

# 土工事における濁水処理に関する研究 (第20報)

——泥水中の砂粒子の沈降特性と沈砂槽の砂除去率——

辻 博 和 喜 田 大 三  
炭 田 光 輝

## Studies on Muddy Water Treatment in Earthwork (Part 20)

——Settling Properties of Sand Particles in Slurry  
and Removal Rate of Sand in Settling Tank——

Hirokazu Tsuji Daizo Kita  
Mitsuteru Sumida

### Abstract

It is important to remove excavated soils from circulating slurry in the slurry excavation method. A settling tank as well as a screen and a cyclone are used for their removal. The studies here were thus conducted to investigate the settling properties of sand particles in the slurry and the removal rate of the sand in a settling tank. The results may be summarized as follows: (1) The settling velocity of the sand is mainly affected by the flowage property of the slurry. For the control item of the flowage property, apparent viscosity at low shear rate is more suitable than funnel viscosity which is commonly measured. (2) In order to remove most of the sand of settling velocity more than  $W_s$ , a settling tank must be equipped under the condition that the ratio of the settling velocity  $\bar{W}$ , to overflow rate of the tank  $Q/A$  is equal to 1.5 to 3.0.

### 概 要

泥水を循環して掘削する各種の泥水掘削工法では、掘削土砂を分離する処理が重要である。土砂分離、スライム処理には、スクリーン・サイクロンなどに加えて沈砂槽が使用されている。そこで、泥水中における砂粒子の沈降特性について室内試験を、沈砂槽の除砂状況について現場調査を行ない、下記の事項が判明した。

(1) 砂粒子の沈降速度は泥水の流動特性に大きく影響される。土砂分離に際し、流動特性の管理項目としては従来採用されているファンネル粘度より低ズリ速度におけるみかけ粘度が望ましい。B型粘度計を使用する場合には $1.4\text{sec}^{-1}$ 程度(6rpm程度)のズリ速度が適している。(2) 沈砂槽で所定の沈降速度 $W_t$ 以上の砂分をほぼ完全に除去するには、現場条件にもよるが、沈砂槽の水面積負荷( $Q/A$ )として、 $W_t/(Q/A)$ の値が1.5~3を満足するように、設定する必要がある。

#### 1. はじめに

ハイドロフリーズ掘削機による地中連続壁工法・リバーサーキュレーション工法・泥水シールド工法などのように、泥水を循環して掘削する工法では、地上において泥水から掘削土砂を分離する処理が重要である。

この土砂分離には、スクリーン・サイクロン・沈砂槽などが使用される。先報では、サイクロンによる土砂分離特性を実大試験装置で調査し、サイクロンの処理能力・分級能力を把握するとともに、使用する際のサイクロン

の各種操作項目の最適条件を明らかにした。また、続報では、スクリュードカンターの土砂分離装置としての特性を明らかにしてその使用方法を提案している。

ところで、沈砂槽で土砂分離を行なう場合、泥水中における砂粒子の沈降特性を充分把握しておく必要がある。また、地中連続壁工法などで、コンクリート打設前に孔底に堆積するスライムに対する処理を行なう際にもこの点は重要である。

そこで、この報告では、室内試験によって砂粒子の沈降特性を明らかにし、土砂分離に適した泥水性状特に泥

水の流動特性の管理方法を提案する。さらに、地中連続壁工事における沈砂槽の除砂状況を現場調査し、砂粒子の沈降速度などを用いて沈砂槽の除砂効率に関する既存の各種推定式の適用性を検討する。

## 2. 泥水中における砂粒子の沈降速度

### 2.1. 単一粒子の自由沈降理論

無限静止流体中を重力の作用のみによって沈降する1個の微細な球形粒子について、粒子に働く抗力として浮力・ストークスの粘性抵抗力およびビンガム流体の降伏応力を考え、粒子が微小でレイノズル数が1.0以下とすると、粒子の沈降速度は次式のように表わしうる。

$$W_t = 3600 \left\{ \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu} - \frac{D\tau}{12\mu} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

- ここに  $W_t$ : 粒子の沈降速度 [m/h]
- $D$ : 粒子の直径 [mm]
- $\rho_s$ : 粒子の密度 [t/m<sup>3</sup>]
- $\rho$ : 流体の密度 [t/m<sup>3</sup>]
- $\mu$ : 流体の粘度 [mPa·s]
- $\tau$ : 流体の降伏応力 [Pa]
- $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

(1)式において、 $\tau=0$  がいわゆるストークスの沈降速度式である。また(1)式から、次式を満足するDの粒子は流体中に保持され沈降しないことを意味している。

$$D \leq \frac{3}{2} \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)g} \dots\dots\dots(2)$$

### 2.2. 砂粒子の沈降速度の測定

2.2.1. 目的 先の(1)式に示されたように、砂粒子の沈降速度は理論的に粒子の径・密度および流体の密度・粘度・降伏値によって決定される。

そこで、性状の異なる各種の泥水中における砂粒子の沈降速度を測定し、砂粒子の沈降速度に及ぼす泥水の流動特性の影響について明らかにする。

#### 2.2.2. 実験方法

- (1) 供試泥水: 表-1に示す8種類の泥水
- (2) 供試砂: 珪砂7号, 比重2.456, 砂分80%, 砂画分

| 性状          |            | 番号   |      | 水道水  |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|             |            | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |     |     |
| 比重          |            | 1.00 | 1.05 | 1.07 | 1.09 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 1.13 | 1.06 |     |     |
| 造壁性 (mℓ)    |            | -    | 3.0  | 2.4  | 1.0  | 1.5  | 1.6  | 2.1  | 8.5  | 8.0  |     |     |
| ファンネル粘度 (S) |            | 18.6 | 21.4 | 23.8 | 26.8 | 32.2 | 37.5 | 46.4 | 22.8 | 24.6 |     |     |
| 流動特性        | 粘度 (mPa·s) | B型   | 1.4  | 3    | 10   | 15   | 26   | 54   | 170  | 300  | 480 | 725 |
|             |            | V型   | 2.8  | 2    | 8    | 13   | 25   | 50   | 134  | 225  | 245 | 400 |
|             | 降伏値 (Pa)   | G    | 14.0 | 2    | 6    | 7    | 23   | 41   | 78   | 125  | 52  | 110 |
|             |            |      | 510  | 1    | 4    | 5    | 11   | 18   | 24   | 33   | 6   | 10  |
|             |            | 1022 | 1    | 4    | 4    | 10   | 15   | 19   | 26   | 5    | 7   |     |
|             |            |      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0.2  | 0.4  | 0.7  | 1.0 |     |

表-1 供試泥水の性状

の粒径分布は後掲の図-2に併記したとおりである。

(3) 方法: 沈降管に砂分濃度が10%になるように砂と泥水を混合し、所定時間静止後、水面下0~10cmの泥水を採取する。各溢流速度(深さ/静止時間)における残留砂分量を測定し、溢流速度と砂分の残留百分率の関係曲線を作成する。この曲線から、沈降天秤法による粒度分布を求める手法を応用して、計算によって砂分の沈降速度加積曲線を作成する。

#### 2.2.3. 実験結果と考察

各溢流速度で得られた泥水中の砂分の残留百分率を図-1に示す。

図から明らかなように、No. 7, No. 8の泥水では、溢流速度0.03~30 m/hの範囲で、砂分が100%残留し、供試砂分がなら沈降していないことが分かる。

これに対して、No. 0~No. 6の泥水では、溢流速度の増大とともに残留砂分の百分率が増大し、供試砂分がある範囲の沈降速度をもって沈降していることが分かる。

つぎに、砂分の沈降速度加積百分率を先の2.2.2.(3)に示した計算方法で求め、図-2に示す。

さて、図-2中には、供試した砂の粒径加積曲線も併記した。ここで、砂の各粒径における真比重・形状が変化しないとすれば、沈降速度加積曲線と粒径加積曲線の

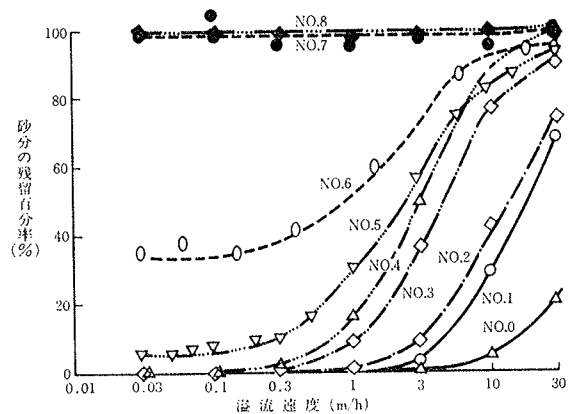


図-1 溢流速度と砂分の残留百分率

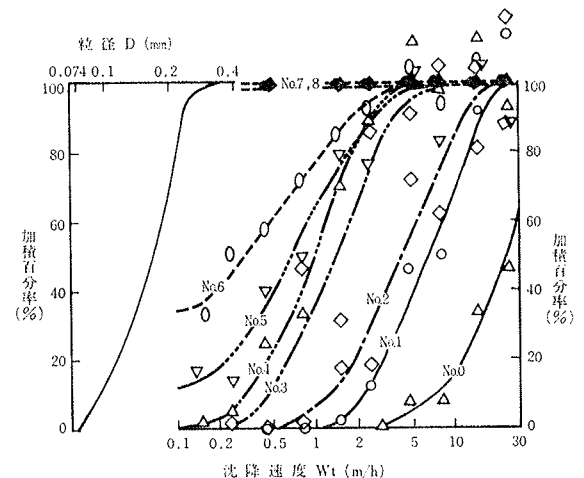


図-2 砂分の粒径加積曲線および沈降速度加積曲線

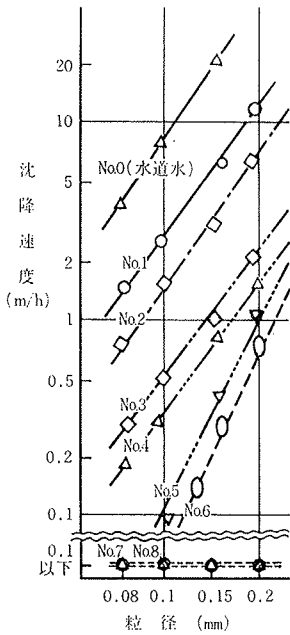


図-3 粒径と沈降速度

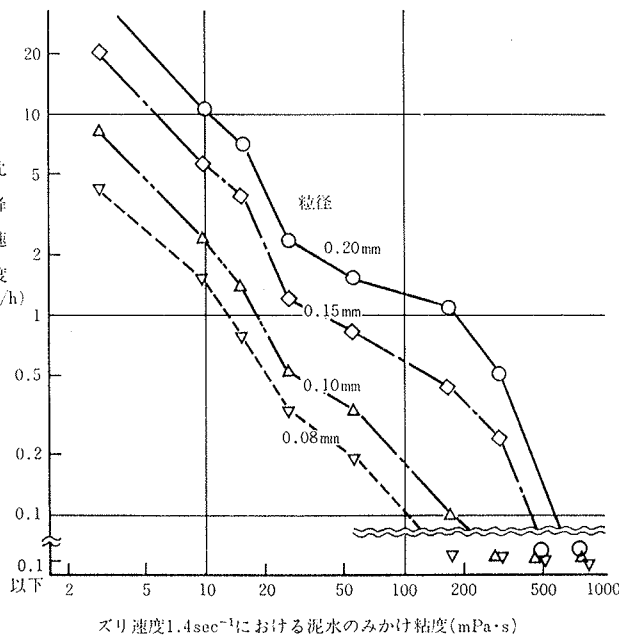


図-4 泥水のみかけ粘度と沈降速度

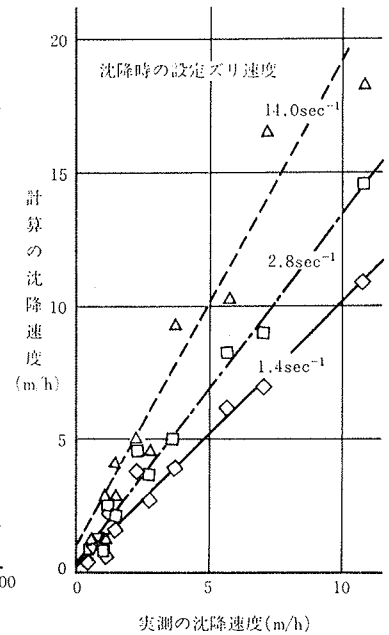


図-5 沈降速度の実測値と計算値

両者を対応させ、同一の百分率を示す沈降速度と粒径を知ることで、各粒径の沈降速度を求めることができる。この方法によって求めた結果を図-3に示す。

No. 0~No. 6の泥水については、泥水ごとに両対数で1対2の勾配の直線に乗り、沈降速度が粒径の2乗に比例していることが分かる。つぎに、泥水の種類別にみると、各粒径の沈降速度は泥水の種類によって大きく異なる。なお、No. 7, No. 8の泥水については、図中に沈降速度 0.1 m/h 以下として表示した。

そこで、泥水の流動特性として、B型粘度計のみかけ粘度とファンネル粘度を取り上げ、沈降速度との関係を図-4、図-6に示す。

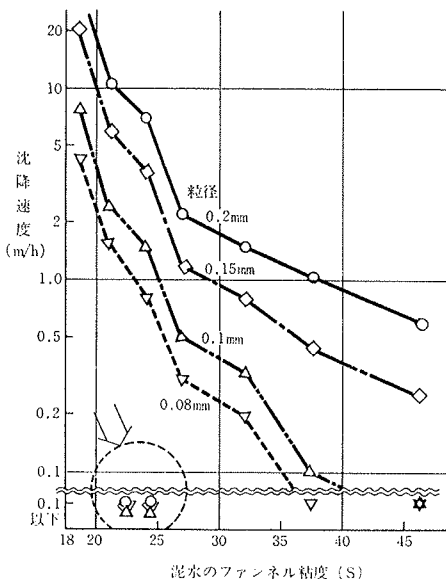


図-6 泥水のファンネル粘度と沈降速度

みかけ粘度と沈降速度との関係では、図-4から明らかのように、相関が非常によく、みかけ粘度の増大とともに沈降速度が減少している。このことは、先の(1)式に示された泥水中における沈降速度の理論式か

らも当然の結果である。ところで、泥水は一般にビンガム流体であり、泥水のみかけ粘度は測定時のズリ速度によって異なる。そこで、今回の実験における沈降速度の実測値と、ズリ速度が  $1.4 \cdot 2.8 \cdot 14 \text{ sec}^{-1}$  におけるみかけ粘度を用いて先の(1)式から算出される沈降速度の計算値との関係を図-5に示す。計算値が実測値とほぼ一致するのはズリ速度が  $1.4 \text{ sec}^{-1}$  と低い場合のみかけ粘度を用いた場合である。

これに対して、ファンネル粘度と沈降速度との関係では、図-6から明らかのように、両者は必ずしも良い相関を示さない。すなわち、No. 7, No. 8以外の大部分の泥水ではファンネル粘度の増大とともに沈降速度が減少しているが、No. 7, No. 8の泥水についてファンネル粘度が低いにもかかわらず沈降速度が極端に低くなっている。ところで、ファンネル粘度計の流出口における平均ズリ速度は  $10^2 \sim 10^3$  のオーダーであり、ファンネル粘度は高ズリ速度における粘度の指標であると考えられる。表-1からも、ファンネル粘度の大小とVGメーターの  $1,022 \text{ sec}^{-1}$  のズリ速度におけるみかけ粘度の大小とが対応していることが確認できる。このことから、ファンネル粘度と沈降速度の相関が必ずしも良くなかった原因は、泥水によって低ズリ速度のみかけ粘度の大小と高ズリ速度のみかけ粘度の大小が対応しないものがあることによると考えられる。

以上の結果から、沈砂槽による土砂分離に際し、泥水の流動特性の管理項目としては、低ズリ速度におけるみかけ粘度が望ましいと判断される。

もちろん、泥水の流動特性の管理項目として、従来使

用されているファンネル粘度も大部分の泥水については適用可能である。しかし、No. 7, No. 8 の泥水のように、ファンネル粘度が低くても低ズリ速度のみかけ粘度が非常に高い泥水もあるので、充分配慮しておかねばならない。なお、No. 7, No. 8 の泥水その他泥水との違いを表一1からみてとると、脱水量が大きく造壁性が悪いことが特徴として上げられる。このことから、ファンネル粘度を泥水の流動特性の管理項目として使用する場合には造壁性の値も併せて判断する必要があることが示唆される。

### 3. 沈砂槽の砂除去率

#### 3.1. 沈砂槽の砂除去率の考え方

沈砂槽における砂粒子の除去率の推定式には各種のものがあるが、代表的な式は下記に示す三つの式である。

##### (1) 理想的清澄沈殿池のモデル

$$\begin{cases} E = \frac{W_t}{Q/A}, & W_t \leq Q/A \\ E = 1, & W_t > Q/A \end{cases}$$

ここに E: 沈降速度  $W_t$  の粒子の除去率

$W_t$ : 粒子の沈降速度

Q: 流量

A: 沈殿池の床面積

##### (2) 乱流拡散を考慮したモデル

$$\begin{cases} E = 1 - 8\alpha^2 \exp(\alpha) \\ \quad \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n^2 H_n \exp\left[-(\alpha^2 + \beta_n^2) \frac{1}{2\alpha} \left(\frac{W_t}{Q/A}\right)\right]}{(\alpha^2 + \beta_n^2 + 2\alpha)(\alpha^2 + \beta_n^2)^2} \\ \alpha = \frac{W_t h}{2D_z}, \quad \beta_n \text{ は } 2 \cot \beta_n = \left(\frac{\beta_n}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta_n}\right) \text{ の実正根} \\ H_n \text{ は } n \text{ が奇数のとき } +1, \text{ 偶数のとき } -1 \end{cases}$$

ここに E,  $W_t$ , Q/A: (1)式に同じ

$D_z$ : 上下方向の乱流拡散係数

h: 沈殿池の水深

##### (3) 完全混合槽を直列に n 個ならべたモデル

$$E = 1 - \frac{1}{\left[1 + \frac{W_t}{n \cdot Q/A}\right]^n}$$

ここに E,  $W_t$ , Q/A: (1)式に同じ

n: 直列にならべた完全混合槽の数

(1)~(3)の式から明らかなように、砂粒子の除去率を大きく支配する特性値は砂の沈降速度  $W_t$  と沈砂槽の水面積負荷 Q/A である。(1)~(3)の式で算出される砂粒子の除去率 E と  $W_t/(Q/A)$  との関係を図示すると、後掲の図一9のとおりである。図から明らかなように、現実の沈殿池における砂粒子の除去率は(1)の理想的沈殿池の水流モデルの除去率と(3)式の完全混合モデルにおける除去率との間にあることが分かる。

#### 3.2. 沈砂槽の砂除去率の調査

3.2.1. 目的 泥水掘削工法において、掘削土砂の分離に沈砂槽を採用する場合、事前に砂粒子の除去率を推定する必要がある。そこで、某現場における沈砂槽の除砂状況を調査し、各粒径における沈降速度として第2章の(1)式から算出される値を用いて、沈砂槽の除砂効率に関する先述の(1)~(3)式の適用性を検討する。

##### 3.2.2. 測定方法

(1) 現場 地中連続壁工事の某現場で、深度-24~-29 m の約 5 m 厚の細砂層を掘削する際に行なった。掘削機はハイドロフレーズであり、土砂分離にはスクリーン・サイロン・沈砂槽を採用し、サイクロンとして  $\phi 150$  mm のものを2系列で合計14本使用していた。また、沈砂槽の規模などはつぎのとおりである。沈砂槽: 幅 4 m, 長さ 10 m, 有効水深 1 m, 流入泥水量:  $240 \text{ m}^3/\text{h}$ 。すなわち沈砂槽の水面積負荷 (Q/A) は  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  である。

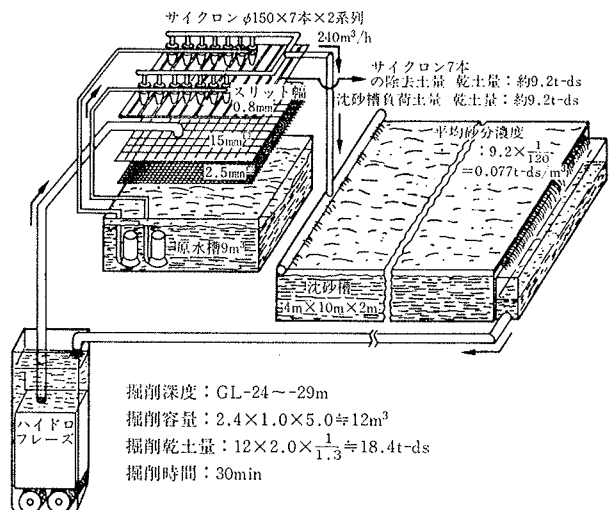
(2) 方法 サイクロン14本のうち半分を閉塞させ、沈砂槽の流入負荷を上げた状態で、沈砂槽の流入泥水と流出泥水を各4箇所から4分ピッチで連続8回採取した。1回の採取で得られた両泥水の4点を混合し、両泥水中の砂分の粒径別濃度を測定した。

なお、調査時における概略の物質収支は図一7に示すとおりである。

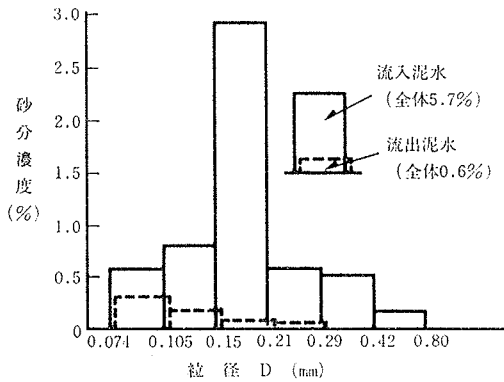
3.2.3. 測定結果と考察 測定は二つのパネルで行ない、流入泥水と流出泥水中の粒径別砂分濃度を図一8に例示する。図示するに際し、流入泥水・流出泥水ともに、連続8回採取した泥水の平均値をもって示した。

両泥水の粒径別砂分濃度から沈砂槽における砂の除去率 E を粒径別に求め、各粒径の沈降速度  $W_t$  として先の2章の(1)式から算出される値を用いて、砂の除去率 E と  $W_t/(Q/A)$  との関係を図一9に示す。

なお、調査時の流出泥水の性状は比重が1.06~1.13、



図一7 調査現場の泥水フローと概略の物質収支



図一八 沈砂槽の流入・流出泥水の砂分濃度

ズリ速度  $1.4 \text{ sec}^{-1}$  におけるみかけ粘度が  $12 \sim 16 \text{ mPa}$ 、ファンネル粘度が  $21 \sim 23 \text{ sec}$  と大きな変化がなかったので、各粒径の沈降速度  $W_t$  を算出するに当たって、比重・みかけ粘度とも流出泥水の平均値を採用した。

図から明らかなように、 $W_t/(Q/A)$  の値とともに除去率  $E$  は上昇している。しかし、 $W_t/(Q/A)$  が 1 であっても除去率は  $80 \sim 90\%$  であり、除去率  $100\%$  を確実に得るには、 $W_t/(Q/A)$  として 3 程度が必要である。

このことから、沈砂槽で所定の沈降速度  $W_t$  以上の砂分をほぼ完全に除去するには（ここでは除去率として  $95\%$  程度を設定）、現場条件にもよるが、沈砂槽の水面積負荷 ( $Q/A$ ) として、 $W_t/(Q/A)$  の値が  $1.5 \sim 3$  を満足するように設定する必要があると判断される。

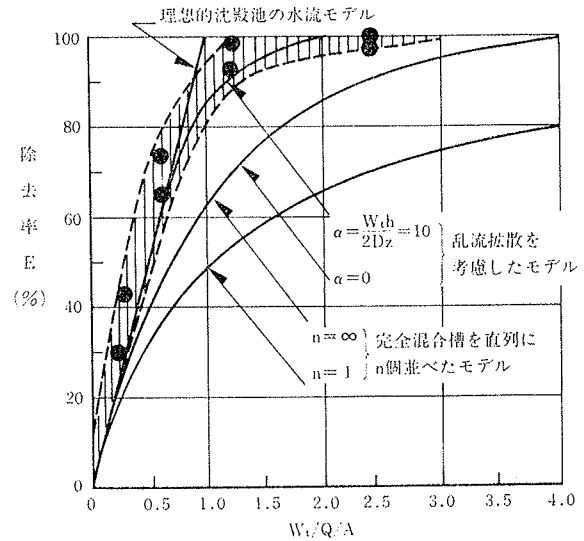
さて、図中には、先の 3.1. で紹介した理想的沈殿池の水流モデル・乱流拡散を考慮したモデル・完全混合槽を  $n$  個直列にならべたモデルによる計算上の除去率を併記した。図から判断すると、砂の除去率を推定するには、三つのモデルのうち、乱流拡散を考慮したモデルの除去率を適用するのが妥当であると考えられる。

ところで、乱流拡散を考慮したモデルの除去率の式を用いる場合、問題となるのは、図中にも示したように、 $\alpha = W_t \cdot h / 2D_z$  の値である。Dobbins によれば、 $\alpha = W_t \cdot h / 2D_z = 122 \times (h/L) \times (W_t/(Q/A))$  と考えてよいとしている。但し、 $L$  は沈殿池の延長である。今回の調査時における  $\alpha$  の値は  $W_t = 1 \text{ m/h}$  で  $\alpha = 2$ 、 $W_t = 10 \text{ m/h}$  で  $\alpha = 20$  と算出されることから、 $\alpha = W_t \cdot h / 2D_z = 10$  程度を設定しておけばよいと考えられる。

#### 4. まとめ

泥水中における砂粒子の沈降特性について室内試験を、沈砂槽における除砂状況について現場調査を行ない下記の事項が判明した。

(1) 泥水中の砂粒子の沈降速度は泥水の流動特性に大きく影響される。土砂分離に際し、泥水の流動特性の管



図一九 沈砂槽における砂の除去率

理項目としては、従来採用されているファンネル粘度より低ズリ速度におけるみかけ粘度が望ましい。

(2) 泥水中の砂粒子の沈降速度は本文中の(1)式で算出可能である。その際、泥水の粘度の値は B 型粘度計であれば  $1.4 \text{ sec}^{-1}$  程度（回転数で  $6 \text{ rpm}$  程度）のズリ速度におけるみかけ粘度を使用するのが望ましい。

(3) 沈砂槽で所定の沈降速度  $W_t$  以上の砂分をほぼ完全に除去するには、現場条件にもよるが、沈砂槽の水面積負荷 ( $Q/A$ ) として、 $W_t/(Q/A)$  の値が  $1.5 \sim 3$  を満足するように設定する必要がある。

おわりに、この研究にあたり、現場測定に協力して下さった本社特殊工法部の皆様深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 喜田, 炭田, 辻, 他: サイクロンによる砂の除去に関する研究, 第 17・18 回土質工学研究発表会講演集 (1982, 1983), pp. 1053~1056, 1227~1228
- 2) 喜田, 炭田, 辻: 土工事における濁水処理に関する研究 (第 21 報), 大林組技術研究所報, No. 32, (1986)
- 3) 喜田, 川地: 泥水中におけるスライムの沈降堆積特性, 第 12・13 回土質工学研究発表会講演集, (1977, 1978), pp. 1301~1304, 1329~1332
- 4) 大塚, 岡田, 山城: SSS くい底部のスライム除去法, 第 8 回土質工学研究発表会, 講演集, (1973)
- 5) 日本粉体工業協会編: 粉粒体計測ハンドブック, (1981)
- 6) 土木学会編: 水理公式集
- 7) Dobbins, W. E.: Effect of turbulence on sedimentation, Trans. ASCE, Vol. 109, (1944)