

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第 3796 号

マイクロフィルム用資料

土 木 研 究 所 資 料

RI 計器による盛土の品質管理法に関する調査

平成 13 年 3 月

国土交通省土木研究所
材料施工部施工研究室

Copyright © (2001) 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。

建設省は、平成13年1月6日付けで国土交通省に再編

RI 計器による盛土の品質管理法に関する調査

施工研究室

室	長	大下武志	
室	長	塚田幸広*	
研	究	員	光橋尚司

要旨

盛土全体の品質の適切な評価や施工への迅速なフィードバックを図るため、全国の道路盛土と河川堤防の施工現場において散乱型 RI 計器及び透過型 RI 計器による品質管理を実施し、従来の品質管理手法との比較によりその適用性と問題点を検討した。その結果をもとに、RI 計器を盛土の品質管理に用いる場合の適用範囲とデータ採取個数、管理基準値などを定めた「RI 計器による盛土の締固め管理要領（案）」を作成した。

キーワード：盛土，品質管理，RI，砂置換法，炉乾燥法，乾燥密度，含水比，締固め度，管理要領

*現 東北地方建設整備局企画部

まえがき

道路盛土や河川堤防、構造物の裏込め土などの盛土の締固め管理は、締固めた後の盛土の品質管理を密度や空気間隙率、強度などで管理する品質規定方式と、転圧機械や転圧回数などの施工方法を規定することで管理する工法規定方式とがあり、我が国では品質規定方式が主に行われている。

従来の品質管理の試験方法は、密度においては砂や水を測定対象の盛土と置き換える置換法、含水量において炉乾燥法が一般的に用いられてきた。これらの試験法は現在広く適用されているが、測定結果を得るまでの時間に一昼夜を要するとともに、測定に多くの人手を必要とすることから容易に測定回数を増やすことが困難である。そのため、特に大規模な機械化施工においては盛土全体の品質の適切な評価や、施工へのフィードバックが困難となる課題がある。これらの課題を解決するために、放射性同位元素（ラジオアイソトープ：RI）を用いた RI 計器による面的な盛土品質管理が導入され、各事業体において RI 計器を用いた締固め管理が標準化されつつある。

RI 計器や測定方法の標準化に関しては、従来の学会基準が改訂され、地盤工学会基準（JGS1614-1995）「RI 計器による土の密度試験方法」が制定されるなど、本格的な導入に向けての環境も整備されてきた。一方、現在及び将来とも数多くの高規格堤防や大規模な道路盛土の事業が進行または計画されており、一般の河川土工や道路土工も含めて合理的な締固め管理手法の導入が必要とされている。

RI 計器による測定は、①試験結果がただちに得られる、②取り扱いが簡単で個人誤差の介入がほとんどない、③散乱型の場合は非破壊試験のため同一箇所を繰り返し測定できる、④多点測定により盛土を面的に評価することができる、などの特徴があり、盛土の品質管理試験を省人化できるとともに、今後増大する大型建設機械を用いた迅速な機械化施工に対応できることが期待できる。一方、RI 計器を盛土の品質管理に適用するにあたっては、①測定精度を明確にすること、②適用範囲を明確にすること、③盛土の品質を適切に評価するための測定頻度と評価方法を設定すること、が必要である。

本報告は、特定技術パイロット事業「散乱型 RI 計器を用いた盛土の品質管理技術」において建設省直轄工事の盛土の品質管理に散乱型 RI 計器及び透過型 RI 計器を適用した結果をもとに、RI 計器を盛土の品質管理に用いる場合の適用範囲とデータ採取数、管理基準値などを定めた「RI 計器による盛土の締固め管理要領（案）」を取りまとめたものである。

目 次

まえがき

1. 研究目的	1
2. RI 計器の概要	2
2.1 開発の経緯	2
2.2 測定原理	3
2.3 計器の種類	5
2.4 測定装置	7
2.5 測定手順	8
3. 現場試験の概要	9
3.1 RI 計器の実用化に向けた課題整理	9
3.2 現場実験の目的	10
3.3 試験現場の概要	10
3.4 試験方法	19
4. 現場試験の結果	30
4.1 盛土の乾燥密度及び含水比のばらつき	30
4.2 同一地点における測定性能の安定性	32
4.3 測定頻度	37
4.4 試験法間の相関関係	41
4.5 法肩付近の品質評価	54
4.6 RI 計器を用いた品質管理の作業性	56
5. RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領の作成	59
5.1 現行の締固め管理基準の整理	59
5.2 締固め管理指標	61
5.3 礫に対する RI 計器の適用範囲	61
5.4 管理単位の設定及びデータ採取	61
5.5 管理基準値	62
あとがき	63
参考文献	64

RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領（案）

付属資料

第1章 研究目的

盛土の品質管理の試験方法は、密度においては砂や水を測定対象の盛土と置き換える置換法、含水量において炉乾燥法が一般的に用いられてきたが、特に大規模な機械化施工においては盛土全体の品質の適切な評価や、施工へのフィードバックが困難となる課題がある。これらの課題を解決するために、放射性同位元素（ラジオアイソトープ：RI）を用いた RI 計器による面的な盛土品質管理が導入され、各事業体において RI 計器を用いた締固め管理が標準化されつつある。

RI 計器による測定は、①試験結果がただちに得られる、②取り扱いが簡単で個人誤差の介入がほとんどない、③散乱型の場合は非破壊試験のため同一箇所で繰り返し測定できる、④多点測定により盛土を面的に評価することができる、などの特徴があり、盛土の品質管理試験を省人化できるとともに、今後増大する大型建設機械を用いた迅速な機械化施工に対応できることが期待できる。一方、RI 計器を盛土の品質管理に適用するにあたっては、①測定精度を明確にすること、②適用範囲を明確にすること、③盛土の品質を適切に評価するための測定頻度と評価方法を設定すること、が必要である。

本研究はこのような背景のもと、建設省直轄工事の盛土の品質管理に散乱型 RI 計器と透過型 RI 計器を適用し、従来手法である砂置換法及び炉乾燥法との比較により、RI 計器を盛土の品質管理に用いる場合の適用範囲とデータ採取数、管理基準値などの検討を行うことを目的としている。

第2章 RI計器の概要

2.1 開発の経緯

RIの原理を利用して土の密度と土中の水分量を計測する技術は、1941年に基本原理が発表されて以来各国で盛んに研究開発が進められ、現在では実用化の域に達していると考えられる。日本国内においては表2-1に示す経緯で検討や基準策定が実施されてきた。

表2-1 RI計器開発の経緯

年	建設省	学会・他機関など
1941	土木研究所で実用化試験を開始。	B.Pontecorvo が初めて中性子水分計の原理を発表。 →以後米国で RI を利用した土の密度・含水量測定に関する計器の研究開発が行われてきた。
1957		
1963		(社) 日本建設機械化協会関西支部で密度計・水分計に関する講演会を開催。
1965		表面透過型密度計の普及を開始。
1974		土質工学会「土質管理とラジオアイソトープ」刊行。
1975		
1983		土質工学会基準「ラジオアイソトープ利用による土の密度・含水量の標準的な測定方法」(JSF T36-84) が制定。
1985		日本道路公団で RI 計器による土の密度・含水量測定方法を規格化。
1985 ～1988		
1986		日本道路公団で本線工事の盛土品質管理試験として本格的に導入。
1990	実現場において散乱型・透過型 RI 計器による計測を行い、測定値の相関性と現場での操作性を調査。	
1992	「RI 計器による締固め管理基準(案)(第1版)」を作成。	
1992	「管理基準(案)」を實現場で適用し、管理単位の面積や測点数、締固め管理基準値の妥当性を検討。	
1993	「管理基準(案)(第2版)」を作成し、各地建の施工現場で再度実施して妥当性を検討。	
1994	特定技術パイロット事業「散乱型 RI 計器を用いた盛土の品質管理技術」を実施。	
1995		地盤工学会基準「RI 計器による土の密度試験方法」(JGS 1614-1995) が制定。
1996	特定技術パイロット事業の結果をもとに、「RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領(案)」を作成。「品質管理基準及び規格値」に適用され、現場での適用を開始。	
1997		住宅都市整備公団で管理要領を作成し、本格的に導入。

2.2 測定原理

RI 計器は放射性同位元素 (Radio Isotope) の放射線源 (コバルト-60, カリフォルニウム-252) から放出される γ 線と中性子線が地盤を構成する原子との相互作用で変化する性質を利用している。地盤中を通過した γ 線には地盤の湿潤密度, 中性子線には地盤の含水量の情報が含まれるため, あらかじめ求めた校正式と自然放射線量などから換算して, 湿潤密度と含水量を物理量として求めることができる。

2.2.1 密度の測定原理

γ 線は, 物質中を通過する際に物質を構成する元素の軌道電子と相互作用を起こす。地盤の湿潤密度測定には, 地盤中に放出された γ 線が地盤中を通過する際に起こす相互作用を利用する。相互作用の主なパターンは次の 4 つである。

- ① トムソン散乱
- ② 光電効果
- ③ コンプトン散乱
- ④ 電子対生成

上記のうち, 湿潤密度の測定には主要な相互作用としてコンプトン散乱を示すエネルギー領域 (1MeV 付近) をもつ放射線源を選定する。コンプトン散乱は, γ 線が物質を構成する軌道電子にエネルギーの一部を与え, 自らは小さなエネルギーになって進行方向を変える現象である。

図 2-1 は, 2 つの元素 Al と Fe について γ 線エネルギー E_γ の減少の目安 (尺度) である質量吸収係数を示したものである。光電効果と電子対生成の質量吸収係数は元素により異なるが, コンプトン散乱の質量吸収係数はほぼ一致しており, コンプトン散乱が卓越する $E_\gamma = 0.3\text{MeV} \sim 2.0\text{MeV}$ の範囲では, コンプトン散乱・光電効果・電子対生成のそれぞれの効果を合計した“全断面積”の曲線とコンプトン散乱の曲線がほぼ一致していることが分かる。図 2-2 は, 他の主要元素についての質量吸収係数 (全断面) を示している。図 2-1 と同様に, $E_\gamma = 0.3 \sim 2.0\text{MeV}$ の範囲では水素原子を除けば質量吸収指数の差はごくわずかである。このことは, $0.3 \sim 2.0\text{MeV}$ の範囲のエネルギーをもつ γ 線は土の元素組成によらず同じ反応を示すことを表しており, γ 線による密度の測定はこの性質を利用している。

土中に放出された γ 線は, 土を構成する元素の電子とコンプトン散乱を繰り返すことによりエネルギーを失い, ついには光電効果によって全エネルギーを電子に与えて消滅する。コンプトン効果の起こる確率は途中で出会う軌道電子の数に比例する。土を構成している物質では陽子数と中性子数の比率がほぼ一定であることから, 単位体

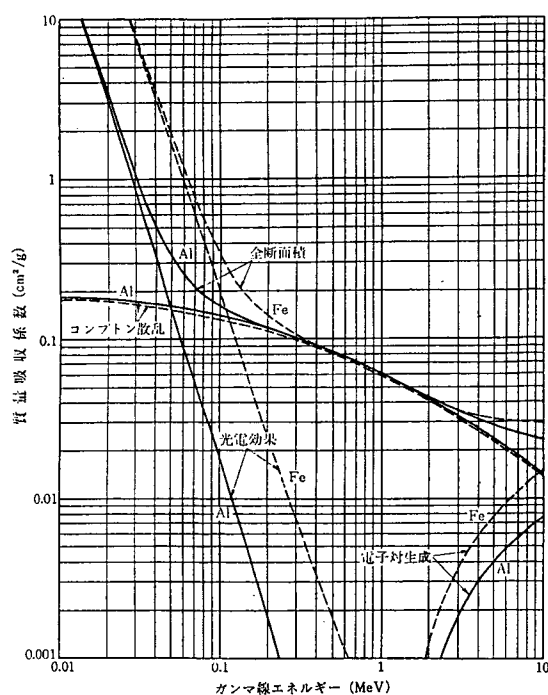


図 2-1 Al 及び Fe に対する γ 線の質量吸収係数¹⁾

積当たりの電子の数と物質の密度とは比例すると見なせるため、コンプトン散乱の起こる割合は、物質の密度が高くなると多くなる。

光電効果によって消滅しないで地中を抜けてきた γ 線は、地表面に γ 線検出器を設置して測定することができる。土の密度が高いと光電効果によって γ 線が吸収される割合が多くなるので、測定される計数率は少なくなる。このように土中で γ 線の散乱・吸収が起こるが、その経路は複雑で計算による推定は非現実的であるので、一般には供試体を多数作成し、それらを測定して得た校正曲線を利用する。

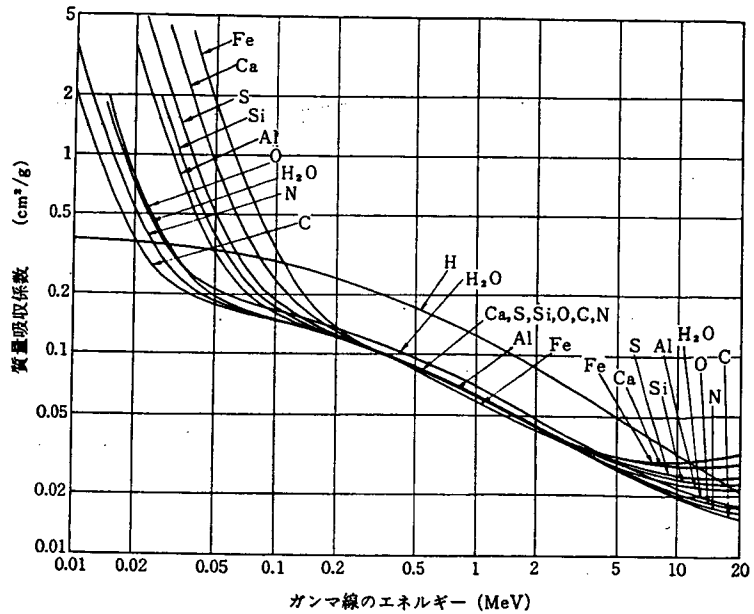


図 2-2 土の主要元素に対する γ 線の質量吸収係数¹⁾

2.2.2 水分量の測定原理

土中の水分密度測定には、中性子線と土中の水分との間に生じる相互作用を利用する。中性子と物質との相互作用の主なパターンは次の3つである。

- ① 弾性散乱
- ② 捕獲反応
- ③ 原子核分裂

中性子水分計は、中性子の弾性散乱の相互作用を利用し水分を測定する。中性子線は運動エネルギーをもった中性子で、中性子線源から放出される高速の中性子のエネルギー（運動エネルギー）は物質の原子核との衝突で失われる。この衝突で失われるエネルギーは、衝突する原子の核の重さが小さいほど大きい。特に、衝突する原子の核が中性子とほぼ同じ重量の陽子（水素の原子核）と衝突すると 100%に近いエネルギーを損失する。従って、土中に水素原子が多く含まれているほど衝突の繰り返して急激にエネルギーを失い、ついには熱中性子と呼ばれるエネルギーの低い中性子になる。土中に水素原子が多いと速中性子が熱中性子に変わる量が多くなるので、熱中性子ができる割合を測定すると水素原子の密度を推定することができる。土中の水素原子はほとんどが水の形で存在しているので、土中の水分密度を推定することができる。

測定に際しては、密度計と同様に供試体を多数作成し、校正曲線を求めて使用する。

2.3 計器の種類

RI 計器は、地中深部の密度と水分量を計測する挿入型 RI 計器と、地表面近くの密度と水分量を計測する表面型 RI 計器の 2 種類に分類できる。表面型 RI 計器には、RI の線源を地中に打ち込み、透過した放射線量を測定して密度や水分量を計測する透過型 RI 計器と、地表に線源を設置して地盤に放射線を入射し、地中から散乱してくる放射線量により密度や水分量を計測する散乱型 RI 計器の 2 種類が開発されている。透過型 RI 計器は標準型のほか、試験機自体には相違はないが校正曲線や強熱減量の影響の除去方法を変更した公団型（日本道路公団で使用）がある。また、散乱型 RI 計器は総合技術開発プロジェクト「建設技術へのエレクトロニクスの利用に関する研究」（昭和 58～62 年度）で開発した土木研究所型の試験機と一般型の試験機がある。

締固め層厚が 30cm までの盛土の品質管理に RI 計器を適用する場合、表面型 RI 計器のうち透過型の標準型と公団型及び散乱型の土研型が適用される。締固め層厚が 30cm を越える厚層締固めの場合は、挿入型が適用されることが多い。

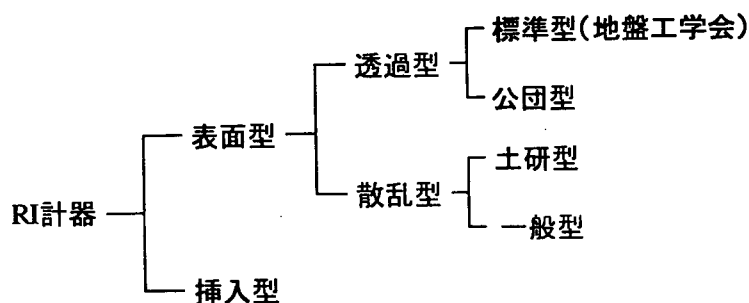


図 2-3 RI 計器の種類²⁾

2.3.1 透過型

透過型は、放射性同位元素を先端に封入した線源棒を地中に所定の深さまで挿入し、地表面に設置した検出器に入射する放射線の強度から土の密度と水分量を測定するものである。測定概念図を図 2-4 に示す。

水分量の測定では、地中に挿入された線源から放出する速中性子が熱中性子にならずエネルギーの高いまま地中を透過してきた中性子を検出する。しかし、検出管で反応するのは熱中性子のエネルギー

レベルであるので、エネルギーの高い中性子を捉えることはできない。そこで、検出器に入射した速中性子を熱中性子にまで減速する必要があることから検出管のまわりが水素原子を多く含む減速材で覆われている。検出管はこの熱中性子を計数するが、検出器としては速中性子を検出していることになる。一方、土中で生成した熱中性子は、熱中性子吸収材で遮断して検出器には入射しない構造になっている。

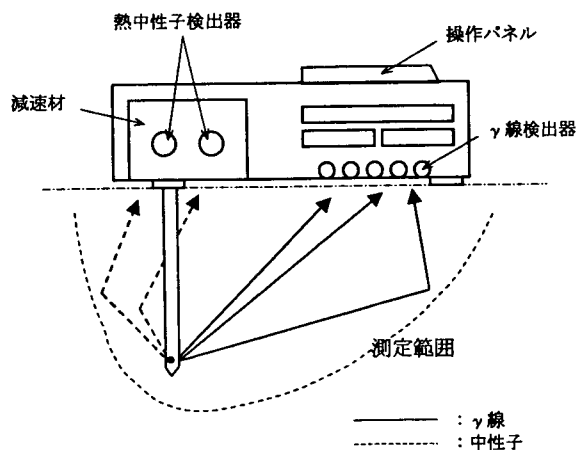


図 2-4 透過型の測定原理

2.3.2 散乱型

散乱型は、放射性同位元素を先端に封入した線源棒と検出器を計器に内蔵し、検出器に入射する放射線の強度から土の密度と水分量を測定するものである。基本的な構成は図 2-5 に示すように、線源、検出管、シールド鉛からなる。散乱型の基本的な測定原理は透過型 RI 計器と同じであるが、透過型が線源から放出された放射線のうち地盤の構成原子と相互作用しなかった放射線を検出するのに対し、散乱型は地盤の構成原子と相互作用した放射線を検

出する。そのため、線源から直接、検出管に入射する γ 線を遮断する必要があるため、線源と検出部との間にシールド鉛を配置する。水分計は、線源を計器内部に装備しているので、土中を透過してきた速中性子を検出するのではなく、土中で減速・散乱され、地表面に抜けてきた熱中性子を測定する。

散乱型は線源が地表面にあるために測定前の作業が測定面を平滑に整形するだけで済む利点がある。しかし、測定範囲（測定深度）が地表面付近の浅い部分に集中したり地表面と計器底面との空隙の影響を受けやすいなどの欠点から、これまで使用実績は多くなかった。その原因の一つとして、全エネルギーレベルの γ 線を検出する従来の計器では、地表の浅い部分で散乱してくる比較的エネルギーの高い γ 線に測定結果が影響されることが考えられる。土研型は、散乱されてくる特定のエネルギーレベルの γ 線のみを選定して検出する改良を施し³⁾、これによりある程度深いところ（地表から 15~20cm）の密度を計測できるようになっている。

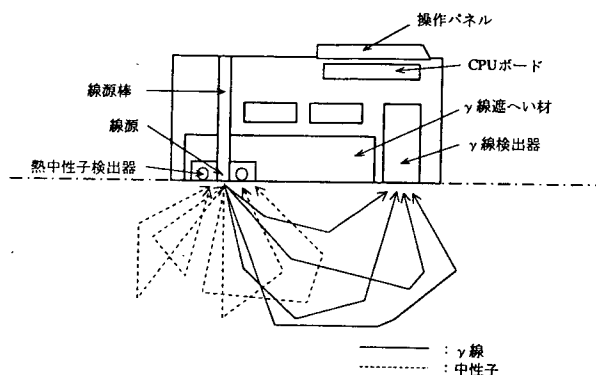


図 2-5 散乱型の測定原理

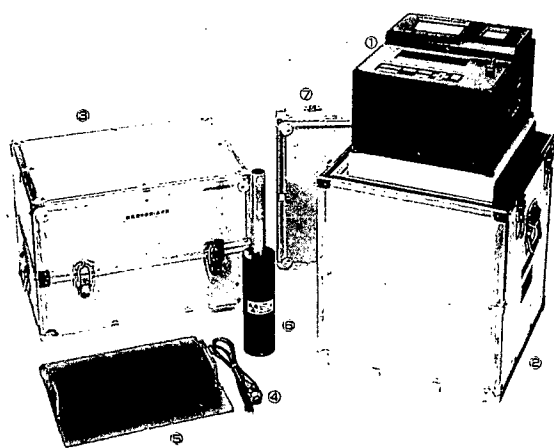
2.4 測定装置

現在市販されている主な RI 計器の仕様例を表 2-2 に示す。

表 2-2 RI 計器の仕様例

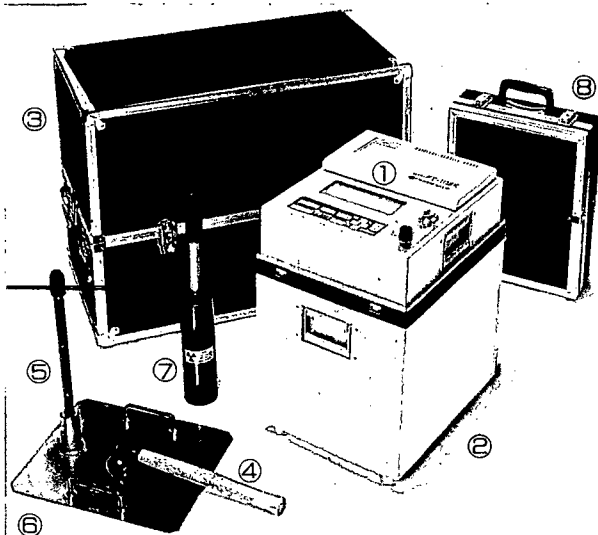
販売会社	A 社	B 社	C 社
測定方法	密度： γ 線散乱型 水分：熱中性子散乱型	密度： γ 線透過型 水分：速中性子線透過型	密度： γ 線透過型 水分：速中性子線透過型
測定範囲	湿潤密度：0.80～3.50 t/m ³ 含水量：0.05～0.90 t/m ³	湿潤密度：0.80～2.8 t/m ³ 含水量：0.05～1.0 t/m ³	湿潤密度：0.80～2.8 t/m ³ 含水量：0～1.0 t/m ³
線源	γ 線：Co60, 70 μ Ci 熱中性子：Cf252, 30 μ Ci	γ 線：Co60, 70 μ Ci 速中性子：Cf252, 30 μ Ci	γ 線：Co60, 2.6 ｶｷﾞﾍﾞｸﾚﾙ 速中性子：Cf252, 1.1 ｶｷﾞﾍﾞｸﾚﾙ
検出器	γ 線：シンチレーションカウンタ ー×1 熱中性子： ³ He 計数管×2	γ 線：GM 管/5 本 中性子線：中性子管/2 本	γ 線：GM 計数管 中性子線： ³ He 比例計数管
測定深さ	表面から 15～20cm	20cm	20cm
測定時間	60s (現場, 現場 BG) 300s (標準体, 標準体 BG)	60s (現場) 600s (標準体)	60s (現場) 600s (標準体)
使用温度	-10～50℃	0～50℃	0～50℃
計器重量	27.5kg	11kg	10.5kg

計器の構成は、散乱型 RI 計器は図 2-6 に示すように RI 計器本体、標準体、ベースプレートで構成される。透過型 RI 計器は、図 2-7 に示すように RI 計器本体、線源棒、標準体、線源筒、ハンマー、打ち込み棒、ベースプレートで構成される。



①計器本体 ②標準体 (線源棒保管容器兼用) ③計器本体収納箱
④充電ケーブル ⑤ベースプレート ⑥線源筒 ⑦付属品収納箱

図 2-6 散乱型の構成例



①本体 ②標準体 ③収納箱 ④鉄ハンマー
⑤打ち込み棒 ⑥ベースプレート ⑦線源筒 ⑧付属品収納箱

図 2-7 透過型の構成例

2.5 測定手順

RI 計器の一般的な測定手順を図 2-8 に示す。

(1) 計器の準備, ウォーミングアップ

線源棒を RI 計器本体に取り付け, 電源を入れる。

(2) 標準体測定

放射線源の時間的な減衰を補正するために標準体測定を実施する。計器本体を標準体上に設置する。標準体の周囲 1.5m 以内には壁や器物などの障害物がないようにし, γ 線標準体計数率と中性子標準計数率を記録する。

(3) 標準体 BG (バックグラウンド) 測定

BG (バックグラウンド) とは, 自然界に存在する放射線 (宇宙線や大地からの放射線) のことである。標準体 BG 測定は, この自然放射線の影響を除くために実施する。

まず, RI 計器から線源棒を取り外し, 線源棒を計器本体から 20m 以上遠ざける。次に γ 線標準体計数率と中性子標準計数率を記録する。

(4) 現場 BG (バックグラウンド) 測定

現場 BG 測定は, 地盤に含まれる自然放射線の影響を除くために実施する。

まず, RI 計器から線源棒を取り外し, 線源棒を計器本体から 20m 以上遠ざける。次に, γ 線標準体計数率と中性子標準計数率を記録する。RI 水分計では, 土中の結晶水も水分量として計測するため, 炉乾燥法よりも含水量が大きな値をとることが多い (図 2-9 参照)。そこで, 特に粘性土や有機質土を計測する場合は, 強熱減量をあらかじめ計測しておく。

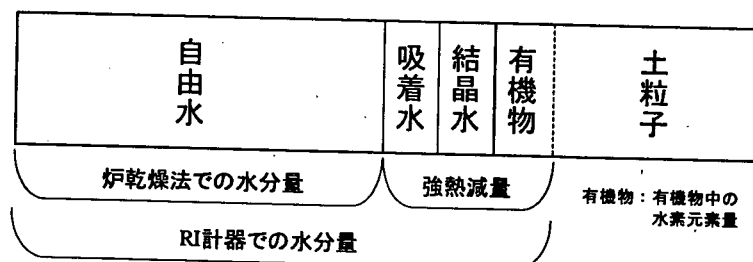


図 2-9 RI 計器と炉乾燥法の水分計測の関係

(5) 測定地点の準備

計器の接地面はできる限り平滑に仕上げ, 周辺にもものをおかないようにする。

(6) 測定の実施

透過型 RI 計器の場合は線源棒を計器本体に取り付けて測定する。散乱型 RI 計器の場合は, 計器本体をそのまま設置して測定する。

(7) 計器の充電と保管

測定が終了したら計器を充電し, 保管する。

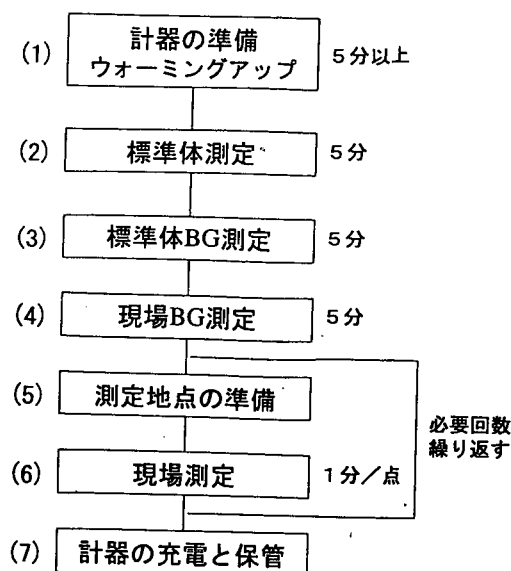


図 2-8 RI 計器の一般的な測定手順

第3章 現場試験の概要

3.1 RI計器の実用化に向けた課題整理

RI計器を盛土の品質管理に適用するにあたり、以下に挙げる課題を明らかにする必要がある。

(1) 盛土の乾燥密度及び含水比のばらつき

RI計器は測定結果がただちに得られるため、測定個所を砂置換法に比べて多くすることによって、盛土の品質を面的に評価することができる可能性がある。品質評価では、数多く得られる測定結果を統計的に処理して客観的に評価することが望ましいといえる。そこで、盛土材の乾燥密度と含水比のばらつき具合を明らかにする必要がある。

(2) 同一地点における測定性能の安定性

RI計器は、理想的な状態では測定値のばらつきが非常に小さく、計器自体の信頼性は十分高いことが、過去の実験において標準体上で繰り返し計測した結果から明らかになっている²⁾。しかし、現場では、盛土材の土質やばらつきの影響を受けるほか、散乱型RI計器については礫質土における計器の接地面の平滑性、透過型RI計器については孔壁と線源棒との空隙の大きさも測定の誤差に大きな影響を及ぼすので、これらの影響を定量的に明らかにする必要がある。

(3) 測定頻度

測定頻度は、砂置換法による建設省の品質管理基準では測定頻度が500m³に1回（但し500m³未満の工事は1工事当たり3回以上）と設定されている。RI計器は測定個所を砂置換法に比べて多くすることができるが、実際の施工管理では測定費用と測定時間の制限があり、有限個の標本数にとどめざるを得ない。そこで、盛土の品質を適切に評価するための最適な測定頻度を設定する必要がある。

(4) 試験法間の相関関係

RI計器の現場への導入は、従来の品質管理手法である砂置換法及び炉乾燥法の測定値と散乱型及び透過型RI計器の測定値の相関関係が高いことが前提となる。また、土質や施工条件によって相関性が異なることも考えられるため、RI計器に適した土質を明らかにすることが望ましい。

(5) 法肩付近の品質評価

法肩や構造物付近は締固め機械の搬入が困難なので締固めが不十分となることが多い。これらの施工範囲は狭いことが多いため、現行の品質管理方法では反映されてこなかった。RI計器による多頻度の測定では、法肩及び構造物付近の品質管理も可能であると考えられ、その場合の品質評価方法を別途確立する必要がある。

(6) RI計器を用いた品質管理の作業性

RI 計器を用いて盛土を面的に管理するためには、測定頻度が高くなるので従来の施工管理方法とはかなり異なったものとなる。そこで、実務担当者へのアンケート調査により RI 計器を用いた施工管理の作業性を把握する必要がある。

3.2 現場実験の目的

前節の課題をもとに、平成元年度から 7 年度にわたり全国の道路盛土及び河川堤防の施工現場で実験を実施した。実験で確認する項目を以下に示す。

- (1) 盛土の乾燥密度及び含水比のばらつき
- (2) 同一地点における測定性能の安定性
- (3) 測定頻度
- (4) 試験法間の相関関係
- (5) 法肩付近の品質評価
- (6) RI 計器を用いた品質管理の作業性

3.3 試験現場の概要

試験は、95 箇所（層によって土質が異なる場合は、土質毎に 1 箇所と数えた。実際は 84 現場。）、362 管理単位（盛土を管理する単位）で実施した。調査対象盛土の諸元を表 3-1～3-4 に示す。

表 3-1 調査対象盛土の諸元 (1)

番号	日本統一 土質分類	土質名	土粒子 の比重 Gs	最大 乾燥密度 (t/m ³)	最適 含水比 (%)	2mm以上(礫) (%)	75 μ m以下 (%)	最大粒径 (mm)	転圧機械	規格	転圧 回数	管理 単位 数	盛土種類	砂置換	散乱型 RI	透過型 RI
1	GW	粒度のよい礫	2.663	2.128	7.2	72.9	2.8	—	ブルドーザ	15t	7	3	河川堤防	○	○	○
2	GW	粒度のよい礫	2.645	2.100	8.1	74.1	2.0	75.0	振動ローラ	—	—	8	河川堤防	○		○
3	GP	粒度のわるい礫	2.670	2.025	9.2	80.2	4.4	75.0	タイヤローラ	8~20t	5	3	道路盛土路床	○	○	○
4	GP	粒度のわるい礫	2.712	2.224	6.6	87.7	2.9	75.0	タイヤローラ	8~20t	7	3	道路盛土路床	○	○	○
5	GP _s	粒度のわるい礫	2.740	2.046	10.3	63.5	4.1	53.0	タイヤローラ	14t	5	2	河川堤防	○	○	○
6	G-F	細粒分まじり礫	2.706	2.056	8.1	82.4	7.0	75.0	タイヤローラ	11t	10	1	道路盛土路体	○		○
7	G-F	細粒分まじり礫	2.639	2.178	7.4	61.3	12.3	26.5	タイヤローラ	8~16t	5	3	道路盛土路床	○	○	○
8	G-F	細粒分まじり礫	—	1.286	19.2	—	—	—	タイヤローラ	—	—	9	道路盛土路床	○	○	
9	G-F	細粒分まじり礫	2.386	1.286	19.2	52.2	14.6	75.0	タイヤローラ	—	—	4	道路盛土路床	○	○	
10	G-F	細粒分まじり礫	2.386	1.493	5.4	52.2	14.6	75.0	タイヤローラ	—	—	5	道路盛土路床	○	○	
11	G-F	細粒分まじり礫	2.661	1.956	11.4	58.6	13.8	53.0	タイヤローラ	—	—	34	河川堤防	○	○	
12	G-F	細粒分まじり礫	2.620	1.748	17.2	66.4	5.1	25.4	タイヤローラ	—	—	19	河川堤防	○	○	
13	G-F	細粒分まじり礫	2.680	2.174	6.5	58.3	12.3	—	タイヤローラ	—	—	9	河川堤防	○	○	
14	G-M	シルトまじり礫	2.639	2.178	7.4	61.3	12.3	26.5	タイヤローラ	8~20t	4	14	道路盛土路床	○	○	
15	G-M	シルトまじり礫	2.648	1.592	22.2	52.0	11.0	76.2	ブルドーザ	—	8	3	道路盛土	○	○	○
16	G-M	シルトまじり礫	2.654	2.010	10.0	53.5	13.3	53.0	タイヤローラ	—	4	3	河川堤防	○	○	○
17	G-M	シルトまじり礫	2.680	2.174	6.5	58.3	12.3	53.0	タイヤローラ	—	—	2	河川堤防	○	○	
18	G-C	粘土まじり礫	2.677	2.077	7.8	61.8	12.5	53.0	ブルドーザ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
19	G-C	粘土まじり礫	2.755	1.903	14.3	81.9	12.9	80.0	ブルドーザ	27t	4	3	道路盛土路体	○	○	○
20	G-C	粘土まじり礫	2.750	2.229	5.4	60.0	8.0	53.0	タイヤローラ	—	—	3	河川堤防	○	○	
21	GF	礫質土	2.678	1.860	13.6	47.5	20.3	53.0	ブルドーザ	21t	4	1	道路盛土路体	○	○	
22	GF	礫質土	2.747	1.913	9.1	41.6	19.2	53.0	ブルドーザ	21t	4	2	道路盛土路体	○	○	
23	GF	礫質土		1.518	21.4	79.0	21.0	—	—	—	—	1	河川堤防	○		○
24	GM	シルト質礫	2.856	1.635	18.6	67.4	20.6	75.0	乾地ブルドーザ	27t	4	10	道路盛土路体	○	○	
25	GM	シルト質礫	2.856	1.635	18.6	67.4	20.6	75.0	タイヤローラ+ブルドーザ	27t	4	2	道路盛土路床	○	○	
26	GM	シルト質礫	2.681	1.995	9.2	61.3	17.6	53.0	タイヤローラ	8t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
27	GM	シルト質礫	2.685	2.078	7.2	54.1	16.9	37.5	タイヤローラ	8t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
28	GM	シルト質礫	2.747	2.045	8.4	68.0	14.0	—	—	—	—	3	道路盛土	○	○	○
29	GM	シルト質礫	2.689	2.100	8.5	41.0	18.8	63.5	ブルドーザ	16t	5	3	河川堤防	○	○	○
30	GM _s	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	

表 3-2 調査対象盛土の諸元 (2)

番号	日本統一 土質分類	土質名	土粒子 の比重 Gs	最大 乾燥密度 (t/m ³)	最適 含水比 (%)	2mm以上(礫) (%)	75 μ m以下 (%)	最大粒径 (mm)	転圧機械	規格	転圧 回数	管理 単位 数	盛土種類	砂置換	散乱型 RI	透過型 RI
31	GMs	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	
32	GMs	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	
33	GMs	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	
34	GMs	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	
35	GMs	シルト質砂礫	2.697	1.603	20.2	46.0	21.1	46.0	乾地ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	
36	GC	粘土質礫	2.702	1.986	9.5	66.1	13.8	53.0	ブルドーザ	14t	5	21	道路盛土路床	○	○	
37	GC	粘土質礫	2.752	1.806	16.7	65.0	15.0	50.8	タイヤローラ	12.85t	8	3	道路盛土	○	○	○
38	GC	粘土質礫	2.703	2.076	7.9	66.7	13.0	26.5	タイヤローラ	8~20t	6	3	河川堤防	○	○	○
39	Sg	まさ土	2.712	1.941	10.8	37.6	4.0	9.5	タイヤローラ	11t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
40	Sg	まさ土	2.712	1.852	13.4	33.0	7.0	9.5	タイヤローラ	11t	5	3	河川堤防	○	○	○
41	SP	粒度のわるい砂	2.657	1.532	20.2	0.0	3.1	0.8	ブルドーザ	21t	5	4	道路盛土路体	○	○	○
42	SP	粒度のわるい砂	2.670	1.834	13.5	26.7	4.7	38.1	ブルドーザ	—	—	3	河川堤防	○	○	○
43	S-F	細粒分まじり砂	2.616	1.856	11.3	33.1	12.6	19.0	タイヤローラ	—	—	20	道路盛土路体	○	○	
44	S-F	細粒分まじり砂	2.628	1.949	9.4	44.1	7.0	53.0	タイヤローラ	—	—	3	河川堤防	○	○	
45	S-F	細粒分まじり砂	2.628	1.949	9.4	44.1	7.0	53.0	振動ローラ	—	—	1	河川堤防	○	○	
46	S-F	細粒分まじり砂	2.642	1.958	9.2	43.2	7.6	75.0	タイヤローラ	—	—	3	河川堤防	○	○	
47	Fg	細粒土	2.680	1.690	12.6	22.7	51.1	37.5	タイヤローラ	11t	10	2	道路盛土路体	○	○	○
48	Fg	礫まじり細粒土	2.751	1.818	14.3	33.0	52.5	53.0	タイヤローラ	15t	5	3	河川堤防	○	○	○
49	S-M	シルトまじり砂	2.644	1.896	13.1	24.1	13.8	9.5	振動ローラ	—	—	1	河川堤防	○	○	
50	SF	まさ土	2.666	1.778	16.1	11.0	28.0	9.5	振動ローラ	起振力 23.7t	6	3	道路盛土路体	○	○	○
51	SF	砂質土	2.689	1.818	14.5	0.8	18.1	9.5	ブルドーザ	16t	5	2	河川堤防	○	○	○
52	SF	砂質土	2.672	1.977	10.0	29.1	15.6	100.0	タイヤローラ	12.8t	8	3	河川堤防	○	○	○
53	SF	砂質土	2.557	1.528	18.0	20.9	25.5	38.1	タイヤローラ	—	—	3	河川堤防	○	○	○
54	SF	砂質土(しらす)	2.490	1.345	27.5	0.5	28.9	4.8	ブルドーザ	—	—	3	河川堤防	○	○	○
55	SFg	しらす	2.417	1.358	24.6	13.0	27.3	25.4	タイヤローラ	15t	15	3	道路盛土路床	○	○	○
56	SFg	礫まじり砂質土	2.496	1.252	31.0	29.8	33.6	38.1	タイヤローラ	12t	5	3	道路盛土路床	○	○	○
57	SFg	礫まじり砂質土	2.544	1.378	23.3	16.0	23.7	53.0	タイヤローラ	11t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
58	SFg	しらす	2.457	1.354	31.0	7.8	28.5	26.5	ブルドーザ	16t	5	3	河川堤防	○	○	○
59	SFg	礫まじり砂質土	2.674	1.738	15.7	33.1	16.0	53.0	タイヤローラ	14t	5	1	河川堤防	○	○	○
60	SFg	しらす	2.467	1.161	31.4	2.9	27.1	9.5	ブルドーザ	15t	5	3	河川堤防	○	○	○

表 3-3 調査対象盛土の諸元 (3)

番号	日本統一 土質分類	土質名	土粒子 の比重 Gs	最大 乾燥密度 (t/m ³)	最適 含水比 (%)	2mm以上(礫) (%)	75 μ m以下 (%)	最大粒径 (mm)	転圧機械	規格	転圧 回数	管理 単位 数	盛土種類	砂置換	散乱型RI	透過型RI
61	SFg	礫まじり砂質土	2.714	1.785	16.2	23.0	42.4	53.0	タイヤローラ	11t	5	3		○	○	○
62	SM	シルト質砂	2.667	2.017	9.2	28.0	29.0	9.5	タイヤローラ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
63	SM	シルト質砂	2.543	1.514	17.3	0.00	32.0	2.0	タイヤローラ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
64	SM	シルト質砂	2.072	1.670	14.3	0.8	22.2	4.8	ブルドーザ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
65	SM	シルト質砂	2.748	2.070	8.4	27.7	28.4	37.5	タイヤローラ	8t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
66	SM	シルト質砂	2.727	2.065	7.3	32.7	10.5	19.0	タイヤローラ	8t	5	3	道路盛土路床	○	○	○
67	SM	シルト質砂	2.667	1.629	17.5	8.4	28.9	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
68	SM	シルト質砂	2.675	1.622	18.0	10.6	32.8	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
69	SM	シルト質砂	2.671	1.641	16.9	8.2	29.6	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
70	SM	シルト質砂	2.671	1.641	16.9	8.2	29.6	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
71	SM	シルト質砂	2.666	1.618	17.7	10.8	33.8	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
72	SM	シルト質砂	2.673	1.635	17.3	8.6	38.5	9.52	乾地ブルドーザ	15t以上	5	1	河川堤防	○	○	
73	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
74	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
75	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
76	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
77	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
78	SM	シルト質砂	2.673	1.688	15.4	9.8	19.2	12.0	乾地ブルドーザ	16t	5	1	河川堤防	○	○	
79	SM	シルト質砂	2.716	1.947	10.7	19.4	29.2	—	ブルドーザ	21t	7	3	河川堤防	○	○	○
80	SM	シルト質砂	2.641	1.813	13.3	0.3	22.1	9.5	タイヤローラ	10t	5	3	河川堤防	○	○	○
81	SM	シルト質砂	2.568	1.698	17.5	33.4	16.3	73.2	ショベル	—	—	8	河川堤防	○	○	
82	SM	シルト質砂	2.654	1.743	16.4	34.2	16.8	9.5	ブルドーザ	—	5	3	河川堤防	○	○	○
83	SM	シルト質砂	2.708	1.938	12.4	23.0	23.8	50.8	ブルドーザ	—	7	3	河川堤防	○	○	○
84	SC	粘土質砂	2.635	1.882	12.5	12.0	23.0	19.1	タイヤローラ	8t	7	3	道路盛土路体	○	○	○
85	SC	粘土質砂	2.647	2.060	8.6	31.8	25.7	26.5	振動ローラ	16t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
86	SC	粘土質砂	2.630	1.862	12.6	32.0	24.8	38.1	ブルドーザ	—	5	3	道路盛土	○	○	○
87	SC	粘土質砂	2.632	1.807	14.3	28.9	25.5	50.8	ブルドーザ	15.5t	5	3	河川堤防	○	○	○
88	ML	シルト	2.734	1.712	16.2	33.4	14.3	53.0	ブルドーザ	21t	4	2	道路盛土路体	○	○	
89	MH	シルト	2.691	1.010	51.2	11.9	61.3	9.5	タイヤローラ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
90	CL	粘質土	2.635	1.755	15.8	9.5	87.0	38.1	ブルドーザ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○

表 3-4 調査対象盛土の諸元 (4)

番号	日本統一 土質分類	土質名	土粒子 の比重 Gs	最大 乾燥密度 (t/m ³)	最適 含水比 (%)	2mm以上(礫) (%)	75 μ m以下 (%)	最大粒径 (mm)	転圧機械	規格	転圧 回数	管理 単位 数	盛土種類	砂置換	散乱型 RI	透過型 RI
91	CL	粘質土	2.719	1.986	12.0	60.9	25.5	50.8	タイヤローラ	12.8t	5	3	道路盛土路体	○	○	○
92	CL	粘性土	2.699	1.637	20.0	0.0	63.9	—	ブルドーザ	—	—	3	河川堤防	○	○	○
93	CH	粘土	2.615	1.532	19.5	0.3	80.0	4.8	タイヤローラ	—	—	3	道路盛土路体	○	○	○
94	CH	粘土	2.699	1.655	20.2	3.2	60.7	9.5	ブルドーザ	21t	—	3	道路盛土路体	○	○	○
95	SV	凝灰質砂	2.542	1.453	21.8	4.6	32.3	6.0	タイヤローラ	8.5t	5	3	河川堤防	○	○	

調査対象盛土の内訳を図 3-1、3-2 に示す。管理単位別に見ると、河川堤防が 49%、道路盛土路体が 27%、道路盛土路床が 20%、道路盛土その他が 5%である。調査対象土質の内訳を図 3-3、3-4 に示す。管理単位別に見ると、礫が 56%、砂が 39%、シルトが 1%、粘土が 4%である。

調査対象土質の礫率分布を図 3-5、その内訳を表 3-5 に示す。10%未満が 39 管理単位、30~40%が 52 管理単位、50~60%が 66 管理単位、60~70%が 89 管理単位である。70%以上は 22 管理単位で少ない。調査対象土質の最大粒径を図 3-6、その内訳を表 3-6 に示す。50~60mm が 102 管理単位で最も多い。次いで 10mm 未満と 70~80mm がそれぞれ 55、53 で多い。

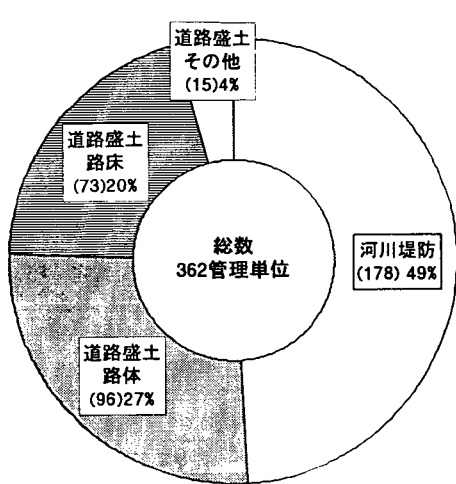


図 3-1 調査対象盛土の内訳 (管理単位毎)

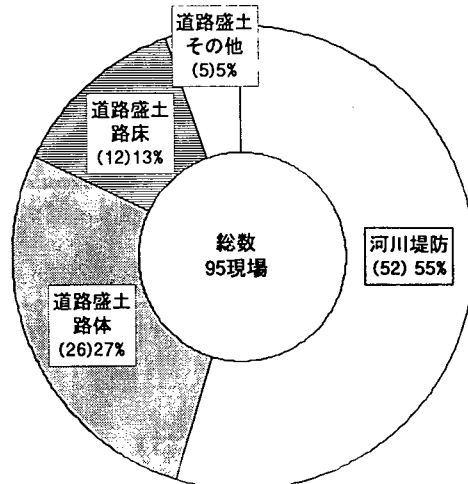


図 3-2 調査対象盛土の内訳 (現場毎)

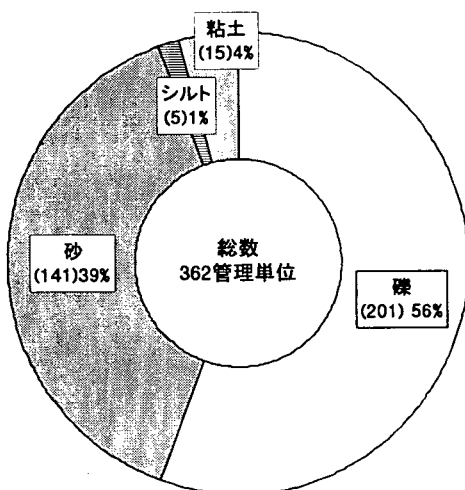


図 3-3 調査対象土質の内訳 (管理単位毎)

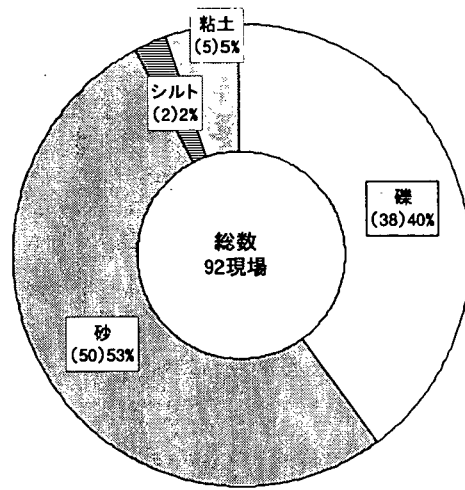


図 3-4 調査対象土質の内訳 (現場毎)

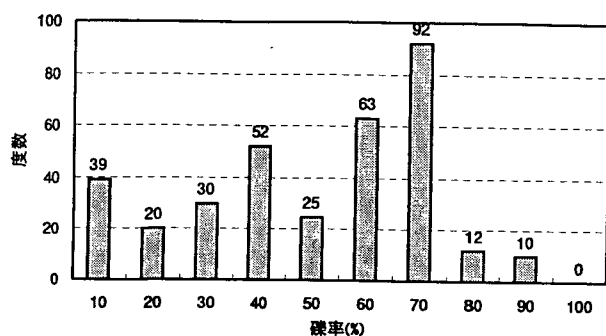


図 3-5 調査対象土質の礫率分布

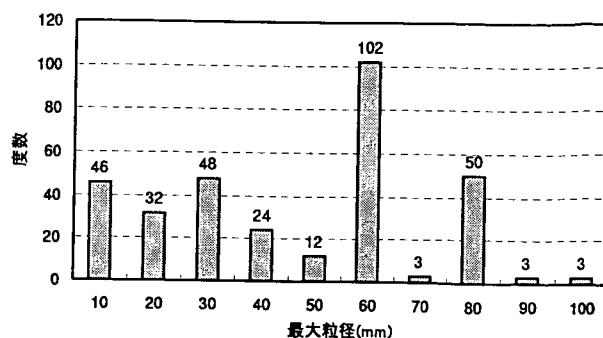


図 3-6 調査対象土質の最大粒径

表 3-5 調査対象土質の礫率分布（現場数：括弧内は管理単位）

	0%以上 10%未満	10%以上 20%未満	20%以上 30%未満	30%以上 40%未満	40%以上 50%未満	50%以上 60%未満	60%以上 70%未満	70%以上 80%未満	80%以上 90%未満	90%以上 100%
GW								2(11)		
GP									2(6)	
GPs							1(2)			
G-F						4(52)	2(22)		1(1)	
G-M						3(8)	1(14)			
G-C							2(6)		1(3)	
GF					2(3)			1(1)		
GM					1(3)	1(3)	4(18)			
GMs					6(12)					
GC							3(27)			
Sg				2(6)						
SP	1(4)		1(3)							
S-F				1(20)	3(7)					
Fg			1(2)	1(3)						
S-M			1(1)							
SF	2(5)	1(3)	2(6)							
SFg	2(6)	2(6)	2(6)	1(1)						
SM	13(9)	3(5)	3(9)	3(14)						
SC		1(3)	1(3)	2(6)						
ML				1(2)						
MH		1(3)								
CL	2(6)						1(3)			
CH	2(6)									
SV	1(3)									
合計	23(39)	8(20)	11(30)	11(52)	12(25)	8(63)	14(92)	3(12)	4(10)	

表 3-6 調査対象土質の最大粒径（現場数：括弧内は管理単位）単位：mm

	0以上 10未満	10以上 20未満	20以上 30未満	30以上 40未満	40以上 50未満	50以上 60未満	60以上 70未満	70以上 80未満	80以上 90未満	90以上 100
GW								1(8)		
GP								2(6)		
GPs						1(2)				
G-F			2(22)			1(34)		1(10)		
G-M			1(14)			2(5)		1(3)		
G-C						2(6)			1(3)	
GF						2(3)				
GM				1(3)		1(3)	1(3)	2(12)		
GMs					6(12)					
GC			1(3)			2(24)				
Sg	2(6)									
SP	1(4)			1(3)						
S-F		1(20)				2(4)		1(3)		
Fg				1(2)		1(3)				
S-M	1(1)									
SF	3(8)			1(3)						1(3)
SFg	1(3)		2(6)	1(3)		3(7)				
SM	11(21)	7(9)		1(3)		1(3)		1(8)		
SC		1(3)	1(3)	1(3)		1(3)				
ML						1(2)				
MH	1(3)									
CL				1(3)		1(3)				
CH	2(6)									
SV	1(3)									
合計	23(46)	9(32)	7(48)	8(24)	6(12)	21(102)	1(3)	9(50)	1(3)	1(3)

調査対象土質と締固め機械の関係を表 3-7 に示す。全体ではタイヤローラが 212 件と全体の 59%を占め、ブルドーザ 86 件、乾地ブルドーザ 34 件、振動ローラ 16 件、ショベル 8 件、タイヤローラとブルドーザの併用が 2 件であった。

現場単位の総土工量は、5,000m³までが 34 件、5,000～10,000m³が 20 件、10,000～15,000 m³、25,000～30,000 m³、30,000～35,000 m³が 15 件などであった。また、現場単位の日施工量は、250 m³までが 63 件、250～500 m³が 32 件、500～750 m³が 23 件、750～1,000 m³が 10 件、1,000～1,250 m³が 2 件、1,250～1,500 m³が 3 件、1,750～2,000 m³が 1 件であった。

表 3-7 調査対象土質と締固め機械（管理単位数）

	タイヤ ローラ	ブルドーザ	乾地 ブルドーザ	振動ローラ	ショベル	タイヤローラ とブルドーザ の併用
GW		3		8		
GP	6					
GPs	2					
G-F	84					
G-M	19	3				
G-C	3	6				
GF		3				
GM	6	3	10			2
GMs			12			
GC	6	21				
Sg	6					
SP		7				
SF	26			1		
Fg	5					
S-M				1		
SF	6	5		3		
SFg	13	6				
SM	15	12	12		8	
SC	3	6		3		
ML		2				
MH	3					
CL	3	6				
CH	3	3				
SV	3					
合計	212	86	34	16	8	2

3.4 試験方法

(1) 盛土の乾燥密度及び含水比のばらつき

表 3-1～3-4 に示す現場のうち、現場 41 において、所定の締固めを終えた後に盛土表面を 56 等分し、散乱型及び透過型 RI 計器で乾燥密度及び含水比を測定した。これらの測定値が正規分布にしているかどうかを検討した。

(2) 同一地点における測定性能の安定性

表 3-1～3-4 に示す現場のうち、12 現場 (3, 4, 7, 16, 38, 50, 51, 55, 56, 57, 60, 85) で以下の実験を実施した。

各現場において所定の締固めを終えた後に、2～3カ所を選んで散乱型 RI 計器を設置し、同一地点で 20 回測定した。そのうちはじめの 10 回は RI 計器を設置したまま計測スイッチを押すだけとし、残りの 10 回は RI 計器を持ち上げて同一地点に設置しなおして計測した。散乱型 RI 計器による計測を終えた後、透過型 RI 計器を同一地点に設置して同様の方法で 20 回測定した。両 RI 計器の計測を終えた後で、同一地点で砂置換法及び炉乾燥法を各 1 回ずつ実施し、密度と含水比を測定した。試験結果はデータ記入シート (様式-4, p.28) に整理した。

(3) 測定頻度

乾燥密度や含水比の真の平均値や分散を知るために必要な測定頻度を、表 3-1～3-4 に示す現場の測定結果と区間推定の考え方を用いて検討した。

(4) 試験法間の相関関係

表 3-1～3-4 に示す現場において、「RI 計器による盛土の品質管理要領 (案)」に基づき乾燥密度と含水比を計測し、砂置換法及び炉乾燥法による測定値との相関関係を検討した。本要領案は特定技術パイロット事業に適用するために作成したもので、平成 2 年度から適宜修正を加えながら適用している。現場における施工管理は図 3-7 にしたがって実施した。現場 51 における測定位置の例を図 3-8 に示す。試験結果はデータ記入シート (様式-1～3, pp.25-27) に整理した。

(5) 法肩付近の品質評価

表 3-1～3-4 に示す現場のうち、13 現場 (3, 4, 7, 16, 50, 51, 56, 57, 59, 60, 79, 85, 92) において法肩から横断方向に 0.5m, 1.0m, 3.0m, 5.0m, 7.0m 離れた地点で散乱型及び透過型 RI 計器による測定を行った。現場 51 における測定位置の例を図 3-9 に示す。試験結果はデータ記入シート (様式-5, p.29) に整理した。

(6) RI 計器を用いた品質管理の作業性

RI 計器の現場作業性を検討するため、RI 計器による品質管理に要した作業時間を施工管理担当者に対するアンケートにより調査した。

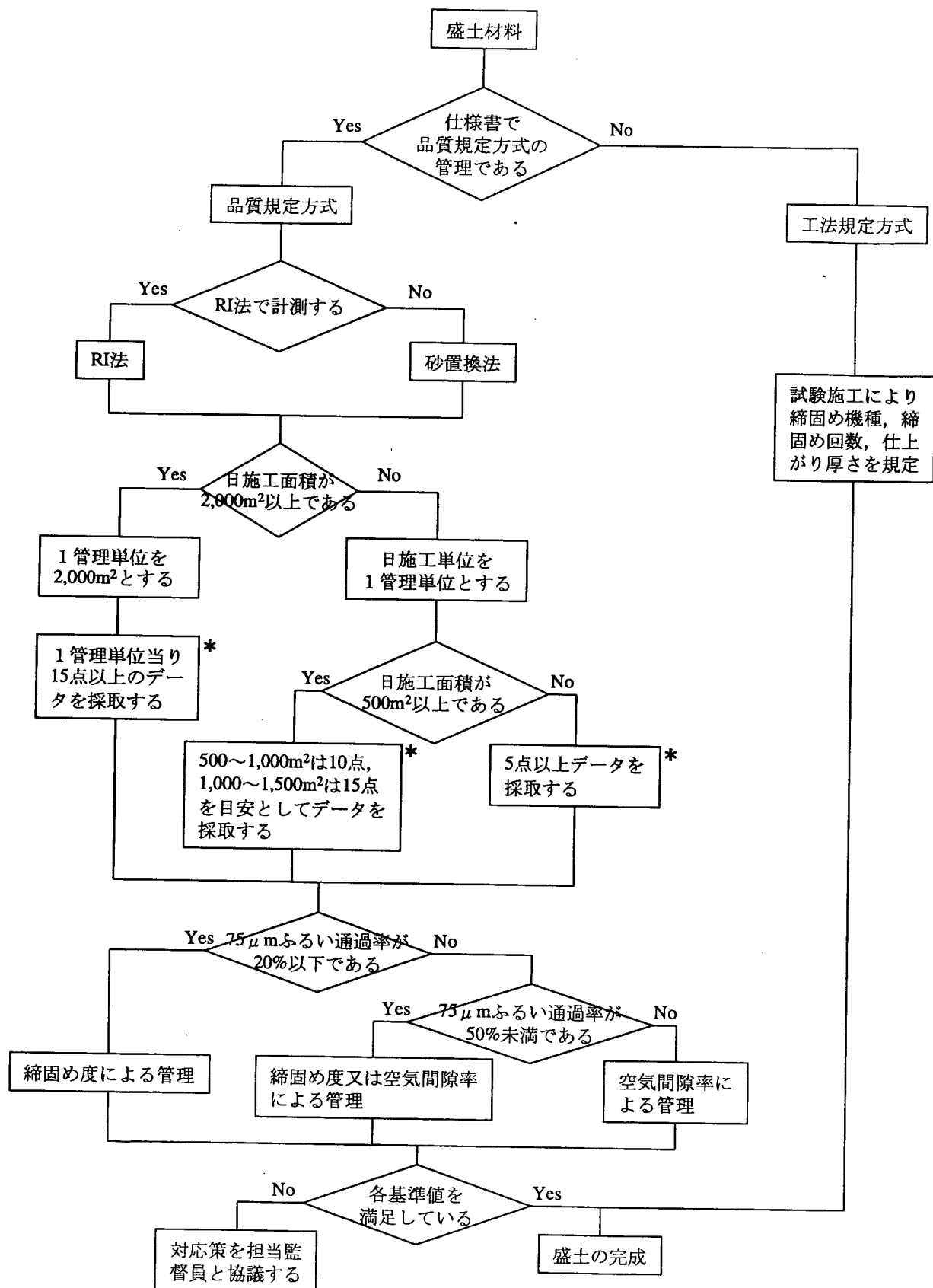
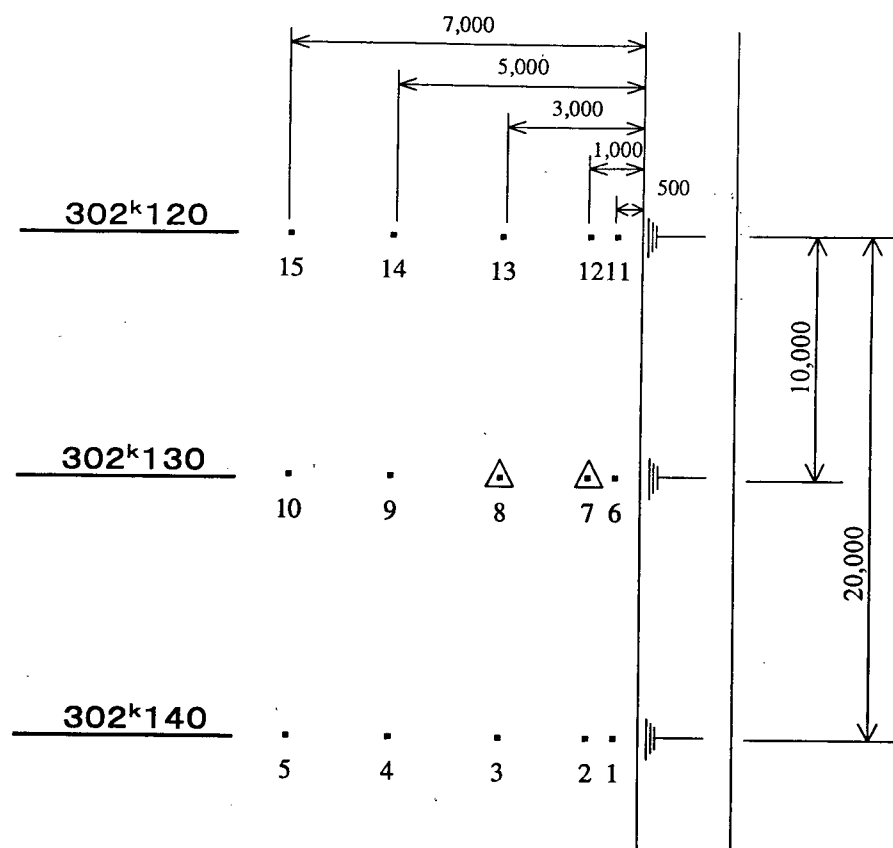


図 3-7 盛土品質管理の作業フロー



- ・ 散乱型, 透過型RI測定
1層15点×3層 = 45点
- △砂置換測定
1層2点×3層 = 6点

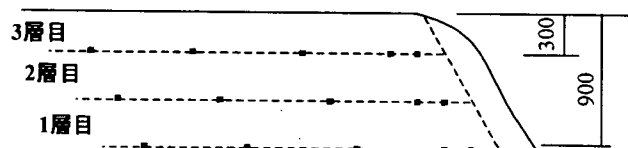
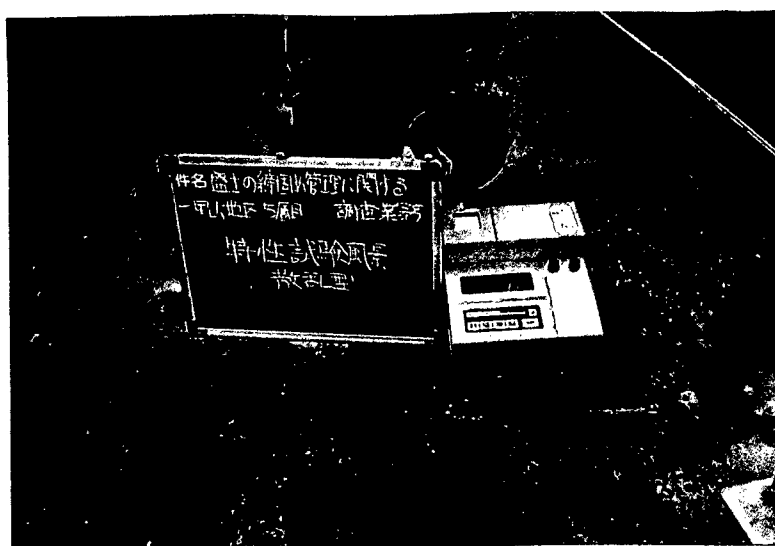


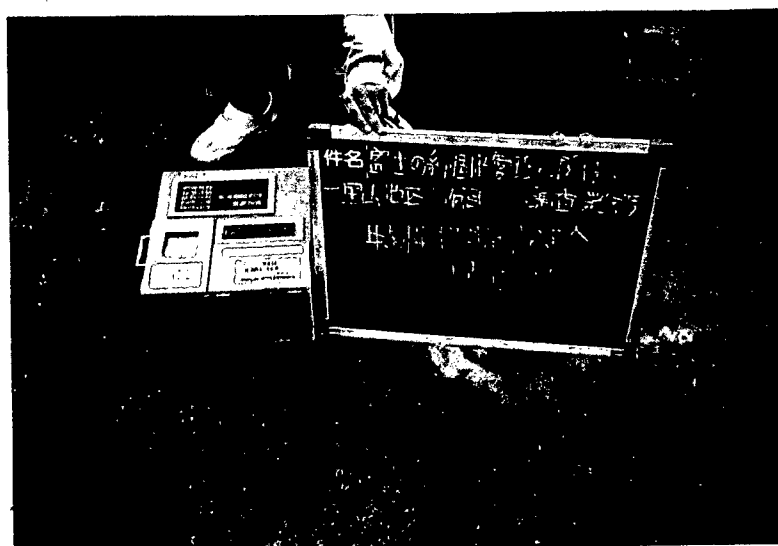
図3-9 法肩付近の調査位置平面図 (現場51の例)



測定区域全景



同一地点における測定性能の安定性 (散乱型 RI)



同一地点における測定性能の安定性 (透過型 RI)

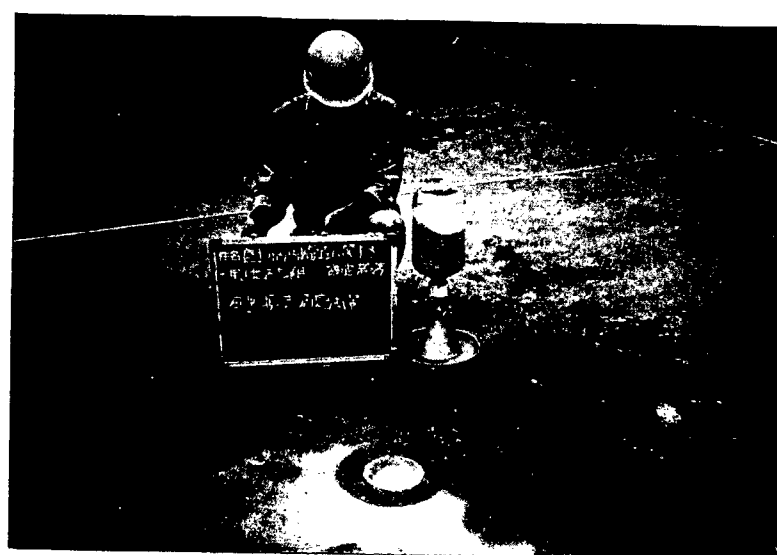
図 3-10 測定風景 (1) (現場 56)



従来の品質管理手法との相関（散乱型 RI）



従来の品質管理手法との相関（透過型 RI）

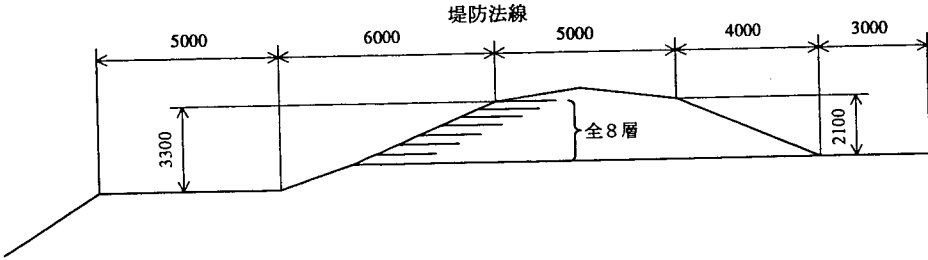


従来の品質管理手法との相関（砂置換法）

図 3-11 測定風景（2）（現場 56）

盛土施工管理調査データシート

様式-1

工事名称	〇〇樋門新設工事		
施工場所	〇〇県〇〇郡〇〇町〇〇地先		
地建名	〇〇地方建設局	事務所名	〇〇工事事務所
施工業者	〇〇建設株式会社	工事期間	平成〇年〇月〇日～〇月〇日
盛土種類	1.道路路体 2.道路路床 ③.河川堤防 4.その他 ()		
総土工量 (m³)	3,700 (m³)	平均日施工量 (m³)	450 (m³)
平均施工面積	1,200 (m²)	最大施工面積	1,700 (m²)
最小施工面積	700 (m²)	まき出し厚さ	36 (cm)
転圧回数	5回	仕上がり厚さ	30 (cm)
転圧機械	機種 ショベル	規格または仕様	D60S
平均日施工時間 ¹⁾	7時間	施工可能時間 ²⁾	10.0時間
施工管理に要した時間	砂置換 40分	RI法 210分	
<工事概要>	築堤 1式 (132.5m) 護岸 1式 樋門 1式		
<断面図>	 (単位: mm)		

1) 盛土工事を行った1日の平均時間

2) 開始時間から終了時間まで (休憩時間, 昼食時間を含まず)

盛土施工管理調査データシート
(材料試験結果)

様式-2

材 料 試 験 結 果	自然含水比*) Wn (%)		8. 7 9 (%)	
	土粒子の比重 Gs		2. 5 6 8	
	レキ	礫比重	2. 6 1 0	
		含水量	2 0. 9 (%)	
	最大粒径 (mm)		7 3. 2 (mm)	
	粒度組成	レキ分	37.5mm 以上	3. 9 (%)
			19.0~37.5mm	3. 2 (%)
			9.5~19.0mm	5. 1 (%)
			4.75~9.5mm	7. 9 (%)
			2.0~4.75mm	1 3. 3 (%)
			合計	3 3. 4 (%)
		砂分 2.0mm~75 μ m		5 0. 3 (%)
		細粒分 75 μ m 以下		1 6. 3
	コンシステンシ	液性限界		N P
		塑性限界		N P
		塑性指数		N P
強熱減量				
最大乾燥密度		1. 6 9 8 (t/m ³)		
最適含水比		1 7. 5 0 (%)		
土の分類	日本統一土質分類		S M	
	俗称名		シルト質砂	
改良材	土質改良材の種類		流用土	
	添加量 (対乾燥密度)			
試料の準備および使用方法			a (b) c	
締固め試験の種類 (JIS A1210-1990)			A B C D (E)	

*)ある程度以上の粒径を取り除いた室内用の試料ではなく、なるべく盛土に近い試料の含水比を得る観点から、室内突固め試験に用いる土ではなく現場から採取した土を使用する。

盛土施工管理データ

管理単位番号 () 計測回 (回目)

様式-3

工事名称	〇〇樋門新設工事				
計測の種類	①.散乱型 RI 試験		2.透過型 RI 試験		
計測日	平成8年7月22日	層番号	全8層の内1層目		
計測者名	〇〇〇〇	盛土前日の天候	晴れ		
盛土時の天候	晴れ	計測時の天候	晴れ		
最大乾燥密度 (t/m³)	1.698	最適含水比 (%)	17.50		
管理基準値	85.0				
標準体 (密度)		標準体 (水分)			
標準体 (密度) B.G.		標準体 (水分) B.G.			
現場 (密度) B.G.		現場 (水分) B.G.			
転圧機械	D-60S	規 格	17.7t	転圧回数	5回

測点番号	湿潤密度 t/m³	乾燥密度 t/m³	含水比 %	締固め度 %	空気間隙率 %	飽和度 %
85 053	2.124	1.969	7.9	116.0	6.31	69.98
85 061	2.111	1.970	7.7	115.4		
85 070	2.136	1.984	7.7	116.8		
85 078	2.124	1.975	7.5	116.3		
85 086	2.124	1.978	7.4	116.5		
85 095	2.111	1.965	7.4	115.8		
85 103	2.120	1.976	7.3	116.3		
85 111	2.124	1.979	7.3	116.7		
85 120	2.122	1.967	7.9	115.9		
85 126	2.115	1.954	8.2	115.1		
85 132	2.126	1.963	8.3	115.6		
85 138	2.119	1.959	8.2	115.4		
85 145	2.126	1.978	7.5	116.5		
85 153	2.123	1.959	8.4	115.4		
85 161	2.165	1.991	8.2	117.3		
平均値	2.125	1.971	7.8	116.1		
最大値	2.165	1.991	8.4	117.3		
最小値	2.111	1.954	7.3	115.1		
個数	15	15	15	15		
標準偏差						

砂置換

測点番号	湿潤密度	乾燥密度	含水比	Dc	Va	Sr
85 070	1.941	1.671	16.20	98.4		
85 095	1.971	1.666	18.31	98.1		
85 120	1.949	1.662	17.24	97.9		
85 145	1.975	1.673	18.08	98.5		
平均値	1.959	1.668	17.46	98.2		

盛土施工管理データ
(同一地点 20 回計測)

様式-4

〇〇現場

No.〇層目

計測 種類	測定 番号	散乱型 RI 試験				透過型 RI 試験			
		湿潤密度 t/m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 %	縮固め度 %	湿潤密度 t/m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 %	縮固め度 %
不動計測	1	1.461	1.087	34.4	80.3	1.539	1.164	32.2	86.0
	2	1.452	1.077	34.8	79.5	1.556	1.185	31.3	87.5
	3	1.444	1.074	34.5	79.3	1.556	1.185	32.1	87.5
	4	1.463	1.090	34.2	80.5	1.558	1.187	31.2	87.7
	5	1.487	1.113	33.6	82.2	1.567	1.186	32.1	87.6
	6	1.448	1.087	33.2	80.3	1.542	1.152	33.9	85.1
	7	1.435	1.052	36.4	77.7	1.545	1.169	32.2	86.3
	8	1.444	1.073	34.6	79.2	1.578	1.209	30.5	89.3
	9	1.441	1.070	34.6	79.1	1.540	1.167	32.0	86.2
	10	1.462	1.092	33.9	80.7	1.583	1.207	31.2	89.1
	平均値	1.454	1.082	34.4	79.9	1.557	1.181	31.9	87.2
	最大値	1.487	1.113	36.4	82.2	1.583	1.209	33.9	89.3
	最小値	1.435	1.052	33.2	77.7	1.539	1.152	30.5	85.1
	標準 偏差	0.014	0.015	0.8	1.1	0.015	0.017	0.9	1.3
再設置計測	11	1.479	1.115	32.6	82.4	1.535	1.155	32.9	85.3
	12	1.517	1.152	31.7	85.1	1.577	1.216	29.7	89.8
	13	1.477	1.108	33.2	81.9	1.553	1.177	31.9	86.9
	14	1.479	1.116	32.5	82.4	1.569	1.180	33.0	87.1
	15	1.503	1.147	31.1	84.7	1.538	1.162	32.3	85.8
	16	1.505	1.148	31.1	84.8	1.557	1.176	32.5	86.7
	17	1.529	1.174	30.3	86.7	1.541	1.166	32.2	86.1
	18	1.471	1.115	31.9	82.4	1.573	1.193	31.8	88.8
	19	1.492	1.139	31.0	84.1	1.553	1.166	33.2	86.1
	20	1.517	1.171	29.6	86.5	1.571	1.185	32.5	87.6
	平均値	1.497	1.139	31.5	84.1	1.557	1.178	32.2	87.0
	最大値	1.529	1.174	33.2	86.7	1.577	1.216	33.2	89.8
	最小値	1.471	1.108	29.6	81.9	1.535	1.155	29.7	85.3
	標準 偏差	0.019	0.023	1.0	1.7	0.015	0.017	0.9	1.2
全体	平均値	1.475	1.110	33.0	82.0	1.557	1.179	32.0	87.1
	最大値	1.529	1.174	36.4	86.7	1.583	1.216	33.9	89.8
	最小値	1.435	1.052	29.6	77.7	1.535	1.152	29.7	85.1
	標準 偏差	0.027	0.035	1.7	2.5	0.015	0.017	0.9	1.3

	湿潤密度 t/m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 %	縮固め度 %
砂置換	1.45	1.09	33.0	80.5

盛土施工管理調査データシート
(路肩計測) 構造物周辺計測)

様式-5

測定 個所	測定 番号	散乱型 RI 試験				透過型 RI 試験			
		湿潤密度 t/m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 %	縮固め度 %	湿潤密度 t/m ³	乾燥密度 t/m ³	含水比 %	縮固め度 %
1 層目 302k 140	0.5m	1.735	1.504	15.33	84.61	1.668	1.450	15.06	81.53
	1m	1.738	1.490	16.62	83.82	1.724	1.496	15.21	84.16
	3m	1.825	1.588	14.92	89.32	1.795	1.573	14.12	88.46
	5m	1.824	1.588	14.88	89.30	1.676	1.435	16.80	80.70
	7m	1.853	1.608	15.22	90.45	1.734	1.500	15.57	84.39
1 層目 302k 130	0.5m	1.705	1.490	14.40	83.82	1.656	1.461	13.38	82.15
	1m	1.667	1.422	17.20	80.00	1.799	1.572	14.47	88.39
	3m	1.798	1.567	14.73	88.14	1.740	1.542	12.87	86.70
	5m	1.883	1.648	14.26	92.69	1.846	1.626	13.51	91.47
	7m	1.852	1.652	12.10	92.92	1.842	1.630	13.00	91.68
1 層目 302k 120	0.5m	1.666	1.434	16.14	80.68	1.699	1.506	12.78	84.73
	1m	1.671	1.445	15.68	81.24	1.772	1.560	13.59	87.74
	3m	1.670	1.456	14.67	81.91	1.721	1.515	13.59	85.21
	5m	1.578	1.347	17.15	75.76	1.669	1.481	12.72	83.28
	7m	1.738	1.537	13.09	86.44	1.675	1.497	11.87	84.21

第4章 現場試験の結果

4.1 盛土の乾燥密度及び含水比のばらつき

RI 計器は測定時間が短く、多くの測定が可能であることから盛土の品質を面的に評価することが可能である。多くの測定結果から品質を評価するためには、測定結果を統計的に処理し、客観的な値を用いることが望ましいと考えられる。

図4-1及び図4-2は、現場41において所定の締固めを終えた後に、盛土表面を56等分し、RI計器で測定した乾燥密度及び含水比の度数分布をヒストグラムで表したものである。

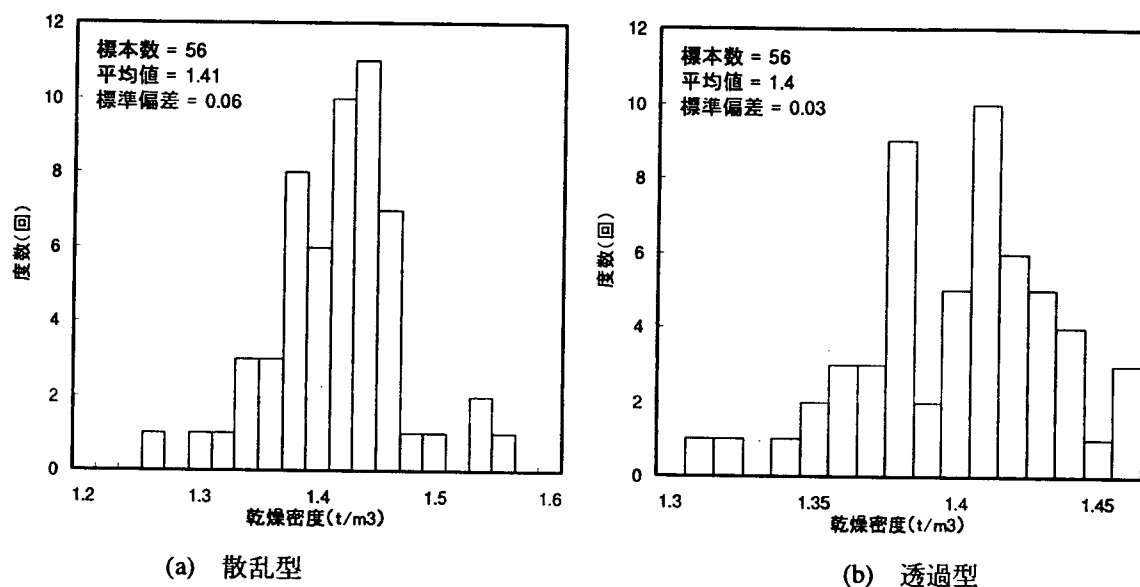


図 4-1 乾燥密度の度数分布 (現場 41)

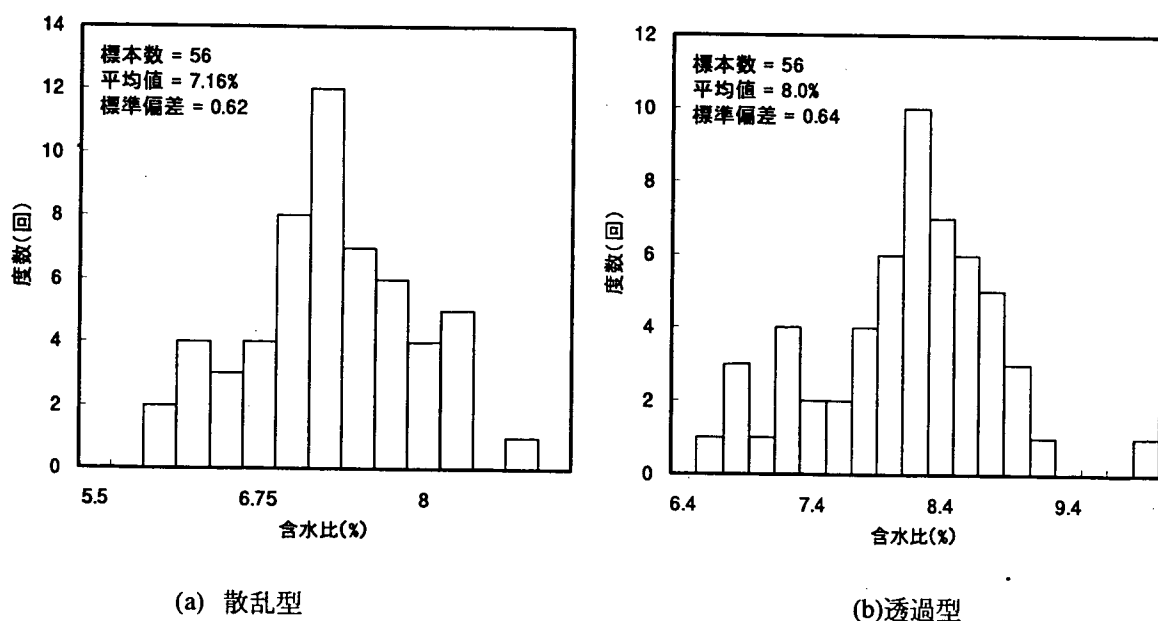


図 4-2 含水比の度数分布 (現場 41)

乾燥密度及び含水比の測定値は、散乱型と透過型ともに平均値を中心として山型の分布形状を示している。これらの分布が正規分布に従っているかどうかを、正規性の検定により検討する⁴⁾。

正規性の検定は、通常の統計的検定と同様に、データが正規分布からのものであるという仮説をたて、仮説が正しくないときに大きい値や小さい値をとりやすいような仮説をたて、それが棄却域に落ちたときに仮説を棄却するという方法で行う。

観測値 $X_1, \dots, X_n$ に基づいて、仮説

$$H_0: X_1, \dots, X_n \text{ は正規分布に従う}$$

を検定するのが正規性の検定であり、その方法がいくつか提案されている。

一般に確率密度関数 $f(x)$ をもつ分布の平均を

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$$

とするとき、

$$\mu'_r = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^r f(x)dx \quad (4.1)$$

をこの分布の平均のまわりの r 次のモーメントと呼ぶ。ここで、 $\mu'_2 = \sigma^2$ は分散を表す。

いま、分布 $f(x)$ が平均に関して対称のときは $\mu'_3 = 0$ だから、これを σ^3 で割って無次元の量にした

$$\beta_1 = \mu'_3 / \sigma^3 \quad (4.2)$$

を分布の非対称性の指標とすることができる。 β_1 を歪度と呼ぶ。正規分布は対称であるから $\beta_1 = 0$ である。

同様に、 μ'_4 / σ^4 は分布のすその長さとモード周辺の尖り方を表すが、正規分布では $\mu'_4 / \sigma^4 = 3$ となることから、あらたに

$$\beta_2 = \mu'_4 / \sigma^4 - 3 \quad (4.3)$$

をすその長さの指標とすることができる。 β_2 を尖度とよぶ。 β_2 は正規分布よりすその長い分布では正の値をとる。

(4.2), (4.3) は母集団の母歪度、母尖度であるが、(4.1) に対応する平均のまわりの標本 r 次モーメントを

$$m'_r = \sum (X_i - \bar{X})^r / n \quad (4.4)$$

とすると標本歪度と標本尖度は

$$b_1 = m'_3 / (m'_2)^{3/2} \quad (4.5)$$

$$b_2 = m'_4 / (m'_2)^2 - 3 \quad (4.6)$$

と定義される。

観測値の分布が正規分布の場合は b_1, b_2 の期待値はほぼ 0 となるから、それらの絶対値が大きいとき、正規性の仮説を棄却すればよい。標本数に応じた棄却域のパーセント点の例を表 4-1 に示す。標本数 n がある程度大きいとき、はほぼ分散 $6/n, 24/n$ の正規分布に従うものとみなすことができる。

図 4-1 及び 4-2 の例における正規性の検定結果を表 4-2 に示す。表 4-1 から、乾燥密度は正規分布ではないという結論を得た。含水比では、表 4-1 から正規分布であるといえる。

ただし、盛土の乾燥密度及び含水比のばらつきは概ね正規分布に従っており、多くの点を計測した場合、盛土の品質は平均値及び標準偏差で評価できるといえる。

表 4-1 標本数に応じた棄却域の上限パーセント点⁴⁾

n	α	b_1		b_2	
		.05	.01	.05	.01
10		1.0	1.4	.9	2.0
15		.9	1.3	1.1	2.3
20		.8	1.2	1.1	2.3
25		.7	1.1	1.1	2.3
30		.66	.99	1.12	2.21
40		.59	.87	1.05	2.00
50		.54	.78	.99	1.87
75		.45	.66	.87	1.59
100		.39	.57	.77	1.39

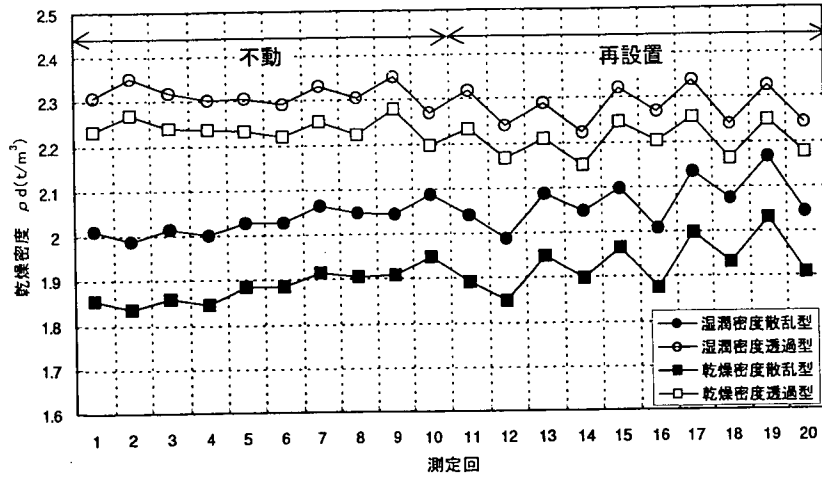
表 4-2 正規性の検定結果 (現場 41 の例)

	計器種類	b_1	b_2	検定結果
乾燥 密度	散乱型	-0.216	1.06	正規分布ではない
	透過型	-0.903	0.323	正規分布ではない
含水比	散乱型	0.0197	-0.313	正規分布である
	透過型	-0.179	0.291	正規分布である

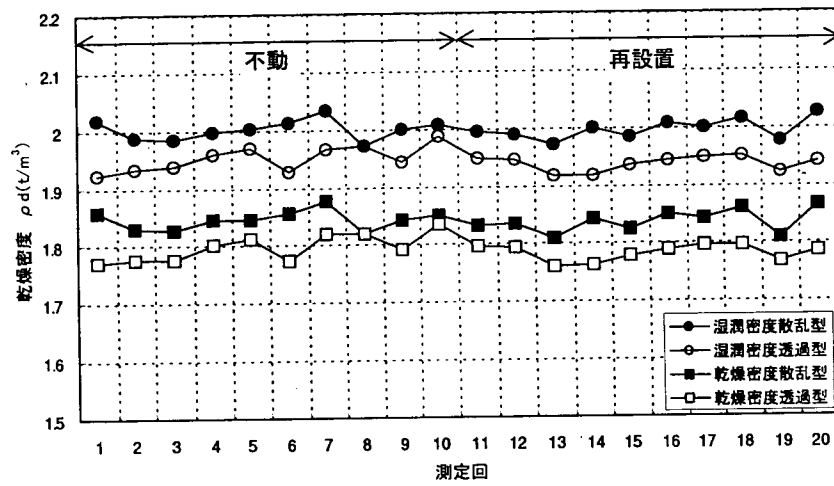
4.2 同一地点における測定性能の安定性

散乱型及び透過型 RI 計器で 20 回同一箇所で計測した。20 回のうち、1～10 回目は計器を動かさずに連続して計測し、11～20 回目は 1 回毎に計器を動かしてから再び同じ場所に設置して計測した。

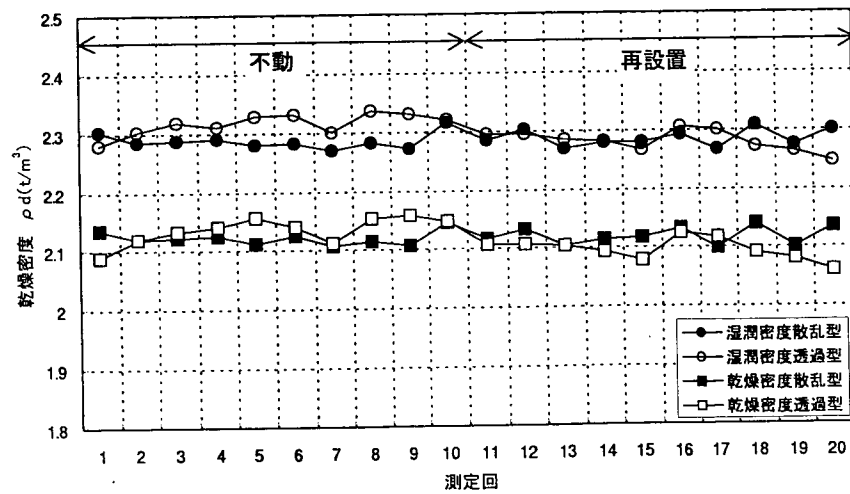
現場 3, 51, 85 における乾燥密度の測定結果を図 4-3 に示す。この図から、不動の場合よりも再設置した場合の方が計測値のばらつきが大きいことが分かる。また、盛土によってばらつきの度合いが異なり、礫分の割合が大きくなるとばらつきも大きくなることが分かる。



(a) 現場 3



(b) 現場 51



(c) 現場 85

図 4-3 同一地点における乾燥密度

各現場における乾燥密度の標準偏差を表 4-3 に示す。不動の状態での測定による標準偏差は、散乱型が 0.012~0.036、透過型が 0.011~0.029 と小さいことから、両機種ともに再現性に優れているものと考えられる。同一地点に再設置して測定したときの標準偏差は、散乱型が 0.013~0.13、透過型が 0.010~0.046 であり、いずれの現場も不動の状態での測定に比べて大きく、特に散乱型にその傾向が顕著に表れている。散乱型について土質別に見ると、砂質土では 0.013~0.036 と不動の状態での測定とほぼ同じ値を示すのに対して、礫質土では 0.022~0.13 とかなり大きくばらついていることから、特に礫質土において散乱型 RI は測定値が変動しやすいといえる。

表 4-3 乾燥密度の標準偏差一覧

現場名 (土質)	不動の状態での測定		再設置後の測定	
	散乱型	透過型	散乱型	透過型
3 (GP)	0.02439~0.03554	0.02440~0.02744	0.05087~0.05668	0.04033~0.04604
4 (GP)	0.01350~0.02458	0.01364~0.02557	0.04565~0.1264	0.03100~0.03300
7 (G-F)	0.02098~0.02406	0.01099~0.01291	0.04884~0.07305	0.01562~0.02609
16 (G-M)	0.0138~0.01618	0.01761~0.02896	0.02253~0.02424	0.02231~0.02586
38 (GC)	0.01249~0.03427	0.01285~0.01999	0.02265~0.04516	0.01956~0.03319
50 (SF)	0.01157~0.01690	0.01464~0.02400	0.01447~0.01987	0.02403~0.03427
51 (SF)	0.01537~0.01682	0.02115~0.02337	0.01450~0.01904	0.01459~0.02356
55 (SFg)	0.01628~0.02911	0.01491~0.01875	0.02149~0.03560	0.01688~0.01763
56 (SFg)	0.01489~0.0313	0.01119~0.01960	0.01634~0.0230	0.01514~0.02795
57 (SFg)	0.01972~0.0313	0.01960~0.02699	0.01819~0.0230	0.009527~0.02795
60 (SFg)	0.01532~0.02315	0.01103~0.02316	0.01721~0.02978	0.01790~0.02314
85 (SC)	0.01272~0.01745	0.01615~0.02748	0.01253~0.01865	0.01896~0.03660

RI 計器による計測値の分散（誤差）は、RI 計器本体の誤差、計測条件による変動、盛土地盤のばらつき、の和であると考えられる。

RI 計器本体の誤差は、放射線の統計的な揺動（計数率がポアソン分布をすることが知られている）に起因する計器の絶対的な誤差である。これは、計器を不動の状態での測定したときの標準偏差から求めることができる。計測条件による変動は、測定面の凹凸による RI 計器との空隙や線源棒と孔壁との空隙などが原因で生じる誤差である。盛土地盤のばらつきは、測定箇所における土質の不均一や施工含水比など盛土品質のばらつきである。同一地点に再設置して測定したときの標準偏差は、これらを合計したものであるから、その値は不動計測のときに比べて大きくなる。

図 4-4 は、礫率と乾燥密度の標準偏差の関係を示している。散乱型 RI 計器では礫率が 60%以上になると再設置の場合の標準偏差がかなり大きくなるのが分かる。一方、透過型 RI 計器では礫率と標準偏差の間には明確な相関関係は見られない。図 4-5 は、最大粒径と乾燥密度の標準偏差の関係を示している。散乱型 RI 計器では最大粒径が 80mm 程度では再設置の場合の標準偏差が 0.5 よりも大きくなるが、25mm 付近においてもピークが見られるため、最大粒径と標準偏差の間に明確な相関関係はないと考えられる。同様に透過型 RI 計器についても明確な相関関係は見られない。

盛土地盤のばらつきは、散乱型と透過型で同じ条件であるから、散乱型は礫率が 60%を越える地盤では透過型に比べて計測条件による変動を受けやすいといえる。

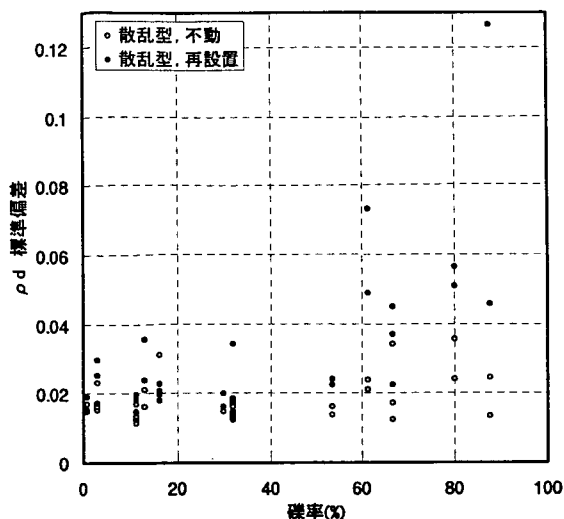


図 4-4(a) 礫率と ρ_d 標準偏差 (散乱型)

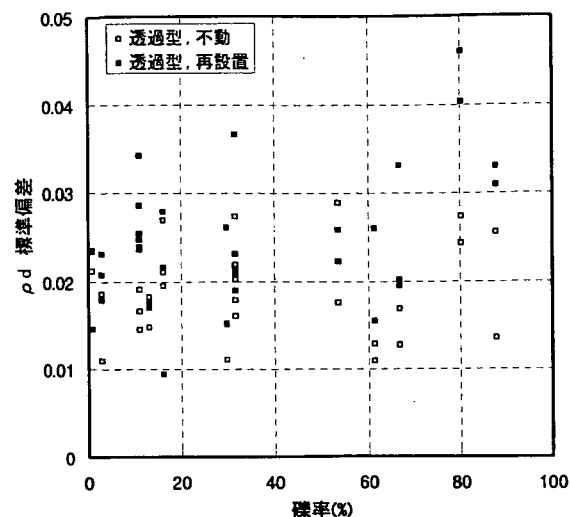


図 4-4(b) 礫率と ρ_d 標準偏差 (透過型)

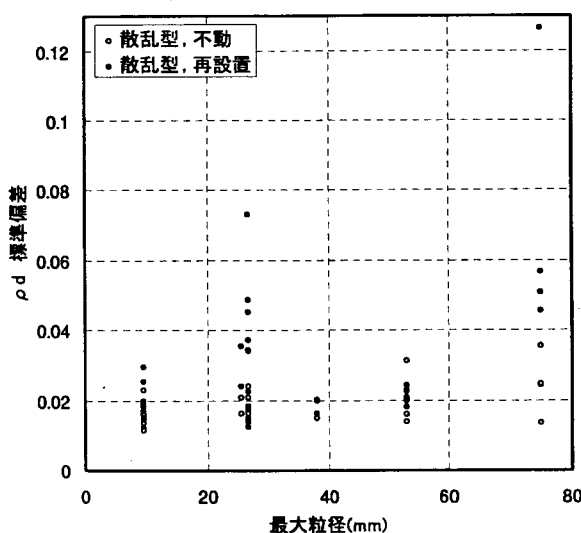


図 4-5(a) 最大粒径と ρ_d 標準偏差 (散乱型)

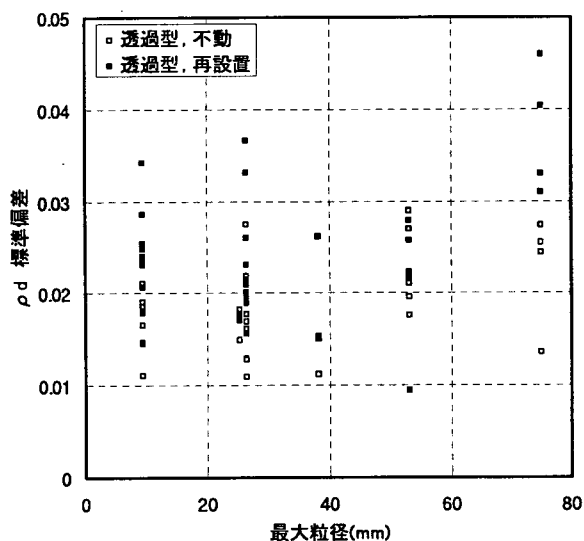


図 4-5(b) 最大粒径と ρ_d 標準偏差 (透過型)

図 4-6 は、計測条件の変動量と盛土地盤のばらつきを合計したものと礫率の関係を示したものである。縦軸の値は、各測定地点における再設置の標準偏差から不動の標準偏差を引いて算出した。透過型及び礫率が 60%未満の領域における散乱型は計測条件による変動量が無視できるほど小さいと仮定すれば、盛土地盤のばらつきは砂質土及び粘質土で 0.01 t/m^3 程度、礫質土で $0.01 \sim 0.02 \text{ t/m}^3$ 程度であり、礫質土のばらつきが比較的大きいといえる。また、散乱型の計測条件の変動量は礫率が大きくなるに従って大きくなり、その値は礫率が 60%で 0.01 t/m^3 程度であることが分かる。

散乱型の計測値が変動する原因の一つに、地盤表面と計器の間に生じる空隙が指摘されている。礫質土は、地盤表面に凹凸が多く平滑にするのが難しいため、計測値が不安定になりやすい。そこで、現場 3 (礫分 80.2%) のうち第 1 層目において、地盤表面に現場発生土を敷いて凹凸を少なくして計測し、表面処理による計測値の変動を比較した。

散乱型の測定条件による変動（乾燥密度の標準偏差），および在来法の砂置換法と比較した結果を表4-4に示す。

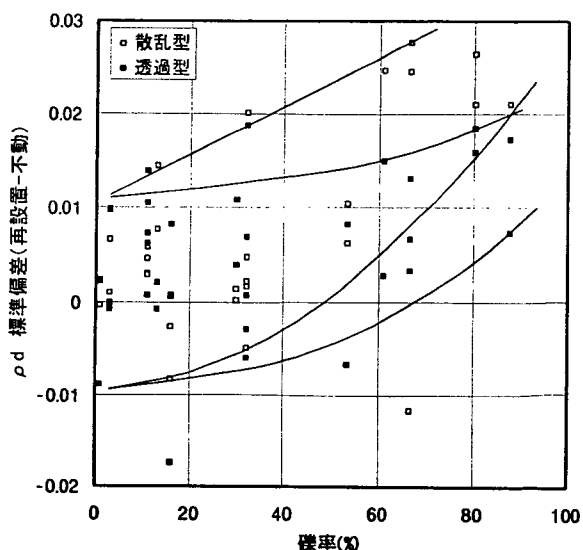


図 4-6 礫率と乾燥密度標準偏差（再設置－不動）の関係

表 4-4 敷砂の有無による標準偏差及び平均値の変化

測定層	敷砂	測定条件による変動 乾燥密度の標準偏差	砂置換法との差 乾燥密度（3点平均）
3 1層目	有	0.0014	0.199
3 2層目	無	0.0554	0.297
3 3層目	無	0.0234	0.225

表より、敷砂により測定条件による変動は大きく改善され、在来法との測定値の比較でも差はあるものの、絶対値の差は減少したことが分かる。したがって、礫材で表面の凹凸が大きく、測定面が平滑に仕上がらない場合、敷砂や現場発生細粒土での敷ものは測定条件の改善効果が非常に大きいといえる。

以上から、本調査結果は以下のようにまとめられる。

- ① 不動の状態での測定による乾燥密度の標準偏差（RI 計器本体の誤差）は散乱型が 0.012～0.036，透過型が 0.011～0.029 と小さく，両機種ともに再現性に優れているといえる。
- ② 同一地点に再設置して測定したときの乾燥密度の標準偏差は，散乱型が 0.013～0.13，透過型が 0.010～0.046 であり，いずれの現場も不動の状態での測定に比べて大きい。その主な要因は土質性状であり，盛土地盤のばらつきが砂質土及び粘質土で 0.01 t/m^3 程度，礫質土で $0.01 \sim 0.02 \text{ t/m}^3$ 程度あるためであると考えられる。また，散乱型 RI 計器については，礫質土において計測条件の変動量が変わり，その値は礫率が 60% で 0.01 t/m^3 程度である。
- ③ 礫質土において表面の凹凸が大きく，測定面が平滑に仕上がらない場合，敷砂や現場発生細粒土を敷くと散乱型 RI 計器の測定条件が大幅に改善され，測定誤差が小さくなる。

4.3 測定頻度

盛土の密度及び含水比は 4.1 より概ね正規分布に従うことが確認されたが、ある程度ばらつきがある盛土の品質を適切に評価するためには、正規分布となる母集団の平均値と分散を正確に求めることが必要となる。母集団は標本数が多ければ多いほど正確に求めることができるが、実際の施工管理では、測定費用と測定時間の制限を勘案して有限個の標本から母数に関する推定を行うことになる。そこで、標本数をいくらに設定すれば良いかという問題が生じる。つまり、RI 計器の測定点数を多くすればするほど、密度・含水比の平均値及び分散の推定精度は向上するが、どれだけの測定を行えば（測定頻度）、その盛土の品質を的確に表せるか、ということになる。

標本平均 $\bar{X}$ は、確率変数 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の和を n で割ったものである。 $X_1, X_2, \dots, X_n$ は母集団分布と同一の分布に従う独立した確率変数であるから、各々独立で $N(\mu, \sigma^2)$ に従う。したがって、 $\bar{X}$ の分布は正規分布であり、平均は母集団分布と同一で μ 、分散は σ^2/n である。すなわち、 $\bar{X}$ の分布は $N(\mu, \sigma^2/n)$ であり、それを標準化した

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

は標準正規分布 $N(0,1)$ に従う。このことから、 σ^2 がわかっていれば $\bar{X}$ の標本分布は結局標準正規分布 $N(0,1)$ を見ることになる。この $N(0,1)$ において、その点より上側の確率が $100\alpha\%$ となる点をパーセント点とよび、 Z_α と記す⁵⁾。

$\bar{X}$ の標準偏差は $\sigma/\sqrt{n}$ である。このことは、標本数 n が増加するとともに $\bar{X}$ は μ のより正確な推定値となること、推定の誤差は $1/\sqrt{n}$ のオーダーでしか減少しないことを表している。

平均 μ と標準偏差 σ の推定精度は、区間推定の考え方をを用いると、以下のようになる。区間推定とは、真の母数の値 θ がある区間 (L,U) に入る確率を $1-\alpha$ (α は θ が区間に入らない確率) 以上になるように保証する方法であり、

$$P(L \leq \theta \leq U) \geq 1-\alpha \quad (4.8)$$

となる確率変数 L,U を求めるものである。 L,U はそれぞれ下側信頼限界、上側信頼限界といわれる。 $1-\alpha$ は信頼係数と予備、区間 $[L,U]$ を $100(1-\alpha)\%$ 信頼区間と呼ぶ。 $1-\alpha$ は目的に応じた適当な値を選ぶが、通常 0.99, 0.95 つまり 99%, 95% に設定されることが多い。信頼区間は、多くは $\hat{\theta}$ の標本分布から求められる。 α を一定にした場合、推定の誤差をある一定の値以下にするのに必要な標本数 n を求めることができる。

$\bar{X}$ は正規分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$ に従うから、これを標準化すると

$$P(-Z_{\alpha/2} \leq \sqrt{n}(\bar{X} - \mu)/\sigma \leq Z_{\alpha/2}) = 1-\alpha \quad (4.9)$$

となる。括弧内の不等式を μ について解くと、

$$P(\bar{X} - Z_{\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}) = 1-\alpha \quad (4.10)$$

であり、 μ の信頼係数 $1-\alpha$ の信頼区間は

$$[\bar{X} - Z_{\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}, \bar{X} + Z_{\alpha/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}] \quad (4.11)$$

となる。

ここで、 Z_α 、 α どの程度に設定するかは議論の余地があるところであるが、盛土の締固め管理では $Z_\alpha = 10\%$ 、 $\alpha = 0.95$ 程度が妥当であると考えられる。(4.8)に $Z_{0.05} = 1.645$ を代入すると、

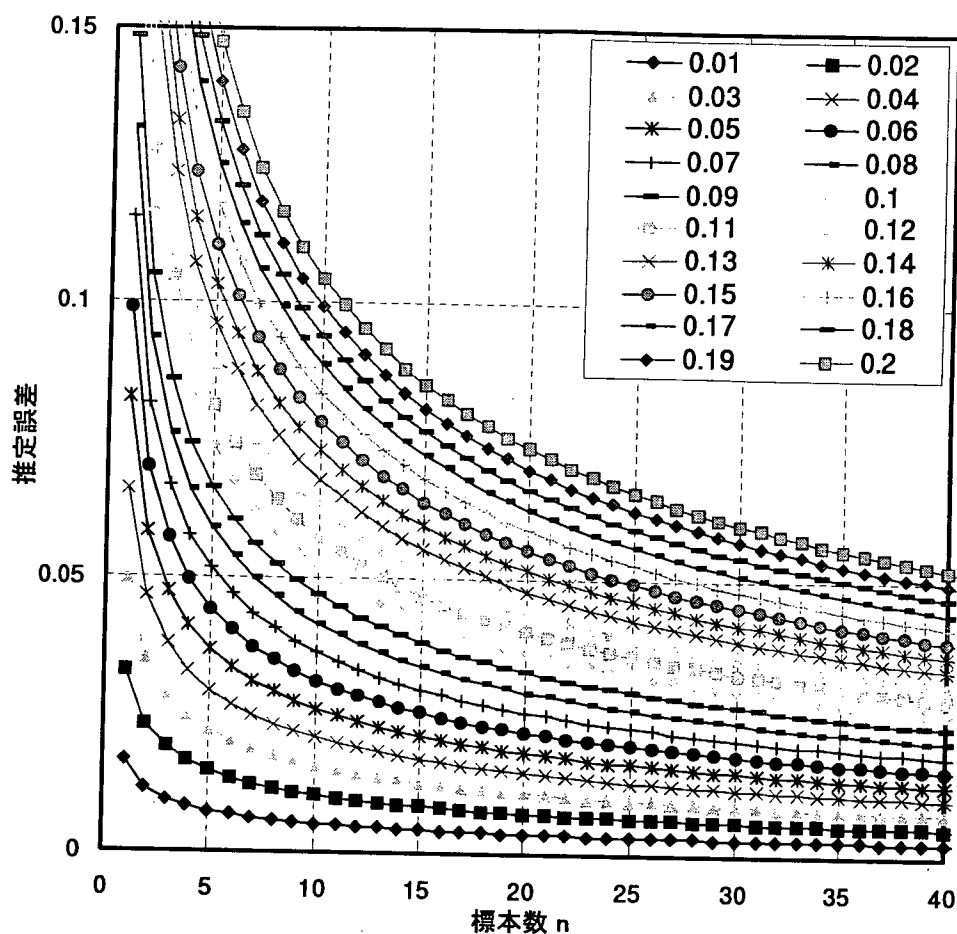


図 4-7 標本数と推定誤差との関係

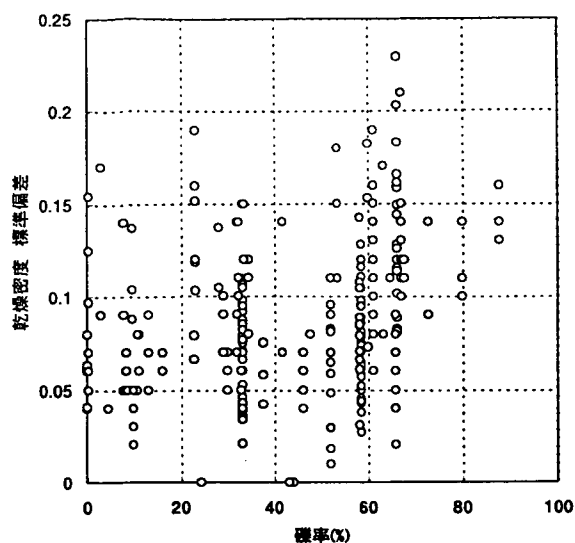
$$[\bar{X} - 1.645 \sigma / \sqrt{n}, \bar{X} + 1.645 \sigma / \sqrt{n}] \quad (4.12)$$

となる。

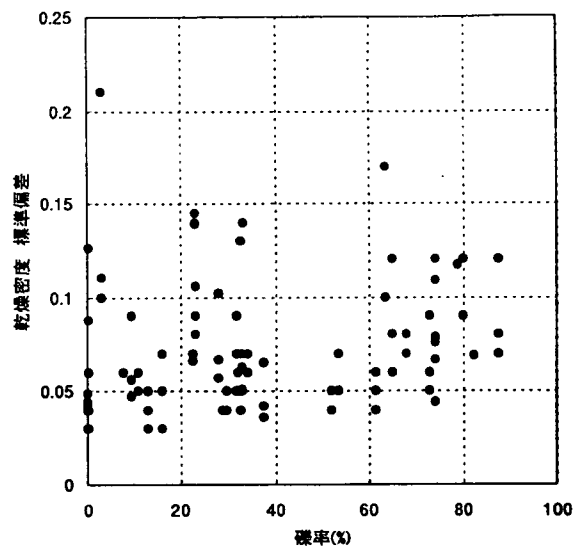
図 4-7 は、式(4.12)をもとに、標準偏差を変化させたときの標本数 n と推定誤差の関係を算出した結果を示したものである。区間推定が 90%以上となるのは、図では推定誤差が 0.05 以下となる場合であり、標準偏差が 0.06 までは標本数が 5、標準偏差が 0.09 までは標本数が 10、標準偏差が 0.12 までは標本数が 15、標準偏差が 0.13 までは標本数が 20、標準偏差が 0.15 までは標本数が 25 以上であれば区間推定が 90%以上となることが分かる。また、標準偏差が 0.20 の場合は、標本数が 40 でも区間推定が 90%とならないことが分かる。

乾燥密度と含水比の標準偏差は、土質性状に依存する。図 4-8、4-9 は、表 3-1～3-4 に示す現場において 15 点から 60 点計測した乾燥密度及び含水比の標準偏差と礫率の関係を示したものである。

乾燥密度は、散乱型 RI 計器では礫率が小さい土質では標準偏差が 0.15 程度であるが、礫率が 60%を越えると 0.20 を越える場合も多くなる。透過型 RI 計器では礫率に関係なく 0.15 未満である。含水比は、両機種とも礫率が大きくなるに従って標準偏差が小さくなる傾向を示している。これは、礫率が小さい粘質土では含水比そのものの値が大きいため標準偏差が大きくなっているからであると考えられる。

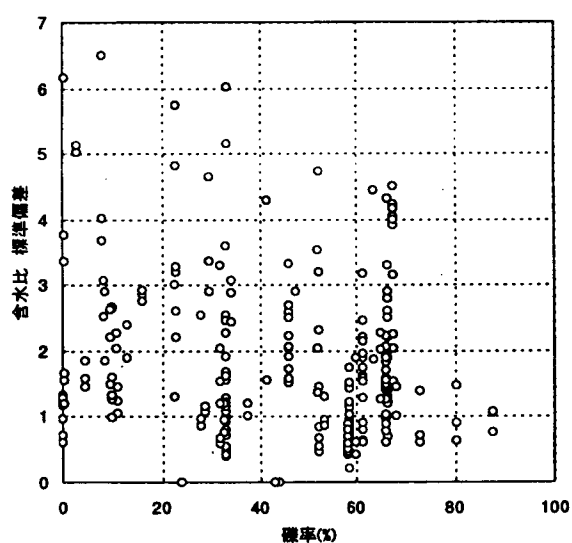


(a)散乱型

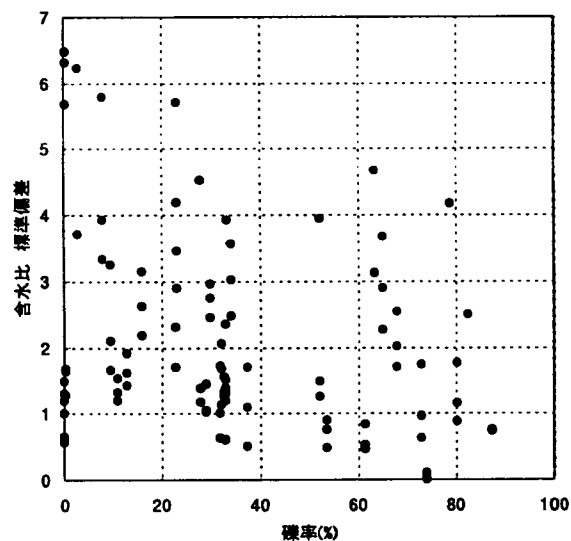


(b)透過型

図 4-8 確率と乾燥密度標準偏差の関係



(a)散乱型



(b)透過型

図 4-9 確率と含水比標準偏差の関係

以上から、本調査結果は以下のようにまとめられる。

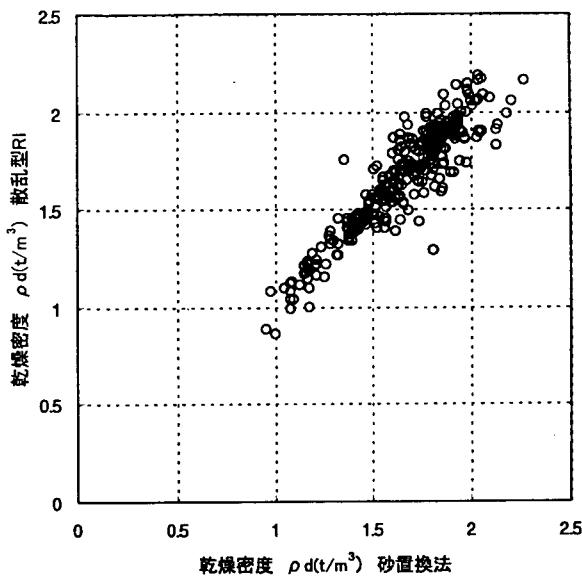
- ① 母集団の平均値と標準偏差を確からしく得るための標本数は、得られる測定値の分散に依存する。
- ② 測定値の標準偏差が 0.07 までは測定頻度を 5、標準偏差が 0.09 までは測定頻度を 10、標準偏差が 0.12 までは測定頻度を 15、標準偏差が 0.13 では測定頻度を 20、標準偏差が 0.15 では測定頻度を 25 以上設定すれば、区間推定を 90% 得ることができる。
- ③ 乾燥密度は、透過型 RI では乾燥密度の標準偏差が 0.15 未満であるが、散乱型 RI では乾燥密度の標準偏差は確率が 60% を越えると 0.20 を越える場合も多くなる。

- ④ 含水比は、両機種とも礫率が大きくなるに従って標準偏差が小さくなる傾向を示している。これは、礫率が小さい粘質土では含水比そのものの値が大きいため標準偏差が大きくなっているからであると考えられる。

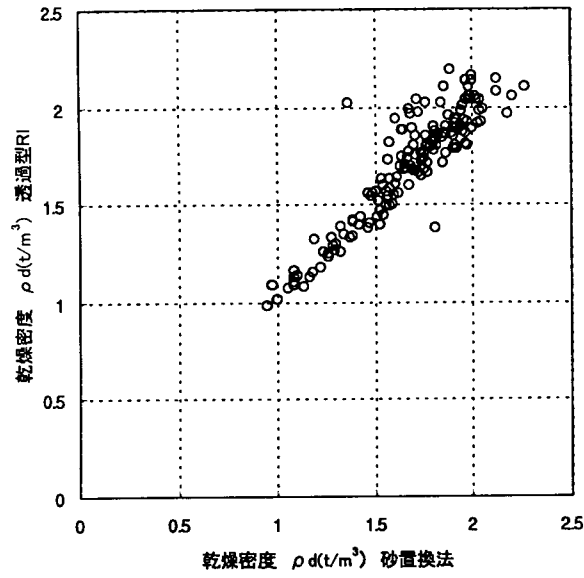
4.4 試験法間の相関関係

4.4.1 全体的な傾向

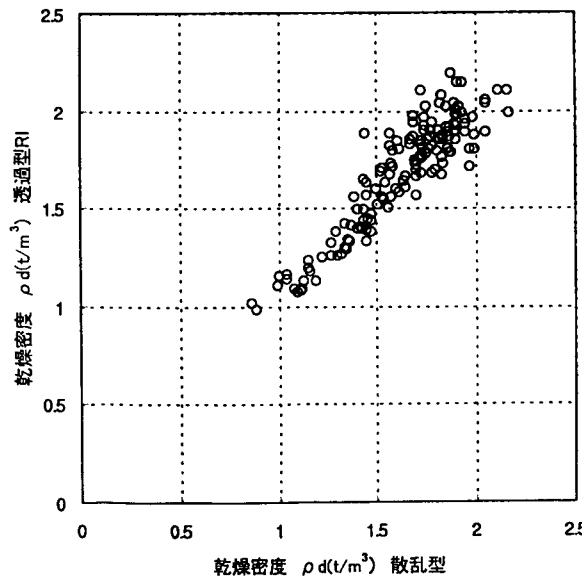
盛土材料の乾燥密度を砂置換法と RI 計器で比較した結果を図 4-10 に示す。砂置換法が 1 箇所における測定値であるのに対し、RI 計器は 15~60 箇所の測定値の平均をプロットしている。図から、砂置換法で得られる乾燥密度と RI 計器で得られる乾燥密度の値は、乾燥密度の大きさに関わらず同様の値が得られ、その差は±10%程度に収まっていることが分かる。



(a)砂置換法と散乱型



(b)砂置換法と透過型



(c)散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

砂－散	砂－透	散－透
0.927	0.917	0.919

図 4-10 各層毎の乾燥密度の比較

図 4-11 は、盛土材料の含水比を炉乾燥法と RI 計器で比較したものである。乾燥密度と同様に、RI 計器は 15~20 箇所の測定値の平均をプロットしている。散乱型 RI 計器では、ほぼ炉乾燥法と同様の値が得られるが、炉乾燥法で 10%の辺りでかなり低い値が得られているものがある。また、20%の辺りと 30%の辺りにも同じように低い値を計測したものがいくつかある。これらは特定の土質に対して計測しているものと思われる。透過型 RI 計器では、ほぼ炉乾燥法と同様の値が得られるが、含水比が 10%までの礫質土に対しては測定値の差が大きい。

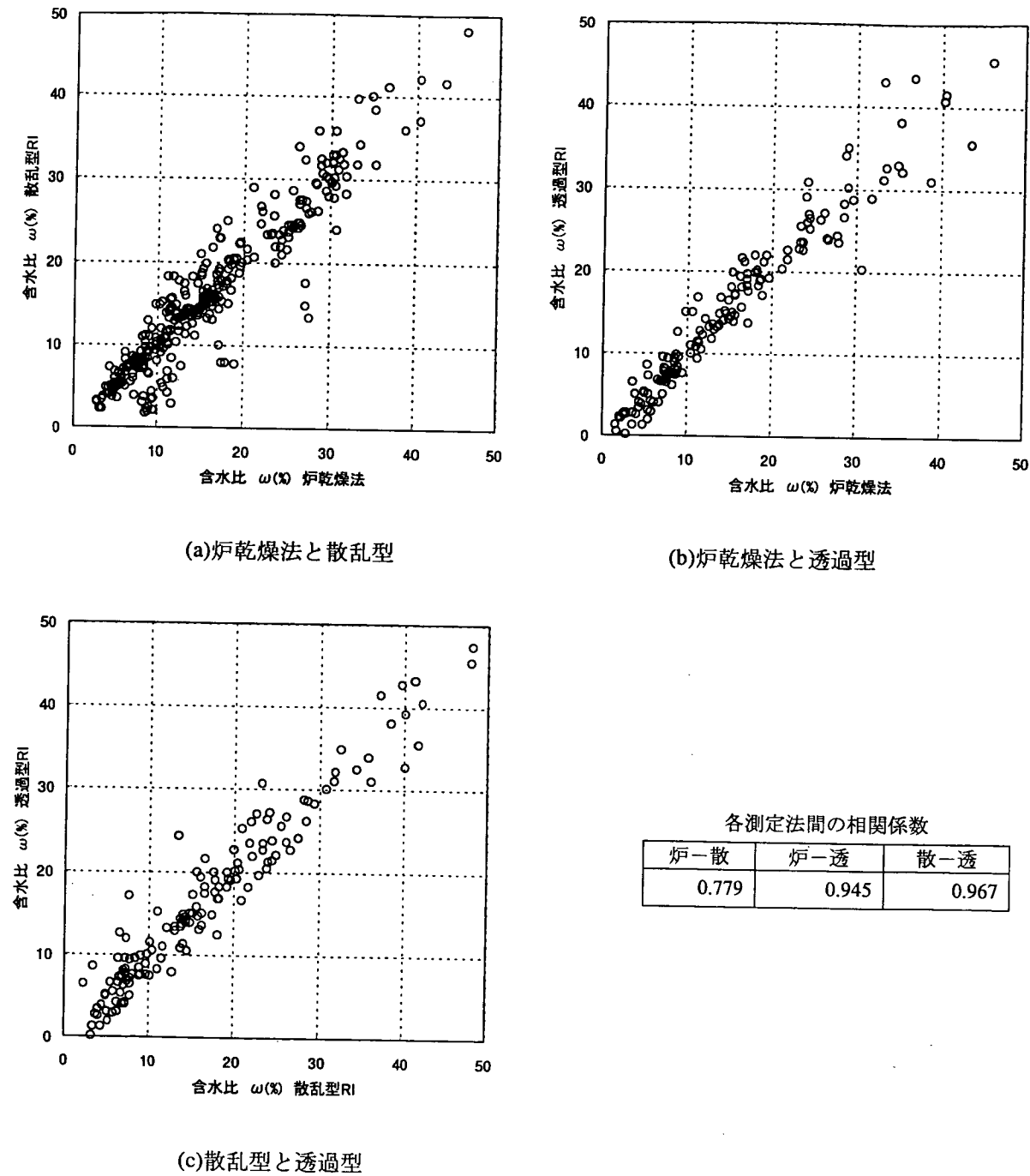


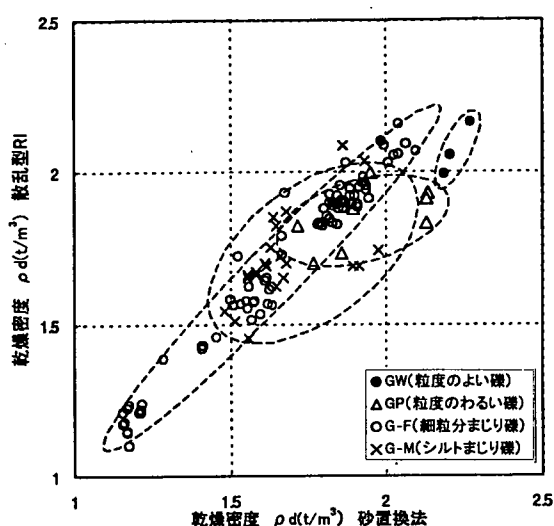
図 4-11 各層毎の含水比の比較

4.4.2 土質別の詳細整理

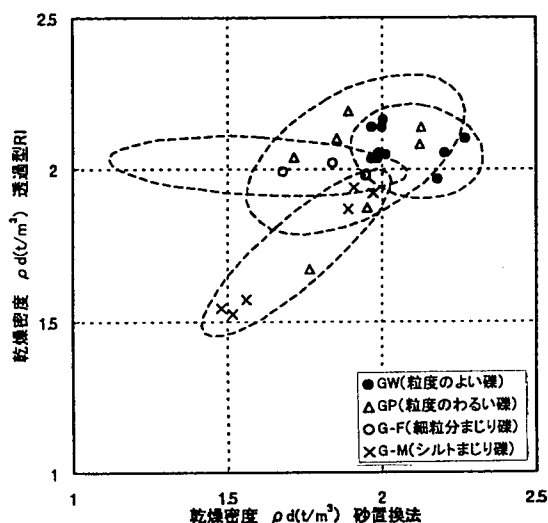
(1) 礫 (GW, GP, G-F, G-M)

図 4-12 は、礫 (GW, GP, G-F, G-M) の乾燥密度を各測定法間で比較したものである。各測定法によってサンプル数が異なるので単純に比較することは困難であるが、以下のような傾向が認められる。

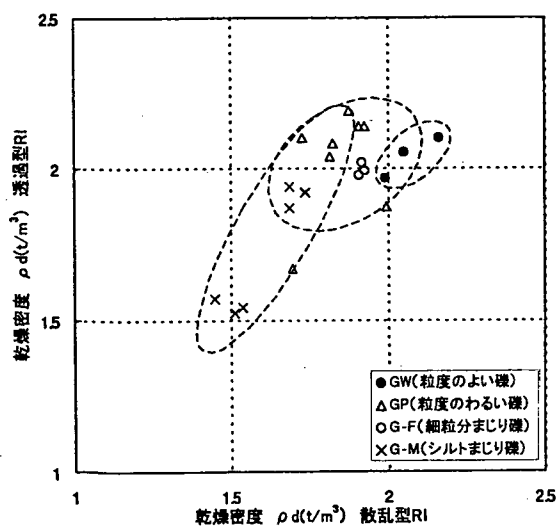
- ① GW (粒度のよい礫) は現場によって砂置換法と RI 計器の相関性にばらつきがある。RI 計器間では比較的良好な相関が得られた。
- ② GP (粒度の悪い礫) は各測定法間の相関性は高くはない。これは、盛土自体の粒度のばらつきが大きいためと考えられる。
- ③ G-F (細粒分まじり礫) は砂置換と散乱型との相関性が非常に高い。
- ④ G-M (シルトまじり礫) はサンプル数が少ないものの、各測定法間の相関性は高い。



(a) 砂置換と散乱型



(b) 砂置換と透過型



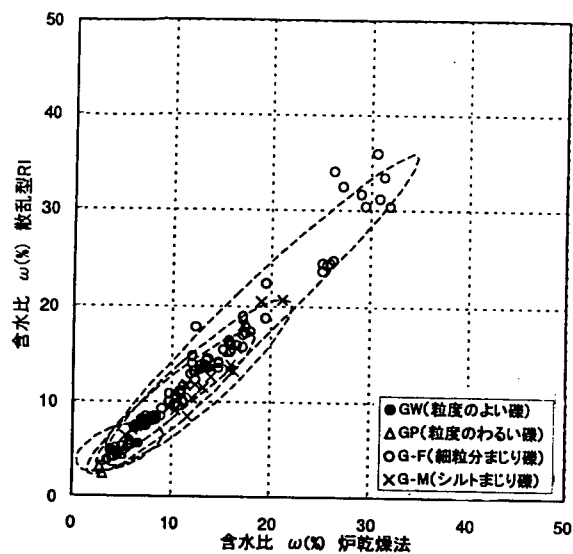
(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

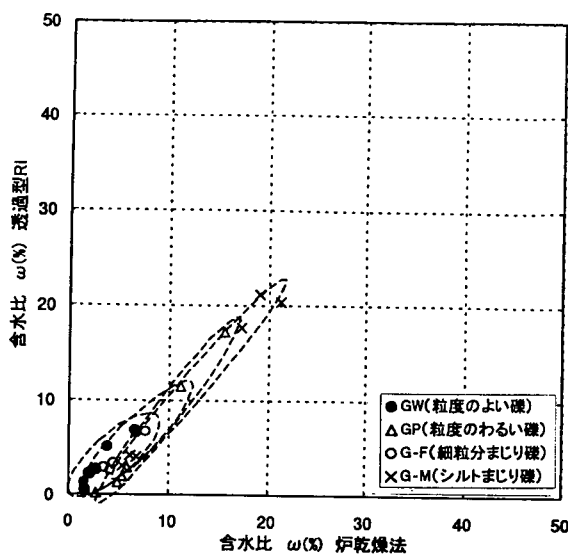
	砂-散	砂-透	散-透
GW	0.991	0.239	0.942
GP	0.558	0.469	0.34
G-F	0.983	0.296	—
G-M	0.595	0.989	0.938

図 4-12 乾燥密度の比較 (礫: GW, GP, G-F, G-M)

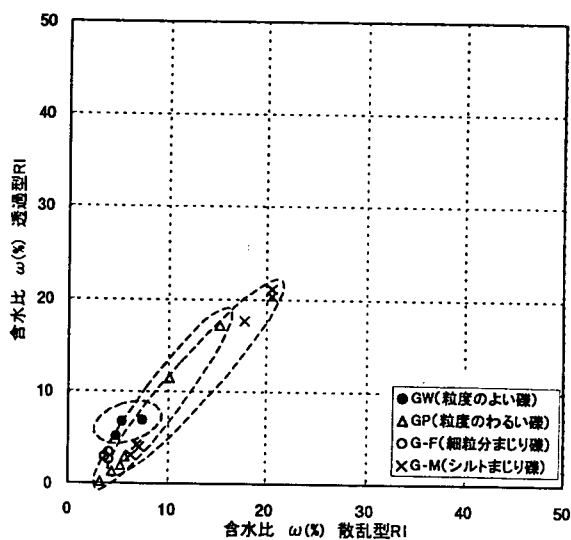
図 4-13 は、礫 (GW, GP, G-F, G-M) の含水比を各測定法間で比較したものである。いずれも測定法による差異は少なく、高い相関性があるといえる。透過型は炉乾燥法及び散乱型に比べて小さめの値となる傾向が認められる。



(a) 炉乾燥法と散乱型



(b) 炉乾燥法と透過型



(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

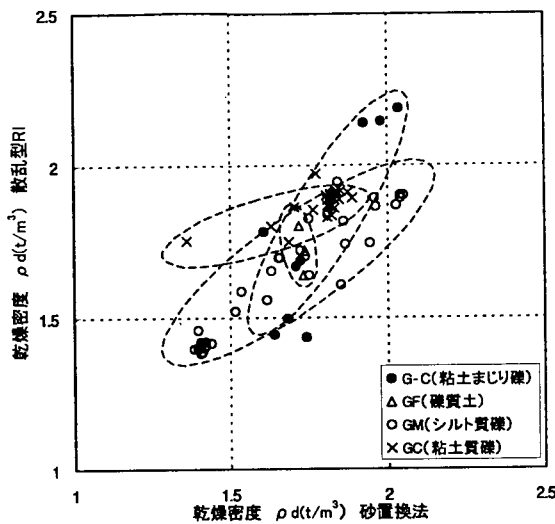
	炉－散	炉－透	散－透
GW	0.620	0.966	0.774
GP	0.995	0.995	0.993
G-F	0.981	0.985	—
G-M	0.958	0.992	0.999

図 4-13 含水比の比較 (礫 : GW, GP, G-F, G-M)

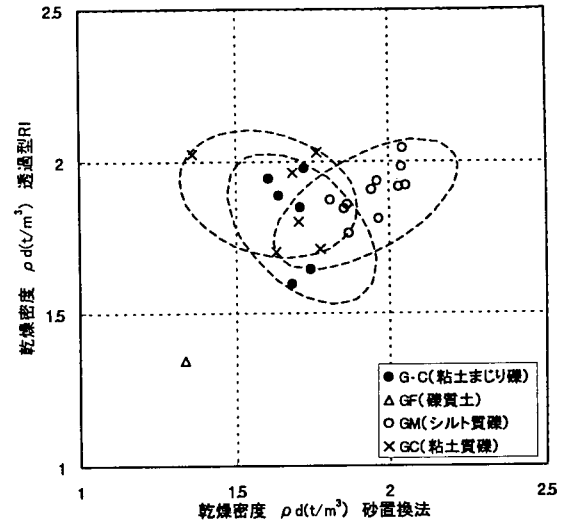
(2) 礫 (G-C, GF, GM, GC)

図 4-14 は、礫 (G-C, GF, GM, GC) の乾燥密度を各測定法間で比較したものである。各測定法によってサンプル数が異なるので単純に比較することは困難であるが、以下のような傾向が認められる。

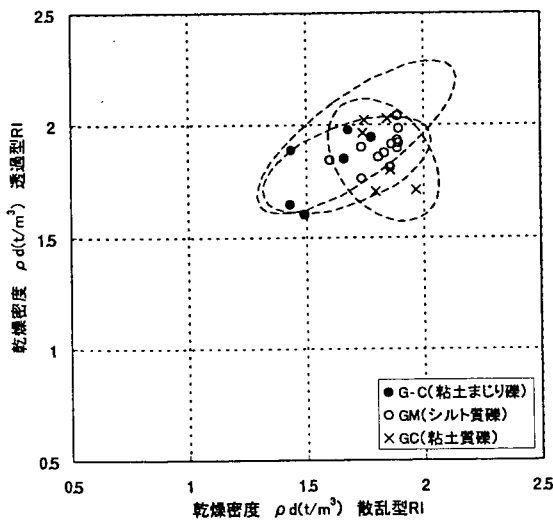
- ① G-C (粘土まじり礫) は現場によって砂置換法と RI 計器の相関性にばらつきがある。
- ② GM (シルト質礫) は各測定法間による差異が比較的少ない。
- ③ GC (粘土質礫) は、砂置換と散乱型の相関性は比較的高い。



(a) 砂置換と散乱型



(b) 砂置換と透過型



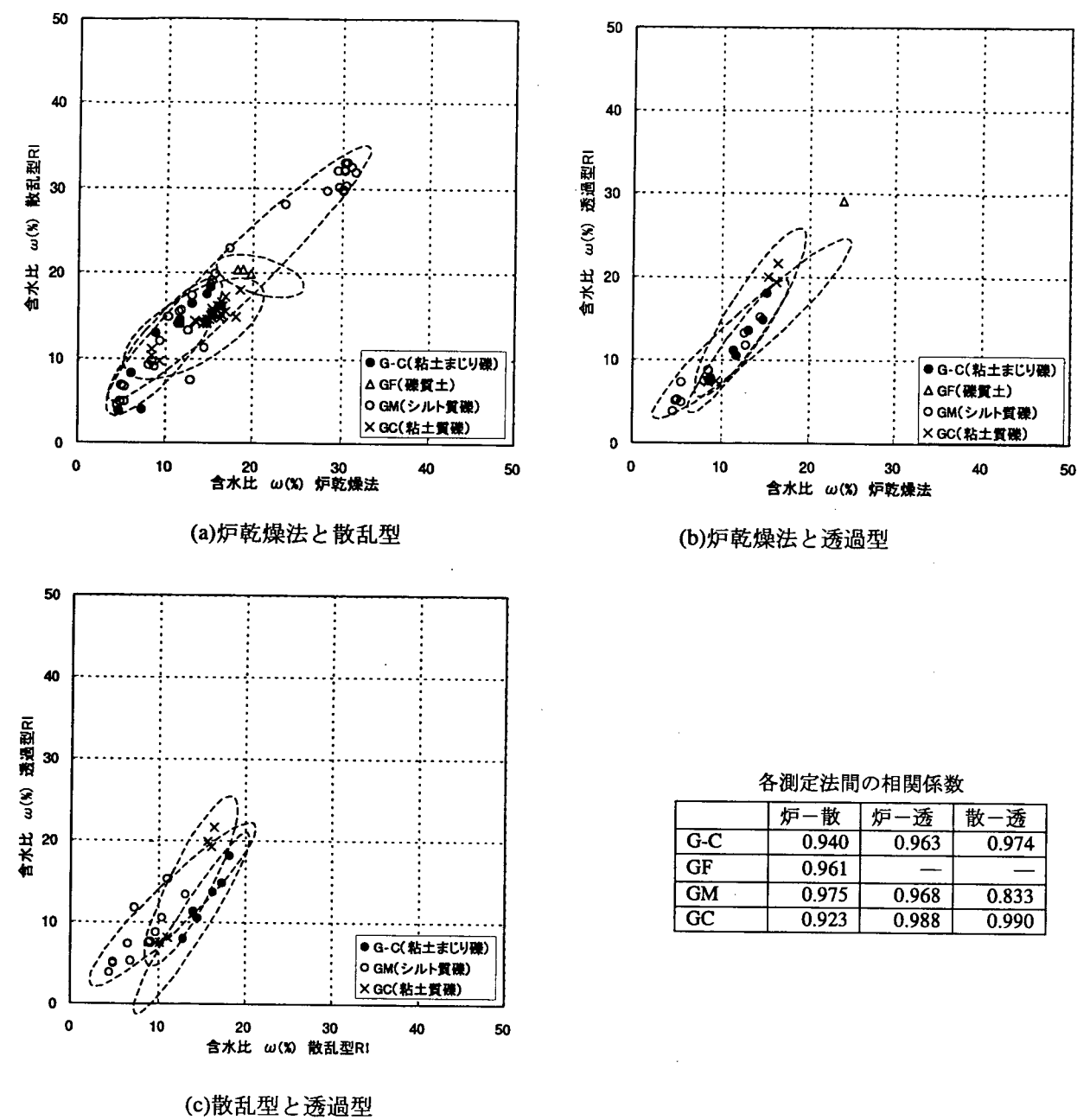
(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

	砂-散	砂-透	散-透
G-C	0.856	0.355	0.691
GF	0.729	—	—
GM	0.943	0.690	0.553
GC	0.701	0.37	0.563

図 4-14 乾燥密度の比較 (礫: G-C, GF, GM, GC)

図 4-15 は、礫 (G-C, GF, GM, GC) の含水比を各測定法間で比較したものである。いずれも測定法による差異は少なく、高い相関性があるといえる。



各測定法間の相関係数

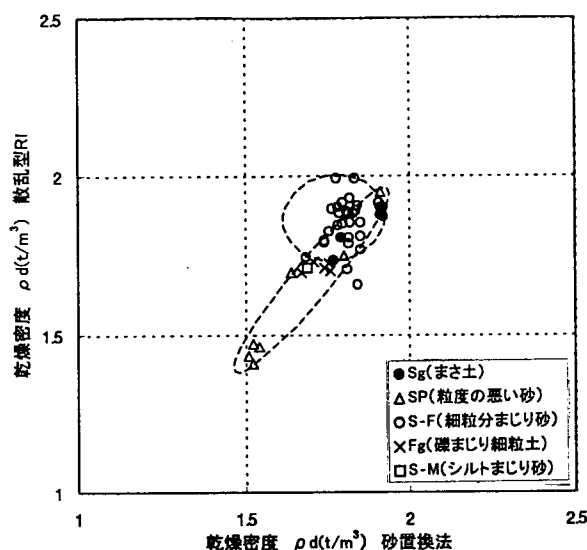
	炉－散	炉－透	散－透
G-C	0.940	0.963	0.974
GF	0.961	—	—
GM	0.975	0.968	0.833
GC	0.923	0.988	0.990

図 4-15 含水比の比較 (礫：G-C, GF, GM, GC)

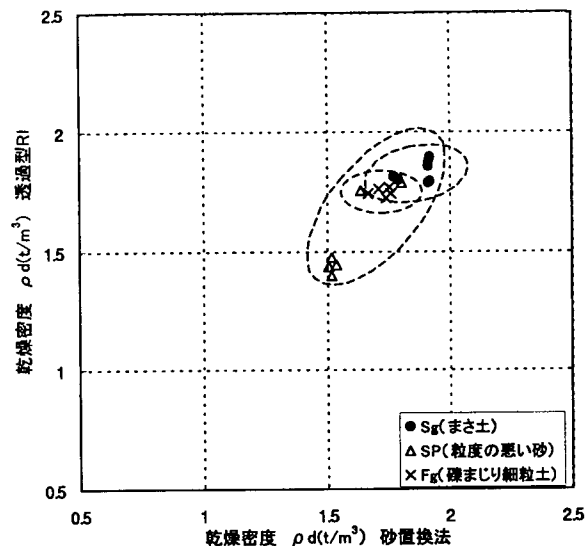
(3) 砂 (Sg, SP, S-F, Fg, S-M)

図 4-16 は、砂 (Sg, SP, S-F, Fg, S-M) の乾燥密度を各測定法間で比較したものである。サンプル数が少ないが、以下のような傾向が認められる。

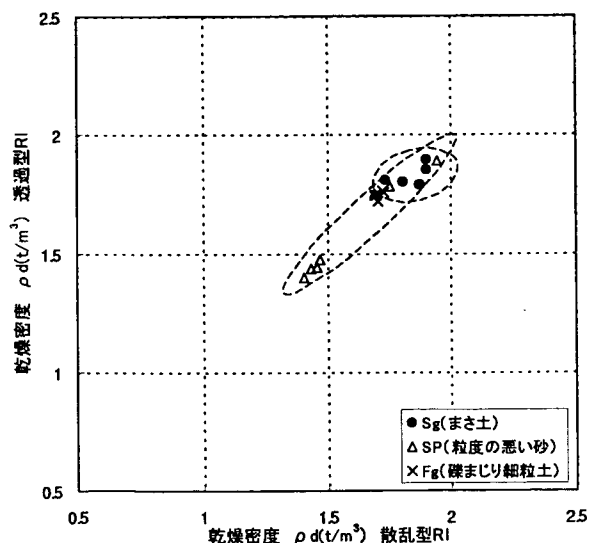
- ① Sg (まさ土) は、測定法による差異が比較的少ない。
- ② SP (粒度の悪い砂) は、砂置換と散乱型の相関性は比較的高い。
- ③ S-F (細粒分混じり砂) は、砂置換と散乱型の相関性は高くない。
- ④ Fg (礫まじり細粒土) は、測定法による差異が比較的少ない。



(a) 砂置換と散乱型



(b) 砂置換と透過型



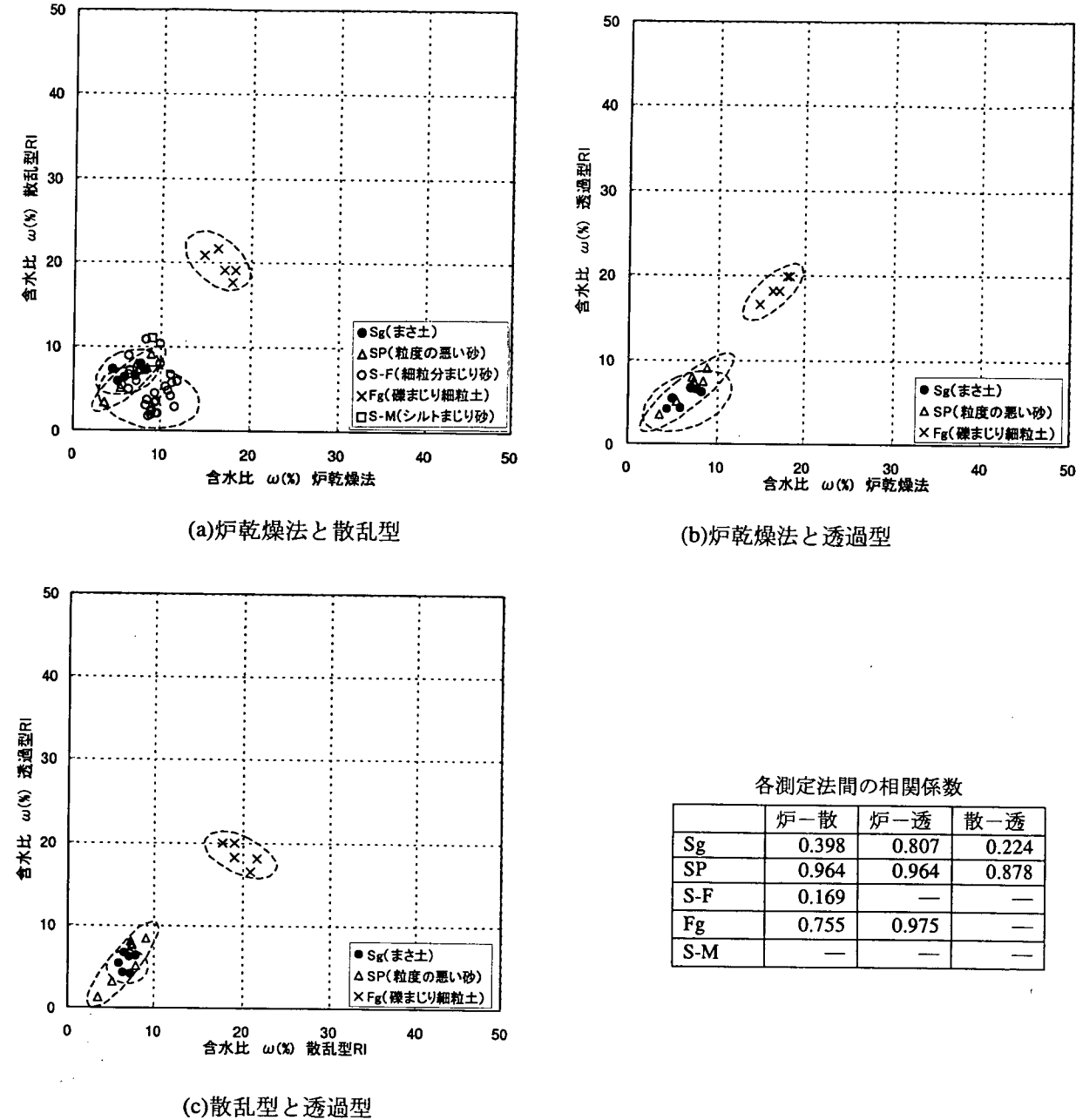
(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

	砂-散	砂-透	散-透
Sg	0.943	0.31	0.419
SP	0.971	0.938	0.984
S-F	0.17	—	—
Fg	0.246	0.057	—
S-M	—	—	—

図 4-16 乾燥密度の比較 (砂: Sg, SP, S-F, Fg, S-M)

図 4-17 は、砂 (Sg, SP, S-F, Fg, S-M) の含水比を各測定法間で比較したものである。測定法による差異は少ないが、S-F (細粒分混じり砂) の一部については、散乱型で得られる値が炉乾燥法に比べて 1 / 2 程度であり相関性が低い。



各測定法間の相関係数

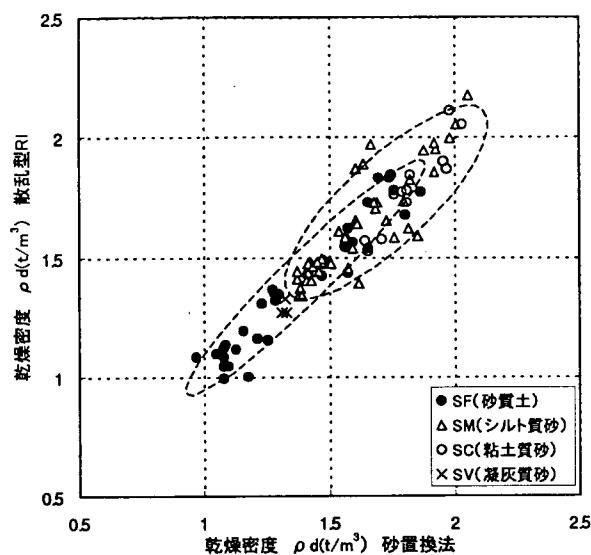
	炉－散	炉－透	散－透
Sg	0.398	0.807	0.224
SP	0.964	0.964	0.878
S-F	0.169	—	—
Fg	0.755	0.975	—
S-M	—	—	—

図 4-17 含水比の比較 (砂 : Sg, SP, S-F, Fg, S-M)

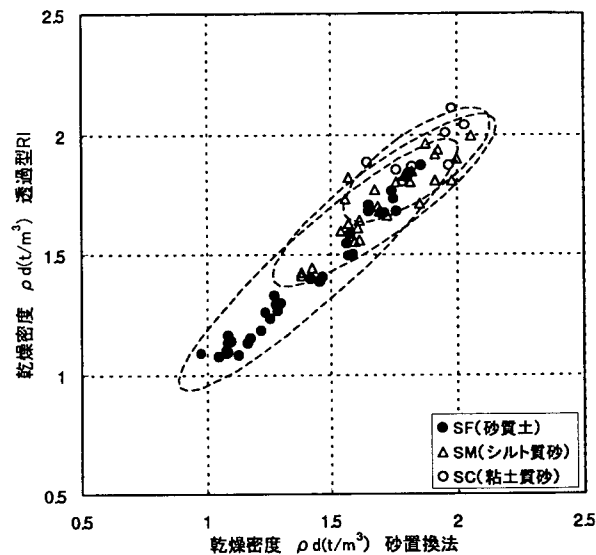
(4) 砂 (SF, SM, SC, SV)

図4-18は、砂 (SF, SM, SC, SV) の乾燥密度を各測定法間で比較したものである。SVのみはサンプル数が少ないが、その他の土質については以下のような傾向が認められる。

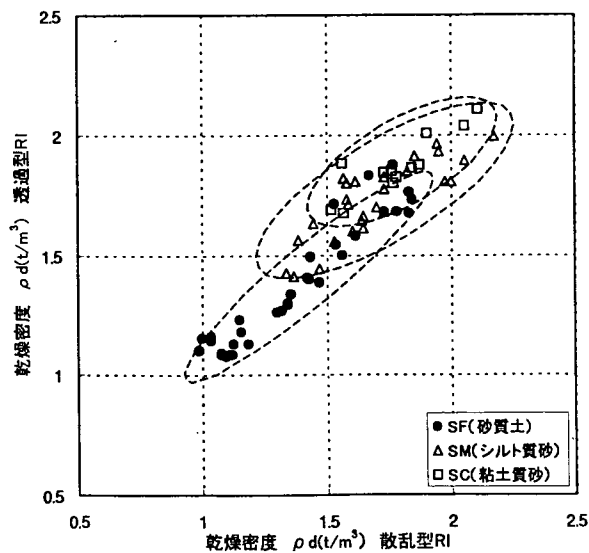
- ① SF (砂質土) は測定法による差異が少なく相関性が非常に高い。
- ② SM (シルト質砂) は測定法による差異が少なく相関性が非常に高い。
- ③ SC (粘土質砂) は測定法による差異が少なく相関性が非常に高い。



(a)砂置換と散乱型



(b)砂置換と透過型



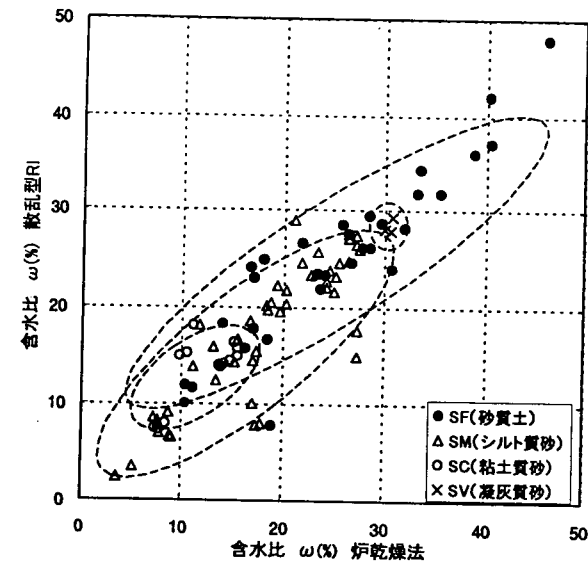
(c)散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

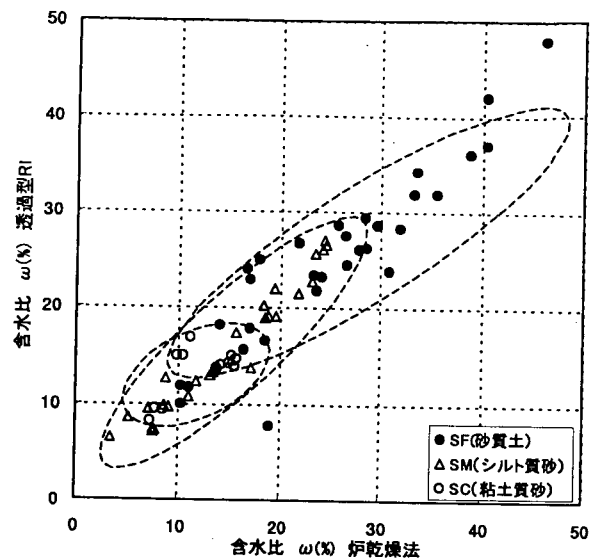
	砂-散	砂-透	散-透
SF	0.958	0.985	0.954
SM	0.876	0.883	0.845
SC	0.939	0.791	0.878
SV	—	—	—

図4-18 乾燥密度の比較 (砂: SF, SM, SC, SV)

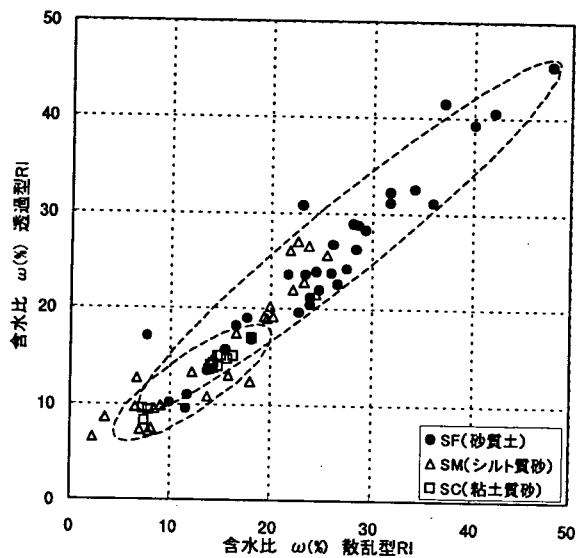
図 4-19 は、砂 (SF, SM, SC, SV) の含水比を各測定法間で比較したものである。いずれも測定法による差異は少なく、高い相関性が得られた。SM (シルト質砂) の一部については、散乱型で得られる値が炉乾燥法に比べて 1/2 程度であり相関性が低い。



(a) 炉乾燥法と散乱型



(b) 炉乾燥法と透過型



(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

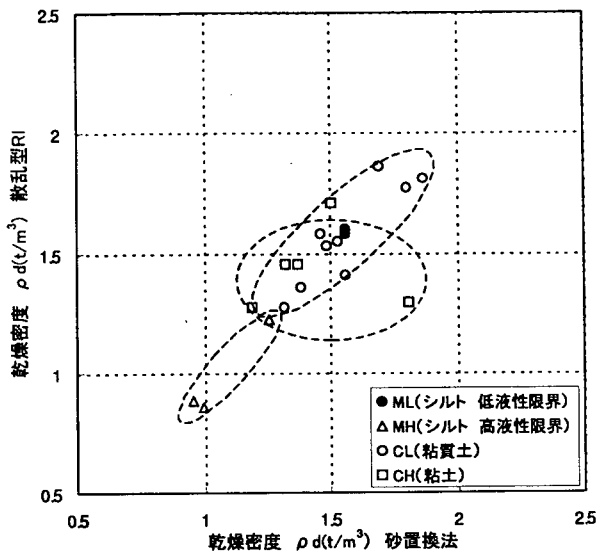
	炉-散	炉-透	散-透
SF	0.877	0.877	0.724
SM	0.858	0.971	0.923
SC	0.712	0.650	0.986
SV	—	—	—

図 4-19 含水比の比較 (砂 : SF, SM, SC, SV)

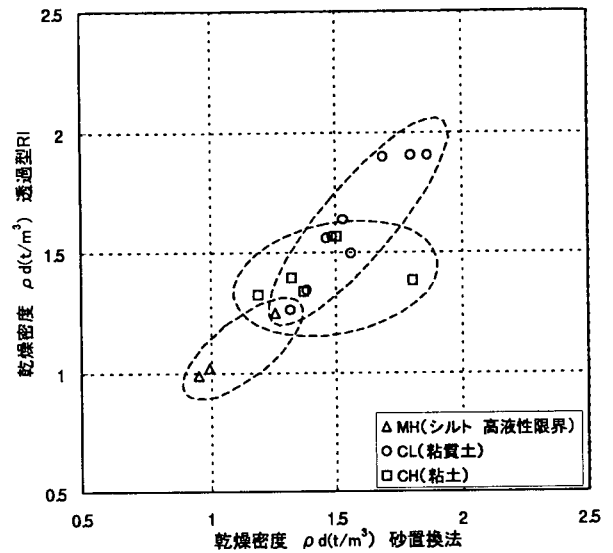
(5) 粘土 (ML, MH, CL, CH)

図 4-20 は、粘土 (ML, MH, CL, CH) の乾燥密度を各測定法間で比較したものである。サンプル数が少ないので単純な比較はできないが、以下のような傾向が認められる。

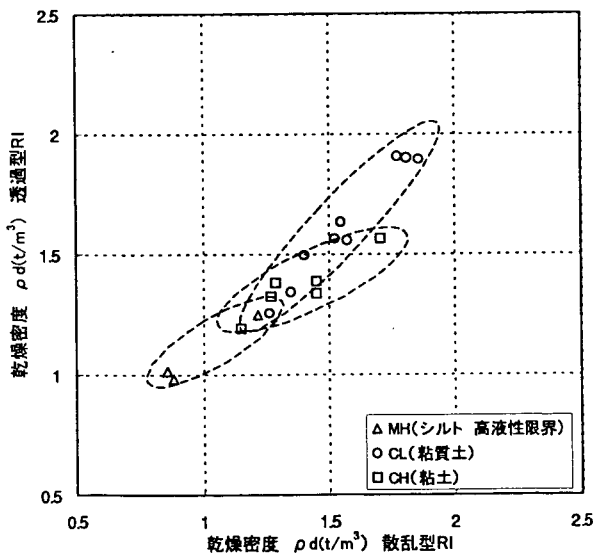
- ① MH (シルト高液性限界) は測定法による差異が少なく相関性が非常に高い。
- ② CL (粘質土) は測定法による差異が少なく相関性が非常に高い。
- ③ CH (粘土) は散乱型と透過型の相関性は高いが、砂置換法と RI 計器の相関性は低い。



(a) 砂置換と散乱型



(b) 砂置換と透過型



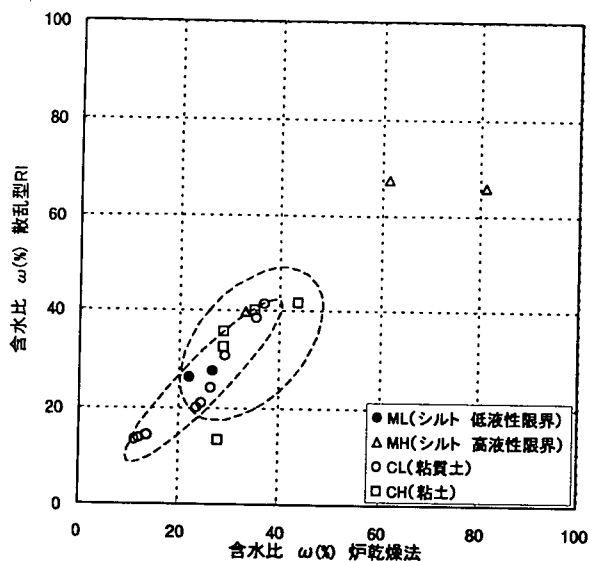
(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

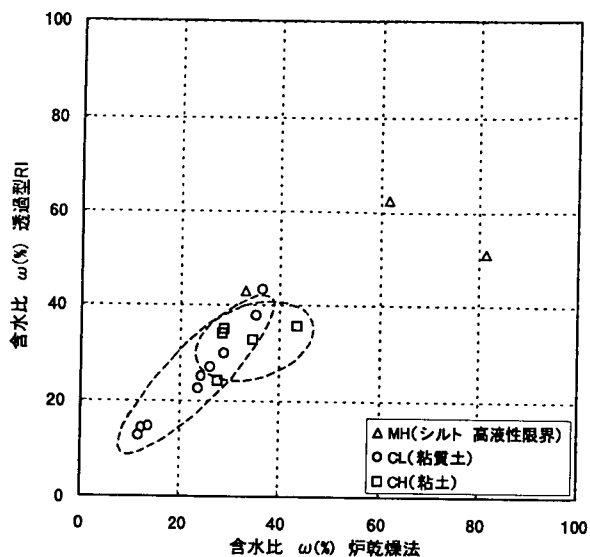
	砂-散	砂-透	散-透
ML	—	—	—
MH	—	—	—
CL	0.887	0.887	0.982
CH	0.014	0.0938	0.916

図 4-20 乾燥密度の比較 (粘土: ML, MH, CL, CH)

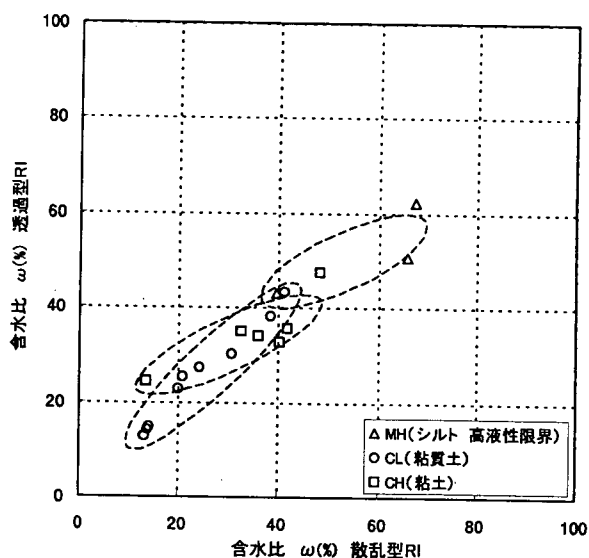
図 4-21 は、粘土 (ML, MH, CL, CH) の含水比を各測定法間で比較したものである。測定法による差異は少ないが、MH (シルト) については炉乾燥法と RI 計器の相関性は低い。



(a) 炉乾燥法と散乱型



(b) 炉乾燥法と透過型



(c) 散乱型と透過型

各測定法間の相関係数

	炉-散	炉-透	散-透
ML	—	—	—
MH	—	—	—
CL	0.963	0.985	0.986
CH	0.651	0.485	0.873

図 4-21 含水比の比較 (粘土: ML, MH, CL, CH)

以上の調査結果から、以下の点がまとめられる。

- ① 全ての盛土材料を対象にした各測定法間の乾燥密度及び含水比の相関係数は 0.92 以上であり、測定法による測定値の違いは少ないといえる。ただし、散乱型と炉乾燥法の含水比の相関係数は 0.78 であり比較的低い結果となった。その理由として、S-F（細粒分混じり砂）及び SM（シルト質砂）の一部について散乱型の測定値が炉乾燥法による値の 1 / 2 程度のものがあつたためと考えられる。
- ② 測定法間の相関係数を表 4-5 に示す。礫質土の乾燥密度は土質（現場）によって測定法間の相関係数にばらつきがみられるが、砂質土の乾燥密度は各測定法間の相関係数が比較的高い。含水比は土質に係わらず各測定法間の相関係数は高い。

表 4-5 測定法間の相関係数

土質	乾燥密度			含水比		
	砂－散	砂－透	散－透	砂－散	砂－透	散－透
GW	◎	×	◎	▲	◎	△
GP	×	×	×	◎	◎	◎
G-F	◎	×	—	◎	◎	—
G-M	×	◎	◎	◎	◎	◎
G-C	○	×	▲	◎	◎	◎
GF	△	—	—	◎	—	—
GM	◎	▲	×	◎	◎	○
GC	△	×	×	◎	◎	◎
Sg	◎	×	×	×	○	×
SP	◎	◎	◎	◎	◎	○
S-F	×	—	—	×	—	—
Fg	×	×	—	△	◎	—
S-M	—	—	—	—	—	—
SF	◎	◎	◎	○	○	△
SM	○	○	○	○	◎	◎
SC	◎	△	○	△	▲	◎
SV	—	—	—	—	—	—
ML	—	—	—	—	—	—
MH	—	—	—	—	—	—
CL	○	○	◎	◎	◎	◎
CH	×	×	◎	▲	×	○

凡例：0.9 以上＝◎，0.8 以上 0.9 未満＝○，0.7 以上 0.8 未満＝△，0.6 以上 0.7 未満＝▲，0.6 未満＝×

4.5 法肩付近の品質評価

法肩付近の乾燥密度を測定した結果を図 4-22 に示す。図の横軸は法肩からの距離 (m) , 縦軸は調査した層のにおいて法肩から十分離れた部分で測定した乾燥密度の平均に対する割合 (%) を示す。図中の山は, 調査した 117 層の乾燥密度を 10%毎に区分してヒストグラムにしたものであり, 度数をそれぞれのグラフの右下に示した。

散乱型では, 法肩からの距離が小さいほど乾燥密度のばらつきが大きく, 法肩の距離が 0.5m では 60%から 120%まで幅があるが, 法肩からの距離が 3m 以上では, 平均値±20%に収まっている。透過型 RI 計器についても, 散乱型と同様の傾向を示すが, 乾燥密度の幅は小さく, 法肩からの距離に係わらず平均値±20%に収まっている。

その理由としては, 法肩付近では重機による施工が困難であるため一般部に比べて締固めが不足しやすいことと, 散乱型 RI 計器では法面の影響によって測定値が比較的小さくなりやすいことが考えられる。

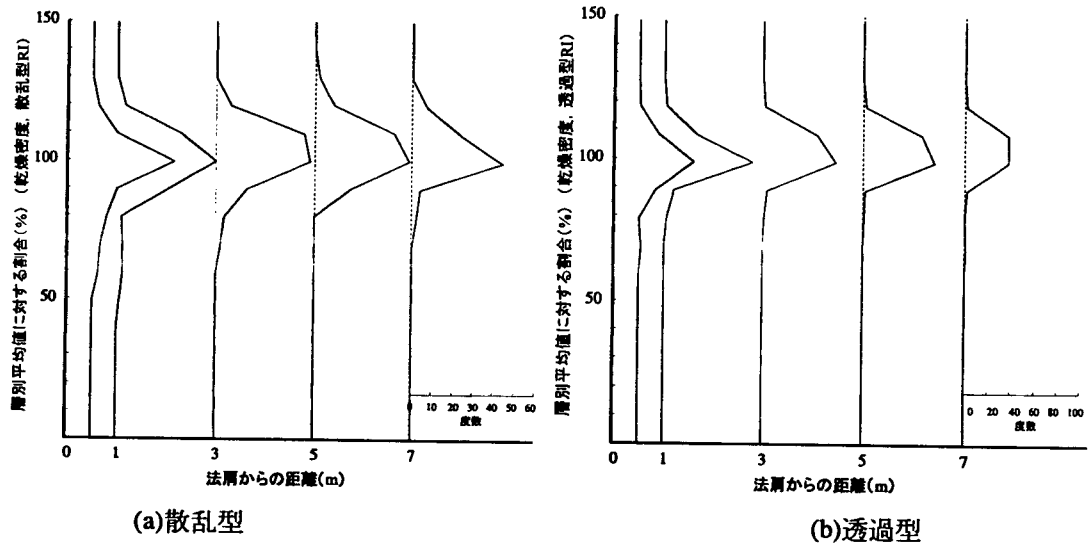


図 4-22 法肩からの距離と乾燥密度の関係

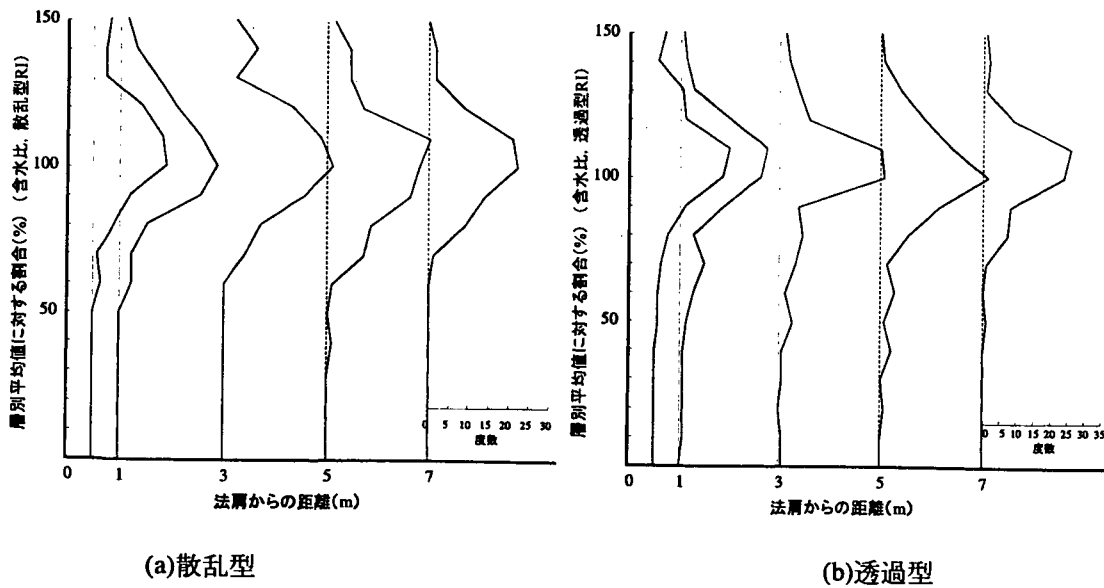


図 4-23 法肩からの距離と含水比の関係

法肩付近の距離と含水比の関係を図 4-23 に整理した。図には、横軸に法肩からの距離 (m) , 縦軸に該当する層の含水比平均値に対する割合 (%) を示した。

散乱型では、法肩からの距離が小さいほど含水比のばらつきが大きく、法肩の距離が 0.5m では 50% から 150% 以上まで幅があるが、法肩からの距離が 3m 以上では平均値 $\pm 30\%$ 程度に収まっている。全体的に法肩に近い方が大きな値であるが、その理由として法肩に近い部分は一般部に比べて締固めが不十分であることが考えられる。透過型 RI 計器についても、法肩からの距離が小さいほど含水比の幅が大きく、その値は散乱型 RI 計器よりも大きい。また、法肩からの距離に係わらずばらつきが大きい現場も見られた。

以上の結果から、次のようにまとめることができる。

- ① 法肩付近における盛土の乾燥密度は、法肩からの距離が小さいほどばらつきが大きいですが、法肩からの距離が 3m 以上では、平均値 $\pm 20\%$ に収束する。
- ② 法肩付近における盛土の含水比は、法肩からの距離が小さいほどばらつきが大きく、法肩の距離が 0.5m では 50% から 170% 程度まで分布しており、法肩からの距離が 3m 以上では、平均値 $\pm 30\%$ 程度に収まっている。
- ③ 上記の理由として、法肩付近では重機による施工が困難であるため一般部に比べて締固めが不足しやすいことが考えられる。

4.6 RI 計器を用いた品質管理の作業性

RI 計器による施工管理は、測定場所における密度と含水比の測定のほか、標準体、標準体 BG、現場 BG の測定や測定面の平滑処理などの作業を行う。本節では、平成 3 年度に実施したアンケート調査をもとに、現場作業の観点から施工管理に適した作業時間を検討する。

計測地点 1 箇所あたりの計測時間を図 4-24 に示す。市販の RI 計器は 1 箇所につき計測時間を 1 分間としており、現場においても散乱型ではほぼ半数、透過型では 60% が 1 分未満であった。透過型について必要な測定前の削孔作業は、ほとんどの現場では 1 箇所につき 1 ～ 2 分程度を要し、削孔しにくい礫質土では削孔時間が長くなる傾向があった。

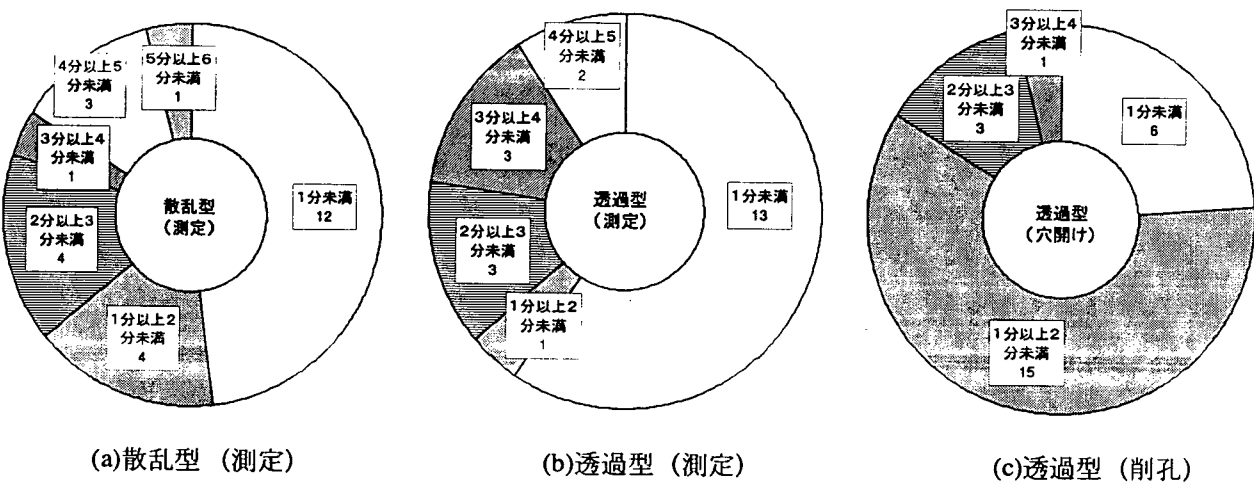
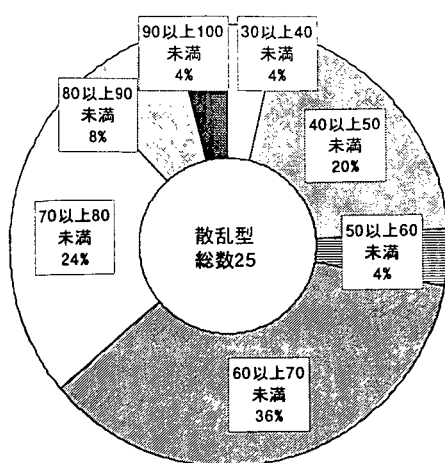


図 4-24 1 箇所あたりの計測時間 (平成 3 年度調査)

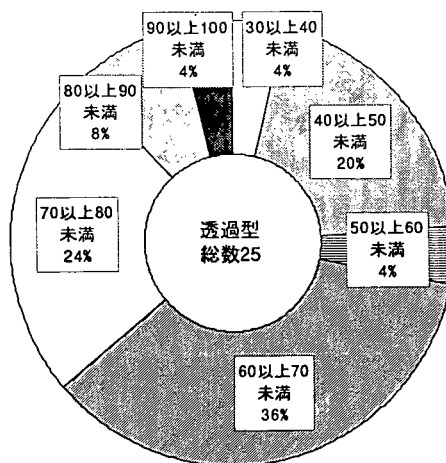
1 日の計測箇所数は、図 4-25 に示すように両機種とも全く同じであり、30 箇所から 100 箇所近くまで幅広く分布していた。多い順に 60 箇所以上 70 箇所未満が 36%，70 箇所以上 80 箇所未満が 24%，40 箇所以上 50 箇所未満が 20% となっており、全体的に測定点数が多い。これは、通常施工管理に必要な測定に加えて RI 計器の測定性能を検証するために同一地点において繰り返し測定したからである。

ウォーミングアップ、測定箇所間の移動、測定箇所の表面整形に要した時間も含む 1 日の計測時間を図 4-26 に示す。現場によって計測時間が異なり、1 時間程度から 9 時間近くまで幅広く分布していた。分布は両機種とも同様の傾向を示し、多い順に 2 時間以上 3 時間未満、3 時間以上 4 時間未満、1 時間以上 2 時間未満となっている。散乱型が透過型よりも計測時間が若干短いのは、散乱型では削孔作業が不要であるためと考えられる。

図 4-27 に、現場作業に影響を与えない施工管理作業時間について回答を得た結果を示す。30 分以上 1 時間未満、1.5 時間以上 2 時間未満がともに 36%，15 分以上 30 分未満が 24% とばらつきが見られる。調査対象とした施工現場の規模のばらつきをそのまま表しているとすれば、全作業時間に占める施工管理作業時間は施工規模に比例すると考えることができる。図 4-25 と比較すると、施工管理作業時間が現在の 1/4 程度に短縮されれば現場作業に影響を与えないと担当者は認識しているといえる。

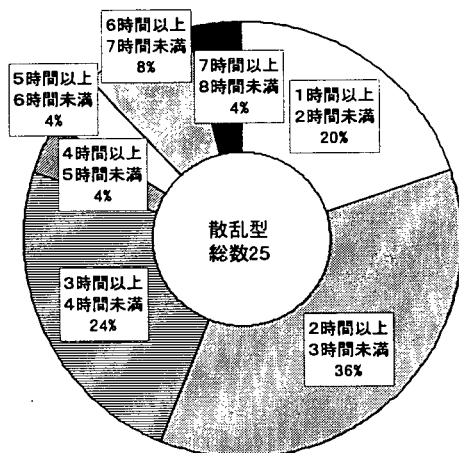


(a) 散乱型

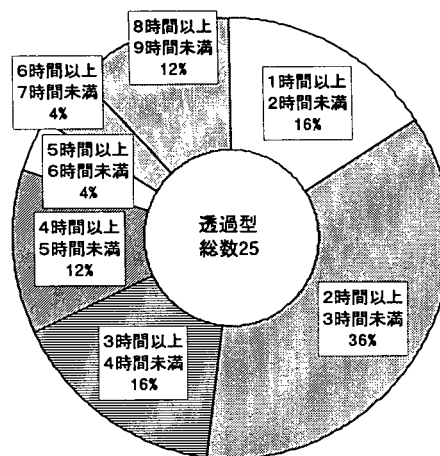


(b)透過型

図 4-25 1日の計測点数 (平成3年度調査)



(a) 散乱型



(b)透過型

図 4-26 1日の計測時間 (平成3年度調査)

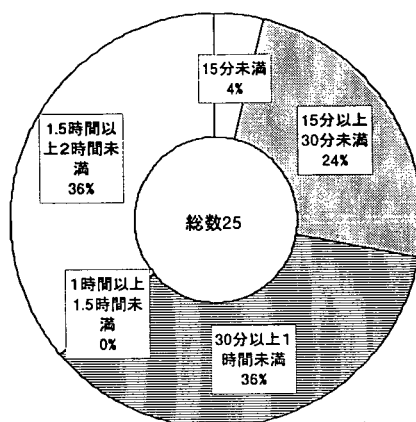


図 4-27 現場に影響を与えない施工管理作業時間 (平成3年度調査)

以上から、本調査結果は以下のようにまとめられる。

- ① 計測地点 1 箇所あたりの計測時間は両機種とも概ね 1 分である。透過型は、線源棒を挿入するための削孔作業に 1 箇所あたり 1 ～ 2 分を要するため、全体の作業時間は散乱型より若干長い。
- ② 1 日の計測箇所数は、30 箇所から 100 箇所近くまで幅広く分布していた。一番多いのは 60 箇所以上 70 箇所未満で 36%，その次に 70 箇所以上 80 箇所未満で 24% などである。
- ③ 全作業時間に占める施工管理作業時間は施工規模に比例すると考えられる。
- ④ 施工管理担当者は、施工管理作業時間（計測箇所数）が現在の 1/4 程度に短縮されれば現場作業に影響を与えないと認識しているといえる。

第5章 RI計器を用いた盛土の締固め管理要領の作成

土工の品質管理手法や品質管理基準を考える場合、構造物の重要度などに応じた品質、材料の品質管理や施工基準、管理基準項目など多数の項目について検討することが必要である。特に土の種類や含水比などの品質規格、締固め機械や転圧回数などの施工基準は施工管理の上で重要な検討項目である⁶⁾。本章では、これらの検討項目のうち新しい計測機器、計測方法による品質管理手法、管理基準に直接関係する項目、すなわち、品質の管理基準項目とその試験基準、測定方法及び計測で得られた結果の評価・判定方法を検討する。

5.1 現行の締固め管理基準の整理

平成7年度（本特定技術パイロット事業の終了時）において、関係分野あるいは関係機関で採用されていた締固め度の規定の代表例を表5-1に示す。締固め度の試験方法としてはJIS A 1214「砂置換法による土の密度試験方法」あるいはRI計器が用いられ、含水比の試験方法としてはJIS A 1203「土の含水比試験方法」あるいはRI計器が用いられる。

建設省において、道路土工の規格値が路体で ρ_{dmax} の85%以上、路床で ρ_{dmax} の90%以上と異なるのは、求められる機能が異なるためであると考えられる。道路路体の役割は、道路交通や維持管理に支障を与えるような有害な沈下やすべりを生じさせないことである。通常の盛土では沈下やすべりは自重と水の進入によって引き起こされるので、これらが生じないような締固めを行えばよい。一方、路床の役割は、交通荷重を路盤と路床が一体で支持することと路盤施工時の安定性を確保することである。路床は路体に比べて交通荷重の影響を受けることから、路体よりも大きな強度が求められると考えられる。

表5-1 土工の施工管理基準及び規格値（平成7年度）^{7),8)}

基準名	適用工種・土質	試験方法	規格値	備考（測定回数など）
建設省 品質管理基準 及び規格値	道路土工・粘質土	最大粒径 $\leq 53\text{mm}$: JIS A 1214 JIS A 1210 AB 最大粒径 $> 53\text{mm}$: 舗装試験法便覧	路体 : ρ_{dmax} の85%以上。 路床 : ρ_{dmax} の90%以上。 その他、設計図書による。	路体は、1,000 m^3 につき1回。路床は、500 m^3 につき1回の割で行う。但し、土量が5,000 m^3 未満の工事は、1工事当り3回以上、1,000 m^3 未満の工事は1回以上。
	河川土工・粘質土	JIS A 1214 JIS A 1210 AB	ρ_{dmax} の85%以上。又は設計図書に示された値。	築堤は、1,000 m^3 につき1回。但し、土量が5,000 m^3 未満の工事は、1工事当り3回以上、1,000 m^3 未満の工事は1回以上。
道路土工 施工指針	乾燥密度規定	JIS A 1214 RI計器	締固め度 : JIS A1210 第1方法の ρ_{dmax} の90%以上 施工含水比 : ω_{opt} と90%締固め度の得られる湿潤側の含水比の範囲	—
	空気間隙率または飽和度規定（特に自然含水比の高い粘性土）	—	砂質土 : $V_a \leq 15\%$, $S_r \geq 85\%$ 粘性土 : $V_a \leq 10\%$	—
河川土工 マニュアル	粗粒質	JIS A 1214 RI計器	平均締固め度90%以上 締固め度品質下限値80%	基準締固め試験はA-a法（JIS A 1210 第1方法）とする
	砂質土 {SF} (15% $\leq -74\mu\text{m} < 25\%$)	JIS A 1214 RI計器	平均締固め度90%以上 締固め度品質下限値80%	基準締固め試験はA-a法（JIS A 1210 第1方法）とする
	砂質土 {SF} (25% $\leq -74\mu\text{m} < 50\%$)	—	$V_a \leq 15\%$ 品質合格率 : 90%	施工含水比 : トラフィカビリティを確保しうる範囲
	粘性土	—	2% $\leq V_a \leq 10\%$ 85% $\leq S_r \leq 95\%$ 品質合格率 : 90%	—

平成 12 年度現在の土工の施工管理基準及び規格値を表 5-2 に示す。「道路土工施工指針」及び「河川土工マニュアル」は変更されていないので割愛した。表から、RI 計器が施工管理の試験方法に導入されていることが分かる。

表 5-2 土工の施工管理基準及び規格値（平成 12 年度）⁹⁾

基準名	適用工種	試験方法	規格値	備考（測定回数など）
建設省 品質管理基準 及び規格値	道路土工 現場密度 の測定	最大粒径 $\leq 53\text{mm}$ ： JIS A 1214 JIS A 1210 AB 最大粒径 $> 53\text{mm}$ ： 舗装試験法便覧	路体： ρ_{dmax} の 85% 以上。 路床： ρ_{dmax} の 90% 以上。 その他、設計図書による。	路体の場合、 $1,000\text{m}^3$ につき 1 回。但し、 $5,000\text{m}^3$ 未満の工事は、1 工事当たり 3 回以上。 路床の場合、 500m^3 につき 1 回。但し、 $5,00\text{m}^3$ 未満の工事は 1 工事当たり 3 回以上。 左記の規格値を満たしていても、規格値を著しく下回っている点が存在した場合は、監督職員と協議の上で、（再）転圧を行うものとする。
		または 「RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領（案）」	路体・路床とも 1 管理単位の現場乾燥密度の平均値が ρ_{dmax} の 90% 以上。または設計図書による。	路体・路床とも、1 日の 1 層あたりの施工面積を基準とする。管理単位の面積は $1,500\text{m}^2$ を標準とし、1 日の施工面積が $2,000\text{m}^2$ 以上の場合、その施工面積を 2 管理単位以上に分割するものとする。1 管理単位あたりの測定点数の目安を下表に示す。 ・最大粒径 $< 100\text{mm}$ の場合に適用する。 ・左記の規格値を満たしていても、規格値を著しく下回っている点が存在した場合は、監督職員と協議の上で、（再）転圧を行うものとする。
	河川土工 現場密度 の測定	最大粒径 $\leq 53\text{mm}$ ： JIS A 1214 JIS A 1210 AB 最大粒径 $> 53\text{mm}$ ： 舗装試験法便覧	ρ_{dmax} の 85% 以上。 または設計図書に示された値。	築堤は、 $1,000\text{m}^3$ につき 1 回の割合、または堤体延長 20m に 3 回の割合のうち、頻度の高い方で実施する。 左記の規格値を満たしていても、規格値を著しく下回っている点が存在した場合は、監督職員と協議の上で、（再）転圧を行うものとする。
		または 「RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領（案）」	1 管理単位の現場乾燥密度の平均値が ρ_{dmax} の 90% 以上。または設計図書による。	築堤は、1 日の 1 層あたりの施工面積を基準とする。管理単位の面積は $1,500\text{m}^2$ を標準とし、1 日の施工面積が $2,000\text{m}^2$ 以上の場合、その施工面積を 2 管理単位以上に分割するものとする。1 管理単位あたりの測定点数の目安を下表に示す。 ・最大粒径 $< 100\text{mm}$ の場合に適用する。 ・左記の規格値を満たしていても、規格値を著しく下回っている点が存在した場合は、監督職員と協議の上で、（再）転圧を行うものとする。
高規格堤防盛土設計・施工マニュアル	RI 計器を用いる管理方法	—	・乾燥密度で管理する場合 1 管理単位の現場乾燥密度の平均値が ρ_{dmax} の 90% 以上。 ・飽和度または空気間隙率で管理する場合 砂質土： $V_a \leq 15\%$ 粘性土： $2\% \leq V_a \leq 10\%$, $85\% \leq S_r \leq 95\%$ コーン指数 (q_c) は 392kN/m^2 以上を確保する。	RI 計器の品質管理頻度は上記と同じ。 RI 計器を用いる場合のコーン指数測定数は、乾燥密度等の測定数の 1/2 以上の箇所において実施し、1 箇所の測定は深さ 10cm, 20cm, 30cm の 3 深度においてコーン指数を記録するものとする。
	砂置換法を用いる管理方法	—	・乾燥密度で管理する場合 JIS A 1214 の規定に従い実施する。管理単位毎の締固め度は 85% 以上とする。 ・飽和度または空気間隙率で管理する場合 RI 計器を用いる管理方法と同様 コーン指数 (q_c) は 392kN/m^2 以上を確保する。	管理単位は盛土量 $1,000\text{m}^3$ を基準とする。ただし、総土工量が $1,000\text{m}^3$ 未満の場合においても 1 回は行うものとする。1 回当たりの測定は 3 個を原則とする。 コーン指数の管理頻度は、乾燥密度等の管理頻度と同様な頻度で行う。

5.2 締固め管理指標

各関係機関が定めた基準は、細粒分が多い砂質土や粘性土では空気間隙率・飽和度、細粒分が少ない砂質土や礫質土では締固め度を品質管理の指標としており、例えば「河川土工マニュアル」では75 μ mふるい透過率25%以上の土質では空気間隙率・飽和度による管理、25%未満の土質では締固め度を指標としている。本研究の測定実績でも、75 μ mふるい通過率が低い場合には空気間隙率よりは締固め度の方が規定値に収まりやすく、75 μ mふるい通過率が高い場合には空気間隙率の方が規定値に収まりやすい傾向があり、その境界は75 μ mふるい通過率が20%~50%の範囲にあると考えられるが、境界の特定にはさらなるデータの蓄積を待つ必要があると考えられる。

そこで、本基準（案）では河川土工マニュアルに準じて、75 μ mふるい通過率が20%未満の砂礫土及び砂質土の場合は締固め度による管理、50%以上の粘性土の場合は空気間隙率による管理を原則とし、その中間においては自然含水比など、使用土砂の状況から判断してどちらによる管理を採用するか判断するものとした。

なお、道路土工指針には飽和度による管理の規定も記載されているが、飽和度はばらつきが大きく、今回の管理基準（案）においては飽和度は採用しなかった。

5.3 礫に対するRI計器の適用範囲

散乱型RI計器は、礫率が60%以上になると測定地点の表面整形がしにくくなり、計器と盛土表面の間に生じる空隙によって乾燥密度のばらつき（標準偏差）が大きくなる。一方、透過型RI計器は礫率に関係なく標準偏差はほぼ一定の値を示す（図4-8）。真の値を算出するために必要な測定点数と標準偏差とは正の相関関係があるので、測定点数を増やせば標準偏差が大きい盛土でも精度の高い品質管理が可能であるが、あまり測定点を増やすと測定作業時間が長引いてRI計器のメリットである迅速性が発揮されない。4.6で得た結論から、施工作業上可能な測定点数を15点程度とすると、4.3の結論から標準偏差は0.12以下であることが必要となる。散乱型RI計器は盛土材料の礫率が60%を越えると乾燥密度の標準偏差が0.20を越える場合が多くなるので、本基準（案）では、盛土材料の礫率が60%以上でかつ細粒分が10%未満の場合は原則として散乱型RI計器による管理は行わないものとした。

また、盛土材料に粒径の大きい礫が含まれると表面整形が困難となるため、層厚の1/2~1/3にあたる10cm以上の径を含む盛土材料はRI計器による管理を行わないものとした。

5.4 管理単位の設定及びデータ採取

（1）管理単位

従来の品質管理基準は、施工の状態を検定する単位（以下「管理単位」という）を土工量としていた。この方法では、1つの管理単位で複数の土層を施工する場合に品質管理を実施しない層が生じる可能性があり、

品質を担保できない課題があった。締固めの状態は面的に変化することから面的な管理を行う必要もあり、本基準（案）では施工面積によって管理単位を規定した。

本研究の測定実績では、現場総数 134 件のうち現場単位の日施工量は 250m^3 までが 63 件、 $250\sim 500\text{m}^3$ が 32 件、 $500\sim 750\text{m}^3$ が 23 件などであり（p.19 参照）、 500m^3 程度の施工規模が標準的であるといえる。本基準（案）では 500m^3 程度の施工量に見合う施工面積を管理単位として設定した。

$$500\text{m}^3 / 0.3\text{m} \text{（一層の仕上げ厚さの上限）} = 1,670\text{m}^2 \rightarrow 1,500\text{m}^2$$

（2）データ採取個数

1 管理単位あたりのデータ採取個数は、5.3 で述べたように測定結果の信頼性と施工管理作業の効率化を担保するために、15 点を原則とした。現場での測定にあたってはこの $1,500\text{m}^2$ で 15 点を原則として考えるが、単位面積に対しての弾力性を持たせ、1 日の施工面積 $500\text{m}^2\sim 2,000\text{m}^2$ までは $1,500\text{m}^2$ とほぼ同等とみなし 15 点のデータ採取個数とした。一方、1 日の施工面積が 500m^2 未満の場合は 15 点のデータ採取とするとあまりにも過剰な管理になると考えられるので最低確保点数を 5 点とした。

盛土の品質を面的に評価するには管理単位各部から偏りなくデータを採取することが望ましいので、測定位置の間隔の目安として 100m^2 に 1 点の割合で測定することとした。また、4.5 によれば盛土周辺部、特に法肩から 1.0m 程度までは締固め管理指標が低い値を示している。盛土周辺部において十分な締固めが行えるかどうかは、土質や法面の勾配により異なると考えられるので、法肩から 1.0m 以内は管理基準の対象としないこととした。

5.5 管理基準値

従来運用されてきた品質管理基準及び規格値は、試験方法として測定点数が限られた砂置換法を前提に定められている。そのため、各々の測定値が規格値を満たす必要があると考えられている。RI 計器は砂置換法に比べて測定時間が短いので、多くの測定による平均値管理が可能である。

砂置換法と RI 計器の測定値は、4.4 の結果からほぼ同じ値が得られるといえる。砂置換法による品質管理は最低値管理であるのに対し、RI 計器では平均値で管理するので本基準（案）では基準値をこれまでよりも高い 90%とした。従来の品質管理基準及び規格値においても平均値を管理単位の代表値としているが、砂置換法の場合、限られた範囲から得たサンプル（標準で 3 箇所）をもとにしている。それに対して、RI 計器では盛土表面からまんべんなく測定値を得るので、同じ管理単位の代表値でもその意味は異なるといえる。

管理基準値は、表 5-1 に示したように基準によって異なるが、本基準（案）では様々な構造物や土質に応じた規格を定めず、暫定的に品質管理基準及び規格値よりも厳しい道路土工施工指針及び河川土工マニュアルの規格値に合わせている。道路土工については、路床に対して 90%よりも大きい値（例えば 95%）を規格値とすると、規格値を満たさない現場が多くなり工事に支障をきたすおそれがあることから、路床についても 90%を規格値とすることにした。

あとがき

本報告では、盛土全体の品質の適切な評価や施工への迅速なフィードバックを図るため、全国の道路盛土と河川堤防の施工現場において散乱型 RI 計器及び透過型 RI 計器による品質管理を実施し、従来の品質管理手法との比較によりその適用性と問題点を検討してきた。

その結果、RI 計器は十分な精度で盛土の品質管理に適用でき、作業効率を落とすことなく盛土全体を面的に管理できることが明らかとなった。今後はさらに多くの土質における測定データを蓄積していくことにより、「RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領（案）」の追加・修正を図っていきたい。

近年、建設発生土の有効活用を目的に、複数の現場から運搬された建設発生土を用いた盛土が数多く施工されるようになった。土質構成が複雑な盛土では、品質管理指標や管理基準が単一土質で構成される盛土とは異なることが想定される。今後は、そのような盛土における品質管理手法が望まれる。また、RI 計器の測定精度を担保するための検定体制の整備も、普及を図っていく上で不可欠であると考えられる。

最後に、本調査は平成元年度から平成7年度まで各地方建設局の協力を得て継続的に実施したものであり、実施にあたっては、建設省各地方建設局企画部技術管理課及び技術事務所の方々に測定結果のとりまとめ、アンケート調査に終始ご協力いただいた。ここに心からお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) (社)土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ，表面型密度計・水分計の取り扱い手引，p.30，p.32，1974.10
- 2) 千田昌平，熊谷恒一郎，武田繁：土木研究所資料第 1040 号 礫混り土の盛土施工管理（ラジオアイソトープの利用について），1975.6
- 3) 梅園輝彦，中川良文，武山峰典，高田知典，嶋津晃臣，見波潔：土の締固め度の非破壊試験法（その 6）－散乱型 RI 法による密度・水分の測定－，第 22 回土質工学研究発表会発表論文集 pp.1665-1668，1987.6
- 4) 東京大学教養学部統計学教室編：自然科学の統計学，pp.222-228，1992.8
- 5) 東京大学教養学部統計学教室編：統計学入門，pp.197-198，p.226，1991.7
- 6) 苗村正三，境友昭，田中貢，下坪賢一ほか：機械化施工における施工管理手法の合理化，土木研究所資料 2995 号，1991.3，pp.74-108
- 7) (社)日本道路協会：道路土工－施工指針（改訂版），1986.11
- 8) (財)国土開発技術研究センター：河川土工マニュアル，1993.6
- 9) (財)リバーフロント整備センター：高規格堤防盛土設計・施工マニュアル，1999.2
- 10) 中場広喜，田中貢：土の締固め管理のための非破壊試験法（その 12）－地盤の不陸が RI 法に及ぼす影響について－，第 27 回土質工学研究発表会発表論文集，1992

R I 計器を用いた盛土 の締固め管理要領(案)

目 次

1 章 総 則	1
1. 1 適用の範囲	1
1. 2 目 的	1
2 章 R I 計器による測定方法	2
2. 1 計器の種類	2
2. 2 検定方法	3
2. 3 R I 計器による測定方法	5
3 章 R I 計器による締固め管理	7
3. 1 締固め管理指標	7
3. 2 水分補正	7
3. 3 礫に対する R I 計器の適用範囲	8
3. 4 管理単位の設定及びデータ採取	8
3. 5 管理基準値	10
3. 6 データの採取方法	12
3. 7 データの管理	12
3. 8 是正処置	12
参 考 資 料 (省略)	
参 考 文 献 (省略)	

1 章 総 則

1. 1 適用の範囲

本管理要領（案）は河川土工及び道路土工における R I 計器を用いた盛土締固め管理に適用するものとする。

解 説

河川土工及び道路土工における盛土の締固め管理においては、これまで砂置換法が主として用いられてきたが、高速道路や一部のダムをはじめとして R I 計器が導入され、各事業体において R I 計器を用いた締固め管理が標準化されつつある。

また、R I 計器や測定方法の標準化に関しては、従来の学会基準が改訂され、地盤工学会基準（JGS 1614-1995）「R I 計器による土の密度試験方法」が制定されるなど、本格的な導入に向けての環境も整備されてきた。

一方、現在及び将来とも数多くの高規格堤防や大規模な道路盛土の事業が進行または計画されており、一般の河川土工や道路土工も含めて合理的な締固め管理手法の導入が必要とされている。

そこで本管理要領（案）は、現場密度試験に R I 計器を用いる場合に R I 計器の持つ特長を最大限発揮させるべく、計器の基本的な取扱い方法やデータ採取、管理基準値の規定を行なうものである。

この基準に規定していない事項については、下記の基準・マニュアルを基準とする。

- ・「河川土工マニュアル」…平成 5 年 6 月、(財) 国土開発技術研究センター
- ・「道路土工－施工指針」…昭和 61 年 11 月、(財) 日本道路協会

1. 2 目 的

本管理要領（案）は河川土工及び道路土工において、R I 計器を用いた盛土の締固め管理を行う際の R I 計器の基本的な取扱い方法、データの採取個数、管理基準値を定めることを目的とする。

解 説

本管理要領（案）では、R I 計器に関するこれまでの試験研究の成果を踏まえ、R I 計器の基本的な取扱い方法や土質等による適用限界を示した。

また、本管理要領（案）ではデータの採取個数を規定した。砂置換法を前提とした管理では計測に時間がかかることから、かなり広い施工面積を 1 点の測定値で代表させており、盛土の面的把握という観点からは十分なものではなかった。一方 R I 計器は砂置換法に比べ飛躍的に測定時間が短くなっているため、従来 1 個の測定値で代表させていた盛土面積で複数回測定することができる。そこで本管理要領（案）では、盛土の面的管理の必要性和 R I 計器の迅速性を考慮してデータの採取個数を規定した。

2 章 R I 計器による測定方法

2. 1 計器の種類

R I 計器は散乱型及び透過型を基準とするものとし、両者の特性に応じて使い分けるものとする。

解 説

R I 計器には一般に散乱型と透過型があり（図－1 参照）、両者の特徴は以下の通りである。

(1) 散乱型 R I 計器

線源が地表面にあるため、測定前の作業が測定面の平滑整形だけでよく、作業性が良い。地盤と計器底面との空隙の影響を受けやすいので注意が必要である。

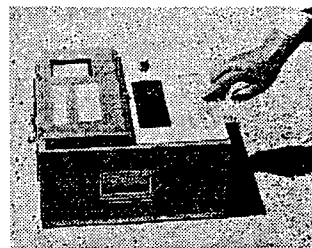
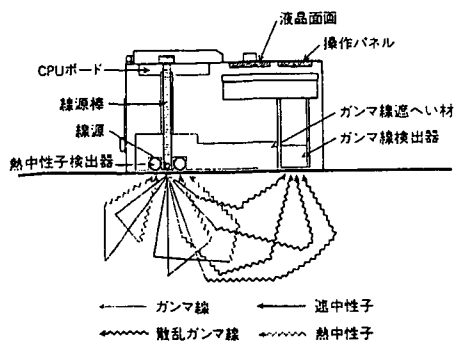
(2) 透過型 R I 計器

線源が長さ20cmの線源棒の先端付近にあり測定時には線源棒の挿入作業を伴うので散乱型に対して少し測定作業時間が長くなる。線源が地中にあるため、盛土面と計器底面との空隙の影響は比較的受けにくい。

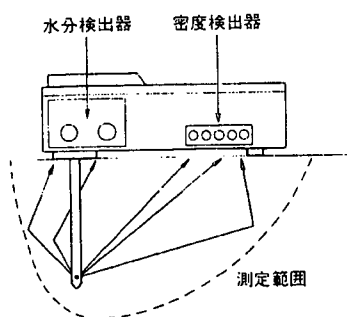
表－1 散乱型と透過型の比較例

項 目		散 乱 型	透 過 型
線 源	ガンマ線	コバルト－60	コバルト－60
	中性子線	カリフォルニウム－252	カリフォルニウム－252
検 出 器	ガンマ線	SCカウンタ×1	GM管×5
	中性子線	He－3 カウンタ×2	He－3 管×2
測 定 方 法	密 度	ガンマ線後方散乱方式	ガンマ線透過型
	水 分	熱中性子散乱方式	速中性子透過型
本 体 寸 法		310×365×215mm	310×365×160mm
本 体 重 量		25kg	11kg
測 定 範 囲 （ 深 さ ）		160 ～ 200mm	200mm
測 定 時 間	標 準 体	5 分	10分
	現 場	1 分	1 分
測 定 値		湿潤密度、水分密度、乾燥密度、含水比、空隙率、 締固め度、飽和度（平均値、最大・最小値、標準偏差）	
電 源		DC 6 V内蔵バッテリー 連続8時間	DC 6 V内蔵バッテリー 連続12時間
長 所		・孔あけ作業が不要 ・路盤などにも適用可能 ・感度が高く計測分解能力が高い	・軽量で扱い易い ・表面の凹凸に作用され難い ・使用実績が多い
短 所		・測定表面の凹凸の影響を受け易い ・礫の適用に注意を要する ・重い	・孔あけ作業が必要 ・礫に適用できない場合がある （削孔不能な地盤） ・線源棒が露出している

これまでの研究によると散乱型と透過型の測定結果はどちらともほぼ砂置換法と同様であることが判っており（参考資料参照）、基本的には機種による優劣はない。ただし、盛土材が礫質土の場合（礫の混入率が60%以上）、その使用には充分留意すること。（3.3 参照）



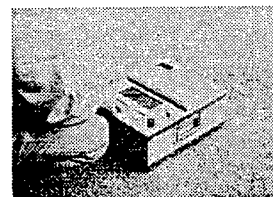
① 散乱型



孔あけ



測定



設置



② 透過型

図-1 RI計器の概要

2.2 検定方法

使用するRI計器は正しく検定がなされたものであって、検定有効期限内のものでなければならない。

解説

放射線源が時間とともに減衰していくため、同じものを測定しても結果が異なってくる。因みに線源として一般に用いられているコバルト60 (^{60}Co) やカリフォルニウム (^{252}Cf) の半減期はそれぞれ5.26年、2.65年である。

そのため標準体での値を基準にした計数率を定期的に調べておく必要がある。

この計数率と測定する物体についての計数率（現場計数率）との比を計数率比（R）といい、計数率比と密度や含水量とに指数関数の関係がある。（図-2）

この関係を正しく検定したRI計器を使用しなければならない。

$$\text{計数率比 (R)} = \frac{\text{現場計数率}}{\text{標準体の計数率}}$$

$$\text{計数比 (R)} = R_0 \exp(a \cdot X)$$

ここに、 R_0 と a は定数であり、 X は密度あるいは含水量を表わす。

また、使用するR I計器のメーカーでの製作納入時、および線源交換時毎の検定結果を添付し、提出するものとする。

校正式の例を図-3 (透過型) に示す。

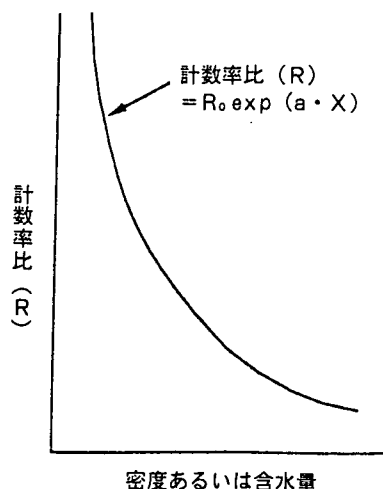
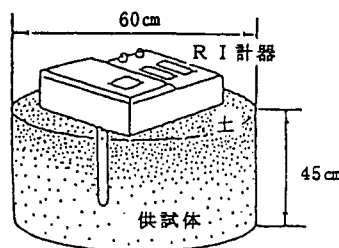
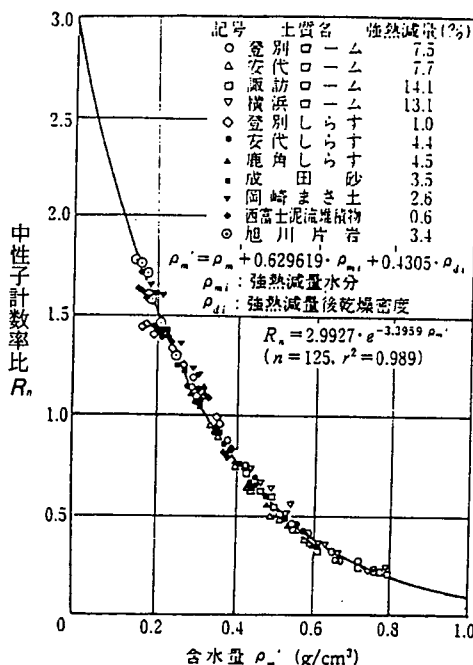
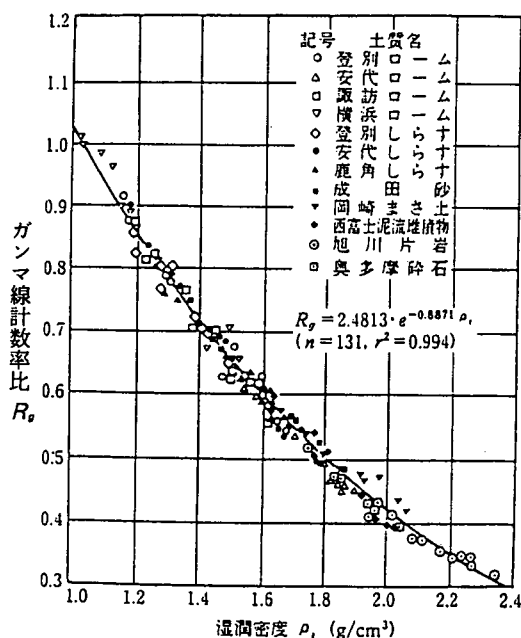


図-2 計数率比 (R) と密度および含水量の関係



10種類以上の土質を用いて、100点以上の供試体が作成されて関係が求められた。

図-3 計数率比と湿潤密度および含水量の検定例
(地盤工学会「地盤調査法」から引用)

2. 3 R I 計器による測定方法

R I 計器による測定は操作手順にしたがって正しく行わなければならない。

解 説

(1) R I 計器の構成

散乱型 R I 計器は計器本体だけで測定が可能であるが、透過型は R I 計器本体、線源棒、標準体、線源筒、ハンマー、打ち込み棒、ベースプレートが必要である。

R I 計器は現時点において供給体制が十分であるとは言えないため、使用にあたっては担当監督員と協議の上、散乱型あるいは透過型 R I 計器を選定し使用するものとする。

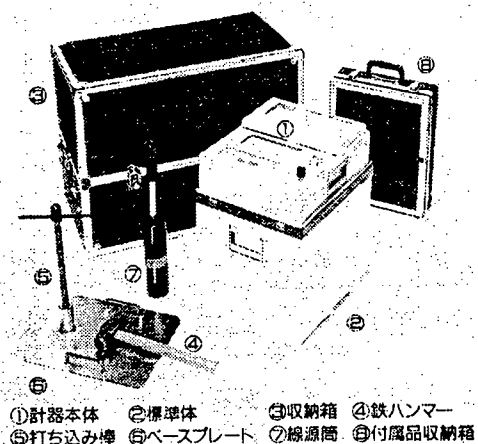


図-4 計器の構成例（透過型）

(2) 測定手順

測定手順は一般に図-5 のようになる。

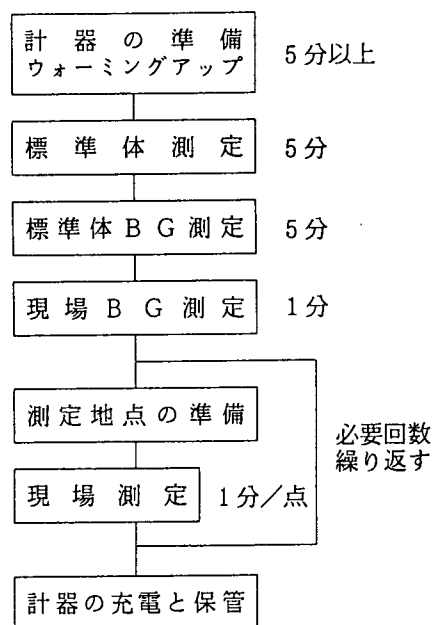
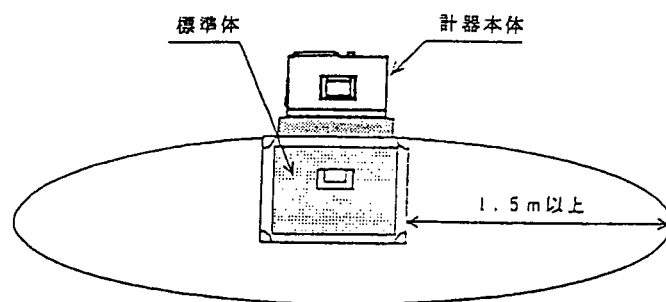


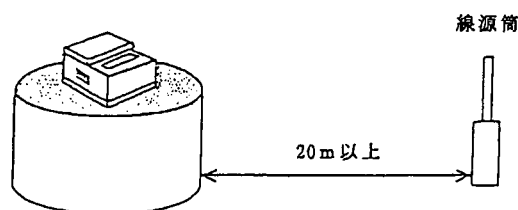
図-5 測定の手順の例

(3) 測定上の留意点

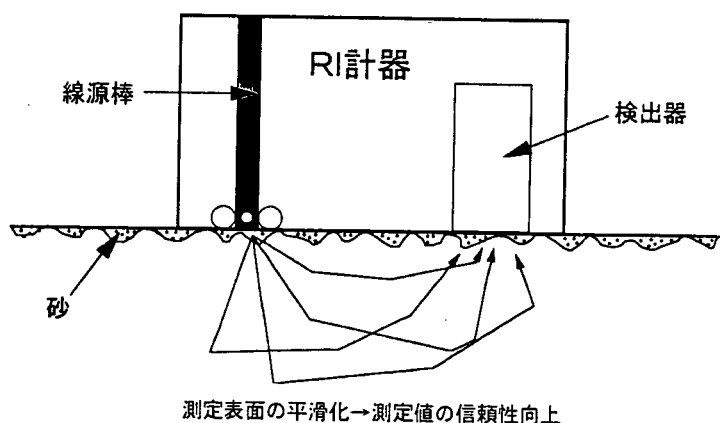
- 1) 計器の運搬は激しい衝撃や振動を与えないよう十分注意して行う。
- 2) 充電は十分しておく。
- 3) R I 計器の保管場所は過酷な温度条件とならないところでなければならない。特に夏の自動車の車内は要注意である。また、室内外の寒暖差が大きいところでは、結露に注意すること。
- 4) 標準体での測定時には、標準体は壁や器物から1.5m以上離れたところにおいて行う必要がある。



- 5) 自然放射線の影響を除くためバックグラウンド測定を行う時、線源は少なくとも20m以上遠ざける必要がある。



- 6) 現場での測定地点は出来るだけ平滑にすることが大事である。特に散乱型は測定面と計器底面との間に空隙を生じると測定結果に大きな影響を与えるため特に注意が必要である。
- 7) 測定表面を平滑にするために鉄板や装備のプレート等を使用するが、表面を削り過ぎて測定対象層より深い深度のデータを取ることはないよう注意が必要である。なお、レキ分が多く、削ることにより平坦性を確保する事が困難な場合は、砂などをひき平滑にする。



- 8) 測定は施工当日を原則としているので、気象変化には十分注意し3章に示したデータの採取数を同日に確保することを心掛ける必要がある。
- 9) 測定能率を上げ、一つ一つのデータの採取時間を短縮するために、測定ポイントの地点出し、表面整形、測定、記録と流れ作業化することが望ましい。
- 10) 平均値管理を基本としているため、一つ一つのデータのバラツキにあまり神経質になり過ぎ、測定や施工を無為に遅らせることのないよう注意することも管理者として必要である。

3 章 R I 計器による締固め管理

3. 1 締固め管理指標

締固め度および空気間隙率による管理を行うものとし、盛土材料の75 μ mふるい通過率によりその適用区分を下記のとおりとする。

75 μ mふるい通過率が20%未満の礫質土及び砂質土の場合	75 μ mふるい通過率が20%以上50%未満の砂質土の場合	75 μ mふるい通過率が50%以上の粘性土の場合
締固め度による管理	締固め度による管理 または 空気間隙率による管理	空気間隙率による管理

解 説

ここでは河川土工マニュアルに準じて、75 μ mふるい通過率が20%未満の砂礫土及び砂質土の場合は締固め度による管理、50%以上の粘性土の場合は空気間隙率による管理を原則とし、その中間においては自然含水比など、使用土砂の状況から判断してどちらによる管理を採用するか判断するものとする。

なお、河川土工マニュアルおよび道路土工—施工指針には飽和度による管理の規定も記載されているが、飽和度はバラツキが大きいことから、ここでは飽和度による管理は省いている。

3. 2 水分補正

現場でR I 計器を使用するためには、予め土質材料ごとに水分補正を行う必要がある。土質材料ごとの水分補正值を決定するため水分補正值決定試験現場で実施しなければならない。

解 説

(1) 水分補正值

R I 計器が測定する水分量は、炉乾燥法 (JIS-A1203) で求められる水分量のみでなく、それ以外の結晶水や吸着水なども含めた、土中の全ての水分量に対応するものである。従って、結晶水や吸着水に相当する量を算出して補正する必要がある。

R I 計器では、これらを補正するために、乾燥密度と強熱減量を考慮した校正式が組み込まれている。土質材料ごとの強熱減量試験を一般の現場試験室で実施することは難しいので、現場でR I 計器による測定と含水量試験を同一の場所の同一材料で実施し、水分補正を行うものとする。

R I 計器は測定した計数比率と校正定数から、強熱減量を1%ごとに変化させて、そのときの含水比を推定計算した結果を印字する機能を有している計器を用いる必要がある。この計算結果と含水量試験による含水比から、その土質材料に対応する強熱減量値を水分補正值と称す。

(2) 現場水分補正決定試験の手順例

1) 現場の盛土測定箇所でのR I 計器の測定準備。

- a) 標準体測定
- b) 標準体BG測定
- c) 現場BG測定

- d) 測定箇所の整形および均し
- e) R I 計器を測定箇所に設置
- 2) 「現場密度」の測定を行う。
- 3) 測定が終了したら、水分補正值－含水比の対応表を表示、印字する。
- 4) R I 計器の真下の土を 1 kg 以上採取する。
(深さ 15cm 程度まで採取し混合攪拌する)
- 5) 採取した土の含水量試験を実施する。
- 6) 含水量試験の含水比に近い含水比に対応する水分補正值を読みとる。
- 7) R I 計器に水分補正值を設定する。
- 8) 土質材料が変わらない限り水分補正值を変更してはならない。

3. 3 礫に対する R I 計器の適用範囲

- 1. 盛土材料の礫率は 60% 以上で、かつ細粒分 ($75\mu\text{m}$ ふるい通過率) が 10% 未満の場合は原則として散乱型 R I 計器による管理は行わないものとする。
- 2. 径 10cm 以上の礫を含む盛土材料の場合には、散乱型及び透過型 R I 計器による管理は行わないものとする。

解 説

(1) 礫率に対する適用範囲

散乱型については礫率 (2mm 以上の粒径の土が含まれる重量比) が 70% を越えると急激な測定値の精度が低下する室内実験結果 (実測値との相違、標準偏差の増加など) がある。また、現場試験においても礫率が 65% ~ 70% を越えると標準偏差が増加する傾向であった。これは礫分が多くなると測定地点の表面整形がしにくくなり平滑度が低くなるため、特に散乱型の場合はこの平滑度が測定結果に大きく影響を受けるためである。

ここでは、施工管理における適用範囲であることから限界を安全側にとり、礫率 60% 未満を散乱型の適用範囲とした。なお、透過型は礫率 60% 以上でも適用可能としているが、線源棒の打ち込みに支障となる場合があり注意を要する。

(2) 礫径に対する適用範囲

大きな礫が含まれる盛土材料の場合には R I 計器による測定値に大きなバラツキがみられ、値が一定しないことが多い。これは礫率のところでも述べたように表面の平滑度の問題である。すなわち、礫径の大きなものが含まれる盛土材料では表面の平滑度が保てず、測定結果に影響を及ぼすため礫径に対する適用範囲を設けた。

ここでは一層仕上り厚さが通常 20cm ~ 30cm であることも考慮して、層厚の $1/2 \sim 1/3$ にあたる 10cm を R I 計器の適用範囲とした。

ただし、やむを得ず R I 計器による管理を行う場合は、散乱型・透過型とも監督官と協議の上、現地盛土試験より種々の基準値、指標を決定するものとする。

3. 4 管理単位の設定及びデータ採取

1. 盛土を管理する単位（以下「管理単位」）に分割して管理単位毎に管理を行うものとする。
2. 管理単位は築堤、路体、路床とも一日の一層当たりの施工面積を基準とする。管理単位の面積は1,500㎡を標準とする。
また、一日の施工面積が2,000㎡以上の場合、その施工面積を2管理単位以上に分割するものとする。
3. 各管理単位について原則15個のデータ採取を行い、平均してその管理単位の代表値とする。
ただし、一日の施工面積が500㎡未満であった場合、データの採取数は最低5点を確保するものとする。
4. データ採取はすべて施工当日に行うことを原則とする。
5. 一日の施工が複数層に及ぶ場合でも1管理単位を複数層にまたがらせることはしないものとする。
6. 土取り場の状況や土質状況が変わる場合には、新規の管理単位として取り扱うものとする。

解 説

(1) 管理単位を日施工面積で規定したことについて

従来、管理単位は土工量（体積）を単位として管理していた。しかし、締固めの状態は面的に変化することから盛土の面的な管理を行う必要があり、施工面積によって管理単位を規定した。

また、その日の施工はその日に管理するのが常識であることから、1日の施工面積によって管理単位を規定するのが妥当と考えられる。

(2) 管理単位の規定について

平成4年度の全国的なアンケート結果によると日施工面積は、500～2,000㎡の間に多く分布しており、特に1,500㎡くらいの施工規模が標準的であった。

また、1台の締固め機械による1日の作業量は2,000～2,500㎡が最大であることから、管理単位の面積を原則1,500㎡とした。

(3) データの採取個数の規定について

データの採取個数は3.5の解説に示したように、観測された土層のバラツキからサンプリングの考え方に基づき算定されたもので、概ね15個となった。この考え方によれば、計測個数を増やせば、管理の精度（不合格な部分が生じない安全度）は高くなるが、あまり測定点を増やすと測定作業時間が長引いてR I計器のメリットの一つである迅速性が発揮されなくなることから15点とした。

現場での測定に当たってはこの1,500㎡で15点を原則として考えるが、単位面積に対しての弾力性を持たせ、1日の施工面積500～2,000㎡までは1,500㎡とほぼ同等とみなし15点のデータ採取個数とした。

一方、1日の施工面積が500㎡未満の場合は15点のデータ採取とするとあまりにも過剰な管理になると考えられるので最低確保個数を5点とした。

また、管理単位が面積で規定し難い場合（土工量は多いが構造物背面の埋立てや柱状の盛土等）は、土工量の管理でも良いものとする。

なお、1管理単位当りの測定点数の目安を下表に示す。

面 積 (㎡)	0 ～ 500	500 ～ 1000	1000 ～ 2000
測 定 点 数	5	10	15

3. 5 管理基準値

R I 計器による管理は1管理単位当たりの測定値の平均値で行う。なお、管理基準値は1管理単位当たりの締固め度の平均値が90%以上とする。

解 説

(1) 管理基準値について

R I 計器を用いて管理する場合は、多数の測定が可能であるR I 計器の特性を生かして、平均値による管理を基本とする。上の基準を満たしていても、基準値を著しく下回っている点が存在した場合は、監督員の判断により再転圧を実施するものとする。

締固め度による規定方式は早くから使用されており、実績も多いが、自然含水比が高く施工含水比が締固め度の規定範囲を超えているような粘性土では適用し難い問題がある。そのため、3. 1に示すように粘性土では空気間隙率、砂質土は締固め度あるいは空気間隙率により管理する。空気間隙率により管理する場合の管理基準値は河川土工マニュアル、道路土工指針に準ずるものとする。

【参 考】

河川土工マニュアル、道路土工指針の管理基準値（空気間隙率）

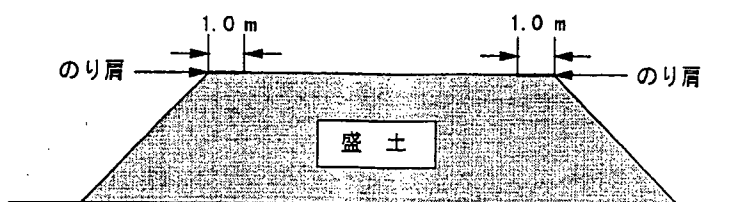
基準名	河川土工マニュアル	道路土工－施工指針	
区分	河 川 堤 防	路 体	路 床
空気間隙率 (V_a) による基準値	・砂質土 {SF} $25\% \leq 74\mu m < 50\%$ $V_a \leq 15\%$ ・粘性土 {F} $2\% < V_a \leq 10\%$	・砂質土 $V_a \leq 15\%$ ・粘性土 $V_a \leq 10\%$	—
備考	施工含水比の平均が90%の締固め度の得られる含水比の範囲の内 W_{opt} より湿潤側にあること。	同 左	施工含水比の平均が W_{opt} 付近にあること。少なくとも90%の締固め度の得られる含水比の範囲の内にあること。

〔凡 例〕 W_{opt} : 最適含水比

(2) 測定位置

測定位置の間隔の目安として、 $100m^2$ ($10m \times 10m$) に1点の割合で測定位置を決定する。構造物周辺、盛土の路肩部及び法面の締固めが、盛土本体の転圧と同時に進行される場合、次のような点に留意する。

- ① 構造物周辺でタイヤローラなどの転圧機械による転圧が不可能な場合は別途管理基準を設定する。
- ② 特にのり肩より1.0m以内は本管理基準の対象とせず、別途締固め管理基準を設定する。



基準となる最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ の決定方法

現行では管理基準値算定の分母となる最大乾燥密度は室内締固め試験で求められている。締固め試験は、材料の最大粒径などでA、B、C、D、E法に分類されており、試験法（A～E法）により管理基準値が異なる場合（路床）もあるため注意を要する。

表－2 室内締固め試験の規定
(地盤工学会編：土質試験法より抜粋)

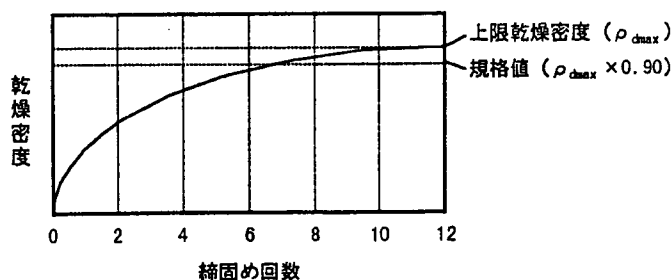
呼び名	ランマー重量 (kg)	モールド内径 (mm)	突固め層数	1層当たりの突固め回数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5

しかしながら、最大乾燥密度は、種々の材料や施工条件により決定しにくく、一定の値として限定できない場合もある。よって、下記のような条件では、試験盛土より最大乾燥密度を決定すべきである。

- 数種類の土が混在する可能性のある材料を用いる場合。
- 最大粒径が大きく、レキ率補正が困難で、室内締固め試験が実施できないようなレキ質土材料を用いる場合。
- 施工含水比が最適含水比より著しく高い材料を用いる場合。
- 上記以外の盛土材が種々変化する場合は、試験盛土で基準値を決定する管理や工法規定により管理する。

*＜試験施工の実施例＞

- 規定値は試験施工により、所定の材料、締固め機械、締固め回数より算定し決定する。
- 締固め回数を2、4、8、10、12回と変化させ締固めを行い、各々の締固め段階での乾燥密度を15点測定し、その平均値を求め、上限乾燥密度を求める。



- 上限乾燥密度を最大乾燥密度と定義し、その規格値 ($D_c \geq 90\%$) で管理する。
- 材料の混合率など、層や場所等で変化する場合はそれぞれ材料で同様の試験施工を行うか、もしくは、その材料に適合した校正式を別途定め、R I 計器に設定する必要がある。
- 締固め度が100%をたびたび越えるような測定結果が得られる場合、突固め試験の再実施や盛土試験を実施した新たな基準を決定する。

- f) 改良土（セメント系、石灰系）特殊土の管理基準値は試験盛土により決定する。また、改良土の場合は材令によっても変化するため、試験方法や管理基準値について別途定められた特記仕様書に準ずるものとする。

3.6 データの採取方法

データの管理単位各部から偏りなく採取するものとする。

解 説

盛土を面的な管理として行う目的から、管理単位各部から偏りなくデータを採取するものとする。

3.7 データの管理

下記の様式に従って管理記録をまとめるものとする。

1. 工 事 概 要 様式-1
2. 材料試験結果 様式-2
3. 施工管理データ集 様式-3

また、現場で測定したデータは原則としてプリンター出力結果で監督員に提出するものとする。

解 説

各様式については以下の要領でまとめる。

様式-1 工 事 概 要 工事毎

様式-2 材料試験結果 材料毎

様式-3 施工管理データ集 ... 測定機器毎に管理単位面積毎（但し、再締固めを行なった場合は締固め毎）

3.8 是正処置

施工時において盛土の管理基準値を満たさない場合には、適正な是正処置をとるものとする。

解 説

- (1) 現場での是正処置として、転圧回数を増す、転圧機械の変更、まき出し厚の削減、盛土材料の変更、及び気象条件の回復を待つなどの処置をとる。
- (2) 盛土の土質が管理基準の基となる土質と異なっている場合には、当然基準値に当てはまらないので、締固め試験を行なわなければならない。
- (3) 礫の多い材料や表面整形がうまくできなくて、R I 計器の測定値が著しくバラつく場合などには、砂置換などの他の方法によることも是正処置としてあり得るものとする。
- (4) 是正処置の判断は、その日の全測定データをみて、その日の品質評価を行い、是正処置が必要な場合翌日以降の施工方法を変更する。
全体を見通した判断が要求され、一日単位程度の是正処置を基本とする。ただし、過度に基準値を下回る試験結果がでた場合、現場での判断により転圧回数を増すなどの応急処置をとるものとする。処置後はR I 計器で再チェックを行う。
- (5) 是正処置の詳細については、監督員と協議するものとする。

盛土工事概要

工事名称					
施工場所					
地 建 名		事務所名			
施 工 業 者		工事期間			
盛 土 種 類	1. 道路路体 2. 道路路床 3. 河川堤防 4. その他 ()				
総土工量 (m ³)	(m ³)		平均日施工量 (m ³)	(m ³)	
平均施工面積	(m ²)		最大施工面積	(m ²)	
最小施工面積	(m ²)		まき出し厚さ		
転 圧 回 数			仕 上 が り 厚 さ		
転 圧 機 械	機種		規格または仕様		
平均日施工時間 ¹⁾			施工可能時間 ²⁾		
施工管理に要した時間	砂置換法		R I 法		
<工事の概要>					
<断面図>					

1) 盛土工事を行なった1日の平均時間

2) 開始時間から終了時間まで(休憩時間、昼食時間を含まず)

材料試験結果

No. _____

材 料 試 験 結 果	自 然 含 水 比 [*] Wn (%)		(%)	
	土 粒 子 の 比 重 Gs			
	レキ	礫 比 重 Gb		
		含 水 量 Wa (%)	(%)	
	最 大 粒 径 (mm)		(mm)	
	粒 度 組 成	レ キ 分	37.5mm 以上	(%)
			19.0 ~ 37.5 mm	(%)
			9.5 ~ 19.0 mm	(%)
			4.75 ~ 9.5 mm	(%)
			2.0 ~ 4.75mm	(%)
			合 計	(%)
		砂 分 75 μ m ~ 2.0 mm	(%)	
		細 粒 分 75 μ m 以下	(%)	
	コン シ ス テ ン シ	液 性 限 界 W _L (%)	(%)	
		塑 性 限 界 W _p (%)	(%)	
		塑 性 指 数 I _p		
		強 熱 減 量 I _g (%)	(%)	
最 大 乾 燥 密 度 ρ_{dmax}		(t / m ³)		
最 適 含 水 比 W _{opt} (%)		(%)		
土 の 分 類	日 本 統 一 土 質 分 類			
	俗 称 名			
改 良 材	土 質 改 良 材 の 種 類			
	添 加 量 (対 乾 燥 密 度)			
試 料 の 準 備 お よ び 使 用 方 法			a b c	
締 固 め 試 験 の 種 類 (JIS A 1210 - 1990)			A B C D E	

*) ある程度以上の粒径を取り除いた室内用の試料ではなく、なるべく盛土に近い試料の含水比を得る観点から、室内突固め試験に用いる土ではなく現場から採取した土を使用する。

付 属 資 料

1. 同一地点における測定性能の試験結果

付表 1-1 同一地点における測定性能の試験結果 (1)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
3 No.1	散乱型	不動	平均値	2.031	1.883	7.834	93.00
			最大値	2.086	1.947	8.550	96.15
			最小値	1.986	1.835	7.098	90.62
			標準偏差	0.02983	0.03554	0.5278	1.755
		再設置	平均値	2.068	1.929	7.254	95.24
			最大値	2.167	2.031	7.829	100.3
			最小値	1.988	1.847	6.694	91.21
			標準偏差	0.05498	0.05668	0.4033	2.800
	透過型	不動	平均値	2.313	2.238	3.374	110.5
			最大値	2.352	2.278	3.690	112.5
			最小値	2.27	2.195	3.044	108.4
			標準偏差	0.02545	0.02440	0.1852	1.203
		再設置	平均値	2.280	2.205	3.424	108.9
			最大値	2.337	2.256	3.851	111.4
			最小値	2.222	2.148	2.951	106.1
			標準偏差	0.04319	0.04033	0.2545	1.991
3 No.2	散乱型	不動	平均値	2.099	1.927	8.937	95.15
			最大値	2.131	1.964	9.627	96.99
			最小値	2.079	1.898	8.474	93.73
			標準偏差	0.02038	0.02439	0.4169	1.206
		再設置	平均値	2.105	1.931	9.028	95.34
			最大値	2.161	1.996	9.753	98.57
			最小値	1.998	1.832	8.279	90.47
			標準偏差	0.05107	0.05087	0.4579	2.513
	透過型	不動	平均値	2.419	2.278	6.193	112.5
			最大値	2.461	2.323	6.883	114.7
			最小値	2.389	2.252	5.773	111.2
			標準偏差	0.02537	0.02744	0.3745	1.355
		再設置	平均値	2.404	2.263	6.248	111.7
			最大値	2.452	2.325	6.871	114.8
			最小値	2.320	2.179	5.462	107.6
			標準偏差	0.04671	0.04604	0.4175	2.274
4 No.1	散乱型	不動	平均値	1.704	1.601	6.458	71.97
			最大値	1.717	1.621	7.338	72.89
			最小値	1.694	1.579	5.931	71.00
			標準偏差	0.009279	0.01350	0.4524	0.6070
		再設置	平均値	1.574	1.479	6.508	66.48
			最大値	1.692	1.599	9.544	71.90
			最小値	1.319	1.245	3.506	55.98
			標準偏差	0.1201	0.1264	1.764	5.686
	透過型	不動	平均値	1.997	1.939	2.523	87.18
			最大値	2.079	1.962	2.690	88.22
			最小値	1.971	1.922	2.105	86.42
			標準偏差	0.03129	0.01364	0.1913	0.6116
		再設置	平均値	2.015	1.963	2.633	88.26
			最大値	2.069	2.015	2.940	90.60
			最小値	1.968	1.919	2.075	86.29
			標準偏差	0.03269	0.03100	0.2409	1.391

付表 1-2 同一地点における測定性能の試験結果 (2)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
4 No.2	散乱型	不動	平均値	1.490	1.434	3.887	64.48
			最大値	1.514	1.461	4.874	65.69
			最小値	1.439	1.378	3.384	61.96
			標準偏差	0.02139	0.02458	0.4991	1.104
		再設置	平均値	1.565	1.511	3.561	67.94
			最大値	1.628	1.577	4.422	70.91
			最小値	1.482	1.426	2.976	64.12
			標準偏差	0.04526	0.04565	0.4105	2.052
	透過型	不動	平均値	2.076	2.116	-1.896	95.15
			最大値	2.123	2.159	-1.656	97.08
			最小値	2.036	2.084	-2.490	93.71
			標準偏差	0.02788	0.02557	0.2606	1.150
		再設置	平均値	2.122	2.162	-1.832	97.19
			最大値	2.163	2.190	-1.233	98.47
			最小値	2.050	2.091	-2.384	94.02
			標準偏差	0.03350	0.03300	0.3183	1.484
7 No.1	散乱型	不動	平均値	1.960	1.882	4.143	86.42
			最大値	1.989	1.917	4.717	88.02
			最小値	1.936	1.855	3.752	85.17
			標準偏差	0.01836	0.02098	0.3257	0.9632
		再設置	平均値	1.923	1.839	4.565	84.43
			最大値	1.989	1.915	6.240	87.92
			最小値	1.805	1.699	3.865	78.01
			標準偏差	0.06538	0.07305	0.7009	3.352
	透過型	不動	平均値	2.086	2.004	4.078	92.01
			最大値	2.110	2.033	4.496	93.34
			最小値	2.070	1.991	3.388	91.41
			標準偏差	0.01212	0.01291	0.3366	0.5919
		再設置	平均値	2.082	2.004	3.934	91.99
			最大値	2.103	2.024	4.291	92.93
			最小値	2.055	1.974	3.579	90.63
			標準偏差	0.01422	0.01562	0.2334	0.7170
7 No.2	散乱型	不動	平均値	2.078	2.013	3.205	92.43
			最大値	2.098	2.039	4.045	93.62
			最小値	2.040	1.961	2.915	90.04
			標準偏差	0.01971	0.02406	0.3283	1.103
		再設置	平均値	2.031	1.955	3.877	89.77
			最大値	2.115	2.055	4.811	94.35
			最小値	1.971	1.890	2.910	86.78
			標準偏差	0.04245	0.04884	0.6516	2.242
	透過型	不動	平均値	2.044	1.986	2.880	91.20
			最大値	2.059	2.002	3.60	91.92
			最小値	2.027	1.972	2.529	90.54
			標準偏差	0.01192	0.01099	0.2978	0.5054
		再設置	平均値	2.044	1.993	2.526	91.53
			最大値	2.094	2.054	3.535	94.31
			最小値	2.016	1.961	1.947	90.04
			標準偏差	0.02268	0.02609	0.4405	1.198

付表 1-3 同一地点における測定性能の試験結果 (3)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
16 No.1	散乱型	不動	平均値	1.920	1.825	5.174	90.81
			最大値	1.939	1.848	5.426	91.94
			最小値	1.900	1.806	4.940	89.85
			標準偏差	0.01335	0.0138	0.1602	0.6856
		再設置	平均値	1.915	1.818	5.298	90.46
			最大値	1.948	1.854	5.489	92.24
			最小値	1.877	1.784	5.024	88.76
			標準偏差	0.02390	0.02424	0.1512	1.206
	透過型	不動	平均値	1.996	1.936	3.115	96.31
			最大値	2.021	1.957	3.669	97.36
			最小値	1.970	1.908	2.443	94.93
			標準偏差	0.01793	0.01761	0.3527	0.8752
		再設置	平均値	1.982	1.922	3.111	95.62
			最大値	2.026	1.965	3.445	97.76
			最小値	1.925	1.870	2.802	93.03
			標準偏差	0.02802	0.02586	0.2265	1.287
16 No.2	散乱型	不動	平均値	1.836	1.745	5.238	86.81
			最大値	1.855	1.764	5.506	87.76
			最小値	1.811	1.718	5.099	85.47
			標準偏差	0.01570	0.01618	0.1460	0.8041
		再設置	平均値	1.861	1.768	5.271	87.94
			最大値	1.901	1.810	5.921	90.05
			最小値	1.826	1.733	5.013	86.22
			標準偏差	0.02135	0.02253	0.2798	1.120
	透過型	不動	平均値	2.055	2.009	2.332	99.93
			最大値	2.116	2.070	2.913	102.99
			最小値	2.014	1.957	1.989	97.36
			標準偏差	0.02721	0.02896	0.2927	1.443
		再設置	平均値	2.032	1.988	2.216	98.89
			最大値	2.058	2.019	3.009	100.45
			最小値	2.002	1.960	1.535	97.51
			標準偏差	0.01969	0.02231	0.4381	1.111
38 1 層目	散乱型	不動	平均値	2.015	1.841	9.42	88.68
			最大値	2.093	1.932	9.72	93.06
			最小値	1.989	1.814	8.30	87.38
			標準偏差	0.02965	0.03427	0.433	1.649
		再設置	平均値	1.991	1.815	9.68	87.44
			最大値	2.020	1.842	9.95	88.73
			最小値	1.955	1.780	9.44	85.74
			標準偏差	0.02244	0.02265	0.170	1.093
	透過型	不動	平均値	2.073	1.922	7.84	92.59
			最大値	2.099	1.951	8.26	93.98
			最小値	2.055	1.900	7.23	91.52
			標準偏差	0.01457	0.01693	0.341	0.8161
		再設置	平均値	2.086	1.937	7.69	93.31
			最大値	2.111	1.961	8.17	94.46
			最小値	2.053	1.910	7.24	92.00
			標準偏差	0.02259	0.02022	0.293	0.9755

付表 1-4 同一地点における測定性能の試験結果 (4)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
38 2 層目	散乱型	不動	平均値	2.039	1.877	8.60	90.43
			最大値	2.055	1.894	9.13	91.23
			最小値	2.024	1.862	8.29	89.69
			標準偏差	0.01109	0.01249	0.239	0.6010
		再設置	平均値	2.105	1.944	8.33	93.63
			最大値	2.155	1.999	8.86	96.29
			最小値	2.062	1.894	7.83	91.23
			標準偏差	0.03570	0.03717	0.323	1.790
	透過型	不動	平均値	2.155	2.023	6.54	97.43
			最大値	2.185	2.050	7.05	98.75
			最小値	2.125	1.988	6.04	95.76
			標準偏差	0.01903	0.01999	0.310	0.9633
		再設置	平均値	2.129	2.000	6.49	96.32
			最大値	2.173	2.038	6.88	98.17
			最小値	2.069	1.943	6.17	93.59
			標準偏差	0.03371	0.03319	0.197	1.599
38 3 層目	散乱型	不動	平均値	1.931	1.718	12.39	82.78
			最大値	1.951	1.742	12.77	83.91
			最小値	1.897	1.682	11.95	81.02
			標準偏差	0.01575	0.01741	0.3001	0.8380
		再設置	平均値	1.961	1.744	12.44	84.03
			最大値	2.018	1.807	13.29	87.04
			最小値	1.891	1.677	11.71	80.78
			標準偏差	0.04374	0.04516	0.5006	2.175
	透過型	不動	平均値	2.232	2.047	9.03	98.61
			最大値	2.258	2.066	9.49	99.52
			最小値	2.203	2.026	8.66	97.59
			標準偏差	0.01475	0.01285	0.285	0.6188
		再設置	平均値	2.239	2.053	9.04	98.90
			最大値	2.268	2.090	9.26	100.7
			最小値	2.207	2.021	8.50	97.35
			標準偏差	0.01765	0.01956	0.231	0.9418
50 No.2	散乱型	不動	平均値	2.091	1.957	7.34	94.82
			最大値	2.117	1.972	7.46	95.50
			最小値	2.009	1.933	7.22	93.61
			標準偏差	0.03162	0.01235	0.0720	0.5980
		再設置	平均値	2.134	1.989	7.31	96.30
			最大値	2.177	2.033	7.48	98.45
			最小値	2.108	1.964	7.04	95.11
			標準偏差	0.01820	0.01822	0.123	0.8820
	透過型	不動	平均値	1.963	1.823	7.73	88.26
			最大値	1.993	1.857	8.00	89.93
			最小値	1.928	1.788	7.30	86.59
			標準偏差	0.02301	0.02366	0.245	1.146
		再設置	平均値	1.941	1.803	7.62	87.32
			最大値	2.015	1.882	8.00	91.14
			最小値	1.889	1.755	7.10	84.99
			標準偏差	0.03331	0.03427	0.239	1.660

付表 1-5 同一地点における測定性能の試験結果 (5)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
50 No.6	散乱型	不動	平均値	2.129	1.927	7.22	93.30
			最大値	2.703	1.951	7.45	94.48
			最小値	2.043	1.904	6.99	92.20
			標準偏差	0.2022	0.01366	0.170	0.6621
		再設置	平均値	2.081	1.941	7.20	93.99
			最大値	2.099	1.964	7.37	95.11
			最小値	2.046	1.904	6.87	92.20
			標準偏差	0.01720	0.01833	0.157	0.8892
	透過型	不動	平均値	1.858	1.740	6.79	84.27
			最大値	1.877	1.758	7.10	85.13
			最小値	1.826	1.708	6.50	82.71
			標準偏差	0.01369	0.01464	0.218	0.7090
		再設置	平均値	1.847	1.728	6.93	83.66
			最大値	1.904	1.788	7.10	86.59
			最小値	1.805	1.686	6.50	81.65
			標準偏差	0.02794	0.02866	0.189	1.388
50 No.10	散乱型	不動	平均値	2.209	1.971	9.34	95.44
			最大値	2.713	1.989	9.65	96.32
			最小値	2.141	1.955	9.14	94.67
			標準偏差	0.1774	0.01203	0.139	0.5827
		再設置	平均値	2.143	1.963	9.19	95.05
			最大値	2.162	1.987	9.56	96.22
			最小値	2.123	1.939	8.85	93.90
			標準偏差	0.01384	0.01506	0.195	0.7282
	透過型	不動	平均値	2.012	1.847	8.93	89.44
			最大値	2.039	1.879	9.20	90.99
			最小値	1.989	1.821	8.50	88.18
			標準偏差	0.01506	0.01664	0.231	0.8069
		再設置	平均値	2.015	1.851	8.85	89.64
			最大値	2.042	1.879	9.20	90.99
			最小値	1.958	1.793	8.50	86.83
			標準偏差	0.02344	0.02403	0.217	1.162
50 No.13	散乱型	不動	平均値	2.060	1.906	8.08	92.29
			最大値	2.081	1.927	8.32	93.32
			最小値	2.041	1.890	7.94	91.53
			標準偏差	0.01195	0.01157	0.126	0.5609
		再設置	平均値	2.083	1.929	7.98	93.39
			最大値	2.107	1.954	8.12	94.62
			最小値	2.066	1.911	7.81	92.54
			標準偏差	0.01376	0.01447	0.107	0.7006
	透過型	不動	平均値	1.953	1.816	7.52	87.96
			最大値	1.980	1.844	7.90	89.30
			最小値	1.917	1.778	7.20	86.10
			標準偏差	0.02207	0.02400	0.270	1.162
		再設置	平均値	1.941	1.803	7.63	87.33
			最大値	1.976	1.842	8.00	89.20
			最小値	1.904	1.769	7.30	85.67
			標準偏差	0.02520	0.02481	0.183	1.200

付表 1-6 同一地点における測定性能の試験結果 (6)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
50 No.19	散乱型	不動	平均値	2.108	1.974	6.80	95.59
			最大値	2.133	2.010	7.03	97.34
			最小値	2.089	1.952	6.15	94.53
			標準偏差	0.01415	0.01690	0.254	0.8186
		再設置	平均値	2.141	2.018	6.13	97.71
			最大値	2.177	2.053	6.41	99.42
			最小値	2.110	1.989	5.96	96.32
			標準偏差	0.02050	0.01987	0.170	0.9631
	透過型	不動	平均値	1.929	1.813	6.40	87.79
			最大値	1.964	1.851	6.80	89.64
			最小値	1.907	1.786	6.10	86.49
			標準偏差	0.01737	0.01912	0.240	0.9263
		再設置	平均値	1.926	1.804	6.41	87.37
			最大値	1.965	1.843	6.80	89.25
			最小値	1.879	1.764	6.20	85.42
			標準偏差	0.02723	0.02545	0.197	1.233
51 (1)	散乱型	不動	平均値	2.001	1.844	8.51	103.73
			最大値	2.032	1.876	8.65	105.51
			最小値	1.972	1.818	8.27	102.25
			標準偏差	0.01746	0.01682	0.129	0.94469
		再設置	平均値	1.996	1.837	8.64	103.31
			最大値	2.024	1.865	9.19	104.89
			最小値	1.971	1.809	8.30	101.74
			標準偏差	0.01679	0.01904	0.281	1.0709
	透過型	不動	平均値	1.951	1.797	8.59	101.1
			最大値	1.987	1.834	9.08	103.15
			最小値	1.921	1.769	8.13	99.49
			標準偏差	0.02202	0.02337	0.274	1.315
		再設置	平均値	1.937	1.783	8.66	100.3
			最大値	1.950	1.797	8.88	101.07
			最小値	1.916	1.761	8.36	99.04
			標準偏差	0.01325	0.01459	0.169	0.8210
51(2)	散乱型	不動	平均値	2.083	1.796	16.00	101.0
			最大値	2.096	1.808	16.49	101.69
			最小値	2.047	1.757	15.69	98.82
			標準偏差	0.01527	0.01537	0.2344	0.8638
		再設置	平均値	2.076	1.797	15.52	101.1
			最大値	2.099	1.819	16.10	102.31
			最小値	2.039	1.772	15.06	99.66
			標準偏差	0.01788	0.01450	0.3623	0.8436
	透過型	不動	平均値	1.970	1.692	16.41	95.16
			最大値	2.005	1.734	17.47	97.53
			最小値	1.945	1.656	15.66	93.14
			標準偏差	0.01712	0.02115	0.5432	1.190
		再設置	平均値	1.955	1.677	16.62	94.30
			最大値	1.986	1.708	17.68	96.06
			最小値	1.929	1.652	15.64	92.91
			標準偏差	0.02153	0.02356	0.6637	1.324

付表 1-7 同一地点における測定性能の試験結果 (7)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
55 17 層目	散乱型	不動	平均値	1.408	1.161	21.3	85.76
			最大値	1.426	1.185	23.6	87.52
			最小値	1.377	1.114	19.5	82.27
			標準偏差	0.01435	0.02108	1.22	1.558
		再設置	平均値	1.418	1.185	19.7	87.55
			最大値	1.458	1.242	21.5	91.73
			最小値	1.375	1.132	17.3	83.60
			標準偏差	0.02711	0.03560	1.39	2.630
	透過型	不動	平均値	1.396	1.097	27.2	81.03
			最大値	1.410	1.116	28.7	82.42
			最小値	1.377	1.069	26.3	78.95
			標準偏差	0.01395	0.01491	0.672	1.100
		再設置	平均値	1.398	1.099	27.2	81.19
			最大値	1.427	1.124	28.3	83.01
			最小値	1.370	1.077	25.9	79.54
			標準偏差	0.01650	0.01707	0.796	1.260
55 18 層目	散乱型	不動	平均値	1.454	1.082	34.4	79.88
			最大値	1.487	1.113	36.4	82.20
			最小値	1.435	1.052	33.2	77.70
			標準偏差	0.01510	0.01628	0.857	1.201
		再設置	平均値	1.497	1.139	31.5	84.08
			最大値	1.529	1.174	33.2	86.71
			最小値	1.471	1.108	29.6	81.83
			標準偏差	0.02020	0.02404	1.10	1.776
	透過型	不動	平均値	1.557	1.181	31.9	87.23
			最大値	1.583	1.209	33.9	89.29
			最小値	1.539	1.152	30.5	85.08
			標準偏差	0.01592	0.01833	0.917	1.353
		再設置	平均値	1.5567	1.178	32.2	86.97
			最大値	1.577	1.216	33.2	89.81
			最小値	1.535	1.155	29.7	85.30
			標準偏差	0.01538	0.01763	0.990	1.303
55 19 層目	散乱型	不動	平均値	1.383	1.132	22.1	83.64
			最大値	1.405	1.162	25.2	85.82
			最小値	1.342	1.072	20.8	79.17
			標準偏差	0.02161	0.02911	1.32	2.151
		再設置	平均値	1.380	1.134	21.8	83.74
			最大値	1.402	1.162	23.3	85.82
			最小値	1.352	1.097	20.6	81.02
			標準偏差	0.01861	0.02149	0.749	1.589
	透過型	不動	平均値	1.409	1.129	24.8	83.38
			最大値	1.434	1.164	25.9	85.97
			最小値	1.395	1.109	23.2	81.91
			標準偏差	0.01324	0.01875	1.08	1.384
		再設置	平均値	1.407	1.131	24.4	83.54
			最大値	1.436	1.158	26.0	85.52
			最小値	1.386	1.106	23.0	81.68
			標準偏差	0.01594	0.01688	0.956	1.246

付表 1-8 同一地点における測定性能の試験結果 (8)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
56 3 層目	散乱型	不動	平均値	1.409	1.144	23.2	84.26
			最大値	1.426	1.165	24.2	85.79
			最小値	1.393	1.122	22.1	82.62
			標準偏差	0.01181	0.01489	0.709	1.096
		再設置	平均値	1.420	1.161	22.3	85.49
			最大値	1.440	1.190	23.2	87.63
			最小値	1.391	1.130	21.1	83.21
			標準偏差	0.01348	0.01634	0.667	1.204
	透過型	不動	平均値	1.503	1.173	28.1	86.41
			最大値	1.521	1.191	28.8	87.70
			最小値	1.482	1.156	26.6	85.13
			標準偏差	0.01176	0.01119	0.615	0.8224
		再設置	平均値	1.503	1.175	27.9	86.53
			最大値	1.529	1.195	29.0	88.00
			最小値	1.467	1.142	26.9	84.09
			標準偏差	0.01633	0.01514	0.650	1.117
56 4 層目	散乱型	不動	平均値	1.334	1.084	23.0	79.85
			最大値	1.366	1.131	24.5	83.28
			最小値	1.316	1.057	20.8	77.84
			標準偏差	0.01404	0.01996	1.02	1.468
		再設置	平均値	1.346	1.085	24.0	79.90
			最大値	1.383	1.106	25.5	81.44
			最小値	1.308	1.043	22.4	76.80
			標準偏差	0.02521	0.02012	1.09	1.481
	透過型	不動	平均値	1.513	1.243	21.8	99.24
			最大値	1.536	1.271	22.8	101.52
			最小値	1.494	1.217	20.5	97.20
			標準偏差	0.01317	0.01535	0.708	1.228
		再設置	平均値	1.502	1.227	22.4	98.03
			最大値	1.532	1.265	24.2	101.04
			最小値	1.471	1.191	20.7	95.13
			標準偏差	0.02124	0.02616	1.06	2.089
56 5 層目	散乱型	不動	平均値	1.451	0.959	51.4	76.60
			最大値	1.484	1.000	56.8	79.87
			最小値	1.399	0.892	48.4	71.25
			標準偏差	0.02263	0.0313	2.72	2.494
		再設置	平均値	1.454	0.964	50.9	76.97
			最大値	1.489	1.003	53.3	80.11
			最小値	1.433	0.939	47.9	75.00
			標準偏差	0.01752	0.0230	2.00	1.839
	透過型	不動	平均値	1.616	1.122	44.1	89.61
			最大値	1.634	1.137	46.9	90.81
			最小値	1.578	1.074	41.9	85.78
			標準偏差	0.01630	0.01960	1.48	1.565
		再設置	平均値	1.625	1.138	42.8	90.92
			最大値	1.648	1.181	47.5	94.33
			最小値	1.593	1.091	37.8	87.14
			標準偏差	0.01899	0.02795	2.73	2.232

付表 1-9 同一地点における測定性能の試験結果 (9)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
57 9 層目	散乱型	不動	平均値	1.400	1.034	35.5	82.56
			最大値	1.434	1.075	37.0	85.86
			最小値	1.378	1.010	33.4	80.67
			標準偏差	0.01805	0.01972	0.997	1.575
		再設置	平均値	1.400	1.033	35.4	82.49
			最大値	1.429	1.064	37.1	84.98
			最小値	1.375	1.004	34.2	80.19
			標準偏差	0.01869	0.02053	1.04	1.640
	透過型	不動	平均値	1.604	1.114	44.0	88.97
			最大値	1.637	1.153	46.6	92.09
			最小値	1.576	1.075	41.5	85.86
			標準偏差	0.02272	0.02699	1.68	2.154
		再設置	平均値	1.615	1.123	43.8	89.71
			最大値	1.642	1.146	44.7	91.53
			最小値	1.586	1.113	42.5	88.90
			標準偏差	0.01476	0.009527	0.757	0.7595
57 10 層目	散乱型	不動	平均値	1.483	1.009	47.1	80.58
			最大値	1.502	1.037	50.5	82.83
			最小値	1.452	0.965	44.9	77.08
			標準偏差	0.01500	0.02081	1.68	1.662
		再設置	平均値	1.492	1.017	46.7	81.26
			最大値	1.516	1.045	49.8	83.47
			最小値	1.476	0.988	45.0	78.91
			標準偏差	0.01401	0.01819	1.44	1.455
	透過型	不動	平均値	1.598	1.120	42.7	89.47
			最大値	1.623	1.158	44.9	92.49
			最小値	1.571	1.096	39.5	87.54
			標準偏差	0.01536	0.02107	1.65	1.682
		再設置	平均値	1.597	1.114	43.3	89.01
			最大値	1.624	1.142	44.7	91.21
			最小値	1.564	1.082	41.7	86.42
			標準偏差	0.01968	0.02166	1.15	1.728
57 11 層目	散乱型	不動	平均値	1.451	0.959	51.4	76.60
			最大値	1.484	1.00	56.8	79.87
			最小値	1.399	0.892	48.4	71.25
			標準偏差	0.02263	0.0313	2.72	2.494
		再設置	平均値	1.454	0.964	50.9	76.97
			最大値	1.489	1.003	53.3	80.11
			最小値	1.433	0.939	47.9	75.00
			標準偏差	0.01752	0.0230	2.00	1.839
	透過型	不動	平均値	1.616	1.122	44.1	89.61
			最大値	1.634	1.137	46.9	90.81
			最小値	1.578	1.074	41.9	85.78
			標準偏差	0.01630	0.01960	1.48	1.565
		再設置	平均値	1.625	1.138	42.8	90.92
			最大値	1.648	1.181	47.5	94.33
			最小値	1.593	1.091	37.8	87.14
			標準偏差	0.0190	0.02795	2.73	2.232

付表 1-10 同一地点における測定性能の試験結果 (10)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
60 3層目	散乱型	不動	平均値	2.096	1.965	6.7	96.04
			最大値	2.121	2.001	7.2	97.80
			最小値	2.059	1.921	6.0	93.89
			標準偏差	0.01772	0.02315	0.40	1.132
		再設置	平均値	2.086	1.957	6.6	95.65
			最大値	2.115	1.989	7.7	97.21
			最小値	2.031	1.887	6.3	92.23
			標準偏差	0.02499	0.02978	0.44	1.455
	透過型	不動	平均値	2.038	1.902	7.1	92.98
			最大値	2.085	1.947	7.8	95.16
			最小値	2.006	1.873	6.7	91.54
			標準偏差	0.02201	0.02316	0.30	1.132
		再設置	平均値	2.043	1.909	7.0	93.32
			最大値	2.080	1.950	7.6	95.31
			最小値	2.014	1.877	6.5	91.74
			標準偏差	0.02049	0.02314	0.37	1.130
60 4層目	散乱型	不動	平均値	1.652	1.423	16.1	81.86
			最大値	1.672	1.445	16.9	83.14
			最小値	1.638	1.406	15.5	80.90
			標準偏差	0.01439	0.01532	0.415	0.8801
		再設置	平均値	1.648	1.417	16.3	81.50
			最大値	1.665	1.441	17.6	82.91
			最小値	1.611	1.370	15.4	78.83
			標準偏差	0.01936	0.02528	0.752	1.454
	透過型	不動	平均値	1.761	1.510	16.6	86.87
			最大値	1.774	1.523	17.0	87.63
			最小値	1.741	1.488	16.4	85.62
			標準偏差	0.01091	0.01103	0.215	0.6339
		再設置	平均値	1.746	1.498	16.6	86.18
			最大値	1.796	1.546	17.6	88.95
			最小値	1.725	1.472	15.9	84.7
			標準偏差	0.02036	0.02077	0.581	1.194
60 6層目	散乱型	不動	平均値	1.925	1.692	13.7	82.70
			最大値	1.946	1.719	14.6	84.02
			最小値	1.907	1.664	13.2	81.33
			標準偏差	0.01187	0.01615	0.462	0.7897
		再設置	平均値	1.900	1.666	14.1	81.43
			最大値	1.927	1.700	14.7	83.09
			最小値	1.882	1.650	13.4	80.65
			標準偏差	0.01348	0.01721	0.449	0.8398
	透過型	不動	平均値	1.797	1.529	17.5	74.75
			最大値	1.820	1.553	18.6	75.90
			最小値	1.766	1.502	16.8	73.41
			標準偏差	0.01869	0.01857	0.533	0.9076
		再設置	平均値	1.786	1.526	17.1	74.57
			最大値	1.799	1.562	18.6	76.34
			最小値	1.769	1.495	13.3	73.07
			標準偏差	0.009916	0.01790	1.46	0.8738

付表 1-11 同一地点における測定性能の試験結果 (11)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_c(\%)$
85 No.2	散乱型	不動	平均値	2.285	2.121	7.78	102.95
			最大値	2.314	2.146	7.97	104.17
			最小値	2.268	2.105	7.47	102.18
			標準偏差	0.01360	0.01272	0.139	0.6180
		再設置	平均値	2.285	2.119	7.81	102.86
			最大値	2.306	2.140	8.11	103.88
			最小値	2.266	2.099	7.45	101.89
			標準偏差	0.01412	0.01501	0.185	0.7292
	透過型	不動	平均値	2.315	2.134	8.49	103.59
			最大値	2.336	2.157	9.10	104.71
			最小値	2.279	2.089	8.00	101.41
			標準偏差	0.01790	0.02189	0.425	1.0623
		再設置	平均値	2.280	2.096	8.81	101.74
			最大値	2.305	2.123	9.00	103.06
			最小値	2.246	2.061	8.60	100.05
			標準偏差	0.01862	0.01896	0.152	0.92081
85 No.6	散乱型	不動	平均値	2.263	2.053	10.25	99.66
			最大値	2.292	2.079	10.47	100.92
			最小値	2.238	2.026	9.87	98.35
			標準偏差	0.01705	0.01745	0.2022	0.8457
		再設置	平均値	2.263	2.048	10.36	99.42
			最大値	2.290	2.068	10.68	100.39
			最小値	2.241	2.024	9.92	98.25
			標準偏差	0.01369	0.01253	0.2556	0.6077
	透過型	不動	平均値	2.303	2.118	8.79	102.79
			最大値	2.334	2.150	9.10	104.37
			最小値	2.273	2.088	8.50	101.36
			標準偏差	0.01750	0.01784	0.1853	0.86555
		再設置	平均値	2.269	2.083	8.98	101.10
			最大値	2.335	2.145	9.30	104.13
			最小値	2.216	2.034	8.60	98.74
			標準偏差	0.03785	0.03660	0.2251	1.778
85 No.10	散乱型	不動	平均値	2.156	2.017	6.89	97.93
			最大値	2.182	2.046	7.12	99.32
			最小値	2.129	1.989	6.63	96.55
			標準偏差	0.01507	0.01645	0.183	0.7986
		再設置	平均値	2.126	1.988	6.96	96.50
			最大値	2.153	2.018	7.35	97.96
			最小値	2.091	1.955	6.69	94.90
			標準偏差	0.01757	0.01810	0.217	0.8794
	透過型	不動	平均値	2.140	1.975	8.42	95.85
			最大値	2.160	2.014	10.0	97.77
			最小値	2.106	1.941	6.50	94.22
			標準偏差	0.01939	0.02748	1.140	1.336
		再設置	平均値	2.165	1.975	9.65	95.86
			最大値	2.198	2.013	10.2	97.72
			最小値	2.140	1.950	9.20	94.66
			標準偏差	0.02032	0.02154	0.246	1.047

付表 1-12 同一地点における測定性能の試験結果 (1 2)

現場番号	使用計器	方法		湿潤密度 $\rho_t(t/m^3)$	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	含水比 $\omega(\%)$	締固め度 $D_o(\%)$
85 No.13	散乱型	不動	平均値	2.299	2.072	10.99	100.6
			最大値	2.324	2.093	11.28	101.6
			最小値	2.285	2.055	10.56	99.76
			標準偏差	0.01244	0.01383	0.2500	0.6692
		再設置	平均値	2.273	2.044	11.13	99.23
			最大値	2.300	2.074	11.61	100.7
			最小値	2.251	2.022	10.81	98.16
			標準偏差	0.01621	0.01865	0.2279	0.9036
	透過型	不動	平均値	2.323	2.097	10.80	101.8
			最大値	2.349	2.125	11.10	103.2
			最小値	2.290	2.064	10.30	100.2
			標準偏差	0.01849	0.02024	0.2404	0.9842
		再設置	平均値	2.333	2.111	10.51	102.5
			最大値	2.362	2.141	10.90	103.9
			最小値	2.298	2.072	10.20	100.6
			標準偏差	0.01893	0.02099	0.2183	1.020
85 No.19	散乱型	不動	平均値	2.277	2.058	10.63	99.91
			最大値	2.300	2.081	11.11	101.0
			最小値	2.262	2.036	10.37	98.83
			標準偏差	0.01271	0.01422	0.2102	0.6902
		再設置	平均値	2.226	1.993	11.71	96.74
			最大値	2.258	2.036	12.82	98.83
			最小値	2.170	1.923	10.92	93.35
			標準偏差	0.02741	0.03438	0.5716	1.667
	透過型	不動	平均値	2.266	2.057	10.80	99.84
			最大値	2.297	2.088	11.10	101.4
			最小値	2.241	2.032	10.30	98.64
			標準偏差	0.01569	0.01615	0.2404	0.7837
		再設置	平均値	2.271	2.060	10.51	100.0
			最大値	2.307	2.101	10.90	102.0
			最小値	2.246	2.029	10.20	98.50
			標準偏差	0.02122	0.02315	0.2183	1.122

2. アンケート調査結果

2.1 基準案に関する意見及び対応（平成3年度）

特定技術パイロット事業では、「RI 計器による盛土の締固め管理要領（案）」による施工管理を実施し、地方建設局及び施工管理担当者から得られた意見をもとに要領案を修正することを繰り返して、要領案の最終案を策定した。下表に、平成3年度に各地方建設局から得られた要領案に対する意見と、それに対する土木研究所の対応をまとめた。

地方建設局からの意見	対 応
1. 管理単位を施工面積で規定したことについて	
管理単位として面積で規定することは考え方としてはよいが、当面は在来法と平行して管理することとなるので、いままで通り土工量で管理したい。（北陸）	各層毎の面的な管理を行うという主旨から施工面積を単位としてデータ採取及び規格値を規定する必要がある。すなわち、 m^3 単位の規定を行った場合、その土工量で複数の土層の施工を行った場合に、各層から均等にデータが採取されるということが担保されなくなってしまう。また、各層単位でデータを平均化した値を管理基準値に対応させるということから m^2 単位での管理単位の規定が妥当であると考えられる。
管理単位を $500m^3$ /回としたい。（近畿） （理由） ・ 現行では、体積（ m^3 ）管理としており、面積（ m^2 ）管理とした場合間違いが生じる恐れがある。 ・ 管理単位を $500（m^3）$ /回以内を基準として、一層当たりもしくは日当たり毎に適宜データを取る。	現行の m^3 単位の管理との現場における混同は、新しい管理基準案を周知していくことにより解決すべき問題であると考えられる。
2. データの採取個数に関して	
日施工単位に対するデータ採取個数は総土工量によって異なる問題。（四国） （理由） 総土工量が多い場合に、日施工単位に対するデータ採取個数が多くなることが理解できない。また、土工量の変更によって区分が変わった場合の取扱いが難しくなる。 （対策） 日施工単位に対するデータ採取個数は一定とする。	土研案において総土工量によりデータの採取個数が異なっているのは、施工管理にかけられる費用が工事の規模によって異なることを考慮したためであり、また、現行の砂置換を前提とした基準においても小工事におけるデータ採取個数の割引を行っている。データ採取個数の割引の比率も現行の基準に準じている。この比率の妥当性については、平成4年度以降の課題としたい。
締固め度による管理について、規模による区別は必要ないと思われる。（近畿）	
1 管理単位当たりの個数について（九州） ・ 路床：工事規模に関係なく→15 個以上 ・ 路体／築堤：工事規模に関係なく→10 個以上	
日施工量が極めて少ない場合の問題（四国） （理由） 最近の工事においては、日施工量が極めて少ない場合が多い。 （対策） 日施工量が所定の施工量以下の場合は、連続した複数日の施工量単位で管理する。	土研案は層当たりの日施工面積が小さくなった場合にその日施工面積に不釣り合いなデータ数の採取を行わなければならない可能性があるため以下のように修正する。 （例） ・ 路体、築堤、 $5,000m^3$ 未満の工事でその層における日施工面積が $1,500m^2$ を下回るとき。 （現行） 1 管理単位 15 個以上のデータを採取すること。 （変更） 1 点/ $100m^2$ 以上の採取密度を得ること。かつ管理単位当たり 3 点以上のデータを採取することを目途に採取個数を決定。

3. 礫率に対する適用限界に関して	
礫率に対する適用限界については、パイロット事業で行う場合はデータを収集する観点からも 60～70%に引き上げたい（北陸）。	本管理基準（案）で示した礫率の適用限界 50%は暫定的なものであり、将来最終的な管理基準値としてどの値を採用するかについては今後データを蓄積し、RI による計測値の安定性及び砂置換とのずれ等をみて決定したい。したがって、当面の実工事への適用ないし試験施工などにおいて礫率 50%以上の盛土においても散乱型 RI のデータ採取を行うことが望ましい。また、盛土の表面処理によってはより高い礫率に対しても散乱型の適用が可能であると考えられ、この面に関する検討は平成 4 年度以降に進めていきたい。
散乱型については、礫率 50%未満を適用の限界としているが、60%程度でお願いしたい。また、表面処理による限界値の拡大についても検討をお願いしたい（近畿）。	
4. 管理基準値について	
管理基準値については、現行のままとするのが妥当と思われる（近畿）。（地建運用値の 85%に 3%上乗せする意義が不明）	砂置換法においては 1 個のデータをもって盛土の締固め状況を把握していたが、RI においては複数のデータの平均値をもって判断しようとしており、その場合、もし基準値を従来のままとすれば、基準値を満たさない多数のデータの存在を許すことになり、従来より実質的にゆるい基準となる。どの程度基準値を上乗せするかについては、JIS に規定された計量基準型抜き取り検査の方法に従い決定した。
5. データ採取箇所について	
管理単位でのデータ採取箇所については、測点単位で横断的に 3 点とし、担保より 1/4, 2/4, 3/4 で設定するのが妥当と思われる（近畿）。	データの採取箇所についての規定を行うにあたって留意すべき点は ① 所定の密度でデータの採取が行えること。 ② 管理単位各部から均等にデータが採取されること ③ 盛土法肩部の締固め管理が適切に行われていること が担保されることであるが、提示されたような採取方法では、盛土の幅によりデータの採取密度が変化してしまう。また、法肩部を管理するにあたり 1/4 及び 3/4 の位置で良いかどうか検討すべき点である。 今後はこのような点を検討した上で、具体的な採取箇所の規定を検討するが、当面は「盛土周辺部においては締固めが不完全になりやすいので特に注意すること」との定性的な記述にとどめた。
6. RI 機器の普及に関して	
請負者側は RI 計器を所有していないが、その対応をどうするか（中部）。	本管理基準（案）は、ある程度 RI による締固め管理が定着してきた将来を念頭において作成したものであり、現状における RI の普及状況等を必ずしもすべて反映させる必要はないものと考えられる。
試行的に導入する場合の工事規模については検討が必要。現場導入にあたっての方策（民間リース、官貸与、業界集中管理等）の対策が必要（近畿）。	現段階においては、RI 試験機の普及の度合いが低いこと、現場技術者に RI による管理手法が浸透していない等の問題が存在すると考えられるが、その点は地建毎に事情が異なることもあり、各地建の実状に応じて適宜 RI による締固め管理を普及されたい。
対象土工量を 5,000m ³ 以上の工事とし、それ以下の土工量については、RI 密度管理から除外し、現行での管理としたい（九州）。 理由：地建管内の土工工事では、まだ RI 試験機は普及しておらず、一定規模以上の工事で適用したい。小規模工事では、RI 試験機を使用した場合管理費用が割高となる。現場管理者の未熟など対応に困難が考えられる。	なお、小規模工事に、RI による締固め管理を導入しようとした際の管理費用の問題は、データの採取個数を小規模工事については割り引くことにより基準上の対応を行っており、また、RI の普及方策を別途講じてゆくべき問題であると考えられる。また、現場技術者の未熟練の問題は、RI による密度管理手法の周知に努めることにより解決すべき問題であると考えられる。

7. 積算等	
平成4年度土木工事標準積算基準書（建設省）の技術管理費の取り扱いをどうするか（中部）。	RIによる締固め管理に要する費用は、現行の技術管理費率には含まれないものとして、当面別個に積算する必要があると考えられる。歩掛かりについては4年度からの検討課題とするとともに、将来は特定パイロット事業等のなかで検討することとしたい。
発注者側の監督体制をどうするか（中部）。	RIを採用したことによる新たな管理項目として、少なくともデータの採取個数、採取場所については適宜報告を求めるべきものと考えられる。

北海道開発局，東北地方建設局，関東地方建設局からは意見なしとの回答を得た

2.2 基準案に関する意見（平成4年度）

平成4年度に実施した特定技術パイロット事業において、施工管理担当者から要領案に対して得られた意見を下表に示す。なお、問いの1～7は施工者、8～12は計測担当者から回答を得た。

1. 管理単位が土工量から面積になったことに対して		
(1)	土工量の方が管理しやすい	17 件
(2)	面積の方が管理しやすい	16 件
(3)	その他	5 件
代表的な意見 (1) ・ 盛土材の土質、盛土施工時期、関連工種等により現場の条件が異なる。 ・ 土工量の方がほぼ確実な数量がわかり管理しやすい。 ・ 施工範囲が小規模の場合は土工量による管理の方が時間を短くできる。 ・ 土量確認（概算ダンプ台数）が簡単である。 ・ 施工面積が少ないが盛土量が約3000m²の高盛土現場では面積管理は不適切。 ・ 面積管理では施工中断になり時間もかかる。また盛土量が多い工事では工程への影響が大きい。 (2) ・ 面積の方が土工量よりも簡単に測ることができる。（3件） ・ ダンプで運搬を伴わない発生土による施工であることから面積管理は有効。 ・ 堤防の場合施工エリアが明確。 ・ 層毎で管理できる。（6件） ・ 日施工面積が少ない場合、従来の管理では2層にまたがることになり、品質管理が不十分。 ・ 面積管理では管理する場所が広範囲になり管理がしやすい。 (3) ・ 1500m²で割り切れない場合が多く判断が難しい。 ・ 施工面積が狭く管理単位の判断が難しい。 ・ 日単位等の時間単位での管理が良いのではないか。 ・ 大規模な土工量の場合は面積管理、小規模な土工量の場合は土工量管理としてはどうか。		
2. 管理単位が1,500m ² であることに対して（1または2を選択した場合は数量も記入）		
(1)	小さい	7 件 （例：5,000m ² ）
(2)	大きい	5 件 （例：1,200m ² , 1,000m ² ）
(3)	妥当	27 件
3. 1管理単位あたり15点もしくは20点の測定数について（1または2を選択した場合は数量も記入）		
(1)	多い	12 件 （例：10点, 15点）
(2)	少ない	1 件 （例：15～20点）
(3)	妥当	26 件
4. 1管理単位あたりの測定時間はこれまでの砂置換法と比べてどうでしたか。		
(1)	長い	14 件
(2)	短い	21 件
(3)	同じ	4 件
5. 1管理単位が500m ² 以下の場合、5点の測定点数はどうでしたか。		
(1)	多い	7 件
(2)	少ない	1 件
(3)	妥当	25 件

6. 砂置換法から RI 法に変わり管理作業がどの程度変化しましたか。	
(1) 管理が極めて楽になった	1 件
(2) 管理が楽になった	20 件
(3) 変わらない	11 件
(4) 管理が難しくなった	6 件
(5) 管理が極めて難しくなった	1 件
7. 管理基準値, 管理単位, 採取個数についてご意見をお聞かせ下さい	
(施工及び品質管理で留意した点) ・ 盛土材の含水比の管理が重要となった。 ・ 含水比が高い土を用いると締固めにばらつきが生じる。 ・ 管理基準の中の施工含水比について施工含水比の平均が 90%の締固め度の得られる含水比のうち ω_{opt} より湿潤側というのは礫質土の場合難しいと思われる。 ・ 転圧試験結果により得られた回数より多く転圧した。(4 件) ・ 放置期間を十分取って転圧した。 ・ 転圧がタイヤローラで施工可能な場合には, 測定のための整地も簡単で時間もはやく締固め度も達成できるが, 工程上, 雨天・雪天後に十分な乾燥時間がとれない様な場合にはタイヤローラでの転圧が難しくなり, やむなくブルドーザ転圧となり, 整地に要する時間はかなり増加する。 ・ 転圧回数が増えた。施工性に注意を払うようになった。現場搬入時, 山土の自然含水比をチェックした。 ・ RI 試験器, 測定鉄棒の穴打設に破碎岩のためか打ち込みに苦労した。 ・ 表面の均しに留意した。 ・ 土質の種類により試験結果に異なる結果が得られる場合がある。例えば, 砂質, シルト等では現場密度試験では規定の密度で得られる場合でも散乱型 RI 計では転圧回数を増しても所定の密度を満足しない場合もあった。 (管理基準値に関する意見) ・ 河川の築堤の基準値は 93%ではオーバーコンパクションぎみであるので, 88%でよいのではないか。 ・ 最適含水比でないと 93%以上の数値を満足しにくい。 ・ 締固め度では基準値を十分満足するが, 空気間隙率では含水比が少ないため, 基準値を満足しなくなる。 ・ 種々の材料が混在し, 室内試験を実施した材料と異なる場合があり, 締固め度が基準を満たさない例があった。 (管理単位に関する意見) ・ 1500m²を 1 単位ではなく「点/○○○m²」にした方がよい。 ・ 1 層当り 500m²以下でしか施工できないような小規模の現場では, 1 管理単位を見直した方がよい。例えば土量で管理するか, 2~3 層のうち 1 層を管理するとかでどうか。 (採取個数に関する意見) ・ 締固め度の傾向をつかむには 10 個位で十分ではないか。 ・ 2000m²に 5 点管理でよいと思う。 ・ 200m²に 1 点の方が良い。 ・ 1500m²で 5 点, 500m²で 3 点で良い。 ・ 盛土材料は同じものを使用する 경우가多く, 測定個所を多くしてもデータが似通うため 15 点も必要ないと思われる。また時間的にもロスを感じる。 ・ 標準体・BG 測定に時間がかかりすぎる。 (その他) ・ 高含水比材料の場合の基準が不明確で管理手法が決定できない。 ・ RI 計器が高価であり, 自社購入が難しくリースするが多いため使用期間が限られる。また重量がありかさばる点が使用しにくい。	
8. 施工管理 (測定) 試験はだれが実施しましたか。	
(1) 施工者	21 件
(2) 地質・土質調査業者	11 件
(3) コンサルタント業者	7 件
9. RI 法による測定は今回が初めてですか。	
(1) 初めて	20 件
(2) 2 回目以上	19 件

10. 管理（測定）手順は次のどれですか。		
(1)	全部転圧後に測定	29 件
(2)	半分転圧後に測定	10 件
11. 砂置換法から RI 法に変わり何が変化しましたか。（複数選択可）		
(1)	人手が少なくてすむ	17 件
(2)	人手が多く必要である	9 件
(3)	管理に要する時間が短い	28 件
(4)	管理に要する時間が長い	8 件
(5)	測定方法が難しい	3 件
(6)	整地が面倒	8 件
(7)	その他	2 件
12. 今後締固め管理の試験法に RI 法が採用されたとき、どのような利点や問題点が生じますか。		
(利点) ・ 施工管理に要する時間が短くなる (10 件) ・ 現場密度試験の結果を直ちに施工作業に生かすことができる (16 件) ・ 日々の施工管理が安心して行える。 (問題点) ・ 表面の均し方に工夫がいる。 ・ 放射能に留意する必要がある (2 件) ・ 機械損料が高い (5 件) ・ 障害物 (玉石) があつた場合に密度が高くなり、ばらつきも生じる (11 件) ・ 最大乾燥密度の決定方法 ・ 基準値が厳しすぎる ・ 測定器械が重い (2 件) ・ Ig 値の決定が難しい ・ 土質が変わったときにその都度室内試験が必要 (2 件) ・ 施工管理の手間がかかる ・ 試験機が故障したときのメンテナンス ・ 施工業者自ら施工管理をしないと試験工程が組みにくい (2 件)		

2.3 基準案に対する意見（平成5年度）

平成5年度に実施した特定技術パイロット事業において、各地方建設局から要領案に対して得られた意見を下表に示す。

1. 管理単位について		
時間単位では施工効率や機械能力などによりかなりの格差が生じるので、面積管理が望ましい（関東）。		
単位の大きさは、現行(1500m ²)の半分程度に小さくして約半日分の施工面積とすれば良い（関東）。		
盛土に使用する土質に変化がなければ、1500m ² ／1回とする。ただし1日の施工面積が1800m ² 以下の場合は1800m ² ／1回とすることができる（北陸）。		
道路盛土及び河川築堤において、施工延長100mに1回程度の締固め管理が必要と考えられ、面積的には1500m ² 程度が平均と思われる。また、盛土の品質は土質、含水比、施工法により変化するが、1日の施工中にこれらの要因の変化・変更はあまりないと考えてよく1500m ² の20%増程度は許容して良いと考え、「1日の施工面積が1800m ² 以下の場合は1800m ² ／1回とすることができる。」とした（北陸）。		
締固めの良否は、天候、場所（作業性）、締固め機械等が重要な要素と考えられ、日単位への変化は少ないと思われる（中国）。		
大規模工事には、日当たりの施工量が現行の管理単位の2倍以上あるものもある（中国）。		
省力化の観点からは、特に問題が生じない範囲でできるだけ管理単位が大きい方がよい（RI計器の導入により省力化は図られると思うが）（中国）。		
現在、四国地建の砂置換法の規定は、路床500m ³ 、路体1000m ³ に1カ所を管理単位としているが、今回の「締固め管理基準（案）」を今後適用するとすれば、面積管理、施工日管理及び盛土の各層での管理が必要となる。また、現況よりも密度測定頻度がかかなり多くなり、現行の基準と比較すると複雑かつ砂置換法と同等以上の労力が必要となると思われる。さらに、山間部の土工（片切、片盛）の場合などは面積による管理測定は困難が予想され、施工管理の省力化からすれば逆行する。従って、現行規定の「路床500m ³ 、路体1000m ³ に1管理」とし、具体的には各々の現場に適合した管理単位を策定することとしたい（四国）。		
管理単位の基本的考え方は、①日作業区域の品質チェック（各層の均一化）②手直し作業の削減と思われる。これらを考慮すると、RI計測器は短時間で計測できるため、路床・路体・築堤の管理単位を統一する。すなわち基本的に1日施工量（一層毎）を管理単位とし測定頻度をもうける。なお、データの採取数は下表の通りとする（九州）。		
	1日施工量1500m ² 以上	1日施工量1500m ² 以下
路床	管理単位15カ所以上	管理単位10カ所以上
路体、築堤	管理単位8カ所以上	管理単位5カ所以上
2. 管理基準値について		
管理基準値は統一すべきと考えられるが、値については平成4年度の施工実績から決定すべきと思われる（関東）。		
管理基準について統一する方向で検討すべきと考える。値については、施工実態から85.9%以上の管理基準値は現場が対応に苦慮するため85.9%を提案する（北陸）。		
（基準値の統一について）管理基準の統一は、複数の地方で作業を展開する施工者の混乱を避ける意味ではメリットがあると思うが、地域ごとの土質の特殊性を考慮する必要があると思う（中国）。		
管理基準値について）中国地建では、現場密度により（粘性土の場合は飽和土）締固め度を管理しているが、管理基準値については実績からみても現行（路体・築堤は85%以上、路床は90%以上）が妥当であるという意見が多かった（中国）。		
築堤については、堤体の安全性の観点及び実績（90%を切るケースは少ない）から、90%以上が望ましいという意見もあった（ただし流用土など土質が悪い場合は適用除外とする）（中国）。		
各地建により土質が異なるなどの地域特性もあり、過去からの実績・試行錯誤の積み重ねにより各地建が基準値を定めていることから、各地建間の基準値の統一までは必要ないものと思われる（四国）。		
RI計器による管理基準は、現行の締固め管理基準（案）の通りでよいと思う。ただし今後RI計器の管理評価が確立され次第、全国的な基準値の統一化が必要となると思われる（九州）。		