

九州大学 正会員 安田 裕
九州大学 正会員 神野 健二
九州大学 正会員 上田 年雄

まえがき 水資源の逼迫、地盤沈下、塩水の侵入への対策として、地下水の人工涵養が普及しつつあるが目づまり現象が大きな阻害要因となっている¹⁾。その対応策として再揚水が行なわれているが、そのメカニズムは明確にはなっていない。再揚水効果は総揚水量よりも単位時間あたりの揚水量(揚水率)が大きい方が大であること、同一の揚水率では目づまり進行の度合いが少ない方が効果的であることが知られている。本報では、浸透層への濁水の注入を行ない、目づまり現象と再揚水効果についての実験的考察を行なう。

1. 実験 図-1に示す一次元浸透層モデルを用いた。浸透層には径0.5mmの砂を用い、懸濁粒子には図-2の粒度分布をもつ博多湾ヘドロを使った。この浸透層に定水頭で濁水を注入すると濁水中の懸濁粒子が砂層に抑留されて目づまりが進行する。流量が注入開始時の50%及び60%低下した段階で濁水の注入を中止し、反対側から清水を注入時よりも高水頭で注入し、再揚水効果を評価する。実験中には浸透層に取り付けられたマノメータで水頭変化を計測し、実験終了後に砂層をサンプリングして単位砂重量あたりの懸濁粒子抑留量を測定する。

2. 解析法 この実験は浸透層内の一次元流れを扱うので
連続式: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ ----- (1) 運動方程式: $\bar{u} = -k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$ ----- (2)
懸濁粒子の抑留について、懸濁粒子の連続方程式: $\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = -\sigma_s(1-\varepsilon_0)/\varepsilon \cdot \frac{\partial g_s}{\partial t}$ ----- (3)
懸濁粒子の抑留条件式: $\frac{\partial g_s}{\partial t} = \varepsilon \beta C / \{ \sigma_s(1-\varepsilon_0) \cdot (1-\beta_1 g_s) \cdot (1+\beta_2 g_s) - \varepsilon \beta_4 / \{ \sigma_s(1-\varepsilon_0) \} \cdot f(\tau) \cdot g_s$ ----- (4)
空隙率と懸濁粒子抑留量の関係式: $\varepsilon = \varepsilon_0 - \sigma_s(1-\varepsilon_0) / \{ \sigma_h(1-f_r) \} g_s$ ----- (5)
透水係数と懸濁粒子抑留量の関係式³⁾: $\frac{k}{k_0} = \frac{ \{ \varepsilon_0 - (1-\varepsilon_0) \sigma_s g_s / \sigma_h(1-f_r) \}^3 }{ \varepsilon_0^3 \{ 1 + \sigma_s g_s / \sigma_h(1-f_r) \}^2 } \left[\sqrt{ \frac{ \sigma_s g_s }{ 3 \sigma_h(1-f_r) } + \frac{1}{4} } + \frac{ \sigma_s g_s }{ 3 \sigma_h(1-f_r) } + \frac{1}{2} \right]$ ----- (6)

ここに $f(\tau) = (\tau - \tau_c) / \tau_c \cdot U(\tau - \tau_c)$, $\tau = \frac{g}{2\bar{u}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot r'$, τ : 剪断応力(dyn/cm^2), τ_c : 限界剪断応力(dyn/cm^2), $U(x)$: 単位ステップ関数, $r' = \sqrt{1 - \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0 \sigma_h} \cdot (1-\varepsilon) \cdot g_s} \cdot r_m$, C : 間隙流体中の懸濁粒子濁度(g/cm^3), g_s : 浸透層構成砂1gあたりの抑留量(g/g), σ_s : 砂の単位重量(g/cm^3), σ_h : 懸濁粒子の単位重量(g/cm^3), f_r : 抑留粒子内の2次空隙率, r_m : 細管半径(cm), r' : 懸濁粒子が抑留された状態での細管半径(cm), $\bar{u}$: 断面平均流速(cm/sec), ϕ : 水頭(cm), k : 透水係数(cm/sec), k_0 : 初期透水係数(cm/sec), ε : 空隙率, ε_0 : 初期空隙率, ν : 水の動粘性係数(cm^2/sec), g : 重力加速度(cm/sec^2), $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: 定数

再揚水効果は砂粒子空隙内の流れに発生する剪断応力による抑留懸濁粒子の砂粒子表面からの剝離⁴⁾によってもたらされると考える。そのために砂粒子間の流れを細管内のHagen-Poiseuille流れとして表し、目づまりを半径の減少で示した。その際、細管半径は文献4より砂粒子平均径の5分の1とした。抑留懸濁粒子の剝離は、ある剪断応力以上で生じるとして、この剪断応力を限界剪断応力 τ_c とした。剪断応力による剝離の項を懸濁粒子の抑留条件式に付加してある。数値計算は上述の基礎式を差分化して行なった。懸濁粒子の連続方程式については、移流項の離散化誤差を防ぐために粒子移動法⁵⁾を用いた。

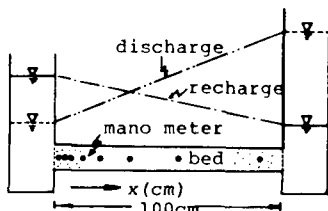


図-1 実験装置概略

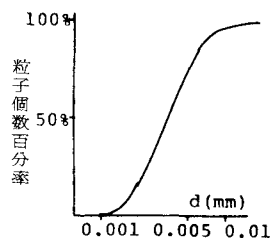


図-2 懸濁粒子の粒度分布

3. 実験結果 濁水の注入を続けると目づまりが進行して図-3のように流量が減少していく。注入の最終状態での透水係数と懸濁粒子抑留量の分布は図-4のようになる。注入口付近に集中して抑留が生じ、透水係数が低下していることがわかる。このことから動水勾配の分布は図-5が示すように注入側で著しく高いものとなっている。この状態で再揚水を行なうと、砂粒子間の流れの剪断応力は注入口側で大きくなるので再揚水による

抑留懸濁粒子の剝離は注入口付近でのみ生じ、懸濁粒子抑留量と透水係数の分布は図-6のようになる。再揚水時の流量変化は図-7が示しているように一定値以上には増加しない。これは、抑留懸濁粒子の剝離が進行し、抑留量が減少すると動水勾配が低下して剪断応力が限界剪断応力以下に落ちるので、剝離がそれ以上進行しなくなるためだと考えられる。再揚水時の水頭勾配と再揚水の効果の関係を示すと図-8のようになる。これは初期透水係数と再揚水時の水頭勾配から求めた流量(Q_0)と再揚水最終状態の流量(Q)の比を、流量減50%まで目づまりさせた場合(case(a))と流量減60%まで目づまりさせた場合(case(b))について示したものである。水頭勾配が大きいほど、また目づまりの程度が小さいほど再揚水効果が大きい。図中の計算値は基礎式で、 $\beta_1=0.013(1/\text{sec})$, $\beta_2=\beta_3=12.0$, $\beta_4=0.6$, $\tau_c=9.0(\text{dyn/cm}^2)$ として得られたものである。流量が実測値に一致するようにこれらの定数を定めたので、懸濁粒子抑留量の分布等で誤差が生じている(図-6)

結び 目づまり対策としての再揚水の効果は砂粒子間隙流れの剪断応力に規定される。したがって浸透層を細管モデルで表し、Hagen — Poiseuille 流れの剪断応力による剝離項をろ過方程式へ導入することにより、再揚水効果のある程度評価することができる。図-8より再揚水の効果は、目づまりが進行していない場合の方が大きく、また水頭勾配の大きい方、すなわち揚水率を高くした方が大きいことが実験的に確かめられた。さらに上述の方法により再揚水効果のシミュレートを行なうことができることがわかった。今後は定数等の物理的意義を明らかにし、より厳密なシミュレートを目指したい。

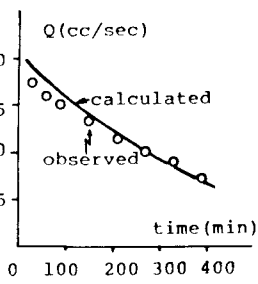


図-3 注入時の流量変化

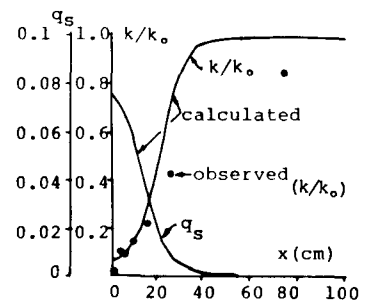


図-4 注入最終時の抑留量と透水係数

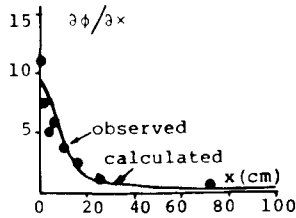


図-5 注入最終時の動水こう配

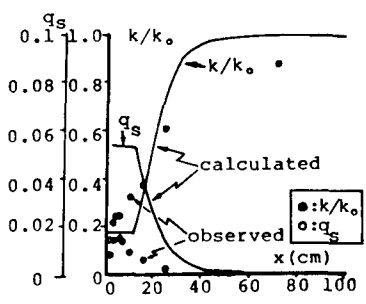


図-6 再揚水最終時の抑留量と透水係数

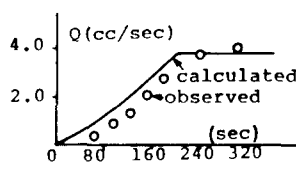


図-7 再揚水時の流量変化

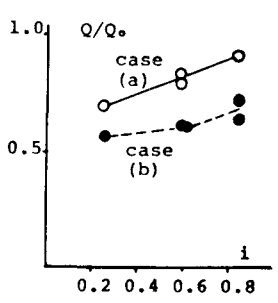


図-8 水頭こう配と再揚水効果

case(a): 流量減50%まで目づまりしたとき
case(b): 流量減60%まで目づまりしたとき

参考文献 1) 注入井による地下水の人工涵養, 土木研究所資料1498, 2) 円保; 砂ろ過の抑留機構に関する研究(I), 水道協会雑誌458, 3) R.Camp; Theory of water filtration, ASCE1964.SA4, 4) 神野; 浸透層内の縦方向分散係数および細管モデルについて, 地下水学会誌1979, 5) 神野; 粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討, 土木学会論文報告集1978