

土 木 研 究 所 資 料

ロック材料の三軸供試体の締固め 方法に関する検討

昭和63年1月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

「Copyright ©(1988) by P. W. R. I

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

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

ロック材料の三軸供試体の締固め 方法に関する検討

フィルダム研究室 室長 松本 徳久
〃 研究員 豊田 光雄
ダム構造 〃 〃 渡辺 和夫

要旨

本報告は、ロック材料の三軸供試体を突固め試験機および電気ハンマーで作製した供試体内の均一性と、この供試体を用いて三軸試験を行ったことについて述べたものである。

この結果、この2種類の締固め機械では供試体下部ほど密度がやや大きくなり、供試体上端面から細粒分が少なくなること、とくに突固め試験機では供試体上端面のゆるみが生じ、低側圧、低ひずみ時の変形係数が電気ハンマーで作製したものより小さくなる。しかし、せん断強度においては2種類の締固め機械による差が少ないことがわかった。

キーワード

ロック材料、三軸供試体、供試体内の密度および粒度分布、せん断強度、変形係数

目 次

1. はじめに	1
2. 供試体の作製方法の現状	2
3. 締固め機種と供試体内の密度分布および粒度分布	3
3. 1 締固め方法	3
(1)締固め装置	3
(2)試験材料	4
(3)供試体の作製方法および密度、粒度分布の測定法	6
3. 2 試験結果と考察	9
(1)締固めを与えない状態	9
(2)突固め試験機による締固め	12
(3)電気ハンマーによる締固め	18
4. 締固め機種とせん断強度等の比較	26
4. 1 三軸圧縮試験方法	26
4. 2 試験結果と考察	27
5. まとめ	31
6. 謝辞	32
7. 参考文献	32
8. 参考資料	33

1. はじめに

現在、ロック材料のせん断強度を求める一方法として主に三軸圧縮試験が行われている。ロック材料の三軸圧縮試験では、多くの場合、直径30cm、高さ60cm程度の供試体寸法で、最大粒径を63.5mm程度、最小粒径を0.074mmとして、粒度および間隙比をいくつか変えて試験している。その供試体の作製方法にあたっては、振動テーブルによる振動締固め、ランマーの自由落下による突固め、油圧シリンダ等により圧縮荷重を与える方法などがある。

三軸圧縮試験用供試体の作製では、締固めによって粒子が破碎せず、大小粒径の分離が生じず、供試体の上端から下端までの密度分布および粒度分布にバラツキがない方が好ましいと言える。例えば、振動テーブルを利用して供試体を作製した場合に供試体上部と下部でかなりの密度差および粒度のちがいが生じた事例¹⁾がある。また、供試体の上部および下部の密度差のちがった供試体を用いた三軸圧縮試験では、せん断抵抗角の値が約6度もちがった研究事例²⁾がある。

本報告は、衝撃による締固めに着目し、供試体作製によく利用されている突固め試験機および電気ハンマーで三軸圧縮試験用供試体を作製し、供試体内の密度分布および粒度分布を調べるとともに締固め機種のちがいによるせん断強度および変形係数の比較を行い考察を加えてまとめたものである。

2. 供試体の作製方法の現状

三軸圧縮試験用供試体を所定の密度に締固めるために、①衝撃による締固め、②振動による締固め、③静的荷重による締固めの3つの方法あるいは、これらを組み合わせた方法が用いられている。

フィルダムのロック材の締固めを行う場合には、次の条件をできるだけ満すことが望ましい。

- 締固め後の粒度は、粒子破砕が少なく締固め以前の粒度と変わらないこと。
- 締固め後の密度と締固めエネルギーとの関係が明瞭であること。
- 実際のロック材料の盛立現場と同じ、または類似な締固め機構であること。
- 所定密度に締固めることが容易なこと。
- 試験装置が簡単であること。

以上のことを踏まえて上記の①、②、③の締固め方法を比較検討すれば、表-1に示すようにそれぞれ一長一短があるが、三軸圧縮試験用供試体では①、②の方が好ましく、今回は①の衝撃による締固め方式を検討することにした。

表-1 三軸圧縮試験用供試体の締固め方法

締 固 め 方 法				機 械	利 点	問 題 点	備 考
①	衝撃	ランマーの自由落下	・供試体上面にランマーの自由落下を与えて締固める	突固め試験機	・突固めエネルギーの算出が簡単 (ブロッタの締固めの定義)	・粒子破砕が大きい。 均等係数が小さいと破砕率はかなりのものとなる	・土の締固めに良く用いられる
		電気ハンマー	・供試体上部に電気ハンマーを置きハンマーのくり返し衝撃力によって締固める	電気ハンマー	・所定の密度が短時間に得られる	・突固めエネルギーの算定が難しい	
②	振動	上 載 式	・供試体上端面にバイブレータを置き締固める ・振動によって粒子の再配列をおこさせる	バイブレータ	・粒子破砕が他の方法に比べ少なく締固め前と同じ粒度で試験ができる	・締固めエネルギーの算定および評価が難しい ・供試体の材料が粗粒細粒分に分離しやすい	・ダム現場におけるロック材の締固め機構(振動ローラ)と同じ
		下 振 式	・ “ ” ・振動テーブルの上に供試体をのせ、振動テーブルを上下に振動させて締固める	振動テーブル			
③	静的	圧縮荷重	・圧力によって試料を押固める	重錘 油圧シリンダ	・荷重および圧力と密度の関係が明確	・粒子破砕が伴う。 ・最大密度を得る場合には他の方法に比べかなり大きな装置が必要	・CBR試験における供試体の締固めに用いられる

3. 締固め機種と供試体内の密度分布および粒度分布

3. 1 締固め方法

(1) 締固め装置

締固め装置には室内試験で良く用いられている突固め試験機と電気ハンマーを用いた。突固め試験装置を図-1、写真-1に示す。本装置はランマーの自由落下によって供試体を突固めるものである。

ランマーの落下高およびランマー重量は可変である。

電気ハンマーは表-2に示す仕様をもち、1分間に950回転のハンマーによる衝撃荷重を与え、突固め試験機と同様に供試体の上部から締固めを行うもので電気ハンマーの総重量は33kgfある(写真-2)。

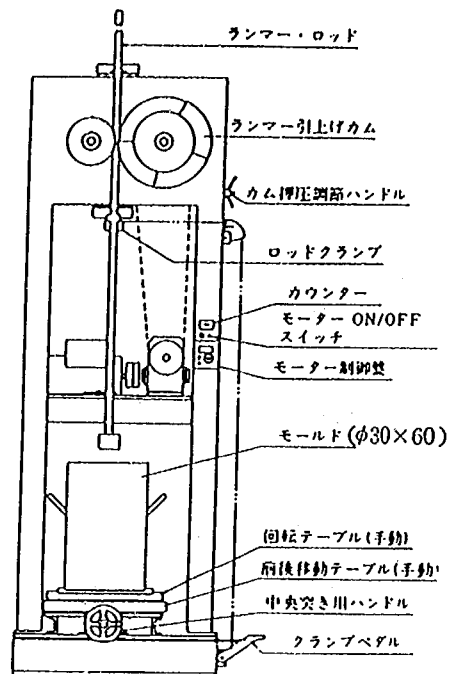


図-1 突固め試験機

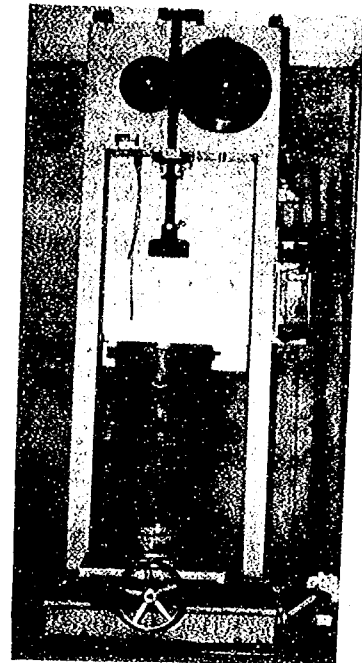


写真-1 突固め試験機の使用状況

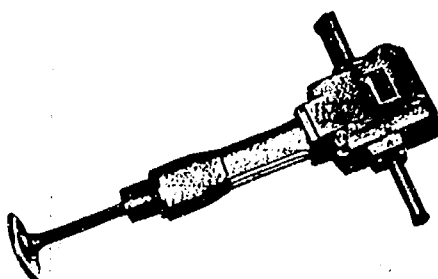


写真-2 電気ハンマー

表-2 電気ハンマーの仕様

項目	仕様
名称	日立電気ハンマー PH-85 型
使用電源	単相交流 50/60 Hz 電圧 100 V 又は 200 V, 電流 14 A (100 V), 7 A (200 V)
全負荷打撃数	毎分 950 回
電動機	保護形単相直巻整流子電動機
重量	33 kgf

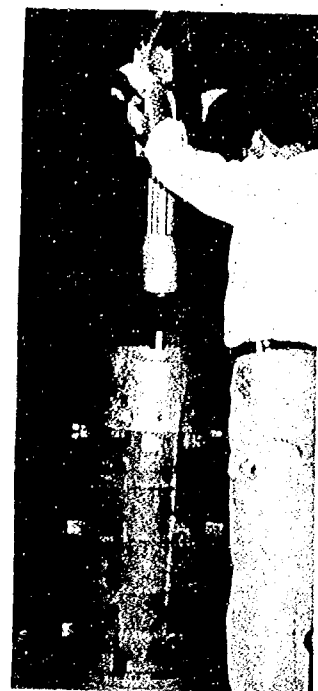


写真-2 電気ハンマーの使用状況

(2) 試験材料

試験材料には比較的堅硬な材料であるロック材料（石英安山岩）を用いた。比重および吸水量は表-3，図-2に示すように，絶乾比重2.574，吸水量3.3%である。

表-3 比重および吸水量

粒 径 (mm)	残留率 f i (%)	比 重			吸水量 Q i (%)
		真比重 Gg	絶乾比重 Gb	表乾比重 Ga	
63.5-50.8	6	2.701	2.583	2.627	1.685
50.8-38.1	10	2.715	2.551	2.611	2.368
38.1-25.4	19	2.736	2.546	2.615	2.718
25.4-19.1	14	2.749	2.527	2.607	3.211
19.1-9.52	22	2.778	2.490	2.594	4.163
9.52-4.76	10	2.786	2.469	2.583	4.602
4.76-2.00	9	2.805	—	—	—
2.00-0.84	7	2.798	—	—	—
0.84-0.42	3	2.794	—	—	—
平 均		2.574			3.309

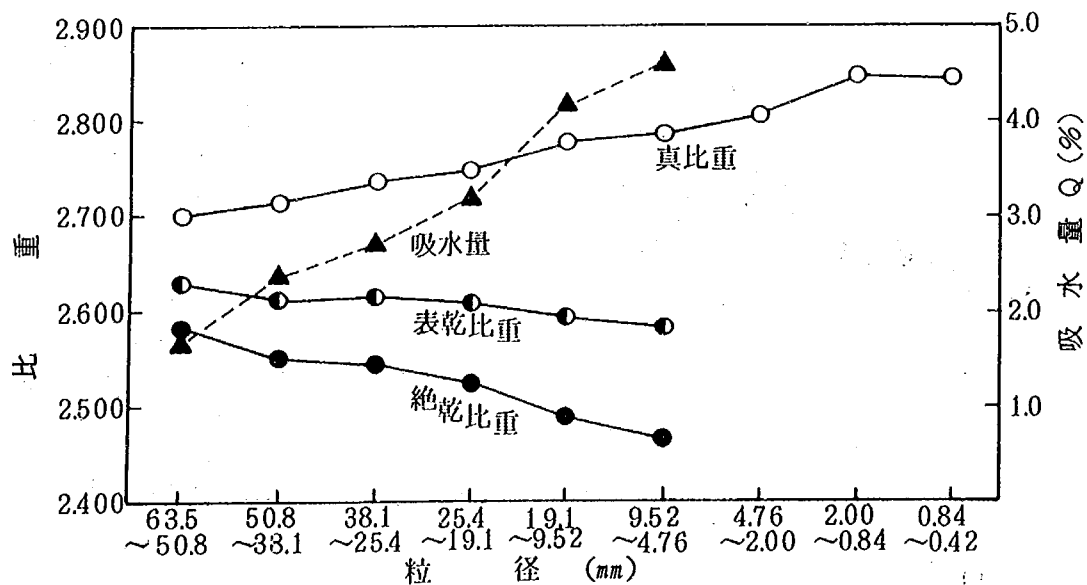
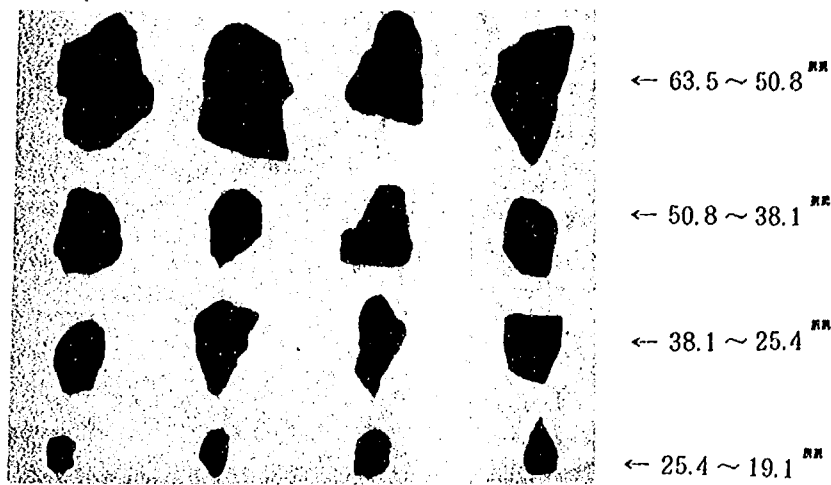


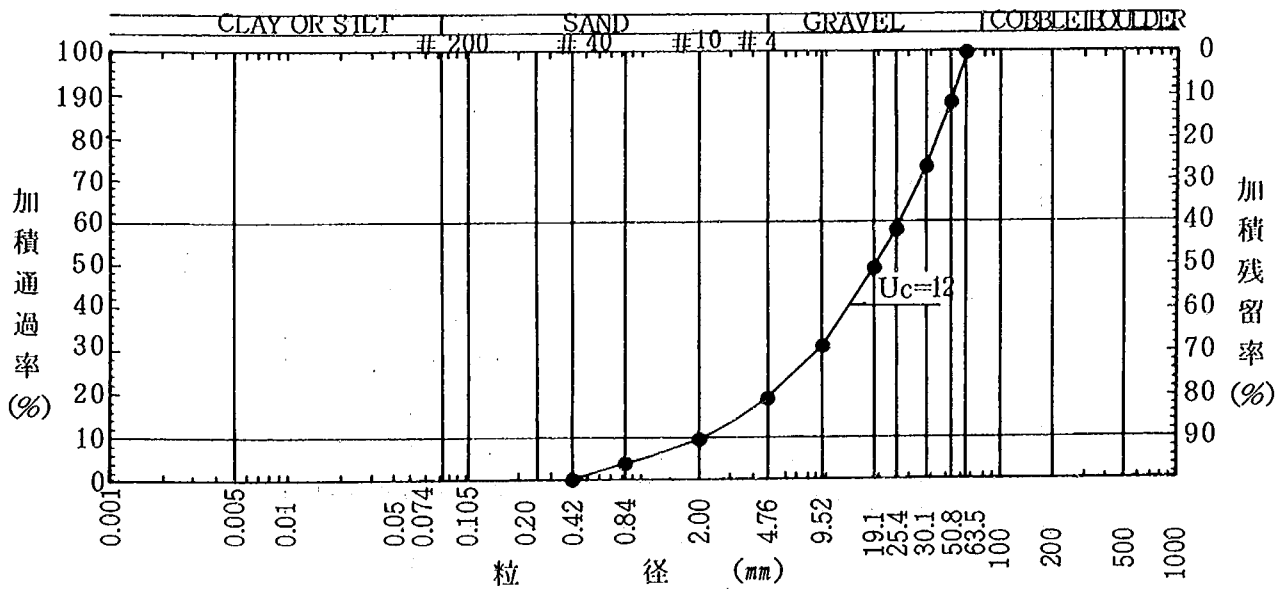
図-2 粒径と比重および吸水量

石英安山岩の粒子形状を写真－3に示す。



写真－3 粒子形状

試験粒度を図－3に示す。均等係数が12，4.76mm通過率が19％である。



粒 径 (mm)	63.5～ 50.8	50.8～ 38.1	38.1～ 25.4	25.4～ 19.1	19.1～ 9.52	9.52～ 4.76	4.76～ 2.00	2.00～ 0.84	0.84～ 0.42
加 積 残 留 率(%)	6	16	35	49	71	81	90	97	100
各粒径毎の 残留率(%)	6	10	19	14	22	10	9	7	3
最大粒径	63.5mm	D ₆₀ 粒径 24mm		D ₁₀ 粒径 2mm		均等係数 12		4.76mmの 19	
最小粒径	0.42mm	通過率							

図－3 粒径加積曲線

(3) 供試体の作製方法および密度、粒度分布の測定方法

突固め試験機および電気ハンマーによる供試体の作製手順のフローチャートを図-4に示す。

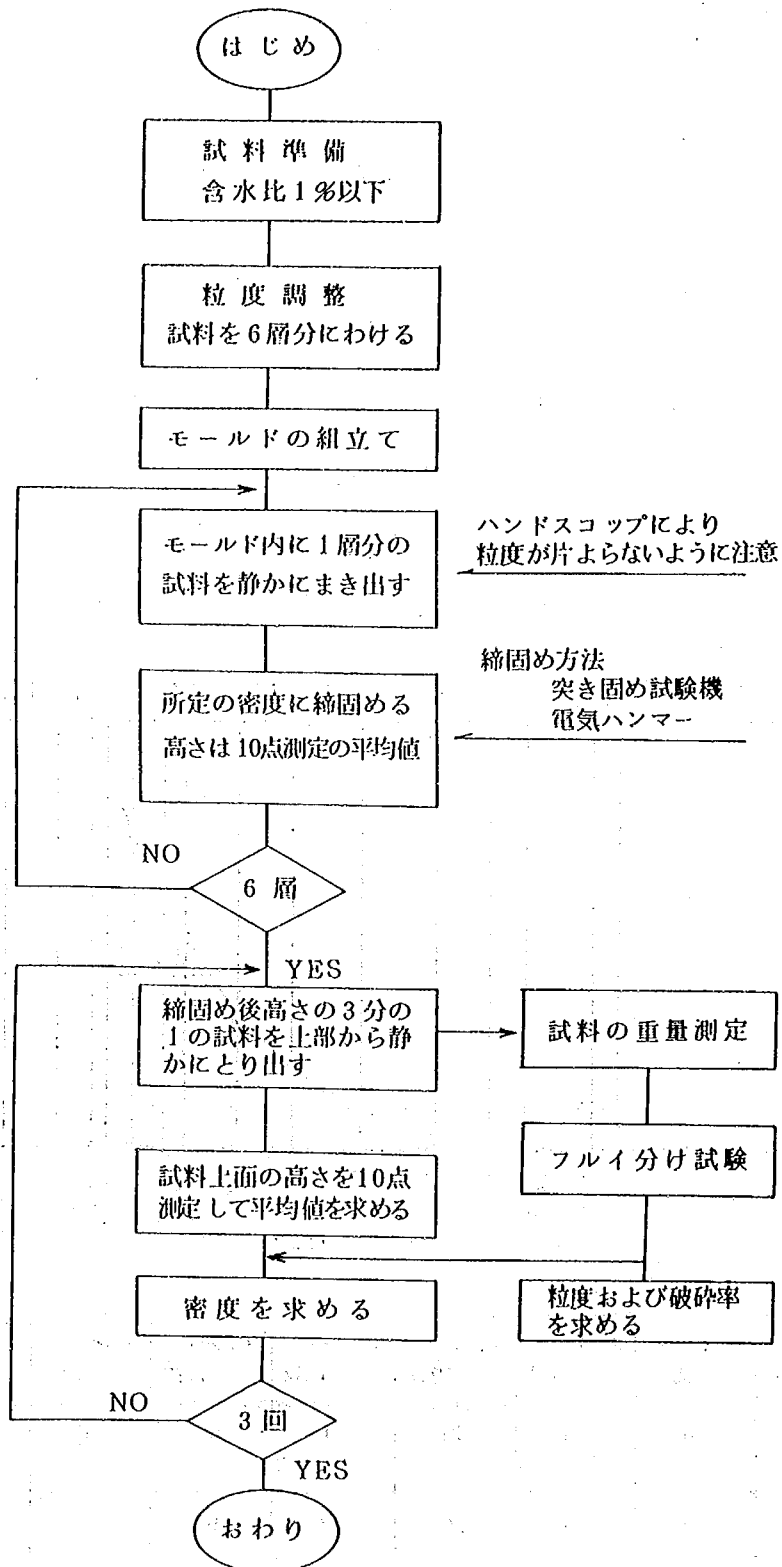


図-4 供試体の作製手順および密度、粒度分布調査手順

- ① 直径30cm, 高さ60cmの供試体用の試料準備を行う。このときの含水比は1%以下とする。
- ② 粒径63.5, 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.76, 2.00, 0.84, 0.42mm毎に分けられた試料を一層分毎(合計6層分)に混合する。
- ③ 一層分の試料をモールド内にハンドスコップを用いて落下高さを小さくして試料を静かに投入する。
- ④ 投入後, 供試体表面を水平にし, 突固め試験機または電気ハンマーによって供試体表面から締固める。締固め後, 供試体高さを10点読み取り平均値を求めて一層毎の密度を求める。なお, 供試体高さの測定後, 層別の密度調査を行うために各層の境界がわかるように目印の紙片を入れる。
- ⑤ ②～④までを6回繰り返し供試体を作製する。

供試体作製後の密度分布の調査および粒度分布は次の手順に従う。

- ⑥ 締固め後, 供試体高さの約3分の1ずつ(目印の紙片のところまで)を供試体上部から取り出し, このときの供試体高さを読み取り, 密度を求める。取り出した試料の重量をはかり, それを木杵ふるいでふるい分け, 各粒度毎に残留率を求める。
- ⑦ これを3回繰り返し, 供試体上部, 中央部, 下部の密度分布および粒度分布を求める。

所定の密度に締固めるために, 突固め試験では突固めエネルギーを0.5, 1.0, 2.0ECの3種類に変えた。突固めエネルギー(Ec)は次に示すプロクタの定義によった。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (\text{m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3)$$

W_R : ランマー重量(kgf)

N_B : 層当りの突固め回数

H : ランマー落下高(m)

N_L : 層の数

V : モールドの容量

(締固め供試体の体積)(m^3)

$$1 \text{ EC} \approx 5.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf}/\text{m}^3$$

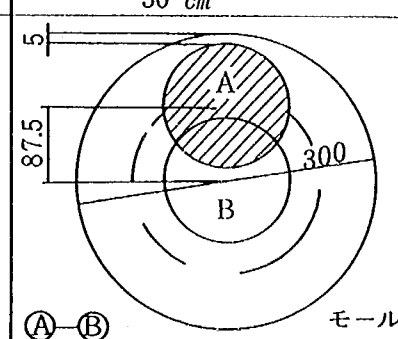
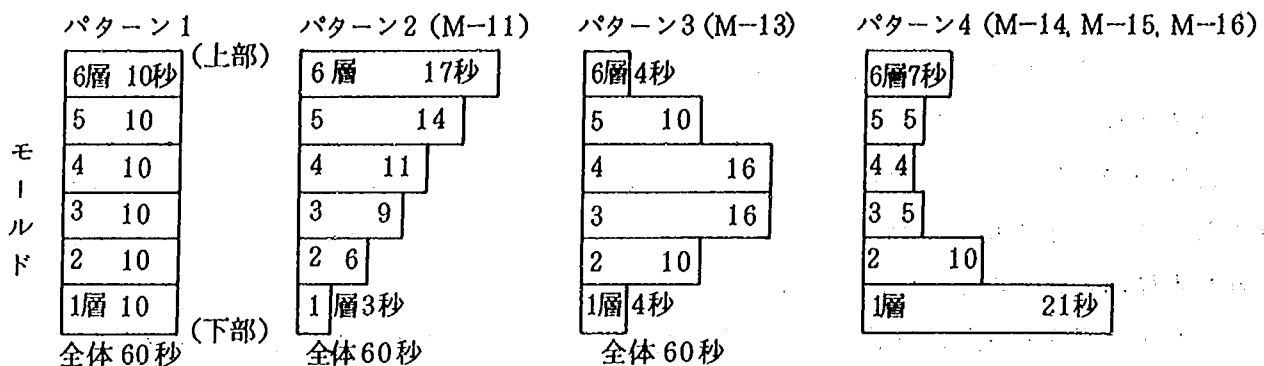
ランマー直径	$\phi 150 \text{ mm}$	
ランマー重量	15 kg	
ランマー落下高	50 cm	
突固めパターン		
	突固めエネルギー	
0.5 EC	(B-1回, A-9回)×2	B-1 A-7 (28)
1 EC	(B-1, A-9)×5	B-1 A-4 (55)
2 EC	(B-1, A-9)×11	(110)

図-5 突固めパターン

図-5に各エネルギー毎の突固めパターン(突固め位置)を示す。この実験に使用したランマー直径15cm, 重量15kgおよびランマーの落下高さ50cmについてはフィルダム研究室で行った粗粒材料の試験結果³⁾を踏えて決定した。

電気ハンマーでは、供試体上面に厚さ8mm、直径280mmの鉄板をのせ、その上に電気ハンマーをのせて図-6に示すように各層毎に締固め時間を変えて作製した。このうち、締固めパターン4は各層毎に間隙比が一様になるように高さを規定していく方法である。この方法では1層目の締固め時間が多くなり、上層に行くに従い締固め時間が少なくなる。密度を求めるための供試体高さの読み取りは、読み取り精度1mmの鋼尺を用いて図-7に示す10点を測定した。

粒度分布の測定には木杵ふるいを用いてふるい分け、破碎率はMarsalの破碎率を用いた。



パターン1、2、3は層毎に時間を固定し締固める

パターン4は各層毎に同一間隙比になるように高さを規定し、締固め時間を変える方法

図-6 締固めパターン (層別の締固め時間)

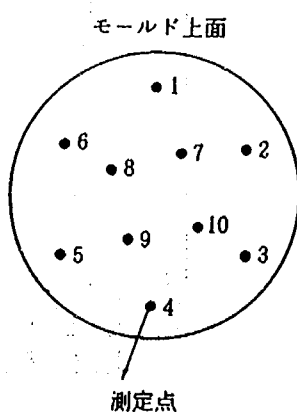


図-7 供試体高さの測定ポイント

3. 2 試験結果と考察

(1) 締固めを与えない状態

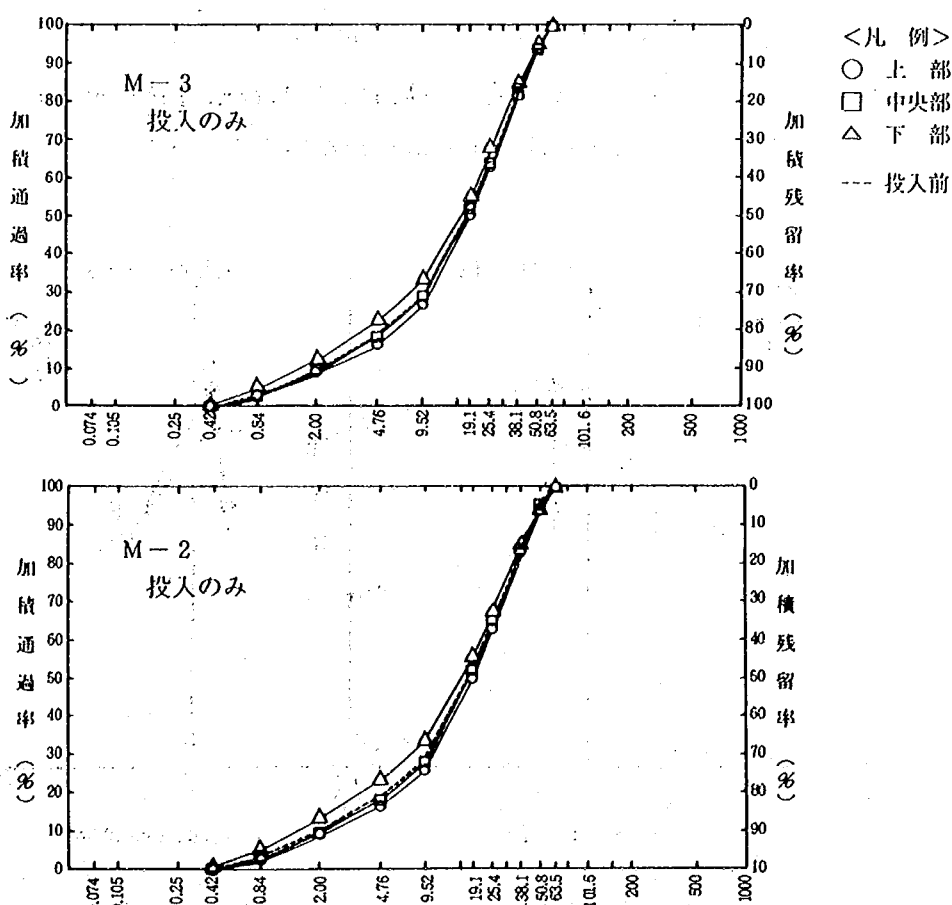
供試体上部、中央部および供試体下部の間隙比を表-4に示す。供試体上部、中央部、下部の間隙比は供試体の平均間隙比とほぼ等しく、供試体の密度は一様であると考えられる。

表-4 締固めを与えない状態における供試体内部の間隙比

試験番号	全体平均	供試体下部	供試体中央部	供試体上部
M-3	0.675 (100)	0.649 (104)	0.723 (93)	0.653 (103)
M-2	0.676 (100)	0.634 (106)	0.700 (96)	0.696 (97)

()内は供試体下部、中央部、上部の間隙比が供試体平均に対する割合(パーセント)

密度測定後に、各部から取り出したものをふるい分けて粒度曲線に示すと、図-8のようになる。供試体下部、供試体中央部、供試体上部の順に下部ほど細粒分の多い粒度曲線になっている。



これらの粒度曲線から供試体下部，中央部，上部の均等係数および4.76mm以下の細粒分の通過率を求めて表-5に示す。投入後の均等係数は供試体下部が中央部および上部に比べ大きく，試験前の均等係数とは供試体中央部ではほぼ等しい。一方，4.76mm粒径以下の細粒分は供試体下部が中央部および上部に比べ多く，試験前とは供試体中央部ではほぼ等しい。

表-5 締固めを与えない状態における各部毎の均等係数
および4.76mm粒径の通過率

(均等係数)

試験番号	試験前 均等係数	供試体 下部	供試体 中央部	供試体 上部
M-3	12	14 ₂	11 ₋₁	11 ₋₁
M-2	12	16 ₄	12 ₀	10 ₋₂

(4.76mm粒径通過率)

試験番号	試験前 通過率	供試体 下部	供試体 中央部	供試体 上部
M-3	19	22 ₃	18 ₋₁	17 ₋₂
M-2	19	23 ₄	18 ₋₁	16 ₋₃

*右下の数字は試験前に対する差を示す。

図-9は，縦軸に間隙比をとり，横軸に均等係数および4.76mm通過率を示したものである。間隙比と均等係数および4.76mm通過率とはあまり関係がないようである。

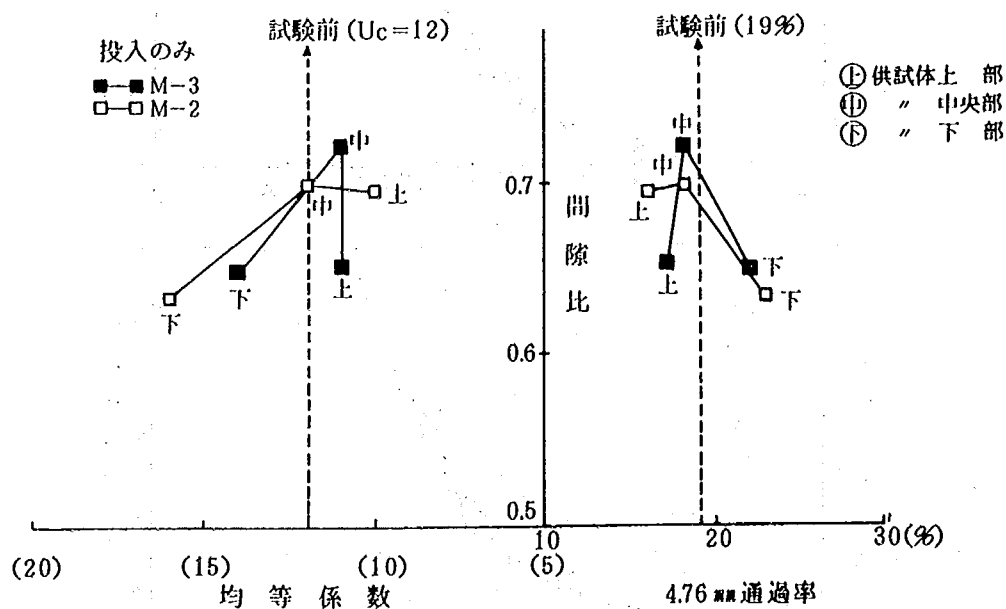


図-9 間隙比と均等係数および4.76mm通過率との関係

さらに、小さい粒子の動きを確かめるために供試体上部、中央部、下部の境界にそれぞれ網目が約8mmの網を入れた。表-6は、粒径9.52mmよりも大きい粒子が動かないものとして、各部毎の残留率を比較したものである。すなわち、63.5~9.52mmまでの残留率の合計は各部等しい。変動があるのは2.00mm以下であり、供試体上部から中央部に、中央部から下部に2.00mm以下の粒子が投入状態でも動いていることがわかる。

また、目視によって投入後の粒子の散らばり具合をみるために、6層投入後にモールドを開いた結果を写真-4に示す。すなわち、大小の粒子が適当に散らばっているようである。

表-6 供試体上部、中央部、下部の粒径別残留率

A-1 (供試体平均間隙比 0.571)

ふるい目 (mm)	投入前	投入後			
		全 体	供試体 下 部	供試体 中 央 部	供試体 上 部
63.5-50.8	% 6.0	% 5.09	% 4.88	% 6.29	% 4.05
50.8-38.1	10.0	10.80	11.21	10.48	10.72
38.1-25.4	19.0	18.49	18.33	18.37	18.78
25.4-19.1	14.0	14.41	14.51	13.88	14.86
19.1-9.52	22.0	21.86	21.72	21.63	22.24
9.52-4.76	10.0	9.97	10.49	9.61	9.83
4.76-2.00	9.0	8.89	9.90	8.58	8.19
2.00-0.84	7.0	7.06	8.73	6.81	5.59
0.84-0.42	3.0	3.26	4.53	3.19	2.06
0.42 以下	0.0	0.17	0.25	0.14	0.11
合 計	100.0	100.00	104.55	98.98	96.42

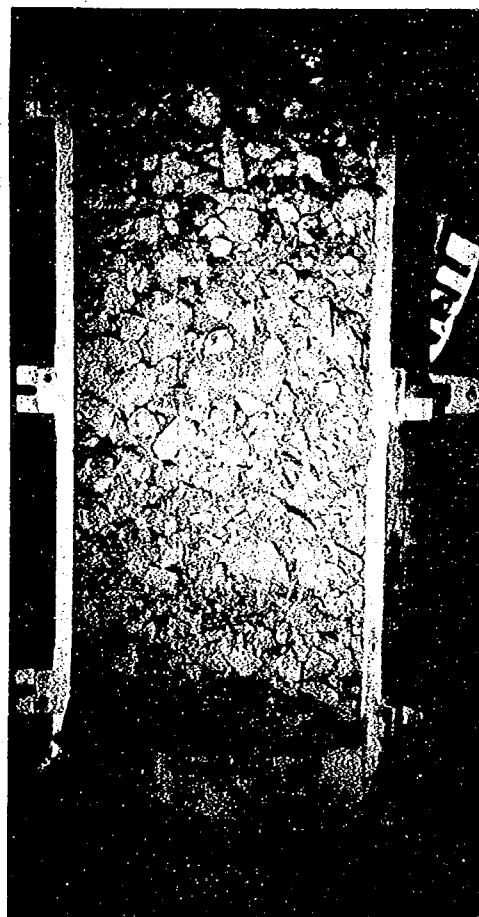


写真-4 締固めを与えない状態の供試体 ($e=0.566$)

以上、締固めを与えない投入状態においても2.00mm以下の粒子が粒子間の空隙を自然落下によって動いており均一な供試体の状態と言えない。しかし、各部毎の密度分布等を調べるために供試体上部から試料を取り出していくときの境界付近の細粒分をどちらに入れるか、また、細粒分を取り出しにしても非常に難しい。従って、これらのことを考慮し、供試体上部、中央部、下部の間隙比と粒度曲線さらには供試体の写真撮影から判断すれば締固めを与えない供試体は上端から下端まで、ほぼ均一な密度および粒度状態であると考えられる。

(2) 突固め試験機による締固め

突固めエネルギーを3種類変えて供試体内部の密度分布および粒度分布を調べた。各々の突固めエネルギーにおける供試体の平均間隙比は、0.5Ecが0.36、1.0Ecが0.33、2.0Ecが0.27である。

表-7は、供試体上部、中央部、下部の間隙比と破碎率を突固めエネルギー毎に示したものである。突固めエネルギー2Ecの場合をのぞき供試体下部の間隙比が供試体上部、中央部に比べ小さい。

表-7 突固め試験による供試体内部の間隙比、破碎率

突固めエネルギー	試験番号	全体平均	破碎率 (%)	供試体 下部	供試体 中央部	供試体 上部
0.5 Ec	T-3	0.358 (100)	2.0	0.325 (109)	0.352 (102)	0.401 (88)
	T-4	0.349 (100)	1.4	0.313 (110)	0.346 (101)	0.392 (88)
	T-7	0.363 (100)	2.5	0.319 (112)	0.336 (107)	0.443 (81)
1.0 Ec	T-1	0.327 (100)	2.5	0.307 (106)	0.337 (97)	0.337 (97)
2.0 Ec	T-2	0.276 (100)	4.2	0.279 (99)	0.277 (100)	0.275 (100)
	T-5	0.274 (100)	3.4	0.263 (104)	0.261 (105)	0.306 (88)

()内は供試体下部、中央部、上部の間隙比が供試体平均に対する割合(%)

図-10は、供試体上部、中央部、下部の粒度曲線を各々突固めエネルギー毎に示したものである。概観すると突固めエネルギーによる差は少なく、供試体下部、中央部、上部の順に下部ほど細粒分を多く含んだ粒度曲線となっている。この粒度曲線の傾向は投入のみの状態とあまり変わらず、突固めによって供試体下部の粒度曲線が大きく左にずれることはない。

凡 例

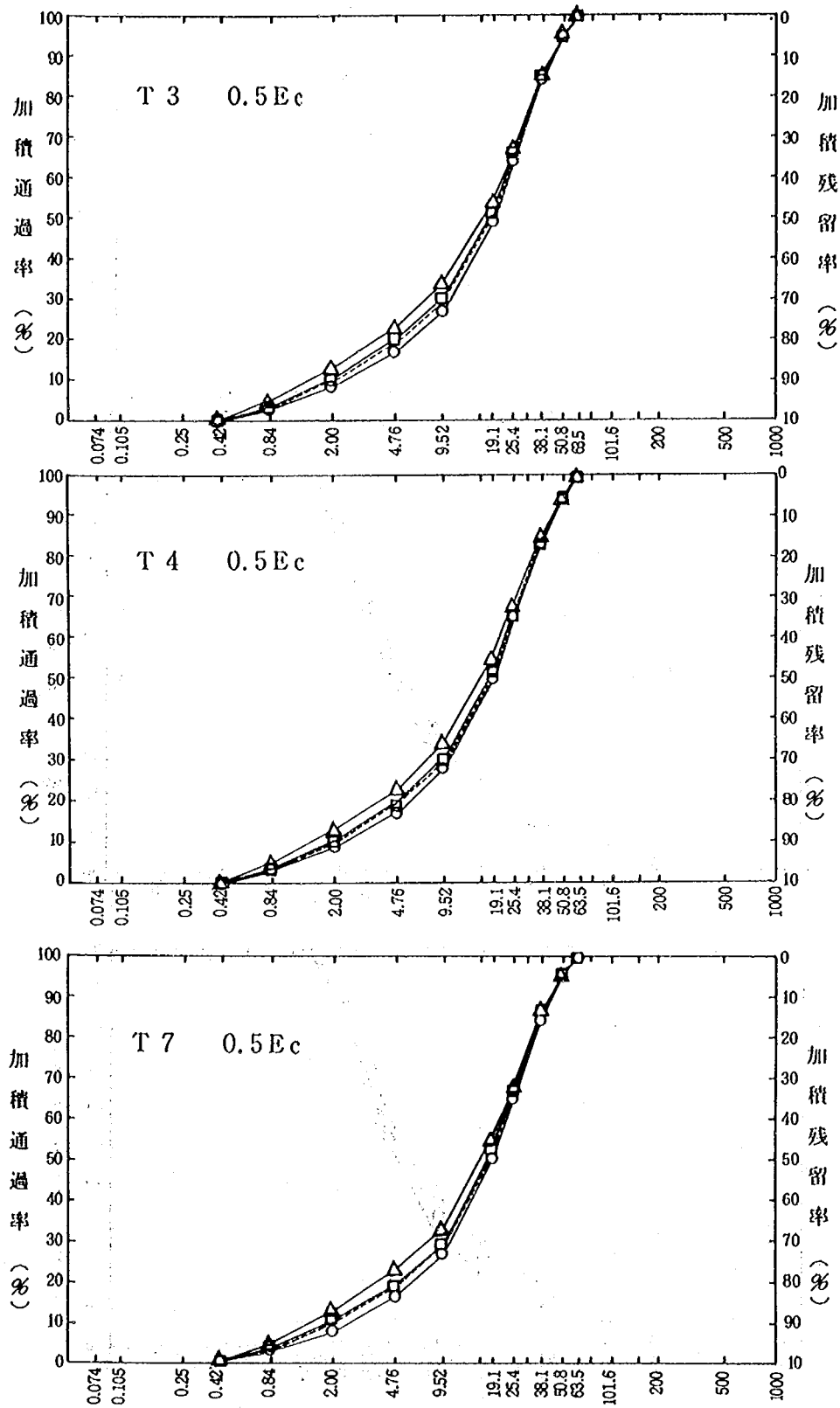
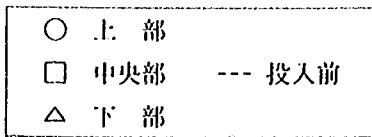


図-10(1) 突固め試験後の粒径加積曲線

凡 例

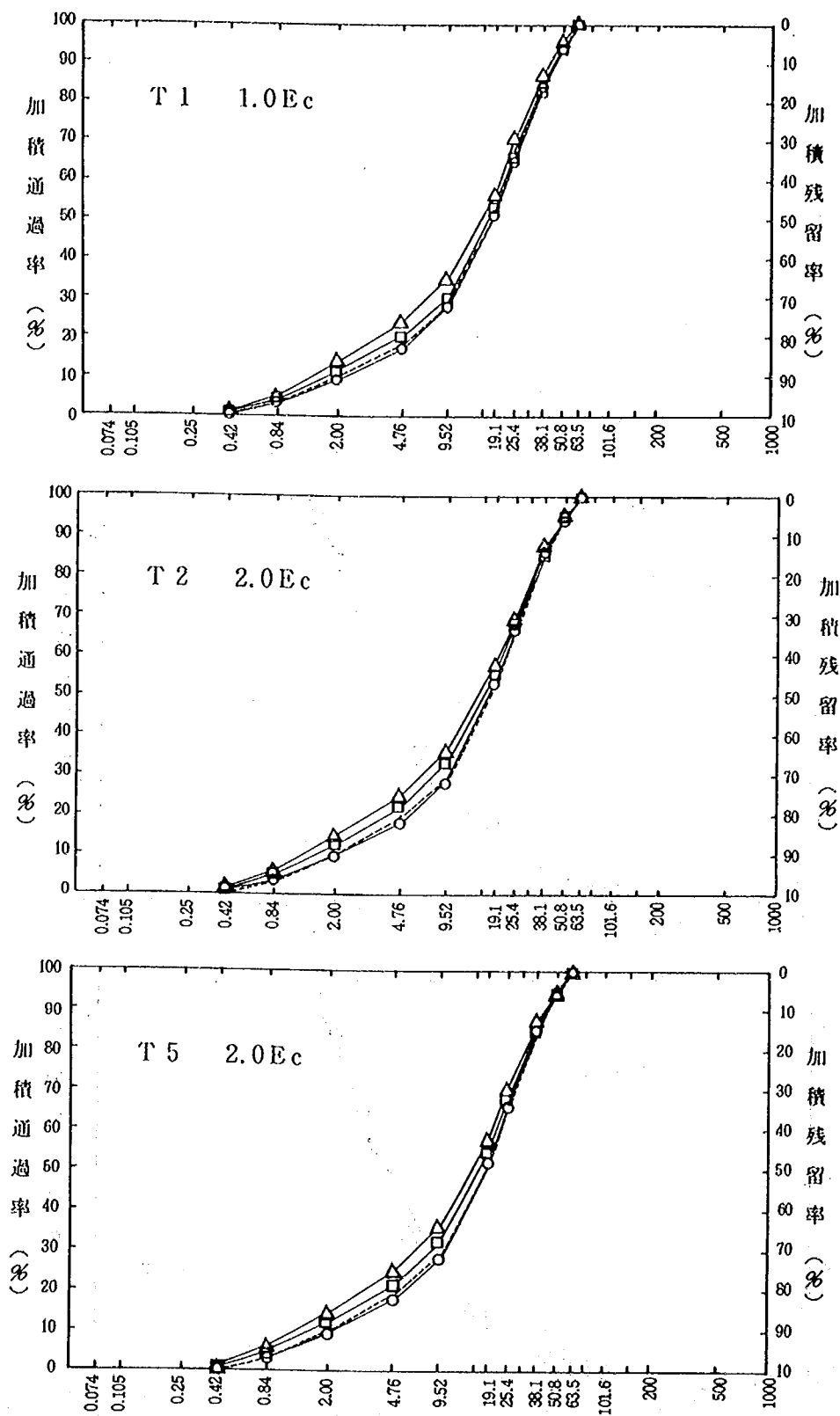
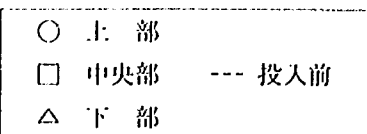


図-10(2) 突固め試験後の粒径加積曲線

この粒度曲線から読みとった均等係数および4.76mm粒径通過率を表-8に示す。供試体中央部の均等係数および4.76mm通過率は、試験前の状態とほぼ等しい。なお、わずかであるが、締固めを与えない状態に比べ突固めエネルギーが増えると、4.76mm以下の細粒分が供試体下部ほど多くなる。

表-8 突固め試験における供試体内部の均等係数および4.76mm通過率

(均等係数)						(4.76mm粒度通過率)					
突固めエネルギー	試験番号	試験前 位 度	供試体 下 部	供試体 中 央 部	供試体 上 部	突固めエネルギー	試験番号	試験前 通 過 率	供試体 下 部	供試体 中 央 部	供試体 上 部
0.5Ec	T-3	12	16.4	13.1	11.1	0.5Ec	T-3	%	%	%	%
	T-4	12	15.3	12.0	11.1		T-4	19	23.4	20.1	17.2
	T-7	12	14.2	12.0	10.2		T-7	19	23.4	19.0	17.2
1.0Ec	T-1	12	15.3	13.1	11.1	1.0Ec	T-1	19	24.5	20.1	17.2
2.0Ec	T-2	12	15.3	14.2	11.1	2.0Ec	T-2	19	25.6	22.3	18.1
	T-5	12	16.4	12.0	11.1		T-5	19	25.6	21.2	18.1

*右下の数字は試験前に対する差を示す。

図-11は、縦軸に間隙比をとり、横軸に均等係数および4.76mm通過率との関係を示したものである。0.5Ecの突固めエネルギーでは供試体下部、中央部、上部の順に下部ほど間隙比が小さくなり、均等係数および4.76mm粒径の通過率は大きくなっていく傾向を示している。一方、1.0Ecおよび2.0Ecの突固めエネルギーでは供試体下部、中央部は間隙比に差がないものの、供試体下部、中央部の順に均等係数および4.76mm通過率は増える。

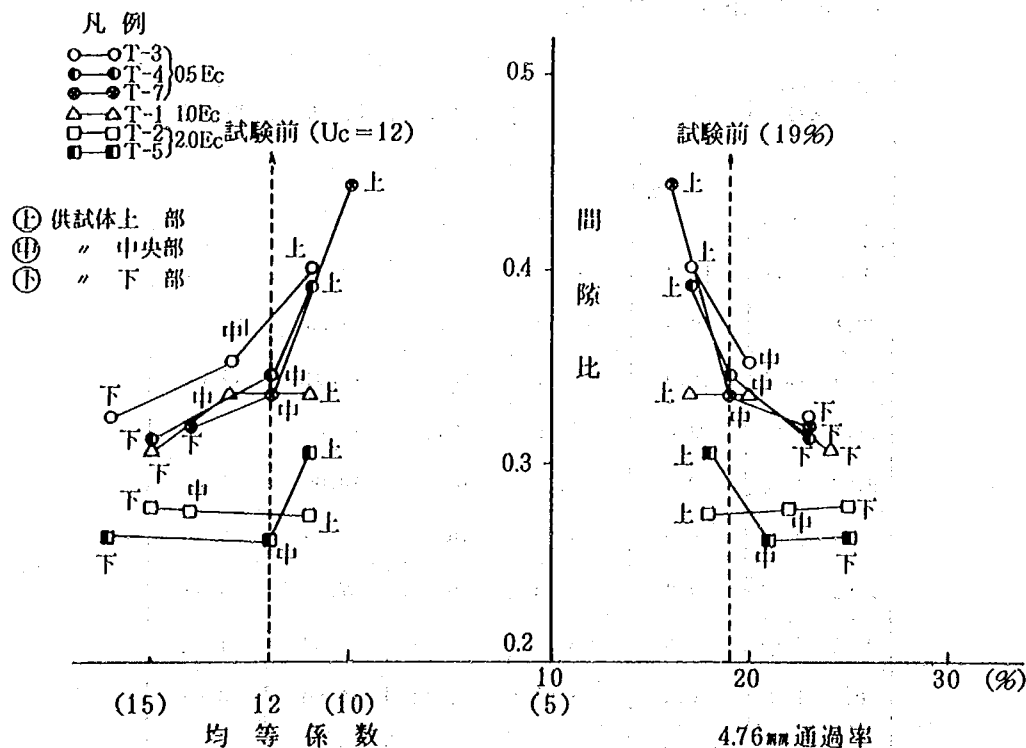


図-11 間隙化と均等係数, 4.76mm通過率との関係

突固めを行った場合でも、供試体下部、中央部、上部の境界に網目の開きが約 8 mm の網を入れて、細粒分の動きをみた。表-9 に示すように 4.76 mm 以下の粒子が供試体上部から中央部、中央部から供試体下部に動いている。

表-9 突固め試験後の供試体上部、中央部、下部の各粒径毎の残留率

C-1 (供試体平均間隙比 0.292)

ふるい目 (mm)	試験前	突 固 め 試 験 後			
		全 体	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
	%	%	%	%	%
63.5-50.8	6.0	5.51	5.37	4.90	6.24
50.8-38.1	10.0	9.05	8.94	9.34	8.88
38.1-25.4	19.0	18.32	18.31	18.30	18.33
25.4-19.1	14.0	13.83	14.76	13.54	13.20
19.1-9.52	22.0	22.33	21.66	22.96	22.39
9.52-4.76	10.0	10.00	10.09	9.98	9.93
4.76-2.00	9.0	9.18	10.53	9.24	7.76
2.00-0.84	7.0	7.38	9.95	7.03	5.09
0.84-0.42	3.0	3.34	4.77	3.21	2.02
0.42 以下	0.0	1.06	1.48	1.02	0.68
合 計	100.0	100.00	105.86	99.52	94.52

C-3 (供試体平均間隙比 0.276)

ふるい目 (mm)	試験前	突 固 め 試 験 後			
		全 体	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
	%	%	%	%	%
63.5-50.8	6.0	5.70	5.07	6.34	5.69
50.8-38.1	10.0	10.05	10.52	10.28	9.33
38.1-25.4	19.0	17.32	17.75	16.80	17.42
25.4-19.1	14.0	13.97	13.35	13.96	14.61
19.1-9.52	22.0	22.16	22.51	21.82	22.15
9.52-4.76	10.0	10.12	10.48	10.05	9.82
4.76-2.00	9.0	9.29	10.89	9.03	7.95
2.00-0.84	7.0	7.14	9.50	7.00	4.93
0.84-0.42	3.0	3.23	4.64	3.06	1.99
0.42 以下	0.0	1.02	1.44	0.99	0.62
合 計	100.0	100.00	106.15	99.33	94.51

突固め試験における供試体の粒子の分布を写真-5に示す。この供試体の間隙比は0.29である。供試体上端面から約5 cmの間で細粒分がなくなっている他は、粗粒分および細粒分が適当に混合しており、粗粒分だけの塊り、細粒分だけの塊りは認められず、大きな粒子は最も安定した状態で供試体中に入っているようである。なお、破碎率は突固めエネルギーによって異なるが $0.5Ec$ ($e=0.36$) のときに2%である。

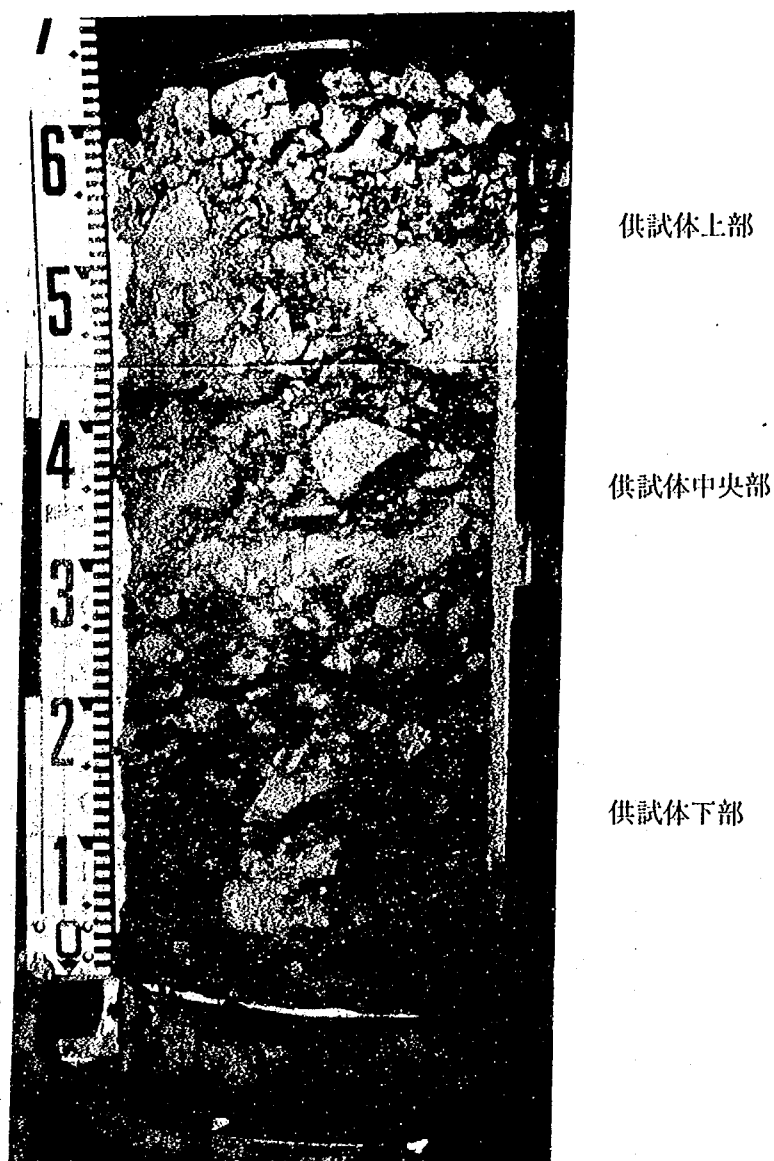


写真-5 突固め試験による供試体 ($e=0.293$)

(3) 電気ハンマーによる締固め

電気ハンマーによる締固めは図-6に示す4つの締固めパターンで締固めて、供試体密度および粒度分布を調べた。

表-10は、各パターンにおける供試体の間隙比を供試体上部、中央部、下部毎に示したものである。締固めパターン1では供試体下部の間隙比が最も小さく、締固めパターン2、3では供試体中央部の間隙比が最も小さい結果となった。供試体全体の間隙比が一様になるように設定した締固めパターン4は供試体下部の間隙比が小さく全体的に均一な供試体密度を作ることができなかった。

表-10 電気ハンマーによる締固め試験後の供試体内部の間隙比

	試験番号	全体平均	破碎率	供試体下部	供試体中央部	供試体上部
パターン1	M-7	0.292 (100)	3.3	0.255 (114)	0.228 (124)	0.326 (91)
	M-8	0.274 (100)	2.8	0.253 (108)	0.272 (101)	0.303 (89)
	M-9	0.371 (100)	0.9	0.341 (108)	0.350 (106)	0.430 (84)
	M-10	0.375 (100)	1.3	0.347 (108)	0.376 (100)	0.406 (92)
パターン2	M-11	0.365 (100)	1.0	0.375 (97)	0.323 (112)	0.402 (90)
パターン3	M-13	0.371 (100)	1.6	0.351 (105)	0.326 (112)	0.440 (81)
パターン4	M-14	0.374 (100)	2.5	0.339 (109)	0.363 (103)	0.430 (85)
	M-15	0.371 (100)	1.1	0.336 (109)	0.370 (100)	0.406 (91)
	M-17	0.374 (100)	2.1	0.300 (120)	0.400 (93)	0.428 (86)

()内は供試体下部、中央部、上部の間隙比が供試体平均に対する割合(%)

図-12に各締固めパターン毎の粒度曲線を示す。供試体下部、中央部、上部の順に下部ほど細粒分の多い粒度曲線を示している。この結果は突固め試験と同様の傾向である。

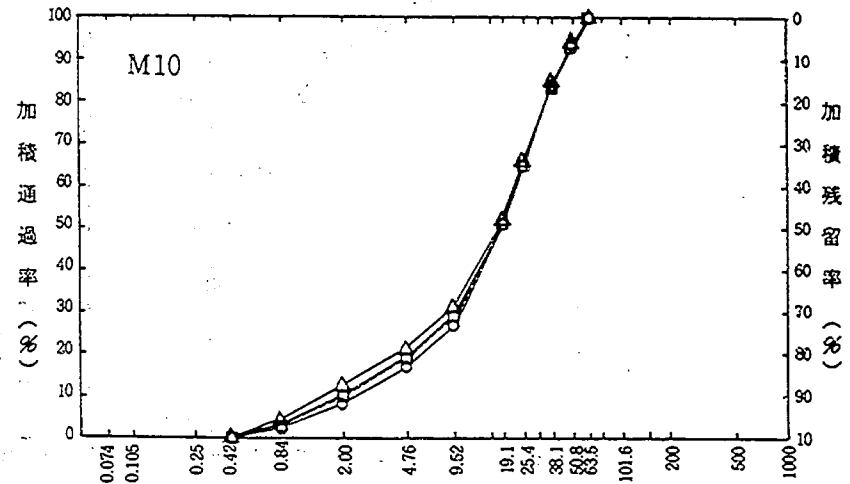
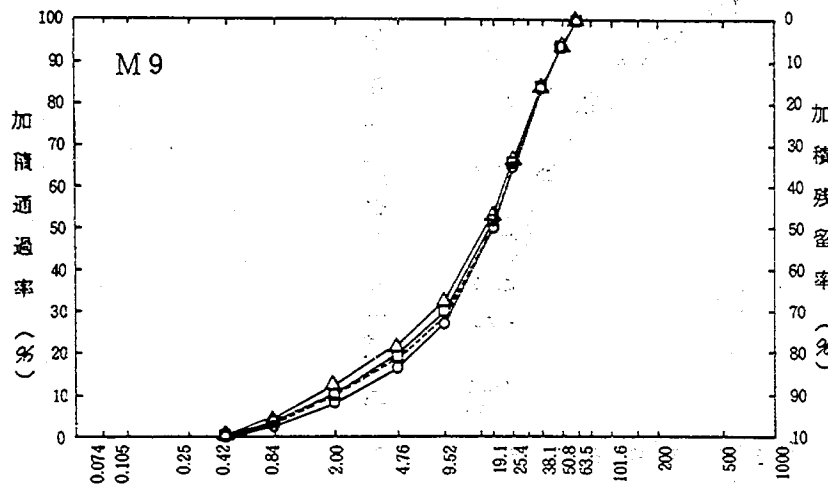
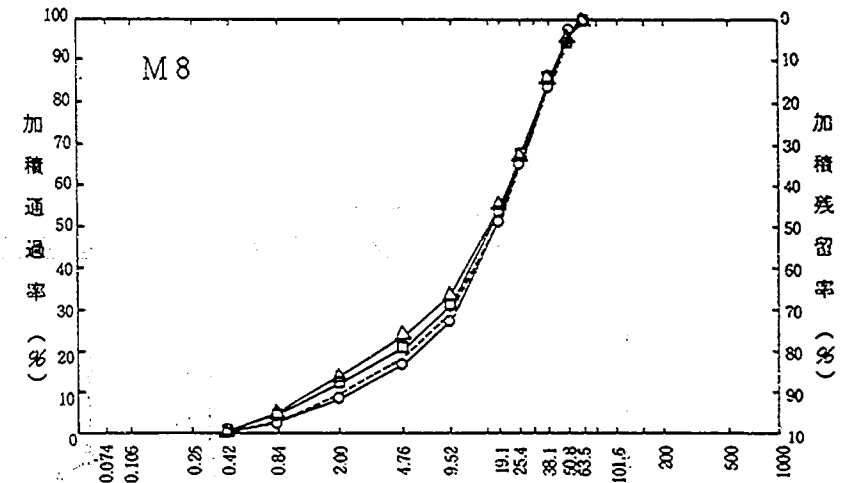
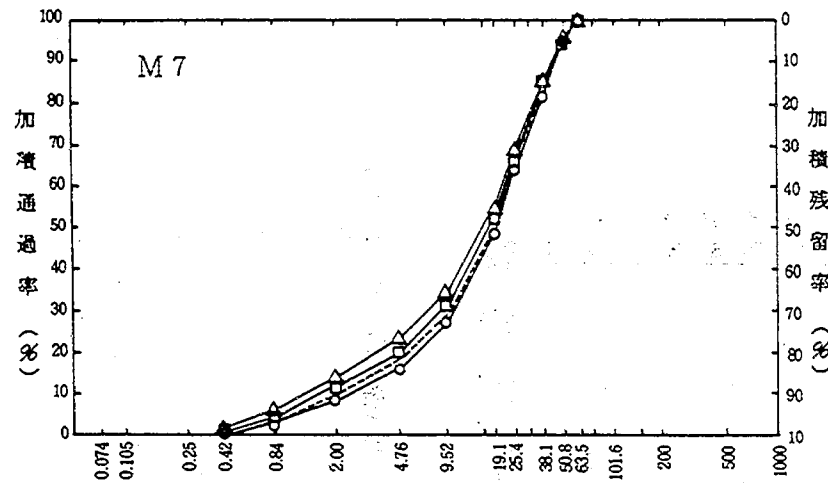
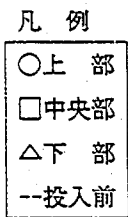


図-12(1) 供試体上部, 中央部, 下部の粒径加積曲線 (締固めパターン1)

凡 例

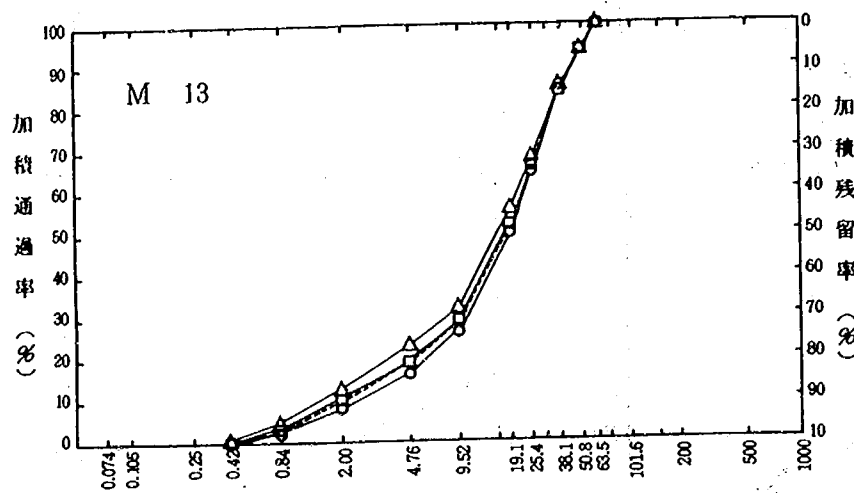
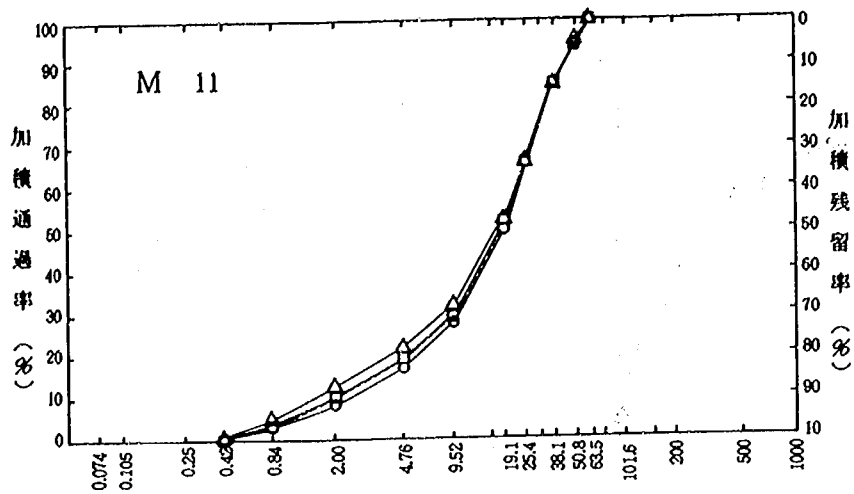
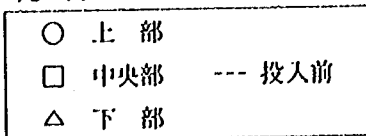


図-12(2) 供試体上部, 中央部, 下部の粒径加積曲線 (締固めパターン 2, 3)

凡 例

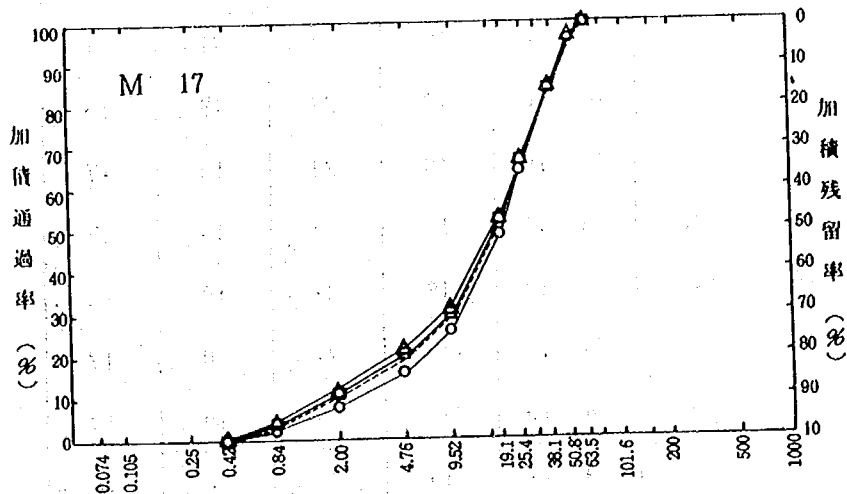
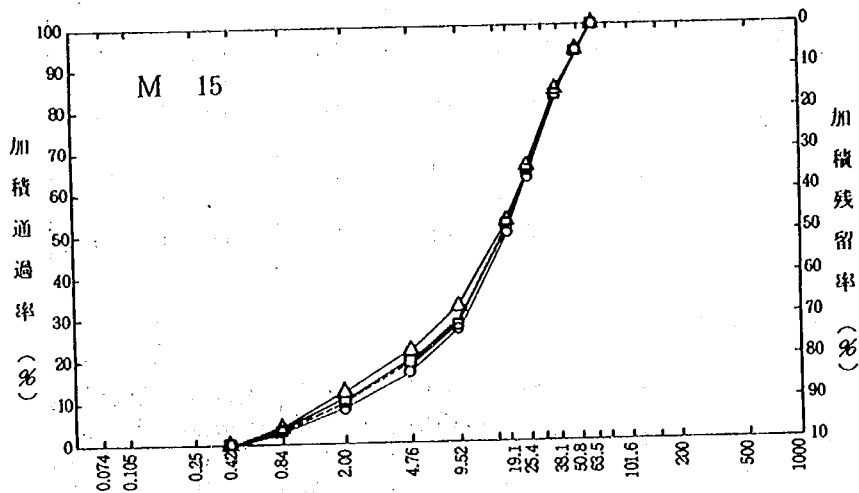
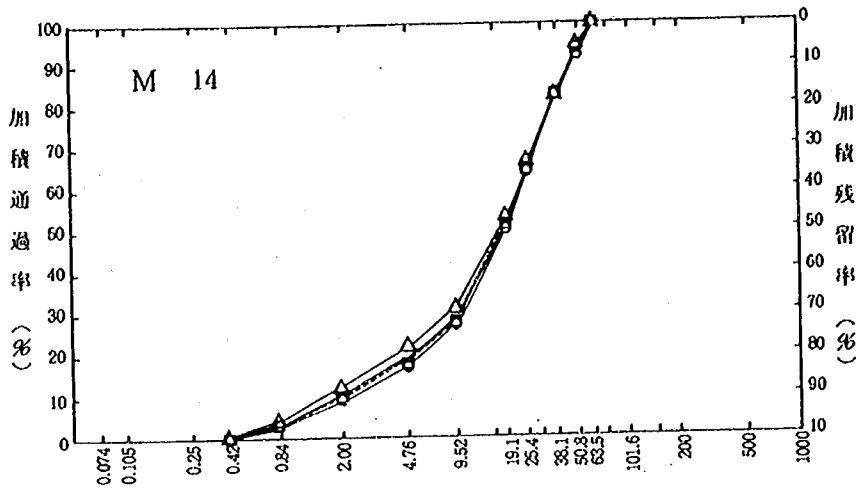
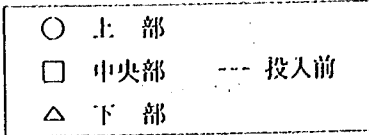


図-12(3) 供試体上部, 中央部, 下部の粒径加積曲線 (締固めパターン4)

表-11は、粒度曲線より読みとった均等係数および4.76mm粒径の通過率である。締固めパターンによって差はあるが、突固め試験と同様に供試体中央部の均等係数および4.76mm粒径通過率が、試験前のそれぞれの値とほぼ同じである。ただし、突固め試験に比べどの締固めパターンでも4.76mm粒径が供試体下部に多くなるという傾向はいくらか少なくなる。

表-11 突固め試験における各部毎の均等係数および4.76mm粒径の通過率
(均等係数)

	試験番号	試験前 粒 度	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
パターン1	M-7	12	16 ₄	14 ₂	10 ₋₂
	M-8	12	15 ₃	15 ₃	9 ₋₃
	M-9	12	15 ₃	12 ₀	10 ₋₂
	M-10	12	16 ₄	12 ₀	10 ₋₂
パターン2	M-11	12	15 ₃	12 ₀	9 ₋₃
パターン3	M-13	12	16 ₄	13 ₁	9 ₋₃
パターン4	M-14	12	14 ₂	12 ₀	11 ₋₁
	M-15	12	13 ₁	11 ₋₁	10 ₋₂
	M-17	12	15 ₃	14 ₂	9 ₋₃

(4.76mm粒度通過率)

	試験番号	試験前 通過率	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
パターン1	M-7	% 19	% 23 ₄	% 20 ₁	% 15 ₋₄
	M-8	19	23 ₄	21 ₂	17 ₋₁
	M-9	19	22 ₃	19 ₀	16 ₋₂
	M-10	19	22 ₃	19 ₀	17 ₋₂
パターン2	M-11	19	22 ₃	19 ₀	17 ₋₂
パターン3	M-13	19	22 ₃	19 ₀	16 ₋₃
パターン4	M-14	19	22 ₃	18 ₋₁	17 ₋₂
	M-15	19	22 ₃	19 ₀	17 ₋₂
	M-17	19	22 ₃	20 ₁	16 ₋₃

*右下の数字は試験前に対する差

図-13は、縦軸に間隙比を、横軸に均等係数および4.76mm粒径の通過率を示したものである。供試体下部、中央部、上部の順に間隙比が小さくなれば均等係数および4.76mm粒径の通過率は増加している。

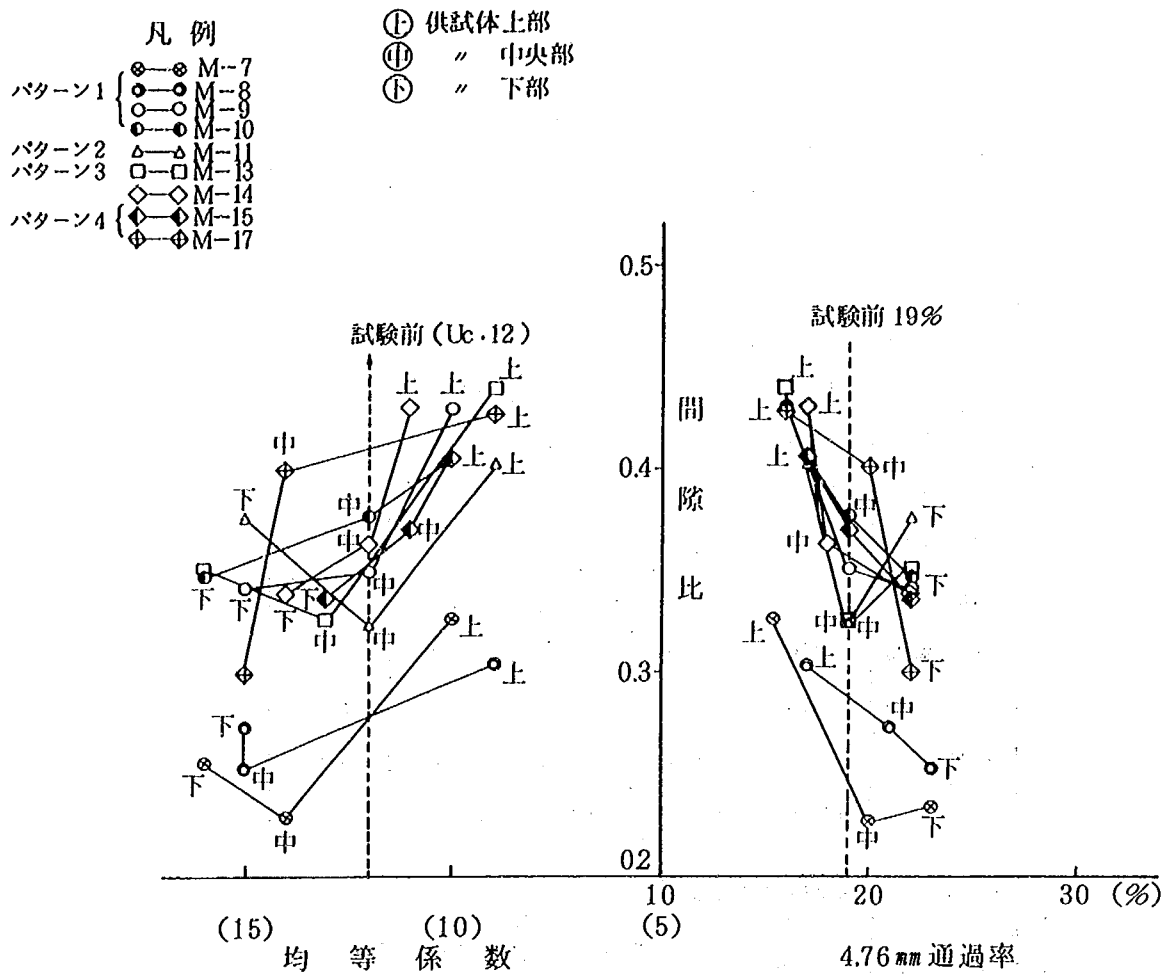


図-13 間隙比と均等係数および4.76mm粒径の通過率

細粒分の動きは、表-12 からわかるように突固め試験と同様に4.76mm以下の粒子が供試体上部から中央部、中央部から下部に動いていると考えられる。

表-12 電気ハンマーによる締固め試験後の各部毎の各粒径残留率

B-1 (供試体平均間隙比 0.269)

ふるい目 (mm)	試験前	電気ハンマー締固め後			
		全 体	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
	%	%	%	%	%
63.5-50.8	6.0	4.80	5.02	4.93	4.43
50.8-38.1	10.0	10.86	11.47	9.77	11.34
38.1-25.4	19.0	18.54	18.96	19.14	17.53
25.4-19.1	14.0	15.27	14.31	15.58	15.93
19.1-9.52	22.0	21.33	21.04	21.38	21.57
9.52-4.76	10.0	9.92	10.25	9.95	9.56
4.76-2.00	9.0	8.87	10.44	8.85	7.30
2.00-0.84	7.0	6.97	10.15	6.48	4.23
0.84-0.42	3.0	3.03	4.84	2.90	1.33
0.42 以下	0.0	0.41	0.80	0.30	0.13
合 計	100.0	100.00	107.28	99.28	93.35

B-3 (供試体平均間隙比 0.271)

ふるい目 (mm)	試験前	電気ハンマー締固め後			
		全 体	供試体 下 部	供試体 中央部	供試体 上 部
	%	%	%	%	%
63.5-50.8	6.0	6.22	6.14	5.43	7.09
50.8-38.1	10.0	9.36	9.66	9.01	9.39
38.1-25.4	19.0	18.87	18.46	19.78	18.38
25.4-19.1	14.0	14.31	14.16	14.17	14.59
19.1-9.52	22.0	21.98	22.31	22.34	21.29
9.52-4.76	10.0	9.87	9.79	10.18	9.66
4.76-2.00	9.0	8.98	10.23	9.31	7.39
2.00-0.84	7.0	6.93	9.22	7.26	4.33
0.84-0.42	3.0	3.06	4.67	3.21	1.30
0.42 以下	0.0	0.42	0.87	0.27	0.12
合 計	100.0	100.00	105.52	100.96	93.53

写真-5は、電気ハンマーにより締固めたときの、供試体における粒子の分布を示したものである。供試体上部端面からわずか2~3cm範囲で細粒分が少なくなっているほかは、粗粒分、細粒分だけの塊りは認められない。

図-14に電気ハンマーによる間隙比と破碎率の関係を突固め試験の場合と比較して示す。堅硬な岩石を用いたために破碎率は全体に小さく、間隙比が小さくなれば破碎率は大きくなるが電気ハンマーによる締固めの方がわずかであるが破碎率は小さいといえる。



写真-5 電気ハンマー (M-16) $e=0.275$

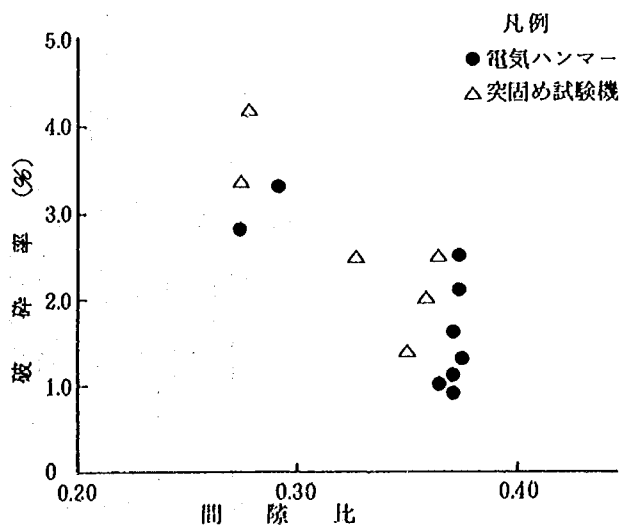


図-14 間隙比と破碎率

4. 締固め機種とせん断強度等の比較

4. 1 三軸圧縮試験方法

突固め試験機、電気ハンマーで作製した供試体によるせん断強度等の比較を行うために、表-13に示す試験条件で三軸圧縮試験を行った。試料は気乾状態において初期間隙比を0.36にし、側圧2, 4, 6 kgf/cm²で圧密排水試験を行った。

図-15, 表-14に三軸圧縮試験機の概要図および仕様を示す。

表-13 試験条件

供試体の大きさ	直径 30cm, 高さ 60cm
試料状態	不飽和 ($\omega = 1\%$ 以下)
排水条件	圧密排水 (CD) 試験
せん断方法およびせん断スピード	ひずみ制御 せん断スピード 1%/min
試験側圧	2, 4, 6 kgf/cm ²
その他	初期間隙比一定 ($e \approx 0.355$)

表-14 三軸圧縮試験機の性能

項目	仕様
供試体の寸法	D 300 × H 600mm
最大軸力	150ton ($\approx 215\text{kgf/cm}^2$)
最大側圧	30kgf/cm ² ($\frac{\sigma_{1max}}{\sigma_{3max}} \approx 7.2$)

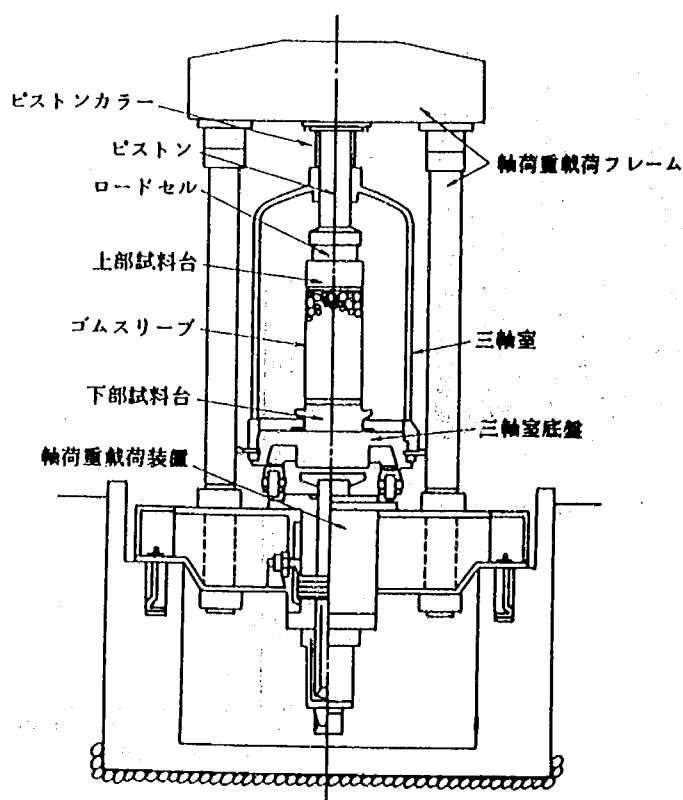


図-15 大型三軸圧縮試験機

4. 2 試験結果と考察

図-16は、突固め試験機および電気ハンマーで作製した供試体において、側圧による体積変化量の比較を行ったものである。前項で述べたように、突固め試験機で作製した供試体は端面のゆるみのために、側圧4, 6 kg f/cm²では体積変化量が電気ハンマーで作製したものより大きい値を示すと考えられる。

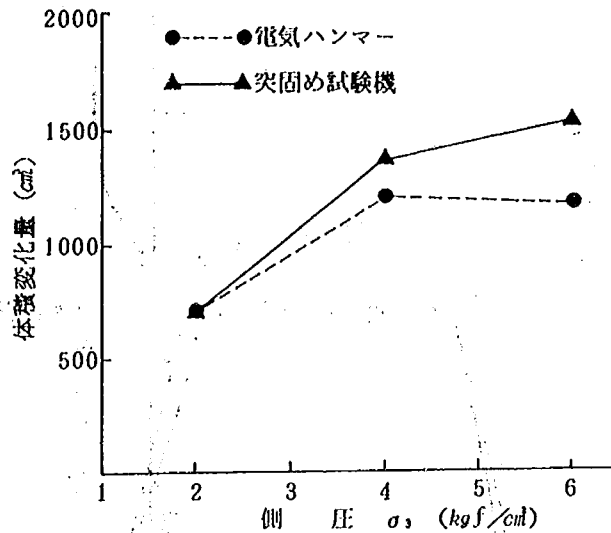


図-16 側圧による体積変化量の比較

図-17は、側圧2, 4, 6 kg f/cm²毎の応力ひずみ曲線の比較である。側圧が低い場合 ($\sigma_3=2$, 4 kg f/cm²) において、突固め試験機と電気ハンマーの供試体では応力ひずみ曲線が異なり軸ひずみ5%までは電気ハンマーの方の軸差応力が大きい。この理由としては、突固め試験機で供試体を作製した場合に、供試体径よりもランマー径が小さいことからランマー径以外のところがゆるみやすく、仕上がり時の供試体上端面が電気ハンマーに比べゆるんでおり、低側圧時においてこの影響があると考えられる。図-18に最大軸差応力と側圧の関係を示す。突固め試験機と電気ハンマーによる最大軸差応力の差は非常に少ないと言える。

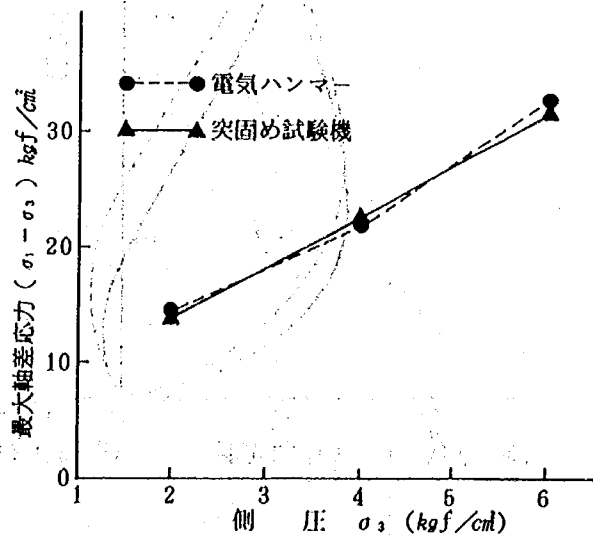
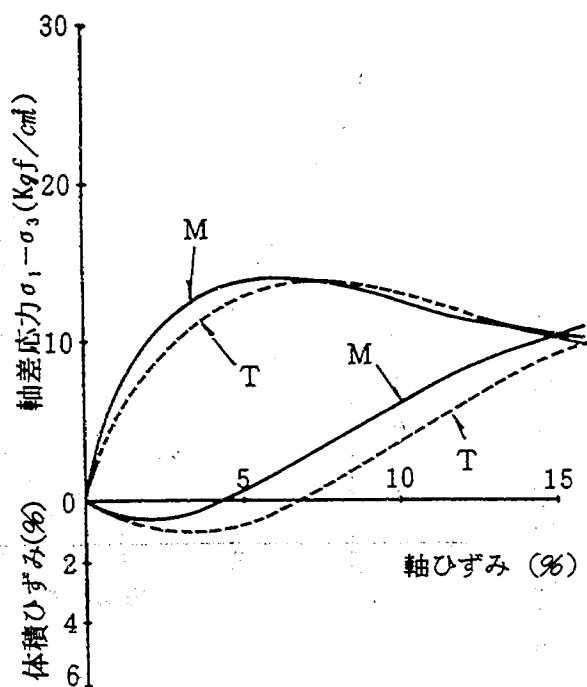


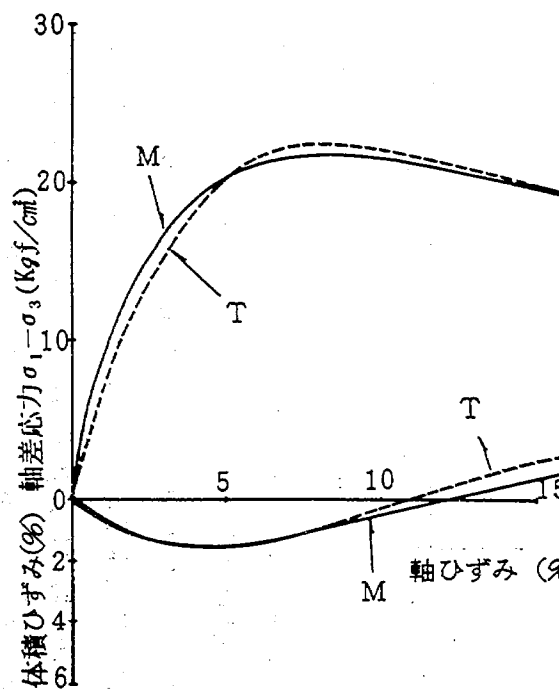
図-18 側圧と最大軸差応力の関係

----- T: 突固め試験で作製した供試体
 ——— M: 電気ハンマーで

$\sigma_3 = 2.0 \text{ Kg f/cm}^2$



$\sigma_3 = 4.0 \text{ Kg f/cm}^2$



$\sigma_3 = 6.0 \text{ Kg f/cm}^2$

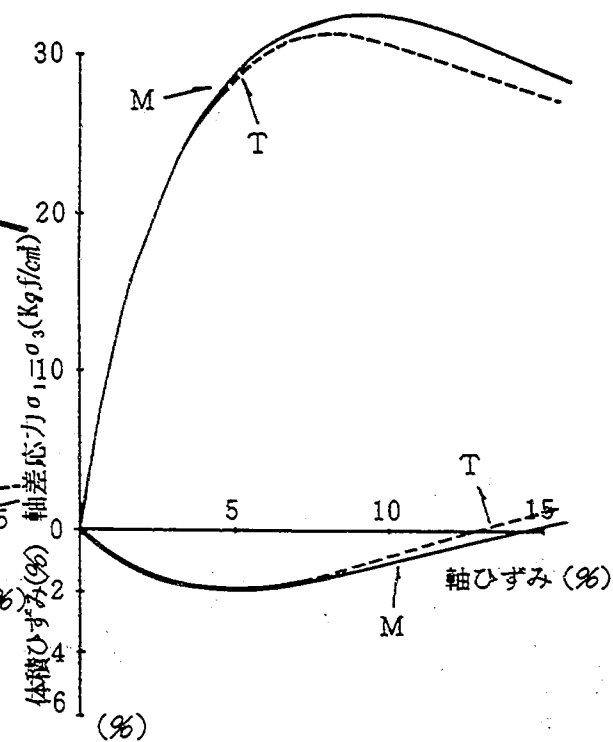
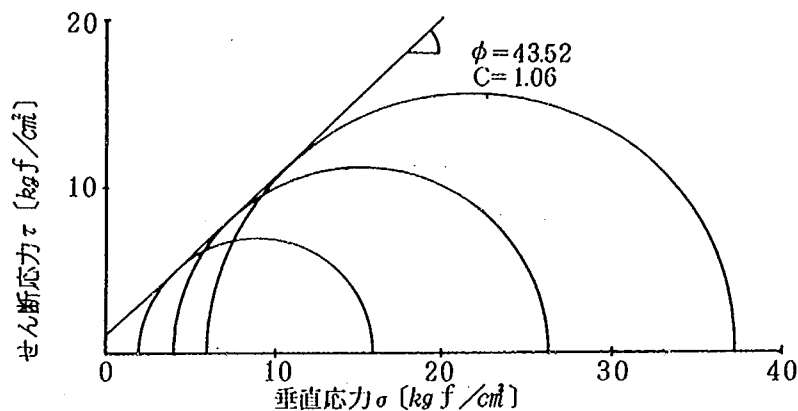


図-17 応力ひずみ曲線の比較

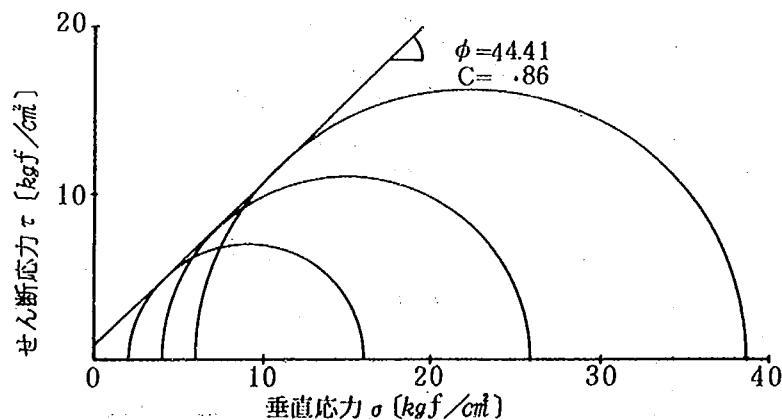
図-19にモールの応力円を比較して示す。このときのせん断抵抗角およびみかけの粘着力は、最大軸差応力と側圧の関係より最小二乗法によって求めたものである。せん断抵抗角は電気ハンマーで作製した供試体が44.4°、突固め試験で作製した供試体のせん断抵抗角は43.5°と電気ハンマーの方が大きめの結果が得られた。みかけの粘着力は突固め試験の方がわずかであるが0.2kgf/cm²大きいようである。

TEST No	間隙比	σ_3	$\sigma_{11}-\sigma_3$	σ_1	ϵ_f (%)	ϵ_v (%)
TT1-2.0	0.354	2	13.93	15.93	7.02	-1.18
TT2-4.0	0.355	4	22.43	26.43	8.07	-0.87
TT3-6.0	0.356	6	31.52	37.52	8.24	1.35



1) 突固め試験機で作製した供試体のモールの応力円

TEST No	間隙比	σ_3	$\sigma_{11}-\sigma_3$	σ_1	ϵ_f (%)	ϵ_v (%)
MT6-2.0	0.354	2	14.06	16.06	6.59	-1.17
MT2-4.0	0.360	4	21.84	25.84	8.27	0.95
MT5-6.0	0.355	6	32.54	38.54	8.6	1.42



2) 電気ハンマーで作製した供試体のモールの応力円

図-19 モールの応力円の比較

粘着力成分をゼロにした内部摩擦角 (ϕ_0) を次式より求めて側圧との関係を図-20に示す。

$$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{\sigma_{11} - \sigma_3}{\sigma_{11} + \sigma_3}$$

σ_{11} : ピーク時最大軸差応力

σ_3 : 側圧

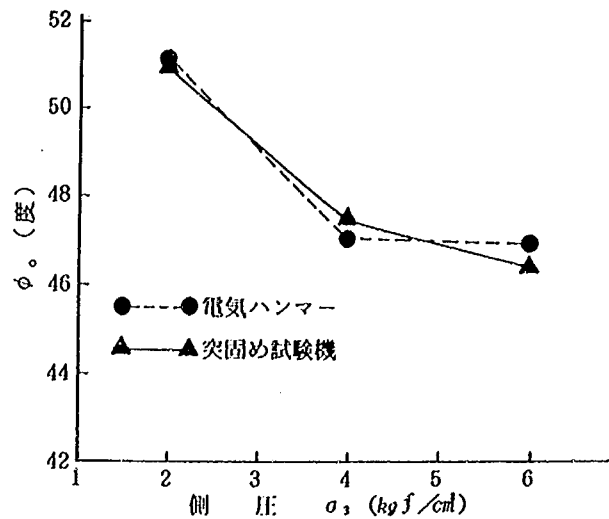


図-20 側圧とφ₀の関係

締固め機種のちがいはあってもφ₀の値に顕著な差は認められない。

また、変形係数（割線変形係数）を次式より求めて側圧との関係で示すと図-21のようになる。

$$E = \frac{\sigma_{11} - \sigma_3}{\epsilon} \times 100 \quad \epsilon: \text{軸ひずみ} \quad (1\%, 3\%, \text{ピーク時})$$

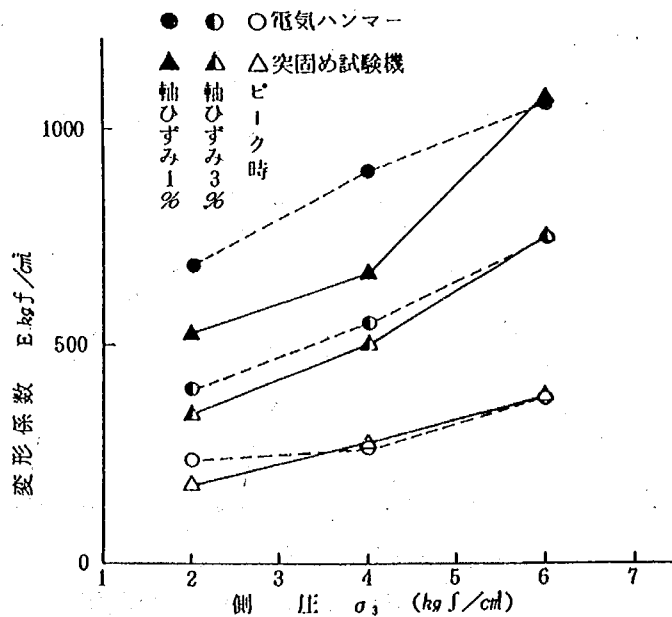


図-21 側圧と変形係数の関係

側圧の小さい場合の低ひずみ領域（約3%未満）において、電気ハンマーで作製した供試体の変形係数が突固め試験機で作製したものより大きい。しかし、側圧が大きくなるとその差は少ない。すなわち、側圧が小さく、しかも低ひずみ領域では供試体上端面のゆるみが問題になると考えられる。

5. まとめ

本試験で用いた材料と粒度条件等から得られた比較試験結果をまとめると以下のとおりである。

① 締固め機種を変えて三軸用供試体を作製した結果次のことが言える。

a. 締固めを与えない状態，すなわち投入後の供試体でも粒度曲線などからみると2.00mm以下の粒子が供試体下部に移動し，供試体下部の方に細粒分が多い状態となっている。しかし，これは供試体上部，中央部，下部の試料を取り出すときに境界付近の細粒分を取り出すことが難しいなどから，これに起因する試験誤差が大きく含まれているものと考えられる。このことを考慮すれば投入後供試体の密度および粒度は供試体の上部から下部まではほぼ同じあると考えられる。

b. 突固め試験機による供試体内部の密度は，供試体下部が供試体上部，中央部に比べ大きい突固めエネルギーを増やす（供試体全体の空隙比を小さくする）と供試体上部から下部までの空隙比の差は小さくなるようである。しかし，ランマー落下の衝撃等により4.76mm粒径以下のものが供試体下方に動いているため，供試体下部では均等係数および4.76mm粒径の通過率も大きい，供試体中央部の粒度は試験前の粒度とほぼ同じである。また，突固め試験機で作製した供試体は，供試体上端面から約5cmの範囲において細粒分は全く認められず，この部分はあまり締まっていないようである。供試体上端面をのぞけば供試体全体としては粗粒分と細粒分が一様に混じっていると判断される。破碎率は空隙比0.36において2%程度で，この値は同程度の空隙比状態に締めた電気ハンマーとほぼ同じであった。

c. 電気ハンマーによる供試体作製においても，密度分布および粒度分布とも突固め試験と同様の傾向であり，粒度分布は供試体中央部が試験前とほぼ同じである。電気ハンマーによる供試体作製では，供試体内の密度および粒度が一様になるように各層毎の締固め時間をコントロールしたが，一様な供試体を作ることは不可能であった。ただし，供試体上端面からの細粒分の減少は突固め試験に比べ少なく，供試体端面に供試体径とほぼ同じ大きさの鉄板をのせて締固めるために供試体上端面のゆるみが少なく，破碎率も突固め試験機に比べ少ない。

② 突固め試験機および電気ハンマーによって作製した供試体を用いて三軸圧縮試験を行うと，変形係数において突固め試験機で作製した変形係数が低側圧時でしかもひずみが小さいときに電気ハンマーの変形係数より小さくなり，供試体上端面のゆるみが問題になっていると考えられる。しかし，各側圧毎の見掛けの粘着力成分をゼロにしたせん断抵抗角の値は締固め機種によってあまり変わらず，また3つの応力円から求めたせん断抵抗角も同様である。すなわち締固め機種のちがいによるせん断強度の差は少ないと言える。

③ 三軸試験用供試体を作るにあたっては、供試体上端面のゆるみおよび粒子の破碎も少なく、供試体作製時の作業性と効率性等の点から総合的に判断すると電気ハンマーの方が好ましいと考えられる。

6. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、材料を提供して頂いた七ヶ宿ダム事務所の方には並々ならぬご協力を賜りここに感謝します。

7. 参考文献

- 1) 松本, 豊田: ロック材料の相対密度試験 土木研究所資料 1757号
- 2) 松本, 渡辺, 小川: ロック材料の三軸圧縮試験方法に関する実験的検討
土木技術資料 1984, 3
- 3) 松本, 渡辺, 岩田, 小川: 粗粒材料の密度試験に関する実験的検討
土木研究所資料 2233号

8. 參考資料

締固め方法：投入のみ

供試体 番 号	締固め 時 間 (sec)	平 均 密 度					上 部 密 度					中 央 部 密 度					下 部 密 度				
		h cm	γ_d g/cm ³	e	U _c	%	h _u cm	γ_{du} g/cm ³	e _u	U _{cu}	%	h _m cm	γ_{dm} g/cm ³	e _m	U _{cm}	%	h _L cm	γ_{dL} g/cm ³	e _L	U _{cl}	%
M-3	0	75.34	1.537	0.675	12	100	24.71	1.570	0.653	11	103	24.20	1.494	0.723	11	93	26.43	1.561	0.649	14	104
M-2	0	75.41	1.536	0.676	12	100	24.11	1.518	0.696	10	97	25.93	1.514	0.700	12	96	25.37	1.575	0.634	16	106

h：供試体高さ γ_d ：乾燥密度 e：間隙比 $= \frac{G_o \cdot \gamma_u}{\gamma_d} - 1$ G_o ：2.574 U_c ：均等係数

%：平均密度に対する上・中・下部密度の割合

$$\% = \frac{e}{e_{u+m+L}} \times 100$$

締固め方法：突固め試験機

供試体 番 号	締固め 試験機	平 均 密 度					上 部 密 度					中 央 部 密 度					下 部 密 度				
		h cm	γ_d g/cm ³	e	U _c	%	h _u cm	γ_{du} g/cm ³	e _u	U _{cu}	%	h _m cm	γ_{dm} g/cm ³	e _m	U _{cm}	%	h _L cm	γ_{dL} g/cm ³	e _L	U _{cL}	%
T-1	1Ec	63.72	1.940	0.327	13	100	20.87	1.925	0.337	11	97	21.16	1.925	0.337	13	97	21.69	1.970	0.307	15	106
T-2	2Ec	61.30	2.017	0.276	14	100	19.57	2.019	0.275	11	100	20.51	2.016	0.277	14	100	21.22	2.012	0.279	15	99
T-3	0.5Ec	60.27	1.896	0.358	13	100	20.03	1.837	0.401	11	88	19.95	1.904	0.352	12	102	20.29	1.943	0.325	16	109
T-4	0.5Ec	59.89	1.908	0.349	14	100	19.97	1.849	0.392	11	88	19.63	1.912	0.346	12	101	20.29	1.960	0.313	16	110
T-5	2Ec	61.21	2.020	0.274	14	100	20.05	1.971	0.306	11	88	20.33	2.041	0.261	12	105	20.83	2.038	0.263	16	104
T-6	2Ec	61.04	2.026	0.270																	
T-7	0.5Ec	60.50	1.888	0.363	12	100	20.53	1.784	0.443	10	81	19.59	1.927	0.336	12	107	20.38	1.951	0.319	14	112

h：供試体高さ γ_d ：乾燥密度 e：間隙比 $= \frac{G_b \cdot \gamma_u}{\gamma_d} - 1$ G_b ：2.574 U_c ：均等係数

%：平均密度に対する上・中・下部密度の割合

$$\% = \frac{e}{e_{u,m,L}} \times 100$$

締固め方法：電気ハンマー

供試体 番号	締固め 時間 (sec)	平均密度					上部密度					中央部密度					下部密度				
		h cm	γ_d g/cm ³	e	U _c	%	h _u cm	γ_{du} g/cm ³	e _u	U _{cu}	%	h _m cm	γ_{dm} g/cm ³	e _m	U _{cm}	%	h _L cm	γ_{dL} g/cm ³	e _L	U _{cl}	%
M-4	(64) 384	61.08	2.024	0.272	12	100	20.75	1.977	0.302	10	89	19.82	2.091	0.231	13	115	20.51	2.084	0.235	15	114
M-5	(85) 510	61.06	2.025	0.271	12	100	20.23	1.939	0.327	9	79	20.43	2.034	0.265	14	102	20.40	2.101	0.225	15	117
M-6	(85) 510	60.95	2.029	0.269	12	100	20.50	1.954	0.317	9	82	19.97	2.030	0.268	14	100	20.48	2.100	0.226	18	116
M-7	(58) 350	62.05	1.993	0.292	13	100	20.90	1.941	0.326	10	91	20.26	2.096	0.228	14	124	20.89	2.051	0.255	16	114
M-8	(75) 450	61.22	2.020	0.274	12	100	19.86	1.976	0.303	9	89	20.73	2.023	0.272	15	101	20.63	2.054	0.253	15	108
M-9	(10) 60	60.87	1.877	0.371	12	100	20.43	1.800	0.430	10	84	20.22	1.906	0.350	12	106	20.22	1.919	0.341	15	108
M-10	(10) 60	61.05	1.871	0.375	12	100	20.23	1.831	0.406	10	92	20.11	1.870	0.376	12	100	20.71	1.911	0.347	16	108
M-11	(10) 60	60.57	1.886	0.365	12	100	19.91	1.836	0.402	9	90	19.62	1.946	0.323	12	112	21.04	1.872	0.375	15	97
M-12	(10) 60	60.26	1.896	0.358	12	100															
M-13	(10) 60	60.88	1.877	0.371	13	100	20.73	1.787	0.440	9	81	19.50	1.941	0.326	13	112	20.65	1.905	0.351	16	105
M-14	(8.7) 52	61.01	1.873	0.374	12	100	20.66	1.800	0.430	11	85	19.80	1.889	0.363	12	103	20.55	1.923	0.339	14	109
M-15	(9.2) 55	60.78	1.878	0.371	12	100	20.38	1.831	0.406	10	91	20.08	1.879	0.370	11	100	20.32	1.926	0.336	13	109
M-16	(42.8) 257	61.22	2.019	0.275		100															
M-17	(43.0) 258	61.01	1.873	0.374	12	100	20.19	1.802	0.428	9	86	21.33	1.839	0.400	14	93	19.49	1.980	0.300	15	120

h：供試体高さ γ_d ：乾燥密度 e：間隙比 = $\frac{G_b \cdot \gamma_u}{\gamma_d} - 1$ G_b ：2.574 U_c ：均等係数

%：平均密度に対する上・中・下部密度の割合

$$\% = \frac{e}{e_{u,m,L}} \times 100$$

三軸試験結果一覧表

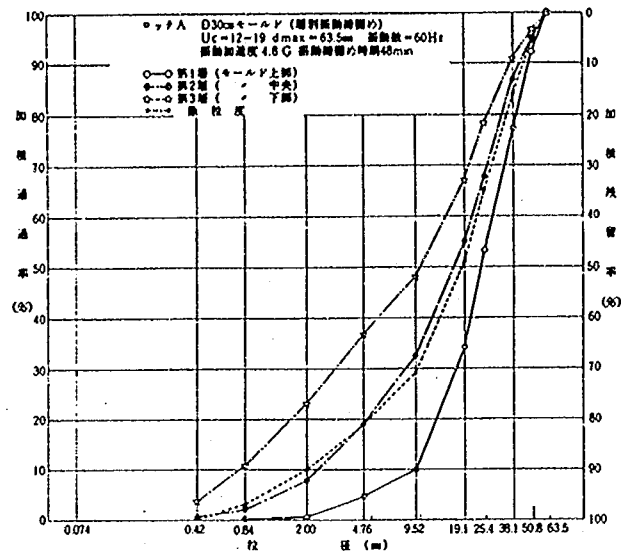
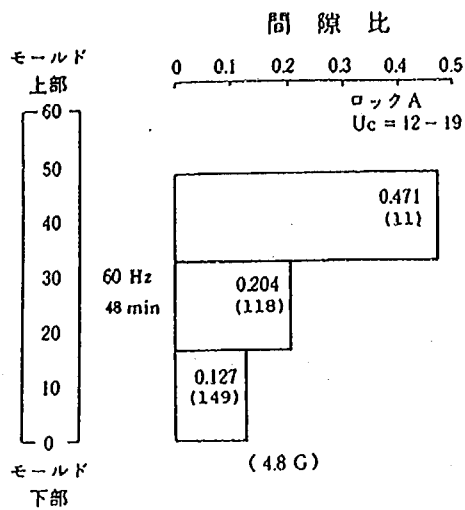
供試体作製 のための 締固め方法	試験 方法	側 圧 σ_3 kgf/cm ²	初 期 乾燥密度 ρ_{d0} g/cm ³	平 均 乾燥密度 $\bar{\rho}_{d0}$ g/cm ³	間 隙 比 の 変 化				破 壊 時							破砕率 B_M %	ϕ_0 kgf/cm ²	せん断抵抗 角(ϕ) ・ 見掛けの粘 着力(C)
					初 期 間隙比 e_0	平 均 初 期 間隙比 $\bar{e}_0$	圧密後 間隙比 e_c	平 均 圧密後 間隙比 $\bar{e}_c$	破壊時 の 間隙比 e_f	$(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max}$ $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$	軸ひずみ ϵ_f %	$\Delta V/V$ %	E kgf/cm ²	ポアソン 比 ν	主応力 比 σ_1/σ_3			
突固め 試験機	TT-1	2.0 (700)	1.901	1.900	0.354	0.355	0.332	0.316	0.338	17.934 (13.934)	7.00	-0.17	199	0.5123	7.96	1.78	50.98	$\phi = 43.52^\circ$ kgf/cm ² C=1.06
	TT-2	4.0 (1370)	1.900		0.355		0.310		0.298	30.433 (22.433)	8.10	0.88	277	0.4457	6.61	3.17	47.49	
	TT-3	6.0 (1530)	1.898		0.356		0.306		0.288	43.529 (31.529)	8.20	1.36	385	0.4178	6.25	3.91	46.41	
電 気 ハンマー	MT-6	2.0 (700)	1.901	1.898	0.354	0.356	0.332	0.323	0.342	18.049 (14.049)	5.90	-0.80	238	0.5675	8.02	-	51.11	$\phi = 44.41^\circ$ kgf/cm ² C=0.86
	MT-2	4.0 (1200)	1.893		0.360		0.321		0.308	29.850 (21.850)	8.30	0.96	263	0.4421	6.46	3.41	47.05	
	MT-5	6.0 (1170)	1.899		0.355		0.317		0.299	44.548 (32.548)	8.60	1.42	378	0.4173	6.42	5.38	46.94	

() 内は、圧密による体積変化量の値を示す。

$$e_0 = \frac{G_b}{\rho_{d0}} - 1 \quad G_b = 2.574 \quad E = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\epsilon_f} \times 100 \quad \phi_0 = \sin^{-1} \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{\sigma_{1f} + \sigma_3}$$

(1) 松本，豊田： ロック材料の相対密度試験 土木研究所資料 1757号

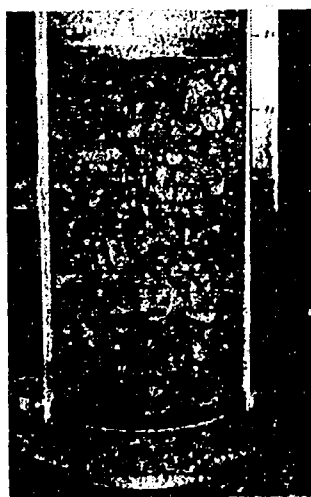
供試体上部と下部でかなり密度差が生じる。また粒度分布も異なり供試体上部は粗粒分が多く、下部には細粒分があつまる。



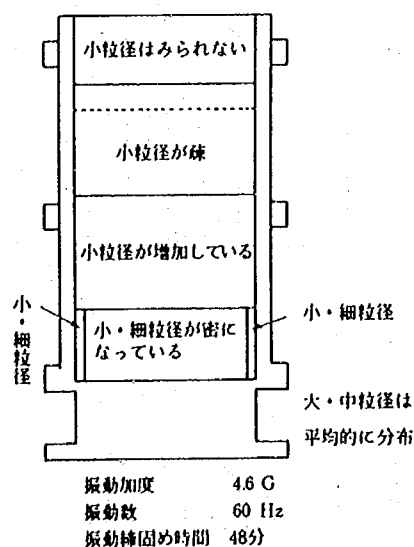
平均間隙比 $e = 0.249$

()内の数字は平均間隙比に対する
上・中・下層の間隙比の割合

振動テーブルによる供試体の密度分布および粒度分布



(2) 層別振動締め後 (ロック C)
 $U_c = 12-19$



粒度分布の状況

(2) 松本, 渡辺, 小川: ロック材料の三軸圧縮試験方法に関する実験的検討
土木技術資料 1984, 3

表-1 試験の方法・条件

項 目	方 法・条 件
供 試 体 寸 法	100×高20cm
圧密後供試体間隙比	0.60
せん断速度 %/min	供試体高さに対する百分率 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 1.25, 1.50, 1.75, 2.00
目標試験荷重	2, 4, 6kgf/cm ²

供	上層部	M: 平均間隙比
試	中層部	L: M + 0.05
体	下層部	D: M - 0.05

表-2 供試体の密度および最大主応力産等

試験ケース (供試体下よりの の標記)	側 圧 σ_3 (kgf/cm ²)	代 表 性 値	供試体作成時間隙比			間 隔 比			破壊時 軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kgf/cm ²)	強度定数 ϕ (度) C (kgf/cm ²)	凡 例 記 号
			供 試 体 下 部	供 試 体 中 部	供 試 体 上 部	初 期 e_0	圧密後 e_c	破壊時 e_f			
I (D→M→L)	1.55	D-密詰め M-標準詰め L-緩詰め	0.318	0.372	0.419	0.369	0.349	0.340	14.47	38.0 22.5	.
	3.0		0.335	0.385	0.435	0.384	0.350	0.366	18.48		
	4.7		0.353	0.398	0.449	0.399	0.350	0.393	24.18		
	5.55		0.357	0.398	0.453	0.402	0.349	0.389	27.23		
II (D→L→M)	1.5	Gb=2.52 Uc=7 Q 3.4%	0.322	0.422	0.374	0.371	0.350	0.345	12.40	38.9 18.0	×
	2.7		0.336	0.430	0.386	0.383	0.350	0.363	16.73		
	4.5		0.342	0.439	0.398	0.391	0.350	0.378	23.34		
			0.353	0.447	0.395	0.397	0.350	0.387	26.64		
III (M→D→L)	1.6	St=133 kgf/cm ² 板・棒状	0.372	0.321	0.422	0.371	0.350	0.347	13.98	40.9 16.5	+
	3.25		0.387	0.336	0.431	0.383	0.350	0.369	18.73		
	4.7		0.389	0.345	0.445	0.392	0.350	0.373	24.53		
	5.8		0.402	0.347	0.448	0.398	0.350	0.392	29.84		
IV (M→L→D)	1.5		0.371	0.422	0.323	0.371	0.349	0.341	13.41	41.6 15.7	△
	3.4		0.380	0.437	0.335	0.388	0.350	0.368	19.73		
	4.8		0.394	0.437	0.348	0.392	0.350	0.380	25.61		
	5.7		0.402	0.450	0.345	0.398	0.350	0.383	30.02		
V (L→D→M)	1.37		0.424	0.319	0.376	0.376	0.350	0.336	12.41	39.2 1.79	□
	2.6		0.433	0.336	0.387	0.384	0.350	0.360	16.30		
	4.8		0.442	0.346	0.391	0.392	0.350	0.380	23.97		
	6.2		0.448	0.355	0.389	0.398	0.350	0.392	28.96		
VI (L→M→D)	1.75		0.420	0.377	0.319	0.371	0.351	0.338	12.53	43.8 0.99	◇
	3.1		0.435	0.392	0.340	0.388	0.350	0.357	18.54		
	4.8		0.445	0.393	0.341	0.392	0.350	0.380	25.99		
	5.5		0.442	0.402	0.346	0.395	0.350	0.388	29.49		
VII (M→M→M)	1.7		0.392	0.395	0.395	0.394	0.350	0.363	12.15	41.9 1.15	○
	2.6		0.415	0.414	0.414	0.414	0.350	0.375	15.46		
	4.3		0.431	0.431	0.428	0.430	0.347	0.398	22.32		
	5.75		0.396	0.396	0.402	0.398	0.350	0.325	28.35		

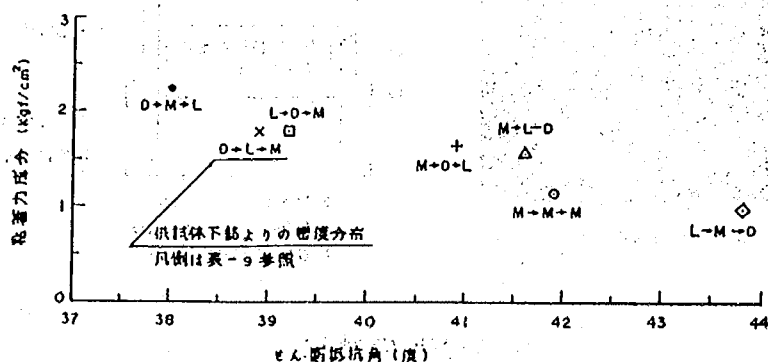


図-1 せん断抵抗角と粘着力成分

配布先住所

土木研究所資料第 2532 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印