

# 土工事における濁水処理に関する研究 (第17報)

——サイクロンによる砂の除去に関する研究(その2)——

喜田大三 炭田光輝  
辻博和

## Studies on Muddy Water Treatment in Earthwork (Part 17)

——Sand Separation from Slurry Using Hydrocyclones (Part 2)——

Daizo Kita Mitsuteru Sumida  
Hirokazu Tsuji

### Abstract

In a slurry excavation system, it is very important to separate excavated soil and slurry. Hydrocyclones have been widely used for this purpose, and establishment of a reasonable design and operating method is desired. In the first paper were described plant tests carried out to investigate mainly the effects of the sizes of the various parts of the hydrocyclones on sand separation performance. This paper gives the results of the work, the effect of particle-size distribution of ground and extensive properties of slurry in sand separation performances of hydrocyclones. The relations with regard to treated volumes, motive power requirements, flow ratios, classification performances and concentrations of underflow slurries are discussed.

### 概 要

泥水を循環させて地盤を掘削する泥水工法では、砂分の分離除去にサイクロンが広く使用されており、その合理的な設計・運転方法の確立が望まれる。前報では、地盤条件が単一で、限られた泥水性状の範囲での、主にサイクロン各部の寸法が砂の除去特性に及ぼす影響について明らかにした。本報告は、掘削地盤の粒度および広範な泥水性状の影響を明らかにするために、砂の粒度構成が違う場合、また著しく劣化した泥水でのプラント実験を行なった結果で、処理量、所要動力、流量比、分級性能、アンダーフロー土砂の濃度に及ぼす影響について報告している。

### 1. まえがき

泥水を循環させて地盤を掘削する泥水工法では、掘削土砂の分離は非常に重要で、砂分の分離除去にはサイクロンが広く使用されている。これはサイクロンが占有床面積当りの処理能力が大きく設備費が安価であるなど非常に優れた利点を有するためである。

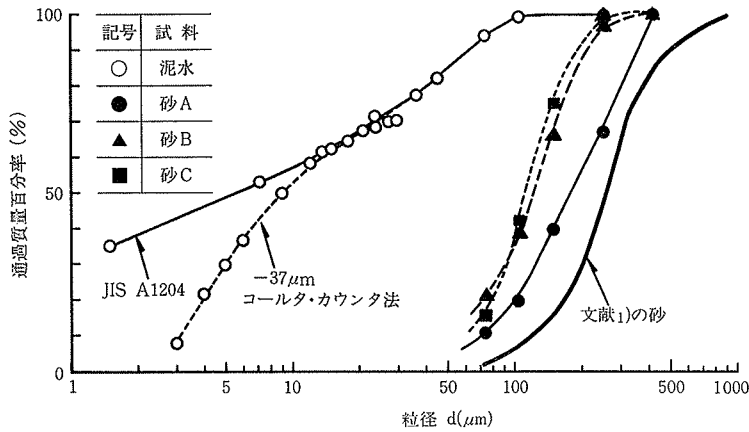
さて、サイクロンの土砂除去効率に及ぼす主な要因は、サイクロン径、フィード口径、アンダーフローノズル径、オーバーフローファインダー径および円錐頂角の設計変数と流入圧力および泥水性状の操業変数であり、これらの要因のうち現場で効率よく利用するに際して特にサイクロン径、アンダーフローノズル径、オーバーフロー

ファインダー径、流入圧力、泥水性状の影響を明らかにする必要がある。そこで、前報<sup>1)</sup>では、地盤条件が単一で、泥水の劣化の程度の比較的狭い範囲での、主にサイクロン各部の寸法の砂の除去特性に及ぼす影響について明らかにした。しかし、現場では各種地盤に遭遇し、また劣化の著しい泥水も対象とする。

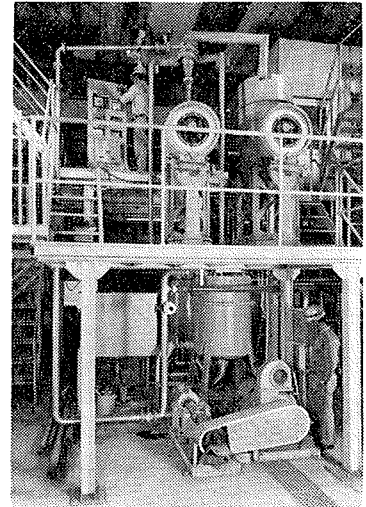
そこで、本報告では、掘削地盤の粒度および泥水の劣化の程度が処理量、流量比、分級性能、アンダーフロー土砂の濃度の土砂除去特性および所要動力に及ぼす影響について報告する。

### 2. 実 験

#### 2.1. 試料



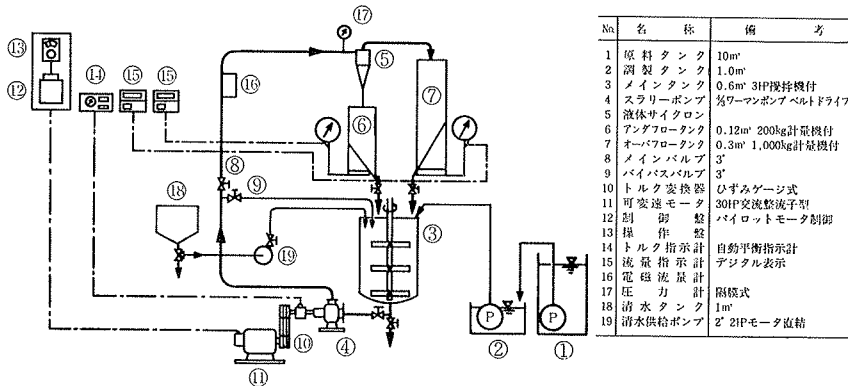
図一 泥水・砂の粒度分布



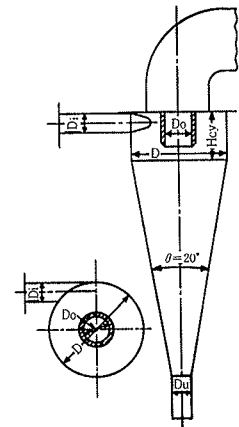
写真一 実験プラントの全景

項目	泥水種					
	泥水	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E
ファンネル粘度(sec)	23.7	23.4 ~ 24.2			32.0	40.0
降伏値 (dyn/cm <sup>2</sup> )	0.10	0.05 ~ 0.11			50	80
塑性粘度 (cp)	12.2	9.9 ~ 12.3			344	437

表一 泥水の性状



図二 実験プラントの系統図



名称と記号	寸法 (mm)
円筒部内径	D
円筒部高さ Hcy	(D/2)
流入口内径 Di	(D/5)
オーバーフローファインダー内径 Do	(√2·D/5)
アンダーフローノズル内径 Du	(D/5)
	(D/5·√2)
	(D/5·√2)

図三 供試サイクロン

泥水は都内の粘土地盤の泥水シールド現場で発生した余剰泥水にベントナイト、水を加えて比重1.10に調製したものを使用した。また、地盤を想定して A, B, C の3種の珪砂を使用した。これら泥水、砂の粒度分布を図一に示す。なお、同図には前報で使用した砂も併記している。

実験は、泥水に A, B, C の砂を添加した Sample A, Sample B, Sample C と泥水に消石灰を添加し、泥水を劣化させたものに砂 B を添加した Sample D, Sample E の5種類の泥水で行なった。これら Sample の性状を表一に示す。なお、砂は前報同様泥水 1m<sup>3</sup> 当り 100 kg 添加した。

## 2.2. 装置・方法

写真一、図二に示す前報<sup>1)</sup>と同じ装置を使用して、同様の方法で実験した。なお、サイクロンは図三に示す円筒部内径 160 mm のものを使用し、流入圧力は 1.0 ~ 3.0 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲で実験した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1. 処理量

処理量  $Q_{vf}$  は添加した砂の粒度が違う場合、また劣化した泥水のいずれの Sample においても流入圧力  $P_i$  を上げると増大し、近似的に  $Q_{vf} \propto P_i^{0.5}$  の関係が認められた。しかし、開口比  $D_u/D_0$  は  $Q_{vf}$  にほとんど影響を及

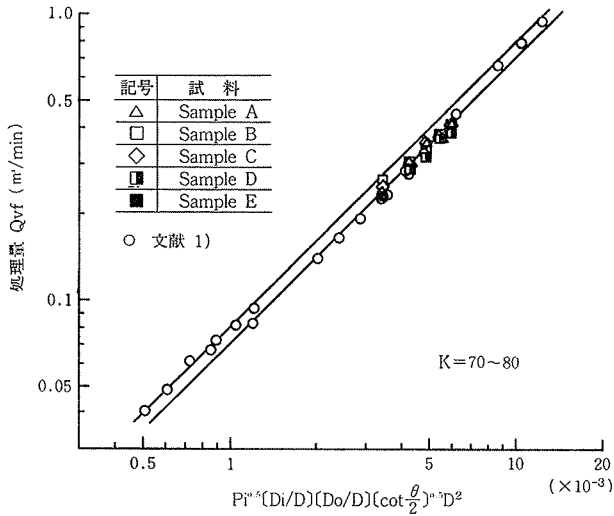


図-4 処理流量線図

ばさない。

上述の結果は前報<sup>1)</sup>で報告した傾向と同じであった。そこで、流量式を前報と同様に(1)式とおくと結果は図-4に示す通りとなる。図から明らかなように、泥水工法で使用する泥水における流量式を(1)式とおけば、定数Kの値は70~80を採用すればよいものと考えられる。

$$Q_{vf} = K \cdot P_1^{0.5} [D_i/D] [D_0/D] \left[ \cot \frac{\theta}{2} \right]^{0.5} \cdot D^2 \dots\dots(1)$$

ここに、 $Q_{vf}$  [m³/min],  $P_1$  [kgf/cm²],  $D_i$ ,  $D_0$ ,  $D$  [m],  $\theta$  [°]とする。

### 3.2. 所要電力

サイクロン内へ泥水を圧入し、処理するのに必要な所要動力(水動力)  $L_w$  について検討する。 $L_w$  は流入速度  $V_i$  を増大させると大きくなり、おおむね  $L_w \propto V_i^3$  の関係が認められた。しかし、開口比  $D_u/D_0$  の影響はほとんど認められなかった。

上述の結果は前報においても同様であった。前報では軸動力について述べているが  $L_w$  で整理すると、サイクロン径  $D$  の影響はおおむね  $L_w \propto D^2$ , また口径比  $D_0/D$  の影響は  $D_0/D$  が大きい方が  $L_w$  は小さい値を示した。

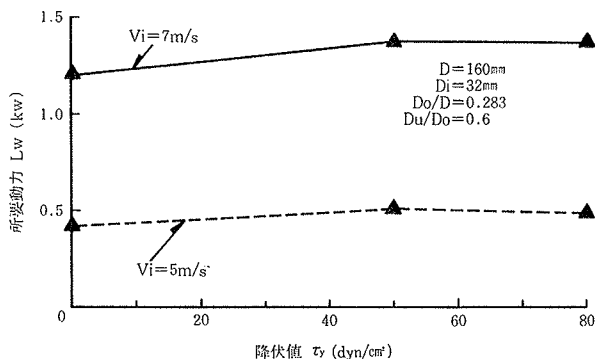


図-5 降伏値と所要動力

さて、図示しないが、添加した砂の粒度の違いによって  $L_w$  の差は認められなかった。

図-5は降伏値  $\tau_y$  の影響を示すものである。図示するように、 $\tau_y$  の大きい劣化した泥水では正常な泥水に比べて  $L_w$  は大きくなるが、例えば  $V_i=7$  m/s ( $P_1 \approx 2$  kgf/cm²) では  $\tau_y \approx 0$  dyn/cm² のとき 1.20 kw に対して  $\tau_y=50$  dyn/cm² のとき 1.37 kw となり 14%大きくなるものの  $\tau_y=50$  dyn/cm² と  $\tau_y=80$  dyn/cm² の泥水による差は認められず、著しく劣化した泥水においてもさほど  $L_w$  は大きくならない。

### 3.3. 流量比

流量比  $R_f$  は前報同様フィード流量に対するアンダーフロー側への流量の体積比を百分率で表示する。 $R_f$  は流入速度  $V_i$  を増大させると減少する傾向にあり、開口比  $D_u/D_0$  が 0.5~0.6 の範囲では  $V_i=5\sim 6$  m/s 以上で

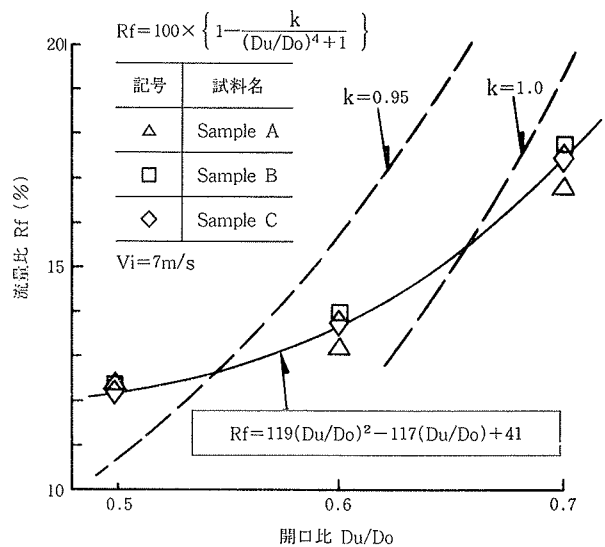


図-6 流量比線図

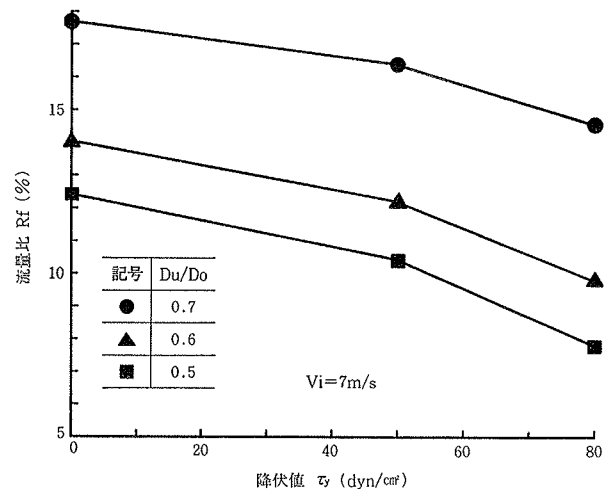


図-7 降伏値と流量比

ほぼ一定値となる。 $R_f$  は  $V_i$  が 5~6 m/s 以上のとき、同一泥水では  $D_u/D_0$  条件によって値がほぼ決まる。

図-6 は粒度の違う 3 種類の砂を添加した時の  $D_u/D_0$  条件と  $R_f$  の関係を示すものである。図示するように、 $R_f$  は添加した砂の粒度によってほとんど影響されない。吉岡ら<sup>2)</sup> は希薄なスラリーにおいて、

$$R_f = 100 \times \left\{ 1 - \frac{0.95}{(D_u/D_0)^4 + 1} \right\}$$

の結果を得ているが、図-6 に併記するように、泥水工法で使用する正常な泥水の場合(2)式の 2 次式で近似できる。

$$R_f = 119(D_u/D_0)^2 - 117(D_u/D_0) + 41 \dots\dots(2)$$

図-7 は降伏値  $\tau_y$  の影響を示すものである。図から明らかなように、 $\tau_y$  の大きい劣化した泥水では  $R_f$  は小さくなり、おおむね  $\tau_y$  20 dyn/cm<sup>2</sup> 当り 1% 小さくなる。

### 3.4. 分級性能

分離粒径  $d_T$  および補正分離粒径  $d_T'$  と添加した砂の 50% 粒径  $D_{50}$  との関係を図-8 に示す。なお、 $d_T$  とはフィードスラリー中に含まれているある粒径  $d$  の粒子のアンダーフロー中に出る割合を重量百分率で表示したとき、50% の値を示す粒子径をいい、 $d_T'$  とは流量比零の場合に補正した補正曲線の 50% 粒径をいう。さて、図示するように、 $d_T$ 、 $d_T'$  は  $D_{50}$  が約 180  $\mu\text{m}$  以上では  $D_{50}$  の影響を受けずほぼ一定値であるのだが、 $D_{50}$  が約 180  $\mu\text{m}$  以下になると大きくなる。この事象は掘削地盤の 50% 粒径が約 180  $\mu\text{m}$  以下の細砂地盤では  $d_T$ 、 $d_T'$  が大きくなり、砂分の分離がしづらくなることを示唆する。

図-9 は降伏値  $\tau_y$  の影響を示すものである。図から明らかなように、 $\tau_y$  が大きくなると  $d_T$ 、 $d_T'$  は大きくなる。したがって、泥水が劣化すると砂分の分離除去がしづらくなる。

図-10 に修正トロンプ曲線を示す。修正トロンプ曲線とは、補正分離粒径  $d_T'$  に対するある粒径の比とその粒径の粒子のアンダーフローに捕集される割合(補正回収率)  $R$ (%) との関係を示すもので、希薄なスラリーの場合、条件によらずほぼ

$$R = 100 \times \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{d}{d_T'} - 0.115 \right)^3 \right\} \right]$$

で近似できるとされている<sup>2),3)</sup>。泥水工法で使用する泥水の場合、図から明らかなように、分級精度が悪いため、その曲線からずれるものの、図-10の斜線の範囲内にある。そして、その曲線は添加した砂の粒度による影響には明確な差は認められなかった。しかし、劣化した泥水では分級精度が悪くなる傾向を示す。

なお、図-10から明らかなように、泥水工法で使用する

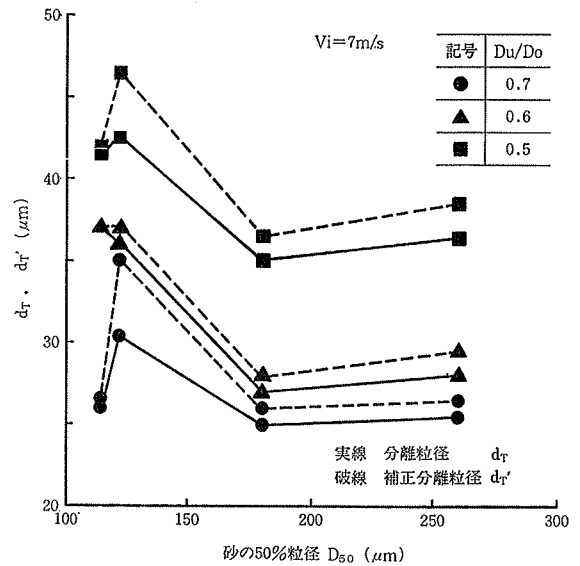


図-8 砂の粒度と分離粒径

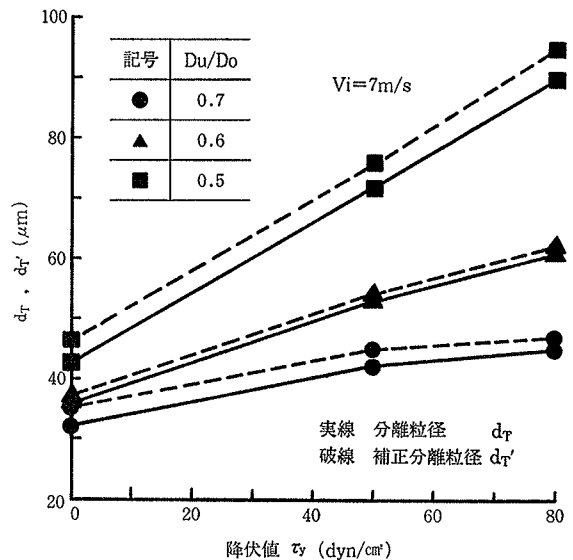


図-9 降伏値と分離粒径

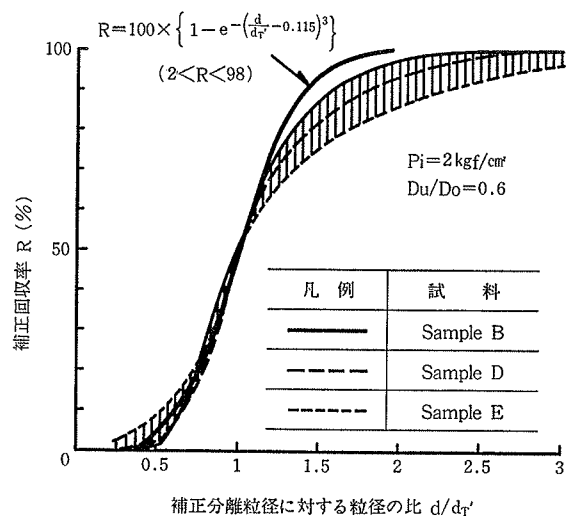


図-10 修正トロンプ曲線

る泥水の場合、補正分離粒径  $d_{r'}$  の約3倍以上の粒径の粒子はほとんどすべてアンダーフローに捕集される。

### 3.5. アンダーフロー土砂の濃度

アンダーフロー土砂の濃度  $\delta_u$  は流入速度  $V_i$  を増大させると高くなる。この場合、正常な泥水で開口比  $D_u/D_0$  条件が 0.5~0.6 の範囲では  $V_i$  が約 6 m/s 以上でほぼ一定値となる。なお、 $D_u/D_0$  条件が 0.7 あるいは泥水の降伏値  $\tau_y$  が約 50 dyn/cm<sup>2</sup> 以上の劣化した泥水では、今回の実験範囲内の  $V_i$  (約 8.5 m/s) において  $V_i$  とともに  $\delta_u$  は高くなった。

図-11は添加した砂の50%粒径  $D_{50}$  と  $\delta_u$  の関係を示すものである。図示するように、 $D_{50}$  が大きいほど  $\delta_u$  は大きくなる傾向にあり、 $D_u/D_0$  が 0.5~0.6、 $V_i \approx 6$  m/s ( $P_1 \approx 1.5$  kgf/cm<sup>2</sup>) 以上の条件のとき砂質地盤の掘削では  $\delta_u$  は 65~75%になるものと考えられる。

図-12は泥水性状の影響を示すものである。図から明らかなように、 $D_u/D_0$  条件が 0.5~0.6 の範囲では泥水の劣化による影響はほとんどない。しかし、 $D_u/D_0$  が 0.7 の条件では泥水が著しく劣化すると  $\delta_u$  は低くなる。なお、現場では  $D_u/D_0$  条件はほとんどの場合 0.5~0.6 の範囲で運転しているので、 $\tau_y$  による  $\delta_u$  への影響はな

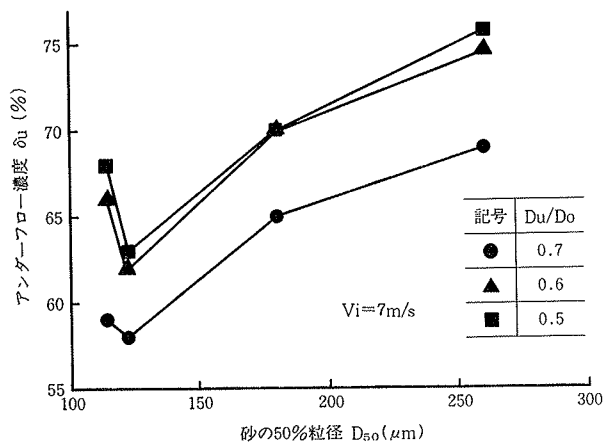


図-11 砂の粒度とアンダーフロー土砂の濃度

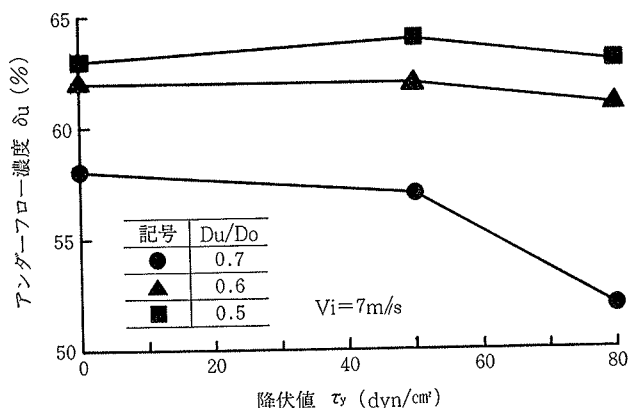


図-12 降伏値とアンダーフロー土砂の濃度

いものと考えられる。

## 4. まとめ

サイクロンによる土砂除去特性に及ぼす掘削地盤の粒度および泥水性状の影響を明らかにするために、砂の粒度構成が違う場合、また著しく劣化した泥水でのプラント実験を行なった。その結果以下のことが判明した。

(1) 処理量は砂の粒度、泥水性状のいかんをとわず(1)式とおける。

(2) 所要動力は砂の粒度が変わっても差は認められない。一方、降伏値が 50 dyn/cm<sup>2</sup> の劣化した泥水では  $V_i = 7$  m/s のとき14%大きくなるものの、80 dyn/cm<sup>2</sup> に著しく劣化した泥水においてもそれ以上大きくならない。

(3) 流量比は砂の粒度によって影響は受けないが、泥水の降伏値が大きくなると小さくなり、おおむね 20 dyn/cm<sup>2</sup> 当り 1% 小さくなる。

(4) 分離粒径は添加した砂の50%粒径  $D_{50}$  が約 180  $\mu\text{m}$  以上の場合には  $D_{50}$  の影響を受けずほぼ一定であるが、約 180  $\mu\text{m}$  以下の場合には  $D_{50}$  が小さくなると大きくなる。また、泥水の降伏値が大きくなるとほぼ直線的に大きくなり、分離しづらくなる。なお、泥水の降伏値が大きくなると分級精度も悪くなる。

(5) アンダーフロー土砂の濃度は  $D_{50}$  とともに高くなる。しかし、泥水性状にはほとんど影響されない。

## 5. あとがき

前報および本報のプラント実験によって、泥水工法におけるサイクロンの土砂除去特性のおおよそが明らかになった。今後は、これらの結果を踏まえて土砂分離装置全体のシステムについて検討する予定である。

おわりに、本研究は通産省工業技術院公害資源研究所の設備を使用して、同所の技術指導を受けて行なった。指導していただいた資源第3部第4課 田中忠次主任研究官、茂呂端生課長また同課の皆様は深く謝意を表します。

## 参考文献

- 喜田, 炭田, 辻, 田中, 茂呂: 土工事における濁水処理に関する研究 (第16報), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 112~117
- 吉岡, 堀田: 液体サイクロンの分級性能, 化学工学, Vol. 19, No. 12, (1955), pp. 18~27
- 吉岡: 続新化学工学講座12「液体サイクロン」, 日刊工業新聞社, (1962)