ( $4.45 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )
  - $Kp$  : セメントペーストの体積弾性係数
  - $K = E / 3(1 - 2\gamma)$
  - $\gamma$  : ポアソン比

なお、セメントペーストの自己収縮 $\epsilon_p$ としては図6に示す実測値を用い、静弾性係数は材齢1、28日の実験値を基に決定した。

自己収縮の実測値を前述した複合則による計算値と比較した結果を図7に示す。ここでは基点

材齢を1日としている。水結合材比が0.2の場合、材齢の進行に伴い自己収縮の実測値がHobbsモデルの計算値と非常によく一致している。水結合材比が0.3の場合、自己収縮の実測値が並列モデルとHobbsモデルの中間の値を示している。いずれの水結合材比においても自己収縮ひずみは、既往の乾燥収縮予測式で予測できることが明らかとなった。しかし、ここでの自己収縮の実測値は材齢1日以降についてのデータを基にしたものであり、初期材齢からの自己収縮ひずみをも含めて今後さらに検討する必要がある。

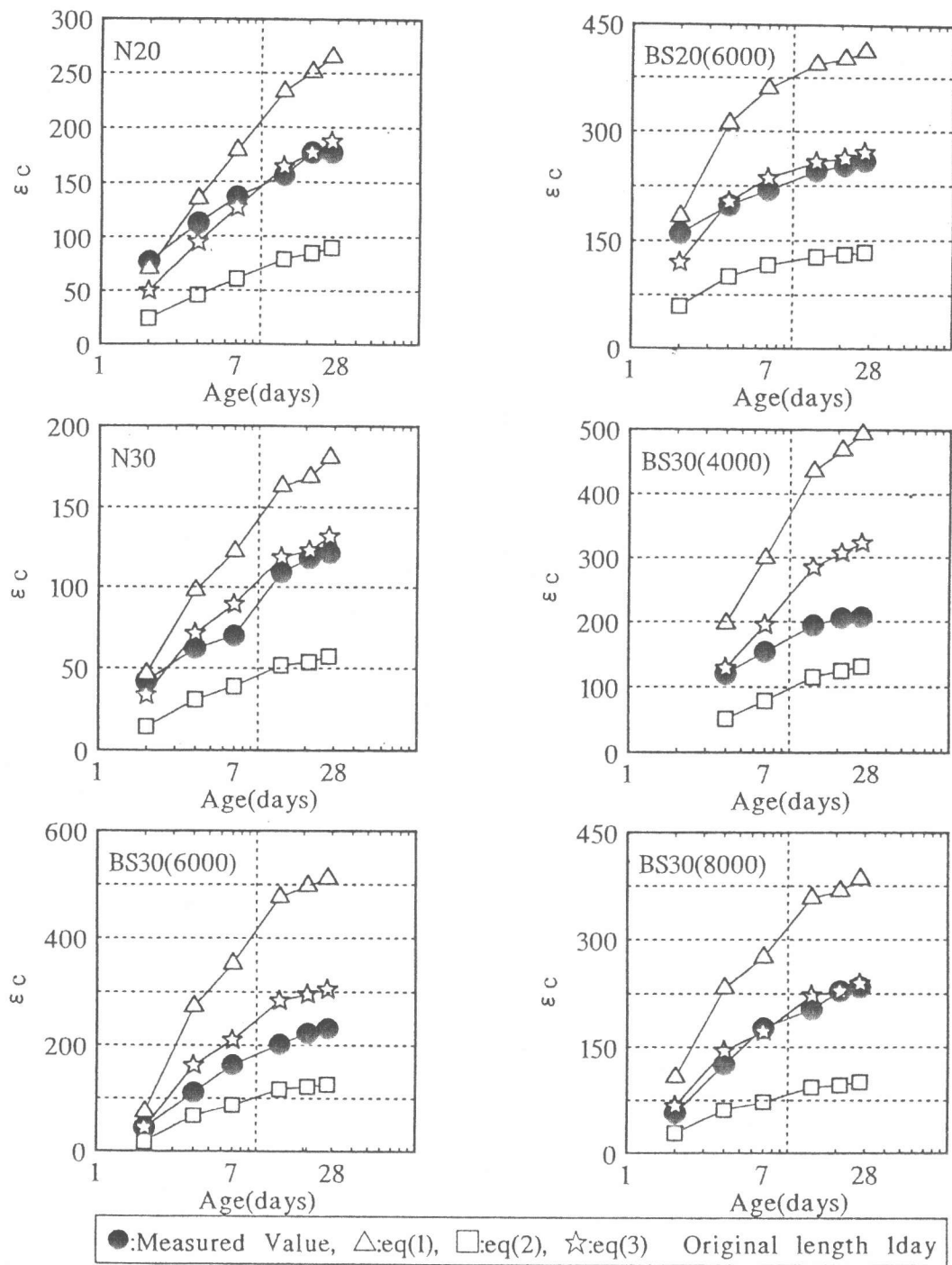


図7 計算値と実測値の比較

### 3.3 自己収縮低減方法の検討

自己収縮の特に大きい配合(水結合材比 20%)において自己収縮低減の検討を行った。自己収縮低減を目的として使用した材料は低発熱ポルトランドセメント、収縮低減剤である。それらの自己収縮の測定結果を図8に示す。自己収縮が小さいといわれる低発熱ポルトランドセメントは、高炉スラグ微粉末を混入した本実験条件では低減効果が認められなかった。一方、粉末度の高い高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに収縮低減剤の効果が認められた。これは、間隙水の表面張力の低下により毛細管張力が低下したことが一因と考えられる。しかし、自己収縮発生機構は毛細管張力だけではなく  $C_3A$  および  $C_4AF$  の水和生成物であるエトリングイトが大きく影響していることが明らかとなっており[5]、今後それらを含めた低減方法を検討する必要があると思われる。

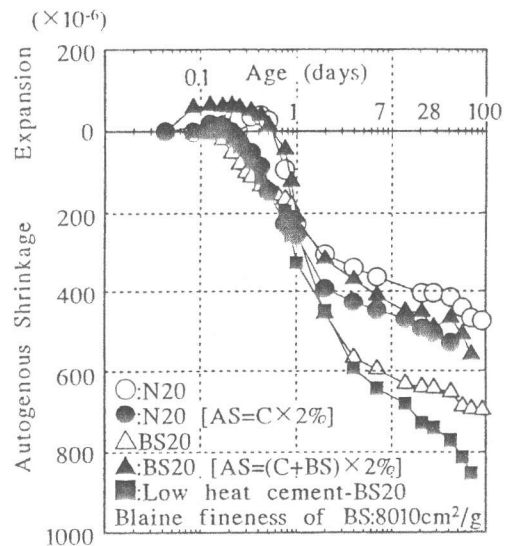


図8 コンクリートの自己収縮に及ぼす収縮低減剤の影響

## 4 結論

- (1)高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮は、水結合材比の低下および高炉スラグ微粉末の粉末度の増大とともに大きくなり、 $W/(C+BS)=0.2$ 、 $BS/(C+BS)=0.5$  においては始発以前から自己収縮が進行していることがわかった。
- (2)高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮は Hobbs モデルを用いることにより推定できることが明らかとなった。
- (3)収縮低減剤を使用することにより、高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの自己収縮低減効果が認められた。

【謝辞】本研究は、土木学会コンクリート委員会高炉スラグ微粉末研究小委員会（委員長：沼田晋一）の活動の一部として行われたものである。また、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金により行われた。記して感謝の意を表す。

### 【参考文献】

- [1]Davis.H.E.:Autogenous volume change of concrete, Proc.ASTM, 40, pp.1103-1110, 1940
- [2]田澤榮一, 宮澤伸吾, 佐藤剛:セメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.684-689, 1992.12
- [3]田澤榮一, 宮澤伸吾, 佐藤剛, 橋本聖三:高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, No.19, pp.23-28, 1992.10
- [4]Hobbs.D.W.:Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete, Journal of ACL, Vol.71, No.9, pp.445-450, 1974
- [5]田澤榮一, 宮澤伸吾, 三浦智哉, 谷慎太郎:セメントペーストの自己収縮に及ぼす  $C_3A$  の影響, 第49回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.700-701, 1994.9