

# 論文 湿式碎石粉を添加したコンクリートの性能に関する研究

本居貴利<sup>\*1</sup>・片山一司<sup>\*2</sup>・中原信幸<sup>\*3</sup>・田村隆弘<sup>\*4</sup>

**要旨:** 湿式方式による碎石・砕砂の製造過程で産出される碎石スラッジは、フィルタープレスで脱水されスラッジケーキの状態が発生する。現段階ではこの碎石スラッジから採取される碎石粉は JIS 化されておらず、有効利用が難しいため大半は廃棄処分されている。本研究では、碎石スラッジを有効利用することを目的とし、碎石スラッジを加熱乾燥再微粉化して製造した湿式碎石粉を用いたコンクリートに関する各種実験を行った。実験では、湿式碎石粉を適量添加することでコンクリートの圧縮強度他の諸性能が向上することを確認した。また、この結果から、碎石粉を活用することによる単位セメント量の低減の可能性についても検討した。

**キーワード:** 湿式碎石粉, 圧縮強度, フレッシュ性状, 乾燥収縮

## 1. はじめに

### 1.1 碎石粉を取り巻く現状

国内の骨材生産状況はコンクリート用・道路用を合わせ、1990年の949百万トンをピークに2012年では381百万トンと4割近くまで減少している。一方、碎石、砕砂の供給比率は、天然骨材の採取規制もあり1990年では55%であったものが、2012年には70%と年々増加している。この碎石・砕砂を製造する際には生産量の約1~2%の微粒分(75 $\mu$ m以下)が発生するといわれているが、近年では高強度コンクリートや高流動コンクリートの普及に伴い、粒形の良い碎石・砕砂が求められていることから、碎石粉はさらに増加する傾向にある。

碎石粉には、碎石・砕砂を乾式方法で製造する際に副産されるもの(以下、乾式碎石粉)と、湿式方法で濁水処理施設から脱水ケーキとして捕集されるもの(以下、湿式碎石粉)がある。乾式碎石粉については2009年にJIS A 5041「コンクリート用碎石粉」が制定され、利用用途が研究・開発されてきている。しかし湿式碎石粉は対象外であり、一般的には「建設汚泥」として産廃処理をするケースが多く、処理に当たっては産廃処理場の確保、処理費用、そして、環境への影響等、問題が山積している。従って、湿式碎石粉を有効利用することは、それらの問題を改善し、環境負荷の低減に繋がる可能性がある。

### 1.2 湿式碎石粉について

湿式方法において捕集された碎石スラッジは、脱水処理の程度や試料の材齢によって15~25%程度の含水率(含水量=湿潤質量)があり、含水状態にあることが再資源化への一つのネックとなっている。また、シックナー内で碎石スラッジを沈下させるために用いる凝集剤が、コンクリートの品質に与える影響も報告されており<sup>1)</sup>、

コンクリート用碎石粉として利用することを妨げる一因となっている。ここでは、脱水ケーキを加熱・乾燥し、無水の微粉末状に再加工することでコンクリートへの添加が可能となったことについて報告する。

## 2. 碎石粉の活用に関するこれまでの研究

碎石粉には、前述のとおり乾式と湿式とがあり、乾式碎石粉については2009年にJIS A 5041として規格化され、活用方法が模索されている<sup>2)3)</sup>。乾式の場合、高流動コンクリートなど、高性能 AE 減水剤と併用する混和材としての利用提案も報告されている。

一方で湿式碎石粉は、碎石スラッジの凝集沈降過程で添加される凝集剤がコンクリートの品質に影響を及ぼす可能性があり<sup>1)</sup>、また、実用化に向けた研究実績も少ないことから今日なお規格化に至っていない。

著者らは湿式碎石粉の再利用化について、これまでスラッジケーキをスラリー化してコンクリートに添加する方法や、造粒して細骨材として添加する方法を試みたが、そこでは高粘性状態の発現や、過大な経時変化が発生するなど、所要の品質を得ることができなかった。

しかし、乾式の碎石粉がJIS化されたことにより、湿式碎石粉を乾燥させ、乾式碎石粉とほぼ同様の状態とすることで、本材料のJIS規格の適合への可能性を見出し、今回の研究に至った。

## 3. 碎石粉を添加したコンクリートの性能

### 3.1 実験概要

湿式碎石粉のコンクリートへの添加性能を評価するために、湿式碎石粉を細骨材に置換する場合とセメントに置換する場合の2種類のケースについて実験した。そし

<sup>\*1</sup> 西部徳山生コンクリート(株) 徳山工場(正会員)

<sup>\*2</sup> コーウン産業(株) (正会員)

<sup>\*3</sup> (株)富国建設工業社 (正会員)

<sup>\*4</sup> 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科教授(正会員)

て、各置換方法において、1) 圧縮強度の変化量、2) スランプ性状、3) 空気量の変化、4) 加圧ブリーディング性能、5) 乾燥収縮性能を確認した。また、各置換方法において乾式砕石粉(記号：SC-DRY)を使用した場合についても実験を行い、湿式砕石粉(記号：SC-WET)との比較を行った。

### 3.2 砕石粉について

本研究では、山口県周南市の砕石・砕砂製造工場で採取される砕石粉を使用した。岩種は硬質砂岩である。砕石粉の種類と名称を表-1に、品質について表-2に示す。

湿式砕石粉を使用するにあたり凝集剤による影響が無視できない。そこで、有機物である凝集剤が高温加熱乾燥により無効化できないか試みた。凝集剤の影響として、単位水量の顕著な増加が挙げられており<sup>1)</sup>、影響が無効化される温度を、フロー値比を指標として探った結果を表-3に示す。200℃以上で加熱することでフロー値比が砕石粉の規格(JIS A 5041)を満足できることが分かった。

表-1 研究で使用した砕石粉の種類と名称

記号	砕石粉名称	製造方式
SC-WET	湿式・200℃乾燥品	湿式
SC-DRY	乾式・105℃乾燥品	乾式

表-2 砕石粉の品質

項目	JIS A 5041	SC-WET	SC-DRY
水分(%)	1.0 以下	0.0	0.9
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.5 以上	2.79	2.80
フロー値比(%)	90 以上	91.5	99.4
活性度指数(材齢 28 日)(%)	60 以上	74	78
150μm ふるい残分(%)	5 以下	0.0	0.7

表-3 湿式砕石粉の加熱温度とフロー値比

試料名称	加熱温度(℃)	フロー値比(%)	活性度指数(%)	可否
規格値	—	90 以上	60 以上	—
乾式砕石粉	105	99.4	78	合
湿式砕石粉	105	86.1	77	否
	200	91.5	74	合
	400	96.8	77	合

### 3.3 砕石粉の細骨材置換試験

細骨材置換の実験に使用したコンクリートの各材料を表-4に示す。無添加配合をBASE1として、SC-WETをS1の質量割合で4%置き換えた配合をSC-WET4、8%置き換えた配合をSC-WET8、SC-DRYをS1の質量割合で4%

置き換えた配合をSC-DRY4、8%置き換えた配合をSC-DRY8として実験を行った。(表-5参照)

#### (1) 砕石粉の吸水率補正

砕石粉は無水状態であるため、そのままコンクリートに添加した場合、砕石粉が吸水し生コンクリートの性状に大きく影響する。配合に使用する砕石粉の吸水率は、JIS A 1109 コンクリート用細骨材に用いる表乾密度及び吸水率の測定方法では測定が困難であるため、式(1)により間接的に測定を行い、補正を行うこととした。この結果、砕石粉を混入したコンクリートの明らかなスランプ低下は表れず、本手法は妥当であったと考える。

$$Q_{sc} = Q_m - Q \quad (1)$$

ここに、

$Q_{sc}$  : 砕石粉の吸水率(%)

$Q_m$  : JIS A 1109 により測定した、細骨材に砕石粉を定量混合した試料の吸水率(%)

$Q$  : JIS A 1109 により測定した、細骨材だけの試料の吸水率(%)

また、本実験で求められた砕石粉を混入した砕砂の吸水率は表-5のとおりであった。

表-4 実験に用いたコンクリートの各材料

種類		混合比率(%)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント : C	—	3.16
水	工業用水 : W	—	1.00
細骨材	砕砂 : S1 (硬質砂岩)	60	2.68
	砕砂 : S2 (石灰石)	40	2.64
粗骨材	砕石 1505A : G1 (硬質砂岩)	40	2.73
	砕石 2010A : G2 (硬質砂岩)	60	2.73
混和剤	AE 減水剤 : AD	—	1.10

表-5 砕石粉の吸水率

SC-WET 混入率	$Q_m$ (%)	$Q$ (%)	$Q_{sc}$ (%)
0%	—	1.94	—
4%	2.68	—	0.74
8%	2.93	—	0.99

表-6 実験に用いたコンクリートの配合

記号	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	S	SC	G	AD
BASE1	50	48.4	4.5	177	354	846	-	937	3.54
SC-WET4	50	47.7	4.5	177	354	825	20	937	3.54
SC-WET8	50	47.0	4.5	177	354	805	40	937	5.31
SC-DRY4	50	47.7	4.5	177	354	825	20	937	3.54
SC-DRY8	50	47.0	4.5	177	354	805	40	937	5.31

## (2) 圧縮強度試験

試験に用いたコンクリートの配合を表-6 に示す。JIS A 1108 により材齢 28 日で行った、BASE1 の圧縮強度を基準とした細骨材置換率と圧縮強度変化率を図-1 に示す。細骨材置換率 4%、8% どちらにおいても BASE1 コンクリートを上回る結果となった。また、置換率は SC-WET では 4%、SC-DRY では 8% が最も高い結果となった。砕石粉を混和した場合、砕石粉の粒子がセメント粉体を分散させ、結果、未反応のセメントが水と反応するため強度が増加する微粉末効果<sup>4)</sup>が現れる場合があることが知られているが、今回の結果もこの効果の発現が考えられる。

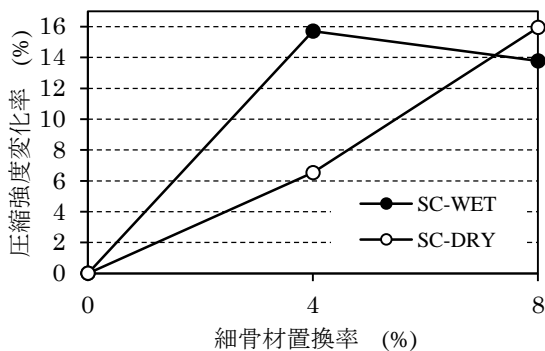


図-1 細骨材置換率と圧縮強度変化率

## (3) スランプ性状

砕石粉を細骨材と置換したコンクリートの試験結果を表-7 に、スランプ性状(写真)を図-2 に示す。8%置換のコンクリートは、混和剤添加率を増して所要のスランプを確保した。

BASE1 コンクリートと 4%添加したコンクリートは同等の結果が得られた。砕石粉の種類では、SC-WET に対して SC-DRY は高い流動性が得られた。性状としては置換率が増すほど粘性が強くなり、分離抵抗性が高くなる傾向であった(図-2 参照)。練り上がり直後から 90 分後まで、30 分ごとに測定したスランプ変化量を図-3 に示す。スランプの経時変化は、砕石粉を添加したものはいずれも添加しない BASE1 に比べスランプロスが小さくなった。中でも、SC-WET4%の結果は試験を行った経過時間 90 分の範囲では最もロスが小さいといった性状を示した。

表-7 細骨材置換したコンクリートの試験結果

記号	スランプ(cm)	空気量(%)	混和剤添加率(%)
BASE1	17.0	4.6	1.0
SC-WET4	16.5	4.2	1.0
SC-WET8	16.0	4.2	1.5
SC-DRY4	17.5	4.9	1.0
SC-DRY8	17.5	4.0	1.5

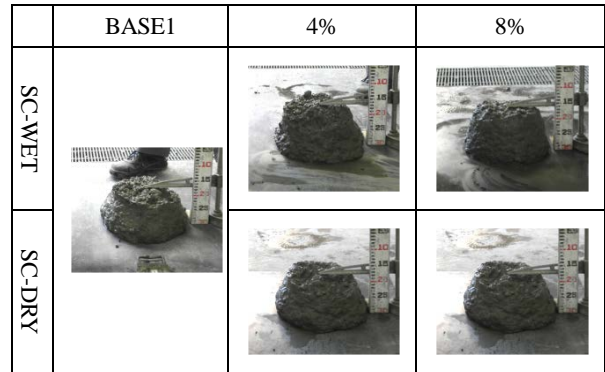


図-2 細骨材置換率とフレッシュ性状

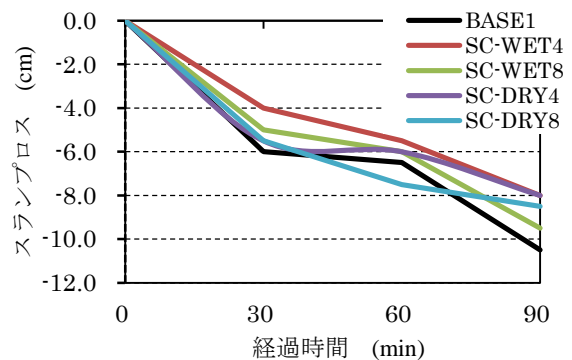


図-3 スランプの経時変化量

## (4) 空気量の経時変化

スランプ試験と同様に練り上がり直後から 90 分後まで、30 分ごとに測定した空気量の変化を図-4 に示す。

空気量でもスランプと同様に SC-WET を 4%添加したものが最もロスが小さかったが、SC-DRY を 4%添加したものは BASE1 とほぼ同じ変化量となった。

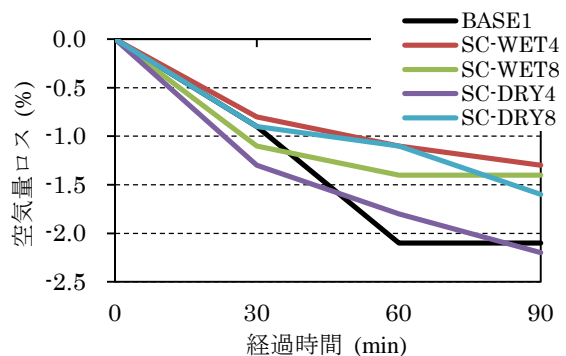


図-4 空気量の経時変化

## (5) 加圧ブリーディング性能

加圧ブリーディング試験は、ポンプ圧送性能の評価方法として、「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」<sup>5)</sup>、「コンクリートのポンプ施工指針」<sup>6)</sup>に記載されている試験結果を図-5 に示す。砕石粉を細骨材置換すると脱水量が若干ではあるが減少した。

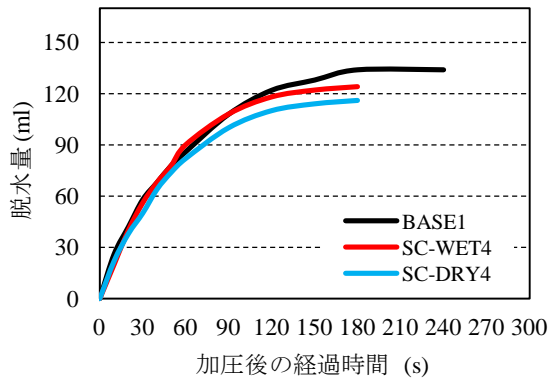


図-5 加圧ブリーディング試験結果

### (6) 乾燥収縮量

近年、コンクリート構造物の耐久性を評価する指標の一つとして、コンクリートの乾燥収縮量が着目されている。ここでは、JIS A 1129-2 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部：コンタクトゲージ方法により、乾燥収縮量の測定を行った。供試体成型後、1 週間標準養生を行った後に基長を行い、測定材齢は 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 119, 147, 182 日とした。

材齢 28 日現在の測定結果は、図-6 に示すとおり無添加と 8% 添加したものはほぼ同等な結果となったが、4% 添加したものは約 20 $\mu\text{m}$  小さい値となっている。

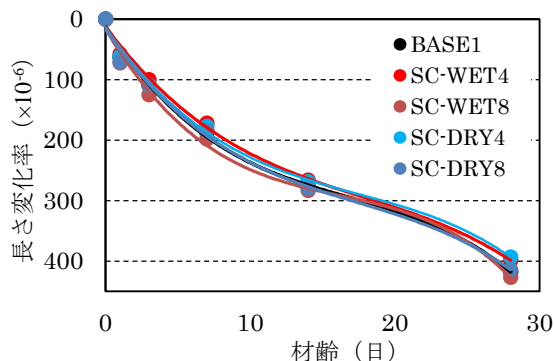


図-6 乾燥収縮率試験結果

### 3.4 碎石粉のセメント置換試験

3.3(2)の圧縮強度試験結果より、碎石粉を添加すると圧縮強度が 4%程度増加する結果が得られた碎石粉のセメント置換の可能性を検討した。SC-WET, SC-DRY のそれぞれを、無置換の BASE1 (W/C50%) に対してセメントの質量割合 4%で置換した配合 (WET1-4, DRY1-4), 8%で置換した配合 (WET1-8, DRY1-8), BASE2 (W/C66%) に対してセメントの質量割合 4%で置換した配合 (WET2-4, DRY2-4), 8%で置換した配合 (WET2-8, DRY2-8), BASE3 (W/C41%) に対してセメントの質量割合 4%で置換した配合 (WET3-4, DRY3-4), 8%で置換した配合 (WET3-8, DRY3-8) の 15 種類の配合に対して以下の各種性能を確認した。セメント置換した配合は、置換率が

大きいほど W/C は大きくなる。試験で使用したコンクリートの配合を表-8 に示す。

表-8 実験に用いたコンクリートの配合

記号	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	SC	S	G	AD
BASE1	50	48.4	4.5	177	354	—	846	937	3.54
WET1-4	52	48.4	4.5	177	340	14	846	937	3.54
DRY1-4	52	48.4	4.5	177	340	14	846	937	3.54
WET1-8	54	48.4	4.5	177	326	28	846	937	3.54
DRY1-8	54	48.4	4.5	177	326	28	846	937	3.54
BASE2	66	55.2	4.5	183	277	—	990	838	2.77
WET2-4	69	55.2	4.5	183	266	11	990	838	2.77
DRY2-4	69	55.2	4.5	183	266	11	990	838	2.77
WET2-8	72	55.2	4.5	183	255	22	990	838	2.77
DRY2-8	72	55.2	4.5	183	255	22	990	838	2.77
BASE3	41	45.7	4.5	189	461	—	744	918	4.61
WET3-4	43	45.7	4.5	189	443	18	744	918	4.61
DRY3-4	43	45.7	4.5	189	443	18	744	918	4.61
WET3-8	45	45.7	4.5	189	424	37	744	918	4.61
DRY3-8	45	45.7	4.5	189	424	37	744	918	4.61

### (1) 圧縮強度試験

セメント置換したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-7 に示す。SC-WET を使用した場合、W/C66%の 8% 置換 (WET2-8) のみ BASE2 の強度を下回ったが、それ以外は BASE2 配合の強度を超えた。一方、SC-DRY を使用した場合は、W/C66%では、いずれの置換においても BASE2 配合の強度を下回り、W/C50%, 41%では BASE2 配合の強度を超えた。水セメント比が小さな場合、すなわち、単位セメント量が多い場合には、碎石粉のセメント置換ができる可能性が確認できた。

### (2) スランブ性状

碎石粉をセメント置換したコンクリートの試験結果を表-9 に、性状 (写真) を図-8 に示す。水セメント比との関係では、W/C50% (BASE1) は碎石粉を混入したことによる影響はほとんど表れなかった。しかし、W/C66% (BASE2), W/C41% (BASE3) ではスランブは低下し、混入割合が大きくなるとスランブはさらに小さくなった。また、碎石粉種類による違いは表れなかった。

### (3) 加圧ブリーディング性能

碎石粉をセメント置換したコンクリートの加圧ブリーディング試験結果を図-9~図-11 に示す。

W/C66%のコンクリート (BASE2 シリーズ) では、セメント置換したコンクリートは、加圧して 60 秒後からの脱水量が BASE2 を若干上回った。W/C50%では BASE1

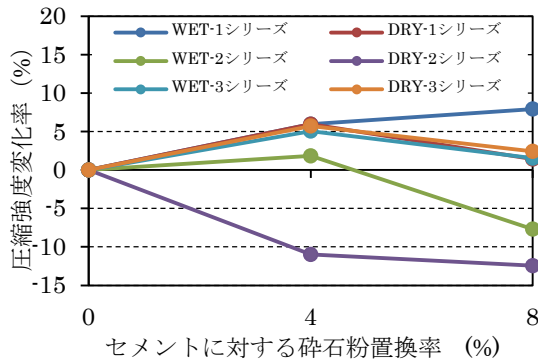


図-7 セメント置換率と圧縮強度増加比

表-9 セメント置換したコンクリートの試験結果

記号	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	混和剤 添加率(%)
BASE1	50	16.0	4.9	1.0
WET1-4	52	16.5	4.6	1.0
DRY1-4	52	17.0	5.0	1.0
WET1-8	54	15.5	4.0	1.0
DRY1-8	54	16.0	4.2	1.0
BASE2	66	20.0	4.5	1.0
WET2-4	69	16.5	4.7	1.0
DRY2-4	69	19.0	3.9	1.0
WET2-8	72	15.5	3.8	1.0
DRY2-8	72	17.5	3.8	1.0
BASE3	41	19.0	5.4	1.0
WET3-4	43	17.0	4.9	1.0
DRY3-4	43	15.5	4.7	1.0
WET3-8	45	16.0	4.5	1.0
DRY3-8	45	14.0	4.4	1.0

と同等の性能となり、W/C41% (BASE3 シリーズ) では DRY3 は BASE3 と同等、SC-WET では加圧直後から脱水量が BASE3 を上回る結果となった。

#### (4) 乾燥収縮量

砕石粉をセメント置換したコンクリートの乾燥収縮量の結果を図-12 に示す。

材齢 56 日までの結果であるが、砕石粉を添加したコンクリートは無添加のコンクリートよりも長さ変化率が少ない結果となった。砕石粉種類では、SC-DRY に比べ SC-WET は若干であるが収縮量が小さい傾向であった。

#### 4. 砕石粉添加量と強度の関係

3.3 の細骨材置換試験では、SC-DRY を使用した場合、置換率が増加するに従って BASE1 配合に対する強度増加率が以下の式(2)で表されるように線形で増加した。(図-13 参照) x は細骨材置換率、y は圧縮強度変化率である。

$$y=7.971x-8.454 \quad (2)$$

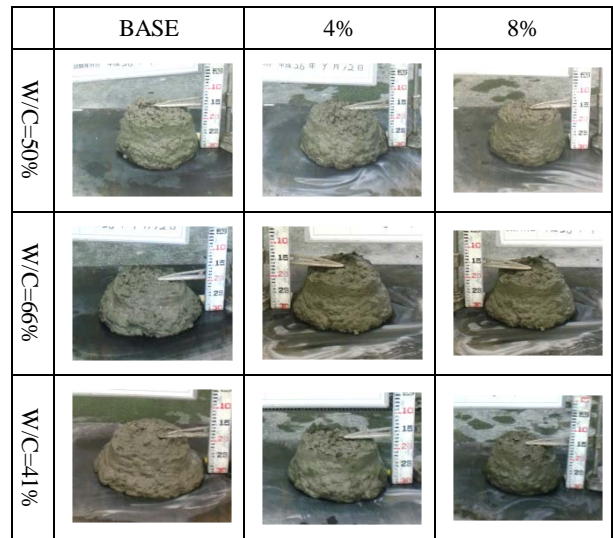


図-8 セメント置換率とスランブ性状

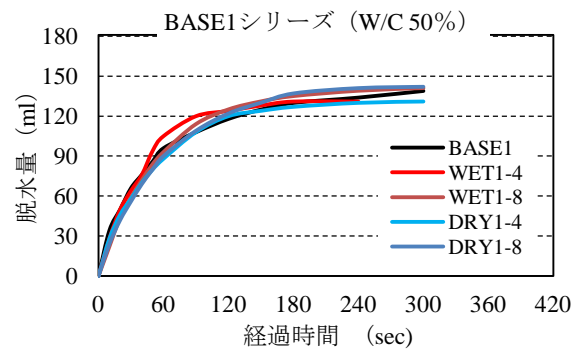


図-9 加圧ブリーディング試験結果 (W/C50%)

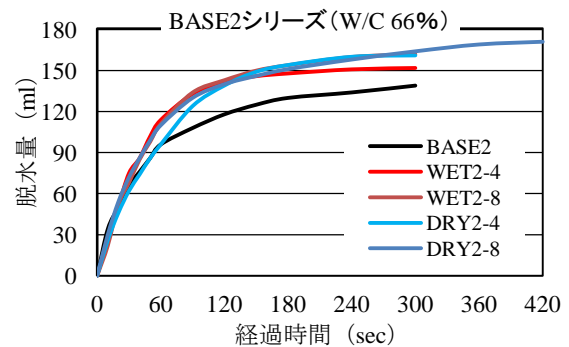


図-10 加圧ブリーディング試験結果 (W/C66%)

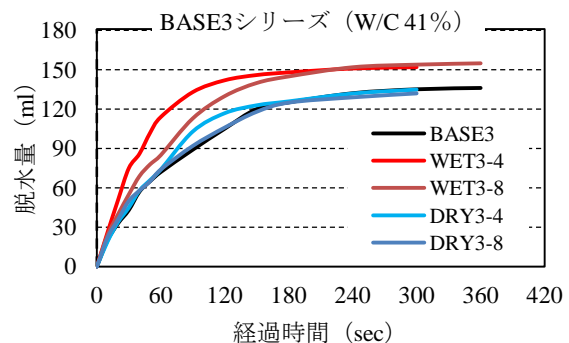


図-11 加圧ブリーディング試験結果 (W/C41%)



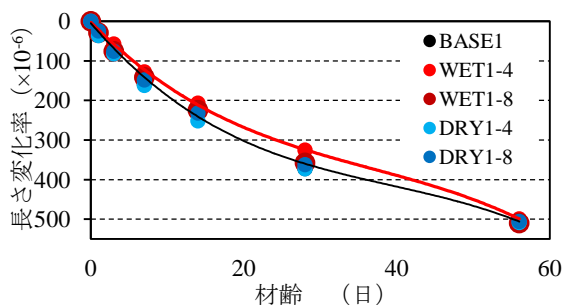


図-12 セメント置換率と長さ変化率

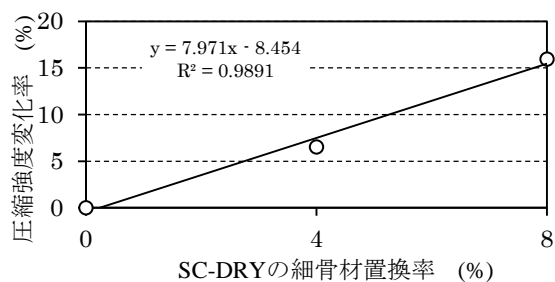


図-13 SC-DRYの細骨材置換率と圧縮強度変化率

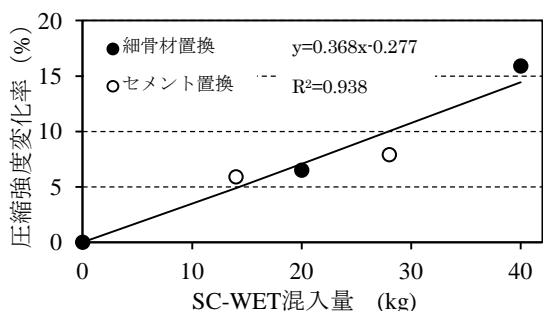


図-14 SC-WET 混入量と圧縮強度変化率の関係

一方、3.4のSC-WETをセメント置換したデータの中で、BASE1配合でSC-WETを4%細骨材置換した場合も含めて、砕石粉混入量と圧縮強度変化率（圧縮強度／BASE配合コンクリート強度）の関係に着目した（図-14参照）。xはSC-WET混入量、yは圧縮強度変化率である。この図から、SC-WETを混入した場合の圧縮強度変化率は、以下の式(3)で表される。

$$y=0.368x-0.277 \quad (3)$$

## 5. まとめ

コンクリートに砕石粉を添加する方法として、細骨材に置き換える方法、セメントに置き換える方法について実験を行い、以下の結果が得られた。

- (1) SC-WETとSC-DRYのいずれもコンクリートに適量添加すると圧縮強度は増大する。添加量は細骨材置換、セメント置換ともに4%が最適で、この場合SC-WETを添加したコンクリートの方が、強度増加率が大きかった。
- (2) 水セメント比が大きくなると圧縮強度が低下する場合も確認されたことから、強度増加にはある程度の

単位セメント量が必要であると考えられる。このことは砕石粉微粒分が加わることが、セメント粒子の分散と水和反応の促進に寄与するという微粉末効果の説明に一致する。

- (3) 水セメント比が大きいコンクリートにおいて細骨材の4%を砕石粉に置換すると流動性が高くなり、スランプロスは低減する。逆に、水セメント比が小さいコンクリートでは8%添加すると粘性を増し、練り上がりスランブは小さくなる。
- (4) 加圧ブリーディング試験では、砕石粉の細骨材置換で脱水量が減少したが、セメント置換ではほとんど変化はなかった。
- (5) 砕石粉をコンクリートに添加すると、乾燥収縮量は小さくなった。細骨材置換、セメント置換のどちらにおいても乾燥収縮量の低減に効果があり、最適な添加率は4%であった。

微細な砕石粉の充填効果によりコンクリートが密実化されたことで圧縮強度は増加、乾燥収縮量は減少した。この事から耐凍害性や中性化に対する効果も期待できる。今回の実験で得られた結果から、乾式と同様に湿式砕石粉も、加熱・乾燥・再微粉化により十分に使用可能であり、コンクリートの性能が向上すると言える。

謝辞：本実験の実施にあたり、(株)トクヤマ、セメント開発グループの加藤弘義氏から多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤道生, 佐伯竜彦, 井下一郎: 湿式にて捕集した砕石スラッジの混和材としての特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 2) 藤本郷史, 橋本勝由, 賀谷隆人, 大久保孝昭: 乾式砕砂における細粒・微粒分の粒度分布がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 3) 大橋正治, 田村博, 谷川恭雄: コンクリート用混和材としての砕石粉の有効利用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.532, 7-11, 2000.6
- 4) 山崎寛司: 鉱物質微粉末がコンクリートのワーカビリティおよび強度におよぼす効果に関する基礎研究, 土木学会コンクリートライブラリー, No.8, 1963.7
- 5) 日本建築学会: コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 付2.フレッシュコンクリートの圧送性評価試験方法
- 6) 土木学会: コンクリートライブラリー135, コンクリートのポンプ施工指針, 2012, 11.加圧ブリーディング試験