

◇報 告◇

カーボフィクス[®]セメントを使用した流込み
コンクリート製品の現場への適用事例Application Case of Poured Concrete Products Using
CARBOFIX[®] Cement深 谷 竣 平*, 落 合 昂 雄**,
石 田 征 男***FUKATANI, Shumpei*; OCHIAI, Takao**;
ISHIDA, Masao***

要 旨

コンクリート分野における CO₂ 削減対策の一つとして開発されたカーボフィクス[®]セメントの流込みコンクリート製品への適用性を検討するとともに、実際の製品工場で流込みコンクリート製品を製造し、実施工に適用した。その結果、製品に求められる性能を十分に満足し、製造した製品は実物件に採用された。また、カーボフィクス[®]セメントを使用したコンクリート製品を施工したことで、OPC を使用した場合と比較して CO₂ 排出量を約 43kg/m³-con. 削減できることを確認した。

キーワード: カーボフィクス[®]セメント, 境界ブロック, 炭酸化養生, CO₂固定量

* 研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 コンクリートソリューショングループ
Concrete Solution Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research and Development Division

** 研究開発本部 新規技術研究所 建設マテリアルグループ
Construction Materials Group, New Technology Research Laboratory, Research & Development Division

*** 研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 コンクリートソリューショングループ リーダー
Manager, Concrete Solution Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

ABSTRACT

To achieve carbon neutrality, efforts are being made to reduce greenhouse gas emissions. Our company has developed CARBOFIX[®] cement, which has a low CO₂ emission during manufacturing and reacts with CO₂ during curing to enhance strength. We are currently considering its practical application in concrete products. To apply CARBOFIX[®] cement to pour-in concrete products, we manufactured actual products at our production facility and evaluated various properties. The manufactured products fully satisfied the required performance and were adopted in real projects. Furthermore, it was demonstrated that the concrete products using CARBOFIX[®] cement could reduce CO₂ emissions by approximately 43 kg/m³-concrete, compared to those using ordinary Portland cement (OPC). These efforts contribute to the realization of carbon neutrality by reducing greenhouse gas emissions. We will continue to research, develop, and work towards practical implementation to achieve a sustainable society.

Keywords : CARBOFIX[®] cement, Boundary block, Carbonation curing,
Amount of CO₂ fixed

1. はじめに

地球温暖化の原因は二酸化炭素 (CO₂) やメタン、代替フロンなどの温室効果ガスといわれており、このうち最も多くを占める CO₂ の排出量削減に向けた取組みが世界中の各産業分野で行われている。我が国では 2020 年 10 月の政府によるカーボンニュートラル宣言¹⁾以降、CO₂排出量削減に向けた動きが本格化している。

コンクリート分野における CO₂ 排出量削減対策の一つとして、CO₂を吸収・固定することで、製造による CO₂ 排出量を実質的にマイナスにすることができるコンクリートが開発され、普及拡大に向けた取組みが推進されている²⁾。この技術は、 γ -C₂S を主要鉱物とする混和材を用いることで CO₂ と反応して硬化することを特長としており、従来のコンクリートと比較してセメントの使用量を削減可能であることに加え、硬化時に CO₂を固定化することで、CO₂を大幅に削減できるとしている。

セメント産業では、年間約 3300 万 t の CO₂ を排出していることが知られている³⁾。他方、セメント産業は、その製造工程において大量の廃棄物を原料、燃料としてリサイクルしており、循環型社会の構築に大きく貢献している⁴⁾。このような中、CO₂排出量の削減と廃棄物活用を両立すべく、CO₂を吸収し、硬化するセメントである「カーボフィクス[®]セメント」を開発した⁵⁾。カーボフィクス[®]セメントは、普通ポ

ルトランドセメント (OPC) と同様の鉱物で構成され、 β -C₂S を主要鉱物としている。また、OPC よりも CaO 含有率が低いこと、低温でクリンカを焼成できることから製造時の CO₂ 排出量が少ない。さらに、炭酸養生により CO₂を吸収させることで、大幅な CO₂ 排出量削減を実現することが可能である。これまでに、カーボフィクス[®]セメントを即脱製品であるインターロッキングブロックに適用した実績があり、炭酸養生を行ったインターロッキングブロックは、曲げ強度が JIS の規定値を満足するとともに、CO₂ 排出量削減に貢献することを確認している⁶⁾。今後の CO₂ 排出量の削減においては、カーボフィクス[®]セメントを幅広く展開していくことが有効であり、そのためには即脱製品だけでなく、より市場規模が大きい流込みコンクリート製品への適用が必要となる。しかし、カーボフィクス[®]セメントを流込み製品に適用するにあたっては、即脱製品と比較して脱型までの時間を要すること、組織が緻密なため炭酸化の進行が遅いことが懸念事項として挙げられる。

本稿では、カーボフィクス[®]セメントの流込みコンクリート製品への適用性を検討するとともに、実際の製品工場で流込みコンクリート製品を製造し、実施工に採用した事例について報告する。

2. 流込みコンクリート製品向け コンクリートの基本性状

2.1 試験概要

カーボフィクス®セメントを流込み製品に適用するにあたり，コンクリートの基本性状を把握する目的で室内試験を実施した．室内試験における使用材料を **Table 1** に示す．セメントはカーボフィクス®セメントを使用した．カーボフィクス®セメントの密度およびブレン比表面積は OPC と同等である．細骨材は千葉県君津市産の山砂を，粗骨材は茨城県笠間市産の砕石 2005 を使用した．また，化学混和剤として，ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した．

して，スランブは 10 ± 2.5 cm，空気量は 2.0 ± 1.0 %とし，所定のスランブを得るために SP の添加量を調整した．

供試体は，軽量型枠（型枠内寸： $\phi 100 \times 200$ mm）を用いて JIS A 1115 および JIS A 1132 に準拠して作製した．供試体の締固めは，突き棒を用いて行った．型枠内に打ち込んだコンクリートは，蒸気養生後に脱型し，炭酸化養生を実施した．**Fig. 1** に蒸気養生の条件を示す．蒸気養生は， 20°C で 4 時間前養生を行った後に，昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ で最高温度 65°C まで上昇させ，最高温度を 4 時間保持した．その後，降温速度 $4.5^\circ\text{C}/\text{h}$ で 20°C まで降下させ，材齢 24 時間で脱型した．炭酸化養生は， 30°C ，60%RH， CO_2 濃度 80%に管理された炭酸化養生槽（**Fig. 2**）で脱型直

Table 1 Material in laboratory tests（室内試験における使用材料）

Material	Symbol	Characteristics
Water	W	Tap water
Cement	C	CARBOFIX® cement Specific surface area: $3300\text{cm}^2/\text{g}$, Density: $3.16\text{cm}^3/\text{g}$
Fine aggregate	S	Mountain sand Density in saturated surface-dry condition: 2.62 g/cm^3 Fineness modulus: 2.60
Coarse aggregate	G	Crushed stone; Size 20mm-5mm Density in saturated surface-dry condition: 2.67 g/cm^3
Chemical admixture	SP	Poly carboxylic acid-based high-performance water reducing agent

コンクリートの配合を **Table 2** に示す．コンクリートの水セメント比（以下，W/C）は，44%および 50%の 2 水準とした．W/C44%は，コンクリート製品を製造予定の平野コンクリート工業株式会社（千葉県市原市）において実際に運用されている配合である．W/C50%は，カーボフィクス®セメントを使用したコンクリートの CO_2 吸収効果は W/C 大きいほど大きくなるとされている⁷⁾ことから，従来よりも W/C が大きい配合として設定した．単位水量は W/C によらず $162\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とした．フレッシュ性状の目標値と

Table 2 Mix proportion of concrete in laboratory tests（室内試験におけるコンクリートの配合）

Name	Conditions		Unit amount (kg/m^3)				
	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	SP
W/C44	44	38	162	368	698	1161	3.68
W/C50	50	40	162	324	772	1123	3.24

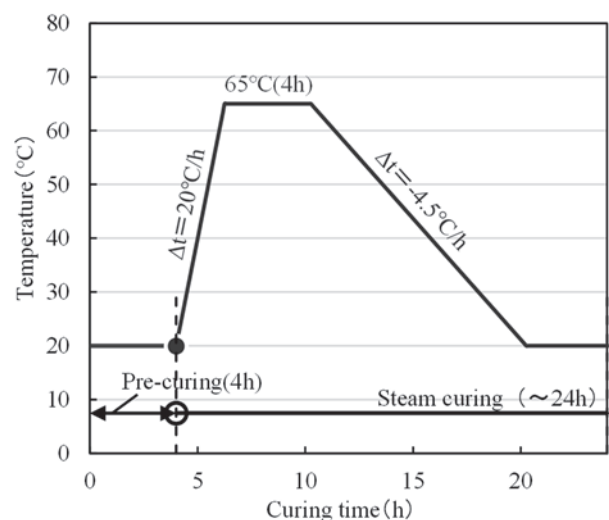


Fig.1 Steam curing conditions（蒸気養生条件）



Fig.2 Carbonation curing chamber
(炭酸化養生槽)

後より行い，炭酸化養生期間は1，2，3，6および13日間とした．炭酸化養生終了後は，コンクリート製品工場の出荷材齢である材齢14日まで20℃，60%RHの恒温恒湿室で気中養生を行った．

試験項目は，圧縮強度（JIS A 1108），炭酸化養生後の中性化深さ（JIS A 1152）およびCO₂固定量（全炭素分析）とした．コンクリートの中性化深さは，圧縮強度試験後の円柱供試体を使用した．供試体の切断面が円形断面に垂直となるようコンクリートカッターで切断した後，100×200mmの断面に対し1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し，200mm辺において，供試体表面から呈色域までの深さを左右10点ずつ等間隔に測定し，計20点の平均値を算出した．CO₂固定量の測定は，既往の報告⁸⁾を参考に，コンクリート円柱供試体を全粉砕し，必要量まで縮分した試料について全炭素分析（TC分析）により炭素量測定した．

2.2 試験結果

Fig.3 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す．蒸気養生直後の圧縮強度は，W/C44 が13.6N/mm²，W/C50 が9.15N/mm²であった．炭酸化養生による強度増進量は，炭酸化養生期間が長いほど大きくなった．また，W/C44 では炭酸化養生期間3日，W/C50 では炭酸化養生期間6日で設計基準強度を満足する結果となった．炭酸化養生後に行った気中養生期間においても，水和反応により強度が増進することが確認された．

Fig.4 に炭酸化養生を行ったコンクリートの中性化深さを示す．中性化深さは炭酸化養生期間が長い

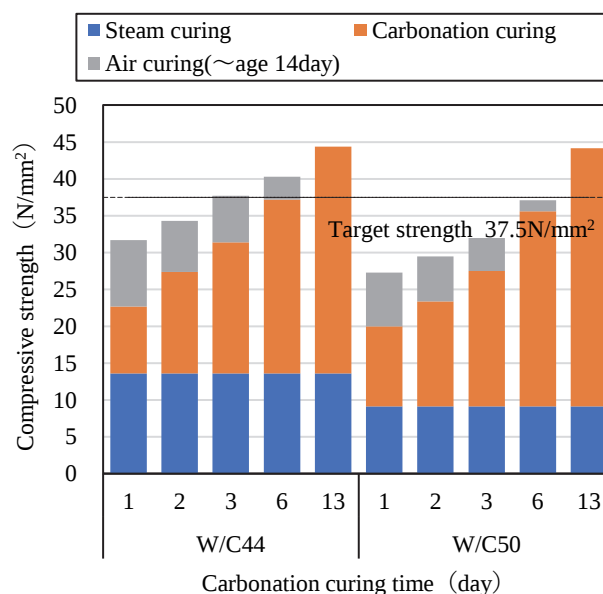


Fig.3 Compressive strength in laboratory tests
(室内試験における圧縮強度)

ほど大きくなることを確認した．炭酸化養生13日における中性化深さは，W/C44 が14.9mm，W/C50 が27.2mmであり，W/C50の方が中性化速度は速く，同一炭酸化養生期間におけるW/C44の場合の1.6～1.9倍程度であった．

Fig.5 に炭酸化養生を行ったコンクリートのCO₂固定量を示す．いずれの配合においても炭酸化養生期間が長いほどCO₂固定量が多くなることを確認し

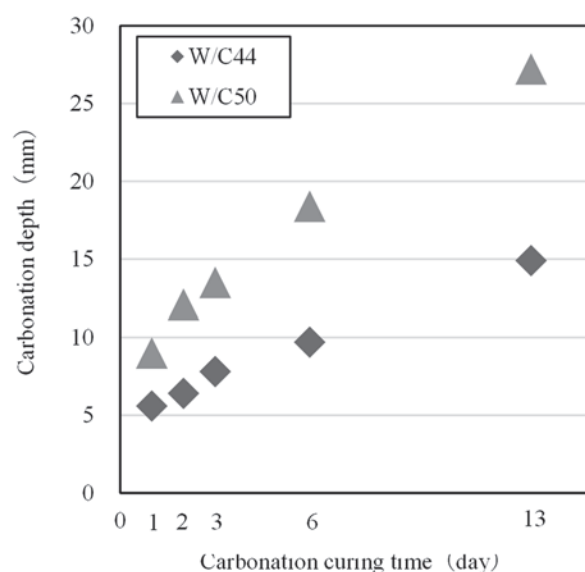


Fig.4 Carbonation depth in laboratory tests
(室内試験における中性化深さ)

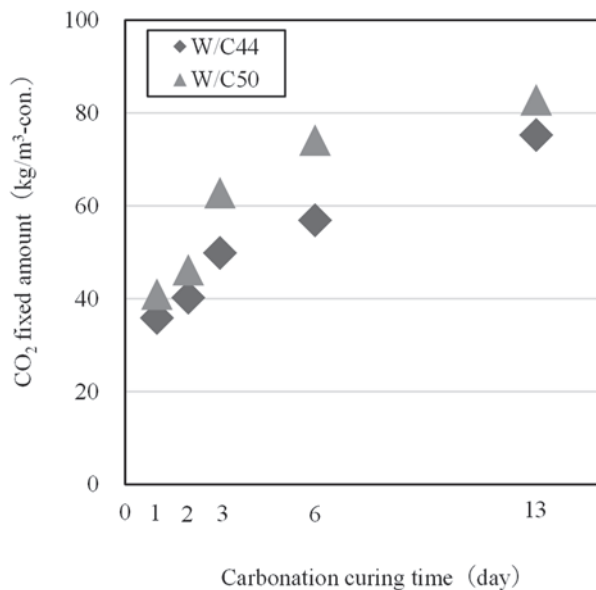


Fig.5 CO₂ fixed amount in laboratory tests
(室内試験におけるCO₂固定量)

た．炭酸化養生期間 13 日での CO₂ 固定量は，W/C44 が 75kg/m³-con.，W/C50 が 83kg/m³-con. であった．以上の結果より，カーボフィクス®セメントは，配合を調整することで，流込みコンクリート製品に十分に適用可能であることを確認した．また，本検討の結果より，工場におけるコンクリート製品の製造は，蒸気養生後の脱型強度および炭酸化養生による強度発現性が良好であった W/C44%の配合を採用して行うこととした．

3. 実機製造試験

3.1 試験概要

実機製造試験は，千葉県市原市の平野コンクリート工業株式会社にて実施した．

3.1.1 配合および供試体作製方法

Table 3 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状を示す．コンクリート配合は，室内試験の結果より，W/C を 44%，単位水量を 162kg/m³とした．コンクリートの練混ぜは，**Fig. 6** に示す傾胴ミキサに

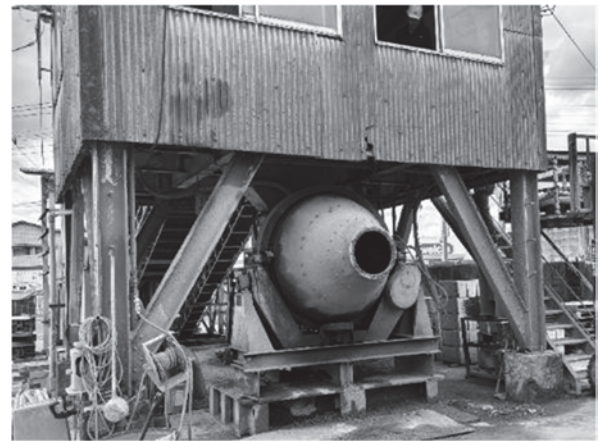


Fig.6 tilting mixer
(傾胴ミキサ)

より行った．練混ぜ終了後のコンクリートは，強度試験用供試体（φ100×200mm）および境界ブロック（120×120×600mm）の型枠に打ち込んだ．

3.1.2 養生条件

Fig. 7 に養生条件を示す．コンクリート打込み後の供試体および境界ブロックは，**Fig. 8** に示す条件で蒸気養生を行った後に材齢 24 時間で脱型を行った．脱型後は，30℃，60%RH，CO₂ 濃度 80%の環境下で 3，6，13 日間炭酸化養生を行った．炭酸化養生を行う水準では，炭酸化養生後，材齢 14 日まで気中養生を行った．炭酸化養生後の境界ブロックを **Fig. 9** に示す．

3.1.3 試験項目

試験項目として，φ100×200mm の供試体において圧縮強度（JIS A 1108）を，境界ブロックにおいて曲げひび割れ耐力（JIS A 5371），炭酸化養生後の中性化深さ（JIS A 1152）および CO₂ 固定量（全炭素分析）を実施した．圧縮強度および曲げひび割れ耐力は，蒸気養生，炭酸化養生および気中養生の各養生終了時において測定した．中性化深さおよび CO₂ 固定量は，3，6，13 日間の炭酸化養生終了後に実施した．中性化深さは，曲げひび割れ耐力測定後の切片を用い，1%フェノールフタレイン溶液により **Fig. 10**

Table 3 Mix proportion and fresh properties of concrete
(コンクリートの配合およびフレッシュ性状)

Conditions		Unit amount (kg/m ³)					Fresh properties		
W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	SP	Slump (cm)	Air content (%)	Temperature (°C)
44	38	162	368	697	1161	1.84	9.5	0.7	25

に示す方法で測定した. CO_2 固定量の測定は, **Fig. 10** を全炭素分析 (TC) により測定した.
 中 1. の赤色部分より代表試料を採取し, コンクリート単位容積あたりの CO_2 固定量 (単位: $\text{kg}/\text{m}^3\text{-con.}$)

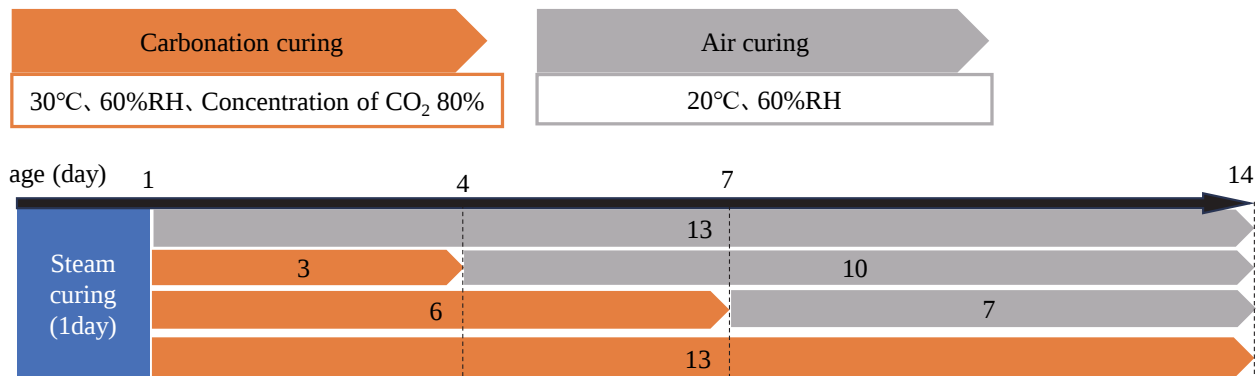


Fig.7 Curing conditions
(養生条件)

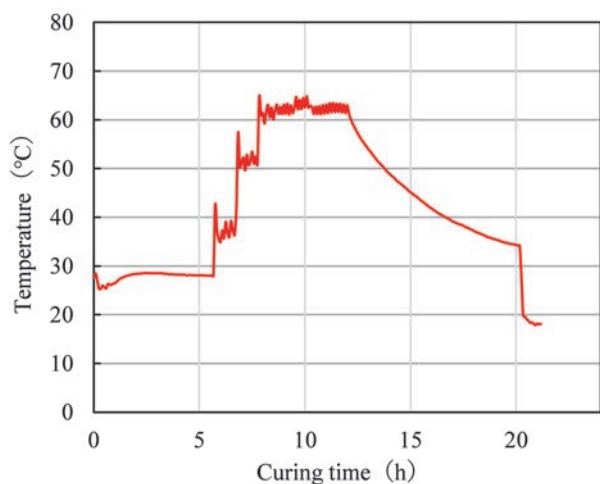


Fig.8 Steam curing conditions
(蒸気養生条件)



Fig.9 Boundary block
(境界ブロック)

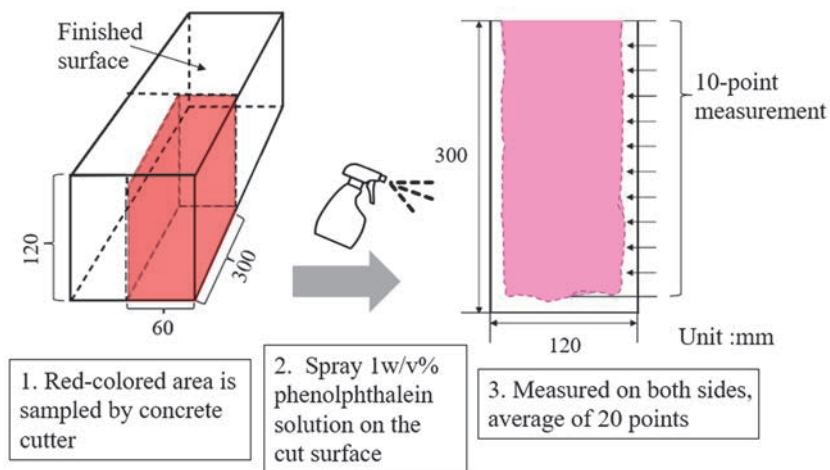


Fig.10 Method of measuring carbonation depth
(中性化深さの測定方法)

3.2 試験結果

Fig. 11 に圧縮強度試験結果を示す。本試験の結果より、炭酸化養生期間が長いほど圧縮強度が増加し、炭酸化養生期間を6日以上とすることで配合強度 37.5N/mm^2 を上回ることを確認した。また、炭酸化養生期間が短い場合においても、気中養生を行うことで一定の強度増進は見込まれることを確認した。これらの結果より、カーボフィクス®セメントを用いて実機設備で製造したコンクリートは、炭酸化養生を適切な期間行うことで、従来と同等の力学性能が

得られることを確認した。

Fig. 12 に境界ブロックの曲げひび割れ耐力試験の結果を示す。本検討では、材齢14日における曲げひび割れ耐力は、炭酸化養生を実施しない水準においても、境界ブロックにおける曲げひび割れ耐力のJIS規定値 $0.84\text{kN}\cdot\text{m}$ (図中破線) を満足した。また、炭酸化養生期間が長いほど材齢14日における曲げひび割れ耐力は増加しており、その増加量は、養生期間が長いほど大きい結果となった。

Fig. 13 および Fig. 14 に中性化深さおよび CO_2 固

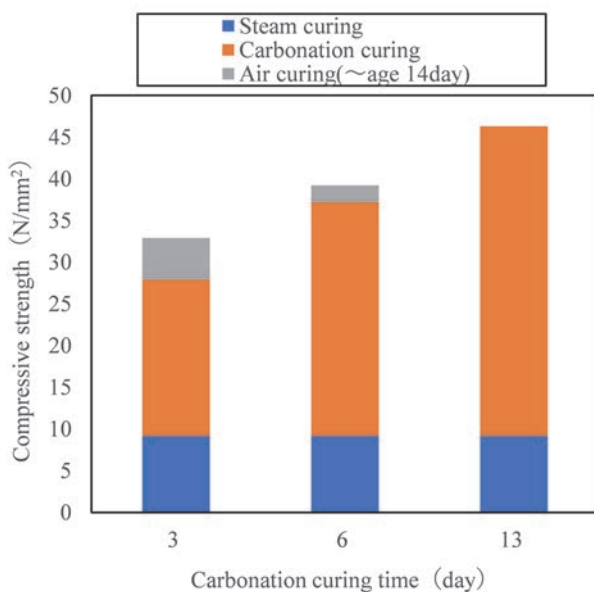


Fig.11 Compressive strength
(圧縮強度試験)

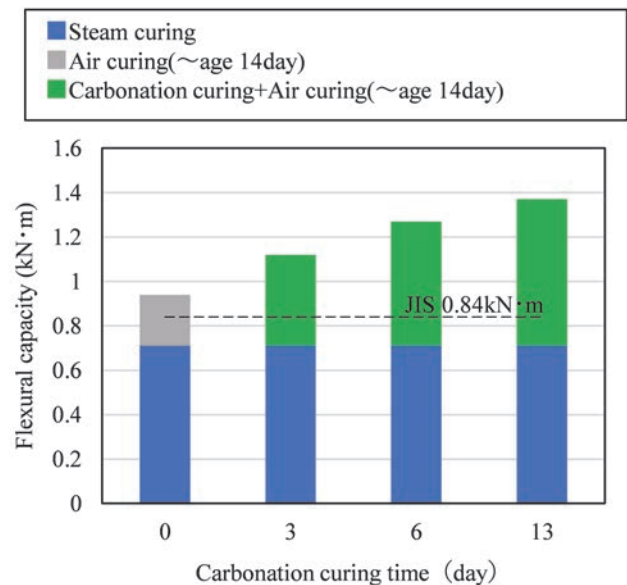


Fig.12 Flexural capacity
(曲げひび割れ耐力)

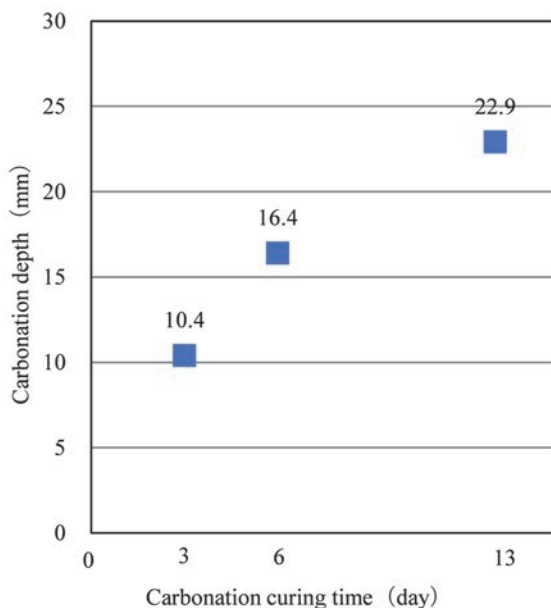


Fig.13 Carbonation depth
(中性化深さ)

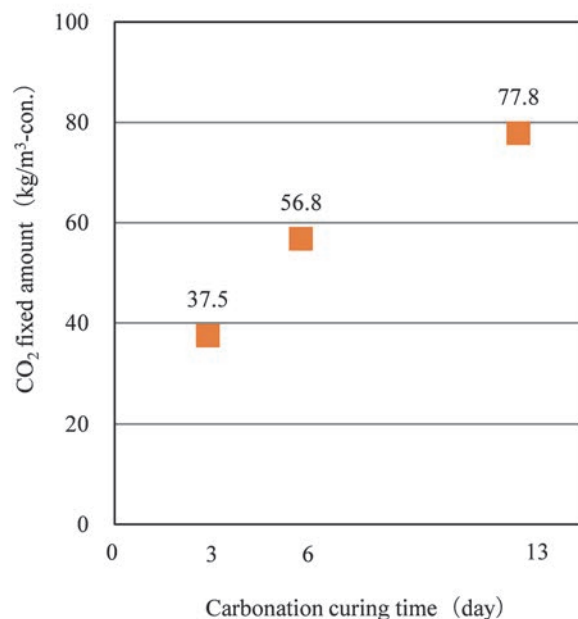


Fig.14 CO2 fixed amount
(CO2 固定量)

定量の経時変化をそれぞれ示す。中性化深さおよび CO_2 固定量は、炭酸化期間が長いほど増加し、炭酸化養生期間 13 日では $77.8\text{kg}/\text{m}^3\text{-con.}$ であり、カーボフィクス®セメント製造時における CO_2 削減量と併せると、OPC に対して、約 $100\text{kg}/\text{m}^3\text{-con.}$ の CO_2 排出量削減が見込まれることを確認した。

以上の結果より、カーボフィクス®セメントは、従来の実機設備において、配合を修正せず使用可能であることに加え、製品に求められる性能を十分に満足することを確認した。また、OPC を使用する場合

と比較し、大幅な CO_2 排出量削減が可能であることを確認した。

4. 製品の現場への適用および CO_2 削減量

実機製造した境界ブロックにおいて、埼玉県深谷市幼稚園・こども館の駐車場に施工を実施した。

Fig. 15 に施工場所を、**Fig. 16** に施工図面と範囲を示す。施工に用いた境界ブロックは、炭酸化養生を 13 日間行ったものとし、図中赤線部に施工を行った。



Fig.15 Construction location

Fukaya Kindergarten and Children's Center 19-2 Naka-cho, Fukaya-city, Saitama-prefecture

(施工場所 深谷市幼稚園・こども館複合施設 埼玉県深谷市仲町 19-2)

出典：国土地理院（地理院地図をもとに施工場所を記載）⁹⁾

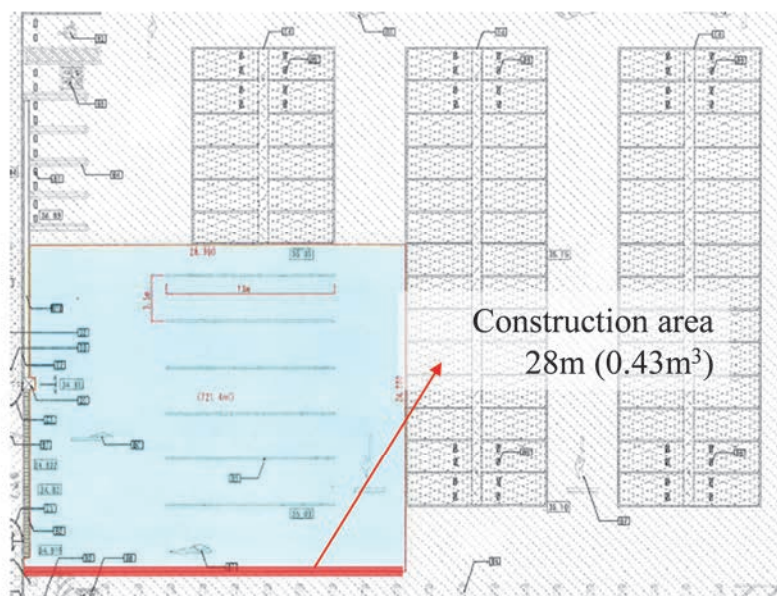


Fig.16 Construction area
(施工図面と範囲)

施工後の現場の様子を **Fig. 17** に示す。 **Table 4** に本施工における CO₂ 削減量を示す。今回、カーボフィクス[®]セメントを使用し、炭酸化養生を実施した境界ブロックを施工した箇所においては、OPCを使用した場合と比較して、約 43kg (約 38%) の CO₂ 排出量を削減することができた。



Fig.17 After construction
(施工後の様子)

5. ま と め

本稿では、カーボフィクス[®]セメントの流込みコンクリート製品への適用性検討として、製品工場の実機設備にてカーボフィクス[®]セメントを使用した境界ブロックを作製し、実施工に適用した。得られた結果をまとめる。

- 1) カーボフィクス[®]セメントは、従来の実機設備において、配合を修正せずに使用可能であることを確認した。
- 2) カーボフィクス[®]セメントにおいて、従来と同一の配合で、流込みコンクリート製品に十分に適用可能であることを確認した。
- 3) 炭酸化養生期間が長いほど圧縮強度は増加し、炭酸化養生後に気中養生を行った場合においてもセメントの水和反応により強度が増進することを確認した。
- 4) 炭酸化養生期間が長いほど境界ブロックの曲げひび割れ耐力は増加し、炭酸化養生期間を3日以上とすることで、JIS 規定値 0.84 kN・m を満足した。
- 5) 境界ブロックの中性化深さおよび CO₂ 固定量は、炭酸化期間が長いほど増加した。
- 6) 炭酸化養生を 13 日間行った境界ブロックにおける CO₂ 固定量は、77.8kg/m³ であり、この境界ブロックを適用した現場における CO₂ 排出量は、OPCを使用した場合と比較して、約 43kg (約 38%) 削減することができた。

「カーボフィクス」、「CARBOFIX」は、太平洋セメント株式会社の登録商標です。

Table 4 Evaluation of CO₂ reduction by using CARBOFIX[®] cement
(カーボフィクス[®]セメント使用による CO₂ 削減量の評価)

	OPC	CARBOFIX [®] cement	CO ₂ reduction
Concrete CO ₂ emissions calculated from cement CO ₂ emissions (kg/m ³) ¹⁰⁾	263.1	162.6	100.5
Construction volume (m ³)	0.43		—
CO ₂ emissions at construction site (kg)	113.1	69.9	43.2

参 考 文 献

- 1) 経済産業省. 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. 2021.
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf, (accessed 2025-05-21).
- 2) 取違 剛, 森 泰一郎, 河内友一ほか. CO₂固定型カーボンネガティブコンクリート CO₂-SUICOM の開発と今後の展開. セメント・コンクリート. 2022, (900), p. 64-69.
- 3) セメント協会. セメント産業の現状と排出量取引の影響. 2024
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/carbon_pricing_wg/dai2/siryou2.pdf, (accessed 2025-05-21).
- 4) セメント協会. 循環型社会構築に向けた取り組み ; 廃棄物・副産物の有効利用.
<https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html>, (accessed 2025-05-21).
- 5) 橋本真幸, 小林和揮, 扇 嘉史ほか.
 CO₂ 吸収・硬化セメント「カーボフィクス®セメント」の開発. セメント・コンクリート. 2022, (906), p. 10-16.
- 6) 小林和揮, 馬場智矢, 橋本真幸ほか. 低炭素型セメントを用いた炭酸化養生コンクリートの硬化性状と CO₂ 低減効果. 無機マテリアル学会学術講演会講演要旨集. 2021, 143, p. 58-59.
- 7) 茨木泰介, 橋本真幸, 石田征男ほか. β -C₂S を主要鉱物とした CO₂ 吸収・硬化セメント系材料を用いたコンクリートの力学特性および炭酸化性状. コンクリート年次論文集. 2024, 46, e1044.
- 8) 扇 嘉史, 小林和揮, 橋本真幸ほか.
 CO₂ 吸収・硬化セメント「カーボフィクス®セメント」の強度発現および CO₂ 固定化. 太平洋セメント研究報告. 2022, (183), p. 43-54.
- 9) 国土地理院. 地理院地図 (電子国土 WEB) .
<https://maps.gsi.go.jp/#18/36.200515/139.286470/&base=std&ls=std&disp=1&vs=clglj0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m>, (accessed 2025-07-15).
- 10) セメント協会. セメントの LCI データの概要. 2023.