

フライアッシュコンクリートの自己収縮について

Study on Autogenous Shrinkage of Fly Ash Concrete

北電興業（株）土木部 ○正 員 齋藤敏樹(Toshiki Saito)
北海道大学大学院 正 員 名和豊春(Toyoharu Nawa)
北海道電力（株）総合研究所 正 員 林 透 (Toru Hayashi)

1. まえがき

近年、高強度・高流動コンクリートが普及してきているが、単位結合材量が多いため自己収縮が大きくなり、ひび割れが発生することが危惧され、多くの研究がなされている。フライアッシュを使用した高強度・高流動コンクリートの自己収縮は小さいことが報告されているが、フライアッシュの品質が自己収縮に及ぼす影響について検討した研究はあまりない。¹⁾ そこで本研究では、品質の異なる3種類のフライアッシュを使用して、自己収縮に与えるフライアッシュの品質の影響について検討した。

2. 試験概要

(1) 使用材料

本試験で使用した材料を、表-1～2および図-1に示す。なお、高性能AE減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系のものを使用した。

(2) 試験方法

コンクリートの配合は、水粉体質量比を22および30%の2水準、フライアッシュ置換率を25および50%（容積比）の2水準、同一水粉体比における細骨材率を一定の条件とし、スランプフローが65±5cmとなるように高性能AE減水剤の添加率を調整した。コンクリートの練混ぜは、公称容量55Lの水平2軸強制練りミキサを使用し、細骨材および粉体を投入した後に、30秒空練りし、次に1次水を投入し90秒練混ぜ、掻き落としを行った。次いで、粗骨材、2次水および混和剤を投入し、90秒練混ぜを行った。ここで、1次水は単位水量の80%、2次水は残りの水量とした。

自己収縮ひずみの測定は、堀田ら²⁾の提案する低弾性埋込み型ひずみゲージ（弾性係数0.98N/mm²）を用いて測定し、内部温度は銅・コンスタンタン熱電対を用いて測定した。

供試体の作製は、φ125mm×h250mmのプラスチック製の型枠を使用した。型枠と試料との間に生じる摩擦を低減するために型枠内側にテフロンシート（厚さ0.1mm）を敷き、コンクリートの打設と同時にひずみゲージを埋込み、水分の逸散を防ぐため上部端面を封緘し、温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿度室で脱型せずに養生した。自己収縮ひずみは、供試体作製直後から測定を実施した。

コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-3に、供試体の概要を図-2に、ひずみゲージを写真-1に示す。

表-1 使用フライアッシュおよびセメント

種 類	FA1	FA2	FA3	OPC (普通セメント)
強熱減量 (%)	2.3	1.8	0.1	0.8
二酸化けい素 (%)	66.2	68.8	57.4	20.8
酸化アルミニウム (%)	25.11	18.50	23.47	5.95
酸化第二鉄 (%)	5.02	3.79	7.71	2.62
酸化カルシウム (%)	2.80	0.76	3.22	63.63
酸化マグネシウム (%)	1.13	0.46	1.25	1.79
酸化ナトリウム (%)	0.21	0.19	0.11	0.18
酸化カリウム (%)	1.32	0.69	1.91	0.33
C ₃ S (%)	—	—	—	51.2
C ₂ S (%)	—	—	—	21.2
C ₃ A (%)	—	—	—	11.3
C ₄ A F (%)	—	—	—	8.0
pH	11.4	10.4	10.5	—
メチレンブルー吸着量 (mg/g)	0.64	0.64	0.40	—
水分 (%)	0.11	0.01	0.15	—
密度 (g/cm ³)	2.26	2.13	2.30	3.15
密かさ比重 (g/cm ³)	1.344	1.221	1.590	—
充填率 (%)	59.5	57.3	69.1	—
物理性状				
粉末度				
ブレン比表面積 (cm ² /g)	4,260	2,790	2,100	3,470
45μmふるい残分 (%)	12.0	21.0	28.0	—
フロー値比 (%)	115	94	102	—
活性度指数 (材齢28日) (%)	88	84	78	—
活性度指数 (材齢91日) (%)	106	90	84	—

表-2 使用骨材

試 験 項 目	細骨材	粗骨材
	陸砂 大井川水系	砂岩碎石 青梅産
ふるい分け試験（粗粒率）	2.76	6.72
網ふるい0.075mmを通過する量の百分率 (%)	1.40	0.56
単位容積質量 (kg/L)	1.72	1.59
実 績 率 (%)	68.9	60.4
密 度（表乾） (g/cm ³)	2.57	2.65
吸 水 率 (%)	2.15	0.59
安 定 性 (%)	1.60	4.90

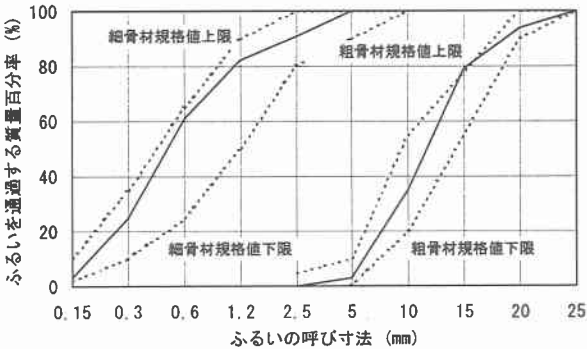


図-1 使用骨材の粒度分布

表-3 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

記号	水粉体 質量比 W/P (%)	水粉体 容積比 W/P (%)	フライアッシュ 種類	フライアッシュ 置換率 F/(C+F) (vol.%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						フレッシュ性状				
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤 SP (P×wt%)	スラン フロー (cm)	50cm70- 到達時間 (sec)	70-流動 停止時間 (sec)	空気量 (%)	温度 (°C)
OPC 22%	22	69.3	なし	0	43.0	165	750	0	647	880	10.50 (1.40)	62.4	17.1	151.6	1.2	22.5
OPC 30%	30	94.5	なし	0	48.5	165	550	0	804	880	4.95 (0.90)	67.4	5.7	78.0	1.2	22.0
FA1 25%	30	87.7	FA1	25	48.5	159	429	102	804	880	3.43 (0.80)	69.1	4.6	62.7	2.1	20.0
FA1 50%	30	80.9	FA1	50	48.5	152	296	212	804	880	2.31 (0.78)	64.0	4.2	35.7	2.6	19.5
FA2 25%	30	86.6	FA2	25	48.5	158	431	97	804	880	3.88 (0.90)	67.1	10.1	106.1	1.4	20.5
FA2 50%	30	79.4	FA2	50	48.5	151	300	202	804	880	3.60 (1.20)	69.4	20.8	132.6	1.7	21.0
FA3 50%	30	81.8	FA3	50	48.5	153	295	215	804	880	2.24 (0.76)	69.9	5.8	51.6	1.7	20.0

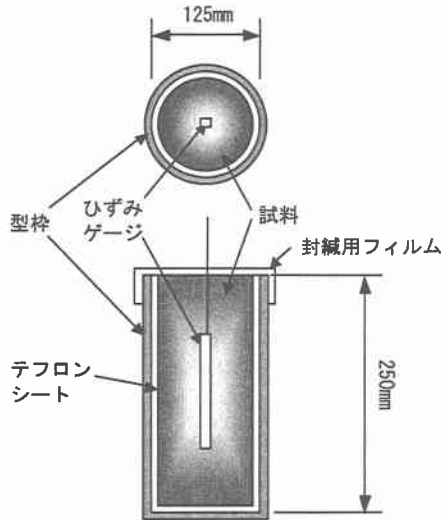


図-2 供試体の概要

3. 実験結果および考察

実験結果を図-3 および図-4 に示す。全てのコンクリートにおいて材齢1日以内に急激に収縮する現象が認められた。

フライアッシュ無混入の普通セメントのみを用いた水セメント比 22%および 30%のコンクリート（以下 OPC22% および OPC30%と記す）では、材齢1日以降も継続的に収縮するが、材齢が経過するに従い、収縮速度は緩やかになった。一方、フライアッシュ置換率 25%の場合は、材齢1日以降7日程度まで若干の膨張を生じた後、OPC30%と同様な収縮現象を示した。フライアッシュ置換率が50%まで増えると、材齢1日以降の膨張期間が14日程度

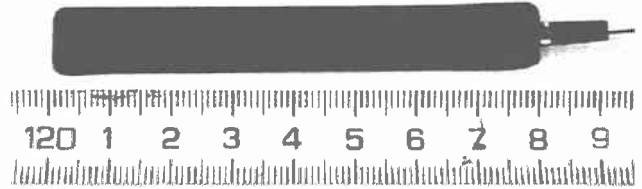


写真-1 ひずみゲージ

まで伸び、その後緩やかに収縮するのが認められた。

図-3 に示す材齢1日までの自己収縮ひずみについて、OPC22%と OPC30%を比較すると、水セメント比が小さく自己収縮ひずみが増大すると考えられる³⁾ OPC22%の方が OPC30%より自己収縮ひずみが小さくなっている。これは、本研究による自己収縮ひずみの測定が、供試体作製直後のコンクリートがフレッシュな状態からの測定のため、高性能AE減水剤添加率が OPC22%の方が多くなっていることに起因する水和反応の遅延が要因と考えられる。図-4 に示すように材齢が経過するに従い、OPC22%の方が OPC30%より自己収縮ひずみが増大していることから、初期における水和反応速度の相違がうかがえる。同様にフライアッシュ置換率 50%の場合、FA2 では（以下 FA2 50%と記す）、FA1（以下 FA1 50%と記す）および FA3（以下 FA3 50%と記す）より高性能AE減水剤添加率が多くっており、水和反応の遅延の影響により材齢1日までの自己収縮ひずみが小さくなっているものと考えられる。

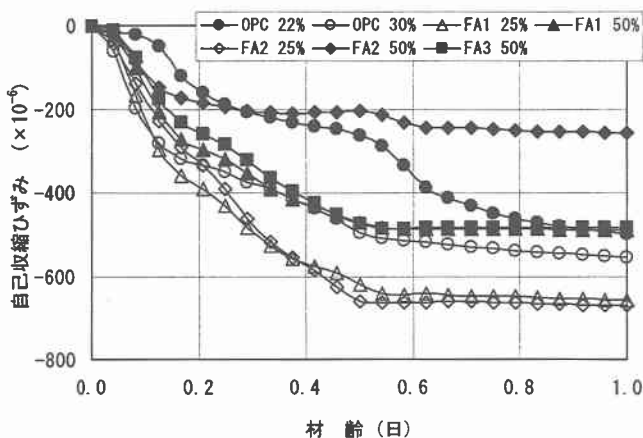


図-3 自己収縮試験結果(材齢1日まで)

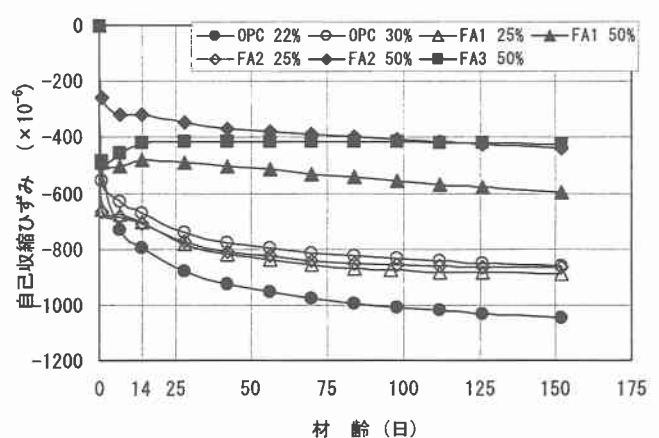


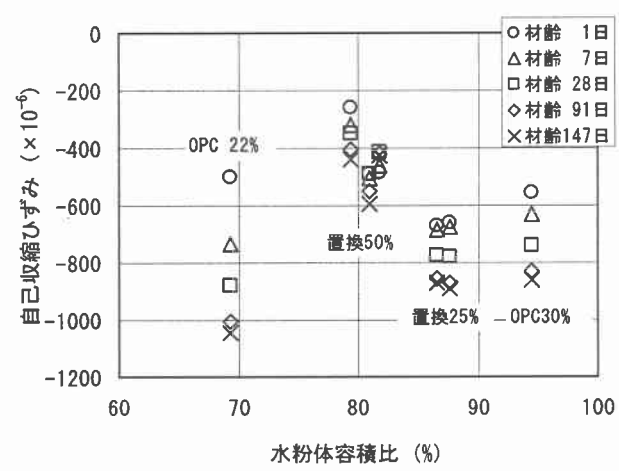
図-4 自己収縮試験結果

材齢 150 日での自己収縮ひずみは、フライアッシュ置換率 25%の場合は、 0.87×10^{-6} であるが、フライアッシュ置換率 50%の場合は、 $4.5 \sim 6.0 \times 10^{-6}$ 程度となり、フライアッシュの置換による自己収縮の抑制効果が示されている。

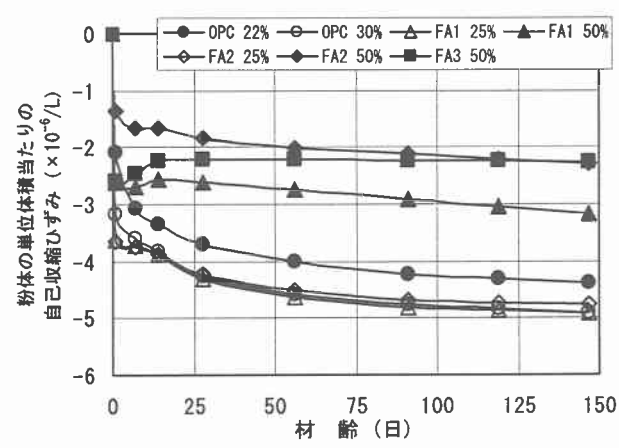
フライアッシュを混入すると、コンクリートの自己収縮が低減することは知られており¹⁾、見かけ上本研究の結果は、既往の研究成果と合致しないように思われる。しかし、既往の研究成果が粉体の水に対する容積比が同一条件での成果であり、本研究のように水粉体質量比が一定の条件ではない。

表－4 粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ

記号	水粉体質量比 (%)	水粉体容積比 (%)	粉体体積 (L/m ³)	粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ (×10 ⁻⁶ /L)				
				材 齢 (日)				
				1	7	28	91	147
OPC 22%	22	69.3	238.1	-2.10	-3.08	-3.70	-4.23	-4.38
OPC 30%	30	94.5	174.6	-3.18	-3.61	-4.25	-4.77	-4.93
FA1 25%	30	87.7	181.3	-3.63	-3.72	-4.31	-4.81	-4.91
FA1 50%	30	80.9	187.8	-2.61	-2.69	-2.62	-2.93	-3.17
FA2 25%	30	86.6	182.4	-3.66	-3.76	-4.24	-4.68	-4.76
FA2 50%	30	79.4	190.1	-1.36	-1.67	-1.83	-2.13	-2.30
FA3 50%	30	81.8	187.1	-2.59	-2.46	-2.22	-2.23	-2.27



図－5 水粉体容積比と自己収縮ひずみ



図－6 材齢と粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ

本研究での、各コンクリートの粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみを表－4に示す。また、水粉体容積比と自己収縮ひずみとの関係を図－5に、材齢と粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみとの関係を図－6に示す。

図－5より、水和反応が進行するに従い水粉体容積比が小さいものほど自己収縮ひずみが大きくなり、フライアッシュ置換率を増大するほど同一水粉体容積比では自己収縮ひずみが小さくなる傾向が認められた。

図－6より、粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみは、OPC22%とOPC30%では、水セメント比の小さいOPC22%の方が自己収縮ひずみが小さくなっている。セメントの水和反応率を測定していないため、実験的に実証した訳ではないが、この理由として水セメント比によって水和反応率が相違することが考えられる。また、フライアッシュ置換率 25%の場合は、同一水粉体質量比であるOPC30%と同程度の粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみとなった。一方、フライアッシュ置換率 50%の場合は、同一水粉体質量比であるOPC30%よりも粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみは小さく、フライアッシュの置換による自己収縮の低減効果が認められた。

なお、図－6においてフライアッシュの種類により粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみの関係が異なるため、フライアッシュの品質が自己収縮ひずみに及ぼす影響について検討を行った。ただし、ここでは高性能AE減水剤添加率の相違によるセメントの水和反応の遅延が初期の自己収縮ひずみに与える影響を考慮し、材齢1日を基点として検討した。フライアッシュ置換率 50%におけるフライアッシュ品質と粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみとの関係を図－7～10に示す。

フライアッシュ品質のうち、化学成分では、二酸化けい素が多いものは粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみが大きく、酸化カルシウムが少ないものは粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみが大きい傾向が示され、物理性状では、充填率が小さいものは粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみが大きい傾向が示された。

フライアッシュのポズラン反応性は、フライアッシュ中のガラス相の量が重要であることが知られている。⁴⁾また、化学成分のうち二酸化けい素が少なく、酸化カルシウムが多いフライアッシュはガラス相が多い傾向であり、ガラス相が多いフライアッシュはポズラン反応性に優れているとされている。⁴⁾

本研究で使用したフライアッシュのガラス化率は測定していないものの、二酸化けい素が少なく、酸化カルシウムが多いFA3が、ガラス相が多く、ポズラン反応性に優れ、自己収縮の低減効果が大きいと推察された。

以上の結果より、化学的には二酸化けい素が少なく、酸化カルシウムが多く、また物理的には充填率が大きいフライアッシュほど、自己収縮を低減する効果が大きいものと判断された。

今後、これらフライアッシュの品質などがどのようなメカニズムで自己収縮を低減させているのかについての検討が必要と考える。

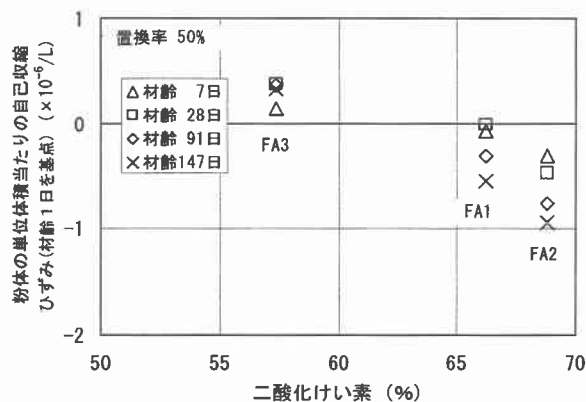


図-7 二酸化けい素と
粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ



図-8 酸化カルシウムと
粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ

4. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 水粉体質量比一定の条件において、フライアッシュ置換率が 25%では、普通セメントと同じ水粉体容積比-自己収縮量の関係を示した。しかし、置換率が 50%の場合は明らかに自己収縮が低減でき、フライアッシュを混合すると低水セメント比の高強度・高流動コンクリートの自己収縮を低減できることを確認できた。
- (2) フライアッシュによる自己収縮の低減効果は、フライアッシュ置換率および品質により大きく異なることが分かった。すなわち、フライアッシュの品質のうち、化学成分では二酸化けい素および酸化カルシウムが比較的高い相関を示し、物理的要因としては充填率の寄与が大きく、二酸化けい素が少なく、酸化カルシウムが多く、充填率が大きいものほど、自己収縮の低減効果が大きい傾向にあることが分かった。

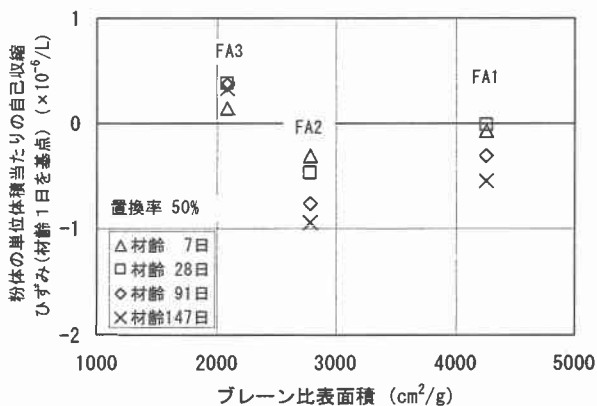


図-9 ブレーン比表面積と
粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ

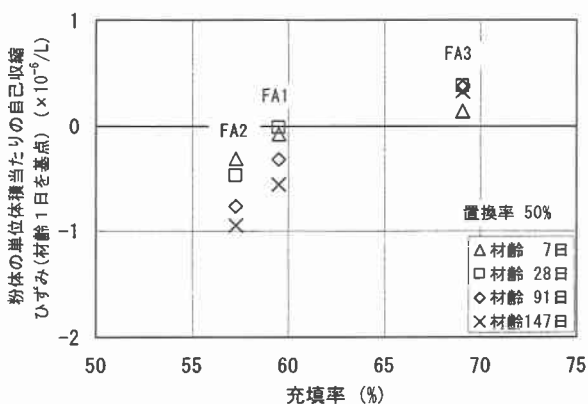


図-10 充填率と
粉体の単位体積当たりの自己収縮ひずみ

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書、pp122-124、2002
- 2) 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
- 3) 田澤栄一、宮澤伸吾：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-25、pp43-52、1994. 11
- 4) 坂井悦郎、渡辺賢三、李昇憲、大門正機：電気集じん装置から採取した石炭灰の特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19、No. 1、pp235-240、1997
- 5) 名和豊春、出雲健司、矢野めぐみ、湯浅昇：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、pp218-224、2001
- 6) 堀田智明、名和豊春、矢野めぐみ、出雲健司：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報告集、Vol. 23、No. 2、pp697-702、2001
- 7) 堀田智明、名和豊春：モルタル効果対中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報告集、Vol. 24、No. 1、pp165-170、2002