

石川県七尾市域における地下水人工かん養井実験について

誌名	東海大学紀要. 海洋学部
ISSN	13487620
著者名	柴崎, 達雄
発行元	東海大学海洋学部
巻/号	16号
掲載ページ	p. 69-84
発行年月	1983年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



石川県七尾市域における地下水人工 かん養井実験について*

柴 崎 達 雄

Artificial Recharge Well Experiments in Nanao City, Ishikawa Prefecture

Tatsuo SHIBASAKI

Abstract

Artificial recharge well experiments in Nanao City were undertaken in 1977 as one of the research projects on preventing land subsidence. A test recharge well (diameter 200 mm, depth 96 m) and a observation well (diameter 100 mm, depth 100 m, distance 10.5 m) were drilled. The main aquifer consists of unconsolidated sand and gravel layer overlain by a soft clayed bed. The injected water was the treated water of water supply from pumping groundwater.

The recharge tests were all done under natural flowing conditions. Testing procedures were combinations of step drawdown test (SDT), constant discharge test (CDT), step recharge test (SRT) and constant recharge test (CRT). The total amount of injected water was 11,657.5 m³ during all series of recharge tests.

Specific recharge capacity (*Scr*) decreased due to clogging of the test well and its surrounding part of aquifer. By pumping operation, *Scr* was slightly recovered to the previous conditions, however the restoration efficiency vanished in a short time after commencement of recharging. The injected water through a well was confined to the limited area near the test well.

Considering the data above mentioned, a tentative operation plan of a small scale supply and recharge well system for cooling purposes was proposed, which illustrates by Figs. 12 and 13.

1. はじめに

地下水利用にともなう地盤沈下などの障害の発生の原因が、地下水収支の赤字に起因するならば、その解決策のひとつとして、人工的に水収支の赤字を解消させる方法も考えられる。この方法が「地下水人工かん養」あるいは「人工地下水強化策」とよばれるものである。

* 東海大学海洋学部業績A第233号。受理1982年9月22日

その具体的方策として、いろいろな手段が考えられ、また実施されてきている。それらは大別して、地表からかん養をおこす「間接法」と、直接、水を地下水層中に注入する「直接法」とに分けられる。今回、ここに報告するものは、注入井による直接法である。この方法は「注入井法」ともよばれている。

最近にいたって、地下水保全対策のひとつとして、この注入井法の効用が説かれているが、問題を技術的な諸点にかぎってみても、まだ不明な点が多数残されている。たとえば、注入効率をいかに持続させるか、あるいは注入にともなう地下水層中の水の挙動など、その基本的な解明は、けっして十分とはいえない。とくに、注入井法の経済性に決定的な意味をもつ注入効率の持続性を予測するためにも、注入井に関する基本的な検討は、ぜひ必要である。

筆者は、1968年代の後半から以上の視点にたって、注入井法の基礎的実験を続行し、その結果を公表してきた（佐賀県農林部、1969；柴崎ほか、1974）。今回の報文は、石川県七尾地域の地下水保全対策調査の一環として、昭和51年度から52年度にかけて実施した地下水かん養試験のデータを再解析したものである。

七尾地域における地下水かん養試験は、石川県環境部、七尾市および石川県地下水保全対策協議会によってすすめられたもので、筆者は協議会専門委員として、この試験の計画立案、実施に参加した。試験成果の一部は、すでに石川県地下水保全対策協議会報告書（1977、1978、1979）として公表されている。

今回の再解析は、これらの実験結果を中心に、いままでの各地で実施した注入井実験の経験を加えて、主に注入井法の技術問題を中心に検討をすすめたものである。実験全般にあたって種々御便宜をいただいた石川県環境部、七尾市、石川県地下水対策協議会の関係者諸氏、とくに粕野義夫・中川耕二両専門委員、ならびに現地での実験作業を担当された北国鑿泉株式会社の各位に厚くお礼を申しあげる。

2. 注入試験井の諸元

今回の実験に使用した注入試験井は、注入試験を目的に、七尾市本府中町の七尾市民会館の前庭に設置されたものである。井戸の仕様は、口径 200 mm、深度 96 m で、ストレーナは深度 56~78 m 間と 83.5~89 m 間の 2 層に設置し、総延長は 27.5 m である。ストレーナ構造は、NST スクリーンを採用した。

主注入層は、深度 56~78 m 間は粗粒砂~細礫、83.5~89 m 間はシルト混りの細粒砂で、いずれも洪積層にぞくするものである。注入井設置地点の地質構成は、地表から 25 m までが沖積層に対比され、それ以深から井底までは洪積層に対比される。試験中、数回にわたって実施された揚水試験の結果では、透水量係数 (T) は $250\sim 300\text{ m}^2/\text{day}$ であり、七尾地下水盆中の同一層準の地下水層と比較して、透水性は高い部類にぞくしている。

注入井の構造は Fig. 1 に示したとおりで、口径 200 mm の井管内に、口径 50 mm の注入管と揚水試験用の 50 mm 水中ポンプをつけた口径 50 mm の逆流管が設置されている。また注入井内の水位測定用として、口径 50 mm の測定管もあわせて設置した。さらに、井管外側には、口径 25 mm の側管を付設し、井管外部の充てん砂利中の水位を測定できるようにし、実際の井戸損失を調査するとともに、注入水中の空気ぬきの役目をはたすようにした。

注入井からの距離 10.5 m の地点に、口径 100 mm、深度 100 m の水位観測井を 1 本設置した。

ストレーナの位置は注入井のそれとおなじで、構造はスリットを採用した。

水位の測定は、注入井内水位を自記水位計（中浅水研62型AN-37）とテスター改良水位計による手観測でおこない、側管については、テスター改良水位計による手観測をおこなった。観測井の水位は、自記水位計（フェロー工業 LTC 100 型水位計と横河電気 ER 記録計を併用）とテスター改良水位計を使用して測定した。

水量の測定は、揚水の場合には三角ノッチを、注入の場合には水道メータ用の量水器を使用した。この水道水は地下水を水源とし、上水道用水として処理済みのものである。

3. 試験の工程

実際の試験は、昭和52年1月から3月までの第Ⅰ期と、同年10月から12月までの第Ⅱ期に分けられる。第Ⅰ期の試験は、むしろ予備的試験の性格をもつもので、両試験の工程内容には、やや相違がある。

3.1 第Ⅰ期試験の工程

第Ⅰ期注入試験の内容はつぎの3試験からなりたっている。

- (1) 24時間段階注入試験：単位注入量を、47, 106, 143, 210, 263 m³/day の5段階にとり、各段階は24時間連続注入をおこない水位を測定した。
- (2) 2時間段階注入試験：単位注入量を 52, 94, 154, 186, 212 m³/day の5段階にとり、各段階は2時間連続注入をおこない水位を測定した。
- (3) 一定量注入試験：単位注入量を平均して 15 m³/day とし、7日間連続して注入を6回くりかえした。各注入試験間には1日の休止期間または逆洗期間をおいた。

以上の注入試験で、実際に注入された水量は 7,450 m³ である。

3.2 第Ⅱ期試験の工程

第Ⅱ期の試験を実施するにあたっては、まず、つぎの基本的な試験単位を設定し、それらを組合せることで、いろいろな目的に応じて試験がおこなえるようにした。

- (1) 段階揚水試験 (SDT)：井戸洗浄の役割をはたすとともに、揚水にもなる水位変動と井戸効率を知る。
- (2) 一定量揚水試験 (CDT)：井戸洗浄の役割をはたすとともに、一定量揚水にもなる水位変動と帯水層係数値を求める。
- (3) 段階注入試験 (SRT)：注入量を段階的に増加し、その過程での水位変動を知るとともに、注入時の井戸効率を求める。
- (4) 一定量注入試験 (CRT)：一定量注入にもなる水位変動を測定し、注入時の帯水層係数値

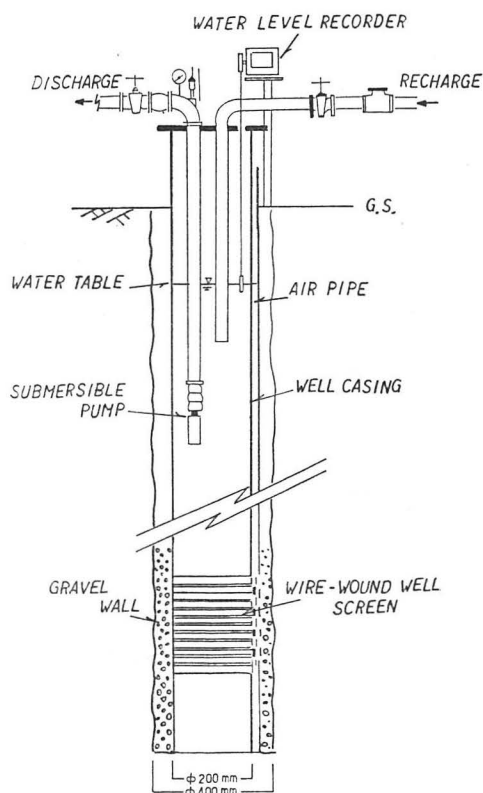


Fig. 1. Construction features of test well for artificial recharge.

を求めるとともに、目づまりの状況を知る。

これらの試験単位を目的に応じて組合せ、それをひとつのサイクルとしてとりあつた。これらの組合せをもつサイクルを5工程にわたってくりかえした。この全工程で注入された総水量は12,601.3 m³であり、洗浄などで揚水された水量が943.8 m³、実質としては11,657.5 m³が注入されたことになる。

4. 比注入量の変化

注入井の注入効率を表現する方法として、比注入量 (Scr) がある。比注入量は次式で示される。

$$Scr = Qr / sr \quad (1)$$

ここで、 Qr : 注入量, sr : Qr を注入するときの井戸水位の上昇量, で示される。つまり、井戸水位が1 m 上昇したときの注入量で、m³/day/m, m³/hr/m, m³/min/m などの単位で表わされる。

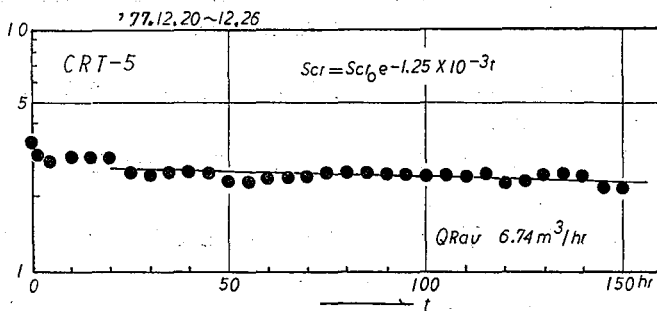
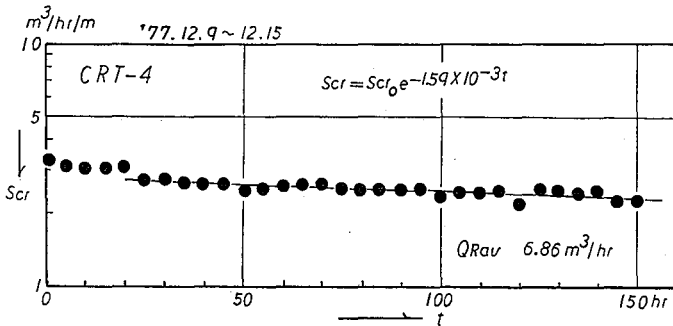


Fig. 2. Time variations of specific recharge capacity (Scr) during constant recharge tests CRT-4 (upper) and CRT-5 (lower).
 $QRav$: the average of recharge rate.

指標として比注入量を使用し、注入時間の経過とともに減少していく様子を、各サイクルの一定注入試験の資料から図化したものの一部を Fig. 2 に示した。

これらの図は、片対数グラフで直線として示されるように、指数曲線状で比注入量が時間とともに減少していることがわかる。つまり、比注入量 (Scr) と注入経過時間 (t) の関係は、つぎの式で示される。

$$Scr = Scr_0 e^{-bt} \quad (3)$$

ここで、 Scr_0 は注入初期の比注入量を示している。

る。

比注入量に対して、揚水する場合には、比湧出量 (Scd) がよく使用される。

$$Scd = Qd / sd \quad (2)$$

ここで、 Qd : 揚水量, sd : Qd を揚水するときの井戸水位低下量である。つまり、比湧出量と比注入量は符号が正負逆になるだけで、おなじ概念である。

この比注入量および比湧出量は、一般に、その井戸の注入(揚水)試験で求められる透水量係数(T)と近似した数値がえられることから (LOGAN, 1964; 水収支研究グループ, 1973), 井戸の注入あるいは揚水の度合を示すひとつの指標として使われることが多い。

一般に、注入効率は注入にしたがって、指数曲線状に減少していくことが知られている (柴崎ほか, 1974)。いま注入効率の指

この経時的变化は、注入量が一定であるかぎり、注入累計量を横軸にとっても、おなじ指数関係として示されることになる。

ここで問題となるのは、各サイクルの一定量注入試験から求められた比注入量経過時間、比注入量注入累計量の片対数グラフ直線の勾配が、サイクルの経過回数 (N) とともに減少していくことである。このことは、当然、(3)式の b (減てい係数) が減少していくことを示している。

いま、その減てい係数と注入サイクル回数との関係を Fig. 3 に表わしてみると、この関係もまた片対数グラフで直線関係、つまり指数関係で減少している。もちろん、この関係が将来このままの状態をつづくのかは、今回までの試験結果から断言するのはむずかしい。

これらの試験結果から考えられることは、注入効率の減少は、他の地域での傾向とくらべて減少率が小さく、注入井の寿命がながびく傾向にあるといえることができる。

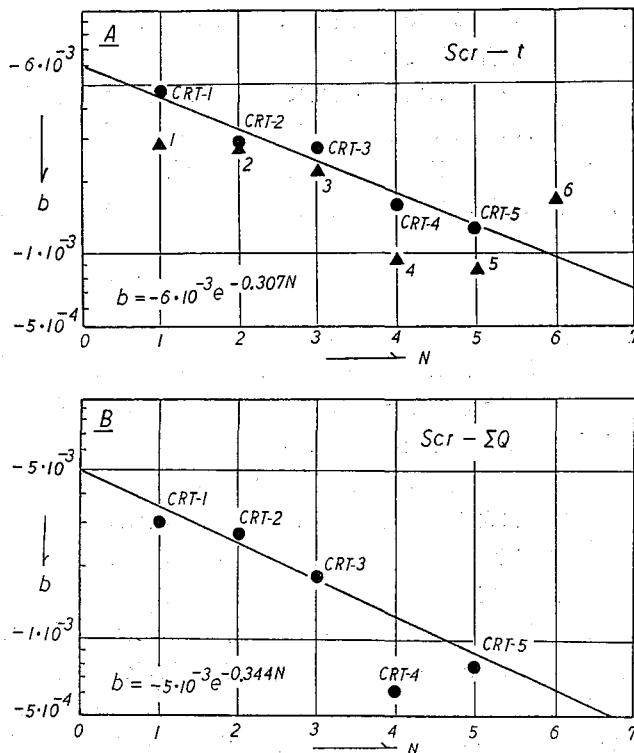


Fig. 3. Decreases in depletion coefficients (b) during the first and second operating seasons.
 A: specific recharge capacity (Scr) versus time (t).
 B: Scr versus cumulative volume of recharge (ΣQ).
 N : the number of recharge tests.

5. 揚水による洗浄効果

各サイクルの工程のなかに、揚水工程において、目づまり除去を目的とした洗浄効果を期待している。この洗浄効果は、比注入量の回復率で評価できる。とりあえず、この洗浄効率を R で示すと、

$$R = Scr_{f(n)} / Scr_{b(n-1)} \tag{4}$$

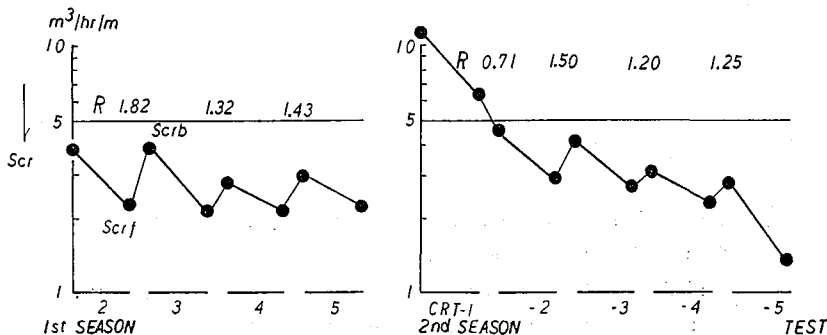


Fig. 4. Changes in restoration ratios (R) of Scr by pumping operations.

で定義される。ここで $Scrf_{(n)}$ は n サイクル目の初期の比注入量, $Scrb_{(n-1)}$ は $(n-1)$ 期の終期の比注入量を意味している。

この関係を使用して、いままでの試験でみられた洗浄効果を算出してみたものが Fig. 4 である。平均して1.32ほどの回復効果が認められる。ただし、この回復効果は永続するものではなく、時間にして注入開始後20~30時間、注入累計量として注入開始後 100~200 m^3 で効果が消滅してしまう。これは、平塚市でおこなった注入試験結果とも共通している(柴崎ほか, 1974)。

6. 注入井の寿命の推定

注入井の経済性を決定する有力な要因は、注入効率の持続性にある。前章で検討した比注入量の減少傾向曲線から求められた減退係数を使用して、その推定を試みてみよう。

まず推定の基礎となる条件として、前記の事項のほか、つぎのような諸点を加えてみた。

- (1) 初期注入量を 10 $m^3/hr/m$ とする。
- (2) 揚水による回復効果をあまり重要視しない。
- (3) 注入工程は、1週間を1サイクルとして、150時間を注入にあて、18時間を休止期間とする。

以上の条件で、注入効率の変化を試算してみたものが Fig. 5 である。この図のなかで、注入水位 (sr) としたものは、注入量を 10 m^3/hr と仮定したものであり、注入量および注入累計量は、注入水位 5 m にたまった場合を想定して試算したものである。

これらの試算結果をみると、比注入量は、16週目以降になるとほぼ安定してしまう。それにともない注入水位を一定にするかぎり、揚水量も16週目以降は初期値の11%程度で安定する。また注入量を一定とした場合には、やはり16週目以降は初期値の12.5倍の水位で安定することになる。

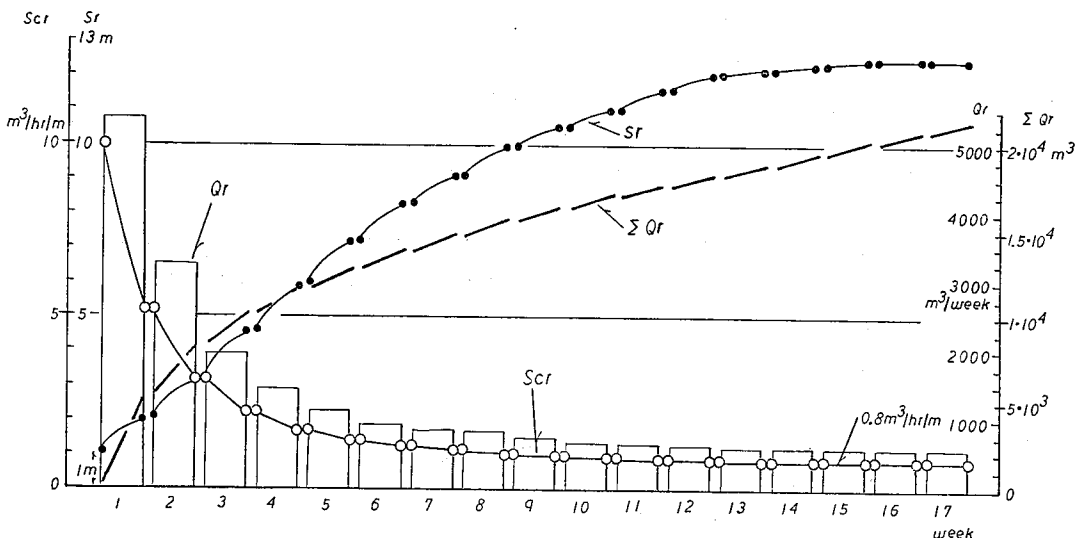


Fig. 5. Estimated time variations of recharge efficiency on test well.

Scr : specific recharge capacity.

sr : build up of water table under 10 m^3/hr constant recharge rate.

Qr : recharge rate under 5 m build up of water table.

ΣQr : cumulative volume of recharge under 5 m build up of water table.

これだけからみると、16週目以降の安定注入量（または安定注入水位）を保持すれば、ほぼ半永久的に注入が持続されることになるが、この点は注入減退係数 (b) のとり方しだいで、寿命の長短がきまる。それ以上に重要なことは、井戸構造などの技術的あるいは注入量の経済的制約条件などによっても、注入井の寿命が決定されることである。この点については後述する。

7. 揚水注入にともなう帯水層係数の変化

すでに、いままでの注入試験の結果から、揚水と注入では非可逆的な過程をとることが知られている（水収支研究グループ、1973）。今回の一連の試験結果からみても、比湧出量と比注入量のあいだに、大きな相違がみられる。そこで、その原因を究明するために、両過程での帯水層係数を求めてみた。

今回の注入井を使用した一定量揚水試験の観測記録をみると、揚水開始後 40～50 min の間で、水位が安定してくるのが認められる。これは、加圧層を通して地下水が補給されてくるためと考えられ、漏水性被圧帯水層系の特徴である。

漏水性被圧帯水層系の水理定数としては、つぎのものが知られている。

(1) 透水量係数 (T)：この係数は、主帯水層の透水係数 (k) と主帯水層の層厚 (S_m) の積である。この数値が大きいほど、帯水層にそう水平方向の地下水補給量が大きい。つまり、帯水層全体の透水性を示す指標として使用される。この係数の次元は、 m^2/day , m^2/hr , m^2/min で示される。

(2) 貯留係数 (S)：この係数は、揚水などによって排出された地下水量と、その排水によって生じた地下水頭の低下体積の量比である。被圧帯水層の場合には、帯水層の弾性変化とほぼ一致している。この数値が小さいほど、水圧変化に対する変形度が小さい。

(3) 漏水係数 (k'/b')：この係数の中身は、加圧層の透水係数 (k') を加圧層の層厚 (b') で割ったものである。この係数に不圧水位と被圧水頭の差 ($H-h$) を乗ずれば、漏水量が求まる。次元は時間の逆数 (day^{-1} , hr^{-1} , min^{-1}) で示される。

(4) 漏水関数 (B)：この係数の内容はつぎに示される (HANTUSH, 1956)。

$$B = \sqrt{T/(k'/b')}$$

この式から、この関数値が小さいほど、井戸に流れこむ水量中に漏水の占める割合が大きい。次元は長さ (m) の単位で表わされる。

7.1 漏水性帯水層係数の求め方

これらの諸係数を揚水（注入）試験から求める方法はいろいろ知られている。ここでは試験方法および記録精度から考えて、つぎの方法を採用した。

A. 定常水位曲線による解析法（複井法）

この方法は、漏水性被圧帯水層系から揚水する場合、ある時間継続して一定の揚水をつづけると、安定水位が求まることに注目し、複数の安定水位記録から帯水層係数を求めるものである (HANTUSH, 1956)。この方法は、複数の観測井の水位記録が必要となる制約があるものの、比較的広域の帯水層係数が代表値として求まる利点があげられる。ただし、この方法からは貯留係数を求めることはできない。

具体的な係数値の求め方は、まず両対数グラフ紙の縦軸に水位 (s)、横軸に井戸中心からの距離 (r) を定め、安定水位をプロットする。その曲線を $K_0(r/B)$ 標準曲線と重ね合せ、 $K_0(r/B)=1$, $r/B=1$ の点をマッチ・ポイントとして、その s と r とをよみとる簡便な方法を採用してみた。あ

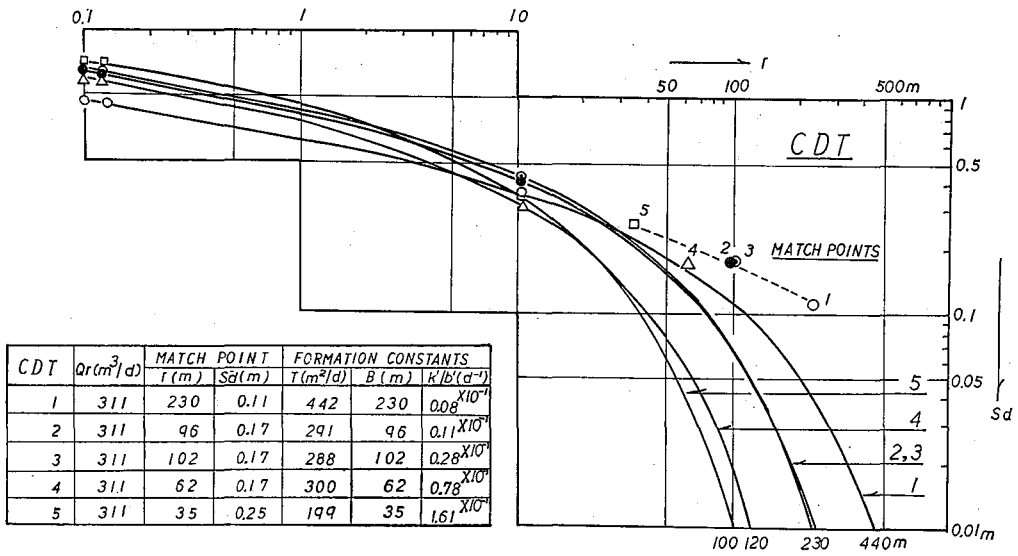


Fig. 6. Calculated curves of cone of depression during constant discharge tests based on HANTUSH theory.

sd : drawdown of water head.

r : radial distance from the center of test well.

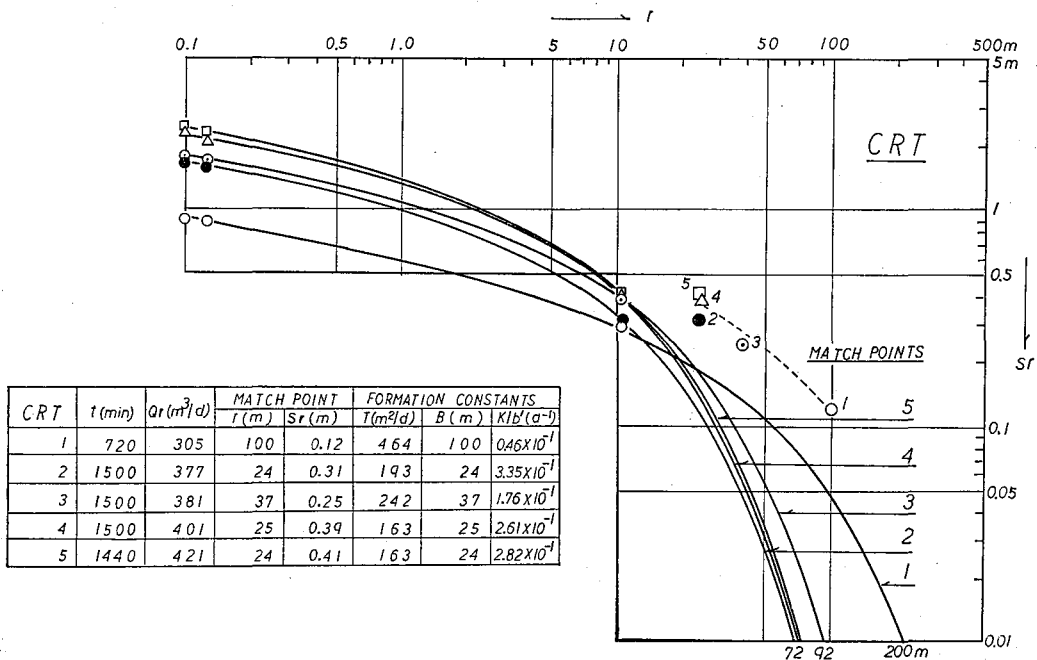


Fig. 7. Calculated curves of water mound by artificial recharge during constant recharge tests based on HANTUSH theory.

sr : build up of water head.

r : radial distance from the center of test well.

とは、つぎの式から係数値を計算することができる。

$$\left. \begin{aligned} T &= 0.159Q/s \\ B &= r \\ k'/b' &= T/B^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 Q は揚水（注入）量を示す、具体的な手順は Figs. 6, 7 を参照いただきたい。

B. 非定常水位曲線による解析法（単井法）

この方法は、よく知られている THEIS (1935) の方法とおなじように、一定量揚水（注入）のときの水位—時間曲線を使用して解析をすすめる方法である。具体的な解析方法は、Fig. 8 を参照いただきたい。

単井法によって求められた係数値は、とくに揚水（注入）井自体の水位記録を使用して解析する場合、現実とかけはなれた数値が求まることがある。この原因は、井戸効率や局所的な地質条件にあり、係数値を採用するにあたって、その点の配慮が必要となる。

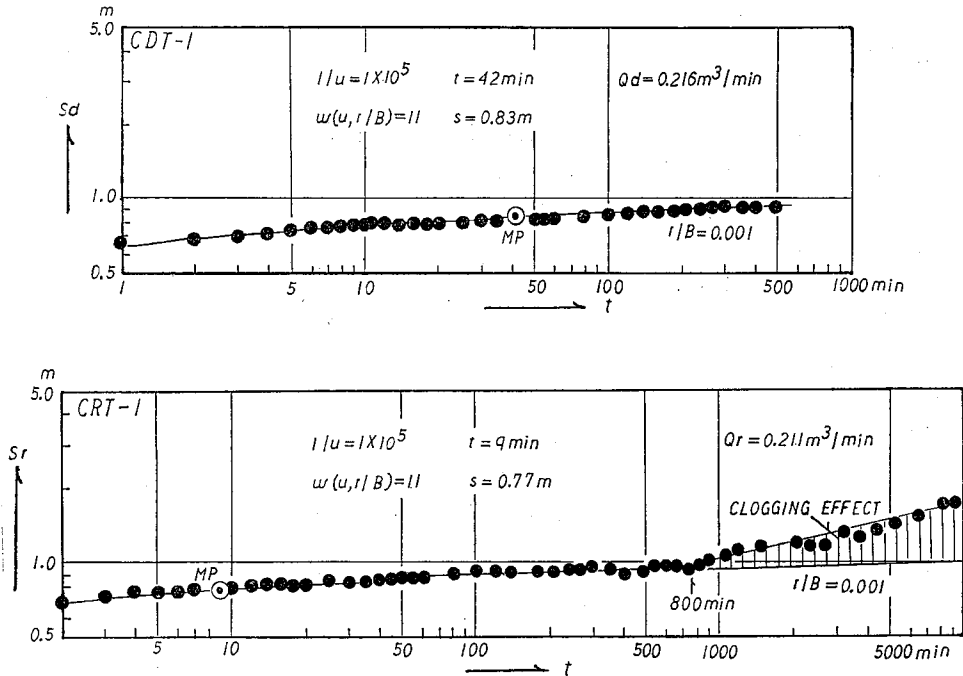


Fig. 8. Time variations of water tables during CDT-1 (upper) and CRT-1 (lower) stages. Data are analyzed by leaky theory.

sd : drawdown of water table.

sr : build up of water table.

7.2 水位—時間曲線にみられる目づまりの発生

単井の水位記録から作成した揚水過程と注入過程の水位—時間曲線 (Fig. 8) を比較してみると、両者のあいだには大きく異なる点がある。それは、注入過程のある時期にいたると、水位の上昇が急激となる傾向がある。それ以前の水位変動は、揚水過程—もちろん水位の上昇と下降で、符号が逆となる—とほぼ同一の傾向を示している。

この注入過程における水位の上昇傾向は、目づまり効果 (clogging effect) によるものと考えら

れる。そしてその上昇傾向が注入開始以降ほぼ 1500 min 前後、注入累計量にして約 300~400 m³ 前後から発生するのが注目される。これと同じ現象は、平塚の注入試験でも知られており、この場合には注入開始より 400 min ほど経過した時点、注入累計量にして 300 m³ ほどから発生している(柴崎ほか, 1974)。

この注入過程にみられる水位上昇現象は、目づまり現象が、井戸傍周辺だけに発生するものでなく、ある注入量(この場合では 300~400 m³)を受入れて、はじめて発生することを示している。この現象については、さらに検討する価値がある。

7.3 揚水・注入両過程での帯水層係数の相違

第Ⅱ期の一連の試験記録について、上記の方法で求めた帯水層係数の変化を Fig. 9 に示す。

Fig. 9-A は、そのうちの複井法による目づまり効果発生前の帯水層係数値の変化を、各サイクルの順にしたがって図示したものである。これによると、透水量係数 (T) は、試験サイクル回数が増大するにしたがって、減少の傾向が認められる。注入過程の透水量係数は、揚水過程のそれと比較して、減少の度合いが大きい。漏水係数 (k'/b') は、それとは反対に、試験サイクル回数が増大とともに、増加の傾向が認められる。とくに、注入過程の漏水係数の増加傾向が、揚水過程のそれと比べて著しい。

目づまり効果発生後の水位から、複井法によって求めた帯水層係数値の変化を、前図と同様な方法で図示したものが Fig. 9-B である。この図と前図を比較してみると、注入過程での透水量係数の減少度は、目づまり発生以前と比較して大きく、漏水係数の増加度は、目づまり発生前と比較して大きくなっている。

Fig. 9-C は、単井法によって求められた帯水層係数値の変化を、複井法とおなじ方法で図示したものである。透水量係数値の変化傾向は、複井法と大差がない。しかし、特異な変化を示すのは貯留係数 (S) で、揚水過程では回を重ねるほど減少傾向をもつのに、注入過程では逆に増加の傾向をたどる。

この帯水層係数値のもつ、特徴ある変化傾向の意味については次章で考察する。

8. 注入井周辺の地下水の動き

前章では揚水・注入のくりかえしによる帯水層の変化状況を、帯水層係数値の変化をもとに説明した。その状況を整理してみると、つぎに示される。

(i) 透水量係数 (T) は、注入がすすむにつれて減少していく。ただし、その途中で揚水した場合、揚水時の透水量係数の減少の度合いは、注入時のそれよりもすくない。

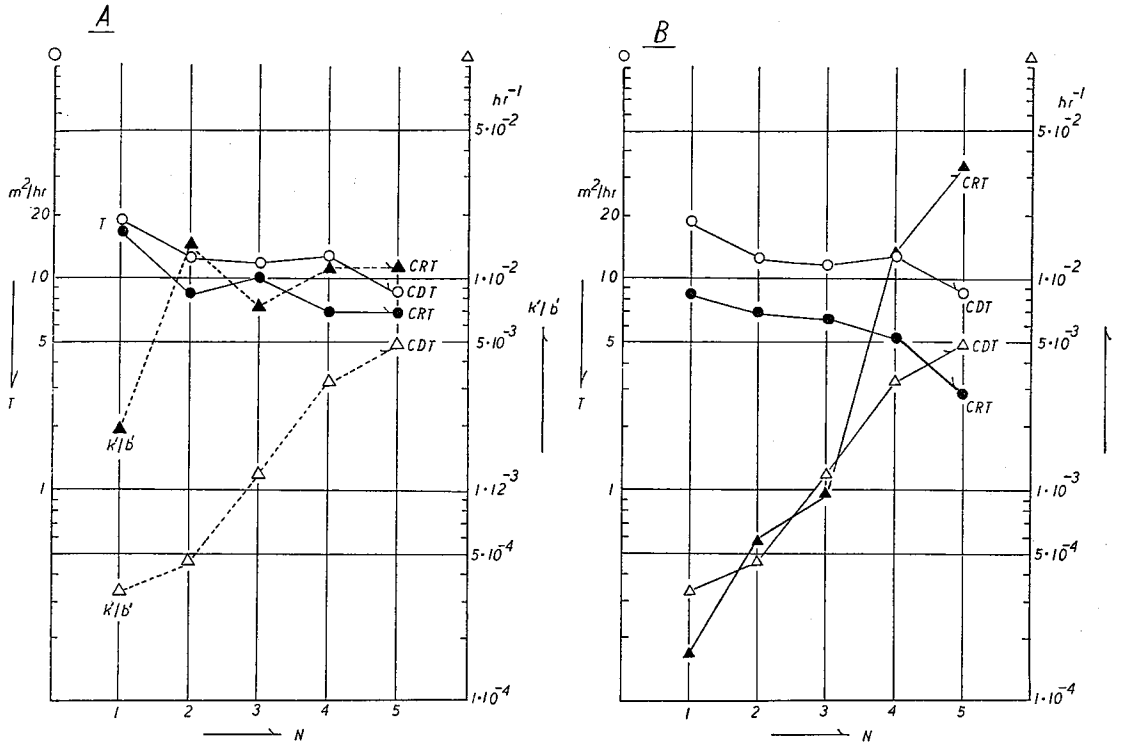
(ii) 漏水係数 (k'/b') は、注入がすすむにつれて、逆に増大していく。その途中で揚水した場合の漏水係数と注入時のそれとを比較してみると、注入時の漏水係数のほうが大きい。

(iii) 貯留係数 (S) は、注入がすすむにつれて、注入時の貯留係数は増大するが、途中で揚水した場合の揚水時のそれは、逆に減少の傾向を示す。

ここでは、これらの現象の意味について、考察してみよう。

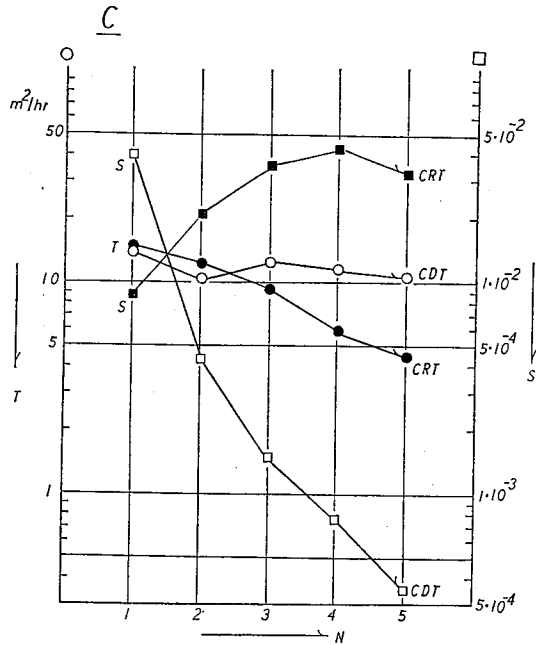
Fig. 10 は、CRT-1, CRT-3, CRT-5 の各一定量注入試験にさいしての井戸周辺の水位上昇状況を示したものである。たとえば CRT-1 では、注入開始後 960, 1,920, 5,200, 9,120 min の各時点の水位上昇を、漏水理論をもとに作図してみた。

これらの図によると、注入初期の段階 (CRT-1) では、注入の進行にともない、水位の上昇範囲はあまり拡大されず、その範囲内で水位だけが上昇する。さらに注入がすすむと、CRT-3, CRT-5



A : using solution of multiwell system and CRT data before commencement of clogging.

B : using solution of multiwell system and CRT data after commencement of clogging.



C : using solution of singlewell system.

Fig. 9. Changes of formation constants during CDT and CRT tests.

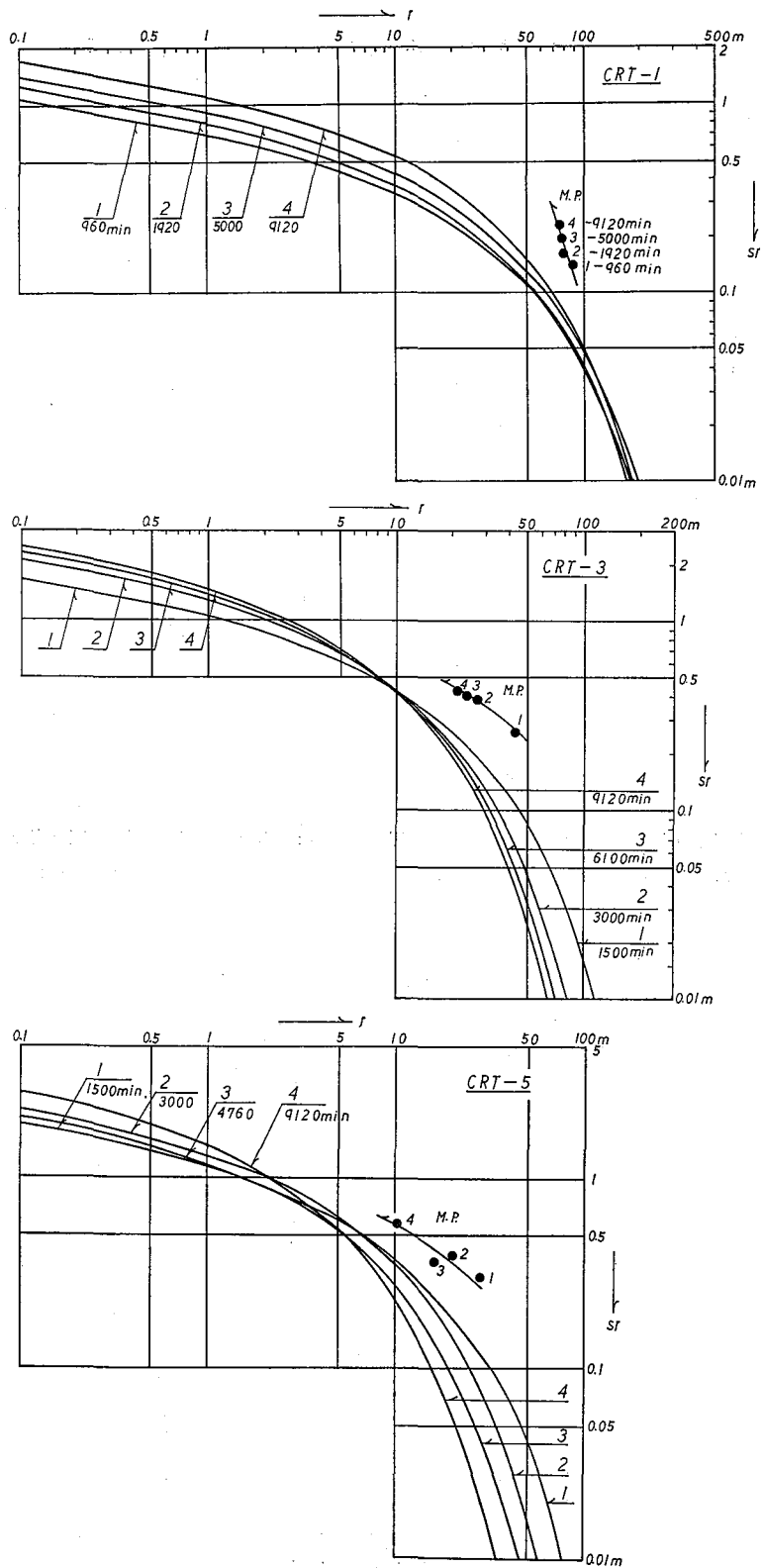


Fig. 10. Changes of calculated curves of water mound since recharge began during constant recharge tests.

で示されるように、水位上昇の範囲はさらに減少し、そのかわりその範囲内の水位上昇が激しくなる。

その傾向は、Fig. 11 に示した複井法解析のマッチ・ポイントの、注入にともなう移動状況でもよみとれる。すなわち、全体傾向としては、 sr が増大し、 r が減少の傾向にあるが、初期の段階ほど r の減少率に比べて、 sr の増加率が大きい。したがって、さきにあげた (6) 式から、初期には透水量係数 (T) が急速に減少し、ついで漏水関係 (B) も減少 (k'/b' は増加) することになる。

つまり、注入の進行にともない、注入による水圧伝播の範囲 (影響圏) が、目づまり現象により縮小され、そのかわり、縮小された影響圏内で、水圧がますます高まっていくことを示している。このことは、注入水の侵入範囲が、きわめて限定されていることを意味している。

今回の調査では、漏水係数が増大する傾向がみられた。平塚の注入井の例では、注入にさいしての漏水係数は、揚水時のそれと比較して無視されるほど小さいことが知られている。この両者の相違は、注入層の地質条件の違いに原因が求められよう。平塚注入井の注入層は加圧粘土層によって上下をかこまれた砂礫層であるのに対し、七尾注入井の注入層は、砂質の厚層で、しかも加圧層も比較的砂質である。七尾注入井の場合は、注入水の水平方向への移動が困難なために、垂直方向に注入水がおしまれる、と考えたらいかがであろうか。

貯留係数 (S) は、一般に透水量係数 (T) と正の相関にあり、透水量係数が小さくなれば、貯留係数も小さくなる。今回の場合には、揚水時の貯留係数は、透水量係数とともに減少していくが、注入時の貯留係数は増大の傾向にある。この点については、さらに検討の要がある。

9. 注入井運用の試案

これまでの解析結果を参考にして、注入井の運用試案を考えてみることにする。運用の前提として、注入水は冷却用にくみあげた地下水を再度地下に注入する方法、つまり、還流方式を考える。その理由は、一度質的な変化をおこした水あるいは地表水を注入する場合には、事前の処理に手数がかかり、経済的でないからである。

今回の注入試験に地下水源の上水道水を使用した理由のひとつもそこにある。くみあげた地下水を冷却用熱交換器を通すだけで、そのまま地下へ還流する状態を想定している。ただし、今回の試験では、熱交換後の増温された水の還流による熱問題は検討されていない。

注入井の運用にあたっては、(1) 注入効率の特続性をはかること、(2) 注入方式は自然流下方式を採用すること、を前提とした。とくに (2) の前提は、圧力注入をおこなう場合、普通の井戸構造では、せいぜい水圧 5 m 以下が適当であるという佐賀県白石平野での注入試験結果 (佐賀県農林部, 1967) が求められていることと、圧力注入をおこなう場合の加圧に要する費用が加算されることを考慮したためである。

この (2) の前提条件にしたがえば、注入井付近の自然水位は地表面下平均 12 m であるので、安全側をみこんで水位上昇限界を 10 m として検討した。注入パターンは、1 週間 1 サイクルとし、そ

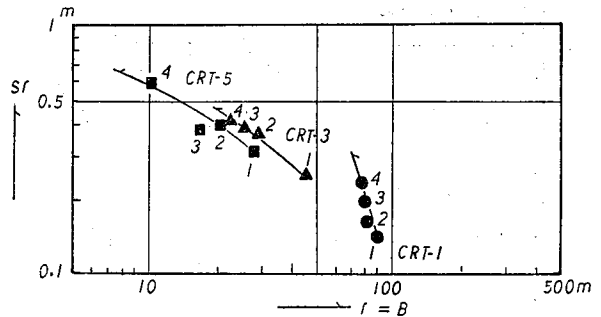


Fig. 11. Movements of match points plotted by HANTUSH method during constant recharge tests.

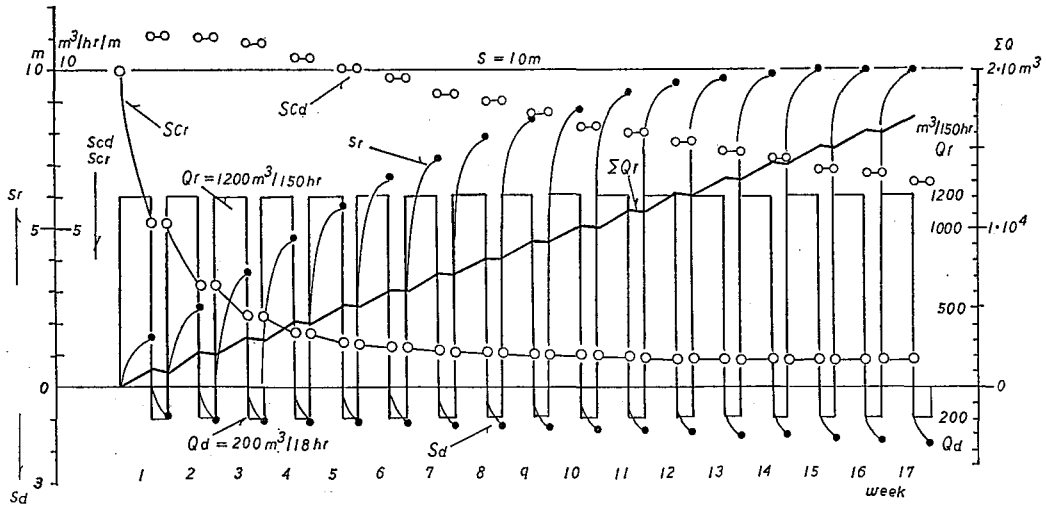


Fig. 12. A tentative operation plan of supply and recharge well system for cooling purposes.

Scr : specific recharge capacity.

Scd : specific capacity.

sr : build up of water table.

sd : drawdown of water table.

Qr : recharge rate.

Qd : discharge rate.

ΣQr : cumulative volume of recharge since operation began.

のうち150時間を連続注入、のこりの18時間を逆洗のための揚水とする。これは、実際の注入試験のパターンに準拠している。

注入試験から推定される注入効率の持続性は、ほぼ13~14週目から安定注入状態になることを勘案して、注入水位上昇限界を10mとした場合の持続性注入量を求めてみると、 $1200 \text{ m}^3/150 \text{ hr}$ ($8 \text{ m}^3/\text{hr}$) が答である。それに対し、逆洗のための揚水量 $200 \text{ m}^3/18 \text{ hr}$ ($11.1 \text{ m}^3/\text{hr}$) は、実際の試験による揚水量 $184 \text{ m}^3/18 \text{ hr}$ を参考にしてきめた。したがって、実質的な注入量は1週間で 1000 m^3 となる。

Fig. 12 は、この運用試案にもとづく注入井の水位変化状況を示したものである。また Fig. 13 は、この運用試案による第1週目と第13週目の注入井周辺の水位上昇傾向を示したものである。

昭和46年度の調査(七尾港周辺地盤沈下対策協議会, 1972)によれば、七尾市内で建築物用(主として冷却用)として使用されていた井戸1本あたりの揚水量は $130 \text{ m}^3/\text{day}$ 前後であった。もし夏期のピーク時に、1日16時間揚水すると、ピーク揚水量は $8.13 \text{ m}^3/\text{hr}$ となる。前述の運用試案による持続注入量は $8 \text{ m}^3/\text{hr}$ であるから、計算上では、ほぼ還流可能ということになる。

したがって、還流方式を採用するならば、今回の注入井と同程度の規模の井戸を2本設置し、一週間交替で揚水・注入をくりかえせば、逆洗効果も助長され、注入井の寿命はさらにながくなるものと考えられる。しかし、この場合でも、注入効果の持続性の確認、地下での蓄熱問題、揚水井と注入井の相互距離、水利用の経済性(とくに他の合理化案との比較)など、まだ検討しなくてはならない諸問題が残されている。

問題解決のひとつの手段として、公共建築物について、試験的なシステムをつくりあげ、それを実際に運用してみて、長期にわたる具体的なデータを蓄積することが考えられよう。

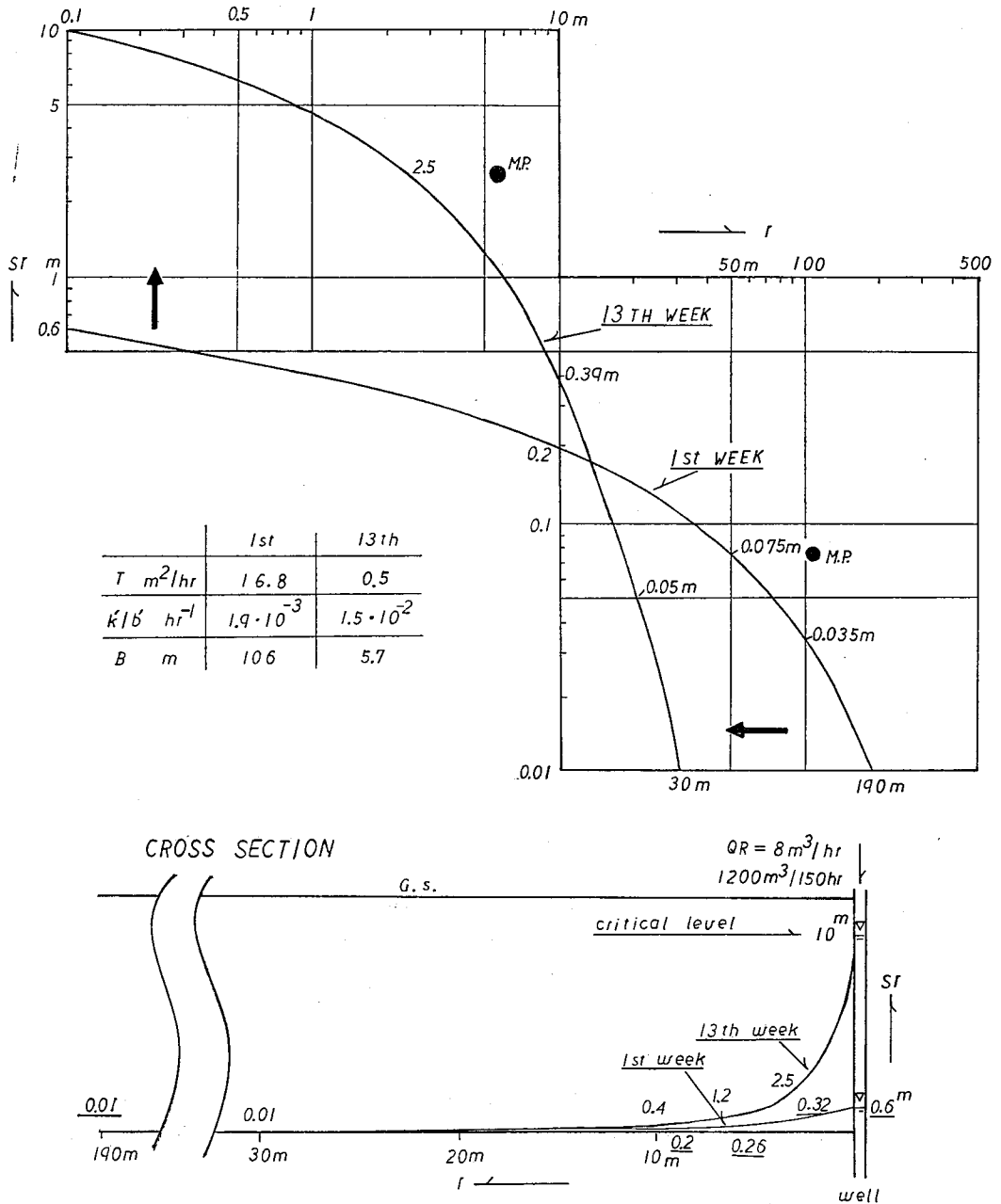


Fig. 13. Estimated features of water mounds around recharge well at the first week and the 13th week since operation began.

10. おわりに

七尾市において実施された地下水人工かん養試験資料を再検討した結果、つぎの程度の還流システムならば実現の可能性がある。

すなわち、冷却用としてくみあげた地下水を再度地下に注入する還流方式を採用し、注入にあたっては加圧することはせず、自然流入を考えれば、今回実施した試験井と同規模の注入井で、8 m³/hr 程度の持続性注入量が求められる。その注入量の範囲で、2本の井戸を交互に揚水・注入井として使用すれば、さらに注入効果の持続が期待できよう。

上記の還流システムは、使用水量の規模からみて、大型店舗あるいは小規模な工場の冷房・温調用水程度の利用にたえるものと思われる。ただし、地下での蓄熱・注入井の経済性の検討を含めて、さらに長期にわたる還流システムの試験的運用が必要である。

近年、注入井法に関して、ややもするとその効用が一部の人によって誇大に主張されている傾向がある。この報文でもわかるように、注入井の技術的問題に限定しても、まだ未解決の点が残されている。ただ単に注入すればよいものではなく、全体の水利用のなかでの地下水人工かん養策の持つ意味を十分検討してからでも、その実行はおそくないと思われる。

いたずらにその効用を強調することは、注入井法のもつ新しい萌芽を自らつむことにもなりかねない。むしろ、データの積みかさねと地道な検討を加えることが、注入井法がもつ本来の積極的意義を認識させる基本と思われる。その意味で、七尾地域での地下水人工かん養試験のはたす役割は、きわめて大きいものと考えてる。

引用文献

- HANTUSH, M. S. (1956) : Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. Trans. Amer. Geophysical Union, **37**, 702~714.
- 石川県地下水保全対策協議会 (1977) : 石川県地下水保全対策調査報告書 (昭和51年度). 57 p.
- (1978) : 石川県地下水保全対策調査報告書 (昭和52年度). 70 p.
- (1979) : 石川県地下水保全対策調査報告書 (昭和53年度). 65 p.
- JACOB, C. E. (1946) : Radial flow in a leaky artesian aquifer. Trans. Amer. Geophysical Union, **27**, 198~208.
- LOGAN, J. (1964) : Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. Ground Water, **2** (1), 36~37.
- 水収支研究グループ (1973) : 地下水資源学——広域地下水開発と保全の科学——. 共立出版, 東京, 397 p.
- 七尾港周辺地盤沈下対策協議会・北陸経済調査会 (1972) : 石川県七尾港周辺の地盤沈下調査報告書 (昭和46年度). 89 p.
- 佐賀県農林部 (1967) : 白石平野の地下水と地下水注入試験. 102 p.
- 柴崎達雄・田中正利・杉山 明 (1974) : 汲上げた水は地下にもどせるか——人工地下水注入井の基本的問題——. 施工技術, **7**(12), 65~73.
- THEIS, C. V. (1935) : The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans. Amer. Geophysical Union, **16**, 519~524.