

環境配慮型コンクリート「SUSMICS-C」の開発

—バイオ炭を混和して炭素を貯留—

山本 伸也 幸田 圭司 清水 和昭 田中 博一 久保 昌史
(技術研究所) (土木技術本部) (技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部)

Eco-Friendly Concrete: “SUSMICS-C”

—Mixing with Biochar to Store Carbon—

Shinya Yamamoto, Keiji Yukita, Kazuaki Shimizu, Hirokazu Tanaka and Masafumi Kubo

バイオ炭は炭素を固定しているため、コンクリート内部に長期的に保持することで炭素貯留が可能となる。著者らはこれに着目し、バイオ炭を混和した環境配慮型コンクリート「SUSMICS-C」の開発を行っている。炭素貯留によるCO₂固定量を算出し、一例として呼び強度24の高炉セメントC種配合にバイオ炭60kgを混和することで、カーボンネガティブ配合となることを確認した。また、各種基礎物性を試験し、バイオ炭無混和の配合と同等のフレッシュ性状、圧縮強度、耐久性(乾燥収縮、中性化)を有することを確認した。実用性の実証のために建設現場の仮舗装コンクリートに適用し、施工性と圧縮強度が要求性能を満足することを確認した。

Since biochar fixes carbon, it can be retained in concrete for a long period of time to enable carbon sequestration. The authors are developing an environmentally friendly concrete, SUSMICS-C, that incorporates biochar. The amount of CO₂ fixation by carbon sequestration was calculated, and as an example, 60 kg of biochar mixed with 24 nominal strength blast furnace cement Class C was confirmed to be a carbon-negative mix. In addition, various basic properties were tested, and it was confirmed that the fresh properties, compressive strength, and durability (drying shrinkage, neutralization) were equivalent to those of the blended cement without biochar. To demonstrate its practicality, it was applied to temporary pavement concrete at a construction site, and it was confirmed that its workability and compressive strength satisfied the required performance.

1. はじめに

主要な建設資材のひとつであるコンクリートは、セメントによるCO₂排出量が多い資材であり、普通ポルトランドセメントを用いた一般的な配合の場合、200~300kg・CO₂/m³程度のCO₂排出量がある。日本における近年のコンクリート出荷量は年間約8,000万m³¹⁾、CO₂排出量は約12億ton²⁾であり、国内CO₂排出量の約2%がコンクリートに由来すると推定されている。対応策として、セメントを大幅に減らしたコンクリートや、製造過程でCO₂と反応・吸着するコンクリートなどが開発されている。しかし、現場打設が困難であったり、特殊な養生設備が必要であったりと、汎用性に課題があるものが多い。また、カーボンニュートラル・ネガティブにまで達するコンクリートは少ない。

筆者らは、カーボンニュートラルを実現可能でありながら、通常のコンクリートと同等の施工性・

性能を有する汎用的な環境配慮型コンクリートとして、バイオ炭を混和することで炭素を貯留するコンクリート「SUSMICS-C」(Sustainable + SMI(炭) + Carbon Storage + Concrete)の開発を行っている³⁾⁵⁾。

バイオ炭は、2019年改訂の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℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物」と定義されている⁶⁾。バイオ炭の特徴は、バイオマスが有する炭素が炭化されることで生成される難分解性炭素を多く含み、通常の下では分解されにくいことである。バイオ炭は炭素を固定しているため、コンクリート内部に長期的に保持することで炭素貯留が可能であり、コンクリートは貯留した炭素に相当するCO₂固定(削減)効果を有する。本報では、SUSMICS-Cの炭素貯留によるCO₂固定、各種基礎物性に関する試験結果、現場適用による実用性実証について紹介する。

2. 炭素貯留による CO₂ 固定

2.1 炭素貯留の概念

SUSMICS-C による炭素貯留の概念図を図-1 に示す。バイオマスに含まれる炭素は、もともと植物が光合成によって吸収した大気中の CO₂ 由来だが、燃料として利用されたり、自然条件下で微生物によって分解されたりして、通常では大気中の CO₂ に戻る。このように炭素が様々な形態をとって移り変わるのが炭素循環である。炭素が CO₂ として大気中に存在すると温室効果を発揮するため、温室効果を持たない形態に炭素を維持することが望ましいと考えられる。バイオマスを炭化してバイオ炭にした場合、微生物による分解はほとんど生じないため、燃やさない限り CO₂ に変化しない。そのため、バイオマスをバイオ炭にして長期的に貯留すれば、炭素循

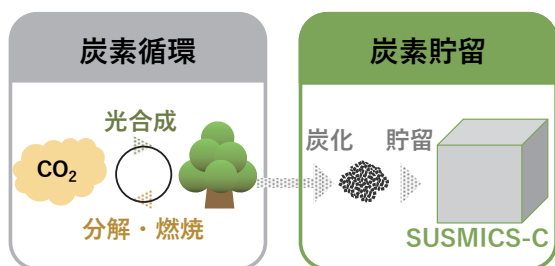


図-1 SUSMICS-C の炭素貯留



図-2 バイオ炭の製造工程

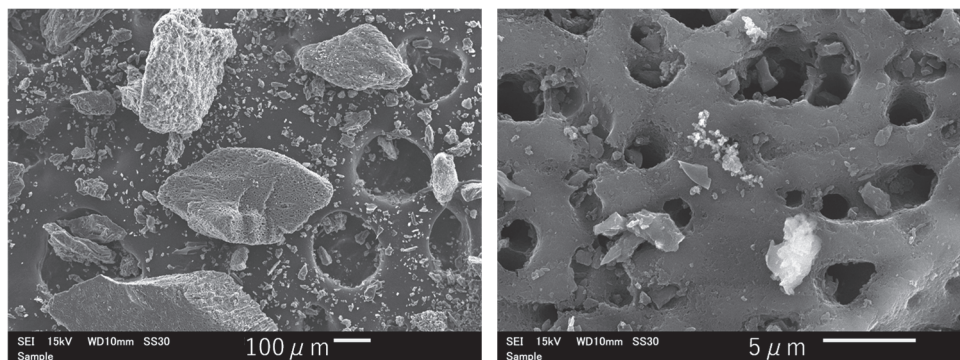


図-3 バイオ炭の微細構造

環の中で温室効果ガスになりうる炭素を減らすことができる。これが炭素貯留の考え方である。

炭素を貯留する場所は、持続性があり、バイオ炭の流出や燃焼をモニタリングできるものが適すると考えられる。この点、コンクリートは炭素貯留に適した材料だと考えられる。

2.2 開発に用いたバイオ炭

本報で紹介する SUSMICS-C にはオガ粉を原料とする粒度調整されたバイオ炭を用いた。図-2 に本バイオ炭の製造工程を示す。まず製材所で副産物として発生するオガ粉を工場に運搬・収集し、180~200℃で加圧成形して棒状に固める。次にこれを炭化炉に移し、初めの2~3日は少量の空気でも自然させ、3~4日目に多めの空気を供給して一気に800~1000℃の高温にして炭化する。自然冷却後に粉碎・分級することで粒径1mm以下の粉状タイプと1~5mmの粒状タイプのバイオ炭を製造する。

図-3 は電子顕微鏡で観察された本バイオ炭の微細構造である。5μm以下の微細な空孔を有する多孔質材料であることが確認されている。

2.3 CO₂ 固定量の定量評価

バイオ炭全般の炭素貯留による CO₂ 固定量(削減量)は IPCC ガイドラインに倣って図-4 のように算出可能である。その結果、開発に用いているバイオ

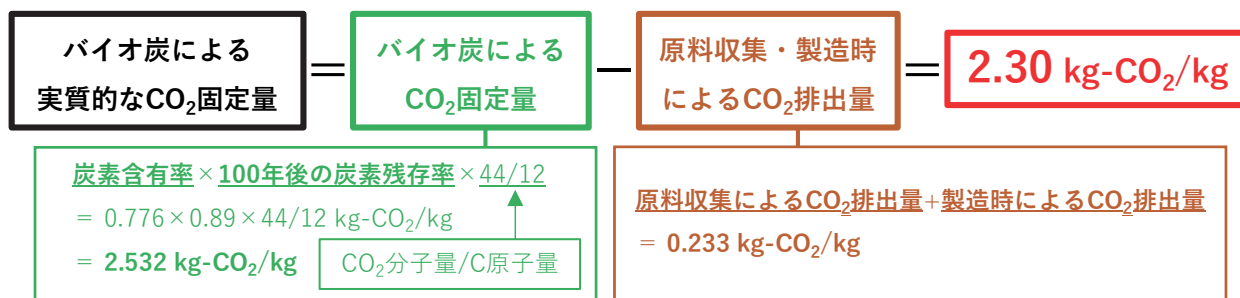


図-4 バイオ炭によるCO₂固定量の定量評価

表-1 試験配合

配合	W/C	s/a	水	高炉セメントB種	高炉セメントC種	バイオ炭粉状	バイオ炭粒状	細骨材①(砕砂)	細骨材②(山砂)	粗骨材(碎石)	AE減水剤
	(%)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(C×%)
BB-Control	55	44.8	169	307	0	0	0	327	491	1008	0.8
BB-P15	55	44.0	169	307	0	15	0	317	476	1008	1.4
BB-G30	55	43.3	169	307	0	0	30	307	461	1008	1.0
BB-G60	55	41.6	169	307	0	0	60	288	432	1008	1.5
BC-Control	50	44.8	169	0	338	0	0	321	481	989	0.8
BC-P15	50	44.0	169	0	338	15	0	311	466	989	1.0
BC-P30	50	43.2	169	0	338	30	0	301	452	989	1.4
BC-G30	50	43.2	169	0	338	0	30	301	452	989	0.8
BC-G60	50	41.6	169	0	338	0	60	281	422	989	1.0

炭は 1kg あたり 2.30kg-CO₂ の「実質的な CO₂ 固定量」を持つことが明らかとなった。「実質的な CO₂ 固定量」はバイオ炭単位量あたりの CO₂ 固定量である(CO₂ 排出原単位と同じ単位だが正負が逆)。

「バイオ炭による CO₂ 固定量」の計算要素について以下に述べる。まず、炭素含有率は分析試験(日本バイオ炭普及会規格 JBAS0002)の結果から得られるバイオ炭中の難分解性炭素の質量比である。開発に用いたバイオ炭は過去 6 か月間 7 回の分析の結果、平均 77.6%、標準偏差 1.3%であった。ただし、分析値はバイオ炭のロットや保管状況で変化する可能性があるため、都度、取得することが望ましいと考えられる。次に、100 年後の炭素残存率とは、難分解性炭素が 100 年間のうちに微生物の分解により貯留先から失われる分を考慮する係数である。IPCC ガイドラインで定められているオガ炭を土壌へ施用した場合の 89%を引用した。コンクリートに貯留する場合の炭素残存率の算定はできていないため今後の課題であるが、土壌と異なりコンクリート内部は微生物に好適な環境と考えられないため、炭素残存率が向上する可能性がある。最後に、貯留する炭素質

表-2 材料密度(単位 : g/cm³)

材料	密度	値
高炉セメントB種	密度	3.04
高炉セメントC種	密度	2.96
バイオ炭(粉)	密度	1.60
バイオ炭(粒)	密度	1.60
細骨材①	表乾密度	2.66
細骨材②	表乾密度	2.60
粗骨材	表乾密度	2.70

を CO₂ としての質量に変換するため CO₂ 分子量/C 原子量 (=44/12) を乗じる。

「原料収集・製造時による CO₂ 排出量」はバイオ炭の原料収集および製造で発生する CO₂ の総計である。原料収集については、使用トラックおよび収集範囲から考えられる中で最も CO₂ 排出量が多くなる運搬ケースで算出した。製造については、工場の消費電力および化石燃料使用量を元に算出した。

表-3 SUSMICS-C の CO₂排出量の一例

配合	バイオ炭以外 の材料の CO ₂ 排出量	バイオ炭の CO ₂ 固定量	コンクリート としての CO ₂ 排出量	BB-Controlに 対する CO ₂ 削減率
	(kg-CO ₂ /m ³)	(kg-CO ₂ /m ³)	(kg-CO ₂ /m ³)	(%)
BB-Control	141	0	141	0
BB-P15	141	34	107	24
BB-G30	141	69	72	49
BB-G60	141	138	3	98
BC-Control	95	0	95	33
BC-P15	95	34	60	57
BC-P30	95	69	26	82
BC-G30	95	69	26	82
BC-G60	95	138	-43	131

2.4 SUSMICS-C の CO₂ 排出量

表-1 に 3 章で後述する各種基礎物性試験の対象としたコンクリート配合を、表-2 に各材料の密度を示す。バイオ炭を混和する配合は、無混和の配合(-Control と付いた配合)の細骨材をバイオ炭混和分で体積置換して定めた。バイオ炭は結合材としての機能がなく、粒径的に細骨材に近いいため、細骨材置換とした。例えば、BB-P15 は BB-Control の細骨材を粉状のバイオ炭 15kg で、BB-G60 は粒状のバイオ炭 60kg で体積置換した配合である。バイオ炭 60kg を混和した場合に、CO₂ 固定量が他の材料由来の CO₂ 排出量と同等か同等以上になるように、普通ポルトランドセメントより CO₂ 排出原単位の小さい高炉セメントを用いた。固定と排出がつり合えばコンクリートとしてカーボンニュートラル、固定の方が大きければカーボンネガティブとなる。なお、バイオ炭の有無に関わらず、細骨材①と②の重量比は 2 : 3 に固定している。表-3 にこれらの配合の CO₂ 排出量を、表-4 に CO₂ 排出量の計算に使用した各材料の CO₂ 排出原単位⁷⁻¹⁰⁾を示す。各配合の CO₂ 排出量 (kg-CO₂/m³)は、使用材料ごとに CO₂ 排出原単位の単位量を乗じ、使用材料ごとの CO₂ 排出量を求め、その和を取ることで算出した。バイオ炭の CO₂ 固定量は負の CO₂ 排出量として計算に用いた。表-4 の示す通り、開発に用いているバイオ炭は他の材料に比べて非常に大きな負の CO₂ 排出原単位を有している。例えば、高炉セメント B 種の約 5 倍であるため、バイオ炭 1kg の混和で高炉セメント B 種約 5kg の CO₂ 排出を相殺可能である。

表-4 各材料の CO₂ 排出原単位(kg-CO₂/kg)

水 ⁷⁾	高炉セメント		細骨材 ¹⁰⁾	粗骨材 ¹⁰⁾	バイオ炭
	B種 ⁸⁾	C種 ⁹⁾			
0.0002	0.4396	0.2645	0.0035	0.0028	-2.30

高炉セメント B 種配合の場合、バイオ炭を 30kg/m³ 混和するとバイオ炭無混和のコントロールに対し 49%削減の 72kg-CO₂/m³ となり、60kg/m³ 混和すると 98%削減してほぼカーボンニュートラルの 3kg-CO₂/m³ となる。高炉セメント C 種配合の場合は、CO₂ 排出原単位が高炉セメント B 種の約 60%になるため、高炉セメント B 種配合に比べ元の CO₂ 排出量が小さい。バイオ炭を 60kg/m³ 混和すると、バイオ炭の CO₂ 固定量⁷⁾が他材料の CO₂ 排出量を 43kg 上回り、コンクリートとしてカーボンネガティブとなる。

3. 各種基礎物性

3.1 試験概要

3.1.1 試験配合

表-1 に試験対象とした 9 種類の配合、表-2 に各材料の密度を示す。試験で使用した材料は、高炉セメント(B 種および C 種)、水(上水道)、2.2 節で述べたバイオ炭(粉状と粒状)、細骨材 2 種(石灰砕砂と山砂)、粗骨材(石灰碎石)、化学混和剤である。細骨材は粒径 5mm 以下、粗骨材は 5mm 以上 20mm 以下のものを使用した。

試験要因はセメント種類(高炉セメント B 種および C 種)、バイオ炭の種類(粉状および粒状)ならびに混和量(0kg/m³、15kg/m³、30kg/m³、60kg/m³)とした。W/C については、高炉セメント B 種を用いた 4 配合は 55%とし、C 種の 5 配合は圧縮強度を B 種配合と同等にするために 50%とした。バイオ炭を混和しない配合である BB-Control と BC-Control は、コンクリート工場が保有する呼び強度 24、スランブ 12cm の配合を元にした。AE 減水剤の添加量は、各配合の練混ぜ直後のスランブが 12~15cm になるように調整した。

3.1.2 試験項目および製造方法

フレッシュ性状に関して、スランブ試験を JIS A 1108、空気量試験を JIS A 1128、ブリーディング試験を JIS A 1123、凝結試験を JIS A 1147 に準拠して行った。いずれの試験も 20℃の恒温室にて実施した。

硬化特性に関して、圧縮強度試験を JIS A 1108、乾燥収縮試験を JIS A 1129、促進中性化試験を JIS A 1153 に準拠して行った。

コンクリートは水以外のバイオ炭を含む全ての材料を 15 秒間空練りした後、注水し 90 秒間練り混ぜて製造した。

3.2 試験結果

3.2.1 スランブと空気量

図-5 に、経時 60 分までのスランブと空気量を示す。バイオ炭を混和した場合、無混和のコントロール配合と同レベルのスランブおよび空気量を確保するのに必要な AE 減水剤の量は増加した。この原因は、コンクリート中の自由水と AE 減水剤の成分がバイオ炭の微細な空孔に吸収・吸着されたためと考えられる。バイオ炭混和量は同じで粒径だけが異なる BC-P30 と BC-G30 を比較すると、同じスランブ値を得るために、BC-P30 の方が AE 減水剤の添加量を増加させた。このことから、バイオ炭の粒径が小さくなるほど比表面積が増加し、流動性が低下すると推察される。一方、BC-P30 のスランブロス率は BC-G30 よりも緩やかであった。AE 減水剤添加量は BC-P30 の方が多いため、スランブ保持性能が向上したと考えられる。バイオ炭を混和した場合の時間経過によるスランブと空気量の低下傾向は、高炉セメント B 種と C 種の両配合群において無混和配合と同様であった。AE 減水剤の添加量を調整することで、バイオ炭を混和したコンクリートのフレッシュ性状を制御できることが明らかとなった。

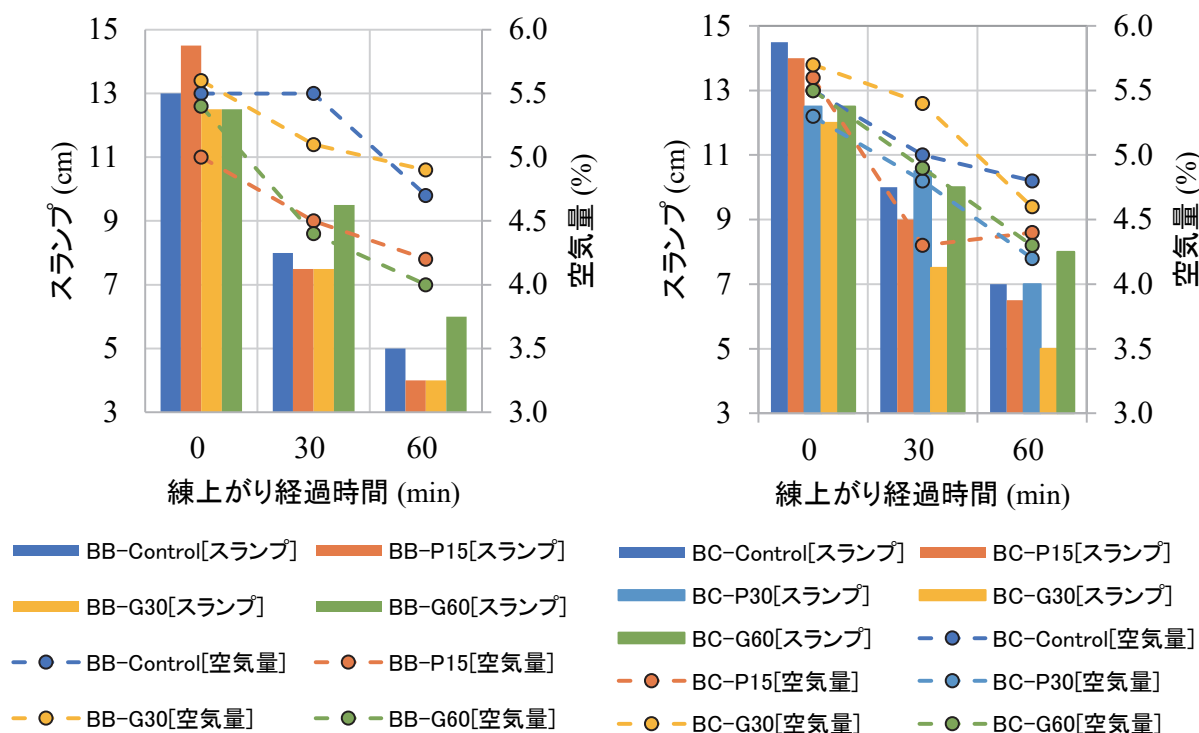


図-5 スランブと空気量
(左：高炉セメント B 種配合、右：C 種配合)

3.2.2 ブリーディング

図-6 にブリーディング試験で測定された累計浮水量を示す。コントロールに対する最終的な累計浮水量について、高炉セメント B 種配合では BB-P15 および BB-G30 が小さく、反対に BB-G60 は大きくなった。高炉セメント C 種配合では BC-P15 が小さく、BC-G60 は同等だった。

B 種および C 種配合の両方において粉状バイオ炭混和配合の最終的な累計浮き水量が下がった原因として、細骨材を粒径のさらに細かい粉状バイオ炭に置換したことで比表面積が増大しペースト自由水を保持しやすくなったことが考えられる。粒状バイオ炭混和ケースで傾向が一定でない原因として、所定のフレッシュ性状を確保するために AE 減水剤添加量を増やした影響が考えられる。BB-G60 の添加量はコントロールの約 1.9 倍であるため、ペーストの粘性が下がり、浮水が増えたと推察される。粉状バイオ炭混和ケースも添加量は増えているが、自由水保持効果が支配的だったと考えられる。BB-G30 および BC-G60 は添加量の増加分が比較的小さかったため、ペーストの粘性低下が顕著ではなかったと推察される。

3.2.3 凝結性状

図-7 に凝結試験で測定された貫入抵抗値、表-5 に始発・凝結時間を示す。コントロールに対する始発および終結時間は、高炉セメント B 種配合では全てのバイオ炭混和配合で遅延が確認された。特に

BB-G30 および BB-G60 の始発遅延が顕著で、1 時間以上の差が生じた。高炉セメント C 種配合では BB-P15 でコントロールよりも早い凝結が見られたが、BB-G60 では始発、終結ともに約 2 時間の遅延が確認された。

バイオ炭混和配合の始発、終結が全体的に遅延した原因として、所定のフレッシュ性状を確保するために AE 減水剤添加量を増やした影響が考えられる。AE 減水剤に含まれる凝結遅延成分が増加し、始発、終結の遅延を引き起こしたと推察される。ただし、BB-G60 と BC-G60 を比較すると、添加量増加割合は BB-G60 の方が大きい、遅延時間は BC-G60 の方が長かった。また、BC-P15 は添加量が増加したにも関わらず遅延は確認されなかった。このことから添加量増加以外の要因も影響していると考えられる。

表-5 始発・凝結時間

	始発	凝結
BB-Control	6:53	10:33
BB-P15	7:15	10:42
BB-G30	7:57	10:56
BB-G60	8:22	11:10
BC-Control	9:29	13:04
BC-P15	8:47	13:04
BC-G60	11:46	15:43

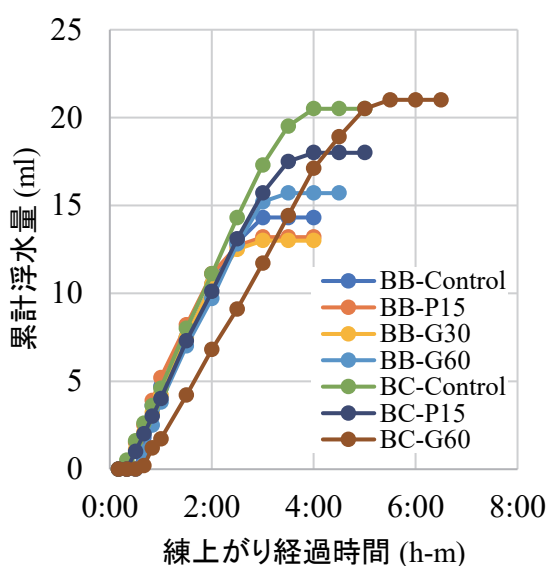


図-6 ブリーディング

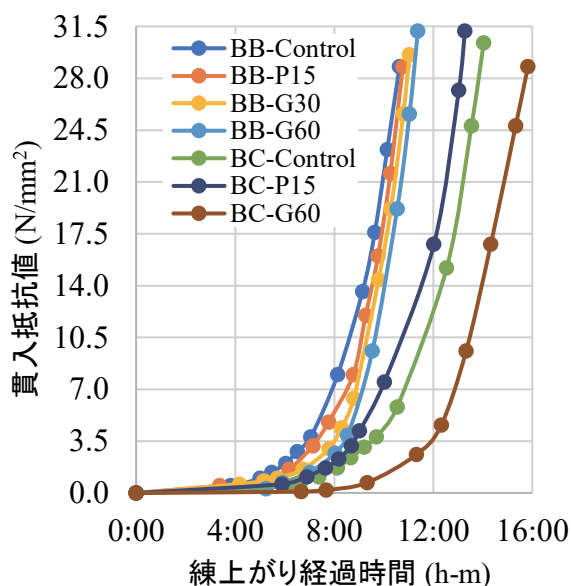


図-7 凝結性状

3.2.4 圧縮強度

図-8 に材齢ごとの圧縮強度を示す。エラーバーは標準偏差を示す。コントロールに対するバイオ炭混和配合の圧縮強度は、高炉セメント B 種配合では同等かそれ以上であったが、高炉セメント C 種配合では BC-G30 と BC-G60 は若干小さく、BC-P15 と BC-P30 は同等であった。コントロールに対する圧縮強度比の最小値は材齢 28 日の BC-G60 で 95%であった。このことから 60kg/m³までのバイオ炭混和であれば、粒状、粉状に関わらず、圧縮強度は無混和の場合と同等であることが確認された。

3.2.5 乾燥収縮

図-9 に乾燥収縮による長さ変化率を示す。高炉セメント B 種配合ではバイオ炭の種類および混和量に関わらず、コントロールと同等であった。高炉セメント C 種配合では BC-P15 がコントロールより若干大きく、材齢 364 日で 6%上回った。反対に BC-G60 はコントロールより若干小さく、材齢 364 日で 3%下回った。総じてコントロールと同等であることが確認された。B 種配合より C 種配合の長さ変化率が小さいのは W/C が低いためであると考えられる。

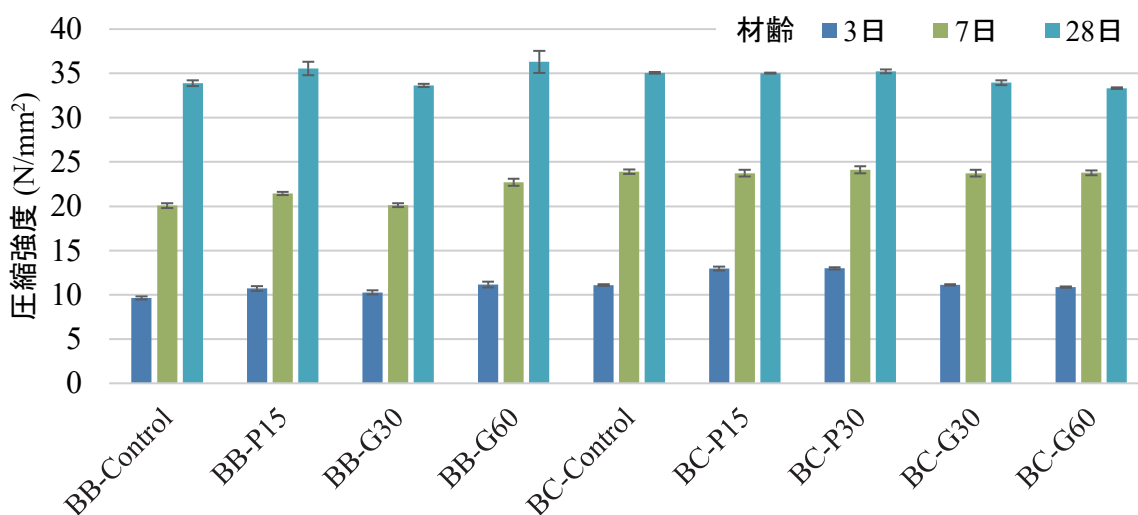


図-8 圧縮強度

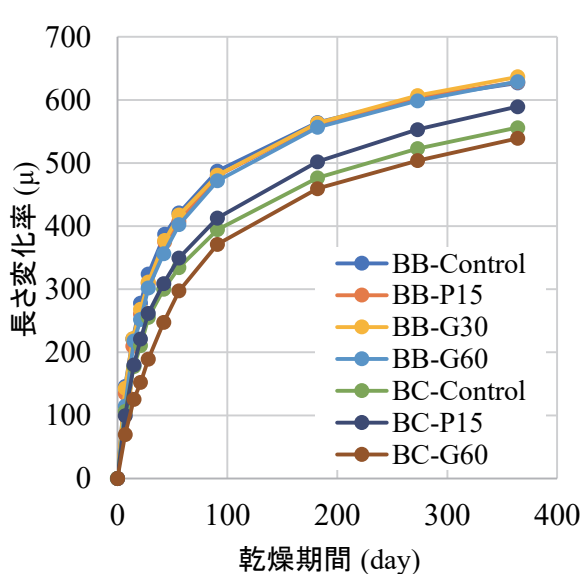


図-9 乾燥収縮

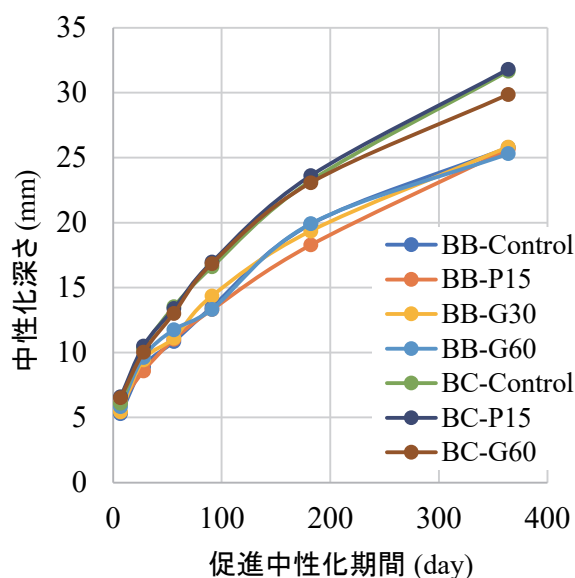


図-10 促進中性化

3.2.6 促進中性化

図-10 に促進中性化試験で測定された中性化深さを示す。高炉セメント B および C 種配合いずれもコントロールと同等であることが確認された。B 種配合より C 種の中性化深さが小さいのは W/C が低いためであると考えられる。

4. 現場適用による実用性実証

4.1 CO₂削減効果

2022年10月に新東名高速道路川西工事(発注者：中日本高速道路株式会社)における場内工事用道路の仮舗装コンクリートに SUSMICS-C を適用した。適用したのは、高炉セメント B 種配合にバイオ炭を 60kg/m³混和した配合である。図-11 に、本現場で普段、舗装に用いている普通コンクリート配合(通常配合)、バイオ炭を細骨材置換で混和する元とした高炉セメント B 種配合(BB ベース)、適用した SUSMICS-C の CO₂ 排出量を示す。なお、バイオ炭の CO₂ 排出原単位は、適用時に混和した約 2.1ton のバイオ炭から抽出した 3 サンプルの炭素含有率平均から -2.27kg-CO₂/kg と算出した。適用した SUSMICS-C の CO₂ 排出量は、セメントの低炭素化およびバイオ炭の CO₂ 固定により、通常配合の 199kg-CO₂/m³ から 96%削減の 7kg-CO₂/m³ まで抑制された。通常配合と BB ベースの差分 56kg-CO₂/m³ が高炉セメント

B 種による低炭素化の効果で、BB ベースと SUSMICS-C の差分 136kg-CO₂/m³ がバイオ炭による CO₂ 固定の効果である。打設数量は 34.5m³ であるため、CO₂ 削減量は(199-7)kg-CO₂/m³×34.5m³=約 6.62ton-CO₂ となった。

4.2 コンクリートの品質

適用した SUSMICS-C の品質目標値は、土木分野で汎用的な設計基準強度の配合で施工性などを実証するために、スランプ 12cm、圧縮強度 24N/mm² と

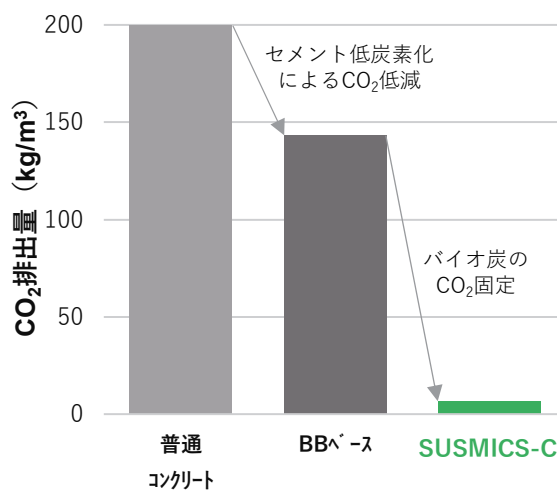


図-11 CO₂ 排出量の比較



図-12 仮舗装コンクリートへの適用

した。図-12に適用時の状況を示す。現場から距離7kmに位置する生コンプラントで製造したSUSMICS-Cをアジテーター車で運搬し、適用箇所にホッパーとバックホーを使用して打設した。一般的なコンクリート同様、バイブレーターを用いた振動による締固めを行った後、レーキやコテで表面を均して仕上げた。ワーカビリティは良好で、打設作業は全体を通して滞りなく完了した。適用箇所は供用後、1日あたり10tonダンプ300台、40tonダンプ30台が通行し、約3年間供用しながら耐久性を確認する予定である。

フレッシュ性状の変動を確認するため、バイオ炭を運搬した全9台のアジテーター車のうち1・4・8台目について生コンプラントで練上がり直後にフレッシュ試験を実施した。1台目については現場での荷降し時に受入れ試験を実施した。これらのフレッシュ性状試験の結果を表-6に示す。試験した3台ともフレッシュ性状は安定しており、目標範囲内であった。打設の際のワーカビリティも全体を通して安定していたことから、SUSMICS-Cのフレッシュ性状の安定性を確認することができた。

圧縮強度を確認するために、1台目のアジテーター車から円柱供試体(φ100×200)とコア抜き用ブロック(W1000×B1000×H500)を採取した。円柱供試体はJIS A 1132に準拠し、鋼製モールドを用いて作製し、標準水中養生した。コア抜き用ブロックは、木型枠にバイブレーターを用いて打設することで作製し、適用箇所付近の屋外ヤードに置くことで、打設した舗装コンクリートに近い養生環境になるようにした。コア供試体を材齢3週時点でコア抜き用ブロックから採取した。材齢4週で圧縮強度試験を実施したところ、モールド供試体は36N/mm²、コア供試体は34N/mm²の強度発現をしており、目標値の24N/mm²を上回ることが確認された。また、モールド供試体とコア供試体で大きな差異はないことが確認された。

表-6 現場適用時のフレッシュ性状

試験項目	1台目 練上り	1台目 荷降し	4台目 練上り	8台目 練上り
スランプ (cm)	14.0	10.5	12.0	12.0
空気量 (%)	5.5	4.5	6.0	5.5
温度 (°C)	20	20	20	20

5. まとめ

バイオ炭を用いて炭素を貯留する環境配慮型コンクリート「SUSMICS-C」について以下の事項を確認した。

- 1) CO₂固定量をIPCCのガイドラインに基づき算出し、実用的なカーボンネガティブ配合を実現できることを確認した。
- 2) 各種基礎物性試験を実施し、バイオ炭無混和の配合と同等のフレッシュ性状、圧縮強度、耐久性(乾燥収縮、中性化)、を有することを確認した。
- 3) 実用性実証のために建設現場の仮舗装コンクリートに適用し、施工性と圧縮強度が要求性能を満足することを確認した。

<参考文献>

- 1) 国生コンクリート工業組合連合会/全国生コンクリート協同組合連合会 HP より全国生コンクリート出荷実績(月次)参照：<https://www.zennama.or.jp/3-toukei/nenji/index.html>(閲覧日：2023年10月26日)
- 2) 環境省 HP より 2018~20年度の温室効果ガス排出量(確報値)について参照：<https://www.env.go.jp/press/107914.html> 他(閲覧日：2023年10月26日)
- 3) 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大会 2023, Vol.45, No.1, pp.1222-1227, 2023.7
- 4) 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, 令和5年度土木学会全国大会, V-782, 2023.9
- 5) 中谷 篤人, 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現場適用, 令和5年度土木学会全国大会, V-30, 2023.9
- 6) 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10月26日)
- 7) 東京都水道局 HP より：<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>(閲覧日：2023年10月26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