

炭酸化した乾燥スラッジ微粉末を用いたモルタルの基礎研究
ー G I 基金事業『CUCO』開発成果ー

三和石産(株) 正会員 ○橋本雄太 大川憲 宮田夏侑
鹿島建設(株) 正会員 関田徹志 非会員 百瀬晴基 巴史郎
東海大学 正会員 笠井哲郎 学生会員 竹澤一輝

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向け国内で様々な取組が行われている。2021 年度のセメント産業における CO₂排出量は一般社団法人セメント協会の報告によると約 4,000 万 t とされており、国内 CO₂排出量全体の約 4%を占めている。その内、約 6 割はセメントの主原料である石灰石の熱分解による脱炭酸反応によるものと言われており、セメント分野ではこれを回収、分離する技術の開発が行われている。一方、コンクリート分野においては γ -C₂S と副産物混和材などを用い、これに高濃度の CO₂で炭酸化養生を行うことでカーボンネガティブとなる環境配慮型コンクリート（以下、カーボンネガティブコンクリートと称す）が製造されている¹⁾。筆者らはこれまでに戻りコン起源のスラッジについてコンクリート製造からスラッジ処理完了までの時間を短縮することで、未水和セメント分を多く残し水和活性を高めた乾燥スラッジ微粉末（以下、DSP と称す）を提案し、これをプレキャストコンクリートや生コンに適用した事例およびこれらのコンクリートの CO₂排出削減効果について報告した^{2),3)}。そこで本研究では「CUCO（Carbon Utilized COConcrete）」の一員として、DSP の更なる低炭素化を指向し、炭酸化した DSP（以下、DSP(C)と称す）を用いたカーボンネガティブコンクリートを開発することを目的とし DSP(C)を用いたモルタルを対象にフレッシュ性状および圧縮強度について実験的に検討した。

2. 実験概要

2. 1 DSP (C) の製造方法

DSP(C)は高濃度炭酸化槽を用い、温度 50℃、湿度 50%、CO₂濃度 80%の条件で槽内に各 DSP をバット（幅 37.6 cm×奥行 27.6 cm）に厚さ 0.3 cm 程度となるように広げ静置して養生した。炭酸化時間は 0、3、6、12、18、24 時間の 6 水準とした。

2. 2 使用材料および配合

各 DSP(C)の基礎物性を表-1、使用材料を表-2、各 DSP(C)の混和剤の添加方法と添加率を表-3 に示す。表-1 より炭酸化前の DSP の比表面積は 5290 cm²/g（以下、DSP(C)-L0 と称す）、6790 cm²/g（以下、DSP(C)-M0 と称す）および 10360 cm²/g（以下、DSP(C)-H0 と称す）の 3 種類を使用した。なお、記号の L、M、H の後の数字は炭酸化時間である。また、これらを炭酸化した DSP(C)は炭酸化時間毎にそれぞれ DSP(C)-L0～L24、DSP(C)-M0～M24、DSP(C)-H0～H24 と示した。配合はセメントの物理試験（JIS R 5201:2015）の強さ試験に準拠し、W/DSP(C)=50%、S/DSP(C)=3.0 とした。

2. 3 試験項目および方法

各種モルタルのフレッシュ試験はモルタルフロー(JIS R 5201:2015)、物性試験はセメントの物理試験方法(JIS R 5201:2015)の強さ試験に準拠した。炭酸化前の各 DSP(C)-0 配合のフロー値が 160±20mm となるようにそれぞれ混和剤の添加率を調整し、表-3 のとおり各 DSP(C)配合は同一添加率とした。一方で DSP(C)-H は同一添加率では、炭酸化後の DSP(C)を用いたモルタルの流動性が大きく材料分離し供試体作製が困難であると判断し、各 DSP(C)-H のフロー値が同程度となるように表-3 の添加率についても実施した。DSP(C)-L0～L24 および DSP(C)-M0～M24 は材齢 1 日で脱型後、試験材齢まで 20±3℃で水中養生し、材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。DSP(C)-H は材

表-1 各 DSP (C) の基礎物性

No	記号	炭酸化時間 (h)	炭酸化後の 密度 (g/cm ³)	炭酸化後の 比表面積 (cm ² /g)	CO ₂ 固定量 (kg-CO ₂ /t)
1	DSP(C)-L0	0	2.96	5290	0
2	DSP(C)-L3	3	2.94	4860	3.3
3	DSP(C)-L6	6	2.97	4810	6.1
4	DSP(C)-L12	12	2.91	4360	11.6
5	DSP(C)-L18	18	2.96	4590	10.4
6	DSP(C)-L24	24	2.96	4510	16.1
7	DSP(C)-M0	0	2.59	6790	0
8	DSP(C)-M3	3	2.74	6450	14.8
9	DSP(C)-M6	6	2.74	6050	17.2
10	DSP(C)-M12	12	2.72	5810	22.4
11	DSP(C)-M18	18	2.74	6090	23.7
12	DSP(C)-M24	24	2.75	6020	27.0
13	DSP(C)-H0	0	2.51	10360	0
14	DSP(C)-H3	3	2.61	8690	30.7
15	DSP(C)-H6	6	2.63	8560	31.0
16	DSP(C)-H12	12	2.60	7400	36.8
17	DSP(C)-H18	18	2.63	8180	40.3
18	DSP(C)-H24	24	2.61	7810	40.9

表-2 使用材料

材料名	記号	詳細
結合材	DSP(C)	DSP(C) (表-1参照)
細骨材	S	セメント協会 標準砂 絶乾密度: 2.64g/cm ³ 吸水率: 0.42%
水	W	水道水
混和剤	SP	高性能AE減水剤

表-3 混和剤の添加方法と添加率

配合名	混和剤の添加方法	配合条件	SP (DSP(C)×w(%)
DSP(C)-L0-24	同一添加率	W/DSP(C)= 50% S/DSP(C)=3.0	1.5
DSP(C)-M0-24	同一添加率		6.1
DSP(C)-H0-24	同一添加率		35.0
DSP(C)-H0	同程度のフロー値と なるように添加率で 調整		35.0
DSP(C)-H3			2.3
DSP(C)-H6			2.3
DSP(C)-H12			6.1
DSP(C)-H18			2.0
DSP(C)-H24			2.3

キーワード CUCO, 乾燥スラッジ微粉末, 炭酸化, フロー, 圧縮強度, CO₂固定量

連絡先 〒252-0823 神奈川県藤沢市菖蒲沢仲之桜 710 番地 三和石産(株)テストング事業部 TEL 0466-48-5515

齢1日では強度試験を行った。DSP(C)-Hは材齢1日では強度が小さく、水中養生が困難であると判断し、脱型後、封かん養生し、材齢28日で圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュ性状

モルタルフロー試験の結果を図-1に、各DSP(C)のCO₂固定量と炭酸化前後のフロー値の増加量の関係を図-2に示す。図-1より炭酸化させることですべてのDSP(C)のフロー値が大きくなり流動性が向上することが見られた。各DSP(C)のフロー値の増加量の最大値(DSP(C)-L: 89mm, DSP(C)-M: 127mm DSP(C)-H: 147mm)を見ると水和生成物の量が多いと思われる炭酸化前の比表面積が大きいDSPほど炭酸化によるフロー値の増加量が大きくなる傾向であった。また、DSP(C)-MおよびHでは炭酸化時間3時間で大幅に流動性が改善する結果となった。図-2より、すべてのDSP(C)においてCO₂固定量が大きくなるとフロー値が大きくなる傾向であることが明らかとなった。これらはDSP(C)に含まれる水和生成物の水酸化カルシウムが炭酸化することにより空隙の多い水和生成物の凝集体が緻密化したためであると考えられる。

3. 2 圧縮強度

材齢28日の圧縮強度試験の結果を図-3に示す。各DSP(C)のCO₂固定量と炭酸化前後の材齢28日の圧縮強度の差を図-4に示す。なお同一添加率のDSP(C)-Hは材料分離が激しく供試体が作製できなかった。DSP(C)-Lでは炭酸化時間が強度に与える大きな影響は見られずDSP(C)-Mでは、DSP(C)-M0とDSP(C)-M3の圧縮強度が同程度であったがそれ以外は炭酸化時間が長い程、圧縮強度が小さくなる傾向が得られた。DSP(C)-Hでは、DSP(C)-H3が最も圧縮強度が大きくなり炭酸化時間が長いほど圧縮強度が小さくなる結果となった。図-4よりDSP(C)のCO₂固定量が大きい程、圧縮強度が小さくなる傾向であった。これらは、水和生成物の炭酸化による炭酸カルシウムの生成量が強度発現性に影響を与えたためと考えられる。

4. まとめ

- 1) 全てのDSP(C)において、それらを用いたモルタルのフロー値は大きくなり、流動性が向上した。
- 2) フロー値の増加量は炭酸化前の比表面積が大きいDSPほど大きくなった。
- 3) 炭酸化前の比表面積が小さいDSPほど、圧縮強度の低下は見られなかったが、DSP(C)-HではDSP(C)-H3が最も圧縮強度が大きくなり、炭酸化時間が長いほど圧縮強度が小さくなる傾向がみられた。

謝辞: 本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21014) を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果である。

参考文献

- 1) 取達剛ほか: 炭酸化養生によるCO₂吸収型カーボンネガティブコンクリートの開発と今後の展開, コンクリート工学, vol. 59, No. 9, pp. 813-818, 2021. 9
- 2) 百瀬晴基ほか: 乾燥スラッジ微粉末を混和剤として用いたレディーミクストコンクリートの適用事例, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1467-1472, 2018. 7
- 3) 大川憲ほか: レディーミクストコンクリート工場の戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の諸特性とCO₂排出原単位, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 1372-1377, 2020. 7

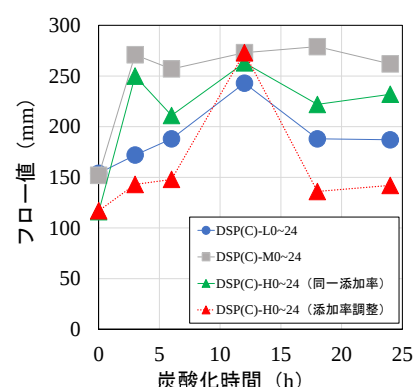


図-1 モルタルフロー試験

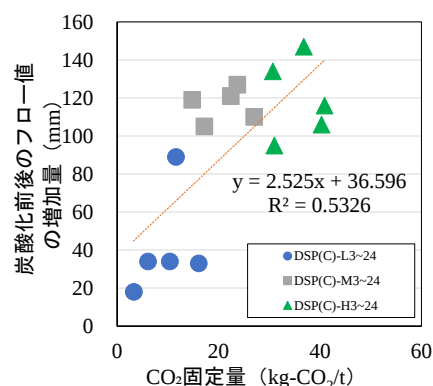


図-2 CO₂固定量と炭酸化前後のフロー値の増加量

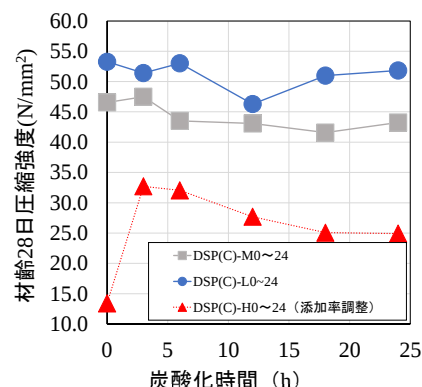


図-3 圧縮強度試験

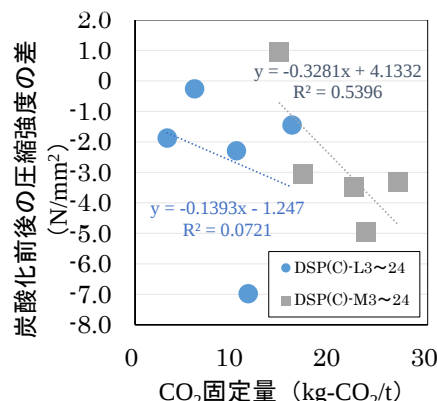


図-4 CO₂固定量と炭酸化前後の圧縮強度の差