

バイオ炭インターロッキングブロックの開発

塚 本 康 誉・新 見 龍 男・岩 本 正 人

建設業界において、コンクリートの利用に伴って発生するCO₂排出量削減のため、各種技術の開発が進められている。筆者らは、セメントなど材料由来の温室効果ガス排出量を実質ゼロとした環境配慮型の歩道用舗装材「バイオ炭インターロッキングブロック」を開発した。本製品は歩道用舗装材に必要な曲げ強度3.0 N/mm²を確保しつつ、CO₂の固定および産業副産物の有効利用を目的に、バイオ炭の一種である木質バイオマスガス化発電の副産物である炭を活用し、炭素を貯留することでカーボンニュートラルを実現した。

キーワード：カーボンニュートラル、バイオ炭、インターロッキングブロック

1. はじめに

日本政府は2050年までにカーボンニュートラル(以下、CN)社会を実現することを宣言した。建設業界において、コンクリートの利用に伴って発生するCO₂排出量削減のため、各種技術の開発が進められている。コンクリート製品のCO₂排出量削減のために考えられる手法は大きく3種類に分けられる。

手法①：産業副産物をセメントの一部に置換した混合セメントを利用する手法

手法②：コンクリート製品にCO₂を直接固定する手法

手法③：CO₂が固定された材料を利用する手法

手法①では、高炉セメントB種(以下、BB)やフライアッシュセメントB種等が、建設業界で広く用いられている。しかしながら、産業副産物自体にCO₂排出量が存在し、手法①単体ではCNとなるコンクリート製品を製造することは困難である。そのため、CNとなるコンクリート製品を実現するためには、手法①に加え、手法②および手法③の併用が必要である。また、手法②では、コンクリート練混ぜ時に液化CO₂を噴射してCO₂を固定する手法等があるが、CO₂固定量は少量である。そこで、筆者らはCO₂を吸収・固定する手法として、手法③を用いたコンクリート製品の開発に取り組んだ。手法③の材料としては、スラッジ水にCO₂を曝気し生成した軽質炭酸カルシウム¹⁾や、樹木の生長過程で吸収したCO₂を難分解性の炭素としたバイオ炭(オガ炭)²⁾等が報告されている。

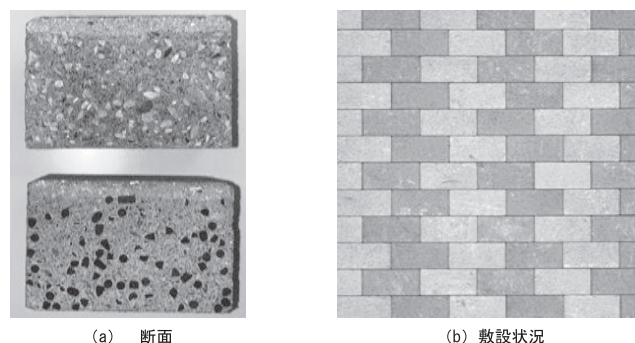
筆者らは、コンクリート製品のCN化を目指し、炭

素貯留を行うことができる材料として、有効な適用先が模索されている木質バイオマスガス化発電で副生される炭(以下、バイオ炭)を選定した。選定したバイオ炭は30～80 wt.%程度の炭素を含有している。このバイオ炭を用いることでCO₂の固定と産業副産物の利用を併用したコンクリート製品の製造が可能であり、コンクリート二次製品であるインターロッキングブロック(以下、ILブロック)に混合した製品を開発し、CNを実現した。写真—1にバイオ炭ILブロックの断面と敷設状況を示す。本稿では、バイオ炭ILブロックの開発に伴い実施した実験結果の一部について報告する。

2. バイオ炭を用いたILブロック

(1) 実験概要

表—1に使用したバイオ炭の特性、写真—2にバ



(a) 断面 (b) 敷設状況

(上：バイオ炭無し、下：バイオ炭有り)

写真—1 バイオ炭ILブロック

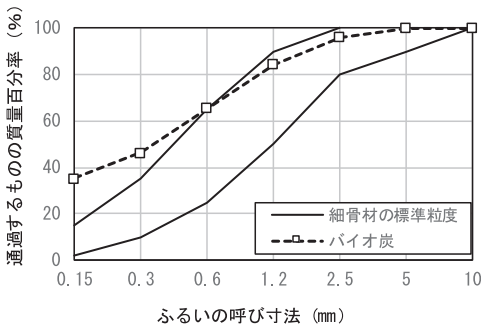
イオ炭の外観、図―1 にバイオ炭の粒度分布、写真―3 に走査電子顕微鏡（SEM）写真を示す。本バイオ炭は 150 μm 以下の微粉が 40% 程度含まれた粉体である。また、粉体内部に多数の空隙が含まれており、かさ容積が 0.30 g/ml 程度と軽量である。このバイオ炭を IL ブロックに混合し曲げ強度への影響を確認した。

表―1 バイオ炭の特性

真密度	1.98 g/cm ³
含水率	1.5 wt.%
かさ容積	0.30 g/ml



写真―2 バイオ炭粉体

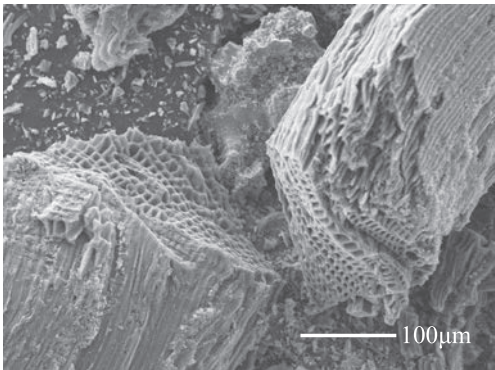


図―1 バイオ炭の粒度分布

表―2 に使用材料、表―3 に室内実験における調合表を示す。ベースは歩道用 IL ブロックの調合を用いた。練混ぜ方法および成形方法は従来品と同様とした。バイオ炭の最大混合量は（調合記号 N200）、J-クレジット制度で認定された「方法論 AG-004 (ver.1.6) バイオ炭の農地試用」に示されている炭素成形体の CO₂ 固定量の算定式をもとに、CO₂ 排出量が CN となるような添加量とした。測定項目は材齢 14 日の曲げ強度とした。試験方法は JIS A 5363「プレキャストコンクリート製品－性能試験方法通則」に準拠した。

(2) 実験結果および考察

図―2 に材齢 14 日の曲げ強度試験結果を示す。バイオ炭の使用量の増加に伴い、曲げ強度が低下する傾向を示した。また、バイオ炭を多量に混合した試験体で表面および層剥離が生じた。これは、バイオ炭は比表面積の大きい微粉を多く含んでおり、吸水量が増加し、セメントの水和が阻害されたためと考えられる。そこで IL ブロックの成型性を向上させるため、バイ



写真―3 SEM 写真

表―2 使用材料（バイオ炭 IL ブロック）

記号	使用材料	備考
W	上水道水	－
NC	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³
Bi-P	バイオ炭	密度 1.98 g/cm ³
S	山口県産砕砂	絶乾密度：2.59 g/cm ³ ，吸水率：1.85%，FM：2.80
G1	山口県産 6 号碎石	絶乾密度：2.69 g/cm ³ ，吸水率：0.69%，FM：6.01
G2	山口県産 7 号碎石	絶乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.65%，FM：4.90

表―3 室内実験（バイオ炭 IL ブロック）における調合表

調合記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	NC	Bi-P	S	G1	G2
N0	28	105	375	0	1,147	266	453
N50		110	393	50	1,064	262	446
N140		120	429	143	906	254	433
N200		135	482	200	779	242	412

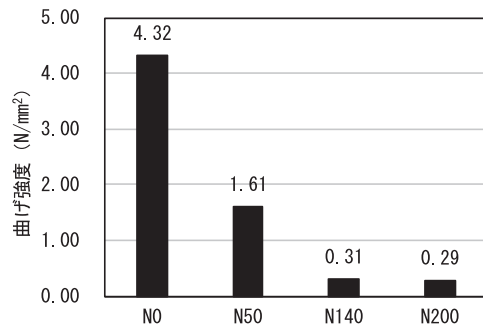


図-2 曲げ強度



写真-4 炭素成形体

オ炭を造粒した炭素成形体の適合性の検討を行った。

3. 炭素成形体を用いた IL ブロック

(1) 炭素成形体混合量が曲げ強度に及ぼす影響

(a) シリーズ 1 (炭素成形体混合量 470 ～ 650 kg/m³)

①実験概要

写真-4 に炭素成形体を示す。バイオ炭粉体と結合材を混合し、加圧成型機を用いて平均粒子径 4 mm、長さ 4 ～ 10 mm 程度の炭素成形体を造粒した。

表-4 に使用材料、表-5 に室内実験における調合表を示す。炭素成形体の密度は JIS A 1110「粗骨材の密度及び吸水率試験方法」に準拠して測定した。炭素成形体の CO₂ 固定量は前述と同様の方法で算定し、結合材の使用量、CO₂ 排出量および混合する炭素成形体の含水率を考慮して試算した。炭素成形体の混合量は IL ブロックの CO₂ 排出量が CN となるよう 470, 530, 650 kg/m³ とした。測定項目および試験方法は

2 章と同様である。

②実験結果および考察

写真-5 に試験体の外観を示す。炭素成形体を混合した IL ブロックは、表面剥離および層剥離が生じにくく良好な成形性を有した。図-3 に材齢 14 日の曲げ強度を示す。炭素成形体未使用の NC_0 は曲げ強度 3.95 N/mm² となり、歩道用 IL ブロックに必要な曲げ強度 3.0 N/mm² を満足した。炭素成形体を混合した試験体は、全調合で曲げ強度 3.0 N/mm² 以下となった。図-4 に炭素成形体混合量と曲げ強度の関係を示す。炭素成形体混合量の増加に伴い、曲げ強度が低下する傾向を示した。試験結果の近似式から炭素成形体混合量 300 kg/m³ 程度で曲げ強度 3.0 N/mm² を満足する可能性が示唆された。

(b) シリーズ 2 (炭素成形体混合量 290 kg/m³)

①実験概要

表-6 に使用材料、表-7 に室内実験における調合表を示す。炭素成形体混合量が 300 kg/m³ 程度で

表-4 使用材料 (炭素成形体 IL ブロック・シリーズ 1)

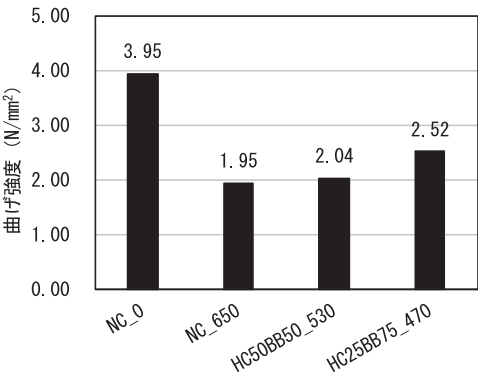
記号	使用材料	備考
W	上水道水	—
NC	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm³
HC	早強ポルトランドセメント	密度：3.14 g/cm³
BB	高炉セメント B 種	密度：3.04 g/cm³
Bi-MD	炭素成形体	絶乾密度：0.85 g/cm³, 吸水率：69.3%, 含水率：51.2%
S	山口県産砕砂	絶乾密度：2.59 g/cm³, 吸水率：1.85%, FM：2.80
G1	山口県産 6 号碎石	絶乾密度：2.69 g/cm³, 吸水率：0.69%, FM：6.01
G2	山口県産 7 号碎石	絶乾密度：2.70 g/cm³, 吸水率：0.65%, FM：4.90

表-5 室内実験 (炭素成形体 IL ブロック・シリーズ 1) における調合表

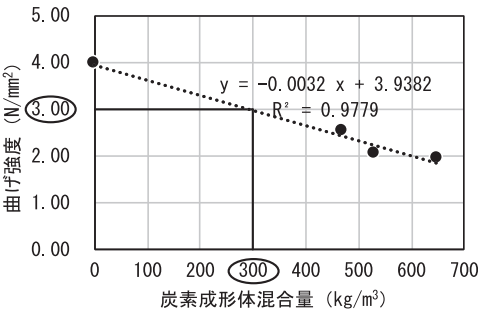
調合記号	W/C (%)	単位量 (kg/m³)							
		W	NC	HC	BB	Bi-MD	S	G1	G2
NC_0	28	120	429	0	0	0	1,095	254	433
NC_650						650	436	0	0
HC50BB50_530			0	215	215	530	674	0	0
HC25BB75_470				107	322	470	794	0	0



写真—5 試験体の外観



図—3 曲げ強度

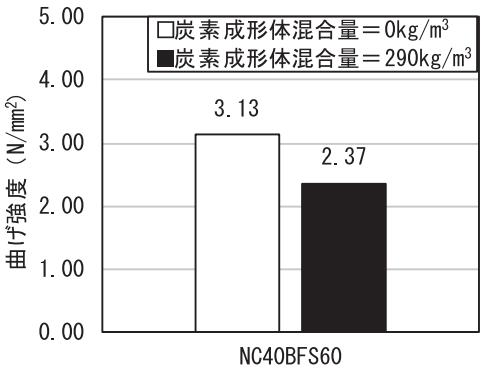


図—4 炭素成形体混合量と曲げ強度の関係

IL ブロックがCN となるよう、結合材は高炉スラグ微粉末（以下、BFS）を 60 wt.% 混合した高炉セメント C 種相当とした。また、セメント種類は普通ポルトランドセメント（NC）とした。炭素成形体混合量は 290 kg/m³ とした。測定項目および試験方法は第 2 章と同様である。

②実験結果および考察

図—5 に材齢 14 日の曲げ強度を示す。炭素成形体未使用の配合は歩道用 IL ブロックに必要な曲げ強度 3.0 N/mm² を満足した。炭素成形体を 290 kg/m³ 混合した試験体の曲げ強度は 2.37 N/mm² となり、NC をベースセメントとした調合の場合歩道用 IL ブロックに必要な曲げ強度 3.0 N/mm² を下回った。ただし、実機で製造した IL ブロック曲げ強度は、手作業で製作した IL ブロックの曲げ強度と比較して、成型時の圧力の違いから 1.2 ～ 1.5 倍程度大きくなることが予測される。そのため、炭素成形体混合量を 300 kg/m³ 程度とした IL ブロックを実機で製造することで、曲げ強度 3.0 N/mm² を満足すると考えられる。



図—5 曲げ強度

表—6 使用材料（炭素成形体 IL ブロック・シリーズ2）

記号	使用材料	備考
W	上水道水	—
NC	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm ³
BFS	高炉スラグ微粉末	密度：2.91 g/cm ³
Bi-MD	炭素成形体	絶乾密度：0.85 g/cm ³ ，吸水率：69.3%，含水率：51.2%
S	山口県産砕砂	絶乾密度：2.59 g/cm ³ ，吸水率：1.85%，FM：2.80
G1	山口県産 6 号砕石	絶乾密度：2.69 g/cm ³ ，吸水率：0.69%，FM：6.01
G2	山口県産 7 号砕石	絶乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.65%，FM：4.90

表—7 室内実験（炭素成形体 IL ブロック・シリーズ2）における調合表

調合記号	W/C (%)	単位量 (kg/m³)						
		W	NC	BFS	Bi-MD	S	G1	G2
NC40BFS60_0	28	120	176	257	0	1,094	254	432
NC40BFS60_290					290		29	50

表—8 使用材料（実機における炭素成形体）

記号	使用材料	備考
W	地下水	—
EC	エコセメント	密度：3.15 g/cm ³
BFS	高炉スラグ微粉末	密度：2.91 g/cm ³
BB	高炉セメント B 種	密度：3.04 g/cm ³
Bi-MD	炭素成形体	絶乾密度：0.85 g/cm ³ ，吸水率：69.3%，含水率：51.2%
S	栃木県産砕砂	絶乾密度：2.60 g/cm ³ ，吸水率：1.37%，FM：2.78
G1	栃木県産 6 号碎石	絶乾密度：2.69 g/cm ³ ，吸水率：0.69%，FM：6.01
G2	栃木県産 7 号碎石	絶乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.65%，FM：4.90

表—9 実機における炭素成形体の混合量

調合名	炭素成形体の単位量 (kg/m ³)
低炭素調合	0
カーボンニュートラル (CN) 調合	350

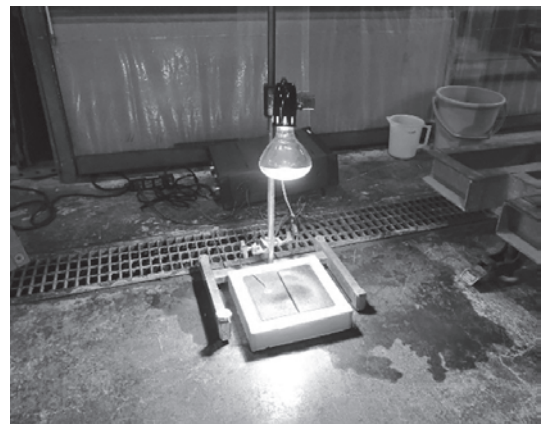
(2) 実機における炭素成形体 IL ブロックの性能検証

(a) 実験概要

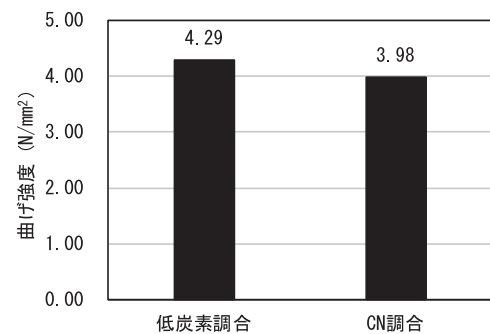
表—8 に使用材料を示す。表—9 に実機製造における調合の炭素成形体混合量を示す。炭素成形体は基層および表層の CO₂ 排出量を考慮し CN となるよう、350 kg/m³ とした。練混ぜ方法および成形方法は従来品と同様とした。測定項目は材齢 14 日曲げ強度、吸上げ高さ、保水率、吸水した IL ブロックの表面温度とした。曲げ強度試験は第 2 章と同様とした。吸上げ高さ、保水率は JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品 付属書 B 舗装・境界ブロック類」に準拠した。写真—6 に吸水した IL ブロックの表面温度測定状況を示す。吸水した IL ブロックの表面温度は、乾いたコンクリート平板上に、20℃の水中で 24 時間浸漬し保水した IL ブロックを 2 個並べ、周囲を発泡スチロール板で囲った後、IL ブロック表面から 30 cm の高さに設置した 250 w の赤外線ランプを用いて加熱し、表面温度を熱電対により測定した。

(b) 実験結果および考察

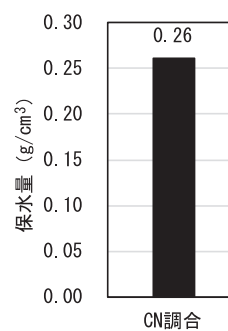
図—6 に材齢 14 日の曲げ強度試験結果を示す。炭素成形体を混合した IL ブロックの曲げ強度は 3.98 N/mm² となり、歩道用舗装材に必要な曲げ強度 3.0 N/mm² を満足した。図—7 に保水量を示す。保水量は 0.25 g/cm³ となり、保水性 IL ブロックの JIS 推奨値である 0.15 g/cm³ の 1.67 倍となった。図—8 に吸上げ率を示す。吸上げ率は 91% となり、保水性ブロックの JIS 推奨値である 70% の 1.30 倍となった。図—9 に吸水した IL ブロックの表面温度、図—10 に材齢 6 時間の表面温度を示す。CN 調合の表面温度は、低



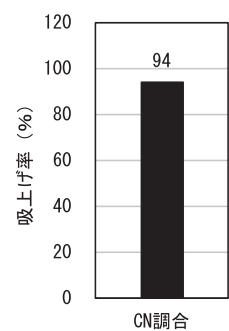
写真—6 吸水した IL ブロックの表面温度測定状況



図—6 曲げ強度

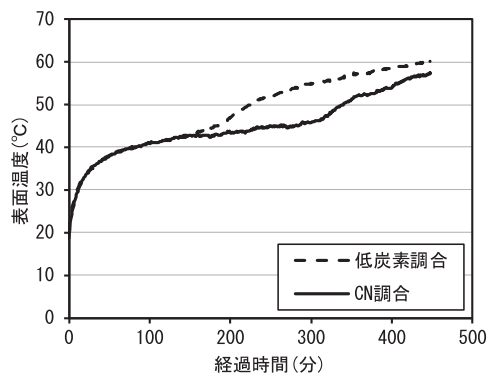


図—7 保水量

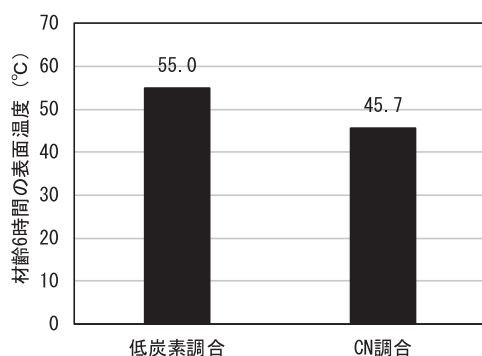


図—8 吸上げ率

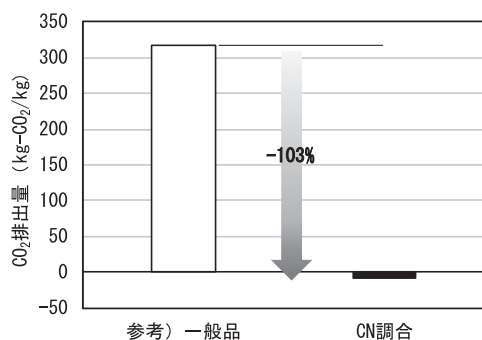
炭素調合と比較して 180 分以降で小さくなる傾向を示した。また経過 6 時間で CN 調合と低炭素調合の温度差が最大となり、10℃程度低い値を示した。炭素成形



図—9 保水したILブロックの表面温度



図—10 材齢6時間の表面温度

図—11 CO₂ 排出量

体を混合したILブロックは一般のブロックと比較して保水性が高く、高性能な保水性舗装として路面の温度を下げる事が出来る可能性が示唆された。図—11にCO₂排出量を示す。一般品と比較して混合セメントと炭素成形体を用いることで、103%程度のCO₂排出量の削減となった。

4. おわりに

今回開発したバイオ炭ILブロックは、トクヤマグループの(株)トクヤマアートブロックLABOにて、製造可能であることを確認している。今後も、(株)フジタと(株)トクヤマおよび(株)トクヤマアートブロックLABOは、バイオ炭ILブロックの適用規模拡大に向けて、曲げ強度および保水性などの性能向上と安定供給体制の構築を進めていく。

J C M A

《参考文献》

- 1) 小林大己, 三森耀介, 小泉信一, 阿合延明, 向俊成, 関田徹志: 二酸化炭素を吸着させた軽質炭酸カルシウムを用いたセメントペーストの分散挙動に関する実験的検討(その1: 各種分散剤の分散効果に関する検討) - GI基金事業『CUCO』開発成果 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP149-150, 2024.8
- 2) 幸田圭司, 久保晶史, 山本信也, 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, Vol45, No.1, PP1222-1227, 2023.7

【筆者紹介】

塚本 康誉 (つかもと やすよし)
(株)フジタ
技術センター 建築研究部



新見 龍男 (しんみ たつお)
(株)トクヤマ
セメント開発グループ
主幹



岩本 正人 (いわもと まさひと)
(株)トクヤマアートブロックLABO
取締役
製造部長

