

# 土工事における濁水処理に関する研究 (第19報)

——泥水シールド工法における余剰泥水処理に関する検討——

喜田大三 辻 博和  
炭田光輝

## Studies on Muddy Water Treatment in Earthwork (Part 19)

——Treatment of Slurry Discharged from Slurry Shield Tunneling Works——

Daizo Kita Hirokazu Tsuji  
Mitsuteru Sumida

### Abstract

In slurry shield tunneling works, excavated soils are separated from slurry by screens, cyclones, and other equipments. However, silt and clay fractions of cohesive soils are dispersed to become suspended in the slurry and cannot be separated with the equipment so that much slurry must be discharged. The studies reported herein were conducted to investigate the volume of the discharged slurry and the capacity of a filter press for dewatering slurry containing alluvial soils, and the following results were obtained: (1) The dispersion rate of an alluvial soil is affected by its liquidity index and sand content. (2) The water content of dewatered cakes produced by a filter press can be calculated beforehand from the liquid limit and plastic limit of the solids in the slurry. (3) Inorganic flocculants are very effective in dewatering slurry. (4) The filtering velocity of the filter press is affected by the density of the slurry, 60% grain size, and the plasticity index of the solids in the slurry.

### 概 要

泥水シールド工法において、土砂の分離は一般にスクリーン・サイクロンなどの土砂分離装置で行なわれる。しかし、粘性土地盤の場合、細粒分が泥水中に解け込み分離装置で除去できず、余剰泥水が発生する。そこで、各種の沖積土を対象に余剰泥水処理の負荷量さらに余剰泥水を処理する際のフィルタープレス (FP) の能力などについて検討し、以下のことが判明した。(1) 沖積土が泥水に解け込む割合、すなわち解膠率は土の性状によって異なり、液性指数および砂分含有量が大きい程大きい。そして両者の値から解膠率は概ね推定できる。(2) FP による脱水ケーキの目標液性指数を設定すると、泥水中の固形分の液性限界・塑性限界から求められる。(3) FP で処理する際、無機系凝集剤の脱水促進効果は大きい、効果が大きい添加量範囲は泥水の種類によって異なる。(4) 無機系凝集剤を所定量添加した際の FP のろ過速度は主に泥水比重・泥水中の固形分の60%粒径および塑性指数に大きく影響され、前2者が大きい程、後者が小さい程、ろ過速度は大きい。

### 1. はじめに

泥水シールド工法における泥水の役割は、掘削切羽の安定・掘削土の流体輸送による搬出などであり、その果たす役割は非常に大きい。掘削土の流体輸送に伴って、地上では排泥水中から掘削土を分離する必要があり、この処理工程は工事にとって重要である。

掘削地盤が砂・砂礫層の場合には、スクリーンやサイクロンなどの土砂分離装置によって掘削土の大部分を除

去することができる。しかし、粘性土層の場合には、細粒分が泥水中に解け込むので、土砂分離装置では除去できずに、余剰泥水が多量に発生する。この余剰泥水の処理には一般にフィルタープレスなどの加圧脱水機が使用されている。ところで、余剰泥水処理が所定時間内に終了しない場合、シールド機の掘進を左右することとなる。過去の施工実績をみると、特に沖積粘性土地盤を対象とした工事で余剰泥水処理がシールド機の掘進に追いつかず、工事の進捗に大きく影響した事例が多い。

したがって、工事計画の段階で、掘削地山中の細粒分がどの程度泥水中に解け込み、余剰泥水の発生量がどの程度であるのか、さらにその余剰泥水をフィルタープレスで処理する際に、フィルタープレスの処理能力はどの程度であるのかを予測しておく必要がある。この予測が適確に行なえた段階で、はじめて現場に適切な規模の余剰泥水処理設備を設計することができる。

そこで、この報告の第2章では、各種の沖積土について室内解膠試験を行ない、沖積土が泥水中に解け込む割合、すなわち解膠率、に及ぼす土の性状に関する因子を明らかにする。さらに室内試験結果と現場実績から、地山の解膠率の推定法を提案する。

そして、第3章では、まずフィルタープレスによる脱水ケーキの性状について検討し、脱水ケーキの目標含水比の設定法を提案する。さらに、各種の沖積土泥水について室内加圧脱水試験を行ない、フィルタープレスの処理能力に及ぼす土の性状に関する因子を明らかにするとともに、フィルタープレスのろ過速度の推定法を検討する。

2. 余剰泥水処理の負荷量の検討

掘削地盤の土が工事に際しどの程度泥水中に解け込み、図-1に示した泥水処理の基本的フローシステムの1次工程である土砂の分離工程で除去できず、後続の2次工程である余剰泥水処理の負荷となるか把握するため、各種の沖積土について室内解膠試験を実施した。

試験方法はつぎの通りである。不攪拌状態の土を1cm角の立方体に切り出し、500 ml 容のシリンダーに水中の体積が20%になるように試料を入れ水で400 ml にしたのち、回転振とう機を使用し60 rpm で振とうした。所定時間後、ふるい分析を行ない、4 mm のふるいを通過した固形分量の供試固形分量に対する割合を解膠率とした。なお、供試した9種類の沖積土の性状は表-1に示す通りである。

2.1. 振とう時間と解膠率

試験結果を図-2に示す。当然のこととして、振とう時間の増大とともに、解膠率は増大している。その際、沖積土の種類によって解膠率が大きく異なっている。

ところで、No. 2, No. 3, No. 4の沖積土は実際のシールド現場の立坑掘削部などから採取したものである。当該土質区間における工事で、余剰泥水として処理した固形分量から算出した現場における解膠率の実績は、No. 2で15~35%, No. 3で45~55%, No. 4で50~65%であった。この三つの現場では、掘進速度・カッター仕様・排泥水流量・排泥距離などの工事条件が異なるけれども、上記の現場における解膠率の値を室内解膠試験の解膠率として与える振とう時間は、図-2から明らか

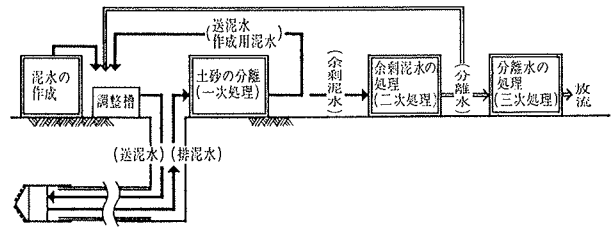


図-1 泥水処理の基本的フローシステム

のように、三つの沖積土とも概ね5~10分である。

そこで、振とう時間が5~10分における解膠率について、土質性状との関連性を次節で検討する。

2.2. 土質性状と解膠率

自然状態の土の相対的軟さを示す指標に液性指数  $I_L$  があり、別名相対含水比と呼ばれている。液性指数は下記の式で定義され、 $I_L = 0$  である場合、自然含水比  $W_n$  が塑性限界  $W_p$  に近いことになり、比較的安定な状態にあることを意味している。これに対して、 $I_L = 1$  である場合、自然含水比が液性限界  $W_L$  に近く、このような土を乱せば液状を呈することになる。

$$I_L = \frac{W_n - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W_n - W_p}{I_p}$$

そこで、液性指数と解膠率との関係を図-3に示す。

項目	試料	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
自然含水比%		47.0	46.9	39.0	70.9	29.3	48.2	31.9	87.2	16.1
比 重		2.610	2.630	2.657	2.600	2.645	2.601	2.609	2.744	2.704
粒度分布	砂分 %	4	1	12	14	33	1	27	4	67
	シル分 %	33	43	71	40	43	74	44	48	17
	粘土分 %	63	56	17	46	24	25	29	48	16
コンシステンシー	WL %	76.5	74.0	46.8	83.7	42.0	53.5	36.2	79.3	NP
	WP %	24.5	23.8	23.9	22.5	17.6	20.6	19.1	31.5	
	Ip	52.0	50.2	22.9	61.2	24.4	32.9	17.1	47.8	
液性指数		0.43	0.46	0.66	0.79	0.48	0.84	0.75	1.17	-

表-1 室内解膠試験の沖積土の性状

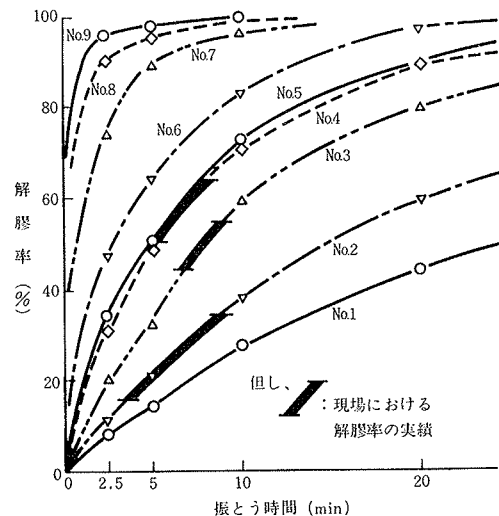


図-2 振とう時間と沖積土の解膠率

なお、図中では沖積土の砂分含有量をパラメータとし、15%以下と25~35%の二つのグループに分けて表示した。また、No. 9の解膠率は98~100%であるが、可塑性が乏しくNPであり図中に表示できない。

解膠率は液性指数ならびに砂分含有量に大きく影響され、両者の値が大きい程大きくなる。すなわち、砂分含有量が15%以下の沖積土についてみると、液性指数が約0.4の場合解膠率は約15~30%であり、それ以後液性指数の増大とともに解膠率は増大する。そして、液性指数が約1.0に至ると解膠率は約90~100%となる。つきに、液性指数が約0.7の沖積土で砂含有量が15%以下と25~35%のものを比較すると、解膠率はそれぞれ40~60%と80~90%を示し、砂分含有量が大きい程解膠率が大きくなることが判る。

さて、2.1.で述べたNo. 2, 3, 4も含めて6現場の実際の工事における解膠率の実績と地山の液性指数との関係を整理すると、図-3中に併記した通りである。なお、No. 2~No. 4以外の現場についての液性指数は、当該工事区間のボーリング調査結果の平均値を使用している。

6現場の地山の砂分含有量は15%以下であり、図から明らかなように、現場における解膠率の実績は室内解膠試験から求められた解膠率と大略一致している。

以上の結果から、沖積地盤を対象とした泥水シールド工事における地山の解膠率は、地山の液性指数と砂分含有量とから図-3によって概ね推定できることが判明した。なお、砂分含有量が50%以上の砂質土地盤では、解膠率として100%を設定しておくのが妥当であろう。

上記の方法によって地山の解膠率が推定できれば、工事前において、土砂の分離(1次処理)に使用する機種を選定、規模の決定が適確に行なえたとともに、余剰泥水処理(2次処理)の負荷土量を算定することができる。

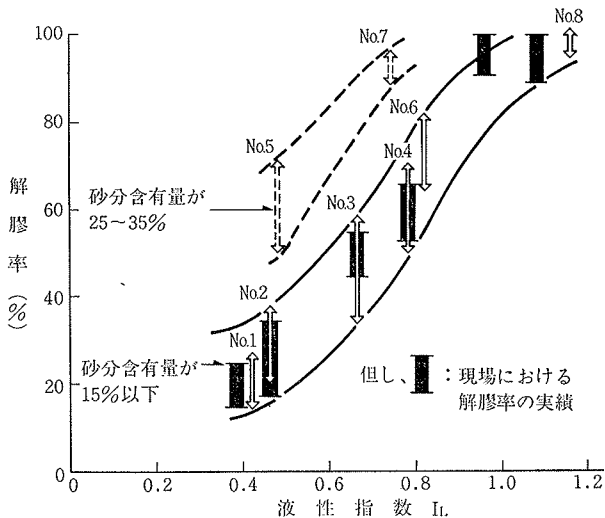


図-3 沖積土の性状と解膠率

### 3. 余剰泥水処理におけるフィルタープレスの処理能力の検討

先の2章で述べたように、沖積地盤の泥水シールド工事における地山の解膠率が推定でき、余剰泥水処理の負荷土量の算定が可能となった。泥水シールド工事の進捗を円滑に進めるために、余剰泥水処理の面からは、各種性状の異なる余剰泥水を所定時間に処理できる能力を持つプラントを設備しておく必要がある。

ところで、現状の余剰泥水処理では、余剰泥水に硫酸バンドなどの無機系凝集剤を添加後フィルタープレスを用いて加圧脱水処理することが多い。

そこで、沖積地盤の泥水シールド工事で発生する余剰泥水をフィルタープレスで加圧脱水する際の脱水ケーキの性状および過速度について検討する。

#### 3.1. 脱水ケーキの性状

フィルタープレスで加圧脱水された脱水ケーキの一般的性状については、既に先報で詳述している。図-4にその結果を引用するように、脱水ケーキの一軸圧縮強さは0.3~2.0kgf/cm<sup>2</sup>、含水比は液性限界より低く、その液性指数は0.5~0.9の範囲にある。

さて、脱水ケーキのコンシステンシーは凝集剤の影響を受けて、処理前の泥水中の固形分のそれとは異なる。そこで、凝集剤として硫酸バンド(液状)を添加した場合の脱水ケーキのコンシステンシーの変化を図-5に例示する。なお、使用した泥水に含まれる固形分の性状は後掲の表-2に示す通りである。

図から明らかなように、硫酸バンドの添加とともに、液性限界・塑性限界は増大し、

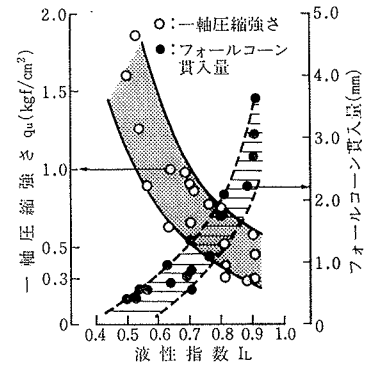


図-4 脱水ケーキの性状

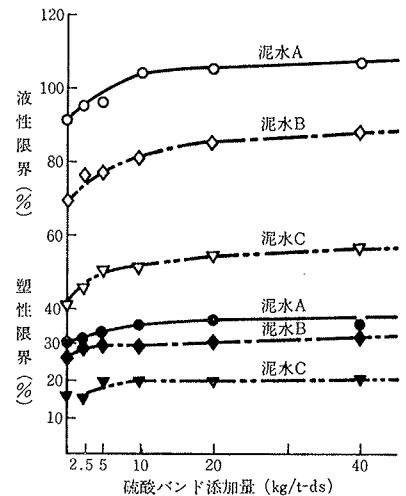


図-5 硫酸バンド添加量と脱水ケーキのコンシステンシー

添加量が10~20 kg/t-dsに至った段階で、その増加程度は少なくなる。その際、各泥水で処理前の液性限界、塑性限界が異なっても、硫酸バンドの添加量が20~40kg/t-dsにおけるその増加量は各泥水ともほぼ同じであり、液性限界が約15%、塑性限界が約5%である。

この現象は、硫酸バンドの添加によって、泥水中の固形分の表面に水酸化アルミニウムが吸着し、その結果固形分に親水性が付加されたことによると考えられる。

さて、工事計画の段階では、泥水処理の物質収支などを算出するために、脱水ケーキの含水比を設定する必要がある。そして、施工時には、フィルタープレスの脱水操作に際し、加圧脱水作業を終了し脱型作業に移る時期を決定するために、脱水ケーキの目標含水比を設定しておく必要がある。

脱水ケーキの目標とする液性指数  $I_L$  を設定すると、上述の試験結果から、脱水ケーキの目標含水比  $W_{cake}$  (%) は処理前の泥水に含まれる固形分の液性限界  $W_L$  slurry (%) と塑性限界  $W_P$  slurry (%) を用いて、次式によって求めることができる。

$$I_L = \frac{W_{cake} - (W_P \text{ slurry} + 5)}{(W_L \text{ slurry} + 15) - (W_P \text{ slurry} + 5)} \text{ から}$$

$$W_{cake} = I_L(W_L \text{ slurry} + 15) + (1 - I_L)(W_P \text{ slurry} + 5) \dots\dots\dots(1)$$

3.2. フィルタープレスのろ過速度

フィルタープレスで余剰泥水を処理するに際し、どの程度の処理能力があるかを把握するために、各種の沖積土泥水について、凝集剤として硫酸バンドを添加し、ろ

項目	泥水種				
	A	B	C	D	
粒度分布	砂分 %	6	2	17	30
	シルト分 %	36	54	44	40
	粘土分 %	58	44	39	30
	60%径 $\mu\text{m}$	6	12	24	40
コンシステンシー	$W_L$ %	91.5	69.7	40.7	46.4
	$W_P$ %	31.4	26.9	16.1	20.9
	$I_P$	60.1	42.8	24.6	25.5

表-2 室内脱水試験に供試した泥水の固形分の性状

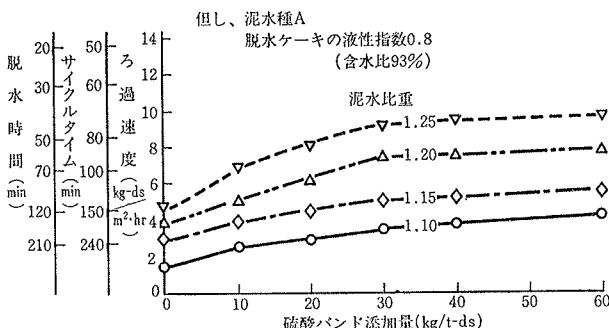


図-6 硫酸バンド添加量とろ過速度 (泥水A)

過面積 45.4 cm<sup>2</sup>・加圧力 3.0 kgf/cm<sup>2</sup>・片面排水条件下で加圧脱水試験を実施した。

脱水ケーキの目標とする液性指数を0.8とし、先の3.1.で提案した(1)式で求まる含水比  $W_{cake}$  (%) で厚さ 15 mm の脱水ケーキを得る脱水時間  $t_r$ (min) を求める。なお、一般のフィルタープレスでは両面排水でケーキ厚約 30 mm であるので、ここではケーキ厚 15 mm とした。この脱水時間に実工事のサイクルを考慮し脱型などの作業時間として30分を加算して処理時間とし、単位ろ過面積・時間当りの処理固形分量すなわちろ過速度  $V_c$ (kg-ds/m<sup>2</sup>·hr) を算出した。なお、ろ過速度の算出式は下記の通りである。但し、土粒子の比重は  $G_s$  とする。

$$\text{ろ過速度 } V_c = \text{処理固形分量} \times \frac{1}{\text{ろ過面積}} \times \frac{1}{\text{処理時間}}$$

$$= \frac{15}{1/G_s + W_{cake}/100} \times \frac{60}{t_r + 30} \dots\dots\dots(2)$$

(1) 硫酸バンド添加量とろ過速度

泥水Aと泥水Bの試験結果を図-6・図-7に例示するように、硫酸バンドの固形分当りの添加量の増大とともにろ過速度は増大し、硫酸バンドの脱水促進効果は大きい。しかし、ある添加量に達するとその増加程度は少なくなる。この添加量は同一種類の泥水であれば、泥水比重にかかわらずほぼ同じである。

このことは、実際の工事で泥水中の固形分の性状に大きな違いはないが泥水比重が変動する余剰泥水の処理において、凝集剤添加量の管理を固形分当りで行なうことが妥当であることを示している。

ところで、泥水Aと泥水Bについて泥水比重1.20・硫酸バンド添加量 30 kg/t-dsにおけるろ過速度を比較すると、泥水Aでは脱水時間が約90分でろ過速度が約7 kg-ds/m<sup>2</sup>·hrであり、泥水Bではそれぞれ約60分で約9 kg-ds/m<sup>2</sup>·hrである。このように泥水Aは泥水Bに比べて脱水性が悪い。しかも、泥水Aでは硫酸バンド添加量をこれ以上増やしても脱水性はほとんど向上しない。逆に、泥水Bでは添加量を約50 kg/t-dsを上限として増やせば、さらにろ過速度が上がり脱水性は向上する。

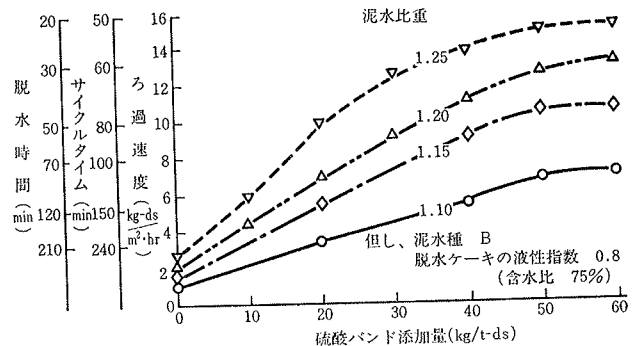


図-7 硫酸バンド添加量とろ過速度 (泥水B)

このことから、余剰泥水処理に際し、脱水時間が長くとろ過速度が小さいからと言って、無暗に凝集剤の添加量を増やすことは有効ではなく、泥水の種類によって凝集剤の添加効果が大きい添加量範囲は異なることを考慮すべきことを示している。例えば、その上限値は泥水Aで約 30 kg/t-ds、泥水Bで約 50 kg/t-ds である。

(2) 泥水性状とろ過速度

ところで、余剰泥水処理に際し、凝集剤添加量は現場の必要処理能力・経済性などから決定され、一般に20~40 kg/t-ds の範囲である。

そこで、各種泥水に硫酸バンドを 30 kg/t-ds 添加した時のろ過速度を求め、このろ過速度に影響する要因として、泥水比重・粘土含有量・砂分含有量・60%粒径・液性限界・塑性指数などをあげ重相関分析を行なった。その結果、ろ過速度に影響する主要な因子は、泥水中の固形分量に関する泥水比重  $\rho_t$  (t/m<sup>3</sup>)・泥水中の固形分の粒度分布に関する60%粒径  $D_{60}$  ( $\mu$ m) および泥水中の固形分の親水性に関する塑性指数  $I_p$  の三つであった。

前二者とろ過速度との関係は図-8に示す通りであり、

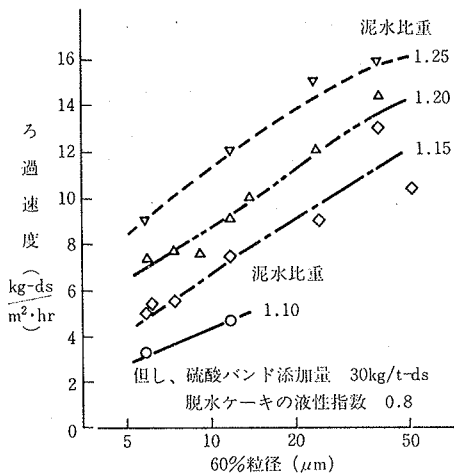


図-8 沖積土泥水の性状とろ過速度 (その1)

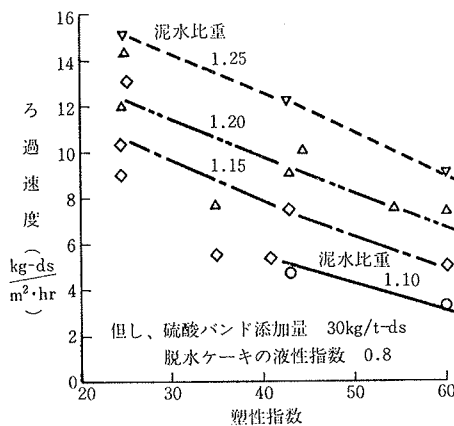


図-9 沖積土泥水の性状とろ過速度 (その2)

泥水比重および60%粒径が大きい程ろ過速度は大きくなる。これに対して、塑性指数とろ過速度との関係では、図-9に示すように、60%粒径に比べて相関性は悪いが、塑性指数が大きい程、ろ過速度が小さくなる傾向が認められる。さて、上述の重相関分析によると、ろ過速度  $V_c$  (kg-ds/m<sup>2</sup>·hr)

は泥水比重  $\rho_t$  (t/m<sup>3</sup>)・60%粒径  $D_{60}$  ( $\mu$ m)・塑性指数  $I_p$  によって下記の回帰式で与えられた。しかし、今回の試験では、サンプル数が20個と少ないので、今後さらに検証する必要がある。

$$V_c = 48.5(\rho_t - 1) + 0.124D_{60} - 0.059I_p + 0.43 \dots (3)$$

$$(R^2 = 0.929, n = 20)$$

上述のように、ろ過速度に及ぼす泥水比重の影響が大きいことから、余剰泥水処理に当っては、泥水の流動性を考慮した上で可能な限り比重の高い泥水を処理することが経済的であることが判る。

4. まとめ

以上、沖積地盤を対象とした泥水シールド工事における余剰泥水処理の負荷量さらに余剰泥水をフィルタープレスで加圧脱水する際の処理能力などについて検討した。その主な結果は下記の通りである。

(1) 沖積土が泥水中に解け込む割合すなわち解膠率は土の性状によって異なり、液性指数ならびに砂分含有量が大きい程大きくなる。工事計画の段階で両者の値がわかれば、本文中の図-3から地山の解膠率を概ね推定でき、その結果から余剰泥水処理の負荷量も算定できる。

(2) フィルタープレスによる脱水ケーキの含水比は、ケーキの目標とする液性指数を設定すると、処理前の固形分の液性限界と塑性限界がわかれば、本文中の(1)式から求めることができる。

(3) フィルタープレスで加圧脱水する際、無機系凝集剤の脱水促進効果は大きい。しかし、凝集剤の添加効果の大きい添加量範囲は泥水の種類によって異なる。

(4) 無機系凝集剤を所定量添加した際のフィルタープレスのろ過速度は主に泥水比重・泥水中の固形分の60%粒径・塑性指数に大きく影響され、前二者の値が大きい程、後者の値が小さい程、ろ過速度は大きくなる。ろ過速度の3者による回帰式は本文中の(3)式で与えられる。

本報告で得られた結果は限られた数の試料についてのものであり、今後室内試験および現地調査を継続し、この成果を検証して行く予定である。

参考文献

- 1) 喜田, 辻, 漆原: 土工事における濁水処理に関する研究 (第11報), 大林組技術研究所報, No. 21, (1980)
- 2) 喜田, 辻: 各種泥水工法における廃棄泥水の処理と有効利用, 土と基礎, Vol. 29, No. 11, (1980)
- 3) 喜田, 辻, 炭田: 土工事における濁水処理に関する研究 (第15報), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982)