

論文 シリカフュームを用いた高強度コンクリートの収縮特性

寺澤 貴裕^{*1}・菅田 紀之^{*2}

要旨：シリカフュームが高強度コンクリートの収縮特性に及ぼす影響を検討するため、シリカフューム置換率を0%から25%まで変化させた高強度コンクリートを目標スランプフロー60 cmとして作成し、自己収縮および乾燥収縮試験を行った。また、乾燥収縮ひずみと水分逸散量の関係を得るため質量減少量も測定した。その結果、初期材齢期においてはシリカフューム置換率が高くなるほど自己収縮ひずみは小さくなることが分かった。また、乾燥収縮ひずみはシリカフューム置換率が高くなるほど大きくなることが分かった。質量減少量は乾燥開始材齢が遅いほど乾燥収縮ひずみと強い直線相関関係が見られた。

キーワード：高強度コンクリート、シリカフューム、自己収縮、乾燥収縮

1. はじめに

近年、高強度、高耐久、高流動などの特性を持つ高性能コンクリートが要求されてきている。高強度コンクリートは水結合材比が小さく、単位結合材量が多くなるため、従来のコンクリートでは実用上ほとんど無視されていた自己収縮ひずみが大きくなることが知られている。その結果、初期材齢期において収縮応力増大によるひび割れ発生が問題になる場合がある。また、流動性の改善のため、シリカフュームや高性能 AE 減水剤等の混和材料の使用が不可欠となる。しかしながら、シリカフュームがもたらすポズラン反応やマイクロファイラー効果は、強度増進や分離抵抗性・流動性改善だけでなく、硬化組織中の細孔構造にも影響を与える。したがって、自己収縮や乾燥収縮の発生主要因を有力説である毛細管張力であると仮定すると、シリカフュームは収縮特性に大きな影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、シリカフュームが初期材齢期の高強度コンクリートの収縮特性に及ぼす影響を検討するため、目標スランプフローを設定し、水結合材比、シリカフューム置換率をパラメータとした高強度コンクリートを作成し、自己収縮試験および乾燥収縮試験を行った。また、乾燥収縮

ひずみと水分逸散量の関係を得るため、供試体の質量減少量も測定した。

2. 試験の概要

2.1 使用材料および配合

本研究に用いた高強度コンクリートの配合を表-1に示す。結合材 (B) には普通ポルトランドセメント (C) およびシリカフューム (SF, 平均粒径：約 $0.2 \mu\text{m}$, 比表面積： $230,000 \text{ cm}^2/\text{g}$, 比重 2.2, ノルウェー産), 細骨材には陸砂 (S), 粗骨材には砕石 2005 (G) を用いた。シリカフューム置換率 (SFC) には 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% の 6 種類, 水結合材比 (W/B) には 20%, 25%, 30% の 3 種類を採用した。単位水量を 140 kg/m^3 , 細骨材率を 41.7% で一定とし, 目標空気量 1.5%, 目標スランプフロー 60 cm として配合を決定した。スランプフローは, 練混ぜ時における材料温度, 室温等の影響により変化したため, 供試体作製の直前に試験練りを行い, 目標スランプフローが得られるよう高性能 AE 減水剤 (SP, ポリカルボン酸系) の添加量を調整した。水結合材比 20% でシリカフューム置換率 0% のケースについては所要のフレッシュ性状が得られなかったため, 試験を行わなかった。

*1 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)

*2 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 博 (工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

SFC (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	SP
0	25	41.7	140	560	0	748	1031	5.6
	30			467	0	782	1076	4.2
5	20	41.7	140	665	35	693	955	10.5
	25			532	28	744	1025	6.7
10	20	41.7	140	630	70	668	947	15.4
	25			504	56	740	1019	10.9
15	20	41.7	140	595	105	682	940	10.9
	25			476	84	736	1013	7.6
20	20	41.7	140	560	140	677	933	16.1
	25			448	112	731	1007	11.8
25	20	41.7	140	525	175	672	925	14.7
	25			420	140	727	1001	10.6
	30			350	117	764	1052	8.6

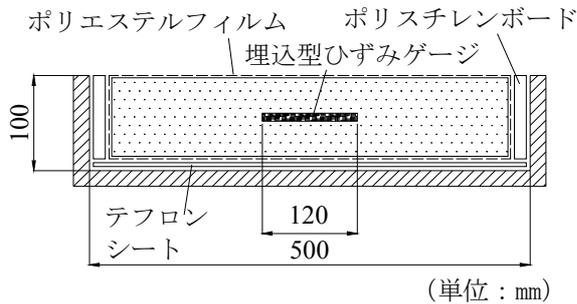


図-1 自己収縮試験体

2.2 自己収縮試験

自己収縮試験は図-1に示すように、試料の変形を拘束しないよう底面にテフロンシートおよび両端面にポリスチレンボードを入れた内寸 100×100×500 mm の角柱鋼製型枠を用い、試料が乾燥しないようにコンクリートを打設する際、ポリエスチルフィルムで6面を封緘状態にして行った。ひずみの測定は、供試体中央に配置したゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージにより打込み直後から開始した。試験環境は温度 20°C に制御された室内、測定期間は凝結始発から 6 日間である。なお、本研究においては JCI 自己収縮委員会¹⁾において定義されているように、始発以後のひずみ変

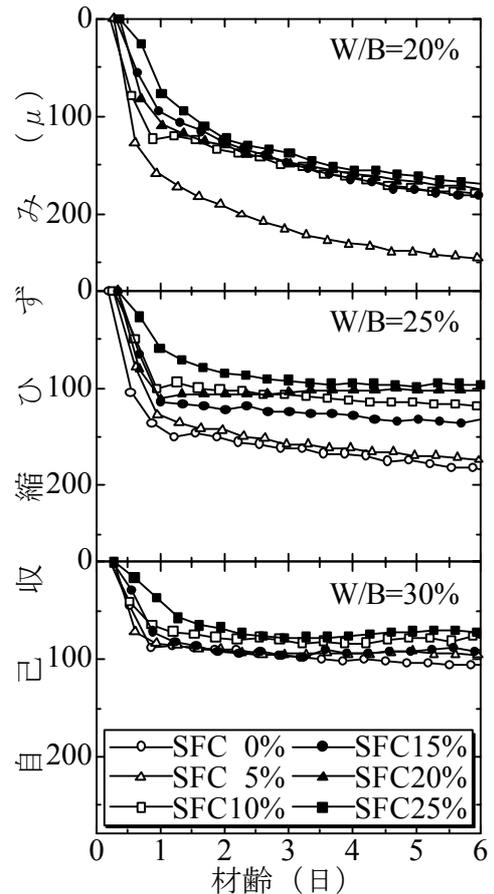


図-2 自己収縮ひずみの経時変化

化を自己収縮ひずみとした。また、熱電対により供試体中央部の温度変化を測定し、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。

2.3 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて行った。乾燥開始材齢を 1 日、3 日および 7 日の 3 種類とし、ひずみの測定は供試体中央に配置したゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージを用いて行った。測定期間は 6 日間である。また、このひずみは自己収縮ひずみを含むものであり、これを減じた純乾燥収縮ひずみを求めるために、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を封緘状態にし、中央に配置したゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージにより自己収縮ひずみの測定も行った。試験環境は温度 20°C、相対湿度 $65 \pm 5\%$ に制御された室内である。また、乾燥収縮と水分逸散の関係を得るため、乾燥収縮試験と同時に直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて質量減少量の測定を行った。

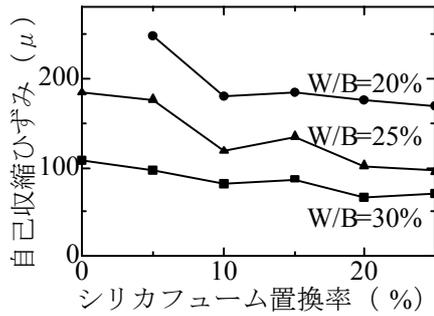


図-3 始発から6日後における自己収縮ひずみ

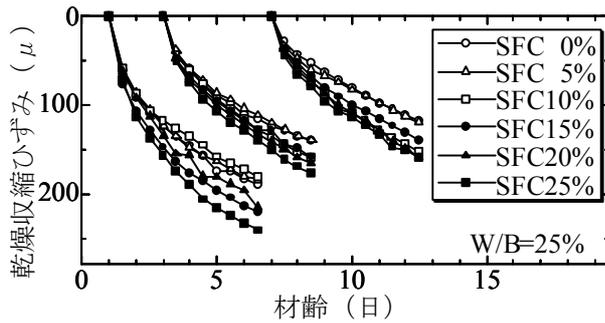


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化

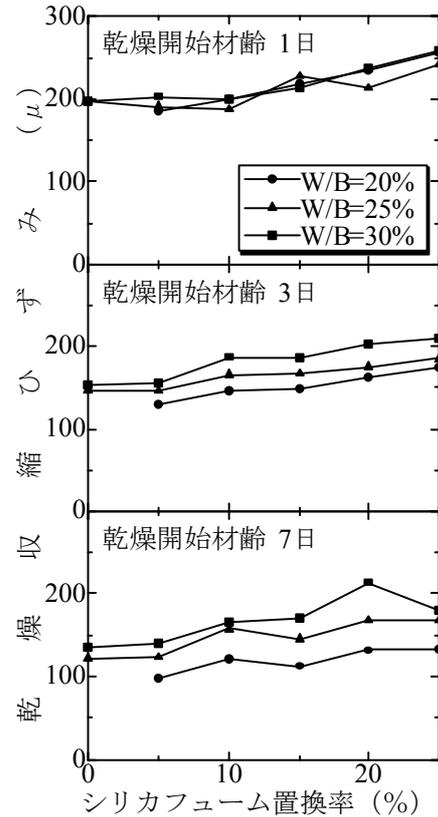


図-5 経過日数6日における乾燥収縮ひずみ

3. 実験結果および考察

3.1 自己収縮

図-2は凝結始発時間を始点とした自己収縮ひずみの経時変化を水結合材比別に示したものである。収縮の挙動に着目してみると、いずれの実験ケースにおいても材齢1日までの収縮量が大きいことが分かる。材齢1日以降の収縮挙動は、水結合材比やシリカフェーム置換率により異なり、水結合材比20%のケースおよび水結合材比25%のシリカフェーム置換率5%以下のケースでは、自己収縮ひずみは材齢1日以降においても増進傾向にある。しかしながら、水結合材比25%のシリカフェーム置換率10%以上のケースおよび水結合材比30%のケースでは、自己収縮ひずみの増進は材齢3日程度までであり、その後の増加はごく僅かであった。また、水結合材比25%および30%のシリカフェーム置換率20%および25%のケースにおいて材齢4日以降に若干のひずみの減少が見られた。図-3は凝結始発から6日後における自己収縮ひずみを示したものである。これより、シリカフェーム置換率が高くなるほど自己収縮ひずみが小さくなることがわかる。また、水結合材比が

大きくなるほど自己収縮ひずみが小さくなることもわかる。水結合材比20%および25%においては、シリカフェーム置換率5%までのケースと10%以上のケースとでは大きな差が見られ、シリカフェーム置換率5%と10%の6日後における差は、水結合材比20%および25%で約60 μ であった。しかしながら、水結合材比が30%においては、シリカフェーム置換率が高くなるほど自己収縮ひずみが小さくなる傾向にあるが、前述のような大きな差はほとんど見られなかった。高性能AE減水剤の添加率が一定の下で、シリカフェーム置換率が高くなるほど材齢2週程度以後において自己収縮ひずみが大きく、それ以前においては反対に小さくなるという報告²⁾がある。また、同一置換率の場合、高性能AE減水剤の添加率が多いほど多少ではあるが自己収縮ひずみが小さくなる³⁾との報告がある。スランプフローを一定とするため高性能AE減水剤の添加量を調整した本研究では、始発から6日後までの初期材齢期においては、文献2)と同様にシリカフェーム置換率が高くなるほど自己収縮ひずみが小さくなった。

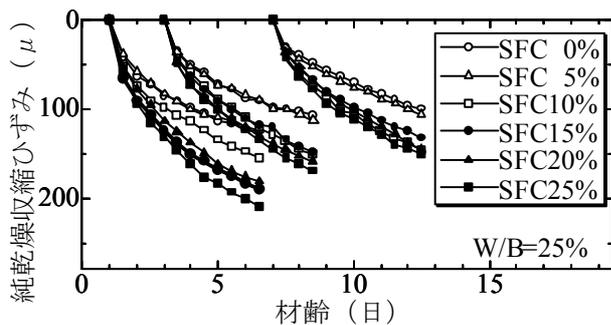


図-6 純乾燥収縮ひずみの経時変化

3.2 乾燥収縮

図-4は水結合材比25%のケースにおける乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。なお、これには自己収縮ひずみも含まれている。これより、乾燥収縮ひずみは乾燥開始材齢が遅くなるほど小さくなるのが分かる。また、乾燥開始材齢が3日と7日との乾燥収縮ひずみ量の差は約20 μ 程度と小さかった。ひずみの挙動をみると、経過日数2日までの乾燥収縮ひずみは、乾燥開始材齢が遅くなるほど小さくなっているが、経過日数2日以降は乾燥開始材齢に関係なくほぼ同じ割合でひずみが増加しているといえる。図-5は経過日数6日における乾燥収縮ひずみを乾燥開始材齢別に示したものである。シリカフェーム置換率と乾燥収縮ひずみの関係に着目すると、いずれの乾燥開始材齢においても乾燥収縮ひずみはシリカフェーム置換率が高くなるほど大きいことが分かる。しかしながら、乾燥開始材齢が遅くなるほどシリカフェーム置換率の影響度は小さくなり、シリカフェーム置換率5%と25%の経過日数6日における乾燥収縮ひずみの差は、水結合材比20%の乾燥開始材齢1日で72 μ 、3日で44 μ 、7日では36 μ となった。この関係は、水結合材比25%、30%においても同様であった。水結合材比と乾燥収縮ひずみの関係に着目すると、乾燥開始材齢1日のケースでは乾燥収縮ひずみは水結合材比によらずほぼ同じであった。しかしながら、乾燥開始材齢が3日、7日と遅くなるに従い乾燥収縮ひずみに水結合材比の影響が大きく現れ、水結合材比が大きくなるほど乾燥収縮ひずみは大きくなるのが分かる。図-6は水結合材比25%のケースにおける乾燥収縮ひずみから自己収縮ひずみを減じた値の経

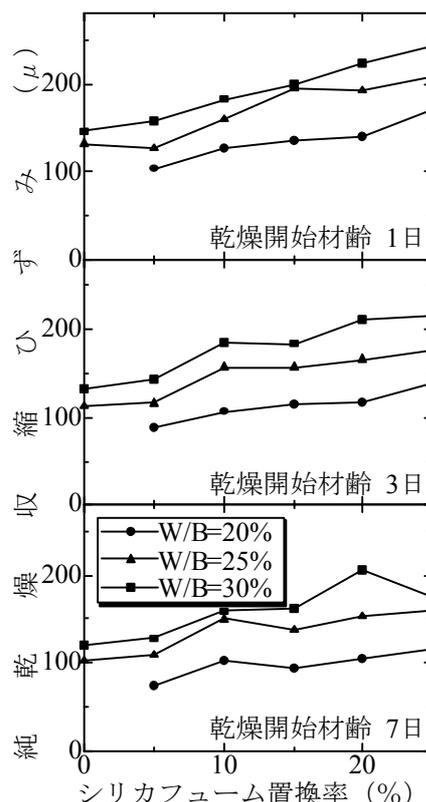
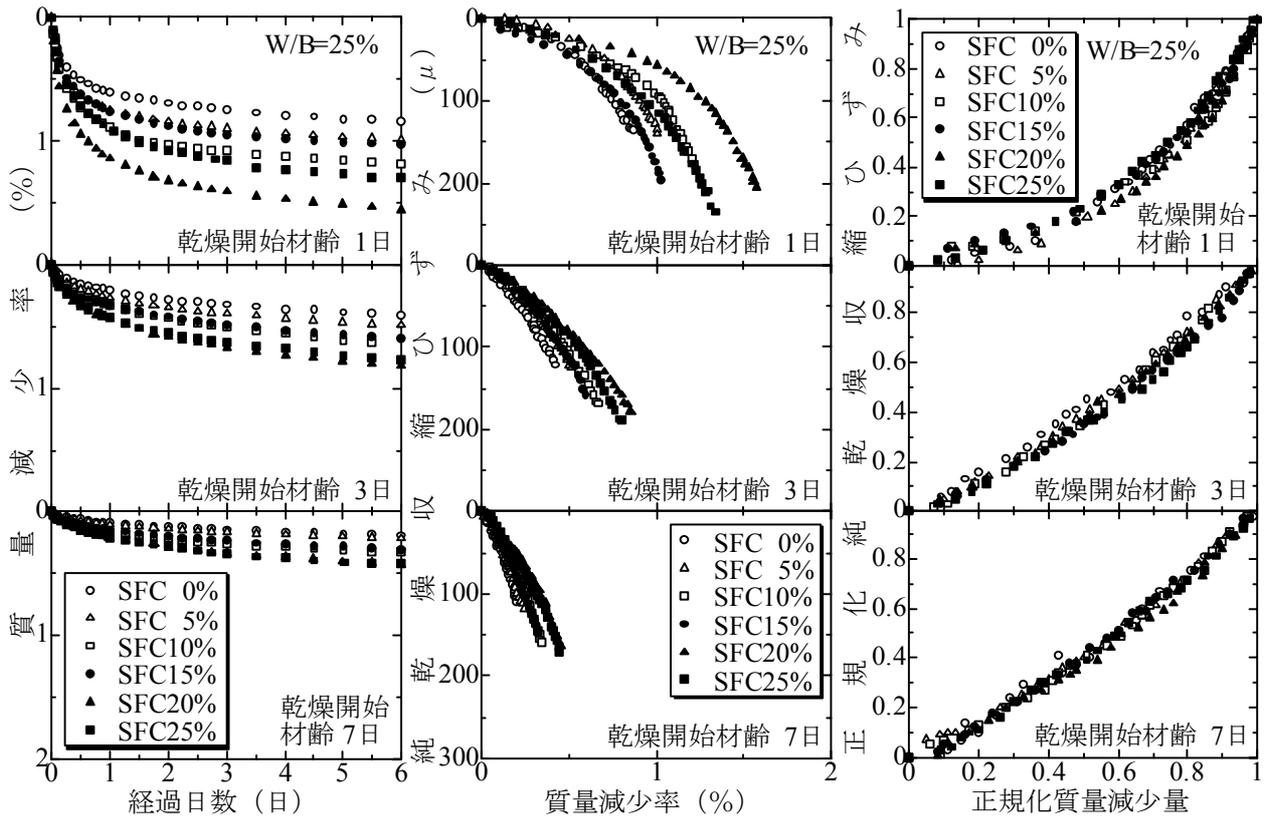


図-7 経過日数6日における純乾燥収縮ひずみ

表-2 経過日数6日の乾燥収縮ひずみに占める純乾燥収縮ひずみの割合 (%)

W/B (%)	SFC (%)	乾燥開始材齢 (日)		
		1	3	7
20	5	56	69	76
	25	66	80	56
25	5	66	79	88
	25	86	96	95
30	5	77	92	91
	25	94	103	98

時変化を示したものである。以後、これを純乾燥収縮ひずみと呼ぶこととする。これは、純粋に水分逸散の影響のみを考慮したひずみである。図より、乾燥収縮ひずみの場合と同様に、乾燥開始材齢が遅くなるほどひずみは小さくなるのが分かる。図-7は経過日数6日における純乾燥収縮ひずみの大きさを乾燥開始材齢別に示したものである。これより、シリカフェーム置換率が高いほど、水結合材比が大きいほど純乾燥収縮ひずみが大きくなっているのが分かる。乾燥収縮ひずみとは異なり、乾燥開始材齢1日においても水結合材比



図一 8 質量減少率の経時変化

図一 9 質量減少率と純乾燥収縮ひずみ

図一 10 正規化した質量減少率と純乾燥収縮ひずみ

による差が見られ、その差はいずれの乾燥開始材齢においても乾燥収縮ひずみの場合より大きかった。また、水結合材比の影響度は、乾燥開始材齢によらずほぼ等しいといえる。表一 2 は経過日数 6 日の乾燥収縮ひずみに占める純乾燥収縮ひずみの割合を示したものである。水結合材比 30%、シリカフェーム置換率 25% の乾燥開始材齢 3 日のケースにおいては、自己収縮ひずみに減少が見られたため、結果的に純乾燥収縮ひずみの方が大きくなっている。この表より、シリカフェーム置換率が高いほど、水結合材比が大きいほど純乾燥収縮ひずみの割合が大きいことが分かる。これはシリカフェーム置換率が高いほど、また、水結合材比が大きいほど自己収縮ひずみが小さく、さらにその自己収縮ひずみの増進期間が短く、材齢 2 日から 3 日以降はその大きさがほとんど変化しない (図一 2 参照) ことによるものである。

3.3 質量減少 (水分逸散) 量

図一 8 は水結合材比 25% のケースにおける供試体の質量減少率の経時変化を乾燥開始材齢別に示

したものである。なお、質量減少率とは次式 (1) により算定したものである。

$$\text{質量減少率 (\%)} = (1 - m_t / m_0) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 m_0 : 乾燥開始時における供試体質量 (g)、 m_t : 経過時間 t における供試体質量 (g)

質量減少率は乾燥開始材齢が早いほど大きく、乾燥開始材齢 7 日のケースでは乾燥開始材齢 1 日のケースの 1/3 程度の質量減少率となった。これは乾燥開始材齢が早いほど硬化組織内に未水和水が多く残存しているためであると考えられる。また、シリカフェーム置換率 20% のケースで質量減少率が最大になっているが、シリカフェーム置換率が高いほど質量減少率が大きい傾向にあるといえる。シリカフェーム置換率の影響度に着目すると、減少率が最大であったシリカフェーム置換率 20% の質量減少率は、いずれの乾燥開始材齢においても置換率 0% の約 2 倍であった。変化の挙動に着目

してみると、いずれの乾燥開始材齢においても経過日数 2 日までの減少率が大きく、シリカフェーム置換率が高いほど減少率は大きい、それ以降はシリカフェーム置換率によらずほぼ同じ割合で直線的に変化していた。図-9 は水結合材比 25% のケースにおける質量減少率と純乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。これによると、乾燥開始材齢が 1 日においてはシリカフェーム置換率による一定の傾向が見られず、同じ質量減少率であっても純乾燥収縮ひずみの大きさは全く異なるものであることが分かる。しかしながら、乾燥開始材齢が 7 日になると一定の傾向が見られ、質量減少量が同じならばシリカフェーム置換率が低いほど純乾燥収縮ひずみが大きくなることが分かる。これは、純乾燥収縮ひずみに影響を与える毛細管空隙等の細孔構造が水和初期においてはシリカフェーム置換率の違いにより大きく異なり、それがこのような結果をもたらしているものと思われる。図-10 は経過日数 6 日における値で正規化した質量減少量と純乾燥収縮ひずみの関係を乾燥開始材齢別に示したものである。なお、正規化質量減少量純および正規化乾燥収縮ひずみとは次式 (2) および (3) により算定したものである。

$$\text{正規化質量減少量} = (md_t / md_6) \quad (2)$$

$$\text{正規化純乾燥収縮ひずみ} = (S_t / S_6) \quad (3)$$

ここに、 md_6 : 経過日数 6 日における質量減少量 (g), md_t : 経過時間 t における質量減少量 (g), S_6 : 経過日数 6 日における純乾燥収縮ひずみ (μ), S_t : 経過時間 t における純乾燥収縮ひずみ (μ)

これによると、正規化質量減少量と正規化純乾燥収縮ひずみの関係は、いずれの乾燥開始材齢においてもシリカフェーム置換率には無関係であり、ほぼ同じ傾向にあった。乾燥開始材齢 1 日の乾燥初期においては質量減少の割に純乾燥収縮ひずみが小さく、その関係は下に凸の曲線状になることが分かる。乾燥開始材齢が遅くなるほどその関係は直線状になり、純乾燥収縮ひずみの大きさと質

量減少量は強い直線相関関係を示すようになった。これは、硬化直後からの乾燥においては、硬化組織内に残存する水分の中でも収縮の原動力となりにくい供試体表層部や比較的大きな空隙からの水分逸散が多いためであると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果から、次のことが得られた。

- 1) スランプフローを一定とするため高性能 AE 減水剤を適宜添加した場合、初期材齢期における自己収縮ひずみはシリカフェーム置換率が高くなるほど小さくなる。
- 2) 水結合材比が 25% のシリカフェーム置換率 10% 以上および水結合材比が 30% の場合、自己収縮ひずみの増進は材齢 3 日程度までであり、それ以降はほとんど変化しない。
- 3) シリカフェーム置換率が高くなるほど、乾燥収縮ひずみおよび純乾燥収縮ひずみは大きい。
- 4) シリカフェーム置換率が高くなるほど、水結合材比が大きくなるほど、また乾燥開始材齢が遅くなるほど、乾燥収縮ひずみに占める純乾燥収縮ひずみの割合が大きい。
- 5) 正規化した質量減少量と純乾燥収縮ひずみの関係は、シリカフェーム置換率に無関係である。
- 6) 正規化した質量減少量と純乾燥収縮ひずみの関係は、乾燥開始材齢が早いと曲線状になるが、乾燥開始材齢が遅くなるにつれ強い直線相関関係を示すようになる。

参考文献

- 1) コンクリートの自己収縮委員会報告書, コンクリート工学協会, pp.3 - 4, 2002.9
- 2) 今本啓一, 大谷博: 高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1061 - 1066, 1995.6
- 3) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 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, 1991.12