

論文 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

幸田 圭司*1・久保 昌史*1・山本 伸也*2・田中 博一*2

要旨: 2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、CO₂排出量の少ないセメントの使用に加え、CO₂固定材としてバイオ炭をコンクリートに混和した環境配慮型コンクリートの開発を行っている。本稿では、バイオ炭を混和した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を実施した結果をまとめた。結果として、バイオ炭を混和したコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度や中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数は、バイオ炭無混和のものと概ね同等であった。また、バイオ炭を混和したコンクリートを現場適用し、普通コンクリートと同様に施工可能であることを確認した。

キーワード: 低炭素, バイオ炭, フレッシュ性状, 圧縮強度, 促進中性化, 塩化物イオン拡散係数

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、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。

筆者らは製造時のCO₂排出量が少ないセメントの使用に加え、CO₂固定材としてバイオ炭を併用することで、製造時のCO₂の排出量を実質的に低減可能な環境配慮型コンクリートを検討している^{2) 3)}。2020年にバイオ炭を農地に施用することで難分解性の炭素を土壌に貯留する活動がJ-クレジット制度に認定されたこともあり、CO₂固定材としてのバイオ炭の有効活用が注目されている。

本稿では、バイオ炭をコンクリートに混和することによるCO₂貯留の考え方、バイオ炭を混和した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をまとめるとともに、実際の土木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CO₂固定の考え方について

本検討で対象とするバイオ炭は、図-1に示す通り、針葉樹や広葉樹を製材する際に発生するオガ粉を使用している。製造方法は下記に示す通りである。

- ① オガ粉を180~200℃の温度下で加圧成型する。
- ② ①を炭化窯に投入し、100℃程度から自らの熱で徐々に温度上昇し、2~3日かけて少しずつ酸素を供給する。
- ③ 3日目から4日目に酸素の供給量を増やして窯内の温度を800~1000℃超にして最終炭化する。

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。原料である針葉樹や広葉樹は、光合成によって大気中からCO₂を吸収するが、燃焼・枯死することで吸収されたCO₂は大気中に排出される。そのため、バイオマスによるCO₂の吸収・排出の収支は0、即ちバイオマス自体はカーボンニュートラルな資源とされている。ただし、炭化することで、吸収したCO₂を難分解性の炭素とすることができ、これを燃料以外の用途（例えば農地施用やコンクリート材料等）で活用することで、大気中のCO₂低減に寄与することになる。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⁴⁾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。

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

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

ST_{total} : 炭素固定量 (kgCO₂)

ST_{PJ} : プロジェクト実施後固定量 (kgCO₂)

ST_{BL} : ベースライン固定量 (= 0 kgCO₂)

EM_{PJ} : プロジェクト実施後排出量 (kgCO₂)

炭メーカー実績より0.233 kgCO₂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⁴⁾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 kgCO₂/kgと算出される。

3. 検討配合および各種試験方法

3.1 検討配合

*1 清水建設(株) 土木技術本部 基盤技術部 コンクリートグループ (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター (正会員)



図-1 本検討で用いたバイオ炭の製造フロー

表-1 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 使用した材料の諸元

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 ⁵⁾
セメント(C)	BB(高炉セメントB種)・・・密度:3.04g/cm ³	0.4396 ⁶⁾
	BC(高炉セメントC種)・・・密度:2.96g/cm ³	0.2645 ⁷⁾
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 ⁸⁾
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 ⁸⁾
粗骨材(G)	栃木県佐野市産砕石, 表乾密度:2.70g/cm ³	0.0028 ⁸⁾
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)	—

表-3 バイオ炭の成分分析結果

項目	平均値	標準偏差
	固有水分	2.6 %
灰分	1.6 %	0.2 %
	揮発分	5.4 %
固定炭素分	90.4 %	0.7 %

本検討で使用した配合を表-1に、使用材料の諸元およびバイオ炭の成分分析結果(7ロット分)を表-2および表-3に示す。セメント種類としては、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⁹⁾。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(粒径:1mm以下)と粒状(粒径:2~5mm)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、粉状の場合、混和量が多くなると所要のスランブ・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いため、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。バイオ炭は写真-1に示すように、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ブ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、今回使用したバイオ炭の吸

水率は35%程度、含水率は13~18%程度であるが、これを気乾状態でミキサに投入して練混ぜを行った。各配合のCO₂排出量を表-1に示すが、これらは各材料の単位量にCO₂排出原単位を乗じたものの総和として算出している。本検討においては、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。

3.2 フレッシュコンクリートの施工性確認試験

(1) フレッシュ性状試験

JIS A 1101, JIS A 1128 に準拠し、スランブおよび空気量試験を実施した。練混ぜはプラントの実機ミキサを用いて行った。スランブの測定は練上り直後に加え、アジテータ車内で30分、60分、90分、120分攪拌後でそれぞれ実施したが、スランブが6cm以下となった時点で試験を終了することとした。

(2) ブリーディング試験

JIS A 1123 に準拠して試験を実施した。

(3) 加圧ブリーディング試験

JSCE-F502 に準拠して試験を実施した。

(4) 圧送試験

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-2 に示すように水平換算距離が約 150m の配管 (5B) を組み、圧送前後のスランブ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。

3.3 硬化後のコンクリートの物性試験

(1) 圧縮強度試験

所定材齢まで水中養生を施した供試体に対し、JIS A 1108 に準拠し、圧縮強度試験を実施した。試験材齢は 7 日、28 日、91 日の 3 材齢とした。

(2) 促進中性化試験

JISA 1153 に準拠し、促進中性化試験を実施した。試験材齢は 7、28、56、91 日の 4 材齢とした。

(3) 塩化物イオン拡散係数試験

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 日間浸せし、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。塩化物イオン量は JSCE-G574-2013 に準拠して EPMA によって測定した。なお、試験配合は BC ベース、BC 炭粉 30、BC 炭粒 30、BC 炭粒 60 の 4 配合とした。

4. 試験結果

4.1 フレッシュコンクリートの施工性確認試験結果

(1) フレッシュ性状試験結果

表-4 に練上り直後のフレッシュ性状試験結果を、図-2 にスランブの経時変化をそれぞれ示す。バイオ炭混和によるスランブの経時変化特性への影響としては、主にバイオ炭の吸水によるスランブロスと AE 減水剤の添加量増加による経時保持性向上の 2 つが考えられる。バイオ炭の混和量が多いほど吸水量は多くなるが、AE 減水剤の添加量も増加するため、相反する効果が同時に生じることになる。バイオ炭の粒径に着目すると、粉状のバイオ炭は表面積が大きいので、粒状より練混ぜ時の吸水量が多く、AE 減水剤の添加量は多くなる。また、粒状のバイオ炭は粒径が大きいので、注水後の吸水量の経時的な増加量が粉状よりも多いと考えられる。BB 配合ではベース配合よりも炭粉 15 の方がスランブ保持性は高かったが、バイオ炭の吸水によるスランブロスよりも AE 減水剤の添加量が増加したことによる経時保持効果が高かったためと推察される。一方で BC 配合ではベース配合と比較してバイオ炭混和配合のスランブロスが大きかったが、これはバイオ炭の吸水によるスランブロスの方が大きかったためと考えられる。また、粉状よりも粒状の方がスランブロスは大きかったが、AE 減水剤の添加量が粉状と比較して少ないこと、練混ぜ直後からの経時的なバイオ炭の吸水量が多いことが要因と考えられる。なお、BB 配合と比較して BC 配合の AE 減水剤の添加量は少なかったが、BC 配合に使用した AE 減水剤は高炉スラグ微粉末高含有セメント用に開発されたものであり、

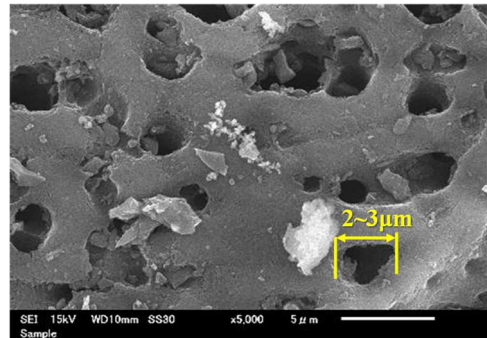


写真-1 電子顕微鏡で観察したバイオ炭 (×5000)



写真-2 配管組立状況 (圧送試験)

表-4 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
スランブ (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
C _{on} 温度 (°C)	23	23	22	21	22	24	24

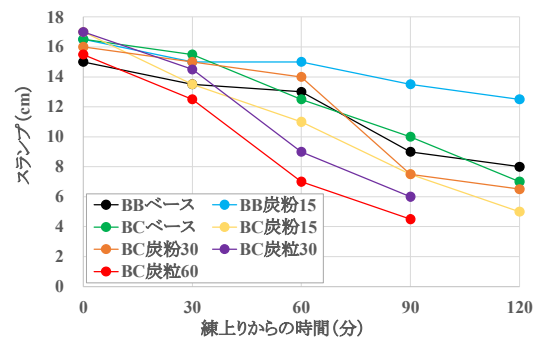


図-2 スランブの経時変化

BB 配合で使用したものとは異なるためと考えられる。

以上より、配合によってはバイオ炭混和量の増加に伴い、経時的なスランブロスが大きくなることも確認されたが、ベース配合と比較して大きく逸脱するほどではないため、実施工においては上記に注意すれば問題なく使用できるものと考えられる。

(2) ブリーディング試験結果

図-3 にブリーディング試験の結果を示す。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。この要因としては、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。

(3) 加圧ブリーディング試験結果

図-4 に各配合の加圧ブリーディング試験結果を示す。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、脱水量が少なくなることが確認された。BC 炭粉 30 と BC 炭粒 30 で比較すると、BC 炭粉 30の方が脱水量が少なかった。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ため、その影響が大きいと推察される。

(4) 圧送試験結果

表-5 に各配合の圧送前後のフレッシュ性状試験結果を示す。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は0.5~2.0cm程度であった。図-5 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¹⁰⁾に示される5B管を用いた場合のスランプ8cmおよび12cm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、ポンプ指針に示されるスランプ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。

4.2 硬化後のコンクリートの物性試験結果

(1) 圧縮強度試験結果

図-6 および図-7 に BB 配合および BC 配合の圧縮強度試験結果を示す。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。これは特に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、特に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ことも考えられる。

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

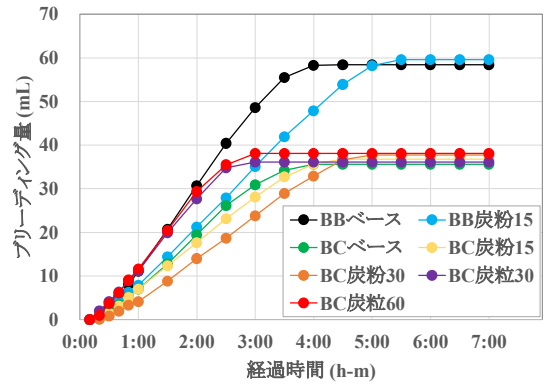


図-3 ブリーディング試験結果

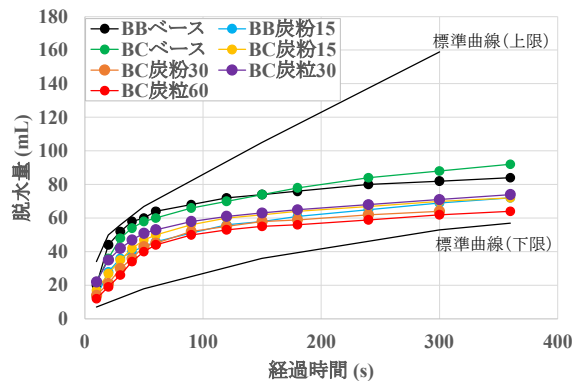


図-4 加圧ブリーディング試験結果

表-5 圧送前後のフレッシュ性状

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

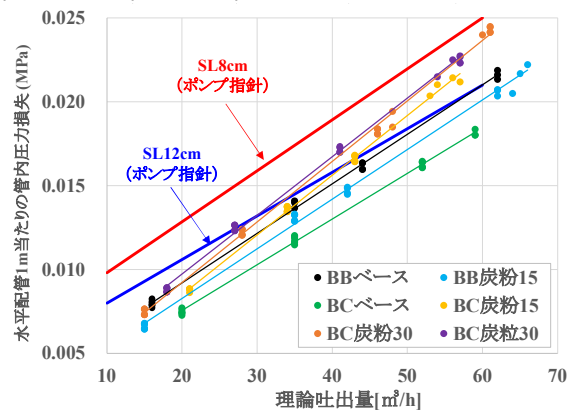


図-5 各配合の管内圧力損失

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。

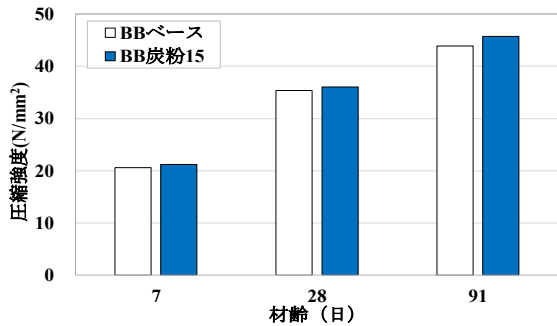


図-6 BB配合の圧縮強度

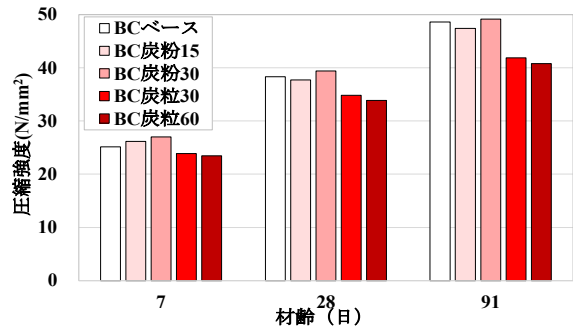


図-7 BC配合の圧縮強度

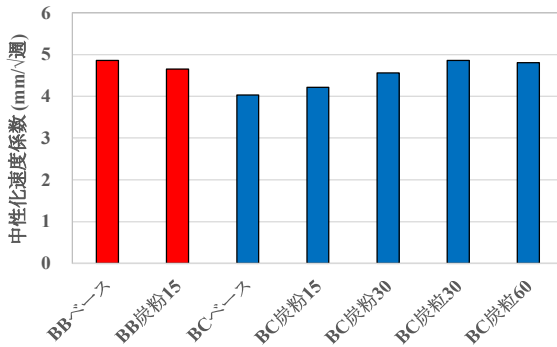


図-8 各配合の中性化速度係数

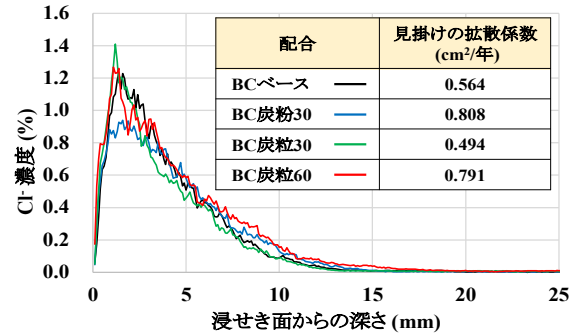


図-9 各配合の塩化物イオン拡散係数試験結果

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 ⁵⁾
セメント(C)	BB(高炉セメントB種)・・・密度:3.04g/cm ³	0.4396 ⁶⁾
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 ⁸⁾
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 ⁸⁾
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 ⁸⁾
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	—

表-7 現場適用配合

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)						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

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可能であると考えられる。

(2) 促進中性化試験結果

図-8 に各配合の中性化速度係数を示す。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。

(3) 塩分浸透試験結果

図-9 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。

5. 現場適用

バイオ炭を混和したコンクリートを現場の仮設構造物（工事中舗装）に 34.5m³ 適用した。使用した材料の諸元および配合を表-6 および表-7 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。

適用配合の CO₂ 排出量は 7kgCO₂/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、6.62t の削減となる。

施工時の状況を写真-3 および写真-4 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-8 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。

6. まとめ

本稿では、バイオ炭をコンクリートに混和することによる CO₂ 貯留の考え方およびバイオ炭を混和したコンクリートの各種試験の結果をまとめるとともに、実際の土木工事に適用した事例について紹介した。得られた結果を下記にまとめる。

- (1) 製造時の CO₂ 排出量が少ない高炉セメントの使用に加え、バイオ炭を混和することで、コンクリート製造におけるカーボンニュートラル・カーボンネガティブを実現することが可能である。
- (2) バイオ炭を混和したコンクリートのフレッシュ性状は、混和剤添加量の調整によってバイオ炭無混和のコンクリートとほぼ同等とすることが可能である。また、ポンプ圧送も問題なく可能である。
- (3) 粉状のバイオ炭を混和したコンクリートの圧縮強度は無混和のコンクリートと同等である。一方、粒状のバイオ炭を混和したコンクリートの圧縮強度は、無混和のコンクリートと比較して若干低下する傾向が確認されたが、配合によってその傾向は異なる可能性があり、今後さらなる検討が必要である。
- (4) バイオ炭を混和したコンクリートの中性化速度係数および見掛けの塩化物イオン拡散係数は、バイオ炭混和量によって若干差はあるものの、バイオ炭無混和のコンクリートと概ね同等である。
- (5) バイオ炭を混和したコンクリートでも、通常のコンクリートと同様の施工が可能である。

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 1 月 4 日）
- 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



写真-3 打設状況



写真-4 仕上り状況

表-8 アジテータ車ごと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

術講演会, V-245, 2022

- 4) 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 1 月 4 日）
- 5) 東京都水道局 HP より：
<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>（閲覧日：2023 年 1 月 4 日）
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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