

〈研究発表〉

急速ろ過プロセスにおけるろ過池損失水頭推定に関する検討

村山 清一¹⁾, 大澤 俊¹⁾, 山原 裕之¹⁾
毛 受 卓¹⁾, 横山 雄²⁾, 金谷 道昭²⁾

¹⁾ 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター
(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail: seiichi.murayama@toshiba.co.jp)

²⁾ 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部
(〒212-8585 川崎市幸区堀河町72-34)

概要

急速ろ過方式の浄水場の自動化・最適化に向け、ろ過池におけるろ過水濁度とろ過池損失水頭を推定するモデル構築を進めている。急速ろ過方式では、凝集沈澱処理にて、原水中の懸濁物質の大部分を沈澱分離し、後段のろ過池に余力を残して運用するのが一般的である。そこで、ろ過池の処理能力を正確に把握することで、適切な凝集剤注入率ならびにろ過池洗浄タイミングの決定を支援することを考えた。これまでろ過水濁度を推定するモデルを構築してきたが、今回、損失水頭の推定モデルを立案したため、その結果について報告する。

キーワード：急速ろ過、濁度、損失水頭、モデル、推定

原稿受付 2022.7.7

EICA: 27(2・3) 106-109

1. はじめに

急速ろ過方式を採用している浄水場では、凝集沈澱処理で原水中の懸濁物質の大部分を沈澱分離し、後段のろ過池で残った懸濁成分を除去している。凝集沈澱処理で確実に除去し、後段のろ過池への負荷を減らして安全側の運用をするケースが一般的であるが¹⁾、これはろ過池に余力を残した状態で運用していることを示している。ろ過池に流入する水量・濁度などの変化に応じたろ過池の処理能力をモデルにより演算することができれば、ろ過池での処理を維持できるろ過池への流入水質の範囲を算出することができ、凝集沈澱処理の負荷を軽減できる可能性がある。その結果、凝集沈澱からろ過プロセスを通して処理水質を維持しつつ凝集剤注入量を低減した最適運用やろ過池の洗浄タイミングの適正化が期待できる。このような背景のもと、急速ろ過方式の浄水場の凝集沈澱からろ過プロセスの最適化に向け、流入水質とろ過流量などの運転条件からろ過水濁度、およびろ過池の損失水頭を推定するろ過プロセスモデルの開発を進めている。

筆者らはろ過池の最適運用に向けたモデル化のためには、処理水濁度と損失水頭の推定が重要であると考えており、既報³⁾にて処理水濁度の推定について報告した。既報³⁾では、ろ過池への供給水中の微小な懸濁成分と僅かに残った凝集剤成分がろ過池での濁質除去性能を向上させる²⁾ことに着目し、ろ過池への供給水の凝集剤由来の Al 濃度を用い、ろ層を複数に分割し

て濁度除去の性能に関わるろ過係数 λ をろ層ごとに变化させることでろ過水濁度の推定精度の向上が可能なことを報告した。

本報では、損失水頭の推定について検討した。処理水濁度の推定と同様、ろ層を複数に分割し、ろ層ごとにろ過により蓄積する懸濁成分の影響を加味した損失水頭の推定モデルを立案・評価した結果について報告する。

2. ろ過池損失水頭推定モデル

2.1 モデルの概要

立案したろ過池損失水頭推定モデルを(式1)に示す。ろ層を複数に分割し、各ろ層で層流状態における充填層の圧力損失を示す Kozeny-Carman の式²⁾((式2)に示す)を用いて損失水頭を算出し、合計をろ層全体の損失水頭として算出する。また、ろ層ごとに空隙率 $\varepsilon(i)$ を設定し、ろ過の時間経過とともに変化する変数としている。これにより、ろ過処理においてろ過供給水の懸濁成分がろ層内部に蓄積することで除去される時、蓄積する懸濁成分によりろ過砂同士の隙間が埋まっていく現象を反映できる。

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p(i) \quad \cdots \text{(式1)}$$

$$\frac{\Delta p(i)}{z(i)} = \frac{180U\mu}{\Phi_S^2 D^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon(i))^2}{\varepsilon(i)^3} \cdot \frac{10.2}{1000} \quad \cdots \text{(式2)}$$

ここで、 Δp ：ろ層全体の損失水頭 (cmH₂O)， $\Delta p(i)$ ：上から i 番目の層の損失水頭 (cmH₂O)， n ：ろ層の分割数 (2以上の整数)， $z(i)$ ：上から i 番目の層のろ層厚 (m)， ϕ_s ：ろ過砂の球形度 (-)， $\varepsilon(i)$ ：上から i 番目のろ層の空隙率， D ：ろ過砂の粒子径 (等体積球相当径) (m)， U ：ろ過速度 (m/s)， μ ：沈澱水の粘性係数 (Pa·s) である。

2.2 空隙率 $\varepsilon(i)$ の算出

各ろ層の空隙率 $\varepsilon(i)$ の算出方法を説明する。まず、ろ層への流入水の濁度と残留している凝集剤濃度、次のろ層への流出水の濁度を入力変数として、ろ層に蓄積する濁度と凝集剤成分の量を算出する。次に、各々を体積に変換する係数を A, B とし、ろ過速度と時間を乗ずることで体積ベースの蓄積量を算出する。そして、ろ過開始時のろ層の空隙率 ε_0 から減じることでそのろ過時間での各層の空隙率 $\varepsilon(i)$ を算出する。各ろ層の空隙率 $\varepsilon(i)$ の算出式を (式3) に示す。

$$\varepsilon(i) = \varepsilon_0 - \left(A \cdot (TB_{in(i)} - TB_{out(i)}) + B \cdot \frac{TB_{in(i)} - TB_{out(i)}}{TB_{in(1)}} \cdot PACl \right) \cdot \frac{U \cdot t}{z} \dots \text{(式3)}$$

ここで、 ε_0 ：ろ過開始時のろ層の空隙率 (全層で同じ値)， $PACl$ ：ろ過供給水中の凝集剤濃度 (mg/L)， $TB_{in(i)}$ ：上から i 番目の層への流入水の濁度 (度)， $TB_{out(i)}$ ：上から i 番目の層からの流出水の濁度 (度)， t ：ろ過時間 (s)， A ：蓄積する濁度の体積変換係数 (-)， B ：蓄積する凝集剤成分の量の体積変換係数 (-) である。

3. 検証実験方法

2章にて説明したろ過池損失水頭推定モデルの評価のためにろ過塔を用いた検証実験を行った。Fig. 1 に砂ろ過検証実験装置のフロー図を示す。ろ過塔は内径 10 cm の透明塩ビ製で、上部を開放端とした重力式下向流方式で通水ろ過する。有効径 0.6 mm、均等係数 1.4 以下の水道用ろ過砂 (JWWA A 103:2006-2 適合品) を用い、ろ層厚は 80 cm とした。ろ過塔への供給水 (以降、ろ過供給水とする) には、水質変動を極力抑えるためろ過供給水用のタンクに凝集沈澱プロセスの沈澱水を模擬した水として、カオリン懸濁水に PACl を所定量添加したものを準備し、攪拌しながら一定流量でろ過塔に供給した。実験中はろ過供給水、ろ過処理水、ろ層途中から定期的に採水し、濁度、損失水頭を測定した。採水箇所は、Fig. 1 に示すようにろ層表面の上に 1 箇所、ろ層内に 4 箇所、ろ層底部の下に 1 箇所設け、ろ層内 4 箇所の位置はろ層表面から深さ 10 cm、30 cm、50 cm、70 cm とした。濁度測定は、日本電色製 WA-6000 を用い 10 mm セルにてポ

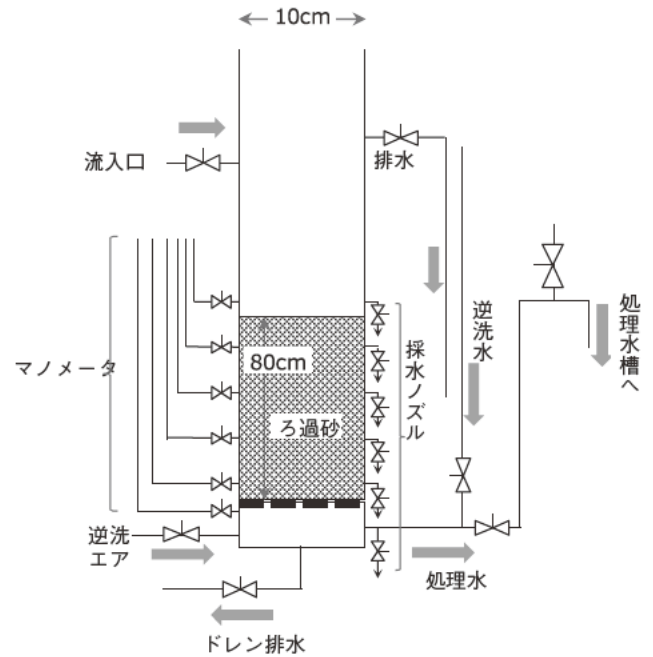


Fig. 1 Sand filtration evaluation system flow diagram

Table 1 Sand filtration experimental condition

No.	流量 (mL/min)	流速 (m/日)	原水濁度 (度)	PACl 注入率 (mg/L)
1	820	150	1	0.5
2	820	150	1	1
3	820	150	1	3
4	820	150	1	5

リスチレンラテックス基準の濁度を測定した。損失水頭は、マノメータの数値を目視で記録した。Table 1 に実験条件を示す。急速ろ過を対象としているため、流速 150 m/日、濁度は沈澱水濁度相当の 1 度とし、PACl 注入率は沈澱水の残留アルミニウム濃度相当となるよう注入率を調整した。4章で、本検証実験の結果を報告し、5章にて本検証試験の結果に基づき (式3) の A, B の係数を決定し、構築したモデルと実測の損失水頭の比較評価を行った結果を示す。

4. 検証実験結果

4.1 損失水頭

Fig. 2 に損失水頭の時間変化を示す。図のプロットは、PACl 注入率別のろ層全体の損失水頭を示している。凡例の PACl 後の数値 (0.5, 1, 3, 5) は PACl 注入率を示している。PACl 注入率 5 mg/L の条件のみ、深さ 10 cm の位置とろ層底部の間の損失水頭も示した (図中 (PACl5 (10 cm))) と表記)。ろ層全体の損失水頭は時間と共に増加し、PACl 注入率が多い条件ほどその上昇率は高くなった。また、深さ 10 cm の位置とろ層底部の間の損失水頭 (PACl 注入率 5 mg/L の条件) は時間変化がほとんどなく、図示しなかつ

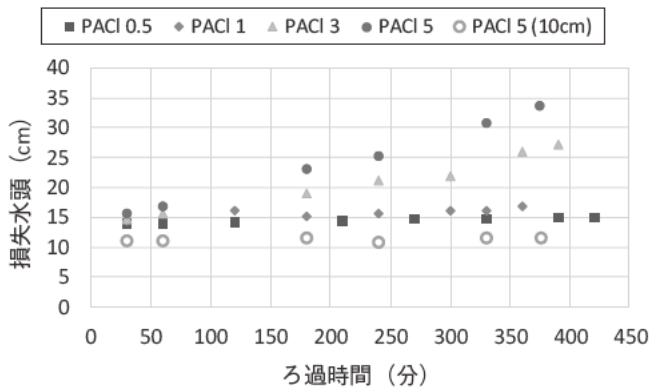


Fig. 2 Head loss experimental data of total filtration layer

た他の条件についても同様であった。このことから、今回の実験時間の範囲では、損失水頭の上昇はろ層上層 10 cm で生じ、ろ過供給水に含まれる凝集剤成分の量が多いほどその上昇率は高くなるという結果が得られた。

4.2 ろ過水濁度

Fig. 3 に各 PACI 注入条件におけるろ層深さとその深さでの濁度の関係を示す。濁度の時間変化はほとんどなかったため、実験時間中の平均値とした。全ての PACI 注入条件において、ろ層深さが増すに従って濁度が下がり、特にろ層上層 10 cm においてその除去率は高い結果となった。

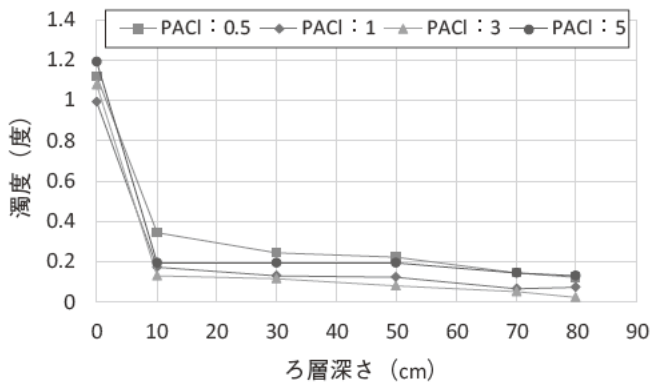


Fig. 3 Filtration water turbidity experimental data according to filter layer depth

5. モデルの評価結果

5.1 空隙率算出式の係数 A, B の決定

ろ層の分割は、検証実験に合せて最上層と最下層は 10 cm, 間は 20 cm ずつ 3 層とした合計 5 層とした。(式 2) の係数については、文献³⁾を参考にろ過砂の球形度 $\phi S=0.77$ とし、有効径 0.6 mm のろ過砂を用いていることからろ過砂の粒子径 $D=0.0006$ (m) とした。ろ過供給水の粘性係数 μ は、水 (20°C) の値を用い 0.001002 (Pa·s) とした。ろ過速度 U は Table 1

の実験条件に示す流速 (m/日) を (m/s) に単位変換した値とした。また、これらの係数は実験中にほとんど変化しないと考え、固定値とした。次に、(式 3) の係数については、 ε_0 は Fig. 2 のろ過開始時の損失水頭の検証実験データ (14.0 cmH₂O) となるよう 0.56 とし、 $TB_{in(i)}$, $TB_{out(i)}$ は Fig. 3 に示す検証実験データ、PACI は Table 1 に示す実験条件の PACI 注入率を用いる。Fig. 2 より損失水頭は表層の 10 cm のみで変化していることから、最上層 (ろ層厚 10 cm) の損失水頭データを用いて係数 A, B を決定した。即ち、Fig. 2 の検証実験データのうち最上層の部分の損失水頭の全データ (全ての PACI 注入率条件で、全ての時間のデータ) と (式 1), (式 2), (式 3) で算出した最上層の損失水頭の差の 2 乗和が最小となるような値を求め、 $A=0.026$, $B=0.0089$ と決定した。

5.2 ろ層の損失水頭の推定

“5.1” で求めた A, B を用い、(式 1), (式 2), (式 3) により損失水頭を推定した。Fig. 4 にろ層の損失水頭推定結果を示す。検証実験の結果 Fig. 2 と比較して、検証実験結果と推定結果の差を求めた。Table 2 に PACI 注入率条件ごとの損失水頭の検証実験結果と推定結果の差の最小, 最大, 平均を示す。差の最小は 0.18 cmH₂O, 最大は 4.8 cmH₂O, 平均は 1.5 cmH₂O となった。次に、損失水頭の推定値のろ過時間に対する変化について考察する。Fig. 4 より、損失水頭推定値の経時変化は直線的な増加ではなく、時間経過とともに上昇率が大きくなる曲線を示した。特に PACI 注入率条件の大きい時に顕著である。これは、(式 3) に

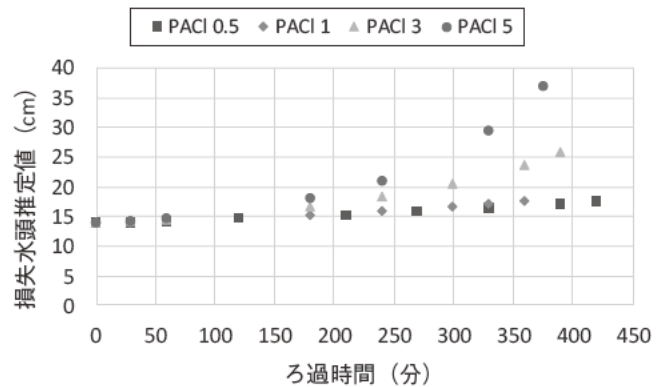


Fig. 4 Head loss model outputs of total filtration layer

Table 2 Summary of head loss model outputs

PACI 注入率 (mg/L)	差の最小値 (cmH ₂ O)	差の最大値 (cmH ₂ O)	差の平均値 (cmH ₂ O)
0.5	0.30	2.7	1.3
1	0.18	0.99	0.53
3	0.25	2.7	1.6
5	0.98	4.8	2.8
全体	0.18	4.8	1.5

より求める空隙率が単調減少となることが原因である。**Fig. 2**に示す検証実験結果では損失水頭の上昇は直線的な増加をしていることから、空隙率の減少率は一定ではなく、時間と共に減少率が小さくなっていると考えられる。空隙率の時間変化のモデルに改良を加えることで、損失水頭推定の精度の更なる向上を見込むことができると思われる。

6. おわりに

本報告では、急速ろ過方式の浄水場のろ過プロセスのろ過池損失水頭モデルの構築と評価を行った。Kozeny-Carmanの式²⁾を基本モデルとしてろ層を複数に分割し、ろ層ごとにろ過により蓄積する懸濁成分に応じてろ過池の損失水頭を推定するモデルを構築した。また、ろ過処理の進行に伴い変化するろ層の空隙率を各ろ層への濁度、ならびに残留している凝集剤成分により変化するものと定義し、損失水頭を推定するモデルとした。モデル検証のための実験を行い、損失水頭の推定値は検証試験結果を概ね再現できた。今後、

損失水頭推定の精度の更なる向上を狙い、空隙率の時間変化モデルの改良を行う予定である。また、既報のろ過水濁度推定モデルと合わせた評価や、長時間運転の評価などを進め、適切な凝集剤注入率の決定やろ過池洗浄タイミングの決定を支援するアプリケーションへの適用を目指す。

参考文献

- 1) 松井佳彦, 丹保憲仁: 急速ろ過プロセスの数式モデル, 水道協会雑誌, Vol.61, No.2, pp.17-27 (1992)
- 2) 土木学会環境工学委員会環境工学に関わる出版準備小委員会: 環境工学公式・モデル・数値集, 土木学会, pp.27-29 (2004)
- 3) 村山清一, 福田美意, 毛受卓, 横山雄, 金谷道昭, 黒川太: 急速ろ過プロセスにおけるろ過水濁度推定に関する検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol.26, No.2/3, pp.16-19, (2021)
- 4) 松井佳彦, 丹保憲仁: 急速ろ過過程の数値シミュレーションのための諸係数の算定, 水道協会雑誌, Vol.61, No.3, pp.2-12 (1992)