

論文 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

大川 憲*1・青木 真一*2・関田 徹志*3・笠井 哲郎*4

要旨：本研究は、新たなレディーミクストコンクリート工場における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 排出原単位について検討した。これまでに自社や複数のレディーミクストコンクリート工場における戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末については明らかとなっている。そこで戻りコンクリートの使用材料のメーカーが異なる新たな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基礎物性や CO₂ 排出原単位について検討した結果、工場の相違による品質への影響は小さく、これを有効利用することで CO₂ 排出量を削減できることが明らかとなった。

キーワード：戻りコンクリート、乾燥スラッジ微粉末、比表面積、圧縮強度、CO₂ 排出原単位

1. はじめに

建設産業に関わる主要な建設副産物として、現場に運搬されたレディーミクストコンクリート（以下、生コンと称す）の内、受入検査で不合格となったり、全量使用されず工場に戻されたりするコンクリート（以下、戻りコンと称す）がある。この戻りコンは、国土交通省の調査によると、平成 17 年時点で生コン出荷量の約 1.6%とされ、年間 100 万 m³ 超が廃棄されており、廃棄物削減とリサイクル促進は喫緊の課題である。著者らは、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、未水とセメント分を多く残し水和活性を高めたことを特徴とする乾燥スラッジ微粉末（以下、DSP と称す）を提案し、それを用いたプレキャストコンクリートや生コンへの適用について報告した^{1) 2) 3)}。

また、生コン工場における戻りコンは主に生コンを出荷した当日の夕方以降に集中して発生するため、その処理を行うためには夕方以降の作業員の時間外労務が増加することや、今後労働人口の減少が避けられないことなどが課題となる。そこで、生コン工場における戻りコン処理の効率化の観点から、複数の生コン工場（以下、複数工場と称す）の戻りコンを集約して処理を行うことは必要不可欠になると考えられ、これまでに複数工場の戻りコンから製造した乾燥スラッジ微粉末の諸特性について報告した⁴⁾。今後、新たな生コン工場の戻りコンを受入れ、本処理と同様に DSP を製造することが考えられるため、戻りコンの使用材料のメーカーの相違が、DSP の品質に及ぼす影響について検討する必要がある。

一方、世界では地球温暖化が問題となっており、現在

パリ協定に提出されている各国の目標では 2100 年に産業革命前に比べ、約 3.0°C 上昇すると予測されている⁵⁾。またセメント産業における CO₂ の発生源はセメント製造プロセスにおける化石燃料の使用と原料中の石灰石の脱炭酸とがその大部分であり、人為的に排出される世界中の CO₂ 排出量の約 5% を占めると言われている。そのため、セメント・コンクリート分野においても CO₂ 排出量削減は喫緊の課題である。

そこで本研究では、これまでに行った自社工場および複数工場の DSP 製造プラントで得られた DSP（以下、全 DSP と称す）と新たな生コン工場の戻りコンから製造した DSP（以下、新 DSP と称す）を比較し、戻りコンの使用材料のメーカーの相違が、DSP の品質に及ぼす影響について明らかにすることを目的とし、DSP の基礎物性と CO₂ 排出原単位について検討した。

なお、全 DSP と新 DSP の戻りコンの条件を表-1 に示す。

2. DSP の製造工程

DSP の製造工程を図-1 に示す。DSP は、戻りコンから骨材を分級し、残ったスラッジ水をフィルター加圧装置で脱水後、破碎攪拌翼付きスラッジ乾燥機（乾燥温度：120～130°C）を用いて含水率が 1～2% 程度となるまで破碎乾燥処理して製造したものである。なお、図の湿式サイクロンの工程で、細骨材の微粒分の一部を除去しているが、DSP には骨材の微粒分が 30～35% 程度含まれていたことが報告されており⁶⁾、本研究で用いた DSP も同程度含まれているものと考えられる。また原料となる戻りコンは、施工時に使用されず工場に戻されたコンクリー

*1 三和石産（株）テストング事業部長 博士(工学) (正会員)

*2 三和石産（株）研究開発部長

*3 鹿島建設（株）技術研究所 主席研究員 Ph.D(正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科教授 工博(正会員)

表-1 全 DSP と新 DSP の戻りコン条件の比較表

区分	全 DSP (自社工場および複数工場の DSP 製造プラントで得られた DSP)	新 DSP (新たな生コン工場の戻りコンから製造した DSP)
戻りコンの条件	<ul style="list-style-type: none"> 同一生コン工場で生コンを練り、時間を経過させ、実験のために戻りコンと仮定したもの(実機製造実験用に作った戻りコン) 配合は全て同一生コン工場の同一配合 W/Cは50%のみ 原材料は全て同一メーカー セメントの種類は普通セメントのみ 混和材や特殊骨材は含まない 	<ul style="list-style-type: none"> 単一生コン工場実際に現場で余った戻りコン 配合は数種類のもの混在 W/Cは45~50%のもの混在 原材料は全て同一だが、<u>全 DSP とはセメント、骨材、混和剤メーカーが全て異なる</u> セメントの種類は普通セメントのみ 混和材や特殊骨材は含まない

ト、荷卸し時に不合格となった製品で、普通ポルトランドセメント（以下、OPC と称す）を用いた普通コンクリートのみである。ただし、新 DSP の戻りコンは、購入先のセメント会社が異なることや骨材の産地や混和剤メーカーも異なる。また、図中の遅延剤添加は DSP の品質を安定化させるために夏季のみ使用するものである。

3. DSP の基礎物性

3.1 実験概要

本実験では全 DSP と新 DSP を比較し、戻りコンの使用材料のメーカーの相違が、DSP の品質に及ぼす影響について明らかにすることを目的とし、DSP の基礎物性やモルタルによるフレッシュおよび強度発現性状について検討した。

3.2 実験方法

各実機プラントで製造した DSP に関し、密度試験(JIS R 5201)、比表面積試験(JIS R 5201)、強熱減量試験(JIS R 5202)を行った。なお、比表面積試験の測定条件は密度を測定し、量り採る試料の質量を算出した後、粉末度測定用標準試料のベッド成形時の成形圧力がほぼ同等となるようなポロシティーを設定し、ブレーン空気透過装置により測定した。また、DSP を用いたモルタルはホバート型モルタルミキサーを用いて練混ぜを行い、練混ぜ時間やフロー試験および供試体作製方法は JIS R 5201 の強さ試験に準拠した。フレッシュ試験では、モルタルフロー(目標値 170±30 mm)、空気量(目標値 6.5±2.0%)の各試験を目標値となるよう高性能 AE 減水剤（以下、SP と称す）の添加量を調整し実施した。圧縮強度試験では、モルタル供試体(4×4×16cm)を作製し、その圧縮強度から DSP の強度発現性を評価した。モルタルの配合条件は、水結合材比(W/DSP)=50%、細骨材結合材比(S/DSP)=3.0 の一定とした。細骨材はセメント協会標準砂を用い、養生条件は水中養生(20±1℃)とした。その後材齢 7、28 日で圧縮強度試験を行った。

3.3 実験結果および考察

(1) DSP の物性試験結果

DSP の比表面積と密度の関係を図-2 に示す。図より、

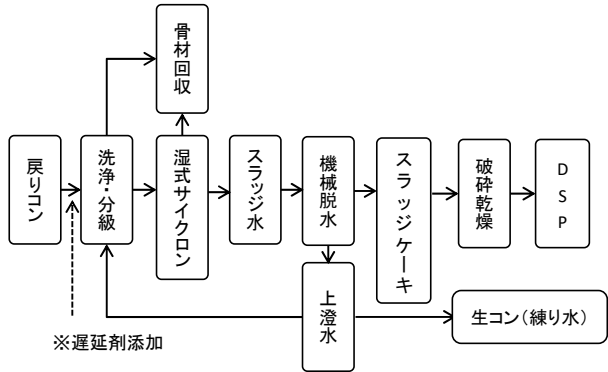


図-1 DSP の製造工程

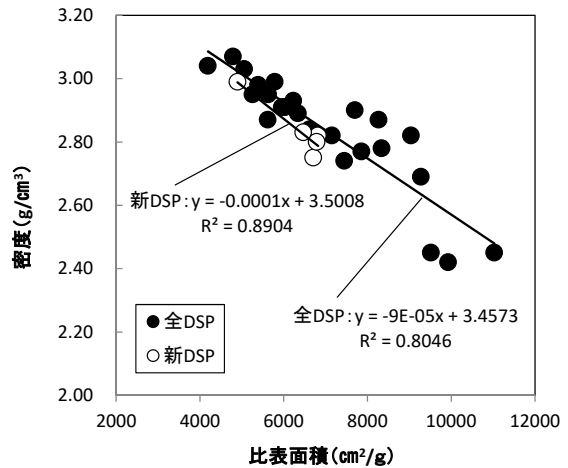


図-2 比表面積と密度の関係

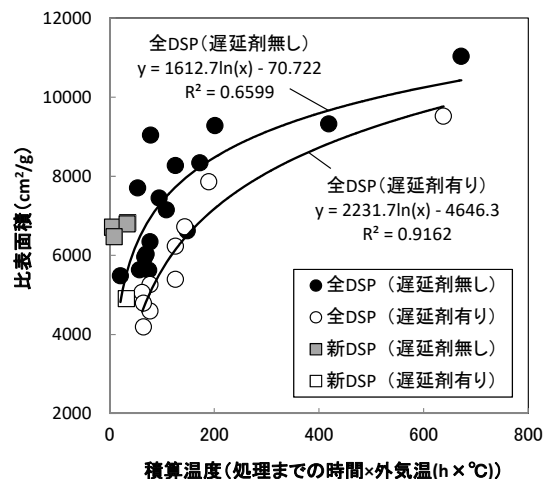


図-3 積算温度と比表面積の関係

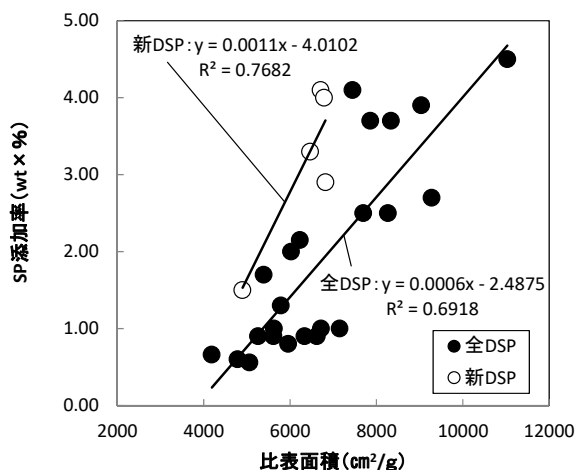


図-4 比表面積と SP 添加率の関係

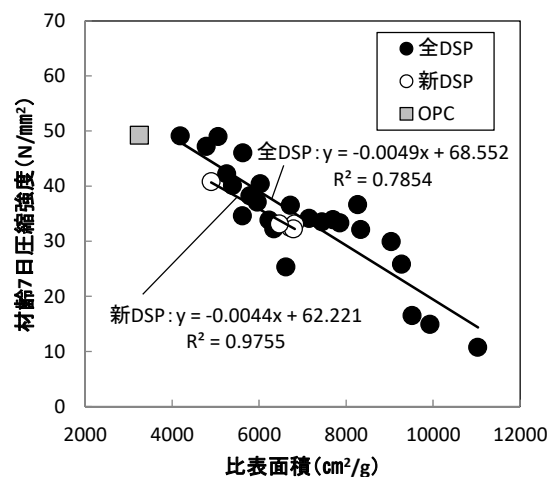


図-5 比表面積と材齢 7 日圧縮強度

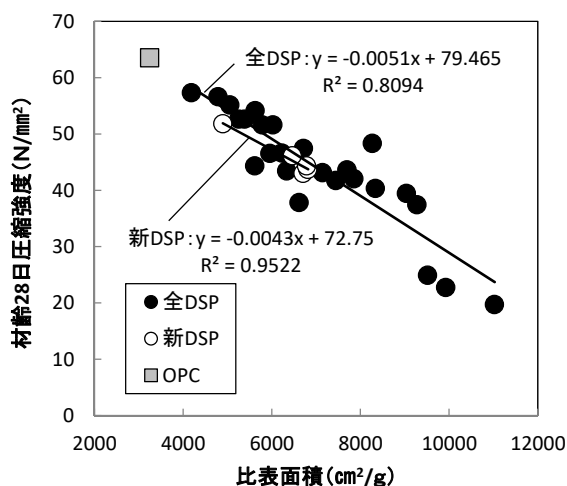


図-6 比表面積と材齢 28 日圧縮強度

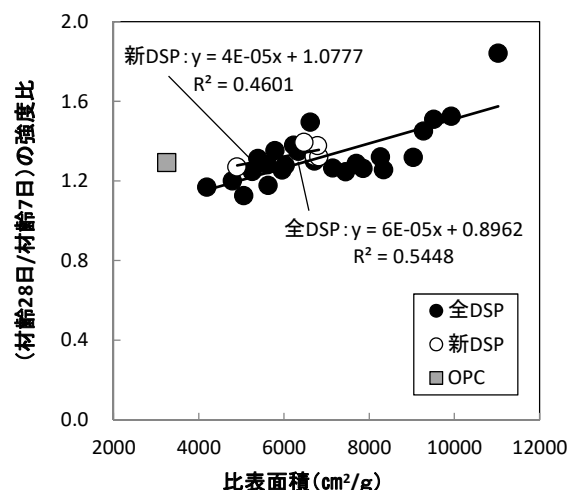


図-7 比表面積と強度比の関係

比表面積が小さいほど密度は大きくなった。これは、これまでと同様な傾向であり、DSP の原料である戻りコンに含有するセメントの水和反応の進行度合いに差が生じ、未水和セメントの残存量が多いほど、密度が大きく、比表面積が小さくなっていると考えられる。また、全 DSP と新 DSP とともに比表面積と密度には高い相関性が認められた。さらに全 DSP と新 DSP は回帰式および相関係数ともほぼ同等の値となり、戻りコンの使用材料のメーカーの相違による DSP の物性への影響は見られなかった。

(2) 積算温度と比表面積

積算温度と DSP の比表面積の関係を図-3 に示す。ここで積算温度とは戻りコン処理までの時間と処理時の外気温の積を示す。図より、遅延剤有り無しともに積算温度が大きいほど比表面積が大きくなり、全 DSP と新 DSP とともに積算温度と比表面積には相関性が見られた。これは、上記と同様にセメントの水和反応の進行度合いの差により、積算温度が大きいほど未水和セメントの残

存量が小さくなり、比表面積が大きくなっていると考えられる。また遅延剤を用いることで、全 DSP と新 DSP とともに同一積算温度で比表面積が 1000cm²/g 程度小さくなるのがわかった。これは、遅延剤により戻りコンの水和反応が抑制されたことにより、比表面積が小さくなったためであると考えられる。また、これまでに DSP の品質管理は比表面積で行うことができると報告したが、戻りコンの使用材料のメーカーが異なる場合でも、DSP の品質管理は同様に比表面積で管理でき、積算温度から DSP の比表面積をある程度予測できることがわかった。

(3) フレッシュ性状

DSP の比表面積と SP 添加率の関係を図-4 に示す。図より全 DSP と新 DSP とともに比表面積が大きくなるほど、目標フロー値が得られる SP 添加率が大きくなったが、新 DSP は同一の比表面積で SP 添加率がわずかに大きく、回帰式の傾きも大きくなった。これは、表-1 に示すように全 DSP と新 DSP の戻りコンの使用材料が異なるこ

とが影響している可能性があるが、今後検討が必要である。

(4) 圧縮強度

DSP の比表面積とモルタルの材齢 7 日の圧縮強度の関係を図-5 に示す。図より比表面積が大きくなるほど圧縮強度は小さくなり、全 DSP と新 DSP とともに比表面積と強度に高い相関性が認められる。これは、比表面積が大きいほど、未水和セメントの残存量が小さくなっているため、強度が小さくなったと考えられる。また全 DSP と新 DSP は回帰式および相関係数ともほぼ同等の値となり、戻りコンの使用材料のメーカーの相違による DSP の強度への影響は見られなかった。さらに、DSP の比表面積が 5000cm²/g 程度以下のものは、OPC と同程度の強度となった。

DSP の比表面積とモルタルの材齢 28 日の圧縮強度の関係を図-6 に示す。全 DSP と新 DSP は上記の材齢 7 日と同様な傾向で、回帰式や相関係数もほぼ同程度であった。また全ての DSP で OPC よりも強度が小さくなった。

DSP の比表面積と（材齢 28 日/材齢 7 日）の強度比の関係を図-7 に示す。図より、DSP の比表面積が大きくなるほど、強度比は大きくなった。これは、文献 7) において DSP の鉱物組成は比表面積が大きくなるほど、水和反応速度が速い C₃S や C₃A の割合が小さくなり、水和反応速度が遅い C₂S の割合が大きくなることや、DSP の比表面積が大きくなるほど DSP に含まれる水和生成物等が凝集したものの割合が大きくなり、内部に水を拘束している可能性があること、さらには図-4 に示す通り、DSP の比表面積が大きいものほど SP 添加率が大きくなっていることから、比表面積が大きい DSP は水和初期の反応が SP により遅延され、その後材齢 28 日では強度が増進したものと考えられる。これらの影響度合い等については、今後詳細に検討する必要がある。

4. DSP の CO₂ 排出原単位

4.1 算出方法の概要

本試算では、一般社団法人産業環境管理協会の LCA ソフトの MiLCA を用い、DSP の有効利用における地球温暖化への影響を明らかにすることを目的とし、戻りコンから製造した DSP の CO₂ 排出原単位を ISO14040、ISO14044 に準拠して算出した。

4.2 製品システム

DSP の CO₂ 排出原単位の算出は、以下に示す製品システムで行った。図-1 に示す機械脱水、破碎乾燥は電力を使用し、東京電力地域の標準的な電力を用いた。スラッジケーキはホイールローダーを用い、破碎乾燥に投入する。なお、ホイールローダーの燃料は軽油、破碎乾燥の燃料は A 重油を使用した。スラッジケーキ 1.5385kg から DSP1kg が生産されるが、スラッジケーキの含水率は 35%の設定で行った。上記のそれぞれのデータは、全て自社工場での実測値（1 年間分）を用いた。燃料に用いる軽油、重油の輸送はタンクローリー車(10kL)で行い、20km の距離を輸送してきたものとして算出した。

4.3 インベントリ分析結果

インベントリ分析とは、「製品やサービス等において、原料の調達、製造、流通、使用、排気、リサイクルなどライフサイクルの各段階のうち、予め設定した調査範囲に対し、各段階で投入される資源、エネルギー又は排出物を定量的に把握し分析すること」と定義されている⁸⁾。このインベントリ分析について、上記 MiLCA を用い算出した結果、DSP の CO₂ 排出原単位は 95.8kg-CO₂/t であった。これは表-2 に示す高炉スラグ微粉末(26.5kg-CO₂/t)（以下、BFS と称す）やフライアッシュ(29kg-CO₂/t)（以下、FA と称す）に比べ大きな値となるが、OPC が 2017 年度で 769kg-CO₂/t であることから⁹⁾、DSP は OPC の約 1/8 程度の CO₂ 排出原単位となることがわかった。

表-2 使用材料および各原材料の CO₂ 排出原単位

項目	記号	材料	産地	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント	-	3.15	3280	769
	H	早強ポルトランドセメント	-	3.14	4450	769
混和材	DSP	乾燥スラッジ微粉末	-	2.87	6000	95.8
	BFS	高炉スラグ微粉末4000	-	2.90	4450	26.5
	FA	フライアッシュⅡ種	-	2.30	4170	29
細骨材	S1	砂	千葉県富津産	2.58	-	5.47
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡産	2.67	-	3.7
	S3	砕砂	神奈川県厚木産	2.58	-	3.7
粗骨材	G1	碎石2005(石灰石)	岩手県大船渡産	2.69	-	2.9
	G2	碎石	神奈川県厚木産	2.62	-	2.9
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-	-	-
練り水	W	上澄水	-	-	-	0.14

表-3 配合表

分類	呼び方(配合名)	W/B (%)	s/a (%)	単位数(kg/m ³)									
				W	OPC	DSP	BFS	H	S1	S2	S3	G1	G2
生コン	普通27-15-20N (OPC100%)	53.5	49.4	170	318	0	0	0	263	176	440	465	453
	普通27-15-20N (DSP20%置換)	51.5	48.3	165	256	64	0	0	479	392	0	955	0
プレキャスト製品	OPC100%	50	48.7	170	340	0	0	0	382	486	0	933	0
	DSP50-BFS40-H10	45	47.3	170	0	189	151	38	369	451	0	933	0

5. DSP を用いた各コンクリート 1m³ の CO₂ 排出量

5.1 概要

本試算では、上記で算出した DSP の CO₂ 排出原単位を用い、DSP を用いた生コンとプレキャスト製品での有効利用における地球温暖化への影響を明らかにすることを目的とし、DSP を用いた各コンクリート 1m³ の CO₂ 排出量を算出した。

5.2 使用材料および配合

対象としたコンクリートの使用材料および各原材料の CO₂ 排出原単位を表-2 に、配合表を表-3 に示す。表-2 の各原材料の CO₂ 排出原単位は、文献 8)、9) を参照した。また表-3 は文献 2) や文献 3) で行った配合を用い、生コンにおいては工場で通常使用する配合（普通 27-15-20N (OPC100%)）と、それと同一の呼び方で DSP を OPC に対し、20%置換した配合（普通 27-15-20N (DSP20%置換)）である。なお、DSP を用いた配合は、通常使用する配合に比べ、スランプロスが大きくなることから、単位水量を小さくし、混和剤添加量を大きくすることで、スランプロスを小さくするようにした。

プレキャスト製品においては、文献 2) で同程度の強度となる配合と比較し、通常配合 (OPC100%) に対し DSP を用いたプレキャスト製品の配合 (DSP50-BFS40-H10) は、結合材の割合を DSP50%、BFS40%、H10%としたものである。

5.3 実験結果および考察

生コンの CO₂ 排出量試算結果を図-8 に示す。図は、表-2 の各材料の CO₂ 排出原単位と、表-3 の単位数の積により生コンの原材料の CO₂ 排出量と、生コンの生産量と電力使用量から計算した製造時の CO₂ 排出量 (2.07kg-CO₂/m³)⁸⁾ の和を示したものである。図より、普通 27-15-20N (OPC100%) 配合において、生コン 1m³ の CO₂ 排出量は、253.0kg-CO₂/m³ であった。一方、普通 27-15-20N (DSP20%置換) 配合では、211.9kg-CO₂/m³ であった。この結果から、DSP を用いた生コン 1m³ では、CO₂ 排出量を約 16.2%低減できることがわかった。また、生コンの CO₂ 排出量は原材料が大きな割合で、その中で

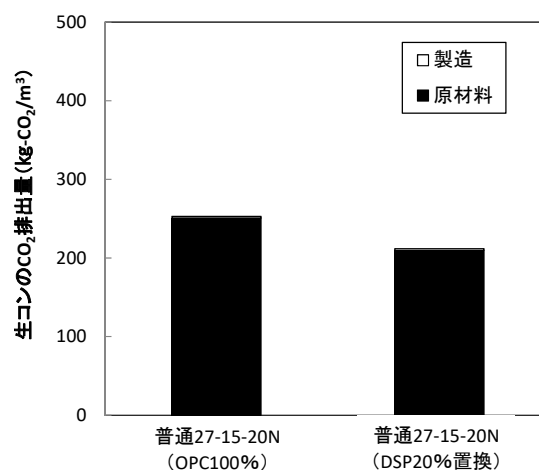


図-8 生コンの CO₂ 排出量試算結果

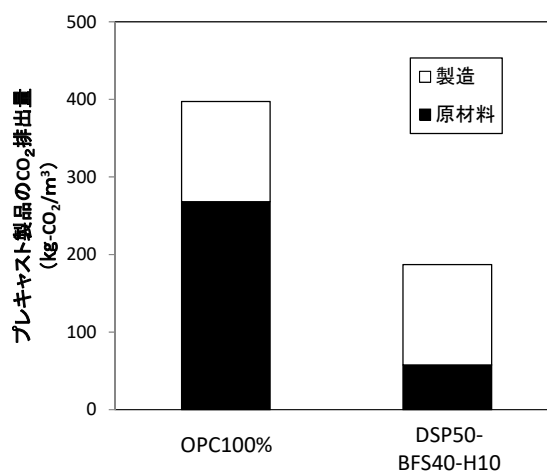


図-9 プレキャスト製品の CO₂ 排出量試算結果

もセメントが大部分を占めていることがわかる。これに比べ、生コン製造時の CO₂ 排出量の影響は極めて小さいことがわかった。

プレキャスト製品の CO₂ 排出量試算結果を図-9 に示す。こちらも生コンと同様に原材料部分を算出し、プレキャスト製品の種類によって大きく異なるが、製品工場における製造時の CO₂ 排出量 (129.3kg-CO₂/m³)⁸⁾ の平均値との和を示したものである。図より、OPC100%配合で

は、397.4kg-CO₂/m³であった。一方、DSP50-BFS40-H10配合では、187.0kg-CO₂/m³であった。これは、結合材にCO₂排出原単位の小さいDSPやBFSを用いたことが影響した。この結果から、DSPおよびBFSを用いたプレキャスト製品1m³では、CO₂排出量を約52.9%低減できることがわかった。また、生コンと同様にCO₂排出量は原材料が大きな割合を占めているが、製造時のCO₂排出量は生コンに比べ大きい。これは、製品工場では鉄筋、表面仕上げ材、型枠の他に、蒸気養生を行うことが影響しているためであると考えられる。

6. まとめ

本研究では、全DSPと新DSPを比較し、戻りコンの使用材料のメーカーの相違が、DSPの品質に及ぼす影響について明らかにすることを目的とし、DSPの基礎物性とCO₂排出原単位について検討し、下記の結論が得られた。

- (1) 戻りコンの使用材料のメーカーの相違によるDSPの物性への影響は見られなかった。
- (2) DSPを用いたモルタルのフレッシュ性状は、新DSPが同一の比表面積でSP添加率がわずかに大きく、回帰式の傾きも大きくなった。
- (3) DSPを用いたモルタルの圧縮強度は、新DSPと全DSPとも比表面積と強度に高い相関性が認められる。
- (4) DSPの比表面積と（材齢28日/材齢7日）の強度比は、比表面積が大きくなるほど、DSPの強度比が大きくなった。これについては今後詳細に検討する必要がある。
- (5) DSPのCO₂排出原単位は、95.8kg-CO₂/tであった。
- (6) DSPを用いた生コンでは、通常配合の生コンに比べ、CO₂排出量を約15.6%低減できることがわかった。
- (7) DSPおよびBFSを用いたプレキャスト製品では、通常配合に比べ、CO₂排出量を約52.9%低減できることがわかった。

これらの結果から、生コン業界で問題となる戻りコンに関し、今後新たな生コン工場の戻りコンから製造したDSPも同程度の品質のものが製造できることを示唆した。

謝辞

本研究は、住友大阪セメント(株) 執行役員建材事業部長 小堺規行氏に乾燥スラッジ微粉末のCO₂排出原単位についてご指導、ご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大川憲, 閑田徹志, 巴史郎, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末を用いたプレキャスト製品積みブロックへの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1591-1596, 2017.7
- 2) 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末と産業副産物混和材を併用した養生方法の異なるクリンカーフリーコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.1, pp.107-117, 2017
- 3) 百瀬晴基, 大川憲, 津嶋武志, 城戸隆宏: 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
- 4) 大川憲, 百瀬晴基, 閑田徹志, 笠井哲郎: 複数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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1565-1570, 2019.7
- 5) 環境省: IPCC「1.5°C特別報告書」の概要, pp.1-92, 2019.7
- 6) 八巻真規, 大川憲, 青木真一, 閑田徹志, 百瀬晴基, 石関浩輔, 笠井哲郎: 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の基礎物性, 第42回土木学会関東支部技術研究発表会, V-65, 2015
- 7) 大川憲: 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その有効利用に関する研究, 東海大学大学院博士論文, 2018
- 8) 公益社団法人日本コンクリート工学会: コンクリートの環境テキスト(案), pp.1-144, 2015.
- 9) セメント協会ホームページ:
http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg1i_01.pdf
(閲覧日: 2020年1月6日)