

論文 フライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの自己収縮低減

小山 央*1・菅田 紀之*2

要旨: 本研究では、フライアッシュとシリカフュームを併用することによる高強度コンクリートの自己収縮の低減効果について検討するために、圧縮強度試験および自己収縮試験を行った。コンクリートの水結合材比を 20 %および 25 %に設定し、フライアッシュの置換率を結合材の 0 %から 40 %, シリカフュームの置換率を 0 %から 20 %まで変化させて検討を行った。その結果、フライアッシュの増加にともない強度が低下すること、強度に及ぼすシリカフュームの影響はフライアッシュよりも小さいこと、フライアッシュの使用とともにシリカフュームを併用することで自己収縮を大きく低減できることを明らかにした。

キーワード: 高強度コンクリート, フライアッシュ, シリカフューム, 自己収縮, 圧縮強度

1. はじめに

フライアッシュを含む石炭灰は毎年約 1,000 万トン排出されており、その処分に関する問題を解決する方策としてコンクリート分野では主にセメント原料として利用してきている。これは石炭灰の処分問題を解決するのみならず、セメント原料の枯渇問題の解決方法として一定の効果を上げている。近年では、地球温暖化対策として、温室効果ガスである CO₂ の削減が求められるようになり、コンクリート分野においても取り組むべき問題となっている。CO₂ 削減のためのフライアッシュの有効的な利用方法としては、フライアッシュを混和材として用いる方法が挙げられる。フライアッシュを混和材として用いたコンクリートに関する研究は多く行われてきたが、初期強度の低下や中性化の促進等の特徴があるため特殊な用途を除いて適用例が少ない。また、高強度コンクリートに応用した場合の検討としては、船本らの研究¹⁾や深川らの研究²⁾が行われている程度であった。その後、著者らはフライアッシュとシリカフュームを混和した高強度コンクリートに関する検討を行った³⁾。その研究で、フライアッシュとシリカフュームを併用することによる自己収縮の低減効果を示すことが出来た。しかしながら、限られた実験条件の中で示すことが出来たのは、混和量を多くするほど低減効果が大きいということであり、適切な混和量を示すことが出来なかった。

本研究では自己収縮を低減するためのフライアッシュとシリカフュームの最適な混和量を明らかにするために、自己収縮量に及ぼすフライアッシュおよびシリカフューム混和量の影響、さらに圧縮強度に及ぼすフライアッシュおよびシリカフューム混和量の影響について検討を行った。高強度コンクリートにおける水結合材比は、20 %および 25 %である。水結合材比 20 %では、フライアッシュ置換率を結合材の 0 %から 30 %, シリカフューム置

換率を結合材の 5 %から 20 %に設定し、水結合材比 25 %では、フライアッシュ置換率を結合材の 0 %から 40 %, シリカフューム置換率を 0 %から 20 %に設定して実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究においてフライアッシュとシリカフューム併用高強度コンクリートの製造に使用した材料を表-1に示す。結合材には普通ポルトランドセメント (C), フライアッシュ (FA) およびシリカフューム (SF) を用いた。使用したフライアッシュは JIS II 種の規格を満足するものであり、比表面積は 3,990 cm²/g, 密度は 2.20 g/cm³である。シリカフュームはノルウェー産の粉体系のものであり、比表面積は 200,000 cm²/g, 平均粒径は約 0.2 μm, 密度は 2.2 g/cm³である。細骨材 (S) としては陸砂, 粗骨材 (G) としては JIS 規格 2005 砕石を用いた。また、混

表-1 使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³
フライアッシュ (FA)	比表面積: 3,990 cm ² /g 密度: 2.20 g/cm ³
シリカフューム (SF)	比表面積: 200,000 cm ² /g 平均粒径: 0.2 μm 密度: 2.2 g/cm ³
細骨材 A (S-A)	陸砂 表乾密度: 2.69 g/cm ³
細骨材 B (S-B)	陸砂 表乾密度: 2.70 g/cm ³
粗骨材 A (G-A)	JIS 2005 砕石 表乾密度: 2.66 g/cm ³
粗骨材 B (G-B)	JIS 2005 砕石 表乾密度: 2.67 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域准教授 博 (工) (正会員)

表-2 配合
(a) W/B = 20 %

	W/B (%)	FA/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	FA	SF	S-A	G-A	SP
HC20-00-05	20	0	5	49	165.5	786	0	41.4	733	756	11.6
HC20-00-10	20	0	10	49	165.5	745	0	82.8	726	748	12.8
HC20-00-15	20	0	15	49	165.5	703	0	124.1	718	741	13.7
HC20-00-20	20	0	20	49	165.5	662	0	165.5	711	733	14.9
HC20-10-05	20	10	5	49	162.5	691	81	40.6	729	752	9.3
HC20-10-10	20	10	10	49	162.5	650	81	81.3	722	744	10.6
HC20-10-15	20	10	15	49	162.5	609	81	121.9	714	736	12.2
HC20-10-20	20	10	20	49	162.5	569	81	162.5	707	729	13.0
HC20-20-05	20	20	5	49	158.3	594	158	39.6	729	752	7.5
HC20-20-10	20	20	10	49	158.3	554	158	79.2	722	745	9.1
HC20-20-15	20	20	15	49	158.3	514	158	118.7	715	737	10.3
HC20-20-20	20	20	20	49	158.3	475	158	158.3	708	730	11.1
HC20-30-05	20	30	5	49	155.0	504	233	38.8	727	750	7.0
HC20-30-10	20	30	10	49	155.0	465	233	77.5	720	743	8.1
HC20-30-15	20	30	15	49	155.0	426	233	116.3	713	735	9.3
HC20-30-20	20	30	20	49	155.0	388	233	155.0	706	728	10.5

B = C + FA + SF

(b) W/B = 25 %

	W/B (%)	FA/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	FA	SF	S-B	G-B	SP
HC25-00-00	25	0	0	49	165.5	662	0	0	813	838	4.8
HC25-00-05	25	0	5	49	165.5	629	0	33.1	807	832	6.0
HC25-00-10	25	0	10	49	165.5	596	0	66.2	801	826	7.3
HC25-00-15	25	0	15	49	165.5	563	0	99.3	795	820	8.3
HC25-00-20	25	0	20	49	165.5	530	0	132.4	789	813	9.6
HC25-10-00	25	10	0	49	162.5	585	65	0	810	835	4.2
HC25-10-05	25	10	5	49	162.5	553	65	32.5	804	829	5.5
HC25-10-10	25	10	10	49	162.5	520	65	65.0	798	823	6.5
HC25-10-15	25	10	15	49	162.5	488	65	97.5	792	817	7.5
HC25-10-20	25	10	20	49	162.5	455	65	130.0	786	811	8.5
HC25-20-00	25	20	0	49	158.3	507	127	0	811	837	3.8
HC25-20-05	25	20	5	49	158.3	475	127	31.7	805	831	5.1
HC25-20-10	25	20	10	49	158.3	443	127	63.3	800	825	5.7
HC25-20-15	25	20	15	49	158.3	412	127	95.0	794	819	7.0
HC25-20-20	25	20	20	49	158.3	380	127	126.6	788	813	7.9
HC25-30-00	25	30	0	49	155.0	434	186	0	810	836	3.7
HC25-30-05	25	30	5	49	155.0	403	186	31.0	805	830	4.7
HC25-30-10	25	30	10	49	155.0	372	186	62.0	799	824	5.3
HC25-30-15	25	30	15	49	155.0	341	186	93.0	793	818	6.5
HC25-30-20	25	30	20	49	155.0	310	186	124.0	788	812	7.4
HC25-40-00	25	40	0	49	151.5	364	242	0	811	836	3.2
HC25-40-05	25	40	5	49	151.5	333	242	30.3	805	830	4.2
HC25-40-10	25	40	10	49	151.5	303	242	60.6	799	824	4.9
HC25-40-15	25	40	15	49	151.5	273	242	90.9	794	819	6.1
HC25-40-20	25	40	20	49	151.5	242	242	121.2	788	813	7.0

和剤 (SP) としては、流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

2.2 配合

本研究に用いたフライアッシュとシリカフェーム併用高強度コンクリートの配合を表-2に示す。表-2(a)は水結合材比(W/B, B=C+FA+SF) 20%の配合であり、材料としては細骨材 A, 粗骨材 A を用いた。フライアッシュ置換率 (FA/B) は、セメント内割で結合材の 0%から 30%である。また、シリカフェーム置換率 (SF/B) は、セメント内割で結合材の 5%から 20%であり、全部で 16

ケースの配合である。表-2(b)は水結合材比 25%の配合であり、材料としては細骨材 B, 粗骨材 B を用いた。フライアッシュ置換率は、セメント内割で結合材の 0%から 40%である。また、シリカフェーム置換率は、セメント内割で結合材の 0%から 20%であり、全部で 25 ケースの配合である。配合における目標スランプフローを 65 cm, 目標空気量を 1.0%とした。

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従った。試験には直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体を用いた。供試体

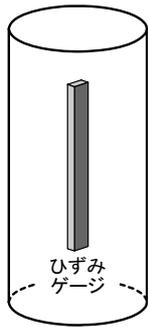
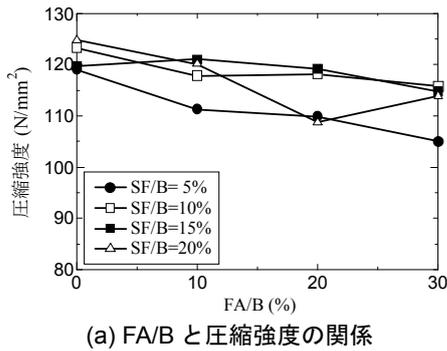
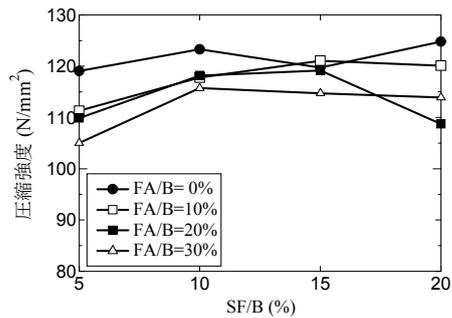


図-1 自己収縮試験



(a) FA/B と圧縮強度の関係



(b) SF/B と圧縮強度の関係

図-2 圧縮強度 (W/B = 20%)

の養生方法は、コンクリート打込み後1日間は20℃での封緘養生、材齢1日目以降から20℃での水中養生である。供試体の端面処理は研磨機による研磨仕上げである。試験材齢は28日である。

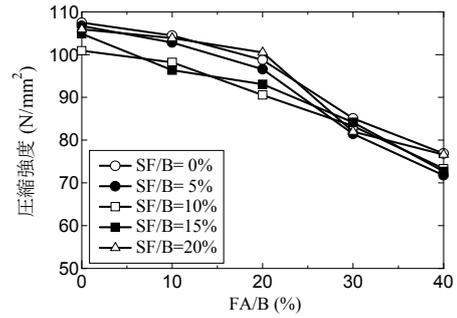
2.4 自己収縮試験

自己収縮試験は、図-1に示すように直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の中央軸方向にゲージ長120mmの埋込み型ひずみゲージを配置して行った。また、水和熱による温度変化を測定するために供試体中央に熱電対を設置した。試験環境は温度20℃に制御された恒温室内である。試験期間は材齢28日までとした。なお、この方法による結果とJCI自己収縮研究委員会の試験方法⁴⁾による結果には大きな差がないことを確認している。

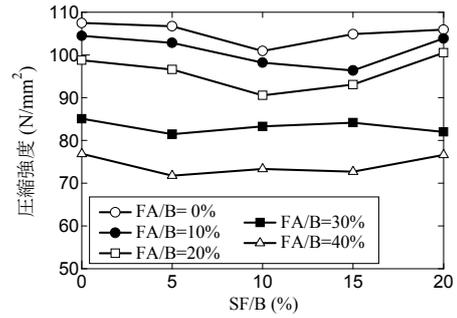
3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-2に水結合材比(W/B)が20%の圧縮強度の試験



(a) FA/B と圧縮強度の関係

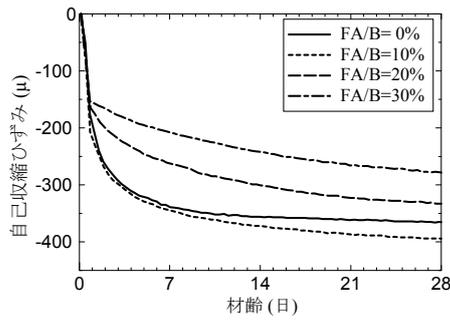


(b) SF/B と圧縮強度の関係

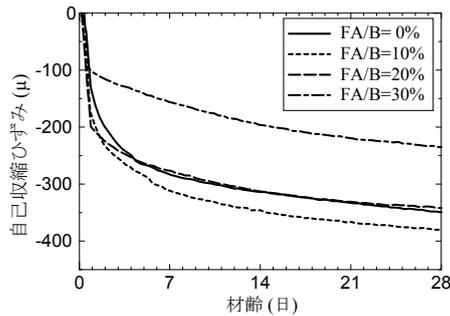
図-3 圧縮強度 (W/B = 25%)

結果を示す。図より、一般的に言われているようにフライアッシュの混和率の増加に伴い、圧縮強度が低下していることがわかる。フライアッシュ置換率0%に対するフライアッシュ置換率30%の圧縮強度の低下率は、シリカフェーム置換率5%において12%、シリカフェーム置換率10%において6%、シリカフェーム置換率15%において4%、シリカフェーム置換率20%において9%である。水結合材比が20%の高強度コンクリートでは、フライアッシュ置換率を30%にすることにより圧縮強度が10%程度減少することがわかる。シリカフェーム混和の圧縮強度に及ぼす影響はフライアッシュ混和よりも若干小さくなっており、同一のフライアッシュ置換率においてシリカフェーム混和による強度差は8%前後である。

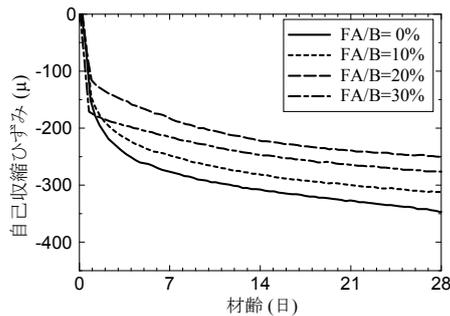
図-3に水結合材比25%の圧縮強度の試験結果を示す。図より、水結合材比20%の場合と同様にフライアッシュの混和率の増加に伴い、圧縮強度が低下していることがわかる。フライアッシュ置換率0%に対するフライアッシュ置換率40%の圧縮強度の低下率は、シリカフェーム置換率0%において28%、シリカフェーム置換率5%において33%、シリカフェーム置換率10%において27%、シリカフェーム置換率15%において31%、シリカフェーム置換率20%において28%であり、水結合材比(W/B)が25%の高強度コンクリートでは、フライアッシュ置換率を40%にすることにより圧縮強度が30%程度減少することがわかる。なお、フライアッシュ置換率10%での強度低下は2%~8%、置換率20%での強度低下は6%~12%、置換率30%での強度低下は17~25%である。



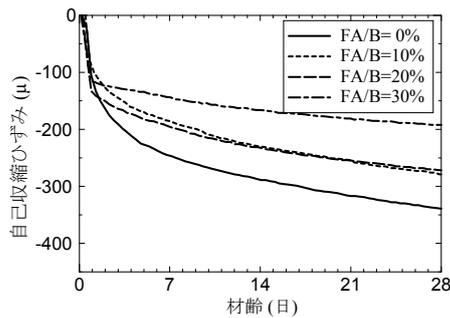
(a) SF/B = 5 %



(b) SF/B = 10 %



(c) SF/B = 15 %



(d) SF/B = 20 %

図-4 自己収縮 (W/B = 20 %)

シリカフェウム混和の圧縮強度に及ぼす影響はフライアッシュ混和よりも小さくなっており、同一のフライアッシュ置換率においてシリカフェウム混和による強度差は7%前後である。

以上より、フライアッシュの圧縮強度への影響は、一般に言われているように混和率の増加により強度が低下する結果となった。これは緩慢なポズラン反応を要因するものである。しかしながら、強度低下は水結合材比が

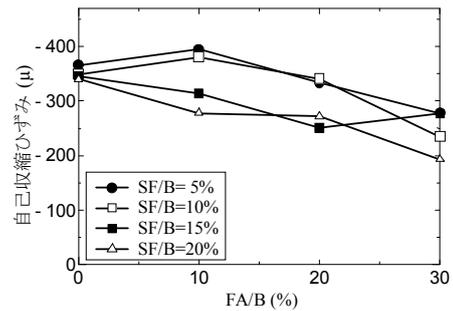


図-5 材齢 28 日の自己収縮ひずみ (W/B = 20 %)

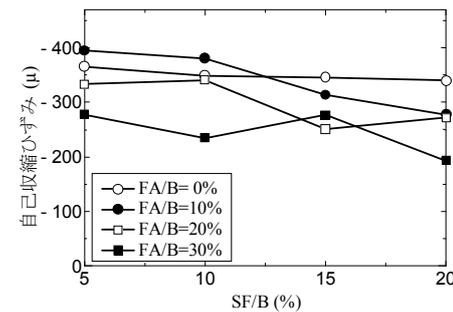


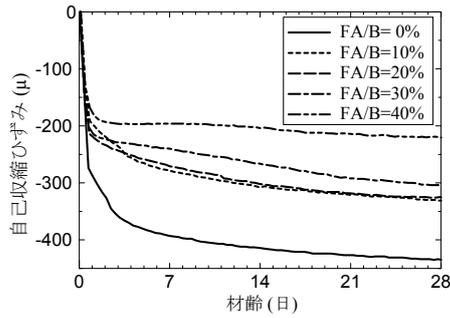
図-6 材齢 28 日の自己収縮ひずみ (W/B = 20 %)

20%の場合に小さく抑えられる結果となった。

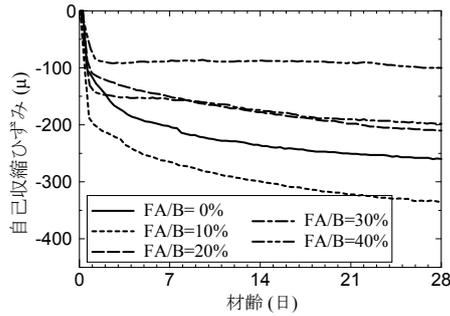
3.2 自己収縮試験結果

図-4に水結合材比20%の自己収縮試験結果を示す。横軸に材齢、縦軸に自己収縮ひずみを取り、フライアッシュ置換率 (FA/B) ごとに線種を変えて示している。また、シリカフェウム置換率 (SF/B) ごとに図を変えている。図(a)のシリカフェウム置換率5%の場合では、フライアッシュ置換率10%の自己収縮ひずみが置換率0%より若干大きくなっているが、フライアッシュ置換率20%および30%の自己収縮ひずみは置換率0%に対してそれぞれ9%および23%の収縮低減がある。図(b)のシリカフェウム置換率10%の場合では、フライアッシュ置換率10%の自己収縮ひずみが図(a)のシリカフェウム置換率5%の場合と同様に置換率0%より大きくなっているが、置換率30%の自己収縮ひずみは置換率0%に対して32%の収縮低減がある。図(c)のシリカフェウム置換率15%の場合では、フライアッシュを混和することにより自己収縮ひずみが小さくなっている。置換率10%、20%および30%の収縮ひずみの低減率は置換率0%に対してそれぞれ10%、28%および20%である。図(d)のシリカフェウム置換率20%の場合では、図(c)のシリカフェウム置換率15%の場合と同様にフライアッシュ混和による自己収縮ひずみの低減があり、置換率10%、20%および30%の収縮ひずみの低減率は置換率0%に対してそれぞれ20%、20%および43%である。

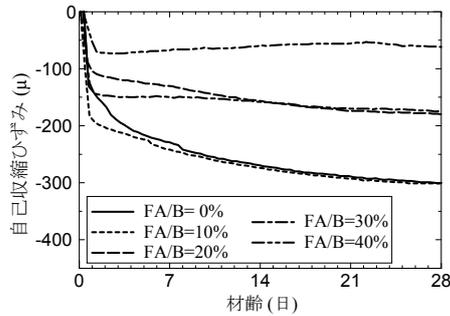
図-5および図-6に水結合材比20%の材齢28日における自己収縮ひずみを示す。図-5では、横軸にフラ



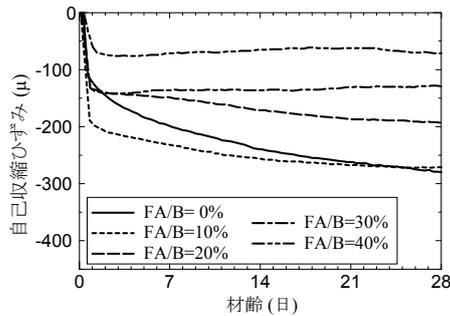
(a) SF/B = 0 %



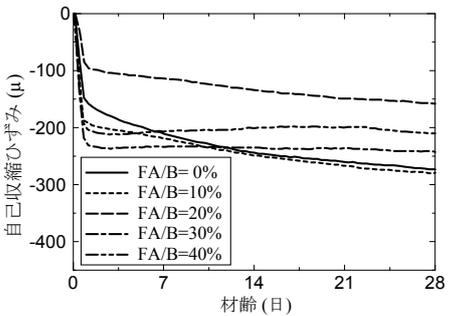
(b) SF/B = 5 %



(c) SF/B = 10 %



(d) SF/B = 15 %



(e) SF/B = 20 %

図-7 自己収縮ひずみ (W/B = 25 %)

イアッシュ置換率 (FA/B), 縦軸に自己収縮ひずみを取り, シリカフェーム置換率 (SF/B) ごとにマークを変えている。図-6では, 横軸にシリカフェーム置換率, 縦軸に自己収縮ひずみを取り, フライアッシュ置換率ごとにマークを変えている。図-5より, シリカフェーム置換率 5%および10%でフライアッシュ置換率10%の場合に自己収縮ひずみが若干大きくなっているが, 全体的な傾向としてフライアッシュ置換率の増加に従い, 材齢28日における自己収縮ひずみが小さくなっているといえる。また, 図-6より, フライアッシュ置換率0%の場合にシリカフェームの影響が小さくなっているが, シリカフェーム置換率が増加するに伴い, 自己収縮ひずみが若干小さくなる傾向にある。水結合材比20%の場合, 自己収縮を低減するための適切なフライアッシュとシリカフェームの置換率の組合せは, フライアッシュ混和による強度低下を考慮しなければ, フライアッシュ置換率30%とシリカフェーム置換率20%の組合せといえる。この場合, 自己収縮ひずみを45%低減できる。ただし, この場合には材齢28日における圧縮強度は, フライアッシュ置換率0%に対して9%程度低下する。

図-7に水結合材比25%の自己収縮試験結果を示す。横軸に材齢, 縦軸に自己収縮ひずみを取り, フライアッシュ置換率 (FA/B) ごとに線種を変えて示している。また, シリカフェーム置換率 (SF/B) ごとに図を変えている。図(a)のシリカフェーム置換率0%の場合では, ごく初期材齢における急激な収縮現象に大きな差はないが, 材齢1日以後においてフライアッシュ混和により自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。置換率10%~30%において24%~30%の収縮低減, 置換率40%において49%の収縮低減がある。図(b)のシリカフェーム置換率5%の場合では, フライアッシュ置換率10%においてフライアッシュ置換率0%に対して自己収縮ひずみが増加しているが, フライアッシュ置換率20%および30%で20%および24%の収縮低減, 置換率40%で61%の収縮低減がある。図(c)のシリカフェーム置換率10%の場合では, フライアッシュ置換率10%の自己収縮ひずみは置換率0%と同程度であるが, 置換率20%および30%では, 40%および42%の収縮低減, 置換率40%では材齢28日において79%もの収縮低減がある。図(d)のシリカフェーム置換率15%の場合も同様の傾向があり, フライアッシュ置換率10%において置換率0%と同程度あるいは材齢21日程度まで大きな自己収縮ひずみを示すが, 置換率20%, 30%および40%の収縮低減率は31%, 53%および74%である。図(e)のシリカフェーム置換率20%の場合では, フライアッシュ置換率10%の自己収縮ひずみが置換率0%と同程度になっているが, 置換率20%, 30%および40%では置換率0%より小さくなっている。しかしな

がら、材齢7日程度までは置換率30%および40%の収縮ひずみは大きくなっている。以上から、総合的にフライアッシュ混和の影響を判断すると、自己収縮ひずみはフライアッシュを混和することにより低減する傾向にあるといえる。この要因としては、フライアッシュ混和により水和反応が緩慢になったということが挙げられる。

図-8および図-9に材齢28日における自己収縮ひずみを示す。図-8では、横軸にフライアッシュ置換率(FA/B)、縦軸に自己収縮ひずみを取り、シリカフェーム置換率(SF/B)ごとにマークを変えている。図-9では、横軸にシリカフェーム置換率、縦軸に自己収縮ひずみを取り、フライアッシュ置換率ごとにマークを変えている。図-7を用いて考察したことが図-8に明確に示されており、フライアッシュ置換率(FA/B)の増加に従い、材齢28日における自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。また、図-9より、シリカフェームの影響はフライアッシュ置換率により若干異なるが、シリカフェーム置換率を5%~15%にすることにより自己収縮を低減出来ることがわかる。以上より、自己収縮を低減するための適切なフライアッシュとシリカフェームの置換率の組合せは、フライアッシュ混和による強度低下を考慮しなければ、フライアッシュ置換率40%とシリカフェーム置換率10%の組合せといえる。ただし、この場合には材齢28日における圧縮強度は30%程度低下する。また、フライアッシュ置換率20%とシリカフェーム置換率10%の組合せの場合、強度低下を10%程度に抑えることが出来るとともに、40%程度の収縮低減効果がある。

以上のように、フライアッシュとシリカフェームを併用することにより自己収縮ひずみを大きく低減できることを示した。自己収縮には水和反応に伴う自己乾燥状態と水和生成物により形成される細孔構造が大きく影響することが知られている。フライアッシュ混和による収縮低減は、緩慢なポズラン反応により自己乾燥が抑制されたことおよび細孔構造の粗大化が要因と推察される。しかしながら、シリカフェーム併用の効果を含め不明な点が残っており、収縮低減メカニズムを明確にしていくことが必要である。

4. まとめ

本研究では、高強度コンクリートの自己収縮を低減するためのフライアッシュ置換率とシリカフェーム置換率の適切な組合せを明らかにするために、水結合材比、フライアッシュ置換率およびシリカフェーム置換率を変えて、圧縮強度試験および自己収縮試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

1) フライアッシュの混和により圧縮強度は減少する。

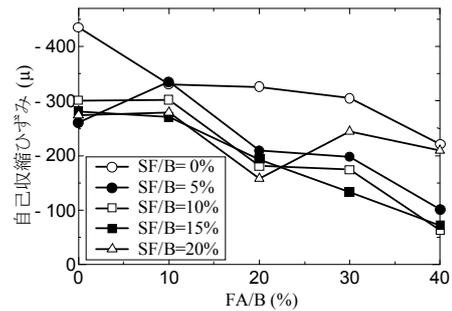


図-8 材齢28日の自己収縮ひずみ (W/B = 25%)

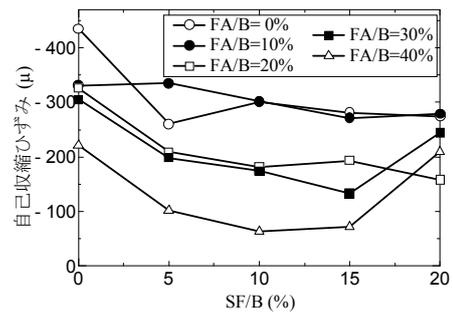


図-9 材齢28日の自己収縮ひずみ (W/B = 25%)

- 2) シリカフェーム混和の圧縮強度に及ぼす影響はフライアッシュ混和よりも小さい。
- 3) フライアッシュ混和率が大きいほど自己収縮量は減少する。
- 4) 本研究の範囲内で、水結合材比20%の場合ではフライアッシュ置換率30%、シリカフェーム置換率20%の組合せ、水結合材比25%の場合ではフライアッシュ置換率40%、シリカフェーム置換率10%の組合せで大きな自己収縮低減効果が得られる。

参考文献：

- 1) 船本憲治ほか：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
- 2) 深川正浩ほか：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
- 3) 菅田紀之，三好友也，井田翔：フライアッシュとシリカフェームを混和した高強度コンクリートの強度および収縮特性について，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.486-492，2010
- 4) 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