論文　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

高巣　幸二[*1]・松藤　泰典[*2]

要旨：フライアッシュを大量に外割混合したコンクリートの強度発現性状，及び高耐久性状を利用して，比較的低品質な再生骨材が構造用コンクリートに使用可能となるようフライアッシュの種類及び水結合材比を変化させて強度性状に関する実験を行った。フライアッシュを外割混合した場合，再生骨材を使用しても，91 日までの範囲において材齢とともに圧縮強度，割裂引張強度，及び曲げ強度が増加した。フライアッシュ外割混合量が多いほど，再生骨材を使用しても圧縮強度が大きくなった。本実験の範囲内において材齢と共に静弾性係数が増加したが，フライアッシュ外割混合量を大きくしても静弾性係数は増加しなかった。

キーワード：再生骨材，フライアッシュ，外割混合，圧縮強度，静弾性係数，割裂引張強度

1. はじめに

高度経済成長期から蓄積された膨大な建設物のストックが，その寿命を迎え始めており，今後，多大な建設廃材の排出が予想されている。廃棄物と捉えるのか，未利用資源として捉えるのかで今後の経済社会に大きな影響を与えるだろう。循環型経済社会では後者として捉える必要がある。建設産業にあっては，この状況を踏まえていち早く建設廃棄物の再資源化に取り組んでいる。木材，汚泥，アスファルトコンクリート塊，コンクリート塊等の建設廃棄物は，2000 年度実績で全量 8500 万 t のうち 81%である 7200 万 t を再資源化した。特にコンクリート塊に関しては 96%もの再資源化を行っている [1)]。しかしながら，再資源化の実情を鑑みるとコンクリート塊の再資源化のほとんどは路盤材に利用されているに過ぎない。コンクリートの資源循環を形成させるには，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 [1)]。

また，火力発電所から発生するフライアッシュは，1999 年に我が国で約 760 万 t も発生しており，今後さらに増大するものと予想される [2)]。発生したフライアッシュは，一部がセメント原料として利用されているが，残りのほとんどは埋め立て処理されており，年々，灰捨て場の確保が難しくなってきている。筆者ら [2)]はフライアッシュをセメント代替ではなく，砂代替として調合する外割調合則を確立させ，フライアッシュ外割混合コンクリートが無混合のコンクリートより高い強度発現性状及び高耐久性状を示すことを明らかにしている。

本研究は，フライアッシュを大量に混合したコンクリートの強度発現性状，及び高耐久性状を利用して，比較的低品質な再生骨材が構造用コンクリートに使用可能となるようフライアッシュの種類及び水結合材比を変化させて強度性状に関する実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－１に使用材料，**表－２**に再生粗骨材の異物混合率を示す。本研究で使用した再生粗骨材は，タイル，ガラスおよびモルタルなどの不純物が質量比で約 11%混合していた。使用した再生粗骨材は JIS 原案「再生骨材 M を用いた再生

*1 北九州市立大学　国際環境工学部環境空間デザイン学科　准教授　工博　(正会員)
*2 北九州市立大学　国際環境工学部環境空間デザイン学科　教授　工博　(正会員)

骨材コンクリート」に規定されている再生骨材M，再生細骨材はJIS原案「再生骨材L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Lの規格であった。

表－3にフライアッシュの物性を示す。フライアッシュは，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種類用いた。また，強熱減量および比表面積ともにFA1が小さかった。

2.2 調合

表－4に調合を示す。調合は単位水量，単位セメント量ともにJASS5規定値の上限値である185kg/m^3，及び285 kg/m^{3}で一定とした。骨材は海砂と砕石，海砂と再生粗骨材，再生細骨材と再生粗骨材とする3種類の組み合わせで使用し，フライアッシュ無混合のものと2種類のフライアッシュを244kg/m^{3}混合したもの，1種類を455kg/m^{3}混合したものの計12調合とした。フレッシュコンクリートの流動性は，フライアッシュ量が0および244kg/m^{3}の調合でスランプ18±2.5cm，フライアッシュ量が455kg/m^{3}の調合でスランプフロー50cm～70cmとした。空気量は4.5±1.0%の範囲とした。

2.3 測定項目および測定方法

試験項目および試験方法を**表－5**に示す。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－5**に示す材齢で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図－1にFA1を使用した時の圧縮強度の経時変化を示す。フライアッシュを外割混合した場合，骨材の種類に関わらず，91日までの範囲において材齢とともに圧縮強度が増加した。フライアッシュの混合量が多いほど，骨材の種類に関わらず圧縮強度が材齢とともに大きくなった。フライアッシュの外割混合量が多いと圧縮強度が大きくなるが，再生骨材コンクリートは普通

表－1　使用材料

項目	種類	密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率 (%)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	-	-	-
水	上水道水	1.00	-	-	-
細骨材	海砂（北九州市岩屋沖産）	2.54 (絶乾)	1.55	60.3	2.7
	再生細骨材	2.20 (絶乾)	4.43	67.6	2.9
粗骨材	砕石（福岡県岡垣町上畑産）	2.81 (絶乾)	0.79	59.4	7.0
	再生粗骨材	2.41 (絶乾)	3.90	61.6	6.8

表－2　再生粗骨材の異物混合率

	再生粗骨材(%)	タイル(%)	モルタル(%)	ガラス(%)	その他(%)
再生粗骨材	88.74	0.45	2.16	0.05	8.6

表－3　フライアッシュの物性

記号	密度 (g/cm^3)	強熱減量 (%)	比表面積 (cm^2/g)	湿分 (%)
FA1	2.25	1.4	3410	0.07
FA2	2.21	2.22	4200	0.1

表－5　試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法	養生・材齢
圧縮強度	JIS A 1108	20℃水中 3・7・28・91日
静弾性係数	JIS A1149	
引張強度	JIS A 1113	20℃水中，7・28・91日
曲げ強度	JIS A 1106	20℃水中，28・91日

表－4　調合表

調合			W/C (%)	W/B (%)	単位質量(kg/m^3)					混和剤(%)*	
混和材	骨材の種類	調合記号			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE剤
無混合	砕石＋海砂	NN-65	65	65	185	285	0	841	974	0.35	0.005
	再生粗骨材＋海砂	RN-65						841	863	0.35	0.005
	再生粗骨材＋再生細骨材	RR-65						771	863	0.35	0.005
FA1	砕石＋海砂	NN1-35		35			244	561	974	1.05	0.001
	再生粗骨材＋海砂	RN1-35						561	863	0.6	0.008
	再生粗骨材＋再生細骨材	RR1-35						514	863	0.6	0.01
FA2	砕石＋海砂	NN2-35						561	974	0.5	0.025
	再生粗骨材＋海砂	RN2-35						561	863	0.5	0.025
	再生粗骨材＋再生細骨材	RR2-35						514	863	0.43	0.014
FA1	砕石＋海砂	NN1-25		25			455	318	974	1.5	0.05
	再生粗骨材＋海砂	RN1-25						318	863	1.5	0.05
	再生粗骨材＋再生細骨材	RR1-25						292	863	1.5	0.05

*高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）、AE剤（アルキルエーテル系）

骨材コンクリートより低下した。再生骨材コンクリートは材齢91日において普通骨材コンクリートより小さな圧縮強度になった。W/B=35%，材齢28日では，再生骨材コンクリートの圧縮強度が普通骨材コンクリートより大きくなっている場合があり，骨材品質の影響が現れにくい。フライアッシュの外割混合によって RN コンクリートと RR コンクリートとの圧縮強度の差は生じていない。

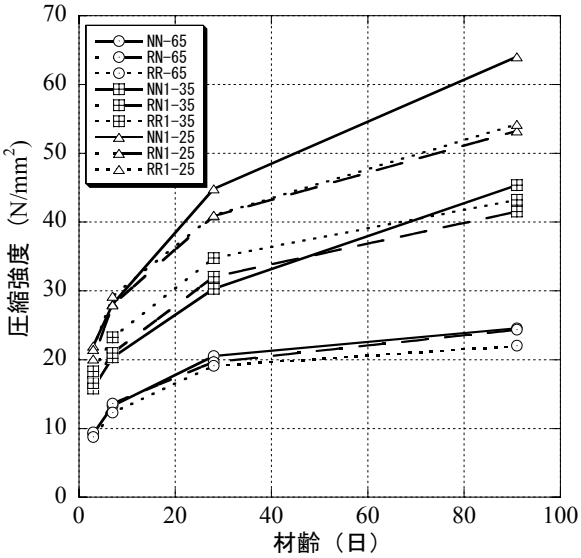
また，材齢 28 日から 91 日の圧縮強度の増加率はフライアッシュ無混合コンクリートよりフライアッシュを外割混合したコンクリートの方が大きい。

図－２に FA1 を使用した時の材齢 3 日, 7 日, 28 日および91日における単位フライアッシュ量と圧縮強度の関係を示す。すべての材齢において，単位フライアッシュ量が増加するに伴い圧縮強度が増加した。この圧縮強度の増加は普通骨材コンクリートにおいても，再生骨材コンクリートにおいてもともに発現した。フライアッシュ無混合の場合，再生骨材コンクリートは普通骨材コンクリートより圧縮強度低下を生じた。フライアッシュを外割混合した場合，再生骨材コンクリートはフライアッシュ無混合の普通骨材コンクリートと同等の圧縮強度を発現させることができる。

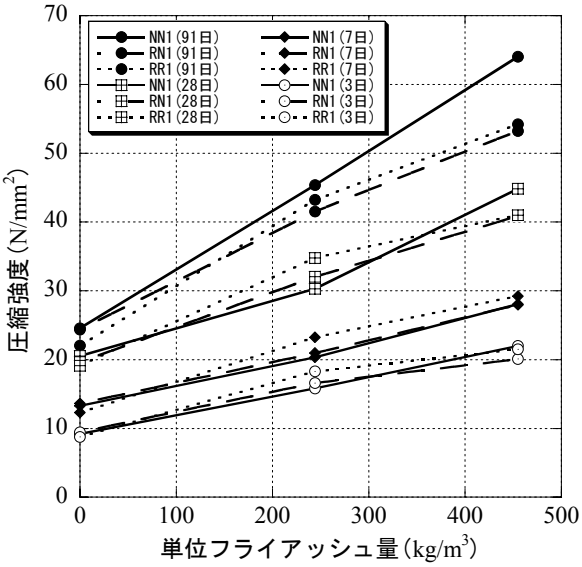
図－３に FA1 と FA2 を使用した時の圧縮強度の経時変化を示す。NN コンクリートは同調合においてもフライアッシュの違いにより同材齢で圧縮強度が異なっていたが, RN コンクリートでは同材齢での強度差が小さくなり, RR コンクリートは同材齢でほとんど強度差が無くなった。

3.2 静弾性係数

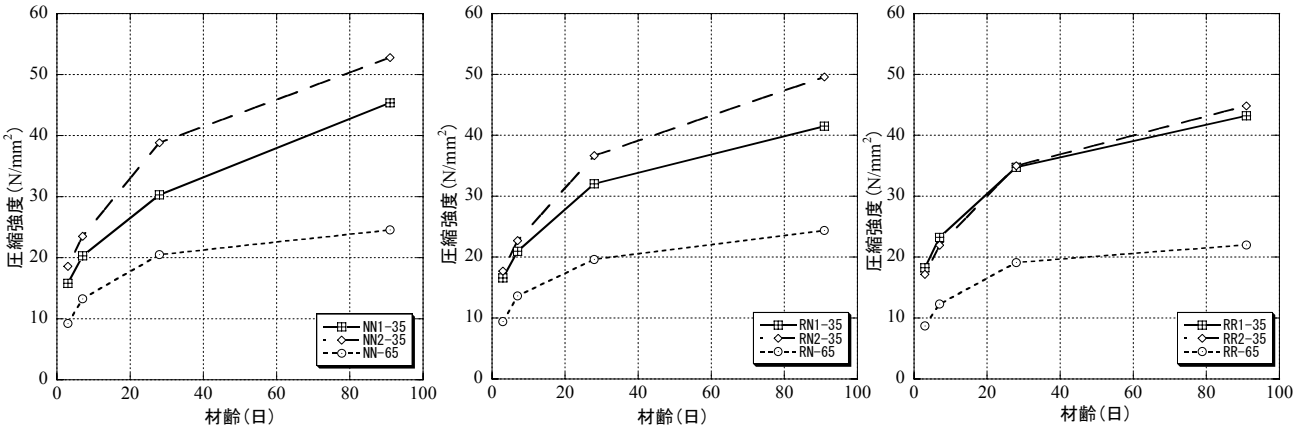
図－４に静弾性係数の経時変化を示す。全ての調合において材齢と共に静弾性係数が増加した。フライアッシュの外割混合によらず材齢 7 日以降は, NN シリーズの静弾性係数が大きくなった。静弾性係数は骨材の品質が大きく影響することが明らかになった。ただし，RN シリーズと RR シリーズで比較するとフライアッシュを外割混合した方が無混合よりも静弾性係数は大きな値を示した。**図－５**に単位フライアッシュ量と静弾性係数の関係を示す。再生骨材を使用してもフライアッシュを外割混合することにより 91 日までの材齢において概ね静弾性係数を増加させることができた。W/B=35% の時と W/B=25%の時の静弾性係数は，91 日までの材齢において骨材の品質にかかわらずほぼ同じ値を示した。また，同材齢の静弾性係数は，NN シリーズ，RN シリーズ，RR シリーズの順に大きくなった。以上のことから静弾性係数はフライアッシュの外割混合量よりも骨材の品質による影響が大きいことが確認できた。



図－１　圧縮強度の経時変化



図－２　単位フライアッシュ量と圧縮強度の関係



(a)　砕石＋海砂　　(b)　再生粗骨材＋海砂　　(c)　再生粗骨材＋再生再骨材

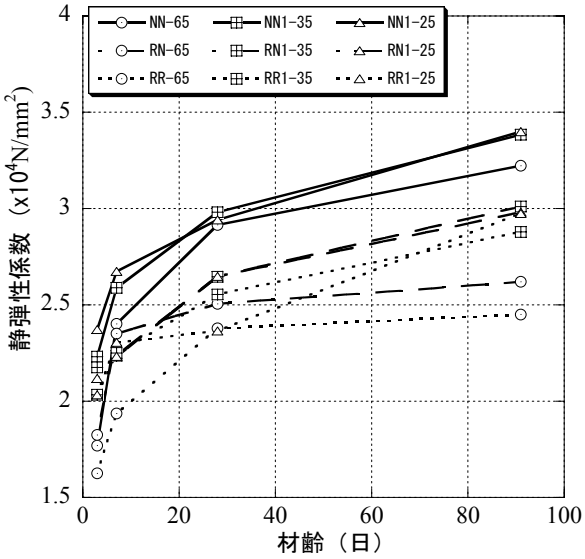
図－３　FA1 と FA2 を使用した時の圧縮強度の経時変化

3.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

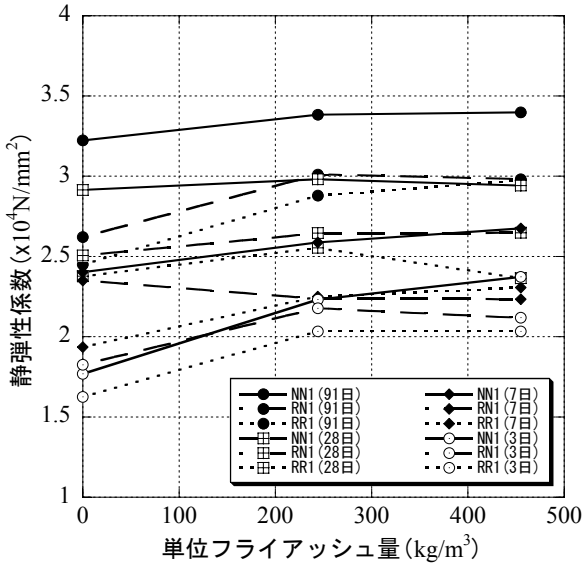
図－６にフライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。フライアッシュを外割混合した普通骨材コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係は，γ=2.1（コンクリートの単位容積重量），K_1=1.0（骨材による影響），K_2=1.1（混和材による影響）とした時の NEW-RC 式(36N/mm^2 以上)，建築学会規準式(36N/mm^2 以下)の値[3)]に対して，静弾性係数が圧縮強度に対して大きなところに分布している。フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートは，普通骨材コンクリートより若干小さなところに分布している。フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートは NEW-RC 式，建築学会規準式の値より大きくなっており，両式を基準にすれば安全側に分布する。

3.4 割裂引張強度

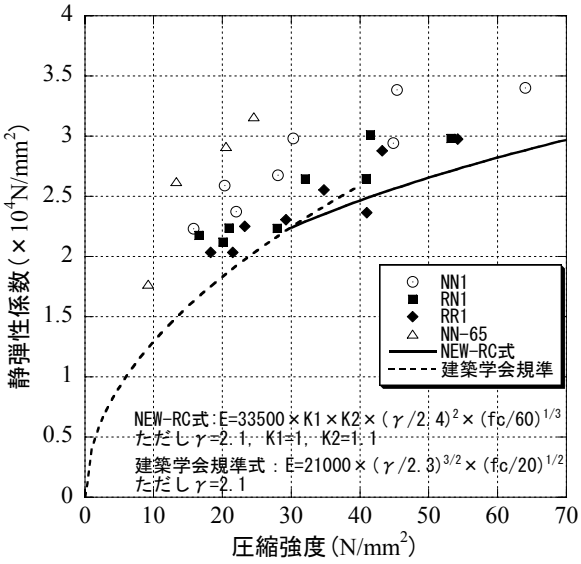
図－７に割裂引張強度の経時変化を示す。RR1-25 以外の調合において材齢と共に割裂引張強度は増加した。RR1-25 は材齢 28 日から 91 日の間において割裂引張強度の増加は認められず同等な値を示した。フライアッシュを外割混合することにより骨材の品質にかかわらず材齢 91 日までにおいてフライアッシュ無混合の NN-65 より大きな割裂引張強度を示した。図－８に単位フライアッシュ量と割裂引張強度の関係を示す。材齢 91 日までにおいてフライアッシュを外割混合すると再生骨材を使用しても割裂引張強



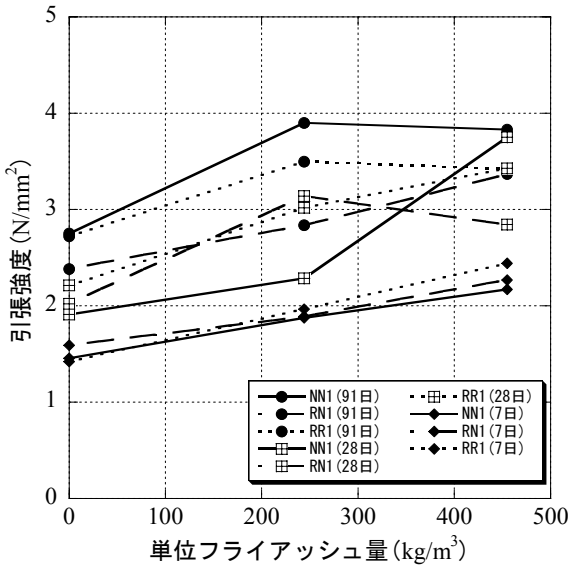
図－４　静弾性係数の経時変化



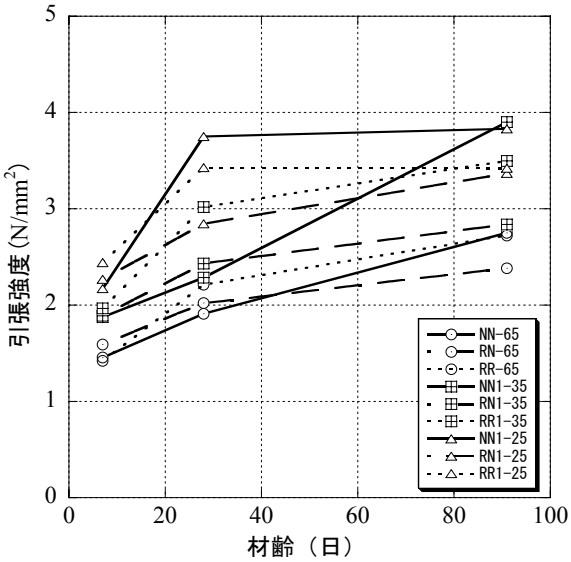
図－５　単位フライアッシュ量と静弾性係数の関係



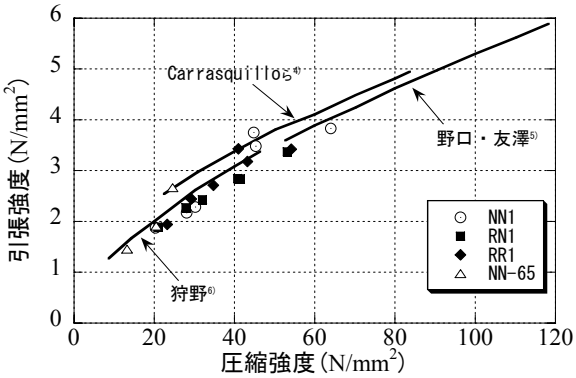
図－６　圧縮強度と静弾性係数の関係



図－８　単位フライアッシュ量と割裂引張強度の関係



図－７　割裂引張強度の経時変化



図－９　圧縮強度と割裂引張強度の関係

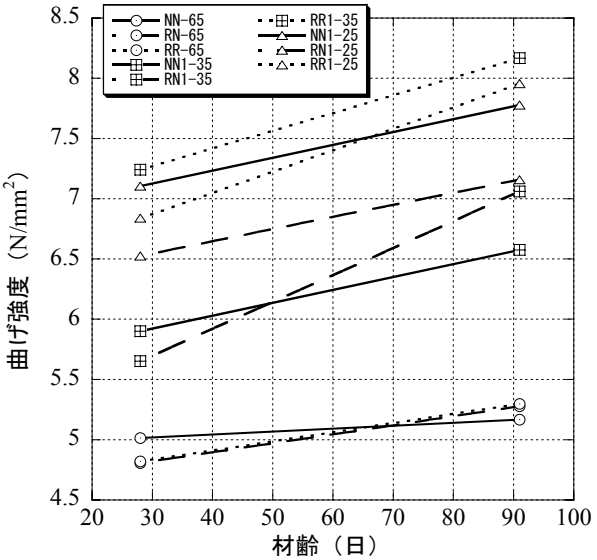
度が増加する。材齢 28 日以降の再生骨材コンクリートの割裂引張強度はフライアッシュの外割混合量を増やしても圧縮強度のように顕著な増加傾向を示さないことが確認できた。

3.5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

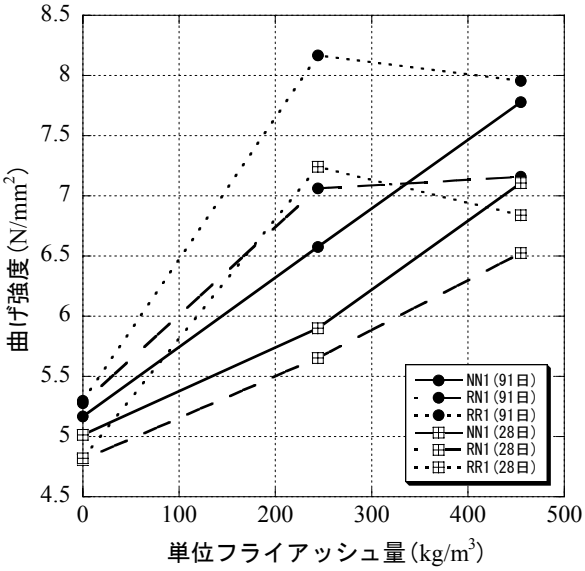
図－９に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。材齢，フライアッシュの混合量，骨材の品質に関係なく割裂引張強度は圧縮強度の 1/15～1/8 の範囲に分布し，既往の研究による回帰式[4)5)6)]と同等な値を示した。フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係は，フライアッシュ無混合の普通骨材コンクリートの関係と同様な傾向を示すことが窺えた。

3.6 曲げ強度

図—10 に曲げ強度の経時変化を示す。全ての調合において材齢 28 日より 91 日の方が曲げ強度が大きくなった。材齢と共に曲げ強度の増加が期待できる。**図－11** に単位フライアッシュ量と曲げ強度の関係を示す。材齢 91 日までにおいてフライアッシュを外割混合すると再生骨材を使用しても曲げ強度を増進させることが明らかになった。RR シリーズでは材齢 28 日，91 日において W/B=35%の方が W/B=25%より大きな曲げ強度を示した。再生骨材コンクリートの曲げ強度はフライアッシュの外割混合量を増やしても圧縮強度のように顕著な増加傾向を示さないことが確認できた。



図－10　曲げ強度の経時変化



図－11　単位フライアッシュ量と曲げ強度の関係

4. まとめ

以下に得られた知見を要約して示す。

(1) フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートは, 91 日までの範囲において材齢とともに圧縮強度が増加し，フライアッシュの外割混合量が多いほど，圧縮強度は大きくなる。これは，砂をフライアッシュのような微粉末に置換したことにより組織が緻密化したためであると考えられる。

(2)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静弾性係数は材齢とともに増加した。但し，普通骨材コンクリートの静弾性係数より小さい。

(3) 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圧縮強度と静弾性係数の関係は， NEW-RC 式（36N/mm^2 以上），建築学会規準式（36N/mm^2 以下）で安全側に分布する。

(4) 材齢 91 日までにおいて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割裂引張強度，曲げ強度は材齢とともに増加するものの，その強度はフライアッシュの外割混合量を増やしても圧縮強度のような顕著な増加傾向は示さない。今後，実験データを蓄積してこの傾向を検討していく必要がある。

謝辞

本研究は，2006～2007 年度　文部科学省　科学研究費補助金　基盤研究(C)「フライアッシュをセメント外割混合するコンクリートの養生則」の支援を受けて行った。本研究を遂行するにあたり，（株）京星より再生骨材の提供を受けた。実験に際して本学 EA・三島剛氏，三倉英史氏，及び本学大学院生・林田拓也君，北村利英君から協力を得た。末尾に記して謝意を表す。

参考文献

1) コンクリート再生材高度利用研究会 : コンクリートリサイクルシステムの普及に向けての提言（コンクリート再生材高度利用研究会活動報告書），2005.9

2) 松藤泰典ほか : 石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.2，pp51-60，2001

3) 日本建築学会 : 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説，2005.1

4) Carrasquillo，et. al : Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Load, Journal of ACI，Vol.78，No.3，pp.171-178，1981

5) 野口貴文，友澤史紀 : 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，No. 472，pp11-16，1995.6

6) 狩野春一 : コンクリートの引張に関する研究，日本建築学会論文集，No. 4，pp1-6，1940