



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)

昭和50年6月

建設省土木研究所
施工研究室

目 次

まえがき

第1章 概 説	1
1・1 礫混り土施工管理上の問題点	1
1・1・1 礫混り土の特性	1
1・1・2 品質管理上の問題点	1
1・2 RI計器および測定原理	4
1・2・1 測定原理	4
1・2・2 RI計器の構造	10
1・3 校正曲線の作成	11
第2章 室内実験	16
2・1 実験概要	16
2・2 室内実験データ(その1)	16
2・3 " " (その2)	27
2・4 " " (その3)	38
2・5 考 察	48
第3章 現場実験	51
3・1 実験概要	51
3・2 現場実験データ(その1)	51
3・3 " " (その2)	59
3・4 考 察	65
第4章 モンテカルロシミュレーションによる測定精度の検定	67
4・1 目 的	67
4・2 シミュレータのシステム仕様	67
4・3 演算解析結果	72
参 考 文 献	77
あ と が き	78
付録 RI測定 of 精度検定プログラム	79

ま え が き

近年の道路交通の増加とその高速化による道路線形、巾員の改良は、その道路構造の大部分を占める盛土および切土区間の、土工事の規模を著しく増大させた。更に、水資源確保のためのフィルタイプダム需要と都市周辺における大規模な宅造土工事は、この傾向を増大せしめ、その施工も大型機械による機械化施工を中心に進められてきている。このような土工事の大規模化、高速化に伴ない、従来の施工管理方式が工程上の隘路となりつつあり、特に盛土の品質管理においては、その締固め基準の合理的設定と検査、測定方法の簡便化、省力化、高精度化が望まれている。

従来、盛土の品質の判定には、その乾燥密度により締固め度を推定する密度管理方式が一般に用いられているが、その測定手段も、従来の砂置換法、水置換法、コアカッター法等に代わるものとして、ラジオアイソトープを利用した密度水分測定器（以下R I計器と略す）の開発が行なわれて、精度および取扱いの簡便さから良好な結果を得てきた。

一方、山岳部における盛土施工においては、礫や岩砕の混入する割合が非常に多く、これが支持力の不均等をもたらし均質な施工を困難なものとしているが、材料、経費、工程の関係から、これらの礫を除去して施工する例はきわめて少ない。このような礫混り土に、前述の密度管理方式を適用する場合、礫の混入度や分布状況が湿潤密度や含水比の測定値およびそのバラツキに与える影響が無視しえないだけでなく、見かけの密度の上昇により締固め度の判定に過大評価を与える結果となり、フィルダムのコア部等、高い品質を必要とする土工構造物において、この問題は特に重大である。

本研究は、これらの礫混り土施工管理上の問題点を明らかにするとともに、R I密度水分計の礫混り土の締固め管理への応用性の検討を試みたものである。

すなわち、先づ礫の粒径分布や混入率を種々に変化させたモールド供試体による室内実験を実施し、礫混り土に対してR I計器が基本的には応用可能であることを確認するとともに、実験結果より礫混り土の土質特性やR I計器の測定方法による測定精度の変化を検討し、各礫混り土に応じて妥当な精度で測定しうる測定方法の決定に関する考察を行なった。

次に、いくつかの礫混り土の盛立現場を選定し、当該現場で採用されている施工管理方式（砂置換、水置換等）との比較実験を行ない、R I計器のこれらの現場での実用性等について検討した。

最後にこの問題に対する理論的アプローチとして、礫の分布とR I計器の幾何学的条件に着目したR I測定のモンテカルロシミュレーションを実施し、室内実験データとの対比を行なった。この結果では、シミュレーションモデル構成のための種々の仮定と、室内実験に用いた供試体の不均一性のため多少の誤差を含むものとなった。しかしながらこのシミュレータは種々の礫混り土に対して、きわめて簡便にその測定値の分布の傾向を予測しうるものであり、R I計器の測定方法の選択決定の基礎資料となりうるとの結論に達した。

本資料は、礫の混入度、粒径分布等が湿潤密度、含水比の測定値とそのバラツキに与える影響を定量的に把握する目的で行なった室内モールド試験、現場試験、シミュレーション演算実施の各デ

一タおよび解析結果をまとめたものである。

施工研究室

千
熊
武

田
谷
田

昌
恒
一

平
郎
繁

第1章 概 説

1・1. 礫混り土施工管理上の問題点

1・1・1. 礫混り土の特性

盛土施工中の材料への礫や岩砕の混入は、崖錘台地など、礫と粘土の混合した地盤を掘削した場合や、山岳部などにおいて岩盤層に至る深い切土を行なった場合に起る。また、フィルダムの盛立材料として、風化堆積岩を破碎して用いる場合、材料不足から堤体下部やトンネル等の掘削ずりを混合する場合にも、しばしば多量の礫が混入する。

この様な礫混り土は、礫の混入率が50%と70%の近傍でその力学的特性を著しく変えることが解明されており、それぞれの領域は粘土領域、過渡領域、礫領域と呼ばれている。

通常、現場で問題となっている礫混り土の多くは粘土領域に属するもので、これに関するいくつかの実験的研究結果を総合すると、

- (1) 強度特性は、通常の混入率では土自身のものと大差ない。
- (2) 透水性は、礫の混入量が大きいと非常に増加する。
- (3) 締め固め施工特性は、礫の混入量が適量(20%程度以下)な場合を除いては、締め固め度均一性の面から不良となる。

などで盛土の材料として品質上良好とは言えない。しかしながら、これらの混入した礫や岩砕を除去して施工することは、工程、経費、及び材料供給の上から、きわめて困難であり、実際その例も稀である。したがって、これらの礫混り土の効果的な締め固め施工法及びその適切な施工品質管理の方法が求められている。

1・1・2. 品質管理上の問題点

施工管理とは、設計仕様(品質、出来形)を満足する築造物を妥当な工期で、経済的に仕上げることを目的として行なわれ、工程管理、品質管理、原価管理をその3大要件とする。このうち、品質管理とは、欠陥の未然防止、品質のバラツキの防止、工事の信頼性の向上等、築造物が質的、量的に設計品質や出来形を満足させるための一切の業務を指し、以下の手続きからなる。

- (1) 品質管理基準の設定
- (2) 基準を達成するための施工法の検討決定
- (3) 施工法の検査
- (4) 品質の検査

一方、土工は、現場の自然条件に左右される要素がきわめて多く、設計仕様にそった管理を行なって施工される品質について考えてみても、工場内で生産される生産管理の様に画一的な方法で対処していくものにくらべ、はなはだ困難なことが多い。

土工における品質管理上、最も重要な事項と考えられるものが、締め固めの問題である。道路土工指針に締め固めの目的として、次の様に述べられている。

(1) 土の空気間隙を減じ、透水性を低下させ、水の浸入による軟化、膨張を小さくし、土をより安定した状態にすること。

(2) 盛土のり面の安定、交通荷重の支持など、土構造物に必要な強度特性を持たせること。

(3) 完成後の路面に悪影響を及ぼす盛土自体の圧縮沈下を少なくすること。

このいずれもが、盛土が機能を果たするために要求される品質であり、この品質目標を満たすべく管理が行なわれる。

この様な盛土施工における品質管理としては、基本的に次の3つの方法が考えられる。

(1) 締固め施工法を規定する方法

(施工機種、まき出し厚、転圧回数、施工含水比等)

(2) 直接要求される品質特性を規定する方法

(強度特性、変形特性、透水性等)

(3) 盛土の締固め度を規定する方法

(乾燥密度、飽和度、空気間隙率)

(1)は、所定の品質を維持する施工法(まき出し厚、転圧機種、転圧回数、含水比)を、予め十分検討しておき、その施工法が遂行されているかどうかを確認する方法であり、従来から、監督の形で他の方法を併用して行なわれてきたが、今後、テレビカメラ等による集中管理方式の採用とともにVTRと画像解析機の活用により十分可能な方法となりつつある。

(2)は、盛土に要求される品質特性を直接測定する方法で、平板載荷、CBR、等の強度特性に関するものの他、透水試験や、橋台との取付部における段差の原因となる圧縮沈下特性を知るための先行圧縮応力値(P_o)試験等の方法がある。

(3)は、盛土の種々の品質特性が一定の施工条件のもとでは、一般に、締固めの度合に比例することから、締固め度を一般的品質向上のパラメータに用いる方法である。

締固め度は、測定された湿潤密度と含水比から算定された乾燥密度によって表わされ、通常、最大乾燥密度に対するその割合で管理基準が設定される。

また、高含水比の粘性土のような場合、乾燥密度で規定することは多くの問題があり、飽和度や空気間隙率が多く用いられる。しかしながら、この方法は含水比の影響を多く受けること、強度との相関が必ずしも確実でないこと等の問題を残している。

これらの方法は、盛土構造物の用途や個々の現場の条件に応じて、個別に、もしくは組合せて用いられるが、このうち、最も一般的なものは、乾燥密度から、締固め度を推定する方法とすることができる。

このいわゆる密度管理方式は、従来、砂置換法、コアクタ法等、密度、含水比を測定するための種々の方式があるが、いずれも多大の労力と時間を要し、最近の土工事の大規模化、高速化の傾向に追従しかねており、工程上の1つのネックとなりつつある。これらの問題に対する効果的測定手段として、ラジオアイソトープを用いた透過型密度水分計が開発され、測定の簡便さ、迅速さ及び精度の点で良好な結果を得て来た。更に、近年の電子回路の発達に伴ない、機器の小型化、軽量化と、強度の弱い線源の使用により、その実用性を高めてきており、宅造土工事、フィルタイプ

ダム等の大規模土工現場での使用が進められつつある。

この様にR I 計器の出現等により、密度管理方式の簡便化、省力化、高精度化が進められ、今後ますますその採用が増すと考えられる。しかしながら、元来、密度管理方式は、乾燥密度と締固め度、更に土の品質特性の間の相関関係を前提としたものであるから、この関係が明確でない場合には実際上の問題が生じる。先に述べた高含水比粘性土がその例であるが、特に最近問題となっているものが、山岳部等の土工現場における盛土材料への岩砕、礫の混入である。

この岩砕、礫等の混入したいわゆる礫混り土は、強度等の品質特性の均一性や敷きならし、転圧等の施工性からも決して好ましいものではないが、材料取得や工程、経費の関係から、これらを除去して施工する例はきわめて少ない。

この様な礫混り土に前述の密度管理方式を適用する場合、礫の混入度、粒径分布、散布状況等が湿潤密度や含水比の測定値に与える影響から、基本的に次の2つの品質管理上の問題を生じる。

(1) 湿潤密度および含水量の測定値が、測点付近の礫の混入度、粒径分布により大きくばらつき測定値の信頼度が低いこと。

(2) 礫の混入による見かけの乾燥密度の増加が締固め度の過大評価を与えること。

(1)の測定値のバラツキの問題は、礫混り土の密度、水分量を十分に代表しうるロットの大きさ(有効容積)とR I 計器の測定範囲(有感容積)との関連でとらえられ、個々の礫混り土に応じた十分な有感容積を有する測定器もしくは測定方法の採用により解決されうる問題である。

ここで有効容積とは、測定対象が最大粒径の礫を含んで、かつ、全体の粒度分布に近い状態となりうる体積であり、その大きさのロットを数多く測定することにより、密度、含水量の妥当な平均を求めるに必要な体積と言うことができる。

また、有感容積とは、測定値に影響する範囲を指し、R I 計器の場合、線源打込深や計数管設置位置等、計器の幾何学的条件やガンマ線の線質特性により計器個有の作用範囲が定まっているが、近接部分を順次測定する等の方法により、これを大きくすることも可能である。

この関係を模式図に示すと図-1・1のようになる。

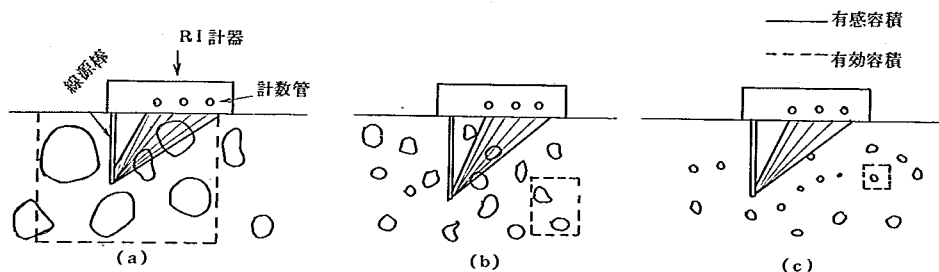


図-1.1 有感容積と有効容積

(a)の状態は、密度を正當に評価する事はできず、(b)では、ほぼ正しい平均値を与え、(c)では、平均

値の信頼性が高くなるという事ができる。(a)の材料は有効容積が最も大きく、(c)の材料で最少となる。有効容積は一般に、材料の最大粒径を目安に推定されるが、通常は、最大粒径の1～2倍程度の辺長を持つ立方体を想定すれば十分であるといわれる。

一方、(2)の締固め度の過大評価の問題は、十分締固めが行なわれていないにもかかわらず礫の多数混入した部分は見かけの乾燥密度が上昇し、基準を満たす結果をもたらす。この問題は、盛土の品質管理上きわめて重要であり、特に、高盛土やフィルダム等高い品質を要求される土構造物においては、何らかの対応策を要する。いくつかの提案を以下に列挙する。

- (1) 密度、含水量の測定地点における礫の混入量を調べ、礫分を補正した乾燥密度を用いて管理を行なう。
- (2) 礫を含んだ盛土の締固め基準を作成し、礫混り土の乾燥密度により管理する。
- (3) 強度管理、施工法管理等の方法を採用もしくは併用する。

本資料の次章以下に示す室内実験、現場実験、モンテカルロシミュレーションは、前述の2つの礫混り土施工管理上の問題点のうち、先ず礫混り土の密度、水分量測定の精度向上のための測定法の検討を目的として行なわれたものである。

すなわち、先づ、礫の混入率や粒径分布、土の締固め度等を変化させて作成した種々の礫混り土供試体において、R I 計器による室内実験を行ない

- ・ 基準となる校正曲線が礫に対しても有効であること。
- ・ 通常の混入率の供試体では線源棒の打込みや地表面整形が可能であること。

など、R I 計器の礫混り土への応用が基本的に可能であることを確認した。次に、礫の混入率や粒径分布、土の締固め度等の土質条件と、線源打込深やI 測点における計器設置方向、測定時間等の測定方法が湿潤密度や含水比の測定値とそのバラツキに与える影響を検討し、礫混り土の土質特性に依じて、妥当な精度で測定しうる適切な測定法の決定に関する考察を行なった。

また、同時に、いくつかの現場を選定し、当該現場で採用されている施工管理方式（砂置換法、水置換法）との比較測定実験を行ない、R I 計器の礫混り土現場での実用性等について検討した。

最後にこの問題に対する理論的アプローチとして、礫の分布とR I 計器の幾何学的条件に着目したR I 測定のモンテカルロシミュレーションを実施し、室内実験との対比を行なった。この結果、本シミュレータが、礫を球形とし、土は一樣に締固められる等の仮定を行なっていること、また室内実験のモールド供試体も礫の分布や締固めの均一性が十分確保されていると言い難い等の理由で完全な近似解とはなりえなかった。しかしながらあらゆる礫混り土に対して、きわめて簡便にその測定値の分布の傾向を予測しうるものであり、R I 計器の妥当な測定法の決定の基礎資料となりうるとの結論に達した。

1・2. R I 計器および測定原理

1・2・1. 測定原理

土木工学の分野で土工構造部を建設する過程で問題となることの一つに土の密度・含水量の管理がある。現在この密度・含水量管理は、在来法すなわち砂置換法、水置換法、パラフィン法、炉乾

燥法等があるが、これに代って全く新しい測定原理で開発されたラジオアイソトープを利用した土の密度・含水量管理の方法があり現在すでに実用化の段階に入りつつある。

このR I 計器は従来の砂置換法などに比べてつぎのような特色をする。

- 1) 測定が非破壊的である。それ故同一箇所の繰り返し測定が可能である。
- 2) 測定時間が短かく(1~3分程度)ただちに結果が得られる。
- 3) 取扱いが簡単で個人誤差の介入が少ない。
- 4) 適切な使用法によりかなりの精度が期待できる。

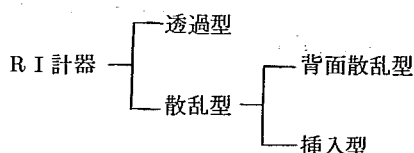
一方欠点としては

- 1) 計器が比較的高価である。
- 2) 複雑な電子回路を有しており計器の安定性が充分でない。
- 3) 人体に有害な放射線を放出する。
- 4) ラジオアイソトープを装備している関係上法律による取扱いの規制がある。

しかし、これらの欠点も技術の進歩とともに計器の改良も期待できるのでラジオアイソトープを使った計器は将来性のある有望な測定手段として今後ますます普及していくものと考えられる。

(I) 密度計・水分計の原理

ラジオアイソトープによる密度・水分測定器は原理的に透過型と散乱型に分けられ、更に散乱型は挿入型と表面型(背面散乱型)からなる。



密度計の場合にはコバルト60 (^{60}Co) やセシウム137 (^{137}Cs) 等の線源が放出するガンマ線が被測定物中の電子との相互作用の結果生ずる散乱ガンマ線パルスを測定する背面散乱型密度計と、ガンマ線が被測定物質中を透過した後のパルスを測定する透過型密度計とからなる。

前者の散乱ガンマ線密度計では一般に土を構成するような軽い元素(原子番号30以下)では水

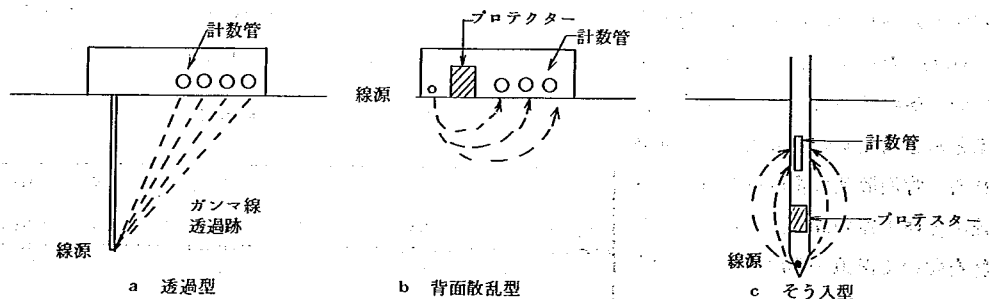


図-1.2 R I 計 器

素原子を除けば質量数と原子番号の関係は約 2 : 1 である。この一定関係により物質の電子密度と散乱ガンマ線との関係はそのまま物質の密度と散乱ガンマ線の関係に大体おきかえることができる。このような関係を利用して密度を測定するものである。後者の透過型ガンマ線密度計はガンマ線が物質中を透過する際にガンマ線のエネルギーを消失していくことを利用したものであり、原子番号が 20 番程度の軽い元素ではエネルギーの消失される割合（質量吸収係数）が水素原子を除いてほぼ一定しており、その物質の密度のみに関係している。この関係を利用して物質の密度を測定するものである。

水分計の原理は中性子源から速度の速い速中性子を放出し、被測定物質中に含まれている水素原子に弾性衝突して急激に減速されて作り出される熱中性子（低いエネルギーを持った中性子）を検出することにより含水量を測定する方法である。これは速中性子の水素原子における減速が被測定物質中の水素量とほぼ比例関係にあることを利用したもので、通常土中に含まれている水素原子は H_2O の形で存在している場合が多いため減速された中性子を測ることで土中の水分を測定することができる。

(2) ガンマ線密度計

1) 散乱型密度計

ガンマ線のエネルギーが 0.5 ~ 3 MeV のものが原子番号 20 番程度の軽い元素に入射した場合、ガンマ線と物質の相互作用としてはコンプトン散乱と電子対生成が起るがそのうちコンプトン散乱が最も優勢となる。コンプトン散乱による吸収係数 Σ_c は電子の散乱断面積 σ と物質の単位体積あたりの電子数 $\rho N_0 Z/A$ との積で以下の式の様に表わされる。

$$\Sigma_c = \rho N_0 Z \sigma / A \quad (1-1)$$

ρ : 物質の密度

Z : 原子番号

N_0 : アボガドロ数

A : 質量数

Z/A は表 1.1 に示すように水素を除いてほぼ 0.5 である。

実際の土においては水素のみにて存在することは非常に少なく通常 H_2O の形で含まれていることが多い。したがって水素のガンマ線吸収係数に与える影響は物質の含水比に関係が深く見かけの密度 1 の物質の含水比によるその影響は計算すると表 1.2 のような小さな値となる。また水 (H_2O) の吸収係数はある一定のガンマ線のエネルギーに対して他の物質と変わらない。したがって吸収係数は物質の種類によらず、

ほとんど密度 ρ のみによって決定さ

表-1.1 種々の元素 Z/A

元 素	H	Li	B	C	N	O	Na	Mg
Z/A	1.000	0.432	0.462	0.500	0.500	0.500	0.478	0.500
元 素	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
Z/A	0.482	0.500	0.484	0.500	0.486	0.487	0.500	0.465

れる。背面散乱型密度計ではガンマ線源と検出器の間に適当なしゃへい物を置いて線源から直接ガンマ線が到達しないようにして散乱ガンマ線のみを検出する。

校正曲線の線形は被測定物質の密度に関係が深い。すなわち密度がゼロであればガンマ線の散乱・吸収はなく、従って散乱ガンマ線の強さもゼロになる。物質の密度 ρ がある低い範囲 ($\rho = 0 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$) では密度が増すにつれて検出器に入射する散乱ガンマ線の強さは増加する。しかしながら密度がある程度以上になると散乱ガンマ線の吸収が優勢になり密度が増すにつれて散乱ガンマ線の強さは逆に減少する。密度が無限大になれば検出器に到達しなくなる。これは密度が低い範囲で

表-1・2 見かけの密度1の物質の含水比による影響

含 水 比	水 分 密 度	影響する割合
20%	0.167 g/cm ³	0.93%
40	0.286	1.59
60	0.375	2.08
80	0.444	2.46
100	0.500	2.77
110	0.524	2.91
120	0.545	3.03

はガンマ線光子の散乱のみによる現象であり、その後は散乱と吸収の両方の作用が起り密度が大きくなればなるほど吸収作用が支配的になってくるからである。密度 $0 \sim 2.0$ までの間で理論的に求めたものでは検出器に到達するガンマ線の強さの最大値は密度が 0.75 g/cm^3 くらいのところに現われている。この最大値の位置はガンマ線源と検出器との間隔に関係があり、線源と検出器との間隔が縮まるにつれて計数率比 ($R \cdot C$) の最大値は密度大なる方へ移動する。実際に使用する範囲は計数比の最大から下降する範囲であり、使用密度範囲は $1.0 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ でこの間の計数率比と密度の関係はほぼ直線で近似することができ、 $R \cdot C = -a \cdot \rho + b$ なる式で表わされている。

ii) 透過型密度計

ガンマ線は物質を透過するとき光電効果、後方散乱 (コンプトン散乱) および電子対生成の相互作用により吸収されエネルギーを消失してゆく。これらは被測定物質の原子番号 (Z) とガンマ線の振動数 (γ) によるエネルギーによって定まるが実際の現象は非常に複雑である。各々の現象についての光子エネルギーの消滅を追跡すると、光電効果や電子対生成によって光子は1回の過程で消滅する。またコンプトン散乱でも散乱された光子は始めの光子とは別のものであるから入射光子は1回の過程で消滅する。従って被測定物質に入射した光子がある厚さの物質を通る間にその数が減少する割合は光子数を I とすれば、 $-dI/I$ で表わされ、光子がその中で遭遇する原子あるいは電子の数、すなわちその厚さ Δx (cm) に比例することになる。

$$-dI/I = \mu x \cdot \Delta x \quad (1-2)$$

よって吸収体の厚さを変え貫通してくる光子の数、あるいはガンマ線の強度は前式を積分することにより

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x \cdot x} \quad (1-3)$$

という指数関数の式となる。ここで I_0 は入射前の光子数、あるいはガンマ線の強度 (ガンマ線に垂直な 1 cm^2 の面積を 1 sec に通過する光子の数) を表わす。 μx は cm^{-1} の単位をもち、その物質の吸収の能力を表わす量で線吸収係数または線減衰係数といい単位長さで吸収される γ 光子の割合を意味し、吸収物質とその密度 ρ および γ 線の線質 (エネルギーすなわち波長) によって決まる。線吸収係数を吸収体の密度 ρ で割った値 μ/ρ は質量吸収係数 Σ とよばれ、ふつう cm^2/g の単位で表わされる。質量吸収係数は吸収物質の切口 1 cm^2 、質量 1 g について光子の吸収される割合ということが

できる。質量吸収係数はガンマー線のエネルギーによって変化するが0.3~3MeVのガンマー線のエネルギー範囲では原子番号が20番程度の軽い元素ではその種類によらずほぼ一定値をとる。表-1.にガンマー線のエネルギーが0.6MeVに対する質量吸収係数を示す。質量吸収係数を Σ で表わすと(1-4)式は

$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma \rho x} \quad (1-4)$$

となる。ガンマー線源は壊変に伴う減衰を除いて一定であるから I は $\Sigma \rho x$ の指数で表わされる。

したがって距離を一

定にすれば密度 ρ の

変化によって定まる

ことがわかる。この

ような原理に基づい

て透過型密度計に応

用されるものである。

ところが透過型ガン

表-1.3 0.6 MeVに対するガンマー線の質量吸収係数

元 素	H	C	N	O	Na	Al	Si
質量吸収係数 (cm ² /g)	0.1600	0.0805	0.0805	0.0805	0.0770	0.0779	0.0805

元 素	Ca	Fe	Cu	Air	H ₂ O	Concrete
質量吸収係数 (cm ² /g)	0.0813	0.0769	0.0760	0.0804	0.0894	0.0804

¹³⁷Cs のガンマー線のエネルギーは0.66MeV

マ線密度計の場合を考えると線源から放出されるガンマー線はあらゆる方向に放射されるので直接透過してきたガンマー線の外に散乱を受けて検出器に到達するものも合わせて検出されることになる。そこで散乱線の一部が検出器に達するのでその影響を考えてこれを補正する意味で再生係数 B (Build-up-factor) が与えられ(1-4)式は

$$I = B \cdot I_0 \cdot e^{-\Sigma \rho x} \quad (1-5)$$

と書き改められる。再生係数 B はガンマー線のエネルギーおよび吸収体の種類(原子番号)、形状、厚さ、密度、検出器の種類及び寸法、減衰距離その他測定の幾可学的条件によっても異なってくるが大体厚さの関数と考えられるが一義的には定め難い。一般に透過型ガンマー線密度計の特性は上記のビルドアップ係数も含めて次式で表わすことができる。

$$I = A \cdot e^{-\alpha \rho} \quad (1-6)$$

A , α : それぞれの各密度計に対して実験的に求められるパラメーター

校正曲線の線形としては上式で示され、厚さ x を一

定にとると A , α が一定値となり結局 ρ の指数関数に

より I が定まることにより図-1.3のようになる。

(3) 中性子水分計

(4) 背面散乱型中性子水分計

水素原子の入った物質に高速中性子を衝突させると

水素原子による高速中性子の減速能が他の物質の減速

能に比べて桁はずれに大きいことを利用して単位体積

当りの水素原子の数を測定するものである。中性子と

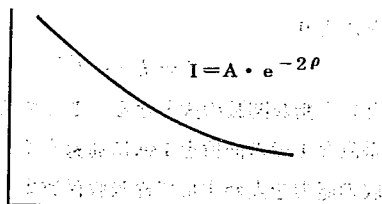


図-1.3 透過型密度計の校正曲線

原子核との衝突を純力学的な弾性衝突として考えれば、原子核の質量が小さいほど中性子が失う運動エネルギーは大きくなる。従って高速中性子は水とかパラフィンのような水素を多量に含む物質の中を拡散していく間に減速され数十回の衝突で熱中性子になる。表-1.4に中性子に対する種々の元素の核的性質を示すが、水素による減速能が極めて高いことがわかる。実際の減速物質では熱エネルギーよりも高いエネルギーの中性子に対する散乱断面積で示される散乱の確率が大きくないかぎり、エネルギー対数の平均減少率 ξ が大きいだけではあまり価値がなく、熱中性子より高いエネルギーの中性子に対する減速物質のマクロ散乱断面積を Σ_s としたとき、 $\xi \cdot \Sigma_s$ を減速能という。従って速中性子源の近くに熱中性子検出管を配置することにより、熱中性子の測定をすることで周囲の物質中の水素原子の密度を測定することになる。土などの物質では水素原子はほとんど H_2O の形で含まれているので水素原子密度を測定することは水分を測定することになる。しかし周囲の物質中に熱中性子を吸収しやすい、すなわち熱吸収断面積の大きい元素の場合すなわち表-1.4からわかるようにB, Cl, Mn, Ti, Feなどが多量に含む場合には熱中性子計数率は減少するので補正しなければならない。又付着水と結晶水の区別ができずOH, CH, H_2O などの間の化学組成を区別することもできない。

表-1.4 中性子に対する種々の元素の核的性質

元素	質量数	エネルギー対数の平均減少率 ξ	熱中性子の吸収断面積 σ_a (barn)	平均散乱断面積 σ_s (barn)	原子1個当りの減速能 $\xi \sigma_s \times \xi$
H	1.00	1.00	0.332	38	38
Li	6.94	0.268	71.0	14	0.37
B	10.82	0.171	795	4	0.68
C	12.01	0.158	0.0032	48	0.76
N	14.01	0.136	188	10	1.36
O	16.00	0.120	0.0002	42	0.50
Na	22.99	0.084	0.525	4	0.34
Mg	24.32	0.081	0.069	3.6	0.29
Al	26.98	0.072	0.241	14	0.10
Si	28.09	0.069	0.16	1.7	0.12
P	30.98	0.063	0.20	5	0.32
S	32.07	0.061	0.52	1.1	0.07
Cl	35.46	0.056	338	16	0.90
K	39.10	0.050	2.07	1.5	0.08
Ca	40.08	0.049	0.44	3	0.16
Ti	47.90	0.041	5.8	4	0.16
Cr	52.01	0.038	3.1	3	0.11
Mn	54.94	0.035	132	2.3	0.08
Fe	55.85	0.035	2.62	11	0.39
Ni	58.71	0.033	4.6	17.5	0.58
Cu	63.54	0.030	38.5	7.2	0.22
Cd	112.41	0.017	2450	7	0.12
H_2O	18.00	0.948	0.9	10.7	10.14

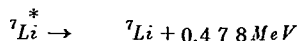
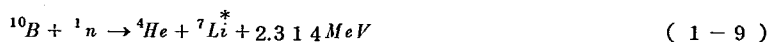
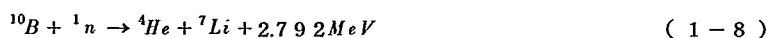
中性子線源としては $Am-Be$, $Ra-Be$ などがあるが、 Ra からは強度のガンマ線を放出するので現在ではほとんど使用されず $Am-Be$ が多く使用されている。又最近では放射性壊変の過程で中性子を直接放出する自発核分裂中性子源(カリフォルニウム252)が使われることもある。 $Am-Be$ から中性子が出る反応は Am から出た α 線が Be をターゲットとして衝突し中性子を発生する。反応式を示すと



α : Am から放出されるアルファ線

n : 中性子線 エネルギーは13.6MeV

熱中性子カウンターとしてBF₃(3フッカホソ)が使用されているが、これは熱中性子との間に起る次の反応を利用したものである。



(1-8), (1-9)に分かれる割合は中性子のエネルギーに依存している。

1・2・2 RI計器の仕様

室内モールド実験および現場実験に用いられたRI計器は2機種である。1つは、大径礫の混入した供試体を十分な精度で測定しうる様に線源打込深さを40cmまで可能とした透過型密度計であり、もう1つは打込深20cmの軽量小型で無資格線源(100μC)を取り付けた透過型密度水分計である。

(1) 透過型密度計

機器構成は、線源打込棒、計器本体、計器装置、標準体等からなる。本体および計数装置を写真1-1に示す。測定は測定対象物の表面にプローブを置き、線源の棒を打込むことにより線源と検出器の間の密度を測定するものである。ガンマ線源としては、打込深20cmの場合コバルト60の200μCi、打込深40cmの場合コバルト60の1mCiを用い放出されたガンマ線が物質を透過したパルスを計測するための検出器としてガイガー・ミュラー管を30本使用している。密度の測定範囲は1.00~2.50g/cm³である。

計数装置は、1定時間中にガンマ粒子が検出器に到達する数を加算表示するものであり、その詳細仕様は以下に示す通りである。

※SX-1型仕様(日本イーティエル社製)

測定範囲 0~99990カウント

タイマー 10秒, 1分, 2分

タイマーの安定度 $\pm 1 \times 10^{-4}$ day

確 度 タイマーの安定度 ± 1 カウント

表 示 数字表示管4桁2チャンネル

重 量 約22.3Kg

寸 法 0^{mm}×200^{mm}×355^{mm}

電 源 12Vのバッテリー(規定電圧11~13V)

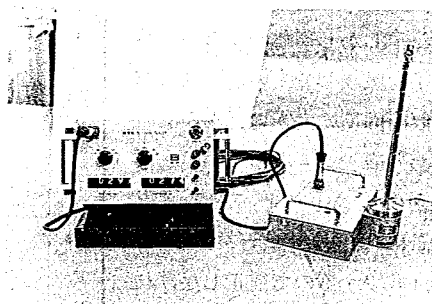


写真-1.1 透過型密度計

標準体は計器の動作状態を点検し、標準計数率を決定するとともに測定にあたって計器の正確度精度を確定しておくために用いるものである。標準体の材料としては白雲石、パラフィン、水な

どがあるが周囲の温度、湿度の変化に対して物理的、化学的な変化が少なく一定の単位体積重量あるいは含水量の材料が必要である。また運搬や作成上の問題を考慮すれば水を使用した場合が最適と思われる。ここでは標準体の材料として水を使用した。構造はステンレススチール製の枠の中に水を入れる構造となっておりサイズは $400\text{ mm} \times 550\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ で底面に整準ネジを設けて標準体上面が水面と平行になるようにしている。またブローブを定位置にセットするため上面を凹状した。又外部の影響をなくするため高さ 40 cm の鉄製の台上にて使用した。

(2) 透過型水分密度計

この計器は透過型密度計と透過型水分計の二組を、一組の計器に収納したものであり、計数装置バッテリーともすべて内蔵されている。密度計用線源としてはコバルト $60 \sim 100\mu\text{Ci}$ 、水分計用線源としてはカリフォルニウム $252-15\mu\text{Ci}$ を使用している。打込深は密度計、水分計とも 20 cm である。この計器で測定する場合は水分と密度が1回の測定で同時に得られ、又測定時間が短縮される利点がある。今後は現場計測においてはこの類の計器が多く使用されるものと思われる。

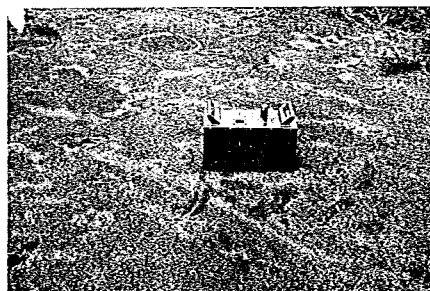
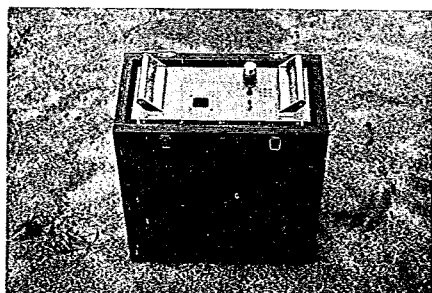


写真-1.2 RI水分密度計SX-11B

SX-11B型仕様（日本イーティエル社製）

測定範囲	密度	$1.0 \sim 2.4\text{ g/cm}^3$
	水分	$0 \sim 0.5\text{ g/cm}^3$
出力表示	4桁, 2チャンネル, 発光ダイオードディスプレイ	
タイマー	1分	
電源	内蔵蓄電池+6V, 連続使用時間7時間	
消費電力	約7VA	
外形寸法	$375(\text{W}) \times 160(\text{L}) \times 200(\text{H})\text{ mm}$	
重量	約12Kg	

1・3. 校正曲線の作成

校正曲線は現場における湿潤密度(g/cm^3)と含水量(g/cm^3)を密度計および水分計で測定するためにあらかじめ既知の湿潤密度と含水量の物質によって計器の出力とそれらの関係を定めたもの

である。校正曲線は一般に図-1.4の様に計数率比と密度、水分の関係で表わされる。ここで計数率比とは既知の密度、水分を有する標準体上における放射線のカウント数と対象土における放射線カウント数の比である。

一般に放射線の散乱特性が物質毎に多少異なるため校正曲線は土の化学的組成の違いによって差異を生ずる。従って特に高い精度の測定が必要なきには土質ごとに校正曲線を作成するか、あるいは

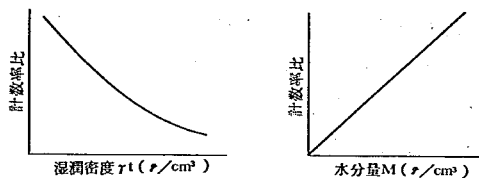


図-1.4 校正曲線図

はあらかじめ土質による差異を明らかにして既に求めてある校正曲線を補正する必要がある。今回用いたガンマ線透過型密度計では化学的組成による差異がほとんどないものといわれており、このような計器の校正曲線の作成においては土質の種類はもちろん無視できるが土以外の物質、たとえば水、石材、ガラス板、アルミニウム板等を用いることもできる。

校正曲線を作成する方法は通常二種類ある。一つは土のモールド試験による方法で、種々の密度に締固めた土の供試体を作成し、その供試体の密度とRI計数値とを求め校正点を定める方法である。もう一つの方法はガラス板等の特定の物質を板状に重ねることにより、平均密度を変化させその時のRI計数値を用いて校正点を定める方法である。この方法は実験が簡単であり、他の方法で求められた校正曲線の検定等に用いることも出来る。以下に具体例としてガラス板による方法を示す。測定手順は1cm厚さのガラス板を水で満たされた容器の上に1枚ずつ重ねてゆき、そのときの計数率と図中の式から求めた透過密度より校正点をプロットし最少二乗法でもって校正曲線を作成する。

1) 供試体の作成

RI計器は固有の有感容積を持っており、これを計器が感じる最大容積として定義するとRI計器の特性上これより小さい容積の供試体を用いて校正した場合、カタヨリを生じ致命的な欠陥になりかねない。したがって校正試験用の供試体容積は用いる計器の有感容積の1~2倍程度以上の大きさのものである事が必要となる。有感容積は実験的に確認する方が望ましい。おおよその目安としては散乱型の密度計及び水分計の場合高さは約30cm以上、水平面積は計器面積の4倍以上の円筒または直方体の供試体を用意すればよい。透過型の密度計に対しては面積は散乱型とほぼ同じに考えてよいが供試体の厚さを線源の打込み深さの1.2倍程度以上にする。上に述べた様に供試体の大きさを有感容積から決定し、円筒または直方体容器に土を数層に分けて締固めながら均一になる

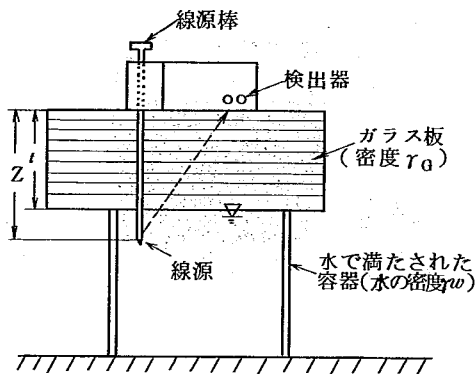


図-1.4 ガラス板による校正曲線方法(透過型密度計)

$$\text{透過密度 } \rho_t = \frac{t \cdot \rho_0 + (Z - t) \cdot \rho_w}{Z}$$

ように詰める。供試体上面はカラーをとりはずし容器上端に沿ってストレートエッジなどを用いて凹凸のないように注意深く整形して仕上げる。調査対象や内容によって校正曲線の必要範囲をあらかじめ設定し、この範囲内でなめらかな曲線をあてはめられるような供試体数を用意する必要がある。通常しめ固め度を5～6種類の低上変化させ各しめ固め度について2～3点以上とることが望ましい。

ii) RI 密度水分計による測定

- 標準体上における密度計と水分計の計測を行ない標準体計数率 $S_1 (= \frac{S_1}{T_1})$ を求めておく。
- 供試体の計測を行ない、計数率 $n_i (= \frac{N_i}{t})$ を求める。
- 計測作業完了時に再度標準体の計測を行ない、試験後の標準体の計数率 $S_2 (= \frac{S_2}{T_2})$ を求める。
- 次式によりその供試体における計数率比 (R_i) を求める。

$$R_i = \frac{n_i}{(S_1 + S_2)/2} \quad (1-10)$$

S_1, S_2 ; 供試体計測前、計測後の標準体計数値

T_1, T_2 ; 供試体計測前、計測後の標準体計数時間

N_i ; 供試体計数値

t ; 供試体計測時間

iii) 供試体の湿潤密度・含水量の測定

密度計、水分計による計測の完了後供試体をこわしながら含水比測定のための試料を採取し下部カラー容器の上面に沿って平滑に整形する。供試体の重量は供試体上面の整形時の重量 W_1 から下部カラー容器の上面整形時の重量 W_2 及び供試体容器重量 W_0 を差引くことによって得られる供試体の湿潤密度 γ_t は供試体容器内の土の重量 $W (= W_1 - W_2 - W_0)$ とその内容積 (V) から次式で計算する。

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_1 - W_2 - W_0}{V_0} \quad (g/cm^3) \quad (1-11)$$

つぎに容器内各部から採取した試料 JISA1203 の方法により含水比 ($w\%$) を求め、含水量 M (g/cm^3) を次式により決定する。

$$M = \frac{w}{100 + w} \cdot \gamma_t \quad (g/cm^3) \quad (1-12)$$

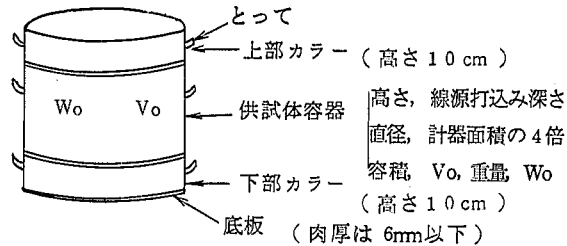
iv) 校正点確定

グラフ上で縦軸に計数率比、横軸に密度もしくは含水量をとり、各供試体による各々の値をプロットし回帰曲線をあてはめる。

v) 回帰分析による校正曲線の決定

回帰曲線は通常最小二乗法によって求められ、最良の相関係数が得られるように関数形を選ばなければならない事はいうまでもない。実用上は多項式、指数関数等により精度の比較を行ない関数

(1) 用具
(イ) 容器

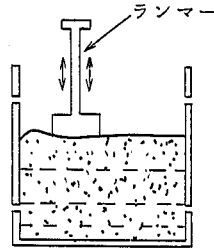


(ロ) ランマー ; 重量 20kg, 端面直径 15cm

(ハ) 整形用具 ; エッジ (鉄定規), 容器周面カッター

(ニ) 台バカリ ; 容量 500kg~1000kg

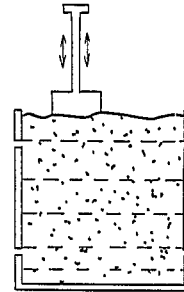
(2) 試料の均一締固め



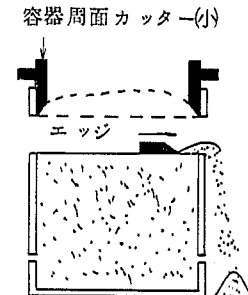
層厚 : 10cm 以下

仕事量 : JISA 1210 の約 2 倍
(112 kg cm/cm²)

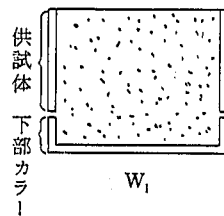
(3) 締固め完了



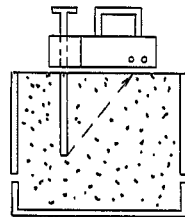
(4) 供試体上面の整形



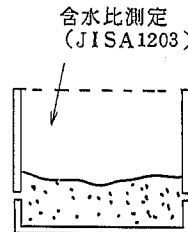
(5) 重量 W_1 の測定



(6) RI 計測

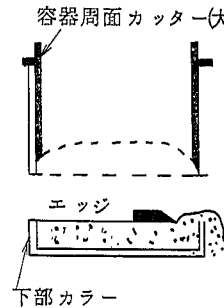


(7) 試料の含水比測定



供試体をこわしながら各部から均等に含水比測定のための試料を採取する

(8) 下部カラー上面の整形



(9) 重量 W_2 の測定

供試体の湿潤密度 :

$$\gamma_t = \frac{W_1 - W_2 - W_0}{V_0}$$

供試体の含水量

$$M = \frac{w}{100 + w} \cdot \gamma_t$$

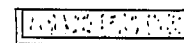


図-1.5 土による校正曲線の作成方法

形を選ぶ。通常透過型密度形の場合は指数関数が最も精度がよい。またグラフは片対数目盛を用いれば透過型の校正曲線式は直線となる。なお本実験に使用する器具類の主なものを列举すると以下のとおりである。

- a) RI 計器一式
- b) 標準体 (水, パラフィン等)
- c) 試料 (1 点につき 150~300 ℓ)
- d) 試料容器 (40 ℓ 用, フタは数個)
- e) 校正容器 (直径 70 cm×高さ 60 cm)
- f) ランマー (バイブレーター)
- g) 台ばかり (秤量 1,000 Kg, 感度 500 g)
- h) 炉乾燥用具一式

第2章 室内実験

2.1 実験概要

この室内実験は大径の礫を含んだ土の密度・含水比の測定値のバラツキを調べ、これをR I計測器で測定する場合どのような測定法を用いれば妥当な精度で礫を含んだ全体の平均密度、含水比が得られるかを検討することを主たる目的として行ったものであるが、同時に礫に対する基準校正曲線の使用の適否、計器設置のための地表面整形や線源棒打込の困難等R I計器の礫混り土施工管理への実用性に関する検討を試みた。

実験は、種々の土および礫の試料を混入した礫混り土供試体を鉄製モールド内に作成し、この供試体において種々の方法でR I測定を行い、あらかじめ算定した供試体密度と比較する方法がとられた。

密度の測定値のバラツキに影響を与える要因としては、良好な測定が行われた場合には

○礫混り土の特性……礫の粒径分布、混入率、密度、土の密度

○R I測定法……線源打込深、1測点での計器設置方向、測定時間、測点数

などが挙げられる。このうち礫混り土供試体の特性について、礫の粒径分布および混入率は、基礎となる土質試料（真砂土）に種々の粒径の碎石を色々な組合せで混合することにより制御し、土の密度は締固め度により変化させたが、礫の密度に関しては同種の碎石を利用したため特に変化させることはできなかった。一方R I測定法に関しては線源打込深、計器設置方向、測定時間を変化させた組合せを設定したが、モールド実験であるため測点数を増すことはできなかった。

線源打込深さは、PI計器の有感容積に直接関係するもので礫混り土における測定精度へ与える影響もかなり大きなものと考えられるが、本実験では20cm、30cm、40cm、の3段階を用いた。また1測点における計器設置方向は、基準の位置から順に0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°、の8方向とし、No3の実験においてはモールド周辺に礫のかたよりを知るために線源を打込み新たに測点を加えた。また測定時間はガンマ崩壊の統計的揺動を打ち消すために本来線源強度と計数能力の関係（カウント数）から決定されるものであるが、ここでは測定器の精度検定を兼ねて10秒、1分、2分等に変化させて測定を行った。

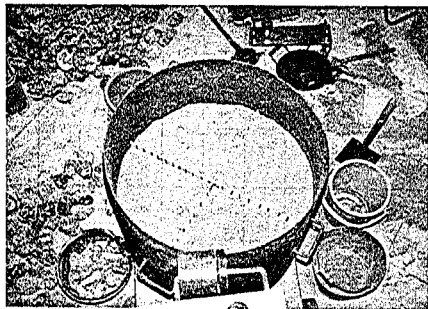
以上述べた様な種々の粒径分布や混入率を有する礫混り土供試体に対して、上記の組合せの方法による測定を行い、基準校正曲線からのかたよりや測定精度等について検討し、妥当な精度で測定しうる適切な測定法の選択についても検討を行った。

2.2 室内実験データ（その1）

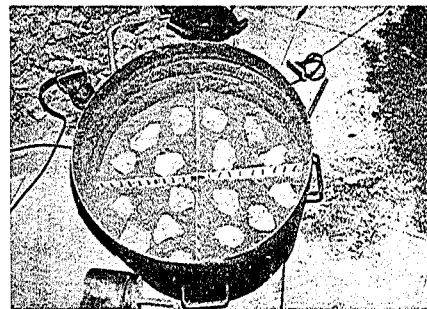
実験期日 昭和47年8月～10月

場 所 建設省土木研究所千葉支所内土工管理実験室

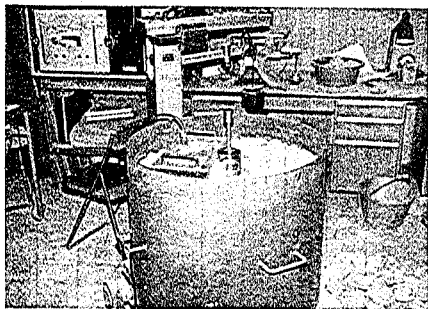
使用機器 SX-1A型



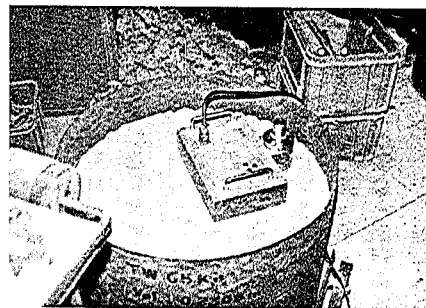
(a) 供試体 (- 20 mm)



(b) 供試体 (- 100 mm)



(c) RI 測定 (中心 8 方向)



(d) RI 測定 (周辺 4 方向)

写真 2.1 室内モールド実験

(1) 試料

実験に用いた試料は関東ローム、砂(0.1~5mm)、6号碎石(5~10mm)、平均15mm径の碎石、4号砂石(20~30mm)、平均40mm径の碎石、2号碎石(40~60mm)、平均90mm径の碎石、100~140mm径の碎石、140~200mm径の碎石である。

(2) 供試体作成

上記の試料を種々の割合で混合し、表2.1に示す供試体を作成した。モールド供試体の作成においては、試料を6層に分けて投入し、締固めを行った後ストレートエッジによりオーバーフロー分を切り取り表面整形を行った。なお、締固め度は、締固めなし、足固め50回、ランマ50回、ランマ100回の4種類の区分で行った。ただし、ランマーの重量は15kg、落下高は40cmである。

(3) 測定方法

表2.1に示す各々の供試体の表面にRI計器を設置し、以下の要領で密度測定を行った。

○線源・強度 コバルト60—5mCi

表-2.1 実験に用いた供試体

試料 番号	配 合	レキ分 (%)	砂 分 (2mm以下) (%)	最大径 (mm)	60%径 (mm)	10%径 (mm)	均等係数	粗粒率 F M
①	関東ローム	0	100	1.5	0.095	0.012	7.78	
②	砂	33	67	6.4	1.6	0.2	7.18	5.12
③	レキ(5~10mm)	97.5	2.5	13	8.3	3.3	2.5	6.01
④	レキ(15mm)	100	0	21	14.2	11.2	1.28	6.95
⑤	レキ(20~30mm)	100	0	30	25.3	22	1.17	7.96
⑥	レキ(40mm)	100	0	54	39	30	1.30	8.35
⑦	レキ(40~60mm)	100	0	94	60	44.1	1.36	8.9
⑧	レキ(90mm)	100	0	84	73	60	1.22	9.0
⑨	コブル(100~140mm)	100	0	260	77	53.1	1.45	9.0
⑩	コブル(140~200mm)	100	0	260	145	130	1.11	9.0
⑪	①1/2 ②1/2	21	79	6	0.54	0.04	14.48	5.09
⑫	②1/2 ③1/2	67	33	12	6.8	0.30	22.48	5.87
⑬	③1/2 ④1/2	100	0	26	13	6.6	1.97	6.69
⑭	④1/2 ⑤1/2	100	0	26	21	13	1.62	7.43
⑮	⑤1/2 ⑥1/2	100	0	46	38	22.4	1.70	8.20
⑯	⑦1/2 ⑧1/2	100	0	96	64	43	1.49	8.9
⑰	⑧1/2 ⑨1/2	100	0	130	98	62	1.58	9.0
⑱	⑪1/3 ③1/3 ④1/3	81.4	18.6	19	10	0.33	30.3	6.23
⑳	⑧1/3 ⑨1/3 ⑩1/3	100	0	210	110	72	1.53	9.0

○線源打込深さ 20, 30, 40cm

○計器設置方向 4方向(0°, 90°, 180°, 270°)

○測定時間 10秒, 1分, 2分を各8回

(4) RI測定結果

各モールド供試体のRI計器による密度測定データ(計数率比)を表2.2に示す。

これより、供試体密度と計数比の関係を得るが、これを礫混り供試体の最大粒径別のグループに分けて校正曲線(供試体密度と計数比の関係)を作成し、粒径の変化に対するかたよりやバラツキの変化から、R・I法の礫混り土に対する測定精度を評価する方法をとった。主として各粒径別の打込深度、測定時間、測定回数の最適組合せに着目した。

表2.2の測定データを供試体の最大粒径別に4つのグループに別けてそれぞれの校正曲線を解析した。最大粒径別のグループは、(1)基本：細粒土や砂のみによるもの、(2)0～20mm、(3)20～70mm、(4)70～260mmであり、これらグループ別の校正曲線を線源の打込深さ別に図-2.1に示す。各打込深さにおいていずれも基本の線と0～30mmの線とは大体一致している。しかしながら粒径が大きくなるにしたがってその基本線からのかたよりや校正点のバラツキが増えているのがわかる。基本線からのかたよりが大きくなることの原因に線源を垂直に打込みにくいために生ずる透過距離の減少が考えられる。また供試体の密度測定の際のモールド上面の高さの測定における基準線のとり方も関係するのであろう。従って一般の現場測定においては線源棒を垂直に保つことに留意すれば、このかたよりの問題は除去できるものと考えられる。

次にバラツキについて整理したのが図-2.2である。バラツキの度合の表示方法として、ここでは、計数率比を y 、湿潤密度を x 、定数を a 、 b としたときの

$$\log y = ax + b$$

の回帰式における y 軸方向の不偏分散の平方根すなわち $\sqrt{V_{yx}}$ を用いている。またこれに対応する密度差 $\Delta\gamma_t$ を併用している。そして各打込深さ毎に測定時間と測定方向(回数)の組合せを変えた場合の $\sqrt{V_{yx}}$ 及び $\Delta\gamma_t$ を示している。なお各打込深さ共、基本線のバラツキは密度差 $\Delta\gamma_t$ で大体0.03程度(1分測定、4方向)が得られているので、この値と粒径が大きくなった時の $\Delta\gamma_t$ を比較すると大体の傾向がつかめる。

まず線源の打込深さの影響を見ると0～20mm粒径を除いて大体打込深さが深い程バラツキは小さくなる傾向を示すがそれほど顕著ではない。40cm打込深さで0～20mm粒径の場合のバラツキが他と比較して一段と大きいことは補足実験等を行い充分に検討する必要がある。今回の実験では、打込深さの影響は一般に考えられているほど大きくはないということができよう。次に測定時間の影響についてみると10秒(約2,000カウント)で測定しても16分(約160,000カウント)のように長時間をかけても総合的精度ではあまり顕著な差は出ていない。これは測定箇所の密度のバラツキの方が放射線の統計的揺動よりもはるかに大きいことを物語っている。次に測定方向(回数)についてみると、1測点における測定を1方向のみで行うよりも2方向、4方向と数多く測定位置をずらして行き平均化をはかる方がバラツキの面から有利になることが図-2.2から明白にわかる。次にバラツキと最大粒径との関係を見ると粒径20mmぐらいまでは普通の細粒土の場合と全く変らないが、70mmぐらいに大きくなってくると2倍ぐらいのバラツキとなってくる。

表-2.2 モールド試験データ(計数率比)

供試体 ナンバー	スタンダー ドカウント (cpm)	方向 打込深 時間	0°			90°			180°			270°			備考
			10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	
1	9005.5	20 ^{cm}	1.033	1.033	1.032	0.992	0.993	0.995	1.070	1.068	1.067	1.049	1.042	1.041	
		30	0.487	0.487	0.486	0.493	0.489	0.430	0.497	0.498	0.498	0.479	0.483	0.482	
		40	0.243	0.243	0.244	0.240	0.238	0.238	0.245	0.244	0.264	0.239	0.239	0.239	
2-1	8884.3	20	0.438	0.440	0.439	0.440	0.439	0.440	0.441	0.440	0.437	0.441	0.439	0.439	
		30	0.169	0.169	0.168	0.170	0.169	0.168	0.168	0.165	0.166	0.168	0.167	0.167	
		40	0.078	0.078	0.078	0.079	0.079	0.080	0.077	0.078	0.077	0.077	0.077	0.078	
2-2	8880.2	20	0.415	0.415	0.413	0.406	0.405	0.403	0.423	0.419	0.419	0.442	0.444	0.442	
		30	0.158	0.159	0.160	0.154	0.156	0.155	0.162	0.162	0.161	0.166	0.171	0.170	
		40	0.074	0.075	0.074	0.075	0.075	0.076	0.075	0.076	0.076	0.077	0.079	0.079	
2-3	8918.5	20	0.636	0.632	0.630	0.617	0.620	0.619	0.609	0.614	0.614	0.627	0.627	0.627	
		30	0.260	0.260	0.261	0.265	0.266	0.266	0.244	0.247	0.243	0.253	0.254	0.253	
		40	0.116	0.117	0.116	0.119	0.120	0.120	0.105	0.107	0.106	0.115	0.114	0.114	
3	8856.1	20	0.775	0.780	0.777	0.771	0.770	0.769	0.846	0.768	0.762	0.763	0.764	0.762	
		30	0.347	0.348	0.347	0.344	0.346	0.346	0.338	0.341	0.339	0.340	0.341	0.340	
		40	0.160	0.161	0.160	0.157	0.158	0.158	0.157	0.156	0.155	0.157	0.156	0.155	
4	8966.9	20	0.589	0.587	0.587	0.636	0.638	0.637	0.605	0.602	0.602	0.607	0.605	0.606	
		30	0.249	0.248	0.248	0.257	0.257	0.257	0.258	0.259	0.257	0.267	0.265	0.266	
		40	0.113	0.113	0.113	0.113	0.112	0.112	0.112	0.111	0.111	0.108	0.107	0.106	
5	8848.4	20	0.674	0.676	0.672	0.716	0.722	0.720	0.679	0.678	0.678	0.687	0.682	0.680	
		30	0.261	0.262	0.261	0.285	0.284	0.284	0.309	0.283	0.238	0.281	0.281	0.282	
		40	0.123	0.124	0.124	0.125	0.124	0.124	0.121	0.131	0.134	0.138	0.139	0.139	
6-1	8838.3	20	0.827	0.830	0.827	0.864	0.870	0.868	0.717	0.717	0.714	0.654	0.654	0.653	
		30	0.336	0.330	0.330	0.292	0.289	0.289	0.297	0.295	0.295	0.299	0.300	0.299	
		40	0.138	0.135	0.135	0.128	0.145	0.145	0.129	0.131	0.131	0.146	0.146	0.146	

6-2	8933.6	20	0.796	0.795	0.793	0.790	0.793	0.793	0.840	0.839	0.840	0.773	0.773	0.772	
		30	0.351	0.352	0.351	0.381	0.380	0.380	0.349	0.350	0.351	0.422	0.422	0.423	
		40	0.167	0.167	0.166	0.180	0.179	0.179	0.174	0.172	0.172	0.159	0.160	0.160	
6-3	8867.2	20	0.876	0.876	0.872	0.810	0.810	0.810	0.777	0.785	0.781	0.819	0.823	0.825	
		30	0.363	0.404	0.360	0.351	0.352	0.352	0.361	0.361	0.362	0.323	0.325	0.326	
		40	0.153	0.153	0.154	0.161	0.162	0.162	0.144	0.143	0.143	0.158	0.158	0.157	
6-4	8950.0	20	0.856	0.856	0.855	0.695	0.692	0.692	0.760	0.766	0.764	0.887	0.882	0.880	
		30	0.350	0.349	0.350	0.313	0.314	0.314	0.284	0.282	0.284	0.309	0.311	0.312	
		40	0.164	0.164	0.163	0.138	0.138	0.138	0.122	0.124	0.123	0.151	0.151	0.151	
7	8909.8	20	0.906	0.902	0.901	0.910	0.912	0.910	0.737	0.740	0.738	0.800	0.799	0.798	
		30	0.425	0.425	0.425	0.373	0.375	0.375	0.336	0.336	0.336	0.406	0.405	0.409	
		40	0.149	0.150	0.149	0.170	0.170	0.170	0.164	0.166	0.165	0.159	0.157	0.159	
8-1	8774.5	20	1.002	1.000	0.998	1.262	1.260	1.260	1.053	1.049	1.049	0.731	0.733	0.733	
		30	0.290	0.294	0.292	0.421	0.420	0.419	0.368	0.369	0.370	0.490	0.493	0.493	
		40	0.262	0.261	0.262	0.187	0.188	0.189	0.213	0.214	0.213	0.196	0.194	0.194	
8-2	9017.5	20	0.793	0.790	0.787	0.931	0.924	0.927	0.829	0.827	0.827	1.027	1.039	1.038	
		30	0.315	0.320	0.319	0.303	0.302	0.303	0.360	0.360	0.361	0.359	0.358	0.357	
		40	0.152	0.153	0.152	0.175	0.172	0.174	0.134	0.133	0.132	0.160	0.160	0.160	
8-3	8962.0	20	0.800	0.802	0.800	0.840	0.839	0.841	0.525	0.521	0.503	0.646	0.645	0.647	
		30	0.332	0.332	0.335	0.528	0.530	0.530	0.285	0.284	0.284	0.325	0.325	0.326	
		40	0.154	0.156	0.157	0.195	0.195	0.195	0.130	0.128	0.129	0.158	0.157	0.158	
8-4	8946.4	20	0.853	0.852	0.852	0.989	0.991	0.990	1.162	1.169	1.162	0.747	0.748	0.747	
		30	0.336	0.335	0.336	0.327	0.330	0.330	0.430	0.430	0.429	0.276	0.275	0.275	
		40	0.157	0.158	0.158	0.203	0.204	0.203	0.182	0.183	0.181	0.152	0.153	0.153	

供試体 ナンバー	スタンダー ドカウント (c p m)	方向 打込時間 深	0°			90°			180°			270°			備 考
			10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	
8-5	8851.3	20 cm	1.022	1.018	1.016	0.823	0.820	0.821	1.402	1.408	1.399	1.016	1.013	1.017	
		30	0.402	0.405	0.404	0.326	0.325	0.325	0.392	0.391	0.392	0.307	0.306	0.306	
		40	0.149	0.148	0.144	0.150	0.152	0.151	0.175	0.175	0.175	0.141	0.141	0.143	
8-6	8855.9	20	0.982	0.981	0.980	1.246	1.247	1.245	0.915	0.915	0.912	1.013	1.011	1.010	
		30	0.374	0.377	0.375	0.420	0.421	0.421	0.387	0.385	0.387	0.236	0.238	0.236	
		40	0.209	0.211	0.209	0.183	0.184	0.183	0.174	0.172	0.173	0.150	0.151	0.151	
9-1	8874.4	20	1.162	1.161	1.157	0.745	0.749	0.748	1.143	1.145	1.147	0.828	0.832	0.833	
		30	0.361	0.364	0.364	0.361	0.362	0.361	0.362	0.360	0.358	0.448	0.447	0.447	
		40	0.153	0.153	0.153	0.157	0.155	0.153	0.224	0.224	0.223	0.201	0.200	0.200	
9-2	9077.0	20	0.959	0.961	0.957	0.748	0.751	0.752	1.088	1.090	1.087	1.394	1.396	1.395	
		30	0.370	0.369	0.371	0.437	0.432	0.434	0.418	0.417	0.418	0.498	0.499	0.498	
		40	0.209	0.208	0.208	0.277	0.278	0.277	0.174	0.175	0.175	0.254	0.251	0.250	
10-1	8784.4	20	0.657	0.655	0.652	1.149	1.155	1.150	1.410	1.407	1.440	1.700	1.702	1.705	
		30	0.475	0.470	0.471	0.563	0.564	0.563	0.591	0.590	0.588	0.675	0.677	0.675	
		40	0.217	0.218	0.218	0.250	0.252	0.251	0.127	0.128	0.127	0.294	0.292	0.292	
10-2	9014.8	20	0.856	0.848	0.853	1.016	1.018	1.016	1.165	1.162	1.162	0.658	0.659	0.658	
		30	0.321	0.321	0.320	0.425	0.423	0.424	0.362	0.362	0.362	0.355	0.354	0.356	
		40	0.226	0.226	0.227	0.279	0.281	0.278	0.152	0.153	0.154	0.306	0.306	0.307	
10-3	9021.2	20	0.512	0.517	0.514	1.638	1.638	1.640	0.999	0.997	1.001	1.786	1.793	1.792	
		30	0.263	0.262	0.265	0.529	0.529	0.530	0.482	0.485	0.485	0.696	0.694	0.697	
		40	0.164	0.163	0.163	0.329	0.391	0.391	0.231	0.229	0.231	0.269	0.270	0.269	
11	8905.1	20	0.789	0.784	0.789	0.786	0.789	0.784	0.787	0.784	0.782	0.795	0.796	0.793	
		30	0.340	0.340	0.338	0.343	0.343	0.342	0.346	0.345	0.346	0.348	0.346	0.346	
		40	0.154	0.153	0.153	0.153	0.154	0.154	0.158	0.157	0.157	0.156	0.155	0.158	

1 2	89235	20	0.443	0.444	0.444	0.448	0.447	0.446	0.440	0.441	0.440	0.431	0.433	0.434	
		30	0.174	0.172	0.172	0.173	0.173	0.174	0.167	0.168	0.168	0.172	0.172	0.172	
		40	0.079	0.079	0.080	0.080	0.079	0.080	0.081	0.080	0.080	0.081	0.081	0.081	
1 3	88234	20	0.662	0.662	0.660	0.635	0.635	0.634	0.635	0.555	0.634	0.625	0.629	0.627	
		30	0.266	0.266	0.265	0.266	0.248	0.264	0.246	0.243	0.244	0.256	0.255	0.254	
		40	0.114	0.114	0.107	0.112	0.111	0.111	0.106	0.106	0.106	0.110	0.111	0.110	
1 4	88064	20	0.673	0.674	0.672	0.649	0.655	0.653	0.655	0.662	0.659	0.720	0.720	0.718	
		30	0.280	0.279	0.279	0.267	0.267	0.264	0.267	0.266	0.266	0.280	0.280	0.281	
		40	0.116	0.118	0.117	0.118	0.117	0.117	0.116	0.117	0.116	0.124	0.124	0.124	
1 5	88807	20	0.619	0.614	0.613	0.697	0.700	0.699	0.660	0.662	0.659	0.617	0.620	0.615	
		30	0.246	0.250	0.249	0.263	0.263	0.263	0.276	0.276	0.276	0.259	0.258	0.260	
		40	0.124	0.123	0.123	0.121	0.120	0.120	0.120	0.118	0.120	0.125	0.125	0.125	
1 6 - 1	90362	20	0.805	0.803	0.807	0.751	0.754	0.749	0.848	0.848	0.846	0.665	0.666	0.667	
		30	0.368	0.371	0.368	0.339	0.335	0.333	0.318	0.316	0.317	0.324	0.322	0.323	
		40	0.142	0.144	0.143	0.140	0.140	0.140	0.143	0.144	0.142	0.123	0.123	0.124	
1 6 - 2	89186	20	0.764	0.762	0.760	0.651	0.649	0.651	0.651	0.650	0.652	0.954	0.948	0.950	
		30	0.308	0.309	0.311	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.291	0.294	0.292	
		40	0.115	0.120	0.114	0.128	0.127	0.128	0.200	0.199	0.199	0.146	0.143	0.144	
1 6 - 3	90175	20	1.082	1.079	1.085	0.958	0.958	0.960	0.842	0.842	0.843	0.863	0.863	0.864	
		30	0.424	0.424	0.424	0.372	0.373	0.373	0.310	0.310	0.308	0.428	0.425	0.424	
		40	0.156	0.156	0.156	0.168	0.166	0.168	0.190	0.189	0.188	0.192	0.192	0.193	
1 7 - 1	90476	20	0.866	0.862	0.864	0.837	0.834	0.838	0.786	0.784	0.783	0.627	0.621	0.624	
		30	0.478	0.474	0.478	0.363	0.363	0.364	0.320	0.320	0.321	0.334	0.334	0.334	
		40	0.178	0.178	0.179	0.162	0.162	0.162	0.147	0.147	0.147	0.155	0.157	0.157	

供試体 ナンバー	スタンダー ドカウント (c p m)	方向 打込時間 深	0°			90°			180°			27270°			備 考
			10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	10秒	60秒	120秒	
17-2	9016.6	20 cm	0.997	1.001	0.996	0.935	0.934	0.938	1.121	1.125	1.126	1.092	1.093	1.095	
		30	0.534	0.537	0.535	0.306	0.303	0.303	0.386	0.385	0.385	0.490	0.492	0.490	
		40	0.195	0.194	0.195	0.202	0.203	0.202	0.140	0.141	0.141	0.243	0.246	0.246	
17-3	8965.2	20	0.822	0.818	0.820	1.383	1.374	1.376	1.224	1.224	1.223	0.932	0.928	0.925	
		30	0.431	0.431	0.432	0.548	0.543	0.545	0.603	0.595	0.598	0.377	0.374	0.372	
		40	0.189	0.187	0.189	0.154	0.156	0.154	0.213	0.213	0.213	0.184	0.185	0.183	
19	8799.7	20	0.536	0.534	0.533	0.533	0.535	0.532	0.590	0.590	0.586	0.517	0.518	0.517	
		30	0.211	0.212	0.211	0.214	0.213	0.212	0.218	0.218	0.217	0.210	0.212	0.211	
		40	0.092	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.095	0.097	0.096	0.099	0.097	0.098	
24-1	9046.1	20	0.982	0.986	0.979	0.437	0.438	0.440	0.771	0.776	0.774	0.927	0.925	0.927	
		30	0.339	0.342	0.344	0.244	0.246	0.245	0.320	0.323	0.323	0.337	0.336	0.336	
		40	0.125	0.124	0.124	0.136	0.137	0.137	0.149	0.150	0.150	0.138	0.139	0.139	
24-2	8957.1	20	0.772	0.772	0.771	0.977	0.984	0.985	0.822	0.823	0.821	1.044	1.045	1.046	
		30	0.281	0.279	0.278	0.290	0.293	0.293	0.387	0.388	0.387	0.413	0.411	0.412	
		40	0.141	0.141	0.140	0.163	0.163	0.163	0.153	0.153	0.153	0.153	0.153	0.154	
24-3	9014.2	20	0.967	0.961	0.958	0.970	0.968	0.968	1.437	1.442	1.443	0.641	0.640	0.642	
		30	0.407	0.408	0.406	0.454	0.453	0.453	0.543	0.544	0.543	0.390	0.390	0.391	
		40	0.312	0.313	0.312	0.217	0.214	0.217	0.226	0.227	0.229	0.221	0.220	0.220	

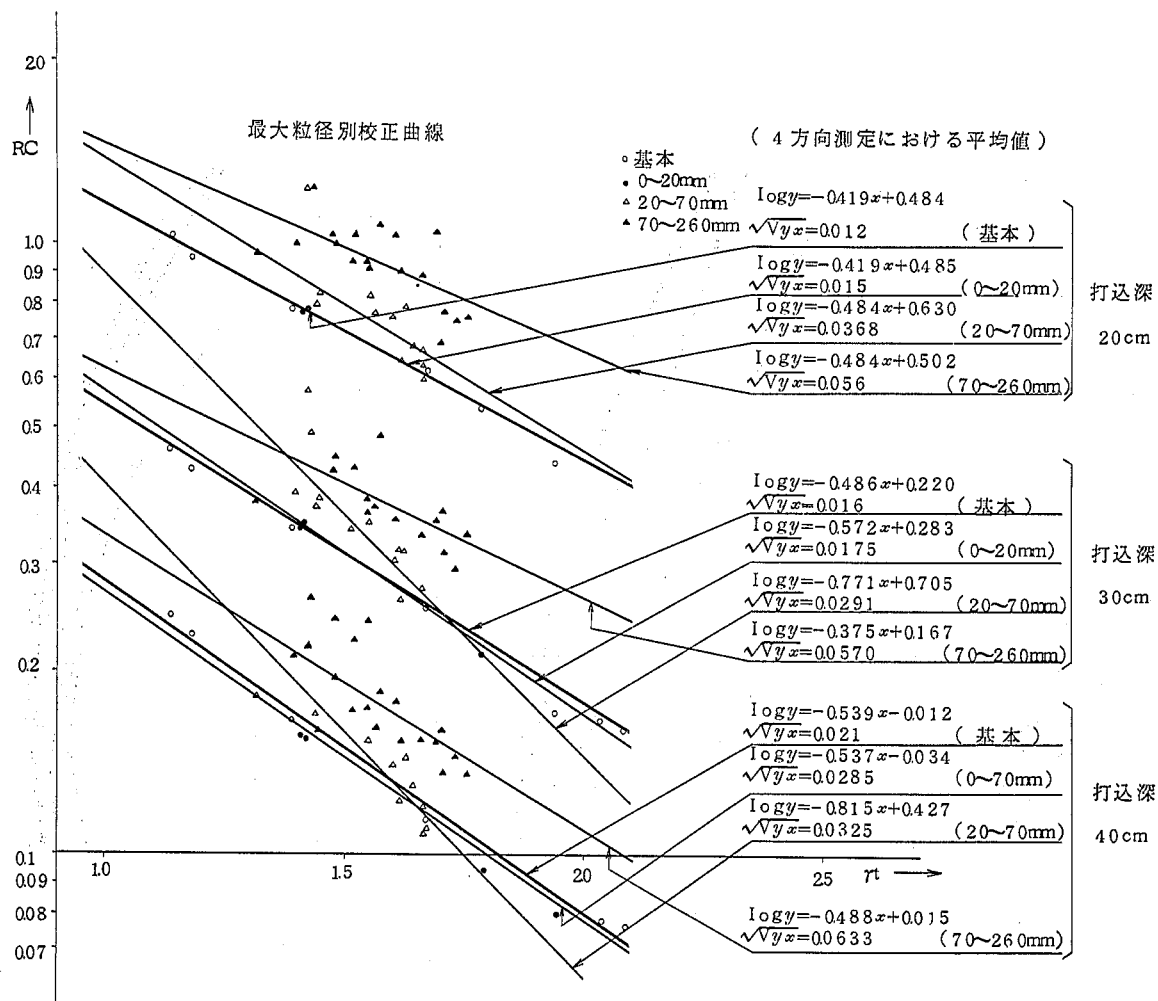


図 - 2.1 最大粒径別校正曲線

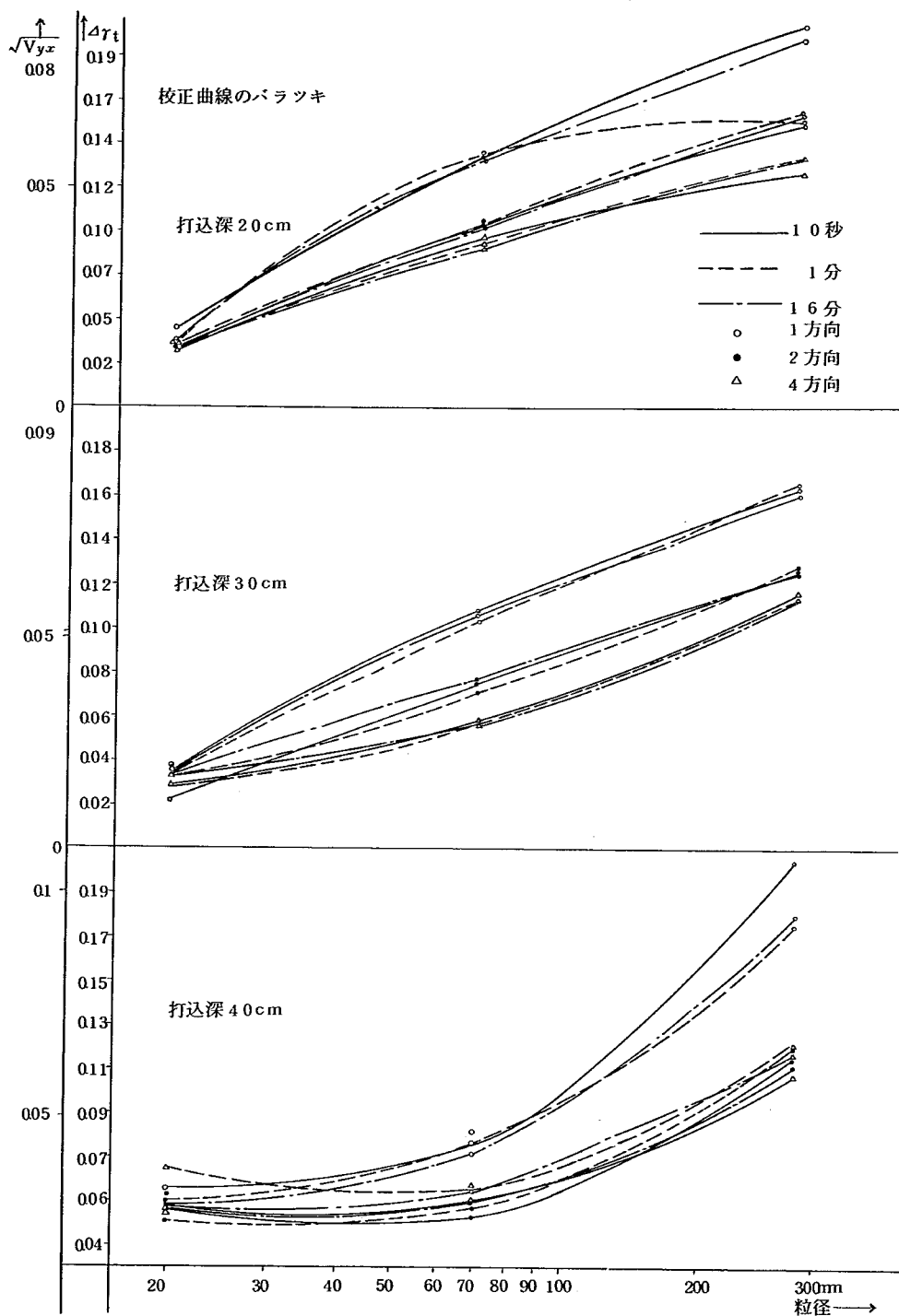


図-2.2 校正曲線のバラツキ

2.3 室内実験データ(その2)

実験期日 昭和48年12月1日～昭和49年2月10日

場 所 土木研究所千葉支所構内土工管理室

使用計器 SX-1A型

(1) 試料

実験に用いた礫混り材料は、前回の実験と同様に、関東ローム、砂(0.1～5mm)、6号碎石(5～10mm)、平均15mm径の碎石、4号碎石(20～30mm)、平均40mmの碎石、2号碎石(40～60mm)、平均90mm径の碎石からなる。

(2) 供試体作成

上記の試料を種々の割合で混合し表2.3に示す供試体を作成した。締固めの方法は、締固めなし、足締め25回、足締め50回、ランマー50回、ランマー100回、ランマー200回の6種類を採用した。

表面整形や試料の層分けについては前回の実験の要領で行なった。

(3) 測定方法

表2.3に示す各々のモールド供試体の表面にRI計器を置き、線源打込み深度20、30、40cm、1測点における測定方向を、1方向、2方向、4方向、8方向、1回当りの測定時間10秒、1分、4分と変えた組合わせて各々2回の測定を行い、供試体密度と訂数率比の関係を求めた。

(4) RI測定結果

各モールド供試体のRI計器による密度測定データ(計数率比)を表2.4に示す。

これを礫混り土の最大粒径別のグループに分けてそれぞれの校正曲線を作成し、粒径変化に

表-2.3 モールド供試体

試料番号	配 合	レキ分 (%)	砂 分 (2mm以下) (%)	最 大 径 (mm)	60%径 (mm)	10%径 (mm)	均等係数	粗 粒 率 F M
①	関東ローム	0	100	1.5	0.095	0.012	7.78	
②	砂	33	67	6.4	1.6	0.2	7.18	5.12
③	レキ(5～10mm)	97.5	2.5	13	8.3	3.3	2.5	6.01
④	レキ(15mm)	100	0	21	14.2	11.2	1.28	6.95
⑤	レキ(20～30mm)	100	0	30	25.5	22	1.17	7.96
⑥	レキ(40mm)	100	0	54	39	30	1.30	8.35
⑦	レキ(40～60mm)	100	0	94	60	44.1	1.36	8.9
⑧	レキ(90mm)	100	0	84	73	60	1.22	9.0
⑪	①1/2 ②1/2	21	79	6	0.54	0.04	14.48	5.09
⑫	②1/2 ③1/2	67	33	12	6.8	0.30	22.48	5.87
⑬	③3/7 ④4/7	81	19	13.5	8.2	1.00	8.20	5.37
⑭	⑤1/2 ⑥1/2	100	0	46	38	22.4	1.70	8.20
⑮	レキまじり土(0～30mm)	100	0	100	82	39	2.10	8.99
⑯	レキ(15～90mm)	97.5	2.5	78	60	14	4.29	8.30

対応する測定値バラツキやかたよりの変化から、R I 計器の礫まじり土に対する測定精度を評価する方法をとった。主として各粒径に応じた打込深度、測定方向、測定時間の最適組合せに着目した。

表 2.4 の測定データを、供試体の最大粒径別に 4 つのグループに分けてそれぞれの校正曲線を解析した。最大粒径別のグループは、(1)基本：細粒土や砂のみによるもの(0～5 mm)、(2)5～20 mm、(3)20～50 mm、(4)50～100 mm であり、これらグループ別の校正曲線を線源の打込深別に図-2.3 に示す。各打込深さにおいて粒径が大きくなるに従い基本線からのかたよりが校正点のバラツキが増えているのがわかる。基本線からのかたよりが大きくなることの原因に供試体上面に垂直に線源を打込みにくいために生ずる供試体透過距離の減少が考えられる。また供試体の密度測定の際のモールド上面の高さの測定における基準線のとり方も関係するであろう。従って一般の現場測定においては線源棒を垂直に保つことに留意すれば、このかたよりの問題は除去できるものと考えられる。

次にバラツキについて整理したのが図-2.4-(a)、(b)、(c)である。バラツキの度合の表示方法として、ここでは計数率比(供試体上での計数率と標準体上での計数率との比)湿潤密度を x 、定数 a 、 b としたとき $\log y = ax + b$ の回帰式(校正曲線式)における y 軸方向の不偏分散の平方根すなわち $\sqrt{V_{yx}}$ を用いている。またこれに対応する密度差 $d\gamma_t$ も併用している。そして、各打込深さ毎に測定時間と測定方向の組合せを変えた場合の $\sqrt{V_{yx}}$ 及び $d\gamma_t$ を示している。なお各打込深さ共、基本線のバラツキは密度差 $d\gamma_t$ で大体 0.02 程度(4分測定、8方向)が得られているので、この値と粒径が大きくなった時の $d\gamma_t$ を比較すると大体の傾向がつかめる。

まず、線源の打込深さの影響をみると、0～50 mm の粒径範囲では打込深さが深くなればなるほど透過距離などの幾何的条件から精度は有利になるはずであるが、得られた結果を見ると打込深さが変わってもバラツキはほとんど同じであった。これはカウント数が打込深さの 2 乗に反比例するため、カウント数の統計的振動による誤差が生ずることと、幾何的条件からの有利さが相打ち合うためであろう。50～100 mm 粒径の礫では各打込深さともバラツキが非常に大きくなったが、その中でも打込深さが増大するとバラツキの大きさは小さくなっている。これは試料の最大粒径が大きくなると、測定対象の有効容積が測定器の有感容積(打込深さが深くなれば増える)よりも大きくなり誤差が増大するため、一定の最大粒径をもつ試料に対しては打込深さが大きいほど試料の平均的な密度をとらえやすくなる、その結果測定精度があがるためであろう。この場合打込深さは測定器の有感容積が試料の有効容積よりも大になるように選ぶのが理想的となる。また打込深さが深くなるほど粒径が大きい場合に地表面に計器の浮上り等が考えられたときなどの透過距離に対する幾何的条件もよくなる。

次に測定時間の影響についてみると 10 秒(13,000 c.p.m)、1 分(78,000 c.p.m) 及び 4 分(312,000 c.p.m) のいずれの場合で測定しても総合的な精度ではあまりかわらなかった。これは 1 回当たり 10,000 カウント以上あれば測定箇所(密度)のバラツキの方が放射線の統計的揺動による誤差よりもはるかに大きいことを示している。

次に測定方向についてみると、一測点における測定を 1、2、4、8 方向にわたって測定したが、バラツキの面から考えると 1、2、4、8 方向のどの方向でもほとんど同じ結果が得られて

いる。一測点における測定は計器の位置をなるべく多くずらして値を平均化するのが効果的と思われるが、計器を回すことにより供試体内部が乱れ密度が変化する恐れがあり、又プローブと供試体上面との浮上りによる透過距離が方向別で違ってくるため必ずしも方向を変えることが効果的であるとはいえないようである。このことは一点当りの測定においては1方向のみの測定でも十分であることを物語っている。

次にバラツキと最大粒径との関係では粒径0～20mmまでは細粒土と同等の精度（密度誤差 $0.02 \sim 0.03 \text{ g/cm}^3$ ）で測定できるが、最大粒径が50mm程度になるとバラツキが細粒土の3～4倍程度と急激に大きくなる（密度誤差 0.1 g/cm^3 ）。さらに粒径が大となった場合は密度誤差のふえ方は一定値に落着く傾向にある。これは最大粒径200mmについて測定した場合にそのバラツキは最大粒径100mmの場合とほとんど同じであった。この実験で用いた打込深さ200～400mmについては、最大粒径50mm程度が適用の限界であるように思われる。ただし用いた試料は礫まじり土ではなく礫のみであったので実際よりも空隙が多く条件的には不利な結果を与えていると思われる。又最大粒径が50～100mmの場合、打込深さ別や時間別の密度のバラツキは各方向とも同じような位置関係となっている。この場合データ整理の都合上各方向は常に同じ方向に重ねあわせたためであろう。

表-2.4 室内実け

供試体 ナンバー	スタンダー ドカウント (cpm)	方向 時間 打込 深	0°			45°			90°			
			10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒
2-1	7920.5	20 cm	0.692	0.687	0.691	0.667	0.675	0.673	0.683	0.683	0.685	0.705
		30	0.288	0.345	0.264	0.301	0.289	0.264	0.300	0.298	0.300	0.296
		40	0.132	0.134	0.131	0.133	0.134	0.123	0.137	0.135	0.138	0.136
2-2	7866.4	20	0.533	0.538	0.536	0.532	0.529	0.530	0.523	0.524	0.522	0.512
		30	0.218	0.219	0.218	0.217	0.217	0.214	0.216	0.214	0.214	0.209
		40	0.108	0.103	0.102	0.101	0.101	0.101	0.098	0.098	0.101	0.100
2-3	7938.9	20	0.448	0.451	0.454	0.432	0.442	0.440	0.433	0.443	0.441	0.436
		30	0.174	0.174	0.176	0.166	0.170	0.171	0.171	0.171	0.172	0.174
		40	0.087	0.084	0.084	0.088	0.085	0.084	0.084	0.086	0.084	0.088
6-1	7860.4	20	0.810	0.806	0.809	0.790	0.800	0.800	0.936	0.943	0.947	0.789
		30	0.364	0.364	0.363	0.327	0.337	0.340	0.339	0.332	0.333	0.351
		40	0.124	0.128	0.130	0.153	0.147	0.147	0.150	0.151	0.150	0.142
6-2	7856.4	20	0.746	0.739	0.740	0.899	0.900	0.900	0.847	0.853	0.853	0.793
		30	0.332	0.325	0.324	0.341	0.341	0.341	0.433	0.428	0.426	0.425
		40	0.178	0.175	0.172	0.161	0.161	0.161	0.181	0.173	0.172	0.182
8-1	7843.5	20	1.017	1.029	1.027	0.830	0.826	0.828	0.817	0.810	0.825	0.868
		30	0.363	0.371	0.375	0.311	0.313	0.313	0.476	0.489	0.489	0.377
		40	0.183	0.191	0.189	0.194	0.190	0.191	0.274	0.230	0.232	0.217
8-2	7959.0	20	0.635	0.641	0.642	0.749	0.749	0.750	0.987	0.996	0.996	0.958
		30	0.400	0.407	0.407	0.387	0.386	0.385	0.354	0.362	0.361	0.402
		40	0.215	0.216	0.214	0.209	0.201	0.200	0.216	0.207	0.207	0.170
8-3	7855.3	20	0.878	0.886	0.880	0.770	0.774	0.773	0.855	0.848	0.848	0.955
		30	0.409	0.414	0.414	0.352	0.344	0.346	0.361	0.364	0.364	0.372
		40	0.151	0.149	0.150	0.125	0.132	0.132	0.179	0.180	0.179	0.159
11-1	7838.1	20	0.733	0.735	0.735	0.736	0.731	0.734	0.735	0.738	0.735	0.734
		30	0.335	0.333	0.333	0.336	0.337	0.334	0.327	0.333	0.333	0.324
		40	0.154	0.153	0.153	0.155	0.154	0.155	0.152	0.153	0.154	0.149
11-2	7844.6	20	0.857	0.857	0.858	0.854	0.858	0.859	0.857	0.857	0.858	0.856
		30	0.377	0.377	0.377	0.372	0.378	0.378	0.369	0.377	0.377	0.358
		40	0.176	0.175	0.175	0.170	0.173	0.176	0.177	0.172	0.176	0.178
11-3	7850.9	20	0.604	0.605	0.606	0.597	0.609	0.606	0.600	0.606	0.605	0.606
		30	0.254	0.254	0.254	0.254	0.255	0.254	0.241	0.256	0.253	0.243
		40	0.121	0.121	0.121	0.122	0.119	0.121	0.119	0.119	0.121	0.122
12-1	7888.0	20	0.531	0.535	0.541	0.559	0.561	0.560	0.553	0.564	0.563	0.542
		30	0.210	0.211	0.216	0.218	0.221	0.221	0.227	0.220	0.219	0.221
		40	0.100	0.101	0.102	0.108	0.102	0.104	0.108	0.101	0.101	0.097
12-2	7925.5	20	0.425	0.425	0.426	0.447	0.456	0.450	0.468	0.474	0.474	0.467
		30	0.165	0.168	0.169	0.168	0.171	0.172	0.180	0.180	0.180	0.181
		40	0.078	0.081	0.081	0.086	0.084	0.083	0.083	0.084	0.084	0.089

ん デ ー タ (そ の 2)

135°		180°			225°			270°			315°		
60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒
0.699	0.697	0.711	0.720	0.716	0.736	0.727	0.730	0.725	0.725	0.727	0.715	0.708	0.712
0.302	0.298	0.308	0.305	0.304	0.298	0.301	0.302	0.301	0.303	0.300	0.292	0.298	0.297
0.136	0.138	0.133	0.135	0.134	0.133	0.133	0.134	0.135	0.133	0.133	0.130	0.135	0.135
0.525	0.517	0.520	0.522	0.519	0.530	0.521	0.525	0.534	0.527	0.526	0.530	0.534	0.531
0.211	0.210	0.209	0.210	0.212	0.214	0.211	0.212	0.222	0.213	0.215	0.209	0.216	0.214
0.102	0.101	0.099	0.097	0.100	0.097	0.099	0.100	0.100	0.100	0.101	0.098	0.102	0.102
0.446	0.443	0.446	0.435	0.440	0.439	0.441	0.445	0.445	0.449	0.443	0.436	0.440	0.441
0.174	0.174	0.172	0.172	0.170	0.168	0.173	0.173	0.173	0.175	0.173	0.170	0.172	0.175
0.085	0.083	0.087	0.083	0.082	0.085	0.085	0.085	0.085	0.083	0.083	0.085	0.086	0.083
0.788	0.788	0.741	0.728	0.728	0.757	0.753	0.755	0.799	0.806	0.808	0.770	0.760	0.763
0.346	0.348	0.305	0.298	0.312	0.336	0.331	0.332	0.347	0.359	0.360	0.323	0.326	0.324
0.144	0.142	0.149	0.148	0.148	0.147	0.148	0.146	0.143	0.145	0.145	0.138	0.138	0.142
0.802	0.802	0.809	0.825	0.825	0.893	0.895	0.894	0.887	0.881	0.879	0.882	0.887	0.888
0.423	0.423	0.369	0.362	0.361	0.362	0.366	0.361	0.402	0.396	0.395	0.362	0.368	0.364
0.180	0.180	0.182	0.177	0.176	0.196	0.186	0.186	0.196	0.196	0.195	0.186	0.188	0.188
0.874	0.874	1.089	1.089	1.092	1.118	1.118	1.116	0.991	0.983	0.982	0.962	0.956	0.958
0.379	0.381	0.761	0.742	0.743	0.667	0.672	0.670	0.509	0.499	0.499	0.488	0.494	0.494
0.207	0.207	0.225	0.226	0.225	0.239	0.234	0.234	0.229	0.233	0.234	0.225	0.220	0.220
0.964	0.964	0.877	0.868	0.868	1.345	0.893	0.893	1.037	1.024	1.025	1.060	1.059	1.060
0.399	0.399	0.301	0.302	0.301	0.391	0.383	0.382	0.467	0.464	0.463	0.510	0.508	0.507
0.168	0.167	0.165	0.160	0.159	0.178	0.177	0.177	0.164	0.170	0.170	0.217	0.204	0.204
0.955	0.848	1.231	1.236	1.238	0.965	0.970	0.971	0.935	0.942	0.787	0.954	0.980	0.981
0.374	0.360	0.354	0.349	0.356	0.312	0.327	0.354	0.319	0.319	0.353	0.341	0.342	0.370
0.159	0.157	0.151	0.146	0.147	0.163	0.162	0.164	0.166	0.168	0.168	0.157	0.154	0.154
0.733	0.733	0.741	0.733	0.736	0.725	0.732	0.736	0.735	0.738	0.737	0.739	0.731	0.738
0.333	0.333	0.331	0.333	0.333	0.330	0.330	0.333	0.337	0.331	0.333	0.330	0.332	0.332
0.158	0.156	0.150	0.153	0.153	0.153	0.152	0.153	0.160	0.151	0.153	0.159	0.151	0.155
0.854	0.857	0.860	0.856	0.856	0.864	0.859	0.858	0.868	0.857	0.855	0.855	0.857	0.858
0.376	0.375	0.360	0.376	0.374	0.364	0.375	0.376	0.366	0.375	0.376	0.364	0.376	0.377
0.177	0.175	0.168	0.171	0.175	0.171	0.173	0.175	0.175	0.174	0.175	0.171	0.175	0.175
0.603	0.608	0.608	0.602	0.608	0.603	0.592	0.607	0.598	0.602	0.606	0.601	0.603	0.606
0.252	0.253	0.242	0.248	0.255	0.248	0.253	0.253	0.266	0.255	0.255	0.254	0.256	0.255
0.119	0.121	0.119	0.120	0.122	0.117	0.119	0.121	0.121	0.121	0.120	0.118	0.119	0.121
0.542	0.544	0.560	0.562	0.565	0.556	0.550	0.559	0.574	0.569	0.572	0.558	0.547	0.546
0.212	0.215	0.217	0.221	0.220	0.221	0.214	0.213	0.212	0.210	0.209	0.207	0.209	0.210
0.099	0.099	0.096	0.100	0.100	0.096	0.097	0.097	0.106	0.096	0.098	0.100	0.099	0.099
0.467	0.470	0.482	0.486	0.483	0.450	0.451	0.454	0.441	0.444	0.442	0.437	0.429	0.433
0.181	0.184	0.180	0.189	0.189	0.185	0.175	0.176	0.179	0.177	0.179	0.179	0.176	0.174
0.086	0.085	0.085	0.083	0.085	0.085	0.080	0.082	0.080	0.080	0.081	0.083	0.082	0.081

供試体 ナンバー	スタンダー ドナンバー (c p m)	方向 打込 時間 深	0°			45°			90°			10秒
			10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	
12-3	77828	20 cm	0.472	0.460	0.462	0.447	0.448	0.449	0.449	0.453	0.455	0.479
		30	0.179	0.176	0.176	0.188	0.180	0.180	0.193	0.183	0.184	0.179
		40	0.082	0.082	0.082	0.085	0.082	0.082	0.085	0.081	0.081	0.082
12-1	77419	20	0.467	0.477	0.466	0.463	0.460	0.461	0.455	0.449	0.450	0.471
		30	0.204	0.202	0.203	0.197	0.197	0.197	0.188	0.195	0.196	0.193
		40	0.098	0.099	0.100	0.095	0.096	0.097	0.088	0.092	0.093	0.092
12-2	77419	20	0.535	0.535	0.535	0.533	0.522	0.523	0.558	0.552	0.553	0.561
		30	0.216	0.220	0.220	0.209	0.215	0.216	0.226	0.221	0.221	0.218
		40	0.098	0.102	0.103	0.096	0.098	0.098	0.099	0.100	0.100	0.098
12-3	77419	20	0.477	0.479	0.479	0.456	0.459	0.460	0.474	0.463	0.464	0.476
		30	0.192	0.202	0.203	0.198	0.200	0.192	0.194	0.192	0.193	0.195
		40	0.091	0.091	0.092	0.091	0.091	0.092	0.092	0.089	0.090	0.094
15-1	78581	20	0.761	0.778	0.778	0.767	0.765	0.765	0.776	0.775	0.775	0.881
		30	0.373	0.363	0.362	0.370	0.377	0.377	0.377	0.385	0.385	0.341
		40	0.153	0.153	0.149	0.153	0.150	0.150	0.156	0.159	0.156	0.156
15-2	78973	20	0.669	0.671	0.668	0.688	0.681	0.680	0.861	0.868	0.867	0.855
		30	0.324	0.321	0.322	0.327	0.327	0.329	0.337	0.333	0.334	0.295
		40	0.142	0.138	0.137	0.128	0.130	0.128	0.131	0.131	0.129	0.127
25-1	79121	20	0.598	0.596	0.598	0.576	0.575	0.577	0.587	0.580	0.582	0.601
		30	0.255	0.255	0.254	0.246	0.247	0.246	0.237	0.248	0.247	0.253
		40	0.112	0.115	0.117	0.113	0.114	0.115	0.107	0.108	0.110	0.110
25-2	79334	20	0.551	0.539	0.538	0.509	0.510	0.508	0.489	0.503	0.502	0.520
		30	0.213	0.210	0.211	0.213	0.210	0.212	0.207	0.208	0.209	0.196
		40	0.095	0.093	0.097	0.098	0.095	0.095	0.091	0.095	0.096	0.090
27-1	79106	20	0.682	0.682	0.682	0.630	0.628	0.628	0.658	0.656	0.656	0.798
		30	0.282	0.279	0.280	0.289	0.292	0.292	0.270	0.275	0.275	0.280
		40	0.103	0.108	0.109	0.108	0.109	0.109	0.126	0.124	0.125	0.121
27-2	79149	20	0.678	0.703	0.704	0.807	0.802	0.802	0.797	0.791	0.794	0.693
		30	0.320	0.317	0.320	0.321	0.321	0.322	0.322	0.315	0.318	0.284
		40	0.136	0.134	0.134	0.133	0.130	0.129	0.136	0.131	0.130	0.113
27-3	79149	20	0.624	0.622	0.623	0.613	0.611	0.614	0.621	0.621	0.623	0.613
		30	0.240	0.238	0.238	0.237	0.234	0.235	0.241	0.240	0.240	0.241
		40	0.092	0.089	0.089	0.092	0.091	0.092	0.088	0.087	0.088	0.083

135°		180°			225°			270°			315°		
60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒	10秒	60秒	240秒
0.472	0.473	0.485	0.481	0.482	0.472	0.469	0.470	0.473	0.482	0.479	0.472	0.472	0.474
0.186	0.185	0.180	0.179	0.179	0.176	0.174	0.174	0.169	0.176	0.176	0.175	0.178	0.177
0.086	0.086	0.082	0.085	0.085	0.086	0.084	0.084	0.083	0.084	0.084	0.085	0.085	0.085
0.465	0.466	0.491	0.489	0.489	0.522	0.523	0.522	0.534	0.534	0.533	0.519	0.526	0.524
0.197	0.199	0.215	0.208	0.209	0.210	0.204	0.205	0.199	0.197	0.198	0.199	0.202	0.202
0.093	0.094	0.095	0.095	0.096	0.099	0.094	0.095	0.093	0.097	0.097	0.098	0.098	0.094
0.572	0.574	0.531	0.534	0.535	0.583	0.593	0.594	0.625	0.629	0.627	0.587	0.584	0.582
0.215	0.216	0.210	0.207	0.208	0.220	0.223	0.223	0.232	0.230	0.231	0.222	0.227	0.228
0.096	0.096	0.096	0.097	0.097	0.098	0.102	0.102	0.106	0.108	0.108	0.108	0.105	0.106
0.483	0.483	0.526	0.530	0.529	0.503	0.508	0.509	0.481	0.507	0.508	0.505	0.505	0.505
0.190	0.189	0.207	0.202	0.203	0.198	0.200	0.199	0.199	0.201	0.202	0.214	0.211	0.211
0.089	0.090	0.101	0.101	0.101	0.102	0.102	0.101	0.102	0.104	0.105	0.116	0.117	0.117
0.883	0.883	0.757	0.779	0.779	0.738	0.734	0.734	0.829	0.837	0.838	0.851	0.829	0.829
0.340	0.339	0.363	0.366	0.366	0.344	0.347	0.347	0.324	0.330	0.330	0.384	0.385	0.385
0.160	0.160	0.170	0.171	0.169	0.177	0.174	0.173	0.150	0.149	0.148	0.157	0.152	0.151
0.856	0.855	0.855	0.862	0.861	0.745	0.742	0.741	0.706	0.699	0.697	0.753	0.765	0.762
0.296	0.298	0.307	0.303	0.304	0.333	0.334	0.335	0.302	0.303	0.305	0.302	0.303	0.305
0.129	0.128	0.137	0.134	0.134	0.146	0.139	0.138	0.134	0.132	0.132	0.139	0.144	0.144
0.606	0.608	0.573	0.576	0.579	0.569	0.567	0.567	0.650	0.639	0.642	0.590	0.598	0.605
0.251	0.249	0.226	0.233	0.231	0.235	0.239	0.238	0.239	0.244	0.243	0.239	0.244	0.241
0.107	0.110	0.105	0.106	0.106	0.108	0.106	0.107	0.112	0.107	0.107	0.116	0.124	0.127
0.515	0.514	0.500	0.502	0.501	0.517	0.509	0.509	0.529	0.529	0.527	0.527	0.534	0.531
0.194	0.196	0.195	0.190	0.192	0.199	0.194	0.195	0.209	0.210	0.210	0.214	0.214	0.215
0.090	0.091	0.088	0.089	0.090	0.091	0.094	0.094	0.096	0.097	0.098	0.099	0.099	0.100
0.803	0.803	0.738	0.742	0.742	0.683	0.684	0.684	0.664	0.658	0.690	0.740	0.736	0.737
0.286	0.286	0.299	0.298	0.299	0.277	0.273	0.275	0.266	0.260	0.260	0.231	0.237	0.238
0.117	0.118	0.123	0.112	0.123	0.111	0.112	0.112	0.117	0.115	0.116	0.121	0.122	0.123
0.689	0.691	0.664	0.668	0.670	0.760	0.771	0.773	0.718	0.731	0.732	0.675	0.672	0.675
0.287	0.289	0.287	0.283	0.286	0.298	0.319	0.322	0.294	0.294	0.296	0.304	0.310	0.313
0.107	0.106	0.130	0.134	0.134	0.126	0.129	0.130	0.137	0.133	0.134	0.141	0.145	0.146
0.617	0.619	0.627	0.624	0.624	0.630	0.628	0.628	0.627	0.625	0.636	0.622	0.619	0.619
0.239	0.239	0.253	0.246	0.246	0.249	0.248	0.249	0.239	0.239	0.239	0.246	0.252	0.252
0.080	0.080	0.083	0.081	0.082	0.096	0.092	0.093	0.098	0.093	0.094	0.093	0.087	0.089

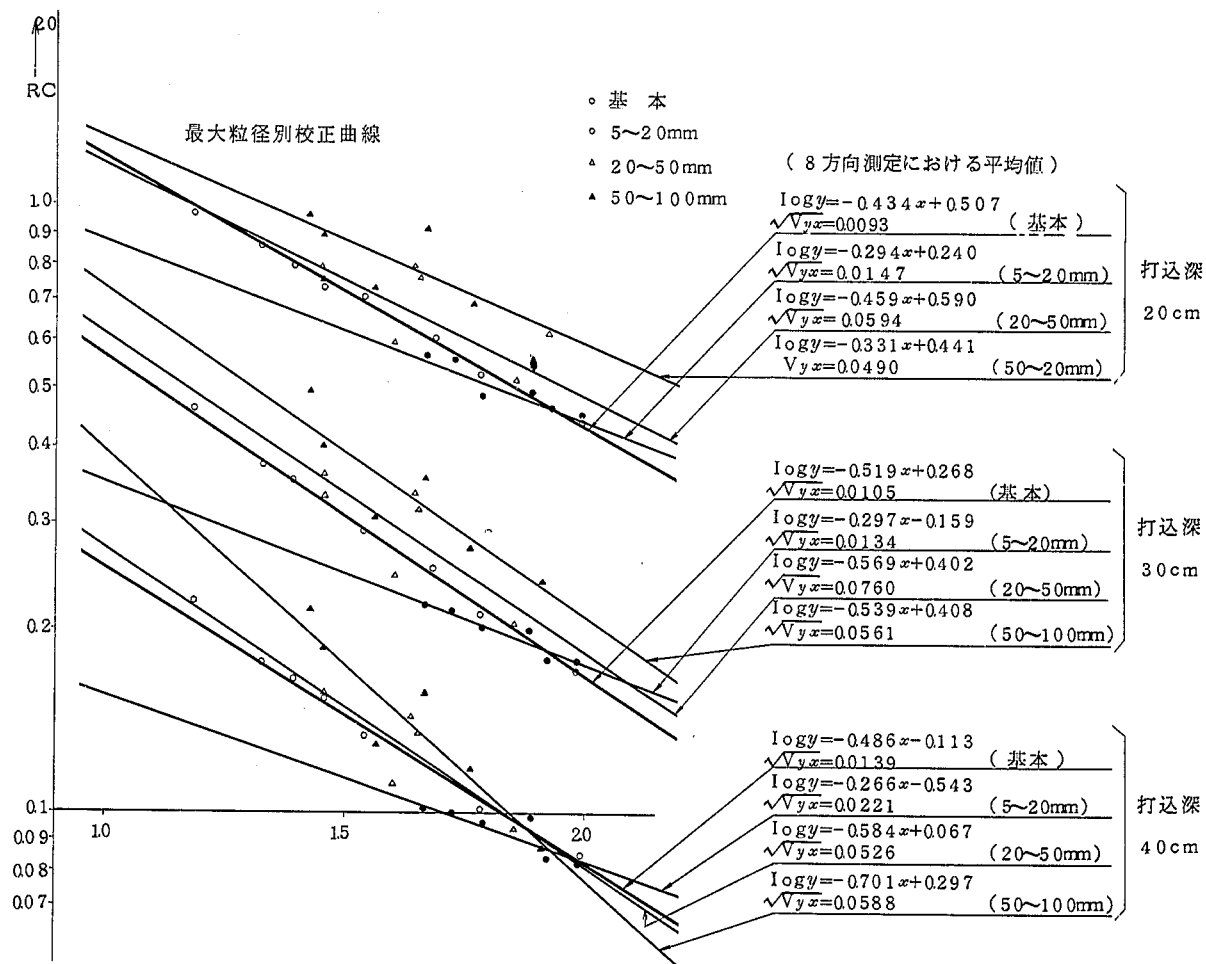


図 - 2.3 最大粒径別校正曲線

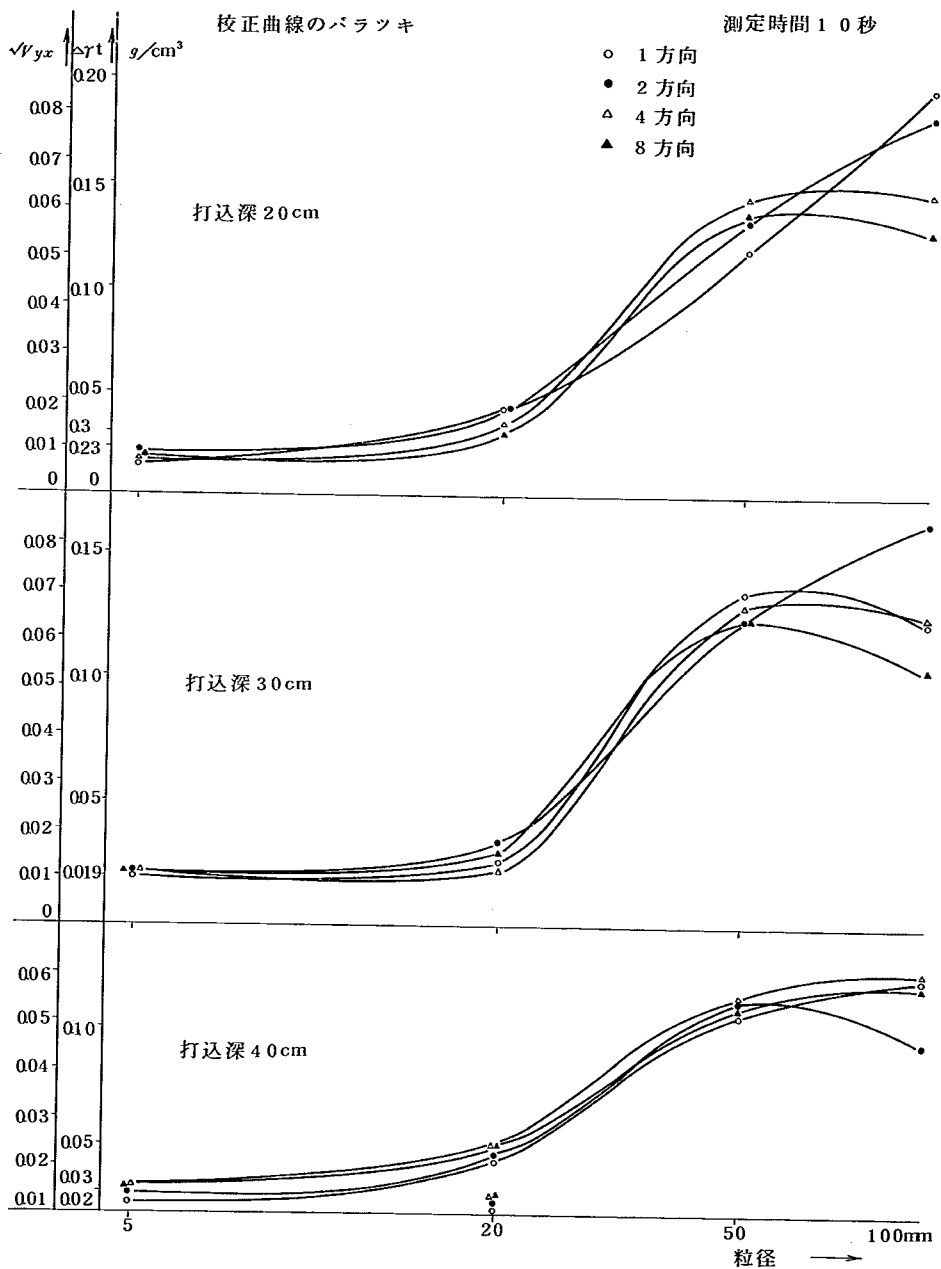


図 - 2.4 (a) 校正曲線のバラツキ

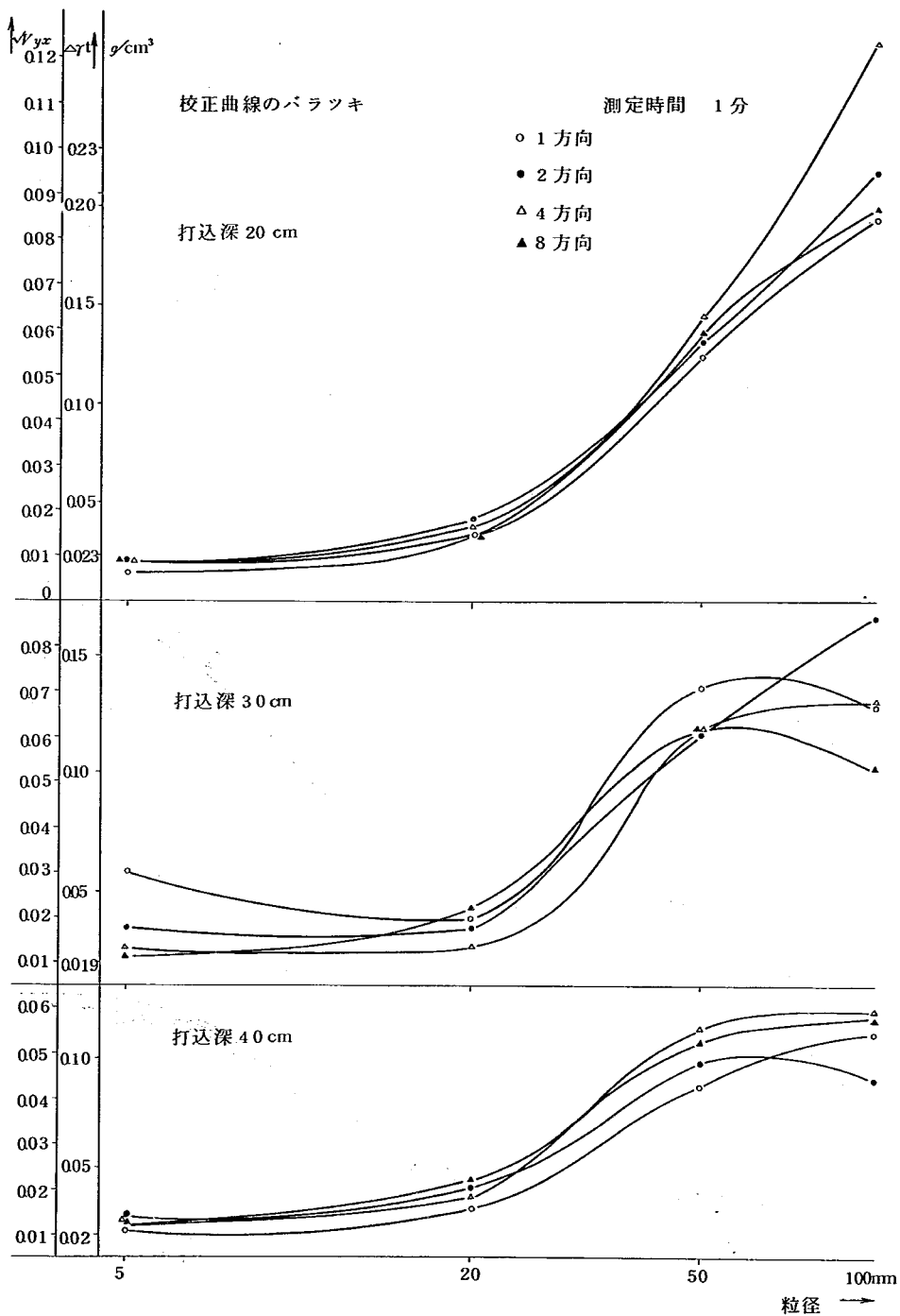


図-2.4 (b) 校正曲線のバラツキ

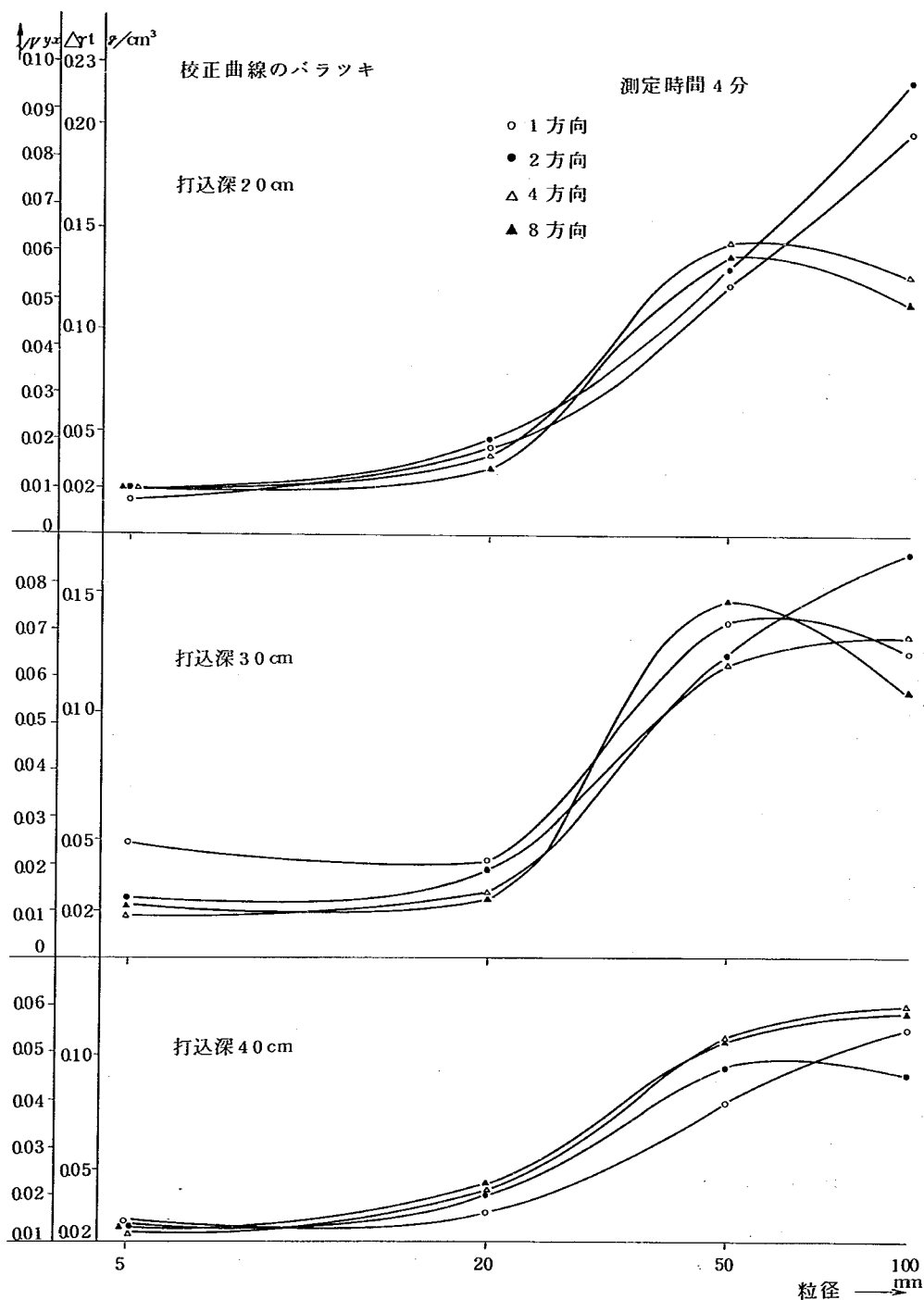


図 - 2.4 (c) 校正曲線のバラツキ

2.4 室内実験データ（その3）

期 日 昭和50年1月～2月

使用機器 SX-1A型

(1) 試料

実験に用いた礫混り土は、以下に示す真砂土と礫の混合物である。

○真砂土 採取地：滋賀県びわ湖西側北小松地点 土粒子の比重＝2.63の20mmフルイ通過分

○ 礫 最大粒径φ60mmおよび100mmの碎石

(2) 供試体作成

供試体は上記の真砂土に重量比30%でどちらかの礫を混合して作成した。実験に用いた20ケースの供試体の条件を表2.5に示す。

ここで、粒度は、最大粒径20mm（真砂土のみ）60mm，100mmの3種類を用い、礫の混入率は30%とした。図-2.5にその加積粒径曲線を示す。また、供試体の作成においては、3～

表-2.5 供試体作成の条件

供 試 体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
最大粒径	20mm			100mm			60mm			20mm			100mm			60mm			20	mm
含 水 比	6%									10%										6%
締固め度	粗に詰める									密に詰める										粗

4層に試料を分割して投入し、バイブレータを用いて2種類の締固めを行った。なお、供試体作成時、礫が均等に混合されるように、各層毎に4ブロックの仕切枠内にあらかじめ必要量を計量して入れた。

(3) 測定方法

金属性円筒容器に、試料を表-1に示したような条件で詰めて供試体を作成し、密度計の線源打込深さを、20，30，40cmの3段階について図-2.6(a)に示したような測定配置で測定する。

またモールド周辺の密度のバラツキもチェックする意味で数個の供試体について図-2.6(b)，(c)の測定方法についても測定した。各計器設置位置における測定は1分測定で2回行われた。

一方、密度計はあらかじめガラス板と水を組合せて、線源深さ20，30，40cmの4種類について校正曲線を作成していた。（図-2.7参照）

(4) 測定結果

各モールド供試体の実際の密度およびRI計器による測定データとそのバラツキを表-2.6，表-2.7および図-2.8に示す。

表-2.6は各モールド供試体毎の実際の密度と測定位置(a)のRI測定データを記したもので、

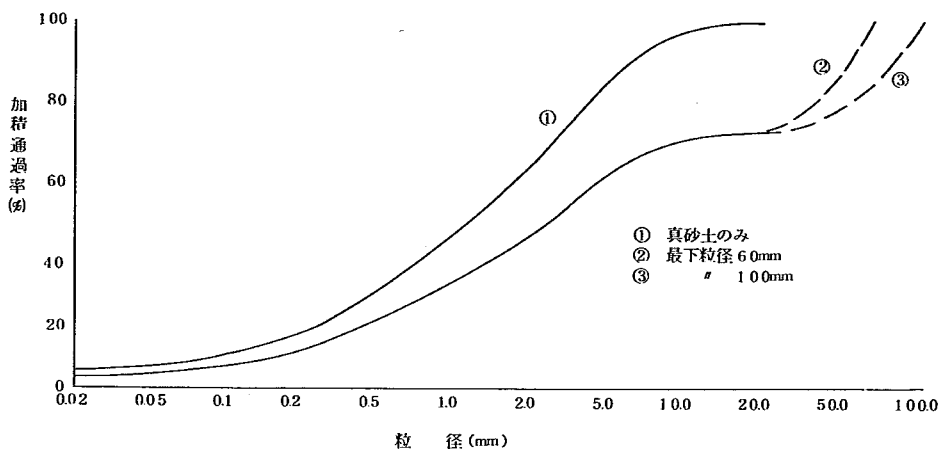


図 - 2.5 各供試体の粒径曲線

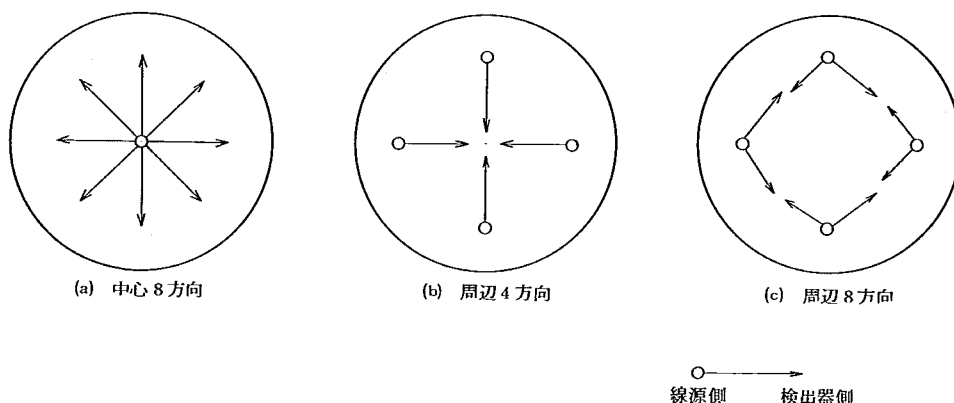


図 - 2.6 RI 計器の測定配置

その他、測定位置(b)および(c) (周辺測定点) のデータの平均と標準偏差を併記した。

表 2.7 は各打込深さ毎、測定方向数毎のバラツキを知る目的で、各々の標準偏差を算定した結果である。

この表から各打込深さおよび測定方向数が増加するにつれて著しく精度が向上する傾向が認められる。また礫の粒径による差異も若干認められる。

図 - 2.8 は表 - 2.7 に基づいて、95% の信頼性 (2σ) のグラフを作成したものであるが測定対象とする粒径の礫混り土に対して所要の精度で測定しうる RI 計器の線源打込深さおよび測定方向をこの図より読取ることができる。

測定結果について、それぞれモールドの湿潤密度と密度計の測定値との回帰関係を調べてみると、図 - 2.9 (a), (b), (c) に示したようになる。図から明らかなように、礫の寸法、また混入の

有無にかかわらずほぼ3%程度内に測定が散布している。一方、この傾向は線源の打込深さでみた場合でも、回帰関係が異なるとはいいがたい。したがって、密度計の線源と検出器の距離すなわちガンマ線の透過距離が測定しようとする試料の粒径より十分長ければ、かたよりはほとんど生じない。

回帰分析の式から、モールドの密度に対するかたよりを相対値にして図化すると、図-2.10のようになる。図から、密度が低い側では負のかたよりがやや大きいと思われるが、相対的に校正曲線の不正確さとして±2%程度は許容誤差と考えれば、礫混り土に対して特に校正曲線を修正して使用する必要性は認められない。

この回帰分析では測定配置が図-2.6(a)に示した中心8方向の平均値で行ったが、参考までに測定した(b), (c)方向のデータとの比較を行い周辺との密度の違いを調べた。すなわち、試料の粒径ごとに測定配置(a), (b), (c)の各方向で測定したときの平均値を求め、(a)に対する偏差(ε)を計算してみた。(表-2.8 参照)

$$\epsilon = \frac{(\bar{C} \text{ or } \bar{B} - \bar{A})}{\bar{A}} \times 100 \quad (\%)$$

これによると、±2%を越えるものは、B方向100mm試料が大きく、次に60mm試料となる。また、20mm試料では1%以内で、測定方向による違いはないものとみてよい。

礫混り土の供試体を作成する場合、礫を均等に配合させるための仕切板の位置と線源棒穴と容器中心にそう線上には、礫が含まれていない状態となるのでそのため過少に評価されるものと考えられる。

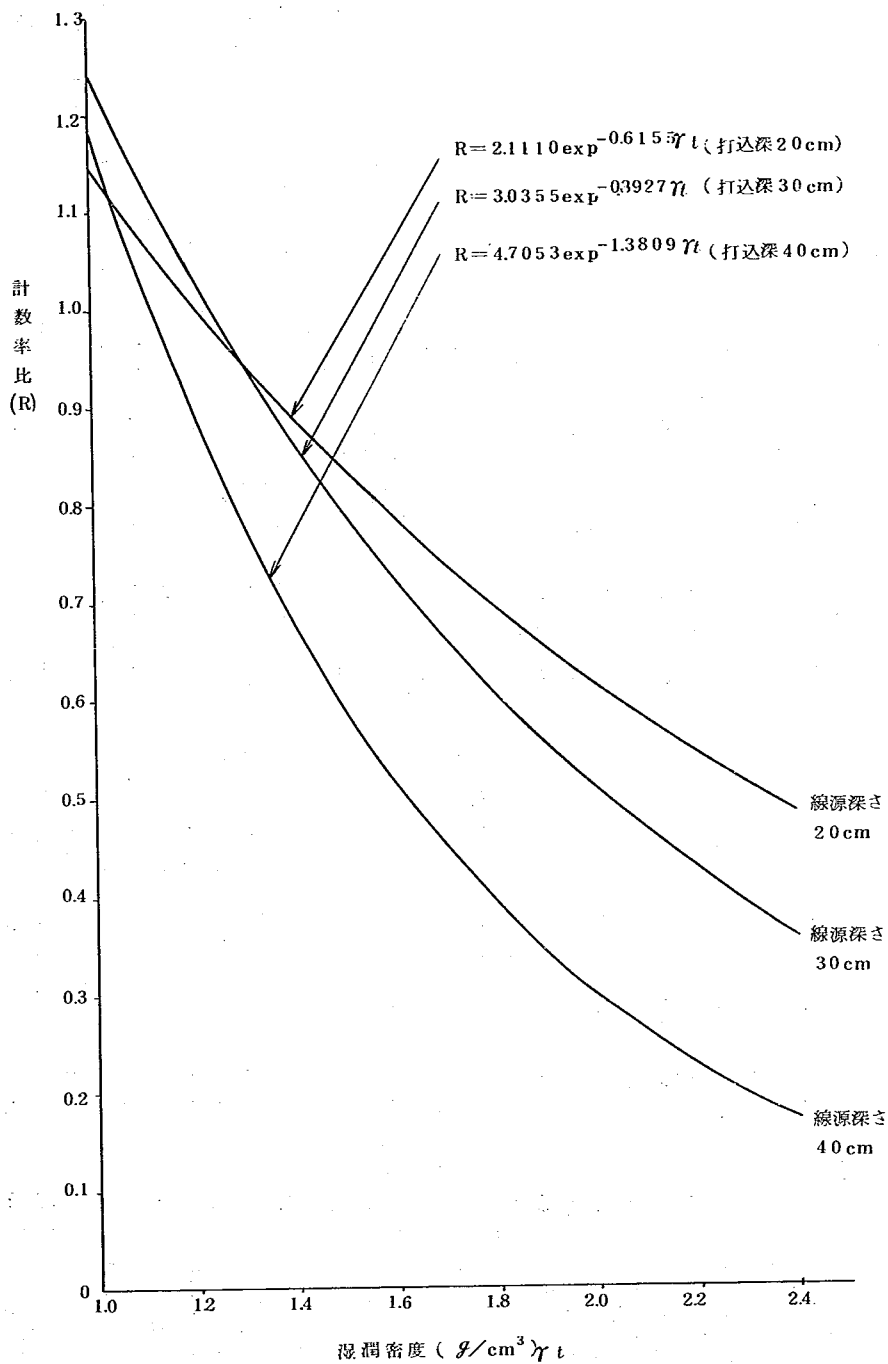


図 - 2.7 密度計の校正曲線

表-2.6 室内実験データ(その3)

供試体ナンバー	打込深	測定場所 A										測定場所 B		測定場所 C	
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均 $\bar{r}_t$	標準偏差 σ	平均 $\bar{r}_t$	標準偏差 σ	平均 $\bar{r}_t$	標準偏差 σ
No. 1 粒径 2.0mm以下 締めゆる詰め 密度 1.558g/cm ³	20 cm	1.581	1.582	1.580	1.627	1.562	1.544	1.558	1.560	1.574	0.039	-	-	-	-
	30	1.570	1.589	1.599	1.591	1.556	1.547	1.551	1.558	1.569	0.021	-	-	-	-
	40	1.562	1.573	1.581	1.569	1.565	1.533	1.529	1.525	1.555	0.021	1.575	0.039	-	-
No. 2 粒径 2.0mm以下 締めゆる詰め 1.518	20	1.543	1.541	1.517	1.530	1.510	1.496	1.463	1.459	1.507	0.032	-	-	-	-
	30	1.554	1.536	1.514	1.518	1.500	1.505	1.494	1.467	1.511	0.026	-	-	-	-
	40	1.526	1.529	1.502	1.500	1.497	1.492	1.510	1.490	1.506	0.015	1.507	0.014	-	-
No. 3 粒径 2.0mm以下 締めゆる詰め 1.539	20	1.526	1.530	1.505	1.510	1.520	1.535	1.536	1.520	1.523	0.011	-	-	-	-
	30	1.545	1.540	1.529	1.537	1.530	1.521	1.506	1.504	1.526	0.015	-	-	-	-
	40	1.526	1.525	1.528	1.516	1.508	1.508	1.509	1.519	1.517	0.009	1.522	0.017	-	-
No. 4 粒径 100mm以下 締めゆる詰め 1.757	20	1.670	1.676	1.710	1.704	1.670	1.651	1.614	1.640	1.667	0.031	-	-	-	-
	30	1.670	1.684	1.709	1.696	1.687	1.686	1.681	1.639	1.681	0.020	1.696	0.034	-	-
	40	1.710	1.716	1.712	1.724	1.711	1.713	1.701	1.692	1.710	0.010	1.751	0.076	-	-
No. 5 粒径 100mm以下 締めゆる詰め 1.750	20	1.731	1.804	1.765	1.775	1.727	1.706	1.716	1.735	1.745	0.032	-	-	-	-
	30	1.696	1.753	1.778	1.798	1.770	1.724	1.718	1.706	1.743	0.036	1.666	0.019	1.682	0.046
	40	1.713	1.818	1.794	1.776	1.752	1.721	1.717	1.726	1.752	0.039	1.671	0.025	1.693	0.038
No. 6 粒径 100mm以下 締めゆる詰め 1.778	20	1.769	1.731	1.697	1.693	1.696	1.820	1.660	1.739	1.726	0.049	-	-	-	-
	30	1.715	1.700	1.738	1.727	1.708	1.741	1.733	1.796	1.732	0.029	1.679	0.027	1.687	0.032
	40	1.714	1.732	1.764	1.778	1.757	1.756	1.749	1.789	1.755	0.023	1.717	0.030	1.723	0.037
No. 7 粒径 60mm以下 締めゆる詰め 1.786	20	1.712	1.745	1.746	1.772	1.723	1.763	1.767	1.740	1.746	0.021	-	-	-	-
	30	1.737	1.757	1.772	1.781	1.712	1.712	1.746	1.733	1.744	0.025	1.733	0.033	1.740	0.046
	40	1.776	1.790	1.794	1.821	1.771	1.796	1.778	1.804	1.788	0.018	1.754	0.023	1.761	0.023
No. 8 粒径 60mm以下 締めゆる詰め 1.773	20	1.839	1.760	1.791	1.732	1.742	1.770	1.751	1.838	1.778	0.040	-	-	-	-
	30	1.768	1.737	1.731	1.741	1.756	1.720	1.717	1.728	1.737	0.017	1.718	0.019	1.726	0.039
	40	1.793	1.775	1.769	1.773	1.767	1.762	1.761	1.797	1.775	0.013	1.724	0.009	1.744	0.026
No. 9 粒径 60mm以下 締めゆる詰め 1.845	20	1.806	1.808	1.837	1.811	1.779	1.776	1.801	1.808	1.803	0.019	-	-	-	-
	30	1.886	1.859	1.842	1.806	1.774	1.785	1.837	1.872	1.833	0.039	1.807	0.048	1.872	0.041
	40	1.951	1.925	1.886	1.839	1.814	1.829	1.889	1.935	1.884	0.050	1.849	0.035	1.916	0.038
No.10 粒径 2.0mm以下 密に詰める 1.671	20	1.709	1.725	1.732	1.742	1.730	1.716	1.716	1.716	1.723	0.012	-	-	-	-
	30	1.683	1.690	1.691	1.694	1.682	1.676	1.683	1.688	1.686	0.006	1.682	0.022	1.677	0.026
	40	1.683	1.691	1.680	1.681	1.677	1.673	1.687	1.686	1.682	0.007	1.683	0.015	1.672	0.022

供試体ナンバー	打込深	測 定 場 所 A										測定場所 B		測定場所 C	
		1	2	3	4	5	6	7	8	平 均	標準偏差	平 均	標準偏差	平 均	標準偏差
No. 11 20mm以下 密に詰める 1.741	20 cm	1.788	1.784	1.790	1.803	1.795	1.797	1.772	1.785	1.789	0.010	-	-	-	-
	30	1.768	1.761	1.765	1.751	1.737	1.733	1.744	1.764	1.753	0.013	1.737	0.007	1.735	0.017
	40	1.769	1.757	1.742	1.735	1.728	1.720	1.751	1.768	1.746	0.018	1.748	0.010	1.742	0.015
No. 12 20mm以下 密に詰める 1.821	20	1.853	1.854	1.826	1.785	1.788	1.829	1.856	1.857	1.831	0.029	-	-	-	-
	30	1.832	1.836	1.827	1.797	1.792	1.816	1.814	1.827	1.818	0.016	1.811	0.024	1.809	0.027
	40	1.826	1.830	1.814	1.800	1.793	1.817	1.824	1.833	1.817	0.014	1.812	0.014	1.813	0.016
No. 13 100mm以下 密に詰める 1.831	20	1.790	1.859	1.823	1.817	1.814	1.751	1.873	1.852	1.822	0.039	-	-	-	-
	30	1.759	1.833	1.858	1.830	1.799	1.729	1.775	1.768	1.794	0.043	1.725	0.024	1.779	0.024
	40	1.818	1.878	1.895	1.878	1.861	1.817	1.837	1.834	1.852	0.029	1.786	0.018	1.829	0.026
No. 14 100mm以下 密に詰める 1.969	20	2.124	2.070	2.006	1.933	1.898	1.950	1.996	2.045	2.003	0.073	-	-	-	-
	30	2.042	2.018	1.953	1.882	1.873	1.928	1.978	2.024	1.962	0.062	1.847	0.029	1.906	0.040
	40	2.038	2.034	2.008	1.953	1.961	2.032	2.055	2.058	2.017	0.040	1.926	0.016	1.968	0.38
No. 15 100mm以下 密に詰める 1.941	20	1.936	1.904	1.955	2.005	2.030	1.947	1.907	1.938	1.953	0.043	-	-	-	-
	30	1.906	1.888	1.955	2.016	2.022	1.917	1.868	1.912	1.935	0.055	1.873	0.032	1.953	0.039
	40	1.917	1.916	1.958	1.990	2.014	1.947	1.894	1.922	1.945	0.040	1.897	0.024	1.975	0.030
No. 16 60mm以下 密に詰める 2.010	20	2.042	2.017	2.014	2.013	2.048	2.062	2.057	2.060	2.039	0.021	-	-	-	-
	30	2.087	2.065	2.062	2.072	2.084	2.093	2.099	2.094	2.082	0.094	1.991	0.021	2.014	0.017
	40	1.979	1.972	1.968	1.967	1.963	1.974	1.981	1.987	1.974	0.008	1.983	0.016	2.011	0.022
No. 17 60mm以下 密に詰める 2.055	20	2.069	2.051	2.064	2.039	2.071	2.107	2.061	2.051	2.064	0.020	-	-	-	-
	30	2.104	2.080	2.062	2.019	2.014	2.050	2.057	2.070	2.057	0.029	2.055	0.050	2.048	0.027
	40	2.097	2.066	2.040	2.005	2.005	2.037	2.052	2.076	2.047	0.032	2.044	0.014	2.048	0.014
No. 18 60mm以下 密に詰める 1.982	20	1.985	1.997	2.031	2.000	1.974	1.979	2.058	2.065	2.011	0.035	-	-	-	-
	30	1.963	1.996	1.995	1.941	1.902	1.932	2.006	2.016	1.969	0.040	2.007	0.020	1.949	0.008
	40	1.956	1.939	1.946	1.938	1.926	1.946	2.020	2.006	1.960	0.033	1.961	0.014	2.019	0.014
No. 19 20mm以下 密に詰める 1.846	20	1.851	1.823	1.850	1.880	1.888	1.894	1.873	1.866	1.866	0.023	-	-	-	-
	30	1.809	1.776	1.777	1.819	1.832	1.828	1.820	1.831	1.811	0.022	1.865	0.081	1.862	0.078
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
No. 20 20mm以下 ゆる詰め 1.731	20	1.701	1.756	1.756	1.722	1.711	1.708	1.699	1.710	1.721	0.023	-	-	-	-
	30	1.694	1.703	1.708	1.691	1.667	1.667	1.682	1.693	1.688	0.015	1.695	0.020	1.706	0.025
	40	1.717	1.708	1.711	1.696	1.682	1.676	1.688	1.703	1.698	0.014	1.733	0.017	1.743	0.019

表-2.7 RI測定データのバラツキ

粒 径	打込深	測定方向	1	2	4
20 mm以下	20	cm	0.025	0.011	0.003
	30	cm	0.018	0.010	0.003
	40	cm	0.014	0.005	0.004
60 mm以下	20	cm	0.027	0.017	0.006
	30	cm	0.048	0.016	0.004
	40	cm	0.029	0.012	0.008
100 mm以下	20	cm	0.047	0.023	0.013
	30	cm	0.043	0.019	0.004
	40	cm	0.032	0.015	0.007

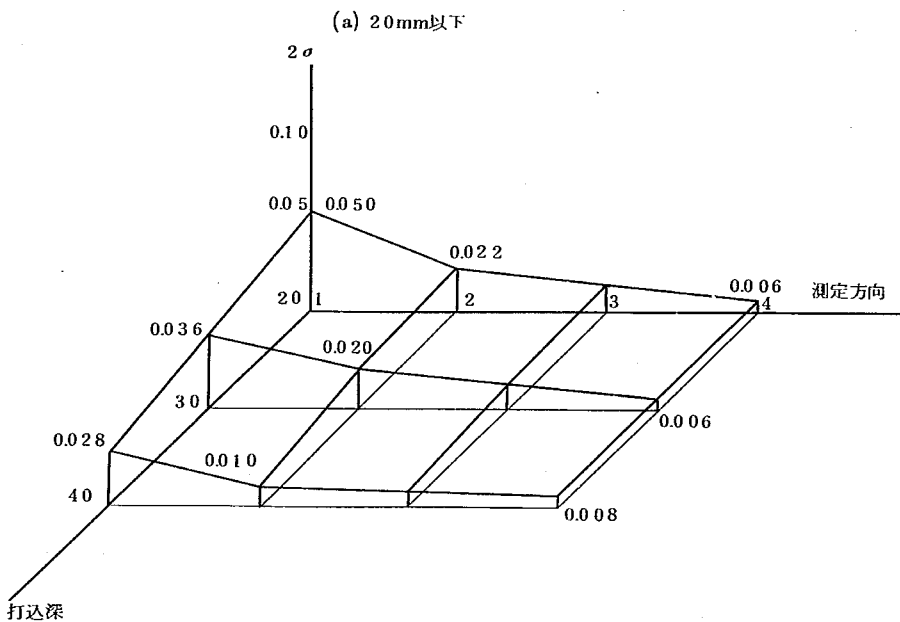


図-2.8 RI測定データのバラツキ

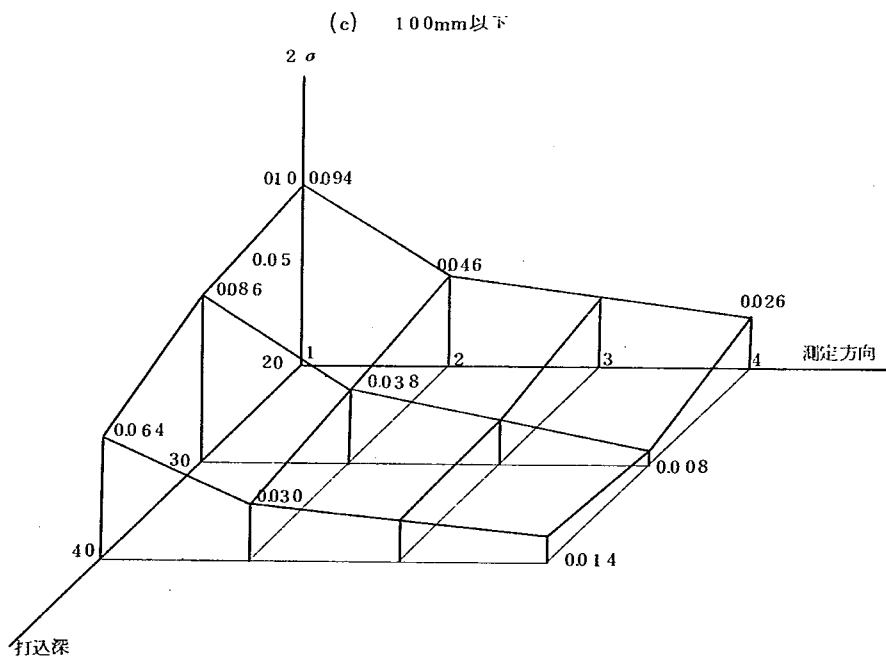
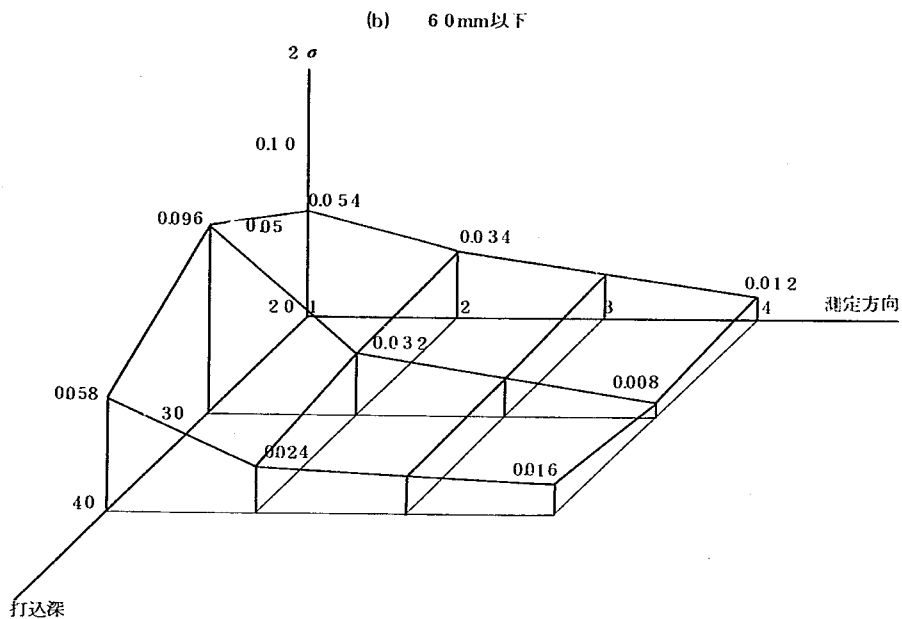


図-2.8 RI測定データのバラツキ

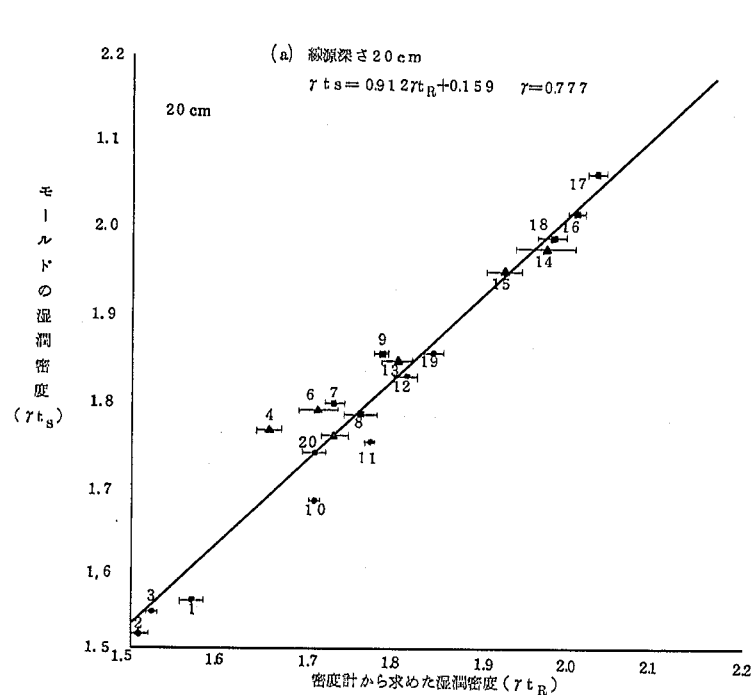


図 - 2.9 密度の回帰

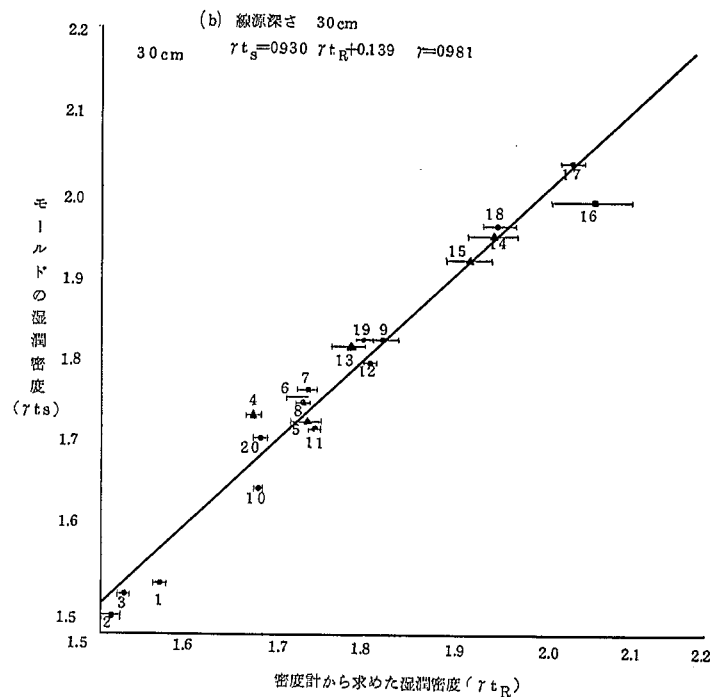


図 - 2.9 密度の回帰

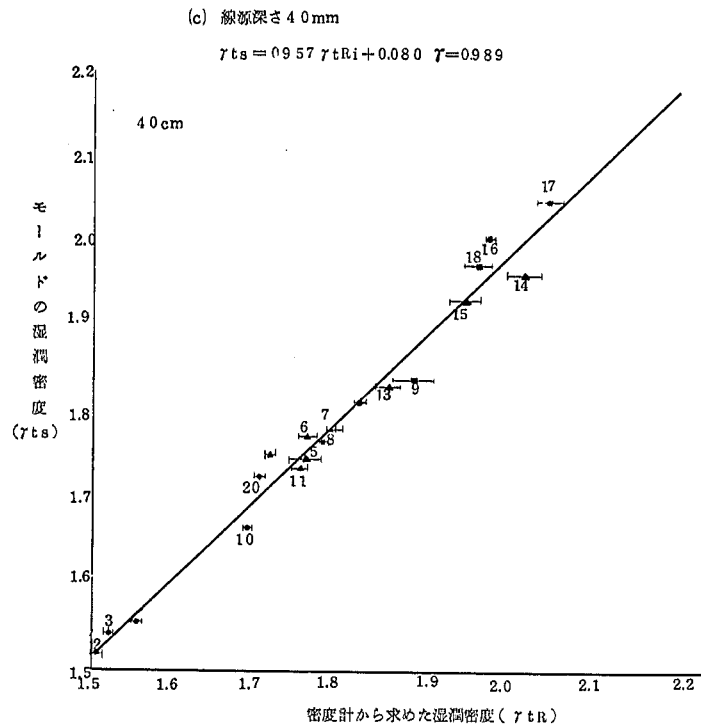


図 - 2.9 密度の回帰

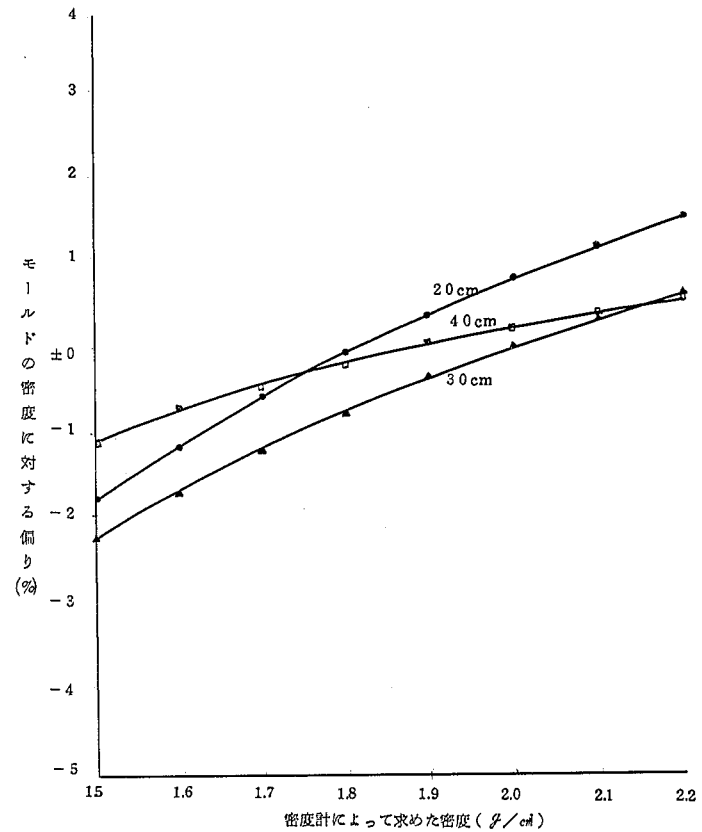


図 - 2.10 基準密度に対する R I 法による
密度測定値の平均的なカタヨリ

表-2.8 測定位置による密度の違い

粒 径	測 定 方 法	密 度 40cm	ϵ 40 (%)	密 度 30cm	ϵ 30 (%)
100	A	1.864	-	1.833	-
	B	1.799	- 3.5	1.758	- 4.1
	C	1.838	- 1.4	1.801	- 1.7
60	A	1.901	-	1.904	-
	B	1.866	- 1.8	1.855	- 2.6
	C	1.917	+ 0.8	1.892	- 0.6
20	A	1.736	-	1.751	-
	B	1.744	+ 0.5	1.758	+ 0.4
	C	1.743	+ 0.4	1.761	+ 0.6

2.5 考 察

前述の3回の室内実験の結果に基づいてR I計器の礫混り土の施工管理への適用性について行った検討考察結果を以下に列記する。

(1) 礫混り土への基準校正曲線の適用性

実験No.1およびNo.2において、礫混り土の校正実験の結果が、一般の試料等による基準校正曲線から、礫の粒径に応じてしだいにかたよりも有する傾向が見られる。この傾向は単なる礫の混入による測定精度の低下によるものではなく、特にこれらの実験が礫の混入率のきわめて高い供試体で行われたことによる以下の理由によるものと考えられる。

- 基準となるモールド供試体の密度算定に必要な供試体上面の高さの測定の誤差
- 供試体に線源を垂直に打込めないことによる透過距離の変動
- 計器底面の供試体上面への設置不良による透過距離の変動

一方、礫の混入率が30%の供試体で行われたNo.3の実験においては、礫の粒径や混入率にかかわらず、密度測定値のバラツキは3%以内に収まっており、打込深さについてもこの傾向は変わらない。すなわち、ガンマ線透過距離が礫の粒径に比べて十分大きい状態では礫の混入による特殊なかたよりは見られず、特に校正曲線を修正して使用する必要性は認められない。

したがって、線源を垂直に打込むこと、計器を測定面に密着させ水平に設置すること、等測定に関する幾何学的条件を満足する計器の設置が可能であればガンマ線の透過特性等による影響は殆んど考えられず、基本的にR I計器の使用は可能と考えられる。

(2) 測定精度の低下

一般に礫混り土をR I計器で測定する場合、礫の粒径、混入度、線源打込深さ、計器設置方向、測定時間等が測定値のバラツキに影響を及ぼすと考えられる。

1) 礫の粒径による影響：例えば実験No.2によれば20mm以下の供試体の場合には、打込深さにかかわらずバラツキは大体等しい値をとるが、粒径が大きくなるに従って、打込深さの小

さい測定値のバラツキが増大し、50mm以上になるとこの傾向が顕著である。すなわち粒径の大きい場合は打込深さにより精度が変わってくる。これは供試体の有効容積とR I計器の有感容積の関係によるものである。礫の最大粒径が打込深さの1/5程度であれば通常の土の測定と同程度の精度がえられるが粒径が大きくなるにしたがい打込深さを大きくしなければ同等の精度は得られない。

ii) 線源打込深さによる影響：打込深さはR I計器の有感容積を最も効果的に増大させるものであり、実験No.1においてその影響が見られないのは、ガンマ線のカウント数の減少だけでなく、線源打込や計器設置の不備による誤差が支配的であったため打込深さの影響が現われなかったことによるものと考えられる。更に打込深さを大きくすることにより表面の不整形や計器設置不良等による誤差を小さくすることが有感容積の増大とともに精度を向上させると思われる。

iii) 計器設置方向：1測定点において計測器を回転させ多方向での測定を行うことが測定精度を向上させることは特にNo.3の実験結果より明白である。これはR I計器の有感容積を礫混り土の有効容積に対して十分大きく取れない場合に有感容積を増大させ礫の分布による密度の不均一を平均化するのに効果的と思われる。しかしながら計器を回すことにより供試体内部の乱れや計器設置不良（底面の浮上り）等を引起す恐れがあるため、打込深さが礫の径に対して十分大きく1点1方向での測定値が妥当な精度を有する場合には、1点1方向による多点測定が好ましい。なお、No.1およびNo.2の結果から、計器設置方向の影響が十分見られないのは前述の様に計器設置の不備による誤差が支配的であったためと考えられる。

iv) 測定時間：礫まじり土のように密度のバラツキの大きいものに対しては、長時間をかけても効果は上がらない。一回の測定によって10,000カウント以上（この実験の場合は10秒計測で13,000カウント）あれば十分である。しかしながら、弱線源の使用により十分なカウント数が得られない場合にはラジオアイソトープのガンマ崩壊の統計的揺動の影響が増すことになるため測定時間もしくは1測点における測定回数を検討する必要がある。

(3) 測定方法の決定

礫の粒径や混入率に応じて妥当な精度で測定しうるR I計器とその測定法の選択が盛土施工管理の最初に問題となる事項である。ここではこの妥当な精度を2通り設定してその選択の試みを行う。

まず、通常の土質の供試体（粒径20mm以下）におけるR I測定値と同程度の精度で測定しうる計器設置方向を実験的に求める方法である。すなわち、No.3の実験において1測点における計器設置方向を8方向として計測した結果から、1測点における妥当な計器設置方向について検討を行う。測定値の分布が正規分布の場合、その平均値の95%信頼限界は、標準偏差 σ 、測定データ数 n を用いて

$$\bar{x} - 1.96 \sigma / \sqrt{n} \leq x \leq \bar{x} + 1.96 \sigma / \sqrt{n}$$

で示される。ここで、今回の実験における真砂土のみの供試体（粒径20mm以下）を打込深さ40cmで1分間計測するときの精度を基準とし、礫混り土において同程度の精度を得るに必要な計器設置方向を検討する。すなわち、前式の95%信頼区間を一定とする測点数 n の値は $\sigma / \sqrt{n}$ を一定とする $\sqrt{n}$ により与えられ、20mm試料の標準偏差 σ_{20} を基準にすると必要測定方向は以下の式で

表わされる。

$$n = (\sigma_i / \sigma_{20})^2$$

ここで、本実験における各粒径毎の標準偏差 σ_{20} 、 σ_{60} 、 σ_{100} はそれぞれ 0.015、0.029 および 0.031 であるから、 $n_{60} = 3.7$ 、 $n_{100} = 4.3$ を得る。すなわち 20mm 供試体で 1 点 1 方向の測定と同程度の精度を得るために、最大粒径 60mm、混入率 30% の供試体では 1 点 4 方向、最大粒径 100mm、混入率 30% の供試体では 1 点 5 方向の計器設置による測定が必要であると言える。

もう 1 つは種々の条件のもとでの測定値のバラツキを定量的に求めておき、その 95% もしくは 99.7% 信頼巾 (2σ or 3σ) から、品質管理上望ましい測定精度に応じて選択する方法である。

測定値のバラツキに影響する要因としては

- 礫の粒径分布、混入率、密度、土の密度
- RI 計器の打込深さ、計器設置方向、測点数

などがあげられるが、これらの組み合わせによる測定精度への影響を標準偏差の形で求めておけばこの方法による選択が可能である。しかしながら、これらの要因の組み合わせについて室内実験を行うことは莫大な費用と労力を要する。したがってこれら要因間の関係に基づく無次元化による組み合わせ数の整理とともに、後述のモンテカルロシミュレーション等の理論的アプローチの必要があると考えられる。

(4) 礫混り土室内実験の問題点

RI 計器による室内モールド実験において供試体密度の均質性を確保することは最も重要な問題の 1 つである。これは礫混り土供試体の場合、密度分布の大勢を支配する礫の分布の一様性をどのように再現するかにある。このため、本実験においては、モールドに投入する試料を層別に区分し、所要の礫を配分して供試体の作成を行い、特に No. 3 の実験においては十字形の仕切枠を設けて平面的な均一性をも確保しようとした。この結果前節において述べた様に一応の一様性は保たれたと考えられるが、例えば、No. 3 の実験において、打込深さ 20cm の測定データのバラツキが 30cm および 40cm の打込深さのそれに比べて小さく出ているのは層方向の礫の分布の一様性が保たれず、表面付近に礫の混入が少なかったことによるものと考えられる。

また、礫の混入の多い場合に、線源棒の垂直な打込や計器設置面の整形の困難により良好な測定ができなかったきらいがあり、礫混り土の現場における実用性についても同様の問題があると考えられる。

第3章 現場実験

3・1. 実験概要

R I 測定器が礫まじり土の現場で妥当な精度で密度、含水比の測定が可能か、又実用上の問題がないかの検討を行なうため水置換法、砂置換法等の現場の施工管理法との比較を行なうとともに礫を含んだ盛土の密度、水分量の測定値から締固め度を判定しその強度、透水性等の推定が可能かどうかを検討するものである。

実験実施の対象としては、道路土工現場の掘削工事部とフィルタイプダム盛立現場のコアゾーンをそれぞれ選定した。いずれの場合にも、表土を掘削してかつその表面を平滑化して、試験面の土質の平面的および深さ方向の均質化を計った。

測定は、この試験面を分割した各測定部分においてR I 計器とその現場の施工管理方式による測定結果を対比する形で行なった。主たる測定項目は各測定部分の湿潤密度と含水比であるが、その他実験Ⅰにおいては、地山にくり返し測定点（P点）を設定して試験面土質の均質性を検定し実験Ⅱにおいては、礫の影響を把握する目的で最大粒径と混入率を同時に測定した。

実験結果は①現場の湿潤密度および含水比の均質性の検定、②R I 計器の礫混り土現場での使用可能性の検討、③R I 計器とその他の方法の測定精度の比較、の項目について検討を行ない礫混り土現場でのR I 計器の使用と締固め度の判定に関する考察を行なった。

3・2. 現場実験データ（その1）

期 日 昭和46年6月30日

場 所 千葉県新東京国際空港 空港線の建設現場

使用機器 SX-1 型表面型水分・密度計

(1) 試験面概要

試験面は千葉県新東京国際空港線の地山面であり、いくぶん傾斜しているのでブルドーザーにより表土（0.5 m）及び地山を整地して、試験面をだいたい水平にした。なお現地は基礎地盤は砂層であり、地表面から砂層まで約3.5 mの深さである。試験面全体は縦（傾斜面方向）4.8 m×横6 mであり測点箇所60点に分割するため縦に10、横に6分割し、そのうちバラツキが少ないと見られる32点を選んで選択測定点（selected area）として解析検討の対象とした。試験面概要を図-3.1に示す。

(2) 実験方法

前述の試験面において密度・水分量をR I計器及び砂置換法により測定し、その精密度、かたより等を検討するものである。測定方法はR I法と砂置換法でありその詳細は以下の通りである。

・ R I 法：60点測定：1点当り1分間×4回

くり返し計測点（P点）：現場の基準点

繰り返し測定回数19回

（1分測定）

・ 砂置換法（JIS法）

JIS A1214の器具2台

JIS A1203（含水比）

測定はR I計器の場合、標準体計測（1分間5回）→測点1（1分間1回）→P点（1分間1回）→標準体計測→測点2→P点→標準体計測――→測点n→P点――→測点60→標準体計測、の順序に従って行なった。又従来の方法ではJIS A1214により砂置換法を行ない、JIS A1203により含水比の試験を行なった。R I計器の密度および水分測定に用いた校正曲線式を以下に示す。

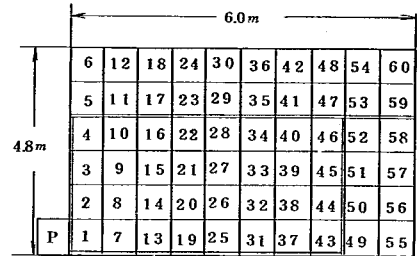
密度計 $\log y = -0.545x + 0.895$

水分計 $y = 1.005x + 0.401$

x ：密度もしくは水分量

y ：計数率比

(a) 平面図



(b) 断面図

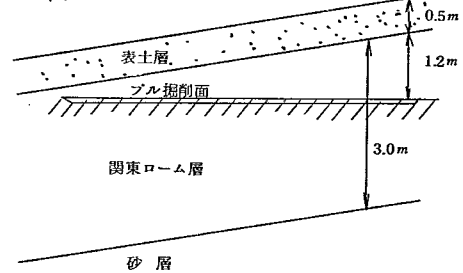
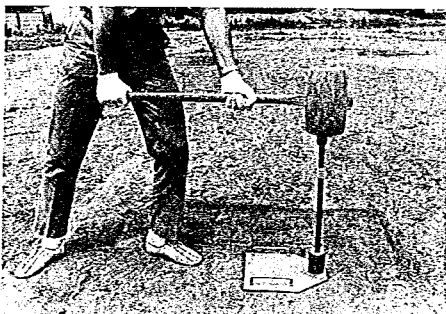
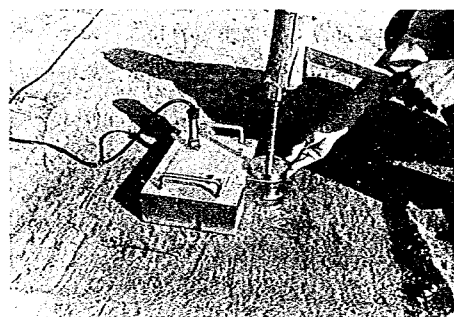


図-3.1 試験面概要



(a) 測定面整形



(b) R I 計器設置

写真-3.1 R I 現場測定

(3) 密度水分量測定結果

RI法および砂置換法(JIS法)による密度水分量の測定値を以下の表-3.1~3.2に示す。

表-3.1は試験面横のくり返し測定点(P点)における湿潤密度と水分量の測定結果および乾燥密度と含水比の算定値を示したものである。この結果よりガンマ線発生機の統計的な揺動によるRI法の測定精度の推定が可能であるが、密度測定の精度がきわめて高いことが判かる。

表-3.2は試験面上の全測定点におけるRI法および砂置換法(JIS法)による測定結果を示したものである。RI法については湿潤密度と水分量の測定値および乾燥密度と含水比の算定値をまたJIS法については湿潤密度と含水比の測定値および乾燥密度の算定値を各測定点毎にそれぞれ記した。

図-3.2(a)(b)は表-3.2の湿潤密度および含水比の測定値の平面的な変動を図式化したものである。また、図-3.3(a)(b)はRI法とJIS法の湿潤密度、含水比の分布を比較したものである。同様に、図-3.4(a)(b)は、比較的均質な領域(selected area)における測定値の比較を行なったものである。これらの図より含水比の測定はRI法、JIS法ともに大差なく同程度の精度を有すると考えられるが、湿潤密度の測定においては両者の差が明白である。

表-3.3は試験面全体および均質測定部分(selected area)での湿潤密度と含水比の測定値の一元分散分析表である。これは、試験面全体の密度含水比が同一の母集団からなる標本データと言えるかどうかの検定の目的で行なったものである。この結果、試験面全体についてはRI法JIS法ともに有意差が出ており、土自身の密度、含水比のバラツキが測定バラツキを上回る傾向を示しているが、均質測定部分については有意差があまり認められず、同一の母集団に属すると見なしうる。

表-3.4は、RI法とJIS法および地山のくり返し測定点の湿潤密度、含水比、乾燥密度のバラツキを95%信頼区間で示したもので、同時に本実験における測定データの統計的解析結果をまとめたものである。

表-3.1 くり返し測定点におけるRI測定値

測定回数	湿潤密度	水分量	乾燥密度	含水比
1	1.144 g/cm ³	0.554 g/cm ³	0.590 g/cm ³	93.90%
2	1.141	0.526	0.616	85.34
3	1.142	0.517	0.626	82.59
4	1.142	0.520	0.622	83.69
5	1.146	0.504	0.642	78.51
6	1.142	0.526	0.616	85.28
7	1.140	0.542	0.597	90.82
8	1.146	0.536	0.609	87.99
9	1.140	0.531	0.610	87.08
10	1.150	0.530	0.620	85.49
11	1.143	0.529	0.614	86.18
12	1.127	0.548	0.580	94.49
13	1.110	0.544	0.565	96.23
14	1.130	0.541	0.589	91.74
15	1.138	0.531	0.607	87.45
16	1.143	0.534	0.608	87.87
17	1.141	0.529	0.612	86.48
18	1.139	0.546	0.593	92.03
19	1.133	0.565	0.568	99.60
平均値	1.139	0.534	0.604	88.57
√不偏分散	0.0089	0.0140	0.0197	5.150
変動係数	0.784	2.630	3.260	5.810

表-3.2 試験面におけるR I 法および砂置換法による測定値

測 点 ナンバー	R I 法				砂 置 換 法		
	湿潤密度	含 水 量	含 水 比	乾 燥 密 度	湿潤密度	含 水 比	乾 燥 密 度
	g/cm^3	g/cm^3	%	g/cm^3	g/cm^3	%	g/cm^3
1	1.141	0.593	108.10	0.548	1.237	111.8	0.584
2	1.119	0.541	93.46	0.578	1.099	115.9	0.509
3	1.149	0.555	93.31	0.595	1.124	119.4	0.512
4	1.123	0.525	87.70	0.598	1.129	80.0	0.601
5	1.177	0.540	84.90	0.637	1.099	92.9	0.570
6	1.163	0.517	80.14	0.646	1.192	80.7	0.660
7	1.118	0.584	109.42	0.534	1.153	90.3	0.604
8	1.137	0.615	117.82	0.522	1.096	113.1	0.514
9	1.122	0.587	109.69	0.535	1.042	126.6	0.460
10	1.145	0.608	113.24	0.537	1.172	96.0	0.598
11	1.145	0.547	91.40	0.598	1.190	91.1	0.623
12	1.137	0.539	90.29	0.598	1.119	88.1	0.595
13	1.090	0.531	94.96	0.559	1.109	114.9	0.516
14	1.119	0.583	108.96	0.535	1.099	106.5	0.532
15	1.113	0.579	108.56	0.534	1.080	106.1	0.524
16	1.118	0.620	124.67	0.498	1.104	111.4	0.510
17	1.118	0.610	120.03	0.508	1.160	107.9	0.558
18	1.146	0.553	93.21	0.593	1.167	81.3	0.644
19	1.113	0.585	110.99	0.527	1.066	111.3	0.504
20	1.095	0.543	98.21	0.552	1.059	92.2	0.551
21	1.101	0.591	115.84	0.510	1.046	105.8	0.508
22	1.110	0.584	111.21	0.525	1.266	103.0	0.624
23	1.119	0.580	107.48	0.539	1.266	108.3	0.608
24	1.146	0.571	99.21	0.575	1.183	91.2	0.619
25	1.112	0.536	93.10	0.576	1.084	110.1	0.516
26	1.117	0.583	109.01	0.534	1.103	96.3	0.562
27	1.096	0.601	121.54	0.495	1.133	110.0	0.540
28	1.120	0.627	127.40	0.492	1.099	114.2	0.513
29	1.147	0.601	110.19	0.546	1.121	110.1	0.534
30	1.159	0.602	108.16	0.557	1.124	93.2	0.582
31	1.083	0.518	91.86	0.564	1.094	89.9	0.576
32	1.117	0.545	95.29	0.572	1.141	90.0	0.601
33	1.120	0.566	102.24	0.554	1.033	112.0	0.487
34	1.122	0.546	94.84	0.576	1.115	109.5	0.532
35	1.125	0.580	106.54	0.545	1.095	101.2	0.544
36	1.121	0.570	103.41	0.551	1.156	78.2	0.649

測 点 ナンバー	R I 法				砂 置 換 法		
	湿潤密度	含 水 量	含 水 比	乾 燥 密 度	湿潤密度	含 水 比	乾 燥 密 度
	g/cm^3	g/cm^3	%	g/cm^3	g/cm^3	%	g/cm^3
37	1.136	0.559	97.01	0.577	1.103	80.3	0.612
38	1.102	0.525	91.17	0.576	1.056	96.6	0.537
39	1.107	0.564	103.72	0.543	1.084	104.0	0.531
40	1.106	0.537	94.33	0.569	1.145	97.0	0.581
41	1.126	0.564	100.54	0.562	1.085	96.3	0.553
42	1.142	0.595	108.74	0.547	1.144	89.3	0.604
43	1.092	0.544	99.35	0.548	1.046	114.1	0.489
44	1.067	0.533	99.72	0.534	1.092	96.6	0.530
45	1.100	0.585	113.62	0.515	1.100	116.2	0.509
46	1.100	0.595	117.83	0.517	1.103	115.0	0.513
47	1.128	0.623	123.58	0.504	1.204	113.0	0.565
48	1.145	0.621	118.68	0.524	1.127	110.0	0.537
49	1.075	0.518	92.85	0.557	1.062	117.8	0.488
50	1.095	0.548	100.32	0.547	1.055	113.2	0.495
51	1.058	0.504	91.06	0.554	1.055	110.0	0.502
52	1.102	0.537	95.01	0.565	1.117	118.4	0.511
53	1.109	0.580	109.86	0.528	1.111	109.4	0.531
54	1.084	0.591	119.78	0.493	1.151	112.2	0.542
55	1.064	0.584	121.69	0.480	1.216	113.6	0.569
56	1.082	0.556	105.60	0.526	1.076	130.7	0.466
57	1.102	0.582	111.79	0.520	1.111	87.7	0.592
58	1.125	0.584	108.08	0.541	1.106	109.3	0.528
59	1.137	0.617	118.82	0.520	1.072	112.6	0.504
60	1.110	0.589	113.06	0.521	1.178	98.2	0.594

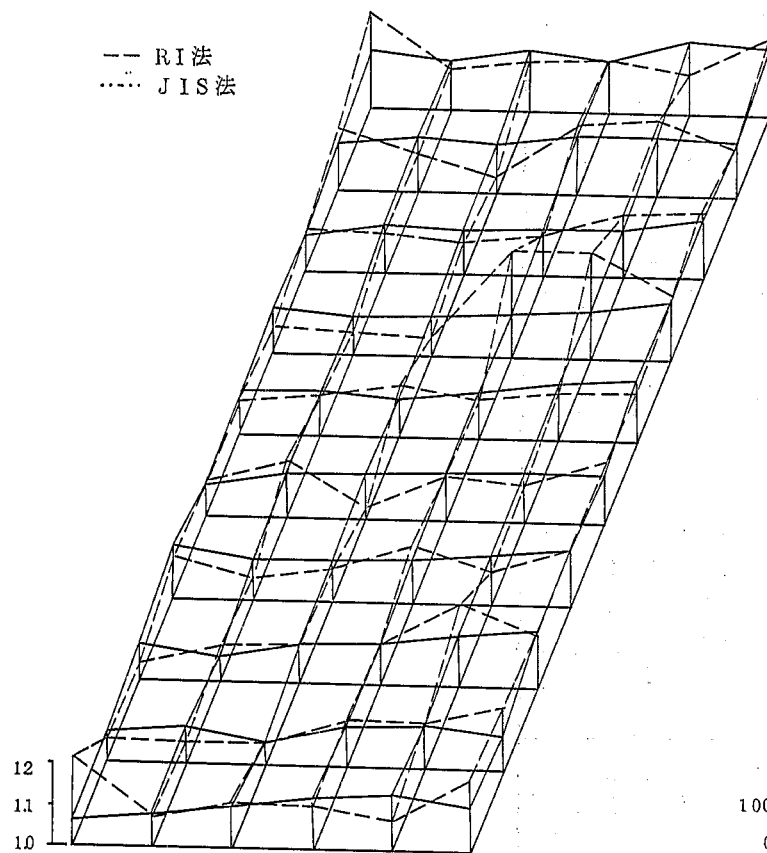


図-3.2(a) 各測定点の湿潤密度 r_t

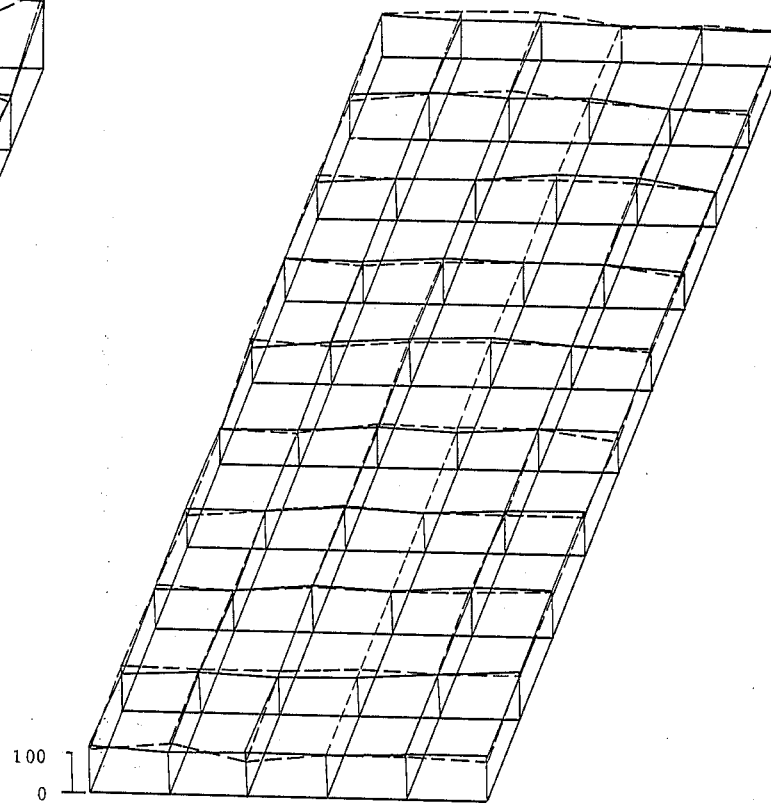


図-3.2(b) 各測定点の含水比

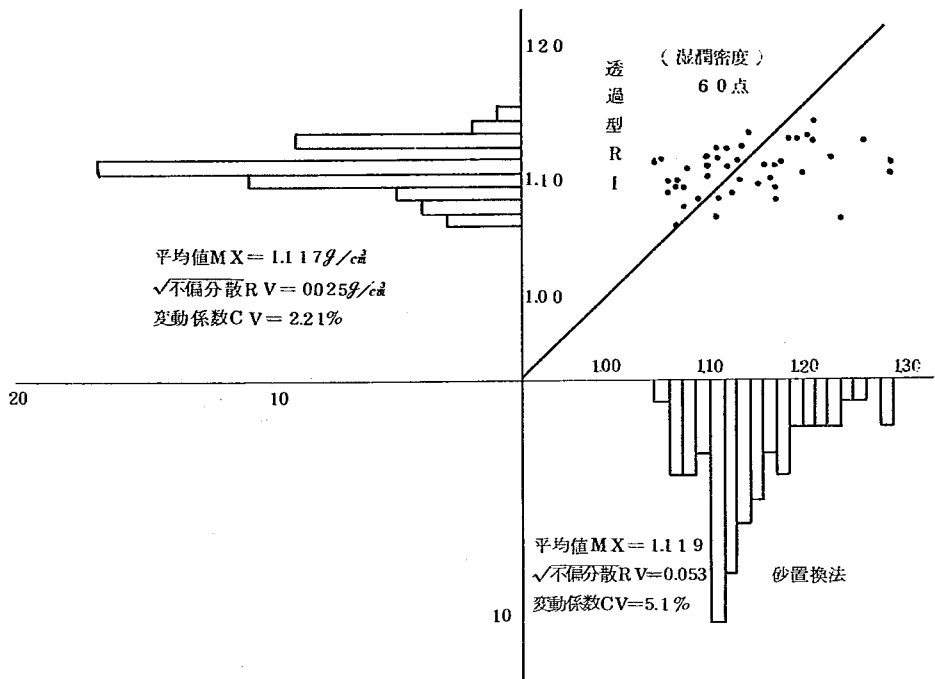


図-3.3(a) 試験面全体の測定点(60点)におけるRI法と砂置換法の比較

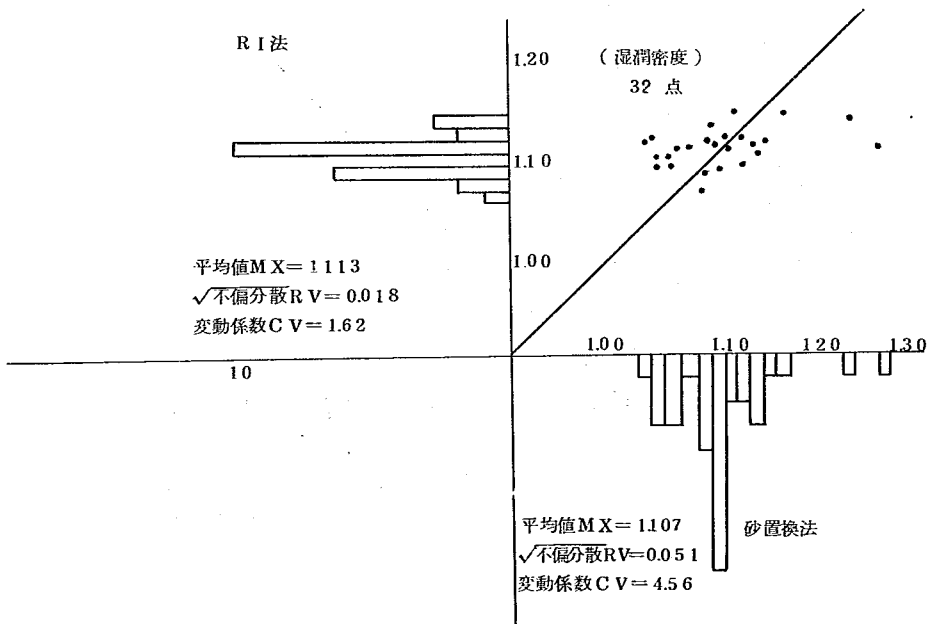


図-3.3(b) Selected area(32点)におけるRI法と砂置換法の比較

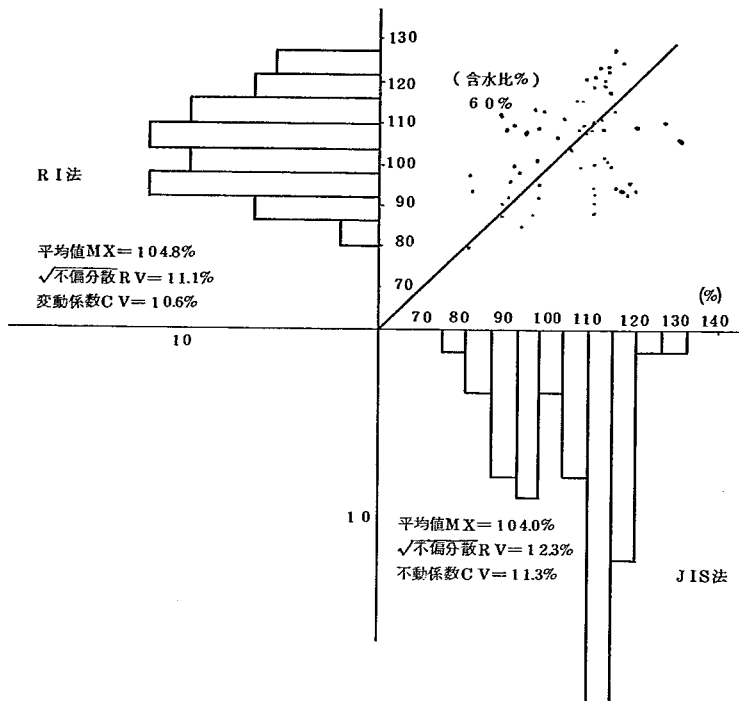


図-3.4(a) 試験面全体の測定点におけるRI法とJIS法の含水比の比較

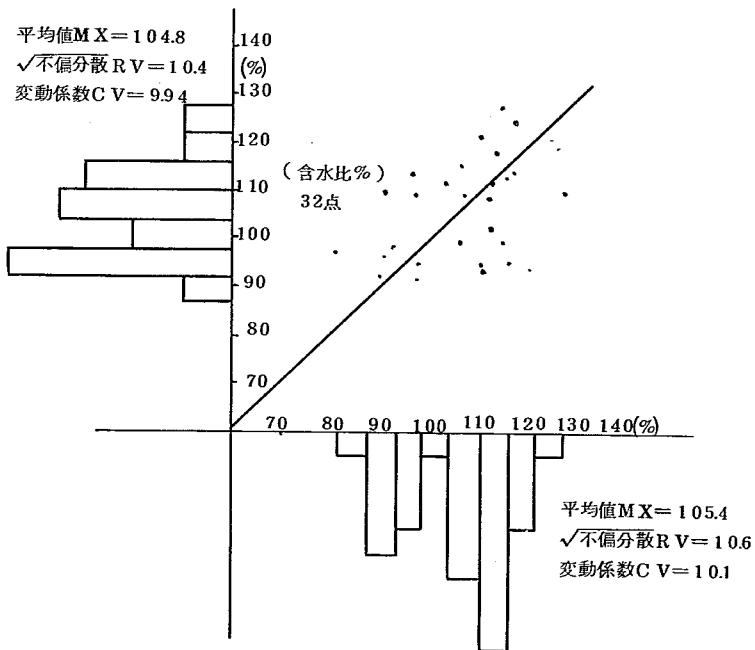
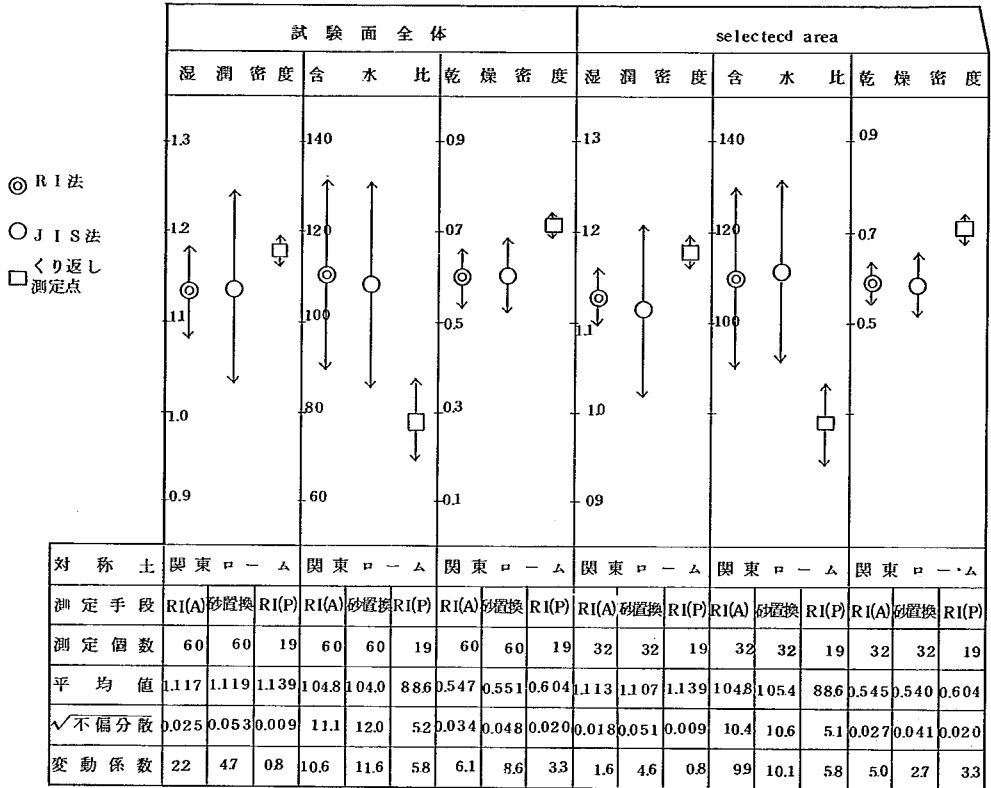


図-3.4(b) Selected areaにおけるRI法とJIS法の含水比の比較

表-3.4 各測定値の95%信頼区間



3・3 現場実験データ(その2)

期 日 昭和49年12月

場 所 山形県白川ダム

使用計器 SX-11B

(1) 試験面概要

フィルタイプダムコアゾーン上の10.5m×12mの範囲を縦横3等分に区切り、9PARTについてRI計測と水置換法による計測が行なわれた。(図-3.5参照)

なお、試験面整形に当っては、凍上した表土を約30cmブルドーザにより切削し、表面を水平にならし、密度含水比の深さ方向の分布が均一になる様に注意した。

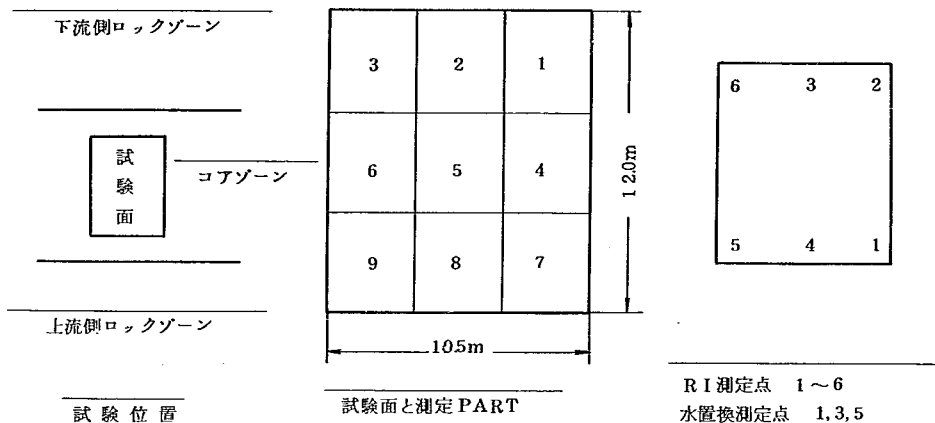


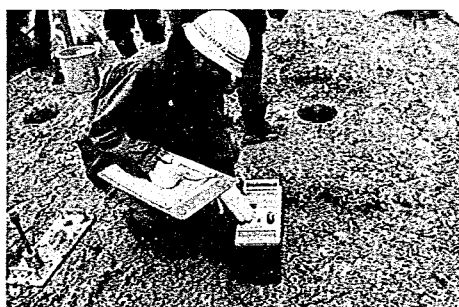
図-3.5 試験面概要

(2) 実験方法

フィルタイプダムのコア部の施工管理のための水置換法による密度・含水量測定をRI計器による測定と比較した。RI計器による測定は密度・含水量を1PART当り6点、1点につき1分間を4回行ない、水置換法による測定は密度、含水比、礫混入率、最大粒径(D_{max})等を1PARTにつき3点、RI測定と同じ点上で行なった。



(a) 測定面整形



(b) 密度・水分測定

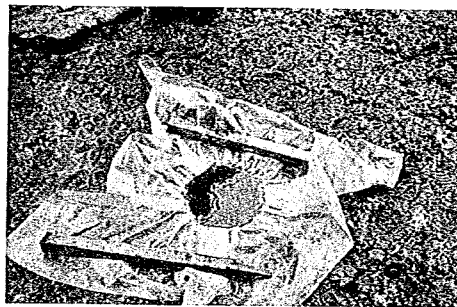
写真-3.2 RI測定



(a) 孔 掘 削



(b) 水 注 入



(c) 水 注 入 完 了

写真-3.3 水 置 換 法

(3) 測定結果

R I 法および水置換法による湿潤密度，含水比の測定値および乾燥密度の算定値等を表-3.5および3.6に示す。

表-3.5は，各測定Partの各測定点における湿潤密度 γ_t ，含水比 w ，礫の混入率，礫の最大粒径等の実測データおよび乾燥密度 γ_{dRS} ，礫分を補正した乾燥密度 γ_{dS} の算定値を記してある。礫分を補正した乾燥密度とは礫中に水分は殆んど含まれないと仮定した以下の式による計算結果である。

$$\gamma_{dS} = \frac{1 - P - w / (1 + w)}{1 - (\gamma_t / \gamma_R) P} \cdot \gamma_t$$

ここに γ_t : 湿潤密度， w : 含水比

γ_R : 礫の密度， P : 礫の混入率

表-3.6は各測定Part毎の湿潤密度，含水比，乾燥密度の平均値と標準偏差を示したものである。この表よりR I 法による測定値と水置換法による測定値の間に一定程度のかたよりがあること，そ

のバラツキは大差不いこと等の傾向が見られる。

図-3.6はR I法と水置換法による測定値の分布を比較する目的で作成した湿潤密度、含水比および乾燥密度の全データのヒストグラムである。この図からも前述の表-3.6と同様の傾向を読み取ることができる。

表3-5 R I 法・水置換法による測定データ

測定部	測点	最大粒径	隙の混入率	湿潤密度		含水比		乾燥密度		隙補正乾燥密度	
				R I 法	水置換法	R I 法	水置換法	R I 法	水置換法	R I 法	水置換法
1	1	63.5	22.1	2.24	2.33	9.5	8.6	2.05	2.15	1.91	2.03
	2			2.25		11.0		2.03			
	3	38.1	11.3	2.18	2.28	11.1	11.2	1.96	2.04	1.88	1.98
	4			2.32		10.4		2.10			
	5	50.8	16.6	2.16	2.20	10.9	9.9	1.95	2.01	1.85	1.90
	6			2.30		*16.2		1.98			
2	1	63.5	17.1	2.24	2.20	10.4	11.3	2.03	1.98	1.93	1.86
	2			2.28		8.9		2.09			
	3	50.8	11.6	2.22	2.26	10.8	11.9	2.00	2.02	1.94	1.94
	4			2.24		10.8		2.02			
	5	50.8	17.3	2.11	2.24	11.3	9.9	1.90	2.04	1.77	1.95
	6			2.32		10.3		2.10			
3	1	101.6	36.1	2.27	2.30	11.6	10.3	2.03	2.09	1.79	1.85
	2			2.27		9.2		2.08			
	3	63.5	26.9	2.35	2.32	10.5	10.5	2.13	2.10	1.98	1.93
	4			2.30		10.3		2.08			
	5	63.5	15.1	2.29	2.24	9.9	9.5	2.08	2.05	1.99	1.97
	6			2.25		10.2		2.04			
4	1	50.8	13.4	2.22	2.31	12.5	10.3	1.97	2.10	1.88	2.05
	2			2.14		11.4		1.92			
	3	63.5	20.5	2.18	2.18	11.2	9.2	1.96	1.99	1.82	1.88
	4			2.24		11.5		2.01			
	5	63.5	19.4	2.19	2.39	11.6	9.5	1.96	2.18	1.84	2.07
	6			2.21		11.4		1.98			
5	1	101.6	29.5	2.22	2.45	11.1	11.0	2.00	2.21	1.80	2.06
	2			2.12		11.8		1.90			
	3	63.5	23.6	2.17	2.21	10.1	11.5	1.97	1.98	1.83	1.80
	4			2.12		11.0		1.91			
	5	63.5	31.6	2.24	2.36	10.3	9.5	2.03	2.16	1.81	1.94
	6			2.21		8.8		2.03			
6	1	63.5	21.0	2.15	2.12	10.3	9.5	1.95	1.94	1.81	1.78
	2			2.30		10.7		2.08			
	3	101.6	32.0	2.17	2.28	9.3	8.7	1.98	2.10	1.77	1.93
	4			2.28		10.3		2.07			
	5	101.6	48.9	2.18	2.25	10.5	9.8	1.97	2.05	1.53	1.62
	6			2.29		10.4		2.07			
7	1	25.4	11.3	2.20	2.32	10.5	9.6	1.99	2.11	1.94	2.10
	2			2.14		10.5		1.94			
	3	63.5	25.8	2.14	2.36	10.5	10.4	2.10	2.14	1.76	2.03
	4			2.22		10.5		2.01			
	5	50.8	17.6	2.40	2.24	10.4	10.2	2.17	2.03	2.09	1.95
	6			2.28		10.5		2.06			
8	1	101.6	36.5	2.15	2.22	12.4	10.9	1.91	2.00	1.62	1.74
	2			2.26		11.7		2.02			
	3	50.8	9.3	2.33	2.00	11.5	10.9	2.09	1.80	2.03	1.74
	4			2.14		11.1		1.93			
	5	50.8	18.1	2.18	2.23	12.4	11.1	1.94	2.01	1.82	1.89
	6			2.00		11.2		1.80			
9	1	101.6	38.1	2.14	2.33	12.1	10.1	1.91	2.11	1.58	1.86
	2			2.14		12.0		1.91			
	3	63.5	20.0	2.07	2.36	12.1	10.2	1.85	2.14	1.71	2.05
	4			2.05		11.6		1.84			
	5	63.5	16.9	2.08	2.11	12.4	10.3	1.85	1.91	1.75	1.81
	6			2.12		10.6		1.92			

表 3-6 各測定PART毎のRI法・水置換法の比較 上段が平均値
下段が標準偏差

測定PART	最大粒径	隙混入率	湿潤密度		含水比		乾燥密度	
			RI法	水置換法	RI法	JIS法	RI法	水置換法
1	63.5	16.7	2.24 0.06	2.27 0.06	10.6 0.7	9.9 1.3	2.01 0.06	2.06 0.07
2	63.5	15.3	2.24 0.07	2.24 0.03	10.4 0.8	11.0 1.0	2.02 0.07	2.01 0.03
3	101.6	26.0	2.29 0.03	2.29 0.04	10.3 0.8	10.1 0.5	2.07 0.04	2.08 0.03
4	63.5	17.8	2.20 0.04	2.29 0.11	11.6 0.5	9.7 0.6	1.97 0.03	2.09 0.09
5	101.6	28.2	2.18 0.05	2.34 0.12	10.5 1.0	10.7 1.0	1.97 0.06	2.12 0.12
6	101.6	34.0	2.23 0.07	2.22 0.08	10.3 0.5	9.3 0.6	2.02 0.06	2.03 0.08
7	63.5	18.2	2.23 0.10	2.30 0.06	10.5 0.0	10.1 0.4	2.05 0.08	2.09 0.06
8	101.6	21.3	2.18 0.11	2.15 0.13	11.7 0.6	10.9 0.1	1.95 0.10	1.94 1.12
9	101.6	25.0	2.10 0.04	2.26 0.14	11.8 0.6	10.2 0.1	1.88 0.04	2.05 0.13

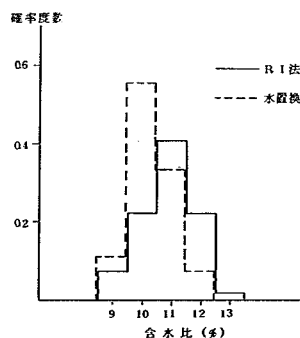
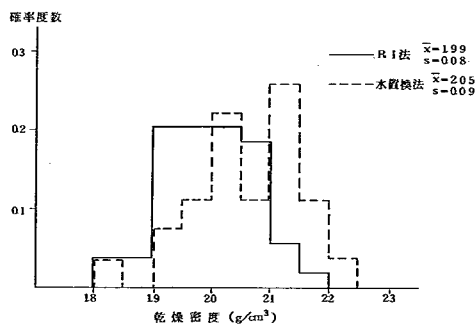
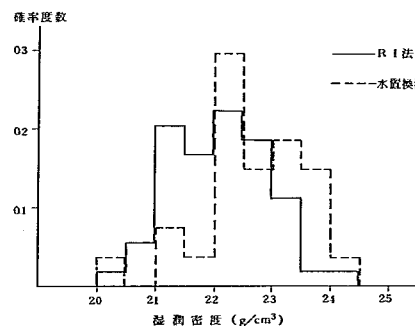


図-3.6 RI法と水置換法の分布の比較

3・4 考 察

(1) 試験面土質の均質性

現場実験データのバラツキは大まかに言って測定方法によるものと試験面土質の不均一性によるものとに区別される。この実験は、R I 法とその他の方法の測定値を比較するものであるから試験面の土質、締固め度、礫の混入度、水分量等による測定値のバラツキを把握しておかねばならない。

㍷1の実験では、くり返し測定点を設けるとともに、試験面測定データの分散分析を行なって試験面自身の変動の推定を試みた。その結果、試験面全体の測定データには明らかに有意差があること、そのうち比較的均質と見られる選択測定面 (selected area) の測定データには R I 法による密度測定値のみに有意差があること、等が判明した。したがって、試験面全体のデータにおいては測定位置による変動が測定法による誤差を上回っていると考えられ、測定法比較のデータとしては選択測定面のもののみを用いるのが妥当と思われる。

礫の混入の多い㍷2の実験データに関しても測定位置による密度、含水比の各測定値の変動が見られた。これらの変動は礫の混入による影響がかなりの部分を占めるものと思われ、混入の多い部分で湿潤密度が高い傾向がやや見られた。しかしながら、礫の混入度測定位置と R I 測定位置が必ずしも一致していないこと、礫の混入度の測定ロットが十分な大きさの容積を持たなかったこと等の理由で、湿潤密度と礫混入度との相関関係を求めることはできなかった。

(2) 測定データの比較

密度測定データのバラツキについては、㍷1、㍷2の実験結果によれば、いずれも R I 法の分布巾が砂置換もしくは水置換法に比して小さくなっている。特に、㍷1の実験結果において地山のくり返し測定の結果を用いて試験面の土質特性による変動を差し引くと R I 法の精度が砂置換法に比べて、かなり高いと言うことができる。これは、これまで行なわれて来た一般の土質における数多くの比較実験の結果と一致している。

一方、含水比の測定データのバラツキに関しては、殆んど同程度の分布巾を有しており、測定精度の面からの優劣を判定するには到らなかった。

次に㍷2の実験結果において、R I 法と水置換法による現場湿潤密度の計測値には多少の偏差がみられる。これは次の理由によるものと考えられる。すなわち、R I 計器は地中に打込まれた線源から出る放射線が土の粒子及び水分によりどれだけ吸収・散乱させられるかを一定距離はなれた地上の計数管で計測するものであるから、計測地面の整形不良や計器の傾き等の計測上の不備により放射線の地中透過距離が短くなり計測値が低めに出る結果となる。

一方水置換法においては掘削孔の周辺土圧による変形、ビニールの孔周辺への密着不良、注入水面の吃水の判定等に問題を残し、その値は一般的にかなり大きく出ていると考えられる。これらの原因が重なり、この様な偏差を生じたと考えられる。この様な偏差は、実験㍷1の砂置換法と R I 法との間にも見られるがその値は 0.1 に満たないものである。

しかしながら、これら偏差の問題は測定方法の検討により解決可能であり品質管理の上では現場盛土試験において双方を比較検討し、その相関を求めておけば実用上問題は無いと考えられる。

(3) 礫混り土の締固め度判定について

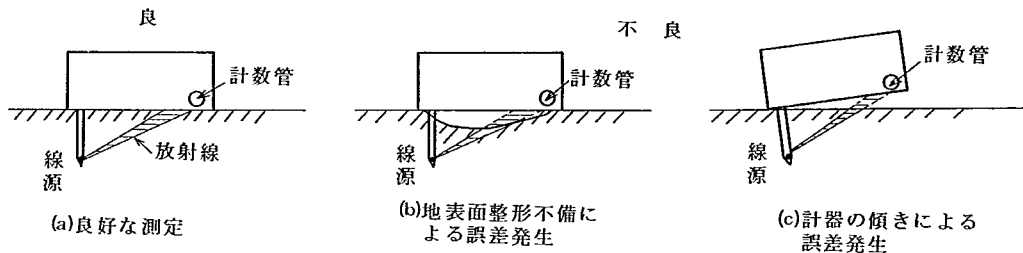


図-3.7 RI測定法の適否

今回、特に462の現場実験データにおいて、かなりの礫の混入が見られ、そのうち礫の混入度の高い部分に湿潤密度の上昇の傾向が見られた。通常盛土等の品質管理において密度・含水比を測定するのは乾燥密度を求めて土の締固め度＝土の品質を判定することが目的であり、この様な礫の混入による湿潤密度の上昇は土の品質の適正な評価を阻害するものであり、何らかの対策を行なう必要があると思われる。

通常密度管理と言われるものは、突固め試験等の結果得られた最大乾燥密度に基づいて締固め基準を設定し、現場測定の結果算出された乾燥密度によりその締固め度を判定するものであるが、礫混り土にこの密度管理方式を適用する場合、基本的に次の2つの方法が考えられる。

- ・ 礫を除去した試料で突固め試験を行なって締固め基準を設定しておき、現場の乾燥密度からも礫の混入量を補正する。
- ・ 礫を含んだ試料で締め固め基準を設定し、現場の乾燥密度をそのまま用いる。

施工管理を実際実施するうえでは、測定および算定手順の簡略な後者の方がより好ましいと考えられる。しかしながら①現場の礫混入度をモールド容器内に再現可能かどうか、②大径の礫を含む場合のモールドの適正な容積はいくらか、③大径礫を含む場合に十分な突固めが可能かどうか等の問題点を残すとともに、礫混入による変動を補うため、突固め試験および現場測定の回数を増す必要がある。

一方、前者の礫分を補正する方法では、各測定点の礫の混入量をどの様にして把握するかが問題である。すなわち、各点毎に礫の混入率を測定しうる試料を採取しては、RI計器の有する非破壊性、簡便性、迅速性等の特色をそこなう結果となる。

第4章 モンテカルロシミュレーションによる測定精度の検定

4.1 目的

施工品質の管理において、実用上の所要の精度を得る計測器と計測法の決定が重要な問題であることは言うまでもない。

特に盛土の締固め度をその乾燥密度により推定する現在の密度管理方式においては、礫の混入度、分布状況が湿潤密度や含水比の測定値に与える影響はきわめて大きい。このため測定対象を十分代表しうるロットの大きさ（有効容積）と、計測機の一度に測定しうる範囲（有感容積）を十分比較検討し、妥当な有感容積を有する測定方法を決定しなければならない。R I密度、水分計においても礫まじり土管理におけるこの問題は重要であり、礫の混入度、粒径等に応じて適切な有感容積をとり得る測定方法（打込深、方向、回数）を検討する必要にせまられている。しかしながらこれをあらゆる場合に応じて実験的に検討することは多大の費用、労力、時間を要するため、何らかの理論的アプローチが必要である。

本システムはR I密度、水分計を用いて、ある土中の密度、水分量を測定する過程をモンテカルロ法によりシミュレートし、土中に含まれる礫の混入度、粒径がR I計器の密度、水分量の測定値に与える影響を推定し、礫の混入度、粒径等に適した測定方法（打込深、方向、回数）の決定のための判定資料を与えるものである。

4.2 シミュレータのシステム仕様

本シミュレータは、地塊として円柱形のモデルを設定し粒度分布に基づく累積粒径曲線などの土質条件を与えて、乱数を発生させ、礫をランダムに分布させた供試体（モールド）を造る。そしてこのモールドにラジオアイソトープ密度計を打込んでガンマ（ γ ）線を発生させて、地表の γ 線計測器が感応するという以上のような想定を座標軸面に展開させ、モールド全体の密度（もしくは含水量）とその測定値の平均分散を出力し、そのモールドに対するその測定方法の適性を評価するものである。

したがって機能上以下の様なブロックからなる。

- (1) 入力
- (2) モールド作成
- (3) 測定方法設定
- (4) ガンマ線発生
- (5) 計測器によるガンマ線検出の有無の判定
- (6) ガンマ線透過跡の平均密度算定
- (7) 計測器別の測定密度算定
- (8) 出力

以下にそのアルゴリズムを示す。

(1) 入力

入力データは、(a)土質条件 (b)計測器諸元
(c)計測方法からなる。

(a) 土質条件

- i) 土の密度、礫の密度
- ii) 累積粒径曲線による礫の径、混入度
- iii) モールド深さ、径

(b) 計測器諸元

- i) 計測器サイズ
- ii) ガンマ線カウント数

(c) 計測方法

- i) 線源打込深さ
- ii) 測定方向（最下8方向）

(2) モールド作成

(a) モールドサイズ指定

(b) 土質条件設定

- i) 土、礫の密度を指定する。礫はすべて円礫と同じ密度とする。
- ii) 累積粒径曲線を設定し、礫の個数を算定する。

累積粒径曲線とは、地塊からサンプリングし、実験によりそれを粒径によって分類し、その粒径別にモールドに対する累積重量比を求め、曲線で表わしたものである（右図）。

本シミュレーションでは粒径と重量比を与えてこれをモデル化した。したがって領域 E_n 、直径 R_n から R_{n+1} の礫の個数 N_n は、

$$N_n = V_{MOLD} \times (W_{n+1} - W_n) / \frac{4}{3} \pi \times \{ (R_n/2 + R_{n+1}/2) / 2 \}^3$$

で表わされる。ここで、 V_{MOLD} ；モールド体積である。

iii) 礫の位置分布設定

礫の中心座標 (x_n, y_n, z_n) を乱数を発生させて決定する。ただし次の条件を満たさなければならない。

i) モールドの周囲と交わらぬ。

$$\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + r_n^2} \leq R_{MOLD}$$

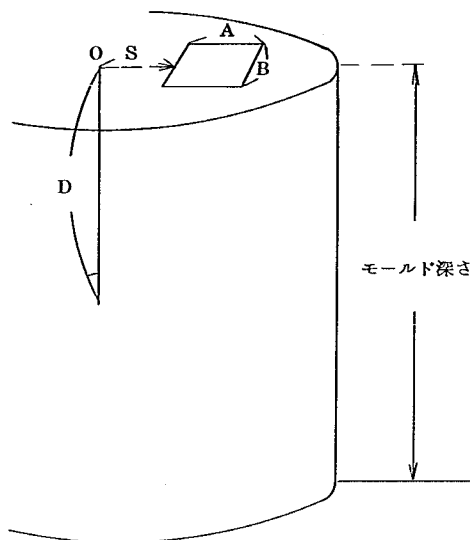


図 4.1 計測器サイズ

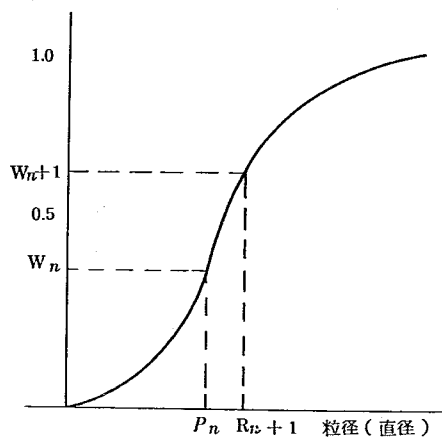


図 4.2 累積粒径曲線

- かつ $RMOLD \leq HMOLD - r_n$
 かつ $r_n + HMOLD - r_n$
 ロ) 中心部 (密度計打込部) に変わらぬ。

$$x_n^2 + y_n^2 \leq r_n$$

- ハ) 他の碟と交わらぬ。

$$\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2} \leq r_n + r_m$$

※ $m = 1 \sim n - 1$

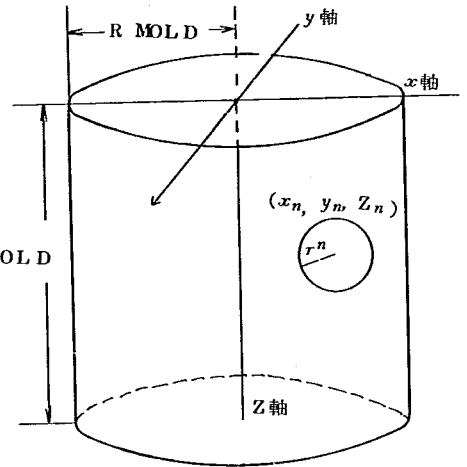


図 4.3 碟の分布設定

(3) 測定方法設定

- (a) 打込深さ指定
 (b) 計測器 8 器設け, サイズ指定 (8 器共同
 サイズ) (重複可能)

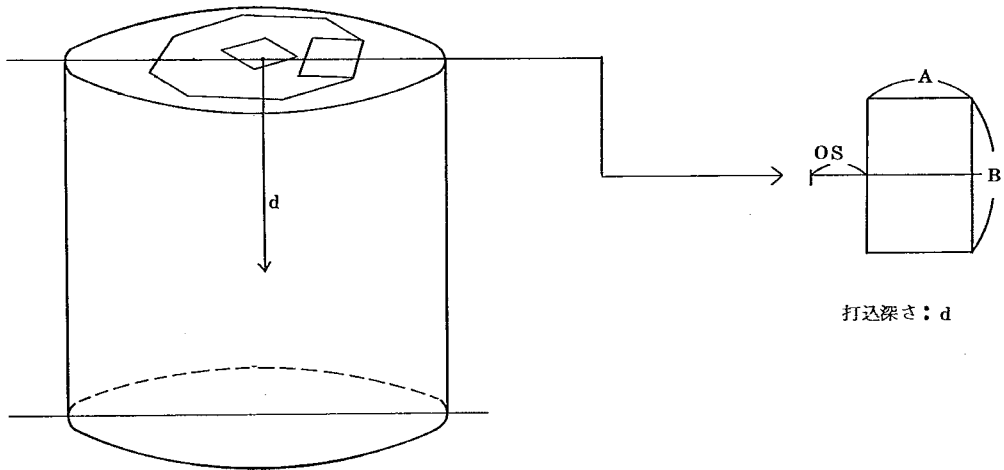


図 4.4 計器設置位置

(4) ガンマ線発生

- (a) ガンマ線カウント数指定
 (b) ガンマ線方向決定 (1 ; 6 , 4 図)

$$\theta_1 = \text{ARCTAN} (d/L)$$

$$\theta_2 = \text{ARCTAN} (d/S)$$

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \times \text{RAND} \quad \text{RAND; 一様乱数 } (0 \leq \text{RAND} \leq 1)$$

ガンマ線発生方向別の密度を均等にするため, φ の発生確率 E を,

$$E = \cos \theta / \cos \theta_1 \text{ で乱数制御する。}$$

$$\varphi = 2\pi \times \text{RAND}$$

この時、ガンマ線の地表面通過座標 (x, y) は

$$x = (d / \tan \theta) \times \cos \varphi$$

$$y = (d / \tan \theta) \times \sin \varphi$$

で表わされる。

(5) 計測器によるガンマ線検出の有無の判定

ガンマ線が計測器を通過する条件は、ガンマ線の地表面通過座標 (x, y) を用いて以下の式で表わされる。

$$-B/2 \leq y \leq B/2 \text{ の時}$$

$$S \leq x \leq S + A$$

計測器 1 計測

$$-(S + A) \leq y \leq -S$$

" 5 "

$$-B/2 \leq x \leq B/2 \text{ の時}$$

$$S \leq y \leq S + A$$

計測器 3 計測

$$-(S + A) \leq y \leq -S$$

" 7 "

$$x - \frac{\sqrt{2}}{2}B \leq y \leq x + \frac{\sqrt{2}}{2}B \text{ の時}$$

$$-x + \sqrt{2}S \leq y \leq -x + \sqrt{2}(S + A)$$

計測器 2 計測

$$-x - \sqrt{2}(S + A) \leq y \leq -x - \sqrt{2}S$$

計測器 6 計測

$$-x - \frac{\sqrt{2}}{2}B \leq y \leq -x + \frac{\sqrt{2}}{2}B \text{ の時}$$

$$x + \sqrt{2}S \leq y \leq x + \sqrt{2}(S + A)$$

$$x - \sqrt{2}(S + A) \leq y \leq x - \sqrt{2}S$$

(6) ガンマ線透過跡の平均密度算定

(a) ガンマ線透過跡の長さ算定

$$\cos \varphi \times \tan \theta = \alpha x, \quad \sin \varphi \times \tan \theta = \alpha y$$

とすると、ガンマ線の座標

$$P_1(0, 0, -\alpha), \quad P_2(\alpha x d, \alpha y d, 0)$$

であるから、

$$x = \alpha x(d + z)$$

$$y = \alpha y(d + z)$$

碟の方程式

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = r_n^2$$

$d + z = Z$ (Z 軸を移動) とおくと、

$$(\alpha_x Z - x_n)^2 + (\alpha_y Z - y_n)^2 + (Z - (Z_n + d))^2 - r_n^2 = 0$$

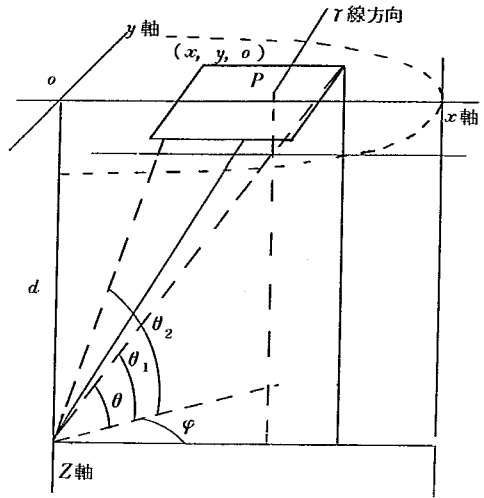


図 4.5 RI 測定モデル

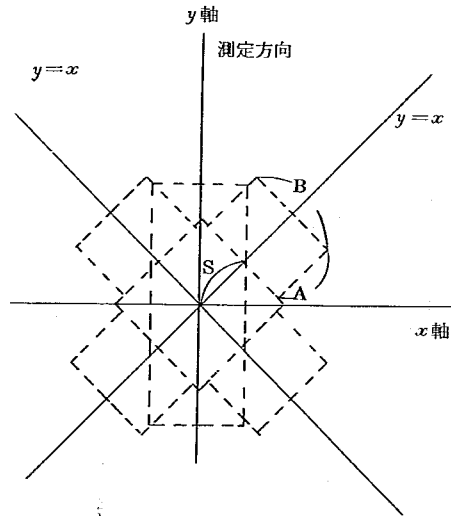


図 4.6 計測器のカウント条件

$$Z^2 (1 + d^2 y + \alpha^2 x) - 2Z (\alpha_x x_n + \alpha_y y_n + Z_n + d) + x_n^2 + y_n^2 + (Z_n + d)^2 - r_n^2 = 0$$

ここで

$$1 + \alpha^2 y + \alpha^2 x = AA, \quad \alpha_x \cdot x_n + \alpha_y \cdot y_n + Z_n + d = BB$$

$$x_n^2 + y_n^2 + (Z_n + d)^2 - r_n^2 = CC \quad \text{とおくと,}$$

$D = BB^2 - AA \times CC > 0$ のとき, Z は 2 実根をもち, この時の交点 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) とすると,

$$z_1 = (BB + \sqrt{D}) / AA, \quad z_2 = (BB - \sqrt{D}) / AA$$

$z_2 > 0$ の条件のもとで $(z_1 > z_2, 6.1 \text{ の iii) の (i) より}$

$$\begin{cases} x_1 = \alpha_x \cdot z_1 \\ y_1 = \alpha_y \cdot z_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x_2 = \alpha_x \cdot z_2 \\ y_2 = \alpha_y \cdot z_2 \end{cases}$$

したがって, n 番目のガンマ線透過跡の長さ Δdr

$$\Delta dr = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

全透過跡の長さ

$$dr = \sum \Delta dr$$

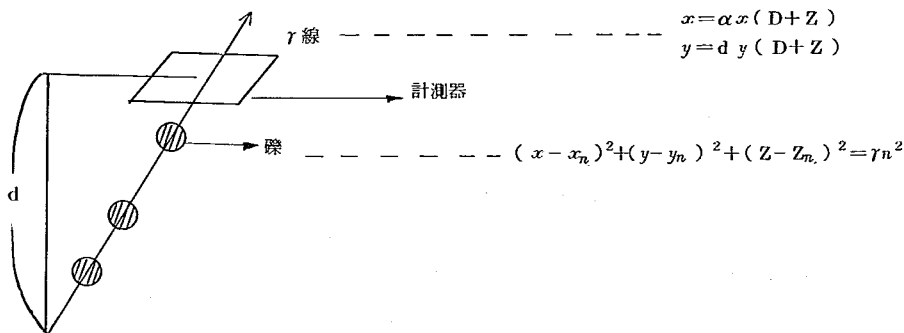


図 4.7 ガンマ線透過跡の平均密度算定

跡の密度: GR を指定

土の密度: GS を指定

ガンマ線透過跡の平均密度 G

$$G = GR \cdot dr + GS (LL - dr) / LL$$

LL : ガンマ線透過距離

$$LL = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$$

(7) 各計測器の測定密度の算定

(4) - (6) の過程をガンマ数 N まで実行し, ガンマ線を計測した計測器ごとに計測数が累加される。(重複可能) そして計測器別に平均密度が算定される。

(8) 出力

- (a) モールドの体積, 密度
- (b) 礫の個数
- (c) 計測器別の下線計測数と計測密度
- (d) 8個の計測器のトータルガンマ線計測数と平均密度

シミュレーション演算は, 特定の土質条件(土, 礫の密度, 粒径分布)毎に数ケースの供試体を作成し, 指定された打込深さにより最大8方向の測定を行なう様になっており, そのトータルフローを示すと図4.8のとおりである。

なお, プログラム仕様の詳細およびリストについては付録に示す。

4.3 演算解析結果

シミュレーション演算は, 49年度に行なった室内実験との対比を考えて, 径70cm, 深さ60cmのモールド容器内に, 径40~70mmおよび40~100mmの礫を混入率30%で散布させた供試体を想定して実施した。線源打込深さは20cm, 30cm, 40cmとし, 各ケースにつき, 3つの供試体を作成するものとした。入力データ及び演算の結果得られた密度の各測定値, 平均値, 標準偏差を以下に示す。

(1) 入力データ

シミュレーションケース1

モールドの径	70.00 cm
モールドの深さ	60.00 cm
モールドの体積	230,906.87 cm ³
計測器サイズ	A = 16.00 cm B = 20.00 cm
中心からの計測器の位置	S = 8.00 cm
礫の径 (cm)	7.00 4.00 0.00
重量比	1.00 0.70 0.00
礫の個数: 795	ガンマ数: 2000
礫の密度	2.650
土の密度	1.750
礫混じり土密度	2.020

シミュレーションケース2

モールドの径	70.00 cm
モールドの深さ	60.00 cm
モールドの体積	230,906.87 cm ³
計測器サイズ	A = 16.00 cm B = 20.00 cm
中心からの計測器の位置	S = 8.00 cm
礫の径 (cm)	10.00 4.00 0.00

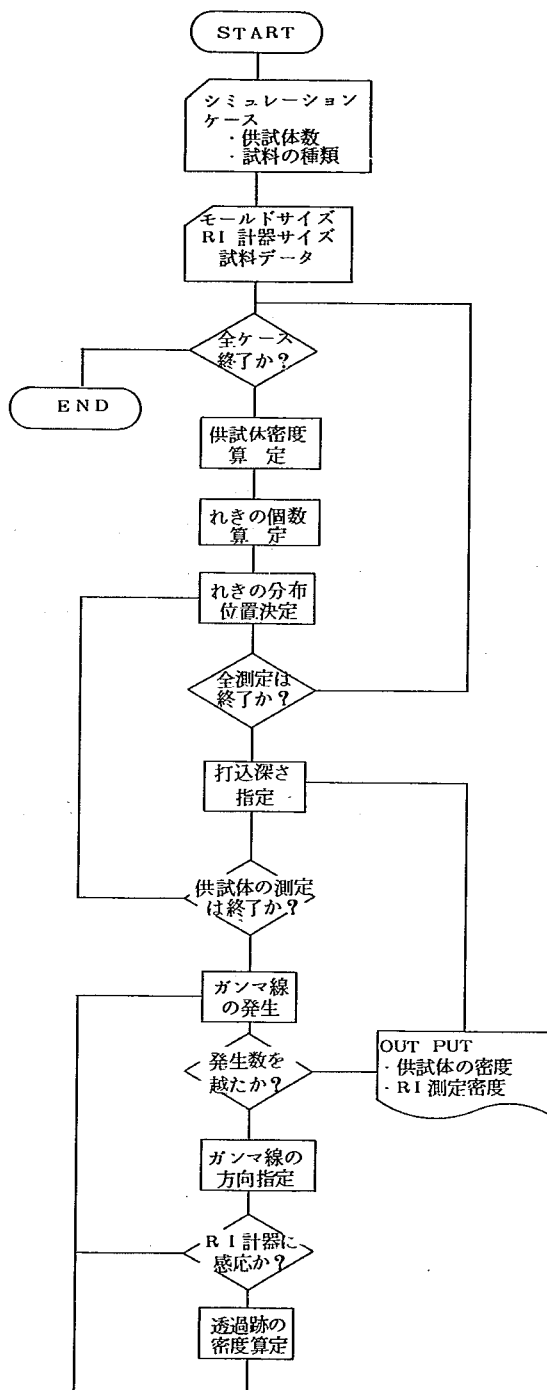


図 4.8 RI 測定 シミュレータ の システム フロー

重量比	1.00	7.00	0.00
礫の個数：386	ガンマ数：2000		
礫の密度	2.650		
土の密度	1.750		
礫混じり土密度	2.020		

(2) 演算結果

R I 測定シミュレータによる演算結果を表 4.1～4.2 に示す。

表 4.1 は礫混り土供試体を線源打込深さおよび計器設置回数を変化させて R I 密度測定させた場合の各測定データを示したものである。表中の左端に記した供試体全体の密度と R I 測定値の平均を比較すると十分近い値を示しており、作成供試体の礫の分布が十分一様であることが明らかである。

表 4.2 は各測定値のバラツキを知る目的で、線源打込深さおよび計器設置方向毎の標準偏差を算定したものである。これより線源打込深さおよび計器設置方向の増加による測定精度の向上が明白であり、また礫の粒径分布による差異も現われている。なお、表中のカッコ内の数値は室内実験の結果得られた値であるが、打込深さ 20cm のものを除けば十分近い値を示しており、本シミュレータの予測精度が高いことを示している。また、打込深さ 20cm の実験データは作成供試体中の礫の高さ方向の分布の不均一性によるものと考えられる。

図 4.9 は粒径分布に応じた R I 測定法の検討の目的で作成したグラフである。すなわち線源打込深さと測定方向数に応じた R I 測定精度（95%信頼巾）を表わしたものである。

この図より、各粒径分布における所要の精度に応じた打込深さと測定方向の関係をj得る。このシミュレーションによる方法は、礫を球と仮定し、その散布を乱数により発生させる等、実際の礫混じり土との間に若干の特性の相違が見られ、その結果が表われている。しかしながら、礫の混入度、粒径、打込深さ、測定方向が測定値のバラツキに与える影響を定性的にとらえることができ、室内実験との比較を行なうことにより、十分実用的な図表化を計ることが可能である。

表 4.1 シミュレーションによる R I 密度測定値

ケース No (モールド密度)	打込み 深 さ	各 計 器 に よ る 測 定 値										2 つ の 計 器 に よ る 平 均 値					4 つ の 計 器 に よ る 平 均 値			全平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	標 準 偏 差		1.5	2.6	3.7	4.8	標 準 偏 差	1・3 5・7	2・4 6・8	標 準 偏 差	
ケ ー ス 1 - 1 (1.985)	20 cm	2.197	2.080	1.916	1.938	1.939	1.938	1.958	2.129	0.1075		2.071	2.012	1.937	2.031	0.0562	2.007	2.022	0.0106	2.015
	30	2.068	2.027	1.970	1.911	1.918	1.948	1.980	2.049	0.0589		1.996	1.989	1.975	1.982	0.0090	1.985	1.986	0.0007	1.985
	40	1.943	1.966	2.006	2.008	1.974	1.937	1.909	1.931	0.0357		1.958	1.952	1.957	1.970	0.0070	1.957	1.961	0.0028	1.959
ケ ー ス 1 - 2 (1.978)	20	2.000	2.021	2.053	1.970	1.935	1.930	1.973	2.019	0.0433		1.966	1.972	2.009	1.995	0.0200	1.987	1.983	0.0028	1.985
	30	1.964	1.978	1.924	1.925	1.957	2.043	2.037	1.950	0.0457		1.961	2.011	1.980	1.938	0.0309	1.970	1.975	0.0035	1.973
	40	1.973	2.035	1.983	1.958	1.992	1.984	2.022	1.945	0.0302		1.982	2.010	2.001	1.951	0.0261	1.992	1.980	0.0085	1.986
ケ ー ス 1 - 3 (1.989)	20	1.948	1.939	1.961	2.051	1.982	1.937	1.968	1.921	0.0403		1.964	1.938	1.964	1.987	0.0200	1.964	1.961	0.0021	1.963
	30	1.942	1.993	1.974	1.925	1.926	1.934	1.973	1.940	0.0255		1.934	1.964	1.973	1.933	0.0205	1.953	1.948	0.0035	1.951
	40	1.993	1.963	1.965	1.964	2.012	1.956	1.966	1.988	0.0195		2.002	1.960	1.966	1.976	0.0185	1.984	1.968	0.0113	1.976
ケ ー ス 2 - 1 (1.942)	20	1.946	1.989	2.046	1.949	1.995	2.155	1.952	1.891	0.0805		1.969	2.069	1.998	1.919	0.0627	1.983	1.992	0.0064	1.988
	30	1.983	1.925	1.865	1.871	1.992	2.056	1.930	1.940	0.0638		1.988	1.992	1.898	1.904	0.0515	1.944	1.949	0.0035	1.946
	40	1.935	1.927	1.877	1.889	1.937	1.927	1.939	1.939	0.0240		1.936	1.927	1.907	1.914	0.0130	1.922	1.921	0.0007	1.921
ケ ー ス 2 - 2 (1.935)	20	1.998	1.932	1.978	1.946	1.830	1.864	1.928	2.067	0.0600		1.919	1.899	1.953	2.007	0.0473	1.937	1.955	0.0127	1.946
	30	2.016	1.926	1.905	1.856	1.831	1.864	1.941	2.012	0.0692		1.919	1.895	1.923	1.928	0.0149	1.921	1.911	0.0071	1.916
	40	1.881	1.915	2.002	1.976	1.909	1.892	1.937	1.908	0.0419		1.894	1.903	1.971	1.942	0.0357	1.932	1.923	0.0064	1.927
ケ ー ス 2 - 3 (1.952)	20	2.004	2.006	1.917	1.969	1.999	1.874	1.977	2.064	0.0584		2.001	1.940	1.949	2.019	0.0387	1.974	1.978	0.0028	1.976
	30	1.945	1.971	1.937	1.941	1.998	1.959	2.030	2.040	0.0405		1.971	1.965	1.982	1.991	0.0116	1.977	1.978	0.0014	1.977
	40	1.968	1.966	1.940	1.962	2.022	1.891	1.942	2.015	0.0420		1.996	1.928	1.941	1.988	0.0334	1.968	1.959	0.0064	1.963

表 4.2 シミュレーションによる R I 測定値のバラツキ

上段 シミュレーション結果
下段 室内実験結果

礫の粒度 混入率	測定方向 打込深	1	2	4
40～70 mm 30%	20 cm	0.071 (0.027)	0.036 (0.017)	0.006 (0.006)
	30 cm	0.046 (0.048)	0.022 (0.016)	0.003 (0.004)
	40 cm	0.029 (0.029)	0.019 (0.012)	0.008 (0.008)
40～100 mm 30%	20 cm	0.067 (0.047)	0.051 (0.023)	0.008 (0.013)
	30 cm	0.059 (0.043)	0.032 (0.019)	0.005 (0.004)
	40 cm	0.037 (0.032)	0.029 (0.015)	0.005 (0.007)

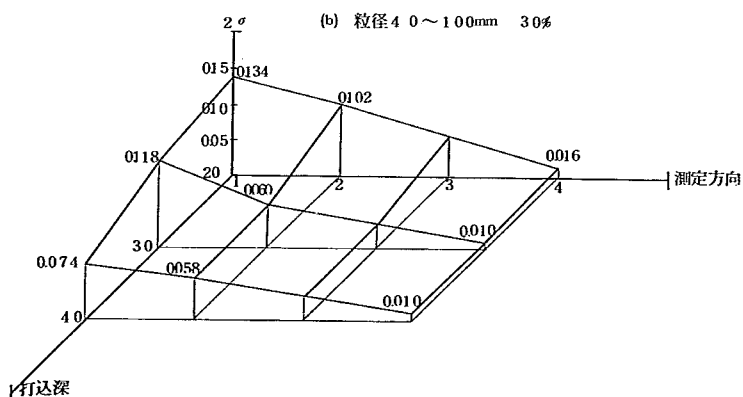
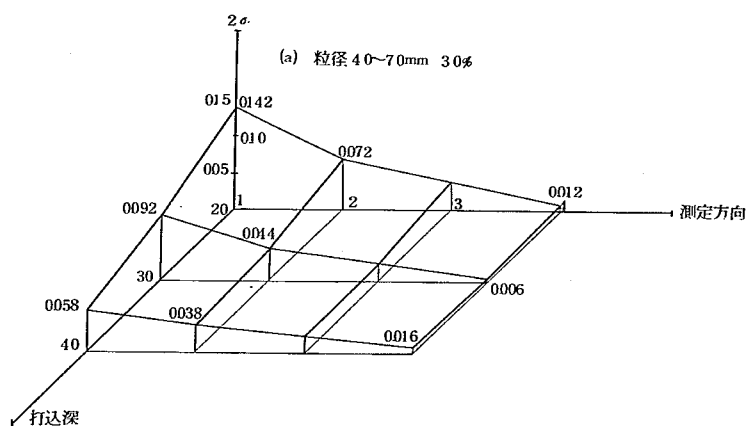


図 4.9 R I 測定値のバラツキ (95%巾)

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：「土質調査法」第1回改訂版 p 591 1972
- 2) 土質工学会編：「土質試験法」第1回改訂版 p 194 1969
- 3) 土質工学会編：「土工管理とラジオアイソトープ」 1974
- 4) 日本放射性同位元素協会編：「新版アイソトープ便覧」 丸善
- 5) 土木研究所資料第434号「R I 利用による土の現場密度・含水量の測定」(第1報) 1969
- 6) 土木研究所資料第580号「R I 利用による土の現場密度・含水量の測定」(第2報) 1970
- 7) 土木研究所資料第683号「土の締固めの一表示法に関する試験」 1971
- 8) 土木研究所資料第708号「関東ロームの圧縮特性試験」 1972
- 9) 土木技術資料「〔講座〕現場計測(22) R I による現場密度・含水量の測定」 1974
1月号 947
- 10) 土木学会論文報告集「飽和レキ混り粘土のせん断特性」 1970 11月第183号
- 11) 第10回日本道路会議論文集：「締固めたレキ混り土の性質について」 1971
- 12) 土木技術資料「レキの混った土の締固め度の補正法について」 1961 1月号 p 32

あ と が き

施工研究室においては、盛土施工における重要な問題の1つである盛土材料への礫、岩碎の混入について、土工管理の立場から検討を続けてきたが、その結果、測定精度の低下と締固め度の過大評価と言う2つの基本的な問題点からなると考えられるに至った。

本研究は、そのうち特に前者に着目し、様々な礫の混入度、粒径分布を有する礫混り土を、透過型RI密度、水分計を用いて測定した場合の密度、含水比の値とそのバラツキを定量的に把握する目的で、室内モールド試験、現場試験、モンテカルロシミュレーションを実施し、個々の礫混り土に応じた適切な測定方法（線源打込深さ、計測方向、回数）について、検討を加えたものである。

しかしながら、近年、大規模盛土構造やフィルダム等、高度な品質を要求される土工事の増加とともに、礫の混入による締固め度の過大評価の問題の重要性が増しつつあり、今後に残された問題と言えよう。

なお、この研究は昭和47年度以降続けられたもので、各実験解析等の担当者は以下のとおりである。

- 室内実験 (1) 嶋津 晃臣、武田 繁、江添 良春
(2) " " 岩井 茂雄
(3) 熊谷 恒一郎、武田 繁

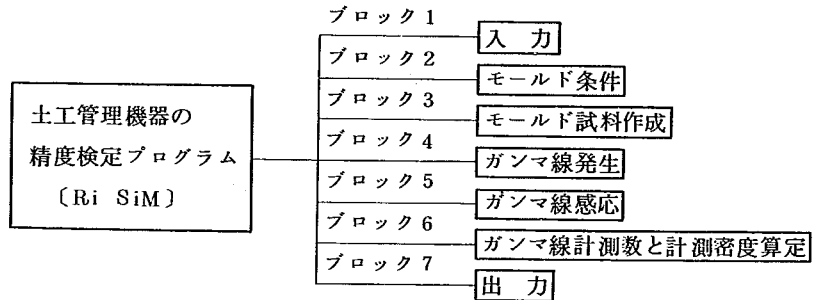
- 現場実験 (1) 嶋津 晃臣、長崎 邦広、武田 繁、柏原 雄次
(2) 熊谷 恒一郎、岡村 栄三、武田 繁

シミュレーション 熊谷 恒一郎

付 録

土工管理機器の精度検定プログラムの仕様およびリスト

(1) プログラム構成



(a) 入力

○ シミュレーションケース

初めに礫の位置分布ケースの数と密度計打込みケースの数を決め、そのプロセスをシミュレートするモールド（試料）のケースを設定する。したがってシミュレーションケースとモールドケースは対応する。

○ モールドの条件の相違は、礫と土の密度、礫の区分半径とそれに対応する重量比に基づく。

(b) モールド条件

(i) モールド体積算定

(ii) 礫の個数算定

(c) モールド試料作成

○ 礫の径を粒径区分間内で乱数を発生させて決定し、礫と礫が相互に交わらないように乱数を発生させて礫をランダムに分布させる。

○ 礫の発生が終了するとモールド全体の密度が算定される。

(d) ガンマ線発生

ガンマ線の方向をZ軸方向 θ と x , y 軸方向 φ で乱数を使って決定する。

(e) ガンマ線感応

ガンマ線の地表座標が方程式で表わされる計測器に含まれるか判定する。

(f) ガンマ線計測数と計測密度算定

ガンマ線の直線方程式と礫の球の方程式よりガンマ線の礫透過長さを求め、礫と土の密度からガンマ線透過跡の密度を算定する。

(g) 出力 計測器別のガンマ線計測数と密度を出力

(2) リスト

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```

1      C      PROGRAM RI SIM
2      DIMENSION DD(5),RRMOLD(10),ERMOLD(10),X(3000),Y(3000),Z(3000),
3      &R(3000),NCOUNT(10),KCOUNT(10),GAMRS(10),KCOUNT(4,10),GOUT(4,10),
4      &NTAB(4,8),IHED(4,25),NRLOCK(10),GTOT(4,10),JHED(10,10),
5      &KHED(10,10,10)
6      DATA NTAB / 4*1,3*2,1,2*3,2*1,2*4,2,1,5,3*1,6,2*2,1,7,3,2*1,
7      & 8,4,2,1 /
8      DATA PAI/3.14159/
9      WRITE(6,2) PAI
10     2 FORMAT(1H0,'PAI',F10.5)
11     WRITE(6,4)((NTAB(I,J),J=1,8),I=1,4)
12     4 FORMAT(1H0,'NTAB',/(1H,8(3X,I2)))
13     READ(5,1) KKK
14     1 FORMAT(I10)
15     DO 6 I=1,4
16     READ(5,5) (IHED(I,J),J=1,25)
17     5 FORMAT(20A4)
18     6 CONTINUE
19     READ(5,7) KLIST
20     7 FORMAT(I10)
21     C
22     C      INPUT START JYOUKEN DATA OF MOLD
23     C
24     WRITE(6,8)
25     8 FORMAT(1H1//5X,'* OUT PUT')
26     READ(5,10) MOLDC,NRANDC,NDDC
27     10 FORMAT(3I10)
28     DO 16 K=1,MOLDC
29     READ(5,12) (JHED(I,K),I=1,10)
30     12 FORMAT(10A4)
31     WRITE(6,13) (JHED(I,K),I=1,10)
32     13 FORMAT(1H0//30X,10A4)
33     DO 16 J=1,NRANDC
34     READ(5,14) (KHED(I,J,K),I=1,10)
35     14 FORMAT(10A4)
36     WRITE(6,15) (KHED(I,J,K),I=1,10)
37     15 FORMAT(1H0/40X,10A4)
38     16 CONTINUE
39     C
40     READ(5,20) RRMOLD,HMOLD
41     20 FORMAT(2F10.2)
42     READ(5,30) SIZA,SIZB,SIZS
43     30 FORMAT(3F10.2)
44     READ(5,35) NGANM
45     35 FORMAT(I10)
46     READ(5,40) (DD(I),I=1,5)
47     40 FORMAT(5F10.2)
48     C
49     RRMOLD=RRMOLD/2
50     SIZL=SIZS+SIZA
51     VMOLD=PAI*RRMOLD**2*HMOLD
52     C
53     C****      JOUKEN SETTEI OF MOLD ( CASE )
54     C
55     DO 370 M=1,MOLDC
56     C
57     WRITE(6,41) (JHED(I,M),I=1,10)
58     41 FORMAT(1H1/1H0,50X,10A4/1H0)

```

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```

59      WRITE(6,50) RMOLD,HMOLD
60      50 FORMAT(1H0,20X,'MOLD KEI',F10.2,' CM',10X,'MOLD HUKASA',F10.2,
61      &' CM')
62      WRITE(6,60) SIZE,SIZEB,SIZE
63      60 FORMAT(1H0,20X,'KEISOKUKI SAIZU',/30X,'A',F7.2,' CM',10X,'B',F7.2,
64      &' CM',10X,'S',F7.2,' CM')
65      WRITE(6,65) VMOLD
66      65 FORMAT(1H0,20X,'MOLD TAISEKI',F15.2,' CM**3')
67      READ(5,70) GAMR,GAMS
68      70 FORMAT(2F10.3)
69      READ(5,80) RROCK
70      READ(5,80) EROCK
71      80 FORMAT(10F8.2)
72      DO 85 L=1,10
73      IF ( EROCK(L).LE.0.0 ) GO TO 86
74      85 CONTINUE
75      86 CONTINUE
76      LW=L-1
77      GRT=EROCK(LW)*GAMS+( 1.0-EROCK(LW) ) *GAMR
78      WRITE(6,93) GAMR,GAMS,GRT
79      93 FORMAT(1H0/31X,'REKI MITSUDO',F7.3,10X,'TSUTI MITSUDO',F7.3,
80      &' 10X','REKIMAJIRIDO MITSUDO',F7.3 )
81      DO 94 I=1,10
82      IF(RROCK(I).LE.0.0) GO TO 95
83      94 CONTINUE
84      95 CONTINUE
85      IW=I
86      WRITE(6,96) (RROCK(I),I=1,IW)
87      96 FORMAT(1H0,30X,'REKI NO KEI (CM)',5X,10F7.2)
88      WRITE(6,97) (EROCK(I),I=1,IW)
89      97 FORMAT(1H ,30X,'JYUURYOU HI',10X,10F7.2)
90      WRITE(6,98) NGANM
91      98 FORMAT(1H0,30X,'GANMER SUU',5X,110)
92      NSAMR=0
93      C
94      C      REKI NO KOSUU SANTEI
95      C
96      DO 100 IR=1,10
97      IF(RROCK(IR+1).LE.0.0) GO TO 110
98      RR=(RROCK(IR)/2+RROCK(IR+1)/2)/2
99      ROCKN=(EROCK(IR)-EROCK(IR+1))*VMOLD/(PAI*RR**3*4/3)
100     IF(ROCKN.LE.1.0) ROCKN=0.0
101     RK=RROCKN+0.5
102     NROCK(IR)=INT(RK)
103     NSAMR=NSAMR+NROCK(IR)
104     IF(NSAMR.GE.3001 ) GO TO 110
105     100 CONTINUE
106     110 CONTINUE
107     WRITE(6,112) NSAMR
108     112 FORMAT(1H0,30X,'REKI KOSUU',5X,110)
109     IF(NSAMR.GE.3001 ) GO TO 380
110     IIR=IR-1
111     C
112     C***      REKI NO BUNPU SETTEI ( RANSUU HASSEI ) (CASE)
113     C
114     DO 340 N=1,NRANDC
115     RVMOLD=0.0
116     JE=0

```

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```

117      DO 140 NR=1,IIR
118      IF(NROCK(NR).LE.0) GO TO 140
119      JS=JE+1
120      JE=JE+NROCK(NR)
121      C
122      DO 135 JK=JS,JE
123      C
124      C      RANSUU HASSEI
125      C
126      120 CONTINUE
127      X(JK)=(RAND20(KKK)-0.5)*RRMOLD
128      Y(JK)=(RAND20(KKK)-0.5)*RRMOLD
129      Z(JK)=RAND20(KKK)*(-HMOLD)
130      RS=(X(JK)**2+Y(JK)**2)**0.5
131      R(JK)=((RROCK(NR)-RROCK(NR+1))*RAND20(KKK)+RROCK(NR+1))/2
132      IF(RS+R(JK).GT.RMOLD) GO TO 120
133      IF(R(JK)-Z(JK).GT.HMOLD.AND.-Z(JK).LT.R(JK)) GO TO 120
134      IF(R(JK).GT.RS) GO TO 120
135      C
136      IF(JK.LE.1) GO TO 132
137      JK1=JK-1
138      DO 130 JKK=1,JK1
139      RL=((X(JK)-X(JKK))**2+(Y(JK)-Y(JKK))**2+(Z(JK)-Z(JKK))**2)**0.5
140      IF (R(JK)+R(JKK).GE.RL) GO TO 120
141      130 CONTINUE
142      132 CONTINUE
143      RVMOLD=RVMOLD+4*PA1*R(JK)**3/3
144      135 CONTINUE
145      140 CONTINUE
146      GMOLD=(RVMOLD*GAMR+(VMOLD-RVMOLD)*GAMS)/VMOLD
147      C
148      C**      UTIKOMI ( CASE )
149      C
150      DO 330 K=1,NDDC
151      C
152      SIZL=SIZS+SIZA
153      T= DB(K)/(SIZL**2+(SIZB/2)**2)**0.5
154      THEAT1=ATAN(T)
155      TT=DB(K)/SIZS
156      THEAT2=ATAN(TT)
157      DO 147 KC=1,8
158      KCOUNT(KC)=0
159      GAMRS(KC)=0.0
160      147 CONTINUE
161      B2=SIZB/2**0.5
162      W2=SIZL*2**0.5
163      S2=SIZS*2**0.5
164      C
165      C*      GAMMERSEN HASSEI
166      C
167      IF( KLIST.GE.1 ) WRITE(6,148)
168      148 FORMAT(1H1,'* CHECK LIST'/1H0)
169      C
170      NGM=0
171      149 CONTINUE
172      NGM=NGM+1
173      IF(NGM.GT.NGANM) GO TO 265
174      150 CONTINUE

```

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```

175      THEAT=THEAT1+(THEAT2-THEAT1)*RAND20(KKK)
176      E=RAND20(KKK)
177      IF( E.GT.COS(THEAT)/COS(THEAT1)) GO TO 150
178      FAI=2.0*PAI*RAND20(KKK)
179      ALFX=COS(FAI)/(SIN(THEAT)/COS(THEAT))
180      ALFY=SIN(FAI)/(SIN(THEAT)/COS(THEAT))
181      XRAY=ALFX*DD(K)
182      YRAY=ALFY*DD(K)
183
184      C      DO 155 KC=1,8
185      NCOUNT(KC)=0
186      155 CONTINUE
187      IF(ABS(YRAY).GT.SIZB/2) GO TO 160
188      IF( SIZS.LE.XRAY.AND.XRAY.LE.SIZI ) NCOUNT(1)=1
189      IF( -SIZL.LE.XRAY.AND.XRAY.LE.-SIZS ) NCOUNT(5)=1
190      160 CONTINUE
191      IF(ABS(XRAY).GT.SIZB/2) GO TO 180
192      IF( SIZS.LE.YRAY.AND.YRAY.LE.SIZL ) NCOUNT(3)=1
193      IF( -SIZL.LE.YRAY.AND.YRAY.LE.-SIZS ) NCOUNT(7)=1
194      180 CONTINUE
195      IF( YRAY.LT.XRAY-B2.OR.YRAY.GT.XRAY+B2 ) GO TO 200
196      IF( YRAY.GE.-XRAY+S2.AND.YRAY.LE.-XRAY+W2 ) NCOUNT(2)=1
197      IF( YRAY.GE.-XRAY-W2.AND.YRAY.LE.-XRAY-S2 ) NCOUNT(6)=1
198      200 CONTINUE
199      IF( YRAY.LT.-XRAY-B2.OR.YRAY.GT.-XRAY+B2 ) GO TO 220
200      IF( YRAY.GE.XRAY+S2.AND.YRAY.LE.XRAY+W2 ) NCOUNT(4)=1
201      IF( YRAY.GE.XRAY-W2.AND.YRAY.LE.XRAY-S2 ) NCOUNT(8)=1
202      220 CONTINUE
203
204      C      NCSAM=0
205      DO 222 KC=1,8
206      NCSAM=NCSAM+NCOUNT(KC)
207      222 CONTINUE
208      IF(NCSAM.LE.0) GO TO 149
209
210      C      IF(KLIST.LE.0) GO TO 233
211      IF(NGM.GE.51) GO TO 233
212      WRITE(6,232) NGM,XRAY,YRAY
213      232 FORMAT(1H0,'GANM NO',I3,' HYOUMEN ZAHYOU ('',2F8.2,'', 0.00 )')
214
215      C      233 CONTINUE
216
217      C      RAYROC=0
218      AA=1.0+ALFX**2+ALFY**2
219      DO 250 L=1,NSAMR
220      250 REKI TOUKA HANFI
221      IF(-(Z(L)+DD(K)).GE.R(L)) GO TO 250
222      BB=ALFX*(X(L)-ALFX*DD(K))+ALFY*(Y(L)-ALFY*DD(K))+Z(L)
223      CC=DD(K)**2*(ALFX**2+ALFY**2)-2*DD(K)*(ALFX*X(L)+ALFY*Y(L))
224      2+X(L)**2+Y(L)**2+Z(L)**2-R(L)**2
225      HANBET=BB**2-AA*CC
226      IF(HANBET.LE.0.0) GO TO 250
227      Z1=(BB+HANBET**0.5)/AA
228      Z2=(BB-HANBET**0.5)/AA
229
230      C      WWMD=0-DD(K)
231      IF(Z1.LE.WWMD ) GO TO 250
232      X1=ALFX*(Z1+DD(K))

```

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```

233      Y1=ALFY*(Z1+DD(K))
234      X2=ALFX*(Z2+DD(K))
235      Y2=ALFY*(Z2+DD(K))
236      RAYROC=RAYROC+((X1-X2)**2+(Y1-Y2)**2+(Z1-Z2)**2)**0.5
237  C
238      IF( KLIST.LE.0) GO TO 250
239      IF(NGM.GE.51) GO TO 250
240      WRITE(6,235) NGM,X(L),Y(L),Z(L),R(L),X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2
241  235 FORMAT(1H,110,' TYHUSIN('3F8.2,' )', ' R',F5.2,' KOUTEN 1('3F8.2
242      ,', ' )', ' KOUTEN 2('3F8.2,' )')
243  C
244  250 CONTINUE
245  C
246      KEISOKU MITSUDO AND COUNT SHU SANTEI
247  C
248      DDL=DD(K)*AA*0.5
249      DGAMRS=(RAYROC+GAMR*(DDL-RAYROC)*GAMS) / DDL
250  C
251      IF( KLIST.LE.0 ) GO TO 255
252      IF(NGM.GE.51) GO TO 255
253      WRITE(6,252) NGM,DGAMRS,RAYROC,DDL
254  252 FORMAT(1H,110,' MITSUDO',F5.2,' TSUUKA REKI NAGASA',F8.2,' GANM N
255      ,AGASA',F8.2)
256  C
257  255 CONTINUE
258      DO 260 KC=1,8
259      IF(NCOUNT(KC).LE.0) GO TO 260
260      GAMRS(KC)=GAMRS(KC)+DGAMRS
261      KCOUNT(KC)=KCOUNT(KC)+1
262  260 CONTINUE
263      GO TO 149
264  265 CONTINUE
265  C
266      DO 270 I=1,4
267      DO 270 J=1,8
268      KCOUT(I,J)=0
269      GTOT(I,J)=0.0
270      GOUT(I,J)=0.0
271  270 CONTINUE
272  C
273      OUTPUT SETTEI
274  C
275      DO 281 I=1,4
276      DO 280 J=1,8
277      JJ=NTAB(I,J)
278      KCOUT(I,JJ)=KCOUT(I,JJ)+KCOUNT(J)
279      IF(KCOUT(I,JJ).LE.0) GO TO 280
280      GTOT(I,JJ)=GTOT(I,JJ)+GAMRS(J)
281      GOUT(I,JJ)=GTOT(I,JJ)/KCOUT(I,JJ)
282  280 CONTINUE
283  281 CONTINUE
284  C
285      KP=(K-1)/2+2
286      IF( KP.NE.K-1 ) GO TO 285
287      WRITE(6,282) (KHED(I,N,M),I=1,10)
288  282 FORMAT(1H1/1H0,10X,10A4/1H0)
289      WRITE(6,283) GMOLO
290  283 FORMAT(1H0,20X,'MOLD MITSUDO',5X,F5.3)

```

31726 01 03-19-75 15.808 ROGRAM RI SIM

```
291      285 CONTINUE
292      WRITE(6,290) DD(K)
293      290 FORMAT(1H0/15X,'UTIKOMI HUKASA',F7.2,' CM')
294      C
295      DO 320 I=1,4
296      1J=NTAB(I,8)
297      WRITE(6,300) (IHED(I,J),J=1,25)
298      300 FORMAT(1H0,20X,25A4)
299      WRITE(6,310) (KCOUNT(I,J),J=1,IJ)
300      310 FORMAT(1H0,20X,'KEISOKU COUNT',5I,8110)
301      WRITE(6,315) (GOUT(I,J),J=1,IJ)
302      315 FORMAT(1H,20X,'KEISOKU MITSUDO',3X,8F10.3)
303      320 CONTINUE
304      330 CONTINUE
305      340 CONTINUE
306      370 CONTINUE
307      380 CONTINUE
308      STOP
309      END
```

*****W 7 MEMORY EXPANDED. USE YLIMITS OR CORE= OPTION FOR NEXT RUN
THERE WERE 1 DIAGNOSTICS IN ABOVE COMPILATION
29K WORDS WERE USED FOR THIS COMPILATION