

バイオ炭を活用した環境配慮型コンクリートの開発 ～SUSMICS-C【Sustainable + SMI(炭) + Carbon Storage + Concrete】の開発～

清水建設(株) 正会員 ○幸田 圭司
正会員 山本 伸也
正会員 久保 昌史
正会員 田中 博一

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、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が喫緊の課題となっている。建築物に関しては、運用時のCO₂排出量（オペレーショナルカーボン）削減だけでなく、資材調達から解体・廃棄までのCO₂排出量（エンボディドカーボン）削減が求められている。特に、エンボディドカーボンの中でも、資材調達と施工段階のCO₂排出量をアップフロントカーボンといい、コンクリートの影響が大きいことが指摘されている¹⁾。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社会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社会の実現に向け、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（以下、バイオ炭コンクリート）の開発を行っている²⁻⁴⁾。本稿では、バイオ炭による炭素貯留の考え方、バイオ炭コンクリートの基本性能（フレッシュ性状および硬化後の各種物性）、実際の工事に適用した事例について紹介する。

2. バイオ炭による炭素貯留

(1) バイオ炭とは

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°C超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義されており⁵⁾、バイオマスを熱分解またはガス化することによって得られる炭化物の総称である。バイオ炭の原料となるバイオマスには、木質バイオマスの他に、家畜糞尿、草本、もみ殻・稲わら、木の実（コーヒー滓を含む）、製紙汚泥・下水汚泥などが使用されている⁶⁾。本開発で使用したバイオ炭の原料はオガ粉であり、図-1に本開発で使用したバイオ炭の製造工程の概要を示す。詳細な製造方法は下記の通りである。

- ① オガ粉を180~200°Cの温度下で加圧成型してオガライトを製造する。
- ② ①を炭化窯に投入し、100°C程度から自らの熱で徐々に温度上昇し、2~3日少しずつ酸素を供給する。
- ③ 3~4日目に酸素の供給量を増やして窯内の温度を800~1000°C超にし（精錬）、オガ炭を製造する。
- ④ オガ炭を粉砕して粉状（粒径2mm程度以下）、粒状（粒径2~5mm程度）に分級する。

なお、①の工程で一度成型する理由は炭を硬質にするためであり、硬質にすることで、高温で精錬することができ、固定炭素の割合を高くすることもできるためである。本開発では要求性能に応じて粉状・粒状を使い分けてコンクリートに混和して使用している。



図-1 本開発で使用したバイオ炭の製造工程

キーワード カーボンニュートラル、バイオ炭、環境配慮型コンクリート、現場適用

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1 清水建設(株)土木技術本部基盤技術部 TEL 03-3561-3915

(2) バイオ炭による炭素貯留の概念

バイオ炭による炭素貯留の概念を図-2に示す。バイオマス中の炭素は、植物が成長の過程で光合成によって大気中のCO₂を吸収したものであるが、最終的に燃料として利用されたり、微生物に分解されたりして再び大気中にCO₂が放出される。ここで、

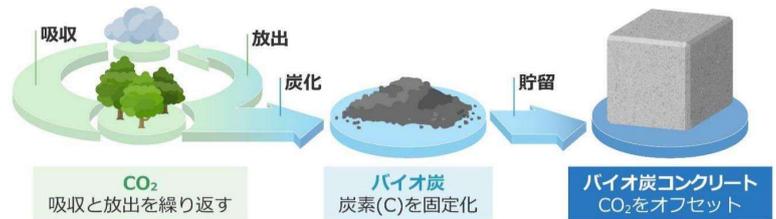


図-2 バイオ炭による炭素貯留の概念図

バイオマスが炭化されてバイオ炭になると、バイオマス中の炭素の一部が難分解性の炭素となり、長期にわたりCO₂となって再び大気中に放出されにくくなる。よって、バイオマスをバイオ炭に転換し貯留すれば、炭素循環の中で大気中に放出されるCO₂を減らすことができる。これがバイオ炭による炭素貯留の考え方である。

(3) バイオ炭によるCO₂固定量

バイオ炭の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。一方、日本国内のカーボンクレジット制度であるJ-クレジット制度において、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⁵⁾が2020年に策定されている。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CO₂単位(CO₂質量)で求める方法が定められている(以降、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)。そこで本開発では、上記のJ-クレジット制度を参照してバイオ炭コンクリートのCO₂固定量を計算している。なお、海外の一部のボランタリークレジットではすでにバイオ炭をコンクリートに混和することによる炭素貯留も認証対象として扱われている事例がある⁶⁾。

また、バイオ炭の混和によるコンクリートへのCO₂固定量を評価するためには、オガ粉の輸送やバイオ炭製造時に使用する電力や燃料といったバイオ炭の製造に関わるCO₂排出量を考慮したバイオ炭の実質的なCO₂固定量を評価する必要がある。本開発でバイオ炭の実質的なCO₂固定量は式(1)及び式(2)より算出した。

$$CF_{total} = CF_{BC} - CE_{BC} \quad (1)$$

$$CF_{BC} = F_C \times F_{perm} \times 44/12 \quad (2)$$

CF_{total} : バイオ炭の実質的なCO₂固定量 (kg-CO₂/kg)

CF_{BC} : バイオ炭によるCO₂固定量 (kg-CO₂/kg)

CE_{BC} : バイオ炭製造に関わるCO₂排出量 (kg-CO₂/kg)

F_C : バイオ炭の炭素含有率 (%)

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⁵⁾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(2)のバイオ炭製造に関わるCO₂排出量は製造メーカーの実績を基にしており、バイオ炭の炭素含有率は複数回の成分分析結果(77.6%)を適用している。以上より、本検討で使用するバイオ炭の実質的なCO₂固定量は約2.3kg-CO₂/kgと算出される。

3. バイオ炭コンクリートの性能

バイオ炭コンクリートの基本的な性能を確認するため、種々の検討配合で各種試験を実施した。

(1) 検討配合

使用材料の諸元を表-1に、検討配合を表-2に示す。セメントは、製造時のCO₂排出量の少ない高炉セメントB種(以下、BB)および高炉セメントC種(以下、BC)を用いた。なお、BB配合とBC配合で強度レベルを同等とするため、BC配合のW/CはBB配合に対して5%小さくした¹²⁾。バイオ炭の混和量は15kg/m³、30kg/m³、60kg/m³の3水準を設け、細骨材容積に置換して使用した。使用したバイオ炭は粉状と粒状の2種類とし、粉状は混和量15kg/m³、30kg/m³、粒状は混和量30kg/m³、60kg/m³で使用した。この理由は、粉状の場

表-1 検討配合の使用材料諸元

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 ⁷⁾
セメント (C)	BB (高炉セメントB種)・・・密度:3.04g/cm ³	0.44 ⁸⁾
	BC (高炉セメントC種)・・・密度:2.96g/cm ³	0.26 ⁹⁾
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 ¹⁰⁾
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 ¹⁰⁾
粗骨材 (G)	栃木県佐野市産砕石, 表乾密度:2.70g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
バイオ炭	原料:オガ粉, 密度:1.60g/cm ³ , 炭素含有率:77.6%	-2.3
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	0.15 ¹¹⁾

表-2 検討配合

セメント 種類	配合略称	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	
							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	
	BB炭粉15						44.7	169	307	318	475	1008	15	0	1.8	15.0
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	
	BC炭粉15						44.7	169	338	311	466	989	15	0	1.2	7.0
	BC炭粉30						43.9	169	338	301	451	989	30	0	1.4	7.0
	BC炭粒30						43.9	169	338	301	451	989	0	30	1.0	5.0
	BC炭粒60						42.3	169	338	282	422	989	0	60	1.2	7.0

合、混和量が多くなると所要のスランプ・空気量を確保することが困難となるためである。また、粉状は粒状よりも製造コストが低いので、粉状が使用できる範囲では粉状のバイオ炭を用いる計画とした。バイオ炭は微細な孔を多数有する材料であり、水や混和剤を吸着するため、無混和のものと比較してスランプや空気量が低下する。そのため、練上り時に所定のフレッシュ性状を確保できるよう、混和剤の添加量を増加させることで調整した。なお、バイオ炭は気乾状態でミキサに投入して練混ぜを行った。

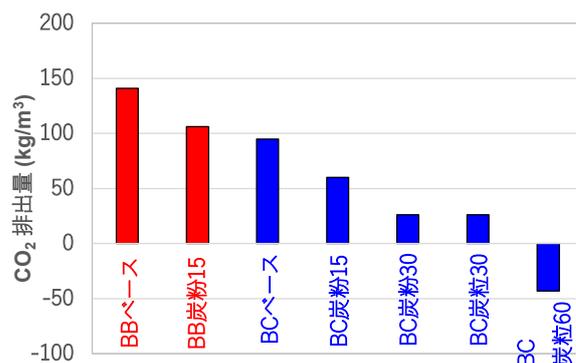


図-3 各配合のCO₂排出量

表-3 練上り直後のスランプ・空気量

	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

(2) CO₂ 排出量

各材料の単位量に表-1に示すCO₂排出原単位を乗じたものの総和として、各配合のCO₂排出量を算出した結果を図-3に示す。検討配合においては、BC配合にバイオ炭を60kg/m³混和するとCO₂排出量は-43kg/m³、即ちカーボンネガティブを達成することができる。

(3) フレッシュ性状

(a) スランプ, 空気量

JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠して練上り直後のスランプ, 空気量を測定し、練上りから30分おきに、スランプが6cm以下もしくは練上りから120分になるまでスランプを測定した。表-3に練上り直後のスランプ, 空気量の試験結果を示す。BB配合, BC配合ともにAE減水剤, AE剤の添加量を調整することで所定のスランプ, 空気量を確保できた。また、図-4にスランプの経

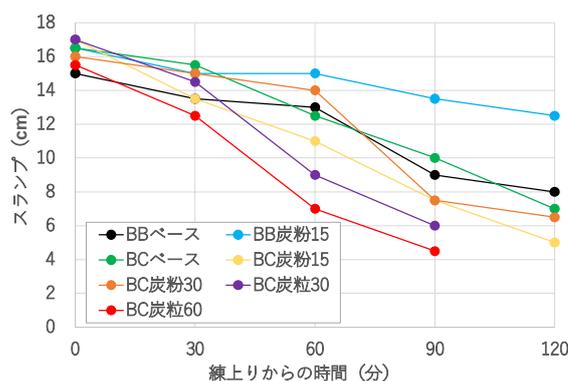


図-4 スランプの経時変化

時変化を示すが、バイオ炭を混和すると、バイオ炭を混和していないベース配合と比較して経時的なスランプ低下量が大きい水準もあるが、大きく逸脱するほどではなく、実施工においても使用できる範疇であると判断した。

(b) ブリーディング

JISA 1123 に準拠して実施したブリーディング試験結果を図-5 に示す。BB 配合と比較して BC 配合の方が総じてブリーディング量が少なかった。理由としては、BC 配合は BB 配合と比較して水セメント比が低いことが一つとして考えられる。また、BB 配合、BC 配合のいずれにおいても、バイオ炭の混和量に関わらず、最終的なブリーディング量はベース配合と同等であったため、バイオ炭の混和がブリーディング量に及ぼす影響は小さいと言える。

(c) 加圧ブリーディング

JSCF-F502 に準拠して実施した加圧ブリーディング試験結果を図-6 に示す。BB 配合、BC 配合のいずれにおいても、バイオ炭を混和することによって脱水量が少なくなった。BC 炭粉 30 と BC 炭粒 30 で比較すると、BC 炭粉 30 の方が脱水量は少なかった。この要因は、圧送圧がかかることにより、多孔質なバイオ炭がコンクリート中の自由水を吸水するためであると考えられ、特に粉状のバイオ炭の場合は表面積が大きいので、その影響が大きいと推察される。

(d) 圧送性

ポンプ圧送によるコンクリートのフレッシュ性状変化を確認するため、写真-1 に示すように水平換算距離が約 150m の配管 (5B) を組み、圧送前後のスランプおよび空気量を測定した。また、配管に圧力計を設置し、配合ごとの管内圧力損失も測定した。表-4 に各配合の圧送前後のスランプ、空気量試験結果を示す。バイオ炭混和の有無によらず、圧送前後で大きな性状変化はなく、圧送によるスランプロスが 0.5~2.0cm 程度であった。図-7 に吐出量と管内圧力損失の関係を示す。参考までに、コンクリートのポンプ施工指針¹³⁾ に示される 5B 管を用いた場合のスランプ 8cm および 12cm の標準的な配合の理論吐出量と圧力損失の関係も合わせて示しているが、BB ベース、BB 炭粉 15、BC ベースについてはスランプ 12cm の標準的な配合よりも圧力損失が小さかった。一方で、バイオ炭を混和した BC 配合では理論吐出量 30m³/h を超えると、スランプ 12cm の標準的な配合と比較して圧力損失は大きくなるが、スランプ 8cm の標準的な配合よりは小さい結果であった。この結果から、配合によってはバイオ炭の混和量によっては圧送時の管内圧力損失が若干増加するが、普通コンクリートの標準的な範囲か

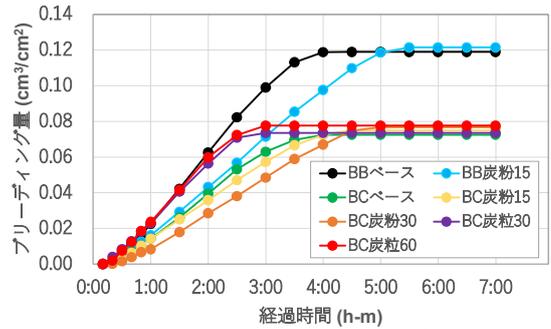


図-5 ブリーディング試験結果

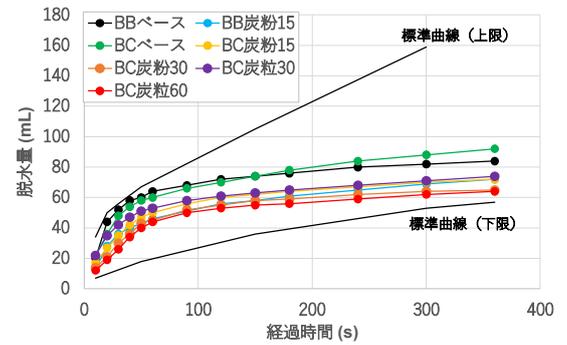


図-6 加圧ブリーディング試験結果



写真-1 圧送試験配管設置状況

表-4 圧送前後のスランプ・空気量

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

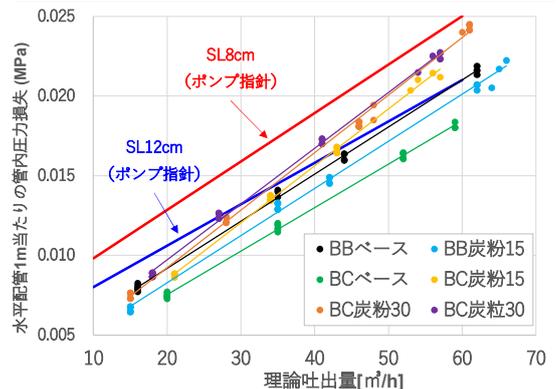


図-7 各配合の管内圧力損失

ら大きく外れるほどの差はなく、概ね同等であると言える。

(4) 硬化後のコンクリート物性

(a) 圧縮強度

バイオ炭の混和が圧縮強度に及ぼす影響として、バイオ炭の吸水によってセメント硬化体の実質的な水セメント比が低減することで強度が増進することが考えられる。これは粒径が小さく表面積の大きい粉状のバイオ炭の場合に顕著であると考えられる。一方で、粒状のバイオ炭の場合、それ自体が他の材料と比較して脆い材料であるため、バイオ炭自体が弱部となり、圧縮強度が低下する可能性も考えられる。

図-8 および図-9 に BB 配合および BC 配合の圧縮強度試験結果を示す。BB 配合, BC 配合いずれにおいても、粉状のバイオ炭を混和した場合の圧縮強度はベース配合と同等もしくは若干高い結果であったが、これは前述したバイオ炭の吸水による圧縮強度の増進の影響が大きかったためであると考えられる。一方で、BC 配合に粒状のバイオ炭を混和した場合、ベース配合と比較して強度が低い結果であった。これは粒径の大きいバイオ炭自体が弱部となった影響が大きかったためであると考えられる。ただし、既報³⁾では BB 配合に粒状のバイオ炭を 30kg/m³, 60kg/m³ 混和した場合はベース配合と同等以上の強度であった。そのため、バイオ炭の混和が圧縮強度に及ぼす影響については今後さらに検討する必要がある。なお、最も強度の低かった BC 炭粒 60 でも材齢 28 日で 33.9N/mm², 91 日で 40.8N/mm²であったことから、一般的な土木構造物に適用される強度は満足できるものと考えられる。

(b) 中性化抵抗性

JIS A 1153 に準拠して実施した促進中性化試験によって測定した各配合の中性化速度係数を図-10 に示す。BC 配合ではバイオ炭の混和量の増加に伴い、若干高くなる傾向が確認されたが、概ね同等の結果であると言える。

(c) 塩分浸透抵抗性

JSCE-G572-2018 に準拠して前処理した供試体を材齢 28 日から濃度 10%の NaCl 水溶液に 91 日間浸せきした後に供試体を切断処理し、JSCE-G574-2013 に準拠して

EPMA によって深さ方向の塩化物イオンを測定し、見掛けの拡散係数を算出した。なお、本試験は BC ベース, BC 炭粉 30, BC 炭粒 30, BC 炭粒 60 で実施した。図-11 に各配合の深さごとの塩化物イオン濃度分布および見掛けの拡散係数の算出結果を示す。バイオ炭混和量によらず、塩分浸透深さは同等であった。また、見掛け

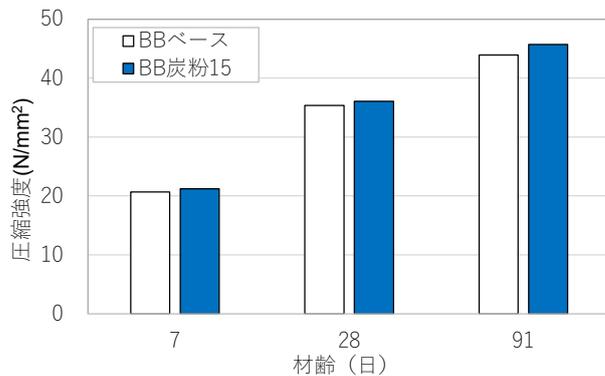


図-8 BB 配合の圧縮強度

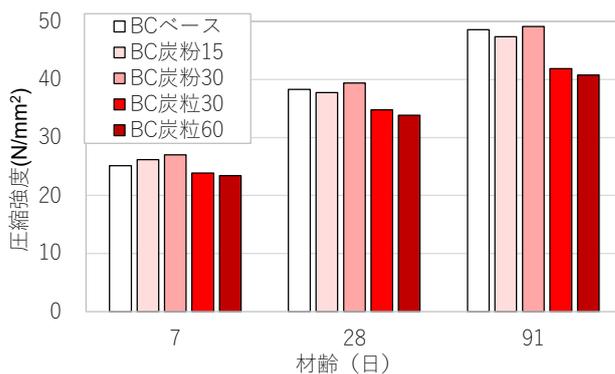


図-9 BC 配合の圧縮強度

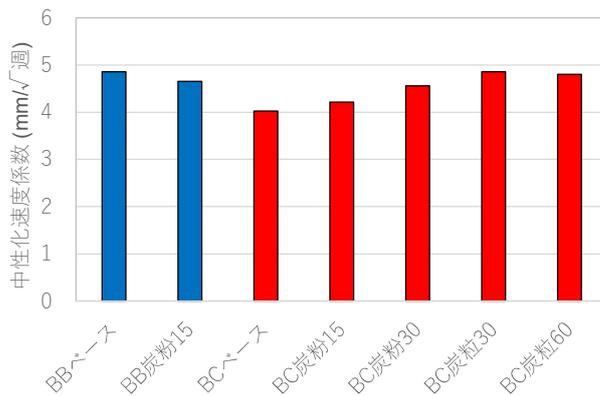


図-10 中性化速度係数

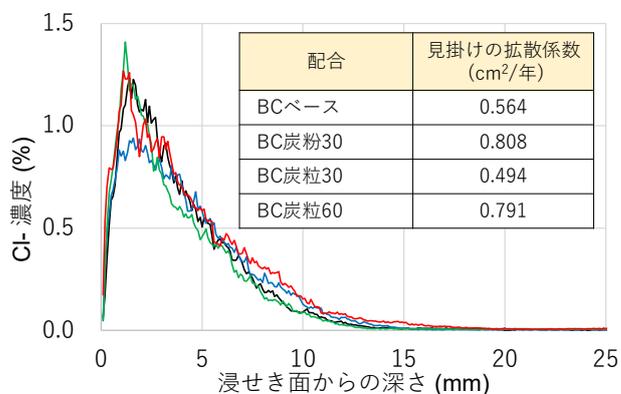


図-11 塩化物イオン濃度分布

表-5 現場適用配合の材料諸元

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 ⁷⁾	
セメント (C)	高炉セメントB種 (BB)・・・密度: 3.04g/cm ³	0.44 ⁸⁾	
工場A	細骨材 1 (S ₁)	茨城県潮来市産砂, 表乾密度: 2.60g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
	細骨材 2 (S ₂)	栃木県栃木市産砕砂, 表乾密度: 2.67g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
	粗骨材 (G)	栃木県栃木市産碎石, 表乾密度: 2.67g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
工場B	細骨材 (S ₁)	茨城県神栖市産砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³	0.0035 ¹⁰⁾
	粗骨材 (G)	栃木県佐野市産碎石, 表乾密度: 2.70g/cm ³	0.0028 ¹⁰⁾
バイオ炭	原料: オガ粉, 密度: 1.60g/cm ³ , 炭素含有率: 78.1%	-2.3	
AE減水剤	リグニンスルホン酸塩・オキシカルボン酸塩	0.15 ¹¹⁾	

表-6 現場適用配合

工場	セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
							W	C	S ₁	S ₂	G	バイオ炭 (粉)	バイオ炭 (粒)	AE減水剤
A	BB	20	15±2.5	3.0±1.5	64.9	47.5	174	268	543	240	993	20	40	4.56
B					63.3	48.9	173	273	800	0	975	20	40	4.10

の拡散係数は配合ごとで差が生じていたが一意的な傾向は確認できなかった。

4. 現場適用事例

(1) 適用概要および施工状況

バイオ炭コンクリートを建築工事におけるレベルコンクリート（非構造部材）に適用した。適用数量は 510m³ であり、打込みは計 13 回に分けて行った。コンクリートの材料の諸元を表-5 に、適用配合を表-6 に示す。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成分分析した結果を基にしている。また、コンクリートの供給は 2 工場からとし、表-5 および表-6 ではそれぞれを工場 A、工場 B と表記している。バイオ炭は粉状を 20kg/m³、粒状を 40kg/m³、合計 60kg/m³ 混和した。写真-2 および写真-3 に示すように、本施工はポンプ車ブームに先端ホースを接続して打込みを行ったが、閉塞等のトラブルを生じることなく通常通りの施工が可能であり、仕上りも良好であった。



写真-2 施工状況



写真-3 仕上り状況

(2) CO₂削減量の定量評価（第三者機関における審査）

本事例においては、バイオ炭コンクリートの材料としての評価だけでなく、バイオ炭コンクリートの現場適用による CO₂ 削減量の妥当性について、第三者である審査機関の審査を受けた。審査では、下記①～③の CO₂ 排出量、固定量の収支で CO₂ 排出量が評価された。

① 設計配合（バイオ炭なし）の材料由来の CO₂ 排出量

② バイオ炭を混和するために追加で発生した CO₂ 排出量

（バイオ炭の製造過程で発生する CO₂ 排出量、バイオ炭の運搬に由来する CO₂ 排出量等）

③ 本適用において使用したバイオ炭中の CO₂ 固定量

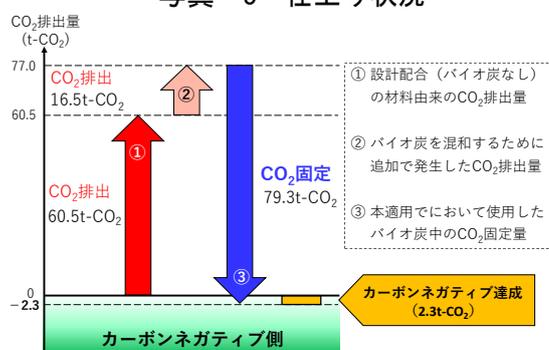


図-12 適用現場での CO₂ 排出量収支の模式図

審査の結果、図-12に示すように、①60.5t-CO₂、②16.5t-CO₂、③79.3t-CO₂となり、収支としては-2.3t-CO₂となり、バイオ炭コンクリートを適用することでカーボンネガティブを実現できていることが証明された。

5. おわりに

本稿では、バイオ炭による炭素貯留の考え方、バイオ炭コンクリートの施工性に関わるフレッシュ性状試験および硬化後の各種物性試験の結果、実際の工事に適用した事例についてまとめた。今後は非構造部材で適用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、バイオ炭コンクリートの性能評価についても第三者認証の取得に向けて検討を進める。

参考文献

- 1) 早川 梨穂, 大江 秀明:建築物分野におけるエネルギー評価の転換 ～“Operational Carbon”から“Embodied Carbon”へ～, NRI パブリックマネジメントレビュー, 2023.10
- 2) 幸田 圭司, 木原 亮太, 山本 伸也, 清水 和昭, 田中 博一, 久保 昌史:バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートのフレッシュ性状, 土木学会第 77 回年次学術講演会, V-244, 2022
- 3) 木原 亮太, 幸田 圭司, 山本 伸也, 清水 和昭, 田中 博一, 久保 昌史:バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの硬化性状, 土木学会第 77 回年次学術講演会, V-245, 2022
- 4) 幸田 圭司, 久保 昌史, 山本 伸也, 田中 博一:バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1222-1227, 2023
- 5) 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:2024年7月8日)
- 6) 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:2024年7月8日)
- 7) 東京都水道局 HP より : <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html> (閲覧日:2024年7月8日)
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 日本コンクリート工学協会:コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する検討委員会報告書, 2010.7
- 12) 室野井 敏之, 坂井 吾郎, 井上 和政, 齋藤 秀:高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの基礎物性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 13) 土木学会:コンクリートライブラリー135, コンクリートポンプの施工指針 [2012年版], p17, 2012