

平成21年 3月31日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760395

研究課題名（和文）再生骨材コンクリートの高品質化に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Improvement of Quality for Concrete with Recycled Aggregate

研究代表者

高巢 幸二 (TAKASU KOJI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：6336948

研究成果の概要：再生骨材を使用してもフライアッシュを外割混合することにより、圧縮強度95～97N/mm²程度の高い強度性状を発現するコンクリートを製造できる可能性が示された。エコセメントを使用することによる長期強度増進の低下を、フライアッシュを外割混合することにより改善出来る可能性やエコセメントと再生骨材を同時に使用したコンクリートにおいても、W/C65%において、フライアッシュを外割混合することにより、中強度クラスのコンクリートを製造できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	2,000,000	0	2,000,000
20年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,900,000	270,000	3,170,000

研究分野：建築材料学・施工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：フライアッシュ，外割混合，再生骨材，アルカリ骨材反応，圧縮強度，静弾性係数

1. 研究開始当初の背景

コンクリートのリサイクルを形成させるには、コンクリート塊から骨材を取り出し、再生骨材として再度コンクリートに使用する必要がある。現在、再生骨材は様々な研究者によって研究が進められており、再生骨材のJIS化の段階まで至っている。再生骨材は、再生骨材H、再生骨材M、再生骨材Lの3種類のグレードに分かれており、再生骨材Hは普通骨材と同等の品質を有する規格になっており、再生骨材M及びLは絶対密度、吸水率、微粒分量の物理的性質が砕石より緩やかな規格である。現状でJIS認定を受けているレディーミクスト工場で使用できる再生骨材は再生骨材Hのみである。コンクリートの再資源化工場の多くで再生骨材Hの生産

に挑戦しているが、吸水率の基準を満たすことが難しく、結果として再生骨材の生産を諦め、従来通り路盤材として出荷している工場が多い。特に北部九州地区で再生骨材Hを製造している工場は、ほとんど見受けられない。吸水率の高い骨材を使用するとコンクリートの強度発現性状に影響を及ぼしてしまう。コンクリートの資源循環を進めるには、再生骨材M、再生骨材Lのような低品質の骨材を、強度低下を招かずに容易に使用できるコンクリートを開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、フライアッシュ外割混合により、普通エコセメントおよび比較的low品質な再生骨材を単独でもしくは組み合わせることで用いたコンクリートの高品質化を図ることを目

的とし、フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートの諸特性（以下実験Ⅰ）、エコセメントとフライアッシュを混合した再生骨材コンクリートの諸特性（以下実験Ⅱ）およびフライアッシュ外割混合によるアルカリシリカ反応抑制効果（以下実験Ⅲ）に関して検討を行った。

3. 研究の方法

(1)使用材料および調合

表1に使用材料の物性を示す。使用した再生粗骨材（以下RG）はJIS A 5022「再生骨材Mを用いた再生骨材コンクリート」に規定されている再生骨材M、再生細骨材（以下RS）はJIS A 5023「再生骨材Lを用いた再生コンクリート」に規定される再生骨材Lの規格であった。アルカリシリカ反応性骨材は、JIS化学法およびJISモルタルバー法で無害でないとされた粗骨材を使用した。普通骨材としては、砕石（以下NG）および海砂（以下NS）を使用した。またセメントは、普通ポルトランドセメント（以下NC）および普通エコセメント（以下EC）を使用し、フライアッシュ（以下FA）はJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」Ⅱ種に適合するものを2種類使用した。

表1 使用材料

項目	種類	物性	記号	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³	NC	
	普通エコセメント	密度 3.15g/cm ³	EC	
水	上水道水	—	W	
細骨材	海砂	絶乾密度 2.54g/cm ³	NS	
	北九州市岩屋沖	吸水率 1.55%		
再生細骨材	再生細骨材	絶乾密度 2.20g/cm ³	RS	
		吸水率 4.43%		
粗骨材	砕石	岡垣町上畑	絶乾密度 2.81 g/cm ³	NG
			吸水率 1.06%	
	実積率	57.62%	粗粒率	6.80
	再生粗骨材	再生粗骨材	絶乾密度 2.44g/cm ³	RG
			吸水率 3.64%	
	実積率	59.37%	粗粒率	6.75
	アルカリシリカ反応性粗骨材	長崎県南島原市	絶乾密度 2.72g/cm ³	ARG
			吸水率 1.17%	
		実積率 63.4%		
		粗粒率 6.69		
混和材	フライアッシュ (JISⅡ種適合品)	密度 2.21g/cm ³ 強熱減量 1.40% 比表面積 3410cm ² /g	FA1	
	フライアッシュ (JISⅡ種適合品)	密度 2.25g/cm ³ 強熱減量 2.22% 比表面積 4200cm ² /g	FA2	
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	AD1	
	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	AD2	
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	AD3	

(2)調合

表2に調合表を示す。すべての調合において単位水量を185kg/m³で一定とした。実験Ⅰにおいては、単位セメント量を285kg/m³で一定とし、骨材の組み合わせはNSとNG、NSとRG、RSとRGの3種類とした。これらに、

単位FA量をそれぞれ0, 244, 455 kg/m³外割混合した9調合に、W/B35%において、FAの種類を変えたRNおよびRRコンクリートの合計11調合とした。実験Ⅱにおいては、前述の調合にECを使用した9調合に、比較用としてNCを使用したFA無混合の普通骨材コンクリートを加えた合計10調合とした。実験Ⅲにおいては、単位セメント量を285kg/m³で一定とし、これにFAを0, 51, 244, 455kg/m³混合した4調合と、単位セメント量を336kg/m³ (W/C=55%), 440kg/m³ (W/C=42%), 515kg/m³ (W/C=36%)としたセメント単味のコンクリート3調合の合計7調合とした。フレッシュコンクリートの流動性は、ⅠおよびⅡにおいてはFA量が0および244kg/m³の調合でスランプ18±2.5cm、FA量が455kg/m³の調合でスランプフロー50cm~70cmとし、空気量は4.5±1.0%となるように、Ⅲにおいてはスランプが18±2.5cm、空気量が4.5±1.5%となるように混和剤で調整した。

表2 調合表

実験	材料組合せ	調合記号	W/C (%)	W/B (%)	単位質量(kg/m ³)						AD1 (%)	AD2 (%)	AD3 (%)		
					W	C	FA	S	G						
①	NC+NG+NS	NN-65	65	35	185	285	244	841	974	0.35	-	-	0.005		
	NC+RG+NS	RN-65						841	863	0.35					
	NC+RG+RS	RR-65						771	863	0.35					
	NC+NG+NS+FA1	NN1-35						561	974	0.5					
	NC+RG+NS+FA1	RN1-35						561	863	0.5					
	NC+RG+RS+FA1	RR1-35						514	863	0.43					
	NC+RG+NS+FA2	RN2-35						561	863	0.6					
	NC+RG+RS+FA2	RR2-35						514	863	0.6					
	NC+NG+NS+FA1	NN1-25						318	974	1.81					
	NC+RG+NS+FA1	RN1-25						318	863	1.81					
NC+RG+RS+FA1	RR1-25	292	863	1.7											
②	NC+NG+NS	NNN65-65	65	35	185	285	244	845	953	0.45	-	-	0.45		
	EC+NG+NS	ENN65-65						859	953	0.45					
	EC+RG+NS	ERN65-65						854	854	0.45					
	EC+RG+RS	ERR65-65						786	854	0.45					
	EC+NG+NS+FA1	ENN65-35						588	953	0.33					
	EC+RG+RS+FA1	ERN65-35						583	854	0.35					
	EC+RG+RS+FA1	ERR65-35						537	854	0.4					
	EC+NG+NS+FA1	ENN65-25						354	953	0.58					
	EC+RG+RS+FA1	ERN65-25						349	854	0.59					
	EC+RG+RS+FA1	ERR65-25						321	854	0.57					
③	NC+ARG+NS	AR65-65	65	55	185	285	440	0	776	0.45	-	-	0.55		
	NC+ARG+NS+FA1	AR65-55						51	719	0.45					
	NC+ARG+NS+FA1	AR65-35						244	505	0.75					
	NC+ARG+NS+FA1	AR65-25						25	455	270				1015	
	NC+ARG+NS	AR55-55						55	55	336				735	0.45
	NC+ARG+NS	AR42-42						42	42	440				653	0.55
NC+ARG+NS	AR36-36	36	36	515	594	0.55									

(3)試験項目および方法

表3に試験項目および試験方法を示す。各試験の供試体の成型および養生は該当する試験規格に準じて表3に示す材齢で行った。

表3 試験項目および試験方法

実験	試験項目	試験方法	養生	材齢
Ⅰ	圧縮強度	JIS A 1108	20℃水中	3/7/28/91日
	静弾性係数	JIS A 1149		
	割裂引張強度	JIS A 1113		
Ⅱ	長さ変化	JIS A 1129-3	20℃気中	~200日
	圧縮強度	JIS A 1108	20℃水中	28/91/182日
Ⅲ	膨張率	JCI AAR3	40℃湿潤	1/2/3/4/5/6ヶ月
	空隙構造	気体吸着法	20℃水中	91日
	Ca(OH) ₂ 量	TG-DTA		28/91日
	自由水量	105℃乾燥	20℃封緘	28/91/182日

4. 研究成果

(1)圧縮強度

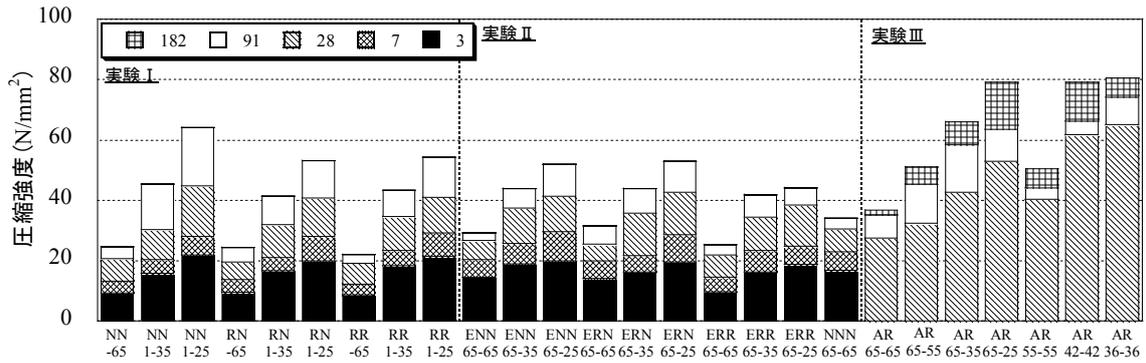


図1 圧縮強度の経時変化 (実験ⅠⅡⅢ)

図1に実験ⅠⅡⅢにおける圧縮強度経時変化を示す。全ての調合において、材齢の経過および単位FA量の増加と共に圧縮強度が増加し、ECやRGおよびRSを用いても、FAを外割混合することにより、同W/Cの普通コンクリートに対し圧縮強度が増加した。Ⅰにおいては比較的品質な再生骨材を使用しても、W/C65%で材齢91日において圧縮強度を53N/mm²程度発現するコンクリートを製造できる可能性が示され、Ⅱにおいては塩化物イオン量の制約の中で、ECやRGおよびRSを使用しても、W/C65%においてFAを外割混合することにより、材齢91日において、圧縮強度44~53N/mm²程度のコンクリートを製造できる可能性が示された。また、NNN65-65の材齢28日から91日にかけての圧縮強度増加量はECを使用することにより低下する傾向にあるが、FAを外割混合することにより増加量の低下も改善された。RGおよびRSを使用することによる増加量への影響は見られなかった。

(2)圧縮強度と割裂引張強度の関係

図2に実験ⅠⅡにおける、圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。また同図中に、普通コンクリートにおける圧縮強度と割裂引張強度の関係評価式を、野口式、Carrasquillo式およびRC構造計算規準式として示す。RC構造計算規準式は、(1)式は実験値の範囲を表し、(2)式はその平均を表している。RC構造計算規準式においては、平均式に対し下側に分布するものの、概ねその範囲内に実験

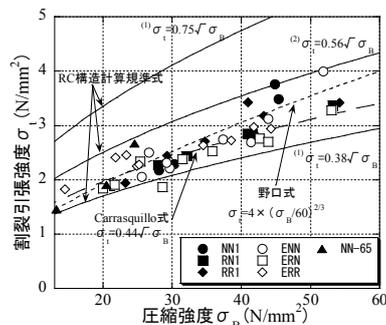


図2 圧縮強度と割裂引張強度 (実験ⅠⅡ)

結果は納まった。実験の範囲内において、NCを使用し、FAを外割混合した再生骨材コンクリートは、野口式に対し、比較的良好な対応を示した。ECを使用し、FAを外割混合した再生骨材コンクリートは、Carrasquillo式において回帰係数を0.44とすることで、良好な回帰が可能であった。

(3)圧縮強度と静弾性係数の関係

図3に実験ⅠⅡにおける、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。また同図中に、NNコンクリートでは $\gamma=2.35$ 、RNコンクリートでは $\gamma=2.24$ 、RRコンクリートでは $\gamma=2.18$ とし、 $K_1=1.0$ (骨材による影響)、 $K_2=1.1$ (混和材による影響)とした場合の建築学会1991規準式(40N/mm²以下)およびRC構造計算規準式(30N/mm²以上)も普通コンクリートにおける既往の実験式として併せて示す。ばらつきはあるものの概ね規準式に対応したが、FA無混合の普通骨材コンクリートも含め、建築学会1991規準式(40N/mm²以下)には圧縮強度に対して静弾性係数が規準式よりも若干上側に分布する傾向が見られた。本研究の範囲内においては、40N/mm²以下の圧縮強度域においてもRC構造計算規準式を用いた方が比較的良好な対応を示した。また、NCコンクリートとECコンクリートはほぼ同程度の圧縮強度と静弾性係数の関係を示し、既往の研究通り、ECを使用することによる静弾性係数への影響は見られなかった。

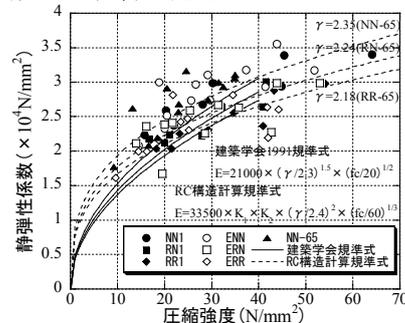


図3 圧縮強度と静弾性係数 (実験ⅠⅡ)

(4)長さ変化率

図4にⅠにおける長さ変化率を示す。今回

の実験の範囲内において、RG および RR を使用したコンクリートの長さ変化率は、「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」に示される乾燥収縮率の目安 7×10^{-4} を材齢 6 ヶ月程度で上回った。しかし、FA を 244kg/m^3 外割混合した再生骨材コンクリートの長さ変化率は 6×10^{-4} 以下に抑えることができた。

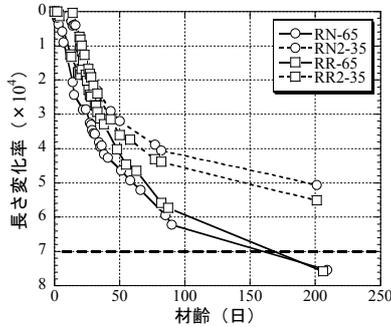


図4 長さ変化率（実験Ⅰ）

(5) 膨張率の経時変化

図5にⅢにおける膨張率の経時変化を示す。また同図中にそれぞれの調合における、促進の為の添加アルカリを加えた総アルカリ量を示す。セメント単味のコンクリートにおいては、単位セメント量が 512kg/m^3 、単位総アルカリ量が 5.03kg/m^3 と最も多い、AR36-36 が顕著な膨張性を示した。AR65-65, AR55-55 および AR42-42 は材齢 182 日においてほぼ同程度の膨張性を示した。材齢 56 日までの初期においては AR55-55 の膨張率が最も大きかったが、材齢の経過とともに単位セメント量の大きい、AR36-36 の膨張率が上回った。

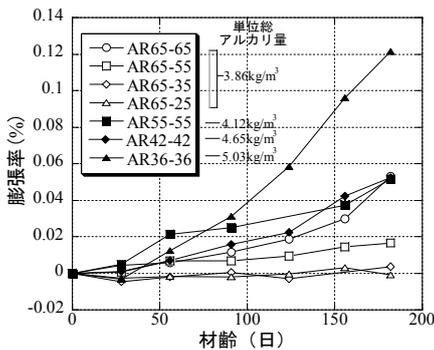


図5 膨張率の経時変化（実験Ⅲ）

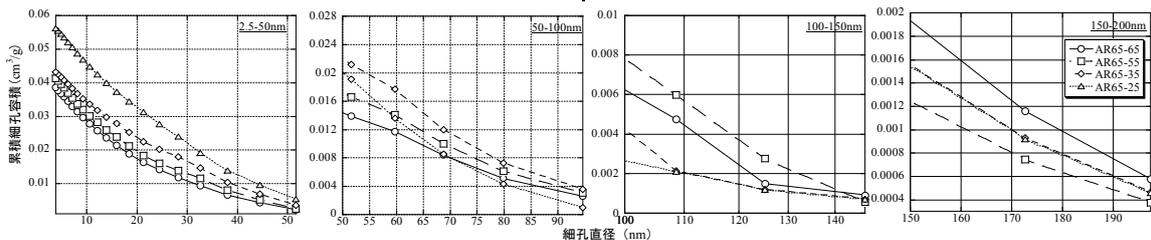


図6 区間累積細孔量（実験Ⅲ）

FA を外割混合したコンクリートは同 W/C である AR65-65 に比べ、全ての調合において膨張率が低下した。FA を外割混合することによる膨張抑制効果が鑑みられ、特に材齢 91 日以降においてその差が大きくなった。また AR65-55, AR65-35, AR65-25 と単位 FA 量が大きい方が膨張率は小さい傾向が見られた。また、図1によれば、フライアッシュを外割混合した AR65-55 は、セメント単味のコンクリート AR55-55 と材齢 91 日で、AR65-35 は材齢 28 日において AR55-55 と、AR65-25 は材齢 91 日において AR42-42 と、材齢 182 日において AR36-36 および AR42-42 と同程度の圧縮強度を示した。同程度の圧縮強度を有するセメント単味のコンクリートに比べても、FA を混合したこれらのコンクリートは膨張を抑制することが出来た。十分な圧縮強度性能を保有し、かつ ASR に対する耐久性を兼ね備えた FA 外割混合コンクリートを製造出来る可能性が示された。

(6) 区間累積細孔量

図6にⅢにおける AR65-65, AR65-55, AR65-35 および AR65-25 の区間累積細孔量を示す。単位 FA 量の多い順に、より微細な領域で相対的に卓越した累積細孔量を示す傾向が見られた。FA を外割混合すると、比較的粗大な空隙が細分化され、微細な空隙が増大することにより、コンクリートのマトリクスが緻密化されるものと考えられる。コンクリート中に存在する水は、大別してセメント硬化体の主体をなす C-S-H として化学的に結合しているもの、これらと物理的な力によって結びついているゲル水、ならびにセメント硬化体間の空隙に存在する毛細間隙水（自由水）があるが、このうち自由水は物理的な条件、つまりそれが存在する空間サイズに起因する力によってその場に留まっており、サイズが大きい空隙に存在するものは、比較的簡単にセメント硬化体中を拡散する。ASR は固液反応であり、内部水分を介してアルカリが骨材表面から供給されることにより開始・維持される反応とされる。したがって、水分と骨材がコンクリート内部で接触することがアルカリ供給の必要条件となる。今回の実験においては、FA を外割混合することによるマトリクスの緻密化によりコンクリート中の水およびイオンの透過性が低下することで、それらがマトリクスに固定化された状態と

なり、水を介した反応性骨材とアルカリとの物理的な接触が遅延もしくは減少したことが、ASRによる膨張を起りにくくさせた一つの要因として考えられる。

(7) Ca(OH)₂ 含有率の経時変化

図 7 にⅢにおける AR65-65, AR65-55, AR65-35 および AR65-25 の Ca(OH)₂ 含有率経時変化を示す。材齢によらず、FA の外割混合量が多いほど、水酸化カルシウム含有率は小さい値を示した。FA 外割混合コンクリートは単位セメント量および単位水量を一定とした中で、FA を外割混合することにより、細骨材への置換容積分だけコンクリートの単位容積当たりのマトリクスが占める容積が増量するため、骨材も含めたコンクリートとしての Ca(OH)₂ の定量的な比較は一概には出来ないが、少なくとも、同 W/C における単位容積当たりのコンクリートの部分的な Ca(OH)₂ 濃度は低下しているものと考えられる。CI を含んだ溶液中でのセメントの水和過程で Ca(OH)₂ が生成すると、Na⁺, Ca²⁺, OH⁻ は、H₂O を伴ってペースト部から骨材粒子内へ浸透し、同時に Si⁴⁺ の骨材粒子外への拡散を妨げて、その周辺に反応層を生成する。Ca(OH)₂ は Na⁺, OH⁻, H₂O の骨材への浸透を早めるため、Ca(OH)₂ が減少すればこの反応も減少する。今回の実験においては、骨材周辺の Ca(OH)₂ 濃度が減少することも ASR 膨張の抑制の一要因となったものと考えられる。

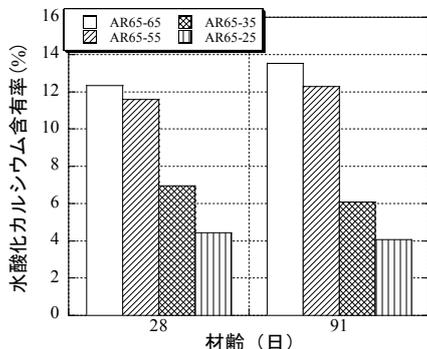


図 7 水酸化カルシウム含有率経時変化 (実験Ⅲ)

(8) 自由水量の経時変化

図 8 にⅢにおける AR65-65, AR65-55, AR65-35 および AR65-25 の自由水量経時変化を示す。同材齢において、FA 外割混合コンクリートは混合量が多いほど自由水量が多くなる傾向が見られるが、材齢 28 日においては全ての調査で、ほぼ同程度の自由水量を示した。材齢 91 日においては、無混合のコンクリートに比べ自由水量が少ない傾向が見られた。原因は明らかではないが、FA 外割混合コンクリートの材齢による FA の増加はほとんど見られず、セメントの水和のみによる自由水の減少とは考えにくい。また、材齢 28 日から 91 日にかけて FA を比較的大量に混合したコンクリートは、Ca(OH)₂ 含有率が停滞

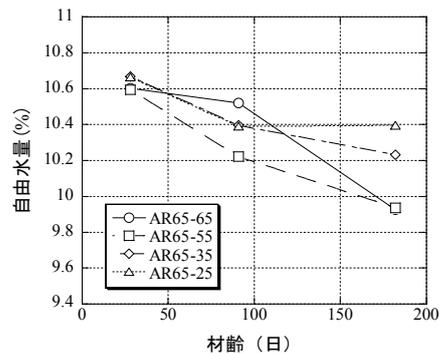


図 8 自由水量経時変化 (実験Ⅲ)

もしくは減少する傾向があったことから、自由水を介した FA の Ca(OH)₂ との反応等が原因として考えられる。材齢 91 日以降、AR65-65 には FA 外割混合コンクリートに対し、比較的大幅な自由水量の低減が生じているが、これは AR65-65 における材齢 91 日から 182 日の圧縮強度の増進が少ないことから、セメントの水和によるものとは考え難いため、ASR によりコンクリート中の水分が減少したものと考えられる。材齢 28 日から 182 日にかけての自由水低減率は、FA 無混合のものに比べ、FA 外割混合コンクリートはすべての調査において小さな値を示した。初期のマトリクスにおける均一に拡散された水のうち、反応性骨材周辺のもので一定のアルカリシリカ反応を終えた後は、周囲には存在していなかった水分が浸透により、反応性骨材との反応点まで到達しなければその反応は起り得ない。また FA と Ca(OH)₂ の水を介した反応が生じていた場合にも同様のことが言える。FA 外割混合コンクリートの材齢 28-182 日にかけての自由水量の変化が小さい要因として、組織の緻密さに起因する水の固定化により、一定のそれら化学的な反応を終えた後は、その反応性が緩慢となる事が考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

I 高巢幸二, 松藤泰典: 再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, コンクリート工学年次論文集, 29 巻, pp379-384, 2007, 査読有り

II 相馬生, 高巢幸二, 松藤泰典: 再生骨材を使用した石炭灰外割混合コンクリートの力学性状に関する研究 その 1 変形性状, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), A-1, pp195-196, 2007, 査読無し

III 林田拓也, 高巢幸二, 松藤泰典: 再生骨材を使用した石炭灰外割混合コンクリートの力学性状に関する研究 その 2 強度性状, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), A-1,

pp197-198, 2007, 査読無し

IV 山内信英, 高巢幸二, 松藤泰典: 高強度領域における石炭灰外割混合コンクリートの諸特性に関する研究 その1 強度性状及び収縮性状, 日本建築学会研究報告九州支部(熊本), 47・1, pp5-8, 2008, 査読無し

V 北村利英, 高巢幸二, 松藤泰典: 高強度領域における石炭灰外割混合コンクリートの諸性状に関する研究 その2 40℃気中環境下による影響, 日本建築学会研究報告九州支部(熊本), 47・1, pp9-12, 2008, 査読無し

VI 相馬生, 高巢幸二, 松藤泰典: 高強度領域における石炭灰外割混合コンクリートの諸特性に関する研究 その3 再生骨材による影響, 日本建築学会研究報告九州支部(熊本), 47・1, pp13-16, 2008, 査読無し

VII 林田拓也, 高巢幸二, 松藤泰典: 石炭灰外割混合コンクリートのASR迅速判定に関する研究, 日本建築学会研究報告九州支部(熊本), 47・1, pp17-20, 2008, 査読無し

VIII 高巢幸二, 松藤泰典: 40℃気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, コンクリート工学年次論文集, 30巻, pp201-206, 2008, 査読有り

IX 石山貴英, 高巢幸二, 松藤泰典: 石炭灰外割混合コンクリートのアルカリシリカ反応迅速判定に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), A-1, pp947-948, 2008, 査読無し

X 相馬生, 高巢幸二, 松藤泰典: 石炭灰を外割混合した再生骨材コンクリートの力学性状に関する研究 その3 高強度領域, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), A-1, pp1171-1172, 2008, 査読無し

XI 高巢幸二, 松藤泰典: フライアッシュ外割混合コンクリートの諸特性に関する研究 その2 フライアッシュの強度寄与, 日本建築学会研究報告九州支部(沖縄), 48・1, pp65-68, 2009, 査読無し

XII 相馬生, 高巢幸二, 松藤泰典: エコセメントとフライアッシュを混合した再生骨材コンクリートの諸特性に関する研究 その1 力学性状, 日本建築学会研究報告九州支部(沖縄), 48・1, pp69-72, 2009, 査読無し

〔学会発表〕(計3件)

I 高巢幸二: 再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, 日本コンクリート協会仙台大会, 2007年7月13日, 江陽グランドホテル

II 高巢幸二: 40℃気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, 日本コンクリート協会仙台大会, 2008年7月11日, 福岡国際会議場

III 高巢幸二: フライアッシュ外割混合コンクリートの諸特性に関する研究 その2 フライアッシュの強度寄与, 日本建築学会九州支部研究報告会, 2009年3月8日, 琉球大学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高巢 幸二 (TAKASU KOJI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
研究者番号: 6336948