特集/下水汚泥の濃縮の効率化

神戸市における汚泥濃縮の動向

森 田 正 巳*・井 上 寿 三**

1. はじめに

神戸市の下水道は昭和26年に着手して以来、30有余年を経過し、現在、人口普及率で88%に達している。これに対応して終末処理場も既に12ヶ所で稼動するに至っており、今後は昭和58年秋に供用開始をめざして、現在鋭意建設中の新垂水処理場を残すのみである。まさに、本市の下水道は建設から維持管理の時代を迎えたといえよう。いうまでもなく下水道は建設が目的ではなく、これら建設された施設を適正に維持管理して、市民サービスに努めるところに意義があり、常に最小の経費で最大の効果を発揮するよう不断の努力を求められている。

しかし、下水処理施設の維持管理には多額の経費を必要とし、しかも年々累増していく傾向にある。従って限られた財源と人員のなかではより一層の効率化を図る必要があり、本市の下水道も今後は量的拡大から質的向上に一層重点をおいた下水道をめざす時代に入ったといえる。

このような背景のなかで、より機能的、効率的な処理をめざして処理技術の改善に鋭意取り組んでいるところであるが、本稿では最近汚泥処理プロセスの経済性の観点より重視されるようになった汚泥濃縮技術について、本市の動向、強制濃縮法の実施例等について紹介する。

2. 汚泥濃縮の重要性

汚泥処理プロセスは基本的には濃縮—調質—脱水—焼却の各工程の組み合わせにより構成されており、その先端に位置するのが濃縮工程である。

汚泥処理においては濃縮により汚泥体積を極力減容化することが、後続の汚泥処理工程の規模を縮小化することになり、処理効率を高めることになる。従って

濃縮は効率的、経済的な汚泥処理を行うため必要不可欠のものであるばかりでなく、濃縮にさいして固形物回収率を高めることは、水処理系内循環汚泥を軽減し、水処理の効率化、安定化にも寄与するものである。この意味で濃縮は下水処理システムにおいて極めて重要な位置にあるといえる。

本市では従来より混合汚泥を重力濃縮する一般的な方法をとってきた。しかし分流式の汚泥は有機分が80%程度と高く、沈降性が悪いいため濃縮しにくい傾向にあった。とくに余剰汚泥はSVIが高い場合や、夏場には2%弱しか濃縮せず、しかも固形物回収率が悪いいため水処理系にも悪影響を及ぼすなど次のようなへい害を生じていた。

- (1) 消化タンクの効率低下と加温熱量の増加
- (2) 汚泥脱水機の処理能力低下
- (3) 脱水用薬注量の増加と脱水ケーキ量の増加
- (4) 流出固形物の水処理系内循環によるエアレーションタンク負荷の増加
- (5) 余剰汚泥引抜量制限によるキャリーオーバーの発生

このようなへい害はすべて余剰汚泥の沈降性の悪さに起因するものといえる。そして今後は下水道の普及に伴い、分流式に限らず汚泥の沈降濃縮はさらに難しくなっていくものと考えられる。

一方、省資源、省エネルギー対策の推進を図るため、汚泥処理技術の改善について積極的に取組む必要があり、本市においても省エネ・減量化の観点より汚泥消化タンクが見直されるようになった。これは分流式汚泥が有機分含有率の高いことに着目し、消化タンクを活用して減量・安定化するとともに、発生した余剰消化ガスを燃料として積極的に有効利用しようとするものである。いうまでもなくこれには高率消化をめざす必要があり、濃縮技術の改善が欠かせないものとなっている。

* 神戸市下水道局設備課 設備課長 Masami MORITA

** 全 上 設備係長 Hisazo INOUE

3. 余剰汚泥の強制濃縮

(1) ソリッドボウル型遠心濃縮機の導入

汚泥濃縮の改善には沈降性の悪い余剰汚泥を生汚泥と分離し、生汚泥は従来どおり重力濃縮とし、余剰汚泥を遠心濃縮法や加圧浮上濃縮法により強制濃縮する方式が有効とされ、最近注目されるようになってきた。

本項では東灘処理場で運転している遠心濃縮機について、その概要を紹介する。

ソリッドボウル型遠心濃縮機の特長として

ア. 余剰汚泥を無葉注で、5%前後に濃縮できる

イ. 装置がコンパクトで、設置面積が小さい

ウ. 連続運転が可能で、手間がかからない

エ. 密閉構造で、防臭対策が容易である

等の利点を有していることに注目し、本市では昭和50年頃に有野処理場に小型実験機を持ち込み、余剰・生・混合汚泥を対象にして濃縮効果、脱水効果等の基礎実験を行い、一応所期の成果が得られたので、引き続き昭和51年に東灘処理場に処理能力30m³/時の大型機を持ち込み、1年間にわたる実証テストが行われた。

当時、この処理場は流入水量が著しく増加し、しかも重力式濃縮タンクの設置をみあわせていたこともあって、汚泥回収能力が不足し、水処理系に悪影響を招いていた。このような状況のなかで、実証テストにより余剰汚泥の分離濃縮に対する有効性が確認されたため、余剰汚泥の一部を対象に表1に示すような遠心濃縮機2台を急拠導入することとし、昭和53年9月頃から実運転に入っている。

東灘処理場の場合は濃縮余剰汚泥の全量を直接真空脱水機にかけているため、遠心濃縮機の運転に当っては濃縮汚泥濃度に重点をおいた運転を行っているが、本機の導入により

ア. 濃度1%程度の余剰汚泥を無葉注で、5%前後に

写真1 中部処理場 浮上装置フロスカき取り機

濃縮可能になった

イ. エアレーションタンクのMLSS濃度を容易に制御できるようになり、水処理が安定化した

ウ. 真空脱水機の汜過速度が向上した

等の効果がみられ、当処理場にとって救世主的な役割りを果たしてきたが、一方において次のような問題点も指摘されている。

ア. 固形物回収率は60～80%とかなりばらつきがあり、実験データーの95%を実運転で維持することは困難である。本機に投入する汚泥は安定した濃度、性状のものが望ましいが、現実にはある程度の時間変動、季節変動等の負荷変動はやむを得ないことである。

従って回収率を向上させるには、本機の特長上、投入汚泥の濃度、性状に合わせてダム深さとスクリュボウル回転差速を調節して濃度と回収率のバランスを適切に設定する必要があるが、これらの間には微妙な相関があり、特にダムレベルの設定は容易ではない。従って汚泥の性状変化に対応して容易に追従できる機能が望まれる。

イ. 消費電力量は処理汚泥当り2.8KWH/m³、回収固形物当り400KWH/T.DS程度となり、これは加圧浮上濃縮の約3倍に相当するもので、省電力化が望まれる。

ウ. スクリュ先端部は耐磨耗性を高めるためタングステンカーバイト製のタイルを溶接しているが、約18,000時間で交換した。給泥部付近のスクリュの磨耗が特に著しく、20mm程度に達していた。円錐部（ビーチ部）のスクリュが磨耗すると、ビーチ部に汚泥が堆積し、ダムレベルを浅くしたのと同じような現象が生じ、回収率が低下するとともに不安定になる。このため当処理場では12,000～15,000時間を補修時期の目安としているが、補修費は1台当り8百万円程度かかるため、

表1 遠心濃縮機設計諸元

型 式	ソリッドボウル・スクリュデカンタ
処 理 能 力	30m ³ /時
回 転 数	2,800回/分(2,800 G)
電 動 機 出 力	90kw
供給余剰汚泥濃度	1%(0.9～1.3%)
濃 縮 汚 泥 濃 度	5%以上
固 形 物 回 収 率	95%以上
設 置 台 数	2台

表 2 加圧浮上濃縮装置設計諸元

	中部処理場	西部処理場	鈴蘭台処理場
有効水面積 m^2	50 m^2 /池×2(矩形)	142 m^2 /池×2(円形)	34.4 m^2 /池×2(矩形)
フロスカき取り方式	チェーンフライト式	円周走行台車付ドラム回転式	走行台車付ドラム回転式
沈殿汚泥かき寄せ方式	なし	中央集泥方式	チェーンフライト式
供給汚泥の種類	余剰汚泥	余剰汚泥	余剰汚泥
給泥量 m^3 /日	3,000	3,770	850～970
汚泥濃度 mg/l	5,000	6,000	7,000～8,000
S V I	130～150	130～220	150～200
フロス濃度 %	3.5以上	4 (3.5～4.5)	3.5以上
分離液濃度 mg/l	200以下	200以下	200以下
気固比(A/S) $kg \cdot Air/kg \cdot DS$	0.02以下	0.025以下	0.025以下
固形物負荷 $kg \cdot DS/m^2 \cdot 日$	150以上	150以上	100以上
SS回収率 %	96.7以上	97以上	95以上

補修費の軽減が望まれる。

本機については以上の点が今後の検討課題として残されており、改善が望まれる。

(2) 浮上濃縮への指向

遠心濃縮法と並び加圧浮上濃縮法が最近非常に脚光をあびてきている。これは余剰汚泥が本来浮上しやすく、自然沈降性が劣っている傾向があり、浮上しやすいものは強制的に浮上させ、沈むものと区別して処理しようとするもので、自然な発想といえる。そして少なくとも無薬注で濃度3.5%以上を保証でき、経済上もそれほど極端に悪くならないからであろう。

本市においても、かねてよりこれに注目していたが、下記のような見通しのもとに、中部処理場に処理能力1,500 m^3 /日の加圧浮上濃縮装置2系列を導入すること

とし、昭和55年度当初から運転に入っている。

ア. 過去の実施例や、本市の実験データより余剰汚泥を無薬注で濃縮し、濃度3.5%は保証できる。フロスカき取り装置の構造、制御方法を改善することにより、目標濃度4%を達成できる。

イ. 過去の実施例では装置工学上の問題があったが、最近の技術で十分対応できる

ウ. 遠心濃縮機は負荷変動に対する適応性、消費電力量、寿命等の点で、実用機として改善の余地が残っている。また、遠心濃縮機が5%以上に濃縮可能であっても、移送、攪拌、混合技術や軸動力の点で問題があり、実用的には5%程度が妥当とすれば、浮上濃縮の4%に対し2割の減量効果は維持費の割高分と比べ、必ずしも有利とはいえない。

図-1 鈴蘭台処理場 汚泥浮上濃縮機械設備 フローシート

エ. 消化汚泥の脱水方式が無機凝集剤（塩鉄・消石灰）を使用する真空脱水機から有機凝集剤（高分子）を使用する遠心脱水機や、さらにベルトプレス型脱水機へと移行しており、これに伴い遊休化した既存の汚泥洗浄タンクを浮上濃縮タンクに転用できる。

本市では中部処理場で本装置を運転の結果、所期の成果が得られたので、これを他の処理場にも導入することとし、昭和57年度に入って鈴蘭台、西部の各処理場においても運転を始めている。これらの概要については次項で述べる。

4. 加圧浮上濃縮装置の現況

(1) 加圧浮上法の原理

汚泥中に無数の気泡を発生させると気泡は固形物の粒子に付着し、その浮力で粒子を浮上させる。加圧浮上法はこの現象を応用して汚泥を濃縮するもので、液体に加圧した状態で空気を溶解させ飽和した液体とし、この液体を大気圧に解放すると過飽和の空気が微細気泡となって放出する。この微細気泡が汚泥中の固形物に付着すると見掛け比重が小さくなり、固形物は浮上を始める。このようにして水面に形成されたフロス層は下方から上昇する新たな粒子により水面上に押し上げられ、フロス内の水分が重力で落下し圧密され濃縮が促進される。

(2) 加圧浮上法の特徴

本装置は無薬注を前提とした高濃度濃縮を目標としており、本市での運転経験から、加圧浮上濃縮法を重力沈降濃縮法と比較して顕著に違いの出ている箇所は次のとおりである。

ア. 濃縮汚泥の固形物濃度が高い

混合汚泥の重力濃縮の固形物濃度は水温の変化による影響はあるが、概ね2%前後である。余剰汚泥単独の重力濃縮は投入余剰汚泥濃度の最大限3倍程度までしか濃縮できないが、浮上濃縮は安定して3.5%以上の固形物濃度が確保できている。

イ. 固形物の回収率が高く、安定した性能が得られる

固形物の回収率は濃縮装置の分離水濃度に左右されるが、重力濃縮の場合は投入する汚泥の温度、滞留時間、性状（例えば余剰汚泥のSVI）等の変化によって重力濃縮槽からのキャリーオーバーがしばしば起っており、回収率が非常に悪い。しかし浮上濃縮の分離水はSSで100～150ppm程度で流入下水SS濃度より低い値であり、固形物の回収率が大幅に改善されるため水処理系での汚泥の悪循環は少なくなっており、水処

写真2 西部処理場 浮上装置フロスカき取り機

理にも好影響を与えている。

ウ. 臭気が緩和される

浮上濃縮は余剰汚泥に空気を加圧して溶解させているため、好気性が保たれ、かつ、汚泥の滞留時間も重力濃縮に比べて短い等の好条件により腐敗がすすみにくい。したがって臭気対策に要する費用も安価となる。

上記3項目が特に目立った点であるが、汚泥の固形物濃度があがることにより消化槽への投入汚泥量が減少し消化槽の効率が向上するとともに、加温熱量が節約できる等の付随的な効果も現れている。なお、構造物の形状から比較してみると、浮上濃縮槽の有効水深は4m以上必要であり重力濃縮槽に比べて1～1.5m深くなっている。また、浮上圧密したフロス濃度を常に有効に維持するためには、槽上部に少なくとも降雨対策としての覆いを設ける必要がある。

(3) 本市での実施例

ア. 処理のフローシート

本市ではすでに中部、西部及び鈴蘭台処理場において浮上濃縮装置を稼働させており、これらはほぼ同じフローなので図-1に示すような鈴蘭台処理場のフローシートを中心に説明する

(ア) 混気タンクに浮上濃縮槽の分離水または2次処理水を入れ空気圧縮機より4kg/cm²程度の圧縮空気を圧入し、空気を十分に溶解させる。

(イ) 空気を十分に溶解した加圧水を水深相当まで減圧（約0.4kg/cm²）し、混合管で余剰汚泥と混合させ浮上濃縮槽に導き解放する。

(ウ) 微細気泡が付着して水面に浮上した汚泥はフロス層を形成し、圧密される。フロスはかき取り機により回収され、貯留槽兼脱気槽に移送され脱気した後消化槽へ圧送される。

図-2 中部処理場 加圧浮上濃縮機械設備 (断面図)

- (エ) 槽底部に沈殿した汚泥は汚泥かき寄せ機によりピットに集められ、重力濃縮タンク等へ移送される。
- (オ) 分離水は水処理系へ排出し流入下水と一緒に処理されるが、一部は加圧水として循環使用する。

イ. 設計諸元並びに効果

中部、西部及び鈴蘭台処理場の設計諸元は表 2 のとおりであり、その効果も処理場別に記していくが西部、

鈴蘭台の装置はそれぞれ57年度に入ってから運転を開始したもので、まだ装置導入による得失が判断できるまでに至っていない。

(ア) 中部処理場

当処理場の浮上濃縮槽は矩形の汚泥洗浄タンクを転用したものであるが、改造にさいしてはできるだけ既設タンクの形状及び構造を活かした程度にとどめた

図-3 西部処理場 汚泥浮上濃縮機械設備 (断面図)

め、装置の主要機器もフロスカき取り機はフライト式とし沈殿した汚泥のかき寄せ機は設置せずに池底に設けた勾配の低部より、外部へ抽出する方法をとった。

加圧水と余剰汚泥の混合は減圧直後混合方式とし、以後の西部、鈴蘭台の装置もこの方法を継承した。フロスの脱気については3処理場とも同一タイプの機械攪拌方式となったが、フロスの比重で脱気の進み具合を追ってみると、まずフロス形成層ではフロスの比重は0.6～0.8程度であり、脱気槽に入る手前では0.8～0.9となり、脱気槽出口では1となっており順調に脱気は行われていると判断している。

昭和55年の5月より本格運転に入っており、その間フロスの濃度はほぼ4%以上を維持しており、この減容効果により消化タンクの投入汚泥量が減ったため、消化日数が伸び加温熱量が少なくなったこととあいまって余剰が量が増大している。消化汚泥の濃度は当初1.7～1.8%のものが現在、2.7～2.8%となっており、高分子の注入率並びに脱水ケーキ含水率とも若干低下している。電力の消費量は供給余剰汚泥1 m^3 当り0.8±0.02KWH程度となっており、3処理場とも概ねこの値となっている。

また、本装置の分離水の安定度は当処理場が最も悪く、SSで90～1,000ppmの範囲でよく変動している。これは槽内に沈殿汚泥のかき寄せ機を設けていないためと考えられる。しかしながら分離水が悪化するとこの水を循環使用して加圧水としているため、空気溶解率が低下し、槽内の固形物の浮上に影響を及ぼし、分離水が更に悪くなるという悪循環をおこすこととなる。したがって安定した運転を続けるため加圧水ポンプの入口付近に2次処理水を混入できるように配管し、現

写真3 鈴蘭台処理場 浮上装置フロスカき取り機

在、このラインを常用している。

(イ) 西部及び鈴蘭台処理場

西部処理場の場合も中部処理場と同じように汚泥洗浄タンクを転用したもので、同タンクが円形であったためフロスカき取り機はドラム回転式のものを採用し、沈殿汚泥かき寄せ機も通常の円形沈殿池のかき寄せ機と同じものを配置した。

鈴蘭台処理場の場合は新たに矩形の槽を築造し、走行台車と一体になったドラム回転式フロスカき取り機及びチェーンフライト式の沈殿汚泥かき寄せ機を設けた。ともに稼働を始めてから日が浅く、データの蓄積も少ないためその効果も定かでない。しかしながら中部処理場の例より懸念していた分離水のSSについてはともに100ppmを切っていることが多く、悪くても流入下水と同程度となっており、固形物の回収率の急上昇に伴い、水処理系への汚泥の悪循環は断ち切れたと思っている。フロスの濃度も3.5～4%と安定してきており、今後、消化槽の効率的な活用法とともに、維

図-4 鈴蘭台処理場 汚泥浮上濃縮機械設備 (断面図)

持管理費への影響等を追跡調査していきたいと考えている。

5. 加圧浮上の設計上の留意事項

3 処理場のうち 2 つは稼働して間がないため維持管理上の問題点は少なく、もう 1 つの処理場のトラブルも設計時点で配慮しておけば解決した事項が多いため、設計上の留意点に的をしぼってみた。

(1) 間欠運転の対策

余剰汚泥の引抜量とのバランスから装置自体が間欠運転となる場合には、混気タンクの前後に自動開閉弁を設けタンクの内圧が抜けないように配慮しなければならない。タンクの圧力を使用圧に戻すとなると空気圧縮機の吐出容量にもよるが数時間が必要となり、効率的な運転ができなくなる。

(2) フロスかき取り装置

フライト式、ドラム式その他種々のかき取り機があるがフライト式の場合、わずかであるがフロスのもぐり込み現象は避けられず、少量の水が混入しフロス濃度を下げる要因となる。

(3) 沈殿汚泥対策

円形、矩形を問わず汚泥かき寄せ機を設けた方が望ましく、常に分離水を清澄に維持して安定運転を続けるためにも、沈殿した汚泥は速やかに抽出すべきである。

(4) 加圧水の確保

通常、浮上濃縮槽の分離水を循環使用するが、分離水が悪化すると処理機能も著しく低下するので、このような場合に備え、分離水のかわりに 2 次処理水に切換え使用できるような配管が不可欠である。

(5) 供給汚泥量の制御

余剰汚泥の供給量は常に一定というわけにはいかず、種々の理由で量の調節が必要となる場合がある。この場合、吐出弁による絞り制御は汚泥中の夾雑物による閉塞の原因となりやすいため、供給ポンプのプーリの交換も含めた回転数制御及び台数制御が望ましい。

(6) 分離水の集水

矩形タンクの場合は問題にならないが円形タンクの場合、円周方向より均等に分離水を集水するのが望ましい。この方法としては、槽内円周方向に配置した 4～8 個の集水孔の配管抵抗を同一にするため、最終集合管から各々の集水孔までの配管径及び距離を同一にする等の工夫が必要である。

以上が装置の設計上配慮すべき点と考えているが、

維持管理上は、フロスの厚みのコントロールが濃厚なフロスを確保する上で不可欠な要件と思われる。フロス厚は 700～1,500 mm 平均して 1,000 mm 程度に保つのが理想的であるが、フロス厚を測定するセンサーの信頼度が乏しいのが難点である。しかし供給量と濃度からタイマー運転によるフロスカき取りでも実用上支障なく運転できており、フロスの発達した上面だけの検出でフロスカき取り機を運転することも可能であろう。

6. おわりに

本稿では余剰汚泥の浮上濃縮法を中心に、本市における汚泥濃縮の動向についてその概要を求めた。浮上濃縮法は重力濃縮に代る一つの方法として脚光をあびはじめたが、我が国では運転実績も少なく、未だ確定技術として評価されるまでに至っていない。

しかし、欧米ではかなりの運転実績があり、今後、汚泥処理の効率化が叫ばれるにつれ、我が国でも採用の傾向が強まるものと考えられる。

本市における浮上濃縮もはじめたばかりであり、本稿ではその導入効果について主として定性的な記述にとどまったが、今後、詳細な追跡調査を行い、汚泥処理プロセス全体の効率化の観点より総合的に追求していく必要があると考えている。