

報告 乾燥スラッジ微粉末を混和材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

百瀬 晴基^{*1}・大川 憲^{*2}・津嶋 武志^{*3}・城戸 隆宏^{*4}

要旨：戻りコンクリート起源のスラッジを効率良くレディーミクストコンクリートに再利用できる技術として、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ことを特徴とする乾燥スラッジ微粉末と、これをセメント代替の混和材として用いたレディーミクストコンクリートを提案した。本コンクリートを、大規模物流施設に適用した結果、荷卸し時のフレッシュ試験および圧縮強度試験は、全てのロットで所要の品質を満足し、脱型後の躯体は、ひび割れ等も見られず、良好な充填状況を示し、普通コンクリートと変わらない優れた外観を確保する結果となった。

キーワード：戻りコンクリート、乾燥スラッジ微粉末、スラッジ、乾燥収縮、中性化

1. はじめに

建設産業に関わる主要な建設副産物として、現場に輸送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、受入検査で不合格になったり、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。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%未満で使用できるように従来よりもその上限値を緩和し、スラッジ水の有効利用を促進する規定が盛り込まれた。しかし、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研究は多数報告されているにも拘らず^{1),2),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。

生コンスラッジの利用促進に資する技術として、乾燥・粉砕による微粉末化があり、佐藤らによる精力的な研究が進められてきた⁴⁾。その成果によれば、乾燥スラッジによる微粉末は、一般コンクリート用の混和材として利用可能であり、結合材量の10%程度までの内割り利用が適当だとしている。結合材に対する混和率を高めることにより、この微粉末の効率的な利用の促進が期待されるが、この点については、例えば微粉末の添加により強度が低下することなどが課題として考えられる。

筆者らは、前記課題を解決する乾燥スラッジ微粉末(以下、DSPと称す)を提案している⁵⁾。DSPの製造工程は図-1に示す通りであり、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 $^{\circ}\text{C}$)を用いて含水率が1~2%程度となるまで乾燥・破砕処理して製造する。この処理を戻りコンが発生した当日に行うことで、未水和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。表-1は、文献5)に記載されたDSPと普通ポルトランドセメント(以下、OPCと称す)の主要な化学成分表であり、DSPは各成分ともOPCに比べ小さく、ig.lossが大きい結果となっている。

本報では、DSPをセメント代替として結合材の20%~30%添加したコンクリート(以下、L-SRコンクリートと称す)の実適用に向けた基礎物性実験結果、実機製造実験結果、大規模物流施設への適用事例について報告する。

2. コンクリートの基礎物性実験

2.1 基礎物性実験の検討概要

基礎物性実験の概要を表-2に示す。DSPを混和材として用いたコンクリートの基礎物性を把握することを目的に、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、促進中性化試験を行った。実験要因は、DSPの混合率と水結合材比の2要因とし、DSPの混合率は0, 20, 30%の3水準、水結合材比は35, 45, 60%の3水準とした。

使用材料の一覧を表-3に、調合表を表-4に示す。セメントはOPCを用い、セメントの内割として、比表面積6780 cm^2/g 、密度2.86 g/cm^3 のDSPを使用した。DSP

*1 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)

*2 三和石産(株) テスティング事業部 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 横浜支店

*4 日本郵政(株) 不動産部門施設部

の原料となる戻りコンは、W/C48.5%、セメント量 351 kg/m³ の普通セメントコンクリートであり、生コン練混ぜから 110 分程度経過した時点で、戻りコンの処理を開始した。目標とするスランプは 15cm、空気量は 4.5%とし、単位水量は 170kg/m³、粗骨材かさ容積は 0.56m³/m³とした。

2.2 基礎物性実験の検討結果

DSP 混合率が標準養生材齢 28 日の圧縮強度に与える影響を図-2 に示す。水結合材比 35%の水準では、DSP の混合により最大 5%程度の強度低下となったが、水結合材比 45%および 60%の水準では DSP を混合した方が強度は若干高くなる結果であり、DSP が圧縮強度に与える顕著な影響は本実験では認められなかった。

DSP が乾燥収縮に与える影響を図-3 に示す。本実験では、20°C RH60%の環境下において、文献(6)に示す省力化乾燥収縮試験を行い、得られた試験結果から、JIS A 1129 による長さ変化試験の結果を推定した。省力化乾燥収縮試験とは、i) Φ100×200mm の試験体を用い、ii) 試験体内部に埋設したひずみ計により自動計測を行う試験法である。JIS 法とは試験体形状と測定方法が異なるが、これらの影響程度は多くの実験データから把握できており、JIS 法による試験結果の推定が可能である⁶⁾。図-3 から、乾燥材齢 182 日の乾燥収縮率は、普通コンクリートである N-45%が 623 μであるのに対し、DSP を混合した DSP30-45%は 694 μであり、N-45%と比較して 1 割程度大きい、いずれも比較的小きな値で、本実験条件においては有害なひび割れの原因となるようなレベルには達しなかった。

DSP 混合率が中性化深さに与える影響を図-4 に示す。促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠し、10×10×40cm の試験体を用い、材齢 28 日まで標準養生に供し、その後、材齢 56 日まで 20°C RH60%の気乾養生とした。気乾養生後、20°C RH60%、CO₂ 濃度 5%の促進中性化槽に入れ、促進期間 1、4、8、13、26 週にて、試験体を切断し、断面の中性化深さを測定した。図-4 から、DSP 混合率が

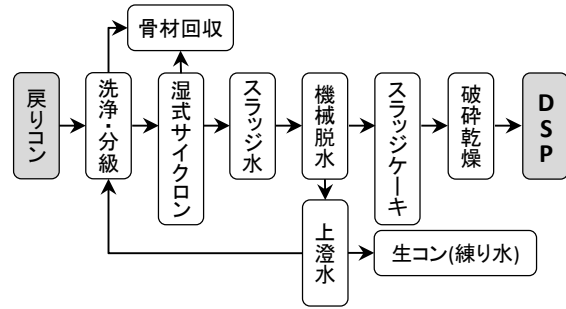


図-1 DSPの製造工程

表-1 DSP および OPC の主要な化学成分⁵⁾

種類	化学組成 (%)						密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	ig.loss		
DSP	18.96	5.14	2.68	53.11	1.75	12.01	2.70	6810
OPC	20.68	5.28	2.91	64.25	2.10	1.80	3.16	3220

表-2 基礎物性実験の概要

DSPの混合率	水結合材比		
	35%	45%	60%
0%	○	○△□	○
20%	○	○□	○
30%	○	○△□	○

* ○: 圧縮強度試験、△: 乾燥収縮試験、□: 促進中性化試験

表-3 使用材料の一覧

項目	記号	材料	産地	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)
セメント	OPC	普通	-	-	3.15
		ポルトランドセメント	-	-	
混和材	DSP	乾燥スラッジ微粉末	-	6780	2.86
		砂	千葉県富津産	-	2.58
細骨材	S1	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.67
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.69
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-	-

表-4 調査表の一覧

記号	DSPの混合率 (B×%)	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)						SP (B×%)
				W	OPC	DSP	S1	S2	G	
N-35%	0%	35%	44.4%	170	486	-	336	410	934	0.65
N-45%	0%	45%	47.2%	170	378	-	376	460	934	0.60
N-60%	0%	60%	49.5%	170	283	-	412	503	934	0.55
DSP20-35%	20%	35%	44.1%	170	389	97	332	406	934	1.05
DSP20-45%	20%	45%	47.0%	170	302	76	373	456	934	0.80
DSP20-60%	20%	60%	49.3%	170	227	57	409	500	934	0.85
DSP30-35%	30%	35%	44.0%	170	340	146	330	403	934	1.10
DSP30-45%	30%	45%	46.9%	170	264	113	372	454	934	0.90
DSP30-60%	30%	60%	49.3%	170	198	85	408	499	934	1.00

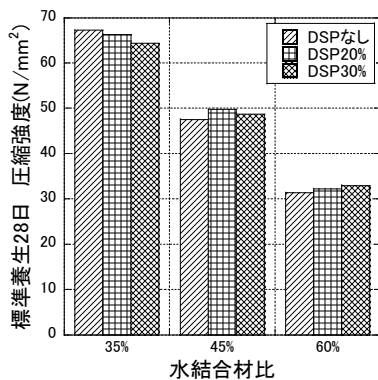


図-2 DSP混合率が圧縮強度に与える影響

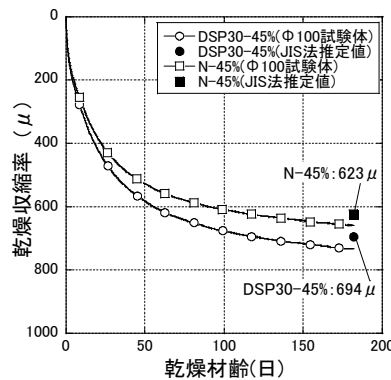


図-3 DSPが乾燥収縮に与える影響

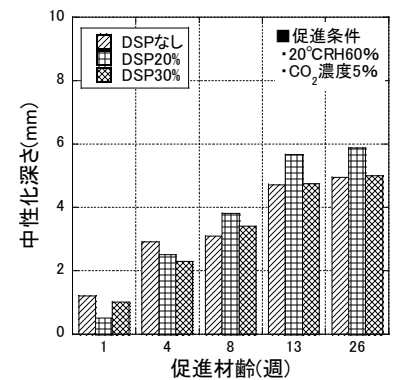


図-4 DSP混合率が中性化深さに与える影響

表-5 実機製造実験の概要

記号	W/B	標準養生 圧縮強度試験			模擬試験体 コア強度試験		
		夏期	標準期	冬期	夏期	標準期	冬期
DSP20-40%	40%	○	○	○	—	—	—
DSP20-50%	50%	○	○	○	○	○	○
DSP20-60%	60%	○	○	○	—	—	—
N-50%	50%	○	—	—	○	—	—

表-6 使用材料の一覧

項目	記号	材料	産地	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)
セメント	OPC	普通	-	-	3.15
		ポルトランドセメント	-	-	
混和材	DSP	乾燥スラッジ微粉末	-	6000	2.87
細骨材	S1	砂	千葉県富津産	-	2.58
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.67
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	-	2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	-	-	-

表-7 調合表の一覧

記号	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)							SP (B×%)
			W	OPC	DSP	S1	S2	G		
DSP20-40%(夏期)	40%	42.2%	170	340	85	393	322	1001	1.50	
DSP20-40%(標準期)		43.2%	170	340	85	402	329	985	1.20	
DSP20-40%(冬期)		43.3%	170	340	85	405	331	985	0.95	
DSP20-50%(夏期)	50%	46.5%	170	272	68	453	370	968	1.40	
DSP20-50%(標準期)		47.5%	170	272	68	463	378	950	1.20	
DSP20-50%(冬期)		47.6%	170	272	68	464	380	950	0.95	
DSP20-60%(夏期)	60%	48.9%	170	226	57	489	400	950	1.35	
DSP20-60%(標準期)		49.8%	170	226	57	498	407	933	1.20	
DSP20-60%(冬期)		49.8%	170	226	57	498	408	933	1.00	
N-50%(夏期)	50%	48.7%	170	340	-	477	391	933	1.05	

* DSPの混合率はB×20%

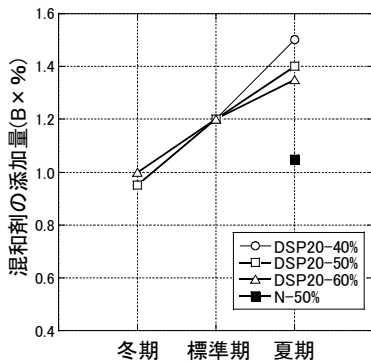


図-7 打設時期と混和剤添加量の関係

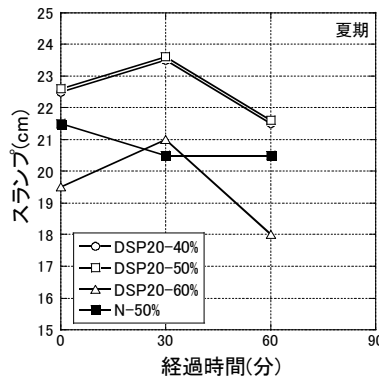


図-8 スラップの経時変化(夏期)

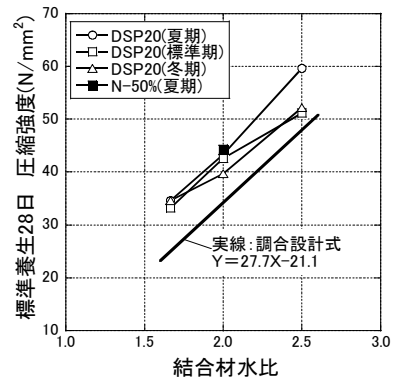


図-9 結合材水比と強度の関係式

中性化深さに与える影響は認められず、DSPを混合したコンクリートの中性化抵抗性は、普通コンクリートと同程度であることを確認した。

以上の基礎物性検討結果により、DSPを結合材の20～30%用いたL-SRコンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、中性化抵抗性は、普通コンクリートと比較し顕著な差がないことを実験的に確認した。

3. レディーミクストコンクリートの実機製造実験

3.1 実機製造実験の検討概要

L-SRコンクリートの実機製造部への適用に向け、実機により製造したレディーミクストコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度、構造体強度補正值₂₈S₉₁値を確認する

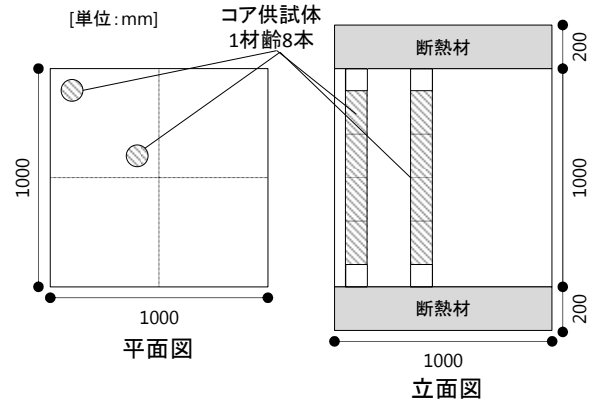


図-5 マスコン部材用の模擬試験体の詳細図

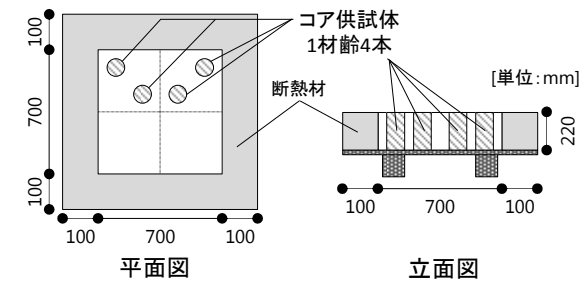


図-6 板状部材用の模擬試験体の詳細図

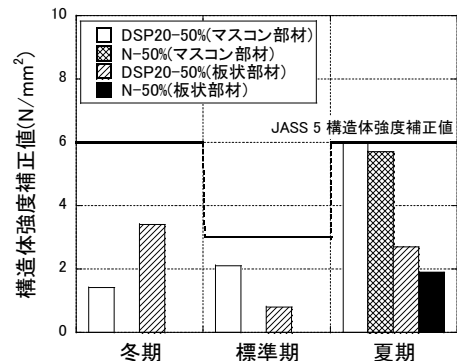


図-10 構造体強度補正值₂₈S₉₁の実験結果

ことを目的に、三和石産株式会社藤沢工場(神奈川県藤沢市)において、夏期・標準期・冬期の3シーズンの実機製造実験を行った。

実験概要の一覧を表-5に示す。L-SR コンクリートについて、比較的広い強度域のコンクリートのフレッシュ性状、強度特性を確認するため、水結合材比 40%、50%、60%の3調合のコンクリートを対象に検討を行った。また、比較対象として、水結合材比 50%の普通コンクリートについても実験を実施した。水結合材比 50%の L-SR コンクリートについては、全ての季節で、図-5 のマスコン部材用の模擬試験体および図-6 の板状部材用の模擬試験体を作製し、コア強度試験を行うことで、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を評価した。マスコン部材用コア強度は1材齢につき8本のコア供試体の試験を行い、板状部材用コア強度は1材齢につき4本のコア供試体の試験を行った。

使用材料の一覧を表-6に、調合表を表-7に示す。DSP の混合率は結合材の 20%とし、セメントの内割とした。DSP の原料となる戻りコンは、W/C49.8%、セメント量 372 kg/m^3 の普通セメントコンクリートであり、生コン練混ぜから 120 分程度経過した時点で、戻りコンの処理を開始した。単位水量は 170 kg/m^3 とし、粗骨材かさ容積は工場の実績から水結合材比と季節により調整した。

3.2 実機製造実験の検討結果

打設時期と混和剤添加量の関係を図-7に示す。図-7から、L-SR コンクリートは普通コンクリートに比べ、所要のスランプを得るための混和剤添加量が多くなる傾向が認められた。この要因として、DSP は戻りコンクリートの時点で極初期の水和が進んでいるため初期水合の速度を調整するための石膏が減少していることなどが考えられる。

夏期の実機試験におけるスランプの経時変化を図-8に示す。練混ぜから 60 分後のスランプの目標値を 18cm とし、スランプロスを 3cm と仮定して、練直のスランプの目標値を $21 \pm 2.5 \text{ cm}$ と設定した。図-8 から、N-50% は練混ぜ直後から 1cm 程度スランプロスしているのに対し、L-SR コンクリートは 30 分時点でスランプが 1cm 程度大きくなり、60 分経過時点で練混ぜ直後から 1cm 程度スランプが小さくなっている。この原因として、L-SR コンクリートの混和剤添加量が多いことが挙げられる。L-SR コンクリートのフレッシュ性状は、普通コンクリートと若干傾向が異なるものの、混和剤添加量の微調整など、生コン工場において通常の出荷時に行っている管理により対応が可能と考えられる。

結合材水比と強度の関係式を図-9に示す。コンクリートの結合材水比と圧縮強度の関係は線形であることが広く知られており、一般にこの関係式から調合設計を行う。図-9から、実機製造実験にて得られた L-SR コンクリートの結合材水比と強度の関係も概ね線形の関係であり、普通コンクリートと同様の調合設計が可能であるこ



写真-1 事務所棟の建物外観

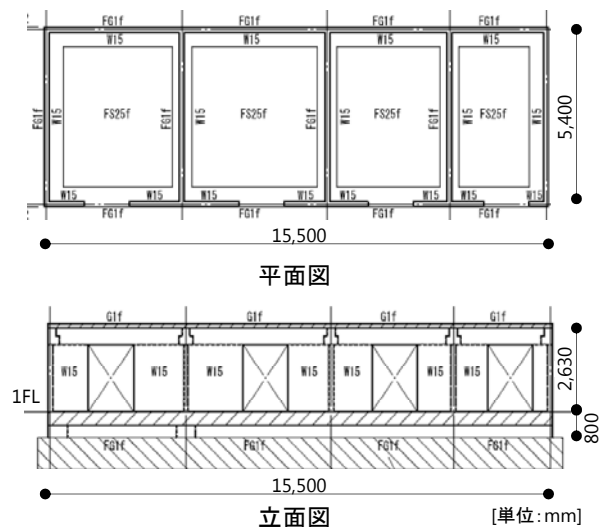


図-11 付属舎棟の平面図および立面図

表-8 調合表の一覧

呼び方 (適用部位)	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)					
			W	OPC	DSP	S1	S2	G
普通18-15-20N (事務所棟レベルコン)	60.0%	48.9%	165	220	55	494	405	960
普通27-15-20N (付属舎棟本設躯体)	51.5%	48.3%	165	256	64	479	392	955

* DSP の混合率はB × 20%

とが確認でき、同図中の調合設計式を採用するに至った。

構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値の実験結果を図-10に示す。建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2015)では、普通コンクリートの構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値は、冬期 6 N/mm^2 、標準期 3 N/mm^2 、夏期 6 N/mm^2 と定められている⁷⁾。図-10から、L-SR コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値は、普通コンクリートと同程度の結果であり、JASS 5 で定められた普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値の値以下であることから、安全側として、JASS 5 に示される普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値を採用することとした。

以上の実機製造実験により、L-SR コンクリートの調合設計が可能となった。また、実験を行った三和石産株式会社藤沢工場において、本実験データなどに基づいた技術資料を整備し標準化することで、L-SR コンクリートに対し JIS A 5308 の JIS 認証が付与されるに至った。



写真-2 レベルコン打設状況



写真-3 基礎耐圧盤打設状況



写真-4 壁部施工状況①

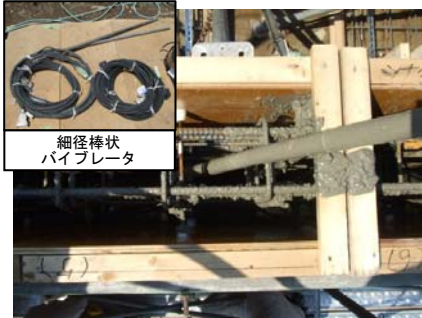


写真-5 壁部施工状況②



写真-6 壁部施工後の状況



写真-7 付属舎棟施工後の外観

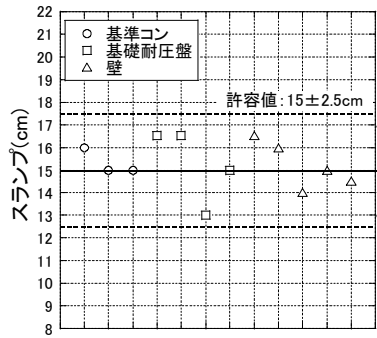


図-12 荷卸し時のスランプ試験結果

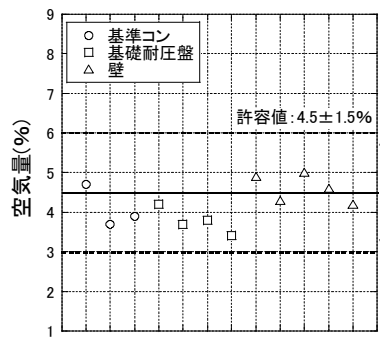


図-13 荷卸し時の空気量試験結果

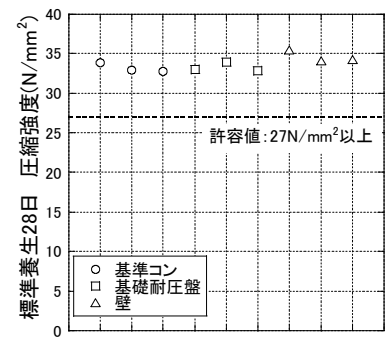


図-14 圧縮強度試験結果

4. 実構造物への適用

4.1 適用概要

L-SR コンクリートを適用した大規模物流施設の事務所棟の建物外観を写真-1 に、付属舎棟の平面図および立面図を図-11 に示す。本工事では、仮設材となる事務所棟のレベルコンクリートと、付属舎棟の本設躯体に、DSP を結合材の20%混合したL-SR コンクリートを適用した。

- ・建物名称：神奈川県西郵便局
- ・建設地：神奈川県海老名市
- ・建物用途：事務所棟 - 事務所(郵便処理施設)
付属舎棟 - 倉庫
- ・建築主：日本郵便株式会社
- ・設計：日本郵政株式会社一級建築士事務所
- ・施工：鹿島建設株式会社
- ・延床面積：42,260.76m²
- ・建築面積：14,586m²
- ・階数：事務所棟 - 地上5階，地下1階
付属舎棟 - 地上1階

・構造種別：鉄筋コンクリート造

・工期：2016.3.11～2017.8.22

4.2 適用結果

(1)事務所棟のレベルコンクリートへの適用

レベルコンクリートの打設は、約 173m×72m の範囲であり、この内の約 1/3 となる計 141m³ について、2016年10月～12月の延べ3日間で、L-SR コンクリートを打設した。使用材料は表-6 の材料を用い、調査は呼び強度 18、スランプ 15cm、空気量 4.5% とし、表-8 に示す調査とした。

レベルコンクリートの打設状況を写真-2 に示す。レベルコンクリートは無筋の仮設材であり、施工しやすい条件であった。L-SR コンクリートの施工性は、普通コンクリートと大きな差が無く、施工後の状況はレベルコンクリートとして良好な出来形であった。

(2)付属舎棟の本設躯体への適用

付属舎棟の打設範囲は、図-11 に示す付属舎棟の基準コンクリート、付属舎棟躯体の基礎耐圧盤および壁であり、2017年4月～5月の延べ3日間で、計 117m³ のコン

クリートを打設した。基準コンクリートとは、基礎耐圧盤の下に位置する捨てコンクリートである。使用材料は表-6の材料を用い、調合は呼び強度 27, スランプ 15cm, 空気量 4.5%として、表-8に示す調合とした。

打設状況の写真を写真-3~写真-5に示す。基準コンクリート、基礎耐圧盤は、レベルコンクリートの打設と同様に、打設直後のひび割れなどなく、良好な施工を行うことができた。壁については、密実なコンクリートを施工するため、薄い壁部材の締固めに適した長さ 2m の細径棒状バイブレータを用い、確実な施工を行った。

スランプ試験結果を図-12に、空気量試験結果を図-13に示す。荷受け時のフレッシュコンクリートの試験は、生コン車 2 台につき 1 回の高い頻度で実施した。図-12 および図-13 から、スランプおよび空気量共に、試験を行った全てのロットで許容値内の結果が得られた。

標準養生 28 日圧縮強度試験結果を図-14に示す。図-14 から、呼び強度 27 に対して、標準養生 28 日の圧縮強度は 30N/mm^2 以上であり、全てのロットで所要の圧縮強度が得られた。

壁部施工後の状況を写真-6に、付属舎棟施工後の外観を写真-7に示す。脱型後の躯体の状況は、ひび割れ等も見られず、良好な充填状況であることが確認できた。付属舎棟完成後の外観状況は、色合いなども普通コンクリートと変わらず、優れた外観を確保する結果となった。

5. まとめ

本報では、乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたコンクリートの実用化に向け、試験室での基礎物性実験、実機製造実験を行った。各実験結果から下記の事項が明らかとなり、実構造物においても良好な結果が得られた。

- (1) 基礎物性実験から、DSP を結合材の 20~30% 用いた L-SR コンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、中性化抵抗性は、普通コンクリートと比較し顕著な差がないことを確認した。
- (2) 実機製造実験結果から、実機でのフレッシュ性状および強度特性を確認すると共に、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値は、普通コンクリートと同程度の結果であり、JASS 5 で定められた普通コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値の値以下であることを確認した。
- (3) 実適用の結果、荷卸し時のフレッシュ試験および圧

縮強度試験は、全てのロットで所要の品質を満足し、脱型後の躯体は、ひび割れ等も見られず、良好な充填状況を示し、普通コンクリートと変わらない優れた外観を確保する結果となった。

謝 辞

本研究は、環境研究総合推進費(平成 24-26 年度 3K123015, 平成 27-29 年度 3J153001)「スラッジ再生セメント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よる鉄筋コンクリート部材の開発研究」の一環として実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大川裕, 菅俣匠, 井手敬善ほか: 24 時間以上凝結遅延させた戻りコンクリートの凝結特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.878-879, 1998
- 2) 高野肇, 中田善久, 奈良禧徳ほか: 戻りコンクリートの配合およびセメントの種類がウェットスクリーニングしたポンプ圧送用モルタルの品質に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.1, pp.23-31, 2001.1
- 3) 福島和将, 岡沢智, 大川裕: 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) 佐藤嘉昭, 劉嘉銘, 清原千鶴, 田口茂久: 微粉碎乾燥スラッジ(PDS)のコンクリート材料としての用途開発に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.1, pp.63-76, 2002.1
- 5) 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
- 6) 百瀬晴基, 閑田徹志, 今本啓一, 三橋博三: 乾燥収縮迅速評価システムの開発, コンクリート工学, Vol.47, No.10, pp.22-29, 2009.10
日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015.7