

注入井による地下水涵養 — 特に目づまりとその対策 — Artificial Recharge by Recharge Well —Clogging and Its Measures —

建設省土木研究所 正会員 石 崎 勝 義
正会員 ○北 川 明

1. 緒 言

地下水の過剰揚水による地盤沈下等の地下水障害の深刻化によって、今まで地下水の利用に対して大きな反省がなされるとともに、水資源の逼迫の解決手法として、膨大な地下の貯留能を生かした地下貯水池の構想が目目を浴びている。この地下水障害の軽減および表流水と地下水の利用を一体化する地下貯水池による水資源逼迫の緩和、これらの実現に対して大いなる期待を抱かせる技術が地下水の人工涵養技術であろう。

涵養技術は地表面に水を張る拡水法と井戸から注入する注入法に大別される。地下水とは雨水等が長い時間を要し、そこにあるべく条件を満たしつつ浸透したものである。人工涵養とはいわば、この過程を省略し、表流水を直接的に地下水化するものであって、そこには地下水と帯水層が一体となった拒絶反応が予想される。これがいわゆる目づまり現象である。

注入井の目づまりは直接人間の触れられない所で発生するものであり、その究明に緻密なデータの集積とその繊細な洞察・解析が不可欠である。本報告書は、各地で実施されてきた注入井による涵養実験結果の内容を調査と、室内実験から、目づまりの実態とその対策を明らかにすることを目的としている。

2. 現地に見られる目づまりとその発生状況

注入井における目づまりの原因として、次の5項目があげられている。ⅰ) 注入水中の懸濁物質、ⅱ) 帯水層での微生物の発生、ⅲ) 空気泡、ⅳ) 注入水と地下水の化学反応による沈殿物の生成、ⅴ) 帯水層の砂粒子の再配列、注入水は何らかの懸濁物が含まれ、それが長期にわたって注入井の近傍に抑留されること、また、懸濁物が有機物であるなら微生物の発生を伴うことから、ⅰ)、ⅱ) による目づまりは発生頻度が高いものと推定される。気泡の帯水層での発生は、注入水に含まれていた気泡がそのまま帯水層中に持ち込まれる場合と溶存空気が気泡化する場合の二通り考えられる。前者においては、注入時、気泡が発生しないような注入井の構造とする。後者においては、帯水層での水温上昇による飽和量の減少より、水圧上昇による飽和溶存量の増加分が大きく、まず気泡化しにくいことから、気泡による目づまりは回避しえる。注入水と地下水の化学反応による沈殿物の生成は、注入水と地下水の混合が、注入井から拡がっていくため、沈殿物が注入井の近傍に集中して生成しえない。このため、この原因による目づまりは無視しえるものと考えられる。砂粒子の再配列について具体的な説明はなされていないが、注入、揚水に伴う微小帯水層粒子の移動に伴う透水性の劣化と考えられる。例えば、注入の場合、ストレーナ近くの微細粒子は流体力で運ばれ、流体力の減少する地点で沈降し、そこでの透水性が減少することになる。

図1はわが国で行なわれた代表的な注入井による涵養現地実験において、比注入量の累加注入量に伴う変化を示している。ここで比注入量とは、注入量(m^3/h)/注入時の注入井内での静水位からの水位上昇量(m)で定義される。いづれの場合も、主な目づまりの発生に伴って比注入量は指数関数的に減少していくことが明らかである。表1は、おのおのの現地実験における、注入対象層の透水係数、注入井構造、注入水注入量、比注入量半減注入高、考えられる目づまりの原因についてとりまとめたものである。比注入量半減注入高とは、比注入量が当所の半分になるまでの累加注入量をストレーナ単位面積当りに直した値であり、おのおの実験条件の異なる各地での目づまりの進捗状況を比較判定するパラメーターと考えることができる。

明らかに懸濁物質が目づまりの原因と考えられるのは、上越、名古屋、妻沼の例である。上越の場合は、最大で濁度 5 ppm、平均 2~3 ppm であり、名古屋市では、濁度 4 ppm である。妻沼の場合は酸化鉄、酸化マンガンが懸濁物であり、一般的なケースと異なるが、濃度が高いとはるかに比注入量半減注入高が小さくなっている。

微生物による目づまりだけが発生することは、注入水質から考えてありえず、懸濁物質による目づまりと同時にある

いはその後で生ずることが普通である。注入水質と再揚水質から、微生物による目づまりが関与していると考えられるのは、上越と佐賀白石の例であるが、比注入量の減少傾向に何ら特徴的なものは見られない。

酸化鉄による目づまりの原因がほとんどの例について書かれているのは、妻沼での例のように注入水中に元来含まれているものとは異なって、注入水中の飽和に近い溶存酸素によって、注入井のケーシング・ストレーナーが酸化され酸化鉄が析出するからである。図-2は室内コラム実験において、砂層の上にストレーナーをおいたものと、そうでないものとでの浸透量の減少を比較

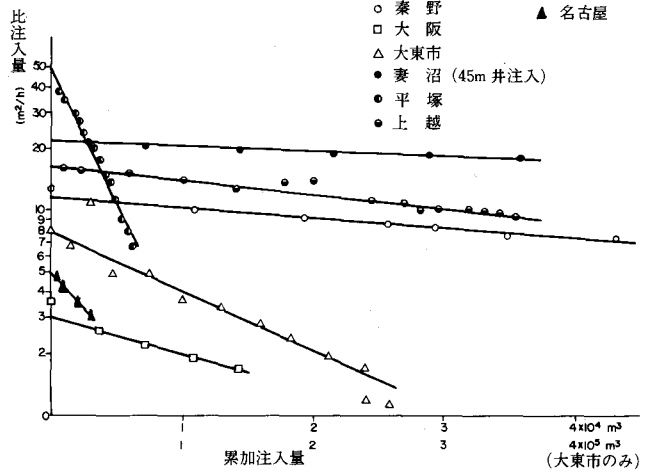


図-1 注入に伴う比注入量の減少

表-1 現地涵養実験における目づまり調査

地名	透水係数	注 入 水	注入井構造 ①深度 ②径 ③ストレーナ長	比注入量半減注入高 (注入量)	考えられる目づまりの原因
泰 野	$3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$	水道水	① 85m ② 300mm ③ 18m	$4.2 \times 10^3 \text{ m}$ ($38 \text{ m}^3/\text{h}$)	空気泡, 酸化鉄
大 阪	$1 \sim 5 \times 10^{-2}$	"	51m 300mm 75m	$2.4 \times 10^3 \text{ m}$ ($30 \text{ m}^3/\text{h}$)	水道SS, 酸化鉄
大東市	1×10^{-2} (推定)	"	182m 250mm 37.5m	$4.6 \times 10^3 \text{ m}$ ($63 \text{ m}^3/\text{h}$)	酸化鉄
妻 沼	3.1×10^{-2}	地下水 A 45m井 Fe+Mn 1.78ppm B 15m井 " 8.0 ppm	200m 400mm 39.5m	A $4.1 \times 10^3 \text{ m}$ B $0.04 \times 10^3 \text{ m}$ ($60 \text{ m}^3/\text{h}$)	酸化鉄, 酸化マンガン
平 塚	1.1×10^{-1}	浅井戸水	80m 300mm 25m	$0.1 \times 10^3 \text{ m}$ ($60 \text{ m}^3/\text{h}$)	?
佐 賀 白 石	$2.83 \sim 6.4 \times 10^{-3}$	深井戸水	165m 150~75mm 67.5m	- (定圧注入)	SS, 微生物, 酸化鉄
上 越	6.2×10^{-2}	表流水浄化 (凝集沈殿・急速濾過) 濁度 2~3 ppm	285m 300mm 47m	$1.0 \times 10^3 \text{ m}$ ($53 \text{ m}^3/\text{h}$)	SS, 酸化鉄, 微生物
山 形	2.1×10^{-3}	表流水 (粗大のみ除去, 清澄) Fe 0.4ppm	84m 300mm 36m	$3.6 \times 10^3 \text{ m}$ ($42 \text{ m}^3/\text{h}$)	酸化鉄
名古屋	5.6×10^{-2}	工業用水 (浄水池の逆洗水の上澄水) 濁度 4 ppm	200m 350mm 2cm	$0.4 \times 10^3 \text{ m}$ ($21 \text{ m}^3/\text{h}$)	SS, 酸化鉄

したものである。時間の経過に伴って、ストレーナーの酸化によって生じた酸化鉄のため、浸透量の減少が速いことが明らかである。砂層表面により酸化鉄の抑留が認められた。

目づまりは注入井のごく近傍に目づまり物が集中的に抑留されることによって発生するもので、注入水中のわずかな懸濁物によっても、長時間注入されることによって、注入井近傍に集中し、目づまりを発生させる。注入水の有する一般的な性質から、注入に伴う比注入量の減少はほぼ不可避免であると考えられる。比注入量の減少程度は注入水質によって

異なり、水道水のように上質の注入水では比注入量半減注入高は $4.0 \times 10^3 \text{ m}$ 以上に達する。河川水を浄化して注入水として用いた上越の実験例は、今後河川水を注入する場合に一つの目安を与える。平均濁度 2~3 ppm で比注入量半減注入高は $1.0 \times 10^3 \text{ m}$ である。注入量としては注入井の径を大きくしたりして、十分期待できるが、目づまりに

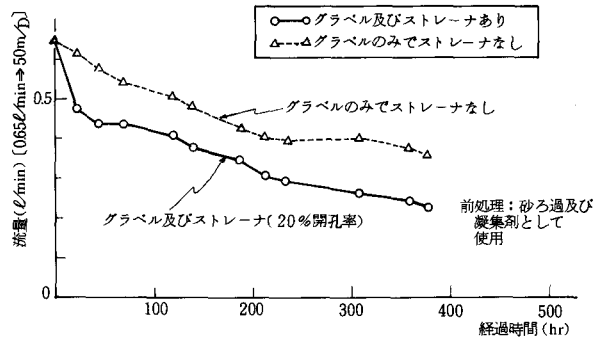


図-2 ストレーナーの酸化による目づまり

よって減少する比注入量の回復のための再揚水の効果を明らかにすることが不可欠である。

3. 現地実験における再揚水による比注入量の回復

図-3は妻沼における再揚水による逆洗効果を示す。この図から次のことが明らかである。①再揚水総量が多ければ多いほど比注入量回復がよい。②注入量と同程度の再揚水量ではあまり効果があがらない。さらに再揚水量を大きくした方が総量を多くするより効果が大きい。③揚水量を多くし、断続揚水を行なえば、逆洗効果はさらに大きい。

平塚においては注入量と再揚水量が同じであったためか、注入総量と同程度揚水しても、初期の比注入量に回復していない。上越では注入量の2.5倍で2時間の再揚水で比注入量は回復し、再揚水は年に1～2回である。大東市の実験例も、最初の再揚水から3～4日休止後の第二回目の再揚水初期においても高濃度の酸化鉄が検出されており、断続的な揚水が効果的であることが示されている。さらに揚水と注入を交互に行なうことによって一そう逆洗効果が高まることが妻沼の実験で示されている。

目づまりを発生させた抑留物の物理的性質の差異によって、逆洗効果も異なるので、上記のことが一般的に言えることは断言できない。しかし、上水道で行なわれる激しい逆洗ではないにもかかわらず比注入量が元のそれに回復することは、抑留物はストレーナの近傍のみに、フロック状に蓄積されうることが推測される。SS等がこのような状態で抑留される条件を室内実験で明らかにすることが不可欠である。

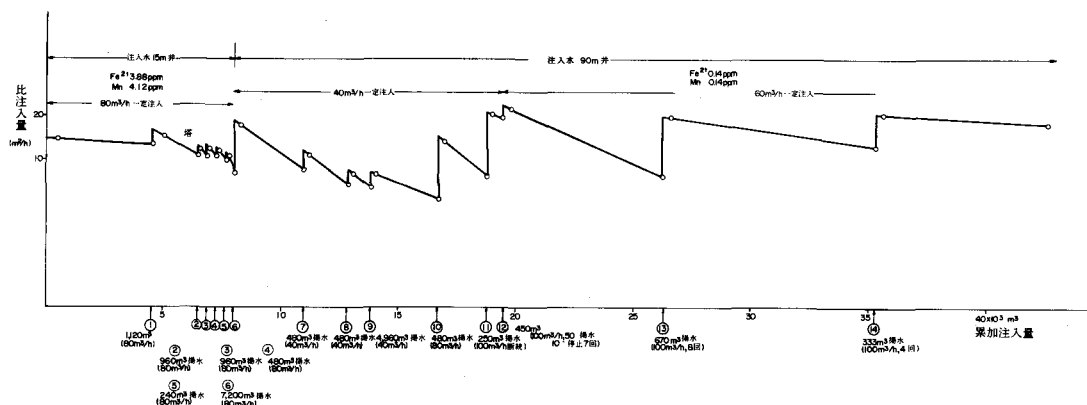


図-3 再揚水による比注入の回復(妻沼)

4. 目づまりの発生と再揚水による比注入量の回復に関する室内実験

図-4に本実験に用いた実験装置を示す。実験水は隅田川の河川水を一旦沈殿池に滞留させ、その後、生物酸化装置による有機物の除去、そして、凝集剤を使用した急速砂ろ過あるいはそのまま急速砂ろ過したものである。実験水の水質を表-2に示す。帯水層材として使用した実験砂は0.24mmの有効径を有するもので、図-4に示される実験装置につめた状態での透水係数は 1.3×10^{-1} cm/secである。またグラベル材として用いたのは平均径約5mmの礫である。

実験水は富栄養化した隅田川水を処理したものであり、凝集剤を用いないで急速ろ過した実験水は、わずかながら緑がかったいて、懸濁物の主体が、らんそう類の有機物であり、らんそう類の直接の抑留による目づまりから、それらの微生物の作用の影響が次第に現われてくるものと考えられる。河川水を注入水として使用する場合、当然懸濁物による目づまりから、微生物の関与した目づまりへ進行するものと考えられるから、再揚水による回復を図る場合、微生物の関与している状態で再揚水を行なうのが一般的であり、本実験のケースもこの意味では一般的なものと考えてよいであろう。

図-5は、生物酸化・急速砂ろ過水(凝集剤無し)を使用した場合の比注入量の時間変化を示す。再揚水による比注入量の回復も合わせて示してある。再揚水の条件は表-3に示す。第一番目の再揚水後、グラベル近くの砂が、グラベル、ストレーナーを通して、ストレーナー内に、わずかな量ではあるが流入したことをここにこわっておく。

(1) 再揚水によるフロックの流出状況と
比注入量の回復

現地実験での再揚水量は注入量と同程度か大きくて2～3倍である。それでも、再揚水量は注入井のストレーナー単位面積当たり50～150 m/日で、帯水層の間隙率を考慮したとしてもその速度はわずかで、浄水場のろ過池のような強烈的な逆洗とは、当然おもむきが異なる。ゆえに、注入井での再揚水による逆洗機構を考える上で、グラベルあるいは近傍の帯水層でのフロックの形成過程と、再揚水に伴う流出状況を明らかにすることは非常に重要である。

本実験においては比注入量の減少につれて、グラベル内のフロックの形成が明確になる。同条件による立型コラムでの浸透実験では浸透時間が経過しても、ほとんどフロックは見られず明らかな相違を見せている。このことは、同様な再揚水による比注入量の回復にも歴然とした差となって現われている。このようなフロックの形成と再揚水によるフロックの流出状況は次のように推定される。

注入井からの浸透は横方向の浸透流となるため、流速の減少とともに重力によって懸濁物質がグラベルおよび砂粒子の上面に沈殿し、付着しやすくなる。懸濁物質の付着に伴って微生物が発生し、微生物の粘

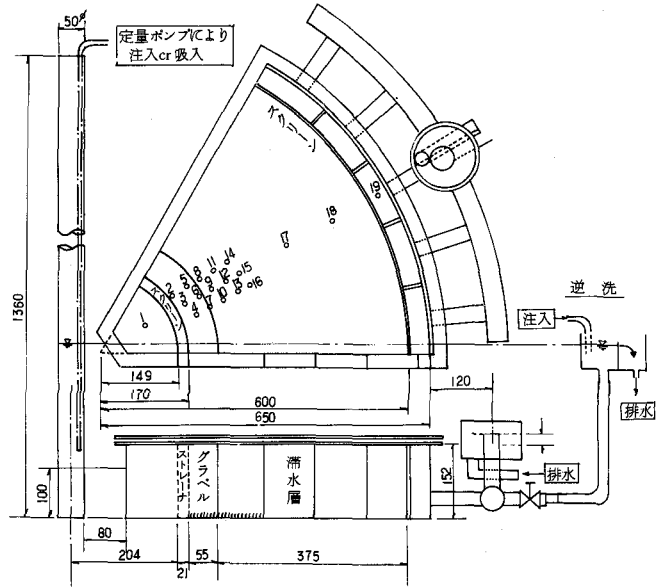


図 - 4 扇型地下水涵養実験装置

表 - 2 注入水の水质

	pH	COD	SS	水温	DO
生物酸化・砂ろ過	7.8	8 mg/ℓ	1.3 mg/ℓ	25℃	7.5 mg/ℓ
生物酸化・凝集砂ろ過	7.7	5.6 mg/ℓ	0.3 mg/ℓ	20℃	8.3 mg/ℓ

表 - 3 再揚水の条件

- ① 50 m/日 (ストレーナ単位面積当たり) 1 hr
- ② 100 m/日 (") 30 min
- ③ 150 m/日 (") 20 min
- ④ " " "
- ⑤ " " "
- ⑥ 150 m/日, 20min (C₂10 ppm 15min注入 1hr放置)

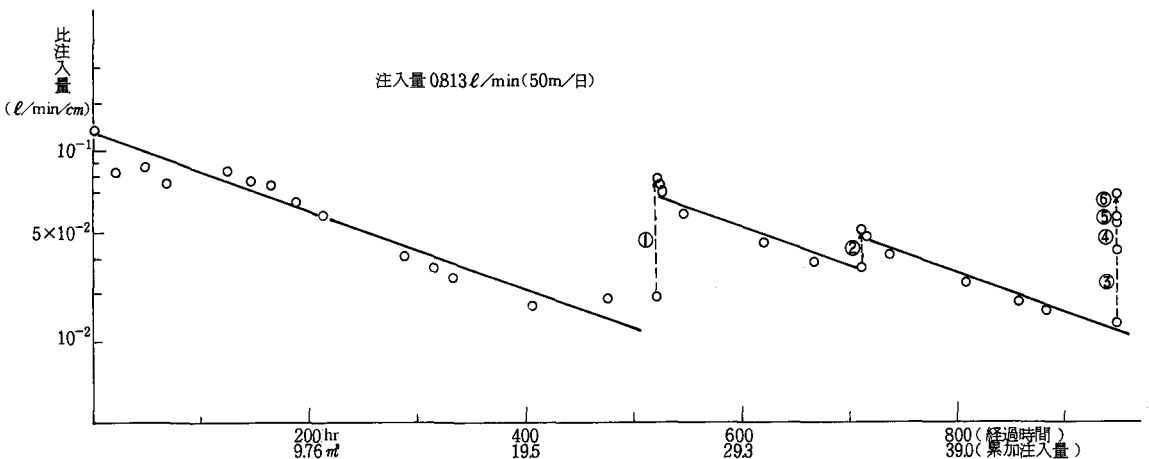


図 - 5 比注入量の減少と回復 (室内実験, 水质: 生物酸化・砂ろ過)

着性の分泌物によって、さらに懸濁物質が付着しやすくなり、フロックとしてのかたまりが形成しやすい状態となる。また重力によって他のフロックが重なることもなく、比重が小さく形の大きいフロックになると考えられる。それゆえ、再揚水量が小さい場合（50 m/日）には1 mm程度の小さなフロックしか流出しないが、再揚水量が大きくなると（100 m/日）大きさ2～5 mm程度のフロックまで流出しうようになる。再揚水に伴ない、ミジンコ等の微小動物を見られ、明らかに有機物による微生物の発生が目づまりに関与していることが知れる。

再揚水による比注入量の回復については、①の場合は他と比較することはできないが、②と③を比較すると、再揚水総量は同じであるが、再揚水量の大きい③の方が回復の効果が大きく、再揚水量が大きい方が効率的であることが示されている。再揚水量が大きいとより大きいフロックまで流出しうからであろう。目づまりの原因は異なるが、妻沼での現地実験と同様な結果となっている。④と⑤は同様な再揚水をくり返し、再揚水後の比注入量を示したものである。回数を重ねるにつれて回復効果は明らかに減少している。再揚水総量を一定とし、いろいろなケースの再揚水の効果について比較すべきであるが、妻沼の現地実験で示されているように、断続揚水あるいは揚水と注入をくり返して行なった方が比注入量の回復効果が高いことが推定しうる。⑥においては、再揚水前に塩素を注入し、目づまり原因である微生物を弱め再揚水時に微生物によるフロックを取り除きやすくすることを意図し、再揚水を行いその結果を示したものである。⑥での回復がほとんど見られなかったのと比較すると、明らかな回復が得られており、微生物が目づまりの原因となっていたこと、再揚水時にグラベル、帯水層内を塩素等で滅菌した方が、微生物のフロックが流出しやすくなり、従って回復効果が高いことが明らかである。

（2）目づまりの発生と再揚水による回復機構に関する考察

以上の実験結果をまとめると、図－6を参考にして、次のようなことが考えられる。

① 注入初期

多くの注入水中の懸濁物は帯水層内へ流入し、ほとんどが帯水層で抑留される。時間の経過とともに、グラベルおよびごく近傍の帯水層に、微生物の作用によって懸濁物が抑留される率が高くなり、徐々にフロックが形成される下地ができあがっていく。

② フロック形成期

グラベルおよびごく近傍の帯水層でフロックが形成しはじめると、注入水中の懸濁物質、栄養分はグラベル、近傍の帯水層で抑留されたり、消費される量が多くなり、微生物の発生がさかんになり、フロックの形成が明確になる。それに伴って、帯水層内へ浸入する懸濁物質、栄養分は少なくなる。

③ グラベル近傍を除く帯水層内での微生物量安定期

グラベルおよび近傍の帯水層内でのフロック形成がさらに進むと、懸濁物の抑留、有機物の消費はグラベルと近傍の帯水層でなされ、それ以降の帯水層へ流入する有機物量は少なくなり、そこで生息する微生物の必要量に近づき、微生物の生息量が一定となる。注入が長期にわたると、グラベルおよび近傍の帯水層内でほとんどの溶存酸素が消費され、それ以降では嫌気的な分解が行なわれるようになることも考えられる。

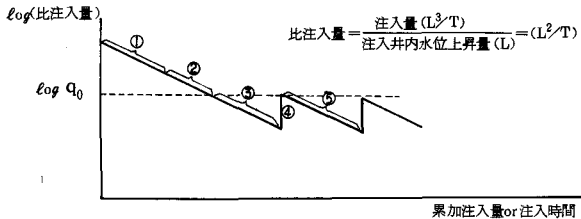
④ 再 揚 水

再揚水を行なえば、グラベルと近傍の帯水層内のフロックが除去されるが、除去される量は再揚水量、揚水方法で異なる。フロックの除去で比注入量の回復がなされるが、多くのフロックは残されている。

⑤ 再 注 入

注入を再開すると、懸濁物質の抑留、有機物の消費はグラベルと近傍の帯水層内でほとんど行なわれる。帯水層内へ浸入する量は、注入開始後、いくらか増加することも考えられるが、すぐ一定に達し、微生物生息量の変化ほとんど影響なく、大きな時間スケールではその生息量は一定と考えることができる。

帯水層等の自然条件が異なるため、まったく同



図－6 注入・揚水に伴う比注入量の一般的変化

じ状況を呈するとはいいがたいかもしれないが、イスラエルの人工涵養においても、再揚水後、注入当初の比注入量に回復することはないものの、注入－揚水の経年的なパターンにおいて、比注入量が徐々に減少することはないことが報告されている。

以上のような考え方に基つけば、実際重要な物理量となるのは回復後の比注入量 q_0 と比注入量の減少率である。 q_0 は帯水層の透水係数、グラベルとその近傍の帯水層内の残存フロック量で決まると考えられるが、注入当初の比注入量との関係を明らかにすることは困難である。注入帯水層が異なれば q_0 は透水係数に比例すると考えられる。比

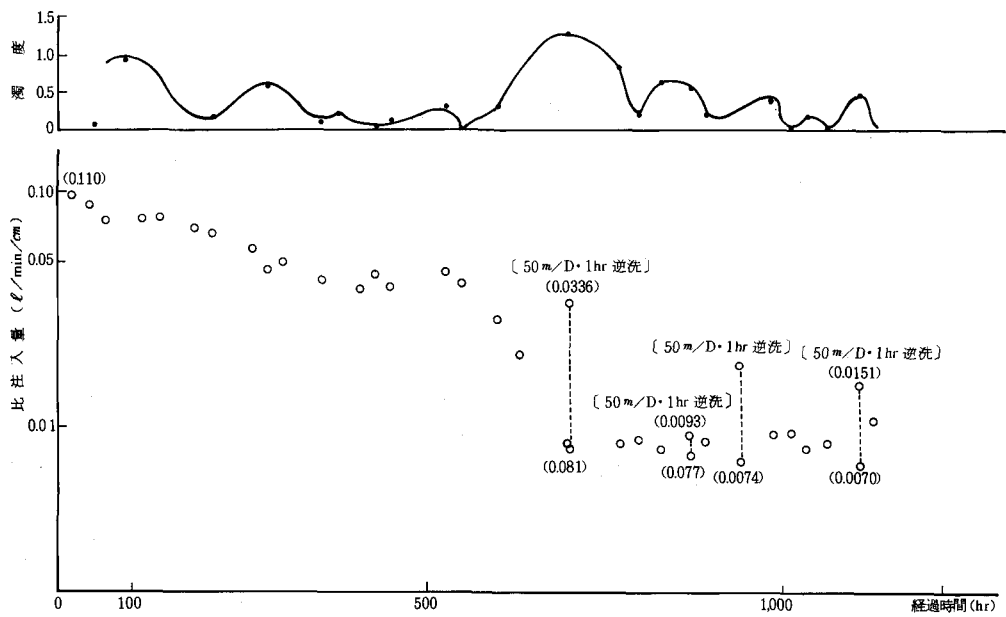


図 - 7 比注入量の減少と回復（室内実験、水質・生物酸化・凝集砂ろ過）

注入量の減少率はグラベルおよびその近傍の帯水層でのフロックの増加に関係し、注入水質が最も大きな要因と考えられる。

図 - 7 は注入水に凝集剤による急速ろ過を使用した場合での比注入量の変化を示す。注入水の濁度によって比注入量の減少傾向がかなり異なるので濁度の変化も合わせて示してある。また再揚水はすべて単位ストレーナー面積当り 50 m/日、1 時間で行なっている。図 - 8 は、グラベルから 0 ~ 3 cm, 3 ~ 10 cm, 10 ~ 40 cm の砂層での注入に伴う透水係数の変化を示したものである。グラベルに接した帯水層の部分は負荷量の増加に伴って透水係数がほぼ指数関数的に減少し、再揚水で回復した後さらに同様な傾向で減少している。しかし、グラベルから 3 cm 以上離れた部分での透水係数はある量まで減少するとほぼ一定となり、注入・揚水による比注入量の変化はわずかグラベルから 3 cm までの帯水層の透水係数の変化によるものであり、それ以降の帯水層内での抑留物量はほぼ変化しないと考えてよい。

目づまりの原因の一つに帯水層の砂粒子の再配列が挙げられるが、帯水層の微細粒子の注入・揚水に伴う何らかの移動によるものと考えられる。この移動の原因となるのは水頭の変化

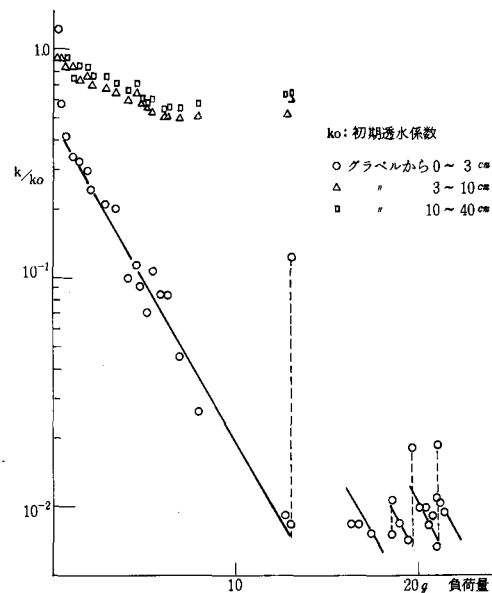


図 - 8 透水係数の変化

による帯水層の伸縮（どの程度か想像しがたいが）と目づまりの進行に伴う透水力の増加であろう。透水力は帯水層の砂粒子に働く有効物体力となり単位体積当り $r_w \partial h / \partial r$ で表わされる。ここに r_w : 水の単位体積当りの重量, h : 水頭, r : 直径方向座標である。本実験の場合, グラベルと 3 cm 離れた帯水層の所での水頭差は 100 cm にまで達し, 水からの有効物体力は最高で約 50 g/cm² 程まで達すると考えられる。注入と揚水のくり返しによって, この力の働く方向が変わるため, 帯水層材が移動し, 深刻な障害に発展しかけない。注入井においては, 目づまりが発生するゆえ, 揚水井以上にグラベルの粒度分布および厚さ, 井戸仕上げによく注意を払わなければならない。

以上については, 帯水層は均一で理想的なものであることを前提にして考察してきたが, 現実の帯水層は不均一で, 多かけ少なかれ水みち的な流動形態をとることが一般的と考えられる。目づまりは注入井のごく近傍に集中的に発生するものであることは先に述べたが, その集中度は帯水層の不均一性で異なる。水みち的な不均一な帯水層では, 流れの遅い所から目づまりが進行し, 流速の大きい水みちでは懸濁物は付着しにくく, 微生物の発生に伴うフロックも形成されにくくなり, 目づまりの発生は遅れ, 比注入量の減少からみると, 全体としての目づまりの進行は遅くなると考えられるからである。再揚水による比注入量の回復も当然異なることが予測される。水みちの流速の大きい所では, 目づまりの原因となっている懸濁物や微生物のフロックが洗い出されやすくなるが, 一方流速の遅い所では, フロックを洗い出しうる流速まで達しえず, そこでの回復がなされないことになる。このように再揚水によって回復した比注入量 q_0 は帯水層の不均一性によって左右されることが考えられる。極端な場合には, 岩盤帯水層のようにほとんど目づまりが発生しないこともありえる。

4. 結 語

本研究によって得られた知見をまとめると次のようになる。

- ① 目づまりは注入井のごく近傍に集中して発生するもので, 長時間にわたって徐々に進行し, 表流水を注入する場合には, 不可避な現象であると考えられる。
- ② 注入に伴って比注入量はほぼ指数関数的に減少する。いわゆるこの目づまり進捗状況は比注入量半減注入高によって表わすことができる。これは注入水質で異なり, 水道水等の上質な注入水では 4.0×10^3 m まで達し, 濁度 2~3 ppm の河川水を処理したものでは 1.0×10^3 m 程度であるが, 比注入量の減少は, 注入井径を大きくすることなどの注入井の構造によってカバーすることができる。
- ③ 目づまりはほぼ避けることができないから, 再揚水による比注入量の回復機構を明らかにしなければならない。注入井からの浸透は横方向であり, 重力, 浸入に伴う速度の減少によって, 比重の小さく形の大きく, 再揚水時除去されやすいフロックが注入井の近傍に形成されうる。
- ④ 懸濁物質の扣留, 微生物の関与によるフロックの形成, 再揚水によるフロックの除去, また注入による養分の補給といった全体的に釣りあった微生物の生息状況の中に, 注入・揚水のくり返しのパターンによって長期間にわたる注入井による地下水涵養が可能となりうると考えられる。
- ⑤ 再揚水は量を多くしたり, 断続的にすばやくくり返したり, あるいは注入・揚水を交互に行なえば効率的な回復が見られる。微生物が関与している場合には, 塩素を使用して再揚水すれば, さらに効果が高い。
- ⑥ 目づまりが発生することによって, 注入井近傍の透水力が増加し, 再揚水・注入のくり返しに伴ない帯水層材が移動しやすい状態となるから, 注入井におけるグラベル, 仕上はよりいっそうの注意を要する。

参 考 文 献

- 1) 石崎・北川; 注入井における涵養に伴う目づまりについて, 第 33 回年講
- 2) 土木研究所; 涵養井の目づまりについて, 土研資料 第 1402 号
- 3) 名古屋市公害対策局水質保全課; 地下水人工かん養報告書, 地下水と井戸とポンプ, 1978. 10
- 4) M. REBHUN, J. SCHWARZ; Clogging and Contamination Processes of Recharge Wells, W.R.R. Vol. 4, No. 6, 1968.12