

浸透層内における目詰まり原因物質の 抑留量の推定方法の検討

平野文昭¹・神野健二²・船岡基³・百田博宣⁴

- ¹正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (〒1358530東京都江東区越中島3-4-17)
²正会員 工博 九州大学教授 工学部附属環境システム科学研究センター (〒8128581福岡市箱崎6-10-1)
³正会員 工修 清水建設株式会社 土木東京支店 (〒1058007東京都港区芝浦1-2-3)
⁴正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 主席研究員 (〒1358530東京都江東区越中島3-4-17)

本論文では、目詰まりの進行過程の予測方法を確立するために、まず実験に用いた地下水中の目詰まり原因物質が鉄の水和酸化物であることを特定するとともに、目詰まり現象を表す数学モデルについて検討している。次に、鉄の水和酸化物を含む懸濁溶液を用いた室内カラム浸透実験に対して数学モデルを適用し、流量および抑留量に関する評価指標により数学モデル中の抑留パラメーターの推定が可能であることを示している。最後に、目詰まり原因物質の濃度を減らすための限外ろ過膜などを用いた人工涵養の計画フローについて提案している。

Key Words : groundwater, clogging, ultra filter, column permeable test

1. はじめに

建築構造物の地下工事に伴って地下水を揚水する場合、その地下水を原位置で地盤へ還元するリチャージ工法は、排水量を低減するのに有効である。さらに、最近では有毒物質で汚染された土壌や地下水を修復するために、原位置で地下水を循環させる方法が用いられている。これらの方法は、いずれも揚水井で揚水した地下水を注水井へ送り、注水井から帯水層へ還元して、地下水を循環させるものである。特に、後者の方法は、地下水循環のための井戸を利用してバイオレメディエーションに必要な酸素や栄養源を注入できるため、最近脚光を浴びている原位置バイオレメディエーションへも容易に展開することができる。

これらの方法を用いる場合には、注入井での目詰まりが問題となる。目詰まりには、その発生原因から(1)鉄などの水和酸化物粒子すなわち懸濁粒子による帯水層での目詰まり、(2)微生物の増殖による注水井や帯水層での目詰まり、(3)気泡による帯水層での目詰まり、(4)帯水層中の砂粒子の配列変化による目詰まりなどが考えられる¹⁾。ここでは、注入する地下

水の水質に起因する(1)の目詰まり現象を対象にする。

フィルター層や帯水層内への目詰まりの発生を防止する方法には、(1)地表で地下水中の目詰まりの原因となる物質を除去した後に注入井へ還元する方法、(2)注入井で目詰まりが発生する度に井戸の逆洗を行って井戸内の目詰まり物質を除去する方法などが考えられる。上記リチャージ工法や地下水を循環させる方法は、主として連続運転されることが多いので、このような方法を行う場合には地表で運転の管理ができる(1)の方法が有利である。

従来、Rebhum & Schwarz は地下水の人工涵養時の注入井における目詰まり現象に関する実験的研究²⁾を、北川・石崎は目詰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研究³⁾を行っているが、いずれも注入初期時を対象としており、目詰まりが十分に進行した状態までは考慮していないようである。

本論文では、目詰まりの進行過程の予測方法を確立するために、まず水道の水源として使用されている地下水を用いた室内カラム浸透実験を行い、浸透層内における目詰まりの原因物質を特定する。次いで、目詰まりの原因物質を対象に、目詰まり現象を

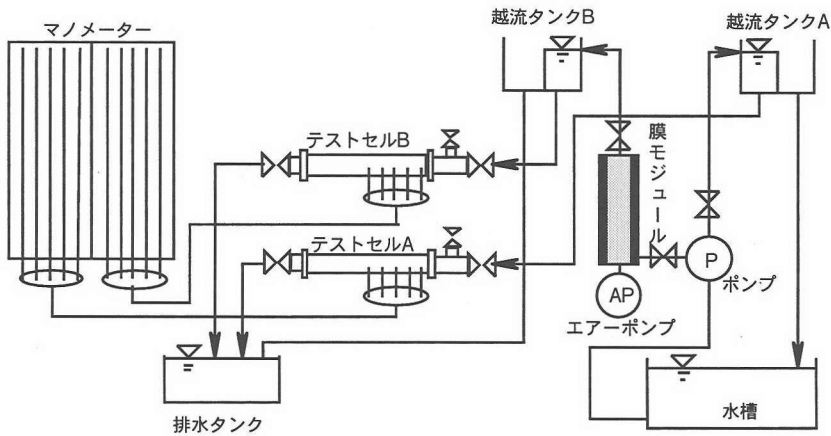


図-1 実験装置

表す数学モデルを構築する。次いで、イオン交換水に目詰まり原因物質だけを混入させた溶液を用いた室内カラム浸透実験を行い、実験結果を利用して数学モデルで示されるパラメーターの算定方法を示す。最後に、数学モデルを用いた人工涵養の計画フローについて述べる。

2. 実際の地下水を用いた室内浸透実験

(1) 浸透実験装置の概要

装置は、図-1に示すように2本のテストセル、膜モジュール、水槽、マンノメーターから構成されている。テストセルAには原水が直接供給でき、テストセルBには膜モジュールを通過したろ過水が供給できるようになっており、水質の異なる2種類の浸透水による目詰まり現象の比較が可能である。内径5.4cm、長さ70cmのテストセルには、粒径420~840 μm の豊浦標準砂が充填されており、その流入口付近には水頭分布を測定するための9個のマンノメーター（設置位置は流入口からそれぞれ0.2, 3.2, 3.5, 4.2, 5.2, 6.5, 8.2, 11.2, 13.5cmである）が密に設置されている。テストセルは、軸方向に半割りすることができ、任意の位置の砂のサンプリングが可能である。膜モジュールには、外圧式中空糸型限外ろ過膜を用いている。表-1に膜モジュールの仕様を示す。

(2) 実験方法と実験結果

実験は以下のように行った。まず、原水（福岡県粕屋郡志免町の旧馬越水源地で揚水した地下水）を水槽に貯留し、ポンプで水頭を一定に維持している越流タンクA、Bへ送水した。次に、セルAには越流タンクAから原水を直接供給し、セルBには越流タ

表-1 膜モジュールの仕様

| ろ過方法 | | 外圧ろ過方式 |
|----------|------------------------|--|
| 洗浄方法 | | 空気洗浄, 透過水逆流洗浄 |
| 性能 | 公称孔径 | 0.01 μm |
| | 初期ろ過水量 | 1.0m ³ /h(0.5kg/cm ² , 25℃, 純水) |
| 運転条件 | 供給水温度 | 40℃以下 |
| | 膜内外差圧 | 3kg/cm ² 以下 |
| | 供給圧力 | 5kg/cm ² 以下 |
| | pH範囲(運転時) pH範囲(洗浄時) | 2~10 1~12 |
| モジュールの仕様 | 中空糸径 | 内径;0.35mm/ 外径;0.48mm |
| | 有効膜面積 | 12m ² |
| | モジュール全長 | 1078mm |
| | モジュール径 | 114mm |
| | モジュール空重量 モジュール運転重量 | 5kg 14kg |
| 主要材質 | 中空糸膜 | 高重合度 β -リアクリロニル 塩化ビニル樹脂 |
| | ハウジング | |

ンクBからろ過水を供給した。通水開始後のマンノメーターの値が安定した時点を実験開始時間とし、セルAの流量が初期値の1/3になるまで連続通水した。

1日間隔に水槽の水温、pH、溶存酸素(DO)と各マンノメーターの値およびセルA、Bの流出口の流量を測定し、水槽およびセルA、Bの流入口、流出口で採水を行った。セルAの流入口、流出口では全鉄とMn²⁺の濃度を、セルA、Bの流入口、流出口では各種陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)の濃度および各種陰イオン(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)の濃度を、セルA、Bの流入口ではHCO₃⁻、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、BOD、COD、浮遊物質(SS)、電気伝導度(EC)、細菌数を測定した。

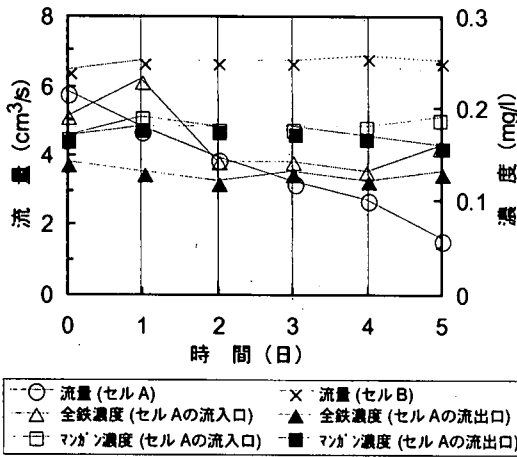


図-2 実際の地下水による流量，全鉄濃度，マンガン濃度の経時変化

a) 流量

図-2にセルA，Bの流出口の流量の経時変化を示す。セルBでは流量が一定しており目詰まり現象は認められないが，セルAでは流量が直線的に減少しており，目詰まりが発生していると考えられる。

b) 全鉄濃度とマンガン濃度

図-2にセルAの流入口，流出口の全鉄濃度とマンガン濃度の経時変化を示す。全鉄濃度は流出口で低くなっており，セル内に鉄の水和酸化物が抑留し，目詰まりの原因になっていると考えられるが，マンガン濃度は流入口と流出口の値に差がないことから，マンガンは目詰まり現象に無関係であるといえる。

c) 河川伏流水の水質状況

実験期間中，水槽の水温は13.4℃，pHは7.5，DOは8.8 mg/lであった。表-2にセルA，Bの流入口，流出口の各種陽イオン(Na⁺，K⁺，Ca²⁺，Mg²⁺)の濃度を，表-3に各種陰イオン(Cl⁻，NO₃⁻，SO₄²⁻)の濃度を示す。いずれの項目も流入口と流出口の値に差がないことから，これらは目詰まり現象に無関係であるといえる。上記以外の水質項目(HCO₃⁻，T-N，T-P，BOD，COD，SS，EC，細菌数)もセルA，Bの流入口で測定し，平均的な値は，それぞれ170 mg/l，0.03 mg/l，1.0 mg/l，1.2 mg/l，0.3 mg/l，1 mg/l/未満，490 μS/cm，30 Cells/mlであった。

d) 抑留物質の分布

a)~c)から目詰まり原因の抑留物質は鉄の水和酸化物と考えられる。セルA，B内の砂に抑留した鉄の水和酸化物の分布は，セル内の砂をマノメーターの間隔ごとにサンプリングし，シュウ酸抽出法により分析し求めた。抑留量は鉄の水和酸化物が全てFe(OH)₃で存在するものとして，原子吸光分析により求めた値をFe(OH)₃に換算した。図-3にセルA，

表-2 陽イオンの濃度

| 項目 | 日数(日) | テストセルAの濃度 (mg/l) | | テストセルBの濃度 (mg/l) | |
|------------------|-------|------------------|--------|------------------|--------|
| | | 流入口 | 流出口 | 流入口 | 流出口 |
| Na ⁺ | 0 | 60.165 | 60.878 | 60.073 | 61.913 |
| | 3 | 66.211 | 65.935 | 70.993 | 68.648 |
| | 5 | 64.763 | 65.751 | 72.717 | 72.717 |
| K ⁺ | 0 | 3.949 | 3.949 | 3.871 | 3.871 |
| | 3 | 3.949 | 3.988 | 3.988 | 3.910 |
| | 5 | 4.027 | 3.988 | 4.027 | 4.027 |
| Ca ²⁺ | 0 | 32.223 | 30.580 | 29.457 | 30.219 |
| | 3 | 30.700 | 30.259 | 29.537 | 29.497 |
| | 5 | 30.499 | 30.580 | 29.978 | 30.139 |
| Mg ²⁺ | 0 | 4.885 | 4.715 | 4.715 | 4.594 |
| | 3 | 4.618 | 4.594 | 4.545 | 4.496 |
| | 5 | 4.594 | 4.618 | 4.594 | 4.521 |

表-3 陰イオンの濃度

| 項目 | 日数(日) | テストセルAの濃度 (mg/l) | | テストセルBの濃度 (mg/l) | |
|-------------------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | | 流入口 | 流出口 | 流入口 | 流出口 |
| Cl ⁻ | 0 | 2.579 | 2.865 | 3.536 | 2.662 |
| | 3 | 2.631 | 2.669 | 3.005 | 2.669 |
| | 5 | 2.657 | 2.719 | 2.725 | 2.748 |
| NO ₃ ⁻ | 0 | 0.550 | 0.577 | 0.743 | 0.564 |
| | 3 | 0.521 | 0.534 | 0.569 | 0.520 |
| | 5 | 0.520 | 0.511 | 0.507 | 0.500 |
| SO ₄ ²⁻ | 0 | 6.090 | 6.173 | 6.499 | 6.051 |
| | 3 | 6.016 | 6.040 | 6.249 | 6.101 |
| | 5 | 6.094 | 6.099 | 6.123 | 6.002 |

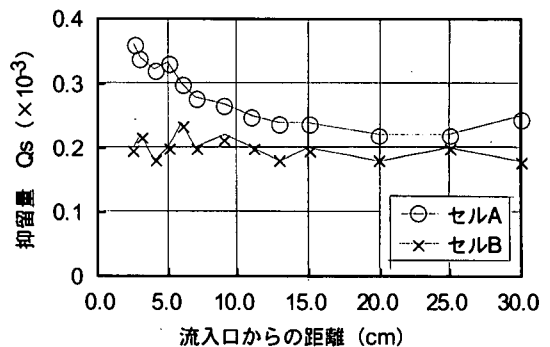


図-3 鉄の水和酸化物の分布

B内の鉄の水和酸化物 Fe(OH)₃ の分布を示す。セルAでは抑留量がセルの入口付近で多く，流下するにしたがって徐々に減少している。セルBの抑留量が全体にわたり一定であるのは，通水期間を通して流量が変化していないことから，セルBにおける抑留量の値は元来砂中に存在している量を示していると考えられる。

地下水を用いた室内実験から鉄の水和酸化物により目詰まりが起り，透水性はセルの入口付近で低

く時間が経過するにつれて低下することが分かった。

$3(1-\epsilon_0)/(4\pi r_p^3)$ である。粒子1個当たりの表面積は、 $4\pi r_p^2$ であるので、Sは次式で与えられる。

3. 数学モデル

$$S = \frac{3(1-\epsilon_0)}{r_p} \quad (5)$$

目詰まりの進行過程の予測方法の確立を目的に、ここでは鉄の水和酸化物による目詰まり現象を対象にして数学モデルを検討する^{4),5)}。

式(3)に式(4)を代入すれば、式(3)は次のように表される。

(1) 支配方程式

浸透水の流動に関する連続の式は、

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

ここに、vは断面平均流速(cm/sec)、xは流下方向にとった座標(cm)である。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v}{\epsilon} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S)(1 - \beta_3 Q_S) C \quad (6)$$

いま、濃度の時間変化と分散が移流と抑留に比べて小さいと仮定できるとすれば、式(6)の左辺第1項と右辺第1項を省略して、次式が得られる。

浸透水の流動に関する運動方程式は、ダルシー則が成り立つとすれば、

$$\frac{v}{\epsilon} \frac{\partial C}{\partial x} = -\beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S)(1 - \beta_3 Q_S) C \quad (7)$$

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

ここに、Kは透水係数(cm/sec)、hは水頭(cm)である。ここでは、注入の方向を正の向きをとっている。目詰まり現象は、ろ過に関する基礎方程式すなわち懸濁物質保存の方程式と懸濁物質の抑留式により表すことができる。ここでの懸濁物質すなわち鉄の水和酸化物に関する物質保存の方程式は、

なお、このような近似の妥当性については、糸井によって示されている⁴⁾が、数値解析上の利点として、次項に述べるような簡単なアルゴリズムを構成できることが挙げられる。

一方、懸濁物質の抑留式は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v}{\epsilon} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \lambda C \quad (3)$$

ここに、Cは間隙水中の鉄の水和酸化物濃度(mg/l)、 ϵ は浸透層の間隙率、 λ はろ過における阻止率(1/sec)、Dは分散係数(cm²/sec)である。

$$\frac{\partial Q_S}{\partial t} = \frac{\epsilon}{\rho_m(1-\epsilon_0)} \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S)(1 - \beta_3 Q_S) C \quad (8)$$

ここに、 ρ_m は充填物質の密度(g/cm³)である。

初期条件および境界条件は、以下のようである。

初期条件 $t=0$ $C=0$, $Q_S=0$

境界条件 $t>0$ $x=0$, $h=h_0$ $C=C_0$ (9)

$$x=L, \quad h=h_L$$

ここに、 C_0 は流入水の鉄の水和酸化物の濃度(mg/l)、Lは浸透層の長さ(cm)、 h_0 , h_L はそれぞれ浸透層の流入口、流出口での水頭(cm)である。

懸濁粒子の抑留速度は一般に過飽和濃度の1次反応あるいは2次反応として表されるが、ここでは抑留量が懸濁粒子濃度に比例して増加する効果や、抑留量が増加すると間隙が狭くなり、間隙内の流速が増大するため懸濁粒子が抑留しにくくなる効果を考える。本論文では Ives に従い、抑留を促進、減衰させる効果を考慮して次のような過阻止率の式を適用する⁶⁾。

$$\lambda = \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S)(1 - \beta_3 Q_S) \quad (4)$$

ここに、 β_1 , β_2 , β_3 は鉄の水和酸化物の抑留パラメーター、Sは浸透層の単位体積当たりの充填物質の表面積(1/cm)、 Q_S は鉄の水和酸化物の抑留量である(無次元量)、 $\beta_2 Q_S$ を含む項は鉄の水和酸化物の抑留速度の加速効果を、 $\beta_3 Q_S$ を含む項は抑留速度の減速効果を表している。浸透水が接触する浸透層の単位体積当たりの充填物質の表面積Sについて、充填層の単位体積当たりの粒子の個数は、 ϵ_0 を初期間隙率、 r_p を粒子の半径(cm)とすれば、

(2) 数値解法

濃度に関して、式(7)を $x=0$ から任意の点 x まで積分すれば、

$$C(x, t) = C_0 \exp \left\{ - \int_0^x \frac{1}{u} \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S(x, t)) \times (1 - \beta_3 Q_S(x, t)) dx \right\} \quad (10)$$

ここに、 $C(x, t)$, $Q_S(x, t)$ はそれぞれ時刻 t における地点 x での鉄の水和酸化物の濃度(mg/l)、鉄の水和酸化物の抑留量(無次元量)、 $u (= v/\epsilon)$ は間隙内の流速(cm/sec)である。次に、 x から微小距離 Δx だけ離れた地点の $C(x + \Delta x, t)$ は、同様にして、

$$C(x + \Delta x, t) = C_0 \exp \left\{ - \int_0^{x+\Delta x} \frac{1}{u} \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S(x, t)) \times (1 - \beta_3 Q_S(x, t)) dx \right\}$$

$$= C(x,t) \exp\left\{-\int_x^{x+\Delta x} \frac{1}{u} \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S(x,t)) \times (1 - \beta_3 Q_S(x,t)) dx\right\} \quad (11)$$

ここで、 $F(x,t) = \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S(x,t))(1 - \beta_3 Q_S(x,t))/u$ とおき、 Δx が十分小さければ、式(11)の指数関数の部分は次式で近似できる。

$$\left\{-\int_x^{x+\Delta x} F(x,t) dx\right\} \\ \approx \left[-\frac{\Delta x}{2} \{F(x,t) + F(x + \Delta x,t)\}\right]$$

$$C(x + \Delta x,t) \\ = C(x,t) \exp\left[-\frac{\Delta x}{2} \{F(x,t) + F(x + \Delta x,t)\}\right] \quad (12)$$

$x=0$ での境界条件 $C=C_0$ を代入すれば、式(12)を用いて順次 x 方向の C を求めることができる。

さらに、任意の地点における Q_S は、式(8)に時間に関して差分すれば、次式が得られる。

$$Q_S(x,t + \Delta t) = Q_S(x,t) \\ + \frac{\varepsilon}{\rho_m(1 - \varepsilon_0)} \beta_1 S(1 + \beta_2 Q_S(x,t))(1 - \beta_3 Q_S(x,t))C(x,t)\Delta t \quad (13)$$

したがって、式(12)、(13)を用いて濃度および抑留量の分布を予測することができる。

懸濁粒子内の間隙を考慮すれば、浸透層の単位体積当たりに懸濁粒子が占める体積は、次のように表される。

$$V = \frac{(1 - \varepsilon_0)\rho_m Q_S}{\rho_S(1 - f_\sigma)}$$

ここに、 ρ_S は懸濁物質の密度(g/cm^3)、 f_σ は抑留された懸濁粒子内の間隙率(2次間隙率)である。したがって、懸濁粒子の抑留に伴って低下する間隙率は、次式で表される。

$$\varepsilon(x,t) = \varepsilon_0 - V \\ = \varepsilon_0 - \frac{(1 - \varepsilon_0)\rho_m Q_S}{\rho_S(1 - f_\sigma)} \quad (14)$$

浸透層内に抑留した懸濁物質の質量と透水係数との関係を表す Kozeny-Stein 式は次式によって与えられる⁵⁾。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\left(\varepsilon_0 - \frac{(1 - \varepsilon_0)\rho_m Q_S}{\rho_S(1 - f_\sigma)}\right)^3}{\varepsilon_0^3 \left(1 + \frac{\rho_m Q_S}{\rho_S(1 - f_\sigma)}\right)^2}$$

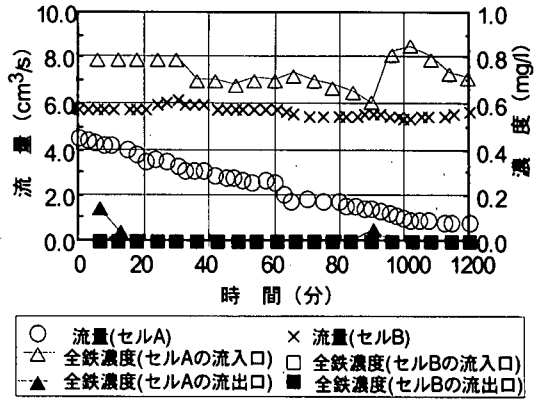


図-4 流量、全鉄濃度の経時変化

$$\times \left(\sqrt{\frac{\rho_m Q_S}{3\rho_S(1 - f_\sigma)} + \frac{1}{4}} + \frac{\rho_m Q_S}{3\rho_S(1 - f_\sigma)} + \frac{1}{2} \right) \quad (15)$$

ここに、 K/K_0 は初期透水係数との比である。

4. 室内実験

鉄の水和酸化物による目詰まり状況を把握するため、図-1に示した装置を用いて室内カラム浸透実験を行った。

(1) 実験方法

実験は2.(2)に示した方法と同様に行った。実験水はイオン交換水に $Fe(OH)_3$ 溶液を混ぜ、鉄の水和酸化物を生成し、その全鉄濃度を $0.75mg/l$ に調整した。まず、純水のみを通水しマノメーターの値が安定した時点を実験開始時間とし、 $Fe(OH)_3$ 溶液を浸透させ、セルAの流量が初期値の1/4になるまで連続通水した。30分間隔に水槽の水温と各マノメーターの値およびセルA、Bの流出口の流量を測定し、水槽およびセルA、Bの流入口、流出口では全鉄の濃度を求めた。実験中はpHを7.5に維持した。

(2) 実験結果

a) 流量

図-4にセルA、Bの流出口の流量の経時変化を示す。セルBでは流量は一定しており目詰まりが起こっていないが、セルAでは流量は直線的に減少しており、目詰まりが起こっていると考えられる。

b) 全鉄濃度

図-4にセルA、Bの流入口、流出口の全鉄濃度の経時変化を示す。全鉄濃度はセルAの流出口でほとんど0となっており、セル内に鉄の水和酸化物が抑留していると考えられる。セルBの流入口では全

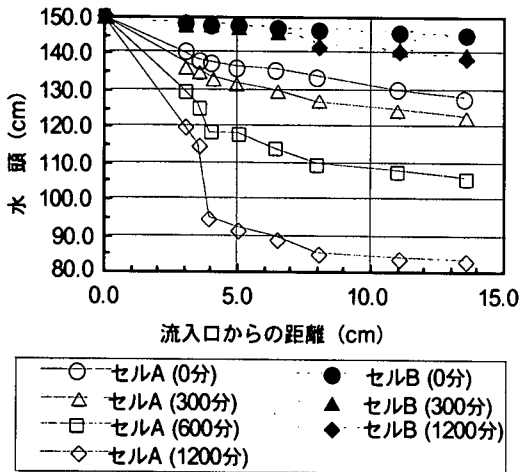


図-5 水頭分布

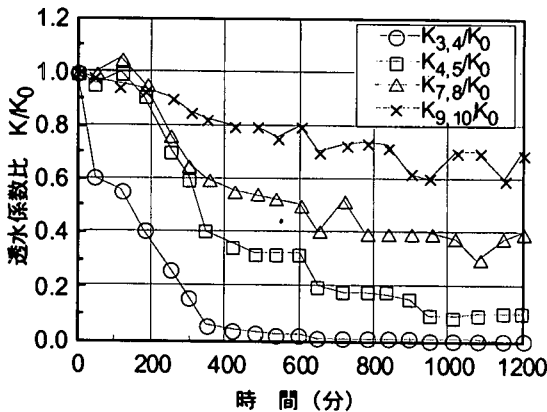


図-6 透水係数の経時変化
(Kの添字はマノメータの設置番号で、 $K_{3,4}/K_0$ は設置点3および4間の透水係数を初期透水係数で無次元化したもの)

鉄濃度は検出されず、鉄の水和酸化物は限外膜モジュールにより除去されているといえる。

c) 水頭

セルA, Bの水頭をそれぞれ図-5に示す。セルAでは流入口から10cm以内で水頭が急激に変化している。目詰まり現象が主に10cm以内のところで行き、この部分の透水性が低下していることが分かる。セルBでは時間の経過による水頭の変化はほとんどなく、目詰まりの発生がないといえる。

d) 透水係数

セルAにおける流量と水頭の実測値から式(2)を用い透水係数を算定した。各マノメータ間の透水係数比の経時変化を図-6に示す。図中の透水係数比は実験開始直後の透水係数値で除し無次元化している。透水係数比は流入口に近いほど時間が経過するにつれて急激に減少しており、流入口に近い部分での目詰まりの進行が速いことが分かる。

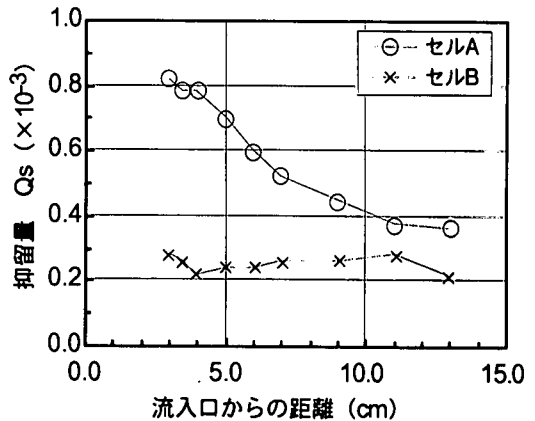


図-7 実験開始900分後の鉄の水酸化物の分布

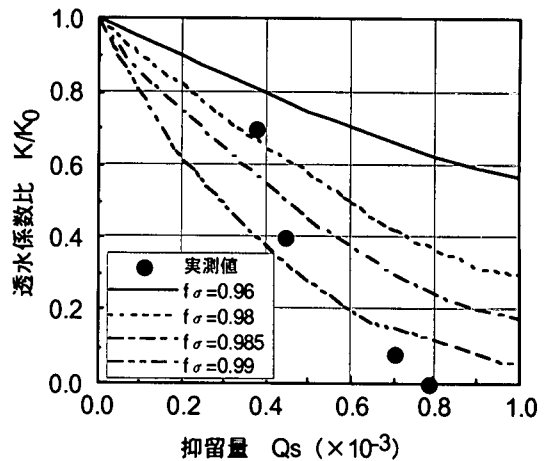


図-8 透水係数比と抑留量の関係

e) 抑留量の分布

セルA, B内の砂に抑留した鉄の水酸化物 $Fe(OH)_3$ の分布は、2.(2)のd)のようにして求め、図-7を得た。セルAでは抑留量がセルの入口付近で多く、入口から遠くなるにしたがって指数関数的に減少している。2.(2)と同様にセルBでは流量が変化していないので、抑留量の値は元来砂中に存在する量を示していると考えられる。

f) 透水係数と抑留量の関係

透水係数比 K/K_0 と鉄の水酸化物の抑留量 Q_s との関係を図-8に示す。実測値は式(15)の f_σ の値が0.98~0.99の曲線上にほぼ分布している。なお、ここで二次間隙率 f_σ の値については、丹保・小笠原によると急速ろ過におけるマイクロブロック（主成分はアルミニウム水酸化物）に対する検討例がある⁷⁾。

本実験で対象とした鉄の水酸化物についてもマイクロブロックと同様のコロイド粒子とみなせるから、 f_σ をパラメータとして実測値を表現することについては問題はないと考えられる。

表-4 計算条件

| | | | |
|----------|---|---|--|
| 浸透層条件 | 全長 断面積 浸透層の単位体積当たりの充填物質の表面積 透水係数の初期値 初期間隙率 充填物質の密度 粒子半径 | L A S K_0 ϵ_0 ρ_m r_p | 70(cm) 22.9(cm ²) 66.67 (cm ² /cm ³) 0.151(cm/s) 0.3 2.65(g/cm ³) 0.0315(cm) |
| 鉄の微小フロック | 懸濁物質の密度 2次間隙率 | ρ_s f_a | 1.0(g/cm ³) 0.985 |
| 浸透水 | 初期流量 水頭 (x=0) 水頭 (x=L) 鉄の初期濃度 | Q_0 h_0 h_L C_0 | 4.5(cm ³ /s) 151(cm) 60(cm) 0.742(mg/l) |

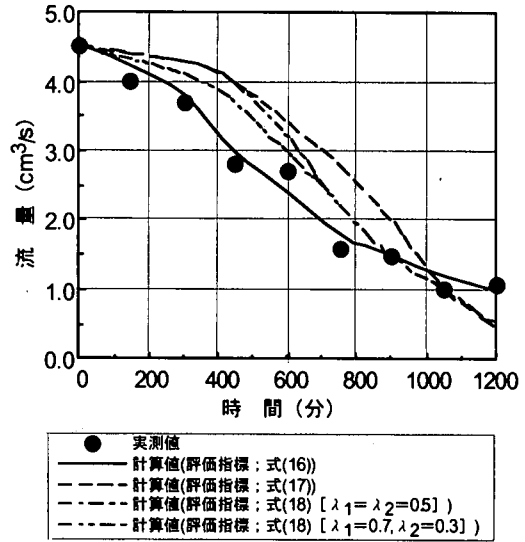


図-9 流量の経時変化

5. 抑留パラメーターの評価方法

(1) 室内実験に関する評価

4.の室内実験結果を用いて、式(12)、(13)の抑留パラメーター β_1 、 β_2 、 β_3 を評価する。評価方法は、表-4に示す計算条件のもとで行った数値計算による流量 Q と鉄の水酸化物の抑留量 Q_s と、実測値とを比較するものである。

a) 流量の計算値と実測値との差の2乗和を最小にする方法

流量に基づいた評価指標を次式のようにおく。

$$J_Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_{cal}(t) - Q_{obs}(t)}{Q_{obs}(t)} \right)^2 \quad (16)$$

ここに、 N は比較を行う時点数、 $Q_{cal}(t)$ は時間 t における流量の計算値である。すなわち式(13)から得られる Q_s を用いて式(15)から透水係数 K を計算し、式(2)から $Q_{cal}(t)$ を求めることができる。 $Q_{obs}(t)$ は時間 t における流量の実測値である。

式(16)に示す流量の指標が最小となる抑留パラメーターを感度解析し、 $\beta_1=0.014$ (cm/sec)、 $\beta_2=420$ (無次元量)、 $\beta_3=500$ (無次元量)を得た。これらのパラメーターに対する J_Q は0.0038であった。これらの値を用いて流量の経時変化を求めたのが、図-9に示す実線である。図から、実測値と計算値は良い一致を示している。

次に、これらの値を用いて実験開始 1200 分後の鉄の水酸化物の抑留量 Q_s の分布を求めたのが、図-10に示す実線である。図中の実測値と計算値はあまり一致していない。このときの鉄の水酸化物の抑留量を指標とした J_{Q_s} の値は0.8698で、流量の指標だけでは抑留パラメーターを評価するのは十分では

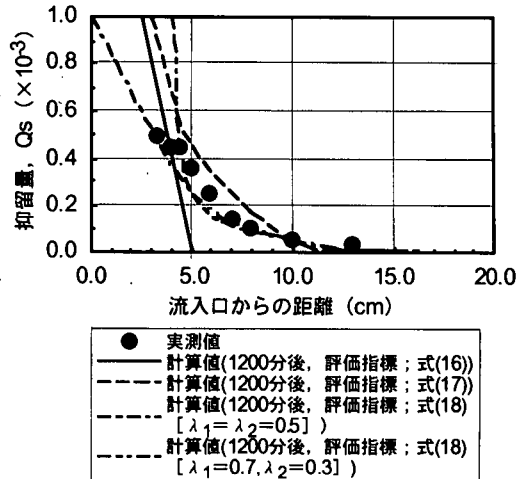


図-10 鉄の水酸化物の分布

ないことが伺える。

b) 鉄の水酸化物の抑留量の計算値と実測値との差の2乗和を最小にする方法

鉄の水酸化物の抑留量に基づいた評価指標を次式のようにおく。

$$J_{Q_s} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{Q_{scal}(i) - Q_{sobs}(i)}{Q_{sobs}(i)} \right)^2 \quad (17)$$

ここに、 M は実測値の点数、 $Q_{scal}(i)$ は式(13)から得られる実験終了時における鉄の水酸化物の抑留量の計算値、 $Q_{sobs}(i)$ は実験終了時における鉄の水酸化物の抑留量の実測値で、 i は測定位置である。

式(17)に示す鉄の水酸化物の抑留量の指標が最小となる抑留パラメーターを感度解析し、 $\beta_1=0.0028$ 、 $\beta_2=1500$ 、 $\beta_3=220$ を得た。このとき J_{Q_s} は0.1635

であった。これらの値を用いて 1200 分後の鉄の水酸化物の抑留量の分布を求めたのが、図-10に示す破線である。実測値と計算値は良い一致を示している。このときの鉄の水酸化物の抑留量の指標 J_{Q_0} の値は0.1635で、5.(1)a)の値より小さくなっており改善されていることが分かる。

次に、これらの値を用いて流量 Q の経時変化を求めたのが、図-9に示す破線である。この場合、図中の実測値と計算値はあまり一致していない。流量の指標 J_Q の値は0.1123で、5.(1)a)の値よりかなり大きくなっており、鉄の水酸化物の抑留量の指標だけから抑留パラメーターを評価するのも十分とは言えないようである。

c) 流量と抑留量の指標を合わせて評価する方法

流量と鉄の水酸化物の抑留量を同時に考慮するため、次式に示す指標を考える。

$$J = \lambda_1 J_Q + \lambda_2 J_{Q_0} \quad (18)$$

ここに、 λ_1 、 λ_2 は重み係数である。

まず、式(18)に示す $\lambda_1=0.5$ 、 $\lambda_2=0.5$ の場合の指標が最小となる抑留パラメーターを感度解析し、 $\beta_1=0.0022$ 、 $\beta_2=4000$ 、 $\beta_3=380$ に対し、 $J_Q=0.0626$ 、 $J_{Q_0}=0.1821$ 、 $J=0.1224$ を得た。これらの値を用いて流量の経時変化と 1200分後の鉄の水酸化物の抑留量の分布を求めた。結果をそれぞれ図-9、10の一点鎖線に示す。5.(1)b)で得られた値(破線)と比較すれば、流量の経時変化の精度は向上しているが、必ずしも良い一致とはいえない。一方、鉄の水酸化物の抑留量の分布は、実測値と計算値が5.(1)b)と同様に良い一致を示している。

さらに、流量の経時変化の精度を上げるために、 $\lambda_1=0.7$ 、 $\lambda_2=0.3$ の場合を算定し、 $\beta_1=0.0021$ 、 $\beta_2=5000$ 、 $\beta_3=420$ に対し、 $J_Q=0.0461$ 、 $J_{Q_0}=0.2016$ 、 $J=0.0929$ を得た。これらの値を用いて流量の経時変化と 1200分後の鉄の水酸化物の抑留量の分布を求めた。結果をそれぞれ図-9、10の二点鎖線に示す。 J_Q の値から流量の経時変化の精度が若干向上していることがわかる。

$\lambda_1=0.7$ 、 $\lambda_2=0.3$ の場合に得られたパラメーターを用いて、240分後の透水係数比の分布を求めた。結果を図-11に示す。図から、実測値と計算値は良い一致を示している。さらに、水頭分布の計算値を算定し、図-12を得た。水頭分布についても実測値と計算値は良い一致を示している。

以上により、人工の地下水を用いたカラム実験において本モデルが妥当であると考えられる。

(2) 実際の地下水による室内実験に関する評価

2. 実際の地下水による室内実験結果を用いて、

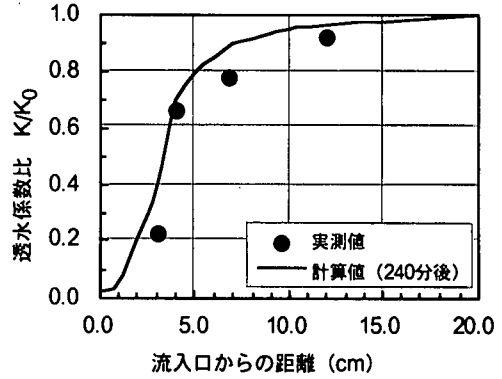


図-11 透水係数比の分布

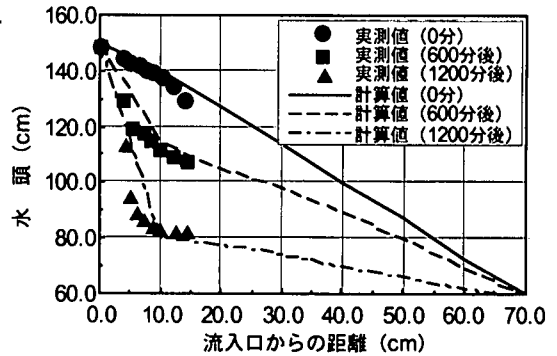


図-12 水頭分布

式(12)、(13)の抑留パラメーター β_1 、 β_2 、 β_3 を評価した。評価方法は、表-4に示す浸透条件のもとで初期流量と鉄の初期濃度をそれぞれ $Q_0 = 5.8$ (cm^3/sec)、 $C_0 = 0.166(\text{mg/l})$ として行った数値計算による流量 Q と鉄の水酸化物の抑留量 Q_0 と、実測値とを比較するものである。

まず、式(18)に示す $\lambda_1=0.5$ 、 $\lambda_2=0.5$ の場合の指標が最小となる抑留パラメーターを感度解析し、 $\beta_1=0.0040$ 、 $\beta_2=4200$ 、 $\beta_3=340$ に対し、 $J_Q=0.0572$ 、 $J_{Q_0}=0.0089$ 、 $J=0.0334$ を得た。これらの値を用いて流量の経時変化と実験終了時である7200分後の鉄の水酸化物の抑留量の分布を求めた。結果をそれぞれ図-13、14の実線に示す。流量の経時変化は、必ずしも良い一致とはいえない。一方、鉄の水酸化物の抑留量の分布は、実測値と計算値が良い一致を示している。

さらに、流量の経時変化の精度を上げるために、 $\lambda_1=0.7$ 、 $\lambda_2=0.3$ の場合を算定し、 $\beta_1=0.0035$ 、 $\beta_2=6000$ 、 $\beta_3=390$ に対し、 $J_Q=0.0164$ 、 $J_{Q_0}=0.0185$ 、 $J=0.0170$ を得た。これらの値を用いて流量の経時変化と実験終了時である7200分後の鉄の水酸化物の抑留量の分布を求めた。結果をそれぞれ図-13、14の破線に示す。 J_Q の値から流量の経時変化の精度が向上していることがわかる。このときの

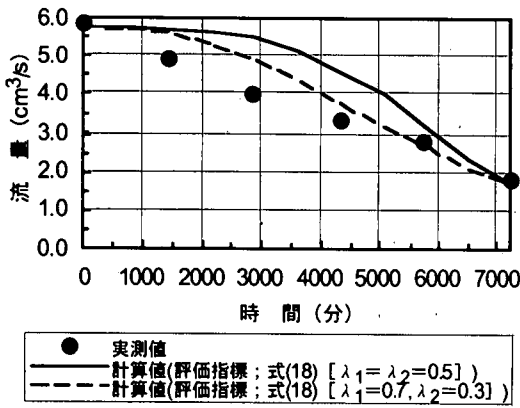


図-13 流量の経時変化

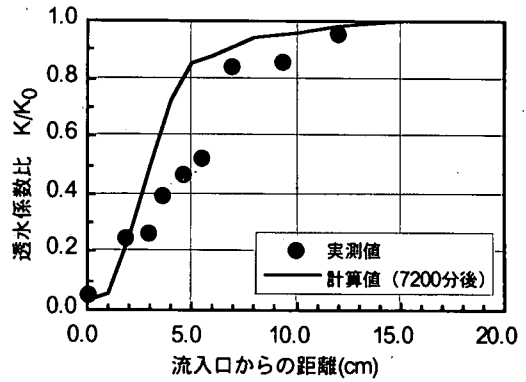


図-15 透水係数比の分布

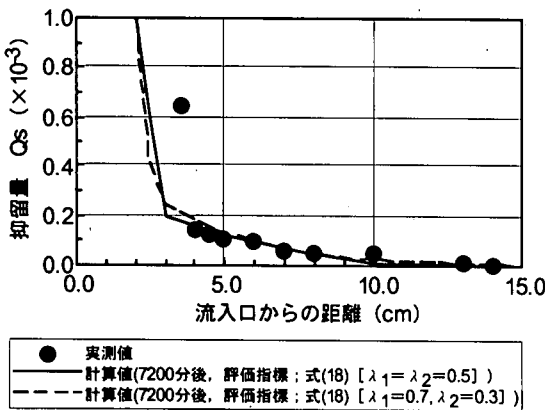


図-14 鉄の水酸化物の分布

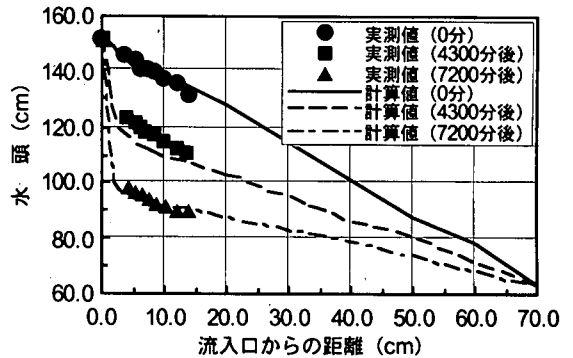


図-16 水頭分布

実験終了時である7200分後の透水係数比の分布を求めた。結果を図-15に示す。図から、実測値と計算値は良い一致を示している。さらに、水頭分布の計算値を算定し、図-16を得た。水頭分布についても実測値と計算値は良い一致を示している。

以上により、実際の地下水を用いたカラム実験においても本モデルの妥当性が確認できた。このように流量および抑留量に関する評価指標により抑留パラメーター $\beta_1 \sim \beta_3$ を推定し、式(12)、(13)、(15)を用いれば、流量 Q や鉄の水酸化物の抑留量 Q_s を推定することができる。

6. 膜ジュールと目詰まり予測モデルによる地下水の人工涵養計画

本数学モデルで全鉄の濃度が異なるときの流量、抑留量、水頭、透水係数などの経時変化を計算できることが分かった。今回の実験では、セルの流出口での流量が初期流量の1/3に低下するのに、全鉄濃度が約0.2mg/lの実際の地下水を用いたときには5日を要し、全鉄濃度が約0.75mg/lの人工の地下水を用い

たときには14時間を要した。このように濃度によって目詰まり発生速度が異なるので、使用する地下水中に高濃度の目詰まり原因物質が含まれ、目詰まりの発生が速いと予測される場合、限外ろ過膜などを利用して目詰まり原因物質の濃度を低く調整すれば、目詰まり速度を遅くすることができ、工事期間中の目詰まりの発生を防止することができる。

したがって、人工涵養の計画を行う場合、図-17に示すように計画段階では、透水係数、初期間隙率、目詰まり原因物質の濃度などの現地データを収集した後、数値計算モデルで流量の経時変化の試算を行い、揚水した地下水を注入井へ直接注水するかあるいは限外ろ過膜を通した後、注水井へ注水するかの選択を行う。計画の実施段階では、流量、目詰まり原因物質の濃度などの注水条件を設定し、数学モデルにより流量、抑留量、水頭、透水係数などの予測を行う。この際、注水流量、水頭分布などを観測し、実測値と計算値から逐次モデルを更新して予測を実施する。

このようにすれば、地下水を注入水に用いる場合に目詰まりの発生しない期間を推定することが可能である。

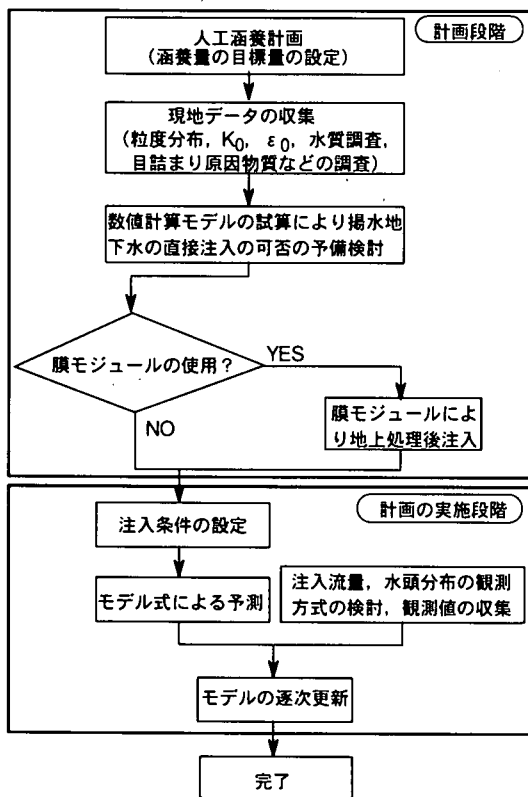


図-17 人工涵養の計画フローチャート

7. おわりに

本論文では、実際の地下水による室内カラム浸透実験と、鉄の水和酸化物が混入している溶液による室内カラム浸透実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 低濃度の各種イオンを含む実際の地下水による室内カラム浸透実験で、目詰まりの主原因物質が鉄の水和酸化物であると推察された。
- (2) 実際の地下水および人工的に作製した鉄の水和酸化物による実験では、目詰まりは浸透層の流入口からほぼ10cm以内の流入口近傍で起こっていることが確認できた。
- (3) カラム浸透実験に対して数学モデルを適用し、流量および抑留量に関する評価指標により抑留パラメー

ターの推定が可能であることを示した。なお、実際には抑留量の測定を現地で行うことは困難であるので水頭分布と注水量の観測値から透水係数を推定することも考えられる。

(4) セルの流出口での流量が初期流量の1/3に低下するのに、全鉄濃度が約0.2mg/lの実際の地下水では5日間を、約0.75mg/lの人工地下水では14時間を要した。目詰まり原因物質の濃度によって目詰まり発生速度が異なることが分かった。

(5) 本目詰まり予測モデルと目詰まり原因物質の濃度を減らすための限外ろ過膜などを用いた人工涵養の計画フローの一例を示した。

謝辞：本研究を行うに当たり、福岡県粕屋郡志免町水道課には実験場を提供して頂きました。また、九州大学理学部横山拓史助教授、同農学部和田信一郎助教授、同工学部糸井龍一助教授、同工学部広城吉成助手には有益な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村下敏夫, 永井茂：人工地下水用井戸の目づまり, 日本地下水学会誌, 第14巻, 第2号, pp.11-14, 1972.
- 2) Rebhum, M. and Schwarz, J.: Clogging and concentration process in recharge wells, Water Resources Research, Vol.4, No.6, pp.1207-1217, 1968.
- 3) 北川明, 石崎勝義：浮遊物による目詰まりに関する研究, 第24回水理講演会論文集, pp.91-96, 1980.
- 4) 糸井龍一：シリカ付着による地熱還元井周辺の透水性低下およびその予測に関する研究, 九州大学学位論文, 1989.
- 5) 上田年比古, 神野健二, 安田裕, 重藤恵昭：懸濁物質による砂充填層内の目詰まりと再揚水による透水係数の回復について, 日本地下水学会誌, 第25巻, 第3号, pp.121-138, 1983.
- 6) Ives, K. J.: The Science Basis of Filtration, N.A.T.O., Advanced Study Institutes Series, pp.203-241, 1975.
- 7) 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.

(1998.3.12 受付)

MODELING OF CLOGGING IN POROUS MEDIA AND DESIGN FOR AN ARTIFICIAL GROUNDWATER RECHARGE

Fumiaki HIRANO, Kenji JINNO, Motoi FUNAOKA and Hironobu MOMOTA

In order to model the process of clogging in porous media, a laboratory column experiment by infiltrating the pumped groundwater and a numerical simulation have been carried out. Hydrated oxide of iron was identified as a major substance of the clogging. The parameters in the prediction model are calibrated by the least square estimate. A design of an artificial groundwater recharge using the numerical simulation model and an ultra filter membrane reducing the clogging substances is proposed.