コラム浸透における 目づまりに伴う透水性の減少に関する研究

北川 明¹

¹正会員 サンコーコンサルタント株式会社 (〒136-8522 東京都江東区亀戸一丁目8-9)
E-mail: a.kitagawa@suncoh.co.jp

社会経済活動にとって重要な水資源である表流水と地下水はその存在状況が対照的に異なる。健全な水循環において表流水と地下水の健全な関係性が主要なファクターと言える。近年の水利用や都市化等によって失われきた表流水と地下水の健全性の回復技術として、直接地下水化を図る注入法は、自然涵養量を補う有効な手法となりうる可能性があるが、必然的に目づまりが伴う。本研究は、目づまりに関するコラム浸透実験によって懸濁物質および微生物による目づまりの特性を明らかにするとともに、実験から得られた懸濁物質の抑留量と透水係数との関係を基に、懸濁物質に起因する目づまりによる透水性の減少を定式化し、微生物による目づまりが複合する場合についても定式化を試みた。実験結果との比較によって、提案式の妥当性が確認された。

Key Words: groundwater, artificial recharge, clogging by suspended solid, biological clogging, permeability, column test

1. 序論

地下水は、降水が地表を浸透しあるいは河川等表流水からの涵養を経て存在する水循環における水の賦存状態の一形態である。地球環境への負荷を軽減すると共に自然との共生を図り生態系等自然環境へのインパクトを低減させるため自然共生型流域圏の形成が求められてきた。また、気候変動による水資源の時間的、空間的偏在が懸念される中、健全な水循環を保全する水循環基本法が制定されることとなった。高度に集中化した社会活動が営まれる現在の流域においては、適正な水利用を図る他、適切な水資源の賦存状態に向けて水循環の補強、補填、矯正するなどの人為的な手法の体系的、総合的な整備が重要と考えられ、地下水人工涵養技術も、その重要な手段の一つとして位置づけられるものと考えられる。地下水人工涵養技術の一手法である注入井による地下水涵養はアメリカにおける塩水侵入防止¹⁾あるいはイスラエルにおける水資源の地下貯留による有効利用²⁾を目的にして実施され所定の成果が上げられている。しかしながら、わが国ではいくつかの事例^{3),4)}において地下水障害対策としての効果や注入井の涵養機能の確認の現地実験として実施された程度である。

地下水は、地表水が土壌等地層で物理的・化学的・生物学的フィルタリングを受け浸透したものである。地下水の人工涵養はこのプロセスを簡略化するため、必然的に目づまりが発生する。目づまりは注入井近傍帯水層に集中的に目づまりの原因となる抑留物が抑留され

ることによって発生する。目づまりに伴う注入水位の上昇等の水理量の変化を定量的に評価することは、注入井による地下水涵養を効率的に実施する上で不可欠である。

懸濁物質による目づまりに関しては、懸濁物質の連続方程式と抑留条件式が提案され、熱水の還元における透水性の低下に適用されている⁵⁾が実験レベルに留まっており、未だ目づまりに起因する比注入量の減少を定量的に評価可能とする定式化はなされていない。また、微生物による目づまりについては現地実施例において報告^{2),6)}がなされている程度である。本研究は、コラム浸透実験を行い、主な目づまりの原因と考えられる懸濁物質と微生物による目づまりに伴う透水性の減少特性を明らかにする。また、実験で得られた懸濁物質および微生物による目づまりの特性から、目づまりに伴う透水性の低下に関する定式化を行う。

2. 目づまりに関するコラム浸透実験

(1) 実験の目的とその方法

現地注入実験例での目づまりは懸濁物質と微生物を原因に発生していることが知られた⁷⁾。また、河川水等の表流水が主な注入水源になるものとするれば、懸濁物質と微生物による目づまりが最も発生しやすいものと考えられる。河川水を実験原水として、実験水質を管理するなど実験条件を整え、それぞれの目づまり発生の基本特性を明らかにするためにコラム浸透実験を行った。実験水については、河川水を取水源とし、自然沈殿さ

図-1 コラム実験装置の概要

図-2 実験に用いたコラム型浸透装置

せた沈殿水とそれを生物酸化処理した後PAC凝集ろ過したものを用いた。また、水道水を活性炭によって脱塩素をしたものも比較のため浸透実験に用いた。さらに、実験水温をヒータによって水温管理も可能となっている。

用いた実験装置は、基本的な目づまりの特性を把握するためのコラム型浸透装置である。図-1にコラム実験装置の概要、図-2にコラム型浸透装置を示す。コラ

図-3 浸透実験計測の概略

ム型浸透装置は、内径15cm、高さ2.3mの透明塩ビ製で、1~20cm間隔に計17箇所にマンノメータが取り付けられている。コラム上面から1.04m地点に浸透層上面とし、それ位深、コラムが逆円錐になる上面まで浸透材を詰め浸透層としている。目づまりは主に浸透層の表層部で発生することから、上層部には1cm間隔で密に集中的に設置してあり、層ごとの目づまり状況の把握あるいは、透水係数の算定ができるようになっている。実験水はコラム上面から供給される。浸透層上面から0.704m地点で余分な実験水は越水できるようになっていて浸透水位を一定に保つことが可能となっている。また、計5箇所に採水口があり、浸透水の浸透に伴う水質変化を把握できるようになっている。浸透水はコラムの末尾から背面調節部に連結されここで水位が一定に保たれ越水するようになっている。水量調節は背面調節の水位を変化させることによって初期浸透流量を設定することができるようになっている。実験は主に定水位とし、昼夜に関係なく長期にわたる場合もあるため、浸透流量の測定には自記式転倒式流量計が用いてある。浸透実験計測の概略を図-3に示す。多くの実験ケースが想定されたので複数の実験ケースが同時に実施できるよう8塔のコラムが設置してある。

(2) 実験結果

a) 懸濁物質が卓越する目づまりの特性

初期浸透速度の違いによる浸透量の変化を図-4に示す。実験水は河川水の沈殿水を用いた。実験期間中の実験水の平均水質は、SSが22.4mg/l、DOが7.4mg/l、CODは8.0mg/lであった。浸透時間の経過とともに、初期浸透速度20m/d、160m/dケースで浸透経過96時間後、浸透侵出水のDOは、それぞれ4.0mg/lと1.5mg/lに低下し、微生物の関与が見受けられるものの、懸濁物質濃度が高く、目づまりはほぼ懸濁物質によって発生しているものと考えられる。なお、浸透材は有効径

図-4 初期浸透速度の違いによる浸透量変化

図-5 浸透層各層における透水係数の変化

0.98 mm, 均等係数 1.43 の砂を用いている。

図-5 は、図-4 における初期浸透速度 50 m/d における浸透層各層における浸透時間の経過に伴い増加する懸濁物質負荷量に対する透水係数の変化を示している。透水係数は概して指数関数的に減少することが示されている。初期浸透量の異なる、また、有効径の異なる浸透材ケースについても同様な結果が得られたことから、浸透層上層における透水係数の減少勾配を初期浸透速度に対して図示したのが図-6 (a) である。また、初期浸透速度 50 m/d として有効径の異なる浸透材での変化を示したのが図-6 (b) である。用いた浸透材は有効径が 0.98 mm, 1.50 mm, 2.15 mm でそれぞれの均等係数は 1.43, 1.50, 1.35 である。初期浸透速度が小さいほど、また、浸透材の有効径が小さいほど、浸透層上層での透水係数の減少が大きくなることが示されている。

b) 定水位浸透と定量浸透の比較

地下水の人工涵養は一定水量を保ちながら浸透させるのが一般的である。定水位浸透は目づまりの進行に従い、浸透速度が低下するため定量浸透とは懸濁物質の抑留分布に差異が生じ、その結果、透水性にも違いがでてくることも想定される。そこで、定水位浸透と定量浸透における透水係数減少の比較実験を行った。

実験水には、平均懸濁物質濃度 0.3 mg/l の生物酸化凝

(a) 初期浸透速度と透水係数の減少勾配

(b) 浸透材の有効径と透水係数の減少勾配

図-6

図-7 定水位浸透と定量浸透での透水係数変化 (上: 浸透層上層 5 cm, 下: 浸透層全層)

図-8 水道水と生物酸化急速ろ過水の浸透量変化

図-9 水道水と生物酸化凝集ろ過水の上層での透水係数の変化

集ろ過水を、浸透層の浸透材として有効径 0.24 mm の砂を用いた。浸透層表層及び浸透層全層での透水係数の変化をそれぞれ図-7 の上下に示す。実験結果からすると、どちらも指数関数的に減少し定水位浸透と定量浸透での透水性の減少に違いはほぼ見られないものとなった。特に表層での透水係数減少はよく一致している。定量浸透と定水位浸透での違いは浸透速度であり、懸濁物質の抑留に関して浸透速度に左右される重力の効果より浸透速度に関係がない懸濁物質の粒径と浸透材の粒径の大きさで決まるさえぎりの効果が卓越したためと考えられる。このことから定水位実験結果は定量浸透に対しても適応できるものと理解される。

c) 微生物が関与した目づまりとその評価

図-8 は SS 0.23 mg/l, COD 5.51 mg/l の生物酸化処理凝集ろ過水と SS 0.26, COD 3.35 mg/l の活性炭ろ過によって塩素除去した水道水を浸透水として浸透量の変化を示した図である。浸透材として有効径 0.24 mm 均等係数 1.96 の砂を用いている。なお、初期浸透速度は 50 m/d である。

図-8 における浸透量減少の差は、SS がほぼ同じであることから COD の差に起因する微生物による目づまりの差によるものと理解される。図-9 は浸透層上層での懸濁物質負荷量に対する透水係数の変化を表したものである。図に示されるように、生物酸化凝集ろ過処理水では浸透層間隙での微生物の増殖による目づまりが

図-10 浸透水温の違いによる浸透量の変化

図-11 浸透層上層における固有透過度の変化

関与していると考えられるが、水道水と同様に懸濁物質負荷量に対して指数関数的に減少していることは、微生物による目づまりが複合していても、懸濁物質負荷量を指標に微生物による目づまりを評価しうる可能性が示されていて興味深い。

微生物による目づまりの特性を把握するため実施した浸透水温の違いによる目づまり発生浸透実験結果を図-10 に示す。実験水は生物酸化凝集ろ過水を用い、平均水温をそれぞれ 10°C, 20°C, 30°C に保った。平均懸濁物質濃度 0.94 mg/l で、平均 COD 4.73 mg/l である。有効径 0.24 mm の実験砂を用いている。初期浸透量は 50 m³/d である。浸透量の減少によって浸透に伴う目づまりの進行が知れる。浸透初期では実験水温が高いほど浸透量の減少が早く、微生物による目づまりが発生しやすくなっている。浸透初期を除き浸透層上層では浸透水温と同じ温度が保たれるいると考えられる。そこで、図-11 に浸透初期における浸透層上層での水温等の浸透水の物理特性によらない透水性を示す固有透過度の変化を示した。懸濁物質負荷量の増加にともないいずれの浸透水温においても指数関数的に減少し、水温が高いと減少勾配が大きくなっている。ちなみに固有透過度と透水係数の関係は次式で表される。

$$\kappa = \frac{\mu k}{\rho g} \quad (1)$$

ここに、 κ は固有透過度、 μ は浸透水の粘性係数、 ρ は浸透水の密度、 g は重力の加速度、 k は透水係数である。

図-12 実験水温と透水係数減少勾配

図-12は、図-11に示した固有透過度の減少勾配と実験水温との関係を表したものである。図中には近似曲線として二次式を示している。この二次曲線は、0°Cにおいては微生物の活動は無視しえると仮定しその結果固有透過度が最も小さくなるものとして最小二乗法で得られたものである。異なる水温での実験例が3点しかなく、近似曲線の妥当性を判断することは十分とは言いが、本実験で設定された実験水の水温は、いわゆる常温であり常温の範囲においては水温の上昇に伴って微生物の増殖はより活発化することから、便宜的に二次曲線による近似はやむをえないものと考えられる。主に懸濁物質によって目づまりが発生する場合においても、また、微生物による目づまりが複合していても固有透過度が懸濁物質負荷量に対して指数関数的に減少するという特性から、図中の二次曲線から微生物による目づまりと懸濁物質による目づまり発生度を評価することが可能となる。0°Cにおける固有透過度の減少勾配は懸濁物質のみに起因した目づまりによる減少程度を表すものとする。二次曲線のy軸との交点を求めるとその値は、0.34となる。この値をベースに各実験水温における微生物による目づまり占める割合を固有透過度の減少勾配への寄与率から試算してみると、実験水温10°Cにおいては減少勾配が0.40であるから、0°Cと10°Cでの固有透過度減少勾配の差、つまり0.06が微生物による目づまりの寄与によるものと考えられることができる。10°Cでは微生物に起因した目づまりは、全体のうち15.0%であり、また、17.6%の懸濁物質負荷量が増加した懸濁物質による目づまりと同等であるものと推測することができる。同様に、20°C、30°Cでの減少勾配が0.56、0.85となり、目づまりにおける微生物の目づまりは、それぞれ全体の39.3%、64.7%を占め、それぞれ60.0%、150%の懸濁物質負荷量が増加した懸濁物質による目づまりと試算される。実験数も少なく、誤差も含まれる。また、0°Cにおいて微生物の活動は無視しえものとして水温と微生物による目づ

まりの関係を便宜的に二次式で表したにすぎない。上記の数値は一試算と考えられるが、懸濁物質と微生物による目づまりが混在しても、固有透過度あるいは透水係数が懸濁物質負荷量に対して指数関数的に減少することから、微生物による目づまりの程度が懸濁物質による目づまりを基準にして評価できることになり大変興味深い。

3. 目づまりによる透水性変化の定式化

(1) 目づまり現象の簡略化とその妥当性

最終的には、実際の注入井による地下水の人工涵養における目づまりの予測を可能とする定式化を目的としている。そこで、ここでは水質的、水理的厳しい管理のための精度の高い予測と監視が要求される浄水におけるろ過と異なり、注入井による地下水の人工涵養においては結果的には水理的な予測でよいという実際の側面も考慮に入れ、目づまりに関する室内実験成果を取り込むことで、現象をさらに簡略化して取り扱うことにする。簡略化の結果については、室内実験結果によってその妥当性を検証するという方向で議論を進めることにしたい。

懸濁物質の一次元浸透における保存の基本式は次のように書かれる。

$$(e_0 - \sigma) \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial z} = E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

ここに、 e_0 は初期間隙率、 c は懸濁物の体積濃度、 E_z は分散係数、 q は見かけの流速、 σ は体積抑留量、 z は浸透方向座標、 t は時間である。また、懸濁物質の抑留に関しては、次式によって示される。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda q c \quad (3)$$

ここに、 λ は懸濁物質の抑留を表すろ過係数と呼ばれる。

ろ過係数は懸濁物質の抑留を論ずる場合、大変重要なパラメータとなる。通常次式のように書かれる。

$$\lambda = \lambda_0 f(\sigma) \quad (4)$$

ここに、 λ_0 は初期のろ過係数である。

初期のろ過係数は、浸透層砂粒子の粒径、浸透速度等で異なってくる。 $f(\sigma)$ については σ の一次式や二次式などが提案⁸⁾されている。

式(2)が懸濁物質の保存の基本式となる。懸濁物質濃度が主に間隙内への抑留によって変化する場合には、式(2)は簡略化され式(5)のように書かれる。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -q \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5)$$

現象を簡略化して、 $\lambda = \text{const.}$ とする。ここでは、 λ を抑留係数と呼ぶ。式(3)および式(5)から次式が得られる。

図-13 抑留量による透水係数の変化の比較

$$\sigma = \lambda \int_0^t C_0 q dt \exp(-\lambda z) \quad (6)$$

ここに、 C_0 は浸透水の懸濁物質の体積濃度である。また、 $\int_0^t C_0 q dt$ が懸濁物質負荷量となる。

前節における透水係数の懸濁物質負荷量に対する変化を見ると、よく指数関数で近似できることが示されている。すなわち透水係数として、式(6)に示されるように抑留量は懸濁物質負荷量に比例することから、透水係数は次式で近似される。

$$k = k_0 \exp(-a\sigma) \quad (7)$$

ここに、 k_0 は初期の透水係数、 a は定数である。

抑留量と透水係数との関係は、Kozeny-Carman の式でよく表されることが知られている⁹⁾。図-13は、参考文献¹⁰⁾においてCampが実験結果とKozeny-Carmanを比較した図に、式(7)において $a = 10$ として書き入れたものである。式(7)はKozeny-Carmanの式とよく対応している。また、実験値の中間的な値を取っていて驚くほど実験値を代表していると言えよう。Kozeny-Carmanの式は、次式で示されるようにダルシー則における抵抗則から間隙内の抑留量を勘案して導かれたもので、所定の物理量、初期の間隙率および初期の透水係数が得られれば、抑留量に対する透水係数が求まる。

$$\frac{k_0}{k} = \frac{(1 - e_0 + \sigma)^2}{(1 - e_0)^2} \times \frac{e_0^3}{(e_0 - \sigma)^3} \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma}{3(1 - e_0)} + \frac{1}{4} + \frac{\sigma}{3(1 - e_0)} + \frac{1}{2}}} \quad (8)$$

しかし、上式によって地下水の涵養に伴う目づまりを評価することは、浸透層全体での透水性の変化を求めることが必要となり、式の展開が複雑でそれに基づく議論や考察がやっかいである。一方、式(7)は今回目づまりに関する室内実験結果から提案したものである。シンプルな関数形であり、抑留量と透水係数との関係が直接的で理解しやすい。ただ、この式においては定数 a が物理的にあいまいで、今のところその値を決め

図-14 抑留量分布

る手段がないという大きな欠点を有する。そこで次のような推論によって定数 a を求めることとする。

式(7)は、定数 $a = 10$ でほぼ全ての抑留量に対応していることから、定数 a は σ とは無関係であると考えられる。初期の間隙率 e_0 の大小によって、同じ抑留量 σ でも抑留物による閉塞効果が異なってくることから、定数 a は初期の間隙率 e_0 の関数となることが理解される。また、間隙中における抑留量が多くなってくると、抑留物の間隙率が影響を及ぼしてくるものと考えられる。そこで定数 a は、浸透層の初期間隙率 e_0 と抑留物の間隙率の関数となるが、浸透初期の抑留量が少ない状況においては、抑留物の間隙を占める割合が小さく、抑留物の間隙率の影響は無視しえるものとあする。よって、浸透初期においては定数 a は初期の間隙率 e_0 のみの関数と考えられ、次式のように書ける。

$$a \approx f_1(e_0) \quad (9)$$

ここでは、図-13に示されているように、式(7)とKozeny-Carman式とが似通っており、特に抑留量が小さい段階で、ほぼ同じような値を与えることから、便宜的に定数 a の値をKozeny-Carman式から求めることにする。つまり、両式において、 $\sigma = 0$ での微分係数が等しいとすると、次式が得られる。

$$a \approx \frac{4}{3(1 - e_0)} + \frac{3}{e_0} \quad (10)$$

通常、砂層の間隙率は、 $0.2 \leq e_0 \leq 0.4$ である。この場合、 $9.7 \leq a \leq 16.7$ となつて、図-14で用いた $a = 10$ はこの不等式を満たしている。実験に用いた砂は均等性が高いことから、その間隙率は0.4に近いものと考えられ、 $a = 10$ としたことは妥当であることが解る。

図-14での実験水は、河川水を滞留させたのもので、平均懸濁物質濃度20ppmとなっている。初期の浸透速度は50m/dで浸透速度が1/20程度になるまで一定水位で浸透を継続した。

式(6)から抑留量は指数分布し、 λ が抑留量の空間分布も決定していることが解る。図-14における実線は、 $\lambda = 0.14$ 1/cmとおいた式(6)を示す。この値は、同図から表層の砂層1g当たりの抑留量は約13mgと推定さ

図-15 全層での透水係数変化の比較

れ、浸透層表面の間隙はほぼ閉塞しているものとして得られたものである。この場合懸濁物質質量とフロク体積の比、 $\omega \div 0.05 \text{ g/cm}^3$ が得られた。実験での抑留物は浸透層の上部に集中しているようであるが、概して指数分布に近く、浸透層表面での抑留量から得られた抑留係数 λ によって、抑留量の分布がよく表現されている。

次に、注入での目づまりにおいては全体的な透水性が問題となることから、浸透層全層での透水係数の比較を行う。ダルシー則から動水勾配 $I(z)$ は次式で与えられる。

$$I(z) = \frac{q}{k} = \frac{q}{k_0} \exp \left\{ a\lambda \int_0^z C_0 q dt \exp(-\lambda z) \right\} \quad (11)$$

上式を全層で積分し、全層での透水係数を k_T とすると次式のようにになる。

$$k_T = \frac{k_0 z_0}{\int_0^{z_0} \exp \left\{ a\lambda \int_0^z C_0 q dt \exp(-\lambda z) \right\} dz} \quad (12)$$

ここに、 z_0 は浸透層厚である。

図-15 は全層での透水係数の実験値と式 (12) を比較したものである。浸透全般で計算結果は実験値とよく一致している。

以上のことから、懸濁物質の抑留されやすさとその分布を決定する抑留係数 λ は一定としても精度よく浸透層の透水性の変化を表すことが可能であること、また、式 (6)、式 (7) が妥当であることが示された。式 (6) から λ が大きくなると懸濁物質はより浸透層上層に抑留されることになり、浸透層の透水性の減少が大きくなることが式 (12) から解る。

(2) 抑留係数の特性

抑留係数は、懸濁物質の浸透層内における抑留分布を決定し、目づまりの進行を支配する重要なパラメータである。このため抑留係数の特性を明らかにすることは、目づまりの進行を予測する上で重要と考えられる。

図-16 に浸透速度の違いによる抑留係数の変化、図-17 に浸透層の砂粒子径の違いによる変化を示す。先に述べたように、抑留係数は透水性を決定することから、

図-16 初期浸透速度と抑留係数

図-17 実験砂の有効径と抑留係数

両図に示された初期浸透速度や実験砂粒径が異なるそれぞれのケースにおける浸透層上層 5 cm での透水係数の変化から得られたものである。実験数が少なくデータの蓄積が必要と考えられるが、図-16 と図-17 から抑留係数は次のように書ける。

$$\lambda \propto q_0^{-1} d^{-1.5} \quad (13)$$

ここに、 q_0 は初期浸透速度、 d は浸透層砂の有効径である。

一方、藤田⁸⁾は懸濁物にカオリンを、凝集剤に硫酸バンドを用いた実験によって、初期のろ過係数 λ_* に関して以下のような実験式を得ている。

$$\lambda_* \propto q_0^{-(0.5-0.67)} d^{-(1.4-1.5)} \quad (14)$$

また、凝集剤を用いない実験では浸透速度との関係で、 q_0^{-1} 近い結果を得ている。

藤田の実験と本実験では、実験方法、懸濁物質の性質等が異なるものの同様な形となっている。10 μm 以上の懸濁物質の抑留においてはさえぎりと重力沈殿が卓越する^{8), 11)}とされる。懸濁物質にカオリンを用いた場合には、さえぎりの効果が卓越因子であることが示されている⁸⁾。本実験水の原水は河川水で懸濁物質はらん藻類、酸化鉄フロク、粘土粒子等が混在しているものと考えられることから、さえぎりが強く卓越したと言える。このため、様々な違いがあるもののさえぎりが卓越した抑留ということで、藤田の実験と同様な

状況を呈したものと考えられる。

本研究で得られた抑留係数と藤田による初期のろ過係数がほぼ同じ関数形によって表現されることから、有機性懸濁物質をも含む様々な注入水に対しても、抑留係数は浸透速度と代表粒径の関数形として与えられると考えられ、次式のように表現される。

$$\lambda \propto q^{-\gamma} d^{-(1.4 \sim 1.5)} \quad (15)$$

有機性懸濁物質は凝集剤による凝集効果が弱くなること、また、無機性懸濁物質より密度が小さくなることから重力沈降の効果がさらに低くなる。様々な無機性懸濁物質と有機性懸濁物質の比を有する注入水が想定されことから、 $0.5 < \gamma \leq 1$ と考えることが無難であろう。

(3) 懸濁物質と微生物による目づまりが複合する場合での透水性の変化

図-9に示されているように、微生物の増殖による目づまりの発生が複合している場合においても透水係数が指数関数的に減少している。そこで次式のように表される。

$$k = k_0 \exp \left\{ -(\alpha + \alpha') \int_0^t C_0 q dt \right\} \quad (16)$$

ここに、 α と α' はそれぞれ懸濁物質と微生物による目づまりに伴う透水係数の減少勾配を表す定数である。

式(7)と同様に、透水係数と抑留量との関係が成り立つものとすれば次式のように書ける。

$$k = k_0 \exp(-\alpha \sigma') \quad (17)$$

ここに、 σ' は微生物による目づまりが複合している場合での抑留量である。

式(16)と式(17)から次式が得られる。

$$\sigma' = \sigma \left(1 + \frac{\alpha'}{\alpha} \right) \quad (18)$$

上式は、透水係数の減少勾配の増加分だけ抑留量が増加することを示している。微生物による目づまりが複合している状態では、抑留係数そのものもその影響によって変化することが考えられるが、第一次近似として懸濁物質主体による目づまりの抑留係数を適用できるとすると、式(12)から、微生物による目づまりが複合している場合における全層での透水係数は次式で表される。

$$k_T = \frac{k_{0z_0}}{\int_0^{z_0} \exp \left\{ a \left(1 + \frac{\alpha'}{\alpha} \right) \lambda \int_0^t C_0 q dt \exp(-\lambda z) \right\} dz} \quad (19)$$

図-18に実験データは浸透水を10℃一定に保った場合での実験値と式(19)での計算値を示している。計算に当たって定数については次のような値を用いた。λについては、浸透砂の有効径のみが異なるから、図-14の計算

図-18 微生物による目づまりが複合する場合の透水係数の実験値と計算値の比較 (同定)

(a) 浸透水 20℃における透水係数の比較

(b) 浸透水 30℃における透水係数の比較

図-19

で用いた $\lambda = 0.14 \text{ 1/cm}$ と式(15)によって $\lambda = 1.0 \text{ 1/cm}$ とした。凝集剤処理をしているため浸透水は質的に異なるものと考えられるが、原水が同じであることも考え合わせ、近似的な値として適用するものとした。微生物による目づまりの寄与分に関しては以下のように考えた。図-12での曲線の0℃での交点から懸濁物質による目づまりのみの発生ととすると、 $\alpha = 0.34$ が得られる。よって、10℃においては、 $\alpha'/\alpha = 0.06/0.34 = 0.176$ となる。このとき浸透水温10℃での ω については、実験値と計算値が一致するように同定して、 $\omega \doteq 0.028 \text{ g/cm}^3$ を得た。この値は、懸濁物質による目づまりが卓越し、無機質の懸濁物質の割合が多いケースでの $\omega \doteq 0.05 \text{ g/cm}^3$ より小さくなっていて、妥当な範囲の値と思われる。

図-19 (a), 図-19 (b) は、浸透水を 20°C, 30°C にそれぞれ保った場合での実験値と計算値を比較している。計算に当たって、 ω については同定された値を、 α' については、図-12 から得られる値を用いた。つまり、20°C, 30°C において、それぞれ $\alpha'/\alpha = 0.65, 1.5$ とした。

今回の試算では浸透層全体の温度分布は必ずしも実験水温と一致していない可能性など不確定要素があるものの、20°C, 30°C いずれの実験水温つまり微生物による目づまりの程度が異なっても、実験値と計算値は概略一致をみている。微生物による目づまりが複合していても懸濁物質による目づまりをベースにその延長上で、目づまりの把握が可能であることが理解される。つまり、微生物による目づまりを等価の懸濁物質による目づまりに置き換え、新たな懸濁物質が負荷された懸濁物質による目づまりと捉えることが可能と思われる。ただし、図-10 に見られるように、浸透が長時間にわたると微生物の複雑な挙動が想定されることから、目づまりに伴う浸透も複雑な様相を呈してくる。これについては、さらに微生物の成長、変化に特化した研究が必要と考えられる。

4. 結論

注入井による地下水涵養における最も大きな課題である注入に伴う目づまりの特性を明らかにする目的で、目づまりに関する浸透サンドコラムによる基礎的な室内実験を行うとともに、その結果を踏まえ、目づまりによる透水性の減少に関する定式化を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 懸濁物質負荷量あるいは懸濁物質の抑留に伴い、浸透層の透水係数が指数関数的に減少する。また、微生物による目づまりが複合していても、懸濁物質負荷量に対して指数関数的に減少することが確認された。
- 2) 実験水の水温を上げると微生物による目づまりの発生程度が大きくなり透水係数の減少勾配も大きくなること、また、微生物による目づまりは相当分の懸濁物質抑留量の増加に置き換えられることが示された。実験結果の外挿から 0°C での微生物の繁殖が抑制された目づまり、つまり懸濁物質のみと考えられる目づまりによる透水係数の減少勾配が推定され、実験水温変化に伴う微生物による目づまりが懸濁物質による目づまりを基準に定量的に評価されることになる。
- 3) 懸濁物質による目づまりに伴う透水性の減少に関する定式化を行った。懸濁物質による目づまりは、浄水におけるろ過における現象と同様に、浸透層における懸濁物質の抑留とそれに伴う透水性の減

少によるものである。本研究では水理量の変化の把握で良いという実際的な立場に立つこととし、抑留係数は時間的、空間的に一定として現象を簡略化することとした。室内実験結果からその仮定は妥当であることが示された。

- 4) 実験結果を踏まえ、透水係数と懸濁物質の抑留量との関係式として指数関数式 (7) を提案した。この式に含まれる定数 a の物理的な意味があいまいであるという欠点を有する。Camp が提案している懸濁物質の抑留量と透水係数との関係式とほぼ同様な関数形となることから、Camp が提案している式において抑留量 0 において微分係数が一致するものとして a として式 (10) を得た。図-13 に示されているようにほぼ一致した透水係数と抑留量との関係を与えることが示され、式 (7) 及び式 (10) の妥当性が明らかにされた。
- 5) 上記の透水係数と抑留量の関係式を用いて浸透層全層での透水係数の変化を表す式 (12) を求めた。浸透層表層における懸濁物質の抑留状況から必要な定数を得て、計算値と実験値と比較すると式 (12) の適合性が確認された。
- 6) 微生物による目づまりが複合する場合での特性から、微生物による目づまり相当部分を懸濁物質による目づまりとして付加する最も簡単な微生物による目づまりに関するモデルとなる式 (19) を提案した。実験水の水温の違いによる微生物による目づまりに関する室内実験結果に一致することが示された。
- 7) 本研究で定義した懸濁物質の抑留に関する定数抑留係数について実験データが少ないが式 (15) が得られた。この式は、本実験で用いた実験水はらん藻類等の有機性懸濁物質を含むもので、懸濁物質の特性や実験方法が異なるが、藤田⁸⁾が提案している初期のろ過係数についてのろ過速度とろ材の粒径との関係式とほぼ同様なものとなった。

今後は、今回得られた成果を注入井に拡張し実際の注入に伴う目づまりによる注入効果の減少と比較し、その妥当性を明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 山本莊毅：地下水人工涵養について、その 1、用水と廃水、Vol. 2, No. 8, pp. 54-64, 1960；その 2、用水と廃水、Vol. 2, No. 9, pp. 55-62, 1960；その 3、用水と廃水、Vol. 2, No. 10, pp. 63-69, 1960。
- 2) Rebhun, M. and Schwarz, J.: Clogging and contamination process of recharge wells, *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 6, 1968.12.
- 3) 長瀬和雄, 宮永昭二, 横山尚秀, 大木靖衛, 荻野喜作, 遠藤栄一, 和田泰造, 加藤武：秦野盆地における地下水人工涵養 (1), 神奈川県温泉研究所報告, 第 7 巻, 第 3 号, pp. 135-144, 1976。

- 4) 永井茂, 村下敏夫: 人工地下水における注入井戸の目づまりと回復—妻沼実験の例—, 工業用水, pp. 48-54, 1972.11.
- 5) 上田年比古, 神野健二, 安田裕, 重藤恵昭: 地下水人工涵養時の目づまりについて, 第2回水資源シンポジウム, 1982.
- 6) Vecchioli, J. and Ku, H. F. H.: Preliminary results of injecting highly treated sewage-plant effluent into a deep sand aquifer at Bay Park, New York, *Geological Survey Professional Paper*, Vol. 751A, 1980.
- 7) 石崎勝義, 北川明: 注入井による地下水の人工涵養に関する研究, 土木研究所報告, 第155号, 1981.3.
- 8) 藤田賢二: 急速ろ過工程の数学的表現 (I) —ろ過方程式—, 水道協会雑誌, 510号, pp. 12-29, 1977.3.
- 9) 土木学会水理委員会: 水理公式集, p. 340, 土木学会, 1988.4.
- 10) Camp, T. R.: Theory of water filtration, *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, Vol. 90, No. 4, pp. 1-30, 1964.
- 11) 海老江邦夫: 急速ろ層における抑留物質の挙動 (I), 水道協会雑誌, 493号, pp. 25-46, 1975.10.

(2015. 4. 24 受付)

A BASIC STUDY ON THE PERMEABILITY DECREASE CAUSED BY CLOGGING IN TEST COLUMNS

Akira KITAGAWA

Groundwater and surface water, which exist and behave differently each other in contrast, are very important water resources for social and economic activities. The sound interaction between groundwater and surface water is a main factor to maintain the sound hydrological cycle in a river basin. However it has been damaged by the recent water use and urbanization. The artificial recharge by well, which directly converts surface water into groundwater and compensates the decrease of natural recharge, has a great possibility to restore efficiently the sound interaction between groundwater and surface water. However clogging occurs inevitably and decrease the efficiency of the artificial recharge. This study reveals the general characteristics of the clogging by suspended solid and biological clogging by the basic laboratory tests. The relation between the permeability decrease and the clogging by suspended solid is formulated. The decrease of the permeability is also formulated when the clogging combined by suspended solid and biological clogging takes place. The formulations are found to be reasonably explain the results of the laboratory sand column tests.