

◇報 告◇

カーボフィクス[®]セメントを使用したスプリットンブロックの
製造ならびに道路法面の補強工事への適用Manufacture of Splitton Blocks Using CARBOFIX[®]
Cement and Application to Road Slope Reinforcement Work落合 昂 雄*, 深谷 竣 平*, 橋本 真 幸**,
石田 征 男***, 小山 航****, 横山 勝 典*****OCHIAI, Takao*; FUKATANI, Shumpei*; HASHIMOTO, Masayuki**;
ISHIDA, Masao***; KOYAMA, Wataru****; YOKOYAMA, Katsunori*****

要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、世界中の各産業分野で CO₂ 削減の取り組みが加速している。当社では製造時の CO₂ 排出量が少なく、養生時に CO₂ と化学反応して硬化する「カーボフィクス[®]セメント」を開発した。本稿では、カーボフィクスセメントを使用してコンクリート製品工場の実機設備で即時脱型製品であるスプリットンブロックを製造し、適用性を検討した。その結果、従来のスプリットンブロックの製造工程に加え、割裂後に簡易炭酸化養生設備を用いた炭酸化養生を行うことにより、設計基準強度 18N/mm² 以上の強度を確保し、スプリットンブロックに CO₂ を約 40kg/m³ 固定化できることを確認した。また、カーボフィクスセメントを使用して製造したスプリットンブロックは、道路法面の補強工事の一部に適用され、2024 年 6 月より供用されている。

キーワード：カーボフィクスセメント，スプリットンブロック，簡易炭酸化養生設備，
法面補強，CO₂ 固定量

* 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 コンクリートソリューションチーム

Concrete Solution Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

** 知的財産部 企画管理グループ リーダー

Manager, IP Strategy and Administration Group, Intellectual Property Department

*** 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 コンクリートソリューションチーム リーダー

Manager, Concrete Solution Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

**** スプリットン工業会

Splitton Industrial Association

***** 白馬村役場

Hakuba Village Office

ABSTRACT

Efforts to reduce CO₂ emissions have been accelerated in various industries around the world in order to achieve a decarbonized society. Our company has developed CARBOFIX[®] cement which has low CO₂ emissions during manufacturing and hardens through a chemical reaction with CO₂ during curing. In this paper, we manufactured splitton blocks, which were immediate demolding products, using CARBOFIX cement at a precast concrete factory, and examined their applicability. The results showed that by performing carbonation curing using a portable carbonation curing equipment after splitting, in addition to the conventional manufacturing process of splitton blocks, it was possible to fix approximately 40 kg/m³ CO₂ in the splitton blocks while ensuring a strength of 18 N/mm², the standard design strength, or higher. Furthermore, splitton blocks manufactured using CARBOFIX cement were used on road slopes as part of reinforcement work and have been in service since June 2024.

Keywords : *CARBOFIX cement, Splitton block, Portable carbonation curing equipment, Slope reinforcement, Amount of fixed CO₂*

1. はじめに

地球温暖化の原因に挙げられる二酸化炭素 (CO₂) の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。国内では、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、各産業分野における CO₂ 排出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 の排出削減対策の一つとして、高濃度の CO₂ 環境で養生を行うこと (以下炭酸化養生) により、コンクリートに CO₂ を固定化させるカーボンネガティブコンクリートが開発されており²⁾、コンクリート製品を中心に実用化が進んでいる。この技術は、CO₂ と反応して硬化する混和材を使用することを特長としており、CO₂ を大幅に削減できるとしている。

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³⁾。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⁴⁾。このセメントは、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 含有率が低く、低温でクリンカを焼成できるため、製造時の CO₂ 排出量が少ない。さらに、炭酸化養生により CO₂ を吸収させることで、大幅な CO₂ 削減

を実現することが可能である。

本稿では、カーボフィクスセメントを使用したコンクリート製品が公共工事に初めて採用された事例として、道路法面の補強工事への対応について報告する。

2. 村道法面補強工事の概要

施工現場は、長野県北安曇郡白馬村の村道における法面である。この村道は山腹斜面に建設されており、2023 年 9 月の豪雨により谷側の村道法面表層の一部が崩落した。

村道法面の被災箇所における復旧工事の概要を Fig. 1 に示す。今回の復旧工事では、崩落が発生した村道下側斜面の補強を目的としており、積みブロックの一種であるスプリットブロック (以下、SP ブロック) を使用した法面保護 (施工規模: 幅 6.4m, 高さ 4.8m, 面積約 30m²) が実施された。工事では、下部に設置された OPC を使用した SP ブロックの上部約 1.7m にカーボフィクスセメントを使用した SP ブロックを約 110 個設置した。

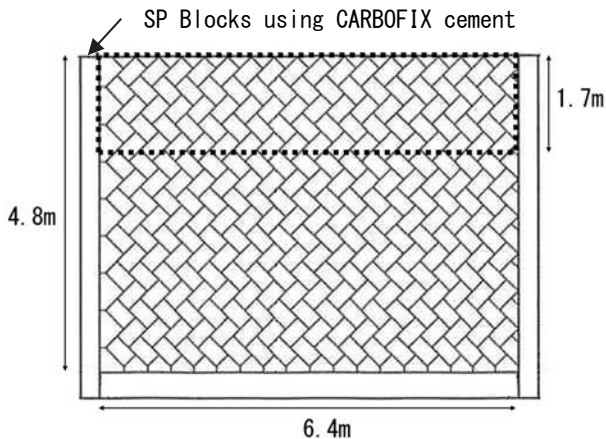


Fig.1 Installation position of SP blocks using CARBOFIX cement
(カーボフィクスセメントを使用したブロックの設置位置)

3. カーボフィクスセメントを用いた超硬練りコンクリートの基本性状

3.1 検討の目的

SPブロックは、即脱製品であり、コンクリートには超硬練りコンクリートが使用される。そこで、カーボフィクスセメントを使用した超硬練りコンクリートの配合選定や炭酸化養生後の強度発現性等の事前確認を目的として、室内試験を行った。

3.2 試験概要

(1) 使用材料およびコンクリート配合

室内試験で使用したコンクリートの材料を Table 1 に示す。セメントにはカーボフィクスセメントを用

いた。細骨材、粗骨材および混和剤は、製品工場で使用されているものと同一とした。カーボフィクスセメントの密度は 3.16g/cm^3 、比表面積は $3300\text{cm}^2/\text{g}$ であり、OPC と同程度である。

コンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 、粗骨材の最大寸法は 10mm とした。なお、水セメント比は、OPC を使用した SP ブロックと同様に 32% とした。

(2) 供試体作製および試験方法

コンクリートの練混ぜにはアイリッヒ型ミキサを使用した。供試体は、寸法を $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、目標空隙率となるようにランマーを用いて作製した。供試体成形後は直ちに脱型し、その後、材齢 14 日まで高濃度中性化促進装置にて炭酸化養生(温度 30°C 、湿度 $60\%\text{RH}$ 、 CO_2 濃度 $80\text{vol.}\%$)を実施した。試験項目は、圧縮強度試験(JIS A 1108)とし、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用して、材齢 3, 7, 14 日において実施した。

3.3 試験結果

圧縮強度試験の結果を Fig. 2 に示す。製品工場における SP ブロックの管理材齢である材齢 14 日の強度は 46.5N/mm^2 であり、設計基準強度 18N/mm^2 を大幅に上回った。また、材齢 3 日および 7 日の圧縮強度は、それぞれ 29.2N/mm^2 および 40.7N/mm^2 であり、材齢 3 日(炭酸化養生期間 2 日)で設計基準強度よりも高い強度を発現した。

室内試験の結果より、カーボフィクスセメントは OPC を用いた場合と同一の配合で 사용할ことが可能であり、作業性や炭酸化養生後の圧縮強度についても目標とする性能を確保可能であることを確認した。

Table 1 Materials
(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	River sand Saturated surface-dry particle density: 2.60 g/cm^3 Fineness modulus: 2.90
Coarse aggregate	G	River gravel Saturated surface-dry particle density: 2.63 g/cm^3 Maximum aggregate dimensions: 10 mm
Chemical admixture	AD	Admixture for immediately remolded concrete product

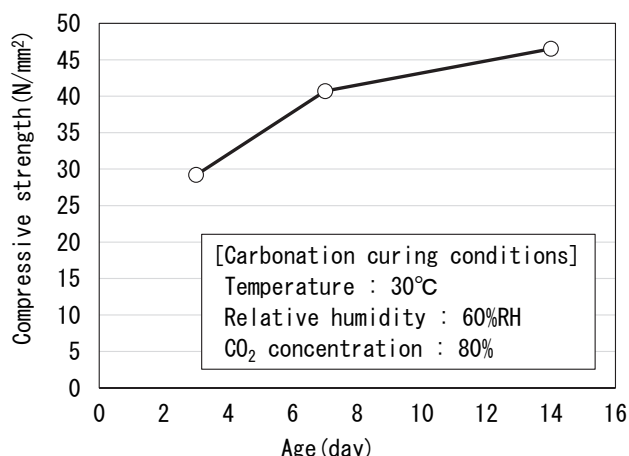


Fig.2 Compressive strength in laboratory tests
(室内試験における圧縮強度試験の結果)

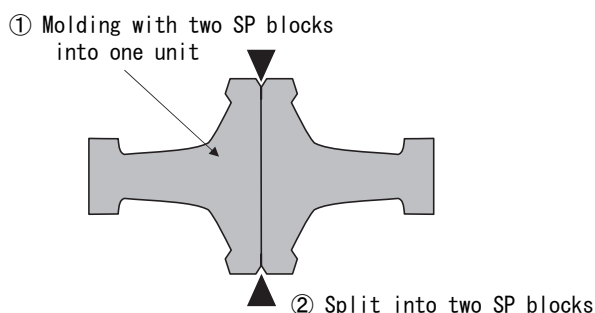


Fig.3 Manufacturing method of SP block
(SP ブロックの製造方法)

4. SP ブロックの実機製造に向けた養生工程の検討

4.1 実機製造での炭酸化養生の課題

これまでカーボフィクスセメントは、即時脱型製品であるインターロッキングブロックに適用されており、インターロッキングブロックの成形後、直ちに脱型し、炭酸化養生を行っている⁵⁾。しかし、今回対象としている SP ブロックは、**Fig.3**に示すように 2 個を一体成形し、SP ブロックの強度が発現した後に 2 個に割裂して製造する。このため、既往の工程（以下、養生工程①）で養生を行う場合は、**Fig.4**に示す通り、炭酸化養生終了後に SP ブロックを割裂することになる。すなわち、炭酸化養生時は 2 個の SP ブロックが一体となった状態であり、ブロックの寸法が大きいため、炭酸化養生による炭酸化の進行速度が遅く、強度増進量の低下が懸念される。また、成形直後は、未硬化の状態であり、SP ブロック同士を積み重ねることができないため、炭酸化養生設備で一度に養生できる SP ブロックの個数は 20 個程度に限られることが課題であった。

これらの課題を解決するために、**Fig.5**に示す SP ブロックを割裂した後に炭酸化養生を実施する工程（養生工程②）の採用を検討した。養生工程②では、SP ブロックの成形直後に加温養生を行うことで硬化を促進するため、炭酸化養生前の割裂が可能となる。また、割裂後の SP ブロックは一定の強度を有することから、炭酸化養生設備内で積み重ねることが可能となる。これにより、一度に 60 個以上の SP ブロックを炭酸化養生することが可能となるため、大幅な生産能力の向上につながる。

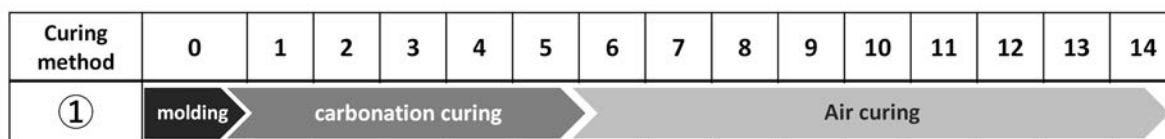


Fig.4 Curing method ①
(養生方法①)

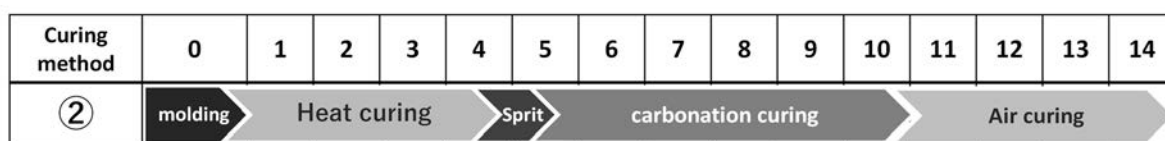


Fig.5 Curing method ②
(養生方法②)

製品工場において、養生工程①および養生工程②により SP ブロックを実機製造し、SP ブロックの力学性状を比較した。なお、SP ブロックの製造における加温養生および炭酸化養生の各養生期間は、製造工場における作業工程を考慮して設定した。

4.2 養生工程の検討概要

(1) 使用材料と配合

使用材料は、Table 1 の室内試験で用いた材料と同一とした。すなわち、セメントはカーボフィクスセメントを使用し、その他は製品工場で通常使用している材料と同一とした。

コンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 とした。コンクリートの配合は、室内試験と同様に、工場で製造している SP ブロックと同一とし、水セメント比は 32% とした。

(2) SP ブロックの製造および養生

SP ブロックの形状を Fig. 6 に示す。施工完了後に SP ブロック 1 個当たりの表面に露出する面積は 0.1m^2 である。

カーボフィクスセメントを用いた SP ブロックの製造プロセスを Fig. 7～Fig. 11 に示す。コンクリートは、製品工場のミキサで練り混ぜ、練り上がったコンクリートをミキサからバケットに移し、加圧振動成形機で 2 個の SP ブロックを一体成形した (Fig. 7, Fig. 8)。

成形した SP ブロックは直ちに脱型して、養生工程① (Fig. 4) および養生工程② (Fig. 5) の 2 種類の養生を実施した。養生工程①では、SP ブロックの成形直後より 5 日間の炭酸化養生を行った (Fig. 9)。

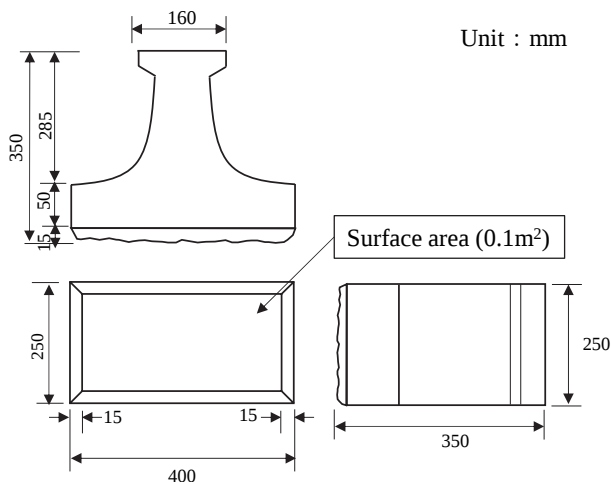


Fig.6 Shape of manufactured SP block
(製造した SP ブロックの形状)



Fig.7 Molding situation with pressure vibration molding machine
(加圧振動成形機での成形状況)



Fig.8 SP blocks after molding
(成形後の SP ブロック)

炭酸化養生後は、2 個の SP ブロックに割裂し (Fig. 10)、材齢 14 日まで工場屋内で気中養生を行った。

養生工程②では、成形直後の SP ブロックを製品工場の養生設備により、温度 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\sim 80\%RH$ の条件で 4 日間の加温養生を行った。加温養生終了後は、SP ブロックを 2 個に割裂し、5 日間の炭酸化養生を実施した。炭酸化養生終了後は、材齢 14 日まで工場屋内で気中養生を行った。なお、炭酸化養生は、簡易炭酸化養生設備を用いて行った。簡易炭酸化養生設備は、当社において設計、整備した、製品工場等に移設可能な設備である。今回は、簡易炭酸化養生設備を初めて使用するため、本養生設備で炭酸化養生を実施可能であることを実証することも目的とした。



Fig.9 Exterior view of portable carbonation curing equipment
(簡易炭酸化養生設備の外観)



Fig.10 Splitting status of SP block
(SP ブロックの割裂状況)

(3) SP ブロックの力学特性

SPブロックの力学特性は、Fig. 11 に示す位置より採取した $\phi 100\text{mm}$ のコンクリートコアを $\phi 100 \times 200\text{mm}$ に整形した供試体による圧縮強度を評価した。圧縮強度試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して、材齢 5 日および 14 日に実施した。

4.3 養生工程の検討結果

(1) 試験水準

簡易炭酸化養生による炭酸化養生は、2024 年 3 月 1 日 15 時より 5 日間実施した。炭酸化養生時の設備内の環境を Fig. 12 に示す。炭酸化養生中の養生設備内環境は、炭酸化養生開始後約 5 時間で CO_2 濃度が高くなり、その後は温度 $14.0 \sim 23.5^\circ\text{C}$ (平均温度 20.0°C)、湿度 $59.4 \sim 66.5\%\text{RH}$ (平均湿度 $63.3\%\text{RH}$)、 CO_2 濃度 $39.1 \sim 77.8\text{vol.}\%$ (平均 CO_2 濃度 $70.3\text{vol.}\%$) の範囲で変動した。なお、炭酸化養生中

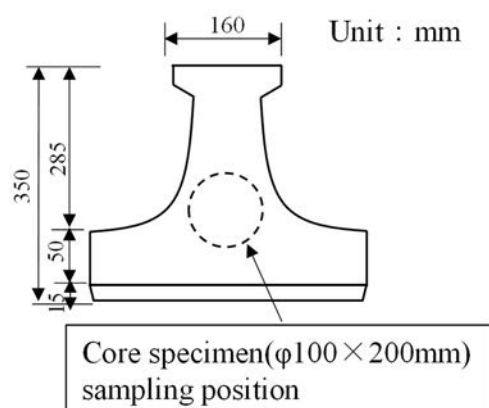


Fig.11 Concrete core sampling position in SP block
(SP ブロックにおける
コンクリートコア採取位置)

の平均外気温は、 2.4°C であった。

圧縮強度試験結果を Fig. 13 に示す。材齢 14 日における圧縮強度は、養生工程①では $23.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、養生工程②では $29.2\text{N}/\text{mm}^2$ であり、いずれの養生方法も設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ を上回った。これらの結果より、簡易炭酸化養生設備を使用して炭酸化養生を行うことが可能と考えた。ただし、SPブロックより採取したコンクリートコアの材齢 14 日における圧縮強度は、室内試験の結果 ($45\text{N}/\text{mm}^2$ 程度) よりも小さい結果であった。この結果については、供試体の製造方法、養生条件、炭酸化養生期間などの違いにより、供試体の充填率や炭酸化の進展状況等が異なっていることなどが影響していると考えられる。養生工程①および②の炭酸化養生による圧縮強度の増進

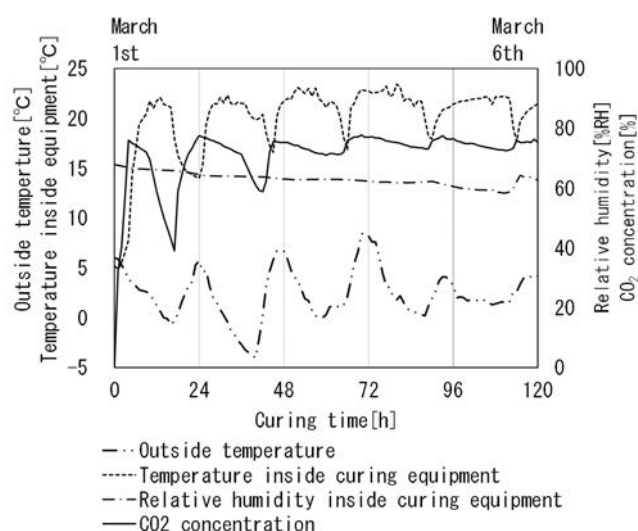


Fig.12 Curing environment in portable carbonation curing equipment
(簡易炭酸化養生設備内の養生環境)

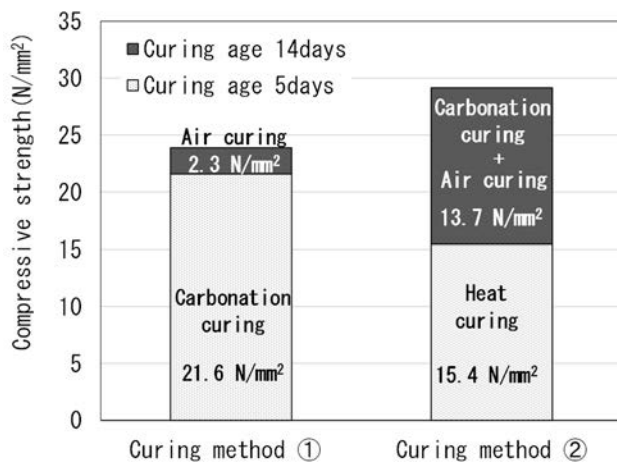


Fig.13 Compressive strength of concrete core specimen
(コア供試体の圧縮強度)

量は、それぞれ 21.6N/mm² および 13.7N/mm² であり、養生工程①の場合のほうが大きい結果となった。養生工程①は、緻密な硬化体組織が形成されていない成形直後より炭酸化養生を行うため、炭酸化が進行しやすく、強度増進量が大きくなったと考えられる。しかし、前述の通り、成形直後のブロックは硬化していないため、割れや欠けなどの破損が発生しやすく、製品を重ねることもできないため、一度に炭酸化養生できる数量が少ない点が課題といえる。

養生工程②では、炭酸化養生による強度増進量は養生工程①の場合より小さいものの、材齢 14 日における圧縮強度は養生工程①よりも 5N/mm² 高い結果となった。さらに、養生工程②では、SP ブロックの成形直後に加温養生を行うことで、炭酸化養生開始時に一定の強度が発現しているため、SP ブロックを積み重ねることが可能であり、養生工程①よりも一度に多くの SP ブロックを炭酸化養生することが可能である。以上より、SP ブロックの製造では、製造効率の観点から養生工程②を採用することとした。

5. カーボフィクスセメントを用いた SP ブロックの製造

5.1 SP ブロックの製造

SP ブロックは、これまでの検討と同様に製品工場と同一の材料および配合の超硬練りコンクリートにより製造した。製造工程は 4.2 節に示す手順と同一とし、養生工程は 4 章の検討より、養生工程②を採用した。

5.2 SP ブロックの試験概要

(1) SP ブロックの品質

SP ブロックの品質として、製造した SP ブロックより無作為に 3 個を抜き取り、質量、外観および圧縮強度を評価した。

SP ブロックの質量は、JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」において、施工面積 1m² 当たりの質量が 350kg 以上と規定されている。今回製造した SP ブロック 1 個当たりの表面に露出する面積は 0.1m² であることから、コンクリート製品工場では、SP ブロック 1 個当たりの質量を 35kg 以上として管理している。本検討においても同様に、割裂後のブロック質量を測定した。

SP ブロックの外観検査は、コンクリート製品工場で実施している項目（割面の凹凸状況、ひび割れおよび欠けの有無など）について実施した。

圧縮強度は、4 章と同様に SP ブロックから採取したコンクリートコア（φ100mm）を φ100×200mm に整形した供試体を用い、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。圧縮強度試験は、加温養生後および炭酸化養生後において実施した。

(2) CO₂ 固定量

炭酸化養生を実施した SP ブロックの CO₂ 固定量は、全炭素分析 (TC) によって測定した。TC の測定には炭素・硫黄分析装置 (堀場製作所社製 EMIA-Step) を使用し、酸素気流中で試料を 1250℃ で燃焼することで発生した CO₂ を赤外吸収方式にて定量した。炭酸化養生によって SP ブロックに固定化された CO₂ 量の算出手順を以下に示す。

- ① SP ブロックに含まれる全 CO₂ 量の測定する。全 CO₂ 量の測定は、SP ブロックを全量粗砕した後縮分し、微粉碎した試料を使用した。
- ② SP ブロックの製造に使用した各材料に含まれる CO₂ 量を測定する。
- ③ 成形直後の SP ブロック質量を測定し、配合をもとに SP ブロックを構成する各材料の質量を推定する。各材料の単位量あたりの CO₂ 量から、SP ブロックに含まれる材料由来の CO₂ 量を算出する。
- ④ ②で求めた炭酸化養生後の SP ブロックに含まれる全 CO₂ 量から、③で求めた SP ブロックに含まれる材料由来の CO₂ 量を差し引くことで、炭酸化養生によって SP ブロックに固定化した CO₂ 量 (CO₂ 固定量) を算出する。

5.3 実機製造した SP ブロックの品質

(1) 成形状態の評価

SP ブロックの質量を **Table 2** に示す。SP ブロック質量は、いずれも管理値 (35kg) を上回ることを確認した。

SP ブロックの外観調査の結果、ひび割れや欠けなどの異常は認められず、良好であった。また、割裂した SP ブロックの断面における凹凸性状についても、製品工場での社内規格値を満足しており、カーボフィクスセメントを使用した場合でも従来と同等の品質を確保可能であることを確認した。

Table 2 SP block mass after splitting
(割裂後の SP ブロック質量)

Inspection period	Mass per block (kg)	
	Measured value	Control value
1	36.9	35
2	36.9	
3	37.2	

(2) 圧縮強度

加温養生を 4 日間実施後の圧縮強度は 14.8N/mm^2 であった。また、炭酸化養生を 5 日間実施後の圧縮強度は 32.7N/mm^2 であり、設計基準強度 18N/mm^2 を十分に上回ることを確認した。

(3) CO₂ 固定量

カーボフィクスセメントを用いた SP ブロックの炭酸化養生 5 日間実施後の CO₂ 固定量は 40.6kg/m^3 であった。また、これまでの検討において、配合条件や養生条件によって炭酸化の進行速度が異なることを確認している。引き続き、より多くの CO₂ を固定化可能な配合条件や養生条件について検討を進めていく。

6. SP ブロックの施工

カーボフィクスセメントを使用した SP ブロックの施工は、2024 年 6 月 6 日～7 日にかけて行われた。施工は、法面下部に OPC を用いた SP ブロックを設置した後に、上部約 1.7m にカーボフィクスセメントを用いたブロックを設置した (**Fig. 14**)。各ブロックの裏側と法面との間には、裏込め材として土砂を入れて締固め、各 SP ブロックを一体化する目的で、ブ

ロックの隙間にレディーミクストコンクリートを打設した。この工程を繰り返して、法面最上部までブロックを積み上げた状況を **Fig. 15** に示す。カーボフィクスセメントを用いたブロックは、天端部分から法面下側に 5 段目まで設置している。その後、天端部分にコンクリートを打設して、2024 年 6 月下旬より供用した。



Fig.14 SP block installation status
(SP ブロックの設置状況)



Fig.15 Installation status of SP blocks
using CARBOFIX cement
(カーボフィクスセメントを使用した
SP ブロックの設置状況)

7. ま と め

本稿では、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道路法面の補強に適用した事例について紹介した。得られた結果をまとめる。

- 1) カーボフィクスセメントを使用した超硬練りコンクリートの作業性および炭酸化養生後の圧縮強度は、目標とする性能を確保することが可能であった。
- 2) カーボフィクスセメントを使用した SP ブロックの製造に簡易炭酸化養生設備を適用可能であることを実証した。
- 3) カーボフィクスセメントを使用した SP ブロックの養生工程について検討し、SP ブロックの力学性能確保と製造効率の向上を実現した。
- 4) カーボフィクスセメントを使用し、コンクリート製品工場で製造した SP ブロックの質量および外観は工場の管理基準を満足した。
- 5) コンクリート製品工場で製造した SP ブロックの圧縮強度は、設計基準強度を十分に満足した。
- 6) カーボフィクスセメントを使用し、炭酸化養生を 5 日間行った SP ブロックの CO₂ 固定量は、40.6kg/m³であった。

「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。

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年6月18日. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf, (accessed 2024-9-20)
- 2) 取違剛, 森泰一郎, 河内友一, 藤木昭宏. 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. 2, No. 900, p. 64-69.
- 3) 一般社団法人セメント協会ホームページ. 循環型社会構築に向けた取り組み. <https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html> (accessed 2024-9-20)
- 4) 橋本真幸, 小林和揮, 扇嘉史, 細川佳史. 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, No. 906, p. 10-16.
- 5) 小林和揮, 馬場智也, 橋本真幸, 細川佳史ほか. 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第 143 回学術講演会講演要旨集. 2021. 11, No. 580, pp. 58-59.