

論文 乾式砕砂製造プロセスにおける複数回の破碎が骨材とコンクリートの各種物性へ与える影響

藤本 郷史^{*1}・橋本 勝由^{*2}・賀谷 隆人^{*3}・長原雄一^{*4}

要旨： 砕砂の製造では、粒形の改善を目的として破碎機への複数回の投入(複数回破碎)がおこなわれることがある。この複数回破碎を対象として骨材やコンクリートの各種物性への影響を抽出することを目的とした。砂岩、花崗岩、石灰石の3種類の岩石種10水準を対象に、破碎回数のみが異なり粒度分布が同一な細骨材を人工的に調整し、コンクリート試験体を作製した。複数回破碎によって粒形が向上しない場合でも、品質向上に寄与する場合があることを示した。また、複数回の破碎に伴う粒形の違いは、骨材種・粒度分布・調合など他の因子が同じ場合、乾燥収縮に対して無視できるほど小さな影響しか与えないことを示した。

キーワード： 砕砂、製造プロセス、破碎、粒形、乾燥収縮

1. はじめに

良質なコンクリート用骨材の供給は逼迫する状況にあり、碎石、砕砂への移行が進むとの見解が多い。特に西日本では従前より細骨材の枯渇が深刻であり、海砂の採取規制の強化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。砕砂の製造方式には、大別して乾式と湿式の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⁾。

乾式砕砂の製造では、1)副産物として碎石粉が発生する点、2)粒形が陸砂・海砂などに比べて悪い点、が特に留意すべき点として挙げられる。破碎によって製造する以上、川砂などと比べて凹凸の多い形状であるのは避けられないが、この欠点を補う資源保護(川砂・海砂の採取抑制)や品質の安定性などの効果を総合的に勘案すれば、砕砂にも利点がある。したがって、これらの利点を最大限に発揮できるように、砕砂の品質向上を目指すことが肝要である。このような観点から、著者らは乾式砕砂製造プロセスの技術開発を行っている^{2,3)}。

さて、砕砂の製造では、粒形改善のために、同一破碎機を2回通すことによる「複数回破碎」が用いられることがある。この手法は、破碎機の種別を問わずに試みることでできるものであり、碎石工場の立場からは極めて少ない設備投資で採用できるという利点がある。一方で、この方法を採用したとしても、碎石粉の発生量を増大させるだけでなく、粒形がほとんど改善されないこともある。したがって、骨材種別によって異なる特性を把握することが重要である。

近年、2009年にはJIS A 5005(コンクリート用碎石及び砕砂)が改正され、微粒分量の規格値が緩和されるなど、碎石粉問題に対処する機運が高まっているが、碎石粉を混和材として採用する事例は非常に少ない現状にある。1200万トンにおよぶ⁴⁾碎石粉発生量の抑制は依然として砕砂製造プロセスの設計において重要な課題である。したがって、碎石粉の発生量とのトレードオフを考慮した上で「複数回破碎」の採用が適切であるか骨材種ごとに把握することが重要であると考えられる。

また、骨材種を考慮する上では、地域ごとの特性を勘案しておく必要がある。例えば、著者らが所在している中国四国地方では、花崗岩砕砂が相当数の生コンクリート工場で採用されている。この岩種では、風化した成分が流動性の低下、乾燥収縮の増大、強度の低下など各種の悪影響を与えることが報告されている⁵⁾。このような悪影響の適切な除去も骨材製造プロセス開発の立場からは重要と考えている。

以上のような考えのもとに、本報では、破碎プロセスの適切な構成設計・設定手法を確立しようとする立場から、「複数回破碎」のコンクリートの各種物性への影響を実験的に検討した。具体的には、以下の2項目について検討することを目的とした。

- a) 複数回破碎による粒形改善効果とそのコンクリートの流動性、乾燥収縮への影響を骨材種ごとに実験的に検討する。
- b) 複数回破碎と細粒・微粒分の分級を併用したプロセスを想定し、その風化花崗岩砕砂などにおける粘土分の除去可能性を検討する。

*1 広島大学 大学院工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 コトブキ技研工業(株) 開発部 開発1課 (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)

2. 本報の想定する乾式碎砂製造プロセス

図-1 に本報で想定する乾式碎砂製造プロセスの模式図を示す。乾式碎砂の製造は大別すると破碎・選別・分級の3プロセスからなる。一般には、選別プロセスにおいて再破碎が必要と分別された粒子のみが再度破碎機を通過する運用がなされている。本報における「複数回破碎」とは、“図-1 の碎砂製造プロセスにて破碎生成物の再破碎の必要がある”とみなした場合にあたる。本報では、著者らが開発・保有する碎砂製造プロセス用のテスト機を用い、破碎生成物を再度投入することで「複数回破碎」を模擬することとした。

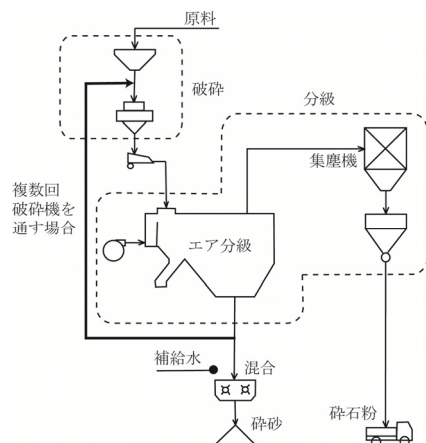


図-1 本報の想定する乾式碎砂製造プロセス模式図

3. 実験の概要

3.1 実験の目的、および因子と水準

本実験では、碎砂製造における破碎回数が、コンクリートの流動性・強度・静弾性係数・長さ変化率に与える影響を抽出することを目的とした。骨材種ごとに比較を行うために、各骨材種ごとに粒度分布を同一に調整した。なお、 $75\mu\text{m}$ 以下の微粒子についても粒度分布が同一となるように留意した。

表-1 に実験の因子と水準を示す。破碎回数を主たる因子として、砂岩、石灰石、花崗岩の3種類の骨材種について比較検討した。但し、細骨材の粒度分布は、破碎回数1回の砂岩について細骨材率と混和剤量を因子として試し練りを行って定めた。試し練りは、フレッシュ性状の目視観察に拠った。花崗岩と石灰石の粒度分布は、粗粒率が砂岩(基準)と同一となるように調整し、粒度分布は破碎機特性のままとして定めた。砂岩については、 $150\mu\text{m}$ 以下の微粒子の含有率が異なる3水準を設定した。これは、碎砂製造プロセスにおいて、分級性能(図-1 参照)の設計の影響を検討するためである。表-1 に示す微粒子細粒分の水準は、 $150\mu\text{m}$ 以下の範囲で粒度分布のピーク値の下限を示す。“基準”は微粒子細粒分を添加していない砂を示す。

表-1 実験の因子と水準

因子		水準
骨材種	骨材の岩種	砂岩, 花崗岩, 石灰石
	粒度分布 ^{※1}	基準, $75\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$
破碎機の通過回数		1回, 2回

※1: $150\mu\text{m}$ 以下の粒子について。砂岩のみ検討。

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 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3370\text{cm}^2/\text{g}$), 粗骨材は広島産砕石(実積率 61.9% , 表乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.00%), 練混ぜ水は上水道水を用いた。細骨材は乾式プロセスで製造された碎砂を用いた。碎砂の諸物性は後述する。中国地方の碎砂コンクリートの調査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 細骨材粒度分布の調製方法

碎砂の粒度調製は、以下の手順で行った。

- 1) 破碎処理を行い生成物を取り出した。ただし、破碎回数2回の細骨材については破碎機へ2度投入して破碎生成物とした。
- 2) 手順1)で得られた破碎生成物を分級プロセスで処理した。破碎回数2回の碎砂についてはさらにふるい分級によって粒度分布を調製した。
- 3) 破碎回数1回の場合に発生した $150\mu\text{m}$ 以下粒子を $75\mu\text{m}$ 以上は機械式のふるい分け, $75\mu\text{m}$ 以下は気流分級方式(機械内部のロータによって強制的に気流を起こし遠心分離)によって分級した。以上の工程により, $150\text{--}75\mu\text{m}$, $75\text{--}40\mu\text{m}$ の範囲にピークを持つ微粒・細粒粉を調製した。
- 4) 手順3)で調製した粉を手順2)で作製した碎砂に添加して調製した。ただし、微粒細粒分の添加率は、碎砂製造プロセスにおける材料バランスを参考に決定し、砂岩(水準 $75\mu\text{m}$)では細骨材の 9.54% , 砂岩(水準 $40\mu\text{m}$)では 15.14% , 花崗岩(水準 $75\mu\text{m}$)を 9.01% とした。その他の水準には添加しなかった。

3.4 実験結果：複数回破碎による碎砂の諸物性の変化

表-2～表-4 に複数回破碎に伴う碎砂の諸物性の変化を示す。いずれの骨材種においても密度の変化は小さく、いずれの骨材種においてもわずかな吸水率の低下が観察された。また、粒形判定実積率は、石灰石では $+1.8\%$ の向上が観察されたものの、砂岩、花崗岩では $+1.0\%$ 以下にとどまった。一般に、複数回破碎した場合には、原石の特性によってその度合いは異なるものの1回目の破碎による粒形の改善効果に比べて、2回目、3回目の方が粒形改善効果が小さい。本結果はこのような傾向に合

致するものと言える。

デジタルマイクロスコープ（倍率 50 倍）を用いて、調製した砕砂の 2.5mm-1.2mm の単一粒子を観察した結果を図-2～図-4 に示す。目視観察によっても、砂岩、花崗岩ではわずかな粒形の向上しか観察されなかった。一方、石灰石では角がとれたような傾向が観察された。これは実積率の変化量が他の骨材種より大きいことと整合している。以上のように、目視観察によっても上述の傾向が確認された。

既に述べたように、複数回破碎を行った場合には、砕石粉の発生量が増加する。そこで、実製造プロセスを用いて発生量の試算を行った。いずれの骨材種においても、2 回破碎による砕石粉の発生量は、一回目破碎への投入量を 100 として 4.5%程度の増加であった。ただし、本報では、コンクリートの物性を比較するために、一回目破碎後に砕砂の粒度調整を行ったので、留意が必要である。

表-2 砂岩砕砂(愛媛県産)

破碎機の通過回数	1 回	2 回	差分
表乾密度(g/cm ³)	2.63	2.63	0.0
絶乾密度(g/cm ³)	2.61	2.61	0.0
吸水率(%)	0.67	0.59	-0.08
実積率(%)	55.9	56.7	+0.8

表-3 花崗岩砕砂(島根産)

破碎機の通過回数	1 回	2 回	差分
表乾密度(g/cm ³)	2.60	2.61	+0.01
絶乾密度(g/cm ³)	2.58	2.60	+0.02
吸水率(%)	0.43	0.35	-0.08
実積率(%)	56.3	56.9	+0.6

表-4 石灰石砕砂(岡山県産)

破碎機の通過回数	1 回	2 回	差分
表乾密度(g/cm ³)	2.69	2.68	-0.01
絶乾密度(g/cm ³)	2.68	2.68	0.0
吸水率(%)	0.19	0.09	-0.10
実積率(%)	59.2	61.0	+1.8

※実積率は粒径判定実積率として表記。

表-5 計画調合表（※各骨材種ごとに破碎回数を問わず同一）

水準 (骨材種)	水セメント比	細骨材率	単位粗骨材 かさ容積	目標 スランプ 空気量	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
	W/C(%)	s/a(%)	m ³ /m ³	cm, %	W	C	S	G	C×%
砂岩(基準)	50	51.4	0.525	18±1.0cm 4.5±0.5%	175	350	901	877	適宜 調整
砂岩(75 μm)		49.6	0.545				870	910	
砂岩(40 μm)		48.4	0.558				849	932	
花崗岩		50.2	0.539				877	900	
石灰石		50.1	0.540				894	902	



図-2 砂岩の粒形 (2.5-1.2mm の粒子)

(左) 破碎 1 回, (右) 破碎 2 回

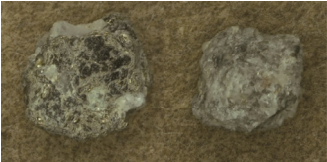


図-3 花崗岩の粒形 (2.5-1.2mm の粒子)

(左) 破碎 1 回, (右) 破碎 2 回

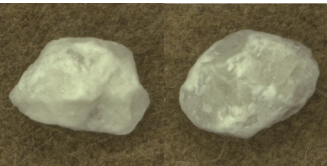


図-4 石灰石の粒形 (2.5-1.2mm の粒子)

(左) 破碎 1 回, (右) 破碎 2 回

3.5 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、水セメント比 (W/C=50%), 単位水量 (W=175kg/m³) とし、20℃, 60%の室内で練り混ぜた。計画調合表を表-5 に示す。各調合は、各骨材ごとに破碎回数 1 回の細骨材を用いて試し練りを行い、目標スランプ 18cm, フロー比 F/S=1.6, 空気量 4.5%となるように定めた。なお、砕砂コンクリートでは粘性上昇が問題となることから、F/S を文献1)等を参考に定めた。破碎回数 2 回の水準については、水セメント比、単位水量、細骨材率が同一骨材種の破碎回数 1 回の水準と同一となるように調合を定めた。その上で、目標スランプ 18cm, フロー比 F/S=1.6, 空気量 4.5%となるように混和剤添加率を定めた。なお、3.1 節で述べたとおり各骨材種ごとに粒度分布をそろえた (図-6～図-8 参照) ので、複数回破碎に伴う粒度分布の変化の影響は排除されていることになる。一方で、実際のプロセスでは破碎回数

によって各粒度の生成比率も異なるが、このような違いは考慮していないことになる。

なお、コンクリートの流動性については、スランプ (S)、スランプフロー (F)、空気量を測定した。硬化コンクリートの物性については、3, 7, 28 日に圧縮強度 (JIS A1108) および静弾性係数 (JIS A1149) を測定し、長さ変化率を JIS A1129-3 に準拠して測定した。

3.6 実験結果と考察：コンクリートの流動性への影響

コンクリートの流動性への影響は、高性能 AE 減水剤の添加率を調整せずスランプを観察してフレッシュ性状への影響を見るのが一般的¹⁾と思われるが、このような手法の場合、砕砂を用いたコンクリートでは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。そこで本報では、高性能 AE 減水剤の添加量で簡易的に判断することとした。図-5 に複数回破砕の高性能 AE 減水剤添加率への影響を示す。砕砂コンクリートについて重倉は粒形判定実積率 1 %につき単位水量 4.17kg/m^3 とする式を提案している⁶⁾。砂岩砕砂 3 種類について高性能 AE 減水剤のカタログに記載された減水率から単位水量の減少量を算定すると、砂岩 (基準) 3.41kg/m^3 、砂岩 ($75\ \mu\text{m}$) 2.98kg/m^3 、砂岩 ($40\ \mu\text{m}$) 1.28kg/m^3 となった。重倉の提案式から算定すると 3.33kg/m^3 となり本報の結果とおおむね整合した。一方、花崗岩砕砂については、重倉の提案式を大幅に上回って高性能 AE 減水率が低減される結果となった。メチレンブルー試験によると、本報で用いた花崗岩由来の砕石粉には粘土鉱物の含有 (メチレンブルー吸着量 3.3mg/g) が示唆されている。複数回破砕を行った前後で花崗岩の実積率、吸水率の変化が小さいことから考えて、花崗岩砕砂コンクリートにおける高性能 AE 減水剤の添加量の顕著な減少は、粘土鉱物が複数回破砕によって除去されたことを示唆するものと思われる。ただし本報では、都合により、破砕回数ごとに骨材を採取してメチレンブルー吸着量を比較するなどの分析を行えなかった。本報で示唆された複数回破砕による粘土分除去効果を実証するには、さらなる検討が必要である。

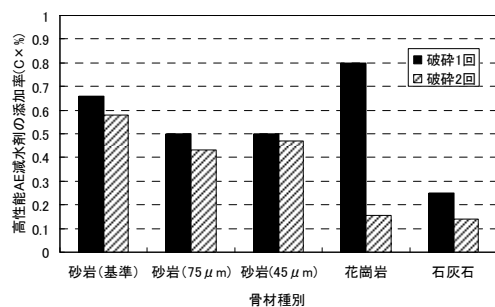


図-5 破砕回数と高性能 AE 減水剤の添加率

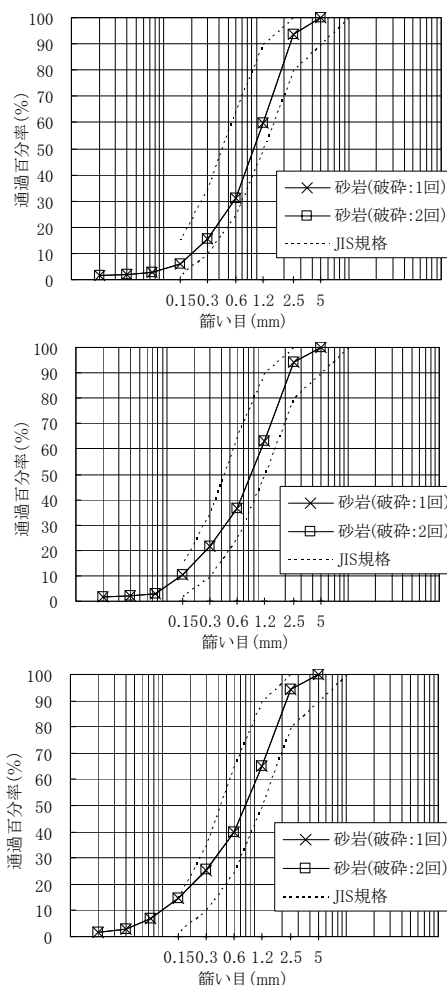


図-6 砂岩砕砂の粒度分布

上から、砂岩(基準)、砂岩($75\ \mu\text{m}$)、砂岩($40\ \mu\text{m}$)

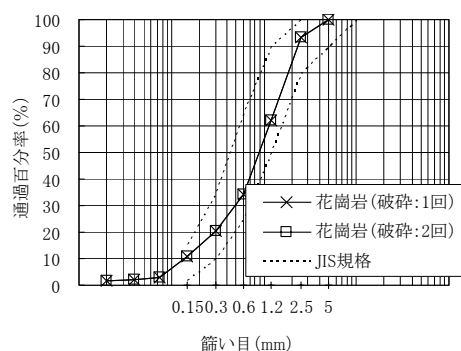


図-7 花崗岩砕砂の粒度分布

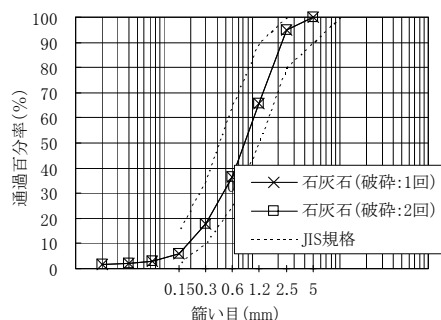


図-8 石灰石砕砂の粒度分布

3.7 実験結果と考察：コンクリートの力学特性への影響

破碎回数の影響について、図-9 に圧縮強度、図-10 に静弾性係数への影響を示す。同一強度だった石灰石を除くいずれの骨材種においても強度は数 MPa 程度低下した。表-2～表-4 によると破碎回数の増加に伴って吸水率は減少しており、複数回破碎に伴う骨材の強度減少は考えにくい。粗骨材において碎石などの凹凸が強度に寄与する⁷⁾のと同じ理由で圧縮強度が低下したものと推測している。ただし、経験的な推測にとどまるものであり、今後の実験的裏付けが必要と考えている。静弾性係数については目立った傾向は観察されなかった。以上のように、骨材種、骨材の粒度分布、調合を同一とした場合、砕砂の複数回破碎による粒形の違いがもたらすコンクリートの力学的性能への影響は小さいといえる。

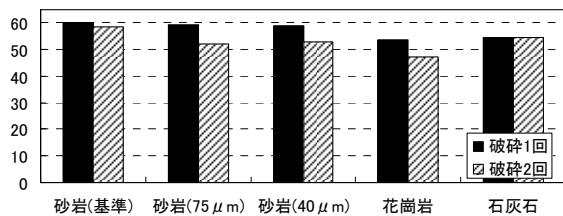


図-9 破碎回数と28日圧縮強度(N/mm²)

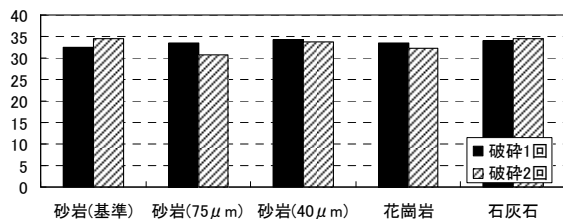


図-10 破碎回数と静弾性係数(kN/mm²)

3.8 実験結果と考察：コンクリートの乾燥収縮への影響

図-11～図-13 に硬化コンクリートの長さ変化率試験の結果を示す。いずれの骨材種においても、破碎回数による違いは非常に小さかった。特に、複数回破碎の結果実積率で1.8%の向上がみられた石灰石においても、長さ変化率はほぼ同一の値となった。また、3.6 節の考察によると、花崗岩砕砂においては複数回破碎によって粘土鉱物が減少していると推測されるが、この影響は長さ変化率の試験結果からは観察されない。

既往の研究例では、骨材の形状が拘束効果などを通じて収縮に影響するとの指摘^{8,9)}がみられる。しかし、骨材種、骨材の粒度分布、調合が同一な場合、破碎回数の追加によって砕砂の粒形のみを変化させても硬化コンクリートの長さ変化率にはほとんど違いが見られなかった。このことから、細骨材の粒形が収縮におよぼす影響は、少なくとも単一の因子としては、無視できるほど小さいと推察される。

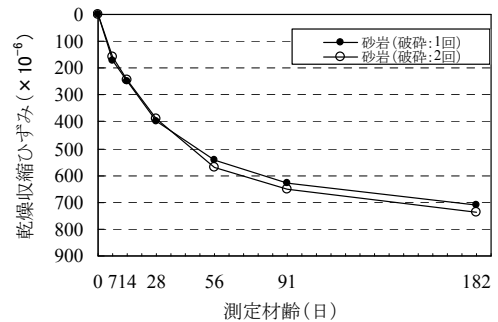
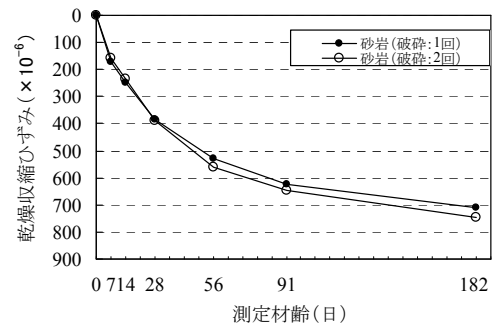
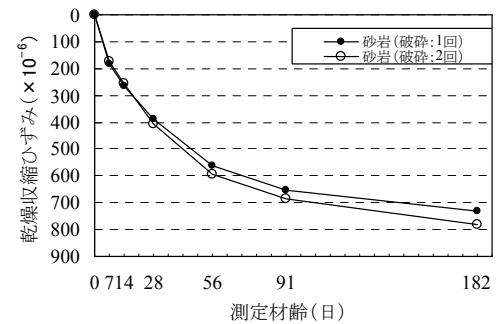


図-11 砂岩砕砂コンクリートの長さ変化率
上から、砂岩(基準), 砂岩(75 μm), 砂岩(40 μm)

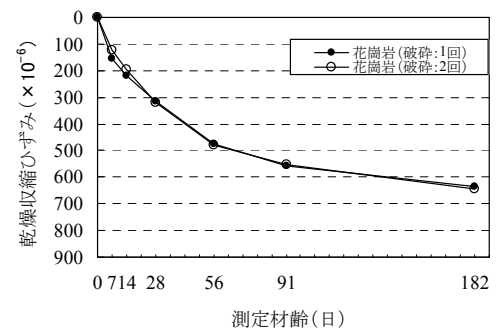


図-12 花崗岩砕砂コンクリートの長さ変化率

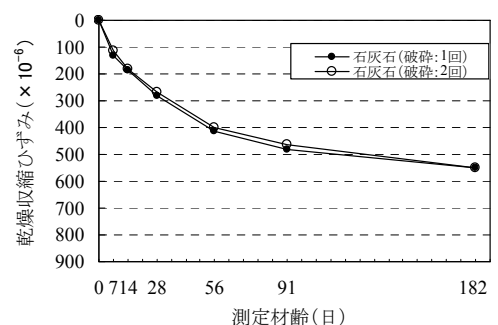


図-13 石灰石砕砂コンクリートの長さ変化率

4. まとめ

本研究は、砕砂の製造プロセスの設計・最適設定手法を確立しようとする立場から、複数回破碎した骨材やコンクリートの諸物性への影響を明らかにすることを目的としていた。本報は、以下のようにまとめられる。

- (1) 骨材種、骨材の粒度分布、調合が同一の場合には、破碎回数の追加によって砕砂の粒形のみを変化させても圧縮強度、静弾性係数への影響は小さかった。わずかながら強度が低下する傾向にあった。これは、粗骨材において碎石などの凹凸が強度に寄与する⁷⁾のと同様の理由によると推測される。
- (2) 骨材種、骨材の粒度分布、調合が同一の場合には、破碎回数の追加によって砕砂の粒形のみを変化させても硬化コンクリートの長さ変化率にはほとんど違いが見られなかった。この傾向は、3 骨材種すべてに共通して観察された。この結果から、細骨材の粒形の変化は、少なくともこの因子のみではコンクリートの乾燥収縮への影響が無視できるほど小さいと推察される。ただし、本報では粒形の変化は小さく、実験の水準数も不足している。より大きな粒形変化についてはさらなる検討が必要である。
- (3) 本報で用いた花崗岩では複数回破碎を行っても実積率の上昇は+0.6%程度であり、顕微鏡観察によってもそれほど大きな形状の改善はみられなかった。しかし、同一の調合・骨材種・粒度分布にも関わらず、複数回破碎を行うと同一スランプを得るのに要する高性能 AE 減水剤添加量は顕著に低減された。これは、複数回破碎にともなう含有粘土鉱物量の減少によるものと推察された。このように粒形の大幅な改善が見込めない場合であっても、複数回破碎が細骨材の品質向上に寄与する可能性があることが明らかとなった。

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: 碎石粉を使用した碎石・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) 賀谷隆人, 橋本勝由, 山本春行: 粒形改善砕砂生産時に発生する微石粉のコンクリートへの有効利用に関する研究, 骨材資源, Vol.40, No.158, pp.84-89, 2008
- 3) 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
- 4) 友澤史紀, 辻幸和, 山本和成: 「JIS A 5005 (コンクリート用碎石及び砕砂)」の改正について, コンクリート工学, Vol.47, No.3, pp.3-9, 2009.3
- 5) 藤原靖, 岡本修一: コンクリートの性質に及ぼす花崗岩骨材の風化度に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, 1992
- 6) 重倉 祐光: 粒形判定実積率を考慮した砕砂コンクリートの調合設計方法の研究, 日本建築学会論文報告集 Vol.315, pp.10-16, 1982.05
- 7) 中村 則清, 鈴木澄江, 阿部道彦, 柳 啓: 過去 30 年に実施した試験におけるコンクリート圧縮強度の比較検討, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.A-1, pp. 1119-1120, 2008
- 8) 浅本晋吾, 石田哲也, 前川宏一: 骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2 pp327-340, 2007.06
- 9) 後藤 幸正, 藤原 忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集 Vol.286, pp.125-137, 1979.06