

# 廃石粉をフィルタに 利用した水の急速砂濾過法の検討

今井 忠 男<sup>※)</sup> 網田 和 宏<sup>※※)</sup>  
藤村 恭 平<sup>※※※)</sup> 杉本 文 男<sup>※※※※)</sup>

## 1. はじめに

現在、上下水道の水処理には、主に砂濾過システムが用いられている。この砂濾過システムには、緩速濾過法と急速濾過法の2種類がある。緩速濾過法は、砂の表面上に生成する生物濾過膜によって水を浄化するシステムであるが、濾過速度を4~5m/日(約0.005cm/s)以下にする必要があり、大量の濾過には不向きである。これに対し、急速濾過法は、砂粒子間での物理吸着によって濾過するシステムであり、濾過速度を120~150m/日(約0.15cm/s)に増加でき、大量の水の濾過が可能である。しかし、濾過速度を大きくするためには、粒子径を0.5~1mm程度に大きくしなければならず、微小な粒子が除去できない。このため、濾過前の原水に凝集剤を加え、微細な粒子を沈殿槽で凝集させて、粒子径を大きくする必要がある<sup>1)</sup>。しかし、この方法では、沈殿槽など大規模な施設を必要とし、メンテナンス等の費用も大きい。従来の急速濾過法に対し、現在では、濾過過程で目詰まりを起こしやすいとされた微粒子(0.1mm以下)を濾材として用い、凝集工程を用いない簡易な急速細砂濾過法が提案されている<sup>2) 3)</sup>。

本研究では、急速細砂濾過法の濾過材として、碎石場から排出される廃石粉の脱水ケーキに注目し、濾過材としての廃石粉の性能について、室内実験によって評価することを目的とした。具体的には、濾過性能と濾過材の粒度分布との関係を明らかにし、濾過材として有効な廃石粉の粒度分布を提案する。また、濾過後の水質の変化に関し、岩種の影響を明らかとし、有効な濾過材となる

廃石粉について検討した。

## 2. 研究理論

### 2.1 濾材の基本性能

砂濾過システムにおいて、濾材に求められる性能には、①濁質物質の除去率が良いこと、②濁質物質を多量に除去出来ること、③濾過水の生産性が良いこと、④濾過水の水質に変化が少ないこと等があげられる。これら4つの性能は、表1に示すように濾材の濾過係数、均等係数、透水係数および濾過水の特定イオン濃度等、4つのパラメータを測定することで、評価することが可能である。

したがって、廃石粉を用いた濾材に関し、これら4つのパラメータを測定し、提案されている細砂濾過法の濾材との値を比較することで、廃石粉による濾材の可能性を評価することができる。

### 2.2 濁質物質の除去率

図1に、濾過システムのモデル図を示す。図のような濾過器の中に、厚さLの濾過層があり、濁質濃度 $c_0$ (mg/L)の原水がこれを透過し、濾過された水(濾過水)の濁質濃度が、 $c$ (mg/L)となった場合を考える。このとき、濾過層Lにおける濁質物質の捕集効率 $\eta$ は次式で表

表1 濾材の基本性能

性 能	評価パラメータ
濁質物質の除去率	濾過係数 (cm <sup>1</sup> )
濁質物質の除去量	粒子の均等係数 (-)
濾過水の生産率	透水係数 (cm/s)
濾過水の水質	特定イオン濃度 (mg/L)

※) 正会員 秋田大学 大学院 工学資源学研究所・准教授 研究企画委員

※※) 秋田大学 大学院 工学資源学研究所・助教

※※※) 秋田大学 大学院 工学資源学研究所・院生

※※※※) 秋田大学 大学院 工学資源学研究所・教授

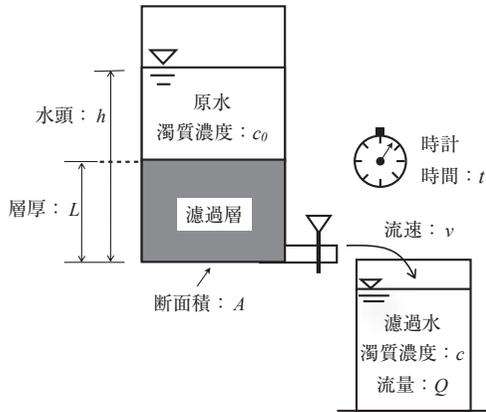


図1 濾過システムのモデル図

される。

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} \quad (1)$$

また、厚み $L$ を考慮した濾材粒子そのものの濾過性能は、次式の濾過係数 $\lambda$  ( $\text{cm}^{-1}$ )によって表すことができる。

$$\lambda = \frac{1}{L} \ln \frac{c_0}{c} \quad (2)$$

ただし、濁質濃度 $c$ および $c_0$ を測定するには、数多くの手間が必要なため、一般には、濁質濃度の評価には、濁度が用いられている。濁度とは、水の濁りを光の透過率あるいは散乱率によって評価したもので、懸濁物質の濃度だけでなく、粒子の径 $D$ や色等にも影響を受ける値である。ここで、濁度 $T_b$ と濁質濃度 $c$ とは次式の関係にある。

$$c = kD^m T_b \quad (3)$$

ただし、 $k$ および $m$ は濁質粒子の光学特性によって決まる数値である。

実験では、鉍物および粒径が同じ濁質物質を用いることで、 $k$ および $m$ を一定とし、濁質濃度 $c$ の変化を濁度 $T_b$ で評価した。さらに、濁度 $T_b$ を用いて捕集効率 $\eta$ および濾過係数 $\lambda$ を算定した。

### 2.3 濁質物質の除去量

濁質物質が濾過層内の空隙に蓄積されることで、空隙は閉塞され、濾過層の透水性は徐々に低下する。そのため、濾過材は一定時期に交換する必要がある。このことから、空隙率が小さい濾材は、濁質物質をあまり除去しないうちに、透水性が低下してしまうため、濾材としての性能は低いと考えられる。濾材の空隙率を評価する方法として、一般には、粒度の均等係数 $U_c$ が用いられている。均等係数とは、次式に示すように、粒度分布において、累積通過質量の割合が60%になる粒径 $D_{60}$ と10%になる粒径 $D_{10}$ との比で定義される。

$$U_c = D_{60} / D_{10} \quad (4)$$

従来の実験結果より、この均等係数 $U_c$ が、1に近づくほど、空隙率が高くなることが知られている<sup>4)</sup>。

### 2.4 濾過水の生産率

濾過水の生産速度は、ダルシーの式によると、透水係数と水圧勾配によって決まるが、水圧を大きくするには、過大な加圧システムが必要となる。水圧を小さく抑えるためには、濾材の透水係数ある程度大きくする必要がある。ここで、図1のように、濾材の透水係数 $K$  ( $\text{cm/s}$ )は、濾過層の厚さ $L$  ( $\text{cm}$ )、水頭 $h$  ( $\text{cm}$ )および濾過層の流速 $v$  ( $\text{cm/s}$ )によって、次式によって測定することができる。

$$K = v \frac{L}{h} \quad (5)$$

また、水圧を $P$  ( $\text{Pa}$ ,  $\text{N/m}^2$ )とし、水の密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 、重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ とすると、 $K$ は以下の式となる。

$$K = \frac{98vL}{P} \quad (6)$$

ここで、粒状物質の透水係数 $K$ は、累積質量割合が20%となる粒径 $D_{20}$ と良い相関があることが知られている<sup>5)</sup>。

### 2.5 濾過水の水質変化

濾材によって濾過された水は、濾材の溶出あるいはイオン交換によって、水質が変化する可能性がある。基本

的には、原水と濾過水とは、水質の変化が無い方が良く、有害なイオンを溶出する石粉は、濾材には不適切である。よって、濾材の適性として、濾過水の水質変化が小さいことが重要と考えられる。

### 3. 実験方法

#### 3.1 濾材および支持材

本実験で用いた濾過層の構成を図2に示す。図のように、濾過層は、濾材が濾過水とともに流出しないよう、粒径の大きい粒子で下部の層（支持層）と上部層で濾材を挟む構造となっている。ここで、上部および支持層の材料は、化学的に安定な珪砂を用いた。とくに、下部の支持層は、濾材が流出しないように、粒度の異なる3つの珪砂を用いて、支持層①～③を作製した。ここで、上部層および支持層の厚さは、図2のとおりである。また、濾材層の厚さ $L$ は、1.0～4.0cmに調整した。

表2に、濾材に用いた3種類の岩種の石粉(A)～

(C)について、それぞれの物性値を示す。ただし、石粉(A)と(B)は採石場から採取した廃石粉であり、石粉(C)は市販の石灰石製品(石灰石)である。以降では、これら試料は廃石粉も単に石粉と呼ぶこととする。また、図3に比重計法(JISA1204)によって求めた、各石粉の粒度分布を示す。平均粒径は、石粉(A)と(B)が0.18および0.13mmと同程度で、石粉(C)はその半分程度の0.068mmと小さい。しかし、これら粒度分布から、透水性の大きさは、 $D_{20}$ 値より、石粉(B)が最も低く、(C)および(A)の順になっていると予想される。また、石粉(C)の粒度分布の幅は小さいため、均等係数は1.11と小さいが、他の2つは、粒度分布の幅が大きく均等係数が大きい。通常、急速濾過に用いられる砂の均等係数は1.7以下であることから、石粉(A)と(B)は、目詰まりし易いことが予想されるが、空隙率は、3つの石粉試料とも、約45～47%の範囲であり、大きな差は無い。

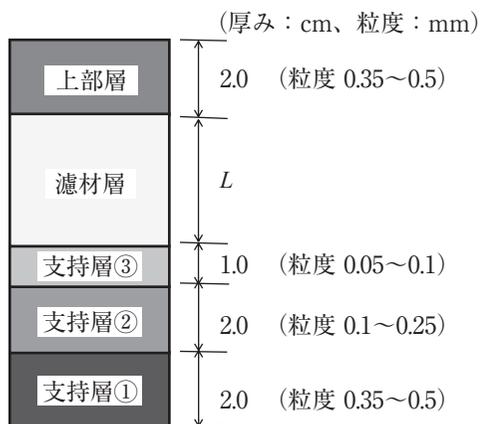


図2 濾過層の構成図

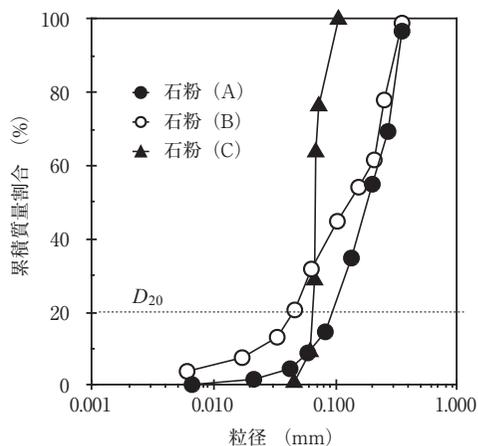


図3 各石粉の粒度分布

表2 濾材に用いた石粉の物性

濾材	岩種	産出地	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	空隙率 (%)	平均粒径 (mm)	均等係数
石粉(A)	凝灰岩	秋田県	2.63	45.5	0.180	3.75
石粉(B)	輝石安山岩	秋田県	2.50	46.8	0.130	8.00
石粉(C)	石灰石	岩手県	2.70	44.8	0.068	1.11

### 3.2 濾過実験システム

#### (1) 実験システム

濾過実験システムの概略を図4に示す。本実験システムは、濾過層を構成するステンレス製の圧力容器（耐圧20MPa）と原水を供給する水圧ポンプ（最大29.5MPa）および圧力を一定に保つステンレス製のアキュムレーター（耐圧20MPa）から構成されている。圧力容器内の原水の圧力は、水圧ポンプに付属した圧力ゲージ（0～0.5MPa）およびアキュムレーター近くに設置した圧力センサ（0～1MPa）によって測定した。圧力容器は、本体と上部の蓋とからなっており、容器内部の容積は約2320mL（φ100×295mm）である。

濾過層を浸透し濾過された濾過水は、メスシリンダーで回収し、ストップウォッチによって、一定流量ごとに時間を測定した。回収した濾過水は、散乱光方式の濁度計（HANNA製、HI98703型）を用いて、濁度（単位NTU）を計測した。本濁度計は、測定レンジを切り替えることで、0～1000NTUまで測定でき、その精度は±2%である。

#### (2) 実験手法

濾過層（図2）は、圧力容器内に支持層①の珪砂から上部層の珪砂まで順に、それぞれ分量にしたがって敷き詰めた後、容器内をイオン交換水で満たした。

次に、所定の濁度に調整した濁水（原水）を水圧ポンプにセットし、原水を圧力容器およびアキュムレーターに送りながら、容器内の空気を十分抜いた後、所定の圧力を一定に作用させた。圧力容器から排出された濾過水は、流速を測定したのち、一定流量ごとに濁度を測定した。実験は、濾過水の濁度が一定になるまで行なった。

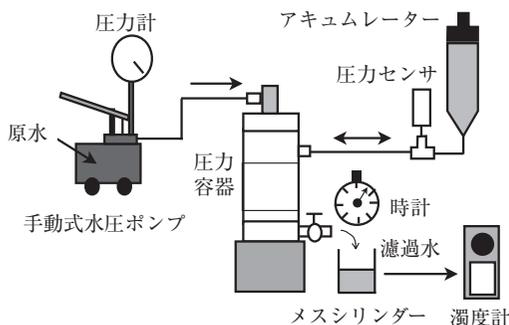


図4 濾過実験システムの概略図

なお、本実験の濾過速度は、緩速濾過法（0.005cm/s）以上で、急速濾過法（0.15cm/s）までの値になるよう、圧力を調整した。

#### 3.3 標準濁液の作製法

本実験では、濁度5～200NTU（精度±2.5%）の標準濁液を作製した。濁質物質にはカオリンを用い、濁度基準（カオリン濃度1mg/Lで濁度1）となるよう、十分に乳鉢で磨り潰したものをを用いた。メスフラスコに所定の濁度の原水を次の手順で作製した。所定量のカオリンを適量のイオン交換水に溶解し、微量の分散剤を添加した後、超音波を照射して十分に濁質物質を分散させた。この濁液を所定の濁度となるようイオン交換水で希釈し、濁度計で濃度を確認した。

#### 3.4 水質測定

濾材とした石粉中の成分が、濾過水の水質に及ぼす影響を検証するため、濾過水の水質測定をおこなった。水質の測定では、カオリンを添加しないイオン交換水（測定対象イオン濃度0mg/L）を原水として濾過実験をおこない、濾過水のイオン濃度を測定した。したがって、濾過水中に含まれるイオンは、すべて濾過過程で溶出したものである。

水質測定には、イオンクロマトグラフを用いた絶対検量法を用い、濾過水中のイオン濃度（mg/L）を測定した。測定対象としたイオンは、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ の計8種類である。

## 4. 実験結果

#### 4.1 支持層の濾過性能

石粉層の濾過性能と比較するため、石粉層を用いず、支持層③②①のみで濾過実験を行なった。その濾過性能を表3にまとめて示す。この結果は、後述する石粉に比較し、支持層の透水性能は高く、濾過性能は低いことから、石粉の濾過性能への影響は小さいと考えられる。

また、本実験において、濁度が0のイオン交換水を原水として用いた場合、濾過水の濁度は、0.4NTUに増加

表3 全支持層の濾材性能

透水係数 (cm/s)	濾過係数 (cm <sup>-1</sup> )	捕集効率 (%)
$4.9 \times 10^{-4}$	0.155	54.5

した。このことから、本実験装置および支持層からは、多少の濁質物質が排出されており、本装置の濾過限界値は、0.4NTUであることが確認された。

#### 4.2 石粉の透水係数

各石粉 (A) (B) (C) の透水係数を調べるため、層厚を2.0cmとしたときの、圧力と流速との関係を図5に示す。図より、各石粉の透水性は同程度であり、圧力と流速の関係における、それぞれの近似直線の勾配の差は小さいことがわかる。この勾配から、式 (6) を用いて各石粉の透水係数を求めた。この結果を表4に示す。各石粉の透水係数は、 $2.3 \pm 0.5 \times 10^{-5}$  cm/sの範囲にあり、D20値の違いは小さいことが分かる。なお、支持層の透水係数は石粉層に比較し十分大きいことから、影響はほとんど無い。

なお、石粉 (A) と石粉 (B) は、流速の上昇に伴って濾過水の濁度が増加する傾向が見られた。この原因は、均等係数が高く、微粒分が多いため、少量の微粒分が支持層を透過するためと考えられる。よって、石粉の微粒分は除去し、均等係数を小さくした方が良いと思われる。

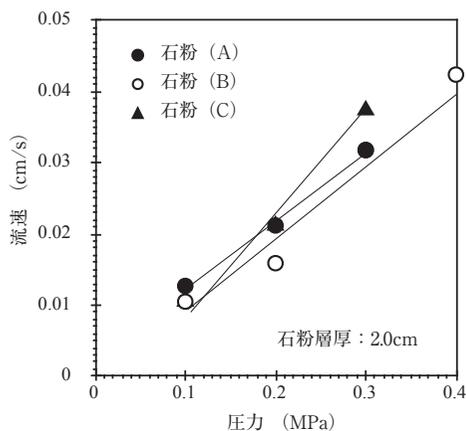


図5 石粉層の流速と圧力との関係

表4 各石粉の透水係数

濾材	透水係数 (cm/s)
石粉 (A)	$1.86 \times 10^{-5}$
石粉 (B)	$2.27 \times 10^{-5}$
石粉 (C)	$2.63 \times 10^{-5}$

#### 4.3 石粉の濾過性能

##### (1) 層厚の効果

次に、石粉 (A) を用い、石粉層の層厚と濾過性能との関係を調べた。図6に、層厚を1.0~4.0cmに変化させたときの、濾過水量と濁度との関係を示す。ここで、原水の濁度は200NTUとし、流速が約0.015cm/s程度となるよう、各層厚ごとに圧力を0.1~0.2MPaの範囲で調整した。図より、層厚に関わらず、濾過水量の増加にしたがって濾過水の濁度は低下し、1000mL以降は0.5~1.5NTUの範囲で一定となることがわかった。なお、濾過水量の増加にしたがい、濾過水の濁度が低下する原因は、濾過の始めには、石粉の微細粒子が支持層内へ移動し、透過してしまうためと考えられる。その後、ある程度の石粉が支持層へ移動し、支持層内の空隙の一部を塞ぎ、空隙径を小さくするため、石粉は透過し難くなり、濾過水の濁度は徐々に低下し、一定になると考えられる。

表5に、石粉層の厚さごとの濾過性能をまとめた。捕集効率は99.3~99.5%でほぼ変化なく、本装置の濾過限

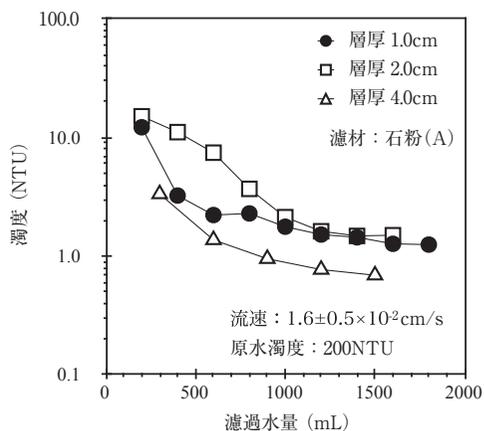


図6 層厚ごとの濾過水の濁度と流量との関係 (石粉 (A))

表5 層厚と濾過性能 (石粉 (A))

層厚 (cm)	原水濁度 (NTU)	濾過水濁度 (NTU)	濾過係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )	捕集効率 (%)
1.0	200	1.25	$> 5.12$	99.4
2.0	200	1.50	$> 2.48$	99.3
4.0	200	0.69	$> 1.32$	99.5

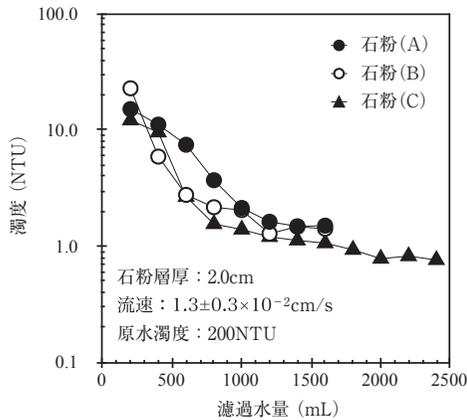


図7 石粉ごと濾過水の濁度と流量との関係

表6 石粉ごとの濾過性能

試料名	原水濁度 (NTU)	濾過水濁度 (NTU)	濾過係数 (cm <sup>-1</sup> )	捕集効率 (%)
石粉(A)	200	1.50	> 2.48	99.3
石粉(B)	200	1.41	> 2.48	99.3
石粉(C)	200	0.76	> 2.76	99.6

界値を考慮すると、捕集効率は、層厚に関わらずほぼ100%と考えられる。濾過係数は、層厚が大きいほど低下する結果となっているが、捕集効率に差が無いためである。したがって、本濾材の濾過係数は、最大5.12cm<sup>-1</sup>程度と考えられる。

以上のことから、石粉(A)を濾材とした場合、1cm程度の濾過層で十分に濾過が可能であることがわかった。

#### (2) 石粉の粒度の影響

濾過実験において、石粉(A)(B)(C)を濾材としてそれぞれ用いた場合の、濾過水量と濾過水濁度との関係を図7に示す。ここで、石粉層の厚さは2.0cmとし、

原水の濁度は200NTUとした。また、流速が0.015cm/s程度となるよう、圧力を0.1MPaに調整した。図より、3つの石粉は同じ傾向を示し、図6と同様に、濾過水量の増加とともに濾過水の濁度は低下し、水量1000mL程度で濁度は1~1.5NTUの範囲で一定となることがわかる。

この実験結果から求めた石粉ごとの濾過性能を表6に示す。表より、石粉(A)(B)(C)は、その粒度に多少の違いがあるが、濾過水の最終濁度は0.7~1.5NTUの範囲にあり、捕集効率はほぼ99.5%程度となった。このことから、石粉は、岩質(鉱物種)に関わらず、濾過性能は十分に高いことがわかった。

#### 4.4 濾過による水質の変化

化学的に変化しやすいと思われる凝灰岩と石灰岩の石粉(A)および(C)を用いて、イオン交換水を濾過したときの濾過水のイオン濃度を表7に示す。なお、安山岩の石粉(B)は未測定である。表には、水道水のイオン濃度も参考に示した。表より、両者の石粉とも濾過水のイオン濃度は、すべてのイオンに関し多少増加しているが、水道水と比較して、その濃度は低く、石粉は水質をほとんど変化させないということがわかった。

また、各イオン中でも、Ca<sup>2+</sup>は多少増加しており、とくに、石粉(C)の石灰石で最も多い結果となった。このことから、石粉の濾材では、酸性の原水を多少中性化することも可能と思われる。

#### 4.5 実用化された濾材との性能比較

表8に、村上ら<sup>6)</sup>が用いた細砂急速濾過法の濾材性能について示した。表より、本実験で用いた石粉は、村上らの濾材に比較し、微粒分が多く平均粒径が小さいため、透水係数が1/100程度小さいことから、濾過効率が低いことがわかる。しかし、濾過係数が極めて高いため、濾材層の厚みを薄くできることから、濾過の圧力を100倍

表7 濾過水中の溶解イオン濃度

試料名	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	(mg/L)							
水道水	16.1	0.19	1.33	2.81	9.48	23.0	2.12	17.5
石粉(A)	2.1	0.37	0.46	0.40	2.21	1.7	0.36	1.0
石粉(C)	1.1	0.46	0.55	0.55	3.7	1.5	0.32	1.0

表8 細砂急速濾過法の実用濾材<sup>5)</sup>

平均粒径(mm)	透水係数(cm/s)	均等係数	濾過係数(cm <sup>1</sup> )
0.125	4.1×10 <sup>-3</sup>	1.3	0.173

も大きくする必要がなく、10倍程度で良いと考えられる。よって、石粉フィルタでは、濾材の使用量が少なく済むため、濾材の廃棄コストが少なくできる可能性がある。また、微粒分を除去し、D<sub>20</sub>値を大きくすることで、透水係数を大きくすることも必要である。これらは今後の検討課題である。

## 5. おわりに

本研究では、細砂急速濾過法の濾材として、砕石工場の廃石粉の利用可能性について、濾過実験を行なって検討した。

その結果、本実験で用いた3種類の石粉に関し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本報告で使用した廃石粉の平均径は、0.15±0.03mm程度で、均等係数は3～8と大きく、不均質であった。
- (2) 石粉試料の透水係数は、粒度および均等係数に関わらず、2.3±0.5×10<sup>-5</sup>cm/sの範囲である。
- (3) 石粉試料の濾過係数は、粒度および均等係数の影響は小さく、2.48cm<sup>-1</sup>以上であった。
- (4) 石粉試料から濾過水へ溶出するイオン濃度は低く、濾過による水質変化は小さい。
- (5) 廃石粉をそのまま用いても、細砂急速濾過法の濾過材とすることが可能であるが、より透水性の改善が必要である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、本学元学生の岡田英樹君には、献身的に実験を行っていただいた。また、本研究は、日本砕石協会の平成23年度研究助成金によって行われた。ここに記して、感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 杉本泰治 (1992) : 濾過メカニズムと濾材・濾過助剤、地人書館、pp.107-115、pp.236-238.
- 2) 高津忠、唯野英輝、今井淳、吉田弘明 (2007) : コンクリート廃棄物の粒度特性と空隙率、土木学会年次学術講演会、pp.602-603.
- 3) 熊谷渉、村上光正、来山哲二、上村一武、高濱利行 (2005) : 高圧力式細砂濾過法の開発、全国水道研究発表会講演集、第56巻、pp.162-163.
- 4) 熊谷渉、村上光正、来山哲二、上村一武 (2006) : 高圧力式細砂濾過法の実用化実験、全国水道研究発表会講演集、第57巻、pp.176-177.
- 5) 土質工学会編 (1982) : 土質工学ハンドブック、p.70.
- 6) 村上光正、来山哲二、高濱美栄 (2004) : 高圧力式細砂ろ過装置およびその方法、特許 (識別番号) 593066368.