

# 土 木 研 究 所 資 料

## 粗 粒 材 料 の 現 場 転 圧 試 験

平成5年3月

建 設 省 土 木 研 究 所  
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1992) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## 粗粒材料の現場転圧試験

フィルダム研究室 室長 中村 昭

研究員 豊田 光雄

### 要 旨

本報告は、ロック材料の転圧試験において現状の転圧試験の課題を整理するとともに、置換法による密度測定代わりに、非破壊試験であることから同一箇所での繰り返し測定が可能で多点数のデータが容易に得られるRI法を用いて転圧試験を行った結果について述べたものである。

キーワード： RI密度計 現場密度 盛立試験 粗粒材料 フィルダム

# 粗粒材料の現場転圧試験

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1. はじめに .....                 | 1  |
| 2. 従来の粗粒材料の現場転圧試験における課題 ..... | 2  |
| 2.1 現場転圧試験の目的 .....           | 2  |
| 2.2 置換法による現場転圧試験の課題 .....     | 2  |
| 3. RI法を用いた現場転圧試験方法 .....      | 6  |
| 3.1 RI法の概要 .....              | 6  |
| 3.2 転圧試験の概要 .....             | 12 |
| 3.3 RI計器の校正曲線 .....           | 16 |
| 4. 現場転圧試験結果および考察 .....        | 24 |
| 4.1 RI法を用いた現場転圧試験 .....       | 24 |
| 4.2 従来法による現場転圧試験 .....        | 33 |
| 5. まとめと今後の課題 .....            | 37 |
| 5.1 転圧試験のまとめ .....            | 37 |
| 5.2 今後の課題 .....               | 37 |
| 6. 参考文献 .....                 | 38 |

## 1. はじめに

ゾーン型ロックフィルダムでは堤体積のおよそ8割がロック材料で占められており、当然のことながらロック材料の工学的性質は、ダムの安定性に大きな影響を与えている。ロック材料では最大粒径が、1 mにもおよぶために、実物材料を用いた力学試験によってせん断強度や変形特性を直接的に求めることは不可能である。現状では最大粒径63mm以下に縮小し調整（例えば相似粒度）された試料を用いて試験を行うのが一般的になっている。しかしながら、縮小モデルと実物とが必ずしも同じ力学的挙動を示すとは限らず、両者の関係については未解明の部分も少なくないが、これまでに蓄積されてきた多くの試験データや技術的経験を通して、室内試験と現場とを結びつける共通の尺度として広い意味での密度に着目するという考え方が概ね定着している<sup>1)</sup>。言い換えれば、粗粒材料のような様々な粒径の粒子から成る粒状体のせん断強度や変形性は、材料の集合状態の密度差によって大きく変化するというを示しているのである。ただし、粒子の形状や粒度分布などの密度以外の諸要因の影響を無視することはできないが、安定したフィルダムを建設する最も確実で経済的な方法は盛立材料を十分締固めることである。

設計段階での材料試験においては、縮小材料を用いた力学試験を行ってせん断強度と密度との関係を把握しておき、安全率を満足するせん断強度に対応する締固め度（設計密度）を決める。そして、実施工において設計密度を確保できる施工基準を定めることによって所要のせん断強度を確保しダムの力学的安定性を保証するわけである。しかし、室内での締固め試験と実施工での重機転圧による締固めでは、エネルギー特性や境界条件などがかなり異なっており、室内試験から現場施工密度を完全に予測することはできない。従って、設計密度が十分に得られるかどうかは実施工と同じ条件のもとで確認しなければならない。また、経済的で合理的な施工基準を決定するためにも現場締固め試験の重要性がある。

本報告は、ロック材料の転圧試験において現状の転圧試験の課題を整理するとともに、置換法による密度測定の代わりに、非破壊試験であることから同一箇所での繰り返し測定が可能で多点数のデータが容易に得られるRI法を用いて転圧試験を行った結果について述べたものである。なお、ここで取上げた現場転圧試験の材料の粒度は、直轄ダムで用いられる粒度に比べてやや細かいものが多く含まれている材料である。

## 2. 従来の粗粒材料の現場転圧試験における課題

### 2.1 現場転圧試験の目的

フィルダムの現場転圧試験は、1) 実際の現場施工条件のもとでの締固め特性を把握し、2) 締固め施工に使用する機種を選定を行い、さらには、3) 設計値および設計条件を満足するためのまき出し厚さ、転圧回数等の施工基準および品質管理基準を決定するために行われる。

主な測定項目は、密度、粒度、透水係数などである。ロック材料においては、せん断強度と密度の相関が高いことから密度試験は最も重要である。以下、ここでは現場密度に重点をおき話を進める。

### 2.2 置換法による現場転圧試験の課題

現場転圧試験は、一見単純な試験のように見えるが、実際にはかなり難しい課題を内包しており、細心の注意を払わないと納得のゆく結果が得られず、単に本施工の模擬演習（これも転圧試験の目的のひとつではあるが）だけで終わってしまうことにもなりかねない。例えば、次のような問題点がある。

#### 1) 試験ヤードの配置

#### 2) 置換法による密度試験の限界

#### 3) 密度のばらつきと試験点数

以下、これらについて考えてみる。

#### (1) 試験ヤードの配置

試験ヤードをどのように配置するかという盛立試験の手法について考えてみる。従来の典型的な現場転圧試験の方法は、図-2.1に示すように転圧回数の異なるヤードをいくつか設けて、現場密度試験（水置換法がほとんどである）を数点ずつ行い、最も効果的な転圧回数やまき出し厚さ等を決定するというものである。ところが、各転圧回数毎に試験ヤードを配置する方法ではまき出し材料の粒度分布や含水比の

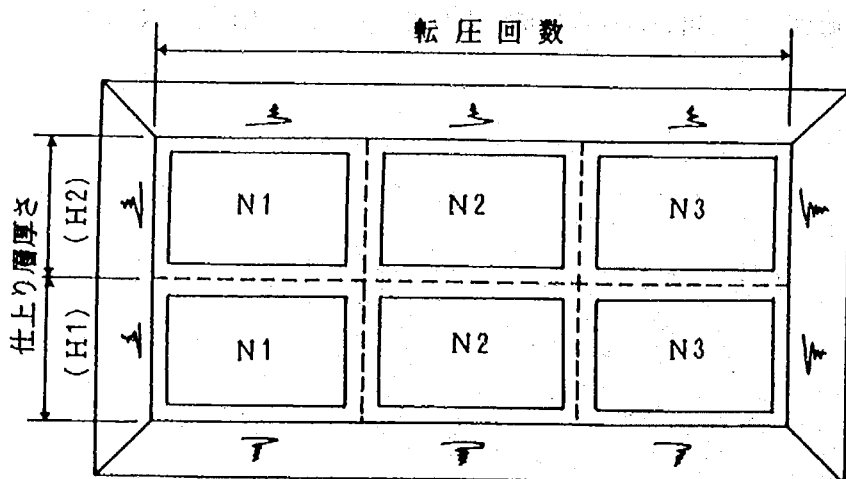


図-2.1 典型的な試験配置

ばらつきによって生じるヤード間の密度の変動が、転圧回数やまき出し厚さを目的とする試験要因の効果と交絡してしまうために、転圧回数と密度との関係を示す転圧効果曲線がスムーズな形にならず、転圧回数が多いのに密度は逆に小さくなるという不合理な結果になることもまれではない（例えば図-2.2<sup>2)</sup>）。これは特に粗粒材料の場合、試験ゾーン全体にわたって材料の状態が決して均質でないことに起因していると考えられる。すなわち、盛立現場に搬入されるロック材料の粒度変動およびダンピングの時の材料分離などによって生じる転圧密度のばらつきは意外に大きく、これが試験結果に少なからず影響することを考慮しておく必要がある。

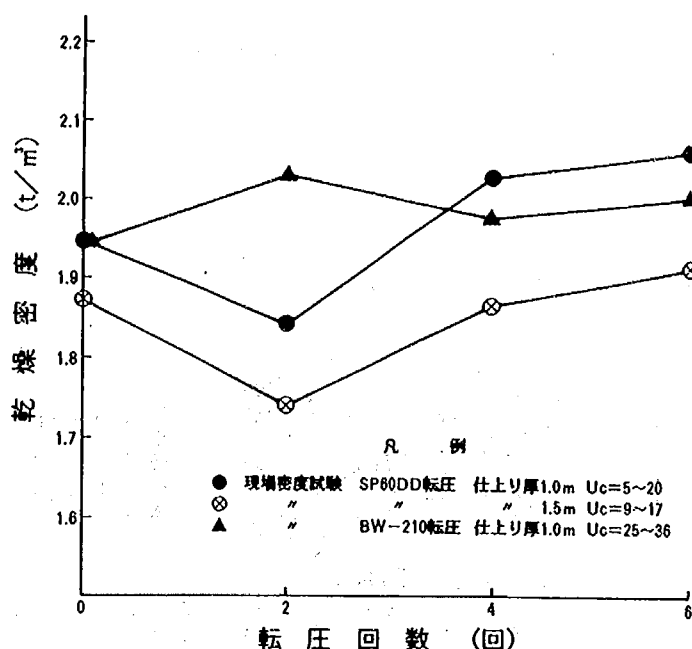


図-2.2 転圧回数および締固め仕事量と乾燥密度の関係（七ヶ宿ダム）

## (2) 置換法による密度試験の限界

ロック材料の最大粒径は数10cmから1m以上に及んでおり、転圧層の厚さは最大粒径以上に設定されることになる。現場密度試験を行う容積は、最大粒径の岩塊に比べて十分大きくならなければならないが、このような大容量の密度試験が可能なのは現状でも「大型置換法」しかなく、透水ゾーンでは置換材として水が用いられることが多い。置換法による現場密度測定は置換孔の体積と掘削材料重量から密度を求めるという点ではわかり易い方法であり、加えてこの置換孔を利用して透水試験を行うことができるという利点をもっており、よく利用されている。

置換法による密度試験にみられる問題点をまとめると次のようである。

- ① 破壊試験であるため繰返し測定が不可能である。
- ② 置換孔の大きさにもよるが一般に多くの労力と時間がかかる。このため、試験点数を多くできない。
- ③ 必要とされる置換孔の大きさと材料の最大粒径との関係が明確に設定できない。図-2.3<sup>2)</sup>は置換孔径と最大粒径の比率と密度の変化を示したものであり、最大粒径の3倍以上の置換孔径がないと密度を大きめに評価する可能性があることを示している。

④ 転圧層内で深さ方向に密度が一様でない場合、平均密度に偏りを生じる。すなわち、図-2.4に示すように粗粒材料においては円柱状に掘削ができないため、深さ方向に密度のちがいがあった場合には、例えば図中の④と⑤の分布では密度評価がかなり異なる。

⑤ 孔壁のゆるみや透水シート（水置換法の場合）の密着性など、置換法の誤差要因はどちらかという密度を大きめに評価する傾向を持っている。例えば、図-2.5<sup>2)</sup>はビニールシートの厚さによる密度の変化を示したものであり、ビニールシートが厚いと密度を大きく見積る結果になることを示している。

なお、一層内の深さ方向の密度分布の状況については、最近、あとで述べる導管埋設型のRI法によって、かなり詳細に調べられるようになったが、過去においても例えば鉛直方向に2, 3段階に分けて、密度試験を行うなどの方法によって転圧上層の密度が大きく転圧下部の密度が小さくなるという傾向<sup>2) 3)</sup>にあることが報告されている。

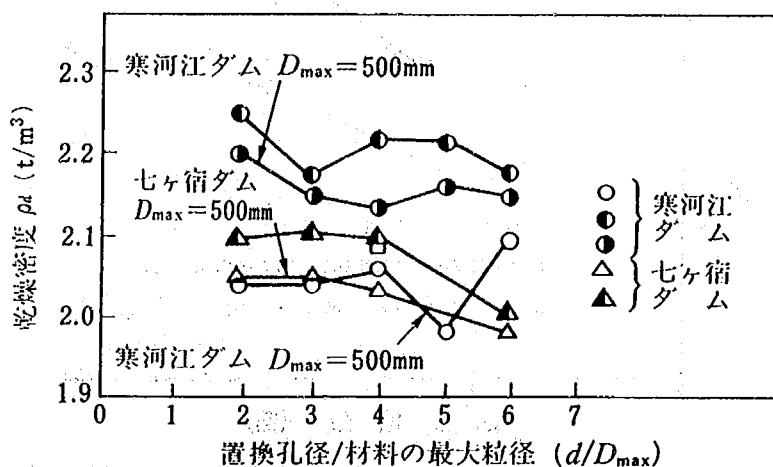
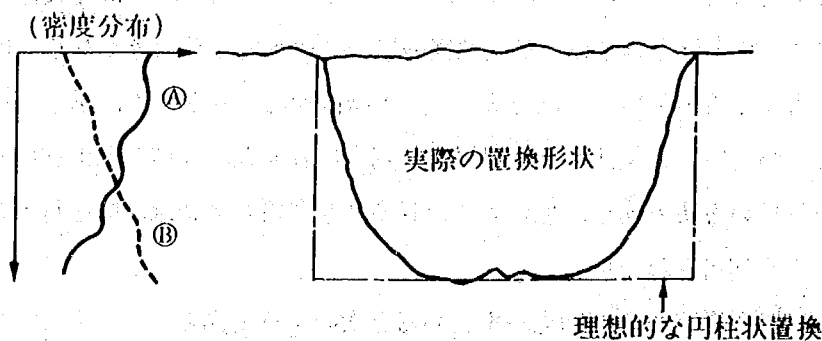


図-2.3 置換孔径／材料の最大粒径と測定密度の関係



④の場合→平均密度が過大に評価される。

⑤の場合→平均密度が過小に評価される。

図-2.4 置換孔形状の影響

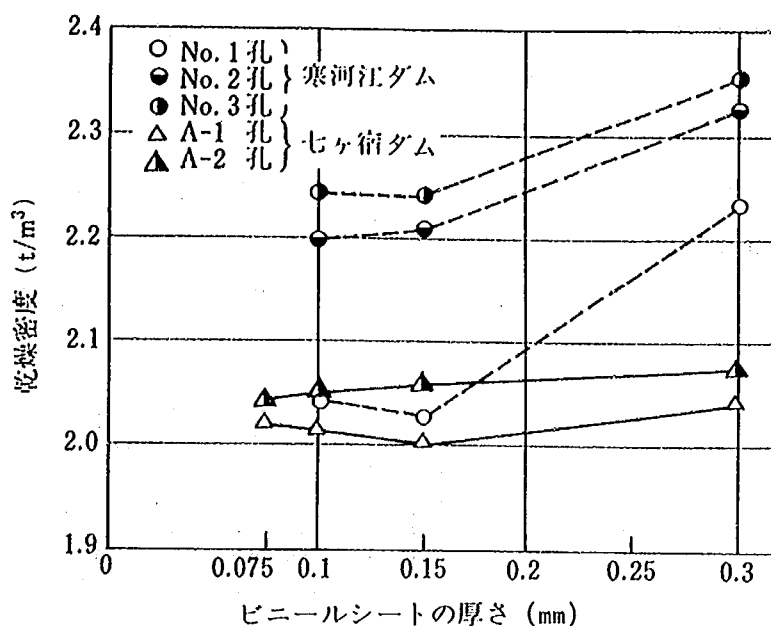


図-2.5 ビニールシートの厚さと測定密度の関係

### (3) 密度のばらつきと試験点数

粗粒材料のように「ばらつき」がかけられない施工条件のもとで転圧回数やまき出し厚さの効果を検出するためには、試験データの「数」を増やすことによって統計的に抽出するか、あるいは同じ条件のもとで繰返し測定が可能な非破壊試験法を用いるかいずれの方策が考えられる。

ひとつの試験条件当たりの現場密度試験の点数は、これまで工程上無理のない範囲で実施可能な数量として経験的に決められてきたように思われる。置換法の場合は3～4点ぐらいの事例が最も多い。試験数量は本来密度分布の分散（ばらつきの大きさ）を考慮して、統計的な観点から決められるべき性質のものである。我々は集められた複数のデータから分散の大きさを知るわけであるが、これは材料の粒度分布や施工方法だけで決まるものではなく「密度を測定する方法にも依存する」ことに注意する必要がある。大型表面型RI密度計を用いると、粗粒材料の転圧後の代表的な密度の標準偏差 $\sigma$ は $0.05 \text{ (t/m}^3\text{)}$ くらいである<sup>9)</sup>。今、ゾーン内の密度評価の誤差を平均密度（例えば $2.0 \text{ t/m}^3$ ）の1%以下に抑えるとして測定点数 $n$ を次式によって計算すると

$$\frac{1.96}{\sqrt{n}} \sigma \leq 2.0 \times 0.01$$

測定点数 $n$ は約25点が必要となる（信頼度95%）。この数量は置換法では現実的に無理であるが、RI法の場合はさして困難ではない。

### 3. RI法を用いた現場転圧試験方法

#### 3.1 RI法の概要

ここでRI法と呼ぶのは土木工学の分野で利用されているガンマ線や中性子線を用いて土質材料、粗粒材料、コンクリートなどの密度や水分量を求める測定法であり、特に粗粒材料を対象としたものとしては、現在、図-3.1に示すタイプの計器がある。RI法の特徴と得失をまとめると次のようになる。

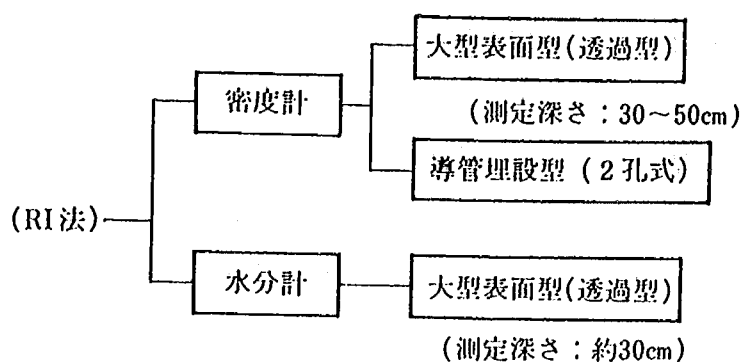


図-3.1 粗粒材料に用いられているRI法

- ① 本質的には、非破壊測定法である。これより同じポイントで繰返し測定が随時行える。
- ② 測定が簡単で計測時間が短い。このため多点測定が容易に可能であり、置換法に比べるとはるかに多くのデータが得られる。
- ③ 置換法に比べて測定容積がかなり小さい。しかし、データ数を増やすことでそれを補うことができる。  
表面型：深さ30~50cmまでの表層しか測定できない  
導管型：2次元的な面状の測定になる
- ④ 密度計は通常の土や岩石材料であれば、校正曲線が岩石の種類によらず、どのような材料にも適用できるが、バックグラウンド（自然放射能、岩種によってかなり差がある）の補正が必要である。
- ⑤ 一方、水分計の場合は結晶水や拘束水、有機物などの含有率が異なると校正曲線もかわるので、各材料に対して較正式に含まれる補正パラメータをチェックする必要がある（RI水分計は原理的には水素濃度計である）。

#### (1) 大型表面型RI密度計

粗粒材料を対象とする大型表面型RI密度計は、土質地盤に対して用いられている汎用型（測定深さ20cm）よりもガンマ線の透過距離をできる限り大きくして測定領域を拡大したものである。地表面から最大で50cmまでの表層密度を測ることができる。このタイプの仕様を表-3.1に示す。測定する前に、線源棒（φ16mm）を所定の深さに挿入するためのガイド孔（φ18mm）を準備する必要がある。

通常は各測点において測定器本体を線源挿入孔を中心として90度ずつ振り分け測定を繰り返す。このようにして1測点4方向の測定を行うと、測定深さ30cmの場合、直径約80cm、深さ約30cm（容積約150ℓ）

の領域の密度が求められる。

表－ 3. 1 大型表面型RI密度計の諸元例

|       |                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 線 源   | コバルト60 ( $^{60}\text{Co}$ ) 3.7メガベクレル (3.7MBq)<br>(100マイクロキュリー ( $\mu\text{Ci}$ )) |
| 検 出 器 | NaI (TI) シンチレーション検出器                                                               |
| 測定深さ  | 30cm : 標準 (最大50cm)                                                                 |
| 測定時間  | 3分 / 1点                                                                            |
| 使用温度  | 0～50℃                                                                              |
| 本体寸法  | 縦200mm×横450mm×高さ180mm (BOX部)                                                       |

## (2) 導管埋設型RI密度計

導管（フレーム）埋設型のRI密度計はロックゾーンの密度計測を目的として比較的最近開発されたものである<sup>5)</sup>。表－ 3. 2に導管埋設型RI密度計の諸元、図－ 3. 2には計測器の概要図を示す。導管をいくつか組合せれば多面的な測定もできる。この方法はロック材料を敷均するとき計測用のフレームを盛土中にセットしておく点に特徴がある。密度計測は2本の導管の間でガンマ線を透過させて行われるが、ガンマ線の透過能力に限界があるため導管の最大間隔は75cmとなっている。ただし、導管の軸方向には、任意ピッチで計測ができるから、フレームの上下端部近傍を除くと、概略75cm（導管の間隔）×100cm（導管の有効測定長）×15cm（透過ガンマ線の広がり巾）の平板状の領域の密度が求められる（図－ 3. 3）。なお、導管フレームの埋設は約45度の傾斜で行う。この程度の角度で設置しておけば、導管の存在が締固めに影響することはないことが確かめられている<sup>5)</sup>。

表－ 3. 2 導管埋設型密度計の諸元例

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| 線 源   | $^{60}\text{Co}$ 3.7MBq (100 $\mu\text{Ci}$ )   |
| 検 出 器 | NaI (TI) シンチレーション検出器                            |
| 測定深さ  | 表層約30cmを除くまき出し厚全層                               |
| 透過距離  | 75cm (最大)                                       |
| 測定時間  | 3分～6分 / 1点                                      |
| 使用温度  | 0～50℃                                           |
| 導 管   | 導管寸法 $\phi 83 \times 1000 \times 1400\text{mm}$ |
|       | 材質規格 STM 83-C 55                                |

導管フレームには、2本の導管を固定するH鋼部材があるため、この部材による散乱の影響がでる上下端部の20cm区間は測定できず、また転圧時に頭部を保護するために10cm程度は地表面から埋没させるので、地表面からおよそ30cmの区間は大型表面型RI密度計を用いてデータを補うことが必要である。なお、下端側はフレームを設置するとき下位の層内に剛結部材を埋込むことによって、対象層の下端面まで密度を求めることができる。

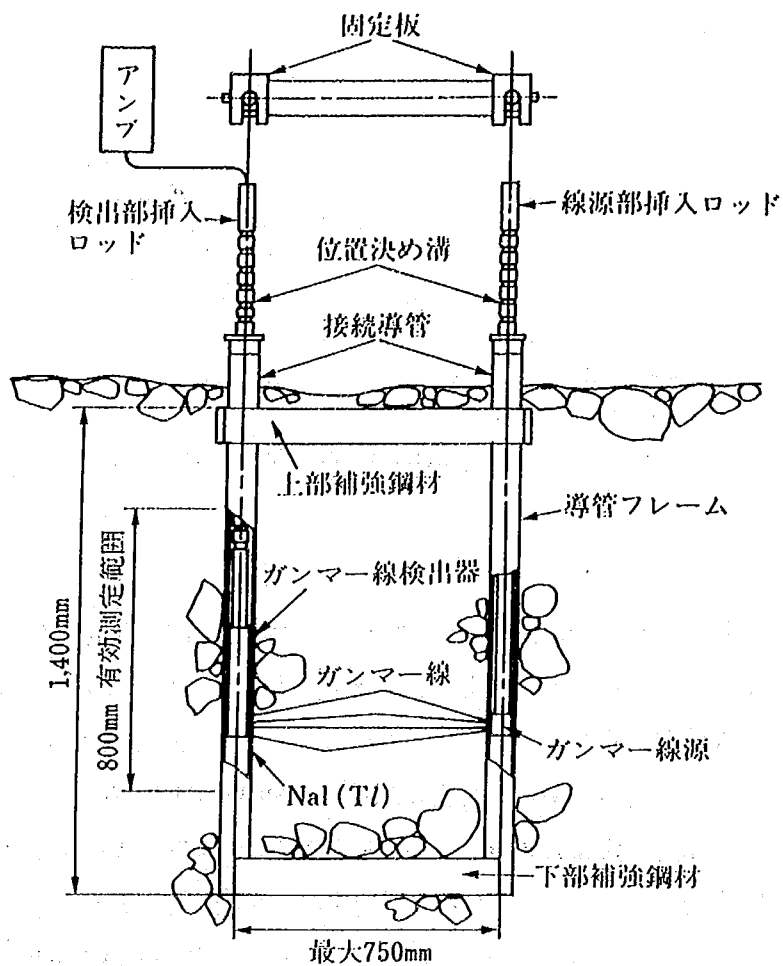


図-3.2 フレーム型RI密度計の概要

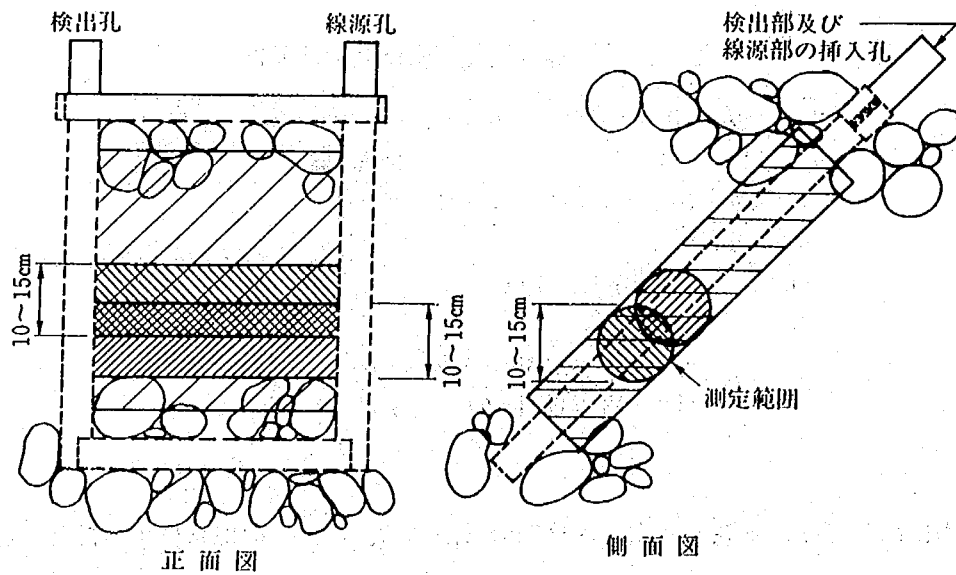


図-3.3 導管埋設型RI密度計の測定範囲

本装置は、手動測定の場合、深さ方向に任意ピッチで密度測定を行えるが、測定の自動化によってまき出し層内の密度分布をほぼ連続的にとらえることができる（測定器のひき上げ速度0.5mm/秒）。自動測定システムの概要を図-3.4に示す。また測定時間も例えば有効測定長100cmの場合、手動計測の2時間（5cmピッチの場合）より1/2に短縮され、迅速な試験が可能である。

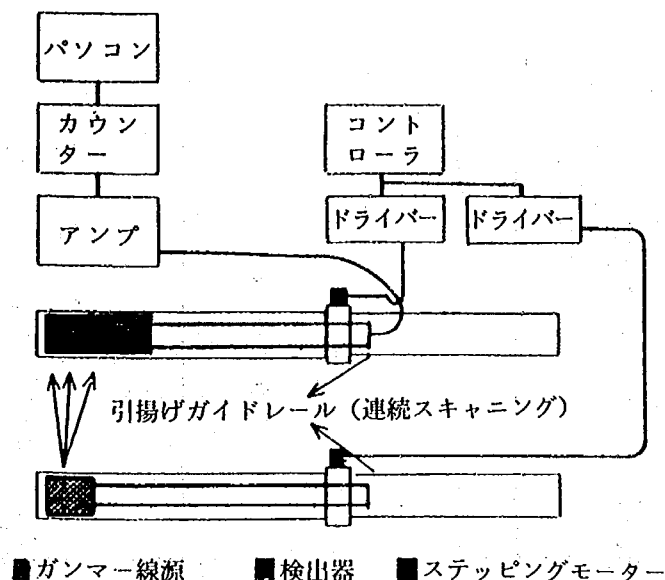


図-3.4 自動観測システムの概要

図-3.5に導管フレームを設置する手順を示す。

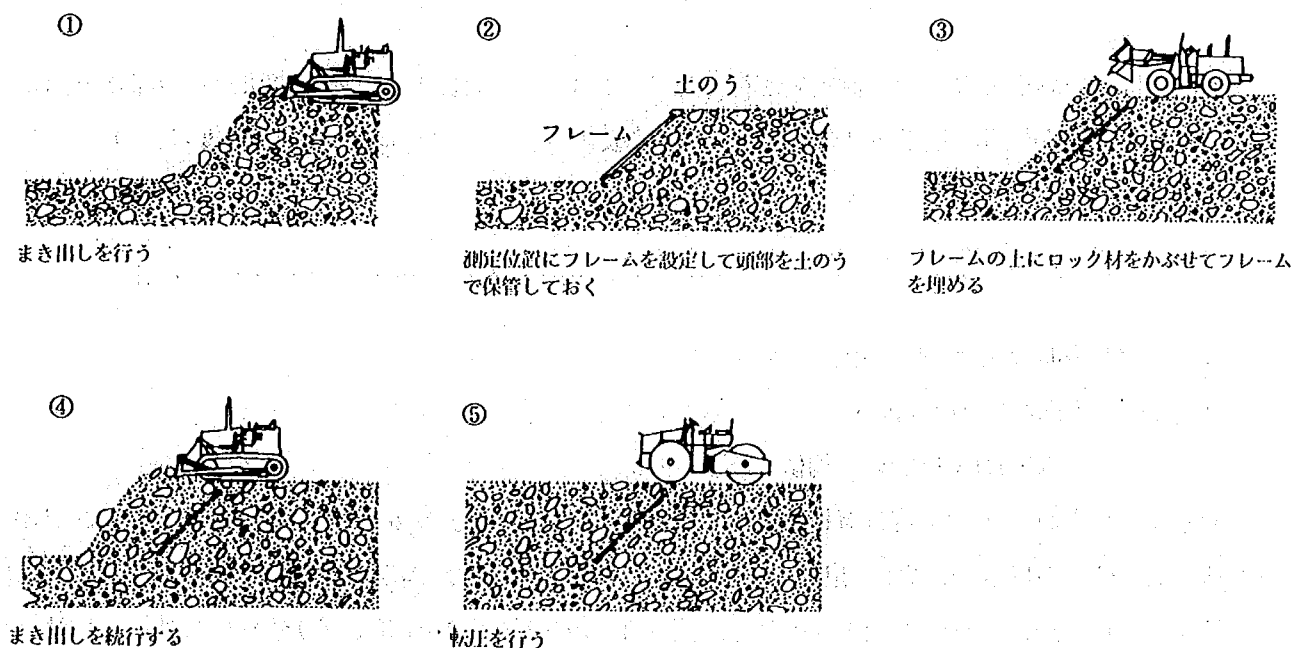


図-3.5 フレームの埋設手順

図-3.6 aは、フレーム型RI密度計で得られた連続測定によるまき出し層内の密度分布測定の一例である。この事例は最大粒径500mm、均等係数約30のロック材料を最大起振力30tonfの振動ローラで締固めたものである。まき出し後と、2回および4回転圧後の密度分布を比較して示している。図-3.6 bは図3.6 aの連続測定の結果から、10cm毎の区間平均値を求めてプロットしたものである。

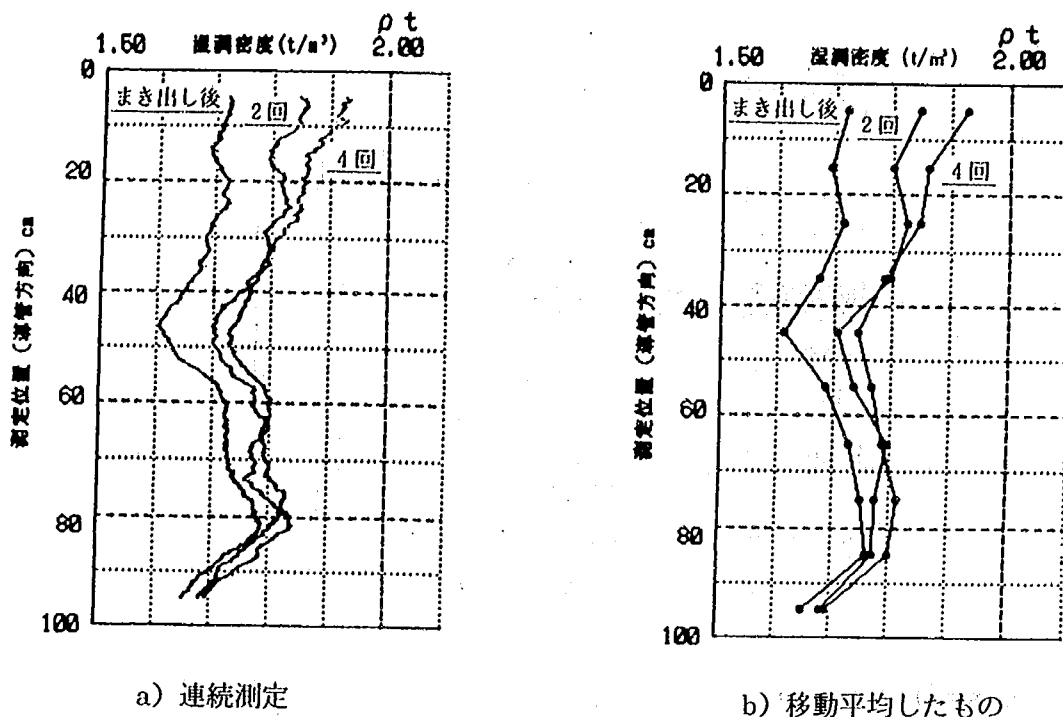


図-3.6 転圧層内の密度分布測定の一例

置換法では、一測点でひとつの測定値が得られるのに対して、RI法では盛土表層からの深さ方向の密度分布が求められるから、転圧層（厚さH）全体の代表値は式3.1から求まる平均密度（ $\rho_i$ ）として算定される。

$$\rho_i = \frac{0.3 \cdot \rho_{i1} + (H - 0.3) \cdot \rho_{i2}}{H} \quad \dots\dots\dots 3.1$$

$\rho_{i1}$  : 大型表面型RI密度計の値

(例えば4方向測定の平均値)

$\rho_{i2}$  : フレーム型RI密度計の平均値

この式で計算される平均密度は置換法による密度より小さいことが多いが、この差は主としてRI法と置換法の測定領域の形状の差異に起因している。盛土表面上の水平な面から置換孔の掘削内壁面までの深さをメッシュ状に測ってその形状を調べると、図-3.7のように概略ドンブリ状ないし紙コップ状に掘削されることが多い。例えばドンブリ状の場合、置換孔を水平面で切った断面の面積は盛土表層ほど小さくなっている。RI法での密度測定の結果（例えば図-3.6）に見られるように、転圧層の内部では表層ほど密度が大きく、下層では密度分布が低くなることがよくある。このような密度分布を持つ盛土で置換

法を行うと、掘削孔の形状が断面積一定の円柱状でない限り、表層ほど大きな重みをもった平均値として密度が評価されることになる、深さ方向の単純平均値として求められたRI法の値（これは円柱状の置換孔に対応する）よりも大きくなると考えられる。このためRI法と置換法の結果を比較するときには置換孔の形状に十分注意する必要がある。

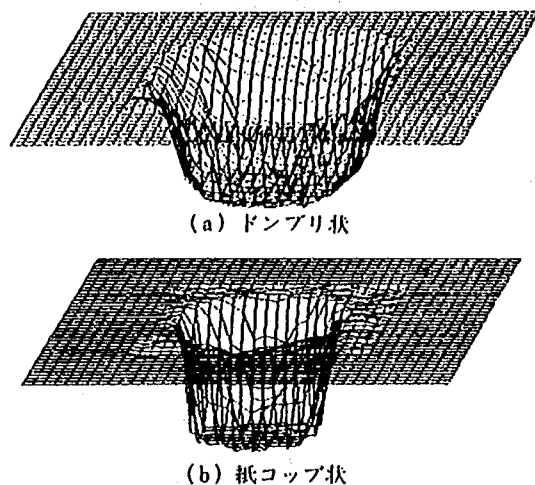


図-3.7 置換孔の形状測定例

図-3.8<sup>9)</sup>はRI密度と置換法密度の関係を示す一例である。黒塗りで示したデータは、縦軸のRI密度を置換孔の形状測定結果に基づいて断面補正したものである。この補正はRI法による実測値から形状を考慮し置換孔内の平均密度を求めたことに相当する。図-3.8の例では置換法密度とRI密度の差は $\pm 0.1 \text{ t/m}^3$ の範囲に分布しているが、このばらつきは置換法およびRI法の測定領域のちがいの影響を反映していると考えられる。

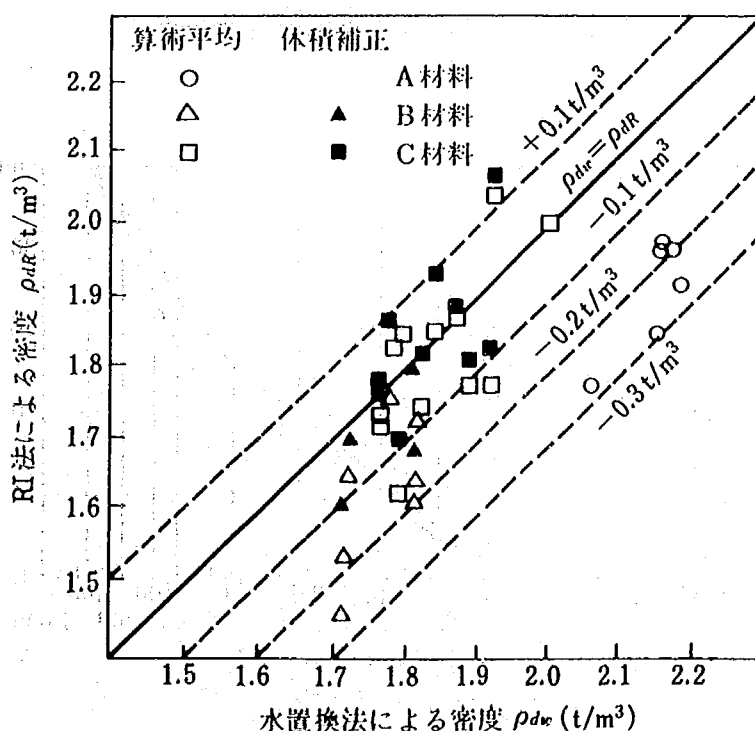
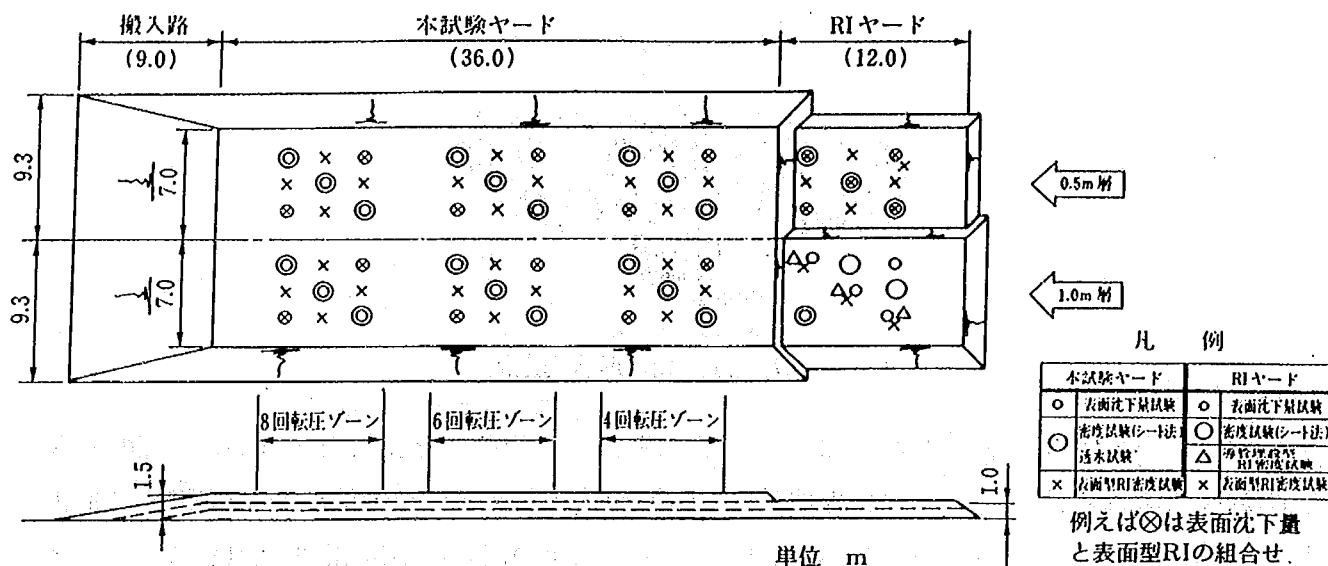


図3.8 RI密度と置換法密度との関係

### 3.2 転圧試験の概要

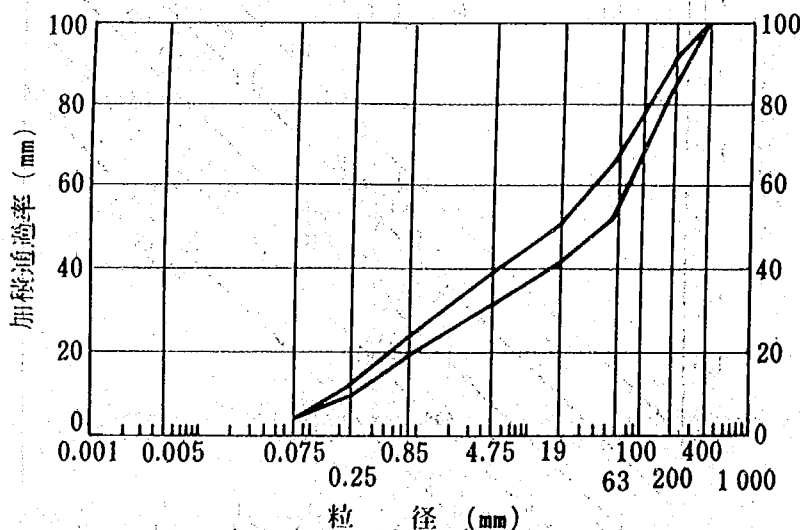
転圧試験は、まず予備試験（RIヤード）を行い、引き続き従来法による試験（各転圧回数ヤードを設定した従来方法による試験）を行った。RIヤードでの試験は主として転圧回数の効果を調べ、従来法による試験ヤードでも転圧回数と密度の関係を把握することを目的とした。

図－3.9に試験盛立ヤードを示す。図中には各種試験の計測位置が記入してある。試験盛土は大きくRI測定ゾーンと従来法による試験ヤードに分かれている。



図－3.9 盛立試験ヤードの構成と試験位置

図－3.10は試験盛土に用いた粗粒材料の粒度分布である。最大径400mmで従来のフィルダムのロック材料に比べ細粒分のやや多い材料である。材料の物性値を表－3.3に示す。



図－3.10 盛立材料の粒度曲線

表-3.3 材料の物性値

| 泥 流 堆 積 物  |                   |
|------------|-------------------|
| 絶乾比重       | 2.1~2.3、吸水率 7~10% |
| 最大粒径       | 400mm             |
| 礫分         | 68~74%            |
| 砂分         | 22~27%            |
| 砂分以下       | 4~6%              |
| 均等係数       | 218~412           |
| 63.5mm以上礫率 | 30~40%            |

RIヤードでは、図-3.5の方法と若干異って、盛立材料のまき出しと敷均しはバックホウを用いて試験ヤードの側方から行った(写真-3.1)。この方法により材料は適度に攪拌され、ブルドーザによる敷均しで生じやすい材料分級は少なくとも見ためにはほとんどなかった。また、バックホウは盛立基盤上を移動したため敷均し作業中に盛土が締固められた様子もない。

まき出し厚さは仕上がり層厚100cmのヤードでは115cm、50cmヤードでは65cmとした。



写真-3.1 バックホーによる敷均し

締固めに用いた振動ローラは、表-3.4に示すように車両重量10.3ton、最大起振力21tonのものを用いた。図-3.11はその概観図である。振動ローラによる転圧状況の一例を写真-3.2に示す。

表-3.6に試験盛土の試験数量を示す。RIヤードではまき出し厚さ $H=50\text{cm}$ では大型表面型RI密度計だけを、まき出し厚さ $H=100\text{cm}$ では大型表面型RI密度計とフレーム型RI密度計を組合わせて用い、転圧回数を16回まで変えた。最終転圧後には水置換による密度試験を行い、大型表面型RI密度計による値と

比較した。さらに各転圧回数毎に地表面の沈下量を測計によって求めた。従来法による試験ヤードでは、所定回数の転圧がなされた各試験ゾーンにおいて大型表面型RI測定と水置換法による密度試験等を行った。

表-3.4 振動ローラの諸元

|      |                                        |
|------|----------------------------------------|
| 総重量  | 10.3ton 前輪（ローラ）5.6ton<br>後輪（タイヤ）4.7ton |
| 起振力  | 21ton 最大                               |
| 走行速度 | 0～7km/時                                |
| 設置圧  | 前輪 12.37ton/m 線圧<br>後輪 2.35ton/m //    |
| 寸法   | 全長 5450mm<br>全幅 2330mm<br>締固め幅 2150mm  |

SV91D 外形寸法図

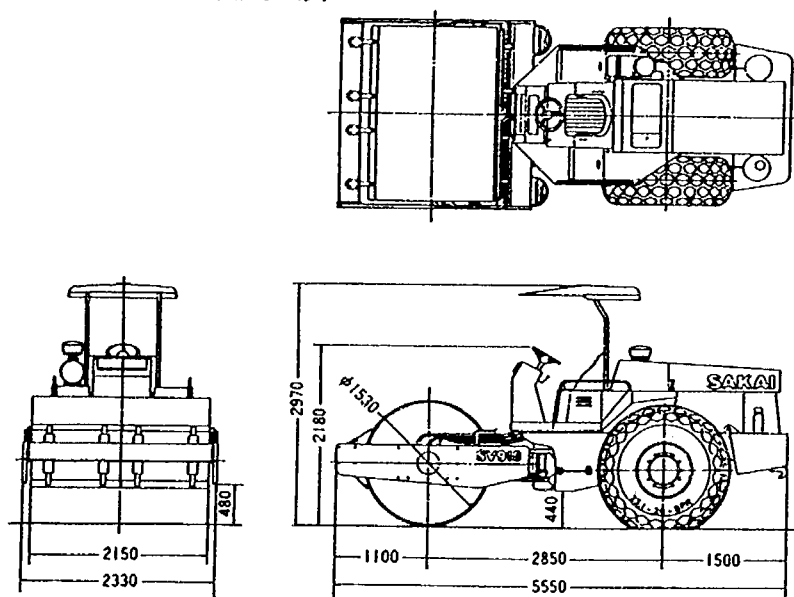


図-3.11 振動ローラ概観図

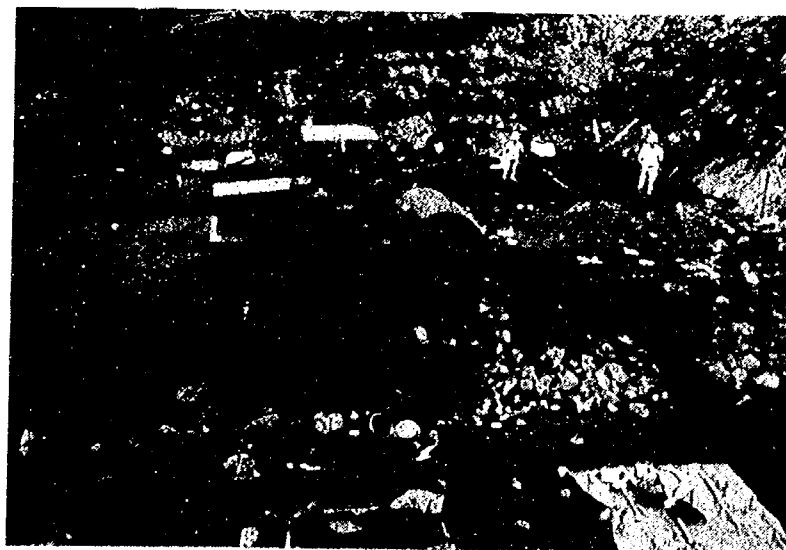


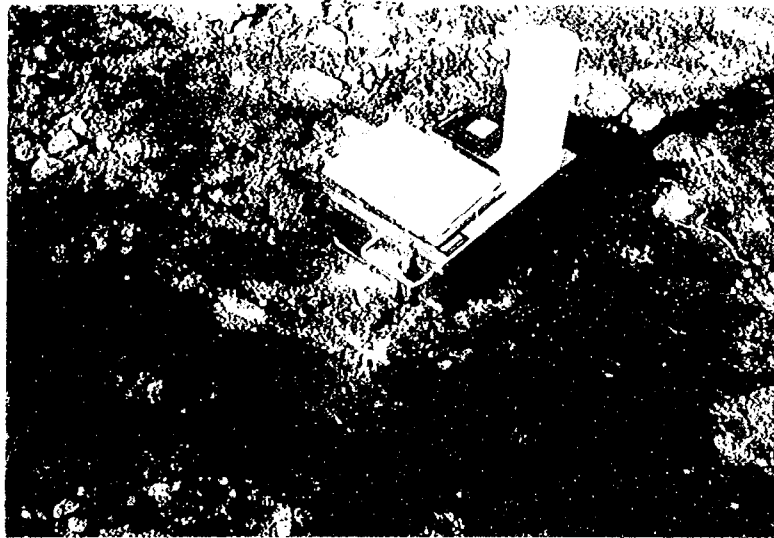
写真-3.2 転圧状況（サカイSV91D）

表－ 3. 6 試験盛土の構成と密度試験の数量

| 試験種別            | 仕上がり<br>層 厚<br>H | 盛 層<br>立 数 | 試験数量 (A×B) <sup>(1)</sup> |            |      |
|-----------------|------------------|------------|---------------------------|------------|------|
|                 |                  |            | 表面型<br>RI法                | 2孔式<br>RI法 | 水置換法 |
| RIヤード           | 50cm             | 1          | 9×7                       | —          | 3×1  |
|                 | 100cm            | 1          | 3×7                       | 3×5        | 3×1  |
| 従来法による<br>試験ヤード | 50cm             | 4          | 6×7                       | —          | 3×3  |
|                 | 100cm            | 2          | 6×7                       | —          | 3×3  |

注：A×B＝（測点数）×（転圧回数に伴う試験ケース）

大型表面型RI密度計を用いた測定は、仕上がり層厚50cmヤードで線源深さ50cmのものをいい、100cmヤードでは線源深さ30cmを用いた。8回転圧までは2回転圧後ごとに、その後16回までは4回転圧後ごとにRI密度測定を行った。写真－ 3. 3 に大型表面型RI密度計の測定状況を示す。



写真－ 3. 3 表面型RI測定

水分測定は初回（0回転圧）と12回転圧後に全測点で実施した。中間（2， 4， 6， 8回転圧後）と16回転圧後では代表点（50cmヤードおよび100cmヤードで各1点）でのみ測定した。1回当たりのRI密度測定は、線源棒挿入孔を中心に4方向とした。

一方、フレーム型RI密度計を用いた測定は仕上がり層厚100cmのヤード内で3ヶ所行った。今回使用したフレームは導管間隔75cm，長さ140cm（測定有効長100cm）のもので埋設時の傾斜角45度，頂部埋設深さ10cmとした。測定で2回転圧毎に導管方向に20cmピッチの5測点の手動による計測を行った。写真－ 3. 4 にフレーム型RI密度計のフレームの埋設状況と写真－ 3. 5 には測定状況を示す。



写真-3.4 フレームの埋設状況



写真-3.5 導管型RI測定

### 3.3 RI計器の校正曲線

#### (1) 密度計

透過型RI密度計の校正曲線は次式で表される。

$$R_{\rho} = A \cdot e^{-B \cdot \rho_i} \quad \dots\dots\dots 3.2$$

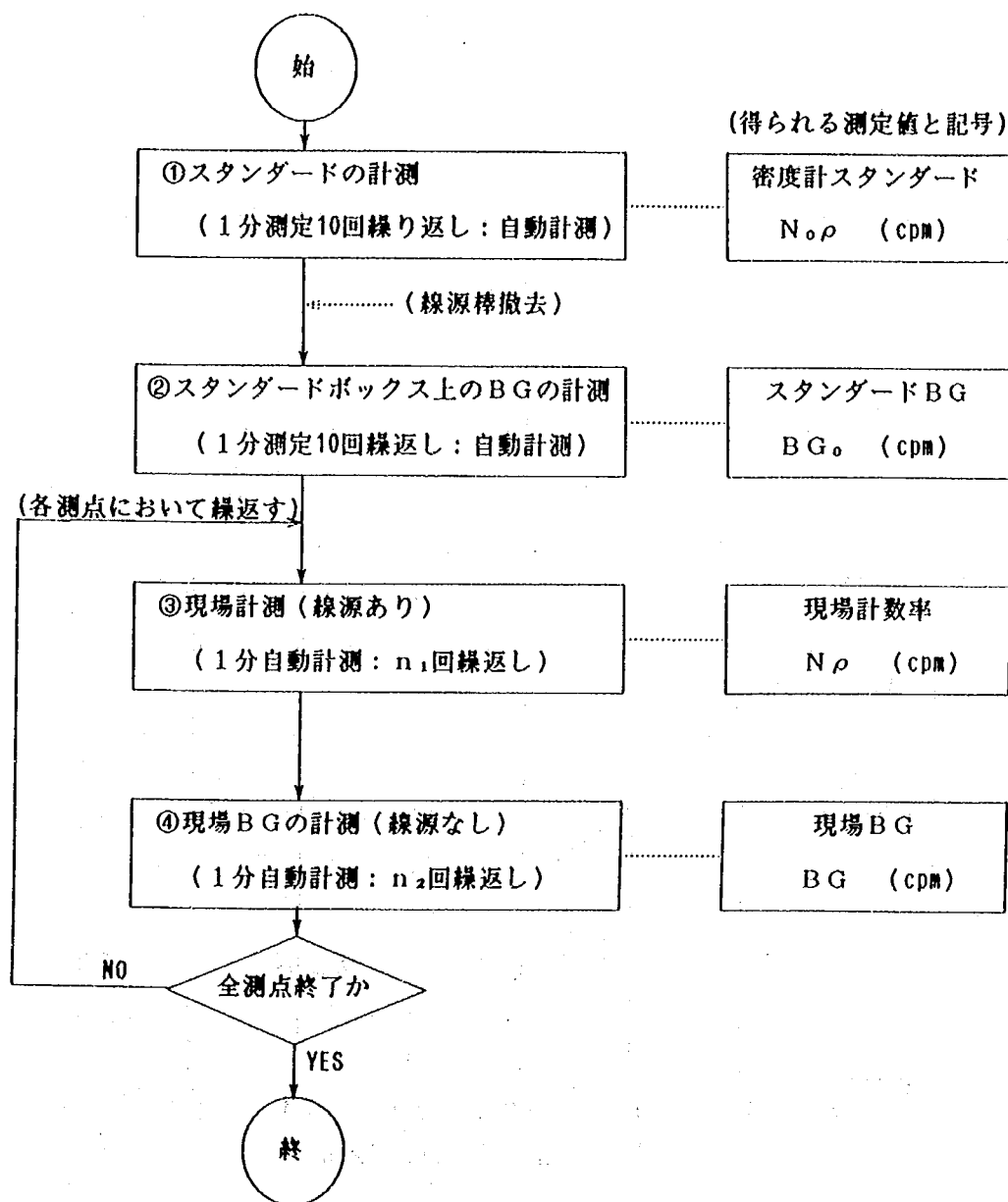
ここで、 $R_{\rho}$  : (ガンマ) 計数率比

$\rho_i$  : 湿潤密度 ( $t/m^3$ )

A, B : 校正定数

計数率比 $R_{\rho}$ とは密度計を標準計数台(スタンダード・ボックス)上にセットして計測される単位時間(通常は1分)当りのカウント数(これを標準計数率または単にスタンダードと呼ぶ。)を基準にして、

現場で計測された単位時間当りのカウント数（現場計数率）を相対値で表したものである。密度計のスタンダードと現場計数率には線源から放射されたガンマ線の他に地中や空中から飛来する自然放射能が含まれており、これをバックグラウンド（BG）と呼んでいる。バックグラウンド $\gamma$ 線の強度は岩種や場所あるいは計測時期などによって変動しているため、密度計測においては実測された計数率からこれらを差し引く必要がある。BGは線源棒をセットしない状態（線源棒は影響しない場所に遠ざけておく必要がある。）で、スタンダード計測および現場計測と同じ条件で別個に計測しておく必要がある。要約するとRI計測は図-3.12の手順で行われる。



注1) 通常  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 1$  を標準としている。

注2) 各計測値はいずれも平均値で1分当りのカウント数(cpm)を表す。

注3) cpmはcount per min.の略である。

図-3.12 RI計測の手順

図-3.12の手順で得られた各計測値を用いると計数率比 $R_\rho$ は次のように定義される。

$$R_\rho = \frac{N_\rho - BG}{N_0 - BG_0} \dots\dots\dots 3.3$$

RI計器の校正曲線を式3.2のように標準計数率を用いて基準化した相対値（左辺の計数率比）と密度との関係で定めるのは、線源の強度が時間とともに自然減衰する性質があるためである。もし、実測ガンマ線の強度を相対値でなく絶対値を用いて校正式を定めると、同じ密度であっても計測する時期によってカウント数が変わるので、その都度校正定数A、Bが変わることになり大変不便である。(1)式のように左辺を相対値で表しておけば、線源の減衰の影響を受けなくなるのでA、Bは定数として設定できることになる。ちなみに線源強度（単位時間に放射される放射線の個数）が半分に低下するまでに要する時間は半減期と呼ばれるが、密度計に通常用いられているコバルト60 ( $^{60}\text{Co}$ ) やセシウム137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) の半減期はそれぞれ約5年および30年である。

密度計測は式3.2の左辺の計数率比、いいかえれば式3.3の右辺の4つのカウント値を計測する作業であり、 $R_\rho$ が求まると式3.2に代入して密度 $\rho$ が決定される。

図-3.13～3.15に各密度計の校正曲線を示す。

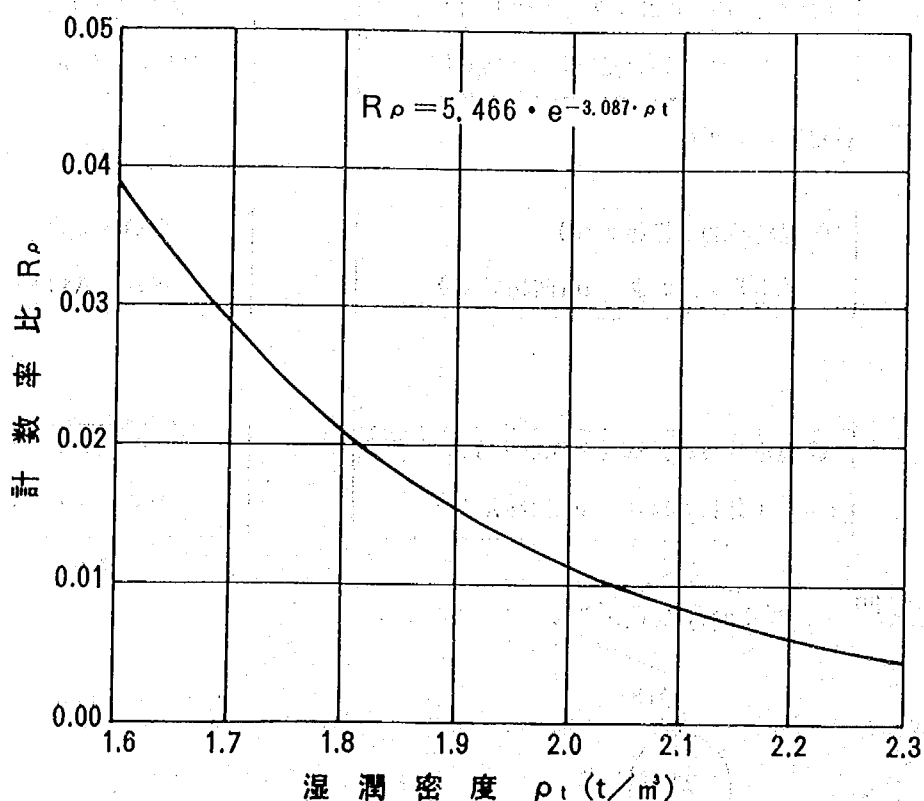


図-3.13 2孔式RI密度計の校正曲線（導管間隔  $d=750\text{mm}$ ）

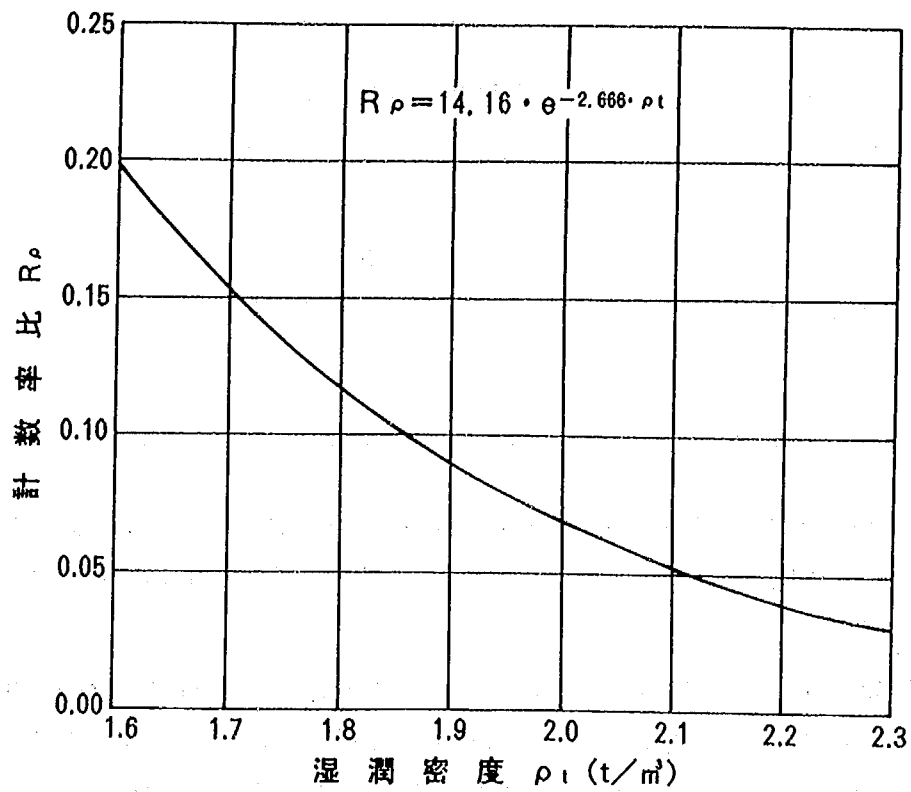


図-3.14 大型表面透過型密度計の校正曲線（線源深さ  $Z=50\text{cm}$ ）

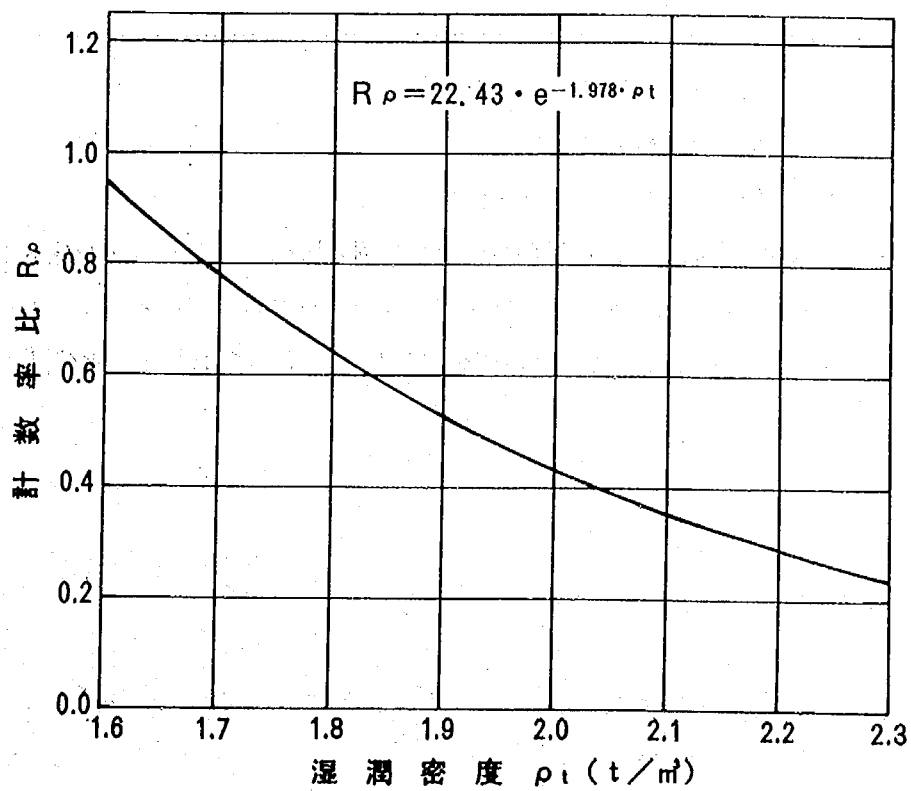


図-3.15 大型表面透過型密度計の校正曲線（線源深さ  $Z=30\text{cm}$ ）

## (2) 水分計

透過型水分計の校正曲線も式 3. 2 と同様に指数関数を用いて表される。

$$R_m = C \cdot e^{-D \cdot \rho_m} \dots\dots\dots 3. 4$$

(C, D : 校正定数)

左辺の水分計数率も密度計の場合と全く同じように定義されるが、水分計に用いられている検出器では自然放射能に含まれる中性子線は検知できないので、BGを考慮する必要はない。したがって $R_m$ を次のように表す。

$$R_m = \frac{N_m}{N_{0m}} \dots\dots\dots 3. 5$$

ここで、 $N_m$ は現場計測で得られた中性子計数率 (cpm)、 $N_{0m}$ は水分計の標準計数率 (cpm) を示す。

BGを考慮しない点を除けば水分計の場合も密度計と全く同じ手順で計測を行い、較正式 3. 4 から  $\rho_m$  を決定する。

中性子水分計は原理的には“水素濃度計”とみなされるため、土質試験法による含水比として評価する水分量 (即ち、110℃24時間の炉乾燥によって失われる水分量) の他に土中に含まれる結晶水や拘束水および有機物が存在する場合にはその含有量の影響を受けることに留意する必要がある。

式 3. 4 右辺の  $\rho_m$  は、自由水以外に含まれる水素元素の効果を含めたみかけ上の全体含水量を表し、等価含水量 ( $t/m^3$ ) と呼ばれるものである。特定の現場においては土質が同じであれば結晶水・拘束水・有機物などの含有量は乾燥密度に比例すると考えられるので、 $\rho_m$  は次のように表される。

$$\rho_m = \rho_w + \alpha \cdot \rho_d \dots\dots\dots 3. 6$$

ここで、 $\rho_w$  : 含水量 ( $t/m^3$ )

$\rho_d$  : 乾燥密度 ( $t/m^3$ )

$\alpha$  : 土質によってかわる補正係数

当然のことながら  $\alpha$  は拘束水などの含有量が多い土質 (例えば粘土・ローム・有機質土など) ほど大きな値になり、自由水以外に含水素成分をあまり含んでいない土質に対しては  $\alpha$  は小さくなる。したがって予め測定の対象となる土質に応じて適切な  $\alpha$  の値を決定しておく必要がある。水分計の校正曲線を図 3. 16 に示す。

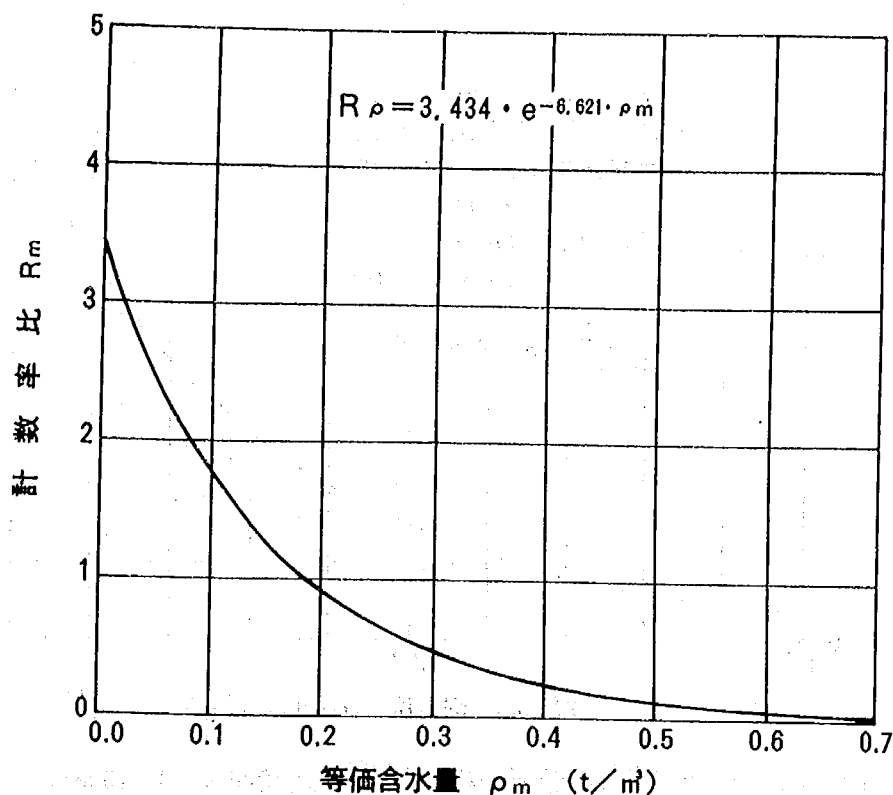


図-3.16 大型表面透過型水分計の較正曲線（線源深さ  $Z=30\text{cm}$ ）

### (3) 計測値のバラツキ（統計ノイズ）

RI計測法の原理には、確率的な現象や過程が含まれているので、全く同じ条件で計測を繰り返しても、得られる測定値は同じ値を示さず一定のばらつきが現れる。これを一般に統計ノイズと呼んでいるが、このばらつきは正規分布で表すことができ、標準偏差 $\sigma$ が平均計数率 $\bar{N}$ の平方根に等しくなることが知られている。

$$\sigma = \sqrt{\bar{N}} \quad \dots\dots\dots 3.7$$

このことからそれぞれの計数率から求まる密度や水分量の統計ノイズの大きさは較正式を用いて計算することができる。図-3.17～3.20は各測定器の統計ノイズの大きさを示したものである。RI法では統計ノイズが所要精度以下となるようにRI機器の設計や計測法が定められている。統計ノイズを小さくする為にはカウントを多くする必要がある、計測時間を長くしたり繰り返し測定を行うのはこのためである。

なお、一般のロックフィルダムの盛土計測では密度や水分量の場所ごとのばらつきが意外に大きいのが普通であり、このような環境のもとでは統計ノイズはほとんど無視できる。したがって同一地点での繰り返し測定よりも場所を変えて繰り返し測定（多点数データの収集）を行う方が望ましい。

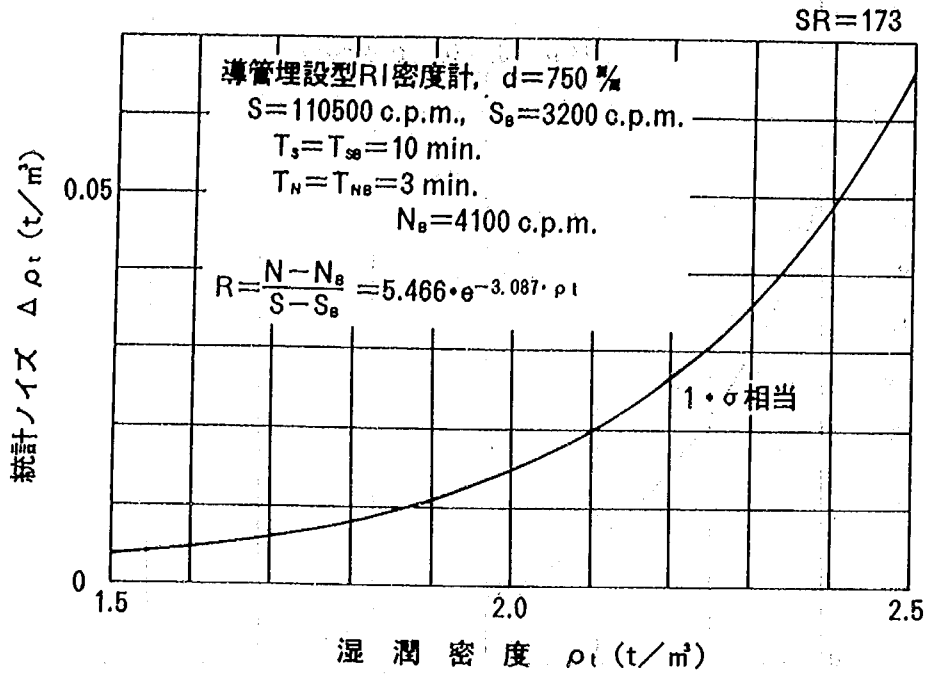


図-3. 17 2孔式RI密度計の統計ノイズ (導管間隔  $d=750$ mm)

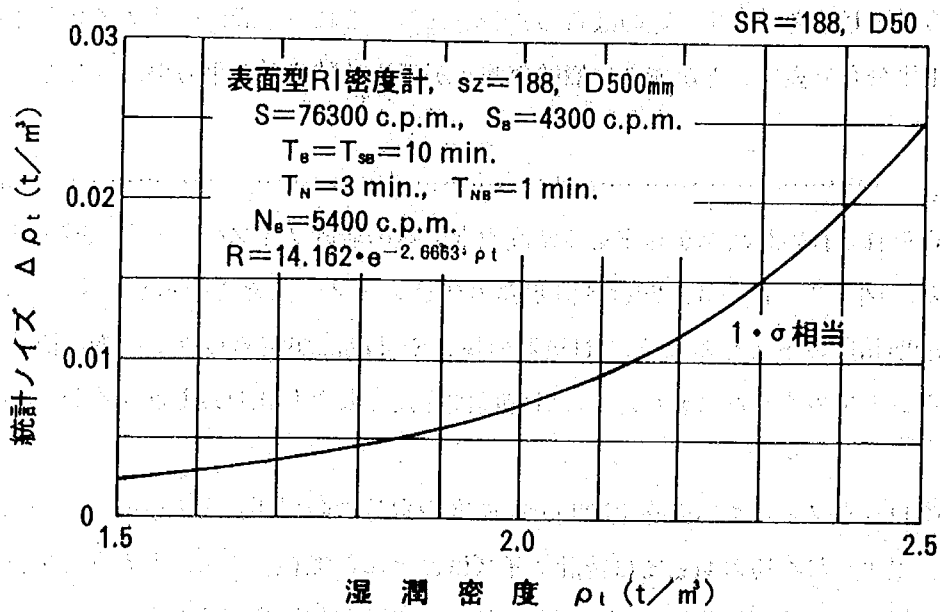


図3. 18 大型表面型RI密度計の統計ノイズ (線源深さ  $Z=50$ cm)

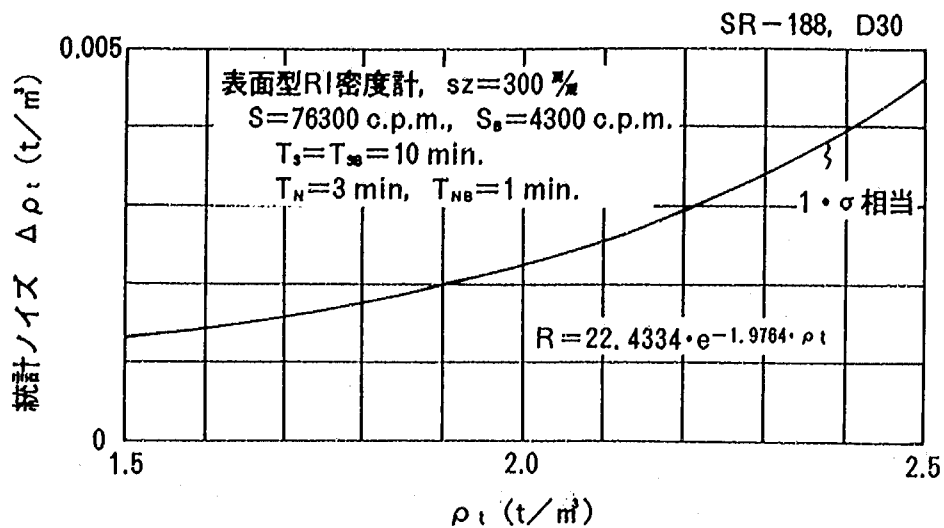


図-3. 19 大型表面型RI密度計の統計ノイズ (線源深さ  $Z=30$ cm)

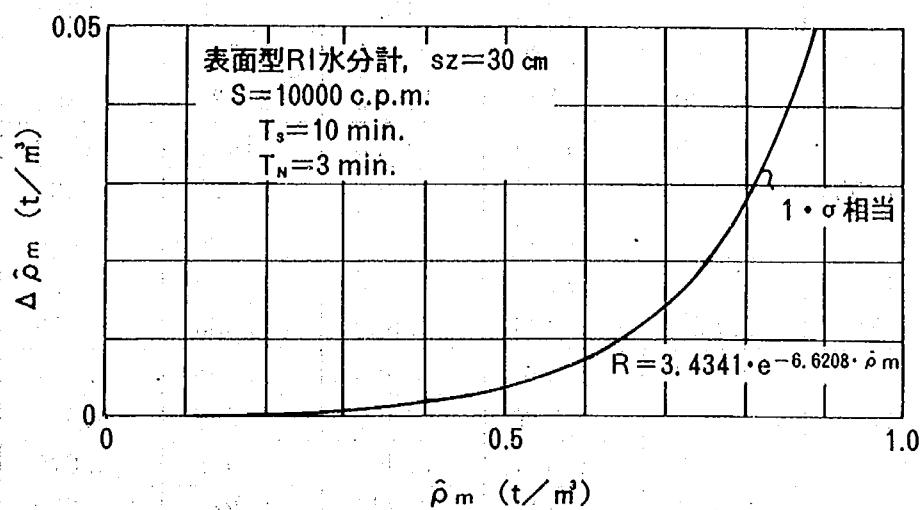


図-3. 20 大型表面型RI水分計の統計ノイズ (線源深さ  $Z=30$ cm)

## 4. 現場転圧試験結果および考察

### 4.1 RI法を用いた現場転圧試験

#### (1) 仕上り層厚H=50cmゾーン

表-4.1に大型表面型RI密度計による測定値を示す。なお、最終16回転圧後には3ヶ所で水置換法による密度試験も行ったのでその測定値も表-4.1に示す。

表-4.1(1) 大型表面型RI密度計による測定値(線源深さ50cm)

| 転圧回数No. | N=0   | N=2   | N=4   | N=6   | N=8   | N=12  | N=16  |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | 2.003 | 2.196 | 2.249 | 2.264 | 2.264 | 2.289 | —     |
|         | 14.6  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | —     |
|         | 1.748 | 1.918 | 1.964 | 1.977 | 1.977 | 1.999 | —     |
| 2       | 2.008 | 2.193 | 2.247 | 2.266 | 2.249 | 2.323 | —     |
|         | 13.2  | 13.0  | 13.0  | 13.0  | 13.0  | 12.5  | —     |
|         | 1.774 | 1.941 | 1.989 | 2.005 | 1.990 | 2.065 | —     |
| 3       | 1.995 | 2.120 | 2.192 | 2.239 | 2.275 | 2.284 | 2.287 |
|         | 15.0  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.0  | 13.8  | 13.8  |
|         | 1.735 | 1.852 | 1.955 | 1.966 | 2.996 | 2.007 | 2.010 |
| 4       | 1.972 | 2.128 | 2.167 | 2.198 | 2.233 | 2.236 | 2.252 |
|         | 14.4  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.5  | 14.5  |
|         | 1.724 | 1.859 | 1.893 | 1.920 | 1.950 | 1.953 | 1.967 |
| 5       | 1.971 | 2.292 | 2.334 | 2.355 | 2.355 | 2.351 | 2.362 |
|         | 13.9  | 13.8  | 13.7  | 13.6  | 13.6  | 13.3  | 13.3  |
|         | 1.730 | 1.973 | 2.016 | 2.055 | 2.075 | 2.075 | 2.085 |
| 6       | 1.978 | 2.114 | 2.292 | 2.248 | 2.283 | 2.252 | —     |
|         | 14.6  | 14.5  | 14.4  | 14.3  | 14.2  | 14.1  | —     |
|         | 1.726 | 1.846 | 2.004 | 1.967 | 1.999 | 1.974 | —     |
| 7       | 2.050 | 2.044 | 2.222 | 2.335 | 2.294 | 2.297 | —     |
|         | 9.6   | 10.0  | 12.0  | 12.5  | 13.0  | 13.1  | —     |
|         | 1.870 | 1.858 | 1.984 | 1.959 | 2.066 | 2.031 | —     |
| 8       | 2.058 | 2.255 | 2.286 | 2.268 | 2.320 | 2.272 | —     |
|         | 12.4  | 12.4  | 12.4  | 12.4  | 12.4  | 12.5  | —     |
|         | 1.831 | 2.006 | 2.034 | 2.018 | 2.064 | 2.020 | —     |
| 9       | 1.928 | 2.117 | 2.248 | 2.210 | 2.266 | 2.252 | —     |
|         | 10.6  | 10.5  | 10.5  | 10.0  | 9.5   | 9.0   | —     |
|         | 1.743 | 1.916 | 2.034 | 2.009 | 2.069 | 2.066 | —     |
| 平均      | 1.996 | 2.157 | 2.244 | 2.248 | 2.287 | 2.284 | 2.300 |
|         | 13.1  | 13.1  | 13.3  | 13.3  | 13.2  | 13.0  | 13.9  |
|         | 1.966 | 1.908 | 1.981 | 1.985 | 2.021 | 2.021 | 2.020 |

注) 上段 湿潤密度  $t/m^3$  中段 含水比 % 下段 乾燥密度  $t/m^3$

表-4. 1(2) 水置換法による測定結果一覧表

| 試料名               | 仕上がり層厚<br>(m) | 転圧<br>回数<br>(回) | 測点 | 湿潤密度<br>$\rho_t$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 含水比<br>$\omega$<br>(%) | 乾燥密度<br>$\rho_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 63.0mm以<br>上の礫率<br>(%) | 備 考                           |
|-------------------|---------------|-----------------|----|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 0.5-16<br>(RIヤード) | 0.5           | 16              | ①  | 2.308                                    | 11.3                   | 2.074                                    | 24.7                   | Dmax=300mmが3個 水出ず             |
|                   |               |                 | ②  | 2.332                                    | 12.2                   | 2.078                                    | 30.1                   | Dmax=400mmが2個 水出ず             |
|                   |               |                 | ③  | 2.312                                    | 10.5                   | 2.092                                    | 42.6                   | Dmax=400mmが2個 水出ず             |
|                   |               |                 | 平均 | 2.317                                    | 11.3                   | 2.081                                    | 32.5                   | —                             |
| 1.0-16<br>(RIヤード) | 1.0           | 16              | ①  | (2.386)                                  | (9.6)                  | (2.177)                                  | (51.3)                 | Dmax=500mmが2個 大礫多く礫間に<br>空隙あり |
|                   |               |                 | ②  | 2.321                                    | 11.1                   | 2.089                                    | 28.0                   | Dmax=400mmが2個 礫間に若干空隙<br>あり   |
|                   |               |                 | ③  | 2.283                                    | 13.1                   | 2.019                                    | 37.2                   | Dmax=400mmが2個 水出ず             |
|                   |               |                 | 平均 | 2.302                                    | 12.1                   | 2.054                                    | 32.6                   | ①は大礫多く礫間に空隙があるため平均<br>値より省いた  |

仕上り層厚H=50cmゾーンでは線源深さ50cmの表面型密度計を用いており、9測点において転圧層の平均密度が大型表面型RI密度計で求められている。ただし、水分計の線源挿入深度は30cmであるが、測定の影響範囲は線源の後背部にも及ぶので密度計とあまりちがわないと考えてよい。図-4.1は各転圧回数における盛立ヤード全測点におけるRI法による湿潤密度の値である。密度の最大、最小値の分布幅は、約0.15t/m<sup>3</sup>の範囲にありこの分布範囲は、転圧回数が増えてもほとんど変わらない。この湿潤密度のばらつきは、転圧ゾーン内の粒度分布や含水比のばらつきを反映したものと考えられる。

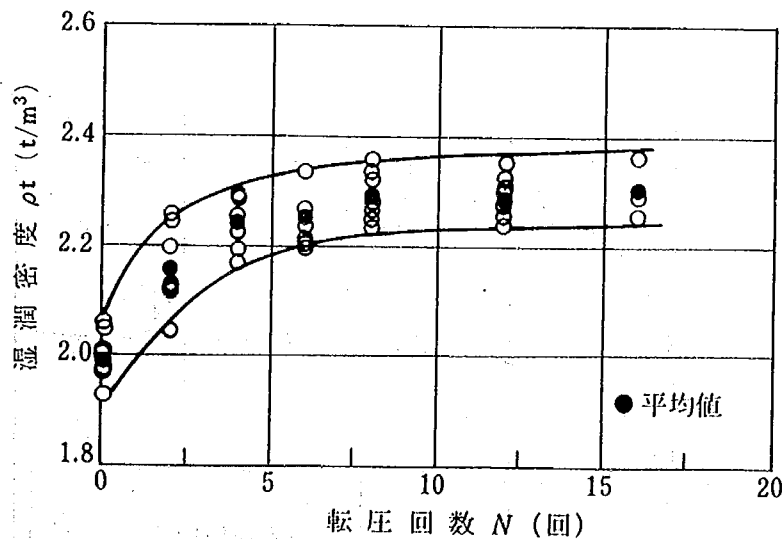


図-4.1 転圧回数と密度との関係 (Z=50cmゾーン)

図-4.2は、9測点の密度の平均値と転圧回数との関係を示したものである。湿潤密度 $\rho_t$ および水分計から得られる含水量を差引いた乾燥密度 $\rho_d$ はいずれも転圧回数が増すごとに滑らかに上昇し、N=8回付近ではほぼ収束状態に達することがわかる。図中の曲線は、次の双曲線回帰式を用いて密度と転圧回数

との関係を近似したものである。

$$\rho_N = \rho_0 + \frac{N}{a + bN} \quad \dots\dots\dots 4.1$$

N : 転圧回数,  $\rho_0$  : 初期密度  $\rho_N$  : 転圧後の密度, a, b : 回帰定数

式4.1における実験定数(a, b)と双曲線回帰の相関係数を表-4.2に示す。表-4.2には後で示すまき出し厚さが100cmの場合(大型表面型による測定)の値も併記している。 $\rho_i$ ,  $\rho_d$ いずれの場合も(2)式に対する回帰性はきわめて良好で、双曲線回帰の相関係数は0.99以上の値が得られている。ところで(2)式を変形すると次のようになる(図-4.3)。

$$\frac{1}{\Delta\rho} = \frac{a}{N} + b \quad \dots\dots\dots 4.2$$

$$(\Delta\rho = \rho_N - \rho_0)$$

aの値は転圧の効率を示す係数となり、aの値が大きくなれば転圧の効率が悪いことを示している。図-4.4にその概念図を示す。一方、b値の逆数はNを無限大にしたときの密度増分の極限值 $(\rho - \rho_0)_{\infty}$ に等しい。以上により、転圧回数と密度の関係は双曲線近似が可能であり、これにより締固めの上限密度が推定できることがわかる。また、転圧の効率についても判断できることも示している。例えば締固め度を評価してみると極限值に対してN=16回の締固め度は約90%、N=8回では約80%の締固め度となっている。N=16回のときを事実上の上限密度とするならばN=8回の転圧では90%の締固め密度が得られることになる。

なお、N=16回転圧後の置換法では大型表面型RI密度計による密度より少し大きめの値が得られている。

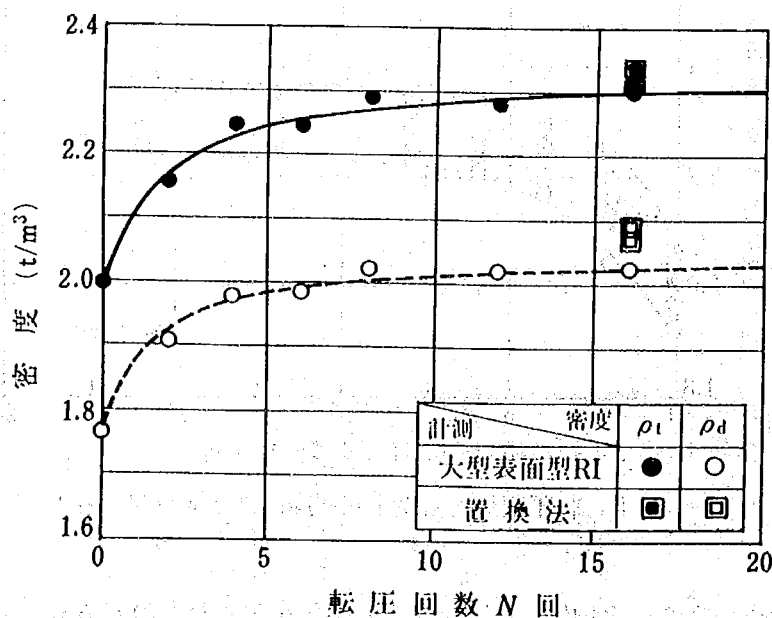


図-4.2 転圧回数と密度との関係 (Z=50cmゾーン)

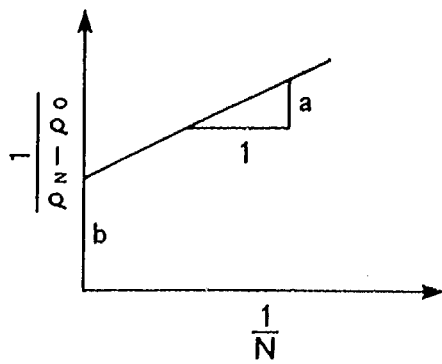


図-4.3 実験定数bの値の概念図

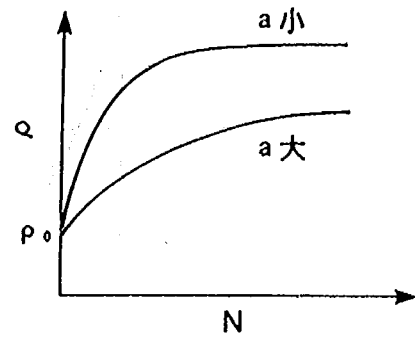


図-4.4 実験定数aの値の概念図

表-4.2 双曲線近似式の実験定数（大型表面型）

| まき出し厚さ |          | a     | b     | 相関係数   |
|--------|----------|-------|-------|--------|
| 50cm   | $\rho_i$ | 5.434 | 2.949 | 0.9975 |
|        | $\rho_d$ | 5.387 | 3.507 | 0.9968 |
| 100cm  | $\rho_d$ | 3.781 | 2.790 | 0.9967 |
|        | $\rho_s$ | 6.771 | 3.123 | 0.9931 |

表-4.3, 図-4.5 に転圧回数と地表面沈下率との関係を示す。図中の□印は転圧による締固めが一次的な境界条件のもとに行われたものと仮定して次式によって密度の増分から沈下量を逆算したものである。

$$\frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \quad \dots\dots\dots 4.3$$

$H_0, \rho_0$  は初期高さおよび初期密度

$H, \rho$  は転圧後の高さおよび転圧後の密度

このケースでは地表面沈下率に対しても(2)式と同様の双曲線近似（図中の曲線）が成り立つことが示されており、沈下率と密度変化はほぼ完全に整合していると言える。

表-4.3 表面沈下量および沈下率（H=50cm）

| 転圧回数<br>(回) | 転圧前<br>層厚<br>(cm) | 転圧後<br>層厚<br>(cm) | 沈下量<br>(cm) | 沈下率<br>(%) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------|------------|
| 0           | 60.0              | —                 | —           | —          |
| 2           | —                 | 56.0              | 4.0         | 6.7        |
| 4           | —                 | 54.0              | 6.0         | 10.1       |
| 6           | —                 | 53.0              | 7.0         | 11.7       |
| 8           | —                 | 52.0              | 8.0         | 13.3       |
| 12          | —                 | 51.0              | 9.0         | 15.5       |
| 16          | —                 | 50.5              | 9.5         | 15.8       |

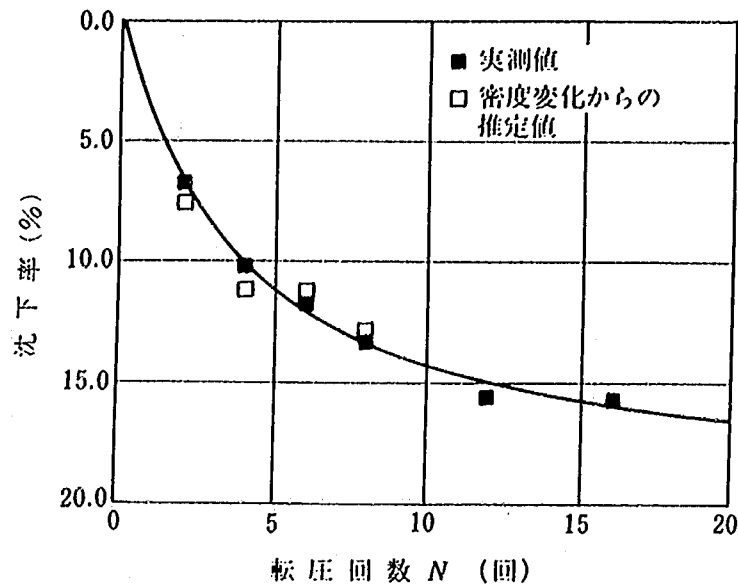


図-4.5 転圧回数と沈下率との関係 (H=50cmゾーン)

(2) 仕上がり層厚H=100cmゾーン

仕上がり層厚さが100cmの場合の大型表面型RI密度計およびフレーム型RI密度計の測定値を表-4.4に示す。H=50cmの場合と対応させて、まず大型表面型RI密度計（線源深さ30cm）による密度測定結果を図-4.6にプロットし、あわせて双曲線回帰式を併記した。密度と転圧回数との関係はH=50cmのときと同様に滑らかに推移しており、双曲線回帰式を用いて近似することができる。このケースでもN=8回段階で密度は安定している。8回転圧後の密度は極限値の80%となっており、N=16回のときを最大値とするとN=8回では約90%の締固め度に達している。なお、N=16回転圧後の置換法による密度はH=50cmゾーンに比べて、大型表面型RI密度計による値よりもかなり高い値が得られており、約0.15t/m<sup>3</sup>のばらつきが生じている。

また、まき出し層50cmと100cmの転圧効率を比較すれば、aの値を乾燥密度でみると表-4.2からわかるようにまき出し厚さ50cmの方が小さく転圧回数の少ない段階で所定の締固め度に達することを示している。

表-4.4(1) 大型表面型RI密度計による測定値 仕上り厚さ 100cm  
線源深さ 30cm

| No. | n=0   | n=2   | n=4   | n=6   | n=8   | n=12  | n=16  |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | 1.938 | 2.018 | 2.088 | 2.112 | 2.132 | 2.177 | 2.160 |
|     | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.1  | 12.2  | 12.2  |
|     | 1.730 | 1.802 | 1.864 | 1.886 | 1.902 | 1.940 | 1.925 |
| 2   | 1.863 | 2.083 | 2.148 | 2.197 | 2.223 | 2.239 | 2.212 |
|     | 11.7  | 15.6  | 13.9  | 11.7  | 11.6  | 11.7  | 11.7  |
|     | 1.668 | 1.802 | 1.886 | 1.967 | 1.992 | 2.004 | 1.980 |
| 3   | 1.800 | 2.102 | 2.154 | 2.167 | 2.181 | 2.204 | 2.189 |
|     | 15.1  | 19.4  | 18.0  | 17.5  | 17.6  | 17.3  | 17.3  |
|     | 1.564 | 1.760 | 1.825 | 1.844 | 1.855 | 1.879 | 1.866 |
| 平均  | 1.867 | 2.068 | 2.130 | 2.159 | 2.179 | 2.207 | 2.187 |
|     | 12.9  | 15.7  | 14.6  | 13.7  | 13.8  | 13.7  | 13.7  |
|     | 1.654 | 1.788 | 1.859 | 1.899 | 1.916 | 1.941 | 1.924 |

上段 湿潤密度 (t/m<sup>3</sup>) 中段 含水比 (%) 下段 乾燥密度 (t/m<sup>3</sup>)

表-4.4(2) フレーム型RI密度による測定値 仕上り厚さ 100cm

| No   | n=0   | n=2   | n=4   | n=6   | n=8   | n=12  | n=16  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1-3  | 1.897 | 2.044 | 2.050 | 2.098 | 2.122 | 2.153 | 2.192 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.694 | 1.825 | 1.830 | 1.873 | 1.895 | 1.922 | 1.957 |
| 1-7  | 1.898 | 2.028 | 2.057 | 2.066 | 2.107 | 2.148 | 2.277 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.695 | 1.811 | 1.837 | 1.845 | 1.881 | 1.198 | 2.033 |
| 1-11 | 1.938 | 2.053 | 2.062 | 2.133 | 2.129 | 2.175 | 2.225 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.730 | 1.833 | 1.841 | 1.904 | 1.901 | 1.942 | 1.987 |
| 1-15 | 1.950 | 2.037 | 2.111 | 2.103 | 2.094 | 2.188 | 2.261 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.741 | 1.819 | 1.885 | 1.878 | 1.870 | 1.954 | 2.019 |
| 1-19 | 1.835 | 1.916 | 1.941 | 1.991 | 1.980 | 2.001 | 2.099 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.638 | 1.711 | 1.733 | 1.778 | 1.768 | 1.787 | 1.874 |
| 平均   | 1.904 | 2.016 | 2.044 | 2.078 | 2.086 | 2.133 | 2.211 |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  |
|      | 1.700 | 1.800 | 1.825 | 1.856 | 1.863 | 1.904 | 1.974 |
| 2-3  | 1.692 | 2.022 | 2.160 | 2.226 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.511 | 1.805 | 1.929 | 1.988 | -     | -     | -     |
| 2-7  | 1.991 | 2.191 | 2.258 | 2.237 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.778 | 1.956 | 2.016 | 1.997 | -     | -     | -     |
| 2-11 | 2.039 | 2.142 | 2.169 | 2.183 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.821 | 1.913 | 1.937 | 1.949 | -     | -     | -     |
| 2-15 | 2.016 | 2.082 | 2.118 | 2.129 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.800 | 1.859 | 1.891 | 1.901 | -     | -     | -     |
| 2-19 | 1.921 | 2.053 | 2.081 | 2.134 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.715 | 1.833 | 1.858 | 1.905 | -     | -     | -     |
| 平均   | 1.932 | 2.098 | 2.157 | 2.182 | -     | -     | -     |
|      | 12.0  | 12.0  | 12.0  | 12.0  | -     | -     | -     |
|      | 1.725 | 1.873 | 1.926 | 1.948 | -     | -     | -     |
| 3-3  | 1.854 | 2.141 | 2.236 | 2.203 | 2.206 | 2.260 | 2.256 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.585 | 1.830 | 1.911 | 1.883 | 1.885 | 1.932 | 1.928 |
| 3-7  | 1.876 | 2.118 | 2.152 | 2.214 | 2.239 | 2.221 | 2.250 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.603 | 1.810 | 1.839 | 1.892 | 1.914 | 1.898 | 1.923 |
| 3-11 | 1.862 | 2.093 | 2.155 | 2.167 | 2.180 | 2.223 | 2.252 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.591 | 1.789 | 1.842 | 1.852 | 1.863 | 1.900 | 1.925 |
| 3-15 | 1.923 | 2.088 | 2.150 | 2.180 | 2.185 | 2.235 | 2.248 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.644 | 1.785 | 1.838 | 1.863 | 1.868 | 1.910 | 1.921 |
| 3-19 | 1.859 | 2.037 | 2.017 | 2.054 | 2.080 | 2.191 | 2.289 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.589 | 1.741 | 1.724 | 1.756 | 1.778 | 1.873 | 1.956 |
| 平均   | 1.875 | 2.095 | 2.142 | 2.164 | 2.178 | 2.226 | 2.259 |
|      | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  | 17.0  |
|      | 1.602 | 1.791 | 1.831 | 1.849 | 1.862 | 1.903 | 1.931 |
| 総平均  | 1.903 | 2.070 | 2.114 | 2.141 | 2.132 | 2.180 | 2.235 |
|      | 13.7  | 13.7  | 13.7  | 13.7  | 14.5  | 14.5  | 14.5  |
|      | 1.676 | 1.821 | 1.861 | 1.884 | 1.862 | 1.904 | 1.952 |

上段 湿潤密度 (t/m<sup>3</sup>) 中段 含水比 (%) 下段 乾燥密度 (t/m<sup>3</sup>)

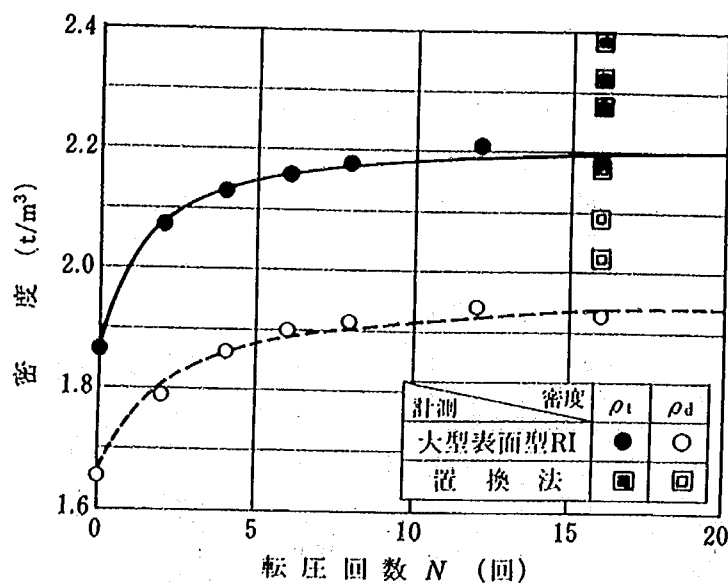


図-4.6 転圧回数と密度との関係 (H=100cmゾーン)

次にフレーム型RI密度計によって求められた転圧回数毎の深度方向の密度分布の変化状況を図-4.7に示す。図中の点は、3ヶ所で得られた各深度における平均値をプロットしたものである。また、Z=15cmにプロットされているデータは大型表面型RI密度計の値である。敷均し直後では密度は深さ方向にかなりばらついており、底部と上半部で値が低くなっている。しかし、転圧がすすむにつれて底部を除いて盛土内部が均質化し、密度が一様になっていく状況を示している。内部の密度上昇は表層（大型表面型RI密度計による値）と同じく初期転圧段階で大きく、回数が増えるにつれて次第に収束していく傾向は図-4.6の場合と全く同じである。N=8回転圧後には盛土内部の密度はほぼ上限密度に達したものと判断できるが、この状態でも下位層と接する最下部のおよそ20cm区間は上・中層に比べて0.1t/m³以上密度は低くなっている。しかし、この差が、まき出し厚さが大きすぎるために生じているのか、あるいは材料分離などの要因によるものかは明らかではない。

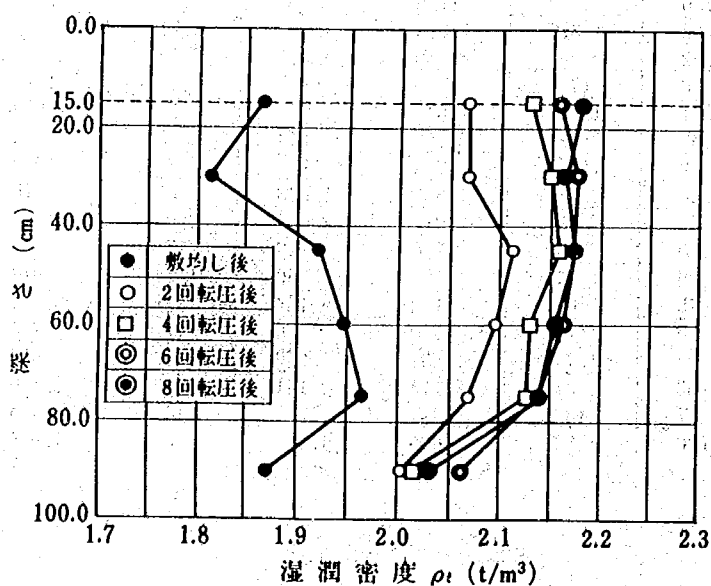
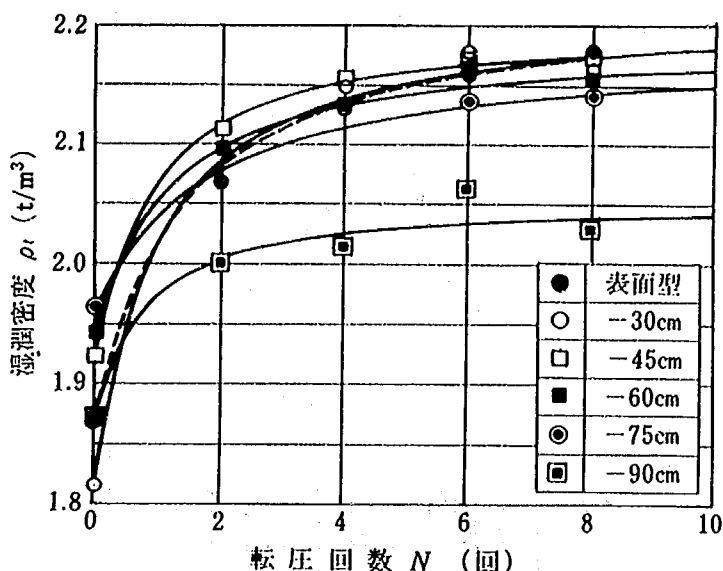


図-4.7 転圧回数と密度分布との関係 (H=100cmゾーン)

図－4.8は各深度における密度と転圧回数との関係を双曲線回帰式とともに示したものである。表－4.5に各々深さ方向の回帰定数、相関係数を示す。最も下層に位置する測点での値に少しばらつきがみられるが、その他の点では各々双曲線に沿って密度は滑らかに上昇しており、転圧の進捗に伴って初期密度の開きは次第に消滅していく状況が読み取れる。N＝8回転圧後には最低部を除いて盛土内の密度は0.05t/m<sup>3</sup>のばらつきの中におさまっている。



図－4.8 転圧回数と密度との関係 (H＝100cmゾーン)

表 4.5 双曲線近似式の実験定数 (導管フレーム型)

| 深さ   | a     | b     | 相関係数   |
|------|-------|-------|--------|
| 30cm | 2.385 | 2.484 | 0.9949 |
| 45   | 3.137 | 3.547 | 0.9991 |
| 60   | 5.124 | 4.044 | 0.9952 |
| 75   | 8.539 | 4.447 | 0.9913 |
| 90   | 4.253 | 5.465 | 0.9692 |

図－4.9に実験定数であるaまたはb値と深さとの関係を示す。深さ90cmの点を除くと、aの値は深さとともに大きくなっている。言い換えれば深くなるにつれて転圧の効率が悪いことを示している。そのひとつの要因として転圧エネルギーの逸散が考えられる。また、bの値は深い方がやや大きくなっている。

全層の平均密度の変化量を用いて逆推定した沈下率およびレベル測量による沈下率 (表－4.6) と転圧回数との関係を図－4.10に示す。H＝50cmのケース (図－4.5) と同様に双曲線回帰式のあてはめは概ね妥当であるが、密度増分から逆推定した沈下率とレベル測定による沈下率の間には差を生じた。この要因のひとつには、RI法による初期密度が深度方向にばらついているために、転圧前の平均密度がやや過小評価されたためと考えられる。

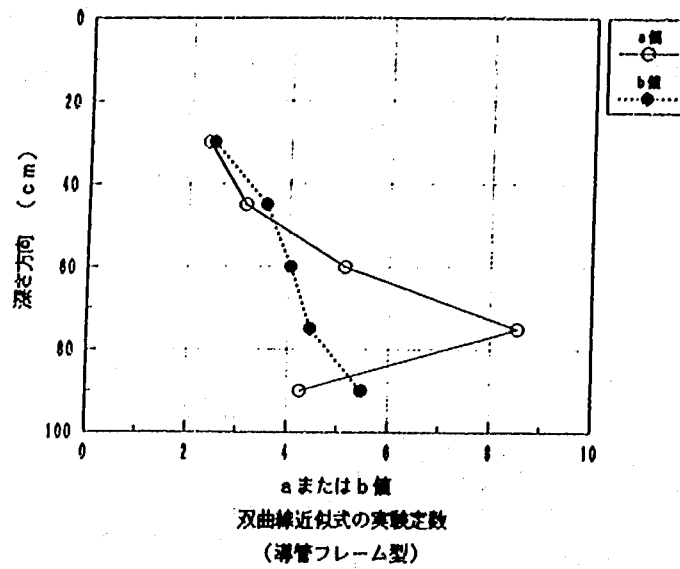


図-4.9 深さ方向と実験定数aとbの値

表-4.6 表面沈下量及び沈下率

H = 100cm

| 転圧回数<br>(回) | 転圧前<br>層厚<br>(cm) | 転圧後<br>層厚<br>(cm) | 沈下量<br>(cm) | 沈下率<br>(%) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------|------------|
| 0           | 112.0             | —                 | —           | —          |
| 2           | —                 | 106.0             | 6.0         | 5.4        |
| 4           | —                 | 104.0             | 8.0         | 7.1        |
| 6           | —                 | 104.0             | 8.0         | 7.1        |
| 8           | —                 | 103.0             | 9.0         | 8.0        |
| 12          | —                 | 101.0             | 11.0        | 9.8        |
| 16          | —                 | 100.0             | 12.0        | 10.7       |

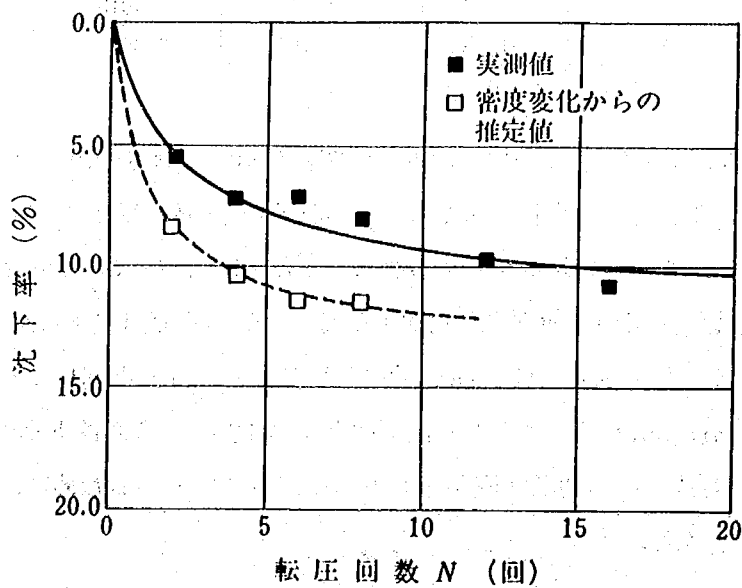


図-4.10 転圧回数と沈下率との関係 (H=100cmゾーン)

## 4.2 従来法による現場転圧試験

表4.7に各転圧ヤード毎に大型表面型RI密度計および水置換法による測定値を示す。

表-4.7(1) 大型表面型RI密度計による測定値

| 試験ヤード                 | 湿潤密度<br>$\rho_t$ ( $t/m^3$ ) | 含水比<br>$\omega$ (%) | 乾燥密度<br>$\rho_d$ ( $t/m^3$ ) |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| H = 50 cm<br>n = 4 回  | 2.170                        | 13.43               | 1.913                        |
|                       | 2.209                        | 12.02               | 1.972                        |
|                       | 2.093                        | 10.80               | 1.889                        |
|                       | 2.154                        | 10.12               | 1.956                        |
|                       | 2.175                        | 14.78               | 1.895                        |
|                       | 2.239                        | 11.39               | 2.010                        |
|                       | (2.173)                      | (12.09)             | (1.939)                      |
| H = 50 cm<br>n = 6 回  | 2.155                        | 13.30               | 1.902                        |
|                       | 2.364                        | 9.90                | 2.151                        |
|                       | 2.279                        | 10.63               | 2.060                        |
|                       | 2.228                        | 9.81                | 2.029                        |
|                       | 2.244                        | 8.88                | 2.061                        |
|                       | 2.257                        | 6.41                | 2.121                        |
|                       | (2.173)                      | (9.82)              | (1.939)                      |
| H = 50 cm<br>n = 8 回  | 2.232                        | 11.94               | 1.994                        |
|                       | 2.286                        | 11.40               | 2.052                        |
|                       | 2.268                        | 11.83               | 2.028                        |
|                       | 2.264                        | 11.09               | 2.038                        |
|                       | 2.315                        | 8.53                | 2.133                        |
|                       | 2.187                        | 11.07               | 1.969                        |
|                       | (2.259)                      | (10.98)             | (2.036)                      |
| H = 100 cm<br>n = 4 回 | 2.215                        | 11.42               | 1.988                        |
|                       | 2.209                        | 12.02               | 1.972                        |
|                       | 2.244                        | 8.25                | 2.073                        |
|                       | 2.218                        | 8.04                | 2.053                        |
|                       | 2.224                        | 12.44               | 1.978                        |
|                       | 2.181                        | 12.42               | 1.940                        |
|                       | (2.215)                      | (10.77)             | (2.001)                      |
| H = 100 cm<br>n = 6 回 | 2.168                        | 12.68               | 1.924                        |
|                       | 2.140                        | 12.90               | 1.984                        |
|                       | 2.204                        | 14.79               | 1.920                        |
|                       | 2.254                        | 14.18               | 1.974                        |
|                       | 2.235                        | 13.97               | 1.961                        |
|                       | 2.190                        | 11.85               | 1.958                        |
|                       | (2.215)                      | (13.40)             | (1.954)                      |
| H = 100 cm<br>n = 8 回 | 2.215                        | 11.47               | 1.987                        |
|                       | 2.303                        | 9.77                | 2.098                        |
|                       | 2.238                        | 12.58               | 1.988                        |
|                       | 2.275                        | 9.74                | 2.073                        |
|                       | 2.278                        | 11.78               | 2.038                        |
|                       | 2.202                        | 10.10               | 2.000                        |
|                       | (2.252)                      | (10.91)             | (2.031)                      |

(注) カッコ内は平均値を表す

表 4. 7(2) 水置換法による測定値

| 試験ヤード<br>呼び名 | 仕上がり<br>層厚<br>(m) | 転圧<br>回数<br>(回) | 測点 | 湿潤密度<br>$\rho_l$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 含水比<br>$\omega$<br>(%) | 乾燥密度<br>$\rho_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 63.0mm以<br>上の礫率<br>(%) | 備 考                        |
|--------------|-------------------|-----------------|----|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| 50-4         | 0.5               | 4               | ①  | 2.266                                    | 11.4                   | 2.034                                    | 38.5                   | Dmax=300mmが2個              |
|              |                   |                 | ②  | 2.404                                    | 12.0                   | 2.146                                    | 26.9                   | Dmax=400mmが1個              |
|              |                   |                 | ③  | 2.136                                    | 11.5                   | 1.916                                    | 34.7                   | Dmax=300mmが3個、大きい礫が多い      |
|              |                   |                 | 平均 | 2.269                                    | 11.5                   | 2.032                                    | 33.4                   | -                          |
| 50-6         | 0.5               | 6               | ①  | 2.262                                    | 10.3                   | 2.051                                    | 39.9                   | Dmax=200mmが5個              |
|              |                   |                 | ②  | 2.267                                    | 11.2                   | 2.039                                    | 32.5                   | Dmax=300mmが2個、大礫による孔壁の凹凸   |
|              |                   |                 | ③  | 2.290                                    | 10.9                   | 2.065                                    | 40.1                   | Dmax=400mmが1個、孔壁の凹凸比較的少ない  |
|              |                   |                 | 平均 | 2.273                                    | 10.8                   | 2.052                                    | 37.5                   | -                          |
| 50-8         | 0.5               | 8               | ①  | 2.323                                    | 10.2                   | 2.108                                    | 37.6                   | Dmax=300mmが3個              |
|              |                   |                 | ②  | 2.275                                    | 8.7                    | 2.093                                    | 43.5                   | Dmax=300mmが2個              |
|              |                   |                 | ③  | 2.187                                    | 9.5                    | 1.997                                    | 39.5                   | Dmax=300mmが2個              |
|              |                   |                 | 平均 | 2.262                                    | 9.5                    | 2.066                                    | 40.2                   | -                          |
| 100-4        | 1.0               | 4               | ①  | 2.205                                    | 9.4                    | 2.016                                    | 41.7                   | Dmax=400mmが2個、孔の下部緩い       |
|              |                   |                 | ②  | 2.142                                    | 9.5                    | 1.956                                    | 48.3                   | Dmax=400mmが1個、孔の下部緩い       |
|              |                   |                 | ③  | 2.194                                    | 9.5                    | 2.004                                    | 44.9                   | Dmax=400mmが2個、孔の下部緩い       |
|              |                   |                 | 平均 | 2.180                                    | 9.5                    | 1.992                                    | 45.0                   | -                          |
| 100-6        | 1.0               | 6               | ①  | 2.247                                    | 11.6                   | 2.013                                    | 34.9                   | Dmax=300mmが1個、孔壁の凹凸比較的少ない  |
|              |                   |                 | ②  | 2.214                                    | 10.8                   | 1.998                                    | 44.1                   | Dmax=400mmが1個、大礫による孔壁の凹凸   |
|              |                   |                 | ③  | 2.224                                    | 10.7                   | 2.009                                    | 38.3                   | Dmax=300mmが1個、大礫による孔壁の凹凸   |
|              |                   |                 | 平均 | 2.228                                    | 11.0                   | 2.007                                    | 39.1                   | -                          |
| 100-8        | 1.0               | 8               | ①  | 2.209                                    | 9.5                    | 2.017                                    | 53.2                   | Dmax=400mmが1個、孔壁の凹凸比較的少ない  |
|              |                   |                 | ②  | (2.060)                                  | (8.8)                  | (1.893)                                  | (57.7)                 | Dmax=400mmが1個、大礫多く、礫間に空隙あり |
|              |                   |                 | ③  | 2.224                                    | 10.3                   | 2.016                                    | 50.0                   | Dmax=400mmが2個、孔壁の凹凸比較的少ない  |
|              |                   |                 | 平均 | 2.217                                    | 9.9                    | 2.017                                    | 51.6                   | ②は大礫多く礫間に空隙があるため平均値より省いた   |

図-4. 11と図-4. 12は湿潤密度と転圧回数の関係である。図-4. 11はH=50cmのまき出し厚さ、図-4. 12はH=100cmのまき出し厚さの場合である。図中では、置換法と大型表面型RI密度計のデータを合わせてプロットしている。黒塗りのプロットはRI法および置換法の平均値である。

RI法および置換法ともH=100cmのヤードに比べ、H=50cmのヤードでは各ブロック内のばらつきが大きい。平均値でみるとN=6回と8回のブロックではRI法および置換法ともまき出し厚さによる差がほとんどないように見える。H=100cmのヤードは転圧回数と締固め密度との関係において、平均値でみるとRI法

では $N=8$ 回になると密度が大きくなるが、置換法では測定ヤードが異なることなどから小さくなるという不自然な傾向を示している。RI法において図-4.2と図-4.11を対比してみると $H=50\text{cm}$ ヤードの密度は予備試験の結果よりもやや小さくなっており $H=100\text{cm}$ ヤード（図-4.6と図-4.12）では逆に少し高めの値が得られている。その結果、図-4.11および図-4.12を比べると $N=8$ 回の場合にまき出し厚さによる密度の差がほとんど生じていない状態（ $H=50\text{cm}$ ,  $\rho_t=2.26\text{t/m}^3$ ,  $H=100\text{cm}$ ,  $\rho_t=2.25\text{t/m}^3$ ）となる。以上の結果から、本試験ヤードはブロック間およびブロック内（ $H=50\text{cm}$ ゾーン）で材料の粒度分布や含水比にばらつきがあったと推察され、このために転圧回数の効果やまき出し厚さの効果が、予備試験の場合ほど明確には現れなかったものと考えられる。

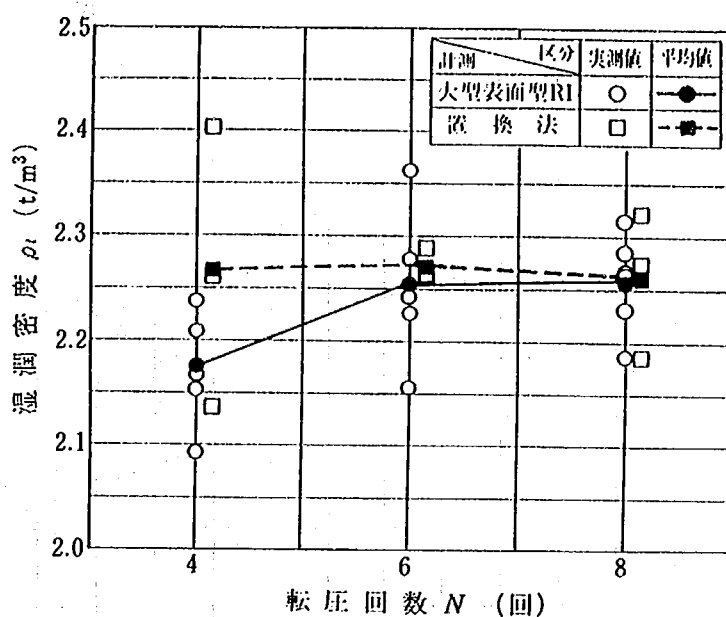


図4.11 転圧回数と湿潤密度との関係（本試験ヤード： $H=50\text{cm}$ ゾーン）

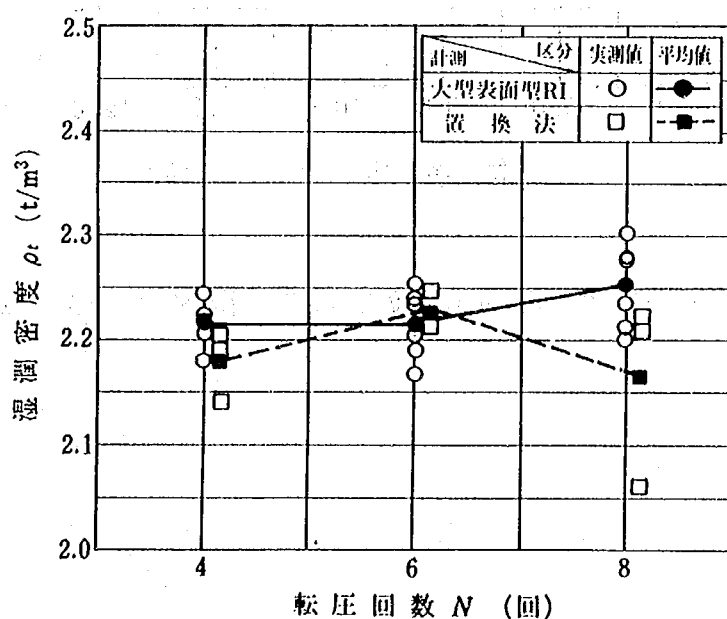


図-4.12 転圧回数と湿潤密度との関係（本試験ヤード： $H=100\text{cm}$ ゾーン）

図-4. 13に本試験ヤードで得られた全データを乾燥密度-含水比の関係として示す。ばらつきはあるが全般的な傾向として乾燥密度は主として施工含水比に影響されているようである。

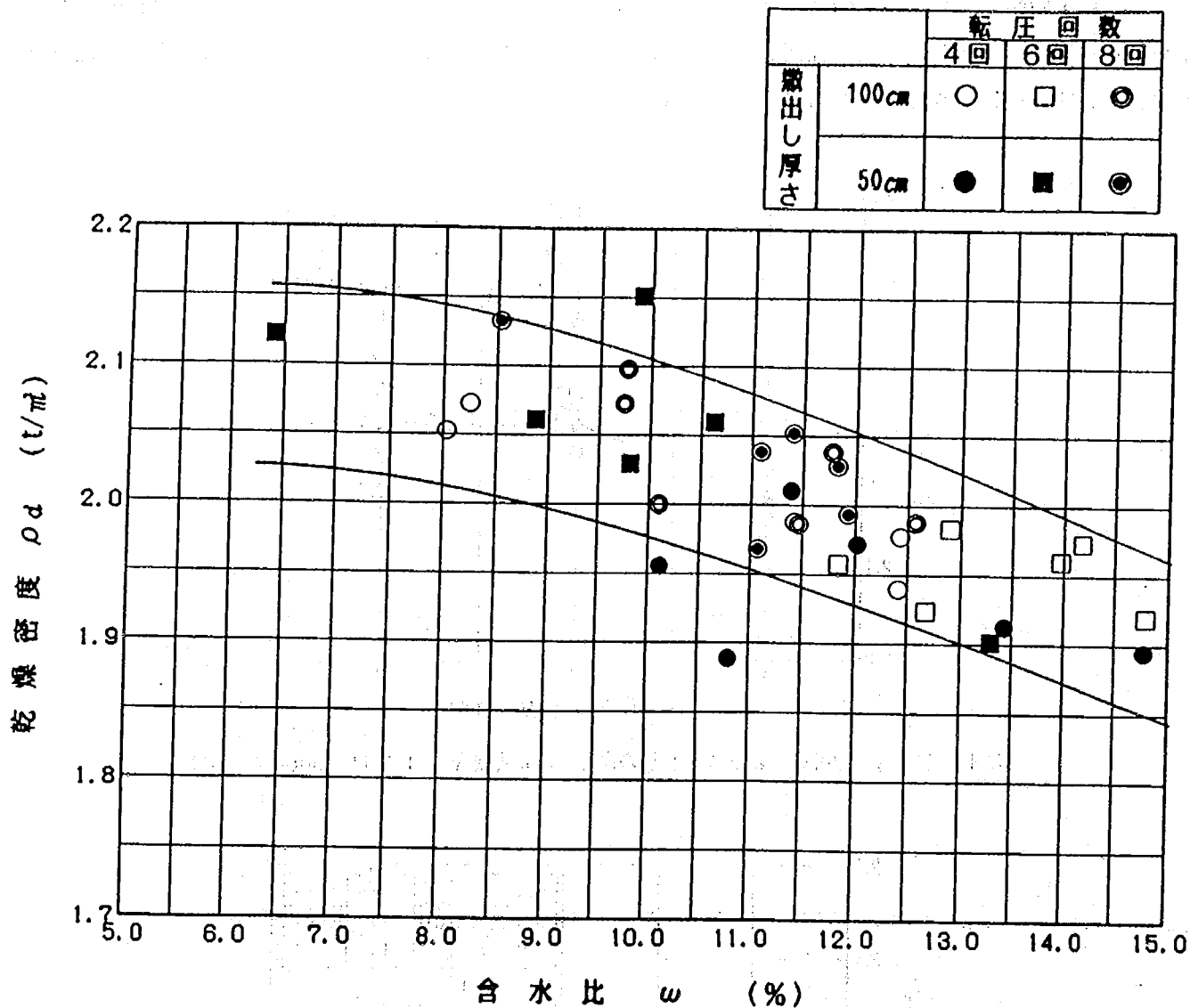


図-4. 13 含水比と乾燥密度との関係 (本試験ヤード全測点)

## 5. RIを用いた粗粒材料の現場転圧試験のまとめと今後の課題

### 5.1 転圧試験結果のまとめ

- ① 転圧回数と密度との関係は双曲線を用いてほぼ正確に近似することができる。今回の事例ではまき出し厚さ $H=50\text{cm}$ と $H=100\text{cm}$ の両ケースともに $N=8$ 回の転圧で締固め度はほぼ収束することが示された。また、双曲線回帰式から各転圧回数の締固め度と締固め効率などを判断することができる。
- ② フレーム型RI密度計と大型表面型RI密度計とを併用することによって、転圧層内部の締固め状況を詳細にとらえることができた。その結果、敷均し直後には深度方向に密度のばらつきがあっても転圧がすすむにつれて盛土内部は密度が次第に一様化し、まき出し層内において均質化していく状況がデータの的に明らかとなった。

なお、 $H=100\text{cm}$ ゾーンの場合、下位層に接する底部境界面近傍は上・中層部に比べて、明らかに密度が低いことが認められた。しかし、これが転圧エネルギーの分散によるものか、下層部の粒度分離によるものかは明らかでない。
- ③ 最終の $N=16$ 回転圧後の密度について、大型表面型RI密度計と水置換法を比較すると後者の方が高めであった。 $H=100\text{cm}$ ゾーンで両者の差が大きかったが、その差は $0.15\text{t/m}^3$ 程度であった。
- ④ 地表面沈下率と転圧回数との関係においても、双曲線近似が成り立つことが確認された。 $H=50\text{cm}$ ゾーンでは密度の変化と沈下率とがほぼ完全に整合しており、転圧時に側方流動による沈下は生じていないことがわかった。しかし、 $H=100\text{cm}$ ゾーンでは両者間に明らかな差異が認められ、1次元的な締固めモデルとは矛盾する結果となった。
- ⑤ 転圧回数の効果を確認する場合、今回の試験でもみられたように従来の試験ゾーンの構成では粒度や施工含水比のばらつきに伴う密度の違いと転圧に伴う密度変化とが交絡してしまうことが多いので好ましくない。むしろ、今回のRIゾーンでの試験のように繰返し測定が可能なRI法を適用して1つのゾーンで転圧の効果を調べるのが有効である。しかし、盛土材料にはばらつきがさけられないのでこのような試験は数ケースについて繰返しが必要である。

### 5.2 今後の課題

今回の転圧試験で取り上げられた粗粒材料は従来のロック材料に比べると細粒分がやや多い材料である。今後、この種の材料を透水ゾーンに活用する事例も増えてくるものと予想される。一般に、粒度分布が滑らかなほど締固めに伴う密度変化は大きくなるので、十分に締固めれば従来のロック材料と同じレベルのせん断強度や剛性を確保するのはそれほど困難ではない。このため粒子強度の劣る材料や均等係数がやや大きい透水性材料では堅硬なロック材料の場合よりも締固めの問題が重視されるようになると考えられる。すなわち、現場における密度を正確にとらえることが増々重要となる。

今回の事例は透水性材料の盛立試験にRI法を利用した一例であるが、フレーム型RI密度計による方法などは比較的新しい計測法であるため、今後このような手法を活用するときには、非破壊測定の利点を生かした試験ヤードの構成など盛立試験の方法に工夫をこらしながら経験を積んでいく必要がある。また、大

型置換法とRI法との関係についても盛立試験と設計において、これらをどのような位置づけのもとに使い分けるか等の基本的な課題が残されている。

## 6. 参考文献

- 1) 土質工学会：粗粒材料の現場締固め，第1章，pp. 1～54，1990
- 2) 松本徳久，渡辺和夫，岩石充弘，小川 優：粗粒材料の密度試験に関する実験的な研究，建設省土木研究所資料2233号，1985
- 3) 岩片 透：ラジオアイソトープを利用した密度測定方法（RI法）のフィルダム管理への適用性，土と基礎，pp. 63～69，1975
- 4) 例えば三室 高，鈴木他：粗粒材料に対するRI法の適用性，粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム，1990
- 5) 瀬古育二，大本家正，柏木 順，青木美樹：ロックフィルダムの粗粒材料の盛立て密度測定方法，土と基礎，1989
- 6) 土質工学会：粗粒材料の現場締固め，第3章，pp. 135，1990

粗粒材料の現場転圧試験

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第3195号  
平成5年3月 (1993)

中村 昭  
豊田 光雄

要旨： 本報告は、ロック材料の転圧試験において現状の転圧試験の課題を整理するとともに、置換法による密度測定代わりに、非破壊試験であることから同一箇所での繰り返し測定が可能で多点数のデータが容易に得られるRI法を用いて転圧試験を行った結果について述べたものである。

キーワード： RI密度計 現場密度 盛立試験 粗粒材料 フィルダム

○

郵便はがき

切手  
はって  
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム部フィルダム研究室 行

No. 063

No. 063

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第3195号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印