

論文 戻りコンクリートから回収した乾燥スラッジ微粉末と骨材の諸特性に関する研究

大川 憲^{*1}・川名 正嗣^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

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および回収された骨材の諸特性について検討した。スラッジの再生利用については脱水後、乾燥粉碎処理した微粉末に関し、その強度発現性等についてこれまでの検討で、普通セメントの 4～5 割の強度発現性を有することから、強熱減量法による水和率の算定を行い、その関係を検証した。回収骨材については、回収細骨材に含まれるセメント量を測定し、回収骨材を使用したコンクリートのフレッシュおよび硬化性状との関係について検討したが、影響はわずかであった。

キーワード：戻りコンクリート、生コンスラッジ、圧縮強度、水和率、回収骨材

1. はじめに

コンクリート施工時に生ずる戻りコンクリート(以下、戻りコンと称す)の再生処理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の利用については、再生利用がほとんど進んでいないのが現状である¹⁾。またこの際に、回収される骨材(以下、回収骨材と称す)の再生利用に関しては、ISO 22965-2 で5%までならば使用可能²⁾となっているが、JIS A 5308 には規定がない。一方、コンクリート塊から製造される再生骨材はJIS で制定され、再生骨材 H (2005 年制定)、再生骨材 L (2006 年制定)、再生骨材 M (2007 年制定)があり、コンクリート用骨材として利用することが進められている。一方、戻りコンに超遅延剤と硬化促進剤を併用することにより再生利用する研究等³⁾が行われているが、その利用はほとんど進んでいないのが現状である。著者らはこれまでの検討により、スラッジの再生利用については脱水後、乾燥粉碎処理した微粉末(以下、DSP と称す)に関し、地盤改良材(固化材)として有効利用することが可能であること、回収骨材については回収粗骨材を用いたコンクリートは原骨材を用いたコンクリートと同程度の強度、収縮特性を示すこと、回収細骨材は処理工程時に水和・未水和のセメント分が含まれることから、それをを用いたコンクリートの性能は若干低下することを報告した¹⁾。

そこで本研究では、DSP の新たな結合材としての利用を指向し、その強度発現性に関し、水和率との関係から検討を試みた。また回収骨材については、回収細骨材に含まれるセメント量を試算するとともに、回収骨材を使用したコンクリートのスランプロス、圧縮強度について

水セメント比 3 水準(W/C=40・50・60%)における原骨材を用いたコンクリートとの比較検討を行った。

なお、本研究の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た。

2. 実験概要

2.1 DSP の製造と評価試験

(1) DSP の製造方法と基礎物性

DSP は、生コンスラッジ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・粉碎処理して製造したものである。DSP と普通ポルトランドセメントの SEM 画像から、DSP はセメントに比べ微細粒子を多く含んでいることが観察された(写真-1, 写真-2)。比表面積はセメントが3,250cm²/g に対し、DSP は6,000～10,000cm²/g 程度である。また、前報¹⁾より DSP の原料である戻りコン処理までの時間と温度の積により大幅に異なることがわかった。そこで本論文では、DSP の密度、強熱減量および比表面積の影響について再度1年間測定し、その結果を図-1～3 に示した。図より DSP の密度、強熱減量と平均気温には前報¹⁾とほぼ同様な関係が認められ、平均気温が低いほど、DSP の密度は高く、強熱減量が低くなった。また、新たに示した比表面積も平均気温が低いほど小さくなる傾向を示した。これは施工時の気温により、セメントの水和反応の進捗度合いに差が生じ、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ためであると考えられる。

*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 三和石産(株) 取締役生産統括部長 (非会員)

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

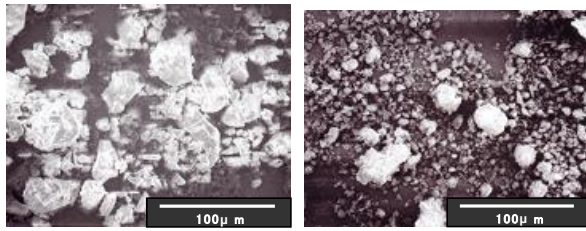


写真-1 普通セメント

写真-2 DSP

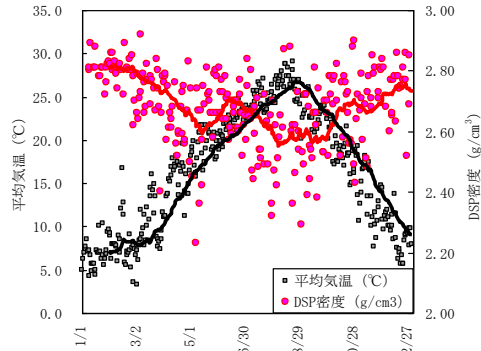


図-1 DSP 密度と平均気温

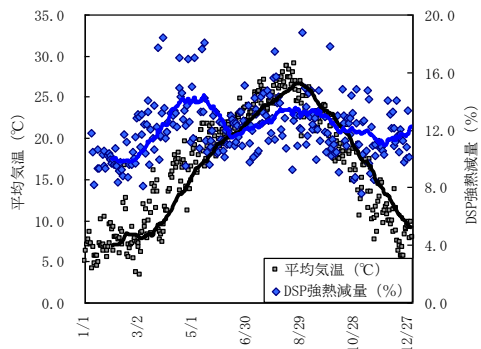


図-2 DSP 強熱減量と平均気温

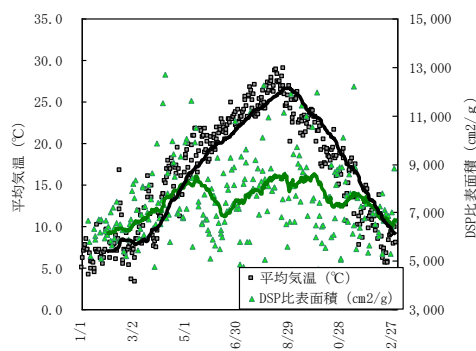


図-3 DSP 比表面積と平均気温

(2) DSP の強度発現性の評価試験

DSP を用いモルタル供試体 (φ5×10cm) を作製し、その圧縮強度試験から 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 である。細骨材はセメント協会標準砂を用いた。なお、DSP はスラッジを当日処理したものと翌日処理したものを複数サンプル使用して行った。

(3) DSP の化学組成と未水和セメント分の鉱物組成

表-1 はセメントおよび当日処理した DSP の化学成分を示したものである。この値を用いて、DSP に含有する未水和セメントの鉱物組成の試算を行った。DSP は後述の強熱減量の試験結果から製造時に 45% 程度水和セメントを含有している。この水和の程度は、文献 4) から普通セメントの場合材齢 3 日程度に相当する。また、同文献から材齢 3 日における各セメント鉱物の水和率を引用し、この値と DSP の各化学成分の値から、DSP に含まれる未水和セメント分の各化学成分を算出し同表に示した (未水和セメント分 (%) = 当日処理した DSP の化学組成 (%) × (1 - 文献 4) の材齢 3 日の水和率における水和した化学成分の比率)。

表-2 は表-1 の未水和セメント分のみの化学組成の値を用いて、ボーグ式から算出した DSP の未水和セメント分の鉱物組成である。本試算で得られた鉱物組成の値は、DSP に含まれる骨材微粒分 (8.9%) を無視したものであり、その絶対値の信頼性は低いと考えられる。しかし、水和反応が比較的遅い C₂S、C₄AF は、水和反応が速い C₃S、C₃A より残存量が多い結果となっており、本試算方法は DSP の化学成分から未水和セメント分の鉱物組成を評価する一手法として提案できるものと考えられる。

(4) DSP の強熱減量法による水和率の算定

各結合材について、W/C = 60% のセメントペーストを作製した。セメントペーストはモルタルミキサーを用いて、低速 90 秒、高速 90 秒で練り混ぜた。練混ぜ後、φ5 × 10cm の円柱供試体を作製し、24 時間後脱型を行い、その後水中養生した。供試体が指定の材齢に達した後、ハンマーを用いて粉砕し、5~10mm のものを集め、アセトンに浸し吸引脱気して水和を停止し、110℃ の乾燥炉に入れ 24 時間乾燥させた。デシケーター内で試料を冷ました後、乳鉢で試料をさらに粉末状になるまで (0.1mm ふるいを通過) すり潰した後、試料約 1.0 g 秤取り、950 ± 25℃ の炉に入れ脱水させ、坩堝をデシケーター内で冷まして減量を測定した。なお、脱水時間は試料の質量が恒量になるまでとした。減量のうち結合材自体の持つ強熱減量を差し引き、残りを全て結合水の量とした。求めた結合水量から未水和セメント 1 g 当りの結合水量に換算し、セメント 1 g が完全に水和するのに必要な水分量で除して水和率を求めた (式 (1))⁵⁾。

$$\text{水和率 (\%)} = \frac{\text{結合水量 (g)}}{\text{完全水和時の理論結合水量 (g)}} \times 100 \quad (1)$$

なお、完全水和時の理論結合水量は、文献 6) より 0.227 を用いた。

表－1 各結合材の代表的な化学分析結果

結合材の種類	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		
普通セメント	20.68	5.28	2.91	64.25	2.10	1.80	3.16	3220
当日処理した DSP	18.96	5.14	2.68	53.11	1.75	12.01	2.70	6810
水和材齢3日を想定した DSP に含有する未水和セメント分	8.26	1.97	1.53	21.82	ig.loss および水和セメント 分の合計 (%)			
					60.07			

表－2 各結合材の鉱物組成

結合材の種類	C ₃ S(%)	C ₂ S(%)	C ₃ A(%)	C ₄ AF(%)	CaSO ₄ (%)	計(%)
普通セメント	58.7	15.1	9.1	8.8	3.6	95.3
DSP に含有する未水和セメント分	10.6	15.7	2.6	4.6		33.6

2.2 回収骨材の製造方法と評価試験

(1) 回収骨材の製造方法

回収骨材は、戻りコンを洗浄後に1次洗浄振動ふるい(7-26mm)で分級し、7mmふるいに留まるものを粗骨材(以下、回収粗骨材と称す)とした。更に7mmふるいを通したものを2次洗浄振動ふるい(1mm)、湿式サイクロンおよび3次洗浄振動ふるい(0.7mm)の処理工程により回収したものを細骨材(以下、回収細骨材と称す)とした。なお、ここで対象とした戻りコンは工場で製造されたレディーミクストコンクリートの戻りコンを連続して処理したものであり、主に普通ポルトランドセメントを使用し、W/Cが40～60%の配合のコンクリートである。

(2) 回収細骨材に含まれるセメント量

回収骨材は、特に回収細骨材にこれまでの検討から処理工程時に水和・未水和のセメント分が含まれ、その影響が大きいと考えられる。そこで、グルコン酸ナトリウム溶液が貝殻や石灰石骨材に起因する炭酸カルシウムをほとんど溶解せず、セメント分を溶解することを活用した「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(NDIS3422:2002)」に準拠し⁷⁾、105℃絶乾状態における粉末試料の溶解量百分率(%)を回収細骨材に含まれる水和、未水和セメントの総量(以下、含有セメント分と称す)とし、測定した。

(3) コンクリートの各種試験条件

回収骨材を使用したコンクリートに関し、フレッシュ性状、硬化性状を原骨材を使用したコンクリートと比較するためにこれらを使用した室内実験を実施した。使用材料およびコンクリートの配合を表－3、表－4に示す。コンクリートの配合は原骨材を使用した配合と細骨材および粗骨材の容積比が全ての配合で同一となるようにし、回収粗骨材を0, 50, 100%, 回収細骨材を0, 25, 50%それぞれ置換した配合のコンクリートについて、水セメ

表－3 使用材料および物性値

種 類	記号	産地	密度 g/cm ³	吸水率 %
普通セメント	C	—	3.16	—
砕 砂	S1	飯山産	2.58	2.90
	S2	大船渡産	2.67	0.93
山 砂	S3	富津産	2.58	1.22
回収細骨材	S4	—	2.56	3.07
砕 石	G1	飯山産	2.62	2.72
	G2	大船渡産	2.69	0.44
回収粗骨材	G3	—	2.66	1.40
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系		
AE減水剤	AE	高機能タイプ		
AE剤	AE剤	—		

表－4 コンクリート配合表

No	記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)											
			W	C	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3	SP (C×%)	AE (C×%)	AE剤 (C×%)
1	40-ベース	40	175	438	378	151	227	-	459	471	-	0.85	-	0.150
2	40-回収G-50		175	438	378	151	227	-	231	234	466	0.85	-	0.200
3	40-回収G-100		175	438	378	151	227	-	-	-	931	0.85	-	0.200
4	40-回収S-25		175	438	284	113	170	189	459	471	-	0.85	-	0.150
5	40-回収S-50	50	175	438	189	76	113	378	459	471	-	0.85	-	0.125
6	50-ベース		170	340	429	171	257	-	456	465	-	0.85	-	0.250
7	50-回収G-50		170	340	429	171	257	-	228	231	463	0.75	-	0.300
8	50-回収G-100		170	340	429	171	257	-	-	-	923	0.65	-	0.200
9	50-回収S-25	60	170	340	322	129	193	214	456	465	-	0.80	-	0.250
10	50-回収S-50		170	340	214	86	128	429	456	465	-	0.75	-	0.100
11	60-ベース		169	282	413	165	248	-	495	508	-	-	1.10	0.125
12	60-回収G-50		169	282	413	165	248	-	249	253	508	-	1.10	0.150
13	60-回収G-100	60	169	282	413	165	248	-	-	-	1005	-	0.80	0.100
14	60-回収S-25		169	282	310	124	186	207	495	508	-	-	1.10	0.125
15	60-回収S-50		169	282	207	83	124	413	495	508	-	-	1.10	0.100

ント比3水準(W/C=40・50・60%)で比較検討した。フレッシュ性状に関する試験としてスランプ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)をそれぞれ練混ぜ直後、30分、60分静置後に実施し、経時変化を測定した。硬化性状に関する試験は、材齢7日、28日および91日について圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 DSPの試験結果

(1) DSPの強度発現性

図－4は、結合材をDSPとしたモルタルの圧縮強度を示したものである。左図が当日に処理したDSP、右図が翌日に処理したDSPの材齢28日における圧縮強度試験結果である。当日に処理したDSPは、25～35N/mm²程度で、平均が30.5N/mm²であった。翌日に処理したDSPは、

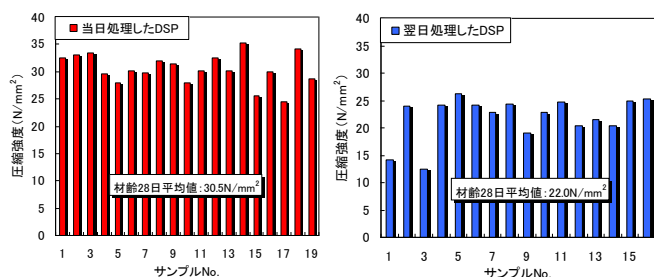


図-4 材齢 28 日における DSP 圧縮強度

13～26N/mm²程度で、平均が 22.0N/mm²であった。これらは、前報¹⁾とほぼ同様の結果であることが確認できた。

(2) DSP の強熱減量法による水和率の測定

図-5、図-6、図-7 は、強熱減量および強熱減量から算出した水和率と圧縮強度の関係をそれぞれ表したものである。図-5 は材齢と強熱減量の関係を示したものである。図より各材齢における普通セメントの強熱減量は小さく、DSP-1、DSP-2 の順に強熱減量が大きくなっている。これらは、DSP の原料である戻りコンを当日および翌日に処理し製造するため、処理までの水和反応の進行度合いの差によるものであると考えられる。図-6 は、図-5 の値から各結合材の初期強熱減量を差し引いた値を示したものである。図より、強熱減量の推移は普通セメントが大きく、DSP-1、DSP-2 の順に小さくなっている。これは、練混ぜ後の水和反応の進行速度を示しており、普通セメントの進行速度が速く、DSP-1、DSP-2 の順になっている。図-7 は、水和率と圧縮強度の関係を示している。全ての結合材において、水和率に比例して圧縮強度が増加しているが、DSP はセメントに比べ同一の水和率における強度が小さい値となっている。

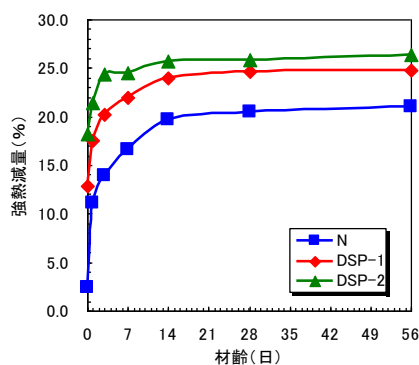


図-5 セメントおよび DSP の強熱減量

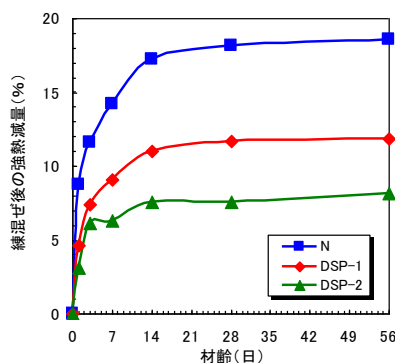


図-6 セメントおよび DSP の練混ぜ直後からの強熱減量の変化

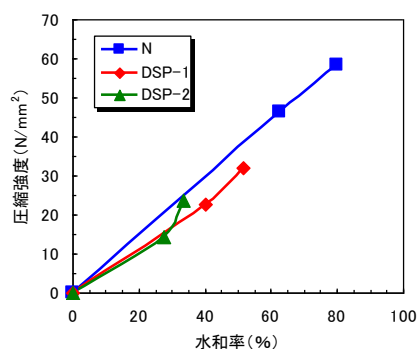


図-7 水和率と圧縮強度の関係

3.2 回収骨材の試験結果

(1) 回収骨材の基礎物性

回収粗骨材および回収細骨材の各種物性を 2 年間測定し、その結果を図-8～図-12 に示した。図より、回収粗骨材は、ほぼ全ての試験項目で原骨材と同程度の物性値となった。回収細骨材は、原骨材と比べ密度が低く、吸水率は高くなり、そのバラツキも大きくなっている。また粗粒率、微粒分量は大きくなる傾向となった。これらの原因として密度、吸水率、微粒分量は水和および未水和のセメント粒子が細骨材に付着している場合や単独で含有しているためであると考えられる。一方、図-11 に示すように細骨材の粗粒率は原骨材管理範囲内でわずかに大きく、粗骨材のそれはわずかに小さくなっている。これは粗骨材の過小粒が細骨材に混入したためであると考えられる²⁾。

(2) 回収細骨材に含まれるセメント量

図-13 は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から導いた含有セメント

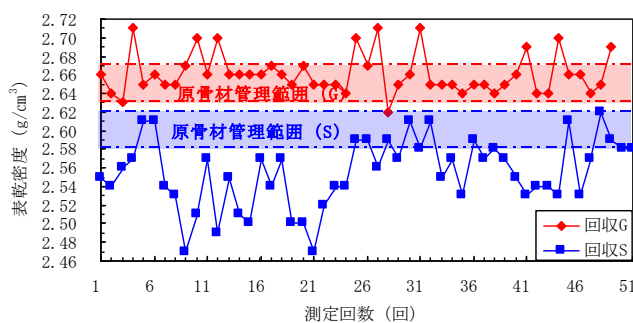


図-8 回収骨材の表乾密度

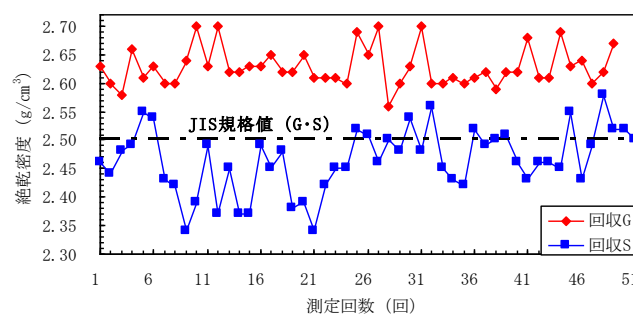


図-9 回収骨材の絶乾密度

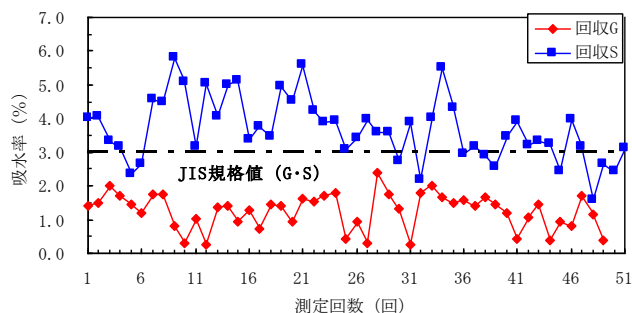


図-10 回収骨材の吸水率

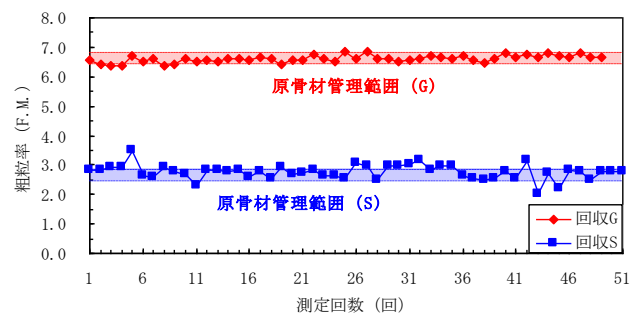


図-11 回収骨材の粗粒率

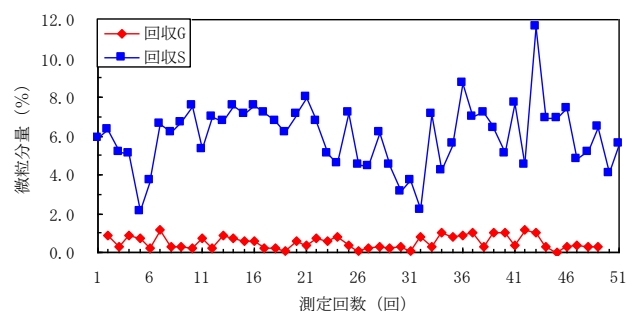


図-12 回収骨材の微粒分量

分を示したものである。なお図の太線は、表-5 に示す計算により算出した回収細骨材に含まれる推定含有セメント分の値である。推定含有セメント分は、戻りコン 1m³ の原骨材それぞれの微粒分量 (%) から質量 (kg) に換算し、その後、戻りコン 1m³ で製造される DSP および回収骨材のそれぞれの微砂分 (%), 微粒分量 (微粒分量試験より測定した 1 年間の平均値 (%)) から微砂分量と微粒分量 (kg) を算出し、処理前の微粒分合計量 (33.8kg) と処理後の微粒分合計量 (87.1kg) を差し引き、その増加分を単位回収細骨材量で除したものである。図より、サンプル A~I においてバラツキもあるが、3.5~7.5% 程度の含有セメント分であり、これは計算により求めた推定含有セメント分とほぼ同程度である。

3.3 回収骨材を用いたフレッシュコンクリートの特性

図-14, 図-15 はフレッシュコンクリートのスランプおよび空気量の経時変化を示したものである。スランプ値は、練混ぜ直後の値を全ての配合で同程度となるように高性能 AE 減水剤 (0.65~0.85 (C×%)), AE 減水剤

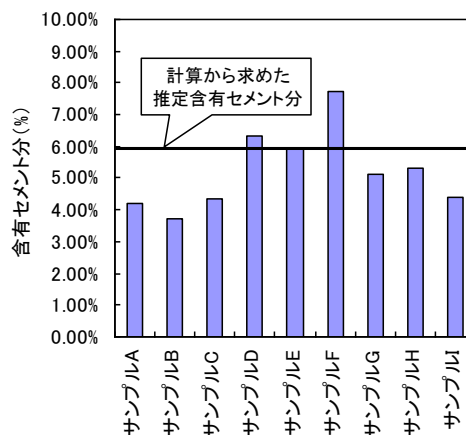


図-13 回収細骨材の含有セメント分

表-5 回収細骨材に含まれる推定含有セメント分

戻りコン 1m ³ (配合 27-18 と仮定する)				
材料	セメント	水	原細骨材	原粗骨材
単位量(kg)	309	170	892	914
骨材の微粒分量 (%)			1.9	1.8
骨材の微粒分量 (kg)			17.3	16.5
骨材全体の微粒分量 (kg)			33.8	



戻りコン 1m ³ で製造される DSP および回収骨材				
材料	DSP	水	回収細骨材	回収粗骨材
単位量(kg)	309	—	892	914
砂分率(%)	8.9	微粒分量(%)	6.2	0.5
砂分量(kg)	27.5	微粒分量(kg)	55.0	4.6
全微粒分量(kg)	87.1			
回収細骨材の推定含有セメント分	5.98%		—	

(0.8~1.10 (C×%)) を添加した。30 分経過後においてスランプロスは 1.0~4.5cm 程度、60 分経過後で 5.5~10.5cm 程度の範囲となっている。40-回収 S-50 (No.5), 50-回収 S-50 (No.10) で若干スランプロスが大きい傾向が見られるが、骨材の種類による差は小さく、スランプロスに及ぼす含有セメント分の影響は小さいものと考えられる。空気量は、AE 剤の添加量を 0.10~0.30 (C×%) とし、練混ぜ直後の値が 4.5±1.5% の範囲となるようにした。空気量は時間の経過に伴い全ての配合でわずかに変化し、4.5±1.5% となり、骨材の種類による影響は表れなかった。

3.4 回収骨材を用いた硬化コンクリートの特性

図-16 は硬化コンクリートの圧縮強度試験の結果を示したものである。W/C=40% で材齢 91 日の高強度域においては、回収骨材を用いた場合の圧縮強度は、原骨材

を用いた配合と比較すると、若干低下している。これは回収細骨材に付着している脆弱な水和または未水和セメント粒子の層が強度低下に影響しているものと思われる。しかし、W/C=50%、60%ではどの材齢においても原骨材を用いた場合に比較して強度の低下はみられない。すなわち中強度以下のコンクリートに回収骨材を用いても原骨材を用いた場合と同等の強度が期待できる。

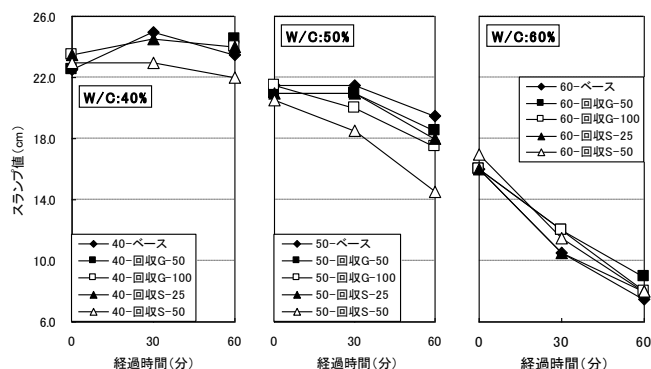


図-14 スランプ試験結果

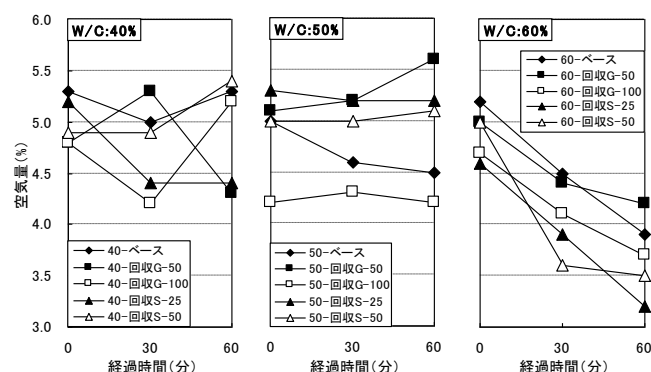


図-15 空気量試験結果

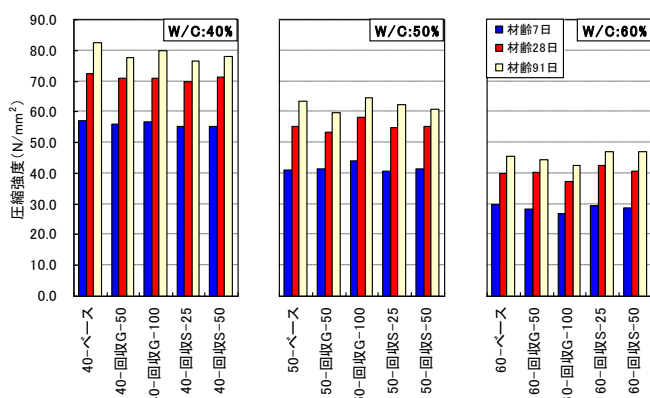


図-16 圧縮強度試験結果

4. まとめ

(1) DSP の密度および強熱減量は再測を行った結果、前報¹⁾とほぼ同様に平均気温が低いほど、密度は高く、強熱減量が低くなった。また、DSP の比表面積は平均気温が低いほど、低くなることがわかった。

(2) DSP には未水和セメント分が残存しており、その強度発現性は圧縮強度で普通ポルトランドセメントの約40～55%を発揮する。

(3) DSP の強度発現性と強熱減量法による水和率の値には比例関係が認められた。

(4) 回収粗骨材の物性はほぼ全ての項目で JIS 規格値を満足し、原骨材と同程度であった。一方、回収細骨材は、原骨材と比べ密度が低く、吸水率は高くなり、そのパラツキも大きく、粗粒率、微粒分量は大きくなる傾向であった。

(5) 回収細骨材に含まれる水和・未水和セメントの量は、試算による推定含有セメント分と、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 (NDIS3422:2002) で求めた値とで相違なく、3.5～7.5%程度含まれていると考えられる。

(6) 回収骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、高強度域では、原骨材を用いた場合より若干低下しているが、中強度以下のコンクリートに回収骨材を用いても同程度の強度が期待できる。

参考文献

- 1) 大川憲, 川名正嗣, 笠井哲郎ほか: 戻りコンクリートから回収したスラッジ微粉末と骨材の再生利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.1571-1576, 2011.7
- 2) 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: 「残コン・戻りコンの発生抑制と有効利用」に関するシンポジウム委員会中間報告, 日本コンクリート工学協会, pp.156-159, 2010.2
- 3) 古井博, 吉田康史, 西村正ほか: 戻りコンクリートの再使用に関する一研究, 「残コン・戻りコンの発生抑制と有効利用」に関するシンポジウム論文報告集, 日本コンクリート工学協会, pp.43-47, 2010.2
- 4) 笠井哲郎, 田澤栄一: 硬化収縮の測定法によるセメントの水和度の簡易推定法, 広島大学工学部研究報告, vol.37, No.1, pp.23-29, 1988.
- 5) 植松桂治, 魚本健人: 鉱物組成に着目した各種セメントペーストの細孔構造, コンクリート工学年次論文集, vol.21, No.2, pp.13-18, 1999.
- 6) 森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.17, No.1, pp.651-654, 1995.
- 7) 社団法人日本非破壊検査協会: 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), pp.1-13, 2002.8