

論文 品質の異なる再生骨材を使用したコンクリートの強度性状

鶴田 浩章^{*1}・松下 博通^{*2}・陶 佳宏^{*3}・近田 孝夫^{*4}

要旨：コンクリート塊から製造した再生骨材がコンクリート強度に与える影響について、特に再生骨材の品質に着目して検討を行った。細骨材は品質区分案の2種、粗骨材は2種と3種に該当するものであり、再生骨材を天然骨材と100%置換したものと再生骨材と天然骨材を50%ずつ混合使用したものについて強度の測定を行った。その結果、再生粗骨材が2種の場合には天然粗骨材の場合と大きな違いはなかったが、3種の場合には明らかに天然粗骨材の場合と強度に差異が見られたことから、品質の異なる再生粗骨材による強度への影響が異なる場合があることが明らかとなった。

キーワード：再生骨材, 品質, 圧縮強度, 混合使用, コンクリート塊

1. はじめに

平成12年度建設副産物実態調査結果¹⁾によると、コンクリート塊の再資源化率は平成7年度の65%から96%に上昇している。しかし、再利用の主な用途が、コンクリート材料としての再生骨材というわけではなく、路盤材や埋め戻し材が主な用途のようである。天然骨材を有効に利用していくためにも、多くの再生骨材をコンクリート用材料として使用していくことが必要であると考えられる。また、再生骨材を用いたコンクリートのTRが公開され²⁾、JIS化へ向けたデータの蓄積が求められている。

そこで、本論文では品質の異なる再生粗骨材として、旧建設省コンクリート用再生骨材品質区分案³⁾で2種と3種に該当するものを使用して、水セメント比を変化させた場合のコンクリートの強度への影響について検討を行った。また、再生骨材の用途拡大を目指す意味での使用方法として、天然骨材を再生骨材で100%置換する場合と50%置換する場合のように、置換方法を変化させた場合についても検討を行い、強度への影響について考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 実験1

セメントに高炉セメントB種(密度 3.02g/cm^3 , スラグ置換率45%), 天然骨材として細骨材は海砂(表乾密度 2.59g/cm^3 , 吸水率1.20%, 粗粒率2.60), 粗骨材は門司産碎石(表乾密度 2.72g/cm^3 , 吸水率0.64%, 実積率57.0%), 混和剤は減水剤(リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体, 添加率0.25%(対セメント質量比))とAE剤(アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤)を併用した。

使用した再生骨材の主な物性値は表-1のとおりであり、原コンクリートは昭和36年架設の橋梁でコアの圧縮強度は 26.4N/mm^2 であった。再生骨材は、原コンクリート塊を定地式ジョークラッシャで一次破碎し、インパクトクラッシャで二次破碎した後に分級したもので、粗骨材の最大寸法は40mmである。なお、再生細骨材には微粉分も含んでいる。表-2の再生骨材の品質区分案によると、再生細骨材、再生粗骨材とも2種に分類されるものであった。

*1 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (正会員)

*4 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター長 博士(工学) (正会員)

表-1 使用した再生骨材の物性値

実験	実験1		実験2	
	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
絶乾密度 (g/cm^3)	2.15	2.36	2.12	2.34
吸水率 (%)	8.31 (2種)	4.80 (2種)	8.58 (2種)	5.50 (3種)
実積率(%)	65.3	60.1	64.3	58.0
すりへり 減量(%)	—	26.4	—	37.0
粗粒率	3.27	7.18	3.05	6.60

※吸水率の()内は、表-2 品質区分案の該当区分

表-2 再生骨材の品質区分案³⁾

種別 項目	再生粗骨材			再生細骨材	
	1種	2種	3種	1種	2種
吸水率(%)	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下

(2) 実験2

セメントに普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)、天然骨材として細骨材は海砂(絶乾密度 $2.47\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 2.70%、粗粒率 2.52)、粗骨材は篠栗産碎石(絶乾密度 $2.89\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.02%、実積率 57.4%)、混和剤には AE 減水剤(リグニンスルホン酸系、添加率 0.25% (対セメント質量比))と空気連行剤(アルキルアリルスルホン酸系)を使用した。

使用した再生骨材の主な物性値は、表-1 に示すとおりであり、原コンクリートは昭和 26 年建設の市営アパートの基礎でコアの圧縮強度は $23.1\text{N}/\text{mm}^2$ であった。再生骨材は、原コンクリート塊をジョークラッシャで一次破碎し、コーンクラッシャで二次破碎した後に分級したも

表-3 コンクリートの示方配合(実験1)

骨材	配合条件(%)		単位量(kg/m^3)				
	W/C	s/a	W	C	S	G	Ad
再生 + 再生	44.5	43.0	163	366	672	948	0.915
	50.0	44.0		326	701	950	0.815
	57.1	45.5		285	739	943	0.712
	66.7	47.5		244	787	926	0.610
再生 + 天然	44.5	45.9	162	364	719	990	0.910
	50.0	47.0		324	751	989	0.810
	57.1	48.4		284	788	981	0.710
	66.7	50.3		243	835	963	0.608
天然 + 再生	44.5	37.9	145	326	689	1081	0.815
	50.0	39.0		290	721	1080	0.725
	57.1	40.4		254	760	1073	0.635
	66.7	42.3		217	809	1056	0.542
天然 + 天然	44.5	39.0	143	321	713	1171	0.802
	50.0	40.0		286	743	1171	0.715
	57.1	41.4		250	782	1162	0.625
	66.7	43.5		214	835	1139	0.535

ので、粗骨材の最大寸法は 20mm である。表-2 によると、再生細骨材は 2 種、再生粗骨材は 3 種に分類されるものであった。なお、0.15mm 以下の微粉分は除いて使用したが、微粉を除かないものを 1 配合だけ検討した。その場合には、混和剤としてポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤とポリアルキレングリコール系の空気量調整剤を併用した。

2.2 コンクリートの配合

(1) 実験1

示方配合を定めるため天然骨材を使用する場合と同様に試し練りを行い、目標スランプ $8 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1\%$ として細骨材率および

表-4 コンクリートの示方配合(実験2)

再生細骨材 置換率 (%)	再生粗骨材 置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
				W	C	S		G		AE 減水剤	空気連行剤 *1
						海砂	再生材	碎石	再生材		
0	0	50	45	169	338	781	0	1095	0	1.056	3A
0	50	50	45	170	340	780	0	545	461	1.063	4A
50	0	50	44	174	348	377	342	1101	0	1.088	5A
100	0	50	44	178	356	0	677	1090	0	1.113	6A
0	100	50	45	169	338	781	0	0	925	1.056	3A
100	100	50	44	178	356	0	677	0	922	1.113	6A
100	100	44.4	43	178	401	0	647	0	918	1.253	6A
100	100	57.1	45	178	312	0	707	0	924	0.975	6A
100	100	50	44	178	356	0	677	0	922	0.107*2	6B*3

*1: 1A はセメント 1kg に対して 0.01cc, *2: 高性能 AE 減水剤,

*3: 1B はセメント 1kg に対し空気量調整剤を 0.01cc

単位水量を決定した。決定したコンクリートの示方配合は表-3に示す。なお、再生骨材を使用する場合には、天然骨材の全てを再生骨材で置換しており、表-3中の「骨材」は、(細骨材)+(粗骨材)の順に使用した骨材の種類を示している。

(2) 実験 2

実験1と同様にして、日標スランブ $8 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量 $4 \pm 0.5\%$ として細骨材率および単位水量を決定した。決定したコンクリートの示方配合は表-4に示す。表-4中の最下段(網掛け)の配合が再生細骨材から微粉を除かずに使用したものである。また、再生骨材置換率を 0, 50, 100%と変化させ、表-4のように組合せた配合について検討した。

表-5 コンクリートのフレッシュ性状(1)

骨材	配合条件(%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
	W/C	s/a			
再生 + 再生	44.5	43.0	8.0	4.0	19.0
	50.0	44.0	8.5	5.2	19.0
	57.1	45.5	8.5	5.4	19.0
	66.7	47.5	9.0	4.9	19.0
再生 + 天然	44.5	45.9	7.0	4.1	19.2
	50.0	47.0	8.0	4.7	19.2
	57.1	48.4	7.0	4.2	19.2
	66.7	50.3	6.5	4.0	19.2
天然 + 再生	44.5	37.9	9.0	4.0	19.3
	50.0	39.0	9.5	5.0	19.4
	57.1	40.4	8.0	4.5	19.3
	66.7	42.3	7.5	4.5	19.3
天然 + 天然	44.5	39.0	8.5	4.1	19.1
	50.0	40.0	8.5	4.0	19.2
	57.1	41.4	7.0	3.9	19.2
	66.7	43.5	7.0	4.2	19.4

表-6 コンクリートのフレッシュ性状(2)

再生骨材 置換率	配合条件(%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
	W/C	s/a			
0-0	50.0	45.0	8.0	3.9	17.5
0-50	50.0	45.0	9.0	4.5	17.0
50-0	50.0	44.0	8.5	4.3	20.0
100-0	50.0	44.0	7.5	3.8	20.0
0-100	50.0	45.0	7.5	4.8	18.0
100-100	50.0	44.0	7.0	3.5	18.0
100-100	44.4	43.0	8.0	4.0	18.0
100-100	57.1	45.0	7.5	4.3	17.0
100-100	50.0	44.0	8.5	4.5	17.0

2.3 試験方法

実験1および2いずれにおいても供試体は $10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を各水準につき3本作製して、材齢1日で脱型した後 20°C の水中で標準養生を行った。その後、材齢7日および28日、91日において JIS A 1108 に準じて圧縮強度の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

実験1のコンクリートのフレッシュ性状を表-5に、実験2のコンクリートのフレッシュ性状を表-6に示す。ただし、表-6の再生骨材置換率の欄は、例えば 50-0 の場合、再生細骨材の置換率 50%-再生粗骨材の置換率 0%(全て天然粗骨材)を意味するものとする。

また、実験1および2の配合決定に際して明らかになった知見を以下に示す。

- 再生骨材を使用したコンクリートの最適細骨材率も天然骨材の場合と同様に、他の条件を一定として細骨材率を変化させる試し練りによって定めることができた。
- 骨材全量を天然骨材とした場合も再生骨材とした場合も、水セメント比の変化 $\pm 5\%$ に対応する最適細骨材率の変化は $\pm 1\%$ となった。
- 実験1では再生細骨材を用いた場合は海砂を使用した場合より最適細骨材率は大きくなったが、粗骨材は再生骨材と天然骨材で大差ない結果となった。
- 単位水量は、再生細骨材を使用したコンクリートでは海砂の場合より実験1で約 18kg/m^3 、実験2では約 9kg/m^3 大きくなった。一方、粗骨材を使用したコンクリートではどちらの実験においても再生骨材と天然骨材で必要な単位水量に大きな差異は生じなかった。
- 日標スランブが同じで水セメント比が異なる場合は、試し練りによって決定した配合と単位水量を同一とし、水セメント比 $\pm 5\%$ に対して細骨材率を $\pm 1\%$ 変化させて定めることができた。

3.2 セメント水比と圧縮強度との関係

(1) 実験 1

圧縮強度の測定結果より、セメント水比と圧縮強度との関係を図-1および図-2に示す。プロットは試験した3本の圧縮強度の平均値である。図-1および図-2のように、天然骨材を使用した場合と同様に、再生骨材を組合せて使用した場合においても、コンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係は直線関係となった。また、水セメント比 50% ($C/W=2.0$) の場合の再生+再生と天然+天然との比較から、再生材料の使用による強度低下は、3~12%程度と小さいものであることがわかった。

図-3~5は図-1と図-2を材齢ごとに整理して示したものである。天然+天然と再生+天然の強度差、つまり細骨材に再生材料を使うか、天然材料を使うかという点による差は材齢7日で 3.0N/mm^2 、28日で 5.4N/mm^2 、91日で 9.0N/mm^2 と材齢の経過とともに大きくなっている。したがって、再生細骨材を使用した場合は、天

然細骨材を使用した場合よりも強度が低く、セメント水比が大きくなるほど、材齢が経過するほど、細骨材の違いによる圧縮強度の差異が大きくなっていることになる。

一方、粗骨材については図-3~5より分かるように、より粗骨材の影響が大きくなると考えられる⁴⁾高 C/W 領域における再生+再生と再

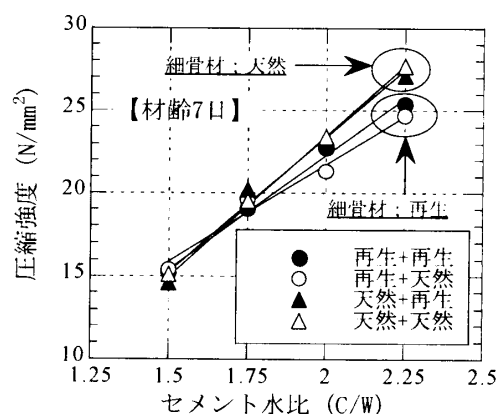


図-3 材齢ごとのセメント水比と圧縮強度の関係(材齢7日)

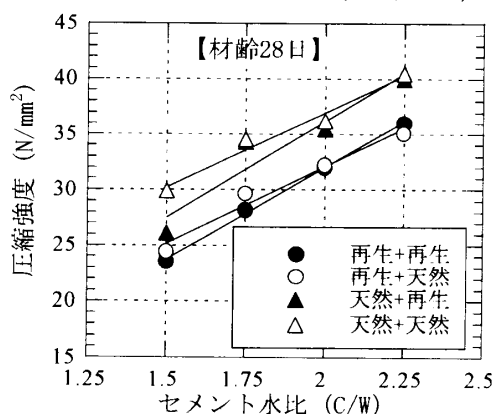


図-4 材齢ごとのセメント水比と圧縮強度との関係(材齢28日)

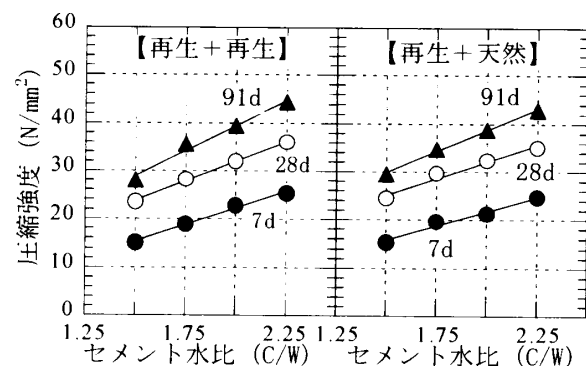


図-1 セメント水比と圧縮強度の関係(再生+再生, 再生+天然)

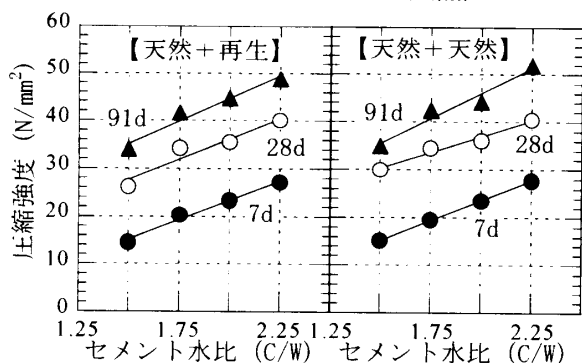


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係(天然+再生, 天然+天然)

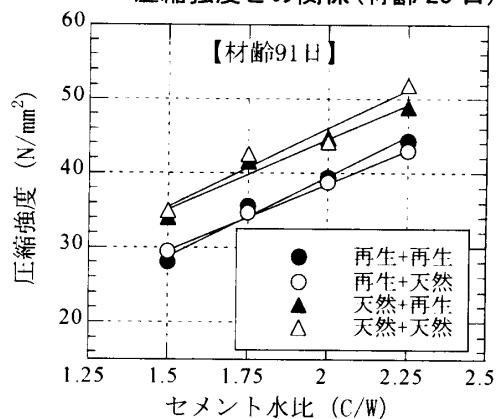


図-5 材齢ごとのセメント水比と圧縮強度との関係(材齢91日)

生+天然との強度差，天然+再生と天然+天然との強度差は非常に小さく，材齢 91 日の天然+再生と天然+天然との強度差を除けば，全て 1N/mm^2 未満である。材齢 91 日の天然+再生と天然+天然との強度差でさえ， 3.1N/mm^2 であり，細骨材の違いによる強度差と比較すると非常に小さい。以上のように天然粗骨材と再生粗骨材が圧縮強度に及ぼす影響への大きな差異は認められない。

図-6 は，再生細骨材と再生粗骨材の圧縮強度への影響度を検討するために，再生骨材を使用したケースの強度をそれぞれ比較の対象となる圧縮強度で除して強度比として示したものである。例えば，左上の図の強度比（再+天/天+天）は再生+天然の強度を天然+天然の強度で除して強度比として W/C ごとに示したものである。したがって，上段の 2 つの図が再生細骨材の圧縮強度への影響度を示し，下段の 2 つ

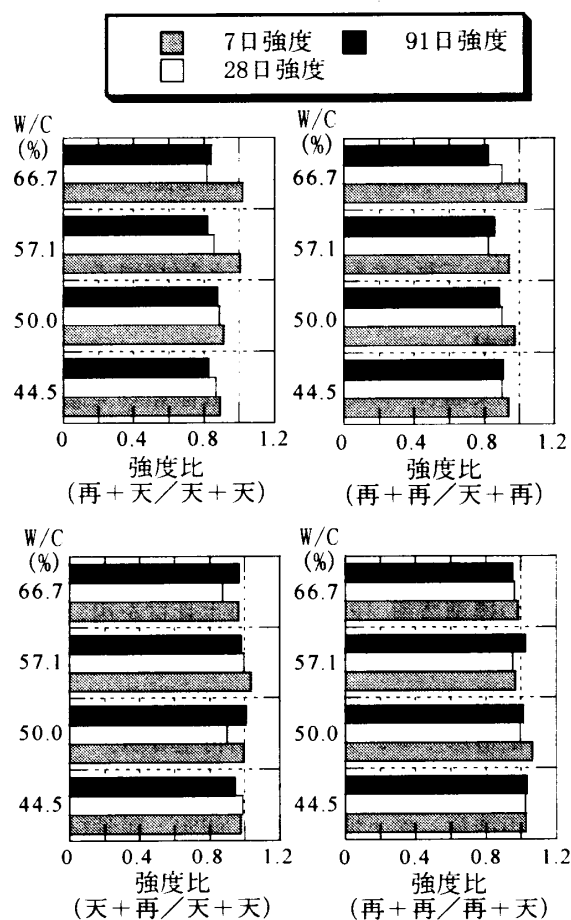


図-6 再生骨材の圧縮強度への影響(1)

の図が再生粗骨材の圧縮強度への影響度を示すことになる。図に示されるように，下段の再生粗骨材の影響度を示す 2 つの図においては，強度比がいずれのケースでも 1 に近く，上段の図と比較することにより，再生細骨材の圧縮強度への影響度が著しく大きいことが分かる。

(2) 実験 2

図-7 は実験 2 における再生骨材置換率 100-100(全ての骨材が再生骨材)と 0-0(全ての骨材が天然骨材)の場合のセメント水比と圧縮強度との関係を示したものである。プロットは，試験を行った 3 本の圧縮強度の平均値である。

図-1 および図-2 と同様に，セメント水比と再生骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は直線関係である。なお，100-100 と 0-0 を比較すると，100-100 の 0-0 に対する強度低下は 23~30% 程度である。また，微粉を除かないで使用した 100-100 の場合の材齢 7, 28, 91 日強度はそれぞれ 30.0 , 32.3 , 34.6N/mm^2 であった。

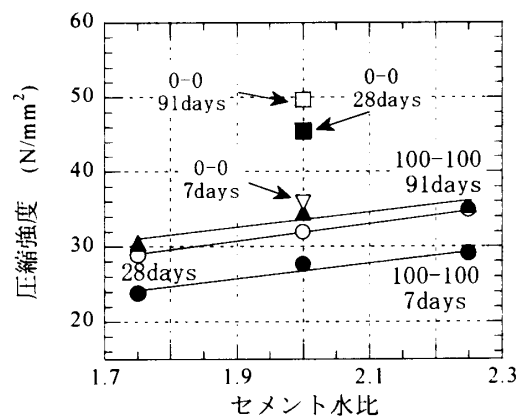
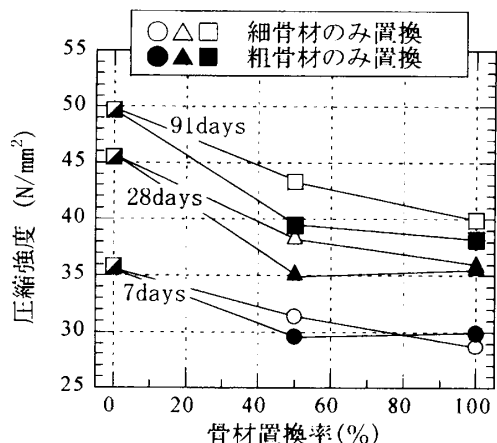


図-7 セメント水比と圧縮強度との関係

図-8 は再生骨材の置換率とコンクリートの圧縮強度との関係について示したものである。細骨材のみを再生材料に置換した場合，全ての材齢において置換率が増加するにつれて圧縮強度がほぼ直線的に減少している。一方，粗骨材を再生材料に置換して使用した場合，置換率 50%において，細骨材のみを置換した場合より大きな割合で圧縮強度の低下が発生した。しか



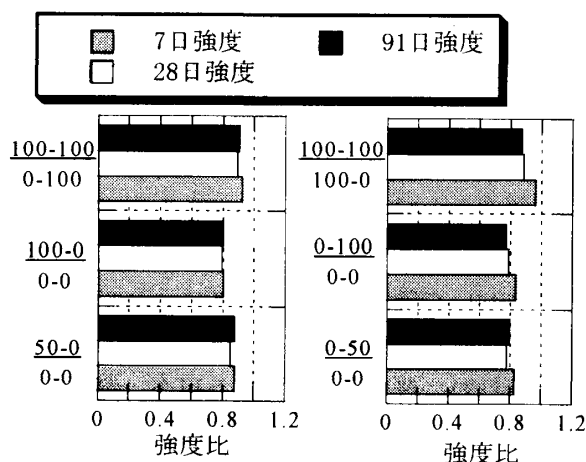
図－8 置換率による圧縮強度の変化

し、置換率 100%においては 50%の場合とほぼ同程度の圧縮強度であり、置換率が 50%から 100%に増加するのに伴う圧縮強度の変化は細骨材のみを置換した場合と異なる傾向であった。以上のことから、実験 2 においては再生粗骨材の方が再生細骨材よりも圧縮強度に及ぼす影響が大きいことを示唆する結果となった。

図－9 は図－6 と同様に再生骨材の圧縮強度への影響度を検討するために再生骨材を使用した場合の強度をそれぞれ比較の対象となる圧縮強度で除して強度比として示したものである。

例えば、 $\frac{50-0}{0-0}$ は再生細骨材置換率 50%の場合

の強度を 0-0 の強度で除して強度比として示したものであり、左図は再生細骨材の影響を、右図は再生粗骨材の影響を示している。図から明



図－9 再生骨材の圧縮強度への影響(2)

らかなように、再生骨材を使用した場合はいずれも強度比 1.0 に及ばず、図－6 と比較しても明らかに再生粗骨材においても圧縮強度が低下している。

以上のように、低品質の再生粗骨材を使用した場合には、圧縮強度に及ぼす影響は再生細骨材を使用した場合よりも大きくなることが確認された。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) コンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係は、再生骨材を用いた場合でも、直線関係となり、圧縮強度の減少に対する影響は再生細骨材の方が大きかった。
- 2) 再生細骨材の場合、置換率の増加とともに圧縮強度は直線的に減少したが、再生粗骨材の場合、置換率 50%から 100%への強度減少が小さくなる傾向が見られた。
- 3) 低品質の再生粗骨材を使用した場合には、圧縮強度に及ぼす影響は再生細骨材を使用した場合よりも大きくなることが確認された。

なお、本研究は科学研究費補助金基盤研究 A (研究代表者; 松下博通, 平成 11~13 年度, 課題番号; 11035032) の一環として行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) 国土交通省:平成 12 年度建設副産物実態調査結果について, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha01/01/011225_.html, 2001.12
- 2) コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会:エコセメントの標準情報 TR および再生骨材を用いたコンクリートの TR の概要, コンクリート工学, Vol.39, No.11, pp.53-59, 2001.11
- 3) 阿部道彦:コンクリート用再生骨材, コンクリート工学, Vol.35, No.7, pp.42-48, 1997.7
- 4) 鶴田浩章, 松下博通, 陶 佳宏:粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.991-996, 1998