

# 噴流を利用した砕砂の研磨法

POLISHING METHOD OF CRUSHED SAND USING JET FLOW

今井忠男\*・木崎彰久\*\*・杉本文男\*\*\*

by Tadao IMAI, Akihisa KIZAKI and Fumio SUGIMOTO

## 1. はじめに

コンクリートの力学性能において、天然砂の使用に比較し砕砂が劣ることは無い<sup>1)</sup>。しかし、砕砂を用いると、フレッシュコンクリートの流動性が著しく低下するため、砕砂の使用が進まない現状がある。この原因は、天然砂に比較し、砕砂は形状が複雑で、表面の凹凸が多いためである。

今後、開発が困難となりつつある天然砂の代替として、砕砂を普及させるためには、砕砂を整粒・研磨し、天然砂の流動性に近づける必要がある。

現在、砕砂の整粒・研磨法は幾つか種類があるが、ドラム内に水と砕砂を投入し、回転させながら、粒子同士を研磨させる「ドラムウォッシャー」式の研磨機が主流である。しかしながら、本方式では、砕砂に十分な研磨効果が得られず、コンクリートが必要とする高い流動性も得られていない。

本研究では、ドラムウォッシャー式の研磨法では、原理的に十分な砕砂の研磨効果は得られないことを説明し、噴流を利用した新たな研磨法の提案を行い、その効果を実験によって明らかにした。

## 2. 研究理論

### 2.1 ドラムウォッシャー式研磨法の限界

著者らは、これまでドラムウォッシャー式研磨法について研究し、粒度と円形度との関係を調べてきた<sup>2)</sup>。円形度係数 $R$ とは、1を真円とし、1に近づくほど丸くなっていることを示す指標である。 $R$ の定義を式(1)に示す。

$$R=4\pi A/L^2 \quad \dots (1)$$

ただし、 $A$ および $L$ は、投影した粒子の面積および周囲長である。

実験では、粒度0.25-4.75mmの安山岩砕砂を用い、ドラム内に水と砕砂を質量比1:1の割合で投入し、回転速度50rpmで24時間運転して研磨した。その結果を図1に示す。図より、粒度0.25-1mm(平均

0.5mm)および1-2.38mm(平均1.69mm)の粒子は、研磨の前後で、円形度係数はほとんど変化がないことがわかる。これに対し、粒度2.38-4.75mm(平均3.57mm)の粒子のみ、円形度係数が大きくなっており、研磨の効果があることがわかった。粒子径によって研磨の効果に違いが生じた原因は、回転するドラム内の流体速度に起因すると考えられる。粒径が小さいほど、流体内で浮遊しやすいため、ドラム壁面や他の粒子と慣性衝突するには、流体速度を大きくしなければならない。しかし、ドラムの回転速度を大きくすると、遠心力が高まり、流体と粒子は壁面から移動しづらくなる。したがって、ドラムウォッシャー式の研磨法は、原理的に、粒径が小さい粒子の研磨には向いておらず、砕砂の研磨方法としては、適切でないと考えられる。

なお、図中の天然砂では、どの粒度においても円形度係数が高いが、粒度が小さくなると、円形度が低くなる傾向にある。すなわち、河川等での自然の研磨作用においても、低粒度の粒子の研磨は難しいことがわかる。

以上のことから、低粒度の粒子を研磨するためには、粒子が慣性衝突しやすい、高流速の研磨環境が必要と思われる。

### 2.2 噴流研磨法の原理

流体中の粒子速度を大きくするには、噴流(ジェット流)の利用が容易である。図2に噴流を利

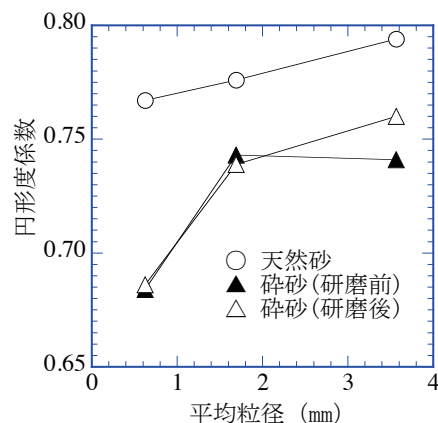


図1 ドラムウォッシャー式法による砕砂の研磨

\* 秋田大学 教授 国際資源学部 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、\*\* 秋田大学 准教授 国際資源学部、\*\*\* 秋田大学大学院 教授 工学資源学研究科

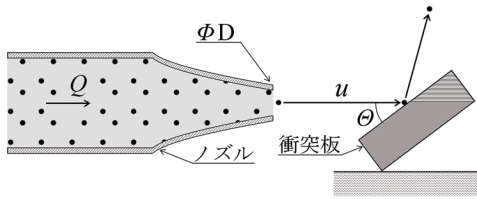


図2 衝突研磨モデル

用した粒子の衝突および研磨の原理を示す。パイプ中に直径 $d$ で密度 $\rho$ の粒子と粘性係数 $\mu$ の流体が流量 $Q$ で輸送され、直径 $D$ のノズル先端から、速度 $u$ で噴出したとする。このとき、流体中の粒子が流体の流れから分離し、ノズルの先の衝突板に慣性衝突する条件は、次式の慣性パラメータ $\psi$ によって式(2)で定義される。

$$\psi = (d^2 \rho u) / (18 \mu D) \quad \dots (2)$$

ここで、 $\psi^{1/2} > 0.5$ ならば、流体中の粒子は、ほぼすべて慣性衝突すると考えられている<sup>3)</sup>。

粒子が慣性衝突し、研磨が進む条件は、上式より、粒子の直径と噴流の流速との関係によって決まる。ただし、衝撃力が強いと粒子は破壊されるので、衝突板と粒子の衝突角 $\theta$ を適切な角度に調整する必要がある。

### 3. 実験方法

#### 3.1 砕砂および天然砂試料

表1に実験に用いた砕砂(安山岩)およびマサ土

表1 試料粒子の物性値

試料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	平均粒径(mm)
天然砂	2.60	3.3	0.50
砕砂(安山岩)	2.61	1.8	0.71
マサ土	2.58	-	0.71

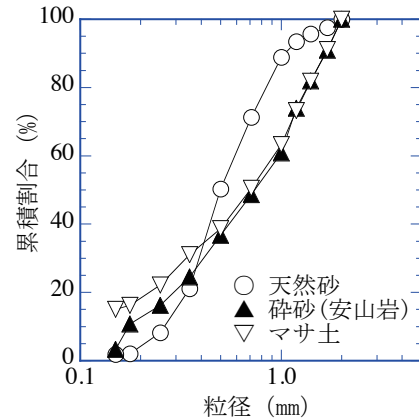


図3 試料粒子の粒度分布

(花崗岩)と、比較のための天然砂の物性値を示す。砕砂は、天然砂とほぼ同じ密度(約2.6g/cm<sup>3</sup>)のものを用いた。また、図3にそれぞれの粒度分布を示す。各試料の粒度は0.15-2.0mmに調整した。この粒度範囲は、ドラムウォッシャー式の研磨では、研磨が十分に行えない領域である。

なお、粒度分布において、天然砂に比較し、砕

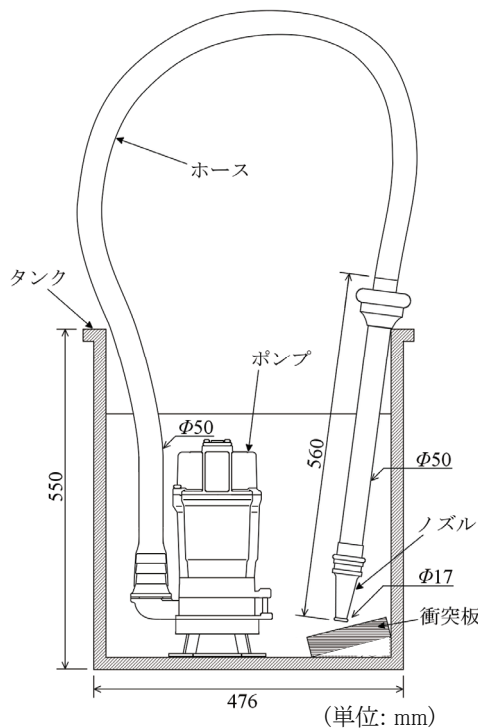


図4 噴流研磨システム



写真1 実験装置の外観

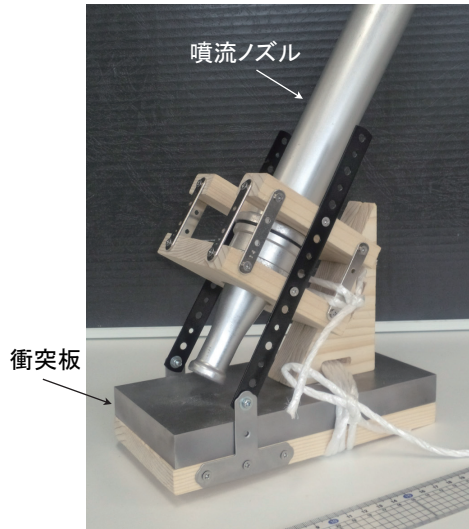


写真2 衝突板とノズルの固定治具

表2 噴流装置の条件

最大流量 (L/s)	ノズル径 (mm)	最大流速 (m/s)
3.7	17	16.3

砂とマサ土は、粒径の大きい粒子の割合が少し多く、平均粒径が大きくなっている。

### 3.2 噴流研磨システム

図4に噴流研磨システムを示す。本システムは、水と砕砂を混合したスラリー用のタンク、スラリー循環用のポンプ、噴流ノズルおよび粒子の衝突板からなる。また、写真2のように、噴流ノズルと衝突板(ステンレス製)は、木製の治具で固定され、衝突角 $\theta$ を20、45、75°に変化させることができ、効果的な衝突角を調べることができる。

本システムでは、タンク内のスラリー濃度を一定にする目的で、タンク内にノズルと衝突板を設置し、タンク内に噴流を噴射させてスラリーを攪拌した。なお、タンクの流体内において、ノズルからの噴流は、急激に減速すると考えられるので、ノズル近くに衝突板を設置した。本装置の外観を写真1に示す。ホースは大きく屈折しないように、各所にヒモで小さな折れを作り、できるだけ円形とした。ノズルは単管パイプで固定した。本装置は、運転中に衝撃音もなく、長時間にわたり静かに作動する。

噴流装置の条件を表2に示す。使用した水中ポンプ(出力0.56kW)の最大流量は3.7L/s、ノズル(アルミニウム製)の直径は17mmであり、噴流の最大流速は16.3m/sが期待される。よって、本噴流の流速では、式(1)より、直径0.045mmの粒子まで慣性衝突させることができ、これ以上の粒子では、十分な衝突エネルギーによって研磨が可能と考えられ

表3 実験の条件

平均スラリー濃度 (%)	衝突角 (°)	水量 (L)	砕砂量 (kg)
4, 8, 12, 14	20, 45, 75	25	1-11

る。ただし、水(20℃)の粘性係数を $\mu=1.005 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ として計算した。

### 3.3 砕砂の研磨回数の算定法

砕砂の研磨の評価には、噴流で運ばれた砕砂が衝突板で研磨される回数(研磨回数)を用いた。

砕砂と水による平均スラリー濃度 $c_0$ は、砕砂の質量 $m$ 、水の容積 $W$ とするとき、体積濃度として式(3)で定義できる。

$$c_0 = (m/\rho)/(W+m/\rho) \quad \dots (3)$$

また、砕砂の研磨回数 $n$ は、砕砂の循環時間 $t_L$ とポンプの運転時間 $t_R$ によって、式(4)で表すことができる。

$$n = t_R/t_L \quad \dots (4)$$

ここで、砕砂の循環時間 $t_L$ は、砕砂の単位質量あたりの循環時間 $t_{L0}$ を用いて式(5)で表される。

$$t_L = t_{L0} \cdot m \quad \dots (5)$$

ただし、 $t_{L0}$ は式(6)で定義され、この値を小さくできれば、効率の良い研磨システムになる。

$$t_{L0} = 1/(Q\rho c) \quad \dots (6)$$

ここで、 $Q$ はポンプ流量、 $c$ は実際の流送スラリー濃度とする。ここで、タンク内に濃度分布が生じず、 $c$ と $c_0$ が同値ならば、砕砂の研磨回数 $n$ は式(7)で求めることができる。

$$n = t_R(Q\rho c_0)/m \quad \dots (7)$$

なお、流送スラリー濃度 $c$ は、ノズルから噴射する単位時間あたりのスラリーを別途容器に採取し、このスラリー量と砕砂量から求めた。

### 3.4 砕砂の流動性の評価法

研磨回数毎の砕砂の流動性を評価するため、フローコーン(JISA1109)を用いて、スランプ試験を行った。砕砂とベントナイト泥水(ベントナイト/水比=6.5)は体積割合1:1で混合し、砕砂を泥水で飽和させ、フローコーンに入れたのち型を抜き、崩れた砕砂の山の高さを計測した。フローコーンの高さで崩れた砕砂の高さとの差をスランプ高さとして、流動性に対する抵抗性を評価した。

### 3.5 実験条件

表3に示すように、本実験では、水量を25Lとし、砕砂の量を調整することで、平均想スラリー濃度 $c_0$ を4~14%に設定し、研磨効果に及ぼす濃度の影

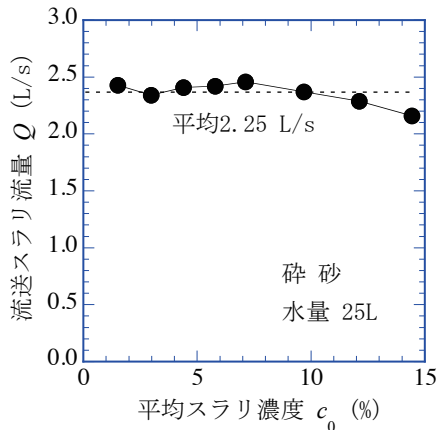


図5 平均スラリー濃度と流量の関係

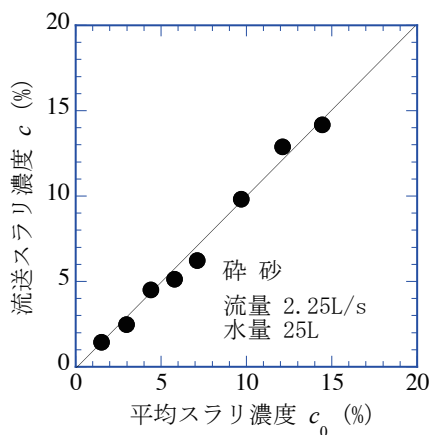


図6 実験装置の流送特性

響を調べた。また、衝突角を3段階に変化させ、角度の影響も調べた。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 実験システムの性能

図5は、理想スラリー濃度を増加させたときのポンプ流量の変化を示している。図より、ポンプ流量は、平均スラリー濃度が約10%程度までは一定値であるが、それ以上の濃度で、多少低下する傾向にあることがわかった。平均スラリー濃度15%までの、ポンプ流量の平均値は2.25L/s(ノズル流速約9.9m/s)であり、ポンプの最大性能の約61%であった。

図6は、スラリー流送実験における平均スラリー濃度  $c_0$  と実際の流送スラリー濃度  $c$  との関係を示している。図より、流送スラリー濃度  $c$  は、ほぼ平均スラリー濃度  $c_0$  と一致している。このことより、タンクの底で沈滞する粒子がほとんどなく、良く攪拌されて、タンク内での濃度ムラが発生していないことがわかった。したがって、本装置による粒子の研磨回数は、式(7)を用いて求めることができる。以降は、スラリー濃度の表現に統一する。

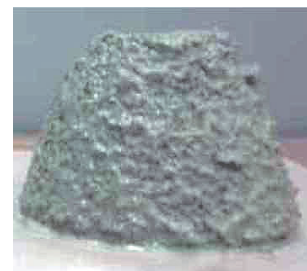
##### 4.2 研磨回数と砕砂のスランプとの関係

##### (1) スランプの形状

写真3(a)~(d)に、スラリー濃度8%、衝突角75°の条件で、研磨回数0~400回まで研磨した砕砂についての、スランプ試験の結果を示す。また、比較の対象として、写真4に天然砂のスランプも示した。

写真より、研磨0回の砕砂は、山型がほとんど崩れないが、研磨回数が増えるにしたがい、山の形が崩れていき、滑らかなドーム型を示すようになることがわかる。とくに、写真3(d)の研磨400回と写真4の天然砂とは、ほぼ同等の流動性を示していることから、本装置の研磨性能は、砕砂の研磨に対して十分と考えられる。

##### (2) スラリー濃度の影響



(a) 研磨 0回



(b) 研磨 100回



(c) 研磨 200回



(d) 研磨 400回

写真3 砕砂の研磨回数とスランプ状態 (8%、75°)



写真4 天然砂のスランプ状態

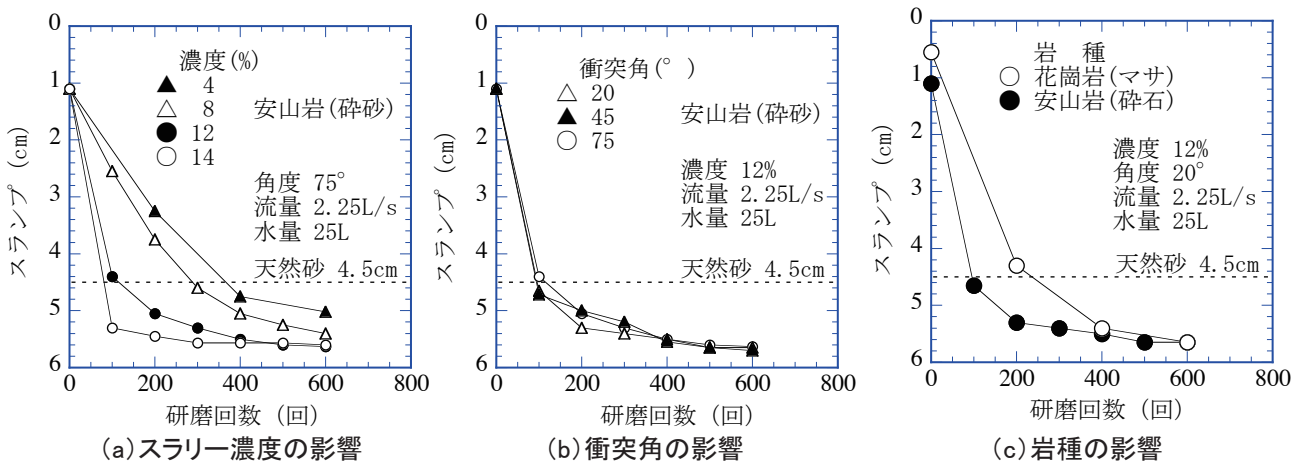


図7 砕砂の研磨回数とスランプ量の関係

図7(a)に、砕砂の研磨回数と砕砂のスランプとの関係に及ぼすスラリー濃度の影響を示す。ただし、衝突角は75°とした。図中には、天然砂のスランプ値を破線で示した。この値が、砕砂研磨の目標値となる。図より、各濃度において、研磨回数が多くなるにしたがい、砕砂のスランプ値は急激に大きくなり、その後、スランプ値が天然砂の値を超えるあたりから、変化が小さくなることがわかる。また、研磨回数に伴うスランプ値の増加傾向は、スラリー濃度が増加するにしたがい、急激になっていることがわかる。すなわち、スラリー濃度の増加にしたがい、砕砂の研磨効率が高くなっていることから、砕砂の研磨は、衝突板との衝突だけでなく、粒子同士の摩擦による研磨作用が大きいことがわかる。ただし、スラリー濃度を高くすると、ポンプ性能が落ちて流量が低下するレベルがあるので、本装置の場合、 $c_0=12\%$ 程度が適切と考えられる。この濃度では、研磨100回程度で、砕砂は天然砂と同等の流動性になる。

(3) 衝突角の影響

図7(b)に、砕砂の研磨回数と砕砂のスランプとの関係に及ぼす衝突角の影響について示す。なお、スラリー濃度は12%とした。図より、衝突角を20~75°まで変化させても、スランプ値にほとんど影響が無いことがわかる。また、微小な変化ではあるが、衝突角20°の場合が、最も研磨効率が良い傾向にある。この原因は、粒子の研磨作用は、衝突板より粒子同士の摩擦の方が効果が大きいためと考えられる。また、粒子は、低い角度で衝突し、衝突板と長く接した方が、研磨効率が良いと考えられる。

(4) 岩種の影響

図7(c)に、砕砂の研磨回数と砕砂のスランプとの関係に及ぼす岩種の影響について示す。実験試料

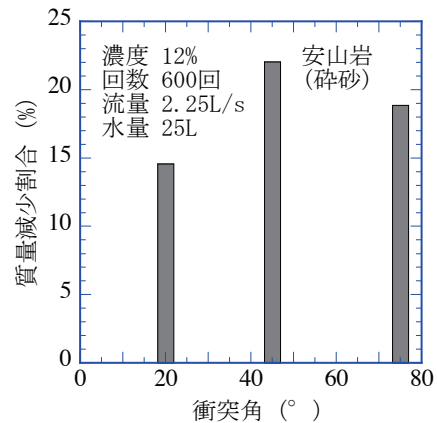


図8 研磨600回後の砕砂の質量減少割合

は安山岩の砕石と花崗岩のマサ土である。図より、両者とも研磨回数400回以上では、同定のスランプ値で一定となるが、安山岩の方が少ない研磨回数でスランプ値が高くなり、研磨効率が良いことがわかる。この原因は、岩種の硬度によると考えられ、花崗岩類の硬度に比較し、安山岩は低いため、研磨し易いと考えられる<sup>4)</sup>。

(5) 研磨による石粉の発生

図8に、研磨600回後における砕石の質量減少割合と衝突角との関係を示した。ただし、質量減少割合は、研磨後に砕砂質量を測定し、その減少量から求めた。また、減少した質量は石粉として排水中に存在していると考えられるため、減少割合は石粉発生量(%)といえる。図より、質量減少割合は15~22%と大きく、砕砂の研磨によって、大量の石粉が発生することがわかる。また、衝突角と減少割合との関係は、ほとんど相関は見られない。この原因は、粒子の研磨作用は、衝突板よりも粒子同士の摩擦が大きいためと考えられる。ただし、ポンプのエンペラーによる研磨効果について

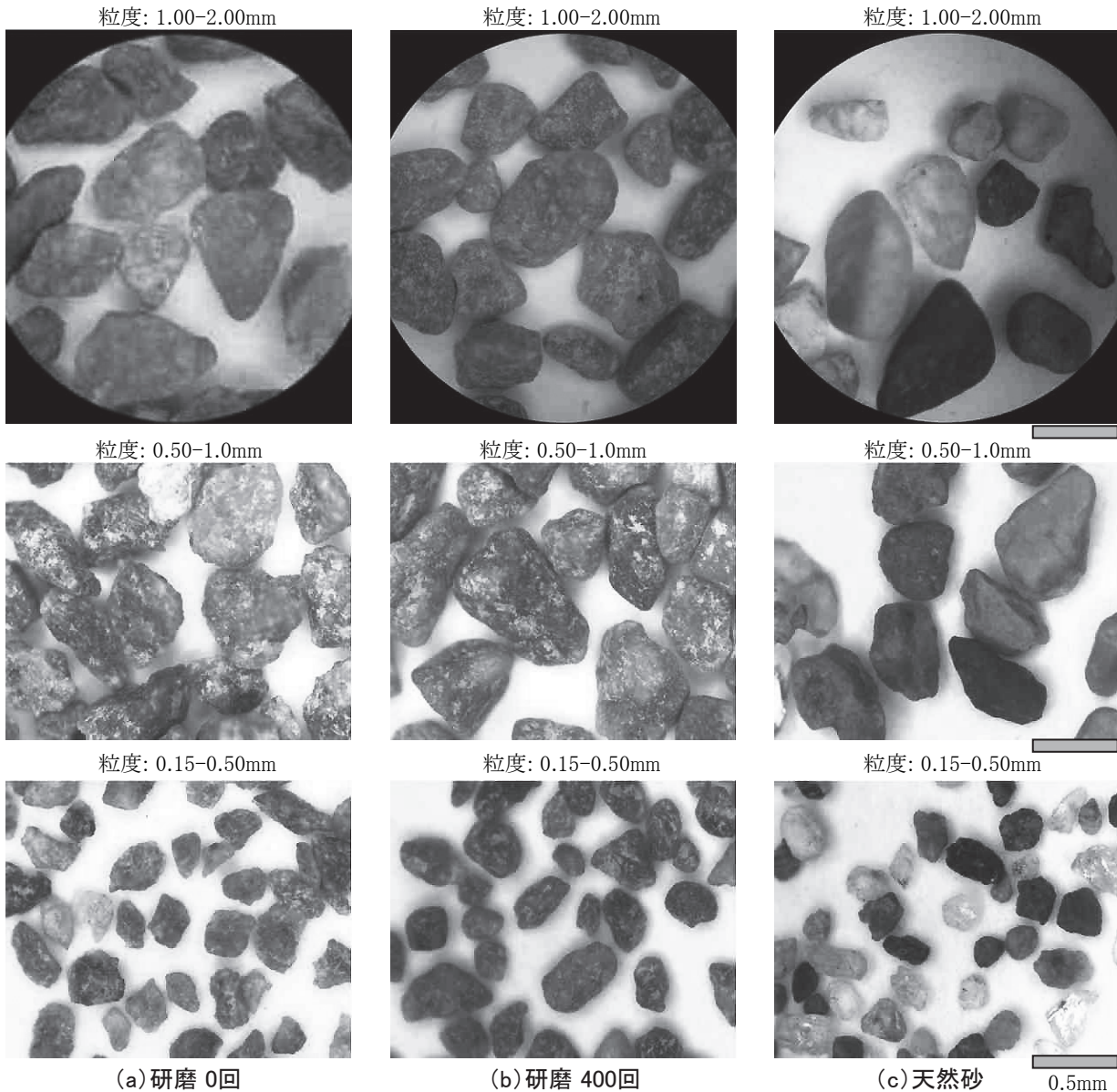


写真5 砕砂の研磨状態 (8%、75°)

は、本研究では考慮していない。また、衝突板によって粒子の破碎はほとんど進まないこと、および研磨によって、粒度分布も余り変化が無いことも確認した。

#### 4.3 研磨回数と砕砂の粒径および摩耗度の変化

写真5(a)~(c)に砕砂および天然砂の研磨状態を示す。写真は、粒度別に示しており、下から順に粒度を小(0.15-0.5mm)、中(0.5-1.0mm)、大(1.0-2.0mm)に分類した。砂は外形の形状より、表面粗さの方が流動性を支配することが分かってきたため、写真観察によって粗さを評価した。大粒子(1.0-2.0mm)では、研磨0回に比較し研磨400回では、多少、丸みを帯びているが、天然砂は極めて研磨が進んでいることがわかる。次に、中粒子(0.5-1.0mm)では、研磨0回に比較し研磨400回と天

然砂は、同程度に研磨されていることがわかる。さらに、小粒子(0.15-0.5mm)では、研磨400回の砕砂が最も研磨されており、天然砂もあまり研磨が進んでいないことがわかる。小粒子では、天然砂でもあまり研磨が進んでいない原因は、自然での河川流の流速も、噴流ほどの流速はあまり期待できないため、あまり研磨が進まないためと考えられる。よって、砕砂を小粒子まで研磨し、流動性を向上させるには、本論で提案した噴流研磨法が有効であることが実証された。

#### 5. おわりに

本研究では、砕砂の研磨についてドラムウォシャー法の問題点を検討し、新たに噴流を利用した研磨法を提案した。また、噴流研磨システムに

よる砕砂の研磨実験をおこない、本法の有効性を検討した。本研究の結果を要約すると、以下のようである。

- (1) 流速9m/s程度の噴流で、粒径0.15mm以上の砕砂が研磨可能である。
- (2) スラリ濃度が高いほど研磨効率は高くなる。
- (3) 研磨高率に及ぼす衝突角の影響は小さい。
- (4) 硬度の高い岩石ほど研磨効率は低い。

2) 石川(2010) : 秋田大学卒業論文、pp. 26-52.

3) 粉体工学会(2006) : 気相中の粒子分散・分級・分離操作、日刊工業新聞社、pp. 57-58.

4) 朽津(2007) : エコーチップ試験による文化財石材の硬さに関する研究、保存科学、No. 46、pp. 145-160.

(2014年12月24日受付 2015年3月2日受理)

#### 引用文献

- 1) 今井ら(2010) : 建設用原材料、Vol. 18、No. 1、pp. 9-16.