

コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究

黒田 泰弘 菊地 俊文
(技術研究所) (技術研究所)

Uptake of Carbon Dioxide by Demolished and Crushed Concrete

by Yasuhiro Kuroda and Toshifumi Kikuchi

Abstract

Reducing CO₂ emissions is an important issue of global warming. This study examined the uptake of CO₂ by demolished and crushed concrete by conducting an exposure experiment using crushed mortar and crushed concrete. The results of the experiment show that CO₂ uptake increases significantly when the particle size is small and when repeatedly wetted and dried. The uptake of CO₂ in concrete rubble obtained from middle processing factories was also examined. The amount of CO₂ uptake in one ton of concrete rubble was estimated to be 10.8 kg-CO₂. Using this value, the life cycle CO₂ (LCCO₂) of reinforced concrete was calculated and shown to be about 5.5% less than the uptake of CO₂ compared with a case that did not consider it.

概要

地球温暖化を背景として、CO₂排出量の削減が世界的に求められている。本研究では、コンクリート塊中のセメント水和物の炭酸化によるCO₂の固定化について検討した。モルタル片およびコンクリート片を用いた曝露試験を行って、粒径や曝露条件が、CO₂の固定化に及ぼす影響を調べた結果、粒径が小さく、乾湿を繰り返した場合に、CO₂の固定化が著しく速くなることを示した。また、複数の中間処理工場から入手した再生砕石を用いて試験を行い、コンクリート塊を破砕して得られた1tonの再生砕石が固定化しているCO₂量を10.8kg-CO₂と推定した。この結果をもとに、鉄筋コンクリートのLCCO₂を試算し、CO₂の固定化を考慮することで、考慮しない場合に比べ、LCCO₂が5.5%程度小さくなることを示した。

§ 1. はじめに

地球温暖化の問題を背景として、温室効果ガス排出量の削減が世界的に求められている。1997年には、気候変動枠組条約第3回締結国会議(COP3)において、京都議定書が採択され、2004年にロシアが批准したことを受け、2005年に発効された。我が国では2008~2012年の間に1990年を基準として、温室効果ガス6種の排出量を6%削減することが義務付けられている。しかしながら、2004年度の温室効果ガスの排出量は1990年比で8%の増加となっており、約束年までの目標の達成が危ぶまれている。また、こうした温室効果ガス増加の原因の一つとして、経済成長やそれに伴う消費の拡大が挙げられており、現在の大量生産・大量消費から離脱するための議論も始まっている。

一方、高度経済成長期に建設された建築物が更新時期を迎えるにあたって、廃コンクリート発生量の急激な増加が予測されている¹⁾。1990年比での建築物の解体量が増大すると、解体に伴うCO₂排出量も増大すると

考えられる。

ところで、コンクリートのLCCO₂を求める場合、CO₂排出だけではなく、供用時および解体後のコンクリートによるCO₂の固定化を考慮する動き²⁾が、欧米を中心としてある。一般に、コンクリートの中性化はコンクリート表面から \sqrt{t} 則によって進行し、Ca(OH)₂等のセメント水和物は炭酸化反応によってCaCO₃を生成し、CO₂を固定化する。これは構造物を解体した後のコンクリート塊についても同様であるが、表面積が格段に大きくなるだけでなく、炭酸化していない新しい破断面が増えるため、CO₂を固定化する量も増加すると考えられている。

こうした状況を踏まえ、本研究ではコンクリート塊によるCO₂の固定化について、以下のような検討を実施することにした^{3), 4)}。

(1) モデル試験

・モルタル片を用いた試験

セメント種類と水セメント比を変えて作製したモルタル供試体を粉砕して得た疑似コンクリート塊(モル

タル片)を用い、粒度範囲や曝露条件の違いが、CO₂の固定化に及ぼす影響を明らかとする。

・コンクリート片を用いた試験

実構造物の解体により発生した廃コンクリートを粉碎して得たコンクリート塊(コンクリート片)を用い、最大寸法や曝露条件の違いが、CO₂の固定化に及ぼす影響について明らかとする。

(2) 中間処理工場における実態調査

複数の中間処理工場を対象にヒアリング調査を実施することにより、受け入れたコンクリート塊の破碎・保管方法の実態を把握する。また、コンクリート塊を破碎して得られた路盤材用の再生砕石のサンプルを各工場より入手して、破碎後のコンクリート塊が固定化している一般的なCO₂量を推定する。

(3) LCCO₂の試算

(2)で推定したCO₂量を用いて、100m³の鉄筋コンクリートを想定した場合のLCCO₂の試算を行って、コンクリート塊によるCO₂の固定化の考慮が、LCCO₂にどの程度影響しているのかを明らかとする。

§ 2. モルタル片を用いた試験

2.1 試験の概要

(1) 使用材料および調査

セメントに普通ポルトランドセメント(OPC)または高炉セメントB種(BB)、細骨材に標準砂、水にイオン交換水を用いた。調合は、水セメント比をW/C=40%、60%とし、砂セメント比をS/C=3とし、ホバートミキサで

練り混ぜ、プラスチック製の型枠を使用して、モルタル供試体を作製した。

(2) モルタル片の作製と屋内曝露

20°C一定の環境下に材齢1年まで封緘養生したモルタル供試体を粗破碎した後、ジョークラッシャーで5mm以下に全粉碎し、モルタル片の試料とした。

この試料を底の浅い容器に平らに入れ、温度20°C、相対湿度65%の室内で、乾燥(D)または乾湿繰り返し(DW)の条件として、91日間曝露した。乾湿繰り返し条件では、写真-1に示すように、含水率が15%程度となるように、週2回蒸留水を散布し、均一になるようにかき混ぜた。また、乾燥条件でも週2回、同様にかき混ぜた。

(3) 試験方法

試料の作製および試験は次のように実施した。

①試料作製：所定の期間まで曝露したモルタル片をアセトン処理後、写真-2のように粒度範囲の異なる3試料(0~0.5mm、0.5~2.0mm、2.0~5.0mm)にふるい分け、振動ミルで0.15mm以下に全粉碎した後、必要量を分取した。

②不溶残分試験：JCAS F-18「硬化コンクリートの配合推定」に規定される方法に準拠して実施し、骨材の含有量に相当する不溶残分を求めた。

③熱分析(TG-DTA)：写真-3の熱分析装置を用い、昇温速度10°C/min(室温~850°C)として実施した。DTAの450°C~500°C付近および600~700°C付近の吸熱ピークをそれぞれCa(OH)₂からの脱水(H₂O)およびCaCO₃の分解(CO₂)とみなし、TGの質量損失から、試料中のCa(OH)₂およびCaCO₃の含有量を算出し、さらに不溶残分試験結

表-1 試験結果の一覧(モルタル片)

セメント種類	W/C (%)	曝露条件	粒度範囲 (mm)	曝露期間								
				0日			28日			91日		
				insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)
OPC	40	D	0.5-0	68.4	10.81	2.02	58.9	11.52	9.41	61.8	7.44	17.27
			2-0.5				73.3	9.25	3.07	77.5	8.97	10.52
			5-2				69.5	12.42	2.98	70.5	11.16	8.41
		DW	0.5-0				61.7	-	53.64	64.0	-	67.68
			2-0.5				60.6	-	17.21	76.0	3.09	29.95
			5-2				66.2	6.82	8.82	68.5	6.93	14.16
OPC	60	D	0.5-0	68.3	12.60	2.15	57.2	11.54	19.19	58.4	8.02	32.92
			2-0.5				79.7	12.17	6.84	79.5	1.61	25.86
			5-2				70.3	14.83	3.83	70.5	7.54	32.08
		DW	0.5-0				54.0	-	55.39	57.5	-	66.00
			2-0.5				72.6	-	34.04	73.2	-	33.70
			5-2				69.4	5.92	16.95	68.2	5.31	25.25
BB	60	D	0.5-0	69.6	7.72	0.90	56.2	6.20	9.14	58.0	-	22.37
			2-0.5				74.2	4.79	5.64	77.5	-	17.39
			5-2				68.8	4.35	5.54	69.5	-	13.65
		DW	0.5-0				54.9	-	45.15	57.6	-	50.97
			2-0.5				71.5	1.01	18.20	72.1	-	29.35
			5-2				71.0	2.98	10.67	69.3	2.82	15.56

※-は吸熱のピークが認められなかったことを示す

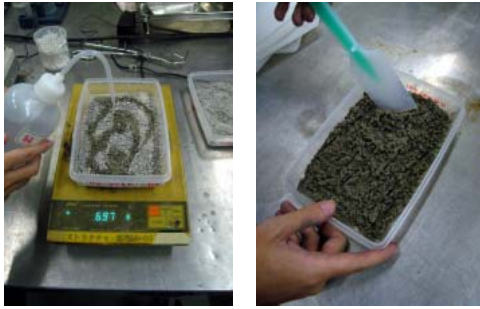


写真-1 蒸留水の散布とかき混ぜ状況



写真-2 ふり分け後のサンプル



写真-3 熱分析装置

果をもとに、セメントペースト当たりの含有率に換算した。なお、 $\text{Ca}(\text{OH})_2=74.1$ 、 $\text{CaCO}_3=100.1$ 、 $\text{H}_2\text{O}=18.0$ 、 $\text{CO}_2=44.0$ とした。

2.2 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-1に、曝露期間と CaCO_3 含有率との関係を図-1に示す。

水セメント比に関しては40%の場合より60%の場合が CaCO_3 含有率は高かった。水セメント比が大きいほど、水和物がポーラスなため、炭酸化の進行が速くなったと考えられる。

また、セメントの種類に関してはBBよりOPCの場合が CaCO_3 含有率は高かった。BBは、OPCと比べて初期の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率が低いため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化による消失は早く、相対的に CaCO_3 含有率が小さくなったと考えられる。

粒度に関しては、粒径が小さいほど、炭酸化の進行は速くなった。これは粒径が小さいほど、空気に接す

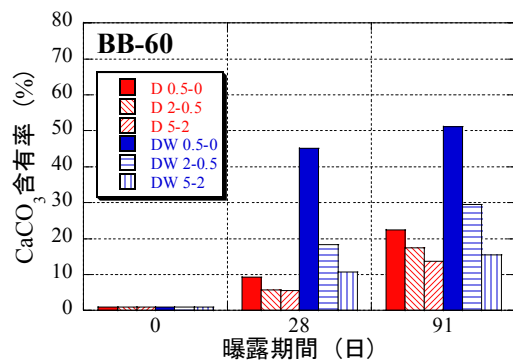
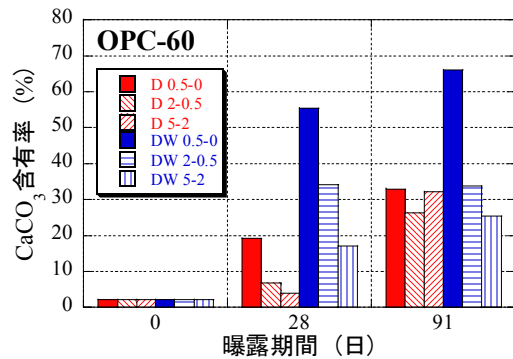
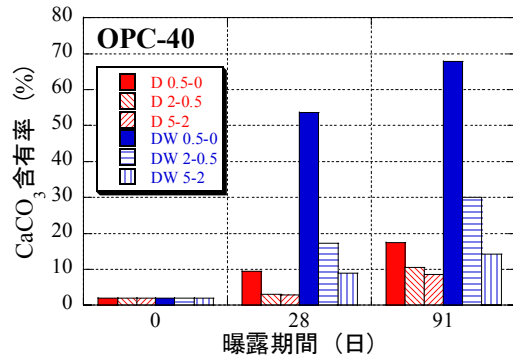


図-1 曝露期間と CaCO_3 含有率との関係 (モルタル片)

る面積が大きくなり、その影響が卓越したためと考えられる。

また、乾燥と乾湿繰り返しでは、乾湿繰り返し条件の方が炭酸化は速かった。乾湿繰り返し条件にある粒径の小さなサンプルで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の減少が著しく、それに対応して CaCO_3 含有率は増加していることから、乾湿繰り返し条件下では、炭酸化反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費を補うために、固相から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶出し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費が促進されたものと考えられる。なお、既往の研究⁵⁾においても、水の介在は、炭酸化速度を加速するとされている。

§3. コンクリート片を用いた試験

表-2 試験結果の一覧 (コンクリート片)

試料	曝露条件	粒度範囲 (mm)	曝露期間								
			0日			28日			91日		
			insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	insol. (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)
コンクリート片	D	2-0	68.7	4.47	13.88	65.6	2.87	14.68	68.5	2.74	19.57
		10-0				74.7	1.95	16.01	77.2	1.81	19.16
	DW	2-0				67.3	-	24.14	68.4	-	39.88
		10-0				66.2	-	22.85	68.5	-	28.97

※-は吸熱のピークが認められなかったことを示す



写真-4 入手したコンクリート塊



写真-5 粉砕後のコンクリート片試料

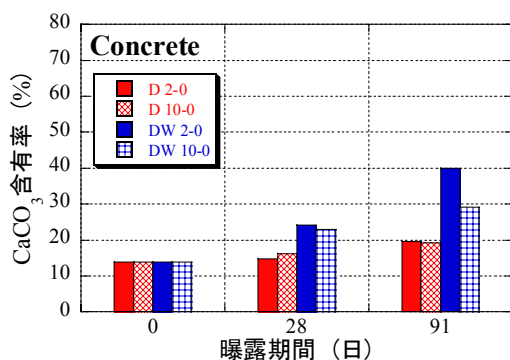


図-2 曝露期間と CaCO₃ 含有率との関係 (コンクリート片)

3.1 試験の概要

(1) 廃コンクリート

都内の解体現場 (1960 年代に建設された RC 造建築物) の解体時に入手したコンクリート塊を試料として用いた。コア強度の平均は 26.7N/mm² であり、採取してから粉砕するまでの約 3 ヶ月間は、写真-4 のように

袋に入れた状態で保管されていた。

(2) コンクリート片の作製と曝露条件

人頭大のコンクリート塊数個を、150mm 程度に粗破碎した後、ジョークラッシャを数回通すことで写真-5 のように 10mm 程度以下に全粉碎し、曝露試験用のコンクリート片試料とした。

コンクリート片試料は、温度 20℃、相対湿度 65% の室内で、乾燥 (D) または乾湿繰り返し (DW) (含水率が 15% 程度となるように、週 1 回の蒸留水の散水) の条件下で、91 日間曝露した。

(3) 試験方法

所定の期間曝露後、コンクリート片試料をふるって最大寸法の異なる 10-0mm、2-0mm の 2 試料を作製し、§ 2. の場合と同様に、不溶残分試験および熱分析 (TG-DTA) 試験を実施し、セメントペースト当たりの Ca(OH)₂ および CaCO₃ の含有率を求めた。

3.2 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-2 に、曝露期間と CaCO₃ 含有率との関係を図-2 に示す。

曝露開始時点で既に CaCO₃ 含有率は 10% を超えていた。これは施工後の供用期間および試料作製までの保管期間における炭酸化の影響と考えられる。

乾燥と乾湿繰り返しでは、乾湿繰り返し条件の方が CaCO₃ 含有率は高かったが、モルタル供試体の破砕片を用いた試験結果ほどの CaCO₃ 含有率の急激な増加は認められなかった。モルタルとコンクリートといった材料の違いに加え、元々炭酸化が進行していたこと、乾湿繰り返しを週 2 回から週 1 回に変更していることなどが影響していると考えられる。

なお、コンクリート片の場合でも、乾湿繰り返し条件下での炭酸化の進行は早く、曝露期間 91 日において、2-0mm の試料で CaCO₃ 含有率は約 40%、10-0mm の試料でも約 30% と、セメント水和物による CO₂ の固定化は確実に進行していた。現状、コンクリートの LCCO₂ を算出するにあたって、コンクリート塊による CO₂ の固定化は考慮されていないが、無視できない割合の量であり、考慮すべき事項ではないかと考えられる。

§ 4. 中間処理工場における調査

4.1 調査の概要

図-3の立地にある首都圏の8箇所の中間処理工場を対象に、コンクリート塊の破碎・保管方法等についてヒアリング調査を実施するとともに、各中間処理工場より再生砕石 RC40 のサンプルを入手して、次の試験を行った。

①粒度分布試験：0.5mm, 2mm, 5mm, 20mm, 40mm のふるいを用いてふるい分けを実施した。

②不溶残分試験：5mm 通過分の試料に対して実施した。

③熱分析 (TG-DTA) 試験：5mm 通過分の試料に対して実施し、CaCO₃含有率を推定した。

②と③の試験対象を 5mm 通過分の試料に限定したのは、(a)RC40 を全粉碎して均一なサンプルを得るには、非常に多くの試料が必要なこと、(b)RC40 は 5mm 通過分に比べ、骨材の割合が多いため、試験誤差が大きくなること、(c)5～40mm 試料の炭酸化速度が 5mm 通過分に比べて著しく小さいこと、などによる。

なお、③の熱分析試験において、いずれの試料においても Ca(OH)₂の吸熱ピークは、DTA ではほとんど確認できなかったため、Ca(OH)₂含有率の推定は行わなかった。

4.2 調査結果および考察

中間処理工場および再生砕石の例を写真-6および写真-7に、調査結果の一覧を表-3に示す。

(1) ヒアリング調査

受け入れたコンクリート塊を必要に応じて前処理（小割、鉄筋の除去等）した後、ジョークラッシャで1次破碎し、インパクトクラッシャで2次破碎して、再

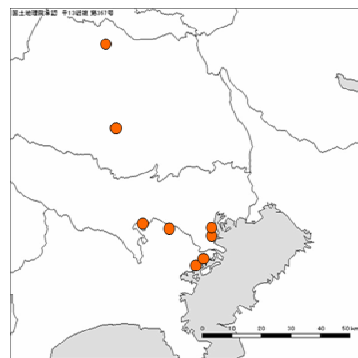


図-3 中間処理工場の立地



写真-6 中間処理工場の例



写真-7 再生砕石の例

表-3 調査結果の一覧

工場	ヒアリング調査結果					サンプル試験結果						
	期間	破碎		保管方法		通過率 (%)					不溶残分 (%)	CaCO ₃ (%)
		破碎条件	破碎能力	受入から破碎	破碎から出荷	40mm	20mm	5mm	2mm	0.5mm		
A	1ヶ月以内	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ 3次破碎：コンクラッシャ	2,000t/日	屋外	屋外	100	84	15	6	2	58	34.5
B	1ヶ月以内	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	3,000t/日	屋外	屋外	99	80	37	26	5	65	22.7
C	1ヶ月以内	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	820t/日	屋外	屋外 一部屋根付き	100	69	19	12	4	66	30.2
D	1～3ヶ月程度 の場合もある	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	3,520t/日	屋根付き	屋外 一部屋根付き	100	79	30	20	6	57	24.4
E	1～3ヶ月程度 の場合もある	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	2,040t/日	屋外	屋外	100	80	27	19	6	55	25.8
F	1～3ヶ月程度 の場合もある	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	640t/日	屋外	屋外	100	74	22	14	5	70	29.8
G	1ヶ月以内	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	630t/日	屋外	屋外	96	61	25	17	4	63	18.8
H	1～3ヶ月程度 の場合もある	1次破碎：ジョークラッシャ 2次破碎：インパクトクラッシャ	480t/日	屋外	屋外	100	73	18	9	5	68	34.3
平均						99	75	24	15	5	63	27.6

生砕石を製造しているケースが大半であり、3次破碎まで行っているのは1ケースのみであった。また、調査対象となった工場の破碎能力は480~3,520 t/日の範囲にあった。

保管方法は原料(コンクリート塊)および製品(RC40)ともに屋外に曝露されているケースがほとんどであり、結果的に乾湿を繰り返しているケースが一般的と考えられる。また、受入から出荷までの期間は、概ね1ヵ月以内という回答と1~3ヵ月程度の場合もあるという回答が半々であった。

(2) サンプル試験

各工場から入手した再生砕石の5mm通過分の全体に対する割合を図-4に、5mm通過分に対して行った不溶残分の試験結果を図-5に、熱分析によるCaCO₃含有率の推定結果を図-6に示す。

5mm通過分の割合は平均で24%であり、不溶残分は平均で63%であった。著しく不溶残分の小さいケースはなかったことから、石灰石コンクリートは混入して

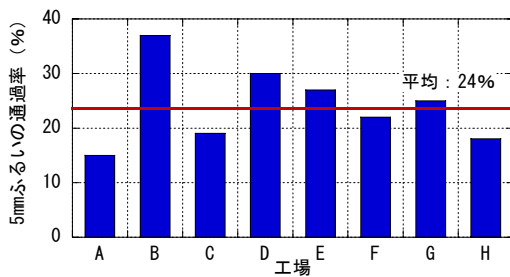


図-4 5mm通過分の全体に対する割合

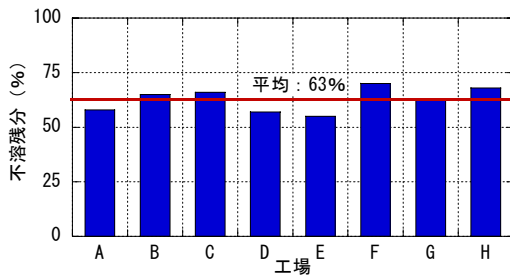


図-5 不溶残分

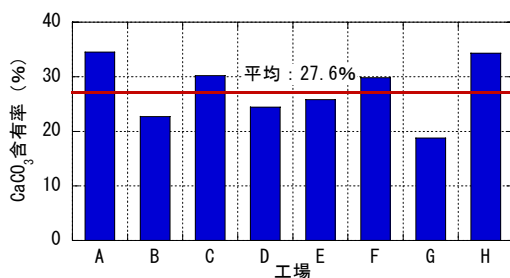


図-6 CaCO₃含有率

いないと判断した。

CaCO₃含有率は平均で27.6%であり、§3のコンクリート片試料を乾湿繰り返し28日曝露した場合よりも大きく、91日曝露した場合よりも小さかった。破碎後の保管期間を1ヵ月から3ヵ月程度と考えると、妥当と思われる結果であった。

今回の調査の範囲では、これらの結果より、コンクリート塊1tから製造された再生砕石が一般的に固定化しているCO₂量は、10.8kg-CO₂と推定した。なお、5~40mmのコンクリート塊も全くCO₂を固定化していないわけではないため、実質の固定化量はこれより多いと思われる。また、この量は、リサイクル工程だけでなく、供用中や解体時のCO₂の固定化を含むものである。

§5. LCCO₂の試算

5.1 算定条件

土木学会の試算例⁶⁾をもとに、表-4に示すような調査と材料の使用量を有する100m³の鉄筋コンクリートを想定し、インベントリ分析を行い、LCCO₂量を検討することとした。

インベントリ分析したのは、P1(使用材料)、P2(生コン製造・施工)、P3(解体)、P4(中間処理)、P5(輸

表-4 コンクリート調査および各材料の使用量

材料	単用量	使用量
	(kg/m ³)	(t/100m ³)
W(上水)	165	16.5
C(ポルトランドセメント)	300	30.0
S(砕砂)	800	80.0
G(砕石)	1050	105.0
鉄筋(電気炉鋼)	-	20.0
W/C(%)		55.0
s/a(%)		44.0
空気量(%)		4.5

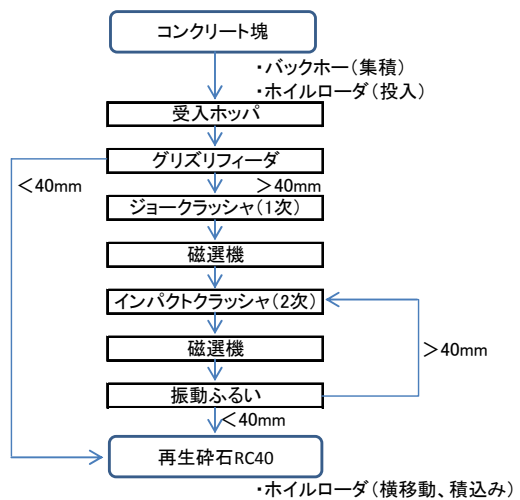


図-7 再生砕石の製造フロー

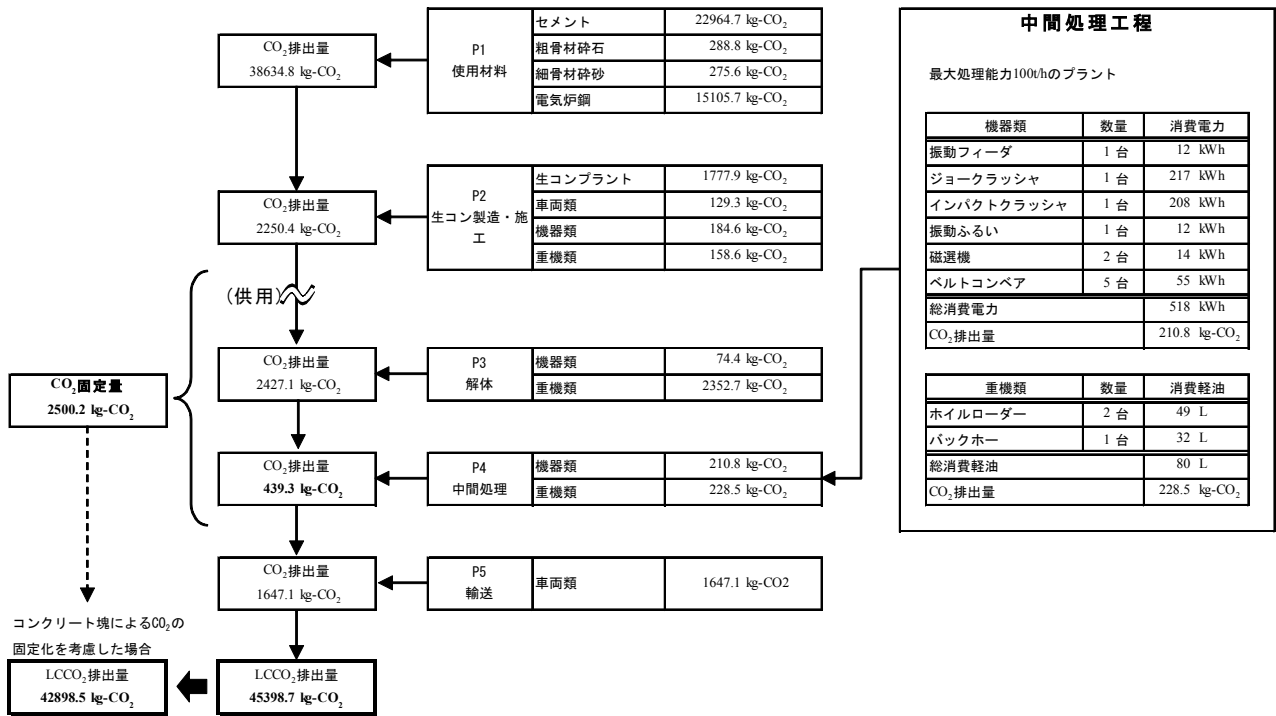


図-8 鉄筋コンクリート 100m³を対象とした LCCO₂の試算結果

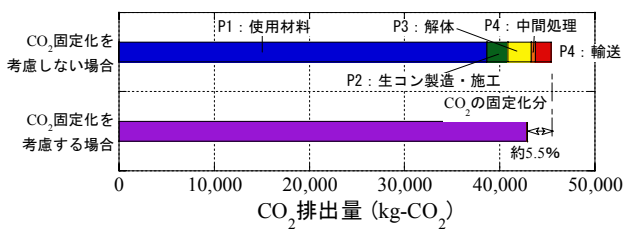


図-9 CO₂固定化の考慮の有無による LCCO₂の比較

送)の各工程であり、プロセスごとにCO₂排出量を算定し、加算した。P1、P2、P3、P5については文献⁶⁾に示されたデータを、そのまま引用することとして、P4に関しては、一般的な中間処理工程として、図-7のような再生砕石の製造フローを仮定した。

P4では、1次破碎にジョークラッシャ、2次破碎にインパクトクラッシャを用いる一般的な再生砕石製造システムとして、最大で100t/hの処理能力を有する比較的小規模のプラントを想定した。また、プラントの稼働率を80%と仮定し、破碎機メーカーの機器類の定格値に対する消費電力を試算した。さらに、重機類の稼働時間をプラントの稼働率に合わせて設定し、その消費燃料を、(社)日本建設機械化協会の建設機械等損料算定表⁷⁾に基づき、試算した。

5.2 試算結果および考察

鉄筋コンクリート 100m³を対象とした LCCO₂の試算結果を図-8に示す。

再生砕石が固定化しているCO₂量はP1と比較すると小さなものであったが、P2やP3で排出されるCO₂量とは概ね同程度であり、P4よりも明らかに大きなものであった。解体や中間処理で発生するCO₂量の多くは、CO₂固定化によって相殺されると考えられる結果である。

また、CO₂の固定化を考慮しない場合のLCCO₂と考慮した場合のLCCO₂を比較すると、図-9に示すとおり、後者の場合の方が、LCCO₂が5.5%程度少なく算定される結果となった。

今後、高度経済成長期に建設された建築物が更新時期を迎えるにあたって、解体コンクリート量の増大に伴うCO₂排出量が増大すると考えられる。コンクリートのLCCO₂を算定する際には、CO₂排出量のみを加算するのではなく、セメント水和物の炭酸化によるCO₂の固定化を考慮して、その分を減じる必要があり、その方が合理的と考えられる。

§ 6. まとめ

地球温暖化の問題を背景として、CO₂排出量の削減が世界的な関心事となっている。本研究では、セメント水和物の炭酸化によるCO₂の固定化に着目して、モルタル片やコンクリート片によるモデル試験を実施するとともに、中間処理工場のコンクリート塊におけるCO₂の固定化の実態を調査し、その結果をもとにLCCO₂の試算を行った。主な検討結果は以下のとおりである。

(1) コンクリート塊の炭酸化速度は、粒径が小さくなるほど速くなり、CO₂を多く固定化した。粒径が小さいほど、空気に接する面積が大きくなり、その影響が卓越するためと考えられる。

(2) コンクリート塊の炭酸化速度は、乾湿繰り返した場合に速くなり、CO₂を多く固定化した。炭酸化反応によるCa(OH)₂の消費を補うために、固相からCa(OH)₂が溶出し、Ca(OH)₂の消費が促進された結果、CO₂をより多く固定化したと考えられる。

(3) コンクリート塊の炭酸化速度は、粒径が小さく、乾湿を繰り返した場合に、構造体と比較して著しく速くなり、W/Cが低い場合でも、ごく短期間に炭酸化が進行し、CO₂を多く固定化した。

(4) 今回の中間処理工場におけるサンプル調査の範囲では、コンクリート塊を破砕して得られた路盤材用の再生砕石の5mm通過分に含まれるCaCO₃含有率は、セメントペースト含有率に対して、平均で27.6%であり、

コンクリート塊1tから製造した再生砕石が固定化しているCO₂量は、10.8kg-CO₂と推定された。

(5) 鉄筋コンクリートのLCCO₂を試算した結果、解体や中間処理で発生するCO₂量の多くは、コンクリート塊によるCO₂の固定化によって相殺される結果となった。LCCO₂を試算する際に、CO₂の固定化を考慮すると、CO₂の固定化を考慮しない場合に比べ、LCCO₂は5.5%程度小さくなった。

以上の結果より、コンクリートのLCCO₂を算定する際には、セメント水和物の炭酸化によるCO₂の固定化を考慮するのが合理的と考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、早稲田大学興石研究室の廣嶋裕晃君（現清水建設株）、野村隆太君（M2）にご協力頂きました。末筆ながら感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 立屋敷久志：“解体コンクリートの現状と将来—地域性と構造規模から見た発生予測—”，セメント・コンクリートNo.717, pp.25-33, 2006.11
- 2) Danish Technological Institute：“Guidelines-Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete”，2005.10
- 3) 菊地俊文，黒田泰弘：“コンクリート塊のCO₂固定化に関する研究（その1 破砕後の曝露がCO₂の固定化に及ぼす影響）”，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.203-204, 2007
- 4) 黒田泰弘，菊地俊文：“コンクリート塊のCO₂固定化に関する研究（その2 LC CO₂の算定）”，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.205-206, 2007
- 5) 中村秀三：“炭酸化の機構に関する一考察”，セメント・コンクリート論文集No.48, pp.584-589, 1994
- 6) 土木学会：“コンクリート技術シリーズNo.62 コンクリートの環境負荷評価（その2）”，pp.32-40, 2004
- 7) 日本建設機械化協会：“建設機械等損料算定表（平成15年度版）”，国土交通省総合政策局建設施工企画課監修, 2003