

コンクリート塊の再資源化による二酸化炭素固定

建設リサイクルを通じた吸収作用の保全・強化の展望

曾根 真理・神田 太朗

コンクリートは、セメント水和物の炭酸化と呼ばれる現象によって、大気中のCO₂を固定する。特に、コンクリート塊の再資源化は、短期間で大きなCO₂固定が可能であると見込まれる。しかしながら、定量的な知見はほとんど無い。そこで、各都道府県の中間処理工場で採取した再生砕石を対象に全国調査を実施し、CO₂固定量を求めた。調査の限りでは、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定原単位は約8.5 kg-CO₂/tであった。この結果を用いると、平成20年度における年間のCO₂固定量は約26万tに及び、コンクリート塊を用いた再生材は代替材に比べてCO₂排出原単位が小さい。本調査により、コンクリート塊の再資源化を通じて、建設リサイクルは循環型社会と低炭素社会の両立に資することが示された。

キーワード：二酸化炭素固定、建設リサイクル、コンクリート塊、再資源化、粒度

1. はじめに

地球温暖化は最も重要な環境問題の一つであり、あらゆる主体による対策が求められている。我が国においては、京都議定書で約束された第一約束期間において基準年に対する6%の温室効果ガス排出量の削減を達成するため、地球温暖化対策の推進に関する法律(平成10年10月公布、平成23年6月最終改正)に基づく京都議定書目標達成計画(平成17年4月策定、平成20年3月全部改定)が定められている。

京都議定書目標達成計画においては、建設分野に密接に関連する対策として、エネルギー起源の二酸化炭素(CO₂)排出量を抑制する「建設施工分野における低燃費型建設機械の普及」、非エネルギー起源のCO₂排出量を抑制する「混合セメントの利用の拡大」のほか、吸収作用の保全・強化として道路等における都市緑化等の推進が示されている。

コンクリートは、都市緑化等と同様に、大気中のCO₂を固定することが知られている。特に、建設分野で発達している再資源化によって、CO₂固定速度の上昇が期待される。しかしながら、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量については知見が乏しく、地球温暖化対策として有効であるかの定量的な判断は困難である。

そこで、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量を把握することを目的として、全国調査を実施した。本稿では、本調査の結果を紹介し、建設リサイク

ルを通じた吸収作用の保全・強化の展望を示す。

2. コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定

(1) コンクリートによるCO₂固定のメカニズム

セメント製造の焼成工程における脱炭酸、コンクリートの練混ぜ後の水和反応を経て、コンクリート中には、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)等のセメント水和物が生成する。セメント水和物は、pHが概して高く、Ca(OH)₂で約13である。このため、コンクリートの微細な間隙を通じて表面からCO₂が内部に浸透し、水中で炭酸イオン(CO₃²⁻)にイオン化すると、酸塩基反応によって炭酸カルシウム(CaCO₃)として固定される。炭酸化の模式図を図-1に示す。

コンクリートのライフサイクルを通じた主なCO₂

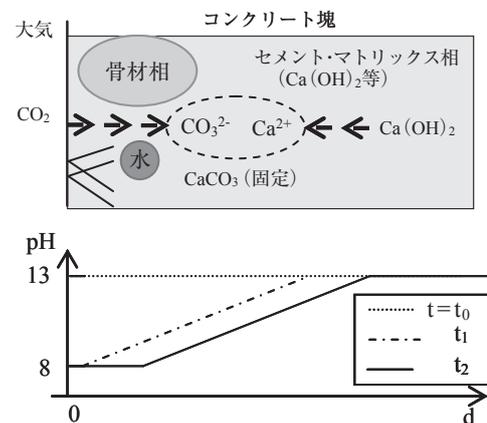


図-1 セメント水和物によるCO₂固定の模式図

動態は、以下の反応式で表せる。

- ・脱炭酸（セメントの製造）：

$$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \quad \text{式 (1)}$$
- ・セメントの水和（コンクリートの練混ぜ）：

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \quad \text{等} \quad \text{式 (2)}$$
- ・炭酸化（コンクリートの供用及び再資源化）：

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \quad \text{等} \quad \text{式 (3)}$$

(2) 炭酸化がコンクリート構造物に及ぼす影響

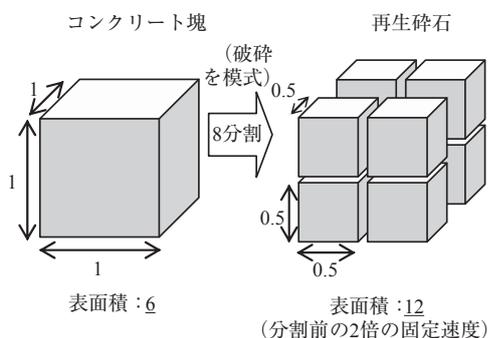
炭酸化は、CO₂によって進行する中性化である。中性化は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性の観点で抑制すべき現象である。その理由は、中性化がコンクリートの表面から徐々に進行し、鉄筋位置のpHがある一定値まで低下すると、鉄筋が腐食・膨張し、ひび割れ等の原因になるためである。

コンクリート塊は、通常、道路の路盤材等に用いる再生砕石として再資源化される。よって、再資源化後には鉄筋と一体の構造物として用いられることはないことから、再資源化時に炭酸化が進行したとしても、耐久性の観点で問題が生じることはない。

(3) 再資源化によるCO₂固定速度の上昇

コンクリートの再資源化においては、再生砕石に望まれる所定の粒度分布を得るため、解体後のコンクリート塊の破碎、粒度調整が行われる。破碎、粒度調整によって、CO₂固定速度は高くなると考えられる。その理由として次の3つが挙げられる。

- ・コンクリートの比表面積の増大（図—2）
- ・炭酸化が進行していない新破断面の出現
- ・比表面積が大きい細粒分へのセメント水和物の偏在



3. 全国調査

(1) 調査方法

(a) 試料採取

調査に供する再生砕石を、45都道府県の46の中間

処理工場において採取し、指定の実験室に収集した。

採取試料の種類は再生クラッシュラン（RC40）を基本とし、採取箇所は各中間処理工場のストックヤードや製造ラインとし、原則、破碎直後に採取した。

採取した試料は、均質さを保ちながら、分析に必要なとなる約30kgに縮分した。縮分した試料は厚手のビニール袋とペール缶で密封し、大気との接触を断った状態で指定の実験室に送付した。これらの手順は、試料採取後の炭酸化の進行を防ぐため、手早く実施した。なお、分析を実施するために一定量以上の細粒分が必要であることから、縮分にあたって細粒分を優先した試料もある。

(b) 試験方法

試験項目及び参照した規格類を表—1に示す。CO₂固定量の算定に用いるCaCO₃含有量のほか、炭酸化の進行状況や各要因の影響を考察するための分析を実施した。各項目の試験方法は次の通りである。

表—1 試験項目及び分析において参照した規格類

分析項目	対象試料	分析手法(規格類)	結果の利用
① 粒度分布	0d	JIS A 1102, 舗装再生便覧	CO ₂ 固定量との関係
② 不溶残分 CaO	0d/2粒群	セメント協会 F-18	セメント量推計, CO ₂ 固定量との関係
			CO ₂ 固定量
③ CaCO ₃ Ca(OH) ₂	0d, 28d/ 2粒群	示差熱重量分析 (TG-DTA)	炭酸化の進行

① 粒度試験

粒度試験は、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に従って実施した。ただし、ふるい目の大きさについては、対象試料である再生砕石の主な用途は道路用の路盤材であるため、舗装再生便覧に従った。

② 骨材及びセメント量試験（配合推定）

配合推定は、対象を粒径20mm未満の試料とし、0～5mmの粒群と5～20mmの粒群に分けて実施した。なお、石灰石骨材が利用されていると考えられた試料については、試験方法の性質によりセメント量を過大に見積もってしまうため、結果の集計では除外した。

試験方法は、セメント協会コンクリート専門委員会 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」に従い、直接には不溶残分量、CaO含有量を求めている。

骨材量、セメント量は、不溶残分量及びCaO含有量の測定結果から、式(4)、(5)によって推計した。

なお、式 (4), (5) で得られる骨材量やセメント量は、乾燥状態 (水は結合水だけ) における配合割合であり、示方配合における材料使用量とは異なる。

$$a = \frac{u_m}{u_a} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

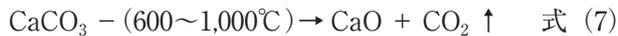
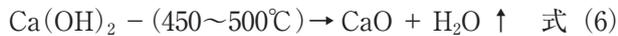
$$c = \frac{CaO_m - a \times CaO_a / 100}{CaO_c} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

ここで、 a : 骨材量, u : 不溶残分量, c : セメント量, CaO : CaO 含有量であり、添え字 a, c, m は、それぞれ、骨材, セメント, コンクリート塊を表す記号である。なお、骨材の不溶残分量 (u_a), CaO 含有量 (CaO_a), 及びセメントの CaO 含有量 (CaO_c) については、参照した規格類に示される全国の平均的な試料の数値により設定した。

③熱分析 (TG-DTA) 試験

CO_2 固定量を直接表す $CaCO_3$ 含有量, 及び $Ca(OH)_2$ 含有量については、熱分析 (TG-DTA) によって測定した。TG-DTA は、試料の温度を徐々に上げ、熱反応による試料の質量変化を記録することで、特定の物質の含有量を推定する方法である。

本調査では、 $450 \sim 500^\circ C$ における質量変化を $Ca(OH)_2$ 中の H_2O の脱水 (式 (6)), $600 \sim 1,000^\circ C$ における質量変化を $CaCO_3$ の脱炭酸 (式 (7)) と見なして、それぞれの結果により $Ca(OH)_2$ 含有量, $CaCO_3$ 含有量を求めた。



再資源化による CO_2 固定量を求めるには、コンクリート塊の破碎後の CO_2 固定量の増加量を知る必要がある。そこで、TG-DTA 用の試料は二つに分割し、一方は試料収集後速やかに分析し、もう一方は試料収集後に 28 日間の大気曝露を実施した上で分析した。両者の差分により、破碎後の CO_2 固定量の増分を求め、再資源化による固定量とした (図-3)。なお、材料試験と同様、TG-DTA も対象を粒径 20 mm 未満の試料とし、0 ~ 5 mm の粒群と 5 ~ 20 mm の粒群に分けて分析した。

大気曝露は、再生砕石工場における屋外での一般的な製品の保管方法を再現した環境で実施した。具体的には、温度約 $20^\circ C$ 、湿度 40 ~ 70% の換気した実験室内において平積みした状態で大気に曝した。28 日間の曝露期間は、破碎後の製品の保管期間に関する再生砕石工場に対するヒアリングの結果を参照して設定したものである。さらに大気曝露期間中は、国内における平均的な降雨頻度である一週間に 2 度の散水を実施し、散水後の含水比を約 15% に調整した。また、大

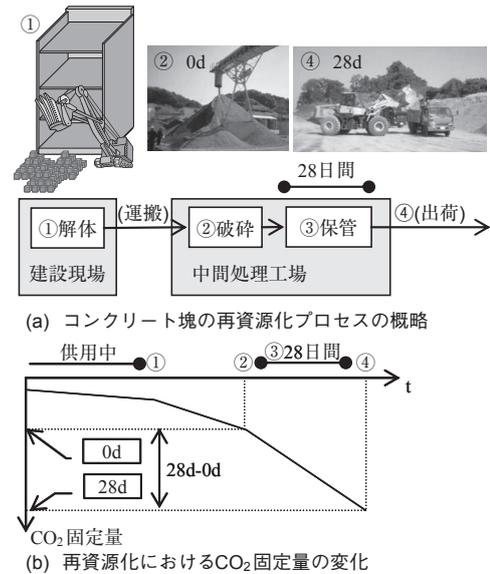


図-3 再資源化による CO_2 固定量の算出方法

気曝露中における室内の CO_2 濃度を連続計測し、一般大気中の CO_2 濃度と同程度の 400 ppm 前後でほぼ安定していることを確認した。

(2) 調査結果

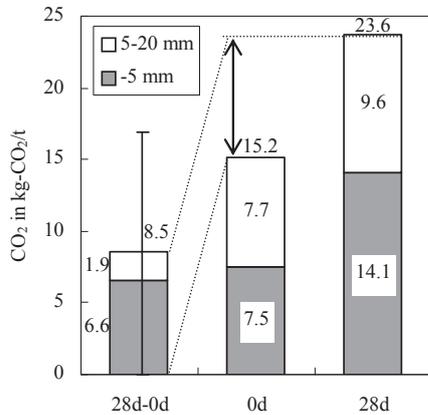
(a) 粒度分布

図-2 に示した通り、 CO_2 固定量は粒度に依存すると思われる。そこで、採取した試料の代表性を粒度の観点で確認するため、粒度試験の結果をコンクリート塊の再資源化用途として最も大きな割合を占める RC40 と比較した。その結果、多くの試料の粒度分布は RC40 の望ましい粒度範囲に分布し、平均もこの範囲に収まった。よって、採取した試料はコンクリート塊の再資源化による CO_2 固定量を把握する上で粒度の観点で適切であると言える。なお、RC40 の望ましい粒度範囲よりも細粒側に分布している試料も散見されたものの、これは主として、分析に必要な量の試料を得るために、あえて細粒分を多めに採取した試料もあったためである。

(b) 配合推定

セメント量は CO_2 固定の母材となるセメント水和物量を規定するため、 CO_2 固定のポテンシャルに強い影響を及ぼすと考えられる。そこで、採取した試料の配合推定の結果を一般的なコンクリートの配合と比較した。採取した試料の骨材量, セメント量は、それぞれ平均で、81%, 14% と推定され、一般的なコンクリートの配合であった。また、試料間の配合の相違も僅かであった。よって、採取した試料はコンクリート塊の再資源化による CO_2 固定量を把握する上で配合の観点で適切であると言える。

(c) コンクリートの再資源化による CO₂ 固定量
TG-DTA の試験結果から求めた CO₂ 固定量を図—4 に示す。CO₂ 固定量は、粒度試験の結果によって 0～5 mm, 5～20 mm の CO₂ 固定量を重み付け、収集した再生砕石 1 t における 0～20 mm の粒群による固定量として示している。



図—4 採取直後、大気暴露後における CO₂ 固定量の変化

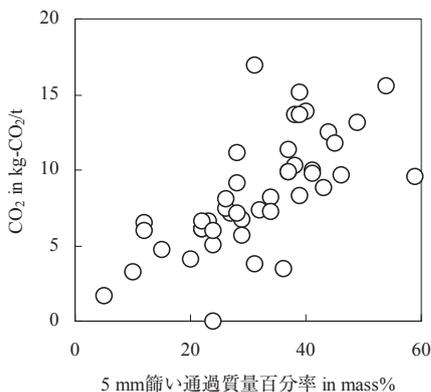
収集直後 (0d), 大気暴露後 (28d) の CO₂ 固定量は、それぞれ平均で、15.2, 23.6 kg-CO₂/t であった。破碎後の CO₂ 固定量の増分 (28d-0d) は、両者の差分として、平均 8.5 kg-CO₂/t であったが、試料によって大きく異なり、全く固定が進まない試料から最大では 17.0 kg-CO₂/t を固定する試料までであった。

0～5 mm と 5～20 mm の粒群別の CO₂ 固定量の増分 (28d-0d) を比較すると、0～5 mm の粒群が全体の 8 割近くを占めていた。

4. 考察

(1) CO₂ 固定の効率に影響を及ぼす要因

破碎後の CO₂ 固定量の増分 (28d-0d) と粒度の関係を図—5 に示す。CO₂ 固定量の増分は、粒度分布 (5 mm 篩い通過質量百分率) と強い正の相関を示し



図—5 再資源化による CO₂ 固定量の増分と粒度の関係

た。なお、セメント量とはわずかな相関しか示さなかった。

セメント水和物による CO₂ 固定のメカニズムによれば、粒度は CO₂ 固定速度に影響し、セメント量は主に CO₂ 固定可能量に影響する因子である。すなわち、炭酸化がセメント水和物の新破断面にとどまり、深さ方向に進行していない状況においては、粒度が CO₂ 固定量に強い影響を及ぼすと考えられ、炭酸化が深さ方向に進行するにつれ、CO₂ 固定量と粒度の関係は薄れ、代わってセメント量の影響が強まると考えられる。セメント量に関しては、値が大きいほど表面付近での CO₂ 固定量は大きい一方、水密性が高まるために深さ方向の炭酸化は抑制されると考えられることから、両者が相殺することで、CO₂ 固定量との相関をほとんど示さないものと推察できる。

従って、コンクリート塊の破碎後 28 日間程度では、炭酸化の進行は表層におけるものが主であり、深さ方向には限られているものと考えられる。CO₂ 固定量が、固定の母材となるセメント水和物に占める割合 (モル比) で定義される「炭酸化度」に関する既存式 (式 (8)) を準用して、CaO, CaCO₃ 含有量から求めた CaO の消費率は、28d の平均として、0～5 mm で 51.4%, 5～20 mm で 36.1% であった。

$$\text{炭酸化度} = \frac{CO_2}{CaO \times M_{CO_2} / M_{CaO}} \times 100(\%) \quad \text{式 (8)}$$

ここで、M: 化学量 (CO₂ = 44, CaO = 56) である。

(2) CO₂ 固定が CO₂ 排出量の評価に及ぼす影響

(a) 建設リサイクルによる一年間の CO₂ 固定量

コンクリート塊の破碎後の CO₂ 固定原単位 (8.5 kg-CO₂/t) を用いて、我が国のコンクリート塊の再資源化による CO₂ 固定量を推計した。結果を表—2 に示す。

CO₂ 固定原単位が一定であれば、CO₂ 固定量はコンクリート塊の再資源化量の経年変化に従って推移する。コンクリート塊の再資源化量は、平成 7 年度以降続く発生量の減少と、再資源化率の上昇傾向の結果として、平成 14 年度にピークを迎え、近年は減少傾向である。

平成 20 年度のコンクリート塊の再資源化量は 3,043 万 t である。これらが 8.5 kg-CO₂/t の CO₂ を固定しているとする、一年間の CO₂ 固定量は約 26 万 t である。

26 万 t は、コンクリート塊と同様に CO₂ を固定する都市緑化による一年間の CO₂ 固定量 (約 70 万 t) の 4 割近くに相当する。さらに、式 (8) によって求

表一2 再資源化によるCO₂の年間固定量及び固定原単位の推移

年度	コンクリート塊の一年間のCO ₂ 固定量		再生砕石のCO ₂ 固定原単位		
	Co塊の再資源化量(1) in 1,000 t	年間のCO ₂ 固定量(2) in 1,000 t/year	As・Co塊の再生砕石 への投入量(3) in 1,000 t	再生砕石への投入量の Co塊割合(4) in mass%	再生砕石のCO ₂ 固定原 単位(5) in kg-CO ₂ /t
H7	23,590	201	21,435	52.4	4.5
H12	33,940	289	16,104	67.8	5.8
H14	34,250	291	14,529	70.2	6.0
H17	31,550	268	10,854	74.4	6.3
H20	30,430	259	4,050	88.3	7.5
根拠	建設副産物実態調査	8.5*(1)	アスファルト合材統計年報	(1)/((1)+(3))*100	8.5*(4)/100

めたCaOの消費率は、工夫次第では、現在の4倍程度のCO₂固定が最大で可能であることを示している。

(b) 再生砕石のCO₂排出原単位

我が国では、再生砕石の原料としてコンクリート塊のほかにアスファルト・コンクリート塊(As・Co塊)が従来利用されている。従って、コンクリート塊とAs・Co塊の再生砕石への投入比率を考慮することで、再生砕石1tあたりのCO₂固定原単位が算出される。近年は、建設廃棄物の用途が、コンクリート塊であれば再生砕石、As・Co塊であれば再生加熱アスファルト混合物と区別されつつあり、再生砕石の原料としてはコンクリート塊の割合が上昇している。その結果、再生砕石のCO₂固定原単位は増大する傾向であり、平成20年度は7.5kg-CO₂/tであった。砕石(新材)、再生砕石のCO₂排出原単位は、熱エネルギー利用などによる排出量を積み上げたのみの場合、同程度であると考えられる。従って、CO₂固定の影響を考慮すれば、再生砕石のCO₂排出原単位は砕石(新材)より小さい。

5. おわりに

本稿では、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量に関する全国調査について紹介し、建設リサイクルがCO₂の吸収作用の保全・強化に果たしている役割について示した。

本調査により、コンクリート塊の再資源化は年間26万tに及ぶCO₂を固定しており、地球温暖化対策として京都議定書目標達成計画にも位置づけられている都市緑化等と比較しても、無視できないCO₂固定効果を発揮していること、再生砕石等の再生材のCO₂排出原単位は、CO₂固定を考慮すると代替品に比べて小さいことが明らかとなった。すなわち、コンクリー

ト塊の再資源化は、循環型社会と低炭素社会の両立に資することが示された。

さらに、再資源化方法の工夫次第では、CO₂固定量を現状の4倍程度まで高めることも可能であることが示唆された。すなわち、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定は、低炭素化への更なる貢献が期待される対策であると言える。

今後は、CO₂固定を促進する再資源化手法について研究を進めるとともに、原位置における簡易なCO₂固定量の判定手法の開発に取り組むこととしている。

謝辞：本稿で紹介した全国調査の実施にあたって、試料収集については、サンプルをご提供頂いた全国の再生砕石工場、その依頼にご協力頂いた公益社団法人全国産業廃棄物連合会及び各都道府県産業廃棄物協会の方々にお世話になった。ここに記して謝意を表す。本調査は、国土交通省国土技術政策総合研究所の総合技術開発プロジェクト「社会資本のライフ・サイクルをととした環境評価技術の開発(プロジェクトリーダー：岸田弘之)」において、建設資材のCO₂排出原単位を作成する一環として実施したものである。

J|C|MA

[筆者紹介]



曾根 真理 (そね しんり)
国土交通省 国土技術政策総合研究所
環境研究部 道路環境研究室
室長



神田 太郎 (かんだ たろう)
国土交通省 国土技術政策総合研究所
環境研究部 道路環境研究室
研究官