

報告 粒状化再生骨材を用いたコンクリートの強度特性に関する報告

齊藤 辰弥*1・三本 巖*2・松田 信広*3・小山 明男*4

要旨：粒状化再生骨材の品質や混合率がコンクリートの強度特性に与える影響について把握するため、同一の原コンクリートから2種類の粒状化再生骨材および従来のコンクリート用再生骨材L相当の骨材を製造し、コンクリートの骨材に混合して圧縮強度および静弾性係数試験を行った。その結果、粒状化再生骨材の品質や混合率によって、粒状化再生骨材を用いたコンクリート中の骨材の相対吸水率は変化し、相対吸水率と圧縮強度および静弾性係数との関係には、従来のコンクリート用再生骨材と同様に相関が確認された。

キーワード：粒状化再生骨材, 骨材の品質, 混合率, 相対吸水率, 圧縮強度, 静弾性係数

1. はじめに

資源循環の観点からコンクリート施工現場で余ったことで戻ってくるコンクリートの有効利用方法として、粒状化技術を用いた再資源化がある。粒状化技術¹⁾とは、フレッシュな状態のコンクリートに吸水作用のある高分子系の薬剤や紙粉等（以下、粒状化材料）を添加し、攪拌することでコンクリートの流動性を著しく低下させ、骨材に使用できるような粒子群（以下、粒状化再生骨材）にする技術である。解体した構造物等の硬化コンクリートを破砕して製造する従来の再生骨材との違いは、粒状化再生骨材は機器による破砕工程を必要としない点や原料となるコンクリート（以下、原コンクリート）の出荷元が明確であり、原コンクリートの品質や使用材料の把握が容易である点等が挙げられる。

2022年度には、(一社)生コン・残コンソリューション技術研究会（RRCS）が、42工場にて粒状化再生骨材の全国試験を実施²⁾した。2023年度には、令和5年度経済産業省 国際ルール形成・市場創造型標準化推進事業に採択され、“資源循環ビジネスモデルに資する粒状化再生骨材に関するJIS開発”にて、3年計画で粒状化再生骨材の規格化を検討する委員会（以下、粒状化再生骨材JIS

委員会、委員長：阿部道彦・工学院大学名誉教授）を立ち上げ、2024年度も引き続き実験を行った。

本報告では、2024年度に粒状化再生骨材JIS委員会活動の一環で行った粒状化再生骨材を用いたコンクリートの強度特性について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。目的によって2つのシリーズを設定し、それぞれ異なる機関で再生骨材の製造およびコンクリート実験を行った。

シリーズ1では、粒状化再生骨材の品質がコンクリートの強度特性に及ぼす影響を把握するため、同一の原コンクリートから2種類の粒状化再生骨材およびコンクリート用再生骨材L（以下、再生骨材L）相当の骨材を製造し、これらの骨材を用いてコンクリートを作製して基礎的な性状の比較を行った。

シリーズ2では、粒状化再生骨材の混合率がコンクリートの強度特性に及ぼす影響の把握を目的とした。コンクリートにおける粒状化再生細骨材の混合率は0%、30%および100%、粒状化再生粗骨材の混合率は0%、50%お

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
	シリーズ1	シリーズ2
製造する再生骨材の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・粒状化再生骨材（GR）2種類 [A, B] [細骨材（GRS），粗骨材（GRG）] ・再生骨材L（RL）1種類 [細骨材（RLS），粗骨材（RLG）] 	<ul style="list-style-type: none"> ・粒状化再生骨材（GR）1種類 [細骨材（GRS），粗骨材（GRG）]
コンクリートにおける再生骨材の容積混合率	<ul style="list-style-type: none"> ・細骨材 [0%, 100%] ・粗骨材 [0%, 100%] 	<ul style="list-style-type: none"> ・細骨材 [0%, 30%, 100%] ・粗骨材 [0%, 50%, 100%]

*1 (一財) 建材試験センター 中央試験所 材料グループ (正会員)

*2 (株) 内山アドバンス 技術センター センター長代理 (正会員)

*3 (株) 東京テクノ 生産技術統括本部長 博士 (工学) (正会員)

*4 明治大学 理工学部 建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法	実施シリーズ
骨材試験	表乾密度 (g/cm ³)	JIS A 5023 附属書 A A.5.3	1・2
	絶乾密度 (g/cm ³)	[JIS A 1109, 1110]	1・2
	吸水率 (%)	(3回の試験結果の平均値) *1*2	1・2
	微粒分量 (%)	JIS A 1103	1・2
	ふるい分け [粗粒率]	JIS A 1102	1・2
フレッシュ コンクリートの 試験	スランプ	JIS A 1101	1・2
	空気量	JIS A 1128 および JIS A 1116	1・2
	単位容積質量	JIS A 1116 (空気量測定時)	1・2
	コンクリート温度	JIS A 1156	1・2
硬化コンクリートの 試験	圧縮強度	JIS A 1108 (材齢 28 日, 標準水中養生)	1・2
	静弾性係数	JIS A 1149 (材齢 28 日, 標準水中養生)	2

*1 JIS A 1103 の箇条 5(試験方法)によって洗った粒状化再生細骨材を試料として用いない。
*2 JIS A 1109 の 4.d,e)の方法で、表乾状態を判定する。

表-3 製造する再生骨材の概要

シリーズ	種類	原コンクリートの配合 (呼び方)	粒状化材料の種類	攪拌方法
1	粒状化再生骨材 (A)	21-18-20N	A (セルロース繊維系)	アジテータ車による攪拌
	粒状化再生骨材 (B)		B (高吸水高分子系)	
	再生骨材 L		-	
2	粒状化再生骨材	27-18-20N	B (高吸水高分子系)	アジテータ車による攪拌

表-4 原コンクリートの配合

シリーズ	原コンクリートの 配合 (呼び方)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状	
		水	普通 ポルトランドセメント	細骨材		粗骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)
				砕砂	山砂			
1	21-18-20N	178	286	636	266	910	20.5	4.4
2	27-18-20N	170	328	558	294	938	21.0	4.0

よび 100%とした。

2.2 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-2に示す。骨材試験は、密度、吸水率、微粒分量およびふるい分け試験を両シリーズで行った。フレッシュコンクリートは、スランプ、空気量、単位容積質量および温度の試験を実施した。硬化コンクリートは、シリーズ1では圧縮強度試験を実施し、シリーズ2では圧縮強度および静弾性係数試験を実施した。

3. 再生骨材の製造

製造する再生骨材の概要を表-3に、原コンクリートの配合を表-4に示す。

両シリーズともに、粒状化再生骨材を製造する際の攪拌方法は、アジテータ車に粒状化材料を投入してドラムを回すことで攪拌する方法とした。その他の攪拌方法として、排出したフレッシュコンクリートに粒状化材料を混入して重機で混ぜることで攪拌させる方法、専用の機

器で攪拌する方法等がある。本実験では、その中から比較的製造する際の差が生じにくく、モルタルまたはセメントペーストが均一に骨材に付着しやすいアジテータ車による攪拌方法を採用した。粒状化再生骨材の製造工程は、粒状化材料を投入して攪拌させた後、厚さ 20cm 程度に敷き均し、ビニールシート等を掛けて1日程度放置した。その後、粒状物の固結を防ぐために解砕し、粒状化再生骨材が白く乾燥している場合は適宜散水を行い、骨材試験日まで残置した。

シリーズ1で製造する粒状化再生骨材および再生骨材 L は、コンクリートの強度特性に骨材品質の影響が生じやすくなるように、原コンクリートの水セメント比が作製するコンクリートよりも大きくなる呼び強度 21 相当とした。粒状化材料は、セルロース繊維系の A および高分子系の B の 2 種類とした。再生骨材 L は、同一の原コンクリートを一度硬化させた後、破碎処理によって製造した。なお、破碎処理は材齢 5 日に行った。

シリーズ2では、呼び方 27-18-20N の配合の原コンク

表-5 製造した再生骨材および原骨材の品質 (シリーズ1)

項目	細骨材						粗骨材			
	原骨材			再生骨材			原骨材	再生骨材		
	砕砂	山砂	混合	再生細骨材 L	粒状化再生細骨材		砕石 2005	再生粗骨材 L	粒状化再生粗骨材	
	S1	S2	S	RLS	GRS (A)	GRS (B)	G	RLG	GRG (A)	GRG (B)
表乾密度(g/cm ³)	2.64	2.58	2.62	2.23	2.18	2.21	2.66	2.39	2.30	2.41
絶乾密度(g/cm ³)	2.60	2.54	2.58	1.99	1.92	1.97	2.63	2.24	2.11	2.25
吸水率(%)	1.47	1.83	1.58	11.82	13.22	12.44	0.98	6.54	8.86	6.94
微粒分量(%)	3.4	1.4	—	5.3	2.3	1.8	0.2	0.8	1.0	0.6
粗粒率	2.95	1.69	2.58	3.30	3.94	3.18	6.46	6.36	6.64	6.44
備考	細骨材の容積混合比 S1:S2=70 : 30									

表-6 製造した再生骨材および原骨材の品質 (シリーズ2)

項目	細骨材				粗骨材		
	原骨材			再生骨材	原骨材	再生骨材	
	砕砂	山砂	混合	粒状化再生細骨材	砕石 2005	粒状化再生粗骨材	
	S1	S2	S	GRS	G	GRG	
表乾密度(g/cm ³)	2.62	2.58	2.61	2.29	2.65	2.46	
絶乾密度(g/cm ³)	2.58	2.52	2.56	2.03	2.63	2.31	
吸水率(%)	1.59	2.49	1.90	12.92	0.69	6.14	
微粒分量(%)	2.5	1.4	—	2.1	0.7	0.4	
粗粒率	3.04	1.85	2.64	3.85	6.58	6.75	
備考	細骨材の容積混合比 S1:S2=65 : 35						

リートから、粒状化材料 (B) を用いて 1 種類の粒状化再生骨材を製造した。

4. 実験結果および考察

4.1 製造した再生骨材の品質

製造した再生骨材および原骨材の品質を表-5 および表-6 に、粒度分布を図-1 および図-2 に示す。骨材試験は、両シリーズともに粒状化再生骨材および再生骨材 L を製造してから材齢 7 日で行った。

(1) 吸水率

シリーズ 1 の粒状化材料 (A) を用いた粒状化再生骨材の吸水率は、細骨材および粗骨材ともに再生骨材 L の JIS 規格値より大きい値となった。再生骨材 L と粒状化再生骨材 (B) の吸水率は、細骨材および粗骨材ともに粒状化再生骨材 (B) の方がやや大きくなった。

(2) 粒度分布

シリーズ 1 は、粒状化再生細骨材 (A) の粒度が大きくなり、再生細骨材 L の JIS で規定する粒度範囲を満足しなかった。粗骨材は、すべて再生粗骨材 L の JIS で規定する粒度範囲を満足した。

シリーズ 2 の粒状化再生細骨材は、粒状化材料 (B) を用いているが、粒度は大きくなり再生細骨材 L の JIS で規定する粒度範囲を満足しなかった。粒状化再生粗骨材は、ふるいの呼び寸法 20mm 以上の粒度で、再生粗骨材 L の JIS で規定する粒度範囲を満足しなかった。

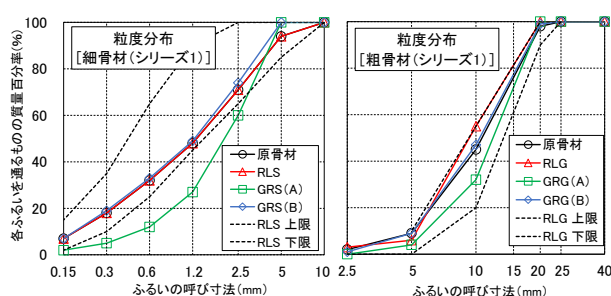


図-1 粒度分布 (シリーズ1)

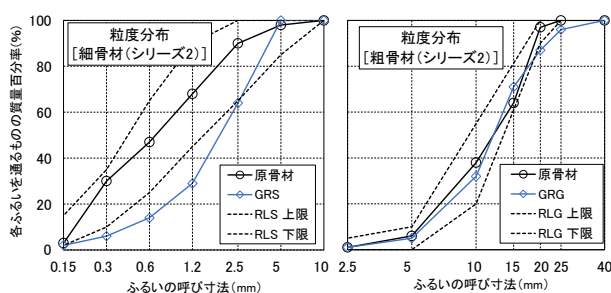


図-2 粒度分布 (シリーズ2)

4.2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合を表-7 および表-8 に示す。両シリーズ毎に、粗骨材かさ容積と単位水量および単位セメント量を固定して、骨材の容積およびセメントペーストの容積が同一となる配 (調) 合 (以下、配合) とした。

表-7 コンクリートの配合 (シリーズ 1)

記号	骨材の組合せ		かさ容積 (m ³ /m ³)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)										Ad (C×%)	AE	
	細骨材	粗骨材			W	C	S1	S2	RLS	GRS (A)	GRS (B)	G	RLG	GRG (A)			GRG (B)
1-NC	S1/S2	G	0.57	50.0	170	340	619	259	—	—	—	910	—	—	—	1.05	1.5A
S-RLG	S1/S2	RLG	0.57	50.0	170	340	619	259	—	—	—	—	817	—	—	1.00	1.5A
S-GRG(A)	S1/S2	GRG(A)	0.57	50.0	170	340	619	259	—	—	—	—	—	787	—	1.00	1.5A
S-GRG(B)	S1/S2	GRG(B)	0.57	50.0	170	340	619	259	—	—	—	—	—	—	824	1.05	1.0A
RLS-G	RLS	G	0.57	50.0	170	340	—	—	747	—	—	910	—	—	—	0.85	3.0A
GRS(A)-G	GRS(A)	G	0.57	50.0	170	340	—	—	—	730	—	910	—	—	—	0.75	1.5A
GRS(B)-G	GRS(B)	G	0.57	50.0	170	340	—	—	—	—	740	910	—	—	—	0.60	2.5A
RLS-RLG	RLS	RLG	0.57	50.0	170	340	—	—	747	—	—	—	817	—	—	0.80	3.0A
GRS(A)-GRG(A)	GRS(A)	GRG(A)	0.57	50.0	170	340	—	—	—	730	—	—	—	787	—	0.75	1.0A
GRS(B)-GRG(B)	GRS(B)	GRG(B)	0.57	50.0	170	340	—	—	—	—	740	—	—	—	824	0.60	2.5A

[備考] 水 (W) : 地下水, セメント (C) : 普通ポルトランドセメント
 混和剤 (Ad) : AE 減水剤 標準形 [ポリカルボン酸系, 多機能タイプ], 混和剤 (AE) : AE 剤 [1A=C×0.001%]

表-8 コンクリートの配合 (シリーズ 2)

記号	骨材の容積混合率(%)		かさ容積 (m ³ /m ³)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							SP (C×%)	AE	T
	GRS	GRG			W	C	S1	S2	GRS	G	GRG			
2-NC	—	—	0.60	55.0	160	291	310	584	—	954	—	1.90	4.5A	1.0T
S-GRG50	—	50	0.60	55.0	160	291	310	587	—	477	440	1.80	2.25A	0.5T
GRS30-G	30	—	0.60	55.0	160	291	217	409	236	954	—	1.25	3.0A	0.5T
GRS30-GRG50	30	50	0.60	55.0	160	291	217	411	236	477	440	1.30	2.75A	0.5T
S-GRG100	—	100	0.60	55.0	160	291	312	587	—	—	881	1.75	1.5A	0.5T
GRS100-G	100	—	0.60	55.0	160	291	—	—	785	954	—	0.70	0A	2.0T
GRS100-GRG100	100	100	0.60	55.0	160	291	—	—	790	—	881	0.50	0A	1.0T

[備考] 水 (W) : 上水道水, セメント (C) : 普通ポルトランドセメント
 混和剤 (SP) : 高性能 AE 減水剤 標準形 [ポリカルボン酸系], 混和剤 (AE) : AE 剤 [1A=C×0.001%]
 空気量調整剤 (T) : 消泡剤 [1T=C×0.002%]

表-9 コンクリートのフレッシュ性状 (シリーズ 1)

記号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	単位容積質量 (kg/m ³)	温度 (°C)	空気量 (%)	骨材修正係数 (%)
1-NC	20.5	33.6×33.6	2291	22	4.9	—
S-RLG	18.5	30.0×29.8	2182	22	5.4	0.5
S-GRG(A)	19.5	32.0×30.0	2159	22	5.4	0.5
S-GRG(B)	19.5	29.8×29.5	2191	22	5.1	0.5
RLS-G	20.5	38.5×37.7	2188	21	4.0	0.5
GRS(A)-G	20.0	35.0×34.5	2116	21	4.9	0.5
GRS(B)-G	20.5	40.2×40.1	2152	21	4.8	0.5
RLS-RLG	20.0	38.5×35.5	2093	20	4.3	0.5
GRS(A)-GRG(A)	20.0	35.1×34.9	2038	20	4.8	0.5
GRS(B)-GRG(B)	20.5	48.0×46.5	2106	20	3.6	0.5

表-10 コンクリートのフレッシュ性状 (シリーズ 2)

記号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	単位容積質量 (kg/m ³)	温度 (°C)	空気量 (%)	骨材修正係数 (%)
2-NC	19.0	30.0×28.0	2302	22	5.3	—
S-GRG50	16.5	21.0×21.0	2281	22	4.7	0.3
GRS30-G	17.0	25.5×24.5	2273	22	4.8	0.2
GRS30-GRG50	15.5	25.0×24.5	2236	22	4.9	0.4
S-GRG100	17.0	28.0×27.5	2243	22	4.8	0.4
GRS100-G	8.5	34.0×34.0	2180	22	4.7	0.3
GRS100-GRG100	16.0	36.5×35.5	2083	22	5.5	1.0

セメントの種類は、普通ポルトランドセメントとした。目標スランブは $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

シリーズ1では、普通骨材（原骨材と同一）、再生骨材 L および粒状化再生骨材（A, B）を組み合わせ、全 10 配合とした。各骨材はそれぞれ単独使用である。

シリーズ2では、普通骨材（原骨材と同一）と粒状化再生骨材を組み合わせ、粒状化再生骨材の混合率を変化させた全 7 配合とした。

コンクリートのフレッシュ性状を表-9 および表-10 に示す。フレッシュ性状の特徴として、粒状化再生骨材の混合率が大きくなると、目標スランブを得るための混和剤の添加率が小さくなる傾向がみられ、特に粒状化再生細骨材を使用した配合にこの傾向が顕著であった。しかし、シリーズ2の粒状化再生細骨材を 100% 使用した記号 GRS100-G および GRS100-GRG100 の配合では、材料分離の傾向がみられた。

4.3 硬化コンクリートの強度特性

(1) シリーズ1

圧縮強度を図-3 に示す。棒グラフの上の数字は、基準コンクリート（1-NC）に対する圧縮強度比である。

シリーズ1では、基準コンクリート（1-NC）の圧縮強度が最も大きく、粒状化再生骨材および再生骨材 L を 100% 使用すると圧縮強度は基準コンクリートに比べて小さくなった。粒状化再生骨材および再生骨材 L を混合する対象が粗骨材の場合、細骨材に混合する場合に比べて、圧縮強度の低下が小さくなる傾向となった。また、再生骨材の種類においては、再生骨材 L > 粒状化再生骨材（B） > 粒状化再生骨材（A）の順に圧縮強度が大きくなる傾向であった。これは、粒状化再生骨材および再生骨材 L の吸水率が影響していると考えられる。

そこで、相対吸水率と圧縮強度の関係を図-4 に示す。コンクリート中の骨材の相対吸水率と圧縮強度の関係については、相関が確認³⁾されており、相対吸水率は以下の式⁴⁾ (1) により算出した。

$$Q_t = \frac{Q_v G \times a + Q_r G \times b + Q_v N \times c + Q_r N \times d}{a + b + c + d} \dots (1)$$

- ここに、
- Q_t : 骨材の相対吸水率 (%)
 - $Q_v G$: 普通粗骨材の吸水率 (%)
 - $Q_r N$: 普通細骨材の吸水率 (%)
 - $Q_r G$: 再生粗骨材の吸水率 (%)
 - $Q_v N$: 再生細骨材の吸水率 (%)
 - a, b, c, d : 各骨材の絶対容積 (L/m^3)

相対吸水率と圧縮強度の関係は、細骨材および粗骨材、また粒状化再生骨材および再生骨材 L の種類の影響は小

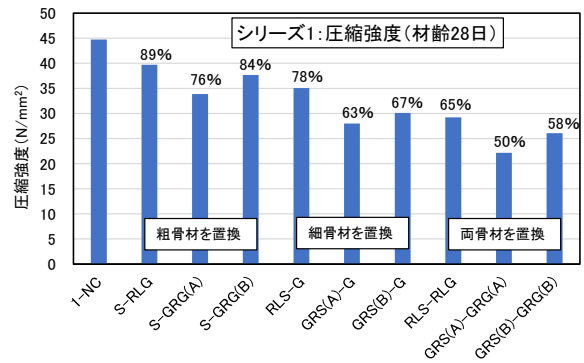


図-3 圧縮強度（シリーズ1）

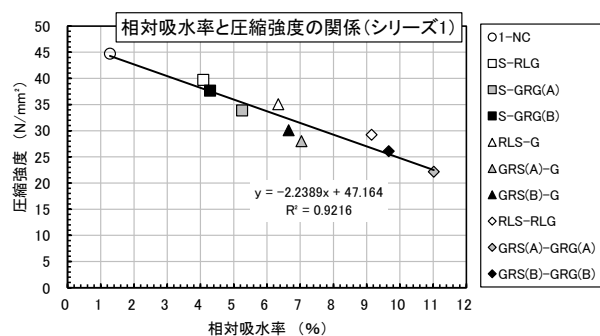


図-4 相対吸水率と圧縮強度の関係（シリーズ1）

さく、相対吸水率が大きくなると圧縮強度は小さくなる傾向が全体的に確認された。

(2) シリーズ2

圧縮強度を図-5 に、粒状化再生骨材の混合率と圧縮強度の関係を図-6 に示す。シリーズ2では、粒状化再生骨材の混合率が、粗骨材は 100% まで、細骨材は 30% まででは、基準コンクリート（2-NC）と比べて、同等以上の圧縮強度となった。しかし、粒状化再生細骨材を 100% 使用した記号 GRS100-G および GRS100-GRG100 の場合、圧縮強度は基準コンクリートと比べて小さくなった。この傾向はシリーズ1と同様であり、粒状化再生骨材を細骨材に混合する方が、粗骨材に混合するよりも影響が大きく、骨材の吸水率による影響と考えられる。

相対吸水率と圧縮強度の関係を図-7 に示す。シリーズ2では、基準コンクリートの圧縮強度がやや小さくなったため、決定係数 (R^2) は小さくなったが、シリーズ1と同様に、全体的に相対吸水率が大きくなると圧縮強度は小さくなる傾向となった。

シリーズ1および2の結果から相対吸水率と圧縮強度に相関が確認され、従来のコンクリート用再生骨材と同様に相対吸水率による評価が、粒状化再生骨材でも可能と考えられる。

相対吸水率と静弾性係数の関係を図-8 に示す。圧縮強度と同様に、相対吸水率が大きくなると静弾性係数は

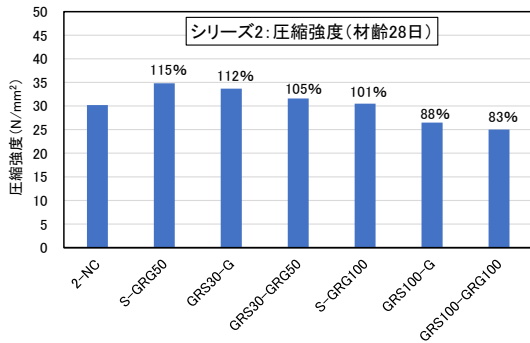


図-5 圧縮強度 (シリーズ 2)

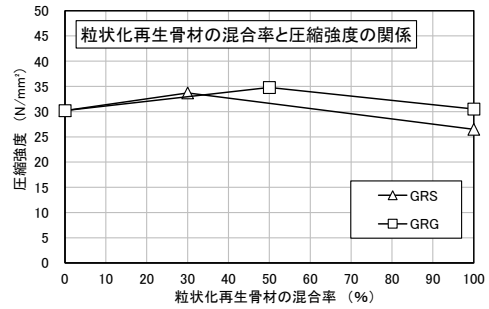


図-6 粒状化再生骨材の混合率と圧縮強度の関係 (シリーズ 2)

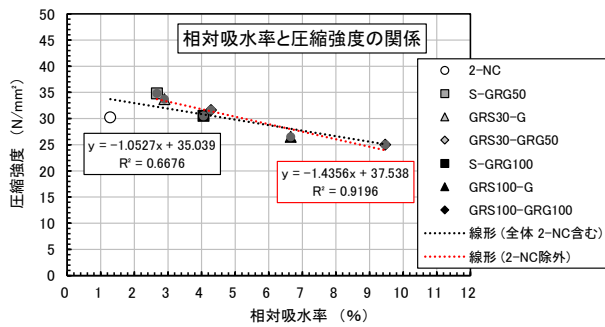


図-7 相対吸水率と圧縮強度の関係 (シリーズ 2)

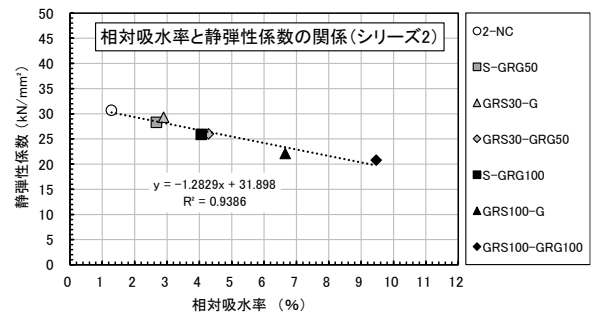


図-8 相対吸水率と静弾性係数の関係 (シリーズ 2)

小さくなる傾向が確認された。そのため、静弾性係数も相対吸水率による評価が可能と考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9 に示す。粒状化再生骨材の混合率が大きくなると、圧縮強度に対して静弾性係数が小さくなる傾向となった。粒状化再生骨材を混合したコンクリートの単位容積質量は、本実験の範囲において、おおむね 2.0~2.3 t/m³ であり、単位容積質量の係数 γ を反映させた NEW RC 式⁵⁾におおむね対応するため、NEW RC 式による評価も可能と考えられる。

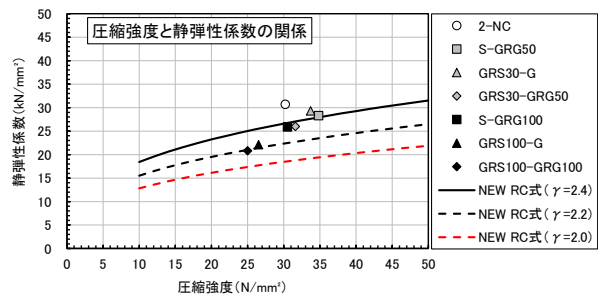


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ 2)

5. まとめ

本実験の範囲から以下の知見が得られた。

- (1) 粒状化再生骨材を用いたコンクリート中の骨材の相対吸水率が大きくなると、圧縮強度が小さくなる傾向が確認され、相対吸水率と圧縮強度との関係には、従来のコンクリート用再生骨材と同様に相関が確認された。
- (2) 粒状化再生骨材を用いたコンクリート中の骨材の相対吸水率が大きくなると、静弾性係数は小さくなる傾向が確認された。

謝辞

この成果は“令和 6 年度 経済産業省 国際ルール形成・市場創造型標準化推進事業費 (戦略的国際標準化加速事業:産業基盤分野に係る国際標準開発活動)”における委託業務の結果得られたものです。ご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小山明男:粒状化による残コンクリートの資源化, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 34, No. 6, pp. 413- 421, 2023
- 2) 白岩誠史, 船尾孝好, 小山明男, 土井雅裕: 戻りコンクリート由来の粒状化再生骨材の品質に関する全国共通試験結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.940-945, 2023.7
- 3) 道正泰弘ら: 建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート塊のリサイクルシステム 骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの品質管理手法, 日本建築学会技術報告集, 第 21 号, PP.15-20, 2005.6
- 4) 日本産業規格: JIS A 5022 再生コンクリート M, 解説, 2024
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, pp213, 2022