

論文 養生条件の異なるフライアッシュコンクリートに対する廃瓦粗骨材の内部養生効果の検討

小川 由布子^{*1}・河合研至^{*2}・石森慎一郎^{*3}・佐藤良一^{*4}

要旨：環境負荷抑制の観点から、フライアッシュのセメント代替材料としての使用が期待されている。フライアッシュは、長期強度発現性を有しているが、湿潤養生が不可欠である。本研究では、3日間あるいは7日間の封かん養生後、気中暴露した場合と封かん養生を外部からの養生条件とし、廃瓦粗骨材を用いた内部養生機構がフライアッシュを混和したコンクリートの強度発現に与える影響を検討した。また、フライアッシュを混和したコンクリートで懸念される中性化を促進中性化試験により検討し、廃瓦粗骨材の混入によって中性化が抑制されることを示した。

キーワード：養生条件、フライアッシュ、廃瓦粗骨材、内部養生、圧縮強度、促進中性化試験

1. はじめに

フライアッシュは、良質なポゾランであり、コンクリートに混和することで、組織を緻密にすること、長期強度発現性を發揮することが広く知られている。しかし、フライアッシュの品質が一定でないこと、初期強度が低下することなどが懸念され、一般的な利用に至っていない。フライアッシュのセメント代替材料としての利用は、二酸化炭素排出量の低減に貢献するため、環境負荷の観点から利用促進が望まれている。

廃瓦は、これまで路盤材等に使用されているが、建設材料としての利用が検討されている。友竹らは、廃瓦微粉末のポゾラン反応性を示し¹⁾、微粉末を多く含む瓦細骨材のコンクリート製品への利用が有用であることを示している²⁾。一方、鈴木らは、廃瓦粗骨材の内部養生材として高強度コンクリートへの適応性を検討し、強度増進および自己収縮抑制効果を示した³⁾。また、高炉セメントB種を用いたコンクリートにおいても、廃瓦粗骨材の混入により、組織が緻密化し、強度が増進することを明らかにしている⁴⁾。

温品らは、フライアッシュコンクリートに対する廃瓦の内部養生材としての効果を検討し、各配合に対して廃瓦が効率的に効果を発揮する混入量があることを示している⁵⁾。しかし、この効果は封かん養生における検討であり、外部の養生条件の影響は明らかになっていない。

本研究は、廃瓦粗骨材を内部養生材として混入し、コンクリートの外部からの養生条件を変化させ、十分な湿潤養生を必要とするフライアッシュコンクリートの強度発現性および中性化性状に対する廃瓦粗骨材の効果を実験的に検討することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント、フライアッシュはJIS A 6201のII種に適合するものを用いた。セメントおよびフライアッシュの物理試験結果を表-1および表-2に、化学組成を表-3に示す。

細骨材は、石英碎砂と石灰碎砂を6:4の割合で混合使用した。粗骨材は、碎石と廃瓦粗骨材を使用した。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日間吸水させて使用した。細骨材および粗骨材の物理試験結果を表-4に示す。

表-1 普通ポルトランドセメントの物理試験結果

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強さ (N/mm ²)		
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		3日	7日	28日
3.16	3400	27.7	2-29	3-32	良	30.4	46.8	65.1

表-2 フライアッシュの物理試験結果

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	45μふるい 残分 (%)	フロー値比 (%)	活性度指数	
						28日	91日
2.25	3260	0.2	3.0	10	113	85	95

表-3 普通ポルトランドセメント(NC)およびフライアッシュ(FA)の化学組成

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
NC	20.82	5.15	2.92	64.69	1.12	2.22	0.23	0.38
FA	59.2	24.6	5.6	1.75	1.26	0.26	0.39	1.13

表-4 細骨材および粗骨材の物理試験結果

		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)		BS 812による 400kN破碎値(%)
			石英碎砂	石灰碎砂	
細骨材	石英碎砂	2.60		1.13	-
	石灰碎砂	2.70		0.93	-
粗骨材	碎石	2.67		0.56	12
	廃瓦粗骨材	2.24		8.58	21

*1 広島大学大学院 工学研究院社会環境空間部門助教 博(工) (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究院社会環境空間部門教授 工博 (正会員)

*3 中国電力株式会社 エネルギア総合研究所 (非会員)

*4 広島大学大学院 工学研究院社会環境空間部門教授 工博 (正会員)

表-5 コンクリートの配合

配合略記	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換率 F/(C+F) (%)	細骨材率 (%)	単位量					
				W	C	FA	S	G	PC
NC	50	0	47.2	165	330	0	851	963	0
PC20NC				165	330	0	851	770	163
FA10				165	297	33	840	963	0
PC20FA10		10	46.9	165	297	33	840	770	163
FA20				165	264	66	829	963	0
PC20FA20		20	46.5	165	264	66	829	770	163
PC20NC				165	413	0	783	769	163
PC20FA20		40	0	165	330	83	753	769	163
PC20NC		30	53.4	165	550	0	900	636	134
PC20FA20				165	440	110	860	636	134

W : 水, C : 普通ポルトランドセメント, FA : フライアッシュ, S : 細骨材, G : 碎石, PC : 廃瓦粗骨材

2.2 配合

本実験の配合を表-5に示す。水結合材は50%とし、フライアッシュはセメントに対して10%および20%で質量置換した。廃瓦粗骨材は、粗骨材に対して20%の体積置換で混入した。単位水量を165kg/m³とし、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは「NC」、フライアッシュを混和した場合は「FA」、さらに廃瓦粗骨材を混入した場合は「PC20」を用い、表-5の配合略記で示す。また、廃瓦粗骨材を20%混入したコンクリートについては、水結合材比30%および40%の場合も試験した。水結合材比40%および50%は、スランプが10±2cm、空気量が4.5±1.5%となるように、水結合材比30%の場合は、スランプフローが600±100mm、空気量が2.0%以下を目標として、細骨材率、AE減水剤および高性能AE減水剤で調整した。

2.3 供試体作製方法

コンクリートは水平二軸形強制練りミキサを用いて作製した。使用材料を20°Cの恒温室で保存し、打設時の過度な温度低下を防いだ。この結果、練混ぜ直後の温度は10°C以上となった。 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を圧縮試験用に、100×100×400 mmの角柱供試体を促進中性化試験用に作製した。打設後、表面をアルミ粘着テープで封かんし、20°Cの恒温室に移動した。

2.4 試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、図-1に示すとおり、3日間の封かん養生後に気中暴露、7日間の封かん養生後に気中暴露、試験材齢まで封かん養生の3条件とした。全ての供試体は、温度20°C、相対湿度60%の恒温恒湿室に保管し、材齢3, 7, 28および91日で圧縮強度試験を行った。

(2) 促進中性化試験

促進中性化試験は、図-2に示すとおり、材齢28日で、二酸化炭素濃度5.0%，温度20°C、相対湿度60%の促進中性化槽に暴露した。促進材齢7日および28日において、中性化深さを計測した。

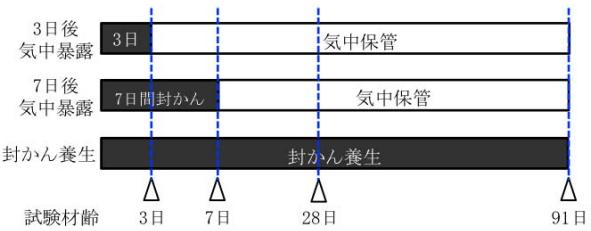


図-1 圧縮強度試験の養生条件

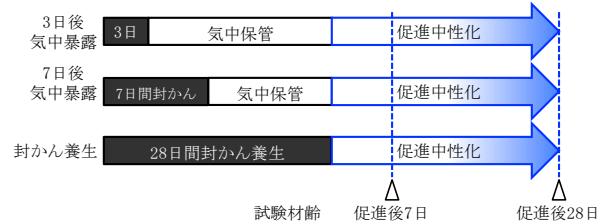


図-2 促進中性化試験の養生条件

3. 試験結果および考察

3.1 強度発現性状

(1) 養生条件の影響

3日後気中暴露した場合と封かん養生した場合のコンクリートの強度発現性状を図-3に示す。

3日後気中暴露した場合、すべての配合で材齢28日以降の強度増進は確認できず、内部養生の効果は確認できない。一方、封かん養生の場合、全ての配合において材齢91日まで強度増進していることがわかる。特に、廃瓦粗骨材とフライアッシュの両方を用いた場合、すなわちPC20FA10およびPC20FA20は、比較的強度増進が大きい。これは、封かん養生することにより、外部への水の逸散を防ぐとともに、セメントおよびフライアッシュの水和反応により失われる水を廃瓦粗骨材から供給される内部養生水で補われたためと考えられる。

図-4にNCに対する強度比を示す。全ての養生条件において、廃瓦粗骨材を混入すると強度が低下している。既往の研究⁵⁾で、廃瓦粗骨材を混入したフライアッシュコンクリートがNCを超えると示されており、本実験と

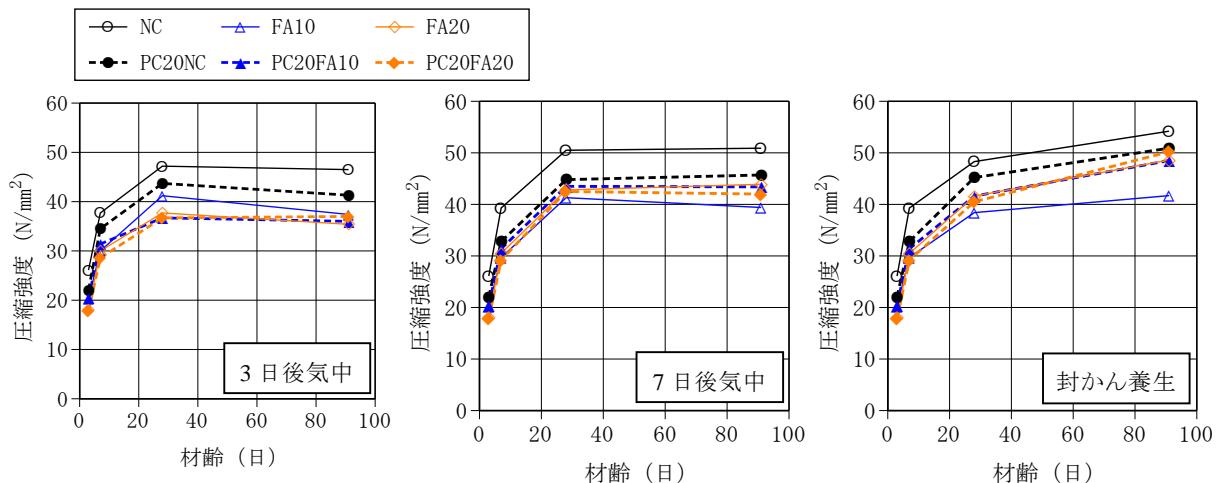


図-3 強度発現に対する養生条件の影響（水結合材比 50%）

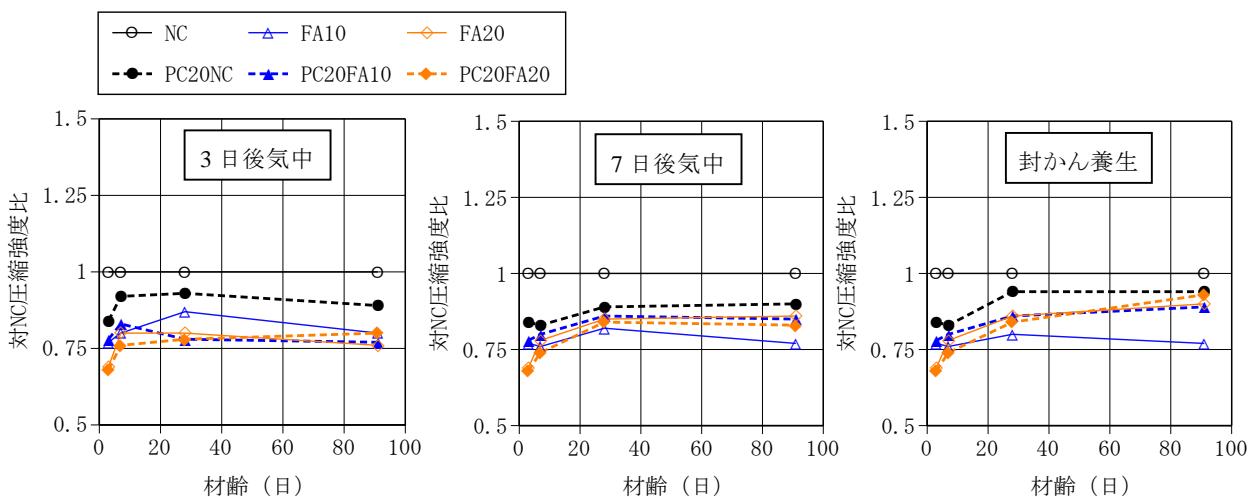


図-4 NCに対する強度の比の変化（水結合材比 50%）

の相違の原因は不明であるが、今後データを積み重ね検討していく必要がある。以下、本実験の結果について考察する。3日封かん養生後気中に暴露した場合、材齢28日以降、PC20NCを除く全ての配合において、NCの75%程度の強度となっており、廃瓦粗骨材混入による内部養生効果およびフライアッシュによる長期強度発現効果は確認できない。封かん養生期間が7日の場合、FA10以外のコンクリートが材齢28日および91日においてNCの80から90%程度の強度を発揮している。さらに、封かん養生の場合は、廃瓦粗骨材を混入した場合、すなわち、PC20NC、PC20FA10およびPC20FA20の強度増進が大きく、特に、材齢91日において、PC20FA20がPC20NCと同等の強度を発揮していることから、長期材齢においても強度を発現するフライアッシュに対して、廃瓦粗骨材から効率よく内部養生水が供給されたと考えられる。

(2)強度増進に対する廃瓦骨材の影響

強度の増進に着目するため、強度の増進率を算出した。材齢28日の増進率は、材齢7日強度との差を材齢7日強度で除した値、材齢91日の増進率は、材齢28日強度と

の差を材齢28日強度で除した値として算出した。この増進率を図-5に養生条件ごとに示す。

3日後に気中暴露した場合、材齢28日での増進率は配合によらずほぼ同じである。材齢91日では、廃瓦粗骨材とフライアッシュの双方を使用した場合のみ0となっており、その他の配合は若干の強度低下を示した。

7日後に気中暴露した場合、材齢28日での圧縮強度の伸びに差が見られた。廃瓦粗骨材を混入した配合が、混入していないものより大きい。また、材齢91日では、全ての配合で、ほぼ0となっており、強度増進していないことがわかる。すなわち、廃瓦粗骨材の内部養生効果が材齢28日までに発揮されているといえる。

一方、封かん養生では、全ての配合において、材齢91日まで強度増進している。また、廃瓦粗骨材混入による効果は、NCでは材齢28日まで、FAでは91日まで現れている。これより、PC20FA20においては、封かん養生により外部への水の逸散を防ぎ、セメントおよびフライアッシュの反応によって失われた内部の水を、廃瓦粗骨材から材齢91日まで供給している可能性が示された。

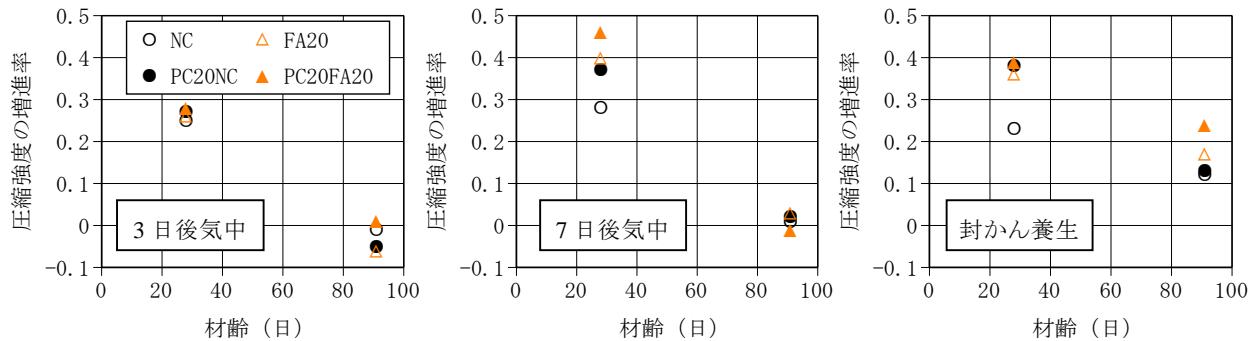


図-5 強度発現に対する廃瓦粗骨材の影響（水結合材比 50%）

(3)フライアッシュの置換率の影響

封かん養生の場合の、フライアッシュの置換率と強度発現の関係を図-6に示す。

廃瓦粗骨材を混入しない場合、材齢3日ではフライアッシュの混和量の増加にともない、圧縮強度が低下している。材齢が長くなるにつれて、フライアッシュを混和した場合も強度増進が認められるが、材齢91日においても置換率0%すなわちNCよりも低い。特に、フライアッシュ置換率が10%の場合、材齢28日以降の強度増進が小さい。一方、廃瓦粗骨材を混入した場合、材齢3日において、フライアッシュの混和量の増加にともない圧縮強度が小さくなっているが、無混和の場合よりフライアッシュの置換率の影響は小さく、材齢91日では、すべての配合で 50N/mm^2 程度を示している。これは、フライアッシュを10%混和した場合の材齢28日以降の強度増進が内部養生によって向上したことを表しており、内部養生効果がフライアッシュの量によって異なる可能性が確認できた。また、フライアッシュを混和したコンクリートは、廃瓦粗骨材の混入による強度低下が小さいこともわかる。すなわち、廃瓦粗骨材を混入した場合の内部養生効果は、NCよりもフライアッシュを混和した場合に大きく発揮される可能性があると考えられる。

(4)セメント有効係数kによる評価

セメント有効係数k（以下、k値とする）は、置換率や養生温度などの任意の条件における、単位量のフライアッシュの結合材としての強度発現性能を、ポルトランドセメント（以下、普通セメント）の性能に対する比で表したもので、以下のとおり算出できる。

コンクリートの圧縮強度がセメント水比に支配されることから、フライアッシュコンクリートの結合材水比 $(C+F)/W$ を $(C+k \cdot F)/W$ とおき、以下の手順でk値を算出する。

はじめに、式(1)のように、 $(C+k \cdot F)/W$ と同等の強度を有する普通セメントコンクリートのセメント水比 $(C/W)_{eq}$ を等価とする。

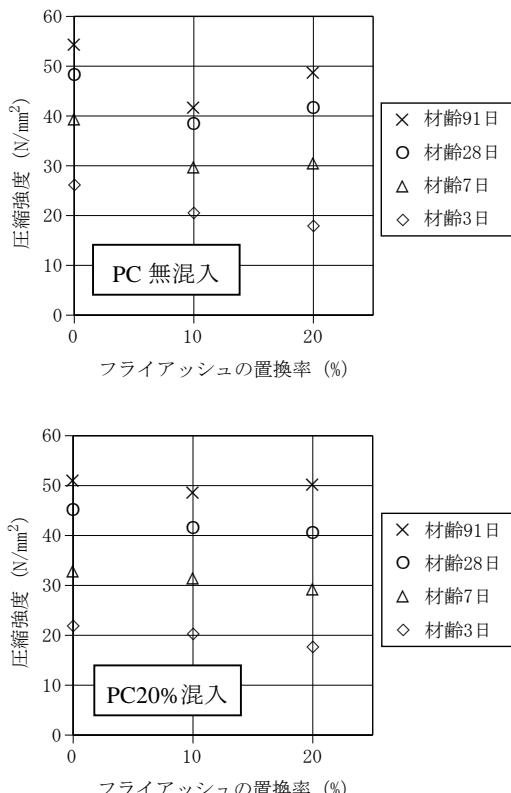


図-6 フライアッシュ置換率の影響（水結合材比 50%）

$$(C+k \cdot F)/W = (C/W)_{eq} \quad (1)$$

ここで、W：単位水量(kg/m^3)

C：単位セメント量(kg/m^3)

F：単位フライアッシュ量(kg/m^3)

この $(C/W)_{eq}$ は、普通セメントコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を一次直線式により定式化し、フライアッシュコンクリートの圧縮強度を代入することで求めることができる。PC20NCの封かん養生の材齢28日の場合を例として、図-7に示す。求まった $(C/W)_{eq}$ と置換率rを表す式(2)を用いて、k値を式(3)で算出する。

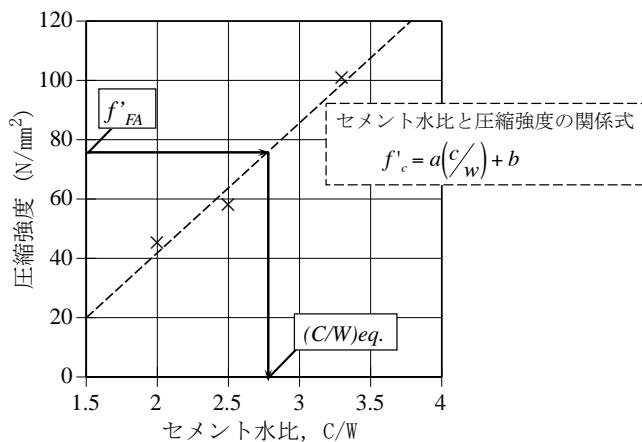


図-7 等価セメント水比の算出

$$r = \frac{F}{C+F} \quad (2)$$

$$k = \left\{ \frac{(C/W)_{eq}}{(C/W)} - 1 \right\} \cdot \frac{1-r}{r} \quad (3)$$

フライアッシュの強度発現に対する性能は、 k 値を用いることにより、普通セメントの性能に対する比で表現でき、 $k < 1$ で普通セメントより劣り、 $k = 1$ で同等、 $k > 1$ で普通セメントを上回ることを意味する。この評価により、任意の養生および配合条件における、フライアッシュが有する強度発現に対する性能を数値化できる。

本実験において 3 種の水結合材比で試験した PC20NC を基準として算出した k 値に対する養生条件の影響を図-8 に示す。全ての水結合材比において、3 日後気中暴露の場合が最も小さく、封かん養生の場合が最も大きい傾向にある。水結合材比が 30 および 50% の場合に材齢 28 日までに k 値が 1 前後となっている。これは、セメント水比と圧縮強度の回帰式よりも実測値が小さいことから、 k 値が過大に評価されたと考えられる。しかし、例えば水結合材比 50% で封かん養生した場合を図-9 に示すとおり、フライアッシュを混和した場合に、廃瓦粗骨材の混入による初期強度低下が小さく、PC20NC と PC20FA20 の強度差が小さくなった結果、セメントの強度発現性に対するフライアッシュの性能を示す k 値が大きく表されているとも考えられ、水結合材比や混和材の置換率など、結合材の違いが廃瓦粗骨材を混入したコンクリートの初期強度発現性に及ぼす影響について検討する必要がある。

3.2 中性化性状

(1) 中性化深さに対する廃瓦粗骨材混入の影響

促進中性化試験結果を養生条件ごとに図-10 に示す。全ての配合において封かん養生期間が長いほど、中性化深さは小さくなっている。また、廃瓦粗骨材の混入により中性化が抑制されている。これは、廃瓦粗骨材を混入

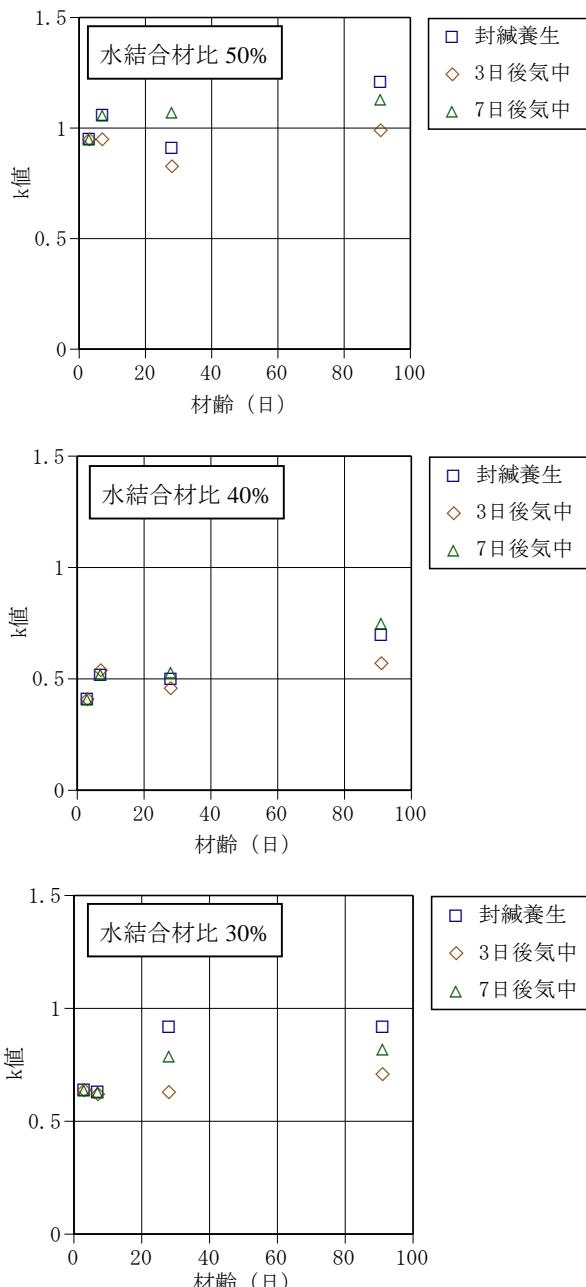


図-8 等価セメント水比の算出（水セメント比ごと）

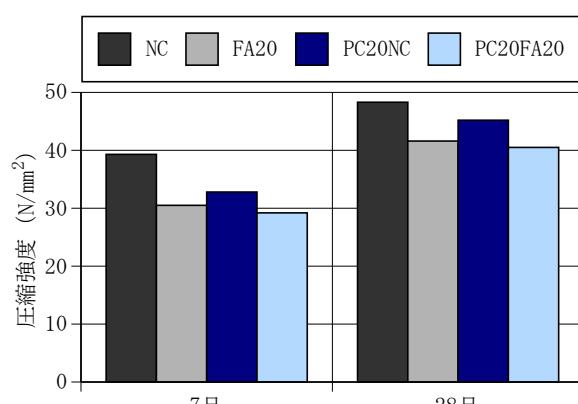


図-9 水結合材 50%における初期強度の比較
(水結合材比 50%, 封かん養生)

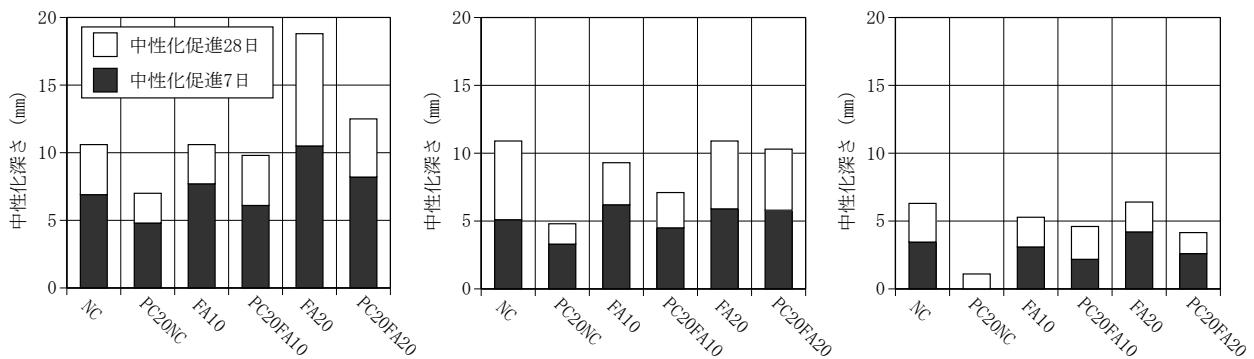


図-10 促進中性化試験結果（左：3日気中暴露，中：7日気中暴露，右：封かん養生）

することにより細孔構造の緻密化あるいは水和反応で自己乾燥しうる細孔が内部養生水により飽和されている可能性が考えられ、今後検討する必要がある。フライアッシュを混和しない場合と比較して、フライアッシュを混和した場合に、廃瓦粗骨材混入による中性化の抑制効果が小さいのは、フライアッシュの反応による細孔構造の緻密化と相反する、水酸化カルシウムの消費によって中性化しやすくなっている可能性が考えられる。

(2)フライアッシュ混和量の影響

封かん養生した場合と3日後気中暴露した場合の中性化促進28日の中性化深さを図-11に示す。

フライアッシュの混和の有無に関わらず、廃瓦粗骨材を混入した場合に、中性化深さが小さくなっている。また、この効果は前述のとおり、フライアッシュを混和しない場合、すなわち普通セメントのみを使用した場合に顕著である。フライアッシュを20%混和した場合において、3日後気中暴露すると、中性化深さが非常に大きくなるが、廃瓦粗骨材を混入することで、中性化が抑制されることが明らかとなった。

4. 結論

- 1) 廃瓦粗骨材を混入すると、封かん養生7日間の場合に初期に、封かん養生期間が長くなると長期に、内部養生効果が発揮され、強度が増進する。この長期での強度増進は、フライアッシュを混和した場合に顕著となった。
- 2) 水結合材比50%の場合、廃瓦粗骨材混入による初期の強度低下は、フライアッシュを混和した場合の方が無混和と比較して小さい。
- 3) 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの中性化性状を検討した結果、廃瓦粗骨材の混入により、中性化が抑制されることがわかった。

謝辞

本実験の実施にあたり、修士2年であった温品達也氏(現、鹿島建設株式会社)にご協力頂いた。ここに謝意を表します。

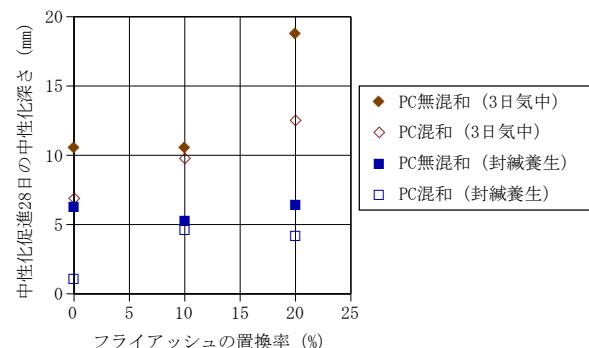


図-11 中性化に対するフライアッシュの置換率の影響

参考文献

- 1) 友竹博一, 山戸博晃, 坂本一樹, 鳥居和之：建設廃材微粉末のコンクリート混和材としての有効利用, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.705-712, 2002
- 2) 友竹博一, 清水利康, 坂本一樹, 鳥居和弘：廃瓦再生骨材を使用したコンクリート製品の諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1355-1360, 2003
- 3) Suzuki, M., Medda, M. S. and Sato, R. : Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Research 39, pp.373-381, 2009
- 4) Sato, R., Shigematsu, A., Nukushina, T. and Kimura, M.: Improvement of Properties of Portland Blast Furnace Cement Type B Concrete by Internal Curing Using Ceramic Roof Material Waste, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING ASCE, JUNE 2011, PP.777-782, 2011
- 5) 温品達也, 清木祥平, 中川信矢, 佐藤良一：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No1, pp.241-246, 2009