II－492　急速ろ過負圧によるろ層内気塊の形成モデル

水処理・水環境・木原研究室　正員　木原　敏
明建設計(株)　江守　猛

はじめに：本報告は急速ろ過負圧発生の水理的構造モデルを組立て、さらにそれによって生じたそれぞれのろ層深度に対する負圧に対して発生する過飽和溶存空気の気化量を解析し、さらに間隙内流掃過程での微少ガス粒子の合一モデル化を検討したものである。

1．負圧発生の構造モデル

①ろ層砂面上に形成される人工ろ過膜によるもの　②砂層間隙ろ過抑止によって捕捉されたフロック汚泥による間隙率の減少に起因するもの　③ろ層のろ砂の表面にマンガン，鉄などが膠着したために粒径が肥大して間隙率を縮少させたために生じるもの　④ろ材表面に付着した微生物により水中の有機物質が消化、微生物汚泥になって間隙中に付着することによるもの

このうち①人工ろ過膜による損失水頭は極めて高くこれを無視することは出来ない。したがって①と②ろ層間隙汚泥に注目して論ずることにする。

1.1 表面ろ過膜と間隙内の閉塞に対する汚泥の分率

$L_1=L_0 \cdot R_r$ ‥‥(1)，　$L_2=L_0(1-R_r)$ ‥‥(2)，　$R_r=0.823-0.608(\varepsilon_{0t}/\varepsilon_{00})$ ‥(3)

$\varepsilon_{0,t}$：ろ層最上部の t_f における砂層間隙率 $\varepsilon_{0,t}=\varepsilon_{00}-vm_{z,t}$ ‥‥(4)，$vm_{z,t}=m_{sot}/\rho_{fo}(1-\varepsilon_f)$ ‥‥(5)

ε_f：floc含水率0.965~0.996，ρ_{fo}：flocドライ密度1.85~2.13,

1.2 ろ層表面ろ過膜による損失水頭の発生

ろ過開始洗浄直後のろ層は砂粒子そのままの状態で、水中に残留している懸濁質はそのまま間隙内に侵入していく。そのときの閉塞はいわゆる岩崎のろ過方程式が成立するので、つぎに述べるパターンで閉塞が進行する。ろ層の閉塞が進むとろ層表面近くの間隙は汚泥でほぼ充満し、その後、次第に表面にろ過膜が形成されていく。ろ過膜が形成された後はろ過膜によって大部分汚泥は抑止され、次第に緻密に厚く成長し、これによる損失水頭も急激に増大する。表面ろ過膜の形成の汚泥量 $d\,m_{sot}$ は

$$m_{sot}=\int_0^{tf} L_1 \cdot U_f \cdot dt_f \quad \cdots\cdot (6)$$

ろ層表面直下の汚泥量 $m_{20,t}:=L_2 \cdot U_f \cdot t_f \cdot \lambda_{0t}/\{1-\exp(-\lambda_{0,t} \cdot Z_0)\}$ ‥‥(7)　$\lambda_{0,t}$ 岩崎阻止率 $Z≒0$，t_f の値：$=\alpha_R \cdot R_*^{-m_o} \cdot \varepsilon_{z,t}^{n_o}$ ‥‥(8)，$R_*=U_{fo} \cdot \delta_{*0,t}/\nu$ ‥‥(9)，t_f：ろ過経過時間(sec)，間隙流速(cm/sec) $U_{fo}=U_f/\varepsilon_{0,t}$ ‥‥(10)，α_R：52.0~<u>53.3</u>~54.0，m_o：1.30~<u>1.34</u>~1.40，n_o：1.20~<u>1.23</u>~1.25，k_f：表面ろ過膜浸透係数≒0.002~<u>0.0034</u>~0.004(cm/sec)，δ_{ft}：表面ろ過膜厚=$vm_{z,t}$ ‥‥(11)，表面のろ過膜の損失水頭 $h_{L1}=(U_f/k_f)\,\delta_{ft}$ ‥‥(12)

2.3 閉塞ろ層内で生じる損失水頭

ろ層深さdZに対する損失水頭 $dh_{12}=U_f \cdot dZ/k_{2z,t}$ ‥‥(13)

$k_{2z,t}$：dZでのZ，t_f での浸透係数(cm/sec)=$(\alpha_* \cdot \varepsilon_{z,t} \cdot g/\nu)\,\delta_{*z,t}^2$ ‥‥(14)，ここに α_*：0.09~<u>0.096</u>~0.1，
$\varepsilon_{z,t}$：Z_i，t_f での閉塞によって変化したろ層間隙率，$\delta_{*z,t}$：Z_i，t_f のろ層間隙流水理的有効動深=$\varepsilon_{z,t}/A_{*z,t}$ ‥(15)
$A_{*z,t}$：単位体積中のろ層間隙の潤面面積=$(\phi_a/\phi_v)\,6(1-\varepsilon_o)/\phi_i$ ‥‥(16)，ϕ_a，ϕ_v：ϕ_i の球に対する同径の砂の表面積，体積のそれぞれ補正係数，実測より ϕ_a=0.96~<u>0.98</u>~0.99，ϕ_v=0.93~<u>0.95</u>~0.97，ε_o：砂の間隙率 0.3mm以上では微少変化，天然珪砂では ε_o=0.48~<u>0.52</u>~0.54，$A_{*z,t}=a_s \cdot A_{*zo}$ ‥‥(17)，$a_s=\exp(-k_m \cdot vm_{z,t})$ ‥‥(18)
k_m：0.120~<u>0.0124</u>~0.130，$vm_{z,t}$：ろ層 z_i，t_f での単位体積中間隙の抑止汚泥見掛け体積

$vm_{z,t}=m_{z,t}/\rho_{f0}(1-\varepsilon_f)$ ····(19), $m_{z,t}$: z, t_fでの抑止汚泥質量(g/cm³)で岩崎の阻止率 $\lambda_{z,t}$ を用いると $m_{z,t}= L_0\cdot U_f\cdot \lambda_{z,t}/\{1-\exp(-\lambda_{z,t}\cdot Z_0)\}\exp(-\lambda_{z,t}\cdot Z_i)$ ····(20), α_R:52.0~<u>53.3</u>~54.0, m_0:1.30~<u>1.34</u>~1.40 n_0:1.20~<u>1.23</u>~1.25

2.4 総水頭の時間変化

Z_i, t_fにおける蒸気圧 $P_{Gz,t}$(gf/cm²) は大気圧を P_0(gf/cm²)=1033.6とすれば

$$P_{Gz,t}=\left(h'+Z_i-\int_0^{tf}dh_{11}-\int_0^{Zi}dh_{12}\right)\rho_0\cdot g/k_g+1033.6 \quad \cdots\cdots(21)$$

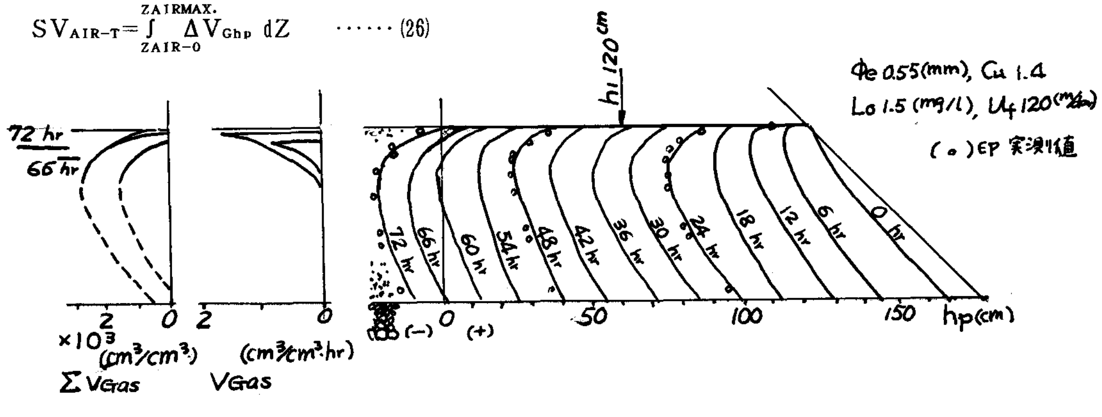
2.5 発生空気量

$Z_i\sim Z_{i+1}$での dZ間に発生するh_pに対する空気体積 ΔV_{Ghp}(cm³/cm³·sec)$=\Delta V_{G0}\cdot\{1033.6/(h_p+1033.6)\}\cdot U_f$ ····(22), ここにΔV_{G0}: 1気圧下での溶存空気量体積換算(cm³) で, $\Delta V_{G0}=V_{AIR-T}\{(h_{pZi}-h_{pZi+dZ})/1033.6\}$ ····(23), 1気圧下での溶存空気量 V_{AIR-T}は $V_{AIR-T}\fallingdotseq 286.521-7.9634\cdot t_W+0.1558\cdot t_W^2-0.001304\cdot t_W^3$ ····(24), t_W:水温 (℃), $Z_i\sim Z_i+dZ$でのdZ間のろ層単位体積中の空気発生量 $Va_{AIR}=\Delta V_{Ghp}/dZ$ ····(25)

気泡が発生するのは圧力ゼロ～負圧最大深度で、発生量が最大である深度は深度に対する負圧勾配最大値の深度であり、通常は負圧ゼロの直下がこれに当たる。一寸考えると負圧最大深度に気泡が最も多く発生するように考えがちであるがしかし、気泡塊が形成れるのは必ずしもそうではなく、気泡発生の累積効果として現われるので負圧ゼロよりさらに深い位置に生じることになる。

発生空気体積 Va_{AIR} が少ない時は発生する気泡は小さくろ層間隙中を殆ど、ろ水によって押し流されて、さらにろ層深部に入ってゆく。深部に入ると負圧最大値の深さまでさらにそこでも気泡が発生する。さらに深くなると負圧勾配が減少していくので、発生量は次第に減少するが気泡は発生する。したがって、すでに気化した気泡と合流してろ層内の気泡量は増加してゆく。このようにして累積された気泡量は負圧最大値深度まで増加し、その過程で気泡粒径は次第に大きくなり、ろ層間隙中を流下し難くなる。一度、間隙中に捕捉されると後続の気泡微粒子がこれに合体して次第に気泡は発達し気泡塊となる。負圧最大値深度での累積空気量SV_{AIR-T} は

$$SV_{AIR-T}=\int_{ZAIR-0}^{ZAIRMAX.}\Delta V_{Ghp}\,dZ \quad \cdots\cdots(26)$$



ろ層間隙中を微少気泡が掃流されるためには気泡が砂表面からの掃流力と表面張力とのバランスに支配され、さらに気泡の成長は間隙流れの速度勾配に比例すると思われる。

気泡が間隙中を気液混合流れとして流動可能な粒径は砂層での実験観察から0.1～1.0μ以下に抑えることが必要であると思われ、このことから気泡の衝突合一によって成長する過程をこの範囲に抑制する必要がある。この結果は巽の報告や筆者の実験結果ともほぼ近似しており、解析結果は妥当であろうと思われる。また、負圧の許容し得る限界としては、従来、砂面下50(cm)を超えるものもあったが、安全を考慮すると15～25 (cm) に留めるべきであると思われる。