

地下水調査のための密度検層（測定上の問題点と使用機器の試作について）

小 鯛 桂 一

Density Logging Techniques for Ground-water Investigation

Keiichi KODAI

Abstract

The physical properties of water-bearing formations involve many of important factors for ground-water investigation.

In the first part of this paper, the writer described the interrelation between several factors (bulk density, porosity, moisture, grain-size and permeability) for this investigation. Consequently, he proposed the range of bulk density from 2.0 to 2.3 in gram per cubic centimeter for recognition of a granular aquifer of unconsolidation.

In the second part, he considered about the cause of differences between the value of physical properties measured by laboratory tests of drill cores and that obtained from density logging which is one of continuous tests at the bore hole in the fields.

There are many problems to apply in practice the density logging techniques to the water well of large diameter. As one of solution of them, he introduced to use the improved equipment, produced by making the experiment on both a part of detection and eccentric mechanism (the guider which is constructed to two bow-springs) of probe, of the small natural-gamma logging equipment.

1. はじめに

詳細な地域地下水調査を行なうためには、水位と水電導度の分布的データに加えて、坑井から得られるところの、多種の立体的な物理情報を得る必要がある。

従来、わが国における地下水開発のための坑井内の物理測定手法としては、おもに普通電気検層と揚水試験が多く活躍しているのが現状であるけれども、今後は保全をも充分考慮した地下水開発でなければならないという意味も加わって、正確な物理的情報をより多く得る必要性が特に増大してきた。

透水性もしくは帯水層の物理的性質を知るための従来からの試験方法は、おおよそ次のようである。

- (1) 野外試験として、普通電気検層、揚水試験および流速試験
- (2) 室内試験として、コア試料中の浸透比を観察する直接法および粒度分布、間隙率といった物理的性質を、実験値を通して解析する間接法。

しかし、(2)の室内試験間接法として、コア実験結果か

ら物理的性質が正確に判明する部分は、当然コアが良好な状態で採取されるおもとシルトと粘土の含有分が多い地層に限られる。帯水層を形成しているところの粘土含有率の小さい砂・礫層においては、試料採取にあたって攪乱されるか、あるいは採取不能になるので、一般に物理的性質の多くを知ることができない。また試料採取が可能なシルトおよび粘土含有分の多い地層においても、経済性を考慮して、かなり間引きした散発的なコアリングにとどまるために、連続的な情報は得られないので、もっぱらスライムの観察や掘さく技手の感覚だけに頼っているのが現状である。

自然ガンマ検層や密度検層などの放射能検層法は、井戸がケーシング施工された後においても検層可能なので、その後の情報取得に役立つ。

以下、本報文では、従来この室内試験の間接法で求められていた粒度、間隙率等の帯水層の物理的性質の測定を、原位置連続試験である密度検層法によって行なう場合の問題点と、それに適合した測定機器の試作改良とについておもに論じている。

* 応用地質部

2. 帯水層評価における物理的性質の範囲^{注1)}

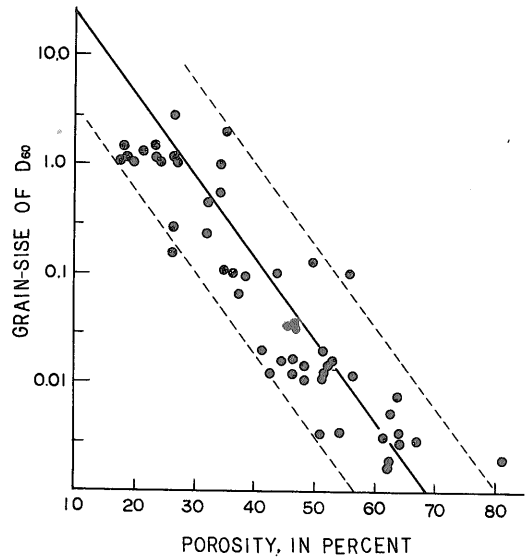
一般に、地層の透水性は、間隙率だけに関係するのではなくて、粒度組成とも関係し、これらが相互にからみ合ってくる。均一な球形粒子を考えた場合の間隙率は、理論的には球の大きさに無関係に26~48%の範囲にある。しかしながら、實際上、完全に固結していない地層の間隙率は、粒子形状、粒度組成、セメンテーションそして粘土中に含まれる吸着水の割合などが多岐に変化するために、均一な球形粒子配列を考えた理論的な間隙率の範囲を上回る20~70%位までの間隙率分布を一般に示す(第1図参照)。

帯水層の物理的性質に関する過去における研究のおもなものとして、下記に示す3氏のものがある。

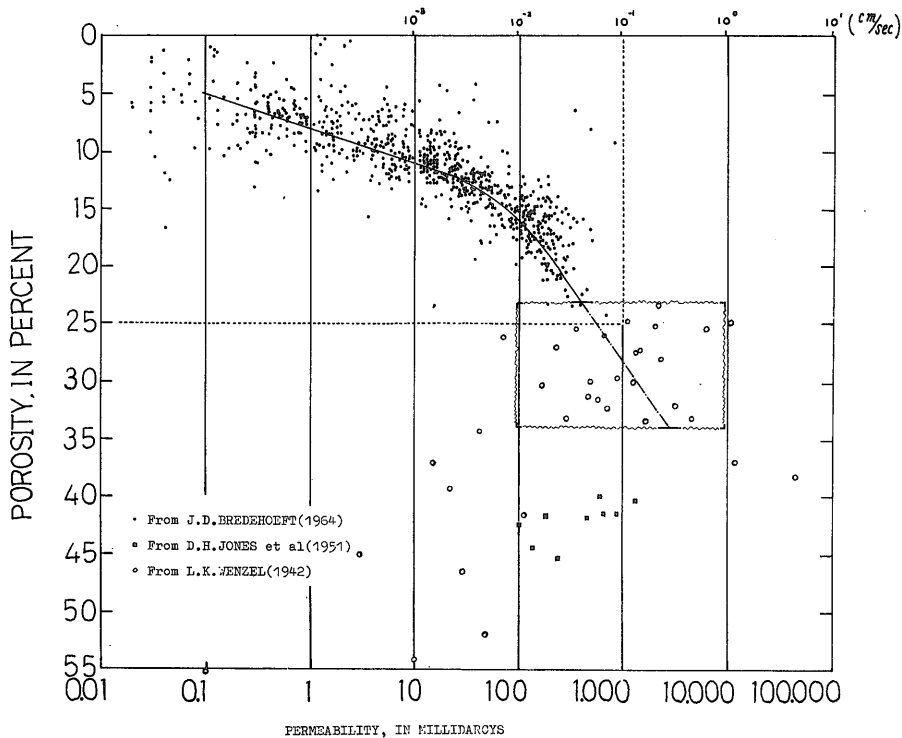
2.1 Jone, D. Bredehoeft (1964) の研究

テンスリープ第三紀砂岩の透水性と間隙率 (0~25%)

注1) 放射能検層法以外にも、地層とケーシングを強固に圧着させる特殊工法を施すことによって、ケーシング挿入井でも測定することの可能な音波検層法が開発されている。したがって、物理的性質は、透水性、密度、間隙率、含水比の他にも多く存在すると思われるが、ここではあくまでも帯水層評価のため、おもに放射能検層によって得られる物理的性質だけについて述べることにする。



第1図 コアの室内試験で得られた粒度と間隙率の関係

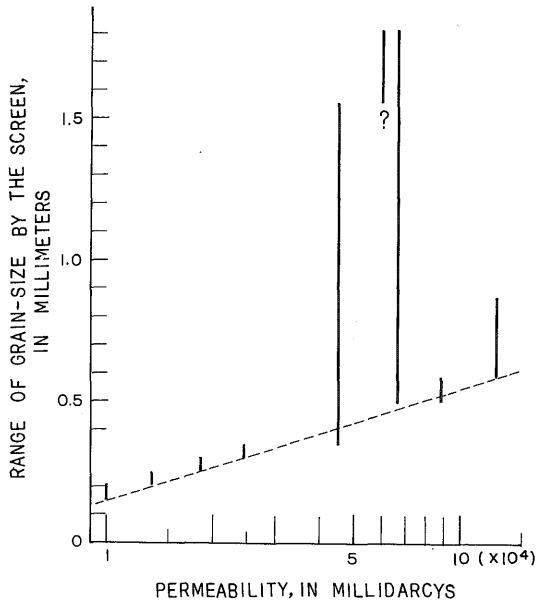


第2図 3氏の研究資料をまとめて作成した間隙率と透水性の関係

の範囲)を調べ、その値を片対数グラフ上にプロットした結果、2次的セメンテーションによるバラツキはあるけれども、なおこの間に直接的関係が有ることを証明した(第2図中の点線部内参照)。

2.2 P. H. Jones ら (1951) の研究

彼らの実験によれば、ふるい分けした粒度に対して、



第3図 P. H. JONESら (1951) のデータから作成した粒度分布と透水性の関係

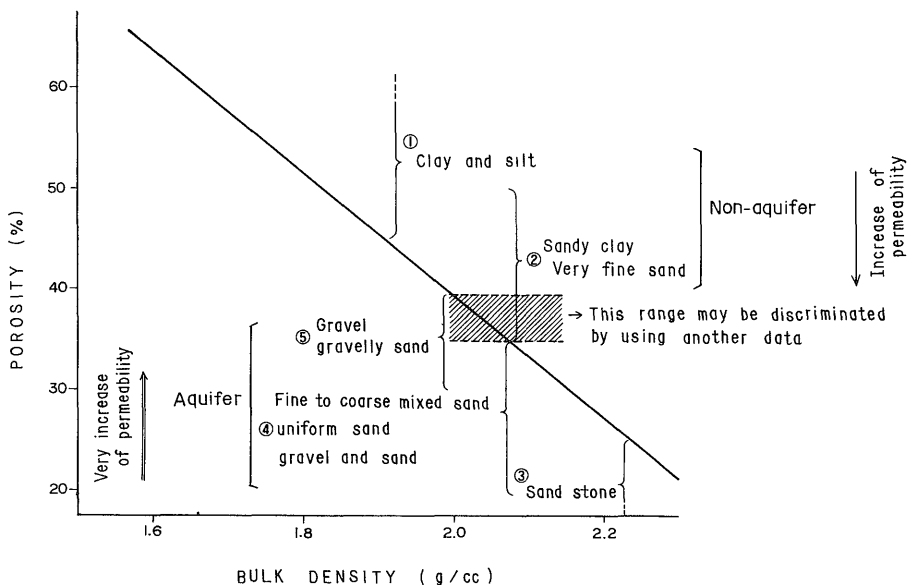
セメンテーションおよび地層係数との比例性はあるけれども、間隙率(40~46%)および透水性との間には順序正しい関係は必ずしもないと結論している。これについて筆者が再検討した結果では、第3図に示すように粒径底値(点線で示した部分)と透水性との間には片対数グラフ上でほぼ直線的な関係はあるけれども、粒径底値以外では全く彼らのいう通りであった。

2.3 L. K. Wenzel (1942) の研究

彼はアメリカ合衆国中から帯水層の物理的性質に関する35地点の代表的な資料を収集し、これから次のように結論している。すなわち『一般に、大きい粒子からなる地層では透水性も大きいけれども、粒度と透水性の厳密な関係はない。』としている。彼の集めたデータを見るかぎり、粒度分布が大きいのに、透水性が悪いものがみられ、理解しがたいところも1・2点みられることは確かである。

以上3氏のデータをミリダルシ単位で統一し、1つにまとめると第2図のようになる。

Jone, D. BREDEHOEFT によって作られた第三紀砂岩の間隙率(0~25%)と透水性との関係曲線(第2図参照)を、さらに高い間隙率を一般に示すところの第四紀層に延進可能かどうかについては、以前から論議されていたところであるけれども、第2図から、2.3)の透水性が良好な部分は、2.1)の関係曲線の延進上に載ることがわかる。しかし、2.3)の透水性の悪い部分は延進曲線上からはずれている。これらは粒度分布からみて、大・小礫お



第4図 堆積物の物理的性質の範囲

よび粗砂の含有率が比較的少ないか、細砂、微砂およびシルト、粘土の含有率が比較的に高いか、あるいはまた、これの両方の性質をもち合せたものである。これらは、いわゆる難透水層の部分であり、この部分では、貯留性の情報としてだけ関係してくる。また、図中の2.3)の各ポイントの間隙率は、透水層と難透水層とでは異なってくる。すなわち、透水層では透水性が特異的に過大な2点を除けば、ほかはすべて24~34%の範囲におさまっている(第2図中の波線の部分)。これに対して、難透水層の間隙率は38~58%と、透水性の減少にある程度比例して逆に高くなっている。他方、2)の各値も1)の関係曲線からはずれている。これは、自然の粒度分布がふるい分けによる粒度組成と異なるということを明示している。ここに24~34%の間隙率を、砂の粒子比重2.65と仮定して容積密度を換算すると、2.09~2.26 g/ccになる。したがって、密度検層によって容積密度を計算し、これから帯水層の評価を行なう場合に対象となりうる容積密度の範囲は、坑壁径の乱れ、粒子比重および測定誤差などを考慮して、普通2.0~2.3 g/cc前後の砂礫層であろう。

これを表にして一般的に示すと、概して第4図のようになる。そして、図中の斜線上部に記した堆積物は、非帯水層、斜線下部の堆積物は帯水層と区分できる。問題は透水性が非常に異なる堆積物で、容積密度または間隙率の値が類似し重複することである(細い斜線で示した部分)。この部分の識別には、土質試験による粒度分布、電気検層図、地質柱状図のいずれかとともに検討することが必要である。

3. 密度検層とその解釈

密度検層を行なうことにより、直接的には地層の容積密度がわかる。そして、砂の粒子比重を一定と仮定することにより、間接的に間隙率を知ることができる。この間隙率は、帯水層の透水性と関連が大きいので帯水層判別に有効である。また、水の飽和度を100%と仮定する

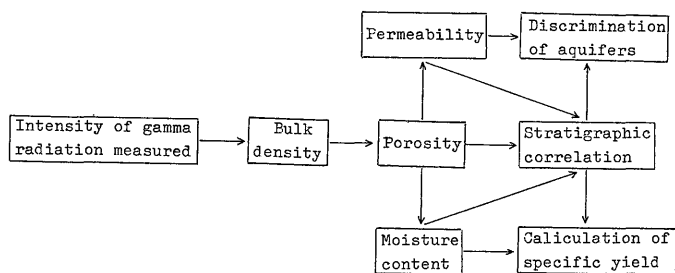
ことにより、間隙率から含水比を導出できる。また、一つの地域について地層の物理的性質を比較検討することによって決定される層厚と含水比を一緒に考え合わせることで、地層の貯留性を知ることができる。

密度検層を、地層対比から成層関係に用いる場合以外では、定量的解釈が要求されてくる。この定量的解釈は、対象となる環境を閉鎖的にシミュレートするような、完璧な坑井モデル実験で較正するのが最も理想的であるけれども、実際には、実験設備の膨大化と実用的経済性との兼ね合いから、ある程度簡略化した設備を考案して計数の較正に利用している。これは、API(米国石油協会)のピットについても同様であり、このピットは、疑似地質として多数の細長い形をした石灰岩で構成されているけれども、実際に測定する物質(Z/A)との相違が問題になっている(Scott Keys and MacGARY, 1971, p. 72)。

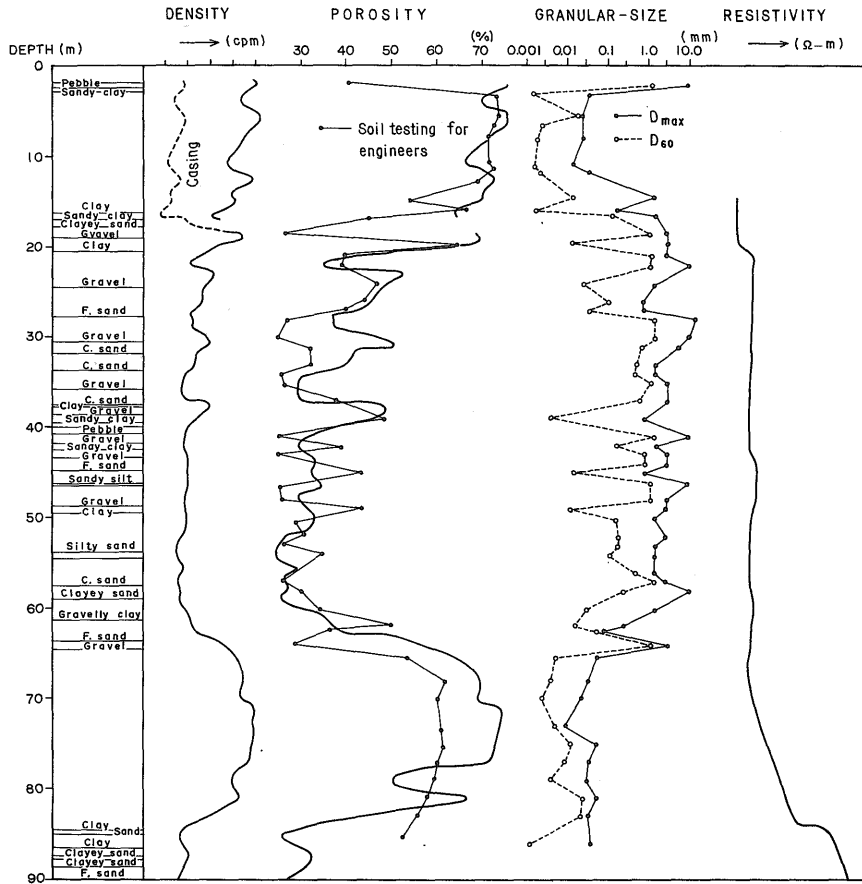
実験室でのコア分析値は、検層図上に実際的な値をのせるのに広く用いられている。

密度検層の調査範囲は、信号の90%を生む全ての物質を含むものとして定義され、その影響量は、線源・検出部間距離に拡張されるので、地層に入る前の検出応答から初まり、地層を離れるまでの検出応答も含まれる。したがって、検出値は、コアの実験値と較べて当然その意味が異なる。すなわち、実験室データが点測定であるのに対して、検層はコア資料よりも100倍以上も大きい物質質量に対する物理的パラメータの値率を表わし、常に不均一地質的環境の統計的表現として解析される。したがって、地層変化がシャープでも検層変化はなだらかであるのが特質である。それで、線源検出部間の距離以下の薄層およびこれに準じるものは、この間の容積密度が複合され平均化された散乱ガンマ線強度として計数されるために、隣接の地層よりも大きい真値は小さく、また小さい真値は大きく見かけ上計数されることにもなる(第6図参照)。

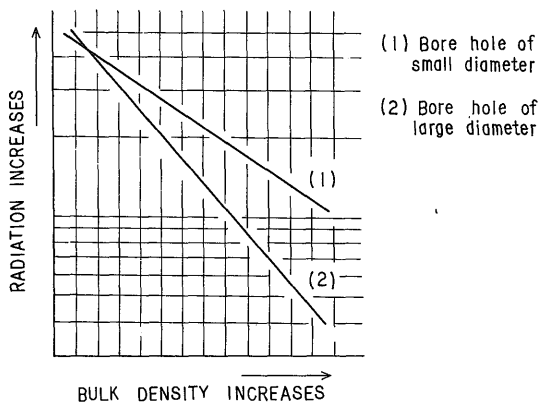
他方、地質が一定であっても、坑径、ケーシング、掘



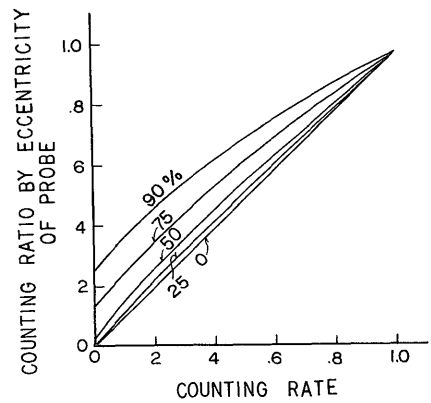
第5図 密度検層から解釈される物理的性質の過程



第6図 土質試験と密度検層の比較例（大阪市内）



第7図 坑径の異なる井戸と散乱ガンマ線強度の関係



第8図 プローブの坑内偏心による係数比変化

なく状態などのファクタが変化することにより検出応答を
変える。

検層上に現われる外部影響としては、ビットサイズの

変更による坑径とケーシング厚さの変化が最も大きい。
一般に坑径が大きくなるほど、また、鉄ケーシングの厚
みが大いほど、検出精度は劣化する（第7図参照）。

また、散乱ガンマ線の幾何学的一次応答理論から、坑内中央での計数率と偏心率の相違による計数比は、第8図のようになり、計数率の小さい部分では、偏心率が大きくなると、わずかな偏心差が大きな計数比になることがうかがえよう。

もし、坑径の影響を最小限にとどめようとするならば、坑径に見合った大坑径で、しかも、線源・検出部間距離の大きいプローブを用いるか、または、プローブの線源と検出部に指向性をもたせ、プローブ自体を常時坑壁近くに位置させておくような工夫をすることが必要である。前者は、米国地質調査所で実施しており、後者は、石油関係の検層サービス会社で多く用いられていて、モータ内蔵により駆動するデ・センタライザと称するアームで坑壁に密着させる構造になっている。

坑径変化による影響の他の一面として、掘さく技術上のトラブル、または、地質的には薄層や、第四紀層のような比較的軟弱な地層で多くの場合発生する坑壁のしわの問題があり検層上の誤差を生むことになる。

この誤差をなくす方法としては、これに適合したキャリパ検層機を開発して対処するしかない。

4. 自然ガンマ検層とその解釈

密度検層が、構造上、自然ガンマ検層機のプローブ先端に遮へい物を介して、放射能線源を接続する構造になっていることと、密度検層の計数率が自然放射能計数率をバックグラウンドとして含んでいるために、自然ガンマ検層は付随的に、必ず実施しなければならない。しかし、自然ガンマ検層自身も時には独立的に有効な情報を提供してくれることもある。その一つに、粘土分を含有する堆積物の確認がある。一般に粘土含有の堆積物の自然ガンマ線強度は炭化物や石英砂の堆積物よりはるかに大きい。しかし、火山性物質を含有する砂岩は放射能を増大することが知られている。

過去において、自然ガンマ線強度と地域地質的な関連を研究した例は2・3ある。すなわち、RABE (1957) は、デンバー、ジャスパーク地域の粘土結合した砂の透水性と自然放射能間の経験的な相互関係を示した。RAPOLOVA (1961) は、検層図からの自然ガンマ線強度と粘土分含有の帯水層の透水性との間の相互関係を示した。そして、GAURら (1965) は、水理実験からの透水性と、ガンマ線強度曲線下の面積間の関係を示した。

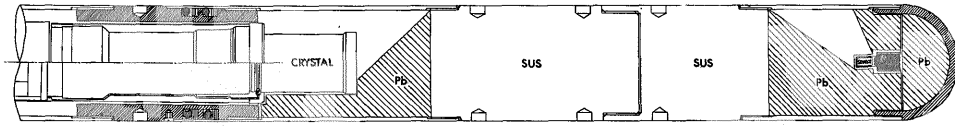
以上は、あくまでも地域的な特性に過ぎず、地層に対する一般的共通性のある独特の応答はもっていないようである。

5. 検層機の試作改造

地質調査所において、かつて、ウラン探査を目的として使用していた小型自然ガンマ検層機がある。これは、井戸掘さくの経済性と検層機自体の可搬性を考えて、小径のプローブが使用されている。その後、工業立地に関係した調査が盛んになるにつれて、土木地質あるいは地質工学的な見地から、筆者はこの小型自然ガンマ検層機を密度検層機に改造し、おもに、サウンディング後の小孔を利用して検層し、地層・地耐力・密度相互間の関係の究明に活用した。そしてその他にも、地質調査井、温泉井、ガス井などのうち孔径100mm位までのケーシング挿入井についても従来通り、プローブを自然垂下する方式で検層を実施してきた。

水井戸のように坑径が大きくなると、第4節で述べたような種々の理由からくる障害を除去するために、米国の地質調査所や、石油関連のサービス会社で実施しているようなプローブ構造をとらねばならない。しかしながら、これをそのまま採用するとなると、かなりの重装備となり、価格的にも数千円位のオーダーであるために、わが国の水井戸調査用としては、とても経済的に引き合わない。このような理由から、筆者は従来から使用してきた小型検層機のおもにプローブを中心とする試作改造を実施した。試作設計に際しては、性能、安全性、耐久性についておもに検討し、最終的には第9図および第1表に示すような性能と構造に到達した。

図表に示すように、試作機は最終的に検出感度、ガンマ線放射の指向性、安全性、耐久性の面で改善された。しかし、水井戸検層で重要なもう1つの問題、すなわち、測定時にプローブを坑内壁に常時密着させておくセッティング技術がある。これを解決するには、前述のような石油関係で使用するデ・センタライザ方式は大装置、大経費になるのでとても採用できないので、筆者は初めは上記のプローブに1本のピアノ線を弓状に張って、坑壁間に数mm程度の余裕をもたせ試験したけれども、このクリアランスが指向性窓の偏角を生むために測定誤差を生む結果となった。それで、次に伸縮する棒状のアンテナを2本垂平に張り試験した。この結果は、かなり良好であったけれども、坑内壁の荒れにより、アンテナ先端が接触した場合の、ビビリが部分的に起ること、また万一、プローブが坑内で抑留された場合に、アンテナ部を破壊して回収するための強度を一率に設定しがたいので、一般使用には危険があることがわかった。このような経験を生かして、最終的には、第10図および第11、12図に示すように、2本のピアノ線を弓状に張り、しか



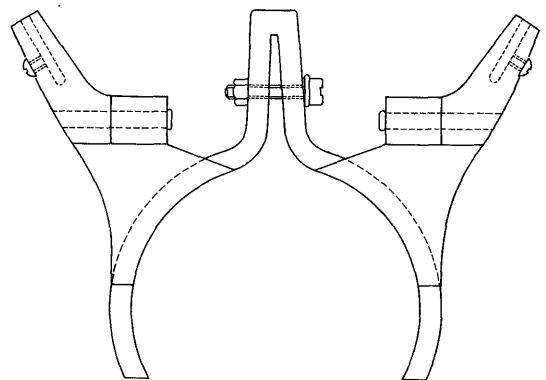
第9図 線源-検出部間のプローブ構造

第1表 測定機器の改造箇所

		第1次改造時	第2次改造時	備 考	
シンチレーション測定器		SL-2型 (Aloka)	TCS-603RU (Aloka)	第1次の真空管方式から第2次のトランジスタ方式に変えた。	
プローブ	購入部分	製品名	ND-8V (Aloka)	ND-15K (Aloka)	
		外 径	28 mm	50 mm	
		クリスタルの大きさ	$\frac{1}{2}$ " ϕ ×2"	1" ϕ ×2"	シンチレーションデテクタの感度は、おもにクリスタルの大きさと形の関数であるので感度向上のため、市販プローブ中最大のものを使用した。
		弁別レベル	100 keV	150 keV	密度検層のノイズ対策・電氣的安定性・散乱ガンマ線の計数効率を考えれば、さらにレベルを上げるべきであるが、自然放射能検層の併用を考慮して150 keVとした。
	改造部分	遮へい体構造	両端が鉛で中央部が中空	中央部をステンレスにし、鉛当量設計	耐圧・耐水性の向上を計った。
		ハウジング材料	普通鋼	ステンレス	耐食性対策
全 体	重 量 (最大時)	約12kg	約20kg		
同軸ケーブル (大日本電線KK製)	許容最大荷重	150kg	250kg	絶縁インピーダンスなどの電氣的特性を変えずに中心導体のピアノ線断面積を増大させ補強した。	
	外 径	6.3 mm	7.5 mm	上記の断面積増大にともなうもの。	
	重 量 (300 m)	約60kg	約90kg	同 上	

も、坑壁と弓の中央部の間のクリアランスをとらずに軽い力で常時接触させておく方式に落ちついた。この方式は、測定操作上のプローブの昇降時において、プローブの重心が、プローブ中心から2本の弓の中央部側へ多少移動するために、線源部と検出部が坑内壁に軽く常時押しつけられるかたちで、滑りながらスムーズに検層できるので理想的であり、一方、プローブ上端のケーブルはたえず坑中央に向う力が作用するので、検層時におけるプローブの昇降操作は安全性が高い。しかも、実験結果では、ガイドーとして使用するピアノ線の最適強度の選定を誤らねば、かなりの坑内壁の変形や縮小部に対しても、これに対応してピアノ線が変形してくれるので、何ら支障のないことがわかった。

上記のプローブとガイドーの試作改造は、地質調査所技術部竹内三郎技官が終始これを担当し、製作上非常に苦心のあったことを記しておく。



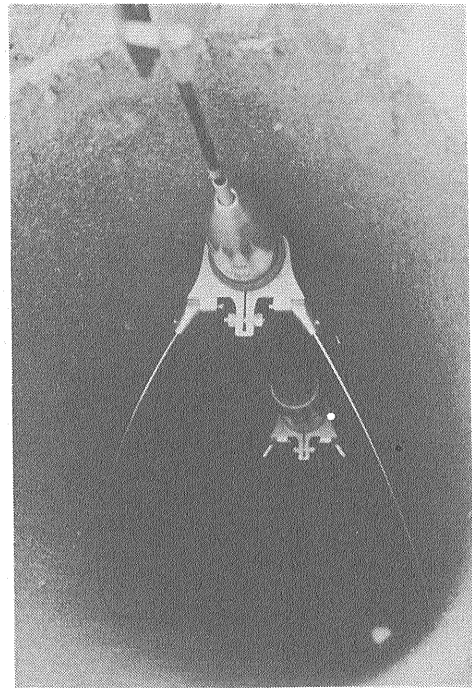
第10図 弓状スプリング用ホルダの構造

6. 残された問題点

水井戸中の検層として、普通電気検層に加えて密度検



第11図 弓状スプリングの据付状態



第12図 弓状スプリングの据付状態

層を併用することは、両検層の欠陥を相補い、特性を十分に発揮するという意味で最も良い方法であると考えられる。しかも、両検層の併用による経済的負担の増加はそれほど大きくないし、長い目でみた場合の利益は、むしろこれをはるかに上回るものと思われる。

地下水調査を密度検層により定量的に算定するための最大の問題点は、地層の圧密とセメンテーションの度合い、間隙率と透水性、粘土の水和と膨張、裂か状態といった地質条件と、コアリング井とノンコアリング井、掘さく時間の長短、ドリルステムの重量と長さ、泥水の材料・圧力・流量といった掘さく技術の相違とがからみ合せて起きるところの坑壁の荒れに対する補正の問題である。この補正には、キャリバ検層の実施が必要である。

この問題はまた、単に密度検層だけでなく、他の全ての検層に共通した問題でもある。

キャリバ検層を実施されていない現時点においては、これら坑内の荒れの発生が推測される怪しい部分は、極力除いて解析しなければならないけれども、わが国の地下水賦存帯の大半が、軟弱な未固結層である第四紀層中に集中していることからすると、この荒れの部分の比率は非常に大きいものと思われる。したがって、適合するキャリバ検層の開発とその実施を、今後並行して推進されるべきものと考えられる。

引用文献

- SCOTT KEYS W. and MACCARY L. M. (1971): *APPLICATION OF BOREHOLE GEOPHYSICS TO WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS*. Techniques of Water-Resources of the United States Geological Survey. BOOK 2, CHAPTER E1.
- BREDEHOEFT, J. D. (1964): Variation of permeability in the Tensleep sandstone in the Bighorn basin, Wyoming, as interpreted from core analyses and geophysical log. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 510-D, p. D166-D170.
- JONES, P. H. and BUFORD, T. B. (1951): *ELECTRIC LOGGING APPLIED TO GROUND-WATER EXPLORATION*. *Geophysics*, vol. 16, no. 1, p. 115-139.
- WENZEL, L. K. (1942): *METHODS FOR DETERMINING PERMEABILITY OF WATER-BEARING MATERIALS WITH SPECIAL REFERENCE TO DISCHARGING WELL METHODS*. U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 887, 192p.

RABE, C. L. (1957): A RELATION BETWEEN GAMMA RADIATION AND PERMEABILITY, DENVER-JULESBURG BASIN. *Am. Inst. Mining. Metall. Petroleum Engineers Trans.*, vol. 210, p. 358-360.

RAPOLOVA, V. A. (1961): Experience of the use of nuclear methods in the investigation of cross section of boreholes being drilled for water, in all-union scientific tech. *U. S. Atomic Energy Comm. Pub., AEC-tr-4475*, p. 67-74.

GAUR, R. S. and Singh, Inderjit (1965): RELATION BETWEEN PERMEABILITY

AND GAMMA-RAY INTENSITY FOR THE OLIGOCENE SAND OF AN INDIAN FIELD, INDIA (REPUBLIC). *Oil and Natural Gas Comm. Bull.* 2, p. 74-77.

小鯛桂一 (1973-a) : 水井戸中における密度検層について. 日本地下水学会々誌, vol. 15, no. 1.

—— (1973-b) : 密度検層による帯水層の判別法について. 日本地下水学会々誌, vol. 15, no. 2.

—— (1973-c) : 帯水層の物理情報について. 日本応用地質学会々誌, vol. 14, no. 4.