

下水道システム制御の計画上の諸問題

Engineering Aspects on the Planning of Instrumentation, Control and Automation Systems for Wastewater Treatment Systems

加藤修嗣* Shûji Katô

下水道システム制御の計画を行なうためには、「下水道システム制御とは何か」から始まり、システムの性質を把握して、システムの定量的、定性的な解析が前提条件となる。

このためには、生物化学的プロセスを主体に土木、建築などの施設、処理機械設備、電気設備、計装設備などが相互に深いかかわり合いをもって関連事項をオーバーラップさせながら計画を進めていく必要がある。

また下水道システムの目的を効果的に達成するために、システム全体の総合信頼性を高めることが重要である。

一方、これまでの下水道のシステム制御の計画においては維持管理の分野まで踏み入って計画がなされていなかったきらいがある。しかし昨今のように、電子計算機や計装設備を活用したシステムにおいて、長期にわたり円滑に運転していくためには、維持管理の計画を下水道システムの全体計画のなかに位置づけ、運転管理体制、教育訓練などについても十分に検討しておく必要がある。

以上述べたような事柄を考慮して、はじめて最適な下水道のシステム制御が実現するものとする。

1 緒 言

下水道システムは雨水の排除、水質保全、水資源確保のための基本的な都市施設であり、その処理プロセスは一般に活性汚泥法が採用され、下水管渠、ポンプ場、最初沈殿池、曝気槽、最終沈殿池など数段階の複雑な過程で構成されている。これらの物理的なシステムは元来、非衛生的なものを浄化する使命をもっているために過酷な環境におかれている。しかしこれを運営していくためには、維持管理に当たる人的システム、また下水道事業を推進する行・財政制度を含めトータルシステムとして考える必要がある。また下水道システム制御という場合、一概に定義づけることはできないがシステム全体の運転成績を最大にし、処理コストを最小にできるよう、プロセスの単位操作、例えばポンプ、沈殿池、曝気槽などに鍵となる指標、すなわちポンプますの水位、曝気槽の溶存酸素濃度、混合液平均浮遊物濃度の設定値を与え、単位操作の干渉、矛盾を除き円滑な運転管理を図る技術と定義できよう。しかし今日、なぜ下水処理に対しシステム制御というものが重視されてきたか、その背景には次のような点が考えられる。

第一には、都市の過集積により下水量が著しく増大しているのに対し、用地取得が困難なため処理場敷地が狭く限られそのため下水処理を効率的に処理しなければならないということ。

第二には、水質汚濁を防止し衛生的で快適な生活環境を保持するため、下水処理の高度化が要請され、これまでより多大な資源やエネルギーを消費するようになってきたこと。

第三には、下水道システムのように膨大な資金投下を必要とする事業を差し迫った地方財政のなかで積極的に執行していかなければならないということ。

以上のようなことから、生活環境の保全、処理の最適化、処理効率の向上、電力の有効利用、運転経費の削減が今日の

重要な課題となっている。

このことから、この論文では下水道システムの物理的な構成の技術的側面と、そのトータルの運営のために維持管理との有機的な結合を考慮した下水道システム制御の計画上の諸問題とについて述べる。

2 下水道システムの特性と解析

従来、下水道システムの運転管理は、都市の広い地域に散在するポンプ場や、処理場の広い敷地内に設けられた沈殿池、曝気槽などの施設をそれぞれ個別に人間の勘と経験的な判断に基づいて行なわれてきた。しかし近年、下水道システムの大規模化とシステム運営の高度化の要求に対し、従来どおりの勘と経験だけでは、もはや追従しきれなくなっている。このため計装の高度化、制御用電子計算機の導入などが図られるが、これには下水道システムの特性が、定性的・定量的にも明確に把握されなければならない。すなわち下水道システムの解析を十分に行なう必要がある。この例について次に述べる。

2.1 流入下水量とポンプ場の特性

ポンプ場の特性は、ポンプをポンプますの水位によって制御を行なう場合、晴天時及び雨天時の流入下水量を把握することが系統解析の基本となる。合流式管渠において晴天時にポンプますの水位による汚水ポンプの制御は、流入管渠内の汚水貯留量を考慮する必要がある。また雨天時において雨水ポンプは、順次流入する雨水によって流入管渠の水位が最高水位を超えないように、雨水流入状況に応じた迅速できめの細かい運転が特に重要である。すなわちポンプ場システムとしては、

(1) 排水区域と管渠網(長さ、体積)

* 東京都下水道局整備拡充部電機設計課 計装係長

- (2) 管渠のこう配、管渠中の雨水吐け口、サージタンク
- (3) 管渠の断面と深さ
- (4) ポンプますの深さ、吸込管の深さ
- (5) スクリーンの損失水頭
- (6) 沈砂池の滞流時間
- (7) ポンプ容量、台数
- (8) 排水位の変動

などの静的、動的な特性要素が系統解析に必要となってくる。

2.2 曝気槽の管理

曝気槽を最適に管理する場合、下水浄化機構に関する主要因は、

- (1) 流入下水量及び下水中の混入物質の種類と量
- (2) 微生物の活性度と量
- (3) 好気性反応に必要な溶存酸素濃度(DO)

であり、これらを最適に制御することにより浄化が行なわれる。従って、これらの静的、動的な特性解析が必要である。曝気槽の管理は、従来の経験では送気量を流入下水量の3～7倍にすれば適切であったことから、まずこれを自動化し一定比率制御からスタートした。最近では、溶存酸素濃度によって送気量を自動制御することが実プラントに採用されつつある。曝気槽の送気量を溶存酸素濃度によって制御する場合⁽³⁾⁽⁵⁾、

- (1) 流入下水量と水質の変動
- (2) 微生物の活性度
- (3) 曝気時間
- (4) 生物化学的酸素要求量(BOD)負荷率($\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$)
- (5) 混合液平均浮遊物質濃度(MLSS)、あるいは混合液の平均有機性浮遊物質濃度(MLVSS)(mg/l)
- (6) 汚泥日令(日)
- (7) 曝気槽の水深、幅及びその比
- (8) 返送汚泥濃度と返送率
- (9) 曝気装置とその設置位置
- (10) 曝気槽溶存酸素濃度レベル(mg/l)

などに支配されるから、これらが系統的に解析整理される必要がある。この解析にはモデル作成、シミュレーションなどの数学的な手法⁽⁶⁾が重要なことは言うまでもないが、これらは依然として実用化されるまでには至っていない。従って、処理システムの解析には、これらの手法のほかに、更にフィールドでの連続測定や実験によってモデルの同定を行なうことが重要である。このためには化学、生物学、衛生工学、土木、機械、計装などの各技術者相互、及びメーカーの技術協力が必要である。このように技術が総合的に結集されてはじめて、二次処理プロセスの特性が解析され、最適のシステム制御が確立されるものと考えられる。

3 プロセス、機械設備及び制御装置の対応性

下水道システムの計画は流入下水量、水質、並びに二次処理プロセスの計画が基礎となり、そのうえに管渠、ポンプ場、沈殿池、曝気槽などの土木構築物と建築物、ゲート、ポンプ、ブロワ、沈殿池機械などの機械設備、また受変電、動力、照明などの電気設備が計画され、更にこれらを感じ覚や頭脳のように結び付ける電子計算機、計装、制御装置が統一した思想のもとに結合され、最適の下水道システムが確立される。従って、これら技術分野の相互間に明確な一線を画することはできない。すなわち、生物化学的プロセスを主体に土木、建築、処理機械、電気、計装、制御が相互に密接な関係を保ち、関連事項をオーバラップさせながら系統的に計画を進めることが重要である。従って、これらの間にアンバランス、不

適合、あるいは穴が空くとシステム全体の運転に信頼性を高く保つことができず、トラブルの多い設備となる危険がある。このような観点に立って、下水道システムの計画を次の三つに分け、二、三の例を挙げて考察する。

- (1) プロセス、機械設備、並びに電気設備の対応性
- (2) プロセス、計装、並びに制御装置の対応性
- (3) 計装、制御装置の選定

3.1 プロセス、機械設備、並びに電気設備の対応性

3.1.1 ポンプ場の設備

ポンプ場が停電し機能が停止した場合、沈砂池が冠水してポンプ場が破壊されることを防止するため、下水の流入を迅速に阻止する必要から、ゲートを緊急に閉鎖する場合がある。この場合、ゲート締切速度が速すぎるとゲート自体に衝撃が加わり破損することがある。また管渠に雨水吐け、あるいはサージタンクがない場合、ウォータハンマを生じ、マンホール蓋を吹き上げるなど危険な事態を招く。逆に締切速度が遅ければ沈砂池冠水事故のおそれがある。また操作頻度が定格を超過すると摩耗を生じ、漏水などの問題を生ずることがある。従って、ゲートの計画には締切速度、機械的構造及び強度、操作方式、管渠の構造、雨水吐け、サージタンク並びにゲート操作用非常電源など各施設の構成要素間に相互のバランスが保たれていなければならない。

ポンプを設置する場合、ポンプますの容量が過大であると四隅にデッドウォータ部分が生じ、そこに有機物が堆積、腐敗してガスを発生する。逆に過小の場合、ますの中に渦流を生じ、これがポンプに吸い込まれキャビテーションが発生し、振動やランナ損傷事故の原因になる。ポンプますの流入流量及びポンプ吐出流量に比べポンプます容量が過小の場合に水位一定制御を行なうとポンプの始動、停止頻度が高くなり、電動機や制御装置に対し始動電流、始動頻度、温度上昇などが定格、責務を超過した状態での過酷な運転を強行する結果となって、焼損事故、あるいは寿命を縮めるおそれがある。またポンプ吐出弁にスルース弁を用いて流量を制御すると、スルース弁は締切用であり、その特性(開度/流量)が非直線性のためにきめの細かい制御ができない。更に小開度部分で長時間頻繁に開閉操作すると振動を生じ、また極めて早く摩耗事故を生ずることがある。従って、流量制御にはロート弁やバタフライ弁などの適正な選定が必要である。ポンプの円滑な運転には以上のように各機器相互間のバランスが重要である。

3.1.2 曝気槽

散気式曝気槽において、下水、空気及び返送汚泥の攪拌混合を効果的に行なうためには、曝気槽の水深、幅及びその比並びに散気装置の構造及び設置位置が適切でなければならない。曝気用送風機容量は、曝気槽の水深、散気装置、送気管、空気清浄器、風量計などの抵抗損失を考慮して送気圧及び風量を決定する。返送汚泥濃度を適切に管理するためには、最終沈殿池の沈降汚泥濃度が池の形状、構造及び排泥設備によって左右されるので、集泥ピットの設計、汚泥引抜ポンプの選定が適切でなければならない。

3.2 プロセス、計装並びに制御装置の対応性⁽²⁾

3.2.1 ポンプ場の計装

ポンプ場の計装は、幹線、沈砂池及びポンプますの水位測定のほか、流量計、調節計、制御装置が設けられている。水位測定には、検出端が流木によって損傷したり、スカムによって測定誤差を生じたり、あるいはフロートが水面の波動を強く受け測定や制御に支障を来すことがないよう検出端の設

置場所に注意を払う必要がある。また流量計は形式によって測定及び設置条件が異なるから、設置環境に適した器種を選択し、正しく設置する必要がある。

3.2.2 曝気槽の計装

曝気槽の計装としては、流入下水量、空気量、返送汚泥量、溶存酸素濃度などの検出端、調節計及び制御装置が設けられている。下水流量計は、最初沈殿池と曝気槽の間に設置すべきであるが、しかしスペースをとることが難しい場合には、形式の選定及び設置条件に注意する必要がある。空気流量計は、溶存酸素濃度によって曝気槽空気量を制御する場合、送気管と各曝気槽の間に設ける。流量計は一般に管廊の狭いスペースに設ける必要があるから設置上の制御条件とのバランスに注意し、また空気制御弁の位置も考慮しておかなければならない。

3.3 計装、制御装置の選定

計装、制御装置を選定するに当たっては、上述した各機器構成要素間の相互のバランスをふまえ、維持管理の現状とプロセスの実体を十分に把握しているユーザーが自ら積極的に、また従来の経験を生かして保守の容易さ、現場の環境に適したものを選定する必要がある。その上に立って、プラントメーカー、計装メーカー、電気メーカーなど専門家の技術協力を得て過誤のないように計画しなければならない。

3.3.1 計装装置の選定条件

計装装置の選定条件は次のとおりである。

- (1) 一般条件
 - (a) 目的
 - (b) 経済性
 - (c) 保守性
 - (d) 補修性(部品入手の難易度、互換性、補修、モデルチェンジによる影響)
- (2) 検出端
 - (a) 測定精度、応答性、直線性
 - (b) 測定対象(汚水、汚泥、アッシュ、しき、薬品)の物理的、化学的、生物化学的性質
 - (c) 使用条件
 - (d) 環境条件(温度、湿度、塵埃、腐食性ガス、振動、衝撃、照明)
 - (e) 信頼性
 - (f) 耐久性
 - (g) 互換性
 - (h) 保守の容易さ
 - (i) 取付位置及び方法
- (3) 調節計
 - (a) 型式、原理、構造
 - (b) 精度、応答性、直線性
 - (c) 調整範囲(設定、比例帯、微分・積分時間)
 - (d) 操作方法(切換方法、設定方法)
- (4) 操作端
 - (a) 型式、原理、構造
 - (b) 精度、動作特性(リニア形、イコールパーセンテージ形、バルブポジション要否)、動作時間、応答性、直線性、バルブCv値
 - (c) 操作対象(汚水、汚泥、薬品、空気)の物理的・化学的・生物化学的性質
 - (d) 使用条件
 - (e) 環境条件(温度、湿度、塵埃、腐食性ガス、振動、衝撃、照明)

- (f) 信頼性
- (g) 耐久性
- (h) 互換性
- (i) 保守の容易さ
- (j) 取付位置及び方法

3.3.2 制御装置の選定条件

制御装置の選定条件は次のとおりである。

- (1) 一般条件
 - (a) 目的
 - (b) 原理(実用性とのバランスから精巧、巧妙に過ぎるものは避ける。)
 - (c) 動作状態及び範囲(平常時、過渡時の最大・最小値、異常入出力時の耐量及び時間)
 - (d) 安全性(故障時の支障範囲、並びに対策、フェイルセーフ)
- (2) 電力機器
 - (a) しゃ断器、電磁接触器：電圧、電流、しゃ断電流、寿命
 - (b) 電動機、始動装置：始動状態、始動電流、始動トルク
 - (c) 環境に対する保護方式
 - (d) 据付・搬入方法
 - (e) 騒音及びその対策
- (3) 動力源
 - (a) 動力源の選定(機械、電気、油圧、空気)
 - (b) 動力源の変動時の影響、動力源喪失時の安全対策
 - (c) 付属装置(空気清浄装置、電圧安定装置などの要否)
 - (d) 設備費、動力消費量
 - (e) 保守の容易さ
 - (f) 信頼性
- (4) 使用環境への適応性
 - (a) 寸法
 - (b) 重量
 - (c) 耐環境性
 - (d) 安全性
- (5) 信頼性(システム運転信頼性に見合うこと)
- (6) 融通性
 - (a) 信号レベルの統一
 - (b) 動力源の統一
 - (c) 寸法、構造の標準化
 - (d) 設定・調整・操作・保守方法の統一
 - (e) 互換性
 - (f) 据付法、センタリングの統一

4 下水道システム全体の総合信頼性

信頼性工学の定義は別として、下水道システムにおける総合信頼性とは施設構造物(管渠、ポンプ場、沈殿池、曝気槽など)機械設備(ポンプ、送風機など)及び制御システムなどすべての動作、性能が安定、且つ円滑に運転管理できることであり、そのプロセスの生産物である処理水の水質が長期間にわたって安全、安定に且つ最適に維持できることである。

ここで下水道システム全体の総合信頼性について考えるのは、技術レベルの高い計装、制御装置を採用しても、盲点になりやすい検出端、操作端の取付け、動力源の選定など、更には人間的要素(使いやすさ、技量、個人的嗜好など)を考慮し、全体的にバランスが保たれ適切に構成されていることが重要であり、またこれが失なわれると円滑にシステムの運営が望めないからである。すなわちシステム全体として、内部の

相対的なバランスを最大にし、且つ安定に保ちながら、公共施設としての下水道システムが事故を生じ機能を喪失しないようにして、住民の生活を安全、且つ安定に保ち社会への影響を最小にすることが重要である。このため下水道システム制御には、次の事項が配慮される必要がある⁽¹⁾。

- (1) 運転員の疲労や心理的負担に起因する事故及び誤操作に対しても十分な配慮が払われていること(マン マシン プロセス インタフェースの充実)。
- (2) 故障時、末端機器も含めシステム全体が安全な状態に確保できるようになっていること。
- (3) 計器、表示器は見やすく、指示値、表示内容が読み取りやすいこと。
- (4) 平常時、異常時、緊急時それぞれの場合に迅速、適切に対応できる運転方式になっていること。
- (5) 故障時、システムを停止することなく迅速に予備系統に切り換え、あるいは予備品に取り換えられるシステムであること。

5 維持管理⁽²⁾

これまでのシステム計画においては、維持管理の分野まで踏み入って計画されていなかったきらいがある。しかし最近の大規模な下水道システム計画においては、前述したように土木、建築、機械、電気、計装、電子計算機システムが複雑となり、そしてこれらが高度に絡み合っている。なかでも計装、電子計算機はソフト、ハード両面における技術レベルが高度化され、またこれらが下水道システム運営の中核となっている。

従って、近代的な下水道システムの計画に当たっては、これらの維持管理に問題が起らないよう計画の当初から維持管理に当たる職員を計画に参加させ教育、指導することが重要である。すなわち、維持管理計画を下水道システム計画の中に位置づけ、運転管理体制、教育訓練などについても検討しておく必要がある。

5.1 運転管理体制

運転管理体制は職員の能力に応じ、下水道システム制御に適した体制の確立を図る。このため運転操作、点検調整、機器保全など、職能的分化を図る必要がある。

- (1) 運転操作：中央監視室における通常の運転監視操作業務
- (2) 点検調整：各設備の日常点検、定期点検、臨時点検、委託点検業務、委託点検は特殊技術又は機器を必要とするものについて、納入メーカーに委託するもので、その他は職員によって行なう。
- (3) 機器保全：不良対策及び処理専任班を設け、点検及び不良品回収を行ない、場内修理か、外注修理かを技術的、経済的に検討を行なう。場内修理は職員の技術向上並びに科学的管理に寄与するところが大きい。一方、職員の人件費や材料費がかさむことから外注工事費などを調べ、その経済性を比較検討する。事故、不良品については、発生場所、時期、不良個所、不良状態、原因、暫定及び恒久対策を講じ、統計をとり今後の管理に備える。特に事故並びに既設設備の欠陥

に対しては、漏れなく情報を集めフィードバックするルールを確立して、迅速な対策と再発の防止を図ることが重要である。

5.2 教育訓練

職員の教育訓練はシステムの概念的な一般教育と専門教育とに分ける。専門教育の効果を上げるには、講義のほか実務の訓練を併用する必要がある。また下水道事業組織内の全職員に下水道システム制御の重要性を理解させ、認識を浸透させることが重要であるから、課長以上の幹部職員、事務職員、土木、建築、機械、水質などの技術職員に対してシステム制御のPR、教育指導を繰り返し粘り強く行なう必要がある。これにより、更に大規模化、高度化、トータル化の方向へ進歩する下水道システム制御に対し良好な環境が形成される。以上の教育訓練は、教育目標、内容、材料、カリキュラム、期間、講師(内部、外部)などを定め、年間行事として計画的に実施するよう制度化する必要がある。

5.3 保守用設備

保守を能率よく実施するためには、これに適した設備がなければならない。保守に必要な設備としては、建物、計測器、試験器類、工具、消耗品などが挙げられる。建物としては、保守に関する資料の作成、整理・保管に必要な部屋、計測機器の分解及び組立作業室、予備品類の整理保管室、保守用機器の整備保管室、材料倉庫、その他管理室などが考えられるが、システムの規模によってその必要度は異なる。計測機器、試験器類、工具などについては、それぞれのシステム制御装置の保守点検に必要なものを用意して置くべきである。もちろん、点検を委託にゆだねるようなものに対しては、職員の技術レベル及び経済性を勘案して決定すればよい。

6 結 言

以上は、現在強力に建設が推進されている下水道システム制御の計画に当たり直面する実際問題について述べた。しかし、十分に例をあげて執筆できなかった点については非常に心残りであり、またわずかな紙数では尽くすのに困難であったので機会があれば他の種々の問題について発表したいと思っている。しかし、この小論が、最近の大規模化、高度化、トータル化していく下水道システム制御の計画に当たり、いささかでも参考の資となれば筆者の幸いとするところである。

参考文献

- (1) 加藤「下水道施設におけるディスプレイの役割」OHM(48-6)
- (2) 加藤「下水道施設にみる電子制御装置の使用実績と問題点」OHM(昭47-8)
- (3) 加藤「下水処理における計装と計算機制御について」第10回下水道研究発表会講演集(昭48-5)
- (4) 小沢、加藤「下水道における電力応用(総論)」昭和49年電気四学会連合大会講演論文集(昭49-10)
- (5) 加藤、鍛冶倉、小出「エアレーションタンクの自動制御」第11回下水道研究発表会講演集(昭49-5)
- (6) 小出、野北ほか「下水道システムの数式モデルとシミュレーション」日立評論 57(昭50-2)