

論文 廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混入コンクリートの性能向上に関する実験的検討

温品 達也^{*1}・清木 祥平^{*2}・中川 信矢^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：フライアッシュを用いたコンクリートは、初期強度が低く、長い養生期間を必要とするため、構造部材への適用は少ない。一方、廃瓦粗骨材を高強度コンクリートの内部養生材として利用し、高強度化と自己収縮低減に有効であるとする研究が報告されている。本研究では、廃瓦粗骨材の内部養生効果に着目し、フライアッシュを用いたコンクリートの初期強度低下を改善させる目的のもと、コンクリートの粗骨材を一部廃瓦で置換し、その力学性能と細孔構造を実験的に検討した。その結果、廃瓦の内部養生効果によって、圧縮強度が増加し、毛細管空隙は緻密化し、自己収縮が低減されることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ、内部養生、廃瓦粗骨材、圧縮強度、細孔径分布、自己収縮

1. はじめに

フライアッシュはコンクリートに混和することで、流動性の改善や水和熱の減少、長期強度の増進などの効果を持つことが知られており、ダムやプレキャストコンクリートの工事などに主として使用されてきた¹⁾。さらに、フライアッシュの JIS 規格の制定、品質規定の改正などによって、その使用量は増加傾向にあるが、普通コンクリートよりも初期強度が低く、長い養生期間を必要とするため、依然として構造部材への適用は少ない。

現在、地球環境保全に対する社会的要請の高まりと「再生資源の利用に関する法律」の制定(指定副産物としての石炭灰の有効利用の促進²⁾)などの社会情勢の変化から、フライアッシュのセメント・コンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を増加させることが、緊急の課題であると認識できる。

また、近年、高含水率の軽量骨材を内部養生材として使用し、収縮低減を行う方法が提案されている³⁾。これは、相対湿度の低下したセメントペーストに湿度勾配を利用し、軽量骨材の水分を供給する手法であり、自己乾燥を抑制することを意図している。内部養生の利点は自己収縮抑制によるひび割れの低減にとどまらず、強度増進、透水性の低減、耐久性の向上もあるとの報告がされている⁴⁾。しかし一方で、軽量骨材を内部養生材として使用した場合、使用量の増加により収縮低減効果はあるが、圧縮強度の頭打ちが起こるとの報告もされている⁵⁾。これらに対し、強度が高く、適度な吸水率を有する廃瓦粗骨材を高強度コンクリートの内部養生材に利用する研究が行われ、高強度化と自己収縮低減に有効であるとする結果が報告されている⁶⁾。

本研究は、上記の成果に着目し、湿潤養生を不可欠とするフライアッシュコンクリート(FAC)に対して廃瓦を内部養生材として用い、その力学性能向上に対する効果を圧縮強度発現、細孔径分布、自己・乾燥収縮の観点から、実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(C)を使用した。混和材としてフライアッシュ(FA)を質量比内割りでセメントの 10%および 20%置換して使用した。細骨材には、石英砕砂(S)と石灰砕砂(LS)を使用した。粗骨材は、砕石(G)と廃瓦粗骨材(PC)を使用した。廃瓦粗骨材は島根県江津産で、カオリン粘土を焼成して作製した瓦の不適合品を破碎して、3 日間吸水させたものを使用した。

2.2 配合

配合を表 - 2 に示す。検討する水結合材比(W/B)は 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 とし、配合は W/B = 0.5 において 7 種類、W/B = 0.4, 0.3, 0.2 においては 4 種類とした。単位水量は同一量の 165kg/m³とした。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを NC とし、そのセメントをフライアッシュで 10, 20%質量比内割り置換したものを FA10, FA20 と表記した。PC20, PC40 は、廃瓦粗骨材を 20, 40%容積置換したことを示す。表 - 3 に、各配合名とセメント、廃瓦粗骨材の置換率の対応表を示す。

W は廃瓦に吸収させた水量を示し、これを単位水量に加算すると各配合の W/B は 表 - 2 の(W+ W)/(C+FA)のように示される。

*1 広島大学 工学研究科社会環境システム専攻 (学生会員)

*2 中国電力(株) エネルギア総合研究所

*3 中国高圧コンクリート(株) 環境事業部

*4 広島大学 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

表 - 1 使用材料表

使用材料	種類	性質	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ ,比表面積3260cm ² /g	C
混和材	フライアッシュ(JIS 種)	密度2.13g/cm ³ ,比表面積3200cm ² /g	FA
細骨材	石英砕砂	表乾密度2.60,吸水率1.13%	S
	石灰砕砂	表乾密度2.70,吸水率0.93%	LS
粗骨材	碎石	表乾密度2.67,吸水率0.56%,破砕値12%,骨材粒径20-5mm	G
	廃瓦粗骨材	表乾密度2.24,吸水率8.58%,破砕値21%,骨材粒径20-5mm	PC
混和剤	AE減水剤	リゲニンスルホン酸塩	
	高性能減水剤	ポリカルボン酸系化合物	

表 - 2 配合表

配合名	W/ (C+FA)	(W+ΔW)/ (C+FA)	単位量(kg/m ³)									slump or flow (mm)	Air (%)
			W	C	FA	S+LS		G	PC	ΔW in PC			
						S	LS						
NC		-	165	330	-	504	349	852	961	-	-	95	5.5
PC40NC		0.58	165	330	-	504	349	852	577	325	28	115	4.0
FA10		-	165	297	33	497	344	840	961	-	-	154	6.0
PC20FA10	0.50	0.54	165	297	33	497	344	840	769	163	14	88	4.5
FA20		-	165	264	66	489	339	828	961	-	-	80	3.5
PC20FA20		0.54	165	264	66	489	339	828	769	163	14	129	3.1
PC40FA20		0.58	165	264	66	489	339	828	577	325	28	81	4.1
NC		-	165	413	-	463	320	783	961	-	-	76	4.7
PC40NC	0.40	0.46	165	413	-	463	320	783	577	325	28	77	4.8
FA20		-	165	330	83	445	308	753	961	-	-	75	4.3
PC40FA20		0.46	165	330	83	445	308	753	577	325	28	78	4.0
NC		-	165	550	-	532	368	900	795	-	-	590×610	1.3
PC40NC	0.30	0.34	165	550	-	532	368	900	477	269	23	540×560	0.6
FA20		-	165	440	110	508	352	860	795	-	-	710×680	0.4
PC40FA20		0.34	165	440	110	508	352	860	477	269	23	590×640	0.6
NC		-	165	825	-	397	275	671	794	-	-	650×680	1.7
PC40NC	0.20	0.23	165	825	-	397	275	671	476	269	23	620×620	1.9
FA20		-	165	660	165	361	250	611	794	-	-	730×690	1.5
PC40FA20		0.23	165	660	165	361	250	611	476	269	23	770×740	2.0

2.3 試験方法

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験には、円柱供試体 100mm×200mm を用いた。試験材齢および養生条件は、7, 28 日材齢, 封緘養生とした。養生は、打設後シールして温度 20℃, 相対湿度 60%の恒温恒湿室に静置した。

(2) 細孔径分布

各配合のモルタル部の累積細孔容積および細孔径分布を水銀圧入式ポロシメータによって測定した。測定対象は、各養生条件下における各配合の強度試験後の供試体から採取したモルタルである。

(3) 長さ変化

100×100×400mm のコンクリートの長さ変化(自己・乾燥ひずみ)を凝結開始から 2 日間をレーザー変位計(1/1000mm 精度), その後はコンタクトゲージ法によって測定した。養生条件は、温度 20℃, 相対湿度 60%の恒温恒湿室にて封緘養生と、材齢 7 日まで封緘養生しその後は気中養生とする 2 種類とした。レーザー変位計による長さ変化の測定概要を図 - 1 に示す。脱枠は打設後 2 日

表 - 3 置換率対応表

配合名	フライアッシュのセメント置換率	廃瓦(PC)の粗骨材置換率(%)
NC	0	0
PC40NC	0	40
FA10	10	0
PC20FA10	10	20
FA20	20	0
PC20FA20	20	20
PC40FA20	20	40

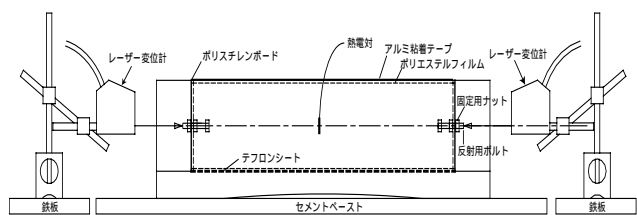


図-1 コンクリートの長さ変化試験装置概要

目に行い、その後はアルミ粘着テープによってシールした。コンクリートの温度変化に伴う体積変化は、コンクリート中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案⁷⁾に準拠し、線膨張係数 10×10^{-6} として補正した。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

(1) B/W と圧縮強度の関係

図-2に封緘養生における4配合のB/Wと材齢7日の圧縮強度の関係を示す。

FA20 を廃瓦で内部養生すると、PC40FA20 の B/W が 2.5~5(W/B=0.40~0.20)の範囲で強度増進し、B/W = 2 (W/B=0.50)においても同等の強度が発現している。B/W = 5(W/B=0.20)においては、FA20 が NC の 80%程度の強度であるのに対して、PC40FA20 では NC と同等の強度にまで増加している。すなわち、B/W = 5(W/B=0.20)においては、FA20 を廃瓦で内部養生することによって、初期強度低下を防ぐことが可能であると考えられる。また、B/W が 2.5 および 3.3(W/B=0.40・0.30)においても、FA20 を NC と同等とまではいかないものの、初期強度の増加が確認でき、FAC の圧縮強度に対する廃瓦の内部養生効果の有効性が確認できる。

廃瓦で内部養生した場合は NC, FA20 とともに圧縮強度が増進し、その効果は W/B に依存し、B/W が大きく(W/B が小さく)なるほど高くなる傾向にあると考えられる。これは、W/B が小さいほど未水和のセメントが多く存在しており、廃瓦から供給された内部養生水と反応しているためと考えられる。

(2) 廃瓦の置換率による影響

図-3に封緘養生条件で、W/B=0.50における廃瓦の置換率の異なる各配合の圧縮強度の発現性状を示す。これによって、廃瓦の置換率の違いによる圧縮強度の発現性状への影響を評価する。

材齢 7 日においては、NC に対して FA20, PC20FA20, PC40FA20 は 83~86%の強度である。また、材齢 28 日においては、NC に対して FA20 が 96%であるが、PC40FA20 は 100%、PC20FA20 は 110%の強度を発現している。よって、廃瓦による内部養生効果が、圧縮強度の発現性状に有効であることが分かる。また、廃瓦の置換率は、40%よりも 20%の方が有利であることが認められる。廃瓦を 40%置換した場合は、20%置換よりも供給水分量が増大し、未水和のセメントが比較的少ない W/B = 0.50 クラスの水結合材比では、供給水分が過剰となったものと推察される。つまり、コンクリートの W/B に応じて、最適な廃瓦置換率の存在を示唆していることがうかがえる。今後、コンクリートの配合によって必要となる内部養生水量の評価を行う必要があると考えられる。

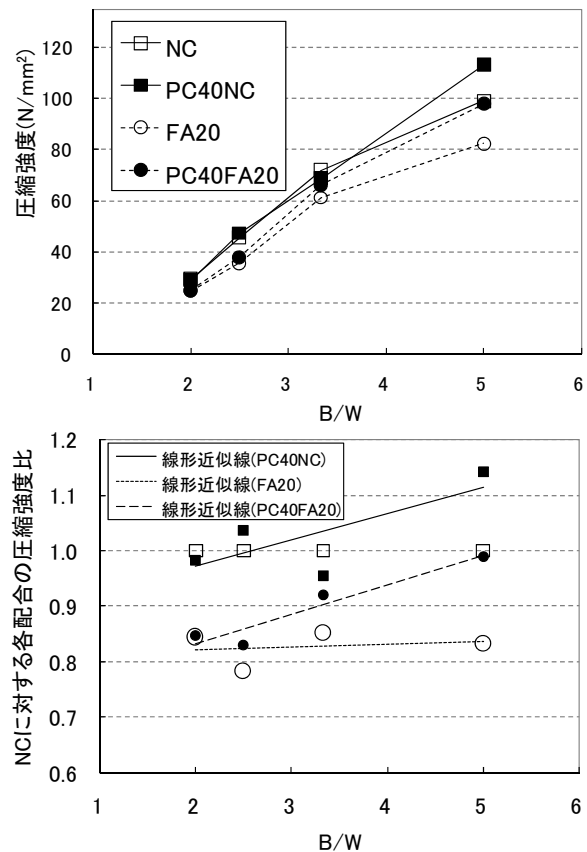


図-2 B/W と圧縮強度の関係
封緘養生・材齢 7 日

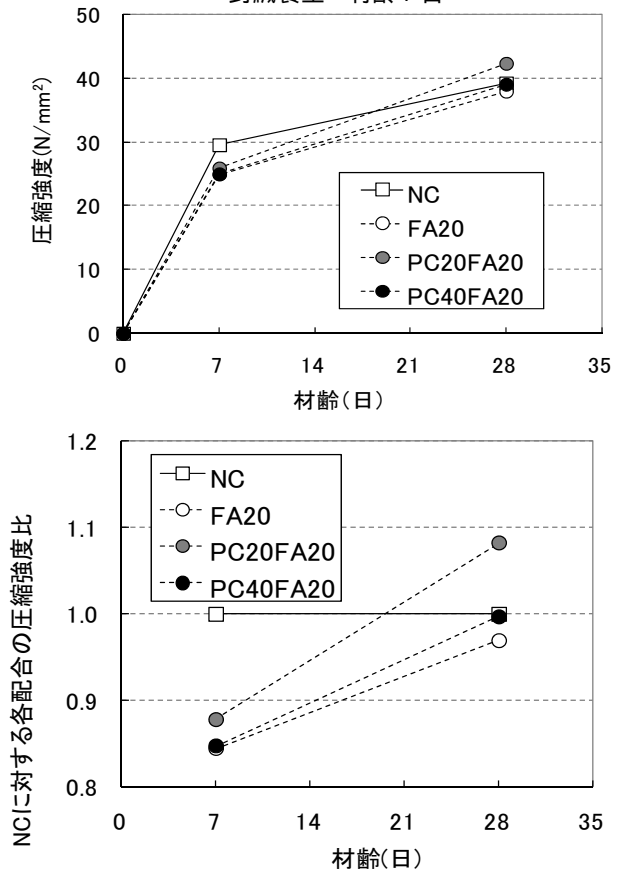


図-3 圧縮強度の発現性状
封緘養生・W/B=0.50

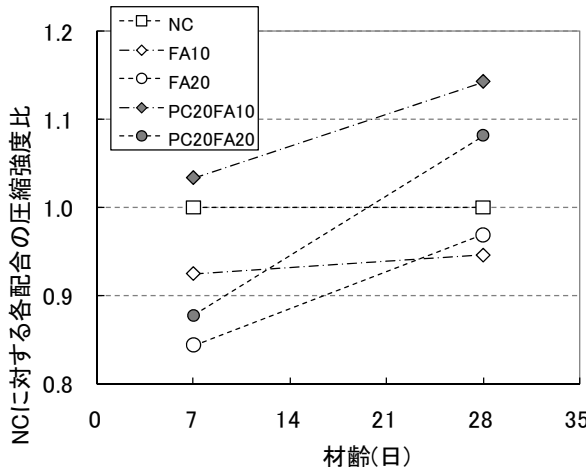
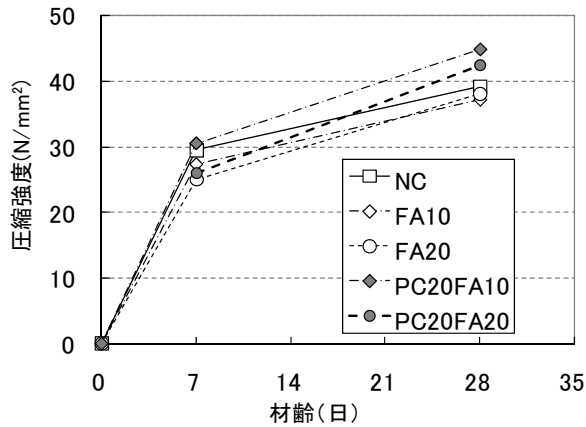


図 - 4 圧縮強度の発現性状
封緘養生・W/B=0.50

(3)フライアッシュの置換率による影響

図-4 に封緘養生条件で、W/B=0.50 におけるフライアッシュの置換率の異なる各配合の圧縮強度の発現性状を示す。これによって、フライアッシュの置換率と廃瓦の内部養生効果が、圧縮強度の発現性状に与える影響を評価する。

材齢7日においては、FA10,FA20はNCに対して92%、83%であるが、それぞれの廃瓦で内部養生したPC20FA10およびPC20FA20は、NCに対して103%、86%まで強度が増進している。材齢28日においては、FA10、FA20はNCに対してそれぞれ94%、96%であるが、廃瓦で内部養生したPC20FA10およびPC20FA20は、NCに対して115%、108%まで強度が発現している。

FAのセメント置換率が10%程度ならば20%粗骨材置換した廃瓦で内部養生することによって、材齢7日から普通コンクリートの圧縮強度発現を上回ることが確認された。これは、FACの初期強度低下を補う意味で注目値する。また、フライアッシュのセメント置換が20%になっても、20%粗骨材置換した廃瓦で内部養生することによって、28日強度の時点においては普通コンクリートを上回る圧縮強度を確保できることが認められる。

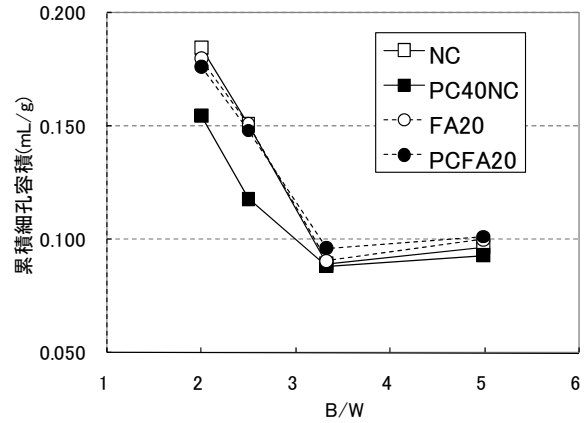


図 - 5 B/Wと累積細孔容積の関係
封緘養生 材齢7日

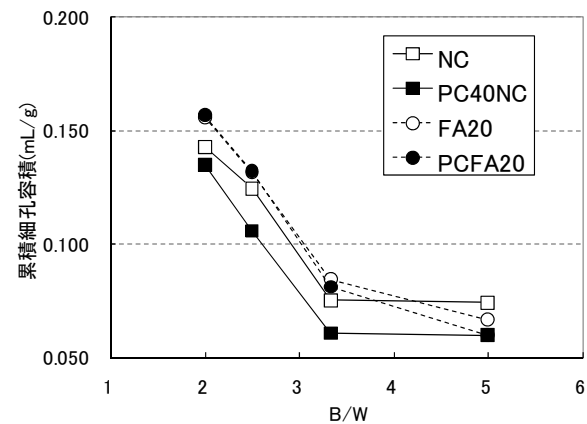


図 - 6 B/Wと累積細孔径容積の関係
封緘養生 材齢28日

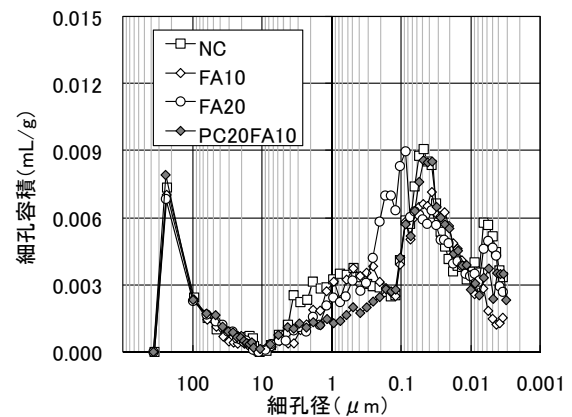
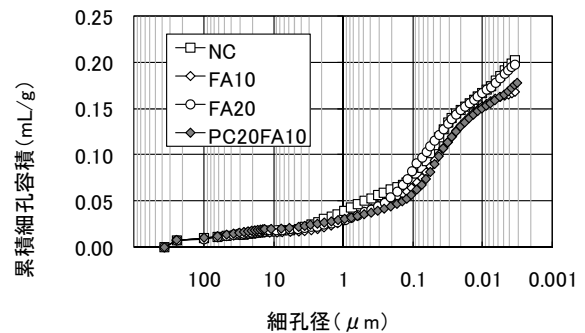


図 - 7 フライアッシュ置換率と細孔径分布の関係
封緘養生 材齢7日 W/B=0.50

3.2 細孔径分布

(1) B/Wと累積細孔容積の関係

図-5に材齢7日の、図-6に材齢28日における封緘養生条件下の4配合の累積細孔容積をB/Wに対して示す。

材齢7日においてPC40FA20は、FA20に対して同等程度の累積細孔容積である。一方、材齢28日においてPC40FA20は、FA20に対して $B/W=3.3\sim 2(W/B=0.3\sim 0.2)$ の範囲で累積細孔径容積の減少が確認できる。さらにPC40NCは、NCに対して明らかに累積細孔径容積が減少している。

(2) フライアッシュの置換率と廃瓦の影響

図-7に材齢7日における封緘養生した、 $W/B=0.5$ のコンクリートの累積細孔容積と細孔径分布に及ぼすフライアッシュの置換率と内部養生の影響を示す。

この図によれば、PC20FA10の、特に細孔径が $2\sim 0.2\mu m$ の範囲の細孔容積が他の配合と比較し小さくなっている。累積細孔容積の点ではPC20FA10のそれはFA10よりやや大きい。しかし、圧縮強度に寄与すると考えられる $0.05\mu m$ 以上の空隙容積総量⁸⁾を比較すると、PC20FA10は $0.082ml/g$ 、FA10は $0.088ml/g$ であり、内部養生により、圧縮強度に影響を及ぼすと考えられる細孔径範囲の細孔径空隙量が減少することが分かる。

すなわち、廃瓦から供給される水分は、C-S-Hなどの生成を促し、細孔構造を緻密化することで、圧縮強度増加などに寄与しているものと推察される(図-4)参照。この傾向は、人工軽量骨材などの内部養生材に関する既往の研究⁹⁾においても確認されている。

3.3 長さ変化

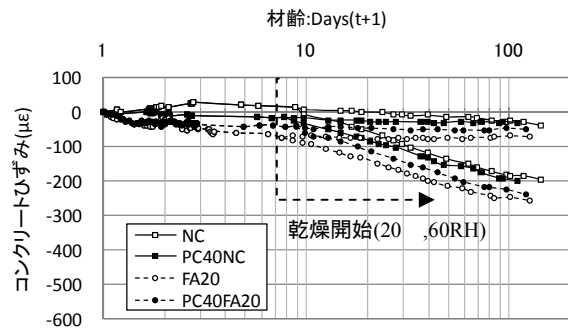
(1) W/Bとコンクリートの収縮ひずみ

(a)から(d)に材齢100日までのコンクリートの各水結合材比における4配合の自己収縮ひずみ及び、材齢7日からの乾燥収縮ひずみを示す。材齢7日から分岐して下方向へ伸びている値が乾燥収縮である。

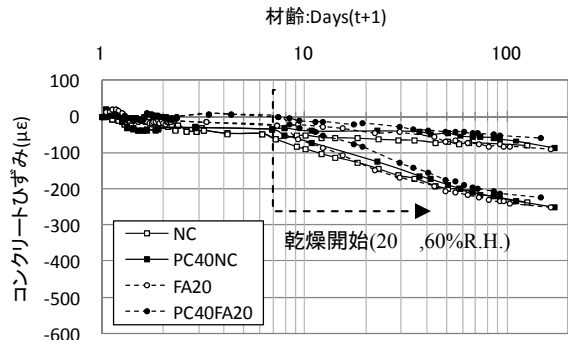
NC、FA20ともに、水結合材比が小さいほど廃瓦の内部養生効果による自己収縮低減効果が高いことが分かる。乾燥収縮はNC、FA20ともに廃瓦置換の有無にかかわらず同様の傾向を示している。廃瓦置換を行っているPC40NCおよびPC40FA20は、廃瓦に吸水された水分だけコンクリート中の全水量は増加しているにもかかわらず、乾燥収縮の増大は認められない。

$W/B=0.2$ においては、廃瓦置換によって70%程度、 $W/B=0.3$ においては、50%程度の自己収縮低減がみられ、高強度領域のコンクリートの自己収縮低減に非常に効果的であることが分かる。またFA20とNC、PC40FA20とPC40NCを比較すると初期材齢においては、フライアッシュを用いたコンクリートの方が若干、自己収縮量が低いことが分かる。 $W/B=0.4\sim 0.5$ においては、各配合で自

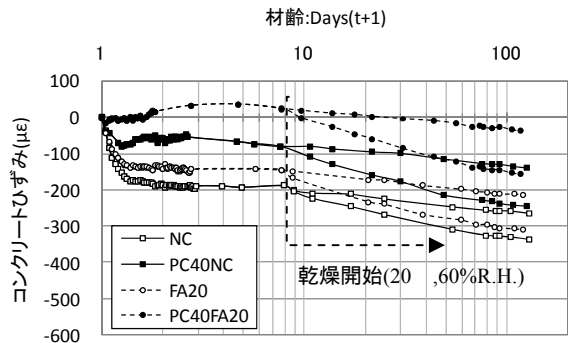
(a) $W/B=0.50$



(b) $W/B=0.40$



(c) $W/B=0.30$



(d) $W/B=0.20$

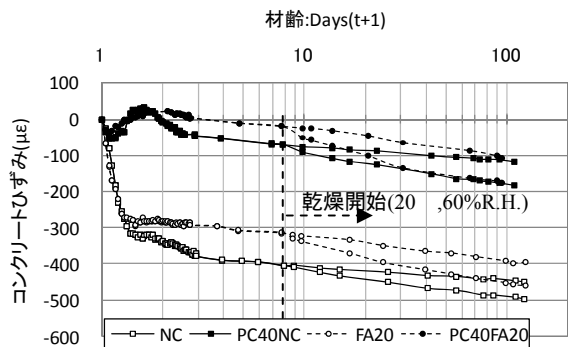


図-8 各W/Bにおけるコンクリートの自己・乾燥収縮ひずみ

己および乾燥収縮の傾向は大きな差はみられず、ほぼ同様であることが分かる。

(2) W/B=0.50 におけるコンクリートの収縮ひずみ

図 - 9 に W/B=0.50 における廃瓦の置換率の異なるコンクリートの収縮ひずみを示す。PC20FA20 と PC40FA20 を比較すると、PC40FA20 の方が材齢初期の収縮ひずみが若干増加している。また、廃瓦の置換率が変化しても、乾燥収縮に対する影響は認められない。

図 - 10 に W/B=0.50 における、フライアッシュの置換率が異なるコンクリートの収縮ひずみを示す。FA20 を除いて、自己収縮ひずみおよび材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみに顕著な違いは認められなかった。FA20 は FA10 よりも、材齢初期の自己収縮ひずみが大きく、データの信頼性の検討が必要である。

4. まとめ

セメントをフライアッシュで置換したものの、粗骨材を廃瓦で置換したコンクリートの圧縮強度、細孔径分布、収縮ひずみを実験的に検討した。本研究の範囲内で明らかになった事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 材齢 7 日における W/B=0.50 ~ 0.20 の範囲で、FAC は 40%粗骨材置換した廃瓦で内部養生することによって強度が増加した。さらに、W/B=0.2 においては、NC と同等程度の圧縮強度が発現した。
- (2) 40%粗骨材置換の場合での廃瓦の内部養生効果は、W/B に依存し、W/B が小さくなるに従い圧縮強度が増加する傾向にある。
- (3) 比較的大きい W/B(0.50)における廃瓦置換率が20%の場合、置換率 40%よりも高い圧縮強度を発現した。
- (4) 廃瓦の内部養生によって圧縮強度を効果的に増加させるためには、コンクリートの配合によって必要となる内部養生水量を評価し、適度な廃瓦置換率を決定する必要がある。
- (5) W/B=0.50 においては、フライアッシュ 10%置換で廃瓦 20%粗骨材置換のコンクリートは、材齢 7 日の時点で NC の強度を上回る。またフライアッシュ 20%置換で廃瓦 20%粗骨材置換のコンクリートは、材齢 28 日の時点で NC の強度を上回る。
- (6) コンクリートの比較的大きな毛細管空隙は、廃瓦で内部養生することによって、緻密になる傾向にある。
- (7) コンクリートの自己収縮ひずみは、W/B が低下するほど廃瓦による収縮低減効果が高い。

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，2004
- 2) 再生資源の利用の促進に関する法律，1991

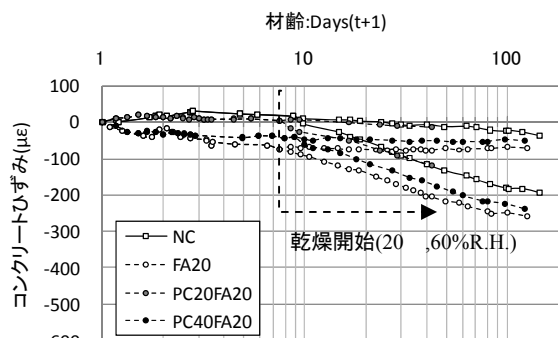


図 - 9 廃瓦置換率の異なる配合のコンクリートの収縮ひずみ W/B=0.50

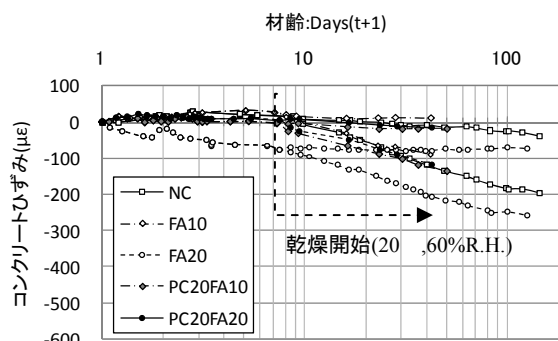


図 - 10 フライアッシュ置換率の異なる配合のコンクリートの収縮ひずみ W/B=0.50

- 3) P. Lura, K. van Breugel: The Influence of Moisture Flow from the LWA to the Paste on the early-age Deformations, 6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, pp.1149-1160, 2002
- 4) Dale P. Bentz, P. Lura, John W. Roberts: Mixture Proportioning for Internal Curing, Concrete International, Vol.27, No.2, pp.35-40, 2005
- 5) 日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した 150N/mm² 級超高強度コンクリートに関する実験的検討，土木学会論文集，No.781，V-66，pp.101-112，2005
- 6) 鈴木雅博ほか：廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの变形と拘束応力に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp651-656，2007
- 7) 日本コンクリート協会：自己収縮委員会報告書，1996 および 2002
- 8) H.Uchikawa, et al.: Similarities and discrepancies of hardened cement paste, International Symposium on Cement and Concrete, Vol.1, pp314-330, 1989
- 9) Semion Zhutovsky, et al.: Influence of Cement Paste Matrix Properties on the Autogenous Curing of High-Performance concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.26, No5, pp499-507, 2004