

サイクロン式分級機を用いた砕砂の噴流研磨法の実用性

JET FLOW POLISHING METHOD OF CRUSHED SAND BY USING CYCLONE SEPARATOR

今井忠男*・木崎彰久**・小峠貴規***・小溝芳春****・齋藤祐好*****・杉本文男*****
by Tadao IMAI, Akihisa KIZAKI, Takanori KOAKUTSU, Yoshiharu KOMIZO, Yuko SAITO
and Fumio SUGIMOTO

1. はじめに

現在、採取できる陸砂等の天然砂資源は、地域による偏在が大きく、コンクリート用の細骨材として、十分に供給できていない。したがって、多くの地域では、砕砂を天然砂と混合して用いるなど、砕砂の使用は広がりつつある。しかし、天然砂に比較し、砕砂は形状が歪なため、流動性が悪く、コンクリート骨材としての性能が低いことが問題となっている。

著者らは、これまで砕砂の研磨法について研究してきており、従来のドラムウォッシャー式の研磨法では、粒径2mm以下の砕砂を研磨できない等の原理的な問題点を指摘してきた¹⁾。そこで著者らは、砕砂の研磨を噴流によって行う方法を提案し、原理的な装置を用いた基礎実験において、ある程度の成果を上げてきた¹⁾。次の研究段階では、実証的なプラントを用いて研磨性能を評価し、研磨に要するコストなど実現可能性を検討しなければならない。

そこで本研究では、初期コストが多額になる新たな研磨プラントを用いずに、従来は分級機として用いられてきたサイクロンを噴流研磨装置として用いる方法を提案し、その研磨性能を評価した。さらに、この方法の実用可能性について、プラントの電力コストと砕砂の研磨レベルとの関係を検討した。

2. 噴流を用いた砕砂の研磨に関する理論

2.1 衝突板式の研磨システム

著者らが、これまで提案してきた噴流研磨装置の原理を図1に示す¹⁾。本装置では、タンク内の砕砂と水によるスラリをポンプで流送し、タンク内に設置したノズルの先端よりスラリを噴出させ、砕砂粒子を慣性力による衝突板や粒子同士の衝突によって、研磨する方式である。以降、この方式を衝突板

式と云う。このシステムでは、噴流流速を10m/s程度に保つことで、0.1~2mmの砕砂が、100~200回程度循環し、研磨されることで、天然砂に近い流動性が得られることがわかってきた。また、衝突板との衝突角度は、20度程度の緩やかな角度でも研磨効率に影響は無いことが分かっている。

なお、平均的にタンク内の砕砂が1循環する時間を、1回の研磨時間とし、スラリの流送時間から砕砂の研磨回数を算定した。

2.2 サイクロンを用いた研磨システム

上述の研磨装置を、実際のプラントとして新たに研磨装置を開発すると、工場では別途に新規設備が必要となる。そこで、著者等は従来の砕砂製造プラントに用いられているサイクロンに着目し、この分級機を粒子の研磨機として利用することを検討した。

図2に、従来のサイクロンを利用した砕砂の噴流研磨システムを示す。図中のバルブBを閉じ、バルブAとCを開放にすると、本装置は従来の分級機となる。分級機としてのサイクロンでは、分級したい粒子径が沈降し、それ以下の微粒子が浮遊する条件となる流速²⁾で、サイクロン中(チャンバー)へスラリを吹込むと、微粒子を含む泥水はオーバー

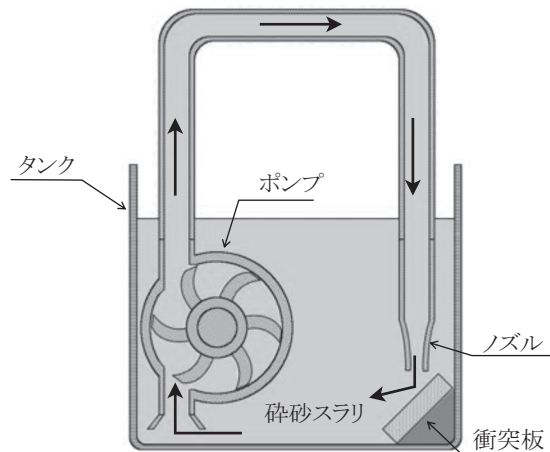


図1 衝突板式の噴流研磨システム

* 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、*** 元秋田大学 学生 工学資源学部、**** ㈱氣工社 技術部長、***** ㈱シンセイ 代表取締役、***** 秋田大学 名誉教授

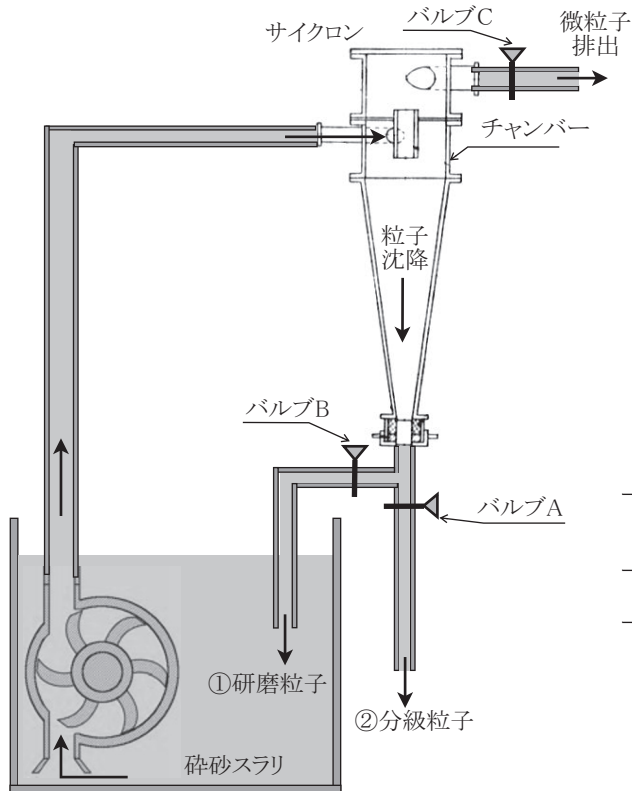


図2 サイクロンを用いた噴流研磨システム

フローして、サイクロン上部より排出され、それ以上の粒径の粒子はサイクロン内を沈降してサイクロン下部から排出される。

次に、図中のバルブAとCを閉じ、バルブBを開放すると、本装置は噴流研磨装置として機能することになる。サイクロンを噴流研磨装置として使用する場合は、吹込み流速を0.1mm程度の碎砂が慣性衝突する速度以上に、ポンプ流量を設定する必要がある。サイクロン内で慣性衝突し研磨された碎砂の粒子は、すべてサイクロン下部から排出されてタンクに戻り、再びサイクロン内に吹き込まれて研磨を繰り返すことができる。

図3にサイクロンへのスラリー吹込み部であるチャンバー（Aタイプ）の断面を示す。ポンプから流送されたスラリーはチャンバー内のフィードの口から噴出され、このフィードの口の断面積とポンプ流量で、噴流速度が決まる。フィードの口からチャンバー内壁へ噴出した碎砂は、粒子同士および内壁面との摩擦で研磨され、サイクロン全体の内壁を回転し研磨されることで、衝突板式の一度の衝突研磨より、効率が上がると予想される。

本研究では、サイクロンを用いた噴流研磨システムの性能を、室内およびプラント実験によって評価し、実用化に向けての検討をおこなった。

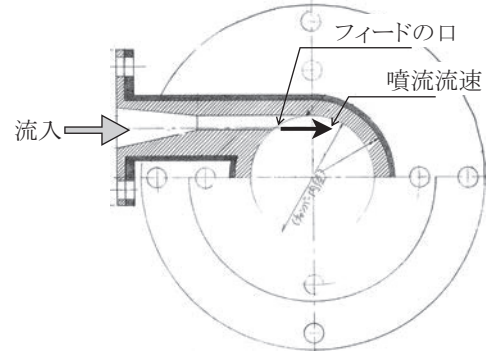


図3 チャンバー（A）の断面図（上面）

表1 碎砂試料の物性値

試料名	粒度 (mm)	密度 (g/cm ³)	岩種	産地
碎砂	2.0~0.075	2.65	硬質砂岩	神奈川県

3. 実験方法

3.1 骨材試料

本実験には、表1に示すような硬質砂岩の碎砂を用いた。この碎砂は、神奈川県の碎砂工場で生産された製品で、それを2mmの篩でふるって使用した。本試料は、硬質砂岩の碎砂であるため、硬く研磨しにくいことが予想された。さらに、変成が進んでいるため、破碎すると扁平になりやすく、コンクリート用骨材として利用する場合、とくに流動性が悪い碎砂と考えられる。

3.2 実験システム

(1) 各サイクロンの構造

図4に、本実験で用いたサイクロンの外観を示す。サイクロンの構造のうち、とくにスラリーが吹込まれるチャンバー部の形状が、噴流の性質を決め、研磨効率に影響を与えると考えられるため、本研究では、タイプの異なる3つのチャンバーを用意した。

図5に、今回の実験で用いたチャンバーAおよびCタイプを示す。Aタイプは、従来の形状（断面図は図3）で、吹込み口は1つである。これに対し、Cタイプは対面する方向に2つの吹込み口をもち、1回の研磨でより効果的に研磨が進むと予想した。

また、Aタイプと同じ構造で、フィードの口の断面積が小さいものをBタイプとした。3つのタイプのチャンバーの仕様を、まとめて表2に示した。

(2) 室内実験装置

図6に室内実験装置を示す。本装置は、配管部をできるだけ省略し、タンク内に直接サイクロン下部を沈め、排出スラリーによってタンク内の攪拌が

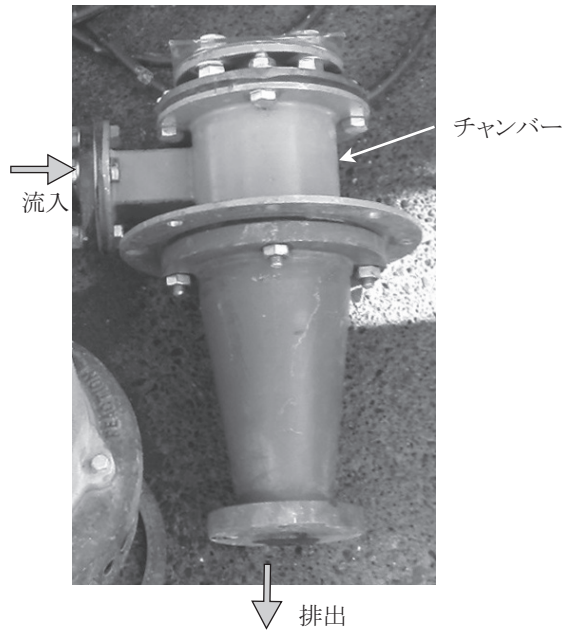


図4 サイクロンの外観

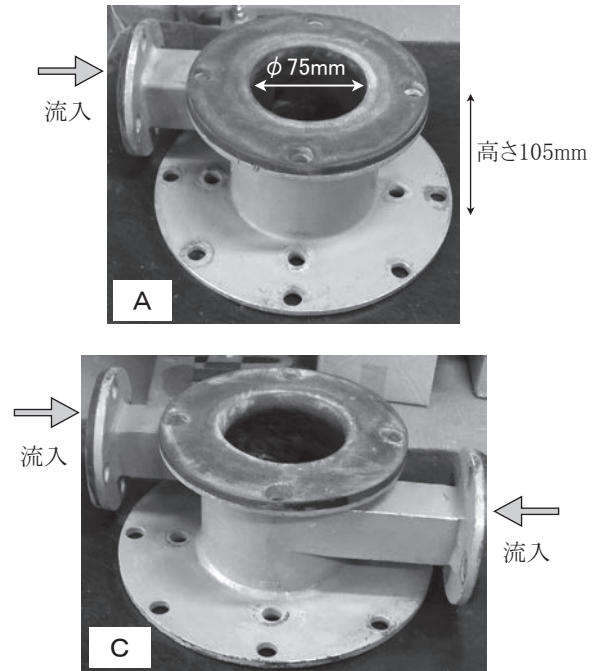


図5 チャンバーの形状

表2 各チャンバーの仕様

チャンバー 名称	フィード開口部	
	口数	幅×高さ (mm)
A	1	9×20
B	1	6×20
C	2	9×15

進みやすいようにし、研磨装置として特化したものとした。流送ポンプには流量200L/minの性能のものを用い、回転数によって任意に流速をコントロールした。本装置では、ポンプの流量が極めて低くなければ攪拌が進み、タンク内のスラリー濃度は理論濃度と一致した。

室内実験の条件を表3に示した。スラリーの体積濃度は、12%になるように水と砕砂を配合し、砕砂は一定の研磨回数ごとに500mL程度採取して、流動性を調べた。本実験では、サイクロンの研磨性能について、少ない試料量でかつ短時間に調べるため、水量の少ないタンク(26.4L)を使用した。なお、1回の研磨時間は、スラリー量(=タンク量/(1-濃度))をポンプ流量で割ると得られる。

(3) サイクロンのミニプラント

図7にサイクロンのミニプラント(TC-3、氣工社製)を示す。通常、本機は分級機のテスト機として使用されているものである。チャンバーはAタイプと同様のものが設置してある。本プラントで

は、スラリーはタンクの下部からポンプへ流れ、ポンプによって4m上部に設置されたサイクロンへ、一定流量で送られる。バルブbは止められているため、サイクロン内で研磨されたスラリーは、排出口から、直接タンク内に戻され、再びポンプへと巡回する。また、タンク内には攪拌羽が設置してあり、スラリーは十分に均質な濃度になっている。表4に、ミニプラントでの実験条件を示す。本機は、タンク容量(150L)に比較し、ポンプ容量(80L/min)が小さいため、砕砂1回分の循環時間が長くなっており、研磨装置としては効率が悪いが、本装置によって、十分な研磨効果が得られれば、ポンプの流送効率の良い大型実機への導入が可能と考えられる。

(4) 砕砂のスランプ試験および顕微鏡観察

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、砕砂のスランプ試験を行った。本法は、砂の流動性を評価するための独自の方法で、試料の粒度分布を一定に調整し、粒子の形状および表面粗さのみが、流動性を支配する条件で行う試験である(詳細は既報¹⁾を参照)。砕砂は決まった粒度分布²⁾に調整したのち、ベントナイト泥水(ベントナイト/水比=6.5)と体積割合1:1で混合し、泥水で飽和させた。砕砂はフローコーンに入れて固めたのちに型を抜き、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。



図6 室内実験装置の外観

表3 室内実験の条件

流量 (L/min)	50~145
流速 (m/s)	4.6~13.6
水量 (L)	26.4
砕砂量 (kg)	11.2
スラリー体積濃度 (%)	12.0
砂サンプリング量 (mL/回)	約500

また、研磨後の粒子は顕微鏡で観察し、表面の粗さや形状について目視で評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 室内実験の結果

(1) 砕砂の研磨効率について

室内実験において、チャンバーAを用いて、流速7.4m/sで研磨したときの、各研磨回数における砕砂（粒径0.5~1.0mm）の形状を図8(a)~(d)に示す。また、図9には天然砂の形状を示した。図8(a)の初期状態では、すべての粒子の表面が粗く、各所が尖っているが、図8(b)の50回および図8(c)の100回研磨状態では、幾つかの粒子表面が、滑らかになりつつあることがわかる。さらに、200回研磨後の図8(d)では、ほとんどの粒子の表面は研磨されて滑らかにな

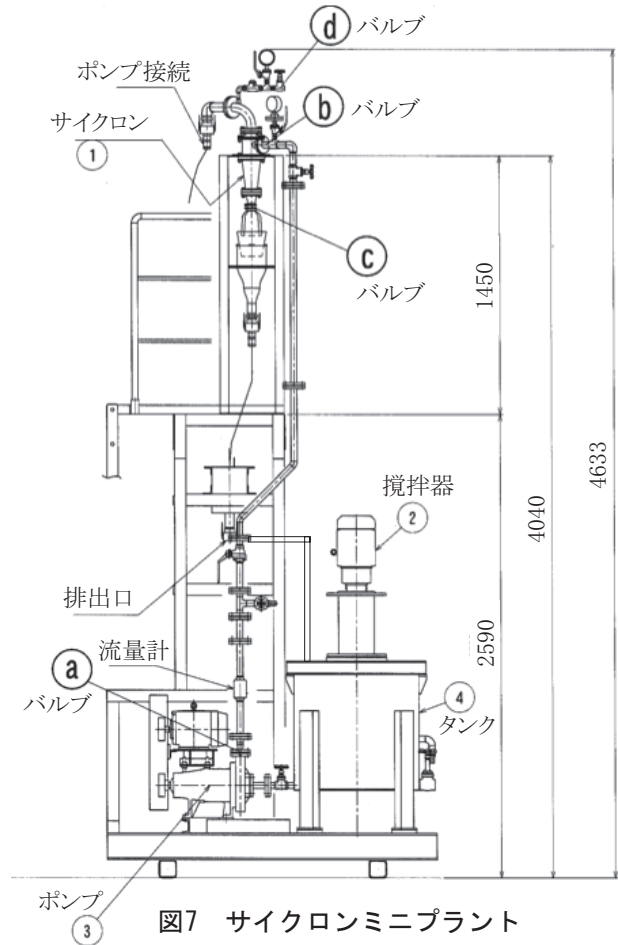


図7 サイクロンミニプラント

表4 ミニプラント実験の条件

流量 (L/min)	80
流速 (m/s)	7.4
水量 (L)	132
砕砂量 (kg)	47.7
スラリー体積濃度 (%)	12.0
砂サンプリング量 (mL/回)	約500

っており、目視では図9の天然砂と比較し、同等の滑らかさに研磨されていることがわかる。

次に、図10(a)~(c)に、砕砂のスランプ値と研磨回数との関係を示す。図中には、目標値となる天然砂のスランプを破線で示した。はじめに、本実験では、研磨によって削られた微粒子が増加し、濁水の濃度が上がり粘性が高くなるため、研磨に与える濁水濃度の影響を調べた。図10(a)は、チャンバーAにおいて、流速7.4m/sで研磨し、研磨回数50回ごとに濁水を交換した場合と、交換せずに研磨を続けた場合とを比較したものである。図よ

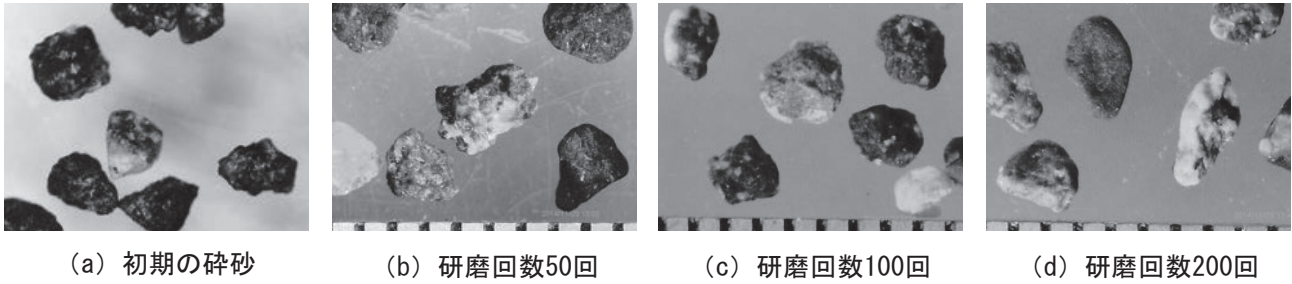
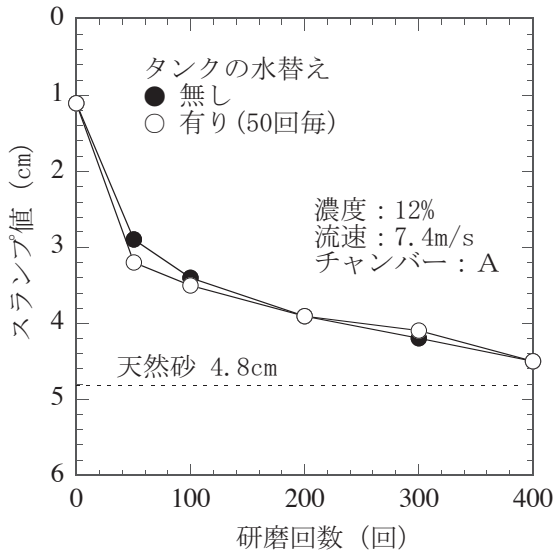
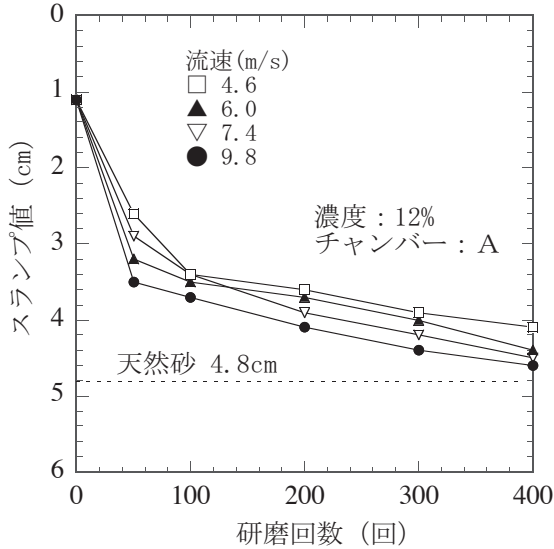


図8 各研磨回数における砕砂の形状
(粒径0.5~1.0mm、流速7.4m/s、チャンバーA)



(a) 濁水濃度の影響



(b) 噴流流速の影響

り、水を交換し濁水濃度を低下させても研磨データに差はないことから、この範囲の濁水濃度では、研磨効率にあまり影響しないことがわかった。次に、チャンバーAを用いて流速を変化させ、その影響を調べた結果を図10(b)に示す。おおよそ、流速が高く

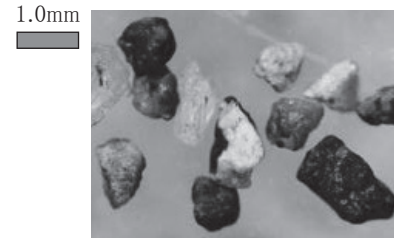
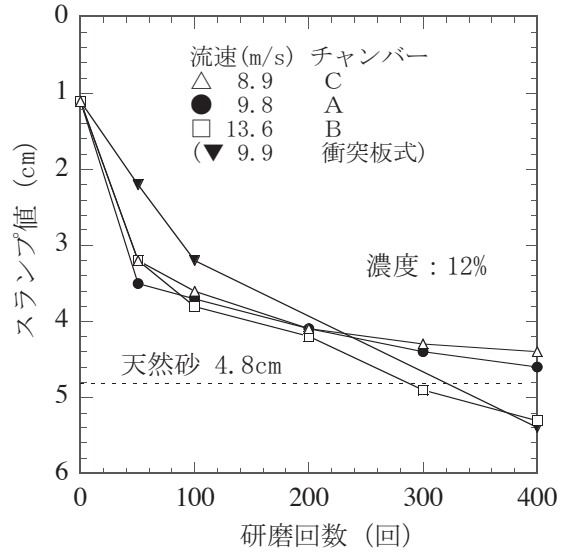


図9 天然砂



(c) チャンバー形状の影響

図10 室内実験におけるスランプ値と研磨回数との関係

なるにしたがいスランプ値が大きくなり、研磨効率が上がっていることがわかる。しかし、流速9.8m/s以内の研磨においては、研磨回数200回以上では、あまり研磨が進まず、スランプ値に改善が少ないことがわかる。

また、図10(c)には、チャンバー形状の影響を示す。なお、図中には比較のため、衝突板式のデータも示した。図より、チャンバー形状の影響は、研磨回数200回までは現れないが、チャンバーBは、200回以降もスランプ値が増加し、300回以降では、天然砂より研磨が進むことがわかった。チャンバーBの流速(13.6m/s)は、他のチャンバーの流速より40~50%以上早いため、チャンバー形状よりも、流速の影響の方が大きいと考えられる。ま

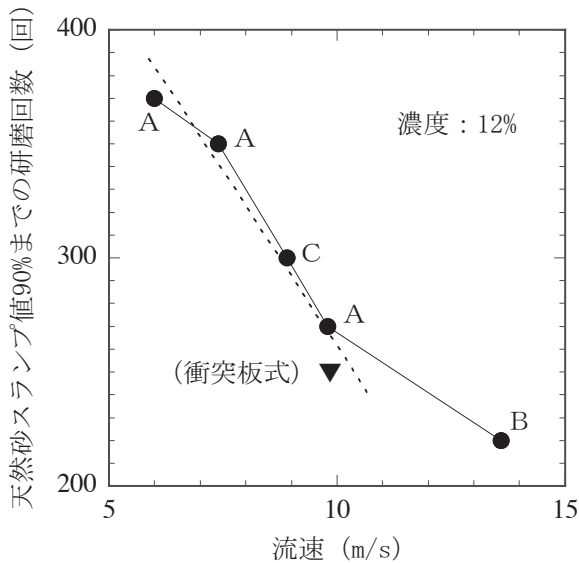


図11 噴流流速と研磨効率との関係

た、200回までのスランプ値は、衝突板式に比較し、各サイクロン式の方（チャンバーA、B、C）が高いことから、サイクロン式の有効性が実証された。

さらに、研磨効率と流速の関係を明確にするため、各チャンバーの実験において、天然砂のスランプ値の90% (4.3cm) に到達するまでの研磨回数を推定し、流速との関係を求めた。その結果を図11に示す。図中には、10m/s以下の流速データを直線で近似し、破線で示した。図より、おおよそ、天然砂の90%到達研磨回数は、流速に比例し低下することがわかる。ただし、10m/s以上では研磨効率があまり上がらなくなる傾向にあることもわかった。なお、流速を上げ過ぎると研磨効率が低下する理由は、今のところ不明である。

なお、どの研磨条件においても、研磨後、試料の粒度分布に大きな変化はなかった。

(2) 排水濃度の変化

図12に、研磨回数50回ごとの濁水濃度と研磨回数との関係を示す。図より、研磨回数150回以上では、流速の影響はほとんど見られないが、研磨回数150回以下では、流速が高いほど濁水濃度が高くなっていることがわかる。この傾向は、流速が高いと、粒子は研磨初期に激しく研磨され、その後はあまり研磨されないことを示していると考えられる。以上のような濁水濃度の変化は、研磨状態（スランプ値）の変化と対応しており、研磨効率を考慮すると、本法の研磨回数は150～200回程度が適切と思われる。

次に、濁水濃度から、研磨回数毎の排水中の石粉量を計算し、全砕砂との割合を石粉排出割合と

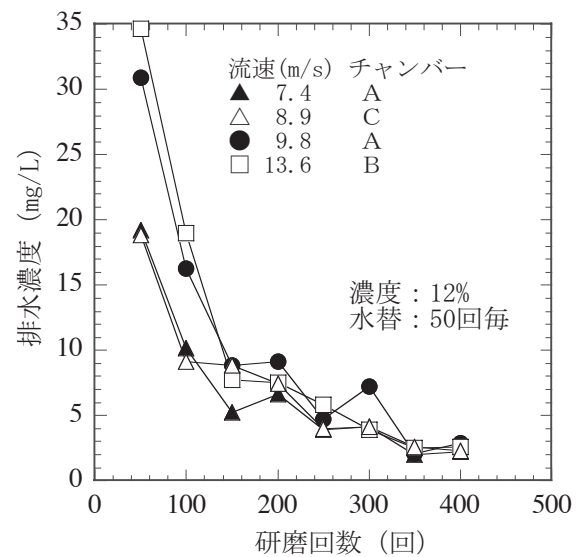


図12 研磨50回毎の排水濃度の変化

表5 砕砂の噴流研磨における石粉の排出割合

研磨回数 (回)	研磨レベル (天然砂比, %)	石粉の排出割合 (%)
100	75	3.5
400	90	8.1

して計算した結果を表5に示す。実験条件はチャンバーA、流速7.4m/sの場合である。また、表中の研磨レベルとは、天然砂のスランプ値との比を示している。表より研磨回数100回程度なら、石粉の排出割合は3.5%程度に押さえられることから、石粉の処理コストが大きくなり過ぎることは無いと考えられる。

4.2 ミニプラント実験の結果

図13に、ミニプラント実験における砕砂のスランプ値と研磨回数との関係を示す。図より、ミニプラントのデータは、同じチャンバーAで同流速7.4m/sの室内実験結果より、スランプ値が少し高くなる傾向にあるが、概ね同等の研磨効率を示していると思われる。このミニプラント実験においては、ポンプの噛み込み音が大きかったため、粒子が欠け、流動性が落ちたとも推定できる。図14に、研磨回数200回後の砕砂(粒径0.5～1.0mm)の顕微鏡写真を示す。図14(A)は同条件における室内実験の結果であり、図14(B)はミニプラントの結果である。図より、両者の粒子は、ほぼ同等に丸みを帯びて滑らかに研磨されており、天然砂(図9)と比較しても同等の滑らかさであることから、サイクロンのミニプラントにおいても、噴流研磨の有効性が実証された。

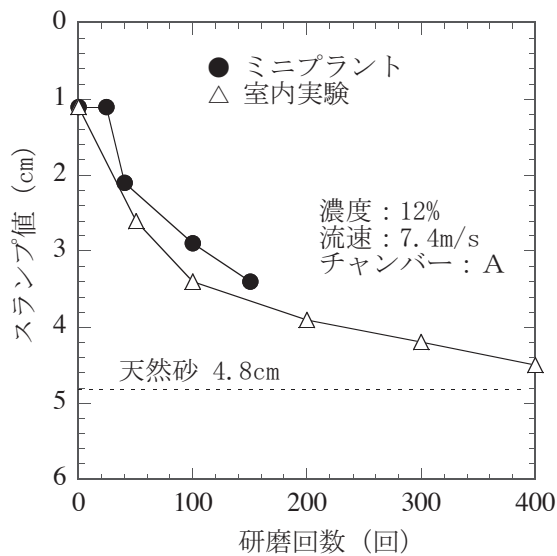


図13 ミニプラント実験における砕砂のスラップ値と研磨回数との関係

最後に、大型のサイクロンプラント（TC-20、氣工社製）を用いて、砕砂の噴流研磨を実施した場合の、研磨コストを電気料金のみとして試算した。表6に試算に用いたパラメータを示す。電気料金の単価は、東京電力の料金表³⁾を参考にした。ポンプ流量を5.0m³/minの定格で使用するなら、体積濃度12%の砕砂スラリーを用いて、1tonの砕砂（0.38m³）を流送するには、スラリー量にして3.2m³、その流送時間は0.63min（0.011h）程度であり、45kWのポンプの電気料金に換算して約7.6円である。これは、1tonの砕砂を1回研磨するためのコスト単価である。

以上の試算から、本試料のような石英粒子（風化花崗岩）と同程度の研磨特性（未公開データ）を示す硬質な岩石であっても、電気料金のコストアップについては、砕砂1tonあたりの研磨コストを250円（研磨回数33回）程度かけることができるなら、天然砂の流動性の50%に、砕砂を研磨できることがわかった。

5. おわりに

本研究では、従来、砕砂製造過程で発生する微粉の分級機として用いられてきたサイクロンを、噴流研磨機にも応用できることを実証し、その実用性について検証した。その結果、次のことが明らかとなった。

- 1) 砕砂は、研磨回数150回まで、効率的に研磨され、それ以上はあまり研磨は進まない。
- 2) サイクロン内へ吹出すスラリーの流速に比例して、研磨効率は向上する。

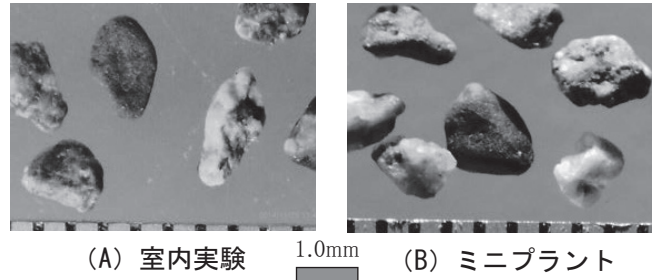


図14 研磨回数200回後の砕砂
（粒径0.5～1.0mm、流速7.4m/s、チャンバーA）

表6 大型プラント（TC-20）による研磨コストの試算

ポンプ流量 (m ³ /min)	5.0
ポンプ消費電力 (kW)	45
スラリー体積濃度 (%)	12
砕砂密度 (g/cm ³)	2.6
電力料金 (円/kWh)	16
研磨コスト (円/ton/回)	7.6

- 3) 砕砂を天然砂の流動性の75%程度まで研磨しても、排出される石粉は全砕砂に対して3.5%程度である。
- 4) サイクロンのミニプラントを用いた実験でも、室内実験と同程度の研磨の成果が得られた。
- 5) 大型プラントを用いた場合の、研磨コストの試算では、砕砂1tonを1回研磨する電気料金は7.6円程度である。

引用文献

- 1) 今井忠男, 木崎彰久, 杉本文男 (2015) : 噴流を利用した砕砂の研磨法, 建設用原材料, vol. 30, pp. 6-12.
- 2) 粉体工学会編(2006) : 気相中の粒子分散・分級・分離操作, pp. 57-58, pp. 142-143.
- 3) 東京電力ホームページ (2016) : 高圧・特別高圧の電気料金メニュー, <http://www.tepco.co.jp/e-rates/corporate/charge/index-j.html>

(2016年1月15日受付 2016年4月1日受理)