

9. 再生骨材コンクリートの品質および 施工性に関する実験的研究

高見 錦一 崎山 和隆
立松 和彦 山崎 順二
佐藤 実^{*1} 仁平 明弘^{*1}

要 旨

再生コンクリートの品質および施工性を調査するために、再生粗骨材・再生細骨材を使用したコンクリートについて、フレッシュコンクリートの性状、強度および耐久性についての室内試験とポンプ圧送試験を行った。その後、粗骨材のみに再生骨材を使用したコンクリートを実施工において打設した結果、乾燥収縮にやや問題がみられたが、その他の物性やポンパビリティについては特に問題はなく、再生コンクリートも通常のコンクリートと同様に扱えることが分かった。

キーワード

再生粗骨材／再生細骨材／吸水率／管内圧力／圧力損失係数

目 次

1. はじめに
2. 室内試験
3. ポンプ圧送実験
4. 実 施 工
5. おわりに

9. EXPERIMENTAL STUDY ON QUALITY AND EXECUTION OF RECYCLED CONCRETE

Kin-ichi Takami Kazutaka Sakiyama
Kazuhiko Tatematsu Junji Yamasaki
Minoru Sato Akihiro Nihei

Abstract

Concrete made from recycled aggregate was placed at a construction site. Its quality and execution proved no less satisfactory than ordinary concrete. This paper presents the results of indoor tests and pumping tests with respect to characteristics, strength and durability of recycled concrete conducted prior to ordinary concrete as well as tests during execution.

* 1 東京本店建築部

1. はじめに

地球環境問題が大きな社会問題として提起される一方、資源の枯渇も地球の未来を考える上において無視できないほど大きな問題となってきた。建設業では、今もって膨大な資源を消費するだけでなく、大量の建設廃材を排出しており、各方面でその解消に向けての対策が種々講じられている。建設廃材の中でも、既存構造物を解体する際に発生するコンクリート塊は量も多く、その有効利用を図ることができれば、資源枯渇防止の一助にもなることから、建設省では総プロとして早くから「再生コンクリートの利用技術の開発」をテーマに掲げて取り組まれ、その研究成果も発表されている。しかし再生骨材は、天然の砂利、碎石、川砂、山砂等と比べ、粒形、微粉量、比重などにやや問題があり、特に吸水率の大きいのが欠点とされ、実用面で普及するまでには至っていない。

この度、再生粗骨材を使用したコンクリートを実際の作業所で打設できる機会を得たことから、事前に再生コンクリートの基本性状や物性を確認するための試験、およびポンプ圧送実験を行い、再生コンクリートが実用上問題のないことを確認した上で実施を行った。本報告はそれらの試験結果および実用面で得た成果を述べるものである。

2. 室内試験

2.1 試験概要

表－１に示す材料を使用して試験練りを行った。

目標とした設計基準強度は、 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 、スランブ 18cm （練り上がり時 19.5cm ）、空気量 4.5% である。

表－２にそれぞれの供試体の記号および骨材の混入量などを示す。実施工での強度推定式を導くために、粗骨材のみに再生骨材を使用して水セメント比をパラメータとしたRGシリーズと、再生細骨材の混入量をパラメータとしたRSシリーズの２種類について各種の試験を行い、天然骨材のみを使用した普通コンクリート（RS-P）と対比較を行った。表－３にこれらのコンクリートの調合を示す。

表－１ 使用材料

材 料	品 種 ・ 産 地	比重	F.M.
セメント	普通ポルトランドセメント(秩父小野田)	3.16	—
細 骨 材	万田野産山砂	2.60	2.63
	再生細骨材	2.27	3.21
粗 骨 材	津久見産石灰石碎石	2.69	6.66
	再生粗骨材（A種）	2.50	6.79
混 和 剤	A E減水剤 ポゾリスNa70	1.25	—

表－２ 供試体の記号

シリーズ名	記 号	粗骨材混入量 (vol %)		細骨材混入量 (vol %)		W/C (%)
		再生	天然	再生	天然	
R G シリーズ	RG-45	100	0	0	100	45.0
	RG-50					50.0
	RG-55					55.0
	RG-60					60.0
R S シリーズ	RS-P	0	100	0	100	55.0
	RS-O	100	0	0	100	
	RS-50			50	50	
	RS-100			100	0	

表－３ コンクリートの調合

記 号	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
			水	セ メ ン ト	粗 骨 材 砕 石	粗 骨 材 再 生	細 骨 材 山 砂	細 骨 材 再 生	混 和 剤
RG-45	45.0	45.0	174	387	0	905	772	0	6.22
RG-50	50.0	45.5	172	344	0	918	798	0	5.52
RG-55	55.0	46.0	172	313	0	923	818	0	5.02
RG-60	60.0	46.5	171	285	0	928	840	0	4.58
RS-P	55.0	46.0	165	300	1010	0	831	0	4.82
RS-O	55.0	46.0	172	313	0	923	818	0	5.02
RS-50	55.0	46.5	181	329	0	896	405	354	5.28
RS-100	55.0	47.0	190	345	0	869	0	700	5.55

2.2 骨材試験

使用した骨材は、参議院議員宿舎(東京都千代田区)の既存の擁壁(約35年前に施工)を解体したコンクリート塊を、再生工場でA種の再生骨材(吸水率5%以下)に処理したものである。なお、既存擁壁からコア採取をしたコンクリートの圧縮強度は約24N/mm²であった。

プラントで再生処理された粗骨材および細骨材について、JISに規定された方法により骨材試験を実施した。試験結果を表-4に示す。ただし、再生粗骨材は粒径が小さいほど付着モルタルの割合が多くなり、そのために比重、吸水率が異なってくる。従って比重および吸水率の試験は、JISで規定されている10mm

表-4 骨材試験結果

			粗 骨 材			細骨材
			試験値	A種	B種	試験値
粗粒率			6.79			3.21
表乾比重			2.50			2.27
絶乾比重			2.37			2.00
吸水率 (%)			5.36	5.0以下	5~8.0	13.19
単位容積質量 (kg/m ³)			1.44			1.41
実積率 (%)			60.8			70.5
洗い試験 (%)			0.2	1.5以下		0.46
粘土塊量 (%)			0.1			0.2
ふ る い 分 け 試 験	通 過 百 分 率 (%)	25	100	100	100	
		20	91	90-100	90-100	
		15	71			
		10	26	20-55	20-55	100
		5	4	0-10	0-10	98
		2.5	0	0-5	0-5	83
		1.2				56
		0.6				30
		0.3				10
		0.15				0

注) A種, B種: 総プロでの品質規格(案)



写真-1 再生骨材

以上の試料ではなく、5mm以上の試料を用いて行った。

再生細骨材については、10%を越える高い吸水率を示した。再生骨材には各種仕上げ材が混入する恐れがあったが、目視の調査では不純物の混入は認められなかった。写真-1に工場で再生した骨材を示す。

2.3 フレッシュコンクリートの性状

表-5にフレッシュコンクリートの性状を示す。再生骨材を利用したコンクリートは、天然の骨材を利用したコンクリートと比較して、フレッシュコンクリートの性状やワーカビリティに大きな差異は認められなかった。

図-1は、再生細骨材の混入量と同一のスラブを得るために必要な単位水量について検討した結果である。同一のスラブを得るために必要な単位水量は、再生細骨材の混入量の増加に伴い増加した。その増加率は、再生細骨材の混入量50%の増加に対して、約10kg/m³であった。また、コンクリートの単位容積質量は、再生細骨材の比重が天然のものより小さいため、その混入量の増加に伴い減少した。

表-5 フレッシュコンクリートの性状

記 号	スラブ (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	フロー (cm)	単位 容積質量 (t/m ³)
RG-45	20.5	5.6	13.0	33×33	2.207
RG-50	21.0	4.7	13.0	37×32	2.222
RG-55	19.5	4.8	10.0	31×29	2.218
RG-60	20.0	6.0	12.0	35×31	2.184
RS-P	21.5	3.8	12.0	36×34	—
RS-O	19.5	4.8	10.0	31×29	2.218
RS-50	20.5	4.8	10.0	35×31	2.145
RS-100	18.0	6.2	9.0	33×32	2.078

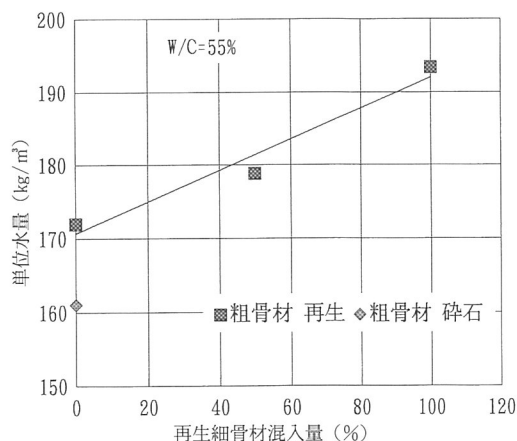


図-1 再生細骨材混入量と単位水量

ブリーディング試験の結果を表-6に示す。ブリーディング量は、高耐久性コンクリートの基準値である $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ とほぼ同じ値を示し、RS-100で $0.33\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、天然骨材を使用したRS-Pでも、 $0.29\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。今回の試験からは、再生骨材を使用したコンクリートと普通コンクリートとのブリーディング量に明確な差は認められなかった。

2.4 硬化コンクリートの物性

(1) 圧縮強度・曲げ強度・割裂強度

図-2に再生細骨材混入量と圧縮強度の関係を示す。再生細骨材の混入量の増加に伴い、コンクリート強度はやや減少する傾向を示した。

図-3にC/Wと圧縮強度の関係を示す。粗骨材に再生粗骨材を用い、細骨材に天然骨材を用いたコンクリート(RGシリーズ)の4週強度の推定式は、

$$F_{28} = 14.6 \times C/W + 2.1 \quad (\text{相関係数 } R^2 = 0.998)$$

となった。強度発現性についても、材齢4週までは大きな差異はみられず、1週強度は4週強度の約70~90%であった。

表-6 ブリーディング試験結果

	単位水量 (kg/m ³)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	ブリーディング率 (%)
RS-P	165	0.29	7.08
RS-0	172	0.27	6.08
RS-50	181	0.29	6.46
RS-100	190	0.33	6.81

試験環境：室温 20℃，湿度 55%

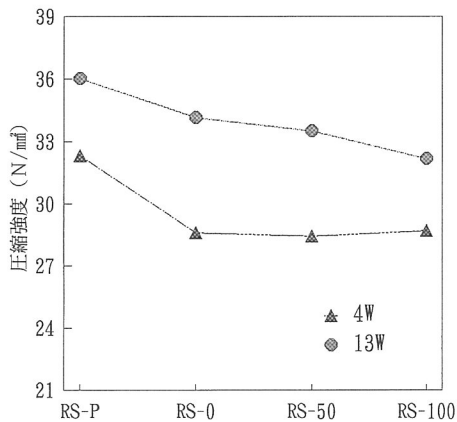


図-2 再生細骨材混入量と圧縮強度

図-4に材齢4週における圧縮強度と、曲げ強度および割裂強度との関係を示す。曲げ強度は圧縮強度の約1/6~1/8、割裂強度は圧縮強度の1/9~1/12となり、通常のコンクリートと大きな差は認められなかった。

(2) ヤング係数

図-5に圧縮強度とヤング係数の関係を、図-6に再生細骨材混入量とヤング係数の関係を示す。再生細骨材の混入量の増加に伴い、ヤング係数は若干低下する傾向にあった。しかし、再生細骨材の混入によってコンクリートの単位容積質量が小さくなることなどを考慮すると、学会式に近い値であった。

2.5 耐久性

(1) 長さ変化

長さ変化率の測定結果を図-7に示す。RS-0、RS-50、RS-100の長さ変化率は、 $-11 \sim -12 \times 10^{-4}$ と

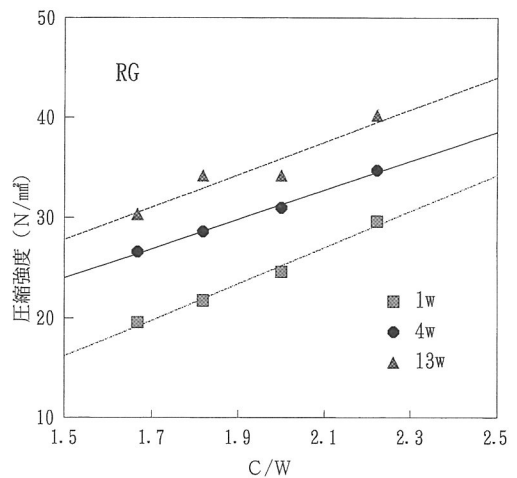


図-3 C/Wと圧縮強度

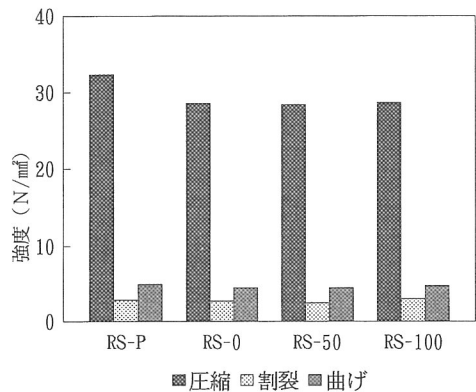


図-4 圧縮強度と割裂および曲げ強度

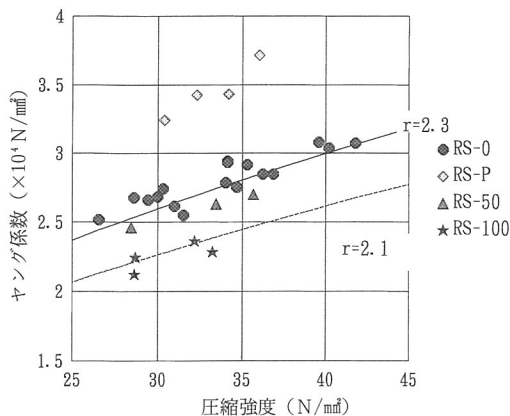


図-5 圧縮強度とヤング係数

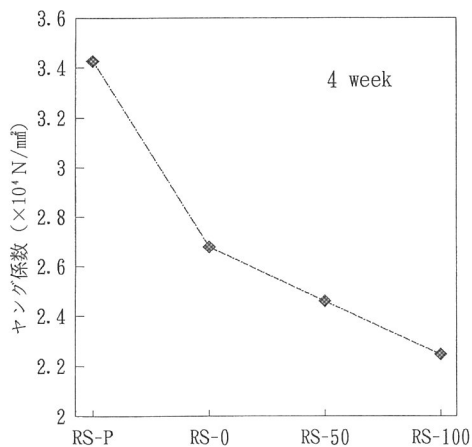


図-6 再生骨材混入量とヤング係数

なり、高耐久性コンクリートの基準値である 7×10^{-4} と比較して1.7～1.8倍の値となった。再生細骨材の混入量の違いによる長さ変化率の差は小さかった。

(2) 凍結融解試験

試験はASTM C 666 (A法) に準拠して行った。試験結果を図-8に示す。いずれの供試体も、JIS A 6204の目標値である相対動弾性係数80%以上(200サイクル終了後)を満足しており、RS-0を除くと高耐久性コンクリートで規定している85%以上(300サイクル終了後)の値となった。天然骨材を使用したコンクリートであるRS-Pと比較して、再生骨材を使用したコンクリートの相対動弾性係数は同程度の値であったが、スケールが若干大きかった。

(3) 中性化促進試験

中性化促進試験は、温度20℃、相対湿度60%、CO₂

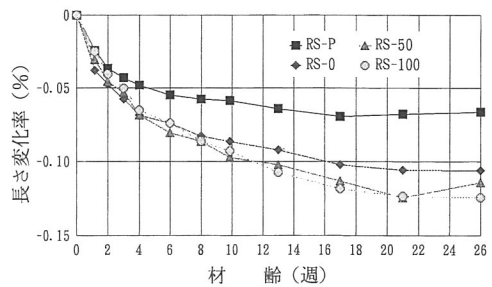


図-7 長さ変化率測定結果

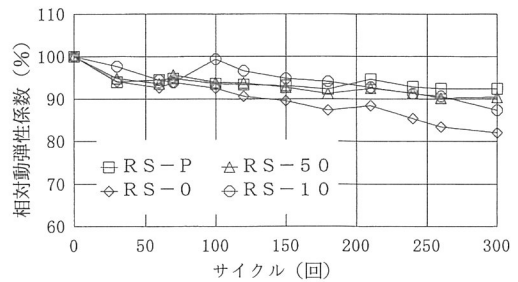


図-8 凍結融解試験結果

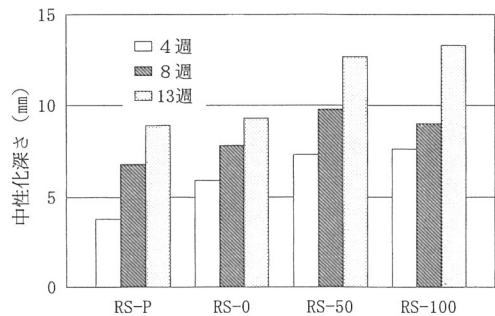


図-9 中性化促進試験

濃度5%の環境下で行った。試験結果を図-9に示す。促進材齢13週までの結果であるが、再生細骨材の混入量の増加によって中性化深さが大きくなり、RS-100は13.3mmの深さでRS-Pの1.5倍の中性化深さを示した。

3. ポンプ圧送実験

再生骨材を使用したコンクリートのポンパビリティについては、これまで詳しい資料が少ないため、施工実験を行うことでその施工性の調査を行うことにした。そこで、事前に再生コンクリートのポンパビリティに関する資料を得るために、再生コンクリート工場内で試験圧送を行った。

3.1 実験概要

実施工を行う前に再生骨材製造プラント内で試験圧送を行った。再生細骨材の混入量の違いによるコンクリートポンプ圧送時の管内圧力損失の変化、および圧送前後での再生コンクリートの品質変化を調査することを目的として実験を行った。同時に比較用として、天然骨材を使用したコンクリートも打設した。また、

表－7 ポンプ車仕様

分 類		ピストン式ブーム付ポンプ車
型 式		PY115-26
シリンダ径×ストローク		φ225×1650mm
ホッパ容量		0.5 m ³
最大吐出量 (吐出量×吐出圧力)	標準	115 m ³ /h × 47 kgf/cm ²
	高压	80 m ³ /h × 67 kgf/cm ²
輸送管径		100A

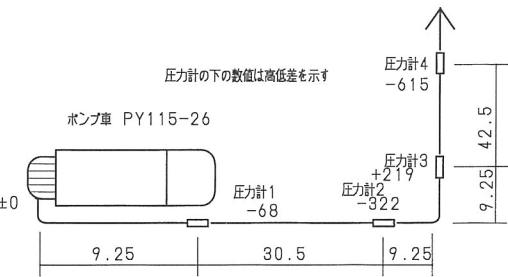


図-10 配管状況と圧力計取り付け位置

表－8 骨材試験成績表

		粗 骨 材		細 骨 材	
		天然	再生	天然	再生
粗粒率		6.62	6.64	2.70	3.04
表乾比重		2.69	2.50	2.60	2.27
絶乾比重		2.68	2.39	2.56	2.04
吸水率 (%)		0.45	4.59	1.72	11.41
単位容積質量 (kg/m ³)		1.68	1.46	1.83	1.41
実績率 (%)		62.6	60.1	71.6	68.1
洗い試験 (%)		2.10	0.64	0.87	4.10
粘土塊量 (%)		—	0.10	—	0.30
ふるい分け試験	通過百分率 (%)	25	100	100	
		20	92	92	
		15	77	71	
		10	40	39	100
		5	4	5	95
		2.5	2	0	84
		1.2			65
		0.6			52
		0.3			31
		0.15			3

圧送前後の屋外暴露用の供試体も作製した。

圧送実験では、4種類のコンクリートをそれぞれ5 m³ずつ打設し、管内圧力とコンクリートの品質変化の調査を行った。使用したポンプ車の機種および性能を表－7に、配管状況及び圧力計取り付け位置を図－10に示す。敷地は、若干の高低差があったが圧力計1と圧力計2は、ほぼ水平となるように配置した。

圧送した再生コンクリートは、室内試験でのRSシリーズと材料・調査とも同じ4種類のものであり、設計基準強度24N/mm²、スランプ18cm、空気量4.5%を目標として設計したものである。本実験で使用した骨材の試験結果を表－8に示す。

3.2 コンクリートの品質変化

荷卸し位置で採取した試料と、一定の吐出量（計画吐出量40 m³/h）で圧送した筒先の試料とを用いて圧送前後のコンクリートの品質変化を調査した。

フレッシュコンクリートの性状を図－11に、硬化コンクリートの標準養生での圧縮強度および暴露用供試体のコア強度を図－12に示す。フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度とも圧送前後において大きな違いは認められなかった。

図－13に再生細骨材混入量と圧縮強度の関係を示す。再生細骨材の混入量が多くなっても圧縮強度はあまり変化せず、再生細骨材の混入量の違いが圧縮強度に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

3.3 管内圧力

管内圧力の測定は、計画吐出量を30・40・50 m³/hの3水準として、それぞれの調査において計測した。吐出量は、ポンプ車に付いているデジタル表示の吐出量計で制御し、管内圧力はダイヤフラム型圧力計を配管に取り付けて、動ひずみ計を用いて0.02秒毎に計測し、圧力の平らになった部分を平均して求めた。実吐出量は1ストロークの時間より理論吐出量を求め、ポンプの容積効率を0.92と仮定して算出した。

圧力分布を図－14に、圧力損失係数を図－15に示す。再生細骨材の混入量の増加に伴い、管内圧力損失係数が増大したが、再生細骨材の混入率100%のRS-100と再生骨材を全く使用していないRS-Pがほぼ同程度の値を示した。圧力損失係数をポンプ圧送指針の普通コンクリートの値と比較した場合、同一スランプの圧力損失係数は、RS-100の値と同程度であった。今回の試験圧送は、再生コンクリートの工場内での実験であったため、練り上がり直後のコンクリートを使用してお

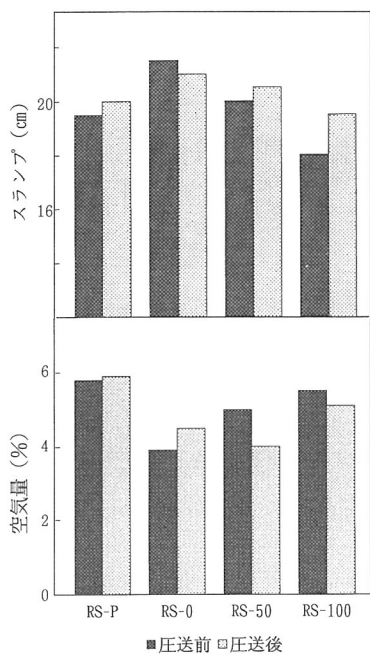


図-11 圧送前後の性状

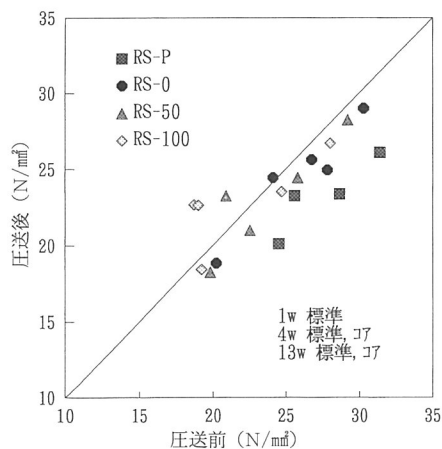


図-12 圧送前後の圧縮強度

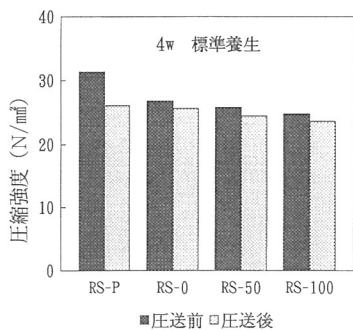


図-13 再生骨材混入量と圧縮強度

り、経時によるスランプやエアのロスがなく、また、アジテータ車での練り混ぜによる再生骨材に付着しているモルタル分の剥がれもなかったために、予想以上に良好な試験結果が得られたのではないかと推察する。

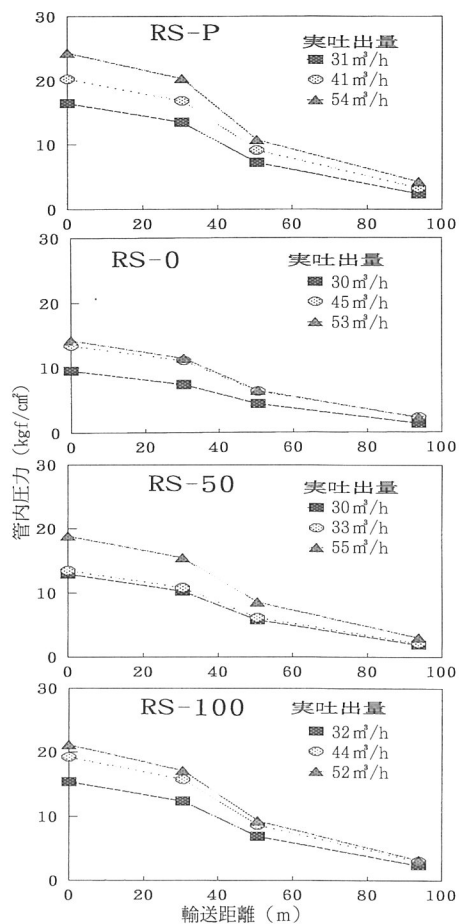


図-14 圧力分布

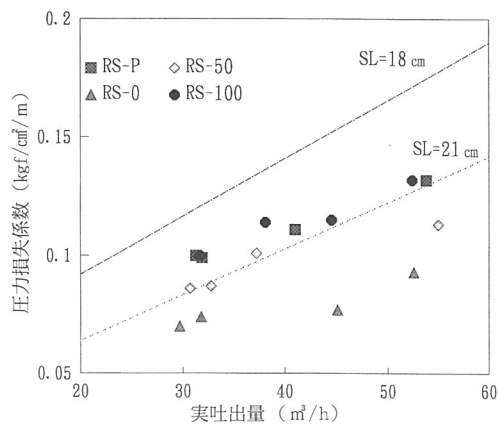


図-15 圧力損失係数

4. 実施工

4.1 工事概要

参議院麹町議員宿舍増築工事の捨てコンクリート部分にA種の再生粗骨材（吸水率5％以下）を用いた再生コンクリートを打設した。表－9に工事概要を示す。捨てコンクリートは、総打設面積約2,700㎡、打設平均厚さ6.0cmであり、3工区に分けて打設した。比較用に普通コンクリートを一部に打設した以外は、全て再生コンクリートを打設した（写真－2）。ポンプ車を構台上に設置し、約9m下の捨てコンクリート部分に打設した。使用したポンプ車はピストン式のブーム付きポンプ車であった。

4.2 使用材料および調査

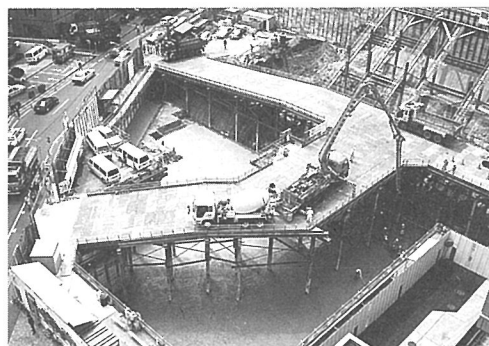
本実験において使用したコンクリートは、設計基準強度24N/㎟、スランプ18cmの普通コンクリート（RS-P）と、粗骨材にA種の再生粗骨材（粗骨材以外は普通コンクリートと同じ材料を使用）を用いた再生コンクリート（RS-0）の2種類である。それぞれの調査は工場実績のほか、室内試験で行った試験練りの結果から決定した。使用材料を表－10に、本実験で使用した骨材の試験結果を表－11に、コンクリートの計画調査を表－12に示す。

表－9 工事概要

工 事 名 称	参議院麹町議員宿舍増築工事
施 工 場 所	東京都千代田区麹町4－5
監 理	建設省大臣官房営繕監督課
工 期	平成7年9月1日～平成9年3月30日
建 物 用 途	宿 舎
敷 地 面 積	10,991.59㎡
建 築 面 積	1,708.39㎡
述べ床面積	9,814.71㎡
構 造	鉄筋コンクリート造
階 数	地下1階、地上7階、塔屋1階
基 礎 種 別	べた基礎

表－10 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（秩父小野田）
粗 骨 材	岩手県住田産砕石 2005
	再生粗骨材
細 骨 材	千葉県万田野産山砂
混 和 剤	A E減水剤（ボゾリス Na70）



写真－2 捨てコンクリート打設状況

表－11 骨材試験結果

		粗 骨 材				細骨材	
		天然	再 生			天 然	
			3 月	4 月	5 月		
粗粒率		6.70	6.54	6.72	6.65	2.66	
表乾比重		2.70	2.48	2.54	2.50	2.58	
絶乾比重		2.68	2.37	2.34	2.40	2.53	
吸水率 (％)		0.53	4.94	4.40	4.18	1.88	
単位容積質量 (kg/㎡)		1.63	1.44	1.45	1.48	1.68	
実績率 (％)		60.7	61.0	59.7	61.4	—	
洗い試験 (％)		0.8	0.6	0.4	0.6	1.8	
粘土塊量 (％)		0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	
ふ る い 分 け 試 験	通 過 百 分 率 (％)	25	100	100	100		
		20	95	92	93	98	
		15	64	77	67	66	
		10	29	43	28	34	100
		5	4	10	6	3	96
		2.5	2	1	1	0	82
		1.2					73
		0.6					49
		0.3					31
		0.15					3

表－12 コンクリートの調査

	呼 び 強 度	ス ラ ン プ (cm)	水 セ メ ン ト 比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単 位 量 (kg/㎡)					
					C	W	S	G		A E
								天然	再生	
RS-P	24.0	18.0	59.2	47.5	297	176	839	972	—	0.7
RS-0	24.0	18.0	54.0	46.0	317	171	813	—	915	1.2

表-13 フレッシュコンクリートの性状

コンクリート 種 類	採 取 位 置	スランブ (cm)	空気量 (%)	フロー (cm)	温 度 (℃)	塩化物 (g/m ³)
RS-0	N	18.5	3.7	—	14.7	31
RS-0	N	18.5	3.9	32×31	21.0	28
RS-0	T	19.0	3.8	32×31	21.5	—
RS-P	N	18.0	3.9	28×27	19.0	22
RS-P	T	18.0	4.2	29×28	19.5	—
RS-0	N	18.5	3.7	31×30	23.5	34
RS-0	T	19.0	4.6	31×30	24.0	—

採取位置 N：荷卸し T：筒先

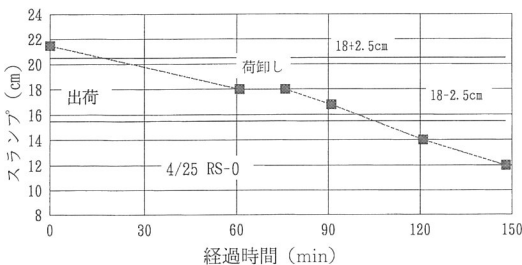


図-16 スランブの経時変化

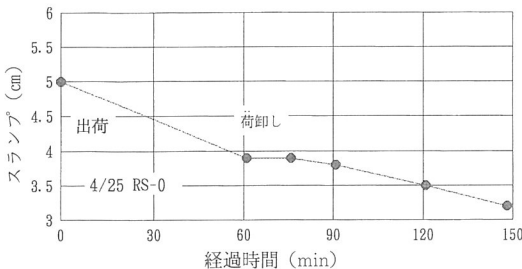


図-17 空気量の経時変化

表-14 圧縮強度試験結果一覧

種 類	採 取 位 置	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	
		1 W	4 W	13W	4 W	13W
RS-0	N	25.8	32.1	—	—	—
RS-0	N	22.2	31.4	32.2	2.713	2.630
RS-0	T	21.5	30.2	31.3	2.638	2.607
RS-0	C	—	26.5	34.8	2.611	2.653
RS-P	N	20.1	31.4	32.3	3.074	3.000
RS-P	T	18.2	28.1	29.9	2.757	2.856
RS-P	C	—	25.1	30.7	2.704	2.696
RS-0	N	19.9	26.3	30.0	2.509	2.583
RS-0	T	19.6	26.9	29.0	2.387	2.538

採取位置 N：荷卸し T：筒先 C：コア

4.3 フレッシュコンクリートの性状

荷卸し時の試料と、一定の吐出量 (30 m³/h) で圧送して筒先で採取した試料とのフレッシュコンクリートの性状を表-13に示す。スランブおよび空気量は、RS-P、RS-0ともJASS5で規定された管理範囲内であり、圧送前後でのフレッシュ性状に変化は認められなかった。また荷卸し時に採取したコンクリートを静置し、スランブと空気量の経時変化を測定した。結果を図-16および図-17に示す。出荷後現場到着まで(約60分)のロスが大きかったが、練り混ぜ後90分までは、管理範囲内であった。

4.4 圧縮強度および静弾性係数

表-14に標準養生での圧縮強度と屋外暴露用に作製した供試体のコア強度を示す。標準養生での平均圧縮強度は29.4N/mm²、標準偏差2.6N/mm²となった。コア強度においても材齢4週で設計基準強度 (24N/mm²) を満足した。また、圧送前後において圧縮強度およびヤング係数に大きな変化はなかった。

5. おわりに

今回の実験では、粗骨材のみにA種の再生骨材を用いた再生コンクリートを実施工に供したが、再生骨材が徹底した品質管理の基で製造され、その品質が安定していれば、再生コンクリートとして十分に使用可能であることを確信した。乾燥収縮については、普通コンクリートと比べて若干劣るが、使用部位を地中部等に限定すれば、特に問題はないものと考ええる。今後、再生骨材の工場が整備されてゆけば、施工面では通常のコンクリートと同等に扱っても問題ないものと推察する。

最後に、今回の調査・実験において立石建設工業㈱、東京建設廃材処理協同組合の方々にご協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

[参考文献]

㈱国土開発技術研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発 平成6年度報告書 その1，その2