

論文 戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の品質向上に関する研究

大川 憲*1・百瀬 晴基*2・関田 徹志*3・笠井 哲郎*4

要旨： 本研究は、コンクリート施工時に生ずる戻りコンクリートや生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時に発生する生コンスラッジを破砕・乾燥処理して製造した乾燥スラッジ微粉末の諸特性について検討した。乾燥スラッジ微粉末はこれまでの検討で、普通セメントの4～6割の強度発現性を有することなどが明らかであるが、特に夏季における乾燥スラッジ微粉末の品質低下が課題であった。そこで実機プラントを用いて遅延剤の利用を検討し、さらにその結果から実製造の運用時における遅延剤の効果を検討した。その結果、遅延剤は夏季における乾燥スラッジ微粉末の品質向上に有効であることが明らかとなった。

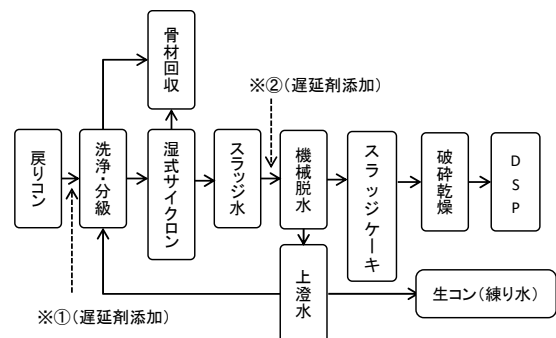
キーワード： 戻りコンクリート、スラッジ微粉末、比表面積、圧縮強度、遅延剤

1. はじめに

建設産業に関わる主要な建設副産物として、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場と称す）で発生する戻りコンクリート（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年時点でレディーミクストコンクリート出荷量の約1.6%とされ、年間100万 m^3 超が廃棄されている。この戻りコンは地域によっても発生量が異なり、特に都市部において多く発生しており、近年産業廃棄物処分場の建設が一層厳しくなる中、残余容量が減少傾向にあることから、生コンクリート業界においても廃棄物削減とリサイクル促進は喫緊の課題である。これらの問題から2011年にJIS A 5308（追補）において、スラッジ固形分率を1%未満（単位セメント量に対するスラッジ固形分の質量の割合）で使用できるように従来よりも利用を促進する規定が盛り込まれた。さらに2014年のJIS A 5308の改正では戻りコンから回収された骨材（以下、回収骨材と称す）の使用に関しても規格化された。しかし、スラッジ水は生コン工場での使用が年々減少していることが報告されており¹⁾、これまでにスラッジ水を用いたコンクリートの研究も多数行われているが²⁾、未だに品質低下に関する不安が影響しているものと考えられる。一方、回収骨材は建築基準法37条の建築材料から除外されており、特に都市部では建築工事の割合が高く、普及に大きく影響しているようである。さらに戻りコンの処理過程に加え、生コンプラントおよびアジテータ車の洗浄時にも発生する生コンスラッジに関しては、その有効利用についての研究は多数報告されているにも拘らず³⁾、再生利用は進まず現状ではほとんどが廃棄処理され、大

きな課題となっている。著者らはこれまで戻りコンから製造した乾燥スラッジ微粉末（以下、DSPと称す）の基礎物性や、普通ポルトランドセメント（以下、OPCと称す）を若干使用しDSPと副産物混和材を主な結合材とした低環境負荷コンクリートのプレキャスト製品への適用について検討した⁴⁾。さらにOPCにDSPを20～30%置換し汎用性を重視した低環境負荷コンクリートをレディーミクストコンクリートや無筋プレキャスト製品積みブロックへの適用についても報告した⁵⁾。現在、DSPを用いたレディーミクストコンクリートに関して実現場での打設を行っており、実績データを蓄積している。

上記の取り組みから、DSPは生コン練混ぜから戻りコンを処理するまでの時間と外気温の影響を受け、セメントの水和反応が進行するとDSPの品質が低下することが明らかとなっている⁴⁾。外気温が高いほどDSPの比表面積が大きくなり、これを用いてコンクリートを練混ぜた場合、混和剤添加量が増大するほか、圧縮強度、中性化抵抗性の低下および収縮が増加する⁴⁾。このため夏季は、戻りコンを処理するまでに水和反応の進行が速いため、DSPの十分な品質向上が課題となっている。



図ー1 DSPの製造工程

*1 三和石産（株）テストング事業部 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 主任研究員 博士(工学)（正会員）

*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）

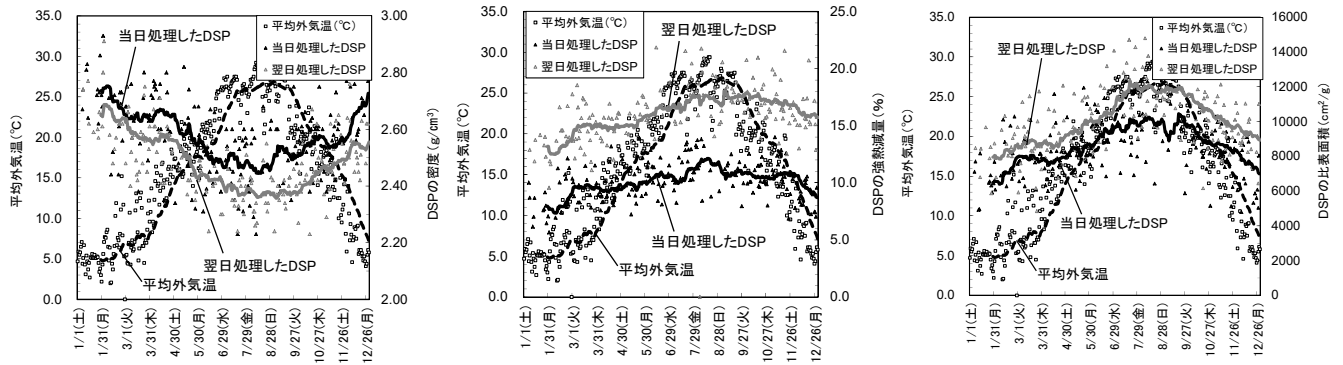


図-2 DSP の密度、強熱減量、比表面積と平均外気温の影響

そこで、本研究では戻りコンの水和反応の進行を遅らせ夏季に製造する DSP の品質向上が期待できる遅延剤の効果を明らかにすることを目的とし、実機プラントによる遅延剤を用いた DSP の製造実験を行った。

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、残余の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℃）を用いて含水率が1～2%程度となるまで乾燥・破碎処理して製造したものである。この処理を戻りコンが発生した当日に行うことで、未水とセメントの含有率を高くすることができ、OPC の5～6割程度の強度発現性を有した高品質の DSP が得られる。製造した DSP は比表面積で3種類に区分し、比表面積が5000～8000cm²/g を DSP-L、8000～10000cm²/g を DSP-M、10000cm²/g 以上を DSP-H とし、セメントサイロに貯蔵する。なお、図の湿式サイクロンの工程で、細骨材の微粒子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 には微砂分が30%程度含まれている結果となった⁹⁾。また本実験で使用した戻りコンはコンクリート施工時に残余したもの、ホッパーや配管などに残ったものおよび荷卸し時に不合格となったレディーミクストコンクリートを対象としている。図中①は実機プラントによる DSP の製造実験における遅延剤の添加時期を、②は実製造の運用時における遅延剤の添加時期を示す。なお、遅延剤の添加時期はセメントの水和反応開始から早い時期に添加する方が未水とセメントの含有量を多くすることができるため、実製造の運用時において一番早い時期である②で行った。

3. DSP の基礎物性

3.1 DSP の密度、強熱減量、比表面積

DSP の物性は処理工程が同一の場合、DSP 製造までの時間とコンクリート温度に影響されるものと考えられ、

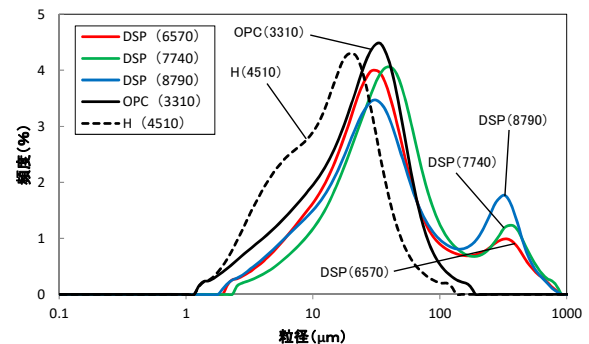


図-3 粒度分布測定結果

生コン製造時の平均外気温と実製造した DSP の密度、強熱減量および比表面積について当日処理した DSP と翌日処理した DSP を1年間測定した結果を図-2 に示す。それぞれの測定方法は JIS R 5201 および JIS R 5202 に準拠して行った。なお、比表面積はセメント以外の粉体の比表面積の測定であるため、粉末度測定用標準試料のベッド成型時と成型圧力がほぼ同等となるように DSP のポロシティを適宜変化させたものと実測密度を用いて算出した。翌日処理した DSP とは、戻りコン等の骨材を回収し、残ったスラッジ水を水槽に貯留し、翌日に図-1 と同様に処理したものである。図より当日処理した DSP の密度、強熱減量および比表面積と平均外気温には高い相関関係が認められ、平均外気温が低いほど、DSP の密度は大きく、強熱減量および比表面積は小さくなった。これは、平均外気温の相違により、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、未水とセメントの残存量は外気温が低いほど多くなっているためであると考えられる。また翌日処理した DSP の密度は当日処理したものより、0.2(g/cm³)程度小さく、強熱減量は5(%)程度、比表面積は2000(cm²/g)程度大きくなった。これは外気温の相違の場合と同様に未水とセメントの残存量が処理までの時間が長いほど少なくなるためであると考えられる。これらより、DSP は処理までの時間と平均外気温により、未水とセメントの残存量が異なるものと考えられる。

3.2 DSP の粒度分布

比表面積の異なる DSP (3 種類), OPC および早強ポルトランドセメント (以下, H と称す) のレーザー回折式粒度分布測定結果を図-3 に示す。図のカッコ内の数字は比表面積の値を示す。図より OPC の粒度分布は 30μm 程度, H の粒度分布は 20μm 程度を中心とした山状の粒度分布であるのに対し, DSP は 30μm 程度のピークの他に 300μm 程度の頻度も高く 2 山状の粒度分布であることが確認された。通常, 比表面積が大きいうことは, 図の OPC と H のように粉体の粒子が細かいことを意味するが, DSP の比表面積は大きくなるに従い, 30μm 程度の頻度は低下し, 300μm 程度の頻度は増大する結果となった。これはセメント粒子が凝集したものや細骨材の微粒分の一部が含まれているものが影響したと考えられる。またレーザー回折式の粒度分布では凝集した顆粒状のものを 1 粒子として測定しているが, ブレーン空気透過法による比表面積では凝集構造を成している各微細粒子を計測しているためであると考えられる。

3.3 DSP の SEM 画像

DSP および OPC の SEM 画像を図-4, 図-5 に示す。図より DSP には, 未水和セメント, 細骨材の微粒分の一部および水和生成物の凝集したものが含まれていることが観察された。

3.4 DSP の未水和セメント量

比表面積が異なる 4 種類の DSP について, 走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) により, DSP の成分分析を行った。エポキシ樹脂と粉体を練り混ぜ DSP のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像を二値化することにより, DSP の未水和セメント量を定量化した。

DSP の比表面積と未水和セメント量を図-6 に示す。図より比表面積が大きくなるほど, 未水和セメントの割合が小さくなった。

以上から, DSP の品質向上を目的として, 実機プラントによる遅延剤を用いた DSP の製造実験を行った。

4. 実機プラントによる遅延剤を用いた DSP 製造実験

4.1 DSP 製造実験の概要

本実験試験は生コンプラントで生コン 5m³を製造し, 練混ぜから処理までの時間を 2.5 時間と設定した。2.5 時間経過後, 骨材を分級し残ったスラッジ水を水槽で貯留する時間を変化させ, DSP を製造した。また夏季において各種遅延剤の効果を検証するため, 遅延剤の添加時期を練混ぜから 1.5 時間後に添加し, 製造した DSP の物性試験 (密度・比表面積・強熱減量) とモルタルによるフレッシュおよび圧縮強度試験を行った。使用材料を表-1 に, 実機試験で使用した生コンクリートの配合表を表-2

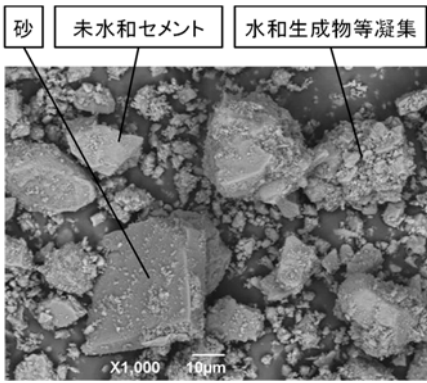


図-4 DSP の SEM 画像 (5960cm²/g)

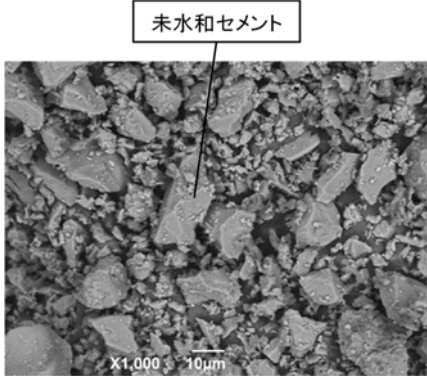


図-5 OPC の SEM 画像 (3300cm²/g)

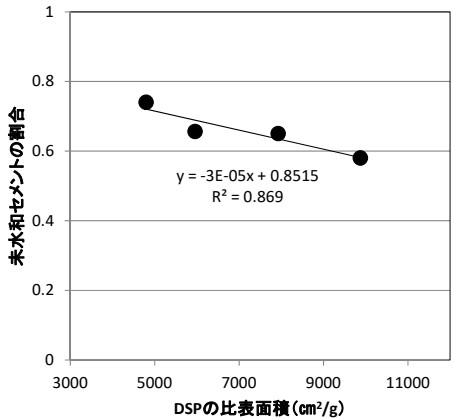


図-6 DSP の未水和セメント量

表-1 使用材料

項目	記号	材料	密度	吸水率
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント	3.15	-
細骨材	S1	石灰砕砂	2.67	0.93
	S2	陸砂	2.57	1.22
粗骨材	G	石灰砕石	2.70	0.44
混和剤	AE	AE減水剤	-	-
	SP	高性能AE減水剤	ホリカルボン酸系化合物	-
遅延剤	A	遅延剤A	水溶液濃度: 40%	-
	B	遅延剤B	水溶液濃度: 68%	-
	C	遅延剤C	水溶液濃度: 35%	-
	D	遅延剤D	水溶液濃度: 35%	-

表-2 配合表

記号	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)						
			W	OPC	S1	S2	G	AE	SP
50-OPC-AE	50	44.4	185	370	418	342	980	4.81	-
50-OPC-SP	50	47.9	170	340	467	382	953	-	3.57

に, 実機プラントによる実験水準を表-3 に示す。なお, 表-3 の積算温度とは戻りコン処理までの時間と処理時

表-3 実機プラントによる実験水準および DSP 物性試験結果一覧表

実施 季節	配合 (記号)	練混ぜからDSP製造までの経過時間 ①													遅延剤			外気温 ℃ (②)	積算温 度①× ②	DSP物性試験結果		
		1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	21h	51h	種類	添加量 (G×wt%)	添加時期	密度 g/cm ³			比表面積 cm ² /g	強熱 減量 %	
夏季	50-OPC-AE														無し			27.0	67.5	2.91	5960	12.25
	50-OPC-AE														無し			31.0	108.5	2.82	7150	14.54
	50-OPC-SP														無し			30.0	75.0	2.87	5620	13.46
	50-OPC-AE													A	0.10%	1.5h	31.0	77.5	2.95	5260	11.16	
	50-OPC-AE													無し			33.0	148.5	2.84	6620	13.71	
	50-OPC-AE													A	0.10%	1.5h	32.0	144.0	2.83	6720	12.60	
	50-OPC-AE													無し			31.0	77.5	2.89	6340	12.10	
	50-OPC-AE													無し			31.0	201.5	2.69	9280	15.80	
	50-OPC-AE													無し			32.0	672.0	2.45	11030	21.65	
	50-OPC-AE													無し			23.0	57.5	2.95	5630	8.91	
	50-OPC-AE													B	0.20%	1.5h	25.0	62.5	3.03	5060	8.01	
	50-OPC-AE													C	0.50%	1.5h	26.0	65.0	3.04	4190	7.66	
	50-OPC-AE													D	0.50%	1.5h	26.0	65.0	3.07	4790	7.63	
	50-OPC-AE													無し			28.0	70.0	2.91	6030	10.42	
	50-OPC-AE													無し			28.0	126.0	2.87	8270	12.15	
	50-OPC-AE													A	0.10%	1.5h	28.0	126.0	2.93	6230	10.96	
	50-OPC-AE													A	0.40%	1.5h	28.0	126.0	2.98	5390	9.64	
冬季	50-OPC-AE													無し			8.3	20.8	3.00	5480	9.60	
	50-OPC-AE													無し			8.3	54.0	2.92	7700	11.65	
	50-OPC-AE													無し			8.3	78.9	2.83	9040	12.95	
	50-OPC-AE													無し			8.3	419.2	2.44	9320	18.43	

の外気温の積である。

4.2 実験方法

本実験で製造した DSP に対し密度試験(JIS R 5201), 比表面積試験(JIS R 5201), 強熱減量試験(JIS R 5202)およびレーザー回折粒度分布測定を行った。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った。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混和剤で調整し実施した。圧縮強度試験では, DSP を用いモルタル供試体(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 とした。細骨材はセメント協会標準砂を用い, 養生条件は標準養生とした。その後材齢 7, 28 日で圧縮強度試験を行った。

4.3 実験結果および考察

(1) DSP の物性試験結果

DSP の物性試験結果一覧表を表-3 に示す。表より夏季および冬季において, 積算温度が小さいほど DSP の密度は大きく, 比表面積および強熱減量は小さくなった。

積算温度と DSP の比表面積の関係を図-7 に示す。図より積算温度と DSP の比表面積には夏季および冬季において, おおむね相関関係が見られた。また夏季に遅延剤を添加することにより, 同一積算温度で DSP の比表面積が小さくなった。このことから, DSP の比表面積は, その積算温度と高い相関関係が見られるが, 遅延剤の有無によりその相関関係は異なることがわかった。

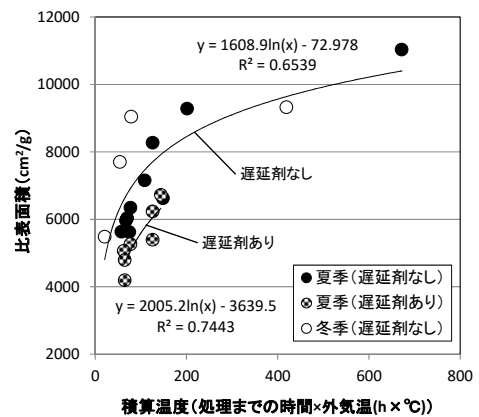


図-7 積算温度と DSP の比表面積

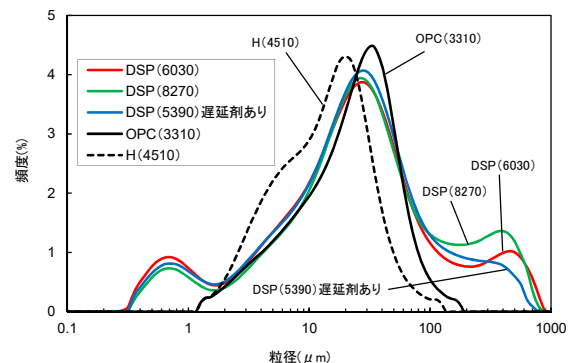


図-8 粒度分布測定 (実機試験サンプル)

(2) DSP の粒度分布

比表面積の異なる DSP (3 種類), OPC および H のレーザー回折式粒度分布測定結果を図-8 に示す。図のカッコ内の数字は比表面積の値である。図より DSP の比表

面積が大きくなるに従い、30 μ m 程度の頻度は低下し、300 μ m 程度の頻度は増大する結果となり、図-3 と同様の結果となった。また遅延剤を用いたものは 300 μ m 程度の頻度がさらに小さくなった。これは 300 μ m に含まれるセメント粒子の凝集したものが遅延剤を用いることにより少なくなったものと考えられる。

(3) DSP を用いたモルタルの試験結果

DSP の比表面積と高性能 AE 減水剤 (以下、SP と称す) 添加率の関係を図-9 に示す。図より DSP の製造時期によらず比表面積が小さいほど、SP 添加率は小さくなった。これは、DSP に含まれるセメント粒子の凝集したものが影響しているものと考えられる。

モルタルの圧縮強度試験結果について、DSP の比表面積と材齢 28 日のモルタル圧縮強度の関係を図-10 に示す。図より DSP は OPC との強度比で 0.3~0.9 程度となった。また夏季および冬季において DSP の比表面積が小さいほど、強度が大きくなり、夏季に戻りコンへ遅延剤を用いることにより、強度が大きくなった。これは前述の図-6 と同様な傾向であった。

以上より、DSP の品質向上に遅延剤添加が有効であることが確認できたため、以下の実製造の運用時においても遅延剤を適用することとした。

5. 実製造の運用時における遅延剤を用いた DSP の特性

5.1 実験概要

実製造の運用時において、処理までの経過時間は 3 時間前後であり、遅延剤の添加時期は図-1 の②とした。また遅延剤 A を用い、添加率は全て単位セメント量に対し 0.2% (wt×%)とした。

5.2 DSP の水和発熱特性

W/C および W/DSP : 55%とし、DSP と水の質量が 4g となるように電子天秤で計量し、注水後 30 秒間練混ぜた。その後、コンダクションカロリメーターを用い、一定温度(20℃)で注水直後から材齢 48 時間までの水和発熱を計測した。比表面積ごとの水和反応熱の結果を図-11 に示す。図のピークの値は C₃S(エーライト)の水和反応活性の挙動を示している。比表面積が小さくなるほどピークの値は大きくなり、強度発現の小さい DSP(8920)や DSP(10590)では、水和反応活性の挙動がほとんどみられないのを確認した。DSP(5430)は、処理工程で遅延剤を利用したためピーク値が他の DSP に比べ遅くなり、初期の水和反応を抑えられているのがわかる。これは遅延剤により初期の水和反応が抑えられたため、遅延剤なしのものより石膏の残存量が多くなったことや遅延剤成分が残留していることが影響したものと考えられる。一方、この遅延剤を混入した DSP を除くと、接水から 5~8 時間程度でピークを迎えている。これは DSP に残存する C₃A

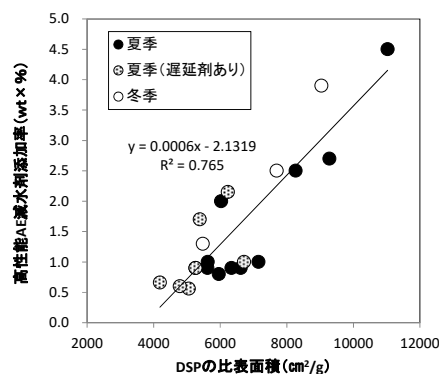


図-9 DSP の比表面積と混和剤添加率

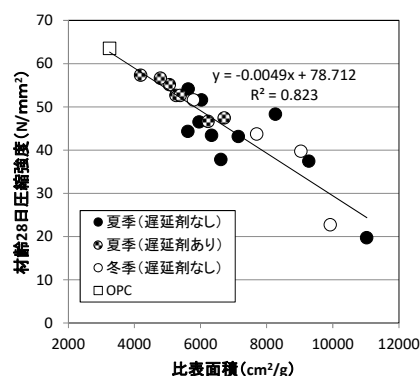


図-10 DSP の比表面積とモルタル強度

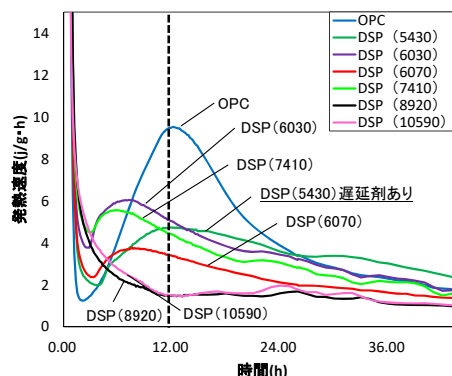


図-11 水和反応熱

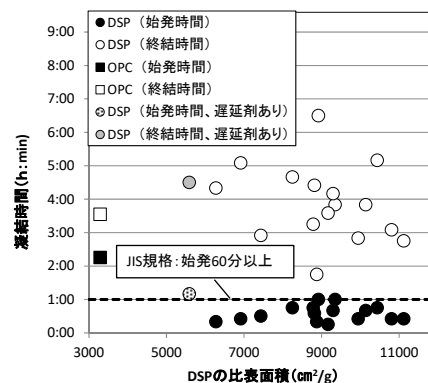


図-12 DSP の比表面積と凝結時間

と石膏の比率が OPC と異なっていることが一つの要因であると推察されるが、詳細については今後検討が必要である。また OPC に着目すると、接水から 12 時間でピ

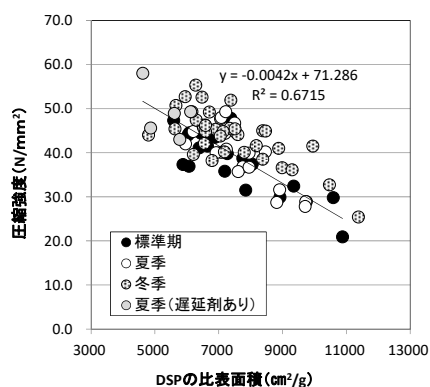


図-13 モルタル圧縮強度試験結果

ークを迎えていることから、戻りコンが OPC から生成された DSP は、水和反応が活性化する 12 時間以前に処理工程を行うことで、強度発現の大きい DSP を生成することができると考えられる。

5.3 DSP の凝結特性

比表面積が異なる DSP と OPC に関しセメントの凝結試験 (JIS R5201) に準拠して行った。DSP の比表面積と凝結時間を図-12 に示す。図より、DSP の始発時間は比表面積に拘らずおおむね 60 分以下、終結時間は、2 時間半～6 時間程度であった。OPC と比較すると、始発時間が早くなり、終結時間はばらつきがあるものの同程度と考えられる。また図の点線は OPC の始発時間の JIS 規格値を示すが、DSP はそれよりも早くなっていることがわかる。一方、遅延剤を用いた DSP はわずかではあるが他の DSP と比べ始発時間が遅くなった。これは前述と同様に、遅延剤により石膏の残存量や遅延剤成分の残留が影響したものと考えられる。ただし今回行った遅延剤を用いた DSP のデータが少ないため、今後検討が必要であると考えられる。

5.4 DSP の強度発現性

DSP を用いたモルタルに関し、フレッシュおよび強度発現性の試験を行った。モルタルの配合条件や実験方法は 4.2 と同様に行った。

DSP の比表面積と DSP を用いたモルタルの材齢 28 日の強度試験結果に、さらに DSP の製造時期と遅延剤の有無を記載したものを図-13 に示す。図より DSP を用いたモルタルの材齢 28 日圧縮強度は、20～60N/mm² 程度の範囲であった。これは OPC が材齢 28 日で 63N/mm² 程度であることから、DSP は OPC との強度比で 0.3～0.9 程度となった。また DSP の比表面積が大きくなるほど、強度は小さくなった。これは図-10 と同様であった。図より DSP の製造時期による影響は、標準期(4・5・10 月)、夏季(6～9 月)および冬季(11～3 月)についても比表面積で管理できることがわかった。さらに夏季に遅延剤を利用することにより、比表面積が小さく、圧縮強度が大き

い DSP を製造することが可能であった。

6. まとめ

(1) DSP の粒度分布は 30μm 程度のピークの他に 300μm 程度の頻度も高く 2 山状であった。また遅延剤を用いることで 300μm 程度の頻度が小さくなった。

(2) DSP の未水和セメント量は、比表面積が大きくなるほど、小さくなった。

(3) 実機プラントによる遅延剤を用いた DSP の製造実験では、同一積算温度で遅延剤を添加したものは比表面積が小さくなった。

(4) DSP の水和発熱特性は比表面積が小さいほどピーク値は大きくなり、5～8 時間程度でピークを迎えている。

(5) DSP の強度発現性は OPC との強度比で 0.3～0.9 程度となり、遅延剤を用いることで強度が大きくなった。

以上より、夏季における DSP の品質向上に遅延剤が有効であることが明らかとなった。

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。また芝浦工業大学 伊代田岳史教授には乾燥スラッジ微粉末の水和発熱特性にご協力頂き、竹本油脂(株)には遅延剤をご提供して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会：生コン産業におけるリサイクルの普及に向けて、第 18 回生コン技術大会パネルディスカッション, pp.7, 2015.4
- 2) 入江一ほか：スラッジ水の高度利用に関する研究, 第 19 回生コン技術大会, pp.105-108, 2017.4
- 3) 福島和将ほか：安定化剤を添加したスラッジを用いたコンクリートの基本性状について、高性能 AE 減水剤を用いた場合の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.277-278, 2000.9
- 4) 大川憲ほか：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
- 5) 大川憲ほか：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1591-1596, 2017.7
- 6) 八巻真規ほか：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