

低炭素型ペーストの中性化特性および乾燥収縮特性に関する一考察

準会員
非会員

○深澤 巴菜*1
瀬野 佑*2

非会員
正会員

島田 明和*2
坂本 英輔*3

ポーラスコンクリート
中性化速度係数

カーボンニュートラル
長さ変化率

CCU 粉体

1. 研究の背景および目的

近年、地球温暖化による気候変動が深刻化しており、生態系の破壊、海水面の上昇、さらには異常気象による災害の頻発など、地球環境問題は複雑化の一途をたどっている。そのため、地球温暖化を引き起こす主要因の一つである温室効果ガス、特に二酸化炭素（以下、CO₂）排出量の削減は、国際社会における共通課題の一つとなっている。日本政府は 2020 年 10 月に、「2050 年までに日本の温室効果ガスの排出を実質ゼロにする」という目標を掲げ、脱炭素社会実現にむけて課題解決に取り組んでいる。中でも、セメント・コンクリート産業では、製造過程で大量の CO₂ を排出するため、排出量削減のため高炉スラグ微粉末（以下、BFS）およびフライアッシュといった産業廃棄物でセメントの一部を置換した低炭素型コンクリートの開発や CO₂ を吸収・固定した CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization）材料の活用^{例えば 1)}など、多様なアプローチが進められている。

ポーラスコンクリート（以下、POC）は通常のコンクリートとは異なり、内部に多くの連続空隙を持っており、連続空隙による広い表面積を活用した CO₂ の吸収源としての役割も期待されている。POC においては、大気中の CO₂ を吸収して固定する中性化はカーボンニュートラルの観点からすると好ましい反応である。コンクリートでは、水セメント比が 40% 以下になると一般的には中性化しないとされており、水セメント比が約 20～35% のペーストが用いられる POC では中性化しない可能性がある。

そこで本報では、低炭素型 POC の開発の前段階として、ペーストの構成材料に BFS や遠心成形品製造工場において排出されるスラッジ水に、同工場で蒸気養生の際に発生する排気ガスを吹き込んでできた軽質炭酸カルシウム²⁾（以下、CCU 粉体）（図 1 参照）を使用した低炭素型ペーストの中性化特性および乾燥収縮特性の把握を試みた。

2. 研究の概要

既報³⁾では、CCU 粉体や BFS を POC のペーストの構成材料として使用し、低炭素型 POC の基礎特性に関する検討を行った。本報では、既報で検討した 15 調合のペースト調合から 6 調合（表 1 参照）を選び、40×40×160mm のペースト供試体を作製して、促進中性化試験および長さ変化測定を実施した。表 2 に使用材料を示す。CCU の CO₂ 排出量は 390kg-CO₂/t と試算²⁾されており、既に実用化されているものである。なお、調合の No.1（C100B0E0）は、普通ポルトランドセメントのみを用いたペーストである。本実験では、調合 No.1 に、セメントの一部を CCU 粉体や BFS で置換した No.5（C50B25E25）、No.6（C50B50E0）、No.8（C25B25E50）、No.9（C25B50E25）および

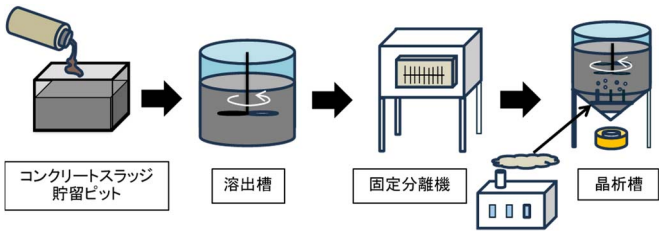


図 1 CCU 粉体の製造フロー

表 1 調合表

No.	調合 記号	単位量 (kg/m ³)				SP (%)	FL (mm)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)
		W	C	BFS	E			
1	C100B0E0	441	1765	0	0	0.13	161	1425
5	C50B25E25	423	846	423	423	0.50	156	537
6	C50B50E0	430	860	860	0	0.15	168	731
8	C25B25E50	411	411	411	822	0.90	165	31
9	C25B50E25	418	418	836	418	0.42	160	210
10	C25B75E0	425	425	1274	0	0.10	159	396

〔註〕W: 水, C: セメント, BFS: 高炉スラグ微粉末, E: CCU 粉末, SP: 高性能減水剤, FL: フロー値

表 2 使用材料

材料名	種類
水	上水道水, CO ₂ 排出量: 0.198kg-CO ₂ /m ³
セメント	普通ポルトランド, 比表面積: 3,420cm ² /g 密度: 3.16g/cm ³ , CO ₂ 排出量: 807kg-CO ₂ /t
高炉スラグ微粉末	比表面積: 4,020cm ² /g, 密度: 2.91g/cm ³ , CO ₂ 排出量: 40.21kg-CO ₂ /t, 石膏無添加
CCU 粉体	軽質炭酸カルシウム, 比表面積: 6,550cm ² /g 密度: 2.60g/cm ³ , CO ₂ 排出量: 50kg-CO ₂ /t, CO ₂ 固定量: 440kg-CO ₂ /t
化学混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) CO ₂ 排出量: 225kg-CO ₂ /t

No.10 (C25B75E0) の 5 調合を加えた合計 6 調合について検討した。

POC の圧縮強度は、同じ空隙率であれば、ペーストの強度が高いほど高くなる。したがって、社会実装可能な低炭素型 POC を開発するためには、施工性を確保しつつ、圧縮強度が高く、かつ CO₂ 排出量が少ないペースト調合が望ましい。また、本研究では、低炭素型 POC を CO₂ の吸収源として利用することを想定しているため、中性化が進みやすく、乾燥収縮による有害なひび割れが生じにくいペースト調合であることも重要と考える。

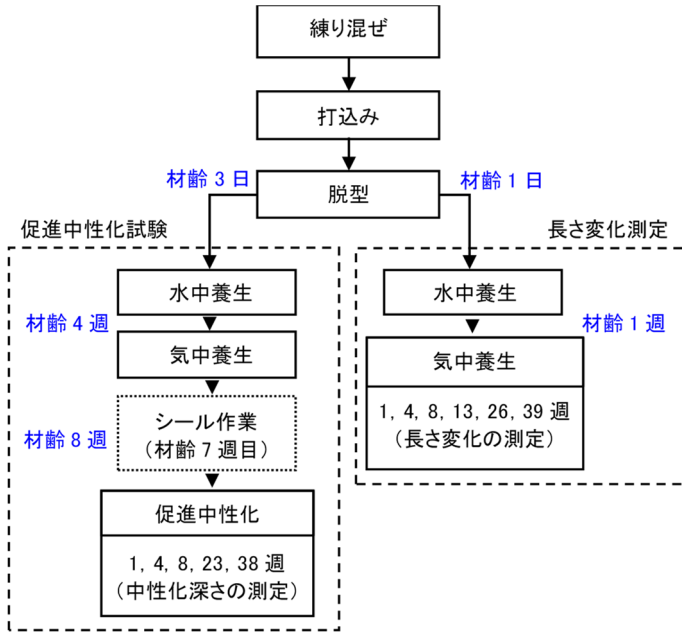


図2 本研究のフロー

3. 実験の方法

図2に本研究のフローを示す。4Lのモルタルミキサーを用いてペーストの練り混ぜを行った。練り混ぜ手順は、はじめに、粉体を練さじで30秒間かき混ぜ、次に、あらかじめ所定の添加率の科学混和剤を混合した練り混ぜ水を投入した。そして、低速で60秒間練り混ぜた後、30秒休止し、その後高速で90秒間の練り混ぜを行った。練さじで10回かき混ぜた後、JIS R 5201に準拠してフロー試験を行い、フロー値が $160 \pm 100 \text{ mm}$ に収まることを確認して、 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 鉄製型枠にテーブルパイププレートを用いて打ち込んだ。調合ごとに6本の供試体を作製し、その内の3本を促進中性化試験用、残りの3本を長さ変化測定用とした。長さ変化測定に用いる供試体については、両端中央部2か所に約20mmのゲージプラグを取り付けた。その後、脱型まで温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に静置した。

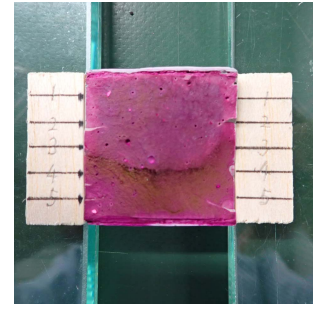
3.1 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」を参考にして実施した(写真1参照)。材齢3日で脱型した後、材齢4週まで水中養生を行った。材齢4週後、気中養生に切り替え、恒温恒湿室に材齢8週まで静置した。なお、材齢7週目に供試体の打込み面、底面および両端面にエポキシ樹脂を用いてシーリングを行った。材齢8週の時点で、温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ 、 CO_2 濃度 $5 \pm 0.2\%$ に設定した促進中性化試験装置内に供試体を静置した。供試体は1水準につき3本とし、合計18本を用いた。促進期間1, 4, 8, 23, および38週において中性化深さの測定を行った。それぞれの促進期間で供試体を割裂し、その割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、側面を6等分した5カ所の中性化深さをノギスを用いて測定した。そして、式(1)より中性化速度係数を算出した。

$$X = A\sqrt{t} \quad (1)$$



(a) 促進中性化試験装置



(b) 中性化深さの測定

写真1 促進中性化試験



(a) 長さ変化測定



(b) 乾燥の様子

写真2 長さ変化測定

ここに、 X : 中性化深さ(mm), A : 中性化速度係数($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$), t : 促進期間(週)

3.2 長さ変化測定

長さ変化測定は、JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第3部:ダイヤルゲージ方法」を参考にして実施した(写真2参照)。供試体は材齢1日で脱型した後、材齢7日まで温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ の水中で養生した。材齢7日にダイヤルゲージを用いて供試体のゲージプラグ間距離を測定し、これを基準とした。その後、恒温恒湿室に静置した。供試体は1水準につき3本とし、合計18本を用いた。乾燥材齢1, 4, 8, 13, 26および39週に長さ変化測定を行い、式(2)を用いて長さ変化率を算出した。また、長さ変化測定にあわせて供試体の質量計測も行った。

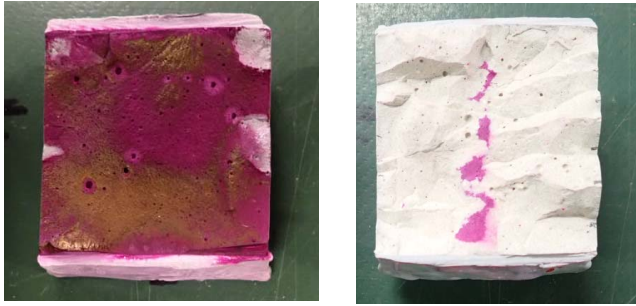
$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \quad (2)$$

ここに、 ε : 長さ変化率($\times 10^{-6}$), L_0 : 基長(mm), X_{01} , X_{02} : それぞれ基準とした時点における標準尺及び供試体の測定値(mm), X_{i1} , X_{i2} : それぞれ基時点*i*における標準尺及び供試体の測定値(mm)

4. 実験結果および考察

4.1 中性化特性

図3に中性化深さと促進期間の関係を示す。なお、本実験では、ペースト表面のひび割れを起因とした中性化域は除外し



(a) ひび割れの影響 (b) 20mm 以上の中性化
写真 3 中性化深さの一例

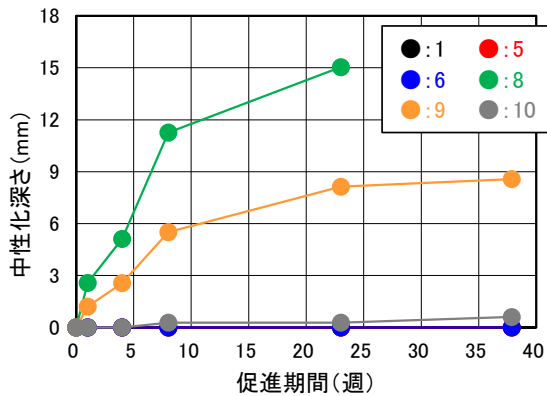


図 3 中性化深さと促進期間の関係

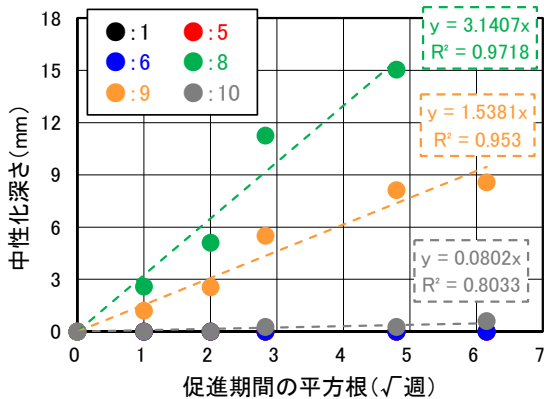


図 4 中性化深さと促進期間の平方根の関係

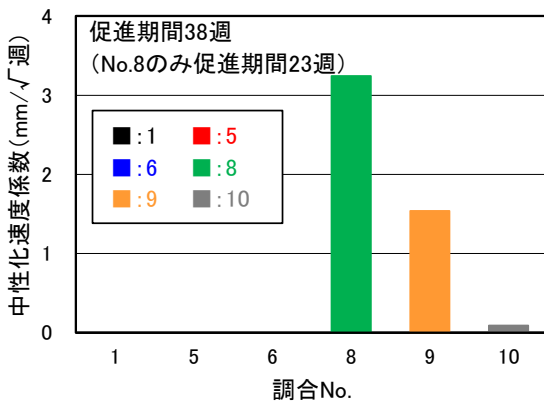


図 5 中性化速度係数

で中性化深さを算出することとした(写真 3(a)参照)。また、いずれかの測点で側面からの中性化深さが 20mm を超えた場合

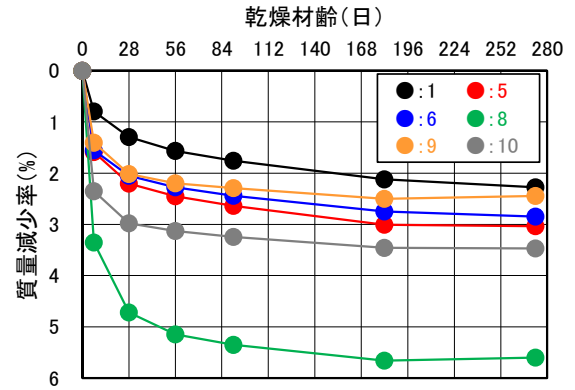


図 6 質量減少率と乾燥材齢の関係

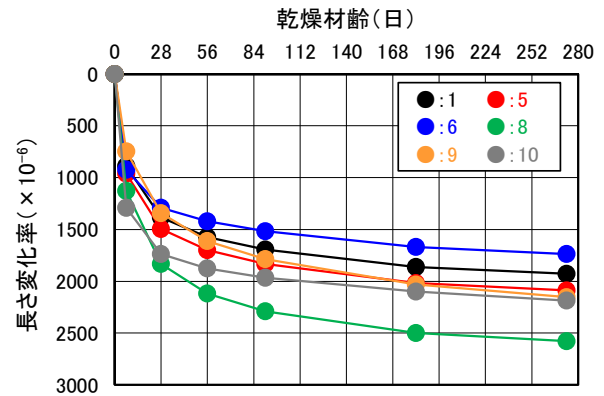


図 7 長さ変化率と乾燥材齢の関係

は、その直前の促進期間までの中性化深さから中性化速度係数を算出することとした(写真 3(b)参照)。同図より、いずれの調査も促進期間とともに中性化深さが大きくなっていることが分かる。また、調査 No.1 (普通ポルトランドセメントのみを用いたペースト)、No.5 および No.6 は、促進期間 38 週においても中性化は認められず、No.10 ではわずかに中性化が確認された。No.8 および No.9 は中性化が確認され、No.8 については、促進期間 23 週において中性化深さが 20mm を超える測点があったため、グラフのプロットは促進期間 23 週目までとなっている。さらに、セメントの質量割合が同じである No.8, No.9, No.10 については、No.10, No.9, No.8 の順番に CCU 粉体の質量割合が大きくなる調査であることから、CCU 粉体の質量割合が大きいくほど、中性化しやすいと考えられる。この傾向は、既往の研究⁴⁾と同様であった。図 4 に中性化深さと促進期間の平方根の関係を示す。同図より、中性化が確認された No.8, No.9, No.10 については、中性化深さと促進期間の平方根が直線関係となることから、CCU 粉体を用いた調査においても $\sqrt{t}$ 則が成り立つと言える。図 5 に中性化速度係数を示す。本研究では、低炭素型 POC を CO_2 の吸収源として利用することを想定している。この観点から、ペースト調査としては No.8 および No.9 が適していると考えられる。一方、No.1 の結果から、一般的な普通ポルトランドセメントを使用した POC では、中性化がほとんど進行せず、 CO_2 の吸収源としての活用は難しいことが示唆された。

4.2 乾燥収縮特性

図 6 に質量減少率と乾燥材齢の関係を示す。同図より、多

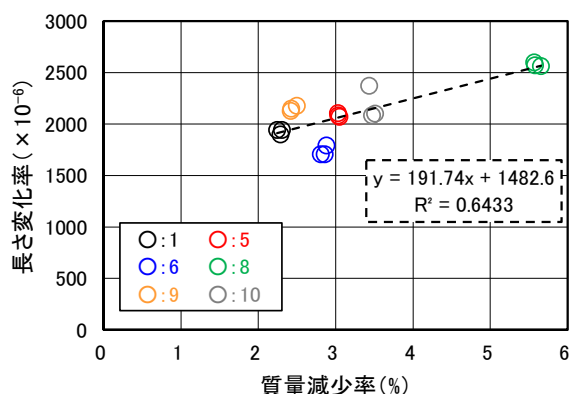


図 8 長さ変化率と質量減少率の関係

表 3 各ペースト調合の性能一覧

調合 No.	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	圧縮強度 (N/mm ²)	中性化速度係数 (mm/√週)	長さ変化率 (× 10 ⁻⁶)
1	1425	113.3	0	1929
5	537	84.5	0	2088
6	731	105.8	0	1736
8	31	67.3	3.24	2579
9	210	84.3	1.54	2152
10	396	83.2	0.09	2186

少のバラツキはあるが、乾燥開始から 56 日までは急激に質量が減少し、その後は緩やかになることが分かる。また、調合 No.1 が最も質量減少率が小さく、No.8 が最も質量減少率が大きくなっている。図 7 に長さ変化率と乾燥材齢の関係を示す。グラフの形状は、質量減少率と同様の傾向を示し、乾燥開始から 56 日までは急激に収縮し、その後は緩やかになることが分かる。調合 No.6 の長さ変化率は No.1 より小さくなり、No.5、No.9 および No.10 は、No.1 より若干大きくなった。また、No.8 は、全ての調合の中で最も大きな長さ変化率を示した。既往の研究⁵⁾では、コンクリートの調合において、CCU 粉体の割合が高いほど、長さ変化率が小さくなることが報告されている。しかし、本実験では、CCU 粉体の割合が高いほど長さ変化率が大きくなる傾向が確認され、試料の違いによる影響も考えられることから、今後の検討課題である。図 8 に長さ変化率と質量減少率の関係を示す。同図より、長さ変化率と質量減少率の間には、正の相関が認められて。本研究では、乾燥収縮による有害なひび割れが生じにくいペースト調合であることも重要視している。このため、長さ変化率は No.1 と同程度、もしくはそれ以下であることが望ましい。以上より、No.6 の調合が最もふさわしいと考えられる。

4.3 ペースト調合の選定

表 3 にペースト調合の性能一覧を示す。評価項目は、CO₂

排出量、圧縮強度、中性化速度係数および長さ変化率である。なお、圧縮強度は、別途実施した同一調合による φ 50 × 100mm 供試体の材齢 28 日圧縮強度を用いた。これらの性能を総合的に評価すると、本実験の範囲では、低炭素型 POC のペースト調合としては、No.9 が適していると考えられる。

5. まとめ

本報では、低炭素型 POC の開発の前段階として、ペーストの構成材料に BFS や CCU 粉体を使用した低炭素型ペーストの中性化特性および乾燥収縮特性の把握を試みた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 調合 No.1, No.5 および No.6 は、促進期間 38 週においても中性化は認められず、No.8, No.9 および No.10 では中性化が確認された。
- (2) CCU 粉体を用いた調合においても√t則が成り立つ。
- (3) 調合 No.6 の長さ変化率は No.1 より小さくなり、No.5, No.9 および No.10 は、No.1 より若干大きくなった。また、No.8 は、全ての調合の中で最も大きな長さ変化率を示した。
- (4) 長さ変化率と質量減少率の間には、正の相関がある。
- (5) 各ペースト調合の性能を総合的に評価すると、低炭素型 POC のペースト調合としては、No.9 が適していると考えられる。

謝辞

本研究費の一部は、科学研究費助成事業 基盤研究(C) (課題番号:24K07775)によった。本研究の実施にあたり、太平洋セメント株式会社よりセメントを、日鉄高炉セメント株式会社より高炉スラグ微粉末を、株式会社フローリックより化学混和剤をご提供いただいた。また、促進中性化試験は国土交通省中国地方整備局中国技術事務所にて実施した。ここに付記して謝意を申し上げる。

【参考文献】

- 1) 田中寛人, 神代泰道, 井上裕太, 並木憲司:CCU 粉体を混入した低炭素型のコンクリートの品質・施工性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1393-1398, 2024
- 2) 佐々木猛, 八木利之:エコタンカル(軽質炭酸カルシウム)とその可能性, セメント・コンクリート, No.900, pp.58-62, 2022
- 3) 坂本英輔, 深澤巴菜, 竹田宜典:低炭素型ポーラスコンクリートの製造方法および基礎特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.636-641, 2025
- 4) 近藤祥太, 鶴田孝司, 宮原茂禎, 大脇英司:混和材を多量に使用したコンクリートの物性及び耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.636-641, 2025
- 5) 金澤優樹, 為石昌宏, 山下紘太郎, 金輪岳男:高炉スラグ微粉末と CO₂ 吸収軽質炭酸カルシウムを混和した環境配慮型コンクリートの特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.450-455, 2025

*1 広島工業大学工学系研究科・大学院生

*2 広島工業大学工学部建築工学科・学部生

*3 広島工業大学工学部建築工学科・教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate school of Eng., Hiroshima Institute of Technology
University Student, Dept. of Arch. Eng., Faculty of Eng., Hiroshima Institute of Technology
Prof., Dept. of Arch. Eng., Faculty of Eng., Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.