

## RI水分密度計の性能について

下條晃裕\* 佐藤厚子\*\* 蛭沢 敦\*\*\*

### 1. はじめに

土の締固めは、道路盛土や河川堤防など「土構造物」の機能を発現させるためには不可欠の工程であり、施工法、管理法によっては土構造物の品質に大きな影響を与え、さらには致命的な欠損を招くこともある。

現在、締固めた土の管理法は、品質を規定する方法が広く用いられており、このうち締固め度により盛土の品質を管理する方法が一般的な方法として普及している。これは、原位置の湿潤密度および含水比から求めた乾燥密度と、室内突固め試験による最大乾燥密度との比によって得られた締固め度により盛土の品質を評価するものである。現場密度の測定には、操作が単純で精度がよくどのような土質にも適応できるという利点から砂置換法による方法が、また、含水比の測定には炉乾燥による方法が一般に用いられている。しかし、これらの方法は時間と手間を要し、迅速性に欠けるものであり、さらに、施工面を一部破壊して検査しなければならないという短所を持つものである。

一方、砂置換法や炉乾燥法に代わる方法として、ラジオアイソトープ（放射性同位元素）を用いて土の密度、含水比を測定する方法（RI法）が開発されている。RI法は測定結果をリアルタイムにフィードバックすることができ、さらにほぼ非破壊の調査ができる特徴を有している。RI法は現在、日本道路公団において密度管理の測定法として仕様書に定められているほか、建設省においても締固め管理に適用する目的で、試験機の開発や締固め度の管理方法について検討されている。

本報告は、市販のRI試験機で原位置の計測を行い、機器の精度や従来法との比較など、基本的な性能に関する試験結果を取りまとめたものである。

### 2. ラジオアイソトープ (RI) による水分・密度測定法

#### 2-1 ラジオアイソトープ (RI) 法の特徴

ラジオアイソトープ (RI, Radioisotope) 法は、RIの密封線源を利用したものであり、ガンマ線密度計および中性子水分計を用いて地盤の密度と含水量を測定する方法である。この方法は、1950年ころ米国で開発に着手され、わが国においては1956年ころ導入されたのち、1963年ころから徐々に普及したといわれている。

RI法は従来の炉乾燥法や砂置換法などと比較して、以下のような特徴を有しているものである。

- (1) 測定が非破壊的であるため、同一箇所の繰り返し測定が可能である。
- (2) 測定時間が短く、リアルタイムに結果が得られる。
- (3) 取扱いが簡単で、個人誤差の介入がほとんどない。
- (4) 適切な使用法により、かなりの精度が期待できる。

#### 2-2 測定原理

##### (1) 密度の測定 (図-1.1)

ガンマ線は、物質中を通過する際に電子と衝突してエネルギーの一部が運動エネルギーとなり、方向を変えて散乱するという性質を持っている。このガンマ線の性質を利用し、対象物質中にガンマ線を通

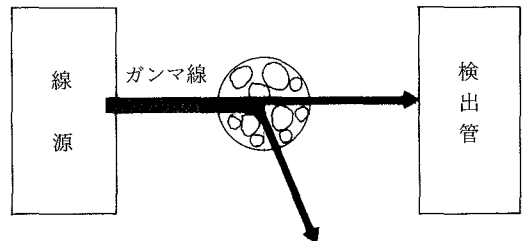


図-1.1 RI法による密度測定原理

\*前土質基礎研究室研究員 現交通研究室研究員 \*\*土質基礎研究室研究員 \*\*\*同室員

過させることにより、密度の大小に応じて吸収または散乱して減少したガンマ線の通過量を測定することによって密度を推定することができる。

(2) 水分量の測定 (図-1.2)

水素原子は、高速度の中性粒子に衝突することによ

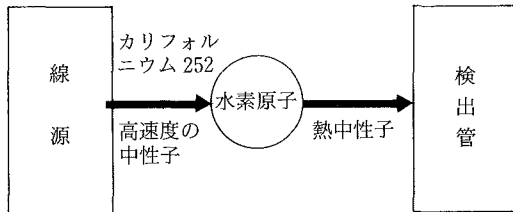


図-1.2 RI 法による水分量測定原理

り、これを低速度の熱中性子に変えるという性質を持っている。この水素原子の性質を利用し、物質中に水の形で存在している水素原子核が、線源から放出された高速度の中性粒子を熱中性子に変えることから、熱中性子の量により、物質中の水分量を推定することができる。

2-3 RI 試験機の種類

盛土の締固め管理の試験機として用いられている RI 試験機には、図-2.1, 2.2 に示すように、透過型試験機と散乱型試験機の 2 種類があり、それぞれの型には表-1 に示すとおりの特徴がある。図-2.1 の散乱型は線源が地表面にあるため、表面密度の測定を行うことになり、図-2.2 の透過型は地中に線源が

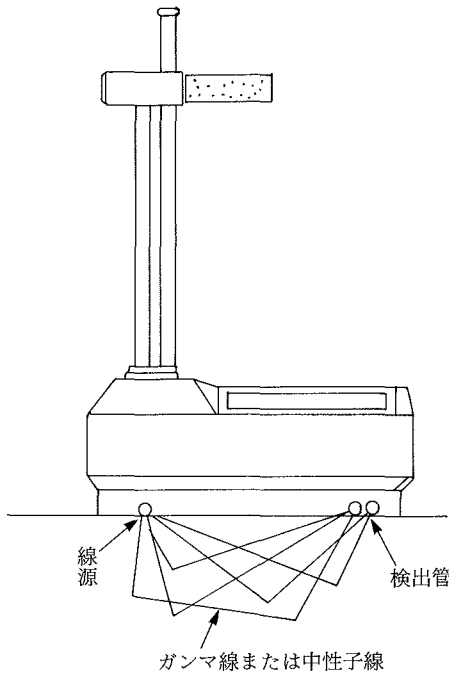


図-2.1 散乱方式

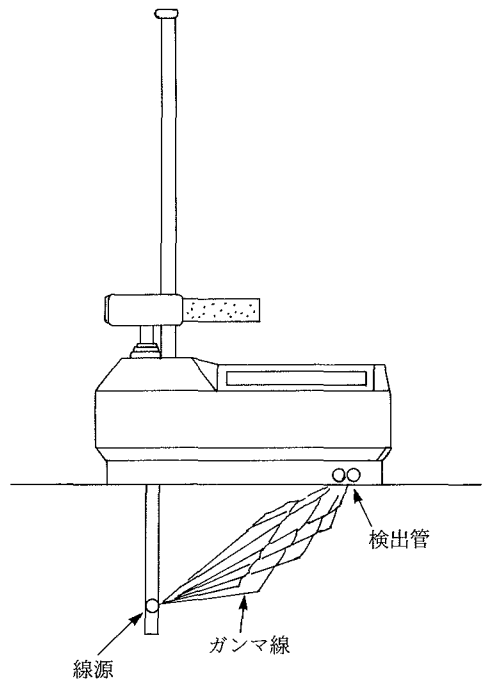


図-2.2 透過方式

表-1 RI 試験機の特徴

試験方式	特 徴
透 過 型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非破壊に近い測定ができる。</li> <li>・線源棒を所定の深さまで地盤に貫入させる必要がある。</li> <li>・道路公団が仕様書で定めている方式。</li> </ul>
散 乱 型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・文字どおり非破壊の測定を行える。</li> <li>・測定範囲が地表面近くに集中してしまうため、地表面の不陸や乱れの影響を受ける。</li> <li>・建設省で検討されている方式。</li> </ul>

あるため、線源と検出管との平均密度を測定することになる。

#### 2-4 水分と密度の測定法

一般に、RI 試験機には水分計と密度計がひとつの計器にまとめられているので、地盤の湿潤密度と含水比を同時に測定することができる。密度計および水分計は放射線の単位時間当たりのカウント数、すなわち計数率で求める。密度と含水比を測定するための一般的な手順は、次のようになる。

- (1) 密度計を用いて密度が既知の標準体、これは土以外でも可能であるが、この標準体の計数率を求める。
- (2) 線源出力の経時減衰を補正するため、地盤で測定した計数率を標準体の計数率で除して、データを規準化した計数率比を、次式で求める。  

$$\text{計数率比}(R) = \frac{\text{地盤の計数率}}{\text{標準体の計数率}}$$
- (3) 数点の計数率比と湿潤密度との関係から、図-3.1 に示すような較正曲線を作成する。
- (4) 現場で計数率を測定し、計数率比から較正曲線を用いて湿潤密度 ( $\rho_t$ ) を求める。
- (5) 水分量についても密度と同様な方法で図-3.2 に示すような較正曲線を作成し、単位体積の含有水分量 (水分密度:  $\rho_m$ ) を求める。

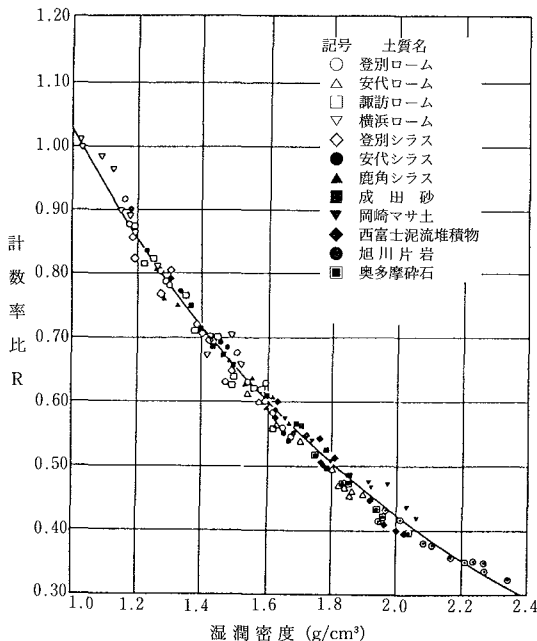


図-3.1 湿潤密度の較正係数<sup>1)</sup>

(6) 乾燥密度 ( $\rho_d$ ) は、湿潤密度と水分密度との差であることから、 $\rho_d = \rho_t - \rho_m$  で求める。

(7) 含水比 ( $w$ ) を、水分密度と乾燥密度との比であることから、 $w = \rho_m / \rho_d \times 100$  で求める。

#### 2-5 使用機器

試験に使用した機械名は、トラクスラー製水分密度計 4442 で、線源は密度測定用のコバルト 60 と水分測定用のカリフォルニウム 252 が装備されており、この機械の特徴は、次の 2 点である。

- (1) 密度の測定は、線源棒を上下にスライドさせることにより、測定方式を散乱型と透過型(深さ 5, 10, 15, 20 cm) から自由に選択できる。
- (2) 内部コンピューターにより較正曲線が入力されているため、湿潤密度、乾燥密度、含水比が直接表示される。

なお、精度および適用範囲に関する仕様は、表-2 のとおりである。

### 3. 試験方法

RI 機の性能を把握するため、試験機の基本的な特性として測定精度を検討するとともに、従来法である砂置換法と炉乾燥法による結果の比較を行うため、原位置での試験を実施した。

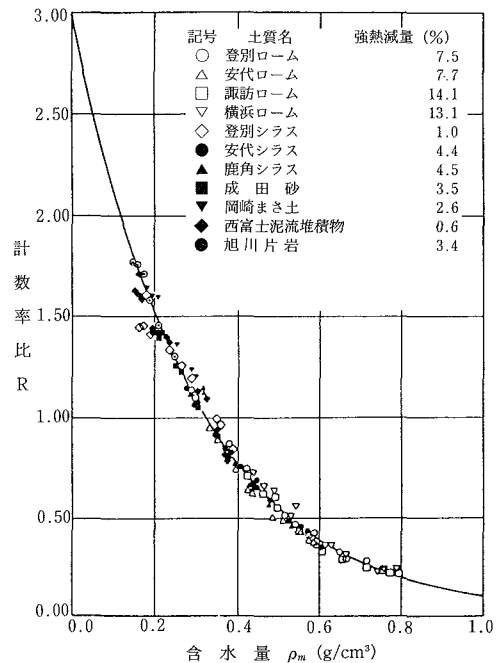


図-3.2 含水量の較正係数<sup>1)</sup>

表-2 トラクスラー製水分密度計仕様

計 測 時 間			1分	2分	4分
精 度	密 度	透 過 方 式	±16 kg/m <sup>3</sup>	±11 kg/m <sup>3</sup>	± 8 kg/m <sup>3</sup>
		散 乱 方 式	±34 kg/m <sup>3</sup>	±24 kg/m <sup>3</sup>	±17 kg/m <sup>3</sup>
測 定 範 囲	水 分	散 乱 方 式	± 2 kg/m <sup>3</sup>	± 1 kg/m <sup>3</sup>	± 1 kg/m <sup>3</sup>
		密 度	1600~2600 kg/m <sup>3</sup>		
		水 分	0~ 640 kg/m <sup>3</sup>		
測 定 機 重 量			20 kg		



図-4 試料採取箇所

### 3-1 試験箇所

図-4に示すとおり、道央付近で平成2年度は8箇所、3年度は9箇所の計17箇所ですべて計測を行った。検討の対象とした試料の土質は、礫質土4試料、砂質土4試料、粘性土4試料、火山灰5試料である。

### 3-2 計測項目

RI法により湿潤密度、乾燥密度、含水比を、砂置換法により湿潤密度を、炉乾燥法により含水比を求めた。

## 4. 結果と考察

### 4-1 散乱方式と透過方式による計測値の関係

計測方法による計測値への影響を検討するため、散乱方式と透過方式(計測深10cm)により水分量と湿潤密度を測定した。

当機によって得られる水分量は、密度計測と同時に散乱方式により計測する形成になっているが、散乱方式と透過方式により密度を計測したときに水分

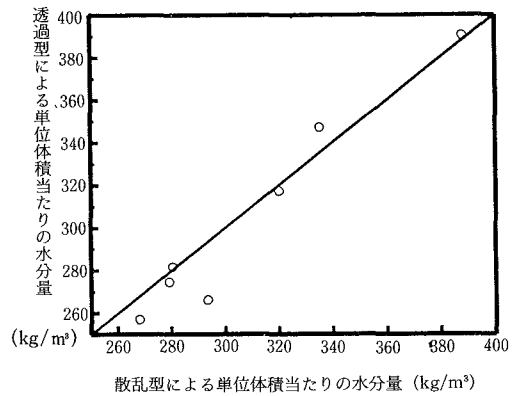


図-5.1 散乱方式と透過方式による単位体積当たりの水分量

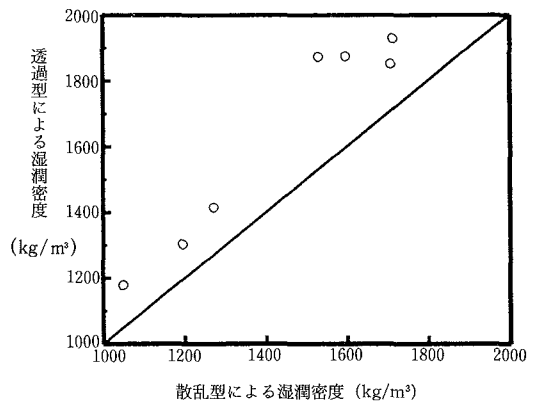


図-5.2 散乱型と透過型による湿潤密度

量の計測値に差異があるかどうかについて検証した。図-5.1はその結果を示したものであるが、両者の単位体積当たりの水分量はほぼ等しい値を示している。

図-5.2は、散乱方式と透過方式で求めた湿潤密度を示したものである。透過方式の方が、散乱方式よりも8%程度大きな値を示している。乾燥密度は、湿潤密度と単位体積当たりの水分量との差であること

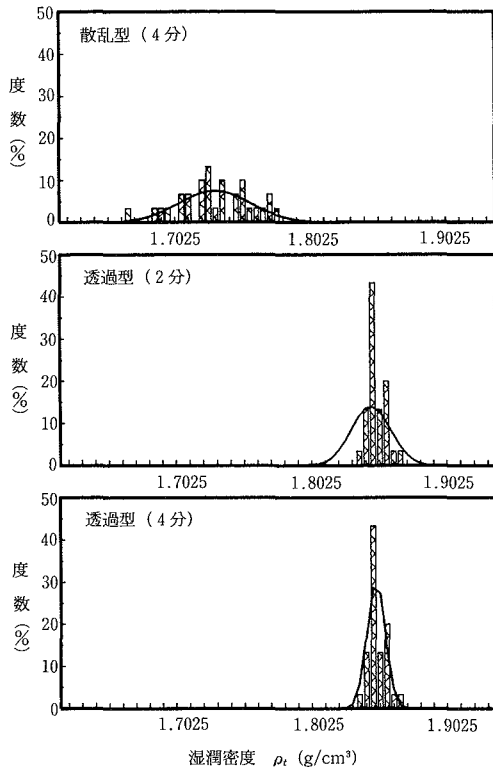


図-6.1 計測値のばらつき (湿潤密度)

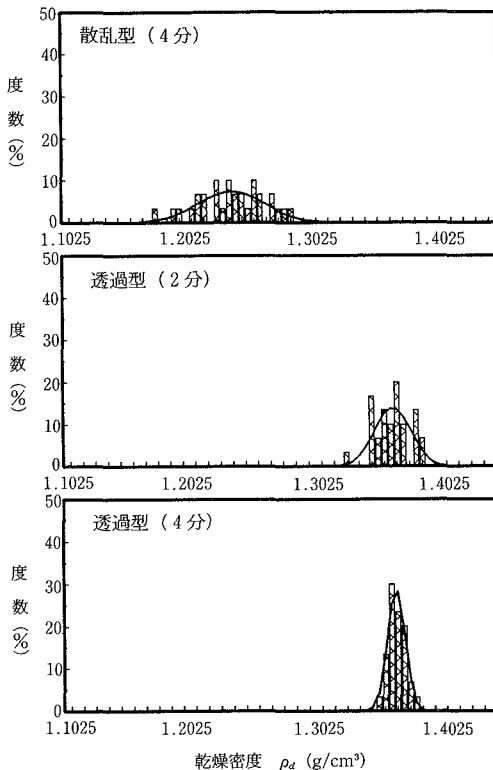


図-6.2 計測値のばらつき (乾燥密度)

から、透過方式による乾燥密度は散乱方式よりも大きくなる。含水比は、水分量と乾燥密度との比であることから、透過方式が散乱方式よりも小さな値となる。

#### 4-2 多点計測による計測値の安定性

計測値の安定性を確認するため、散乱方式と透過方式 (計測深 20 cm) により、同一点で 30 回連続計測を実施した場合の計測値の違いおよびばらつきの程度を検討した。計測を行った試料は礫質土、粘性土、火山灰の 3 試料であるが、これらの代表として粘性土である太美における計測結果を示したものが図-6.1~6.3 である。図中のヒストグラムは実測値を、曲線は実測値の標準偏差を用いて描いた正規分布を示している。湿潤密度、乾燥密度、含水比の各計測度数は、計測方法に拘わらず、正規分布の理論度数とほぼ一致していることから、RI 法による計測は正規分布に従っているといえる。各計測値の分布範囲は、散乱方式で計測時間を 4 分とした場合 (以後「散乱型 4 分」と表わすこととする) では広く分布しているのに対し、透過方式で計測時間を 2 分 (以

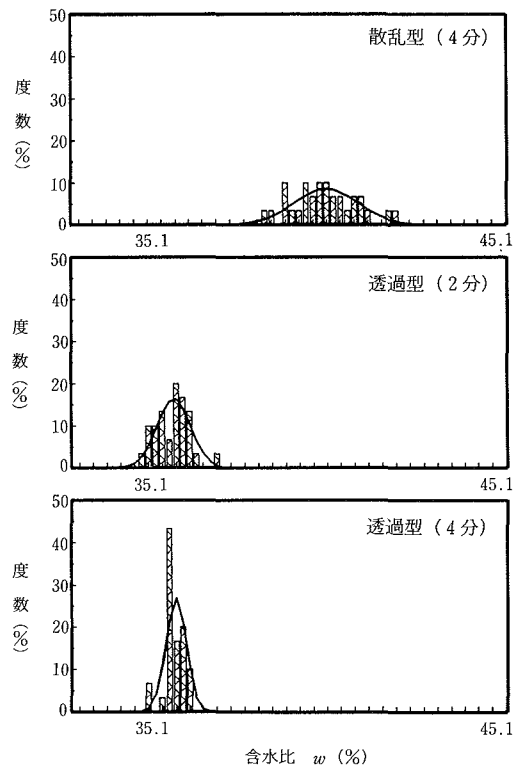


図-6.3 計測値のばらつき (含水比)

後「透過型 2分」と表わすこととする), 透過型 4分となるに従い尖度が高くなっている。湿潤密度および乾燥密度の平均値は, 透過型 2分と透過型 4分とはほぼ等しくなっており, 散乱型 4分ではこれよりも小さくなっている。また, 含水比の平均値は, 透過型 2分と透過型 4分はほぼ等しくなっており, 散乱型 4分ではこれよりも大きくなっている。図-7は, 礫質土, 粘性土, 火山灰の湿潤密度を計測した場合の変動係数を計測方法ごとに示したものである。

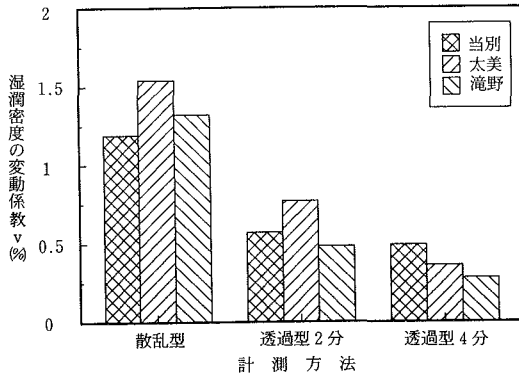


図-7 計測方法の違いによる湿潤密度の変動係数への影響

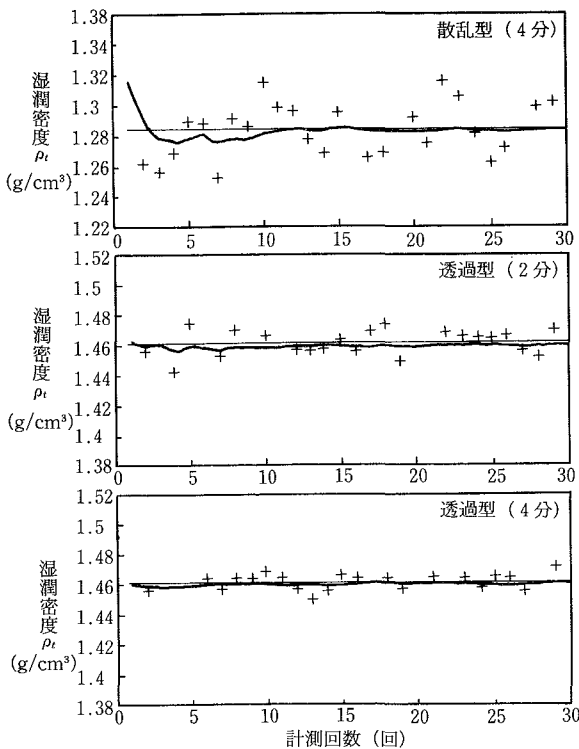


図-8 計測回数と湿潤密度の関係 (滝野)

湿潤密度の変動係数は散乱型 4分, 透過型 2分, 透過型 4分の順に小さくなっており, これは, RI法による測定精度が散乱型 4分, 透過型 2分, 透過型 4分の順によくなっていることを示すものである。

#### 4-3 計測回数に関する検討

RI法により同一地点で30回計測を行った結果を用いて, 計測回数に関する検討を行った。図-8は, 3試料のうち火山灰土である滝野の例を代表として各回数の湿潤密度と, その回数までの平均の湿潤密度を示したものである。図中の直線は, 30回計測したときの平均値を真の値と仮定して表示したものである。図から, 30回の平均湿潤密度と平均湿潤密度がほぼ等しくなる回数は, 散乱型 4分で10回, 透過型 2分で5回, 透過型 4分で3回程度であり, RI法ではこれら以上の計測回数をとることが望ましいといえる。

#### 4-4 計測時間により計測値の安定性

計測を行った計器は, 計測時間を1, 2, 4分と変えることができることから, 計測時間を変化させた場合の湿潤密度の変動係数の変化を求めた。図-9は, 計測方法ごとに計測時間と湿潤密度の変動係数を示したものである。

図中太線は5試料の変動係数の平均値を示したものであるが, どの計測方法でも計測時間が長くなるに従い安定しており, 計測時間4分における変動係数は1分の約半分程度の値を示している。このことから, RI法による計測時間はその方法に拘わらず4分以上とすることが望ましいといえる。

#### 4-5 計測深さによる計測値の安定性

計測を行った計器は, 計測深さを5, 10, 15, 20 cmに変化させて計測を行うことができることから, 砂置換法で得られる湿潤密度に最も近い計測深を求めることとした。計測は図-10に示す位置で, 砂置換法とRI法により湿潤密度の計測を行った。なお, 計測時間は4分で, 計測深さ0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cmである。

図-11は, 砂置換法とRI法によって求めた湿潤密度の関係を示したものである。図から, 砂置換法による湿潤密度と比較して, RI法による湿潤密度は計測深0では砂置換法よりも小さめであるが, その他は同程度の値となっている。そこで, 深さによるばらつきの程度を検討することとした。図-12は, 深さを0, 5, 10, 15, 20 cmとした場合の湿潤密度の

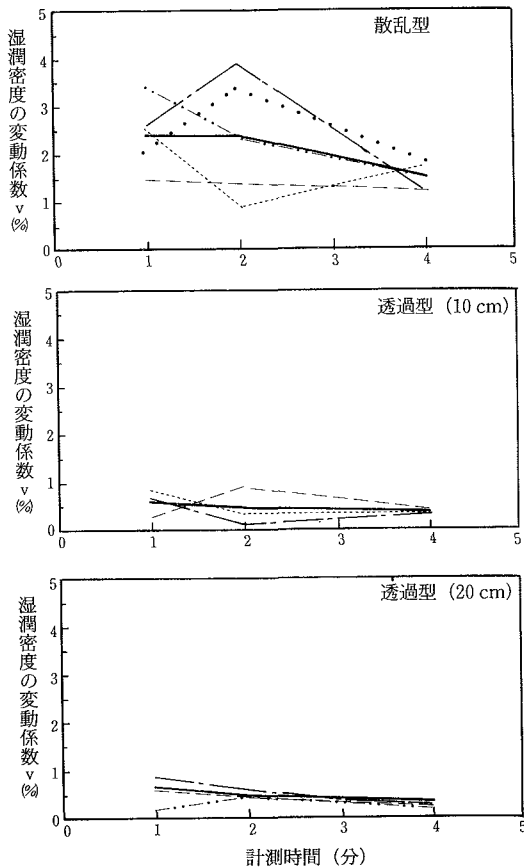


図-9 計測時間と湿潤密度の変動係数

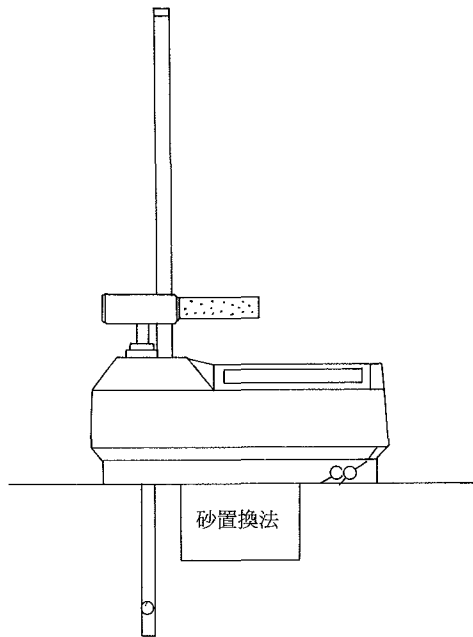


図-10 RI法と砂置換法の計測位置図

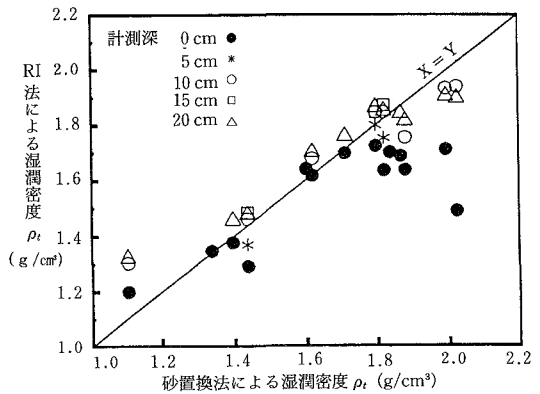


図-11 砂置換法とRI法による湿潤密度の比較

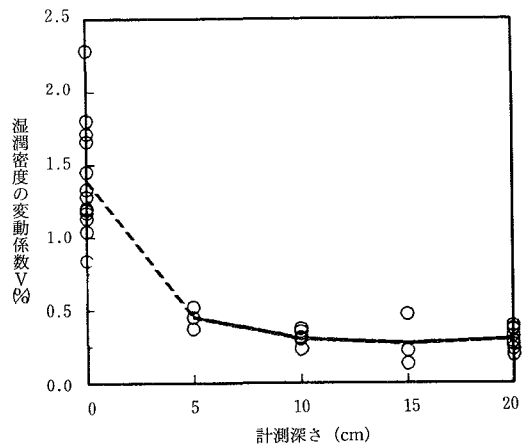


図-12 計測深さと湿潤密度の変動係数

変動係数を示したものである。図中の線は平均値であるが、計測深さが大きくなるほど湿潤密度の変動係数は小さくなっており、計測深さが10 cmを越えると変動係数はほぼ一定となっている。RI法による計測（特に透過型）が計測深までの平均値であることと、砂置換法による密度の計測が直径16 cm、深さ10 cmの円柱状地盤を計測するものであることから、RI法による計測深さは10 cmとすることが望ましいといえる。

#### 4-6 現場のばらつきについて

盛土の安定性は施工の良否に大きく左右されることから、現場の品質に関する検討を行った。図-13は、9箇所の現場について砂置換法とRI法により得られた湿潤密度の変動係数を示したものである。透過型によって求めた湿潤密度の変動係数は、砂置換法によって求めたものと同程度かそれ以下である。

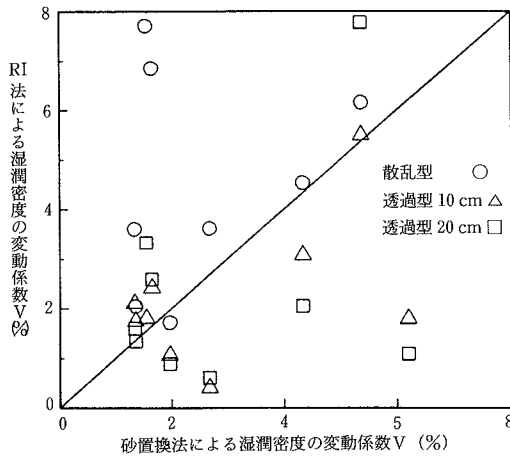


図-13 砂置換法とRI法による湿潤密度の変動係数

しかし、散乱型については、砂置換法で求めた湿潤密度の変動係数よりも大きな値となっており、特に礫質土ではその差が大きく、これは地表面の不陸による影響によるものと考えられる。

そこで、現場密度のばらつきと計測値のばらつきについて検討することとした。現場密度のばらつきを求めるため、5m四方程度の中から適当な箇所をRI法により計測し、計測値のばらつきを求めるため、現場中の1箇所について5点の計測を行った。図-14は透過型で計測深10cm、4分間の計測で湿潤密度を測定したときの計測値のばらつきと、現場密度のばらつきを示したものである。

計測値のばらつきは現場密度のばらつきと比較してかなり小さいものであり、計測時間を1分としてもそのばらつきは、現場密度のばらつきよりもかなり小さな値となっていることがわかる。

#### 4-7 従来法との比較

RI法と従来法との関係を得るため、散乱型および透過型により湿潤密度、乾燥密度、含水比を、砂置換法により湿潤密度を、炉乾燥法により含水比を求め、各値を比較することにより、RI法の実用性を検討した。図-15.1, 15.2は、RI法で得られた湿潤密度と砂置換法によって得られた湿潤密度との関係を示したものである。散乱型では砂置換で得られた湿潤密度よりも低くなる傾向にあり、湿潤密度が大きくなるほど湿潤密度のばらつきは大きい。これは、湿潤密度の比較的大きな試料は礫を多く含む場合が多いため地表面を平らにすることを困難であること

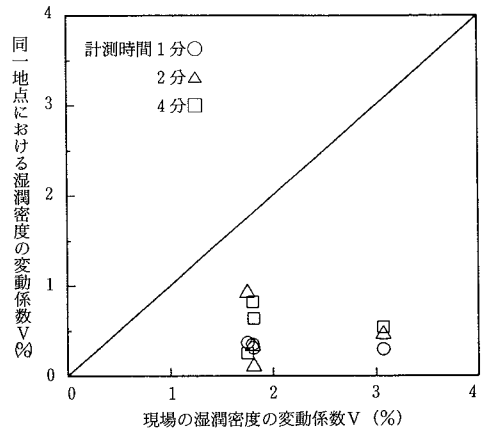


図-14 RI法による現場と機械のばらつき

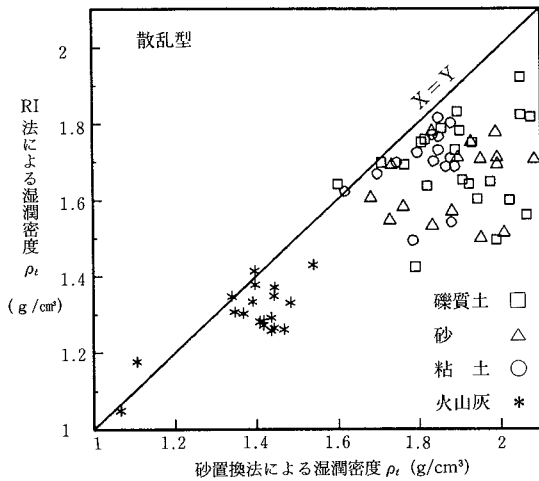
から、散乱型のように地表面の密度を計測する方法では、地表面の不陸により生じる空間も体積として計算されるためと考えられる。これを防止する方法としては、地表面に砂を敷いて不陸を少なくすることにより、砂置換値に近い値まで測定精度が向上すると思われる。これに対し、透過型の湿潤密度と砂置換による湿潤密度は一部火山灰や砂質土で若干異なっている試料もあるがほぼ一致しており、相関係数も0.956と強い相関関係があるといえる。

図-15.3, 15.4は、RI法によって得られた含水比と炉乾燥法によって得られた含水比との関係を示したものである。含水比については、透過型、散乱型ともに相関係数は約0.91であり相関性はよい。しかし、RI法で得られた含水比は、炉乾燥により得られた含水比よりも約5%程度高い値となっている。これは、RI法では地盤中のH<sub>2</sub>Oを計測するため、炉乾燥法では計測できない土中の結晶水まで水分量として計測してしまうことが主因であると考えられる。このことから、RI法によって得られた水分量から含水比を計算する場合、土中の結晶水量を考慮した計算を行うことにより、炉乾燥により得られる含水比

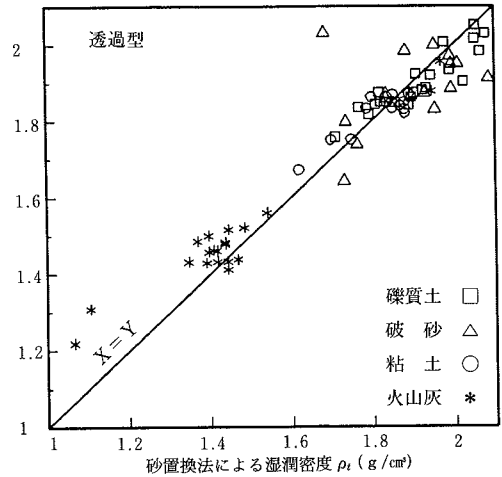
表-3 計測箇所一覧表

	平成2年度	平成3年度
礫質土	滝川, 当別, 生振1	生振2
砂質土	銭函1	対雁, 銭函2, 江別
粘性土	太美, 岩見沢	志文, 赤井川
火山灰	滝野1, 厚別	恵庭, 植苗, 滝野2

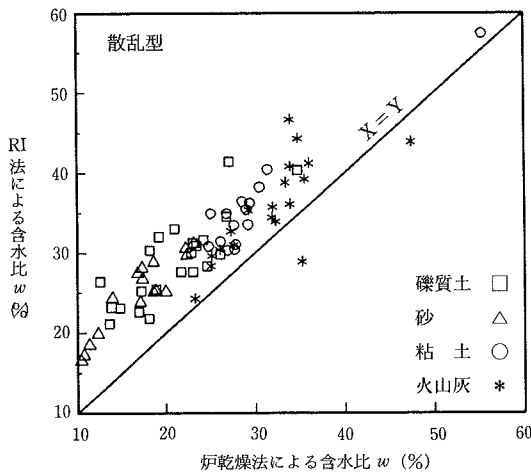




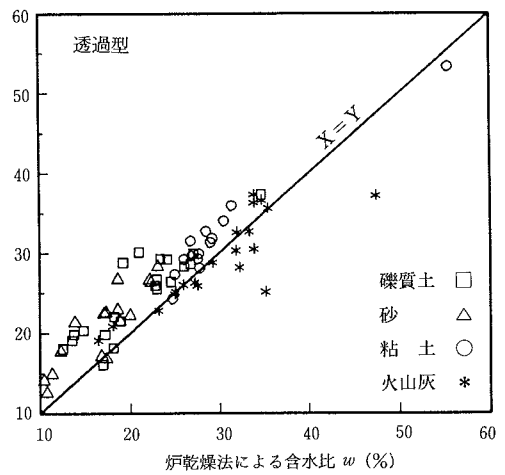
図一15.1 砂置換法とRI法による湿潤密度への影響 (散乱型)



図一15.2 砂置換法とRI法による湿潤密度への影響 (透過型)



図一15.3 炉乾燥法による含水比への影響 (散乱型)



図一15.4 炉乾燥法とRI法による含水比への影響 (透過型)

と同程度の値を得ることができると思われる。

## 5. まとめ

これまでの検討の結果をまとめると、次のようになる。

- ①散乱方式と透過方式で求めた水分量はほぼ等しい値であるが、透過方式による湿潤密度が散乱方式よりも8%程度大きな値になるため、結果的には透過方式による含水比は散乱方式に比べて小さな値となる。
- ②RI法による計測は正規分布に従い、散乱型4分、透過型2分、透過型4分の順に尖度が高くなる。
- ③湿潤密度と乾燥密度の平均値は、透過型2分と散

乱型4分とはほぼ等しく、散乱型4分ではこれよりも小さい。含水比の平均値は、透過型2分と透過型4分はほぼ等しく、散乱型4分ではこれよりも大きい。

- ④RI法による計測値のばらつきは、散乱型4分、透過型2分、透過型4分の順に小さくなる。
- ⑤RI法による1箇所当たりの必要計測回数は、散乱型4分で10回、透過型2分で5回、透過型4分で3回以上といえる。
- ⑥RI法による湿潤密度の変動係数は、計測時間が大きくなるほど安定する。
- ⑦RI法による湿潤密度の変動係数は、計測深さが大きくなるほど安定し、透過型では計測深さが10cm

を越えるとほぼ一定値となっていることから、RI法による計測深さは10 cmとすることが望ましい。

- ⑧砂置換法とRI法による計測値のばらつきは、透過型では砂置換法と同程度かそれ以下であるが、散乱型では砂置換よりも大きな値であり、特に礫質土ではその差が大きい。
- ⑨RI法による計測値のばらつきは、現場密度のばらつきより小さく、計測時間を1分としてもそのばらつきは、現場密度のばらつきよりかなり小さい。
- ⑩RI法と砂置換法によって得られた湿潤密度は、散乱型では砂置換法よりも低くなる傾向にあり、透過型では砂置換法とほぼ一致している。
- ⑪RI法と炉乾燥法によって得られた含水比は、透過型、散乱型ともに相関性はよいが、RI法では炉乾燥法で計測できない土中の結晶水まで水分量として計測してしまうため、炉乾燥法により得られた含水比よりも約5%程度高い値になる。

## 6. おわりに

本報告は、原位置の計測結果からRI機の性能に関して検討したものであるが、透過型による湿潤密度の測定に関しては、おおよそ実用段階にあるといえる。しかし、含水比の誤差が大きいことから含水比

に関する較正曲線を再検討するとともに、 $H_2O$ と水分量との関係を明らかにすることにより測定精度向上のための対策を検討する必要がある。さらに、散乱型の測定精度向上のため、不陸補正のための手法などについての検討する必要がある。

また、今回は検討を行わなかったが、礫混入率や土質による測定可能範囲を明らかにすることが今後の課題とされる。

## 参考文献

- 1) 土質工学会編；土の締め固め管理, 土質基礎工学ライブラリー 36, 1991年8月.
- 2) 土質工学編；土質調査法 (第2回改訂版), P. 650~660, 1982年12月.
- 3) 土質工学会RI利用法研究委員会：砂置換法及び表面型ガンマー線密度計・水分計の精度評価(その1), 土と基礎 Vol.20, P.69~74, 1972年12月.
- 4) 土質工学会RI利用法研究委員会：砂置換法及び表面型ガンマー線密度計・水分計の精度評価(その2), 土と基礎 Vol.21, P.59~61, 1973年1月.
- 5) 苗村正三ほか；新しい計測機を用いた盛土の締め固め管理, 土木技術資料 Vol.32, P.55~60, 1990年5月.
- 6) 田中 貢；新しい計測機を用いた盛土の締め固め管理, 土木技術資料 Vol.32, P.33~37, 1990年8月.