

論文 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

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再生利用について検討した。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検討し、普通セメントの4~5割の強度発現性を有し、地盤改良用の固化材として用いた場合、六価クロム溶出量が大幅に低減する結果を得た。回収骨材については、それを使用したコンクリートのフレッシュおよび硬化性状について検討し、コンクリートのスランプロス、圧縮強度、乾燥収縮等は、原骨材を用いたコンクリートと同程度となった。

キーワード：戻りコン、生コンスラッジ、六価クロム溶出量、固化材、回収骨材、再生骨材、乾燥収縮

1. はじめに

生コンクリート1工場当りの戻りコンの発生量は、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会技術開発部会の全組合員を対象とした実態調査によれば、39m³/月と報告されている¹⁾。コンクリート施工時に生ずる戻りコン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。また、この処理により同時に回収される骨材（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には規定がないため、我が国におけるコンクリート用骨材としての再生利用は進んでいない。一方、コンクリート塊から製造される再生骨材はJISが制定され、2005年には加熱すりもみ法等の高度処理により製造される再生骨材Hが、2006年には簡易コンクリート用としての再生骨材Lが、さらに2007年には、中程度の処理を施した再生骨材MがJIS化され、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。しかし、高度処理を施す再生骨材Hは、処理時のエネルギー消費量が大きく、また大量の微粉末が発生する等の問題点が指摘されている³⁾。また低（中）品質の再生骨材については、モルタル分も一緒に再生利用できる利点があるが、低品質再生コンクリート用の骨材として利用されるなど利用範囲は制限されており、路盤材等への利用がほとんどである⁴⁾。また、このJISでは、生コンの戻りコンクリートを硬化させ破碎処理したものを再生骨材の範囲としているが、この方法で製造する再生骨材は本研究で検討する回収骨材に比べ、エネルギー使用量が多く、高品質の再生骨材を得ること

が困難であると考えられる。

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⁵⁾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。

そこで本研究では、戻りコン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再生利用について検討した。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（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を指向し、その強度発現性や六価クロム溶出特性等について検討した。また回収骨材についてはそれを使用したコンクリートのスランプロス、圧縮強度、乾燥収縮等について、原骨材を用いたコンクリートおよび再生骨材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したものの、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

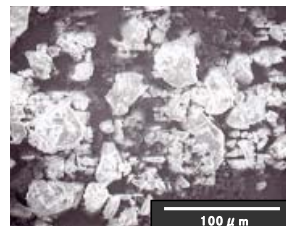


写真-1 普通セメント

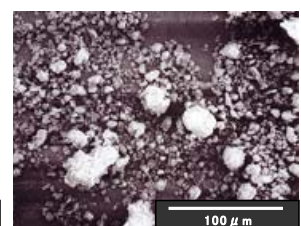


写真-2 DSP

*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）

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%程度となるまで乾燥・粉砕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、DSPの物性は処理工程が同一の場合、生コンスラッジに至る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るため、生コン製造時の平均気温とDSPの密度の関係を1年間測定し、その結果を図-1に示した。図より、DSPの密度と平均気温には高い相関関係が認められ、平均気温が低いほどDSPの密度は大きくなる。また、DSPの強熱減量と平均気温にもほぼ同等の関係が認められ（図-2）、平均気温が低いほどDSPの強熱減量は小さくなった。これは、DSPの原料である戻りコンが処理されるまでの平均気温により、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ためであると考えられる。

以上のことから、DSPの強度発現性等の特性は、その密度によって異なると考えられるため、以下の検討では密度の異なる2種類のDSPを用いた。

(2) DSPの強度発現性の評価試験

結合材として、セメントとDSPの混合粉体を用い、混合粉体の混合比率を変えてモルタル供試体（φ5×10cm）

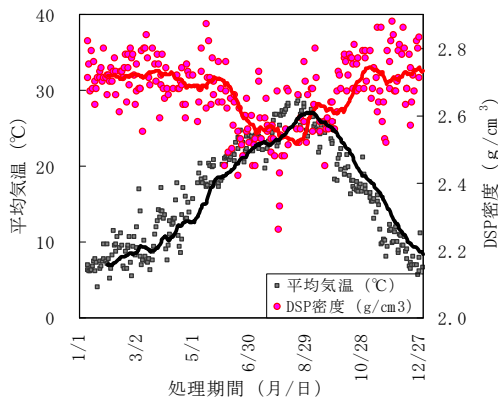


図-1 DSP密度と平均気温

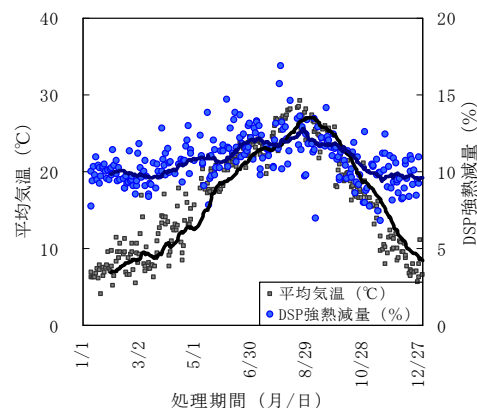


図-2 DSP強熱減量と平均気温

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/（C+DSP））=50%、DSP置換率（DSP/（C+DSP））=0, 25, 50, 75, 100（%）、細骨材結合材比（S/（C+DSP））=3.0である。細骨材はセメント協会標準砂を用いた。使用材料を表-1に示す。なお、DSP①はスラッジを当日に脱水、乾燥粉砕処理したもの、DSP②は翌日に処理したものである。

(3) DSPの六価クロム溶出量試験

環境庁告示第46号に準拠し、分光光度計（定量下限値：0.02mg/L）により、六価クロム溶出量を測定した。

(4) DSPの地盤改良材としての評価試験

セメント系固化材による改良体の強さ試験方法（JCSL-01:2006）に準拠して行った。結合材は表-2に示すセメント系固化材（一般型と六価クロム低減型）、普通ポルトランドセメントおよびDSP、更にこれらに表中の高炉スラグ微粉末を15～45%置換したものについても固化材として使用した。対象土は笠岡粘土を使用し、対象土1m³に対する固化材添加量を50～200（kg/m³）とした。表-3に改良土の配合を示す。表の固化材の種類の記事は表-2に定義したものである。なお、ここで使用したDSPは当日に処理・製造したものである。

2.2 各種骨材の製造方法とコンクリートの試験条件

(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ふるいを通じたものを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

表-1 使用材料

項目	普通ポルトランドセメント	スラッジ微粉末①	スラッジ微粉末②	標準砂	高性能AE減水剤
密度 (g/cm ³)	3.16	2.66	2.38	2.64	—
比表面積 (cm ² /g)	3,270	6,210	9,360	—	—
強熱減量 (%)	2.19	10.16	12.73	—	—
記号	N	DSP①	DSP②	S	SP [®]

※SPはDSP75%および100%置換時のみ使用

表-2 使用材料

項目	一般型固化材	六価クロム低減型固化材	普通ポルトランドセメント	スラッジ微粉末	高炉スラグ微粉末
密度 (g/cm ³)	3.02	3.04	3.16	2.89	2.89
比表面積 (cm ² /g)	3,880	4,390	3,270	5,190	5,290
強熱減量 (%)	—	—	2.19	8.20	—
記号	US10	US50	N	DSP	BS

表-3 改良土の配合表

固化材の種類	対象土1m ³ 当りの固化材添加量 (kg/m ³)
US10	50, 100, 150
US50	
N	
N+BS (15)	
N+BS (30)	
DSP	50, 100, 150, 200
DSP+BS (15)	
DSP+BS (30)	
DSP+BS (45)	

※（ ）内の数値はBSの置換率を示す

称す)とした。

(2) 再生粗骨材の製造方法

再生粗骨材を製造するための原コンクリートの配合は、水結合材比 (W/B) を 25~65%, 細骨材率 (s/a) を 37~55%, W/B=25%の場合のみ混和材としてシリカフェーム (記号: SF, 密度 2.19g/cm³) をセメントに対し外割で 10%置換した。目標スランブを 10±2.5cm, 目標空気量 4±1.5%とし, これらの目標値を満足するよう高性能 AE 減水剤および AE 剤を添加した (表-4)⁴⁾。その後, 長期養生 (材齢約 9 年) したコンクリートをジョークラッシュャで 25mm および 15mm 以下に破碎後, ロサンゼルス試験機 (JIS A 1121) により粒度調整を行い, その内 5mm ふるいに留まるものとした。

(3) コンクリートの各種試験条件

本研究では各種骨材を使用したコンクリートに関し, フレッシュ性状, 硬化性状を比較検討することを目的とした。使用材料およびコンクリートの配合を表-5, 表-6 に示す。コンクリートの配合は原骨材を使用した配合 (No.1) 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

表-4 使用材料および配合条件

使用材料		
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,280cm ² /g
粗骨材	富士川産砕石	密度: 2.67g/cm ³ 吸水率: 0.65%
細骨材	富士川産砕砂	密度: 2.63g/cm ³ 吸水率: 1.60%
混和材	シリカフェーム (SF)	密度: 2.19g/cm ³
混和剤	高性能AE減水剤 AE剤	ポリカルボン酸系 -
配合条件		
W/B: 25~65% (B=C+SF) s/a: 37~55% 粗骨材容積: 300L/m ³ (一定) 目標スランブ: 10±2.5cm 目標空気量: 4±1.5%		

表-5 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	-	3.15	-
砕砂	S1	厚木産	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	-	2.59	3.07
砕石	G1	厚木産	2.62	2.72
	G2	大船渡産	2.69	0.44
回収粗骨材	G3	-	2.66	1.40
再生粗骨材	G4	-	2.44	3.99
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系		
AE剤	AE	-		

表-6 コンクリート配合表

No	W/C	単位量 (kg/m ³)											
		W	C	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3	G4	SP	AE
1	50	170	340	429	171	257	-	456	468	-	-	0.85	0.025N
2	50	170	340	429	171	257	-	228	234	463	-	0.80	0.025N
3	50	170	340	429	171	257	-	-	-	923	-	0.75	0.050N
4	50	170	340	322	129	193	214	456	468	-	-	0.75	0.050N
5	50	170	340	214	86	128	429	456	468	-	-	0.80	0.080N
6	50	170	340	435	174	261	-	225	231	-	417	0.95	0.100N
7	50	170	340	443	177	266	-	-	-	-	820	1.00	0.150N

細骨材を 0, 25, 50%, 再生粗骨材を 0, 50, 100%それぞれ置換した配合のコンクリートについて比較検討した。

フレッシュ性状に関する試験としてスランブ試験 (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 日および 28 日について圧縮強度試験 (JIS A 1108), 材齢 28 日のみ静弾性係数試験 (JIS A 1149), 割裂引張強度試験 (JIS A 1113) を行った。長さ変化試験 (JIS A 1129-3 ダイヤルゲージ法) は, 乾燥開始材齢 7 日 (材齢 1 日脱型後, 20°C水中養生) として行った。

3. 実験結果および考察

3.1 DSP の試験結果

(1) DSP の六価クロム溶出量

図-3 は普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種および DSP の密度と六価クロム溶出量を示したものである。図より DSP の六価クロム溶出量は普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種と比べ大幅に小さい値となった⁶⁾。これは, DSP 製造過程において洗浄水に六価クロムが溶出したためであると考えられる。また, 当日処理したものと翌日処理したものを比較すると, 当日処理した DSP の方がわずかに低い溶出傾向を示した。

(2) DSP の強度発現性

図-4 は, セメントに DSP を置換したモルタルの圧縮強度を示したものである。図より置換率 100%, すなわち結合材を DSP のみとしたモルタルでは置換率 0%, すなわち結合材をセメントのみとしたモルタルの 40~

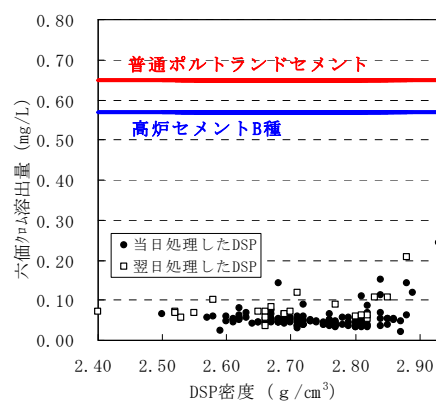


図-3 DSP の密度と六価クロム溶出量

55%程度の強度発現が見られる。なお、図の△-N は W/C50%のモルタルの配合から DSP 置換分のセメントを差し引いた配合のモルタルの圧縮強度を示したものである。図の点線はセメントおよび DSP①を単独で用いた場合のそれぞれの圧縮強度の値と各置換率に相当する質量分率から算出した圧縮強度の計算値である。この値が実測値 (DSP①の値) とほぼ一致していることから、DSP をセメントと混合して用いる場合、その強度発現の程度は、質量分率による単純な複合則に従うものと推察される。また、DSP の置換率が大きい領域では、密度の大きい DSP を用いた場合の方が強度発現性は大きくなった。これは、密度が大きいものほど乾燥粉碎処理されるまでの水和進行の程度が小さく、未水和セメントの残存量が多いためであると考えられる。

図-5 はセメント系固化材、普通ポルトランドセメントおよび DSP を使用した改良土の一軸圧縮強度試験結果を示したものである。図より DSP 単体では他のものに比べ強度は小さくなっているが、DSP に高炉スラグ微粉末を置換した場合、その置換率が高いほど改良土の強度は大きくなり、他の固化材に比べても遜色ない一軸圧縮強度を示した。これは、DSP がその未水和成分の強度発現性だけでなく、高炉スラグ微粉末に対するアルカリ刺激材として作用したためであると考えられる。

図-6 は改良土の六価クロム溶出量と固化材添加量の

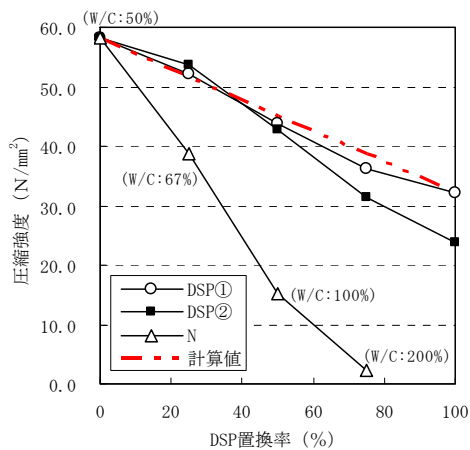


図-4 圧縮強度に及ぼす DSP 置換率の影響

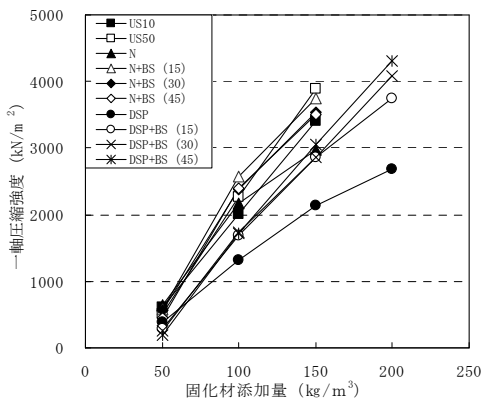


図-5 改良土の一軸圧縮強度 (材齢 28 日)

関係を示したものである。図より、DSP 単体では、一般固化材や普通ポルトランドセメントの場合に比べ低い溶出量となった。また、DSP に高炉スラグ微粉末を置換した固化材の場合、六価クロム低減型固化材と同程度の低い六価クロム溶出量となった。

図-7 は図-5、図-6 から一軸圧縮強度と六価クロム溶出量の関係を示したものである。図より DSP 単体では、一般型固化材や普通ポルトランドセメントの場合と比べ低い溶出量となった。また、図中の朱線は土壤環境基準値 (0.05 mg/L 以下) であるが、DSP に高炉スラグ微粉末を置換した固化材の場合、この値よりも大幅に小さい溶出量であり、六価クロム低減型固化材と同一強度で同程度の低い六価クロム溶出量となった。

3.2 各種骨材の特性

(1) 回収骨材

回収粗骨材および回収細骨材の各種物性を 1 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、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

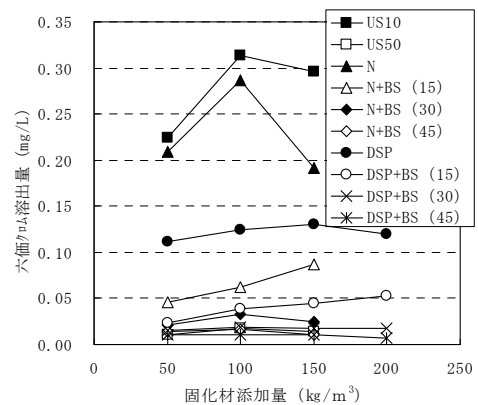


図-6 改良土の六価クロム溶出量

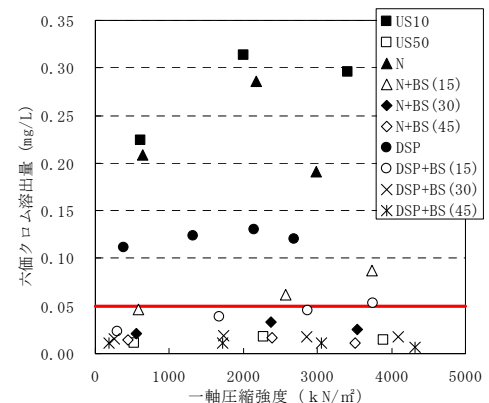


図-7 圧縮強度と六価クロム溶出量

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⁾。

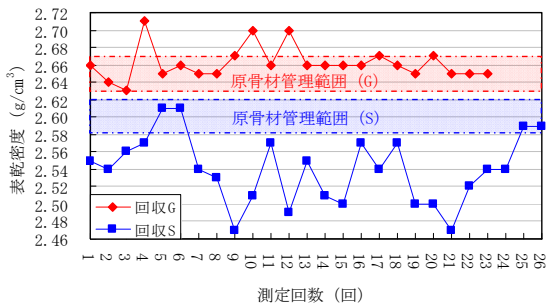


図-8 回収骨材の表乾密度

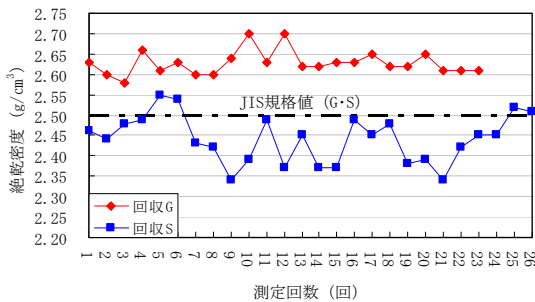


図-9 回収骨材の絶乾密度

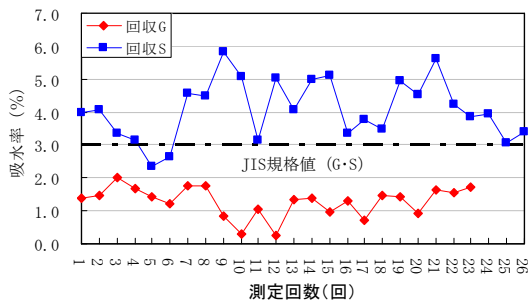


図-10 回収骨材の吸水率

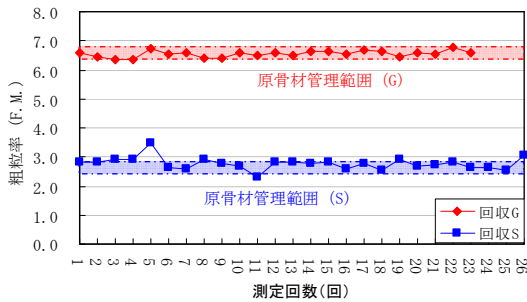


図-11 回収骨材の粗粒率

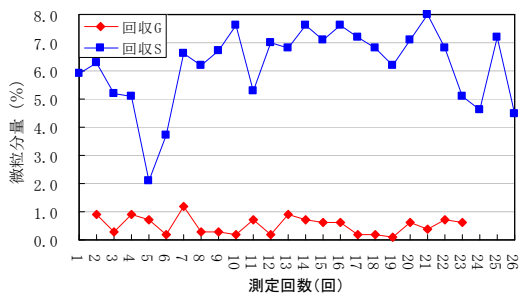


図-12 回収骨材の微粒分量

(2) 各種骨材試験結果

表-7 は、回収粗骨材、回収細骨材、再生粗骨材の物性値を示したものである。表より、回収粗骨材は全ての項目で JIS 規格値を満足している。回収細骨材は絶乾密度の規格値を満足し、吸水率はわずかに大きい値となっているが、再生細骨材 H の規格値 (3.5%以下) は満足している。なお、比較用に作製した再生粗骨材は再生粗骨材 M の規格値に相当するものである。

3.3 各種骨材を用いたフレッシュコンクリートの特性

図-13、図-14 はフレッシュコンクリートのスランプ試験および空気量試験の結果を示したものである。スランプ値は、高性能 AE 減水剤の添加量を 0.75~1.00 (C×%) の範囲とし、練混ぜ直後の値を全ての配合で同程度とした。その後、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 程度となったが、骨材の種類による明確な差は見られなかった。空気量は、AE 剤の添加量を 0.025~0.150 (C×%) の範囲とし、練混ぜ直後の値を全ての配合で同程度とした。なお、同一空気量を得るための AE 剤添加量は再生粗骨材を用いた場合、原骨材および回収骨材の場合に比べ、大幅に大きくなった。また空気量は時間の経過に伴い全て

表-7 各種骨材の物性値

種類	表乾密度 g/cm ³	絶乾密度 g/cm ³	吸水率 %	粗粒率 %	微粒分量 %	実積率 %
回収砂利	2.66	2.63	1.40	6.67	0.4	-
回収砂	2.59	2.52	3.07	2.55	7.2	-
再生粗骨材	2.44	2.35	3.99	6.73	0.5	59.6

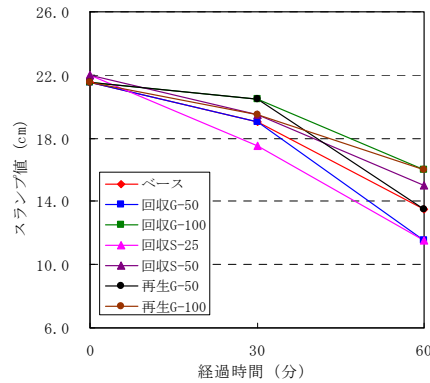


図-13 スランプ試験結果

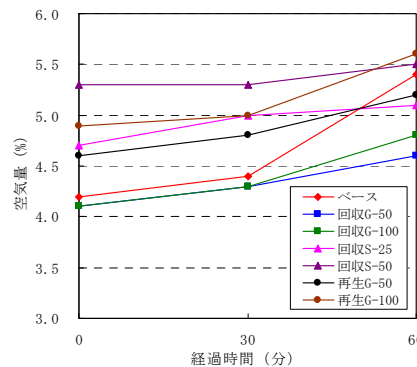


図-14 空気量試験結果

の配合でわずかに増加する傾向を示し、骨材の種類による差はわずかとなった。

3.4 各種骨材を用いた硬化コンクリートの特性

図-15 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。圧縮強度は原骨材を用いた配合と比較すると、回収粗骨材を用いた場合では、置換率 50%および 100%の場合とも同程度の値を示した。回収細骨材では、置換率 25%では同程度の強度となったが、置換率 50%では 1 割程度の強度低下が見られた。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。再生粗骨材は置換率 50%では、同程度の強度となるが、置換率 100%では、強度低下が見られた。これは、再生粗骨材製造時において付着モルタルに生じた微細なひび割れが原因であると考えられる。

図-16 は、長さ変化試験の結果を示したものである。乾燥材齢 28 日までの範囲では、回収粗骨材は原骨材を用いた配合とほぼ同等の乾燥収縮量となった。回収細骨材は、置換率 25%では同程度であるが、置換率 50%では収縮量がわずかに大きくなっている。これは回収細骨材の吸水率が高いことが影響したものと思われる。一方、再生粗骨材を用いた場合、収縮量が大きくなる結果となった。これは再生粗骨材の吸水率が高いことが原因であると考えられ、このため乾燥による質量変化も他の配合のコンクリートよりも大きくなった。

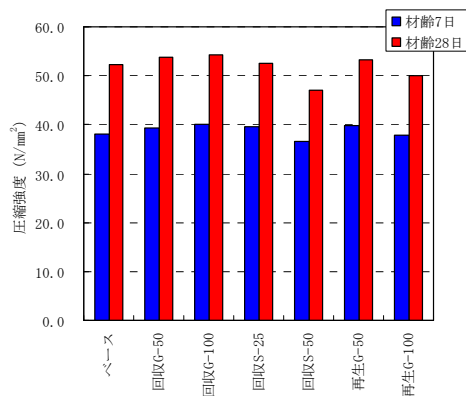


図-15 圧縮強度試験結果

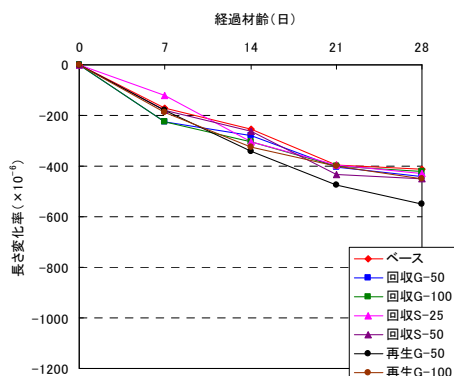


図-16 乾燥収縮試験結果

4. まとめ

(1) 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。

(2) DSP の六価クロム溶出量は、セメントに比べ大幅に小さく、DSP に高炉スラグ微粉末を置換して固化材として使用すると、その改良土は六価クロム低減型固化材と同一強度で同程度の低い六価クロム溶出量となる。

(3) 回収粗骨材の物性は全ての項目で 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、そのバラツキも大きく、粗粒率、微粒分量は大きくなる傾向であった。

(4) 回収骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状の内、スランプおよび空気量の経時変化は原骨材を用いたコンクリートと同程度であった。

(5) 回収粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度および乾燥収縮量は、原骨材を用いたコンクリートと同程度となるが、回収細骨材を 50%置換した場合には、1 割程度強度低下し、収縮量がわずかに大きくなった。

参考文献

- 1) 渡邊真史, 中田善久ほか: 戻りコンクリートをウェットスクリーニングして得られるポンプ圧送用先送りモルタルの実用化に関する実験的研究, 「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.65-70, 2010.2
- 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) 秋吉善忠, 伊藤七恵, 佐藤嘉昭ほか: 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの性状に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, No.48, pp.89-92, 2009.3
- 4) 笠井哲郎, 内田賢吾: 原コンクリートの品質が再生骨材コンクリートの諸物性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No.1, pp.241-246, 2001.6
- 5) 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
- 6) 土木学会コンクリート委員会: コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題, 土木学会, コンクリートライブラリーNo.111, pp.25-29, 2003.5