

γ-γ検層法による密度測定

中井 順二

はじめに

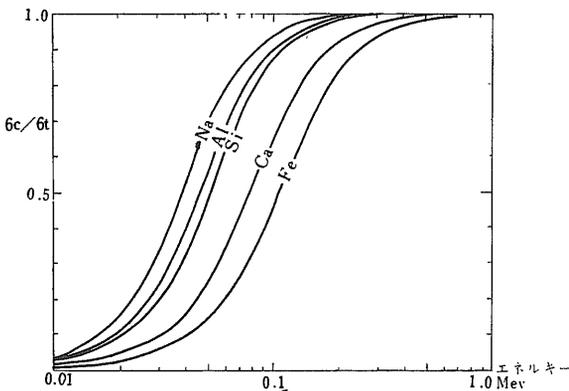
最近石油資源の開発 土木工事における地盤の調査 地下水資源の開発等の分野において原子力利用面での調査が注目されている。とくに人工放射性同位元素を利用した検層が重要でありすでに外国においては この種の坑井内測定が非常に発達している。わが国においても調査技術の試験的研究または研究的利用の実例が報告されているので そのひとつである γ-γ 検層法について簡単な紹介をこころみる。

放射能検層

従来の放射能検層法には γ線検層と中性子検層の二つの種類があり 坑井を使用して 地下の状態についての定性的および定量的知識をうるのに利用され ケーシングの入っている場合 あるいは坑井水のない場合でも測定が可能であるという点で 電気検層とは異なった利点を有している。このうち比較的簡単に利用されているのは γ線検層である。これはさらに天然γ線検層 (natural gamma-ray log) とγ-γ検層 (gamma-gamma log) とに区別されている。天然γ線検層は放射能検層の始祖ともいえるものであり 1940年頃よりはじめられ 原子燃料資源の開発あるいは石油鉱業の隆盛に伴って急速な発展をとげ今日に至っている。

γ-γ 検層

γ-γ 検層法は坑井内に挿入したセシウム-137コバルト-60等のγ線源によって放射される非散乱γ線(一次γ線)とその周囲の物質(地層)との相互作用によって



第1図 γ線エネルギーに対するコンプトン散乱断面積 σ_c と全断面積 σ_t との比率

生じた散乱γ線を測定しそれが地層の密度に関係することを利用して見掛け密度を求める方法である。この方法はある仮定を設けることによって地層の孔隙率を決定することもでき 試錐コアのサンプリングがじゅうぶんでない場合 またその位置があまり正確とはいえない場合には とくに重要な参考資料となっており 最近注目されている。わが国においてもすでに数カ所の研究機関において この方法の技術開発に関する研究 野外における測定調査の実施が行なわれている。

密度測定 の原理

γ線の散乱吸収を利用して 見掛け密度の測定ができる原理についてのべよう。0.3 MeV~3MeV 程度のエネルギーを有するγ線 たとえばセシウム-137 やコバルト-60 からのγ線が軽い元素 すなわち原子番号が30ぐらゐより低い元素から構成されている物質 たとえば堆積岩のようなものに入射する場合 物質とγ線との相互作用はコンプトン散乱作用が重要な役割を果たす。即ち全断面積 (断面積とはγ線と物質との相互作用のおこる確率を示すものでジメンジョンは L^2 である) に対するコンプトン散乱断面積の比率が1に近くなる。岩石の主要構成元素である Na, Al, Si, Ca, Fe についてこれを第1図に示す。コンプトン散乱はγ線と物質中の電子との相互作用であるので 当然その線吸収係数(注1) μ_e は電子のコンプトン散乱断面積 σ_c と物質の単位体積内の電子数との積となる。すなわち

$$\mu_e = \sigma_c \rho N_0 Z/A$$

また質量吸収係数 μ_m は

$$\begin{aligned} \mu_m &= \mu_e / \rho \\ &= \sigma_c N_0 Z/A \end{aligned}$$

で表わされる。

ここに ρ : 物質の密度

N_0 : アボガドロ数

Z : 物質構成元素の原子番号

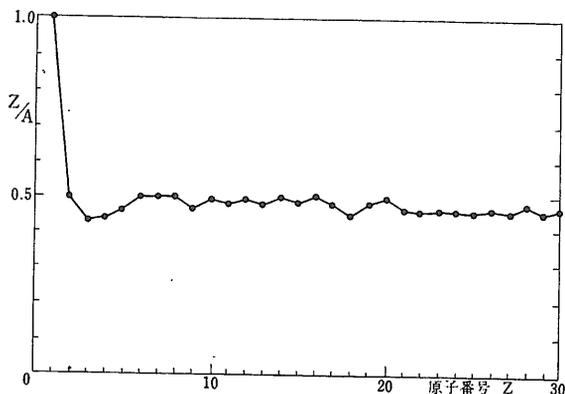
A : 物質構成元素の原子量

(注1) 強さ I_0 のγ線ビームが物質を通過するとき それが一様な物質であれば 厚さ X を通ったのちのγ線の強さ I は

$$I = I_0 e^{-\mu X}$$

で表わされる

この μ をこの物質の線吸収係数という これを吸収体の密度でわったものを質量吸収係数といい ジメンジョンは $L^2 M^{-1}$ である



(第2図) 軽い天然元素の原子番号Zと原子量Aの比率

さて N_0 と σ_c とは構成元素に関係のない量であり軽い元素では Z/A は水素に対して1である以外はほぼ0.5である(第2図)。したがって軽い物質の0.3 MeV ~ 3 MeV の γ 線に対する線吸収係数はほとんど物質の種類によらずその密度に比例することがわかる。したがって γ 線の散乱又は吸収はほぼ物質の密度によって決まるので γ - γ 検層はこれを利用して地層の見掛け密度を決定している。

原理に関連してもう少し詳しく考えてみる。プローブに内蔵されている γ 線源と検出部の間には線源から直接く一次 γ 線が検出器に入射するのを防ぐため通常鉛の遮蔽体が設けられている。したがって検出部に入射する γ 線はほとんどが測定物質による散乱 γ 線である。被測定物質の容積がある程度大きいと当然 γ 線は多数回のコンプトン散乱をくり返して検出部に入射する場合があるが これらを一々計算してそれを総計することはきわめてむづかしい。ここでは典型的な一回散乱だけを一寸考えてその原理的なものだけを知りたいと思う。

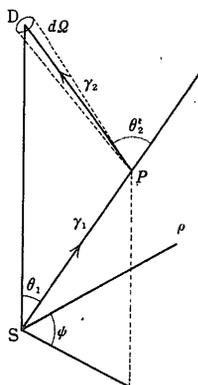
被測定物質中に極座標を考え γ 線源の位置を座標の原点にとる。線源は毎秒 S 個の γ 線を放射しているものとし検出点の位置を点 D で示すものとする。散乱点 P における一次 γ 線は $\exp[-\mu_1 \rho r_1] \times \frac{S}{4\pi r_1^2}$ であり P における微小体準 $dv = (r_1^2 \sin\theta_1 d\theta_1 dr_1 d\phi)$ 内の電子数は $NZ \cdot dv = \left(\frac{NZ \rho}{A} Z dv\right)$ で表わされる。 Θ_2 方向における Klein-Nishina のコンプトン散乱微分断面積を $d\sigma_c/d\Omega$ とすると検出点 D における γ 線束 dF は

$$dF = \frac{S}{4\pi r_1^2} \exp[-\mu_1 \rho r_1] NZ dv \frac{d\sigma_c}{d\Omega} d\Omega$$

で表わされ散乱線 γ の減衰を考えると

$$dF = \frac{SNZ}{4\pi r_1^2} \exp[-\mu_1 \rho r_1 - \mu_2 \rho r_2] \frac{d\sigma_c}{d\Omega} dv d\Omega$$

ここに N : 原子密度 $\left(= \frac{N_0 \rho}{A} \right)$



(第3図)

$d\Omega$: 検出点 D における検出部を点 P から見込む微小立体角

μ_1 : 一次 γ 線の質量吸収係数

μ_2 : 散乱 γ 線の質量吸収係数

r_1 : 線源から散乱点までの距離

r_2 : 散乱点から検出点までの距離

前述のように Z/A は被測定物質の種類によらず ほぼ一定でありしたがって NZ も ρ によってきまる。 μ_1 μ_2 に関してはセシウム-137 コパルト-60 においては散乱角が 90° ぐらいまではエ

ネルギーの損失は各々55% 70%程度である(第4図)したがっていずれも散乱 γ 線のエネルギーは 0.3 MeV より大であり光電効果による吸収を考えなくてよくコンプトン散乱だけを考えればよいことになる。ここで散乱線束 dF は物質の密度 ρ だけによって決まることわかる。

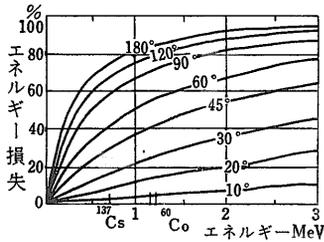
この場合密度が大きくなるにつれて 始めのうちは散乱による影響が大で D における γ 線束は増加する。密度がある値を境として大きくなると 吸収の項がきいてその増加とともに散乱 γ 線束は減少する。通常 γ - γ 検層では後者の範囲を利用している。

多数回散乱を考慮する場合にはモンテカルロ法(じゅうぶん多数回ランダムに抽出を行なうか あるいはランダム実験の結果を集めて 解を近似的にもとめようとする一つの計算法を言う) を使用したりして行なわれる。

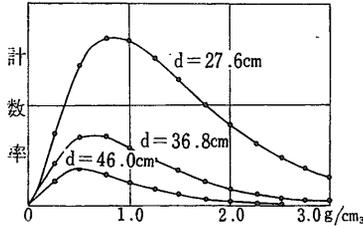
密度測定の原理はおおよそ以上のようなものであるが 実際測定される散乱 γ 線は孔径 ケーシングの有無 坑井水の有無などの坑井の条件や γ 線源の種類 検出部の幾何学的形状 大きさ 鉛シールドの形 プローブ外被の肉厚等の条件が加わり それらを考慮した場合の試料の密度と計数率との関係について理論値をもとめることはほとんど不可能であろう。

密度の決定

計数率の密度への換算には 標準条件のもとで 種々な密度のじゅうぶん容積を有する試料すなわち標準試料を用いて計数率の測定を行ない 較正曲線を作るのが普通である。 実際の調査では 坑井内にプローブをおろしながらある深度で一定時間計数を行なうか あるいは連続的にレートメータに記録させ自然計数を差し引き正味の計数率を求めた後 較正曲線を用いて見掛け密度に換算する。 この場合 孔径 坑井水の有無 ケーシングの種類が標準条件と違った場合 密度が同じでも当然計数率が異なる。 たとえば坑井水のない場合とある



(第4図) γ 線エネルギーとコンプトン散乱によるエネルギー損失



(第5図) 密度と計数率との関係例 (d: 検出器—線源の距離) (J.Homiliusによる)

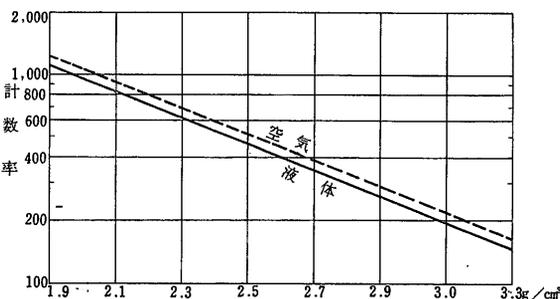
場合では後者の場合計数率が減少する。したがって測定値にこれらによる補正をほどこして標準条件の下における計数率に更生した上で較正曲線を使用することになる。

被測定物の有効測定容積

γ - γ 検層機が坑井内で使用される時 坑井の周囲の地層のどの部分の密度を指示しているかを知るのには測定結果を検討する際に重要なことである。しかし被測定物の各部分がどのような割合で測定結果に寄与しているかを実験的にもとめるのは一般にむづかしい。理想化された場合 理論的にどの範囲までがどの程度の計数の割合を占めているかは 検出部と線源の距離 被測定物の密度によって違ってくるが 一回散乱を考えた Homilius (1958) の計算例によると検出部—線源が50cm 密度が 1.84g/cm^3 の場合には $50\text{cm}\phi \times 50\text{cm}$ がほぼ有効測定容積と言えるようである。この有効測定容積は較正曲線を作る場合の模型標準計料容器の大きさを規定するものである。

γ - γ 検層機の構成とプローブ

γ - γ 検層機は一般にはプローブ ケーブル 滑車 (記録計連動装置付属) 測定器 記録装置から構成される。プローブ以外は天然 γ 線検層機の場合と同じと考えてよい。プローブは種々の型のものが作られているが ここでは三種類の例をあげる (第7図)。Aは孔心の位置で測定する型の例で 最も一般的な型といえよう。Bはスプリングガイドによって孔壁に密着させて



(第6図) 坑井水のある場合の較正曲線の例: McCullough densitytool (J.J.Pickel)

使用するものであり Cは入射の角と散乱の角度を固定して一定の位置の密度の測定ができるようにしたものである。検出部としてはシンチレーションカウンタやGM計数管が用いられる。シンチレーションカウンタは検出効率もよくまたエネルギーレベルの選別ができるという長所を持つ反面 深い坑井などの高い温度では使用に耐えられない欠点を持っている。普通一般には機械的な強度という点でハロゲン入りGM計数管が多く用いられている。

γ 線源としては半減期が長いこと エネルギーが使用目的にかなっていること 安価で入手が容易であることなどの点から $1\text{mc} \sim 20\text{mc}$ 程度のセシウム-137 コバルト-60が多く使用されている。セシウム-137のガンマ線のエネルギーは 0.66MeV であり コバルト-60の 1.17MeV 1.33MeV に比較して密度に対する分解能の点ではすぐれているが測定容積が小さくなる。したがってプローブの径に比して孔径が大ききようなときには有効測定容積内の被測定物の占める割合が小さくなり測定結果が不正確になりやすい欠点がある。これに対しコバルト-60は高い密度に対する測定に適している。

鉛シールドの先端は一般に円錐状になっているがこの角度が重要となってくる。この角を鋭くすると計数率は増加するが泥壁あるいは孔壁の小規模な不規則性の影響をうけ散乱線の強度の変動が起こりやすくなる。また測定の対象もケーシング 坑井水の部分が占める割合が大きくなり誤差の原因となりやすい。鉛シールドの厚さはたとえば セシウム-137 を使用する場合には約12cmあれば じゅうぶん一次 γ 線を防ぎ得る。

誤差の要因

γ - γ 検層法によって地層の密度測定をするとき その測定の誤差の原因として種々な因子が考えられるが基本的なものをあげると先づ測定器による誤差が考えられる。これには 検出部に供給される高圧電源電圧の変動 あるいはシンチレーションカウンタにおいてみられる波高選別レベルの変動等が大きく影響している。長時間測定を行なう場合にはとくにこれらに注意せねばならないが チェック測定を行なうことによってある程度これらによる誤差を防ぎうる。

放射線計測においては 放射能の統計的揺動に基づく誤差からのがれることはできないので 密度測定においてもやはり障害となる。

今スケーラーを使用して計数率 n が得られたとするとその標準偏差 δn は次式で与えられる。

$$\delta n = \sqrt{n/t}$$

ここに t: 測定時間

また放射能の強度をレートメータに記録させる場合 その出力Vの標準偏差 δv は次式で表わされる。

$$\delta v = \frac{V}{\sqrt{2nT}}$$

ここに n: 計数率

T: 測定器の時定数

校正曲線を作るための計数率測定および野外で行なう計数率の測定には この種の誤差が伴うので これらの函数として表わされる密度には 各々の誤差が伝播するのでじゅうぶん考慮しなければならない。

さらに根本的な問題として Z/A の問題がある。一般に計数率の校正の場合には 校正曲線が得られた標準試料と被測定物が同じ値の Z/A を有するとして解析しているが 実際には Z/A は一定していない。標準試料の Z/A を 0.5 とした場合 各種鉱物の得られた密度に対してほどこすべき補正値は第1表に示されたような値で一般に無視しても差支えない場合が多いが一応認識する必要がある。

また $V_s + V_l + V_g = 1$ であり孔隙率を ϕ とすると

$$\phi = 1 - V_s$$

孔隙が水で飽和しているとすると $V_g = 0$ であるので

$$\phi = 1 - V_s$$

$$= V_l$$

第1表 鉱物密度の Z/A に対する補正

		Z/A	鉱物密度 g/cm ³	鉱物に対する 補正 g/cm ³
鉱物	石英	1/2.003	2.66	+0.005
	方解石	1/2.0018	2.711	+0.002
	ドロマイト	1/2.0046	2.85	+0.007
	石膏	1/1.9566	2.32	-0.052
	硬石膏	1/2.0021	2.957	+0.003
	塩	1/2.0876	2.165	+0.091
	長石	1/2.0170	2.56	+0.022
		1/2.0173	2.61~2.64	
		1/2.0687	4.95~5.17	+0.168
		1/1.8016	1.00	-0.110
粘土鉱物	水	1/2.0519	3.51~3.90	+0.095
	褐鉄鉱	1/2.0289	2.652~3.115	+0.041
	黒雲母			
	イライト	1/2.0117	2.76~3.0	+0.016
	カオリナイト	1/1.9859	2.60~2.68	-0.019
粘土鉱物	緑泥石	1/1.9853	2.60~2.96	-0.019
	モンモリロナイト	1/1.9751	2.2~2.70	-0.030
	原油	1/1.7979	0.88	-0.100

孔隙率の推定

地層を構成している鉱物粒子の密度が既知で かつ一定であるとすると γ - γ 検層は 岩石の孔隙率を示すことになり 含水量が孔隙率に比例することからとくに中性子検層と平行することによって その効果は倍加するといえよう。

γ - γ 検層で測定される見掛け密度 ρ_b は 次のような式で表わされる。

$$\rho_b = \rho_s V_p + \rho_l V_l + \rho_g V_g$$

ここに

ρ_s : 構成粒子密度

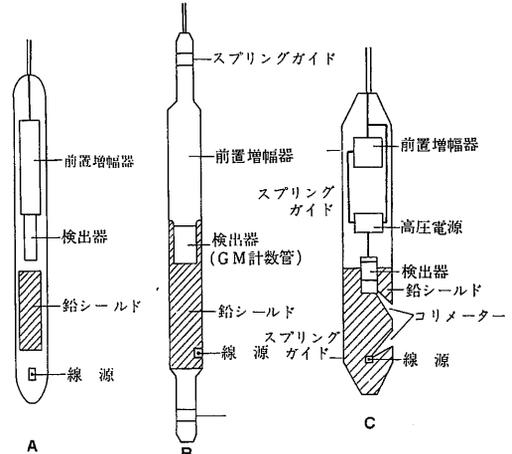
ρ_l : 孔隙中の液体の密度

ρ_g : 孔隙中の気体の密度

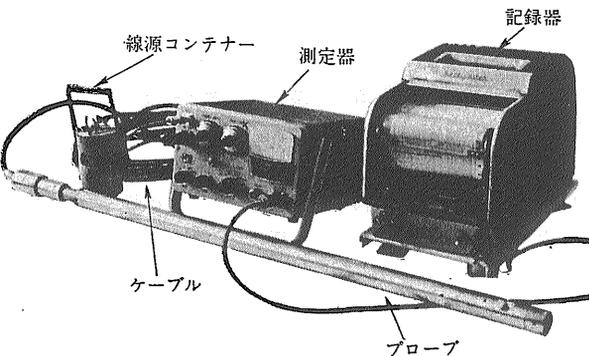
V_s : 構成粒子の占める体積比率

V_l : 液体の占める体積比率

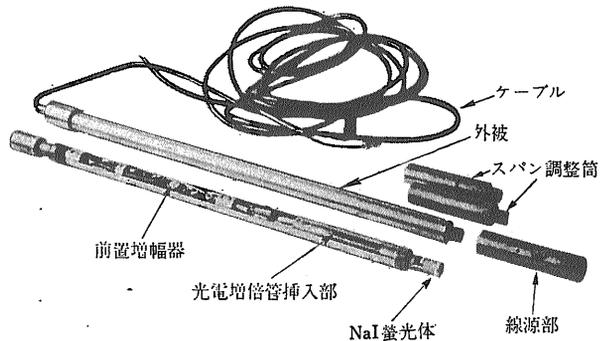
V_g : 気体の占める体積比率



(第7図) プローブの構成



γ - γ 検層機



プローブの内部

となる。ここで

$$\phi = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_l}$$

となり ρ_l が 1 ρ_s を適当に決めると γ - γ 検層は孔隙率 ϕ を表わしていると考えてよいことになる。

γ-γ 検層の実例

① 原子燃料公社試験課では 昭和38年に同社東海製錬所敷地において 試験調査を実施しその解析結果を公表しているのので それを紹介する。

得られた γ - γ 検層図から坑井浅部は砂丘の砂で 計数率は高く 地下水面より上部にある砂であり 地下水水面下にある砂層は これに比較して低い計数率を示しさらに低い計数率を示す礫層と区別される。 基盤の砂質泥岩は上部の礫岩より高く砂より低い計数率を示し 区別されている。 このように定性的な解釈は大体成立している これを定量的に解析を行なうために 測定条件 (線源-検出部距離: 50cm ケーシング: 挿入なし 孔径: 57mm 坑井水: あり) を標準条件 (線源-検出部距離: 50cm ケーシング: A X ケーシング 孔径: 57 mm 坑井水: なし) の場合の計数に更正して 見掛け密度を求めている。

計数率について

- ① 中粒砂 (5.00m~8.00m) 37,000cpm
- ② 砂礫 (9.50m~10.50m) 18,000cpm
- ③ 砂質泥岩 (11.00m~14.00m) 26,000cpm

はこの補正により 次のようにかわり したがって標準条件下で求められた較正曲線によって見掛け密度 ρ_b が求められる。

- ① 中粒砂 6,475cpm
- ② 砂礫 3,150cpm
- ③ 砂質泥岩 4,550cpm

故に ρ_b は

- ① 1.62 g/cm³

- ② 1.90 g/cm³

- ③ 1.77 g/cm³

構成鉱物粒子の密度を 2.60 g/cm³ とし 各地層が水で飽和されているとすると 孔隙率 ϕ は

$$\phi = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_l} \div 1.625 - 0.625\rho_b$$

で計算することができ

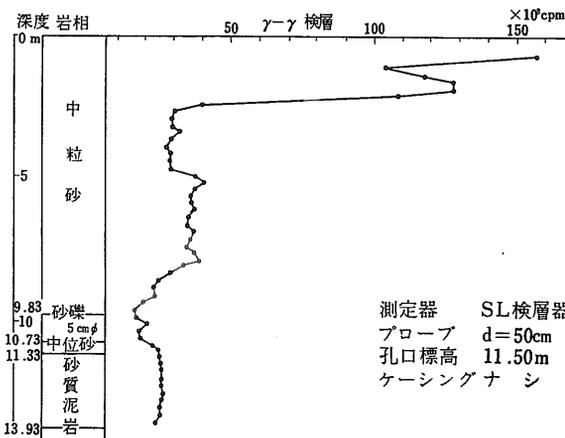
- ① 中粒砂 61.3%
- ② 砂礫 43.7%
- ③ 砂質泥岩 51.9%

となる。 得られた唯一のボーリングコアである砂質泥岩の室内測定による孔隙率は 50.4% であって γ - γ 検層の結果とじゅうぶん一致した結果が得られている。

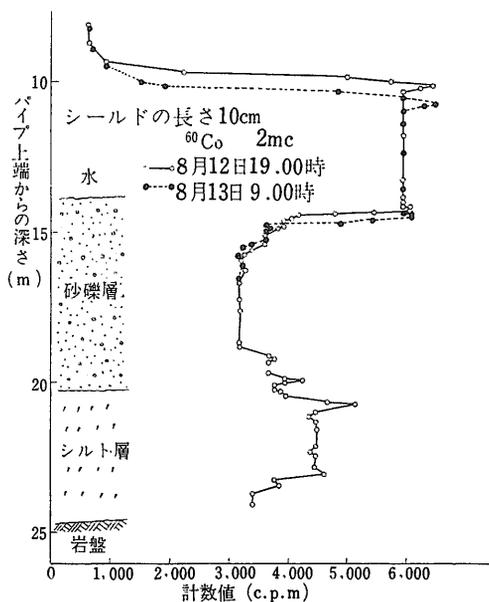
② 土木工学方面への適用の実例として 建設省土木研究所が利根川大橋で実施した洪水時における河床洗堀状況調査の検層結果およびそれについて 有泉 (1963) が解析を行なっているの以下で紹介する。

洪水時には河床が洗堀され その位置が常に変動するこれは河川工学上からもまた水理学上からも重要な問題であったが 従来測定が困難であった。 土木研究所ではかねてから γ 線源を利用した河床の調査を検討しており 昭和35年に利根川大橋において測定のための設備の完成と共に観測を実施している。 現場には橋脚に設けられた足場から測定用鉄管を河床に打込み その中に密度測定用プローブを挿入し計数率と深度との関係から河床の位置を求めている。 増水時において測定された結果およびこの時から約10カ月経たず平水時の測定結果が示されている。 増水時における測定では河床付近で計数率のフレが大きく この現象は河床表面が不安定で砂礫の移動が絶えず行なわれている結果と解釈されている。

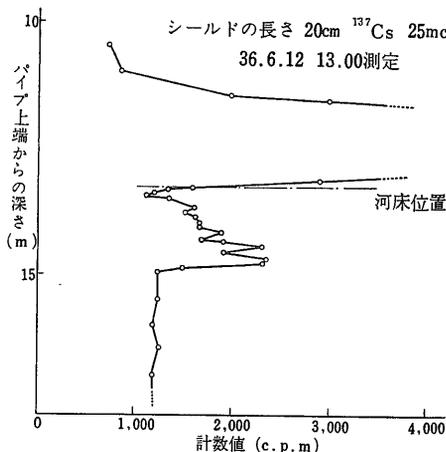
平水時に得られた河床位置は 13.20m で増水時よりも 1.3m 上昇しており 又検層図からわかるように 13.20m から 15m 近くまでは河床がいくつかの相異なる密度の層からなっており しかも河床付近よりも深い層の密度がかえって小さいことが判明している。 これを密度に換算すると 旧河床である深部の砂礫層で 2.15g/cm³ に対し 新堆積層では小さいところでは 1.70g/cm³~1.75g/cm³ くらいと推定されている。 増水時の測定結果では河床位置は 14.50m 程度であって それ以降の増水において 15m 近くまで洗堀されその上に 1.8m の厚さに土砂類が堆積したものと解釈されている。 そしてこの堆積層が下部において密度が小さく 上部において大きいことなどの測定結果によって 新たに生成する土砂類の堆積の仕方もある程度知り得る段階にきており γ - γ 検層による河川の洗堀調査にその特性を完全に発揮して



(第8図) 東海23号試験検層柱状図(原子燃料公社資料)



(第9図) 利根川大橋における増水時の測定結果(有泉による)



(第10図) 利根川大橋における平水時の測定結果(有泉による)

いる。

これに似た調査は運輸省港湾技術研究所が新潟海岸で測定しているものである。原理的には同じような方法で密度測定用プローブを遠隔操作で海中に立てられたパイプ中に降し海水と砂層との境界面を測定することによって強い波浪の作用をうけている時の海底面の変化を測定し重要な資料を得ている。

今後の問題点

この方法自身には種々の問題点が考えられる。とくに誤差の問題は将来の大きな課題であろう。根本的な問題の2, 3については前にのべたがさらに坑井内の泥壁, キャリパーで測定し得ない程度の孔壁の凹凸などのおよぼす影響は小さくないのでこの対策も今後考えなければならない。最近の文献によるとシユランベルジャ社(フランス)ではすでに Dual spacing formation density log と称して2つの検出部をそなえたプローブを使いこの妨害要素を補償する装置を作って効果をあげている。

較正曲線を作るための標準試料については見掛け密度の均一性を保つことが困難な場合が多い。γ-γ検層ではプローブにごく近い試料の部分で散乱されたγ線によって強く影響されるのでこの点に留意してそれによる誤差を小さくすることを考える必要がある。

一方この方法で知りうるのは直径数十種以下の球体

に近い範囲内に存在する物質の平均的な密度でありまた指向性もない。したがって局所的な密度の変化を知るにはγ線スペクトロメータによる散乱γ線のエネルギー分析を行なう必要もでてくるであろう。

測定技術とはやや関係が浅いが線源のシールドの問題もこれらの装置が野外で使用されることが多く可搬性を要求されているのでそれをあまり大きくすることができず漏洩γ線に関連した作業従事者の健康管理それに伴う作業能率等についてなお将来検討の余地がある。

むすび

以上散乱γ線を利用したいわゆるγ-γ密度検層の概略について記しそれによる岩石の密度孔隙率の測定あるいは土木工学方面の適用例を引用した。すでに普及されている他の中性子検層天然γ線検層あるいはさらに電気音波検層等を併用することによって石油天然ガス層の選別土木工学における地盤透水性の調査への応用炭層の発見とその評価等の石炭鉱業重金属元素の探鉱等への応用が期待される。

(筆者は物理探査部)

おもな参考文献

1. 原子燃料公社試験課・土岐市北西部における検層について (1963)
2. 有泉昌・土木分野におけるラジオアイソトープの応用について 応用物理 第32巻第6号 (1963)
3. J.J.Pickell and J.G.Heacock; Density logging, Geophysics, Vol. 25, No.4 (1960)