

論文 モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響

堀田 智明*1・名和 豊春*2

要旨：本研究では、性状の異なる5種類の海外炭フライアッシュを混入したモルタルの自己収縮を測定し、自己収縮低減効果に及ぼすフライアッシュの品質要因について検討を行った。その結果、フライアッシュの自己収縮低減効果はフライアッシュの品質の影響を受け大きく受け、必ずしも収縮を低減させない炭種も存在することが分かった。また、材齢1日での自己収縮ひずみの低減効果は、SiO₂およびCaOの含有率やpHなどのフライアッシュの化学特性と関係が強いことが分かった。

キーワード：自己収縮, 海外炭フライアッシュ, 炭種, 化学性状, SiO₂, CaO

1. はじめに

最近、高流動・高強度コンクリートが普及し、従来のコンクリートでは不可能だった工構法が実現されている。しかし、これらの高性能コンクリートで自己収縮ひび割れ発生の危険性が指摘されており大きな問題点となっている¹⁾。

このような背景から、コンクリートの自己収縮に及ぼす混和材の影響について、多くの研究報告がなされ、特にフライアッシュは自己収縮を低減させる傾向があることも報告されている²⁾。しかし、フライアッシュの品質が自己収縮に及ぼす影響を扱った論文は数少ないため、その作用機構に関して不明な点が多く、混和材を積極的に活用した自己収縮の制御方法が確立されていないのが現状である。

本研究では、性状の異なる5種類の海外炭フライアッシュを混入したモルタルの自己収縮を測定し、フライアッシュの自己収縮低減効果を

定量的に捉え、結合水率や相対湿度の変化とあわせて考察し、自己収縮低減効果に及ぼすフライアッシュの品質要因について検討を行った。

2. 実験計画

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を、混和材は海外炭フライアッシュ5種類（JIS II種相当品）を用いた。使用し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/cm³、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にモルタルの調合を示す。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さらに高速で90秒練り混ぜた。なお、練上がり温度は20±2℃であった。

表-1 粉体の特性

粉体	記号	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)		メチレンブルー吸着量 (mg/g)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	pH
						28日	91日				
普通ポルトランドセメント	OPC	1.1	3.16	3510	—	—	—	—	—	—	—
フライアッシュ	FA1	2.1	2.14	2960	101	83	95	0.55	68.4	0.27	4.3
	FA2	2.3	2.12	2900	100	85	99	0.59	69.3	0.42	4.0
	FA3	1.8	2.21	2660	108	85	—	0.59	56.2	5.25	12.3
	FA4	2.5	2.31	3930	111	79	—	12	55.3	5.03	12.0
	FA5	4.1	2.44	6650	107	91	—	0.86	54.3	4.60	10.4

*1 北海道電力株式会社 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)

表2 モルタルの調合

記号	混和材 容積置換率 (%)	水粉体 容積比 w/b	細骨材 混入率 V_s/V_m	単位量 (m^3/m^3)			
				水 w	セメント c	フライアッシュ fa	細骨材 s
OPC	0	0.948	0.47	258	272	0	470
FA1	10				245	27	
~	30				190	82	
FA5	60				109	163	

2. 2 試験項目および試験方法

(1) 自己収縮ひずみおよび供試体内部温度

自己収縮ひずみの測定は、著者らの提案³⁾する低弾性型埋め込みゲージ（ヤング係数 $1.2N/mm^2$ ）を用いる方法により行なった。供試体は $5\phi \times 10cm$ 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（熱電対付）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 $0.1mm$ 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 $20^\circ C$ 、相対湿度 60% の恒温室内で養生し、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) 結合水率

フライアッシュの炭種が水和反応の速度に及ぼす影響を把握するため結合水率を測定した。結合水率はモルタルの調合と粉体と水の比が等しいセメントペーストにより測定した。セメントペーストは、材料を一括投入した後ハンドミキサーにより 3 分間練り混ぜて作製した。所定の材齢に達した時点で粉砕し、これを大量のアセトン中に 1 日間浸漬して水和を停止させた後、 $40^\circ C$ で 4 時間乾燥させた後粉砕し、結合水量を求めた。結合水量は $1000^\circ C$ での強熱減量から求め、未水和のセメントの強熱減量を補正して、未水和の粉体（セメント+フライアッシュ）に対する容積比率（以後、結合水率）で示した。なお、結合水率の測定は、供試体内部温度の上昇の開始点（材齢 0.17 日）、ピーク点（0.5 日）、

材齢 1 日および 14 日の計 4 点で行った。

(3) 内部相対湿度

相対湿度の測定は、湯浅らが提案する⁴⁾ セラミックセンサーを用いて行った。測定した電気抵抗は、名和らが示した⁵⁾ 電気抵抗と相対湿度の関係を表す (1) 式により相対湿度に換算した。供試体は、ひずみの測定と同様に $5\phi \times 10cm$ の鋼製型枠で作製し、セラミックセンサーは試料の中央に埋設した。試料打ち込み後は水分の逸散を防ぐため上部端面を封緘し、供試体作製直後から材齢 14 日までの相対湿度の変化を測定した。

$$RH = -0.055(\rho - 372.8)^{0.47} + 100 \quad (1)$$

ここに、

RH : 相対湿度 (%)

ρ : セラミックセンサーの電気抵抗 (Ω)

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの自己収縮に及ぼす FA の影響

モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響を図-1、図-2 および図-3 に置換率ごとに示す。図より、フライアッシュの自己収縮低減効果は、フライアッシュの炭種によって大きく異なっていることがわかる。また、いずれのフライアッシュを用いたモルタルにおいても、置換率の増大に伴いひずみが大きく低減されていることが認められる。しかし、置換率が小さい場合逆に自己収縮を増大させる炭種も存在することがわかる。

3.2 水和反応と自己収縮

図-4に、フライアッシュを混入したセメントペーストの結合水率を示す。図より、フライアッシュの置換率の増大に伴い結合水率は低下す

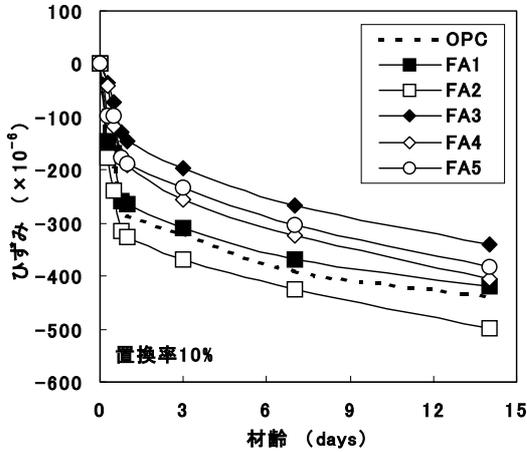


図-1 モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響 (置換率 10%)

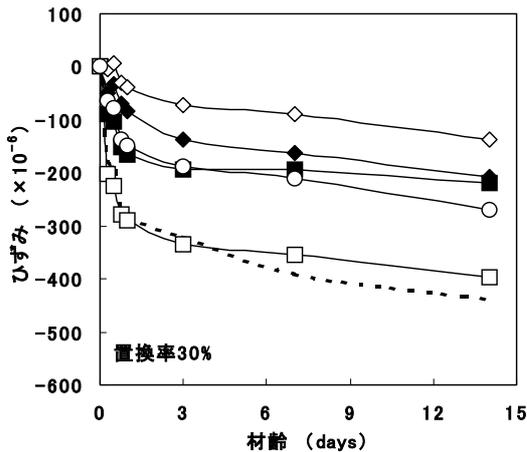


図-2 モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響 (置換率 30%)

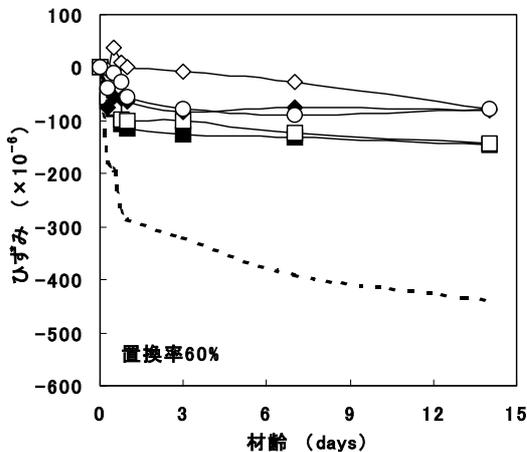


図-3 モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響 (置換率 60%)

るが、FAの炭種によらずほぼ同程度の値を示していることが分かる。図-1~図-3では、自己収縮ひずみの低減効果がFA炭種により大きく異なる結果であったが、この差異は水和反応速度の違いによるものではないことが分かった。

図-5に、モルタルの内部相対湿度の変化を、フライアッシュ置換率ごとに示す。図より、置換率の増大に伴い、相対湿度の低下速度が緩やかになる傾向が認められた。これは、モルタル中の単位セメント量が減少し、水和反応が遅延しているためと考えられる。しかし、置換率の増大により相対湿度の低下が早くなるケースも認められた。また、図-4では結合水率は炭種によらずほぼ同程度であったが、図-5の相対湿度の変化では炭種による差が認められている。これらのことは、水和率が同程度であっても、フライアッシュの炭種により生成する水和物の化学組成、あるいは形成される細孔構造が異なることを示唆していると考えられる。

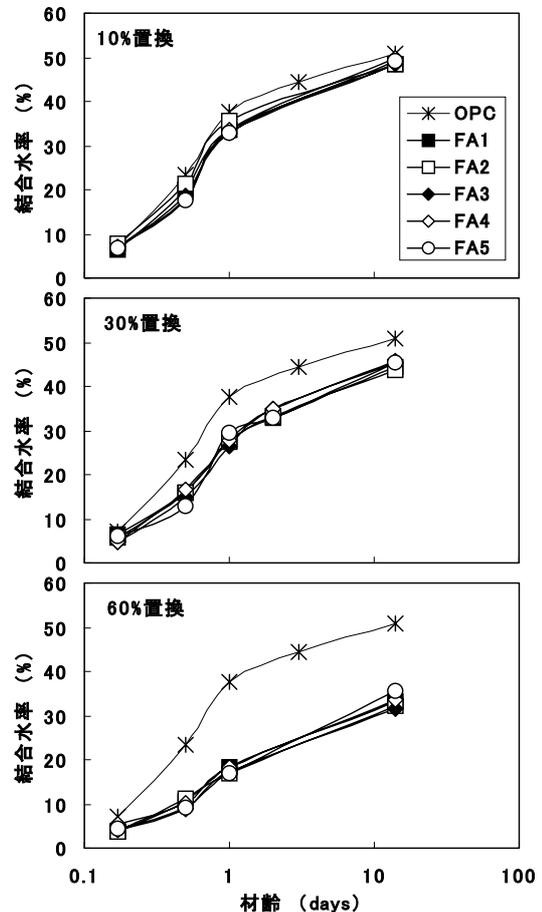


図-4 FAセメントペーストの結合水率

図-6, 図-7 および図-8 に, モルタル内部
 相対湿度の変化と自己収縮ひずみの関係を置換
 率ごとに示す。図より, 相対湿度の低下に伴い,
 自己収縮ひずみが進展しており, フライアッシ
 ュの置換率が大きいほど, その傾きが小さいこ
 とも分かる。また, 相対湿度の減少量に対する
 ひずみの増進分 ($\Delta \varepsilon / \Delta W$) は, フライアッシ
 ュの炭種によらずほぼ同程度であることが分か
 る。このことから, フライアッシュの炭種によ
 る収縮低減効果の違いは, 内部乾燥の違いでは
 なく, 乾燥が生じる前の極初期材齢の時点で生
 じると判断される。

3.3 FA の効果の定量評価

著者らは, 混和材を混入したモルタルの自己
 収縮ひずみの影響を評価する方法として, 式 (2)
 に示すひずみを材齢の対数で表現し, その係数
 の混和材無混入の系との比である, ひずみ増加
 係数 γ および初期収縮低減率 δ で評価する方
 法を前報で提案した⁶⁾。

$$y = -\alpha \ln(x) - \beta \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\alpha_{ad.}}{\alpha_{opc}} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\beta_{ad.}}{\beta_{opc}} \quad (4)$$

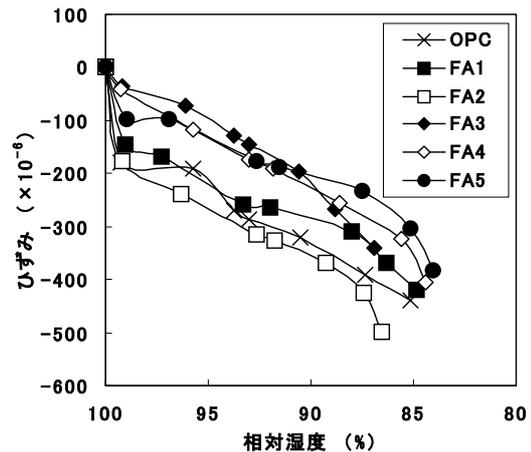


図-6 相対湿度とひずみの関係 (置換率 10%)

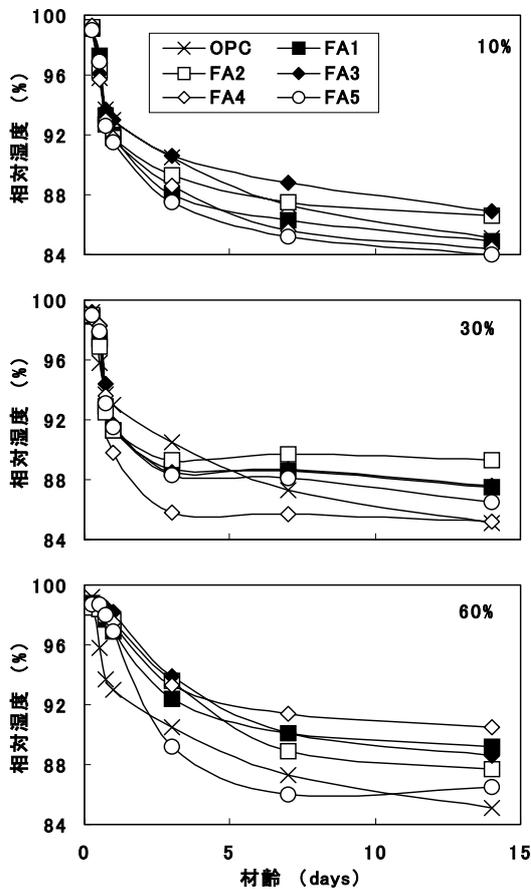


図-5 モルタル内部相対湿度の変化

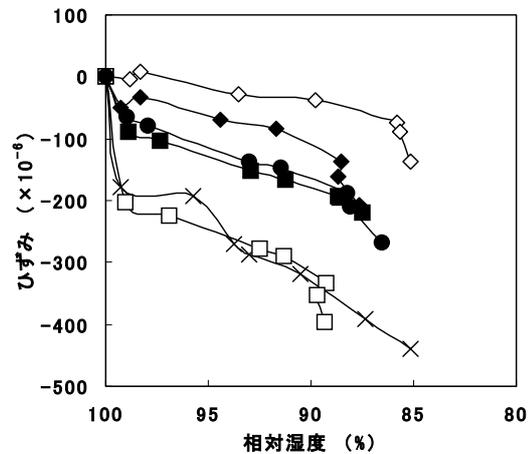


図-7 相対湿度とひずみの関係 (置換率 30%)

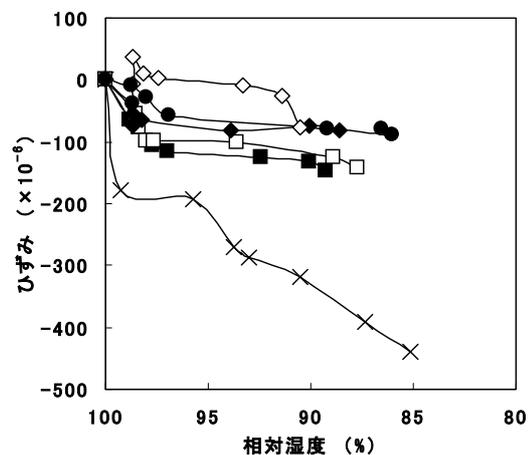


図-8 相対湿度とひずみの関係 (置換率 60%)

ここに、
 y : 材齢 x 日における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)
 x : 材齢 (days)
 α , β : 係数 (下付文字は粉体の記号を示す)
 γ : ひずみ増加係数
 δ : 初期低減率

図-9にモルタルの材齢1日以降のひずみの進展と(2)式による近似曲線による評価の一例を、表-3に各調合における相関係数を示す。図および表より、前報同様良好な直線関係が得られており、いずれの炭種および置換率においても高い相関が得られており、ひずみの進展を良く表していることが分かる。

前項までの検討より、内部乾燥が進展している材齢でのひずみの増進は、炭種によらずほぼ同程度となっているので、これ以降は、材齢1日でのひずみの低減低減率 δ に及ぼす要因について検討する。

(4) 収縮低減率に及ぼす FA 化学成分の影響

前々項の検討で、結合水率が同程度であるにも拘わらず、相対湿度の低下が炭種により異なることが確認された。この原因としては、先に述べたように生成した水和物の組成や細孔構造

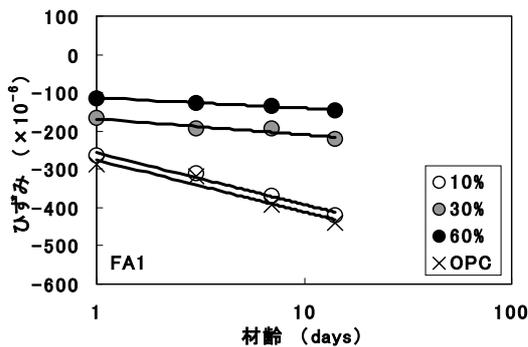


図-9 モルタルの材齢1日以降の収縮ひずみ

表-3 近似式の相関係数

調合	置換率		
	10%	30%	60%
FA1	0.98	0.91	0.96
FA2	0.95	0.98	0.87
FA3	0.96	0.94	0.64
FA4	0.97	0.98	0.52
FA5	0.98	0.94	0.81

の変化が想定されるが、これらの変化は基本的には粉体の物理・化学性状と関係しているものと考えられる。このため、次にフライアッシュの各物理・化学的性質と収縮低減率の関係に

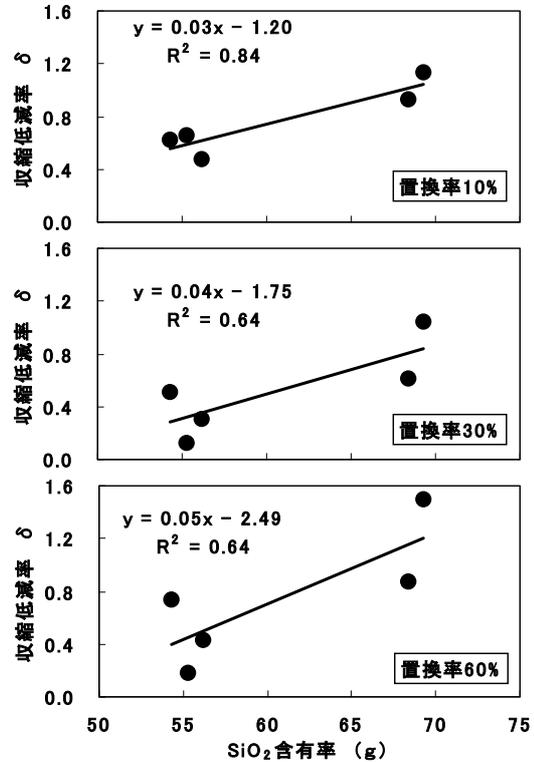


図-10 SiO₂と収縮低減率 δ の関係

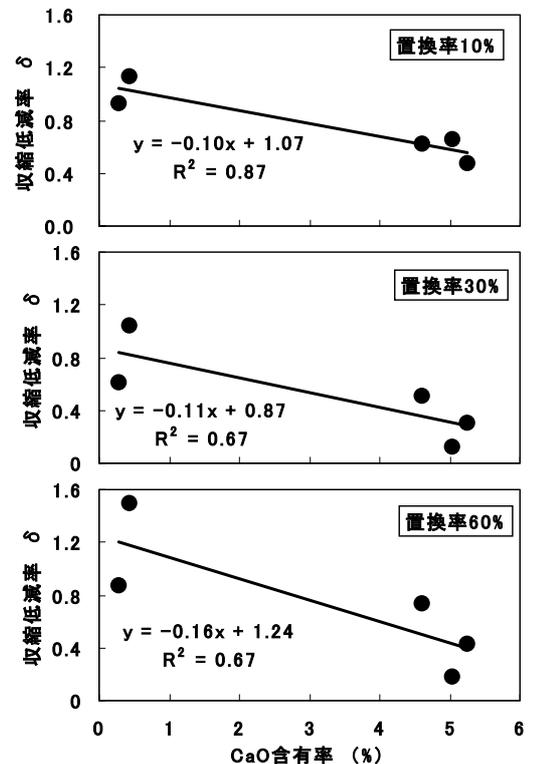


図-11 CaOと収縮低減率 δ の関係

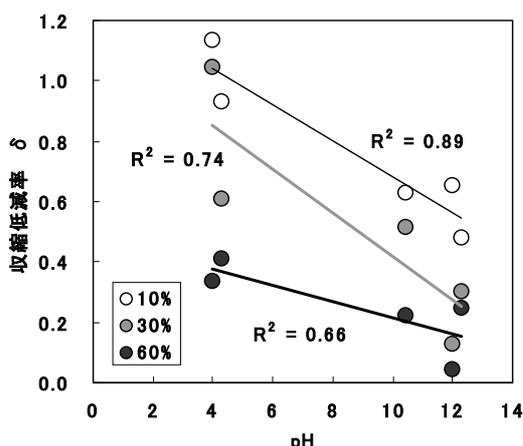


図-12 pHと収縮低減率 δ の関係

について検討した。その結果、フライアッシュの化学成分のうち、二酸化けい素 (SiO_2) と酸化カルシウム (CaO) の含有率および pH について比較的高い相関が得られた。図-10 および図-11 に、 SiO_2 および CaO の含有率と収縮低減率 δ の関係を示す。図より、置換率 30% および 60% では相関係数がやや低いものの、 SiO_2 および CaO 含有率と収縮低減率 δ の間には直線関係が認められる。式 (4) より、 δ の値が小さいほど収縮が低減されていることを示すが、 SiO_2 含有率が多く CaO 含有率が少ないほど、フライアッシュの収縮低減効果が小さいことが分かる。

一方、pH は酸性および塩基性の物質の含有量により決定するので、上記の含有率と密接な関係があると考えられるが、今回検討を行ったフライアッシュ 5 サンプルのみでは、それらの関係を把握することができなかった。そのため、ここでは別途 pH と収縮低減率 δ との関係についての検討も行った。図-12 に、フライアッシュの pH と収縮低減率 δ の関係を置換率ごとに示す。図より、pH と δ の関係も SiO_2 および CaO の関係と同様に、置換率の増大に伴い相関係数がやや低くなるが、両者の間に直線関係が認められることが分かる。

以上、フライアッシュの収縮低減効果は、FA の化学的性質と関係が強いことが確認されたが、今後、これらフライアッシュの化学的性質がどのようなメカニズムで収縮を低減させているのかについて、詳細な検討が必要と考えられる。

4. おわりに

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) フライアッシュには自己収縮を低減させる効果があるが、その効果はフライアッシュの炭種により大きく異なる。また、少量のフライアッシュを混入した場合、逆に自己収縮を増大させる炭種があることが分かった。
- (2) フライアッシュの炭種による、収縮低減効果の差異は、内部乾燥が顕著に進展する以前の材齢で生じている。
- (3) 材齢 1 日での自己収縮ひずみの低減効果は、 SiO_2 および CaO の含有率や pH などのフライアッシュの化学特性と関係が強いことが分かった。

謝辞

本研究にあたり、日本大学工学部の湯浅昇氏、北海道立寒地住宅都市研究所の桂修氏のご協力を得ました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 1995
- 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，第 542 号，pp.9-15，2001.4
- 4) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサーの電気特性にコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 498 号，pp.13-20，1997.8
- 5) 名和豊春 ほか：モルタル硬化体中の湿度変化と自己収縮の関係，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.218-225，2001
- 6) 堀田智明 ほか：セメント系材料の自己収縮に及ぼす混和材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol23, No.2, pp.697-702, 2001