

合流式下水道雨天時下水の高速凝集沈殿処理

小三田 栄* 日沼 宏年** 秦 良介**

Performance of a High-Rate Sedimentation Process for Combined Sewerage Treatment in Wet Weather

by Sakae KOSANDA, Hirotooshi HINUMA, & Ryosuke HATA

A novel high-rate sedimentation process has been developed for directly treating combined sewer overflows (CSOs). This was done using a test facility at an actual wastewater treatment plant in Tokyo. Pilot test results, carried out 13 times, from December 2002 to July 2003 in wet weather, suggested that the process was suitable for treatment of CSOs. The performance of the process was favorable at 50 m³/(m²·h) up to 880 mg/L influent TSS, removing between 78% and 91% of TSS at loading and between 64% and 85% of BOD5 also at loading.

The pilot testing clarified that a decrease in the influent alkalinity due to rain water caused a drop in the pH after FeCl₃ addition and thus improved coagulation, with a significant decrease in the effluent TSS. Mixing, coagulation and flocculation were carried out in a baffling type mixing tank to enable uniform mixing without any short-passes. Coagulation conditions in this mixing method were evaluated and results clarified that rapid mixing was required momentarily after each addition of FeCl₃ and polymer, i.e. to diffuse these additives into the influent.

Keywords: Combined sewer system, Stormwater, Coagulation-sedimentation process, Solid-liquid separator, Baffling mixing, CSOs (Combined Sewer Overflows), Flocculation, Diffusion, Alkalinity, SS

1. はじめに

日本の多くの都市の年間平均降水量は1000 mmを超えており、雨水排除による浸水防止は、汚水排除、公共用水域の水質保全などとともに下水道の重要な役割のひとつである。下水道の整備を早くから行った都市では、下水の排除方式として合流式が採用された。この理由としては、道路が狭く雨水と汚水の2条管施行が困難であったこと、分流式は工事費がかさむこと及び合流式は雨水排除機能を併せもつこと、がある。国土交通省の調査報告書¹⁾では、合流式下水道を一部でも有している都市数は192あり、合流式下水道は総人口の約30%が排水する下水の収集・処理を受けもっている。

合流式下水道では、降雨量が多い場合に下水水量が下

水道施設の処理容量を超過することがある。このような場合、下水処理場への遮集量を超える下水は未処理のまま雨水吐き室やポンプ場から公共用水域へ放流される。更に、二次処理（生物処理）の容量を超える下水は、沈殿処理と消毒処理を行っただけで排出される。

近年、このような合流式下水道からの未処理放流水等による水質汚染が顕在化し、改善対策が広く議論されてきている²⁾。このような中で合流式下水道雨天時下水に対する多くの処理技術が検討されてきている³⁾。合流式下水道雨天時下水の高速処理方法としては、ろ過処理などの物理的方法や凝集沈殿処理などの物理化学的処理方法が他社において研究されてきている⁴⁾。ろ過処理の場合、処理にろ材を使用するために雨天時処理の途中あるいは降雨後にろ材の洗浄が必要である。一方、凝集沈殿処理の場合、高速処理を行うにはバラスト材や傾斜板の使用が求められ、バラスト材の運転管理や降雨後の傾斜板の洗浄が必要である。

筆者らは、運転管理の簡易化と装置構造の簡素化による維持管理の簡易化を重視し、ろ材、バラスト材及び傾斜板を一切使用しない新規の高速凝集沈殿処理方法を開発した。以下、新規凝集沈殿処理方法の説明をし、パイロットプラントで行った試験結果について報告する。

* 荏原環境エンジニアリング(株) 環境エンジニアリング事業統括部
水・環境開発室 第一グループ

** 同 同

技術統括室 大阪技術グループ

** 同 同

* 同 下水技術グループ

10th International Conference on Urban Drainage (2005)にて論文発表し、Water Practice and Technology, Vol.1, No.1 (2006)に掲載されたものを、IWAの許諾を得て、翻訳し一部加筆した。

2. 新規凝集沈殿処理方法

図1に新規凝集沈殿処理装置を構成する迂流式攪拌槽と固液分離槽を示す。

2-1 迂流式攪拌槽

無機凝集剤である塩化第二鉄添加後の混合と凝集及び有機性ポリマ添加後の混合とフロック形成を適切に行うため、これらの攪拌方式として上下迂流式攪拌を採用した。迂流式攪拌では、短絡流が生じず均一な攪拌が可能である。また、大型攪拌機が不要であるため、攪拌機による電力消費や複雑な保守管理の負荷が軽減される。更に、機械式攪拌に比べて攪拌槽をより縦長にすることができ、攪拌槽の設置面積を小さくできるという利点がある。

攪拌槽は8区画から成る。原水は第1区画に流入し、塩化第二鉄は原水流入地点に添加されて原水の流入水流によって原水と素早く混合される。晴天時の下水はMアルカリ度が高いため、塩化第二鉄を添加してもpHの変化は少ない。しかし、雨天時下水はMアルカリ度が低いため、塩化第二鉄の添加によって攪拌槽出口水のpHが6.5を下回る場合がある。このような場合、第2区画出口で苛性ソーダを添加し、攪拌槽出口水のpHが6.5以上となるように調整する。第4区画出口で有機性ポリマを添加し、攪拌機によって数秒間の急速攪拌を行う。その後、攪拌槽出口までの水流攪拌によってフロック形成を行う。

2-2 固液分離槽

図1のとおり、固液分離槽は上部の第1室と下部の第2室とから成る。攪拌槽でフロック形成が行われた水は第1室に自然流下で流入し、フロックは第1室で更に大きく成長する。成長したフロックは第1室で処理水との固液分離が行われた後に第2室へ移送され、第2室で再度固液分離が行われて第2室下部に沈降濃縮する。処理水は第1室上部と第2室上部の両方から得られる。第2室からの処理水量を調整することによって、第1室と第2室の両方の上昇流速を適切に保持する。第1室ではブランケット層が形成され、成長が不十分な微細フロックがブランケット層を通過する過程で微細フロックと既存フロックとの会合が促進される。この結果、第1室ではフロックが巨大化し処理水は清澄となる。

3. パイロットプラント実験

3-1 パイロット試験装置

パイロット試験装置を東京都芝浦下水処理場（現芝浦水再生センター）に設置した。迂流式攪拌槽は幅1.5 m × 奥

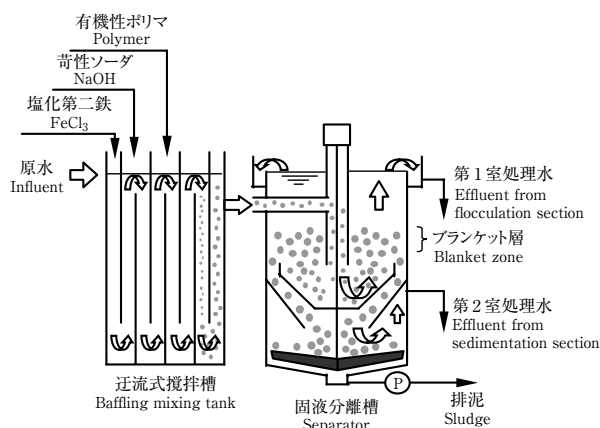


図1 迂流式攪拌槽と固液分離槽

Fig. 1 Baffling mixing tank and solid-liquid separator

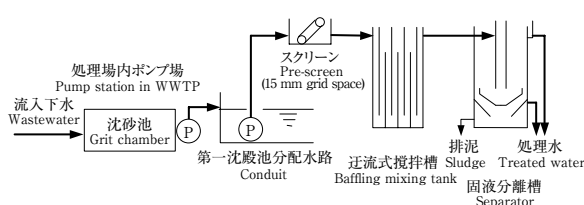


図2 パイロット試験装置の全体フロー

Fig. 2 Flow chart of pilot test

行き1.5 m × 水深4.6 m、固液分離槽は直径2 m × 水深6 mである。図2に全体フローを示す。試験原水は下水処理場第一沈殿池の分配水路の上流部で採水し、水中ポンプで試験装置へ圧送した。目幅15 mmの自動スクリーンで夾雑物が除去され、その後、自然流下で迂流式攪拌槽と固液分離槽へ順次流入する。

固液分離槽からの排泥流量は流入水量に対して10%である。第1室と第2室からの処理水及び排泥は、第一沈殿池の分配水路下流部へ戻される。

3-2 雨天時下水処理実験

雨天時の処理性能確認試験は、2002年12月から2003年7月までに13回実施し、処理水量は150 m³/h一定（初期の3回までは試験中に150 m³/hと180 m³/hが混在する）とした。水面積負荷を①式で定義すると、処理水量150 m³/hの場合の水面積負荷は50 m³/(m²・h)となる。試験の初期段階では、添加率を塩化第二鉄 30～50 mg/L (as FeCl₃, 以下同様)、有機性ポリマ 2～3 mg/Lとして、パイロット試験装置での処理と同時にジャーテストを行い、最適添加率とpH状態を評価した。図3にジャーテスト方法を示す。試験を重ねた結果、添加率が塩化第二鉄 20 mg/L、有機性ポリマ 1.0 mg/Lでも良好な処理が可

能であると判断し、13回のうち終盤2回はこれらの添加率で処理性能を確認した。

固液分離槽の水面積負荷 =

$$\frac{\text{流入水量}}{\text{第1室の水面積}} \cdots \text{①}$$

3-3 水量低下時の凝集とフロック形成の改善試験

降雨時の下水処理場の処理水量は、降雨強度、遮集区の地理的条件などによって変化する。一般的な迂流式攪拌では、処理水量が減少すると攪拌力が低下してしまうという特徴がある。新処理方法に採用する迂流式攪拌では処理水量低下時にも凝集とフロック形成に必要な攪拌力を維持する必要がある。このため、迂流式攪拌における凝集とフロック形成の性能評価と改善を新規処理方法の開発と併せて実施した。

雨天時下水を対象にした試験は実施できる回数が天候と試験体制の制約を受けて非常に限られている。このため、雨天時下水での試験は装置の処理性能の評価に充て、処理水量が異なる場合の凝集とフロック形成の評価は、無降雨時の下水で実施した。処理水量は30～180 m³/hの範囲で30 m³/h 間隔とし、この場合の迂流式攪拌槽での攪拌時間は1240～207秒、固液分離槽の水面積負荷は10～60 m³/(m²・h)である。塩化第二鉄を添加率40 mg/Lで第1区画入口に添加し、図4に示すように水中ポンプを用いて原水に素早く分散させた。一方、有機性ポリマは添加率2.0 mg/Lで第4区画出口に添加し、第5区画入

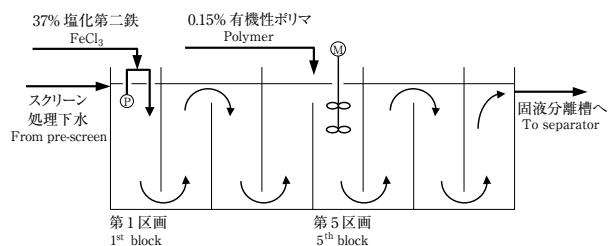


図4 迂流式攪拌槽における、水中ポンプによる塩化第二鉄の分散と攪拌機による有機性ポリマの分散

Fig. 4 Diffusion of FeCl₃ by submerged motor pump and polymer by mechanical agitator and the baffling mixing tank

口で攪拌機を用いて素早く分散させた。

試験時の原水を採取して同一薬品添加率でジャーテストを行い、適切な攪拌条件下で得られる処理水濁度T2を測定した。ジャーテスト手順は図3のとおりであり、添加率は塩化第二鉄40 mg/L、有機性ポリマ2.0 mg/Lである。一方、迂流式攪拌槽と固液分離槽の滞留時間を考慮し、ジャーテスト原水を採取してから所定滞留時間後の固液分離槽第1室の処理水を採取し、5分間静置後の濁度T1を測定した。評価指標Fを②式で定義し、Fが小さいほど処理が良好に行われていると判断した。

$$\text{評価指標 } F = \frac{\text{濁度 } T1}{\text{濁度 } T2} \cdots \text{②}$$

ここで、濁度T1：固液分離槽第1室処理水の5分静置後上澄水の濁度

濁度T2：ジャーテスト処理水の濁度

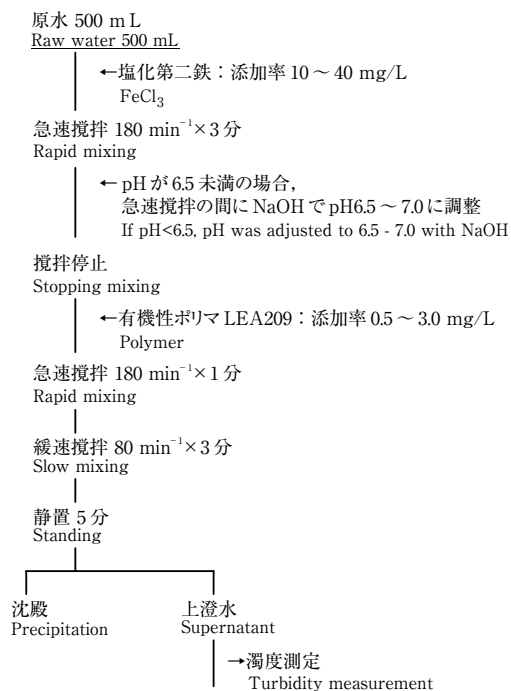


図3 ジャーテスト方法
Fig. 3 Jar test procedure

4. 実験結果と考察

4-1 雨天時下水処理実験

4-1-1 SS除去性能

図5に2003年5月20～21日に実施した試験でのSS、pH及びMアルカリ度の経時変化を示す。原水のSSは降雨初期に755 mg/Lまで急激に増加し、その後100 mg/Lまで漸減した。これに対して処理水SSは降雨初期に約60 mg/Lであり、その後21：00頃に20 mg/L以下に急低下して20 mg/L前後で推移した。原水Mアルカリ度は降雨初期に急激に低下しているが、迂流式攪拌槽でpH調整が行われていることで処理水pHは6.5以上を保持している。原水SSによる流入SS負荷と処理水SSによる放流SS負荷とから、この降雨時試験でのSS負荷除去率を算出すると、91%となる。

図6に13回の雨天時試験のすべてのSS測定値から求めたSS除去率の累積頻度を示す。平均除去率は82%であり、除去率が80%以上の割合は64%を占めた。また、除去率が60%以下の割合は7%以下であった。

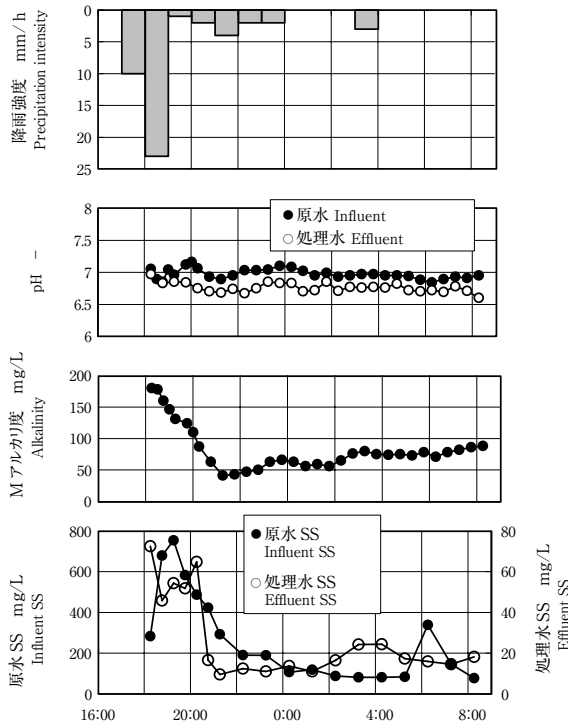


図5 原水と処理水のSS、pH及びMアルカリ度の経時変化 (2003年5月20～21日)
Fig. 5 Time sequence results for SS, pH and alkalinity in influent and effluent on 20 - 21/May/2003

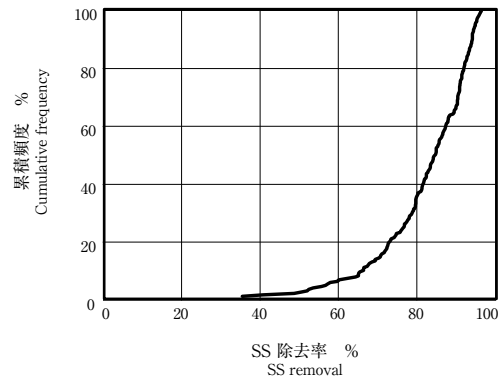


図6 SS除去率の累積頻度
Fig. 6 Cumulative frequency of SS removal

図7に13回の降雨時試験についてSS負荷除去率と流入SS負荷との関係を示す。SS負荷除去率は78～91%であり、流入SS負荷に依存していない。また、塩化第二鉄添加率20 mg/L、有機性ポリマ添加率1.0 mg/Lで行った2回の試験結果は図7に含まれており、SS負荷除去率は2回とも81%であった。

4-1-2 BOD除去性能

溶解性BODは凝集沈殿処理によって除去できない。よって、BOD除去性能は原水BODに占めるSS性BOD

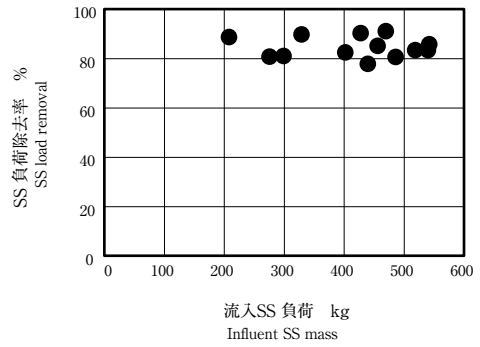


図7 SS負荷除去率
Fig. 7 SS removal performance on load

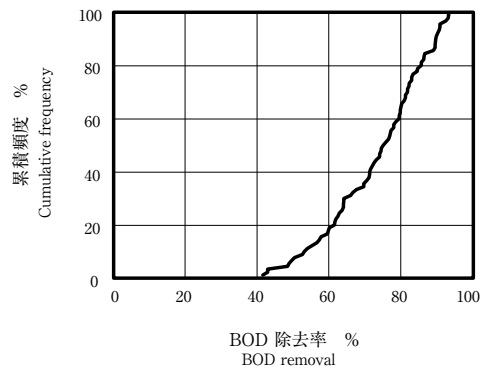


図8 BOD除去率の累積頻度
Fig. 8 Cumulative frequency of DOB removal

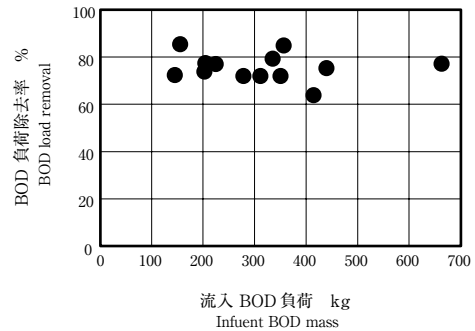


図9 BOD負荷除去率
Fig. 9 BOD removal performance on load

の割合とSS除去率とによって決まる。原水BODに占めるSS性BODの割合が高ければBOD除去率も高くなる。

図8に13回の雨天時試験のすべてのBOD測定値から求めたBOD除去率の累積頻度を示す。平均除去率は73%であり、除去率が80%以上の割合は35%を占めた。また、除去率が60%以下の割合は約20%であった。

図9に13回の降雨時試験についてBOD負荷除去率と流入BOD負荷との関係を示す。BOD負荷除去率は64～

85%であり、流入BOD負荷に依存していない。また、塩化第二鉄添加率20 mg/L、有機性ポリマ添加率1.0 mg/Lで行った2回の試験結果は図9に含まれており、BOD負荷除去率は77%と74%であった。

4-1-3 原水Mアルカリ度減少の効果

図5において処理水SSが21：00頃に急低下しており、原水Mアルカリ度の低下も同時刻に起こっている。この日以外の雨天時試験においても、処理水SSの低下と原水Mアルカリ度の低下が符合する現象が多く確認された。図10に処理水SSと原水Mアルカリ度との関係を原水SS範囲で印分けして示す。処理水SSは原水SSに依存せず、原水アルカリ度に大きく依存することが明らかである。

13回の雨天時試験では試験と同時にジャーテストを行っており、ジャーテストでは原水と塩化第二鉄添加後のpHを測定し、所定攪拌時間内に苛性ソーダでのpH調整を行っている。ジャーテストのpHデータに基づくと、迂流式攪拌槽内のpH変化を推定することができる。図11は塩化第二鉄と苛性ソーダによるpH変化を模式的に示している。塩化第二鉄添加後のpHはAまで急激に

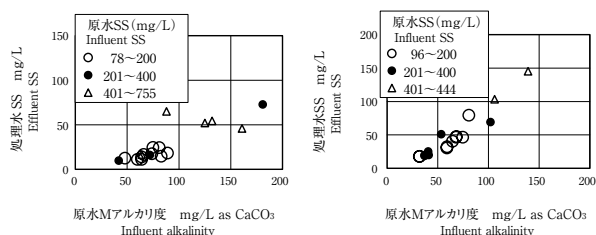


図10 原水Mアルカリ度と処理水SSとの関係
2003年5月20～21日(左)、2003年7月4日(右)
Fig. 10 Relationship between influent alkalinity and effluent SS on 20 - 21/May/2003 (Left side) and 4/July/2003 (Right side)

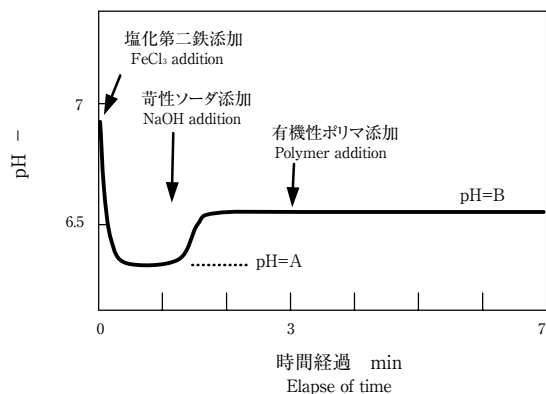


図11 ジャーテストでのpH変化の模式図
Fig. 11 pH drop after FeCl₃ addition

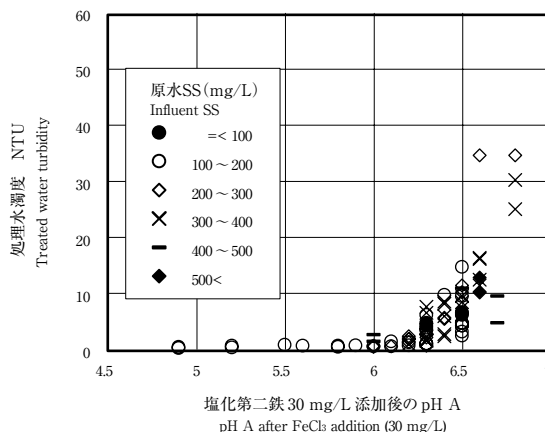


図12 塩化第二鉄添加後のpHと処理水濁度
Fig. 12 pH drop after FeCl₃ addition and improvement in coagulation with significant decrease in the treated water turbidity

減少し、その後苛性ソーダによってpHが6.5以上となるようにBに調整される。pH Aは塩化第二鉄の添加率と原水Mアルカリ度の両方に依存し、原水Mアルカリ度が低い方がpH Aは低くなる。図12はジャーテストにおけるpH Aと処理水濁度との関係であり、pH Aの低下に伴って処理水濁度は低下し、更に、図10での指摘と同じく処理水濁度は原水SS濃度には依存しないことが分かる。これらのことから、雨天時には雨水の混入によって下水のMアルカリ度は低下し、Mアルカリ度の低下は塩化第二鉄添加後のpH Aの低下を引き起こし、その結果凝集状態が改善されて処理水濁度が低下する。

従来の凝集沈殿処理では、凝集剤添加率を原水SSに応じて制御することが一般的である。新規凝集沈殿処理方法での雨天時下水の処理では、処理水SSと原水SSとは関係がなく、よって原水SSに応じて凝集剤添加率を制御する必要はない。凝集剤添加率は、塩化第二鉄が20～30 mg/L、有機性ポリマが1.0～1.5 mg/Lで十分であり、原水SSに依らずに一定注入率で処理を行えばよいことから運転制御の簡素化が可能である。

4-2 処理水量低下時の凝集とフロック形成の改善実験

図13は評価指標Fの分布を3種類の流量について示しており、塩化第二鉄添加時の分散処理の有無と有機性ポリマ添加時の分散処理の有無を比較している。いずれの流量においても、塩化第二鉄と有機性ポリマの両方を分散処理した場合にFが小さくなり、分散処理を行うことで凝集が改善することが分かる。また、処理水量が低下するとFは大きくなる。特に、塩化第二鉄の分散処理を行わない場合及び両方の分散処理を行わない場合には、流量低下によるFの増加が顕著であり、凝集とフロック生成が不十分になることが分かる。

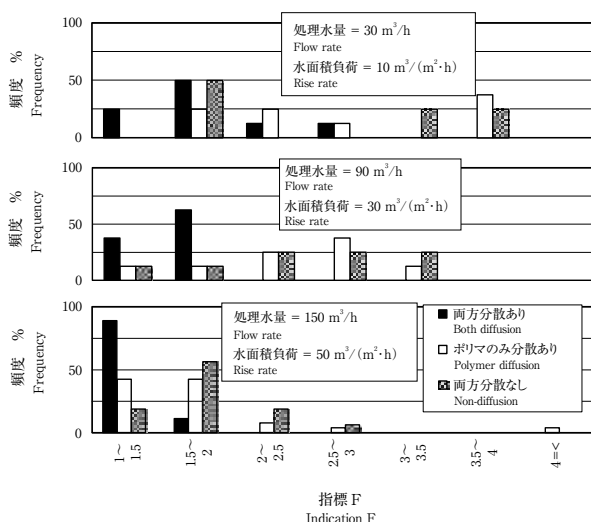


図13 凝集剤添加後の分散と処理水量低下の処理水水質への影響
 Fig. 13 Frequency of indication F according to immediate diffusion of FeCl_3 and polymer

処理水量の低下時には、水流による攪拌強度の低下というマイナス効果があるが、その一方で攪拌時間の増加と固液分離槽上昇流速の低下というプラス効果も考えられた。試験の結果、総合的には凝集とフロック形成の不良が生じることが明らかとなった。迂流式攪拌槽における処理水量低下時の対策としては、塩化第二鉄と有機性ポリマのどちらにおいても添加直後に分散処理することが有効であり、処理水濁度の悪化を抑制する効果がある。

5. まとめ

合流式下水道雨天時下水の処理を目的として高速凝集沈殿処理方法を開発した。成果を次に示す。

(1) 本法の開発にあたっては運転管理と維持管理の簡易化を重視し、ろ材、バラスト材、傾斜板などを使用せずに装置を簡素な構造とした。ろ材を使用しないために連続処理が可能であり、運転中あるいは運転後にろ材を洗浄する必要がない。また、本固液分離方法はバラスト材や傾斜板を使用していないため、バラスト材の運転管理や降雨後の傾斜板の洗浄が不要である。

(2) パイロット試験装置を用いて雨天時下水を対象とした処理実験を13回行い、水面積負荷 $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ においてSS負荷除去率は78～91%、BOD負荷除去率は64～85%という良好な結果を得た。

(3) 降雨時には下水のMアルカリ度が低下することによって塩化第二鉄添加後のpH低下が顕著になり、このpH低下によって凝集状態が改善されることが明らかとなった。また、処理水SSは原水SSに依存せず、塩化第二鉄添加後のpHに依存する。このため、原水SSの変化に応じた凝集剤添加率の制御は不要であり、塩化第二鉄が20～30 mg/L、有機性ポリマが1.0～1.5 mg/Lで一定注入率の処理が可能である。

(4) 新規高速凝集沈殿処理の攪拌方式には上下迂流式攪拌を採用した。迂流式攪拌槽は短絡流が生じず均一な攪拌が可能であり、攪拌機による電力消費を軽減でき、更に設置面積が小さいというメリットを有する。ただし、処理水量低下時には流速低下による攪拌不良が生じる。処理水量低下時の処理不良対策としては、塩化第二鉄と有機性ポリマのどちらにおいても添加直後に分散処理することが有効である。

(5) 本凝集沈殿処理方法は合流式下水道における処理を目的として開発したものである。しかし、下水道に限らず、民間の廃水処理を含めた高速凝集沈殿処理装置としての役割を期待できる。

謝 辞

本開発は東京都下水道局と平成13年から15年に実施したノウハウ+フィールド提供型共同研究（二段造粒式沈殿濃縮装置の技術開発）である。本開発を進めるにあたり御協力下さった芝浦水再生センター及び関係者各位に心から感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省、(財)下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善対策に関する調査報告書、2002。
- 2) Fujita S.: Full-fledged movement on improvement of the combined sewer system and flood control underway in Japan. Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, Oregon, 8-13 September 2002.
- 3) JIWET: Japan Institute of Wastewater Engineering Technology website, <http://www.jiwet-spirit21.jp>, visited 28 January 2004.
- 4) Kurtz W., Muller J.G., Laurence A., Smith R.D. and Young P.J.: Pilot testing of high rate physical-chemical treatment (HRPCT) for wet weather treatment. Proceedings of WEFTEC.03, Los Angeles, California, 11-15 October 2003.