

報告 乾燥スラッジ微粉末を用いたプレキャストコンクリート製品積みブロックへの適用

大川 憲^{*1}・閑田 徹志^{*2}・巴 史郎^{*3}・笠井 哲郎^{*4}

要旨： 戻りコンクリートの有効利用と低炭素化の観点から、著者らは戻りコンクリートから骨材を分級し、残ったスラッジ水を脱水後、破碎乾燥機を用いて製造した乾燥スラッジ微粉末を普通セメントの 20% 置換する低環境負荷コンクリートについて、プレキャストコンクリート製品積みブロックに適用することを目的とし、そのフレッシュ、硬化性状および製品規格（外観・質量・形状、寸法・圧縮強度）との適合性について検討した。その結果、普通セメントを用いたものと同等以上の強度が得られ、コア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、製品規格に適合するプレキャストコンクリート製品積みブロックが製造できた。

キーワード： 戻りコンクリート、乾燥スラッジ微粉末、プレキャストコンクリート製品積みブロック、圧縮強度

1. はじめに

国内の産業廃棄物は平成 25 年度で約 3 億 8470 万トン排出され、その約 8035 万トン（約 20.9%）を建設業が占めており、建設業からの廃棄物の削減は重要な社会的要請である¹⁾。この建設関連廃棄物の一つである戻りコンクリート（以下、戻りコンと称す）は生コンクリート出荷量の約 1~2% を占め、全国で年間 400 万トン程度が発生するとの報告がある²⁾。この戻りコンは、処理費の負担が重く生コン業界において経営上の大きな問題となっており、以前から戻りコンの有効利用に関する研究や、減量化に対する取り組みも行われているが、有効な手段が確立されていないのが現状である。また生コン業界では、戻りコンの引取りと処理に関わる費用を施工者に対し負担を求める有償化の取り組みが各地域の生コン組合単位で行われており、戻りコンの発生率が減少した、という報告もなされているが³⁾、依然として戻りコン問題の根本的な解決には至っていない。また建設物の建設過程は CO₂ 排出量が大きく、国内の CO₂ 排出量の 10% 程度を占め、そのうち約 4%（4250 万 t）は、セメントクリンカーの製造過程で発生する⁴⁾。そのため低炭素化の観点から、コンクリート業界においても、セメントクリンカーの使用量を減らし CO₂ 排出量を削減する技術の開発が昨今盛んに行われている^{5), 6)}。

著者らは、これらの問題を解決すべく、戻りコンから骨材を分級し、残ったスラッジ水を脱水後、破碎乾燥機を用いて製造した乾燥スラッジ微粉末（以下、DSP と称す）の有効利用に関する検討を行ってきた⁷⁾。さらに、この DSP と高炉スラグ微粉末（以下、BFS と称す）やフライアッシュ（以下、FA と称す）を結合材としたクリン

カーフリーコンクリート（以下、RCCF コンクリートと称す）の開発を行っている。このコンクリートは、施工可能なフレッシュ性状を有していることを確認すると共に、設計基準強度 36N/mm² までの普通強度域のコンクリートを実現できることや⁸⁾、中性化抵抗性が付与できることから、一般 RC 構造物に使用できることを報告した⁷⁾。RCCF コンクリートは製造過程における CO₂ 排出量を約 90% 削減する究極の低環境負荷コンクリートであることからその普及が期待される。

一方で著者らは新たな取組として、DSP を普通ポルトランドセメント（以下、OPC と称す）に対し、20~30% 置換する汎用性を重視した低環境負荷コンクリート（以下、L-SR コンクリートと称す）の開発を開始した。このコンクリートは、プレキャストコンクリート部材もしくは製品全般のほか、レディーミクストコンクリートでの適用も検討している。なお、このコンクリートは CO₂ 排出量を約 20% 削減できる。

本研究では DSP の新規用途開発として、プレキャスト

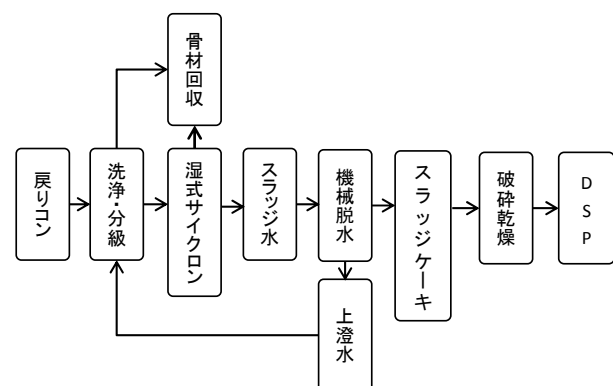


図-1 DSP 製造工程

*1 三和石産（株） テスティング事業部品質管理課長（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 建築生産グループ 主席研究員 Ph.D（正会員）

*3 鹿島建設（株） 技術研究所 建築生産グループ 主任研究員（正会員）

*4 東海大学 工学部土木工学科教授 工博（正会員）

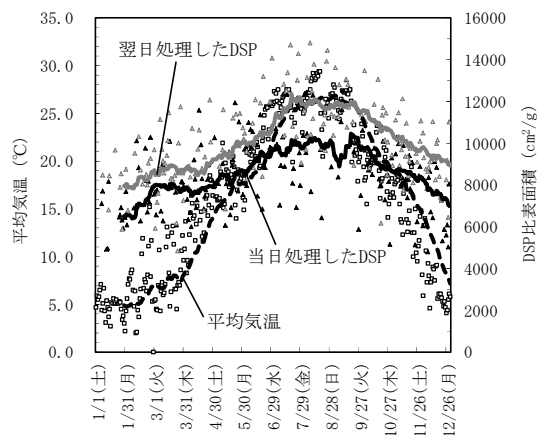


図-2 DSP 比表面積と平均気温の関係

コンクリート製品積みブロック（以下、積みブロックコンクリートと称す）に適用することを目的とし、DSP を用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ、硬化性状および製品規格（外観・質量・形状、寸法・圧縮強度）との適合性について検討した。

2. 実験概要

2.1 DSP の概要

(1) DSP 製造方法

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、残余のスラッジ水をフィルター加圧装置で脱水後、破砕攪拌翼付きスラッジ乾燥機（乾燥温度：120～130℃）を用いて含水率が1～2％程度となるまで破砕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、「グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法（NDIS 3422：2002）」に準拠して行った試験から、DSP には細骨材の微粒分が30％程度含まれている結果となった⁹⁾。また原料となるスラッジは、施工時に使用されなかった残余コンクリート、荷卸し時に不合格となった製品、および生コンプラントやアジテータ車の洗浄時に発生したものを対象とした。

(2) DSP の基礎物性および化学成分

DSP の比表面積と平均気温の関係を図-2 に示す。図より当日処理した DSP の比表面積と平均気温にはばらつきはあるものの相関関係が認められ、平均気温が低い冬期に DSP の比表面積は小さくなる場合が多く現れた。DSP の密度、強熱減量にも同様の関係が見られ、平均気温が低いほど、DSP の密度が大きく、強熱減量および比表面積は小さくなった⁷⁾。これは、平均気温の相違により、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、未水セメントの残存量は気温が低いほど多くなっているためであると考えら

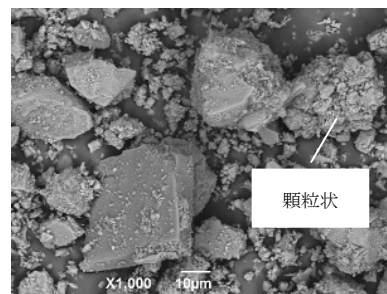


写真-1 DSP の SEM 画像

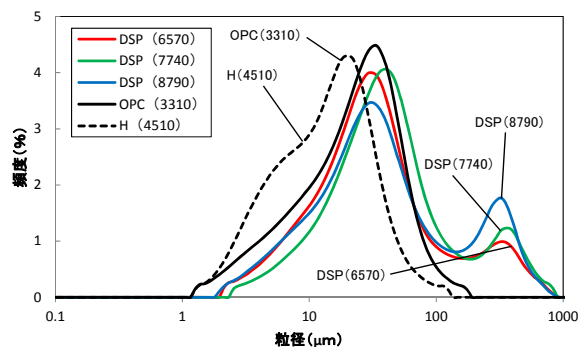


図-3 レーザー回折粒度分布結果

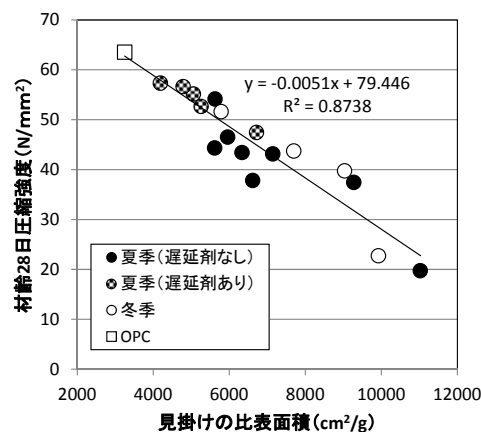


図-4 比表面積と材齢 28 日圧縮強度

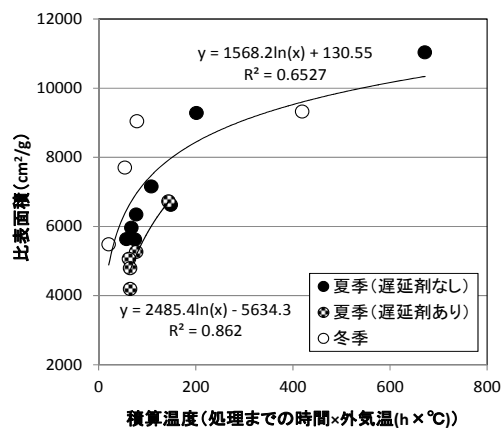


図-5 積算温度と DSP 比表面積

表－1 結合材の化学成分

記号	化学成分(%)							鉱物組成(%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ig.loss	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
DSP	19.90	5.51	2.68	54.20	1.61	1.83	13.1	35.9	14.2	6.7	4.4
OPC	20.68	5.28	2.91	64.25	1.40	2.10	1.80	58.7	15.1	9.1	8.8

れる。

DSP の SEM 画像を写真－1 に示す。SEM 画像から DSP には水和生成物等が顆粒状に凝集したものが含まれていることが観察された。

レーザー回折粒度分布測定結果を図－3 に示す。なお図の凡例にある括弧内の数値は比表面積の値を示す。図より、DSP は OPC や H に比べ、粒度分布の幅が広く、粒径 100～1000 μm に計測されているが、これはセメントが凝集したものや DSP 製造時に細骨材の一部が混入したものと考えられる。DSP の比表面積の違いでは、DSP の比表面積が大きくなるにつれ、粒径 300 μm 程度の値が大きくなった。これは、DSP の比表面積は原料である戻りコンの水和進行に伴い、比表面積が大きくなり、細かい粒子が凝集し写真－1 から観察された 300 μm 程度の見掛け上、粒径の大きな粒子が増大しているものと考えられる。

DSP 比表面積とモルタルによる材齢 28 日圧縮強度の関係を図－4 に、積算温度（処理までの時間×外気温（h×℃））と DSP 比表面積の関係を図－5 に示す。これらは、夏季および冬季において同一の生コンクリート配合（配合 30-18-20N）を用い、実機プラントにより DSP 製造までの経過時間をかえたものや遅延剤を添加した場合について検討を行った結果である。また図－4 のモルタルは、JIS R 5201 のセメント強さ試験に準拠して行った。図より、製造する季節に拘らず DSP 比表面積が小さいほど、圧縮強度は大きくなった。

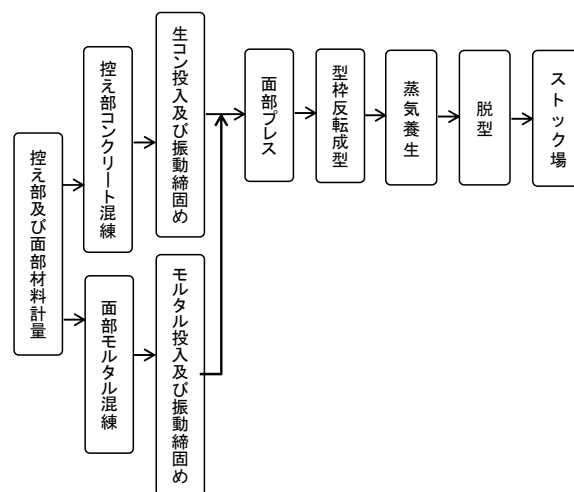
図－5 より製造する季節に拘らず積算温度が低いほど、DSP 比表面積は小さくなった。また遅延剤の添加は DSP の品質向上に寄与することがわかった。

結合材の化学成分を表－1 に示す。表の DSP 鉱物組成は、粉末 X 線回折（XRD）リートベルト法解析を行ったものである。リートベルト解析のため実施した X 線回折装置(XRD)による測定は、ターゲット CuKα、管電圧 40 kV、管電流 15 mA、走査範囲 5～70deg.(2θ)、ステップ幅 0.02 deg.を条件とし、回転試料台と高速半導体検出器を用いた。リートベルト解析は SIROQUANT Ver.3 を用いた。その他 XRD 測定およびリートベルト解析における詳細については参考文献 10) を参照されたい。

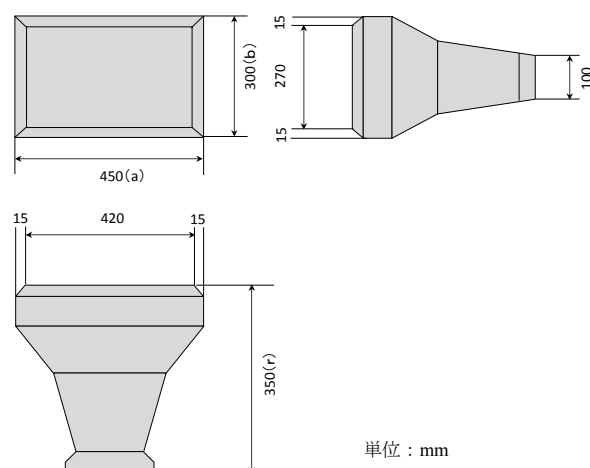
2.2 DSP を用いた積みブロックコンクリート

(1) 実験の目的

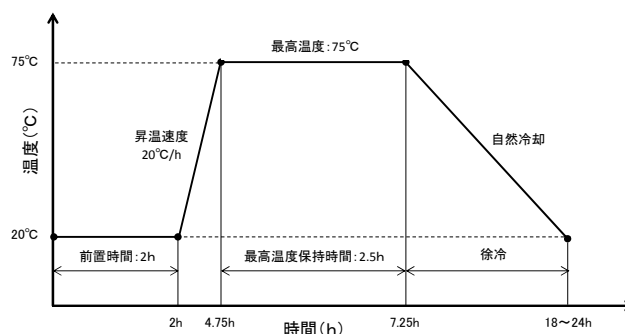
DSP を用いた積みブロックコンクリートでは、OPC に DSP を 20%置換して行い、DSP の種類による影響を



図－6 積みブロックコンクリートの製造方法



図－7 積みブロックコンクリートの形状・寸法



図－8 蒸気養生パターン

明らかにすることを目的とし、DSP を用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ、硬化性状および製品規格（外観・質量・形状、寸法・圧縮強度）との適合性につ

いて検討した。

(2) 積みブロックコンクリートの製造方法

積みブロックコンクリートの製造方法を図-6に示す。実機プラントにて混練後振動締固めを行い、その後即時脱型し、蒸気養生槽へ送りこみ、養生終了後ストック場にて保管する。積みブロックコンクリートの形状、寸法を図-7に示す。また蒸気養生パターンを図-8に示す。

(3) 使用材料および配合

使用材料を表-2に示す。DSP は比表面積が異なる3種類を用いた。混和剤は可塑剤(Ad1)と即脱用(Ad2)の2種類を用いたが、どちらも充填性を向上させるが、即脱用(Ad2)には空気連行性の機能がある。配合表を表-3に示す。DSP 置換率は20%一定とした。なお、比較対象として、OPC のみを用いたものも行った。

(4) フレッシュおよび硬化性状

フレッシュ性状は、振動締固め成型直後の半製品表面に程よく水分の照りがある状態で形状を保ち、ダレおよびジャンカがないことを目視により確認した。硬化性状に関する試験は、コンクリートからのコアの採取方法および圧縮強度試験方法(JIS A 1107)に準拠して行った。圧縮強度試験は、材齢7日および14日で行い、コア採取は試験材齢の2日前に行い、採取したコア供試体を試験時まで20±2℃の水中養生後に圧縮強度試験を行った。またコア供試体の見掛けの密度は上記試験方法に準拠して行った。

(5) 製品規格との適合性

積みブロックコンクリートの規格値を表-4に示す。表より目標圧縮強度は材齢14日で18N/mm²以上である。それぞれ積みブロックコンクリートの外観・質量・形状・寸法、圧縮強度を測定し、規格値との適合性を確認した。なお製品における外観は、使用上有害なきず、ひび割れ、欠け、反りなどがないことを目視により確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 積みブロックコンクリートのフレッシュ性状

振動締固め成型直後の半製品の状態を目視により確認した。DSP を用いたものは、OPC を用いたものとほぼ同程度であり、ダレおよびジャンカも見られなかった。

3.2 積みブロックコンクリートの硬化性状

積みブロックコンクリートの圧縮強度試験結果を図-9に示す。図より DSP を用いたいずれの配合も材齢14日に18N/mm²以上となった。

DSP の比表面積と材齢14日圧縮強度の関係を図-10

表-2 使用材料

種類	記号	材料名	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	吸水率 %
結合材	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16	3330	-
	DSP-L	低ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.86	6780	-
	DSP-M	中ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.79	8820	-
	DSP-H	高ブレン品乾燥スラッジ微粉末	2.58	9950	-
細骨材	S	砕砂(神奈川県相模原産)	2.61(表乾)	-	-
粗骨材	G	砕石(神奈川県厚木産)	2.61(表乾)	-	2.77
混和剤	Ad1	可塑剤	1.01	-	-
	Ad2	即脱用(空気連行型)	1.05	-	-

表-3 コンクリートの配合

No	配合名	W/B %	s/a %	単位量(kg/m ³)						
				W	OPC	DSP	S	G	Ad1 (B×wt%)	Ad2
1	40.2-OPC100-Ad1-0.18	40.2	60.7	102	255	0	1214	787	0.18	-
2	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0	40.2	60.0	108	216	54	1182	787	-	0.00
3	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0.15	40.2	60.0	108	216	54	1182	787	-	0.15
4	39.3-OPC80-DSP-M20-Ad2-0.15	39.3	59.5	108	220	55	1168	795	-	0.15
5	39.3-OPC80-DSP-H20-Ad2-0.15	39.3	59.5	108	220	55	1165	795	-	0.15

表-4 積みブロックコンクリートの規格値

項目	規格値		
外観	使用上有害な、きず、ひび割れ、欠け、反りなどがあってはならない		
質量	1m ³ 当りのブロック質量350kg以上 1個当たり47.3kg以上		
形状、寸法	幅(a)	450mm	±3mm
	高さ(b)	300mm	±3mm
	控長(r)	350mm	±5mm
性能(圧縮強度)	材齢14日で18N/mm ² 以上 (製品と同一養生)		

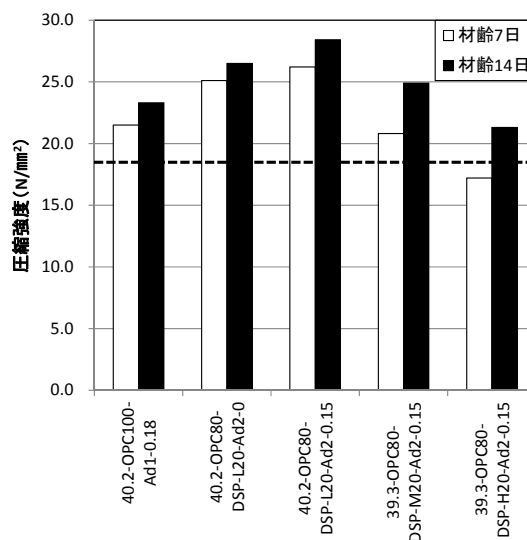


図-9 圧縮強度試験結果

に示す。図より DSP 比表面積が大きくなるほど圧縮強度が小さくなった。これは既往の研究より、DSP の比表面積が大きくなるほど、未水和セメントの残存量が少なくなるため、強度発現が小さくなったものと考えられる⁷⁾。

材齢14日と材齢7日の圧縮強度比を図-11に示す。図より OPC を用いた積みブロックコンクリートと DSP を用いたものではほぼ同程度の強度比であった。

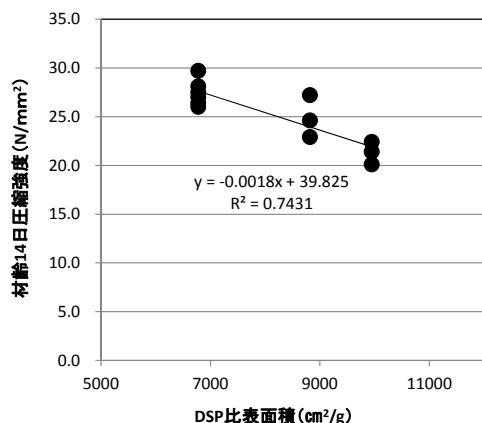


図-10 DSP 比表面積と材齢 14 日圧縮強度

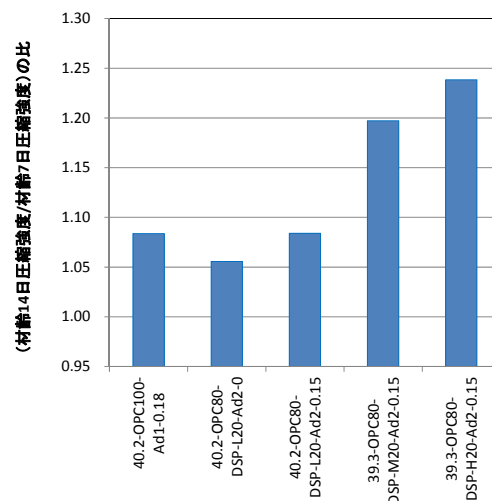


図-11 (材齢 14 日/材齢 7 日) の圧縮強度比

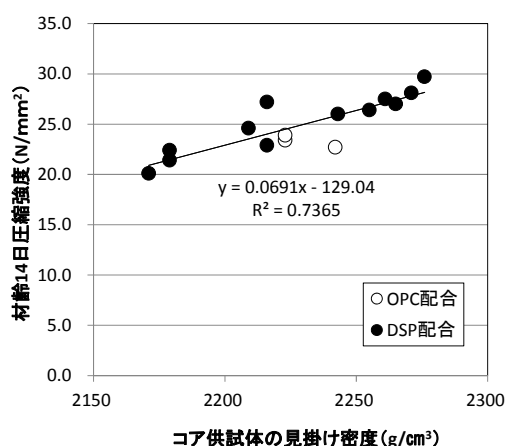


図-12 コア供試体の見掛け密度と
材齢 14 日圧縮強度

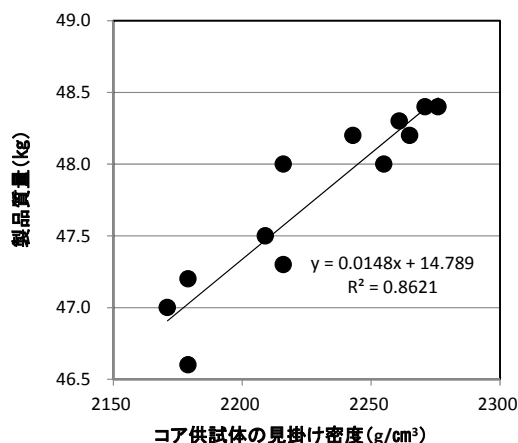


図-13 見掛け密度と製品質量

3.3 積みブロックコンクリートの製品検査

積みブロックコンクリートの製品検査結果一覧表を表-5 に示す。表より、製品質量に関しては、DSP-H を用いたもので規格値より小さくなった。これは、DSP の比表面積が大きくなるほど、密度が小さくなることから、製品質量が小さくなったと考えられる。それ以外では全

て規格値を満足した。

コア供試体の見掛け密度と材齢 14 日圧縮強度の関係を図-12 に示す。図より OPC 配合（配合 No.1）および DSP 配合（配合 No.2～5）ともにコア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、圧縮強度は大きくなり、相関関係が見られた。また DSP 配合と OPC 配合はほぼ同様の傾

表-5 製品検査結果一覧表

No	配合	外観	判定	製品質量 47.3以上 kg	判定	形状寸法			判定	圧縮強度 材齢14日 18以上 N/mm ²	判定	コア供試体 の見掛け 密度 g/cm ³
						幅	高さ	控長				
						450±3 mm	300±3 mm	350±5 mm				
1	40.2-OPC100-Ad1-0.18	良好	○	48.6	○	449	300	355	○	22.7	○	2242
		良好	○	48.7	○	449	300	354	○	23.4	○	2223
		良好	○	48.6	○	449	300	354	○	23.9	○	2223
2	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0	良好	○	48.0	○	450	300	350	○	26.4	○	2255
		良好	○	48.2	○	450	301	351	○	26.0	○	2243
		良好	○	48.2	○	449	300	351	○	27.0	○	2265
3	40.2-OPC80-DSP-L20-Ad2-0.15	良好	○	48.4	○	451	300	347	○	28.1	○	2271
		良好	○	48.4	○	451	301	345	○	29.7	○	2276
		良好	○	48.3	○	450	301	346	○	27.5	○	2261
4	39.3-OPC80-DSP-M20-Ad2-0.15	良好	○	47.3	○	449	300	347	○	22.9	○	2216
		良好	○	48.0	○	450	299	348	○	27.2	○	2216
		良好	○	47.5	○	449	300	349	○	24.6	○	2209
5	39.3-OPC80-DSP-H20-Ad2-0.15	良好	○	47.2	×	450	300	349	○	22.4	○	2179
		良好	○	47.0	×	449	299	347	○	20.1	○	2171
		良好	○	46.6	×	450	300	350	○	21.4	○	2179

向であった。これは積みブロックコンクリートの見掛け密度が大きくなると空隙率が小さくなり、組織が緻密化されたことによって圧縮強度が大きくなったためであると考えられる。

コア供試体の見掛け密度と製品質量の関係を図-13に示す。図はDSP配合のみを示した。図よりコア供試体の見掛け密度が大きくなると、製品質量も大きくなり、相関関係が見られた。

4. まとめ

本研究は、DSPをOPCに対し、20%置換する汎用性を重視した低環境負荷コンクリートを開発するため、プレキャストコンクリート製品積みブロックに適用することを目的とし、DSPを用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ、硬化性状および製品規格（外観・質量・形状、寸法・圧縮強度）との適合性について検討し、以下の結論が得られた。

- (1) DSPを用いた積みブロックコンクリートのフレッシュ性状は、OPCを用いたものとほぼ同程度であり、ダレおよびジャンカも見られなかった。
- (2) 積みブロックコンクリートの硬化性状は、DSPを用いたいずれの配合でも目標強度以上得られた。
- (3) 積みブロックコンクリートの材齢14日と材齢7日の圧縮強度比はOPCを用いたものとほぼ同程度の強度比となった。
- (4) コア供試体の見掛け密度が大きくなるほど、材齢14日圧縮強度は大きくなり、相関関係が見られた。またDSPを用いた積みブロックコンクリートは、OPCを用いたものと同様の傾向となった。
- (5) DSP-Hを用いた配合は、製品質量のみ規格値を満たさなかったが、配合修正を行うことで、DSP-Hを用いたものでも全ての規格値を満足できる積みブロックコンクリートが製造できるものと考えられる。

謝辞：本研究は、平成27-29年度環境研究総合推進費課題3J153001「スラッジ再生セメントと産業副産物を併用したクリンカーフリーコンクリートによる鉄筋コンクリート部材の研究開発」の一環として実施した。また本研究の実施に当たっては、神奈川積みブロック協同組合の

方々に多大なご協力を頂きました。さらに前橋工科大学佐川孝広准教授には乾燥スラッジ微粉末の化学分析にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省：<https://www.env.go.jp/press/101858.html>
- 2) 公益社団法人日本コンクリート工学会：残コン・戻りコンの発生抑制及び有効利用に関する技術検討委員会報告書，2012.1
- 3) 公益社団法人日本コンクリート工学会：第22回生コンセミナー部会報告「関東地区におけるレディーミクストコンクリート工場の実態と意識に関するアンケート調査」，p.17, 2015.7
- 4) 公益社団法人日本コンクリート工学協会：環境時代におけるコンクリートイノベーション，コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会報告書，2010.7
- 5) 小林利充，片野啓三郎，竹田宣典，中村秀佑：混和材を高含有したコンクリートの中性化抵抗性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.165-170，2016.7
- 6) 辻大二郎，小島正郎，井上和政，野口貴文：高炉スラッジ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.201-206，2016.7
- 7) 大川憲，青木真一，百瀬晴基，閑田徹志，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クリンカーフリーコンクリートに関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.710，pp.539-549，2015.4
- 8) 石関浩輔，百瀬晴基，閑田徹志，大川憲，青木真一，笠井哲郎：戻りコンクリート起源の再生セメントによるクリンカーフリーコンクリートの基礎物性，日本建築学会大会学術講演会梗概集，pp.1180-1181，2014.7
- 9) 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-65，2015.3
- 10) 佐川孝広，名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす水セメント比の影響，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.82-88，2006