

土工事における濁水処理に関する研究 (第16報)

——サイクロンによる砂の除去に関する研究——

喜田大三 炭田光輝
辻博和
田中忠次 茂呂端生
(通産省公害資源研究所) (通産省公害資源研究所)

Studies on Muddy Water Treatment in Earthwork (Part 16)

——Sand Separation from Slurry Using Hydrocyclones——

Daizo Kita Mitsuteru Sumida
Hirokazu Tsuji
Tadatsugu Tanaka Tadao Moro

Abstract

In underground excavation using slurry, it is very important to separate the excavated soil and slurry. Hydrocyclones have been widely used for this purpose. This report gives the results of plant tests of sand separation performances of hydrocyclones. The effects of cyclone diameter, overflow finder diameter, underflow nozzle diameter, inlet pressure, kinds and properties of slurry on the performance in sand separation are described. The relations with regard to ① treated volumes, ② power, ③ flow ratio, ④ classification performance, ⑤ concentration of underflow slurry, and ⑥ $-74\ \mu\text{m}$ content of underflow slurry 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、掘削土砂の分離は非常に重要である。そして、砂の分離除去にはサイクロンが広く使用されている。しかし、泥水工法で対象とする泥水におけるサイクロンの性能に関する報告はほとんどなされていない。そこで、泥水工法における砂質地盤の掘削を想定して、サイクロンの性能に関するプラント実験を行なった。本報告では、砂の除去に関連した性能すなわち ①処理量、②所要動力、③流量比、④分級性能、⑤アンダーフロー土砂の濃度、⑥アンダーフロー土砂のシルト粘土混入率；におよぼすサイクロン径、オーバーフローファインダー径、アンダーフローノズル径の設計条件および流入圧力、泥水の種類と性状の操業条件の影響について報告している。

1. まえがき

ハイドロフレーズ掘削機を使用する地中連続壁工法や泥水シールド工法などでは、泥水を循環させて地盤を掘削する。これらの泥水工法で、掘削土砂の分離が適切に行なわれない場合、多量のスライムの発生や掘削効率の低下など工事に重大な支障をきたす結果となる。したがって、これらの工法で土砂分離は非常に重要である。

土砂分離のうち砂分の除去は、一般に、サイクロン、沈砂池を単独もしくは併用して行なわれており、特にサイクロンは広く採用されている。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。

ところで、サイクロンは鉱工業において普及し、その後各種工業において液体中の微粒子の捕集、分級、濃縮および清澄などに用いられており、研究も行なわれてきた¹⁾。しかし、これらの研究でのフィードスラリーの濃度は比較的薄く、その成果が泥水工法で対象とする濃い泥水の場合に適用できるか否かは明らかでない。しかもサイクロンは泥水工法において広く使用されているにもかかわらず、泥水工法で対象とする泥水におけるサイクロンの性能についてほとんど報告されていない。

そこで、筆者らは泥水工法における砂質地盤の掘削を想定して、サイクロンの性能に関しての、プラント実験を行なった。

本報告では、砂の除去に関連した性能に及ぼすサイクロン径、オーバーフローファインダー径、アンダーフローノズル径の設計条件および流入圧力、泥水の種類と性状の操業条件の影響について報告する。

2. 実験

2.1. 試料

泥水は地中連続壁工法で使用しているポリマー泥水と泥水シールド工法で使用しているシルト泥水の2種類でそれぞれの正常泥水と劣化泥水を供試した。実験時にはこれらの泥水に砂質地盤の掘削を想定して、泥水 1 m³ 当り砂を 100 kg 添加してフィードスラリーとした。このフィードスラリーの濃度はポリマー泥水が約20 wt%、シルト泥水が約 30 wt% である。図-1 に添加した砂およびフィードスラリーの代表的な粒度分布を示す。なお今回の実験では試料採取量等の都合で細粒分 (-37 μm) の粒度分析はコールターカウンタ法²⁾で行なった。コールターカウンタ法と JISA 1204 の方法とを比較すると、今回の試料においてコールターカウンタ法では粒径

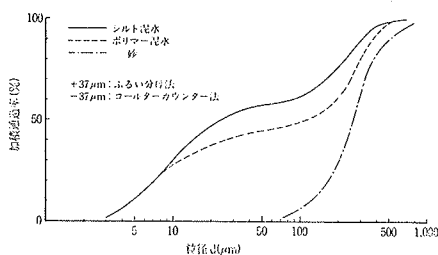


図-1 砂および代表的なフィードスラリーの粒度分布

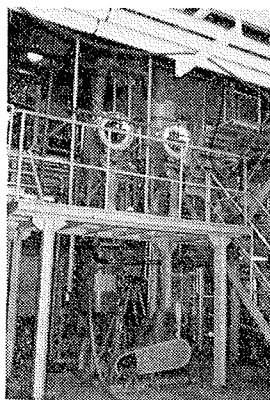


写真-1 実験プラント

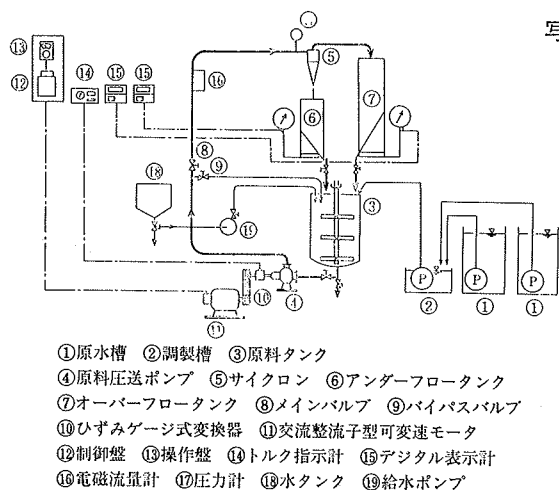


図-2 実験プラントの系統図

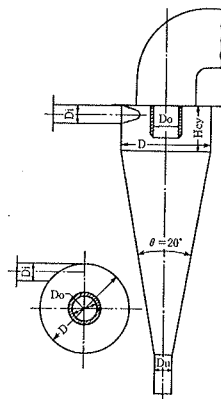


図-3 供試サイクロン

[単位mm]			
円筒部内径 D	80	160	320
円筒部高さ Hcy ; (D/2)	40.0	80.0	160.0
流入口内径 Di ; (D/5)	16.0	32.0	64.0
オーバーフロー Do ; ($\sqrt{2} \cdot D/5$)	22.6	45.2	90.5
ファインダー内径 Do ; ($\sqrt{2} \cdot D/5$)	19.0	38.1	-
アンダーフロー Du ; (D/5)	16.0	32.0	64.0
ノズル内径 Du ; (D/5 $\sqrt{2}$)	13.5	26.9	53.8
Du ; (D/5 $\cdot \sqrt{2}$)	11.3	22.6	45.3
Du ; (D/5 $\cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2}$)	9.5	19.0	38.1
備考：流入圧力 Pi [kgf/cm ²]	0.5 ~2.0	0.5 ~2.0	0.2 ~0.8

表-1 供試サイクロンの寸法

の小さい部分が少なく測定された。しかし、後述するように今回の実験での分離粒径は20~30 μm 以上であるので、実験結果への両試験方法による差異の影響はほとんどないものと考えられる。

フィードスラリーの流動特性は正常泥水で降伏値が0~0.1 Pa, 塑性粘度が 5~10 m \cdot Pa \cdot S, また劣化泥水でそれぞれ 1~1.5 Pa, 約 30 m \cdot Pa \cdot S であった。なお、この流動特性はB型粘度計で測定した。

2.2. 装置

プラント：写真-1, 図-2 に示す閉回路の装置を使用した。

サイクロン：円筒部内径 D が 80, 160 および 320 mm のものを使用した。これらのサイクロンはいずれも図-3 に示すような頂角 20° の相似形である。各サイクロンについて、オーバーフローファインダー径 D_o とアンダーフローノズル径 D_u を表-1 に示す寸法のものを使用した。なお、現場では D_o, D_u とともに概ね今回の実験範囲内の条件で運転している。

2.3. 方法

泥水を原料タンクに投入し、所定量の砂を添加したのちフィードスラリーを均一にした。そして、表-1 に示す各種条件において図-2 に示す計測器の指示値を記録し、サイクロンのオーバーフローおよびアンダーフローのサンプリングを行なった。そして、その固形分濃度および粒度について分析を行なった。粒度分析は +37 μm については湿式ふるい分け法、-37 μm についてはコールターカウンタ法²⁾によった。

3. 実験結果と考察

3.1. 処理量

図-4 に流入圧力 P_i と処理量 (フィード流量) Q_{Fi} の関係の一例を示す。図から明らかなように、P_i が増大すると

Q_{Pr} は増大し、近似的に $Q_{Pr} \propto P_1^{0.5}$ という関係が成立する。また、オーバーフロー開口比 D_0/D が大きいほど Q_{Pr} は大きくなる。しかし、開口比 D_u/D_0 は Q_{Pr} にほとんど影響を及ぼさない。円筒部 D の影響は図示しないが概略 $Q_{Pr} \propto D^2$ であった。

図-5 は試料の影響を示すものである。図示するように、ポリマー泥水とシルト泥水では濃度の低いポリマー泥水の方が同一 P_1 では Q_{Pr} は大きい、その差はわずかである。また、正常泥水と劣化泥水の性状の違いによる差はほとんどない。

ところで、今回の実験では、流入口径 D_i 、円錐頂角 θ の影響は検討していないが、既往の研究においてこれらの因子は Q_{Pr} に影響を及ぼすことが判明している。藤本ら³⁾ は 3~4 wt% の石灰微粉スラリーにおいて(1)式を与えている。

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

ここに、 Q_{Pr} は m^3/min 、 P_1 は kgf/cm^2 、 D_i 、 D_0 、 D は m 、 θ は度とする。

今回の実験においても、 P_1 、 D_0 、 D の影響は(1)式と同

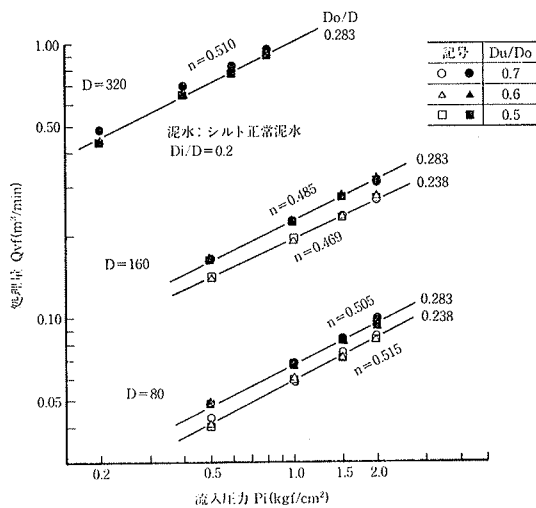


図-4 流入圧力と処理量

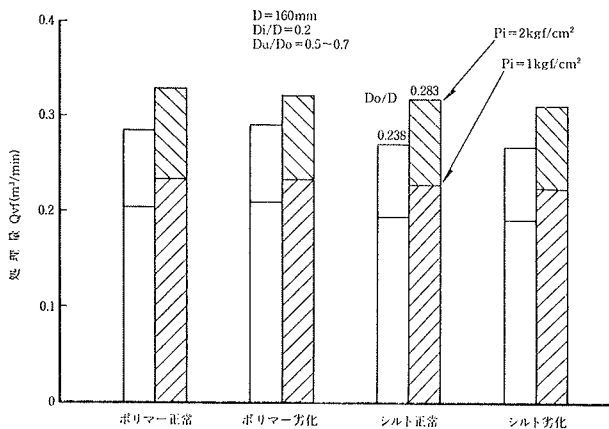


図-5 処理量におよぼす試料の影響

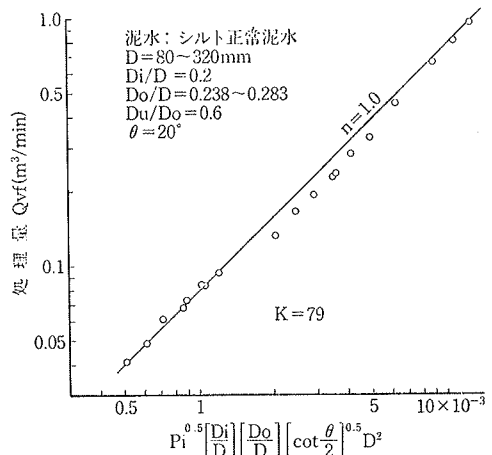


図-6 処理流量線図

様の傾向を示したので、流量式を(1)式とおくと結果は図-6に示す通りとなる。図から明らかなように、泥水の場合にも流量式はほぼ(1)式とされる。この場合、 $K=79$ と算出された。

3.2. 所要動力

図-7に示すように、 D 、 P_1 が大きくなると所要動力 H は著しく大きくなる。図示しないが、同一流入速度 V_1 では D_0/D が大きいほど H は小さくなるが、 D_u/D_0 、また試料による影響はほとんど認められなかった。

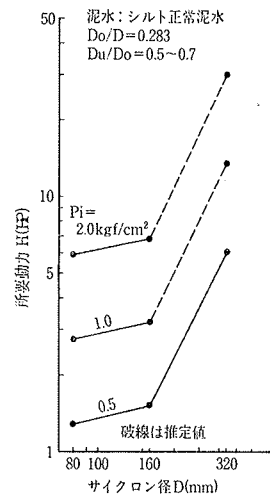


図-7 所要動力

なお、泥水の場合の H は水でのブランク試験の 1.05~1.2倍、平均約 1.1倍であった。

3.3. 流量比

流量比 R_f はいろいろ定義されているが、ここではフィード流量 Q_{Pr} [m^3/min] に対するアンダーフロー側の流量 Q_{Pu} [m^3/min] を百分率で表示する。

図-8 は流入速度 V_1 の影響を示すものである。なお V_1 は $Q_{Pr}/((\pi/4)D_i^2 \times 60)$ で算出した。近似的に $P_1 \propto V_1^2$ であった。

図から明らかなように、 R_f は V_1 が增大すると減少し、ある値に漸近する傾向にある。 D_0/D は大きいほど R_f は小さい傾向にあるが、その影響は非常に小さい。 D_u/D_0 は、図-9に示すように、大きく影響を及ぼし、大きいほど R_f が大きくなる。 D は大きくなると減少し、ある値に漸近する傾向を示すが、その影響は小さい。試

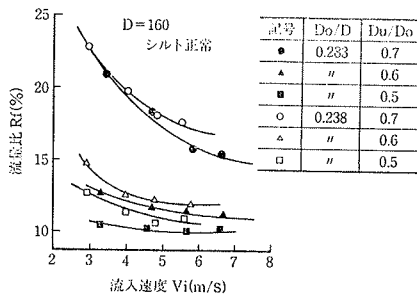


図-8 流入速度と流量比の関係

料による影響は、ポリマー泥水の方がシルト泥水よりも大きく、また正常泥水の方が劣化泥水よりも大きくなる傾向を示すがその差はわずかであった。

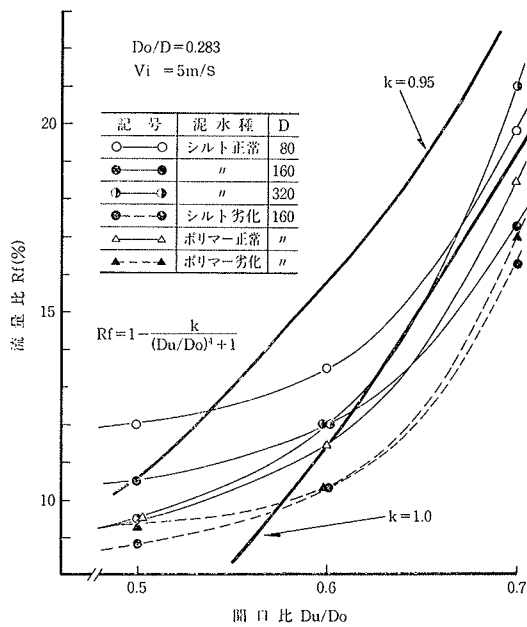


図-9 流量比線図

上述のように、 R_f には D_u/D_0 が最も大きな影響を及ぼす。吉岡ら⁴⁾は R_f を(2)式で近似しており、 $k=0.95$ を得ている。

$$1 - R_f = k / \{ (D_u/D_0)^4 + 1 \} \quad \dots\dots\dots(2)$$

泥水の場合、図-9に併記したように、 D_u/D_0 が0.6~0.7の範囲では、 $k=1$ の方がより相関の高い式となる。これは泥水の場合のフィード濃度(20~30 wt%)が吉岡らの実験のフィード濃度(1~5 wt%)よりも高くしかも粒度構成が異なるためと考えられる。

3.4. 分級性能

泥水工法では、サイクロンは主に砂の分級(分離)のために使用されている。したがって、分級に及ぼす各種因子の影響を明確にすることは非常に重要である。

ところで、分級性能は、一般に、分級における分離粒径と、分級の効率または精度などで表示される⁵⁾が、本報告では主に分離粒径について考察する。

さて、分離粒径は、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もの(これをアンダーフローへの配分率と称す)を粒径dに対してプロット(この曲線をトロンプ配分率曲線と称す)したときの配分率が50%の値を示す粒子径とし、 d_T と表示する。

図-10, 11にトロンプ曲線および D_u/D_0 をパラメータとした時のDと d_T との関係の一例を示す。両図から明らかのように、Dが大きくなると d_T は大きくなり、しかも分級精度も悪くなる。例えばDが80mmの場合 d_T は20~30 μ m、テラ指数 E_T (アンダーフローへの配分率が75%および25%を示す両粒径の差の半分)は5~8 μ mであるのにDが320mmになると d_T は40~65 μ m、 E_T は14~20 μ mと大きくなる。

D以外の因子で d_T に及ぼす影響は D_u/D_0 が最も大きく、図-11からも明らかのように、 D_u/D_0 が大きいかほど d_T は小さくなる。 D_0/D および試料による影響は、図-12に示すように、 D_0/D が小さいほど、ポリマー泥水の

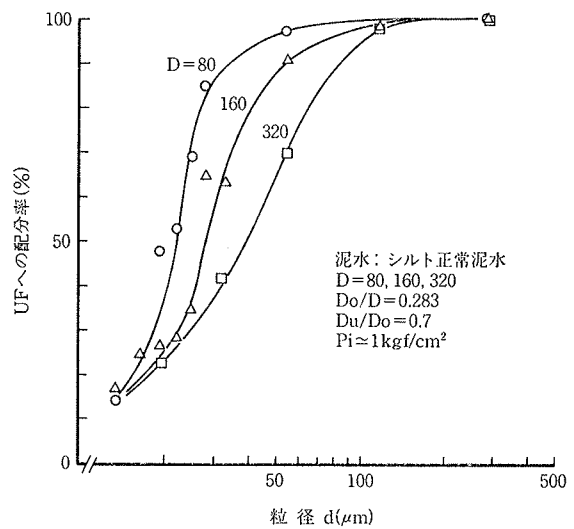


図-10 トロンプ曲線

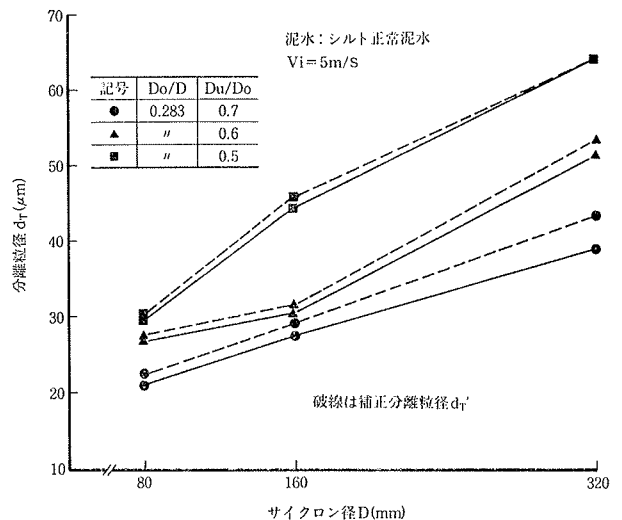


図-11 サイクロン径と分離粒径

方がシルト泥水よりも d_T が小さくなる傾向を示す。泥水性状では正常泥水の方が劣化泥水よりも、 d_T は小さくなる。しかし、これらの影響は D 、 D_u/D_0 に比べると小さい。

また、 V_i すなわち P_i が大きくなると d_T は小さくなるが、その影響は比較的小さく、例えば P_i を 1 kgf/cm^2 から 2 kgf/cm^2 に上げて d_T の減少は $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 、最大数 μm 程度であった。

ところで、吉岡ら⁴⁾は $1 \sim 5 \text{ wt}\%$ のフィードスラリーの実験において、 D_u のみが異なり他の条件が同一の場合には、流量比による影響を考慮して、ドロンプ曲線(回収率曲線と称している)を流量比零の場合に補正して補正曲線を描くとよく一致し、補正分離粒径(補正回収率 50% 粒径) d_r' は D_u の条件によって変化しないと報告している。しかし、泥水工法で使用する泥水の濃度の場合には補正曲線は一致せず、図-11 に破線で併記したように D_u の条件によって d_r' は著しく異なる。この事象は泥水の場合 D_u 条件によって速度分布が変化することを示唆する。さらに、 d/d_r' と補正回収率 R (流量

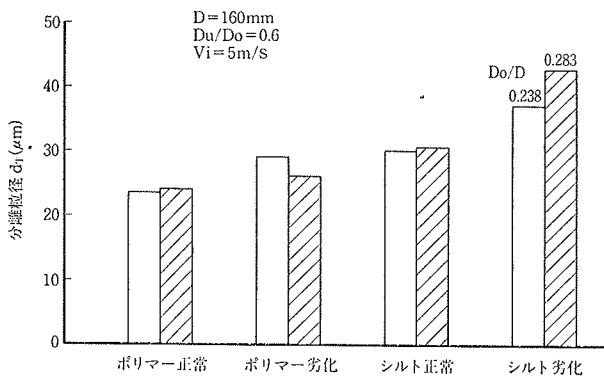


図-12 試料による分離粒径の差

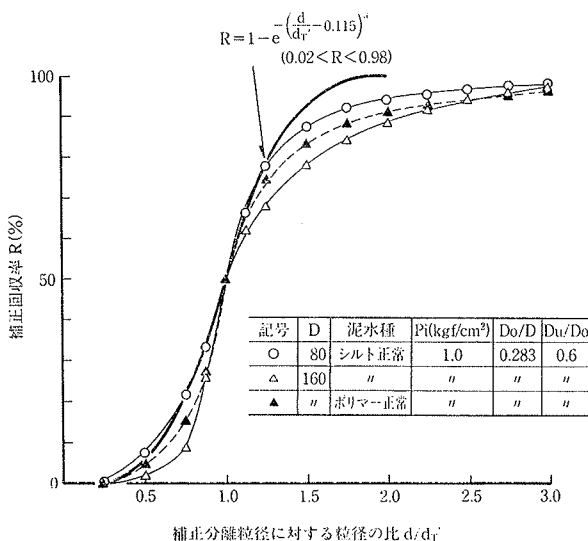


図-13 修正トロンプ曲線

比を補正したアンダーフローへの配分率) との関係は条件によらずほぼ $R = 1 - e^{-(d/d_r' - 0.115)^4}$ ($0.02 < R < 0.98$) で近似できるとしているが⁶⁾、図-14 に示すように、泥水の場合には分級精度が悪いためその曲線からずれることが判明した。

3.5. アンダーフロー土砂の濃度

サイクロンを用いた一般の土砂分離装置では、アンダーフローの土砂は一般に振動ふるいで脱水したのち場外にダンプトラック等で搬出される。それゆえ、アンダーフロー土砂はできるだけ濃い方が望ましい。

図-14 は流入速度 V_i とアンダーフロー土砂の濃度 δ_u の関係を示すものである。図示するように、 δ_u は V_i とともに増加し、 V_i がある値以上になるとやがて δ_u は一定値に達する傾向を示す。この時の V_i は約 6 m/s で δ_u は $70 \sim 75 \text{ wt}\%$ であった。

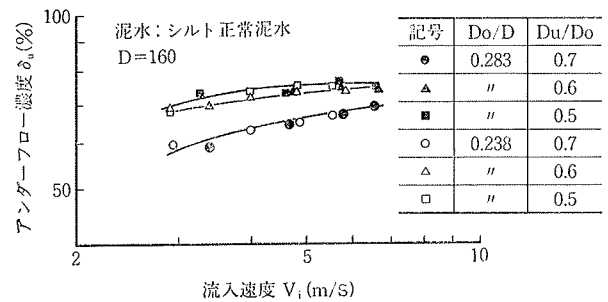


図-14 流入速度とアンダーフロー土砂の濃度

D_u/D_0 の影響は、値が小さいほど δ_u は大きくなる。しかし、今回の実験において D_u/D_0 を 0.4 にした場合閉そくした。したがって、 D_u/D_0 をあまり小さくすると閉そくするので注意する必要がある。 D_0/D 、 D の影響は δ_u が一定値に達する V_i ではほとんど認められない。また、試料による影響はほとんどなかった。

3.6. アンダーフロー土砂のシルト粘土混入率

泥水工法において泥水は言うまでもなく非常に重要な材料であり、特に砂質地盤の掘削時には分離された土砂に付随して持ち出されるシルト粘土分はできるだけ少ない方が望ましい。そこで、アンダーフロー土砂のうち $-74 \mu\text{m}$ と $+74 \mu\text{m}$ との比 $UF(-74 \mu\text{m})/UF(+74 \mu\text{m})$ をシルト・粘土混入率と称し各種因子の影響を検討する。

さて、シルト粘土混入率には D_u/D_0 が著しく影響し図-15 に示すように、 D_u/D_0 が小さいほど少ない。そして、 D および D_0/D が大きいほど、また V_i が小さいほど、シルト粘土混入率は少なくなる傾向を示したがその影響は小さい。

また、試料による影響は図-16 に示すように、ポリマー泥水で小さくシルト泥水で大きな値を示した。しかし、正常泥水と劣化泥水では差がほとんど認められなかった。

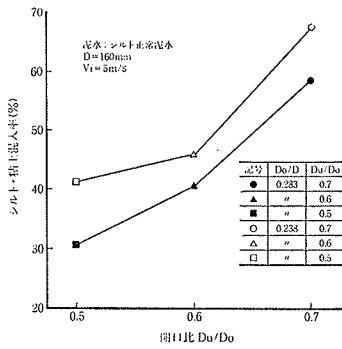


図-15 開口比とシルト・粘土混入率

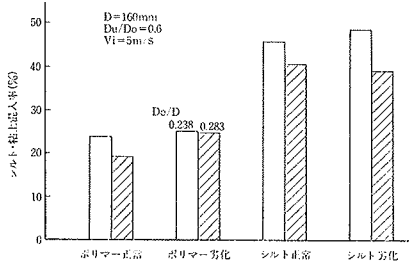


図-16 試料によるシルト・粘土混入率

4. まとめ

泥水工法、特に泥水を循環して地盤を掘削する工法において土砂分離は非常に重要である。そして、砂の分離除去にはサイクロンが広く使用されている。

そこで、泥水工法における砂地盤の掘削を想定して、サイクロン径、オーバーフローファインダー径、アンダーフローノズル径の設計条件および流入圧力、泥水の種類と性状の操作条件が砂の除去に関連した性能に及ぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

- (1) サイクロン径が大きくなると処理量は増大するが、所要動力も増大した分離粒径も大きくなる。
- (2) オーバーフローファインダー径が大きいかほど処理量は大きいが分離粒径も大きくなる。しかし、その影響は小さい。
- (3) アンダーフローノズル径が大きいかほど分離粒径は小さくなるがアンダーフロー土砂の濃度は低くなり、シルト粘土混入率が増大する。

(4) 流入圧力を上げると処理量が増大し、分離粒径は小さくなる。しかし、分離粒径への影響は比較的小さい。また、流入速度が約 6 m/s の流入圧力までは流入圧力とともにアンダーフロー土砂の濃度は増大するがそれ以上流入圧力を上げてはもはやアンダーフロー土砂の濃度は増加しない。

(5) ポリマー泥水の方がシルト泥水に比べてシルト・粘土混入率は小さい。また、分離粒径も小さく処理量も大きくなる傾向にあるがその差は小さい。

5. あとがき

サイクロンを用いた一般の土砂分離装置では、サイクロンのアンダーフロー土砂は振動ふるいで脱水される。その際、分離された土砂の一部は再び回収される。したがって、サイクロンによる土砂分離は振動ふるいも含めて検討する必要がある、これについては今後の課題としたい。

また、今回の試料では試料による差が明確でなかったが泥水工法ではさらに濃度が濃くまた劣化の著しい泥水も対象とするので、サイクロンでの分離性能の限界も含めて今後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。また、土浦工事事務所の森重園所長、柴本崇彦土木主任、倉持豊職員には実験の試料等の便宜を計っていただいた。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤本：資源技術試験所報告，No. 42，(1958)
- 2) 粉体工学会編：粉体粒度測定法，(1965)，養賢堂
- 3) 藤本，茂呂：日本鉱業会誌，Vol. 79，No. 901，(1963)，p. 41
- 4) 吉岡，堀田：化学工学，Vol. 19，No. 12，(1955)，p. 18
- 5) 今泉：日本鉱業会誌，Vol. 70，No. 797，(1954)，p. 15
- 6) 吉岡：続新化学工学講座12「液体サイクロン」，(1962)，日刊工業新聞社