

環境負荷低減に貢献する低炭素型コンクリートの力学特性と耐久性の評価

MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF LOW-CARBON CONCRETE FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACT

鈴木 南都
Minato SUZUKI

For a low-carbon society, concrete CO₂ emissions must be reduced. In this study, low-carbon concrete, which reduced CO₂ emissions by reducing cement use to 5%, was developed, and its compressive strength and durability performance were evaluated. As a result, carbonation and freezing/thawing resistance were not equivalent to those of ordinary concrete. Therefore, an example of using it to create seaweed bed blocks for underwater was presented. This was one example that demonstrated the applicability of low-carbon concrete in non-degraded conditions, such as dry areas inside buildings with no moisture supply.

Keywords : Concrete, SCMs, Low carbon, Self-Compacting, Precast concrete products, Blue carbon

コンクリート, 産業副産物, 低炭素, 高流動, PCa 製品, ブルーカーボン

1. はじめに

近年、地球温暖化問題の解決に向けて、低炭素型社会の構築を目指す取組みが活発化している中で、建築業は CO₂ 排出量が多い産業であると知られている。特に、建築業において最も多く用いられているコンクリートは、セメントを使用していることから CO₂ 排出量が多い建築材料として知られている。そのため、低炭素型コンクリート（材料由来の CO₂ 排出量を削減したコンクリート）の開発が進められており、セメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフェームなどの産業副産物で置換する方法などが広く検討されている。たとえば、これらの産業副産物を最大 85% までセメントと置換した低炭素型コンクリートの既往研究がある¹⁾。また、筆者はセメント使用量の 95% 以上を削減し、CO₂ 排出量を 90% 以上削減できる低炭素型コンクリートを開発した²⁾。

このように、低炭素型コンクリートは低炭素型社会の構築に大きく貢献できる可能性を持つ一方で、実用化を目指すには課題が多く残されている。例えば、建築物の寿命に大きく関係する耐久性能が不十分であることや、一般的なプレキャストコンクリートに適用する場合と比較して、90°C・48 時間という高温・長時間の蒸気養生を必要とすること、シリカフェームの使用量が大きく高コストであることなどが挙げられる。また、単位水量が小さいため施工性も悪く、これらの課題解決が肝要であると考えられる。

以上の背景から、CO₂ 排出量の削減だけでなくコストも考慮した調査で、かつ実用的な養生方法で作製可能な低炭素型コンクリート

を開発することを目的とし、以下の検討を行う。

- 1) 基礎物性として、圧縮強度および耐久性能を取得する。圧縮強度が同程度となる普通コンクリート（結合材にセメントのみを使用したコンクリート）と、これらの性能について比較して、特に問題となる性能項目を明確にする。さらに、微細構造分析を通して、問題となる性能項目について考察し、耐久性能の改善を目指す。
- 2) 耐久性能が、普通コンクリートと比較して同等とまらない場合であっても、2022 年版の建築工事標準仕様書 JASS 5 改訂で加えられた非腐食環境（建築物内部など水分供給の無い部位）での使用も視野に入れた適用方法の一例を示す。その適用例から、低炭素型コンクリートの使用による環境負荷低減の効果、および材料のコストについて併せて評価する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

結合材 (B) は、セメントに普通ポルトランドセメント (C)、混和材に高炉スラグ微粉末 (GGBS)、フライアッシュ II 種 (FA) およびシリカフェーム (SF) を使用した。骨材は、細骨材に砕砂と陸砂を 1 : 1 で混ぜ合わせたもの (S)、粗骨材に砕石 (G) を使用した。混和剤は、AE 減水剤 (SP1)、高性能減水剤 (SP2)、AE 剤 (AE) を使用した。コンクリートの調査表を表 1 に示す。各種試験の基準として、結合材にセメントのみを使用した C100 (W/C=0.53) を準備した。低炭素型コンクリートとして、結合材にセメントを 5%、混和材を 95% の割合で用いた C5 (W/B = 0.25) を設定した。また、「高流

表 1 調合表[kg/m³]

	B				S	G	W	SP*	AE	圧縮	自己収縮	乾燥収縮	中性化	MIP	凍結融解	気泡間隔
	C	GGBS	FA	SF												
C100	340	0	0	0	810	954	178	1.70	0	○	○	○	○	○	○	○
C100-AE	340	0	0	0	810	954	178	1.70	0.01	○	—	—	—	○	○	○
C5	25.2	303	152	25.2	806	1008	123	2.52	0	○	○	○	○	○	○	○
C5-AE	25.1	301	151	25.1	802	1003	118	2.51	5.01	○	—	—	—	○	○	○
C5SC-AE	32.0	384	192	32.0	723	750	152	3.20	6.40	○	○	○	○	○	○	○

*C100はSP1、C5はSP2を使用した。

動コンクリートの配合設計・施工指針³⁾を参考にして、自己充填性を持つ高流動系の調合も設定した。それぞれシリーズ名の後ろに、AE 剤を添加したものは「AE」を付記し、高流動系の調合には「SC」と付記して区別する。以上の5種類のコンクリートを作製した。

コンクリートの練混ぜには、螺旋アーム式強制二軸ミキサ(WHQ-60A、北川鉄工所社製、容量：60 L)を使用した。C100は、結合材と細骨材を入れて30秒間空練りした後、水と混和剤を入れて1分、粗骨材を入れて1分間練り混ぜた。C5は、結合材と細骨材を入れて1分間空練りした後、水と混和剤を入れて3分、粗骨材を入れて2分間練り混ぜた。C5SCは、結合材と細骨材を入れて1分間空練りした後、水と混和剤を入れて1分半、粗骨材を入れて30秒間練り混ぜた。打込み後の試験体について、自己収縮試験用は田澤らの既往研究⁴⁾を、乾燥収縮試験用は百瀬らの既往研究⁵⁾を参考に養生した。それ以外の試験では、プレキャストコンクリート製品(PCa製品)を参考にして、図1に示す蒸気養生を施した後、雨がかりの屋外環境で気中養生を施したものを準備した。本研究では、この養生方法をPCa養生と称す。なお、C100とC5は水中養生を施したものを準備し、「uw」と付記して区別する。

2.2 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表2に示す。圧縮試験は、直径100 mm、高さ200 mmの円柱試験体を用いた。試験機には、油圧式万能試験機(YU-1000SIV、東京衝機試験機社製、最大容量：1000 kN)を使用し、載荷速度は毎秒0.6 N/mm²とした。

自己収縮試験⁴⁾は、テフロンシート、および、ポリ塩化ビニリデン製ラップで養生した100×100×400 mmの角柱型枠に、モールドひずみゲージ(PMFL-50-3LJRTA-F、東京測器研究所社製)を固定し、コンクリートを打ち込んだ。その後、即座に上部をラップと濡れた布で覆い、養生室(室温約20°C、相対湿度90%以上)に設置して測定した。

乾燥収縮試験⁵⁾は、直径100 mm、高さ200 mmの円柱型枠にモールドひずみゲージを固定し、コンクリートを打ち込んだ。1日封緘養生した後脱型して水中養生し、打込みから材齢7日の試験体を屋内空間(室温約23°C、相対湿度約50%)に設置して測定した。

中性化試験は、円柱試験体を割裂してフェノールフタレイン溶液を噴霧し、10 mm間隔で計38箇所測定して平均を求めた。なお、C100_{uw}およびC5_{uw}は、材齢28日の試験体を屋外環境に設置したものをを使用した。

モルタル部分の微細構造の評価を行うために、細孔径分布測定装置(AutoPoreV9620、マイクロメリティックス社製、測定範囲：3 nm~1.1 mm)を用いて水銀圧入試験(MIP)を実施し、細孔径分布の測

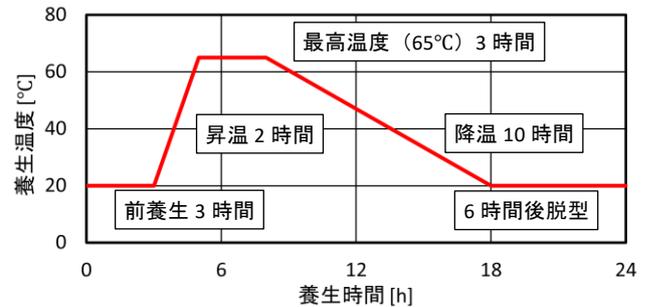


図1 PCa 養生の蒸気養生時におけるオープンの温度推移

表2 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108：コンクリートの圧縮強度試験方法
自己収縮	田澤ら：自己収縮研究委員会報告 ⁴⁾
乾燥収縮	百瀬ら：乾燥収縮迅速評価システムの開発 ⁵⁾
中性化深さ	JIS A 1152：コンクリートの中性化深さの測定方法
細孔径分布(MIP)	JIS R 1655：ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法
凍結融解抵抗性	JIS A 1148：コンクリートの凍結融解試験方法(A法)
気泡間隔	ASTM C 457：Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete

定を行った。試料は、割裂後の試験体から破片を採取して、粗骨材を除いたモルタル部分を5 mm以下の粒状に加工し、アセトンを用いて水和停止させたものを使用した。

凍結融解試験は、100×100×400 mmの角柱試験体を用いた。凍結融解には、水中凍結・水中融解試験装置(TFS-100-TH、田尻機械工業社製)を使用し、一次共鳴振動数の測定には簡易型動ヤング率測定器(MIN-011-0-09、マルイ社製)を使用した。

コンクリート硬化体の空気連行性を評価するため、気泡測定装置(HF-MAC12、八洋コンサルタント社製)を用いて、気泡間隔係数の測定を行った。試料は、円柱試験体をコンクリートカッターで厚さ40 mmに切断し、縦型供試体端面研磨機(NCP-125-A100、日特機械工業社製)を用いて研磨したものをを使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮試験

図2に圧縮試験の結果を示す。ここでは、C5およびC100の結果はAE剤を使用した調合も含めた平均値である。高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用したコンクリートは、初期強度発現が小さいことが知られている⁶⁾。一方で、C5はPCa養生の蒸気養生によって、材齢1日で20 N/mm²を超え、脱型時強度の目安⁷⁾である8

~12 N/mm²を十分に満たした。その後、屋外気中養生によって、PCa 製品の出荷材齢である材齢 14 日では 26 ~ 31 N/mm²、材齢 91 日以降では水中養生と同程度となり、40 N/mm²を超える圧縮強度となった。C5SC については、材齢 14 日で 28 N/mm²となり、C5 と同様の強度増進をすると考えられる。

また、材齢 182 日において、C5 と C100 の圧縮強度が同程度であることから、本研究で準備した C100 が、C5 との耐久性能の比較対象として妥当であることを確認した。

3.2 自己収縮試験および乾燥収縮試験

図 3(a)に自己収縮試験の結果を、図 3(b)に乾燥収縮試験の結果を示す。C5 および C5SC は、C100 と圧縮強度が同程度であるものの、水結合材比が小さいため、自己収縮ひずみは C100 よりも大きく、乾燥収縮ひずみは小さくなった。また、水セメント比を 0.25 とした場合の C100⁸⁾と比較した場合は、どちらも小さくなる結果となった。ここで、フライアッシュは自己収縮ひずみを小さく⁸⁾、高炉スラグ微粉末は、自己収縮ひずみ、および、乾燥収縮ひずみを小さくすることが知られており⁹⁾、これらを併用しても同様の傾向を示す⁶⁾。すなわち、C5 および C5SC は、混和材の収縮低減効果によって、収縮ひずみが C100 (W/C=0.25)⁸⁾よりも小さくなったと考えられる。

3.3 中性化試験

図 4 に中性化試験の結果を示す。C5 は、C100 よりも中性化抵抗性が劣るものの、暴露期間が増加するにつれて中性化深さ A [mm]の増加量が緩慢になる傾向を示した。この結果から、中性化深さと暴露期間 t [年]との間に $A = 6.8\sqrt{t}$ の近似曲線が得られ、C5 においても C100 と同様に \sqrt{t} 則が成り立つと考えられる。また、養生の違いによって、C5 と C100 とともに中性化の速度が異なる傾向が見られた。C5SC は C5 よりも中性化速度係数が小さくなったが、これは C5 よりも結合材量が多く、水酸化カルシウムの生成量が増加したためだと考えられる。

3.4 MIP 試験

図 5 に細孔径分布を示す。増加細孔容積がピークとなる細孔径に注目すると、C5 は C100 と比較して養生の違いによる差が小さいことを確認した。また、C5SC は C5 よりもピークとなる細孔径が大きいものの、グラフの形状は近いものとなった。すなわち、C5 および C5SC は、蒸気養生によって短時間で十分に強度を発現し、また、その後も阻害されることなく強度が増進するため、PCa 製品としての施工に適した調合であると考えられる。また、AE 剤添加の有無により細孔径分布に大きな差は無いことから、自己収縮および乾燥収縮 (3.2)、中性化 (3.3) の試験結果について、AE 剤を使用した場合も同様の結果になると考えられる。

図 6 に、増加細孔容積がピークとなる細孔径と中性化速度係数の関係を示す。C5 および C100 とともに、ピークとなる細孔径が小さくなると中性化速度係数も小さくなった。すなわち、C5 の細孔径分布を密側にシフトさせることで、中性化抵抗性を向上できる可能性があると考えられる。

3.5 凍結融解試験

図 7 に凍結融解試験の結果を示す。なお、凡例にフレッシュ時に計測した調合ごとの空気量を併せて示す。C5 について、AE 剤の添加による抵抗性の向上は限定的であった。図 8(a)に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を、図 8(b)に気泡間隔係数と気泡径 0.15 mm 未満の空気量の関係を示す。C5 の気泡間隔係数は、600 μ m から 300 μ m 程度まで減少し、さらに高流動化することで、C100-AE と同等の 150 μ m 程度まで減少したことを確認した。一方で、コンクリートの凍結融解抵抗性の確保のためには、気泡間隔係数は 250 μ m 以下であり、かつ気泡径 0.15 mm 未満の空気量を一定割合確保する必要がある¹⁰⁾。フライアッシュセメント C 種を使用した場合は、耐久性指数を 60 以上とするためには、気泡径 0.15 mm 未満の空気量を 1.70%以上連行する必要があり、フレッシュ時の空気量が 4.7%以上必要となる¹⁰⁾。

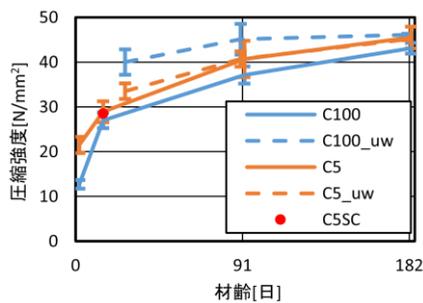
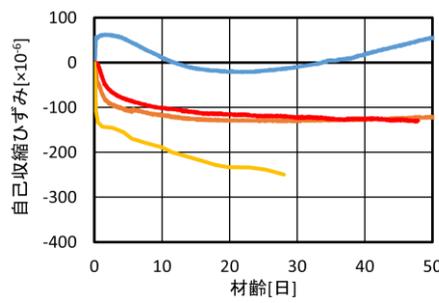
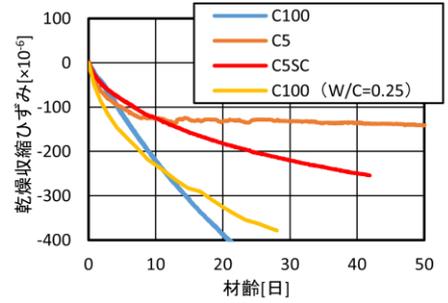


図 2 圧縮強度



(a) 自己収縮ひずみ



(b) 乾燥収縮ひずみ

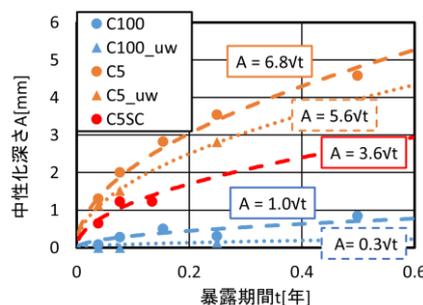


図 4 中性化深さ

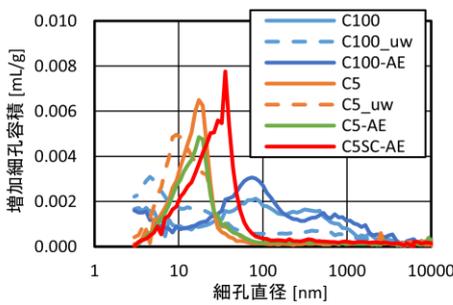


図 5 細孔径分布

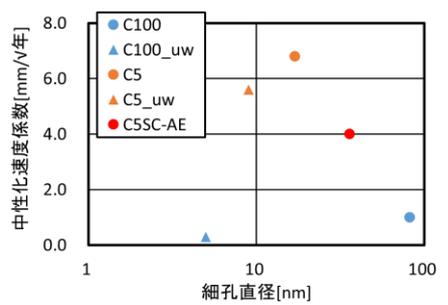


図 6 増加細孔容積がピークとなる細孔径と中性化速度係数の関係

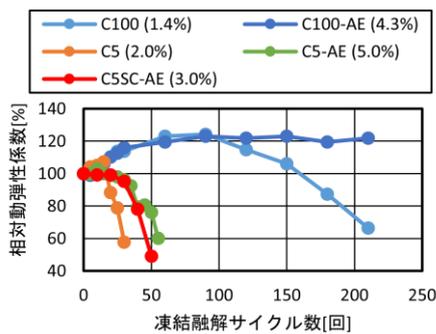
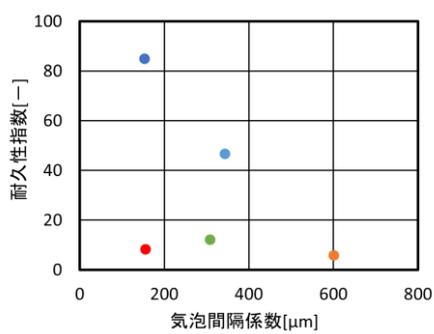
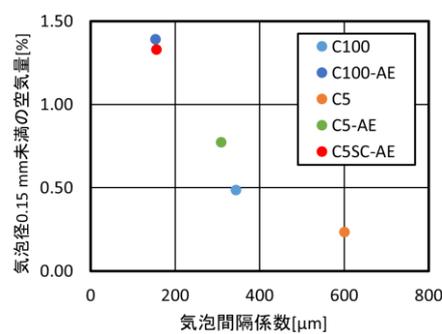


図7 相対動弾性係数



(a) 耐久性指数



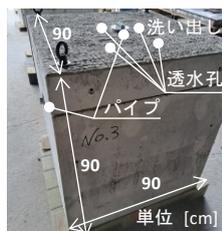
(b) 気泡径 0.15 mm 未満の空気量

図8 気泡間隔係数の関係

表3 各調査のCO₂排出量およびコストの試算

	CO ₂ 排出量[CO ₂ kg]	(吸収量) > (排出量) 必要年数[年]	材料コスト[円]
C100	135.7	19.9	4,477
C5	19.0	2.79	5,861
C5SC	24.0	3.51	6,803
C4 ²⁾	17.4	2.55	8,929

※ 原材料のみでの計算値



(a) ブロック外見 (b) 設置後の様子 (2024年10月)

写真1 藻場ブロック

C5SC-AEは気泡間隔係数が150 μm程度と十分に小さくなった。しかしながら、フライアッシュセメントC種以上に混和材の置換率が大きいにも関わらず、気泡径0.15 mm未満の空気量が1.30%程度、フレッシュ時の空気量が3.0%といずれも上述の基準を下回り、凍結融解抵抗性が十分に向上しなかったと考えられる。

4. 適用事例による環境負荷低減効果およびコストの評価

非腐食環境での使用を視野に入れた低炭素型コンクリートの適用例を示すため、藻場ブロック¹¹⁾を作製して海中に設置した。写真1(a)に作製した藻場ブロックを、写真1(b)に設置後の様子を示す。設置から約1年経過した2024年10月の調査において、ブロックには特に外傷はなく、海藻が生長していることを確認した。海中は溶存酸素量が極めて少ないため、鉄筋腐食の進行が非常に遅いと考えられる。さらに、凍結融解による劣化も生じないことから、長期にわたり藻場ブロックとしての役割を果たすと考えられる。

次に、低炭素型コンクリートの使用による環境負荷低減の効果、および、ブロック作製時の材料コストについて評価を行った。インベントリデータから得られるCO₂排出量原単位に、実際の調査量とブロックの容積を乗じて算出したCO₂排出量と、海藻によるCO₂吸収量¹¹⁾から、カーボンニュートラルとなる年数を算出した。また、原材料単価¹²⁾に、実際の調査量とブロックの容積を乗じてコストを算出した。なお、凍結融解による劣化が生じない環境での比較のため、それぞれAE剤の使用量を除いた。表3に各計算結果を示す。ここでは、筆者が開発したC4²⁾についても比較対象とした。低炭素型コンクリートを用いることで、C100よりも16年以上早く、カーボンニュートラルに寄与できることを確認した。また、コストについては、C4と比較して、C5は約38%、C5SCは約28%削減できることを確認した。

5. まとめ

本研究では、セメントを混和材で95%置換した低炭素型コンクリートの基礎物性を取得し、実際の適用例から環境負荷低減の効果お

よびコストを評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) C5がPCa養生を用いた実用的な養生方法で作製可能であることを確認した。耐久性について、自己収縮および乾燥収縮は十分に小さいものの、中性化および凍結融解の抵抗性は普通コンクリートと同等にはならなかった。一方で、微細構造の分析から、耐久性を改善するための方法について確認した。
- 2) 低炭素型コンクリートを藻場ブロックに適用した例から、非腐食環境で使用することで、環境負荷低減に大きく貢献できる可能性が示唆された。また、この低炭素型コンクリートとして、C5およびC5SCは、C4よりも低コストで作製できることを確認した。

参考文献

- 1) 小林利充ら：二酸化炭素排出量を低減するコンクリート「クリーンクリート[®]」、生産と技術、Vol.67, No.1, pp.58-60, 2015
- 2) 鈴木南都ら：CO₂排出量削減を実現するセメントコンクリートの開発と評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.45, No.1, pp.1054-1059, 2023
- 3) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針、pp.38-41, 2012
- 4) 田澤栄一ら：自己収縮研究委員会報告、コンクリート工学年次論文集、Vol.19, No.1, pp.1-10, 1997
- 5) 百瀬晴基ら：乾燥収縮迅速評価システムの開発、コンクリート工学、Vol.47, No.10, pp.22-29, 2009
- 6) 齋藤尚ら：低水結合材比におけるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの物性、セメント・コンクリート論文集、No.65, pp.304-311, 2011
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事、pp.54-56, 2003
- 8) 菅田紀之ら：フライアッシュとシリカフェームを混和した高強度コンクリートの強度および収縮特性について、セメント・コンクリート論文集、No.63, pp.486-492, 2009
- 9) 槇島修ら：高炉スラグ微粉末高置換コンクリートの収縮および発熱特性に関する検討、とびしま技報、No.71, pp.5-9, 2023
- 10) 坂田昇ら：コンクリートの気泡組織の耐凍害性の関係に関する考察、コンクリート工学論文集、Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012
- 11) 北辻政文：漁礁ブロックを用いた藻場再生の取組み、農業農村工学会誌、Vol.89, No.11, pp.861-864, 2021
- 12) 建設物価調査会：建設物価、pp.78-136, 2024