

九州大学 学生員 ○重 藤 恵 昭
正会員 安 田 裕
正会員 神 野 健 二

1. まえがき 地下水人工涵養はヨーロッパなどで古くから行なわれている手法であるが、近年代が国でも地下水の過剰利用により生ずる諸問題の対応策として、その実施例を見るようになってきた。しかし一方で、涵養の際に主な阻害要因となる目づまり現象¹⁾について、そのメカニズムが未だ十分解明されていないため、目づまり対策の一つとして行なわれる再揚水の効果を事前に評価できない。本報では再揚水効果の評価の一つの基準として、砂粒子間流れのせん断応力に着目し、その変化について考察する。また、再揚水時の目づまり除去過程をせん断応力による剝離項を加えた、3過方程式で示し、シュミレートを目指す。

2. 実験方法 実験には、図-1に示す一次元浸透層モデルを用い、平均粒径0.5mmの砂を透水係数0.15~0.20になるように詰めて浸透層とし、図のようにマンメータを取り付けた。博多湾の底泥を水道水に混ぜた濁水を浸透層に注入することにより目づまりを発生させた。注入は、浸透層の見かけの透水係数が注入開始時の60%, 50%および40%に低下するまで行なった。注入、再揚水時マ

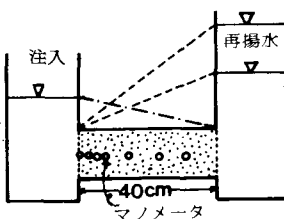


図-1 実験装置概略

表-1 実験条件	
注入時の水頭こう配	0.5
注入水の濁度	900~1000 (mg/l) (60%のみ400)
再揚水時の水頭こう配	2.0

ノメータにより水頭を計測した。こうして目づまりを発生させた浸透層について再揚水として、逆方向から流量が定常状態に達するまで着水を逆注入し、再揚水効果を観察した。再揚水終了後、浸透層の所定の位置の砂を採取して砂の単位重量当りに抑留された懸濁粒子重量(懸濁粒子抑留量と呼ぶ)を測定した。表-1に注入時、再揚水時の初期水頭勾配と注入水の懸濁粒子濃度を示す。

3. 解析 実験結果をシュミレートする際に用いる基礎式を以下に示す。

一次元浸透層内の流れについて、連続式; $\partial \bar{u} / \partial x = 0$ ----- (1), 運動方程式; $\bar{u} = -k \partial \phi / \partial x$ ----- (2)

懸濁粒子の抑留について、連続方程式; $\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} C) = -\sigma_s (1 - \varepsilon_0) / \varepsilon \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t}$ ----- (3)

抑留条件式; $\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = \varepsilon \beta_1 c / \{ \sigma_s (1 - \varepsilon_0) \cdot (1 - \beta_2 \beta_3) / (1 + \beta_3 \beta_3) - \varepsilon \beta_4 f(\tau) / \{ \sigma_s (1 - \varepsilon_0) \} \beta_3$ ----- (4)

空隙率と懸濁粒子抑留量の関係式; $\varepsilon = \varepsilon_0 - \sigma_s (1 - \varepsilon_0) \beta_3 / \{ \sigma_h (1 - f_r) \}$ ----- (5)

透水係数と懸濁粒子抑留量の関係式²⁾; $\frac{k}{k_0} = \frac{\{ \varepsilon_0 - (1 - \varepsilon_0) / \sigma_s (1 - f_r) \}^3}{\varepsilon_0^3 \{ 1 + \sigma_s \beta_3 / \sigma_h (1 - f_r) \}^2} \left[\sqrt{\frac{\sigma_s \beta_3}{3 \sigma_h (1 - f_r)} + \frac{1}{4}} + \frac{\sigma_s \beta_3}{3 \sigma_h (1 - f_r)} + \frac{1}{2} \right]$ ----- (6)

ここに、 $f(\tau) = (\tau - \tau_c) / \tau_c \cdot U(\tau - \tau_c)$, $\tau = \rho g / 2 \cdot \partial \phi / \partial x \cdot r'$, $r' = 1 - \sigma_s / \varepsilon \sigma_h \cdot (1 - \varepsilon) \beta_3 \cdot r_m$ ----- (7)

τ : せん断応力 (dyn/cm^2), c : 砂層間隙の流体中の懸濁粒子濃度 (g/cm^3), 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), τ_c : 限界せん断応力 (dyn/cm^2), r_m : 砂層間隙を細管と見たときの細管半径 (cm), r' : 懸濁粒子抑留後の間隙細管半径 (cm), f_r : 抑留粒子の2次空隙率, $U(x)$: 単位ステップ関数, β_3 : 浸透層構成砂1g当りの抑留量 (g/g), $\bar{u}$: 断面平均流速 (cm/sec), k_0 : 初期透水係数 (cm/sec), k : 透水係数 (cm/sec), ε : 浸透層空隙率, ε_0 : 初期空隙率, ρ : 水の密度 (g/cm^3), g : 重力加速度 (cm/sec^2), ϕ : 水頭, $\beta_1 \sim \beta_4$: 定数

再揚水効果は、砂粒子空隙内の流れに発生するせん断応力³⁾による抑留懸濁粒子の砂粒子表面からの剝離によると考える。いま砂粒子間の流れを細管内のHagen-Poiseuille流れとして、目づまりを半径の減少で示した。なを、細管半径は文献4より平均径の5分の1とした。抑留懸濁粒子の剝離は、あるて以上で生じるとして、この剝離の項を抑留条件式(4)に付加してある。数値計算は前述の式を差分化して行ない、(4)式は粒子移動法⁵⁾を用いて移流項の離散化誤差を防止した。

4. 実験結果、考察

砂層に濁水を注入すると、砂粒子のまわりに徐々に懸濁粒子が残留されて目づまりが生じ、透水係数が低下する。一般に、目づまりは注入口付近で発生する。図-2は装置の注入口付近における(7)式より算定した透水係数の関係を示している。図より、透水係数の低下度の大きいほど、 τ_c は大きい。図-3, 4, 5は、それぞれ透水係数が注入開始時の60%, 50%および40%に低下した浸透層を、再揚水した場合の注入口付近の τ_c と懸濁粒子残留量の時間変化を示している。いずれも、ある時間から τ_c の値が定常状態に達し、同じ頃、懸濁粒子残留量も定常状態に達している。

一方、 τ_c の定常値は、透水係数の低下度の大きい場合ほど大きいことがわかる。この定常値が、 τ_c を τ_c と示すと考えられるので、 τ_c は、残留懸濁粒子の剥離に関係し、再揚水初めの透水係数の低下度すなわち目づまりの程度によって異なると考えられる。すなわち、注入

停止時の τ_c と透水係数は、互いに関係し、また両者は、再揚水時の τ_c と関係していると考えられる。また τ_c は再揚水時に生じる残留懸濁粒子の剥離に関係して、目づまりの進行度および再揚水効果は、透水係数によっても、ある程度評価し得ると考えられるが、目づまりの進行および除去の程度を、懸濁粒子の挙動で考えると、 τ_c に着目すれば、より定量的な評価をすることが可能と考えられる。

次に実験結果より得た τ_c を用いて、実験値と比較した結果を図-3~7に示す。計算では文献6から $\beta_1=0.003$, $\beta_2=20.0$, $\beta_3=0.0$ とし、 β_4 は再揚水時の τ_c と懸濁粒子残留量の時間変化と基礎式(4)から、0.5と定めた。これらの図から計算値と実験値は、ほぼ近似している。 τ_c を導入した再揚水の解析がほぼ可能であると考えられる。

今後は、実験例をふやし、目づまりの進行および除去の程度の、より定量的なシミュレーションを目指したい。

(参考文献)

- 1) 注入井による地下水の人工汚染, 土木研究所資料 1478
- 2) 丹保; 砂3層の滞留機構に関する研究(Ⅰ), 水道協会誌458
- 3) R. Camp: Theory of water infiltration, ASCE 1964
- 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, 地下学会誌1977
- 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
- 6) 白田; 地下水の人工汚染時にかけ目づまりの発生機構について, 西沢文庫 昭和54年度

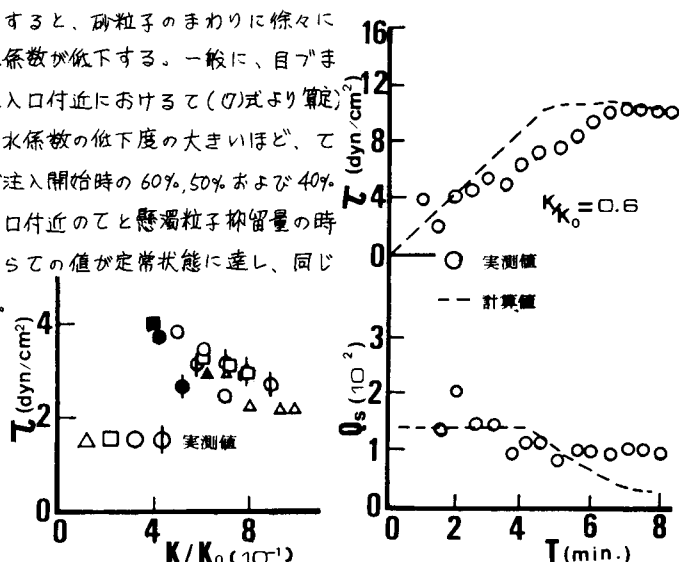


図-2 せん断応力と透水係数の関係

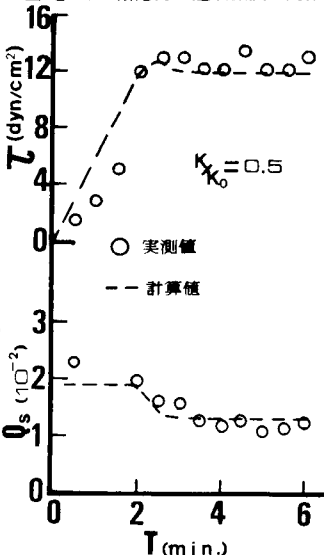


図-3 再揚水時のせん断応力と懸濁粒子残留量の時間変化

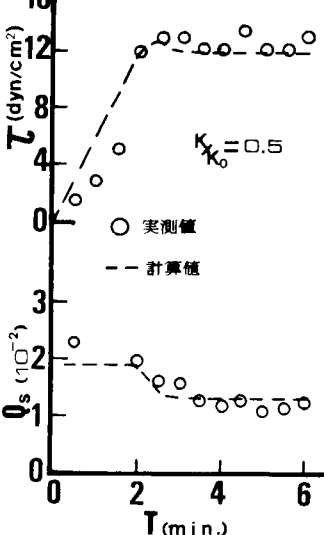


図-4 再揚水時のせん断応力と懸濁粒子残留量の時間変化

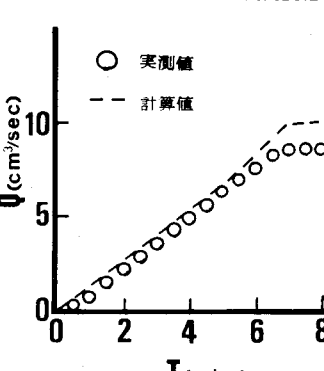


図-5 再揚水時のせん断応力と懸濁粒子残留量の時間変化

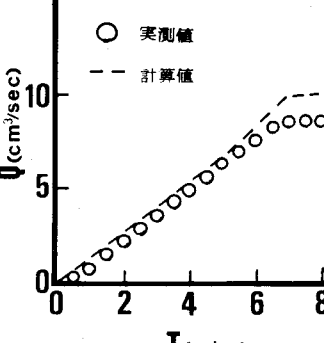


図-6 注入時の流量変化

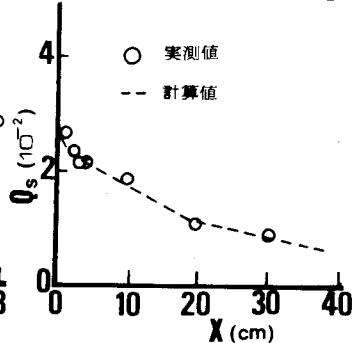


図-7 注入最終時の懸濁粒子残留量の分布