

バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの開発 ～コンクリートのカーボンニュートラルの実現に向けて～

清水建設株式会社 土木技術本部 幸田 圭司, 久保 昌史
清水建設株式会社 技術研究所 山本 伸也, 田中 博一

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、建設産業においても他産業と同様にCO₂を主とする温室効果ガスの排出量削減技術が求められている。コンクリートの製造における年間のCO₂総排出量は約2,500万tとされており¹⁾、これは我が国の年間の温室効果ガス排出量の約2%を占めている。そのため、コンクリート製造時のCO₂排出量を削減することができれば、カーボンニュートラルの実現に大きく寄与することになる。

著者らはカーボンニュートラルの実現に向け、普通コンクリートと施工性および品質が同等の汎用的な環境配慮型コンクリートの実現を目的に、バイオ炭を混和することで炭素貯留するコンクリート(バイオ炭コンクリート)の開発を行っている。本稿ではその概要および現場適用事例を紹介する。

2. バイオ炭コンクリートの概要

2.1 技術の概要

(1) 特長

バイオ炭コンクリートはバイオ炭を混和したコンクリートであり、バイオ炭が有する炭素をコンクリート内部に貯留する特長を有する。混和したバイオ炭量から定量的に算出されるCO₂固定量で、セメントなど材料由来のCO₂排出量を相殺することで、コンクリートとしてカーボンニュートラルさらにはカーボンネガティブの達成が可能である。

(2) バイオ炭

バイオ炭は、2019年改良IPCCガイドラインにおいて、「燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義されている²⁾。その特長は、バイオマスを構成していた炭素が炭化されることで変化した、通常自然条件下においては分解しにくい炭素である難分解性炭素を高比率で含有する点である。図1に本開発で使用したバイオ炭の製造工程を示す。製材所で副産物として発生するオガ粉を工場に運搬し、加圧成型してオガライトとした後に炭化することでバイオ炭(オガ炭)を製造する。それを粉碎・分級することで粉状(1mm以下)と粒状(2~5mm)のバイオ炭になる。2種類の粒径を検討したのは、バイオ炭の粒径がコンクリートの性能に与える影響を検討し、用途に応じて適した配合を提示するためである。

(3) 炭素貯留

バイオ炭コンクリートによる炭素貯留の概念図を図2に示す。バイオマスの炭素は、元をたどれば植物が光合成の過程で大気中のCO₂を吸収したものであるが、燃料として利用されたり、自然条件下では



図1 本検討で使用したバイオ炭の製造過程

表 1 バイオ炭コンクリートの配合および CO₂ 排出量の一例

セメント種類	配合略称	粗骨材最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤添加量		CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	
							W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粉)	バイオ炭 (粒)	AE減水剤 (C×wt%)		AE助剤 (A)
BB	BBベース	20	15±2.5	4.5±1.5	55	45.5	169	307	327	490	1008	0	0	1.2	3.5	141
	BB炭粉15					44.7	169	307	318	475	1008	15	0	1.8	15.0	106
BC	BCベース	20	15±2.5	4.5±1.5	50	45.5	169	338	321	481	989	0	0	1.0	3.0	95
	BC炭粉15					44.7	169	338	311	466	989	15	0	1.2	7.0	60
	BC炭粉30					43.9	169	338	301	451	989	30	0	1.4	7.0	26
	BC炭粒30					43.9	169	338	301	451	989	0	30	1.0	5.0	26
	BC炭粒60					42.3	169	338	282	422	989	0	60	1.2	7.0	-43

表 2 使用材料の諸元

使用材料	産地・仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)
水(W)	地下水	0.00025 ⁴⁾
セメント(C)	BB(高炉セメントB種)・・・密度:3.04g/cm ³	0.4396 ⁵⁾
	BC(高炉セメントC種)・・・密度:2.96g/cm ³	0.2645 ⁶⁾
細骨材①(S ₁)	栃木県佐野市産砕砂, 表乾密度:2.66g/cm ³	0.0035 ⁷⁾
細骨材②(S ₂)	千葉県市原市万田野産山砂, 表乾密度:2.60g/cm ³	0.0035 ⁷⁾
粗骨材(G)	栃木県佐野市産砕石, 表乾密度:2.70g/cm ³	0.0028 ⁷⁾
バイオ炭	原料:オガ粉, 密度:1.60g/cm ³ , 炭素含有率:77.6%	-2.299
AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物・ポリカルボン酸系化合物の複合体	—
AE剤	高級脂肪酸・非イオン系界面活性剤(バイオ炭混和配合)	—
	アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤(バイオ炭無混和配合)	—

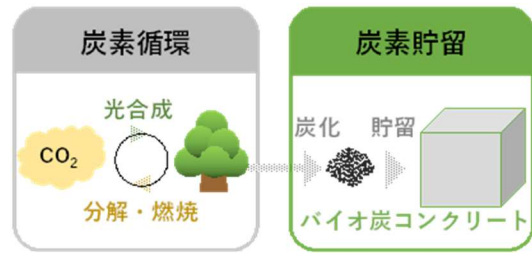


図 2 バイオ炭コンクリートの炭素貯留

微生物に分解されたりして再び大気中の CO₂ に戻ってしまう。一方で、バイオマスが炭化されてバイオ炭になると、燃焼されない限り CO₂ にほとんど変化しなくなる。よって、バイオマスをバイオ炭に転換し貯留すれば、炭素循環の中で温室効果ガスになりうる炭素を減らすことができる。これが炭素貯留の考え方である。

2.2 炭素貯留の定量評価

(1) カーボンクレジット

バイオ炭の炭素貯留の特性を利用し、国内のカーボンクレジット制度である J-クレジット制度では、バイオ炭を農地土壌へ施用することで、土壌への炭素貯留を認める方法論²⁾が 2020 年に策定された。本方法論は 2019 年に IPCC から発行された改訂ガイドラインに準拠しており、その中ではバイオ炭施用による炭素貯留量を kg-CO₂ 単位 (CO₂ 質量) で求める方法が定められている (以下、炭素貯留量を CO₂ 質量で示したものを CO₂ 固定量と呼称する)。バイオ炭コンクリートの CO₂ 固定量計算は本方法論に倣って行っている。なお、バイオ炭混和によるコンクリートへの炭素貯留の方法論は、現時点において IPCC ガイドラインおよび J-クレジット制度で定められていないが、海外の一部のボランタリークレジットではすでにコンクリートへの炭素貯留も認証対象として検討されている³⁾。

(2) バイオ炭の CO₂ 固定量

J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用の方法論²⁾によると、バイオ炭による CO₂ 固定量は、式(1)および式(2)より算出される。

$$ST_{total} = ST_{PJ} - ST_{BL} - EM_{PJ} \quad (1)$$

$$ST_{PJ} = BC_{total} \times F_C \times F_{perm} \times 44/12 \quad (2)$$

ST_{total} : 炭素固定量 (kg-CO₂/kg)

ST_{PJ} : プロジェクト実施後固定量 (kg-CO₂/kg)

ST_{BL} : ベースライン固定量 (= 0 kg-CO₂/kg)

EM_{PJ} : プロジェクト実施後排出量 (kg-CO₂/kg) 製炭メーカー実績より 0.233 kg-CO₂/kg とする。

BC_{total} : 使用するバイオ炭の量 (kg)

F_C : バイオ炭の炭素含有率 (%) 成分分析結果より 77.6% とする。

F_{perm} : バイオ炭の 100 年後の炭素残存率 (%)

J-クレジットの方法論²⁾よりオガ炭の 100 年後の炭素残存率は 89%とされている。

44/12 : 炭素重量を CO₂ 重量に変換する係数

式(1), 式(2)より, 本検討で使用したバイオ炭の CO₂ 固定量は約 2.30 kg-CO₂/kg と算出される。

(3) バイオ炭コンクリートの CO₂ 排出量

バイオ炭コンクリートの CO₂ 排出量(kg-CO₂/m³) は, 構成材料ごとの CO₂ 排出原単位に使用量に乗じたものの和として求め, バイオ炭の CO₂ 固定量は負の CO₂ 排出量として計上した。バイオ炭コンクリートの配合の CO₂ 排出量の一例を表 1 に示す。CO₂ 排出量の計算に使用した各材料の CO₂ 排出原単位⁴⁾⁷⁾を含む材料の諸元を表 2 に示す。バイオ炭の CO₂ 固定量で他材料の CO₂ 排出量をオフセットしてコンクリートとしてカーボンニュートラルを実現できるように, CO₂ 排出原単位の小さい高炉セメントを使用している。表 1 の例では, 高炉セメント C 種を使用して 60kg/m³のバイオ炭を混和することで CO₂ 排出量が0以下, 即ちカーボンネガティブを実現出来ることになる。

2.3 バイオ炭コンクリートの性能

(1) フレッシュ性状

バイオ炭コンクリートのフレッシュ性状は, AE 減水剤や AE 剤といった混和剤の添加量を調整することで所定のスランプ・空気量が得られることを確認している。バイオ炭は多孔質の材料であり, コンクリート中の自由水や混和剤を吸着するため, それを補うように混和剤量を増加させることでフレッシュ性状を担保することになる。表 3 に練上り直後のフレッシュ性状試験結果を, 図 3 および図 4 にスランプの経時変化試験結果を示す。バイオ炭を混和していないベース配合と比較して若干スランプロスが大きい水準もあるが, 大きく逸脱するほどではなかった。また, 写真 1 に示すように水平換算距離 150m 程度の配管を組み, 実際にポンプ圧送を行い, 圧送前後のコンクリートのスランプ・空気量の変化を確認した。結果を表 4 に示すが, すべての配合で圧送後でも大きな性状変化は生じておらず, 問題なく圧送出来ることを確認できている。なお, BC 炭粒 60 の配合では試験の都合上圧送試験は実施していない。

(2) 圧縮強度

図 5 および図 6 にバイオ炭コンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。バイオ炭コンクリートの圧縮強度は一般的なコンクリートと概ね同等であることが確認されている。粒状のバイオ炭を混和した場合は若干圧縮強度がベース配合と比較して小さくなる傾向が認め

表 3 練上り直後のフレッシュ性状試験結果

	BB ベース	BB 炭粉15	BC ベース	BC 炭粉15	BC 炭粉30	BC 炭粒30	BC 炭粒60
スランプ (cm)	15.0	16.5	16.5	17.0	16.0	17.0	15.5
空気量 (%)	5.3	5.6	5.1	5.7	5.1	4.8	4.9
Con温度 (°C)	23	23	22	21	22	24	24

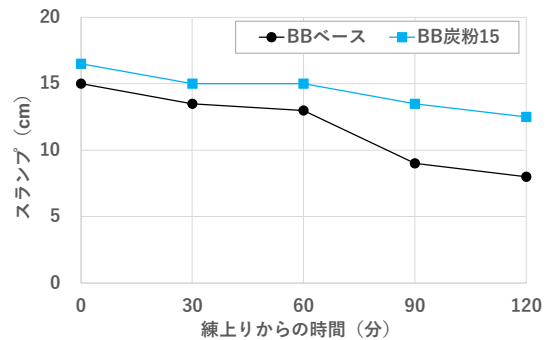


図 3 スランプ経時変化(BB 配合)

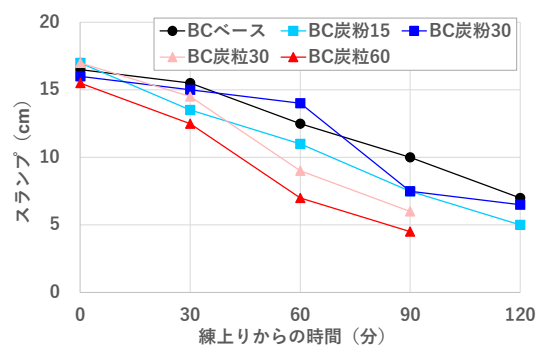


図 4 スランプ経時変化(BC 配合)



写真 1 圧送試験配管組立状況

表 4 圧送前後のフレッシュ性状試験結果

配合	状態	スランプ (cm)	空気量 (%)	Con温度 (°C)
BBベース	圧送前	15.0	5.6	21
	圧送後	13.0	5.5	24
BB炭粉15	圧送前	16.0	5.8	24
	圧送後	15.0	5.8	25
BCベース	圧送前	17.5	4.9	22
	圧送後	15.5	3.7	23
BC炭粉15	圧送前	17.0	5.2	22
	圧送後	16.5	3.6	23
BC炭粉30	圧送前	17.0	4.8	23
	圧送後	16.5	4.2	23
BC炭粒30	圧送前	15.0	5.1	22
	圧送後	13.5	3.7	23

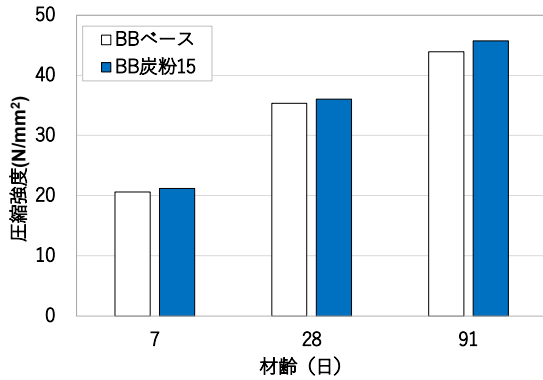


図5 圧縮強度試験結果 (BB 配合)

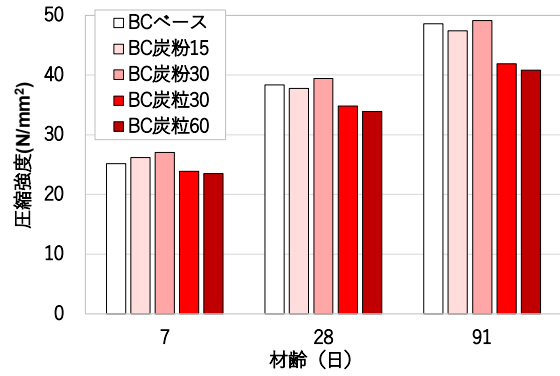


図6 圧縮強度試験結果 (BC 配合)

られるが、バイオ炭自体がコンクリートと比較して強度が低いため、力学的な弱部となった可能性が考えられる。しかしながらその影響は限定的であり、圧縮強度が最も小さかった BC 炭粒 60 でも材齢 28 日で 33.9N/mm² 発現しており、土木工事に用いられる汎用的な強度を満足できることが確認できている。

3. 現場適用

バイオ炭コンクリートを新東名高速道路川西工事(発注者:中日本高速道路株式会社)における場内工事用道路の仮舗装コンクリートに 34.5m³ 適用した。使用した配合および材料の諸元を表 5 および表 6 にそれぞれ示す。なお、バイオ炭の密度および炭素含有率は実際に現場適用時に使用したロットで分析した結果を基にしているため、表 2 の数値とは若干異なっている。図 7 に、本現場の通常舗装コンクリート配合、適用配合のベース配合 (BB ベース)、バイオ炭を混和した適用配合の CO₂ 排出量を示す。適用配合の CO₂ 排出量は 7 kgCO₂/m³ であり、ほぼカーボンニュートラルを達成できていると言える。現場適用したコンクリートの製造における CO₂ 排出量を計算すると、34.5m³ × 0.007t/m³ = 0.23t と算出されるが、これまで適用してきた普通コンクリート配合 (18-8-20N) を同じ数量製造した際の CO₂ 排出量は 6.85t であり、CO₂ 排出量を比較すると、6.62 t の削減となり、CO₂ 排出量を大幅に低減できたと言える。

施工時の状況を写真 2 および写真 3 に示す。打込みはホッパーおよびバケットで行った。コンクリートの施工性や仕上りは良好であった。また、製造時のフレッシュ性状のばらつきを確認するため、アジテータ車 1, 4, 8 台目で練上り直後のフレッシュ性状試験を実施した結果を表 7 に示す。試験値のばらつきは小さく、安定した性状のコンクリートを製造することができていた。

表 5 現場適用配合

セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加量			CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
						W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粒)	AE減水剤 (C × wt%)	AE助剤 (A)	
BB	20	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	55.0	45.5	172	313	593	198	951	60	1.0	2.5	7

表 6 現場適用時の使用材料諸元

使用材料	産地・仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /kg)
水 (W)	地下水	0.00025 ⁴⁾
セメント (C)	BB (高炉セメントB種) … 密度: 3.04g/cm ³	0.4396 ⁵⁾
細骨材① (S ₁)	山梨県南巨摩郡南部町産砕砂, 表乾密度: 2.66g/cm ³	0.0035 ⁷⁾
細骨材② (S ₂)	住友金属鉱山(株) 東予工場産銅スラグ, 表乾密度: 3.50g/cm ³	0.0035 ⁷⁾
粗骨材 (G)	山梨県大月市初狩町産砕石, 表乾密度: 2.62g/cm ³	0.0028 ⁷⁾
バイオ炭	原料: オガ粉, 密度: 1.75g/cm ³ , 炭素含有率: 76.8%	-2.273
AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物・ポリカルボン酸系化合物の複合体	—
AE剤	高級脂肪酸塩・非イオン系界面活性剤	—

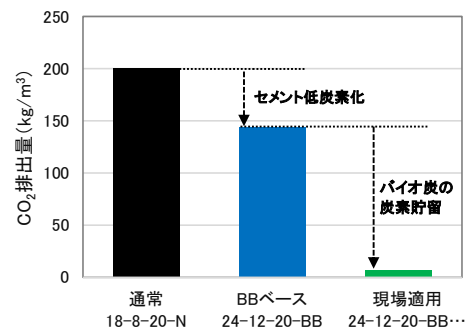


図 7 各配合の CO₂ 排出量



写真2 コンクリート打込み状況



写真3 仕上がり状況

4. おわりに

本稿では、カーボンニュートラルの実現に向けて開発したバイオ炭コンクリートの概要および現場適用事例について紹介した。今後は非構造部材で実績を拡大していくとともに、構造部材への適用も視野に入れ、第三者認証の取得に向けても検討を進める計画である。

表7 アジテータ車毎のフレッシュ性状試験結果

	1台目 練上り直後	1台目 現場試験	4台目 練上り直後	8台目 練上り直後
スランプ (cm)	14.0	10.5	12.0	12.0
空気量 (%)	5.5	4.5	6.0	5.5
Con温度 (°C)	20	20	20	20

【参考文献】

- 1) 一般社団法人 日本建設業連合会 HPより「低炭素型コンクリートの普及促進に向けて」参照：
https://www.nikkenren.com/publication/fl.php?fi=444&f=low-carbon_pamph_A4.pdf (閲覧日:2023年8月25日)
- 2) Jクレジット制度 HPより バイオ炭の農地施用方法論参照：https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004_v1.4.pdf(閲覧日:2023年8月25日)
- 3) Carbonfuture HPより Biochar Concrete Applications by Carbonex 参照：https://verra.org/wp-content/uploads/Biochar_Methodology-Assessment-Report_v1.1_clean.pdf(閲覧日:2023年8月25日)
- 4) 東京都水道局 HPより：<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>(閲覧日:2023年8月25日)
- 5) 一般社団法人 セメント協会:セメントの LCI データの概要, 2022.3
- 6) 辻 大二郎, 小島 正朗, 檀 康弘 :二酸化炭素(CO₂)排出量を6割削減できる高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実工事への適用, 建設機械施工 Vol.69, No.3, pp.9-14, 2017.3
- 7) 河合 研至:コンクリートの環境負荷評価 ②コンクリートに関わる環境負荷評価方法, コンクリート工学 Vol.50, No.7, pp.635-639, 2012.7

【備考】

本稿は、日本コンクリート工学年次論文集 Vol.46 にて発表済みの内容を含んでいる。