

中空糸内圧型膜ろ過における膜破断のモデル解析

東北大学 学生員 大野 崇
東北大学 正会員 後藤光亜
東北大学 正会員 大村達夫

1.はじめに

病原微生物等による水源汚染が深刻化し、それに応する水処理技術として膜処理が各地で稼働を開始している。今後、長期運転をするに当たって、膜破断時に原水がろ水へ直接流出することに対するリスク評価を行うことが重要となってくる。そこで本研究では、浄水システムとして広く利用されている中空糸内圧型クロスフロー式膜ろ過について、水力学的モデルを構築し、膜破断時のろ水への原水流出量を算出することで、モジュール規模や運転条件の違いによる膜破断時リスクを定量的に評価するための基礎的検討を行った。

2. 膜ろ過基礎式

内圧型クロスフロー式の中空糸膜を考え、圧力、クロスフロー流速、透過流束に関して次のような関係式を用いる¹⁾。

中空糸内の圧力損失は、層流の場合は次のボワゼイユの式で計算する。

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{32\mu}{\rho g D^2} v \quad (1)$$

乱流、もしくは遷移領域においては次式で表すものとする²⁾。

$$\frac{dp}{\rho g} = -\left(\zeta + f \frac{dx}{D}\right) \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

連続の式からクロスフロー流速と透過流束との間には、以下の関係がある。

$$\frac{dv}{dx} = \frac{4D_0 u}{D^2} \quad (3)$$

透過流束と圧力の関係は、ケーキロ過理論を用い次式で表す。

$$N = \frac{P - P_0}{\mu R} \quad (4)$$

ここに、x : クロスフロー下方向への距離(m), P : 中空糸膜内圧力(Pa), D : 中空糸膜内径(m), ρ : 密度(kg/m³), g : 重力加速度(m/s²), v : クロスフロー流速(m/s), ζ : 摩擦損失係数(-), u : 透過流束(m/s), D₀ : 中空糸膜初期内径(m), c : 各損失係数, P₀ : ろ液側の圧力(Pa), μ : 粘性係数(kg/m/s), R : 膜抵抗(1/m)である。

3. 解析方法

図-1に示すような膜破断状況を考え、流路を①未破断中空糸膜、②モジュール入口側から中空糸破断部、③モジュール出口側から中空糸破断部への3つの経路について方程式を解き、モジュール内の水の流れを求める。解析に当たつ

ての境界条件は、設定透過流束は1 m/d、中空糸膜入口における設定(最大)クロスフロー流速が1 m/s(ただし設定した以上の透過流束が得られる場合は条件に適合する最大値)とし、出口圧力はモジュール出口から循環タンクまでのパイオラインにおける圧力損失分を加味した。これらの条件下でモジュール長さ、破断位置をバラメータとしてモジュール内の圧力分布、破断面からの循環水(原水)流出量を計算した。

中空糸は膜抵抗R=10¹²のものが400本あるとし、破断時にはその中の1本が完全に切断されるとする。膜破断面からの原水流出流量Q₁(m³/s)は、

$$Q_1 = \frac{\pi D^2}{4} (v_2 + v_3) \quad (5)$$

で計算され、全体のろ過流量Q(m³/s)に占める割合を原水流出率として

原水流出率(%)

$$= \frac{\text{破断面からの流出流量 } Q_1}{\text{全体のろ過流量 } Q} \times 100 \quad (6)$$

により算出した。

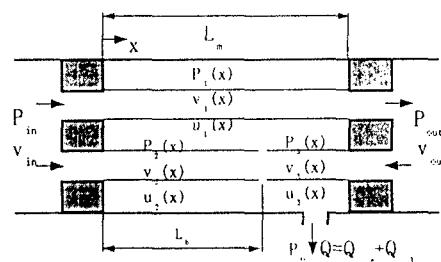


図-1 中空糸膜破断状況モデル図

L_m : モジュール長さ(m), L₁ : 入口側の膜接合部から破断位置までの距離(m), Q₁ : 膜透過流量(m³/s)。添字は流路を表す。1:未破断膜、2:クロスフロー入口側→破断部、3:同出口側→破断部

4. 結果及び考察

4.1 原水流出率を与えるモジュール長さの影響 入口膜始端部における破断を想定し、モジュール長さL_mを0.25, 1mと変化させた場合の圧力分布を図-2, 3に示す。

モジュールが長くなると、クロスフロー流速の壁面摩擦面積が増加するため、より大きな入口圧力が必要となる。膜破断面からの原水の流

出量は式(2),(5)より圧力の平方根に比例する。一方、膜透過流量は式(4)から圧力の1乗に比例する。そのため、圧力が増加すると、ろ液全体に対する割合は、破断面からの流出量よりも膜透過流量の方が相対的に大きくなる。その結果、長さが長くなるほど流出率が小さくなることが示された。

4.2 原水流出率に与える膜破断位置の影響

膜モジュールの長さを1mに固定し、膜破断位置を0, 0.5, 1mと変化させた場合の圧力分布を図-3, 4, 5に示す。各流路における膜透過流量 Q_{f1} と、破断面からの原水流出量 Q_1 の全体に占める割合を表-1にまとめた。

原水流出率が最も大きくなるのは、入口において膜が破断した場合で6.0%であった。モジュール中央部で膜が破断した場合、膜破断面からクロスフローが流出するまでに壁面摩擦が作用するため、原水流出率は3.1%と入口の値よりも低下した。モジュール出口で膜破断が発生した場合、破断膜と未破断膜の圧力分布が出口で2kPaしか違わず、流路②においても①と同程度の膜透過流束が得られている。ただし、流路③における膜破断面からの原水流出も全体の2.0%を占め、全体の原水流出率は中央部における膜破断と比較して0.5%ほど高くなり、この区間内において最小値が存在することが示唆された。

膜ろ過運転において、膜モジュール入口のファウリング軽減等の目的から、クロスフローの流下方向を一定間隔で切り替える運転方式がある。このような方式は、破断位置が入口と出口を交互に繰り返すことになり、原水流出率は入口と出口で破断した場合の平均値4.8%であると考えられる。クロスフローを一方向で運転する場合の入口破断における原水流出率と比較して2割のリスク低下を期待することができる。

5. おわりに

今回の数値シミュレーションによって、膜破断による原水流出量を定量的な評価の可能性を示した。これらの結果に、膜破断の確率や原水中の病原微生物濃度を考慮することで、膜ろ過運転に伴うリスク評価を様々な運転条件に対して応用し得ると考えられる。

表-1 各流路における流量の割合(%)

L_b (m)	0	0.5	1	
流路1	Q_{f1}	93.9	96.8	96.2
流路2	Q_{f2}	0.0	0.1	0.2
	Q_{12}	5.8	2.7	1.6
流路3	Q_{f3}	0.0	0.0	0.0
	Q_{13}	0.2	0.4	2.0
原水流出率	6.0	3.1	3.6	

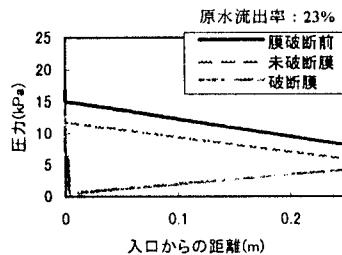


図-2 破断前後の圧力分布 ($L_m=0.25m$)

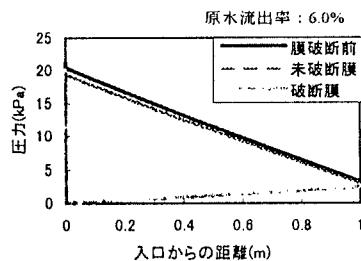


図-3 破断前後の圧力分布 ($L_m=1m, L_b=0m$)

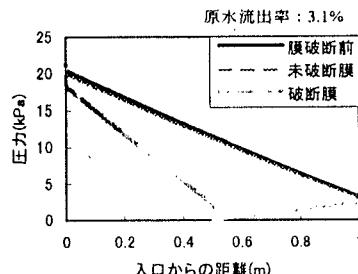


図-4 破断位置と流出率の関係 ($L_b=0.5m$)

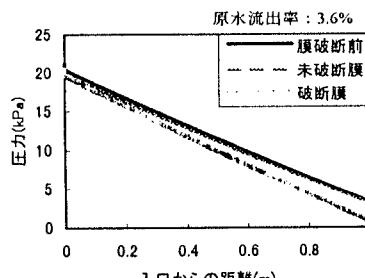


図-5 破断位置と流出率の関係 ($L_b=1m$)

(参考文献)

- 藤田賢二、瀧沢智：外圧式中空糸膜における目詰まりの過程のシミュレーションと操作方法の評価、水道協会雑誌、pp93-100、1992。
- 水理公式集：土木学会(1980)