

低環境負荷型プレキャストコンクリート製品の開発

河合 研至¹

¹ 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 教授

本研究では、プレキャストコンクリート製品に着目し、環境負荷物質排出量の低減といった環境性能の評価を行うとともに、環境負荷低減の方策について検討を行った。低減策は、環境負荷物質排出量の低減ならびに解体コンクリートの有効活用の各側面から検討した。その結果、セメントの20%をフライアッシュ置換し、1年のうち64日間蒸気養生を行わないことで、CO₂排出量、SO_x排出量、NO_x排出量、ばいじん排出量を17%~18%低減することができ、解体コンクリートから再生骨材を製造する際に発生する微粉末を結合材の一部として再生骨材と合わせて再利用することで、リサイクル量を2~4倍にすることができることを示した。

キーワード：プレキャストコンクリート製品、環境負荷、CO₂ 排出量、SO_x 排出量、NO_x 排出量、ばいじん排出量

1. はじめに

本研究では、コンクリートの中でもプレキャストコンクリート（以下、PCa）製品に着目し、環境負荷物質排出量の低減といった環境性能の評価を行った。あるPCa製品会社の9工場に対するヒアリング調査結果をもとに、PCa製品製造における環境負荷評価を行った上で、環境負荷低減の方策について検討を行った。方策は、環境負荷物質排出量の低減に力点を置いた低環境負荷型PCaと解体コンクリートの有効活用に力点を置いた高リサイクル型PCaについて検討した。

2. PCa製品の環境負荷評価

PCa製品のライフサイクルのうち、原材料の製造において排出される環境負荷を原材料起源の環境負荷、PCa製品工場での製品化における環境負荷を施工起源の環境負荷とし、この2つの起源における環境負荷を本研究における評価対象とした。

環境負荷評価は、ヒアリング調査で得た各材料や燃料使用量に環境負荷の原単位を乗じることで行われる。本研究での環境負荷評価項目はCO₂、SO_x、NO_x、ばいじん排出量とした。調査を行ったPCa製品工場では数種類のコンクリート配合が用いられて

いるが、計算の簡易化と単純化のため、代表的な配合を基本配合と設定し、PCa製品工場の年間製造量全てが基本配合の製品であったと仮定して環境負荷を算出した。環境負荷評価は原材料起源と施工起源に分けて行い、その和をPCa製品製造における環境負荷とした。表-1に基本配合を、表-2にPCa製品工場における年間の各種燃料消費量をそれぞれ示す。

基本配合における原材料製造に関する各環境負荷物質排出量の算出結果を表-3に、施工起源の各環境負荷の算出結果を表-4に示す。さらに、原材料起源と施工起源のCO₂、SO_x、NO_x、ばいじん排出量の排出割合を図-1に示す。図-1より、CO₂排出量とNO_x排出量は原材料起源がそれぞれ約81%と約84%で大部分を占め、SO_x排出量とばいじん排

表-1 基本配合

設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	Air (%)	s/a	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
35	40	4.5±1.5	0.4	173	433	689	1081	1.61

(表中のAdは高性能減水剤を示す)

表-2 PCa製品工場における燃料消費量

	単位	使用量
電気使用量	kWh/year	539,994
重油使用量	L/year	276,400
軽油使用量	L/year	22,810

表-3 原材料起源の環境負荷(基本配合)

CO ₂ (t/year)	SO _x (kg/year)	NO _x (kg/year)	ばいじん(kg/year)
4,389	849	8,836	239

表-4 施工起源の環境負荷

CO ₂ (t/year)	SO _x (kg/year)	NO _x (kg/year)	ばいじん(kg/year)
1,046	3,710	1,648	891

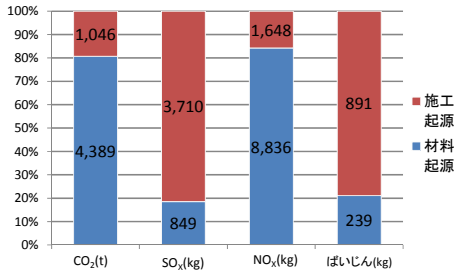


図-1 環境負荷の排出割合

出量は施工起源がそれぞれ約 81%と約 79%で大部分を占める結果となった。

3. 低環境負荷型 PCa の提案

本研究では PCa 製品を製造する際に、細骨材の一部を熔融スラグ細骨材に、粗骨材の一部を再生粗骨材に、セメントの一部をフライアッシュに置換すること、さらに気温の高い日に限り PCa 製品製造時の蒸気養生を行わないことで環境負荷の低減を図った。作製した供試体の配合を表-5に示す。あわせて表-5には材齢 7 日における圧縮強度試験結果を示す。基本配合の出荷強度は材齢 7 日で 35N/mm²となっており、全ての配合が出荷強度を満足する結果となった。

打設後 1 週間気中暴露した後に、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% の中性化促進環境に 8 週間保管することで中性化促進試験を行なった結果

を図-2に示す。基本配合に対してフライアッシュと熔融スラグ細骨材や再生粗骨材を同時に置換した場合、中性化深さが約 3mm 程度大きくなる結果となった。また、蒸気養生の有無により中性化深さに顕著な相違は見られなかった。

上記の配合に関して環境負荷評価を行った。ここでは、平均気温が 25℃以上の日を気温の高い日と想定し、PCa 製品製造の際に蒸気養生を行わなくてもよいと仮定した(1年のうち 64 日間がこれに相当)。

図-3に製品 1m³ 製造する際に排出される CO₂ 排出量の結果を示す。グラフ中の数値は排出量を示し、グラフ上部の数値は基本配合に対する排出量の比を

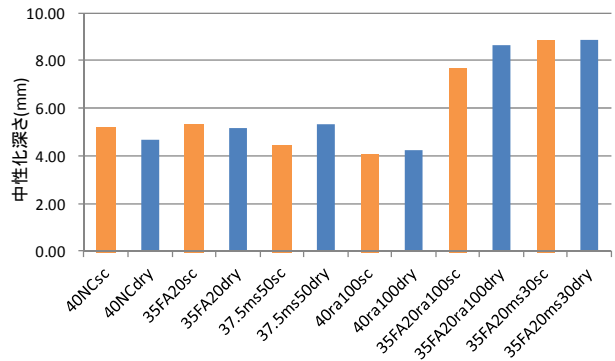


図-2 促進中性化試験結果

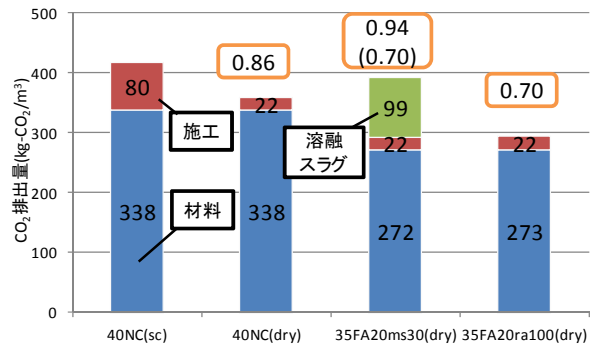


図-3 PCa 製品 1m³ あたりの CO₂ 排出量結果

表-5 環境負荷評価を行った各配合の詳細

配合名	圧縮強度 (N/mm ²)		slump (cm)	Air(%)	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)							
	sc	dry					W	C	FA	S	ms	G	ra	Ad
40NC	45.7	40.7	16.5	3.3	0.40	0.4	173	433	—	689	—	1081	—	1.52
37.5FA10	44.1	40.0	16	3.0	0.38	0.4	162	390	43	694	—	1089	—	1.73
35FA20	43.0	41.2	15.5	2.9	0.35	0.4	152	346	87	698	—	1097	—	1.95
40ms30	39.9	40.9	17	4.1	0.40	0.4	173	433	—	482	227	1081	—	1.52
37.5ms50	45.9	45.7	17.5	4.1	0.375	0.4	162	433	—	350	385	1099	—	1.73
40ra50	42.8	41.0	15.5	4.0	0.40	0.4	173	433	—	689	—	540	493	1.52
37.5ra100	47.6	45.1	19	3.4	0.38	0.4	162	433	—	700	—	—	1000	1.73
40ra100	46.7	49.0	15.5	3.0	0.40	0.4	173	433	—	689	—	—	984	1.52
35FA20ms30	38.5	36.2	15.5	3.1	0.35	0.4	152	346	87	489	231	1097	—	1.73
35FA20ra100	41.4	36.8	15.5	2.8	0.35	0.4	152	346	87	698	—	—	999	1.73

(表中の FA はフライアッシュ, ms は熔融スラグ細骨材, ra は再生粗骨材を示す。sc とは打設後 15 時間、最大 60℃ で蒸気養生を行ない、材齢 1 日で脱型以後気中暴露, dry とは打設後気中暴露した材齢 1 日で脱型、以後再び気中暴露した供試体である。打設時期が 8 月下旬であったため、気中暴露の際は温度約 25~35℃、相対湿度は約 45~90%、平均 72%であった。)

表している。図-1よりCO₂排出量の大部分は原材料起源が占めているため、蒸気養生を行わない場合、施工起源のCO₂排出量は約72%低減となるものの、PCa製品製造におけるCO₂排出量では約14%低減となる。さらにセメントの20%をフライアッシュに置換することで、原材料起源のCO₂排出量は約19%低減となり、PCa製品製造におけるCO₂排出量は約30%低減となる。

図-4にPCa製品製造における年間CO₂排出量を示す。グラフ下部の(301/365)とは、日平均気温が25℃以上の日は蒸気養生を行わないとするため、重油使用量を301/365とした場合の結果であることを意味する。

図-4より、CO₂排出量は原材料起源が大部分を占めているため、蒸気養生を行わないことにより重油使用量を低減してもCO₂排出量低減にはあまり効果的でない。また、セメントの20%をフライアッシュに置換することでCO₂排出量を約18%低減できる。NO_x排出量の算出結果はCO₂排出量と同じ傾向を示し、セメントの20%をフライアッシュに置換することでNO_x排出量を約17%低減できる結果となった。

図-5に製品1m³製造する際に排出されるSO_x排出量の結果を示す。図-1よりSO_x排出量の大部分は施工起源が占めているため、蒸気養生を行わない

ことでPCa製品製造におけるSO_x排出量は約79%の低減となる。また、セメントをフライアッシュに置換することでもSO_x排出量の低減効果はあるが、重油使用量を減らす方がより効果的であることは明らかである。

図-6にPCa製品製造における年間SO_x排出量を示す。図-6より重油使用量を301/365(約18%低減)にすることでSO_x排出量は約14%低減でき、さらにセメントの20%をフライアッシュに置換することでSO_x排出量を約18%低減できる。ばいじん排出量の算出結果はSO_x排出量と同じ傾向を示し、重油使用量を301/365にすることでばいじん排出量を約13%低減でき、さらに原材料置換を行うことでばいじん排出量を約17%低減できる結果となった。

以上、PCa製品の原材料を産業廃棄物や産業副産物に置換し、気温の高い日に限り蒸気養生を行わない場合のCO₂、SO_x、NO_xおよびばいじん排出量の評価を行った結果、フライアッシュの使用によるセメント使用量の低減がCO₂排出量とNO_x排出量の低減に効果的であり、気温の高い日に限り蒸気養生を行わないようにすることで重油使用量を低減することがSO_x排出量とばいじん排出量の低減に効果的であった。

4. 高リサイクル型PCaの検討

ここでは、天然骨材を再生骨材に、再生骨材製造時に発生する微粉末(フィラー)を結合材の一部に置換することでPCaにおける高リサイクル化を図り、廃棄物処分量の低減と砕砂や砕石などの天然資源の消費量削減を検討した。コンクリートの解体時における、再生骨材とフィラーを含めた全量をリサイクルできるような配合、すなわち、再生骨材製造時のフィラー、再生粗骨材、再生細骨材の質量比をそのままコンクリートに使用することを検討した。表

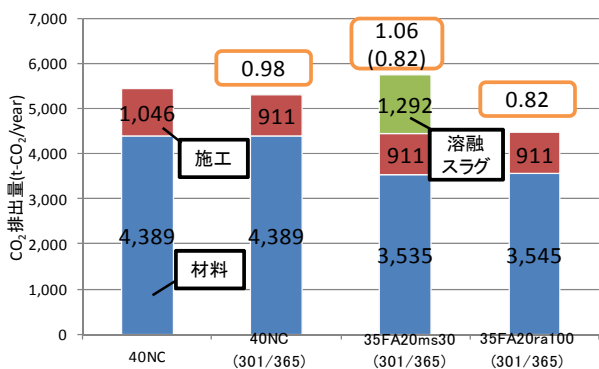


図-4 年間CO₂排出量結果

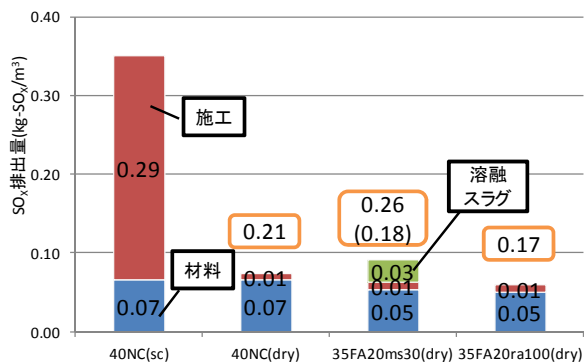


図-5 PCa製品1m³あたりのSO_x排出量結果

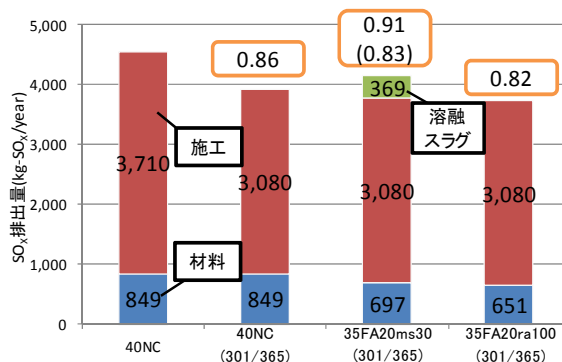


図-6 年間SO_x排出量結果

表一六 不要 PCa から製造される再生骨材の粒径別およびフィラーの質量比

粒径範囲(mm)	質量比率	フィラーに対する質量比
20-13	12%	42%
13-0.5	30%	
5-0	42%	2.63
微粒分(フィラー)	16%	1.00
計	100%	-

表一七 PCa 製品会社の基本配合

設計基準強度 (N/mm ²)	W/B	Air(%)	s/a	単位量(kg/m ³)					
				W	C	BF	S	G	Ad
35.0	0.36	2.0	0.42	169	352	117	711	1028	2.67

表一八 解体したコンクリート配合

設計基準強度 (N/mm ²)	W/B	Air(%)	s/a	単位量(kg/m ³)					
				W	C	BF	S	G	Ad
30.0	0.407	4.5±1.5	0.40	166	326	82	676	1031	2.24

一六に再生骨材製造の再生粗骨材、再生細骨材の粒度別およびフィラーの質量比を示す。また、表一七で示す PCa 製品会社の配合を基本配合とし、その基本配合のうち高炉スラグ微粉末の一部をフィラーに、粗骨材の一部を再生粗骨材に、細骨材の一部を再生細骨材に置換した。なお、フィラーと再生粗骨材、再生細骨材の比を変化させた配合についても検討した。これをフィラーの再利用率として表すこととし、例えば、フィラーの再利用率を 50%とした場合、コンクリートに利用する再生粗骨材と再生細骨材の量はそれぞれ 2 倍とした。ここで、本研究で用いた再生骨材は、調査対象とした PCa 製品会社の不要コンクリート製品の一つを破砕処理したものであり、配合は表一八のようになっている。

検討を行った各種配合を表一九に示す。今回の検討では、全ての供試体において蒸気養生を行った。蒸気養生の方法は、打設後 2 時間を前置き時間とし、その後昇温速度 20°C/h で昇温した後、60°C 一定で 6 時間養生し、以降、自然冷却とした。

硬化後のコンクリートに関しては、圧縮強度試験、

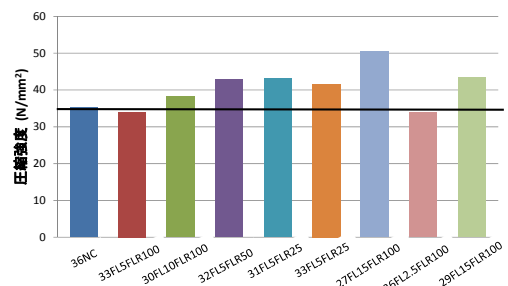
中性化促進試験および自由収縮の測定を行った。

図一七に材齢 7 日における圧縮強度試験結果を示す。円柱供試体(φ100mm, 高さ 200mm)を作製し、蒸気養生を行った後、1 週間気中暴露した。基本配合の出荷強度は材齢 7 日で 35N/mm²である。一部の配合において材齢 7 日で 35N/mm²に若干達しないものも見られたが、全ての配合で概ね所要の強度を満足する結果が得られた。これは、本研究で用いた再生骨材の原コンクリートの実強度が材齢 7 日で 47.4N/mm²と強度の高い PCa であり、品質が良好であったことも一因であると考えられる。

中性化促進試験結果については詳述を省略するが、その結果から、PCa 製品としての耐久性は十分に有するものが得られると判断した。

角柱供試体(100mm×100mm×400mm)を作製し、打設後蒸気養生を行い、材齢 1 日で脱型し、コンタクトチップを 30cm の間隔で 2 面に付け、コンタクトゲージを用いて自由収縮の測定を行った。測定中の供試体は、温度 20°C、相対湿度 60%の室内にて気中暴露した。測定結果を図一八に示す。いずれの供試体においても、基本配合(36NC)より収縮量が大きくなる結果となった。これは、再生骨材の周りに付着したモルタル分の影響で天然骨材よりも吸水率が大きくなったことが原因であると考えられるが、高リサイクル型 PCa の配合では硬化後のコンクリートの体積変化に注意を要する結果となった。

次に、高リサイクル型 PCa の環境負荷評価を行った。また、環境負荷評価を行うにあたり、再生骨材



図一七 圧縮強度試験結果(材齢 7 日)

表一九 環境負荷評価を行った各配合

配合名	W/B	Air (%)	s/a	単位量(kg/m ³)										
				W	C	BF	S	G20-15	G10-05	Ad	FL	RA20-10	RA10-05	RS
36NC	0.36	2.0	0.42	169	352	117	711	668	360	2.67	0	0	0	0
33FL5FLR100	0.33	2.0	0.42	169	384	102	623	606	326	4.20	26	19	48	67
30FL10FLR100	0.30	2.0	0.42	169	423	85	517	531	286	5.63	56	42	106	148
32FL5FLR50	0.32	2.0	0.42	169	396	106	542	551	297	4.75	26	40	99	139
31FL5FLR25	0.31	2.0	0.42	169	409	109	379	444	239	5.45	27	186	100	286
33FL5FLR25	0.33	2.0	0.42	169	365	122	531	569	307	4.42	26	33	102	172
27FL15FLR100	0.27	2.0	0.42	169	399	133	529	562	303	6.42	94	30	94	158
36FL2.5FLR100	0.36	2.0	0.42	169	343	114	695	661	356	2.87	12	4	12	20
29FL15FLR100	0.29	2.0	0.42	169	372	124	553	580	312	6.12	87	28	87	147

(表中の BF は高炉スラグ微粉末, FL はフィラー, RA は再生粗骨材, RS は再生細骨材を示す)

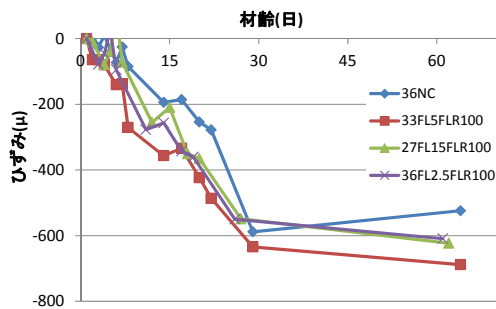


図-8 自由収縮測定結果

表-10 再生骨材 1t 製造時における環境負荷排出量

CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /t)	NO _x 排出量 (kg-NO ₂ /t)	ばいじん排出量 (kg-PM/t)
10.1	4.9.E-03	4.1.E-03	4.5.E-03

製造時に発生する環境負荷量を算出した。表-10に再生骨材 1t 製造時における環境負荷量の算出結果を示す。これは、フィラー、再生粗骨材、再生細骨材の全量を 1t 製造する際に発生する環境負荷物質排出量である。この結果は、本研究で使用した再生骨材の製造にあたって使用された重機や破砕機の使用時間、燃料消費量および電力消費量を基に算出したものである。環境負荷評価を行った配合の結果の一部を図-9、図-10に示す。グラフ中の数値はそれぞれの排出量を示す。

PCa の高リサイクル化を図ることで、いずれの配合においても基本配合より環境負荷量は多少大きくなる結果となった。これは、再生骨材製造における重機や破砕機の使用によって重油や軽油、電力の使用量が増大したことによるものである。また、CO₂ 排出量と NO_x 排出量では材料起源の排出量の方が施工起源の排出量よりも大きくなり、SO_x 排出量とばいじん排出量では施工起源の排出量の方が材料起源の排出量よりも大きくなった。これは、蒸気養生を行う際に大量に使用される重油の影響によるものである。

高リサイクル型 PCa では、高リサイクル化による廃棄物処分量の低減と砕砂や砕石などの天然資源の消費を抑制することを目的とすることから、産業副産物や産業廃棄物を処分する代わりに再利用した量をリサイクル量として評価を行った。図-11に PCa 製品 1m³ あたりのリサイクル量の算出結果を示す。

図-11より、W/B=33%、フィラーを 5% 置換して再利用率を 100% とした配合 (33FL5FLR100) においてはリサイクル量が基本配合の約 4 倍に、W/B=27%、フィラーを 15% 置換して再利用率を 100% とした配合 (27FL15FLR100) においてはリサイクル量が約 8 倍に増大する結果となった。

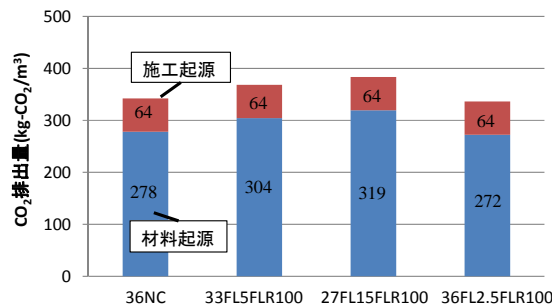


図-9 PCa 製品 1m³ あたりの CO₂ 排出量結果

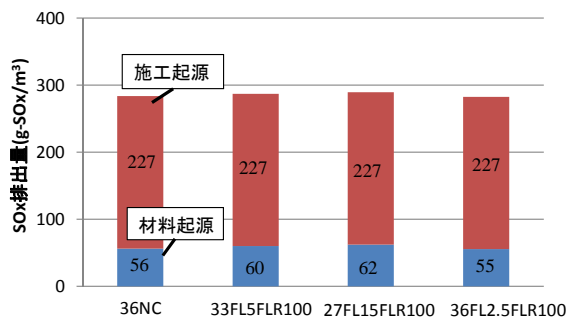


図-10 PCa 製品 1m³ あたりの SO_x 排出量結果

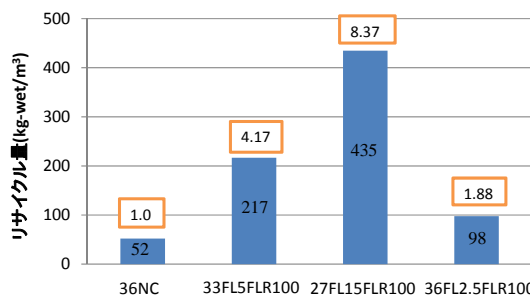


図-11 PCa 製品 1m³ あたりのリサイクル量 (kg-wet/m³)

上述した環境負荷物質排出量では配合により大きな差異はなかったものの、リサイクル量の増加率は基本配合に比べて非常に大きくなった。このことから、PCa にフィラーや再生骨材を材料として使用することで行う PCa の高リサイクル化は環境負荷低減の観点から見ると非常に有意義であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、低環境負荷型 PCa 製品と高リサイクル型 PCa 製品の提案とそれに伴う力学性能の評価および環境負荷評価を行った。これらの結果から明らかになった事項について以下に示す。

- 1) セメントの 20% をフライアッシュに置換し、1 年のうち 64 日間蒸気養生を行わないことで製造

される低環境負荷型 PCa では、CO₂ 排出量、SO_x 排出量、NO_x 排出量、ばいじん排出量を 17%～18%低減することができる。

- 2) 再生骨材製造時に発生するフィラーを再生骨材と合わせて有効に活用した高リサイクル型 PCa

では、フィラーを結合材に 5%置換、リサイクル率を 100%とすることでリサイクル量を約 4 倍に、フィラーを結合材に 2.5%置換、リサイクル率を 100%とすることでリサイクル量を約 2 倍にすることができる。