

研究展望

土木工事に伴う環境対策——水質汚濁の対策と技術開発

OUTLINE OF THE COUNTERMEASURE AND ITS TECHNICAL DEVELOPMENT AGAINST THE WATER POLLUTION IN CIVIL ENGINEERING WORKS

三浦重義*

By Shigeyoshi MIURA

1. まえがき

土木工事に伴って発生する騒音、振動、水質汚濁、地盤沈下、地下水汚染などの公害問題は、従来は限られた範囲、限られた期間のものとみなされ、他産業公害に比べ規制の対象とされることは少なかったが、住民の権利意識の高まり、公害関連法規の整備などとともに、環境対策の一環として取り組むことが要求されるようになってきた。ここでは水質汚濁対策ならびに、それに付随した環境問題に対する対策として開発された技術の一端を紹介させていただくことにする。

2. 汚濁水処理の概要

土木工事から排出される汚濁水は、その発生源からみると、濁水と泥水とに分けられる。濁水はダム工事、トンネル工事、造成工事、浚渫工事などにおいて自然発生的に出てくるもので、浮遊物質(SS)が200~50000 g/m³程度の低濃度のものであり、泥水は泥水シールド工法、地下連続壁工法、場所打ち杭工法などにおいて、施工中は掘削壁面の崩壊防止と掘削ずりの搬送流体としての機能を具備している必要な材料であり、循環使用中に性能が劣化したり余剰になったために、廃棄を余儀なくされるもので、SSが10万~40万 g/m³程度の高濃度のものが多いが、両者に明確な区別があるわけではない。濁水・泥水とも発生原因からみて、SS分の主体をなすものは土砂類であり、有害物や有機物は特殊な場合を除いて、ほとんど含まれることはない。水質汚濁源としてみた場合、建設系は、工業系、農業系、畜産系、生活系

に比べ、有機汚濁度は低いものとみなされている¹⁾。

したがって処理方法の開発は、上水、工業用水などの浄化プロセスで、すでに長年にわたって開発改良されてきた固液分離の技術を土木工事の特殊性に適応させることに重点が置かれ、使用する装置機器類も、従来から水処理の分野で実用されてきたものと基本的に異なるところはない。

(1) 公害関連法体系

汚濁水処理と公害対策基本法に基づく諸法規との関係については、すでに多くの解説があり²⁾、主なものには水質汚濁防止法と廃棄物の処理及び清掃に関する法律(廃棄物処理法)がある。法規制からみれば水質汚濁防止法による特定施設には、建設工事という業種はないが、公共用水域に対する総理府令の一律排水基準以外に、都道府県が適用する条例の上乗せ基準ならびに地方公共団体が定める横乗せ基準があり、これら法体系が逐次整備されてくるとともに、昨今では土木工事における汚濁水の規制は相当厳しいものとなっている。

(2) 凝集

汚濁水の固液分離は、粗大な礫、土塊から150 μm程度の砂分までを自然沈降あるいはスクリーンやクラッシュファイヤなどで取り除き、さらにサイクロンによって細砂まで除去できるが、機械的操作によって除去可能な限度は約60 μm程度までであり³⁾、それ以下の微細な粘土コロイドは、凝集反応によってフロックを形成させ、凝集沈殿装置、たとえばシクナなどにより沈殿除去しなければならない。つまり処理は機械的処理と化学的処理との組合せを必要とし、これまでに汚濁水処理用に開発された装置機器類については成書に詳しく⁴⁾、またいくつか報告もされている^{5),6)}。

* 正会員 工博 (株)鴻池組技術研究所副所長
(〒541 大阪市東区北久宝寺町 4-27)

粘土コロイド粒子は水中で負に帯電し、粒子表面電気二重層の静電的斥力が、粒子相互間に作用する van der Waals 力に打ち勝って安定に懸濁分散しているので、粒子間の凝集を起こさせるためには、 ζ 電位を低下させて静電的反発力を小さくし、粒子同士の衝突合一の機会を増大させることが有効であり、このためには粒子表面の負電荷と反対電荷をもつ電解質を添加することが効果的である⁷⁾。凝集を、粒子の表面電荷を低下させ微小フロックを形成させる一次凝集と、微小フロックをさらに架橋吸着によって大きなフロックに成長させる二次凝集とに分ければ、一般に前者には無機凝集剤が、後者には高分子凝集剤が使用されている。

無機凝集剤としてはアルミニウム (Al) 塩が多く用いられ、Al イオンは水中で6~10個の水分子を配位してアコ錯イオンとなり、pH 4~7においては2つのOHの間で縮合反応を起こして塩基性多核 Al イオンを形成し、ポリ塩化 Al (PAC) では重合度6~8のポリマーイオンとして $[Al_6(OH)_4]^{4+}$, $[Al_6(OH)_5]^{3+}$, $[Al_6(OH)_6]^{2+}$ の形態をとるとされている⁸⁾。

現在入手可能な水溶性高分子物は多数にのぼり、懸濁粒子に対する凝集能をもつものも多く⁹⁾、特にポリアクリルアミド (PAAm) 系が粘土粒子に対しては効果的¹⁰⁾、汚濁水処理に多用されている。PAAm は水中における解離状態から、アニオン性、ノニオン性、カチオン性に分けられ、それらは対象とする懸濁粒子の性質によって、最適のものが選択使用される。

PAAm はその製造原料であるアクリルアミド単量体 (MAAm) が動物に対し神経障害性があり、毒物及び劇物取締法では劇物に指定されているため、これを汚濁水処理の凝集剤として使用することについて、一時、疑いの念がもたれたこともあった¹¹⁾。MAAm から PAAm の製造は水溶液重合反応によって行われる。水溶液重合における反応速度式は、 k を反応速度定数、 t を重合反応時間、 x を重合反応率とすれば式 (1) によって表わされ

$$k = \frac{1}{t} \cdot \frac{x}{1-x} \dots\dots\dots (1)$$

k は単量体 MAAm 初濃度の2乗および重合触媒濃度の1乗に比例する。現在のように薬液注入が珪酸ナトリウム系だけに規制される以前には、その水溶液粘度が水と同程度に低く、地中への浸透性が良好なため、一時期、MAAm 系注入剤もしばしば使用された。このものは重合固結後のゲル体を不溶性の三次元構造とするため、架橋用二官能性単量体メチレンビスアクリルアミド $CH_2=CHCONHCH_2NHCOCH=CH_2$ を MAAm に少量配合したもので、注入時にはその水溶液に過硫酸塩重合触媒を加え、地下の注入点において重合反応を行わせ含水重

合体ゲルを形成させて止水性地盤改良が行われた。もし地下に存在する水によって薬液が希釈されて MAAm 濃度および触媒濃度が低下すれば、重合反応速度が大きく遅延することとなり、ひいては未重合の MAAm がそのまま残留する結果となる。しかし現在 PAAm 凝集剤の品質については、MAAm 残留量が厳しく管理されている。このような PAAm 凝集剤の毒性問題に対して、PAC のみを使用する方法や¹²⁾、無毒性の凝集剤を用いる汚濁水の処理方法も検討された。それは天然物誘導品または食品添加物認可品を対象とし、アルギン酸ナトリウム (Alg)、繊維素グリコール酸ナトリウム (CMC) や¹³⁾、メチルセルロース (MC) およびポリアクリル酸ナトリウム (SPA) を用いるものであるが、これら無毒性凝集剤と PAAm とを比較した一例を図-1 に示した¹⁴⁾。凝集効果の点からはとうてい PAAm に及ぶべくもない。

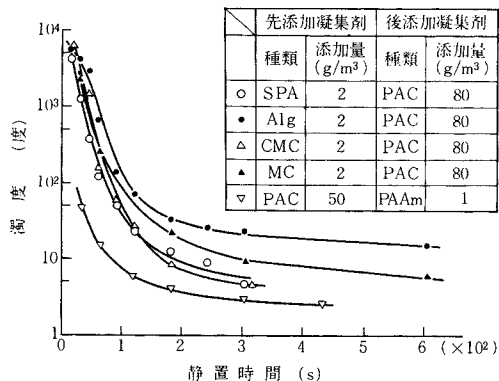


図-1 食品添加物凝集剤による濁水の除濁効果

1951年モンサントケミカル社より土壤改良剤 Kriliun が発表され、土壤へのわずかな添加によっても透水性、通気性、保水性などが改良され、農産物の飛躍的増収が期待できる新薬として当時の脚光を浴びた¹⁵⁾。その後この作用が高分子物による土粒子間の架橋吸着により、団粒塊が形成されるためであることが明らかにされるとともに、多くの水溶性高分子についても土粒子への架橋吸着機構の究明が行われた。現在考えられている高分子凝集剤の凝集機構は、粒子表面電荷の中和作用¹⁶⁾、架橋吸着作用¹⁷⁾、モザイク型静電吸着作用¹⁸⁾ などであり、ノニオン性 PAAm の吸着は水素結合とされ、また負の粘土粒子に対する同種電荷のアニオン性 PAAm の作用機構としては、有名な Michaels の架橋吸着説¹⁹⁾、一般にフロック径が大きく、しかもフロック強さの大きいフロックを形成させるには、分子量の大きい高分子ほど有効であり²⁰⁾、PAAm 系ではアニオン性のものが分子量も大きく、粒子間架橋しやすい状態に水中溶存してい

るため、現在汚濁水処理用の高分子凝集剤はこのタイプが多く使用されている。

汚濁水処理に PAAm が用いられた場合、大部分の PAAm は土粒子に吸着され、スラッジとともに処分されることになるが、分離水中には未吸着の PAAm およびわずかの MAAM が溶存したまま放流されることになる。水中における PAAm 溶存量および MAAM 残留量の測定が行われたが²¹⁾、MAAM は比較的すみやかに生分解し、またオゾンによっても分解される²²⁾。浄水場汚泥に対する PAAm の飽和吸着量は乾土 1 g 当たり約 1.6 mg と測定され²³⁾、またカオリンに対しては乾土 1 mg 当たり 4.8×10^{-3} mg であったとされている²⁴⁾。したがって汚濁水に対し飽和吸着量以上に多量の PAAm を添加したときは、過剰分が分離水中に残存することとなるが、PAAm がコンクリートに混入した場合のコンクリート強さに及ぼす影響について調べた結果、混練水中 7.5 g/m^3 濃度までの PAAm を含むものについては影響がなかったとされている²⁵⁾。なお PAAm 単独添加に比べ、無機凝集剤と併用するときは、水中への残留量は著しく少なくなることも報告されている^{23), 26)}。

凝集剤の最適添加量は、沈降速度、残留濁度、沝過速度などの間に一貫した定量的な関連性がなく、何を凝集性評価の指標とするかによって異なるので²⁷⁾、シリンダーテストやジャーテストによって経験的に決められることが多いが、 ζ 電位を測定する代わりにコロイド滴定値から硫酸バンドの添加量を求めたり²⁸⁾、原水の水質パ

ラメーターから最適添加量を求めることも試みられたが²⁹⁾、画一的手法はまだないようである。このような現状に対して高分子凝集剤の使いやすさとして、有効添加量の範囲が広いことは凝集操作上から望ましいことであり、そのための提案がなされている³⁰⁾。

(3) 沈降濃縮

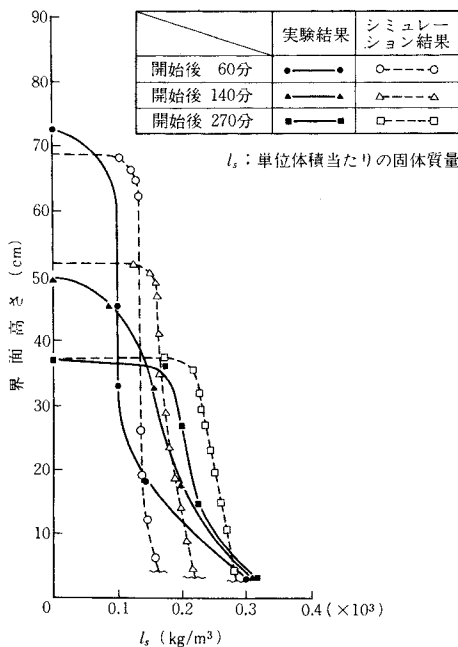
懸濁粒子の沈降には、単粒子沈降、凝集性多粒子沈降、界面沈降、圧縮沈降の各形態があるが、汚濁水に凝集剤が添加されると、凝集フロック形成、界面沈降、沈降圧密の過程が進行する。そこでフロック化された汚濁水の沈降圧密に対し、Kos の方法にならって透水性と圧縮性を考慮し³¹⁾、沈降圧密はフロック形成粒子の、より密な構造への塑性的配置変換であるとする多孔質粒状モデルを仮定し、既報の方法³²⁾に従って実測値とシミュレーション結果とを比較した。用いた試料は、粒子径 $D_{60} = 4.3 \mu\text{m}$ 、SS 濃度 107 kg/m^3 のものに、アニオン化度 24% PAAm を 5 g/m^3 添加したものであり、結果は、図一2に示すとおりとなった³³⁾。

(4) 沝過脱水

下水汚泥では沝過脱水性の改良および脱水ケーキの容積減少を目的として、カチオン性 PAAm を使用する検討が行われ、なかでもカチオン化度の高い PAAm が下水汚泥の疎水化脱水性により結果を与えるとされているが、浄水場汚泥については、脱水性は、アニオン性 > ノニオン性 > カチオン性の順であり、しかも相互にあまり差はなかったと報告されている³⁴⁾。汚濁水に対する各イオン性 PAAm の沝過速度を比較した結果でも、同様にアニオン性のものが最もよい効果を示した³⁵⁾。

(5) 中和

粘土鉱物にはカチオン交換容量以上にカルシウムイオンを吸着して緩衝作用をもつものがあり、コンクリート中の水溶性塩類が混入した汚濁水のアルカリ性が、予測される値より低いこともしばしば経験される。このような汚濁水を凝集固液分離した場合の分離水では、図一3のように緩衝性を示すことも多く、中和前の pH 値から求められる中和必要計算量の数倍の中和剤を必要とすることもある。このような場合は中性付近の緩衝指数が小さい値となるので、pH 制御プロセスが非線形性で中和点近傍の制御が困難になる傾向を、緩和することにもなり、中和剤注入は比例動作によって自動制御するまでもなく、オンオフ動作で排水基準内におさめることができる。また比例制御に準じ、動作はオンオフではあるが、その作動時間を設定値との偏差に応じて、あらかじめ決定しておいた時間間隔にオンオフ動作する簡便な時分割制御の方式も開発されている。その動作形式を図一4に示した。また硫酸などの強酸では過剰に添加された場合は、排水基準以下の酸性となることに対する配慮が必要



図一2 沈降圧密実験とそのシミュレーション結果

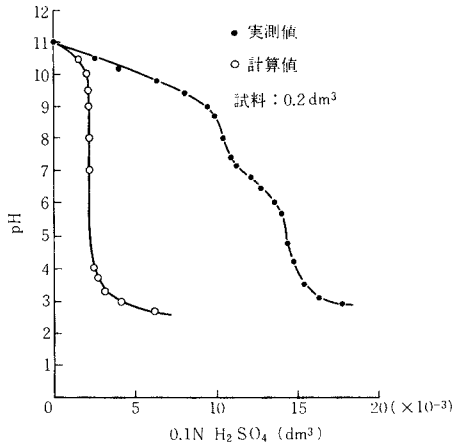


図-3 分離水の中和曲線

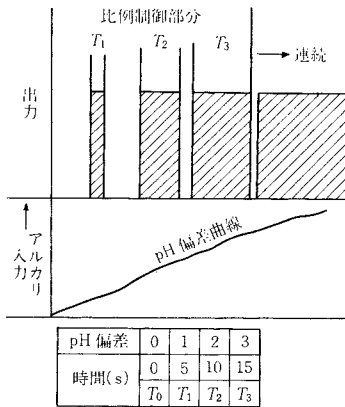


図-4 時分割動作図

であるため、炭酸ガス吹込みによる方法が普及している。雨水は大気中に存在する炭酸ガスと平衡関係にあって、その pH 値は 5.6~5.7 であるが、炭酸ガスが過剰に吹き込まれても、処理水が大気開放された後は、大気中の炭酸ガス濃度と平衡になり、排水基準値以下の酸性にならない簡便さがある³⁶⁾。海中工事における大量のプレパックドコンクリート打設のためのモルタルプラント船では、モルタル洗浄排水を船外に排出しないために船内処理クロズドシステムが開発された³⁷⁾。

3. 濁水の処理

濁水および泥水ともに、無機凝集剤と高分子凝集剤を添加した後、分離水は中和して放流し、分離泥土は脱水後処分する処理方式では基本的な差はないが、濁水においては分離水の清澄性に、泥水では泥土の処理処分におのおの処理の重点が置かれている。図-5に濁水処理フローの概略を示す。

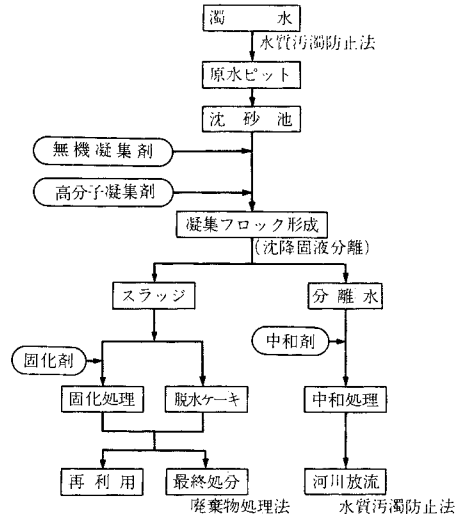


図-5 濁水処理フロー

ダム工事、トンネル工事などから発生する濁水の処理については、すでに多くの処理実績が報告され^{38),39)}、その処理方法もシックナによって固液分離した分離水は河川放流し、沈降スラッジはフィルタプレスで脱水し、脱水ケーキとして搬出する方法が、ほぼ定型化し、土木工事における水質汚濁の環境対策として定着した感がある。また処理機器装置および設計条件の設定要領についても成書に解説されている^{2),40)}。

一般に濁水の SS 濃度は低いが、放流水の水質は SS 25 g/m³ 以下を要求される場合もあり、濁水の SS が 500 g/m³ 程度以下になると、この排出基準の達成がしだいに難しくなる。いま濁水単位体積中で、直径 d_1 粒子の数を n_1 、直径 d_2 粒子の数を n_2 とし、単位時間、単位体積当たりの衝突回数を N とし、攪拌における速度勾配を G とすれば、 N は式 (2) で表わされる。

$$N = (1/6)n_1n_2(d_1 + d_2)^2 G \dots \dots \dots (2)$$

したがって濁水中の粒子濃度が低下すれば、粒子同士の衝突合一の回数が減少して、フロック形成が行われにくくなる。このような場合、シックナをスラッジブランケット方式に変えるか、あるいは直接汜過方式⁴¹⁾を採用することも考えられるが、すでに沈降したスラッジを再び原濁水に返送して、SS 濃度を凝集フロック形成に適する濃度にまで高める方法も開発された⁴²⁾。同様のことは浄水場における原水の低濁度化に伴う凝集沈殿効率の低下に対し、フロックリサイクル方式としても検討されて薬品注入制御法が提案された⁴³⁾。

フロックが成長してからの流体から受けるせん断力による破壊は、表面浸食およびフロックの分裂による粒子数増加を考慮する必要があるとされ、粒子分布は対数正規分布をしていることが知られている⁴⁴⁾。水酸化第 2 鉄

表-1 PAAm 添加量とフロック径

凝集条件		界面沈降速度 (mm/s)	フロック直径 (mm)
Al ₂ O ₃ (g/m ³)	PAAm (g/m ³)		
20	1	0.24	0.13
20	2	0.8	0.25
20	3	2.6	0.45

フロックでは、フロックの破壊は分裂よりもむしろ表層からの粒子の剥離が大きく影響するとの報告もある⁴⁵⁾。Dollimore はカオリン懸濁液に対し、アニオン、ノニオン、カチオン性各 PAAm を添加したときの平均フロック径を求め、0.104~0.173 mm の値を得ている⁴⁶⁾。この算出には Steinour と異なる形状係数を提示しているが、この値を用い粒子径 $D_{50} = 8.2 \mu\text{m}$ 、濃度 51.6 kg/m³ の濁水をアニオン化度 24% PAAm で凝集処理したときのフロック径を求めた結果は表-1 のとおりである。

底質を浚渫し埋立地へ揚泥する工事では、底質の処理処分等に関する暫定指針、で監視基準値が定められていて、余水を埋立地外、多くは元の浚渫水域へ戻すときには、この余水の水質を基準値以下にするための処理条件の設定が必要であるとされている⁴⁷⁾。また底質の固化を目的に、セメント系を主体とした各種の底質固化剤が比較検討されたが⁴⁸⁾、新しくシリカ・フロックを固化剤として用い、凝集と固化を同時に行わせて処理する方法も開発された⁴⁹⁾。

土木工事に伴う地下水汚染としては、ベントナイト泥水の混入によって地下水の白濁が生じることもあるが、薬液注入による化学的汚染に問題が二、三発生した。重合型薬液の未重合による地下水汚染事故以来、注入薬剤は珪酸ナトリウム系に限定されたが、さらに珪酸ナトリウムと硬化剤による反応を瞬時に終結させ、未硬化の薬液が周囲に流亡して地下水をアルカリ汚染しないように二重管による瞬結注入工法や、あらかじめ中性のシリカゾルが地中で生成するよう調製した薬液を注入する工法が開発された⁵⁰⁾。

4. 泥水の処理

廃棄泥水は、工法、施工機械、施工条件、地盤条件、環境条件など多くの因子によって複雑な性状のものとなり、したがって泥水の処理方法は、濁水処理の場合ほどには、まだ定型化されたものになっていない。図-6 に泥水処理フローの概要を法規制と関連づけて示した。

泥水の現場内処理としては、まず振動ふるいを通して礫および土塊を除去し、さらにサイクロンを通して砂分を除くか、場所的に余裕のある場合は沈殿池で自然沈降によって粗粒子分を除去する。次に微粒子からなる泥水に対し凝集剤を添加してフロックを形成させ、これをス

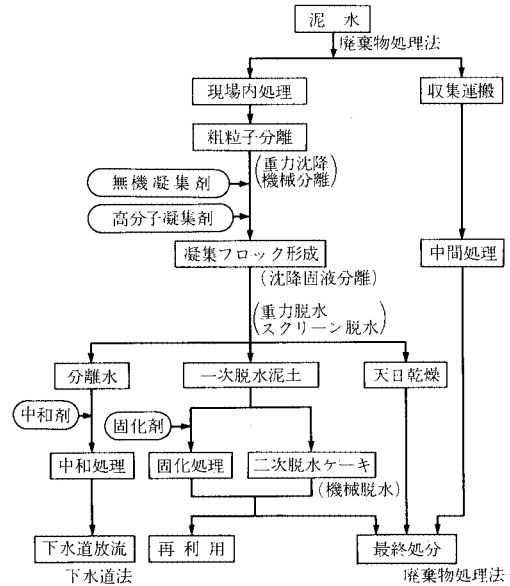


図-6 泥水処理フロー

クリーンなどで固液分離（一次脱水）して、分離水と一次脱水泥土とに分け、分離水は中和して下水道に放流し、泥土は最終処分地へ運搬し投棄するのが一般的方法である⁵¹⁾。一次脱水泥土はそのままでは処分するにあたり、含水率が高くさらに脱水する必要があるときは、フィルタプレスまたはロールプレスなどで機械的に二次脱水するか、あるいは天日乾燥または固化剤を添加して固化処理する方法が行われる。現在までに開発された泥水処理装置も多数あり⁵²⁾、また今後も、より合理的な機器装置が開発されるであろうが、いずれも土木工事現場向きに適するようにコンパクトで運搬据付けが容易であり、取扱いが簡便であることに開発努力が注がれ、特に機械的な面では、二次脱水部分について、おのおの特徴が発揮されている。泥水の現場内中間処理は、廃棄物を排出者責任において処理し排出量の減量化に努めるべきこととした、廃棄物処理法の理念に沿ったものといえる。

(1) 凝集

泥水濃度は一般に高く、無機凝集剤は 500~5 000 g/m³、PAAm は 100~1 000 g/m³ 程度が添加される。分離水の SS 規制は濁水の河川放流ほど厳しくないが、泥土は大量に発生し産業廃棄物汚泥としての適用を受けるので、凝集剤は泥土の合理的な処理処分を考慮して決められる。懸濁液が高濃度になると、沈降過程を経ることなく、ただちに自重圧密が始まるが、カオリンではその限界含水比は 250% とされており⁵³⁾、泥水も無機凝集剤のみを加えて直接加圧脱水する方法が開発された。また PAAm によって形成されるフロック強さが大きい特性⁵⁴⁾を生かし PAAm をフロック形成最少必要量以上に

過剰に添加して、泥土の脱水性をよくすることが行われる。

(2) 水中造粒

フロックを緻密化するには、フロック強さと粒子濃度が必要であるが⁵⁵⁾、泥水に過剰の PAAm を加え、形成したフロックをそのせん断強さ以下のせん断応力のもとで暫時攪拌しているとフロックはしだいに密になり⁵⁶⁾、直径 2~4 mm 程度に成長し、目開き 2 mm のスクリーンで直接に分離水をこし分けることができるようになる。図-7 にその測定結果を示した。このような高分子量 PAAm の特徴を生かすには、凝集造粒槽内において高粘性の泥水と PAAm 水溶液とをよく混合接触させることが必要となるがそのための種々の工夫たとえば、高濃度泥水ではいったん希釈してから PAAm を添加することなどが行われている。また薄層流による乱流攪拌効果を利用した混合方法も開発された。その模式図を図-8 に示すが、多段式傾斜板上を泥水と PAAm とが薄層流となって流下するときは、粘性による速度勾配でフロックの形成と成長が行われる。いま泥水中に x, y, z 座標軸をとり、各速度成分を u, v, w とし、粘性係数を η とすれば、損失エネルギー ϵ は式 (3) となる。

$$\epsilon = \eta \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (3)$$

傾斜板上の流れにおいて、流下方向を x 軸、傾斜板に垂直な方法を y 軸、同板平面内で x 軸に垂直な方向を z 軸とすれば、 $u \neq 0, v = 0, w = 0, \partial u / \partial y \neq 0, \partial u / \partial x = 0, \partial u / \partial z = 0$ であるから、 ϵ は式 (4) で与え

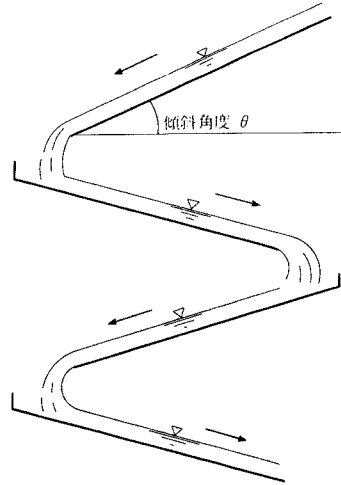


図-8 多段式傾斜板

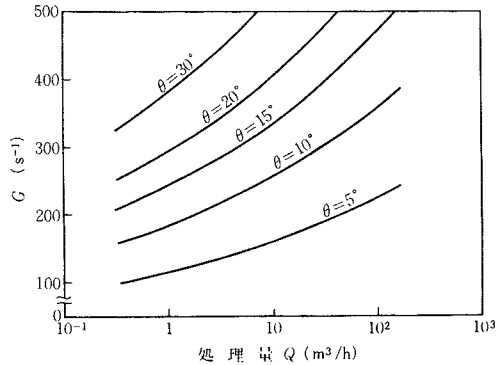


図-9 処理量と G 値との関係

泥水SS濃度 (g/m ³)	PAC (g/m ³)	PAAm (g/m ³)	含水比	スクリーン通過率
219 000	2 500	134	●	○
219 000	2 500	200	▲	△
219 000	2 500	267	▼	▽

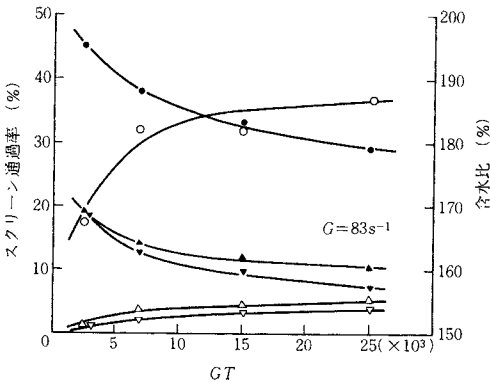


図-7 フロックの含水比およびスクリーン通過率に及ぼす PAAm 添加量の影響

られる。

$$\epsilon = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \dots \dots \dots (4)$$

泥水と PAAm は傾斜板上を薄層流となって乱流状態で流下し、板面近くでは粘性応力が卓越する粘性底層をなし、粘性底層の上にはレイノルズ応力が卓越する部分が形成されている。カルマン係数を K 、傾斜板の傾斜角を θ 、薄層流の層厚を H 、動粘性係数を ν とすれば、速度勾配 G は式 (5) で与えられる。

$$G = \frac{1}{K} \frac{\sqrt{H g_c \sin^3 \theta}}{\sqrt{11.6 \nu}} \dots \dots \dots (5)$$

傾斜板の幅を 1.2 m、 $K=0.4$ とし、傾斜角 θ をパラメーターとして泥水処理量 Q (m³/h) と G との関係を探ってみると図-9 が得られた³³⁾。

(3) 泥土の処理

フロックを箱形スクリーンや回転円筒スクリーンなどで一次脱水した泥土は、多くの測定例によると、含水率は 55~75% 程度であり、廃棄物処理法における含水率

85% 以下という汚泥の埋立処分基準に該当している。しかし土質によっては、これをダンプまたはコンテナ車に積むと、最終処分地までの走行中に微振動の繰返しによって流動化するものもあり、このため処分地での受入れを制限される場合もある。このようなときには振動によって流動化しない状態にまで、一次脱水泥土の土質性状を改良する処理、たとえば二次脱水や固化剤添加による固化処理が必要となる。建設工事から大量に排出される建設残土は、土地造成や埋立材料として使用される有用物であり、廃棄物処理法の適用を受けないが、汚泥はその適用を受け適正に処理処分することが義務づけられている。汚泥の含水率 85% 以下はあくまでも埋立処分基準であって、汚泥と土砂との区分基準ではなく、両者を区別する具体的な数値上の基準が示されていないので、汚泥というものの基準を設定しにくい。脱水ケーキには含水率 50% 以下で、一般の掘削残土なみの土質性状を有しているものも多い。しかしながら有償で取引される有用物でなく、通常の土地造成に利用できない性状のものは汚泥としての取扱いを受けることになる。

a) 泥土の運搬

軟弱土がダンプ走行中に流動化することなく最終処分地まで運搬可能なものかどうかは、その含水率と関係づけて判断されるが、土の粒度特性によってコンシステンシーが相違し、含水率からは一律に流動性を判断しにくいことも多い。そこでダンプ運搬されていた掘削残土の中から比較的軟弱なものを採取して、JIS R 5201 セメントの物理試験方法におけるモルタルフロー試験機を用いてフロー値を求めてみた。JIS における落下回数 15 回を 50 回まで増やした結果を図-10 に示す⁵⁷⁾。e の砂質土は荷崩れの傾向があったが、a, b の粘性土および c, d のシルトはいずれも荷崩れは認められなかった。また A, B は泥水加圧シールド工法、C はリバース工法における泥水を処理した一次脱水泥土であるが、a~d と比較すると含水比の大きな相違が認められる。そこで流動化抵抗性に対する PAAm の効果を見るため、凝集条件を変えた脱水泥土について、50 回フロー値ならびにペーンせん断強さと含水比との関係をもとに図-11 となり、PAAm が添加されると耐流動性が著しく向上する。これは水溶性高分子が土粒子表面に吸着することにより、フロク間隙に親水性高分子物が介在して一種の弱い含水ゲル類似の構造をとるためであろう。また含水珪酸ゲルを泥土と組み合わせても耐流動性が改良される⁵⁷⁾。このような耐流動性の改良は、強親水性の樹脂すなわちアクリル酸ナトリウムと少量の二官能性単量体とから共重合させた吸水性樹脂が、水中においてその体積の数倍の膨潤体にまで吸水する性質を利用して可能であるし、さらにはポリマーの二次転移温度が低く、強い粘接

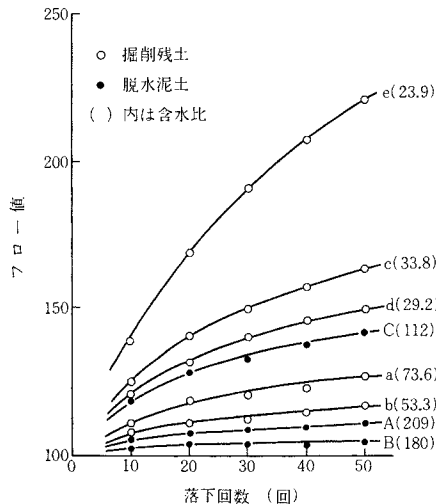


図-10 泥土の JIS R 5201 試験によるフロー値

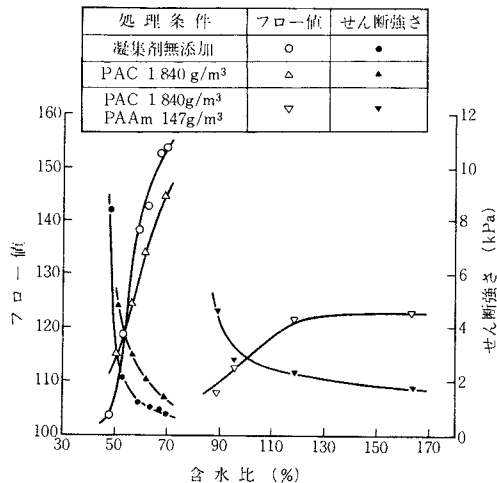


図-11 脱水泥土の含水比とフロー値およびせん断強さとの関係

着性をもつポリマーエマルジョン⁵⁸⁾を添加しても図-12 に示すように流動性を改良することができる。図中には環境庁告示 13 号による溶出液 pH 値も示した。

b) 有効利用

大量に発生する建設残土の処分対策が、受入れ処分地の不足、環境公害の併発などから、目下の急務として鋭意検討されているが、泥土を再資源化しようとする試みも活発化し実用化されている⁵⁹⁾。また下水汚泥でも多方面にわたる有効利用が図られている⁶⁰⁾。泥水を処理した脱水ケーキを単なる産業廃棄物汚泥として処分することなく、積極的に有効利用を図るため、土質工学的性質ならびに水質環境に係る性状が詳細に調べられ、一般の沖積粘土と比較して、単なる埋立土ではなく、かさ上げ盛

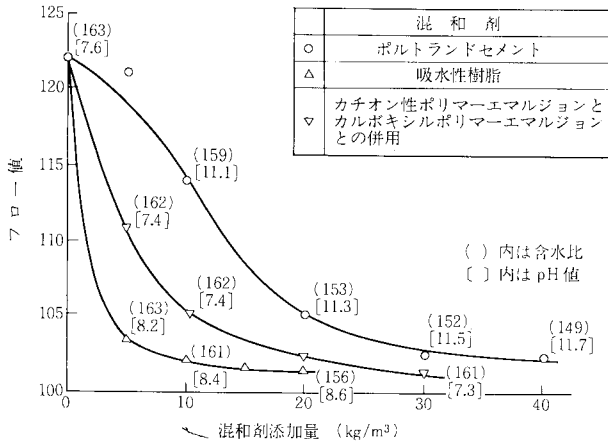


図-12 泥土に対する混和剤添加量とフロー値との関係

土材としても同様に取り扱い得ることが明らかにされた⁶¹⁾。また地下連続壁工事などから発生する高含水比の掘削泥土は産業廃棄物無機性汚泥としての適用を受けるが、これを廃棄泥水とともに固化剤と混合処理し、構真柱埋戻し材として利用する方法が実用化された⁶²⁾。

(4) 廃棄泥水発生量の低減

泥水工法における廃棄泥水の発生は工法上避けられないとしても、その発生量を抑制することによって泥水処理量を極力減少させる方法も種々開発された。

a) 掘削用泥水の劣化防止

泥水の劣化防止のための泥水管理手法⁶³⁾の確立は、同時に廃棄泥水の排出量低減化にもつながることになり、各面からの検討が行われている。たとえば掘削用泥水はコンクリート打設時に混入するカルシウムイオンなどの影響を受けて懸濁安定性が低下し泥水機能が劣化する。この劣化を防止し循環使用回数を上げ、廃棄泥水発生量を低減するために分散剤が添加される。現在用いられているものは、鉄ホウ素リグニンスルホン酸ナトリウム (SFL)、ヘキサメタリン酸ナトリウム (SHMP)、ト

リポリリン酸ナトリウム (STPP)、ポリアクリル酸ナトリウム (SPA) などで、いずれもカルシウムイオン封鎖効果に優れたものであるが⁶⁴⁾、ポルトランドセメント (OPC) に対する抵抗性は図-13に示すように5 kg/m³程度の添加で著しく改良することができる⁶⁵⁾。またさらに進んで耐劣化性が大きく循環再使用の優れたポリマー泥水も開発実用された⁶⁶⁾。ポリリン酸塩は耐硬水性に優れ、洗剤ビルダーとして盛んに用いられてきたが、最近、使用量が急減し⁶⁷⁾、多くの国でリン酸塩規制がされている⁶⁸⁾。分散剤として泥水中に含まれるリン酸塩は、過剰のPACを添加し土粒子と共凝集してやれば、分離水中にほとんど残留しないことは表-2のとおりである。また分散剤・増粘剤には有機物のものが多く、これらも過剰のPACにより同時に共凝集除去される⁶⁹⁾。

b) 泥水固化工法

地下連続壁工法では、掘削終了後泥水を孔内において固化させる泥水固化工法が開発された。この固化体は周

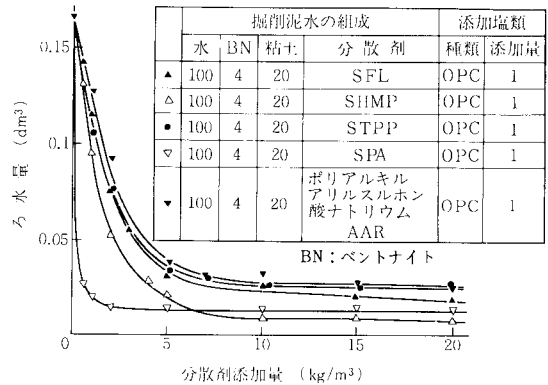


図-13 分散剤添加による掘削泥水の耐塩性改良効果

表-2 分散剤、増粘剤を含むBN泥水の凝集処理

泥水組成						処理方法	汚液分析		
水	BN	分散剤	増粘剤	種類	量		COD	BOD	全リン
100	4	ナシ	ナシ			直接汚過	6.0	3.4	283
100	4	ナシ	CMC	0.1		同上	101	5.2	
100	4	SFL	CMC	0.1		同上	781	82.2	
100	4	SPA	CMC	0.1		同上	438	13.4	
100	4	STPP	CMC	0.1		同上	123	12.1	
100	4	ナシ	CMC	0.1		PAC 12000 g/m ³ 添加後、PAAm 80 g/m ² 添加して汚過	6.8	8.1	
100	4	SPA	CMC	0.1		同上	12.7		
100	4	STPP	CMC	0.1		同上	14.1	13.2	

PACは有姿(10% Al₂O₃)で表示

辺地盤と同等以上の圧縮強さを持ち、また不透水性にも優れているので、裏込め材、目地材、止水材などとして機能させることができる。この工法によれば廃棄泥水は発生しないか、発生しても相当に減量されたものとなる。固化剤としてはセメント・珪酸ナトリウム⁷⁰⁾をはじめ、各種材料が検討され、それらを用いた各種泥水固化工法が開発された⁷¹⁾。

5. 環境対策としての濁水・泥水処理の問題点

濁水、泥水とも、その処理法開発の過程は、まず処理水の水質を排水基準に適合させ、しかも土木工事現場内処理に適する処理方式の検討、ついで脱水泥土が産業廃棄物汚泥の適用を受けることに対する適正処分上の対応とともに、泥土を有効利用する方法も検討され、さらに発生量を低減するための技術開発へと進んできた。土木工事の計画段階において発生量を予測しにくい場合も多く、勢い処理装置は過大になりがちである。そのため処理用機械の標準化とユニット化が望まれるが、さらに現在のような経験に頼る凝集剤種類の選択ならびにその添加量の決定方法を、より定量化するための手法の開発も、この標準化に寄与する一つの要素とされている。また現在わが国においては、浄水場スラッジ処理の場合に限ってPAAmの使用に限定条件が付けられているものの、濁水・泥水の処理では、他種高分子凝集剤に比べ凝集効果の優れた面から、大部分がPAAmを使用している。一方、その安全面に対しては詳細な毒性試験が行われ、MAAm残留量の自主規制されたPAAmでは安全性に問題はないものとされている⁷²⁾、土木工事現場内処理の状況上、処理水は一般河川海域など公共用水域へ放流することも多く、今後、水質の二次汚染防止を含めた、より慎重な安全性の高い、水質汚濁対策のための処理技術の開発が期待されるものである。

6. あとがき

現在までに開発されてきた濁水・泥水の処理技術に関連する事項をまとめるにあたって、既出の文献を参考にさせていただいたので、できるだけ吟味したつもりであるが、誤解や独断的解釈が多々あったものと思われ、大方のご批判をお願いする次第である。おわりに環境衛生工学関係の多くの方々から種々ご助言いただいたことを厚く感謝します。

参考文献

- 1) 合田 健：水質汚濁防止対策の将来像，用水と廃水，Vol. 26, No. 5, pp. 3~18, 1984年5月。
- 2) 日本ダム協会：ダム建設工事における濁水処理，財団法人日本ダム協会，1983年1月。
- 3) 杉山 篤：建設工事における汚濁水の規制と処理，建設

- の機械化，No. 295, pp. 8~16, 1974年9月。
- 4) 小林 勲・今野昭三・岩崎光美：建設工事における濁水・泥水の処理工法，鹿島出版会，1983年4月。
 - 5) 大木達夫・高橋岩一：大町ダム建設に伴う環境問題とその対策，ダム日本，No. 441, 1981年7月。
 - 6) 岩崎光美：濁水処理の現状と問題点，建設の機械化，No. 326, pp. 7~12, 1977年4月。
 - 7) Jorden, R. M. : Coagulation flocculation, Part 2, Water & Sewage Works, pp. 43~47, Feb, 1971.
 - 8) 後藤克己・四ツ柳隆夫：アルミニウムイオンの性質，工業用水，No. 47, pp. 18~25, 1962年8月。
 - 9) Kitchener, J. A. : Principles of action of polymeric flocculants, Br. Polym. J., pp. 217~229, 1972.
 - 10) Slater, R. W. and Kitchener, J. A. : Characteristics of flocculation of mineral suspensions by polymers, Discus. Farady Soc., Vol. 42, pp. 267~275, 1966.
 - 11) 三浦重義：廃泥水処理と公害の問題，基礎工，Vol. 3, No. 5, pp. 11~16, 1975年5・6月。
 - 12) 田中伊三雄：琵琶湖における埋立造成工事の濁水処理対策，土木技術，Vol. 36, No. 3, pp. 89~93, 1981年3月。
 - 13) 熊谷浩二・佐藤 久・永山 晁：凝集助剤の比較実験とくにCMC-NaとAlg-Naについて，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，II-171, pp. 331~332, 1978年。
 - 14) 広浜全洋・三浦重義・蔵野彰夫：ポリアクリル酸ナトリウムによる建設工事濁水の凝集処理，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，II-79, pp. II-79-1~2, 1979年。
 - 15) 大橋九万雄：ポリアクリル酸ソーダによる粘土の団粒化について，日本土壤肥料学雑誌，Vol. 27, p. 383, 1957年。
 - 16) 東谷 公・細川義二郎・相本英樹・松野義三：カチオン性高分子凝集剤荷電密度の凝集への影響，化学工学論文集，Vol. 9, No. 5, pp. 543~548, 1983年。
 - 17) Dollimore, D. and Horridge, T. A. : The dependence of the flocculation behavior of china clay polyacrylamide suspensions on the suspension pH, J. Colloid and Interface Sci., Vol. 42, No. 3, pp. 581~588, 1973.
 - 18) Gregory, J. : Rates of flocculation of latex particles by cation polymers, J. Colloid and Interface Sci., Vol. 42, No. 2, pp. 448~456, 1973.
 - 19) Michaels, A. S. and Morelos, O. : Polyelectrolyte adsorption by kaolinite, Ind. Eng. Chem., Vol. 47, No. 9, pp. 1801~1809, 1955.
 - 20) Walles, W. E. : Role of flocculant molecular weight in the coagulation of suspensions, J. Colloid and Interface Sci., Vol. 27, No. 4, pp. 797~803, 1968.
 - 21) Attia, Y. A. and Rubio, J. : Determination of very low concentration of polyacrylamide and polyethyleneoxide flocculants by nephelometry, Br. Polym. J., pp. 135~138, 1975.
 - 22) Croll, B. T., Arkell, G. M. and Hodge, R. P. J. : Residues of acrylamide in water, Water Research, Vol. 8, pp. 989~993, 1974.
 - 23) 鈴木英友・有満秀信：浄水場汚泥の脱水における残留高分子凝集剤の回収除去，第23回全国水道研究発表会講演集，4-23, pp. 190~191, 1972年。
 - 24) 迫原修治・海野 肇・明島高司：非イオン性有機高分子

- 凝集剤の最適添加条件における懸濁粒子への凝集剤付着量, 化学工学論文集, Vol. 8, No. 4, pp. 532~541, 1982年.
- 25) 片岡崇志：骨材プラントにおける濁水の機械処理, 施工技術, Vol. 9, No. 3, pp. 33~43, 1976年3月.
- 26) 宮永信幸・堀川武夫・坪内 彰・植山洋一・塩谷勝夫：水中における高分子凝集剤の残留性とその毒性, 水処理技術, Vol. 18, No. 4, pp. 33~42, 1977年.
- 27) Dollimore, D. and Horridge, T. A. : The optimum flocculant concentration for effective flocculation of china clay in aqueous suspension, Water Research, Vol. 6, pp. 703~710, 1972.
- 28) Verma, S. and Chaudhuri, M. : Colloid chemical parameters for coagulant dose control, JAWWA, pp. 102~105, 1978.
- 29) Leentvaar, J., Ywema, T. S. J. and Roersma, R. E. : Optimization of coagulant dose in coagulation flocculation of sewage, Water Research, Vol. 13, No. 3, pp. 229~236, 1979.
- 30) 海野 肇：高分子凝集剤の利用とその展望, 化学工業, pp. 171~179, 1984年2月.
- 31) Kos, P. and Adrian, D. D. : Transport phenomena applied to sludge dewatering, J. of the Environmental Engineering Division, pp. 947~965, December 1975. 11781.
- 32) 村田康弘・松岡 譲・住友 恒：泥の圧密実験とその数値解析, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, II -185, pp. 357~358, 1978年.
- 33) 服部博太郎：建設工事における廃棄泥水処理法に関する研究, 京都大学学位論文, 1978年9月.
- 34) 土木学会衛生工学委員会 水質管理に関する研究小委員会：汚泥処理上からみた合理的浄水方法, 汚泥処理上からみた合理的浄水方法に関する研究総括報告書, 土木学会, p. 25, 1980年3月.
- 35) 三浦重義・服部博太郎・久根幸男：廃泥水処理におけるフロクのろ過性に及ぼす凝集剤の影響, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, II -186, pp. 359~360, 1978年.
- 36) 丸山俊朗：炭酸ガスによるアルカリ性排水の中和に関する研究(II), 下水道協会誌, Vol. 15, No. 169, pp. 58~69, 1978年6月.
- 37) 古田富夫・飯塚力也：濁水処理の現状と問題点・海中の橋脚基礎工事の濁水処理, 建設の機械化, No. 326, pp. 34~42, 1977年4月.
- 38) 秦 保之・工藤裕至：敵木グムの施工計画, 建設の機械化, No. 411, pp. 43~48, 1984年5月.
- 39) 蜂屋可直・田島利男・小林以策：トンネル工事の濁水処理, トンネルと地下, Vol. 7, No. 11, pp. 31~40, 1976年11月.
- 40) 日本トンネル技術協会環境保全小委員会：トンネル工事濁水処理方法に関する調査研究報告書, 社団法人日本トンネル技術協会, 1976年2月.
- 41) Yapijakis, C. : Direct filtration: polymer in backwash serves dual purpose, JAWWA, pp. 426~428, August 1982.
- 42) 加藤太重・新名順一：ダム工事における濁水処理の現状と今後の課題, ダム日本, No. 433, pp. 1~10, 1980年11月.
- 43) 芳賀鉄郎・斉藤幸雄・斉藤憲一・柏木雅彦：フロックリサイクルによる低濁度原水薬注制御法の基礎検討, 第34回全国水道研究発表会講演集, 4-30, pp. 146~148, 1983年.
- 44) 住友 恒・宇治貞宏・平井雄二：フロクの破壊に関する基礎的研究, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集, II -352, pp. 673~674, 1977年.
- 45) Leentvaar, J. and Rebhun, M. : Strength of ferric hydroxide flocs, Water Research, Vol. 17, No. 8, pp. 895~902, 1983.
- 46) Dollimore, D. and Horridge, T. A. : The shape factors of china clay polyacrylamide suspensions, Analyst, Vol. 97, pp. 490~494, June 1972.
- 47) 棚橋貞明・佐々木栄三：東京港における汚泥(浮泥を含む)浚渫について, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp. 41~46, 1978年1月.
- 48) 喜田大三・久保 博・漆原知則：へどろ・軟弱土処理における各種固化材の比較検討, 材料, Vol. 31, No. 341, pp. 176~182, 1982年2月.
- 49) 三木五三郎・下田一雄・柴崎光弘：浮遊へどろの凝集と固化の同時処理技術, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp. 47~53, 1978年1月.
- 50) 島田俊介・下田一雄・江口博昭・柏原健二：中性シリカゾルを用いたグラウトとその施工効果について, 材料, Vol. 31, No. 341, pp. 144~150, 1982年2月.
- 51) 藤田圭一：廃棄泥水の処理について, 土と基礎, Vol. 21, No. 1, pp. 47~52, 1973年1月.
- 52) 総合土木研究所：基礎工事用機械の現状, 基礎工, Vol. 6, No. 2, pp. 74~86, 1978年2月.
- 53) 奥村樹郎・梅原靖文：海底浮泥の基本的性質, 土と基礎, Vol. 26, No. 1, pp. 25~32, 1978年1月.
- 54) 丹保憲仁・山田浩一・穂積 準：フロク強度に関する研究, 水道協会雑誌, No. 427, pp. 4~15, 1970年4月.
- 55) 片岡克之・府中裕一・角田吾省：団塊凝集によるフロックブランケット型凝集沈殿装置の高効率化, PPM, Vol. 10, No. 11, pp. 25~35, 1979年11月.
- 56) 楠田哲也・古賀憲一・粟谷陽一：塩水中における粘土粒子の凝集, 用水と廃水, Vol. 20, No. 3, pp. 295~300, 1978年3月.
- 57) 三浦重義・吉田清司：建設工事における廃泥水の処理, 基礎工, Vol. 10, No. 5, pp. 45~53, 1982年5月.
- 58) 松本恒隆・大久保政芳・柴尾 進：高分子カチオン性エマルジョン粒子の粘着性がへどろの凝集に及ぼす効果, 日本接着協会誌, Vol. 12, No. 12, pp. 453~459, 1976年.
- 59) 中井 章・荒 忠彦：排泥の利用とその現状, 化学と工業, Vol. 37, No. 2, pp. 113~115, 1984年2月.
- 60) 福井経一：下水汚泥の有効利用, 土木技術資料, Vol. 26, No. 6, pp. 291~292, 1984年6月.
- 61) 喜田大三・辻 博和・炭田光輝：脱水ケーキの土地造成材としての諸性状—土工における濁水処理に関する研究(第10報), 第17回土質工学研究発表会, 265, pp. 1057~1060, 1982年.
- 62) 恵比寿隆夫・笹原 厚：廃棄泥土固化処理設備の開発と

- 施工例, 建設の機械化, No. 413, pp. 34~39, 1984年7月.
- 63) 三木五三郎: 溝・杭・トンネル掘削への泥水利用, 基礎工, Vol. 10, No. 5, pp. 2~5, 1982年5月.
- 64) Chang, D.M.: The binding of free calcium ions in aqueous solution using chelating agents, phosphates and polyacrylic acid, JAOCS., Vol. 60, No. 3, pp. 618~622, March 1983.
- 65) 三浦重義・吉田清司: ベントナイト安定液の耐セメント性に及ぼす分散剤の影響, 第17回土質工学研究発表会発表講演集, 261, pp. 1041~1044, 1982年.
- 66) 喜田大三・川地 武: 高分子・粘土複合体の泥水工法への適用, 土と基礎, Vol. 28, No. 2, pp. 23~30, 1980年2月.
- 67) 岡村富士夫: リン酸とその塩類の化学, 化学と工業, Vol. 37, No. 4, pp. 218~221, 1984年4月.
- 68) 大場健吉・武井玲子: 世界各国の合成洗剤中のリン酸塩規制の近況, 油化学, Vol. 30, No. 7, pp. 450~455, 1981年7月.
- 69) 三浦重義・吉田清司: 増粘剤と分散剤を含むベントナイト廃泥水の処理について, 第16回土質工学研究発表会発表講演集, 459, pp. 1833~1836, 1981年.
- 70) 増沢鯨男・田中健治郎・矢尾博治: セメント一けい酸ソーダによる掘削溝中ベントナイト泥水の急結法, セ技年報, 32, 135, pp. 526~528, 1978年.
- 71) 齊藤二郎: 安定液固化工法の展望一種類と使い方, 基礎工, Vol. 12, No. 4, pp. 2~13, 1984年4月.
- 72) 高分子凝集剤懇話会: ポリアクリルアミド系高分子凝集剤の毒性についての試験データ(その2), 工業用水, No. 278, pp. 54~58, 1981年11月.

(1984. 8. 25・受付)
