

土 木 研 究 所 資 料

ロ ッ ク 材 料 の 相 対 密 度 試 験

昭 和 57 年 1 月

建 設 省 土 木 研 究 所

ダ ム 部 フ ィ ル ダ ム 研 究 室

Copyright © 1982 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director 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、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ロック材料の相対密度試験

松 本 徳 久
豊 田 光 雄

目 次

1. はじめに	1
2. 試験目的	2
3. 試験方法	3
3.1 試験構成	3
3.2 試 料	3
3.3 試験器具および機械	3
3.4 試験方法	6
3.4.1 比重, 吸水量試験	6
3.4.2 最小密度試験	7
3.4.3 最大 "	9
3.4.4 検討項目	14
4. 試験結果および考察	16
4.1 比重, 吸水量試験	16
4.2 最小密度試験	16
4.2.1 誤 差	16
4.2.2 試料をモールドに投入する回数	18
4.2.3 均等係数	19
4.2.4 モールド径	19
4.2.5 粒子形状	19
4.3 最大密度試験	22
4.3.1 誤 差	22
4.3.2 振動締固め特性	22
4.3.3 均等係数	25
4.3.4 モールド径	27
4.3.5 粒子形状	27
4.3.6 振動締固め試験による密度分布	28
4.3.7 " 破碎	32
4.4 最大間隙比と最小間隙比の相関	35
5. 相対密度とせん断強さの検討	37
6. 結 論	41
参考文献	43
参考資料	44

1. は じ め に

一般に、相対密度は強度常数との相関が強く、施工における締固め度の指標として有効な概念である。

この相対密度とは、任意の密度が最も締まった密度と最もゆるい密度の間のどの状態にあるかを示す指標である。この最も締った密度および最もゆるい密度の試験法であるが、従来から多種、多様な方法が提案されている。このなかでどの方法をとるかは判断が難しいところだが、本報告では主としてASTMの基準²⁾を参考にした。その理由は本報告は粒子の最大径が63.5 mmのロック材料を対象としており、ASTMは76.2 mmの粒径の試料を取扱っており対象粒径が比較的近いこと、およびASTMの方法は相対密度の試験としてはっきり基準化していることの2点である。

本報告は、最大、最小密度試験に関してその試験法をのべ、これらの試験にそれぞれ影響する因子の検討および試験によって生じる密度分布、粒子分布および破碎の程度を把握するものである。さらには相対密度と三軸試験で得られた強度常数との関係について一部言及する。

2. 試 験 目 的

本報告は次の3点について検討したものである。

- 1) 最小密度は、モールドに試験材料（以下試料という）をハンドスコップを用い落下高さをできるだけ小さくして投入して得られた状態より求めることとする。このとき1回の投入量によって、また、岩質、粒度によって最小密度はどう影響を受けるか。
- 2) 最大密度は、振動締固めにより求めることとするが、加速度、振動数、振動締固め時間等によってどう影響を受けるのか。また、振動締固め条件によってモールド内の密度分布はどう影響を受けるか。
- 3) 三軸試験における強度常数と相対密度にどのような相関があるか。

3. 試 験 方 法

3.1 試験構成

本報告で実施した試験は以下の3種である。

1. 比重, 吸水量試験
2. 最小密度試験
3. 最大密度試験

なお, 強度常数を求めた三軸試験は, 以前この試料を用い試験しているので, 今回はそのデータを用いる。

3.2 試 料

試験には, 表-1に示す4種類の試料を用いた。試験は空気乾燥状態で行うために, 屋外で試料を自然乾燥し含水率が約1.0%の状態を作った。

表-1 試 料

3.3 試験器具および機械

本試験に使用した器具および機械は次のものとした。

- ① 比重, 吸水量試験……土質試験法, 建設省土木試験基準(案)に準じた。

- ② 最小密度試験……モールド(D 30×H60cm)(D 50×H50.9cm), ハンドスコップ, 定規, 練り板, 台秤(精度1g)

木杵ふるい(大きさ40×60×7cm)

フルイ目規格 63.5, 50.8, 38.1, 35.4, 19.1, 9.52, 4.76, 2.00, 0.84, 0.42, 0.074)

- ③ 最大密度試験……最小密度試験に必要なもののほかに振動締固め試験機, 加速度計を用いた。

ここで, 最大密度試験に使用した振動締固め試験機は当研究室で製作したので以下に説明を加える。

試験機の写真およびその概略図をそれぞれ写真-1, 図-1に示し, 試験機の仕様を表-2にまとめる。

振動締固め試験機の振動は, 図-1における電動モーター軸の両側に取り付けられている偏心重錘振子が回転することによって生じる。この方法によると, 上下振動が得られる。この上下振動は, モールドが取り付けられている振動テーブルに直接伝達されるが, 架台と振動テーブルを連結しているコイルバネで調整される。モールドの振動加速度は, 偏心重錘振子の枚数を変えることで調節できる。その最

試料名	岩	粒子形状	採取地点
ロックA	ハンレイ岩	角ばっている 堅い	三国川ダム 原石山試掘横抗LRT 2.3
ロックB	粗粒玄武岩	角ばっている もろい 風化している	寒河江ダム 原石山試掘横抗T-3-77m
ロックC	流紋岩	新鮮 角ばっている やや柔かい	七ヶ宿ダム 野沢倉山試掘横抗RT-1
河床砂礫	センリョク岩 とハンレイ岩	丸い 堅い	三国川ダム軸上流部 わらびの堰堤

*1この粒子形状は目視した状態を示す。

*2ここにあげたロック材でS57-1現在でロック材として使用されていないものもある。

*3三軸試験においてはロックBおよびロックCでここにあげた岩種のほかに異なるものを用いた。

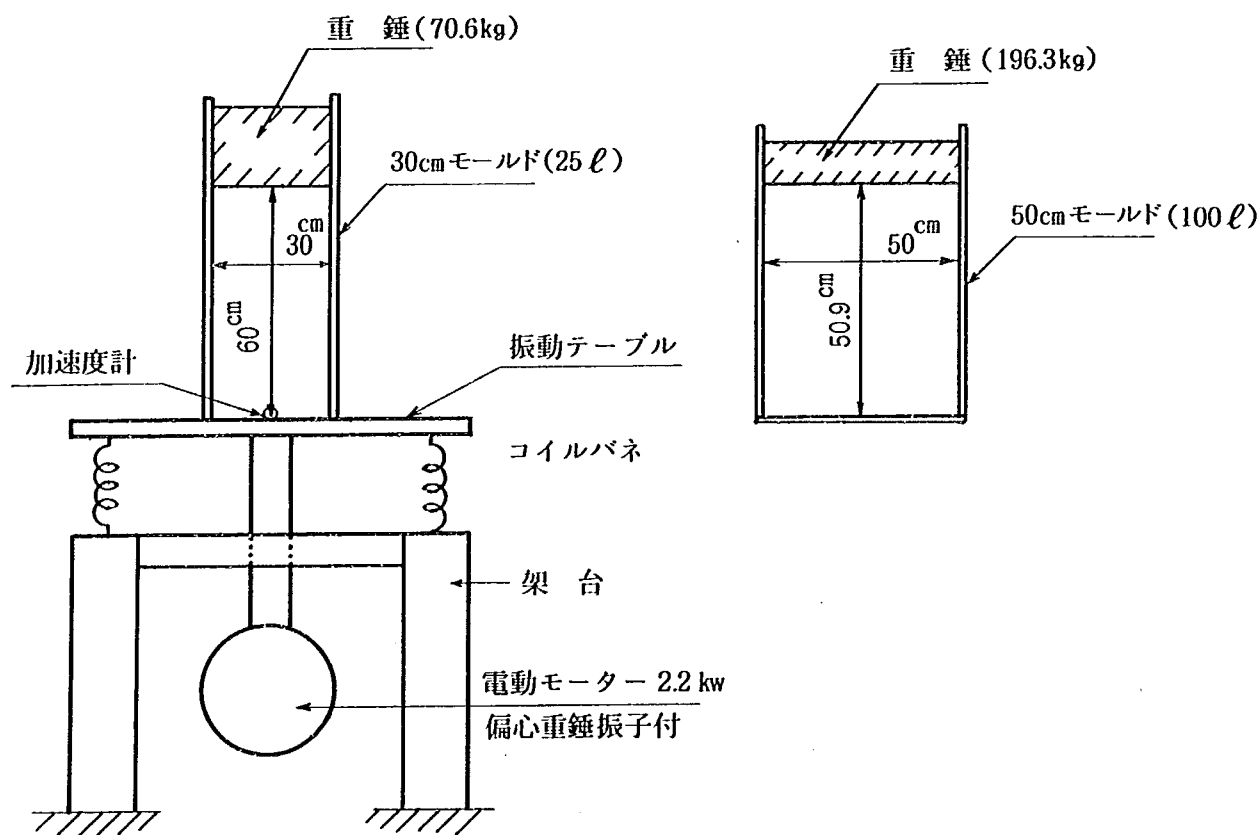
大振動加速度は、振動テーブルに最大600 kgをのせて、最大5～6 Gまで出せる。振動数は、モーターの回転数を変えることで最大60 Hz まで出せる。

なお、振動締固め試験機の製作にあたっては、モールド上部の横振れが少ない構造とした。この横振れをモールド上端の水平方向の振動加速度とモールド下端の鉛直方向の振動加速度比で表すと、その比はおおよそ1：10となり横振れは少なく、ほぼモールドは鉛直振動をしていると考えられる。

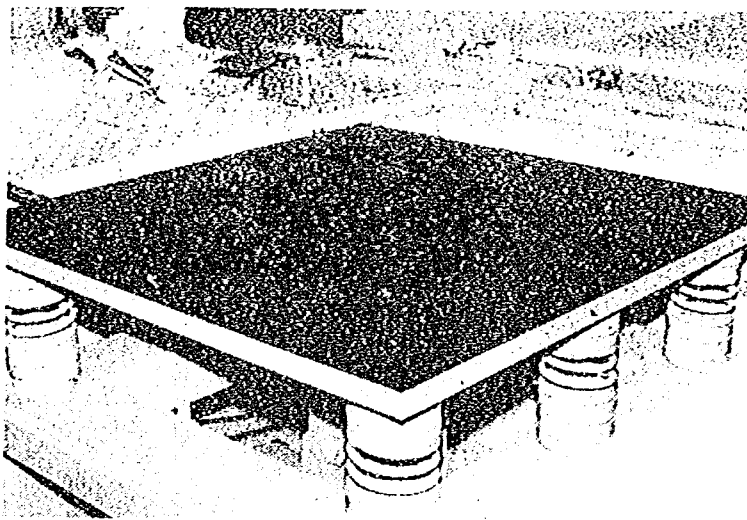
また、振動締固め時の加速度の測定にあたって、図－1に示す箇所に大きさ27×27×30mmの加速度計を取付けた。加速度計は、ひずみゲージ型で応答周波数の範囲が広く、測定は最大加速度約15Gまで可能である。

表－2 振動締固め試験機仕様

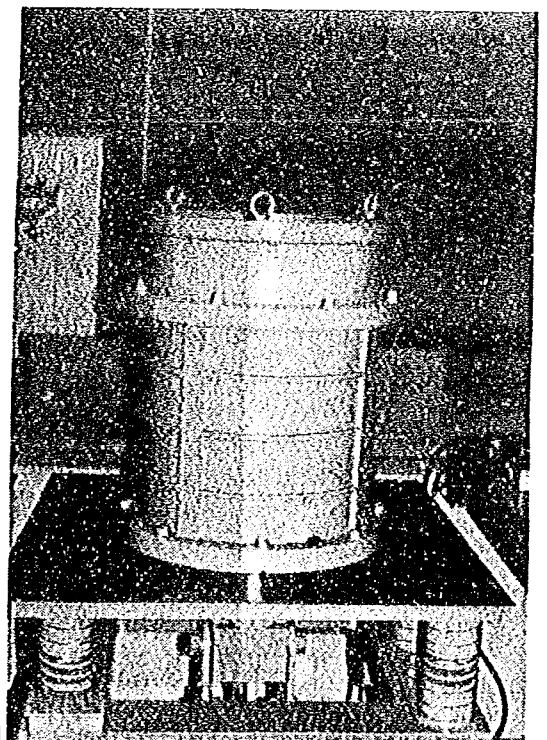
項 目	内 容
加 振	偏心重錘振子による上下振動
加 速 度	任意に設定可能 最大5～6 Gまで
振 動 数	最大60 Hz
振動時間	連続稼動時間20分
最大載荷重	600 kg
振動テーブルの大きさ	100×100cm



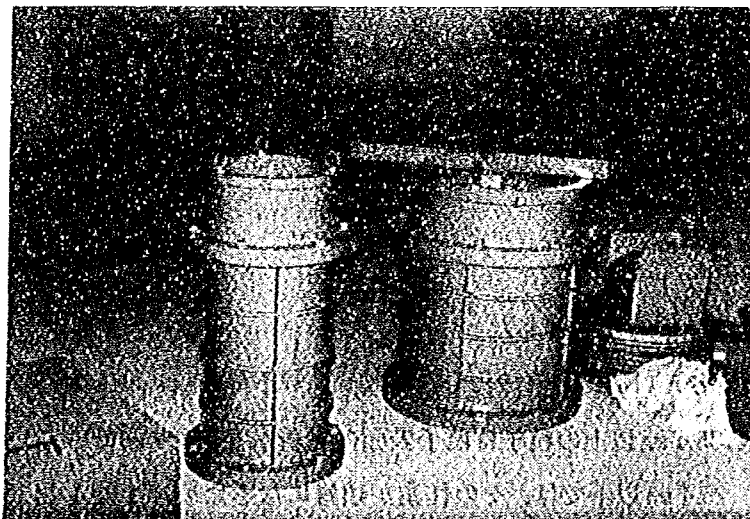
図－1 試験機の概要図



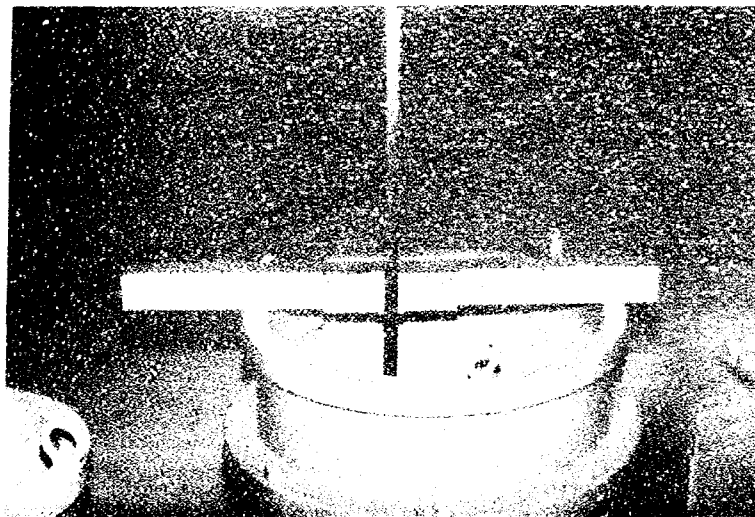
振動テーブル（大きさ100×100cm）



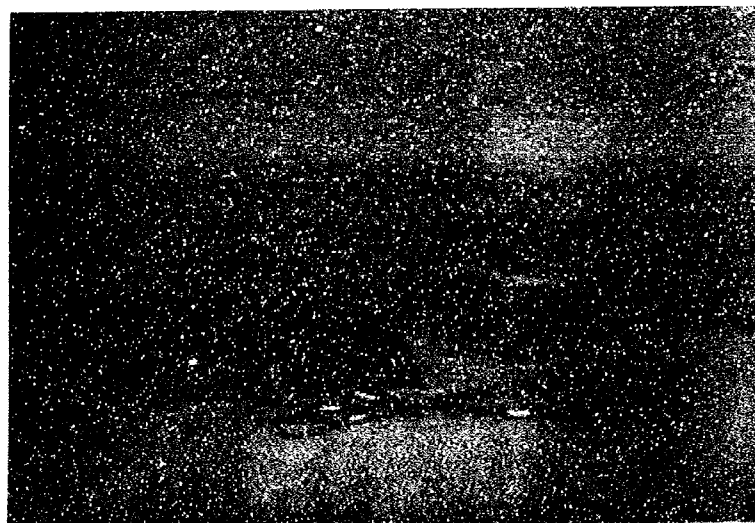
直径(D)50cmモールドを振動テーブルに
のせたとき。(モールドの大きさ D50cm×
H 50.9cm)



D30cmモールド（左）とD50cmモールド（右）
（D30cm×H60cm） （D50cm×H50.9cm）



供試体高さの読み取り装置
(1/10mmまで読み取れる)



重錘(左側 70.6kg, 右側 196.3kg)

写真一 1 振動締固め試験機

3.4 試験方法

3.4.1 比重, 吸水量試験

比重, 吸水量試験は, 粒径の大きさに応じて試験方法を変えた。

1) 粒子の粒径が 4.76 mm 以上の試験は, J I S A 1109, 1110 の粗骨材の比重, 吸水量試験³⁾に準じた。

この試験の表乾重量の測定では, 粒径 25.4 mm 以上の粒子は粒子表面の付着水を 1 個 1 個ていねいにふきとることが可能であるのに対し, 25.4 mm 以下では, その作業が煩雑になるため, 1 個 1 個でのふきとりはできない。しかし, 均一な表乾状態となるよう注意を払った。

2) 粒子の粒径が 4.76 mm 以下の試験は, J I S A 1202 の土粒子の比重試験法⁴⁾によった。

3.4.2 最小密度試験

最小密度試験は、モールドに試料を巾18cm，長さ16cm，高さ6cmのハンドスコップを用いて投入時の落下高さを出来るだけ少なくして投入していく方法である。これは吉見⁵⁾等のレポートではスプーン法と呼ばれている。

この試験では、最小密度と試料投入回数、均等係数等の影響について検討した。詳しくは3.4.4項で述べる。

以下、試験手順を説明する。

- 1) あらかじめ、モールドにはいる試料重量を想定する。
- 2) その試料重量を試験粒度に合うように、粒径毎に精度1gの台ばかりを用いて計量した。これを粒度調整と呼び、その作業を写真-2に示す。

ただし、ここで粒径毎に分けるために使用したフルイは63.5，50.8，38.1，25.4，19.1，9.52，4.76，2.00，0.84，0.42，0.074mmの11種類とした。

- 3) 基本的にはモールドに6層に分けて投入するために、粒度調整した試料をさらに6等分した。
- 4) 3) で分けた6等分の1の試料を練り板上に広げよく混合した。
- 5) 写真-3に示すように混合した試料を、4分法のくり返しによって16等分にした。
- 6) 1/16等分の試料をひとつづつモールドにハンドスコップで試料の落下高を小さくして投入した。
(写真-4)
- 7) 4)～6)を繰り返し、モールドに約60cmの高さまで投入したら試料投入をやめ表面をブラシでならし、2)の項で測定した全試料重量から試料投入で残った重量を差し引いてモールドに投入した重量(W)とした。
- 8) 試料高さを図-2に示す箇所で読み取った。その読み取り精度は1/10mmとした。

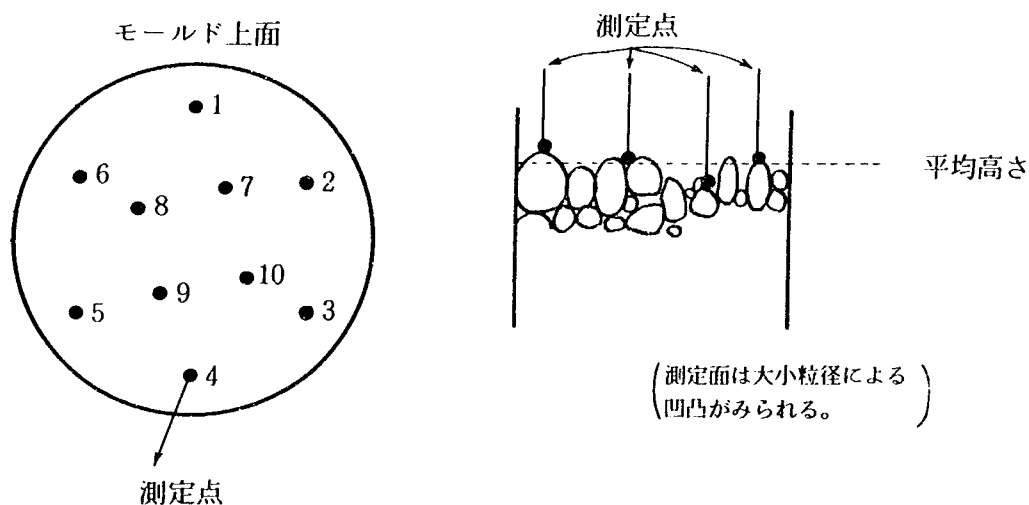
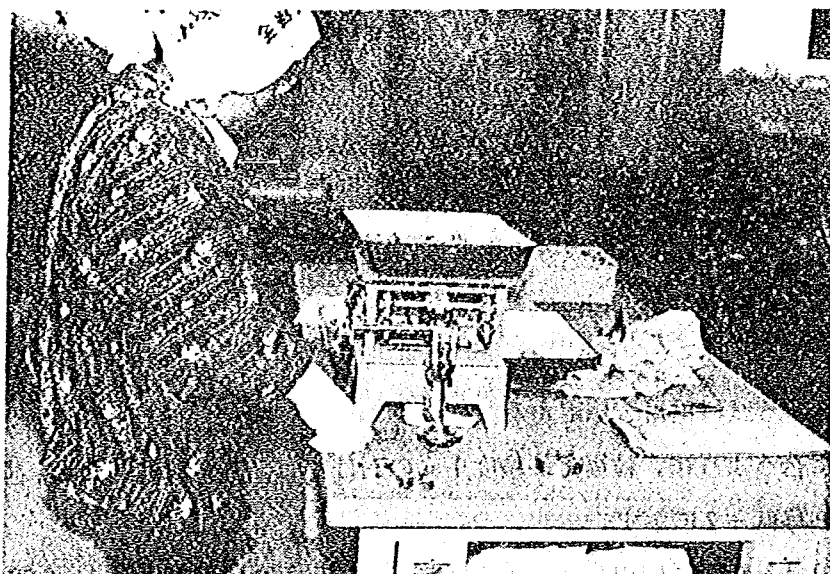


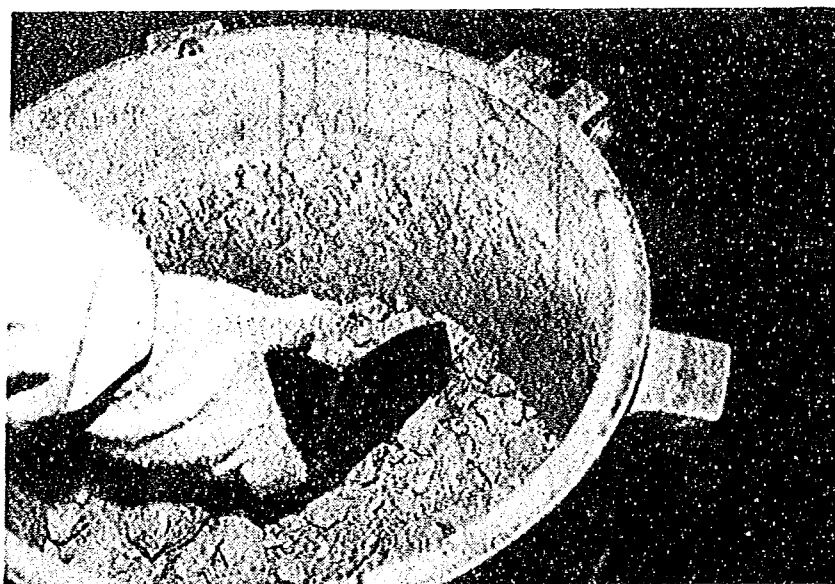
図-2 供試体高さの読み取り



写真－２ 試度調整



写真－３ 試料の混合



写真－４ 試料の投入

9) 最小乾燥密度および最大間隙比は次式によって求めた。なお、最大間隙比は粒子と粒子との間隙を求めるために粒子の絶対比重を用いた。

$$\text{平均試料高さ } \bar{h} = (h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n) / n$$

$$\text{最小乾燥密度 } \rho_{d \min} = \frac{4W}{\pi \cdot D^2 \cdot \bar{h}} \times \frac{1}{1 + \frac{w}{100}}$$

$$\text{最大間隙比 } e_{\max} = \frac{G_{b50}}{\rho_{d \min}} - 1$$

$h_1, h_2, \dots$: 各測点の試料高さ cm

n : 試料高さの測定個数

W : 投入重量 g

D : モールド径 cm

w : 含水比 %

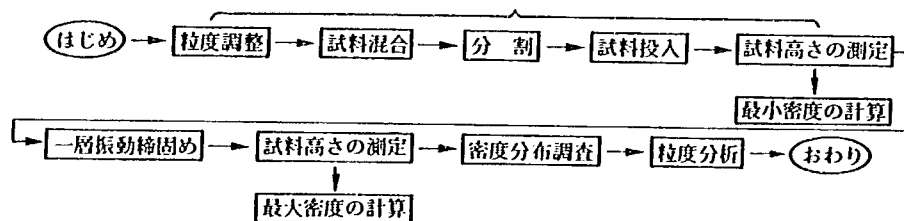
G_{b50} : 50% 粒径の絶対比重

3.4.3 最大密度試験

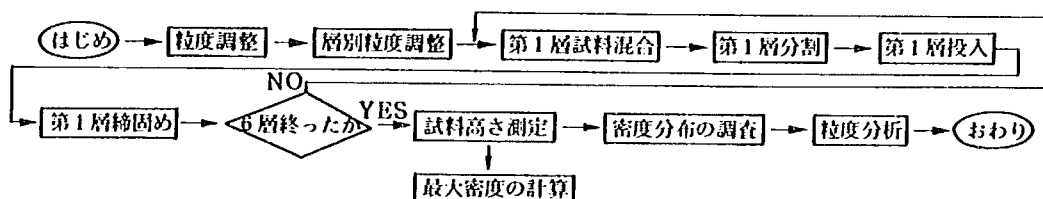
最大密度試験には振動締固め試験を採用した。振動締固め試験は、締固め度と振動加速度、振動数および振動締固め時間の関係を検討するために振動締固めを1回で与える方法と、何回かに分けて与える方法の次のふたつの方法を実施した。

最 小 密 度 試 験

(その1の方法)



(その2の方法)



A) その1の方法をここでは一層振動締固め試験と呼ぶことにする。一層振動締固め試験は最小密度試験が終わってから、その試料に上载荷重を与え加速度、振動数、振動締固め時間を加えた。

B) その2の方法をここでは層別振動締固め試験と呼ぶことにする。この方法はモールドに試料を分割して投入し、上载荷重（重錘）を与え、そのつど一定の加速度、振動数、振動締固め時間を与えて締固めるものである。なお、この試験では一層振動締固め試験と関連させるため投入重量を一層

振動締固め試験と同一の重量にした。

さらに、振動締固め後には、密度分布の調査、破碎率の調査を行った。また、最小密度試験と同様に最大密度と均等係数等の影響を検討した。検討項目については3.4.4項にのべる。

以下に試験手順を示す。

A) 一層振動締固め試験

- 1) 3.4.2 項の最小密度試験の試料高さの測定終了後、試料上面に重錘をのせた。試料上面にかかる上載圧力は、静的な状態で 0.1 kg/cm^2 である。
- 2) 一定の振動締固め条件でモールド内の試料を締固めた。

なお、図-3に振動締固め時の加速度記録の一例を示し、振動加速度の読み取りを説明する。

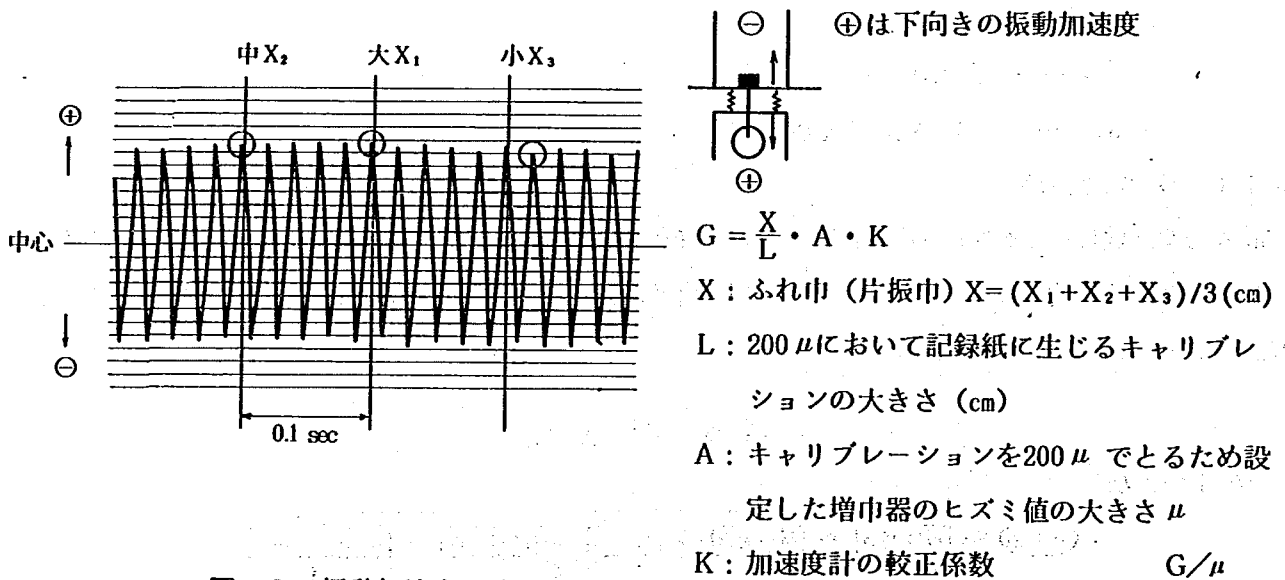


図-3 振動加速度の読み取り例

- 3) 振動締固め終了後、重錘を取りのぞき試料高さを測定し、最大乾燥密度 ($\rho_{d \max}$) 最小間隙比 ($e_{\min}$) を次式によって求めた。

(最大密度)

$$\text{平均試料高さ } \bar{h} = (h_1 + h_2 + h_3 \cdots \cdots + h_n) / n$$

$$\text{最大乾燥密度 } \rho_{d \max} = \frac{4W}{\pi \cdot D^2 \bar{h}} \times \frac{1}{1 + \frac{w}{100}}$$

$$\text{最小間隙比 } e_{\max} = \frac{G_{b50}}{\rho_{d \max}} - 1$$

$h_1, h_2, \cdots$: 各測点の試料高さ (cm)

n: 試料高さの測定個数

W: 投入重量

w: 含水比

D……: モールド径

G_{b50}……: 50%粒径の絶乾比重

B) 層別振動締固め試験

- 1) モールドに投入する試料の重量を想定し、任意の試験粒度になるよう粒度調整を行った。
- 2) モールドに6層に分けて試料を投入するため粒度調整した試料をさらに6等分にした。
- 3) 一層目の試料をモールドに投入し、次の締固め条件で試料を締固めた。

- ・振動加速度 約5 G
- ・振 動 数 60 Hz
- ・振動締固め時間 8分

ただし、振動加速度の影響を検討する場合は、上記の振動加速度の最大を約5 Gにしていろいろ変えた。

- 4) 2層目の試料を投入し、3)の締固め条件で締め固める。さらにこの方法で6層目まで続けた。
- 5) 6層目の締固めが終了後、試料高さははかり最大密度を求めた。最大密度の計算式は、一層振動締固めと同じである。

C) 密度分布調査および粒子破碎の追跡調査

振動締固めによるモールド内部の密度を次の方法によって調べた。

- 1) 3つ割モールド(モールドがたて方向に3等分されており、3つを組み合わせるとモールドができるもの)を利用して振動締固めを行った。試験後、そのひとつのモールドを取りはずして粒度分布を目視によって観察した。
- 2) 締固め後のモールド内の試料をモールド上部から1/3ずつ取り出し、その部分の体積と重量を測り1/3層毎の密度を測定した。また、1/3層ずつ取り出した試料のふるい分け試験によって粒度分析を行った。
- 3) 締固めに用いた試料の一部(主に大粒径)に着色し、試験後に着色した粒子をひろい集め、これから破碎の状況を検討した。

D) ふるい分け試験

最大密度測定後、写真-5のように、モールド内の全試料を大きさ40×60×7 cmの木枠ふるいをういてふるい分ける。木枠ふるいは次の11種類を用いた。

(63.5, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.76, 2.00, 0.84, 0.42, 0.074 mm)

この試験においては、あらかじめふるい分け試験の精度を求めるために粒度調整したものを振動締固めをせずに練り板上でよく混合し、再ふるい分けを行なって確かめた。ふるい分け試験による破碎率の求め方は Marsal と Leslie のふたつの方法を用いた。次にそれらについて説明を加える。

① Marsal の破碎率

試験後、上記に示した10種類のふるいをういてふるい分けた各粒径毎の残留重量を全試料重量に対する百分率であらわした。この試験後の各ふるいの残留率から試験前の残留率を差し引き、

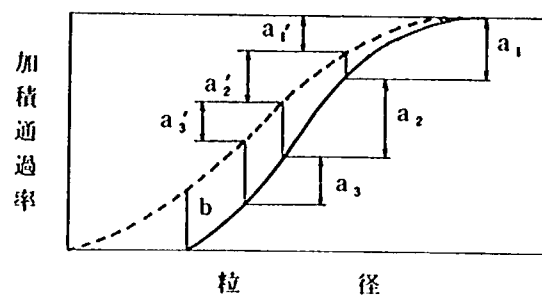
同符号のみをたし合わせたものを試料の破砕率とした。図－4に破砕率の求め方の一例を示す。

② Leslie の破砕率

この方法は、試験後の試料をふるい分け、最小ふるい目以下の増加率を破砕率とした。今回はその最小ふるい目を 0.42 mm とした。Marsel の破砕率と同様に Leslie の破砕率の求め方も図－4 に示す。



写真－5 木枠ふるいを用いたふるい分け試験

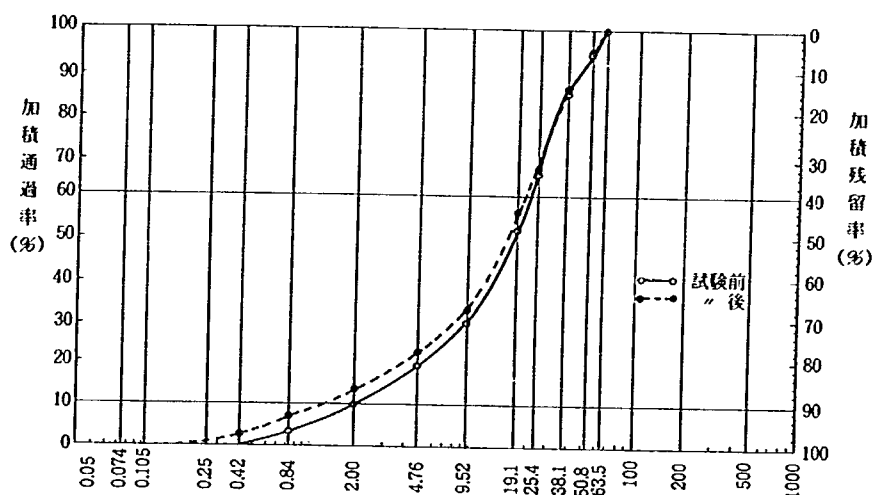


$$\begin{aligned} \Delta i_1 &= a_1 - a'_1 \\ \Delta i_2 &= a_2 - a'_2 \\ \Delta i_3 &= a_3 - a'_3 \\ &\vdots \\ \Delta i_n &= a_n - a'_n \\ \hline \sum \Delta i &= 0 \end{aligned}$$

B_M = 同符号の Δi の絶対値
 B_L = b (0.42 mmの増加率)

図-4.1 破砕率の定義

(破砕率の求め方の一例)



粒径d mm	試験後		試験前		粒径別破砕率 ①-② (%)
	気乾重量kg	①残留率%	気乾重量kg	②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	8,160	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 の破砕率 0.7 + 0.2 + 0.9 + 2.2 + 0.1 + 0.1 = 4.2 %
 Leslie " 0.6 %

図-4.2 破砕率の求め方の一例

図-4 破 砕 率

3.4.4 検討項目

最小密度試験における検討項目は、試料をモールドに投入する回数、粒度、モールド径および粒子形状（アンギュラリティー）とした。最大密度試験における検討項目は、振動締固め条件（加速度、振動数、締固め時間、上載荷重の有無）、粒度、モールド径および粒子形状（アンギュラリティー）とした。以下、検討項目を詳しく説明する。

A. 試料をモールドに投入する回数

D 30cmモールドを用いて試料の投入回数を24回、48回、96回、192回と変化させ、従って1回毎の投入量も自動的に変わるわけであるが、投入回数の最小密度に対する影響を調べた。

B. 振動締固め条件

B. 1 一層振動締固め試験

① 振動締固め時間

振動加速度を約3 G、振動数を60 Hzと一定にして、振動締固め時間を3分、8分、20分と変化させた。

② 振動加速度、振動数

振動締固め時間を8分間に一定とし、振動数（10～60 Hz）と振動加速度（約5 Gまで）をいろいろ組合せた。

③ 上載荷重の有無

振動数を60 Hz、振動締固め時間を8分、振動加速度を約5 Gと一定にして、D 30cmモールドで70.6 kgの上載荷重のある場合とない場合の比較を行なった。

B. 2 層別振動締固め試験

① 振動加速度

振動締固め時間を8分、振動数を60 Hzと一定にして、振動加速度を約5 Gまで変えた。

C. 粒 度

試験粒度を図-5に示すように、粒子の最大径を63.5 mmに固定して、均等係数を変えた。当然のことながら粒子の最大径を固定しているため4.76 mmふるいの通過率は均等係数が増えるに従い増加することになる。

D. モールド径

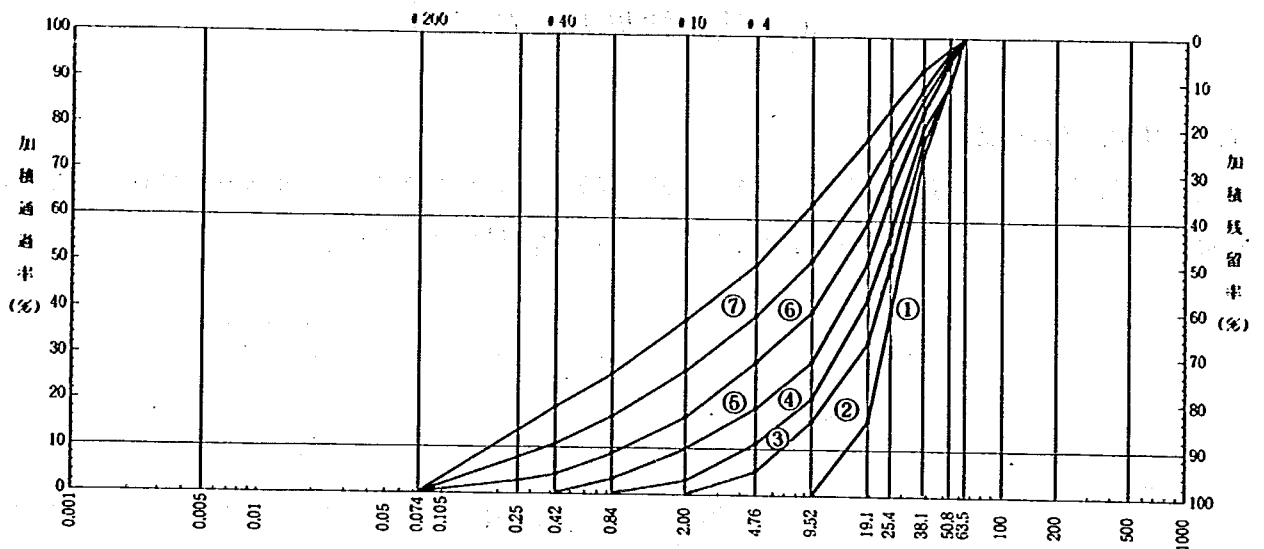
モールド径の大きさのちがいが密度にどう影響するかを検討するために、次のふたつの容器を用いた。

① 大型三軸圧縮試験機に用いられる供試体作成用のモールド。

・直径30 cm、高さ60 cm、容積42 ℓ

② モールドの直径と高さがほぼ1 : 1のモールド

・直径50 cm、高さ51 cm、容積100 ℓ



試料名	河床砂礫		ロック A		ロック B		ロック C	
番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
均等係数 (Uc)								
粒 径 (mm)	2 - 0	4 - 5	6 - 11	12 - 19	20 - 29	40 - 39	50 - 50	
63.5 - 50.8	9 (9)	9 (9)	9 (9)	6 (6)	5 (5)	4 (4)	3 (3)	
50.8 - 38.1	27 (18)	23 (14)	20 (11)	16 (10)	14 (9)	11 (7)	7 (4)	
38.1 - 25.4	61 (34)	50 (27)	43 (23)	35 (19)	28 (14)	23 (12)	16 (9)	
25.4 - 19.1	84 (23)	67 (17)	57 (14)	49 (14)	40 (12)	31 (8)	22 (6)	
19.1 - 9.52	100 (16)	84 (17)	79 (22)	71 (22)	60 (20)	49 (18)	37 (13)	
9.52 - 4.76		95 (11)	89 (10)	81 (10)	71 (11)	61 (12)	50 (13)	
4.76 - 2.00		100 (5)	97 (8)	90 (9)	83 (12)	73 (12)	62 (12)	
2.00 - 0.84			100 (3)	97 (7)	91 (8)	83 (10)	74 (12)	
0.84 - 0.42				100 (3)	96 (5)	89 (6)	81 (7)	
0.42 - 0.074					100 (4)	100 (11)	100 (19)	
最大粒径	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	
最小粒径	9.52	2.00	0.84	0.42	0.074	0.074	0.074	
D ₁₀ 粒径	16	7.5	4.5	2	0.96	0.38	0.16	
D ₆₀ 粒径	32	30	27	24	19.1	15	8	
均等係数	2	4	6	12	20	40	50	
# 4 通過率	0	5	11	19	29	39	50	

注1) 均等係数 (Uc) の欄は次のことを意味する。例えば12-19の12が均等係数、

19が#4の通過率である。

注2) () 内は各フルイの残留率を示す。

図-5 粒径加積曲線

4. 試験結果および考察

4.1 比重, 吸水量試験

図-6は, 絶乾比重および吸水量の大きさを各粒径毎に示したものである。絶乾比重はロック A, 河床砂礫, ロック B, ロック C の順に小さくなっている。吸水量はその逆である。

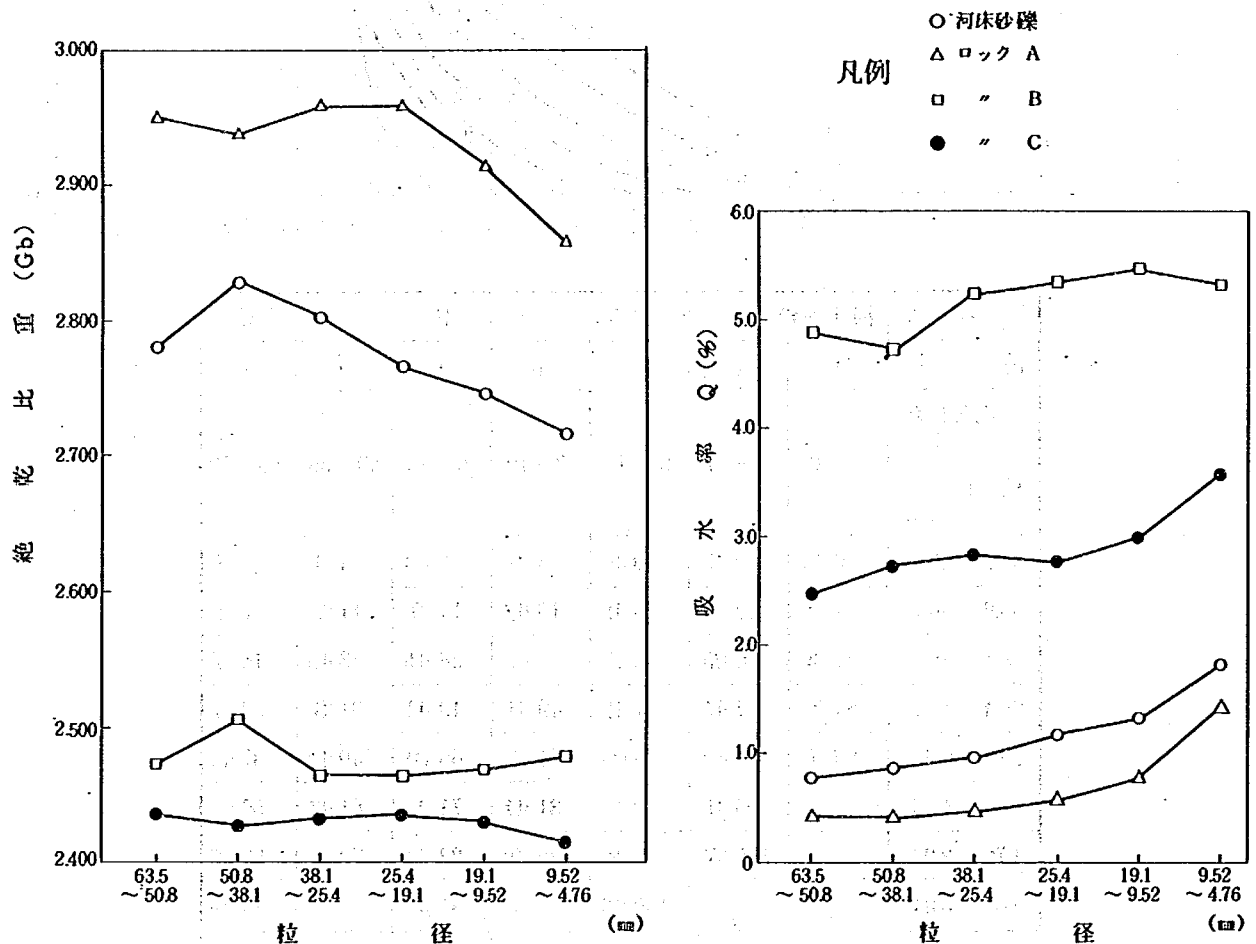


図-6 絶乾比重と吸水率

4.2 最小密度試験

4.2.1 誤差

試料をハンドスコップを用い D30cm モールドに投入する回数を 96 回に設定し, 16 個の最小密度試験から試験による誤差を検討したものを表-3, 図-7 に示す。

- 1) 同一岩種を同一作業者が試験すると図-7 の各図に示すように最大値, 最小値は間隙比の絶対値で平均値に対し ± 0.04 程度の範囲内にある。これは百分率で $\pm 9\%$ 程度となる。
- 2) 同一岩種で作業者を変えて試験すると図-7.1.b と図-7.2.b の比較からわかるように間隙比の平均値の差は 0.005 と小さく, この差は平均値に対して 1% 程度である。また, バラツキの分布も作業員 A, B によって変らないから, 最小密度試験では個人誤差はほとんどないと言えよう。

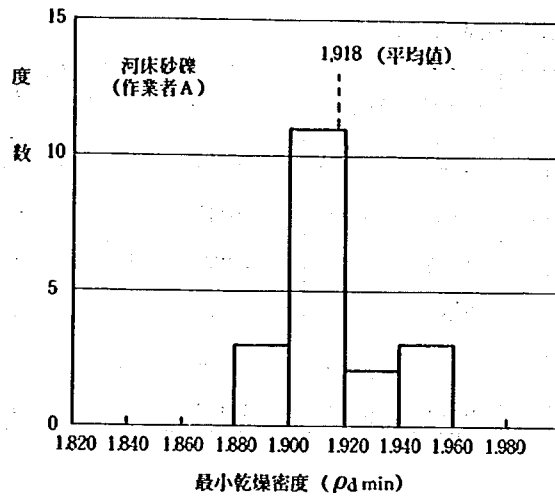


図-7.1.a 最小乾燥密度

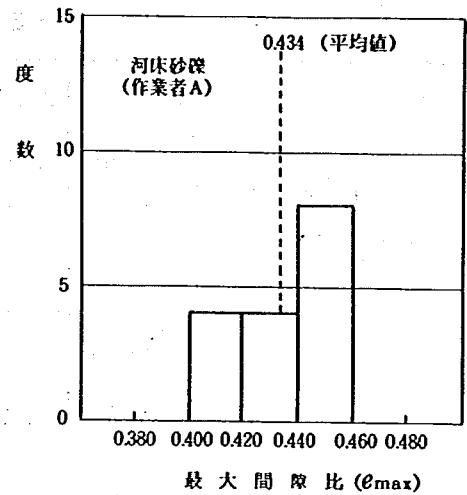


図-7.1.b 最大間隙比

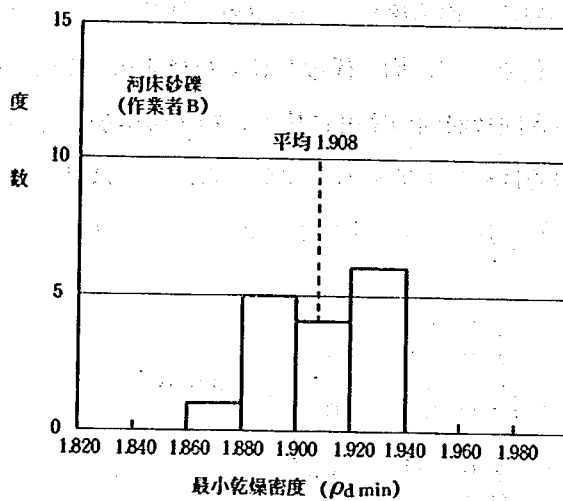


図-7.1.a 最小乾燥密度

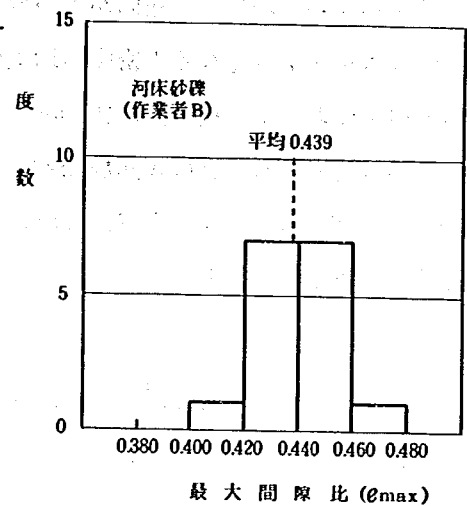


図-7.2.b 最大間隙比

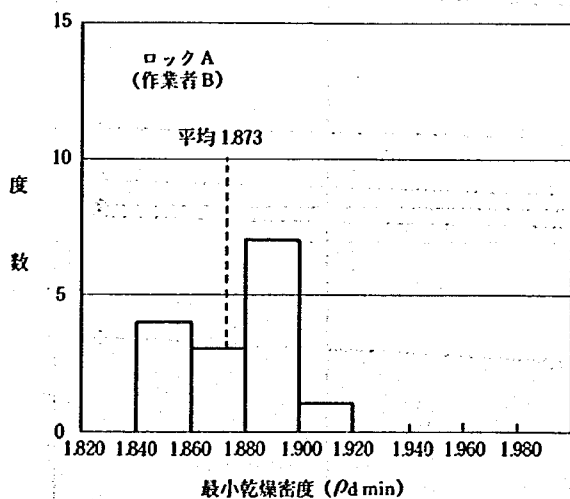


図-7.3.a 最小乾燥密度

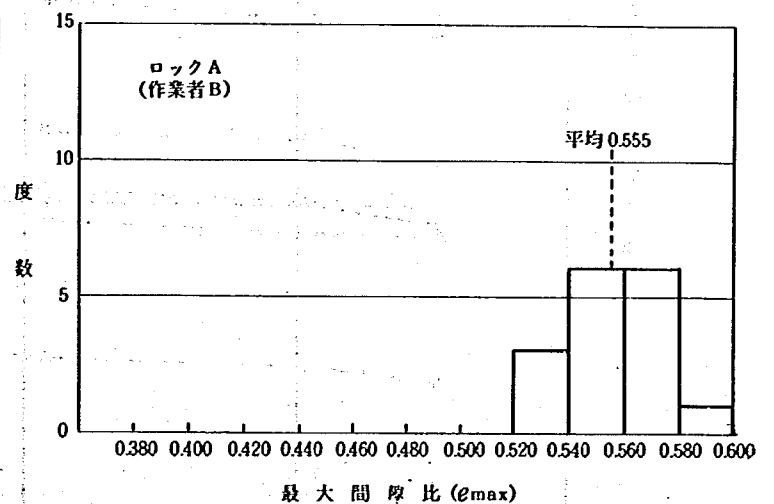


図-7.3.b 最大間隙比

図-7 最小密度の度数分布

表-3 最小密度の試験誤差

試料		個数		平均値	標準偏差	最大値	最小値	レンジ 最大値-最小値	最大値 平均値	最小値 平均値
河床砂礫	作業者A	16	$\rho_{d \min}$	1.916	0.017	1.950	1.900	0.050	1.8 %	- 0.8 %
			$e \max$	0.434	0.013	0.445	0.408	0.037	2.5 %	- 6.0 %
	" B	16	$\rho_{d \min}$	1.908	0.019	1.937	1.879	0.058	1.5 %	- 1.5 %
			$e \max$	0.439	0.014	0.461	0.418	0.043	5.0 %	- 4.8 %
ロックA	" B	16	$\rho_{d \min}$	1.873	0.020	1.901	1.837	0.064	1.5 %	- 1.9 %
			$e \max$	0.555	0.017	0.585	0.532	0.053	5.4 %	- 4.1 %

4.2.2 試料をモールドに投入する回数

図-8は、縦軸に最小乾燥密度を取り、横軸にハンドスコップで投入した回数を示す。投入回数が増えると密度がわずかに増加する傾向がどの岩種、どの粒度（均等係数）でも認められる。いいかえれば、1回当りの投入量が少なくなると密度が増加する。一例として、均等係数が12で粒径4.76mm以下の含有率が19%の場合において、投入回数192回の密度は投入回数24回の密度に比べ、約3%増加している。この変化を間隙比で表わすと投入回数192回と24回の差は約10%である。すなわち、これは最上による「試料の1回当りの投入量が少くなれば粒子の拘束度が小さくなり密度が大きくなる。」ということが今回の実験で確認されたことになる。

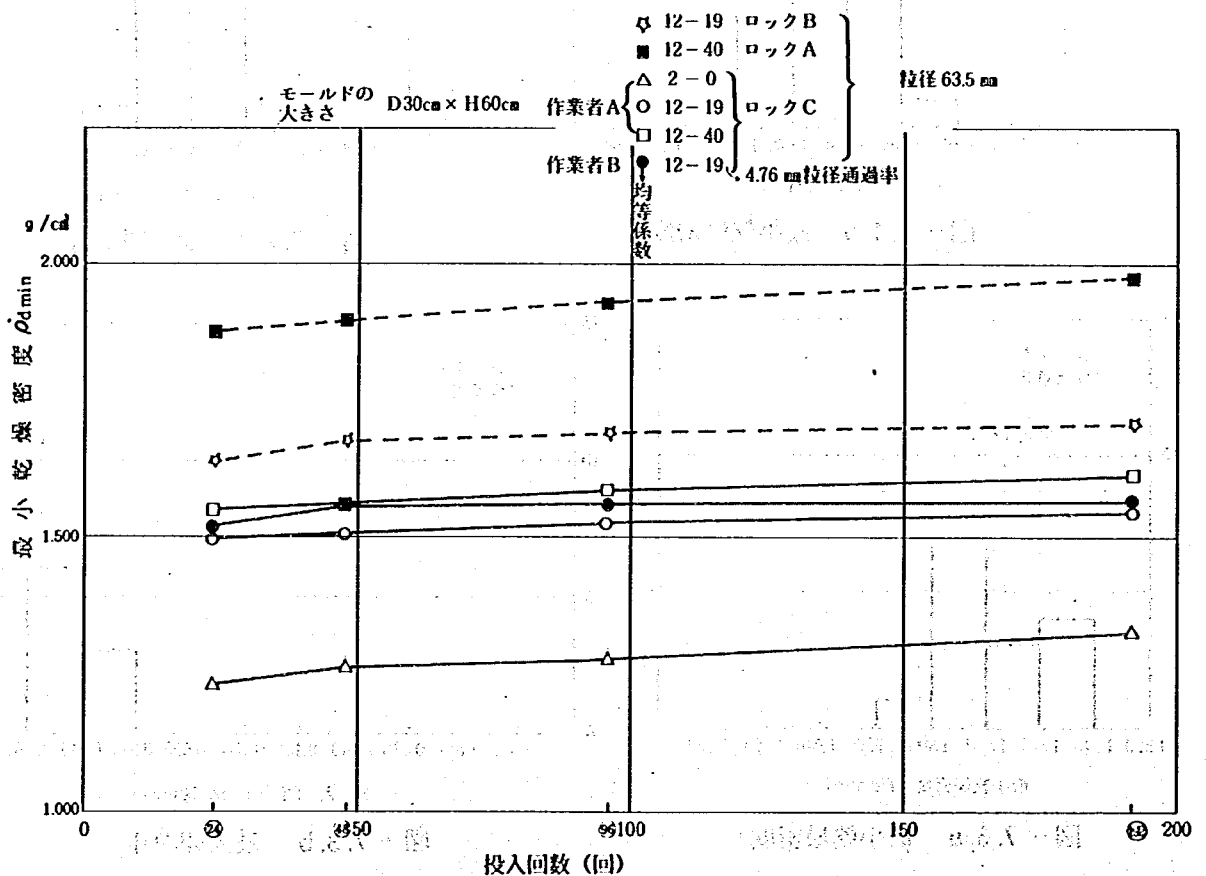


図-8 最小乾燥密度と試料投入回数

4.2.3 均等係数

最大間隙比と均等係数の関係を図-9に示す。図からわかるように均等係数が大きくなれば最大間隙比は指数関数的に減少していくことがどの岩種でも認められる。ただし、河床砂礫において均等係数が40から50に移るとき最大間隙比のわずかな増加が認められる。

4.2.4 モールド径

図-10は均等係数が2~20の範囲でD30cm, 50cmの2種のモールドを使って最大間隙比がどれくらい違うか検討したものである。この図からD30cmのモールドがモールド径50cmに比べ最大間隙比の値が均等係数の広い範囲にわたって0.04程度大きいことを示している。

また、図-11はD30cmモールドを用い上記の方法とは別に粒子の最大径を38.1, 63.5, 88.9mmと変えて、粒子の最大径と最大間隙比の関係を検討したものである。なお、これに使用した試料は表-1以外の試料を用いた。図より、均等係数が小さいうちは、粒子の最大径が大きくなると間隙比が増し、均等係数が大きくなると、粒子の最大径は間隙比に影響しないようである。この方法による試験結果は、粒子の最大径を一定にしてモールド径を変えて行なう図-10の結果と異なる。

4.2.5 粒子形状

粒子形状のなかで粒子の角ばりの度合を表わすアンギュラリティー⁸⁾だけに注目した。アンギュラリティーとは角ばりが多く粒子の形が細長いほどアンギュラリティーの値が大きくなる。図-12は、3種類の岩で均等係数を2, 12, 50と変えた時のアンギュラリティーと最大間隙比の関係を示したものである。岩種の影響がややあるが均等係数が小さいときにはアンギュラリティーが小さいもの（より丸みのあるもの）が最大間隙比が小さいことがわかる。均等係数が大きいときには、最大間隙比はアンギュラリティーによって影響される度合は少なくなるが、やはりアンギュラリティーが大きいほど最大間隙比もわずかに大きいようである。

図-9 均等係数と最大間隙比の関係
(河床砂礫)

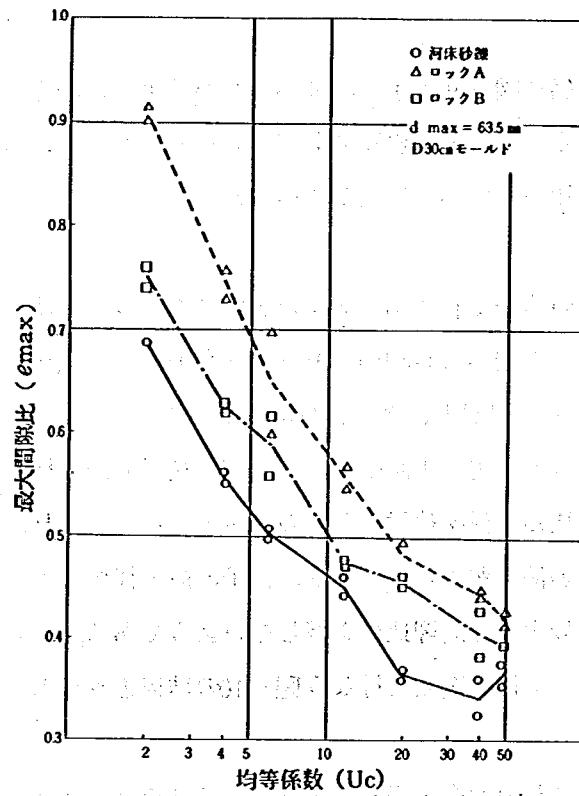


図-9 最大間隙比と均等係数

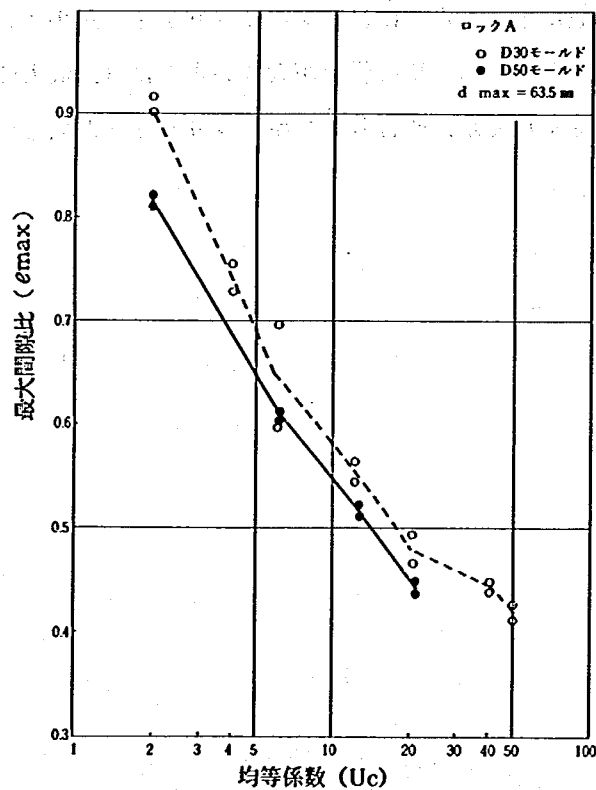


図-10 最大間隙比と均等係数（モールド径の影響）

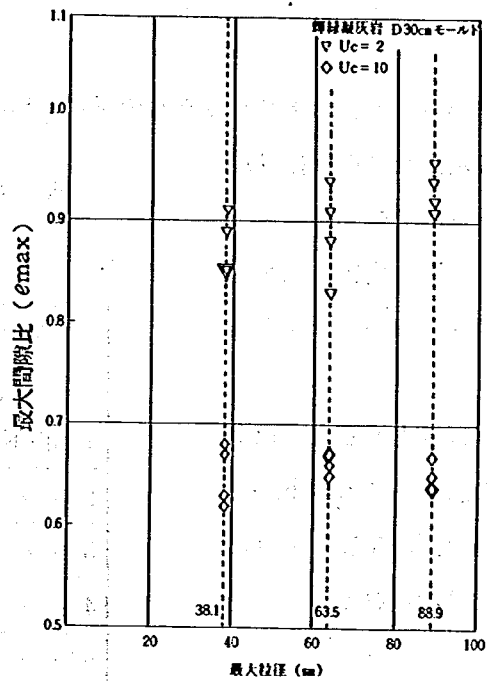


図-11 最大間隙比と最大粒径

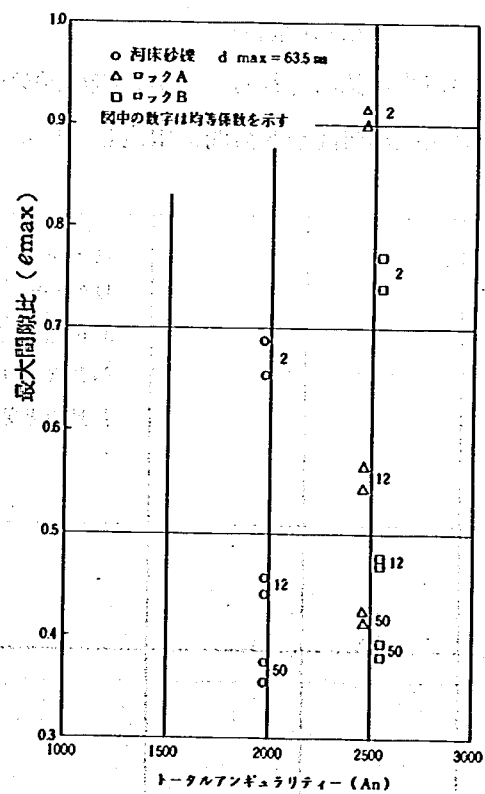


図-12 最大間隙比とトータルアンギュラリティー

4.3 最大密度の試験

4.3.1 誤 差

試験誤差をD30cmモールドを用いロックAおよびロックBの試料で検討した。表-4は、均等係数を2～50に変えて2個ずつ同じ振動締固め条件（振動加速度約5G，振動数60Hz，振動締固め時間8分）を与えて締固めた結果において測定値と平均値の差を平均値に対する誤差として表しそれを各々パーセント毎に個数を調べたものである。

表-4 最大密度の誤差

個数	ロ ッ ク A		ロ ッ ク B	
	ρ_{dmax}	e_{min}	ρ_{dmax}	e_{min}
1%以下	6	1	6	4
2% "	0	2	1	1
3% "	0	2	0	1
4% "	0	1	0	0
5% "	1	0	0	0
5%以上	0	1	0	1
計	7	7	7	7

乾燥密度で表わした場合の誤差はほとんど1%以下であり、間隙比で表わした場合の誤差は3%以下である。この結果、誤差は小さく振動締固め試験により比較的一様に締め固められていると判断される。

4.3.2 振動締固め特性

A. 一層振動締固め試験の締固め特性

1) 図-13はD30cmモールドを用い振動数を30

Hz，振動加速度を3Gと一定にし、振動締固め

め時間の影響を調べたものである。振動締固め

時間が3分以内で、間隙比の減少が認められる。3分以後の20分の範囲内では間隙比の減少はない。なお、ASTMでは振動締固め時間を8分間に限定している。

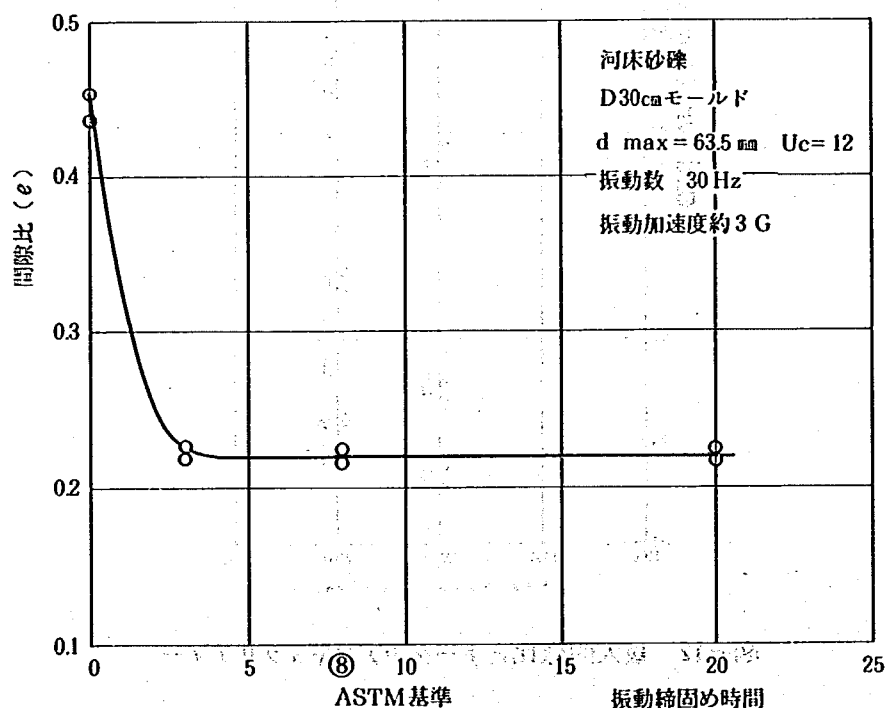


図-13 間隙比と振動締固め時間

2) 図14-1 および図14-2は、D30cmモールドを用い、振動加速度と間隙比の関係を振動数をパラメーターにしてプロットしたものである。このときの振動締め時間はすべて8分間に統一した。両図からわかることは第1に締め密度は振動数によって影響されず、加速度で決まる。すなわち、振動の速度、変位よりも加速度が締め密度に効果を持っていること。第2に振動加速度3 G~4 Gまでは振動加速度が大なるほどよく締め固まるが振動加速度4 G以上の加速度ではほぼ一定の密度であることがわかる。細かく言えば

- ・ 0.5 Gまで……締め効果はほとんどない。(投入時の最大間隙比に近い。)

- ・ 0.5 G~3 G~4 Gまで……間隙比は振動加速度の増加に従い減少する。

- ・ 3 G~4 G以上……間隙比は振動加速度によって増減せずほぼ一定である。

第3に、角ばりの多いロックAの方が丸みのあるものに比べ最小間隙比の安定した状態を得るのに大きな振動加速度を必要とする。

この傾向は、水資源開発公団試験所の「振動加速度と間隙比の関係において、振動加速度0.5 Gまでは締め効果を生じず、0.5~1.4 Gにかけて振動加速度と共に間隙比が減少し、2 G以上になると間隙比の減少がない⁹⁾」という結論と比べると今回の試験では振動加速度1.4 Gより大きい3 G~4 Gまで間隙比が減少する点で上記論文の結論と異なる。

3) 上載荷重がない場合の検討

上載荷重の有無による間隙比の比較を以下に示す。

上載荷重がない場合 $e_{min} = 0.241$ (河床砂礫、振動加速度約5 G、振動数60 Hz、振動締め時間8分)

上載荷重が有る場合 $e_{min} = 0.206$ (" " " ")

この結果からすると上載荷重は、密度を大きくするのに効果的な役割を果たす。しかし、徳江¹⁰⁾によると「砂の場合に上載荷重を加えないほうが粒子間を拘束するものがなく、振動によって粒子間のかみ合い摩擦を少なくして粒子の再配列が起こり密度は大きくなる」という結論と異なる。一概には言えないがロック材料では砂よりはるかに大きな大小粒径が混合しており、この状態をより密な状態に再配列させるには適当な上載応力も必要であると考えられる。

B. 層別振動締め試験の締め特性

図-15は、振動数60 Hz および振動締め時間を8分間として間隙比が振動加速度によってどう影響するかを層別振動締め試験と、一層振動締め試験を比較したものである。

1) 図-14の一層振動締め試験と比較したときに、岩種によって振動加速度と間隙比の関係が異なる。ロックAの方は、振動加速度が大なるほど間隙比が小さく、一層振動締め試験と同じ傾向である。しかし、河床砂礫は、この傾向と異なり振動加速度に関係なく、ほぼ一定の間隙比を示す。層別振動締め試験を行なって上記の差が現われる一因として粒子形状が影響し

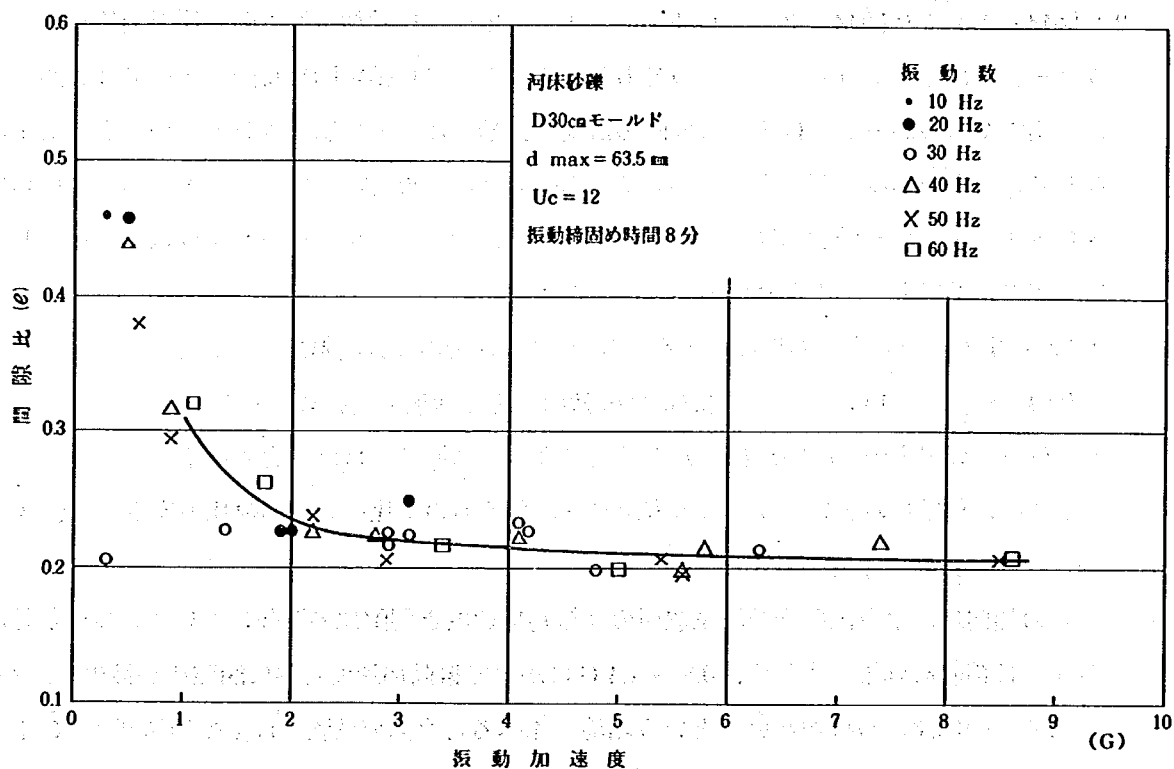


図-14.1 間隙比と振動加速度

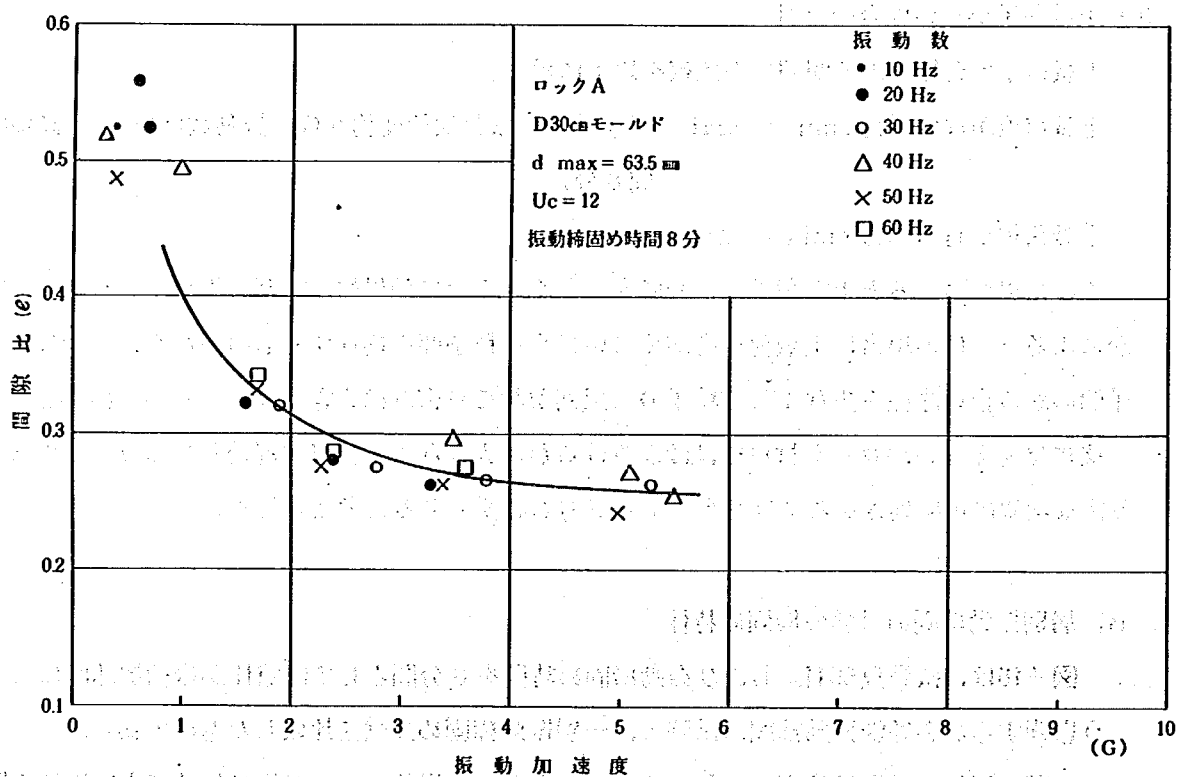


図-14.2 間隙比と振動加速度

ているのではないかと考えられる。

- 2) 全体の密度は層別振動締固め試験の方が一層振動締固め試験よりも大きい。これは振動締固めのエネルギーが層別振動締固め試験では一層振動締固め試験の6倍を要しているためだと考えられる。
- 3) 層別振動締固め試験を行うときの効果は、ロックAと河床砂礫の例からもわかるように角ばりのあるものに強く表われると考えられる。

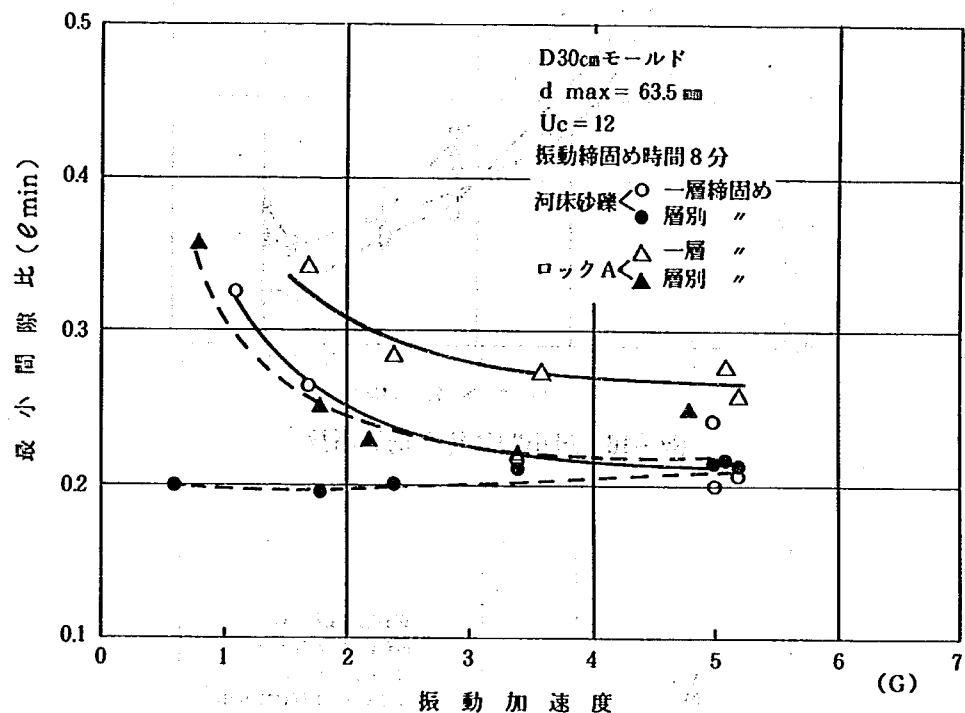


図-15 一層振動締固めと層別振動締固めの比較

4.3.3 均等係数

図-16は、同一振動締固め条件（振動加速度約5 G，振動数60 Hz，振動締固め時間8分）を与えて、均等係数を2～50まで変えた時の最大間隙比の変化を示したものである。ただし、どの均等係数においても粒子の最大径は63.5 mmで一定とした。この試験結果は次のようにまとめられる。

- 1) 最小間隙比は、岩種によらず均等係数40までの範囲では均等係数が大きくなるに従い減少する。
- 2) 図-16の最小間隙比と均等係数の関係を図-9の最大間隙比の場合と比較すれば、図-9では丸みのある河床砂礫が、同じ均等係数の角ばったロックよりも最大間隙比が常に小さいが、図-16では河床砂礫が均等係数が10以上になると角ばったロックよりも最小間隙比は大きくなる。この理由として角ばったロックでは河床砂礫に比べ破碎が大きいと考えられる。
- 3) また、図-9では同一均等係数の各岩種間に0.04の間隙比の差があるが、図-16では均等係数が10以上では間隙比の差は常に小さい。

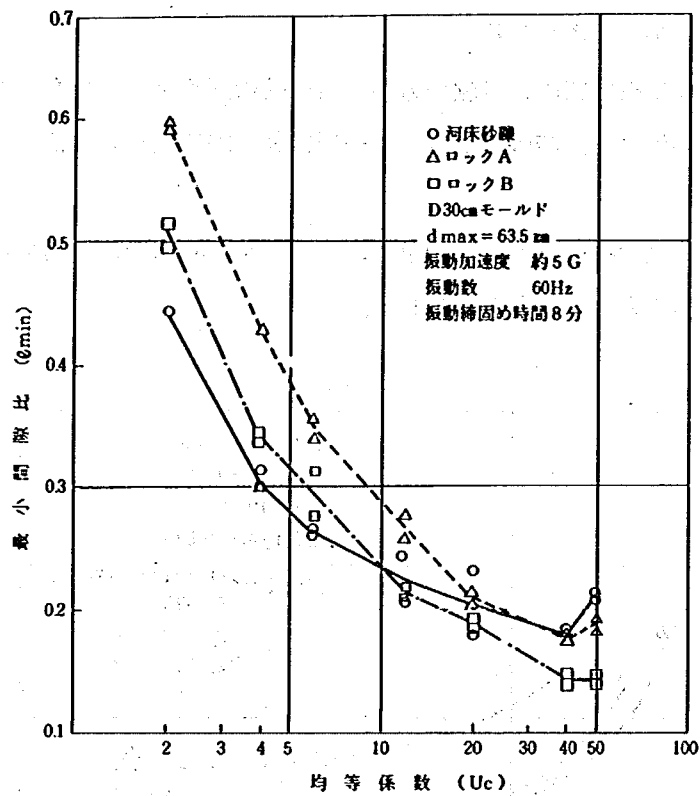


図-16 最小間隙比と均等係数

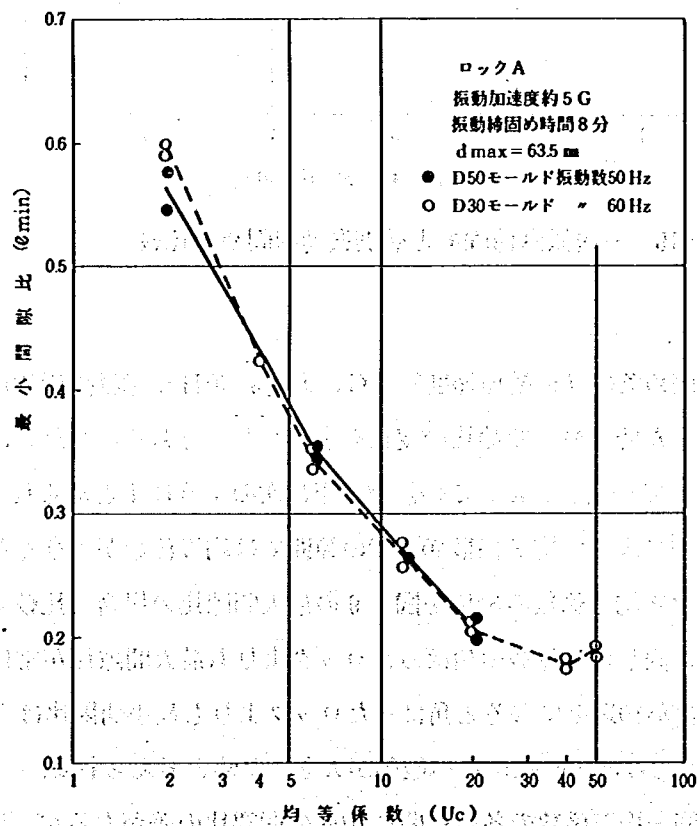


図-17 最小間隙比と均等係数

4.3.4 モールド径

図-17は、最小密度試験で使用したD30cmおよびD50cmモールドを用い、粒子の最大径は63.5mmとし振動締固め条件（振動加速度を5G、振動締固め時間を8分、振動数はD50cmモールドでは50Hz、D30cmモールドでは60Hz）を与えて得た最小間隙比が均等係数によってどう変化していくかを調べたものである。

図から最小間隙比は、均等係数6～20の範囲内ではモールド径に影響されていないことがわかる。図-10の最大間隙比の場合はモールド径の小さい方が最大間隙比が大きいという結果が得られているが、最小間隙比は振動締固めにより密度の均一化が進みモールド径の影響はでないようである。

4.3.5 粒子形状

図-18は最大間隙比の場合と同様に3岩種で均等係数2、12、50の3条件でアンギュラリティーと最小間隙比の相関を示したものである。均等係数が小さいうちはアンギュラリティーの小さなもの（すなわち粒子形状がより丸みを帯びたもの）が、よく締固まる傾向にあるが、均等係数が大きくなるに従い最小間隙比とアンギュラリティーの間に明瞭な関係は認め難いようである。

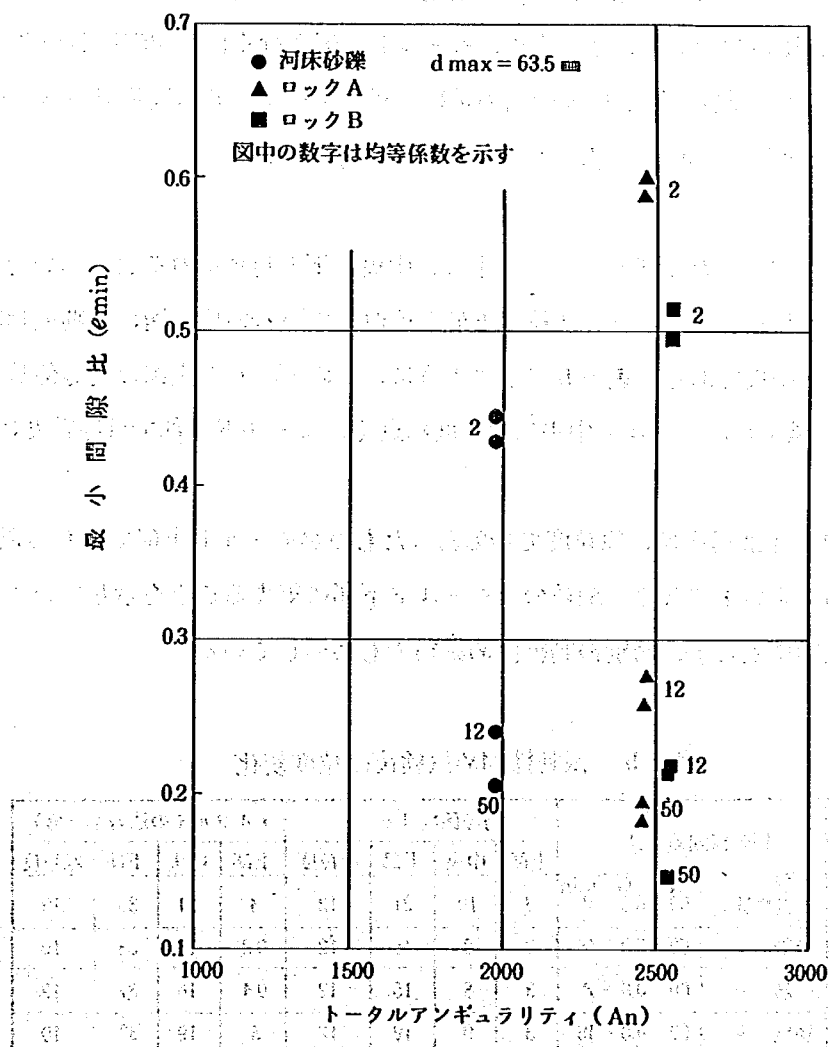


図-18 最小間隙比とトータルアンギュラリティー

4.3.6 振動締固め試験による密度分布

締固め後の密度分布を把握した結果を次の3点にまとめる。

1) 写真-6は均等係数12で4.76mmフルイ通過率19%の状態を振動加速度約5G、振動数60Hz、振動締固め時間8分で振動締固めたあとのモールド内の密度分布を示したものである。いま、大粒径を63.5～25.4mm、中粒径を25.4～9.52mm、小粒径を9.52～0.42mmと定義するとこれらの粒子の分布は次のようである。

一層振動締固め試験では、モールド上部がほとんど大粒径で小粒径はみられず、モールド中央は大、中、小粒径の混合状態となっており、モールド下層部およびモールド周辺部には中、小粒径が分布しているようである。

層別振動締固め試験もモールド上部のみが大粒径でモールド中央ないし下部では大、中、小粒径がバランスよく分布しており、モールド全体で粒子の分布をみれば一層振動締固めに比べ、大、中、小粒径の分離は少ないようである。

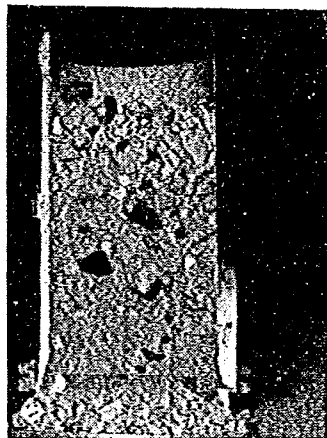
2) 図-19は、振動締固め後、モールドの上部から1/3毎に試料を抜き取り、それぞれの密度を調べたものである。モールド中央の間隙比はモールド上部の間隙比の約60%、モールド下部の間隙比はモールド上部の間隙比の約50%というように、モールド下部に行くほど間隙比が小さくなる。この傾向は、一層振動締固め試験と層別振動締固め試験の双方を見比べても同様である。極端な場合、モールド下部の間隙比がモールド上部の30%程度になる場合もある。

3) 図-20は、2)項でのべた試料をモールド上部、中央、下部毎にそれぞれふるい分けて試験後の粒度を原粒度と比較したものである。原粒度と最も近似しているのは一層、層別振動締固め試験にかかわらずモールド中央である。表-5に示すように、このモールド上部の均等係数は、原粒度の均等係数の1/4に減少し、モールド中央は原粒度に近く、モールド下部では原粒度に比べ大きめの値となる。

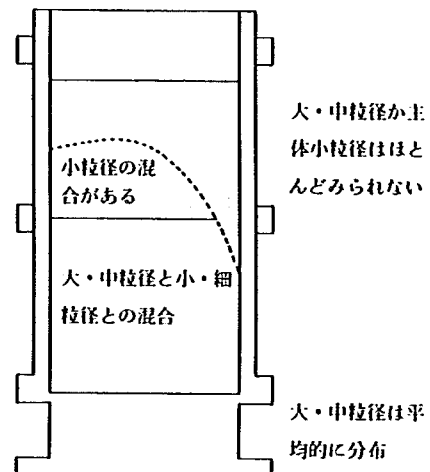
また、4.76mmフルイ通過率は、原粒度で19%あったものがモールド上部では5%以下に、モールド下部では約40%ぐらいまでなり、細粒分がモールド下部に集まることを示している。このことは、一層振動締固め試験に限らず、層別振動締固め試験でも共通している。

表-5 振動締固め試験後の粒度変化

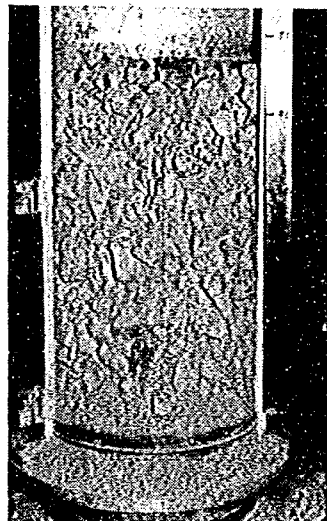
試 料	振動締固め条件		均等係数 U_c				# 4 フルイの通過率 (%)			
			上部	中央	下部	原粒度	上部	中央	下部	原粒度
河床砂礫	一層 振動締固め	Hz G min 60-5.0-8	3	10	21	12	4	21	30	19
	層別 "	60-5.0-48	3	8	15	12	0.2	18	38	19
ロック A	一層 "	60-3.6-8	3	8	15	12	0.4	16	37	19
	層別 "	60-4.8-48	3	9	19	12	5	19	37	19



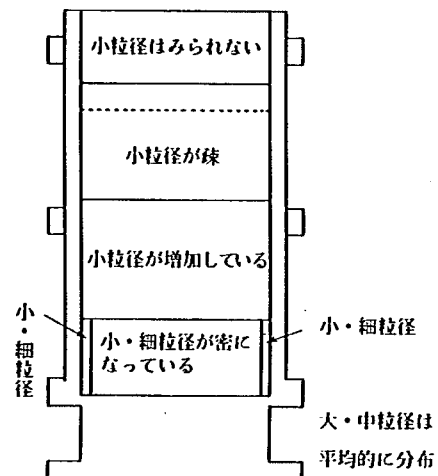
① 一層振動締め後（ロック C）
Uc = 12-19



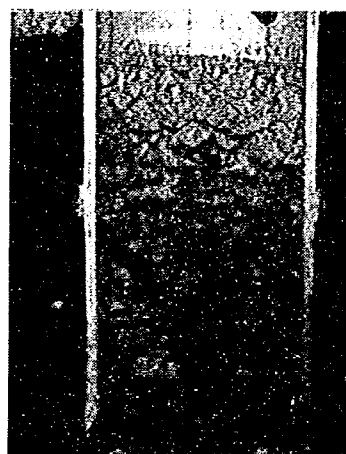
振動加度 5.3 G
振動数 60 Hz
振動締め時間 8 分



② 層別振動締め後（ロック C）
Uc = 12-19



振動加度 4.6 G
振動数 60 Hz
振動締め時間 48 分



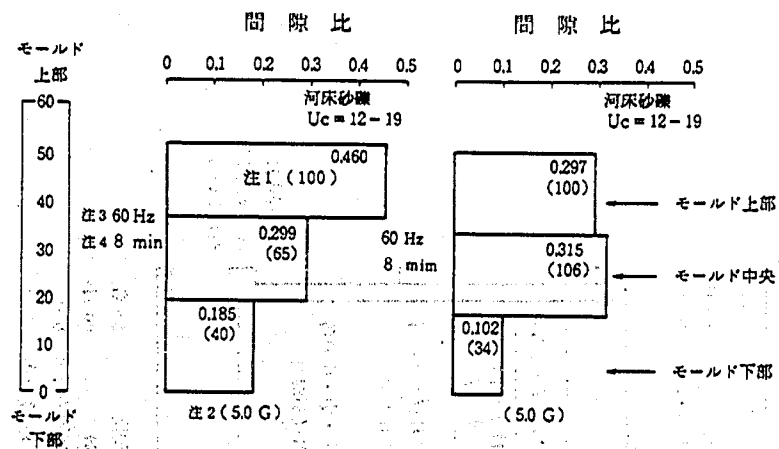
③ 一層振動締め後（ロック B）
Uc = 12-19



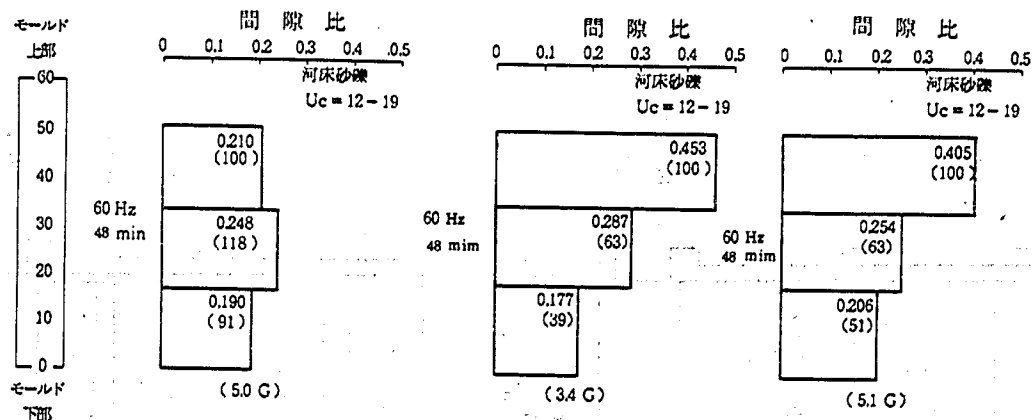
振動加度 5.5 G
振動数 60 Hz
振動締め時間 8 分

写真-6 振動締め後の密度分布

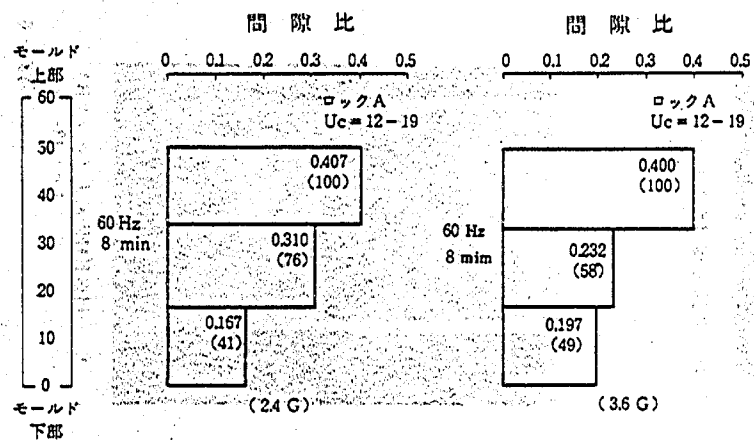
(一層振動締固め) 河床砂礫



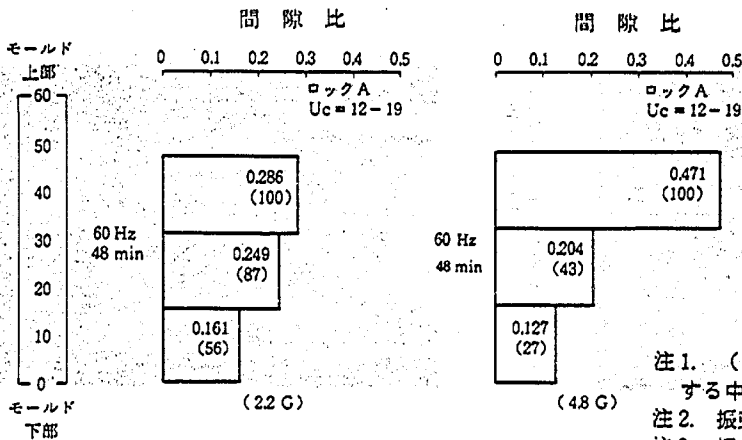
(層別振動締固め) 河床砂礫



(一層振動締固め) ロック A



(層別振動締固め) ロック A



- 注1. () 内の数字はモールド上部に対する中央、下部の百分率
 注2. 振動加速度
 注3. 振動数
 注4. 振動締固め時間

図-19 モールド内の最小間隙比の分布

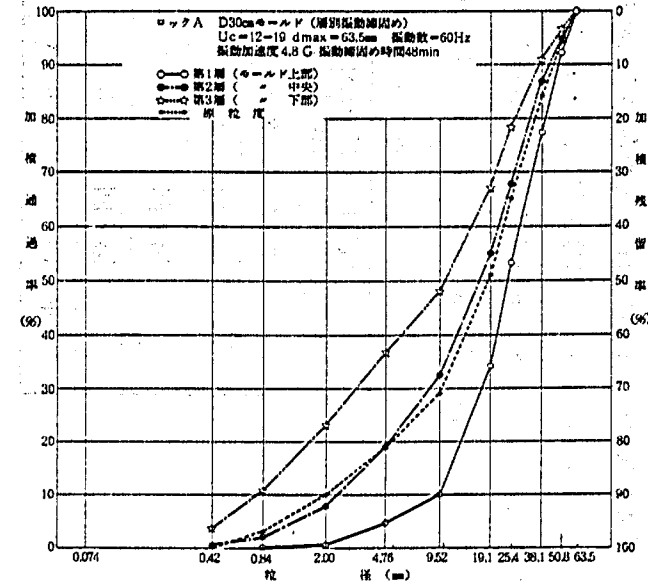
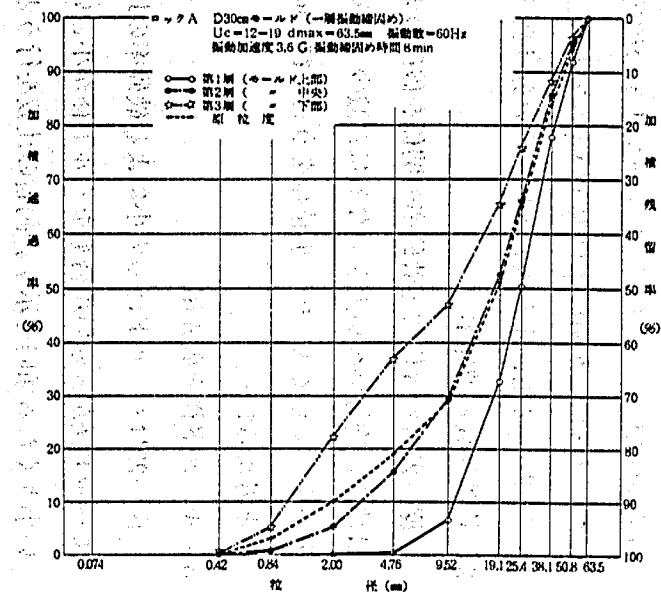
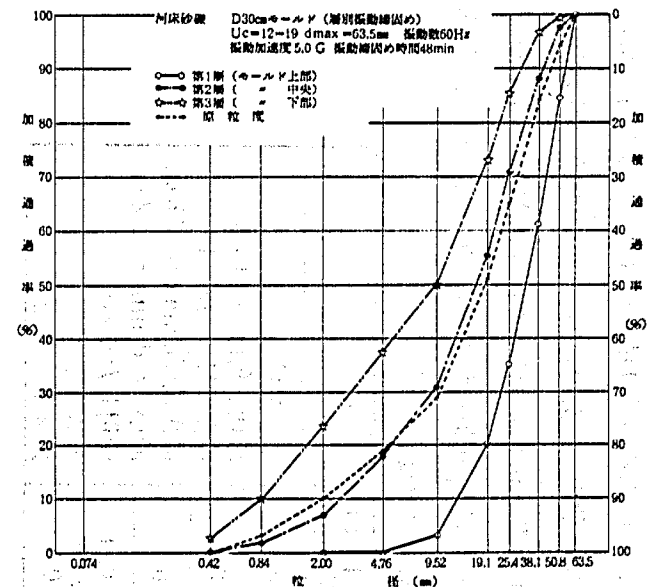
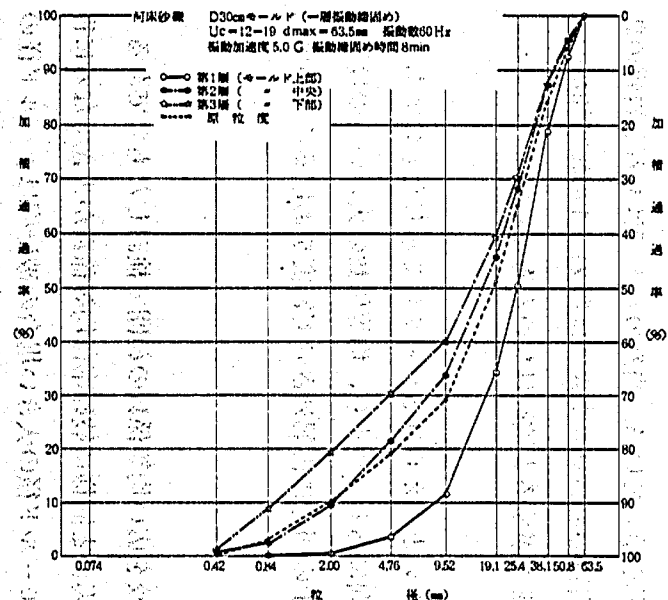


図-20 粒径加積曲線の変化

4.3.7 振動締固め試験による破碎

A. ふるい分け精度

破碎の状況をふるい分けによる試験から求めるが、そのふるい分け精度を確かめる試験を行った。同一作業者が同じように粒度調整し、混合した試料を2個ふるい分け、ふるい分け精度を確かめたものである。これらを Marsal, Leslie の破碎率で示すと表-6 のようになる。作業者A・B・合わせて平均すると Marsal では 2.9 %, Leslie では 0.6 %が既に締固めをせず破碎を生じていることになる。

表-6 ふるい分けの精度

破碎率 作業者		Marsal の 破碎率 (%)	Leslie の 破碎率 (%)	備 考
A	第1回	3.2	0.5	ロックC 形状: 角ばっている 粒度: $U_c = 12 - 19$ 最大粒径 $d_{max} = 63.5 \text{ mm}$ 最小 " $d_{min} = 0.42 \text{ mm}$ 使用したふるい の大きさ $40 \times 60 \times 7 \text{ cm}$
	第2回	2.6	0.6	
B	第1回	3.4	0.5	
	第2回	2.3	0.9	
平 均		2.9	0.6	

B. 振動締固め試験による破碎状況

1) 岩質と破碎率

破碎率と岩質の関係をロックA, ロックBの2種類で検討した。ここで岩質のよしあしについてロックAの方がロックBに比べ堅硬で比重も大きいことから岩質がよくロックBの岩質が悪いと考える。図21-1, 図21-2はロックAおよびロックBの試験前後の粒度曲線をそれぞれ示したものである。このなかでロックAの破碎率は Marsal で1 %, Leslie で0 %となり, ロックBの破碎は Marsal で5 %, Leslie で1 %の破碎率を示している。当然のことではあるが岩質の悪いロックBの方が破碎率は大きいようである。岩質の良いロックAでは図21-1の粒径加積曲線から判断しても、また破碎率にふるい分け精度を考慮すると破碎はないと考えられる。

2) 均等係数と破碎率

図-22は均等係数と破碎率の関係を破碎の大きいと考えられるロックBで示したものである。破碎率は均等係数が大きくなるほど減少する傾向にある。つまり、均等係数の大きいものは破碎率を少なくして大, 中, 小粒径をうまく粒子同士の間隙に再配列させて密度をあげることが出来ると考えられる。

3) モールド径と破碎率

図-23はモールド径の大小による破碎率の比較を広い均等係数の範囲で検討したものである。モールド径が大きい場合もモールド径が小さい場合と同様に破碎率は均等係数が大きくなるに従い小さくなる傾向を示す。両者の比較を行うとモールド径の大きい場合の破碎率はモールド径の小さいときに比べかなり小さい値を示している。その大きさはモールド径の小さい場合の破碎率の約半分である。

4) 破碎の形態

粒子に着色して試験後の粒子破碎の追跡調査を行なうこととした。大きい粒子では、粒子のかがかけるまたは、すれるだけで粒子の中央からの破壊は見当らないようである。小粒径については追跡調査が出来なかったが、すなわち振動締固め試験による破碎の一因は粒子が再配列するときの粒子同士の接触による破壊であると考えられる。

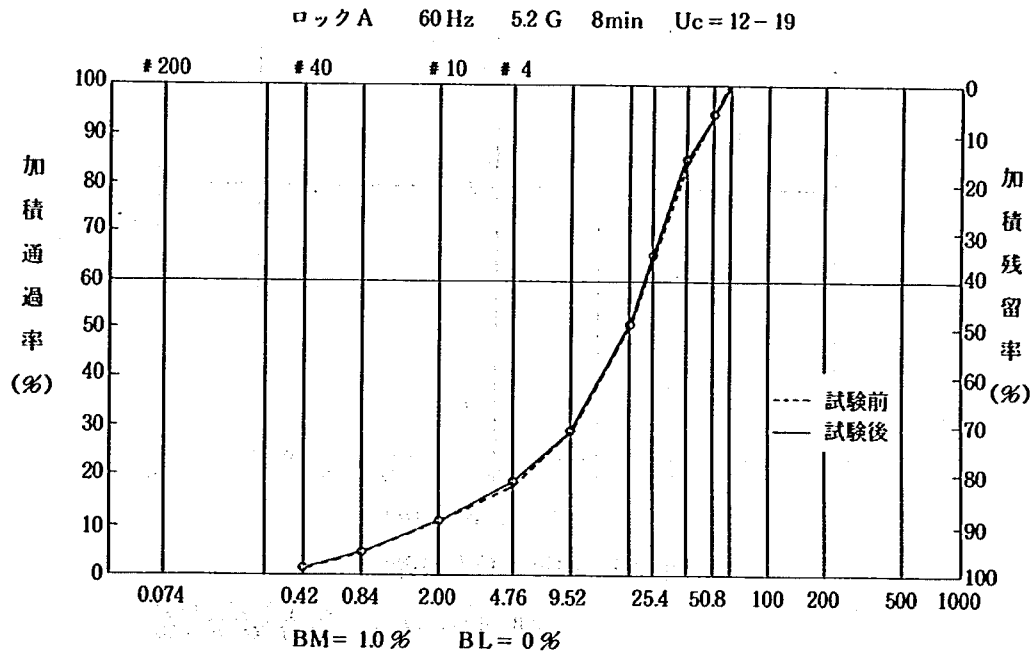


図-21.1 試験前後の粒度曲線の比較 (ロック A)

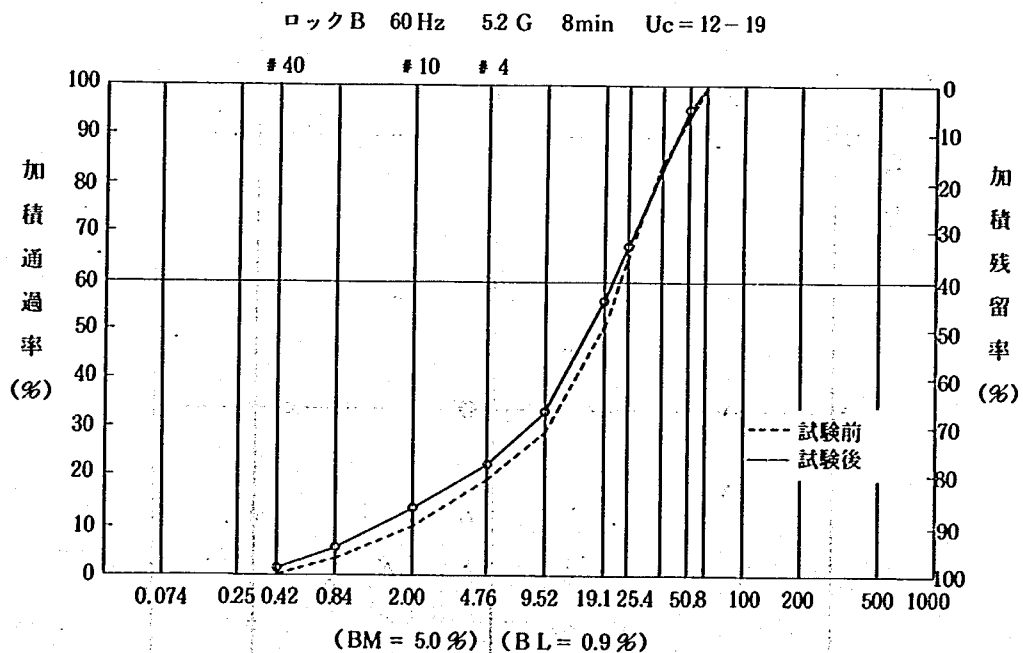


図-21.2 試験前後の粒度曲線の比較 (ロック B)

(G) 1.0 G 1.0 G

試験前後の粒度曲線の比較 (ロック B)

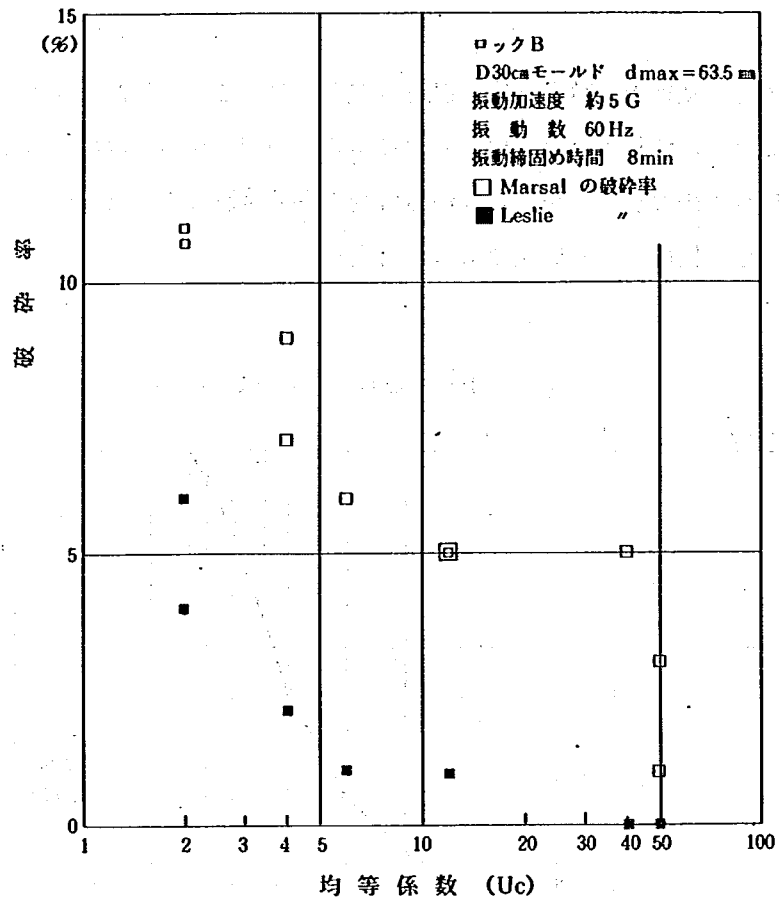


図-22 均等係数と破砕率

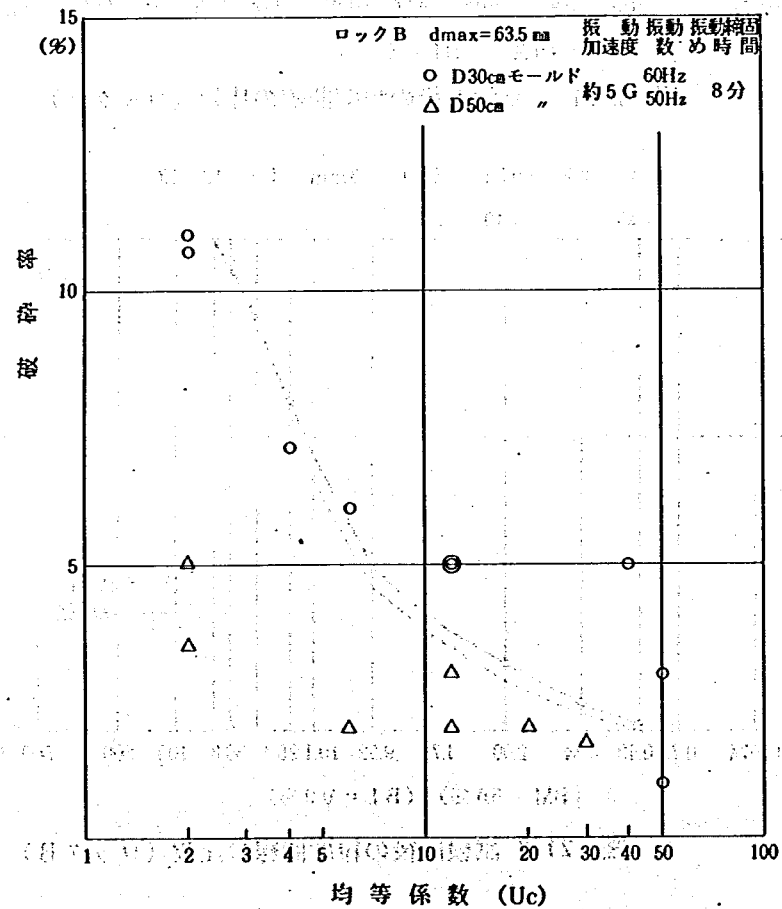
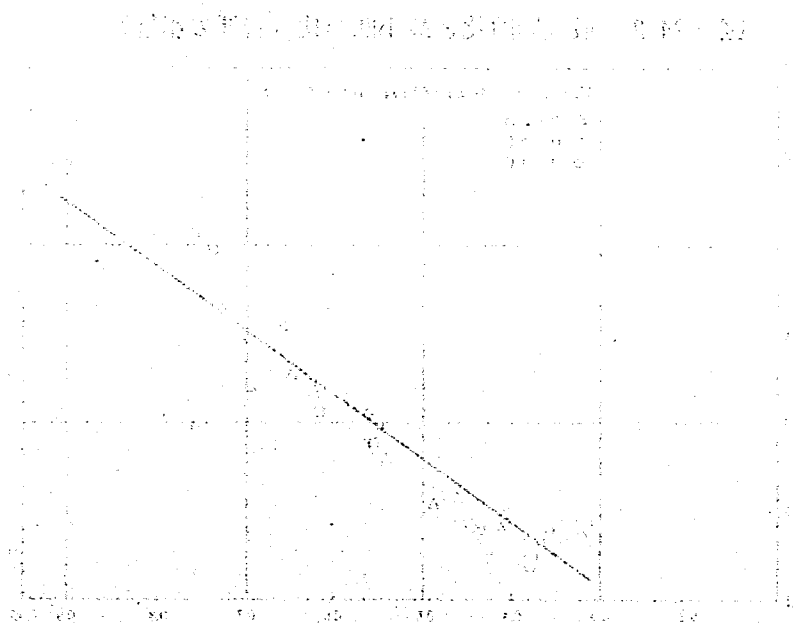


図-23 モールド径の違いによる破砕率の比較

4.4 最大間隙比と最小間隙比の相関

- 1) 図24-1は、均等係数が2~50のロックAに振動数60Hz、振動加速度約5G、振動締固め時間8分の振動締固め条件をそれぞれ加えた時の最大間隙比と最小間隙比との関係を示したものである。この図ではモールド径の違う2種類のモールドに分けてプロットしている。最大間隙比と最小間隙比の関係はモールド径の大小の影響がほとんどなくほぼひとつの直線式が考えられる。その実験式は、 $e_{\min} = 0.825 e_{\max} - 0.174$ となり、この実験式の相関係数は0.95である。
- 2) 図24-2は、D30cmモールドを利用して粒子の最大径を63.5mmと一定にして角ばっていて岩質が良いロックAと同じく角ばっているが岩質が悪いロックBの2つの岩種について最大間隙比と最小間隙比との関係を比較したものである。この結果からも岩質による違いは認められず、最大間隙比と最小間隙比との関係には一本の直線関係が認められる。実験式は、 $e_{\min} = 0.825 e_{\max} - 0.181$ となり、この実験式の相関係数は0.96である。
- 3) 図24-3は、図24-2に粒子形状の異なる丸味のある河床砂礫を入れて、最大間隙比と最小間隙比の関係を調べたものである。この場合も粒子形状に関係なくひとつの直線式で最大間隙比と最小間隙比との関係を示すことが出来る。その実験式は $e_{\min} = 0.752 e_{\max} - 0.125$ で、最大間隙比と最小間隙比との相関係数は図24-1、図24-2とほぼ同じ0.94である。

以上のことから、最大間隙比と最小間隙比との関係は、モールド径、岩種、粒子形状によって実験式がわずかに異なるものの、これらの影響は比較的少ないことがわかり、かなり相関の良い実験式を作ることが出来ると考えられる。



(岩種Aの均等系) 最大間隙比と最小間隙比の関係 図24-1

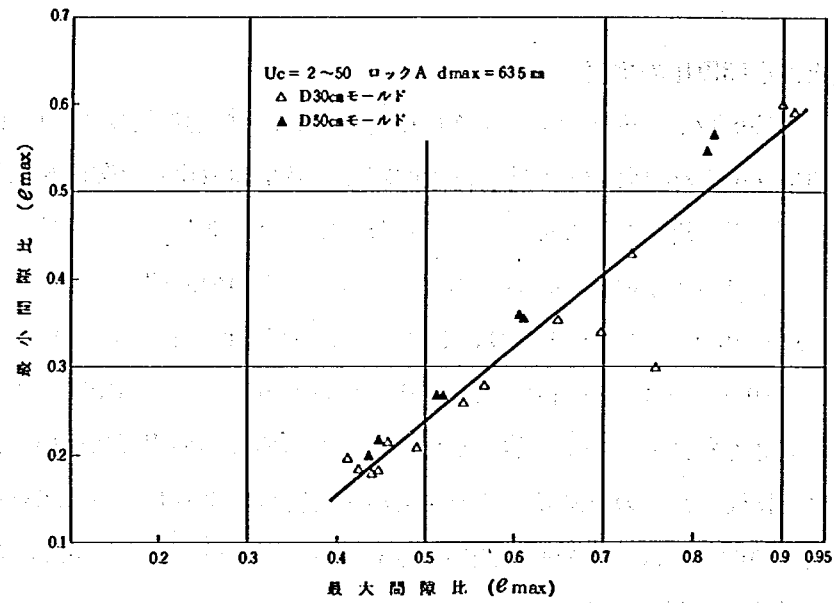


図-24.1 最大間隙比と最小間隙比 (モールド径の影響)

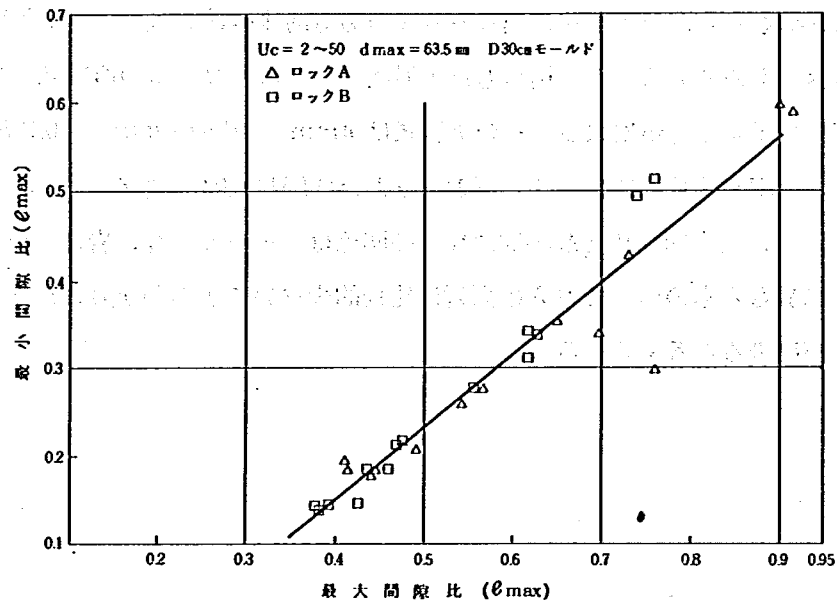


図-24.2 最大間隙比と最小間隙比 (岩種の影響)

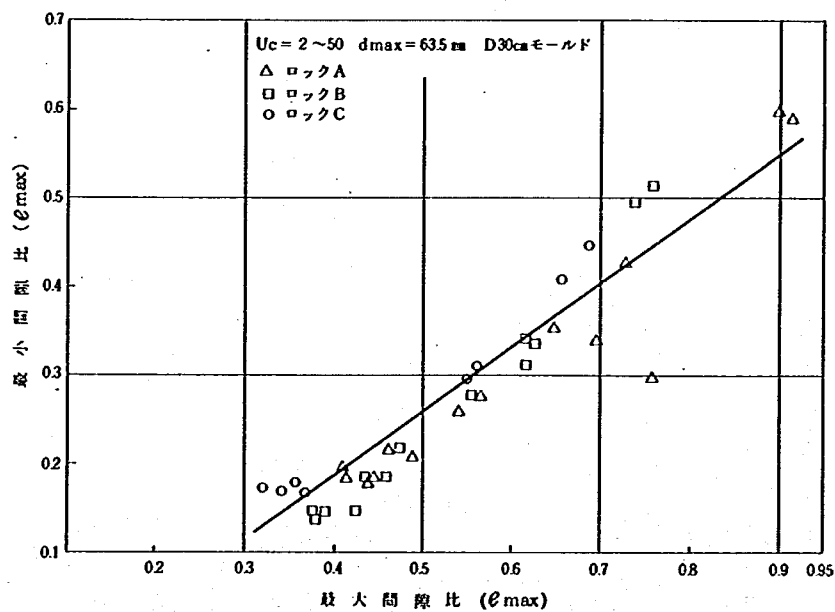


図-24.3 最大間隙比と最小間隙比 (粒子形状の影響)

5. 相対密度とせん断強さの検討

三軸試験時の密度を相対密度、乾燥密度、間隙比で整理し、それぞれの密度におけるせん断強さとの関係を検討した。なお、三軸試験においてはロック B およびロック C の岩以外に、岩種の異なるものを用いた。その岩種は図中の凡例に示す。

- 1) 図26-1~3は、内部摩擦角と圧密前の相対密度、乾燥密度および間隙比との関係を示したものである。この図は粒子の最大径を 63.5 mm と一定にして4岩種について均等係数を 2, 6, 12, 20 と変えた場合の両者の関係をプロットしてみたものである。この結果、内部摩擦角と相対密度および乾燥密度との相関係数は 0.61 と間隙比との相関係数 0.76 に比べ小さく、内部摩擦角との相関性において相対密度の優位性は認められないようである。しかし、相対密度を指標とした場合において同一岩種、同一粒度であれば相対密度が大きくなるに従い内部摩擦角は、ほぼ直線的に増加する傾向にあると言える。
- 2) 三軸試験時における破壊時の主応力比および変形係数(破壊時応力の50%の点と原点を結んだ直線の勾配)と相対密度等の関係をそれぞれ図27-1~図27-3, 図28-1~図28-3に示す。この図は均等係数が20で側圧が 1.5 および 6.0 kg/cm²の場合について検討を加えたものである。この結果においても間隙比の指標が最も岩種の影響が少なく各側圧毎に間隙比と破壊時の主応力比および変形係数をひとつの実験式で表わしやすいようである。
- 3) 以上の結果は、赤司らの「相対密度とせん断強さの関係で岩質、粒度の影響が少ない。」という結論と異なる。この原因のひとつとして、赤司らは最大密度を静的荷重を 200 kg/cm² 負荷して求めており本試験の最大密度の試験法およびその定義と異なるためと考えられる。

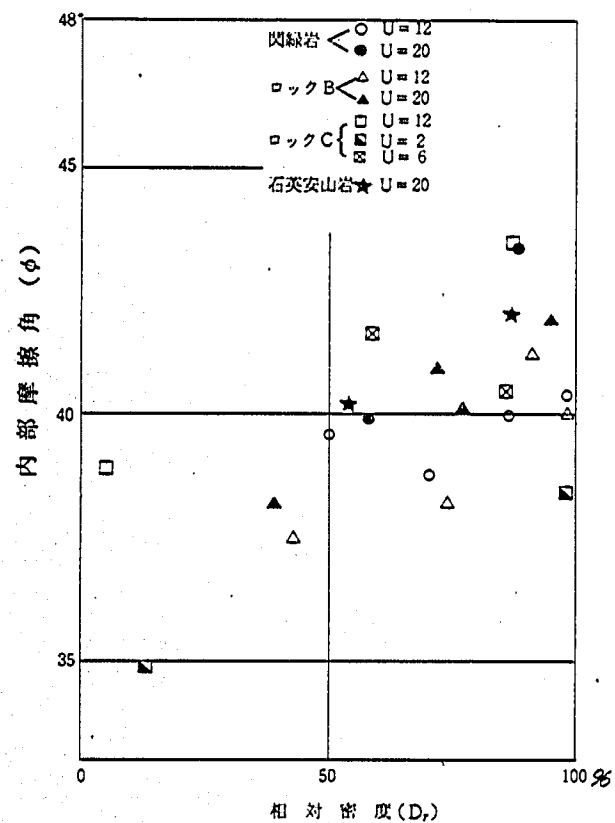


図-26.1 相対密度と内部摩擦角

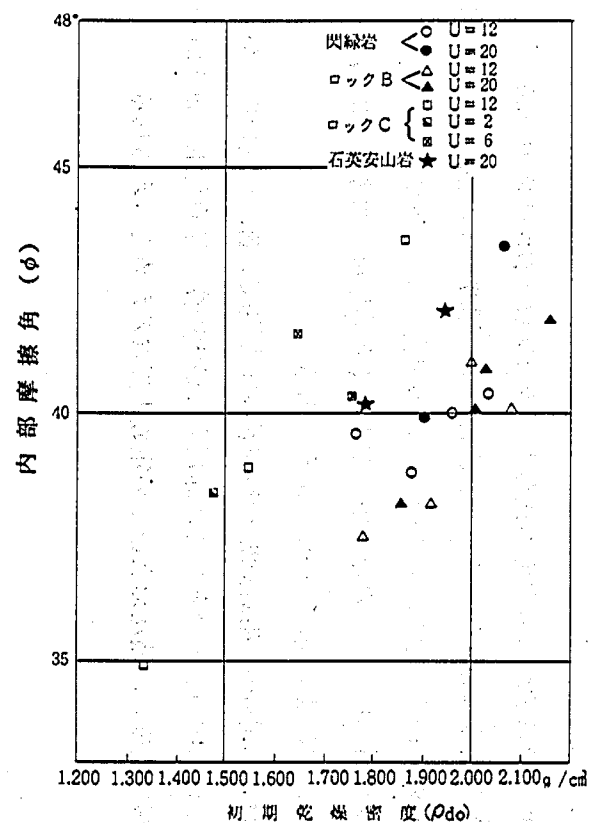


図-26.2 初期乾燥密度と内部摩擦角

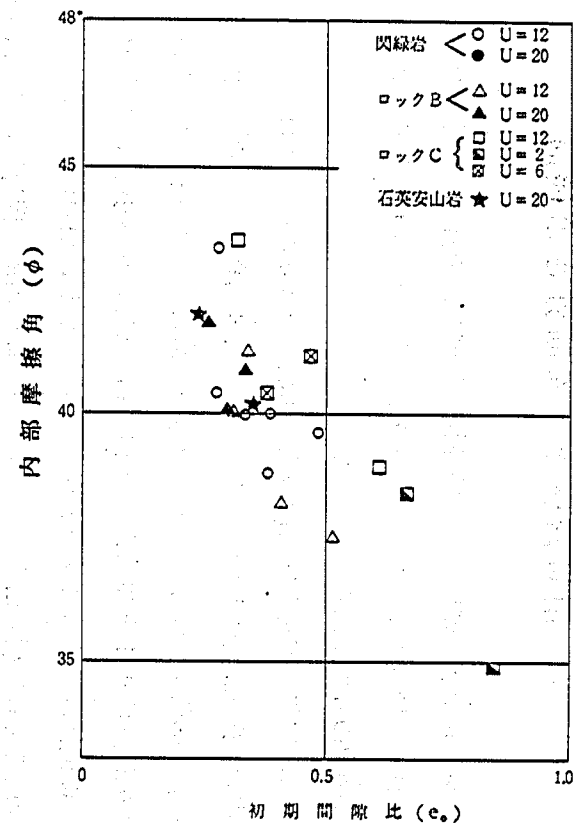


図-26.3 初期間隙比と内部摩擦角

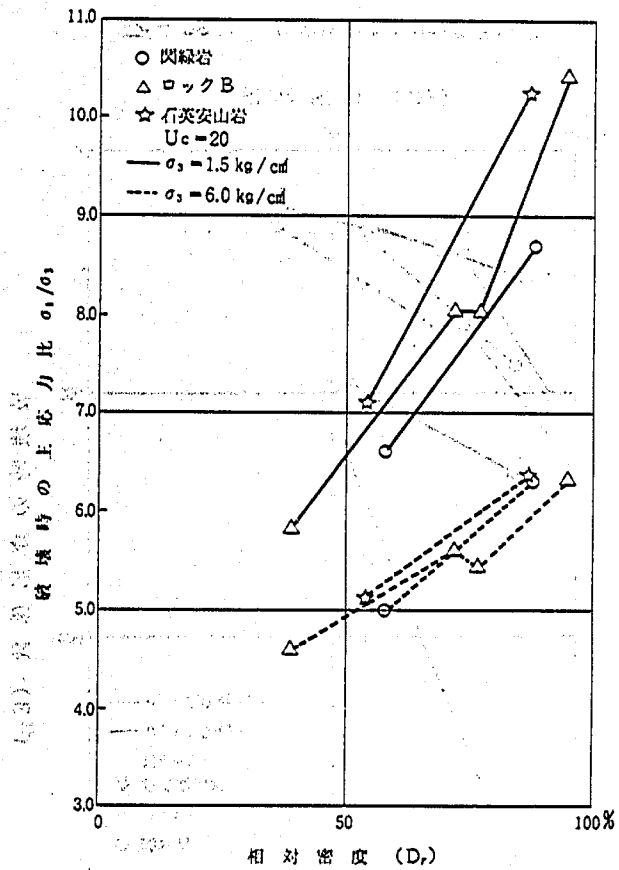


図-27.1 相対密度と主応力比

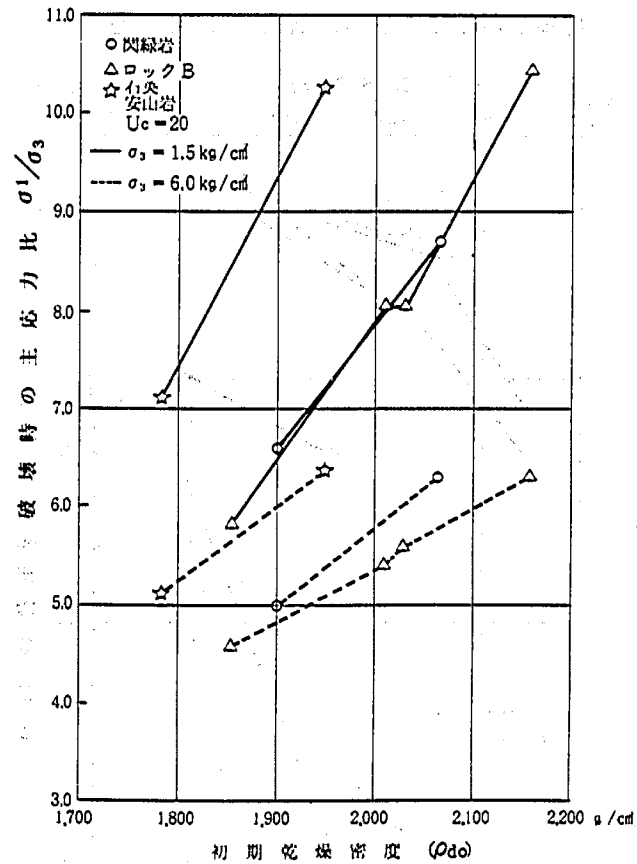


図-27.2 初期乾燥密度と主応力比

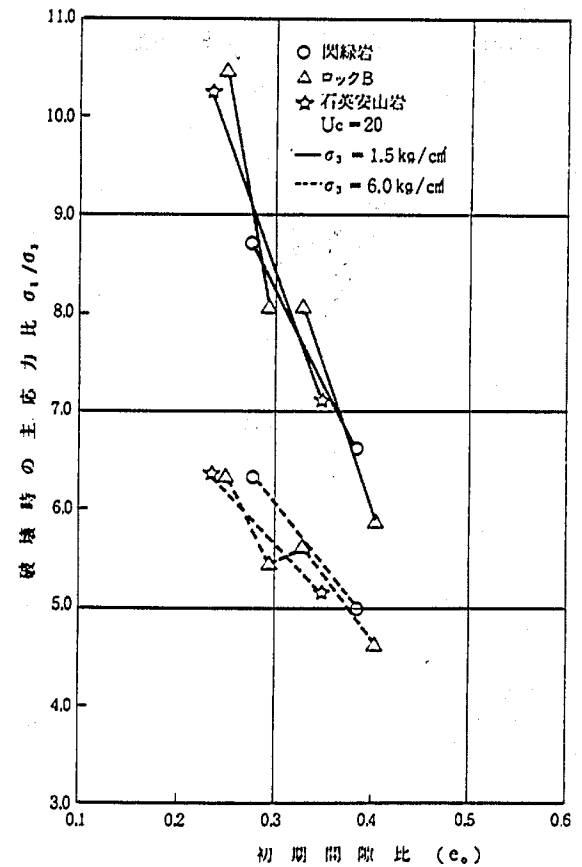


図-27.3 初期間隙比と主応力比

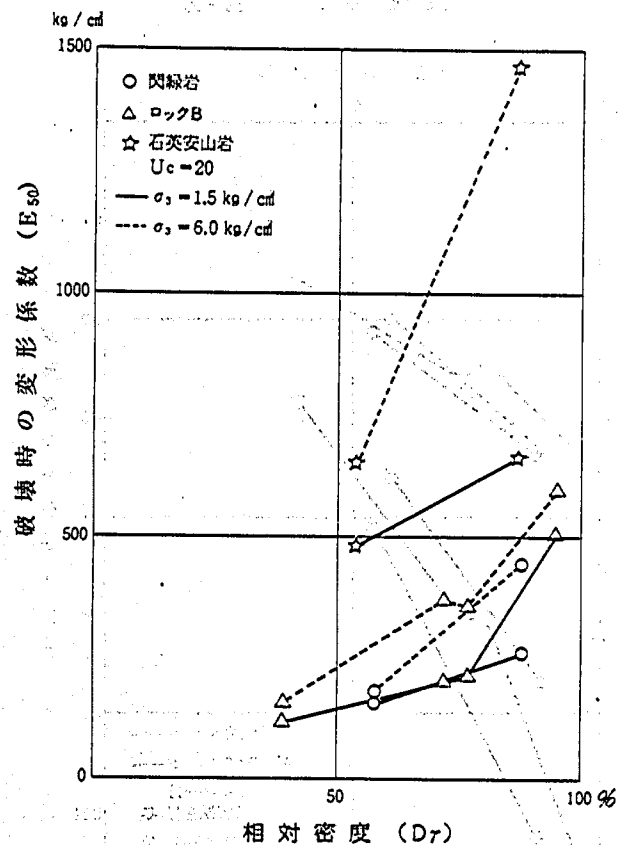


図-26.1 相対密度と内部摩擦角

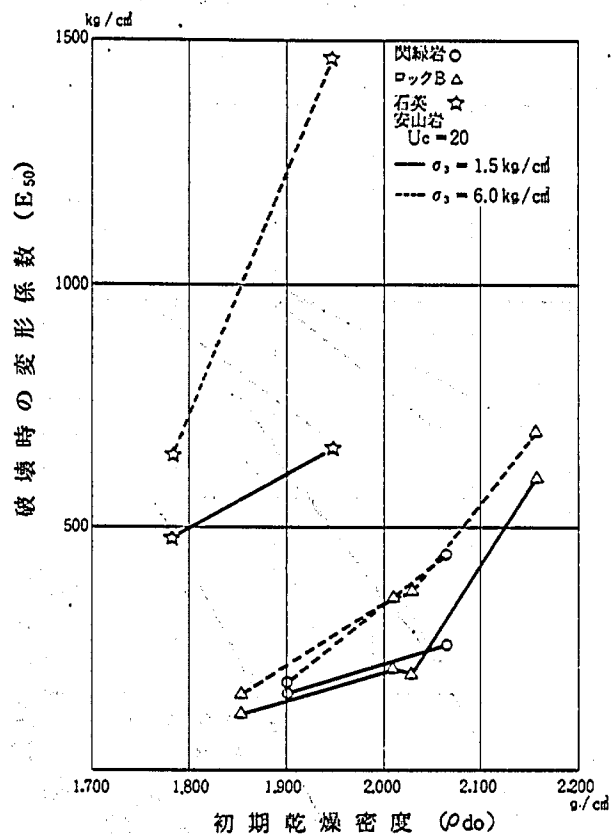


図-26.2 初期乾燥密度と内部摩擦角

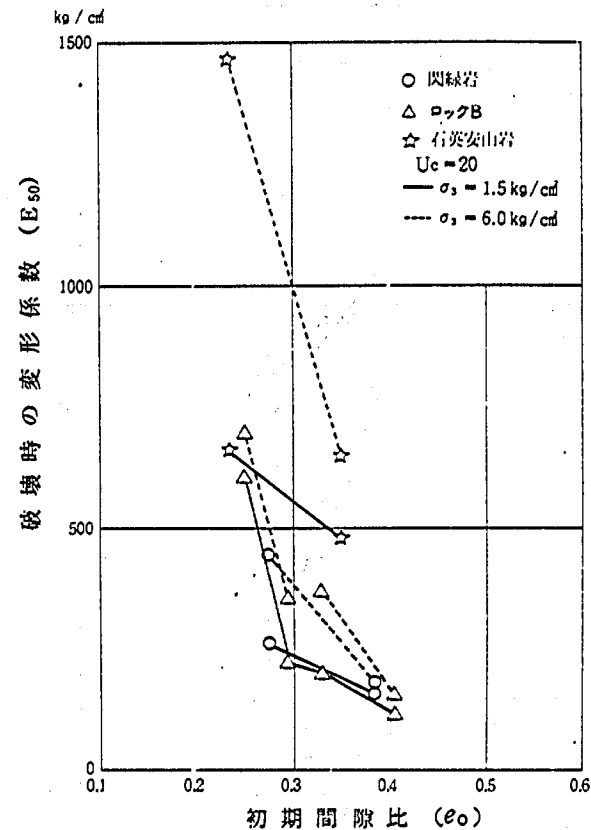


図-26.3 初期間隙比と内部摩擦角

6. 結 論

(最小密度試験)

- 1) 試験のバラツキは、作業者をえて試験しても少ない。そのバラツキは間隙比で $\pm 9\%$ 程度である。
- 2) 最小密度試験において、試料の投入回数が影響することが認められる。ちなみに、ハンドスコップによる試料の投入回数 192 回の場合は、試料の投入回数 24 回に比べ間隙比で約 10% の密度の増加がある。
- 3) 最小密度試験は均等係数、モールド径、粒子形状にそれぞれ影響を受けることがわかった。以下、次のようにまとめられる。
 - ・均等係数が大きくなれば、最大間隙比は岩種のいかにらず指数関数的に減少する。
 - ・モールド径の大小による最大間隙比の比較はモールド径の小さい方がモールド径の大きい方よりモールド側面の拘束をうけて最大間隙比が大きくなる。
 - ・粒子形状では、アンギュラリティーの小さいものが最大間隙比は小さい。とりわけ、均等係数が小さいほどこの傾向が強いようである。

(最大密度試験)

- 1) 試験のバラツキは、最小密度試験のバラツキに比べて小さい。そのバラツキは間隙比で約 3 % 以下である。
- 2) 振動締固め試験では、モールドに全て投入して 1 回の振動締固め条件を与えるものと、モールド全体を 6 層に分けて、そのつど振動締固め条件を与えるというふたつの方法を行ったが、今回の試験では後者(層別振動締固め試験)による方が最大密度を得ることが出来た。その後者では角ばった粒子ほど層別振動締固め試験の効果があることが確められた。
- 3) 振動締固めにおいて、最大密度試験に影響を及ぼすと考えられる要因としては振動加速度、振動数振動締固め時間、上載荷重の有無があると考えられる。これらの影響は次の様にまとめられる。
 - ・振動加速度の影響が明確である。この振動加速度と間隙比との関係で振動加速度 0.5 G まではほとんど間隙比の減少がみられず、振動加速度 0.5 G から 3 G ないし 4 G で間隙比は直線的に減少し、それ以上の振動加速度では間隙比があまり変化しないようである。
 - ・振動締固め時間については、3 分以内で最大密度を得たが間隙比の安定性を考えれば ASTM の基準どおり 8 分で良いと考えられる。
 - ・上載荷重については、上載荷重の無い方が粒子間の摩擦を少なくしてより密な粒子に配列しやすいのではないかと想定されたが、結果はその逆で上載荷重の有る方が締固まり効果を増す。
- 4) 最大密度試験においては、最小密度試験に比べ均等係数、モールド径、粒子形状の影響が少なかった。これらの影響は次のようにまとめられる。
 - ・均等係数が大きくなるに従い最小間隙比は減少していくものの岩種、粒子形状によって最小間隙

比と均等係数の関係が最大間隙比の場合と比べ異なる。さらには、岩種間の差が最大間隙比の場合に比べ縮まるようである。

- ・最大間隙比のときに認められたモールド径の違いによる差は、振動締固めによって得られる最小間隙比では生じなくなる。
- ・最大間隙比と粒子形状のなかのアンギュラリティーの関係には強い相関が認められたが、最小間隙比では均等係数が大きくなるに従いアンギュラリティーとの明確な相関がなくなる。

5) 振動締固めによって得られる粒子状態はモールド上部および下部で、大、中、小粒径が分離している。すなわちモールド上部は大粒径が多く、モールド下部では小粒径が多くなるという傾向を示す。この状態を間隙比で表わすとモールド上部の間隙比は、モールド中央の間隙比を100%にする
と約170%となり、モールド下部の間隙比はモールド中央の間隙比に対し約80%の大きさになる。
これらを粒径加積曲線で確かめると、モールド中央は殆んど試験前の粒径加積曲線と変らないがモールド上部および下部は試験前の粒径加積曲線と大きく異なっている。

6) 振動締固めによる破碎状況を Marsal, Leslie の破碎率からと、振動締固めに用いる粒子に着色しその追跡調査から検討した。その結果は振動締固めによる破碎の状況は均等係数、モールド径、岩質に大きく影響される。すなわち、均等係数およびモールド径が小さく、岩質が悪い方が破碎率
は大きい。また、着色粒子の追跡調査では粒子の中央からの破壊は見当らず、粒子のかどがかける
またはすれるだけと考えられる。

(最小密度と最大密度の相関)

今回の実験からは最大間隙比と最小間隙比とはモールド径、岩種、粒子形状によらずひとつの直線で
あらわせるようである。

(相対密度とせん断強さ)

せん断強さと相対密度の関係を把握するためせん断強さと圧密前の乾燥密度、間隙比の関係とも比較
したが、この中でせん断強さとの関係で相対密度の優位性はあまり明確でなかった。今回の実験では間
隙比だけが、内部摩擦角等の強度常数との関係が岩種、粒度によらずに認められることが判明した。

(今後の問題点)

今回の最大密度試験における振動締固めではモールド上部およびモールド下部で大、中、小粒径の分
離が認められ密度分布の片寄りがあった。今後の問題点としてこのような状態の起らない試験方法を検
討する必要がある。

参 考 文 献

- | | | |
|--|---------------|----------|
| 1) 土質試験法第2編第9章P 172 ~ P 188 | 土質工学会 | S 54. 11 |
| 2) アースマニュアル P 395 ~ P 405 | 日本大ダム会議 | S 52. 7 |
| 3) 建設省土木試験基準(案) | 全日本建設技術協会 | S 45. 12 |
| 4) 土質試験法第2編第2章P 36 ~ P 51 | 土質工学会 | S 54. 11 |
| 5) 砂の相対密度測定法の試案P 157 ~ P 160 吉見吉昭 | 第12回土質工学研究発表会 | S 52. 5 |
| 6) 破 碎 率 | | |
| Marsalの破碎 Marsal, R. J. : Large Scale Testing of Rockfill Materials, Proc. ASCE, Vol. 93, NOSM 2, pp 27-42 | | |
| Leslieの破碎率 Leslie, P. P., : "Large Scale Triaxial Test on Gravelly Soils" Proc. 2nd Pan. Am Conf. Soil Mech. Found. Eug., Brazil | | |
| 7) 土質力学第8章 P 926 ~ P 932 | 最上武雄 技報堂 | S 44 |
| 8) " P 894 ~ P 903 | " " | " |
| 9) フィルダム材料の最適試験手法に関する研究 水野光章ほか水資源開発公団第1試験課報告
第7803号 S 54. 3 | | |
| 10) 振動締固め現象に関する基礎的研究P 293 ~ P 296 徳江俊秀ほか 第6回土質工学会 S 46. 6 | | |
| 11) ロック材料の相対密度についてP 337 ~ P 340 赤司六哉ほか 第14回土質工学会 S 54 | | |

参考資料 - 1

- 試料番号 1 ~ 86 フィル材料の相対密度試験 (その1) S 54. 9 (株) 建設技術研究所 参照
- " 1' ~ 70' " (その2) S 55. 3 (株) " "
- " S-5 ~ 7, H-5 ~ 8, L-17 ~ 22 七ヶ宿ダムロック材料の相対密度試験 S 55. 3
(株) アイ・エヌ・エー新土木研究所 参照

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度 (振 動 前)		最大密度 (振 動 後)		破 砕 率		モールド 投入重量 (乾燥重量) g	備 考
		均等係数 注1) #4 Uc. パス	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数 (Hz)	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度 $\rho_{d.min} \frac{g}{cm^3}$	最大間隙比 e max	最大乾燥密度 $\rho_{d.max} \frac{g}{cm^3}$	最小間隙比 e min	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
						振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)											
1	河床砂礫	12 - 19	63.5	0.42	一 層	片側 8枚×2	2.9	30	1.60	3	1.890	0.453	2.253	0.219	-	-	77.418	作業者A D30cmモールド
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	8	"	"	2.257	0.217	-	-	"	"
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	20	"	"	2.257	0.217	3.8	0.8	"	"
2	"	"	"	"	"	8×2	"	"	"	3	1.911	0.437	2.240	0.226	-	-	81.275	"
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	8	"	"	2.244	0.224	-	-	"	"
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	20	"	"	2.246	0.223	2.3	0.6	"	"
3	"	"	"	"	"	8×2	"	"	"	8	1.912	0.436	"	"	3.9	0.4	81.194	"
4	"	"	"	"	"	8×2	3.2	"	1.77	8	1.909	0.438	2.245	"	-	-	"	"
	"	"	"	"	"	"	"	"	"	20	"	"	2.221	0.236	2.8	0.6	"	"
5	"	"	"	"	"	11×2	4.1	"	2.27	8	1.900	0.445	2.230	0.231	3.4	0.8	81.113	"
6	"	"	"	"	"	11×2	4.2	"	2.32	"	1.907	0.440	2.240	0.226	2.2	"	81.271	"
7	"	"	"	"	"	11×2	7.4	40	2.30	"	1.904	0.442	2.254	0.218	3.5	1.2	81.192	"
8	"	"	"	"	"	6×2	4.1	"	1.27	"	1.906	0.441	2.251	0.220	1.9	0.5	81.196	"
9	"	"	"	"	"	8×2	5.6	"	1.74	"	1.901	0.444	2.294	0.197	3.7	1.6	81.279	"
10	"	"	"	"	"	8×2	5.8	"	1.80	"	1.900	0.445	2.266	0.212	2.6	1.7	81.196	"
11	"	"	"	"	"	5×2	5.6	50	1.11	"	1.907	0.440	2.300	0.194	2.0	1.1	81.115	"
12	"	"	"	"	"	2×2	2.2	"	0.44	"	1.942	0.414	2.216	0.239	0.5	0.3	81.190	"
13	"	"	"	"	"	7×2	8.5	"	1.69	"	1.922	0.439	2.281	0.204	2.3	1.1	81.198	"
14	"	"	"	"	"	2×2	3.4	60	0.50	"	1.935	0.419	2.260	0.215	0.9	0.3	81.192	"
15	"	"	"	"	"	1×2	1.7	"	0.23	"	1.950	0.408	2.175	0.262	1.1	0.3	81.112	"
16	"	"	"	"	"	5×2	8.6	57	1.32	"	1.949	0.409	2.281	0.204	1.5	0.8	81.025	"

注1) #4パスとは4.75mmふるい目の通過率のことを意味する。

注2) 全振巾は実測ではなく次の計算式で求めたものである。 $G = 2.01 \times a r^2 \times 10^{-5}$ a 全振巾 mm / 振動数 G = 加速度 $980 \frac{cm}{sec^2}$ でわったもの

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 砕 率		モー ルド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度	最大間隙比	最大乾燥密度	最小間隙比	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
		注1) #4 Uc. パス				振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)	(Hz)			$\rho_{d,min} \frac{g}{cm^3}$	e max	$\rho_{d,max} \frac{g}{cm^3}$	e min				
17	河床砂礫	12-19	63.5	0.42	一 層	片側 4枚×2	1.4	30	0.77	8	2.015	0.364	2.230	0.228	2.0	0	85.670	作業者A D 30cm モールド
18	"	"	"	"	"	5×2	5.4	50	1.07	"	1.890	0.453	2.275	0.207	1.7	0.6	81.109	"
19	"	"	"	"	"	3×2	5.2	60	0.72	"	1.884	0.457	2.277	0.206	7.2	0.2	81.105	"
20	"	"	"	"	"	3×2	5.0	"	0.69	"	1.906	0.441	2.212	0.241	3.0	0.3	81.188	"
21	"	"	"	"	"	3×2	5.1	"	0.70	48	1.841	0.492	2.259	0.216	2.8	0.7	81.108	"
22	"	"	"	"	層 別	3×2	5.2	"	0.72	"	-	-	2.268	0.211	0.9	0.8	81.283	"
23	"	2-0	"	9.52	一 層	3×2	"	"	"	8	1.661	0.687	1.942	0.443	3.3	0.2	69.444	"
24	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	1.692	0.656	1.988	0.409	2.5	0.3	71.510	"
25	"	4-5	"	2.00	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.785	0.550	2.131	0.298	2.5	0.2	73.630	"
26	"	"	"	"	"	3×2	5.2	"	0.72	"	1.780	0.560	2.118	0.311	2.3	0.1	73.627	"
27	"	6-11	"	0.84	"	3×2	5.2	"	"	"	1.849	0.496	2.189	0.264	2.6	0.2	81.115	"
28	"	"	"	"	"	3×2	5.1	"	0.70	"	1.836	0.506	2.190	0.263	4.2	0.3	81.197	"
29	"	20-29	"	0.074	"	3×2	"	"	"	"	2.023	0.357	2.329	0.179	1.2	0.1	85.899	"
30	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	2.008	0.368	2.353	0.167	2.0	0	85.899	"
31	"	40-39	"	"	"	3×2	"	"	"	"	2.024	0.342	2.324	0.169	2.3	0	85.087	"
32	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	2.056	0.321	2.317	0.172	1.0	0	84.935	"
33	"	50-50	"	"	"	3×2	"	"	"	"	2.005	0.355	2.252	0.206	0.5	0	85.945	"
34	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	1.976	0.374	2.246	0.209	1.0	0	86.246	"
49	ロ ッ ク A	12-19	63.5	0.42	一 層	3×2	5.2	60	0.72	8	1.886	0.544	2.318	0.257	1.0	0	79.600	作業者B D 30cm モールド
50	"	"	"	"	"	3×2	5.1	"	0.70	"	1.860	0.566	2.281	0.277	0.0	0	79.580	"

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 砕 率		モー ル ド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度	最大間隙化	最大乾燥密度	最小間隙化	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
		注1) #4 Uc. パス	振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)		(Hz)		$\rho_{d,min} \frac{g}{cm^3}$	e max	$\rho_{d,max} \frac{g}{cm^3}$	e min							
51	ロック A	2 - 0	63.5	9.52	一 層	片側 3枚×2	5.1	60	0.70	8	1.556	0.900	1.849	0.599	4.0	1.0	66.379	作業名B D 30cmモールド
52	"	"	"	"	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.544	0.915	1.861	0.589	8.0	1.0	66.373	"
53	"	4 - 5	"	2.00	"	3×2	"	"	"	"	1.682	0.758	2.278	0.298	1.0	0	70.986	"
54	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	1.709	0.730	2.072	0.427	5.0	0	70.994	"
55	"	6 - 11	"	0.84	"	3×2	5.2	"	0.72	"	1.793	0.650	2.185	0.354	3.0	0	75.998	"
56	"	"	"	"	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.742	0.698	2.210	0.338	2.0	0	74.320	"
57	"	20 - 29	"	0.074	"	3×2	5.1	"	0.70	"	1.991	0.463	2.399	0.214	3.0	0	85.601	"
58	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	1.954	0.491	2.416	0.206	2.0	0	85.596	"
59	"	40 - 39	"	"	"	3×2	5.6	"	0.77	"	1.977	0.446	2.417	0.182	1.0	0	82.997	"
60	"	"	"	"	"	3×2	5.2	"	0.72	"	1.983	0.441	2.426	0.178	1.0	0	82.999	"
61	"	50 - 50	"	"	"	3×2	5.1	"	0.70	"	2.006	0.425	2.414	0.184	1.0	0	85.000	"
62	"	"	"	"	"	3×2	5.3	"	0.73	"	2.026	0.411	2.392	0.195	0.0	0	85.000	"
35	ロック B	12 - 19	63.5	0.42	一 層	3×2	5.2	60	0.72	8	1.670	0.475	2.024	0.217	5.0	0.9	71.036	作業名B D30cmモールド
36	"	"	"	"	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.678	0.468	2.031	0.213	5.0	1.0	71.210	"
37	"	2 - 0	"	9.52	"	3×2	5.2	"	0.72	"	1.401	0.759	1.628	0.514	11.0	4.0	61.170	"
38	"	"	"	"	"	3×2	"	"	"	"	1.417	0.739	1.649	0.494	10.7	6.0	61.171	"
39	"	4 - 5	"	2.00	"	3×2	"	"	"	"	1.523	0.618	1.836	0.342	7.1	2.1	63.492	"
40	"	"	"	"	"	3×2	5.6	"	0.77	"	1.515	0.626	1.844	0.336	9.0	2.6	63.460	"
41	"	6 - 11	"	0.84	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.583	0.556	1.930	0.277	6.0	1.0	66.373	"
42	"	"	"	"	"	3×2	5.7	"	0.79	"	1.524	0.617	1.879	0.311	6.0	2.0	65.441	"

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 砕 率		モー ルド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数 注1)=4 Uc.パス	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数 (Hz)	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度 $\rho_{d,min} \frac{g}{cm^3}$	最大間隙化 e max	最大乾燥密度 $\rho_{d,max} \frac{g}{cm^3}$	最小間隙化 e min	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
						振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)											
43	ロ ッ ク B	20 - 29	63.5	0.074	一 層	片側 3枚×2	5.7	60	0.79	8	1.718	0.436	2.086	0.183	6.0	0	73210	作業者B D 30cmモールド
44	"	"	"	"	"	3×2	5.6	"	0.77	"	1.690	0.460	2.083	0.185	4.0	0	73210	"
45	"	40 - 39	"	"	"	3×2	5.1	"	0.70	"	1.738	0.426	2.159	0.148	5.0	0	73904	"
46	"	"	"	"	"	3×2	6.4	"	0.88	"	1.794	0.382	2.176	0.139	4.0	0	76488	"
47	"	50 - 50	"	"	"	3×2	5.2	"	0.72	"	1.780	0.392	2.165	0.145	3.0	0	76756	"
48	"	"	"	"	"	3×2	5.4	"	0.75	"	1.797	0.379	2.166	0.144	1.0	0	76050	"
63	河 床 砂 礫	12 - 19	63.5	0.42	一 層	5×2	5.2	50	1.03	8	2.007	0.368	2.290	0.199	1.0	1.0	201293	作業者B D 50cmモールド
64	"	"	"	"	"	5×2	5.1	"	1.01	"	1.952	0.407	2.270	0.210	1.0	0	201496	"
65	"	2 - 0	"	9.52	"	5×2	4.6	"	0.92	"	1.750	0.601	1.925	0.456	0.0	0	177202	"
66	"	"	"	"	"	5×2	5.0	"	0.99	"	1.760	0.592	1.942	0.443	0.0	0	177035	"
67	"	6 - 11	"	0.84	"	5×2	5.2	"	1.03	"	1.918	0.442	2.183	0.267	0.0	0	191159	"
68	"	"	"	"	"	5×2	4.4	"	0.88	"	1.924	0.438	2.203	0.256	0.0	0	191534	"
69	"	20 - 29	"	0.074	"	5×2	4.6	"	0.92	"	2.074	0.324	2.365	0.161	1.0	0	205930	"
70	"	"	"	"	"	5×2	4.8	"	0.96	"	2.067	0.328	2.367	0.160	2.0	0	204462	"
71	ロ ッ ク A	12 - 19	63.5	0.42	一 層	5×2	4.7	50	0.94	8	1.915	0.521	2.303	0.265	1.0	0	191220	作業者B D 50cmモールド
72	"	"	"	"	"	5×2	4.6	"	0.92	"	1.925	0.513	2.303	0.265	2.0	0	191426	"
73	"	2 - 0	"	9.52	"	5×2	4.8	"	0.96	"	1.619	0.826	1.875	0.577	2.0	0	159521	"
74	"	"	"	"	"	5×2	4.8	"	0.96	"	1.630	0.814	1.914	0.545	1.0	0	159362	"
75	"	6 - 11	"	0.84	"	5×2	4.7	"	0.94	"	1.835	0.612	2.184	0.354	1.0	0	182452	"

[illegible]

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 碎 率		モールド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度	最大間隙比	最大乾燥密度	最小間隙比	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
		注1)≒4 Uc.パス				振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)	(Hz)			$\rho_{d,min} \frac{g}{cm^3}$	e max	$\rho_{d,max} \frac{g}{cm^3}$	e min				
1'	河床砂礫	12-19	63.5	0.42	締固めせず	0	0	0		0	1.936	0.418	-	-	-	-	81.437	作業者B D 30cmモールド
2'	"	"	"	"	"	"	"	"		"	1.929	0.424	-	-	-	-	-	"
3'	"	"	"	"	"	"	"	"		"	1.923	0.515	-	-	-	-	79.760	"
4'	"	"	"	"	"	"	"	"		"	1.887	0.544	-	-	-	-	-	"
5'	"	"	"	"	一層	大 9 中 1	0.3	10	1.5	8	1.891	0.452	1.883	0.458	1.1	0.2	81.234	"
6'	"	"	"	"	"	大 4	0.5	20	0.6	"	1.885	0.457	1.886	0.456	1.2	0.2	81.275	"
7'	"	"	"	"	"	大 11	2.0	"	2.5	"	1.894	0.450	2.240	0.226	1.9	0.3	81.315	"
8'	"	"	"	"	"	大 13 小 1	1.9	"	2.4	"	1.879	0.461	2.242	0.225	2.1	0.5	81.234	"
9'	"	"	"	"	"	大 18	3.2	"	4.0	"	1.906	0.441	2.199	0.249	3.2	0.9	81.397	"
10'	"	"	"	"	"	大 1	0.3	30	0.2	"	1.937	0.418	2.279	0.205	4.0	0.0	81.275	"
11'	"	"	"	"	"	大 14	4.8	"	2.7	"	1.926	0.426	2.291	0.199	-	-	-	"
12'	"	"	"	"	"	大 19	6.3	"	3.5	"	1.900	0.445	2.230	0.231	-	-	-	"
13'	"	"	"	"	"	大 1	0.5	40	0.2	"	1.882	0.459	1.910	0.438	3.4	1.1	-	"
14'	"	"	"	"	"	大 2	0.9	"	0.3	"	1.892	0.451	2.087	0.316	3.2	0.3	-	"
15'	"	"	"	"	"	大 4	2.2	"	0.7	"	1.910	0.438	2.246	0.223	5.0	0.6	81.073	"
16'	"	"	"	"	"	大 5	2.7	"	0.8	"	1.931	0.422	2.246	0.223	2.1	0.8	81.315	"
17'	"	"	"	"	"	大 2	0.6	50	0.1	"	1.932	0.421	1.991	0.379	2.2	0.4	81.145	"
18'	"	"	"	"	"	大 1 小 1	0.9	"	0.2	"	1.922	0.429	2.118	0.296	2.3	0.7	81.234	"
19'	"	"	"	"	"	大 3 小 1	2.9	"	0.6	"	1.944	0.413	2.279	0.206	3.0	1.0	81.275	"
20'	"	"	"	"	"	小 2	1.1	60	0.2	"	1.919	0.431	2.080	0.320	1.6	0.8	81.154	"
21'	"	"	"	"	"	大 4	5.0	"	0.7	"	1.926	0.426	2.291	0.198	2.0	0.6	81.275	"

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度 (振動前)		最大密度 (振動後)		破 碎 率		モールド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数 注1) =4 U _c パス	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数 (Hz)	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度 $\rho_{d,min}$ $\frac{g}{cm^3}$	最大間隙比 e max	最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ $\frac{g}{cm^3}$	最小間隙比 e min	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
						振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)											
22'	河床砂礫	12 - 19	63.5	0.42	極別	中 1	0.6	60	0.1	48	-	-	2.290	0.199	0.8	0.2	81.152	作業者B D 30cmモールド
23'	"	"	"	"	"	大 1	1.8	60	0.2	"	-	-	2.293	0.197	2.5	0.2	81.152	"
24'	"	"	"	"	"	大中小 各 5	2.4	"	0.3	"	-	-	2.289	0.200	1.3	0.3	81.274	"
25'	"	"	"	"	"	大 2	3.4	"	0.5	"	-	-	2.261	0.215	1.8	1.0	81.518	"
26'	"	"	"	"	"	大 5	5.0	"	0.7	"	-	-	2.263	0.213	3.0	1.1	81.152	"
27'	"	"	19.1	9.52	一箇	大中 1 中 1	0.5	30	0.3	8	1.566	0.754	1.572	0.747	1.1	1.1	66.267	"
28'	"	"	"	"	"	大中 5 中 1	1.0	"	0.6	"	1.599	0.761	1.711	0.551	1.1	1.1	66.333	"
29'	"	"	"	"	"	大中 13 中 1	5.4	"	3.0	"	1.574	0.744	1.788	0.536	0.5	0.5	66.517	"
30'	"	"	"	"	"	中 1	0.9	60	0.1	"	1.573	0.745	1.644	0.670	1.5	1.5	66.532	"
31'	"	"	"	"	"	大 1	2.6	"	0.4	"	1.581	0.737	1.777	0.545	0.2	0.2	66.466	"
32'	"	"	"	"	"	大 3	4.6	"	0.6	"	1.580	0.738	1.804	0.522	0.8	0.8	66.466	"
33'	ロック A	12 - 19	63.5	0.42	一箇	大中 9 中 1	0.4	10	2.0	8	1.884	0.546	1.910	0.525	2.1	0.9	79.285	作業者B D 30cmモールド
34'	"	"	"	"	"	大 4	0.7	20	0.9	"	1.881	0.549	1.912	0.524	0.9	0.1	79.324	"
35'	"	"	"	"	"	大中 9 中 1	1.6	"	2.0	"	1.888	0.543	2.203	0.322	1.3	0.4	79.641	"
36'	"	"	"	"	"	大中 13 中 1	2.4	"	3.0	"	1.856	0.570	2.275	0.280	1.7	0.5	79.680	"
37'	"	"	"	"	"	大中 18 中 1	3.3	"	4.1	"	1.837	0.585	2.309	0.262	2.3	1.1	79.720	"
38'	"	"	"	"	"	大中 1 中 1	0.6	"	0.7	"	1.854	0.571	1.868	0.559	1.1	0.2	79.561	"
39'	"	"	"	"	"	大中 4 中 1	1.9	30	1.1	"	1.844	0.579	2.207	0.320	2.1	0.2	79.641	"
40'	"	"	"	"	"	大 7	2.8	"	1.5	"	1.849	0.575	2.287	0.274	3.6	0.6	79.641	"
41'	"	"	"	"	"	大中 9 中 1	3.8	"	2.1	"	1.863	0.564	2.312	0.261	3.1	0.8	79.720	"

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 砕 率		モー ル ド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数 注1）≒4 Uc. パス	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数 (Hz)	注2） 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度 $\rho_{d,min} \frac{g}{cm^3}$	最大間隙比 e max	最大乾燥密度 $\rho_{d,max} \frac{g}{cm^3}$	最小間隙比 e min	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
						振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)											
42'	ロ ッ ク A	12-19	63.5	0.42	一 屈	大 中 13 1	5.3	30	2.9	8	1.861	0.565	2.310	0.261	2.7	1.5	79.680	作業者B D 30 cm モールド
43'	"	"	"	"	"	中 1	0.3	40	0.1	"	1.889	0.542	1.918	0.519	1.9	0.2	79.680	"
44'	"	"	"	"	"	大 中 1 1	1.0	"	0.3	"	1.899	0.534	1.953	0.492	1.1	0.2	79.641	"
45'	"	"	"	"	"	大 中 3 1	3.5	"	1.1	"	1.879	0.550	2.250	0.295	1.6	0.2	79.641	"
46'	"	"	"	"	"	大 中 5 1	5.2	"	1.6	"	1.888	0.543	2.293	0.270	2.5	0.5	79.680	"
47'	"	"	"	"	"	大 8	5.5	"	1.7	"	1.901	0.532	2.326	0.252	1.9	1.0	79.522	"
48'	"	"	"	"	"	中 1	0.4	50	0.1	"	1.896	0.536	1.960	0.487	2.0	0.2	79.748	"
49'	"	"	"	"	"	大 中 1 1	1.7	"	0.3	"	1.892	0.540	2.182	0.335	1.2	0.2	79.601	"
50'	"	"	"	"	"	大 中 2 1	2.3	"	0.5	"	1.905	0.529	2.281	0.277	2.1	0.3	79.641	"
51'	"	"	"	"	"	大 中 3 1	3.4	"	0.7	"	1.897	0.536	2.310	0.261	1.1	0.3	79.522	"
52'	"	"	"	"	"	大 5	5.0	"	1.0	"	1.897	0.536	2.348	0.241	2.3	0.6	79.704	"
53'	"	"	"	"	"	大 1	1.7	60	0.2	"	1.894	0.538	2.173	0.341	1.1	0.2	79.641	"
54'	"	"	"	"	"	大 中 1 1	2.4	"	0.3	"	1.895	0.575	2.268	0.284	1.8	0.1	79.641	"
55'	"	"	"	"	"	大 2	3.6	"	0.5	"	1.890	0.541	2.286	0.274	-	-	79.680	"
56'	"	"	"	"	屈 別	中 1	0.8	"	0.1	48	-	-	2.150	0.355	0.7	0.2	79.640	"
57'	"	"	"	"	"	大 1	1.8	"	0.2	"	-	-	2.328	0.251	2.1	0.4	79.720	"
58'	"	"	"	"	"	大 中 1 1	2.2	"	0.3	"	-	-	2.373	0.228	2.2	0.6	79.442	"
59'	"	"	"	"	"	大 2	3.4	"	0.5	"	-	-	2.389	0.219	2.9	0.7	79.720	"
60'	"	"	"	"	"	大 3	4.8	"	0.7	"	-	-	2.332	0.249	-	-	79.680	"
61'	ロ ッ ク B	12-19	63.5	0.42	一 屈	大 3	5.5	60	0.8	8	1.580	0.570	1.975	0.233	1.2	0.2	67.013	作業者B D 30 cm モールド

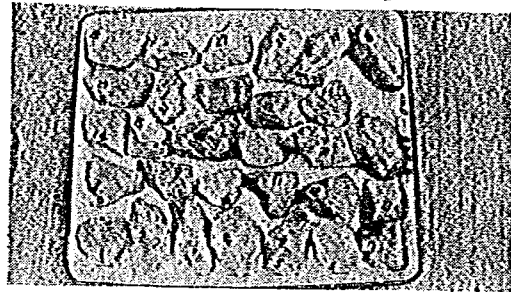
[illegible]

試料 番号	試 料 名	粒 度			締固め方法	振 動 条 件					最小密度（振動前）		最大密度（振動後）		破 砕 率		モールド 投入重量 乾燥重量 g	備 考
		均等係数 注1) = 4 Uc.パス	最大 粒径 (mm)	最小 粒径 (mm)		加 速 度		振動数 (Hz)	注2) 全振巾 (mm)	振動 時間 (min)	最小乾燥密度 $\rho_{d.min} \frac{g}{cm^3}$	最大間隙比 e max	最大乾燥密度 $\rho_{d.max} \frac{g}{cm^3}$	最小間隙比 e min	Marsalの 方法 BM	Leslieの 方法 BL		
						振子枚数 (枚)	加 速 度 (G)											
S-5	ロック B	12 - 19			下振式		5.53	60		8	1.725	0.551	2.098	0.279	2.9	1.0	73.511	作業者C D 30cmモールド
S-6	"	2 - 0			"		5.87	"		"	1.498	0.81	1.782	0.565	4.7	1.3	61.018	"
S-7	"	12 - 40			"		5.87	"		"	1.757	0.505	2.101	0.258	3.2	1.7	73.926	"
H-5	ロック A	12 - 40			下振式		3.51	30		8	1.926	0.481	2.279	0.252	2.6	1.5	83.156	作業者C D 30cmモールド
H-6	"	2 - 19			"		5.68	60		"	1.909	0.526	2.302	0.265	2.1	0.4	78.410	"
H-7	"	12 - 0			"		5.64	"		"	1.632	0.812	1.885	0.569	1.6	0.5	65.256	"
H-8	"	12 - 40.			"		5.38	"		"	1.923	0.486	2.347	0.218	2.2	0.9	83.978	"
L-17	ロック C	12 - 19			下振式			60		8	-	-	1.865	0.303	2.4	0.7	80.594	作業者C D 30cmモールド
L-18	"	"			"		3.63	30		"	1.553	0.565	1.890	0.286	2.5	0.9	66.365	"
L-19	"	"			"		5.34	60		"	1.534	0.584	1.901	0.278	3.1	0.8	"	"
L-20	"	"			"			"		"	-	-	1.926	0.262	3.5	1.4	66.359	"
L-21	"	2 - 0			"		5.91	"		"	1.325	0.819	1.565	0.540	2.8	0.9	55.600	"
L-22	"	12 - 40			"		5.53	"		"	1.636	0.477	1.985	0.217	4.2	1.3	68.842	"

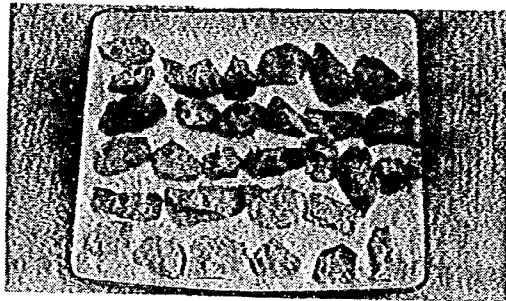
参考資料 - 2

試料の写真

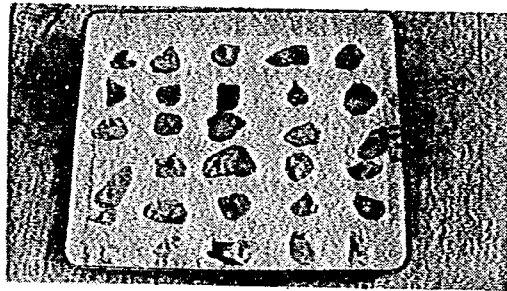
ロックA



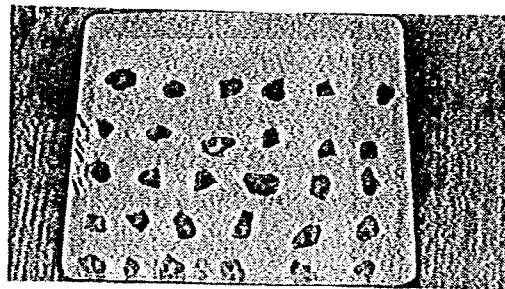
63.5 ~ 50.8mm



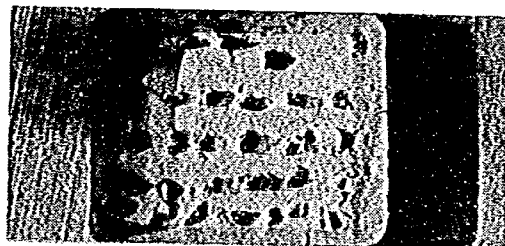
50.8 ~ 38.1mm



38.1 ~ 25.4mm

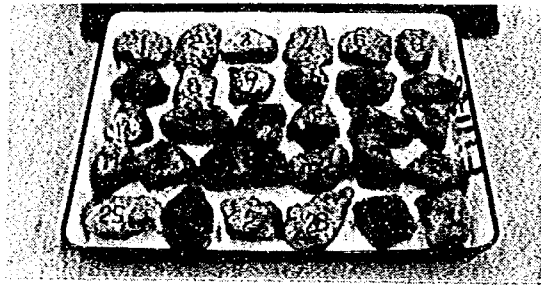


25.4 ~ 19.1mm

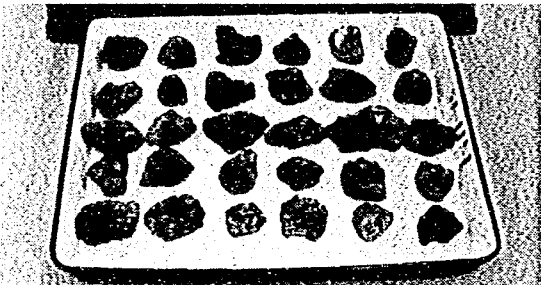


19.1 ~ 9.52mm

ロック B



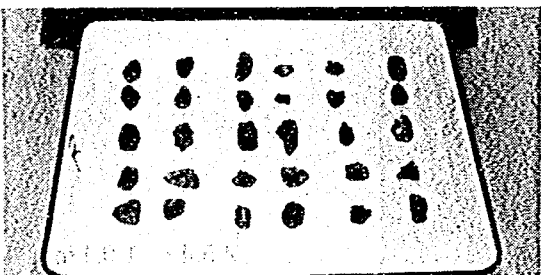
6 3.5 ~ 5 0.8mm



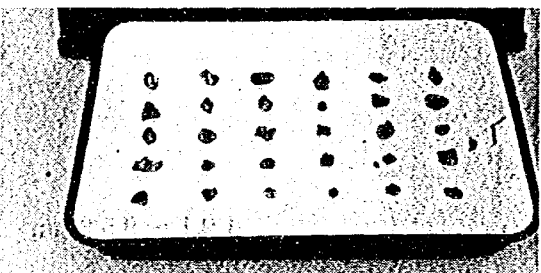
5 0.8 ~ 3 8.1mm



3 8.1 ~ 2 5.4mm

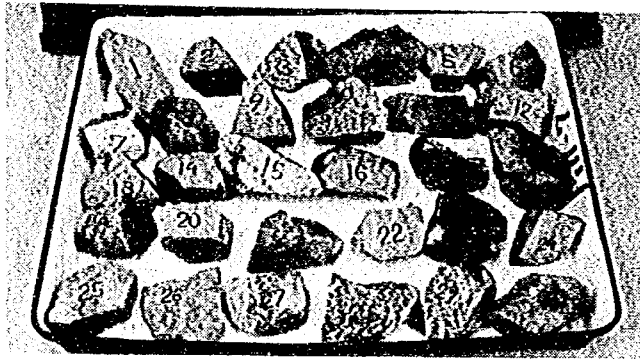


2 5.4 ~ 1 9.1mm



1 9.1 ~ 9.5 2mm

ロック C



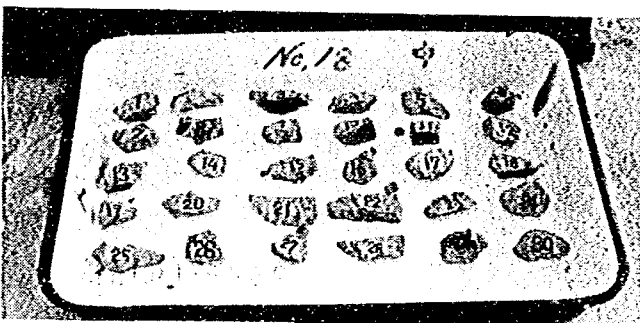
63.5 ~ 50.8 mm



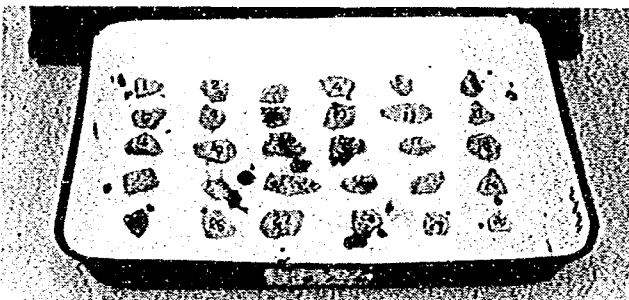
50.8 ~ 38.1 mm



38.1 ~ 25.4 mm

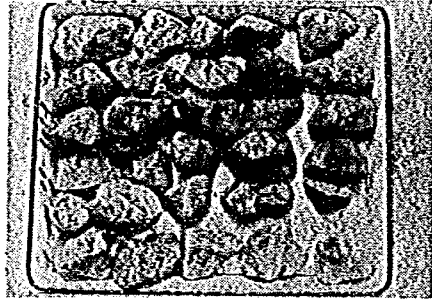


25.4 ~ 19.1 mm

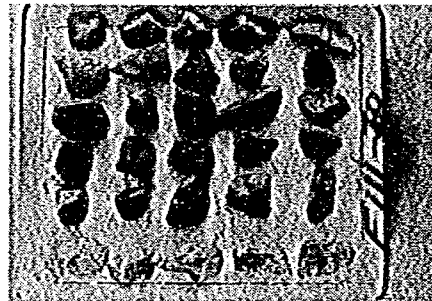


19.1 ~ 9.52 mm

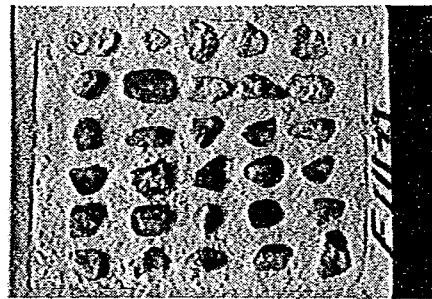
河床砂礫



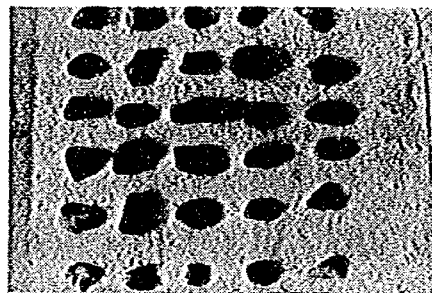
63.5 ~ 50.8mm



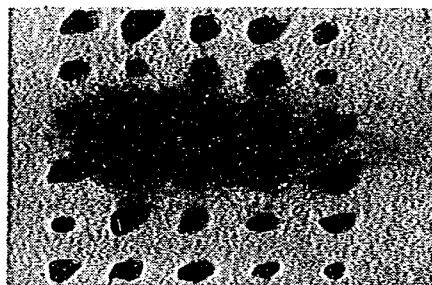
50.8 ~ 38.1mm



38.1 ~ 25.4mm



25.4 ~ 19.1mm



19.1 ~ 9.52mm

ロック材料の相対密度試験

ISSN 0386-5878

〔英文の題

土研資料第1757号

Experiments on relative density of rockfill material.

昭和57年1月

キーワード ロック材料, 相対密度

松本 徳久

豊田 光雄

要 旨

本報告はロック材料の相対密度を求めるための、最大・最小密度試験を実施し、この試験結果をとりまとめたものである。

- ① 最大密度試験における、振動締め固め条件（振幅、振動継続時間、振動数、モールド径、層厚）と得られる密度の関係
- ② 最小密度試験における投入回数、モールド径と得られる最小密度の関係
- ③ 以上の最大、最小密度試験における密度とロック材料の粒度、粒子形状、岩質の関係
- ④ 以上により定義される強度定数の関係

郵便はがき

下を40円
さいつ切
いて手

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所

ダム部フィルダム研究室御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 1757 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印