

論文 コンクリート材料としてのバイオ炭の品質評価およびバイオ炭の物理特性がコンクリートに及ぼす影響

幸田 圭司*1・山本 伸也*2・黒田 泰弘*2・田中 博一*2

要旨：コンクリート材料として使用するバイオ炭の化学組成および物理特性を調査した。その結果、バイオ炭の化学組成としては難分解性炭素分が 90% 超であり、鉄筋コンクリートに有害な影響を及ぼす可能性のある化学成分として、全アルカリ (Na_2Oeq) が 0.71–0.78%, 塩化物イオンが 0.036–0.050%含まれており、バイオ炭の物理特性の中では含水率および粗粒率の製造ロット間のばらつきが比較的大きかった。バイオ炭の含水率はコンクリートのスランブに、粗粒率はコンクリートのスランブおよび空気量に影響を及ぼすが、いずれも圧縮強度にはほとんど影響しないことを確認した。

キーワード：バイオ炭, 低炭素, カーボンニュートラル, 化学組成, 含水率, 粗粒率

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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 排出量をアップフロントカーボンといい、コンクリートによる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 CO_2 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、施工性および品質が普通コンクリートと同等の汎用的な環境配慮型コンクリートの実現を目標に、バイオ炭を混入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）の実用化に向けた検討を行っている。既報^{2),3),4)}では、バイオ炭コンクリートによる CO_2 排出量削減の考え方、バイオ炭コンクリートの基本的な物性および現場適用事例について報告した。本稿では、コンクリート材料として使用するバイオ炭の化学組成および物理特性を整理した上で、これらがコンクリートに及ぼす影響を評価する。

2. 本検討で使用したバイオ炭の製造方法

本検討で使用したバイオ炭は図-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たオガ炭である。製造方法は下記に示す通りである。

- (I) オガ粉を 300–400°C の温度下で加圧成型してオガライトを製造する。
 - (II) オガライトを炭化窯で 100°C 程度から自らの熱で徐々に温度上昇させ、2–3 日かけて少しずつ酸素を供給する。
 - (III) 3 日目から 4 日目に酸素の供給量を増やし、窯内の温度を 800–1000°C 超で精錬してオガ炭を製造する。
 - (IV) 大気中で放熱後破砕し、粒径が 2 mm 程度以下の細粒炭 (Fine Biochar, 以下 FB), 粒径が 2–5 mm 程度の粗粒炭 (Coarse Biochar, 以下 CB) に分級する。
- (I) の工程で加圧成型することで高温精錬が可能となり、有機物量（揮発分）を少なくして難分解性炭素分を高くできるため、コンクリート材料として使用する場合の品質の低下やばらつきを抑えることが出来ると考えられる。また、(IV) の工程でバイオ炭を FB と CB に分級するのは、バイオ炭の粒度を調整するためであり、これまでの試験結果から、コンクリート材料としての混入量の上限は FB で 40 kg/m³ 程度、CB で 80 kg/m³ 程度としている。(II), (III), (IV) の工程は製炭業者が経験によって調整する工程であり、温度調整や炭化までの期間、炭化後の湿度状況



図-1 本検討で使用したバイオ炭の製造工程

*1 清水建設株式会社 土木技術本部 基盤技術部 (正会員)

*2 清水建設株式会社 技術研究所 (正会員)

表－1 バイオ炭の化学分析項目

分析項目	試験方法	製造ロット		
		①	②	③
ig.loss %	JIS R 5202 セメントの化学分析方法	○	—	—
insol %		○	—	—
Na ₂ O %	JIS K 0116 発光分光分析通則	○	○	○
K ₂ O %		○	○	○
Cl %	JIS K 1474 活性炭試験方法	○	○	○
SiO ₂ %	JIS R 5204 セメントの蛍光X線分析方法	○	—	—
Al ₂ O ₃ %		○	—	—
Fe ₂ O ₃ %		○	—	—
CaO %		○	—	—
MgO %		○	—	—
SO ₃ %		○	—	—
P ₂ O ₅ %		○	—	—
TiO ₂ %		○	—	—
MnO %		○	—	—

等によって、バイオ炭（オガ炭）の化学組成や物理特性は一定の範囲においてばらつきが生じることになる。

3. バイオ炭の化学組成および物理特性

3.1 試験項目、試験方法および評価対象

(1) 難分解性炭素分析

難分解性炭素分はバイオ炭による CO₂ 固定量を評価する指標である。日本バイオ炭普及会の試験規格⁵⁾を基に難分解性炭素分、揮発分、灰分をそれぞれ測定した。なお、試験規格ではバイオ炭を 107±2℃ で質量が恒量になるまで乾燥させた試料に対し、815℃ で加熱灰化した時に残留する灰の質量分率を灰分、空気との接触を避けるようにして 900℃ で 7 時間加熱した時の加熱減量の質量分率を揮発分としており、灰分と揮発分以外を難分解性炭素分と定義している。分析対象は製造ロットの異なる 7 試料（製造ロット①～⑦）とした。

(2) 化学成分分析

化学成分分析は表－1 に示すとおり実施した。JIS R 5202 に準拠して強熱減量および不溶残分を、JIS R 5204 に準拠してセメントの化学分析で評価される各成分の含有量を測定した。このうち、Na₂O、K₂O、Cl については JIS R 5204 の方法ではガラスビードを作製する際に一部が揮散する可能性が考えられたため、Na₂O、K₂O は JIS K 0116 に準拠して ICP 発光分光分析で、Cl は JIS K 1474 に準拠してイオンクロマトグラフ法で測定した。Na₂O、K₂O、Cl は製造ロットの異なる 3 試料（製造ロット①～③）、その他の項目については 1 試料（製造ロット①）を対象に実施した。

(3) 物理特性試験

物理特性試験は FB および CB のそれぞれで表－2 に示す項目について実施した。バイオ炭は多孔質であり、軽量細骨材と同様に表面乾燥飽水状態を正しく評価することが困難であるため、FB および CB のそれぞれで表面乾

表－2 バイオ炭の物理特性に関する試験項目

試験項目	バイオ炭種別	試験準拠基準
含水率 (%)	FB・CB	JIS A 1125 骨材の含水率試験方法
真密度 (g/cm ³)	FB・CB	JIS Z 8807 固体の密度及び比重の測定方法
粗粒率	FB・CB	JIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法
表面乾燥状態密度 (g/cm ³)	FB	JIS A 1134 構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法
	CB	—
吸水率 (%)	FB	JIS A 1134 構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法
	CB	—
絶乾密度 (g/cm ³)	FB	JIS A 1134 構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法
	CB	—
フロー値比 (%)	FB・CB	JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ
圧縮強度比 (%)	FB・CB	JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ

表－3 モルタル試験配合

モルタル種類	セメント (C)	バイオ炭 (FB or CB)	標準砂 (S)	水 (W)
基準モルタル	450g	0g	1350g	225g
試験モルタル	450g	50g	1300g	225g

表－4 難分解性炭素分析結果

構成比率	製造ロット						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
難分解性炭素分 (%)	92.6	92.6	94.2	93.4	93.5	92.3	90.6
揮発分 (%)	5.8	5.8	4.7	4.7	5.2	6.4	7.9
灰分 (%)	1.6	1.5	1.1	1.9	1.3	1.3	1.5

燥状態を定義して、表面乾燥状態密度、吸水率、絶乾密度を測定した。FB、CB とともに、試料は 105±5℃ で一定質量となるまで乾燥させた後に 24 時間吸水させた試料を平らな面の上に薄く広げ、暖かい風を静かに送りながら少しずつ乾燥させた。FB は「JIS A 1134 構造用軽量細骨材の密度及び吸水率試験方法」と同様に、フローコーンを引き上げたときにはじめてスランプしたときを表面乾燥状態と定義した。一方で、CB は濡れ色が変わったことを目視で判定し、そのときの状態を表面乾燥状態と定義した。また、バイオ炭を混入した場合の流動性および圧縮強度への影響を評価するため、表－3 に示すモルタル配合で、基準配合に対する試験配合のフロー値比および材齢 28 日における圧縮強度比を測定した。なお、バイオ炭は細骨材に容積置換して使用することを想定しているため、試験配合のバイオ炭は細骨材に内割置換することとした。各試験は製造ロットの異なる 7 試料（製造ロット①～⑦）を対象に実施した。

3.2 バイオ炭の化学成分分析・物理特性試験結果

(1) 難分解性炭素分析結果

分析結果を表－4 に示す。難分解性炭素分は 90% 超であり、製造ロットによるばらつきは小さかった。このことから、検討対象のバイオ炭は CO₂ を安定的に高い割合で炭素として固定化した材であると言える。

(2) 化学成分分析結果

化学成分分析結果を表－5 に示す。コンクリートに有

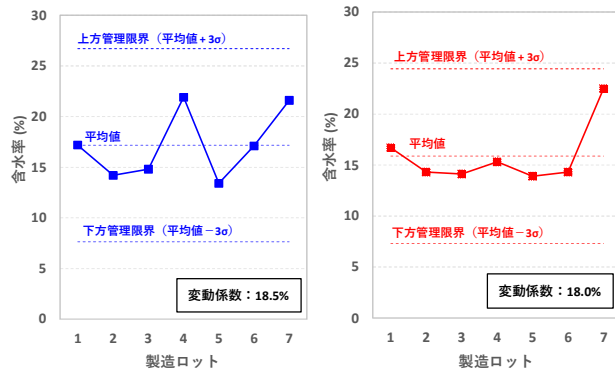
表－5 バイオ炭の化学成分分析結果

製造ロット	JIS R 5202		JIS K 0116		JIS K 1474	JIS R 5204									
	ig.loss (%)	insol. (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	全アルカリ (Na ₂ Oeq) (%)	Cl (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)
①	98.3	0.66	0.22	0.84	0.78	0.048	0.17	0.04	0.10	0.56	0.08	0.04	0.03	0.00	0.02
②	—	—	0.14	0.96	0.77	0.036	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	—	—	0.20	0.77	0.71	0.050	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表－6 FB の物理特性試験結果

試験項目	真密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	表面乾燥 状態密度 [※] (g/cm ³)	吸水率 [※] (%)	絶乾密度 [※] (g/cm ³)
試験準拠基準	JIS Z 8807	JIS A 1125	—	JIS A 1102	JIS A 1134	JIS A 1134	JIS A 1134
平均値	1.82	17.2	1.60	2.14	1.47	14.3	1.28
標準偏差	0.07	3.2	0.07	0.14	0.01	1.3	0.01
変動係数 (%)	4.10	18.5	4.19	6.50	0.94	9.4	0.92

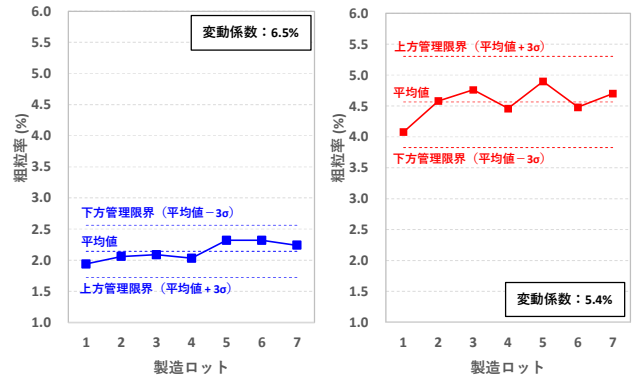
※ あくまで参考値として記載した。



図－2 FB の含水率管理図 図－3 CB の含水率管理図

表－7 CB の物理特性試験結果

試験項目	真密度 (g/cm ³)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	表面乾燥 状態密度 [※] (g/cm ³)	吸水率 [※] (%)	絶乾密度 [※] (g/cm ³)
試験準拠基準	JIS Z 8807	JIS A 1125	—	JIS A 1102	JIS A 1134	JIS A 1134	JIS A 1134
平均値	1.81	15.9	1.60	4.57	1.39	41.8	0.98
標準偏差	0.06	2.9	0.05	0.25	0.01	1.4	0.01
変動係数 (%)	3.20	18.0	3.25	5.38	0.60	3.3	1.44



図－4 FB の粗粒率管理図 図－5 CB の粗粒率管理図

害な影響を及ぼす可能性があると考えられる化学成分として、Na₂O、K₂Oといったアルカリ分および塩化物イオンが考えられた。アルカリ分については、JIS R 5210 に準拠して Na₂O 換算の全アルカリ量を算出すると 0.71–0.78%であり、JIS R 5210 の普通ポルトランドセメントの品質規格の上限値 (=0.75%) と同等であった。塩化物イオン量については 0.036–0.050%であり、たとえば 1m³あたりの混入量が近い混和材である JIS A 6207 コンクリート用シリカフェームを参考にすると、その規格値 (=0.10 %以下) の半分程度の値であった。なお、その他の化学成分についてはいずれもごく微量しか検出されず、それらがコンクリートに有害な影響を及ぼす可能性は極めて低いと考えられる。

(3) 物理特性試験結果

FB、CB の試験結果を表－6 および表－7 に示す。以下に各項目の試験結果について記述する。

○ 含水率

図－2 および図－3 に FB、CB の含水率の管理図を示す。FB、CB とともに全ての製造ロットで管理限界以内であったが、製造ロットごとのばらつきは大きく、より正

確に平均値、標準偏差、変動係数を評価するには、採取データ数を増やすことが望ましいと考えられる。なお、含水率のばらつきはバイオ炭精錬後の放熱過程で大気に曝される期間および湿度によって、吸湿する量が増えるためであると考えられる。

○ 真密度、気乾密度

真密度は FB、CB とともに製造ロットによるばらつきが比較的小さい結果であった。コンクリート材料として使用する際には気乾状態で使用することを想定しているため、真密度と含水率の関係から式(1)によって気乾密度も算出したが、気乾密度の変動係数も真密度とほぼ同様であり、比較的安定していた。

$$d_a = d_t \times \frac{100}{100 + w(d_t - 1)} \quad (1)$$

d_a : バイオ炭の気乾密度 (g/cm³)

d_t : バイオ炭の真密度 (g/cm³)

w : バイオ炭の含水率 (%)

○ 粗粒率

図－4 および図－5 に粗粒率の管理図を、図－6 および図－7 には FB、CB それぞれの粒径加積曲線を示す。FB、

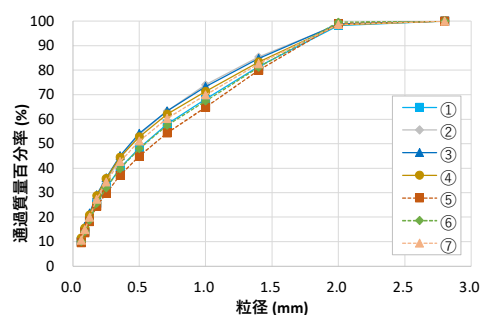


図-6 FBの粒径加積曲線

表-8 FBのフロー値比および圧縮強度比

試験項目	フロー値比 (%)	圧縮強度		
		基準モルタル試験値 (N/mm ²)	試験モルタル試験値 (N/mm ²)	圧縮強度比 (%)
平均値	78.1	65.9	64.9	98.3
標準偏差	2.7	0.6	0.6	0.7
変動係数 (%)	3.4	0.9	1.0	0.7

表-10 コンクリート材料の諸元

材料	記号	密度 (g/cm ³)	産地・仕様
普通ポルトランドセメント	C	3.16	—
水	W	1.00	東京都水道局
細骨材 1	S1	2.66 (表乾)	栃木県佐野市産
細骨材 2	S2	2.60 (表乾)	千葉県市原市万田野産
粗骨材	G	2.70 (表乾)	栃木県佐野市産
細粒バイオ炭	FB	1.60 (気乾)	—
粗粒バイオ炭	CB	1.60 (気乾)	—
高性能AE減水剤	SP	1.00	ポリカルボン酸系化合物
AE剤	AE	1.00	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

CBとともに、粗粒率は製造ロットによるばらつきが比較的大きかったが、いずれも管理限界以内であった。含水率と同様に、より正確な評価のためには採取データ数を増やすことが望ましいと考えられる。

○ 表面乾燥状態密度、吸水率、絶乾密度

FBについては、吸水率が含水率よりも低い結果となっているものもあった。これは表面乾燥状態を正しく評価できていない（本来あるべき含水状態よりも乾燥している状態を表面乾燥状態として評価してしまった）と考えられ、試験方法が適切でなかったと考えられる。そのため、FBの表面乾燥状態密度、吸水率、絶乾密度の結果はあくまで参考値として記載している。CBについては、表面乾燥状態密度、吸水率、絶乾密度の製造ロットごとのばらつきは比較的小さかった。

○ 基準モルタルに対するフロー値比、圧縮強度比

表-8および表-9にFBおよびCBを用いたモルタルのフロー値比、圧縮強度比を示す。フロー値比の平均値はFBで78.1%、CBで82.5%であり、バイオ炭混入による流動性の低下の程度はFBの方が大きかった。これはCBと比較してFBは粒径が小さく、表面積が大きいた

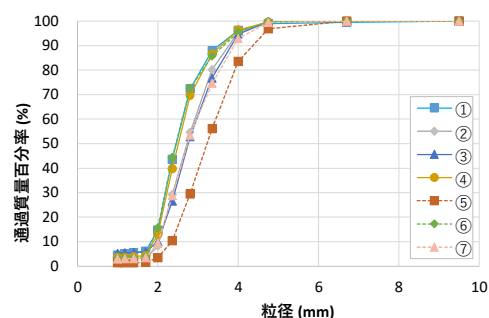


図-7 CBの粒径加積曲線

表-9 CBのフロー値比および圧縮強度比

試験項目	フロー値比 (%)	圧縮強度		
		基準モルタル試験値 (N/mm ²)	試験モルタル試験値 (N/mm ²)	圧縮強度比 (%)
平均値	82.5	65.8	61.9	94.2
標準偏差	3.7	0.5	1.0	1.8
変動係数 (%)	4.5	0.8	1.7	1.9

表-11 コンクリート試験配合

配合 略称	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					C	W	FB	CB	S ₁	S ₂	G
FB40	18	3.0	44.0	44.1	386	173	40	0	294	441	958
CB80	18	3.0	44.0	41.8	386	173	0	80	267	401	958

表-12 各水準のバイオ炭の含水率および粗粒率

バイオ炭種別	含水率 (%)			粗粒率		
	【低 _w 】	【中 _w 】	【高 _w 】	【低 _c 】	【中 _c 】	【高 _c 】
FB	10.6	15.2	20.3	1.83	2.15	2.46
CB	11.5	15.0	19.8	4.01	4.47	4.94

め、モルタル中の自由水をより吸水したためであると考えられる。圧縮強度比の平均値はFBで98.3%、CBで94.2%であり、バイオ炭混入によって圧縮強度は若干低下し、低下の程度はCBの方が大きかった。バイオ炭自体の強度はセメント硬化体と比較して低いため、粒径の大きいCBの方が構造的な弱部になりやすく、このような結果になったと考えられる。なお、製造ロットごとのばらつきについては、フロー値比、圧縮強度比ともに比較的小さかった。

4. バイオ炭の含水率および粗粒率がコンクリートに及ぼす影響

4.1 試験概要および試験配合

バイオ炭の物理特性に関する試験結果より、製造ロットによるばらつきが大きい物性として、含水率および粗粒率が挙げられた。フロー値比、圧縮強度比については変動係数が小さかったものの、製造ロットごとの含水率と粗粒率のばらつきはコンクリートの品質のばらつきに直結すると考えられる。そこで、バイオ炭の含水率、粗粒率を要因としたコンクリート試験を実施し、これらの

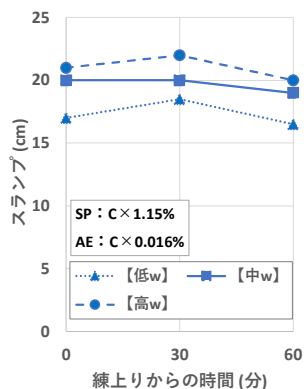


図-8 FB40 のスランプ
(含水率要因)

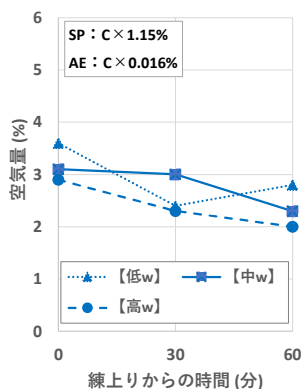


図-9 FB40 の空気量
(含水率要因)

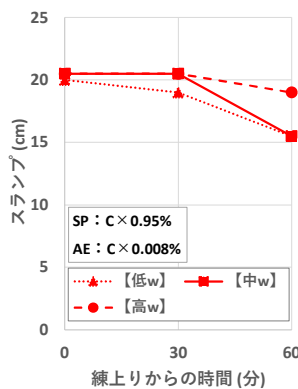


図-10 CB80 のスランプ
(含水率要因)

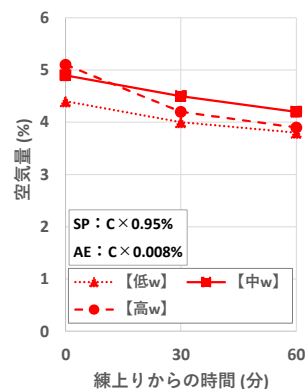


図-11 CB80 の空気量
(含水率要因)

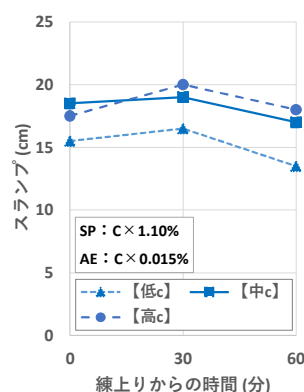


図-12 FB40 のスランプ
(粗粒率要因)

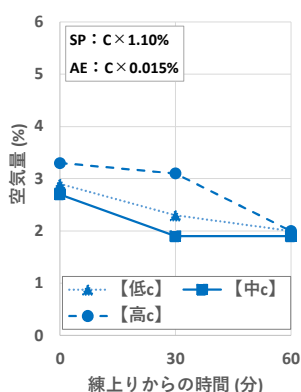


図-13 FB40 の空気量
(粗粒率要因)

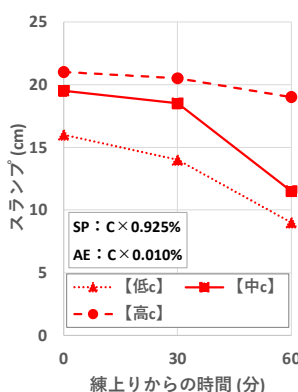


図-14 CB80 のスランプ
(粗粒率要因)

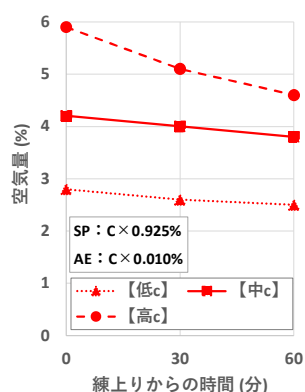


図-15 CB80 の空気量
(粗粒率要因)

影響を評価することとした。

表-10 および表-11 に本検討で使用した材料の諸元および配合を示す。FB、CB の混入量は想定する最大量として FB は 40 kg/m^3 、CB は 80 kg/m^3 とした。試験に用いた FB、CB の含水率および粗粒率は、実測値のばらつきを考慮して表-12 に示す 3 水準を設け、それぞれの水準に調整したものを使用した。バイオ炭は他の物性が一定となるように同じ製造ロットのものを使用することとして、含水率、粗粒率のみを調整した。含水率の調整は、 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ の乾燥炉で一定質量になるまで乾燥させた試料を薄く広げ、散水して攪拌する作業を、目標とする含水率に相当する質量になるまで繰り返した。粗粒率の調整は、試料をふるい分けて分級し、目標とする粗粒率となるように調整した。

試験項目は、フレッシュ性状としてスランプ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128)、強度特性として圧縮強度 (JIS A 1108) とした。スランプ、空気量はバイオ炭の経時的な吸水・混和剤吸着の影響も考慮するため、練上がり直後、30 分後、60 分後でそれぞれ試験した。なお、含水率および粗粒率がスランプ、空気量に及ぼす影響を評価す

るため、いずれも【中】の水準で練上がり 30 分時点でスランプ、空気量が目標値内に入るように高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量を決定し、【高】【低】の水準は同様の添加量で練り混ぜた。圧縮強度は材齢 7 日、28 日で試験した。

4.2 フレッシュ性状に及ぼす含水率と粗粒率の影響

(1) 含水率の影響評価

含水率を要因とした FB40 のスランプおよび空気量の試験結果を図-8 および図-9 に、CB80 の試験結果を図-10 および図-11 に示す。図中には高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量も示している。いずれの配合も含水率が高い水準ほどスランプも高い結果であった。この理由は、バイオ炭の含水率が高いほど、練混ぜ後に吸水する量が少なくなるためであると考えられる。一方で、バイオ炭の含水率に関わらず空気量はほとんど変わらなかったことから、バイオ炭の含水率はコンクリートの空気量にはほとんど影響を及ぼさないものと考えられる。

(2) 粗粒率の影響評価

粗粒率を要因とした FB40 のスランプおよび空気量の試験結果を図-12 および図-13 に、CB80 の試験結果を

図-14 および図-15 に示す。いずれの配合も粗粒率が高いほどスランプ、空気量ともに高くなる傾向であった。一般に、細骨材は粗粒率が高いほど細粒分が少なくなるため、コンクリートの粘性が低下してスランプが高くなるとされている。それに加え、粗粒率が高いほど表面積が小さくなるため、バイオ炭による吸水量および混和剤吸着量が少なくなり、相対的にスランプが高くなった可能性が考えられる。空気量についても同様に、粗粒率が高い（表面積が小さい）ほど、練混ぜ後にバイオ炭が AE 剤を吸着する量が少なくなった可能性が考えられる。

4.3 圧縮強度に及ぼす含水率と粗粒率の影響

図-16 および図-17 に含水率および粗粒率を要因とした圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。なお、配合ごとで空気量の差が大きかったため、空気量 1%につき圧縮強度が 5%変動するという既往文献⁹⁾をもとに、全ての配合で空気量が設計値である 3.0%となるよう補正している。結果として、FB40、CB80 ともに含水率、粗粒率による圧縮強度の差はほとんど確認されなかった。このことから、バイオ炭の含水率、粗粒率による圧縮強度への影響はほとんどないと言える。

5. まとめ

本稿では、コンクリート材料として使用するバイオ炭の化学組成および物理特性を整理した上で、これらがコンクリートに及ぼす影響について評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 検討対象のバイオ炭の化学組成としては難分解性炭素分が 90% 超であり、その他コンクリートに有害な影響を及ぼす可能性のある化学成分は、全アルカリ (Na_2Oeq) が 0.71–0.78%、塩化物イオンが 0.036–0.050%含まれていた。
- (2) バイオ炭を混入することでモルタルのフロー値比は低下した。この影響は粗粒炭よりも細粒炭を混入した場合の方が大きかった。
- (3) バイオ炭を混入することでモルタルの圧縮強度比は若干低下した。細粒炭よりも粗粒炭を混入した場合の方が影響は大きかった。
- (4) バイオ炭の物理特性のうち、含水率および粗粒率は製造ロット毎のばらつきが大きかった。
- (5) バイオ炭の含水率はコンクリートのスランプに影響を及ぼし、含水率が高くなると大きくなり、低くなると小さくなった。
- (6) バイオ炭の粗粒率はコンクリートのスランプおよび空気量に影響を及ぼし、粗粒率が高くなると大きくなり、低くなると小さくなった。
- (7) バイオ炭の含水率および粗粒率がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響はほとんどなかった。

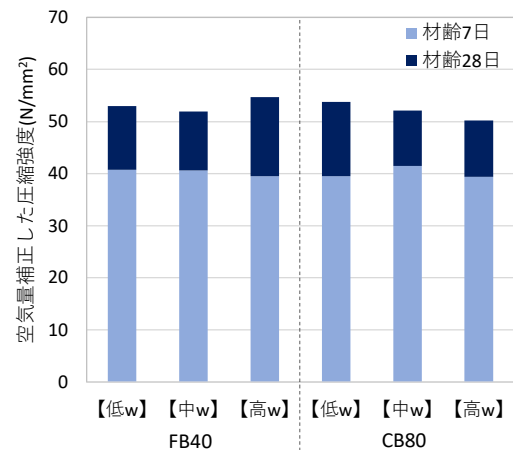


図-16 圧縮強度試験結果（含水率要因）

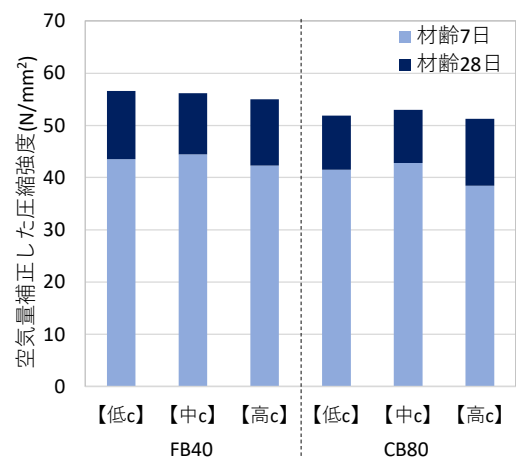


図-17 圧縮強度試験結果（粗粒率要因）

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
- 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) 日本バイオ炭普及会:土壌他の貯留用バイオ炭一測定法一, 2019
- 6) 西林 新蔵, 小柳 洽, 渡邊 史夫, 宮川 豊章:コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, p.383, 2009