普通骨材を混合使用した再生骨材コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に関する基礎的研究†

高 見 新 一* 熊 本 秀 幸** 西 林 新 蔵*

A Study on the Properties of Fresh and Hardened Concrete Mixed Normal and Recycled Aggregate

by

Shinichi TAKAMI*, Hideyuki KUMAMOTO** and Shinzo NISHIBAYASHI*

Recycled aggregates, may give an important contribution towards decreasing the negative consequences that production and dumping of constructions and demolition waste nowadays impose on the environment.

This paper describes an experimental investigation on the properties of fresh and hard of recycled concrete mixed normal aggregates with recycled ones. The results of the investigation are as follows:

The recycled concrete owns almost same characteristics of consistency and entrained air as normal concrete. The mixture of recycled aggregates negatively affects the performance of fresh concrete. Meanwhile, the decrease of strength and elastic modulus in the hardened concrete is slightly small due to the increase of replacement of recycled coarse aggregates. Also in the using of large amount of recycled aggregate, it causes the deduction of durability, and the increase of drying shrinkage and carbonation.

Key words : Recycled aggregate, Mixed concrete of normal and recycled concrete, Fresh and hardened property, Durability

1 緒 言

21世紀は「環境の世紀」ともいわれ、環境に負荷を与えないライフスタイルや社会、産業の新しい姿を探すという重大な課題に対応しなければならない。建設業界においては建設廃棄物の再利用（リサイクル）に関する問題は深刻で、昭和40年代の経済成長期に建設された構造物の耐用期限の到来による構造物の廃棄あるいは改築から建設廃棄物は年々増加し、最近はやや減少したものの、平成12年度には8500万トンで、そのうちコンクリートは約42%である。¹⁾コンクリート塊の再資源化は96%に達している²⁾が、その大半は路盤材や裏込め材として使用されている。しかし、道路建設の鈍化にともない路盤材の需要が低下、2007年以降においては路盤材への利用だけでは再利用は困難になることが指摘されている。このことから、再生骨材をコンクリート構造物に用いることがリサイクルの上で重要となってくる。

現在、再生骨材を用いたコンクリート（以後、再生コンクリートと称する）は規格外のコンクリートとされ、擁壁、土間、ベース、捨てコンクリート、石積みなどの高い強度や耐久性が要求されない部材や部位に限定して使用されている。しかし、今後コンクリート塊のリサイクルを積極的に進めるためには、再生コンクリートを構造部材として使用することを考えて行かなければならない。

本研究は、再生骨材コンクリートの諸物性を普通骨材との混合使用によって向上させ、このことによって再生骨材の需要増を図る目的で計画した。すなわち、普通骨

材に対する再生骨材の置換割合を変化させたコンクリートの諸性質を検討し、再生骨材のコンクリート構造部材への適応性を探る目的で計画したものである。

研究内容としては、再生コンクリートのフレッシュ性状、力学的特性ならびに乾燥収縮、凍結融解、中性化などの耐久性に関する特性を明らかにした後に、これらの結果から、再生骨材を混合した再生コンクリートの利用区分の提示を行うものである。そのことは再生骨材の需要を少しでも高めることに寄与するものと考えられる。

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（密度：3.15g/cm³，粉末度：3400cm²/g）を使用した。

粗骨材には大阪府高槻産砕石（最大寸法：20mm，密度：2.69g/cm³，吸水率：0.81%，F.M：7.04），細骨材には京都府木津川産の川砂（密度：2.55g/cm³，吸水率：1.89%，F.M：2.86），再生粗骨材は原コンクリートに天然骨材（川砂利）が使用されたもの（最大寸法：20mm，密度：2.53g/cm³，吸水率：3.18%，F.M：6.77，モルタルの付着率：20～24%）を水洗いにより微粒分を除去して使用した。

再生細骨材は再生粗骨材を破碎して製造したもの（密度：2.41g/cm³，吸水率：5.50%，F.M：3.23）を用いた。なお、再生骨材の製造は異物を取り除いた原コンクリートを破碎した後に、湿式磨鋸機と比重選別機によりモルタル分が除去処理されたものである。これらの再生粗骨

† 原稿受理 平成14年11月29日 Received Nov. 29, 2002

* 正 会 員 大阪産業大学工学部土木工学科 〒574-8530 大東市中垣内, Dept. of Civil. Eng., Osaka sangyo Univ., Nakagaito, Daito, 574-8530

** 大阪産業大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒574-8530 大東市中垣内, Dept. of Civil. Eng., Osaka sangyo Univ., Nakagaito, Daito, 574-8530

材, 再生細骨材は国土交通省 (旧: 建設省) の「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準 (案)」の 2 種に分類される。

実験に用いた再生粗骨材は水に 24 時間浸漬した後に, 骨材の表面を布で拭いて表面乾燥飽水状態として使用した。また, 再生細骨材は表乾状態に調整して使用した。普通骨材と再生骨材の粒度分布曲線を Fig. 1 に示す。化学用混和剤は, ポリカルボン酸系の AE 減水剤を用いた。

2・2 実験計画

Table I に示方配合を示す。配合は, 目標スランプ $10 \pm 2.0\text{cm}$, 目標空気量 $5 \pm 1.5\%$, 細骨材率 45% は一定とした。再生粗骨材の置換率の影響を検討するため, 目標強度を 3 水準として, 普通骨材 (碎石) に対して再生粗骨材を 20% 間隔で容積置換した。また, 再生細骨材の置換率の影響を検討するため, 目標強度を 2 水準として, 普通細骨材 (川砂) に対して再生細骨材を 20% 間隔で容積置換した。化学用混和剤の添加量は, 基準コンクリート (再生骨材を使用しないコンクリート) の目標スランプ $10 \pm 2.0\text{cm}$ となるように試験練りから標準添加量を $C \times 0.3\%$ にした。

コンクリートの練混ぜは, パン型強制練りミキサ (練混ぜ容量 100 リットル) を使用した。練混ぜは, 細骨材とセメントを 30 秒間の空練り後, 粗骨材を投入して 30 秒間の空練りの後に練混ぜ水を注水して 90 秒間の本練りを行なった。

2・3 実験項目および試験方法

Table II にフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの試験項目を示す。

3 実験結果

3・1 再生粗骨材の吸水率

再生粗骨材を使用する場合に問題となるのが吸水率の調整である。吸水率に影響を及ぼす再生粗骨材のモルタル付着率は, 原コンクリートに使用されている骨材の種類 (天然骨材, 碎石, 岩質), 配合, 強度および再生粗骨材の製造方法で異なる。本実験で使用した再生粗骨材の水中浸漬時間と吸水率の関係を Fig. 2 に示す。

再生粗骨材は水中浸漬の 1 時間以内で急速に吸水し, 24 時間以降では吸水率の変化は小さい。従って, 24 時間水に浸漬すればそれ以降の吸水の増加はほとんどないと考えられる。

Fig. 1. Grading of aggregates.

Table I. Mix. Proportions.

Required strength (N/mm ²)	Re - placing (%)	W/C (%)	Mass per unit volume (kg/m ³)							
			W	C	S		G		W.R.A cx (%)	
					N	R	N	R		
20	0	81	169	208	820	0	1058	0	0.30	
	20						846	197	0.30	
	40						635	395	0.30	
	60						423	592	0.30	
	80						212	790	0.29	
	100						0	987	0.29	
30	0	61		275	796	0	1027	0	0.30	
	20						822	192	0.30	
	40						616	383	0.30	
	60						411	575	0.30	
	80						205	767	0.30	
	100						0	958	0.29	
50	0	41	412	746	0	962	0	0.30		
	20					770	180	0.30		
	40					577	359	0.30		
	60					385	539	0.30		
	80					192	718	0.30		
	100					0	898	0.30		
20	0	81	169	208	796	0	1058	0	0.30	
	20				637	150			0.28	
	40				478	301			0.31	
	60				318	451			0.28	
	80				159	602			0.26	
	100				0	752			0.28	
30	0	61		275	796	796	0	1027	0	0.30
	20					637	150			0.28
	40					478	301			0.32
	60					318	451			0.28
	80					159	602			0.30
	100					0	752			0.27
N : Normal aggregate, R : Recycled aggregate										

N : Normal aggregate, R : Recycled aggregate

Table II. Test method.

Fresh concrete	
Slump	JIS A 1101
Air content	JIS A 1128
Bleeding	JIS A 1123
Hardened concrete	
Compressive strength	JIS A 1108
Splitting tensile strength	JIS A 1113
Static modulus of elasticity	JIS A 1149
Carbonation thickness	—
Length change of mortar and concrete	JIS A 1129-2
Resistance of concrete to freezing and thawing	JIS A 1148

Fig. 2. Relationship between elapsed days and water absorption.

3・2 フレッシュコンクリート

3・2・1 スランプ試験 スランプ試験の結果を Fig. 3 に示す。

各配合の実測スランプは全て目標スランプ $10 \pm 2.0\text{cm}$ の範囲に収まっている。試験練りで決定した混和剤の標準使用量（再生骨材を用いない配合）は $C \times 0.3\%$ で、再生粗骨材を置換した配合での使用量は $C \times 0.29 \sim 0.30\%$ 、再生細骨材を置換した配合の場合は $C \times 0.26 \sim 0.32\%$ で、スランプ調整に用いた混和剤使用量の変動は小さかった。これらのことから、通常使用されるスランプの範囲では、再生骨材の置換率が大きくなっても普通コンクリートと同様のコンシステンシーが得られるものと考えられる。

3・2・2 空気量試験 再生骨材コンクリートの空気量試験結果を Fig. 4 に示す。

再生粗骨材を用いた配合の実測空気量は、ほぼ目標の空気量 $5.0 \pm 1.5\%$ の範囲内となり、再生粗骨材の置換率が大きくなっても空気量の変化は少ない。従って、再生

Fig. 4. Relationship between replacing ratio of recycled aggregate and air content.

骨材のモルタル付着による空気量への影響は小さいと考えられる。なお、目標強度 50N/mm^2 のようにセメント量が多い配合において空気量は僅かではあるが小さくなった。

再生細骨材を用いた配合では、再生細骨材の置換率が大きくなるに伴い空気量は増加する。これは、再生細骨材には原コンクリートのモルタル分が多く含まれているため、置換率の増加とともに空気量が多くなったと考えられる。

以上の結果から、再生粗骨材を使用する場合は通常のコンクリートと同様に空気量を取り扱うことができるが、再生細骨材を使用する場合は置換率によって空気量に変化することに留意して AE 剤量や s/a の値を適正に選んだ配合設計をおこなう必要がある。

3・2・3 ブリーディング試験 再生骨材コンクリートのブリーディング試験結果を Fig. 5 に示す。目標強度 20, 30N/mm^2 では、再生粗骨材の置換率が大きくなるとブリーディング率は増大する傾向を示すが、 50N/mm^2 では置換率のブリーディングに及ぼす影響は小さい。これは、目標強度が大きくなる、つまり W/C が小さくなると単位セメント量が増えるため、セメントによる練混ぜ水の吸着や移動空隙の減少によってブリーディング率は減少するものと考えられる。

再生細骨材を混合した場合のブリーディング率は、再生粗骨材を混合したものに比べて小さく、標準強度が 20N/mm^2 よりも 30N/mm^2 のコンクリートでブリーディング率は小さい。

これらの結果から、再生粗骨材を混合した配合よりも再生細骨材を混合した配合のブリーディング率が小さいため、両者を適切に使用すればブリーディング率の調整が可能になるものと考えられる。

Fig. 3. Relationship between replacing ratio of recycled aggregate and slump.

Fig. 5. Relationship between replacing ratio of recycled aggregate and bleeding.

3・3 硬化コンクリート

3・3・1 強度

(1) 圧縮強度

圧縮強度と再生骨材の置換率の関係を Fig. 6 に示す。

圧縮強度と再生粗骨材, 再生細骨材の置換率とは線形関係で表され, 再生骨材の置換率が大きくなると圧縮強度は低下する。また, これらの関係は目標強度の大きにかかわらず, また, 再生細粗骨材のいずれでも直線の勾配はほぼ等しい。つまり, 置換率の増大にともなう強度の減少割合はほぼ等しいことが認められる。

Fig. 7 は, 各配合の普通骨材単味の圧縮強度を基準として, 再生骨材置換率ごとの圧縮強度減少率の関係を示したものである。

Fig. 6. Compressive strength of recycled concrete.

Fig. 7. Reducing rate of compressive strength.

圧縮強度減少率の大きいものは, 再生細骨材を混合使用した再生コンクリート (約 20 ~ 30%) で, 再生粗骨材を混合したコンクリートの圧縮強度減少率 (約 5 ~ 20%) は小さい。

以上のことから, 再生骨材の混合割合が大きくなると圧縮強度は低下して, 混合使用する再生骨材の種類 (細, 粗骨材) によって, 圧縮強度の減少率は異なることがわかる。

(2) 割裂引張強度

割裂引張強度 (以下, 引張強度) と再生骨材の置換率の関係を Fig. 8 に示す。

引張強度については, 値そのものが小さく, また, 各置換率に対する値がばらついてはいるが, 全体的な傾向は圧縮強度と再生骨材置換率との関係と同様に, 置換率が増大すると引張強度は減少し, その程度は低目標強度の場合に, また, 再生細骨材を置換した場合にやや大きくなっていることが認められる。引張強度と再生骨材の種類との関係については, 再生粗骨材を使用した場合は, 置換率の増加に伴う引張強度の減少割合は目標強度の大きにかかわらずほぼ同じと考えられる。一方, 再生細

Fig. 8. Tensile strength of recycled concrete.

骨材を使用した場合は目標強度 30N/mm^2 では、引張強度の減少割合大きく現れているが、目標強度 20N/mm^2 では、再生粗骨材の場合とほぼ同じ減少傾向が見られる。

以上のことから、再生骨材の混合割合が大きくなると引張強度は低下し、とくに中程度の目標強度の配合において再生細骨材を混合使用した場合の引張強度の低下はやや大きくなる。なお、再生骨材を混入したコンクリートの強度比（引張強度／圧縮強度）は $1/10 \sim 1/12$ で普通に使用されるコンクリートと同程度であった。

3・3・2 静弾性係数 静弾性係数と再生骨材の置換率の関係を Fig. 9 に示す。

静弾性係数は圧縮強度、引張強度の場合と同様に、再生骨材の置換率が増加すると小さくなる傾向が認められる。また、それぞれの置換率において再生骨材の種類（細、粗骨材）が異なっても同一目標強度における静弾性係数は同程度の値となった。さらに、再生骨材の置換率の増加に伴う静弾性係数の低下率は、目標強度の大きさ、再生骨材の種類（細、粗骨材）にかかわらず、置換率 100%（全て再生骨材）の静弾性係数は置換率 0%（全て普通骨材）の約 90% である。

静弾性係数と圧縮強度との関係を Fig. 10 に示す。これらの関係は、普通骨材使用コンクリートの場合と同様である。

3・3・3 乾燥収縮ひずみ 乾燥収縮ひずみ（360 日）と置換率の関係を Fig. 11 に示す。

再生粗骨材表面にモルタル分が付着（付着率：20～24%）しているものの、置換率が大きくなると僅かに乾燥収縮ひずみは大きくなる程度であり、また、目標強度の違いによる乾燥収縮ひずみへの影響はほとんど認められない。

再生細骨材を用いた場合では、置換率が大きくなると乾燥収縮ひずみは再生粗骨材に比べてかなり大きくなる。これは、再生細骨材には原コンクリートのモルタル分の割合が多く、吸水率も再生粗骨材よりも大きいため、乾

Fig. 10. Relationship between young's modulus and compressive strength of recycled concrete.

Fig. 11. Drying shrinkage of recycled concrete.

Fig. 9. Young's modulus of recycled concrete.

燥収縮の大部分はモルタル分に含まれる水分の逸散によるものと考えられる。従って、再生細骨材を多量に混合使用するには、乾燥収縮によるひびわれを十分に考慮する必要がある。

3・4 耐久性

3・4・1 凍結融解試験（耐久性指数 D. F） 耐久性指数と再生骨材の置換率の関係を Fig. 12 に示す。

再生粗骨材を置換した場合、目標強度 50N/mm^2 (W/C : 41%, air : 3.4～4.9%) の耐久性指数は 90% で、W/C と連行空気量が適当であれば凍結融解に対してかなり良好な抵抗性を示すことが認められた。目標強度が低い配合（目標強度 30N/mm^2 , W/C : 61%, air : 3.4～4.3%）は耐久性指数が 70% で、セメント量が少なく骨材量の絶対量が多い配合の場合、凍結融解に対する耐久性がやや劣る結果となった。従って、このような配合では W/C を小さく、空気量をやや多く選ぶことが望ましい。また、再生細骨材を使用した場合の凍結融解に対する耐久性は、他の物性の傾向から、粗骨材の場合と同様の傾向になると考えられる。

Fig. 12. Durability factor (D. F) of recycled concrete.

3・4・2 中性化 中性化深さと再生骨材の置換率との関係を Fig. 13 に示す。

中性化深さは、恒温恒湿（温度：20 ± 3℃，相対湿度：60 ～ 70%）の室内で気中に 360 日間静置した供試体（10 × 10 × 40cm）の中央断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、表面から変色部分までの長さ（20 測点の平均値）を中性化深さとした。

再生粗骨材を置換した配合の中性化深さは、水セメント比の小さい配合のものほど中性化深さは小さく、また、再生粗骨材の置換率による影響は基準コンクリートに比べて小さい。

再生細骨材を置換した配合では、水セメント比の小さい配合のものほど中性化深さは小さい。また、再生細骨材の置換率が大きくなるほど中性化深さは大きくなり、基準コンクリートに比べて置換率 100% の 20N/mm² での中性化深さは 3mm 程度、30N/mm² では 5mm 程度大きくなった。また、再生粗骨材を 40% 置換したコンクリート（△：目標強度 30N/mm²）に、再生細骨材を置換した場合についても検討した。普通骨材に再生細骨材を混合使用したものに比べて中性化深さが若干増加する。つまり、再生細骨材の混合使用はコンクリートの毛細孔隙が多く

Fig. 13. Carbonation thickness of recycled concrete.

なり、中性化を増加させる要因になりうることが予想される。

以上のことから、中性化深さは普通骨材と再生粗骨材の混合使用による影響は小さいが、再生細骨材の置換率が大きくなるほど中性化はやや大きくなる傾向が認められた。

4 結 論

本研究では、普通骨材に対して再生骨材（細、粗骨材）の置換率を変化させた再生コンクリートのフレッシュおよび硬化性状、耐久性の基礎的な実験を実施して、普通コンクリートとの比較検討を行なった。以下に、普通骨材と再生骨材を混合使用したコンクリートに対しての実験結果を要約する。

(1) 本研究において、普通骨材と再生骨材（細、粗骨材）とを混合使用した再生コンクリートでは、通常使用される普通コンクリートとほぼ同様のコンシステンシーが得られる。一方、再生コンクリートの空気量は普通コンクリートと同様に扱うことができるが、再生細骨材を多量に使用する場合は空気量はやや多くなるため、AE 剤量や s/a を適切に選んだ配合設計を行なう必要がある。

(2) 再生骨材を混合したコンクリートのブリーディング率は置換率が大きくなると増大し、セメント量が増えるとは小さくなる傾向がある。また、再生細骨材を混合する場合は再生粗骨材よりもブリーディング率は小さくなる。

(3) 圧縮強度、引張強度、静弾性係数は再生骨材の置換率が大きくなると低下する。また、再生骨材の種類（細、粗骨材）によって強度の減少率は異なり、とくに W/C が大きいと再生細骨材を混合したコンクリートの強度減少率は大きい。なお、同一 W/C において再生骨材の種類（細、粗骨材）が異なっても静弾性係数は同程度の値である。

(4) 乾燥収縮、凍結融解に対する抵抗性および中性化などの耐久性は、再生骨材の置換率が増加すると低下する傾向が見られ、その程度は再生粗骨材よりも再生細骨材の場合にやや大きくなる。

これら、再生骨材と普通骨材を混合使用したフレッシュおよび硬化コンクリートの性状から、フレッシュコンクリートに対する配合設計は、コンシステンシーおよび空気量においては普通コンクリートに対する配合設計をそのまま踏襲すればよいが、硬化コンクリートの性状、とくに耐久性の観点から W/C を普通コンクリートよりも置換率に応じて最大 0.5 程度小さくした配合を選ぶことが適切であると考えられる。実際の RC 部材への適用については、この研究の一環として目下鋭意実施している。

なお、本研究は近畿建設技術協会の補助のもとに行なったことを付記し、交付に対して感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 玉井元治, コンクリート工学, 36, 49 (1999).
- 2) 島 広和, 鴻巣一巳, 橋本光一, 古賀康男, コンクリート工学年次論文報告集, 22, 1093 (2000).