

上の速度をもつ岩盤については、基礎として十分であろう。亀裂係数が25~50%の良質堅岩に相当する2,500~3,500 m/sについては、基礎処理によってどの程度まで改善されるかということが問題となるであろう。このことについては電力中央研究所の増田氏が、グラウト前後の速度の関係を

$$y = 0.834x + 0.706 \text{ (km/sec)}$$

y: グラウト後の速度    x: グラウト前の速度

表 12-2 亀裂係数による岩盤の分類

亀裂係数	岩 盤 の 分 類
25%以下	きわめて良質
25~50%	良 質 堅 岩
50~65%	堅 岩
65~80%	や や 不 良
80%以上	不 良

で表わされることを実験的に示している。この実験式をそのままへアークラックの多い金山ダム岩盤に適用するには問題があるが、一応3,000 m/sの岩盤について考えてみると、グラウト後の速度は3,208 m/sとなり、この際の亀裂係数は33.1%となる。なお、表12-1の亀裂係数は、 $V_R$ (室内で測定した速度)をダムサイトでの最も良質と考えられる岩盤の速度値を用いて計算されたもので、安全側の数値と考えられる。このことを考え合わせると3,000 m/sの速度をもつ岩盤は、基礎として考えてはよいのではないかと判断される。

## 6. あとがき

以上、測定結果について述べたが、ここで行なった方法は、測定、解析とも比較的簡単であり、かつ経費が少なくすむという利点がある。今後、ダムの調査のみに止まらず、橋梁の基礎、隧道の調査などに利用されるべきだと考える。

終わりに望み現地での測定、測量に御協力いただいた海津、小松両技官および金山ダム建設事務所の関係各位に厚く御礼申しあげる。

## 参 考 文 献

- 増田秀夫：1960 ダム基礎の地球物理学的調査，物理探鉱 13.1  
 増田秀夫：1961 わが国におけるコンクリートダム基礎岩盤の弾性波速度に関する応用地球物理学的研究，電力中央研究所報告(土木61006)  
 萩原尊礼：1951 物理探鉱，朝倉書店

## 13. R. I による土の密度，含水量の現場測定と その問題点について — 第1報 —

土木試験所 井波宏之

### まえがき

R. Iを用いて、土の密度およびそれに含まれる水分を測定するという原理が指摘されて以来、各国でそれらに関する研究が進められた。特にアメリカでは応用計器の開発が早く、道路、アースダム、空港の滑走路などの路床、路盤などの密度および含水量の測定に利用し、土の現場管理を容易に、かつ確実にこなしていることが報告されている。

筆者は、現在一般に市販されている国産の中性子水分計およびガンマー線密度計を用いて、計器の諸特性および利用上の問題点などについての基礎的実験を実施している。その結果、若干の成果を得ることができたので

その概要を報告する。

### 1. 測定原理の概要

中性子水分計およびガンマー線密度計は、構造上の特性、使用線源の性質により表 13-1 に示すような型式に分類することができる。

透過型の密度計は線源と検出管 (GM 計数管, シンチレーション計数管など) との間に測定物質を置き, ガンマー線の透過作用を利用するものであるが, 散乱型の計器は線源と検出管 (水分計では BF<sub>3</sub> 計数管) が同一面上に一体となった構造をなし, 密度計ではコンプトン散乱を, 水分計では弾性散乱および熱中性子の拡散により, 検出管に入射した放射線を計数する方法である。さらに検出管の使用の状態から分類したものが, 表面型と挿入型である。表面型の計器は, その検出部を測定物質の表面上におき, 挿入型のは導管により, 検出部を測定物質の内部に入れて測定を行なう。

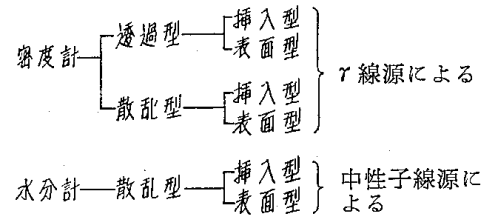


表 13-1 密度計および水分計の型式

本実験に使用した水分計および密度計は, いずれも散乱挿入型の計器であるので, 同型式の測定原理についてその概要を述べる。

#### 1.1 中性子水分計

物質の内部におかれた速中性源から放出された中性子は, 物質の原子核と弾性衝突を行ない, 運動のエネルギーの一部を失う。こうした弾性衝突を多数回行なった後に, ついには物質の構成原子の熱運動の状態に達する。また, この減速の過程で, 中性子の一部は吸収を受けて消滅する。このような減速, 吸収の様子は物質により非常に異なり, それを示したのが表 13-2 である。

元素	質量数	吸収断面積バウン	$\sigma_s$ 平均散乱断面積バウン	$\xi$ 1核子の平均減少率	速中性子が熱中性子になるまでの平均衝突回数	$\sigma_s \xi$ 原子個当りの減速能
H	1	0.33	38.	1.000	18	38.
C	12	0.0032	4.8	0.158	115	0.76
N	14	1.88	10.	0.136	134	1.36
O	16	0.002	4.2	0.120	152	0.50
Na	23	0.51	4.0	0.085	215	0.34
Mg	24	0.063	3.6	0.081	224	0.29
Al	27	0.23	1.4	0.072	252	0.10
Si	28	0.13	1.7	0.070	261	0.12
P	31	0.19	5.	0.063	288	0.32
S	32	0.49	1.1	0.061	297	0.07
Cl	35	32.	16.	0.056	324	0.90
K	39	2.	1.5	0.050	361	0.08
Ca	40	0.43	3.2	0.049	370	0.16
Mn	55	13	2.3	0.036	507	0.08
Fe	56	2.5	11.	0.035	516	0.39

表 13-2 中性子に対する元素の核的性質

物質が中性子を減速させる能力は表 13-2 に示すように,  $\sigma_s \xi$  によって定まり, 一般に減速能と称し, H が著しく大きな影響を与えることがわかる。したがって, 物質の内部に熱中性子の検出管をおけば, その計数値は物質中の H 原子密度を示すことになるのであるが, 他に影響を与える元素, 例えば Fe, Cl, Mn, Be などが含まれていれば, これらに対する考慮をはらわねばならない。一般に, われわれが扱う土木材料, 特に土石類では無視できる場合が多いので, 検出管の計数値は物質に含まれる水分の尺度となる。しかし, 物質に含まれる結晶水と付着水とか, H<sub>2</sub>O, OH, (CH)<sub>n</sub> などの化学組成を区別することはできない。

#### 1.2 ガンマー線密度計

物質の内部におかれた線源より放出されるガンマー線は, 物質を構成する原子の軌道電子により, ある確率

をもって、全方向にコンプトン散乱をうける。この散乱ガンマー線が検出管に入射すれば、計数が行なわれる。しかし、実際には一度散乱を受けると、ガンマー線のエネルギーは低下し、光電効果による吸収の確率が増加する。したがって、物質中の電子密度が増すにつれて、多重散乱の確率も増加し、その結果、ガンマー線が吸収される確率が増加することになる。よってガンマー線が検出管に入射する数はこれらの確率を総合したものになる。入射ガンマー線が最大になる密度は、線源の種類、線源と検出管との距離、検出管の直径、導管の内径、外径および材質などによって異なる。

## 2. 実験方法

本実験に使用した水分計および密度計は、日立製 RMB 型中性子水分型および RSS 型ガンマー線密度計でいずれも散乱・挿入型計器である。構造および検出管特性は 図 13-1、表 13-3 に示す。

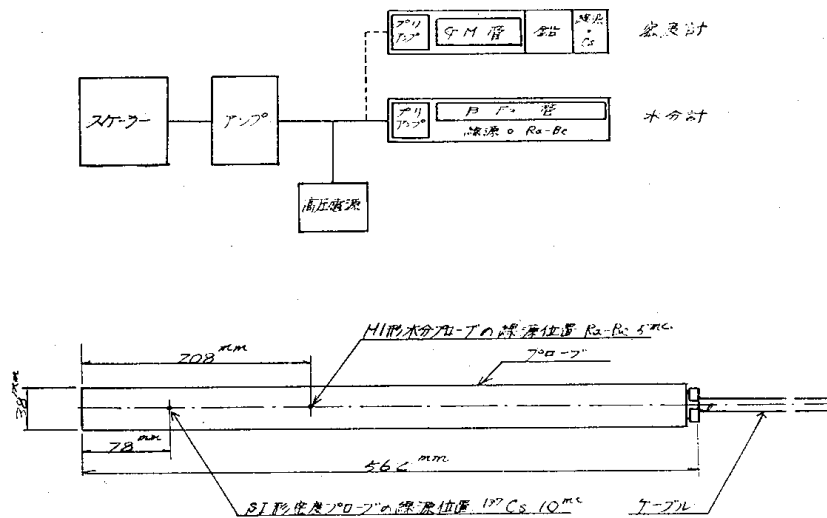


図 13-1 密度計および水分計の構造図

表 13-3 検出管の諸特性

密度計用検出管		水分計用検出管	
Mullard 製 GM 管		日立製 BF <sub>3</sub> 比例計数管	
型式	MX 120/01	型式	EB 125
内部消滅型	10 <sup>4</sup> φ カス	封入カス	濃縮 B <sup>10</sup> F <sub>3</sub> (B <sup>10</sup> 96%)
始動電圧 (20°C 最大)	375 Volts	動作電圧	1,550 Volt
スラット-長さ (20°C 最小)	100 Volts	スラット-長さ	250 Volt
スラット-勾配 (最大)	15%/100 Volts	スラット-勾配	3%/100 Volt
動作温度範囲	-55°C ~ 75°C	全長	450 mm
不感時間	200 μ-sec	管径	26.5 mm φ
陽極線極容量	4.5 μuf	管壁厚	0.75 mm
自然計数	90 cpm	有効長	205 mm
陰極壁厚	5.25 mm/cm <sup>2</sup>	有効容積	100 cc

測定に用いた試料は、苫小牧産の海岸砂、美々産の火山灰および水で、おのおのの試料を単独に、あるいは密度、含水量を適当に変化させるために混合したものを使用した。これらの試料は、深さ 80 cm、内径 60 cm、80 cm、100 cm の鋼製容器に均一に入れ、さらに検出管を挿入する導管として、外径 5.0 cm の鋼管 (2.0' パイプ、肉厚 2 m/m)、6.25 cm (2.5'), 8.75 cm (3.5') のボーリング用ケーシング (肉厚 3 m/m) をあらかじめ容器中央にセットし、おのおのの組み合わせについて測定を行なった。

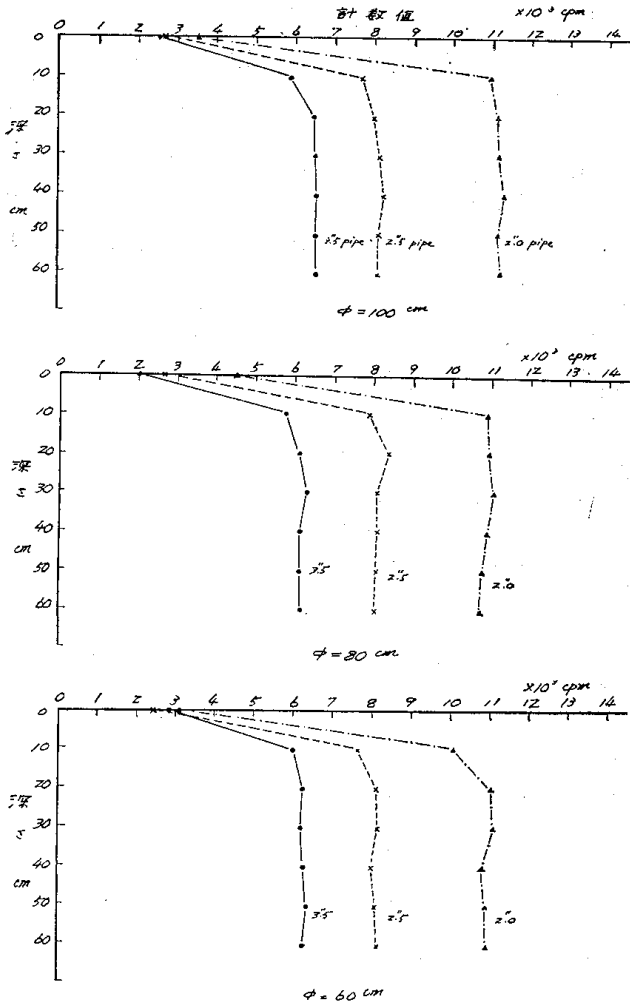
### 3. 特性実験結果と考察

#### 3.1 中性子水分計

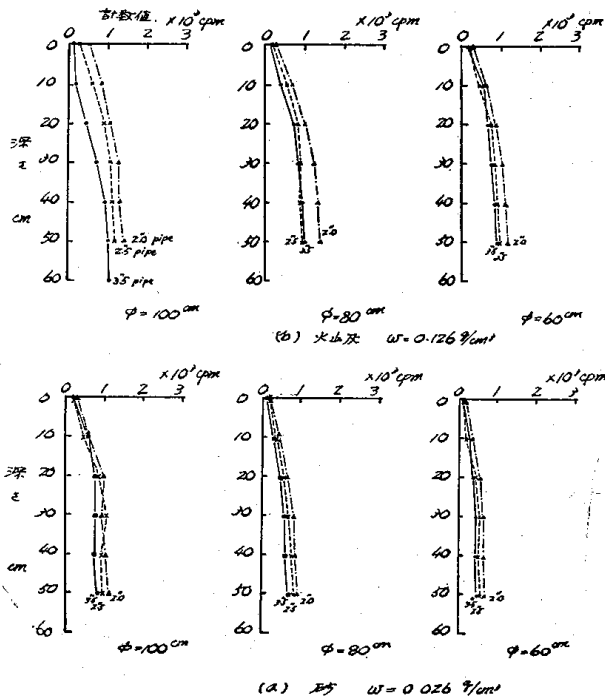
図13-2(a), (b), (c) —は測定物質の含水量を一定にして、容器の直径と導管の直径を変化させた場合の深さによる計数値の変化の様子を示したものである。深さの基準は検出部の線源位置とし、測定物質の表面を0とする。

まず、図13-2(a)を見るに、深さの増加に伴う計数値の増加は非常に小さく、飽和値に達するには相当な深さを要することがわかる。図13-2(b)の  $W = 0.126 \text{ g/cm}^3$  の火山灰の場合についても同じことがいえるが、計数値は大きく表われている。また、容器の径、導管の径を変化させても、その傾向は変わらず、計数値は導管径が小さくなるほど、大きな値を示している。

このことは、物質中の熱中性子密度の分布に密接な関係があると考えられる。すなわち、1.1で述べたように、速中性子は物質中のH原子により減速され、熱中性子になるのであるが、熱中性子密度の分布は図13-3に示すように、線源の近傍で著しく高く、少し離れると指数関数的に急激に減少する。物質中のH原子密度が小さいと peak の絶対値は小さく、flat な曲線になる。したがって、含水量が小さい場合は測定物質の深さ、すなわち、測定物質の厚さを増しても、計数値の増加は小さく、飽和値に



(c) 水  $W=1.00 \text{ g/cm}^3$   
 図-2 深さと計数値との関係



(a) 砂  $W=0.026 \text{ g/cm}^3$

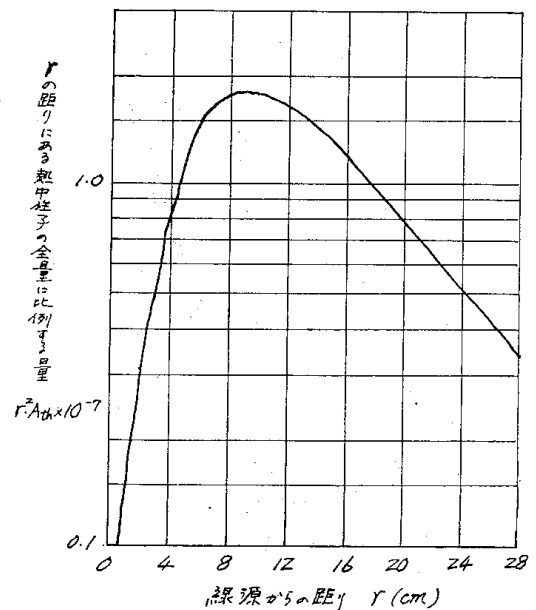


図13-3 水中の遅い中性子(1.4 eV)の分布

達するには相当な厚さを要することになる。ただし、この場合の検出管の感度領域は非常に大きいものとする。しかし、実際は図13-2(a), (b)で見るとおり、容器径を60 cmから100 cmに変えても、両者の計数値には大きな差は認められないことから、検出管の感度領域は30 cm程度と考えられる。よって、含水量の小さい測定物質の計数値の飽和深さは物質の大きさによらず、検出管の感度領域の大きさによって定まることになる。

図13-2(c)は  $W = 1.0 \text{ g/cm}^3$  の場合で、計数値の飽和深さは20 cmで、容器径の大きさによる計数値の変化は認められない。これは図13-3の例からわかるように、線源より20 cm以内の区域に熱中性子のほとんどが集中しているためである。

次に測定を行なう場合、どの程度の大きさの試料を用いれば、精度の良い結果を得るであろうか。図13-4は容器の直径と計数値との関係を示したものである。径の小さい導管を用いたものは、熱中性子の分布曲線の peak

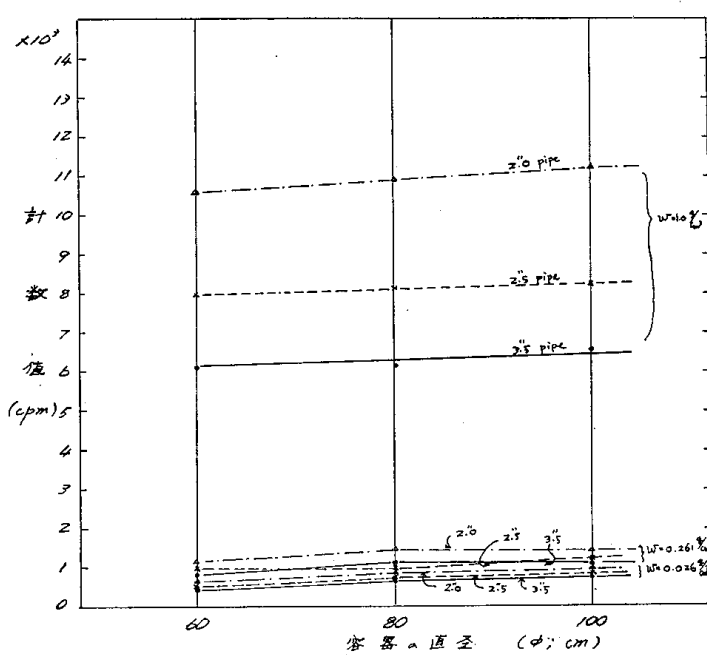


図13-4 容器の直径と計数値との関係

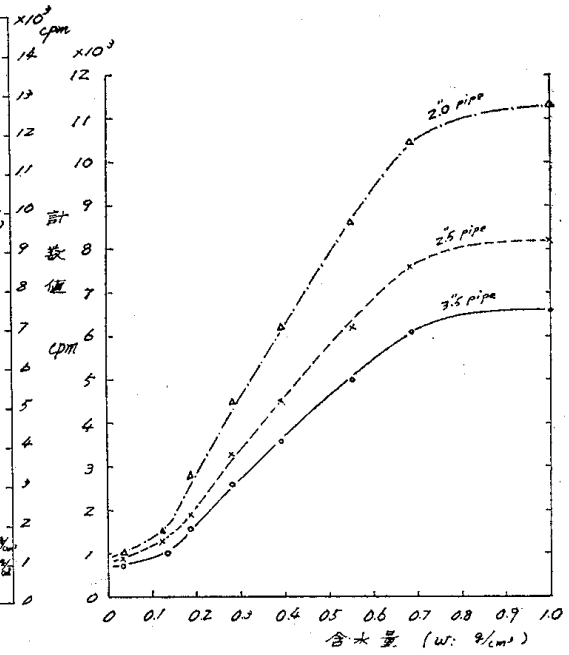


図13-5 水分計の較正曲線 ( $\phi = 100 \text{ cm}$ )

が中心軸に近づき、かつ絶対値が大きくなることにより計数値が大きくなる。計数曲線はいずれも flat で容器の径による計数値の変化は非常に小さい。しかし、 $W = 0.126 \text{ g/cm}^3$ 、 $W = 0.026 \text{ g/cm}^3$  の場合は前述したとおり、検出管の感度領域により定まった値であるので、 $W = 1.0 \text{ g/cm}^3$  の場合と、その意味は異なる。すなわち、 $W = 1.0 \text{ g/cm}^3$  については有効容積なるものは存在するが、含水量の小さいものでは結果的には同じであるが、検出管の感度領域による定まる容積となる。

図13-5に示す曲線群は有効容積について測定した計数値と、Oven dry methodによって求めた含水量との関係を表わしたもので、較正曲線 (Calibration curve) と称している。われわれが水分計を用いて測定を行なう場合、このような較正曲線をいろいろな導管径についてあらかじめ求めておけば、計数値よりただちに測定物質の含水量を求めることができる。また、長期にわたる測定では、導管を設置することにより、直接測定物質をサンプリングすることなく、非破壊的に含水量の変動を観測することができる。

### 3.2 ガンマー線密度計

ガンマー線密度計の特性実験は中性子水分計の場合と同じ方法を用いて行なった。

図13-6は測定物質の見かけ密度を一定にし、導管径と容器の大きさを変え、おのおのの組合わせについて測定を行ない、深さとの関係を示したものである。密度計における計数値と密度との関係は、中性子水分計の場合とは異なり、線源の種類、すなわち、ガンマー線のエネルギーの大きさ、線源と検出管との距離、検出管の直径、導

管の内径および外径などの種々な要素が入るので linear な関係はない。したがって、導管径を小さくしても、計数値の増加は期待できない場合がある。図 13-6 で見るように  $\rho = 1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$  の砂の場合、3.5' 導管による計数値が最大である。深さとの関係は非常に明瞭で、 $\rho = 1.6 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$  のもので 30 cm、 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$  以下の

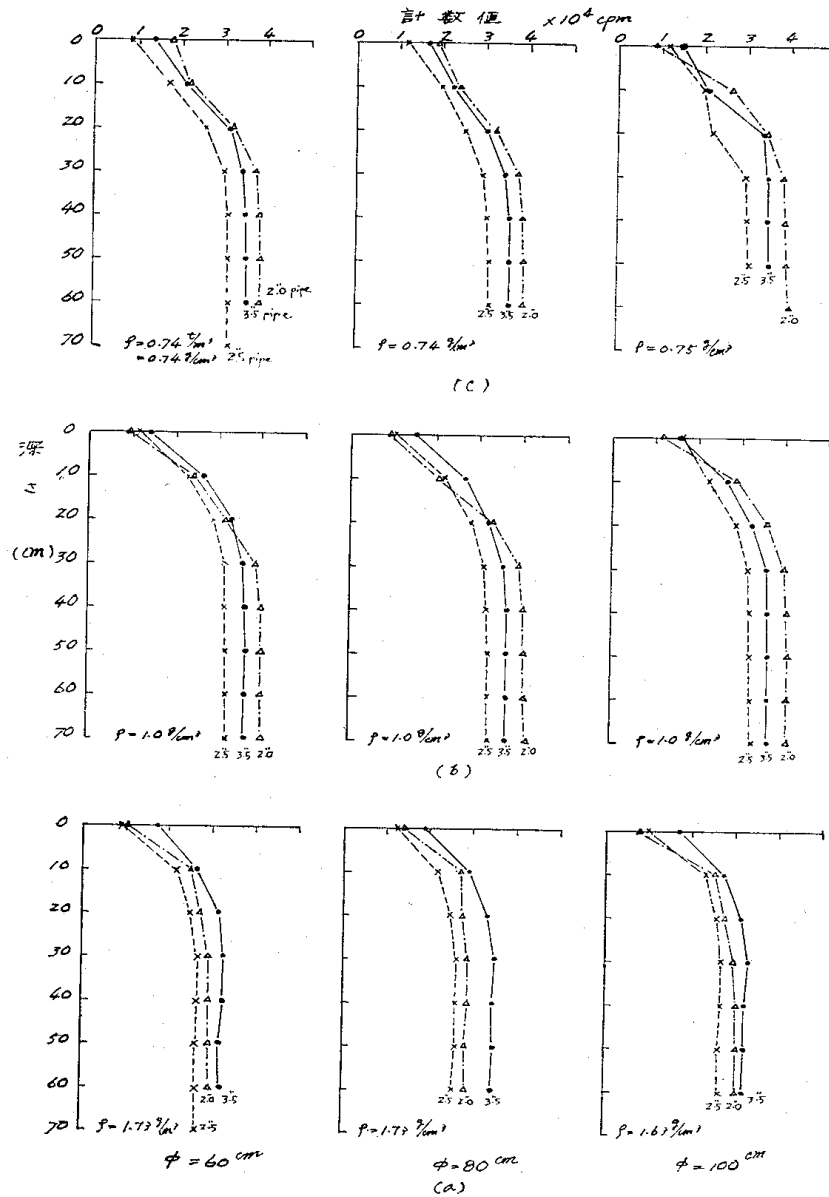


図 13-6 深さと計数値との関係

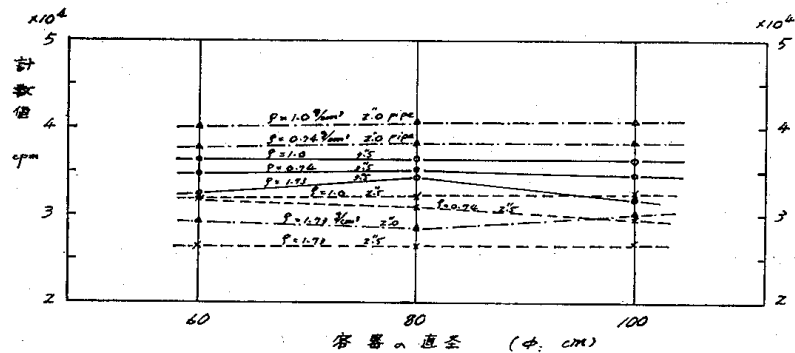


図 13-7 容器の直径と計数値との関係

ものでは 40 cm が飽和深さである。この場合も、水分計と同様、検出管の感度領域は 30 cm 以下であることがわかる。

次に、図 13-7 は計数値と容器の径との関係を示したもので、計数曲線は flat で、3.1 に述べた有効容積は容器径で 60 cm 以下である。したがって、直径 60 cm 程度の大きさの測定物質について測定を行なえばよいことになる。

密度計の較正曲線は 図 13-8 に示す。測定点が少ないので十分なものといえないが、一応の傾向をつかむこ

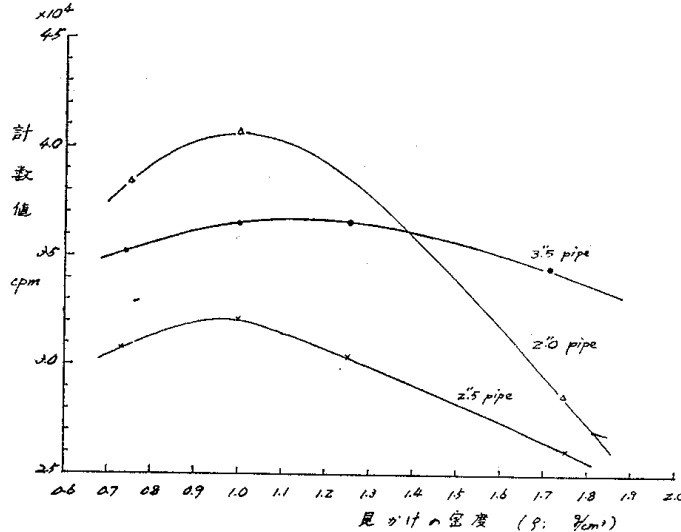


図 13-8 密度計の較正曲線 ( $\phi = 80$  cm)

とができる。 $\rho = 1.0$  g/cm<sup>3</sup> の点が最大値を示し、その勾配は導管径の小さいものが大きい。導管径 3.5'' と 2.5'' の場合について比較すると、3.5'' の較正曲線が全体的に高い計数値を示しているが、これは導管径が大きいため線源より放出されたガンマ線が管壁物質により散乱され、検出管に入射する割合が大きくなるからである。したがって、測定精度の向上を計るには、このような管壁による散乱入射を減少させねばならない。すなわち、導管径を小さくし、検出管との空隙をできるだけ少なくしたり、線源と検出管との距離を長くし、管壁による散乱線を途中のしやへい用の鉛に吸収させるなどの考慮が必要である。

最後に、較正曲線の勾配は測定精度に関係し、勾配の大きな較正曲線は密度あるいは含水量に対する分解能があがるので、小さなものより測定値の精度は高くなる。したがって、前述した種々な関係要素を適当に変え、最も精度の高い、すなわち、誤差の少ない方法で測定を行なわねばならない。大野氏の報告によれば、水分計の場合、含水量が 0.1~0.9 g/cm<sup>3</sup> の範囲の測定物質についての標準偏差は 1% 以下、密度計では 1.0~2.0 g/cm<sup>3</sup> のもので、3% 以下という非常に高い測定精度を得ている。

### あ と が き

以上、中性子水分計およびガンマ線密度計についての二、三の特性について述べたが、今後に残された問題は多い。例えば①含水量あるいは密度の異なる境界層の判別、②測定誤差の問題、③温度変化による計数値の変動、④計測器自体の信頼性の問題などがある。この中①、④については目下実験を実施しているので、別の機会に発表する予定である。

### 参 考 文 献

- 1) 大野博教・町田忠夫：放射性同位元素による水分および密度測定，物理探鉱 Vol. 14, No. 2 (1961).
- 2) 大野博教・町田忠夫：中性子散乱による水分測定について，第 3 回日本アイソトープ会議報文集 (1959).
- 3) 近藤 紀：野外において使用する RI を装備した密度計ならびに水分計，土木技術資料 4-1.

- 4) 石松健二： 中性子水分計とその応用，応用物理 Vol. 30 No. 8 (1961).  
 5) Highway research board: Soil and slope stabilization and moisture and density determination developments. 40 th Annual meeting (1962).

## 14. 盛土用土のトラフィカビリティ試験について

土木試験所 岸 隆  
 渡 部 等

### 1. ま え が き

近年各種の土工機械の普及に伴い，大土工が盛んに行なわれるようになってきた。したがって，現場の用土が施工機械を乗り入れるのに十分な強度特性を持っているか否かが，施工の難易や適否を決める重要な要素となっている。

本報告は，道路の盛土作業において，土の運搬，まき出し作業の適否を判定する一資料を得るため，道内の代表的な土工現場を対象に，盛土用土に対するブルドーザーのトラフィカビリティを検討したものである。

### 2. トラフィカビリティ試験の方法

平坦で，かつ比較的良好に締まった盛土上に，幅約4m，延長約20mの試験区間を設け，まず，その上に盛土用土を40~50cm程度まき出し，それをショベルでならずと同時に，軽くたたいて締固め，試験前の現場合水比，密度，コーン支持力を測定する。次に，ブルドーザーを排土作業を行なうと同じ走行速度で，この盛土上を通過させ，同一ワダチを通過する回数(1, 2, 3, 4, 5, 10, 20回)ごとにワダチの深さとコーン指数を 図14-1, 2 のような測点で測定することとした。

なお，ブルドーザーの通行可能な沈下量の限界は，一応20cmと仮定した。

### 3. 盛土用土の性質

トラフィカビリティ試験実施箇所およびそれぞれの盛土用土は，表14-1のとおりである。

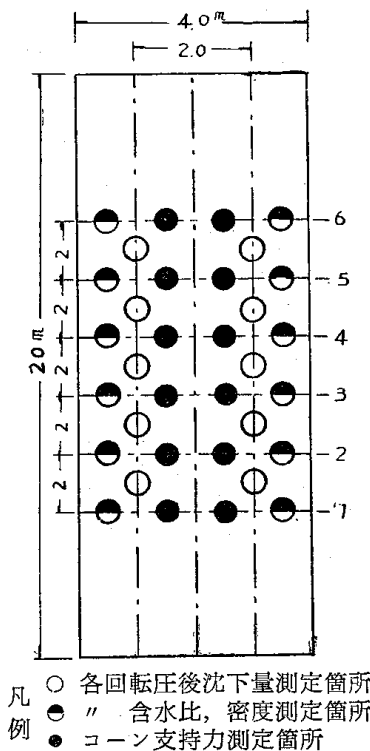


図14-1 測定箇所配置図

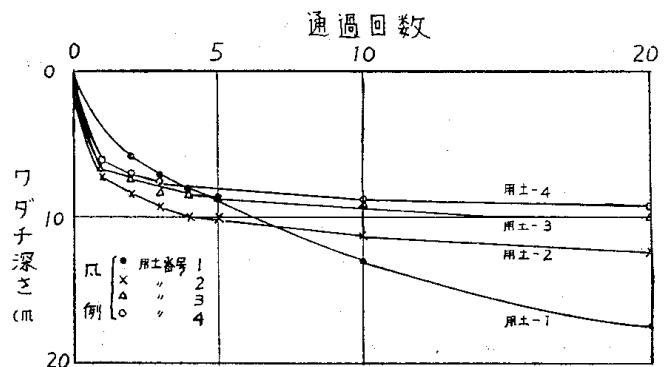


図14-2 ワダチ深さと通過回数の関係