

コンクリート解体材の骨材への再利用技術

ー製造方法の異なる再生骨材を用いたコンクリートの調合と特性ー

早川光敬・丸嶋紀夫

Keywords : Concrete, Recycled Aggregate, Coefficient of Water Absorption, Compressive Strength

コンクリート, 再生骨材, 吸水率, 圧縮強度

1. はじめに

古くなった鉄筋コンクリート構造物を取り壊し、新しい構造物を建設する際、解体したコンクリートを再利用することが求められる。現在、コンクリート解体材の多くは、40mm 程度以下に破碎され、路盤材として再利用されている。しかし、今後はコンクリート解体材の発生量が増加し、路盤材の需要を超えてしまうことが予想されている。このため、コンクリート解体材を有効利用する技術として、解体材から骨材を再生し、新しいコンクリートに利用することが重要になってきている。

コンクリート解体材を処理して JASS5 に示される一般の骨材の品質基準を満足する骨材（吸水率 3%以下など）を取り出す方法が複数提案されている。ここでは加熱すりもみ法とスクリュース摩砕法の2種類の方法を取り上げ、同一起源の解体材を処理して製造される骨材の品質を調査した。またそれぞれの骨材を用いてコンクリ

ートを製造し、骨材量がスランプや強度に与える影響、骨材種類によるセメント水比と圧縮強度、引張強度、静弾性係数、乾燥収縮の関係を調査した。

2. 再生骨材の製造

2.1 解体材

昭和 10 年頃に建設された都内の鉄筋コンクリート構造物の解体工事で発生する解体材を試験に用いた。建物の用途は精密機械の工場および事務所であった。

解体に先立ちコア供試体を採取し、コンクリートの圧縮強度、中性化深さを調査し、調合推定試験を行った。圧縮強度は平均 34.6N/mm^2 であり、中性化深さはモルタル仕上げが 12~25mm ある箇所の測定で 0~17.7mm であった。調合推定の結果は、単位水量 168kg/m^3 、単位セメント量 255kg/m^3 、単位細骨材量 702kg/m^3 、単位粗骨材量 $1,276\text{kg/m}^3$ であった。コンクリート中の塩化



写真-1 加熱すりもみ装置

Appratus 1 for Recycled Aggregate



写真-2 スクリュー摩砕法装置

Appratus 2 for Recycled Aggregate

表-1 使用骨材の試験結果
Properties of Aggregates

	粗骨材				細骨材			
製造方法	再生 1	再生 2	酸処理	砕石	再生 1	酸処理	陸砂	陸砂細
表乾密度(g/cm ³)	2.61	2.56	2.59	2.67	2.62	2.60	2.61	2.63
絶乾密度(g/cm ³)	2.57	2.50	2.55	2.65	2.57	2.53	2.56	2.57
吸水率(%)	1.62	2.54	1.72	0.68	2.03	2.79	1.90	2.26
粗粒率	6.84	6.99	6.94	6.62	3.90	2.78	2.97	1.66
単位容積質量(kg/l)	1.68	1.66	1.65	1.58	1.75	1.84	—	—

物量は 0.23kg/m³ であった。また酸で処理して取り出した骨材の品質は表-1 の酸処理の欄に示すようであった。この解体材に使用されていた粗骨材は川砂利である。

2.2 加熱すりもみ法（再生 1）¹⁾

コンクリート塊を 300℃程度で加熱して、セメントペースト部分を脱水、脆弱化した後、骨材を破碎しない程度の摩砕作用で骨材の周りに付着しているモルタルやセメントペーストを除去する方法である。ここでは千葉県に設置されていた処理能力 3t/h の設備を使用した。設備の概要を写真-1 に示す。40mm 以下に破碎したコンクリート解体材を約 80 トン処理し、再生粗骨材と再生細骨材を製造した。

2.3 スクリュー摩砕法（再生 2）

投入された解体材がケーシング内に取りつけられたスクリューで攪拌され、回転するコーンや台座部分とのクリアランスを通過する際、骨材周囲に付着しているモルタル部分が除去される装置である。装置により 3 回以上処理を行えば JASS5 の基準を満足する高品質再生粗骨材が回収できることが確認されている²⁾。ここでは埼玉県に設置されていた 1 回あたりの処理能力 30t/h の装置を使用した。装置の状況を写真-2 に示す。40mm 以下に破碎したコンクリート解体材を約 30 トン、この装置により 4 回処理し、再生粗骨材を製造した。

2.4 再生骨材の品質

加熱すりもみ法（再生 1）により製造した再生粗骨材および再生細骨材、スクリュー摩砕法（再生 2）により製造した再生粗骨材の試験結果を表-1 に示す。いずれも JASS5 の品質基準を満足するものであった。

製造した再生粗骨材を酸で処理し、付着しているモルタル、および団子状になったモルタル塊の量を測定した。その結果、加熱すりもみ法（再生 1）によるもののモルタル量は 10.4%、スクリュー摩砕法（再生 2）によるもののモルタル量は 20.7%であった。

3. 再生骨材を用いたコンクリート

3.1 試験計画

3.3.1 調査に与える影響調査

骨材の組合せで、砕石と陸砂、再生 1 粗骨材と陸砂、再生 1 粗骨材と再生 1 細骨材に細目陸砂を 1 : 1 で混合したもの、再生 2 粗骨材と陸砂の 4 種類について試験を行った。使用した骨材の品質を表-1 に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。再生 1 細骨材（加熱すりもみ法による）は粗粒率が大きかったため、細目の陸砂を 1 : 1 で混合して使用した。すべての骨材はほぼ表乾状態に調整して用いた。

水セメント比は 55、42、35%の 3 水準とした。水セメント比 55 と 42%では AE 減水剤を標準量使用し、粗骨材のかさ容積が 0.63m³/m³ の時に練り上り時のスランプが 20cm になるよう単位水量を定めた。そのまま単位水量を一定とし、細骨材率を 5%および 10%大きくしたコンクリートを練り混ぜた。水セメント比 35%では単位水量を 175kg/m³ と一定にし、粗骨材のかさ容積が 0.63m³/m³ の時に練り上り時のスランプが 20cm になるよう高性能 AE 減水剤の使用量を決定した。そのまま高性能 AE 減水剤の使用量一定で、細骨材率を 5%および 10%大きくしたコンクリートを練り混ぜた。練り上り時のスランプを 20cm としたのは、輸送中にスランプが 2cm 程度低下するものと考え、荷卸しにおける目標スランプを 18cm とした調査を目指したものである。

目標空気量はいずれも 4.5%である。全体の調査計画を表-2 に示す。

練り混ぜたコンクリートについて、スランプ、空気量、および材齢 28 日における圧縮強度を測定した。

3.3.2 硬化コンクリートの物性調査

骨材の組み合わせは 3.3.1 の組合せに、スクリュー摩砕法（再生 2）による粗骨材と砕石を 1 : 1 で混合した粗骨材と陸砂の組合せを加えた 5 種類とした。

表-2 調合に与える影響

Results of Test 1

記号	粗骨材	細骨材	W/C (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)	ス ラ ン プ(cm)	空 気 量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
1-A-55-1	碎石	陸砂	55	44.9	175	0.25	20.5	4.5	39.5
1-A-55-2				49.9	175	0.25	20.5	4.7	40.5
1-A-55-3				54.9	175	0.25	20.5	4.3	39.8
1-B-55-1	再生 1	陸砂		42.7	157	0.25	21.0	5.2	37.0
1-B-55-2				47.7	157	0.25	20.0	4.6	38.0
1-B-55-3				52.7	157	0.25	14.5	4.5	39.2
1-C-55-1	再生 1	再生 1 ＋ 陸 砂 細		41.5	167	0.25	20.5	4.3	38.4
1-C-55-2				46.5	167	0.25	19.5	4.6	40.7
1-C-55-3				51.5	167	0.25	9.5	5.1	40.2
1-D55-1	再生 2	陸砂		42.1	157	0.25	20.5	4.1	35.6
1-D-55-2				47.1	157	0.25	19.5	5.3	36.1
1-D-55-3				52.1	157	0.25	19.5	5.9	36.1
1-A-42-1	碎石	陸砂	42	41.5	180	0.25	20.5	4.4	53.7
1-A-42-2				46.5	180	0.25	21.0	4.0	54.7
1-A-42-3				51.5	180	0.25	19.5	3.9	56.9
1-B-42-1	再生 1	陸砂		38.8	167	0.25	21.0	4.4	48.2
1-B-42-2				43.8	167	0.25	20.5	3.8	49.9
1-B-42-3				48.8	167	0.25	19.0	4.2	48.2
1-C-42-1	再生 1	再生 1 ＋ 陸 砂 細		37.1	177	0.25	21.0	3.7	54.0
1-C-42-2				42.1	177	0.25	20.0	4.0	53.4
1-C-42-3				47.1	177	0.25	17.5	4.0	53.5
1-D-42-1	再生 2	陸砂		38.2	167	0.25	20.0	3.6	47.5
1-D-42-2				43.2	167	0.25	21.0	5.1	45.7
1-D-42-3				48.2	167	0.25	20.0	5.4	43.7
1-A-35-1	碎石	陸砂	35	39.8	175	0.75	20.5	4.7	60.1
1-A-35-2				44.8	175	0.75	18.5	5.1	60.3
1-A-35-3				49.8	175	0.75	12.5	4.9	61.3
1-B-35-1	再生 1	陸砂		34.8	175	0.55	19.5	4.4	53.4
1-B-35-2				39.8	175	0.55	19.5	4.0	58.0
1-B-35-3				44.8	175	0.55	18.5	3.8	59.5
1-C-35-1	再生 1	再生 1 ＋ 陸 砂 細		34.8	175	0.6	21.0	5.2	57.0
1-C-35-2				39.8	175	0.6	17.5	4.7	59.8
1-C-35-3				44.8	175	0.6	10.0	4.2	62.7
1-D-35-1	再生 2	陸砂		34.1	175	0.5	20.5	5.4	45.5
1-D-35-2				39.1	175	0.5	19.5	4.7	49.4
1-D-35-3				44.1	175	0.5	18.0	3.8	52.3

水セメント比は 55、42、35%の 3 水準とした。使用材料は 3.3.1 と同様である。練り上り時の目標スランプは 20cm、空気量は 4.5%とした。単位粗骨材かさ容積は 0.60m³/m³とした。調合計画を表-3 に示す。

練り混ぜたコンクリートについて、スランプ、空気量、材齢 7、28、56、91 日における圧縮強度、材齢 28 日における引張強度、静弾性係数、ポアソン比、および長さ変化率、促進中性化試験における中性化深さを測定した。

3.2 調合に与える影響

水セメント比 55%の時の骨材の種類による単位水量

の違いを図-1 に示す。解体材に使用されていた骨材が川砂利であったため、加熱すりもみ法（再生 1）による粗骨材を使用したコンクリート（B）、スクリー摩砕法（再生 2）による粗骨材を使用したコンクリート（D）の単位水量は碎石を用いたコンクリートに比べて 20kg/m³ 近く小さくなっている。

水セメント比 55%の時の骨材の種類による細骨材率とスランプの関係を図-2 に示す。細骨材率が大きくなるとスランプは小さくなる傾向にあるが、スランプが低下する細骨材率は骨材により異なっている。いずれのコンクリートでも粗骨材のかさ容積が 0.63m³/m³ の場合は

表-3 調合計画

Mix Proportion						
記号	粗骨材	細骨材	W/C(%)	S/a(%)	単位水量 (kg/m ³)	混和剤 (C×%)
2-A-55	碎石	陸砂	55	47.7	175	0.25
2-B-55	再生 1	陸砂		45.4	157	0.25
2-C-55	再生 1	再生 1 + 陸砂細		44.2	167	0.25
2-D-55	再生 2	陸砂		45.0	157	0.25
2-E-55	再生 2 + 碎石	陸砂		47.0	166	0.25
2-A-42	碎石	陸砂	42	44.4	180	0.25
2-B-42	再生 1	陸砂		41.7	167	0.25
2-C-42	再生 1	再生 1 + 陸砂細		40.1	177	0.25
2-D-42	再生 2	陸砂		41.2	167	0.25
2-E-42	再生 2 + 碎石	陸砂		43.5	173	0.25
2-A-35	碎石	陸砂	35	42.8	175	0.78
2-B-35	再生 1	陸砂		37.8	175	0.55
2-C-35	再生 1	再生 1 + 陸砂細		37.8	175	0.65
2-D-35	再生 2	陸砂		37.4	175	0.50
2-E-35	再生 2 + 碎石	陸砂		40.7	175	0.65
参考： 2001 年 度実験	簡易再生	陸砂	53	48.7	185	0.25
			42	47.0	185	0.40
			35	46.2	185	0.80

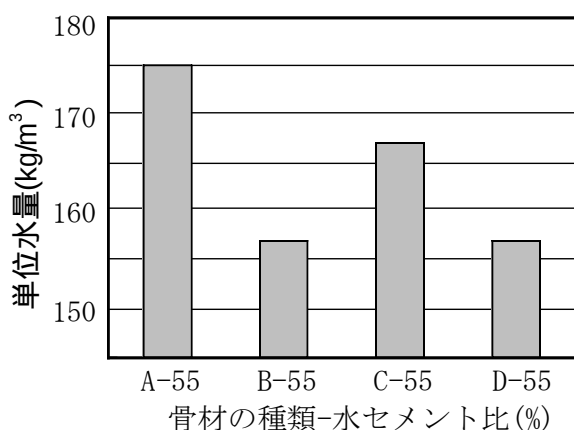


図-1 骨材の種類と単位水量 (W/C=55%)
Water Contents

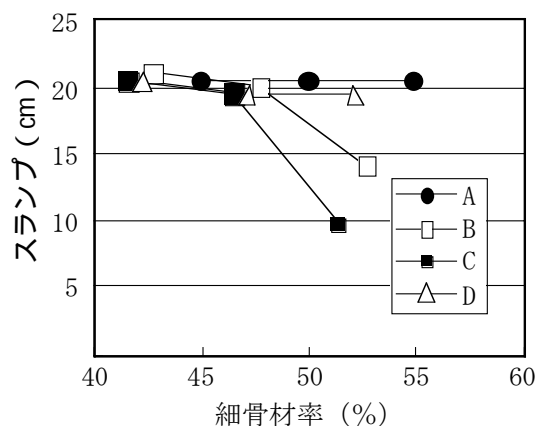


図-2 細骨材率とスランプ (W/C=55%)
Slump and Sand-Aggregate Ratio

粗骨材が目立つ状態であり、かさ容積を 0.60m³/m³ 程度で良好な性状が得られることがわかった。

水セメント比 55%の時の骨材の種類による細骨材率と圧縮強度の関係を図-3 に、35%の場合を図-4 に示す。粗骨材量が大きくなると強度は小さくなる傾向にあるが、この傾向は水セメント比が小さい時のほうが大きくなっている。

3.3 硬化コンクリートの物性

試験結果を表-4 に示す。

骨材種類毎のセメント水比と材齢 28 日における圧縮強度の関係を図-5 に示す。図には 2001 年度に行った実

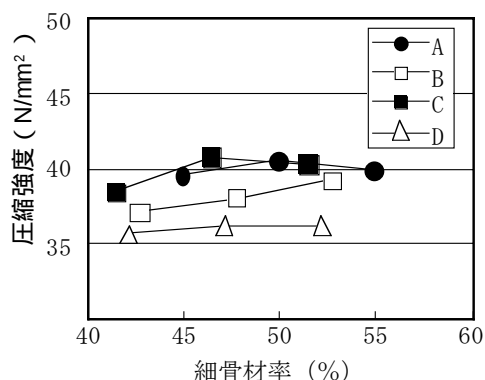
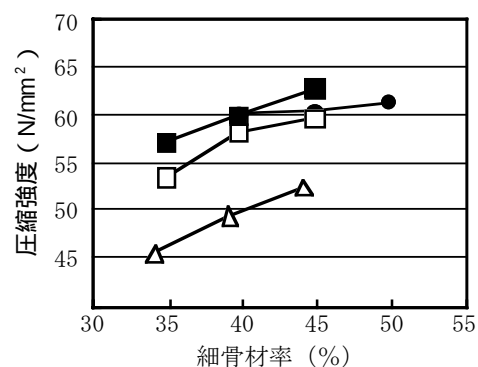
験から吸水率 5.0%の再生粗骨材（簡易再生）を用いたコンクリートの結果をあわせて示した（調合は表-3 参照）。

加熱すりもみ法による再生粗骨材を用いたコンクリート（B と C）は碎石を用いたコンクリート（A）とほぼ同等の強度を示した。スクリー摩砕法による再生粗骨材を用いたコンクリート（D）は 10%程度強度が低くなる傾向がみられた。これは再生 2 粗骨材の残存モルタル量が 20%程度と、再生 1 粗骨材の 10%に比べて大きいことが影響しているものと思われる。一方スクリー摩砕法による再生粗骨材に碎石を混合したコンクリート

表-4 硬化コンクリートの物性

Properties of Hardened Concrete								
記号	圧縮強度(N/mm ²)			引張強度 *1(N/mm ²)	静弾性係数 *1(×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン 比*1	長さ変化 率*2(%)	中性化深 さ*3(mm)
	7日	28日	91日					
2-A-55	27.8	38.7	46.2	2.82	3.19	0.20	-0.069	8.5
2-B-55	27.9	38.2	44.6	2.33	3.51	0.19	-0.055	8.6
2-C-55	29.2	39.6	45.3	2.39	3.24	0.18	-0.068	9.3
2-D-55	25.7	34.5	41.4	2.55	3.33	0.20	-0.054	11.8
2-E-55	26.6	38.4	44.3	2.91	3.30	0.21	-0.065	8.6
2-A-42	42.3	50.2	62.1	3.65	3.37	0.21	-0.067	0.6
2-B-42	37.1	47.1	53.8	3.28	3.47	0.20	-0.049	0.4
2-C-42	37.4	47.2	55.8	3.26	3.38	0.20	-0.059	0.5
2-D-42	34.9	45.2	51.7	3.31	3.48	0.20	-0.052	0.4
2-E-42	38.4	46.6	56.2	3.32	3.36	0.21	-0.065	0.5
2-A-35	44.4	54.5	66.8	3.77	3.38	0.18	-0.064	0.0
2-B-35	44.9	54.9	67.3	3.69	3.55	0.20	-0.048	0.0
2-C-35	46.8	57.5	65.7	3.65	3.53	0.19	-0.054	0.0
2-D-35	42.9	49.2	58.7	3.46	3.67	0.18	-0.056	0.0
2-E-35	43.8	52.8	63.6	3.33	3.41	0.21	-0.060	0.0

*1：材齢 28 日，*2：材齢 182 日，*3：材齢 91 日

図-3 細骨材率と強度の関係 (W/C=55%)
Strength and Sand-Aggregate Ratio図-4 細骨材率と強度の関係 (W/C=35%)
Strength and Sand-Aggregate Ratio

(E) は碎石を用いたコンクリート (A) とほぼ同等の強度となった。

骨材種類毎のセメント水比と材齢 28 日における静弾性係数の関係を図-6 に示す。図には 2001 年度の実験結果をあわせて示した。吸水率 5.0% の再生骨材の結果を除き、ほぼ同等の静弾性係数を示した。今回の結果から、残存モルタル量が 20% 程度あっても、静弾性係数にはほとんど影響しないものと考えられる。

骨材種類毎のセメント水比と乾燥材齢 182 日における乾燥収縮による長さ変化の関係を図-7 に示す。図には 2001 年度の結果をあわせて示した。加熱すりもみ法による再生粗骨材を用いたコンクリート (B) およびスクリー摩砕法による再生粗骨材を用いたコンクリート (D) は碎石を用いたコンクリート (A) に比べて収縮

量が小さくなる傾向を示した。これには再生骨材の原コンクリートの粗骨材が川砂利であり、水セメント比が 42 と 55% の再生コンクリートの単位水量が少なくなっていることが影響しているものと思われる。

骨材種類毎のセメント水比と促進材齢 91 日における中性化深さの関係を図-8 に示す。骨材種類より水セメント比の影響を強く受けることがわかる。

4. まとめ

高品質の再生骨材を製造する方法として、加熱すりもみ法とスクリー摩砕法を取り上げ、同一起源のコンクリート解体材から再生骨材を製造、試験を行った。その結果、加熱すりもみ法では JASS5 の品質基準を満足す

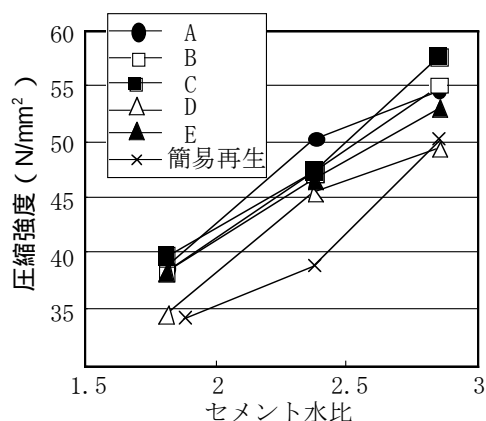


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係
Strength and Cement-Water Ratio

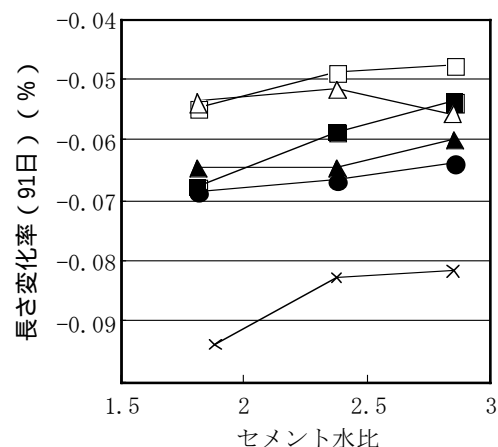


図-7 セメント水比と乾燥収縮の関係
Drying Shrinkage and Cement-Water Ratio

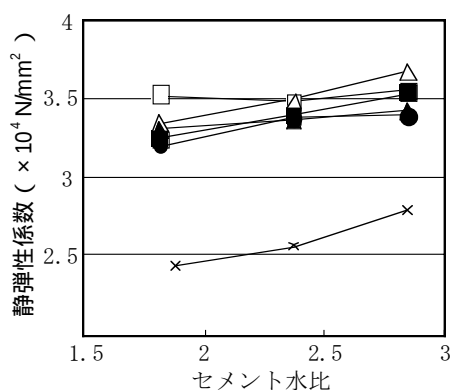


図-6 セメント水比と静弾性係数の関係
Young's Modulus and Cement-water Ratio

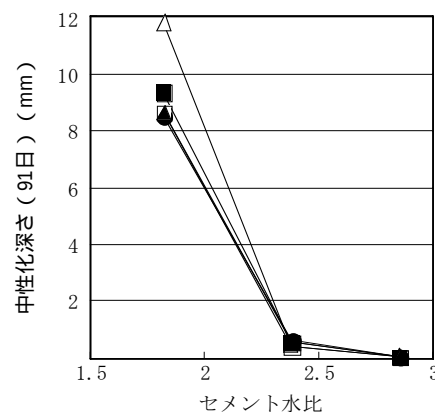


図-8 セメント水比と中性化深さの関係
Carbonation and Cement-Water Ratio

る粗骨材と細骨材を、スクリー摩砕法では品質基準を満足する粗骨材を製造できることを確認した。

続いて製造した再生骨材を用いてコンクリート試験を行った。その結果、加熱すりもみ法による骨材を用いたコンクリートは一般の骨材を用いたコンクリートと同等の品質が得られた。スクリー摩砕法による粗骨材を用いたコンクリートは一般の骨材を用いたコンクリートに比べて、10%程度圧縮強度が低くなる傾向が見られたが、静弾性係数は同等、乾燥収縮は小さくなる結果が得られた。強度特性と乾燥収縮に関しては、今回製造した再生骨材を用い、一般の骨材を用いたコンクリートと比べて遜色のない品質をもつコンクリートが製造できることがあきらかになった。

本研究にあたり東京大学野口貴文助教授のご指導を、また三菱マテリアル(株)、(株)太平洋コンサルタント、および太平洋エンジニアリング(株)の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 三菱マテリアル株式会社：新建築技術認定事業報告書：建築構造用再生骨材「ダイヤゲイト」、財団法人日本建築センター、1999.12
- 2) 石倉武ほか：高品質再生骨材の製造技術に関する開発 [VI] その1 開発の全体概要及び再生骨材試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.1021-1022、2002.8