

# 論文 フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性

菅田 紀之\*1 ・相澤 義徳\*2

**要旨**：水結合材比が 25 %である高強度コンクリートのフライアッシュ置換率を結合材の内割りで 0 %, 10 %, 20 %, 30 %に変化させて強度試験および収縮試験を行い、次の結果を得た。圧縮強度はフライアッシュ置換率が高いほど小さくなる。40 °Cで養生を行った場合、フライアッシュ混入による強度低下を抑えることができる。フライアッシュ置換率 30 %の乾燥収縮ひずみはフライアッシュ無混入の場合より大きい。フライアッシュ置換率 20 %および 30 %の材齢 91 日までの自己収縮ひずみはフライアッシュ無混入の場合より小さい。

**キーワード**：フライアッシュ, 高強度コンクリート, 強度, 弾性係数, 乾燥収縮, 自己収縮

## 1. はじめに

石炭火力発電所から排出される石炭灰は年間約 1 千万トンであり、その内の約 90 %がフライアッシュである。これら石炭灰の約 80 %はセメント原料などとして有効利用されているが、残りは埋立て処分が行われている。今後も石炭火力発電設備の増加に伴う石炭灰排出量の増加が予想されており、さらなる有効利用が課題となっている。また、フライアッシュは「再生資源の利用促進に関する法律」における指定副産物になっており、有効利用が義務付けられている。

フライアッシュをコンクリート用混和材として使用した場合、流動性の向上や水和発熱量の低減、化学抵抗性の向上などの効果があることが確認されている<sup>1)</sup>。しかしながら、初期強度の低下や中性化速度の増加の問題が懸念されており、利用が進んでいないのが現状である。また、高強度コンクリートへの利用についても初期強度低下などの問題があり研究例は少ない。水結合材比が 30 %以下の高強度コンクリートの研究としては、比表面積 8000 cm<sup>2</sup>/g 程度以上の超微粉フライアッシュを混入することにより無混入と同程度の強度が得られたもの<sup>2)</sup>、比表面積 4000 cm<sup>2</sup>/g 程度のフライアッシュを混入したコンクリートで断熱養生により初期強度低下が抑制されたもの<sup>3)</sup>、比表面積 4000 cm<sup>2</sup>/g および

6000 cm<sup>2</sup>/g 程度のフライアッシュを用いた場合には混入量の増加とともに強度が低下するといったもの<sup>4)</sup>などがある。

本研究では、比表面積 4000 cm<sup>2</sup>/g 程度のフライアッシュを用いた高強度コンクリートの初期強度低下の抑制方法の一つとして高温養生を取上げた。養生温度は 20 °C および 40 °C であり、水結合材比 25 %でフライアッシュ置換率を 0 %から 30 %まで変化させ、強度発現に及ぼす養生温度の影響について検討を行った。また、20 °C 養生の場合については、弾性係数、乾燥収縮および自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響についても検討を行った。

表 - 1 使用材料

材 料 (記号)	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ (FA)	JIS A 6201 II 種 比表面積: 4,260 cm <sup>2</sup> /g 密度: 2.16 g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度: 2.65 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 (G)	碎石 2005 表乾密度: 2.68 g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

\*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 博 (工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	FA	S	G	SP
25	0	48.9	167	666	0	762	804	5.3
25	10	48.9	163	585	65	762	804	5.0
25	20	48.9	159	507	127	762	804	4.8
25	30	48.9	155	434	186	762	804	4.6

$$B = C + FA$$

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本研究において高強度コンクリートの製作に使用した材料および配合を表-1および表-2に示す。結合材には普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用いた。フライアッシュは JIS A 6201 の II 種に相当するものである。水結合材比 (W/B) は 25 % であり, フライアッシュ置換率 (FA/B, 結合材中の質量比) を 0 % (無混入), 10 %, 20 %, 30 % の 4 種類に設定した。また, 自己充填性を有する高流動コンクリートを想定し単位粗骨材絶対容積を 300 l, フライアッシュ無混入の場合の単位水量を 167 kg/m<sup>3</sup> に設定した。フライアッシュを混入したコンクリートでは, 無混入のコンクリートと骨材量が等しくなるように単位水量, 単位セメント量および単位フライアッシュ量を決めた。目標スランプフローは 65 cm, 目標空気量は 3.5 % である。スランプフローの実測値は 62 cm から 72 cm, 空気量の実測値は 2.2 % から 3.9 % であった。

### 2.2 強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従って行った。試験に用いた供試体はφ100×200 mm の円柱供試体であり, 各配合, 各材齢で 3 体の試験を行っている。試験用供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込み型ひずみゲージを配置し, ひずみ測定結果から静弾性係数を算定した。静弾性係数の算定は JIS A 1149 に準じて行った。試験材齢は 1 日, 3 日, 7 日および 28 日である。強度試験用の供試体の養生温度は 20±1 °C および 40±1 °C であり, 養生温度 40 °C の場合の温度変

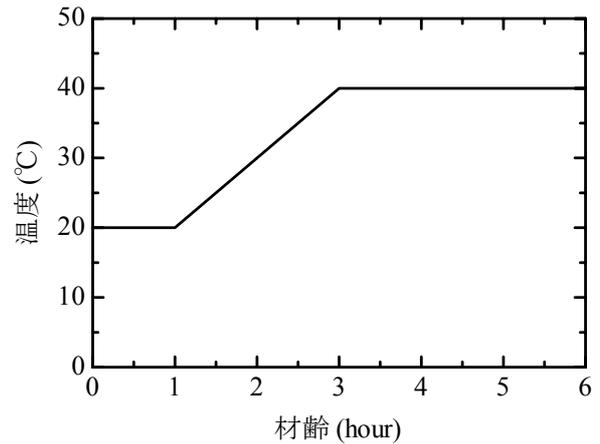


図-1 養生温度の変化

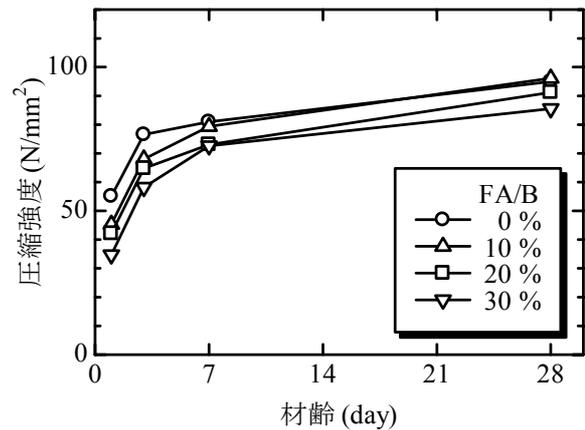
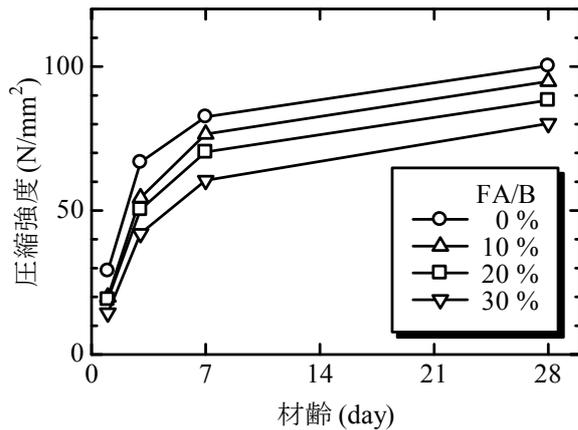
化を図-1に示す。材齢1日までは封緘状態で, それ以降は水中で養生を行った。供試体の端面処理は, 研磨機による研磨仕上げとした。

### 2.3 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は, 100×100×400 mm の角柱供試体を用いて行った。測定項目は乾燥収縮ひずみおよび質量である。乾燥収縮ひずみの測定は, 供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込み型ひずみゲージを配置して行った。供試体の養生は材齢1日まで温度 20±1 °C での封緘養生であり, その後 20±1 °C の水中で養生を続けた。試験は材齢7日から開始し, 試験期間は 28 日間とした。試験環境は温度が 20±1 °C, 相対湿度が 60±5 % に制御された室内である。

### 2.4 自己収縮試験

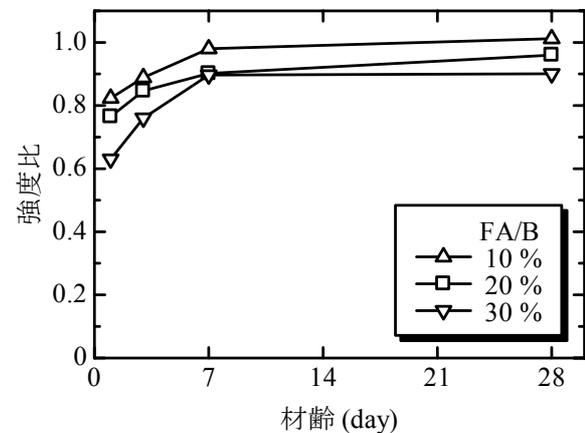
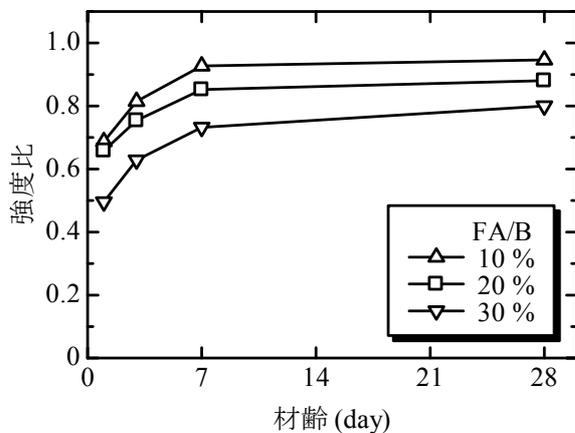
自己収縮試験は, 100×100×400 mm の角柱供試体を用い JCI 自己収縮研究委員会による試験方法<sup>5)</sup>に準じて行った。自己収縮ひずみの測定は, 供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込み型ひずみゲージ (弾性係数 = 2.75 kN/mm<sup>2</sup>) を配置して行い, 凝結始発時からのひずみ変化



(a) 20 °C 養生

(b) 40 °C 養生

図-2 材齢と圧縮強度の関係



(a) 20 °C 養生

(b) 40 °C 養生

図-3 材齢と強度比の関係

を自己収縮ひずみとして検討を行った。また、熱電対により温度変化を測定し、線膨張係数を  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  として温度ひずみの補正を行った。試験環境は温度が  $20 \pm 1$  °C に制御された室内であり、封緘状態で材齢 91 日まで計測を行った。なお、予備試験において JCI 試験方法のダイヤルゲージを用いる方法と本方法を比較した結果、測定される自己収縮ひずみは同程度であった。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 圧縮強度

図-2 に材齢と圧縮強度の関係を示す。図(a) は 20 °C で養生を行った結果、図(b) は 40 °C で養生を行った結果である。20 °C 養生の場合、フライアッシュ置換率 (FA/B) が大きいほど圧縮強度は小さくなっており、強度発現が緩慢になっ

ていることがわかる。フライアッシュ無混入コンクリートと 30 % 混入コンクリートの強度差は、材齢 1 日で  $15 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 3 日で  $25 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 7 日で  $22 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 28 日で  $20 \text{ N/mm}^2$  である。40 °C 養生では、フライアッシュを混入することによる強度低下は小さくなっており、フライアッシュ無混入コンクリートと 30 % 混入コンクリートの強度差は、材齢 1 日で  $20 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 3 日で  $18 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 7 日で  $8 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 28 日で  $9 \text{ N/mm}^2$  である。また、フライアッシュ置換率が 10 % の場合、材齢 7 日以降において無混入の強度と同程度の値になっている。20 °C 養生の結果と 40 °C 養生の結果を比較すると、フライアッシュ混入コンクリートでは 40 °C 養生の強度が大きくなっていることがわかる。フライアッシュ無混入コンクリートでは、材齢 3 日ま

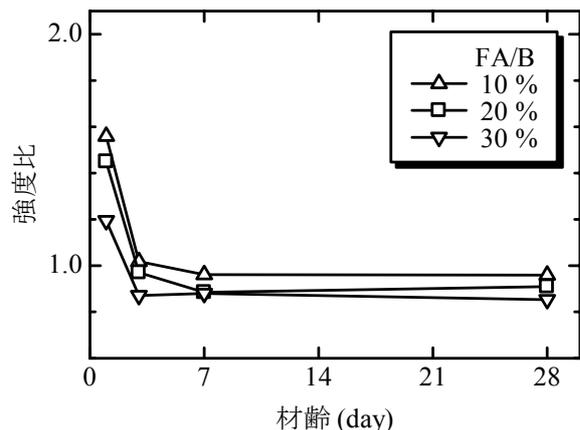


図-4 20℃養生 FA 無混入に対する  
40℃養生コンクリートの強度比

で40℃養生の強度が大きくなっているが、材齢7日および28日では20℃養生の強度のほうが大きくなっている。

フライアッシュ無混入コンクリートの圧縮強度に対する各混入率の強度比を示すと図-3のようになる。20℃養生の場合、フライアッシュ混入コンクリートの強度比は、材齢1日では無混入コンクリートの0.49~0.69、材齢3日では無混入の0.63~0.81、材齢7日では無混入の0.73~0.93、材齢28日では無混入の0.80~0.95になっており、材齢が若いほどフライアッシュを用いた場合の強度比が小さくなっていることがわかる。40℃養生の場合、フライアッシュ混入コンクリートの強度比は、材齢1日で無混入の0.63~0.82、材齢3日で無混入の0.76~0.89になっているが、材齢7日以後において0.90以上の強度比を示している。このように養生温度を高くすることにより、フライアッシュ混入による強度低下を抑えることができる。次に、20℃で養生したフライアッシュ無混入コンクリートの圧縮強度に対する40℃養生フライアッシュ混入コンクリートの強度比を示すと図-4のようになる。フライアッシュ混入コンクリートの各材齢の強度比は、材齢1日で20℃養生の無混入コンクリートの1.20~1.56、材齢3日で0.87~1.02、材齢7日以降では0.85~0.96となっており、図-2および3で示したように、強度低下の補償には高温養生が有効である。

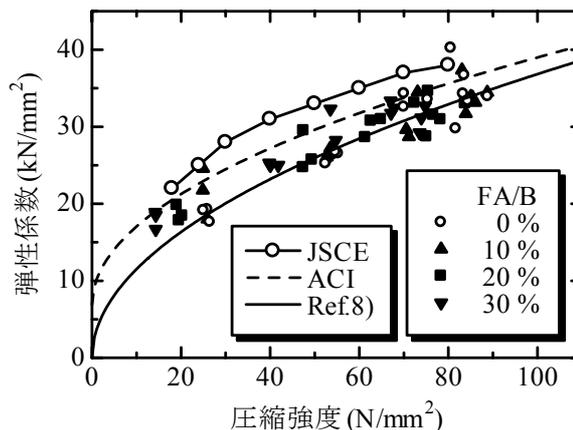


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

### 3.2 弾性係数

図-5は圧縮強度と静弾性係数の関係である。実験結果は試験供試体ごとの圧縮強度と静弾性係数の関係を示している。図中の白抜きマーク付の実線は土木学会コンクリート標準示方書の値<sup>6)</sup>、破線はACI 363委員会の式<sup>7)</sup>を示している。また、実線はシリカフュームを用いた高強度コンクリートに関する著者らの結果<sup>8)</sup>を示している。実験結果と各式等の値を比較すると、弾性係数の実験結果は、1つの点を除きコンクリート標準示方書の関係よりも小さくなっていることがわかる。また、ACI 363委員会の値は実験結果のほぼ上限になっており、平均的な値では実験結果のほうが小さくなっている。シリカフュームを用いた場合の関係と比較すると、フライアッシュ無混入コンクリートでは、シリカフュームを用いた場合とよく一致しているといえる。しかしながら、強度が60 N/mm<sup>2</sup>以下の場合、フライアッシュ混入コンクリートの弾性係数の方が大きくなっていることがわかる。

### 3.3 乾燥収縮

図-6は、乾燥収縮ひずみの経時変化を示している。乾燥開始時の材齢は7日、試験期間は28日であり、試験環境は温度20±1℃、相対湿度60±5%に制御された室内である。横軸には試験開始からの経過日数をとっている。また、図-7に横軸にフライアッシュ置換率(FA/B)をとった場合の乾燥収縮ひずみを示す。両図より、フライアッシュ混入率が30%の場合、試験を開

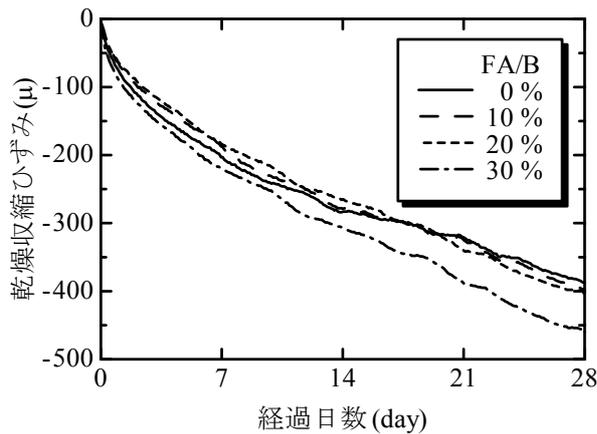


図-6 乾燥収縮ひずみの経時変化

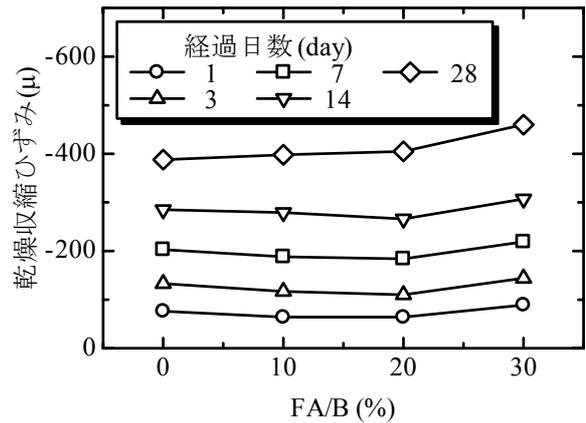


図-7 乾燥収縮ひずみ

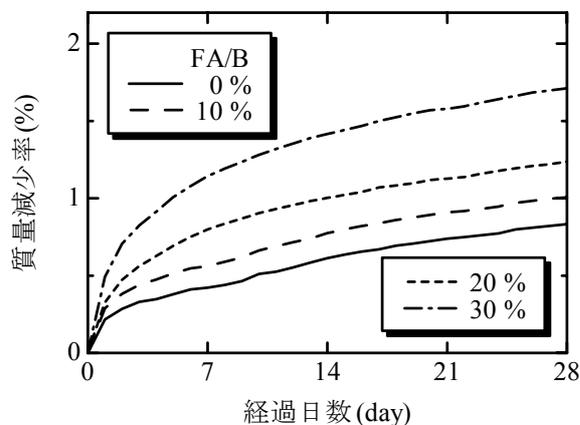


図-8 質量減少率

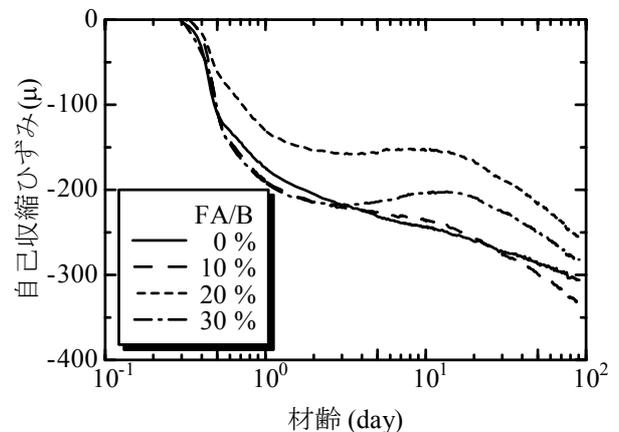


図-9 自己収縮ひずみの経時変化

始した材齢 7 日から材齢 35 日 (経過日数 28 日) の期間において乾燥収縮ひずみが一番大きくなっていることがわかる。フライアッシュ置換率 10% および 20% の乾燥収縮ひずみは、経過日数 18 日程度まで無混入コンクリートの収縮ひずみより小さくなっているが、その後においては若干に大きくなっている。図-8 は質量減少率の経時変化を示している。質量減少率は次式 (1) により算定した。

$$\text{質量減少率}(\%) = 100(1 - M/M_0) \quad (1)$$

ここで、 $M_0$ : 乾燥開始時の供試体質量

$M$ : 供試体乾燥質量

図より、フライアッシュ置換率が大きくなるほど質量減少率が大きくなっていることがわかる。特に、フライアッシュ置換率 30% の場合には、無混入の減少率の 2 倍以上になっている。これは、フライアッシュ置換率を大きくするほど水和反応が緩慢になり、未水和水がより多く残っ

ており、乾燥時の蒸発水量が多くなったためであると考えられる。一般にフライアッシュを混入した場合、減水効果により乾燥収縮量が減少するといわれている<sup>9)</sup>。しかしながら、本研究では骨材量一定の条件で配合を行ったため、単位水量の大幅な減水がなかったこと、試験開始材齢が 7 日であったため、図-8 に示したようにフライアッシュ置換率が大きいほど未水和水が多く残っており、蒸発水量が増加したことにより乾燥収縮量が増加したものと考えられる。

### 3.4 自己収縮

図-9 は、自己収縮ひずみの経時変化を示している。試験環境は温度  $20 \pm 1$  °C に制御された室内であり、横軸に材齢をとっている。試験期間は材齢 91 日までである。フライアッシュ置換率 (FA/B) 10% のコンクリートの自己収縮ひずみは、材齢 25 日までフライアッシュ無混入の場合と同程度であるが、材齢 25 日からは大きな

っている。フライアッシュ混入率 20 %のコンクリートの自己収縮ひずみは、材齢 91 日まで無混入の場合より小さくなっている。また、フライアッシュ混入率 30 %の自己収縮ひずみは、材齢 3 日から無混入の場合より小さくなっている。しかしながら、材齢 10 日から 15 日以後の自己収縮ひずみの増加割合は無混入の場合より大きくなっており、材齢が 100 日を越えてからフライアッシュ混入率 20 %および 30 %の自己収縮ひずみも無混入の場合より大きくなることが予想される。フライアッシュ混入コンクリートでは、自己収縮量が低減されるという報告がある<sup>10), 11)</sup>が、これは材齢が 14 日程度までの結果であり、本結果でも同様である。

#### 4. まとめ

本研究では、水結合材比 25 %の高強度コンクリートのフライアッシュ置換率および養生温度を変えて材齢 28 日までの強度特性に関する検討を行った。また、環境温度 20 °C の場合の収縮特性について検討を行った。本研究から得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) フライアッシュ置換率が大きいほど強度発現が緩慢になり、圧縮強度が小さくなる。
- (2) 養生温度が 40 °C の場合、フライアッシュ混入による強度低下を抑えることができる。
- (3) 圧縮強度が 60 N/mm<sup>2</sup> 以下の場合、フライアッシュ混入コンクリートの弾性係数は無混入コンクリートより大きい。
- (4) フライアッシュ置換率が 30 % の場合の乾燥収縮量はフライアッシュ無混入の収縮量よりも大きい。
- (5) フライアッシュ置換率が大きいほど乾燥による質量減少量は多くなる。
- (6) フライアッシュ置換率が 20 % および 30 % の場合の自己収縮量は、フライアッシュ無混入の収縮量より小さい。しかしながら、材齢 100 日以後において大きくなることが予想される。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），土木学会，1999.4
- 2) 石井光裕・浮田和明・東邦和・山田和夫：分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp.263 – 268, 1991.6
- 3) 船本憲治・村上英治・黒羽健嗣・並木哲：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および強度発現に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No. 1, pp.357 – 362, 1996.6
- 4) 深川正浩・中村成春・榊田佳寛・阿部道彦：分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp.205 – 210, 1997.6
- 5) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977 ~ 2002 年度），日本コンクリート工学協会，pp.455 – 458, 2004.4
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造的機能照査編〕，土木学会，pp.28 – 29, 2002.3
- 7) ACI Committee 363: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI, 1992
- 8) 菅田紀之・寺澤貴裕・田中健司：シリカフェームを用いた高強度コンクリートの強度特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27, No. 1, pp.1069 – 1074, 2005.6
- 9) 浮田和明・石井光裕・重松和男・野尻陽一：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 10, No. 2, pp.1 – 6, 1988.6
- 10) 名和豊春・出雲健司・矢野めぐみ・湯浅昇：モルタル硬化体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 – 226, 2002.2
- 11) 堀田智明，名和豊春：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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 1, pp.165 – 170, 2002.6