

## 砂置換法 (JIS A 1214) および表面型ガンマー線 密度計・中性子水分計の精度評価 (その 1)

土質工学会 RI 利用法研究委員会

### 1. まえがき

土質工学の分野におけるラジオアイソトープ（以下 RI と略す）の利用は、ガンマーライン密度計および中性子水分計による土工事の品質管理を目的とするものが最も多い。

この測定法は

1. 非破壊測定であり、1 個所の測定が数分で行なえる。
2. 測定の精密度が非常によい。
3. 測定における個人差がない。
4. 被測定物の性状は、液体、スラリー、固体のいずれでもよく、また試料の組成の違いによる影響が少ない。

などの特色がある。しかし、土の密度および水分の測定精度（バラツキ、カタヨリ）については、なお不明な点が残されていたため、土質工学の分野で RI 法は必ずしも十分に普及活用されるにはいたっていない。すなわち、従来から RI 法の精度の検討はなされてきたが、バラツキに対する評価が主体であって、カタヨリについては砂置換法を基準にした相対的評価に終始していたため、一般を納得させるにはいたらず、むしろ、砂置換法との相違から RI 法の測定精度に多くの疑念がもたれていた。しかしながら、土はかなり不均一な密度および水分分布をもつて、砂置換法の測定精度にも不明な点があるため、単に砂置換法を基準にした相対的な評価から RI 法の測定精度を求めるとは適切ではない。そこで、当委員会では、砂置換法、RI 法の対応を求める相対的評価でなく、標準あるいは基準密度とする供試体を作成して、おのおのの測定から精度を客観的に評価することとした。

### 2. 実験の概要

土のような粒状体の密度（単位体積重量）測定におけるカタヨリを検出する実験においては、基準密度となる測定対象の大きさ、その密度分布および、その平均値の信頼度によって定まってしまう。すなわち、土のような粒の集合体をミクロ的にサンプリングすれば、その密度は、空気の部分は、 $\approx 0/\text{cm}^3$ 、水だけの部分は  $\approx 1.08/\text{cm}^3$ 、土粒子だけの部分では  $\approx 2.6\sim 2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$  というような値が得ら

れるであろう。土の密度を測定しようとする場合、これらが空間的にある配列、配合されたときの平均密度を求めるのが目的である。ところが一般的に密度を求めようとする場合に問題となるのは、扱う土粒子の大きさによって、それが測定手段の測定影響範囲の中に配列されているかどうか、すなわち、扱う粒子径が大きい場合、それに応じた測定影響範囲をもつ測定器で測定しなければ、正しい平均密度を与えることにならないということである。

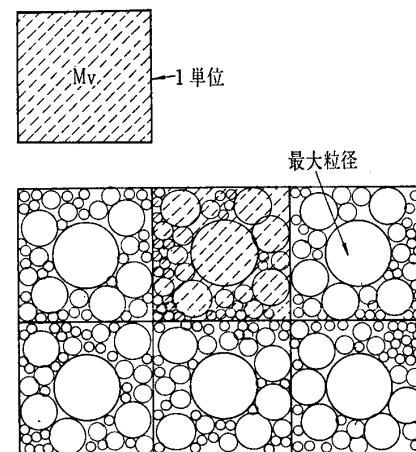


図-1 粒状体の模式図

少し具体的な説明を加えるため 図-1 に模式図を掲げる。測ろうとする試料の粒度分布がわかっているとすれば、その最大粒径を含んで試料の平均密度を与えるのに必要にして十分な体積というものが存在する。それを測定に必要な最少体積（図中破線で囲んだ 1 単位）Minimum Volume (Mv) と定義する。したがって、この試料を測定しようとする場合、測定器の影響範囲 Sensitive Volume (Sv) は、Mv と同じかそれ以上の大きさで測定することによって正しい密度が得られることになる。

実際の測定では、扱う粒子の形状が種々複雑で、一定の形状を示さないので計算値で Mv がいくらという数値で決めかねるので、試料の最大粒径に対する係数で定めている。すなわち、 $Sv/Mv \geq 1$  の条件で測定するケースが一般的であると認められる。

$Sv$  あるいは  $Mv$  が正しく評価できる場合で、その比

が1に対応しているときには、供試体の密度分布の問題を取り上げる必要がなくなる。通常の測定では、 $S_v$  が固定条件として与えられ、それに対して、図-1に示したように  $M_v$  が何単位（図では6単位）かの集合した被測定物を測定することになり、単位  $M_v$  間での粒子配列、粒度と間ゲキ分布の違いが被測定物の密度のバラツキとして現わてくる。したがって、標準密度供試体は単位  $M_v$  間の均一性をよくするということに主眼をおいて作成すればよいことがわかる。これらのことから精度評価を行なうにあたって誤差を

1. 正確度：標準供試体に対する測定結果の平均値のカタヨリ度合
2. 精密度：測定値の散布度合（バラツキ）
3. 信頼度：正確度、精密度の再現性

にわけて考えることにした。

カタヨリを検出する実験では、この供試体の密度あるいは含水量が、正確にいくらであるという標準になる供試体作成が可能か否かで決まってしまう。実験に用いる供試体は、破壊試験法である砂置換法の測定が可能という制約から、粒状試料（土）を使用することとした。

土を均一な密度に締固めることは、非常に困難なことである。すなわち、試料の粒度分布、含水状態、締固め方法などにより支配されるものと考えられる。また、これらの密度分布をチェックする方法にしても測定方法の困難さがつきまとっている。ここでは試料の最大粒径を5mm以下とするマサ土（砂）、砂質土（砂質ローム）および関東ローム（シルト質ローム）の3種類を用いてそれを直径60cm、高さ35cmの鉄製容器に極力均一に締固めて供試体を作成し、その体積密度に対する砂置換法およびRI法の応答から、それぞれの測定法におけるカタヨリを調べ正精度の評価を行なうこととした。

一方、精密度を評価する実験は、千葉県成田市において関東ロームの地山を実験場に選び、ある面積についてランダムに砂置換法およびRI法で60測点のサンプリングを行ない、同一正規母集団からのサンプルとして、その分散から精密度を評価することにした。

信頼度については、今回の実験では、時間的な制限もあり、非破壊試験器であるRI法について一つの供試体で経時変化の追跡を行ない、時間および日間変動の有無について調査した。

### 3. 標準供試体作成方法の検討

この試験では、使用する供試体の密度分布を均一にすることが、その成果を左右する大きな要因であり、このため供試体作成法についての検討を事前に行なった。

検討項目は、供試体を突固めるランマーの端面直径、重量、落下高、突固め回数を要因とし含水比を変化させそれぞれガンマ線透過ビーム式の検層器で、深さ方向に対し

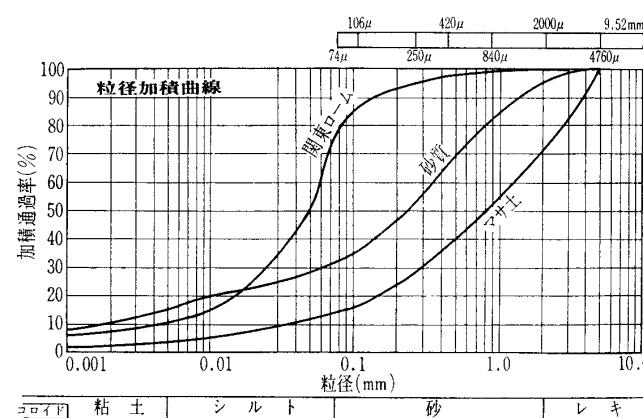


図-2 実験に用いた試料の粒径加積曲線

表-1 供試体作成の条件

要因	準			
	$w_{80}$	$w_{90}$	$w_{opt}$	$w_{110}$
試料含水比				
ランマーの端面直径	10	20	30 cm	
" 落下高	30	75 cm		
突固め層数	3	5	10層	
突固め仕用量	5.6	11.2	16.8 kg/cm <sup>3</sup>	

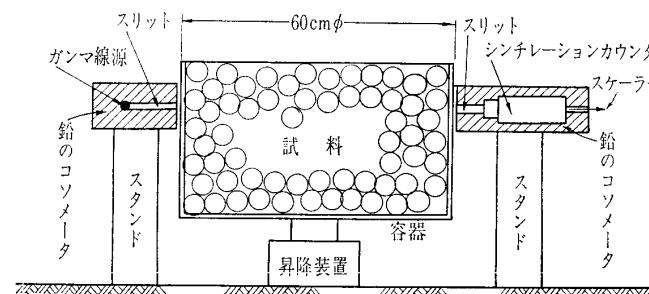


図-3 ガンマ線ビーム透過式検層器の構造

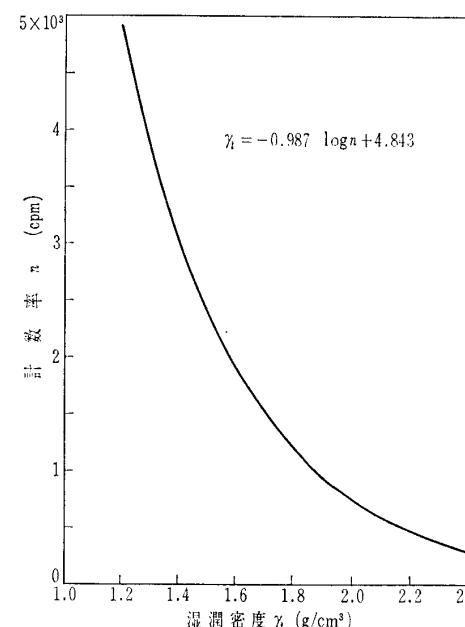


図-4 ガンマ線ビーム透過式検層器の較正器

て 2 cm ピッチで測定し供試体のバラツキを求め、バラツキが小さくなる上記組合せ条件を求める。

ここでは、得られた供試体の密度分布ならびにその突固め方法について述べる。

正確度試験用の供試体試料は、図-2 に示した粒度 3 種類について表-1 のような実験条件で行なった。なお、供試体の密度分布を測定する装置は、図-3 に示したようなガンマ線透過ビーム式の密度検層装置で、その出力と密度の関係すなわち較正曲線は、図-4 に示すとおりである。

ここで、密度分布測定器の精度を確認するため供試体として水を測定したときのデーターを図-5 に示す。図中に示したように、相対標準偏差 ( $R.S.D.$ ) = 0.326%，また平均値の 95% 信頼度誤差 ( $\epsilon$ ) は 0.165% となり、実用に十分な精度といえよう。また密度および測定の繰返し数 ( $i$ ) についての精密度を図-6 に示す。

試験の結果、試料の突固めにはランマーの端面直径 20 cm，重量 26 kg，落下高 30 cm，層数 3 層，突固め仕事量は JIS A 1210 の突固め試験における仕事量の 2 倍に、また含水量は、最適含水比 ( $w_{opt}$ ) 付近で密度分布が均一になることが判明した。これらの条件で各試料とも 15 個の供試体を作成して、深さ方向の測定ピッチを 2 cm にし、1 測点の繰返し数を 3 回とした試験の結果を図-7～9 に示す。

図からわかるように供試体底部で密度が小さくなること、およ

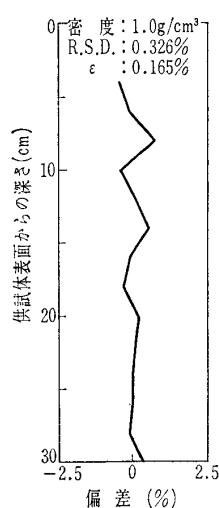


図-5 ガンマ線ビーム透過式検層器で水を計測したときの図  
図からわかるように供試体底部で密度が小さくなること、およ

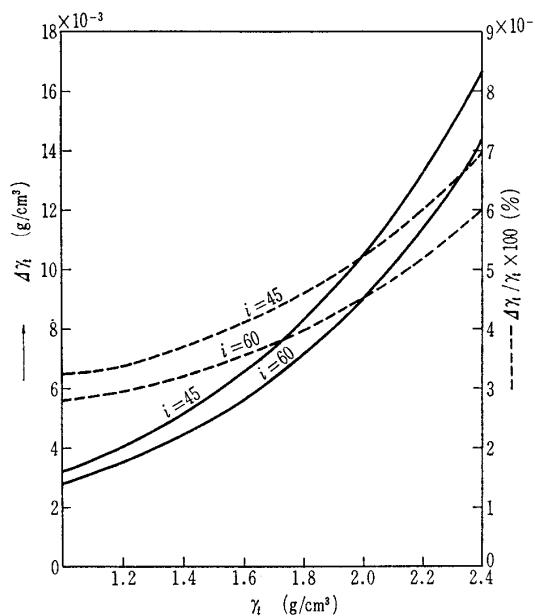


図-6 ガンマ線ムービ透过式検層器の精密度 (95% 信頼度)

び供試体の密度が大きくなるに従ってバラツキが小さくなることが明らかである。なお、図中  $i$  は供試体の繰返し個

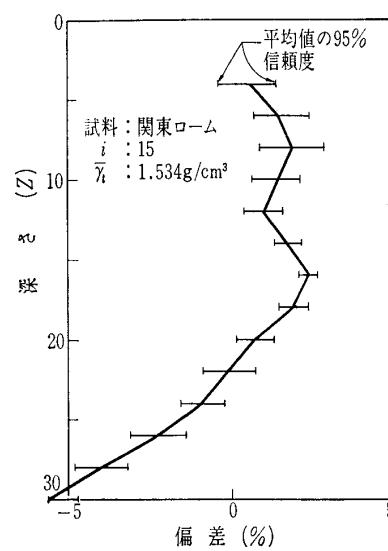


図-7 ガンマ線ビーム透過式検層器による供試体の密度分布

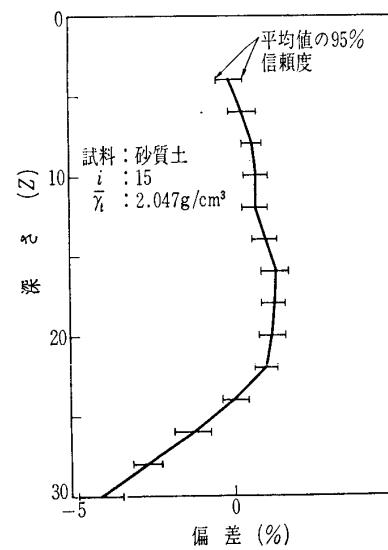


図-8 ガンマ線ビーム透過式検層器による供試体の密度分布

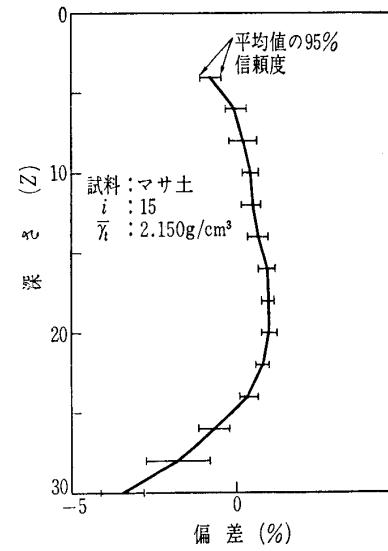


図-9 ガンマ線ビーム透過式検層器による供試体の密度分布

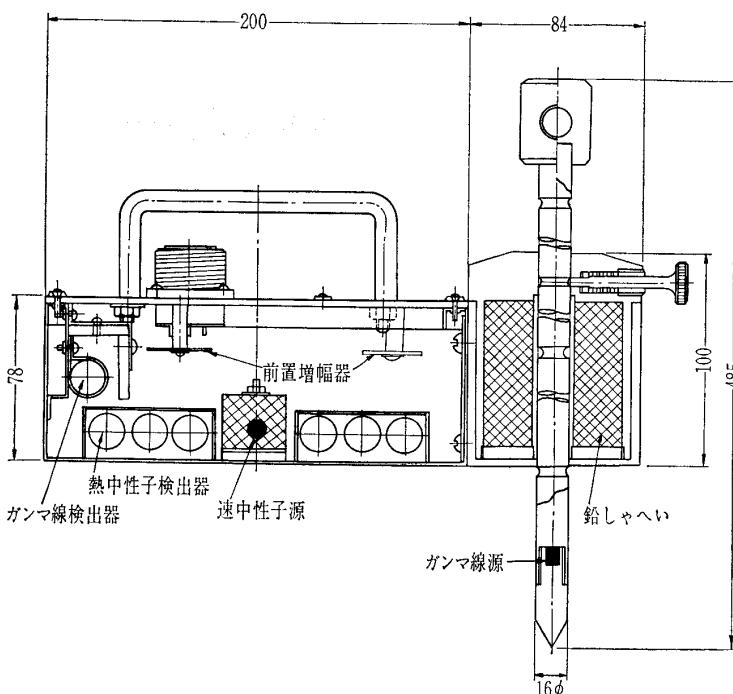


図-10 試験に用いた RI 計器の構造

数、 $\bar{\gamma}_t$  は湿潤密度の総平均を示す。供試体底部で密度が小さくなるのは、突固め時に容器底板、床の反発力の影響により縮まりにくいものと考えられる。

これらの結果から、以下の試験における標準供試体の密度をガンマ線透過式検層器の測定値から砂置換法の場合、供試体表面から深さ 12 cm、また密度計では、線源打込み深さと同じ 20 cm までの値の平均値を採用することとした。

#### 4. 正確度評価試験

3 章で述べた 3 種類の試料について、それぞれ 15 個の標

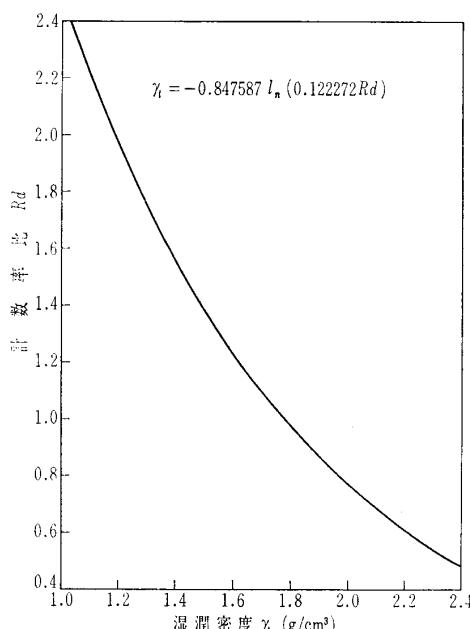


図-11 密度計の較正曲線（副標準供試体による）

準供試体を作成して、砂置換法 (JIS A 1214) および 図-10 に示したような RI 計器で測定し、標準供試体の測定値と回帰分析を行ない、その結果からカタヨリを評価することとした。

RI 計器については、あらかじめ較正曲線を作成しておく必要があるので、密度計については、副標準体による較正として、 $60 \times 60 \times 1$  cm、密度 2.46 の板ガラスに線源そう入孔を開けておき、水を張った容器に 1 枚ずつガラス板を重ねながら計測を行ない、線源深さ 20 cm における水とガラス板の厚さから平均密度

$$\bar{\gamma}_t = \frac{t(\gamma_G - \gamma_w) + l_z \gamma_w}{l_z}$$

ここに、 $t$  : ガラスの厚さ (cm)

$\gamma_G$  : ガラスの密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\gamma_w$  : 水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$l_z$  : 線源のそう入深さ (cm)

を求めて、較正曲線を作成した。一方、水分計の較正は標準供試体の密度およびその含水比に対する水分計出力の較正を行なった。較正曲線を 図-11, 12 に示す。

標準供試体の密度と砂置換法および RI 法との回帰関係を 図-12, 13, 14 に、また含水量の回帰関係を 図-15, 16 に示した。図からわかるように正確度 (カタヨリ) は回帰式

$$\hat{y} = ax + b \text{ から } \frac{(\hat{y} - y)}{y} \times 100$$

ここで、 $\hat{y}$  :  $x$  から求めた  $y$  の推定値

$y$  : 標準供試体の値

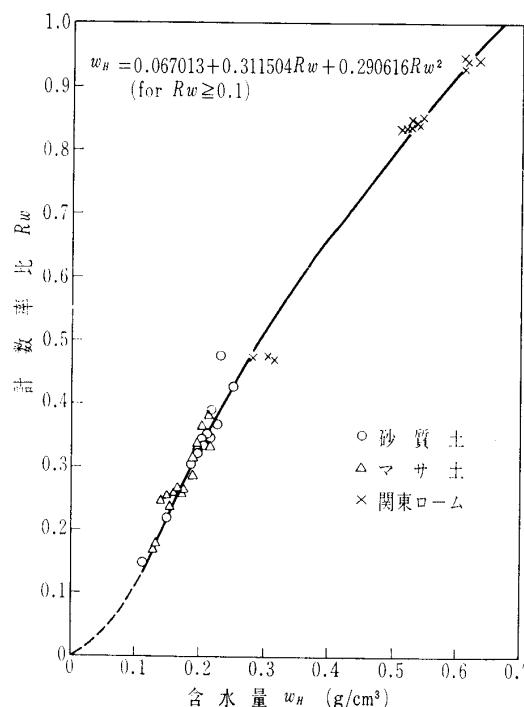


図-12 水分計の較正曲線

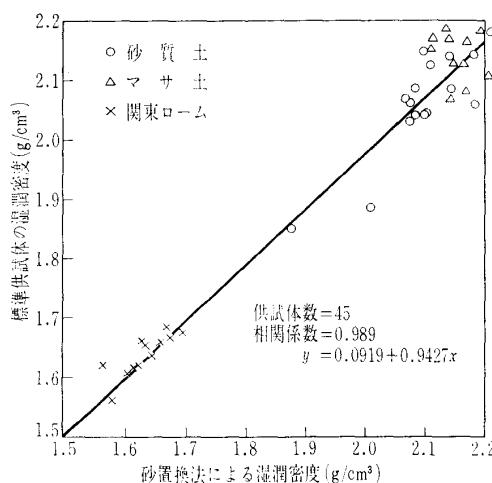


図-13 密度測定の回帰（砂置換法）

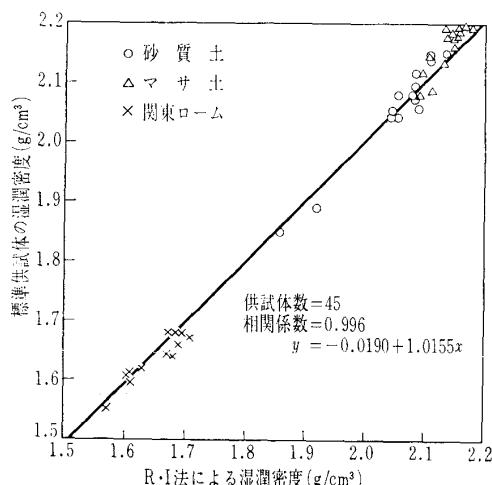


図-14 密度測定の回帰（RI 法）（副標準試料による較正曲線）

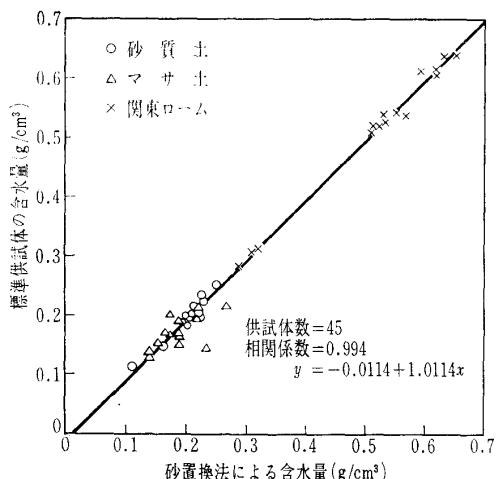


図-15 含水量測定の回帰（砂置換法）

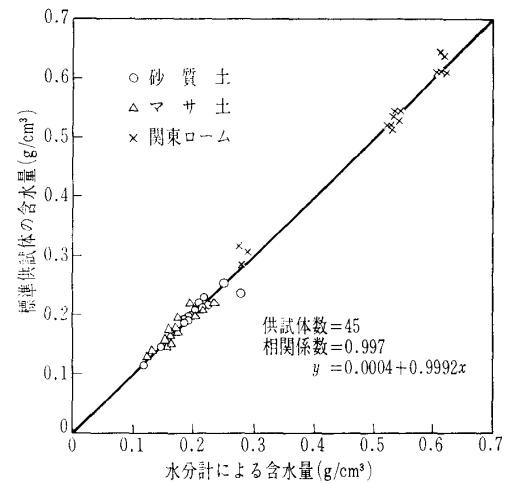


図-16 含水量測定の回帰（水分計）

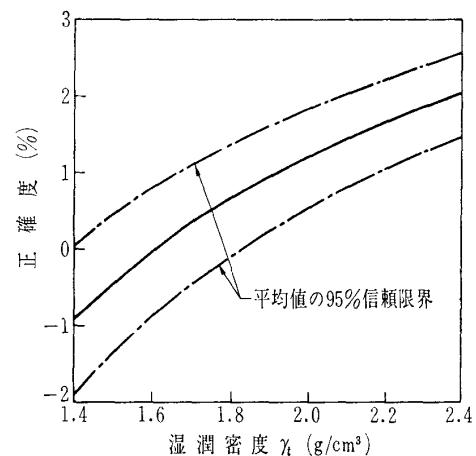


図-17 砂置換法による密度測定の正確度

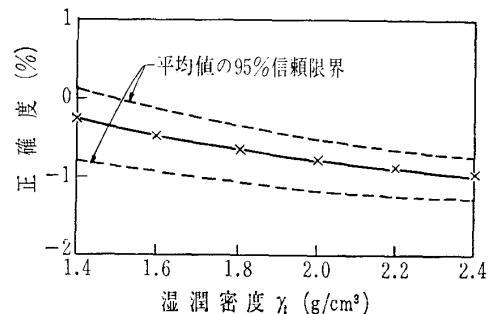


図-18 密度計の正確度（副標準試料による較正）

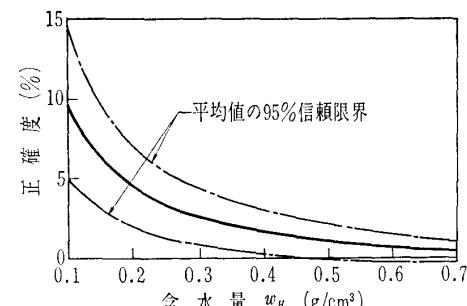


図-19 砂置換法による含水量測定の正確度

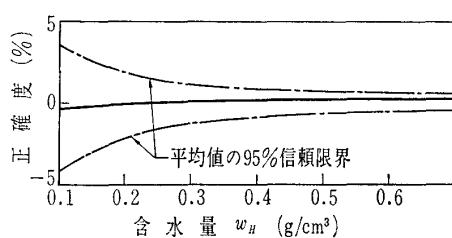


図-20 水分計の正確度

がカタヨリとして評価することができる。これらを試験結果について求めると 図-17~20 に示したようになる。これらの結果から砂置換法では、正のカタヨリすなわち過大評価になることが明らかで、一般的に使用する密度範囲 1.4~2.4 の範囲でおよそ (-0.9~+2.0%) となる。RI 法では、副標準供試体で較正した場合 (-0.3~-1.0%) となる。

(原稿受理 1972.9.28)

## 国際委員会ニュース

### 「テルツァーギ図書館」奨学金 (Terzaghi Library Fellowship)

ノールウェイ土質工学研究所に設けられている「テルツァーギ図書館」は、1973 年から 7 年の期間に授与される奨学金 2, 3 件（1 件 500~1000 米ドル）の募集を行なっている。テルツァーギの生涯・仕事あるいは土質力学・基礎工学の歴史に関する研究を対象とし、どこで、どのように使うかにより金額に幅を持たせたものである。希望者は土質工学会国際委員会まで。

### ガーナ土質工学会の加盟

国際土質基礎工学会 (ISSMFE) は最近、アフリカ地域の 4 番目の国として、ガーナ土質工学会の加盟を認め、全加盟国数は 44 カ国となったと発表した。

### 第 4 回 ブダペスト土質力学研究発表会

1971 年 10 月にブダペストで開催された上記発表会の論文集を、ハンガリー科学院の出版社 Akadémiai Kiadó より寄贈された。関心のある方は土質工学会国際委員会まで。

**題名:** Proceedings of the 4th Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

**内 容:**

- 1) Physical Characteristics of Soils (36 編)
- 2) Earthworks and Road Foundations (17 編)
- 3) Design of Shallow and Deep Foundations (34 編) うち 35 編の論文は独文である。

出版社: Akadémiai Kiadó, Budapest 502, P. O. B. 24, Hungary.

### 浅い基礎に関するシンポジウム

インド土質工学会より、1970 年 11 月にボンベイで開催された上記シンポジウムのプロシーディングスが発行されているので、広報してほしいとの手紙を受取った。購入希望者は直接出版社に申込まれたい。

**題名:** Proceedings of Symposium on Shallow Foundations.

**内 容:**

- 1) Field Investigations and Laboratory Testing For Foundations (8 編)
- 2) Bearing Capacity Pressure Distribution and Consolidation (12 編)
- 3) Structural Analysis and Design of Foundations (7 編)
- 4) Machine Foundations (3 編)
- 5) Foundations under Regional Soil Conditions (7 編)

**価 格:** 送料共 20 米ドル (航空便共 30 米ドル)

出版社: M/S Sarita Prakashan 175, Nauchandi Ground, Meerut, India.