

細骨材用研磨碎砂の品質特性 とその評価

高 海 克 彦^{※)}

1. はじめに

川砂、海砂の採取規制に伴う西日本の骨材不足により、代替材の必要性が高まっている。なかでも、代替材として安定供給の期待できるものに碎砂があるが、碎砂を単独で細骨材として使用すると所要単位水量がかなり増加するという欠点がある。

そこで本研究では、碎砂を研磨機で研磨し、その品質改善を図り、その改善効果を評価した。評価に当たり、研磨碎砂を粒径で3水準に分け、物性試験および新たにレーザー顕微鏡測定、ならびに非接触3次元画像測定機による粒子形状測定を行い、粒子形状改善効果を詳細に調査した。さらにその改善効果がモルタルフローに与える影響を、粒径ごとに検討した。

2. 実験の概要

2. 1 研磨碎砂製造方法

本研究で用いた研磨碎砂製造機を図1に示す。製造機は長さ約1.0mの横型回転ドラムが主装置で、図2に示すように、碎砂投入部、円筒形回転ドラムおよび排出部で構成されている。円筒形ドラムの内部には投入された碎

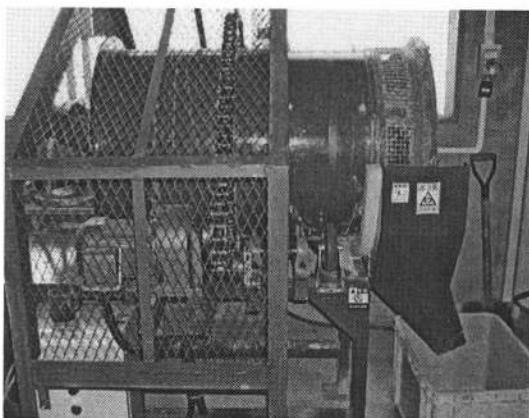


図1 研磨碎砂製造機

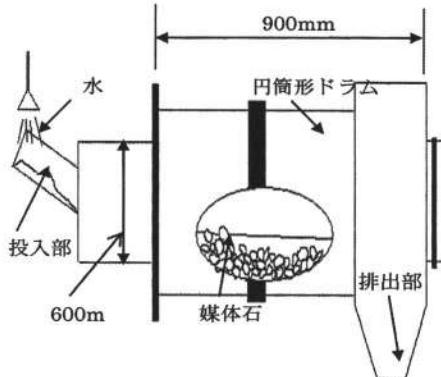


図2 研磨碎砂製造機の構造

砂を研磨するため、定められた粒径（13～80mm）の媒体石が入れられている。碎砂の研磨過程は、次のようにある。水と混合して流しこまれた碎砂は、回転ドラム内で媒体石により研磨された後、排出部から水と共に排出される。研磨碎砂と水を分離する過程で微粒分の一部は除去される。処理後の砂を乾燥させて回収する。これが研磨碎砂製造工程であり、これを所定の研磨回数繰り返す。

2. 2 碎砂の種類

本研究で用いる碎砂は、山口県産硬質砂岩碎砂（H P）と佐賀県産安山岩碎砂（A P）である。研磨碎砂の原石における特性を表1に示す。ショア硬度および摩耗性指數は、硬質砂岩のほうがかなり大きい。

2. 3 試験項目と概要

本研究では、対象とする2種類の碎砂（A P、H P）をそれぞれ3回まで研磨し、研磨効果の比較・検討した。研磨回数を示すために、試料名の末尾に数字を付した。付数の0は研磨しない原砂を表す。試験試料には、研磨碎砂と比較検討のため、海砂（S S）と市販されている高品質碎砂（B）を加えた。なお、海砂と高品質碎砂は

表1 碎砂原石特性

項目	硬質砂岩	安山岩
圧縮強度(N/mm ²)	258	258~137
ショア硬度	107	50~60
含有 SiO ₂	62.7%	76.0%
ABR(磨耗性指數)	1420	140
BR(破碎性)	24.8%	29.9%

表2 試験項目と方法

試験項目	試験方法
密度、吸水率	JIS A 1109
ふるいわけ	JIS A 1102
実積率試験	JIS A 1104
粒形判定実積率	JIS A 5005 5.8

研磨処理を施していない。

試験項目は大きく分けて次の3つである。(1)細骨材としての物性試験、(2)研磨後の粒子性状測定試験、(3)研磨碎砂を用いたフロー試験である。なお、各試験では、さらに詳細に研磨効果を検証するために、研磨回数ごとに粒径を2.5mm~1.2mm、1.2mm~0.6mm、0.6mm~0.3mmの3水準に分けた試料での試験を適宜追加した。以下、各試験の方法を説明する。

(1) 細骨材としての物性試験

コンクリート用細骨材の試験であるふるいわけ試験、密度・吸水率試験および実積率試験を行った。試験方法は、表2に示すJIS規格に従った。

(2) 研磨後の粒子性状測定試験

研磨後の碎砂粒子の特性として、粒子形状測定と粒子表面の走査型レーザー顕微鏡による観察、および表面の粗さを測定した。

i) 粒子形状測定試験

粒子形状は、砂粒子一粒づつを対象に、図3の非接触三次元画像測定器を用いて測定した。測定項目は、図4の投影図の内接円の短径A、内接円と同心円の外接円を用いた内接円真円度B(JIS B 0660)、周長L、断面積aの4つである。

測定データから、粒子の形状評価には2種類の指標を用いた。

一つは円形度指数である。この指標は、粒子が真円形

であれば1の値をとり、粒形がいびつになると0に近づく値をとるため、本研究ではこれを円形度指数(以下C I)とよび、次式で表わす。

$$C I = 4 \pi a / L^2 \quad (1)$$

粒子形状評価法の二つ目は、内接円真円度指数(R i)である。これは、JIS B 0660の規格に沿って計測した図4の内接円真円度を短径で除したものであり、次式で定義する。

$$R i = B / A \quad (2)$$

この指標は、粒子が真円形であれば0となり、形状がいびつになるほど0よりも大きな数値をとることになる。

ii) 表面観察と算術平均粗さ試験

走査型レーザー顕微鏡を用いて、碎砂一粒ごとに赤外



図3 非接触三次元画像測定機

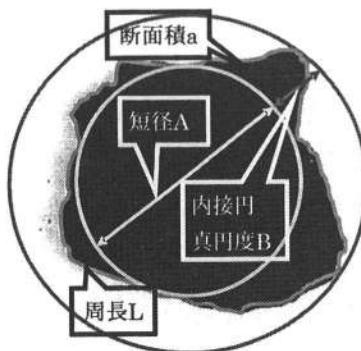


図4 砂粒子投影図と計測事項

線レーザーを照射し、表面の観察をする。そして、図5のように顕微鏡で撮影した砂表面の凹凸データを画像処理することにより、表面粗さの定義(JIS B 0601)に基づいた算術平均粗さを求めた。算術平均粗さ(R_a)とは、凹凸画像の横軸方向(x)の基準長 L に対し、縦軸方向の粗さ y を $y = f(x)$ で表したとき、次式で表わされる。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (3)$$

この計測では、粒径水準ごとの測定サンプル数を、30粒とした。

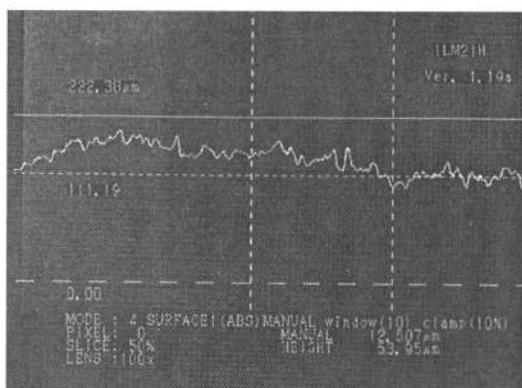


図5 粒子表面粗さ画像

(3) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は、用いる研磨碎砂の状態により、2種類の試験を行った。一つは、研磨回数ごとに対象砂を全量使用した試験である。もう一つは、粗粒率2.7に調整した原砂に対し、対象となる粒径部分のみを研磨回数ごとの碎砂で置換して行った試験である。モルタル配合は $S/C=2.0$ 、 $W/C=0.55$ であり、試験方法は旧JIS R 5201の手順に従った。

3. 実験結果

3.1 細骨材としての物性試験

図6、図7に試験体A P、H Pの粒度分布曲線を示す。図より、A P、H P共に、研磨回数が増えると、1.0mm以下の細粒子が増加している。硬質砂岩は細粒分が均等に増加しているのに対し、安山岩は0.3mm以下の增加割合が大きく、研磨作用の岩種による差異が表われている。

次に、図8、図9および図10に研磨による各碎砂の表乾密度、絶乾密度および吸水率の変化量を示す。試験体A P、H P共に研磨回数が増えると絶乾密度、表乾密度は増加し、吸水率は減少しており、研磨により砂内部の密実度が増加したものと思われる。ただし、試験体H Pの表乾密度の増加量は試験体A Pに比べて小さく、ここにも原砂の種類による研磨効果の差異が現われている。

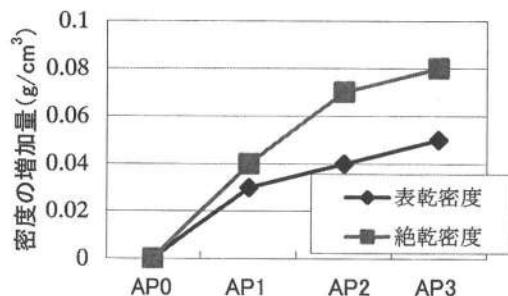


図6 安山岩碎砂粒度分布

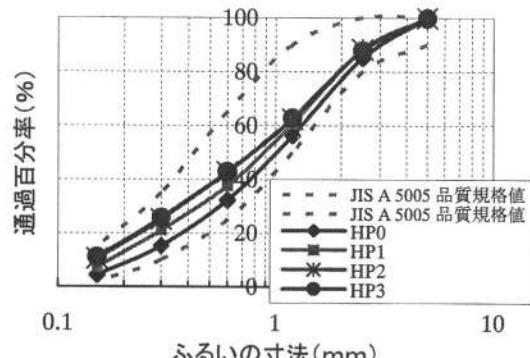


図7 硬質砂岩碎砂粒度分布

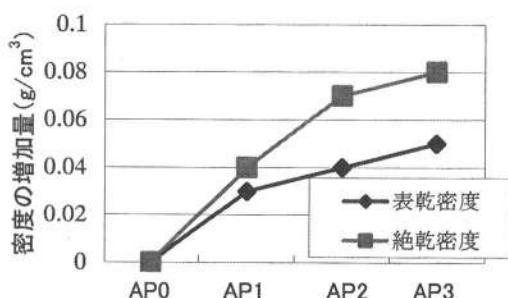


図8 安山岩碎砂密度增加

(16)

図11、図12に研磨碎砂の粒径グループ別の実績率を示す。なお、図9の安山岩碎砂の2.5mm～1.2mmと0.6mm～0.3mmで、また図10の硬質砂岩の粒径2.5mm～1.2mmと1.2mm～0.6mmの実績率は、ほぼ同一で図中のプロット点が重なっている。JISにおいて碎砂の粒子形状の表皮を判断する粒形判定実績率(2.5mm～1.2mm)は、両碎砂とも研磨により増加し、碎石の粒径改善がなされてると考えられる。しかし、安山岩において粒径1.2mm～0.6mmおよび0.6mm～0.3mmの試験体が1回目から2回目の研磨で、また硬質砂岩では研磨後の粒径0.6mm～0.3mmものは研磨をするに従い実績率が減少し、必ずしも粒径が改善されているとはいいがたい。従って、実績率の下がったグループの粒径範囲では、研磨により粒子形状が扁平あるいは凹凸のあるものになった可能性がある。

3.2 粒子形状測定結果

式(1)および式(2)で求めた粒子形状測定結果を、図13～図16に示す。図中には比較のため、海砂(S S)と市販高品質碎砂(B)の結果も入れている。2.3で述

べたように円形度指数(C I)は1に近いほど、また内接円真円度指数(R)は0に近いほどその粒子が円形であることを表しているため、図13と図14では、プロットが図の上にあるほど、図15と図16ではプロットが下にあるほど、粒子は円形に近いことを表す。

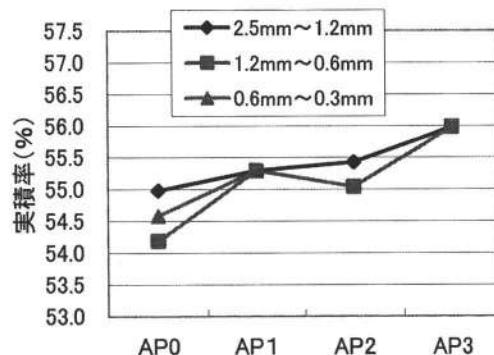


図11 安山岩碎砂粒径別実績率変化

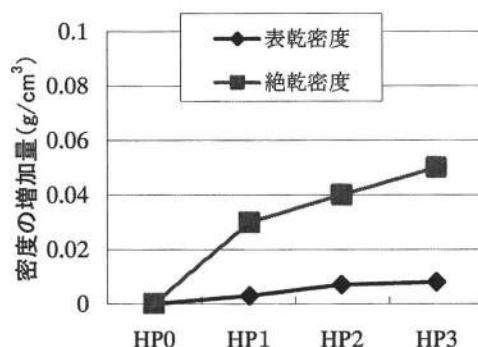


図9 硬質砂岩碎砂密度増加

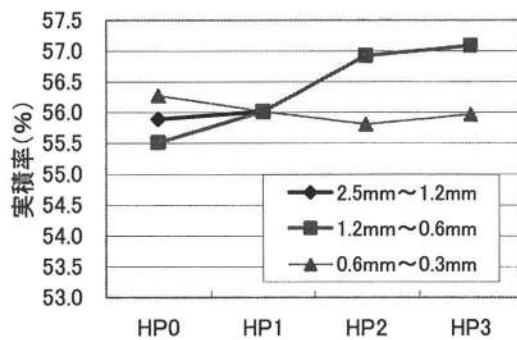


図12 硬質砂岩碎砂粒径別実績率変化

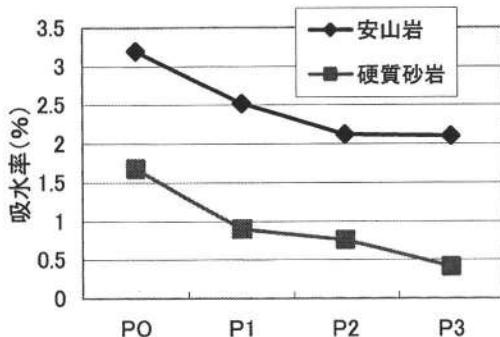


図10 研磨碎砂吸水率変化

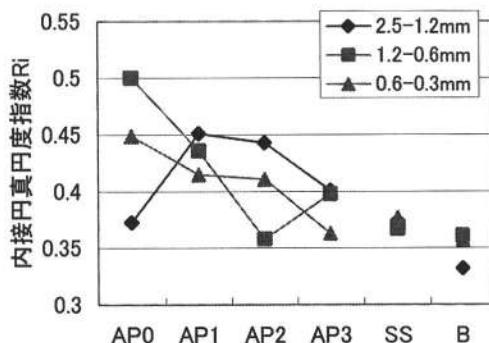


図13 安山岩碎砂研磨回数別円形度指数

図13および図14より、CIによる評価では、高品質碎砂Bがどの粒径グループに対しても、値が大きく、次いで海砂となっている。これは、海砂の0.6mm～0.3mmを除いて、高品質碎砂Bおよび海砂が、どの研磨碎砂より形状が丸いことを示している。研磨碎砂については、

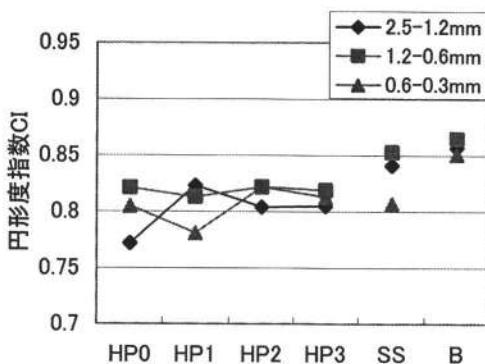


図14 硬質砂岩碎砂研磨回数別円形度指数

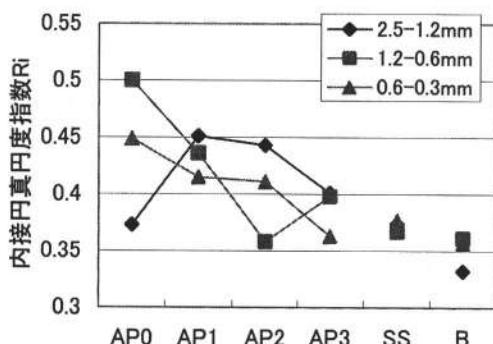


図15 安山岩碎砂研磨回数別内接円形真円度指数

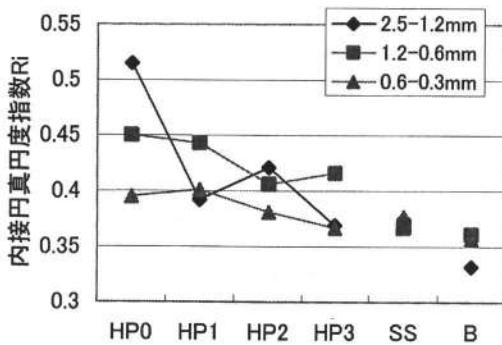


図16 硬質砂岩碎砂研磨回数別内接円形真円度指数

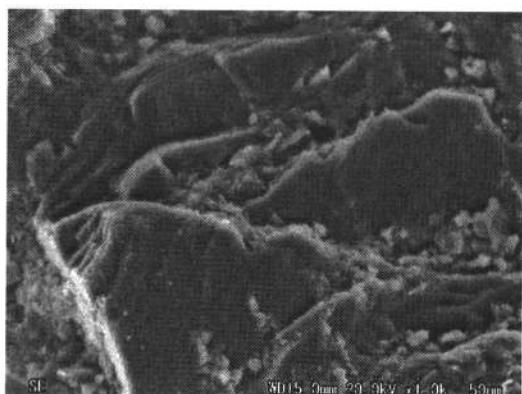
図13および図14から、定性的に若干の粒形改善がなされた、あるいは粒径グループによっては、ほとんど変化が見られない結果となった。これは研磨処理の過程において、碎砂粒子の微小なクラックなどが引き金となり、破碎が生じたためと考えられる。

また、図15および図16の内接円真円度指数(Ri)による評価でも、真円度指数(CI)による評価同様、高品質碎砂Bが最も形状が丸く、次いで海砂となっている。両碎砂で、粒径0.6mm～0.3mmでは、研磨により内接円真円度指数が小さくなり、丸くなっていることがわかるが、その他の粒径では研磨によっても指指数が上下し、研磨回数と形状改善には整合性が見られない。

図13～図16より、高品質碎砂Bは、海砂、碎砂原砂や研磨した碎砂よりも、最も丸い砂であることが分かった。また、円形度指数(CI)と内接円真円度指数(Ri)による評価法は、内接円真円度指数のほうが、研磨碎砂に対して、研磨回数による感度が大きい、即ち研磨回数による指数変化の傾きが大きいことが分かったが、その分、研磨回数と粒径改善度の整合性にも齟齬が生じているのがはっきり示されている。

以上のことから、碎砂を研磨することで粒子形状が若干改善されると考えることができるが、その評価を今回用いたCIやRiで行うと、研磨回数と粒形改善度との強い整合性み出せない。また、岩種や粒径によって、研磨による形状改善効果に差が生じることがわかった。

3. 3 顕微鏡による表面観察および算術平均粗さ測定結果



(a) 安山岩 原砂

図17 研磨碎砂表面顕微鏡写真

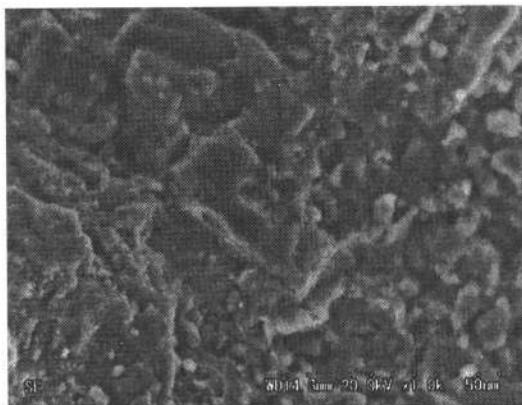


図17-(b) 安山岩 1回研磨

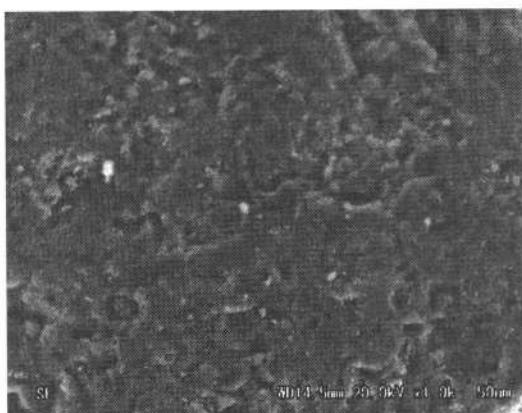


図17-(c) 安山岩 3回研磨

走査型レーザー顕微鏡で安山岩碎砂の研磨回数（0回、1回および3回）別の観察結果を、図17(a)、(b)、(c)に示す。図の分析スケールは全て同じであり、原砂の表面性状は粗いが、研磨すると表面組織は細かくなっているように観察できる。

本研究では、この表面性状を数値的に評価するために、式(3)の算術平均粗さを用いた。算術平均粗さが小さいほうが、表面が滑らかなことを表す。図18に安山岩粒径2.5mm～1.2mmの各粒子の算術平均粗さの頻度を示す。研磨回数を増やすと、算術平均粗さは小さくなり、かつ粗さのばらつきが小さくなっており、図17の観察結果では研磨することにより、表面が滑らかになるという特性を明確に現わしている。

粒径別算術平均粗さの平均値と標準偏差を、粒径1.2mm～0.6mmについて図19および図20に示す。図19より研磨

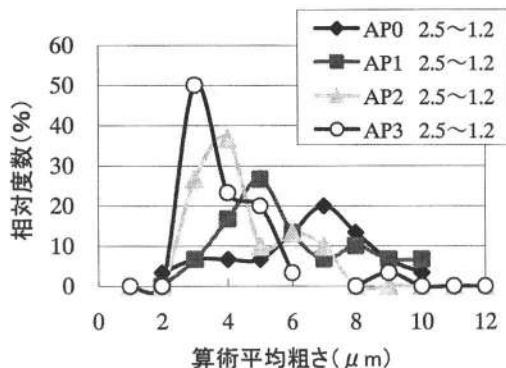
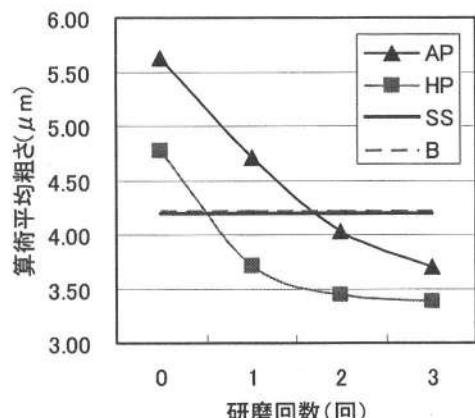
図18 安山岩碎砂算術表面粗さ
(粒径2.5mm～1.2mm)

図19 研磨回数別算術平均粗さ平均値

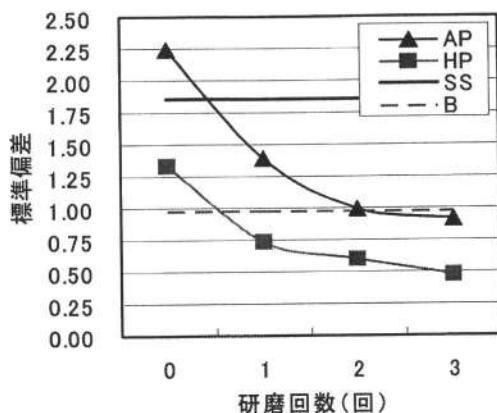


図20 研磨回数別算術平均粗さ標準偏差

回数が増加するごとに安山岩、硬質砂岩共に算術平均粗さの平均値が減少し、表面が滑らかになっていることが分かる。これは他の粒径においても同様の傾向が得られた。原石は硬質砂岩の方が固い性質を持ちながら、研磨処理によって硬質砂岩では安山岩よりも滑らかな碎砂となる傾向がみられた。しかし、原砂からの粗さの低下度合いは、碎砂の種類および粒径で異なる。今回は粒径1.2mm～0.6mmにおいて両碎砂とも算術平均粗さの低下量が大きい。すなわち表面が滑らかになる改善効果が強く現われた。

海砂と高品質碎砂の算術平均粗さに対し、安山岩、硬質砂岩共に研磨1回、もしくは2回の研磨で海砂の算術平均粗さ平均値を下回っている。このことから、碎砂を1～2回研磨すれば海砂以上の表面の滑らかさとなるといえる。

研磨碎砂の粗さのばらつきを表す標準偏差について、図20より安山岩、硬質砂岩ともに研磨回数が増加するごとにばらつきが減少し、より均一な碎砂が得られていることがわかる。また、安山岩粒径2.5mm～1.2mmを除いた各粒径で1回の研磨で標準偏差が海砂の標準偏差より小さくなつた。また、算術平均粗さ平均値と同様に、粒径1.2mm～0.6mmでは標準偏差の低下量が少なく、安山岩よりも硬質砂岩の方が、標準偏差が小さいことがわかつた。

3.4 モルタルフロー試験結果

研磨回数別モルタルフロー値を図21に示す。原砂を用いたフロー値は、両碎砂とも海砂を用いた場合より約20mm小さいが、少なくとも2回研磨をするとフロー値が

海砂を上回つた。フロー値の増加量に着目すると、研磨1回目による改善効果が大きいことが分かる。

また、高品質碎砂Bは、原砂よりもフロー値は大きいが、研磨したものに比べると小さい。図13～図16、図19から、高品質碎砂Bは、研磨碎砂と比べると、粒子形状は丸いが、表面粗さについては研磨碎砂ほどではなく、海砂と同程度である。したがつて、高品質碎砂Bよりも丸くはないが、表面が滑らかになった研磨碎砂の方が、大きなフロー値を得たことから、表面粗さがフロー値に大きな影響を及ぼす可能性がある。

次に、粒径別置換時モルタルフロー値を図22、図23に示す。図22より、粒径2.5mm～1.2mm置換時のモルタルフロー値がほとんど増加していないことがわかる。一方、粒径1.2mm～0.6mm、0.6mm～0.3mmについては図21に示す

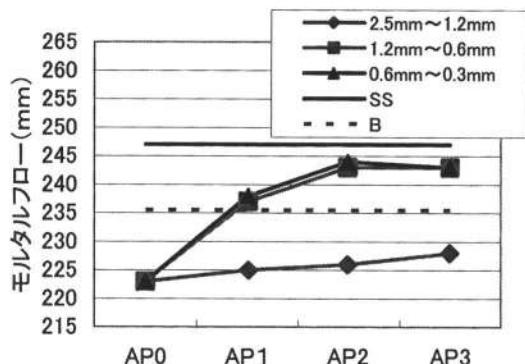


図22 安山岩碎砂粒径別置換モルタルフロー

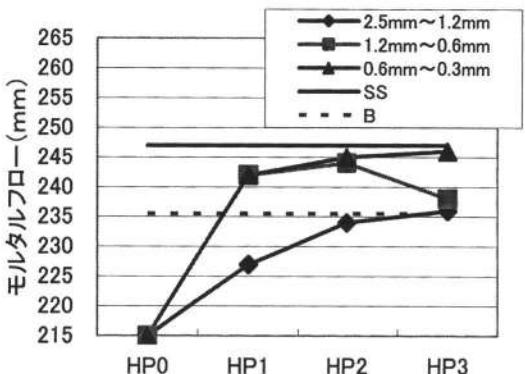


図23 硬質砂岩碎砂粒径別置換モルタルフロー

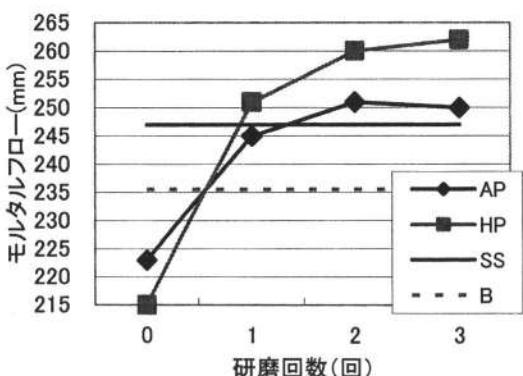


図21 研磨回数別モルタルフロー

安山岩の研磨回数別モルタルフロー値とほぼ同じ程度まで増加している。また、この傾向は、図23に示す硬質砂岩でも観察できる。この両図から、研磨によるモルタルフロー値の増加は、粒径1.2mm～0.6mm、0.6mm～0.3mmの粒子の性状改善効果に起因すると考えられる。

ここで、碎砂粒子改善効果の指標とする図13～図16に示すCIやRおよび図19の算術平均粗さと研磨回数別モルタルフロー値の関係について考察する。前述したように、安山岩、硬質砂岩共に研磨回数が増えると算術平均粗さが低下し、それに対応してモルタルフロー値が増加している。また、安山岩粒径2.5mm～1.2mmにおいては、研磨回数が増えても算術平均粗さの減少量、モルタルフロー値の増加量共にわずかである。これらのことから、粒子表面滑らかさとモルタルの流動性には高い相関性があると考えられる。

一方、粒子形状改善について、図13と図15、図22より、安山岩粒径2.5mm～1.2mmでは、AP0よりもAP1～AP3の形状が悪いにも関わらず、モルタルフロー値が研磨回数を重ねるごとに増加している。また、図12と図14およびモルタルフローの図20より、硬質砂岩の粒径2.5mm～1.2mmでは、HP0～HP1で大きな粒形改善がみられるにもかかわらず、モルタルフロー値の増加量が少ない。これらのことから、粒子の形状はモルタルの流動性にある程度の影響は与えるが、粒径による差が生じるものと考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) ふるいわけ試験結果から、研磨回数を増やすごとに粗粒分が破碎により低下し、細粒分が増加している。
- 2) 密度試験および吸水率試験から、碎砂は研磨回数を増やすごとに密度が増した。また、吸水率が研磨に

より減少した。このことから、研磨により粒子内部のマイクロクラックが減少したと思われる。

- 3) 粒径別の実績率は、相対的には研磨により、各粒径別にも増加するが、硬質砂岩の粒径0.6mm～0.3mmでは研磨によりかえって減少した。
- 4) 粒子形状測定から、研磨することである程度粒子は丸くなるが、研磨回数とのつよい相関性は見られなかった。
- 5) 研磨性状レーザー顕微鏡で測定し、算術平均粗さを算出することで、碎砂の表面性状を数値的に評価することが可能となった。
- 6) 算術平均粗さ測定から、碎砂を研磨することで、海砂以上に表面を滑らかにすると同時に、ある一定の粗さに加工できると考えることができる。
- 7) モルタルフロー試験、および研磨碎砂と高品質碎砂との比較から、フロー値と粒子の表面粗さには高い相関性が見られるが、CIおよびRで評価する粒形改善とは、明確な整合性が見られなかった。
- 8) 粒径2.5mm～1.2mmが流動性に及ぼす影響は、他の粒径に比べて小さいと思われる。
- 9) 碎砂内部や表面のクラックの有無、岩種や粒径により研磨効果が異なることが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 湯間謙次、高海克彦、古谷治昭、浜田純夫：研磨碎砂の物性評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26, pp.111-116, July, 2004
- 2) 高海克彦、湯間謙次、田畠美紀、古谷治昭：碎砂の粒子性状改善がモルタルフローに与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.27, pp.67-72, July, 2005