

自動計測システムを用いた部分揚水試験の開発と適用

高坂 信章

(技術研究所)

三宅 紀治

(技術開発本部)

平野 文昭

(技術研究所)

天利 実

(技術研究所)

玉置 克之

(技術研究所)

天野 賢

(建築本部)

§ 1. はじめに

都市機能の集中により生じた土地不足、地価高騰の問題を、より深い地下の利用という形で解決しようとする方策が提案され、その実現へ向けての法的整備、技術開発が進められている。この過程で、特に注目を集めてきた問題のひとつが地下水対策である。大深度の地下構造物が受ける荷重を考えれば、土圧に比べ水圧が大きな比重を占め、施工中・施工後を通じこの地下水の取扱い方が工事の作業性、安全性、さらに経済性に大きな影響を及ぼす。また、地下構造物の建設により自然地盤における地下水の流動状況を少なからず乱すことになり、この影響が周辺環境へ実害を及ぼさない範囲で計画を進めなくてはならない。

これらの条件を考慮して、地下工事における地下水処理の最適化を図るため、従来とは異なる視点に立った地下水処理の研究・開発を進めている。すなわち、従来は平面二次元の地下水流のみを考慮していたが、これを三次元的なものとして捉えた調査・設計・施工を行なおうとするものである。本報では、地下水処理工法の三次元評価の概念について述べ、設計・施工の基本データを得るための調査法として開発した部分揚水試験、およびこの試験を合理的に行なうための自動計測システムについて概説する。さらに、試験の実施例を示し、その特徴について論ずる。

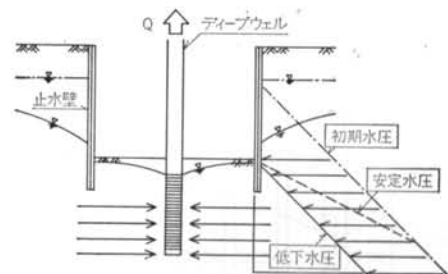
§ 2. 地下水処理の三次元評価の概念

地下工事における地下水処理対策として、ディープウェルやウェルポイントに代表される排水工法と、止水壁や薬液注入等に代表される止水工法が通常用いられている。工費や周辺への影響を考えた場合、両者には一長一短があり、実際の工事では排水工法と止水工法を併用して地下水処理を行なうことが多い。ところが、この併用

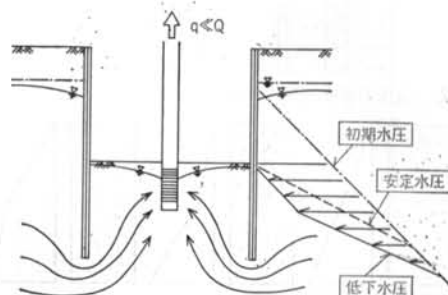
を考えるときに、排水工法と止水工法の比重配分が充分検討されているとは限らず、掘削域内の安全性が損なわれたり、周辺環境へ大きな影響を与えることもあれば、逆に過大な設計になっていることもある。

例えば、図-1に示すような開削工事の地下水処理を検討する際、ディープウェルや止水壁の長さをどの程度にすればよいかという問題に直面する。従来の設計では図-1(a)に示すように、掘削域内をドライにするとともに、充分な長さを有するディープウェルを設置して、盤ぶくれやボーリングに対し安定する深さまで掘削底面の水圧を低下させていた。このため、帯水層内における地下水流は平面的な流れが支配的となる。

ここで提案する地下水処理法は、図-1(b)に示すようにディープウェルや止水壁の長さを充分に検討して、止



(a) 従来の設計法



(b) 三次元評価に基づく設計法

図-1 開削工事における地下水処理の設計概念

水壁の下を回り込む三次元的な地下水流を帯水層内に発生させ、揚水量や水位低下量を減じることを目的とするものである。一般に、地盤の鉛直方向の透水性は、水平方向の透水性に比べ小さいといわれており、この効果により揚水量や水位低下量を大幅に減じることが期待できる。このとき、掘削内をドライに保つと同時に、掘削底面の水圧を過剰に低下させないように設計する。盤ぶくれやボーリングに対する安定性は土被り重量と水圧との釣り合いにより検討されるが、掘削底の水圧を静水圧的に低下させた場合、掘削底からの深度が増すにつれて両者の差が大きくなる(図-1(a)参照)。提案した地下水処理法では、図-1(b)に示すように安定水圧と地下水圧との差が小さくなるようにディープウェル長を決める。

このような地下水処理の設計を正確・合理的に行うためには、帯水層の三次元的な流動特性を把握することが不可欠となる。

§ 3. 部分揚水試験の開発

3.1 従来の揚水試験

帯水層の流動特性を原位置で求める試験法として、従来から図-2に示す多孔式揚水試験が行なわれている。この試験では、帯水層のほぼ全層にわたりスクリーン(地下水の流入部)を有する試験井を数本設置し、このうちの1本を揚水井、他を観測井とする。揚水井から揚水したときの距離の異なる観測井内の水位変動を計測し

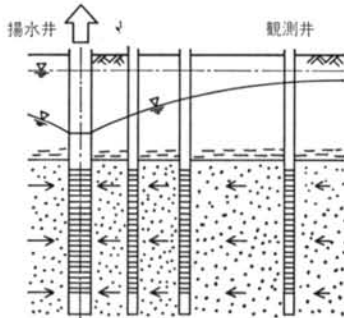


図-2 従来の多孔式揚水試験

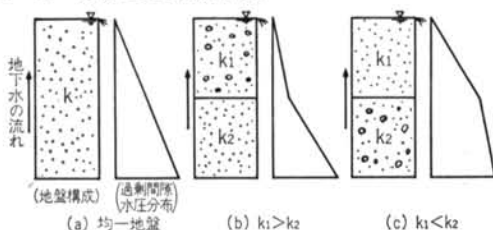


図-3 二層系地盤での水圧分布の比較

て、帯水層の透水量係数 T 、貯留係数 S を求める。帯水層の全層が揚水対象となり、帯水層内の地下水は水平放射状に流れるため、鉛直方向の流動特性を求めることはできない。従来の地下水処理の設計では、図-1(a)に示すように主に水平方向の地下水流のみを対象としていたため、このような試験法とその結果として求められた帯水層定数 T 、 S を用いることで問題はなかった。

3.2 部分揚水試験の目的

前述のように、地下水処理の最適化を図るためには、図-1(b)に示すような三次元地下水流を評価する必要がある。設計を合理的に行なうには掘削底以深の地盤の鉛直方向の流動特性を正確に把握しなくてはならない。鉛直方向の流動特性の情報として、鉛直方向の透水量係数 k_v のほか、難透水性挟み層の存在、上部層と下部層の透水性の優劣等といった帯水層の不均質性に関するものも含まれる。

例えば、図-1(b)でディープウェルのすぐ下に連続性の良い粘性土層が存在する場合、揚水による水圧低下の効果は粘性土層より下の層で著しく減じられる。このため、盤ぶくれ状の破壊が発生する危険性が高い。

また、図-3に示すような二層系の地盤の場合、上部層と下部層の相対的な透水量係数の大小により地盤内の水圧分布が変わる¹⁾。図-3(b)のように上部層の透水性が高い二層系の地盤の場合、図-3(a)の均質層に比べてボーリングに対して安全な水圧分布となり、短いディープウェルによる施工が可能となる。逆に、図-3(c)のように上部層の透水性が低い二層系の地盤の場合、均質地盤に比べて大きな水圧分布となるため、充分な長さのディープウェルにより施工することが必要となる。

以上のように、掘削底面の安定性を確実に保った上で揚水量を減じる設計とするためには、地盤の層序や透水量係数などの綿密な調査が必要であり、このための新しい試験法として部分揚水試験法を開発した。

3.3 部分揚水試験の方法

鉛直方向の透水量係数や不均質地盤での地層構成を原位置試験により把握するためには、試験時に鉛直方向の流れを発生させ、このときの水圧変動を帯水層内の深度の異なる観測点で計測する必要がある。帯水層内に鉛直方向の流れを発生させるためにはポイント揚水が理想的であるが、観測点で解析可能な水圧変動データを得るためには一定量の揚水を継続的に行なう必要がある。このため、帯水層内のある限られた部分のみからの揚水により三次元流を発生させる試験法を開発し、これを部分揚水

試験と呼ぶこととする。

具体的な試験法は、図-4に示すように1本の揚水井と数本の観測井を設置する。このとき、揚水井は帯水層の全層厚に比べて短いスクリーン部を有するため、帯水層のごく一部から揚水されることになり、三次元流が発生する。揚水の影響は観測井で計測するが、観測井内の深度の異なる数点の水圧変動が計測できるよう、1本の観測井内に複数の水圧計を設置する。

試験に用いる井戸は揚水井、観測井ともに図-5に示す構造とした。1本の井戸内に複数のスクリーン部が存

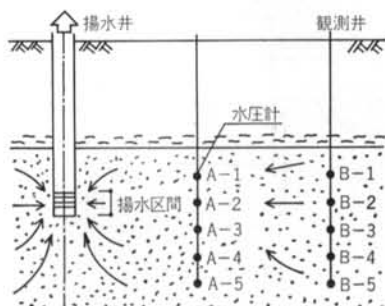


図-4 部分揚水試験法

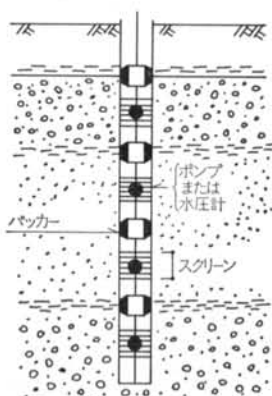


図-5 試験井の構造

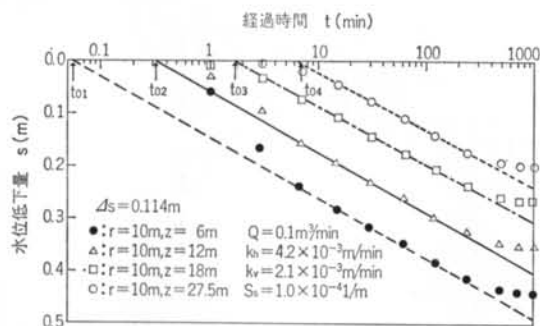


図-6 均質異方性地盤での部分揚水試験結果 (FEM によるモデル計算)

在し、各スクリーン部において揚水あるいは水圧変動の計測ができるようになっている。スクリーン間は井戸管外側ではセメントベントナイトなどの遮水材、内側はパッカーで仕切られており、地下水の流れや水圧の伝播が起きないように工夫されている (後に示す図-9 参照)。

このような試験井を用いることにより、試験の実施上次のような利点がある。

(1)揚水対象とするスクリーンの位置や数を変えることにより、1本の井戸で様々な揚水条件での試験が可能となる。

(2)試験に用いるポンプ、水圧計やパッカーの転用が可能で、メンテナンスも容易である。

(3)揚水井、観測井内がパッカーで仕切られているため井戸内の貯留水の影響 (井戸径の影響)³⁾を受けず、揚水初期のデータが有効に使え、貯留係数も正確に求められる。

3.4 部分揚水試験の解析法

このようにして得られた試験結果を解析して地盤の浸透特性を求める手法として、均質異方性地盤に対しては定常法・非定常法を提案している³⁾。

有限要素法によるモデル計算より、均質異方性地盤で部分揚水試験を実施した場合の試験結果を片対数紙上にプロットすると図-6のようになることが想定される。この特徴として、

- ①揚水開始後直線的に水頭低下が見られる非定常部分があり、揚水ポイントとの深度差 z が小さいほど大きな水頭低下 s が生じる、
- ②非定常部分における直線の傾き Δs は z によらず一定である、
- ③ある時間の経過後、水頭の低下は停止し定常状態に至る、
- ④定常状態における水頭低下量は深度差 z が小さいほど大きな値となる、

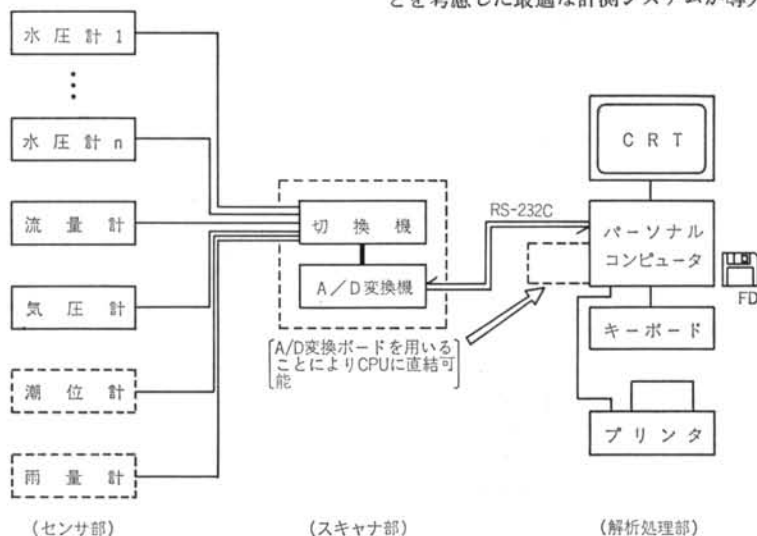
等が分かる。非定常区間の試験結果の解析法としては、不完全貫入井に対する揚水試験の解析法⁴⁾を応用し、非定常部分の直線の零水位低下量軸の切片 t_0 より透水係数の異方性を求める。定常状態の試験結果の解析では、Hsieh⁵⁾により提案されたクロスホール試験の定常解を応用する。揚水点からの水平距離 r 、鉛直深度差 z の異なる観測点における水頭低下量の関係より、透水係数の異方性を求める。

不均質地盤の場合、異方性の透水係数を算定するための確立された解析法がない。このため、通常用いられている Jacob 法などを適用して水平方向の透水性を試算し

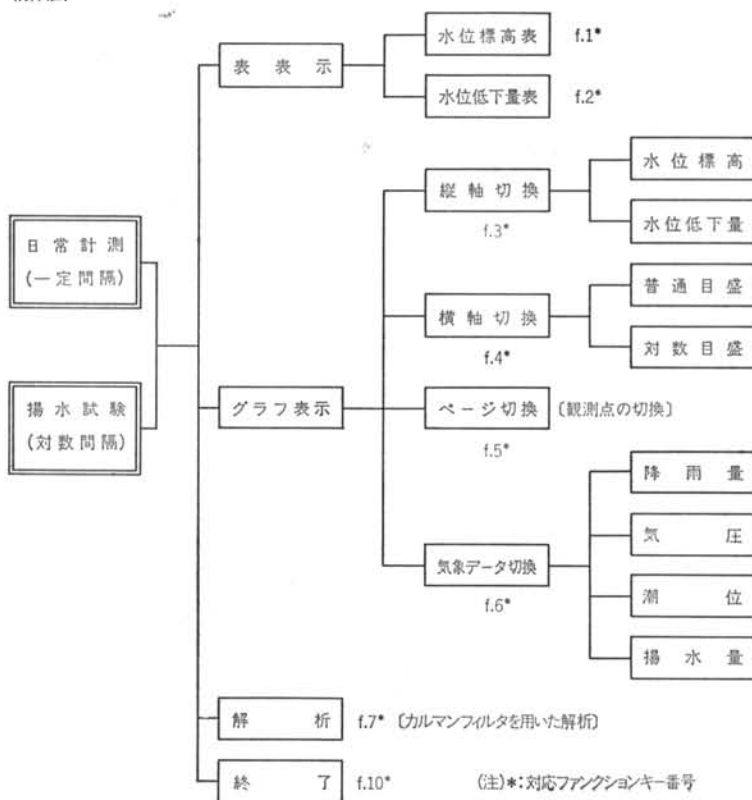
た上で、有限要素法などによる数値解析を行なって試行錯誤的に鉛直方向の透水係数を設定していく方法がとられる。不均質地盤に対する系統化された解析法の確立が研究課題といえる。

§ 4. 計測システムの概要

一般に、揚水試験時の水圧変動や建設工事に伴う地下水の日常的計測管理には、その目的、頻度、観測点数などを考慮した最適な計測システムが導入される。そのシ



図一7 計測システム構成図



図一8 計測システムの機能一覧

システムは大別して手動計測、半自動計測、自動計測に分けられる⁹⁾。本揚水試験においては、多点、長期、高精度の計測を省力化して行なうために、自動計測システムを導入した。

4.1 計測システムの構成

計測システムは、水圧計、流量計などのセンサ部、センサから送られてくる電気的信号を順次アナログデジタル変換するスキャナ部、およびデジタル信号を取り込み処理する解析処理部により構成されている⁷⁾。その一例として、§ 5. で述べる揚水試験で使用したシステムの構成を図-7に示す。水圧計には差動トランス型のものを、流量計には電磁流量計、気圧計は差圧式のものをを用いている。計測のフローは、センサから出力される信号を切換機(スキャニングユニット)により順次取り込み、データ収録装置にてアナログデジタル変換する。デジタル化された信号はRS-232Cケーブルを介して解析処理部のパーソナルコンピュータに送られる。コンピュータでは収録したデータの演算、記憶を行なうとともに、計測結果をCRT画面およびプリンタ紙面上に出力する。

4.2 計測システムの機能

本システムは取り込んだデータを迅速に処理し、その結果を試験や施工管理に反映できるよう工夫された以下の機能を有する。システムの機能一覧を図-8に示す。

①計測間隔を1分以上の任意の間隔に定められる日常計測型(地下水位の自然状態での変動計測や施工管理用の計測など)と、計測間隔を対数的に変えられる揚水試験型の計測が選択できる。

②計測結果を表や経時変化図にして、CRT画面やプリンタへ出力できる。それぞれ地表面(あるいは、他の基準点)からの水頭または第1回計測値からの相対的な変化量として表示できる。

③経時変化図として出力する場合、横軸の時間を普通目盛りによる表示、あるいは対数目盛りによる表示に切り換えることができる。

④観測点の数が多く、一枚の図面上に表示できない場合にはグループごとに表示することができる。

⑤水頭の経時変化図を出力すると同時に、水頭変化に影響を及ぼす気象データを表示できる。気象データとしての降雨量、気圧、潮位あるいは揚水量など必要に応じて計測し出力する。気象データと水頭を揚水が行なわれていない自然条件下で計測し、これらの相関係数を算定すれば、水頭の計測結果を補正して出力することも可能である。

さらに、本システムは以上述べた自動計測機能のほか、揚水試験中に逐次得られる水頭データを利用して、カルマンフィルタと非定常井戸理論に基づき透水量係数 T および貯留係数 S を解析する機能も有する⁸⁾。この方法によれば、 T と S の収束状況をみながら揚水試験を行なうことができるので、試験終了や条件変更の判断を即時に行なうことができる。

§ 5. 部分揚水試験の実施例

5.1 部分揚水試験の実施

深さ約30mの掘削が予定されている都内の某現場において、§ 3. で示した部分揚水試験を実施した。地盤条件および試験井の構造を図-9に示す。掘削底はGL-25~55m付近まで連続して堆積する江戸川層と呼ばれる洪積の砂層内に位置する。この層はGL-15m程度の水頭を有する被圧帯水層であり、帯水層内ではほぼ静水圧分布を示すが、下層ほど水圧が高い傾向が見られる。掘削工事に際して、この層の地下水処理方法が周辺環境および工費に与える影響が大きいことが予想されるため、最適な地下水処理工法決定のために部分揚水試験を実施した。

揚水井は長さ64m、ケーシング径 $\phi 450$ mmで、途中に長さ2mのスクリーン部が4箇所ある。それぞれ上側よりスクリーンA、B、C、Dと呼び、これらから揚水することにより帯水層内に三次元的な流れを発生させる。

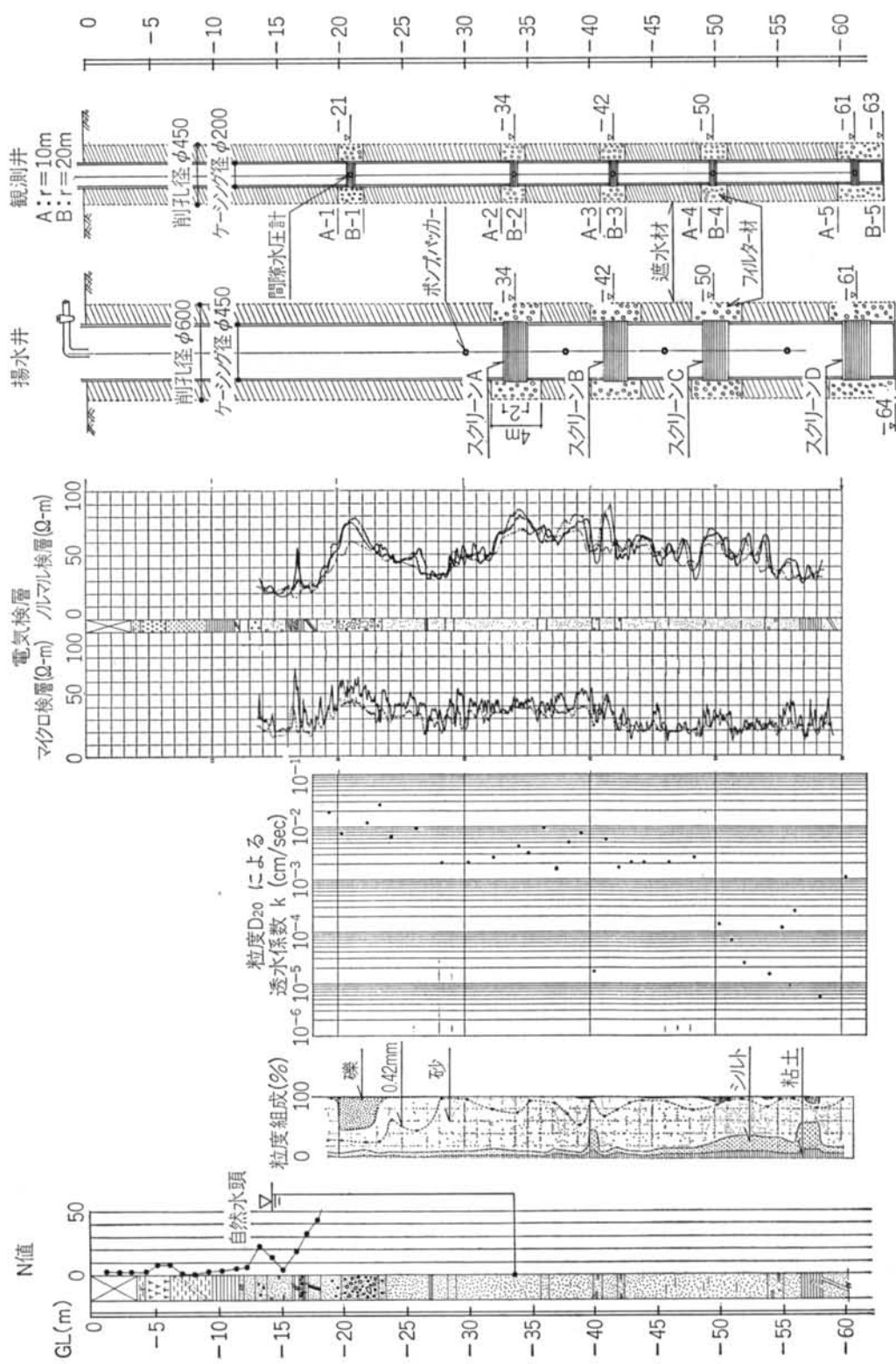
観測井は、揚水井から10mおよび20m離れた位置に1本ずつ設置し、それぞれ観測井A、観測井Bと呼ぶ。ともに長さ63m、ケーシング径 $\phi 200$ mmで、水圧測定深度に長さ500mmのスクリーン部が5箇所あり、各スクリーン部を対象とした水圧計が設置されている。水圧計は上から1、2、3、4、5の番号を付し、観測点A-1、A-2、……、B-1、B-2、……、B-5と呼ぶ。

試験は、揚水が行なわれていない条件下での自然水頭を計測した後、スクリーンA揚水試験、スクリーンB揚水試験、スクリーンC揚水試験、全層揚水試験、スクリーンD揚水試験の順に実施された。各揚水試験は3~7日間にわたって実施され、揚水試験後、揚水期間とほぼ同日数の回復試験を実施して、水頭が自然状態に復元したことを確認してから次の揚水試験を実施した。

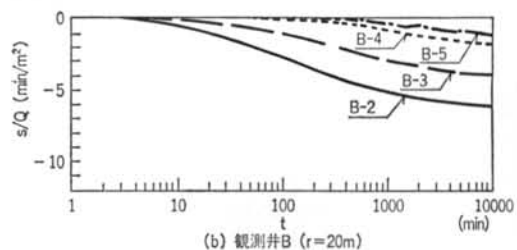
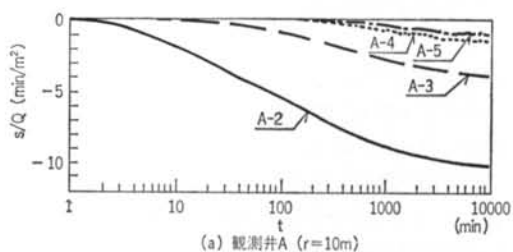
5.2 部分揚水試験の結果

5.2.1 自然水頭の変動計測

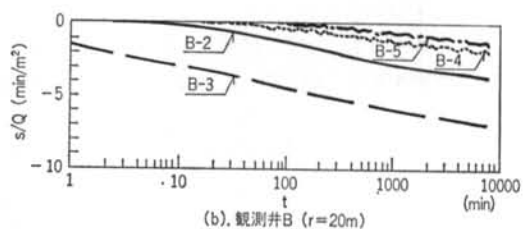
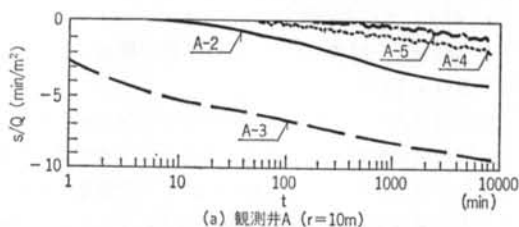
揚水試験に先立ち、自然水頭の変動を計測した。各観



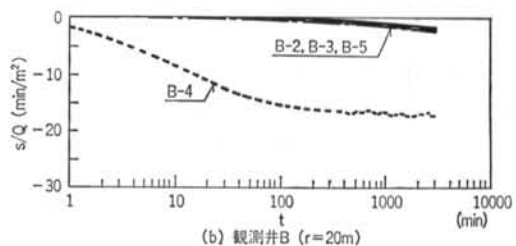
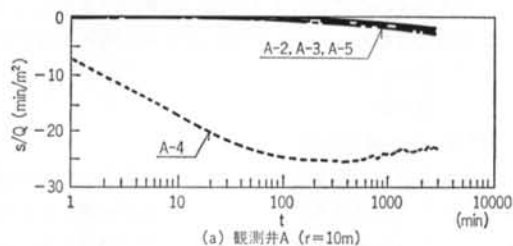
図—9 部分揚水試験実施現場における地盤概要と試験井の構造



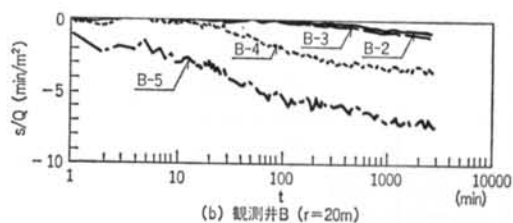
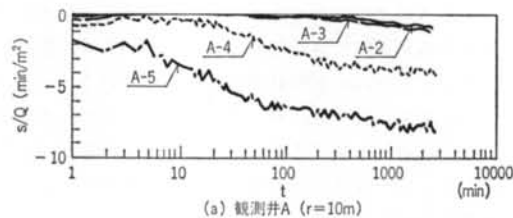
図—10 スクリーンA揚水試験結果 (揚水量 $Q=440\text{ l/min}$)



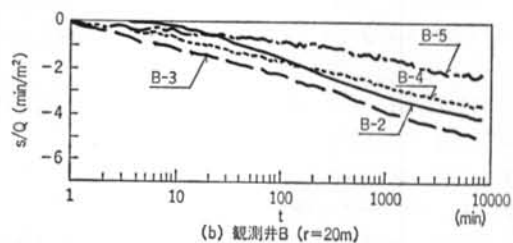
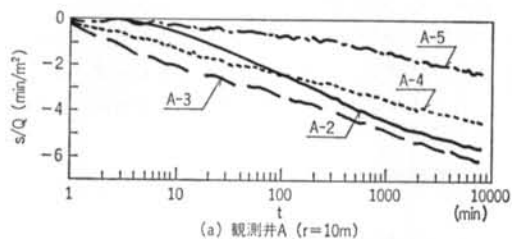
図—11 スクリーンB揚水試験結果 (揚水量 $Q=340\text{ l/min}$)



図—12 スクリーンC揚水試験結果 (揚水量 $Q=240\text{ l/min}$)



図—13 スクリーンD揚水試験結果 (揚水量 $Q=160\text{ l/min}$)



図—14 全層揚水試験結果 (揚水量 $Q=640\text{ l/min}$)

測点とも、60%程度の気圧効率にて気圧の影響を受けていること、降雨、潮汐などによる影響はなく、他の場所における地下水揚水の影響なども認められないことを確認した。また、使用した水圧計は深い位置に設置したもののほどフルスケールが大きいため、計測値のふれが大きくなることが確認された。

5.2.2 スクリーンA揚水試験

スクリーンA揚水試験の結果を図-10に示す。横軸は対数表示した経過時間 $\log(t)$ 、縦軸は水頭低下量を揚水量で除した s/Q により示している。 s/Q により水頭低下量を表示することによって、揚水量の異なる各試験結果を容易に比較することができる。また、水頭低下量は気圧変動の影響を補正した値を用いた。

観測井AおよびBにおける試験結果、図-10(a), (b)より、

(1)揚水点 (GL-34m) と同深度の観測点 (A-2, B-2) では距離による水頭低下量の差が見られるが、他の深度の観測点では距離による水頭低下量の差は殆ど見られない、

(2)揚水初期 (揚水後1000分程度) は、深度により異なる勾配で水頭低下が進む。この勾配は、揚水点との深度差が小さいほど大きな勾配となる、

(3)最終的には、ほぼ同一の勾配で水頭低下が進行している。この勾配により算出される透水量係数 T が、揚水の影響を受ける帯水層全体の透水性を示すものと考えられる、

等の特徴が認められる。

5.2.3 スクリーンB揚水試験

試験結果は図-11に示すとおりで、

(1)揚水点 (GL-42m) と同深度の観測点 (A-3, B-3) では距離による水頭低下量の差が見られるが、その上下の層の水頭低下量に大きな差は見られない、

(2)各観測点の水頭低下は、ほぼ同じ勾配で進行している、

(3)観測点 A-3 および B-3 の結果を、同一紙面上で $\log(t/r^2) - s/Q$ によりプロットしても同一直線上にのらない、

(4)上記(2)および(3)の傾向は、不完全貫入井による揚水試験結果に類似する、

等の特徴が認められる。

5.2.4 スクリーンC揚水試験

試験結果を図-12に示すが、縦軸のスケールは図-10, 11と異なる。この図より、

(1)揚水点 (GL-50m) と同深度の観測点 (A-4, B-4) では大きな水頭低下が見られるが、それ以外の深

度の観測点での水頭低下量は小さい、

(2)A-4 および B-4 の水頭低下量 (s/Q) は他の試験結果と比べて大きな値である、

(3)A-4 および B-4 の水頭低下傾向は漏水系の揚水試験結果に似ている、等の特徴が認められる。

5.2.5 スクリーンD揚水試験

試験結果は図-13のとおりで、

(1)揚水点 (GL-61m) と同深度の観測点 (A-5, B-5) およびその上の観測点 (A-4, B-4) において大きな水頭低下が認められたが、その他の観測点での水頭低下量は小さい、

(2)観測点 A-5 と B-5 の水頭低下状況は相似形であり、揚水開始後約 100 分経過した時点より水頭低下勾配が変化する。 $\log(t/r^2) - s/Q$ により両結果を一枚のグラフ上に整理すると、後半部分は両プロットがよく一致する、

(3)A-4 および B-4 より浅い観測点の水頭低下量には距離による差が認められず、ほぼ平面的に水頭が降下していることが予想される、等の特徴が認められる。

5.2.6 全層揚水試験

各スクリーン間を分断するパッカーをすべて収縮させて、すべてのスクリーン部からの揚水が可能な状態で試験を行なった全層揚水試験の結果を図-14に示す。これによれば、

(1)全スクリーンから揚水することにより、帯水層内の流れを水平方向に卓越させたにもかかわらず、観測点の深度により異なる水頭低下性状を示している、

(2)中でも、A-2, B-2 の観測点における水頭低下は初期に遅れを生じるが、他よりも大きな勾配で低下が進行し、他の観測点の水頭低下曲線を横切るという特異な変動を示している、

(3)A-1 と B-1, および A-5 と B-5 の水頭低下量については距離による差は見られない、

(4) $\log(t/r^2) - s/Q$ により観測井 A, B の結果を一枚のグラフにプロットすると、A-2 と B-2, A-3 と B-3, A-4 と B-4 の結果はそれぞれ同一直線上にある、等の特徴が認められる。

5.3 部分揚水試験結果の考察

以上の結果を総合的に判断すると、以下のようなことがいえる。

(1)今回の試験対象地盤は、局所的に透水性の低い挟み

層が介在したり、帯水層内でも透水性に優劣のある不均質性の帯水層である。

(2)その結果、揚水深さごとに全く異なる傾向の試験結果が得られた。

(3)各揚水試験において、揚水開始後の初期の水頭低下性状は、揚水対象深度近傍の帯水層の特性により支配され、十分な揚水継続後の水頭低下性状は、帯水層全体の流動特性により支配されると考えられる。

(4)スクリーンAに対応する部分は比較的良好な透水性を有するが、貯留係数が大きく水頭低下の反応は遅い。

(5)スクリーンBに対応する部分は最も高い透水性を有し、今回試験対象とした帯水層全体の支配的透水層となっている。

(6)スクリーンCに対応する部分は透水性が低く、この上下層からの漏水の影響により比較的短時間で定常状態に至る。

(7)スクリーンDに対応する部分は比較的良好な透水性を有する。これに深の地盤調査データがないため明かではないが、深部にさらに透水性の良好な帯水層が存在する可能性もある。

(8)帯水層全体としての透水量係数 T は、 $0.25\text{m}^2/\text{min}$ 程度と想定される。

(9)帯水層の鉛直方向の浸透特性についての解析は不充

分であるが、深度ごとの透水性の優劣や透水性の低い層の存在が明らかになったため、これらの情報と試験結果をもとに異方透水係数の解析が可能と考える。

§ 6. おわりに

来るべき大深度地下開発の時代に備え、地下工事の最大の敵ともいえる地下水処理の最適化を図ることは緊急の課題である。このような観点に立ち、周辺環境への影響が小さく、また経済的にも優れた地下水処理を行なうための調査・設計・施工法の研究開発を進めている。

ここで紹介した部分揚水試験法と地下水に関する自動計測システムは、このようなニーズの中から生まれてきた技術であり、これらをさらに展開して総合的な地下水処理システムを作ることが我々の課題と考える。

今回、某現場で部分揚水試験を実施する機会を得、非常に有意義な結果を得ることができたので、ここに紹介した。データの解析など中途の段階であり、定性的な評価しかできなかった。稿を改めて、解析結果と設計・施工への反映手法などを報告したい。

最後に、本試験の実施に際しご尽力いただいた関係各位に感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 高坂信章, 三宅紀治, 吉田洋二郎: “地下水にかかわる 掘削底面の破壊現象とその対策—ボーリング・盤ぶくれ・パイピングについて—” 基礎工 Vol. 18, No. 8 (1990年) pp. 33~41
- 2) 西垣 誠, 高坂信章: “井戸半径を考慮した揚水試験における水位低下特性とその解析方法” 土質工学会論文報告集 Vol. 24, No. 4 (1984年) pp. 194~204
- 3) 高坂信章, 三宅紀治: “部分揚水試験の実施と解析” 地下空間利用シンポジウム1990講演概要 (1990年) pp. 121~126
- 4) 西垣 誠, 進士喜英: “不完全貫入井による揚水試験結果からの被圧帯水層厚の算定法” 土質工学会論文報告集 Vol. 26, No. 4 (1986年) pp. 197~204
- 5) P.A. Hsieh & S.P. Neuman: “Field Determination of Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media, (1) Theory” Water Resources Research, Vol. 21, No. 11 (1985) pp. 1655~1665
- 6) 土質工学会編: “根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで—(現場技術者のための土と基礎シリーズ, No. 19)” 土質工学会 (1991年) pp. 156~257
- 7) 天利 実, 平野文昭: “地下水位、流量および気圧に関する自動計測システムの開発” 日本地下水学会秋期講演会講演要旨集 (1989年) pp. 116~119
- 8) 平野文昭, 三宅紀治, 天利 実: “揚水試験解析へのカルマンフィルターの適用” 清水建設研究報告 Vol. 43 (1986年) pp. 11~18

