

論文 低環境負荷型プレキャストコンクリートの検討

澤井 浩士^{*1}・藤木 昭宏^{*2}・赤崎 大希^{*3}・河合 研至^{*4}

要旨：構造物設計の際、強度や耐久性などの力学性能が重視されており、CO₂ 排出量などの環境性能が考慮されることは少ない。そこで本研究ではプレキャストコンクリート（以下 PCa）製品に着目し、ある PCa 製品製造の環境負荷評価を行った上で、廃棄物や産業副産物をコンクリート用材料として使用することと、蒸気養生を気温の高い日に限り行わないことで、環境負荷低減の観点からより有用な PCa 製品を製造する方策の検討を行った。その結果、本研究で対象とした PCa 製品会社では年間 64 日間蒸気養生を行わないことで SO_x 排出量を約 14%低減でき、フライアッシュを 20%置換することで CO₂ 排出量を約 18%低減できる結果が得られた。

キーワード：環境負荷、プレキャストコンクリート製品、ライフサイクルアセスメント

1. はじめに

現在、地球温暖化、酸性雨、海洋汚染等の環境問題の深刻化が世界中で叫ばれており、環境負荷低減への取り組みが緊急の課題となっている。そのため、各産業において環境負荷低減の努力が必要であり、そのことは建設産業においても同様であり、無視できない問題となっている。建設産業においてコンクリート構造物を設計する際、耐久性、安全性、使用性などの照査が行われるが、環境負荷物質排出量といった環境性能については要求性能が明確でないケースが多く、同様なレベルで照査することは現状では困難である。しかし、今後より一層、環境負荷低減のニーズが高まり、要求性能が明確に示されるケースが増えてくると予想される。

そこで本研究では、建設活動を行う際に必要不可欠なコンクリート製品の中でも PCa 製品に着目し、環境性能の評価を行った。本研究で PCa 製品に着目した理由として、PCa 製品は工場で製品化されるため、現場周辺環境の影響を受けにくく、生コンクリート製品に比べて迅速な品質の確認と安定した品質の確保が期待できる。そのため、環境負荷低減を図るため、コンクリート材料として廃棄物や産業副産物を使用した場合も、一定品質の確保が期待できると考えられるからである。また、PCa 製品は製品自体が JIS 規格を満たすことで、製品の強度や耐久性といった力学性能を満足するため、生コンに比べて要求性能の中で環境性能を考慮しやすいと言える。

以上の理由より、本研究では PCa 製品に着目して、1 つの 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 製品の製造における環境負荷評価を行った上で、環境負荷低減についての検討を行う。本研究でヒアリング調査を行なった PCa 製品会社は、一般的な製品

から特殊な製品まで様々な PCa 製品を製造しているため、全 9 工場からヒアリング調査を行うことで本研究結果はヒアリング調査を行なった PCa 製品会社の一例ではあるが、全国の PCa 製品会社にも結果の傾向は共通すると考えられる。

2. 調査概要

2.1 環境負荷評価範囲

PCa 製品のライフサイクルは一般的にセメントや骨材など原材料の製造から始まり、原材料の PCa 製品工場への運搬、PCa 製品工場での製品化、PCa 製品の現場への運搬、施工現場での PCa 製品の供用・維持管理、供用期間終了後解体、廃棄もしくは再利用となっている。本研究ではこのライフサイクルの内、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とし、PCa 製品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評価対象とした。原材料の製造や PCa 製品工場での製品化において排出される環境負荷は、工場の場所や立地条件にあまり影響されず、日本全国の PCa 製品製造において共通して言及できるが、運搬や施工現場での PCa 製品の使用において排出される環境負荷は、PCa 製品工場や施工現場の場所や立地条件によって排出量が大きく左右されるため本研究では検討対象から除外した。本研究で評価対象とした原材料の製造における環境負荷とは、原材料を製造する際に石炭、石油、石灰石、粘土、骨材資源、石膏といった天然資源、エネルギーが消費され、セメントや細骨材や粗骨材が製造されるが、その結果排出される環境負荷を指す。また、PCa 製品工場での製品化における環境負荷とは、PCa 製品工場では型枠組立て、コンクリート練混ぜ、打設、蒸気養生と

*1 広島大学 大学院工学研究科 社会基盤環境工学専攻（正会員）

*2 ランデス（株） 本部技術センター研究所所長 修（工）（正会員）

*3 広島大学 工学部第四類 社会基盤環境工学課程

*4 広島大学 大学院工学研究院 社会環境空間部門 教授 工博（正会員）

いった工程で製造されるが、各工程において消費された電力、軽油、重油に関して排出される環境負荷を指す。

2. PCa 製品の概要

本研究ではPCa製品製造における環境負荷評価を行うためにPCa製品工場にヒアリング調査を行った。調査対象としたPCa製品工場は、年間製造量約40,000t（約13,000m³）であり、擁壁、水路、道路など様々な用途で用いられる水結合材比25~40%で設計強度30~70N/mm²の数種類のコンクリート配合を使用している。調査の結果、各種コンクリート配合と製造量および工場内での電力、軽油、重油使用量を得た。また、調査を行ったPCa製品工場ではコンクリート打設後15時間、設定温度60℃の蒸気養生を行った上で、材齢1日で脱型、以後気中養生を行い、材齢7日以上で製品として出荷可能としている。

3. PCa 製品の環境負荷評価

本研究では、ヒアリング調査を行った工場から出荷されるPCa製品に関する環境負荷評価を行った。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¹⁾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。表-1に環境負荷原単位であるインベントリデータを示す。また、2.2でも言及している通り本研究で調査を行った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。基本配合は様々な製品に対して用いられ、工場内で全製造量の約34%を占める配合である。なお、各種配合にその製造量を乗じた和を全製造量で除して算出したPCa製品工場での平均材料使用量と、基本配合の材料使用量は、例えば平均セメント使用量が440.3(kg/m³)で基本配合のセメント使用量が433(kg/m³)と大きな差はなかったため、全製造量が基本配合を用いたと仮定した場合にも厳密に試算を行った場合と大きな差は生じず、調査を行ったPCa製品工場内では基本配合は一般的な配合であると考えられる。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する。表-2に基本配合を、表-3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。

3.1 原材料起源と施工起源の環境負荷評価

原材料起源の環境負荷は、各原材料使用量にインベントリデータを乗じて、それらの和をとることで算出される。各原材料使用量はコンクリート配合(kg/m³)に製造量(13,000m³)を乗じることで算出される。環境負荷物質排出量の算出例として、基本配合におけるCO₂排出量の算出を表-4に示す。また、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-5に示す。施工起源の環境負荷も同様に重油と軽油、電力消費量にインベントリデータを乗じて、それらの和をとることで算出される。施工起源の各環境負荷の算出結果を表-6に示す。

表-1 インベントリデータ

材料名	単位 (*)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /*)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /*)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /*)	ばいじん 排出量 (kg-PM/*)	リサイクル (wet-kg/*)
ポルトランドセメント	t	766.6	1.22E-01	1.55E+00	3.58E-02	148
粗骨材	t	2.9	6.07E-03	4.15E-03	1.41E-03	
細骨材	t	3.7	8.60E-03	5.86E-03	1.99E-03	
溶融スラグ骨材（電気式）	t	430.3	1.23E-01	1.50E-01	2.49E-02	1238
三種再生骨材	t	3.1	1.27E-03	1.08E-02	6.55E-04	1000
フライッシュ	t	19.6	6.20E-03	7.54E-03	1.25E-03	
軽油	L	2.64	2.04E-03	3.96E-02	2.01E-03	
A重油	L	2.77	1.30E-02	2.38E-03	3.00E-03	
購入電力	kW h	0.41	1.30E-04	1.60E-04	3.00E-05	

斜体字は電力起源しか考慮していないもの（プロセス起源は不明）

表-2 基本配合

出荷強度	Gmax	sump	Air	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
(N/mm ²)	(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad
35	20	18±2.5	4.5±1.5	40	40	173	433	689	1081	1.61

（表中のAdは高性能減水剤を示す）

表-3 PCa 製品工場における燃料消費量

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

表-4 原材料製造に関する CO₂ 排出量(基本配合)

材料名	単位量 (kg/m ³)	CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)	製造量(m ³)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)	合計CO ₂ 排出量 (t-CO ₂ /year)
ポルトランドセメント	433	766.6	13,000	4,315,191	4,315	4,389
細骨材	689	3.7	13,000	33,141	33	
粗骨材	1081	2.9	13,000	40,754	41	

表-5 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-6 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

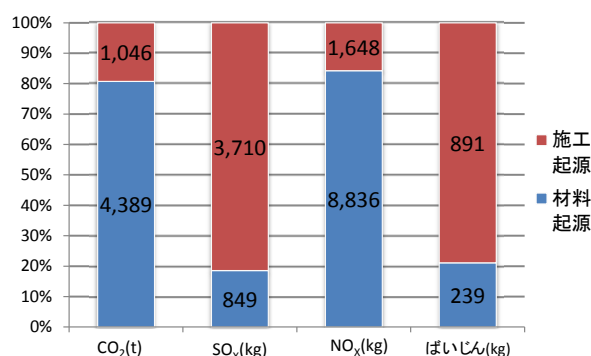


図-1 環境負荷の排出割合

3. 2PCa 製品製造に関する環境負荷評価

PCa 製品製造に関する環境負荷は、上記の原材料起源と施工起源の環境負荷の和である。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。

4. 低環境負荷低 PCa の提案

PCa 製品製造の環境負荷低減を図る場合、原材料起源の面からは使用する原材料をより低環境負荷の原材料に置換すること、施工起源の面からは PCa 製品工場で使用する燃料消費量を減らすことの2種類の方法が考えられる。そこで本研究では PCa 製品を製造する際に、細骨材の一部を溶融スラグ細骨材(電気式、密度 2.83g/cm³, 吸水率 0.32%)に、粗骨材の一部を再生粗骨材(再生粗骨材 M, 密度 2.45g/cm³, 吸水率 5.05%)に、セメントの一部をフライアッシュ(密度 2.2g/cm³)に置換することと、気温の高い日に限り PCa 製品製造の際の蒸気養生を行わないことで環境負荷の低減を図る。図-1 の結果より、原材料起源の環境負荷を低減できれば特に CO₂ 排出量と NO_x 排出量低減に効果的であり、施工起源の環境負荷を低減できれば特に SO_x 排出量とばいじん排出量低減に効果的であると考えられる。しかし、溶融スラグ細骨材を使用したコンク

リートはポップアウトが懸念される。また、溶融スラグ細骨材や再生粗骨材を高い置換率で置換した場合圧縮強度やヤング係数など各種強度の低下が懸念される。

そこで本研究では、上記のような環境負荷低減を図った場合の強度と耐久性に関する測定を行うために、様々な組み合わせで原材料置換を行なったコンクリート供試体を作製した。また、供試体作製時期は気温の高い8月下旬(気温 25.3℃~34.2℃)とし、全てのコンクリート配合に対して、打設後蒸気養生を行う場合と気中暴露する場合の2種類の方法で作製した。本研究ではコンクリート強度の測定として圧縮強度試験を、コンクリート耐久性の測定として中性化促進試験を行なった。本研究で作製した供試体のコンクリート配合を表-7 に示す。表-7 の 40NC とは基本配合を示し、FA はフライアッシュ、ms は溶融スラグ細骨材、ra は再生粗骨材をそれぞれ示す。また、配合名は最初の数値が W/B を示し、その後に基本配合に対する置換材料名と置換率を示している。

4.1 圧縮強度試験結果

表-7 に材齢 7 日における圧縮強度試験結果を示す。表-7 の sc は打設後蒸気養生を行なった供試体を意味し、dry は打設後気中暴露した供試体を意味する。基本配合の出荷強度は材齢 7 日で 35(N/mm²)であるので全ての配合が出荷強度を満足する結果となった。

4.2 中性化促進試験結果

本研究ではコンクリートの耐久性を評価するために、中性化深さの測定を行なった。8 週間中性化促進試験の結果を図-2 に示す。本研究では打設後 1 週間気中暴露した後に、温度 20℃, 湿度 60%, 二酸化炭素濃度 5% の中性化促進環境に 8 週間保管した後に中性化促進試験を行なった結果である。

基本配合に対してフライアッシュと溶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 程度大きくなるという結果となった。また、打設後気中暴露した場合と蒸気養生を行なった場合で中性化深さが変わるといった傾向は得られなかった。

表-7 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)		sLmp (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	0.4	0.4	173	433	689	1081	1.52	—	—	—
37.5FA10	44.1	40.0	16	3.0	0.375	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
40m s30	39.9	40.9	17	4.1	0.4	0.4	173	433	—	482	227	1081	—	1.52
37.5m s50	45.9	45.7	17.5	4.1	37.5	40	162	433	—	350	385	1099	—	1.73
40ra50	42.8	41.0	15.5	4.0	0.4	0.4	173	433	—	689	—	540	493	1.52
37.5ra100	47.6	45.1	19	3.4	0.375	0.4	162	433	—	700	—	—	1000	1.73
40ra100	46.7	49.0	15.5	3.0	0.4	0.4	173	433	—	689	—	—	984	1.52
35FA20m s30	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 日で脱型し以後気中暴露

dry とは打設後気中暴露し材齢 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℃, 湿度は降雨の関係で約 45~90%, 平均 72%であった。)

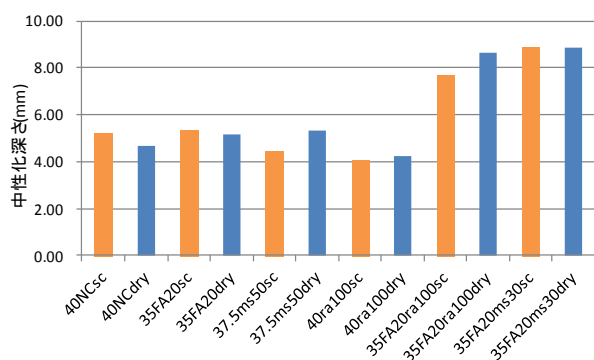


図-2 中酸化試験結果

5. 低環境負荷型 PCa の環境負荷評価

本研究では上記のような方法で PCa 製品の原材料を廃棄物や産業副産物に置換することと, 気温の高い日に限り蒸気養生を行わない場合の環境負荷評価を行った。本研究では 1 年のうち平均気温が 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。25℃以上の日に蒸気養生を行わないと仮定した理由としては, 本研究で供試体作製時期が 25℃以上であったためである。ヒアリング調査を行なった PCa 製品会社近郊の過去 3 年の気温を調べた結果, 日平均気温が 25℃を超える日は 365 日中平均 64 日であった。そこで本研究における気温の高い日に限り蒸気養生を行わないとは, 蒸気養生を 1 年のうち 64 日間は行わない, つまり蒸気養生を行う際の重油使用量を 64/365 減らすこととはほぼ同義であると考えられる。

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意味し, グラフ上部の数値は基本配合に対する排出量の比を意味する。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は施工起源の CO₂ 排出量は約 72%低減となるが, 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。また, 熔融スラグ細骨材の製造において排出される環境負荷は, 廃棄物は熔融スラグ細骨材の製造の有無に関わらず減量化のため熔融処理されるため, 環境負荷排出量を考慮しないという考え方もある²⁾。そのため, 本研究では熔融スラグ細骨材の製造において排出される環境負荷は原材料製造において排出される環境負荷と区別して評価を行った。

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 した場合の結果を意味する。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って重油使用量を減らすことでは CO₂ 排出量低減にあまり効果的でないという結果となった。図-4 より CO₂ 排出量はセメントの 20%をフライアッシュに置換することで約 18%低減できるという結果となった。また, NO_x 排出量の算出結果も CO₂ 排出量と同じ傾向を示しており, 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%低減できるという結果となった。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という結果となった。

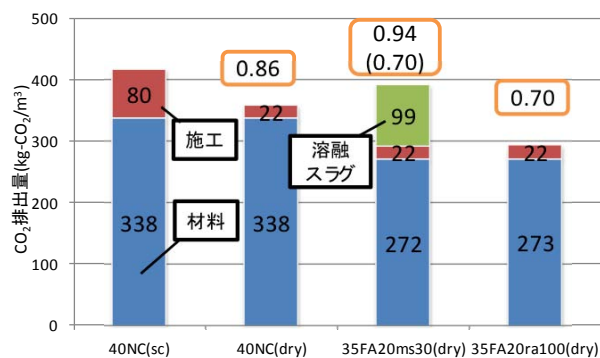


図-3 PCa 製品 1m³ あたりの CO₂ 排出量結果

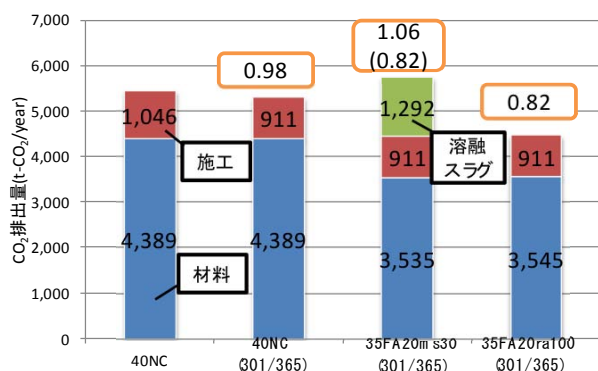


図-4 年間 CO₂ 排出量結果

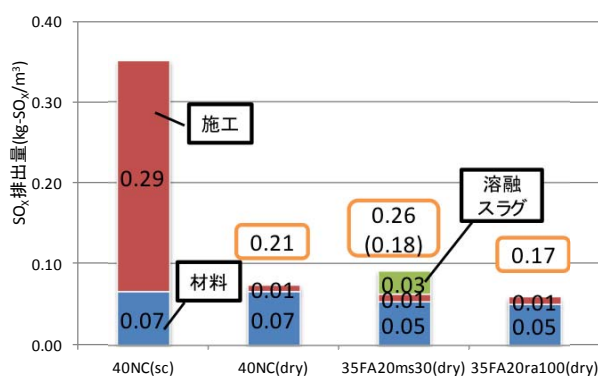


図-5 PCa 製品 1m³ あたりの SO_x 排出量結果

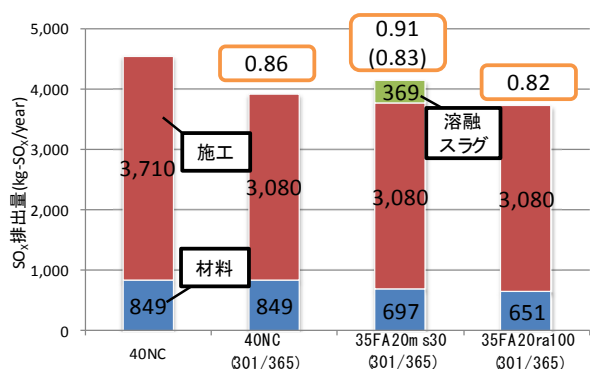


図-6 年間 SO_x 排出量結果

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%低減できるという結果となった。さらにセメントをフライアッシュに置換することで SO_x 排出量を約 18%低減できるという結果となった。ばいじん排出量の算出結果も SO_x 排出量と同じ傾向を示しており、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%低減できるという結果となった。

以上で PCa 製品の原材料を廃棄物や産業副産物に置換すること、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。その結果、フライアッシュを使用することでセメント使用量を低減できるため CO₂ 排出量と NO_x 排出量の低減に効果的であった。また、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できるため SO_x 排出量とばいじん排出量の低減に効果的であった。その一方、溶融スラグ細骨材や再生粗骨材を使用した場合、細骨材や粗骨材使用で排出される環境負荷は少ないため、環境負荷低減に効果的ではなかった。しかし、溶融スラグ細骨材や再生粗骨材は、廃棄物をコンクリート用材料として再利用したものであるため、目的は廃棄物処分量の低減と、砕砂や砕石など天然資源の消費を抑制するためである。そこで本研究では産業副産物や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。本研究においてリサイクル量は、フライアッシュ、溶融スラグ細骨材、再生粗骨材およびセメントの使用によって発生する。表-1 より本研究で用いた環境負荷原単位では、フライアッシュはリサイクル量がないとなっているが、フライアッシュも産業廃棄物であり使用するだけ廃棄物処分量を低減できると考えられるため本研究では石炭灰が全て再利用された場合を想定し、リサイクル量を 1000(wet-kg/t)と仮定してリサイクル量を算出した。図-7 にリサイクル量の算出結果を示す。図-7 より砕砂使用量の 30%を溶融スラグ細骨材に置換

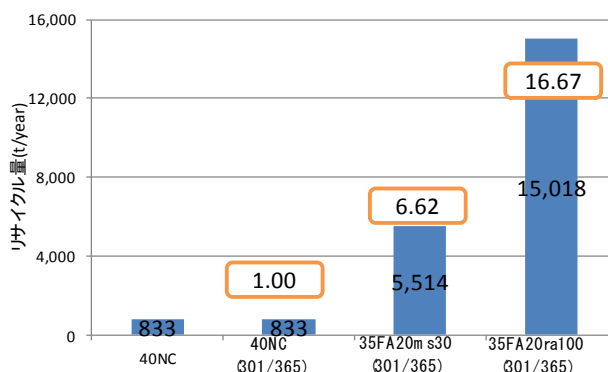


図-7 年間リサイクル量結果

することで約7倍、砕石を再生粗骨材に100%置換することで約17倍と大きく増大する結果となった。

6. コスト面からの考察

本研究ではPCa製品の環境負荷評価を行うことで環境性能を明らかにし、環境性能向上方法を提案した。しかし、一般的にコンクリート製品は力学性能とコストが重視されるため、環境負荷低減を図ったPCa製品に関しても、力学性能とコストを無視することはできない。そこで本研究ではPCa製品を製造する際のコストについての考察を行った。

表-8に参考資料³⁾から引用した各材料、燃料のコストを示す。表-8のコストはプラント持ち込み価格である。なお、熔融スラグ細骨材と再生粗骨材のコストは得ることができなかったため、熔融スラグ細骨材は砕砂と、再生粗骨材は砕石と同じ価格であると仮定した。コストは環境負荷と同様に各材料や各燃料使用量に単価を乗じることで算出した。図-8にPCa製品製造における年間コストの算出結果を示す。施工起源のコストは蒸気養生を行わないことで重油使用量を低減でき、コストの低減となった。材料起源のコストに関して、フライアッシュはセメントに比べて値段が安いいためコストの低減となるが、基本配合と同等の強度レベルとするために水結合材比を低く設定した結果、材料使用量、混和剤使用量が多くなるのでコストの増大となる。また熔融スラグ細骨材は砕砂に比べて密度が大きいため置換の際に使用量が多くな

りコストの増大になり、再生粗骨材は砕石に比べて密度が小さいため置換の際に使用量が少なくなりコストの低減となった。それらの要因によって各配合のコストは上下し、その結果本研究の提案する低環境負荷型PCa製品では約2%~5%程度のコスト低減という結果となった。

7. まとめ

本研究では、PCa製品の製造に関する環境負荷評価と低環境負荷型PCa製品の提案を行った。これらの結果から明らかとなった事項について以下に示す。

- (1) PCa製品製造におけるCO₂排出量とNO_x排出量はそれぞれ全体の約81%と約84%が原材料起源で排出され、SO_x排出量とばいじん排出量はそれぞれ約81%と約79%が施工起源で排出される。
- (2) 1年のうち64日間蒸気養生を行わないことでSO_x排出量とばいじん排出量低減に効果的であり、それぞれ約14%、約13%の低減となる。
- (3) 蒸気養生の回数を減らした上でセメントの20%をフライアッシュに置換することでCO₂排出量とNO_x排出量低減に効果的でありそれぞれ約18%、約17%の低減となる。
- (4) PCa製品を製造する際の砕砂の30%を熔融スラグ細骨材に、砕石の100%を再生粗骨材に置換することでリサイクル量はそれぞれ約7倍、約17倍の増大となる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2）、コンクリート技術シリーズ62, pp.39-40, 2004.9
- 2) 社団法人産業環境管理協会：LCA概論、LCAシリーズ, pp86-93, 2007.11
- 3) 財団法人建設物価調査会：建設物価2008.10

表-8 各材料、燃料のコスト

材料名	単位(※)	コスト(円/※)
C	t	9,600
FA	t	6,400
S	t	3,100
ms	t	3,100
G	t	2,600
ra	t	2,600
Ad	t	148,000
重油	L	70
軽油	L	125
電力	kW h	20

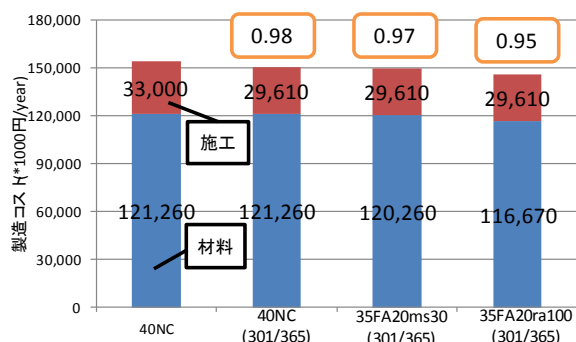


図-8 コスト算出結果