

論文 バイオ炭を混和したプレキャスト鉄筋コンクリート製品の基礎物性

Amin Khalili Bin Ahmad Rizal^{*1}・国井 優嗣^{*2}・宮澤 聡^{*3}・田中 博一^{*4}

要旨：2050 年までのカーボンニュートラル達成に向け、CO₂固定材としてバイオ炭を用いた環境配慮型コンクリート製品の開発に取り組んでいる。バイオ炭は、燃焼しない水準に管理された酸素濃度下で、350℃以上の温度でバイオマスを加熱して生成される固形物である。本稿では、バイオ炭のプレキャスト鉄筋コンクリート製品への適用性を検討するため、フレッシュ性状試験及び硬化物性試験を実施した。その結果、プレキャスト鉄筋コンクリート製品として 80%以上の CO₂ 削減を達成するとともに、フレッシュ性状、硬化物性、製造性の各項目において、バイオ炭を混和していないコンクリートと概ね同等の性能を示した。

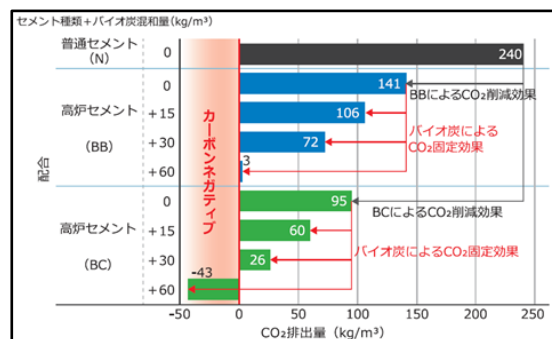
キーワード：バイオ炭、低炭素、環境配慮型コンクリート製品、プレキャスト鉄筋コンクリート製品

1. はじめに

近年、環境負荷の低減や持続可能な社会の実現に向け、建築・土木分野でも CO₂排出量の削減が大きな課題となっている。そのため、コンクリート及びプレキャスト鉄筋コンクリート製品製造時の 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。J-クレジット制度ではバイオ炭の農地施用が認証されており、これを参考に CO₂固定材としてバイオ炭をコンクリート材料として使用することが検討されている。既報¹⁾において、著者らは CO₂をコンクリートに固定化する手法を探るため、バイオ炭を使用する可能性を検討した。また、海外²⁾でもバイオ炭をコンクリートに使用した研究が報告されている。

一般的なコンクリートは CO₂排出量の大きいポルトランドセメントを使用しており、1 m³製造する際に 200～300 kg ほどの CO₂を排出する。バイオ炭は、1 kg あたり約 2.3 kg の CO₂を固定するため、例えばコンクリート 1m³あたり 60 kg 使用することで約 138 kg の CO₂を固定できる。さらに、結合材を高炉セメントに代替した場合の CO₂排出量は約 40%～60%が削減でき、ここにバイオ炭を混和することで、最大 127%の CO₂排出削減効果が得られ、カーボンネガティブの実現が可能である（図－1）。なお、バイオ炭を使用したコンクリートは、現場打ちに適用した報告³⁾はあるが、プレキャスト鉄筋コンクリート製品に適用した報告はまだ見られない。

本研究では、CO₂を固定化できるバイオ炭を用いたコンクリートのプレキャスト鉄筋コンクリート製品への適用について室内試験、実機練り及び実際の製品製造を実施し、フレッシュ性状、硬化物性及びプレキャスト鉄筋コンクリート製品の製造性を検討することとした。



図－1 W/C=55%, スランプ 12cm 配合の CO₂排出量算定例³⁾

表－1 使用材料

材料名		種類	密度 (g/cm³)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /kg)
セメント	C	普通	3.15	0.75550 ⁴⁾
		早強	3.13	
細骨材	S	砕砂	2.68	0.00350 ⁵⁾
粗骨材	G	砕石 2005	2.69	0.00250 ⁵⁾
水	W	地下水	1.00	0.00024 ⁶⁾
混和材	GG	高炉スラグ 微粉末 4000	2.89	0.02650 ⁵⁾
		高炉スラグ 微粉末 6000		
	LSP	石灰石微粉末	2.71	0.01480 ⁵⁾
混和剤	AD	高性能減水剤	—	—
	AE	AE 剤	—	—
バイオ炭	BC	粒状	1.60	-2.2990 ¹⁾

*1 昭和コンクリート工業（株） 製造本部製造部 品質管理課（正会員）

*2 昭和コンクリート工業（株） 営業本部開発部 開発課

*3 昭和コンクリート工業（株） 製造本部製造部 品質管理課 博士（工学）

*4 清水建設（株） インフラ技術グループ 博士（工学）

表-2 検討配合

配合名	W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)	結合材の種類
			W	C	GGBS	LSP	BC	S	G		
ベース	48.8	43.0	150	307	0	0	0	815	1087	237.8	普通 C のみ
BC80LSP65	45.0	43.3	170	189	189	65	80	683	896	-30.3	早強 C+GGBS4000
BC60LSP65		44.4	170	189	189	65	60	716	896	15.8	
BC40LSP65		45.6	170	189	189	65	40	750	896	61.9	
BC80LSP33		44.3	170	189	189	33	80	713	896	-30.7	
BC80LSP98		42.1	170	189	189	98	80	651	896	-29.9	
BC80LSP65		43.3	170	189	189	65	80	683	896	-30.3	早強 C+GGBS6000

図-2 検討で用いたバイオ炭の製造プロセス¹⁾

2. バイオ炭コンクリートの配合検討

2.1 実験概要

(1) 使用材料及び CO₂ 排出量

表-1 に、実験に使用した材料及び各材料の CO₂ 排出量・固定量を示す。セメントは早強ポルトランドセメントを、細骨材は石灰砕砂、粗骨材は石灰砕石を使用した。混和材は、高炉スラグ微粉末の比表面積 4000 cm²/g（以下：GGBS4000）及び 6000 cm²/g（以下：GGBS6000）の 2 種類、及び石灰石微粉末（比表面積：5200 cm²/g、以下：LSP）を使用した。混和剤はポリカルボン酸系化合物の高性能減水剤（以下：AD 剤）とアルキルエーテル型陰イオン界面活性剤の AE 剤（ベース配合に使用した、以下：AE-1）及びフライアッシュ用 AE 剤（バイオ炭を混和した配合に使用した、以下：AE-2）を使用した。AE-2 の使用理由として、バイオ炭を混和した場合、空気量が経時によって低下する現象が事前に確認されたためである⁷⁾。AE-1 及び AE-2 の希釈倍率は 10 倍とした。

バイオ炭は、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、図-2 の通り製造した。なお、本研究では粒状（粒径：2～5 mm）のバイオ炭のみ使用した。粉状（粒径：1 mm 以下）を検討しない理由として、粉状のバイオ炭の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報告があったためである⁸⁾。本実験で使用したバイオ炭の CO₂ 固定量は、J-クレジット制度におけるバイオ炭の農地施用にかかる方法論に基づき、約 2.30 kg-CO₂/kg とした。

(2) 検討配合

表-2 に、本実験の検討配合を示す。ベース配合は、フレッシュ性状としてスランブ 12±2.5 cm、空気量 4.5±1.5%、圧縮強度としてプレキャスト鉄筋コンクリート製品の脱型時（材齢 1 日）において 12 N/mm² 以上、出荷時（材齢 14 日）において 30 N/mm² 以上を確保する配合である。ベース配合に対して、バイオ炭を混和した配合を同等のフレッシュ性状、圧縮強度となるように細骨材率、混和材料を調整して実験を行った。なお、石灰石微粉末及びバイオ炭を用いる場合、細骨材の容積の一部に置換した。バイオ炭の適用、石灰石微粉末の適用、高炉スラグ微粉末の適用の 3 つのパラメーターに基づいて 6 つの配合を設定し、プレキャスト鉄筋コンクリート製品に適した配合を検討した。

(3) 練り混ぜ方法・養生方法

バイオ炭コンクリートの練り混ぜは、室内 20℃にて強制 2 軸練りミキサ（容量 60L）を使用し、練り混ぜ 1 バッチ 35L とした。練り混ぜ方法は、セメント、細骨材、バイオ炭、混和材にて空練りを 20 秒間行い、水、混和剤を投入後 120 秒間、その後粗骨材を投入して 60 秒間練り混ぜて排出した。

供試体の採取後シート養生（シート）を行って翌日に脱型し、圧縮強度試験直前まで気中養生を行った。また、比較のために水中養生（標準）も併せて行った。

(4) 試験方法

フレッシュ性状の試験としてスランブ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）、コンクリート温度（JIS

表-3 フレッシュ性状及び圧縮強度試験

配合	添加率(%)		スランプ	空気量	Con 温度	圧縮強度平均値 (N/mm ²)			
	AD	AE (A=0.001)	cm	%	℃	材齢 1 日	材齢 14 日	材齢 28 日 (同一)	材齢 28 日 (標準)
ベース	0.55	0.3A	13.0	4.3	21	14.7	35.9	40.0	43.5
BC80LSP65	0.40	50.0A	11.0	4.6	22	18.5	52.7	53.4	57.7
BC60LSP65	0.35	40.0A	14.0	5.0	22	16.9	54.0	53.9	58.5
BC40LSP65	0.30	30.0A	13.0	4.0	22	18.0	54.3	55.5	59.7
BC80LSP33	0.40	35.0A	14.0	6.0	21	17.1	52.8	50.9	56.2
BC80LSP98	0.40	50.0A	11.0	4.2	21	19.7	55.1	56.4	61.0
BC80LSP65 (6000)	0.35	50.0A	13.0	5.2	21	26.4	54.8	55.6	61.9

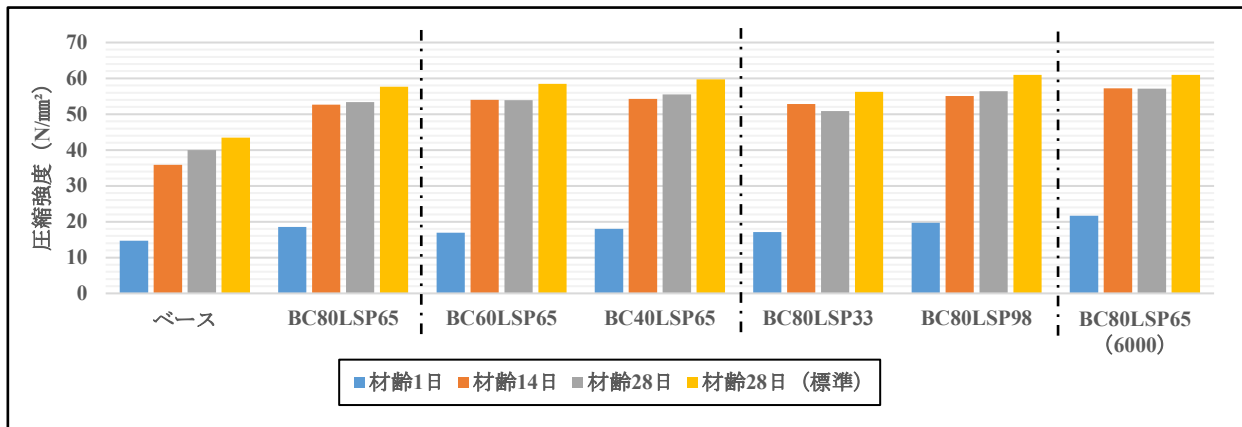


図-3 各配合の強度結果

A 1156), 硬化性状の試験として圧縮強度試験 (JIS A 1108) を実施した。

2.2 実験結果

各パラメーターがフレッシュ性状及び圧縮強度に与える影響を検討した実験結果を、表-3 及び図-3 に示す。

(1) バイオ炭の適用について

ベース配合に対して、混和量は 40 kg/m³, 60 kg/m³, 80 kg/m³ の水準を設け、バイオ炭の混和がコンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度に与える影響を確認した。バイオ炭を混和するにあたり更なる CO₂ 排出量の削減を目指して GGBS を混入したが、コンクリートの単位水量は、これを用いないコンクリートより低減できる⁹⁾ と言われている。しかし、バイオ炭は炭素含有量が高く、多孔質であり、また粒度、粒形も不ぞろいであることから、全ての混和量に対して単位水量を 170 kg/m³ にしなければベース配合と同等のフレッシュ性状が得られなかった。また、バイオ炭を混和したコンクリートのスランプ試験後の形状は、スランプの下部が動かずに上部が崩れる状態であり、ワーカビリティが悪い状況が見られた (図



図-4 改善前後のスランプ形状

4)。その改善のため、バイオ炭の混和量により細骨材率を調整し、さらに LSP を混和した結果、表-2 に示す配合となった。

フレッシュ性状については、単位水量を 170 kg/m³ に設定することで、バイオ炭量を 40~80 kg に変動させても、AD 剤及び AE 剤の添加量を調整することで対応可能であり、規定範囲内の結果が得られた。また、バイオ炭の混和量が増加するにつれて、混和剤の添加量も増加する傾向が確認された。この傾向は、バイオ炭の多孔質構造による吸水効果により、コンクリート内の自由水が減少したことが要因と考えられる¹¹⁾。

圧縮強度については、BC80LSP65 をバイオ炭混和配合

の代表とした場合、ベース配合と比較してやや高い結果が得られた。これは、バイオ炭の吸水によってセメント硬化体の実質的な水結合材比が低減することで、強度が増進したことが考えられる¹⁾。一方、バイオ炭の混和量を増量すると、強度が若干低下する傾向が見られた。これは、前述のように多孔質であるためバイオ炭による空隙が増加し、強度が低下した可能性があると考えられる。バイオ炭の混和量とCO₂排出量の傾向を見ると、本検討配合ではバイオ炭を80 kg/m³混和するとCO₂排出量がマイナスとなった。

以上の結果より、バイオ炭の混和量は、本研究の目的である環境配慮型コンクリートの検討に沿い、フレッシュ性状を満足し、十分な圧縮強度が発現する80 kg/m³として以後の実験を進めていくこととした。

(2) 石灰石微粉末 (LSP) の適用について

前述のバイオ炭混和によるワーカビリティの改善策として、混和量を33 kg、65 kg、98 kgの3段階で検討した。石灰石微粉末の量を33 kg、65 kg、98 kgとした理由は、粉体容積のおおよそ10 % (33 kg)、20 % (65 kg)、30 % (98 kg)としたためである。実験の結果、フレッシュ性状について、AD剤が同じ添加量でスランプの所定範囲内に保たれているが、LSP33 kgでは他の混和量と比較して、AE剤の添加量を50Aから35Aに減らしたにもかかわらず、空気量が上限値に近づく結果が得られた。これは、LSPの混和による影響であると考えられる¹⁰⁾。

圧縮強度については、LSPの添加量が増加するほど強度が向上する傾向が見られた。これらの結果は、石灰石微粉末がその充填材効果と核生成効果により、特に初期段階での強度向上を促進する役割を果たしていることを示しており、既報⁹⁾とも一致している。以上の圧縮強度や前述の空気量に関する傾向から、本実験の範囲では、バイオ炭を混和した配合であってもLSPの使用は既存の報告を参考にして取り扱うことができることが確認された。

この結果から、適切なワーカビリティ及び圧縮強度の発現を考慮し、石灰石微粉末の混和量を65 kgとすることとした。

(3) 高炉スラグ微粉末 (GGBS) の適用について

早強ポルトランドセメントを使用しているが、その半量にGGBSを使用していることから脱型強度(材齢1日強度)の発現が不安視されたため、GGBS4000とGGBS6000を検討した。その結果、フレッシュ性状は、

混和剤の添加率を調整することで所定範囲内の結果が得られた。圧縮強度については、材齢1日強度において両者とも目標とした12 N/mm²以上を上回った。GGBS4000とGGBS6000を比較すると、GGBS6000では大幅な増加が見られた。よって、バイオ炭を混和した配合であってもGGBS6000は初期強度の向上に有効であることが確認された。

なお、地域によってはGGBS6000の安定的な入手が困難であることが考えられ、またGGBS4000でも十分な初期強度発現が得られることが確認されたため、GGBS4000を選定することとした。

3. 実機練り及び製品製造の検討

3.1 実機練り概要

上述の配合検討試験の結果を基に、表-4に示す配合を適用し、バイオ炭のプレキャスト鉄筋コンクリート製品への適用性を検証した。具体的には、一般的に設計・製造されているプレキャスト鉄筋コンクリート製品を打設し、表-5に示す通り、材齢1日、14日、28日、56日で外観を目視で確認した。製品は道路用側溝とし、形状

表-5 外観確認の判定基準

外観確認項目	判定基準
ひび割れ	乾燥収縮によって表れるもので、長さ100 mm、幅0.05 mmまでのものが2箇所を超えないこと。
気泡	気泡の径10 mm以上のものがなく、径5 mmを超えるものが最も多い所で10 cm × 10 cmに5個以下であること。但し、型枠の構造上気泡の抜け難いハンチ部分は除外する。
鉄筋露出	どの部分にもあつてはならない。但し、脱型用の鉄筋は除く
反り、ねじれ	3 mm以下であること。
表面の凹凸	2 mm以内とする。
角欠け	長さ=30 mm、幅=15 mm、深さ=10 mm限度以内であること。
豆板	豆板部の面積が9 cm ² 以下で、深さ3 cm以下であること。
ペースト漏れ	幅20 mm以下、長さ100 mm以下でペースト漏れ部の面積の合計が60 cm ² 以下であること。

表-4 製品の適用配合

W/B (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤添加率 (%)		CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)	結合材の種類
		W	C	GGBS	LSP	BC	S	G	AD	AE		
45.0	43.3	170	189	189	65	80	683	896	0.5	20A	-30.3	早強 C+GGBS4000

及び重量は、水路幅 400 mm、側壁高さ 400 mm、長さ 1500 mm、底版厚さ 80 mm、重量は 297 kg (0.13m³) である。鉄筋は、Φ4 mm をメッシュ状にして、4.517 kg を使用した。製品の適用配合については、実機プラント (2.3 m³強制練り 2 軸ミキサ) を用いて 0.5m³ 練り混ぜ、所定のフレッシュ性状を満足したことを確認した後、投入バケットを使用して 1 層で型枠に投入し、打設を行った。製造された製品の代表的な圧縮強度及びヤング係数 (試験方法: JIS A 1149) を確認するため、JIS A 1132 に準拠して円柱供試体及び長さ 1000 mm、幅 1000 mm、高さ 230 mm の試験体を製造し、JIS A 1107 に基づいてコア供試体を採取して試験を実施した。製品は環境温度 15℃以下 (11 月中旬) の条件下で製造したため、養生は蒸気養生を行った。蒸気養生の条件は、シート内に緩やかに蒸気を入れて 20℃に保った状態で前置きを 4 時間以上実施した後、15℃/h の速度で最高温度 60℃ (55℃±5℃) まで昇温した。その後、60℃ (55℃±5℃) を 3 時間保温し、環境温度に達するまで自然降温を行った。

なお、高炉スラグ微粉末及びバイオ炭の混和により、通常のコンクリートと比較して凝結時間が遅延する可能性があると考えたため、温度上昇のおよそ 10 分前に JIS A 1147 に基づくコンクリートの貫入抵抗を測定した。

3.2 実験結果

(1) フレッシュ性状及び製造性

表-6 に、実機練りを行ったコンクリートのフレッシュ性状を示す。練り量及びミキサの性能の違いにより、所定のフレッシュ性状を得るための AD 量及び AE 量に差が生じたが、適切に調整することで問題なく製造可能であることを確認した。養生時の温度上昇開始前に実施した凝結時間試験の結果、コンクリートの貫入抵抗値が始発値である 3.5 N/mm²を上回っていることが確認された。よって、本配合でコンクリート温度が 20℃前後であれば、前置き時間を 4 時間にすることでコンクリートが温度上昇に適応するために十分な時間を確保していることが分かった。

バイオ炭を混和したコンクリートの製造は、通常のプレキャスト鉄筋コンクリート製品の製造と同様の手順で実施した。具体的には、型枠への打設、棒状及び板状バイブレーターによる振動締め固め、表面仕上げ、蒸気養生である。全ての作業において、バイオ炭を混和したコンクリートについても、一般的なコンクリートと同等の製造性であった。バイオ炭は密度が 1.6g/cm³ と軽いため、打設時の振動によって上部に浮いてくることが予想されたが、浮きは見られなかった。

(2) 硬化後の力学的特性及び外観状態

図-5 に、コア供試体と円柱供試体の材齢 1 日 (脱型後)、材齢 14 日、材齢 28 日の圧縮強度結果及び、円柱供

表-6 実機練りのフレッシュ性状

スランプ (cm)	空気量 (%)	Con.温度 (°C)	貫入抵抗 (N/mm ²)
14.5	5.5	19	3.8

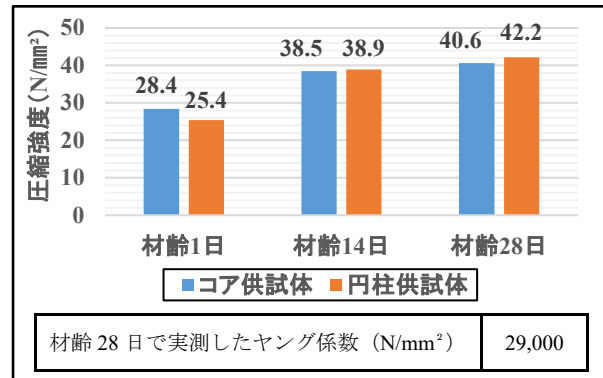


図-5 実機練りの圧縮強度及びヤング係数



図-6 製品とコア供試体の外観状態

試体の材齢 28 日のヤング係数を示す。圧縮強度については、材齢 1 日では、コア供試体の圧縮強度が円柱供試体と比較してやや高い値を示した。これは、コア供試体を採取するための供試体が円柱供試体よりも大きく、水和発熱による積算温度が大きかったためと考えられる。一方、材齢 14 日では両供試体の圧縮強度がほぼ同等の値を示し、材齢 28 日では逆に円柱供試体の強度がコア供試体を上回る結果と確認されたが、概ね同等の結果であった。

ヤング係数は、材齢 28 日で測定した値と式(1)¹²⁾ から得られた値を比較する。

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

E : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

k_1 : 粗骨材の種類により定まる修正係数 (石灰石砕石 = 1.2)

k_2 : 混和剤の種類により定まる修正係数 (高炉スラグ微粉末 = 0.95)

γ : コンクリートの単位容積 (2.272 t/m³)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (42.2 N/mm²)

式(1)より、近似されるヤング係数の値は 30,436 N/mm² であり、実験結果は若干小さい値を示した。これは、バ

イオ炭の混和により粒形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と考えられるが、その差は算出された値の±20%の範囲内であり、許容差内であった¹³⁾。

外観確認は、表-5 の判定基準を用いて、脱型後の製品に対して前述の材齢で実施した。その結果、本実験で確認した範囲においては、劣化や変化は認められず、製品は当初の状態を維持していることが確認された。また、抜き取ったコア供試体の外観を目視で確認した結果、バイオ炭が均等に分布している様子が確認された。しかし、この知見を裏付けるためには、さらなる定量的な調査が必要である。(図-6 右側)

これらの結果は、フレッシュ性状、製造性、圧縮強度、ヤング係数及び外観が実用範囲内にあることを示しており、プレキャスト鉄筋コンクリート製品への適用は可能であると考えられる。

(3) 製品製造における CO₂ 排出量について

今回適用したプレキャスト鉄筋製品の CO₂ 排出量をコンクリートおよび鉄筋を考慮して算出した。製品 1 個あたりに使用したコンクリート数量は 0.13m³であったため、コンクリートに関する CO₂ 排出量は、-3.9kg-CO₂/製品 (-30.3kg-CO₂/m³ × 0.13m³/製品) と算出される。一方、製品 1 個あたりに使用した鉄筋に関する CO₂ 排出量は 8.6kg-CO₂/製品¹⁴⁾ であるため、コンクリートおよび鉄筋を考慮した CO₂ 排出量は 4.7kg-CO₂/製品と算出される。一方、ベース配合で同じ製品を製造した場合の CO₂ 排出量は 39.5 kg-CO₂/製品となる。この結果、バイオ炭を混和した製品の CO₂ 排出量はベース配合と比較して 34.8 kg-CO₂/製品が削減でき、約 88%の削減が可能であることが確認された。

4. まとめ

バイオ炭を混和したコンクリートのプレキャスト鉄筋コンクリート製品への適用性の検討を行い、本実験により以下の結果が得られた。

- (1) バイオ炭を混和したコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度は、単位水量や混和剤の調整及び石灰石微粉末の混和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。
- (2) 実機練りの結果、混和剤量の調整によりフレッシュ性状を所定の範囲内に収めることができ、プレキャスト鉄筋コンクリート製品の製造性も同等であることが確認された。硬化後の力学的特性及び外観状態についても、バイオ炭無混和のコンクリートと同等の結果が得られた。
- (3) バイオ炭を混和し、セメントの 50%を製造時の CO₂ 排出量が少ない高炉スラグ微粉末に代替することで、プレキャスト鉄筋コンクリート製品としてバイ

オ炭を混和した製品の CO₂ 排出量は、ベース配合を使用する場合の製品と比較して 88%の削減ができ、カーボンニュートラルを実現することが可能である。

参考文献

- 1) 久保昌史, 山本伸也, 幸田圭司, 田中博一: バイオ炭を混和したカーボンネガティブ仕様の環境配慮型コンクリートの現場適用, 土木学会第 79 回年次学術講演会, VI-884, 2024
- 2) Zhihao Zhao, et al, Biochar affects compressive strength of Portland cement composites: a meta-analysis, Biochar, (2024)6:21
- 3) 清水建設 HP より:
<https://www.shimz.co.jp/solution/tech383/> (閲覧日: 2024 年 12 月 5 日)
- 4) 一般社団法人 セメント協会: セメントの LCI データの概要, 2024.4
- 5) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価 (その 2), 土木学会, 2004.9
- 6) 東京都水道局 HP より:
<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html> (閲覧日: 2024 年 12 月 5 日)
- 7) 木原亮太, 幸田圭司, 山本伸也, 清水和昭, 久保昌史, 田中博一: バイオ炭を混和したコンクリートのフレッシュ性状及び強度特性, 土木学会第 78 回年次学術講演会, V-782, 2023
- 8) 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, 2023
- 9) 国府勝郎: 高炉スラグ微粉末, コンクリート工学, Vol.26, No.4, pp.25~31, 1988
- 10) 鶴田昌宏, 小島明, 中村秀三: 細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, 2004
- 11) Sachini Supunsala Senadheera, et al, Application of biochar in concrete – A review, Cement and Concrete Composites 143 (2023) 105204
- 12) 公益社団法人 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.212, 2022
- 13) 野口 貴文, 友澤 史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.474, pp.1-10, 1995
- 14) 環境省: サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の計算のための排出原単位データベース, 2018