懸濁物質による砂充填層内の目づまりと 再揚水による透水係数の回復について

上田年比古* 神野 健二* 安田 裕* 重藤 恵昭**

Analyses of Clogging Phenomena in Porous Media and the Recovery of Permeability by Back-pumping

Toshihiko UEDA*, Kenji JINNO*, Hiroshi YASUDA* and Yoshiaki
SHIGETOU**

Abstract

One of the difficult problems in planning an artificial groundwater recharge is the prediction of cloggings in aquifers. In the present study, the mechanism of the clogging caused by suspended solids in recharge water and the effect of back-pumping for recovery permeability are discussed through theoretical and experimental analyses.

The following results are obtained:

- (1) the clogging phenomenon can be simulated by the filtration equations;
- (2) the relation between the amount of clogging solids and the reduced permeability can be expressed by the Kozeny-Stein equation; and
- (3) by assuming that the flow through the capillary tube, the quantitative estimation of the effect of back-pumping can be realized: the effect depends on the magnitude of the shear stress exerted by the flow on the sand grains.

I ま え が き

地下水は古来より安定した良質の水資源として利用されてきたが、近年地下水の過剰揚水が原因で地盤沈下や井戸枯れあるいは塩水侵入など、種々の地下水障害が各地で発生している。このような障害は、

水資源として過剰揚水されること以外にも、大規模な建設工事の際の地下水位低下によっても引き起こされることがしばしば報告されている。

さて、以上のように枯渇しつつある地下水の補強策として最近、地表の余剰水を人工的に地下に注入する、いわゆる地下水の人工涵養が各地で検討されつつあるが、人工涵養のメカニズムの理解は上述の理由により水資源関係者のみならず建設工事関係者にも必要なことと考えられる。

* 九州大学工学部 Faculty of Engineering, Kyusyu University

** 九州大学大学院工学研究科 Graduate Student, Kyusyu University

人工涵養を行う上で、最も困難な問題の一つとして帯水層の目づまりがあげられている¹⁾。水資源の有効利用の立場あるいは経済的な理由から、清浄な水の注入よりは洪水時の河川水や下水処理水などを注入するほうが効率的と考えられるが、この場合、目づまりが問題となる。注入水中の懸濁粒子が原因で発生する目づまり現象は、注入井や浸透池の側面および底面の浸透層に懸濁粒子が抑留され間隙が狭くなり、透水性が低下し注入流量が減少する現象と考えられる。

注入井による地下水人工涵養時の目づまり現象に関する研究として Rebhum, M & Schwarz, J (1968 年)²⁾ の実験的研究、あるいは目づまり現象を懸濁粒子のろ過現象と考え、これにろ過理論を適用した北川・石崎(1980年)³⁾ の研究などがあるが、注入初期の時点の解析であり、目づまりが十分に進行した状態までの解析はなされていないようである。さて、このような懸濁粒子による目づまり現象は、主に注入側にきわめて近い浸透層で発生する現象であるが、注入井戸を用いた人工涵養では、目づまりを起した帯水層から再び地下水を揚水することによって懸濁粒子を剝離させて吸い出し、目づまりを除去するいわゆる再揚水対策が取られることがある。しかし再揚水の効果については定量的な検討⁴⁾ はあまり加えられていないようである。

本報においては地下水の人工涵養計画にあたっての必要な基礎的知見を得るため、人工涵養時の懸濁物質による目づまり過程のメカニズム解析と、再揚水効果について数値シミュレーションによる定量的な検討を行ったものである。特に、目づまり過程に対してろ過方程式を応用し、また再揚水による抑留物質の剝離は、浸透層の空隙を細管でモデル化し、この細管に作用するせん断応力によるものとして解析を行っている。

II 基礎式

1 流れの基礎式

実際の人工涵養は注入井戸や浸透池などを用いて行われるが、本報では 図-1 に示すような一次元一様流の浸透層についての室内実験およびこれに対す

図-1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus

る数値シミュレーションを行う (なお、注入井戸を用いる場合には、方程式を円柱座標表示し以下に示す方法と同様の展開を行う)。

連続の式は、空隙率の時間変化が小さいとして、これを無視すれば

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

運動方程式は、ダルシーの法則が成り立つとして

$$u = -k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、 u ；断面平均流速 (cm/sec)， k ；透水係数 (cm/sec)， ϕ ；水頭 (cm)， x ；座標 (cm)，注入の方向を正の向きにとる。なお、再揚水時においてもダルシーの法則が成り立つものと仮定する。

2 目づまりを表す式

目づまり現象を表現するために、次のような懸濁物質保存の方程式(3)と懸濁物質の抑留式(4)を用いる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\sigma_s(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon} \frac{\partial q_s}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_s(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial t} = \beta_1(1-\beta_2 q_s)C - \beta_3 f(\tau) q_s \quad (4)$$

ここで,

$$f(\tau) = \frac{(\tau - \tau_c) Un(\tau - \tau_c)}{\tau} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\rho \cdot g r}{2} \frac{\partial \phi}{\partial x} r' \quad (6)$$

$$r' = \left\{ 1 - \frac{\sigma_s \cdot (1-\varepsilon) q_s}{\varepsilon_0 \sigma_h (1-f_\sigma)} \right\}^{1/2} r_0 \quad (7)$$

ここに, C ; 空隙水中の懸濁物質濃度(g/cm^3), ε ; 浸透層空隙率, ε_0 ; 初期空隙率, σ_s ; 浸透層構成材料(以下ろ材という)の単位体積重量(g/cm^3), σ_h ; 懸濁物質の単位体積重量(g/cm^3), q_s ; ろ材単位体積重量あたりの懸濁物質抑留重量(無次元量), τ ; せん断応力(dyn/cm^2), τ_c ; 限界せん断応力(dyn/cm^2), ρ ; 水の密度(g/cm^3), $g r$; 重力の加速度(cm/sec^2), $Un(\tau)$; 単位ステップ関数($\tau \geq 0$ で1, $\tau < 0$ で0), r' ; ろ材空隙の細管モデル⁶⁾における任意時点の細管半径(cm), r_0 ; 細管モデルの初期細管半径(cm), $\beta_1, \beta_2, \beta_3$; 実験定数, t ; 時間(sec), f_σ ; 二次空隙率(懸濁物質の抑留状態での空隙率, 詳細は II-3, II-4)。

式(3)および式(4)の右辺の第2項を除いた式はろ過に関する基礎方程式である(参考文献5))。また式(4)の右辺第2項は本報で新しく導入したせん断応力による剝離項である。さて, 式(3)は懸濁物質を含む流体の単位体積, 単位時間の懸濁物質の連続の方程式で, 左辺の第1項は単位時間あたりの流体の単位体積内の懸濁物質の増加量, 第2項は単位時間に流体の単位体積から出ていく懸濁物質質量, 第3項は単位時間に単位体積の流体から分離して, ろ材に抑留する懸濁物質質量である。なお, 第3項の $\partial q_s / \partial t$ にかかる係数はろ材の単位体積重量あたりの抑留量 q_s を流体の単位体積あたりの抑留量にするための係数である。なお, 式(3)では一般のろ過方程式と同様に拡散項を除いている。これは, こ

で取り扱っている現象はろ過と同様に計算値の濃度が主に, ろ材への抑留によって変化する場合であることから, 一般に小さいと考えたからである(参考文献(3))。なお, 式(3)の $\partial C / \partial t$ もまた, 移流項 $u/\varepsilon \cdot \partial C / \partial x$ に比べてろ過では一般に小さいと考えられているが(参考文献5)), ここでは再揚水時の濃度の急激な変化を考えてこの項は残して計算を行っている。

次に, 式(4)は懸濁物質を含む流体の単位時間, 単位体積の懸濁物質の抑留および剝離の量をきめる関係式で, 左辺は式(3)の右辺第3項と同じである。

次に, 式(4)の右辺第1項は懸濁物質の抑留量を示すもので, 抑留はその時点での懸濁物質の濃度按比例することを示している。この比例定数はろ過における阻止率 λ で, Ives, K. J. (1975)⁷⁾ は, 次式を提案している。

$$\lambda = \beta_1(1-\beta_2 q_s)^A \cdot (1+\beta_2' q_s)^B \quad (8)$$

ここに, $\lambda, \beta_1, \beta_2, \beta_2', A, B$ は定数である。この式は, 図-2に示すように, 阻止率 λ が懸濁物質の抑留によって変化することを表している。すなわち, 係数 β_1 は抑留率が懸濁粒子濃度に比例して増加する効果を表わし, β_2 が含まれている項は抑留量が増加すると, 空隙内の流速が増大して懸濁粒子が付着しにくくなり, 抑留率が減少する効果を表わし, また, β_2' を含む項 $(1+\beta_2' q_s)$ は β_2 の項とは逆に抑留量

図-2 阻止率 λ と懸濁粒子抑留量 q_s の関係

Fig. 2 Relationship between coefficient of filtration λ and captured clogging material q_s

が増加すると空隙が狭くなり抑留率が増加する効果を表している。これらの定数は懸濁粒子と流体の物理化学的特性、ろ材の大きさや形状、および浸透層の特性などによって変化する量と考えられ、現時点においては一般的な決定法を見出すことは極めて困難である。なお、 λ は図-2のⅠ線のように注入開始時の $\lambda(q_s=0$ の時の $\lambda(=\beta_1)$ から、初期の段階で、ある程度上昇してから下降するか、あるいはⅡ線のようにはじめから下降していくかは問題となるところであるが、現在まで、これについての定説はない。 $(1+\beta_2'q_s)$ の項すなわち β_2' が大きくなるにつれ λ が上に凸の傾向が強くなり、 β_2' が少さくなるとⅡ線のように λ の上昇の傾向がなくなる。なお、 λ がⅠ線のように初期の段階で上昇する時は、流量の初期の段階で減少が急激になるものと考えられる。本報では流量 Q の実測値は後述の図-13(a)~(e)に見られるように、初期の段階で Q の減少が特に急になっているとは見られないので、ここでは β_2' の項は除いて、次の式(9)を用いることにする。

$$\lambda = \beta_1(1 - \beta_2 q_s) \quad (9)$$

なお、図-2のⅡ線は式(9)を表わしている。

次に式(4)の右辺第2項は浸透層に抑留された懸濁粒子が再揚水時に剝離される量を表している。本報では再揚水効果を評価するために、浸透層を図-3に示すような細管でモデル化しこの細管壁面上に作用するせん断応力の大きさを見積もることを提案している。均一粒径のろ材からなる浸透層においては、粒径のほぼ5分の1程度がモデル化した細管の半径

図-3 細管モデルにおけるせん断応力

Fig. 3 Shear stress on inner surface of capillary tube

に相当するといわれている⁸⁾。いま懸濁物質が抑留されていない初期状態の、この細管半径を r_0 としよう。懸濁粒子が抑留(抑留量 q_s)された時の細管半径を r' とし、 q_s が一様の厚さで細管半径に付着するものとすれば式(7)となる。

次に、再揚水時においても流れが層流状態であるとし、細管内ではHagen-Poiseuilleの流れとなっていてと考えれば、細管壁面上に作用するせん断応力は式(6)となる。

(6)式から判るようにせん断応力の変化は水頭勾配の場所的、時間的变化と細管モデルの半径の変化によって表される。

懸濁粒子がせん断応力によって剝離されるためにはある一定値以上のせん断応力が作用することが必要であろう。いまこの限界のせん断応力を τ_c とし、 τ が τ_c を超えるとときに剝離が生じると仮定する。

剝離量は τ が τ_c よりも大きいほど増加するとして式(5)に示すような関数を考え、剝離量はこの $f(\tau)$ に比例するとする。

また剝離量は抑留量 q_s が大きいほど多くなると考える。

以上のように考えて、単位時間に、流体の単位体積あたりの剝離量を表わす式として、次式を与える。

$$j = \frac{\beta_3 \epsilon f(\tau) q_s}{\sigma_s(1 - \epsilon_0)} \quad (10)$$

これが、式(4)の右辺第2項である。

3 空隙率と懸濁粒子抑留量との関係式

懸濁粒子の抑留により浸透層の空隙率が減少するが、任意時間および任意場所における空隙率 $\epsilon(x, t)$ は次のようになる。

いま、 $f\sigma$ を抑留懸濁粒子間に生じている空隙の空隙率(これを2次空隙率という)⁵⁾とし、 v を浸透層単位体積当たりの抑留懸濁粒子の体積とすると、ろ材単位体積重量当たりの抑留量(重量) q_s との関係は

$$v = \frac{\sigma_s(1-\epsilon_0)q_s}{\sigma_h(1-f\sigma)}$$

を考えなければならない。従って

$$\epsilon(x, t) = \epsilon_0 - v = \epsilon_0 - \frac{\sigma_s(1-\epsilon_0)q_s}{\sigma_h(1-f\sigma)} \quad (11)$$

となる。

4 透水係数と懸濁粒子抑留量との関係式⁹⁾

懸濁粒子の抑留により浸透層の透水係数が減少するが抑留量と透水係数との関係式にはKozeny-Stein式があり、以下のようにして導かれる。

透水係数に関する Kozeny の式は周知のように

$$k_0 = \frac{\gamma \cdot g r \cdot d^2 \cdot \epsilon_0}{v(1-\epsilon_0)^2} \quad (12)$$

ここに、 γ ；係数、 d ；ろ材粒径、 v ；浸透層単位体積中の抑留量（体積）で表されるが、Stein（参考文献9）は懸濁粒子が抑留されたときにも次のような仮定が成り立つとしている。すなわち、

①懸濁粒子はろ材表面に均等に抑留される。②懸濁粒子が抑留されてもろ材の形状は変らない。

懸濁粒子が抑留され、ろ材径が Δd だけ増加したとすると、浸透層単位体積中の抑留量（体積） v は

$$v = \frac{(1-\epsilon_0)\{\alpha(d+\Delta d)^3 - \alpha_0 d^3\}}{\alpha_0 d^3} \quad (13)$$

である。ここに α_0 および α はそれぞれ抑留前後のろ材の形状係数である。いまの場合、仮定②により $\alpha = \alpha_0$ である。また $(\Delta d)^3$ の項を小さいとして無視すると式(13)より

$$\Delta d = d \left(\frac{v}{3(1-\epsilon_0)} + \frac{1}{4} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \quad (14)$$

このとき Kozeny 式は

$$k = \frac{\gamma \cdot g r (\epsilon_0 - v)^3 (d + \Delta d)^2}{v(1-\epsilon_0 + v)^2} \quad (15)$$

式(12)と式(15)との比をとると

$$\frac{k}{k_0} = \frac{(\epsilon_0 - v)^3 (1-\epsilon_0)^2}{\epsilon_0^3 (1-\epsilon_0 + v)^2} \left\{ \left(\frac{v}{3(1-\epsilon_0)} + \frac{1}{4} \right)^{1/2} \right.$$

$$\left. + \frac{3(1-\epsilon_0)}{v} + \frac{1}{2} \right\} \quad (16)$$

となる。式(16)の v に式(12)を用いれば、次のKozeny-Stein式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{k}{k_0} = & \frac{[\epsilon_0 - (1-\epsilon_0)\sigma_s \cdot q_s / \{\sigma_h(1-f\sigma)\}]^3}{\epsilon_0^3 [1 + \sigma_s q_s / \{\sigma_h(1-f\sigma)\}]^2} \\ & \left\{ \left(\frac{\sigma_s q_s}{3\sigma_h(1-f\sigma)} + \frac{1}{4} \right)^{1/2} \right. \\ & \left. + \frac{\sigma_s q_s}{3\sigma_h(1-f\sigma)} + \frac{1}{2} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

III 数値計算について

1 懸濁物質の数値計算

前節で示した方程式のうちで、数値計算の安定性上もっとも注意すべき式は懸濁物質の連続方程式と考えられ、式(3)の左辺第2項の移流項は流速が大きい時に大きな離散化誤差が発生することが知られている。特に目づまり過程において十分に抑留が進行し、式(3)の左辺第3項の抑留項が小さくなった段階では式(3)は実質的には1次元の波動方程式となり安定性が低下することが考えられる。著者らはこのような輸送過程にも十分な精度を持つ数値計算手法について検討し以下に示すような粒子移動法¹⁰⁾を提案している。

この方法は式(3)で、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{\epsilon} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{dC}{dt}$$

とおく。すなわち u/ϵ の速度を持つ特性曲線上では式(3)は

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\sigma_s(1-\epsilon_0)}{\epsilon_0} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial t} \quad (3)'$$

と書くことができる。粒子移動法では(3)'のように見掛け上移流項 $u/\epsilon \cdot \partial C/\partial x$ を消去した式について、計算領域内に当該の濃度を持つ仮想の流体粒子を配置し、これを粒子位置における流速で移動させながら、式(3)'を数値解析するもので、移流項で発生す

る数値計算上の誤差を除いた計算法である。ここでは、計算のアルゴリズムについては述べないが、詳しくは文献 10) を参考にされたい。

いま、粒子移動法の算定精度を確かめるために次式のような移流分散方程式に抑留項 λC が加わった方程式の数値計算を考える。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C \quad (18)$$

境界、初期条件

$$C(0, t) = C_0, \quad C(\infty, t) = 0, \quad C(x, 0) = 0 \quad (19)$$

これを粒子移動法では式(19)の条件のもとに

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C \quad (20)$$

によって数値計算することになる。ここでは $u = 0.08 \text{ cm/sec}$, 拡散係数 $D = 0.08 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 阻止率 $\lambda = 0.0008/\text{sec}$ とし、数値計算では $\Delta x = 3.0 \text{ cm}$, $\Delta t = 20.0 \text{ sec}$ とする。

なお、式(18), (19)の解析解は

$$C = \frac{1}{2} \cdot C_0 \exp\left(\frac{ux}{2D}\right) \left[\exp\left\{-x\left(\frac{u^2}{4D^2} + \frac{\lambda}{D}\right)^{1/2}\right\} \operatorname{erfc}\left\{\frac{x - (u^2 + 4\lambda D)^{1/2} t}{2(Dt)^{1/2}}\right\} + \exp\left[x\left(\frac{u^2}{D^2} + \frac{\lambda}{D}\right)^{1/2}\right] \operatorname{erfc}\left\{\frac{x + (u^2 + 4\lambda D)^{1/2} t}{2(Dt)^{1/2}}\right\} \right] \quad (21)$$

式(18)の explicit 差分法による数値解、式(20)

図-4 数値計算の精度 (式(20))

Fig. 4 Accuracy of numerical calculation (eq. (20))

についての粒子移動法による数値解および式(21)による解析解を図-4に示している。図-4は $t = 620 \text{ sec}$ のときの x 軸上の濁度分布を示している。同図より、このような計算条件下では粒子移動法が十分の精度を持つ計算法と考えられ、従って式(3)の数値計算にはこの粒子移動法を用いて行った。

2 数値シミュレーション

本報では現象の全過程をシミュレートし実測値との適合度を見て、与えられた式の妥当性、現象のとらえかたの良否を検討することになっている。シミュレーションは式(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (11) および(17)から未知数 ϕ , k , ϵ , C , q_s , u , τ , $f(\tau)$, r' が時間と場所の関数として同時に算出されていく。また、これから $Q = Au$ (A は浸透層断面積) が得られる。この場合、 $\sigma_s = \sigma_h = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $r_0 = 0.01 \text{ cm}$ とし、また $f\sigma = 0.90$ (図-11より得られた値), $\beta_2 = 20.0 \{V-2(3) \text{ 参照}\}$, $\beta_3 = 0.4 (\text{g/cm}^3 \cdot \text{sec}) \{V-2(4) \text{ 参照}\}$ を用い、 ϵ_0 , 注入濁度 (C_{in}), k_0 は表-1の値を与えた。つぎに、 β_1 , τ_c は $V-2(2)$ および(5)で述べるように、種々の値を与えてシミュレーションを行い妥当な値を求めた。すなわち、本報では、 β_1 , τ_c の妥当な値を求めるためにシミュレーションを行っている。なお、式(3)には前述の粒子移動法を用いている。また、 $\tau < \tau_c$ のときは剝離を生じない $\{f(\tau) = 0 \text{ となる}\}$ ことから、注入実験のシミュレーションのときは式(4)の右辺第2項は除いて計算を行っている。

以後、シミュレーションとあるのは上述の計算を指すものである。

IV 実験

1 実験装置の概要

図-1に示す装置を用いて懸濁水の注入時の目づまりおよび再揚水の効果について実験を行った。装置には同一規格の2本の浸透層(浸透層の長さ 40 cm , 正方形断面 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, 断面積 36.0 cm^2) がヘッ

ドタンク T_1 , T_2 に平行して取り付けられている。
 これは2本の浸透層を同一条件下で実験を行うため
 であり、両者の初期透水係数も十分に等しくなるよ
 うにろ材を充填している。注入実験はヘッドタンク
 T_1 の水位を(a)に、 T_2 の水位を(3)にし、再揚水実験
 は T_1 の水位を(b)に、 T_2 の水位を(1)または(2)
 に上昇させて行っている。実験では同時に2本の浸
 透層を使って注入するが、再揚水効果を調べる時に
 は片方の浸透層(B層とする)のみを再揚水し、再
 揚水しない方の浸透層(A層とする)と比較する。
 また、注入実験終了後、A層の上蓋をはずし、抑留
 量 q_s を測定し、これをB層の再揚水のシミュレー
 ションの q_s に関する初期条件として与えている。
 さらに、再揚水実験終了後B層の上蓋をはずし、抑
 留量 q_s を測定する。実験中の水頭変化を調べるた
 めにマノメータを取り付けているが、目づまりが大
 きい T_1 側には密に配置している。注入懸濁水濁度
 は北斗理研会社製の濁度計(MA500s)で実測して

いる。

2 実験条件

本報では、表-1のように実験を12回行っている。
 表中で目づまり度は、注入実験最終状態での浸透層
 全体の平均の透水係数 k と初期(注入実験開始時)
 平均透水係数 k_0 を用いて $(k_0 - k)/k_0$ で表わす。ま
 た、再揚水後の目づまり度も再揚水実験終了後の浸
 透層全体の平均透水係数 k' と初期(注入実験開始
 時)平均透水係数 k_0 を用いて $(k_0 - k')/k_0$ とする。
 実験には、ろ材として0.5mm 径の砂を用い。懸濁
 粒子としては図-5に示す粒径の分布を持つ博多湾の
 粘土質シルトを用いている。

V 実験結果および物理定数についての考察

1 実験結果についての考察

1) 注入流量の変化

懸濁水注入時の浸透層の流量は図-6(a)のように
 変化し、目づまりの進行とともに減少してゆく。実

表-1 実験条件
 Tab. 1 Experiment condition

実験番号	初期透 水係数 k_0 cm/s	初期空 隙率 ε_0	注入濁度 C_{in} mg/l	注入時 水頭勾配 T_1, T_2 間	目づ まり 度* $\frac{k_0 - k}{k_0}$ %	再揚水時 水頭勾配 T_1, T_2 間	再揚水後 の目づ まり度** $\frac{k_0 - k'}{k_0}$ %	x = 2 cm の抑留 量*** (無次元量)
1 A	0.170	0.45	.....	0.51	92.5	.....	.....	0.0436
B	0.125	0.45	.....	0.51	81.1	1.02	35.6	0.0259
3 A	0.151	0.43	800	0.51	55.0	.....	.....	0.0157
B	0.144	0.43	~1000	0.51	51.2	1.03	33.4	0.0167
4 A	0.142	0.43	500	0.50	67.8	.....	.....	0.0173
B	0.165	0.43	~660	0.50	65.5	1.03	53.8	0.0195
6 A	0.159	0.44	330	0.50	50.3	.....	.....	0.0174
B	0.143	0.45	~470	0.50	48.3	1.03	30.0	0.0140
7 A	0.140	0.44	250	0.51	31.4	.....	.....	0.0145
B	0.137	0.44	~300	0.51	29.9	1.03	25.4	0.0140
8 A	0.134	0.44	300	0.51	39.2	.....	.....	0.0157
B	0.150	0.44	~400	0.51	42.0	2.02	22.0	0.0091
10A	0.141	0.44	600	0.51	45.4	.....	.....	0.0305
B	0.189	0.44	~900	0.51	85.2	.....	.....	0.0325
11A	0.173	0.43	900	0.51	36.2	.....	.....	0.0214
B	0.175	0.43	~1000	0.51	47.4	2.05	17.7	0.0127
12A	0.166	0.44	700	0.51	38.8	.....	.....	0.0268
B	0.204	0.45	~800	0.51	62.1	2.01	32.3	0.0165

実験番号欄のA, Bは実験浸透層、再揚水実験はAで行わず、Bで行う(ただし、10Bは再揚水実験は行わず)。*注入
 実験終了時、**再揚水実験終了時、***実験Aでは注入実験終了時、実験Bでは再揚水実験終了時の値

図-5 懸濁粒子の粒径分布

Fig. 5 Grain size distribution of clogging material

験では T_1 および T_2 の水位を一定値に保っているから、流量の減少は透水係数の低下によると言える。

2) 透水係数の変化

懸濁粒子の抑留とともに透水係数が場所的にも時間的にも低下するが、特に T_1 側での低下が著しい。図-7は時間とともに浸透層Aの透水係数の場所的分布が変化する様子を示したものであり（実験7）、透水係数の低下が認められるのは T_1 側からせいぜい30cm程度となっている。

3) 抑留量の場所的变化

図-8の白点は注入実験終了後、平均透水係数が、初期平均透水係数のほぼ70%（実験7）、60%（実験8）に低下した時点の q_s の分布を示している。図-7に対応して T_1 側で著しい抑留がみられる。また、黒点は浸透層Bでの再揚水後の q_s の分布を表している。浸透層Bの再揚水後の抑留量は、再揚水前の抑留量（再揚水を行わない浸透層Aの抑留量にほぼ

図-6(a) 注入時の流量

Fig. 6(a) Flow rate during recharge

図-6(b) 再揚水時の流量

Fig. 6(b) Flow rate during back-pumping

図-7 注入時の透水係数分布の時間的变化 (実験7)

Fig. 7 Change of permeability distribution with time during recharge (run 7)

図-8 懸濁粒子抑留量の分布

Fig. 8 Distribution of captured clogging material

等しいとしている) に比べて低下しており再揚水によって抑留粒子が剥離したことが判る。また剥離量は、抑留量の多い T_1 側で最も大きい。また、実験8では再揚水により抑留量がほぼ3分の2に減少しているのに対し、実験7では大きな差異は認められない。これは、表-1に示すように実験8の再揚水時の水頭勾配 (ほぼ2.0) であったのに対し、実験7の水頭勾配 (ほぼ1.0) が小さく、せん断応力が実験8より小さかったためと考えられる。

4) 再揚水時の流量変化

：再揚水時の流量を図-6(b)に示している。時間とともに流量が増加するが、これは再揚水 T_1 の水位上昇に、ある程度の時間がかかるため、それに応じて生じた流量の増加分と水頭勾配の上昇に伴って生じた砂粒子表面に働くせん断応力の増加により、抑留粒子が剥離し、透水係数が回復することによる流量増加分とに分けて考えることが出来るが、両者は同時に進行するのでこの図から区別するのは難しい。詳しい考察は後に述べる。

5) せん断応力

せん断応力 τ の算定はマノメータにより得られた水頭勾配と流量の実測値から透水係数 k を算出しそれを用いて式(17)から懸濁物質抑留量 q_s を算定し、次に、式(7)より r' を求め、式(6)より τ が算定される。なお、この計算に含まれる $f\sigma$ には図-11で得られる $f\sigma = 0.90$ を用いた。浸透層Bの T_1 側から2 cm のところでの注入時せん断応力の時間変化を図-9に示している。時間の経過とともにせん断応力が増加することがわかる。これは、抑留が進行し水頭勾配が大きくなった結果と考えられる。

図-10は再揚水時のせん断応力の実測値を示している。これによると、再揚水開始後、初期にはせん断応力 τ はほぼ直線的に増加するが、ある時点から

図-9 注入時のせん断応力の変化 ($x=2.0$ cm)

Fig. 9 Change of shear stress with time during recharge ($x=2.0$ cm)

急に増加が停止し、それから徐々に低下して一定値に近づくようである。

これは、再揚水開始にあたって T_2 の水位の上昇につれて浸透層全体の水頭勾配が大きくなるため、 τ が増加し、これがある値（限界せん断応力 τ_c ）以上になると急激に剝離が生じ、 τ の増加は停止し、次いで徐々に低下していき、 τ も一定となる。この一定となった τ が限界せん断応力 τ_c と考えられ、各実験により異なった値をとるようである。

2 物理定数についての考察

基礎式を用いて目づまり現象をシュミレートするためには物理定数を決定する必要がある。前述のようにこれらを解析的に決めることは容易ではないの

図-10 再揚水時のせん断応力の変化 ($x=2.0\text{ cm}$)

Fig. 10 Change of shear stress with time during back-pumping ($x=2.0\text{ cm}$)

で、ここでは流量、水頭勾配、抑留量、などの実測値などから求めることを考えよう。

1) 2次空隙率 $f\sigma$ の推定

実験終了時の浸透層の各断面における透水係数と抑留量の実測データを図-11に示している。なお、この実測値は図中に式(17)の算定曲線を併記する必要上 ϵ_0 が同じ値($\epsilon_0=0.44$)を選んでいる。図中の白点は注入実験終了後の浸透層Aについて、また黒点は再揚水実験終了後の浸透層Bについての結果である（ただし、実験10Bは再揚水を行っていないので白点にしてある）。次に、図中には3種の $f\sigma$ を与え、 $\epsilon_0=0.44$ として Kozeny-Stein 式(17)により算定した結果を実線で示している。これから、 $f\sigma=0.85\sim 0.95$ 、平均的には0.90程度が実験値にほぼ合っているようである。したがって、後述のシミュレーションでは $f\sigma=0.90$ を採用している。

2) 定数 β_1 の推定

k/k_0 の時間微分を

$$\frac{\partial(k/k_0)}{\partial t} = \frac{\partial(k/k_0)}{\partial q_s} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial t} \quad (22)$$

の式形にする。いま、注入実験を考え、(4)式の右辺第2項を除いた式について、抑留の初期の段階を考えて、 $q_s \sim 0$ 、 $\epsilon \sim \epsilon_0$ とし、また浸透層の T_1 側に近いところで $C \sim C_{in}$ （注入濃度）と近似させ、得られた式(4)を式(22)へ代入すると

$$\frac{\partial(k/k_0)}{\partial t} = \frac{\partial(k/k_0)}{\partial q_s} \epsilon_0 C_{in} \frac{\beta_1}{\sigma_s(1-\epsilon_0)} \quad (23)$$

図-11 透水係数と懸濁粒子抑留量の関係 (Kozeny-Stein 式)

Fig. 11 Relationship between permeability and captured clogging material (Kozeny-Stein eq.)

または

$$\beta_1 = \frac{\partial(k/k_0)}{\partial t} \frac{\sigma_s(1-\varepsilon_0)}{\{\partial k/k_0 / \partial q_s\} \varepsilon_0 C_{in}} \quad (24)$$

従って、上式に注入初期、 T_1 側注入口付近での k/k_0 の実測値の時間的变化を、また $\partial(k/k_0)/\partial q_s$ には透水係数と懸濁粒子抑留量の関係式である Kozeny-Stein 式(18)で $q_s \sim 0$ 付近の値を適用すれば定数 β_1 を推定することが出来る。例として表-1より数例の実験を選んで β_1 の値を算定してみよう。まず実験結果より得られた k/k_0 と q_s の関係は図-11に示されている。この図から $f_\sigma=0.90$ の曲線の $q_s=0$ 付近の勾配 $\partial(k/k_0)/\partial q_s$ の値を読み取ると、ほぼ $\partial(k/k_0)/\partial q_s \sim 50$ を得る。また、 T_1 側から 2 cm のところでの実測の透水係数の時間変化は図-12に示されるので、これより $\partial(k/k_0)/\partial t$ の値を読み取るとほぼ $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 程度となり、ここでは平均して 5.0×10^{-5} を用いることにする。また、 σ_s , ε_0 , C_{in} にそれぞれの実験による値を代入し、式

図-12 注入時の透水係数の変化 ($x=2.0\text{cm}$)

Fig. 12 Change of permeability with time during recharge ($x=2.0\text{cm}$)

表-2 定数 β_1 (1/sec) の推定

Tab. 2 Estimation of coefficient β_1

実験	第1近似値 β_1^*	最終推定値
7B	0.025	0.002
8B	0.077	0.008
11A	0.005	0.005
11B	0.025	0.003
12B	0.007	0.007

(28)から β_1 を算定すると表-2の第2欄のようになる。そこでこれらの(第1近似)を丸めた値を用いてシミュレーションを行い流量を計算する。この結果を図-13(a)~(e)に示す。なお、この図には実測の丸印に合わせるように第1近似値の β_1^* のオーダーを変えて、同様のシミュレーションを行った結果も示している。これから、実測の流量にはほぼ合う β_1 を推定して、これを表-2の第3欄に示している。

また、1例として、実験11Aについて注入最終状態の懸濁粒子抑留量 q_s の実測値と上述のシミュレーションによる値を比較すると図-14のようになり、この実験では $\beta_1=0.005$ は抑留量の分布からもほぼ妥当なものであるといえる。

3) 定数 β_2 の推定

図-2にも示しているように、式(8)から $q_s=1/\beta_2$ のとき $\lambda=0$ となり、この時懸濁物質の抑留は停止する。すなわち、このとき抑留は飽和に達したといえる。従って懸濁粒子の抑留量 q_s の飽和量は $1/\beta_2$ と考えられる。注入実験終了後に抑留量 q_s を実測すると表-1の第9欄に示すように、 T_1 側に近いところ ($x=2.0\text{cm}$) で q_s のほぼ最大値に近い値として $0.02 \sim 0.05$ が得られた。このことから q_s が 0.05 程度の値を超えることはないと考えられる。従って本報では β_2 として 0.05 の逆数、すなわち $\beta_2=20.0$ を大体の目安として与えることにする。また、前述のように、今回の実験結果図-11からはほぼ妥当と考えられる定数 $f_\sigma=0.90$ に対する Kozeny-Stein 式の曲線からみると、 $q_s=0.05$ で透水係数 k/k_0 が十分小さくなっていることから、 q_s の最大値は 0.05 となり、 $\beta_2=20.0$ と推定できる。

4) 定数 β_3 の推定

β_3 は式(4)の右辺第2項に見られるように抑留された懸濁粒子の剝離の大きさに関する値である。 β_3 は次のようにして推定できる。式(4)右辺第1項は懸濁粒子が抑留される項を表わしているが、再掲水実験では清浄水をヘッドタンク T_2 から供給して

図-13(a) 注入流量の数値計算 (実験 7B)
Fig. 13(a) Numerical calculation of flow rate during recharge (run 7B)

図-13(b) 注入流量の数値計算 (実験 8B)
Fig. 13(b) Numerical calculation of flow rate during recharge (run 8B)

図-13(c) 注入流量の数値計算 (実験 11B)
Fig. 13(c) Numerical calculation of flow rate during recharge (run 11B)

図-13(d) 注入流量の数値計算 (実験 12B)
Fig. 13(d) Numerical calculation of flow rate during recharge (run 12B)

図-13(e) 注入流量の数値計算 (実験 11A)
Fig. 13(e) Numerical calculation of flow rate during recharge (run 11A)

いるので、懸濁粒子の供給はない。したがって、間隙水中の濁度として①注入実験終了時にろ材間隙に取り残されたものと、②抑留されていた懸濁粒子がせん断応力によって剝離し、間隙水中に再浮遊するものとが考えられる。しかしながら、前者は再揚水

の初期段階で間隙水中から除去されること、また、後者の再浮遊したものが再び抑留される割合は剝離される割合よりも十分に小さいと考えられるので、式(4)の右辺第一項は無視でき、再揚水時では

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = \frac{-\varepsilon \beta_s}{\sigma_s(1-\varepsilon_0)} \cdot f(\tau) q_s \quad (25)$$

図-14 懸濁粒子抑留量分布の数値計算 (実験 11A)

Fig. 14 Numerical calculation of captured clogging material (run 11A)

図-15 係数 β_3 の推定

Fig. 15 Estimation of coefficient β_3

図-16(a) 再揚水時の流量 (実験 7)

Fig. 16(a) Flow rate during back-pumping (run 7)

図-16(b) 再揚水時のせん断応力 (実験 7)

Fig. 16(b) Shear stress during back-pumping (run 7)

図-16(c) 再揚水後の懸濁粒子抑留量分布 (実験 7)

Fig. 16(c) Distribution of captured clogging material after back-pumping (run 7)

表-3 限界せん断応力 τ_c (dyn/cm²) の推定
Tab. 3 Estimation of critical shear stress τ_c

実験	第1近似値 τ_c^*	最終推定値
7	5.0	9.0
8	11.0	15.0
11	9.5	9.5
12	13.0	7.0

のように近似できる。これより β_3 は

$$\beta_3 = -\frac{\sigma_s(1-\epsilon_0)}{\epsilon f(\tau)q_s} \cdot \frac{\partial q_s}{\partial t} \quad (26)$$

すなわち、V-1の5) によって得られる q_s, τ および (11)からの ϵ を与えれば、(26)から β_3 を算定できる。この結果を図-15に示している。これによると、

β_3 の値は $10^{-1}(\text{g/cm}^3 \cdot \text{sec})$ のオーダーと推定される。 β_3 の値はかなり変えてもシミュレーション結果にはあまり影響がなく、したがってシミュレーションでは一応 $\beta_3=0.4(\text{g/cm}^3 \cdot \text{sec})$ を用いた。

5) 限界せん断応力 τ_c の推定

V-1の5) で述べたように浸透層内で発生するせん断応力が限界せん断応力以上になると、抑留された懸濁粒子が除去され、最終的にはその場所のせん断応力は限界せん断応力に等しくなるまで低下するものと考えられる。従って再揚水時における浸透層の T_1 での出口付近の最終せん断応力を知ることにより限界せん断応力をほぼ推定出来ると考えられる。

いま図-10から限界せん断応力 τ_c の概略値として、実験末期の τ がほぼ一定値になったときの値を読み取ると、表-3第2欄のようになる。いま、これらの

図-17(a) 再揚水時の流量 (実験 8)

Fig. 17(a) Flow rate during back-pumping (run 8)

図-17(b) 再揚水時のせん断応力 (実験 8)

Fig.17(b) Shear stress during back-pumping(run 8)

図-17(c) 再揚水後の懸濁粒子抑留量分布 (実験 8)

Fig. 17(c) Distribution of captured clogging material afetr back-pumping (run 8)

図-18(a) 再揚水時の流量 (実験 11)

Fig. 18(a) Flow rate during back-pumping (run 11)

図-18(b) 再揚水時のせん断応力 (実験 11)

Fig. 18(b) Shear stress during back-pumping (run 11)

値を τ_c の第 1 近似として、再揚水実験のシミュレーションを行った。この結果得られた流量、せん断応力、懸濁物質抑留量を図-16～図-19の実線に示す。つぎに、第 1 近似値の τ_c^* 以外の実線は、実測の丸印の値に近似するように τ_c の値を変えた算定曲線であり、これらの実線から丸印の点に合うように τ_c を推定したものが表-3の最終推定値である。なお、B 層で行った再揚水実験のシミュレーションの初期

図-18(c) 再揚水後の懸濁粒子抑留量分布 (実験 11)

Fig. 18(c) Distribution of captured clogging material after back-pumping (run 11)

条件は、同じ実験の A 層から得られた懸濁粒子抑留量の実測値を線形補間して得られた再揚水開始時点での q_s の分布、および、この q_s の分布から Kozeny-Stein 式を用いて得られる透水係数の分布を初期条件として与える。図-16～図-19の q_s の丸印は再揚水実験終了後の実測値、 τ の丸印は図-10と同じである。

図-3 をみると、実験 8 と実験 11 では第 1 近似値

図-19(a) 再揚水時の流量 (実験 12)

Fig.19(a) Flow rate during back-pumping (run 12)

図-19(b) 再揚水時のせん断応力 (実験 12)

Fig.(b) Shear stress during back-pumping (run 12)

と最終推定値とはほぼ近似していて、この方法で十分現象を説明できるといえる。なお、実験7および実験12で限界せん断応力の第1近似値とシミュレーション結果から得られた最終推定値がかなり違っている。この理由は明確ではないが、実験7については表-1および図-8からわかるように再揚水による懸濁物質の除去量が非常に少ない。これは、水頭勾配が1.03と小さいためと考えられる。したがって、図-10すなわち図-16(b)の丸印から読み取った τ_c (第

図-19(c) 再揚水後の懸濁粒抑留量分布 (実験 12)

Fig. 19(c) Distribution of captured clogging material after back-pumping (run 12)

1 近似値)は正確な限界せん断応力を示していないのではないかと考えられ、再揚水時の水頭勾配が小さい場合には、 τ_c の決定には注意が必要と考えられる。次に、実験12については、表-1に示すように注入実験終了時のA層とB層の目づまり状態が大きく異なっていることから考えると、この時点のA層とB層の q_s が異なり、したがって、B層の再揚水に関するシミュレーションの初期条件にA層から得られた q_s の分布を与えたことが不適切であったためと考

図-20 再揚水時の水頭勾配 (i/i_0) と目づまり度 $(k_0-k)/k_0$ が再揚水の効果 (k'/k_0) に及ぼす影響 [目づまり度: case(a) 50%, case(b) 60%]

Fig. 20 Influence of hydraulic gradient (i/i_0) and degree of clogging $(k_0-k)/k_0$ on effect of back-pumping (k'/k_0) [degree of clogging: case (a) 50%, case(b) 60%]

えられる。

3 再揚水の効果

人工涵養注入井の目づまりに対する再揚水の効果について、現地実験等から次のようなことがいわれている⁶⁾。

a) 再揚水は総揚水量よりも揚水率（単位時間あたりの揚水量）を大きくして行った方が効果が大きい。

b) 再揚水時の水頭勾配が注入時の水頭勾配より高いほど効果が大きい。

c) 目づまりの進行程度が低いうちに再揚水を行った方が効果が大きい。

これらの事項を本報における実験結果について考察する。まず、目づまり度にはIV-2で定義した値を用いる。また、これと同じ記号を用いて再揚水の効果には k'/k_0 を用いる。次に、注入実験開始時の浸透層全体の平均水頭勾配を i_0 、再揚水実験最終時の浸透層全体の平均水頭勾配を i とし、再揚水終了時

の水頭勾配として i_0 で除した i/i_0 を考えることにする。

図-20は、数例の実験結果について、目づまり度 $(k_0-k)/k_0$ [case(a) は目づまり度50%, case(b) は目づまり度60%] および再揚水時の水頭勾配 i/i_0 が再揚水効果 k'/k_0 にどのように影響するかを示している。なお、この図には参考文献4)による実験結果も含まれている。図は再揚水の効果が再揚水時の水頭勾配の増大に応じて増加することを表わしている。

これについて考えると、本報では、再揚水効果は浸透層内の間隙に作用するせん断応力が大きいとされている。せん断応力は水頭勾配に比例するので、水頭勾配が高いほど再揚水の効果は大きい。このことから、再揚水は総揚水量を大きくして行くよりも、揚水率を大きくして行ったほうが効果が大きいということが理解される。これから、前述の a), b) が肯定される。

次に、図-20から同一の水頭勾配に対しては目づまり度の低い case(a) の方が case(b) よりも再揚水の効果が大きい。これについて考えると、注入時に浸透層間隙で生じるせん断応力は図-9のように時間とともに、すなわち目づまりの進行とともに漸次増加するので、目づまり度が高いほどせん断応力は大きい。したがって、図-20の case (b) は case(a) により大きいせん断応力のもとで抑留が生じていたと考えられる。次に、抑留懸濁粒子のろ材からの剝離には注入時を上回るせん断応力が必要と考えられる。そのため、case(b) は case(a) に比べて、同一の水頭勾配では抑留懸濁粒子の剝離が小さく、再揚水の効果は少ない。したがって、再揚水は、目づまり度が低いうちに行ったほうが効果が大きいということが理解できよう。これから前述の c) が肯定される。

VI むすび

本報では、一次元浸透層モデルによる実験および

シミュレーションを行い以下のような結果を得た。

1) 地下水人工涵養時に生じる目づまり現象はろ過方程式を用いてシミュレートすることができる。

2) 透水係数と懸濁粒子抑留量の関係式として Kozeny-Stein 式を適用できる。

3) 透水係数の回復は浸透層間隙に生じるせん断応力が、抑留懸濁粒子を剝離させることによって生じる。

4) 再揚水の効果は、同一の目づまり度に対しては、再揚水時の水頭勾配が高いほど大きい。また、再揚水時の水頭勾配が同一であれば、目づまり度が低いほど大きい。

5) 基礎式中の定数を実験結果から推定することができる。① β_1 ；浸透層注入口付近での透水係数の時間的变化，および透水係数と懸濁粒子抑留量との関係を基に推定することができる。② β_2 ；懸濁粒子の最大抑留量から求められる。③ β_3 ；再揚水時の透水係数の変化を Kozeny-Stein 式で懸濁粒子抑留量の変化に置きかえこれをもとに推定することができる。

④ f_{σ} ：実験終了時の透水係数と懸濁粒子抑留量か

ら得られる。⑤ τ_c ；再揚水実験最終状態の浸透層注入口でのせん断応力から知ることができる。

参考文献

- 1) 村下敏夫；地下水人工涵養の現状と将来，第1回水資源に関するシンポジウム前刷集，pp. 532～537，1977
- 2) Rebhun. M, Schwarz. J；Clogging and Contamination Process in Recharge Wells, Water Resources Research, Vol. 4, no. 6, pp.1207～1217, 1968
- 3) 北川 明，石崎勝義；浮遊物による目づまりに関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 91～96，1980
- 4) 安田 裕，神野健二，上田年比古；人工涵養井戸の目づまりに対する再揚水の効果について，土木学会年次講演会講演概要集，pp. 386～387，1981
- 5) 丹保憲仁，小笠原紘一；砂ろ過の抑留機序に関する研究(1)，水道協会雑誌，第458号，pp. 2～9，1964
- 6) 建設省土木研究所；注入井による地下水の人工涵養，土木研究所資料1493号，1979
- 7) Ives. K, J；The Science Basis of Filtration, N. A.T.O., Advanced Study Institutes Series, pp. 203～241, 1975
- 8) 神野健二；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，第21巻，第2号，pp. 55～71，1979
- 9) Camp. T, R；Theory of Water Filtration, A.S. C.E, sa 4, Vol. 90, pp. 1～30, 1964
- 10) 神野健二，上田年比古；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，第271号，pp. 45～53，1978

(受付：1983年3月28日，受理：1983年7月30日)