

中性子水分計, γ 線密度計の利用開発に関する研究

齋藤 二郎
木村 薫

概 要

中性子水分計および γ 線密度計には表面型計器と挿入型計器との2種類がある。それぞれの使用分野は前者で土工事の施工管理すなわち地盤の浅い土層を対象とし、後者では地盤深部の土質調査等に使用される。現在、これら計器の利用による土の密度および含水量の測定方法は広く一般に利用されつつある。しかし、現場測定にあたってはなお解決しなければならない測定技術上の諸問題が残されている。

本報告は、ラジオアイソトープ利用による土の密度および含水量の測定方法に関する諸問題のうち、導管および塩分による中性子水分計の出力低下、在来の測定方法との比較、ならびに表面型 γ 線密度計の単一校正曲線等に関する実験結果について述べるものである。研究の1部は日本放射性同位元素協会、水分計専門委員会との共同実験によりおこなわれた。

1. 結 論

中性子水分計および γ 線密度計は、地盤調査、製鉄原料の水分管理、土工事の施工管理ならびに農業および林業における水文学的調査等に広く利用されつつある。わが国におけるこれら計器の使用台数は7~8年前、10数台に過ぎなかったが現在では、数10台に達するものと推定され将来さらに増加が予想される。

中性子水分計および γ 線密度計による土壌の水分ならびに密度の測定は在来になく全く新しい原理に基いており水分や密度の測定に関する未開発分野の開拓に大きな期待がもたれる。しかし、これらの計器のうち可搬型計器については測定方法が確立されているとは云いがたく計器の特長が十分に活用されていない現状にある。

可搬型計器の使用上の問題点としては、校正曲線の作製方法、挿入型計器の場合、導管の設置方法、プローブ周辺における被測定物の水分および密度の不均一性などが挙げられる。これらの問題点の解決あるいは所在を明らかにすることによりR. I. (ラジオアイソトープ) 利用による測定方法の広い活用が期待される。

本研究は、R. I. 利用による水分および密度の測定方法に関する諸問題の解明と土木建築分野への広い活用を主たる目的とし実施したものであり研究の一部は日本放射性同位元素協会、水分計専門委員会との共同実験により行なった。

2. 導管試験および中性子出力の低下試験

挿入型計器を使用し地盤の密度および水分を測定する際、プローブ挿入のための導管を必要とする。導管の材質は γ 線および中性子出力との関係において選定

する必要がある。材質としては肉厚が薄く、しかも機械的な強度を有するもので、口径もプローブの径とほぼ同一なものが望まれる。現在使用中の導管について肉厚の不整による出力の変動ならびに導管中のプローブの偏心による出力変動につき試験を実施した。

また、中性子出力の低下に関する試験は埋立地など塩分含有量の多い測定では中性子水分計の出力が低下し土中水分の含有量を過少評価することとなるため塩分濃度と中性子出力との関係を調べることにした。

2.1. 導管肉厚むらおよびプローブの偏心による出力の変動試験

当技研で現在使用中の導管を表一2.1に示す。

名 称	肉厚(%)	外径(%)	内径(%)	プローブとのギャップ(%)
電 線 管	2.8	48.6	43.0	3.0

表一2.1 導管の諸元

まず導管の肉厚むら試験は、表一2.1に示す導管をランダムに15本選び、それぞれにつき水の入っている210 l のドラム缶の中央に導管を設置して導管各点における密度計の計測を行なった。なお各点における計測は6回の繰返しとし、1回の計測時間は1分とした。

密度計による各測点の計数値は各導管ごとに一元配置法による分散分析する方法とした。危険率5%のF検定の結果は15本の導管全部につき各測点における肉厚の不整は認められなかった。しかし、これら導管の1本ごとの平均計数率を比較した場合、15本のうちの4本は導管全体の平均計数率より5%高い値を示した。

この試験結果から、導管内の肉厚の不整はないといえるが導管ごとに肉厚の相違がある。計数率5%の変動に対する測定誤差は2.5%であり現場使用にあたり

注意を要する。

つぎに、導管中のプローブのセンターリングによる出力の変動試験は肉厚の等しい2本のアルミ管、内径45.73 m/mおよび53.90 m/mを使用して管内におけるプローブと管径とにギャップをつくり水分計ならびに密度計の出力変動を調査した。これら内径の異なるアルミ管とプローブの偏心とにより生ずる最大のギャップは、それぞれ5.73 m/mならびに13.91 m/mである。

アルミ管中のプローブの偏心による出力の変動試験は水の入っている210 lのドラム缶を使用してその中央に管を設置し、アルミ管内におけるプローブもほぼドラム缶中央に設置した状態で15分以上の計測を2回繰返す方法とした。

アルミ管中のプローブの偏心による水分計および密度計の出力変動は2組の対応する平均値差の検定により行なうこととした。危険率5%でt検定を行なった結果を表-2.2に示す。

計器の種類	判定	検 定			
		$ t_0 < t(\Phi, 2\alpha)$		$ t_0 \geq t(\Phi, 2\alpha)$	
型 式	ギャップ	5.73 ^{m/m}	13.9 ^{m/m}	5.73 ^{m/m}	13.9 ^{m/m}
挿入型中性子水分計				○	○
挿入型ガンマ線密度計	○	○			

Φ : 自由度, $\alpha=0.05$

表-2.2 t検定の結果

表-2.2の結果から、密度計の場合プローブの偏心に対する出力の変動は鈍感である。一方、水分計の場合はプローブの偏心に対する出力の変動が大きく最大ギャップ5.73 m/m以下の導管を使用する必要がある。

2.2. 塩分濃度による中性子出力の低下試験

塩分濃度の異なる海水を人工的に造り、それぞれの塩分濃度における中性子出力の変化を調べた。

表-2.3に人工的に造った海水中の塩分濃度を示す。この海水中における中性子水分計の計測は計数値が16万カウント以上となるようにした。

成分	濃度段階	第1段階	第2段階	第3段階	第4段階
Nacl		5.164	3.91	1.99	0.50
Cacl ₂		0.478	0.36	0.18	0.05
MgSo ₄		0.478	0.36	0.18	0.05
Kcl		0.191	0.14	0.07	0.02
計		6.311	4.77	2.42	0.62

表-2.3 人造海水の成分

塩分濃度と中性子水分計の計数率との関係は図-2.1に示すごとく、塩分濃度の増加にともない中性子の計

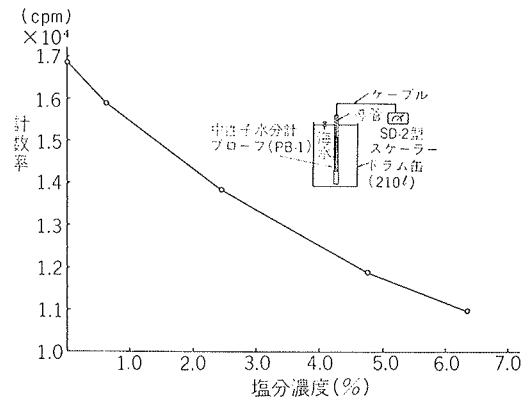


図-2.1 塩分濃度と中性子出力との関係

数率が大巾に低下する。標準塩分濃度における海水の中性子水分計の計数率は純水の計数率に比べて5.8%低下することがわかった。

3. R.I.測定法と在来の測定法との比較実験

3.1. 在来の測定法の精度に関する実験

在来法測定の精度は測定しようとする土質、地盤の締固め程度、測定者の熟練度ならびに密度試験の方法により異なる。これらを誤差の要因とし、その組合せにおける誤差を定量化するため実験計画法に基く実験を行なった。

実験は巾35cm、高さ30cm、長さ3mの組立式実験槽を2ヶ準備しこれに土質としてマサ土、レキ混り砂質土、ローム質土ならびに山砂の合計4種類を選び含水比や地盤の締固め程度を変え均一に締固めた。

実験槽における密度測定は、JIS砂置換法、日本道路公団突砂法I(測定堀削口径 $\phi=15$ cm)および突砂法II($\phi=25$ cm)で行なう。また含水比の試験はJIS法含水量試験のほか急速試験方法として赤外線乾燥法を選ぶこととした。実験は誤差要因として表-3.1に

記号	要 因	水準数	備 考
A	現場密度試験法	3	JIS法; KODANA1214 $\phi=15$ cm・ $\phi=25$ cm (突砂法)
B	含水比試験法	2	JIS法、赤外線乾燥法
C	締固め度	2	突固め試験max $\gamma_d \times 85\%$ 、max $\gamma_d \times 90\%$
D	地盤の含水比	2	O.M.C、OMCよりWet
E	砂置換材	2	粒径 2.0~0.075%、2.0~0.85%
F	測定者の熟練度	2	熟練者、非熟練者
G	土質の種類	4	マサ土、レキ混り砂質土、ローム質土、山砂
I	砂置換材の性質	2	新せん砂、2回以上使用した古い砂
H	測定地区	4	実験槽地盤の測定場所
J	測定器	2	使用試験器の番号

表-3.1 誤差要因と水準数

示す10ヶの因子を用い $L_{16}(2^{15})$ 型直交配列に基く実験を計画した。

直交配列表にわりつけられた各因子は分割法に基き実験を行なう。得られたデータは特性値として、

$$y_{ij} = (\text{測定値} - \text{基準値}) / \text{基準値} \times 100, (\%)$$

ただし、測定値；各因子の組合せに基く乾燥密度測定値、基準値；実験槽の体積とこれに締固められた土の重量とから計算される乾燥密度

特性値 y_{ij} ($i=1, 2, \dots, 32, j=1, 2$) を1次から3次の要因に区分し、要因の区分別にF検定をおこなうとともに特性値 y_{ij} の分散に関する分析も行なった。

要因(記号)	S.S(変動)	df(自由度)	m.s(不偏分散)	F ₀
G	0.001514	3	0.0005046	-----
C	0.000093	1	0.000093	-----
I	0.000763	1	0.000763	-----
D	0.000385	1	0.000385	-----
e ₁	0.003675	1	0.003675	-----
修正1次誤差e' ₁	0.004153	3	0.001384	-----
A	0.002849	1	0.002849	12.1(※※)
J	0.0000010	1	0.0000010	-----
H	0.001201	3	0.000406	1.72
E	0.000029	1	0.00029	-----
F	0.000236	1	0.000236	1.0
F×G	0.002379	3	0.000793	3.36(※)
F×C	0.000722	1	0.000722	3.08(?)
A	0.009549	2	0.004775	20.2(※※)
D×F	0.000062	1	0.000062	-----
B	0.000736	1	0.000736	3.12(?)
e ₂	0.000296	4	-----	-----
e ₃	0.001259	5	-----	-----
e ₄	0.008146	32	-----	-----
修正2次誤差e' ₂	0.009701	41	0.000236	-----

(※)有意水準1%で有意 (※※)有意水準5%で有意 (?)技術的に検討して有意と考えられるもの

表—3.2 分散分析の結果

要因(記号)	S.S(変動)	df(自由度)	m.S(不偏分散)	F ₀
G	0.070419×10^{-6}	3	0.023473×10^{-6}	-----
C	0.146042×10^{-6}	1	0.146042×10^{-6}	1.97
I	0.301435×10^{-6}	1	0.301435×10^{-6}	4.06
D	0.038241×10^{-6}	1	0.038241×10^{-6}	-----
次誤差e ₁	0.074285×10^{-6}	1	0.074285×10^{-6}	-----
(A)	0.358326×10^{-6}	1	0.358326×10^{-6}	2.71
J	0.018711×10^{-6}	1	0.018711×10^{-6}	-----
H	-----	-----	-----	-----
E	1.072457×10^{-6}	1	1.072457×10^{-6}	8.08(※※)
F	0.002552×10^{-6}	1	0.002552×10^{-6}	-----
F×G	0.463415×10^{-6}	3	0.154472×10^{-6}	1.16
C×F	0.001329×10^{-6}	1	0.001329×10^{-6}	-----
A	0.920336×10^{-6}	2	0.460168×10^{-6}	3.47(※)
D×F	0.020111×10^{-6}	1	0.020111×10^{-6}	-----
H	0.754629×10^{-6}	3	0.251543×10^{-6}	1.89
B	0.000301×10^{-6}	1	0.000301×10^{-6}	-----
誤差e'	2.524506×10^{-6}	19	0.132869×10^{-6}	-----

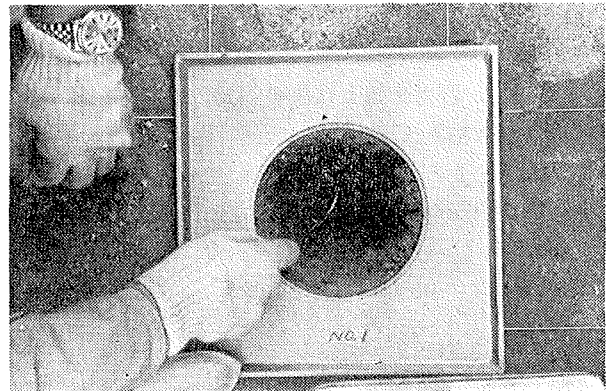
(※)有意水準1%で有意 (※※)有意水準5%で有意 (?)技術的に検討して有意と考えられるもの

表—3.3 分散に関する分散分析結果

危険率5%でF検定した結果を表—3.2 および表—3.3 に示す。

検定結果から有意差ありと認められる因子は、試験方法ならびに測定者の熟練度と被測定土質との交互作用とであり、この他にも地盤の締固め程度と測定者の熟練度との交互作用ならびに含水比の試験方法などが技術的な判断により有意と認められた。

分散に関する分散分析の結果は有意差ありと認められる因子に砂置換材料の性質および密度試験の方法が挙げられた。



写真—1 現場密度試験の状況

実験結果から測定者の熟練度が測定対象地盤の性状により異なることが分った。従来から、在来の測定方法における誤差要因の1つに測定者の熟練度が考えられていた。しかし熟練者と非熟練者との定量的な区別が困難である上、誤差量を要因ごとに区分することかなりの煩雑さが伴うため、現在までこの問題に関し明確にされていなかった。

実験結果から熟練度により測定値に影響を生ずる地盤状態としては、大レキ(実験ではレキの粒径15~35m/m)の混っている締った地盤あるいは大レキが混入していない場合でも固結している硬い地盤(実験では締ったローム質土の地盤)において生ずる。これら地盤における密度測定には砂置換方法による体積測定の際、掘削孔の形状および孔壁の状況等に対する測定者の熟練性が介入しやすい。

これまでに実験をおこなった3種類の密度試験方法のうち最も正確度の高い試験は日本道路公団突砂法Iである。各種の試験対象土質に対して個々のデータが基準乾燥密度と良く一致した。

JIS 砂置換密度試験法はこれら密度試験のうちでも最も正確度が低かった。この試験方法はJISの規定によれば適用粒度範囲が4.8m/m以下であり、本実験の1部ではその適用外において使用した。したがって、実験による期待値の推定結果から直接判断を下し得ない要素はあるが、JIS法などの注砂によって測定孔の

体積を測る方法は突砂方法などに比べて孔壁の状況による影響を受け易いためと考えられる。

次に密度測定値のバラツキについて検討すると、バラツキを与える最大の因子は砂置換材料の性質と試験方法とである。砂置換材料の粒径としては一律な粒径をもつ砂よりも均等な粒度配合をもつ砂の方がバラツキに対する影響は小さい。また試験方法についてみると、JIS 法より日本道路公団で用いている突砂法がバラツキに対する影響が小さくなっている。注砂法では前述したごとく掘削壁面の性質によってバラツキの異なることが考えられ、適用される土質には限定範囲がある。

3.2. R. I. 測定方法と在来の測定方法との比較

当技研敷地内に図-3.1 に示す規模の土質の異なる試験地盤を5ヶ所造成し、各盛土につきそれぞれ合計36点の測定面を設けた。

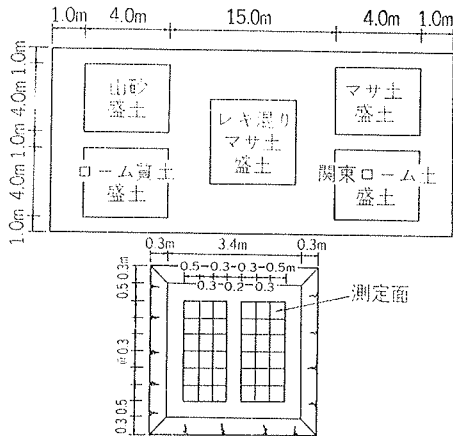


図-3.1 試験盛土の配置

土質の名称	土粒子の真比重 Gs	コンシステンシー			粒度特性		
		LL (%)	PL (%)	PI (%)	最大粒径 (mm)	-74μ (%)	均等係数
ローム質土	2.614	53.0	20.4	32.6	25.4	2.3	
レキ混りマサ土	2.618	35.2	18.2	17.0	38.1	13	69.4
山砂	2.644	26.0	14.9	11.1	2.0	30	42.0
関東ローム	2.637	89.0	64.8	24.2	2.0	30	7.7
マサ土	2.618	35.2	18.2	17.0	4.8	18	125.0

表-3.4 試験土の物理的性質

盛土における R. I. 測定は各盛土につき7点、合計35点を1日の測定数とし連続5日間で全測定の計測をおこなう。なお各盛土における測定の選定とその計測の順序はすべてランダム化した。

R. I. 測定終了後ただちに各盛土における在来法密度測定を実施した。密度測定には JIS 砂置換法および公団突砂法 I および II を選らぶとともに測定者の熟練度をも考慮し3つのそれぞれ熟練度の異なる測定チー

ムを計画した。各盛土における現場密度測定は、それぞれの土質に対し1日4点合計20点を1日の測定とし各チーム共に連続3日試験をおこなう方法とした。なお測定チームと試験方法との組合せは各土質に対し同数ずつの組合せとし、測定順序および測定日との組合せならびに試験方法と測点との組合せについては総べてランダム化した。

本実験は日本放射線同位元素協会、水分計専門委員との共同実験であり提供機器には、表面散乱型2台、表面透過型4台、計6台の他、水分計として5台の使用を計画した。

共同実験の結果は現在解析中であり結果の一部につき要約すれば次の通りである。

(i) 表面型中性子水分計およびγ線密度計共にどのメーカー製品を使用しても測定結果に対する差は生じない。これら計器の指示値は土質や日間による出力の変動に影響を受けない。

(ii) 密度計は、表面散乱型と透過型とで地盤密度の測定範囲が異なる。このため両者間の測定値の分散に違いを生ずる結果となる。

(iii) 表面散乱型密度計に比べて表面透過型密度計の誤差分散は小さく精度が良いといえる。

(iv) 乾燥密度測定値の在来法および R. I. 法の測定に関する相関は極めて良い。このことは水分計および密度計の校正曲線が在来の測定法をベースとし正確におこなわれたことと、R. I. 測定における誤差が在来の測定法における誤差と同程度であることなどによる。

表面散乱型密度計の相関性は表面透過型に比べて低い。その理由としては、校正曲線の問題の他、計器と地表面との間げきによる誤差の影響、測定範囲の差などが考えられる。

(v) 在来の測定法においては土質あるいは地盤の締固め状況等により測定者の熟練による影響を生ずる。また試験方法によっても測定値に差を生ずる。この結果は前述した室内試験の結果と同様である。

4. 単一校正曲線に関する実験

R. I. 測定には計器の校正曲線を使用する。この校正曲線には実際に計器を使用する現場の土質を用いて校正することが望しい。

表面散乱型密度計は透過型密度計に比べて操作が簡便であり迅速測定に適している。しかし、その測定原理が被測定土質の組成に対して原子番号 Z 質量数を A とすると、 $Z/A=0.5$ を満足する必要がある。殆どどの土質では $Z/A \approx 0.5$ を満足しており計器購入当初に標準試料で計器の校正試験をおこなえば以後の測

定に対して1本の校正曲線を用いて測定することができる。しかし関東ロームや或る種の粘土, ロームなどでは土の組成に多量のH元素を含有しており $Z/A \approx 0.5$ なるため校正試験を新たにこなう必要がある。

校正試験は作業そのものが煩雑と労力を要するものである上, 締められた供試体の密度や含水量を決定する方法も定まった方式がまだ確立されていない。

校正曲線を簡略に作製するため密度分布の均一な材料を用い被測定土質の組成の影響に鈍感な計器の校正方法について2~3の実験をおこなった。

4.1 実験方法

表-4.1 に示す密度分布の一樣な組成および密度の異なる試験材料を選定して種々の密度が得られるよう板と板とを密着させるあるいはすき間を作るなどの方法が採られた。

材質及び材質の重ね合せ状態	密度 P (g/cm ³)
ガラス板 (間隙 @ 4 mm; 空隙)	1.8155
ガラス板 (間隙 @ 8 mm; ")	1.4244
アルミ板 (間隙 @ 8 mm; ")	0.9198
アルミ板 (50×50×20cm)	2.703
コンクリート板 (60×64×23.5cm)	2.235
ガラス板 (間隙 @ 4 mm; 空隙飽和)	2.0927
ガラス板 (間隙 @ 8 mm; ")	1.8626
花崗岩 (30×30×30.2cm)	2.638
大理石 (30×30×30cm)	2.704
アルミ板 (間隙 @ 8 mm; 空隙飽和)	1.5836
アルミ板 (間隙 @ 4 mm; ")	1.8674
ガラス板 (50×50×33cm)	2.502
アルミ板 (間隙 @ 4 mm; 空隙)	1.3773
石墨 (30×30×30cm)	1.546

表-4.1 試験材料

試験体の表面に散乱型 γ 線密度計 (PG-4) を設置した状態で計測し, つづいて試験体と密度計底面との間に種々のギャップを作った状態での計測に対し両者の関係は, ギャップの増加につれて計数率が指数的に増加して最大となり以後減少する放物曲線に似た形状を有する。

各試験体の最大計数率の得られる密度計とのギャップ d は 45m/m~50m/m の範囲においてであり, 試験体の組成の違いにより最大計数率は異なる。いま試験体の表面における密度計の計測を密着計数率 F.C とする。つづいて密度計の底面と試験体表面とに最大計数率を与えるすき間 d を作って計測をおこないギャップ計数率 G.C とする。この F.C および G.C を種々の密度を有する表-4.1 の各試験体について計測し, G.C/F.C の比を試験体の密度 ρ に対してプロットすれば図-4.1 に示すごとく正の勾配を有する校正曲線

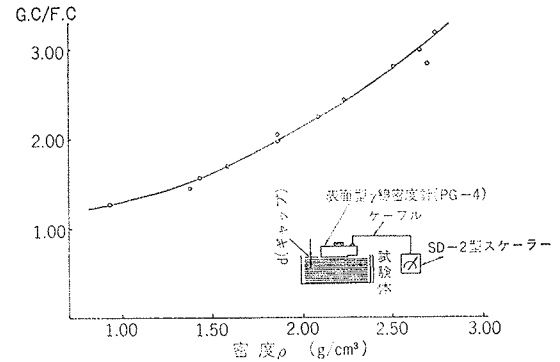


図-4.1 G.C/F.C 法による校正曲線

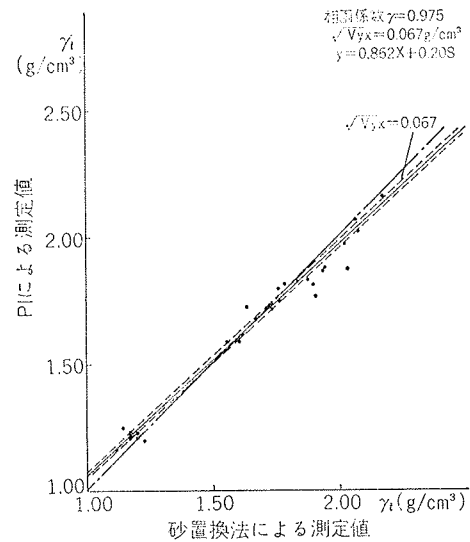


図-4.2 現場密度の散布図

が得られる。

この図-4.1 の校正曲線を使用して現場測定をおこなった結果を砂置換法による現場密度測定結果と対比させて, 図-4.2 に示す。

4.2 G.C/F.C 校正方法の特長

従来の標準体の計数率に対する各供試体の計数率の比による校正法すなわち計数率比法に比べて G.C/F.C 法による校正は土質の組成による影響が少ない。しかし表面型計器特有の土の表面と計器との密着性に基く誤差は, G.C/F.C 法による測定においても同様にありその影響し無視することはできない。

また, G.C/F.C 法の特長としては計器の校正試験が簡単におこなえることである。試験体には, 石材, アルミ板, ガラス板など市販の材料を種々の密度に調整して校正がおこなえる。また, この校正試験によって求められた校正曲線は, どの土質に対しても同程度の精度で測定できるとともに密度変化に対する精度も変わらない。

参考文献

中性子水分計, γ 線密度計の利用開発に関する研究
木村薫他, 大林組技術研究所報告書 S. 42, 10