仕上材を施した原コンクリートから製造した再生粗骨材 コンクリートの諸物性

—再生粗骨材コンクリートの圧縮強度, 静弾性係数および乾燥収縮—

PHYSICAL PROPERTIES OF RECYCLED COARSE AGGREGATE CONCRETE MADE OF THE RAW CONCRETE WITH FINISHING MATERIALS

—The compressive strength, static modulus of elastisity and drying shrinkage
of recycled coarse aggregate concrete—

柳 啓*, 笠井 芳夫**

Kei YANAGI and Yoshio KASAI

This paper deals with the effects of sorts and contents of impurities in recycled coarse aggregate on the properties of recycled concrete. Recycled aggregate which was assumed producing from reinforced concrete structure of wall, floor and roof slab with several sorts of finishing materials. The sorts of finishing materials for original concrete were a multi-layer wall coating (ML), a synthetic resin emulsion paint (EP), a gypsum plaster (GP), a lime plaster (LP), a fibrous wall coating (FW), a ceramic tile (CT), a plastic tile (PT) and an asphalt membran water proofing (AM). The items of the investigations were on the compressive strength, static modulus of elastisity and drying shrinkage of the recycled coarse aggregate concrete.

Key words; Finishing materials, Impurities, Recycled coarse aggregate concrete,
Compressive strength, Static modulus of elastisity, Drying shrinkage.

仕上材料、不純物、再生粗骨材コンクリート、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮

1. はじめに

筆者等は、かねてより再生骨材に含まれる不純物が再生コンクリートの諸性状に及ぼす影響について研究を進めてきている。これまでの研究結果では、再生骨材の原コンクリートの仕様が不明であること、コンクリート、ブロック、ALC等のいろいろなコンクリート塊が混合していること等の理由によって不純物が再生骨材コンクリートに及ぼす影響を明らかにすることは出来なかった。

そこで、再生骨材に含まれる不純物はコンクリートに施工された各種の仕上材によってもたらされと考え、各種仕上材を施工した仕様の明確な原コンクリートから再生粗骨材を製造し、再生粗骨材の品質およびこれを用いた再生粗骨材コンクリートの諸物性について実験検討を行った。なお、仕上材は壁用として複層仕上塗材(ML)、エマルジョン塗料(EP)、石膏プラスター(GP)、しっくい壁(LP)、繊維壁(FW)およびセラミックタイル(CT)を、床用としてアスファルト防水層(AM)を施工した。実験手順の概略を下記に示す。

- (1) RC構造物の壁、床、屋根を想定したコンクリート板(寸法45×90×12cm;壁は縦打ち、床、屋根は平打ち)をレディーミクストコンクリートを使用して打設。(材齢1週間で脱型、その後仕上材施工まで屋外シート養生を実施)
- (2) コンクリート板の材齢1ヶ月の時、各種仕上材を施工。(仕上材の技術者および技能士が施工)
- (3) コンクリート板の材齢2ヶ月(仕上材施工後1ヶ月)の時、これを破碎・分級して再生粗骨材を製造。(一次破碎: 圧碎機、2次破碎: ジョークラッシャー)
- (4) 再生粗骨材コンクリートを調合し各種実験を実施。

前報¹⁾(再生粗骨材コンクリートの調合、凝結およびブリーディング)では再生粗骨材の製造(原コンクリート、仕上材の施工、コンクリート板の破碎)、再生粗骨材(物理的性質、不純物量)、再生粗骨材コンクリートの製造(使用材料、調合)再生粗骨材コンクリートのフレッシュ性状(凝結およびブリーディング)について報告した。ここでは、再生粗骨材コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮について報告する。

* 建材試験センター中央試験所 専門職・修士(工学)

** 日本大学生産工学部建築工学科 教授・博士(工学)

Japan Testing Center for Construction Materials., M. Eng.
Prof., College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

2. 使用材料、再生粗骨材コンクリートおよび供試体

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は静岡県大井川産の川砂を、粗骨材は東京都青梅市産の硬質砂岩砕石(2005)を使用した。AE剤は天然樹脂酸塩系の市販品を使用した。また、建築物の解体時や再生粗骨材の製造過程での混入が考えられる不純物としてガラス(G)および土(S)を使用した。ガラス(一般板ガラス)は25~5mmに粉碎したものを、また土(関東ローム)は25~5mmのものを表乾状態に近い状態に含水調整して使用した。

表・1 コンクリートの基本調査

コンクリート の記号	置換率 (%)	スランパ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	空気量 (%)
NA	0						
NF, RA	30, 50, 100	18±2.5	60	44.0	181	302	4±1.5
NAG, BRG	1, 3, 5						
NAS, BRS	1						
NAS	3			42.5	195	325	
NAS	5	18±2.5	60	41.0	205	342	4±1.5
BRS	3			41.5	201	335	
BRS	5			40.5	208	347	

注-1) 記号

NA; 川砂・砕石コンクリート。

NF100; 川砂・再生粗骨材(砕石に仕上材を含まない再生粗骨材を100%置換)コンクリート。

RA; 川砂・砕石+再生粗骨材(砕石に再生粗骨材を30, 50, 100%置換)コンクリートの総称。再生粗骨材10種類, 30調査。

RA30: 砕石に再生粗骨材を30%置換。(NF30, ML30, EP30等)

RA50: 砕石に再生粗骨材を50%置換。(LP50, FW50, CT50等)

RA100: 砕石に再生粗骨材を100%置換。(PT100, AM100, BR100等)

NAG; 川砂・砕石コンクリートで、ガラスを砕石に(1, 3, 5%)置換。

NAG1: ガラスを砕石に1%置換。

NAG3: ガラスを砕石に3%置換。

NAG5: ガラスを砕石に5%置換。

BRG; 川砂・混合再生粗骨材コンクリートで、ガラスを再生粗骨材に(1, 3, 5%)置換。

BRG1: ガラスを再生粗骨材1%に置換。

BRG3: ガラスを再生粗骨材3%に置換。

BRG5: ガラスを再生粗骨材5%に置換。

NAS; 川砂・砕石コンクリートで、土を砕石に(1, 3, 5%)置換。

NAS1: 土を砕石に1%置換。

NAS3: 土を砕石に3%置換。

NAS5: 土を砕石に5%置換。

BRS; 川砂・混合再生粗骨材コンクリートで、土を再生粗骨材に(1, 3, 5%)置換。

BRS1: 土を再生粗骨材1%に置換。

BRS3: 土を再生粗骨材3%に置換。

BRS5: 土を再生粗骨材5%に置換。

然樹脂酸塩系の市販品を使用した。また、建築物の解体時や再生粗骨材の製造過程での混入が考えられる不純物としてガラス(G)および土(S)を使用した。ガラス(一般板ガラス)は25~5mmに粉碎したものを、また土(関東ローム)は25~5mmのものを表乾状態に近い状態に含水調整して使用した。

(2) コンクリート供試体の作り方

供試体は、JIS A 1115(まだ固まらないコンクリートの試料採取方法)およびJIS A 1132(コンクリートの強度試験用供試体の作り方)に従って作製した。

3. 実験項目および実験方法

各種再生粗骨材を砕石に0、30、50および100%置換した31種類の再生粗骨材コンクリートと、砕石および混合再生粗骨材にガラスおよび土を1、3および5%置換した12種類のコンクリートの合計43調査について圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮試験を行った。コンクリートの基本調査を表・1に示す。また実験方法を表・2に示す。

4. 実験結果および考察

実験結果の一覧を表・3および表・4に示す。考察にあたっては、主として仕上材を含まない再生粗骨材を全量(100%)使用した川砂・再生粗骨材コンクリート(記号: NF100)を基準とした。

4.1 圧縮強度

(1) 仕上材の影響

表-5に各種再生粗骨材コンクリートの圧縮強度比を仕上材を含まない再生粗骨材を100%置換した再生コンクリート(記号: NF100)の値を100として示した。

① 標準水中養生7日の場合: 砕石コンクリート(記号: NA)はNF100とほぼ同じ値を示した。再生粗骨材の置換率30%および50%の再生コンクリート(記号: RA30およびRA50)は仕上材として繊維壁を

表・2 実験方法

試験項目	規 格	養 生 方 法
圧縮強度	JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)	標準水中養生: 材齢7, 28日 標準水中養生28日→空气中養生: 材齢1年 空气中養生: 材齢28日, 1年(温度20℃、湿度60%RH)
静弾性係数	JSTM C7103(コンクリートの静弾性係数試験方法)	標準水中養生: 材齢28日 標準水中養生28日→空气中養生: 材齢1年 空气中養生: 材齢28日, 1年(温度20℃、湿度60%RH)
乾燥収縮	JIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法)コンパレータ方法	標準水中養生: 材齢7日 乾燥期間: 1年間(温度20℃、湿度60%RH)

表・3 圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮試験結果一覧（仕上材を含む再生粗骨材コンクリート）

コンクリート 記号	再生粗 骨材の 置換率 (%)	圧縮強度(kgf/cm ²)				静弾性係数(×10 ⁵ kgf/cm ²)				長さ変化(6ヶ月)		長さ変化(1年)		
		標準養生		空气中養生		標準養生		空气中養生		乾燥	質量減 収縮率 少率	乾燥	質量減 収縮率 少率	
		28日後空气中 7日	28日	1年	28日	1年	28日後空气中 28日	1年	28日	1年	(×10 ⁻⁴) (%)	(×10 ⁻⁴) (%)	(×10 ⁻⁴) (%)	
NA	0	235	347	411	194	233	2.89	2.69	2.14	2.33	7.82	2.9	8.12	3.2
NF30	30	236	363	414	229	228	2.75	2.53	2.30	2.18	8.06	3.1	8.43	3.6
NF50	50	247	353	435	205	240	2.75	2.39	1.99	2.01	8.37	3.3	8.72	3.8
NF100	100	231	310	401	218	222	2.17	2.09	1.81	1.68	9.48	4.0	10.24	4.5
ML30	30	233	329	393	195	223	2.82	2.52	2.16	2.11	8.38	3.1	8.89	3.4
ML50	50	241	340	418	222	241	2.77	2.49	2.12	2.02	8.02	3.2	8.58	3.6
ML100	100	235	315	412	250	239	2.33	2.12	1.91	1.72	9.60	3.9	10.14	4.4
EP30	30	240	342	413	217	234	2.90	2.52	2.13	2.10	8.26	3.0	8.72	3.4
EP50	50	227	333	419	201	226	2.52	2.47	2.01	2.04	7.74	3.3	8.27	3.6
EP100	100	224	317	388	213	217	2.30	2.05	1.76	1.63	9.42	4.0	10.26	4.5
GP30	30	250	346	417	245	232	2.82	2.67	2.33	2.20	7.73	3.0	8.11	3.4
GP50	50	250	344	420	267	277	2.70	2.40	2.17	2.10	8.62	3.2	9.27	3.7
GP100	100	222	316	405	240	231	2.30	2.11	1.80	1.63	10.72	4.1	11.37	4.7
LP30	30	245	359	417	258	272	2.78	2.51	2.19	2.27	7.96	3.0	8.39	3.4
LP50	50	242	340	429	256	276	2.72	2.58	2.29	2.23	7.75	3.2	8.22	3.6
LP100	100	225	320	395	215	223	2.27	2.11	1.80	1.78	9.58	4.1	10.18	4.6
FW30	30	223	327	408	205	229	2.91	2.54	2.17	2.06	7.92	3.0	8.44	3.4
FW50	50	239	337	429	217	237	2.70	2.46	1.97	2.07	8.56	3.3	9.05	3.7
FW100	100	225	307	409	216	231	2.27	2.15	1.76	1.75	9.63	4.2	10.27	4.7
CT30	30	263	342	412	185	217	2.81	2.62	2.33	2.08	8.08	3.0	8.50	3.5
CT50	50	273	366	427	235	252	2.79	2.48	2.17	2.05	8.01	3.2	8.44	3.7
CT100	100	213	304	383	236	234	2.22	2.00	1.76	1.80	9.88	4.0	10.47	4.5
PT30	30	247	359	424	258	252	2.89	2.71	2.29	2.14	7.70	2.8	8.06	3.3
PT50	50	234	357	407	235	223	2.80	2.41	2.11	1.99	8.68	3.3	9.02	3.9
PT100	100	201	278	347	201	205	2.22	1.97	1.45	1.52	10.09	3.9	10.76	4.4
AM30	30	265	358	429	231	256	2.95	2.76	2.25	2.22	8.29	3.0	8.85	3.5
AM50	50	253	357	415	224	251	2.61	2.55	2.15	2.16	7.91	3.2	8.39	3.8
AM100	100	201	294	357	180	193	2.29	2.03	1.57	1.61	9.96	4.2	10.54	4.8
BR30	30	249	342	407	220	231	2.79	2.56	2.14	2.11	8.12	3.2	8.62	3.6
BR50	50	249	340	401	204	218	2.62	2.43	1.94	2.00	8.32	3.6	8.81	3.6
BR100	100	233	316	386	198	211	2.21	2.10	1.65	1.66	9.32	4.1	10.25	4.6

表・4 圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮試験結果一覧（ガラス、土を置換したコンクリート）

コンクリート 記号	ガラス、 土 の 置換率 (%)	圧縮強度(kgf/cm ²)				静弾性係数(×10 ⁵ kgf/cm ²)				長さ変化(6ヶ月)		長さ変化(1年)		
		標準養生			空气中養生 28日 1年	標準養生			空气中養生 28日 1年	乾燥 質量減 収縮率 少率 (×10 ⁻⁴) (%)	乾燥 質量減 収縮率 少率 (×10 ⁻⁴) (%)			
		28日後空气中 7日 28日 1年	28日 1年	28日後空气中 28日 1年		28日 1年								
NAG1	1	232	335	382	236	247	2.90	2.79	2.16	2.41	7.14	2.9	7.74	3.3
NAG3	3	233	343	382	241	249	3.00	2.80	2.29	2.53	7.59	2.8	7.80	3.1
NAG5	5	236	328	371	205	211	2.92	2.63	2.25	2.42	7.38	3.1	7.84	3.5
BRG1	1	227	308	369	187	209	2.33	2.05	1.71	1.54	9.40	4.1	10.02	4.7
BRG3	3	201	289	339	209	212	2.16	1.99	1.59	1.59	10.26	4.4	10.76	4.9
BRG3	5	227	305	357	204	206	2.46	2.04	1.79	1.63	8.70	4.1	9.28	4.7
NAS1	1	261	368	395	208	237	2.90	2.61	2.16	2.15	8.54	3.0	9.07	3.3
NAS3	3	262	383	402	232	242	2.75	2.57	2.08	2.28	9.46	2.9	10.12	3.3
NAS5	5	258	379	396	238	220	2.71	2.30	1.91	1.98	9.67	3.2	10.34	3.6
BRS1	1	237	323	379	208	222	2.35	1.91	1.74	1.65	10.23	4.3	10.86	4.8
BRS3	3	244	333	357	249	230	2.15	1.85	1.84	1.63	10.45	4.4	11.24	5.1
BRS5	5	251	332	353	224	241	2.14	1.73	1.56	1.58	11.50	4.4	12.34	5.0

含む再生粗骨材を碎石に対して30%置換した再生コンクリート（記号；FW30）を除きNF100より大きい値を示した。仕上材を含む再生粗骨材を100%置換した再生コンクリート（記号；RA100）はプラスチックタイルを含む再生粗骨材を碎石に対して100%置換した再生コンクリート（記号；PT100）およびアスファルト防水層を含む再生粗骨材を碎石に対し100%置換した再生コンクリート（記号；AM100）を除いてNF100とはほぼ同じ値を示した。PT100およびAM100はNF100に対し-13%の値を示した。

② 標準水中養生28日および標準水中養生28日後空气中養生1年の場合：標準水中養生材齢28日の場合、RA100はNAの80～92%の値を示し、RA30およびRA50はいずれもNF100より大きくNAの93～106%の値を示した。RA100の中で、PT100およびAM100はNF100に対し各々-10%および-5%の値を示し、圧縮強度の低下が大きい。

標準水中養生28日後空气中養生材齢1年の場合にはRA100はNAの84～100%の値を示し、標準水中養生28日の場合に比べ強度比が大きい、これは再生粗骨材コンクリートが碎石コンクリートよりも多くの水分を含むことから乾燥環境における水和反応が碎石コンクリートに比べて有利に進んだものと考えられる。

RA30およびRA50はいずれもNF100より大きくかつNAの96～104%の値を示した。RA100の中でPT100およびAM100はNF100に対し各々-8%および-13%の値を示し、仕上材としてプ

ラスチックタイルおよびアスファルト防水層が含まれると材齢28日の場合と同様に圧縮強度の低下が大きい。

③ 空气中養生28日および1年の場合：空气中養生材齢28日の場合、NAとNF100の圧縮強度は各々の標準水中養生28日の56、70%であり空气中養生におけるコンクリートの強度発現が不利であることを示している。また、NAに比べNF100の強度比が大きいのは、再生粗骨材コンクリートは粗骨材中により多くの水分を含んでいることが原因と考えられる。RA100はNAの93～129%を、RA30およびRA50は85～118%を示し再生粗骨材コンクリートの種類、置換率によって圧縮強度に及ぼす明確な傾向は認められない。

空气中養生1年の場合、NAとNF100の圧縮強度は各々の標準水中養生28日後空气中養生1年の57、55%であり空气中養生が長期間に及ぶと強度比はほぼ同程度となる。NAの場合は材齢の進行に伴い約20%の強度増進がみられたのに対し、NF100の場合は、わずか2%の増進にとどまった。RAの中でGP50、LP30およびLP50はNF100の圧縮強度の20%以上の強度増進を示し、PT100、BR100およびAM100が各々-8、-9および-17%を示したことが特徴としてあげられる。GP50、LP30およびLP50の圧縮強度が大きかった原因は再生粗骨材中に含まれる石膏または石灰の反応等が考えられる。

（2）ガラスおよび土の影響

表・6 にガラスおよび土を碎石および混合再生粗骨材

表・5 コンクリートの圧縮強度比(%) : 仕上材を含む場合

コンクリート 記 号	標準水中養生;材齢7日			標準水中養生;材齢28日			標準水中養生28日後 空气中養生;材齢1年			空气中養生;材齢28日			空气中養生;材齢1年		
	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換
NF	102	107	100	117	114	100	103	108	100	105	94	100	103	108	100
ML	101	104	102	100	110	102	98	104	103	89	102	115	100	109	108
EP	104	98	97	110	107	102	103	104	97	100	92	98	105	102	98
GP	108	108	96	112	111	102	104	105	101	112	122	110	105	125	104
LP	106	105	97	110	110	103	104	107	99	118	117	99	123	124	100
FW	97	103	97	105	109	99	102	107	102	94	100	99	103	107	104
CT	114	118	92	110	118	98	103	106	96	85	108	108	98	114	105
PT	107	101	87	116	115	90	106	101	87	118	108	92	114	100	92
AM	115	110	87	115	115	95	107	103	89	106	103	83	115	113	87
BR	108	108	101	110	110	102	101	100	96	101	94	91	104	98	95

注-2) 同一養生におけるNF100の圧縮強度の値を100とした値。

(仕上材の異なる8種類の再生粗骨材を等量混合した再生粗骨材、記号;BR)に1、3および5%置換したコンクリートの圧縮強度をNAおよびBR100と比較して示した。

① 標準水中養生7日の場合: 碎石にガラスを1、3および5%置換したNAG1、NAG3およびNAG5の圧縮強度はNAとほとんど変わらないが、混合再生粗骨材にガラスを置換したコンクリートの場合にはBR100に比べBRG1とBRG5は3%、BRG3は14%低い値を示した。BRG3の圧縮強度が小さかった原因はコンクリート中の空気量がBRG1およびBRG5の場合が3.9%であったのに対して5.7%と大きかったことがあげられる。従って、碎石および混合再生粗骨材にガラスを置換しても標準水中養生材齢7日のコンクリートの圧縮強度には大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

碎石に土を1、3および5%置換したNASはNAの110~111%、また混合再生粗骨材に土を1、3および5%置換したBRSはBR100の102~108%であり土が混入したコンクリートの圧縮強度は、若干大きくなる傾向を示した。

② 標準水中養生28日および標準水中養生28日後空气中養生1年の場合: 標準水中養生28日の場合、碎石にガラスを置換したNAGはNAの95~99%、混合再生粗骨材にガラスを置換したBRGはBR100に対し91~97%を示し、ガラスを置換したNAGおよびBRGはガラスを置換しないNAおよびBR100に比べ若干小さい値を示した。

碎石に土を置換したNASはNAの106~110%、また混合再生粗骨材に土を置換したBRSはBR100の102~105%であり、土が混入したコンクリートの標準水中養生材齢28日圧縮強度は土を置換しないコンクリートより若干大きくなる傾向を示した。

表・6 コンクリートの圧縮強度百分率(%) : ガラス(G)および土(S)を置換した場合

コンクリート 記 号	標準水中養生;材齢7日			標準水中養生;材齢28日			標準水中養生28日後 空气中養生;材齢1年			空气中養生;材齢28日			空气中養生;材齢1年		
	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	1%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換
NAG	99	99	100	97	99	95	93	93	90	122	124	106	106	107	91
NAS	111	111	110	106	110	109	96	98	96	107	120	123	102	104	94
BRG	97	86	97	97	91	97	96	88	92	94	106	103	99	100	98
BRS	102	105	108	102	105	105	98	92	91	105	126	113	105	109	114

注-3) NAG、NAS; 同一養生におけるNAの圧縮強度を100とした値。

BRG、BRS; 同一養生におけるBR100の圧縮強度を100とした値。

表・7 コンクリートの静弾性係数比(%) : 仕上材を含む場合

コンクリート 記号	標準水中養生;材齢28日			標準水中養生28日後 空气中養生;材齢1年			空气中養生;材齢28日			空气中養生;材齢1年		
	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換
NF	127	127	100	121	114	100	127	110	100	130	120	100
ML	130	128	107	121	119	101	119	117	106	126	120	102
EP	134	116	106	121	118	98	118	111	97	125	121	97
GP	130	124	106	128	115	101	129	120	99	131	125	97
LP	128	125	105	120	123	101	121	127	99	135	133	106
FW	134	124	105	122	118	103	120	109	97	123	123	104
CT	129	129	102	125	119	96	129	120	97	124	122	107
PT	133	129	102	130	115	94	127	117	80	127	118	90
AM	135	120	106	132	122	97	124	119	87	132	129	96
BR	129	121	102	122	116	100	118	107	91	126	119	99

注-4) 同一養生におけるNF100の静弾性係数の値を100とした値。

標準水中養生28日後空气中養生1年の場合、NAGはNAの90~93%を、BRGはBR100の88~96%を示し、いずれもガラスを置換しないBR100に比べて若干小さい値を示した。また土を置換した場合、NASはNAの96~98%を、BRSはBR100の91~98%を示し、土が混入したコンクリートの1年圧縮強度は、若干小さくなる傾向を示した。

③ 空气中養生28日および1年の場合：空气中養生28日の場合、NAGはNAの106~124%を、またBRGはBR100の94~106%を示したが、混合再生粗骨材にガラスを置換したコンクリートはBRG1を除きガラスを置換しないBR100より大きい値を示した。NASはNAの107~123%を、BRSはBR100の105~126%を示し、土が混入したコンクリートの28日圧縮強度は若干大きくなる傾向を示した。

空气中養生1年の場合、NAGはNAの91~107%を、BRGはBR100の98~100%を示したが、いずれも置換率5%を除いてBR100より大きい値を示した。またNASはNAの94~104%、BRSはBR100の105~114%を示した。土が混入した場合の空气中養生の材齢1年の圧縮強度はNAS5を除き、若干大きくなる傾向を示した。

4.2 静弾性係数

(1) 仕上材の影響

表-7に各種再生粗骨材コンクリートの静弾性係数比(仕上材を含まない再生粗骨材を100%置換したコンクリートの静弾性係数を100とした)を示した。

① 標準水中養生28日および標準水中養生28日後空

気中養生1年の場合：材齢28日の場合、NAの静弾性係数は $2.89 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。仕上材を含まない再生粗骨材を全量使用した再生コンクリート(記号; NF100)の静弾性係数は $2.17 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、NAの75%の値であった。

NF100を基準にすると、RA30およびRA50は116~136%を示し、RA100は102~107%の値を示した。このことから仕上げ材を含んだ再生粗骨材を使用したRAの材齢28日における静弾性係数は、NF100の静弾性係数より大きいと言える。

標準水中養生28日後空气中養生1年の場合、NAの静弾性係数は $2.69 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、NF100は $2.09 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、標準水中養生28日の静弾性係数の各々93%、96%値を示した。これは乾燥によって静弾性係数が低下したものと考えられる。またNF100を基準にすると、RA30およびRA50は115~132%、RA100は94~103%であり、仕上材を含む再生粗骨材を100%使用した再生粗骨材コンクリートの静弾性係数は材齢の進行とともに仕上材を含まない再生粗骨材コンクリートより小さくなる傾向を示していると言える。

② 空气中養生28日および1年の場合：空气中養生の材齢28日の場合、NAの静弾性係数は $2.14 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を示し、またNF100は $1.81 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を示した。これは、標準水中養生の場合の各々74%、83%の値であり、乾燥環境におけるコンクリートの静弾性係数の増進は圧縮強度の場合と同様に水中養生に比べて不利であると言える。NF100を基準にすると、RA30およびRA50は107~129

表・8 コンクリートの静弾性係数比(%) : ガラス(G)および土(S)を置換した場合

コンクリート 記号	標準水中養生;材齢28日			標準水中養生28日後 空气中養生;材齢1年			空气中養生;材齢28日			空气中養生;材齢1年		
	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換	1%置換	3%置換	5%置換
NAG	100	104	101	104	104	98	101	107	105	103	109	104
NAS	100	95	94	97	96	86	101	97	89	92	98	85
BRG	105	98	111	98	95	97	104	96	108	93	96	98
BRS	100	97	97	91	88	82	105	112	95	99	98	95

注-5) NAG、NAS ; 同一養生におけるNAの静弾性係数を100とした値。

BRG、BRS ; 同一養生におけるBR100静弾性係数を100とした値。

%を示し、RA100は80~106%の値を示した。RA100の中ではPT100が80%、AM100が87%およびBR100が91%を示したことが特徴的である。

空气中養生1年の場合、NAの静弾性係数は $2.33 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、NF100は $1.68 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、標準水中養生28日後空气中養生1年の場合の各々87%、80%の値を示した。

NF100を基準にすると、RA30およびRA50は114~135%を、RA100は90~107%を示し、PT100が90%の値を示したことが特徴的である。

(2) ガラスおよび土の影響

表・8に材齢28日および1年の静弾性係数をNAおよびBR100と比較して示した。

① 標準水中養生28日および標準水中養生28日後空气中養生1年の場合：標準水中養生28日の場合、碎石にガラスを置換したNAGはNAの100~104%、混合再生粗骨材にガラスを置換したBRGはBR100の98~111%であり、ガラスを置換したNAGおよびBRGはいずれもNAおよびBR100に比べてほぼ等しいかまたは若干大きい値を示した。碎石に土を置換したNASはNAの94~100%、また混合再生粗骨材に土を置換したBRSはBR100の97~100%であり土が混入した場合には、静弾性係数が若干小さくなる傾向を示した。

標準水中養生28日後空气中養生1年の場合、NAGはNAの98~104%を、BRGはBR100の95~98%を示し、いずれもガラスを置換しない場合と大差ない値を示した。また土を置換した場合にはNASはNAの86~97%を、またBRSはBR100の82~91%を示し、土が混入したコンクリートの静弾性係数は、土の置換率に比例して小さくなる傾向を示した。

② 空气中養生28日および1年の場合：空气中養生28日の場合、NAGの静弾性係数はNAの101~

107%を示し、BRGはBR100の96~108%を示した。NASはNAの89~101%を、BRSはBR100の95~112%を示し、土が混入すると碎石コンクリートの場合は置換率に比例して静弾性係数は低下する傾向を示すが、混合再生粗骨材コンクリートの場合は置換率3%で最大値を示しNASと異なる傾向を示した。

図・1 圧縮強度と静弾性係数との関係
(仕上材; 置換率30%)

図・2 圧縮強度と静弾性係数との関係
(仕上材; 置換率50%)

空气中養生1年の場合、NAGの静弾性係数はNAの103～109%を、BRGはBRの85～98%を示し、碎石にガラスが混入すると静弾性係数は若干大きくなるが混合再生粗骨材に混入すると小さくなる傾向を示した。また、NASはNAの85～98%を、BRSはBR100の95～99%を示し、土が混入すると、その置換率に比例して静弾性係数は低下する傾向を示した。

(3) 圧縮強度と静弾性係数の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を再生粗骨材の置換率別およびガラス、土の置換別に日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準」の(1)式(以後、学会規準式と言う)およびACI Building Codeに示された(2)式(以後、ACI規準式と言う)と比較して図・1～図・5に示した。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times (F_c / 200)^{0.5} \quad (1)$$

$$E = (10600 \sqrt{F_c + 70300}) \times (\gamma / 2.346)^{1.5} \quad (2)$$

ここに、E：静弾性係数($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)

F_c ：コンクリートの圧縮強度(kgf/cm^2)

γ ：コンクリートの気乾単位容積質量(t/m^3)

① 置換率30%の場合(図・1)；標準水中養生28日および空气中養生28日の静弾性係数は、学会規準式の $\gamma = 2.25 \sim 2.35$ (試験時供試体の γ ；2.20～2.33)に、標準水中養生28日後空气中養生1年および空气中養生1年の静弾性係数は、ACI規準式の $\gamma = 2.20 \sim 2.30$ (試験時供試体の γ ；2.18～2.24)にほぼ一致する。

② 置換率50%の場合(図・2)；標準水中養生28日および空气中養生28日の静弾性係数は学会規準式の $\gamma = 2.20 \sim 2.30$ (試験時供試体の γ ；2.16～2.31)に、また標準水中養生28日後空气中養生1年および空气中養生1年の静弾性係数はACI規準式の $\gamma = 2.10 \sim 2.20$ (試験時供試体の γ ；2.15～2.23)にほぼ一致する。

③ 置換率100%の場合(図・3)；標準水中養生28日および空气中養生28日の静弾性係数は学会規準式の $\gamma = 2.00 \sim 2.10$ (試験時供試体の γ ；2.07～2.24)に、標準水中養生28日後空气中養生1年および空气中養生1年の静弾性係数はACI規準式の $\gamma = 1.90$ (試験時供試体の γ ；2.05～2.14)に概ね回帰するが、圧縮強度の値から静弾性係数を推定しようとする場合には学会規準式およびACI規準式に試験時供試体の γ をそのまま使用すると試験によって得られる静弾性係数の値より大きくなる危険性がある。

④ ガラス置換の場合；図・4に示したように、標準水中養生28日および空气中養生28日の静弾性係数は学会規準式の $\gamma = 2.10 \sim 2.40$ (試験時供試体の γ ；2.10～2.30)にまた、標準水中養生28日後空气中養生1年および空气中養生1年の静弾性係数は

図・3 圧縮強度と静弾性係数との関係
(仕上材；置換率100%)

図・4 圧縮強度と静弾性係数との関係
(ガラス置換率1、3および5%)

図・5 圧縮強度と静弾性係数との関係
(土置換率1、3および5%)

ACI規準式の $\gamma = 1.90 \sim 2.30$ (試験時供試体の γ ；2.10～2.31)に概ね回帰する。しかしながら、材齢1年における静弾性係数をACI規準式から推定する場合には γ の値の補正が必要である。

⑤ 土置換の場合、図・5に示したように、標準水中養生28日および空气中養生28日の静弾性係数は学会規準式の $\gamma = 2.00 \sim 2.30$ （試験時供試体の γ ； $2.06 \sim 2.32$ ）にまた標準水中養生28日後空气中養生1年および空气中養生1年の静弾性係数はACI規準式の $\gamma = 1.85 \sim 2.20$ （試験時供試体の γ ； $2.06 \sim 2.22$ ）に概ね回帰する。

以上述べたように、再生粗骨材コンクリートの静弾性係数は、養生条件等が異なる等の問題はあっても概略材齢28日の場合は学会規準式が、また材齢1年の場合はACI規準式が適用出来そうである。再生粗骨材の置換率30%及び50%の再生粗骨材コンクリートの場合は、学会規準式及びACI規準式に使用した γ の値の範囲と試験時供試体の γ の値の範囲とがほぼ一致する。従って学会規準式又はACI規準式を使用して、圧縮強度と供試体の γ の値から静弾性係数を推定する事が可能である。しかしながら、置換率100%の場合および土を置換した場合には、学会規準式及びACI規準式に用いた γ の値が実際の供試体の γ の値より小さい。そのため学会規準式及びACI規準式に供試体の γ をそのまま適用すると実験により得られる静弾性係数の値より大きくなる危険性がある。

4.3 乾燥収縮

① 仕上材の種類と乾燥収縮：表・9に各種再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率の比を仕上材を含まない再生

表・9 コンクリートの乾燥収縮率の比（％）：
仕上材を含む場合

コンクリート 記号	乾燥期間6ヶ月			乾燥期間1年		
	30%置換	50%置換	100%置換	30%置換	50%置換	100%置換
NF	85	88	100	82	85	100
ML	88	85	101	87	84	99
EP	87	82	99	85	81	100
GP	81	91	113	79	91	111
LP	84	82	101	82	80	99
FW	84	90	102	82	88	100
CT	85	84	104	83	82	102
PT	81	92	106	79	88	105
AM	87	83	105	86	82	103
BR	86	88	98	84	86	100

注-6) 同一乾燥期間におけるNF100の乾燥収縮率を100とした値。

粗骨材を100%置換した再生コンクリートの乾燥収縮率を100として示した。乾燥期間1年におけるのNF100の乾燥収縮率は 10.24×10^{-4} であり、砕石コンクリート（NA； 8.12×10^{-4} ）のそれに比べ21%大きい。この値は（社）建築業協会の報告にほぼ等しい。³⁾置換率30%における再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率の比はNF100に対して81～88%（平均85%）である。置換率50%では82～92%（平均86%）の範囲にあり、仕上材からもたらされた不純物を含む再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮率は置換率30および50%の場合には不純物を含まない再生粗骨材コンクリートより小さい値を示した。また置換率100%では96～114%（平均102%）であり、仕上材からもたらされた不純物が乾燥収縮に影響するものと影響しないものがある。影響の大きいものとしてはGP100（114%）およびPT100（110%）があげられる。乾燥に伴う質量減少率も収縮率の場合と同様に置換率の増加に伴い大きくなった。

② ガラスおよび土の影響：表・10にガラスおよび土を置換したコンクリートの乾燥収縮率の比を示した。これによると、砕石および再生粗骨材にガラス及び土を置換するとガラスの場合には置換しないコンクリートの乾燥収縮率とほとんど変わらないが、土の場合にはNASがNAの112～127%、BRSが106～120%を示し、土の置換によって乾燥収縮率が大きくなった。

③ コンクリート中の全水量（単位水量と骨材の吸水率相当分の水量の和）と乾燥収縮率との関係を図・6に示す。ガラスを置換したコンクリートの乾燥収縮率は、砕石コンクリートおよび混合再生粗骨材コンクリートと変わらないが、土を置換したコンクリートの乾燥収縮率は大きくなる事がわかる。また、乾燥期間6ヶ月を基準としてその前後の収縮率の変化を砕石コンクリートと比べると、再生粗骨材コンクリートは何れの場合も大きい。

表・10 コンクリートの乾燥収縮率の比（％）：
ガラス（G）および土（S）を置換した場合

コンクリート 記号	乾燥期間6ヶ月			乾燥期間1年		
	1%	3%	5%	1%	3%	5%
NAG	91	97	94	95	96	97
NAS	109	121	124	112	125	127
BRG	101	110	93	98	105	91
BRS	110	112	123	106	110	120

注-7) NAG、NAS；NAの乾燥収縮率を100とした値。
BRG、BRS；BR100の乾燥収縮率を100とした値。

図・6 コンクリート中の全水量と乾燥収縮率との関係

そこで、通常の乾燥収縮試験は乾燥期間を3ヶ月間または6ヶ月間としてその結果を評価する場合が多いが、再生粗骨材コンクリートの場合には収縮率が一定になるまで時間を要するため乾燥期間1年間程度の測定結果で評価することが必要である。

5. まとめ

各種仕上材を施したコンクリートを破碎して再生粗骨材を製造し、これを用いた再生粗骨材コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮について実験研究を行った。その結果、本研究の範囲で次の知見が得られた。

(1) 再生粗骨材コンクリートの圧縮強度

各種不純物を含む再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、再生粗骨材の置換率30%および50%の場合（記号：RA30およびRA50）には養生方法および材齢によらず不純物を含まない再生粗骨材コンクリート（記号：NF100）より大きいまたは等しい。しかし全量再生粗骨材を置換した再生コンクリートの場合（記号：RA100）は、養生方法および仕上材の種類によって異なるが、低下する傾向を示した。特に、アスファルト防水層およびPタイルを含む再生粗骨材コンクリート（記号：AP100およびPT100）の圧縮強度が小さい。

(2) 再生粗骨材コンクリートの静弾性係数

各種不純物を含む再生粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は、再生粗骨材の置換率30%および50%の場合には養生方法および材齢によらず不純物を含まない再生粗骨材コンクリートより大きい。しかし全量再生粗骨材を置換した再生コンクリートの場合、養生方法、仕上材の種類および材齢によっては小さくなるものがある。

特に、アスファルト防水層およびPタイルを含む再生粗骨材コンクリートの静弾性係数が小さい。また再生粗骨材コンクリートの静弾性係数を実際に得られた圧縮強度の値を使用して推定する際には、全量再生粗骨材を使用したコンクリートの場合には気乾単位容積質量 γ の値の補正が必要であるが、材齢28日に関しては、学会標準式を、材齢1年に関してはACI標準式を用いて算出することができる。

(3) 再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮

各種不純物を含む再生粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は再生粗骨材の置換率30%および50%の場合には不純物を含まない再生粗骨材コンクリートより小さい。しかしながら、全量再生粗骨材を置換した再生コンクリートの場合は大きくなる傾向を示した。特に、石膏プラスターおよびPタイルを含む再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮が大きい。また再生粗骨材コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートに比べ長期間にわたるために1年間程度の測定が必要である。

(4) ガラスおよび土の影響

砕石コンクリートおよび不純物を含まない再生粗骨材コンクリートにガラスおよび土が含まれると圧縮強度に対する影響は少ないが、静弾性係数は低下し乾燥収縮は大きくなる傾向を示した。特に、土が含まれるとその傾向が顕著であった。

謝辞

本稿を執筆するにあたり日本大学・福地利夫名誉教授、高野孝次講師、戸田建設技術研究所・中川宗男プロジェクトマネージャー、建材試験センター・飛坂基夫上級専門職からご助言、ご指導を賜りました。また、実験に際して、日本建設業経営協会中央技術研究所の方々および建材試験センター中央試験所の方々に多大の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 柳 啓、笠井芳夫：仕上材を施した原コンクリートから製造した再生粗骨材コンクリートの諸物性（再生粗骨材コンクリートの調査、凝結およびフリーディング），日本建築学会構造系論文集，No.464，1994.10，pp.7～pp.16
- 2) Yanagi, K., M. Hisaka and Y. Kasai: Physical properties of recycled concrete using recycled coarse aggregate made of concrete with finishing materials, Proceedings of the Third International Symposium RILEM, E & FN SPON, pp.379～pp.390, Oct.1993
- 3) (財)建築業協会建設廃棄物処理・再利用委員会：コンクリート解体物の再利用に関する研究，昭50.3

(1995年2月10日原稿受理，1995年7月13日採用決定)