

# 論文 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力学性状

石山 貴英\*1・高巢 幸二\*2・松藤 泰典\*3

要旨：エコセメント及び比較的低品質な再生骨材を使用したコンクリートにフライアッシュを外割混合してコンクリートの高品質化を図ることを目的とし、普通強度域と高強度域に水セメント比を設定して、単位フライアッシュ量を変化させて力学性状の実験を行った。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は、高強度域になると圧縮強度低減率が大きくなり、その傾向は、再生細粗骨材を使用したときが顕著であった。W/C=65%においてフライアッシュを外割混合することにより、圧縮強度 44～53N/mm<sup>2</sup>程度のエコセメントを使用した再生骨材コンクリートを製造することが可能であり、長期強度も増進できた。

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

## 1. はじめに

現在、再生骨材は様々な研究が進められており、環境保全型の材料として実用化のレベルにまで達している<sup>1)</sup>。しかしながら、普通骨材と同等な性質を示す高品質な再生骨材は、高度な処理を必要とする為、経済的に製造することが難しい。そのため、再生骨材 M や再生骨材 L といった比較的低品質な再生骨材に、より広範な利用選択肢を与えることは、再生骨材の普及促進に寄与するものと考えられる。また、エコセメントは、逼迫する埋立地や環境汚染の問題から、それらを解決する一手段として注目されつつある。エコセメントを使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを用いたものとほぼ同程度の性質を示すとされるが、長期強度の増進が少ないなどの相違点も指摘されている。一方で、筆者ら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、フライアッシュを外割混合したコンクリートは無混合のコンクリートよりも高い強度発現性状及び高耐久性状を有することを示した<sup>2)</sup>。さらに、フライアッシュを混合したコンクリートは長期で強度が増進するために、エコセメントの短所である長期強度の改善も期待される。また、今後の建築資源の枯渇の危惧や、資源循環型社会の構築を考えると、再生骨材やエコセメント、フライアッシュといった環境保全型の材料を組み合わせる必要性が考えられる。

本研究は、エコセメント及び比較的低品質な再生骨材を使用したコンクリートにフライアッシュを外割混合してコンクリートの高品質化を図ることを目的とし、普通強度域と高強度域に水セメント比を設定して、単位フライアッシュ量を変化させて力学性状の実験を行い、再生骨材とエコセメントの影響について比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表 - 1 に使用材料を示す。使用した再生粗骨材と再生細骨材は 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 であり、原骨材は RC 造建築物であった。再生粗骨材は 1 次破砕機で破砕し、その後、摩鋳機により 2 次破砕を行い、比重選別機により再生粗骨材を選別した。再生細骨材は摩鋳機により 2 次破砕後、粒径 5mm 以下で再生骨材 M の粒度分布に適合するように選別した。また、セメントは普通ポルトランドセメントと普通エコセメントの 2 種類を使用し、フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライ

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 <sup>3</sup>	C
	普通エコセメント	密度 3.15g/cm <sup>3</sup>	E
水	上水道水		W
細骨材	海砂 (北九州市岩屋沖産)	絶乾密度 2.54g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.55%	NS
	再生細骨材	絶乾密度 2.20g/cm <sup>3</sup> 吸水率 4.43%	RS
粗骨材	碎石 (福岡県岡垣町上畑産)	絶乾密度 2.81 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.06% 実積率 57.6% 粗粒率 6.80	G
	再生粗骨材	絶乾密度 2.44g/cm <sup>3</sup> 吸水率 3.64% 実積率 59.4% 粗粒率 6.75	G
混和材	フライアッシュ (JIS 種適合品)	密度 2.21g/cm <sup>3</sup> 強熱減量 1.40% 比表面積 3410cm <sup>2</sup> /g フロー値比 102%	FA
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系	AD1
	空気量調整剤	ポリアルキレン グリコール誘導体	AD2

\*1 北九州市立大学大学院 大学院生 (正会員)

\*2 北九州市立大学 准教授・工博 (正会員)

\*3 同 教授・工博 (正会員)

アッシュ」種に適合するものを使用した。

## 2.2 調合

表 - 2 に調合表を示す。普通強度域の調合では、普通ポルトランドセメントと普通エコセメントを使用し、単位水量を  $185\text{kg/m}^3$ 、単位セメント量を  $285\text{kg/m}^3$  で一定とし、高強度域では、それぞれ  $165\text{kg/m}^3$  と  $631\text{kg/m}^3$  で一定とした。また、本実験では JASS5 規準上限値の水セメント比 65% としたときの圧縮強度を普通強度領域、水セメント比 26% としたときの圧縮強度を高強度領域と定めている。骨材の組み合わせは海砂と碎石、海砂と再生粗骨材、再生細骨材と再生粗骨材の 3 種類とした。普通強度域の単位フライアッシュ量をそれぞれ 0, 244, 455  $\text{kg/m}^3$  とし、高強度域では、0, 100, 200, 300, 400  $\text{kg/m}^3$  とし、合計 33 調合とした。単位フライアッシュ量  $455\text{kg/m}^3$  の範囲内において JASS5 規準上限値の水セメント比 65% と低水セメント比の 26% での単位フライアッシュ量の違いによる力学性状を把握するために単位フライアッシュ量を設定している。普通ポルトランドセメントの調合記号は、海砂と碎石の組合せを NN、海砂と再生粗骨材の組合せを RN、再生細骨材と再生粗骨材の組合せを RR と記し、エコセメントの調合記号はそれぞれ ENN、ERN、ERR とした。

フレッシュコンクリートの流動性は、単位フライアッシュ量が 0 及び  $244\text{kg/m}^3$  の調合でスランプ  $18\pm 2.5\text{cm}$ 、単位フライアッシュ量が  $455\text{kg/m}^3$  及び高強度域の調合でスランプフロー  $50\text{cm} \sim 70\text{cm}$  とした。目標空気量は  $4.5 \pm 1.0\%$ 、高強度域で  $3 \pm 1.0\%$  とした。

## 2.3 供試体の作製方法

練混ぜはオムニミキサを用いて行い、練混ぜ時間は 3 ~ 12 分間の範囲内で適正なフレッシュ性状が得られる時間とした。供試体の作製は、 $100 \times 200\text{mm}$  のプラスチック製の円柱型枠を使用し、打設後直ちに養生室に搬送した。材齢 1 日で脱型した後、所定材齢まで 20 環境で水中養生を行った。

## 2.4 測定項目及び測定方法

表 - 3 に測定項目及び測定方法を示す。試験の供試体の成型及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。静弾性係数と割裂引張強度試験については、普通エコセメント使用の場合のみ実施した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 高強度域での力学性状

図 - 1 に材齢 28 日と 91 日の圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係を示す。普通強度域では、単位フライアッシュ量の増加、材齢の経過に伴い圧縮強度が増加した。また、骨材の種類の違いによる圧縮強度の差はほとんど見られなかった。フライアッシュの混合量が多いほど、

表 - 2 調合表

調合記号	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					(C+FA) × %		
		W	C	FA	S	G	AD1	AD2	
普通強度域	65	185	285	0	841	974	0.35	0.005	
					841	863	0.35	0.005	
					771	863	0.35	0.005	
				244	561	974	1.05	0.001	
					561	863	0.6	0.008	
					514	863	0.6	0.01	
					455	318	974	1.5	0.05
						318	863	1.5	0.05
292	863	1.5	0.05						
高強度域	26	165	631	0	737	868	0.8	0.007	
					737	767	0.8	0.015	
					659	767	0.7	0.007	
				100	626	868	1.1	0.01	
					626	767	1.3	0.007	
				200	560	767	1.15	0.007	
					515	868	1.25	0.02	
					515	767	1.7	0.01	
				300	460	767	1.7	0.01	
					403	868	1.9	0.02	
					403	767	1.85	0.02	
				400	361	767	1.85	0.02	
					292	868	3.5	0.2	
					292	767	3.5	0.1	
				261	767	3.5	0.1		
エコセメント	65	185	285	0	859	953	0.45	-	
					854	854	0.45	-	
					786	854	0.45	-	
				244	588	953	0.33	-	
					583	854	0.33	-	
					537	854	0.4	-	
				455	354	953	0.58	-	
					349	854	0.59	-	
					321	854	0.57	-	
					321	854	0.57	-	

表 - 3 測定項目及び測定方法

試験項目	試験方法	養生・材齢
圧縮強度	JIS A 1108	標準水中 3・7・28・91 日
静弾性係数	JIS A 1149	
割裂引張強度	JIS A 1113	標準水中 7・28・91 日
破砕値	BS 812	-

再生骨材を使用しても圧縮強度が大きくなった。高強度域では、使用する骨材によって圧縮強度に差があり、普通強度域と同様の増加傾向は認められないものの、RN コンクリートの材齢 28 日では、単位フライアッシュ量  $300\text{kg/m}^3$  時に  $86\text{N/mm}^2$ 、材齢 91 日においては  $200\text{kg/m}^3$  時に  $97\text{N/mm}^2$  の圧縮強度を示した。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、高強度コンクリートを製造できる可能性が示された。

図 - 2 に圧縮強度と破砕値の関係を示し、図 - 3 に圧縮強度と吸水率の関係を示す。普通強度域において、破砕値が増加しても、圧縮強度は概ね一定値を示した。また、NN シリーズの圧縮強度が  $60\text{N/mm}^2$  以上を示す調合においては、材齢に関わらず、粗骨材の破砕値が増加すると、圧縮強度が低下する傾向が見られた。高強度域では骨材の品質による影響を受けやすいことが分かった。また、

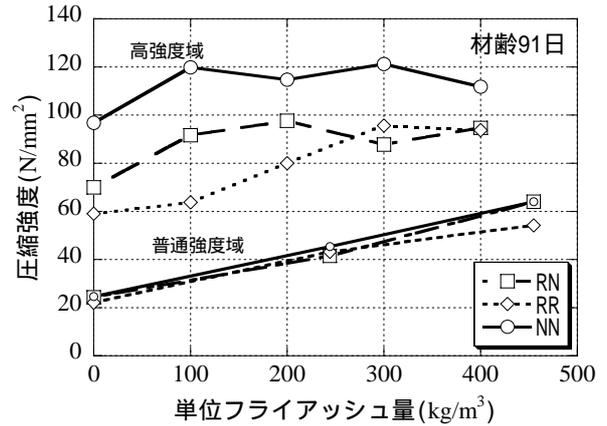
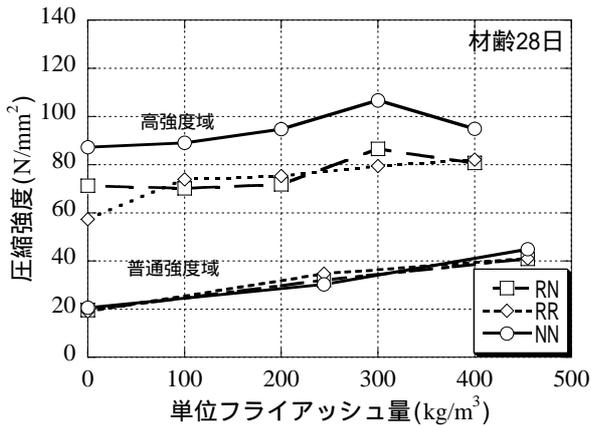


図 - 1 圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係

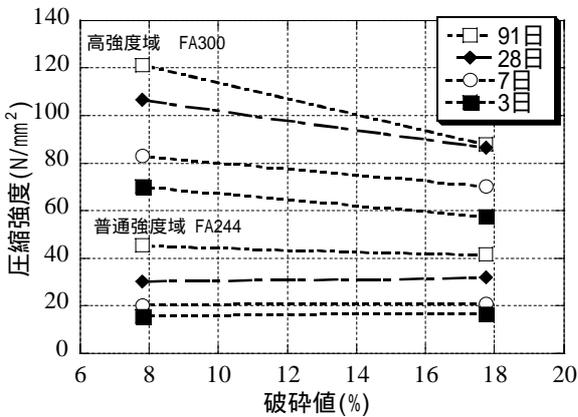


図 - 2 圧縮強度と破砕値の関係

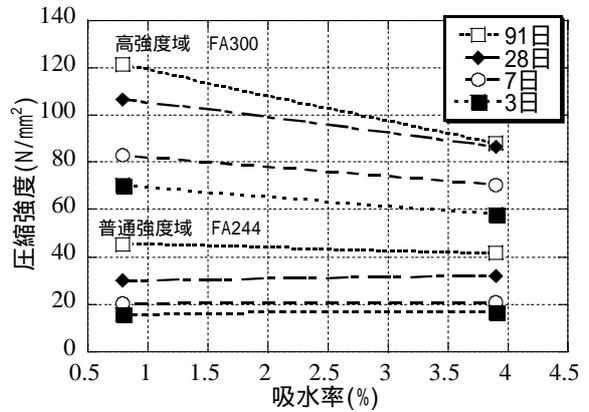


図 - 3 圧縮強度と吸水率の関係

吸水率に関しても同様の傾向を示した。

図 - 4 に NN シリーズの圧縮強度と NN シリーズに対する RN 及び RR シリーズの圧縮強度低減率の関係を示す。圧縮強度の増加に伴い、再生骨材コンクリートの普通骨材コンクリートに対する圧縮強度低減率が大きくなる傾向が見られた。60 N/mm<sup>2</sup> 以下では、圧縮強度低減率が 10% 以下に推移し、圧縮強度が NN シリーズより大きくなった場合も見受けられる。しかし、60 N/mm<sup>2</sup> 以上になると RN シリーズは、圧縮強度が最大 30% 低下し、RR シリーズは圧縮強度低減率がより大きく、圧縮強度は最大 46% 低下した。フライアッシュを外割混合した RN シリーズと RR シリーズは、普通強度域では、差異がみられないが、高強度域においては、RR シリーズの方が大きな低減率を示した。

### 3.2 普通エコセメント使用時の力学性状

#### 3.2.1 圧縮強度

図 - 5 に圧縮強度の経時変化を示す。全ての調査において、材齢 91 日の範囲において材齢の経過と共に圧縮強度が増加した。フライアッシュを外割混合した ENN65-35、ERN65-35、ERR65-35 及び ERR65-25 は材齢 91 日において 41 ~ 44N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を、ENN65-25 及び ERN65-25 のコンクリートは 51 ~ 53N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を示した。エコ

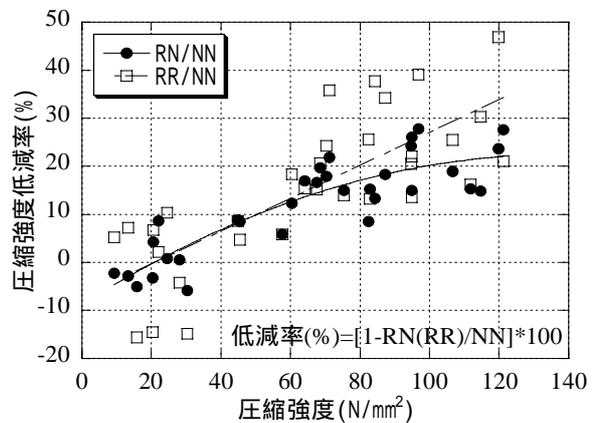


図 - 4 圧縮強度低減率と圧縮強度の関係

セメントと再生骨材を組み合わせ使用しても、W/C=65%においてフライアッシュを大量に外割混合することにより、圧縮強度 44 ~ 53N/mm<sup>2</sup> 程度のコンクリートを製造できる可能性が示された。

図 - 6 に材齢 28 日から 91 日にかけての圧縮強度増加量を示す。同骨材種において比較すると、セメント単味のコンクリートに比べ、フライアッシュを外割混合したコンクリートの方が材齢 28 日から 91 日にかけての圧縮強度の増加量が増進した。単位セメント量を一定にしても、フライアッシュを大量に外割混合することにより、

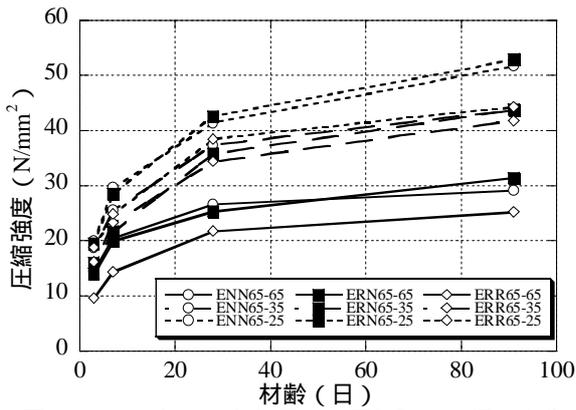


図 - 5 エコセメント使用時の圧縮強度の経時変化

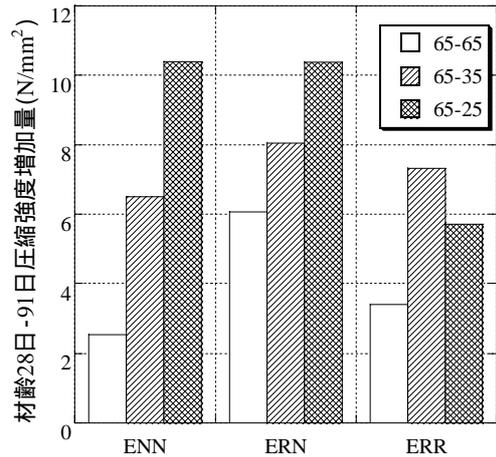


図 - 6 材齢 28 日から 91 の圧縮強度増加量

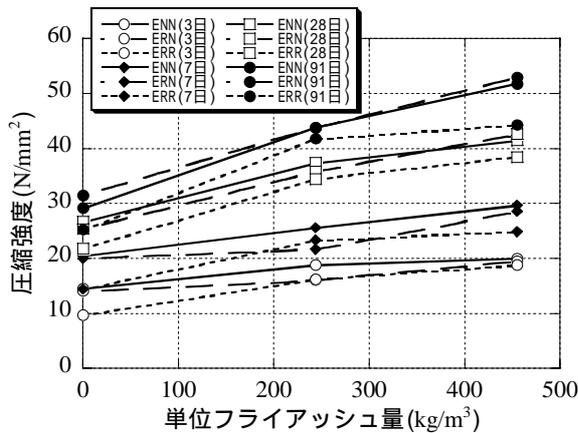


図 - 7 圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係

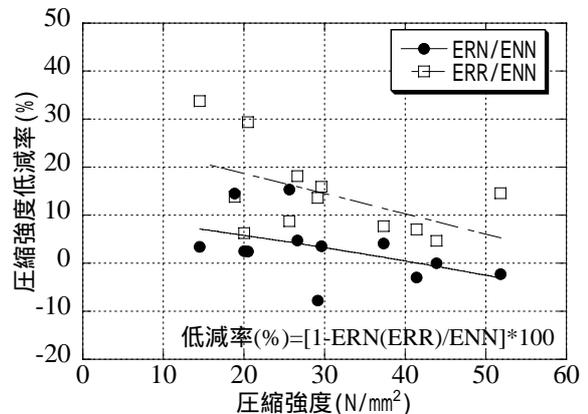


図 - 8 エコセメント使用時の圧縮強度低減率と圧縮強度の関係

長期強度を増進させることができた。これにより、エコセメント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長期強度を改善できる可能性が示された。しかし、ENN シリーズ及び ERN シリーズは、単位フライアッシュ量の増加と共に材齢 28 日から 91 日にかけての圧縮強度増加量は大きくなったが、ERR シリーズは、ERR65-25 よりも ERR65-35 の方が大きくなった。

図-7に圧縮強度と単位フライアッシュ量の関係を示す。全ての割合において単位フライアッシュ量の増加と共に圧縮強度が増加した。フライアッシュ無混合の場合、普通骨材コンクリートと粗骨材に再生粗骨材を使用した ERN シリーズは材齢に関わらず同程度の圧縮強度を示した。細骨材にも再生細骨材を使用した ERR シリーズは、全ての材齢で 5N/mm<sup>2</sup> 前後の圧縮強度低下が生じた。フライアッシュ無混合コンクリートの圧縮強度は本実験の割合範囲内で粗骨材の品質の影響より細骨材の密度と吸水率の影響を受け強度低下が生じたと考えられる。材齢 28 日及び 91 日において、フライアッシュを 100kg/m<sup>3</sup> 程度混合すれば、セメント単味の ENN シリーズと同程度の圧縮強度を ERR シリーズにおいても実現できると推察される。

図 - 8 にエコセメント使用時の圧縮強度と圧縮強度低

減率の関係を示す。エコセメントを用いたコンクリートでは、ERN シリーズの方が ERR シリーズより小さな値を示した。また、圧縮強度が増加するにつれて、圧縮強度低減率は減少する傾向が伺えた。普通ポルトランドセメントを用いた場合では、圧縮強度の増加に伴い圧縮強度低減率が大きくなったが、この差はセメントの相違によるものではなく、実験した強度域が異なることが原因として考えられる。また、普通強度域の普通ポルトランドセメントを用いた割合では、骨材の違いによる顕著な低減率の差は伺えなかったが、エコセメントを用いた割合では、ERR の方が高い低減率を示した。

### 3.2.2 割裂引張強度

図 - 9 に割裂引張強度の経時変化を示す。エコセメント単味のコンクリートの割裂引張強度は材齢 28 日から 91 日にかけて、同程度もしくは低下する傾向が見られたが、フライアッシュを外割混合したコンクリートはエコセメントと再生骨材を使用しても、材齢の経過と共に割裂引張強度が増加した。一方で、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は、材齢 28 日まではフライアッシュを混合した普通骨材コンクリートと同程度の割裂引張強度を示したが、材齢 91 日において

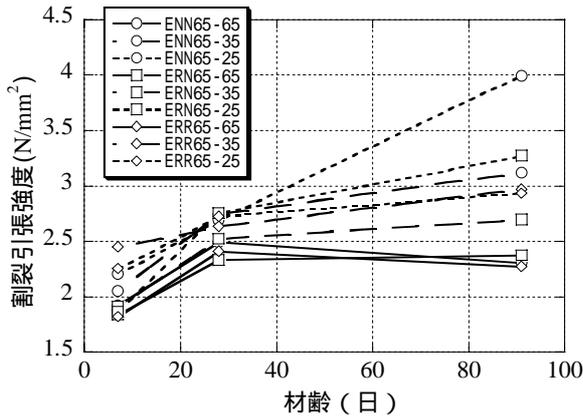


図 - 9 エコセメント使用時の割裂引張強度の経時変化

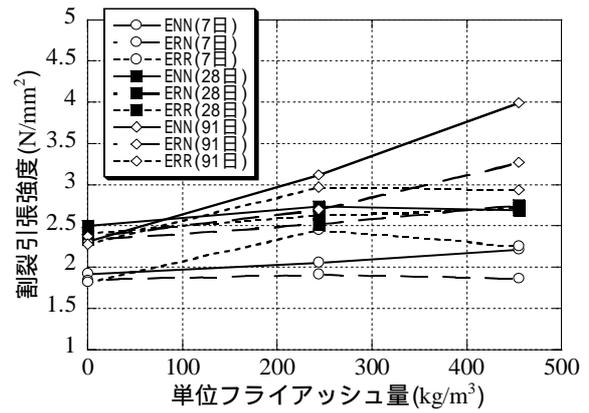


図 - 10 割裂引張強度と単位フライアッシュ量の関係

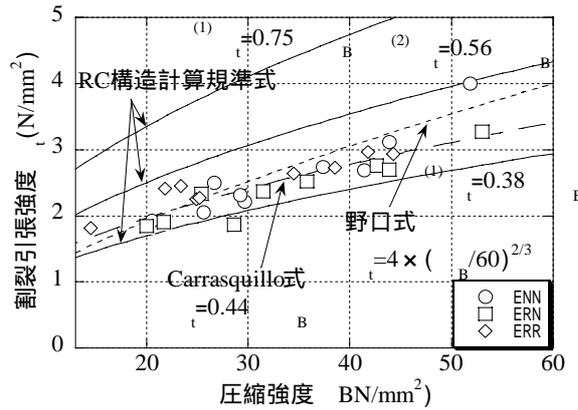


図 - 11 割裂引張強度と圧縮強度の関係

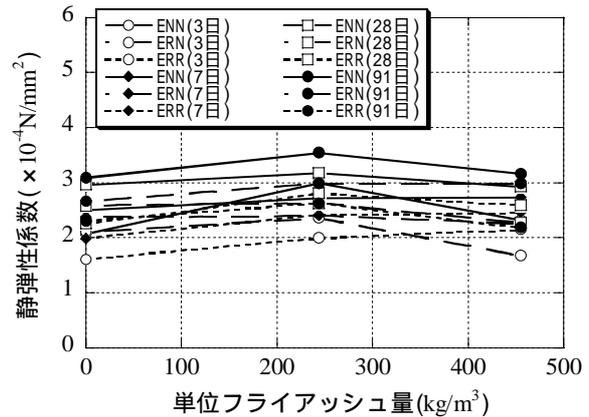


図 - 12 静弾性係数と単位フライアッシュ量の関係

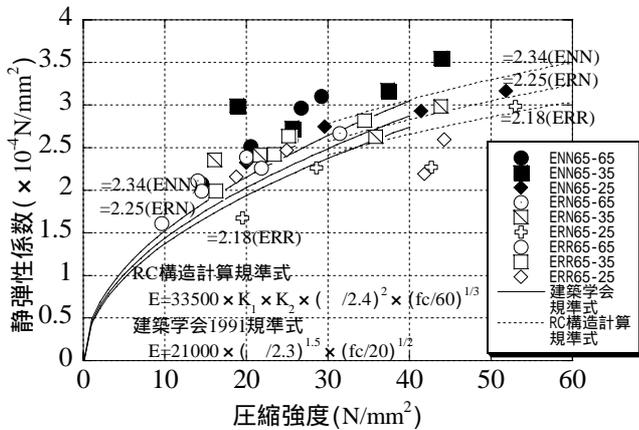


図 - 13 静弾性係数と圧縮強度の関係

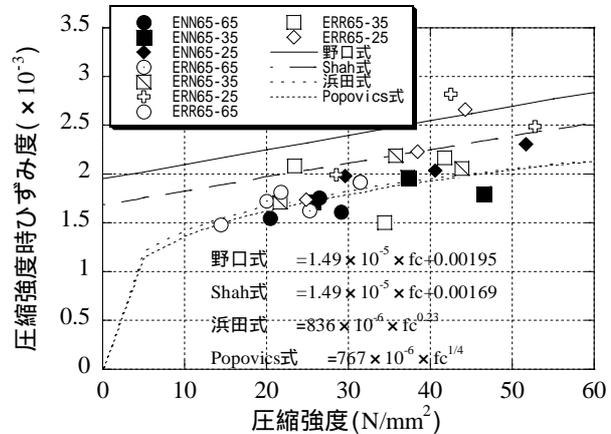


図 - 14 圧縮強度と圧縮強度時ひずみ度の関係

は、強度低下を生じた。特にERNシリーズの圧縮強度はENNシリーズと同程度であったが、割裂引張強度性状はENNシリーズに対して低い値を示し、再生粗骨材の影響も顕著に現れた。

図 - 10 に割裂引張強度と単位フライアッシュ量の関係を示す。材齢 28 日までは、フライアッシュを外割混合しても割裂引張強度の増進はあまり見られなかったが、材齢 91 日では骨材の種類に関わらず、セメント単味のコンクリートに比べ、割裂引張強度が増加した。

図 - 11 に割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。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

度の評価式を、野口式<sup>3)</sup>、Carrasquillo 式<sup>4)</sup>及び RC 構造計算規準式<sup>5)</sup>として示している。RC 構造計算規準式(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、平均式に対して下側に分布したが、概ねその範囲内に実験結果は納まった。野口式には、圧縮強度 30 ~ 50N/mm<sup>2</sup> の範囲で若干下側に分布する傾向があるが回帰式上に分布した。Carrasquillo 式は、回帰係数を 0.44 とすることで、回帰式上に分布した。

### 3.2.3 静弾性係数

図 - 12 に静弾性係数と単位フライアッシュ量の関係を

示す。単位フライアッシュ量の増加に伴う静弾性係数の増加は認められず、単位フライアッシュ量に関わらず同程度の静弾性係数を示す傾向が窺えた。また同材齢の静弾性係数は、ENNシリーズに比べてERNシリーズとERRシリーズは小さくなった。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。また、一般的に細骨材の代替としてフライアッシュのような微粉末を混入すると静弾性係数は低下するが、圧縮強度の増進により静弾性係数の低下分を補い、材齢91日の範囲内で単位フライアッシュ量が変化しても静弾性係数は同等な値を示したと考えられる。

図-13に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。また同図中に、ENNシリーズでは $\alpha=2.34$ 、ERNシリーズでは $\alpha=2.25$ 、ERRシリーズでは $\alpha=2.18$ 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RC構造計算規準式(30N/mm<sup>2</sup>以上)及び建築学会1991規準式(40N/mm<sup>2</sup>以下)も併せて示す<sup>5)</sup>。ERN65-25が他の試験体に比べて全体的に低い値となっているが、それ以外の試験体では、圧縮強度に対して静弾性係数が規準式よりも上側に分布した。また、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は普通骨材を用いたものに比べ、圧縮強度に対し、静弾性係数が低いところに分布した。一方で、同骨材種で見ると、65-65及び65-35に比べ65-25の方が回帰式の下側に分布する傾向が見受けられた。

#### 3.2.4 圧縮強度と最大ひずみ度の関係

図-14に圧縮強度と圧縮強度時のひずみ度を示す。図中には、普通コンクリートにおける既往の実験式である、野口式、Shah式、浜田式<sup>6)</sup>及びPopovics式<sup>7)</sup>を示している。若干のばらつきはあるものの、ENNシリーズ、ERN、ERR65-65及びERR65-35はPopovics式及び浜田式上に分布した。しかし、ERN65-25及びERR65-25は全体的に値が高く、Shah式及び野口式との対応を示す傾向が見られた。従って、これらのコンクリートはフライアッシュを外割混合することによりその変形能力を向上させたと考えられる。

#### 4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を要約して示す。

- 1) 普通強度域で、再生骨材コンクリートはセメントの種類に関わらず、単位フライアッシュ量の増加と材齢の経過に伴い圧縮強度が増加し、単位フライアッシュ量が多いほど、再生骨材を使用しても圧縮強度が大きくなった。高強度域では単位フライアッシュ量が多すぎると、圧縮強度が低下する傾向がみられ、フライアッシュが多すぎると悪影響を及ぼす場合があった。材齢

に関わらず、高強度域の調合においては、粗骨材の破砕値が大きくなると、圧縮強度が低下する傾向が見られ、吸水率に関しても同様の傾向を示した。

- 2) 本実験の範囲内において、エコセメントの使用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、圧縮強度44~53N/mm<sup>2</sup>程度のコンクリートを製造できること、またそれらのコンクリートが普通コンクリートと同様な圧縮強度と割裂引張強度の関係を示すこと等が確認された。変形性状に関しては、フライアッシュを外割混合することで圧縮強度に対し静弾性係数が低い値を示すこと、再生骨材とフライアッシュを使用することで圧縮強度時のひずみ度が大きくなる傾向等が確認された。

#### 謝辞

本研究は、平成19年度、文部科学省研究費補助金若手研究(B)「再生骨材コンクリートの高品質化に関する研究」課題番号19760395(研究代表者 高巢幸二)の支援を受けて行った。また本実験を遂行するにあたり、本学EA・三倉英史氏及び大学院生・相馬生氏、山内信英氏から協力を得た。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) 例えば、高巢幸二他：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、Vol.30、No.1、pp201-206、2008
- 3) 野口貴文他：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、pp.11-16、1995.6
- 4) Carrasquillo, R.L: Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, Journal of ACI, Vol.78, No.3, pp.171-178, 1981
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - , 丸善, 1999
- 6) 谷川恭雄他：高ひずみ領域に至るまでのコンクリートの応力度 - ひずみ度曲線の表示式, セメント技術年報, Vol.34, pp.242-245, 1980
- 7) Popovics.S: A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete, Cement and Concrete Reserch, Vol.3, pp583-599, 1973