



土木研究所資料

羽地ダムロック材(輝緑凝灰岩) の材料試験

昭和61年10月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © 1986 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。

羽地ダムロック材(輝緑凝灰岩) の材料試験

フィルダム研究室 松 本 徳 久

” 豊 田 光 雄

関東地建宮ヶ瀬ダム 小 川 優
工 事 事 務 所

要旨

羽地ダムは、羽地大川水系羽地大川に多目的ダムとして計画中の堤高が66.5mのロックフィルダムである。内部ロック材として輝緑凝灰岩が用いられることが計画されているが、輝緑凝灰岩は緑泥石を含むため岩石の劣化が懸念された。

本試験は、輝緑凝灰岩の劣化および試験状態の違いによるせん断強度の把握を目的として、物理試験、乾湿の繰り返し試験および三軸圧縮試験を行った。

この結果、輝緑凝灰岩の比重は2.83～2.92、吸水量1.0～1.6%で、乾湿の繰り返しを行っても岩石の劣化はきわめて小さいこと、飽和状態の内部摩擦角は不飽和状態に比べ3～4度低下することがわかった。

キーワード

フィルダム、ロック材料、輝緑凝灰岩、三軸圧縮試験、乾湿繰り返し試験、羽地ダム

目 次

1. はじめに	1
2. 原石山の地質と材料の粒度	2
2.1 原石山の地質概要	2
2.2 輝緑凝灰岩の鉱物的特徴	3
2.3 材料の粒度	5
3. 試験材料	11
4. 物理試験	12
4.1 比重および吸水量	12
4.2 粒子形状	16
4.3 圧裂強度	19
5. 泥質輝緑凝灰岩の乾湿の繰り返し試験	23
5.1 試験概要	23
5.2 岩石の飽和度等を変えた乾湿の繰り返し試験	23
5.3 試験結果	26
6. 締固め試験	44
6.1 試験方法	44
6.2 締固まり特性	47
6.3 最大、最小密度	55
7. 透水試験	58
8. 三軸圧縮試験	59
8.1 試験方法	59
8.2 泥質輝緑凝灰岩における相対密度とせん断強度	63
8.3 泥質輝緑凝灰岩における均等係数とせん断強度	70
8.4 混合状態のせん断強度	72
8.5 飽和状態のせん断強度	81

9. まとめ	83
9.1 輝緑凝灰岩のまとめ	83
9.2 密度と強度常数のまとめ	84

1. はじめに

羽地ダムは、羽地大川水系・羽地大川に計画中の堤高 66.5 m, 堤体積 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 総貯水量 $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ のロックフィルダムである。ロック材として砂岩および輝緑凝灰岩が対象とされている。このうち輝緑凝灰岩については、泥質のものと砂質のものとがあり、泥質輝緑凝灰岩は緑泥石を多く含むため、特に乾湿の繰り返し等により泥土化することが懸念された。このためロックゾーンを2つのゾーンに分け、外部には砂岩を内部には輝緑凝灰岩を使用するゾーニングが計画されている。

これまでに北部ダム事務所の依頼により、土研フィルダム研究室で実施した羽地ダムのロック材に関する試験は以下のとおりである。

S 57年度 CL 級砂岩（通称砂岩Ⅰ）の物理試験および三軸圧縮試験

S 58年度 CM 級砂岩（通称砂岩Ⅱ）の物理試験および三軸圧縮試験

S 59年度 泥質輝緑凝灰岩の物理試験および三軸圧縮試験と乾湿の繰り返し試験

S 60年度 砂質輝緑凝灰岩、泥質輝緑凝灰岩それぞれ単独の三軸圧縮試験と泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩とが混合状態として原石山から採取されることを踏えて混合状態における三軸圧縮試験と泥質輝緑凝灰岩の乾湿の繰り返し試験

本報告は、これまでのロック材の試験のなかで、砂岩に関する試験を除き、泥質および砂質輝緑凝灰岩の①物理的性質および劣化の度合、②締固まり特性、③透水係数、④せん断強度に関する試験についてとりまとめ、輝緑凝灰岩の密度および強度定数の設計値について検討を加えたものである。なお砂岩の物理的性質およびせん断強度については、「土研資料第 2209 号羽地ダムロック材料試験報告 S 60. 3 月」を参考にされたい。

2. 原石山の地質と材料の粒度

2.1 原石山の地質概要

輝緑凝灰岩の原石山（通称 R-1 原石山という）は、図-2.1 に示すようにダムサイトから約 1 km 離れた上流左岸地点にある。なお、外部ロックに使用が考えられている砂岩の原石山（平南地区）はダムサイトから約 13 km 離れたところにある。

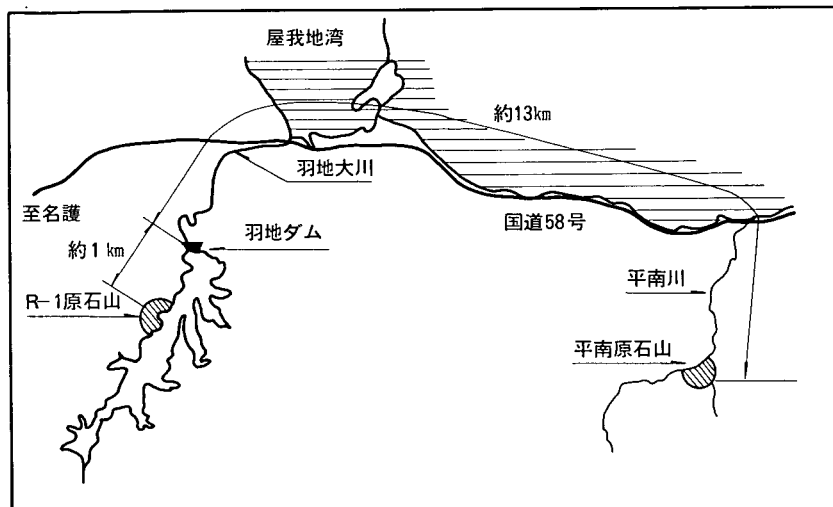
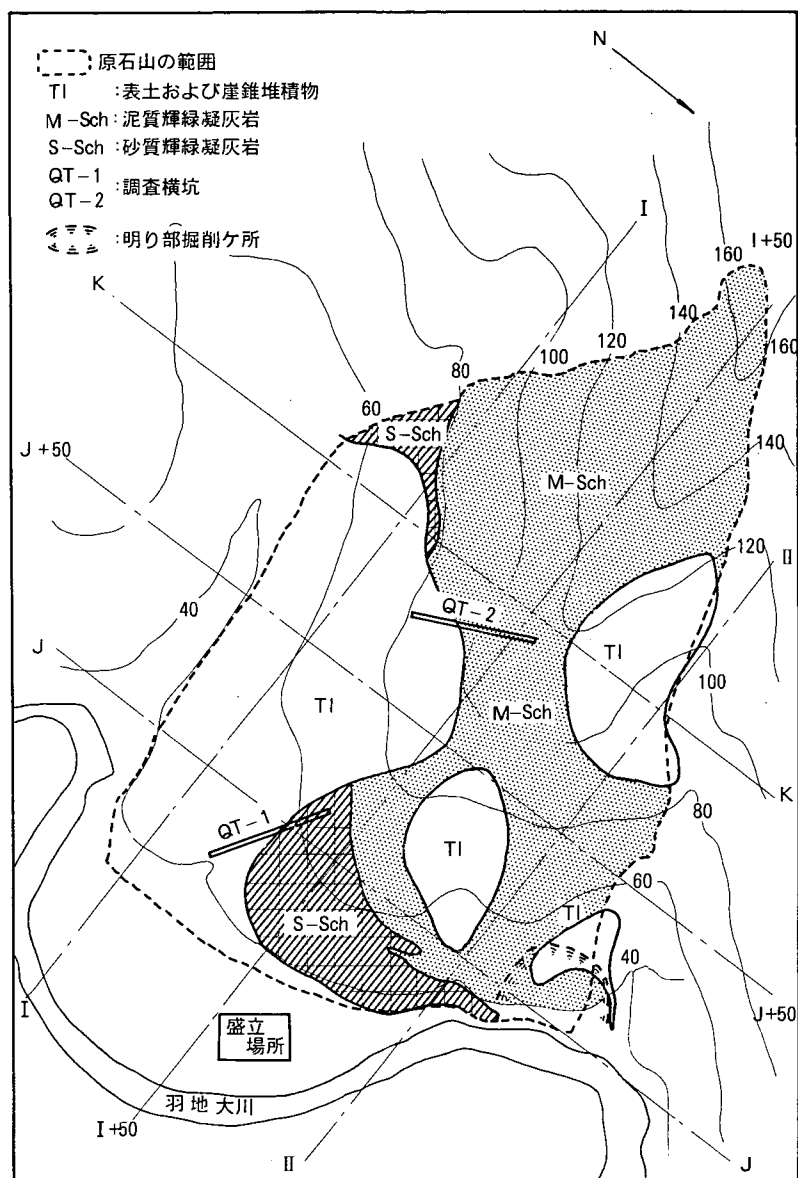


図-2.1 原石山の位置図

R-1 原石山の輝緑凝灰岩は砂質輝緑凝灰岩（S-Sch）と泥質輝緑凝灰岩（M-Sch）からなっている。

図-2.2 に R-1 原石山の地質平面図、図-2.3 に地質断面図を示す。どの断面においても砂質輝緑凝灰岩は泥質輝緑凝灰岩の下部に分布しており、その境界は必ずしも明確でないが、おおよそ E L. 70 m 付近より上部が泥質輝緑凝灰岩、下部が砂質輝緑凝灰岩である。一部には、泥質輝緑凝灰岩の薄い層が、砂質輝緑凝灰岩のなかにレンズ状に分布することもある。砂質および泥質輝緑凝灰岩の分布比率は、採取予定範囲においてはほぼ 1 対 1 の割合である。

高標高部よりリベンチカット工法で原石山を掘削した場合、採取時には泥質輝緑凝灰岩および砂質輝緑凝灰岩はあまり混合されない状態で採取されるが、泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩の境界付近では、両者が混合状態で採取されと考えられる。高標高部では泥質輝緑凝灰岩が、低標高部では砂質輝緑凝灰岩が分布するため、堤体盛立の初期の段階では泥質輝緑凝灰岩が主となり、砂質輝緑凝灰岩は盛立の後期に用いられることになろう。



図－2.2 原石山の地質平面図

2.2 輝緑凝灰岩の鉱物的特徴

泥質および砂質の輝緑凝灰岩の鉱物的特徴を表－2.1に示す。¹⁾ 輝緑凝灰岩は古生代～中生代の海底火山の噴出物が黒色千枚岩のうえに堆積したものである。構成鉱物のオリジナルなものは輝石、角閃石、斜長石であるが、輝石および角閃石が変質して緑泥石となっている。構成鉱物のなかで緑泥石の多いものを「泥質」輝緑凝灰岩、斜長石の多いものを「砂質」輝緑凝灰岩と呼んでいる。

泥質輝緑凝灰岩が劣化しやすいと考えられる理由には、緑泥石という粘土鉱物を含むこと、岩石内にヘアークラックが多いことがあげられる。緑泥石が風化するとモンモリロナイトになる。

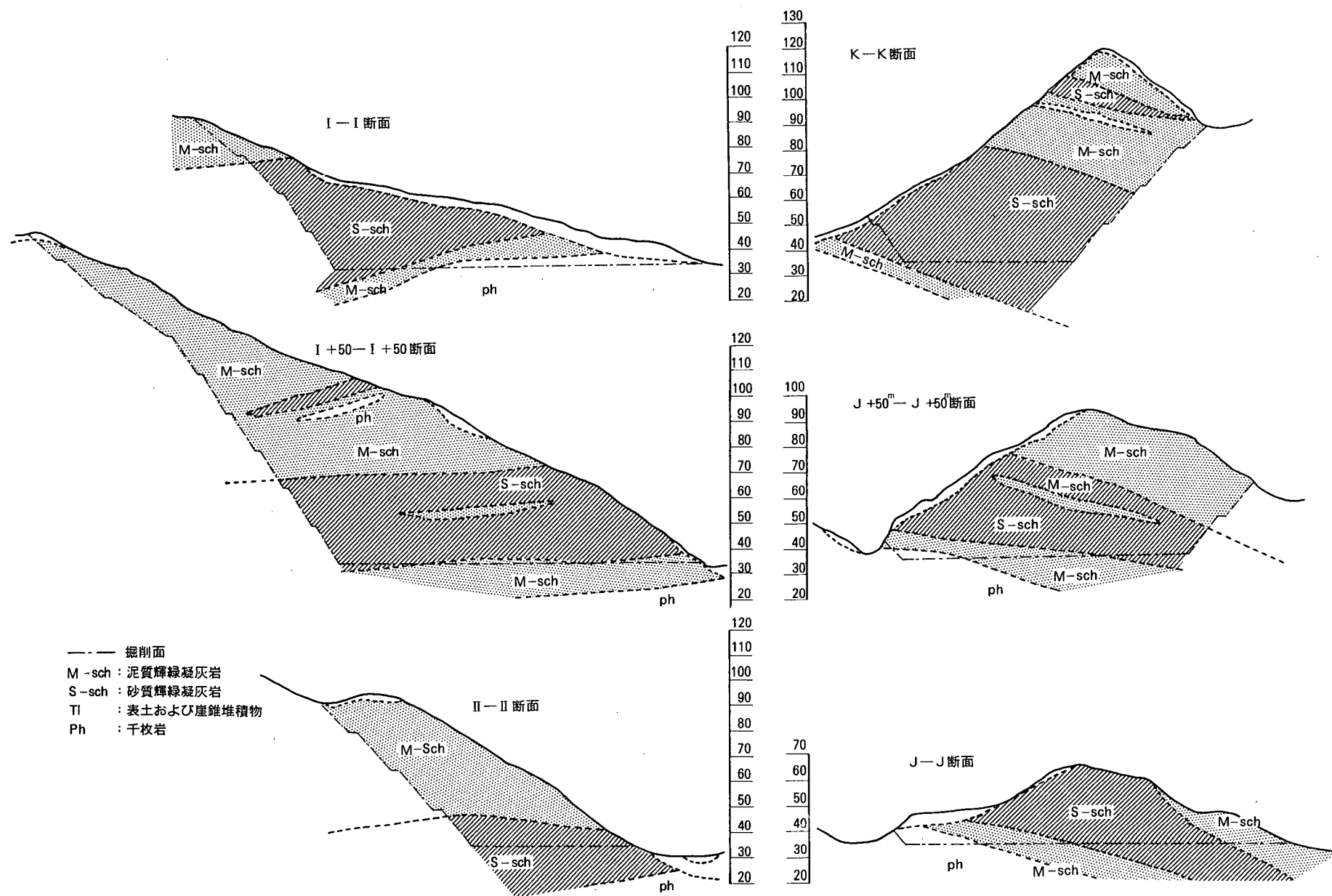


図 - 2.3 地質断面図

表 - 2.1 輝緑凝灰岩の鉱物成分

	泥質輝緑凝灰岩 M-Sch	砂質輝緑凝灰岩 S-Sch
鉱物成分	輝石 } → 緑泥石 角閃石 } (比重 3.0 程度) 斜長石 }	斜長石 (比重 2.6 ~ 2.7) 緑泥石
色調および 硬 さ	暗緑色～緑色 中硬～やや軟	緑灰色～灰緑色 中硬

2.3 材料の粒度

QT-1, QT-2 横坑の展開図を図-2.4に示す¹⁾。横坑から得られる粒度（ここでは原粒度と呼ぶことにする）を表-2.2, 図-2.5に示す。QT-1 坑は深度30mまでは砂質輝緑凝灰岩, それ以降は泥質輝緑凝灰岩よりなり均等係数が6～8である。泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩を比べると, 砂質輝緑凝灰岩は D_{60} 粒径, D_{30} 粒径が泥質輝緑凝灰岩に比べ大きく粗粒であると言えるが, 発破火薬量が泥質輝緑凝灰岩の方がやや多く一概に比較できない面もある。

表 - 2.2 横坑粒度

横 坑 名	深 度 (m)	粒 径 (mm)				均等係数 Uc	火 薬 量 kg / m ³	地 質
		最大粒径 Dmax	60%粒径 通過率 D60	30%粒径 通過率 D30	10%粒径 通過率 D10			
QT-1	20-21	360	61	26	10	6	0.73	S
	25-26	200	42	17	5.1	8	0.63	S
	29-30	170	30	11	4.0	8	0.60	S
	34-35	280	29	11	5.0	6	0.81	M
	39-40	210	28	11	4.8	6	1.03	M
QT-2	15-16	180	23	6.6	—	—	0.98	M
	20-21	270	21	9.1	4.6	5	1.41	M
	25-26	300	29	10	—	—	1.58	M
	30-31	350	17	4.8	—	—	2.14	M
	35-36	320	33	7.6	—	—	2.14	M
	39-40	—	15	4.0	—	—	2.14	M
砂質輝緑凝灰岩(S)の平均値		243	44	18	6.4	7	0.65	—
泥質輝緑凝灰岩(M)の平均値		273	24	8.0	4.8	6	1.53	—

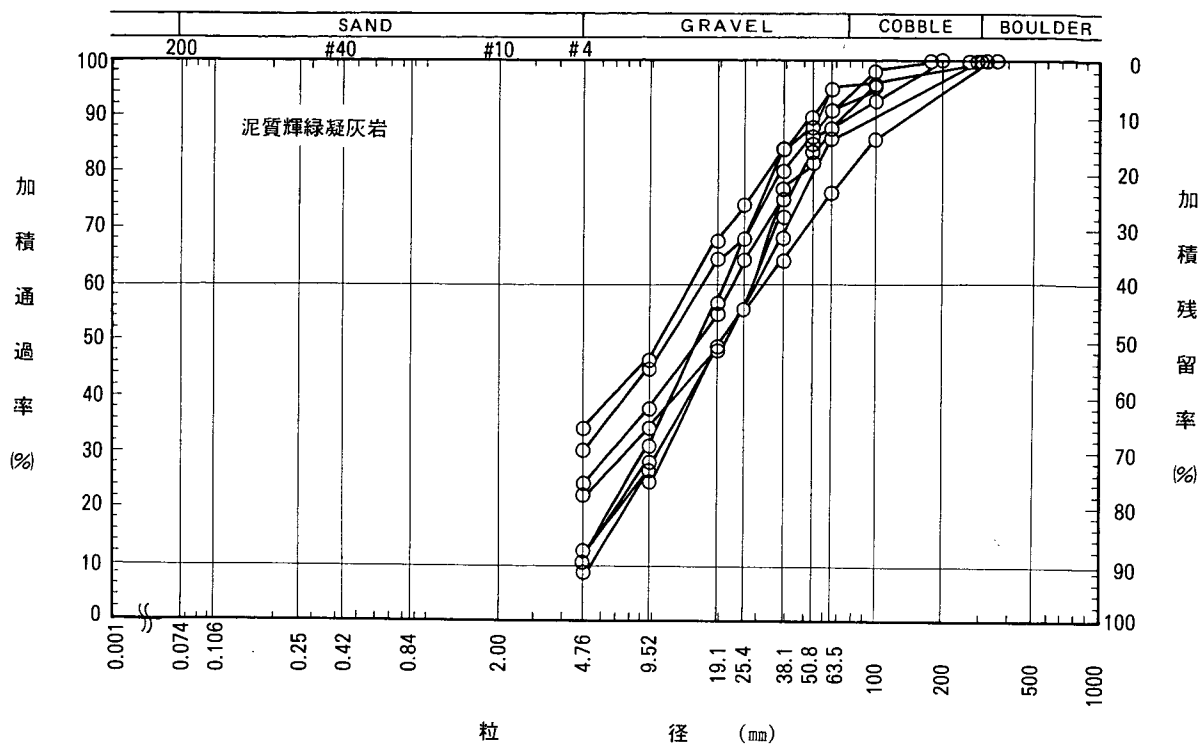


图 - 2. 5. a 原粒度 (泥質輝綠凝灰岩)

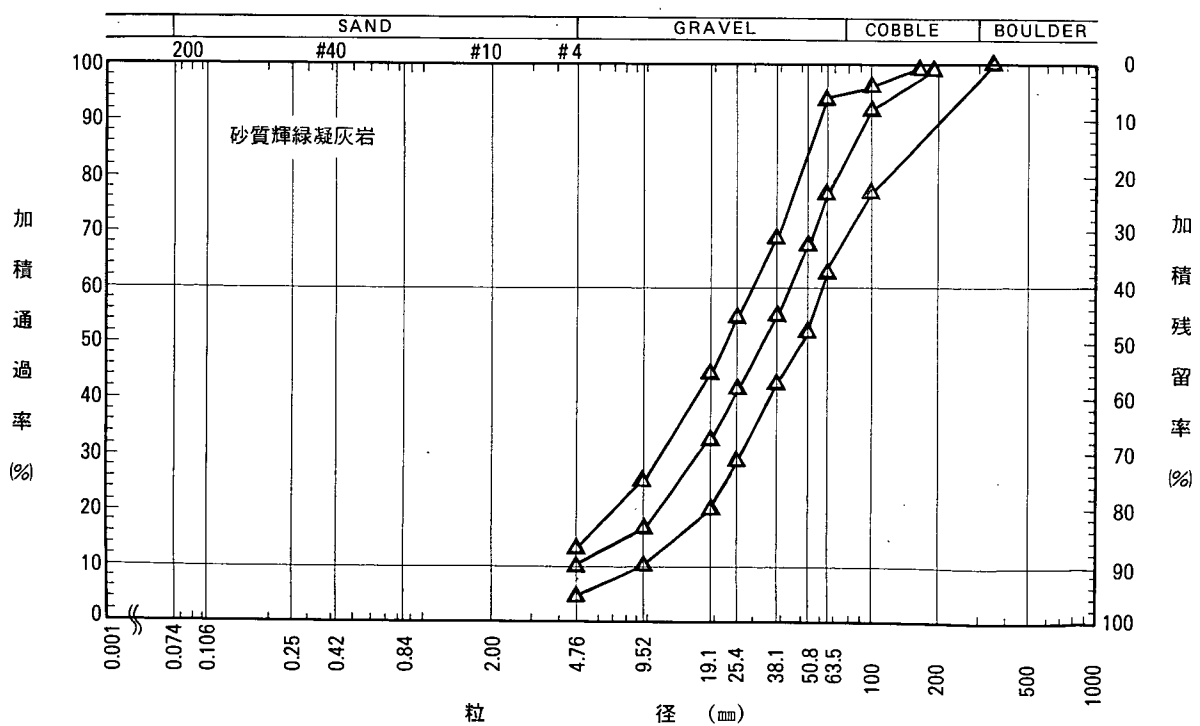


图 - 2. 5. b 原粒度 (砂質輝綠凝灰岩)

QT-2坑はすべて泥質輝緑凝灰岩より成り、 D_{60} 粒径、 D_{30} 粒径がQT-1坑に比べ小さく細粒である。しかし、発破火薬量がQT-1坑の2倍以上あるので注意を要する。

まき出し、転圧に伴い粒子破碎が生じ、ロック材料の粒度が変化することが予想される。そこで、小規模な盛立試験を行った。²⁾試験盛土の形状を図-2.6に示す。材料は泥質輝緑凝灰岩であり、図-2.2に示すR-1原石山の明り部より採取し、表-2.3に示す機械を用い、一層の仕上り厚さを30cmとして転圧した。転圧後の間隙比は0.35となった。ちなみに、この盛土は試験後には泥質輝緑凝灰岩の現地曝露試験に利用するものである。

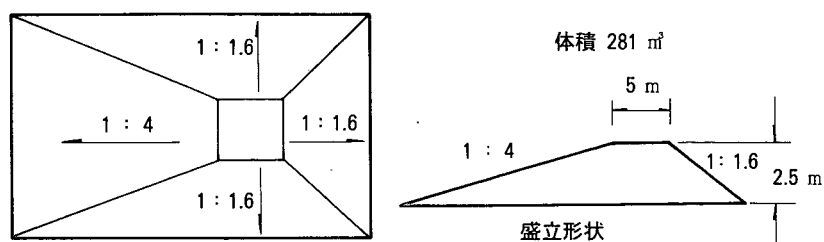


図-2.6 試験盛土の形状

表-2.3 盛立に使用した重機械

掘削・積込み	バックホウ 0.7 m³級 ドーザショベル (D-60S)	19 ton 21 ton
運 搬	ダンプトラック	4 ton
ま き 出 し	ドーザショベル (D-60S)	21 ton
転 圧	振動ローラ (ハンドガイド式)	0.8 ton

図-2.7, 図-2.8に発破直後、まき出し後、振動ローラ転圧後の粒度曲線を示す。表-2.4は均等係数、 D_{60} 粒径、 D_{30} 粒径等の変化を示したものである。これから次のことが言える。

- ① 転圧後の粒度範囲は、まき出し後の粒度範囲とほぼ一致しており、発破直後の粒度の相似粒度に近い。
- ② まき出し後の粒度は、4.76 mm, 2.00 mm通過量が発破直後の2倍以上、 D_{60} , D_{30} 粒径も発破直後に比べかなり小さくなり材料の細粒化が認められる。転圧後はまき出し後とあまり変わらず振動ローラ転圧による細粒化はない。
- ③ 均等係数で比較すれば転圧後の均等係数は平均値で19程度となり発破直後の均等係数（平均値17）とあまり変わらない。なお、発破直後の均等係数が横坑粒度の均等係数（ $U_c=6\sim8$ ）と大きく異なる理由のひとつには、発破火薬量と発破条件（横坑内と明り部）のちがいがあげられる。

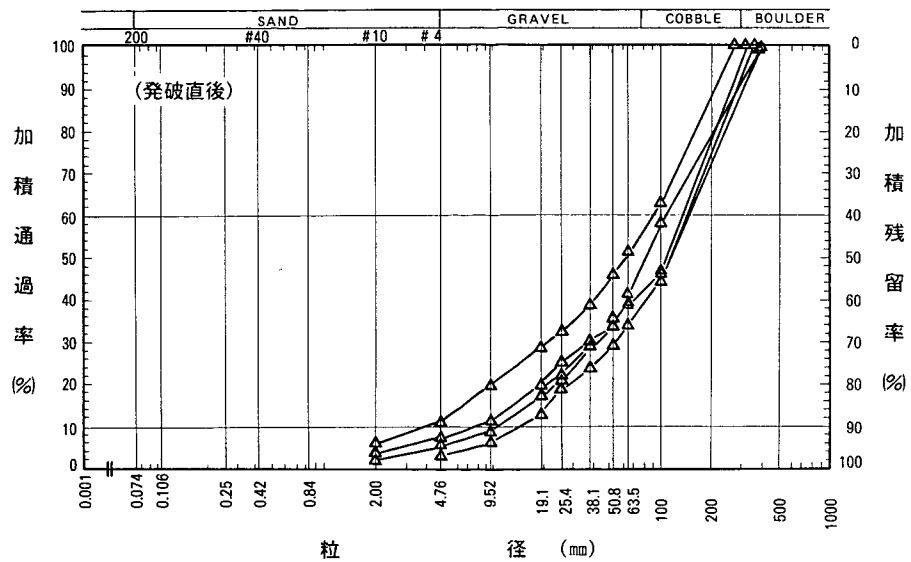


図 - 2.7. a 発破直後の粒度曲線

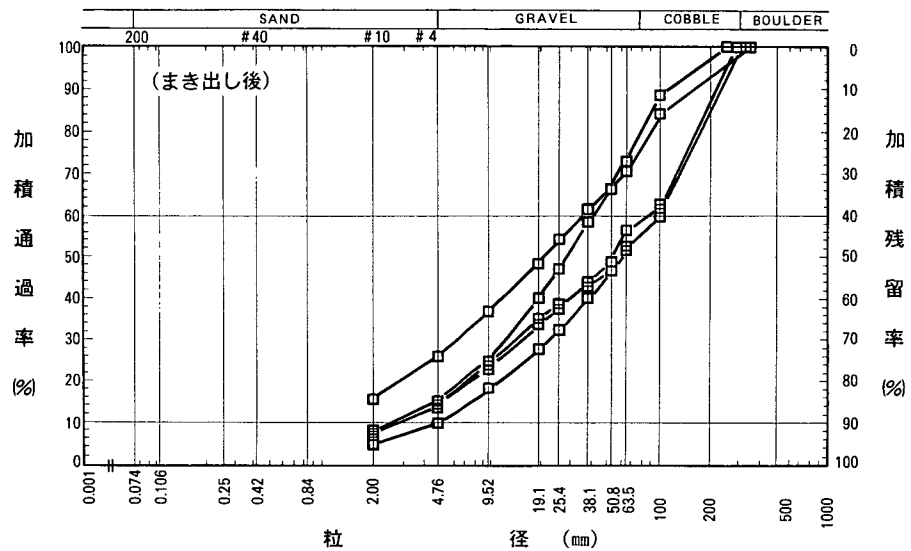


図 - 2.7. b まき出し後の粒度曲線

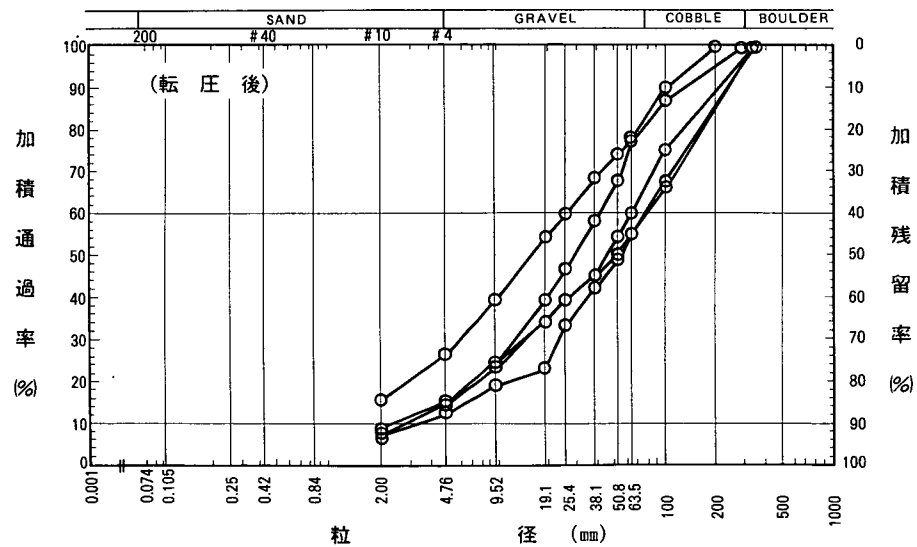
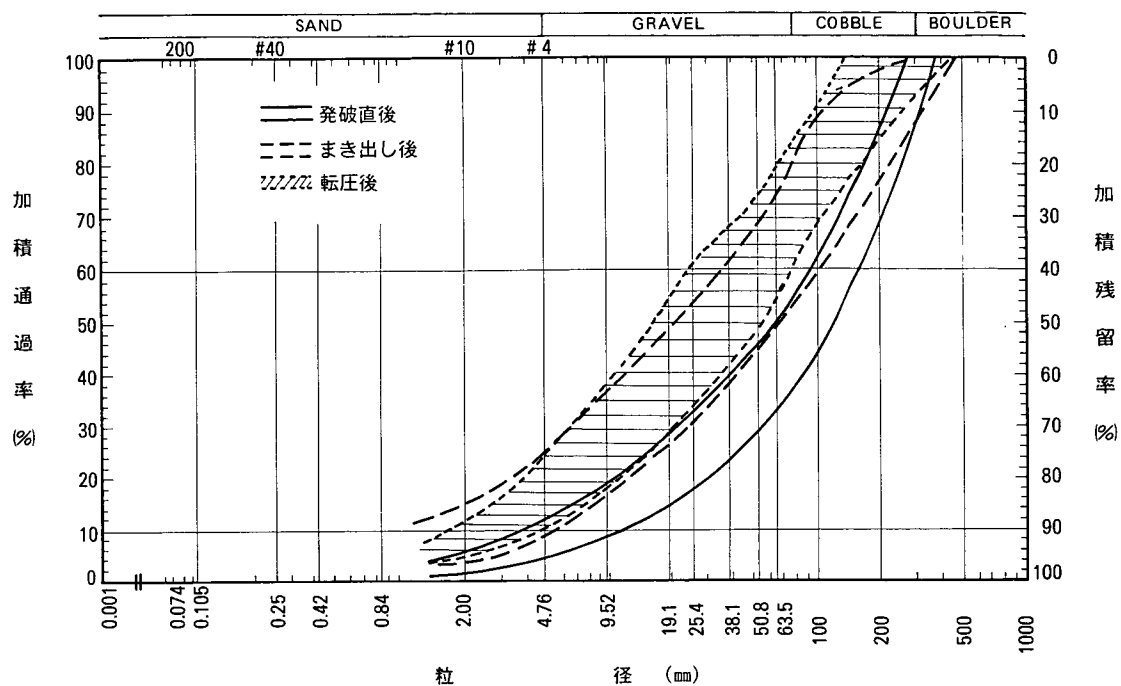


図 - 2.7. c 転圧後の粒度曲線



図－2.8 粒度曲線の重ね合せ

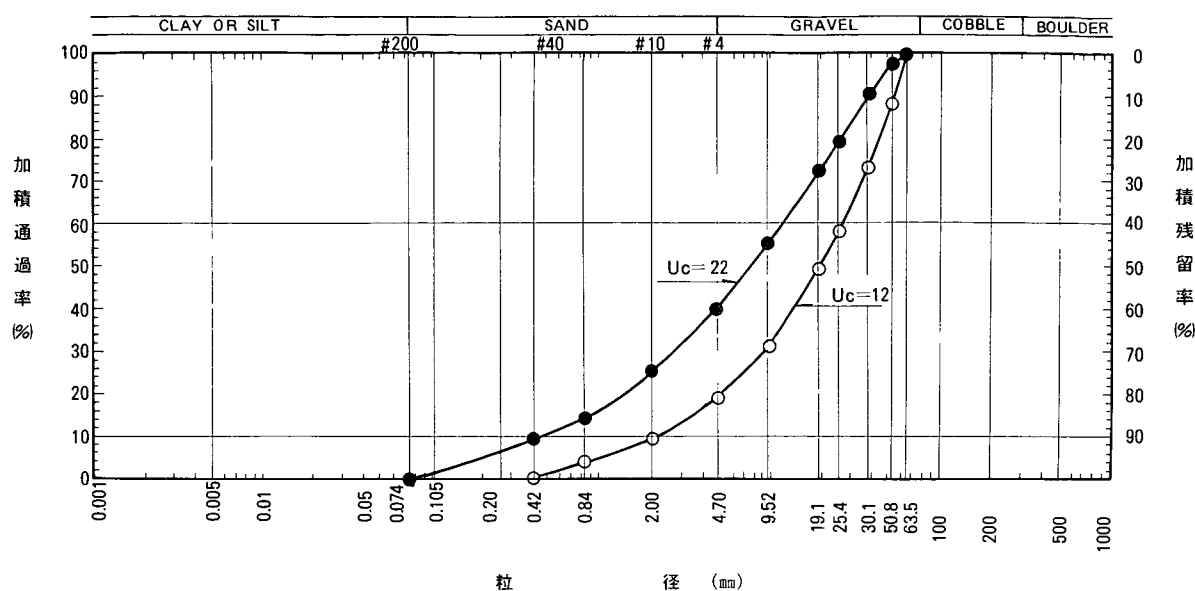
表－2.4 発破直後，まき出し後，転圧後の粒度変化

		最大粒径 Dmax mm	63.5 mm 通過量 %	4.76 mm 通過量 %	2.00 mm 通過量 %	D ₆₀ 粒 径 mm	D ₃₀ 粒 径 mm	D ₁₀ 粒 径 mm	均等係数
発 破 直 後	範 囲	285～390	34～51	5.2～11	2.5～5.4	93～165	23～55	4.5～14	11～21
	平均値	348	41	7.0	3.4	140	40	9.0	17
まき出し後	範 囲	260～330	51～73	10～26	4.7～16	36～100	6.5～22	1.0～4.8	15～37
	平均値	288	61	16	8.7	72	15	2.9	27
転 圧 後	範 囲	190～340	55～78	12～26	6.5～13	26～80	6～21	1.6～4.0	12～20
	平均値	294	65	16	8.6	57	14	3.0	19

3. 試験材料および試験粒度

泥質輝緑凝灰岩の試料は図－2.2に示すR－1原石山の明り部，砂質輝緑凝灰岩の試料はQT－1横坑内（図－2.4）の深度20～25mより採取した。

締固め試験および三軸圧縮試験に用いた試料の試験粒度は，均等係数が12および22の2種類とした。試験粒度を図－3.1，表－3.1に示す。



図－3.1 試験粒度

表－3.1 試験粒度

$U_c = 12$

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	0.42～0.074
加 積 残 留 率(%)	12	27	42	51	69	81	91	96	100	—
各粒径毎の残留率(%)	12	15	15	9	18	12	10	5	4	—
最 大 粒 径	63.5 ^{mm}	D_{60} 粒径	26 ^{mm}	D_{10} 粒径	2.2 ^{mm}	均等係数	12	4.76mmの通過率	19%	

$U_c = 22$

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	0.42～0.074
加 積 残 留 率(%)	3	10	21	28	45	60	75	86	91	100
各粒径毎の残留率(%)	3	7	11	7	17	15	15	11	5	9
最 大 粒 径	63.5 ^{mm}	D_{60} 粒径	13 ^{mm}	D_{10} 粒径	0.6 ^{mm}	均等係数	22	4.76mmの通過率	40%	

4. 物理試験

4.1 比重および吸水量

比重試験は4.76mmの粒径を境に、4.76mm以上の粒径はJIS-A-1110試験に準拠し、それ以下の粒径はJIS-A-1202試験に準拠して行った。吸水量試験はJIS-A-1110試験に準拠した。

表乾比重 (G_a) 絶乾比重 (G_b) 真比重 (G_g) および吸水量 (Q) は次式より求めた。

$$\begin{aligned} G_a &= \frac{B}{B-C} & A : \text{絶乾重量} \\ G_b &= \frac{A}{B-C} & B : \text{表乾重量} \\ G_g &= \frac{C}{A-C} \quad \text{土質材料の比重 } (G_s) \text{ に対応} & C : \text{水中重量} \\ Q &= \frac{B-A}{A} \times 100 (\%) \end{aligned}$$

泥質および砂質輝緑凝灰岩の比重および吸水量を表-4.1に示し、図-4.1には粒径と真比重、表乾比重、絶乾比重および吸水量との関係を示す。ここで平均比重 ($\bar{G}$) および平均吸水量 (Q) は各粒度階における残留率の重みをつけて次式によって求めた。

$$\bar{G} = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{G_i}} \quad Q = \sum f_i \cdot Q_i$$

f_i : 各粒度階における残留率

G_i : 各粒度階の絶乾比重 (ただし、粒径4.76mm以下は真比重)

Q_i : 各粒度階における吸水率 (粒径4.76mm以上)

表-4.1, 図-4.1からわかるように、泥質輝緑凝灰岩の平均比重は2.92程度、砂質輝緑凝灰岩2.83程度と泥質輝緑凝灰岩の方が砂質輝緑凝灰岩に比べ0.1程度大きい。これは比重の大きい緑泥石 (約3.0) が泥質輝緑凝灰岩に多く含まれるためである。

また、平均吸水量は泥質輝緑凝灰岩で1%程度に対し、砂質輝緑凝灰岩は1.6%程度である。

泥質および砂質輝緑凝灰岩の絶乾比重、吸水量を他岩種と比較するために図-4.2³⁾に示す。図中のAおよびBの記号は、Aがロック材およびリップラップ材として用いられるものであり、Bは表層部を良質岩で保護して用いられている。泥質および砂質輝緑凝灰岩は、絶乾比重および吸水量から判断する限りではAブロックに属し、ロック材およびリップラップ材として用いてもよい材料であることを示している。

表 - 4. 1 泥質および砂質輝緑凝灰岩の比重および吸水量

(泥質輝緑凝灰岩)

粒 径 (mm)	残 留 率 (%)		比 重			吸 水 量 Q (%)
	Uc=12	Uc=22	真比重 Gg	絶乾比重 Gb	表乾比重 Ga	
101.6 ~63.5	—	—	2.987	2.932	2.950	0.63
63.5 ~50.8	12	3	2.989	2.927	2.947	0.72
50.8 ~38.1	15	7	2.974	2.907	2.930	0.78
38.1 ~25.4	15	11	2.973	2.910	2.931	0.73
25.4 ~19.1	9	7	2.978	2.900	2.926	0.92
19.1 ~ 9.52	18	17	2.986	2.897	2.927	1.03
9.52~ 4.76	12	15	3.033	2.903	2.946	1.47
4.76~ 2.00	10	15	2.985	—	—	—
2.00~ 0.84	5	11	2.960	—	—	—
0.84~ 0.42	4	5	2.965	—	—	—
0.42~ 0.074	—	9	2.978	—	—	—
平均値 Uc=12	2.919					0.94
平均値 Uc=22	2.932					1.03

(砂質輝緑凝灰岩)

粒 径 (mm)	残留率 (%)	比 重			吸 水 量 Q (%)
		真比重 Gg	絶乾比重 Gb	表乾比重 Ga	
101.6 ~63.5	—	—	—	—	—
63.5 ~50.8	12	2.926	2.836	2.867	1.09
50.8 ~38.1	15	2.928	2.834	2.866	1.13
38.1 ~25.4	15	2.923	2.825	2.858	1.19
25.4 ~19.1	9	2.928	2.816	2.854	1.36
19.1 ~ 9.52	18	2.940	2.797	2.845	1.75
9.52~ 4.76	12	2.936	2.698	2.779	3.01
4.76 2.00	10	2.929	—	—	—
2.00~ 0.84	5	2.934	—	—	—
0.84~ 0.42	4	2.943	—	—	—
0.42~ 0.074	—	—	—	—	—
平 均 値	2.826				1.58

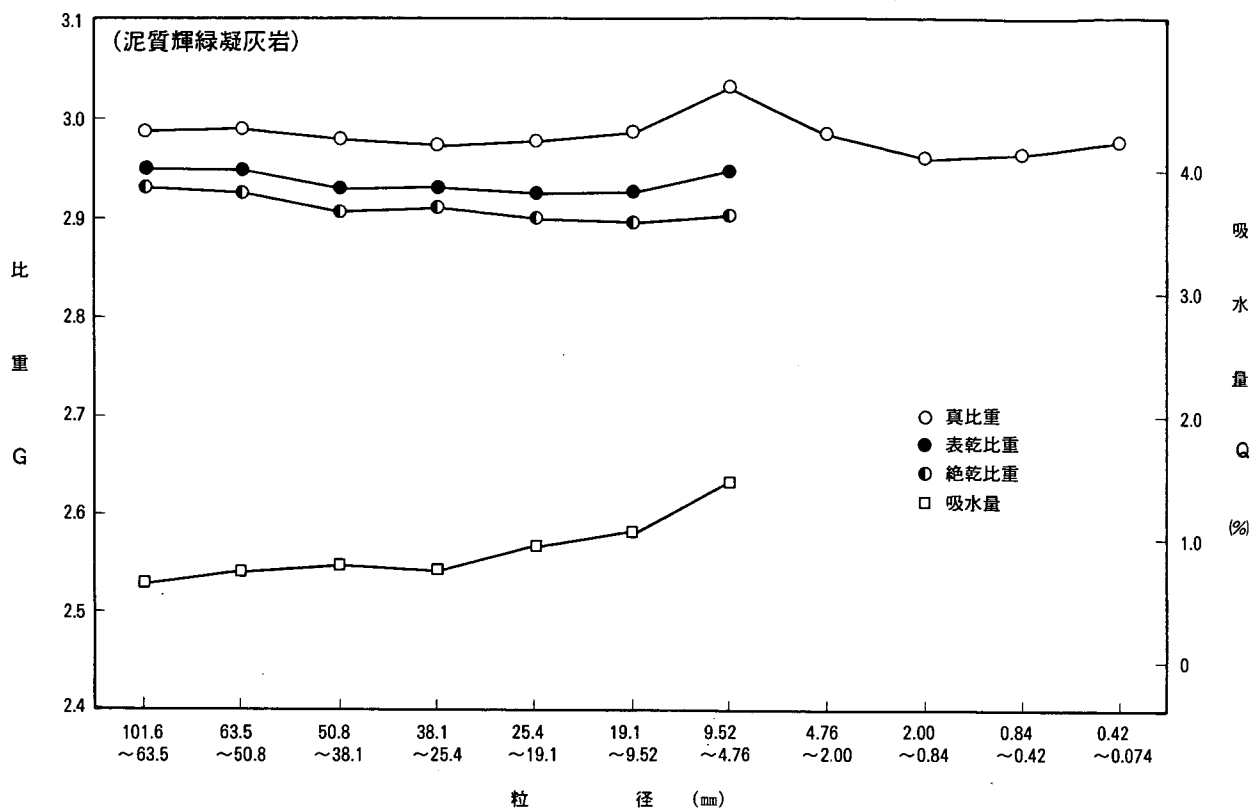


図 - 4. 1. a 泥質輝緑凝灰岩の比重および吸水量

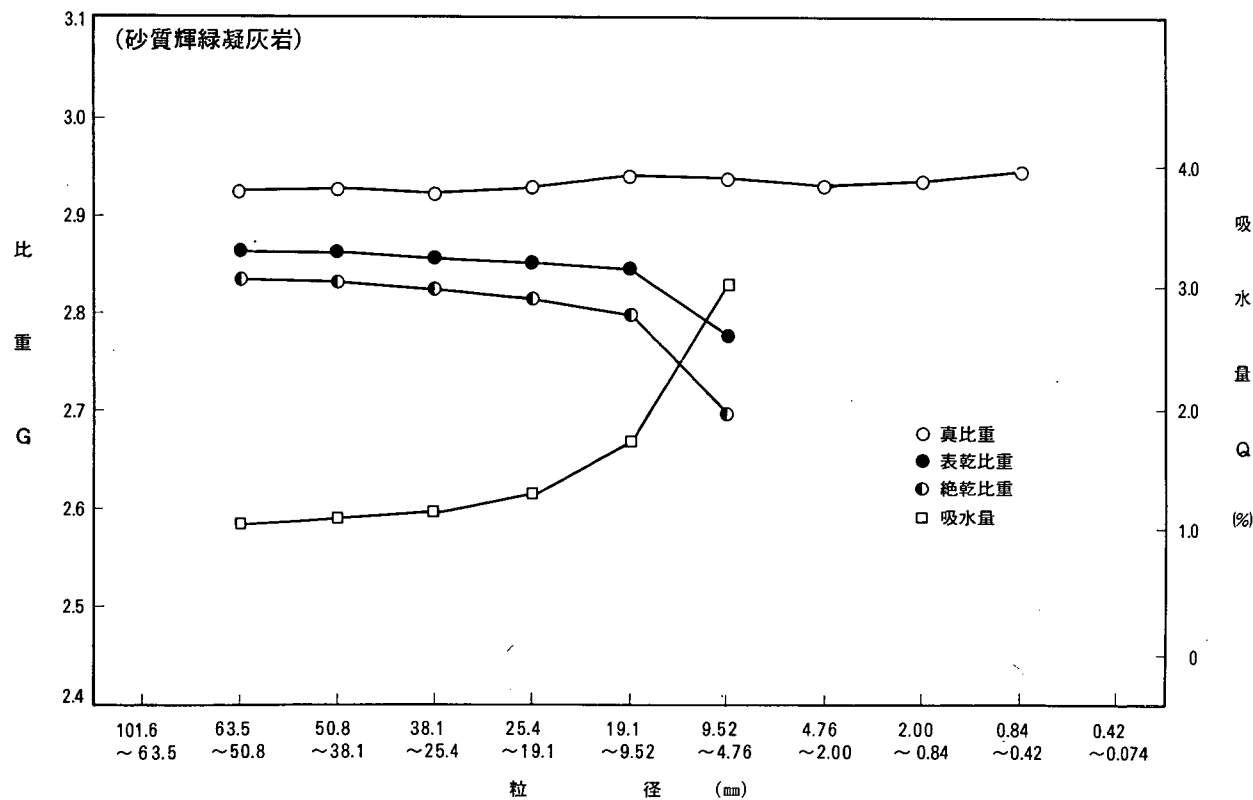


図 - 4. 1. b 砂質輝緑凝灰岩の比重および吸水量

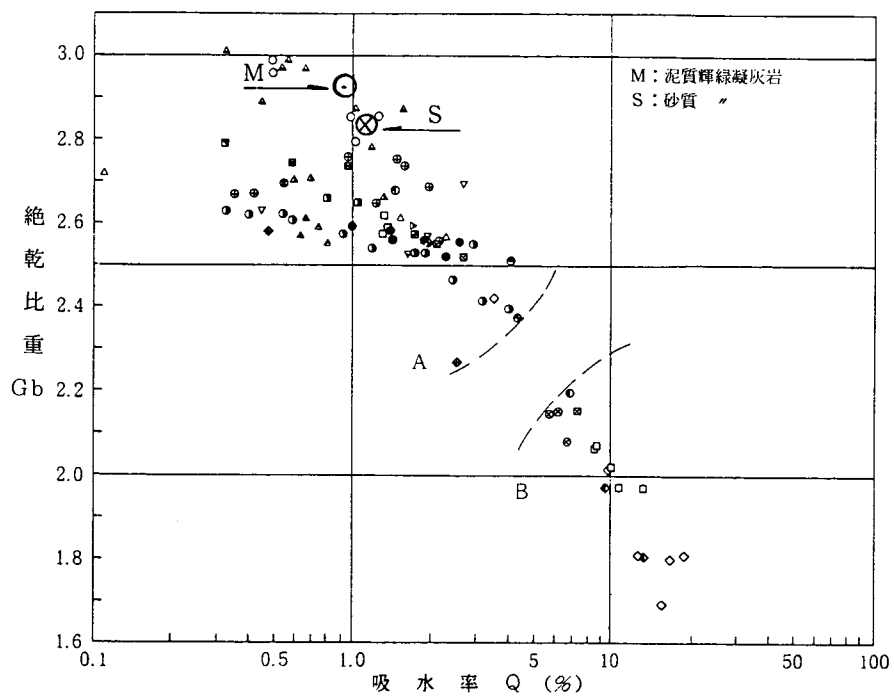


図 - 4.2 岩石の絶乾比重と吸水率

4.2 粒子形状

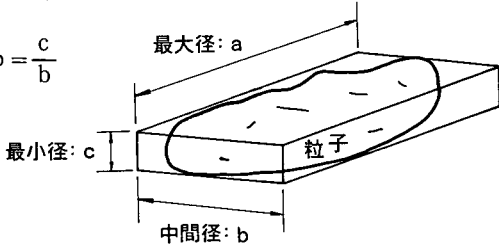
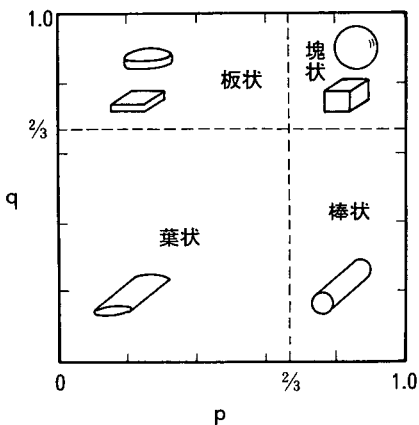
表－4.2 に示すように対象粒径を 25.4 mm 以上とし各粒径から30個ずつ抽出して岩石の最大径(a)、中間径(b)、最小径(c)をノギスで測定⁴⁾し、Zingg の分類に従って粒子形状を板状、塊状、棒状、葉状に分類⁵⁾する。

図－4.3 は横軸に偏平率をとり、縦軸に細長率をとって全粒径および各粒径毎にプロットしたものである。図－4.4 に板状、塊状、棒状、葉状の度数分布を示す。

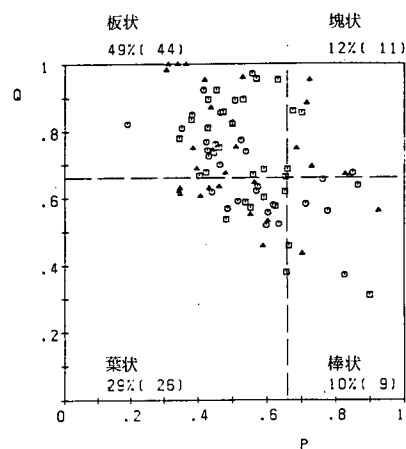
泥質輝緑凝灰岩は板状＞葉状＞塊状＞棒状の傾向を示し、砂質輝緑凝灰岩は板状＞棒状＞葉状＞塊状の順となっている。いずれにしても輝緑凝灰岩の形状は板状の傾向が強い。

これまでに当研究室でロック材の粒子形状を調べた結果によると他の岩種でも板状のものが多い。

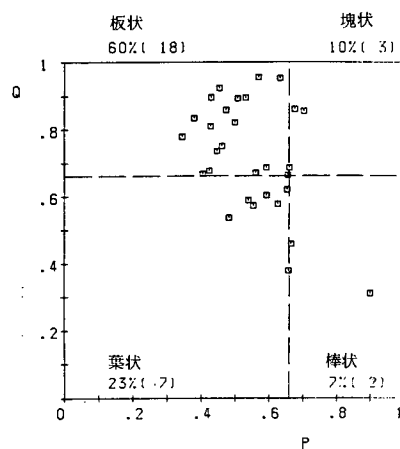
表－4.2 粒子形状の測定方法

対象粒径	63.5～50.8 mm, 50.8～38.1 mm, 38.1～25.4 mm
個数	各粒径当り30個
測定器具	ノギス 精度 1/20mm
測定方法	粒子の最大径、中間径、最小径を測定し、これから偏平率、細長率を求め Zingg の分類によって形状を判断する。 $\text{細長率 } q = \frac{b}{a}$ $\text{偏平率 } p = \frac{c}{b}$ 
形状の分類	板状 塊状 葉状 棒状 

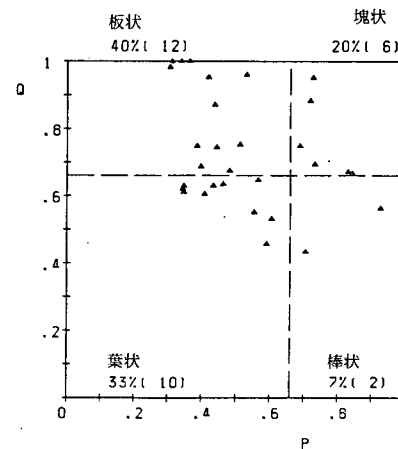
(泥質輝緑凝灰岩)



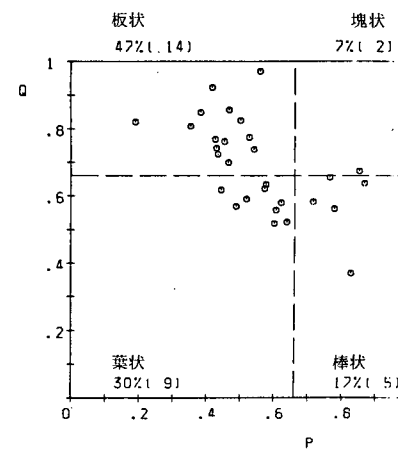
全粒径



粒径 63.5 ~ 50.8 mm

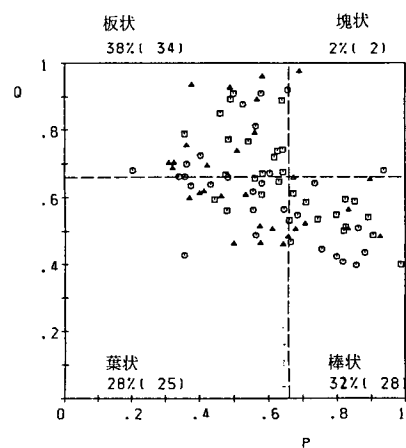


粒径 50.8 mm ~ 38.1 mm

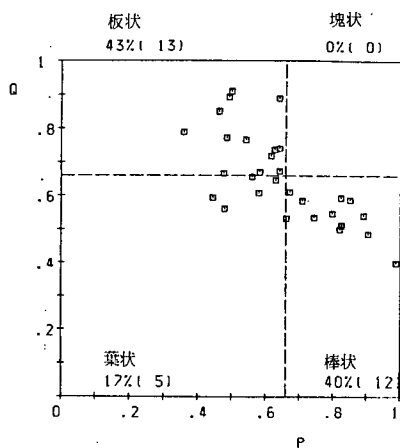


粒径 38.1 ~ 25.4 mm

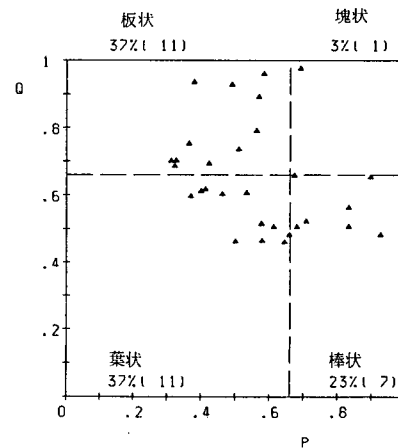
(砂質輝緑凝灰岩)



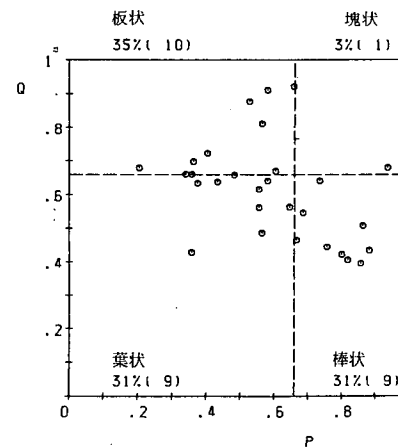
全粒径



粒径 63.5 ~ 50.8 mm

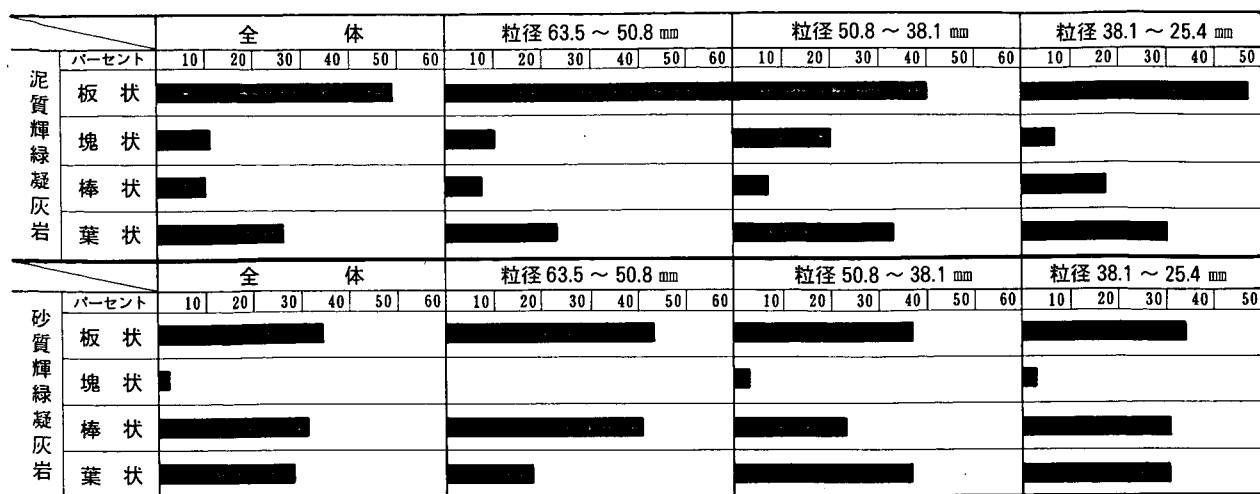


粒径 50.8 ~ 38.1 mm



粒径 38.1 ~ 25.4 mm

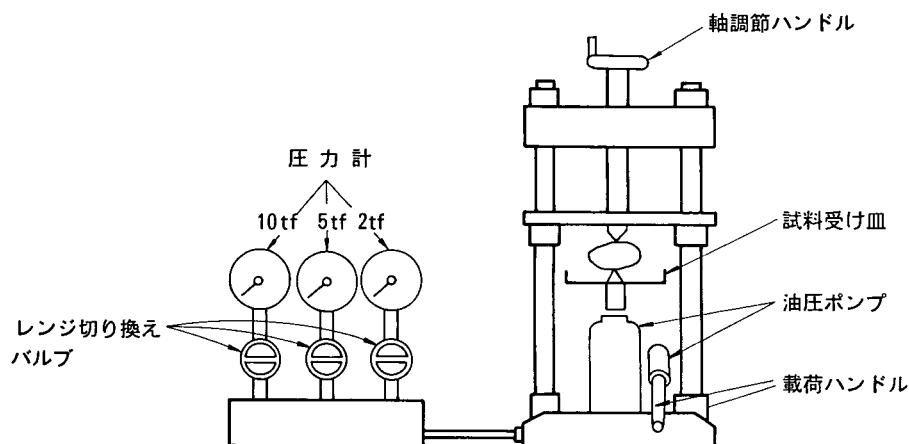
図-4.3 粒子形状の分布



図— 4. 4 粒子形状の分布

4.3 点载荷圧裂強度

点载荷圧裂強度（以下圧裂強度という）の測定には、粒子形状の測定に用いた試料を用い、気乾状態および含水状態の2種類の試験条件で行った。なお、含水状態とは2日間水浸した状態をいう。試験装置を図－4.5に示す。



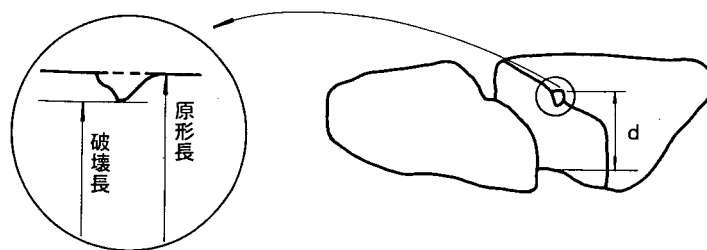
図－4.5 点载荷試験装置

圧裂強度（ σ_t ）は次式⁶⁾によって求める。

$$\sigma_t = 0.891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

F：極限荷重（kg） d：点载荷間隔（cm）

点载荷間隔は、岩種によって载荷ポイントが岩にくいこむことがあるので、これを考慮して図－4.6に示す破壊長とした。



図－4.6 点载荷間隔の測定

泥質および砂質輝緑凝灰岩の圧裂強度の最大値、最小値、平均値を表－4.3に示す。粒径が小さくなるにつれて圧裂強度は大きくなる。泥質輝緑凝灰岩の63.5～50.8mmの平均値は気乾状態で65 kgf/cm²、含水することによって51 kgf/cm²となり圧裂強度がいくぶん小さくなることを示

している。一方、砂質輝緑凝灰岩の気乾状態での圧裂強度は泥質輝緑凝灰岩とほぼ同じ68kgf/cm²を示すが、含水状態になっても圧裂強度の減少はなくその反対に大きめの値(82kgf/cm²)を示す。

表-4.3 圧裂強度の最大, 最小, 平均値

		泥質輝緑凝灰岩		砂質輝緑凝灰岩	
		気 乾	含 水 ^{*1)}	気 乾	含 水
粒 径 63.5~50.8mm (30) ^{*2)}	最大値	217.5 kgf/cm ²	182.5 kgf/cm ²	206.5 kgf/cm ²	263.6 kgf/cm ²
	最小値	9.2	2.4	18.5	5.4
	平均値	64.8	50.5	68.2	82.4
50.8~38.1 (30)	最大値	253.4	/	199.4	/
	最小値	11.1		18.1	
	平均値	84.2		78.0	
38.1~25.4 (30)	最大値	767.8	/	724.9	/
	最小値	10.9		20.0	
	平均値	132.9		146.4	

* 1) 含水状態: 2日間水浸後

* 2) 試験個数

図-4.7に圧裂強度を0~50kgf/cm², 51~100kgf/cm², 101kgf/cm²以上の3段階に分けて度数分布で示す。両岩種を比較してもさほど圧裂強度の違いは認められない。ただし、前述のように泥質輝緑凝灰岩においては含水状態になれば圧裂強度50kgf/cm²以下の度数が増えていることがわかる。

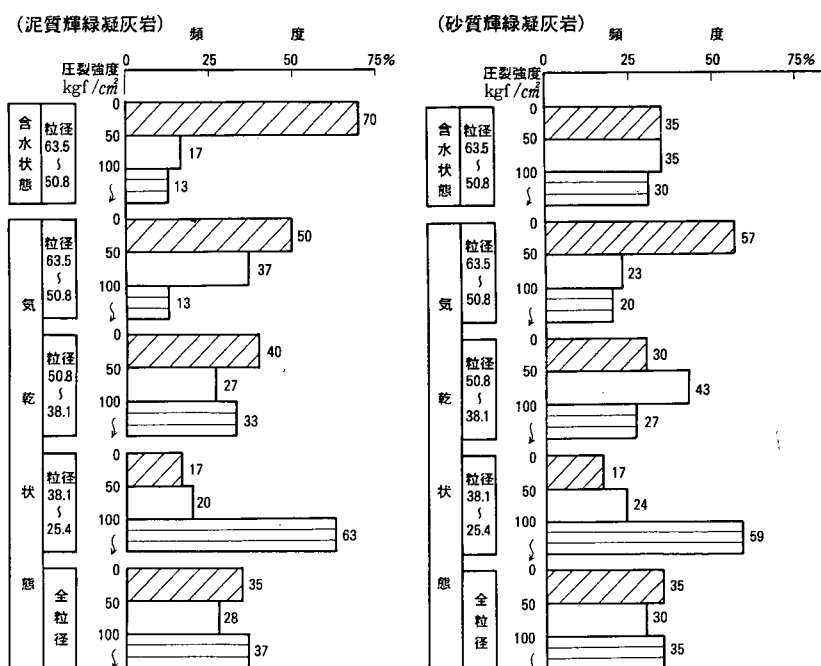


図-4.7 圧裂強度の度数分布

表－4.4 は他岩種を含めて絶乾比重，吸水量と圧裂強度の比較をしたものである。いずれの岩種においても試験値は30個程度の平均値である。図－4.8 は横軸に絶乾比重をとり縦軸には圧裂強度の値を示したものであり，両者の間に相関はほとんどない。図－4.9 は圧裂強度と吸水量との関係を示したものであり，吸水量が小さければ圧裂強度が大きくなる傾向を示し，圧裂強度と吸水量との相関が良いことを示している。泥質および砂質輝緑凝灰岩の場合，他の岩種と比較すると吸水量が小さい割には圧裂強度が小さい。

表 4.4 絶乾比重・吸水率および圧裂強度

ダム名	岩 種	絶乾比重 Gb	吸 水 率 Q %	圧裂強度 σ_i kgf/cm ²	粒子形状	記 号
羽 地	砂質輝緑凝灰岩	2.836	1.09	68	板 状	◇
	泥質輝緑凝灰岩	2.927	0.72	65	板 状	⊕
	砂 岩 I	2.571	2.19	61	塊 状	▼
	砂 岩 II	2.644	1.04	151	板 状	▼
辺野喜	粘 板 岩	2.718	0.33	151	板 状	△
七ヶ宿	流 紋 岩	2.417	2.61	119	板 状	+
三国川	はんれい岩	2.949	0.42	113	塊 状	▽
大分川	花 崗 岩 CH	2.614	0.42	114	板 状	⊕
	花 崗 岩 CM	2.556	1.09	103	板 状	●
竜 門	花 崗 岩	2.588	0.92	98	板 状	●
寒河江	粗粒玄武岩(新鮮)	2.716	1.56	126	板 状	□
	“ T-3 49-51	2.539	4.06	45	塊 状	□
	“ T-3 77	2.472	4.88	29	—	⊗
	“ T-4 30-35	2.566	3.04	52	塊 状	■
	“ 中風化 DO ₂	2.512	4.43	22	—	■

注) Gb・Q・ σ_i および粒子形状は粒径 63.5～50.8mm の平均値

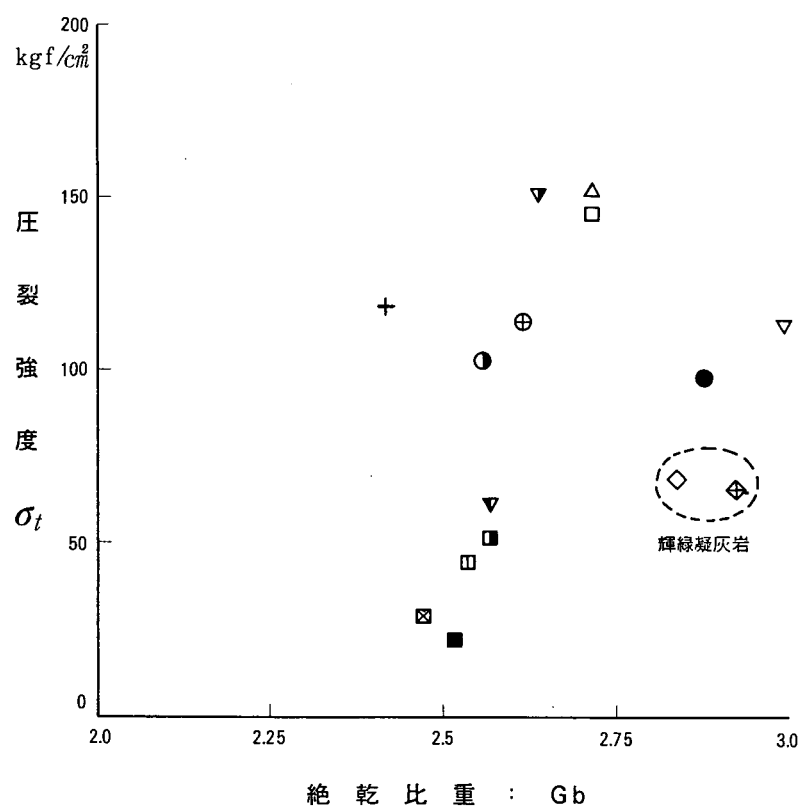


図 - 4.8 圧裂強度と絶対乾比重

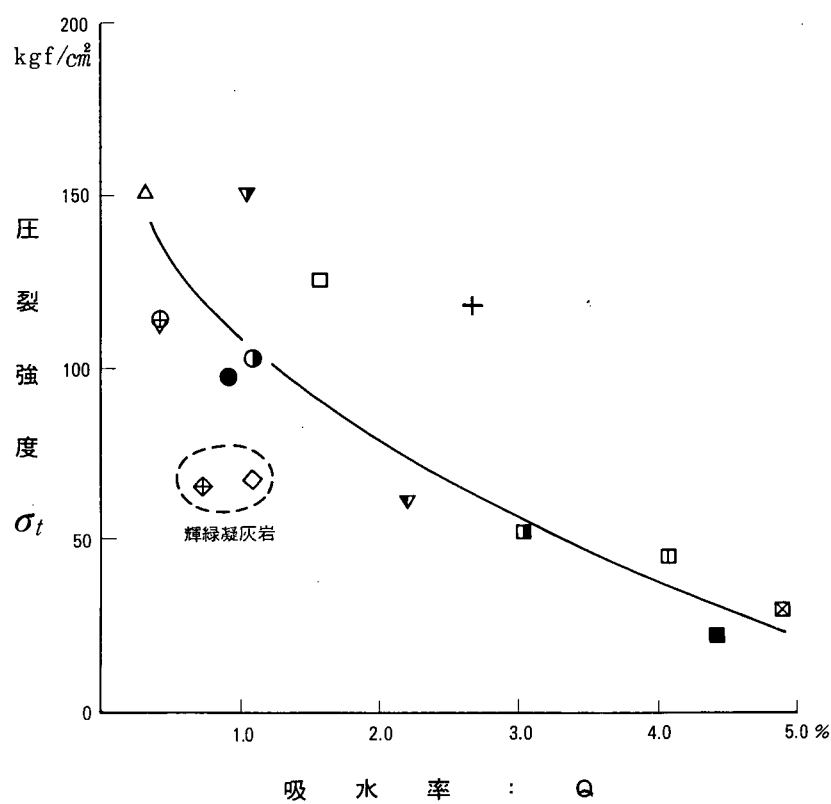


図 - 4.9 圧裂強度と吸水率

5. 泥質輝緑凝灰岩の乾湿の繰り返し試験

5.1 試験概要

フィルダム堤体の大部分を占めるロック材は、①堅硬でひび割れが少ないこと、②水および気象作用に対する耐久性が大きいこと、③大きなせん断強度を有し自由な排水が阻害されないことが望ましい。しかし、必ずしもこのような性質をすべて備えた材料の得られない場合もある。そのようなときには、次のような問題が考えられる。

- a. 堤体の変形および沈下
- b. ロック材の脆弱化に伴うせん断強度の低下
- c. ロック材の細粒化に伴うロック部の排水性の低下

ロック材の劣化は主に物理的な風化によるものであり、その要因には貯水位の変動と気象作用（雨、風、太陽）がある。一方、ロック材の劣化は、岩石自体に次のような問題があれば劣化が促進または起こりやすいと考えられる。

- a. 岩石内にクラックが多い。岩石の間隙率が高い。
- b. 粘土鉱物（例えばモンモリロナイト）を含んでいる。
- c. 結晶同士のつづが粗い。緻密でない。

これらの調査方法には現在のところ、①屋内における規則正しい環境条件のもとにおける風化促進試験 ②屋外における自然条件下の曝露試験が行われている。

「はじめに」で述べたように泥質輝緑凝灰岩は岩石中に粘土鉱物である緑泥石を含んでおり物理的風化による岩石の劣化が懸念された。本試験は、泥質輝緑凝灰岩の乾湿の繰り返し試験を行い、岩石の劣化を把握し設計値に反映させることを目的とした。試験はS59年度に予備的に実施した岩石の飽和度の違い、および拘束圧の有無等に着目し乾湿の繰り返しによって岩石の劣化に、これらがどう影響するかを検討した。なお、泥質輝緑凝灰岩の劣化の度合をわかりやすくするために、実ダムに使用されなかったが乾湿の繰り返しで、劣化しやすいと考えられる粗粒玄武岩と比較した。

5.2 岩石の飽和度等を変えた乾湿の繰り返し試験

試験材料を表-5.1に示す。2岩種とも劣化しやすい要因をもっていると考えられる。それは泥質輝緑凝灰岩が粘土鉱物である緑泥石を含み、粗粒玄武岩は結晶が大きく緻密でないことである。

岩石の飽和度は100%、50%、40%、30%、10%、0%の6種類に設定した。ここで定義する飽和度0%の岩石とは乾湿の繰り返しを行うときに岩石の間隙全部（100%）に水が入りすることを意味し、飽和度100%の岩石は間隙が水で満されており、水の出入りが全くないものである。

飽和度を求める式を次に示す。

$$\text{飽和度}(\%) = \frac{\text{設定時間後の炉乾重量} - \text{初期40℃炉乾重量(48時間)}}{\text{初期表乾重量} - \text{初期40℃炉乾重量(48時間)}} \times 100$$

表－5.1 試験材料

岩 石 名	泥質輝緑凝灰岩	粗粒玄武岩
地 質 年 代	古生代－中生代	－
区 分	火 成 堆 積 岩	火成岩
構 成 鉱 物	緑泥石・斜長石	
絶乾比重 Gb	2.930	2.465
吸 水 量 Q	0.68	5.3
間 隙 率	1.96	12.9

ここで初期表乾重量は48時間水浸後に求めた。岩石は、乾燥温度を上げていけば岩石の間隙の水が蒸発し、岩石の飽和度は乾燥温度によって変わってくると考えられる。ここでは、乾燥温度を40℃に限定し、目的の飽和度は乾燥機の乾燥時間を表－5.2に示すように変えて設定した。乾燥温度を40℃に設定した理由は次のとおりである。

① 関東より西側日本の8月の平均気温が30～33℃であること。⁷⁾

② 粘土鉱物に影響を与えない温度が40℃以下であること。⁸⁾

なお、乾燥機内の湿度は乾燥機内に水槽を設けて40%になるようにした。

表－5.2 飽和度を設定する条件

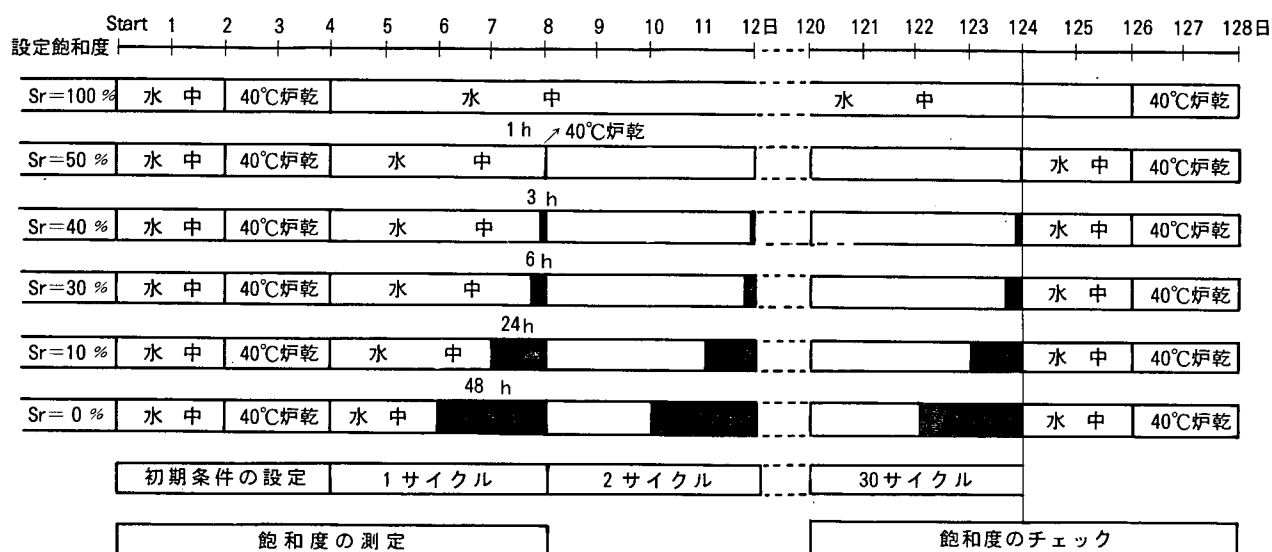
岩石内の飽和度		間 隙 内 に 水の出入り する割合	岩石内の飽和度を規定する条件			
	100%	0%	連続水中			
	50	50	炉乾燥温度40°	乾燥時間1時間	湿度40%	
	40	60	"	"	3	"
	30	70	"	"	6	"
	10	90	"	"	24	"
	0	100	"	"	48	"

試験条件を表－5.3に示す。図－5.1は乾湿の繰り返しのサイクルを示したものである。飽和度は予備試験を行い設定したが再確認を行うために、乾湿の繰り返しを始める前と30サイクル後の2度にわたってチェックした。乾湿の繰り返しサイクルは、1サイクルが4日とし炉乾

乾燥時間は目標飽和度によって規定されるために水浸時間をコントロールした。

表－5.3 試験条件

試料個数		泥質輝緑凝灰岩 (粒径 101.6－63.5mm 72個 粒径 63.5－50.8mm 144個 粗粒玄武岩 粒径 63.5－50.8mm 108個)
乾返 湿し の 繰 り 件	サイクル	30サイクル〔水浸－40℃炉乾〕
	繰り返し時間	4日／サイクル
	設定飽和度	0, 10, 30, 40, 50, 100 %
	拘束応力	0, 0.1 kgf/cm ²
初期条件		1サイクルを始める前に全ての試料に2日間水浸, 2日間40℃乾燥を与える。



図－5.1 乾湿の繰り返しサイクル

試験は、飽和度の変化、拘束圧の有無、粒径の大きさ、岩質の違いに着目して行った。測定項目および測定サイクルを表－5.4に示す。岩石の損失重量は次式によって求める。ただし、飽和度100%のものは表乾重量とする。

$$\text{損失重量百分率} = \frac{B - A}{A} \times 100\%$$

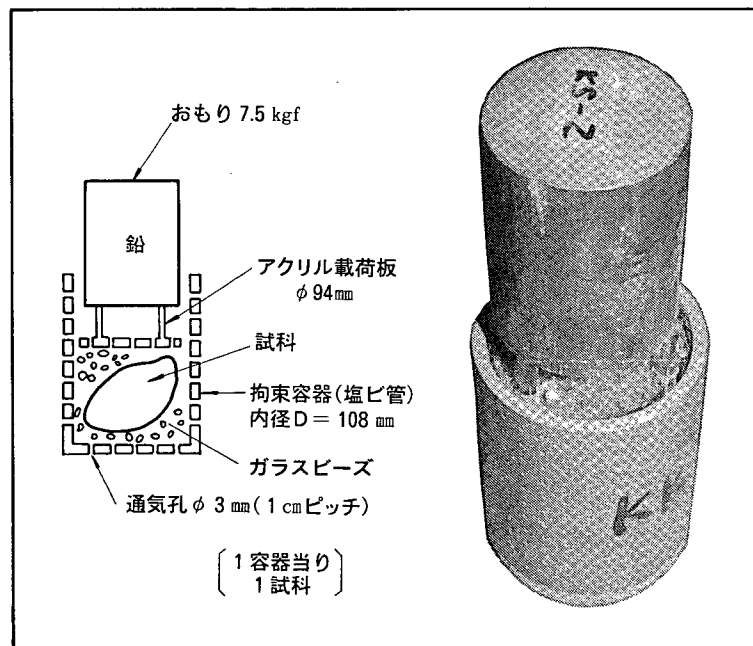
A：1サイクル終了時の炉乾燥後の岩石の重量

B：任意のサイクル終了時炉乾燥後の岩石の重量

表－ 5. 4 測定項目および測定サイクル

測定項目		初期	1	2	3	4	5	繰り返しサイクル					30	試験後
同一粒子の追跡	飽和度	○	①											○
	損失重量	○	①	②	③	④	⑤		⑩	⑮	⑳	㉕	㉟	○
	粒子形状	○												○
異粒子の追跡	圧裂強度	○												○
	鉱物変化	○												○

試験器具はいずれも簡単なものであり、拘束なしの場合は、穴あきバットに岩石を置いただけで、拘束有りの場合は図－ 5. 2 に示すように内径約10 cm、高さ15 cmの塩ビ容器（穴あき）に岩石を入れ周りにはガラスビーズをつめ、その上に重さ 7.5 kgf の鉛の塊をのせて上載圧 0.1kgf /cm²を与えた。



図－ 5. 2 試料拘束用容器

5. 3 試験結果

5. 3. 1 飽和度のチェック

表－ 5. 5、図－ 5. 3 に設定した飽和度に対する測定飽和度の値を示す。初期と終了時の飽和度とは異なり、終了時の飽和度は初期の場合に比べ高くなっており、乾湿の繰り返しを行っているうちに岩石の間隙が増えたことを意味している。

表 - 5.5 飽和度の変化

項 目 試験ケース		設定した 飽 和 度 (%)	初 期 の 飽 和 度 (%)	試験後の 飽 和 度 (%)
泥質輝緑凝灰岩 63.5~50.8 ^{mm} (拘束なし) □ 初期 ■ 試験後	1	100	96	107
	2	50	47	72
	3	40	31	67
	4	30	21	51
	5	10	14	36
	6	0	0.9	22
泥質輝緑凝灰岩 63.5~50.8 ^{mm} (拘束0.1 kgf/cm ²) ◇ 初期 ◆ 試験後	7	100	97	101
	8	50	59	75
	9	0	6.8	15
泥質輝緑凝灰岩 101.6~63.5 ^{mm} (拘束なし) ○ 初期 ● 試験後	10	100	100	101
	11	50	50	89
	12	40	40	58
	13	30	30	49
	14	10	11	29
	15	0	-3.8	27
粗 粒 玄 武 岩 63.5~50.8 ^{mm} (拘束なし) △ 初期 ▲ 試験後	16	100	100	99
	17	50	50	80
	18	40	42	67
	19	30	30	54
	20	10	12	52
	21	0	-1.3	29

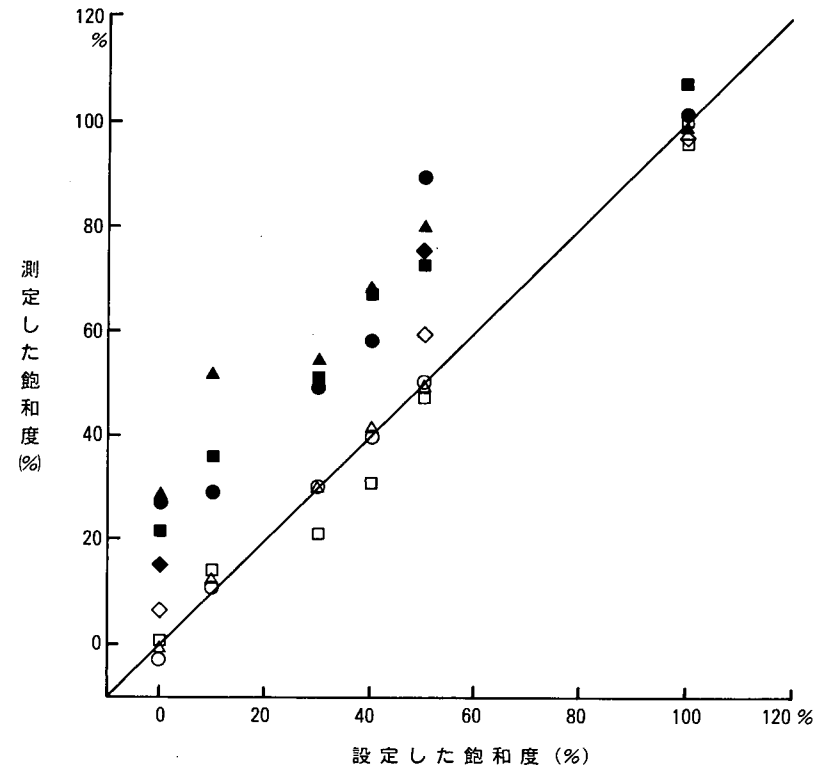


図 - 5.3 設定した飽和度と測定した飽和度

5.3.2 岩石の損失重量

① 経時的变化

表-5.6に5サイクル毎の平均損失重量百分率を示す。図-5.4には岩石の損失重量百分率の経時的な変化を岩種、拘束圧、粒径をパラメータにしてプロットしたものである。損失重量の経時的な変化の大きさは岩種によって変わるが、拘束圧および飽和度の影響が大きい。わずか0.1 kgf/cm²の拘束圧でもあれば損失重量の経時的な変化は認められない。また、飽和度の低い方、いわゆる岩石の空隙に水の出入りの多い方が経時的に変化しやすいが、その値はサイクル数とともに直線的に増加していかない。

表-5.6 5サイクル毎の平均損失重量百分率

試料区分			測定時期 (サイクル)	5	10	15	20	25	30
泥質輝緑凝灰岩	粒 径 63.5~ 50.8mm	拘束圧 なし	飽和度 100%	0.05%	0.41% (-0.01)	0.38% (-0.04)	0.35% (-0.08)	0.67% (-0.18)	0.67% (-0.17)
			50%	0.09	0.04	0.02	0.19 (-0.04)	0.23 (0.01)	0.38 (0.13)
			40%	0.03	-0.03	0	0.02	0.06	0.05
			30%	-0.02	0.14	0.14	0.32	0.36	0.43
			10%	0.09	0.34	0.30	0.43	0.53	1.17 (0.50)
			0%	0.16	0.32	0.58	1.05 (0.72)	1.61 (0.76)	1.86 (0.57)
	粒 径 101.6~ 63.5mm	拘束圧 0.1 kgf/cm ²	飽和度 100%	0.02	0.03	-0.02	-0.07	-0.11	-0.10
			50%	0.04	-0.02	-0.06	-0.11	-0.15	-0.16
			0%	0.04	0.04	0.10	-0.04	0.02	-0.04
			飽和度 100%	0.04	0.01	-0.01	-0.08	-0.11	-0.09
			50%	0	-0.02	0.01	-0.06	-0.07	-0.09
			40%	0.02	0.04	0.05	0.10	0.11	0.11
粗粒玄武岩	粒 径 63.5~ 50.8mm	拘束圧 なし	30%	0.09	0.12	0.03	0.97 (0.26)	1.02 (0.31)	1.03 (0.31)
			10%	0.09	0.40 (0.14)	0.71 (0.14)	1.18 (0.11)	1.65 (0.46)	1.98 (0.83)
			0%	0.13	0.48 (0.18)	0.64 (0.34)	1.06 (0.39)	1.35 (0.64)	1.47 (0.77)
			飽和度 100%	0.15	-0.14	-0.17	-0.18	-0.11	-0.07
			50%	0.53	0.51	0.45 (0.08)	0.66 (0.26)	0.80 (0.37)	0.63 (0.20)
			40%	0.89	0.83	0.86	0.90	1.11	0.97
	粒 径 63.5~ 50.8mm	拘束圧 なし	30%	0.82	0.99	0.89	1.01	1.25	1.11
			10%	0.35	0.41	0.35	1.02	1.11	1.17
			0%	0.45	0.96 (0.40)	1.22 (0.28)	2.30 (0.58)	3.32 (1.46)	9.04 (2.61)

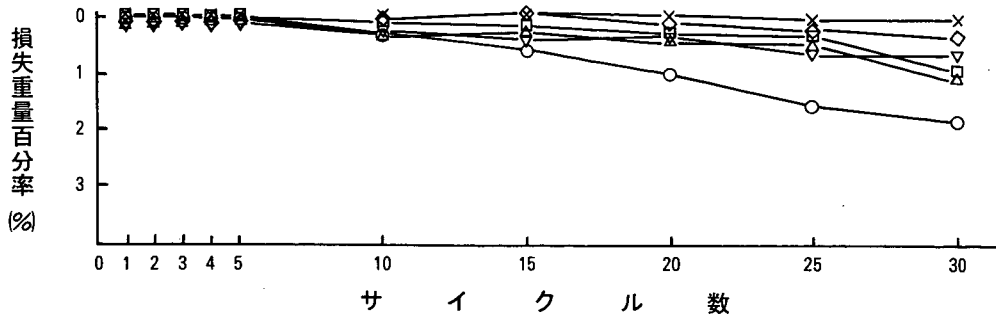
() 内の値は、重量損失が極端に大きな値を除外した平均値。

凡 例

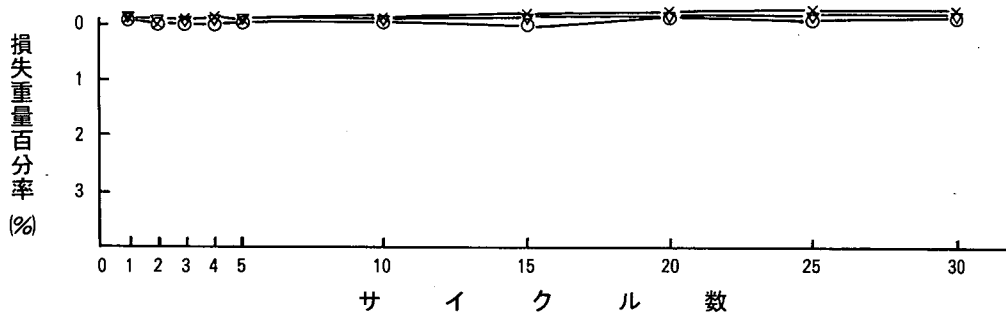


サイクル数と損失重量百分率との関係

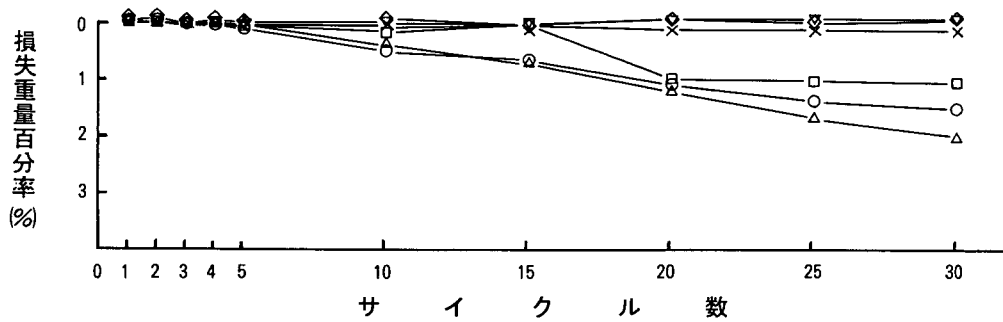
泥質輝緑凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束なし



泥質輝緑凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束圧 = 0.1 kgf/cm²



泥質輝緑凝灰岩 (101.6 ~ 63.5 mm) 拘束なし



粗粒玄武岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束なし

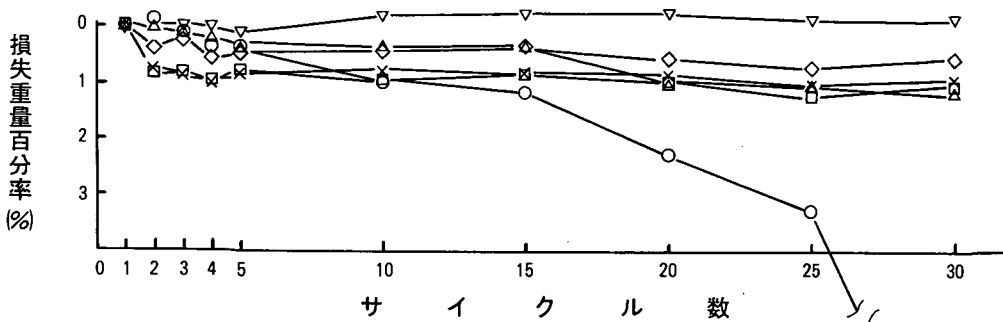


図 - 5.4 損失重量百分率とサイクル数との関係

② 乾湿の繰り返し30サイクル後の岩石の劣化状態

図- 5. 5 に岩石の飽和度と損失重量百分率との関係を示す。図- 5. 6 は損失重量百分率の度数分布を示したものであり、写真- 5. 1 に岩石の劣化状況を初期状態と比較して示す。これにより次のことが言える。

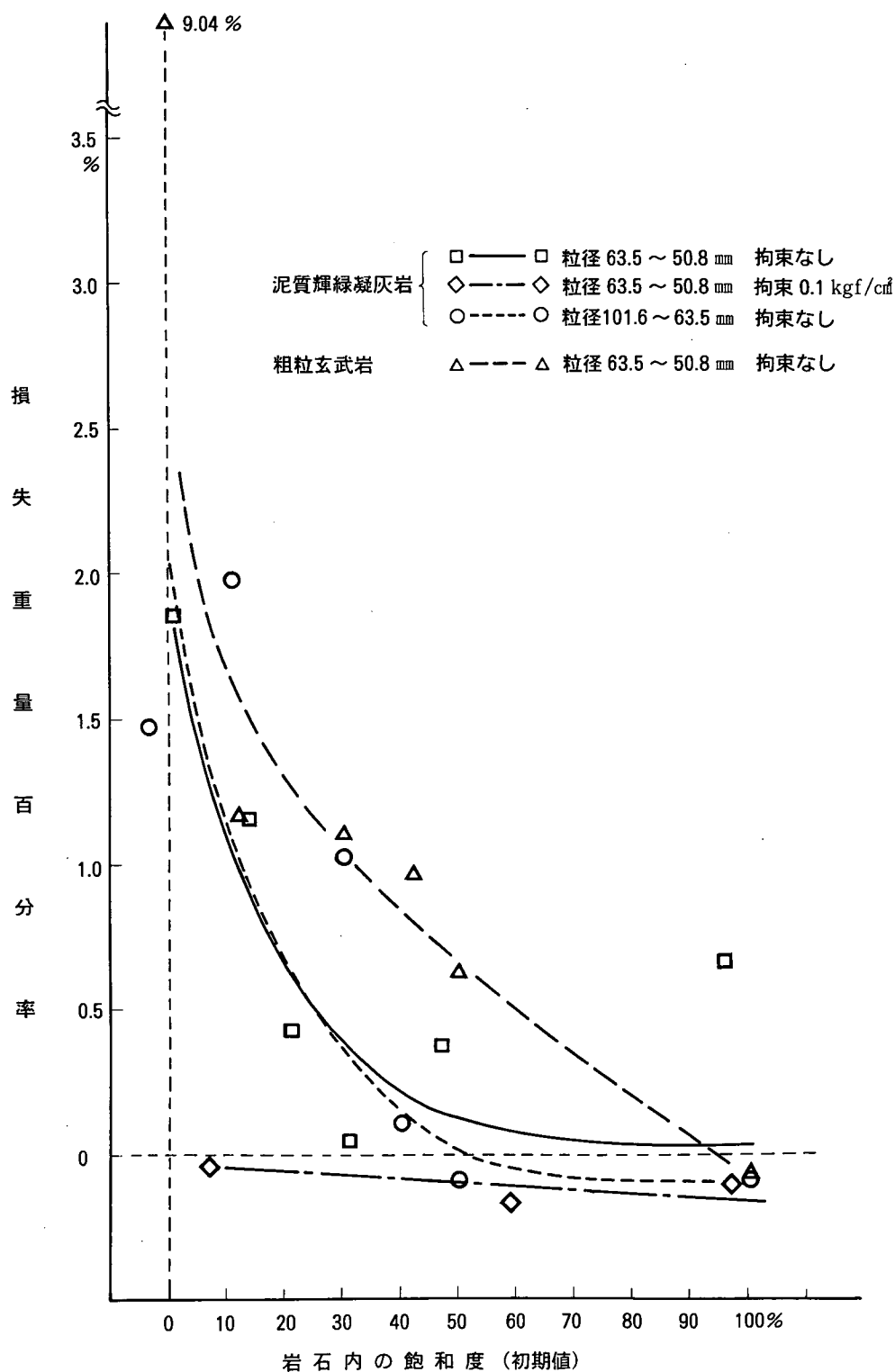


図- 5. 5 岩石の飽和度と損失重量百分率

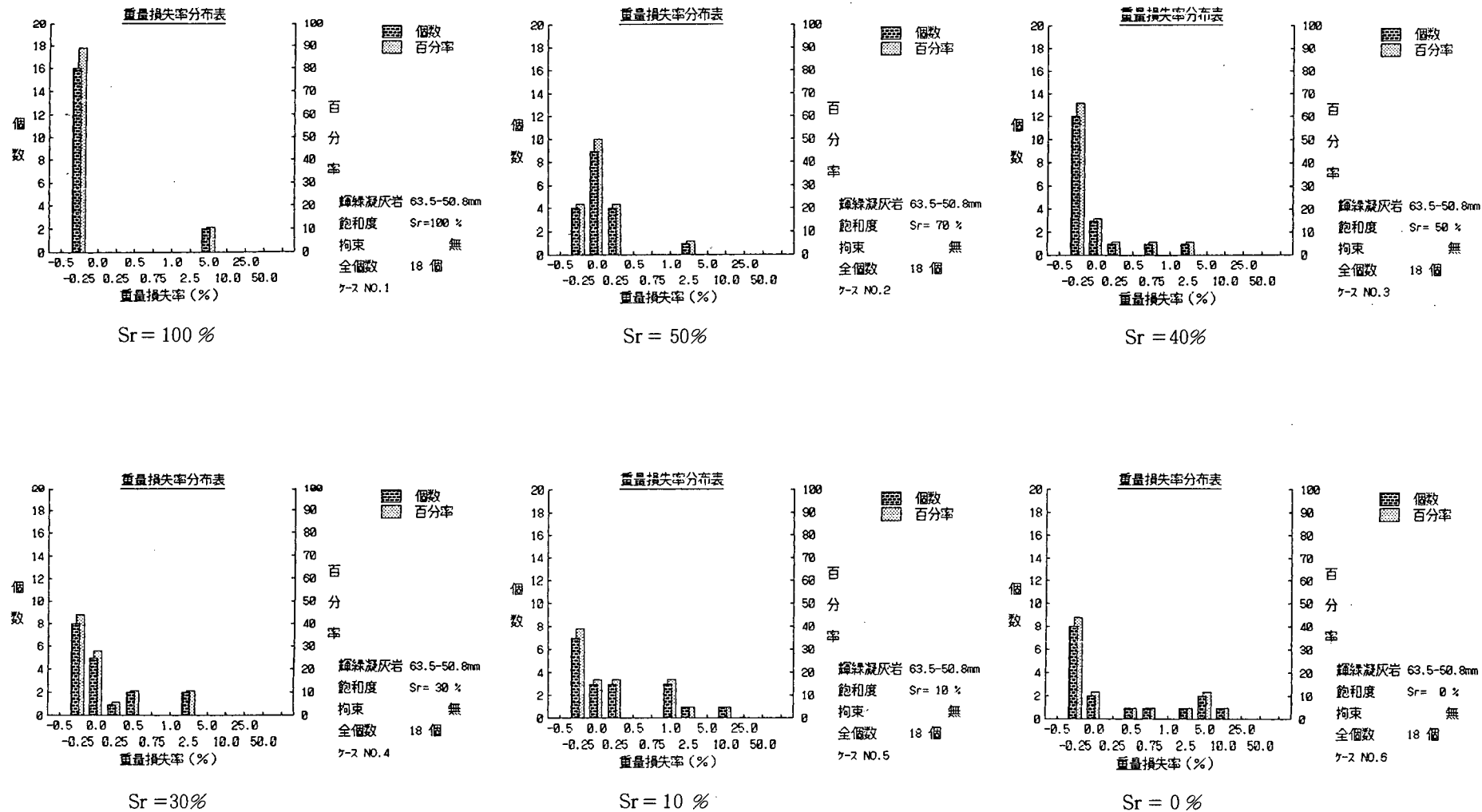


図 - 5.6 損失重量百分率の度数分布 泥質輝綠凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束なし

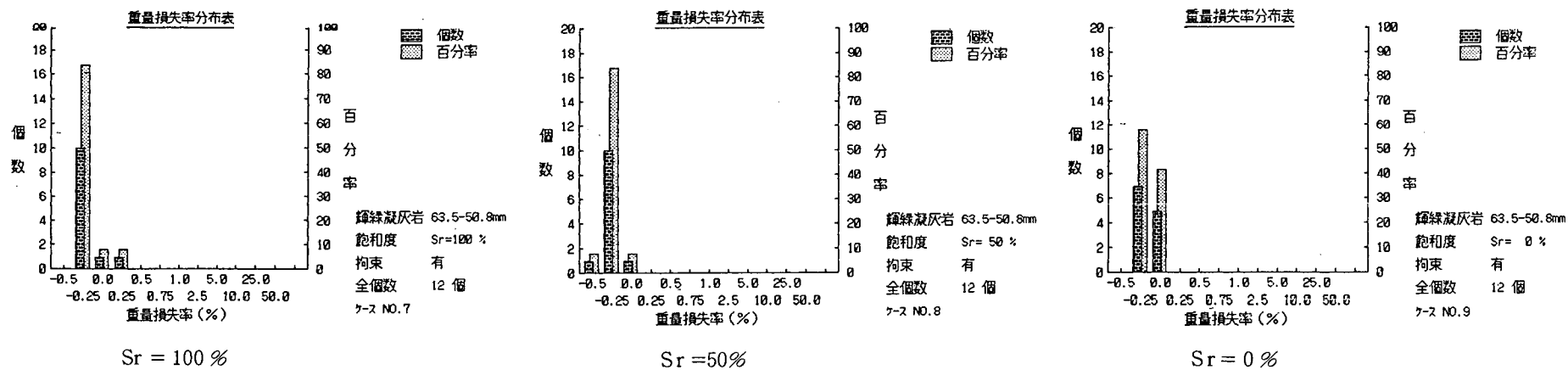
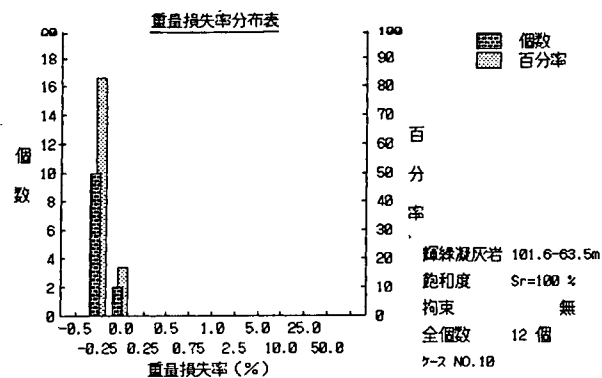
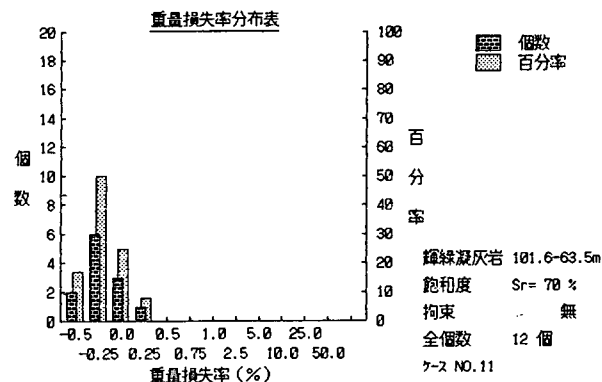


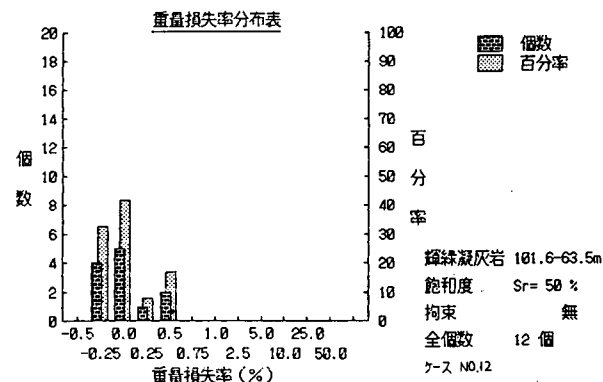
図 - 5.6 損失重量百分率の度数分布 泥質輝緑凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束圧 0.1 kgf/cm²



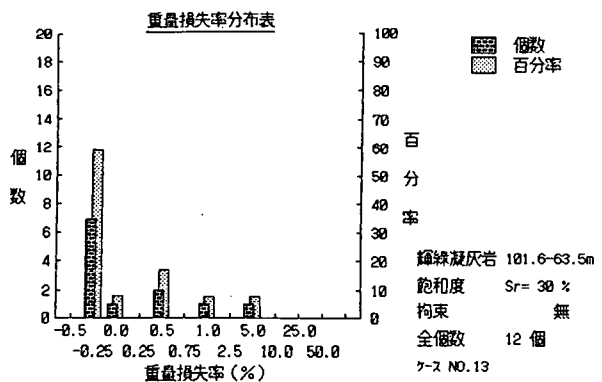
$S_r=100\%$



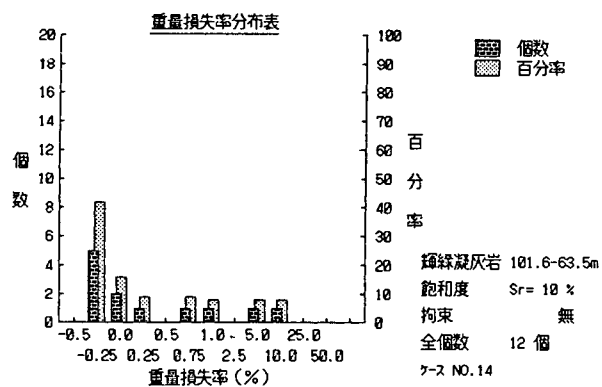
$S_r=50\%$



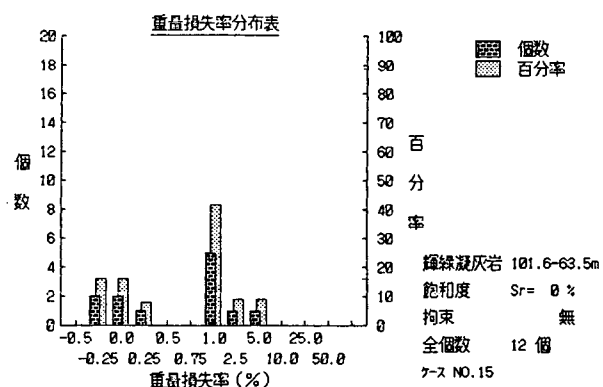
$S_r=40\%$



$S_r=30\%$

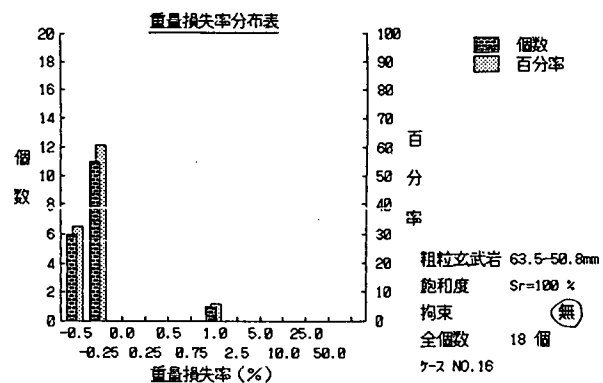


$S_r=10\%$

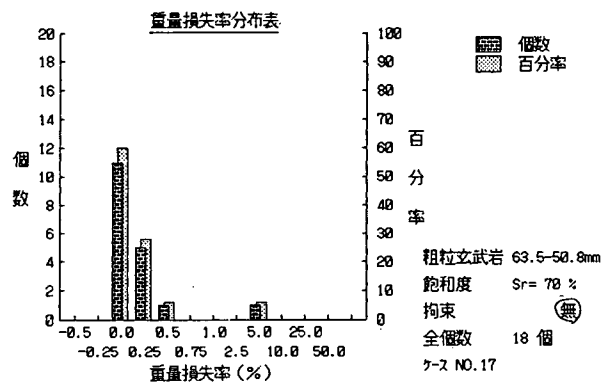


$S_r=0\%$

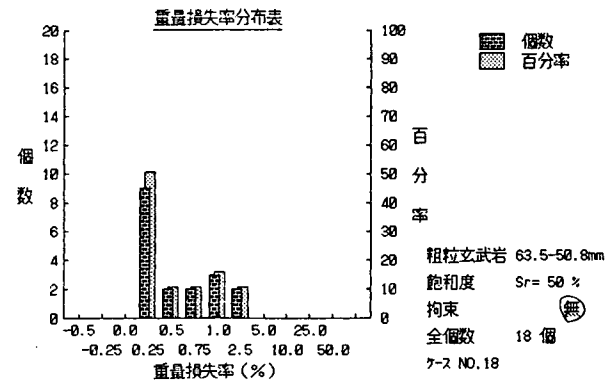
図 - 5.6 損失重量百分率の度数分布 泥質輝綠凝灰岩 (101.6 ~ 63.5 mm) 拘束圧なし



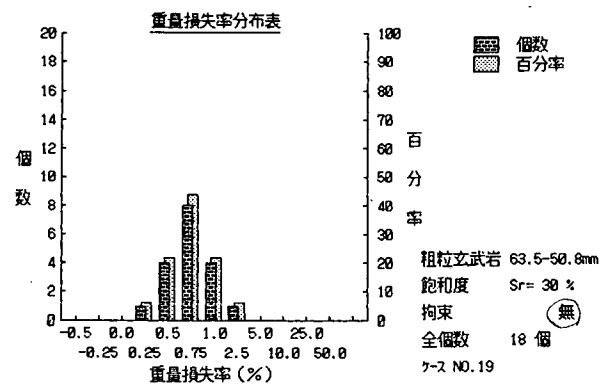
$Sr=100\%$



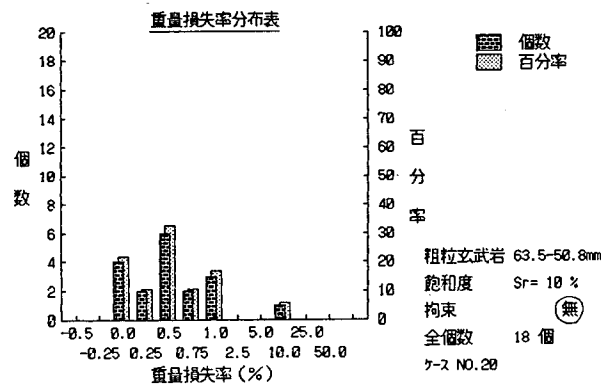
$Sr=50\%$



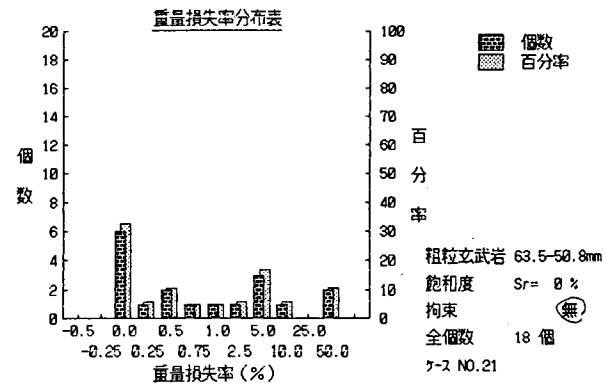
$Sr=40\%$



$Sr=30\%$



$Sr=10\%$



$Sr=0\%$

図-5.6 損失重量百分率の度数分布 粗粒玄武岩 (63.5 ~ 50.8 mm) 拘束圧なし

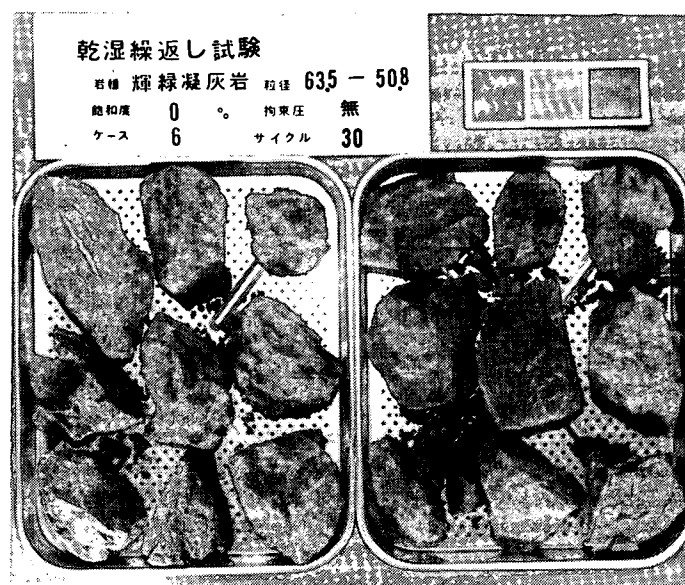
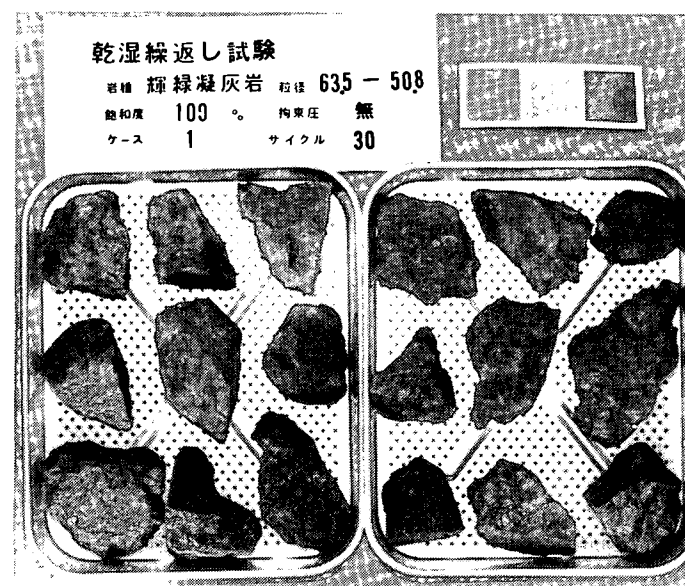


写真 - 5.1 岩石の劣化状態 (1)



写真 - 5.1 岩石の劣化状態 (2)

- ② 飽和度が高くなるにつれて岩石の損失重量は少なくなる。拘束有りをのぞき、飽和度と損失重量百分率との関係は直線的でなく、泥質輝緑凝灰岩では飽和度50%までに損失重量はほとんど減少し、それ以上の飽和度になっても損失重量は変化しない曲線となっている。飽和度0%の泥質輝緑凝灰岩の損失重量は約2%で、粗粒玄武岩の約9%に比べかなり少ない。
- ③ 泥質輝緑凝灰岩において、0.1 kgf/cm²の拘束圧を与えた場合の損失重量百分率は飽和度に依存せず、岩石の劣化がほとんど進まないことを示している。
- ④ 岩種による損失重量百分率の差は明確であり、今回の泥質輝緑凝灰岩と粗粒玄武岩では、吸水量だけから判断する限りでは、吸水量の大きい粗粒玄武岩の方が損失重量百分率は大きく岩石が劣化しやすいことを示している。
- ⑤ 泥質輝緑凝灰岩において、最大粒径100mmと60mmとで粒径の違いによる損失重量の比較をしたがこの差異は認められず、岩石の劣化における粒径の影響はないと考えられる。
- ⑥ 岩石の劣化の状況を視察すると乾湿の繰り返し後、泥質輝緑凝灰岩では飽和度が低いほどクラックの数が多くなり、泥質輝緑凝灰岩および粗粒玄武岩とも岩石の角ばかりがとれていくことがわかった。

北部ダム事務所が行った岩塊の現地曝露試験の結果²⁾と今回の室内の乾湿の繰り返し試験を比較して表-5.7に示す。

表-5.7 屋内試験と屋外試験の比較

環境条件	屋 内	屋 外					
	乾湿の繰り返し 飽 和 度 0 % 30 サ イ ク ル	地 面 上 		台 上 		水 浸 	
岩 質	M	M	S	M	S	M	S
損失重量百分率	1.9 %	4.0 %	0.4 %	1.3 %	0.4 %	0.6 %	0.4 %

M：泥質輝緑凝灰岩

S：砂質輝緑凝灰岩

屋外においては泥質輝緑凝灰岩だけでなく砂質輝緑凝灰岩についても試験している。試験値は2年経過後の値であり、試験個数は地面上、台上、水浸それぞれ3～4個ずつである。

砂質輝緑凝灰岩の損失重量は、泥質輝緑凝灰岩に比べ非常に少なく物理的風化をうけにくい。屋外での泥質輝緑凝灰岩の損失重量は地面上においた状態が約4%と他の状態より大きく、水浸状態ではわずか0.6%程度で砂質輝緑凝灰岩と変らない。現地曝露試験の損失重量は、今回の空中の乾湿の繰り返し試験（30サイクル後）の約2%に比べ大きいわけであるが、この原因としては、試験個数の違い、屋外における岩石の表面温度が40℃を超えることなどが考えられる。

5.3.3 粒子形状の変化

図-5.7にZinggの分類によった粒子形状を乾湿の繰り返し前後で比較して示す。30サイクル後の粒子形状は、拘束なしの状態では飽和度0%を除いて試験前とほぼ同じ粒子形状である。飽和度0%の泥質輝緑凝灰岩および粗粒玄武岩の粒子形状は板状から塊状に変化する。

5.3.4 圧裂強度の比較

表-5.8、図-5.8に乾湿の繰り返しを与えない材料と各種の条件で乾湿の繰り返しを行った材料の圧裂強度の値を示す。図-5.9は圧裂強度を3段階（0～50 kgf/cm²、51～100 kgf/cm²、101 kgf/cm²以上）に分けて度数分布で示したものである。この試験では岩石を破壊させるため同一岩石で追求できない欠点がある。

泥質輝緑凝灰岩において、圧裂強度と飽和度との関係は明確でなく、乾湿の繰り返し後の圧裂強度の値は、乾湿の繰り返しを与えない材料より大きい場合もある。

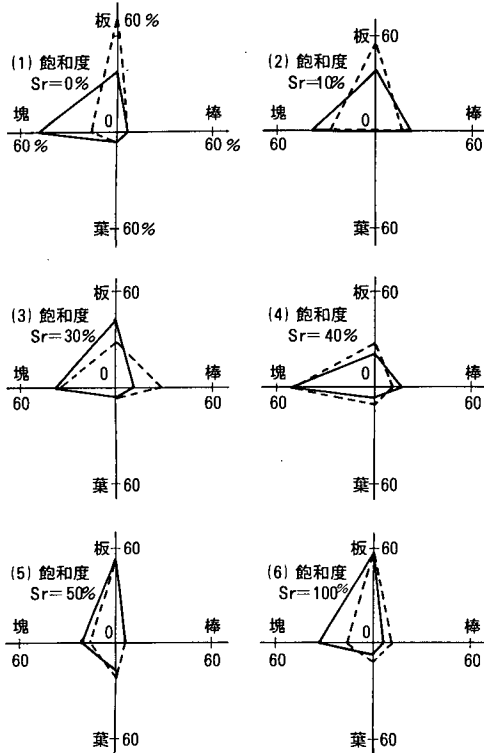
一方、粗粒玄武岩では圧裂強度50 kgf/cm²以下の度数が飽和度が低くなるにつれて増加していることからわかるように、飽和度が低くなると乾湿の繰り返しによって圧裂強度は小さくなる傾向にある。

5.3.5 鉱物変化

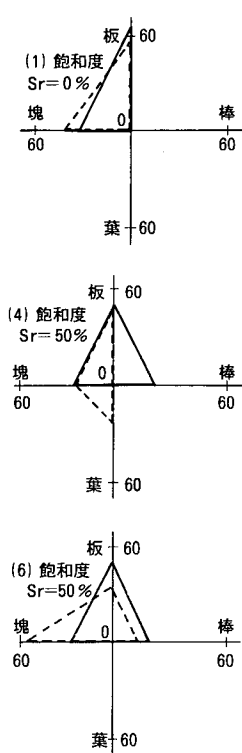
表-5.9に定方位法によるX線回析⁹⁾における泥質輝緑凝灰岩の鉱物変化の状況を示す。この試験でも同一岩石の追跡を行うことができなかった。飽和度0%という最もきびしい条件下においても粘土鉱物（モンモリロナイト、緑泥石）は、乾湿の繰り返しを与えない材料と変わらない。他の鉱物も乾湿の繰り返し後に、変化した鉱物は見当らなかった。

----- 試験前
 ———— 試験後

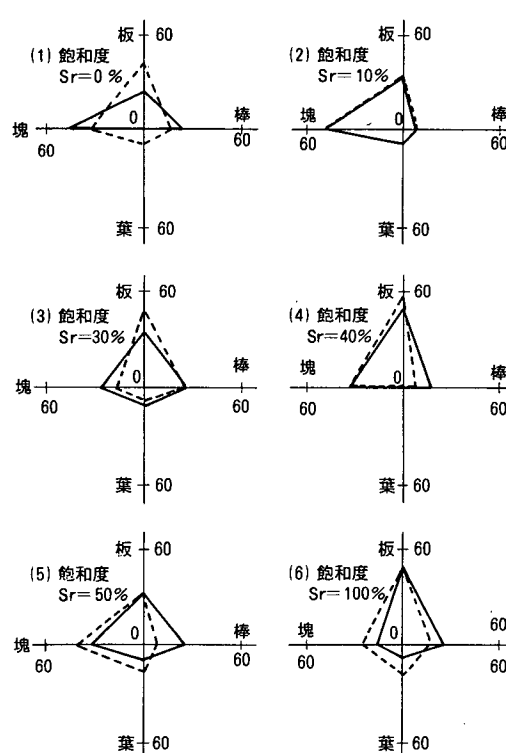
泥質輝緑凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm)
 拘束なし



泥質輝緑凝灰岩 (63.5 ~ 50.8 mm)
 拘束あり 0.1 kgf/cm²



泥質輝緑凝灰岩 (101.6 ~ 63.5 mm)
 拘束なし



粗粒玄武岩 (63.5 ~ 50.8 mm)
 拘束なし

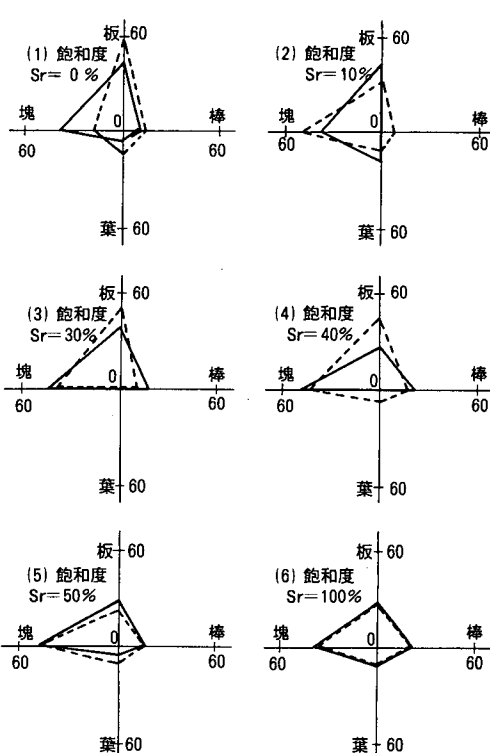


図 - 5.7 粒子形状の変化

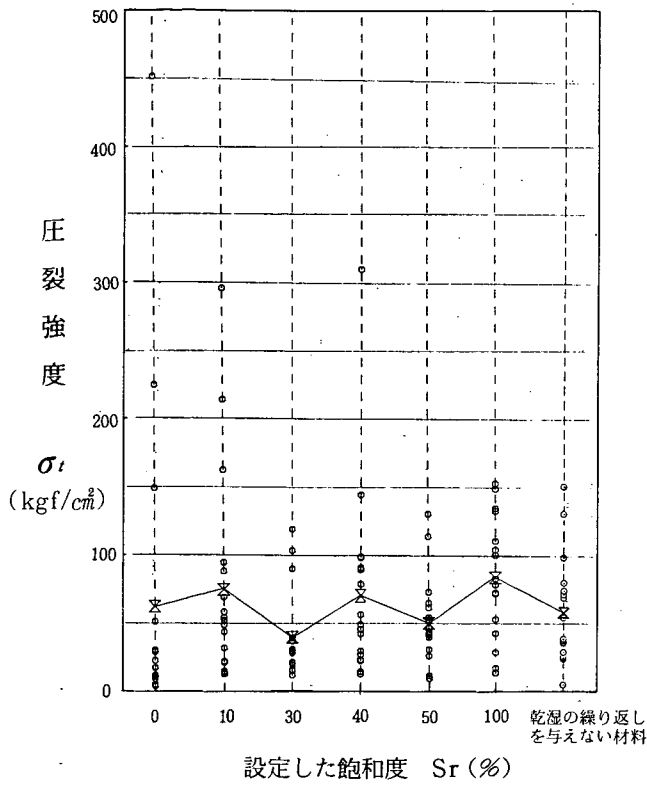
表 - 5.8 圧裂強度の比較表

乾湿の繰り返し後試料の圧裂強度

単位: kgf/cm^2

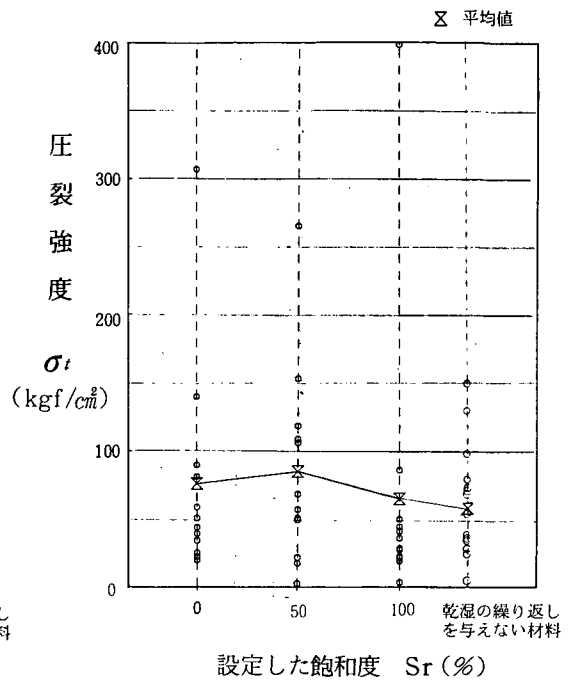
設定した 飽和度 S_r (%)		泥質輝緑凝灰岩			粗粒玄武岩
		拘束なし		拘束 $0.1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$	拘束なし
		101.6~63.5 mm	63.5~50.8 mm	63.5~50.8 mm	63.5~50.8 mm
100	最大値	249.8	151.8	550.4	100.3
	最小値	5.7	13.2	156.9	0.7
	平均値	50.0	83.1	64.6	38.3
50	最大値	267.2	129.5	264.5	151.2
	最小値	7.3	9.4	2.6	13.1
	平均値	97.8	49.8	84.7	61.8
40	最大値	594.0	308.5		106.0
	最小値	11.7	12.5		3.8
	平均値	83.7	69.5		45.3
30	最大値	214.8	118.4		159.5
	最小値	13.3	11.7		12.0
	平均値	75.9	39.4		39.8
10	最大値	126.4	295.2		78.8
	最小値	2.6	13.0		3.0
	平均値	30.0	74.9		26.0
0	最大値	94.2	449.9	305.9	55.3
	最小値	4.0	3.7	19.5	4.3
	平均値	26.8	62.2	75.6	19.5
乾湿の繰り返しを与えない材料	最大値	118.7	149.7		173.4
	最小値	11.0	5.0		6.5
	平均値	30.2	57.6		58.1

泥質輝緑凝灰岩 粒径 63.5 ~ 50.8 mm 拘束なし

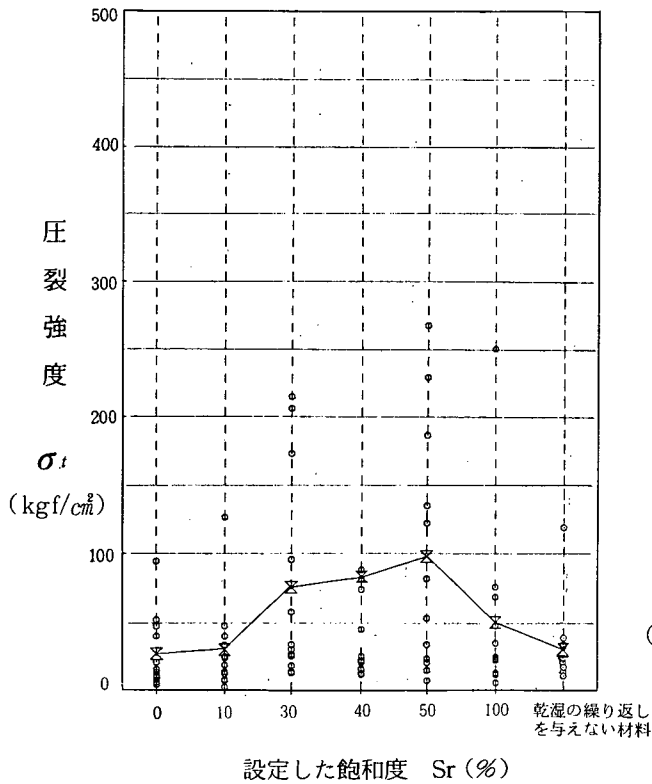


泥質輝緑凝灰岩 粒径 63.5 ~ 50.8 mm

拘束 0.1 kgf/cm²



泥質輝緑凝灰岩 粒径 101.6 ~ 63.5 mm 拘束なし



凡 例
X — X 平均値

粗粒玄武岩 粒径 63.5 ~ 50.8 mm 拘束なし

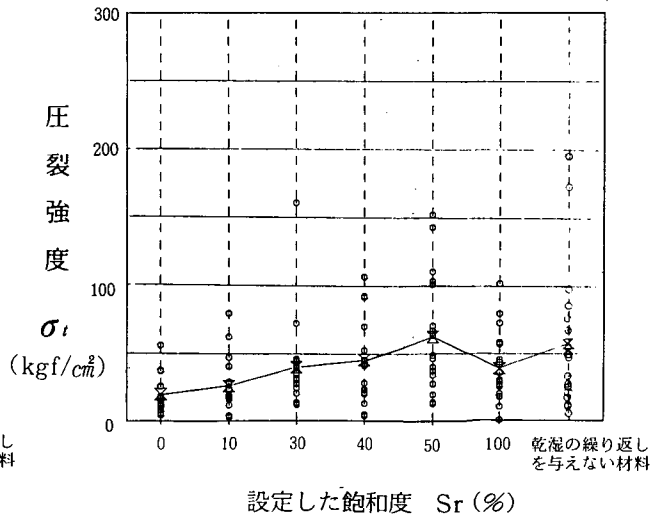


図 - 5.8 圧裂強度の分布

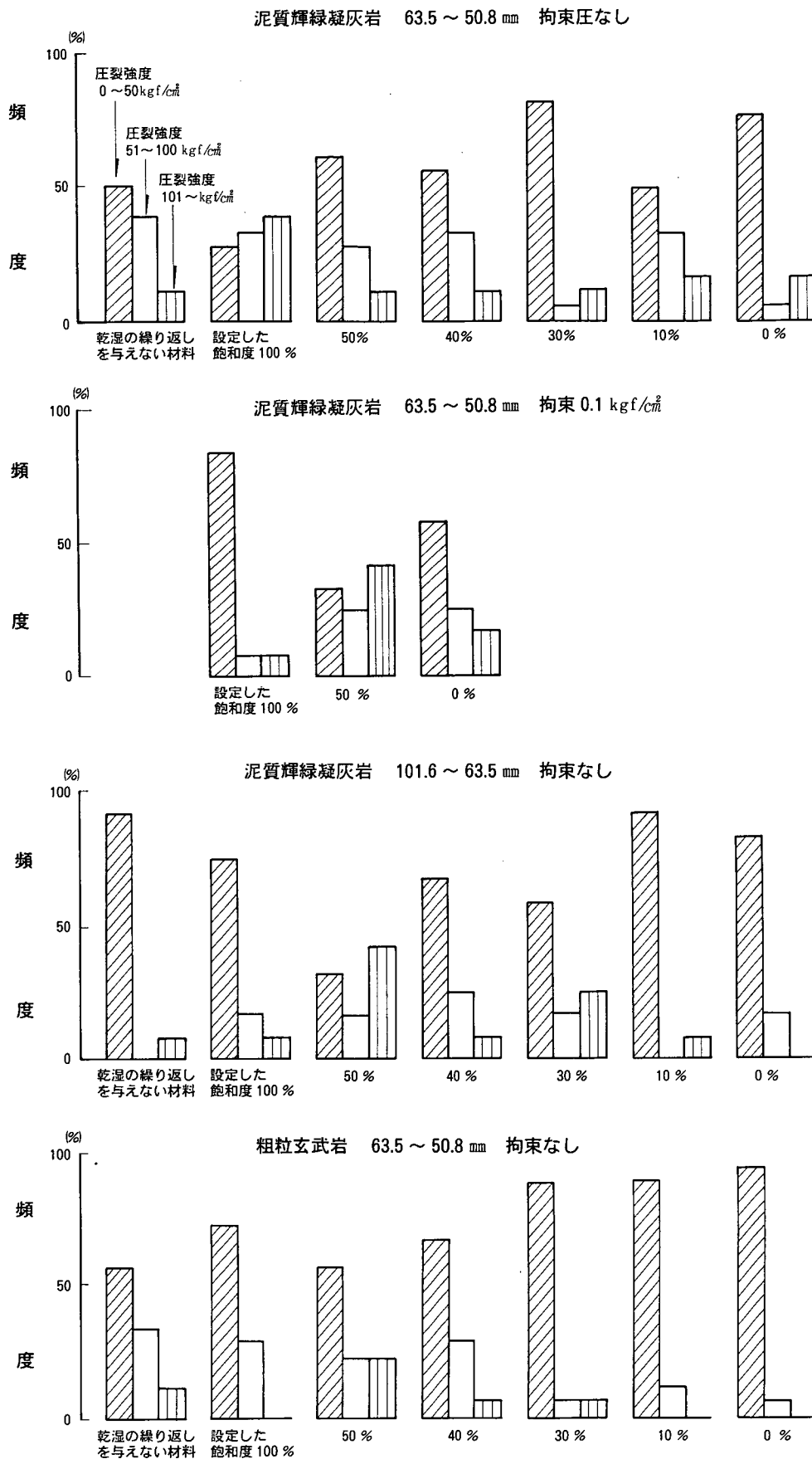


図 - 5.9 圧裂強度の度数分布

表 - 5.9 鉱物変化 定方位法

分類	鉱物名	方法	乾湿の繰り返し を与えない材料		乾 湿 の 繰 り 返 し 後 の 材 料			
			63.5-50.8		飽和度 0 % 拘束なし		飽和度 0 % 拘束 0.1 kgf/cm ²	
			No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
粘土鉱物	モンモリロナイト	無	○	○		◎	◎	◎
		EG	◎	○	○	◎	◎	◎
	緑泥石	無		◎	◎	◎	◎	◎
		EG	◎	◎	○	○	○	◎
	絹雲母	無				△	△	△
		EG				△	△	△
炭酸塩鉱物	方解石	無	△		△	△	△	△
		EG						
珪酸塩鉱物	石英	無	△		△	△		
		EG						
	角閃石	無	○	◎	◎	◇	○	◎
		EG	○	◎	○	○	○	○
長石	斜長石	無	△	△	◎	△	◇	○
		EG	△	△	△	△	△	△

無：無処理

EG：エチレン・グリコール処理

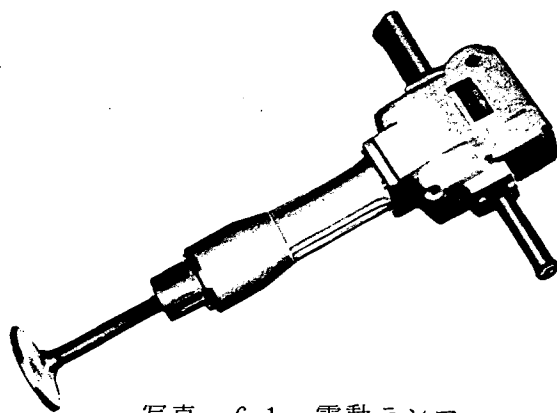
◎多量 ○中量 ◇少量 △微量

6. 締固め試験

6.1 締固め方法

締固め試験は、材料の締固まり特性を把握するために電動ランマによる振動締固めとランマの自由落下による突固め試験の2通りを行った。前者は材料の最大、最小密度を把握することを目的に、後者は材料の密度と締固めエネルギーを把握することを目的とした。

電動ランマ（写真－6.1、表－6.1）による方法は、表－6.2の試験条件に基づき行った。このときの供試体の大きさは直径30 cm、高さ60 cmである。供試体表面上に鉄板（厚さ0.8 cm）を敷いて締固め、試料高さの測定は粒子間の凹凸が少ないために供試体表面の5ヶ所で行った（図－6.1）。



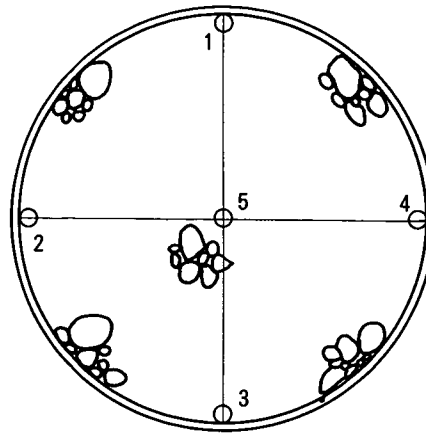
写真－6.1 電動ランマ

表－6.1 電動ランマの仕様

項 目	仕 様
名 称	日立電気ハンマ PH-85型
使 用 電 源	単相交流 50/60Hz 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

表－6.2 試験条件

供試体の大きさ	直径30cm, 高さ60cm
締 固 め 層 数	6層（1層当り10cm）
締 固 め 時 間	0秒, 20秒, 30秒を基本に7種類
供試体高さの測定	5点, 板あり（板厚0.8 cm）
備 考	供試体重量を締固め時間に係らず一定とする。



図－6.1 測定ポイント

半自動突固め試験装置を図－6.2に示す。供試体の大きさは直径30 cm，高さ35 cmであり，表－6.3に突固め試験条件を示す。突固めエネルギーは0.5，1，2，3，5 Ecと変えて試験した。突固めエネルギーはプロクタの突固め試験における締固め仕事量を用いた。プロクタによって定義された締固めエネルギーの式を以下に示す。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (\text{m} \cdot \text{kgf} / \text{m}^3) \quad 1 \text{ Ec} \approx 5.6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{kgf} / \text{m}^3$$

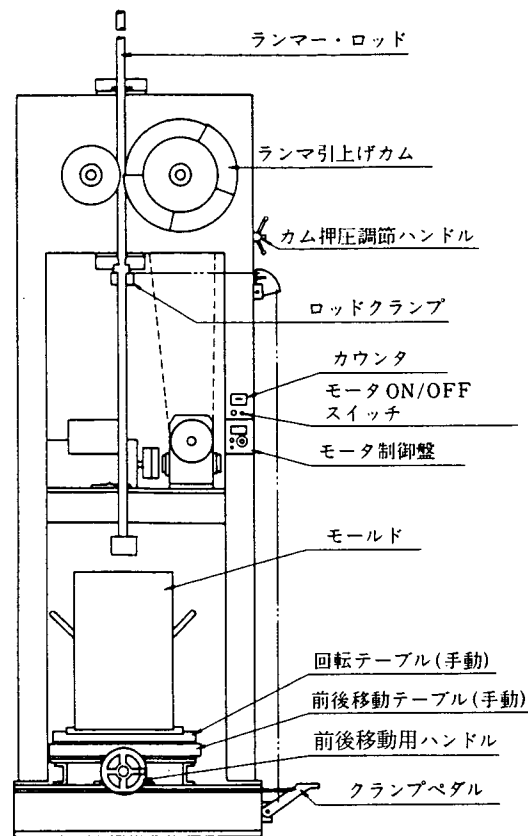
W_R : ランマ重量 (kgf) H : ランマ落下高 (m)

N_B : 層当り突固め回数 N_L : 層の数

V : モールドの容量 (締固めた供試体の体積) (m^3)

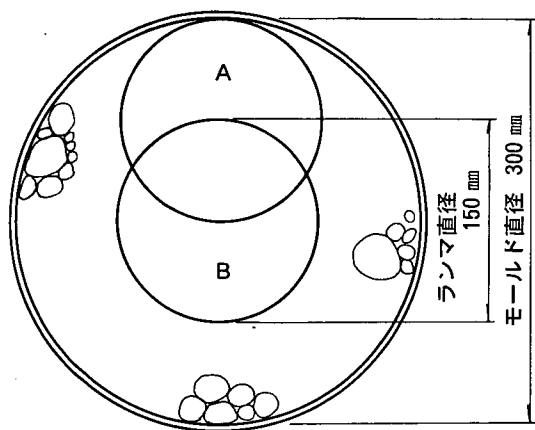
表－6.3 試験条件

試 験 機	半自動締固め試験機
モ ー ル ド	直径30cm×高さ50cm
ラ ン マ	ランマー直径15cm，ランマー重量15 kgf
ランマ 落下高	50cm
突 き 固 め 層 数	3層（1層11～12cm）
供 試 体 目 標 高 さ	約 35 cm±1 cm
突 き 固 め エ ネ ル ギ	0，0.5，1，2，3，5 Ec
供 試 体 高 さ の 測 定	17点（供試体表面に板をのせない）
備 考	供試体体積を一定にすること。そのため，投入重量を各エネルギー毎に調整すること。



図－6.2 半自動突固め試験機

ランマ重量15 kgf ,ランマ落下高50 cm, 突固め層数を3層にして突固め回数を求め, 図－6.3 に示す突固めパターンによって供試体を突固めた。

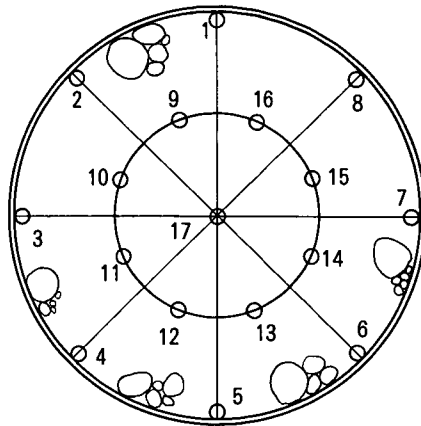


突 固 め エ ネ ル ギ	突固めパターンと回数	計
0.5 Ec	A-9回, B-1, A-10, B-1, A-9, B-1	31回
1 Ec	0.5 Ec + A-9, B-1, A-10, B-1, A-10, B-1	63
2 Ec	0.5 Ec × 3回 + A-9, B-1, A-10, B-1, A-10, B-1	125
3 Ec	0.5 Ec × 5回 + A-9, B-1 A-11, B-1, A-10, B-1	188
5 Ec	0.5 Ec × 9回 + A-10, B-1, A-11, B-1, A-10, B-1	313

注) 1層当りの突固めパターンおよび回数

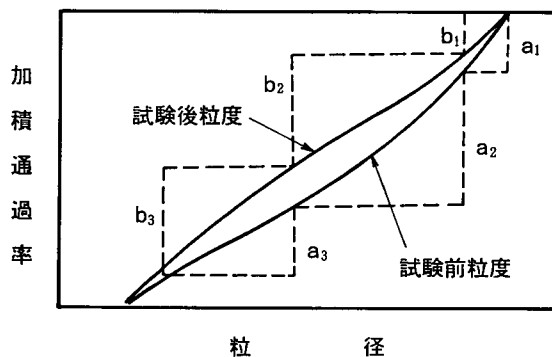
図－6.3 突固めパターン

密度を求めるための試料高さの測定は、図－6.4 に示すように17点を測り極端に凹凸の激しいところはさけた。



図－6.4 測定ポイント

締固め試験後には、破碎率を求めるために木杵フルイを用いて試験後の供試体をふるい分けた。破碎率は図－6.5 に示すように Marsal の破碎率の定義¹⁰⁾に基づいた。



$$a_1 - b_1 = \Delta A_1$$

$$a_2 - b_2 = \Delta A_2$$

$$a_3 - b_3 = -\Delta A_3$$

$$\vdots$$

$$a_n - b_n = \Delta A_n$$

$$\Sigma \Delta A = 0$$

$$B = \Sigma (-\Delta A) \text{ 又は } \Sigma (\Delta A)$$

図－6.5 粒子破碎率Bの算出

6.2 締固まり特性

電動ランマによる供試体の間隙比、乾燥密度および破碎率と締固め時間との関係を表－6.4，図－6.6 に示す。ここで混合状態とは泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩とを重量比で1対1で混合した状態を言う。間隙比eは次式によって求めた。

$$e = \frac{\rho_w \cdot \bar{G}}{\rho_d} - 1$$

$\bar{G}$ ：平均比重

ρ_d ：供試体の乾燥密度 g/cm³

ρ_w ：水の密度 g/cm³

表 - 6.4 締固め時間乾燥密度, 間隙比および破碎率

泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 12$

締固め時間 t (sec)	0 (投入のみ)	3	8	10	20	30 (その1)	30 (その2)	50
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.908	2.065	2.152	2.158	2.219	2.218	2.266	2.348
間隙比 e	0.530	0.414	0.357	0.352	0.316	0.316	0.288	0.243
破碎率 (%)	—	2.0	3.3	3.5	4.3	5.1	6.0	6.8

$$\bar{G} = 2.919$$

砂質輝緑凝灰岩 $U_c = 12$

締固め時間 t (sec)	0 (投入のみ)	10	15	20	30 (その1)	30 (その2)	60	120
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.831	2.100	2.125	2.141	2.198	2.196	2.258	2.288
間隙比 e	0.544	0.346	0.330	0.320	0.285	0.287	0.252	0.235
破碎率 (%)	—	3.4	4.3	1.5	3.5	3.3	3.0	4.8

$$\bar{G} = 2.826$$

混合状態 $U_c = 12$

締固め時間 t (sec)	0 (投入のみ)	0 (投入のみ)	10	20	30 (その1)	30 (その2)	60	120 (その1)	120 (その2)
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.813	1.764	2.082	2.154	2.202	2.194	2.262	2.365	2.330
間隙比 e	0.584	0.628	0.379	0.333	0.304	0.309	0.270	0.214	0.233
破碎率 (%)	—	—	1.8	3.4	3.5	4.4	4.2	6.6	7.4

$$\bar{G} = 2.872$$

泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 22$

締固め時間 t (sec)	0 (投入のみ)	1	5	10	20	30	40	50
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.946	2.028	2.196	2.255	2.296	2.312	2.332	2.352
間隙比 e	0.461	0.402	0.295	0.261	0.238	0.230	0.219	0.209
破碎率 (%)	—	3.4	2.3	2.8	3.7	3.3	3.6	4.3

$$\bar{G} = 2.843 \cdots \cdots S59年度データ$$

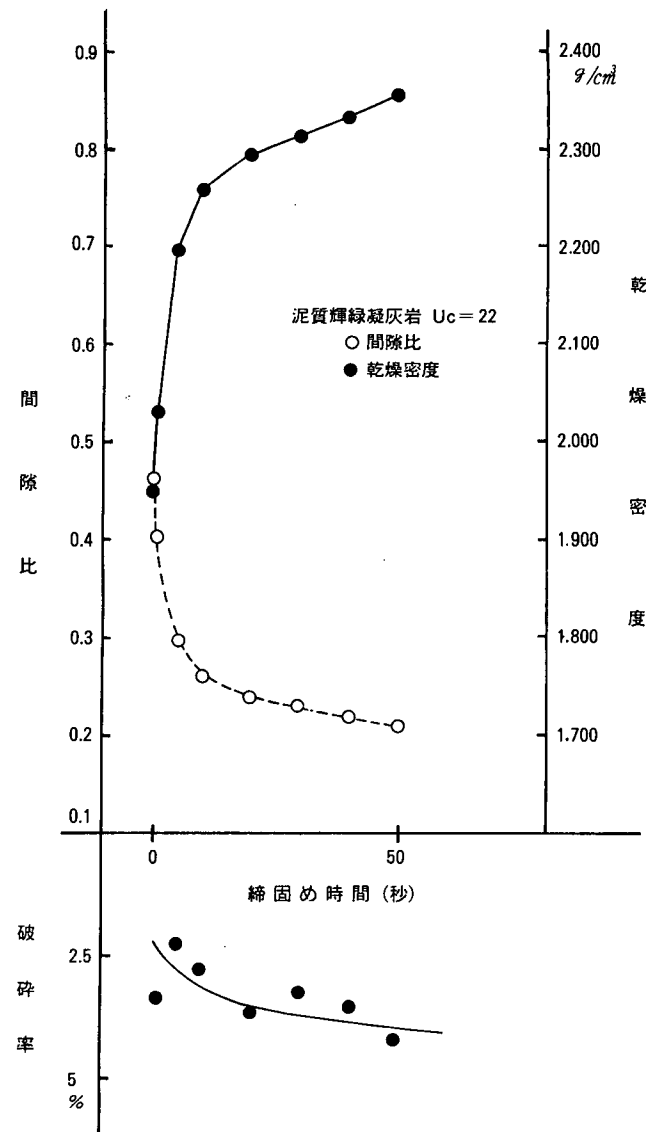
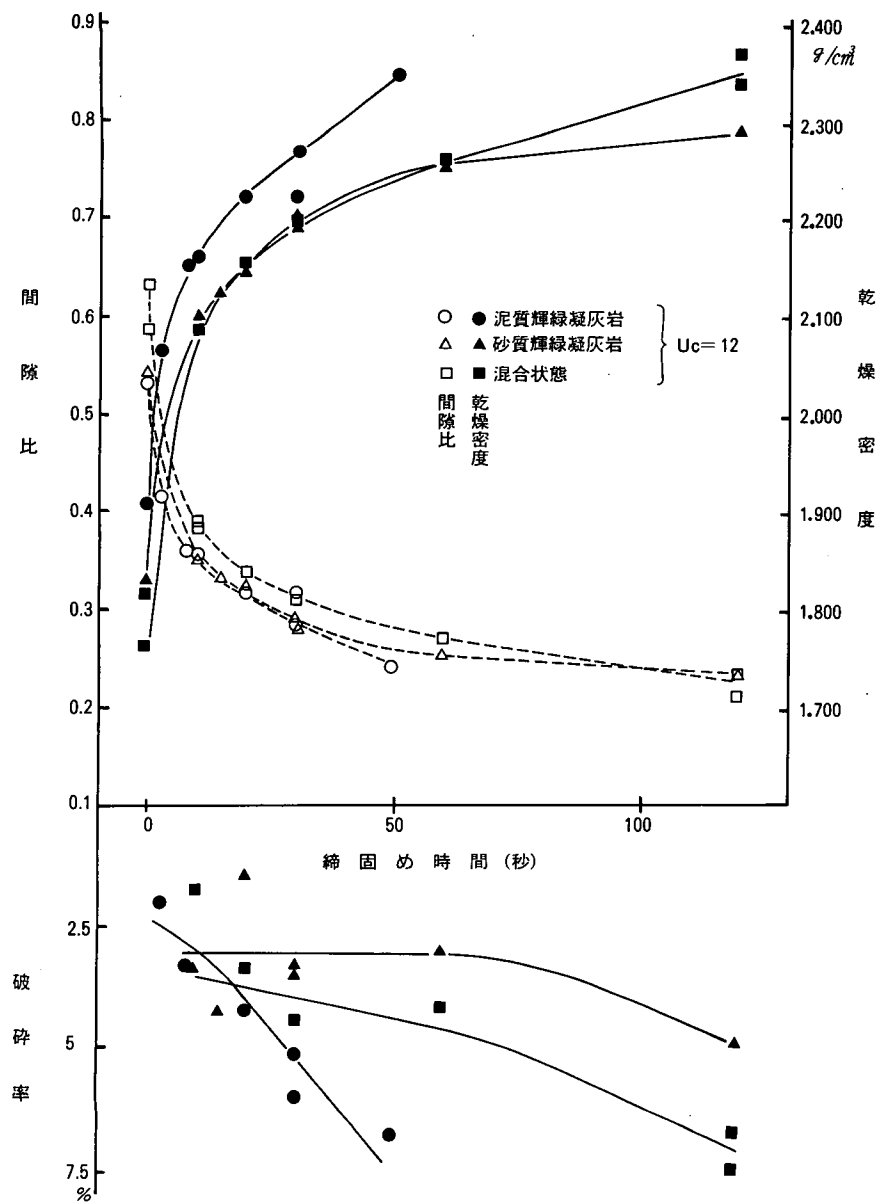


図-6.6 電動ランマによる締固まり特性

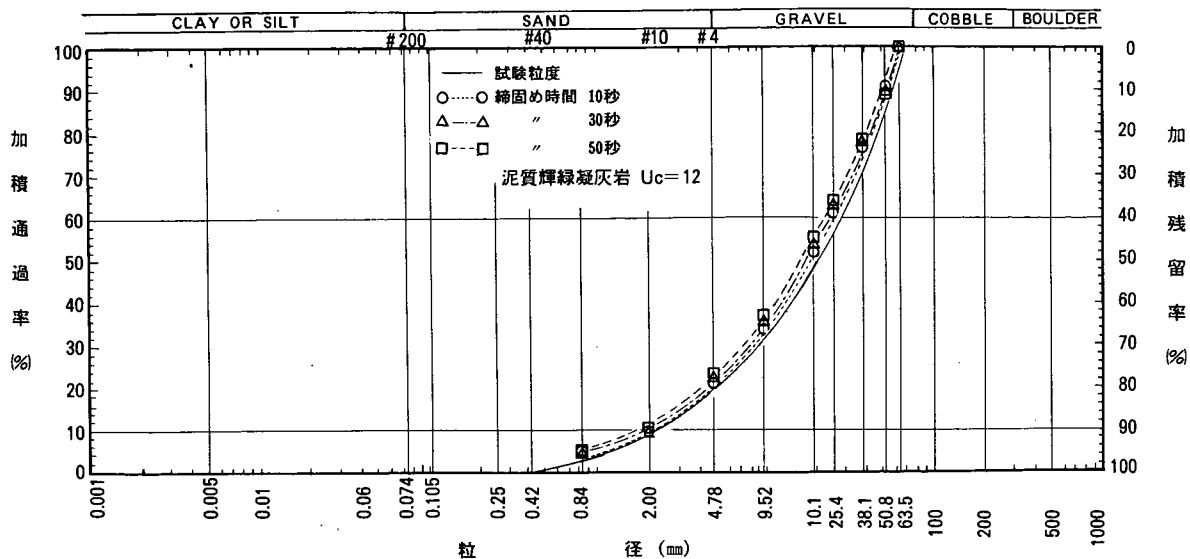


図-6.7.a 電動ランマによる締固め後の粒度曲線（泥質輝緑凝灰岩， $U_c=12$ ）

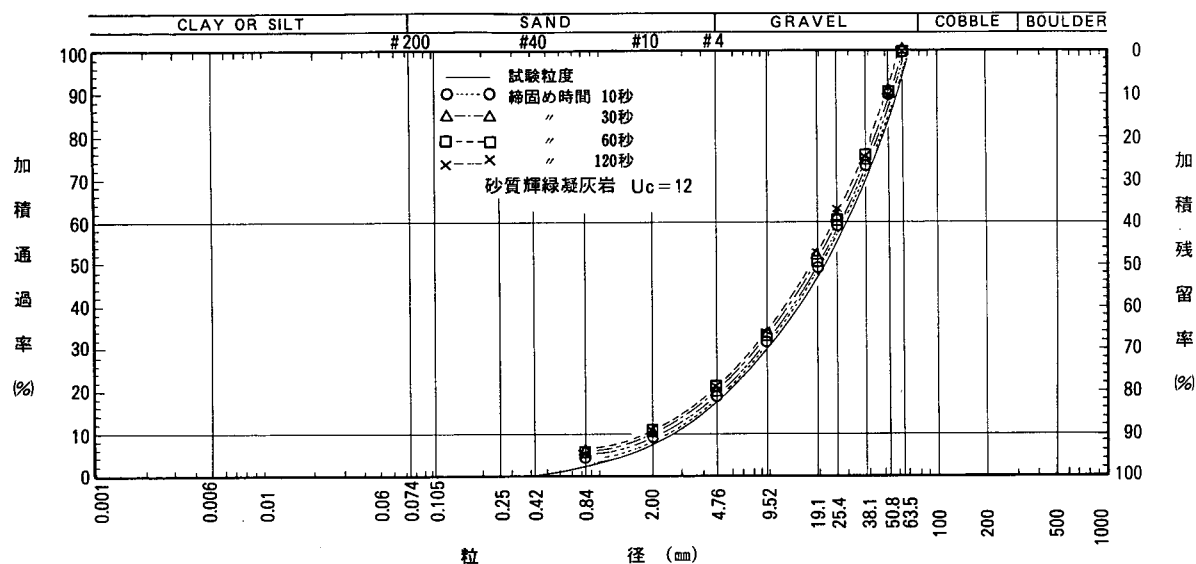


図-6.7.b 電動ランマによる締固め後の粒度曲線（砂質輝緑凝灰岩， $U_c=12$ ）

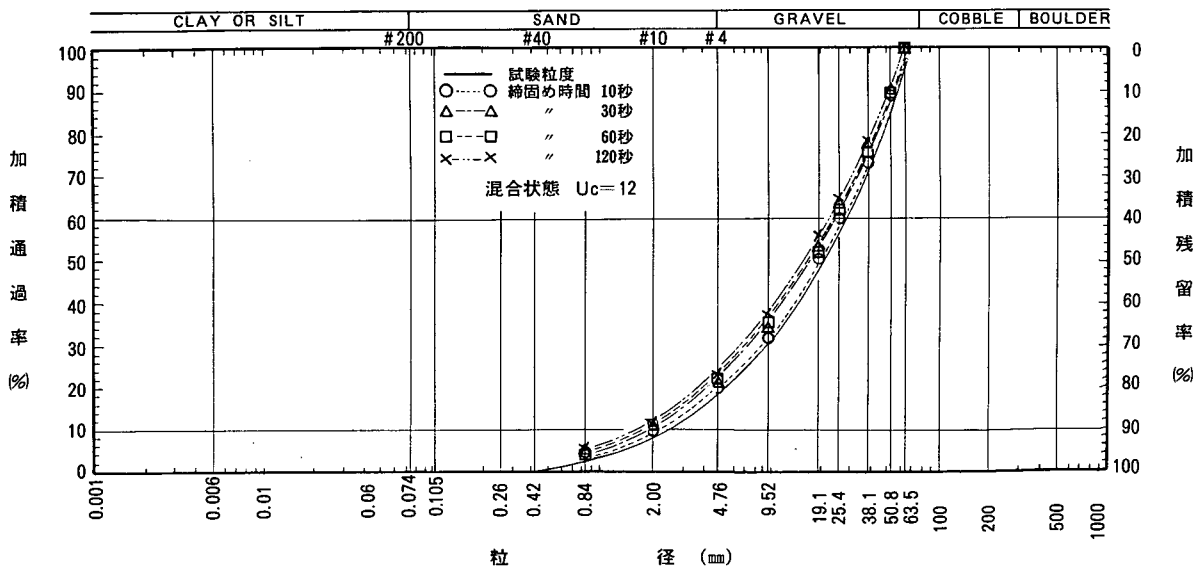


図-6.7.c 電動ランマによる締固め後の粒度曲線（混合， $U_c=12$ ）

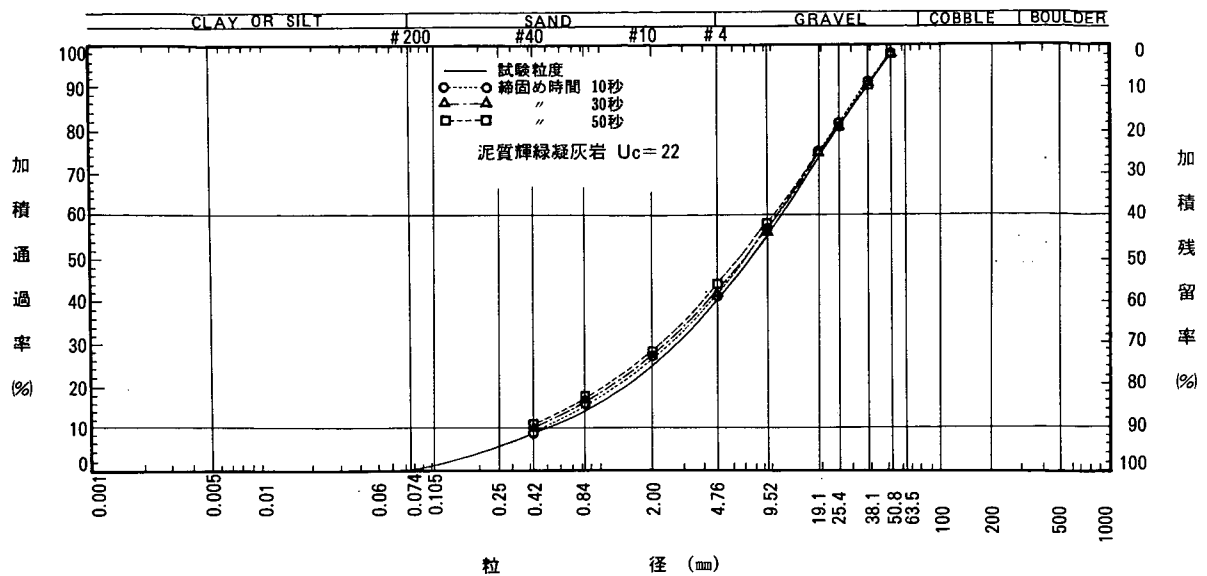


図-6.7 d 電動ランマによる締固め後の粒度曲線 (泥質輝緑凝灰岩 $U_c=22$)

泥質および砂質輝緑凝灰岩および混合状態とも締固め時間が増えるに従い乾燥密度は増加し、間隙比は減少していく。岩質の違いによって間隙比にはあまり違いが認められないが、破碎率においてその差が生じ、泥質輝緑凝灰岩の破碎率は砂質輝緑凝灰岩に比べ大きい。

図-6.7は各々の締固め時間において粒度曲線の変化を調べたものであるが、締固め時間が増えれば当然のことながら粒度曲線は試験粒度より左側に移動していくがその移動量はきわめて少ない。

表-6.5は突固め試験における各エネルギーと間隙比、乾燥密度および破碎率である。図-6.8は横軸に突固めエネルギーをとり、縦軸に間隙比、乾燥密度および破碎率をとったものである。

表-6.5 突固め試験機による間隙比、乾燥密度、破碎率

岩種 均等係数	泥質輝緑凝灰岩						砂質輝緑凝灰岩			混 合 状 態		
	22			12			12			12		
	乾燥密度	間隙比	破碎率	乾燥密度	間隙比	破碎率	乾燥密度	間隙比	破碎率	乾燥密度	間隙比	破碎率
	ρ_d g/cm ³	e	B %	ρ_d g/cm ³	e	B %	ρ_d g/cm ³	e	B %	ρ_d g/cm ³	e	B %
0. Ec	1.944	0.509	—	1.880	0.553	—	1.775	0.592	—	1.839	0.561	—
0.5 Ec	2.229	0.316	2.9	2.152	0.356	5.5	2.060	0.372	5.3	2.100	0.368	6.7
1 Ec	2.305	0.272	3.9	2.186	0.335	8.4	2.120	0.333	5.8	2.179	0.318	10.5
2 Ec	2.331	0.258	7.0	2.242	0.302	11.9	2.148	0.316	7.4	2.221	0.293	10.1
3 Ec	2.383	0.230	7.4	2.266	0.288	14.5	2.154	0.312	11.7	2.235	0.285	14.5
5 Ec							2.223	0.271	14.5			

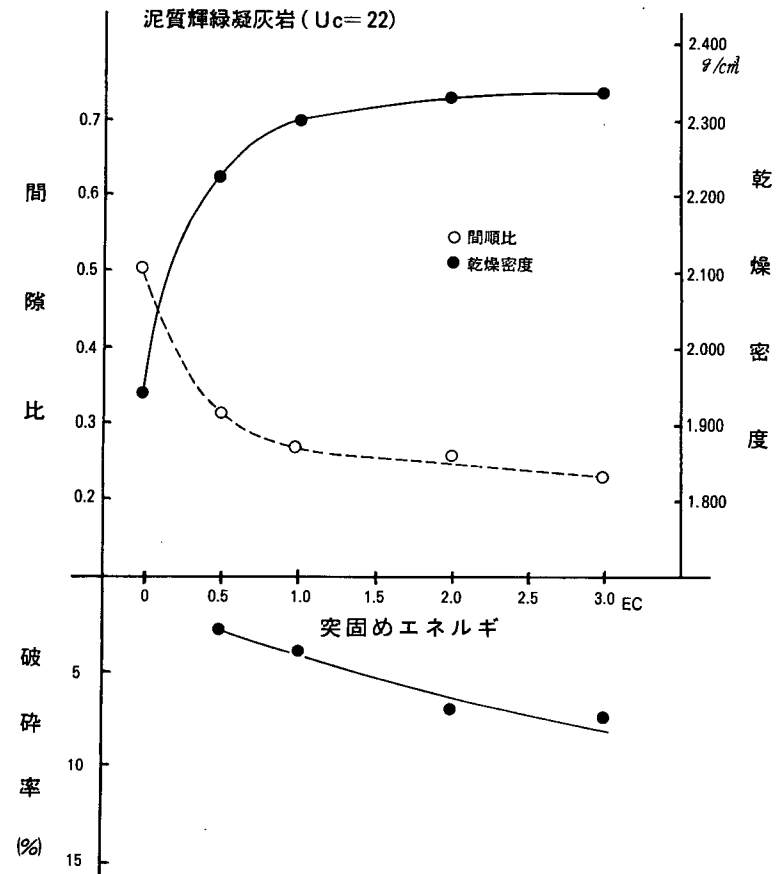
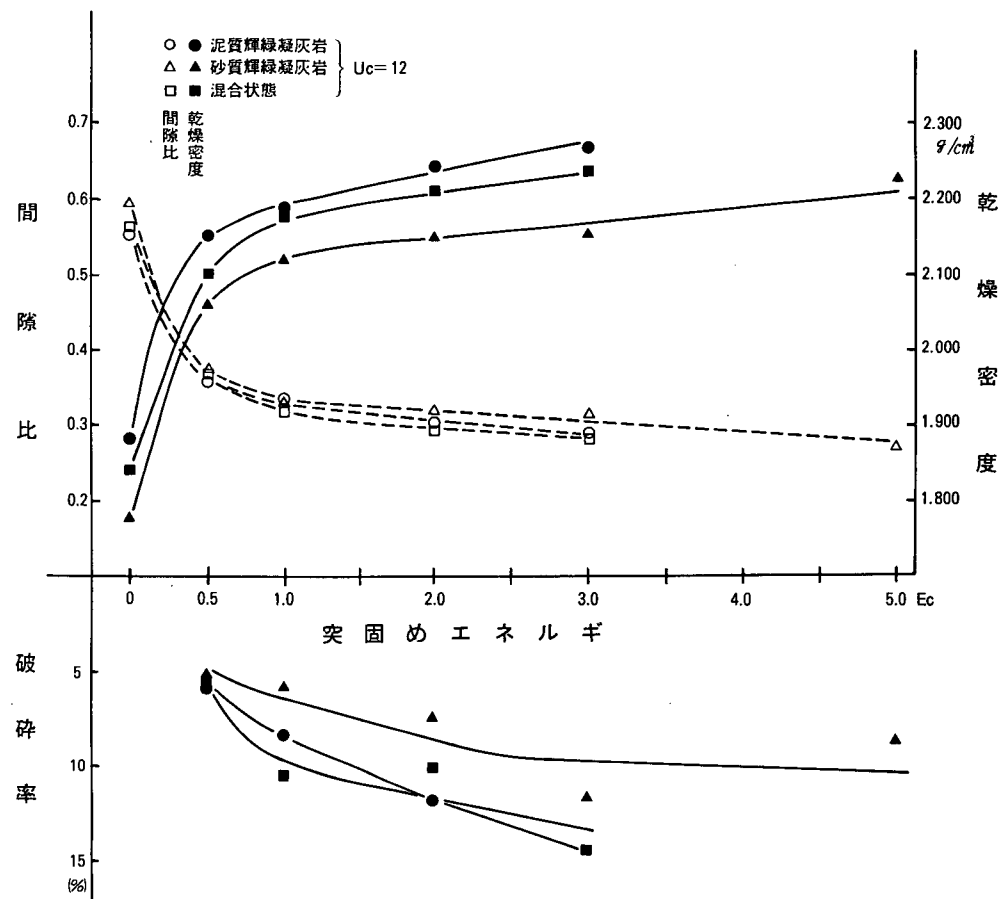


図-6.8 突固め試験機による締固まり特性

突固めエネルギーが増えれば乾燥密度は増加していく傾向にある。間隙比は岩質による差が明確でなく、突固めエネルギー $1 E_c$ 程度から安定する傾向にある。一方、破碎率は泥質輝緑凝灰岩の方が砂質輝緑凝灰岩より大きい。図-6.9 は突固め試験における粒度曲線の変化を示したものである。突固めエネルギーが増えるに従い粒度曲線は試験粒度に比べ左側に移動しており、この傾向は電動ランマの締固めに比べその差異が明確である。

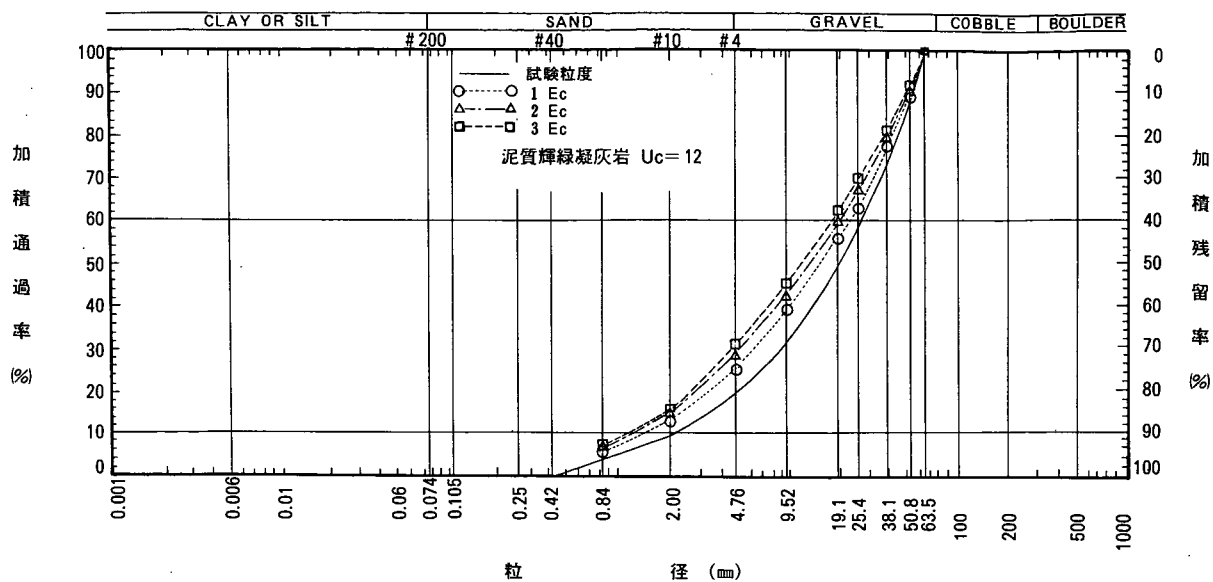


図- 6.9. a 突固め試験機による粒度曲線の変化 (泥質輝緑凝灰岩, $U_c=12$)

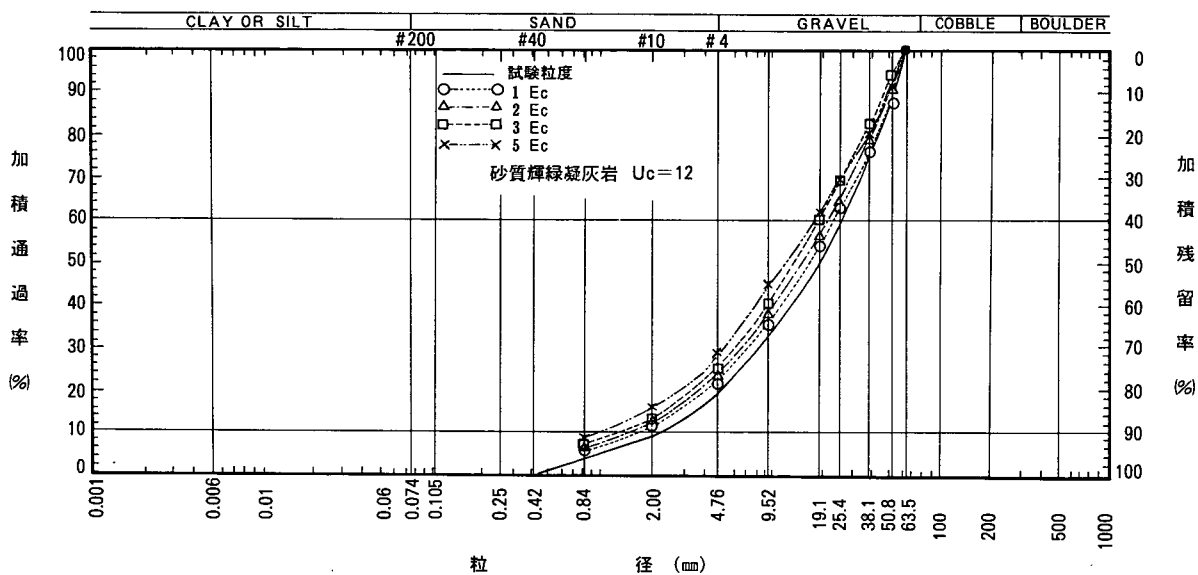


図- 6.9. b 突固め試験機による粒度曲線の変化 (泥質輝緑凝灰岩, $U_c=12$)

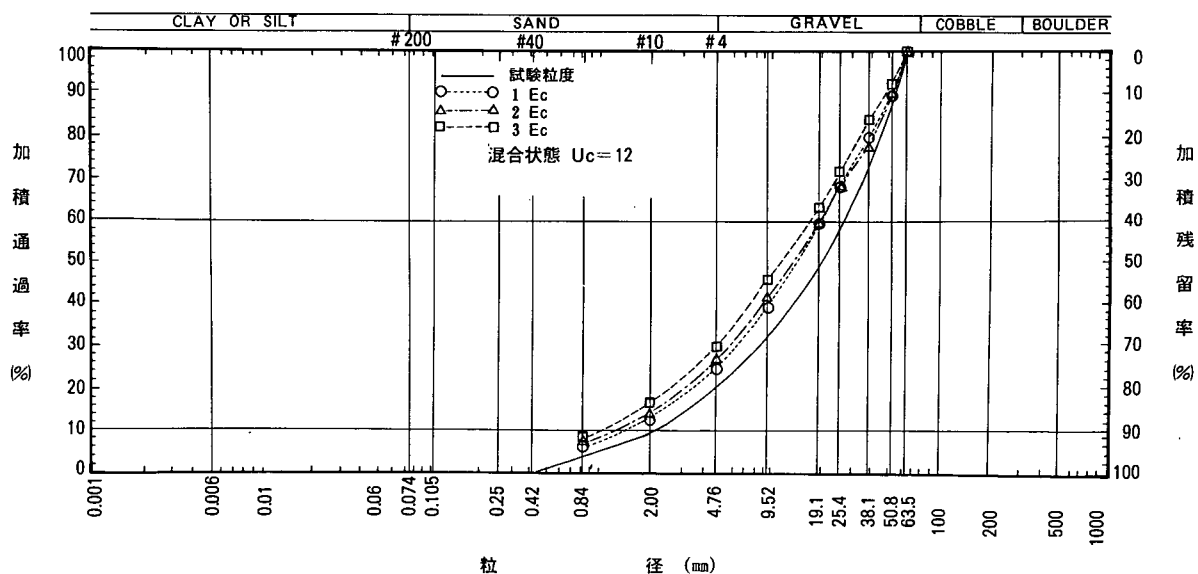
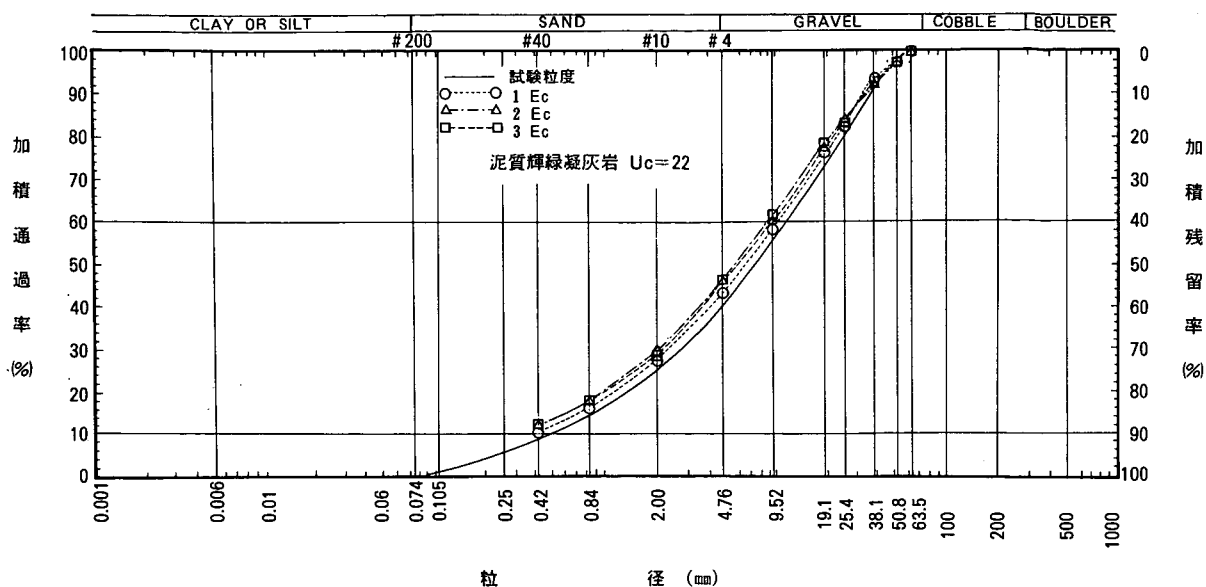


図- 6.9. c 突固め試験機による粒度曲線の変化 (混合, $U_c=12$)



図－6.9.d 突固め試験機による粒度曲線の変化（泥質輝緑凝灰岩， $U_c=22$ ）

6.3 最大、最小密度

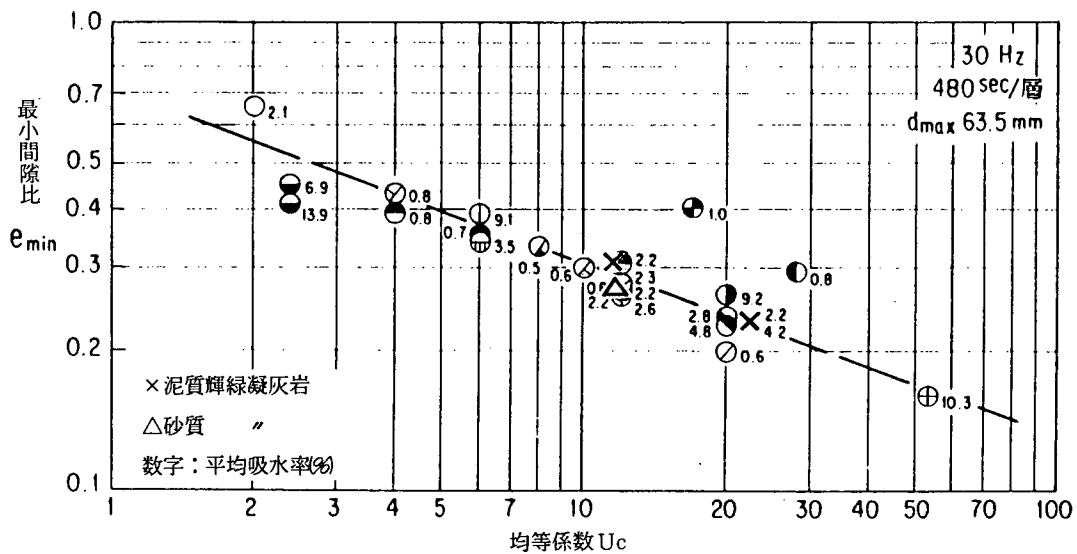
表－6.6 は、電動ランマによる締固め試験から求めた最大、最小密度である。最大密度の決定においては、1) 締固め時間と間隙比および乾燥密度との関係より間隙比および乾燥密度が安定したところ、2) 粒子破碎が少ないこと、3) 締固め時間を与えずに材料分離が生じない時間を考慮し、締固め時間30秒（1層当り）における間隙比および乾燥密度とした。岩質によって以上の3項目でバラツキはあるが締固め時間を30秒に統一することにした。最小密度はハンスコップで落下高さを与えずに投入していく状態とした。

最小間隙比は泥質および砂質輝緑凝灰岩の違いは少なく、均等係数（ U_c ）12で0.29～0.30程度である。 $U_c=22$ では0.23となる。このときのエネルギーを突固め試験から推定すれば均等係数によっても異なるが $U_c=12$ のとき1～2 Ec， $U_c=22$ のとき3 Ecである。

図－6.10¹¹⁾は泥質および砂質輝緑凝灰岩の最小間隙比を他岩種と比較したものである。当然のことながら均等係数が大きくなれば最小間隙比は小さくなっている。泥質輝緑凝灰岩の値も同様な傾向を示す。

表－ 6.6 最大密度および最小密度

	岩 質	泥質輝緑凝灰岩		砂質輝緑凝灰岩	混合状態
	均 等 係 数	22	12	12	12
最大密度	最大乾燥密度 $\rho_{d\ max} : g/cm^3$	2.312	2.242	2.197	2.198
	最小間隙比 e_{min}	0.230	0.302	0.286	0.307
	締 固 め 時 間 sec	30	30	30	30
	突固めエネルギー E_c	3.0	2.0	1.2	1.4
	破 碎 率 B %	3.3	5.6	3.4	4.0
最小密度	最小乾燥密度 $\rho_{d\ min} : g/cm^3$	1.946	1.908	1.831	1.789
	最大間隙比 e_{max}	0.461	0.530	0.544	0.605



図－ 6.10 均等係数と最小間隙比

一方、最小間隙比のときの破碎率は $U_c = 12$ の泥質輝緑凝灰岩が約 6 %，砂質輝緑凝灰岩が約 3 %を示し、 $U_c = 22$ では泥質輝緑凝灰岩は約 3 %である。これら値は、フルイ分け精度を試験的に求め Marsal の破碎率で示すと約 3 %の値であるという報告¹²⁾を考慮すると、 $U_c = 12$ の泥質輝緑凝灰岩だけが約 3 %の破碎率を示しているだけで $U_c = 22$ ， $U_c = 12$ の砂質輝緑凝灰岩の破碎率はほとんどないに等しい。すなわち粒度変化は起っていないと言える。これは、電動ランマによって求めた締固め後の粒度曲線の締固め時間との推移を見てもほとんど変化がないこ

とからもわかる。

表－6.7 は突固めエネルギーと均等係数，4.76mm 通過率および破碎率との関係である。突固めエネルギーが増えるに従い，均等係数，4.76mm 通過率および破碎率は増えている。同一均等係数で比較すると泥質輝緑凝灰岩の方が砂質輝緑凝灰岩に比べ破碎率が大きいために4.76mm 通過率は増えている。

表－6.7 突固めエネルギーと均等係数，4.76mm 通過率，破碎率

	泥 質 輝 緑 凝 灰 岩						砂質輝緑凝灰岩		
	Uc = 22			Uc = 12			Uc = 12		
	均等係数	4.76mm 通過率	破碎率	均等係数	4.76mm 通過率	破碎率	均等係数	4.76mm 通過率	破碎率
試験粒度	22	40%	—	12	19%	—	12	19%	—
0.5 Ec	24	42	2.9%	12	22	5.5%	13	21	5.3%
1.0 Ec	24	43	3.9	15	25	8.4	15	23	5.8
2.0 Ec	30	46	7.0	17	28	11.9	15	24	7.4
3.0 Ec	30	47	7.4	16	31	14.5	14	26	11.7
5.0 Ec							18	30	14.5

13.5 ton 振動ローラ転圧による施工方法を想定すると4～6回転圧は室内突固め試験の1Ec～2Ecに相当すると言われている¹³⁾。これをもとに泥質および砂質輝緑凝灰岩の1Ec～2Ecの破碎率および均等係数を推定すると次のとおりとなる。破碎率のカッコ内の値は破碎率の試験誤差¹²⁾を差し引いた数字である。

砂質輝緑凝灰岩 Uc = 12 破碎率 6～7% (3～4%) Uc = 15
 泥質輝緑凝灰岩 Uc = 12 " 8～12% (5～9%) Uc = 15～17
 泥質輝緑凝灰岩 Uc = 22 " 4～7% (1～4%) Uc = 24～30

均等係数12の場合，泥質および砂質輝緑凝灰岩とも破碎が少ないために均等係数の変化が少ない材料であると考えられる。

7. 透水試験

三軸圧縮試験において飽和状態で実験するためにその供試体を利用して、図 7.1 に示す変水位透水試験法でロック材料の透水係数を求めることにした。なお、試験は供試体に給水後48時間放置し、J I S - A - 1218 に準拠して行った。

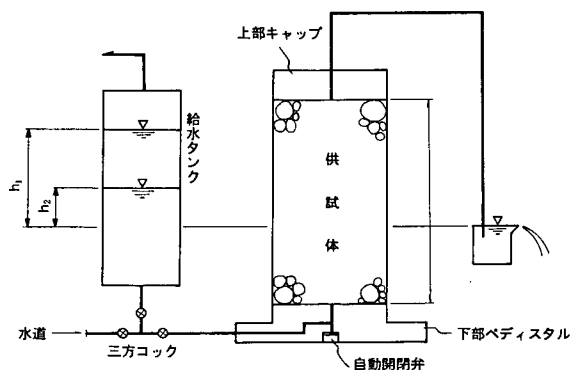


図 - 7.1 変水位透水試験装置

図 - 7.2 は横軸に間隙比を、縦軸に透水係数を示したものである。間隙比が 0.23~0.35 の範囲内において間隙比が大きくなれば透水係数はおよそ 3×10^{-3} cm/sec から 1×10^{-2} cm/sec と大きくなる。一般的にロック材の透水係数は 1×10^{-3} cm/sec より大きければ水位急低下時に間隙水圧が残留しないと言われており、¹⁴⁾ 輝緑凝灰岩の透水係数は間隙比の小さいところで限界の値と言える。

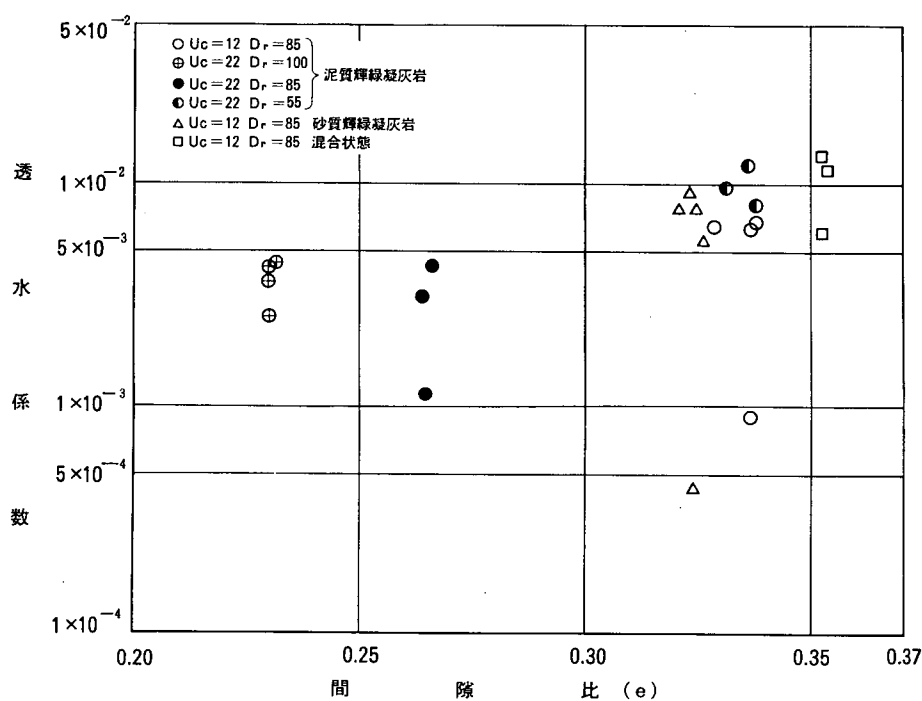
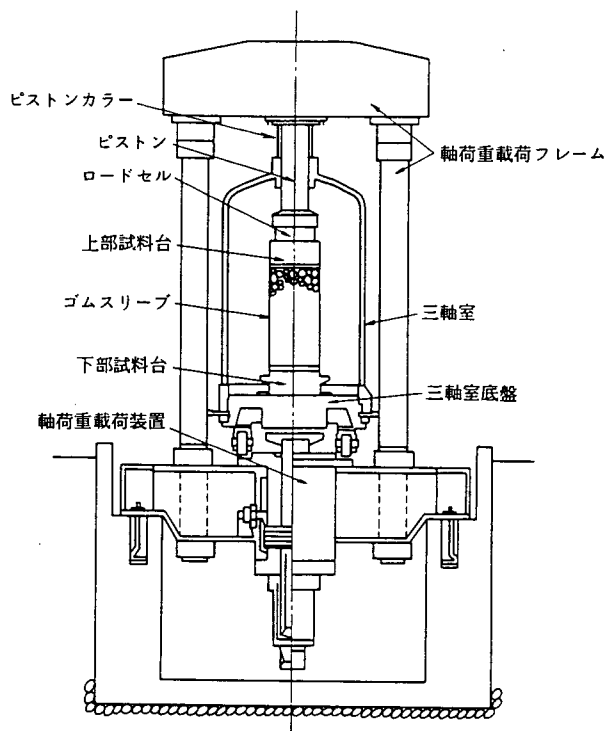


図 - 7.2 間隙比と透水係数

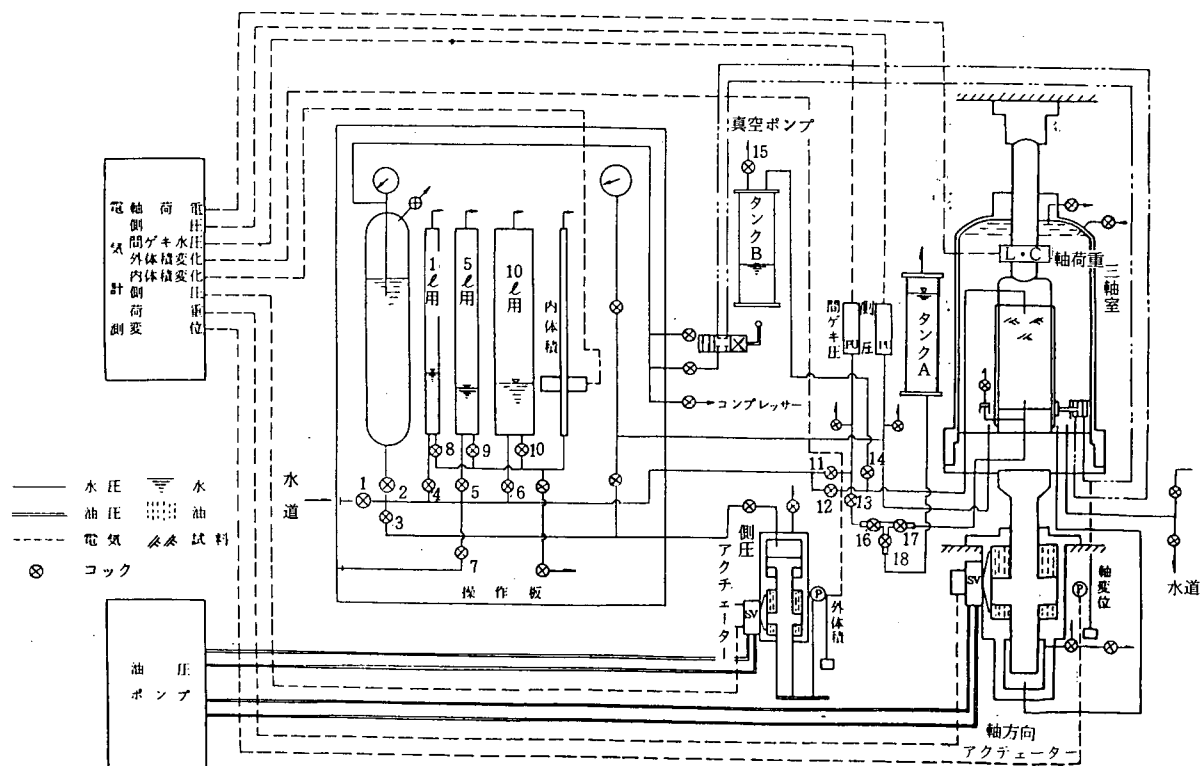
8. 三軸圧縮試験

8.1 試験方法

図－8.1, 8.2 は試験装置の概要である。表－8.1, 8.2 に試験機の仕様と測定精度を示す。

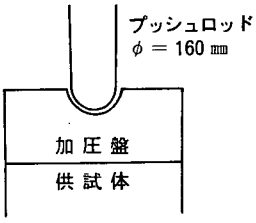


図－8.1 大型三軸圧縮試験機



図－8.2 大型三軸圧縮試験装置の配管系統図

表－8.1 三軸圧縮試験機の仕様

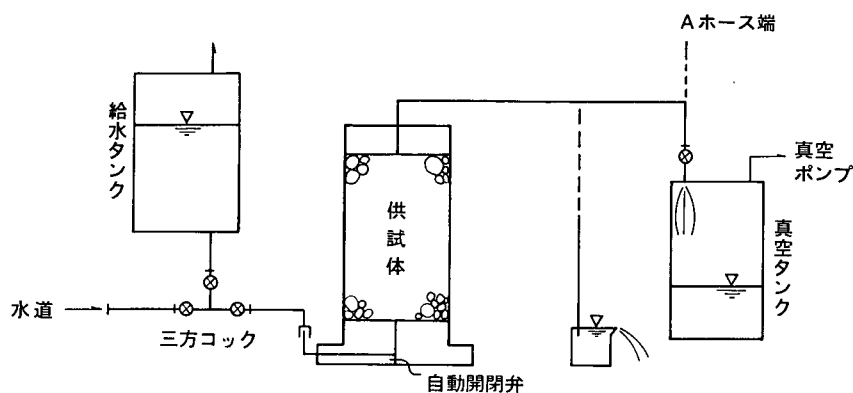
項 目	内 容	項 目	内 容
三 軸 容 器	1 室 式	軸 載 荷 方 式	油圧シリンダーによる方式（油圧サーボ方式）
軸 載 荷 方 法	供試体下部より上方に载荷	軸 方 向 変 位 の 測 定	軸载荷用油圧シリンダーの変位量を測定
上下加圧盤の形状	供試体直径と同寸法の円形	体 積 変 化 の 測 定	外体積変化量（三軸室内の水の出入量）
上部加圧盤の回転の有無	回 転 可 能	体 積 変 化 の 測 定 方 式	加圧用シリンダーの変位測定
上部加圧盤とプッシュロッドまたは反力受け部の関係	分離型（球面） 	载荷用ピストンの貫入量補正（見掛けの体積）	機 械 的 に 補 正 す る
上下加圧盤の排水方法	ポ ー ラ ス メ タ ル	試 験 機 制 御	設 定 器
ゴ ム ス リ ー プ	1.5 mm / 枚 × 2 枚	試 験 時 の 測 定 間 隔	ペンレコードによる連続測定
軸方向荷重の測定	供試体上部反力を三軸室の内部で測定	測 定 値	レコードから読み取る
側圧の加圧方法	油圧を水圧に変換（油圧サーボ方式）	測定項目および測定順序	同時測定 { 軸 荷 重 変 位 軸 変 体 積 側 変 化 側 圧 }

表－8.2 試験時の測定精度

測 定 項 目	容 量	検 出 器 の 方 式	最小読み取り量
軸 荷 重	50 トン	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	0.2 トン
側 圧	30 kgf/cm ²	"	0.1 kgf/cm ²
軸 変 位	15 cm	ポテンシオメータ	0.5 mm
体 積 変 化	10,000 cm ³	加圧シリンダーの変位測定 ポテンシオメータ	40 cm ³

供試体の作製にあたっては、不飽和状態では供試体全体を6層（1層当り供試体高さ10cm）に分け、それぞれを粒度調整を行ったのちモールドにハンドスコップで投入していき、1層毎に電動ランマによって目的の密度になるように締固め時間を調節して作製した。供試体作製後は、真空ポンプで吸引（ -0.3 kgf/cm^2 ）し供試体を自立させ、圧密時に真空解除を行った。

一方，飽和状態の供試体作製は図－8.3に示す装置を用いた。真空ポンプで吸引（ -0.3 kgf/cm^2 ）しながら給水を行い吸引水が出始めて約5分たってから供試体上面側を密閉し真空ポンプを止めたのち，給水タンク水面とホースAが共に供試体上面より高い位置になるようにし大気解放状態で48時間放置した。



図－8.3 飽和試料の供試体作製

試験条件を表－8.3に示す。側圧を2, 4, 6 kgf/cm^2 の3種類に変え，変位制御（ひずみ速度供試体高さの0.5%/min）で不飽和および飽和状態とも圧密排水状態で行った。

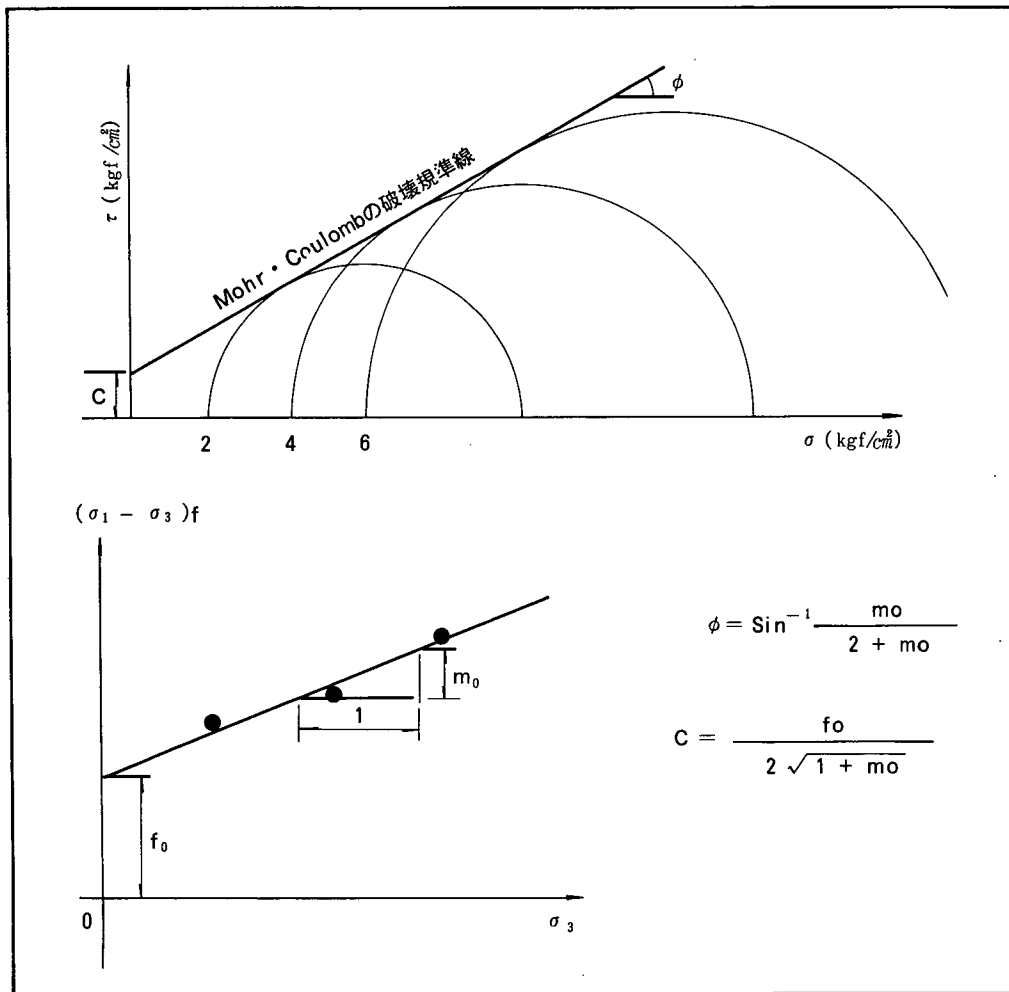
表－8.3 試験条件

試験の種類		圧密排水（CD）試験
供試体	寸 法	直径30cm×高さ60cm
	締 固 め 方 法	電動ランマ，締固め層数，6層
	試 料 状 態	不飽和（含水比1%以下） 飽 和（48時間：モールド付自然放置）
側 圧		$\sigma_3 = 2, 4, 6 \text{ kgf/cm}^2$
せん断	せん断方法	変位制御
	せん断速度	3 mm/min（供試体高さの0.5%/min）

表－8.4に試験ケースを示す。内部摩擦角(ϕ)および粘着力(c)は，最も一般的な強度定数の決定方法であるモール・クーロンの破壊基準線から求めた。なお， ϕ ， c は3つの応力円の最小二乗法によって算出した（図－8.4）。

表－ 8. 4 試験ケース

材 料	均等係数	試料状態	相対密度	目標間隙比
泥質輝緑凝灰岩	2.2	不飽和	100 %	0.230
			85 %	0.265
			55 %	0.334
砂質輝緑凝灰岩	1.2	飽 和	85 %	0.325
混 合				0.352



図－ 8. 4 c , ϕ の求め方

8.2 泥質輝緑凝灰岩における相対密度とせん断強度

表-8.5に相対密度を100%, 85%, 55%と3種類変えて試験した結果の一覧を不飽和状態と飽和状態と比較して示す。相対密度100, 85, 55%のときの間隙比は次のとおりで、最大間隙比および最小間隙比は締固め試験の値を用いた。

$$\text{相対密度 } 100\% \quad e_{100} = e_{min} = 0.230$$

$$\text{相対密度 } 85\% \quad e_{85} = - (0.85 (e_{max} - e_{min}) - e_{max}) = 0.265$$

$$\text{相対密度 } 55\% \quad e_{55} = - (0.55 (e_{max} - e_{min}) - e_{max}) = 0.334$$

$$e_{max} = 0.461$$

図-8.5は応力-ひずみ(軸ひずみ, 体積ひずみ)曲線である。相対密度が高くなれば不飽和および飽和状態とも応力のピーク値が明瞭な曲線となる。図-8.6にモールの応力円を示す。図-8.7は横軸に相対密度をとり、縦軸に内部摩擦角および粘着力をとって示したものである。不飽和および飽和状態とも相対密度が高くなれば内部摩擦角は増加し、粘着力は不飽和状態で横ばい、飽和状態で減少の傾向を示す。不飽和状態と飽和状態との内部摩擦角の差は明確で飽和状態の内部摩擦角は不飽和状態に比べ3~4°程度小さい。図-8.8は横軸を初期間隙比にして内部摩擦角および粘着力と初期間隙比との関係を比較したものである。初期間隙比が大きくなれば内部摩擦角は徐々に減少していく。

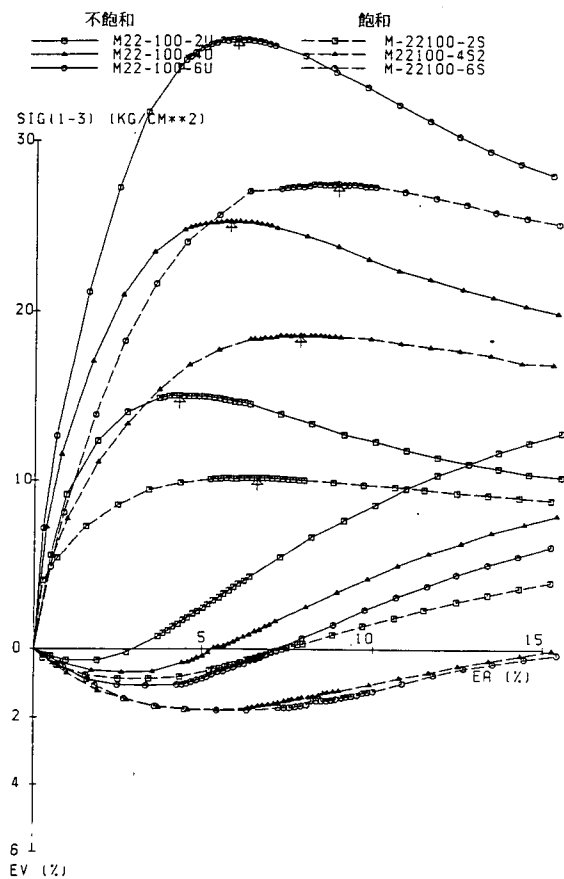
図-8.9は各側圧毎に粘着力成分をゼロにした内部摩擦角($\phi_0 = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$)を求め、側圧との関係を検討したものである。また、破碎率についても示している。 ϕ_0 の値は側圧が増えるに従い減少しており、不飽和状態および飽和状態とも同じ傾向を示す。当然のことながら相対密度が高い方が ϕ_0 の値が大きくなる。破碎率は不飽和状態より飽和状態の方がやや多く、飽和状態では側圧2 kgf/cm²で10%あったものが側圧6 kgf/cm²になると15%程度に達する。破碎率は ϕ_0 の値と異なり相対密度にあまり依存しない。

図-8.10は側圧と軸差応力がピーク時の変形係数($E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}}{\epsilon}$)との関係を示したものである。不飽和状態の変形係数が飽和状態に比べ側圧が大きくなるにつれて変形係数は大きくなり、また相対密度が高くなるに従い変形係数の値は大きいことを示している。

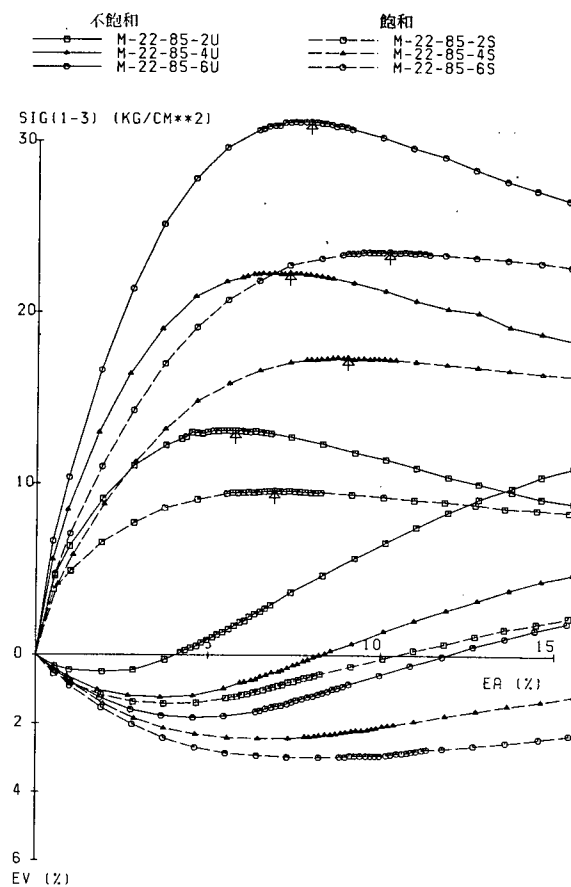
表-8.5 相対密度が異なる場合のせん断強度の比較

均等係数	相対密度 D_r	試験番号	側 圧 σ_3	初 期 乾燥密度 ρ_{d0}	平 均 乾燥密度 $\bar{\rho}_{d0}$	間 隙 比 の 変 化					破 壊 時						破砕率 B%	$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	$\phi \cdot c$
						e_o	$\bar{e}_o$	e_c	$\bar{e}_c$	e_f	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}}$	ϵ_f	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3			
不飽和	100	H-9	kgf/cm ² 2.00	g/cm ³ 2.380	2.386	0.232	0.229	0.222	0.217	0.231	kgf/cm ² 19.01 (15.01)	4.29%	-0.75%	kgf/cm ² 349	0.59	8.51	5.30	52.15°	46.39° 0.88 kgf/cm ²
		H-12	4.00	2.390		0.227		0.215		0.217	33.30 (25.30)	5.76	-0.15	436	0.51	7.33	6.70	49.44	
		H-13	6.00	2.387		0.228		0.213		0.207	48.01 (36.01)	5.93	0.53	610	0.46	7.00	9.00	48.59	
	85	H-42	2.00	2.318	2.318	0.265	0.265	0.255	0.245	0.266	17.11 (13.11)	5.74	-0.87	228	0.57	7.56	5.30	50.01	43.82° 0.88 kgf/cm ²
		H-41	4.00	2.319		0.264		0.248		0.244	30.28 (22.28)	7.32	0.36	305	0.48	6.57	7.80	47.37	
		H-40	6.00	2.317		0.265		0.233		0.233	43.09 (31.09)	7.89	1.23	394	0.42	6.18	10.30	46.18	
	55	H-21	2.00	2.204	2.198	0.330	0.334	0.316	0.309	0.313	16.62 (12.62)	7.00	0.24	180	0.48	7.31	5.90	49.40	42.60° 0.94 kgf/cm ²
		H-19	4.00	2.195		0.336		0.307		0.285	29.09 (21.09)	8.81	1.75	240	0.40	6.27	8.50	46.47	
		H-18	6.00	2.194		0.336		0.303		0.271	41.48 (29.48)	9.78	2.42	301	0.38	5.91	8.90	45.29	
飽和	100	H-10	kgf/cm ² 2.00	g/cm ³ 2.383	2.382	0.230	0.232	0.219	0.218	0.216	kgf/cm ² 14.16 (10.16)	6.57%	0.24%	kgf/cm ² 154	0.48	6.08	7.50	45.85°	43.22° 0.29 kgf/cm ²
		H-47	4.00	2.374		0.235		0.224		0.206	26.57 (18.57)	7.80	1.46	238	0.41	5.64	9.50	44.34	
		H-20	6.00	2.382		0.231		0.210		0.193	39.46 (27.46)	8.92	1.47	309	0.42	5.58	14.80	44.10	
	85	H-45	2.00	2.317	2.318	0.266	0.265	0.252	0.243	0.241	13.59 (9.59)	6.9	0.94	139	0.43	5.80	10.80	44.88	39.34° 0.69 kgf/cm ²
		H-44	4.00	2.318		0.265		0.242		0.214	25.36 (17.36)	9.0	2.23	193	0.38	5.34	9.60	43.20	
		H-43	6.00	2.320		0.264		0.235		0.199	35.50 (23.50)	10.2	2.91	230	0.36	4.92	12.50	41.45	
	55	H-15	2.00	2.194	2.197	0.336	0.334	0.312	0.296	0.287	13.59 (9.59)	11.31	1.91	85	0.42	5.80	10.5	44.88	38.3° 0.79 kgf/cm ²
		H-16	4.04	2.203		0.331		0.294		0.248	24.86 (16.78)	12.95	3.52	129	0.36	5.15	12.4	42.44	
		H-17	6.00	2.194		0.336		0.282		0.225	34.74 (22.74)	13.88	4.47	164	0.34	4.79	13.3	40.89	

相对密度 100 %



相对密度 85 %



相对密度 55 %

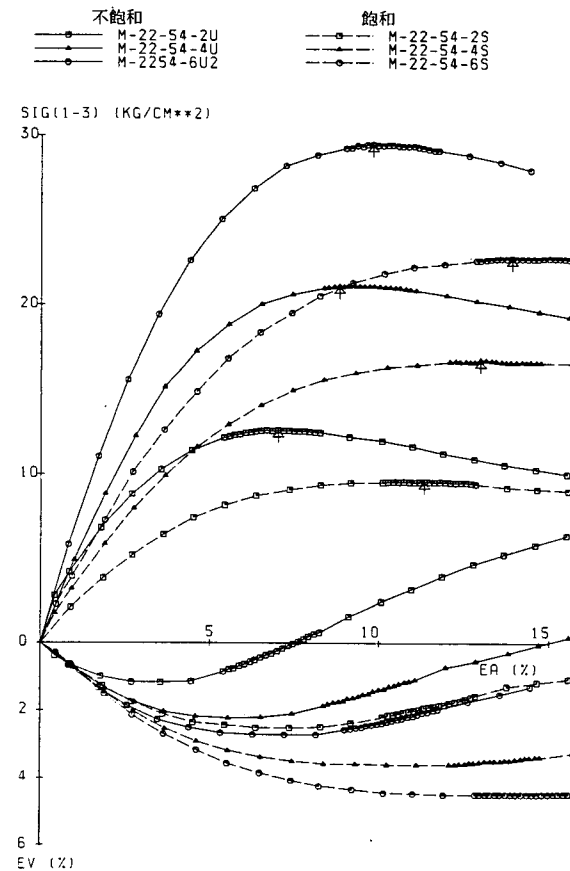


図-8.5 応力-ひずみ曲線

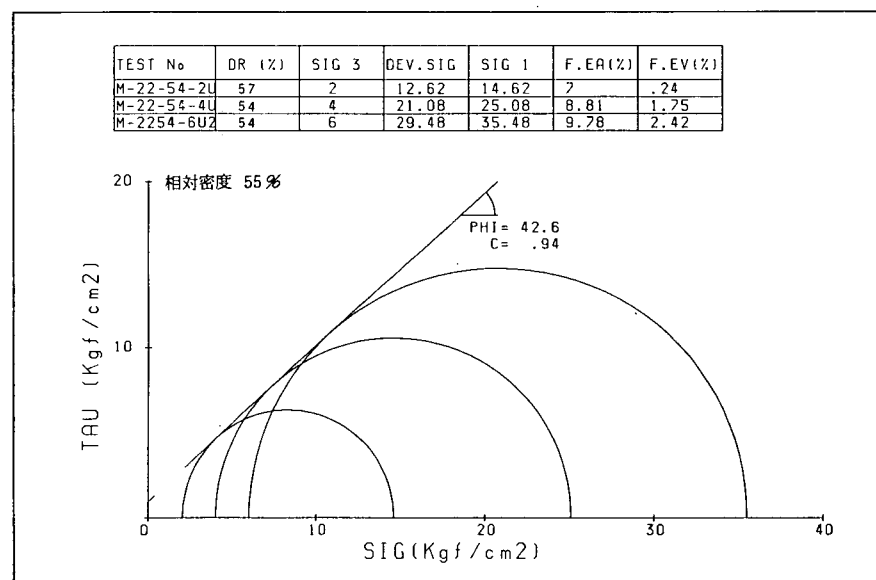
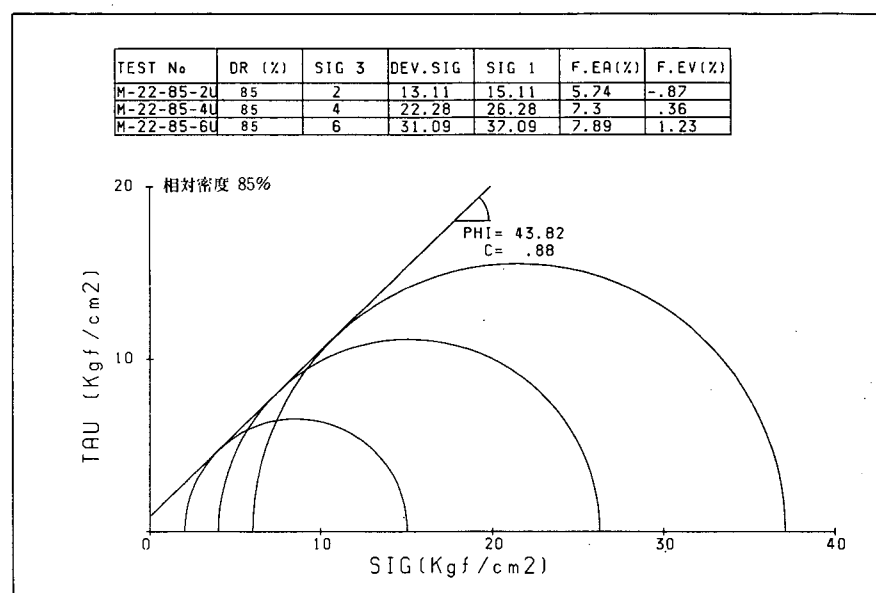
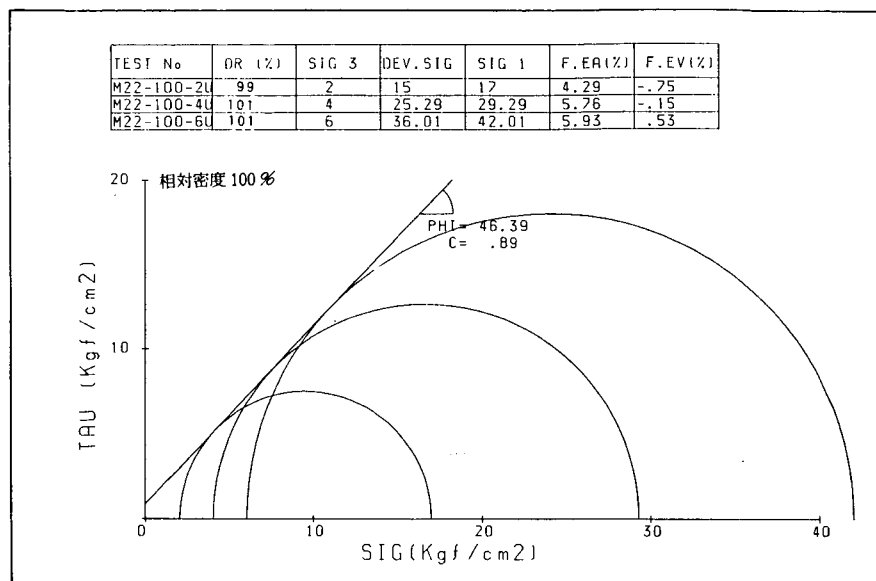
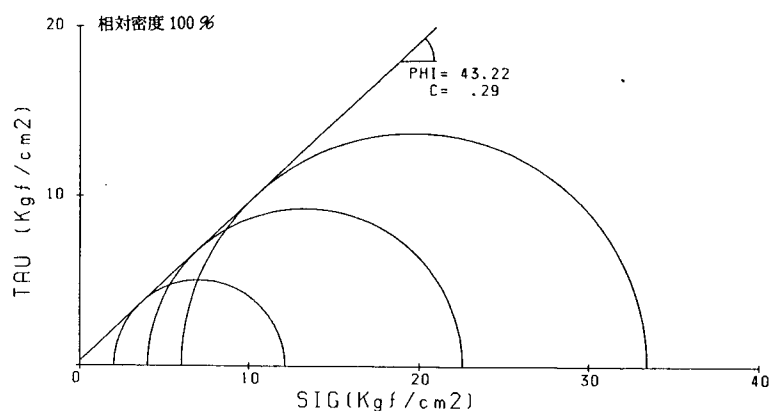
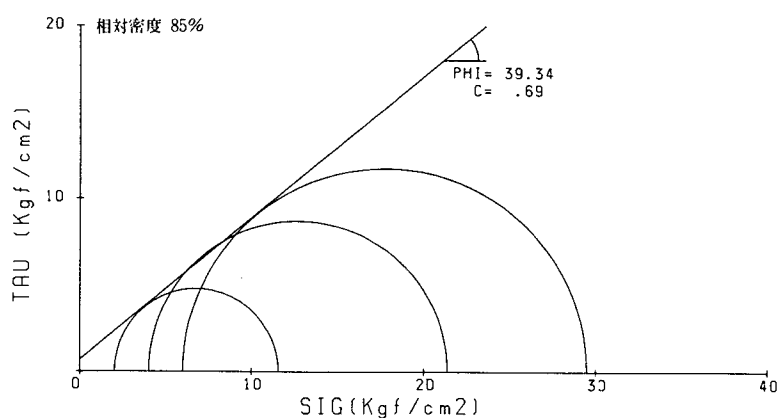


図 - 8. 6. a モールの応力円 泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 22$ 不飽和状態

TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
M-22100-2S	100	2	10.15	12.15	6.57	.24
M22100-4S	98	4	18.57	22.57	7.82	1.46
M-22100-6S	100	6	27.46	33.46	8.92	1.47



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
M-22-85-2S	84	2	9.58	11.58	6.89	.93
M-22-85-4S	85	4	17.36	21.36	8.99	2.23
M-22-85-6S	85	6	23.49	29.49	10.17	2.9



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
M-22-54-2S	54	2	9.59	11.59	11.31	1.91
M-22-54-4S	56	4	16.77	20.81	12.95	3.52
M-22-54-6S	54	6	22.74	28.74	13.88	4.47

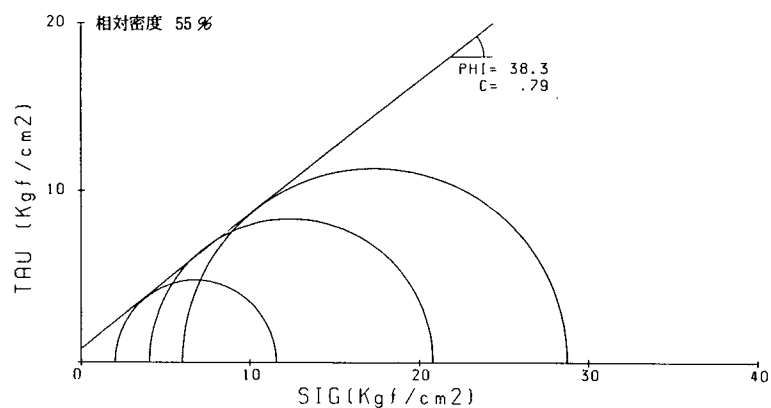


図- 8. 6. b モールの応力円 泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 22$ 飽和状態

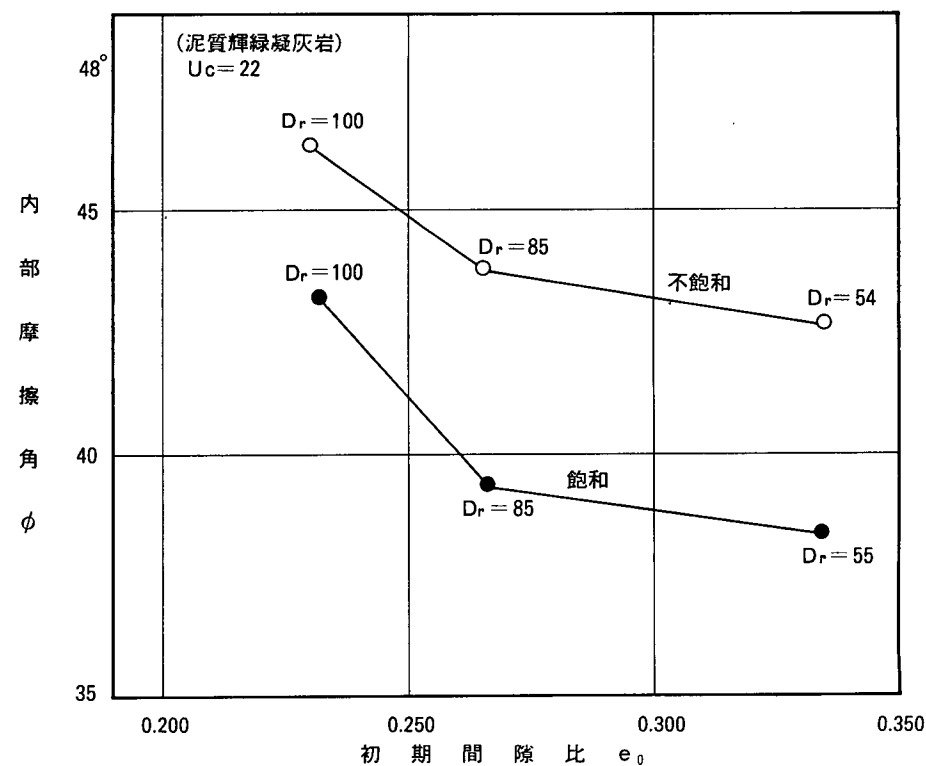
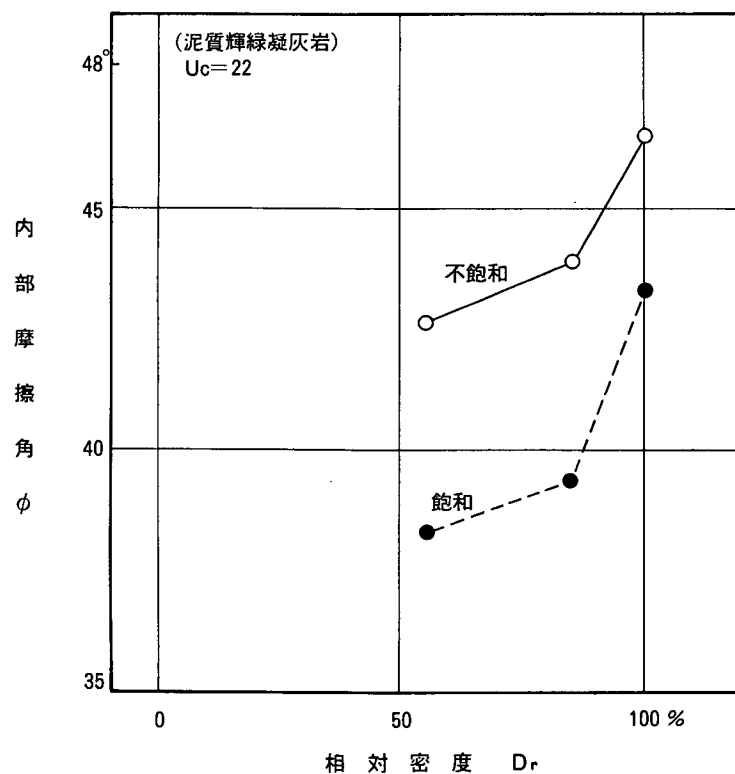
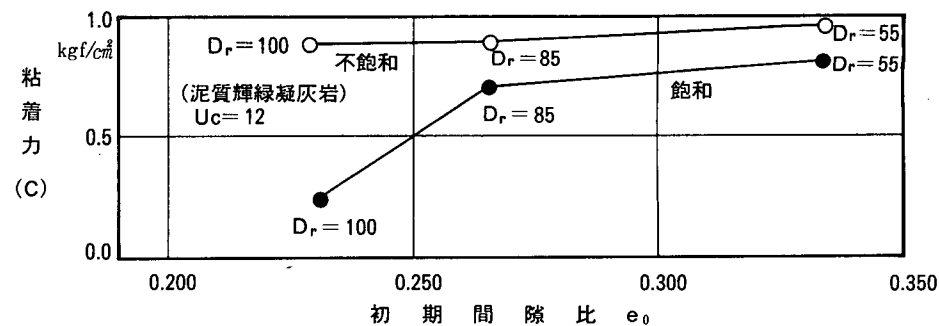
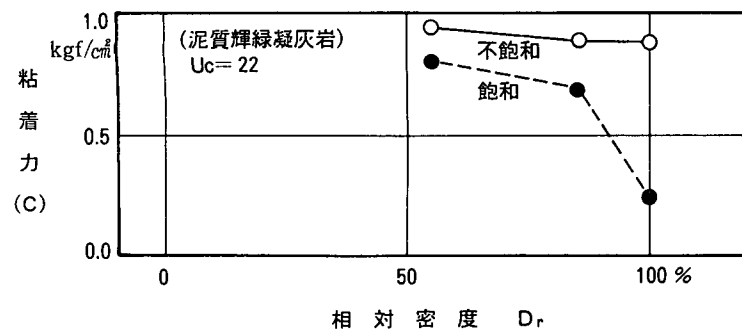


図-8.7 相対密度と内部摩擦角および粘着力

図-8.8 初期間隙比と内部摩擦角および粘着力

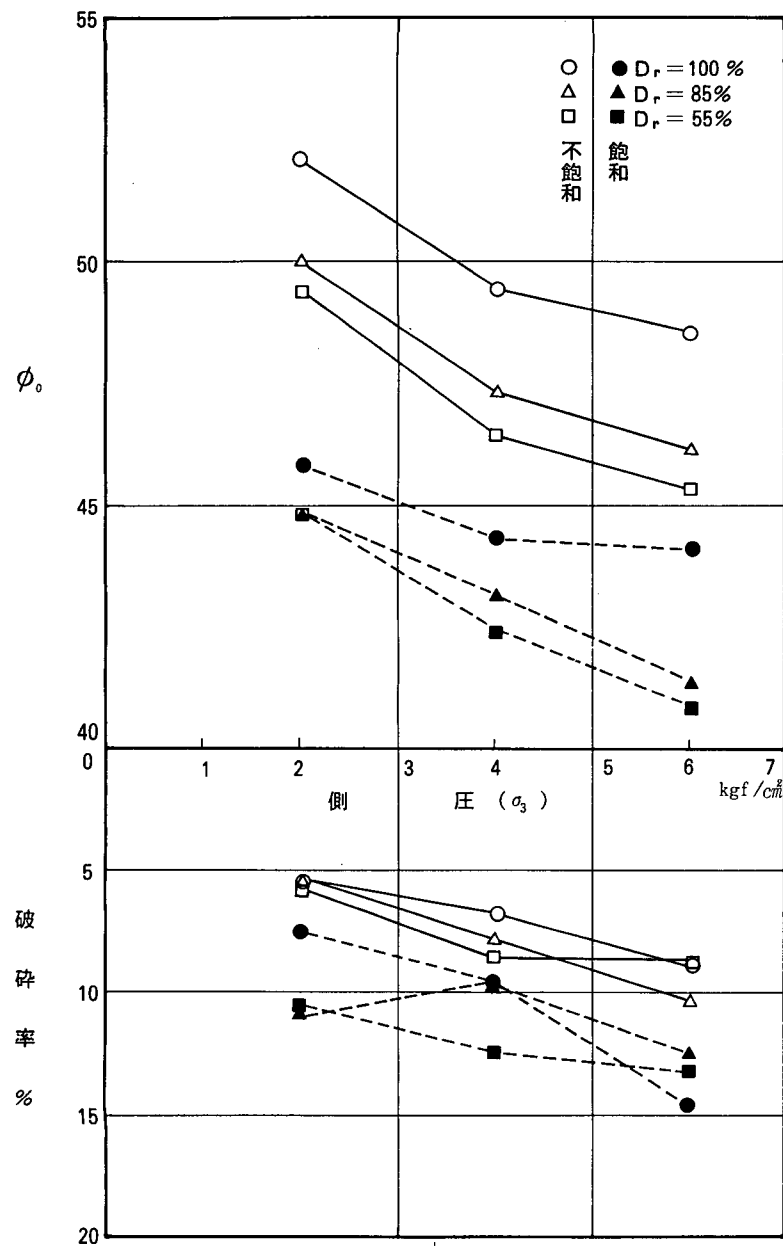


図 - 8.9 側圧と ϕ_0 および破砕率

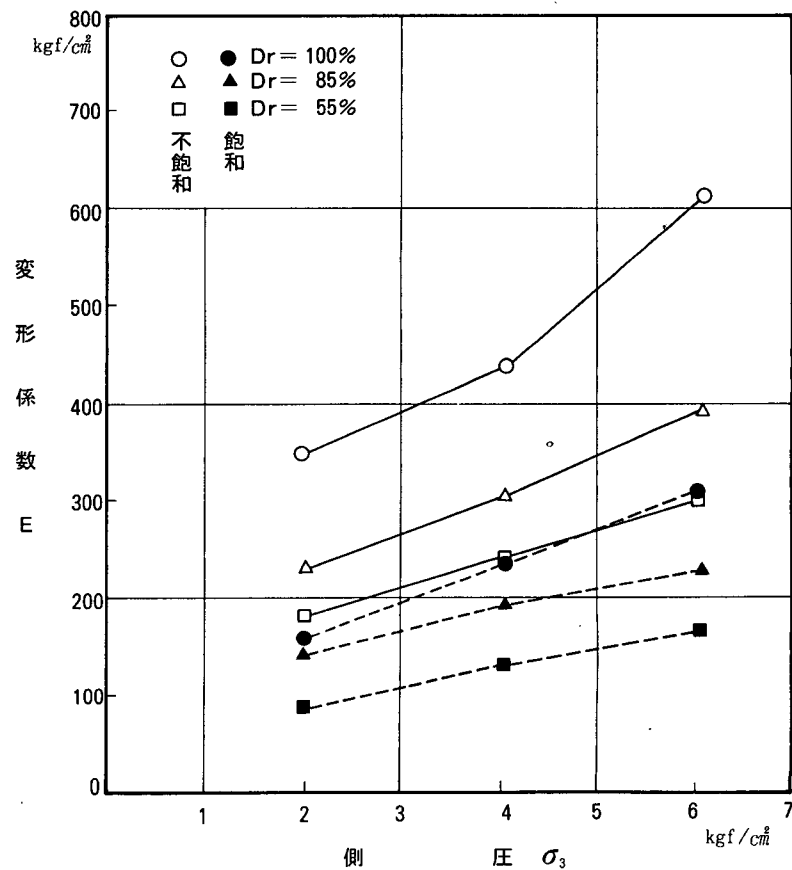


図 - 8.10 側圧と変形係数

8.3 泥質輝緑凝灰岩における均等係数とせん断強度

泥質輝緑凝灰岩において均等係数 (U_c) 22 以外にも $U_c = 12$ で試験した。このときの間隙比は $U_c = 12$, $U_c = 22$ でも同一 ($e = 0.333$) とした。 $U_c = 12$ の相対密度は 85 %, $U_c = 22$ の相対密度は 55 % である。表 - 8.6 に泥質輝緑凝灰岩における試験結果の一覧を示す。

図 - 8.11 および図 - 8.12 に泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 12$ の不飽和および飽和状態の応力-ひずみ曲線とモールの応力円を示す。図 - 8.13 は初期間隙比と内部摩擦角および粘着力との関係である。

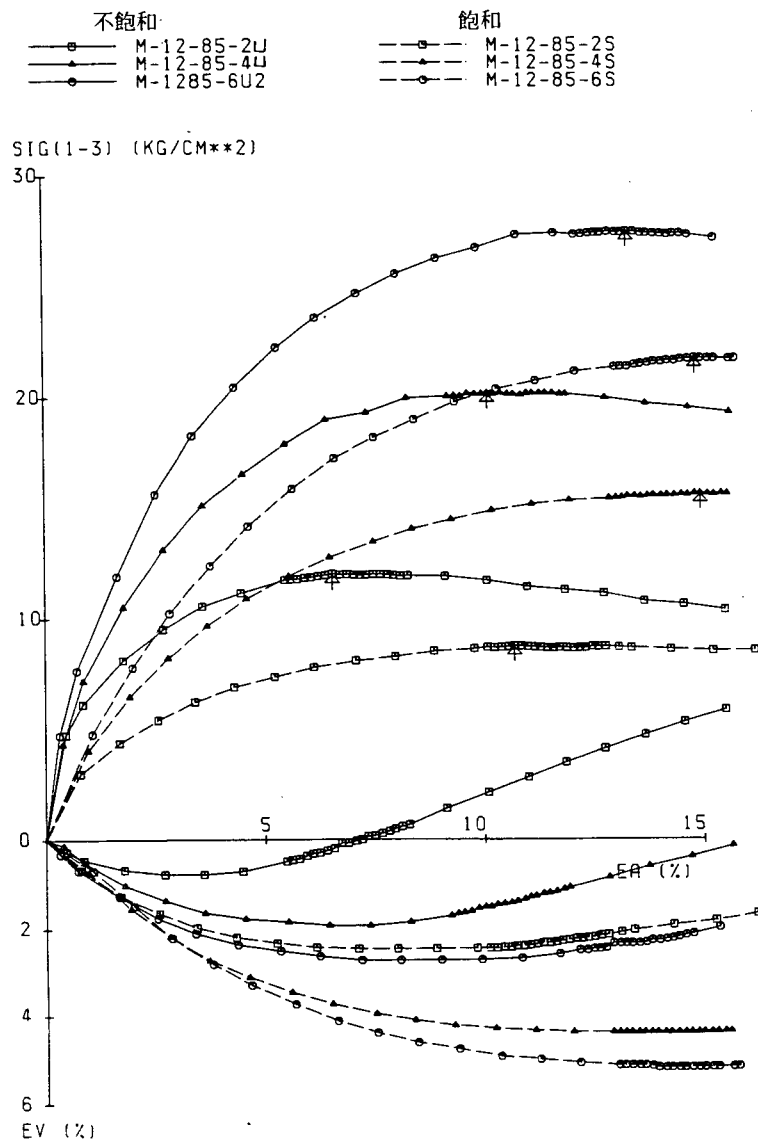
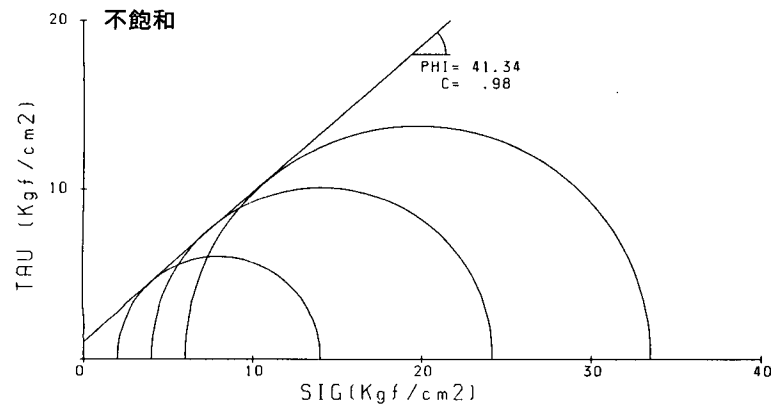


図 - 8.11 応力-ひずみ曲線 泥質輝緑凝灰岩
 $U_c = 12$, $Dr = 85\%$

表 - 8.6 泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 12$

均等係数	試験状態	試験番号	側圧 σ_3	初期 乾燥密度 ρ_{d0}	平均 乾燥密度 $\bar{\rho}_{d0}$	間隙比の変化					破壊時						破壊率 B %	$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	$\phi \cdot c$
						e_0	$\bar{e}_0$	e_c	$\bar{e}_c$	e_f	$\sigma_1 + \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_3$)	ε_f	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3			
12	不飽和	H-1	kgf/cm ² 2.00	g/cm ³ 2.188	g/cm ³ 2.189	0.334	0.334	0.318	0.313	0.315	kgf/cm ² 16.03 (12.03)	% 6.55	% 0.19	kgf/cm ² 182	0.49	7.02	12	48.63°	41.34° 0.97 kgf/cm ³
		H-2	4.00	2.196		0.330		0.310		0.290	28.19 (20.19)	10.12	1.50	200	0.43	6.05	14	45.74	
		H-14	6.00	2.184		0.337		0.310		0.279	39.49 (27.49)	13.32	2.33	207	0.41	5.58	18	44.12	
	飽和	H-8	2.00	2.185	2.189	0.336	0.333	0.314	0.302	0.283	12.76 (8.76)	10.70	2.39	80	0.39	5.38	14.8	43.36	38.3° 0.56 kgf/cm ³
		H-5	4.01	2.187		0.335		0.297		0.241	23.67 (15.65)	14.96	4.32	104	0.36	4.90	17.6	41.38	
		H-6	6.01	2.196		0.329		0.294		0.228	33.79 (21.77)	14.85	5.12	146	0.33	4.62	20.3	40.11	

TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F. ER (%)	F. EV (%)
M-12-85-2U	86	2	12.03	14.03	6.55	.19
M-12-85-4U	88	4	20.19	24.19	10.12	1.5
M-1285-6U2	85	6	27.49	33.49	13.32	2.33



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F. ER (%)	F. EV (%)
M-12-85-2S	85	2	8.76	10.76	10.7	2.39
M-12-85-4S	86	4.01	15.65	19.66	14.96	4.32
M-12-85-6S	88	6.01	21.77	27.78	14.85	5.12

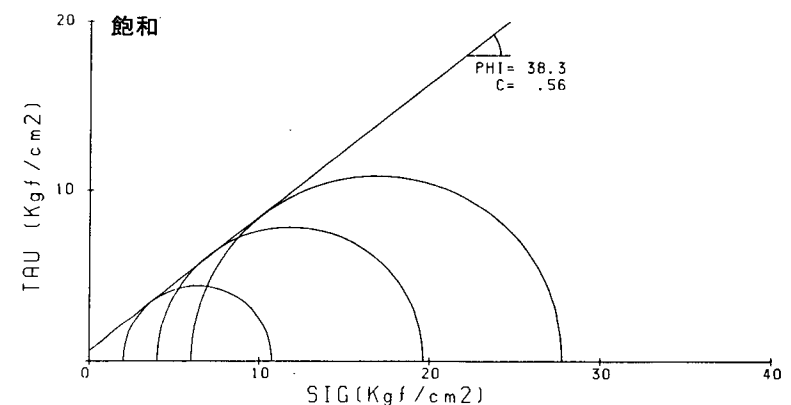


図 - 8.12 モールの応力円 泥質輝緑凝灰岩 $U_c = 12$, $Dr = 85\%$

内部摩擦角は不飽和状態において均等係数が大きい方が約1度大きく、飽和状態では、ほぼ同一の内部摩擦角である。これに対し粘着力は不飽和状態では均等係数の大小に関係なくほぼ同一の 0.95 kgf/cm^2 となっているが、飽和状態では均等係数22の方の粘着力が均等係数12に比べ約 0.2 kgf/cm^2 大きい。相対密度の関係からこの傾向をみると相対密度の小さい方が内部摩擦角は大きくなっており前項でのべた関係と異なる。しかし、この差はわずか1度の差であり、また飽和状態において同一の内部摩擦角となっている。いずれにしても内部摩擦角の差は小さく、均等係数12と22の範囲内において同一間隙比では均等係数および相対密度の依存性は少なく同じ内部摩擦角になると考えられる。

図-8.14は ϕ および破砕率と側圧との関係を不飽和状態と飽和状態で比較したものである。 ϕ の値はどの側圧においても均等係数が22の方が大きく、これと反対に破砕率は均等係数12の方が大きい値となっている。

図-8.15は横軸に側圧をとり、縦軸に変形係数をとり不飽和状態と飽和状態で比較した。均等係数22の方が変形係数は大きく、側圧とともに増加している。変形係数の不飽和状態と飽和状態の差は 100 kgf/cm^2 程度あり、不飽和状態の変形係数が大きい。

図-8.16は、横軸に均等係数をとり縦軸に内部摩擦角を示したものである。相対密度85%において $U_c = 12$ と $U_c = 22$ とを比較すると不飽和状態では均等係数が増えると内部摩擦角は大きくなるが、飽和状態ではその傾向が少ない。同一間隙比で比較すると飽和状態においてほぼ横ばいであると言える。

泥質輝緑凝灰岩の間隙比と内部摩擦角との関係を他岩種と比較するために図-8.17に示す。図-8.17は均等係数が10以上で不飽和状態のものをプロットしたものである。どの岩種においても間隙比が大きくなれば内部摩擦角は小さくなることを示している。不飽和状態の泥質輝緑凝灰岩の内部摩擦角は他岩種の間隙比に位置している。同一間隙比をみると必ずしも同一の内部摩擦角になっておらず、上限値と下限値は約5度の幅がある。例えば間隙比0.4で比較すれば内部摩擦角の最大値は均等係数85で、最小値の内部摩擦角は均等係数11の状態となり、均等係数の大きさがかなり違えば必ずしも同一間隙比で同一の内部摩擦角は得られないことを示している。

8.4 混合した材料のせん断強度

この試験は均等係数12の状態で行うことにし、混合状態は泥質輝緑凝灰岩および砂質輝緑凝灰岩の重量比を1対1として作製した。表-8.7に泥質および砂質輝緑凝灰岩それぞれ単独と混合状態の試験結果を示す。

図-18は応力ひずみ曲線を各岩種毎に比較したものである。

図-19にはそれらのモールの応力円を示す。

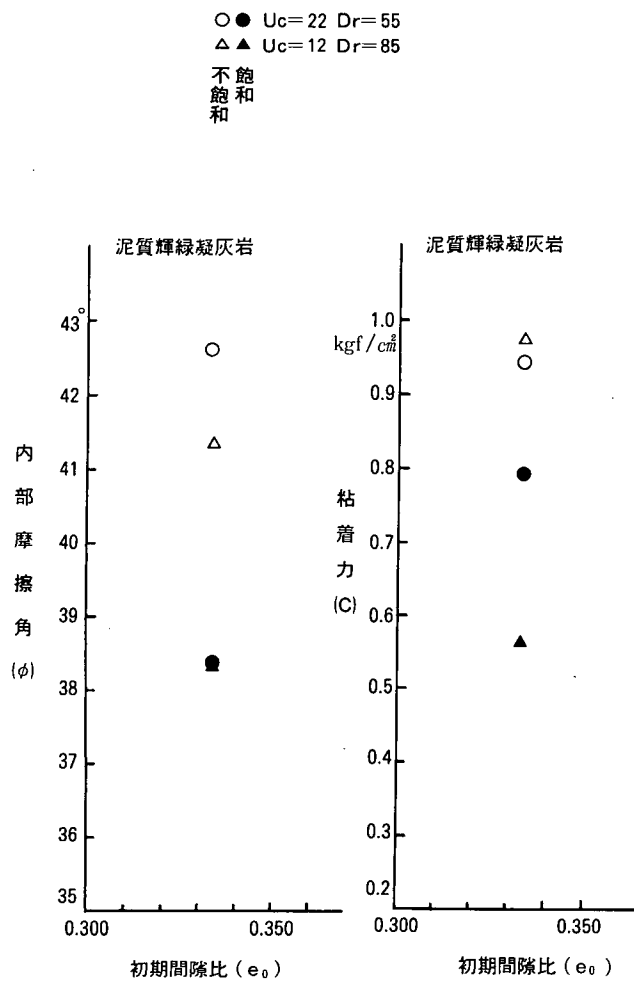


図-8.13 初期間隙比と内部摩擦角および粘着力

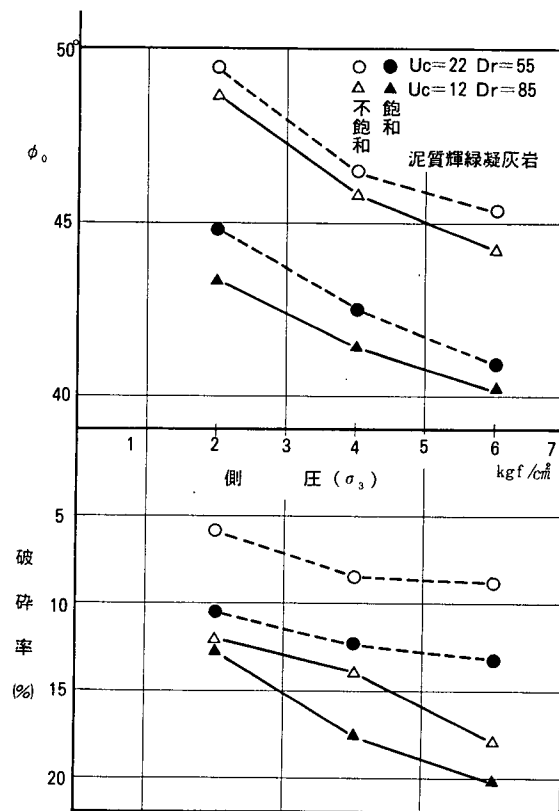


図-8.14 側圧と ϕ_0 および破砕率

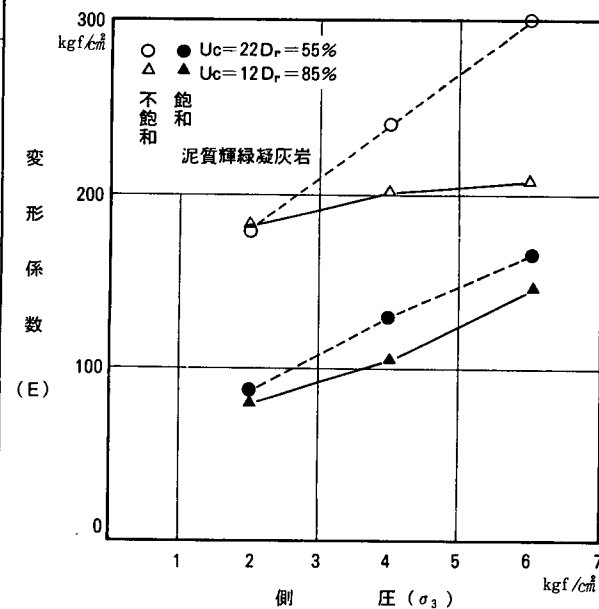


図-8.15 側圧と変形係数

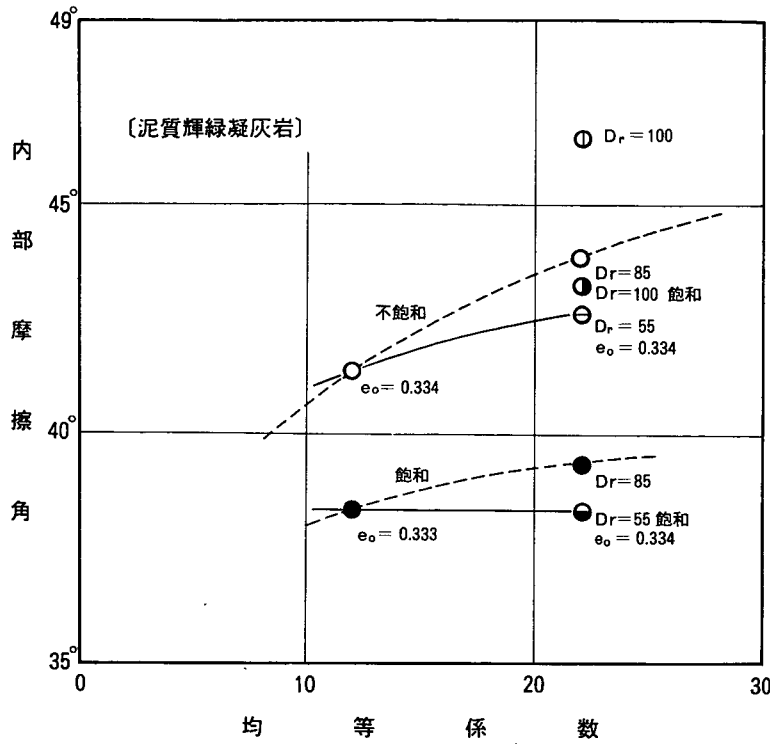


図-8.16 均等係数と内部摩擦角

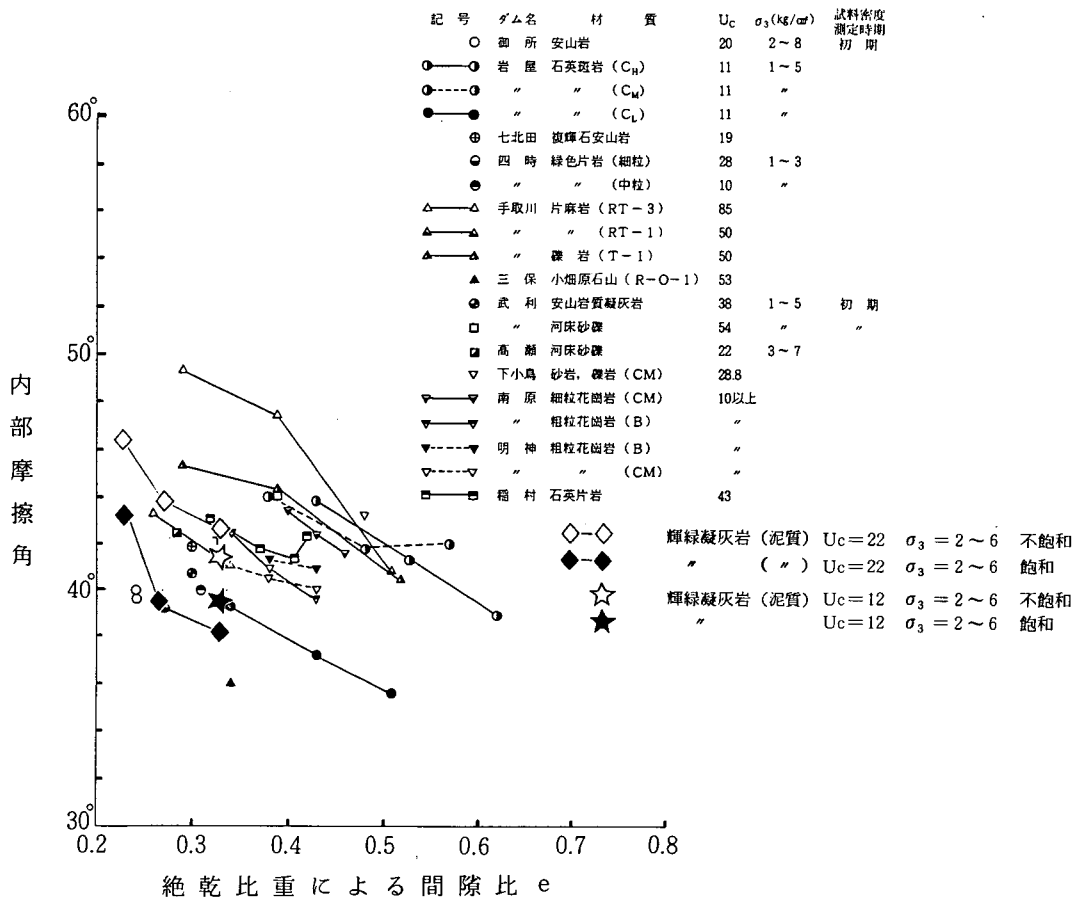


図-8.17 ロック材料三軸圧縮試験結果 ($e \sim \phi$ 関係, $U_c \geq 10$)

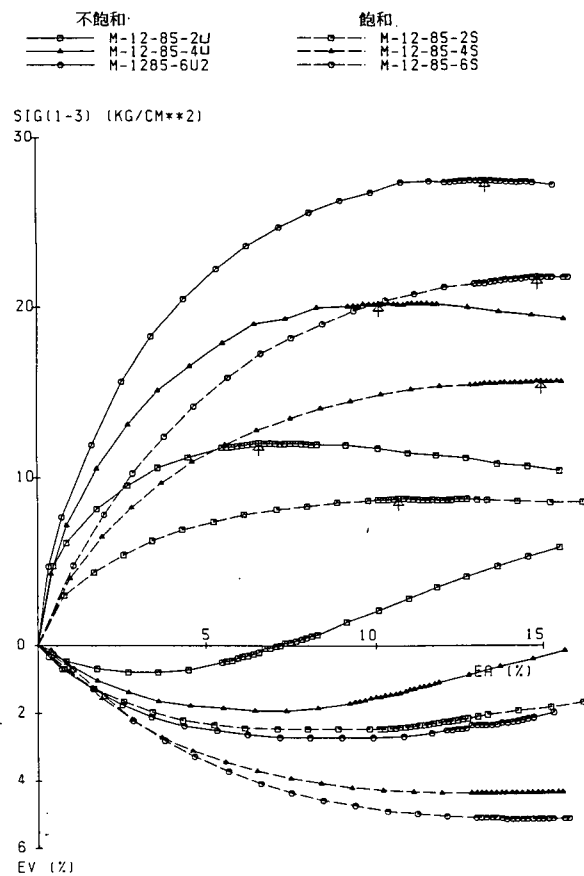
表-8.7 泥質および砂質輝緑凝灰岩単独と混合状態のせん断強度

不飽和状態

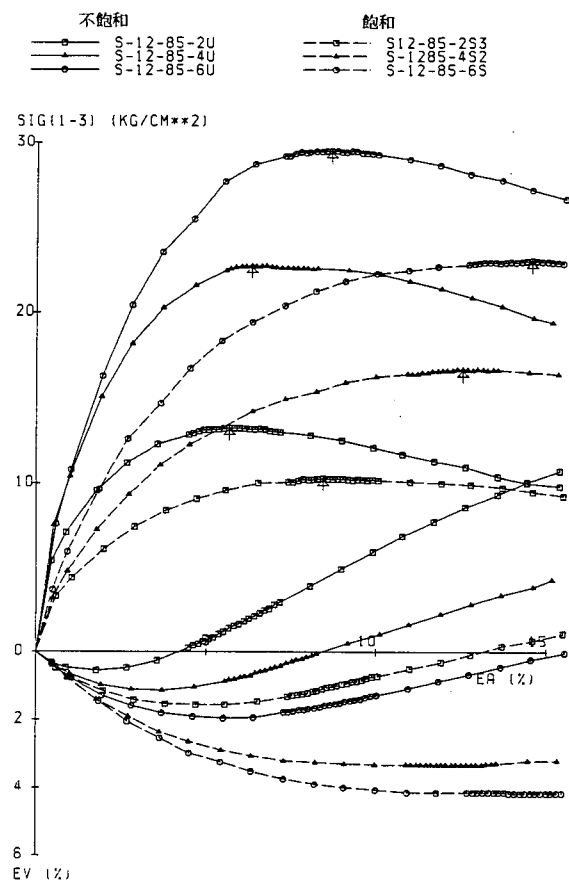
均等係数	試料状態	試験番号	側 圧 σ_3	初 期 乾燥密度 ρ_{d0}	平 均 乾燥密度 $\bar{\rho}_{d0}$	間 隙 比 の 変 化					破 壊 時						破砕率 B%	$\phi_c = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	$\phi \cdot c$
						e_0	$\bar{e}_0$	e_c	$\bar{e}_c$	e_f	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$	ϵ_f	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3			
12	泥質 Gb=2.919 Q=0.94	H-1	kgf/cm ² 2.00	g/cm ³ 2.188	g/cm ³ 2.189	0.334	0.334	0.318	0.313	0.315	$\frac{kgf}{cm^2}$ 16.03 (12.03)	6.55%	0.19%	$\frac{kgf}{cm^2}$ 182	0.49	7.02	11.5	48.63°	4.134° 0.97 kgf/cm ²
		H-2	4.00	2.196		0.330		0.310		0.290	28.19 (20.19)	10.12	1.50	200	0.43	6.05	14.2	45.74	
		H-14	6.00	2.184		0.337		0.310		0.279	39.49 (27.49)	13.32	2.33	207	0.41	5.58	17.9	44.12	
	砂質 Gb=2.826 Q=1.58	H-33	2.00	2.134	2.132	0.324	0.325	0.308	0.299	0.318	17.28 (13.28)	5.66	-0.71	234	0.56	7.64	8.8	50.22	4.229° 1.18 kgf/cm ²
		H-32	4.00	2.134		0.324		0.296		0.287	30.77 (22.77)	6.31	0.68	361	0.45	6.69	10.5	47.73	
		H-31	6.00	2.128		0.328		0.293		0.273	41.52 (29.52)	8.67	1.56	340	0.41	5.92	13.4	45.31	
	混合 Gb=2.872 Q=1.26	H-36	2.00	2.126	2.130	0.351	0.348	0.335	0.322	0.336	16.35 (12.35)	7.64	-0.08	162	0.50	6.17	7.8	49.06	4.166° 1.03 kgf/cm ²
		H-35	4.00	2.135		0.345		0.318		0.302	28.73 (20.73)	9.98	1.19	207	0.44	5.18	11.6	46.18	
		H-34	6.00	2.130		0.348		0.314		0.284	40.28 (28.28)	9.94	2.25	284	0.39	4.71	12.8	44.59	

飽和状態

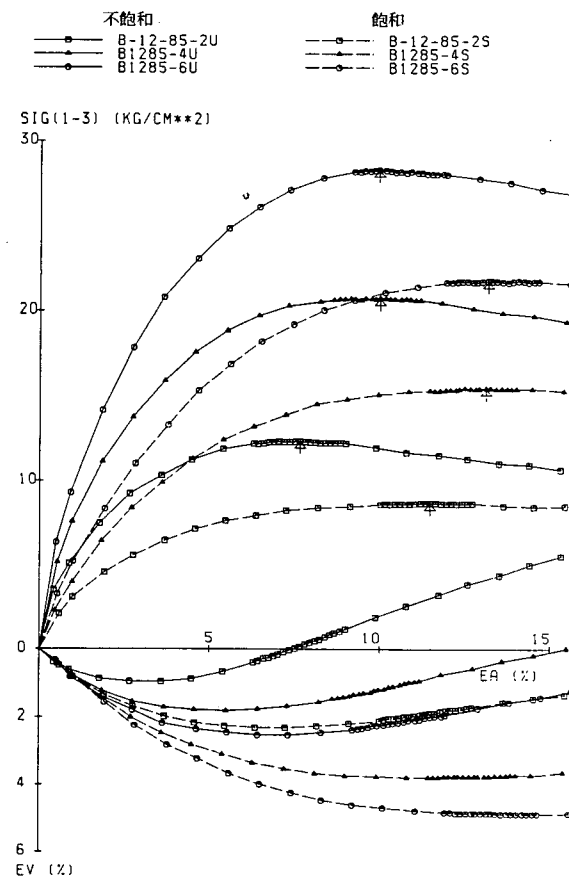
均等係数	試料状態	試験番号	側 圧 σ_3	初 期 乾燥密度 ρ_{d0}	平 均 乾燥密度 $\bar{\rho}_{d0}$	間 隙 比 の 変 化					破 壊 時						破砕率 B%	$\phi_c = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	$\phi \cdot c$
						e_0	$\bar{e}_0$	e_c	$\bar{e}_c$	e_f	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$	ϵ_f	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3			
12	泥質 Gb=2.919 Q=0.94	H-8	kgf/cm ² 2.00	g/cm ³ 2.185	g/cm ³ 2.189	0.336	0.333	0.314	0.302	0.283	$\frac{kgf}{cm^2}$ 12.76 (8.76)	10.7%	2.39%	$\frac{kgf}{cm^2}$ 80	0.39	5.38	14.8	43.36°	38.3° 0.56 kgf/cm ²
		H-5	4.01	2.187		0.335		0.297		0.241	23.67 (15.65)	14.96	4.32	104	0.36	4.90	17.6	41.38	
		H-6	6.01	2.196		0.329		0.294		0.228	33.79 (21.77)	14.85	5.12	146	0.33	4.62	20.3	40.11	
	砂質 Gb=2.826 Q=1.58	H-46	2.00	2.144	2.138	0.318	0.322	0.300	0.293	0.285	14.28 (10.28)	8.44	1.09	122	0.44	6.14	13.6	46.05	37.94° 0.95 kgf/cm ²
		H-29	4.00	2.134		0.324		0.293		0.250	24.70 (16.70)	12.52	3.32	133	0.37	5.17	16.9	42.54	
		H-30	6.00	2.136		0.323		0.286		0.233	35.09 (23.09)	14.55	4.15	159	0.36	4.85	17.3	41.15	
	混合 Gb=2.872 Q=1.26	H-39	2.00	2.123	2.124	0.353	0.352	0.330	0.314	0.305	12.69 (8.69)	11.46	1.89	76	0.42	5.34	12.5	43.22	38.3° 0.55 kgf/cm ²
		H-38	4.00	2.126		0.351		0.311		0.262	23.47 (15.47)	13.12	3.73	118	0.36	4.87	16.0	41.23	
		H-37	6.00	2.122		0.353		0.301		0.238	33.76 (21.76)	13.17	4.83	165	0.32	4.63	15.4	40.13	



泥質輝緑凝灰岩 $U_c=12$ $D_r=85\%$



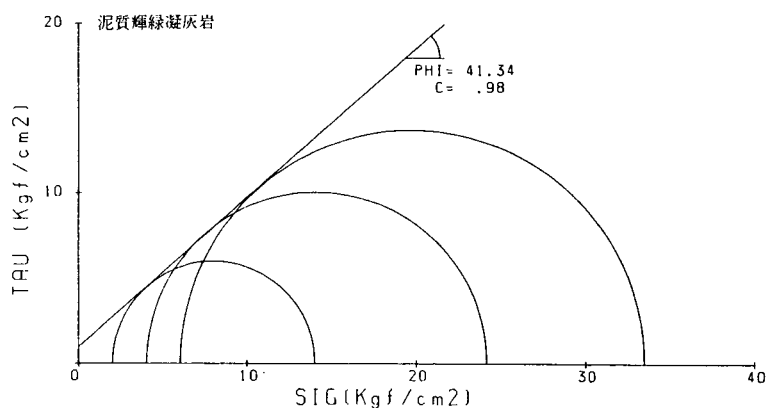
砂質輝緑凝灰岩 $U_c=12$ $D_r=85\%$



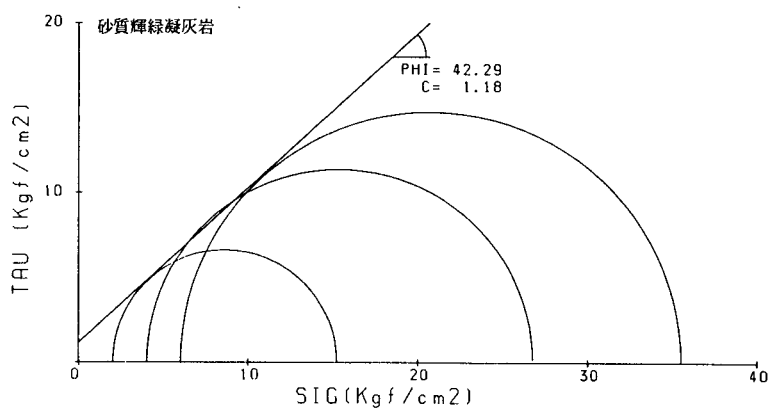
混合状態 $U_c=12$ $D_r=85\%$

図-8.18 応力-ひずみ曲線

TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
M-12-85-2U	86	2	12.03	14.03	6.55	.19
M-12-85-4U	88	4	20.19	24.19	10.12	1.5
M-1285-6U	85	6	27.49	33.49	13.32	2.33



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
S-12-85-2U	85	2	13.27	15.27	5.66	-.21
S-12-85-4U	85	4	22.77	26.77	6.31	.68
S-12-85-6U	84	6	29.52	35.52	8.67	1.56



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
B-12-85-2U	85	2	12.34	14.34	7.64	-.08
B1285-4U	87	4	20.72	24.72	9.98	1.19
B1285-6U	86	6	28.28	34.28	9.94	2.25

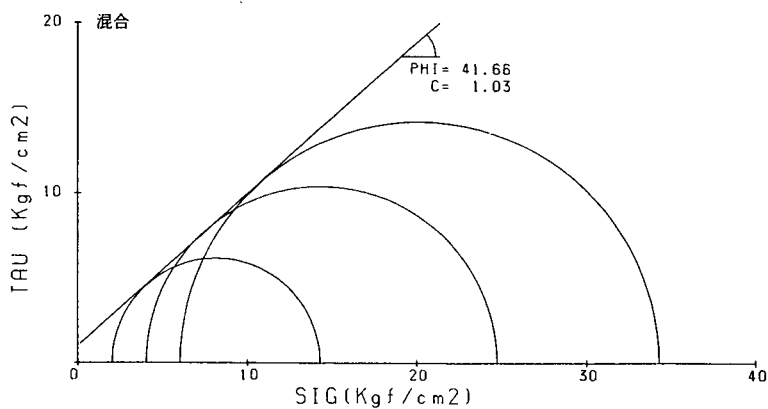
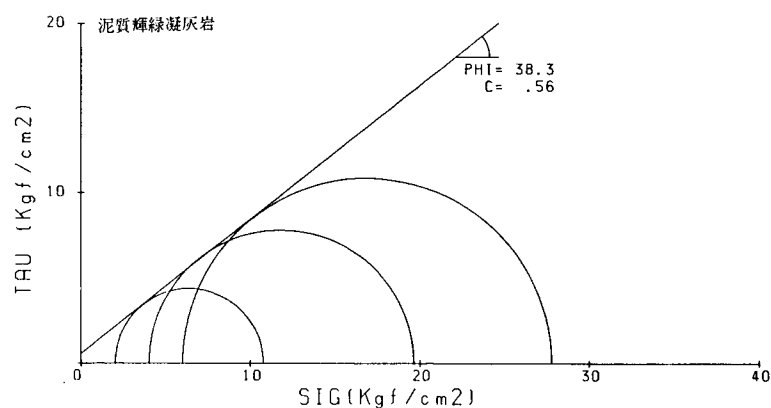
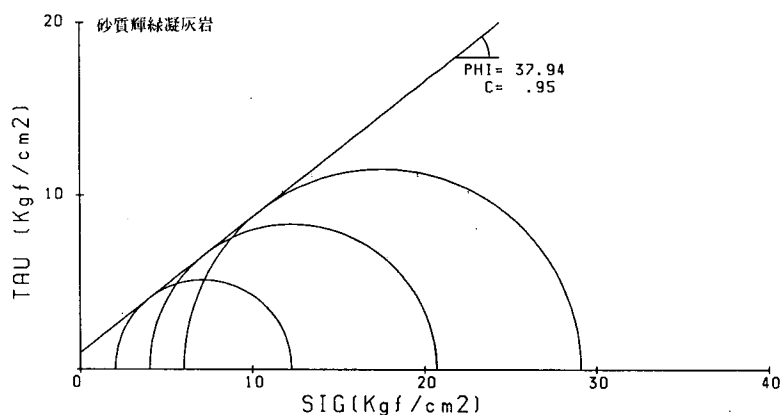


図-8.19.a モールの応力円 (不飽和)

TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
M-12-85-2S	85	2	8.76	10.76	10.7	2.39
M-12-85-4S	86	4	15.65	19.66	14.96	4.32
M-12-85-6S	88	6	21.77	27.78	14.85	5.12



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
S12-85-2SS	88	2	10.28	12.28	8.44	1.09
S-1285-4S2	85	4	16.69	20.69	12.52	3.32
S-12-85-6S	86	6	23.08	29.08	14.55	4.15



TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F.ER(%)	F.EV(%)
B-12-85-2S	85	2	8.68	10.68	11.46	1.89
B1285-4S	85	4	15.47	19.47	13.12	3.73
B1285-6S	85	6	21.75	27.75	13.17	4.83

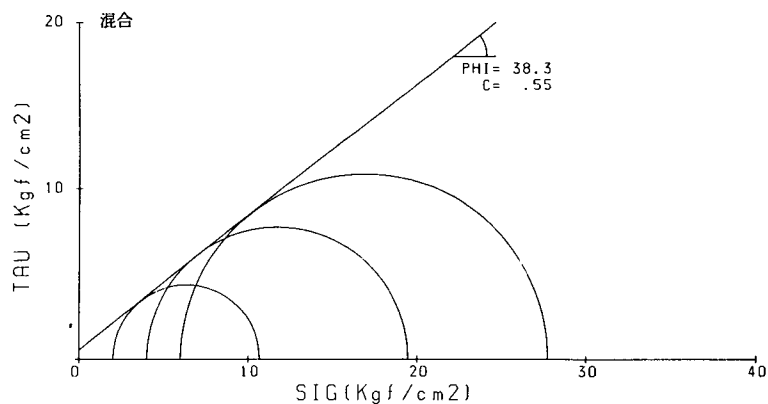
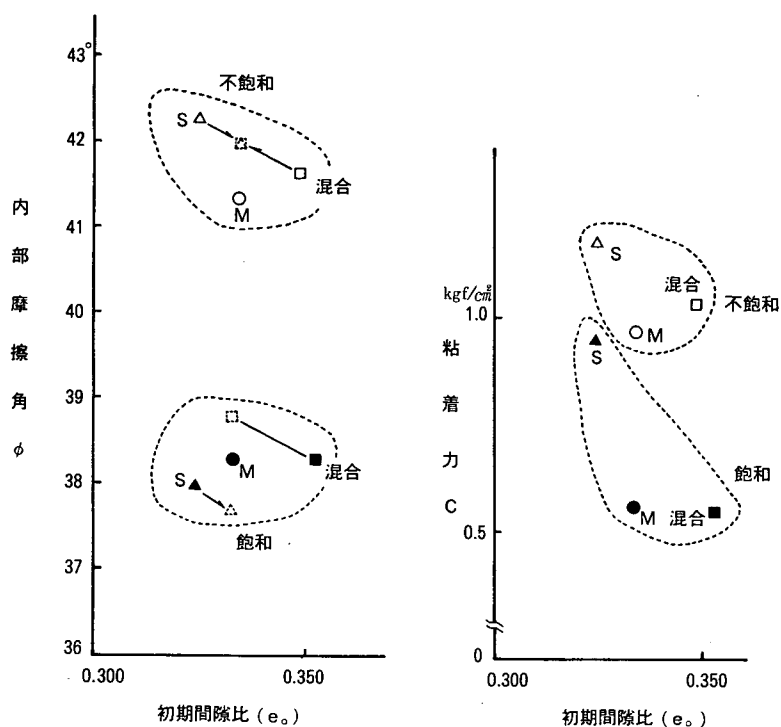


図 - 8.19.b モールの応力円 (飽和)

図－ 8.20 に初期間隙比と内部摩擦角および粘着力との関係を示す。



図－ 8.20 初期間隙比と内部摩擦角および粘着力

不飽和状態においては砂質輝緑凝灰岩、混合状態、泥質輝緑凝灰岩の順に内部摩擦角は小さくなる。飽和状態においては実験値ではほぼ同じ値となり岩質および混合の差が明確でない。間隙比が同一でないために最上の式を用いて間隙比を 0.333 にして内部摩擦角を求める(表－ 8.8)。

表－ 8.8 泥質および砂質輝緑凝灰岩および混合状態の内部摩擦角 ($U_c = 12$)

		実 験 値			補 正 値		
		e_0	ϕ (度)	評 価	e'_0	ϕ' (度)	評 価
不 飽 和	M_1	0.334	41.34°	最 小	0.333	41.37°	最 小
	S_1	0.325	42.29	最 大	0.333	42.32	最 大
	B_1	0.348	41.66	中 間	0.333	42.11	中 間
飽 和	M_2	0.333	38.30	最 大	0.333	38.30	中 間
	S_2	0.322	37.94	最 小	0.333	37.65	最 小
	B_2	0.352	38.30	最 大	0.333	38.81	最 大

M_1, M_2 : 泥質輝緑凝灰岩

S_1, S_2 : 砂質輝緑凝灰岩

B_1, B_2 : 混合

最上の式¹⁵⁾とは次のとおりである。

$$\sin \phi = \frac{3k}{2(1+e) + k}$$

ϕ : 内部摩擦角

e : 間隙比

k : 試験より得られる材料定数

泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩の内部摩擦角の差がわずか1度しかないので、試験から混合状態の内部摩擦角を正確に把握することは難しい。同一間隙比 ($e_0 = 0.333$) で補正した混合材の内部摩擦角は、不飽和状態では砂質輝緑凝灰岩と泥質輝緑凝灰岩の中間 ($\phi = 42^\circ$) に位置し、飽和状態では最大値 ($\phi = 39^\circ$) を示す。当然のことながら材料を混合することによって内部摩擦角が単独の状態より大きく下回ることはない。

一方、粘着力は砂質輝緑凝灰岩が最も大きく泥質輝緑凝灰岩および混合状態の粘着力の差異はあまりない。

図-8.21は側圧と ϕ_0 および破碎率との関係を示したものである。

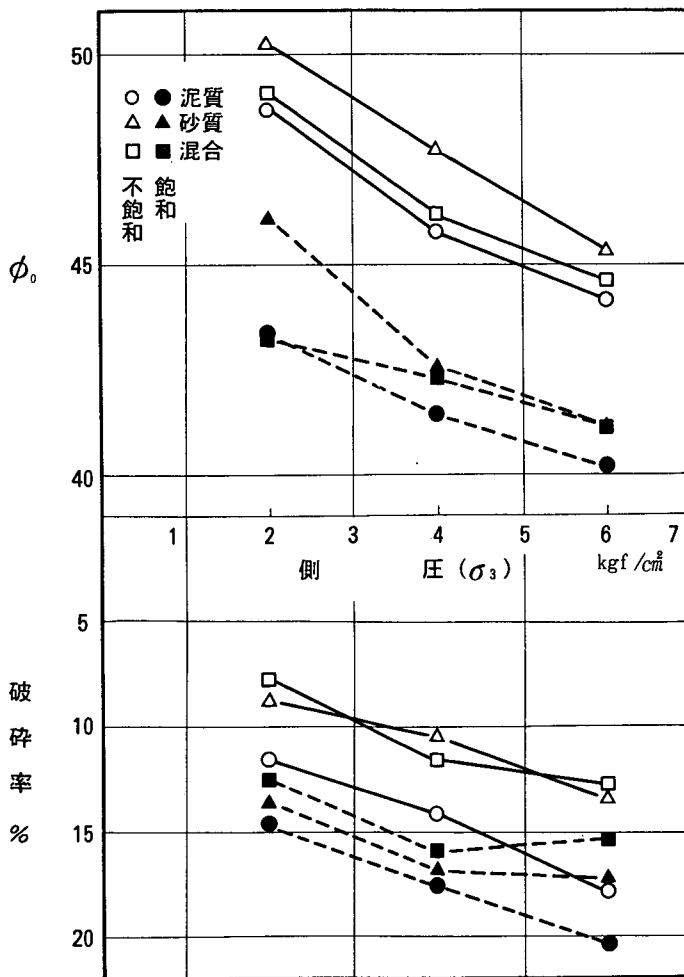


図-8.21 側圧と ϕ_0 および破碎率

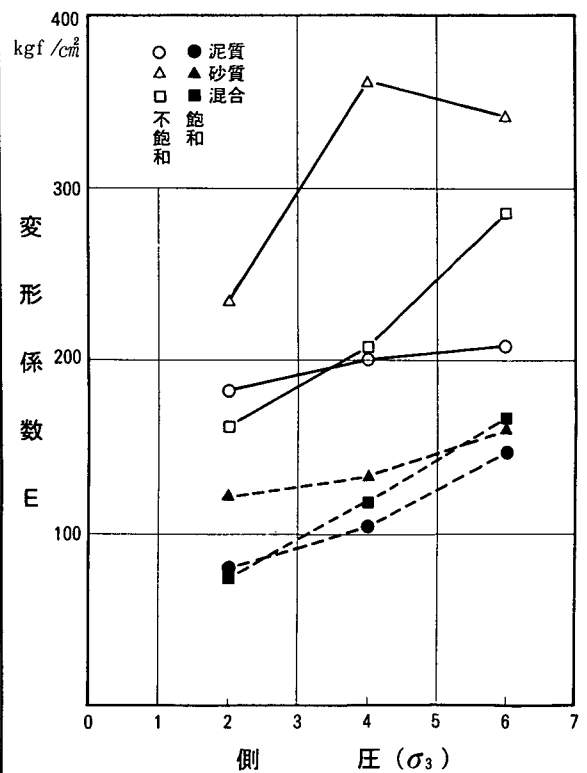


図-8.22 側圧と変形係数

側圧が大きくなれば ϕ_0 の値は減少しており飽和状態の方が ϕ_0 の値は小さくなる。岩質的には不飽和、飽和状態とも砂質輝緑凝灰岩の方が最も大きく、混合と泥質輝緑凝灰岩とはあまり変わらない。一方、破砕率は飽和状態の方が大きく、そのなかで泥質輝緑凝灰岩が破砕率は最も大きくなる。図－8.22に側圧と変形係数との関係を示す。砂質輝緑凝灰岩の変形係数は最も大きい。

以上、岩質の差についてまとめると、砂質輝緑凝灰岩の方が内部摩擦角、 ϕ_0 、変形係数とも大きく、混合状態は、泥質輝緑凝灰岩よりやや大きめか同程度の傾向を示す。

8.5 飽和状態のせん断強度

表－8.9に不飽和状態および飽和状態の内部摩擦角を示す。図－8.21は、不飽和状態の内部摩擦角と飽和状態の内部摩擦角との関係、不飽和状態の粘着力と飽和状態の粘着力との関係、不飽和状態の変形係数と飽和状態の変形係数との関係、不飽和状態の破砕率と飽和状態の破砕率との関係についてそれぞれ示したものである。

表－8.9 不飽和状態および飽和状態の内部摩擦角

	泥 質 輝 緑 凝 灰 岩			砂質輝緑凝灰岩		混合状態
	U c = 22			U c = 12		
	Dr=100%	Dr=85%	Dr=55%	Dr=85%		
不飽和状態	4 6.3 9°	4 3.8 2°	4 2.6 0°	4 1.3 4°	4 2.2 9°	4 1.6 6°
飽 和 状 態	4 3.2 2	3 9.3 4	3 8.3 0	3 8.3 0	3 7.9 4	3 8.3 0
差 *1)	3.1 7	4.4 8	4.3 0	3.0 4	4.3 5	3.3 6

* 1) 差＝不飽和状態－飽和状態

図－8.23、表－8.9からわかるように不飽和状態と飽和状態との関係は次のとおりである。

不飽和状態の内部摩擦角＞飽和状態の内部摩擦角（－3～－4°）

” 粘着力 > ” 粘着力 （－0.2～－0.6 kgf/cm²）

” 変形係数 > ” 変形係数 （－100～－200 kgf/cm²）

” 破砕率 < ” 破砕率 （＋5％）

これらの値は泥質と砂質輝緑凝灰岩の差、均等係数、相対密度にあまり依存していない。

せん断強度に及ぼす水の影響¹⁶⁾には、①粒子表面がぬれることによって粒子間摩擦が変化する現象と、②構成粒子が水を吸い軟弱化する現象に分けることができると言われている。今回の泥質および砂質輝緑凝灰岩におけるせん断強度低下の原因については、含水時において泥質輝緑凝灰岩では圧裂強度の低下が認められたこと、飽和試験において破砕率が約5％も増えていることから岩石が水によって軟弱化したことによるものと考えられる。

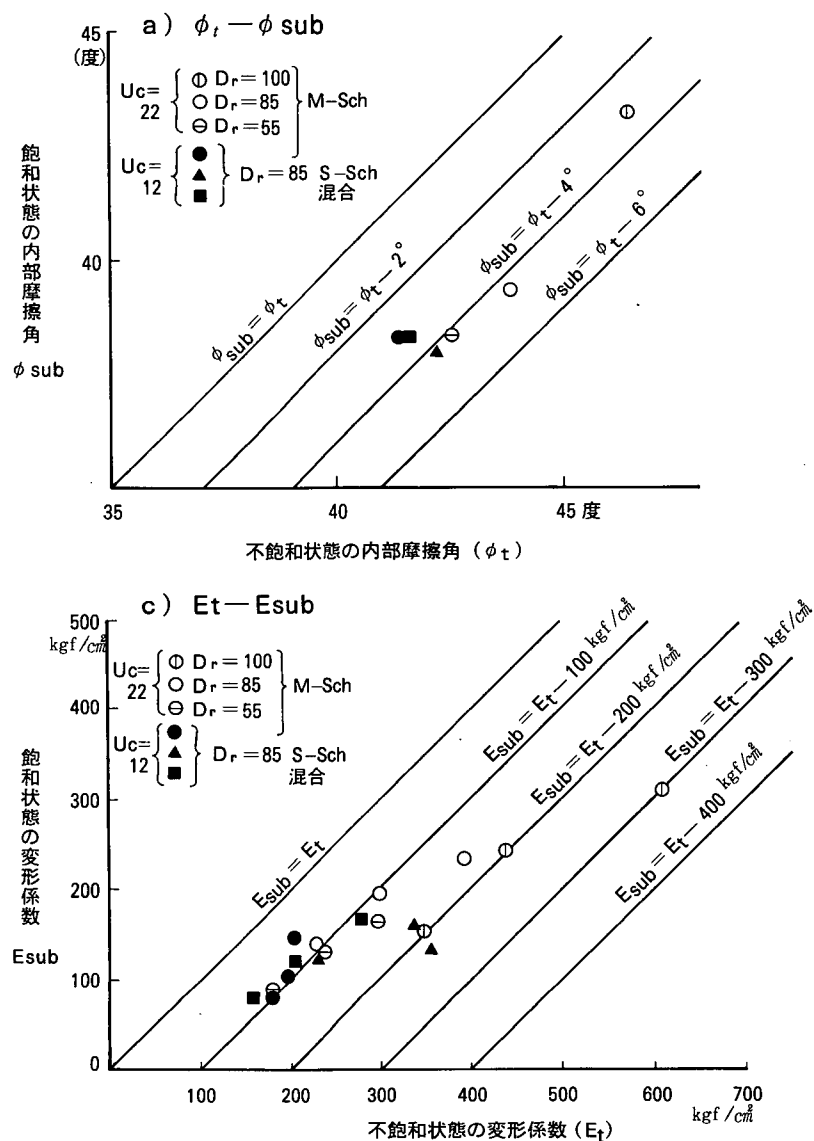


図-8.23 不飽和状態と飽和状態の内部摩擦角等の比較

9. まとめ

9.1 輝緑凝灰岩のまとめ

- 1) ロック材の対象である輝緑凝灰岩の構成鉱物は主に緑泥石（輝石と角閃石が変質したもの）と斜長石である。緑泥石が多く含まれているものが「泥質」輝緑凝灰岩であり、斜長石の多いものが「砂質」輝緑凝灰岩である。
- 2) 泥質輝緑凝灰岩の絶乾比重および吸水量はそれぞれ 2.92, 0.9 %, 砂質輝緑凝灰岩の絶乾比重は 2.83, 吸水量 1.6 %を示し、これまでに使用されてきたロック材に比べ絶乾比重が大きく吸水量の小さい材料であると言える。

岩石の粒子形状は、泥質および砂質輝緑凝灰岩とも大差がなく板状である。岩石の圧裂強度は、気乾状態において泥質および砂質輝緑凝灰岩ともその差はなく、63.5～50.8 mm 粒径で平均 60～70 kgf/cm² の値である。他岩種の圧裂強度と比較すると吸水量が小さい割には圧裂強度が小さいと言える。含水状態になると泥質輝緑凝灰岩の圧裂強度はいくぶん小さめとなるが、砂質輝緑凝灰岩では圧裂強度の低下が認められない。

- 3) 岩石の劣化は、岩石の飽和度および拘束圧の影響を受ける。すなわち、岩石の飽和度が低いほど、いいかえれば岩石の間隙に水の出入りの多いほど岩石の劣化が進行する。しかし、わずか 0.1 kgf/cm² の拘束圧でもあれば岩石の劣化は進行しない。泥質輝緑凝灰岩の場合、岩石の飽和度 0 % という状態で損失重量百分率は約 2 % にすぎず、岩石の粒子形状は拘束なしで飽和度 0 % のときに板状から塊状に変化したのが、圧裂強度の低下および岩石内の鉱物変化は、あまり認められなかった。

当初、泥質輝緑凝灰岩は、緑泥石を多く含むために岩石の劣化が懸念されたが、その傾向は少なく内部ロック材としては使用できる材料である。

- 4) 横坑粒度によれば、泥質輝緑凝灰岩は砂質輝緑凝灰岩に比べ細粒化しやすい。また、泥質輝緑凝灰岩は小規模な盛立試験において転圧後に D_{60} 、 D_{30} 粒径が発破直後の半分以下となり細粒化しやすいが、転圧後の粒度は発破直後の粒度の相似粒度となるので均等係数の変化はあまりない材料である。

一方、室内締固め試験において泥質および砂質輝緑凝灰岩の締固まり特性を比較すると泥質輝緑凝灰岩は砂質輝緑凝灰岩に比べ破碎率が多いものの最小間隙比は、均等係数 12 の場合泥質輝緑凝灰岩と砂質輝緑凝灰岩の差はなく、それぞれ 0.30, 0.29 である。この最小間隙比の値は一般的な値であると言える。

均等係数 12 の状態において 13.5 ton ローラによる転圧（突固めエネルギー 1～2 Ec）後の粒度変化を想定すると泥質輝緑凝灰岩、砂質輝緑凝灰岩も破碎率に差があるものの均等係数 15～17 程度となりその変化は少ない。

- 5) 三軸圧縮試験の飽和供試体を利用して透水試験を行った。泥質および砂質輝緑凝灰岩の均等係数 12 の場合の透水係数は $6 \sim 9 \times 10^{-3}$ cm/sec（間隙比 0.33 程度）、均等係数 22 の泥質輝緑

凝灰岩の透水係数は $3 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (間隙比 0.23 程度) である。一般的に通常の貯水位低下速度で残留間隙水圧が生じない透水係数は $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であり、輝緑凝灰岩の透水係数は間隙比の小さい場合には限界の値と言える。

- 6) 泥質および砂質輝緑凝灰岩のせん断強さの特徴的なことは飽和時において内部摩擦角が $3 \sim 4$ 度、粘着力が $0.2 \sim 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ と不飽和時に比べ低下することである。

粒度については、均等係数 12 と 22 で比較したが、同じ相対密度 (85%) であれば均等係数の大きい方が不飽和および飽和状態でも内部摩擦角が増加することが確かめられた。しかし、同一間隙比において内部摩擦角は不飽和状態で均等係数の大きい方が約 1 度、飽和状態では同じ値を示し、この均等係数の範囲内 ($U_c = 12 \sim 22$) では内部摩擦角に対する均等係数の依存性は少ないと言える。

- 7) 混合材の内部摩擦角は、同一間隙比 ($e = 0.333$) で比較すると不飽和状態では砂質輝緑凝灰岩と泥質輝緑凝灰岩の間 ($\phi = 42^\circ$) となり、飽和状態では混合材の内部摩擦角は砂質輝緑凝灰岩および泥質輝緑凝灰岩の単独の状態より大きい値を示す。

9.2 密度と強度定数のまとめ

- 1) 現場施工可能な状態が相対密度 85% であるとして、設計密度はこのときの間隙比および乾燥密度とするのがよいと考えられる (図 - 9.1)。相対密度 85% の間隙比を得るための締固めエネルギーは室内突固め試験から求めると $1 E_c$ に相当する。

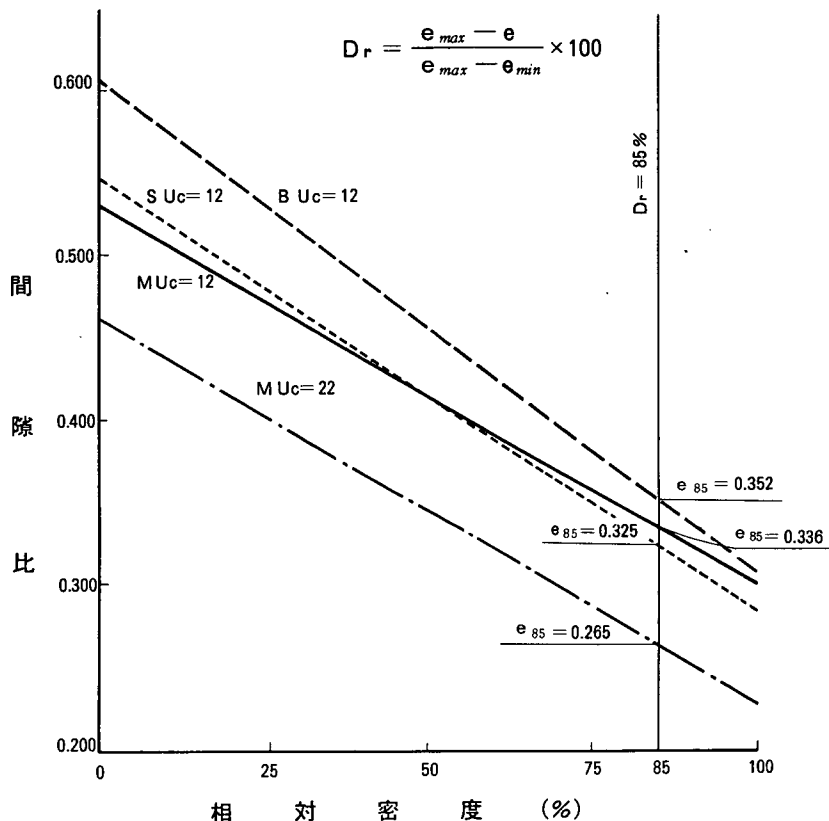


図 - 9.1 相対密度と間隙比

- 2) 設計値としての内部摩擦角を決めるには、①試料状態、②粒度、③試験精度について考慮する必要がある。①については、泥質輝緑凝灰岩は乾湿の繰り返し試験によって岩石の劣化は非常に少なかったが、三軸圧縮試験における飽和時の内部摩擦角が不飽和時の内部摩擦角に比べ3～4度小さかったことから飽和時の内部摩擦角を考慮する必要がある。②については、横坑粒度は均等係数が6～8程度であったが小規模盛立試験の転圧時の均等係数は19程度となった。一方、 $U_c=12$ と $U_c=22$ の比較試験では $U_c=12$ の方が内部摩擦角は小さいことから、安全側をみて $U_c=12$ の内部摩擦角を用いる方がよい。③については3つのモールの応力円等から判断する限りでは試験誤差は少ないようである。
- 3) 以上のことを踏えて設計値として密度は 2.126 g/cm^3 、間隙比は0.350、内部摩擦角は37.0度とした方がよい。試験値と設計値との関係を表-9.1、図-9.2に示す。ちなみに、図-9.3にこれまでの事例¹⁷⁾で求められている全岩種および輝緑凝灰岩の試験内部摩擦角と設計内部摩擦角との関係、およびダム高と設計内部摩擦角との関係を示す。

表-9.1 試験値および設計値

岩 種	均等係数 U_c	絶乾比重 G_b	乾 燥 密 度 $\rho_{d85} (\text{g/cm}^3)$	間隙比 e_{85}	締 固 め エ ネ ル ギ E_c	内部摩擦角	
						状 態	$\phi_{85}(\text{度})$
泥質輝緑凝灰岩	12	2.919	2.185	0.336	1.0	不飽和	41.28
						飽 和	38.52
	22	2.932	2.318	0.265	1.0	不飽和	43.82
						飽 和	39.34
砂質輝緑凝灰岩	12	2.826	2.133	0.325	1.0	不飽和	42.29
						飽 和	37.57
混 合	12	2.872	2.124	0.352	1.0	不飽和	41.54
						飽 和	38.30
設 計 値	—	2.870	2.126	0.350	—	37.0	

注1) ρ_{d85} , e_{85} , ϕ_{85} : 相対密度85%のときの乾燥密度, 間隙比, 内部摩擦角

注2) ϕ_{85} : $U_c=12$ の場合の内部摩擦角は最上の式を用いて計算したもの。

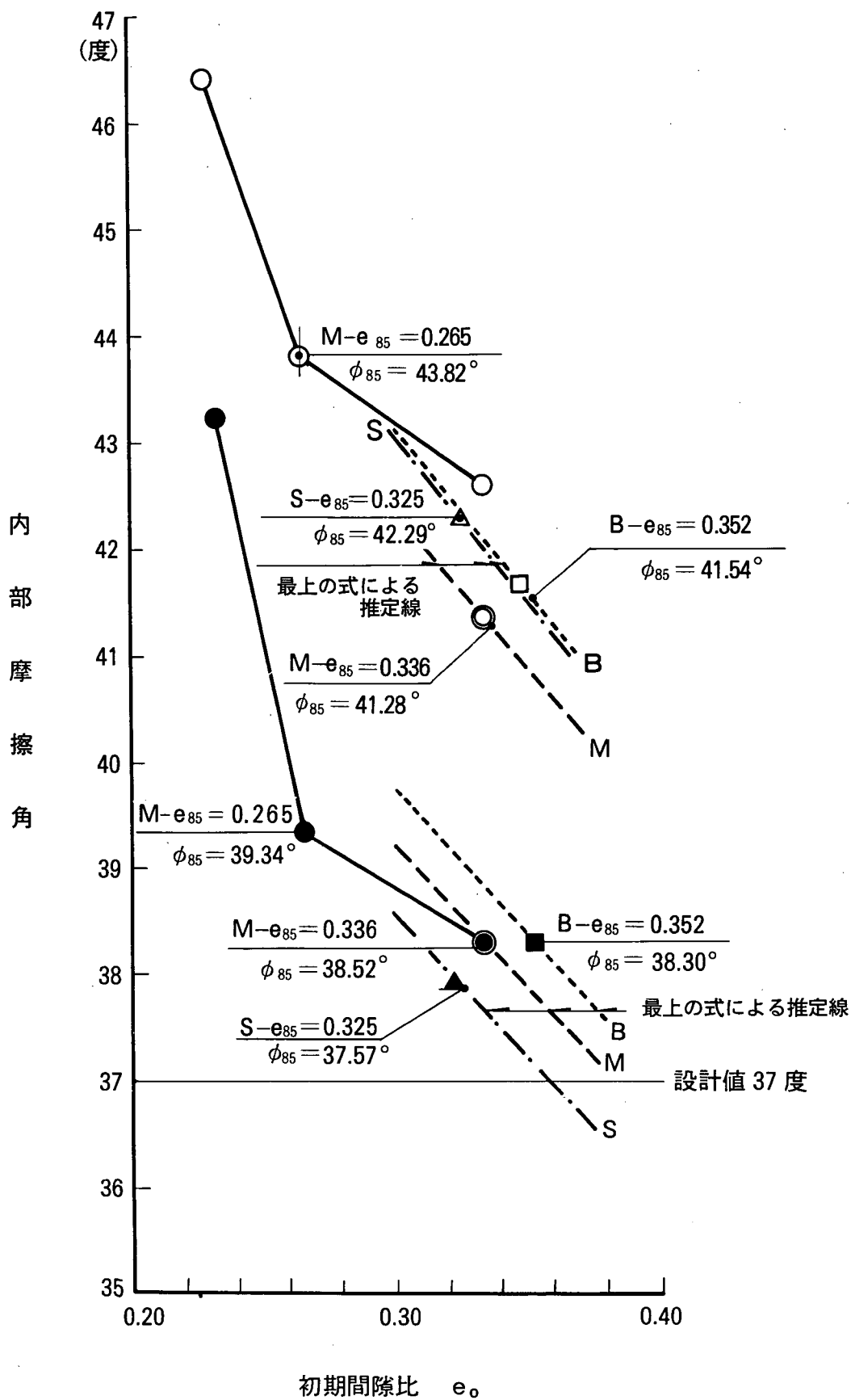


図-9.2 試験値および設計値

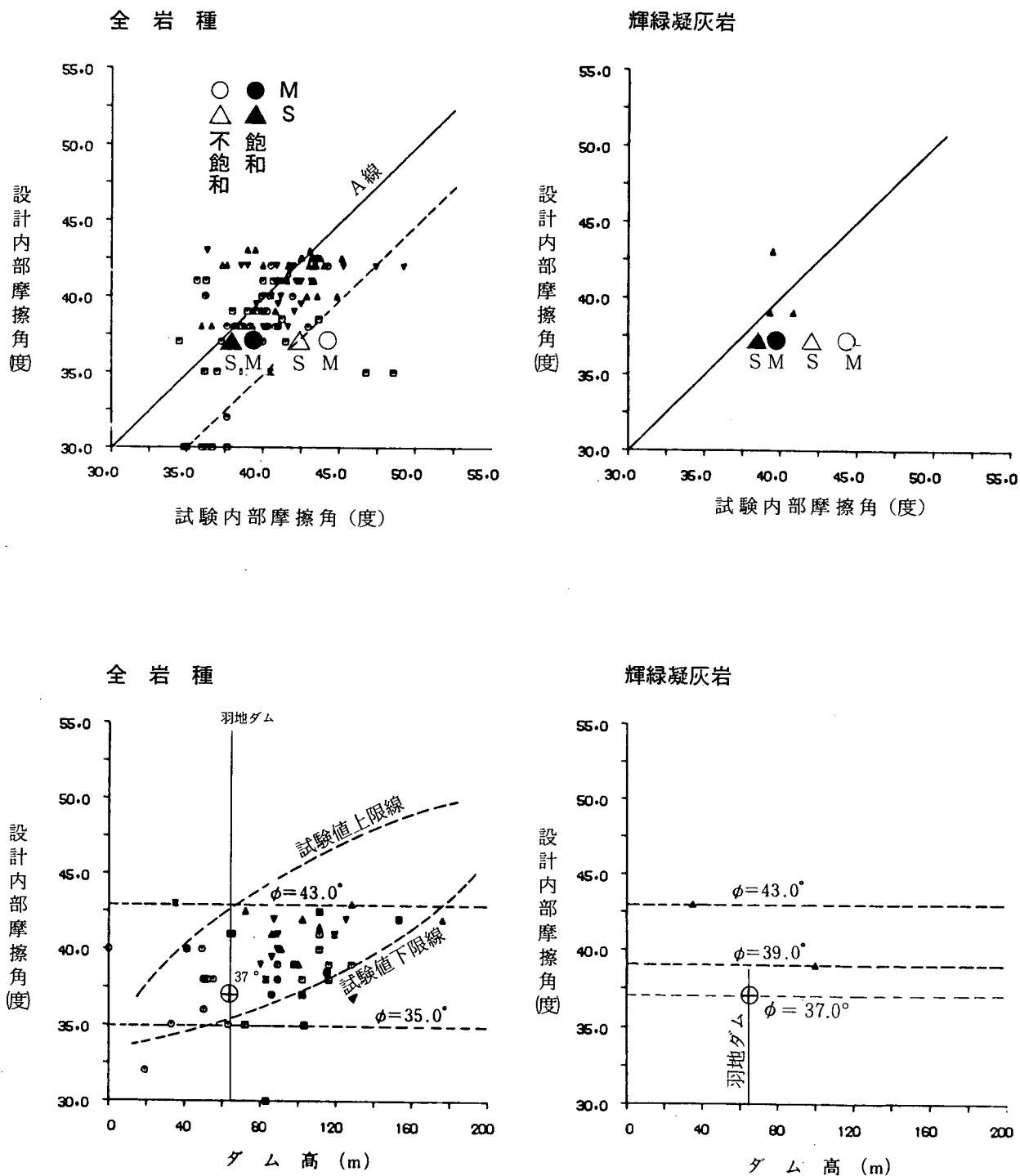


図 - 9.3 設計内部摩擦角の事例

参 考 文 献

- 1) 沖縄総合事務局北部ダム事務所：羽地ダムロック材料試験業務報告書 S 57. 3
- 2) 沖縄総合事務局北部ダム事務所：S 60年度羽地ダムロック材料曝露試験業務報告書 S 61. 3
- 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，P 33土木研究所資料第 1839号，S 57. 7
- 4) 播田一雄，豊田光雄：ロック材料の粒子形状の測定，土木研究所資料第 1659号，1981. 3
- 5) 土木学会監修：土質力学，粒状体の力学，粒状体の構造 P 893～903
- 6) 平松良雄，岡行俊，木山英郎：非整形試験片による岩石の引張強さの迅速試験，日本鉱業会誌 Vol. 81.No 932 P 1024～1030，1965
- 7) 東京天文台：理科年表，1983
- 8) 桑原啓三，平野勇，神保悟：軟岩の吸水劣化試験（その 2），土木研究所資料，第 2067号，1984.
- 9) 土木学会岩盤力学委員会第 4 分科会：S 55. 1. 17「X線回析による鉱物の同定法」
- 10) R. J. Marsal : Mechaniccal Propertics of Rockfill Enbankment—Dam Engineering, Casagrande Volme, P 130～132, 1972.
- 11) 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室：ロックフィル材料の大型三軸圧縮試験，1982.
- 12) 松本徳久，豊田光雄：ロック材料の相対密度試験，土木研究所資料第 1757号
- 13) 松本徳久，粗粒材料の設計定数の決定方法とその適用，土と基礎 1985. 6
- 14) 建設省河川局監修，建設省河川砂防技術基準（案）設計編〔1〕P 202
- 15) 土木学会監修：土質力学，粒状体の力学，統計的理論 P 998～1036
- 16) 土質工学会：ロック材料の試験と設計強度 P 91～92
- 17) " P 247～250

羽地ダムロック材（輝緑
凝灰岩）の材料試験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2405号
昭和61年10月（1986）
フィルダム研究室 松本徳久
" 豊田光雄
関東地建宮ヶ瀬ダム 小川 優
工事事務所

キーワード：

フィルダム、ロック材料、輝緑凝灰岩、三軸圧縮試験、乾湿繰り返し試験、羽地ダム

要旨 羽地ダムは、羽地大川水系羽地大川に多目的ダムとして計画中の堤高が66.5mのロックフィルダムである。内部ロック材として輝緑凝灰岩が用いられることが計画されているが、輝緑凝灰岩は緑泥石を含むため岩石の劣化が懸念された。本試験は、輝緑凝灰岩の劣化および試験状態の違いによるせん断強度の把握を目的として、物理試験、乾湿の繰り返し試験および三軸圧縮試験を行った。この結果、輝緑凝灰岩の比重は2.83～2.92、吸水量1.0～1.6%で、乾湿の繰り返しを行っても岩石の劣化はきわめて小さいこと、飽和状態の内部摩擦角は不飽和状態に比べ3～4度低下することがわかった。

郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
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. 021

No. 021

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2405号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印