



ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2233号

土木研究所資料

粗粒材料の密度試験に関する 実験的検討

昭和60年5月

建設省土木研究所
フィルダム研究室

「 Copyright © (1985) by P. W. R. I

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

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

粗粒材料の密度試験に関する 実験的検討

ダム部フィルダム研究室 松本 徳久
渡辺 和夫*
岩田 充弘**
小川 優

* ダム構造研究室

** (株)竹中土木。昭和58年4月～昭和60年6月の間、
(財)土木研究センターからの部外研究員として在籍

要 旨 フィルダムの粗粒材料に関する、現場密度試験方法および室内締固め試験方法には定まった基準がない。また現場密度の鉛直方向の分布状態、現場密度と室内試験密度の関係についても未解明の部分が多い。

本報告では、現場密度試験と室内締固め試験の試験方法の標準化を計るために、各種実施した試験の結果をとりまとめると共に、現場密度の鉛直方向の分布状態、現場密度と室内試験密度の関係についても考察を加えた。

その結果、現場密度試験時のピット測定用シートの厚さや試験孔径が試験密度に与える影響、および室内締固め試験時の粒度作成方法、締固めランマーの条件についてデータが得られた。また、現場密度の一層内における層状不均一性の存在は確認できたが、現場密度と室内試験密度の関係については、現場と室内の試験条件の統一が難しく、問題提起をするにとどまった。

キーワード：現場密度試験，水置換法，室内締固め試験，相似粒度，均等係数，締固め仕事量

は　じ　め　に

近年、コンクリートダムの基礎となる堅硬な岩盤をもつダムサイトが少なくなり、コンクリートダムに代って比較的條件の良くない基礎岩盤上にも建設可能なフィルダムの建設が増加している。このうち、堤高が100 mを越す大規模なダムはほとんどゾーン型のロックフィルダムで、中央のコア材料がしゃ水機能を受持ち、外部のロック材料によって堤体の力学的安定を計るタイプのものである。

ロックフィルダムの設計には、円弧すべり面法による安定解析手法が基準化¹⁾されており、設計値としては材料の密度、せん断抵抗角が必要になる。このうち特にロック材料のせん断抵抗角は、密度によって大きく左右されるため、現場密度を室内で精度よく求める事は特に重要となってくる。ロック材料のせん断抵抗角を求める試験方法に関しては、大型三軸試験機等を使用して数多くの研究がなされ、成果が多数発表されている。しかし密度に関しては研究報告も少く、現場および室内試験方法に関しても基準化されたものがなく、各機関まちまちの方法で実施されているのが現状である。

現場密度を室内で精度よく求めるためには、両者の関連について検討を加える前に、現場および室内における密度試験方法を確立する必要がある。本報告は第1章で現場密度試験の最適試験方法について述べ、第2章では室内締固め試験時の締固め方法、試験粒度作成方法について述べる。第3章では、第1章、第2章の試験結果を踏まえて、現場密度の分布状況を調査すると共に、室内試験密度との関係についても考察を加える。

目 次

はじめに

1. 現場密度試験	1
1.1 現場密度試験の現状と問題点	1
1.2 試験目的	4
1.3 寒河江ダム現場密度試験	4
1.3.1 寒河江ダムの概要	4
1.3.2 試験方法	4
1.3.3 試験結果	9
1.4 七ヶ宿ダム現場密度試験	14
1.4.1 七ヶ宿ダムの概要	14
1.4.2 試験方法	14
1.4.3 試験結果	16
1.5 考 察	20
2. 室内締固め試験	21
2.1 室内締固め試験の現状と問題点	21
2.2 大型締固め試験	23
2.2.1 試験目的	23
2.2.2 装置の機構	23
2.2.3 試験方法	25
2.2.4 試験結果	30
2.3 試験粒度の作成方法	38
2.3.1 試験目的	38
2.3.2 試験方法	38
2.3.3 試験結果	47
2.4 考 察	61
3. 現場密度の分布状況および室内試験密度との関係	62
3.1 試験目的	62
3.2 寒河江ダム現場密度試験	62
3.2.1 試験方法	62
3.2.2 試験結果	63
3.3 七ヶ宿ダム現場密度試験	73
3.3.1 試験方法	73
3.3.2 試験結果	76
3.4 室内締固め試験	81
3.4.1 試験方法	81

3.4.2 試験結果	83
3.5 現場密度と室内試験密度の関係	86
3.6 考 察	89
お わ り に	90
謝 辞	91
参考文献	92

1. 現場密度試験

1.1 現場密度試験の現状と問題点

フィルダムの現場密度試験は、コア材の試験と粗粒材の試験に大別できる。コア材は最大粒径 150 mm 程度の隙まじり土が使用されるのに対し、粗粒材は、河床砂礫や、原石山から採取した材料が使われ、特にロック材料には 1000 mm を越す大塊が含まれることもある。そのため、コア材の試験は比較的精度よく簡便に求めることができるが、ロック材の試験は大がかりとなり、高い試験精度を期待できない。

コア材の密度試験には砂置換法 (JIS-A-1214-1980)、コアカッター法、RI 法などがあり、いずれも JIS 規格や土質工学会基準 (案)²⁾ で試験方法が定められている。しかし、ロック材の現場密度試験には確固たる基準がなく、各現場でまちまちの試験を実施しているのが現状である (表 1.1)³⁾。近年、ラジオアイソトープが様々な分野で利用され、ロック材の現場密度試験にも応用されている例⁴⁾があるが、線源のレベルアップが難しく、深さ 50 cm 程度までしか測定できない。そのため深さ方向の密度を測定できないという弱みがあり、今後の研究が待たれるところである。

このような現状では、盛立てたロック材を掘削し、その容積と重量を測定して密度を求めるという方法を採用せざるを得ない。いわゆるピット容積を測定するための置換法には、砂利置換法、砂置換法、水置換法等がある。このうち砂利置換法と砂置換法は置換材を直接掘削孔内に入れるので、空洞に置換材が入って正確な容積を測定できないことがある。また置換材の単位体積重量にバラツキをなくすることもむづかしい。そのため水置換法が最も一般的に採用されている。しかし水置換法も試験孔の孔径、および内側に張るシートの厚さ等まちまちである。

図 1.1 はパキスタンの Tarbera ダムで試験されたシートの厚さ (ポリエチレンシートを使用) と試験孔容積の測定誤差のグラフ⁵⁾ である。これによると、シートの厚さが 0.1 mm 程度までなら誤差は小さいが、0.15 mm を越えると大きくなっているのがわかる。土質工学会の「シート法による土の密度試験方法」基準案²⁾ では、内に張るシートは JIS-K-6732 農業用ビニールフィルムの 5 種 (厚さ 0.075 mm) か 6 種 (厚さ 0.05 mm) が適当であるとしている。しかしこれは岩石質材料を対象としたもので、フィルダムのロック材のような粗粒材料だと、石の角でシートに傷がついたり破れたりして、試験そのものができなくなる恐れがある。

試験孔径に関しては、前出の土質工学会基準 (案) では、試料の最大粒径の 3 倍以上となっている。また建設省技術研究会「フィルダムの設計と施工に関する研究」⁶⁾ では 2 ～ 3 倍以上とするのが望ましいとしており、はっきりとした基準は定められていない。

以上のように、ロック材の現場密度試験に関しては、基準化された試験法はなく様々な試験法で実施されているのが現状であり、ある程度の指針を定める必要がある。

表 1.1 ロック材料の現場密度試験方法³⁾

ダ ム 名	試 験 孔 の 大 き さ		体積測定方法
	形 状 (m)	体 積 (m ³)※	
1. 大 雪	$\phi 1.0 \times 0.5$	(0.39)	水 置 換 法
2. 十 勝	$2.0 \times 2.0 \times 1.0$	(4)	砂 置 換 法
3. 漁 川	(上面□2.5, 下面□0.7) $\times 1.5$	(5.1)	砂 利 置 換 法
4. 御 所		0.1~0.16	水 置 換 法
5. 白 川	$\phi 0.5 \times 0.5$	(0.2)	水 置 換 法
6. 岩 屋	□4.0 $\times$ 2.0	(10.6)	砂利置換法または計測法
	□3.0 $\times$ 1.0	(3.0)	
7. 寺 内	$\phi 2.0$	2~3	水 置 換 法
8. 樽 水	$0.5 \times 0.5 \times 0.5$	(0.13)	水 置 換 法
9. 漆 沢	$1.0 \times 1.0 \times 1.0$	(1.0)	水 置 換 法
10. 七 北 田	$\phi 1.5 \times 1.0$	(1.8)	水 置 換 法
11. 前 川	$\phi 0.5 \times 0.25$	0.1~0.15	水 置 換 法
12. 四 時	$\phi 1.5 \times$ (まき出し厚)	0.1~0.16 (1.8)	砂 置 換 法
13. 三 保	$\phi 0.4 \sim 0.8$		水 置 換 法
14. 広 瀬	$\phi 1.5 \times 1.0$	0.9~1.5	水 置 換 法
15. 荒 川	$1.5 \times 1.5 \times 1.5$	3.0	水 置 換 法
16. 武 利	$\phi 0.6 \times 0.6$	(0.17)	水 置 換 法
17. 高 瀬			水 置 換 法 R I 法
18. 南 原	$\phi 1.0 \times 0.5, \phi 1.0 \times 1.0$	(0.39, 0.78)	水 置 換 法
19. 明 神	$\phi 1.0 \times 0.5, \phi 1.0 \times 1.0$	(0.39, 0.78)	水 置 換 法

※ () 書きは形状をもとに計算で求めた値。

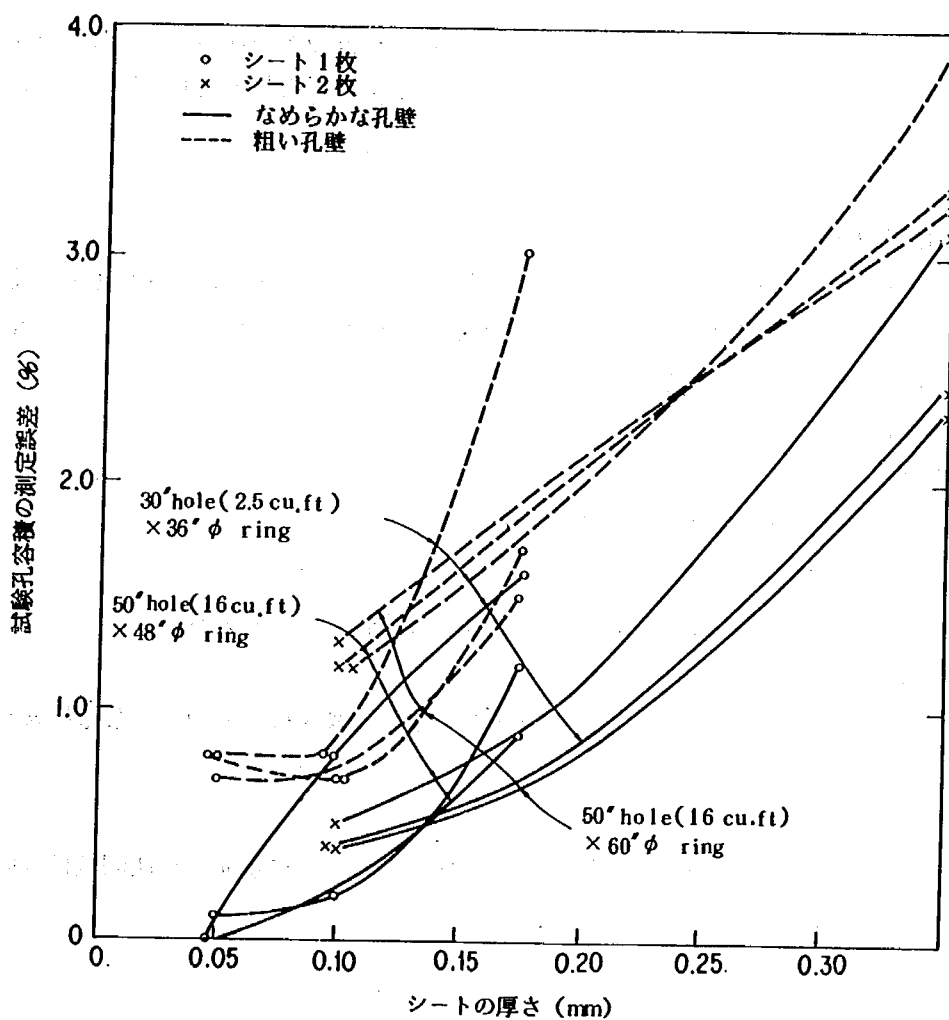


図 1.1 シートの厚さと試験孔容積の測定誤差⁽¹⁾

1.2 試験目的

水置換法による現場密度試験が最も一般的に実施されている試験法であることは既に述べた。ここでは、水置換法によって現場密度試験を実施する際のシートの厚さと試験孔径について最適な試験方法を求めることを目的として試験をおこなった。試験は、細粒分の多い寒河江ダムのロック材料と、比較的粒径の大きなもので構成されている七ヶ宿ダムのロック材料を対象として実施した。

1.3 寒河江ダム現場密度試験

1.3.1 寒河江ダムの概要

寒河江ダムは、最上川の支流寒河江川の流域に建設中の多目的ダムで、堤高 115.0 m、堤頂長 510.0 m、堤体積 9,720,000 m³、総貯水量 110,000,000 m³の大規模な中央コア型ロックフィルダムである。本体は昭和 57 年度に盛立を開始し、現在は最盛期を迎えている。

1.3.2 試験方法

1) 試験位置

寒河江ダム平面図(図 1.2)の A 地点で実施した。

2) 試験マットの形状

試験マットは図 1.3 に示す様な形状で、仕上り厚は 1 m / 層で 2 層である。

3) 試験試料

原石山採取のロック材(粗粒玄武岩)を、グリズリを通して最大粒径 500 mm となる様調整した。代表試料の粒度分布を図 1.4 に示す。

4) 転圧仕様

転圧機種は、振動ローラー SP 60 DD を使用した。仕様を表 1.2 に示す。転圧回数は 5 回、転圧速度は 3 km / hr で試験した。

5) 試験内容

(1) 試験 I — シート厚さの比較試験

農業用ビニールシートの 0.1, 0.15, 0.3 mm、ゴムシートの 0.3 mm の 4 種について、現場密度試験を実施した。この際試験孔径は、直径 1.0 m、深さは仕上り厚と同様 1.0 m とし、同一孔で試験した。

(2) 試験 II — 孔径の比較試験

試験 I で最も適当とされたシートを用い、孔径を試料の最大粒径(500 mm)の 3, 4, 5, 6 倍に徐々に広げて試験をおこなった。

6) 現場密度試験方法

試験方法は、土質工学会基準(案)「シート法による土の密度試験方法」を基本としているが、試験孔容積の測定方法等、違いがあるので以下に試験の詳細を記す。

(1) 試験用具

① シート

シートは試験孔壁に密着させやすい柔軟性に富んだものとする。今回は前出の 4 種類のシートを使用した。

② はかり

はかりは秤量 200 kg 程度、感量 100 g 以下のものを使用する。

③ 給水装置

給水装置は、試験孔体積を求める為に試験孔内に静かに注水できるものとし、注水量を測定できる流量計、あるいは質量を測定できるはかりを備えたものとする。今回は給水車よりドラム缶内の水量を 200 kg はかりで測定して注水する方法をとった（写 1.1 参照）。

④ その他の用具

a 試験孔を掘削するための用具

ピックハンマー、つるはし、スコップ等

b 含水量測定用具

秤量 50 kg 程度、感量 10 g 以下のはかり、ホーローバット

c 転圧面の高さ及び水面の高さを測定するための用具

レベル、スタッフ等

(2) 測定方法

① 試験孔の大きさ

今回の試験では、試験孔の大きさは試料の最大粒径の 2 ～ 6 倍の 5 種類、深さは仕上げ厚と同じにした。

② 試験孔部の高さ測定

試験を行う場所に、所定の直径の円をスプレー等で描き、図 1.5 に示す様に 9 点について、基準点よりレベルによって高さを測定する。試験を行う場所は、できるだけいらない所を選ぶ。

③ 掘削面上部の面積測定

図 1.6 に示す様に、孔口付近にスタッフを平行に設置し、 ℓ の長さを 1-1 から 4-4 測線までは 5 cm 間隔、以後は 10 cm 間隔で測定し、最後の 4 測線は 5 cm 間隔で $\ell = 0$ となるまで測定する。長さの読み取りは mm までとし、面積は平均断面法で算出する。

④ 試験孔の掘削及び含水比、掘削岩質量の測定

試験孔の掘削は、ピックハンマー等を使用し、できるだけ人力で行い、掘削岩は粒度試験を行う為壊さない様注意を要する。孔壁はできるだけなめらかになる様整形し、浮石等は除去する。掘削岩は無作意に 30 kg 程度を 2 つとり、すみやかに 50 kg はかりで計量し、含水比を測定する。

⑤ 試験孔の容積測定

シートは試験孔の孔壁に密着しやすい様に敷き広げ、一部を引いたりたるませたりしながら水を注ぐ。水はできるだけ孔口近くまで注水し、注水後に水面の高さを測定する。試験孔の容積は、転圧面の高さの平均値から水面高をひいたものに、掘削面上部の面積をかけたものと注水した水の容積の和となる。

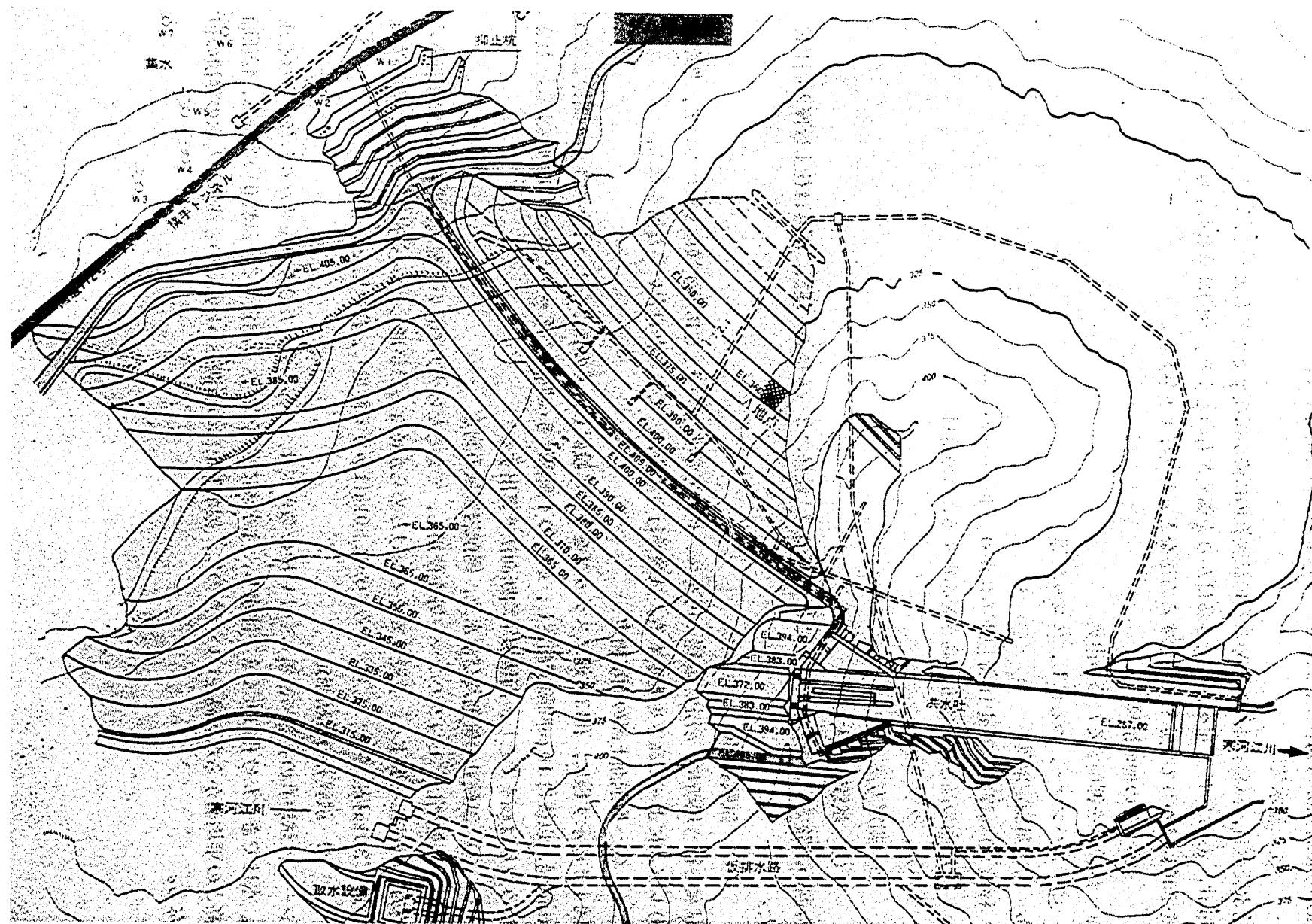


図 1.2 寒河江ダム平面図

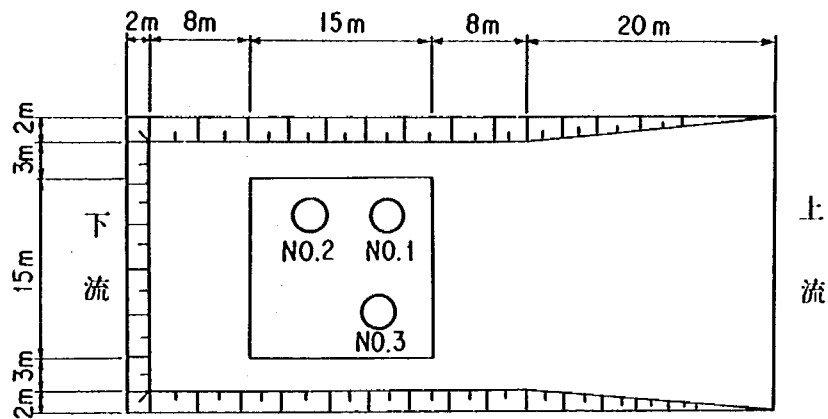


図 1.3 試験マットの形状

表 1.2 振動ローラー (SP60DD) の仕様

総重量 (kg)	17,780	振動数 (cpm)	0 ~ 1,525
前輪重量 (kg)	10,480	起振力 (t)	27.2
後輪重量 (kg)	7,300	最小回転半径 (m)	5.94
全長 (cm)	622	定格出力 (ps)	196
全幅 (cm)	305	速度 (km/hr)	0 ~ 10

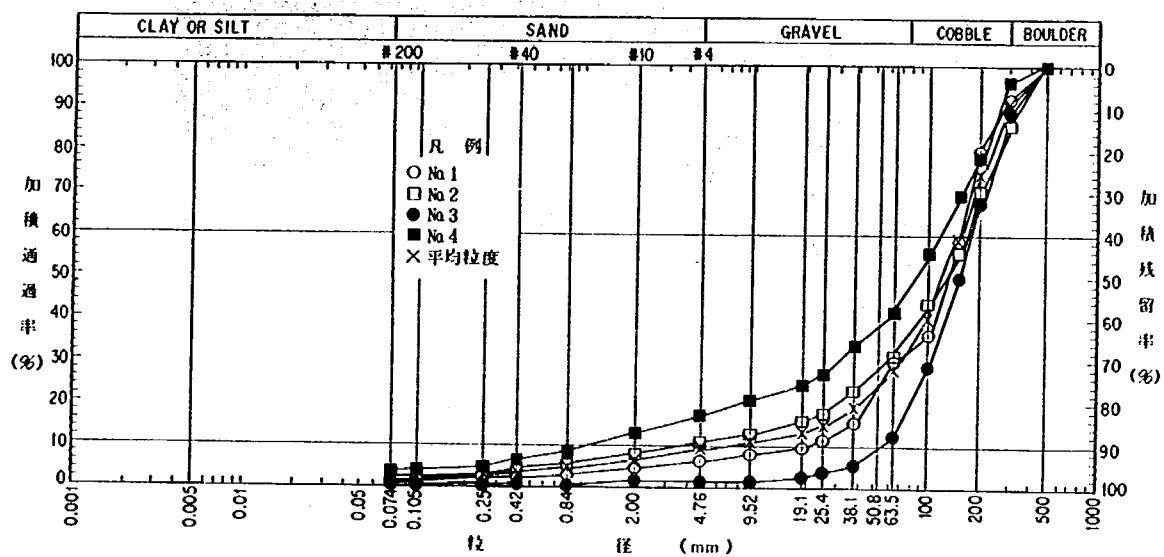


図 1.4 代表試料の粒度分布

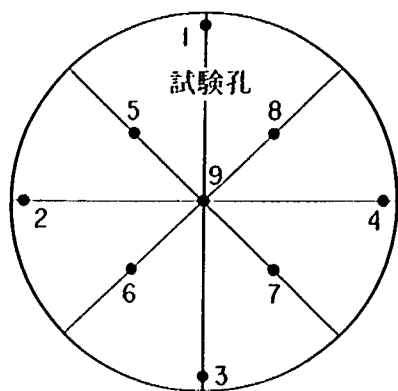


図 1.5 高さの測定位置（平面位置）

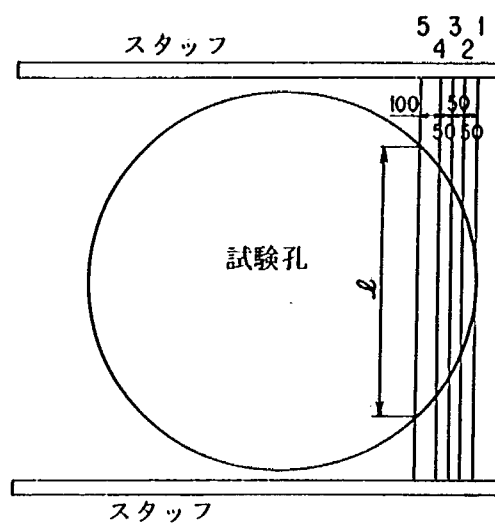


図 1.6 面積測定方法



写真 1.1 試験孔への給水状況

1.3.3 試験結果

1) 試験 I

シートの種類を変えて行った現場密度試験の結果を表 1.3, 図 1.7 に示す。この図によると、ビニールシートの厚さが薄くなるにつれて乾燥密度が小さくなる傾向を示している。厚さが 0.3 mm から 0.15 mm にかけて乾燥密度が急激に変化している主な原因は、孔壁とシートの密着の度合と考えられる。各ビニールシートと孔壁の密着状態を観察した結果によれば、細粒分が露出している部分では各シートの密着の度合にそれほど差はないが、礫が露出している部分では薄いシートの方が密着の度合がよかった。また孔壁が凹面状になっている部分では薄いシートでも完全に密着しなかった。今回の実験では、浮石等をできるだけ取るようにしたが、取り除いたため孔壁が凹面状になるような部分だと、そのままにしておく方がよいように思われる。

ゴムシートは、同じ厚さのビニールシートに比べて、乾燥密度が小さくなっていることから、かなりよく孔壁に密着していたと考えられる。しかし、不透明で密着の度合の観察がむづかしく、また重い作業性が悪く高価なので、ビニールシートの方が使い易いように思われる。

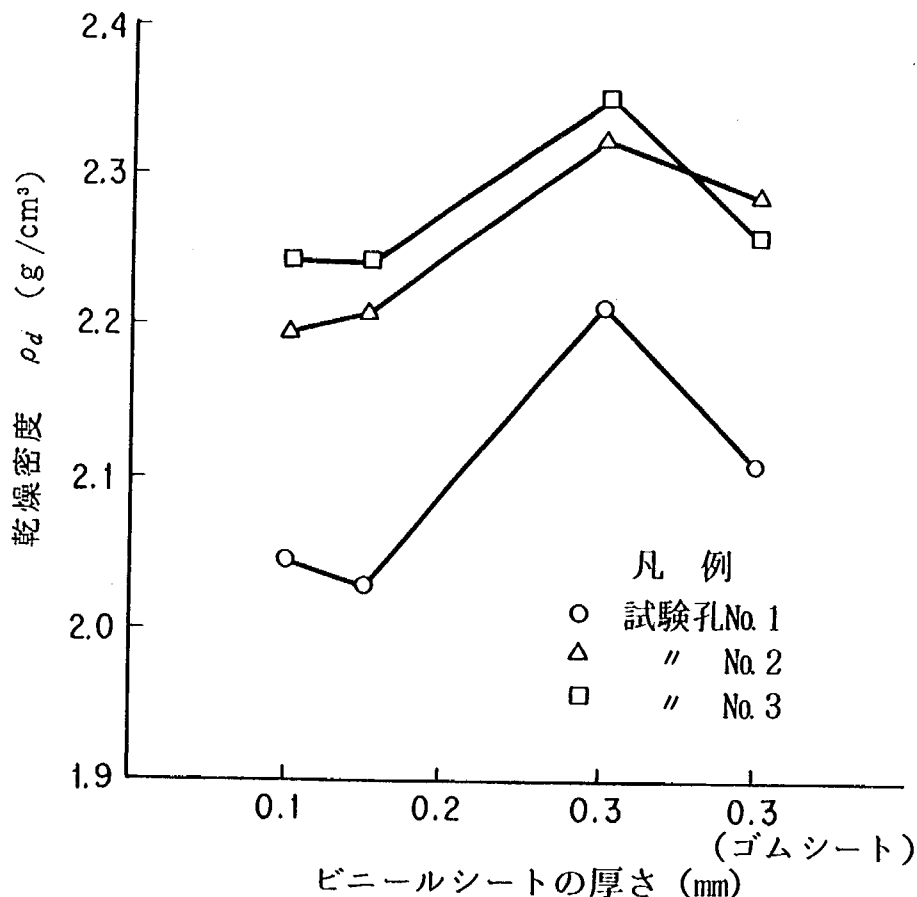


図 1.7 シートの厚さと乾燥密度の関係 (寒河江ダム)

表 1.3 シートの厚さを変えた現場密度試験結果

試験孔 No	シートの 種 類	撤出し 高 さ (m)	転圧後 高 さ (m)	水面の 高 さ (m)	水 量 (ℓ)	上 部 面 積 (cm ²)	試験孔 の容積 (ℓ)	試験孔 の深さ (cm)	真比重	表 乾 比 重	絶 乾 比 重	含水比 (%)	最 大 粒 径 (mm)	均 等 係 数 U _c	曲 率 係 数 U _c '	湿潤試 料重量 (kgf)	乾燥試 料重量 (kgf)	湿 潤 密 度 ρ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm ³)	G _s による 間隙比 e
No 1 $\phi = 1.0$ m	ビニール 0.3 mm	1.943	1.894	1.870	560.4	8216.0	580.12	102.7	2.773	2.699	2.658	3.2	300	140.0	11.4	1324.96	1283.88	2.284	2.212	0.202
	ビニール 0.15 mm	"	"	1.855	655.9	8462.5	688.90	"	"	"	"	"	"	150.0	6.83	1442.18	1397.18	2.093	2.028	0.311
	ビニール 0.1 mm	"	"	1.862	656.3	"	683.38	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.110	2.045	0.300
	ゴ ム 0.3 mm	"	"	1.886	655.7	"	662.47	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.177	2.109	0.260
No 2 $\phi = 1.0$ m	ビニール 0.3 mm	1.880	1.837	1.795	630.9	8056.0	664.74	102.7	2.778	2.618	2.521	4.5	300	123.2	2.88	1613.81	1544.65	2.428	2.324	0.085
	ビニール 0.15 mm	"	"	1.797	667.2	"	699.42	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.307	2.208	0.142
	ビニール 0.1 mm	"	"	1.807	678.8	"	702.97	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.296	2.197	0.147
	ゴ ム 0.3 mm	"	"	1.819	661.1	"	675.60	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.389	2.286	0.103
No 3 $\phi = 1.0$ m	ビニール 0.3 mm	1.869	1.833	1.805	654.9	9337.5	681.05	102.3	2.737	2.623	2.557	4.6	500	166.7	6.67	1675.04	1601.95	2.459	2.352	0.087
	ビニール 0.15 mm	"	"	1.790	674.3	"	714.45	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.345	2.242	0.140
	ビニール 0.1 mm	"	"	1.807	689.9	"	714.21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.345	2.243	0.140
	ゴ ム 0.3 mm	"	"	1.809	687.0	"	709.41	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2.361	2.258	0.132

2) 試験Ⅱ

孔径を広げておこなった現場密度試験の結果を表 1.4 , 図 1.8 , 1.9 に示す。図 1.8 は試験孔径と乾燥密度の関係を示したもので、また図 1.9 は試験孔径と間隙比の関係を示したものである。図 1.8 では試験孔 No A-1 , 試験孔径 $\phi = 2.5$ m で極端に乾燥密度が小さくなっているが図 1.9 では、他の孔径の間隙比とはほとんど変わらない。これは、この点だけ絶対比重が小さいためである。このポイントの絶対比重が全体の比重を正しく表わしているならば、乾燥密度が小さくなる事もうなずけるが、同じ穴で孔径を広げていただけだから、ここだけ絶対比重が小さくなるとも考えにくい。試験誤差による事も考えられるが、差が大きいのので、原因はよくわからない。また図 1.9 では試験孔 No A-2 の $\phi = 2.5$ m と $\phi = 3.0$ m で間隙比が大きくなっているが、図 1.8 ではほとんど変化がない。これも、このポイントの絶対比重が他の絶対比重よりも大きいためである。

当初の予想では比重にこれほどの変動があるとは考えていなかったもので、 D_{50} の絶対比重で整理したが、これだけ変動があると無理が生ずるようである。今後、比重の変動が大きい試料を使用するときは全粒径について比重試験を実施し、その平均値でデータを整理すべきだと思われる。

表 1.4 孔径を広げておこなった現場密度試験結果

試験孔 No	試験孔 孔 径 (m)	巻き出 し高さ (m)	転圧後 高 さ (m)	水面の 高 さ (m)	水 量 (ℓ)	上 部 面 積 (cm ²)	試験孔 の容積 (ℓ)	試験孔 の深さ (cm)	真比重	表 乾 比 重	絶 乾 比 重	含水 比 (%)	最大 粒径 (mm)	均 等 係 数 U _c	曲 率 係 数 U _{c'}	湿潤試 料重量 (kgf)	乾燥試 料重量 (kgf)	湿 潤 密 度 ρ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm ³)	G _s による 間 隙 比 e
No 1	$\phi=1.0$	1.943	1.894	1.862	656.3	8462.5	683.38	102.7	2.773	2.699	2.658	3.2	300	140.0	11.4	1442.18	1397.18	2.110	2.045	0.300
	$\phi=1.5$	1.934	1.891	1.836	1395.3	17673.2	1492.5	104.2	2.776	2.720	2.694	3.0	500	100.0	7.64	3144.0	3053.7	2.107	2.046	0.317
	$\phi=2.0$	1.933	1.889	1.846	2538.0	30763.9	2670.3	103.3	2.739	2.712	2.697	3.3	500	106.7	7.70	5682.0	5504.8	2.128	2.061	0.309
	$\phi=2.5$	1.928	1.882	1.834	4121.0	50186.0	4361.9	103.4	2.776	2.709	2.578	3.4	500	92.9	12.1	8954.4	8663.6	2.053	1.986	0.298
	$\phi=3.0$	1.942	1.879	1.783	5514.3	74986.0	6234.2	102.9	2.766	2.717	2.690	3.4	500	110.0	11.8	13578.5	13137.9	2.178	2.107	0.277
No 2	$\phi=1.0$	1.880	1.837	1.807	678.8	8056.0	702.97	102.7	2.778	2.614	2.521	4.5	300	123.2	2.88	1613.81	1544.65	2.296	2.197	0.147
	$\phi=1.5$	1.875	1.831	1.781	1356.4	17821.0	1445.5	103.4	2.801	2.662	2.584	4.5	500	128.1	3.73	3249.4	3108.9	2.248	2.151	0.201
	$\phi=2.0$	1.880	1.833	1.755	2403.5	31838.5	2651.8	103.1	2.825	2.643	2.544	4.7	500	120.0	3.76	5930.9	5667.2	2.237	2.137	0.190
	$\phi=2.5$	1.868	1.832	1.758	3701.2	49171.5	4065.1	101.7	2.773	2.731	2.707	4.3	500	146.7	5.87	9152.6	8773.2	2.252	2.158	0.254
	$\phi=3.0$	1.864	1.829	1.768	5549.7	73745.2	5999.5	102.5	2.798	2.715	2.669	4.3	500	126.4	6.02	13455.6	12897.7	2.243	2.150	0.241
No 3	$\phi=1.0$	1.869	1.833	1.807	689.9	9337.5	714.21	102.3	2.737	2.623	2.557	4.5	500	166.7	6.67	1675.04	1601.95	2.345	2.243	0.140
	$\phi=1.5$	1.877	1.836	1.795	1317.6	17240.5	1388.3	105.2	2.740	2.610	2.535	4.2	500	42.3	2.01	3146.4	3019.0	2.266	2.175	0.166
	$\phi=2.0$	1.890	1.840	1.815	2640.7	32552.0	2722.1	104.6	2.769	2.630	2.552	4.0	500	120.8	6.26	6265.6	6026.1	2.302	2.214	0.153
	$\phi=2.5$	1.880	1.844	1.813	3751.7	47105.8	3897.7	103.7	2.805	2.666	2.590	4.2	500	128.6	7.22	8997.1	8633.3	2.308	2.215	0.169
	$\phi=3.0$	1.891	1.844	1.796	5292.2	68704.0	5622.0	104.4	2.935	2.629	2.567	4.5	500	142.1	8.49	12793.2	12252.3	2.276	2.179	0.178

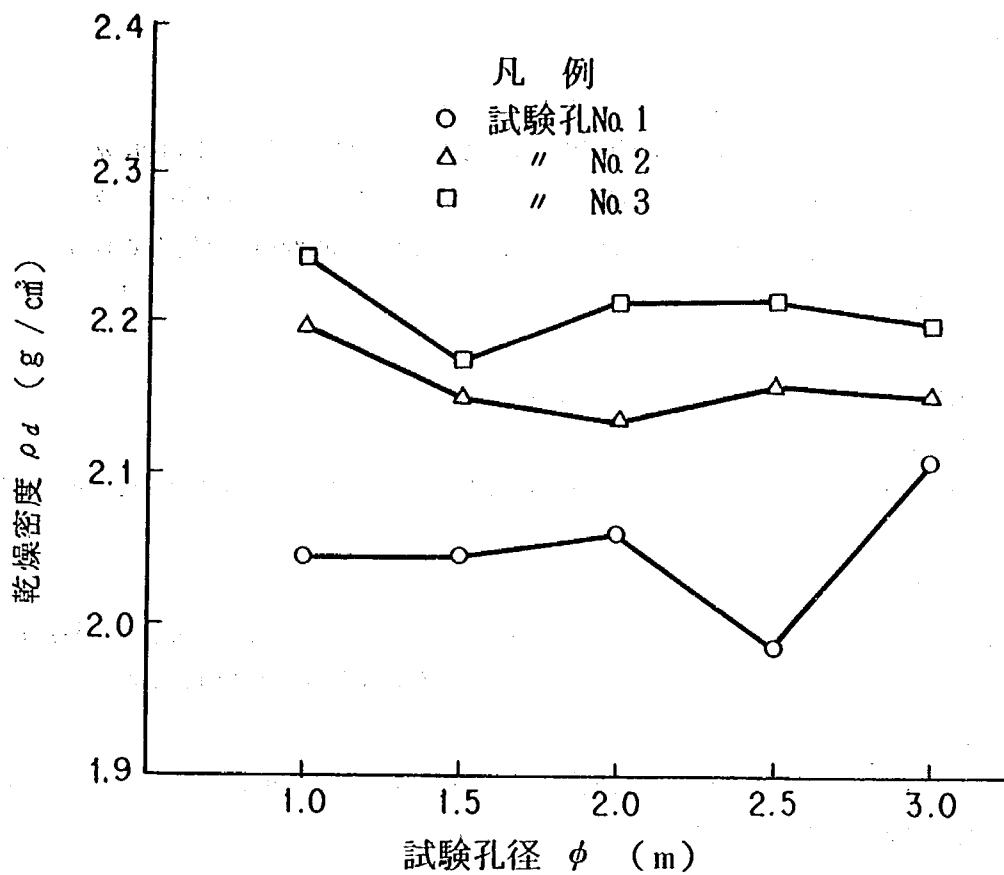


図 1.8 試験孔径と乾燥密度の関係

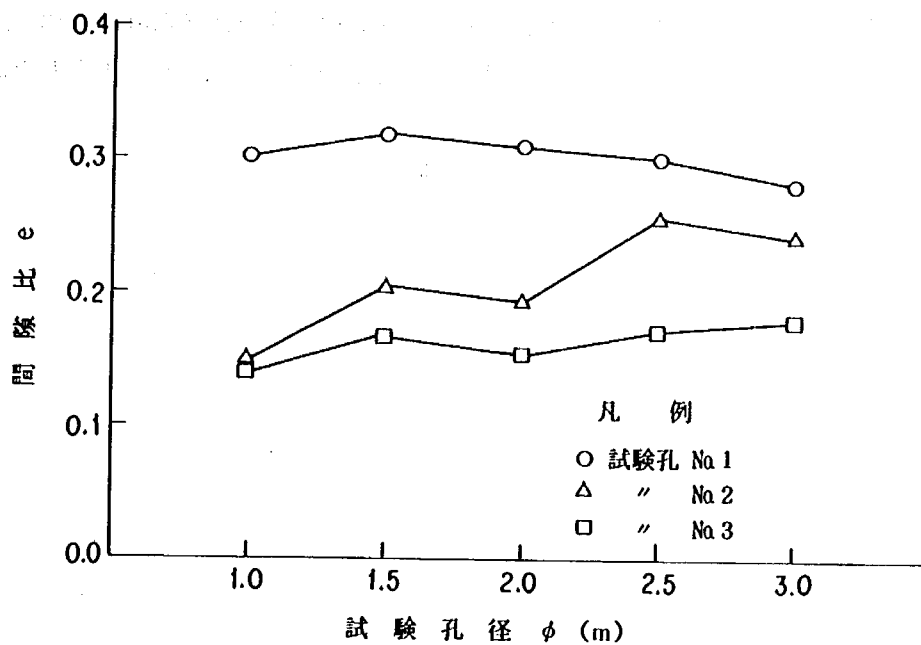


図 1.9 試験孔径と間隙比の関係

1.4 七ヶ宿ダム現場密度試験

1.4.1 七ヶ宿ダムの概要

七ヶ宿ダムは、宮城県阿武隈川の支川白石川に、流水の正常機能維持、洪水調節、かんがい、水道用水および工業用水の供給を目的とした多目的である。ダムの型式は中央コア型ロックフィルダムで、堤高 93 m、堤頂長 565 m、堤体積 5,000,000 m³、総貯水量 109,000,000 m³の規模である。

1.4.2 試験方法

1) 試験位置

試験は、堤体上流左岸のストックヤードで実施した。

2) 試験マットの形状

試験マットの形状、寸法および現場密度試験孔の配置は図 1.10 のとおりであり、仕上り厚は 1 m で 1 層とした。

3) 試験試料

試験試料は、本体掘削ずりを使用した。岩種は石英安山岩で、仮置場から採取する時点に、500mm 以上の粒径を取り除いて、最大粒径を調整した。試料の粒度分布を図 1.11 に示す。

4) 転圧仕様

転圧機種は、振動ローラー SP60DD を使用した。仕様は表 1.2 に示すとおりである。転圧回数は 6 回、転圧速度は 3 km / hr で試験した。

5) 試験内容

(1) 試験 I — シート厚さの比較試験

農業用塩化ビニルフィルムの厚さが 0.075 mm、0.1 mm、0.15 mm、0.3 mm の 4 種について、同一孔で現場密度試験を実施した。試験孔径は直径 1.5 m、深さは 1.0 m とした。

(2) 試験 II — 孔径の比較試験

最初に 1.0 m の孔を掘削し試験をおこなった後、孔径を試料の最大粒径 (500 mm) の 3, 4, 6 倍に広げて実施した。試験に使用したシートは、試験 I で最も適当と判断されたシートとした。

6) 現場密度試験方法

試験方法は、寒河江ダムで実施した現場密度試験と同様である。

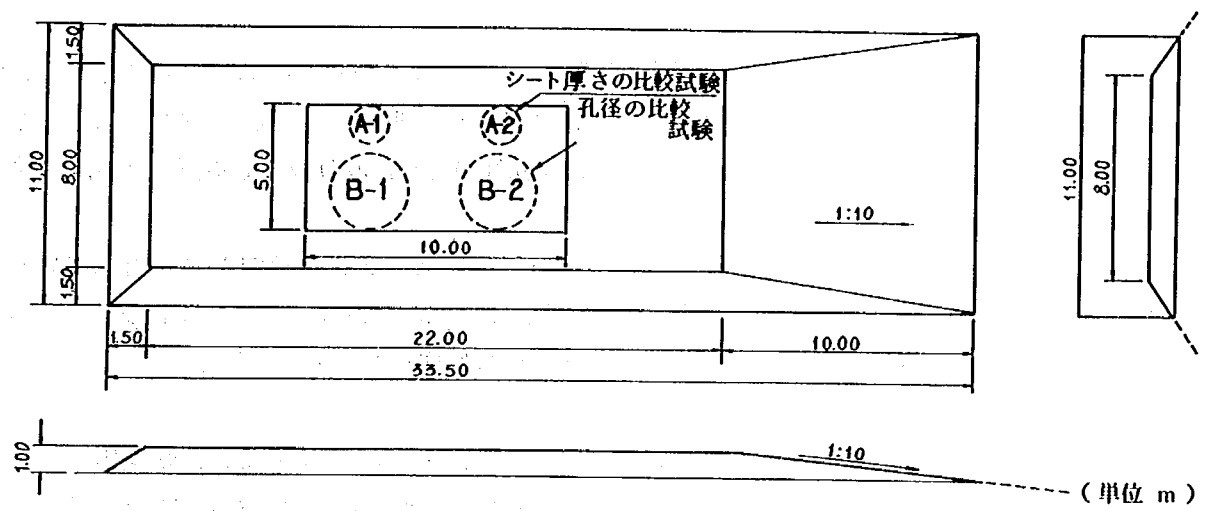


図 1.10 試験マットの形状

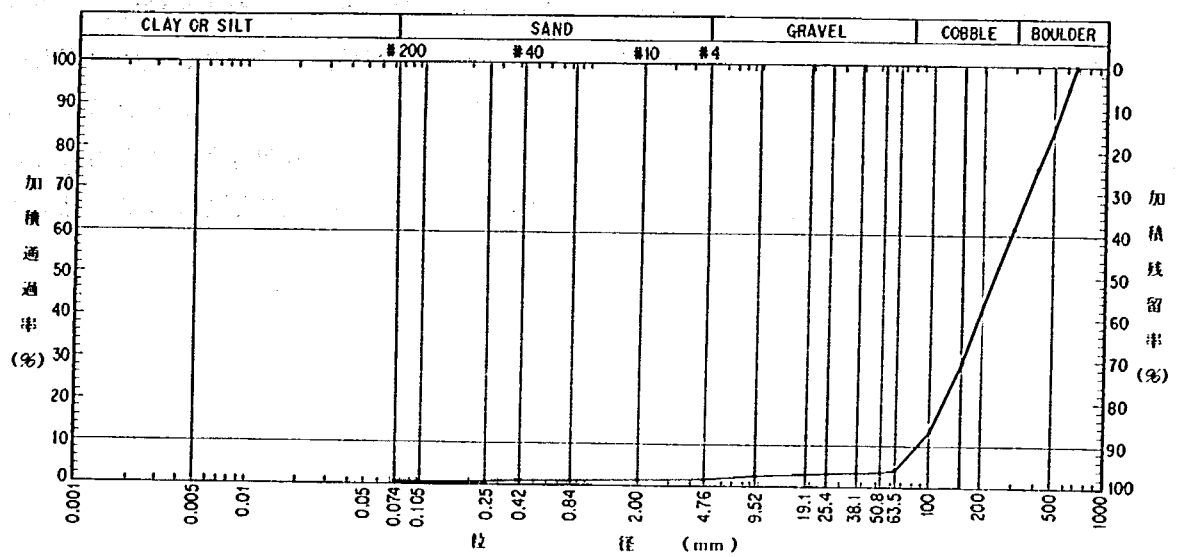


図 1.11 代表試料の粒度分布

1.4.3 試験結果

1) 試験Ⅰ

試験結果を表 1.5, 図 1.12 に示す。この図によると, シート厚さが 0.3 mm のところでは, 乾燥密度が大きくなっている。乾燥密度が大きいという事は, 試験孔の容積を小さく測定していることになり, 誤差は大きいと考えられる。また 0.3 mm のシートは, 柔軟性が悪く, 取り扱いも不便なため, 試験には不適であるといえる。

厚さが 0.075 mm, 0.1 mm, 0.15 mm のシートは, NaA-1 孔と A-2 孔で傾向が逆になっているため, はっきりしたことはわからない。作業性の面から見れば, 厚さ 0.075 mm のシートは試験中に破れる事があるため, ロック材料の現場密度試験に使用するのは無理があるようである。

2) 試験Ⅱ

試験結果を表 1.6, 図 1.13 に示す。図 1.13 によると, 孔径 1.0 m ~ 2.0 m では, 乾燥密度に大きな変化はないが, 3.0 m のところでは 1.0 m に比べて約 3 % 乾燥密度が小さくなっている。また 2 ケ所測定している試験孔の乾燥密度も, 同程度の差がある。2 ケ所の試験孔の乾燥密度に差がある原因としては, 粒度条件の違いが考えられる。図 1.10 から, 2 ケ所の試験孔の距離は 5 m 程度であり, 敷均し時および転圧時の重機による締固め仕事量の差はほとんどないと考えられる。粒度は, 均等係数の違いにより, 密度に及ぼす影響はかなり大きい。敷均し時の材料分離によって, 近距離でも粒度条件が違ふことは十分に考えられ, これが原因となって乾燥密度に差がでたものと思われる。この様に考えると, 孔径が 3.0 m のところで乾燥密度が小さくなっているのも, 粒度条件によるものという可能性が大きい。いずれにしても, このデータだけでは最適な孔径について判断を下すことはできない。

表 1.5 シートの厚さを変えた現場密度試験結果

試験孔 No	シートの種類	転圧後 高さ (m)	水面の 高さ (m)	水 量 (ℓ)	上 部 面 積 (cm ²)	補正值 (ℓ)	試験孔 の容積 (ℓ)	代 表 試 料		含水比 (%)	湿潤試 料重量 (kgf)	乾燥試 料重量 (kgf)	湿 潤 密 度 ρ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm ³)	G _b による 間 隙 比 e
								表 乾 比 重	絶 乾 比 重						
A-1 $\phi = 1.5$ m	ビニールシート 0.3 mm	264.703	264.701	1299.4	19390	3.88	1303.28	2.49	2.42	6.5	2834.30	2661.30	2.175	2.042	0.185
	ビニールシート 0.15 mm	"	264.679	1281.1	"	46.54	1327.64	"	"	"	"	"	2.135	2.005	0.207
	ビニールシート 0.1 mm	"	264.673	1261.6	"	58.17	1319.77	"	"	"	"	"	2.148	2.016	0.200
	ビニールシート 0.075 mm	"	264.674	1260.5	"	56.23	1316.73	"	"	"	"	"	2.153	2.021	0.197
A-2 $\phi = 1.5$ m	ビニールシート 0.3 mm	264.684	264.657	1058.0	17590	47.49	1105.49	"	"	6.3	2439.03	2294.48	2.206	2.076	0.166
	ビニールシート 0.15 mm	"	264.670	1090.0	"	24.63	1114.63	"	"	"	"	"	2.188	2.059	0.175
	ビニールシート 0.1 mm	"	264.668	1091.0	"	28.14	1119.14	"	"	"	"	"	2.179	2.050	0.180
	ビニールシート 0.075 mm	"	264.665	1089.1	"	33.42	1122.52	"	"	"	"	"	2.173	2.044	0.184

表 1.6 孔径を広げておこなった現場密度試験結果

試験孔 No	試験孔孔径 (m)	転圧後 高さ (m)	水面の 高さ (m)	水 量 (ℓ)	上 部 面 積 (cm ²)	補正值 (ℓ)	試験孔 の容積 (ℓ)	代 表 試 料		含水比 (%)	湿潤試 料重量 (kgf)	乾燥試 料重量 (kgf)	湿 潤 密 度 ρ_t (g/cm ³)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm ³)	G_o による 間 隙 比 e
								表 乾 比 重	絶 乾 比 重						
B-1	$\phi = 1.0$	264.773	264.751	683.6	9240	20.33	703.93	2.49	2.42	4.8	1511.11	1441.90	2.147	2.048	0.182
	$\phi = 1.5$	264.769	264.765	1359.3	16390	6.56	1365.90	"	"	4.5	2921.18	2795.39	2.139	2.047	0.182
	$\phi = 2.0$	264.766	264.751	2391.2	31780	47.67	2438.87	"	"	5.0	5220.03	4971.46	2.140	2.038	0.187
	$\phi = 3.0$	264.757	264.731	5318.9	69070	179.58	5498.48	"	"	5.3	11497.62	10918.92	2.091	1.986	0.219
B-2	$\phi = 1.0$	264.720	264.701	572.9	10920	20.75	593.65	"	"	4.7	1303.84	1245.31	2.196	2.098	0.153
	$\phi = 1.5$	264.718	264.713	1066.5	16910	8.46	1074.96	"	"	5.1	2381.60	2266.03	2.216	2.108	0.148
	$\phi = 2.0$	264.719	264.709	2186.1	31710	31.71	2217.81	"	"	5.1	4898.31	4660.62	2.209	2.101	0.152
	$\phi = 3.0$	264.715	264.687	4906.2	69290	194.01	5100.21	"	"	5.3	10871.64	10324.44	2.132	2.024	0.196

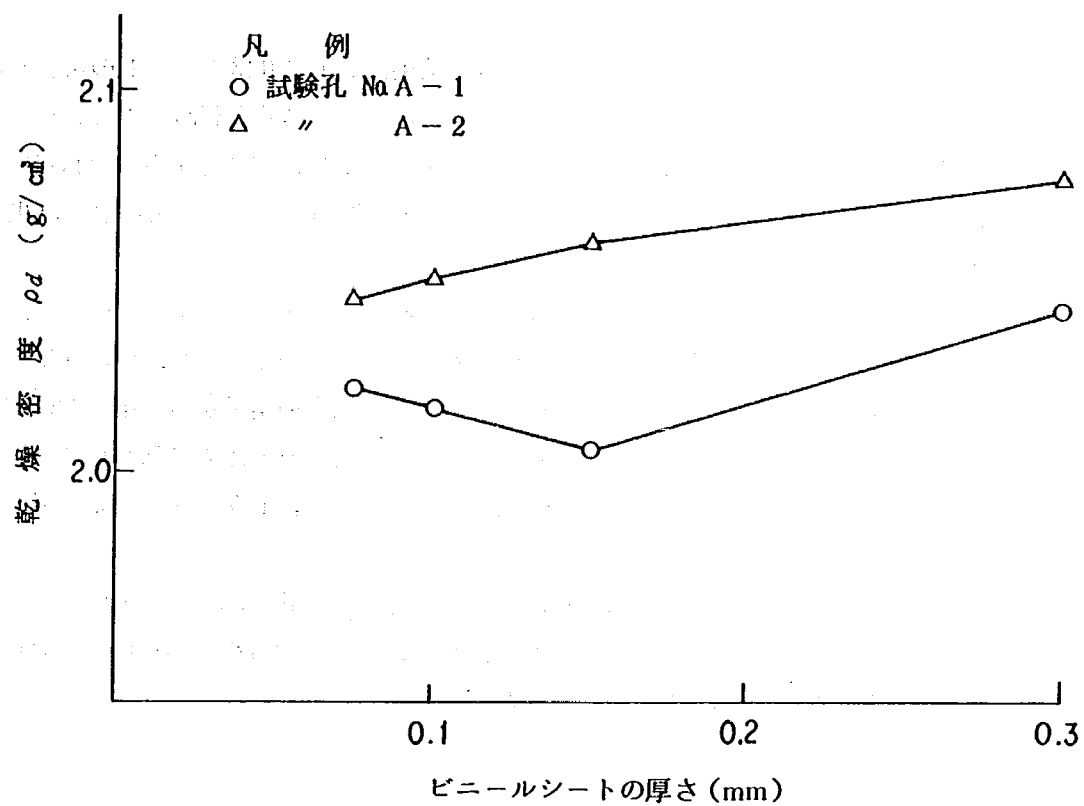


図 1.12 シートの厚さと乾燥密度の関係 (七ヶ宿ダム)

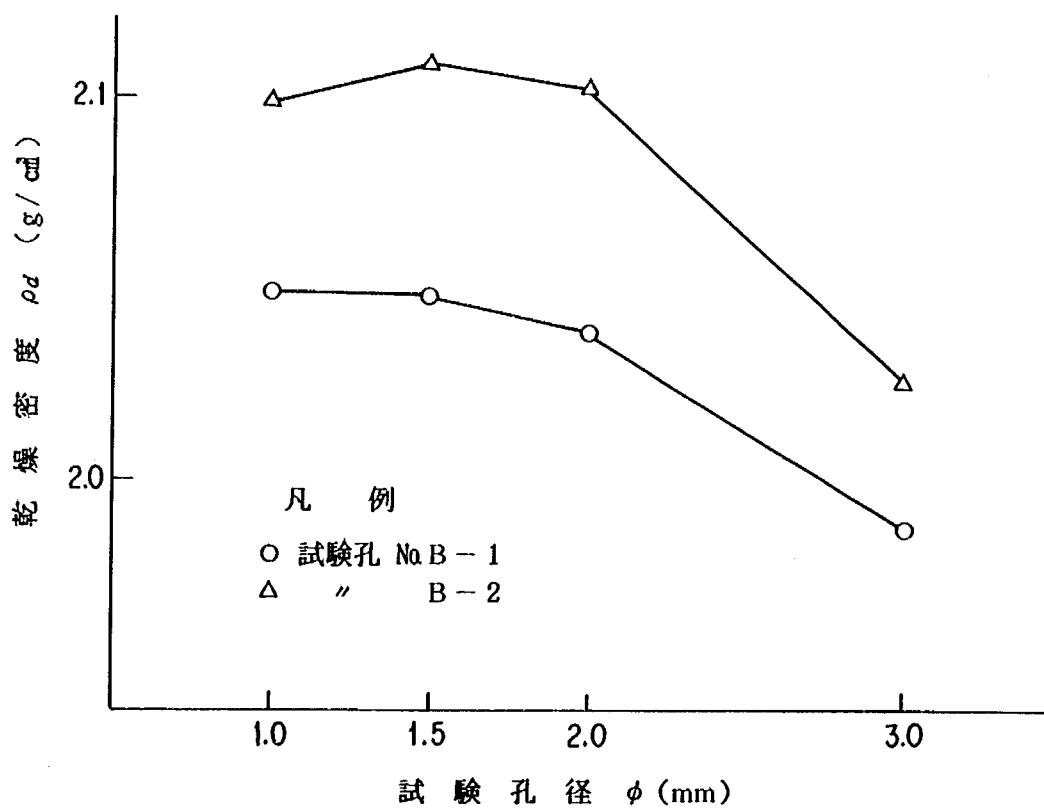


図 1.13 試験孔径と乾燥密度の関係 (七ヶ宿ダム)

1.5 考 察

シートの厚さに関しては、寒河江ダムと七ヶ宿ダムの試験結果、および孔壁とシートの密着度合の肉眼観察から、農業用塩化ビニールフィルムの厚さ 0.1 mm が最も適当であると判断できる。シートの厚さは、薄い方が精度はよいと考えられるが、厚さ 0.075 mm のシートは、細粒分が少ない材料では破れることがあり、不適である。厚さが 0.1 mm というのは、図 1.1 の Tarbera ダムでの試験結果でも誤差は小さく、妥当な値であるといえる。

孔径については、今回の試験データだけでは、はっきりした結論を下すことはできない。寒河江ダムの試験では、試料の最大粒径の 2 倍では乾燥密度がやや大きくなっている。また、現場作業の観察によると、1.5 m の孔径ではやや作業性が悪いように感じられた。以上の結果から、第 3 章の現場密度試験の試験孔径は、「試料の最大粒径の 3 倍か 2 m の大きい方」という考え方に基いて決定した。寒河江ダムでは、試料の最大粒径が 500 mm だったので孔径は 2.0 m とし、七ヶ宿ダムでは、最大粒径を 1.000 mm としたので、孔径は 3.0 m とした。

現場密度試験は、作業が大がかりとなるため試験誤差が大きく、標準化を図るのは非常にむづかしい。シートの厚さについてはある程度の結論を下せたが、孔径については今後さらに同様の試験を実施し、データを蓄積して総合的に判断しなければならない。

2. 室内締固め試験

2.1 室内締固め試験の現状と問題点

室内締固め試験は、締固め方法によって次の4種類に分類できる。⁷⁾

- ① 衝撃的荷重による締固め
- ② 静的荷重による締固め
- ③ 半動的荷重による締固め
- ④ 振動による締固め

①の方法はJISを始めASTM, BS等で一般的に用いられている方法で、主としてシルト、粘土を対象としておこなわれている。ロック材でこの方法を採用するならば、締固め仕事量と密度の関係はよくわかるが、岩石粒子の破碎量が大きくなるという欠点がある。②の方法は、CBR試験における供試体作成時の方法であるが、荷重と密度の関係は得られるものの破碎量が多い。③の方法は実際の転圧機械に最も近い方法であるが、仕事量を測定することがむづかしく、仕事量と密度の関係が求めにくい。④の方法は破碎量も小さく、粒状体に適した方法であるが、③と同様仕事量が求めにくい事と、材料の分離をおこすという欠点がある。この中で最も一般的にロック材の締固め試験としておこなわれているのは、①の衝撃的荷重による締固めである。しかしこの方法も、ランマーの直径、重量、落下高さ等まちまちなのが現状である。(表2.1)⁸⁾。

ロック材料には粒径が1mを越す大塊が含まれていることもあり、現場の粒度そのままを室内で試験することは実質上不可能である。そのため一般的には、“相似粒度”の手法で最大粒径を低減し、締固め試験を実施している。この場合も、試料の最大粒径とモールドの内径の関係⁹⁾や、相似粒度の適用範囲については明確にされていない。また、細粒分の多い材料の最大粒径低減方法には定まった方法はない。

以上のことから、2.2では半自動突固め装置を製作して、ランマーの直径、重量、落下高さを変えた突固め試験について、また2.3では試験粒度の作成方法について、実施した試験結果をとりまとめて考察を加える。

表 1 大型締固め試験実績⁸⁾

ダム名	呼 称	モ ー ル ド			ラ ン マ			突 固 め			最 大 粒 径 mm	目 的	備 考
		直 径 cm	高 さ cm	容 積 cm ³	重 量 kg	落下高 cm	直 径 cm	層 数	回 数	※ 仕事量			
御母衣	L-装置	25.6	29.0	14,930	4.5	45.0	5.0	5	82	1	40	締固め	最大粒径はこの他に 5、10、15、20mmで行ない、相関を調べている。 当初は 75 回を行なったが後に 45 回に変更
"	P-装置	30.0	30.0	21,200	4.5	45.0	5.0	6	96	1	40	透 水	
牧 尾	M B T S	20.0	25.4	8,000	10.0	50.0		5	45	2.5		締固め	
									75	4.15	50		
本 沢	H-規格	30.5	34.3	25,000	4.5	45.0	5.0	5	139	1	50	締固め	透水用（第2法）は同一モールドで振動締固めを行なっている。
魚梁瀬	大 型	26.0	30.1	15,970	7.27	45.0	8.69	5	55	1	40	透 水	
新 冠	第 1 法	30.0	35.4	25,000	10.0	75.0	10.0	5	19	0.5	40	透 水	
									38	1		締固め	
									76	2			施工管理に使用
									114	3			
大 雪	H 規 格	30.5	34.3	25,000	4.5	45.0	5.0	5	139	1	50	締固め	
												透 水	
下小島	大 型	30.0	31.0	21,900	4.5	45.0	5.0			1	50	締固め	施工管理に使用
黒 川		30.0	38.0	26,850	4.5	45.0	5.0			1.5	50	締固め	
瀬 戸		30.0	37.0	26,140	4.5	45.0	5.0			1	50	締固め	
玉 原		30.0	35.4	25,000						3		締固め	
寺 内	大 型	30.0	35.4	25,000	10.0	75.0	10.0	5	38	1	60	締固め	() は仕事量を1とした場合
三 保	大 型	30.0	35.4	25,000	4.5	45.0	5.0	5	139	1	60	締固め	
												透 水	
電 発		30.0	35.4	25,000	4.5	45.0	5.0	5	139	1			締固め
電 研		30.0	35.4	25,000	10.0	75.0	10.0	5	38	1	60		
要領案	大 型	30.0	35.4	25,000	10.0	75.0	10.0	5	(38)		*50		
					4.5	45.0	5.0		(139)	(1)	60	透 水	

注) ※JIS A 1210第1法 (EC≒5.6 cm kg / cm³) を1とする。

*小型 (φ 10 cm) の最大粒径 15.9 mmか 19.1 mmによって 50 mmか 60 mmを決定。

2.2 大型締固め試験

2.2.1 試験目的

JIS・A・1210の突固めによる土の締固め試験は、土質材料を対象とした締固め試験方法である。ここで規定されているのは、モールドの直径、ランマーの直径、重量、落下高さ、試料の最大粒径、礫の含有率等である。モールドの直径は10 cmと15 cm、試料の許容最大粒径は38.1 mmである。ロック材の場合、最大粒径が1 mを越すものもあり、できるだけ大きい粒径、モールドを使用する事が望ましいが、試験の手間等を考慮して、一般的には内径30 cmモールドで試験されている。モールドの内径と試料の最大粒径の関係は次項にゆずるとして、ここでは内径30 cmモールドを使用した時の、ランマーの直径、重量、落下高さに着目して、これらを変化させた時の間隙比から、最適な試験方法を求める事を目的とする。

2.2.2 装置の機構

試験をおこなうに当り、当研究室では半自動締固め試験装置を製作した。(図2.1, 写2.1)この試験機は、モーターによって上部カムを回転させ、カムとランマーロッドの摩擦によりランマーを持ち上げ、所定の高さまで上がると摩擦が解除されてランマーが自由落下し、試料を締固めるものである。そのため、ランマー落下時のロッドと周囲の接触による摩擦損失は無視してさしつかえない。モールドの前後移動、回転は手動でおこない、モールドを動かす時間に合わせてランマーの引上げ速度を調節できるようになっている。落下高さは25 cm, 50 cm, 75 cmに変える事ができるよう、カムの取りはずしが可能になっている。ランマーロッドは、重量が5 kgf, 10 kgf, 15 kgfの3種類、直径は7.5 cm, 10 cm, 11.5 cm, 12.5 cm, 15 cm, 29 cmの6種類で、合計10種類用意した。

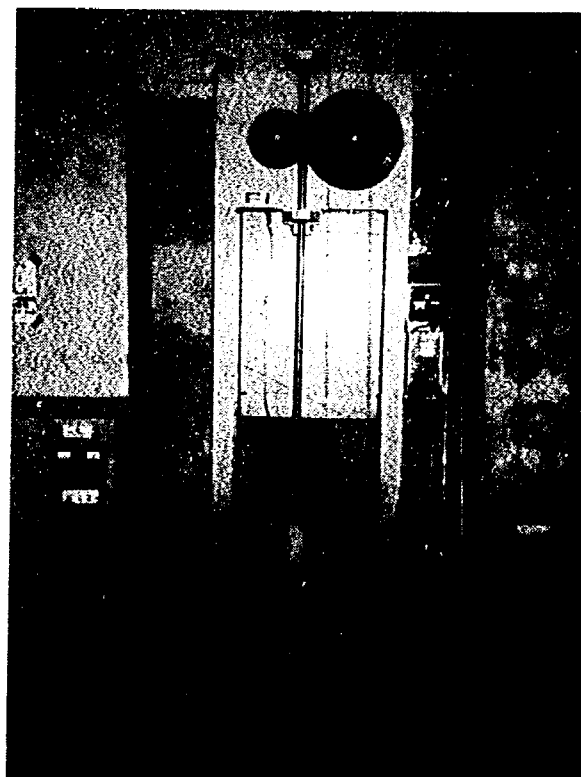


写真 2.1 半自動締固め試験装置

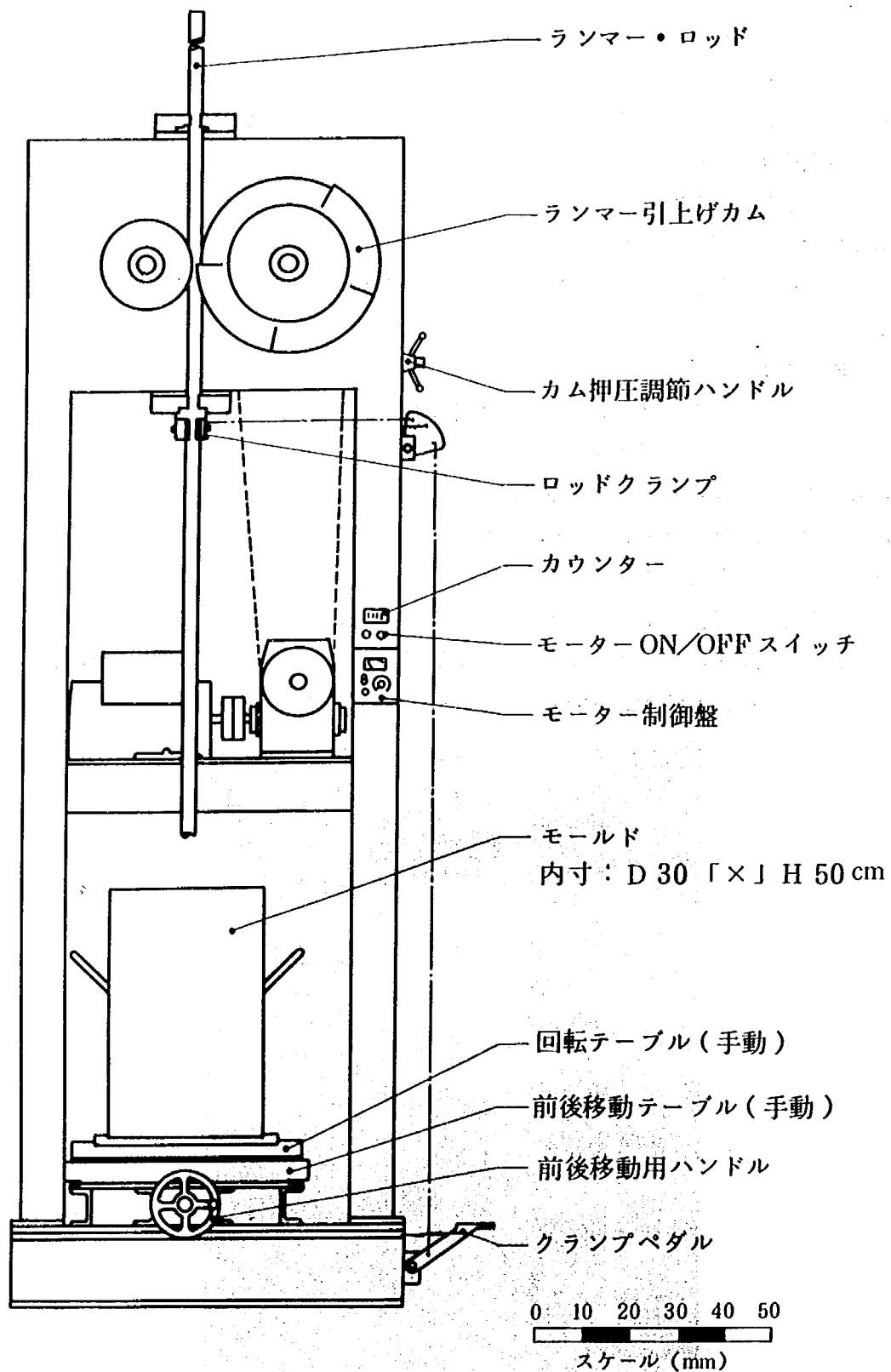


図 2.1 半自動締固め試験装置

2.2.3 試験方法

1) 予備試験

(1) 試験準備

試料は七ヶ宿ダムのありや山より採取した石英安山岩、および砂岩の碎石を使用した。土木研究所大型土質試験室に試料を搬入したのち気乾状態にし、ふるい分け作業をおこなった。使用したふるいは JIS に規定されている 63.5, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.76, 2.00, 0.84, 0.42, 0.074 mm の 11 種類である。

(2) 比重および吸水率

試料の粒径が 4.76 mm～63.5 mm については JIS・A・1110, 粒径が 4.76 mm 未満については JIS・A・1202 の方法で実施した。なお算出は以下の式によるものとする。

$$\text{表乾比重 } G_a = \frac{B}{B - C} \quad \begin{array}{l} A : \text{絶乾重量} \\ B : \text{表乾重量} \\ C : \text{水中重量} \end{array}$$

$$\text{絶乾比重 } G_b = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{真比重 } G_g = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{吸水率 } Q = \frac{B - A}{A} \times 100 (\%)$$

(3) 含水量試験

JIS・A・1203 に準拠して(1)でふるい分けた全粒径についておこなった。この値を使用して試料の乾燥重量を求めた。

2) 締固め試験

(1) 試験条件

試験条件を表 2.2 に示す。突固め層数は、表 2.1 からわかるように一般的に 5 層で実施されている。今回の試験で 3 層としたのは、試料の最大粒径が 63.5 mm なので 5 層にすると 1 層分の厚さが最大粒径とほぼ同じになってしまうからである。

試料の粒度分布は図 2.2 に示す 2 種類とした。これは一般的なダムのロック材の粒度分布¹⁰⁾の中で、均等係数の大きい粒度と小さい粒度をそれぞれ相似粒度にしたものである。均等係数の小さい粒度は七ヶ宿ダムの試料（以下試料 A と記す）を使用した。またこの粒度は、原石山より採取したロック材の相似粒度となっており、均等係数は 11 である。均等係数の大きい粒度の試料は砂岩の碎石（以下試料 B と記す）を使用した。均等係数は 30 である。

(2) 試験ケース

試験ケースの一覧表を表 2.3 に示す。当初はランマーの直径が 11.5 cm 程度が適当と考え、落下高さ、重量を変えた試験では直径 11.5 cm モールドを使用した。しかし試料 A の試験結果では直径 15 cm ランマーが適当であると考えられたので、試料 B の試験では 15 cm ランマーを使用した。

(3) 締固め試験方法

- ① モールドを突固め試験機の回転テーブルに乗せ、ボルトで固定する。
- ② モールド上端からモールド底面までの高さを測定し、モールド深さとする。

- ③ 所定の直径、重量、落下高さとなるようランマーロッドおよびカムを設置する。
- ④ 試料の締固め後の目標高さを3層で約35 cmとし、1層毎に試験粒度分布に試料調製したものを用意する。
- ⑤ 1層分の試料を練板の上に均等に敷均し、4分法により16等分したものを、ハンドスコップで静かに落差を与えないようモールド内に投入する。（この作業を3層目までおこなったものをOE_cとする）
- ⑥ モーターのスイッチをONにし、カムを動かしてランマーロッドを引上げる。
- ⑦ 手でテーブルを前後移動および回転させながら所定の回数突固める。尚この時、試料全面にランマーが当たるよう調節しながらテーブルを移動する。
- ⑧ 締固めが終わったら締固め面が一様の高さとなるよう手で均してモールド上端部から試料上面までの高さを測定する。試料Aを使用した試験では図2.3 aに示すように9点測定した。しかし測定値が乾燥密度に大きく影響するため、その後の試料Bの試験では測定点を増やし、図2.3 bに示すように17点測定した。
- ⑨ ④～⑧までの作業を3回繰返して締固め完了とする。突固め後の試料密度は、全投入試料（乾燥重量に換算したもの）を締固め後の体積（モールド内径と⑧で求めた締固まり厚さより算出する）で除して求める。

(4) 破碎率

各仕事量で締固め後、破碎率を求めるために粒度試験をおこなった。使用したふるいは試料準備に使用したものと同様11種類である。破碎率はMarsalの破碎率¹¹⁾で求めた。Marsalの破碎率とは試験後の各粒径毎の残留百分率から試験前の残留百分率を差し引き、同符号のみをたしあわせたものである。破碎率の求め方の一例を図2.4に示す。

表2.2 試験条件

使用モールド	内 径	30 cm
	高 さ	50 cm, 目標突固め最終高さ 35.4cm
	容 積	25,000 cm ³ (目標の試料容積)
	層 数	3 層
締 固 め 条 件	仕 事 量	0.5 Ec, 1.0 Ec, 2.0 Ec, 3.0 Ec, 5.0 Ec の5種類, 但しOE _c (投入のみ) は各試料3回おこなう (1 Ec $\approx$ 5.6×10^4 mkg f / m ²)
試 料 条 件	最 大 粒 径	63.5 mm
	均 等 係 数	試料A …… 11 試料B …… 30

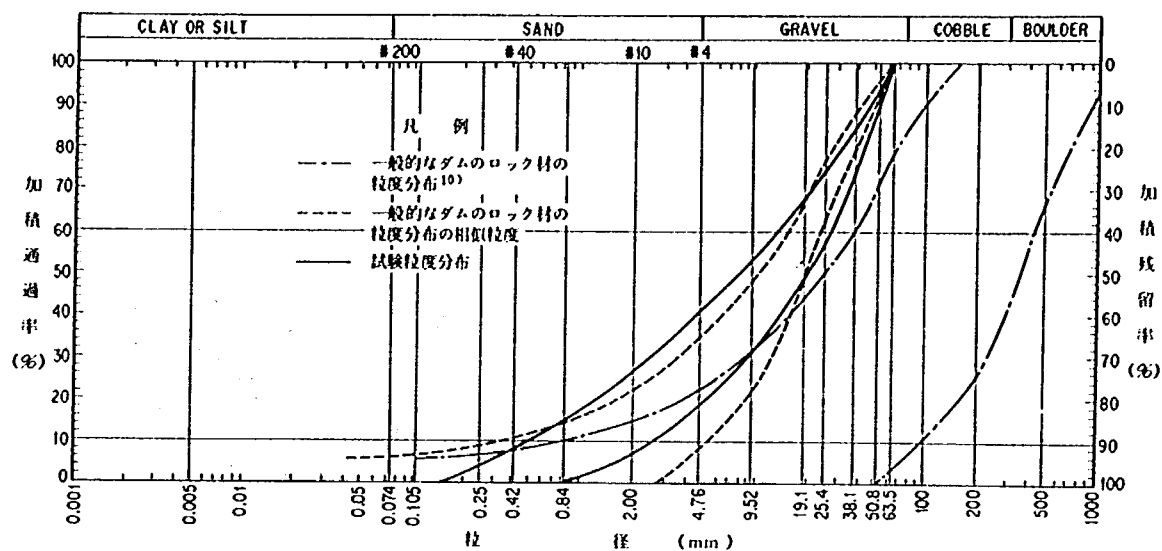


図 2.2 試料の粒度分布

表 2.2 試験ケース一覧表

試験 ケース	試 料	ラ ン マ ー の 条 件		
		直 径 (cm)	重 量 (kg f)	落 下 高 (cm)
①	試 料 A (均等係数 11)	7.5	10	50
②		10.0	10	50
③		11.5	10	50
④		12.5	10	50
⑤		15.0	10	50
⑥		29.0	10	50
⑦		11.5	5	50
⑧		11.5	15	50
⑨		11.5	10	25
⑩		11.5	10	75
⑪	試 料 B (均等係数 30)	7.5	10	50
⑫		10.0	10	50
⑬		11.5	10	50
⑭		12.5	10	50
⑮		15.0	10	50
⑯		29.0	10	50
⑰		15.0	5	50
⑱		15.0	15	50
⑲		15.0	10	25
㉑		15.0	10	75

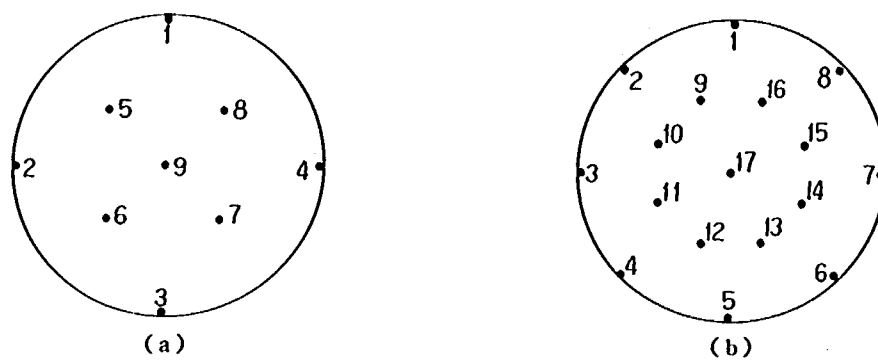
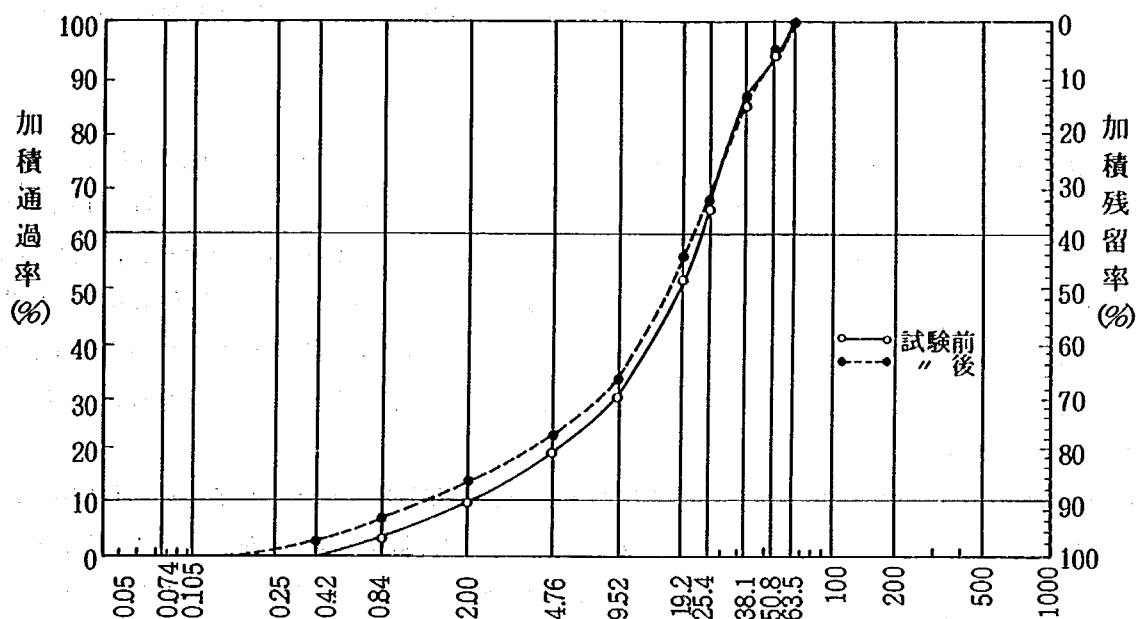


図 2.3 試料高さ測定位置



粒 径 d mm	試 験 後		試 験 前		粒径別破碎率 ①～② (%)
	気乾重量kg	①残留率 (%)	気乾重量kg	③残留率 (%)	
63.5～50.8	4,322	5.3	4,895	6.0	-0.7
50.8～38.1	7,960	9.8	8,150	10.0	-0.2
38.1～25.4	14,712	18.1	15,504	19.0	-0.9
25.4～19.1	9,574	11.8	11,474	14.0	-2.2
19.1～9.52	18,382	22.4	17,952	27.0	0.4
9.52～4.76	8,296	10.7	8,160	10.0	0.2
4.76～2.00	7,214	8.9	7,344	9.0	-0.1
2.00～0.84	5,649	6.9	5,712	7.0	-0.1
0.84～0.42	3,064	3.8	2,448	3.0	0.8
0.42～0.074	0,503	0.6			0.6
計	1,760	2.2			2.2
	81,436	100.0	81,599	100.0	4.2

Marsal の破碎率 $0.7 + 0.2 + 0.9 + 2.2 + 0.1 + 0.1 = 4.2\%$

図 2.4 破碎率の求め方の一例

2.2.4 試験結果

1) 比重試験

比重試験の結果を表 2.4 に示す。間隙比算出に用いる比重の平均値は以下の方法で計算した。試料 A は、粒径 4.76 mm 以上は絶乾比重の値を使用し 4.76 mm 未満は真比重の値を使用して、試験時の粒度分布曲線の重量百分率で加重平均した値とした。試料 B は砂岩の碎石で、クラッシングする前の材料の比重は変わらないと考えることができ、実際に真比重の値も粒径によってそれほど変わらない。そこで、粒径 4.76 mm 以上の試料の絶乾比重の平均値とした。

2) 締固め試験

試験結果を表 2.5, 2.6 に示す。また締固め仕事量と間隙比の関係を図 2.5 ~ 図 2.7 に示す。

図 2.5 は直径を変化させたときのグラフである。ランマーの直径が 29 cm のとき、 $U_c=11$ は間隙比が大きくなっているが、 $U_c=30$ では逆に小さくなっている。直径 29 cm のランマーは、大きさがモールドの内径とほぼ同じなので、全体を一様に突固めることができる。しかし均等係数が小さい場合は、突固めによって材料の分離がおこり、表面の大きな粒径が締固めの邪魔をするため間隙比が大きくなるものと考えられる。またモールド内の空気抵抗も考えられ、直径 29 cm ランマーはあまり実用的でないように思われる。

直径 29 cm ランマーを除けば、ランマーの直径が大きい方が間隙比が小さくなるという傾向を示している。直径の小さいランマーは、ランマーが落下したところは締固められるが、そのまわりは盛り上がるという状態がみられた。この状態になると、締固め仕事量は効率よく締固めに使われず、間隙比が大きくなったと考えられる。以上の結果から、ランマーの直径は、15 cm が最も効率よく位置エネルギーが使われ、締固め試験のランマー直径として適していると思われる。

図 2.6 は、ランマーの重量を変化させたときの、締固め仕事量と間隙比の関係を示したものである。 $U_c=30$ の場合は、ランマー重量が 5 kgf のところで小さい間隙比を示しているが、それ以外はランマーの重量が重い方が間隙比が小さくなるという傾向がみられる。すなわち全体で与える仕事量は同じでも、1 回の締固めに与える仕事量が多い方が有効に位置エネルギーを消費でき、高い密度になるということである。特に均等係数が小さいロック材料の場合は、細粒分の量が少なく、大きな粒径が多いため、この傾向が著しいようである。

図 2.7 は、落下高さを変化させたときの、締固め仕事量と間隙比のグラフである。1 回の締固めに与える仕事量は、ランマー重量 15 kgf、落下高 50 cm と、ランマー重量 10 kgf、落下高 75 cm では全く同じである。このグラフをみても図 2.6 と同様の傾向を示している。すなわち、落下高さが 75 cm のとき間隙比が最も小さくなり、1 回に与える仕事量が多い方が位置エネルギーを効率よく使えるということである。

締固め仕事量と破碎率の関係を図 2.8 に示す。破碎率はかなりバラツキが大きく、はっきりとした傾向は認められない。しかし締固め仕事量が 5 Ec のところでは全体的に破碎率が大きく、その中でもランマー重量 15 kgf、落下高さ 50 cm の破碎率が特に大きくなっている。1 回に与える仕事量が大きすぎると試料を破壊し、そのために破碎率が大きくなるということは十分に考えられる。今回の試験結果の範囲内では、1 回に与える仕事量が多い程、仕事量の効率がよいという結果になったが、これもあまり大きくなり過ぎると破碎率が大きくなることが考えられ、粒度分布が変わってしまうという問題が生じる。

以上の様に、ランマーの重量および落下高さは、重量が15kgfで落下高さが50cmか、重量が10kgfで落下高さが75cmのケースが、最も適しているといえる。これらのケースは、1層の突固め回数が1Ecで63回とさほど多くなく、作業性も良好である。両者を比較した場合は、落下高さを75cmにすると、締固め試験機が大きくなってしまいうという欠点がある。この点を考えると、重量15kgf、落下高さ50cmが最も汎用性のあるランマー条件であるといえる。

表 2.4 比重試験結果

試料	粒 径 (mm)	表 乾 比 重 Ga	絶 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	吸 水 率 Q (%)
試料A	63.5 ~ 50.8	2.627	2.561	2.743	2.59
	50.8 ~ 38.1	2.624	2.550	2.754	2.90
	38.1 ~ 25.4	2.619	2.541	2.756	3.07
	25.4 ~ 19.1	2.610	2.523	2.764	3.46
	19.1 ~ 9.52	2.608	2.511	2.779	3.83
	9.52 ~ 4.76	2.597	2.485	2.797	4.48
	4.76 ~ 2.00	—	—	2.806	—
	2.00 ~ 0.84	—	—	2.795	—
	加重平均値 (間隙比算出に使用した値)		2.580		
試料B	63.5 ~ 50.8	2.679	2.671	2.693	0.3
	50.8 ~ 38.1	2.684	2.670	2.701	0.3
	38.1 ~ 25.4	2.674	2.659	2.699	0.6
	25.4 ~ 19.1	2.669	2.654	2.694	0.6
	19.1 ~ 9.52	2.659	2.638	2.700	0.9
	9.52 ~ 4.76	2.605	2.572	2.657	1.2
	4.76 ~ 2.00	—	—	2.696	—
	2.00 ~ 0.84	—	—	2.729	—
	0.84 ~ 0.42	—	—	2.714	—
	0.42 ~ 0.074	—	—	2.712	—
	平均値 (間隙比算出に使用した値)		2.644		

表 2.5 締固め試験結果一覧表

条 件	ランマー直径 (mm)	$\phi 75$					$\phi 100$						
	ランマー質量 (kg)	10 kg					10 kg						
	落下高 (cm)	50 cm					50 cm						
件	締固め仕事量	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec
	落下回数 (一層当)	47	94	188	281	469	47	94	188	281	469	94	188
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	断面積 A_o (cm ²)	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
	高さ h_o (cm)	34.67	33.63	34.69	34.64	34.97	34.68	33.88	34.68	34.27	34.98	34.44	34.47
	体積 V_o (cm ³)	24507	23772	24521	24486	24719	24514	23948	24514	24224	24726	24344	24365
供試体質量	湿潤重量 W_t (kg)	44.532	44.928	46.362	46.512	47.004	44.682	44.928	46.362	46.680	47.949	44.037	44.928
	乾燥重量 W_d (kg)	44.104	44.496	45.917	46.065	46.552	44.253	44.496	45.917	46.232	47.488	43.614	44.496
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.800	1.872	1.873	1.881	1.883	1.805	1.858	1.873	1.909	1.921	1.792	1.826
物理定数	比重 G_b	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580
	含水比 W_o	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
間隙比 e_o		0.433	0.378	0.377	0.372	0.370	0.429	0.389	0.377	0.351	0.343	0.440	0.413
破砕率 B_o (%)		4.3	4.7	5.1	6.7	8.7	2.7	3.8	7.4	5.7	7.8	4.1	2.7

条 件	ランマー直径 (mm)	$\phi 115$								$\phi 125$			
	ランマー質量 (kg)	10 kg			15 kg					10 kg			
	落下高 (cm)	75 cm			50 cm					50 cm			
件	締固め仕事量	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec
	落下回数 (一層当)	125	188	313	31	63	125	188	313	47	94	188	281
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	断面積 A_o (cm ²)	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
	高さ h_o (cm)	34.46	34.24	34.12	34.70	34.34	34.65	33.84	34.46	33.98	33.54	34.45	34.33
	体積 V_o (cm ³)	24358	24203	24118	24528	24724	24493	23920	24358	24019	23708	24351	24267
供試体質量	湿潤重量 W_t (kg)	46.362	47.133	47.949	44.682	44.928	46.812	46.680	48.000	44.682	44.928	46.338	46.680
	乾燥重量 W_d (kg)	45.917	46.680	47.488	44.253	44.496	46.362	46.232	47.539	44.253	44.496	45.893	46.232
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.885	1.929	1.969	1.804	1.833	1.893	1.933	1.952	1.842	1.877	1.885	1.905
物理定数	比重 G_b	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580
	含水比 W_o	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
間隙比 e_o		0.369	0.337	0.310	0.430	0.408	0.363	0.335	0.322	0.401	0.375	0.369	0.354
破砕率 B_o (%)		6.3	5.6	7.2	5.0	2.8	5.9	6.9	10.3	3.4	2.9	4.7	4.8

(試料A, $U_c=11$)

$\phi 115$														
5 kg			10 kg						10 kg					
50 cm			25 cm						50 cm					
2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec
375	563	938	94	188	375	563	938	47	94	188	281	469	31	63
30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
34.70	34.54	34.55	35.15	35.05	35.07	35.31	34.69	34.87	34.68	33.77	35.83	34.88	34.69	34.19
24528	24415	24422	24846	24775	24790	24959	24521	24648	24514	23871	25327	24655	24521	24168
46.362	46.680	47.748	45.405	46.011	46.617	47.220	47.949	44.961	44.961	45.156	48.249	48.249	44.682	44.928
45.917	46.232	47.289	45.000	45.600	46.200	46.800	47.488	44.529	44.529	44.722	47.785	47.785	44.253	44.496
1.872	1.894	1.936	1.811	1.841	1.864	1.875	1.937	1.807	1.816	1.873	1.887	1.938	1.805	1.841
2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580
0.97	0.97	0.97	0.90	0.90	0.90	0.90	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
0.378	0.362	0.333	0.425	0.401	0.384	0.376	0.332	0.428	0.421	0.377	0.367	0.331	0.429	0.401
3.8	4.4	4.9	4.1	6.1	7.4	5.6	8.1	3.4	3.6	6.6	4.6	6.9	4.1	4.2

φ115						φ290					投入のみ		
10 kg						10 kg							
50 cm						50 cm							
5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec			
469	47	94	188	281	469	47	94	188	281	469			
30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
34.53	35.30	34.47	34.08	34.34	34.19	34.87	35.25	35.43	34.89	36.03	34.14	34.31	34.23
24408	24952	24365	24090	24274	24168	24648	24917	25044	24662	25468	24132	24252	24196
47.949	45.648	46.512	46.755	47.256	48.249	45.030	47.004	47.748	47.628	48.984	40.302	40.302	40.302
47.488	45.209	46.065	46.306	46.802	47.785	44.597	46.552	47.289	47.170	48.513	39.915	39.915	39.915
1.946	1.812	1.891	1.922	1.928	1.977	1.809	1.868	1.888	1.913	1.905	1.654	1.646	1.650
2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580	2.580
0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
0.326	0.424	0.364	0.342	0.338	0.305	0.426	0.381	0.367	0.349	0.354	0.560	0.567	0.564
7.4	3.6	3.0	4.7	6.2	7.7	3.1	3.5	6.8	2.0	2.5	—	—	—

表 2.6 締固め試験結果

条 件	ランマー直径 (mm)	$\phi 75$					$\phi 100$						
	ランマー質量 (kg)	10					10						
	落下高 (cm)	50					50						
件	締固め仕事量	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec
	落下回数 (一層当)	47	94	188	281	469	47	94	188	281	469	47	94
供試体 寸法	平均直径 Do (cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	断面積 Ao (cm ²)	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
	高さ ho (cm)	34.87	37.19	36.90	35.93	35.59	35.78	34.78	36.14	35.07	37.04	35.13	35.53
	体積 Vo (cm ³)	24648	26288	26083	25397	25157	25291	24585	25546	24790	26182	24832	25115
供試体 質量	湿潤重量 Wt (kg)	52.449	56.127	55.847	54.696	55.445	52.200	52.448	54.696	53.928	58.211	52.448	53.197
	乾燥重量 Wd (kg)	51.955	55.599	55.321	54.181	54.923	51.709	51.954	54.181	53.421	57.663	51.954	52.696
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	2.108	2.115	2.121	2.133	2.183	2.045	2.113	2.121	2.155	2.202	2.092	2.098
物理 定数	比重 Gb	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 Wo	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
間隙比 eo		0.254	0.250	0.247	0.240	0.211	0.293	0.251	0.247	0.227	0.201	0.264	0.260
破砕率 Bo (%)		2.6	1.9	4.5	2.7	5.0	1.5	2.8	5.3	5.0	4.0	2.7	2.3

条 件	ランマー直径 (mm)	$\phi 150$			$\phi 150$					$\phi 150$			
	ランマー質量 (kg)	10			10					10			
	落下高 (cm)	25			50					75			
件	締固め仕事量	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	0.5Ec	1Ec	2Ec	3Ec
	落下回数 (一層当)	375	563	938	47	94	188	281	469	31	63	125	188
供試体 寸法	平均直径 Do (cm)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	断面積 Ao (cm ²)	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
	高さ ho (cm)	34.37	34.17	32.71	35.40	35.67	35.91	35.43	35.38	33.20	34.93	34.93	32.21
	体積 Vo (cm ³)	24295	24153	23121	25023	25214	26383	25044	25009	24761	24691	24691	24889
供試体 質量	湿潤重量 Wt (kg)	53.670	53.670	52.448	52.596	53.696	54.645	54.970	56.119	52.449	53.193	54.441	54.945
	乾燥重量 Wd (kg)	53.165	53.165	51.954	52.103	53.191	54.131	54.453	55.591	51.955	52.692	53.929	54.428
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	2.188	2.201	2.247	2.082	2.110	2.133	2.174	2.223	2.098	2.134	2.184	2.187
物理 定数	比重 Gb	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 Wo	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
間隙比 eo		0.208	0.201	0.177	0.270	0.253	0.240	0.216	0.189	0.260	0.239	0.211	0.209
破砕率 Bo (%)		2.5	2.6	4.4	3.4	4.0	2.5	1.8	3.3	3.3	3.1	5.1	3.1

一覧表 (試料B, $U_c=30$)

$\phi 115$			$\phi 125$					$\phi 150$					$\phi 150$	
10			10					5					10	
50			50					50					25	
2Ec	3Ec	5Ec	05Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	05Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	05Ec	1Ec
188	281	469	47	94	188	281	469	94	188	375	563	938	94	188
30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
36.04	35.82	36.10	35.89	35.37	35.86	36.37	35.88	34.31	34.03	34.63	34.75	34.59	33.60	35.82
25475	25320	25518	25369	25002	25348	25708	25362	24252	24054	24479	24563	24450	23750	25320
54.945	55.195	56.930	54.141	53.700	54.627	55.798	56.120	52.449	52.941	54.441	54.945	55.445	50.491	54.945
54.428	54.676	56.394	53.632	53.195	54.113	55.273	55.592	51.955	52.443	53.929	54.428	54.923	50.016	54.428
2.137	2.159	2.210	2.114	2.128	2.135	2.150	2.192	2.142	2.180	2.203	2.216	2.246	2.106	2.150
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
0.237	0.225	0.196	0.251	0.242	0.238	0.230	0.206	0.234	0.213	0.200	0.193	0.177	0.255	0.230
3.3	3.8	4.7	4.2	2.9	5.3	2.7	5.2	2.4	1.9	2.4	3.3	3.7	3.6	4.7

φ150						φ290					投 入 の み	
15						10						
50						50						
5Ec	05Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec	05Ec	1Ec	2Ec	3Ec	5Ec		
313	31	63	125	188	313	47	94	188	281	469		
30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86	706.86
34.54	34.74	34.77	34.70	34.48	35.03	34.32	34.72	34.96	34.90	35.49	32.17	35.88
24415	24556	24578	24528	24373	24761	24259	24542	24712	24669	25086	22740	25362
55.446	52.449	52.947	54.192	54.945	56.392	53.098	53.696	54.645	54.970	56.119	44.206	48.549
54.924	51.955	52.449	53.682	54.428	55.861	52.598	53.191	54.131	54.453	55.591	43.789	48.092
2.250	2.116	2.134	2.189	2.233	2.256	2.168	2.167	2.190	2.207	2.216	1.926	1.896
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
0.175	0.250	0.239	0.208	0.184	0.172	0.220	0.220	0.207	0.198	0.193	0.373	0.395
4.8	1.4	1.3	3.3	4.4	4.6	3.4	3.4	3.9	3.6	4.2	—	—

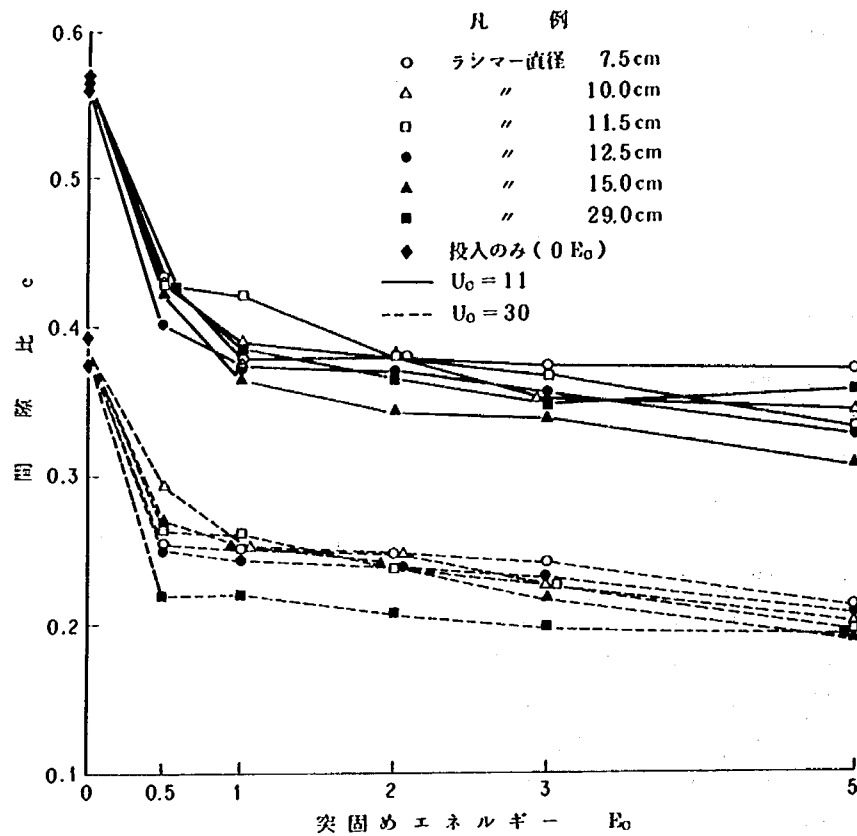


図 2.5 締固め仕事量と間隙比 (ランマー重量10 kgf, 落下高50cm)

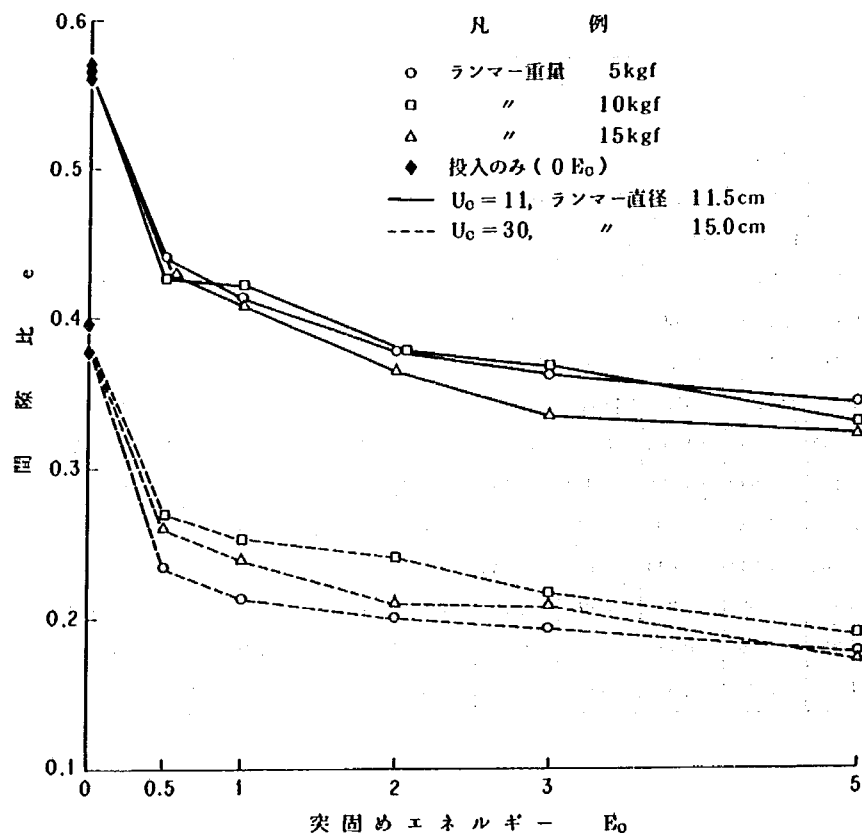


図 2.6 締固め仕事量と間隙比 (ランマー落下高50cm)

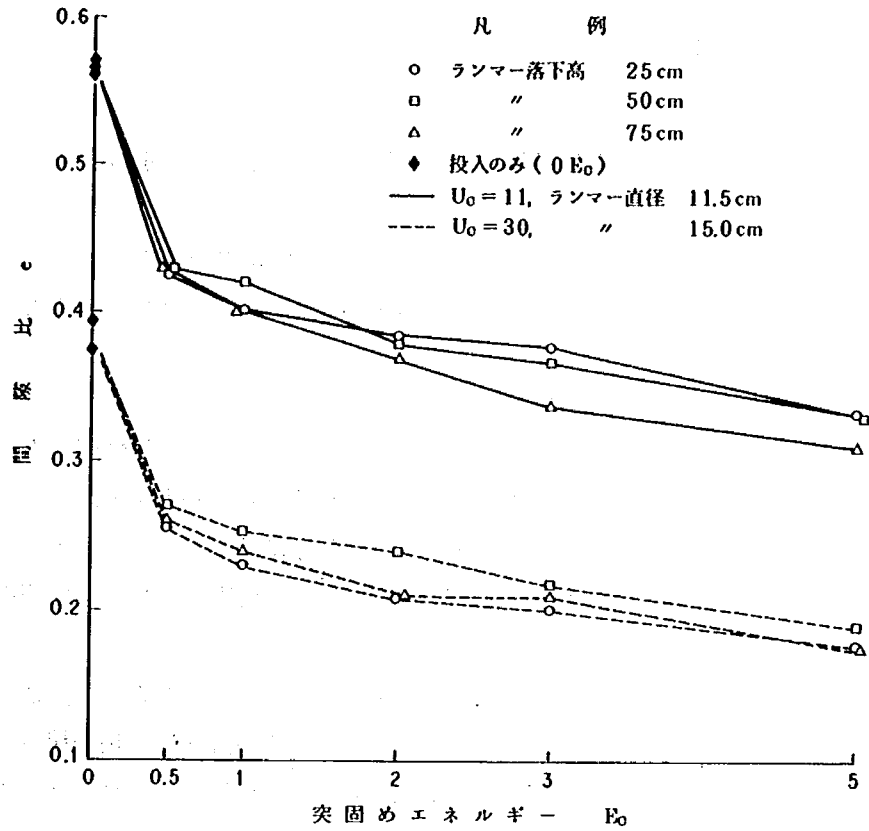


図 2.7 締め固め仕事量と空隙比 (ランマー重量 10 kgf)

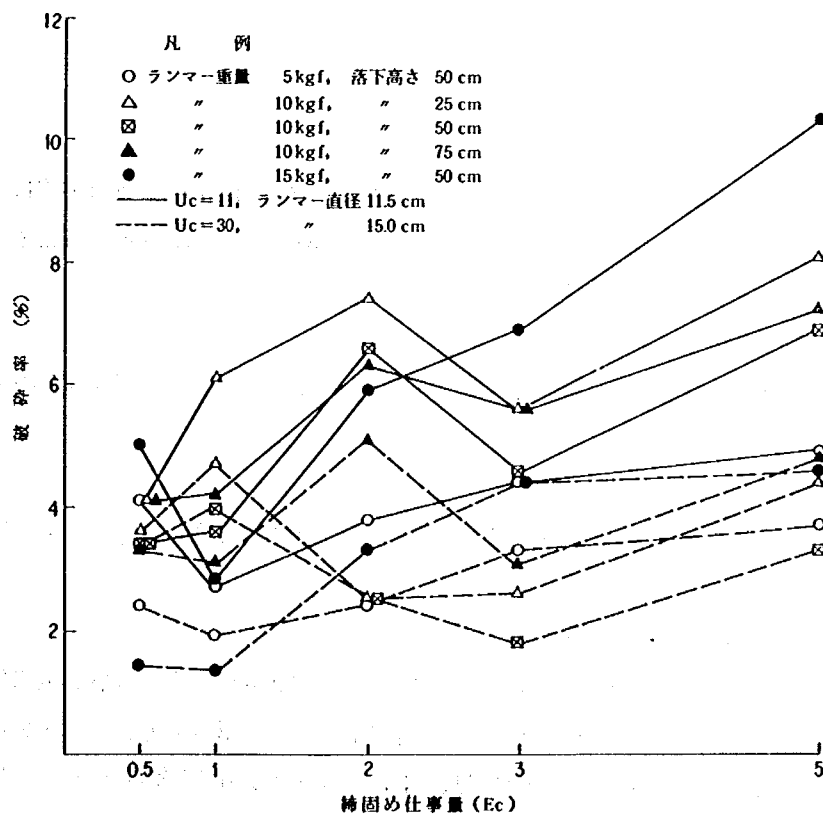


図 2.8 締め固め仕事量と破砕率

2.3 試験粒度の作成方法

2.3.1 試験目的

ロック材料を対象とした、室内締固め試験の粒度作成方法を確立する事を目的として、下記の試験を実施した。

- ① モールドの内径と試料の最大粒径が試験密度に与える影響について調べる。
- ② 試料に含まれる細粒分（たとえば粒径 0.84 mm 以下のもの）の含有量が、試験密度に与える影響について調べる。
- ③ 細粒分の多い材料についての試験粒度作成方法について調べる。

①および②については、最大粒径を低減する方法として最も一般的な相似粒度の手法を用いて試験をおこなった。相似粒度は、片対数グラフ上で粒度分布曲線が平行移動するだけだから、密度に最も影響する均等係数は変らない。ここでは、粒径の大きな部分に着目してモールドの内径と試料の最大粒径の関係を、また小さい部分に着目して細粒分の含有量が試験密度に与える影響を知り、締固め試験における相似粒度の適用範囲を明らかにする。

③の試験は、許容最大粒径より大きい試料を、制限された粒径内の最も大きな粒径で置き換えるという方法 — 仮にオーバーサイズ置換粒度 — でおこなった。この方法は、相似粒度の手法を適用した場合に、室内試験粒度分布において非常に小さな粒径を含む結果になり、ロック材本来の性質とは異なる結果を与えると考えられるような材料についての粒度作成方法である。しかしこれにも適用範囲があるので、置換量を 0～50% に変化させて締固め試験をおこない、オーバーサイズ置換粒度の限界を求める。

2.3.2 試験方法

1) 予備試験

(1) 試験準備

搬入材料（砂岩碎石）を含水比 1% 以下の気乾状態にした後、以下のフルイを用いて試料のふるい分け試験をおこなった。使用したふるいは、63.5, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.76, 2.00, 0.84, 0.42, 0.25, 0.074 mm の 12 種類である。

(2) 比重および吸水率

試料は、2.2 で使用した試料 B と同じものを使用したため、比重および吸水率試験は実施しなかった。

(3) 含水量試験

JIS-A-1203 に準拠して(1)でふるい分けた全粒径についておこなった。この値を使用して試料の乾燥重量を求める。

(4) 締固め時間と間隙比の関係

本試験では、モールドを内径 50 cm, 30 cm, 10 cm と 3 種類用意した。試料の締固めは、内径 50 cm, 30 cm, モールドについては、電動ランマー（950 打撃 / 分, 重量 33 kg f, 加圧盤直径 20 cm, 写真 2.2）を使用し、内径 10 cm モールドについては、JIS・A・1210 規格のランマーを使用した。JIS 規格のランマーによる方法では、ランマーの打撃回数を変え、締固め仕事量を調節して、試験をおこなった。電動ランマーによる方法では、締固め時間と間隙比の関係をj知るために、本試験に先立って

締固め試験を実施した。試験は、内径 30 cm モールドおよび 50 cm モールドを使用して、試料を全層投入後に電動ランマーによって締固め、10 秒毎に高さを測定して間隙比を算出した。（内径 50 cm モールドの時は、50 秒以降は 50 秒間隔）

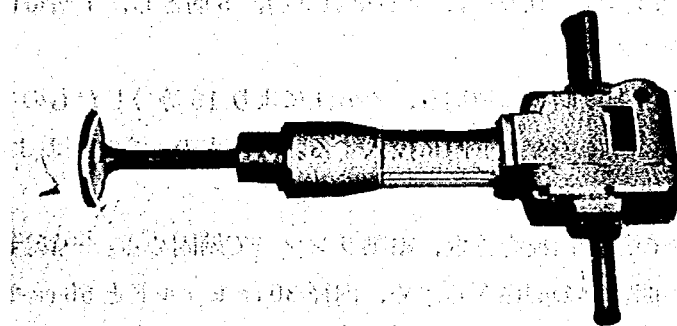


写真 2.2 電動ランマー

2) 締固め方法

(1) 内径 30 cm と 50 cm モールドによる方法

- ① モールドをコンクリート床の水平面に置きボルトで固定する。
- ② モールド上端部からモールド底面までの高さを測定し、モールド深さとする。
- ③ 試料の締固め後の目標高さは、内径 30 cm モールド使用の場合は 30 cm、50 cm モールド使用の場合は 50 cm とする。また締固め層数は、それぞれ 3 層、5 層とし、1 層毎に試験粒度分布に粒度調整したものを用意する。
- ④ 1 層分の試料を練板の上に均等に敷均し、4 分法により 16 等分したものを、ハンスコップで静かに、落差を与えない様にモールド内に投入する。(投入のみを 3 層および 5 層おこなったものを最小密度とする)
- ⑤ 試料上面に厚さ 9 mm の鉄製円板を置き、電動ランマーで締固める。一層当りの締固め時間は、予備試験の振動時間と間隙比の関係から求め、内径 30 cm モールドと 50 cm モールドで、試料の単位体積当りの締固め時間が同じとなるようにする。
- ⑥ 締固め後の試料上面に厚さ 9 mm の鉄製円板を置き、上端部から円板表面までの高さを測定する。測定点数は、内径 30 cm モールドの場合は 9 点、50 cm モールドの場合は 17 点とし、平均値を求める。② で測定した値から、平均値と円板厚さの和を差引いて、試料の締固め厚さとする。
- ⑦ ④～⑥ の作業を、内径 30 cm モールドの場合は 3 回、50 cm モールドの場合は 5 回繰返して締固め終了とする。締固め後の試料密度は、全投入試料(乾燥重量に換算したもの)を、試料の締固め後の体積(モールド内径と⑥ で求めた締固め厚さより算出する)で除して求める。これを最大密度とする。

(2) 内径 10 cm モールドによる方法

締固め方法、器具については、JIS・A・1210 に準拠しておこなった。ランマーは直径 5 cm、重量 2.5 kg f のものを使用し、落下高さは 50 cm、締固め層数は 3 層とした。締固め後の試料上面はナイフエッジでカットし、その後に試料重量を測定して密度を求めたが、 $d_{max}=19.1, 9.52$ mm の粒径はカットする事ができなかったため、試料上面の高さを 5 点測定して密度を求めた。締固め仕事量は、OEc, 0.5 Ec, 1 Ec, 2 Ec, 3 Ec, 4 Ec の 6 ケースとした。

3) 試験粒度分布

(1) 相似粒度の適用範囲を求めるための試験

表 2.7 に試験ケースを一覧表にしたものを、また図 2.9 に試験粒度分布曲線を示す。

試験ケース①～④では、均等係数が 4 と 25 の試料について、内径 30 cm モールド、および 50 cm モールドを使用して、相似粒度による締固め試験をおこなった。試料の最大粒径は 63.5 mm で、この場合、モールドの内径と試料の最大粒径の比率は、内径 30 cm モールドでは 4.72 : 1、50 cm モールドでは 7.81 : 1 となる。試験密度がモールドの内径の影響を受けないならば、同一粒度の試料を同じ仕事量で締固めると、試験誤差の範囲内でほぼ同じ密度が得られるはずである。また試験ケース⑤～⑧では、均等係数 1 の単一粒径で締固め試験を実施した。試料の最大粒径は、内径 30 cm モールドで 63.5 mm、10 cm モールドでは 19.1 mm で、モールドの内径と試料の最大粒径の比率は、それぞれ 4.72 : 1、5.24 : 1 となる。内径 30 cm モールドと 10 cm モールドでは締固め方法が違っているので、両方を比較して論じることができないが、それぞれのモールドでの各粒径の試験密度の変化は知る事ができる。これら

の試験により、粒径の大きな部分に着目して、モールドの内径と試料の粒径が試験密度に与える影響を求める。

細粒分の含有量が試験密度に影響を与えるならば、相似粒度で粒径を小さくした場合、試験密度に変化が生じるはずである。試験ケースの①～⑨は、均等係数を4, 25, 100 と変えて相似粒度の締固め試験を行っており、それぞれの均等係数での間隙比の変化により細粒分の影響を知る事ができる。しかしこれらの試料は粒度分布をもっており、どの粒径が試験密度に影響を及ぼしているかはっきりしない。そこで試験ケース⑩～⑬では、均等係数が1で締固め試験をおこなった。この試験は、JISのふるいの1種類、または2種類の粒径のみを使っているので、粒径毎の試験密度を知ることができる。以上の試験により、締固め試験時に、どの程度細かい粒径が、どの位の割合で含まれていたら、試験密度に大きな影響を与えるかを知ることができる。

(2) 細粒分の多い材料についての試験粒度作成方法について

ここで試験をおこなったオーバーサイズ置換粒度は、図2.10のAのような粒度分布をもった材料に適用できる。この粒度を相似粒度にすると、Bの粒度分布となり、シルト分(0.074 mm以下)が40%を越えてしまい、相似粒度による締固め試験をおこなうには原材料の性質を評価するという点で無理が生じる。この時63.5 mm以上の粒径をCの粒度で置き換えて、それ以下の粒径はAの粒度を使用するというのが、オーバーサイズ置換粒径の考え方である。

表2.8は試験ケースを一覧表にしたもの、また図2.11は粒度分布をグラフにしたものである。図中のE₁～E₆、F₁～F₆、G₁～G₆のオーバーサイズを置換していない粒度は、それぞれ相似粒度である。これらの粒度は、細粒分の影響を受けない範囲内で粒度調製をおこなっており、グループ中の密度に大きな違いはないと考えられる。そこで、それぞれの粒度について、63.5 mm以上の粒径を50.8 mmの粒径で置換して締固め試験をおこなえば、置換量は0%、10%、20%、30%、40%、50%となり、これらの試験密度を比較することにより、オーバーサイズ置換粒度が試験密度に与える影響を知ることができる。

表 2.7 試験ケース一覧表 (相似粒度の適用範囲を求めるための試験)

試験ケース	使用モールドの内径 (cm)	試料の最大粒径 (mm)	使用モールドの内径(mm)	均 等 係 数	グラフの粒度曲線
			試料の最大粒径 (mm)		
①	30	63.5	4.72	4	A 1
②	30	38.1	7.87	4	A 2
③	30	19.1	15.7	4	A 4
④	30	9.52	31.5	4	A 5
⑤	30	4.76	63.0	4	A 6
⑥	30	2.00	150	4	A 7
⑦	50	63.5	7.87	4	A 1
⑧	50	38.1	13.1	4	A 2
⑨	50	25.4	19.7	4	A 3
⑩	50	19.1	26.2	4	A 4
⑪	50	9.52	52.5	4	A 5
⑫	50	4.76	105	4	A 6
⑬	30	63.5	4.72	25	B 1
⑭	30	38.1	7.87	25	B 2
⑮	30	19.1	15.7	25	B 4
⑯	30	9.52	31.5	25	B 5
⑰	30	4.76	63.0	25	B 6
⑱	30	2.00	150	25	B 7
⑲	50	63.5	7.87	25	B 1
⑳	50	38.1	13.1	25	B 2
㉑	50	25.4	19.7	25	B 3
㉒	50	19.1	26.2	25	B 4
㉓	50	9.52	52.5	25	B 5
㉔	50	4.76	105	25	B 6
㉕	30	63.5	4.72	100	C 1
㉖	30	25.4	11.8	100	C 2
㉗	30	9.52	31.5	100	C 3
㉘	30	4.76	63.0	100	C 4
㉙	30	2.00	150	100	C 5
㉚	30	63.5	4.72	1	D 1
㉛	30	38.1	7.87	1	D 2
㉜	30	19.1	15.7	1	D 3
㉝	30	9.52	31.5	1	D 4
㉞	30	4.76	63.0	1	D 5
㉟	30	2.00	150	1	D 6
㊱	10	19.1	5.24	1	D 3
㊲	10	9.52	10.5	1	D 4
㊳	10	4.76	21.0	1	D 5
㊴	10	2.00	50.0	1	D 6
㊵	10	0.84	119	1	D 7
㊶	10	0.42	238	1	D 8
㊷	10	0.25	400	1	D 9

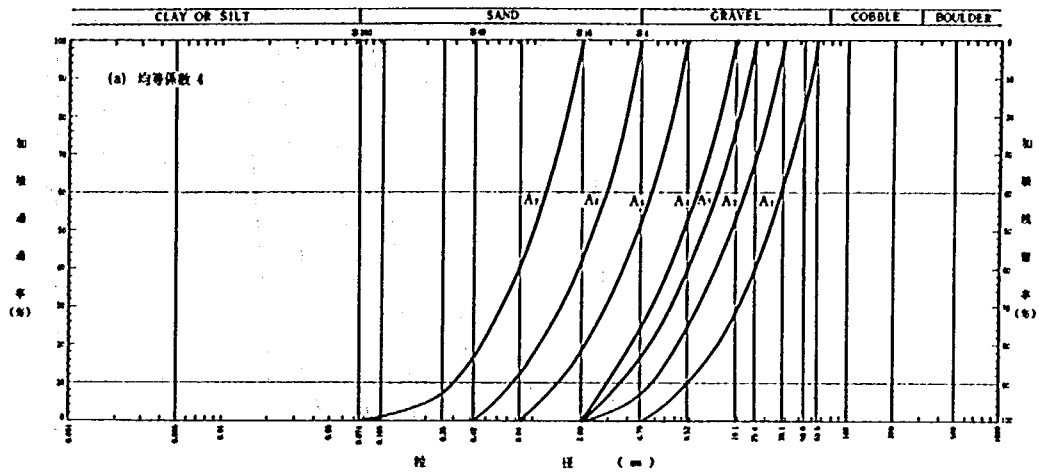


圖 2.9(a) 試驗粒度分布曲線

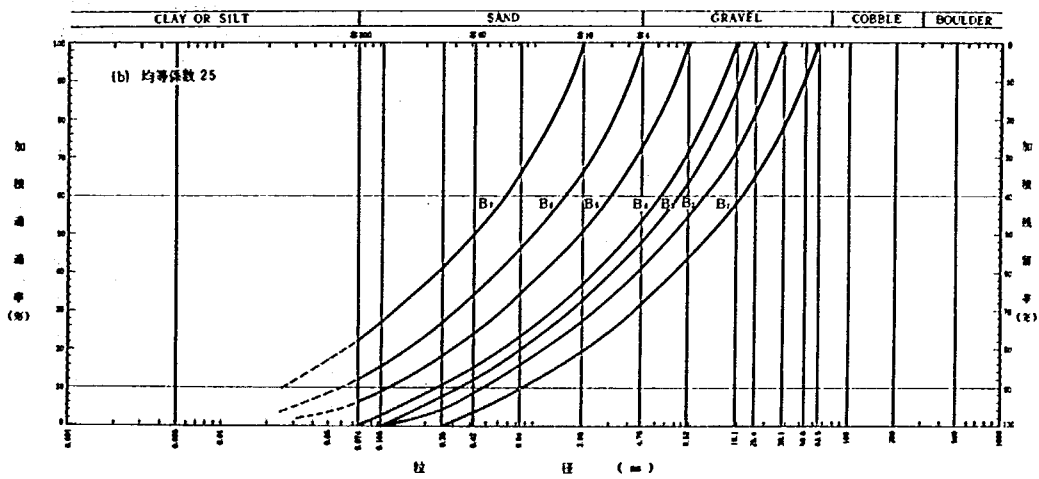


圖 2.9(b) 試驗粒度分布曲線

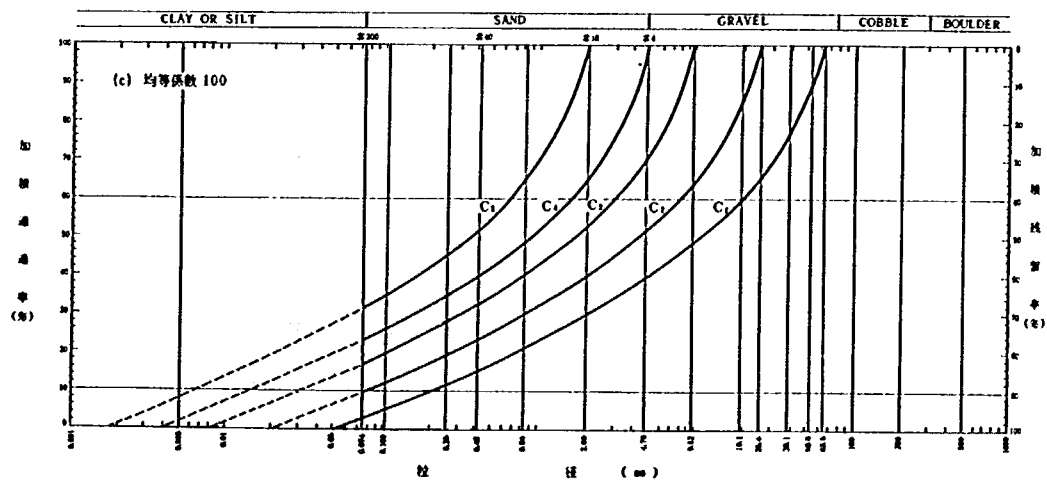


圖 2.9(c) 試驗粒度分布曲線

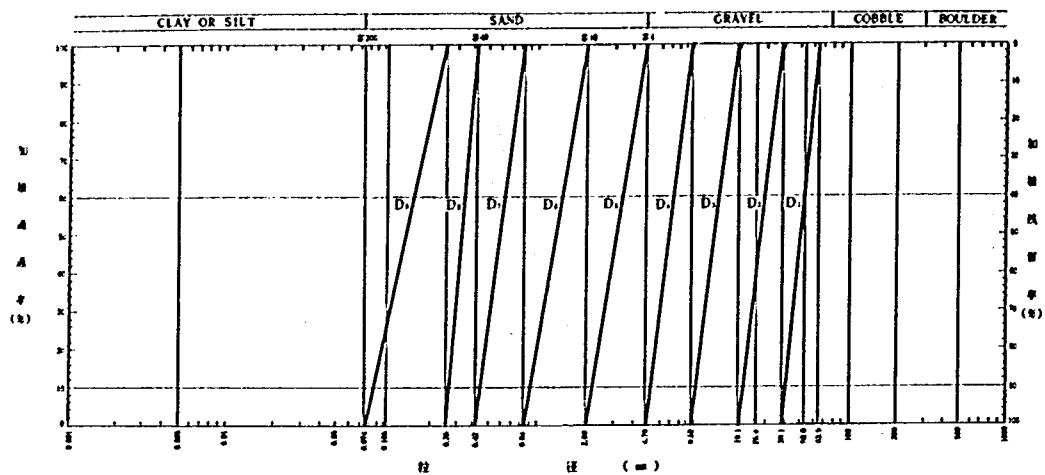


図 2.9(d) 試験粒度分布曲線

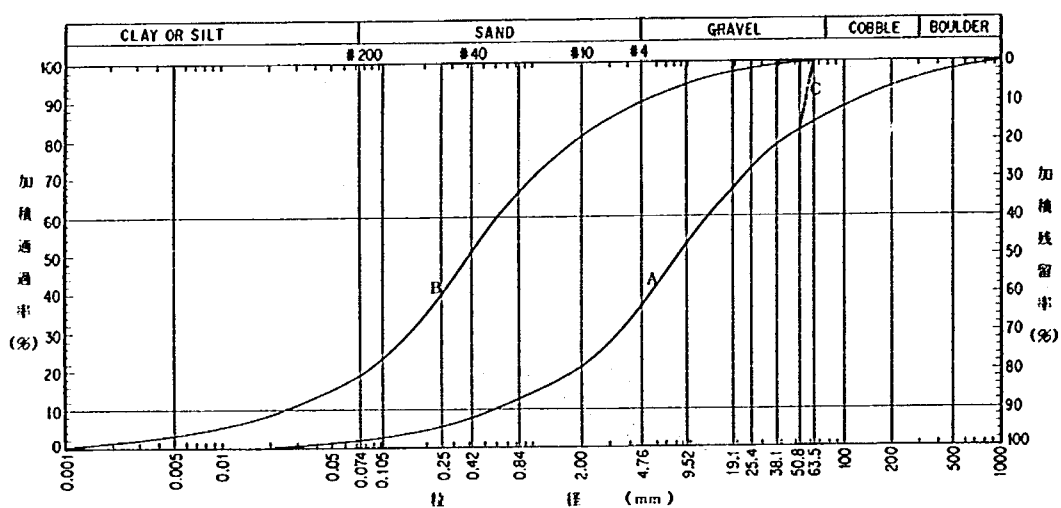


図 2.10 オーバーサイズ置換粒度の例

表 2.8 試験ケース一覧表（オーバーサイズ置換粒度）

試験ケース	均 等 係 数	オーバーサイズ置換量（％）	グラフの粒度曲線
④③	20	50	E 1
④④	20	40	E 2
④⑤	20	30	E 3
④⑥	20	20	E 4
④⑦	20	10	E 5
④⑧	20	0	E 6
④⑨	20	0	E 6
⑤⑩	50	50	F 1
⑤⑪	50	40	F 2
⑤⑫	50	30	F 3
⑤⑬	50	20	F 4
⑤⑭	50	10	F 5
⑤⑮	50	0	F 6
⑤⑯	50	0	F 6
⑤⑰	100	50	G 1
⑤⑱	100	40	G 2
⑤⑲	100	30	G 3
⑤⑳	100	20	G 4
⑥①	100	10	G 5
⑥②	100	0	G 6
⑥③	100	0	G 6

使用モールドは D 30

試料の最大粒径は 63.5 mm

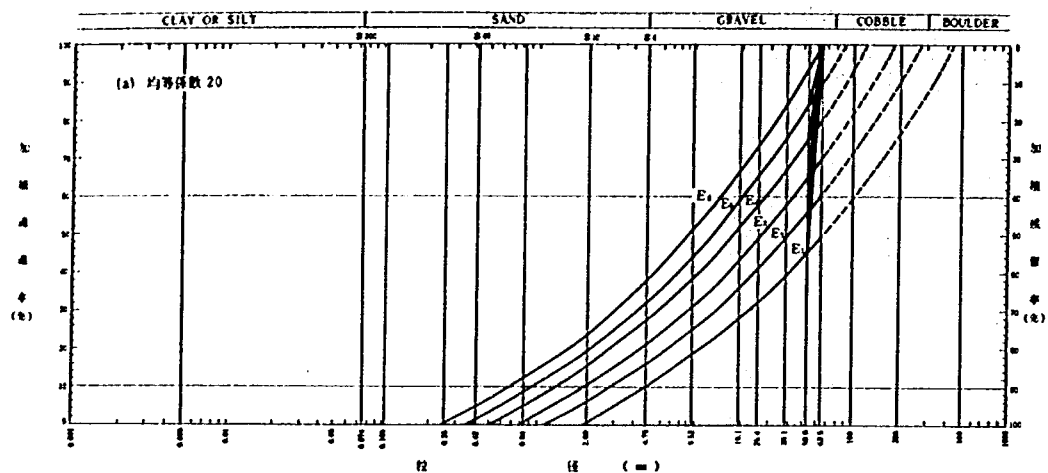


图 2.11(a) 試驗粒度分布曲線

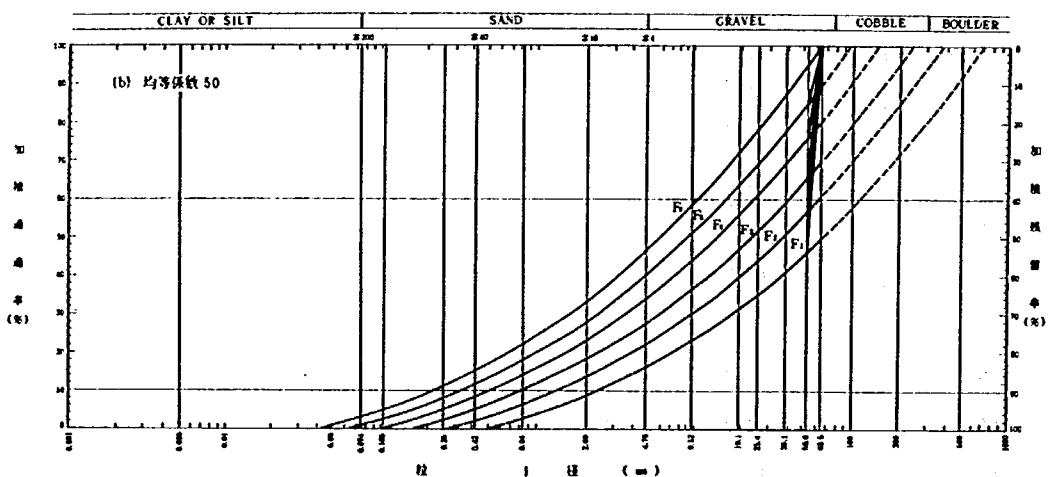


图 2.11(b) 試驗粒度分布曲線

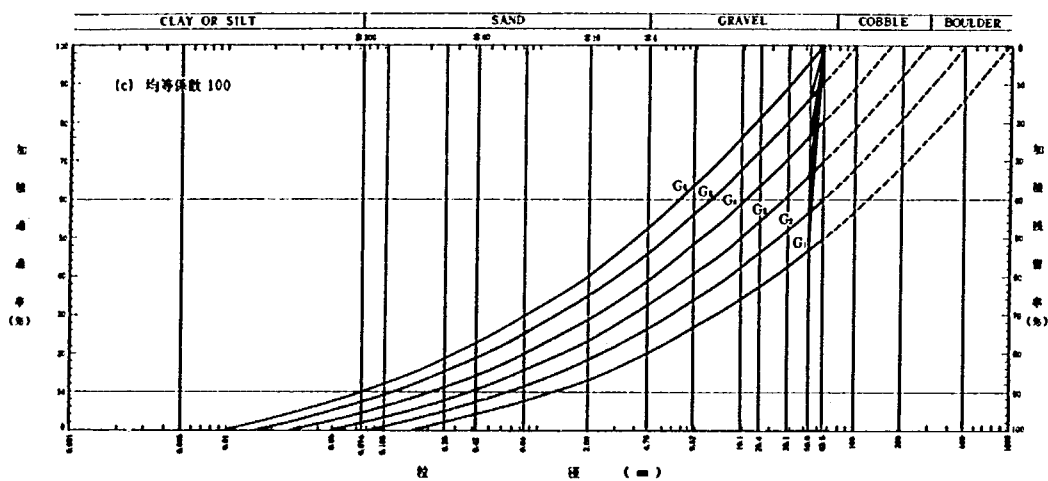


图 2.11(c) 試驗粒度分布曲線

4) 破 碎 率

最大密度測定後、破碎率を求めるためにふるい分け試験をおこなった。使用したふるいは、試料準備に使用したものと同様 12 種類である。破碎率は Marsal の破碎率で定義した。

2.3.3 試験結果

1) 締固め時間と間隙比の関係

締固め時間と間隙比の関係を図 2.12, 2.13 に示す。このグラフによると、内径 30 cm モールドでは、締固め時間が 20 秒程度までは急に密度が増加しているが、それ以降は徐々に増加している。また内径 50 cm モールドでは 50 秒程度までが急な密度増加を示している。時間と共に密度は漸次増加してゆくが、締固め時間が長くなると破碎率が増加すると考えられる。そこで締固め時間は、内径 30 cm モールドで 90 秒、つまり一層当り 30 秒とした。単位体積当りの締固め時間を同じにすると、内径 50 cm モールドでは一層当り 84 秒となる。

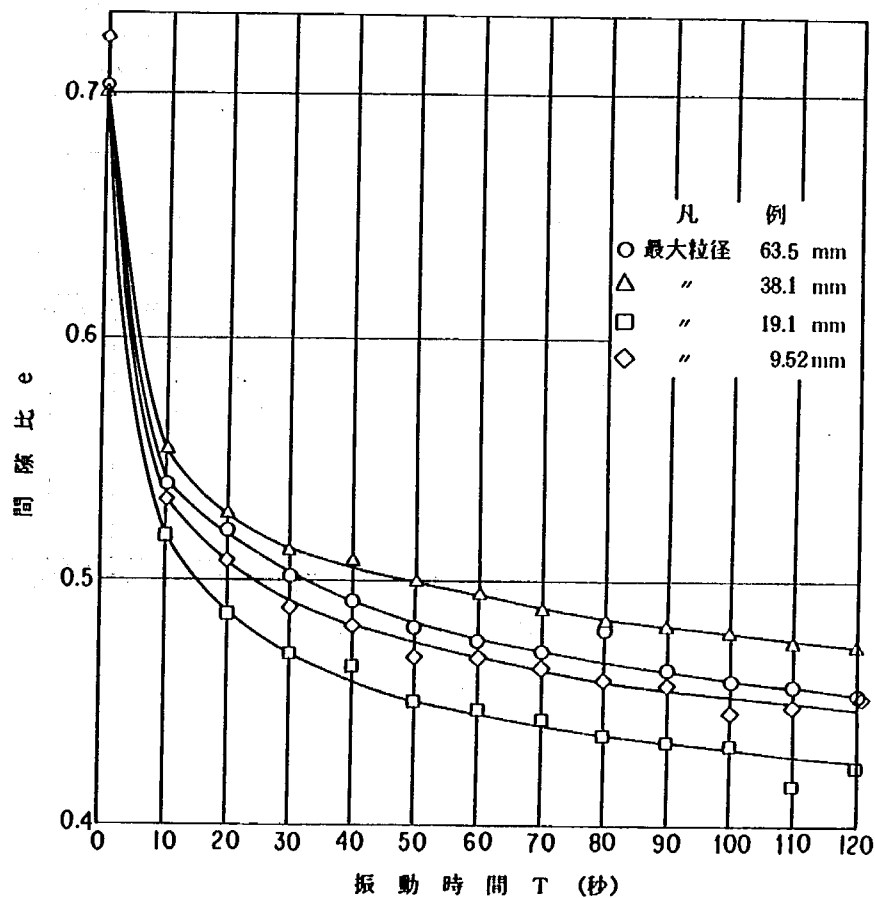


図 2.12 締固め時間と間隙比の関係 ($D = 30$, $U_c = 4$)

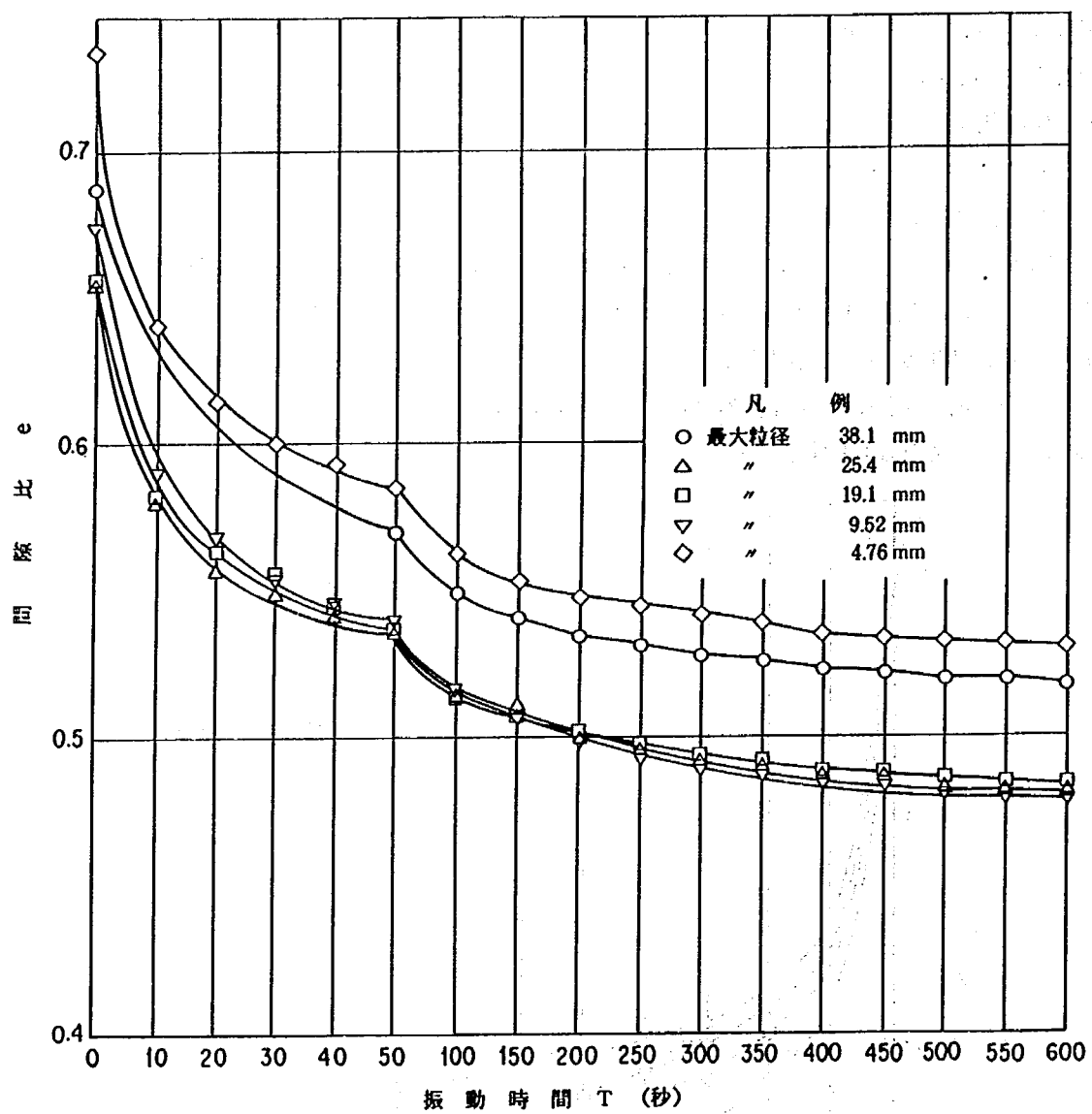


図 2.13 締固め時間と間隙比の関係 ($D = 50$, $U_c = 4$)

2) 締固め試験

(1) 相似粒度の適用範囲を求めるための試験

試験結果を表 2.9, 2.10, 2.11 に示す。

図 2.14 は、モールドの内径と試料の最大粒径の比が間隙比に及ぼす影響をグラフにしたものである。この図によると、モールドの内径と試料の最大粒径の比は、4.72:1~26.2:1 まで9段階に変わっているが、それぞれの均等係数での間隙比の変化はほとんどない。モールドの内径と試料の最大粒径の比が、4.72:1と5.24:1のところで、間隙比が大きくなっているものがある。これは、使用した試料が単一粒径で、同じ大きさの粒径が揃っているため、モールド壁面の影響を受けたものと考えられる。しかし、実際のダムの材料は粒度分布をもっており、 $U_c=4$ 、 $U_c=25$ の試験では、間隙比にほとんど変化がないことから、室内締固め試験においては、内径 30 cm モールドを使用するときは、試料の最大粒径を 63.5 mm として、問題がないことがわかった。

図 2.15 は、 $U_c=1$ で試料の最大粒径と間隙比の関係を示したものである。この図では、試料の最大粒径が大きいところで、間隙比が上昇している。これはさきほども述べた、単一粒径による締固め試験時の、モールド壁面の影響によるものである。またこの図から、D 30 モールドの最小間隙比（一層当りランマーで 30 秒締固める）は JIS のエネルギーのほぼ $3E_c$ に対応しているかがわかる。試料の最大粒径が小さいところを見ると、最大粒径が 2.00 mm 以上は間隙比に変化はないが、それ以下は間隙比が大きくなっている。つまり 0.42~0.84 mm の粒径より小さい粒径では、それ以上の粒径より締め方が悪く、これらの粒径が試験密度に影響を与えることがわかる。

図 2.15 は、 $U_c=4$ 、 $U_c=25$ 、 $U_c=100$ で同じ試験をしたものである。最大間隙比はバラツキが大きい。最大粒径が 4.76 mm より小さい粒径では、間隙比が大きくなっている。ダム現場のロック材料はかなり高い密度に締固められているため、最小間隙比に着目して考えてみる。 $U_c=4$ では、最大粒径が 2.00 mm のところでは間隙比がやや大きくなっているが、他は全体的に大きな変化はない。 $U_c=25$ 、100 では、最大粒径が 4.76 mm 以下のとき、間隙比が大きくなっている。 $U_c=1$ の試験（図 2.15）では、0.84 mm ~ 0.42 mm 以下の粒径が試験密度に影響を及ぼすという結果が得られているので、これらの粒径の含有量と間隙比の関係をみていくと次のようになる。 $U_c=4$ では、0.84 mm 通過量が 13 % 以下の時には間隙比にほとんど変化はなかったが、40 % のときにはやや間隙比が大きくなった。 $U_c=25$ 、100 では、0.84 mm 通過量がそれぞれ 35 %、40 % のときには間隙比に変化はなかったが、46 %、48 % のときは間隙比が大きくなった。

これらの結果を総合的に判断すると、相似粒度の手法で最大粒径を低減する場合、0.84 mm 通過量が 40 % を越えるとこの手法の適用には問題が生じ、別の手法を考えなければならないということになる。

(2) オーバーサイズ置換粒度の試験

試験結果を表 2.12, 2.13 に示す。また図 2.17 は置換量と間隙比の関係をグラフにしたものである。 $U_c=100$ の最小間隙比は、置換量が 30 % までは間隙比に変化はない。また、 $U_c=20$ 、 $U_c=50$ は最大間隙比、最小間隙比共に 20 % までは変化はないという結果が得られた。置換量がこれ以上になると間隙比はかなり大きくなっている。これは、置換量が増えると大きくなる粒径と小さな粒径はうまく混り合わず、大きな粒径間に空隙が生じるためと考えられる。

以上の結果から、オーバーサイズ置換粒度は置換量が 20 % までなら有効であるが、30 % 以上になると適用できないことがわかった。

表 2.9 相似粒度試験結果

試験ケース		㊟						㊟		
均等係数		1						1		
モールド径 (cm)		D 10						D 10		
使用粒径 (mm)		19.1 ~ 9.52						9.52 ~		
締固め仕事量 E_c (mkgf/m^2)		0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	0	0.5	1.0
供試体体積 V_o (cm)		1017	989	1049	1008	993	995	968	1038	1004
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	1.300	1.500	1.600	1.600	1.650	1.700	1.301	1.606	1.606
	乾燥重量 W_d (kg)	1.297	1.497	1.597	1.597	1.647	1.697	1.298	1.603	1.603
	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.275	1.514	1.522	1.584	1.659	1.706	1.341	1.544	1.597
物理定数	比重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 W_o	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
間隙比 e_o		1.074	0.746	0.737	0.669	0.594	0.550	0.972	0.712	0.656
破砕率 $Bo(\%)$		—	3.5	4.5	9.0	9.8	14.9	—	5.1	7.9

試験ケース		㊟			㊟					
均等係数		1			1					
モールド径 (cm)		D 10			D 10					
使用粒径 (mm)		2.00 ~ 0.84			0.84 ~ 0.42					
締固め仕事量 E_c (mkgf/m^2)		2.0	3.0	4.0	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
供試体体積 V_o (cm)		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	1.619	1.642	1.675	1.279	1.467	1.504	1.572	1.616	1.646
	乾燥重量 W_d (kg)	1.619	1.642	1.675	1.274	1.461	1.498	1.566	1.610	1.639
	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.619	1.642	1.675	1.274	1.461	1.498	1.566	1.610	1.639
物理定数	比重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 W_o	0	0	0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
間隙比 e_o		0.633	0.610	0.579	1.075	0.810	0.765	0.688	0.642	0.613
破砕率 $Bo(\%)$		7.2	9.4	10.7	—	4.5	7.4	11.5	13.7	14.8

一覧表 (D10 モールド)

			㉔						㉕		
			1						1		
			D 10						D 10		
4.76			4.76 ~ 2.00						2.00 ~ 0.84		
2.0	3.0	4.0	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	0	0.5	1.0
1013	1012	1028	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1.656	1.703	1.754	1.318	1.537	1.579	1.632	1.655	1.697	1.358	1.518	1.563
1.653	1.700	1.750	1.317	1.535	1.577	1.630	1.653	1.695	1.358	1.518	1.563
1.632	1.680	1.702	1.317	1.535	1.577	1.630	1.653	1.695	1.358	1.518	1.563
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0
0.620	0.574	0.553	1.008	0.722	0.677	0.622	0.600	0.560	0.947	0.742	0.692
12.1	15.4	17.7	—	3.9	6.8	10.2	11.4	12.6	—	2.8	4.2

㉖						㉗					
1						1					
D 10						D 10					
0.42 ~ 0.25						0.25 ~ 0.074					
0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1.246	1.416	1.457	1.534	1.606	1.644	1.215	1.461	1.504	1.540	1.567	1.594
1.241	1.410	1.451	1.528	1.600	1.637	1.205	1.449	1.492	1.528	1.555	1.581
1.241	1.410	1.451	1.528	1.600	1.637	1.205	1.449	1.492	1.528	1.555	1.581
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
1.131	0.875	0.822	0.730	0.653	0.615	1.194	0.825	0.772	0.730	0.700	0.672
—	4.1	6.3	17.0	16.6	18.7	—	7.3	7.2	8.3	11.4	9.1

表 2.10 相似粒度試験

試験ケース		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
均等係数 U_c		$U_c 4$							
モールド径 (cm)		$D 30$							
使用粒径 (mm)		63.5 ~ 4.76	38.1 ~ 2.00	19.1 ~ 2.00	9.52 ~ 0.84	4.76 ~ 0.42	2.00 ~ 0.074	63.5 ~ 4.76	38.1 ~ 2.00
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	30.32	30.36	30.36	30.34	30.40	30.40	50.03	50.03
	断面積 A_o (cm ²)	722.02	723.92	723.92	722.97	725.83	725.83	1965.85	1965.85
	高さ h_o (cm)	32.98	32.79	32.37	33.35	30.77	30.74	56.40	52.75
	体積 V_o (cm ³)	23812	23737	23433	24111	22334	22312	110874	103699
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	37.440	37.428	37.440	37.440	32.233	32.295	179.522	164.560
	乾燥重量 W_d (kg)	37.291	37.279	37.291	37.291	32.169	32.166	178.877	163.904
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.566	1.57	1.591	1.547	1.440	1.442	1.613	1.581
物理定数	比重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 W_o	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4
間隙比 e_o		0.688	0.683	0.662	0.709	0.836	0.834	0.639	0.672
破砕率 B_o (%)		—	—	—	—	—	—	—	—

試験ケース		⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
均等係数		$U_c 25$							
モールド径 (cm)		$D 50$							
使用粒径 (mm)		63.5 ~ 0.074	38.1 ~ 0.074	25.4 ~ 0.074	19.1 ~ 0.074	9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	63.5 ~ 0.074 以下	25.4 ~ 0.074 以下
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	30.40	30.33
	断面積 A_o (cm ²)	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	725.83	722.50
	高さ h_o (cm)	49.95	50.32	51.13	51.50	52.70	48.95	28.37	30.24
	体積 V_o (cm ³)	98194	98922	100514	101241	103600	96228	20592	21848
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	183.700	183.705	183.695	183.700	183.695	161.470	37.165	41.263
	乾燥重量 W_d (kg)	182.968	182.973	182.963	182.968	182.963	160.827	37.091	41.181
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.863	1.850	1.820	1.807	1.766	1.671	1.801	1.885
物理定数	比重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含水比 W_o	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
間隙比 e_o		0.419	0.429	0.453	0.463	0.497	0.582	0.468	0.403
破砕率 B_o (%)		—	—	—	—	—	—	—	—

結果一覽表（最小密度試験）

⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
					Uc 25				
D 50					D 30				
25.4 ~ 2.00	19.1 ~ 2.00	9.52 ~ 0.84	4.76 ~ 0.42	63.5 ~ 0.074	38.1 ~ 0.074	19.1 ~ 0.074	9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	2.00 ~ 0.074 以下
50.03	50.03	50.03	50.03	30.35	30.35	30.355	30.30	30.33	30.33
1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	723.45	723.45	723.69	721.07	722.50	722.50
51.97	51.94	52.57	54.16	31.92	31.68	32.54	29.07	29.91	34.05
102165	102106	103345	106470	23093	22919	23549	20962	21610	24601
164.560	164.560	164.564	164.560	42.060	42.120	42.123	36.944	38.835	41.260
163.904	163.904	163.908	163.904	41.892	41.952	41.955	36.870	38.757	41.178
1.604	1.605	1.586	1.539	1.814	1.830	1.782	1.759	1.793	1.674
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2
0.648	0.647	0.667	0.718	0.458	0.445	0.484	0.503	0.475	0.579
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜
100								
D 30								
9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	2.00 ~ 0.074 以下	63.5 ~ 38.1	38.1 ~ 19.1	19.1 ~ 9.52	9.52 ~ 4.76	4.76 ~ 2.00	2.00 ~ 0.84
30.40	30.33	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.33	30.33
725.83	722.50	725.83	725.83	725.83	725.83	725.83	722.50	722.50
28.10	29.74	32.22	29.12	30.45	27.98	29.78	31.21	31.05
20396	21487	23386	21136	22102	20309	21615	22549	22434
37.128	38.438	39.429	28.363	29.513	27.928	29.874	31.022	30.406
37.054	38.361	39.350	28.335	29.454	27.872	29.814	30.960	30.345
1.817	1.785	1.683	1.341	1.333	1.372	1.379	1.373	1.353
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.455	0.481	0.571	0.972	0.983	0.927	0.917	0.926	0.954
—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 2.11 相似粒度試験

試験 ケース		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
均 等 係 数 U_c		$U_c 4$							
モールド径 (cm)		D 30							
使用 粒 径 (mm)		63.5 ~ 4.76	38.1 ~ 2.00	19.1 ~ 2.00	9.52 ~ 0.84	4.76 ~ 0.42	2.00 ~ 0.074	63.5 ~ 4.76	38.1 ~ 2.00
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	30.35	30.35	30.36	30.34	30.40	30.30	50.03	50.03
	断 面 積 A_o (cm ²)	723.45	723.45	723.93	722.97	725.83	721.07	1965.85	1965.85
	高 さ h_o (cm)	29.76	29.13	29.27	29.05	29.24	31.44	49.79	50.50
	体 積 V_o (cm ³)	21530	21074	21189	21002	21223	22670	97880	99275
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	39.834	39.371	39.738	39.539	39.273	41.456	184.340	187.730
	乾燥重量 W_d (kg)	39.676	39.214	39.570	39.381	39.195	41.373	183.606	186.982
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.843	1.861	1.867	1.875	1.847	1.825	1.876	1.883
物理定数	比 重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含 水 比 W_o	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4
間 隙 比 e_o		0.435	0.421	0.416	0.410	0.432	0.449	0.409	0.404
破 碎 率 B_o (%)		2.14	3.65	4.50	3.10	2.10	3.70	4.35	4.74

試験 ケース		⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
均 等 係 数		$U_c 25$						
モールド径 (cm)		D 50						
使用 粒 径 (mm)		63.5 ~ 0.074	38.1 ~ 0.074	25.4 ~ 0.074	19.1 ~ 0.074	9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	63.5 ~ 0.074 以下
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	50.03	30.33
	断 面 積 A_o (cm ²)	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	722.50
	高 さ h_o (cm)	50.98	50.90	49.70	52.33	52.07	51.24	30.11
	体 積 V_o (cm ³)	100219	100062	97703	102873	102362	100730	21754
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	225.840	227.440	218.835	229.105	227.665	218.835	49.960
	乾燥重量 W_d (kg)	224.940	226.534	217.963	228.192	226.758	217.963	49.860
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	2.244	2.264	2.231	2.218	2.215	2.164	2.292
物理定数	比 重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含 水 比 W_o	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
間 隙 比 e_o		0.178	0.168	0.185	0.192	0.194	0.222	0.154
破 碎 率 B_o (%)		2.30	2.70	3.28	1.53	2.72	1.82	4.20

一覽表 (最大密度試験)

⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
				Uc 25					
D 50				D 30					
25.4 ~ 2.00	19.1 ~ 2.00	9.52 ~ 0.84	4.76 ~ 0.42	63.5 ~ 0.074	38.1 ~ 0.074	19.1 ~ 0.074	9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	2.00 ~ 0.074 以下
50.03	50.03	50.03	50.03	30.35	30.34	30.35	30.34	30.4	30.33
1965.85	1965.85	1965.85	1965.85	723.45	722.97	123.45	122.971	725.83	722.50
49.22	51.17	51.84	50.85	29.55	30.10	29.93	29.24	30.08	31.45
96759	100593	101910	99963	21378	21761	21653	21140	21833	22723
185.020	188.675	190.600	185.015	47.694	48.880	48.955	47.592	48.273	48.216
184.282	187.923	189.841	184.278	47.504	48.685	48.760	47.402	48.177	48.120
1.905	1.868	1.863	1.843	2.222	2.237	2.252	2.242	2.207	2.118
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
0.388	0.415	0.419	0.435	0.190	0.182	0.174	0.179	0.198	0.248
2.60	2.49	1.70	2.21	2.01	2.93	2.26	1.83	2.40	1.40

㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	㉟
100			1					
D 30								
9.52 ~ 0.074 以下	4.76 ~ 0.074 以下	2.00 ~ 0.074 以下	63.5 ~ 38.1	38.1 ~ 19.1	19.1 ~ 9.52	9.52 ~ 4.76	4.76 ~ 2.00	2.00 ~ 0.84
30.33	30.33	30.33	30.40	30.40	30.40	30.40	30.33	30.33
722.50	722.50	722.50	725.83	725.83	725.83	725.83	722.50	722.50
30.06	30.29	31.06	31.05	28.67	28.54	30.35	29.91	29.90
21718	21885	22441	22537	20810	20715	22029	21610	21603
49.951	48.794	49.268	35.111	34.470	34.909	37.091	36.039	36.024
49.851	48.697	49.170	35.076	34.401	34.839	37.017	35.967	35.952
2.295	2.225	2.191	1.556	1.653	1.682	1.680	1.664	1.664
2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.152	0.188	0.207	0.699	0.600	0.572	0.574	0.589	0.589
1.20	0.90	2.40	31.3	38.7	3.30	4.50	2.00	1.90

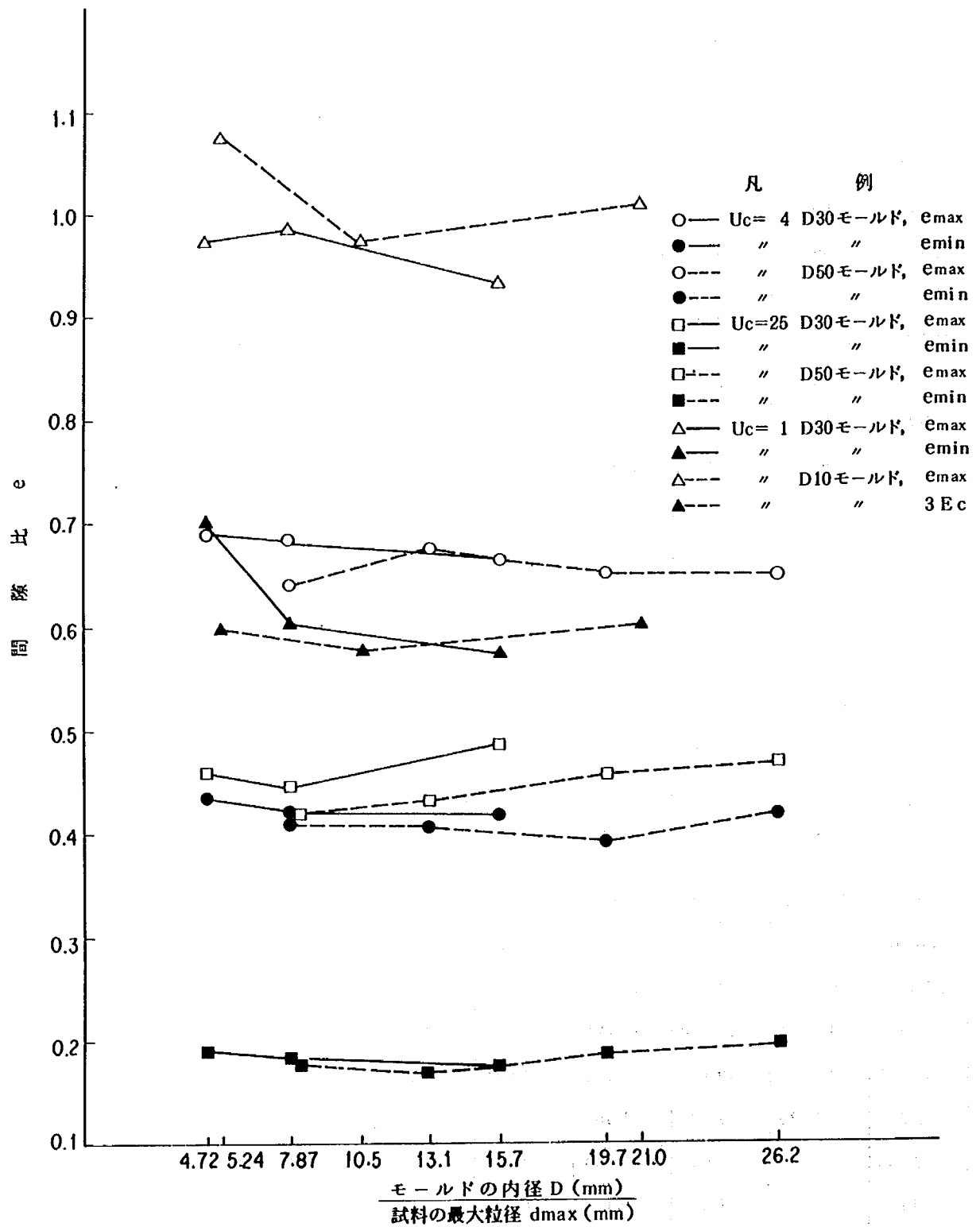


図 2.14 モールドの内径と試料の最大粒径の比が間隙比に及ぼす影響

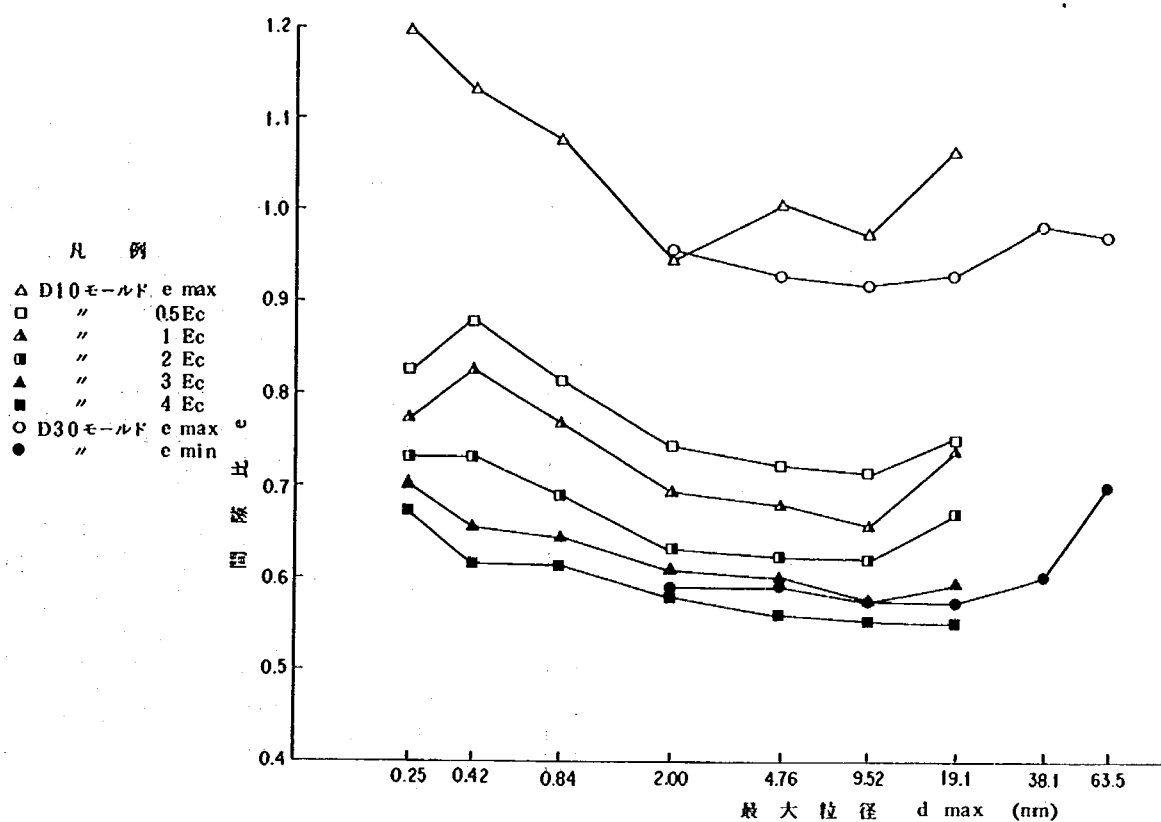


図 2.15 試料の最大粒径と間隙比の関係 ($U_c=1$)

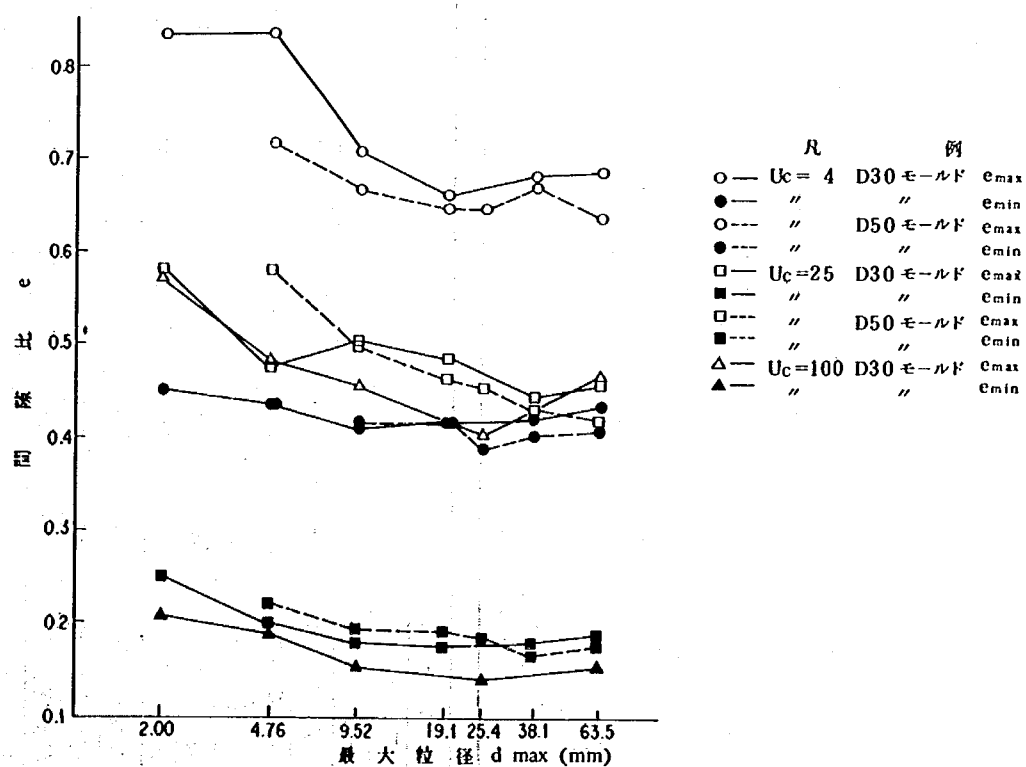


図 2.16 試料の最大粒径と間隙比の関係 ($U_c=4, 25, 100$)

表 2.12 オーバーサイズ置換粒度試験結果一覧表 (最小密度試験)

試 験 ケ ー ス		㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝		
均 等 係 数 U_c		20							50				
モ ー ル ド 径 (cm)		D 30											
使 用 粒 径 (mm)		63.5 ~ 0.84	63.5 ~ 0.84	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.074	63.5 ~ 0.074	
供試体寸法	平均直径 D_o (cm)	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.33	30.33	30.40	30.40	30.33	30.33	
	断 面 積 A_o (cm ²)	725.83	725.83	725.83	725.83	725.83	722.50	722.50	725.83	725.83	722.50	722.50	
	高 さ h_o (cm)	31.34	29.44	30.78	30.62	31.05	31.16	30.72	34.20	31.54	28.93	29.99	
	体 積 V_o (cm ³)	22748	21368	22341	22225	22537	22513	22195	24823	22893	20902	21668	
供試体重量	湿潤重量 W_t (kg)	37.094	36.814	37.746	38.486	39.276	39.135	39.135	39.274	40.365	37.356	40.395	
	乾燥重量 W_d (kg)	37.020	36.741	37.671	38.409	39.198	39.057	39.057	39.196	40.284	37.281	40.314	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.627	1.719	1.686	1.728	1.739	1.735	1.760	1.579	1.760	1.784	1.861	
物理定数	比 重 G_s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	
	含 水 比 W_o	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
間 隙 比 e_o		0.503	0.538	0.568	0.530	0.520	0.524	0.502	0.674	0.502	0.482	0.421	
破 砕 率 B_o (%)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

試験 ケー ス		㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴	㊵	㊶	㊷	
均 等 係 数		50			100						
モ ー ル ド 径 (cm)		D 30									
使 用 粒 径 (mm)		63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074}	63.5 _{0.074}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}	63.5 _{0.074以下}
供試体寸法	平均直径Do (cm)	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33
	断 面 積Ao (cm ²)	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50
	高 さho (cm)	29.84	28.40	30.79	28.35	31.99	30.22	30.69	29.05	30.23	29.94
	体 積Vo (cm ³)	21559	20519	22246	20483	23113	21834	22174	20989	21841	21632
供試体重量	湿潤重量Wt (kg)	39.093	39.090	40.927	35.402	39.084	40.052	42.784	41.226	42.568	42.432
	乾燥重量Wd (kg)	39.015	39.012	40.845	35.331	39.006	39.972	42.699	41.144	42.483	42.347
	乾燥密度Pd (g/cm ³)	1.810	1.901	1.836	1.725	1.688	1.831	1.926	1.960	1.945	1.958
物理定数	比 重Gs	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含 水 比Wo	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
間 隙 比eo		0.461	0.391	0.440	0.533	0.566	0.444	0.373	0.349	0.359	0.350
破 砕 率Bo (%)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 2.13 オーバーサイズ置換粒度試験結果一覧表 (最大密度試験)

試験 ケース		㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	
均 等 係 係 U _c		20							50			
モールド 径 (cm)		D 30										
使 用 粒 径 (mm)		63.5 ~ 0.84	63.5 ~ 0.84	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.42	63.5 ~ 0.25	63.5 ~ 0.074	63.5 ~ 0.074
供試体寸法	平均直径 D _o (cm)	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40	30.33	30.33	30.40	30.40	30.33	30.33
	断 面 積 A _o (cm ²)	725.83	725.83	725.83	725.83	725.83	722.50	722.50	725.83	725.83	722.50	722.50
	高 さ h _o (cm)	31.77	30.02	31.15	29.90	30.64	31.97	32.15	28.44	30.60	30.46	29.81
	体 積 V _o (cm ³)	23060	21789	22610	21702	22239	23098	23228	20643	22210	22007	21538
供試体重量	湿潤重量 W _t (kg)	45.168	45.817	47.023	46.909	48.000	50.603	50.597	42.550	47.997	47.786	48.866
	乾燥重量 W _d (kg)	45.078	45.726	46.929	46.815	47.904	50.502	50.496	42.465	47.901	47.691	48.768
	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	1.955	2.099	2.076	2.157	2.154	2.186	2.174	2.057	2.157	2.167	2.264
物理定数	比 重 G _s	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644
	含 水 比 W _o	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
間 隙 比 e _o		0.352	0.260	0.274	0.226	0.227	0.210	0.216	0.285	0.226	0.220	0.168
破 砕 率 B _o (%)		13.0	10.6	4.9	10.4	10.4	3.0	4.7	6.5	9.2	3.5	4.7

試験 ケース		㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴	㊵	㊶	㊷	
均 等 係 係		50			100						
モールド径 (cm)		D 30									
使 用 粒 径 (mm)		63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074	63.5~ 0.074	63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074以下	63.5~ 0.074以下	
供 試 体 寸 法	平均直径 Do (cm)	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	30.33	
	断 面 積 Ao (cm ²)	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	722.50	
	高 さ ho (cm)	30.32	30.72	30.79	30.76	29.59	28.50	29.41	29.75	30.56	
	体 積 Vo (cm ³)	21906	22195	22246	22224	21379	20591	21249	21494	22080	
供 試 体 重 量	湿潤重量 Wt (kg)	50.384	50.769	50.769	46.043	46.043	47.786	49.734	49.951	51.475	
	乾燥重量 Wd (kg)	50.283	50.668	50.668	45.951	45.951	47.691	49.635	49.851	51.327	
	乾燥密度 ρd (g/cm ³)	2.295	2.283	2.278	2.068	2.149	2.361	2.336	2.319	2.327	
物 理 定 数	比 重 Gs	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	2.644	
	含 水 比 Wo	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
間 隙 比 eo		0.152	0.158	0.161	0.279	0.230	0.142	0.132	0.140	0.136	
破 砕 率 Bo (%)		4.7	3.0	3.1	4.3	6.1	16.7	1.6	1.3	10.2	

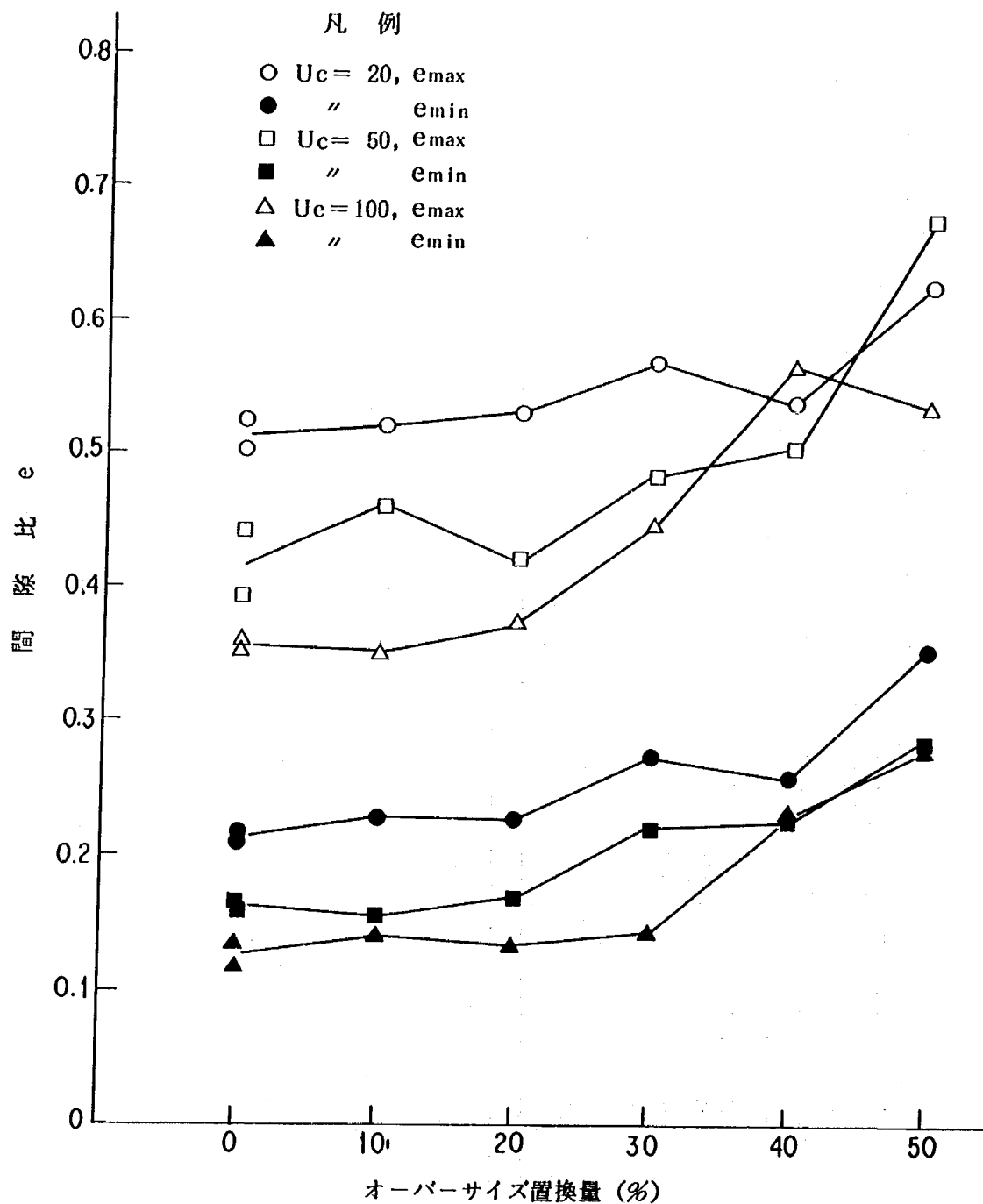


図 2.17 オーバーサイズ置換量と間隙比の関係

3) 破碎率

表 2.9 において $U_c=1$ の粒径 63.5 mm ~ 38.1 mm, 38.1 mm ~ 19.1 mm で破碎率が 30 % を越え、大きい値を示しているのは、締固めにより角が欠けたりして粒径が小さくなり、粒度調整に使用したフルイを通過したためである。粒度分布をもった試料だと、粒径が細かくなっても、その下の粒径も同じように細かくなるので、Marsal の破碎率の定義により、それほど大きな破碎率とは計算上ならない。しかし単一粒径だとひとつの粒径が細かくなると、その値がそのまま破碎率として計算されてしまうので、大きな破碎率となる。また粒径が細かいと、粒子の数が多いのですべての粒子が破碎される事はないが、粒径が大きいと、粒子の数が少なく、破碎される率が多くなるので、試験結果のように大きい粒径で破碎率が大きくなっている。同様の事がいえるのが、オーバーサイズ置換粒度の置換量を多くした場合である。

電動ランマーによる締固め方法は、今までの経験では比較的破碎率が小さいという傾向にあったが、今回も同じような結果になった。破碎率に関しては、小さい方が当初の粒度分布とのちがいが少ないので望ましいと考えられるが、現場の施工時の破碎との関係もあり、今後検討を加えなければならない問題だと思われる。

2.4 考 察

本項では、室内締固め試験時の、ランマーの形状と粒度作成方法について各種比較試験を実施し、結果をとりまとめた。締固めは、ランマーの自由落下による方法で実施し、ランマーの形状について試験をおこなったが、この方法がロック材の締固め方法として最良の方法であるというのではない。現在最も一般的におこなわれている方法であるにもかかわらず、ランマーの形状がまちまちなので、ある程度の指針を定めるために実施したものである。破碎率の評価方法の問題もあり、どの方法が最適な試験方法であるかは、今後別の角度から考えていかなければならない課題である。

今回実施した試験は、数多くのデータを収集してはじめて判断を下すことができる性質のものである。その意味ではまだまだデータは不足しており、今後のデータの積み重ねが必要となる。しかし、室内締固め試験の参考にはなると思われるので、以下に試験結果のまとめを記しておく。

- ① ランマーの自由落下による突固め試験では、内径 30 cm モールドを使用した場合、ランマーの直径が 15 cm、重量 15 kgf、落下高さ 50 cm が最もエネルギーを効率よく消費し、汎用性があると考えられる。
- ② 内径 30 cm モールドを使用して締固め試験を実施する場合は、試料の最大粒径を 63.5 mm としても、試験密度に影響は及ぼさない。
- ③ 相似粒度の手法で試料の最大粒径を低減する方法は、細粒分が少ない時は有効な方法であるが、0.84 mm を通過する試料が 40 % を越えると、間隙比が大きくなる傾向がある。
- ④ 細粒分が多い材料の場合、許容最大粒径より大きい試料を、すぐ下の粒径で置き換えるという方法（オーバーサイズ置換粒度）を採用して、適用範囲を求めた。その結果、置換量が 20 % 以内だと間隙比に変化はないが、30 % 以上になると間隙比が大きくなるというデータが得られた。

3. 現場密度の分布状況および室内試験密度との関係

3.1 試験目的

本報告の第1章では、現場密度を精度よく求めるための試験方法について述べた。また第2章では、室内締固め試験方法について実験的考察を加えた。第3章ではこれらを踏まえて、現場密度の鉛直方向分布を調査すると共に、現場密度と室内試験密度の関係を知らることを目的として試験を実施した。

現場密度の鉛直方向分布に関しては、コア材料を対象とした転圧時の内部変位計測と現場密度試験を昭和59年度に実施した。その結果、振動ローラー転圧時には、層厚が20 cm程度でも一層内に密度の層状不均一性（表層の密度は大きい而下層の密度は小さくなる）が存在するというデータが得られた。²⁾一般的に振動ローラーは、粘性土よりも粒状材料の転圧に適しているといわれており、その意味ではコア材料よりもロック材料の転圧に威力を発揮すると考えられる。しかし、ロックゾーンはコアゾーンに比べて1回のまき出し転圧層がかなり厚いため、下層まで転圧効果が伝わっていない事も十分に考えられる。本章では、寒河江ダムと七ヶ宿ダムで、現場密度の鉛直方向分布調査を実施したので報告する。

現場密度と室内試験密度の関係とは、最終的には、ある転圧機種での転圧回数と、室内試験における締固め仕事量の関係を把握することである。この関係がうまく求まれば、現場密度を室内で精度よく求める指針が得られる。しかし粒度条件や、現場密度のバラツキ、現場の条件をできるだけ再現しうる室内試験方法等むづかしい問題も多い。ここでは、寒河江ダムおよび七ヶ宿ダムで実施した現場試験を基に、室内締固め試験を実施したので、両者の関連について考察を加える。

3.2 寒河江ダム現場密度試験

3.2.1 試験方法

1) 試験マットの形状

試験マットは図3.1に示す形状で、仕上り厚は1.5 m/層で2層盛立てた。

2) 試験試料

原石山採取のロック材（粗粒玄武岩）をグリズリを通して最大粒径が500 mmになるよう調節した。

3) 転圧仕様

転圧機種 振動ローラー 18 t 級 SP60DD

転圧回数 2回, 4回, 6回, 8回

転圧速度 3 km/hr

4) 測定方法

(1) 掘削方法や容積測定方法等については、1・2・3の6)と同様である。

(2) 試験は、各転圧回数共に3点実施し、それぞれについて上層、中層、下層の3層に分けて0.5 mずつ掘削し、密度試験をおこなった。

(3) 第1章の試験結果から、試験孔の直径は2.0 m、深さは仕上り厚と同じ1.5 m、シートは農業用ビニールシートの厚さ0.1 mmのものを使用した。

5) 破碎率の測定

転圧時の粒子破碎を調べるために、密度試験時に掘削した試料について粒度試験を実施した。転圧前の試料は原石山より採取したものを代表試料として、両者を比較した。

3.2.2 試験結果

試験結果を一覧表にしたものを表 3.1～表 3.4 に示す。図 3.2 は全層の平面方向の乾燥密度分布を示したもので、また図 3.3～図 3.6 は転圧回数毎についての深さ方向の乾燥密度分布を示したものである。

平面方向の密度分布と深さ方向の密度分布を比べると、平面方向のバラツキは小さいが、深さ方向には密度の違いが大きくでている。特に 8 回転圧の下層はバラツキが大きく、密度が大きいところがある。この結果から判断すると、次のようなことが考えられる。

上層に関しては転圧回数によらず密度のバラツキは小さい。上層は締固めのエネルギー効率がよいため安定して締固まるので、このような結果になったものと思われる。中層はどの転圧回数でも上層と同じ程度か小さい密度になっておりバラツキも比較的少ない。中層は上層よりエネルギー効率は悪いがまだうまくエネルギーは伝達されていると考えることができる。下層に関しては 2 回と 8 回では大きなバラツキを示し、4 回と 6 回は安定している。これは締固めのエネルギーがうまく伝達されず、その結果、まき出し時の材料分離が影響してきたためではないかと考えられる。

転圧エネルギーの深さ方向への伝播状態については図 3.7 の報告¹³⁾がある。この図によると、13t の振動ローラーで転圧すると深さ 50cm のところでは 0.4 MPa ($1 \text{ MPa} = 10.2 \text{ kgf/cm}^2$) の動的応力がかかるが、深さ 1.5 m のところでは 0.1 MPa の力しかかからない。この報告から考えると、今回の試験結果はうなずけるが、転圧のエネルギーがどのように下部に伝わって材料が変位し、密度が上昇していくのかメカニズムについては不明な点が多い。これは今後解明していかなければならない問題だと思われる。

図 3.8 は厚さ 1.5 m の平均乾燥密度と転圧回数の関係をあらわしたものである。この図によると、転圧回数が増えるに従って密度が増加する傾向を示しているが、転圧回数が 4 回以上になると密度増加は小さい。これは一般的傾向と合致している。

図 3.9 は、転圧後に実施した粒度試験による平均粒度分布曲線と、代表試料の平均粒度分布曲線を示したものである。この図から明らかなように、転圧前と後では粒度分布曲線がかなり違っている。試料を採取した場所が違ので、このように大きな差になったのであろうが、破碎による変化がどの程度あったかは不明である。今後は袋に試料を詰めてその上を転圧する等、別の方法を考えなければ破碎率はうまく測定できないと思われる。

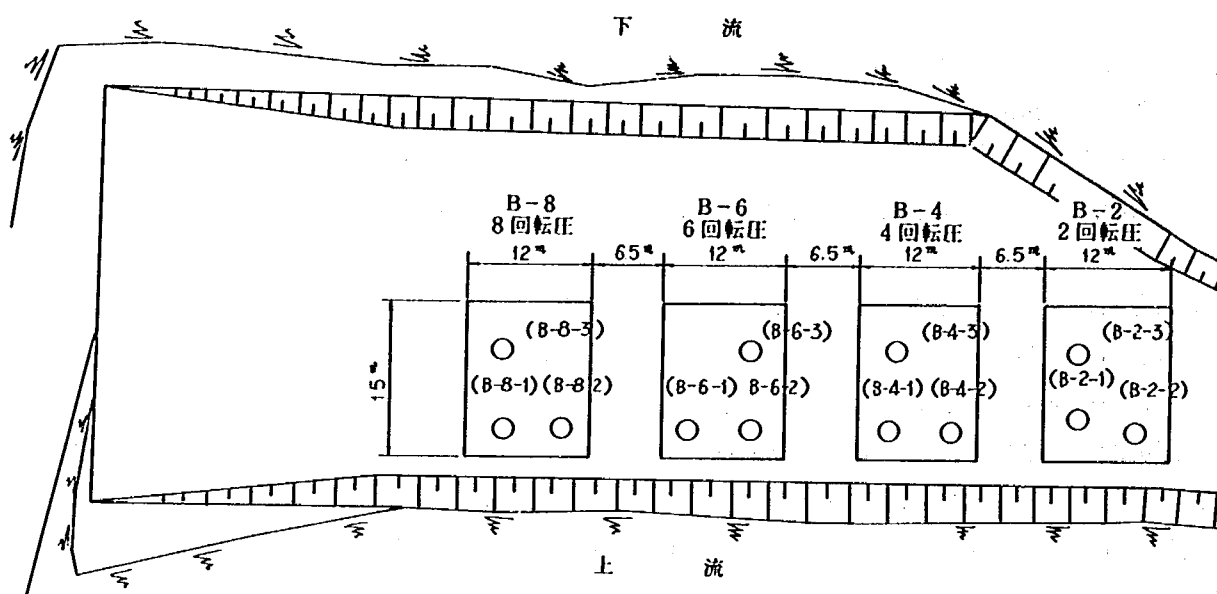


図 3.1 試験マットの形状 (寒河江ダム)

表 3.1 現場密度試験結果一覧表 (2 回転圧)

試験孔	層別	巻出し高さ (m)	転圧後高さ (m)	水面高 (m)	水量 (L)	上部面積 (cm ²)	補正值 (L)	孔の容積 (L)	孔の深さ (m)	真比重 Gg	表比乾重 Ga	絶比乾重 Gb	吸水率 (%)	含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 Uc	曲率係数 U _{c'}	湿潤試料重量 Wt (kg)	乾燥試料重量 Wd (kg)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	G _b による間隙比 e
B-2-1	上層	0.156	0.140	0.089	1056.6	27287.0	139.2	1195.8	0.53	2.782	2.689	2.636	2.0	5.7	500	112.9	0.722	2612.4	2471.3	2.185	2.067	0.275
	中層	"	"	0.105	1811.3	"	95.5	1906.8	1.04	2.756	2.672	2.624	1.8	4.3	"	83.8	1.31	4015.7	3817.0	1.974	1.893	0.386
	下層	"	"	0.087	2639.9	"	144.6	2784.5	1.52	2.758	2.667	2.615	2.0	4.2	"	104.2	2.06	6038.2	5757.6	2.304	2.211	0.183
	全層	"	"	0.087	2639.9	"	144.6	2784.5	1.52	2.765	2.676	2.625	1.9	4.9	"	110.3	0.954	6038.2	5757.6	2.169	2.068	0.269
B-2-2	上層	0.055	0.058	-0.011	1182.4	34305.0	236.7	1419.1	0.55	2.778	2.711	2.673	1.4	6.0	500	87.5	3.75	3272.5	3088.0	2.306	2.176	0.228
	中層	"	"	-0.039	2008.3	"	332.8	2341.1	1.03	2.748	2.619	2.546	2.9	4.4	"	213.1	12.5	5182.4	4917.3	2.071	1.984	0.283
	下層	"	"	-0.055	2911.3	"	387.6	3298.9	1.54	2.787	2.688	2.633	2.1	4.3	"	75.0	2.20	7322.1	6969.2	2.234	2.142	0.229
	全層	"	"	-0.055	2911.3	"	387.6	3298.9	1.54	2.771	2.749	2.617	2.1	5.1	"	78.3	3.20	7322.1	6969.2	2.220	2.113	0.239
B-2-3	上層	0.200	0.203	0.139	1050.7	28772.0	184.1	1234.8	0.51	2.776	2.669	2.614	2.1	5.2	500	108.7	0.743	2768.9	2631.5	2.242	2.131	0.227
	中層	"	"	0.138	2006.9	"	187.0	2193.9	1.02	2.754	2.640	2.575	2.5	4.3	"	63.2	4.49	4774.9	4555.1	2.092	2.006	0.284
	下層	"	"	0.127	2719.9	"	218.7	2938.6	1.55	2.782	2.650	2.576	2.9	5.2	"	70.5	1.85	6213.8	5922.4	1.932	1.836	0.403
	全層	"	"	0.127	2719.9	"	218.7	2938.6	1.55	2.771	2.653	2.588	2.5	4.9	"	89.5	3.28	6213.8	5922.4	2.115	2.015	0.284

表 3.2 現場密度試験結果一覧表 (4 回転圧)

試験孔	層別	巻出し高さ (m)	転圧後高さ (m)	水面高 (m)	水量 (l)	上部面積 (cm ²)	補正值 (l)	孔の容積 (l)	孔の深さ (m)	真比重 Gg	表乾比重 Ga	絶乾比重 Gb	吸水率 (%)	含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 Uc	曲率係数 U _{c'}	湿潤試料重量 Wt (kg)	乾燥試料重量 Wd (kg)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	G _b による間隙比 e
B-4-1	上層	0.239	0.227	0.113	848.5	27854.5	317.5	1166.0	0.56	2.759	2.665	2.611	2.1	5.3	300	148.9	0.439	2734.5	2597.2	2.345	2.227	0.172
	中層	"	"	0.139	2236.1	"	245.1	2481.2	1.04	2.772	2.757	2.748	0.3	3.5	500	76.7	8.53	5832.6	5591.9	2.356	2.277	0.207
	上層	"	"	0.125	3023.5	"	284.1	3307.6	1.53	2.789	2.713	2.671	1.6	6.3	300	117.6	0.314	7632.3	7285.1	2.178	2.049	0.304
	全層	"	"	0.125	3023.5	"	284.1	3307.6	1.53	2.773	2.712	2.677	1.3	4.8	500	85.7	7.71	7632.3	7285.1	2.308	2.203	0.215
B-4-2	上層	0.216	0.181	0.120	1180.4	30871.5	188.3	1368.7	0.54	2.790	2.715	2.674	1.6	4.9	500	136.9	0.424	3345.7	3189.6	2.444	2.330	0.148
	中層	"	"	0.126	2033.8	"	169.8	2203.6	1.01	2.779	2.701	2.657	1.7	5.9	"	136.1	0.340	5263.0	5000.0	2.296	2.168	0.226
	下層	"	"	0.119	2891.5	"	191.4	3082.9	1.55	2.732	2.666	2.628	1.4	8.5	"	127.6	0.912	7186.4	6772.9	2.187	2.016	0.304
	全層	"	"	0.119	2891.5	"	191.4	3082.9	1.55	2.767	2.694	2.653	1.6	6.1	"	148.1	0.448	7186.4	6772.9	2.331	2.197	0.208
B-4-3	上層	0.269	0.244	0.178	1048.0	31833.8	210.1	1258.1	0.54	2.747	2.689	2.656	1.3	3.8	500	134.8	0.519	2886.9	2781.5	2.295	2.211	0.201
	中層	"	"	0.157	2073.3	"	277.0	2350.3	1.07	2.786	2.680	2.621	2.3	5.1	"	—	—	5326.7	5103.7	2.234	2.126	0.233
	下層	"	"	0.152	2641.2	"	292.9	2934.1	1.51	2.748	2.667	2.620	1.8	8.5	300	75.7	0.743	6595.6	6272.9	2.174	2.003	0.308
	全層	"	"	0.152	2641.2	"	292.9	2934.1	1.51	2.760	2.679	2.632	1.8	5.1	500	161.7	0.772	6595.6	6272.9	2.248	2.138	0.231

表 3.3 現場密度試験結果一覧表 (6 回転圧)

試験孔	層別	巻出し高さ (m)	転圧後高さ (m)	水面高 (m)	水量 (l)	上部面積 (cm ²)	補正值 (l)	孔の積 容 (l)	孔の深さ (m)	真比重 G _g	表乾比重 G _a	絶乾比重 G _b	吸水率 (%)	含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _{c'}	湿潤試料重量 W _t (kg)	乾燥試料重量 W _d (kg)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	G _b による 間隙比 e
B 6 1	上層	0.412	0.432	0.291	840.7	30302.8	427.3	1268.0	0.57	2.796	2.725	2.686	1.5	4.7	500	165.6	0.408	3026.5	2890.0	2.387	2.279	0.179
	中層	"	"	0.269	1818.1	"	493.9	2312.0	1.06	2.761	2.678	2.631	1.8	5.8	300	134.3	0.426	5335.8	5073.0	2.212	2.091	0.258
	下層	"	"	0.276	3011.2	"	472.7	3483.9	1.55	2.776	2.686	2.636	1.9	5.2	500	94.8	0.732	7928.4	7538.3	2.212	2.104	0.253
	全層	"	"	0.276	3011.2	"	472.7	3483.9	1.55	2.778	2.696	2.651	1.7	5.2	500	121.1	0.783	7928.4	7538.3	2.276	2.164	0.225
B 6 2	上層	0.479	0.359	0.378	1286.6	30294.5	—	1286.6	0.59	2.715	2.636	2.590	1.8	4.1	500	144.4	4.327	3062.6	2943.0	2.380	2.287	0.132
	中層	"	"	0.382	2358.1	"	—	2358.1	1.04	2.783	2.688	2.635	2.0	5.2	"	138.0	0.397	5493.8	5253.2	2.269	2.156	0.222
	下層	"	"	0.375	3089.3	"	—	3089.3	1.56	2.792	2.695	2.641	2.1	6.9	"	104.6	0.458	7174.0	6825.5	2.298	2.150	0.228
	全層	"	"	0.375	3089.3	"	—	3089.3	1.56	2.763	2.673	2.622	2.0	5.1	"	126.2	0.631	7174.0	6825.5	2.322	2.209	0.187
B 6 3	上層	0.456	0.411	0.329	991.8	30675.0	251.5	1243.3	0.53	2.760	2.693	2.654	1.4	5.1	500	180.4	0.595	2959.7	2816.2	2.381	2.265	0.172
	中層	"	"	0.327	1963.3	"	257.7	2221.0	1.06	2.783	2.695	2.646	1.9	4.7	"	184.5	0.154	5124.1	4882.9	2.214	2.114	0.252
	下層	"	"	0.322	2531.0	"	273.0	2804.0	1.51	2.764	2.690	2.649	1.6	8.4	"	83.1	0.636	6450.0	6106.2	2.274	2.098	0.263
	全層	"	"	0.322	2531.0	"	273.0	2804.0	1.51	2.769	2.693	2.650	1.6	5.6	"	150.0	0.482	6450.0	6106.2	2.300	2.178	0.217

表 3.4 現場密度試験結果一覧表 (8 回転圧)

試験孔	層別	巻出し高さ (m)	転圧後高さ (m)	水面高 (m)	水量 (l)	上部面積 (cm ²)	補正值 (l)	孔の容積 (l)	孔の深さ (m)	真比重 Gg	表乾重 Ga	絶乾重 Gb	吸水率 (%)	含水比 (%)	最大粒径 (mm)	均等係数 Uc	曲率係数 U _{c'}	湿潤試料重量 Wt (kg)	乾燥試料重量 Wd (kg)	湿潤密度 ρ _t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	G _b による間隙比 e
B-8-1	上層	0.572	0.516	0.470	1066.4	29992.2	138.0	1204.4	0.57	2.766	2.696	2.657	1.5	4.2	500	235.3	0.450	2821.5	2708.5	2.343	2.249	0.181
	中層	"	"	0.453	2081.2	"	189.0	2270.2	1.01	2.769	2.694	2.652	1.6	6.1	"	100.0	0.405	5177.5	4929.4	2.211	2.084	0.273
	下層	"	"	0.469	2787.8	"	141.0	2928.8	1.54	2.759	2.684	2.652	1.6	7.8	300	68.2	0.367	6893.0	6521.2	2.605	2.417	0.097
	全層	"	"	0.469	2787.8	"	141.0	2928.8	1.54	2.765	2.691	2.650	1.6	5.7	500	116.7	0.452	6893.0	6521.2	2.354	2.227	0.192
B-8-2	上層	0.585	0.527	0.477	976.1	30160.5	150.8	1126.9	0.53	2.741	2.678	2.642	1.4	4.2	500	125.0	1.01	2658.7	2551.6	2.359	2.264	0.167
	中層	"	"	0.460	2127.3	"	202.1	2329.4	1.01	2.785	2.709	2.666	1.6	4.4	"	—	—	5421.7	5197.9	2.298	2.201	0.211
	下層	"	"	0.457	2895.5	"	211.1	3106.6	1.57	2.766	2.690	2.647	1.6	6.7	"	123.0	2.19	7154.1	6821.0	2.229	2.088	0.268
	全層	"	"	0.457	2895.5	"	211.1	3106.6	1.57	2.764	2.692	2.652	1.5	4.9	"	201.4	2.16	7154.1	6821.0	2.303	2.196	0.208
B-8-3	上層	0.592	0.548	0.497	1120.0	30535.5	155.7	1275.7	0.55	2.754	2.683	2.642	1.5	5.7	500	89.4	0.426	3031.2	2867.8	2.376	2.248	0.175
	中層	"	"	0.509	2201.3	"	119.1	2320.4	1.03	2.791	2.698	2.647	2.0	5.3	"	91.7	5.52	5314.6	5037.3	2.186	2.077	0.274
	下層	"	"	0.510	3274.6	"	116.0	3390.6	1.52	2.778	2.680	2.625	2.1	5.4	"	90.0	1.34	7908.1	7498.0	2.423	2.299	0.141
	全層	"	"	0.510	3274.6	"	116.0	3390.6	1.52	2.774	2.687	2.638	1.9	5.5	"	106.8	0.740	7908.1	7498.0	2.332	2.211	0.193

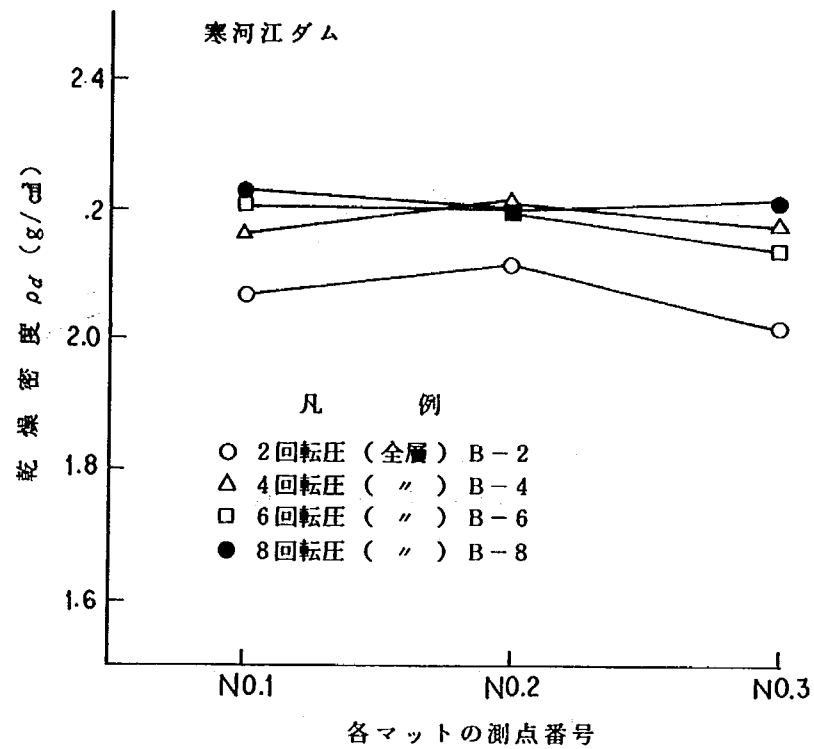


図3.2 乾燥密度の平面方向の分布

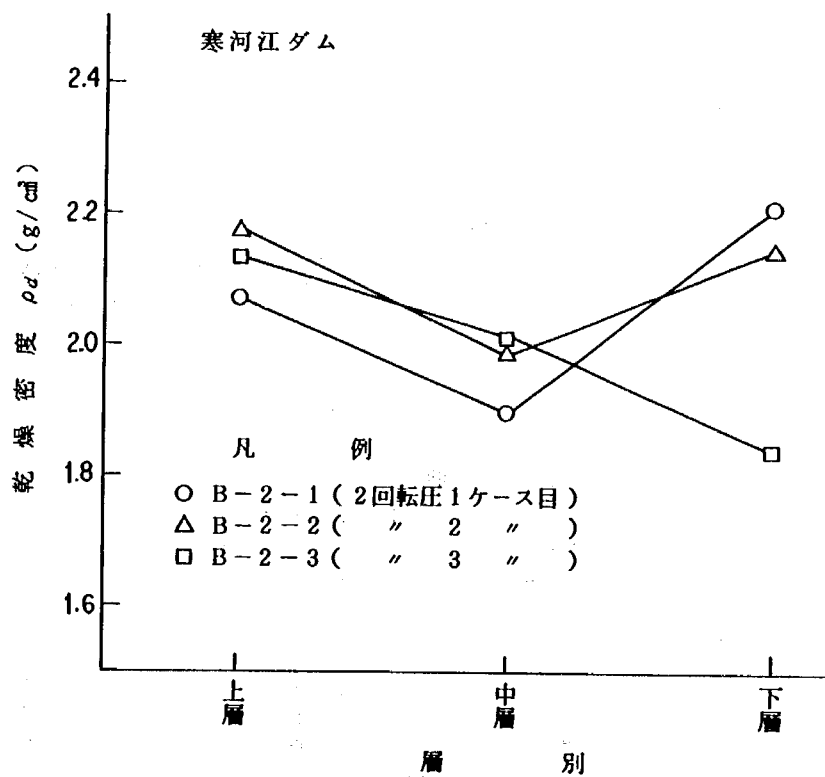


図3.3 乾燥密度の深さ方向の分布 (2回転圧)

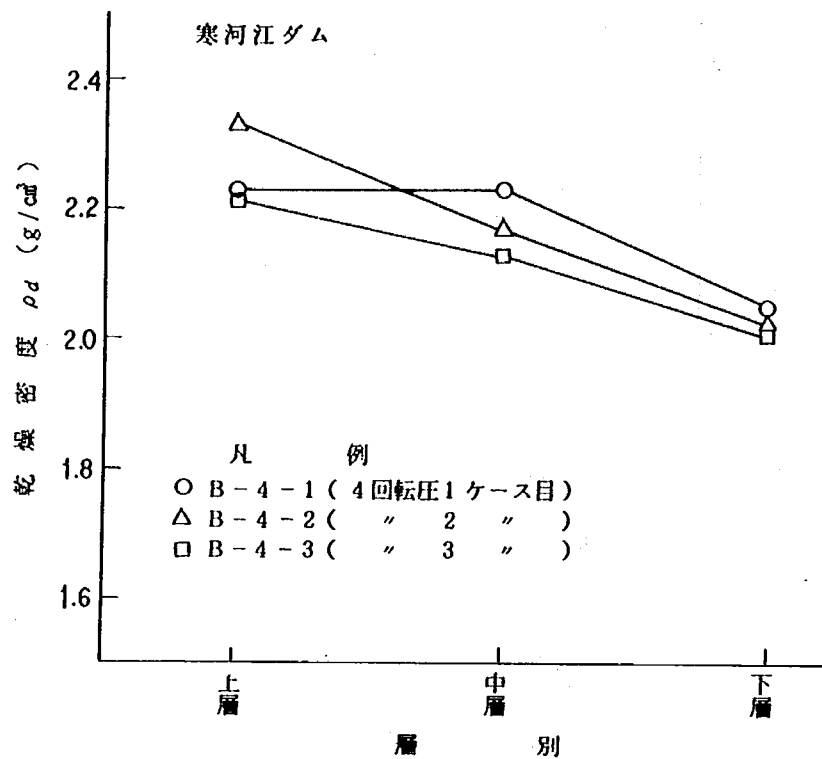


図 3.4 乾燥密度の深さ方向の分布 (4 回転圧)

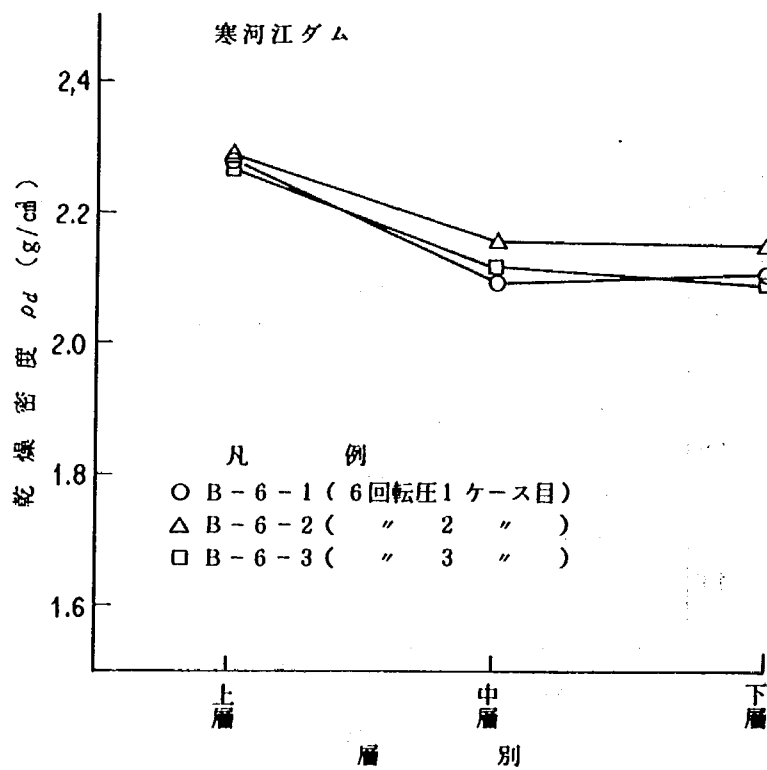


図 3.5 乾燥密度の深さ方向の分布 (6 回転圧)

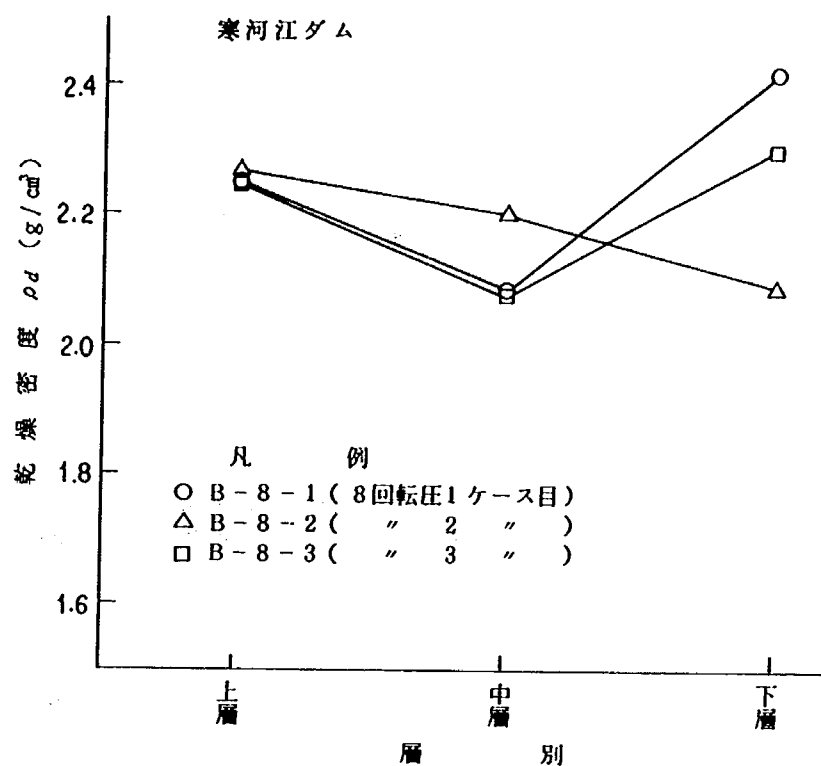


図 3.6 乾燥密度の深さ方向の分布 (8 回転圧)

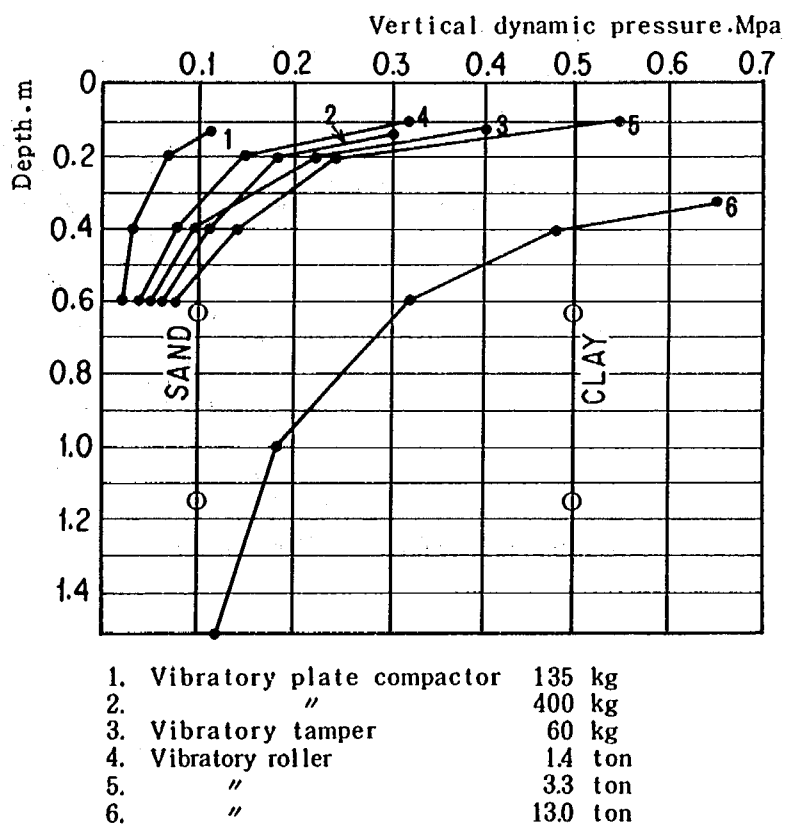


図 3.7 転圧機種の違いによる垂直応力の深さ方向への影響¹³⁾

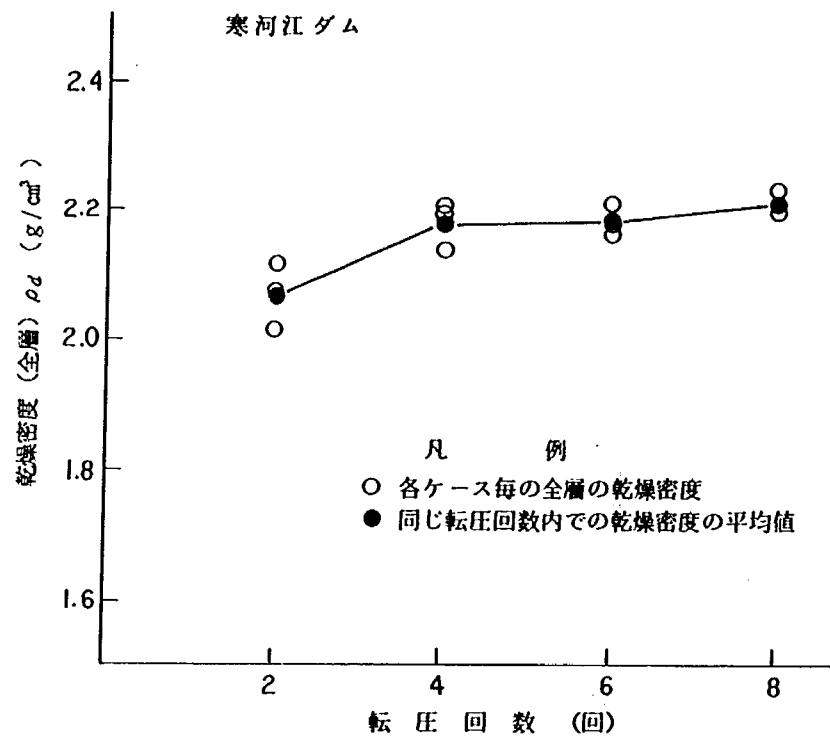


図 3.8 乾燥密度と転圧回数の関係

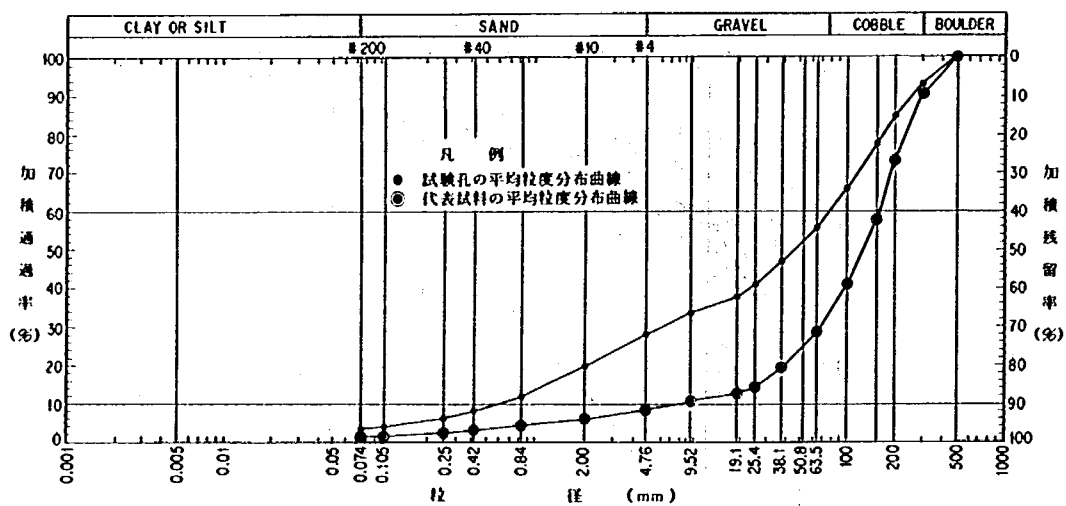


図 3.9 粒度分布曲線 (寒河江ダム)

3.3 七ヶ宿ダム現場密度試験

3.3.1 試験方法

1) 試験マットの形状

試験マットは図3.10に示す形状で、仕上り厚は1.0 m/層(Aマット)と1.5 m/層(Bマット)の2種類について2層盛立てた。

2) 試験試料

原石山採取のロック材(石英安山岩)を使用した。試料の最大粒径は1000 mmである。

3) 転圧仕様

転圧は表3.5に示す仕様でおこなった。またBW-210の仕様を表3.6に示す。

4) 測定方法

(1) 掘削方法や容積測定方法等については1.3.2の6)に準拠したが、試験孔の掘削には1部バックホーを使用した。

(2) 試験は、表3.7に示す項目で実施した。

(3) 第1章の試験結果から、試験孔の直径は3.0 m、深さは仕上り厚と同じとし、シートは農業用ビニールシートの厚さ0.1 mmのものを使用した。

5) 破碎率の測定

転圧時の粒子破碎を調べるために、密度試験時に掘削した試料について粒度試験を実施した。転圧前の試料は原石山より採取したものを代表試料とし、また撤出し前に転圧現場で採取した試料についても粒度試験を実施し、これらの粒度と転圧後の粒度を比較した。

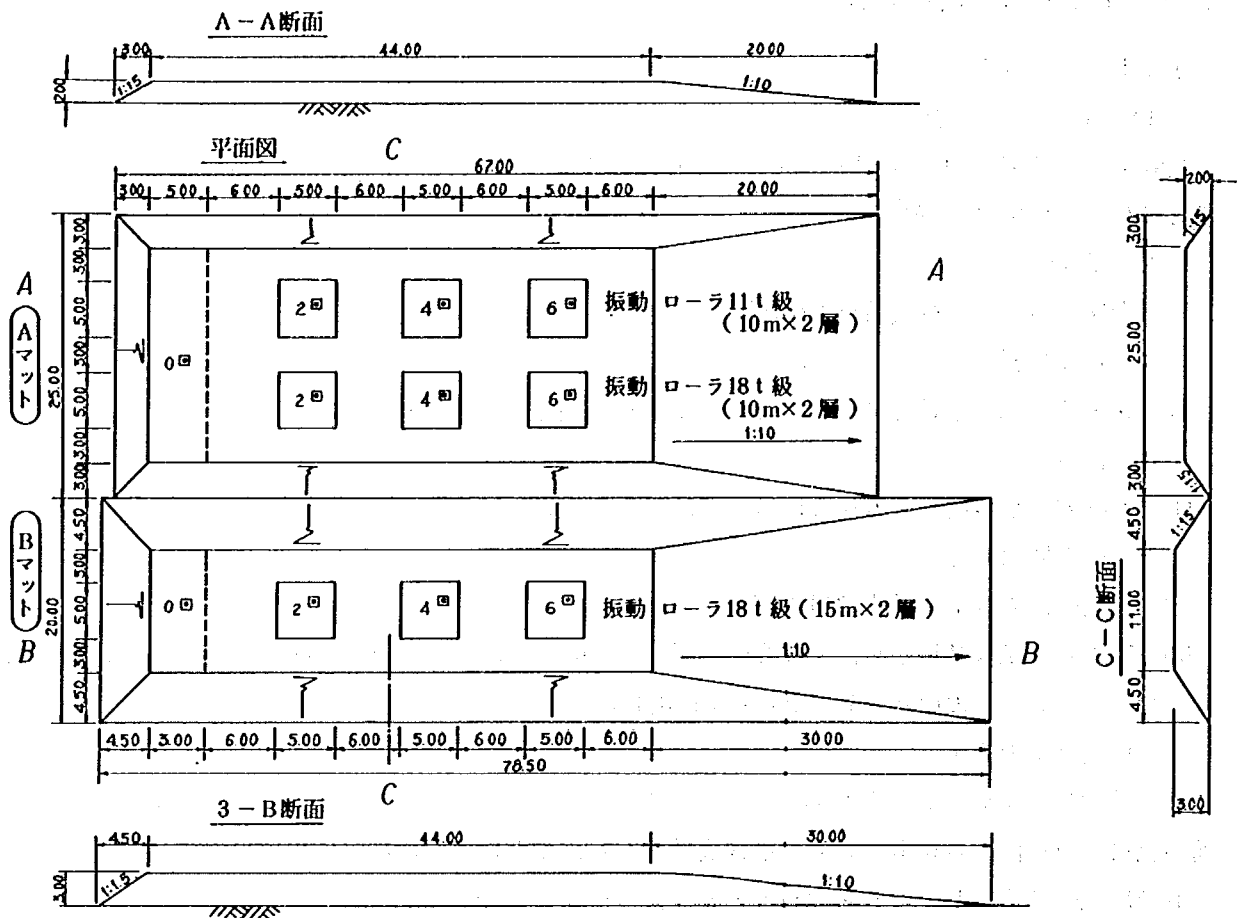


図 3.10 試験マットの形状 (七ヶ宿ダム)

表3.5 転 圧 仕 様

機 種	規 格	転圧速度	仕上り厚	層 数	転圧回数
振動ローラー	11 t 級 BW-210	3 km/hr	1.0 m	2	2
					4
					6
	2				
	4				
	6				
	18 t 級 SP 60 DD		1.5 m		2
					4
					6

表3.6 BW-210の仕様

公 称 重 量		t	8.2	最小回転半径		m	5.13
計		t	8.2	軸 距		m	2.74
重 量	前 輪	t	4.8	締 固 め 幅		cm	213
	後 輪	t	3.4	前 輪	直 径	cm	150
起 振 力		t	18.2		幅	cm	213
振 動 数		v.p.m	1,850	後 輪	直 径	cm	231-26-8×2
寸 法	全 長	m	5.23	定 格 出 力		PS	110
	全 幅	m	2.36	前 後 進	段 数		3
	全 高	m	2.21	速 度	範 囲	km/hr	0~24

表3.7 試験項目および数量一覧表

試験項目		転圧機種	振 動 ロ ー ラ									無 転 圧	
			11 t 級 BW-210			18 t 級 SP60DD							
		仕上り厚	1.0 m × 2 層			1.0 m × 2 層			1.5 m × 2 層			1.0 m × 2 層	15 m × 2 層
		転圧回数	2	4	6	2	4	6	2	4	6	0	0
粒 度 試 験	まき出し前	1			1				1			—	—
	転 圧 後	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
現場密度試験（孔）		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.3 2 試験結果

試験結果の一覧表を表 3.8 に示す。図 3.11, 図 3.12 は, 乾燥密度の深さ方向の分布を示したものである。図 3.12 の無転圧部の下層で乾燥密度がかなり大きくなっているところがあるが, それ以外は下層より上層の密度が大きいという傾向にある。この結果は寒河江ダムの密度試験結果とはほぼ一致している。すなわち, 締固めのエネルギーはうまく下層まで伝達されず, 振動ローラーの転圧によって上層の密度のみが増加したものと考えられる。

乾燥密度と転圧回数の関係を図 3.13, 図 3.14 に示す。仕上り厚が 1.5 m のケースでは, 無転圧部の下層で乾燥密度が大きくなっている他は, 転圧回数が増えると乾燥密度が大きくなる傾向がある。しかし, 仕上り厚が 1.0 m のケースではバラツキが大きくはっきりとした傾向は認められない。表 3.8 をみると各ケースの均等係数も 5 ~ 36 とかなり開きがある。これは, それぞれの転圧回数での現場密度試験位置が違いため, 敷均し時の粒度のバラツキがそのまま影響したと思われる。乾燥密度は均等係数の影響を大きく受けるので, バラツキの原因となったのは均等係数の違いと考えられる。図 3.15 は, 間隙比と均等係数の関係を示したものである。この図によると, 仕上り厚が 1.0 m のデータは, 均等係数が大きくなると間隙比が小さくなる傾向にある。すなわち仕上り厚が 1.0 m のデータは試料の均等係数の違いが密度に影響し, 転圧回数の効果にバラツキを生じさせているものと考えられる。

図 3.16 は, 代表試料の粒度と撒出し前の粒度を示したもので, また図 3.17 は転圧後試料の平均粒度分布である。両図を比較すると, 転圧後試料の粒度の方が全体的に粗くなっている。破碎があったとすると転圧後試料の方が細い粒度になるはずなのに逆になっている。これは試料採取位置の違いによるものと考えられ, このデータからは破碎率について説明することはできない。

表 3.8 試験結果一覧表

マット	振動ローラ (t)	転圧回数 (回)	密度孔深さ (m)	乾燥密度 $\rho_d(t/m^3)$	平均絶乾 比 重	間 隙 比 e	均等係数 $U_c=D_{60}/D_{10}$
A 仕上り厚 1.0 m	—	0	0～0.5	2.055	2.565	0.248	17
			0.5～1.0	1.517	"	0.691	
			0～1.0	1.940	"	0.322	
	11	2	0～0.5	2.044	"	0.255	31
			0.5～1.0	2.018	"	0.271	
			0～1.0	2.031	"	0.263	
		4	0～0.5	2.153	"	0.191	25
			0.5～1.0	1.800	"	0.425	
			0～1.0	1.975	"	0.299	
		6	0～0.5	2.093	"	0.226	36
			0.5～1.0	1.940	"	0.322	
			0～1.0	2.004	"	0.280	
	18	2	0～0.5	1.895	"	0.354	5
			0.5～1.0	1.779	"	0.442	
			0～1.0	1.841	"	0.393	
		4	0～0.5	2.010	"	0.276	20
			0.5～1.0	2.055	"	0.248	
			0～1.0	2.028	"	0.265	
		6	0～0.5	2.309	"	0.111	19
			0.5～1.0	1.769	"	0.450	
			0～1.0	2.063	"	0.243	
B 仕上り厚 1.5 m	—	0	0～0.5	1.811	"	0.416	7
			0.5～1.0	1.704	"	0.505	
			1.0～1.5	2.176	"	0.179	
			0～1.5	1.870	"	0.372	
	18	2	0～0.5	1.812	"	0.416	17
			0.5～1.0	1.678	"	0.529	
			1.0～1.5	1.724	"	0.488	
			0～1.5	1.739	"	0.475	
		4	0～0.5	2.060	"	0.245	16
			0.5～1.0	1.772	"	0.448	
			1.0～1.5	1.720	"	0.491	
			0～1.5	1.865	"	0.375	
		6	0～0.5	2.124	"	0.208	9
			0.5～1.0	1.874	"	0.369	
			1.0～1.5	1.741	"	0.473	
			0～1.5	1.915	"	0.339	

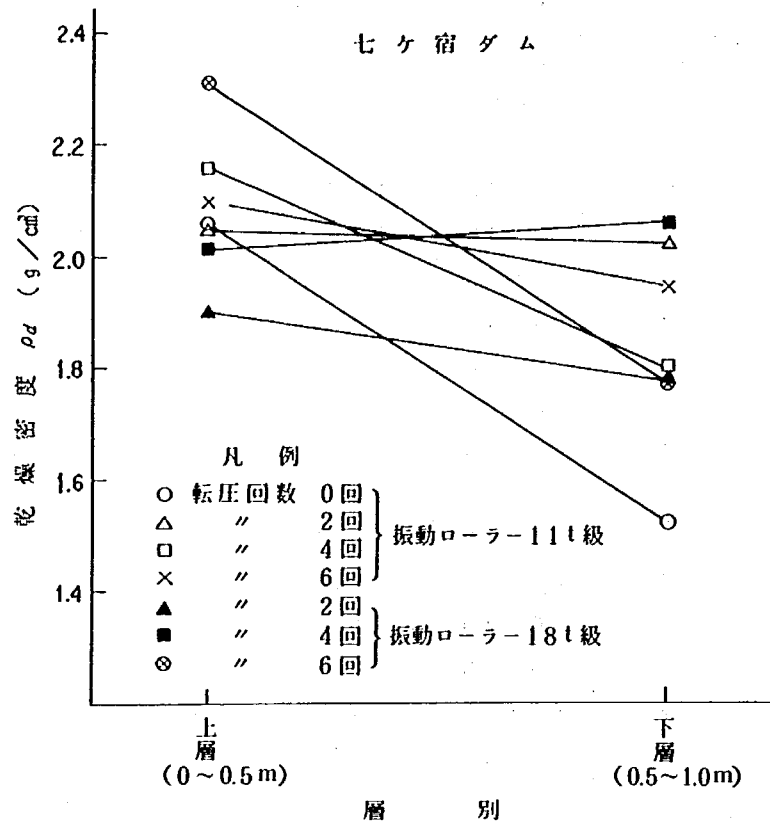


図 3.11 乾燥密度の深さ方向の分布 (Aマット, 仕上り厚 1.0 m)

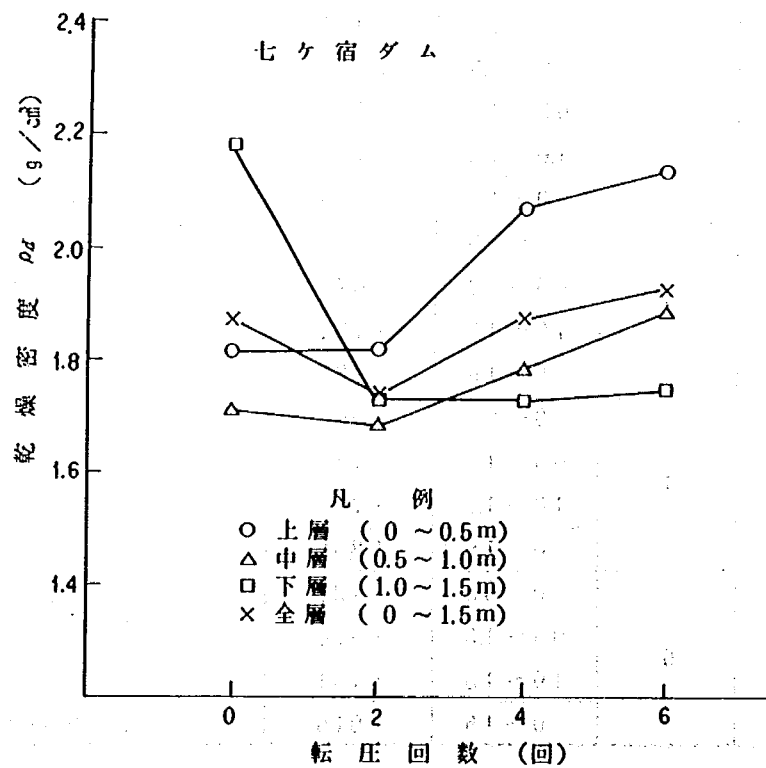


図 3.12 乾燥密度と転圧回数の関係 (Bマット, 仕上り厚 1.5 m)

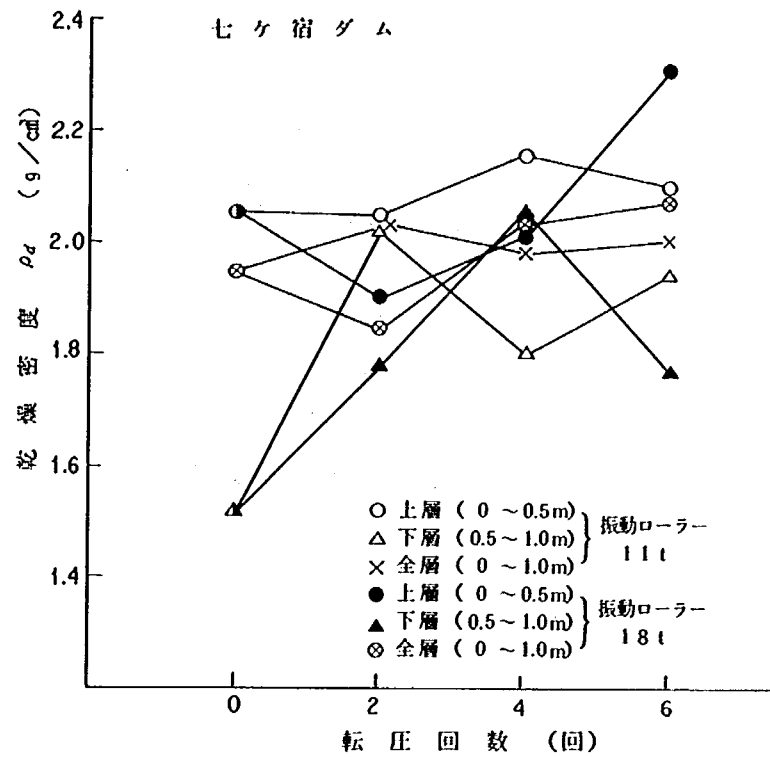


図 3.13 乾燥密度と転圧回数の関係 (A マット, 仕上り厚 1.0 m)

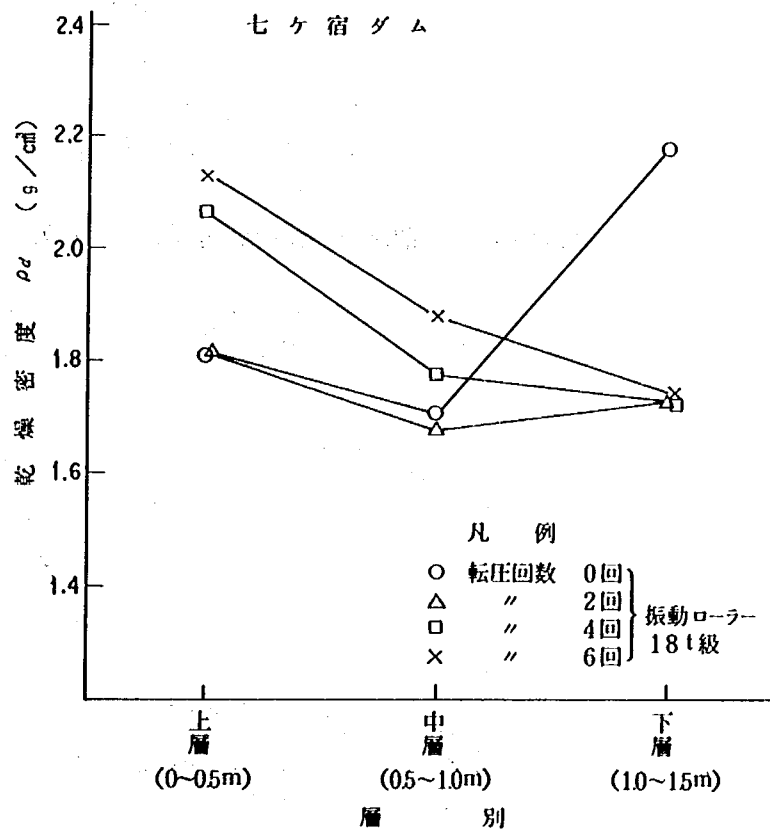


図 3.14 乾燥密度の深さ方向の分布 (B マット, 仕上り厚 1.5 m)

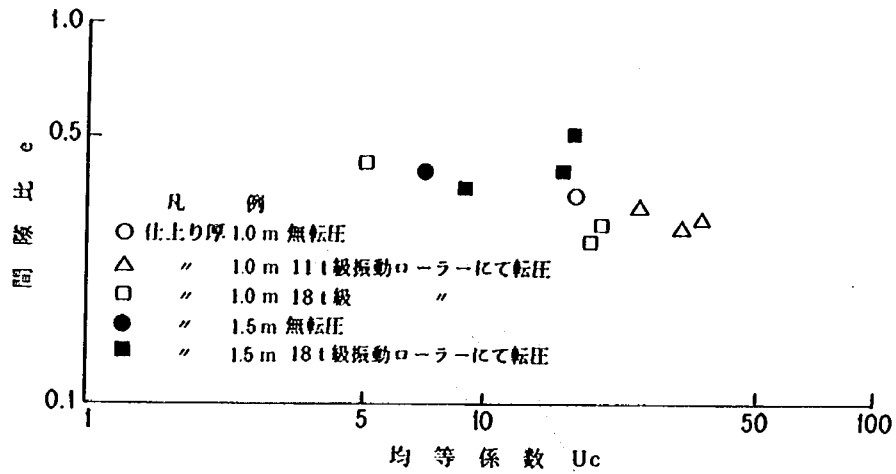


図 3.15 間隙比と均等係数の関係

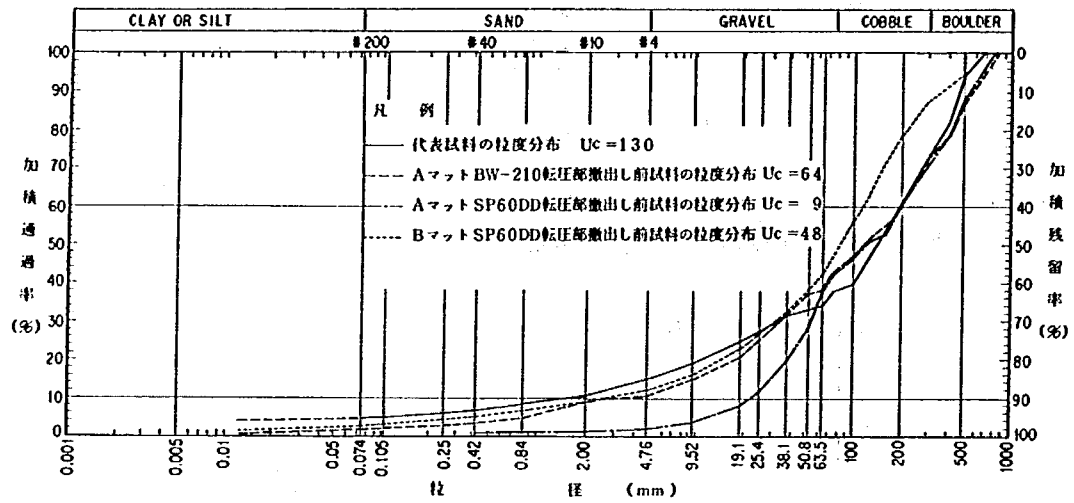


図 3.16 代表試料および撤出前試料の粒度分布 (七ヶ宿ダム)

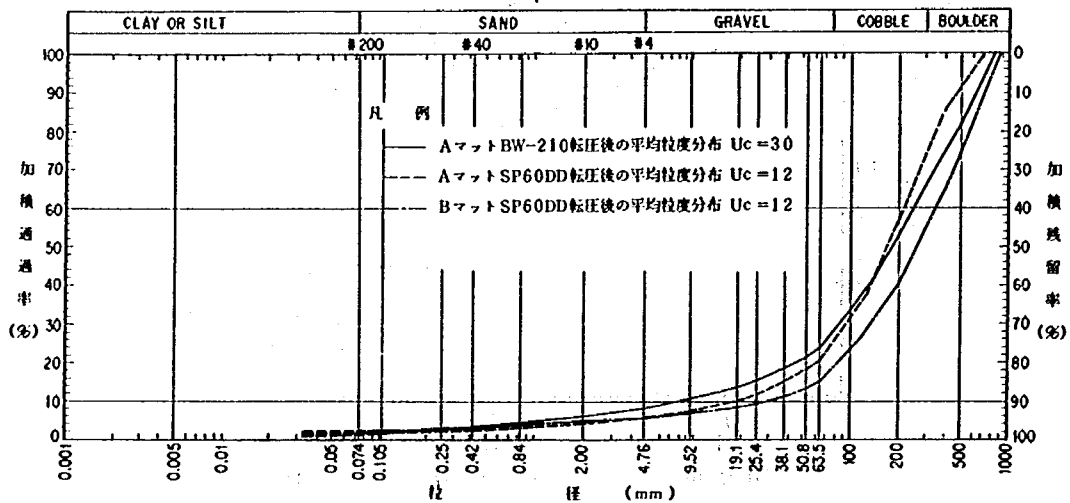


図 3.17 転圧後の平均粒度分布 (七ヶ宿ダム)

3.4 室内締固め試験

3.4.1 試験方法

1) 試験仕様

室内締固め試験は、第2章の結果から下記の仕様で実施した。

モールド内径	30 cm
締固め後の試料の目標高さ	35.4 cm
締固め後試料の目標体積	25 ℓ
試料の最大粒径	63.5 mm
ランマーの直径	15 cm
ランマーの重量	10 kgf
ランマーの落下高さ	75 cm
締固め層数	3層

2) 試験試料

(1) 寒河江ダム試料

現場密度と室内試験密度の関連を知るには、現場の転圧前の試料の粒度を相似粒度の手法によって低減し、現場と同じ破碎率が生じる室内締固め試験を実施する事が理想である。しかし現場の破碎率をうまく測定できなかったため、現場と同様の粒度、破碎率で室内試験を実施することは困難である。3.2.2で述べたように、原石山の代表試料と転圧後試料の粒度分布ではかなりの違いがある。室内締固め試験の破碎率は5%前後であり、代表試料の粒度分布で室内試験を実施した場合、実施工の粒度、すなわち転圧後の粒度とかなりかけ離れた粒度になってしまう。そのため室内締固め試験の粒度分布は、図3.18に示す転圧後試料の平均粒度の相似粒度であるA粒度（均等係数125）と、その粒度曲線を人為的になめらかにしたB粒度（均等係数90）の2種類で実施することとした。

(2) 七ヶ宿ダム試料

室内試験密度と現場密度を比較するには、両者の粒度をできるだけ同じにする必要がある。七ヶ宿ダムの現場試験では、3.2.2でも述べたように、転圧前後の粒度にかなりの開きがある。これは試料採取位置の違いによるものと考えられ、その意味では転圧後の粒度で室内締固め試験を実施する方が、室内試験密度と現場密度の関係をうまく把握できる。転圧後粒度は図3.17に示す通りで、均等係数は30と12である。室内締固め試験の試料最大粒径は63.5 mmなので、相似粒度の手法で最大粒径を低減して室内締固め試験時の粒度とした。この粒度を図3.19に示す。図中のC粒度は現場試験時のAマット（振動ローラー18 t級転圧）およびBマットの粒度と対応している（均等係数12）。またD粒度はAマット（振動ローラー11 t級転圧）の粒度と対応している（均等係数30）。

3) 試験ケース

寒河江ダム試料を使用した試験は、A粒度とB粒度についてOE_c（投入のみ）、0.5 Ec、1 Ec、2 Ec、3 Ec の5種類の仕事量で1ケースずつ実施した。七ヶ宿ダムの試料を使用した試験は、C粒度とD粒度について、OE_cで2ケース、0.5 Ec、1 Ec、2 Ec、3 Ec、5 Ec の仕事量で1ケースずつ実施した。

4) 締固め試験方法

締固め試験方法は、2.2.3と同じ方法で実施した。

5) 破 碎 率

各仕事量で締固め後、破碎率を求めるために粒度試験を実施した。使用したふるいは試料準備に使用したものと同様11種類である。破碎率はMarsalの破碎率で求めた。

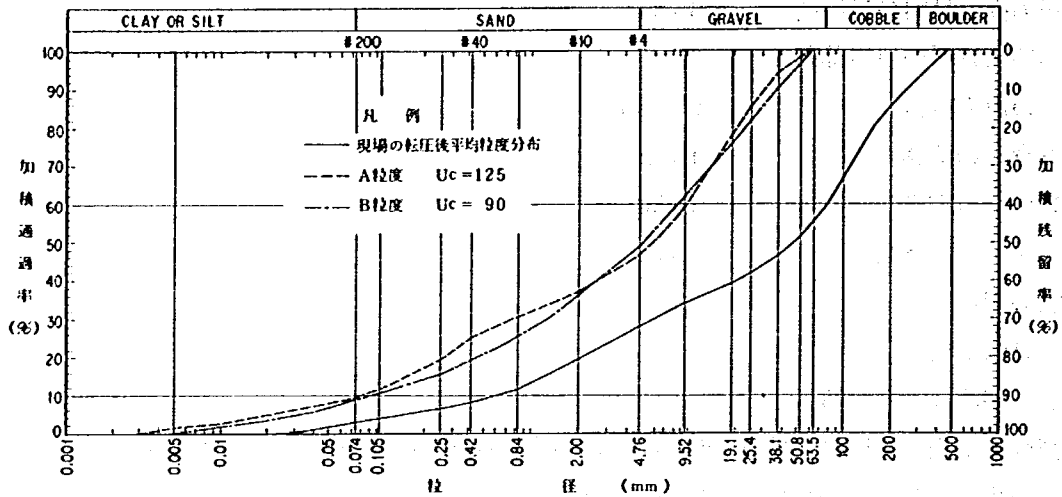


図 3.18 試験試料の粒度分布 (寒河江ダム)

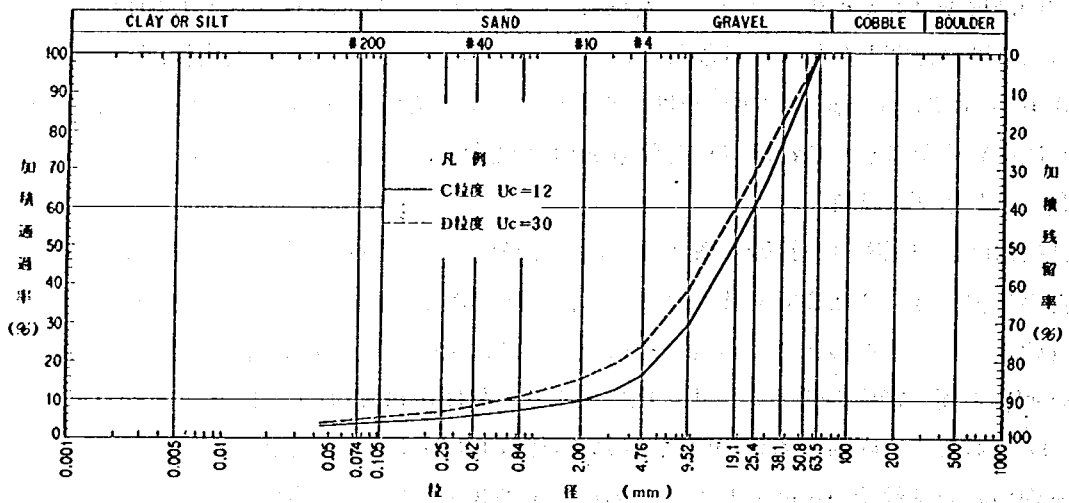


図 3.19 試験試料の粒度分布 (七ヶ宿ダム)

3.4.2 試験結果

1) 寒河江ダム試料

試験結果を表 3.11 に、締固め仕事量と乾燥密度のグラフを図 3.20 に示す。この図によると A 粒度と B 粒度の密度の差はほとんどなく、どちらも締固め仕事量の増加と共に乾燥密度が大きくなる傾向を示している。しかし、2 Ec と 3 Ec の密度はほとんど同じなので、3 Ec では最大密度近くまで締まっているものと考えられる。破碎率は最低 2.6 %、最高 7.5 % で、それほど大きな破碎はなかった。また締固め仕事量と破碎率の相関は特に得られなかった。

2) 七ヶ宿ダム試料

試験結果を表 3.12 に、締固め仕事量と乾燥密度のグラフを図 3.21 に示す。C 粒度 ($U_c=12$) と D 粒度 ($U_c=30$) を比較すると、D 粒度の方が乾燥密度は大きく、締固め仕事量の増加に対する乾燥密度の伸びも大きい。また破碎率はすべて 5 % 以下となっており、比較的破碎が少く試験できたことを示している。

表 3.11 室内締固め試験結果 (寒河江ダム)

粒 度	締固め 仕事量	締 固 め 後の高さ (cm)	締 固 め 後の体積 (cm^3)	湿 潤 重 量 W_t (kg)	含 水 比 W (%)	乾 燥 重 量 W_d (kg)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm^3)	破 碎 率 B_o
A 粒 度	0 Ec	35.22	24896	52.002	0.78	51.600	2.089	—
	0.5 Ec	34.00	24033	54.723	"	54.300	2.259	7.5
	1 Ec	34.60	24457	56.538	"	56.100	2.293	5.2
	2 Ec	35.90	25376	59.259	"	58.800	2.317	2.6
	3 Ec	36.80	26012	61.073	"	60.600	2.330	3.7
B 粒 度	0 Ec	35.32	24966	51.997	0.77	51.600	2.067	—
	0.5 Ec	34.11	24111	54.718	"	54.300	2.252	4.4
	1 Ec	34.67	24507	56.532	"	56.100	2.289	5.2
	2 Ec	34.97	24719	58.044	"	57.600	2.330	5.7
	3 Ec	35.51	25101	59.253	"	58.800	2.343	5.7

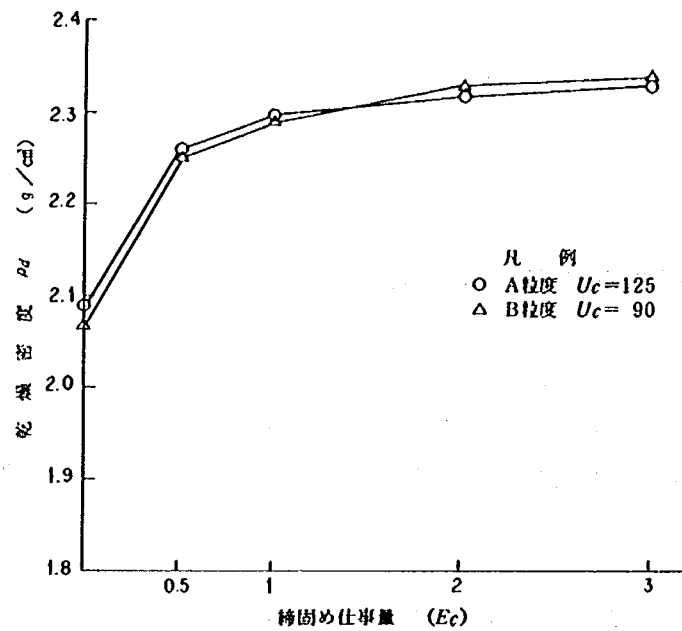


図 3.20 締固め仕事量と乾燥密度 (寒河江ダム)

表 3.12 室内締固め試験結果 (七ヶ宿ダム)

粒 度	締 固 め 仕 事 量	締 固 め 後の高さ (cm)	締 固 め 後の体積 (cm^3)	湿 潤 重 量 Wt (kg)	含水比 W (%)	乾 燥 重 量 Wd (kg)	乾 燥 密 度 ρ_d (g/cm^3)	破 碎 率 Bo
C 粒 度	0 Ec	36.83	26034	41.226	1.00	40.818	1.568	—
		37.29	26359	41.226	"	40.818	1.549	—
	0.5 Ec	34.21	24182	44.976	"	44.531	1.841	3.5
	1 Ec	34.08	24090	45.206	"	44.758	1.858	4.0
	2 Ec	35.28	24938	47.100	"	46.634	1.870	4.4
	3 Ec	33.86	24934	45.808	"	45.354	1.895	3.1
	5 Ec	35.92	25390	49.221	"	48.734	1.919	2.9
D 粒 度	0 Ec	34.91	24676	44.205	"	43.767	1.774	—
		35.55	25129	44.205	"	43.767	1.742	—
	0.5 Ec	35.07	24790	46.845	"	46.381	1.871	4.5
	1 Ec	34.56	24429	46.800	"	46.337	1.897	3.9
	2 Ec	35.29	24945	49.527	"	49.037	1.966	2.2
	3 Ec	34.77	24578	49.776	"	49.283	2.005	3.6
	5 Ec	34.53	24408	52.743	"	52.221	2.140	3.3

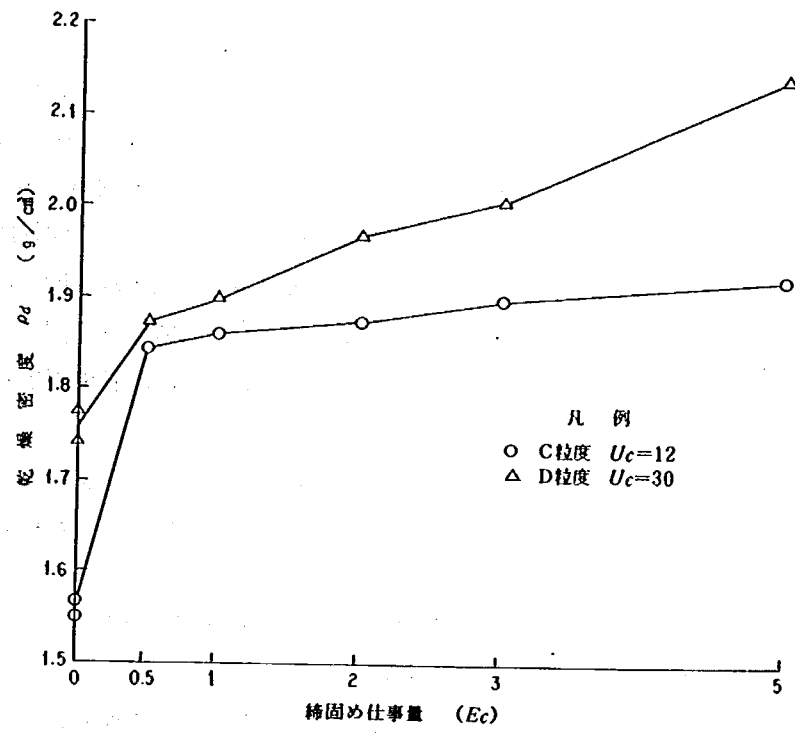


図 3.21 締固め仕事量と乾燥密度 (七ヶ宿ダム)

3.5 現場密度と室内試験密度の関係

転圧回数および締固め仕事量と乾燥密度の関係を図 3.22, 図 3.23 に示す。これらの図から同じ乾燥密度を示している転圧回数と締固め仕事量をグラフにプロットしたものが図 3.24 である。図 3.24 によると、寒河江ダムの試験結果は、転圧回数が 8 回でも室内試験の締固め仕事量の 0.5 Ec 程度である。逆に七ヶ宿ダムでは、室内試験の 5 Ec の仕事量で締固めても、現場の 4 回転圧相当の乾燥密度にも満たないものもある。このように、室内試験の締固め仕事量と現場の転圧回数の関係はバラツキが大きく、はっきりとした対応は得られなかった。現場密度と室内試験密度の対応を図るためには、両者の試験条件を統一する必要がある。今回、大きなバラツキが生じ、両者の対応がとれなかった原因としては次の事が考えられる。

- ① 現場密度試験時に掘削した試料の粒度を調べるとかなりバラツキが多い。これは敷均し時の材料の分離によるものと考えられ、各転圧回数のヤードの粒度条件の違いが乾燥密度に影響を与えた。
- ② 現場転圧試験時の、破碎による粒度条件の変化をうまく測定できなかった。そのため、室内試験の粒度は、現場粒度条件と違うことが考えられる。
- ③ 現場密度は、一層内においても上層、下層で密度に差があることがわかった。今回は全層の密度と室内試験を対比させて考えたが、室内試験と比較する対象を全層とするか、エネルギーがよく伝わっている上層のみとするかによって、両者の対応関係が違ってくる。
- ④ 現場の転圧は振動ローラーによる締固めであるのに対して、室内試験では衝撃的荷重による締固め方法を採用したため、締固め方法、条件が異なる。
- ⑤ 根本的な問題として試験精度があげられる。今回は 1 章と 2 章で最適試験方法を求め、それにそって試験を実施した。しかし細かい試験要領については、試験者の判断に委ねたため、試験誤差が大きくなったと考えられる。

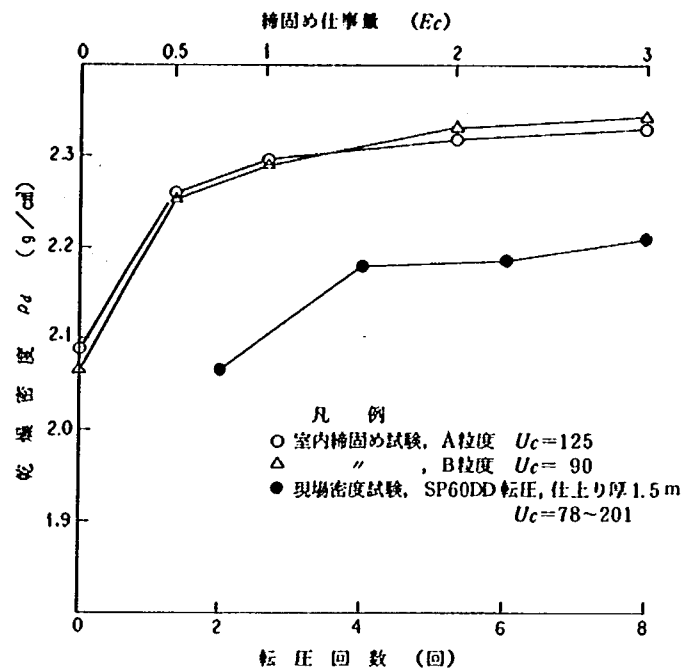


図 3.22 転圧回数および締固め仕事量と乾燥密度の関係（寒河江ダム）

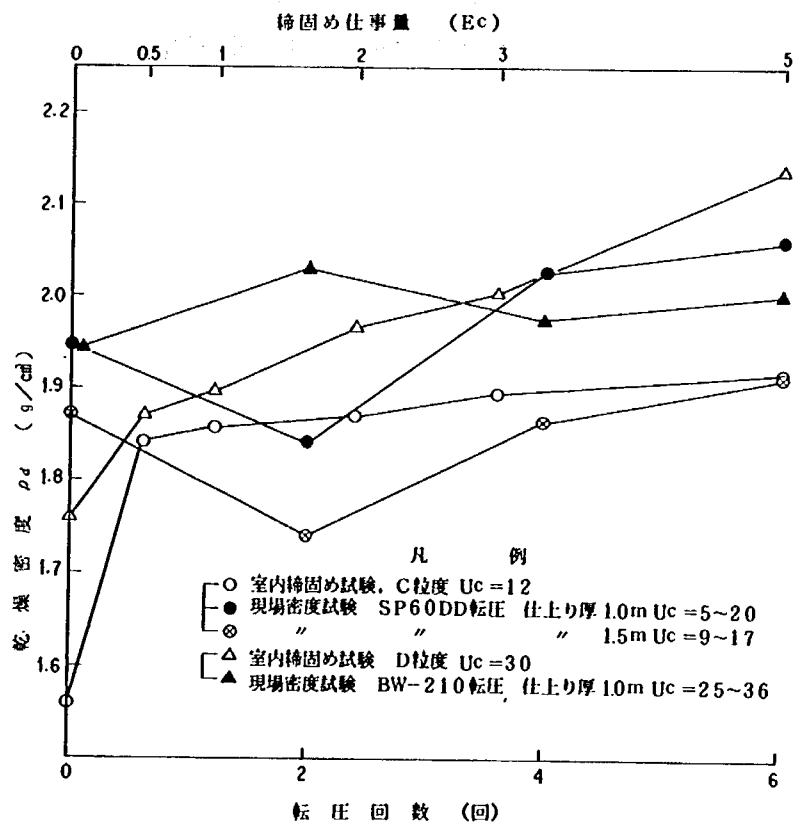


図 3.23 転圧回数および締固め仕事量と乾燥密度の関係（七ヶ宿ダム）

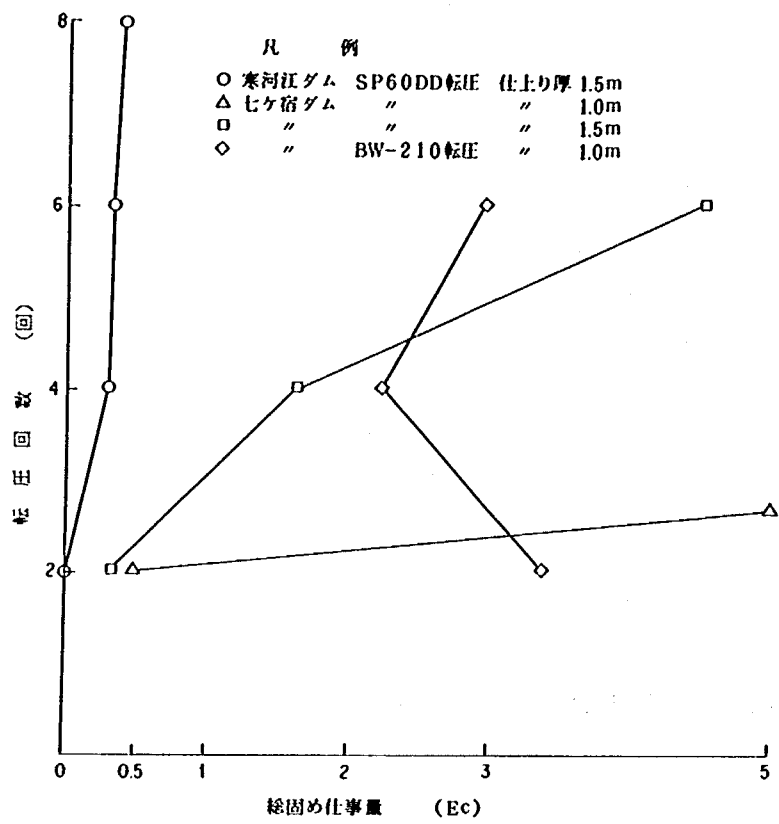


図 3.24 締固め仕事量と転圧回数の関係

3.6 考 察

ロック材料の一層内における密度の鉛直方向分布状況については、上層の方が下層より高い密度になるという結果が得られた。層厚は 1.0 m と 1.5 m、転圧機種は SP 60 DD (18 t 級) および BW-210 (11 t 級) である。層厚を薄くしたり転圧回数を大きくすれば、下層まで締まる事も考えられるが、上層の密度が下層より大きくなるのは避けられないと思われる。

この場合、現場密度試験の方法、現場密度の評価の仕方についても、十分に注意を払わなければならない。現場密度試験を実施する際に、一層全部の密度を測定しないで、表層のみ掘削して測定すると、表層の密度の大きな部分だけを試験した事になり、実際の密度より大きな値が得られる事になる。現場密度試験時には、仕上り厚と同じ厚さで試験しなければ、正確な密度を測定する事はできない。また上層と下層の密度が大きく違うと、下層の密度は施工管理基準を満足できない事も考えられるので、場合によっては、一層を 2 ～ 3 層に分けて現場密度試験を実施した方がよいと思われる。

現場密度と室内試験密度の関連については、容易に対応が得られない事がわかった。前節でも述べた諸問題をひとつづつ解決し、現場転圧試験と室内締固め試験時の試験条件を統一することが、今後の重点課題であると考ええる。

おわりに

ロック材料の現場密度試験方法は、孔径についてははっきりとした結論を下せなかったが、孔内に張るシートの厚さについては比較的よいデータが得られた。試験孔の掘削および容積測定方法は、当研究室の提案した方法で実施して特に支障はなく、本報告で示した方法で精度よく試験できるめどがついたと思われる。しかしこの試験方法は、あくまで水置換法による現場密度試験の標準化をめざしたものであり、より簡略に現場密度を測定できるRI試験法がロック材料にも適用できるようになることが、今後の課題であろう。

室内締固め試験は、締固め方法にランマーの自由落下による衝撃荷重による方法を採用した。この方法が室内締固め試験方法として最良の方法であるかについては問題があるが、現時点で最も一般的に実施されている方法であり、ランマーの直径、重量、落下高さにある程度の指針が得られたことは、今後の室内試験の参考になると思われる。また、粒度低減方法は、試験粒度の作成方法、相似粒度の適用範囲、細粒分の多い材料での最大粒径低減方法が解明でき、室内試験に適用できるとと思われる。

現場密度の鉛直方向分布調査では、ロック材においても一層内に密度の層状不均一性の存在が認められた。しかし、締固めエネルギーがどのように伝播して材料が締固まるかの、締固めのメカニズムについては不明の点が多く、今後解明していかなければならない問題である。

現場密度と室内試験密度の関係については、残念ながらよい対応は得られなかった。この問題は、試験方法や精度、現場粒度のバラツキ、破碎率の問題等、様々な要素が関連しており、容易に解明はできない。しかし、現場密度を室内で精度よく求めるためには、この問題を無視することはできず、諸要素をひとつずつ解明し、今後さらに精度のよいデータを蓄積していかなければならないと思う。

謝 辞

本試験を実施するに当り、建設省東北地方建設局、寒河江ダム工事事務所、並びに七ヶ宿ダム工事事務所の諸氏には、並々ならぬご協力を賜わり、ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本大ダム会議；第2次改訂ダム設計基準，1978年8月，p68
- 2) 土質工学会調査部；土質工学会基準案「土の密度試験方法」（JSF規格：T 33～36-83T）について，土と基礎 31-2，1983年2月，p55
- 3) 松本徳久，渡辺和夫，吉野内真二；ロック材料の調査・設計・施工に関する事例調査，土木研究所資料第1839号，昭和57年7月，p119
- 4) 東京電力株式会社；高瀬川-電源開発工事報告，1981，p497
- 5) E.T.Seling and R.S.Ladd；Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, June 1972, American Society for Testing and Materials, p214
- 6) 建設省河川局開発課，建設省土木研究所；フィルダムの設計と施工に関する研究，第30回建設省技術研究会報告，昭和51年，p547
- 7) 土質工学会；土質試験法，1979，p297
- 8) 建設省河川局開発課，建設省土木研究所；フィルダムの設計と施工に関する研究，第29回建設省技術研究会報告，昭和50年，p549
- 9) 守田祐吉；突固め試験による試料の最大制限粒径について，土と基礎 14-9，1966年9月，p26
- 10) 建設省河川局；多目的ダムの建設第3巻，昭和54年，p353
- 11) R.J.Marsal；Large Scale Testing of Rockfill Materials, Proc.ASCE, Vol 93, NOSM2, p27
- 12) 松本徳久，渡辺和夫，岩田充弘，小川優；コア材転圧時の変位計測と機種による転圧特性の比較，土木研究所資料第2182号，昭和60年3月
- 13) L.Forssblad；Vibratory Soil and Rockfill Compaction

粗粒材料の密度試験に関する 実験的検討

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2233号
昭和60年3月(1985)

ダム部フィルダム研究室 松本 徳久
渡辺 和夫
岩田 充弘
小川 優

要 旨 フィルダムの粗粒材料に関する、現場密度試験方法および室内締固め試験方法には定まった基準がない。また現場密度の鉛直方向の分布状態、現場密度と室内試験密度の関係についても未解明の部分が多い。

本報告では、現場密度試験と室内締固め試験の試験方法の標準化を計るために、各種実施した試験の結果をとりまとめると共に、現場密度の鉛直方向の分布状態、現場密度と室内試験密度の関係についても考察を加えた。

その結果、現場密度試験時のビット測定用シートの厚さや試験孔径が試験密度に与える影響、および室内締固め試験時の粒度作成方法、締固めランマーの条件についてデータが得られた。また、現場密度の一層内における層状不均一性の存在は確認できたが、現場密度と室内試験密度の関係については、現場と室内の試験条件の統一が難しく、問題提起をするにとどまった。

キーワード：現場密度試験、水置換法、室内締固め試験、相似粒度、均等係数、締固め仕事量