

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開発

Development of Ready-mixed Concrete with Dehydrated Sludge Powder

百瀬 晴基 石関 浩輔 閑田 徹志 巴 史郎
大川 憲¹⁾ 青木 真一¹⁾ 笠井 哲郎²⁾

要 約

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開発した。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性および圧縮強度は、全てのロットで所要の品質を満足し、脱型後の躯体は、良好な充填状況を示し、ひび割れ等も見られず、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。

目 次

- I. はじめに
- II. 乾燥スラッジ微粉末(DSP)の概要
- III. コンクリートの基礎物性実験
- IV. レディーミクストコンクリートの実機製造実験
- V. 実構造物への適用
- VI. おわりに

I. 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（以下、生コンと称す）工場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超が廃棄されている。近年、産業廃棄物処分場の建設が一層厳しくなる中、処分場の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急の課題である。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%未満で使用する場合の管理方法を緩和し、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るが、使用量の増大により強度や耐久性の低下が伴うため、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、この点については課題が多いと考えられる。

前記課題を解決するため、筆者らは乾燥スラッジ微粉末（以下、DSPと称す）、およびDSPを混和材として用いたコンクリート（以下、本コンクリートと称す）を開発した。DSPは、戻りコンのスラッジケーキを乾燥粉砕し、文献⁴⁾と類似の方法にて製造するが、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し、未水和セメント分を多く残し水和活性を高めた材料で、普通ポルトランドセメント（以下、OPCと称す）に代わり結合材として使用することが可能となり、結合材量の10%~30%程度を添加することができる。

本報では、DSPの概要を示すとともに、DSPをセメント代替として結合材の20%~30%添加した本コンクリートの

1) 三和石産株式会社 Sanwasekisan Corporation

2) 東海大学 Tokai University

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, 圧縮強度, 乾燥収縮, 中性化

Keywords: returned concrete, dehydrated sludge powder, sludge, compressive strength, dry shrinkage, carbonation

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。

II. 乾燥スラッジ微粉末 (DSP) の概要

1. DSP の製造方法

DSP の製造工程を Fig.1 に示す。DSP は、戻りコンから骨材を分級し、残余の生コンスラッジをフィルター加压装置で脱水した後、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% 程度となるまで乾燥・粉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てから翌朝までに行うことにより、未水和セメントの含有率を高くすることができ、OPC の 5 割程度の強度発現性を有した高品質の DSP が得られる。

2. DSP の基礎物性

(1) DSP の比表面積とセメント圧縮強さ

Fig.2 は、DSP の比表面積と、JIS R 5210 による材齢 28 日のセメント圧縮強さ試験結果の関係について、過去 3 年間に計測した結果を示したものである。Fig.2 から、DSP の比表面積と圧縮強さは相関があり、比表面積が低いほど圧縮強さが高い傾向にある。生コンを出荷した当日に処理した DSP の比表面積の平均値は 7180cm²/g で、圧縮強さの平均値は 28.9N/mm² である。これに対し、翌日処理した DSP の比表面積の平均値は 9570cm²/g で、圧縮強さの平均値が 22.8N/mm² である。以上のことから、生コンを当日処理した DSP は翌日処理したものに比べて、比表面積が小さく、圧縮強さが大きくなる事が分かる。

DSP の比表面積と平均外気温の関係を図 3 に示す。DSP の比表面積は破碎乾燥処理を行うまでの水和反応の程度で変動し、夏季は高く、冬季は低い傾向にあり、当日処理した DSP の平均値の年間変動幅は 6000~10000cm²/g 程度である。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、未水和セメントの残存量は気温が低いほど多くなっている

と考えられる。また、翌日処理した DSP の比表面積は 2000cm²/g 程度大きくなる。これは気温の相違の場合と同様に、未水和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と考えられる。

(2) DSP の微細構造観察および成分分析

レーザー回折式粒度測定機を用いて DSP の粒度分布測定を行うとともに、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 の粉体観察、成分分析を行った。

DSP の粒度分布測定結果を Fig.4 に示す。Fig.4 から、OPC の粒度分布は 30 μm 程度を中心とした山状の粒度分布であるのに対し、DSP は同粒度のほかにも 300 μm 程度の頻度も高く、2 山状の粒度分布であることが確認できる。通常、比表面積が高いということは、粉体の粒子が細かいことを意味するが、DSP の比表面積が高くなるに従い、30 μm 程度の頻



Fig.1 DSP の製造工程

(Manufacturing Process of Dehydrated Sludge Powder)

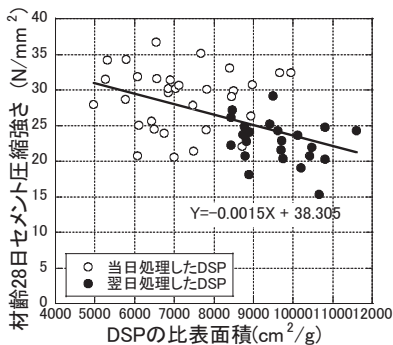


Fig.2 DSP の比表面積と材齢 28 日のセメント強さ試験結果の関係 (Relationship between Specific Surface Area and Compressive Strength)

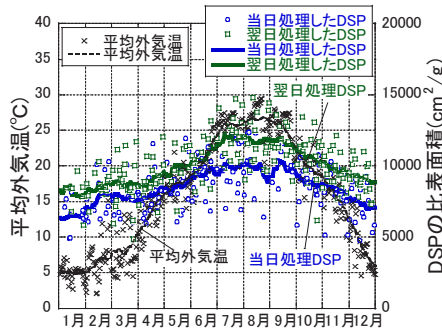


Fig.3 DSP の比表面積と平均外気温の関係 (Relationship between Specific Surface Area and Average Ambient Air Temperature)

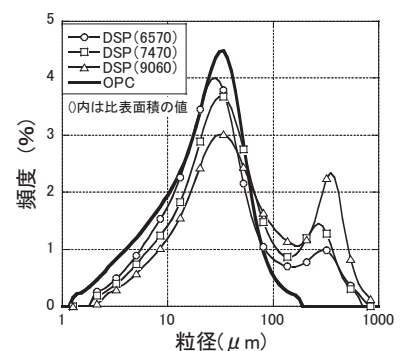


Fig.4 DSP および OPC の粒度分布測定結果 (Particle Size Distribution)

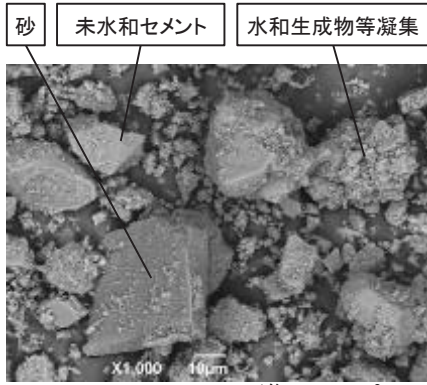


Fig.5 DSP の SEM 画像(5960cm²/g)
(SEM Image of DSP)

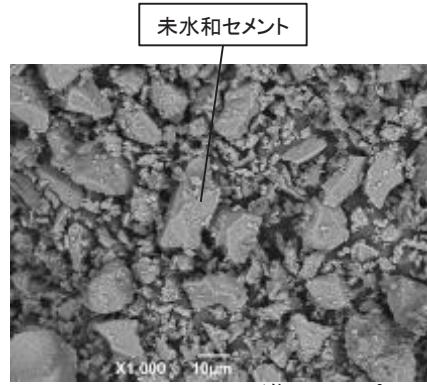
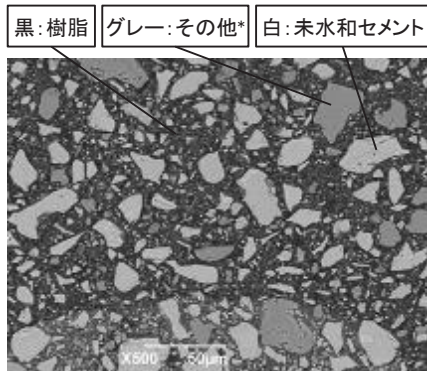


Fig.6 OPC の SEM 画像(3300cm²/g)
(SEM Image of OPC)



*: 砂、水和生成物、石膏、炭酸カルシウム等
Fig.7 DSP の樹脂混合 SEM 画像(5960cm²/g)
(SEM Image of DSP by Mixing Resin)

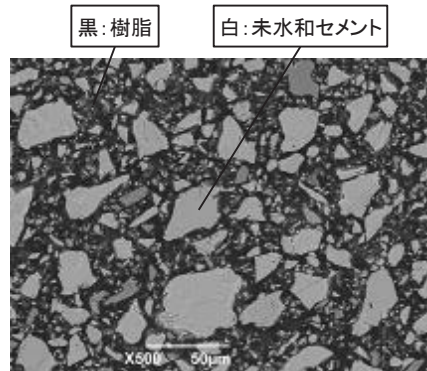


Fig.8 OPC の樹脂混合 SEM 画像(3300cm²/g)
(SEM Image of OPC by Mixing Resin)

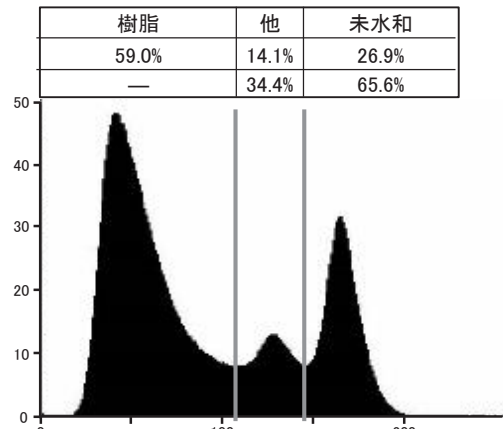


Fig.9 DSP の SEM 画像二値化による成分(5960cm²/g)
(Gray Scale Distribution of DSP)

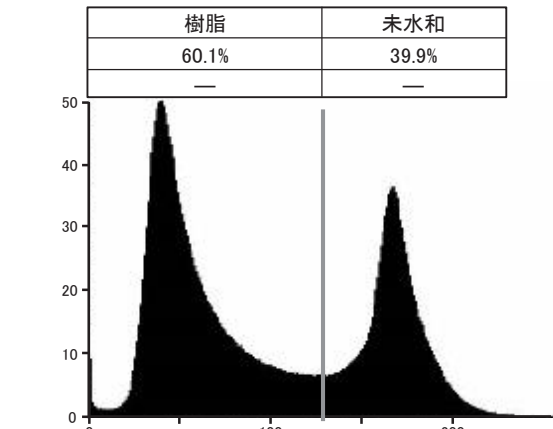


Fig.10 OPC の SEM 画像二値化による成分(3300cm²/g)
(Gray Scale Distribution of OPC)

Table 1 DSP と OPC の主要な化学成分表
(Properties of DSP and OPC)

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

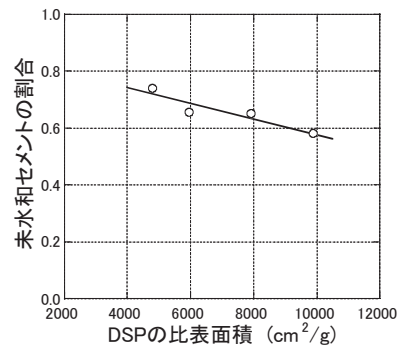


Fig.11 DSP の比表面積と未水和セメント量の関係
(Relationship between Specific Surface Area and Amount of Unhydrated Cement Component)

度は低下し、300 μm 程度の頻度は増大する結果となった。

DSP と OPC の SEM 画像を Fig.5 および Fig.6 に示す。Fig.5 および Fig.6 から、OPC は未水和セメント粒子が独立して存在しているのに対し、DSP 中には未水和セメント以外に、砂や水和生成物などの凝集物が確認された。

Fig.4 から、DSP は 100 μm 以上の凝集した粒子が確認されており、上述の SEM 画像と合致する。比表面積は、JIS R 5201 セメント物理試験方法に規定するブレーン透過装置により測定しており、この手法は「球形粒子よりなる粉末のベッドにおいて、その中の空気を気体を通る経路の全内面積は粉末の全表面積に等しく、また通路の全容積はベッドの空隙容積に等しい」という仮定を前提に、空気の流れから粉体の比表面積を導き出す試験である。DSP の比表面積が大きくなる原因は、100 μm 以上の凝集した粒子の存在により、試験中に凝集粒子中を空気を通ることによるものと考えられる。

DSP および OPC のエポキシ樹脂混合試料による SEM 画像を Fig.7 および Fig.8 に示す。この SEM 画像を二値化することにより、Fig.9 および Fig.10 のように 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の関係を Fig.11 に示す。Fig.11 から、DSP の比表面積が大きくなるに従い未水和セメント量が減少する傾向が認められた。また、DSP 中の 35%程度は砂や水和生成物などであり、強度に寄与しないと考えられる成分が一定程度存在することも確認された。Table 1 は、文献 5) に記載した DSP と OPC 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。DSP 中の砂や水和生成物の存在により、セメントの主要な化学成分が減少し、ig.loss が大きくなっていると推測される。

Ⅲ. コンクリートの基礎物性実験

1. 基礎物性実験の検討概要

基礎物性実験の要因と水準を Table 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 の種類、混合率および水結合材比の 3 要因とし、DSP の種類は比表面積 6000cm²/g、8000cm²/g の 2 水準、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。

圧縮強度試験は、1 調合につき、φ100×200mm の試験体を 9 体作製して、標準養生に供し、材齢 7 日、28 日、91 日にて 3 体づつ圧縮強度試験を実施した。

乾燥収縮試験は、20℃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

Table 2 基礎物性実験の概要
(Experimental Parameter and Level)

DSPの種類	DSPの混合率	水結合材比		
		35%	45%	60%
—	0%	○	○△□	○
DSP(6000)	20%	○	○□	○
	30%	○	○△□	○
DSP(8000)	30%	○	○□	○

* ○: 圧縮強度試験、△: 乾燥収縮試験、□: 促進中性化試験

Table 3 使用材料の一覧
(Concrete Materials)

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(6000)	乾燥スラッジ	—	6780	2.86
	DSP(8000)	微粉末	—	8820	2.76
細骨材	S1	砂	千葉県富津市産	—	表乾2.58
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	表乾2.67
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	表乾2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	—	—	—

Table 4 調合の一覧
(Concrete Mix Proportions)

記号	DSPの種類	DSPの混合率	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)					
					W	OPC	DSP	S1	S2	G
N-35%	—	—	35%	44.4%	170	486	—	336	410	934
N-45%			45%	47.2%	170	378	—	376	460	934
N-60%			60%	49.5%	170	283	—	412	503	934
DSP(6000)20-35%	DSP(6000)	20%	35%	44.1%	170	389	97	332	406	934
DSP(6000)20-45%			45%	47.0%	170	302	76	373	456	934
DSP(6000)20-60%			60%	49.3%	170	227	57	409	500	934
DSP(6000)30-35%	DSP(6000)	30%	35%	44.0%	170	340	146	330	403	934
DSP(6000)30-45%			45%	46.9%	170	264	113	372	454	934
DSP(6000)30-60%			60%	49.3%	170	198	85	408	499	934
DSP(8000)30-35%	DSP(8000)	30%	35%	43.9%	170	340	146	329	402	934
DSP(8000)30-45%			45%	46.9%	170	264	113	371	453	934
DSP(8000)30-60%			60%	49.2%	170	198	85	407	498	934

Table 5 フレッシュ試験および圧縮強度試験結果の一覧
(Summary of Fresh Concrete Test and Compressive Strength Test Result)

記号	SP (B×%)	フレッシュ試験結果			圧縮強度試験結果 (N/mm ²)		
		スランブ (cm)	空気量 (%)	CON温度 (°C)	標準養生		
					7日	28日	91日
N-35%	0.65	17.5	4.7	23.5	53.6	64.3	74.9
N-45%	0.60	17.5	6.0	22.7	37.5	48.8	55.7
N-60%	0.55	13.0	4.2	21.8	23.1	32.9	39.5
DSP(6000)20-35%	1.05	17.5	4.2	22.8	56.0	67.3	76.8
DSP(6000)20-45%	0.80	16.5	5.3	22.4	37.0	47.5	55.4
DSP(6000)20-60%	0.85	17.0	5.7	22.3	22.5	31.3	36.8
DSP(6000)30-35%	1.10	15.0	3.4	22.9	54.1	66.3	75.0
DSP(6000)30-45%	0.90	16.0	4.5	21.7	38.0	49.7	56.8
DSP(6000)30-60%	1.00	17.5	5.3	22.0	23.3	32.2	37.8
DSP(8000)30-35%	1.40	13.5	4.3	22.1	49.2	63.0	73.5
DSP(8000)30-45%	1.15	15.5	4.0	21.0	37.8	49.3	58.1
DSP(8000)30-60%	0.70	12.5	4.1	19.5	20.9	29.9	36.5

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⁾。

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、中性化深さを測定した。

使用材料の一覧を Table 3 に、調合の一覧を Table 4 に示す。表中の記号は、左から DSP の種類、混合率および水結合材比を表す。セメントは OPC を用い、DSP はセメントの内割として使用した。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、単位粗骨材かさ容積は 0.56m³/m³とした。

2. 基礎物性実験の検討結果

(1) フレッシュ試験結果

フレッシュ試験および圧縮強度試験結果を Table 5 に示す。Table 5 のフレッシュ試験結果から、いずれの調合においてもスランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5%の許容値内の結果となり、本コンクリートは混和剤の標準的な添加量の調整により所要のフレッシュ性状が得られることが確認できた。一方で、普通コンクリートに対し、混和剤の添加量が多くなる傾向があり、特に DSP の比表面積が大きい DSP(8000)30 において顕著であった。

(2) 圧縮強度試験結果

結合材水比と圧縮強度の関係を Fig.12 に示す。Fig.12 から、本実験では、標準養生 28 日圧縮強度において、本コンクリートと普通コンクリートに顕著な差は認められなかった。また、同図から DSP 混合率 30%以下の範囲において、本コンクリートの調合設計式は、普通コンクリートと同程度の式が採用できるものと考えられる。

(3) 乾燥収縮試験結果

DSP が乾燥収縮に与える影響を Fig.13 に示す。Fig.13 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 DSP(6000)30-45%は 694 μ であり、N-45%と比較して 1 割程度大きい結果となった。

上記の乾燥収縮率の差が、実構造物に与える影響を検討するため、文献 7) の修正ベースマレー法により、一般的な壁部材に発生するひび割れ幅と間隔を算定した。Fig.14 の算定結果から、両者のひび割れ幅に差はなく、ひび割れ間隔も 30cm 程度の小さな差であることから、本コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は、普通コンクリートと大きな差がないと考えら

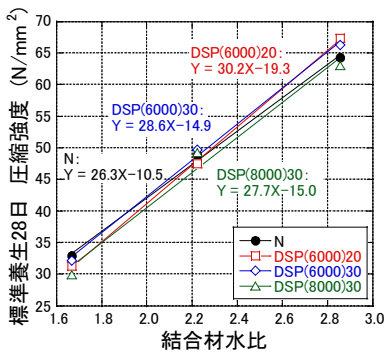


Fig.12 結合材水比と圧縮強度の関係
(Relationship between Binder-Water Ratio and Compressive Strength)

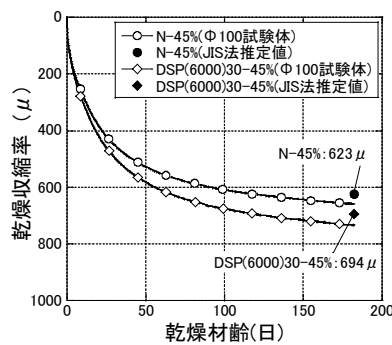


Fig.13 乾燥収縮試験結果
(Strain on Drying-Shrinkage Test)

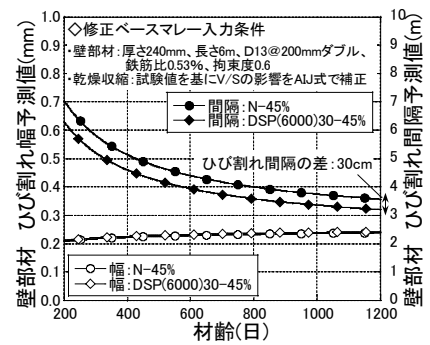


Fig.14 ひび割れ幅と間隔の予測結果
(Estimation of Crack Width and Crack Distance)

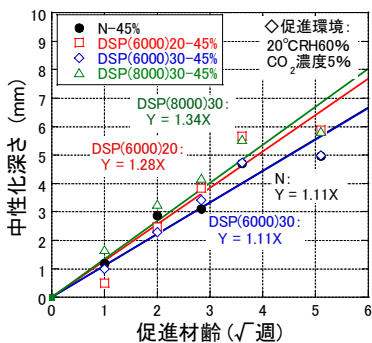


Fig.15 促進中性化試験による
中性化深さ結果
(Carbonation Depth on Accelerated
Carbonation Test)

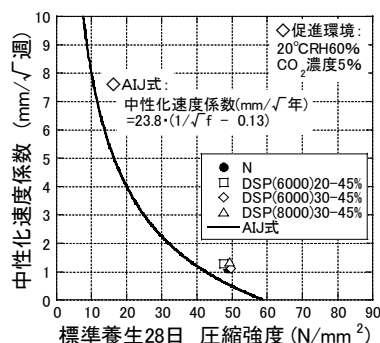


Fig.16 圧縮強度と中性化速度係数の
関係
(Relationship between Compressive
Strength and Carbonation Rate
Coefficients)

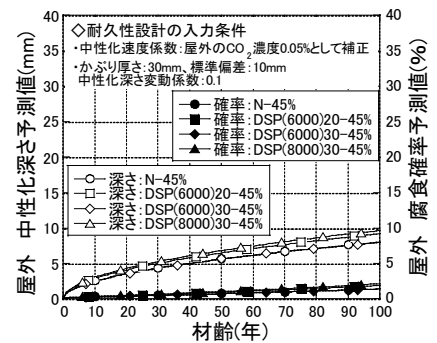


Fig.17 中性化深さと腐食確率の
予測結果
(Estimation of Carbonation Depth and
Rebar Corrosion Probability)

Table 6 実機製造実験の概要
(Experimental parameter and level)

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%	○	—	—	○	—	—

Table 7 使用材料の一覧
(Concrete Materials)

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 ポルトランドセメント	—	—	3.15
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	—	表乾2.58
	S2	砕砂(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	表乾2.67
粗骨材	G	砕石2005(石灰石)	岩手県大船渡市産	—	表乾2.69
混和剤	SP	高性能AE減水剤	—	—	—

Table 8 調合の一覧
(Concrete Mix Proportions)

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%

れる。

(4) 促進中性化試験結果

促進中性化試験結果を Fig.15 に、圧縮強度と中性化速度係数の関係を Fig.16 に示す。Fig.15 および Fig.16 の促進中性化試験結果から、DSP 混合率が中性化深さに与える大きな影響は認められず、本コンクリートの中性化抵抗性は、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。

促進試験により得られた中性化速度係数を基に、文献 8) の耐久性設計を行い、屋外条件での中性化深さおよび腐食確率を算定した結果を Fig.17 に示す。Fig.17 から、W/B45%の条件において、本コンクリートを実構造物に用いた場合の中性化深さや腐食確率は非常に小さい結果であり、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(以下、JASS 5 と称す)における一般的な計画供用期間である 65 年を十分満足できることが確認できた⁹⁾。

IV. レディーミクストコンクリートの実機製造実験

1. 実機製造実験の検討概要

本コンクリートの実構造物への適用に向け、実機ミキサ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

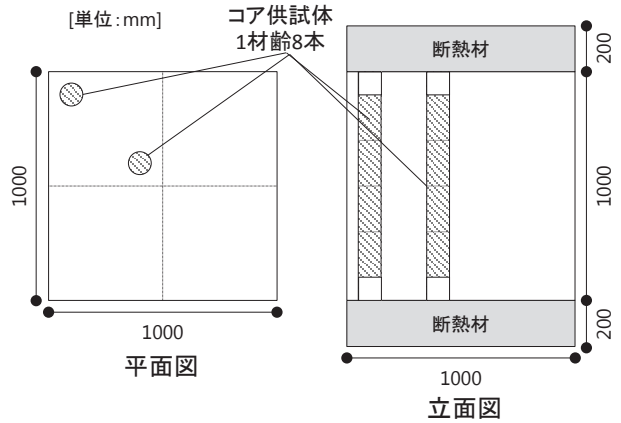


Fig.18 マスコン部材用の模擬試験体の詳細図
(Details of Imitated Column Specimen)

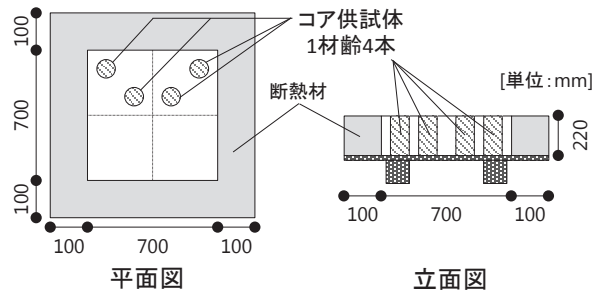


Fig.19 板状部材用の模擬試験体の詳細図
(Details of Imitated Slab Specimen)

性状、圧縮強度、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ 値を確認することを目的に、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 Table 6 に示す。本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、水セメント比 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%の本コンクリートについては、全ての季節で、Fig.18 のマスコンクリート部材を模擬した模擬試験体および Fig.19 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 Table 7 に、調合表を Table 8 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。単位水量は 170kg/m³ とし、単位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。

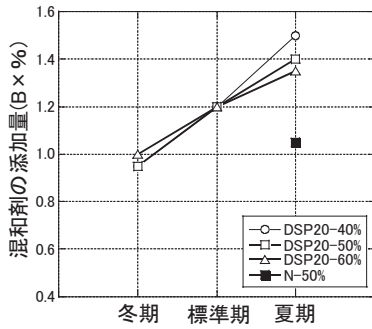


Fig.20 打設時期と混和剤添加量の関係
(Amount of Admixture in Each Seasons)

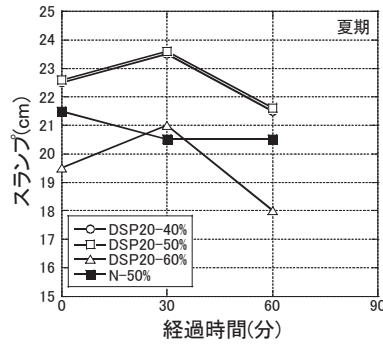


Fig.21 夏期の実機試験における
スランプの経時変化
(Slump in Summer Climatic Condition)

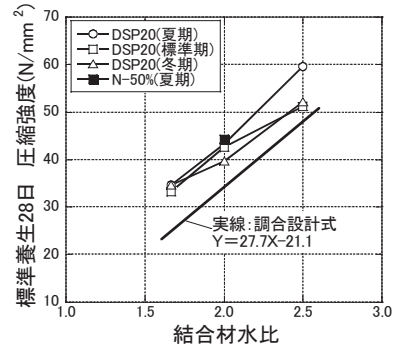


Fig.22 結合材水比と圧縮強度の関係
(Relationship between Binder-Water Ratio
and Compressive Strength)

2. 実機製造実験の検討結果

(1) フレッシュ試験結果

打設時期と混和剤添加量の関係を Fig.20 に示す。Fig.20 から、本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和の速度を調整する働きをする石膏量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 Fig.21 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、練混ぜ直後のスランプの目標値を 21 ± 2.5 cm と設定した。Fig.21 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、本コンクリートは 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、本コンクリートの混和剤添加量が多いことが挙げられる。本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。

(2) 調合設計式の検討結果

結合材水比と圧縮強度の関係式を Fig.22 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。Fig.22 から、実機製造実験にて得られた本コンクリートの結合材水比と圧縮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とが確認でき、同図中の調合設計式を採用することとした。

(3) 構造体強度補正値の検討結果

構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ 値の実験結果を Fig.23 に示す。JASS 5 では、普通コンクリートの構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ 値は、コンクリートの打込みから 28 日までの期間の予想平均気温が 8°C 未満は $6\text{N}/\text{mm}^2$ 、 8°C 以上は $3\text{N}/\text{mm}^2$ 、日平均気温の平

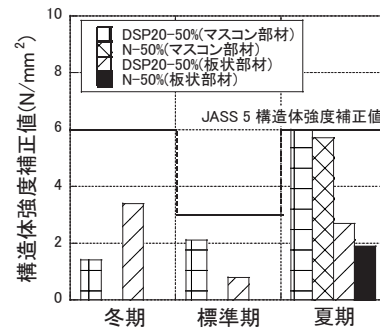


Fig.23 構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$ の実験結果
(Concrete Strength Correction Values $_{28}S_{91}$)

値が 25°C を超える暑中コンクリートの適用期間は $6\text{N}/\text{mm}^2$ と定めている⁹⁾。Fig.23 から、本コンクリートの $_{28}S_{91}$ 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、本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、本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。

V. 実構造物への適用

1. 適用概要

本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 Photo 1 に、付属舎棟の平面図および立面図を Fig.24 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% 混合した本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

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



Photo 1 事務所棟の建物外観
(Office Building)

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，本コンクリートを打設した。Table 7

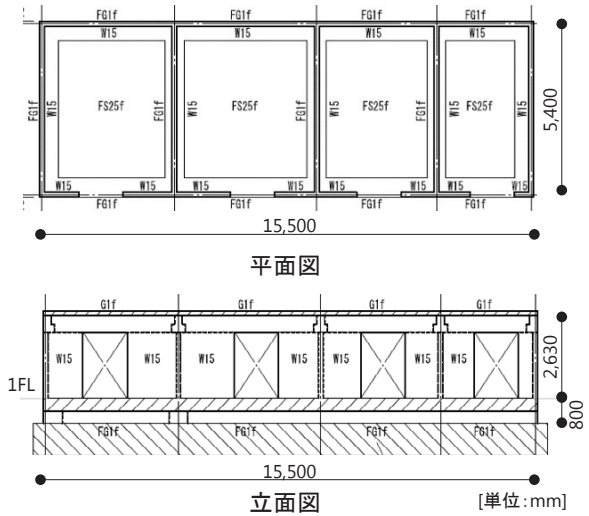


Fig.24 付属舎棟の平面図および立面図
(Floor Plan and Elevation of Machinery Building)

Table 9 調査表の一覧

(Concrete Mix Proportions)

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%



Photo 2 レベルコン打設状況
(Placing of Leveling Concrete)



Photo 3 基礎耐圧盤打設状況
(Placing of Foundation and Pressure Slab)



Photo 4 壁部施工状況①
(Placing of Wall ①)

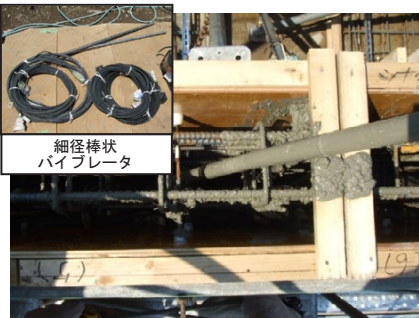


Photo 5 壁部施工状況②
(Placing of Wall ②)



Photo 6 壁部施工後の状況
(Appearance of Wall)



Photo 7 付属舎棟施工後の外観
(Exterior of Machinery Building)

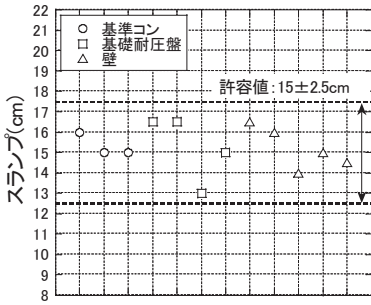


Fig.25 荷下し時のスランプ試験結果
(Quality Control Result of Slump)

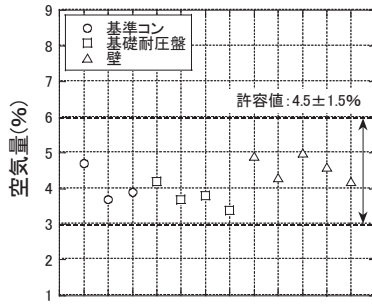


Fig.26 荷下し時の空気量試験結果
(Quality Control Result of Air Content)

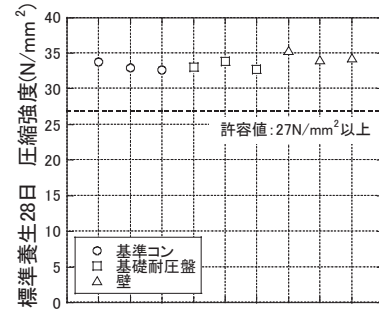


Fig.27 圧縮強度試験結果
(Quality Control Result of Compressive Strength)

の材料を用い、調合は呼び強度 18、スランプ 15cm、空気量 4.5%とし、Table 9 に示す調合とした。

レベルコンクリートの打設状況を Photo 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。本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、Fig.24 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 Table 7 の材料を用い、調合は設計基準強度 24N/mm²、呼び強度 27、スランプ 15cm、空気量 4.5%として、Table 9 に示す調合とした。

打設状況の写真を Photo 3～Photo 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 の細径棒状パイプレータを用い、確実な施工を行った。

スランプ試験結果を Fig.25 に、空気量試験結果を Fig.26 に示す。荷受け時のフレッシュコンクリートの試験は、品質の安定性を確認するため、生コン車 2 台につき 1 回の高い頻度で実施した。Fig.25 および Fig.26 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 Fig.27 に示す。Fig.27 から、呼び強度 27 に対して、標準養生 28 日の圧縮強度は 30N/mm² 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 Photo 6 に、付属舎棟施工後の外観を Photo 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。

VI. おわりに

本報では、DSP の概要を示すとともに、DSP をセメント代替として結合材の 20%～30% 添加した本コンクリートの実適用に向け、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。

- a. 基礎物性実験から、DSP を結合材の 20%～30% 用いた本コンクリートの圧縮強度、収縮ひび割れ抵抗性および中性化抵抗性は、普通コンクリートと比較し顕著な差はなく、WB45% の条件において、一般的な計画供用期間である 65 年を十分満足できることを確認した。
- b. 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ともに、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。
- c. 実適用の結果、荷下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る。

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, 1998, pp.878-879.
- 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, 2001.1, pp.23-31.
- 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, 2000.9, pp.277-278.
- 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, 2002.1, pp.63-76.
- 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, 2015.4, pp.539-549.
- 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, 2009.10, pp.22-29.
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2.
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・同解説, 2016.7.
- 9) 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.

Development of Ready-mixed Concrete with Dehydrated Sludge Powder

Haruki Momose, Kohsuke Ishizeki, Tetsushi Kanda, Shiro Tomoe, Ken Ohkawa¹⁾, Shinichi Aoki¹⁾ and Tetsurou Kasai²⁾

As a technology that can efficiently reuse sludge from waste fresh ready-mixed concrete, we have developed a dehydrated sludge powder containing a large amount of unhydrated cement by shortening the time from concrete production to sludge processing, and also ready-mixed concrete using this powder as admixture.

As a result of applying this concrete to large-scale logistics facilities, the results of fresh concrete tests and compressive strength tests showed that the required quality was satisfied in all lots, that the building frame had no cracks, and that the appearance was excellent and the same as that of normal concrete.