

新しい現地調査法

7. 施工管理と現場計測（その 2）

三 嶋 信 雄*

にし なか むら かず とし 利**

7.3 RI 計器による締固め管理

7.3.1 はじめに

盛土の転圧（締固め）を管理する方法として、従来は砂置換法やコアカッター法のような現場密度測定法が利用されてきた。しかし、これらの方法は結果を得るのにかなりの時間と労力を必要とし、一度に測定できる個数にも限度があるため現在のように施工機械が大型化され規模も大きくなった土工工事に対して適用しづらくなってきている。このため測定が容易で迅速に結果が得られる密度・含水量測定法が必要とされてきた。このような要求を満足する方法に RI（ラジオアイソトープ）を利用した密度計および水分計（RI 計器）がある。

RI 計器を用いた現場密度および含水比測定は、砂置換法やコアカッター法と比較して次の特徴を有している。

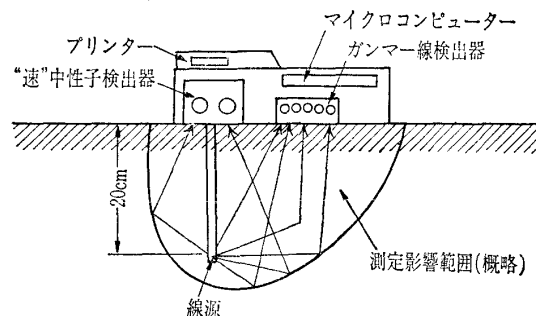
- ① 測定値に個人誤差が入らない。
- ② 1 分間の測定で結果がただちに得られる。
- ③ 非破壊測定である。
- ④ 大量盛土の場合に経済的である。

特に、近年 RI 計器の改良が進み、放射線源が小さく、取扱い便利な計器が実用化されてきたためフィルドムや空港盛土のように同質の土を大量に施工する工事では積極的に活用されるようになってきている。

ところで、従来の RI 計器は土が変わるごとに較正式を作成する必要がある、多くの種類の土を取り扱う道路盛土には用いられなかった。このように従来の RI 計器の欠点を克服すべく、最近日本道路公団によって新しく RI 計器の開発が行われた。この方法では従来とは異なり、土のバックグラウンド（自然放射線）や強熱減量値そして乾燥密度によって自動的に較正式を補正するもので、これにより土が多様に変わる道路盛土においても十分適用できるようになった。本節では、この新しく開発された RI 計器による現場密度・含水比の測定方法について述べる。

7.3.2 RI 計器

盛土の品質管理は、誰でも簡単にできる計器により、現場密度および含水比が測定することができれば非常に効率的である。



図一7.8 透過型 RI 計器の概略図

透過型 RI 計器は、その取扱いにおいて放射線防止法等の法的規制を受けない、100 マイクロキュリー以下の低レベル密封線源を有する測定器であり、密度計と水分計とが一つの計器に組み込まれたものである。

計器の構成は図一7.8 に示すように、土中 20cm に挿入される線源部と、放射線を検出する検出部および放射線の計数値から、密度や含水比を算出する演算部からなっている。さらに計器には、プリンターが装備されていて室内試験によって求めた基準値（最大乾燥密度、土粒子の比重）をインプットしておくことにより、盛土の品質管理に必要な情報（密度比、空気間隙率など）が測定と同時に印字される機能を有している。

7.3.3 測定の原理

1) 密度計

密度測定にはガンマー線（ ^{60}Co ）を用いた密度計を用いる。密度測定原理は、図一7.9 に示すガンマー線と物質との相互作用を利用するものである。すべての物質は種々の元素から構成されており、また元素は原子核と原子核の周りを回っている電子からなっている。ガンマー線と物質との間では、いろんな相互作用があり、重要な作用としては 3 種類ある。エネルギーの小さい順に光電効果、コンプトン効果、電子対生成と呼ばれている。

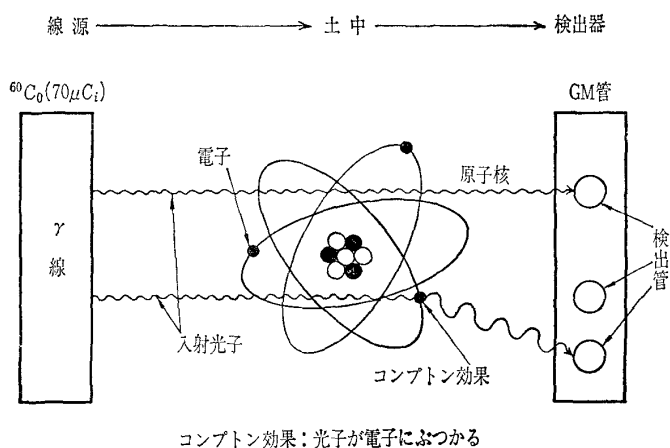
密度の測定に特に関係のあるのは、コンプトン効果で、エネルギーでは 1 MeV 付近で主要な相互作用になっている。他の効果も完全に無視することはできないが、密度計にだけ関して言えば、ガンマー線は電子としかかかわらないと考えたほうが簡単である。

土中で放射されたガンマー線は土を構成する種々の元素の電子とのコンプトン効果により、エネルギーの一部が失

*日本道路公団 山形工事事務所 工事長

**綿建設企画コンサルタント 常務取締役

講 座



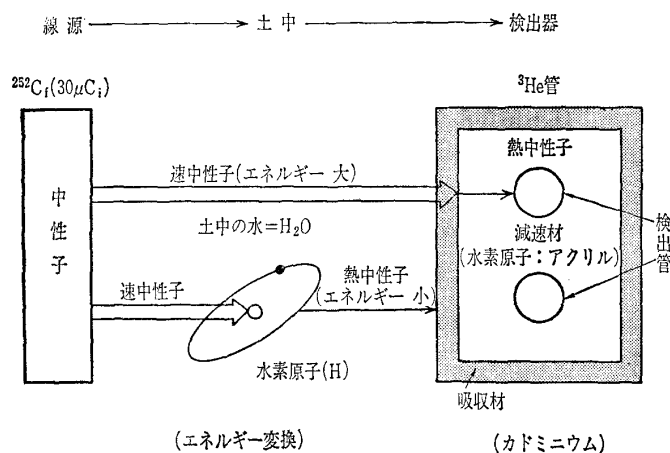
図—7.9 密度計測定原理の概略

われ、進行方向が変わる。これをコンプトン散乱という。何度もコンプトン散乱を繰り返すことによりエネルギーが減少して、光電効果によって、ついには全エネルギーを電子に与えて消滅する。相互作用の起こる確率は電子の数（土の密度）に比例する。図—7.9に示したように、地表面に配置された検出器に到達するガンマー線の数（計数率）を測定することにより、土の密度が推定できることになる。

2) 水分計

水分測定には、中性子(^{252}Cf)を用いた水分計を用いる。中性子はガンマー線と違って、物質を構成する元素の原子核との作用になる。

中性子がさまざまな原子核の集まっている物質の中に飛び込んでいったときは、その中に水素原子核が多く含まれているほど中性子は次々の衝突で急速に勢いを失ってふらふら動くようになる。このことをエネルギーの大きい速中性子が減速されて熱中性子になるという。したがって、速中性子がふらふらの熱中性子にされる割合を見ていると、物質中の水素原子核の密度を求めることができる。このままでは水素計と言うことになるが、幸いなことに、土中で



図—7.10 水分計測定原理の概略

の水素と言えばほとんど水の構成元素として含まれているので、水分の含有量を求めることができる。

水分量測定原理は、図—7.10に示すように、線源と検出器とにある土中の水素原子核以外の重い原子核と衝突を繰り返しながら透過してきた速中性子を検出するものである。

一方、土中に進入した速中性子はおもに水素原子核と衝突して、減速された熱中性子が存在する。この熱中性子は水分測定において、不必要であるため吸収材で遮断して検出器に入射させない構造になっている。

7.3.4 RI 計器の較正試験

RI 計器を用いて、土の密度や含水量を測定するためには、土の密度や水分量と、RI 計器が応答する計数率比の関係を求め、それぞれの較正定数を RI 計器の記憶回路に入力しておくなくてはならない。

従来、RI 計器の適用において問題とされていたのは、計器自体の機器安定性ととも、各種の土質材料ごとに較正曲線が異なっており、そのつど較正曲線を作成しなければならなかったことにある。

道路土工では、一つの現場において多種多様の土質を取り扱うことから、土質の変化にあわせて較正曲線を変えることが難しく、RI 計器の適用を困難にしていた。このため多くの土質に対し共通して適用可能な較正曲線を作成することによりこの問題の解決を図る必要がある。

ここでは、簡略化した較正試験を実施している日本道路公団の例を示す。

1) 供試体の作成と密度・水分量測定

RI 計器を単に特定の現場で使うだけでなく、より広く利用できるようにするには、一部のものに偏らず、できるだけ日本全体で出会う土を代表できるように、種々の土質を選ぶ必要がある。

全国の土による RI 計器の較正は、10 種類以上の土質から、100 点以上の供試体を作成し行っている。較正の方法は、選ばれた土に含水比調整を行い、次に、直径 60cm の円柱形の土槽内に、1 層が 8cm ずつで高さ 45cm になるまで、全体が一様になるよう締め固める（図—7.11参照）。

締め固められた土の湿潤密度は、用いた土の質量と仕上がり後の体積から計算する。水分量は、土槽内の 3 箇所より採取した試料を 24 時間炉乾燥させ求める。

RI 計器による密度・水分の測定は、土槽全体の平均密度水分量を得るため、図—7.11に示す 4 方向に線源位置（測定位置）を変え、各方向 5 回の繰返し測定を行い、これらの総平均を供試体測定値（計数率）とした。この計数率は、このまま使用するのではなく、供試体測定前に標準物質（標準体）を測定した値（標準体計数率）との比である計数率比を用いる。

RI 計器と従来から用いられている置換法による密度・水分量を比較検討するため、RI 計器による較正試験終了

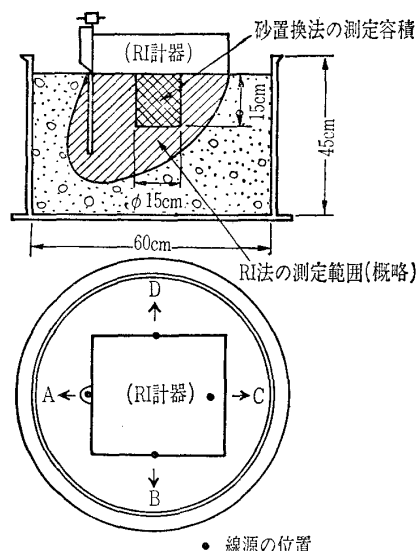


図-7.11 較正容器

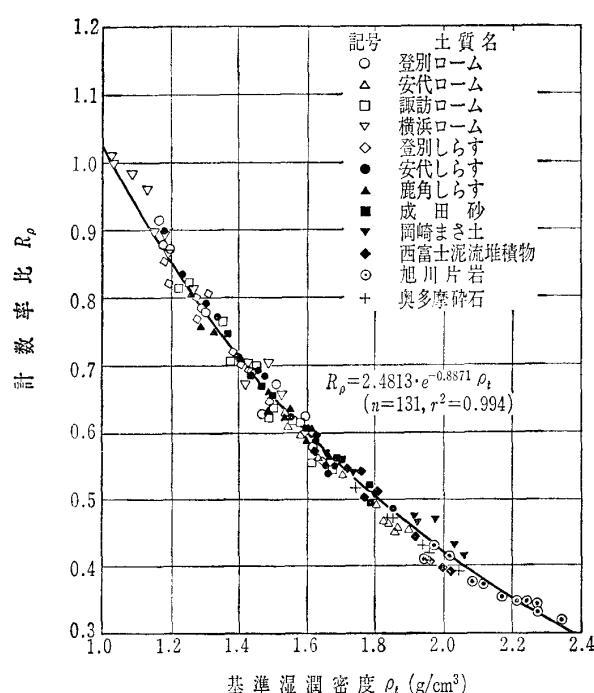


図-7.12 密度計較正試験結果

後の供試体を用いて、RI 計器が測定している領域の中心付近（図-7.11参照）を砂置換法により密度測定を行った。

2) 密度計の較正曲線

7.3.4 1) で求めた RI 計器の密度計計数率比と総質量法で求めた湿潤密度の関係を図-7.12に示す。透過型ガンマ線密度計の較正曲線は、一般に指数関数を用いて式(1)で表される。

$$R_\rho = A \cdot e^{-B\rho_t} \dots (1)$$

ここに、

R_ρ : 密度計計数率比

ρ_t : 湿潤密度 (g/cm³)

A, B : 較正定数

次にガンマ線バックグランド(BG)に関する補正につ

いて述べる。

自然界には、ガンマ線を放射している物質がかなり存在している。RI 計器の検出器にも常時入射しており、線源が装置されていなくてもいくらかの計数率を示す。この計数率を BG 計数率という。BG の影響は、常に一定であれば問題とならないが、地域によって異なることから、これらの補正を行うことが必要になってくる。BG の補正は、計数率比を式(2)によって求めることにより行うことができる。

$$R_\rho = \frac{\eta_\rho - \eta_{\rho BG}}{S_\rho - S_{\rho BG}} \dots (2)$$

ここに、

R_ρ : 密度計計数率比

η_ρ : 供試体計数率

$\eta_{\rho BG}$: 供試体 BG

S_ρ : 標準体計数率

$S_{\rho BG}$: 標準体 BG

なお、後述する水分計に関する BG 補正は自然界に中性子を放出する同位元素がほとんど存在しないことから必要としない。

3) 水分計の較正曲線

7.3.4 1) で求めた RI 計器の水分計計数率比と総質量法で求めた水分量の関係を図-7.13に示す。透過型中性子水分計の較正曲線は、密度計と同様、一般に指数関数を用いて式(3)で表される。

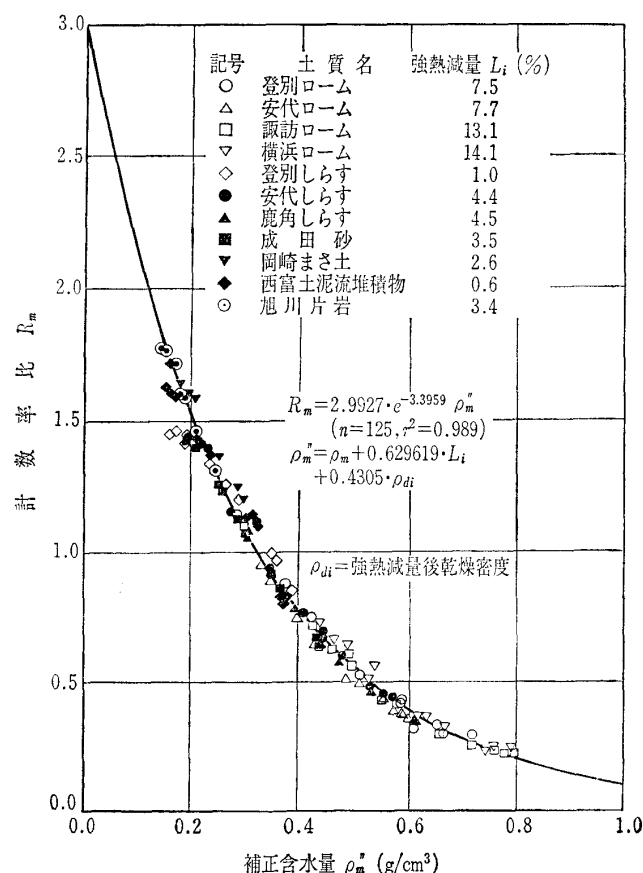


図-7.13 水分計較正試験結果

講 座

$$R_m = F \cdot e - G \rho_m \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

R_m : 水分計計数率

ρ_m : 水分密度 (g/cm³)

(土の単位体積あたりの含有水分の質量をい
い、土の水分密度を便宜上含水量と呼ぶこと
にする)

F, G : 校正定数

水分計は土中に含まれるすべての水分を測定することから、炉乾燥法で求められる含水量以外の水分量(結晶水や吸着水)に着目し、この結晶水や吸着水を強熱減量試験により求め、補正因子として加えた。強熱減量と乾燥密度を用いて、式(4)を得る事ができる。

$$R_m = F \cdot e - G \rho_m' \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

$$\rho_m' : \rho_m + H \cdot L_i + I \cdot \rho_{ai}$$

L_i : 強熱減量

ρ_{ai} : 強熱減量後の乾燥密度

H, I : 校正定数

4) 従来法(砂置換法)との比較

校正試験供試体を用いて、従来法と RI 計器による乾燥密度、含水比の関係について比較したものが図-7.14, 7.15である。この測定結果の整理方法は、RI 計器では、まず湿潤密度・含水量が、従来法では湿潤密度、含水比が求められ、次いでおのおの残り二つが算定されることになる。いずれの場合においても高い相関性を示していることが分かる。このように深さ方向ともに均一に締め固められた供試体では、測定容積の異なる RI 計器、従来法によって密度、含水量の測定を行っても、ほぼ等しい値を示し、RI 計器による密度測定は、従来法に代わる測定方法であるといえる。

5) 新しい RI 計器の校正方法

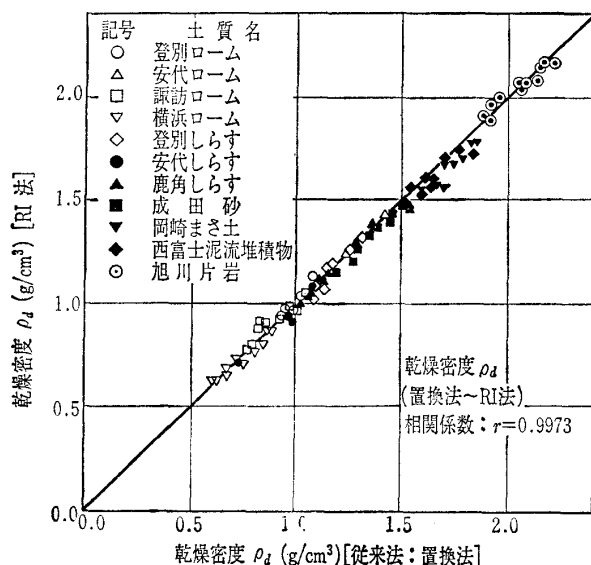


図-7.14 RI 法と従来法の相関(乾燥密度)

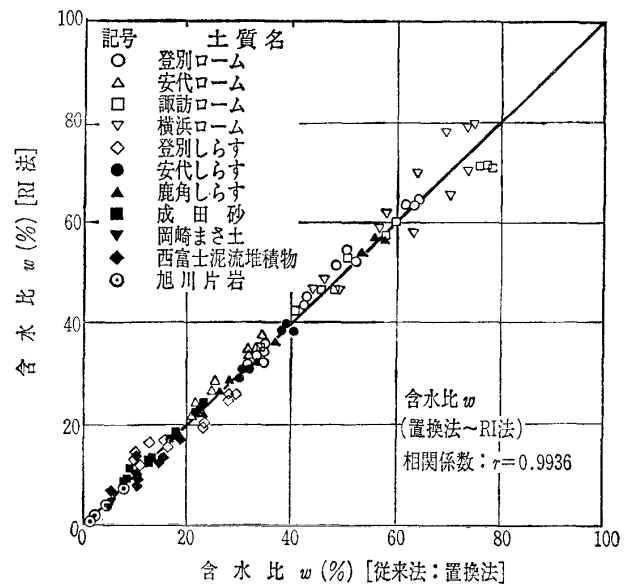


図-7.15 RI 法と従来法の相関(含水比)

RI 計器間には、同器種であっても相互に機械特性が異なる。7.3.4で求めた較正式は、校正試験に使用した RI 計器についての校正定数であり、他の RI 計器に適用することはできない。すなわち、他の RI 計器の較正式を得るためには、そのつど校正試験を行う必要があり、多大な労力と時間を要することになる。

RI 計器による密度・水分量測定原理は7.3.3で述べたように、物質の電子密度や水素原子濃度とそれぞれガンマ線、中性子との相互作用に対する応答特性を利用するものである。したがって、土質材料に限らず適当な密度範囲と水素原子の濃度を有する物質があれば、RI 計器の応答特性を評価することは可能である。

このような土質材料に代わる物質として、物理的・化学的に安定しているガラスとアクリルを用いて図-7.16に示

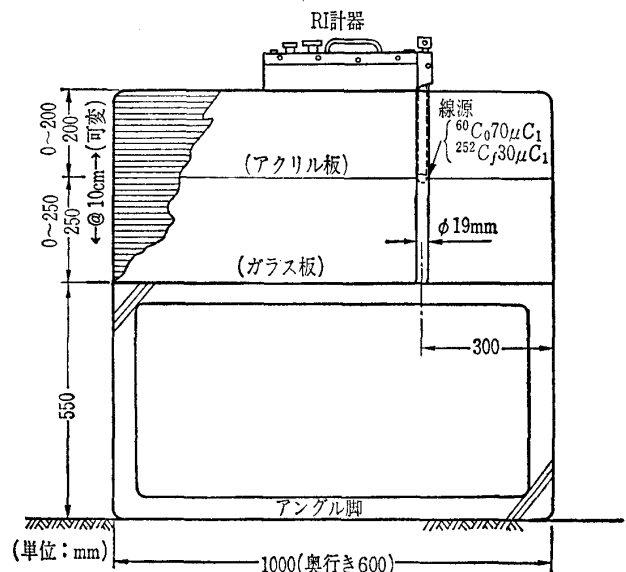
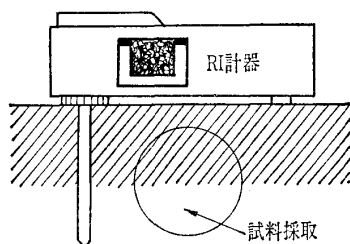


図-7.16 基準原器概要図

図-7.17 L_i 決定試験で用いる現場試料採取位置

す基準原器を設定した。

この基準原器を用いて、較正試験に用いた RI 計器でガラス板とアクリル板の枚数をかえた時のさまざまなケースについて測定し、その時の湿潤密度と含水量を求め、それぞれのケースの固有の値として与える。これで較正試験に用いた RI 計器の土質材料で求めた応答特性を、この基準原器に置き換えたことになる。

新しい RI 計器の較正はガラスとアクリルの組合わせに応じて決定されている密度・水分量に対応する応答を求める。これで較正式を土質材料で求めた RI 計器と同一条件の応答（密度・水分量）特性を評価した RI 計器となる。

6) 強熱減量 (L_i) の決定

L_i の値は、土質によって異なるので、現場使用土の種類に応じて求めておく必要がある。 L_i は、土を実際に強熱減量しなくても、RI 計器を使って盛土部で、次のように決めることができる。

㊸ 通常の「標準体測定」、「標準体 BG 測定」、「現場 BG 測定」、「測定地点の準備」を行い、その後、現場測定を行う。

㊹ RI 計器の強熱減量決定スイッチを押すと、 L_i と含水比の種々の組合わせの表が表示される。

㊺ RI 計器で測定した地点の真下の土を 1 kg 以上採り、炉乾燥で含水比を求める（図-7.17参照）。

㊻ ㊹で RI 計器が表示した L_i と含水比の組合わせの表の中から、炉乾燥での含水比に最も近い含水比を選び、そのときの L_i の値を読む。これが、その土質の最適 L_i となる。このようにして決定された L_i を RI 計器に設定したのち、実際の現場測定にはいる。

L_i の設定は、測定対象土の土質が変わらない限り、一度設定されれば再び行う必要はない。したがって、土質が同じであれば、一度決めた L_i の値はむやみに変更してはならない。

7.3.5 RI 計器を用いた品質管理の実態

1) 品質管理方法

従来の締固め管理においては、基準の締固め試験の最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) を基準とした

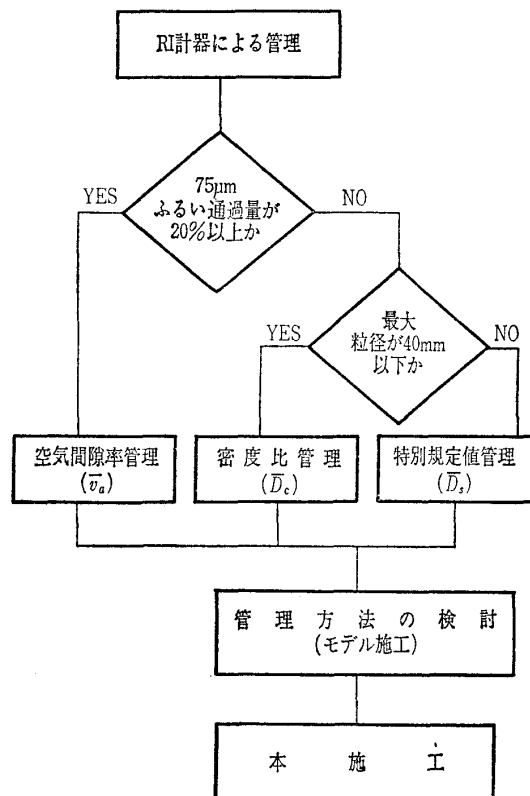


図-7.18 RI 計器の品質管理方法

締固め度 (D_c) により規定する方式が主体的である。その他締固め試験で最大乾燥密度を決め難い粘性土や自然含水比が高く規定された含水比に調整することが困難な土に対しては、空気間隙率 (v_a) や飽和度 (S_r) による管理が行われている。いずれの管理においても、現場の締固めは、室内で求めた基準値（締固め試験、土粒子の比重）の〇〇%以上という規定が設けられている。

RI 計器による締固めの管理においては、多数の点の測定により評価することを原則として、従来の〇〇%以上という管理規定を改め、測定した現場密度の平均値が所定の

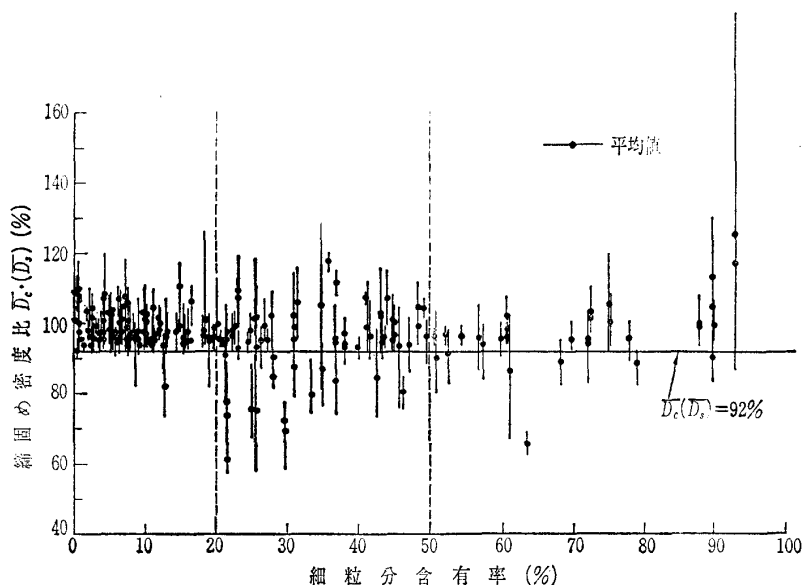


図-7.19 細粒分含有率と締固め密度比の関係

