

PC 工場における残コンクリートを想定した 粒状化再生骨材の諸特性

Material Properties of Granulated Recycled Aggregate
using Returned concrete of Precast Prestressed Concrete.

茨木 泰介^{*1}, アディス ボンガー^{*1}, 臺 哲義^{*1}, 佐々木 亘^{*1}

TAISUKE IBARAKI, ADDISU DESALEGNE BONGER, AKIYOSHI DAI, WATARU SASAKI

プレストレストコンクリート (PC) 工場で生じる残コンクリートや蒸気養生時のボイラ排ガスに含まれる CO₂ の有効利用方法として、粒状化再生骨材への再資源化やその炭酸化による品質改善などが考えられる。ここでは、PC 工場で一般的に使用される強度 50N/mm² 程度のコンクリート (PC 用コンクリート) と呼び強度 24 程度のレディーミクストコンクリートを想定した原コンクリートから粒状化再生骨材を製造し、基本物性や炭酸化による影響について比較検討を行った。その結果、PC 用コンクリートでも概ね同様の物性の粒状化再生骨材が製造できること、炭酸化により粒状化再生骨材の密度は高く、吸水率は低くなり、その傾向は PC 用コンクリートの方が大きいことが確認された。

キーワード：残コンクリート、粒状化再生骨材、CO₂ 固定、PC 工場

The applicability of returned precast prestressed concrete (PCC) into granulated recycled aggregate was examined as an effective way to utilize the residual concrete. Additionally, the influence of CO₂ fixation into granulated recycled aggregate was assessed to explore the potential for effective utilization of CO₂ emitted from boilers at PC manufacturing facilities. Granulated recycled aggregates were produced from both PCC and ordinary concrete, and their physical and carbonation properties were compared. As a result, it was confirmed that granulated recycled aggregate with similar physical properties to ordinary concrete can be produced even from PCC. Furthermore, carbonation was found to increase density and reduce water absorption, with these effects being more pronounced in granulated recycled aggregate derived from PCC.

Keywords: Returned concrete, Granulated recycled aggregate, CO₂ capture, PCC

1. はじめに

コンクリートの打設において余剰となった残コンクリート（以下、残コン）の多くは廃棄物として処理されており、資源循環の観点から課題となっている¹⁾。残コンの有効利用方法として粒状化再生骨材の製造が挙げられる。残コンが硬化する前に吸水作用のある高分子系の薬剤や紙紛を添加し粒状化させ、その状態で硬化させることで骨材として再資源化する技術である。また、粒状化再生骨材を人為的に炭酸化させることで CO₂ を固定する CCU 技術についても検討が進められており、CO₂ 削減への貢献も期待されている²⁾。

粒状化再生骨材は従来の再生骨材と製造方法が異なるため、再生骨材の規格 JIS A 5021～5023 と合致しない。このため、規格化に向けて粒状化再生骨材や製造した粒状化再生骨材を用いたコンクリートの物性について多くの報告がなされている^{3),4)}ものの、そのほとんどは普通ポルトランドセメントや高炉セメントを用いた呼び強度 24 程度のレディーミクストコンクリート（以下、RMC）を対象としたものである。一方、PC 工場においても残

^{*1} 技術研究所 技術開発推進部

コンは発生しており(写真-1),一般的な土木用途のPC用コンクリートは,早期に緊張力を導入するため早強ポルトランドセメント用いた富配合のコンクリートが使用される。このようなコンクリートを原料とした粒状化再生骨材については,十分な知見が得られてない。

本報ではPC用コンクリートの残コンや工場のボイラからの排ガス中に含まれるCO₂の有効利用方法の検討を目的とし,RMCおよびPC用コンクリートを原コンクリートとする粒状化再生骨材の基本物性や炭酸化による物性変化,CO₂固定能力について報告する。

2. 実験概要

(1) 粒状化再生骨材の製造

a) 使用材料および配合

使用材料を表-1, 配合を表-2 に示す。粒状化剤は特殊高分子化合物を主成分としたGSとアクリル系ポリマーを主成分とするGAの2種を用いた。配合は呼び強度24のレディーミクストコンクリートを想定した普通ポルトランドセメントを用いたもの(RMC), 設計基準強度50N/mm²のPC工場製品の製造に使用されている早強ポルトランドセメントを用いたもの(PCC)の2種とした。本検討では粒状化剤2種と配合2種の計4水準の粒状化再生骨材を製造した。

b) 製造方法

原コンクリートの練混ぜおよび粒状化剤の添加方法について図-1に, 粒状化剤添加時の原コンクリートのフレッシュ性状および粒状化剤の添加量を表-3に示す。粒状化剤の添加量は仕様書に準拠した。原コンクリートは強制二軸ミキサを使用し30リットルを製造した。RMCは現場打ち工事における残コンを想定し練上がりから1時間静置した後に,PCCは製品工場を想定し練上がり直後に粒状化剤を添加し,強制二軸ミキサにて90秒間練混ぜ粒状化させた。排出後に雨掛かりのない屋外に広げ3日間静置し,ハンドスコップ等で粒子同士を分離することで粒状化再生骨材を製造した。その後5mmふるいに掛け細骨材と粗骨材に分け,密閉容器にて外気環境で保管した。

c) 粒状化骨材の炭酸化方法

粒状化再生骨材の原コンクリートの違いがCO₂固定量や炭酸化による物性変化に与える影響について検討するため,RMC-GS,PCC-GSの細骨材を炭酸化させた。両細骨材は,材齢35日から容器に薄く広げ20℃,RH60%



写真-1 PC工場における残コンの一例

表-1 使用材料

材料	記号	摘要	密度 [g/cm ³]
混練水	W	上水道水	1.00
セメント	C	N 普通ポルトランドセメント	3.15
		H 早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	S	石灰石砕砂	2.68
粗骨材	G	硬質砂岩碎石 2005	2.65
化学混和剤	AE 減水剤	SP1 リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体	—
	高性能減水剤	SP2 ポリカルボン酸エーテル系化合物	—
	AE 剤	AE 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	—
粒状化剤	GS	特殊高分子化合物	—
	GA	アクリル系ポリマー	—



図-1 練混ぜおよび粒状化剤の添加方法

表-3 フレッシュ性状と粒状化剤添加量

Case	フレッシュ性状			粒状化剤添加量 Concrete×[%]	
	SL [cm]	Air [%]	CT [°C]	GA	GS
RMC-GS	14.5	5.5	17	0.908	—
	10.0*	4.2*	17*		
RMC-GA	14.5	5.3	17	—	0.840
	9.5*	4.0*	17*		
PCC-GS	17.0	4.0	18	0.908	—
PCC-GA	17.0	4.4	17	—	0.840

*: 練上がりから1時間静置後

表-2 原コンクリートの配合

Case	W/C [%]	ペースト 骨材比* [vol.%]	s/a [%]	Air [%]	単位量[kg/m ³]					化学混和剤添加量 C×%		
					W	C		S	G	SP1	SP2	AE
						N	H					
RMC	55	37.4	45	4.5	165	300	—	844	1007	0.40		0.0045
PCC	36	42.1	44	4.5	150	—	417	796	994		0.55	0.0060

*ペースト骨材比: (W+C) / (S+G)

の環境にて7日間静置した。その後20℃, RH60%, 二酸化炭素濃度5.0%の環境にて7日間炭酸化させた。

(2) 試験方法

a) 基本物性

粒状化再生骨材の基本物性として、各水準および原骨材の密度と吸水率、粒度分布を測定した。密度と吸水率は材齢34～35日、炭酸化させたものは材齢49～50日でJIS A 1109, JIS A 1110に準拠し測定した。粒度分布はJIS A 1102に準拠し細骨材、粗骨材に分けて測定した。

b) CO₂ 固定能力

CO₂ 固定能力を評価するためにCa(OH)₂含有量(以下、Ca(OH)₂はCHと略記する)と炭酸化後のCO₂固定量について推定した。試料はアセトンに24時間浸漬した後に、真空乾燥を24時間行い水和停止したものを用いた。分析はTG-DTAを用いて窒素雰囲気中で、昇温速度20℃/min, 1000℃までの条件にて測定した結果より行った。既往文献2)を参考に450℃付近のCHの脱水反応に伴うDTA曲線の挙動より式(1)を用いてCH含有量を、550～950℃の質量変化量を脱炭酸量とし炭酸化前後の試料の脱炭酸量より式(2)を用いてCO₂固定量を推定した。ここに、 CH_m : CHの質量含有率[mass%], TG_{CH} : CHの脱水反応に伴う質量減少率[%], $CO_{2,Fix}$: 粒状化再生細骨材1t当たりのCO₂固定量[kg/t], CO_2' : 炭酸化後の粒状化細骨材の脱炭酸率[%], CO_2 : 炭酸化前の粒状化細骨材の脱炭酸率[%]とする。

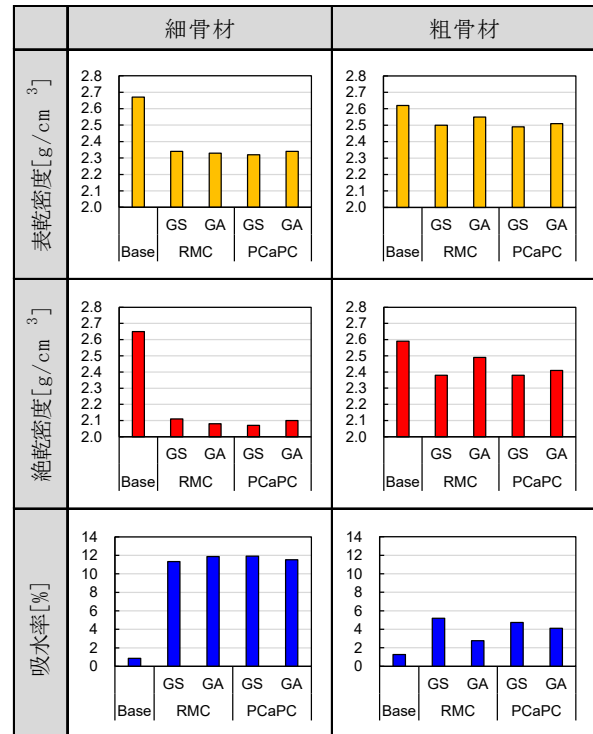


図-2 原骨材および粒状化再生骨材の表乾密度、絶乾密度、吸水率

表-4 再生骨材のJIS規格一覧

骨材品質	再生骨材 H	再生骨材 M	再生骨材 L
吸水率 [%]	粗骨材 3.0%以下 細骨材 3.5%以下	5.0%以下 7.0%以下	7.0%以下 13.0%以下
規格	JIS A 5021	JIS A 5022	JIS A 5023
想定される用途	制限なし	乾燥や凍害の影響を受けにくい部材 (杭, 基礎梁, CFT etc.)	強度, 耐久性を必要としない部材 (裏込コン, 均しコン etc.)

$$CH_m = TG_{CH} \times \frac{74}{18} \quad (1)$$

$$CO_{2,Fix} = 1000 \times \frac{(CO_2' - CO_2)}{100} \quad (2)$$

3. 実験結果および考察

(1) 粒状化再生骨材の基本物性

a) 密度・吸水率

原骨材 (Base) および粒状化再生骨材の表乾密度、絶乾密度、吸水率を図-2 に示す。また、従来の再生骨材の規格を表-4 に示す。

粒状化再生細骨材は原コンクリートの違いや流動化剤の種類による物性値の差は小さく、吸水率については従来の再生骨材の規格において再生細骨材 L に相当するものが得られた。原骨材と比較すると顕著に表乾・絶乾密度ともに低下し、吸水率は増加する傾向にあることが分かった。

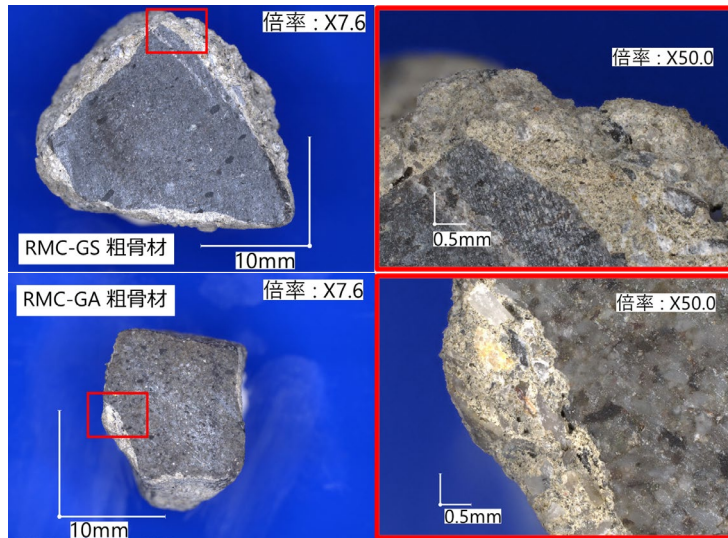


写真-3 粒状化再生粗骨材切断面

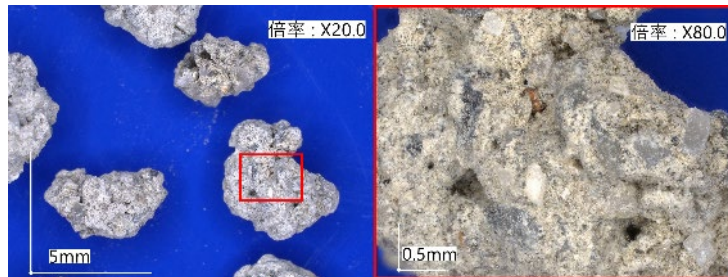


写真-4 PCC-GSの細骨材

粒状化再生粗骨材は粒状化剤 GS よりも GA を用いた方が、表乾・絶乾密度が高く、吸水率が低い傾向にある。吸水率は、従来の再生骨材の規格において RMC-GA は再生粗骨材 H に、他は再生粗骨材 M に相当する。

再生骨材の品質は原骨材に付着するモルタルの量と品質に影響を受けることが報告されており⁵⁾、粒状化再生骨材においても同様と考えられる。原骨材と粒状化再生粗骨材の外観を写真-2、RMC-GS と RMC-GA の粗骨材の切断面を写真-3 に示す。原骨材は碎石であるため角のある形状なのに対して、粒状化再生粗骨材は丸みを帯びておりモルタルが原骨材周りに付着していることが分かる。RMC-GS より RMC-GA の方が角張った形状であること、断面写真からも RMC-GA の方がモルタルの付着量は少ない。その結果、密度は高く、吸水率は低い物性値となったと推察される。モルタル付着量が少ない原因としては、粒状化剤の種類や添加量が考えられる。

PCC-GS の細骨材を写真-4 に示す。粗骨材は一つの前骨材を核として形成されているのに対し、細骨材は複数の前骨材が凝集して形成されていた。そのため、前骨材に対するセメントペーストの割合は細骨材の方が大きくなり、粗骨材よりも細骨材の方が前骨材と比較して吸水率が顕著に増加したものと考えられる。また、本検討では強制二軸ミキサを用いて粒状化させたため、粗骨材接触時に強いせん断力が生じる。そのため、セメントペーストは粗骨材表面から剥がれ落ち、細骨材の形成へ多く消費されたことも細骨材の吸水率が高い理由として考えられる。

本検討では、RMC と PCC で概ね同様の物性の粒状化再生骨材を製造することができた。原コンクリートの水



写真-2 原粗骨材、粒状化再生粗骨材の外観

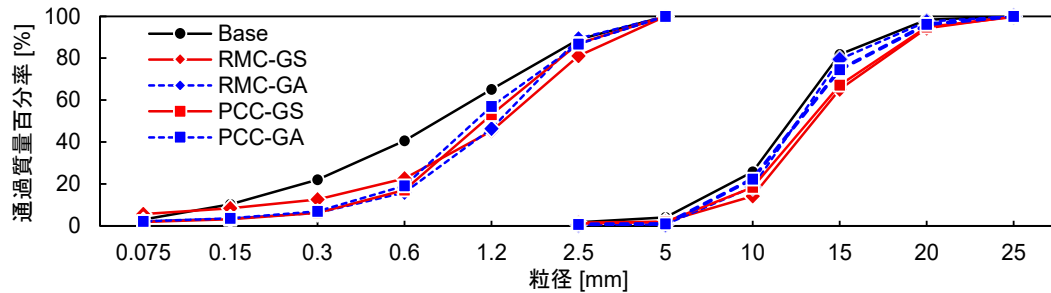


図-3 通過質量百分率

結合材比(W/C)や骨材に対するセメントペーストの体積比率, セメント種類の違いによる物性への顕著な影響は確認されなかった。

b) 粒度分布

原骨材および各水準の通過百分率を図-3に示す。細骨材は原骨材と比較すると0.3mm以下の径が減少し、0.6～1.2mm以上の径が増加する傾向にある。粒状化により0.3mm以下の径は形成されにくいことが確認された。また、セメントペーストのみでなく、微細な骨材も粒状化における骨材周りの層の形成に寄与しており、0.3mm以下の径は特にその傾向にあると考えられる。

粗骨材は原骨材と比較すると最大骨材径に変化はなく、10mm未満の径は減少、10mm以上の径は増加するといった大径側へ推移する傾向にある。また、粒状化剤GAよりもGSの方が大径側へ推移する傾向にあり、このことから粒状化剤GSを用いた粒状化再生粗骨材の原骨材周りの付着モルタル量は少ないと考えられる。

c) 炭酸化による物性変化およびCO₂固定能力

炭酸化による物性変化およびCH含有率、CO₂固定量を表-5に示す。粒状化再生細骨材を炭酸化させることで密度の増加、吸水率の減少が確認された。炭酸化によるペースト硬化体部の空隙構造の緻密化が影響したと考えられる。また、PCCの方が炭酸化による物性への影響が大きい傾向であり、CO₂固定量が多いことに起因していると推察される。炭酸化前のCH含有率はPCCの方が大きくCO₂固定化のポテンシャルが高いと考えられ、炭酸化前後のCH含有率の低下量からより多くのCO₂を固定化したことが推察される。以上より早強セメントを用いた富配合のPCCの方がCO₂固定能力に優れることが示唆された。

表-5 炭酸化による物性変化とCO₂固定能力

項目	粒状化再生細骨材			
	RMC-GS		PCC-GS	
	炭酸化前	炭酸化後	炭酸化前	炭酸化後
絶乾密度 [g/cm ³]	2.11	2.16	2.07	2.18
表乾密度 [g/cm ³]	2.34	2.38	2.32	2.40
吸水率 [%]	11.33	10.24	11.92	10.08
CH含有率 [%]	0.49	0.32	0.82	0.65
CO ₂ 固定量 [CO ₂ -kg/t]	—	13.8	—	19.4

4. まとめ

本報では、比較的富配合なプレストレスト用コンクリート(PCC)と普通コンクリート(RMC)の粒状化再生骨材を製造し、基礎物性やCO₂固定能力について比較検討を行った。得られた知見を下記に示す。

- ① PCCのような早強セメントを用いた富配合であってもRMCと概ね同様の物性の粒状化再生骨材を製造できる。
- ② 粒状化剤の種類、添加量や粒状化方法が原骨材周りの付着モルタル量に与える影響は大きく、その影響によって粒状化再生骨材の物性が変化する。
- ③ 粒状化により粒径0.3mm以下の径は形成されにくい。また、微細な骨材も粒状化再生骨材における原骨材周りの層の形成に寄与しており、粒径0.3mm以下は特にその傾向にあることが示唆された。
- ④ 粒状化再生細骨材を炭酸化させることで密度は増加し、吸水率は低下した。その影響はPCCの方が大きい傾向にあった。また、PCCの方がCO₂固定能力に優れていることが考えられた。

参考文献

- 1) 斉藤丈士，松永篤，北口延郎，齋藤俊克：残コン・戻りコンの発生頻度とその処理に関する実態調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1919-1924，2011.7
- 2) 安部弘康，山内和宏，白岩誠史，鈴木好幸：生コンクリート由来の粒状化再生骨材への CO₂ 固定に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.16-21，2023.7
- 3) 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.413-421，2023.11
- 4) 白岩誠史，小山明男，船尾孝好，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
- 5) 笠井哲郎，内田賢吾，岩野慎平：原コンクリートの配合条件が再生骨材の品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1209-1214，2002.6