

# 論文 セメント系材料の自己収縮に及ぼす混和材の影響

堀田智明\*1・名和豊春\*2・矢野めぐみ\*3・出雲健司\*4

**要旨:**本研究は、混和材が自己収縮ひずみに及ぼす影響を定量的に把握することを目的とし、粉末度の異なるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ3種類混入したモルタルの自己収縮を測定し、各粉体の混合比率と自己収縮ひずみの関係の評価方法について検討した。その結果、材齢1日以降のモルタルの自己収縮ひずみは材齢の対数関数で良く表現することができ、セメントおよび混和材の混合比率により自己収縮ひずみを評価できる可能性が示された。

**キーワード:** 自己収縮, プレーン比表面積, 置換率, 重ね合わせ

## 1. はじめに

最近、高性能AE減水剤が開発されたことにより、高流動コンクリートや高強度コンクリートが施工実績を伸ばしている。しかし、これらのコンクリートでは、水粉体比が低いことや、単位結合材量が多いことから自己収縮が顕在化し、ひび割れが発生する危険性が指摘されている。

このような背景から、混和材が自己収縮に及ぼす影響を扱った多数の研究報告がなされており<sup>1)</sup>、高炉スラグ微粉末は自己収縮を増大させ、フライアッシュはそれを低減させる傾向があることが知られている。しかし、これらの混和材の品質や混合比率が自己収縮ひずみに及ぼす影響を定量的に扱った研究は数少なく、これらの混和材を有効に活用した自己収縮の制御方法は確立されていないのが現状である。

本研究では、混和材が自己収縮ひずみに及ぼす影響を定量的に把握することを目的とし、粉末度の異なるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をそれぞれ3種類混入したモルタルの自己収縮を測定し、各粉体の混合比率と自己収縮ひずみの関係について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調査

セメントには、普通ポルトランドセメント(OPC)を、混和材は粉末度の異なるフライアッシュ(FA)3種類および高炉スラグ微粉末(BS)3種類を用いた。各粉体の特性を表1に示す。細骨材には浜厚真産の陸砂(密度:2.71g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.1%, F.M:2.71)を、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。表2にモルタルの調査を示す。セメント単体のモルタルおよびFAもしくはBSと置換した2成分系のモルタルでは混和材置換率の影響を、3成分系のモルタルではFAとBSの混合比率について検討した。モルタルの練り混ぜにはホバート型ミキサ(公称容量約5l)を用い、粉体と骨材を投入し60秒空練りし、水と混和剤を投入し90秒低速で練り混ぜ、掻き落としをした後更に高速で90秒練

表1 粉体の特性

粉体	記号	密度	プレーン値
		(g/cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>2</sup> /g)
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3510
	F1	2.21	2660
フライアッシュ	F2	2.31	3930
	F3	2.44	6650
	B1	2.91	4120
高炉スラグ微粉末	B2	2.91	6200
	B3	2.91	7990

\*1 北海道電力(株) 土木部 工修(正会員)

\*2 北海道大学大学院 助教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博(正会員)

\*3 北海道大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

\*4 北海道大学大学院 助手 工学研究科 社会基盤工学専攻 工博(正会員)

り混ぜた。なお、練上がり温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ であった。

## 2.2 試験項目および方法

### (1) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定は、著者らの提案する<sup>3)</sup>、低弾性型埋め込みゲージ（ヤング係数 $1.2\text{N/mm}^2$ ）を用いる方法により行なった。供試対は $5\phi \times 10\text{cm}$ の鋼製型枠を用いて作製し、型枠に試料を投入すると同時に、供試体中央にひずみゲージを埋設した。試料が長さ変化を起こす際に、型枠と試料との間に生じる摩擦を低減する目的で型枠の内側に厚さ $0.1\text{mm}$ のテフロンシートを敷いた。試料の打ち込み後は、水分の逸散を防ぐため上端面を封緘し、室温 $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60\%$ の恒温

室で脱型せずに養生し、混練直後から2週間までのひずみを測定した。なお、自己収縮ひずみの測定値は3本の供試体の平均値とした。

### (2) 供試体内部温度

自己収縮ひずみ測定用供試体の内部温度を銅・コンスタンタン熱電対により測定した。熱電対の埋設位置は供試体中央とし、測定した供試体内部温度により自己収縮ひずみの温度補正を行った。なお、モルタルの線膨張係数は $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 自己収縮に及ぼす混和材の影響

図1に、OPC単味とFAおよびBSを混入した

表2 モルタルの調合

シリーズ	使用混和材	混和材容積置換率 (%)		水粉体容積比 w/b	細骨材混入率 $V^*/V^m$	単体量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )		
		FA	BS			水 w	粉体 b	細骨材 s
1成分	-	-		0.948	0.47	258	272	470
2成分	F1、F2、F3 B1、B2、B3	10、30、60						
3成分	F1、B2	10	50					
		20	40					
		30	30					
		40	20					

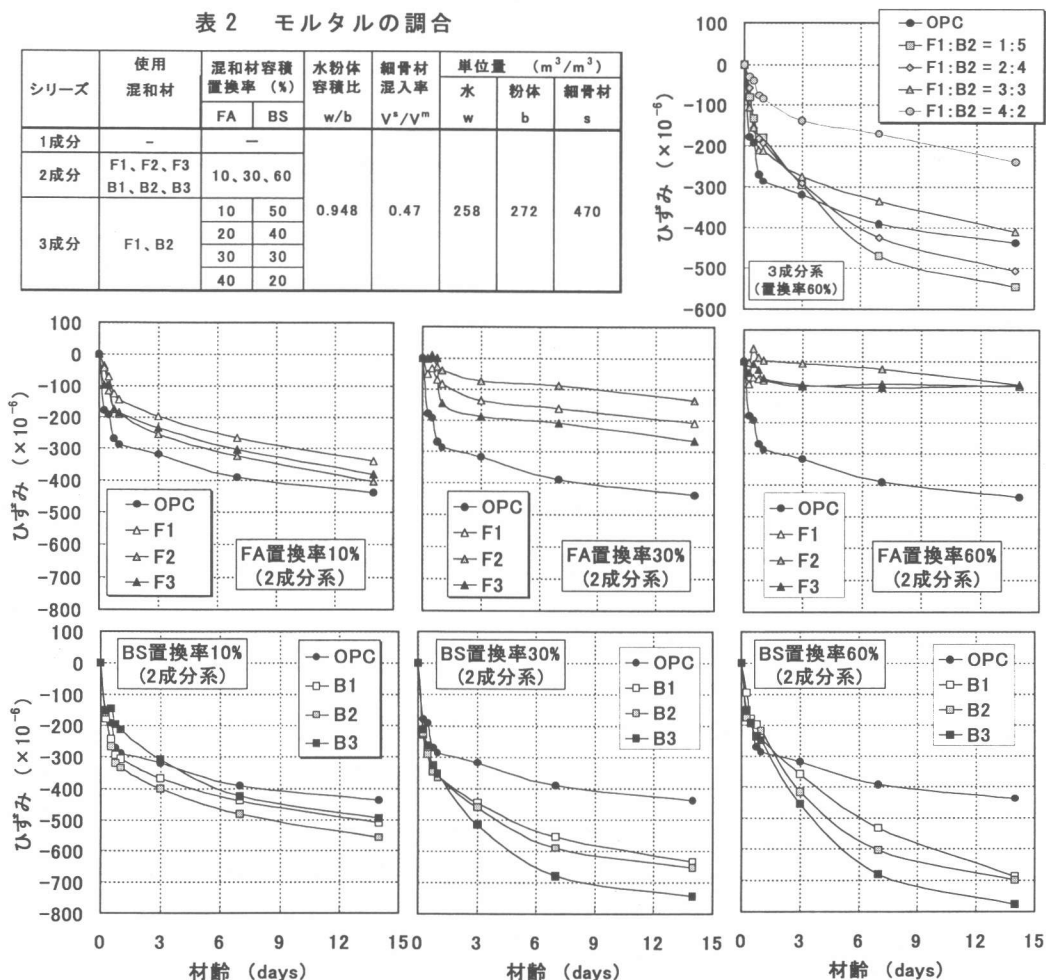


図1 自己収縮に及ぼす混和材の影響

2成分系および3成分系モルタルの自己収縮の測定結果を示す。図より、置換率が大きくなるに従い、混和材の影響が強くなり、フライアッシュは自己収縮を低減させ、高炉スラグ微粉末は自己収縮を増大させる傾向が顕著に認められた。また、高炉スラグ微粉末を混入した系では、従来からの報告どおり<sup>4), 5), 6)</sup> 長期材齢において自己収縮が増大する傾向を示すのに対し、フライアッシュを混入した系では初期材齢および長期材齢ともに自己収縮が抑制される傾向が認められた。

一方、3成分系のモルタルでは高炉スラグ微粉末の混合比率が大きくなるほど自己収縮が増大する傾向も認められる。なお、自己収縮の材齢に伴う変化は、材齢と直線関係になく、初期において自己収縮ひずみが著しく増大するのが認められる。これは、ひずみの進展速度は水和反応が活発なごく初期の材齢と、水和反応が落ち着いた材齢とで異なるためと考えられる。このため、本研究では、前者と後者の境界点を、供試体内部温度が一定となる時点とし、両者における自己収縮ひずみに及ぼす混和材の影響を検討することとした。

図2に、モルタルの内部温度の測定例を示すが、図より材齢1日で内部温度が概ね一定となることから、上記の境界点を材齢1日とした。図3に、材齢1日以降の収縮ひずみとその近似式の例を示す。図より、材齢1日以降のひずみは混和材の種類および置換率ごとに(1)式に示すような材齢の対数関数で良く表すことができる。

$$y = -\alpha \ln(x) - \beta \quad (1)$$

ここに、

y : 材齢x日の自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

x : 材齢 (days)

$\alpha, \beta$  : 係数

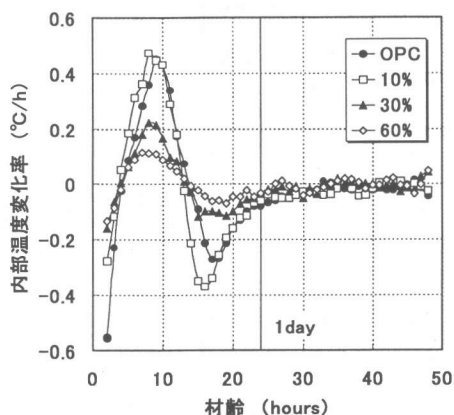
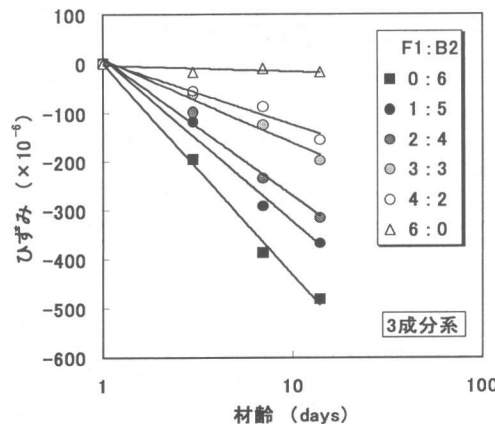
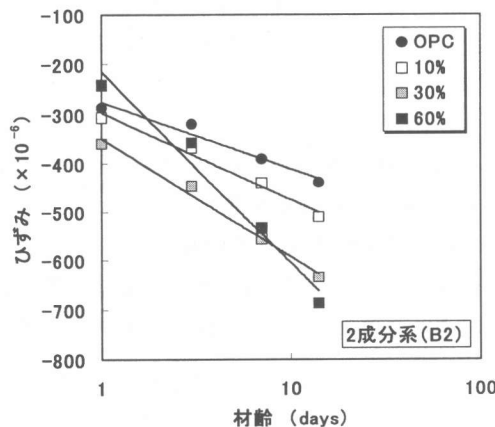
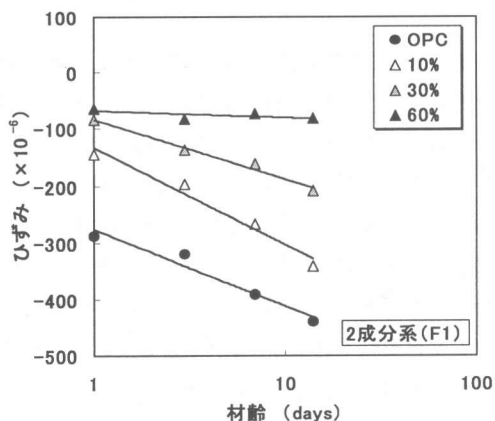


図2 供試体内部温度の変化率

図3 材齢1日以降のひずみ

表3 近似式の相関係数(2成分系)

置換率	F1	F2	F3	B1	B2	B3
10%	0.97	0.98	0.96	0.97	1.00	0.99
30%	0.98	0.94	0.94	0.99	0.99	0.99
60%	0.52	0.81	0.64	0.98	0.98	0.99

表3 近似式の相関係数(3成分系)

F1:B2			
1:5	2:4	3:3	4:2
0.96	0.98	0.99	0.98

表3および表4に、(1)式より求めた各調合の近似式の相関係数の値を示すが、すべての調合で高い相関が得られていることが分かる。このことから、混和材が自己収縮に及ぼす効果は対数関数による近似で表現することが可能であるものと思われる。近似曲線の係数 $\alpha$ は、材齢1日以降のひずみの進展の度合いを、切片 $\beta$ は材齢1日のひずみをそれぞれ表すが、混和材を混入したモルタルの $\alpha$ および $\beta$ を、混和材無混入のモルタルの $\alpha$ および $\beta$ で除した値をそれぞれ $\gamma$ 、 $\delta$ と定義し、以下それぞれひずみ増加係数、初期低減率と呼ぶことにする。

### 3.2 自己収縮ひずみの推定

#### 3.2.1 ひずみ増加係数 $\gamma$

##### (1) 混和材置換率の影響

図4に、前項で求めた材齢1日以降のひずみ増加係数 $\gamma$ と混和材置換率の関係を示す。図より、フライアッシュを混入したモルタルでは置換率

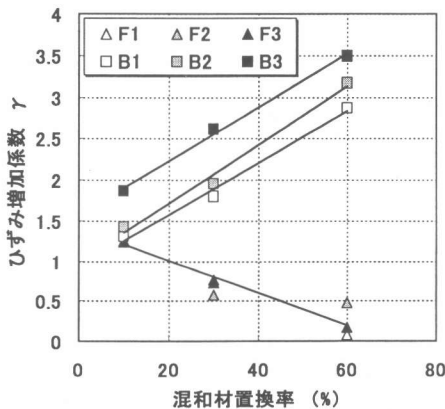


図4 ひずみ増加係数に及ぼす置換率の影響

10%の場合、混和材無混入のモルタルよりもひずみ増加係数が大きくなるものの、置換率の増大に伴い、ひずみ増加係数が小さくなっていることが認められる。また、置換率10%から60%の範囲においては、ひずみ増加係数はフライアッシュのブレン値に拘わらず、直線関係で一義的に近似することが可能と思われる。

一方、高炉スラグ微粉末を混入したモルタルでは、置換率の増大に伴い、ひずみ増加係数 $\gamma$ も直線的に増大しているのがわかり、フライアッシュを混入した系と同様に線形関数による近似が可能と思われる。しかし、高炉スラグ微粉末では、ブレン値が大きくなるに従いひずみ増加係数 $\gamma$ は上側に平行にシフトしていることも認められる。図5に、高炉スラグ微粉末のブレン値とひずみ増加係数の関係を示す。図より、ブレン値とひずみ増加係数の間には、直線関係が存在しており、ブレン値の影響も置換率の影響と同様に線形関数で評価することが可能と考えられる。以上、置換率が10%から60%の範囲において、フライアッシュを混入したモルタルでは置換率により、高炉スラグ微粉末を混入したモルタルではブレン値と置換率によりひずみ増加係数を推定することが可能と考えられる。

図6、図7に、混和材置換率が変化した場合の、材齢1日以降のひずみの実測値と、上記の線形関

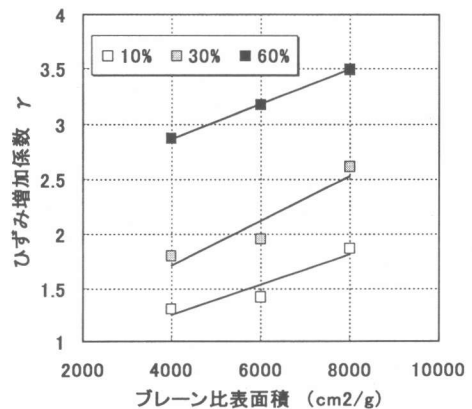


図5 ひずみ増加係数 $\gamma$ に及ぼす高炉スラグ微粉末のブレン値の影響

数から推定したひずみ増加係数によるひずみの推定値の比較の例を示す。図より、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末ともに、推定値と実測値が良く一致しているのが分かり、材齢1日以降の自己収縮に及ぼす混和材置換率の影響は、ひずみ増加係数 $\gamma$ と置換率の関係により評価できるものと考えられる。

### (2) 3成分モルタルの混和材の複合効果

図8に、3成分系モルタルの自己収縮ひずみの実測値から求めたひずみ増加係数と、フライアッシュと高炉スラグ微粉末の混合率の関係を示す。図より、混和材の混合比とひずみ増加係数の間には良好な直線関係が存在しており、任意の混合比率におけるひずみ増加係数を推定することが可能と思われる。すなわち、3成分系モルタルの自己

収縮ひずみは、普通ポルトランドセメント、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末それぞれの粉体の自己収縮ひずみをその体積比率を考慮した単純な重ね合わせで評価できる可能性が示された。

### 3.2.2 初期低減効果 $\delta$

図9に、前項で求めた初期低減効果に及ぼす混和材置換率の影響を示す。図より、フライアッシュは、混和材の置換率が大きくなるに従い、初期低減効果が大きくなっている。しかし、その効果はブレン値により差があり、ブレン値と $\gamma$ の関係は明確ではない。一方、高炉スラグ微粉末は、置換率との間に明確な関係は認められず、また、置換率10%の場合を除いてブレン値によらずほぼ同じ値を示している。以上のことから、初

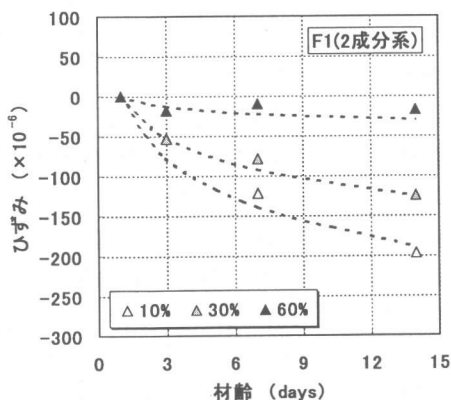


図6 自己収縮の推定値と実測値の比較 (フライアッシュの置換率の影響)

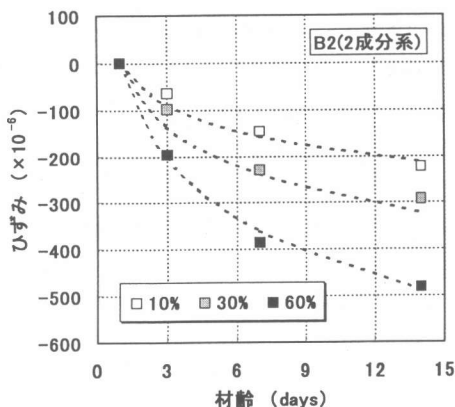


図7 自己収縮の推定値と実測値の比較 (高炉スラグ微粉末の置換率の影響)

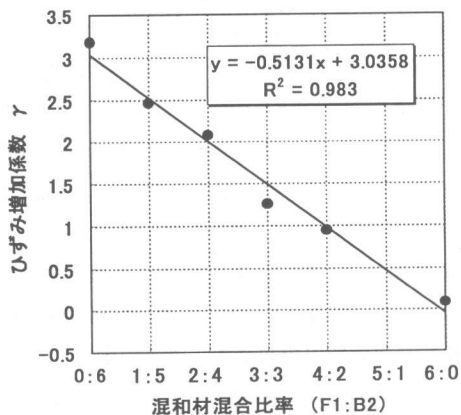


図8 ひずみ増加係数 $\gamma$ に及ぼす混和材混合比率の影響

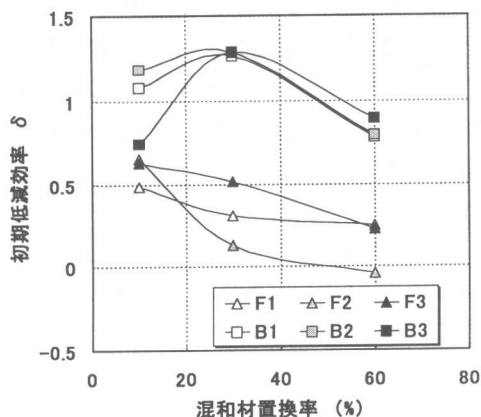


図9 初期低減効果 $\delta$ に及ぼす混和材置換率の影響

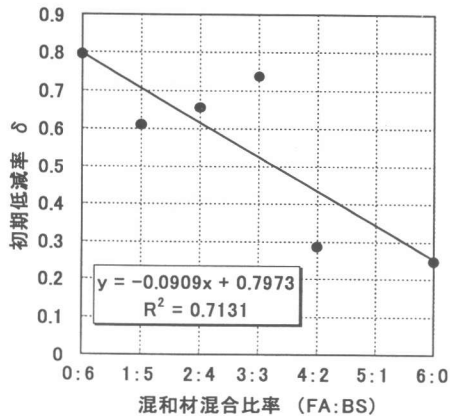


図 10 初期低減効果  $\delta$  に及ぼす置換率の影響

期低減効果と混和材置換率の関係では、概ねの傾向を捉えることは可能であるが、その効果を定量的に評価することは困難と思われる。

図 10 に、3 成分モルタルの  $\delta$  と混和材混合比率の関係を示す。図より、フライアッシュ混入率が増加するに伴い  $\delta$  は小さくなる傾向があるがバラツキが大きく、置換率と  $\gamma$  の関係と同様に定量的に評価することは困難と思われる。

以上のことから、初期低減効果  $\delta$  を、材齢 1 日以降のひずみ増加率  $\gamma$  と同様に、単純に粉体の混合比率の線形関係で評価することは困難であるものと判断される。この原因としては、材齢 1 日以内の硬化過程では、セメントの水和反応が活発に進行していることから、特に混和材の化学的な影響を強く受けているためと考えられる。したがって、材齢 1 日以内の自己収縮ひずみを粉体の混合比率から推定するには、各粉体の水和の特性を定量的に把握する必要があるものと考えられ、今後の検討課題といえる。

#### 4. おわりに

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したモルタルの材齢 1 日以降の自己収縮ひずみは、材齢の対数関数で良く現表することができる。
- 2) 材齢 1 日以降のひずみの増加係数  $\gamma$  は、フライアッシュを混入したモルタルでは置換率により、高炉スラグ微粉末を混入したモルタルではブレン値と置換率により推定できる可能性が示された。
- 3) 材齢 1 日以内のひずみに及ぼす混和材の置換率や混合比率の影響は、単純な重ね合わせでは表現できないものと思われ、各粉体の水和特性も考慮する必要があると考えられた。

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤信吾, 重川幸司: 水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.122-127, 1991
- 2) 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.22-45, 1996
- 3) 堀田智明, 名和豊春: セメント系材料の自己収縮に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.542, 2001.4
- 4) 田澤栄一, 宮澤信吾: 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.502/V-205, pp.43-52, 1994
- 5) Tangtermsirikul.S et al.: Class C Fly Ash as a Shrinkage Reducer for Cement Paste, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, SP-153, Vol.1, pp.385-402
- 6) 矢野めぐみ, 名和豊春, 荻原淳平, 堀田智明: 高流動コンクリートの自己収縮に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, 2000