

ラジオアイソトープによる土の密度および含水量の測定法 (第1報)

福住 隆二
木村 薫

概 要

中性子水分計およびγ線密度計による土の含水量や密度の測定に際しては、これら計器の特性を熟知した上での適切な使用が必要である。本文では以上の観点から実施した計器の諸特性に関する実験結果を述べ、あわせて社内現場における二、三の測定実施例をあげその適用性を検討した。

1. まえがき

近年ラジオアイソトープを利用して物質の密度や含水量を測定する方法が研究開発され関係各方面で注目を集めている。土木建設分野においては、これを土の状態量測定に使用することが試みられ、測定の迅速性非破壊性など数多くの利点が見出されるにともない急速な発展の傾向を示している。

当技術研究所ではその開発の動向と将来性を考え過日、中性子水分計とγ線密度計を日立製作所に依頼し、以後この測定法に関する各種の実験を重ねてきた。本文は、これまで行なった一連の研究結果のうち当社機器を中心とした基礎的な実験の内容を述べ、つづいて社内の工事現場に適用した二、三の実施例を報告することとする。

2. 測定の原理および機構

2.1. 中性子水分計

a) 測定原理 数MeV程度の速中性子線源を物質と一緒に置くと、物質の原子核と弾性散乱を繰返してエネルギーを失ないついに原子の熱運動と同等のエネルギーにまでなる。これを熱中性子と呼ぶ。またエネルギーを失なう過程を減速と呼ぶが減速の様子は物質中の原子の種類により異なる。表一は土壌の主成分について中性子の核的性質を示したものである。表からわかるように、水素原子の減速能は他の原子に比べ非常に大きい。このことから、もし物質中に含有される水素の量が無規できなければ簡単な $\sigma_s N_f$ の計算からわかるように、速中性子に対するその減速能は水素の含有密度により決まるといえる。したがって物質中に速中性子線源と一緒に熱中性子の検出器を置けば単位時間当たり検出される熱中性子の数、すなわち熱中性

子計数率は物質中の水素含有密度に対応することとなる。中性子水分計の測定原理は速中性子に対する水素の特異的性質を利用したものであるが、水分の測定に際し熱中性子吸収断面積の大きい元素や自由水とは異なる結晶水などが多量に含有されている場合は、測定値の補正が必要とされる。

元素	質量数	熱中性子の吸収断面積 σ_a パーセント*	平均散乱断面積 σ_s パーセント	エネルギー対数の平均減少率 ξ	速中性子が熱中性子になるまでに必要な衝突回数**	原子1個あたりの減速能 $\sigma_s \times \xi$
H	1	0.33	38	1.000	18	38
C	12	0.032	48	0.158	115	0.76
N	14	1.88	10	0.136	134	1.36
O	16	0.0002以下	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	2.52	0.10
Si	28	0.13	1.7	0.070	261	0.12
Cl	35	32	16	0.056	324	0.90
K	39	2.0	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	0.039

* : 1パーセント = 10^{-24}cm^2
** : 速中性子のエネルギーは 2MeVとした

表一 中性子に対する元素の核的性質

b) 構造 本器には2種類のタイプがあり使用目的に応じ両者を区別している。すなわち挿入型水分計は地盤深部の測定に使用し他方、表面型水分計では地盤表層の水分測定に使用する。

本器は図に示すごとくプローブ部分と計数器部分とから構成されており両者はケーブルで接続されている。プローブは速中性子線源として、 $R_a - B_65\text{mCi}$ を装備している。熱中性子検出器としては BF_3 カウンターが使用されている (図一1および表二参照)。

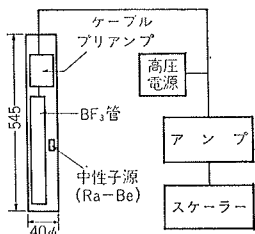


図-1-1 挿入型

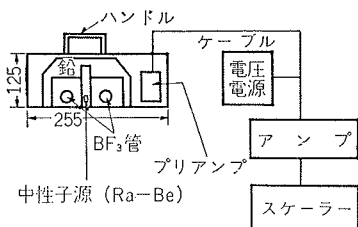


図-1-2 表面型

図-1 中性子計の構造

プローブの外形	円筒形40mmφ×545mm	
速中性子源	Ra-Be 5mci	
型式	日立PB-1	
BF ₃ 管	寸法	φ25mm×300mm 1本
	封入ガス	濃縮B F ₃ (¹⁰ B 96%)
	動作電圧	1700volt

表-2-1 挿入型

プローブの外形	箱型125mm×255mm	
中性子源	Ra-Be 5mci	
型式	日立PB-2	
BF ₃ 管	寸法	φ250mm×150mm 2本
	封入ガス	濃縮BF ₃ (¹⁰ B 96%)
	動作電圧	1950volt

表-2-2 表面型

表-2 中性子水分計の仕様

2.2. γ線密度計

a) 測定原理 γ線が物質を透過する際、物質を構成する原子の軌道電子と相互作用をする。土壌などの比かゝる軽い元素の集団に対し、0.5~1.0Mev程度のエネルギーを持つγ線が入射した場合、軌道電子との相互作用によるγ線の散乱現象が生ずる。これをコンプトン散乱といいγ線の初期エネルギーと密接な関係にある。物質中でコンプトン散乱が生じている場合、γ線源と検出器との間に適当な、しゃ壁体を置き線源

から放射される非散乱γ線を直接入射できないようにすれば、散乱γ線だけを検出することができる。背面散乱型γ線密度計の測定原理は物質中におけるγ線のコンプトン散乱を利用したものである。

土中でコンプトン散乱が生じている場合、散乱γ線の強度は原子の軌道電子の密度に比例する。電子の密度Ne(ケ/cm³)と物質の密度ρ(g/cm³)との関係は、

$$ne = \rho \cdot N_0 \cdot Z/A \text{ (ケ/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、N₀アボガドロの数、Z 原子番号、A質量数とする。

つぎに物質の構成元素とZ/Aの関係についてみると、表-3に示したごとく原子番号が20以下の軽い元素に対するZ/Aは、ほぼ0.5に等しい。普通の土壌は表中に記された元素を主成分とするから、Z/Aは一定値とみなされる。このことから散乱γ線の強度を測定することにより、密度を測定することができる。

物質の密度と散乱γ線強度との関係は物質のγ線吸収効果と散乱線の強度との間に相殺関係がある。γ線密度計による測定は吸収効果の優勢な領域で普通行なわれる。

b) 構造 水分計の場合と同様、本器にも挿入型および表面型の2種類の型式がある。

プローブはγ線源として、Cs¹³⁷ 10mCiを、また検出器としてハロゲン G. M 管を装備している(図-2および表-4参照)。

元素	H	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca
Z/A	1.000	0.500	0.500	0.500	0.478	0.500	0.482	0.500	0.484	0.500	0.486	0.487	0.500

表-3 各元素に対するZ/Aの関係

プローブの寸法	箱型301mm×102mm	
ガンマ線源	Cs ¹³⁷ 10mci	
型式	日立PG-4	
G.M管	寸法	φ20mm×100mm 2本
	動作電圧	350volt

表-4-1 挿入型

プローブの寸法	円筒形40mmφ×510mm	
ガンマ線源	Cs ¹³⁷ 10mci	
型式	日立PG-3	
G.M管	寸法	φ20mm×100mm 1本
	動作電圧	350volt

表-4-2 表面型

表-4 γ線密度計の仕様

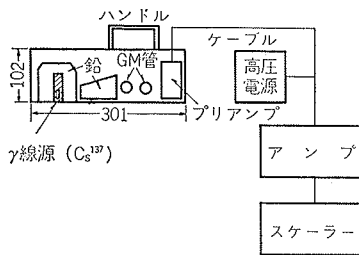


図-2-1 表面型

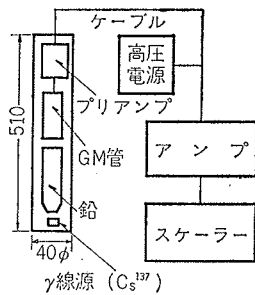


図-2-2 挿入型

図-2 γ線密度計の構造

3. 計器の校正試験ならびに諸特性

3.1. 校正試験

中性子水分計，γ線密度計の使用には，これら計器の校正が必要とされる。このため表-5に示す試料を使用し計器の校正試験を実施した。

各種試料の供試体作製方法は，試料を容器に数回にわたって詰め各層が均一な締固めとなるよう一定落下回数ランマーによる突固めを行なった。なお，使用容器は挿入型計器用として直径56cm×高さ86cmのドラム缶を，また表面型計器用としては直径56cm×高さ40cmのドラム缶の半割を使用した。

供試体の密度および含水量の試験方法は，挿入型計器の場合，試料の締固め密度は容積法（試料の全重量/試料の全体積）により求めることとし含水量は供試体の深さ方向に対し上部，中心部および下部から50～100g程度の試料を3ヶつつ採取し，炉乾燥法により求

試料	密度(g/cm ³)	含水量(g/cm ³)	備考
水	1.00	1.00	H ₂ O
グラニュー糖	0.93～1.03	0.54～0.57	C ₁₂ (H ₂ O) ₁₁
グラニュー糖+砂	1.05～1.50	0～0.55	
砂+水	1.50～1.90	0～0.12	
砂質土+水	1.70～2.30	0.05～0.25	
ローム+水	1.20～2.00	0.05～0.45	

表-5 校正試験試料

めた。なおグラニュー糖と砂の混合試料についての含水量は(2)式から計算した。

$$\text{含水量}(m) = \rho_m \cdot x \cdot 11 (\text{H}_2\text{O}) / (\text{C}_6\text{H}_{22}\text{O}_{11}), (\text{g}/\text{cm}^3) \dots (2)$$

ただし ρ_m 供試体の密度 (g/cm³)，H₂O 水の分子量，C₆H₂₂O₁₁ グラニュー糖の分子量，X 混合比とする。

一方，表面型計器の場合，供試体の密度測定は容積法または供試体表面で2ヶのJIS.A1214による砂置換法を実施することにより求めた。

校正試験に使用する試料の組成は，できるだけ種類の多いことが望まれる。また供試体の作製ヶ数はASTM測定法試案によれば最低15ヶ作製するよう奨めている。本試験では挿入型計器で約15ヶ，表面型計器で30ヶを作製し試験を行なった。供試体のラジオアイソトープ（以下RIと記す）計測は信頼度95%における相対誤差が0.5%以下となるよう154,000カウント以上の計数を選んだ。なお供試体のRI計測値は計数率比とし標準体試料にはパラフィンを使用した。

つぎに校正曲線の決定方法について述べる。校正試験によりグラフ上にプロットされた測点にはバラッキがある。このため，それぞれの計器に対し簡単な函数型を選定し最小2乗法により校正曲線を決定した。校正曲線の実験式は次のとおりである。

(1) 挿入型中性子水分計 (PB-1)

$$\log_{10} R = -1.206 \exp - 3.947 m$$

(2) 表面型中性子水分計 (PB-2)

$$R = (0.006 \cos 1.9m + 0.335 \sin 1.9m) \exp 1.13$$

(3) 挿入型γ線密度計 (PG-3)

$$R = 1.875 \exp(-0.595) \gamma_t - 11.97 \exp(-5.282) \gamma_t$$

(4) 表面型γ線密度計 (PG-4)

$$R = 1.799 \exp(-0.577) \gamma_t - 10.4 \exp(-8.21) \gamma_t$$

ただし，m 含水量(g/cm³)， γ_t 湿潤密度(g/cm³)とする。実験式から求めたそれぞれの計器の校正曲線を図-3に示す。

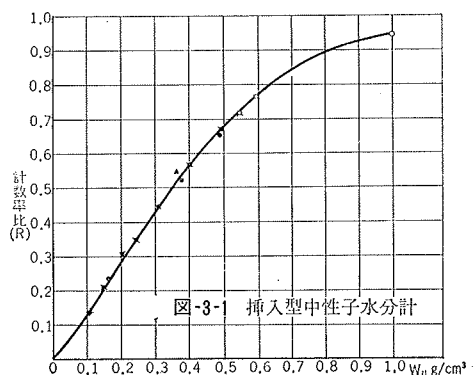


図-3-1 挿入型中性子水分計

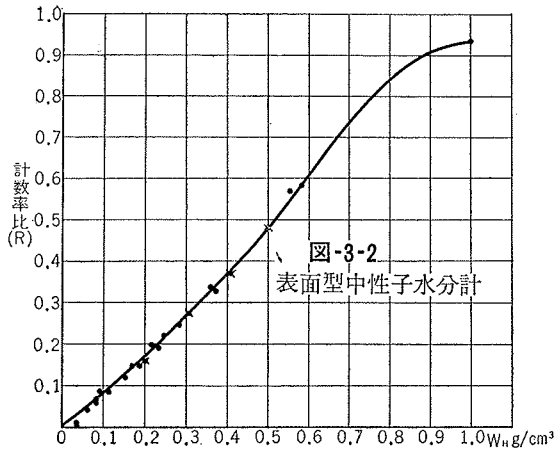


図-3-2 表面型中性子水分計

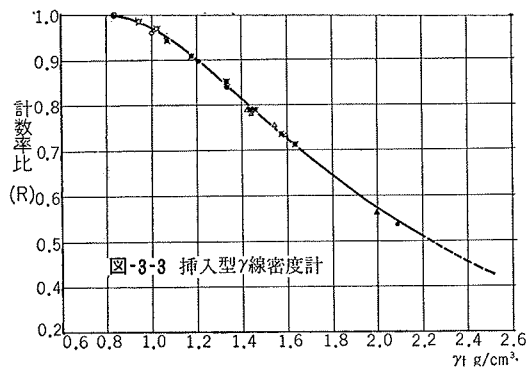


図-3-3 挿入型γ線密度計

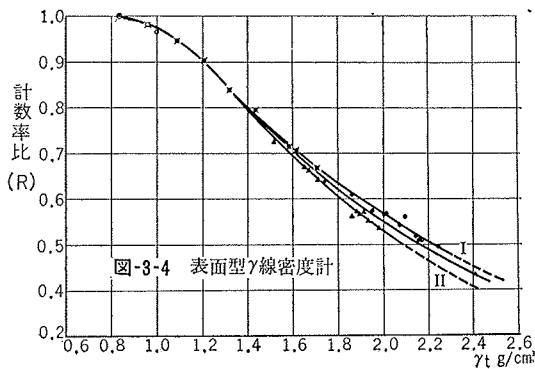


図-3-4 表面型γ線密度計

図一3 校正曲線

3.2. 被測定物に対する計器の測定範囲

RI計器を使用し土の密度や含水量を測定する際、計器に対する被測定物の容積や厚みが問題となる。

被測定物の容積や厚みと密度および含水量との関係は使用する検出器の種類および、その幾何学的配置により異なることが推察される。この問題について各計器の特性試験を行なった。

a) 中性子水分計の有効容積 中性子線源から放射された速中性子が被測定物中において熱中性子になるに要する最小限必要な試料容積を有効容積とよぶ。

図一4-1に示すごとく挿入型計器の場合、含水量が0.16g/cm³以上において半径30cm、それ以下では40cm以上を必要とする。

表面型計器の場合、含水量が0.2g/cm³以上で半径30cm以上、それ以下では40~50cmを必要とする(図一4-2参照)。一般に被測定物の含水量と有効容積との関係は試料の含水量が少ないほど有効容積は増加する。

b) γ線密度計の有効厚さ 密度計においても被測定物に対するγ線の影響範囲がある。これをγ線の有効厚さと呼ぶことにする。

試料の有効厚さは試料の密度により変化する。被測定物の密度が1.0g/cm³以上における密度計の有効厚さは半径が20~30cm以上において得られる(図一5-1および5-2参照)。

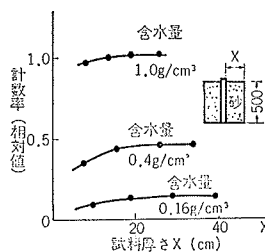


図-4-1 挿入型

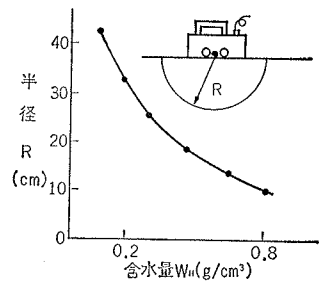


図-4-2 表面型

図一4 中性子水分計の有効容積

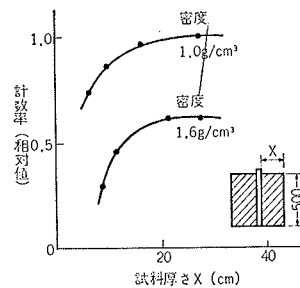


図-5-1 挿入型

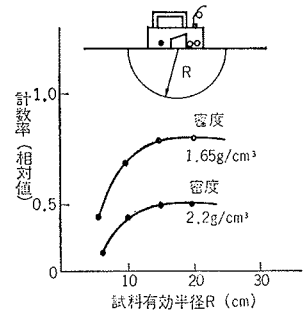


図-5-2 表非型

図一5 γ線密度計の有効厚さ

3.3. プローブの被測定物に対する接触条件

a) 挿入型計器 挿入型計器を使用する際、プローブ挿入用の導管と被測定物との接触条件が問題となる。導管周辺の被測定物との間げきはポーリングなどを利用して導管を設置する際に生じやすく、それによる測定誤差は一種の偶発誤差とみなされる。間げきによる誤差は間げき量がわかれば次式により計算することができる。

$$\text{間げき誤差}(\epsilon) = -(\Delta n_g/n_0)/a, \quad (\text{g/cm}^3) \dots\dots(3)$$

ただし Δn_g 間げきによる計数率変化 (cpm), n_0 間げきがない場合の計数率 (cpm), a 校正曲線の勾配 $(\text{g/cm}^3)^{-1}$ とする。

b) 表面型計器 表面型計器では被測定物の表面と

プローブとの間に空げきがあると、その影響により計数率が変化する。

水分および密度計のプローブと被測定物との間に空げきを設け種々の空げきに対する計数率の変化について実験を行なった。

図-6および7に示すごとく空げきの増加にともない水分計の計数率は減少し密度計の計数率は増加する。密度計の計数率変化は水分計の場合に比べ大きい。空げきの影響により両計器ともに被測定物の密度および含水量を過小評価することとなるが、その影響は被測定物の密度や含水量により異なる。

空げきによる誤差は(3)式で計算される。水分計に比べ密度計の場合、校正曲線の勾配が小さいのでその誤差は大きい。一般に数mmの空げきに対し水分計の空げき誤差は考慮しなくてもよい。一方、密度計の場合被測定物の密度が 2.0g/cm³、空げきが 2~3mm において 4.7% もの誤差を生ずることが実験的に確められており空げきによる誤差は無視することができない。

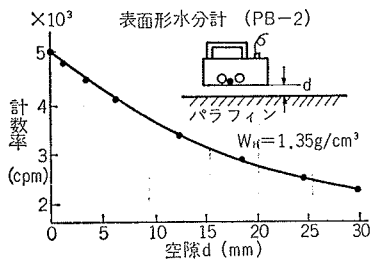


図-6 空隙による影響

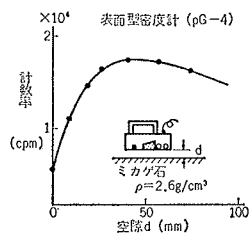


図-7 空隙による影響

3.4. 計器の不安定性

計器の不安定性要因としてバッテリー電源の電圧変動トランジスターや抵抗器の温度変化にもとづく回路特性の変動、計数管の一時的な特性の変動などが考えられる。これらの要因に対し3項目の室内実験を行ない、つぎの結果を得た。

(1)電源電圧変動試験 危険率5%および1%でF検定した結果、入力電源の電圧が基準電圧の±5%変化範囲において出力の変動は生じないといえる。

(2)出力の温度変動試験 水分および密度計のプローブは負の温度係数を有する。計数装置の温度変動の性状は20°Cにおいて正および負の温度係数を有する。上記試験結果を表-6および7に示す。

(3)出力の時間および日間変動試験危険率5%および1%で検定した結果、連続5時間の使用範囲において出力の変動は認められない。また連続5日間の使用範囲においても日間による出力の変動は認められない。

電源電圧の変動にもとづく出力の変動は、一般に密

度計に比べ水分計の方が大きい。したがって水分測定に際しては電源電圧を常に適正に保つよう注意を必要とする。また現場測定に際しては計器の温度特性を十分知っておく必要がある。野外の温度変化が10°C以上におよぶ時、計器の温度に対する補正が必要となる。

型式	種別	温度特性		
		正変動率(%/°C)	負変動率(%/°C)	変動範囲(%)
挿入型	中性子水分計		0.039	±0.8
	γ線密度計		0.14	±2.4
表面型	中性子水分計		0.17	±4.5
	γ線密度計		0.049	±1.0

(※) 20°Cを基準とした場合の変動範囲

表-6 プローブの温度特性

使用プローブ	温度特性			
	正変動率(%/°C)	負変動率(%/°C)	変動範囲(%)	
挿入型中性子水分計	0.09	0.10	n°C ≥ 20°C	-1.9
			n°C ≤ 20°C	-1.8
挿入型γ線密度計	0.08	0.10	n°C ≥ 20°C	-2.0
			n°C ≤ 20°C	-1.8

(※) 正の変動率 n°C ≤ 20°C の場合

(※) 負の変動率 n°C ≥ 20°C の場合

表-7 スケラーの温度特性

3.5. 測定の精度

水分および密度計による被測定物の含水量や密度を測定する際は放射能の統計的揺動による誤差がともなう。

上記、誤差は計数率の標準偏差ならびに相対標準偏差により各計器ごとに検討した。なお標準偏差ならびに相対標準偏差は次式から計算を行なった。

$$\text{標準偏差}(\sigma) = \frac{1}{a\sqrt{N_s}} \sqrt{\frac{R}{T}}, \quad (\text{g/cm}^3) \dots\dots(4)$$

ただし、a 校正曲線の勾配 (g/cm³)⁻¹, R 計数率比, t 計数時間(分), N_s 標準体の計数率(cpm)とする。

$$\text{相対標準偏差(R.S.D)} = \frac{\sigma}{T} \times 100, \quad (\%) \dots\dots(5)$$

ただし、T 含水量および密度(g/cm³)とする。

(4)および(5)式から計算した各計器の標準偏差ならびに相対標準偏差は図に示すごとく含水量や密度と計測時間との相互の関係において変化する。

水分計の場合、含水量が約0.2g/cm³以下において相対標準偏差が急激に増加する傾向にある。このため、低含水量領域における測定には長時間の計測が必要と

される(図-8-1および8-2参照)。

密度計の場合、被測定物の密度が 1.2g/cm^3 以下において相対標準偏差は急激に増大する。このため、これよりも低い密度における測定には長時間の計測が必要とされる(図-8-3および8-4参照)。

われわれが取り扱う地盤の密度は 1.2g/cm^3 以上が普通であり、これに対し密度計の相対標準偏差は5分計測において1%以下である。このことは数分の計測時間で地盤の密度を測定する際、その精度が放射能の統計的揺動による影響をほとんど受けないことを示すものである。

3.6. 特異元素による中性子水分計の出力低下

被測定物中に中性子吸収断面積の大きい元素が含まれている場合、中性子の出力は低下し含水量測定値は過小評価されることとなる。

表-1に示したごとく熱中性子吸収断面積の特に大きい元素は塩素であり量的にも地盤あるいは土中に無視できない程度含まれる可能性が最も大きい。したがって埋立地などの地下水中に多量の塩分を含む地盤における含水量測定には塩分の影響を受けない測定方法として、われわれはつぎに述べる方法を採用している
①被測定地盤の土質を直接使用して水分計の校正を

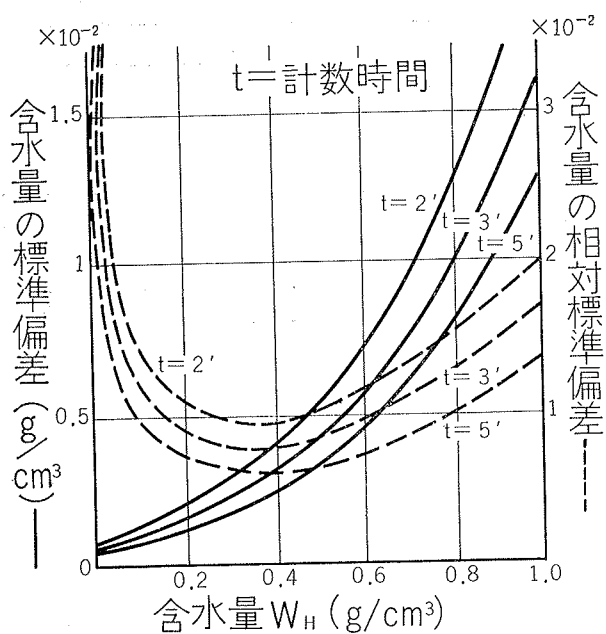


図-8-1 挿入型水分計

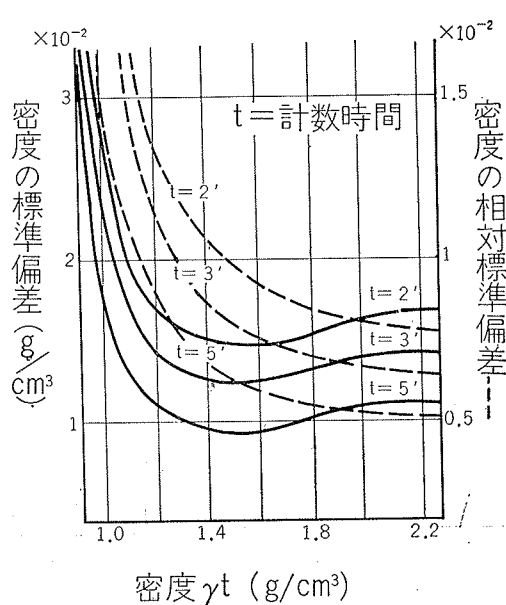


図-8-3 挿入型密度計

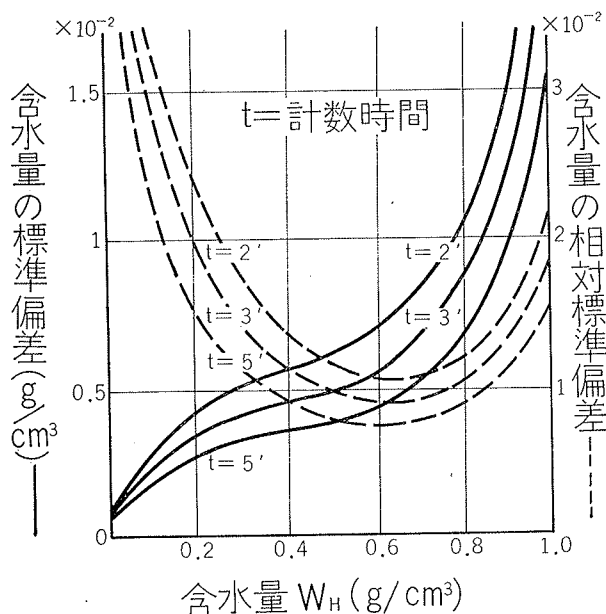


図-8-2 表面型水分計

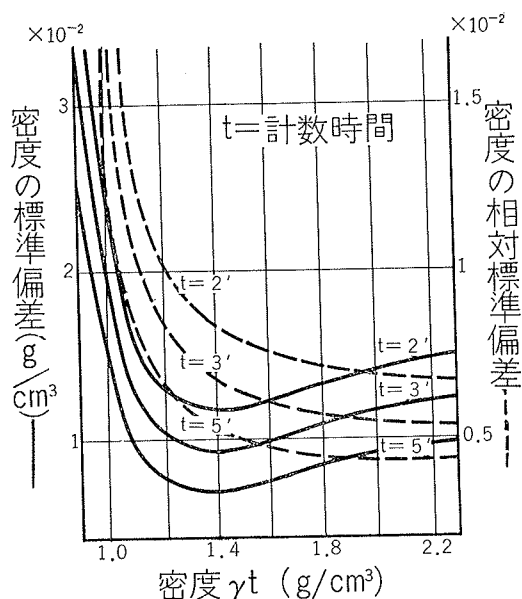


図-8-4 表面型密度計

図-8 水分計および密度計の誤差変動

行なう。(ロ)密度計のみを使用して土質常数と湿潤密度から含水比を求める。なお、(イ)の方法から求める含水比は次式から計算する。

$$\text{含水比}(w) = \frac{\rho_w'(G_s - \gamma)}{G_s(\gamma - \rho_w) - \gamma(\rho_w - \rho_w')} \times 100, (\%) \dots (6)$$

ただし、 γ 地盤の湿潤密度 (g/cm^3), G_s 土粒子の真比重, ρ_w 地下水の比重, ρ_w' 純水の比重とする。

図-9は水分計を使用し含水比を求めた場合と、密度計のみを使用し含水比を求めた場合とを比較した例である。図にみられるように両者はよく一致する。

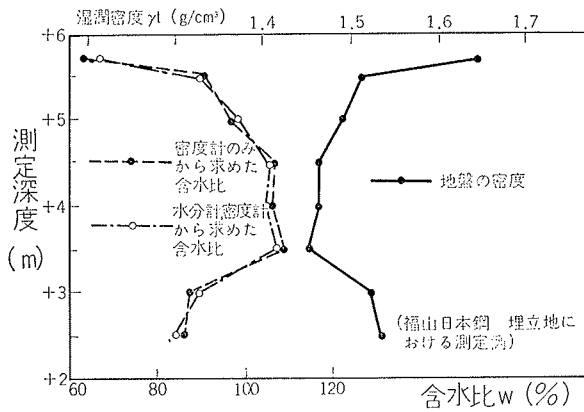


図-9 埋立地における測定例

4. 現場実施例

4.1. サンドドレーンによる地盤改良効果の測定

4.1.1. 概要 神戸製鋼灘浜工場内の埋立地は土質性状がきわめて悪く自然含水比が液性限界に近い状態にあり、各所で地盤の流動がみうけられた。この地区に工場を建設するに際し地盤支持力の改善はもちろんのこと、まず表層土のトラフィカビリティーを改善しなければならなかった。このため軟弱層の粘着力の増加分 $3\text{ton}/\text{m}^2$ を目標としサンドドレーン工法による地盤改良工事が実施された。

非常に軟弱な地盤に同工法を適用するに際し特に厳密な地盤改良効果の判定が必要とされる。このため当工事においては地盤の密度や含水比の経時的変化から

改良効果を迅速に判定する目的のもとに RI 計器の使用が計画された。

RI測定はサンドドレーン打設直後から開始し、約2ヶ月間おきに載荷盛土撤去の時期まで実施した(表-8参照)。

4.1.2. 結果および検討 図-10に示す含水比は測定地区の地下水の比重を1.03とし、前記(6)式から計算した値である。

湿潤密度および含水量の経時的変化についてみるとサンドドレーン打設直後から約6ヶ月経過したのちの地盤の密度および含水量は、かなりの変化を示している。この結果は、その他の地盤動態観測結果と一致しておりサンドドレーンの効果を裏づけるものである。

No.1測定孔のGL±0m付近までは密度や含水量に経時的変化が認められる。この原因としては、GL±0m付近が地下水面に相当し季節により水位面の移動が行なわれるためと考えられる。またNo.1測定孔におけるGL-14.5mよりも深い部分の砂レキ層において密度や含水量に経時的な変化が認められるのは、盛土や土被り荷重の有効応力増加にもとづく密度増加に起因するものと考えられる(図-10参照)。

つぎにRIの測定精度について検討してみる。RI測定による湿潤密度の測定誤差は密度計の計測時間3分、地盤の平均密度を $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ として(4)式から計算すると測定誤差 $\pm 0.0519\text{g}/\text{cm}^3$ を得る。

地盤の含水比測定誤差は次式から計算される。

$$\varepsilon_w = \pm w \left\{ \frac{\Delta E}{\gamma - \rho_w} + \frac{\Delta G_s}{G_s} - \frac{\Delta E'}{G_s - \gamma} - \frac{\Delta \rho_w}{\rho_w} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 w 含水比, ΔE $\Delta E = \Delta \gamma + \Delta \rho_w G_s$ 土粒子の真比重, γ 土の見かけ比重, ρ_w 地下水の比重 $\Delta E'$ $\Delta E' = \Delta \gamma + \Delta G_s$ とする。

地盤の平均含水比を70%とし、(7)式から ε_w を計算すると含水比測定誤差 $\pm 1.4\%$ を得る。

4.2. 機械基礎防振砂の密度管理

4.2.1. 概要 毎日新聞西部本社において輪転機の振動防止のため機械基礎の地盤に減衰効果を有する粗粒率3.3の乾燥砂が使用されることとなった。

輪転機の基礎には7.2m×35mのピットが2ヶあり、それぞれのピットに厚さ50cmの乾燥砂を敷くことが予定されていた。その施工に際しては輪転機の防振効果を保持するために締固めの均一性、規定締固め度の満足性など厳密な施工が要求されていた。このため、その締固め管理に表面型γ線密度計(PG-4)の使用を計画した。

測定に先きだち現場の砂を使用して校正曲線を作製し、つづいて敷砂面の転圧方法などにつき予備測定を

	測定月日	備考
第一回測定	昭和39年9月14日～16日	盛土載荷直後
第二回測定	昭和39年11月13日～16日	盛土載荷から約2ヶ月後
第三回測定	昭和40年1月19日～21日	盛土載荷から約4ヶ月後
第四回測定	昭和40年4月5日	盛土除荷直後

表-8 RI測定月日

実施した。施工中の敷砂面の密度管理には1ピットにつき80の測定を設け、1ヶの測定につき4分の計測で密度測定を実施した。

4.2.2. 結果および検討 図-11は撤出した砂面をバイプロランマーで3層3回づつ転圧して地盤を完成し、つづいて密度計を使用し敷砂面の密度管理を実施した結果である。

管理方法としては3σ方式を採用し、平均値(\bar{X})および範囲(R)について管理した。

敷砂面の施工は図からわかるように締固めのむらがなく規定密度1.7g/cm³以上を満足している。この測定における密度の誤差を計算すると、平均測定誤差

±0.059g/cm³となる。したがって平均値の相対誤差は3.5%の良い精度で測定したことになる。

4.3. 土工事の施工管理

4.3.1. 概要 東名高速道路豊田工区においては土工土量が約80万m³もあり、その施工管理はかなりの時間と労力を要することが予想された。そこで土の密度や含水量を迅速に管理する目的で表面型中性子水分計(PB-2)およびγ線密度計(PG-4)の使用を計画した。

計器は本工事に先きだち、盛土の転圧試験においてその適用性を検討した。その後、本工事に際しては18ヶ月間工事の日常管理試験にこの計器をKODAN法測定と併用し使用した。

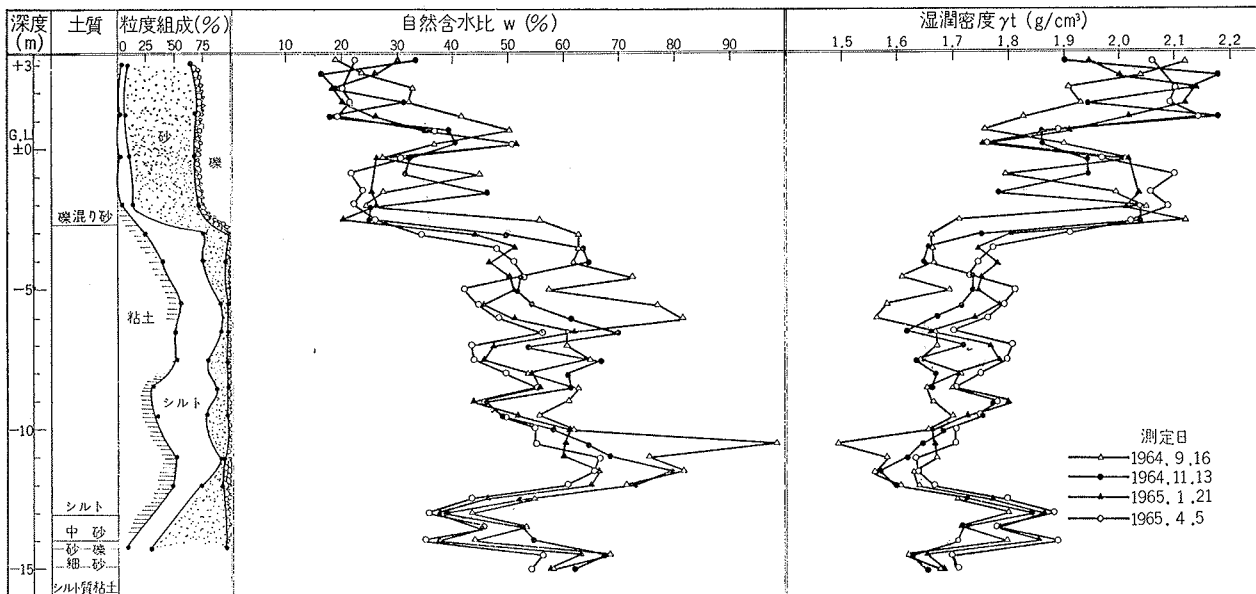


図-10-1 No. 1 測定孔

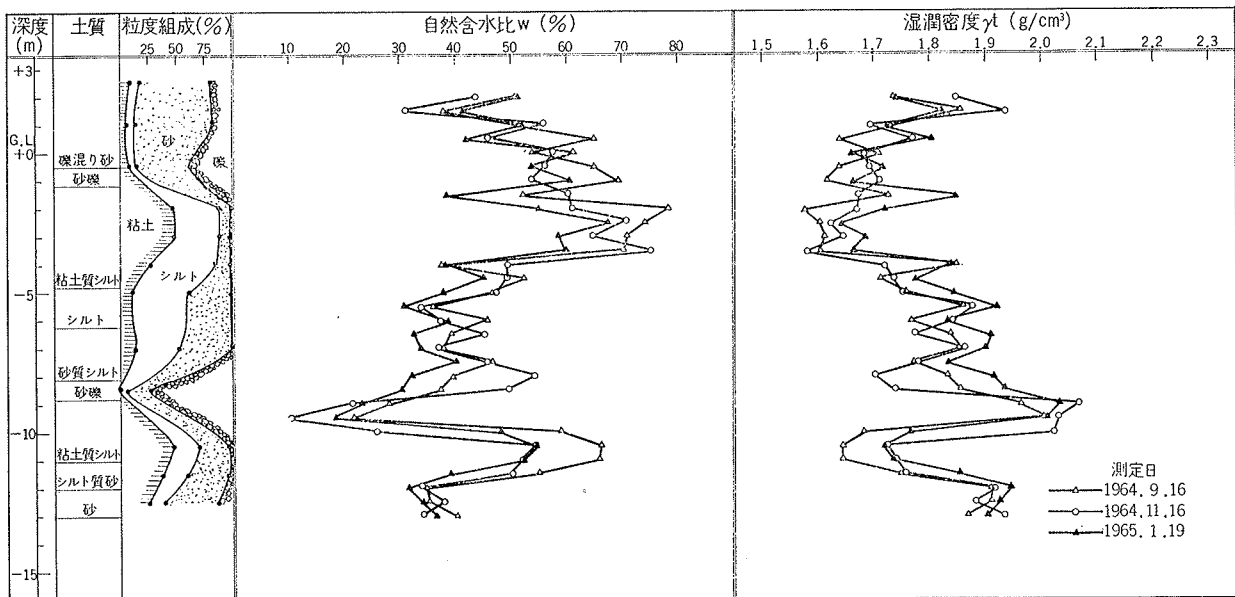


図-10-2 No. 2 測定孔

図-10 サンドドレーンによる地盤改良効果の測定

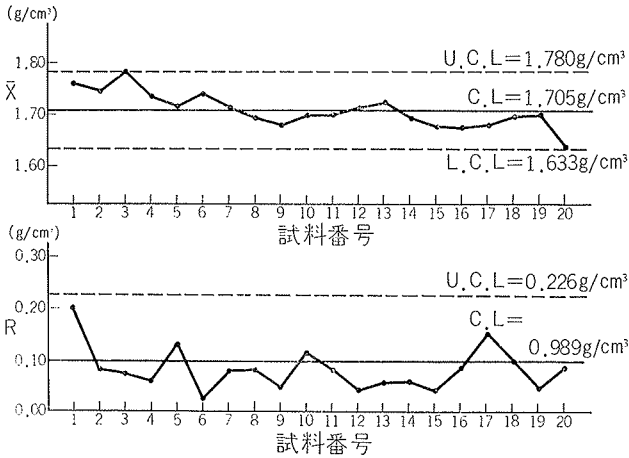


図-11 \bar{X} -R 管理図

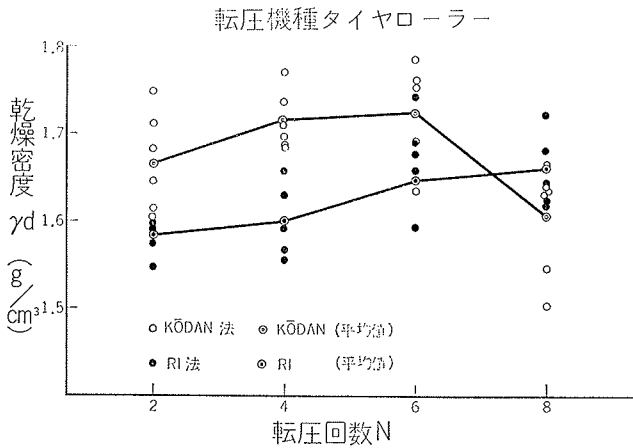


図-12 転圧回数と乾燥度との関係

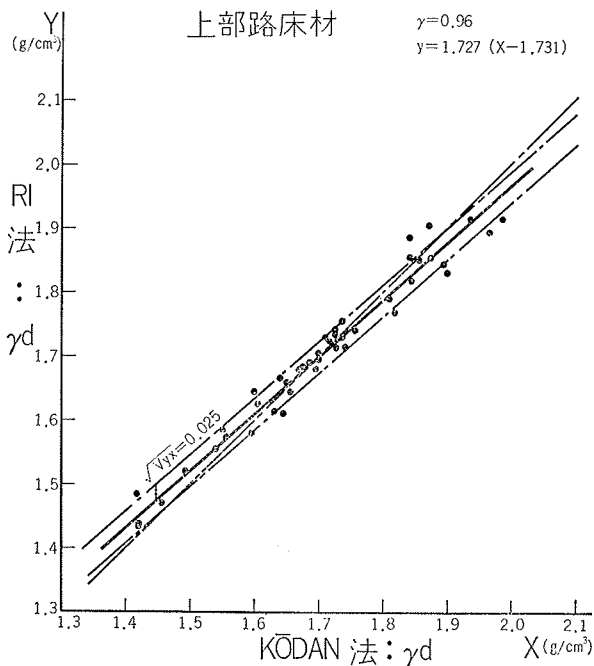


図-13 乾燥密度散布図

4.3.2. 結果および検討 (i) 転圧試験 RI測定はタイヤローラーによる転圧が2,4,6および8回のそれぞれの回数において、KōDAN法測定と同時に実施した。

図-12は両法測定による転圧回数と乾燥密度との関係を示したものである。

図からわかるように両法測定値間には、かなりの違いがある。各転圧回数における両法測定値の母平均差の推定値は $\pm 0.06\text{g/cm}^3$ である。この値はRI測定の平均誤差 $\pm 0.032\text{g/cm}^3$ の約2倍に相当し、両法測定値の違いは各測定法の誤差とは別の原因によるものと考えられる。その原因としては、(i)測定する場所の違い、(ii)測定有効容積の違い、などがあげられた。

(ii) 本施工 施工に際し土の密度や含水量の日常管理試験は両法測定ともに同時に実施し、測定値の比かく検討は工事期間中継続し行なった。図-13に比かく結果の一例を示す。

両側測法を比かくした場合、RI測定法の有利点として、(i)日常管理試験の時間短縮ならびに試験人員の縮小、(ii)迅速測定のため工事の広範囲にわたり数多くの測定を実施することができ、より厳密な施工管理が可能である。(iii)特殊な場所での測定、たとえば裏込めや地山の密度測定ならびに法面の施工管理などを簡便かつ迅速に行なえる、(iv)KōDAN法測定結果との相関性が良い(図-13参照)、ことなどがあげられる。一方、欠点としては、(v)装置が高価である。(vi)放射線に対し不安を感じる、(vii)運搬や移動の際、計器の重量が重すぎることなどがあげられる。しかし相対的に両者を比かくした場合、測定の迅速性にもとづく経済的效果が重視されるのでRI測定法の方が有利であり、今後の活躍に期待がもたれる。

5. あとがき

以上、RI測定法に関する基礎的事項に関する実験ならびに社内現場の適用例について報告したが、この他にも同測定法に関し日本放射性同位元素協会との共同実験など各種の調査研究がある。これらについては別の機会に報告したいと考えている。

中性子水分計およびγ線密度計の土木工事への利用は、著者らが本研究に着手した当時に比べ近年著しいものがある。とりわけ高速道路の建設工時などにおいて土工の施工管理にRIを利用する試みが各所でみられるようになった。当社でも、すでに前述の他二三の高速道路の現場においてRIによる施工管理を実施しており、その成果が期待される。

おわりに、本研究の実施にあたり種々のご援助をいただいた技術研究所、加藤職員に感謝する。