論文　製造プロセスの物質収支を考慮した調製乾式砕砂における微粒・細粒分がコンクリートの諸物性に与える影響

橋本 勝由[*1]・藤本 郷史[*2]・賀谷 隆人[*3]・長原 雄一[*4]

要旨：乾式砕砂について，微粒・細粒分の粒度分布と含有量がコンクリートの諸物性に及ぼす影響を検討した。ただし，微粒・細粒分の調整にあたっては乾式砕砂製造プロセスのマテリアルバランスを考慮した。砂岩，花崗岩，石灰石の3岩種18水準について150μm粒度分布を人工的に調製した砕砂を作製し，コンクリート試験体を作製した。所要のスランプを得るための単位水量について検討し，微粒分量，平均粒子径の両方の影響を受けることを実験的に示した。また，これら2因子の複合指標を提案し，流動性への影響に関して境界値の存在を示唆した。粒度分布を調製した場合，砕砂の微粒・細粒分の乾燥収縮への影響は小さいことを実験的に示した。

キーワード：砕砂，製造プロセス，砕石粉，分級，粒度分布

1. はじめに

環境保全・資源の枯渇等の問題により，コンクリート用細骨材は海砂・川砂の代替品として，砕砂が用いられる傾向にある。特に西日本では以前より細骨材の枯渇が深刻であり，海砂の採取禁止や中国砂の禁輸措置にともなって，砕砂，石灰砕砂，あるいは加工砂（風化花崗岩砕砂）への移行が進んでいる。この砕砂の製造方式には，大別して乾式・湿式の2種類があるが，近年では生産効率，廃棄物処理の容易さの観点から，乾式が採用される傾向にある[1)]。

乾式砕砂製造時には副産物として砕石粉が発生する。この排出量は計1200万トン[2)]と推計され，量に見合う用途が確立されていないため大きな課題となっている。この課題を解決する方策として，砕石粉をコンクリート用混和材として混入し，有効活用しようとする研究が数多く行われてきた。例えば，山崎ら[3)]，品質基準の策定[4)]，高流動コンクリートの分離抵抗性の向上，大量混入などである。また，2009年にはJIS A 5005(コンクリート用砕石及び砕砂)が改正され，微粒分量の規格値が緩和されるなど，標準規格においても対応する動きがある。しかし，現状では砕石粉を混和材として採用する事例は非常に少ない。これは，砕石粉が一般的に表面形状が角ばっているため，同一スランプを得るための単位水量を増加させ，結果として硬化コンクリートに優位な特性をもたらさないと認識されているからであろう。

以上のように，既往の研究を概観すると，砕石粉を混和材として単純混入する手法では砕石粉の大幅な排出抑制は難しい。著者らは，砕砂の製造プロセス，砕石粉の分級・回収プロセスを改良する立場から，砕石粉の排出抑制に取り組んできた。既報[5)]では，細粒分(150μm以下粒子）や微粒分(75μm以下)の粒度分布を制御することにより，フレッシュ性状の改善に可能性があること，平均粒子径が微粒分の粒度分布の評価指標として有効であることを示した。しかしながら，砂岩砕砂に限定した結果であったために，その適用範囲は未検討であった。また，微粒分の粒度分布のみを因子とした試験であり，実際の製造プロセスにおけるマテリアルバランス（発生する砕石粉における粒度ごとの重量比率）を考慮していなかった。また，微粒分の混入量が増加すると乾燥収縮に悪影響がある[1)]との報告も散見されるが，いずれの報告においても，微粒・細粒分の粒度分布を調整せずに用いているために，粒度分布の影響は明らかでない。

以上の背景を踏まえ，本報では，乾式砕砂製造における分級プロセスの改良を念頭に，砕砂の粒度分布がコンクリートの各種物性に与える影響を実験的に検討することを目的とした。具体的には，砂岩，花崗岩，石灰石を3骨材種の砕砂を人工的に調製し，フレッシュ性状，圧縮強度および乾燥収縮への影響を検討した。

2. 用語の定義

本報では，以下のように用語を定義した。”微粒分”は，JIS A 5005(2009)を参考に75μm以下の粒子と定義した。”細粒分”は，プロセスの分級性能を参考に150μm－75μm粒子と定義した。”砕石粉”は，エア分級プロセスを通じて製造プロセス外へ排出される粉と定義し，JIS TR A 0015への準拠を基準としないものとした。

*1 コトブキ技研工業（株）　開発部開発１課　(正会員)
*2 広島大学　大学院工学研究科　助教　博士(工学)　(正会員)
*3 コトブキ技研工業（株）　常務取締役　技術・開発担当　博士(工学)　(正会員)
*4 コトブキ技研工業（株）　開発部　次長（非会員）

3. 実験の概要

3.1 実験計画の考え方

現状の一般的な乾式砕砂プロセスの乾式分級機では150μm 前後で分級して砕石粉とすることが多い。本報は砕砂製造のうち，分級プロセスの改良を念頭に置いている。そこで，破砕生成物は一定であると仮定して 150μm 以上の粒度範囲間の重量比率（粒度分布の形）は，水準間で同一とした。その上で，150μm 以下の範囲で粒度分布のピークが異なる細粒を人工的に調整して基準となる砕砂に添加し，分級プロセスの改良を模擬することとした。ただし，分級プロセスの生産効率上，砕石粉のうち分級した全量を砕砂とすることが望ましい。そこで砕石粉の粒度分布をもとに砕砂 B～E における微粒・細粒分(150μm 以下）の含有率を定めた。

3.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/m³, 比表面積 3370cm²/g)，粗骨材は広島産砕石（粒形判定実積率 61.9%，表乾密度 2.70g/cm³,吸水率 0.00%）を用いた。細骨材は砂岩（粒形判定実積率 55.9%，表乾密度 2.63g/cm³,吸水率 0.67%)，花崗岩（粒形判定実積率 56.3%，表乾密度 2.60g/cm³,吸水率 0.43%)，石灰石（粒形判定実積率 59.2%，表乾密度 2.69g/cm³,吸水率 0.19%）の 3 種類を用いた。また，混和剤は中国地方の砕砂コンクリートの調合実績を考慮して高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を用いた。

3.3 因子と水準

表－1 に実験の因子と水準を示す。微粒・細粒分の粒度分布，骨材種別の 2 つを因子として試験を行った。水準ごとに 150μm 以下の粒度範囲で異なる分布を持つ 6 水準とした。砂岩 C を基準として，予め試し練りを行って粒度分布を決定した。水準 B～E は想定した乾式砕砂製造プロセスのマテリアルバランスと同一になるよう，粒度分布を水準ごとに調製した。水準 F は，150μm 以下の含有率が C と同一になるよう調製した。図－1 に本報で想定した乾式砕砂製造プロセスの概念図を示す。

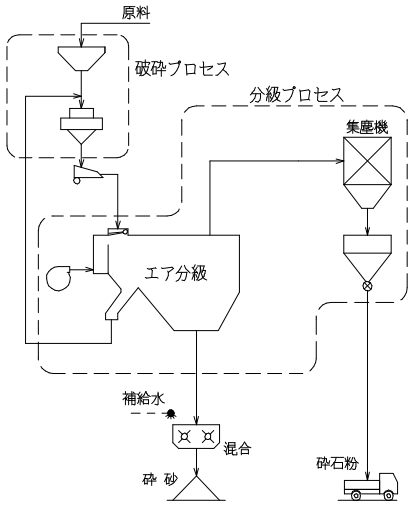
3.4 細骨材の粒度分布調製方法

図－2，4，6 に各水準の砕砂粒度分布を，図-3，5，7 に各水準の微粒・細粒分の含有率を示す。砕砂の調製は，以下の手順で行った。手順 2)に示す分級方式は，実際の乾式砕砂製造プロセスでは処理能力の観点から採用できない。本報では同様の性能をもつ分級技術が開発できたと仮定して試験を行った。

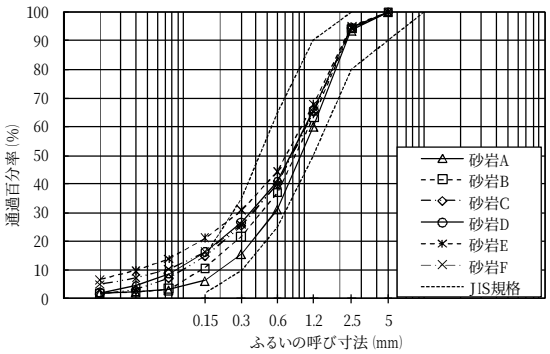
1) 乾式砕砂製造プロセスで砕砂を製造した。
2) 手順 1)で得た砕石粉を 75μm 以上は機械式のふるい分け，75μm 以下は気流分級方式（機械内部のロータにより強制的に気流を起こし遠心力で分離）によって分級した。以上の工程により，基準の砕石粉に対して，75μm 以下，40μm 以下，20μm 以下で分布形状の異なる微粒・細粒分を調製した。
3) 乾式砕砂製造プロセスのマテリアルバランスに合致するよう調製した砕石粉を基準砕砂に混入した。

表－1 実験の因子と水準

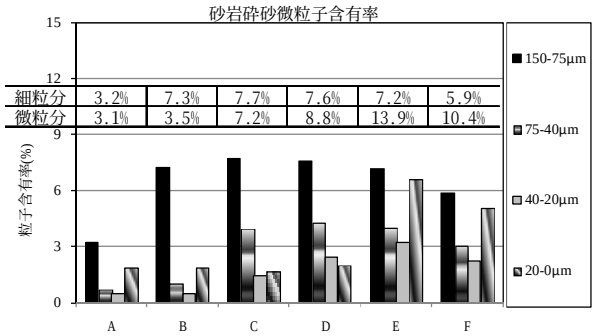
因子	水準※( )内は添加する微粒・細粒分の粒度ピーク
微粒・細粒分の粒度分布 （但し，B～E は 150μm 以上も想定プロセスのマテリアルバランスから算定して調製）	A（基準砕砂，添加なし） B（+75μm,） C（+40μm） D（+20μm） E（砕石粉と同一の粒度分布） F（砕石粉と同一の粒度分布。ただし C と同じ含有率）



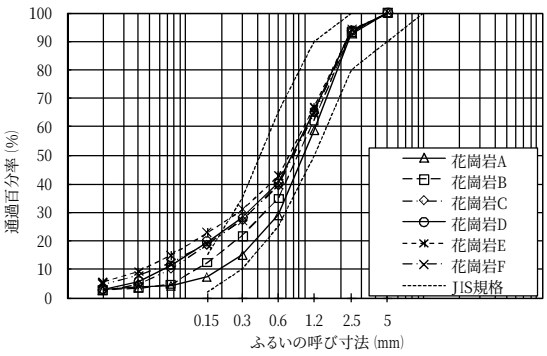
図－1 本報で想定する乾式砕砂製造プロセス



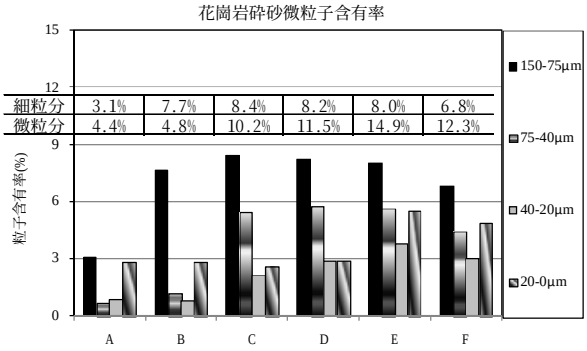
図－2 砂岩砕砂の粒度分布



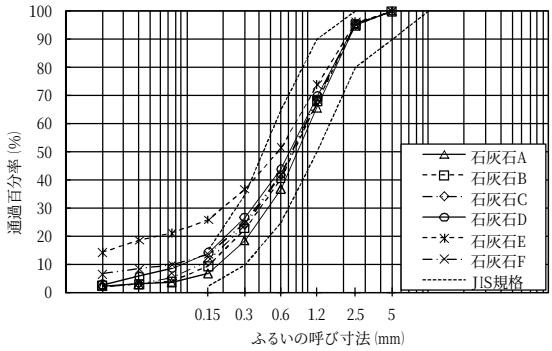
図－3 砂岩砕砂の微粒・細粒分の粒度分布



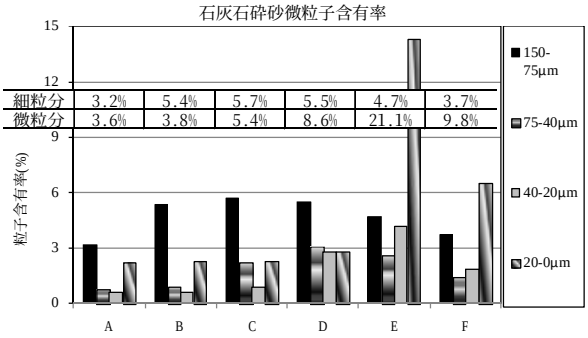
図－4　花崗岩砕砂の粒度分布



図－5　花崗岩砕砂の微粒・細粒分の粒度分布



図－6　石灰石砕砂の粒度分布



図－7　石灰石砕砂の微粒・細粒分の粒度分布

3.5 コンクリートの調合

表－2 にコンクリートの計画調合表を示す。全ての調合で同一の水セメント比（W/C=50%），単位水量（W=175kg/m³）とし，温度 20℃，湿度 60%の室内で練り混ぜた。予め，砂岩Cを基準に選定して試し練りを行い，目標スランプ 18cm，フロー比 F/S=1.6，空気量 4.5%となるように細骨材率，高性能 AE 減水剤添加率，AE 助剤添加率を定めた。砕砂コンクリートでは粘性上昇が問題となることから，文献 1)を参考に F/S=1.6 とした。他の骨材種別については水準 C を砂岩と同一の細骨材率(48.4%)とした。骨材種が同一の他の水準については，日本建築学会 調合設計指針[6]を参考に基準調合に対して，粗粒率+0.01 に対して粗骨材かさ容積を-0.01 として算定した。高性能 AE 減水剤の添加率は，スランプが基準調合と同一になるように定めた。この方法は以下のように解釈できる。本試験では，150μm 以上の粒子について骨材種別ごとに粒形は同一であり粒度分布のみが異なる。150μm 以上の粒子の“ふるい”ごとの重量分率(粒度分布の形）も同一であるが，150μm 以下の粒子の含有量が異なるため，砕砂の粗粒率が異なることになる。そこで，指針[6]による仮定（粒度分布の形状によらず粗粒率のみの影響を受ける）が成立するものとして粗骨材かさ容積の補正を行い，150μm 以上粒子の粒度によるスランプへの影響はないものと仮定した。

JIS A5005(2009)では微粒分量の表示が規定されたが，これは微粒分量がフレッシュ性状へも影響することを考慮したものであろう。本試験では，150μm 以下微粒・細粒分の粒度分布を調製しているので，微粒分（75μm 以下）の量は水準間で異なる。また，微粒分の粒度分布も異なる。本実験の調合は，このような微粒分の含有量と粒度分布の両方の影響のみを抽出し，砕砂製造プロセスの制約の範囲で検討しようとするものと言える。

フレッシュ性状への影響は，高性能 AE 減水剤の添加率を調整せずスランプを観察する手法が一般的と思われるが、このような手法の場合，単位水量が過大となるなど実情を反映しないものとなりがちである。また，微粒分の増加による粘性の増加を過小に見積もる可能性もある。そこで本報では，高性能 AE 減水剤の添加率を調整して評価することとした。スランプは 18±2.0cm を目標とし，空気量は 4.5±1.5%の範囲に収まるよう AE 助剤を調整した。測定項目は，フレッシュ性状についてスランプ，スランプフロー，空気量とし，硬化コンクリートについては，圧縮強度，静弾性係数，長さ変化率とした。

4. 評価の指標

4.1 平均粒子径と微粒分量の相互作用の考慮

既報では微粒・細粒分のスランプへの影響について，平均粒子径[7]（式 1）による評価が有効である可能性を示した。すなわち，細かい粒子ほど所要スランプを得るための単位水量を増加させる。一方，JIS A5005(2009)に微粒分量が規定されたことに代表されるように，微粒子の量も指標として重要である。既報[8,9,10]によると微粒

表－2　計画調合表とフレッシュコンクリート試験結果

調合計画											試験結果	
		水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	単位量（kg/m^3）						スランプ (cm)	空気量 (%)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤 AD	AE 助剤 AE		
砂岩砕砂	A	50	51.4	0.525	175	350	901	877	2.31	0.07	19.5	4.5
	B		49.6	0.545			870	910	1.75	0.07	17.0	3.4
	C		48.4	0.558			849	932	1.75	0.42	19.0	3.5
	D		48.0	0.563			841	940	2.03	1.23	17.5	4.5
	E		46.6	0.577			817	964	3.85	0.88	20.0	3.7
	F		48.3	0.560			846	935	2.65	1.05	20.5	5.1
花崗岩砕砂	A	50	52.2	0.518	175	350	911	865	2.80	0.81	19.5	4.9
	B		50.2	0.539			877	900	2.80	0.91	18.5	4.7
	C		48.4	0.558			846	932	3.12	1.68	20.5	3.5
	D		48.0	0.563			838	940	3.68	1.75	19.5	4.4
	E		46.8	0.576			817	962	4.73	2.63	20.0	4.9
	F		48.3	0.559			843	934	3.85	1.93	17.5	4.3
石灰石砕砂	A	50	50.1	0.540	175	350	894	902	0.88	0.18	19.5	4.4
	B		48.9	0.553			873	924	1.05	0.35	20.5	4.0
	C		48.4	0.558			865	932	0.77	0.53	20.0	4.5
	D		47.5	0.567			849	947	0.74	0.53	17.5	3.3
	E		48.1	0.561			793	1004	1.54	12.95	18.0	4.6
	F		44.4	0.601			860	937	1.02	0.63	19.5	4.4

分量は粘性と降伏値の増加をもたらし，結果として同一スランプを得るための単位水量を増加させる。すなわち，粒子径の大きさと量は逆の効果をもつ。そこで，本報では簡易的な試みとして，粒度範囲ごとに重量分率の逆数で重み付けした指標（式 2）について各種物性との相関を検討した。なお，本実験では乾式ふるいを用いて粒度分布を調整したため，以降に記す微粒分量には砂粒子に付着する分が含まれていない。別途行った実験によると砂岩に付着した微粒子は 0.4%程度であったので付記する。

$$\text{平均粒子径}\quad \bar{z} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} z \cdot q(z)\mathrm{d}z \qquad (1)$$

$$\text{weighted 平均粒子径}\ \bar{z}' = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{z}{q'(z)}\mathrm{d}z \qquad (2)$$

ただし，3.3 手順 2)に示す各粒度範囲の中央値を粒子径 z (μm)，$q(z)$,$q'(z)$: 粒子径 z の粒子が z_{min}＝0μm から z_{max}＝150μm の粒度範囲に占める細粒分に対する重量分率(%)と細骨材全体に対する重量分率(%)

4.2 フレッシュ性状の評価の方法

各水準間で比較するとスランプ値・空気量にはある程度の差があり，これらの解釈が必要となる。本報ではコンクリートの流動性への影響をより適切に評価することを念頭に，以下の知見を参考に所要のスランプを得るための単位水量に換算して簡易的に比較を行った。

1）経験的に，空気量 1%の増加は単位水量 3%に相当 [6,11)]

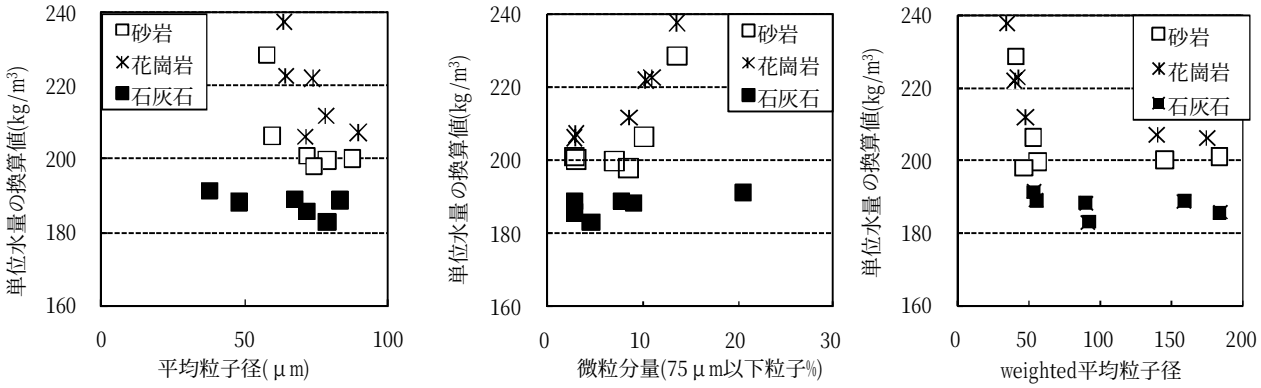
2）高性能 AE 減水剤のカタログに記載された減水率を用いて添加率から単位水量を換算

5.実験の結果と考察

5.1 フレッシュ性状への影響

図－8 に各骨材種における砕砂の粒度分布の指標と単位水量（換算値）の関係を示す。石灰石は微粒子が多い傾向にあるが，どの水準でもほぼ同じ所要単位水量と算定された。砂岩や花崗岩砕砂では，150μm 以下粒子含有率の同じ水準 C と F を比べると粒子の小さい水準 F の方が高性能 AE 減水剤の添加率（表－2）が高くなった。

図－8 上，中ではそれぞれ微粒分量や平均粒子径の影響を検討した。微粒分は増加するほど，粒子径は小さくなるほど所要単位水量は増える傾向にあるが，明らかな相関は観察されなかった。そこで図－8 下では，weighted 平均粒子径の指標を試行し，粒子径と微粒分量の複合的な効果がもたらす単位水量への影響を検討した。指標値が同じ値(=50 程度）で屈曲点が観察された。これは，例えば，50μm の粒子なら 1%以上混入すると著しい単位水量の増加に繋がる，といった意味である。山口ら [12)]はモルタルフロー試験をもとに流動性に関わる砂と微粒子の境界値として 90μm という値を提案しているが，本結



図－8　微粒・細粒分の指標と単位水量換算値の関係

果は，微粒・細粒分の粒度分布と含有率の複合作用として同じような境界値があることを示唆している。

本報では単位水量，水セメント比を一定としたので，コンクリートに占める粉体量のうちセメント量が一定である。仮にセメント量が変化した場合，150μm 以下粒子の分布が一定であってもコンクリート全体における粉体の分布が変わることになる。したがって，本報の結果を単位セメント量の異なるコンクリートへ適用する場合には，別途検討が必要となる。なお，単位水量と水セメント比は，中国地方における調合実績をもとに決定した。

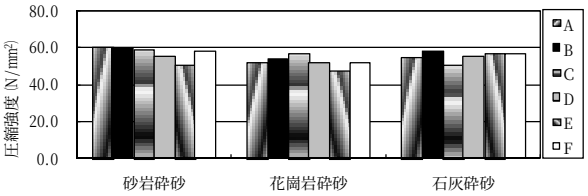
5.2 力学的特性への影響

図－9，10 に各水準と圧縮強度，静弾性係数（28 日）の結果を示す。圧縮強度には差異が見受けられるが，水準間で明確な傾向は見受けられなった。今後さらなる検討を行う予定である。また，静弾性係数は各種骨材，各水準とも目立った傾向は見られなかった。以上の結果から微粒・細粒分の混入が力学的特性に与える影響は小さいといえる。

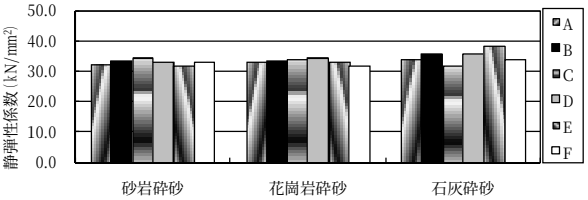
5.3 長さ変化率への影響

図－11～13 に各骨材種の硬化コンクリートの長さ変化率試験結果を示す。砂岩砕砂，花崗岩砕砂は 20μm 以下粒子の含有率が多い水準 E，F に変化率が僅かながら大きくなる傾向が見られた。石灰石砕砂はどの水準においても明らかな相違は見られなかった。

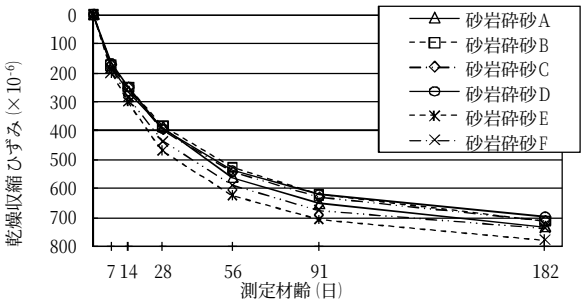
図－14 に weighted 平均粒子径と長さ変化率の関係を示す。単位水量(図－8)と同じように指標値 50μm 付近で，微かに屈曲するようにも見えるが，傾向は明瞭でない。微粒分量や平均粒子径についても同様であった。本実験は，微粒分量の観点からいうと，生産上の下限値（水準 A: 2.8%前後），JIS のほぼ上限値（水準 C）の微粒分や JIS を超過する微粒分(水準 F など)を網羅している。しかしながら，ほぼ JIS の範囲に収まっている水準 A～D までに限ると，長さ変化率の水準間の差は非常に小さい。例えば，砂岩砕砂では 33μm，花崗岩砕砂では 17μm しか差がなかった。試験精度を考えると水準間に差がないとみなしてよい。砕石粉のコンクリートへの混入は乾



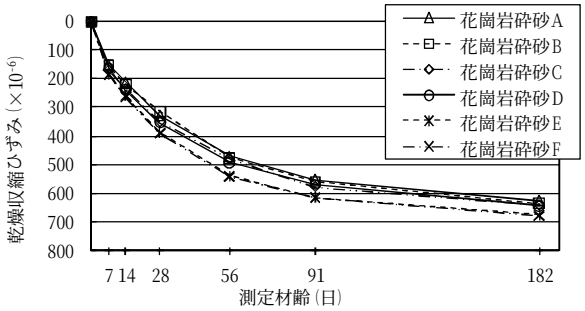
図－9　各骨材種の圧縮強度試験結果



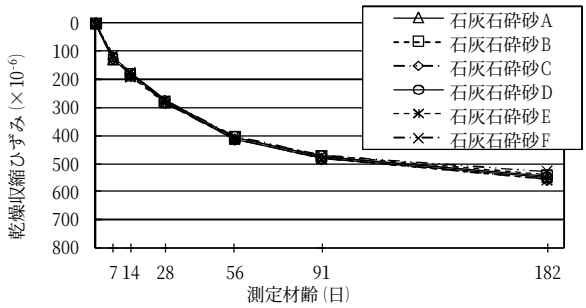
図－10　各骨材種の静弾性係数試験結果



図－11　砂岩砕砂コンクリートの長さ変化率

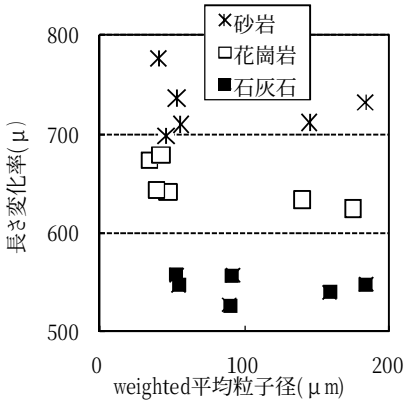


図－12　花崗岩砕砂コンクリートの長さ変化率



図－13　石灰石砕砂コンクリートの長さ変化率

燥収縮の増大を招くとの指摘があるが，本報のように分級・調整の後に混入し(水準 B,C,D)，砕砂一体として調製した場合，乾燥収縮の大きな増大は無いと推察される。以上の結果は，乾式砕砂製造プロセスにおいて分級プロセス（図－1 参照）の改良によって，砕砂の品質向上の可能性があることを示唆する。



図－14　微粒・細粒分の評価指標と長さ変化率の関係

6. 本報のまとめ

本研究は，乾式砕砂の製造プロセス，具体的には砕石粉の分級・回収プロセスを改良する立場から，砕石粉の排出抑制を図ることを最終目標としていた。本報は，以下のようにまとめられる。

1) 150μm 以下粒度分布のみ異なる砕砂を人工的に制御・調製した。調製にあたっては，砕砂製造プロセスのマテリアルバランスを考慮した。この砕砂を用いたコンクリートの各種物性を観察した。
2) 所要のスランプを得るための単位水量の換算値について検討し，微粒分量，平均粒子径の両方の影響を受けることを実験的に示した。この二つの因子を複合的に評価する指標として「逆重み付け平均粒子径」を試行した。その結果，流動性への影響に関して境界値が存在することが示唆された。
3) コンクリートの乾燥収縮に対する微粒・細粒分の粒度分布と含有量の影響を実験的に検討した。その結果，150μm 以下の粒度分布のピークが 40μm 以上にある場合には，収縮への影響が極めて小さいことを示した。

謝辞

本研究は，平成 21 年度　ひろしま産業創生補助金（産業廃棄物抑制・リサイクル枠）研究開発テーマ名「粒形改善砕砂生産時に副産される微石粉のコンクリートへの有効利用の研究開発および実用化」（申請代表者：賀谷隆人，コトブキ技研工業株式会社常務取締役 開発担当）の一部を用いて行われた。関係各位に謝意を表す。

参考文献

1) 真野孝次，辻幸和，友澤史紀，深松孝：砕石粉を使用した砕石・砕砂コンクリートの性状，コンクリート工学, Vol.46, No.11, pp.18-24, 2008.11
2) 友澤史紀，辻幸和，山本和成：「JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）の改正について，コンクリート工学, Vol.47, No.3, pp.3-9, 2009.3
3) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリチーおよび強度におよぼす効果に関する基礎的研究，コンクリートライブラリ 8,（社）土木学会, 1963.7
4) 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
5) 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，日本コンクリート工学協会年次論文集, Vol.32, No.1, pp.95-100, 2010.07
6) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 1999
7) 粉体工学会 編：粒子計測技術，日刊工業新聞社, pp.15, 1994.11
8) Tangsathitkulchai C, Austin LG. Rheology of concentrated slurries of particles of natural size distribution produced by grinding, Powder Technology , pp.293-299, Vol.56, No.4, 1988
9) 谷川恭雄，森博嗣，筒井一仁，福島札規，黒川善幸. 1336 粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートのレオロジー解析 ：その 2 スランプ試験のシミュレーション，学術講演梗概集, pp.671-672, Vol.A-1, 1986
10) 小村理恵，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸: フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究，日本建築学会構造系論文集, pp.1-10, Vol.462, 1994
11) 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点 06, pp.50-55, 2006
12) 山口昇三,枝松良展，岡村甫:モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.16, pp83-88, 1994