

論文 フライアッシュの内割・外割混合を併用した高強度コンクリートの収縮特性について

長枝 健太*1・菅田 紀之*2

要旨：フライアッシュについて内割・外割混合を併用した高強度コンクリートの収縮特性について検討するために、圧縮強度試験、自己収縮試験および乾燥収縮試験を行った。配合は、水結合材比を 25%、シリカフュームの置換率を 10%一定として、フライアッシュの置換率については 0, 20, 40 % の 3 ケースにおいて、内割・外割の置換率を変化させた。結果として、内割・外割混合の併用によりフライアッシュによる圧縮強度の低下が改善できること、外割の比率を大きくするほど乾燥収縮ひずみが小さくなること、強度低下が起こらないようにした場合でも自己収縮を低減できることなどがわかった。

キーワード：フライアッシュ、内割混合、外割混合、高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、圧縮強度

1. はじめに

産業副産物であるフライアッシュは石炭火力発電所より石炭灰の一種として産出されるが、その量は年間約 1000 万トンを超え今後も増加傾向にあり、処分に関する問題が出るほどである。主にセメント原料として利用されているが、「資源の有効な利用の促進に関する法律」の中で指定副産物とされており更なる有効利用が望まれている。また地球環境問題への対策として、フライアッシュを混和材としてコンクリートに混合することで、コンクリート製作における CO₂排出量を削減させることができる。しかしながら、フライアッシュを混和材として利用することで、水和発熱の抑制やアルカリシリカ反応の抑制といった効果が期待できる一方で、材齢初期における強度の低下や中性化を促進させる効果もあり、利用が進まないのが現状である。また、近年では建造物の長大化に伴い設計基準強度が 80N/mm² を超えるような高強度コンクリートの需要が高まりつつある。水セメント比を小さく、つまりセメントの割合を大きくすることで高い強度を得ることができるが、それを起因とした高強度コンクリート特有の大きな自己収縮により構造物にひび割れを起こしてしまう問題が指摘されている。既往の研究¹⁾によりフライアッシュをコンクリートに混合することで自己収縮が小さくなることがわかっているが、セメント代替である内割混合のため結果として強度が低下している。これに対し強度発現の起因となるセメント量を一定とし、混和材を細骨材代替として扱う外割混合する方法がある。フライアッシュの外割混合に関する研究^{2),3)}は行われているものの、高強度コンクリートや収縮に関する研究例はあまりない。

本研究では、フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度特性、自己収縮および乾燥収縮に及ぼす、セ

メント代替である内割混合と細骨材代替である外割混合を併用した場合の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、自己収縮試験および乾燥収縮試験を行った。

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を内割・外割混合した高強度コンクリートの製造に用いた材料を表-1に示す。結合材には普通ポルトランドセメント、フライアッシュおよび高強度コンクリートで一般に使用されるシリカフュームを用いた。使用したフライアッシュは JIS II 種規格を満たす比表面積 4,120 cm²/g、密度 2.29 g/cm³ のものである。シリカフュームはノルウェー産のものをを用い、比表面積 200,000 cm²/g、平均粒径 0.2 μm、密度 2.2 g/cm³ のものである。細骨材として陸砂、粗骨材として碎石

表-1 使用材料

材料	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 ³
フライアッシュ (FA)	比表面積：4,120 cm ² /g 密度：2.29 g/cm ³ SiO ₂ 量：65.3% 活性度指数：81%(材齢 28 日) 100%(材齢 91 日)
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 SiO ₂ 量：97%
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.72 g/cm ³
粗骨材 (G)	JIS 2005 碎石 表乾密度：2.68 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングリコール系

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻（学生会員）

*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 配合およびフレッシュ性状

	W/B	SF/B	FA/B	FAi/B	FAe/B	s/a	単位量 (kg/m³)								スランブ フロー フロー (cm)	空気量 (%)	
	(%)					W	C	SF	FAi	FAe	S	G	SP	AF			
FA00-00	25	10	0	0	0	49	166	598	66.4	0	0	806	826	7.3	0.020	64	1.6
FA20-00			20	20	0			465		132.8	0	785	805	5.3	0.016	57	2.5
FA10-10				10	10			531		66.4	66.4	716	816	7.0	0.021	60	1.1
FA00-20				0	20			598		0	132.8	648	826	8.6	0.026	62	0.8
FA40-00			40	40	0			332		265.6	0	763	783	4.6	0.014	54	1.5
FA30-10				30	10			398		199.2	66.4	691	789	6.0	0.018	63	1.3
FA20-20				20	20			465		132.8	132.8	627	805	7.3	0.022	63	1.7
FA10-30				10	30			531		66.4	199.2	559	816	8.6	0.026	65	1.4
FA00-40				0	40			598		0	265.6	490	826	10.6	0.032	55	1.4

2005を用いた。また、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，空気量を調整するためにポリエチレングリコール系の消泡剤を用いた。

2.2 配合

本研究に用いたフライアッシュを内割・外割混合した高強度コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表－２に示す。フライアッシュの内割単位量を FAi，外割単位量を FAe で表す。水結合材比 (W/B, B=C+FAi+SF) は 25%，シリカフューム置換率 (SF/B) は 10% で一定とした。フライアッシュ置換率 (FA/B, FA=FAi+FAe) を 0, 20, 40% とし，それらの(内割, 外割)を(00,00), (20,00), (10,10), (00,20), (40,00), (30,10), (20,20), (10,30), (00,40)のように 10% ずつ変化させて設定し，合計 9 ケースの配合とした。以降，配合は FA 内割-外割と表記する。目標スランブフローを 65 cm，目標空気量を 1.0% として，配合を決定した。全ケースにおいて単位水量を 166kg/m³ とし，FA00-00 において粗骨材絶対容積が 0.3m³/m³ 程度になるように細骨材率 49% とし，それを全ケースに適用した。その結果，配合により単位粗骨材量が異なっている。

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は，JIS A 1108 に従って行った。試験には直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体を用いた。試験材齢は 28 日である。供試体の養生方法については，練混ぜ直後から 20℃ の恒温室内で封かん養生し，材齢 24 時間で脱型，その後 20℃ の水中養生とした。試験直前に供試体の端面を研磨機により研磨仕上げした。なお，測定本数は供試体 3 本とし，その結果の平均を用いた。

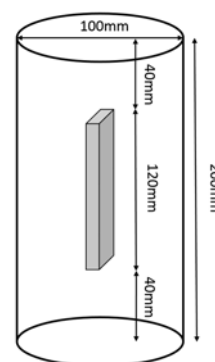
2.4 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は図－１に示すように，直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体中央にゲージ長 120mm の埋込み型ひずみゲージを配置して行った。試験は 20℃ の恒温室内で材齢 7 日まで封かん養生した供試体を脱型して開始した。試験環境は温度 20℃，相対湿度 60% とした。供

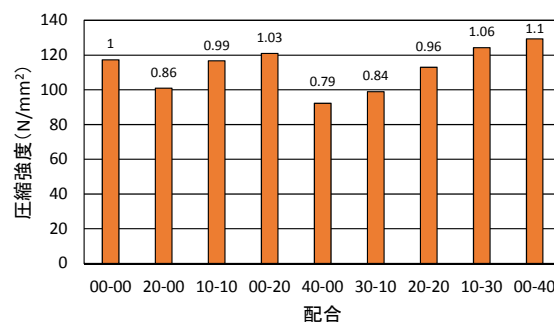
試体の上下面にはアルミテープを貼付け，乾燥面は供試体側面のみとした。ひずみの測定は 320~330 日間行った。なお，乾燥収縮に影響する体積表面積比は 100×100×400mm の角柱供試体とほぼ同一である。同一バッチで製作した供試体の収縮ひずみはほぼ等しいことを確認し，測定本数を各 1 本とした。

2.5 自己収縮試験

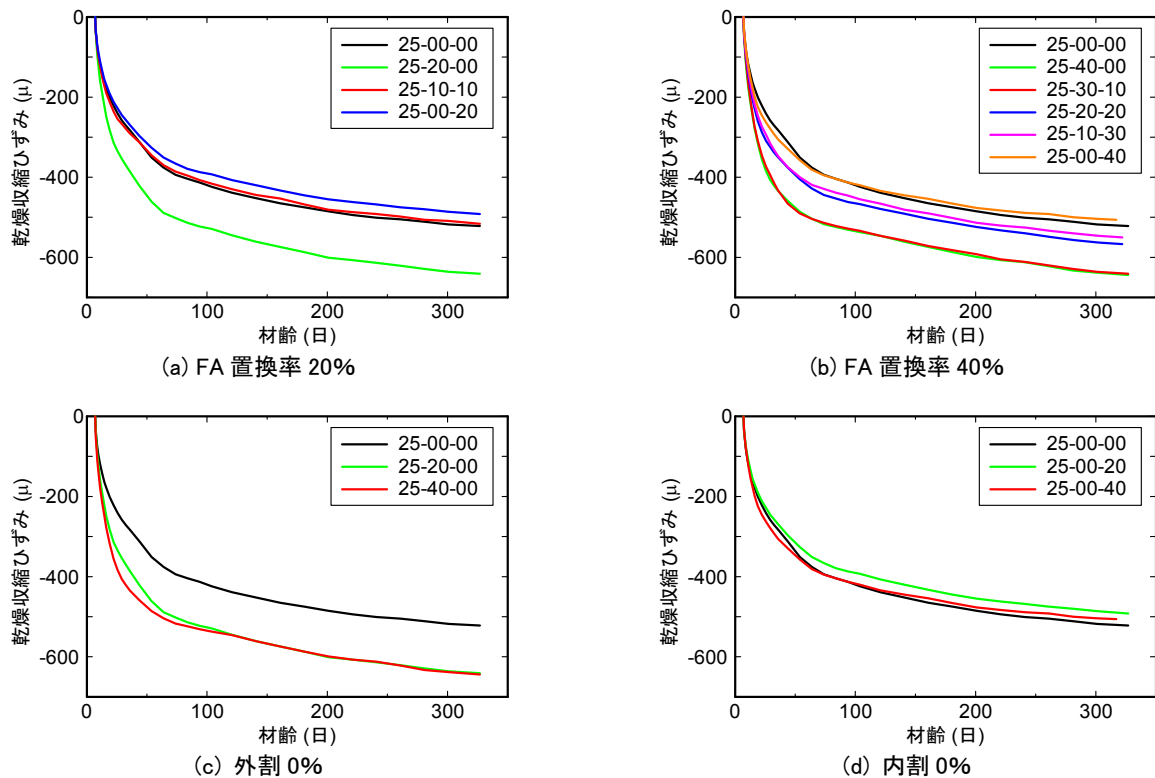
自己収縮試験は，乾燥収縮試験と同様に直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱供試体中央にゲージ長 120mm，弾性係数 2.75GPa の埋込み型ひずみゲージを配置して行った。また，供試体中央に熱電対を配置し温度測定を行い，線膨張係数 10⁻⁵/℃ でひずみの補正を行った。練混ぜ後に型



図－１ 収縮試験用供試体



図－２ 圧縮強度試験結果



図－3 乾燥収縮ひずみ

枠に打込み上面をポリエチレンシートおよびアルミテープを用いて密閉し封かん状態とした。また、用いた型枠は鋼製缶であり、シート等による型枠面の付着処理の有無が自己収縮ひずみに及ぼす影響は小さかったため、付着処理を行わずに供試体を作製した。温度 20℃の恒温室内にて保管し、ひずみの測定は締固め直後から 320330 日間行い、凝結始発を起点として以後のひずみ変化を自己収縮ひずみとしている。なお、測定本数は 2 本とし、その結果の平均を用いた。

3. 結果および考察

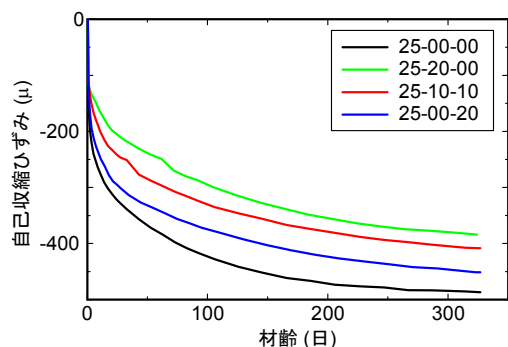
3.1 圧縮強度

図－2 に圧縮強度試験結果を示す。図中の数値はそれぞれの配合における強度のフライアッシュ無混合のものに対する強度比である。FA00-00, FA20-00, FA40-00 で比較、つまり外割 0%一定の条件で比較すると、フライアッシュ置換率が大きくなるほど圧縮強度が低下していることがわかる。これは従来の研究と同様の傾向であり、セメント量の減少による強度低下であると考えられる。FA00-00, FA0-20, FA00-40 で比較、つまり内割 0%一定の条件で比較すると、外割の比率を大きくするほど圧縮強度が増加していることがわかる。内割 10%および 20%一定の条件においても同様の傾向が見られた。これは、フライアッシュのポゾラン反応により、細孔組織が緻密化したためであると考えられる。また、FA10-10, FA00-20, FA20-20 および FA10-30 においてはフライアッシュ無混入のものと同程度の圧縮強度が得られた。以上より

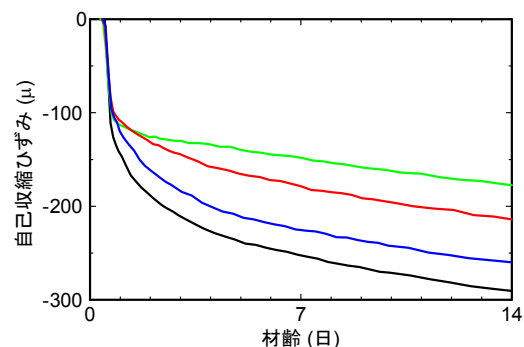
フライアッシュの内割混合と外割混合を併用することによって、フライアッシュ混合による圧縮強度の低下を改善できることがわかった。

3.2 乾燥収縮

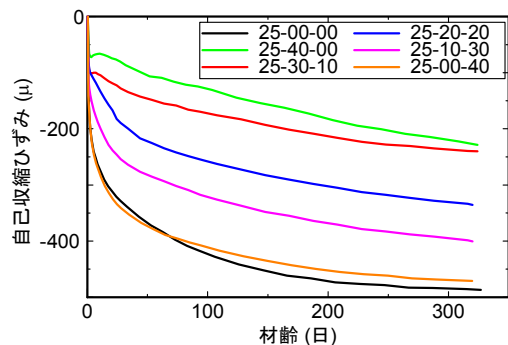
図－3 に材齢と乾燥収縮ひずみの関係を示す。図 (a)、図 (b) はフライアッシュ置換率一定条件での比較、図 (c)、図 (d) は内割・外割それぞれ 0%一定条件での比較として表している。いずれの配合においても材齢初期における乾燥収縮ひずみの増加率が大きく、材齢が進むにつれ小さくなっていることがわかる。フライアッシュ置換率 20%において、全期間で FA10-10 および FA00-20 の乾燥収縮ひずみはフライアッシュ無混合である FA00-00 と同程度か若干小さくなり、外割 0%の FA20-00 の乾燥収縮ひずみは FA00-00 に比べて、材齢 60 日以降で 100 μ 程度と大幅に増加している。この要因として、セメント代替の内割混合によりセメント量が減少し水和反応が緩慢になったため、コンクリート内部に未水和水が多く残り水分蒸発量が多くなったためであると考えられる。また、外割の比率が大きくなるにつれて乾燥収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。これは、水和反応に加え、フライアッシュのポゾラン反応によってコンクリート内部の水の消費量が多くなり、残存する未水和水量が少なくなること乾燥環境における水分蒸発量が少なくなったためであると考えられる。フライアッシュ 40%においては、内割混合 0%である FA00-40 のみが材齢 90 日以降においてフライアッシュ無混合のものに比べ若干小さく



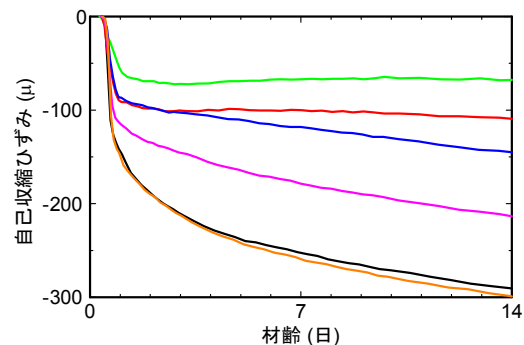
(a) FA 置換率 20%



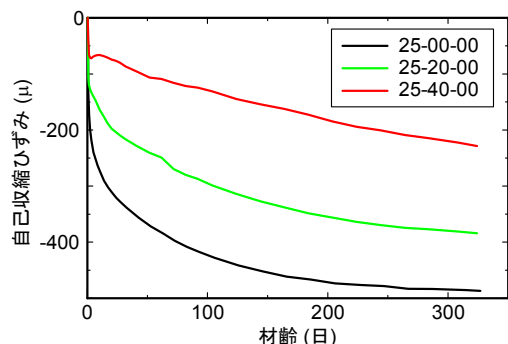
(b) FA 置換率 20% 初期ひずみ



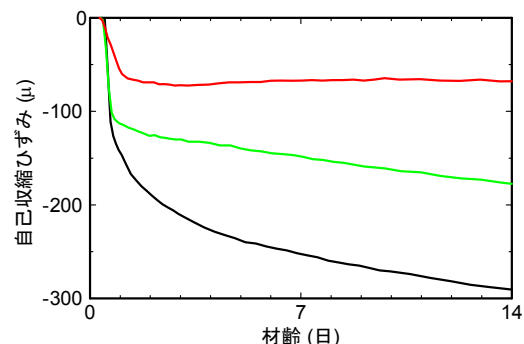
(c) FA 置換率 40%



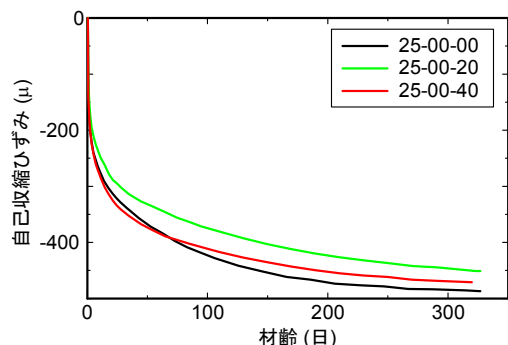
(d) FA 置換率 40% 初期ひずみ



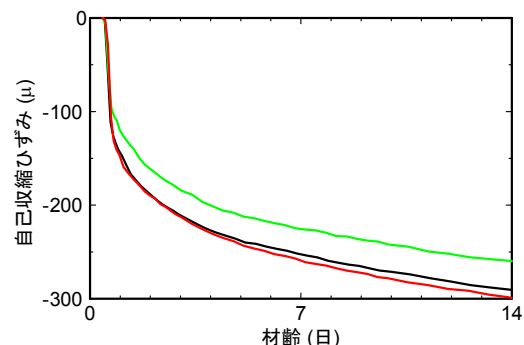
(e) 外割 0%



(f) 外割 0% 初期ひずみ



(g) 内割 0%



(h) 内割 0% 初期ひずみ

図－4 自己収縮ひずみ

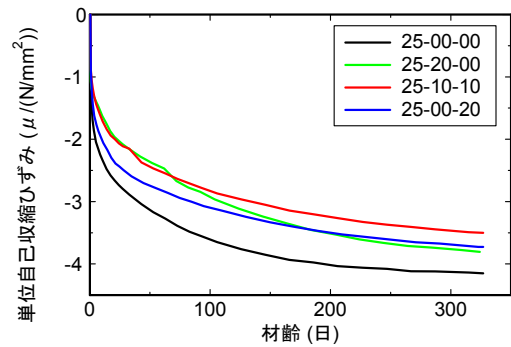
なり、材齢初期より内割混合を含むFA20-20およびFA10-30で増加、FA40-00およびFA30-10で大きく増加していることがわかる。その増加量は材齢60日以降でFA20-20およびFA10-30で50 μ 程度、FA40-00およびFA30-10で100 μ 程度である。また、FA40-00およびFA30-10については材齢初期から終期まで同程度の値となった。フライアッシュ置換率20%のものと同様に、外割の比率が大き

くなるにつれて乾燥収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。要因についても前述と同様であると考えられる。外割0%一定条件で比較すると、フライアッシュを混合することで乾燥収縮ひずみが大きくなっていることがわかる。この要因は前述と同様であると考えられる。材齢初期においてフライアッシュを混合したものはその増加率が大きく、材齢2ヶ月以後は同程度となっている。

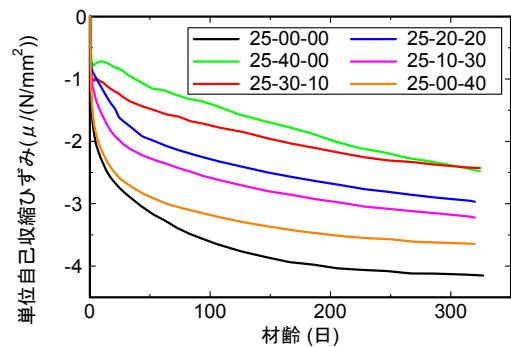
また、フライアッシュ置換率 20%および 40%において、材齢 120 日以降はいずれも同程度となり差は見られなかった。内割 0%一定条件で比較すると、フライアッシュを混合した FA00-20 および FA00-40 の乾燥収縮ひずみはフライアッシュ無混合のものと比べ、同程度か若干低下していることがわかる。これより、コンクリートの乾燥収縮はセメントによる成分が多くを占め、フライアッシュによる影響は小さいことがわかった。

3.3 自己収縮

図-4 に材齢と自己収縮ひずみの関係を示す。図(a), 図(b), 図(c)および図(d)はフライアッシュ置換率一定条件での比較, 図(e), 図(f), 図(g) および図(h)は内割・外割それぞれ 0%一定条件での比較として表している。いずれの配合においても、フライアッシュを混合することによって自己収縮ひずみが減少していることがわかる。フライアッシュ置換率 20%において、材齢 3 日程度までの自己収縮ひずみの増加率に差があるものの、それ以降の増加率は同程度である。フライアッシュ無混合のものと比較して、材齢 100 日以降において FA00-20 で 40μ 程度, FA10-10 で 80μ 程度, FA20-00 で 100μ 程度小さくなっていることがわかる。これより、内割の比率が大きくなるほど自己収縮ひずみは減少する、つまり外割の比率が大きくなるほど自己収縮ひずみが増加していることがわかる。この要因を収縮ひずみの機構の有力説である毛細管張力説に沿って考察すると、フライアッシュの外割混合においては、ポズラン反応によって細孔空隙構造が細分化するため、細孔組織が緻密化しメニスカス半径が小さくなり負圧が増大したためであると考えられる。フライアッシュ置換率 40%においても、材齢 40 日程度までにおける自己収縮ひずみの増加率に差があるものの、それ以降の増加率は同程度となる傾向が見られた。しかしながら、FA40-00 においては初期材齢における自己収縮ひずみの増加は少なく、材齢 3 日程度で一度自己収縮が滞り、材齢 10 日以後において増加し始めていることがわかる。この要因として、セメント量の少ない配合のために材齢初期に未水和水が多く残っていることと、長期にわたるポズラン反応によるものと考えられる。また、フライアッシュ置換率 20%のものと同様に外割の比率が大きくなるほど自己収縮ひずみが増加しているが、この要因についても同様であると考えられる。内割 0%である FA00-40 においてはフライアッシュ無混合のものと同程度か若干小さい値となった。フライアッシュ無混合のものと比べ、材齢 300 日において FA10-30 で 90μ 程度, FA20-20 で 160μ 程度, FA40-00 および FA30-10 で 250μ 程度小さくなっていることがわかる。外割 0%一定条件で比較すると、内割の比率が大きくなるほど自己収縮ひずみが減少していることがわかる。フライアッシュ無混



(a) FA 置換率 20%



(b) FA 置換率 40%

図-5 単位自己収縮ひずみ

合のものと比べ、材齢 50 日以降において FA20-00 で 100μ 程度, FA40-00 で 250μ 程度自己収縮ひずみが減少している。これは、セメント量の減少による水和反応の緩慢が考えられる。内割 0%一定条件で比較すると、フライアッシュを外割混合した場合、自己収縮ひずみが同程度か若干減少していることがわかる。フライアッシュ無混合のものと比べ、FA00-20 の材齢 100 日以降において 40μ 程度, FA00-40 で 10μ 程度小さくなっている。以上より、フライアッシュを混合することで自己収縮ひずみを低減させることができ、特に内割の比率を大きくすることによる低減効果が大きいことがわかった。

3.4 単位自己収縮ひずみ

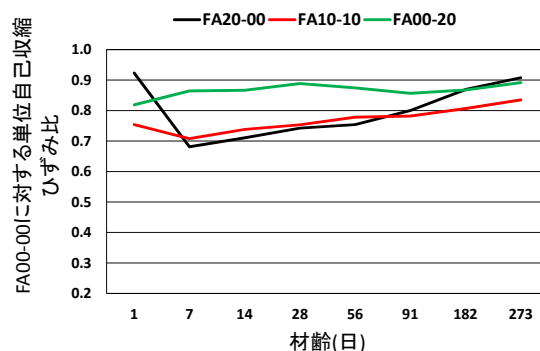
図-5 に材齢と単位自己収縮ひずみの関係を示す。ここで、単位自己収縮ひずみとは、各配合ケースそれぞれの自己収縮ひずみを材齢 28 日強度で割って求めたもので、単位強度当たりの自己収縮ひずみを表している。いずれの配合においてもフライアッシュを混合することで単位自己収縮ひずみが減少していることがわかる。また、自己収縮ひずみの傾向と同様に、外割の比率が大きくなるほど増加していることがわかる。フライアッシュ置換率 20%において、自己収縮ひずみは FA20-00 が一番小さくなっていたが、単位自己収縮ひずみでは FA10-10 が一番小さい結果となった。また、自己収縮ひずみにおいて FA00-20 は FA20-00 に比べ大きい結果となっていたが、単位自己収縮ひずみにおいては同程度となっている。こ

れより、外割混合による細孔組織の緻密化による強度増進効果が収縮ひずみ低減効果より大きいことがわかる。フライアッシュ置換率 40%において、FA00-40 の自己収縮ひずみはフライアッシュ無混合のものと同程度だったが、単位自己収縮ひずみは小さい結果となった。図-6 に材齢と単位自己収縮ひずみ比の関係を示す。各配合ケースの単位自己収縮ひずみをフライアッシュ無混合のものに対する比として表している。フライアッシュ置換率 20%において、内割混合の大きい FA20-00 は材齢中期で単位自己収縮ひずみ比が小さくなり、その後増加傾向にあり、FA10-10 および FA00-20 は横ばいもしくはやや増加傾向にあることがわかる。フライアッシュ置換率 40%において、内割の比率が大きくなるほど単位自己収縮ひずみ比が小さくなっていることがわかる。FA40-00 の材齢 14 日では単位自己収縮ひずみ比 0.29 と低い値を示した。内割 0%である FA00-40 は他の配合ケースに比べて単位自己収縮ひずみ比が大きい結果となったが、材齢が進むにつれて単位自己収縮ひずみ比が減少する傾向が見られた。そのほかの配合については、材齢が進むにつれて単位自己収縮ひずみ比が増加する傾向にあり、内割の比率が大きいほどその傾向が強いことがわかる。以上より、フライアッシュ無混合のものと同程度の圧縮強度が得られた FA10-10, FA00-20, FA20-20 および FA10-30 において自己収縮ひずみが低減されていることが確認でき、内割・外割の併用によって強度を低下させることなく自己収縮を低減できることがわかった。

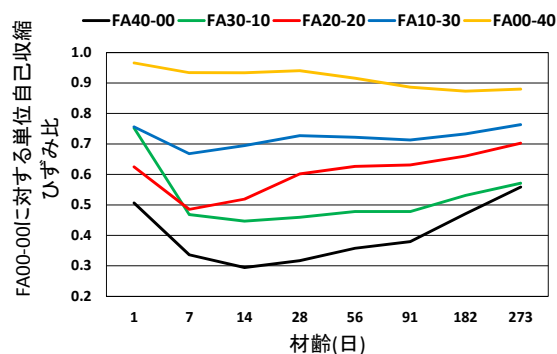
4. まとめ

本研究では、フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度特性、自己収縮および乾燥収縮に及ぼす、セメント代替である内割混合と細骨材代替である外割混合の併用の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、自己収縮試験および乾燥収縮試験を行った。その結果次のようなことがわかった。

- 1) 外割一定条件で内割を大きくするほど圧縮強度は低下し、内割一定条件で外割の比率を大きくするほど圧縮強度が増加する。
- 2) フライアッシュ置換率(内割+外割)が一定の条件では、外割の比率が大きくなるほど乾燥収縮ひずみは小さくなる。
- 3) フライアッシュ置換率が一定の条件では、外割の比率



(a) FA 置換率 20%



(b) FA 置換率 40%

図-6 FA00-00 に対する単位自己収縮ひずみ比

が大きくなるほど自己収縮ひずみは大きくなる。

- 4) フライアッシュ置換率が一定の条件では、外割の比率が大きくなるほど単位自己収縮ひずみは大きくなる。
- 5) 内割・外割混合の併用により、強度低下が起こらないようにした場合でも自己収縮を低減できる。

参考文献

- 1) 小山央, 菅田紀之: フライアッシュとシリカフェュームを併用した高強度コンクリートの自己収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.413-418, 2011
- 2) 黄光律, 野口貴文, 羽原俊祐, 友澤史紀: フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性, コンクリート工学年次論文報告集, No.2, pp.109-114, 1999
- 3) 古賀善雄, 船本憲治, 藤本浩: フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1643-1648, 2006