

ボーリング孔を用いた地下水調査例

—原位置試験実施例（経験した現場から）—

平成28年6月11日

(有) タカイ地盤計測 木村伸一

ボーリング孔を利用した地下水調査について

地下水調査における目的

ボーリング孔を用いた地下水調査において、その主な調査目的として次の3項目があげられる。

1. 地盤の透水性の把握
2. 地下水流動状況の把握
3. 地下水位あるいは水圧の把握

これらの調査目的を満たすため種々の調査方法（原位置試験）がある。一般的に行われる試験をこれらの調査目的別に分類すると以下のようなになる。

1. 透水性を求める試験

単孔で行う場合	土質を対象とする：	現場透水試験
	岩盤を対象とする：	ルジオン試験・湧水圧試験
複数孔で行う場合	揚水試験	

2. 流動状況（流動層）を把握する試験

地下水検層
孔内微流速測定
温度検層

地下水流向流速測定

3. 地下水位あるいは水圧の測定

孔内水位測定（水位観測）
間隙水圧測定

以下、今まで経験した地下水調査について実施例を示しながら測定法を解説する。

例その1 A地点での地下水調査（ダムサイトの例）

ダム建設予定地選定のための調査例である。周辺が急峻となっている台地状地形上にあるため、湛水による漏水の可能性が示唆されているサイトである。このため地下水の賦存状況、地盤の透水性等の把握を目的として調査が行われた。

調査項目として以下の試験等を実施している。

- ・ボーリング掘削時のルジオン試験・間隙水圧測定
- ・ボーリング孔を利用した地下水検層・温度検層

このほかに、地下水の分布状況把握のため調査地全体での地表水・孔内水の水质分析、さらに人工トレーサー（食塩）投入による地下水流動調査も実施している。

今回は、これらのうちボーリング孔での試験について述べる。

・ルジオン試験について

ダム調査において地盤の透水性の把握（およびグラウチング計画の立案）のための指標となるルジオン値を得るために行う試験。試験区間 5m 間で圧力 10kgf/cm²（0.98MPa）で水を注入した際の区間長 1m 単位の水の透水量をルジオン値という。

1Lu(ルジオン)は、1分間あたりボーリング 1m 間で 1 リットルの水が注入される事。

（ルジオン値と透水係数の関係は、1Lu=約 1.3×10^{-7} m/s とされている。）

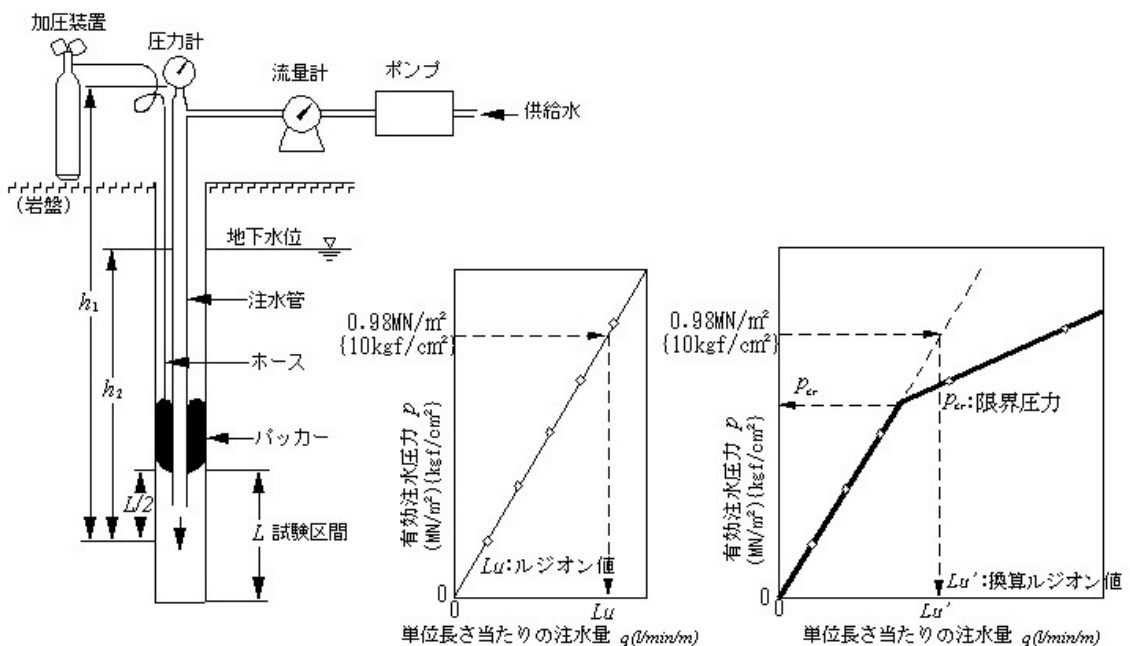


図 ルジオン試験概念図

・間隙水圧測定について

間隙水圧測定としては下図に示したような電気式間隙水圧計を用いて粘性土や砂等を対象とした測定することが多い。岩盤の場合はボーリング孔内でパッカー等の設置により設定された測定区間内の水位（水圧）を測定する試験を指すことが多い。

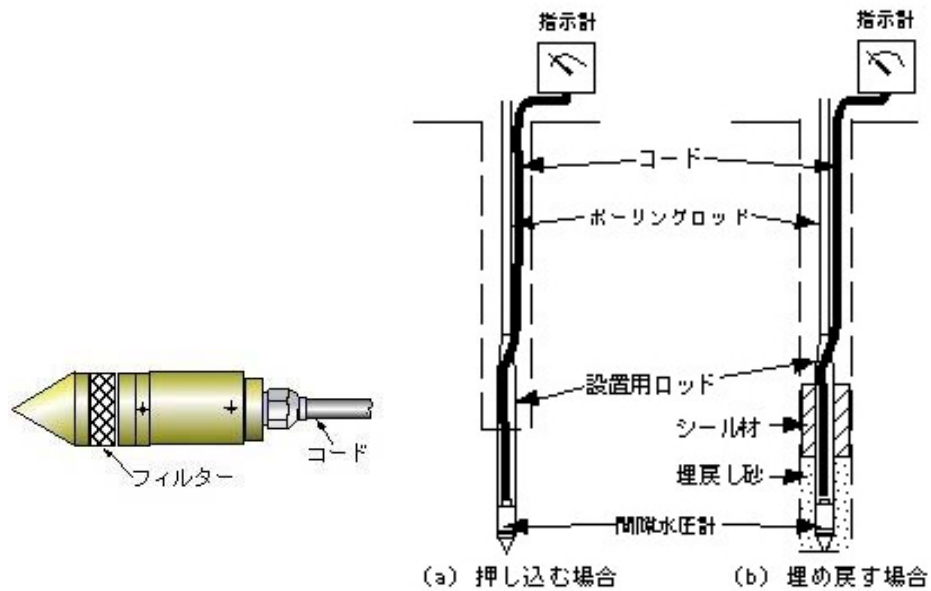
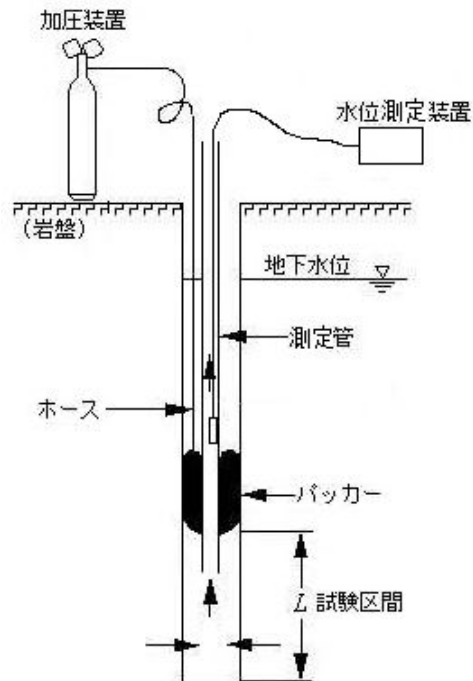


図 電気式間隙水圧計と設置例

対象が岩盤の場合はルジオン試験と併用して行う場合がある。パッカーを設置後、間隙水圧測定を行い、確認された水圧から昇圧してルジオン試験を行う。



なお、このとき測定管内の水位を一旦下げ、その後の水位上昇を時間経過とともに測定すると湧水圧試験となる。

図 間隙水圧測定概念図

地下水検層について

ボーリング孔内に食塩水あるいは温水等を投入し、その希釈状況を観測し地下水の流動を推定する調査である。投入するものが食塩水（食塩）の場合は、孔内水の比抵抗を測定し、温水の場合は温度変化を測定する。食塩水（食塩）を用いた測定の解析の例を示す。

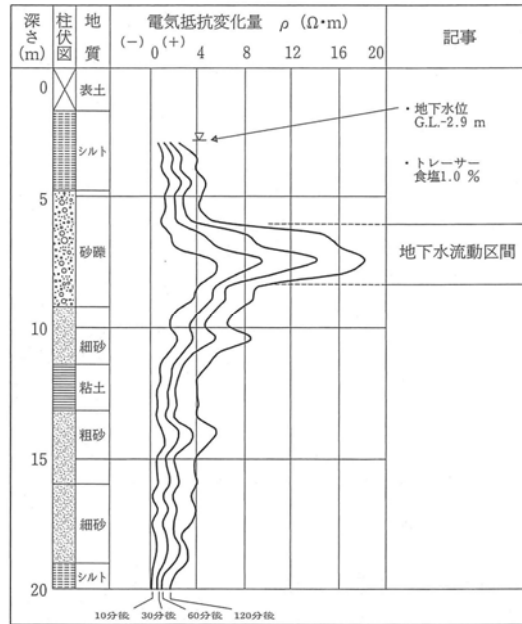


図 食塩を用いた場合の解析例

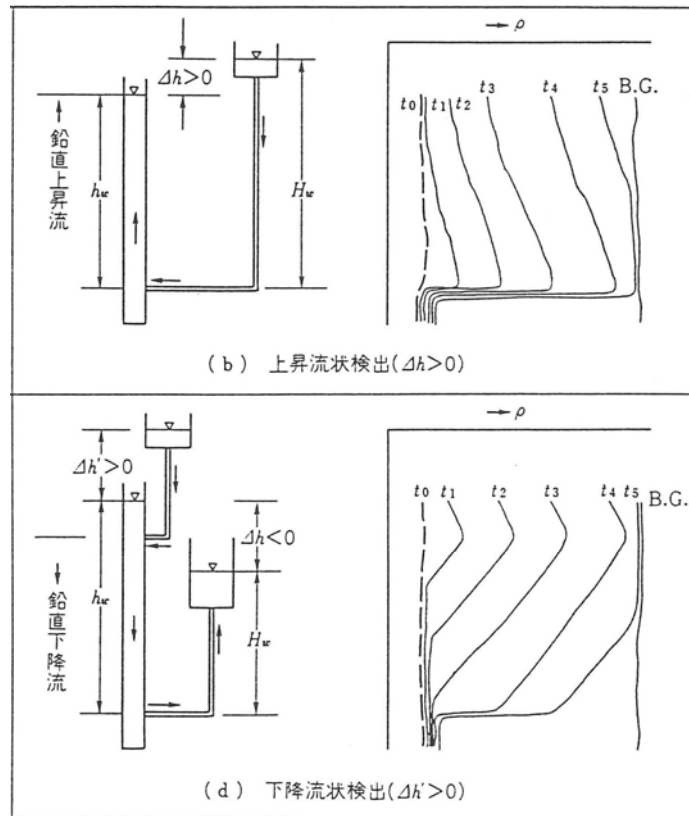


図 周囲の地下水の水頭差により上下動が起きた場合の希釈状況

温度検層について

温度検層は、孔内水の温度変化を測定することにより孔内水に流動状況を推定するものである。地盤の地温勾配は、 $2\sim 4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 程度と言われており地域により差がある。割れ目等から地下水の流入や流出があると孔内水の水温に変化が生じる。湧水および逸水により生ずるボーリング孔内の水温変化を想定すると下図のようになる。

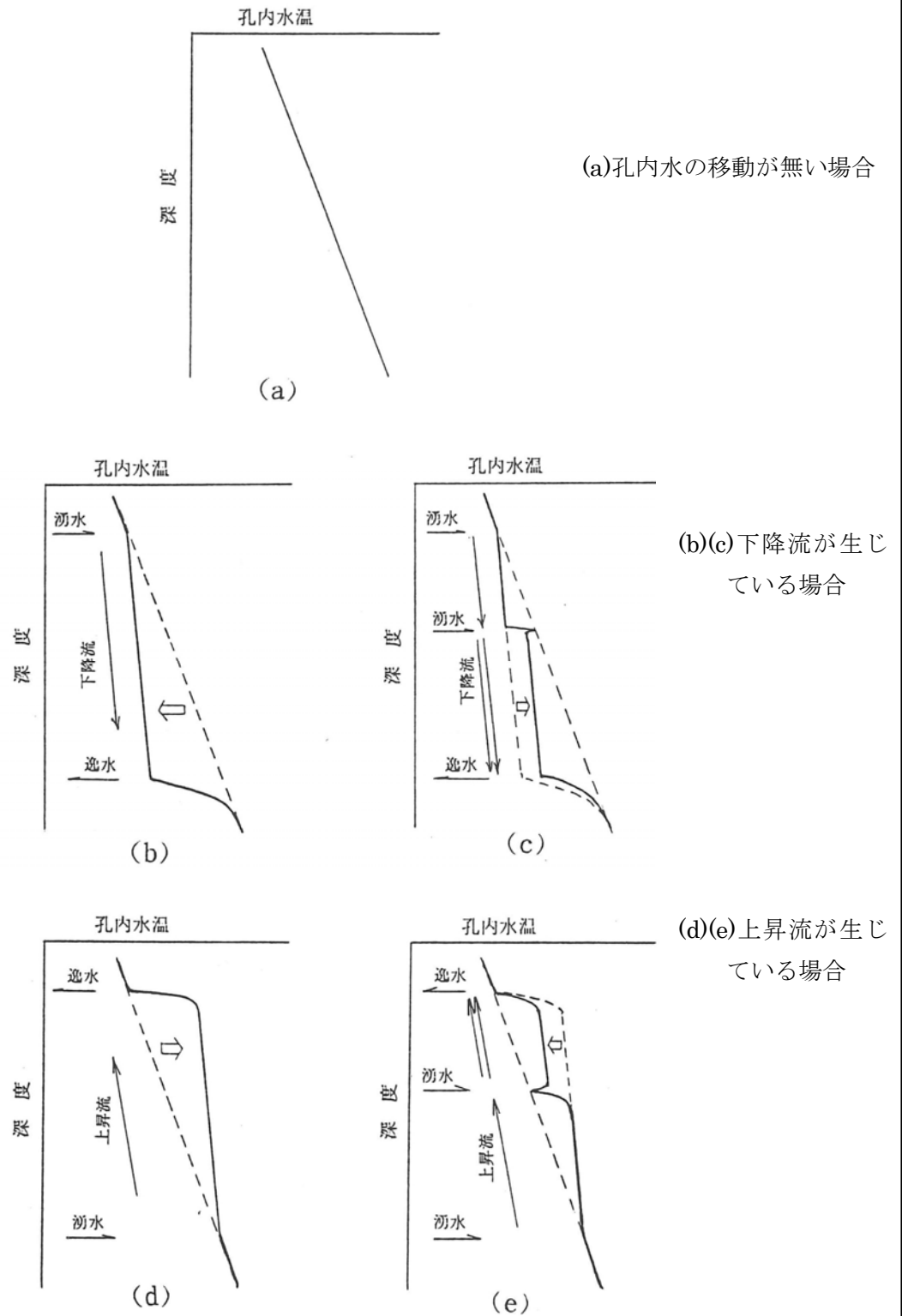
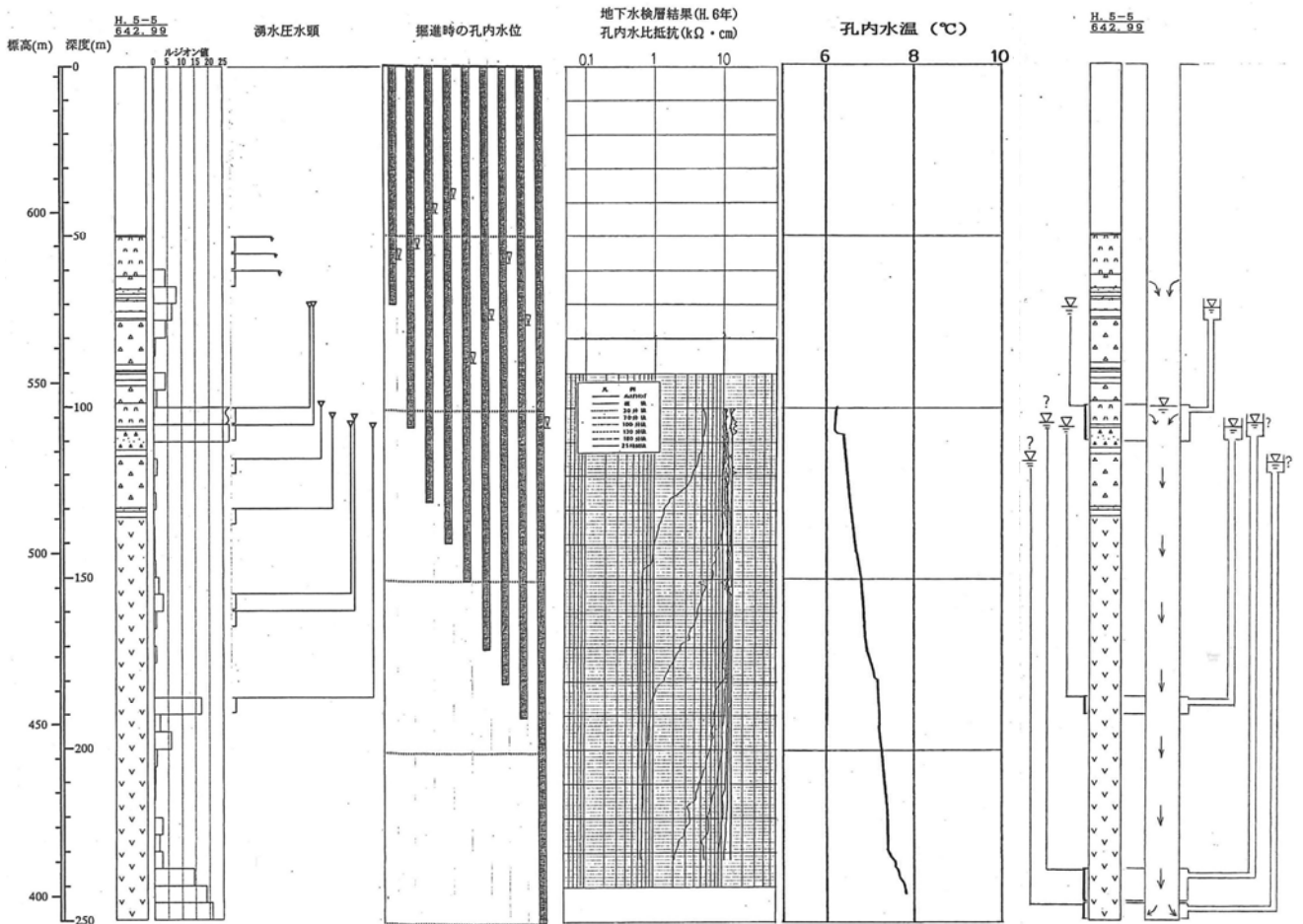
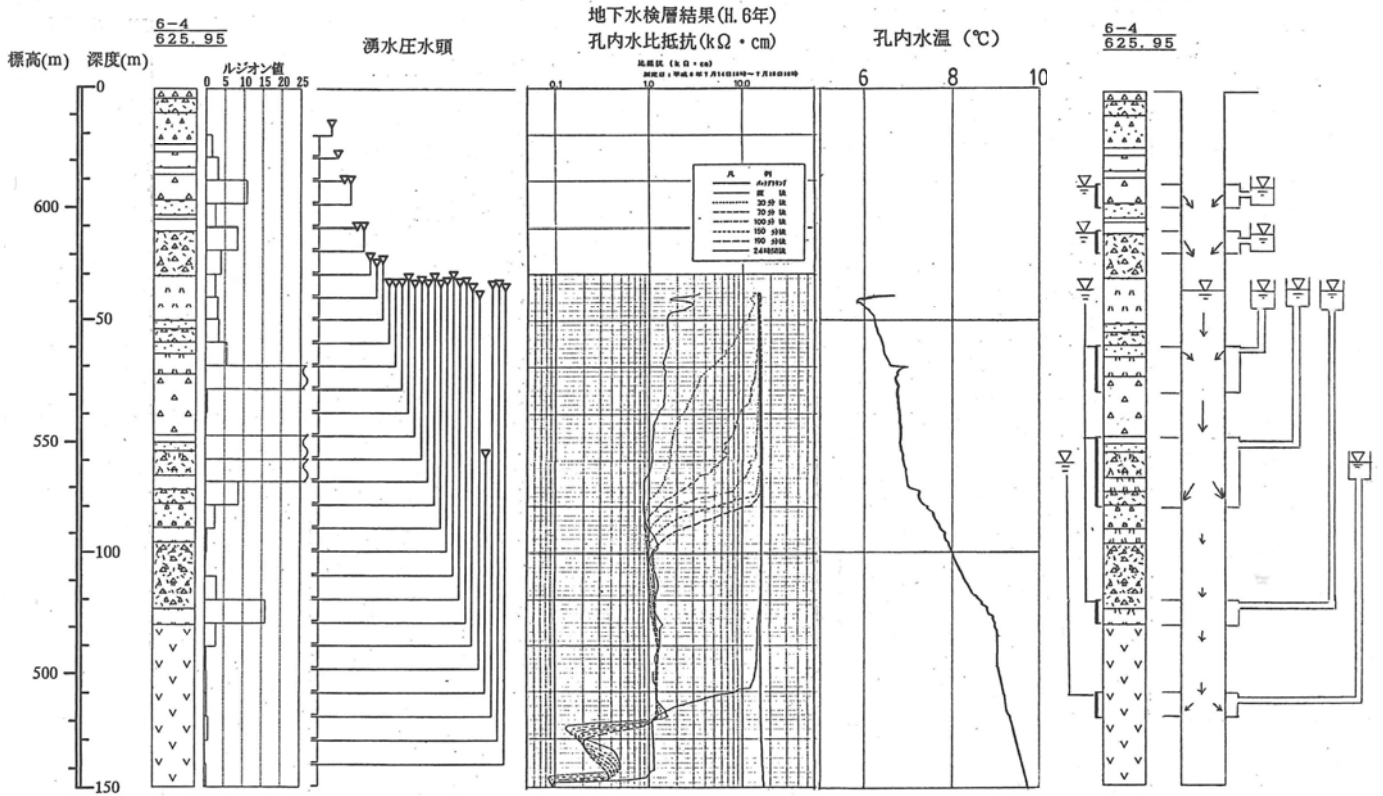


図 湧水による孔内水温の変化

測定結果例



例その2 B地点（地下構造物建設予定地）での調査

地下構造物建設予定地であり、岩盤内に地下空洞を建設するにあたり、地下水挙動を推定するための調査が行われた。

岩盤の透水性を把握するためレジオン試験が、地下水の水圧を求めるため間隙水圧測定が行われている。

ここに試験結果の例をいくつか挙げる。

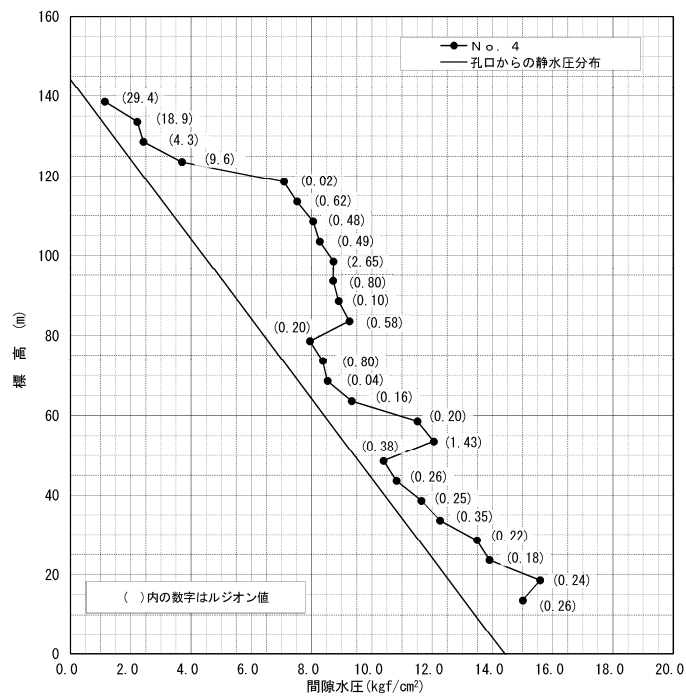


図 間隙水圧測定結果

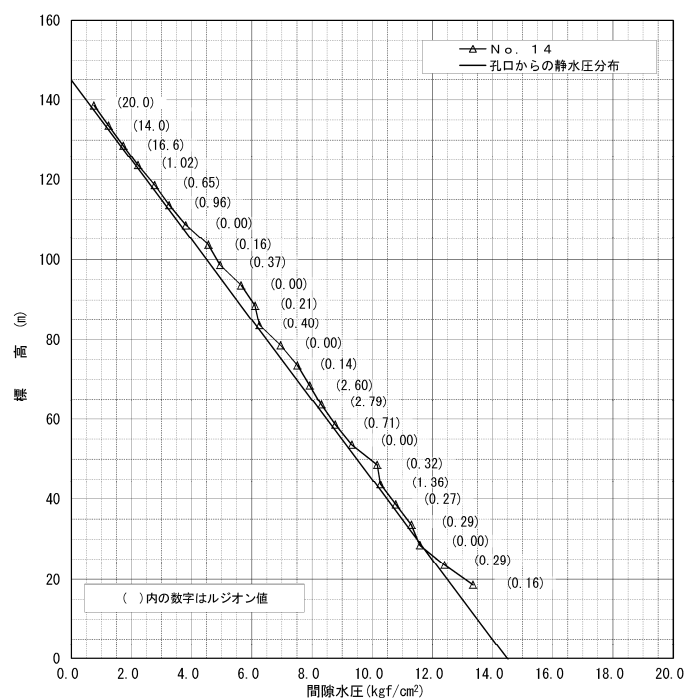


図 間隙水圧測定結果

例その3 地下水流向流速測定

新第三紀砂岩層を対象に水理定数（地下水位・透水係数・地下水流向流速）を把握するための調査において地下水流向流速測定を行った例である。

地下水流向流速測定法の概要

地下水流向流速測定は、複数の測定孔で観測を行うものと、1つの測定孔で観測を行うものがある。ここでは、単孔で行う地下水流向流速測定について述べる。

単孔で地下水流向流速測定を行う場合は、地下水の動きを検出するための物質（トレーサー）が必要であり、現在までに種々の方法が開発されている。主なものを述べると以下ようになる。

- ① ホウ素をトレーサーとする。ホウ素水を測定区間に注出し、その希釈具合を放射線（熱中性子）により観測するもの。4方位あるいは8方位で希釈具合を観測し地下水の流動を求める。
- ② 蒸留水を注出し、電気抵抗の変化を測定器の円周上に配置された電極により検出し地下水の流動を求める。
- ③ ヒーターにより孔内水を加熱し、その温度変化から地下水の流動を求める。
- ④ CCDカメラにより孔内の浮遊物の移動を観測して地下水の流動を求める。

それぞれの特徴としては以下のことが挙げられる。

- ① φ150mmのボーリング孔に外φ90mmの測定管を挿入した観測孔を仕上げるためコストがかかる。観測孔を仕上げた後では何回でも測定を行う事が出来、季節毎のモニタリング等に利用できる。ホウ素が水質汚濁防止法の対象となったため現在はほとんど利用されていない。
- ② φ86～116mmの孔径で測定可能である。測定区間はボーリング孔底あるいはダブルパッカーを用い孔内で可能となる。トレーサーが蒸留水であるため水質にほとんど影響を与えない。
- ③ φ50～100mm程度の孔径で測定可能である。上記の2方法に比べて適用される流速範囲がやや狭い。
- ④ φ40mmより測定可能である。孔内が懸濁していると測定出来ない。流速が精度よく測定出来ない

しかし、この手法はあくまで「点」での調査であり、この結果を調査地での評価とするためにはさらに種々の検討が必要である。

②の測定器例 (LD-60)

測定器の中央からトレーサー（蒸留水）を注出し、その移動状況を周囲の円周上に配置された 12 本の電極で電気抵抗の変化として捉えるものである。地下水の流れの下流側でその変化が大きくなる。電気抵抗の時間変化の速さから流速が推定できる。

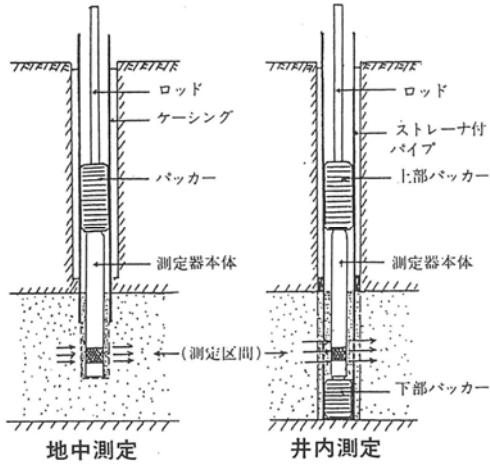


図 測定器の設置状況

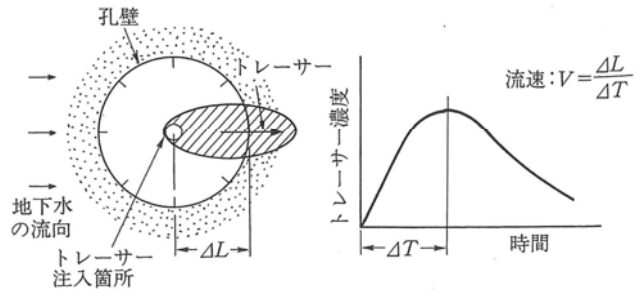


図 トレーサーの流れと測定値イメージ

③の測定器例 (GDF3)

測定器の中央に設置したヒーターを発熱し、その周囲の円周上に配置した 16 個の温度センサーで温度上昇を計測する。地下水流の上流側で温度が低くなり、下流側で温度が高くなる。流速が大きいと温度上昇が低く抑えられ、流速が小さいと温度上昇が大きくなる。

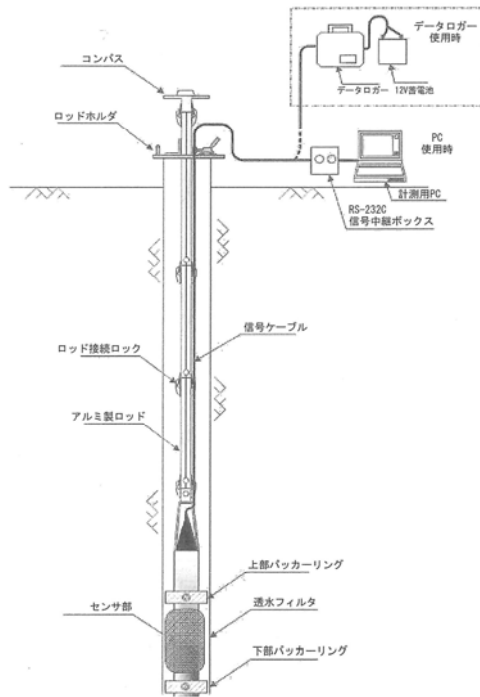


図 測定器概要図

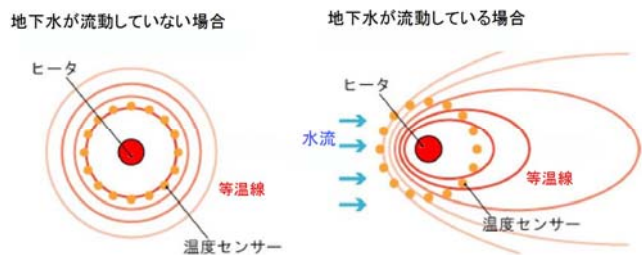


図 測定時孔内温度分布模式図

今回、地下水流向流速測定として紹介するのはホウ素を用いた方法である。現在、この手法はほとんど利用されていない。

調査方法の概要は以下の通りである。

調査地の地質は新第三紀の細粒砂岩が主に分布し、層厚 0.2~0.3m の難透水性のシルト岩の薄層が 2 層介在する。試験対象は細粒砂岩である

下図に観測井の仕上げ状況を示した。測定区間として 2 層のシルト岩に挟まれた砂岩で 1 区間、下位の砂岩で 2 区間の計 3 区間を設けている。

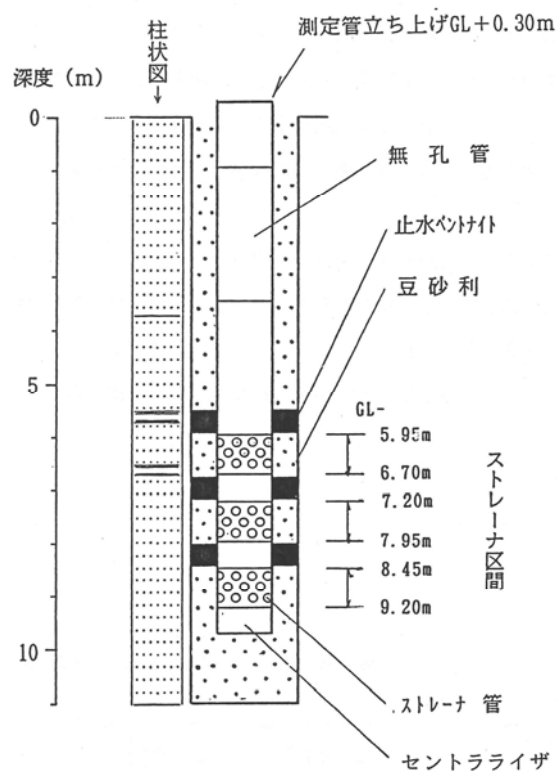


図 地下水流向流速測定用観測井設置状況図

測定は、中性子水分計により行う。トレーサーを投入した当初はホウ素により中性子のカウント数が下がるが、地下水流入の希釈によりそのカウント数は徐々に上がっていく。この変化状況を 4 方位あるいは 8 方位で観測することにより、地下水の流動方向および流速を求めるものである。

次頁にこの手法の測定装置、測定状況の概要を示す。

なお、この測定器の測定範囲は $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$ である。

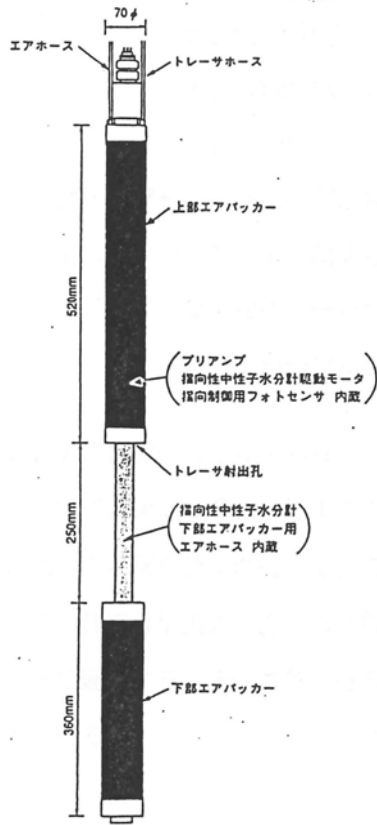


図 地下水流向流速計本体

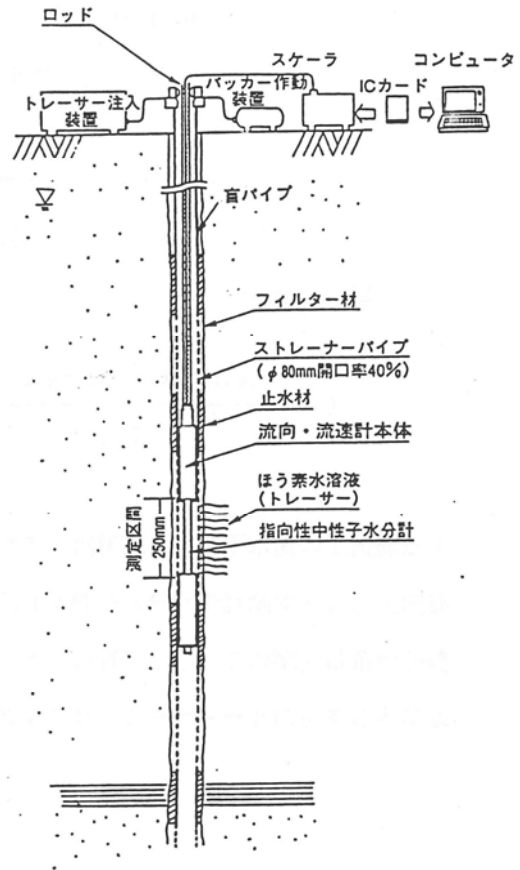


図 測定状況概念図

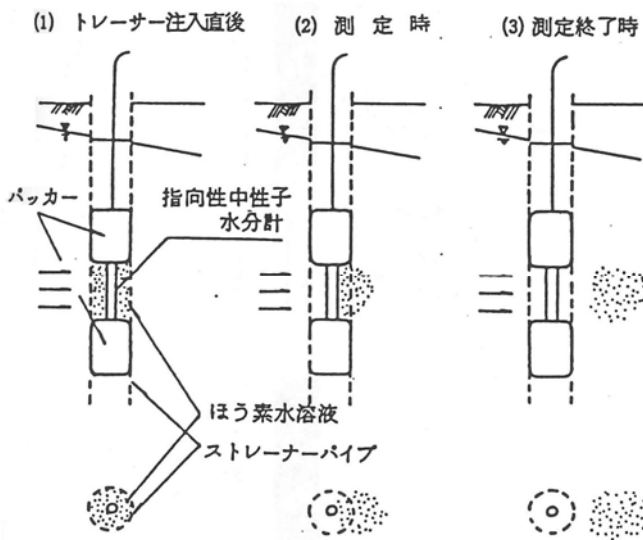


図 トレーサー希釈状況図

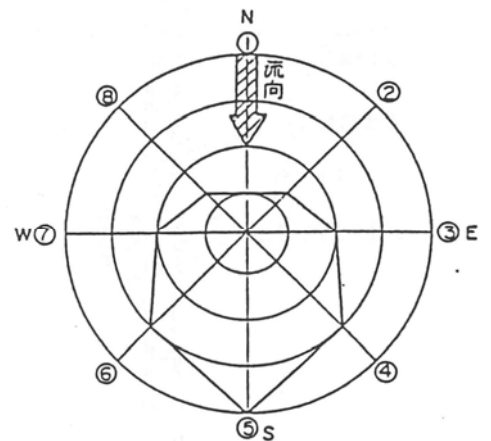
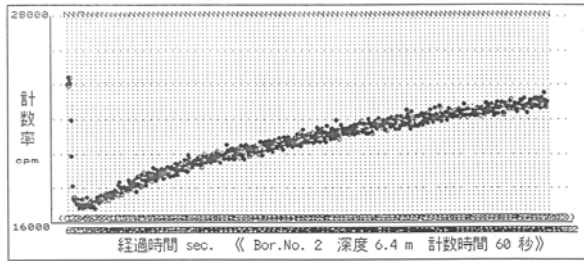
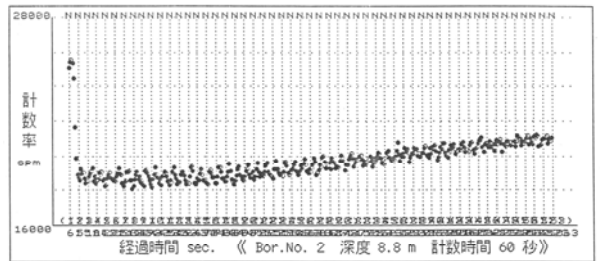


図 方向判定図

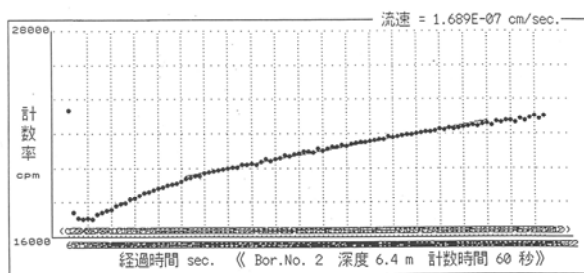
設定された3測定区間で測定を行ったが、中間区間での測定値に異常が認められた。この異常値より地下水は2層あり、中間部に地下水が存在しないと想定され、孔内水は複合水位と推定された。



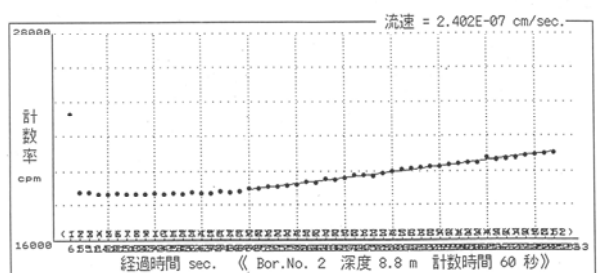
(a) 測定結果図



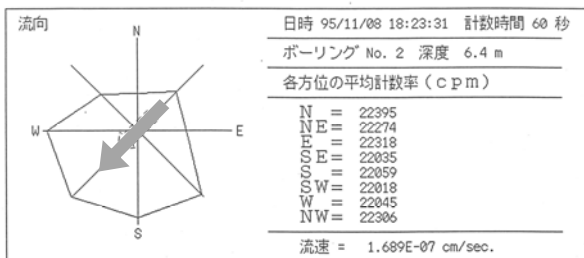
(a) 測定結果図



(b) 流速解析図 (平均計数率変化図)

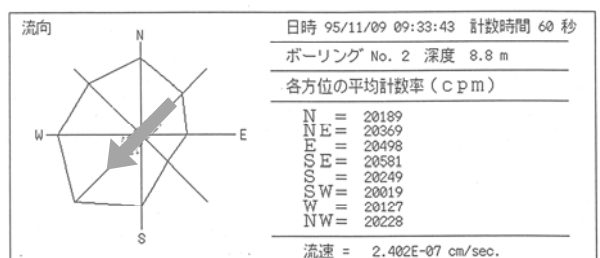


(b) 流速解析図 (平均計数率変化図)



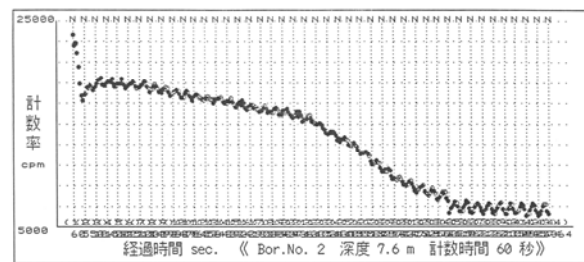
(c) 流向解析図

流向流速測定結果(深度 6.4m)

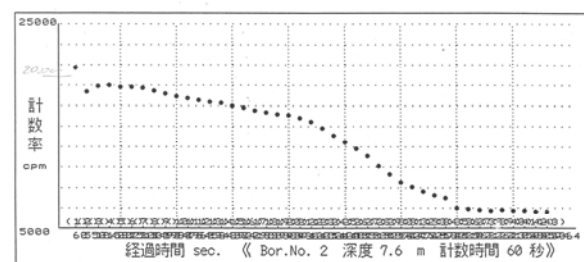


(c) 流向解析図

流向流速測定結果(深度 8.8m)



(a) 測定結果図



(b) 平均計数率変化図

流向流速測定結果(深度 7.6m)

下図に測定結果図を示した。北東方向から南西方向へ流れるとする地下水流向は、周囲の地下水位結果から想定される地下水の流向と概ね整合するものであった。得られた流速は、 $2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 程度でありこの手法の測定精度以下の値のため参考値としている。なお、ボーリングで得られた砂岩の透水係数は $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ($5 \times 10^{-7} \text{m/s}$) 程度であり水位観測からの動水勾配から得られた流速 (約 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) より 1 オーダー以上低い値となった。

調査孔周辺の断面図も示したが、近くに沢地形があるため地下水が流出し、複数の地下水となっているものと思われる。

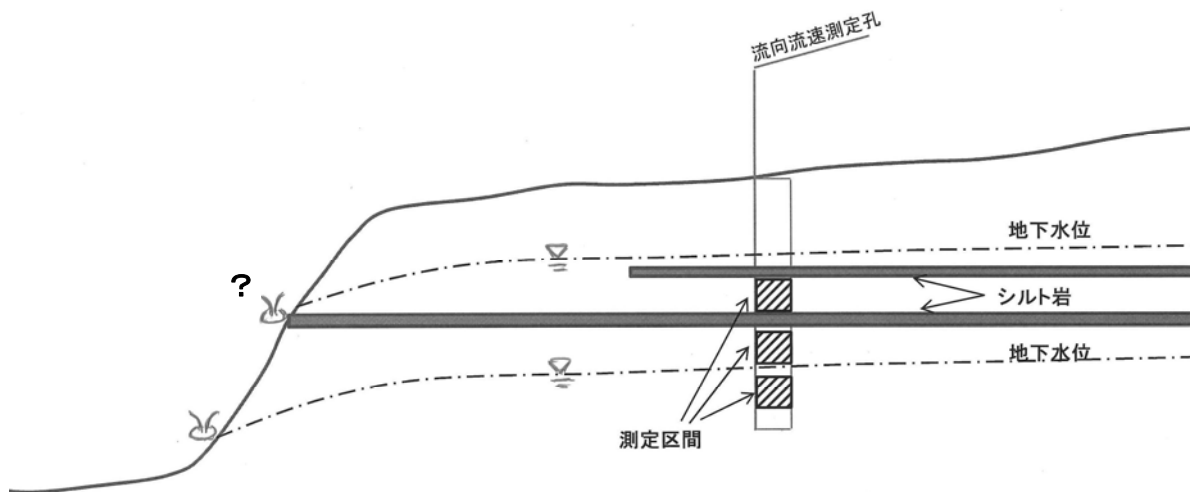
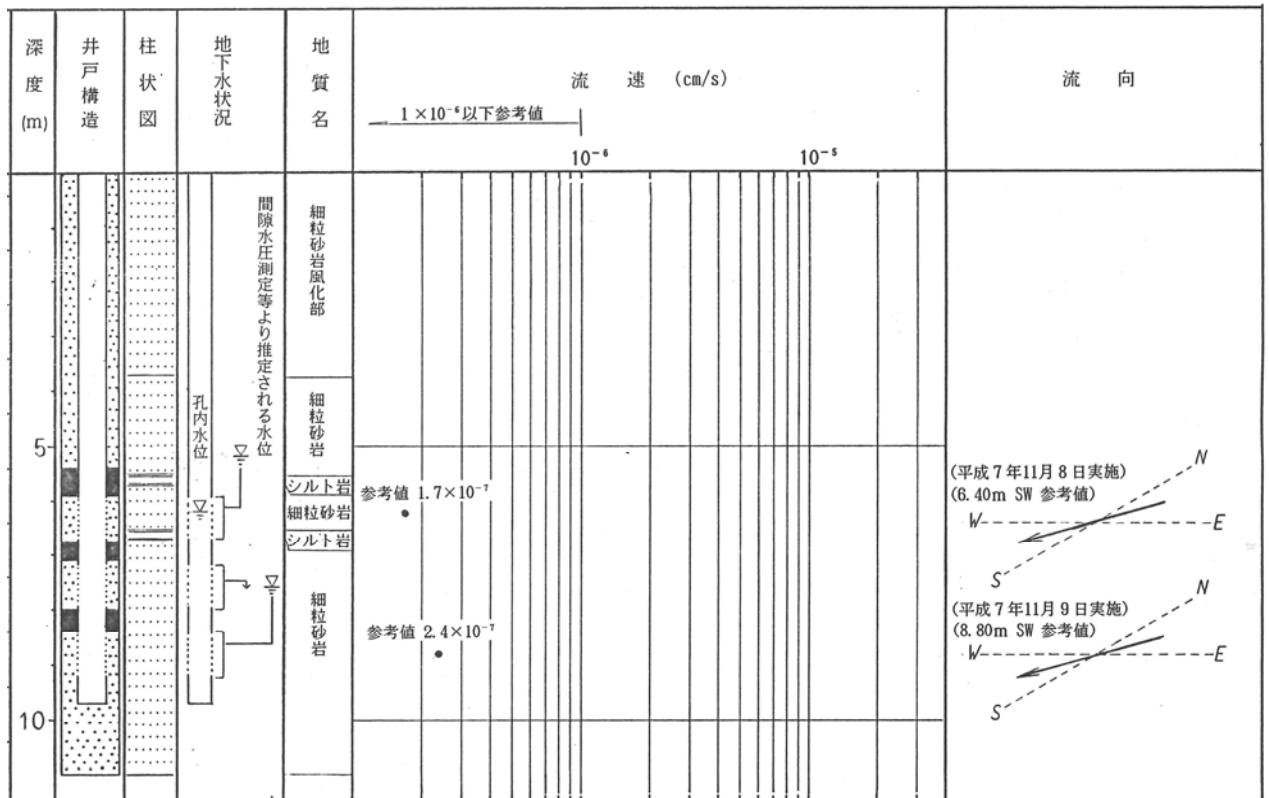


図 測定孔周辺の推定断面図 (イメージ)

例その4 揚水試験の測定例（自動計測による水位観測）

揚水試験は、帯水層の水理定数を把握するために実施する。
通常試験は、予備揚水試験、段階揚水試験、連続揚水試験およびポンプ停止後の回復試験を行い水理定数を求める。

ボーリング孔単孔で行う「現場透水試験」に比べ、複数の観測孔を設置する事により広範囲の地盤の水理定数が求める事が出来る。

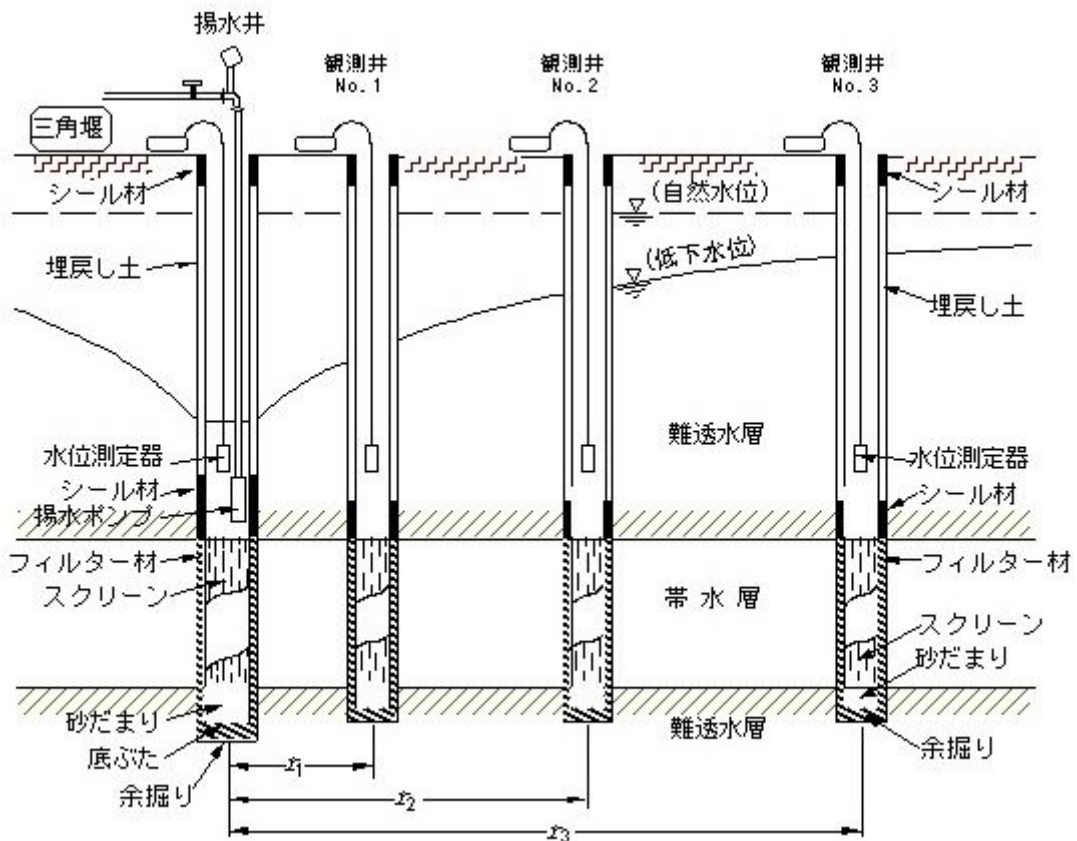


図 揚水試験のイメージ図

以下に、試験の作業手順を示す。

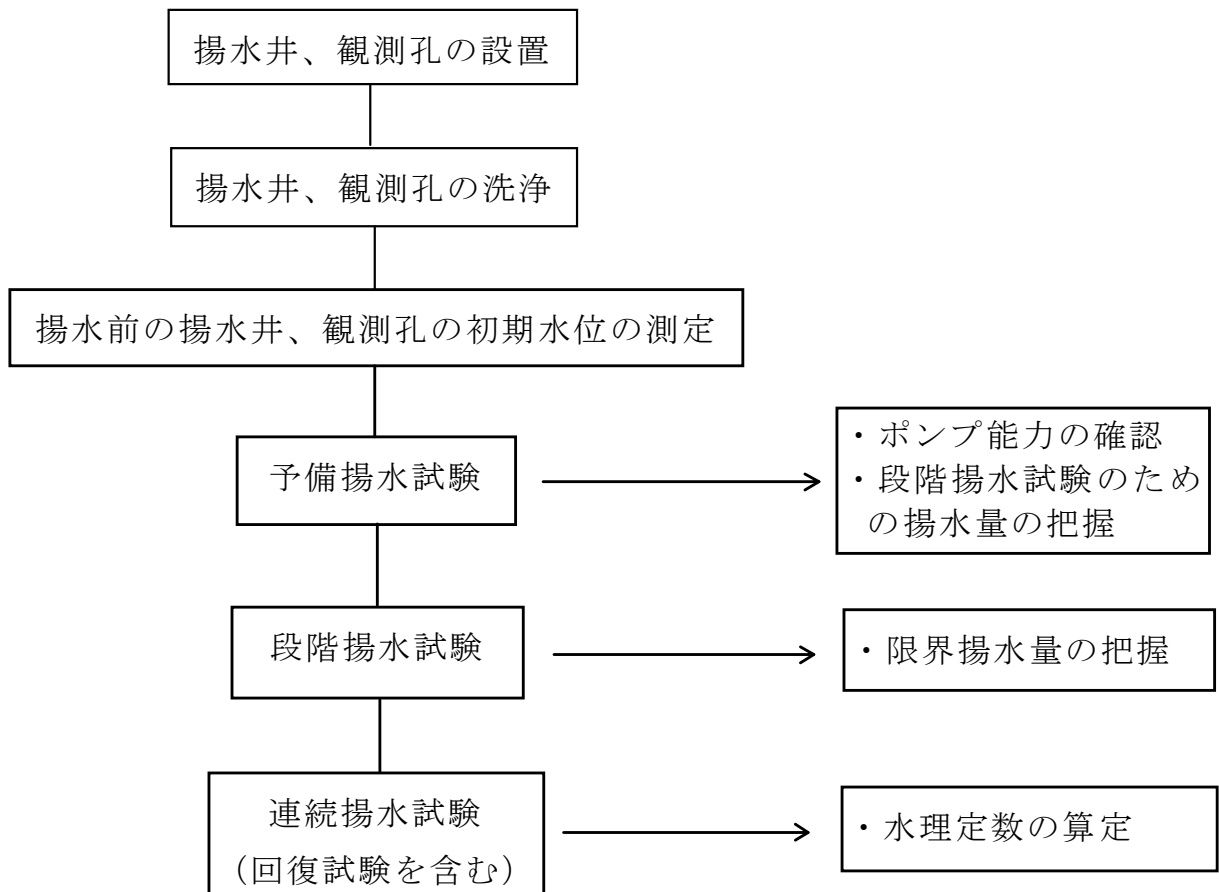


図 揚水試験作業フロー図

揚水孔の他に観測孔が複数孔あるため、試験時には複数の人員が必要となる。

このため、揚水試験の効率的な施工を目的に自動計測を行った例を述べる。

この例では、GL-45~-67m付近に分布する砂層の水理定数を把握すること、および、この層を対象としたディープウェルによる地下水低下工法施工のための参考資料を得る目的で行ったものである。

システムの概略図を示す。

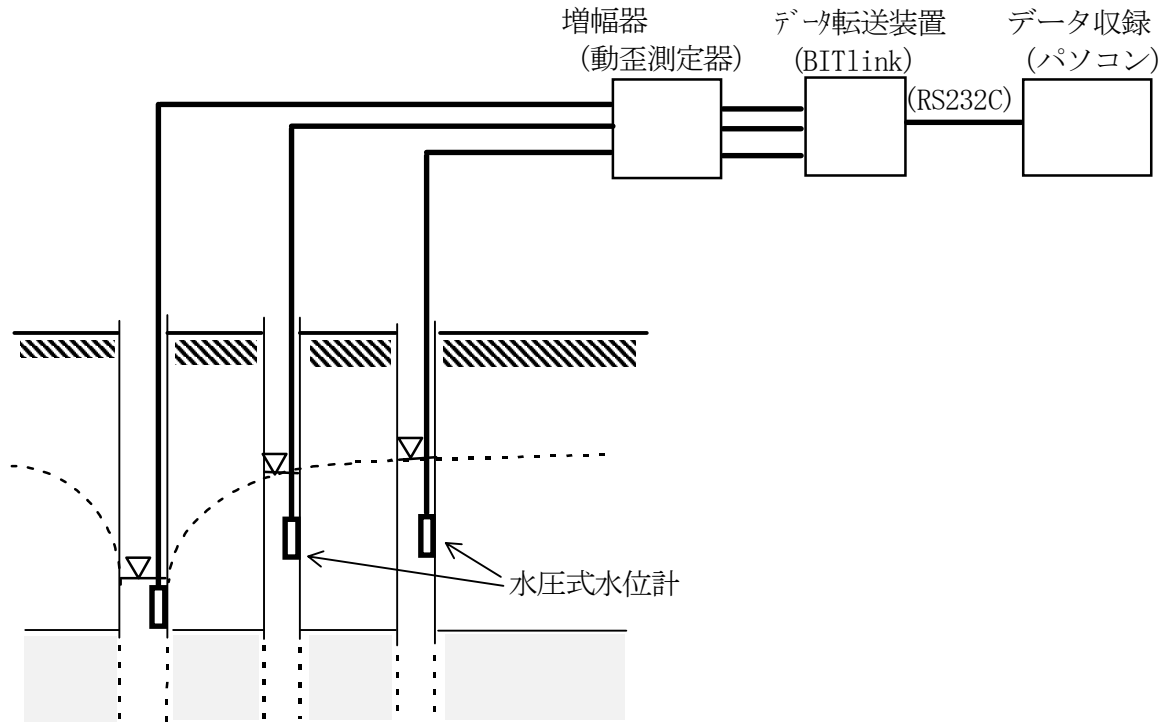


図 自動計測システム概要図

水位変動状況をリアルタイムでモニタするところや、データを逐次パソコンに入力する。

測定本部を設け、各センサーからケーブルを本部まで引き込み、デジタルに変換してパソコンに取り込む。

なお、水位観測孔は5孔であり A-1、B-1、C-1 孔は揚水井と同じ帯水層の観測孔であり、A-2、B-2 孔は上位の帯水層の観測孔である。

地下水位が変動する要因として以下のもの挙げられる。

- ① 降雨 ②潮汐 ③大気圧 ④人為的なもの ⑤その他

- ① 降雨により地下水位が上昇する。
- ② 海に近いところでは潮汐の変動に準じて地下水位は変化する。
- ③ 大気圧が高くなると水位が低くなり、大気圧が低くなると水位が高くなる。
- ④ 井戸ポンプ等の地下水に汲み上げによるもの。
- ⑤ 雪解け水等の地盤への浸透 他

また、地下水位を水圧センサーで測定した場合、測定値に影響を与える因子として以下のものが挙げられる。

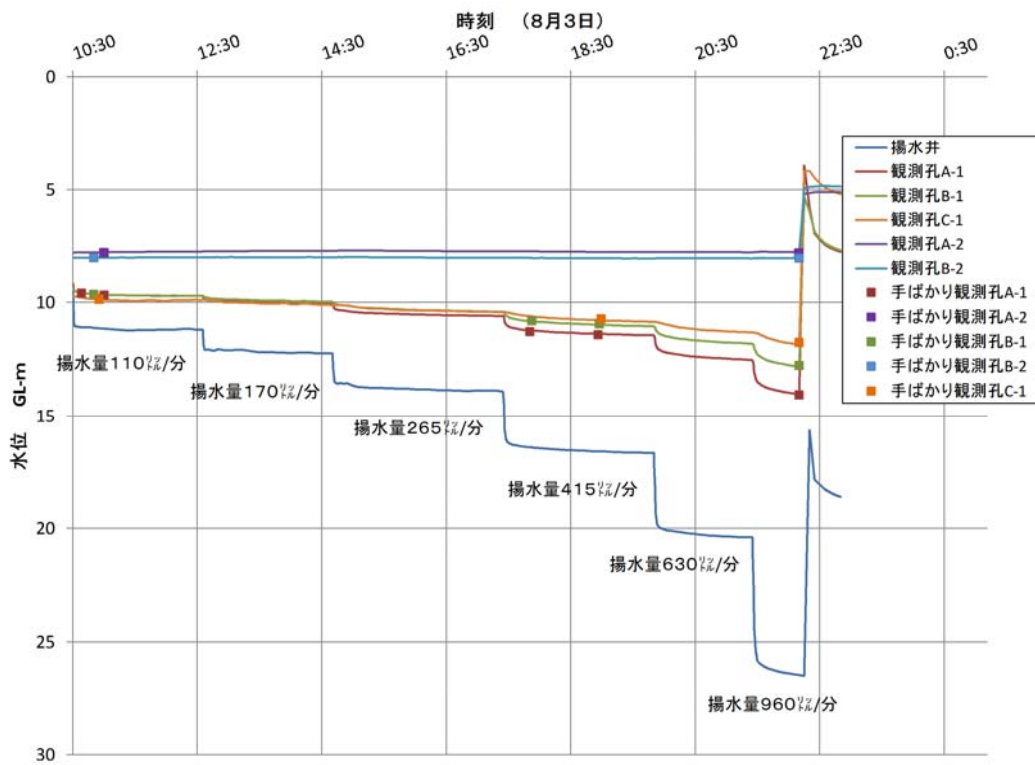
- ① 温度 ②大気圧

- ① 計測器の温度が変化すると抵抗値等の変化により出力値にも変化が生ずる。
- ② 大気圧が変化すると水圧センサーの値が変化する。
(大気圧が高くなるとセンサー出力の数値が高くなり、見かけ上水位が上昇している表示となる)

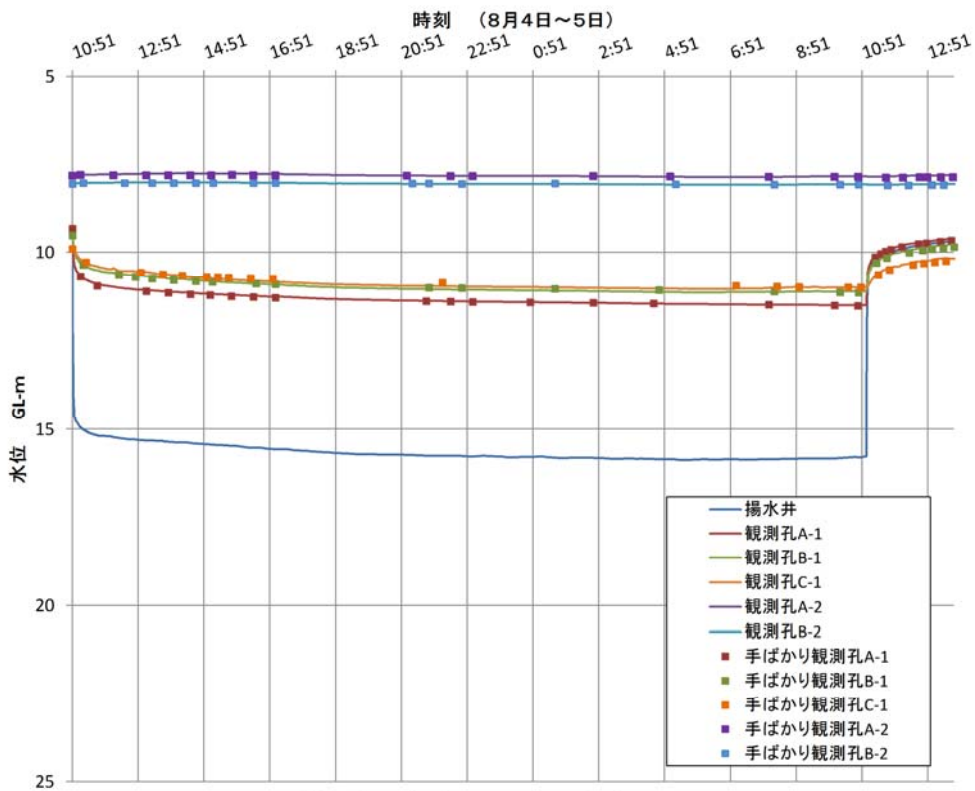
温度に対しては温度補償型の水位センサーを用いることにより、その影響を低減できる。

大気圧に対しては大気圧開放型センサーを用いるか、大気圧観測点を設けて補正を行う。

そのほか、水の比重の違いにも注意が必要であるが、通常の測定に対する影響は小さいものと思われる。



段階揚水試験 水位観測結果



連続揚水試験 水位観測結果(揚水量330 L/min)

解析結果として、各解析方法による透水量係数 T ・透水係数 k は、 $T=0.12\sim 0.16\text{m}^2/\text{min}$ 、 $k=9.0\times 10^{-3}\sim 1.2\times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ となった。また、調査対象の帯水層の上位に位置する別の帯水層に設けた観測孔 (A-2、B-2) では揚水による地下水低下が認められなかった。

なお、このシステムの問題点について以下に示す。

- ・変換装置・パソコンとも防水仕様でないので降雨・夜露に対処するために、車・テント・ハウス等の測定本部となる施設が必要となる。
- ・この種のシステムの宿命として、地上部に露出しているセンサーケーブルや測定装置の温度変化により、センサーからの出力値が影響を受けてしまう事がある。今までの例では日中の気温の上昇により、実測値に対して 10m 用水位計で 10 数 cm の出力の変動が認められている。このため、補正用として手測りによる水位の確認が必要となる。