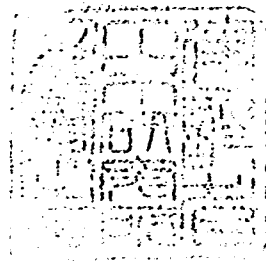


土木研究所資料

軟岩の吸水劣化試験 (その2)



昭和59年3月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

Copyright ©1984 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ってはならない。

ま え が き

洪水の防除や水資源の開発を目的とした多目的ダムは、今日までに数多く建設されてきた。また、水需要の拡大等により、将来的にもその必要性は高まっている。しかし、しだいに地質条件の良好なダムサイトが少なくなり、新期の火山砕屑岩・堆積岩、あるいは破碎、風化、変質等を覆う劣った条件の基礎にもダムを建設しなければならなくなってきた。

第三紀以降の泥岩等、いわゆる軟岩は一般に固結度が低く、その上ある種の軟岩は乾燥・湿潤の繰り返しにより急激に膨張や崩壊を生じ、著しく劣化する性質（スレーキング現象）をもつものがある。このような地質のところにダムの建設を行う場合には、掘削面の劣化や崩壊、貯水池湖岸等の浸食を防ぐために、これらの地質の性質を良く把握した上で対策工の計画・設計・施工、維持管理を行う必要がある。

本資料は、軟岩のスレーキング現象を定量的に把握するために、前報告（土研資料第1930号）に引き続き千葉県鋸南町産の泥岩、下湯・浅瀬石川・久吉・七ヶ宿の各ダムサイトから採取した凝灰岩等について吸水劣化試験を実施し、それらを比較検討した結果をとりまとめたものである。

昭和59年3月

建設省土木研究所地質化学部

地質研究室 室長	桑原啓三
研究員	平野勇
	神保悟

も く じ

まえがき

1. 試験の概要	1
2. 予備試験	2
2.1 供試体寸法	2
2.2 供試体の乾燥温度	3
2.3 水浸温度	3
2.4 測定時間	4
3. 試験方法	6
3.1 試料	6
3.2 膨張量試験	7
3.3 スレーキング試験	8
3.4 浸透能試験	8
3.5 膨張圧試験	9
3.6 物理・力学試験および粒度試験	10
3.7 粉末X線回折試験	10
4. 試験結果	11
4.1 物理・力学試験および粒度試験	11
4.2 粉末X線回折試験	14
4.3 膨張量試験	14
4.4 スレーキング試験	27
4.5 浸透能試験	28
4.6 膨張圧試験	28
5. 考察	46
6. まとめ	47
謝 辞	48

1. 試 験 の 概 要

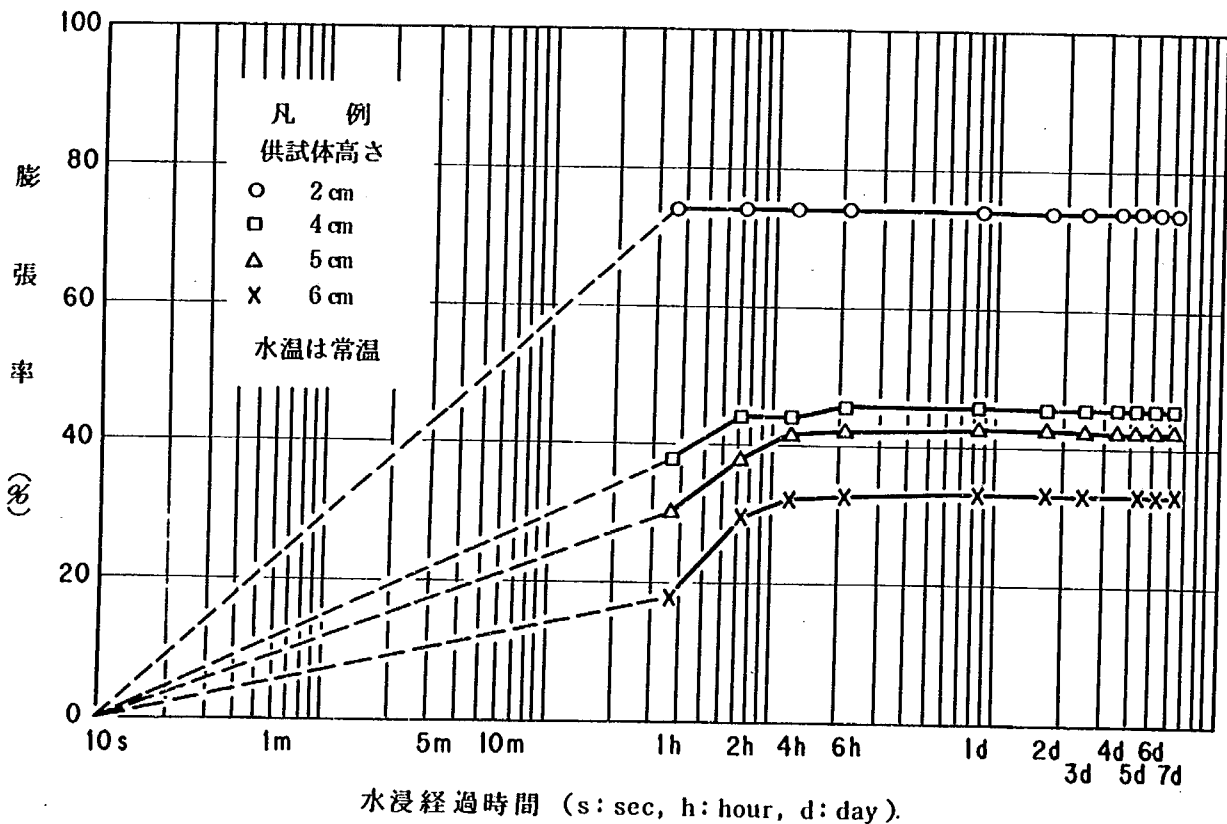
試験は、所定の寸法に整形した軟岩供試体を空気乾燥した後に吸水させ、スレーキングに伴う供試体の吸水量・膨張量・膨張圧・粒径等を測定するとともに、視覚的観察によりクラック数や形状変化を調べたものである。そして、空気乾燥後（吸水前）の供試体の飽和度（初期飽和度）と各測定項目の関係を調べ、スレーキング現象を定量的に評価するための各指標の比較検討を行った。また、岩石の物理・力学試験・粒度試験・粒末X線回折試験を行い、スレーキングとの関係を調べた。

2. 予 備 試 験

膨張量試験・スレーキング試験を行うにあたり、予備試験を行って、それらの試験における供試体寸法、初期飽和度 S_{ri} 調整時の乾燥温度、吸水させる時の水浸温度、水浸後の測定時間について調べた。

2.1 供試体寸法

図一は泥岩を用いて供試体高さを変えて膨張量試験を実施したうちの(B) 柿崎の例である。縦軸は膨張率、横軸は水浸経過時間を常用対数で表わした。同図によれば、7日間経過後の膨張率は供試体高さ2 cm が74%と最も大きく、供試体高さが高くなるにつれ膨張率は小さくなっている。また、供試体高さが2 cm のものは水浸1 hour 以降の膨張率が変化しないのに対して、4 cm ~ 6 cm のものは膨張率が変化しないのは6 hour 以降であることがわかる。



図一 供試体高さと膨張率<(B) 柿崎による>

これから次のようなことが言える。①供試体高さが大きくなると膨張率は小さくなる。この原因は、試験方法として水浸による供試体の崩壊を防ぐために周囲をモールド側壁により拘束していることによるものと考えられる。②供試体高さが大きくなると膨張が停止するまでの時間が長くなる。これは、乾燥によって空気に置きかえられた岩石内の空隙に水が浸透するまでの時間が供試体の高さによって変わるためと考えられる。したがって逆に、前処理段階における供試体の乾燥も高さの高い供試体の方が乾燥時間は

長く必要となり、また供試体内部の乾燥状態も不均一になりやすいと思われる。

一方、供試体高さを2 cm とした場合は、試験時間の短縮ができる（供試体乾燥時間および膨張量測定時間）、現場での試料採取においても試料数が少なくて済むという利点がある。また、軟岩は一般に均質であるので供試体寸法の小ささが試験の結果に影響することは少ないと思われる。

以上の理由によって膨張量試験における供試体寸法は高さを2 cm とする。そして、スレーキング試験においても上述のような利点が考えられるので、供試体寸法は同様とする。

2.2 供試体の乾燥温度

軟岩特にスレーキングを起すようなものは、粘土鉱物を含む場合が多く、この粘土鉱物がその原因とも考えられているので、乾燥温度は粘土鉱物に変化を与えない程度にしなければならない。図-2は、供試体の乾燥温度を常温（気乾）～120℃（炉乾）と変化させた場合の膨張率の変化を示したもので、縦軸は膨張率、横軸は初期飽和度 S_{ri} である。ここで、初期飽和度とは水浸前（膨張前）の飽和度である。図-2における常温での乾燥は初期飽和度 S_{ri} が低下（絶対乾燥に近づく）につれて膨張率が大きくなる傾向がある。60℃で乾燥させた場合も同様の傾向はあるが、常温と比較すると膨張率は小さい。特に80℃以上での乾燥では初期飽和度 S_{ri} 0%（絶乾）でも常温のそれに比較すると著しく小さくなっていることがわかる。これは60℃以上での乾燥ではこの供試体岩石を構成する鉱物が何らかの変化を生ずるものと考えられ、供試体の乾燥は40℃以下であることが望ましい。そこで、常温乾燥が最も適切簡便であるので、膨張量試験・スレーキング試験における供試体の乾燥温度は常温とすることとした。

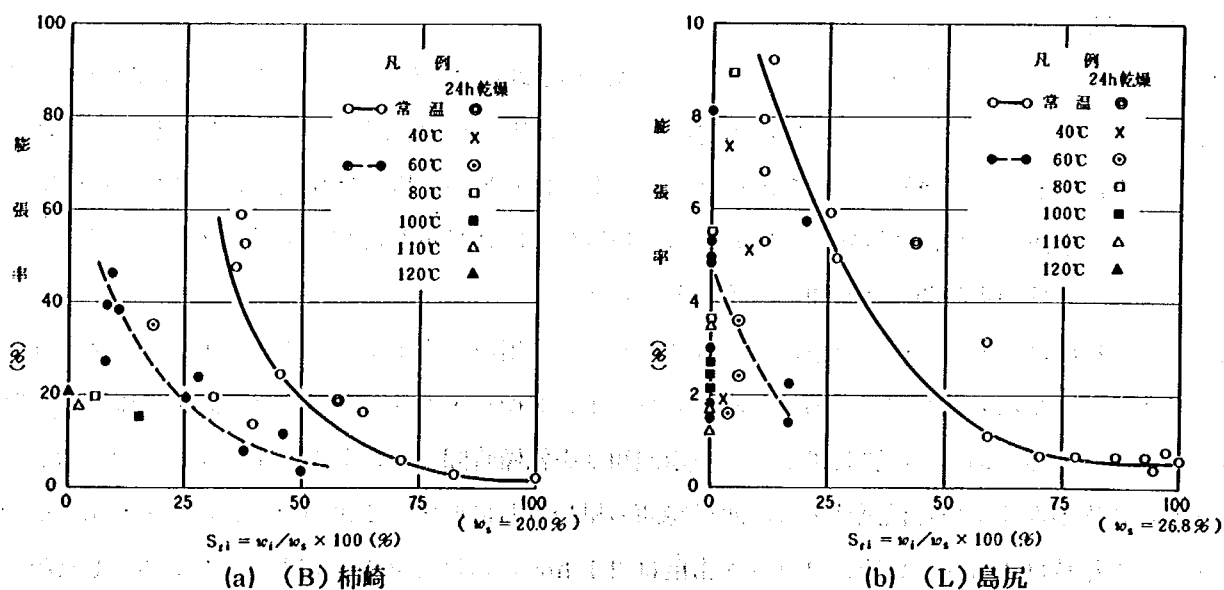


図-2 供試体乾燥温度と膨張率

2.3 水浸温度

膨張量試験における水浸温度の変化はダイヤルゲージの軸の膨縮により、誤差を生ずる恐れがある。ま

た、水温の変化やそれに伴う粘度の差が、鉱物や水の浸透経路に影響することも考えられる。そこで、恒温水槽を用いて水温を一定に保ち、その中にモールドを置いて膨張量試験を実施した。その1例(L)島尻による結果を図-3に示す。縦軸は膨張率、横軸は5℃毎に変化させた水温である。同図より各水温における膨張率にはばらつきが大きく、水温の変化による有意の差はないことがわかる。したがって膨張量試験における水浸温度は恒温水槽が無くても実施できる方法として常温とする。スレーキング試験における水浸温度についても同様とする。

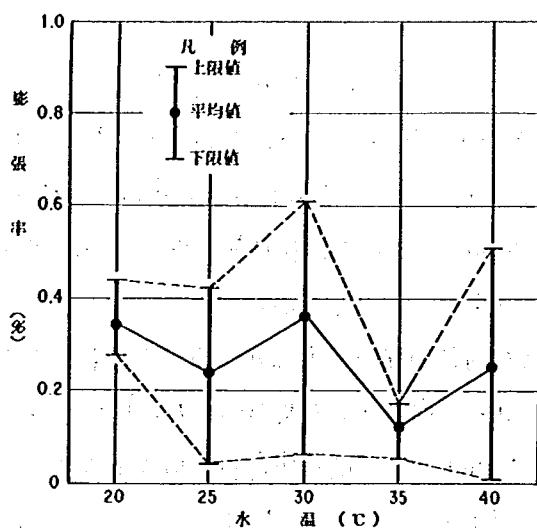
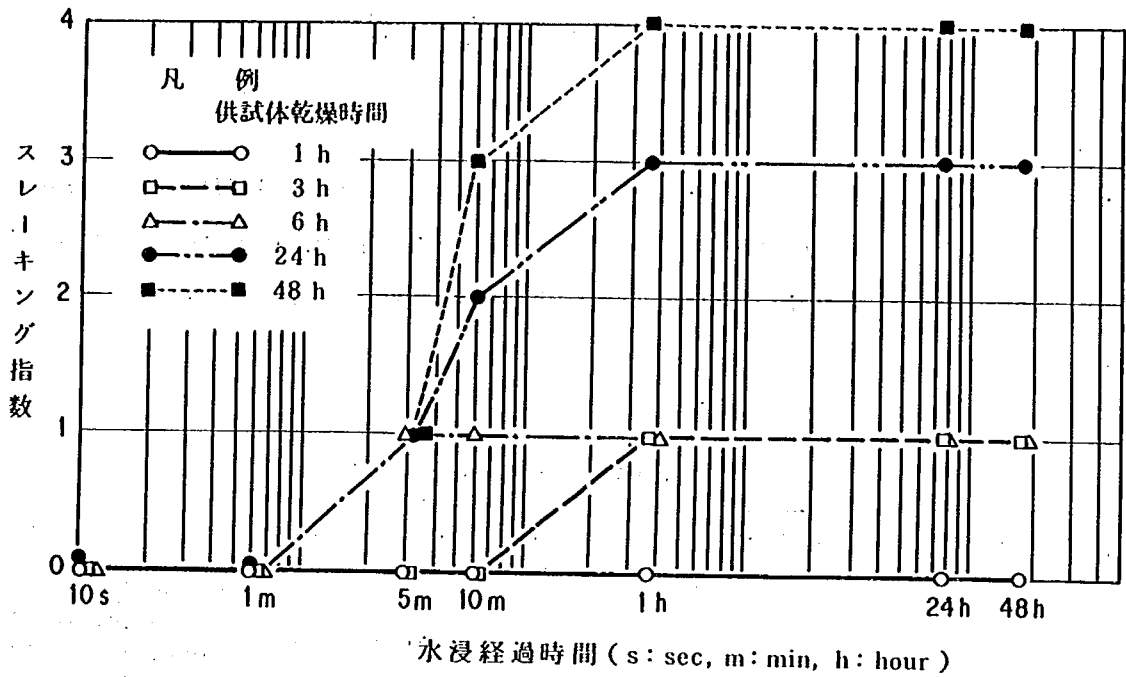


図-3 水浸温度と膨張率<(L)島尻による>

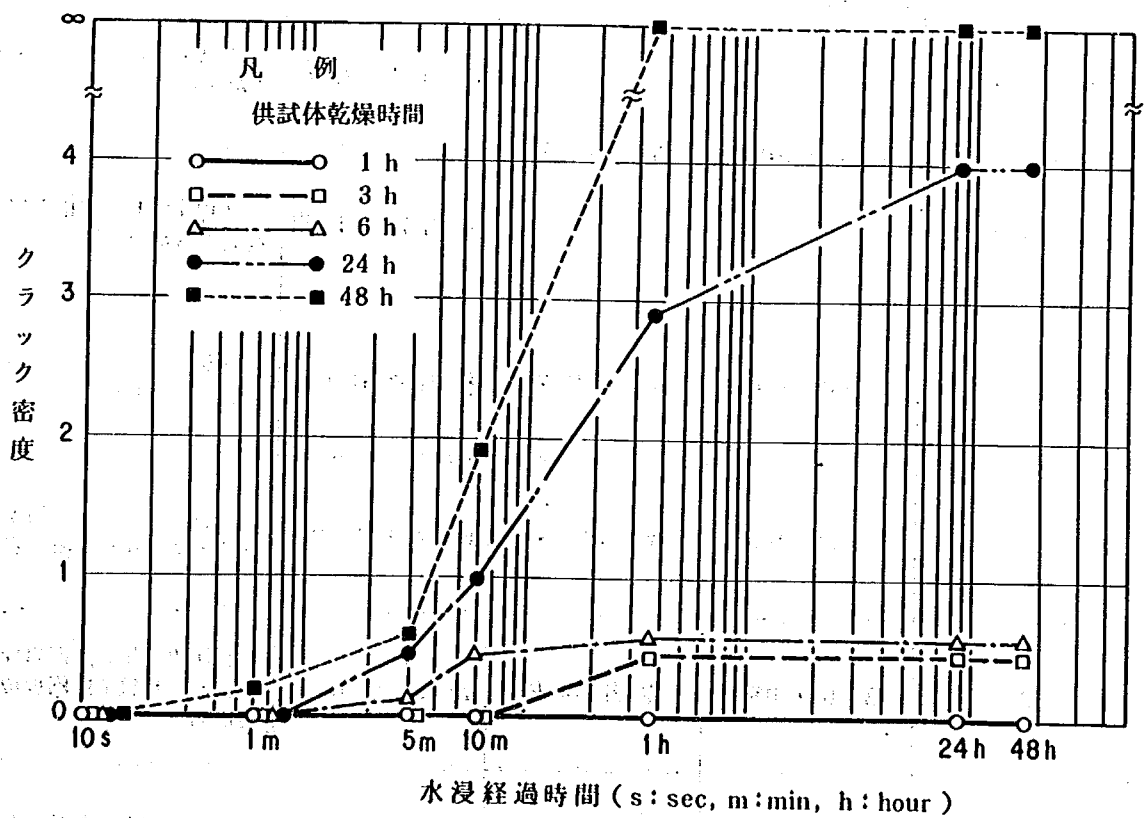
2.4 測定時間

膨張量試験における供試体の膨張、スレーキング試験の崩壊による形状の変化は、水浸時間の経過に従って変化する。したがって各試験における測定は各指標が最大となって落ちつくまで継続しなければならない。図-1に膨張率と水浸経過時間を示した。図-1では6 hour以降は膨張量の変化はみられないが、ダイヤルゲージを使って精密に測定すれば6 hour以降にも図には示し得ない微量な変化がある。したがって、膨張量試験は測定時間を7日間とすることとした。

図-4(a),(b)にはスレーキング試験におけるスレーキング指数(土木学会による)・クラック密度と水浸経過時間について示したものである。なお、スレーキング指数・クラック密度は時間毎に撮影した写真より読みとったものである。両図は供試体の初期飽和度を乾燥時間で5段階に変化させたものを示した。両図ともに乾燥の進んでいる供試体の方が水浸時間の早いうちに形状の変化が現われることを示しており、スレーキング指数は1 hour以降、クラック密度は24 hour以降で最大一定となっている。したがって、形状を視覚的にとらえるため膨張量試験より比較的測定誤差の多いスレーキング試験では、長時間測定しなくても良いと思われるので、スレーキング試験における測定時間は24 hourとする。



図一 4(a) 水浸経過時間とスレーキング<(L) 島尻による>



図一 4(b) 水浸経過時間とスレーキング<(L) 島尻による>

3. 試 験 方 法

3.1 試 料

試験に用いた試料の採取地と地層名・地質年代を表-1に示す。これらの試料は第三紀中新世～第四紀洪積世に属するもので(M)～(R)が青森県、(S)宮城県、(T)千葉県産で、凝灰岩・変質安山岩および砂岩である。採取試料は、自然状態での含水比が変化しないように、採取後直ちにパラフィンコーティングを行い、運搬・保存し、整形した。

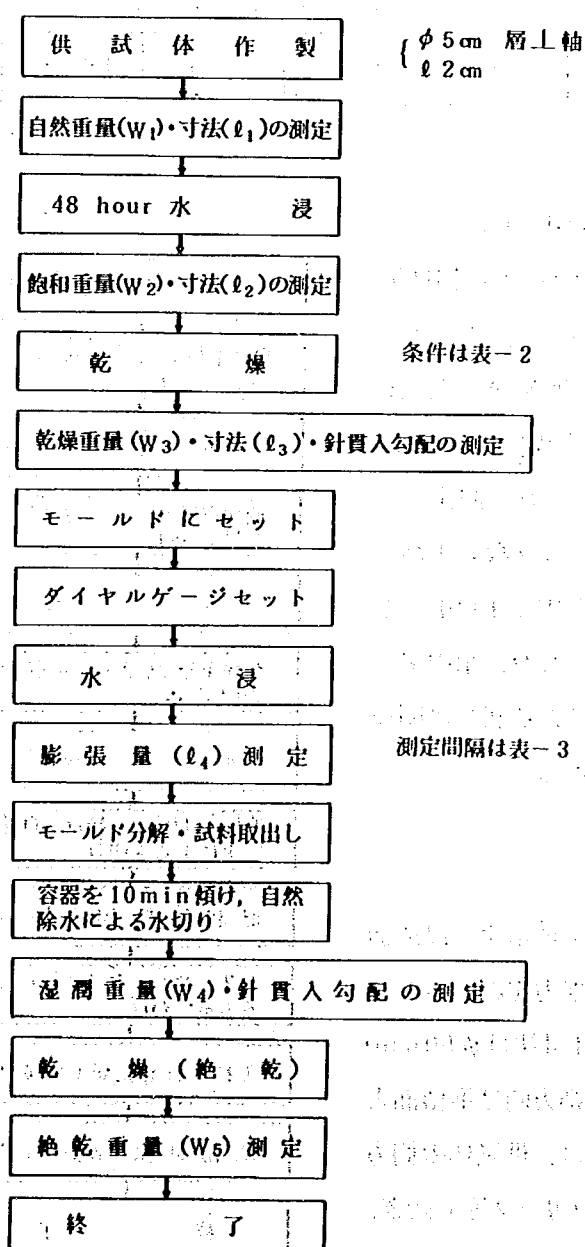
表-1 試料の採取地・地層名・地質年代

記号	採取地・供試体名	地 質 年 代	地 層 名	岩 種	岩 相
M	下 湯 (黒)	第三紀・中新世		変 質 安 山 岩	黒色の火山ガラスを多く含み、一部火山礫凝灰岩状を呈し、礫をほとんど含まない。変質をうけ沸石をかい在する。
N	下 湯 (灰)			砂 質 凝 灰 岩	灰色を呈した砂ないし一部シルト質の凝灰岩で、親指～拳大の円礫をわずかに含む。
O	浅瀬石川・Ⅰ	第三紀・中新世	青 荷 層	砂 質 凝 灰 岩	灰色を呈した砂～シルト質の凝灰岩。
P	浅瀬石川・Ⅱ			軽 石 質 凝 灰 岩	灰色を呈し、親指大以下の軽石を含む凝灰岩。
Q	浅瀬石川・法面	第四紀・洪積世	長 谷 沢 層	軽 石 質 凝 灰 岩	灰色を呈し、親指大以下の軽石を含む凝灰岩。
R	久 吉	第三紀・中新世	遠 部 層	細粒凝灰岩(変質)	淡緑色を呈し、変質をうけ、細粒・粘土化した凝灰岩。
S	七 ヶ 宿	第三紀・中新世	赤 井 畑 層	礫 質 凝 灰 岩	緑灰色を呈し、泥岩礫を多く含む。粗粒で無層理塊状の凝灰岩。
T	鋸 南	第三紀・中新世	安 房 層 群	泥 質 砂 岩	灰色を呈し、粒度不均一な泥質砂岩。

3.2 膨張量試験

膨張量試験の流れを図一5に示す。供試体寸法は $\phi 50\text{ mm} \cdot \ell 20\text{ mm}$ の円柱形とし、軸方向は岩石の堆積面と直交するよう切り出し方向を選んだ。供試体の初期飽和度 S_{ri} は、乾燥の時間によって調整した。側方への膨張を許さないよう内径 50 mm のモールドに入れ（側方拘束条件）一週間まで吸水膨張量を測定した。

膨張量試験では、乾燥過程中に乾燥時間の長い供試体について、軸方向高さを経時的に測定し、収縮量を調べた。また供試体の水浸前後の強度を比較するために、直径 $1\text{ mm} \cdot$ 長さ 10 mm の針を貫入させて測定する針貫入勾配を測定した。



図一5 膨張量試験の流れ

表-2 乾燥時間

乾燥温度	常 温 (気 乾)													
乾燥時間	0 h	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	12 h	16 h	18 h	1 d	2 d	6 d	12 d	24 d

※ h:hour, d:day

表-3 測定時間

測 定 時	0	1 h	2 h	4 h	6 h	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d
-------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

※ h:hour, d:day

表-4 写真撮影時

写 真 撮 影 時	0	1 m	5 m	10 m	1 h	24 h
-----------	---	-----	-----	------	-----	------

※ m:min, h:hour

3.3 スレーキング試験

スレーキング試験の流れを図-6に示す。

供試体寸法は $\phi 50\text{ mm} \cdot \ell 20\text{ mm}$ の円柱形とし、軸方向は岩石の堆積面と平行するよう作製した。供試体を所定の時間乾燥させた後、結晶皿に入れて吸水させた。測定は、水浸24 hour後に吸水量と崩壊試料の粒径を測定し、また、その時の写真からクラック数およびスレーキング指数（土木学会〔案〕1980）等の視覚的形狀変化を調べた。なお、水中でふるい分けを行うのは乾燥させた状態では団粒化するおそれがあるからである。

3.4 浸透能試験

浸透能試験の流れを図-7に示す。浸透能試験は、岩石の水分の浸透能力を調べるために行ったものである。供試体寸法は $\phi 50\text{ mm} \cdot \ell 100\text{ mm}$ の円柱形とし、軸方向は堆積面と直交するようにした。試験は、供試体の側方からの水分の出入りをゴムスリーブ等で防ぎ、常に下端面は吸水、上端面からは蒸発させる方法で行い、重量変化から蒸発量を測定した。

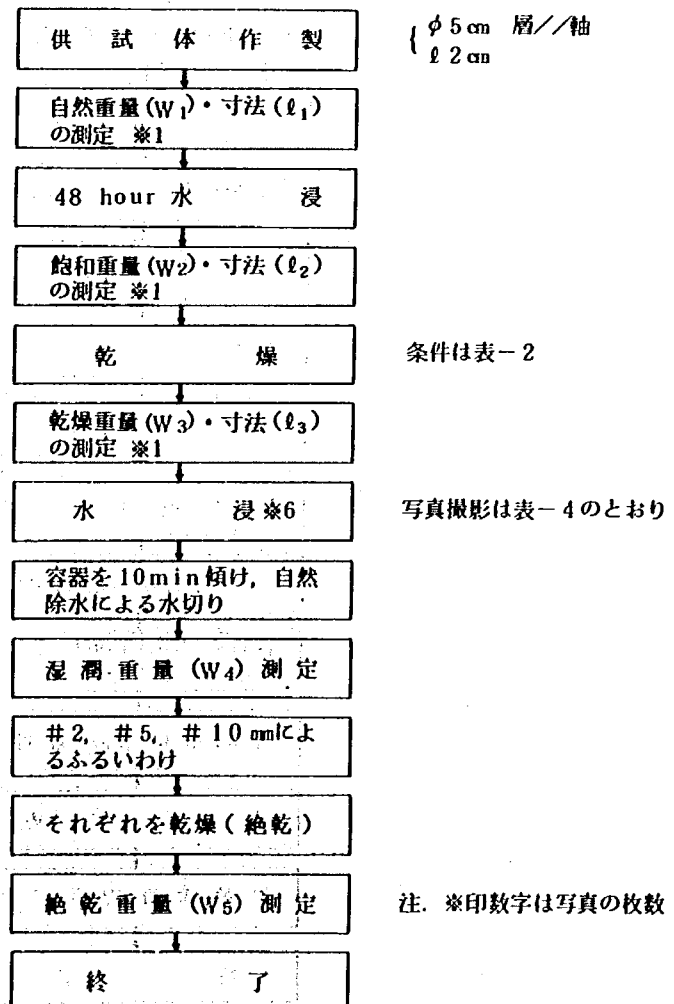
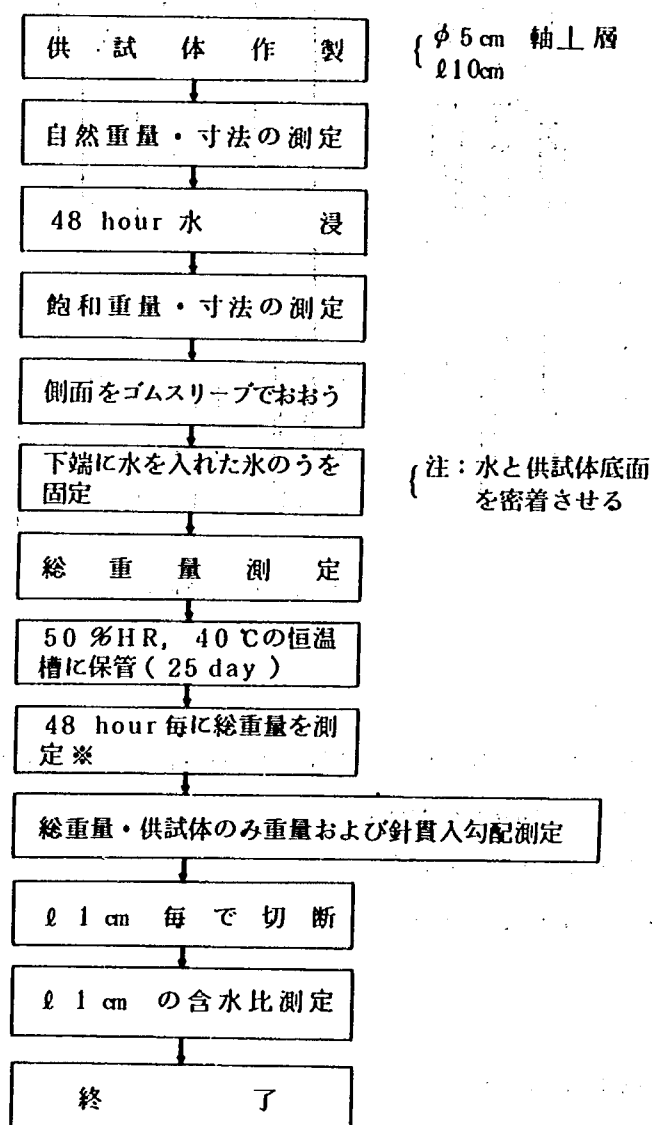


図-6 スレーキング試験の流れ

供試体内部の含水比分布が、概ね平衡状態となったと判断される試験開始 25 日後に、供試体を 10 分割して含水比の分布を測定した。



図一7 浸透能試験の流れ

3.5 膨張圧試験

本試験は膨張圧試験機（図一8）を用いて行った。同試験機の構造は、供試体が 1/100 mm 吸水膨張するとそれを押し戻し、供試体高さを一定に保つようになっており、その時の圧力を膨張圧として、吸水量・膨張量とともに自動記録するものである。供試体の形状寸法や初期飽和度の調整は膨張量試験等と同様である。

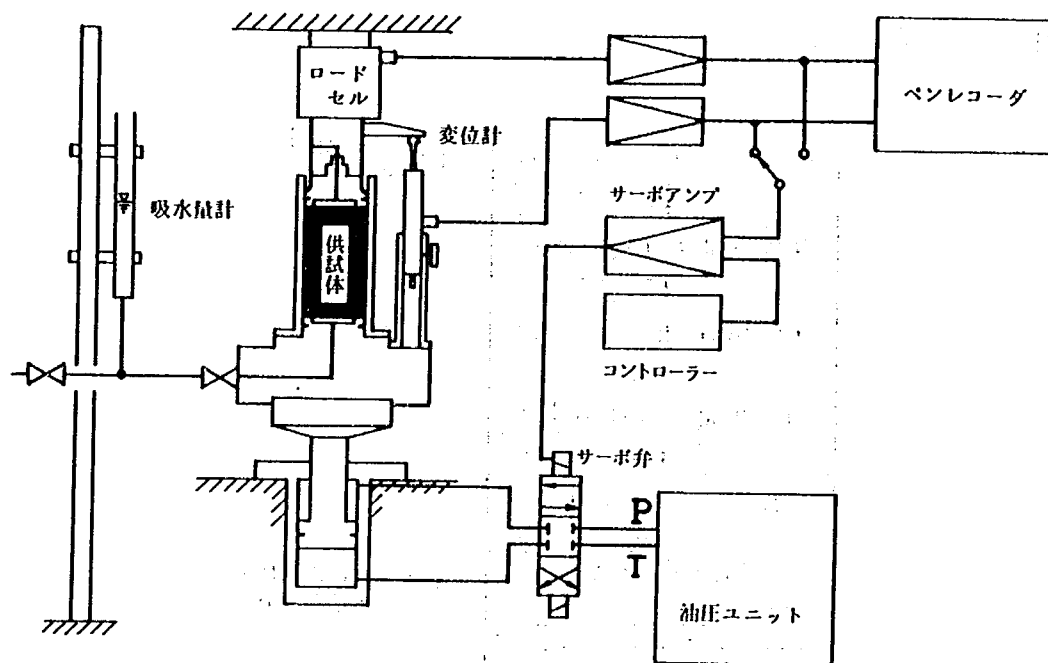


図 - 8 膨張圧試験機

3.6 物理・力学試験および粒度試験

本試験は試験に用いた岩石の物理・力学的性質を知るために行った。試験方法は次のようである。

- 1) 一軸圧縮試験：KDKS-0502 (1968)
- 2) 引張試験：JIS・M-0303-1975
- 3) 粒度試験：JIS・A-1204・T 1979

3.7 粉末X線回折試験

粉末X線回折試験は次の条件で行った。

管 球：Cu フィルタ：Ni

電 圧：40 kV 電流：20 mA

走査範囲： $2\theta = 2 \sim 40^\circ$

走査速度： $2^\circ/\text{min}$

記録紙速度： $20 \text{ mm}/\text{min}$

4. 試験結果

4.1 物理・力学試験および粒度試験

供試体の物理・力学試験結果を表-5に示す。8種の軟岩は2つのグループに分類でき、(N)下湯(灰)～(R)久吉の凝灰岩は次のような特徴を持つ。すなわち一軸圧縮強度・引張強度が小さい。湿潤密度が小さく、吸水率・有効間隙率が大きい。

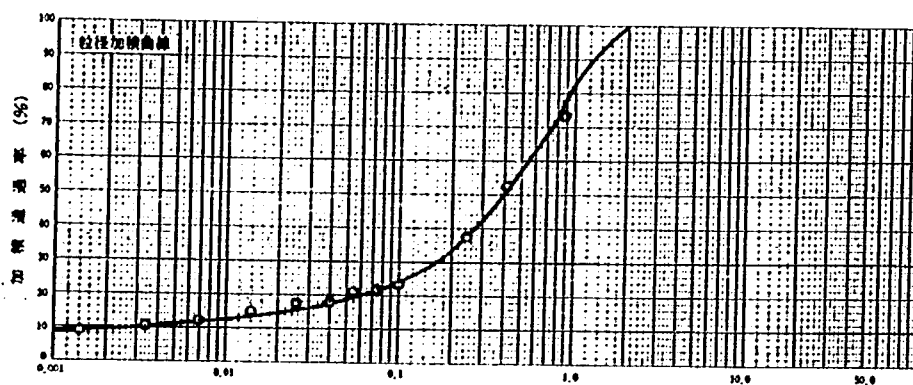
粒度試験の結果は表-6に粒度指標、図-9(M)～(T)に各岩種の粒径加積曲線を示す。一般的に均等係数が4～5以下の場合には粒径が均等であるといわれ、均等係数10以上、曲率係数1～3は粒度の配合が良いという。したがって、(M)下湯(黒)を除くすべてが、ほぼ粒径の片寄りが無く、配合が良いといえる。

表-5 供試体岩石の物理・力学的性質

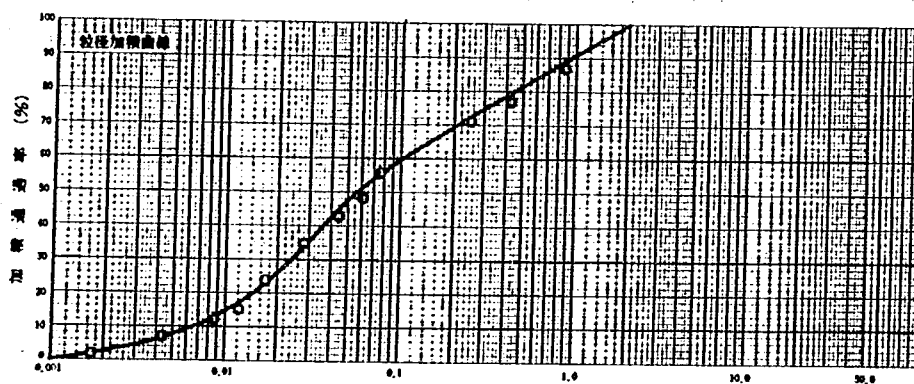
記号	供試体名	岩種	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)
M	下湯(黒)	変質安山岩	64.5	1.12	11.3	23.3	39.5	2.046
N	下湯(灰)	砂質凝灰岩	13.4	1.79	0.78	48.1	52.9	1.611
O	浅瀬石川・I	砂質凝灰岩	12.3	0.16	0.51	41.2	47.4	1.601
P	浅瀬石川・II	軽石質凝灰岩	7.7	0.12	0.26	60.2	52.1	1.461
Q	浅瀬石川・法面	軽石質凝灰岩	40.5	0.34	4.5	43.4	47.9	1.737
R	久吉	細粒凝灰岩(変質)	5.1	0.19	1.4	32.8	44.5	1.788
S	七ヶ宿	礫質凝灰岩	78.4	1.92	17.3	9.4	18.0	2.163
T	鋸南	泥質砂岩	101.0	1.40	9.2	19.0	33.6	2.030

表-6 粒度指標

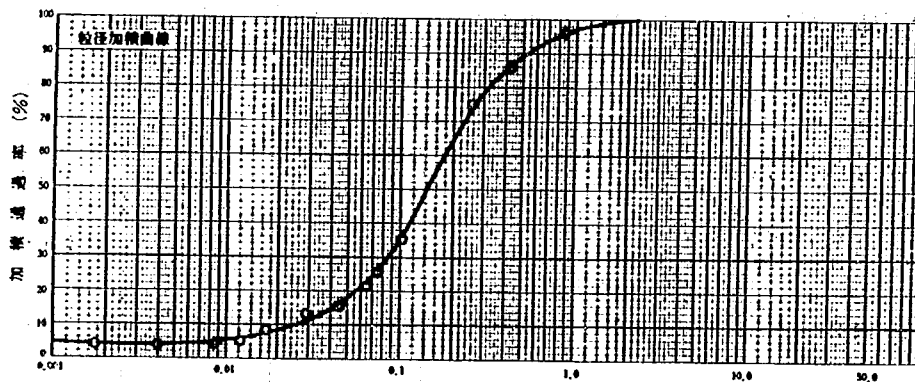
記号	供試体名	岩種	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	60% 粒径(mm)	10% 粒径(mm)
M	下湯(黒)	変質安山岩	224.0	23.1	0.5600	0.0025
N	下湯(灰)	砂質凝灰岩	16.7	0.7	0.1050	0.0063
O	浅瀬石川・I	砂質凝灰岩	9.5	2.4	0.1800	0.0190
P	浅瀬石川・II	軽石質凝灰岩	38.8	4.0	0.6200	0.0160
Q	浅瀬石川・法面	軽石質凝灰岩	300.0	1.0	0.3000	0.0010
R	久吉	細粒凝灰岩(変質)	260.0	1.1	0.2600	0.0010
S	七ヶ宿	礫質凝灰岩	44.6	4.3	0.1900	0.0500
T	鋸南	泥質砂岩	15.6	2.9	0.1400	0.0090



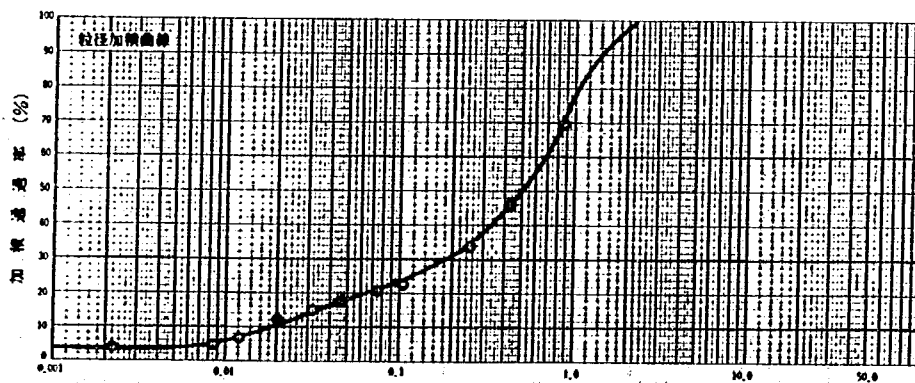
(M) 下湯(黒)＜変質安山岩＞



(N) 下湯(灰)＜砂質凝灰岩＞

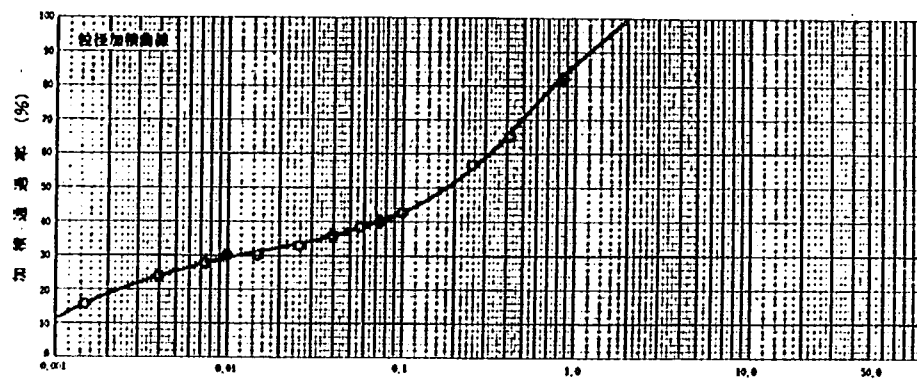


(O) 浅瀬石川・I＜砂質凝灰岩＞

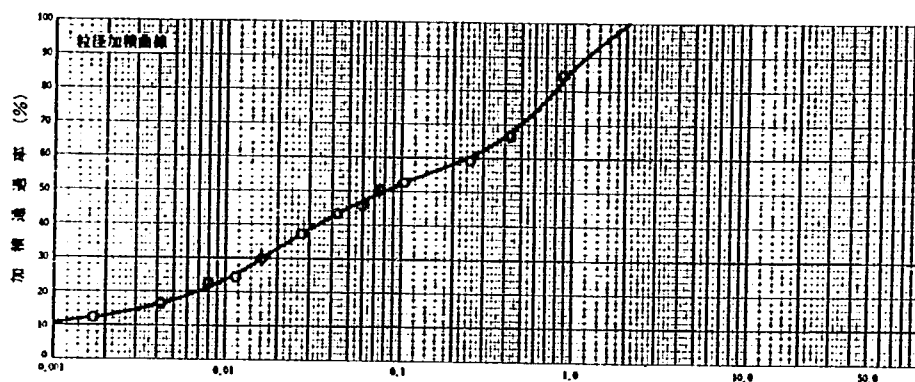


(P) 浅瀬石川・II＜軽石質凝灰岩＞

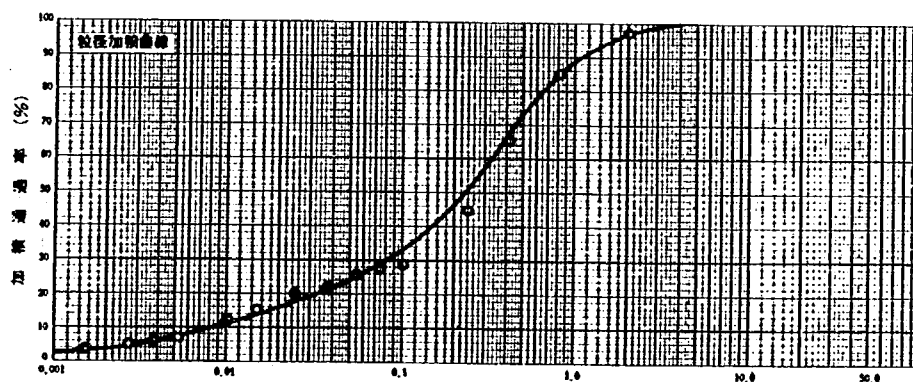
図-9(1) 粒径加積曲線



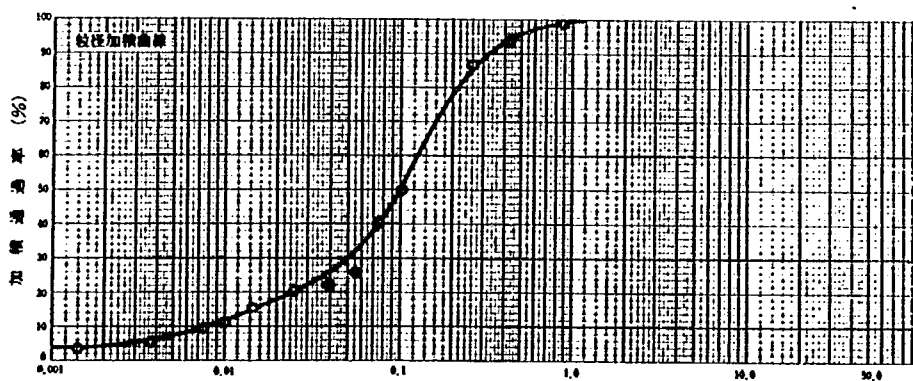
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩(変質)>



(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>



(T) 鋸南<泥質砂岩>

図-9(2) 粒径加算曲線

4.2 粉末X線回折試験

粉末X線回折チャートを図—10 (M)～(T)に、表—7にはそれと岩石の薄片顕微鏡観察によって判定した含有鉱物名を記した。これらによれば石英・長石(特に斜長石が多い)がほとんどの岩種に含まれており、その他に輝石、オパール、角閃石等が含まれているものもある。粘土鉱物では、モンモリロナイトがすべての岩種に含まれている他、雲母類、カオリナイト、クロライト等が含まれている岩種もある。吸水膨張に大きく影響するモンモリロナイトは各岩種によって違うが、(M)下湯(黒)にはそのX線ピーク強度・顕微鏡観察から、かなり多量に含まれており、それより少ないが、(N)下湯(灰)にも多く含まれている。その他の岩種では微量である。

4.3 膨張量試験

i) 乾燥に伴う収縮量

図—11 (M)～(T)に乾燥の程度(初期飽和度 S_{ri})と収縮率の関係を示す。収縮率は次式による。

$$\text{収縮率}(\%) = \frac{l_2 - l_3}{l_2} \times 100$$

l_2 : 飽和時の寸法

l_3 : 乾燥時の寸法

図—11中の黒丸は、24日間乾燥の供試体の経時的収縮率を示し、白丸はその他の試験に用いたすべての供試体の最終的な収縮率を示す。

今回用いたすべての岩種でいえるのは、収縮率のばらつきが大きいことと初期飽和度 S_{ri} が0付近でも概ね収縮率は2%以下であることである。収縮率が最も大きいものは(R)久吉の2.2%であるが、この値は図に示されるとおり特異点であると思われる。(M)下湯(黒)は比較的ばらつきが少なく、黒丸で示したものも0.75%程度で一定となっている。(O)浅瀬石川・Iには乾燥収縮するものとしなないものがあり、(P)浅瀬石川・II, (Q)浅瀬石川・法面, (R)久吉, (T)鋸南にも同様のことがいえる。

ii) 膨張量

図—12 (M)～(T)に各岩種の初期飽和度 S_{ri} と膨張率の関係を示す。膨張率は次式で定義する。

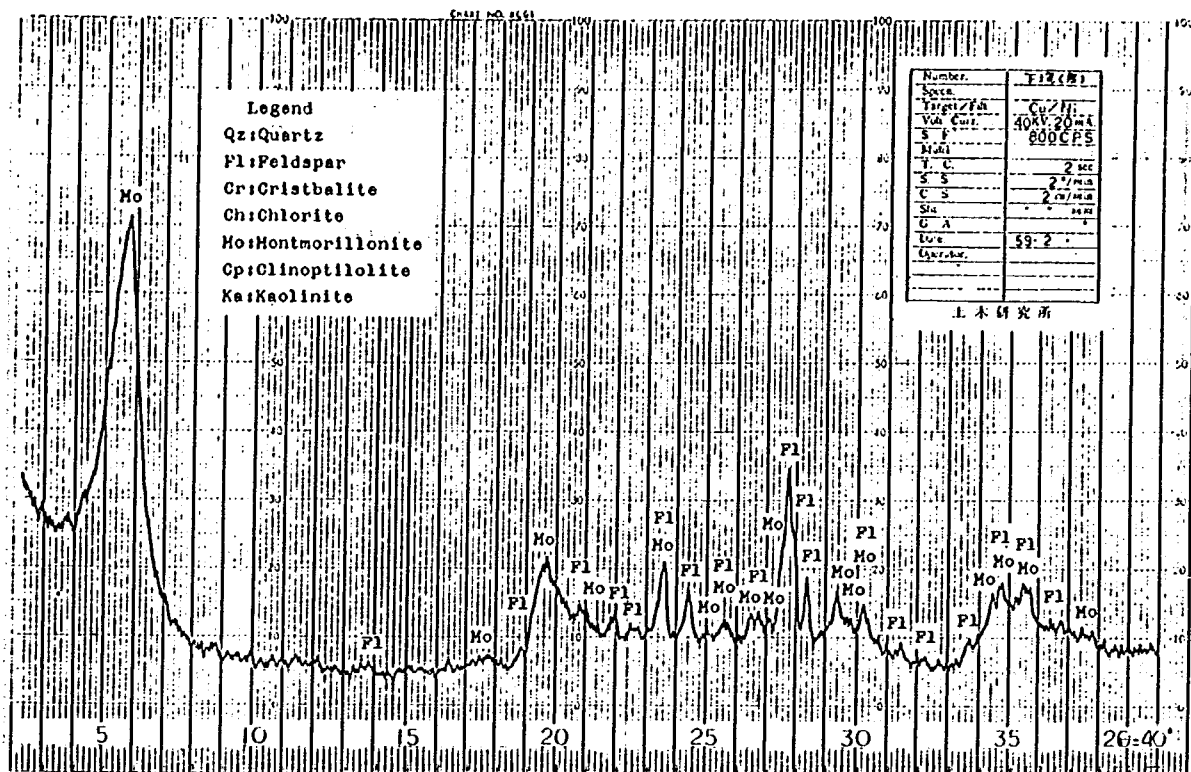
$$\text{膨張率}(\%) = \frac{l_4 - l_3}{l_3} \times 100$$

l_3 : 水浸前の寸法

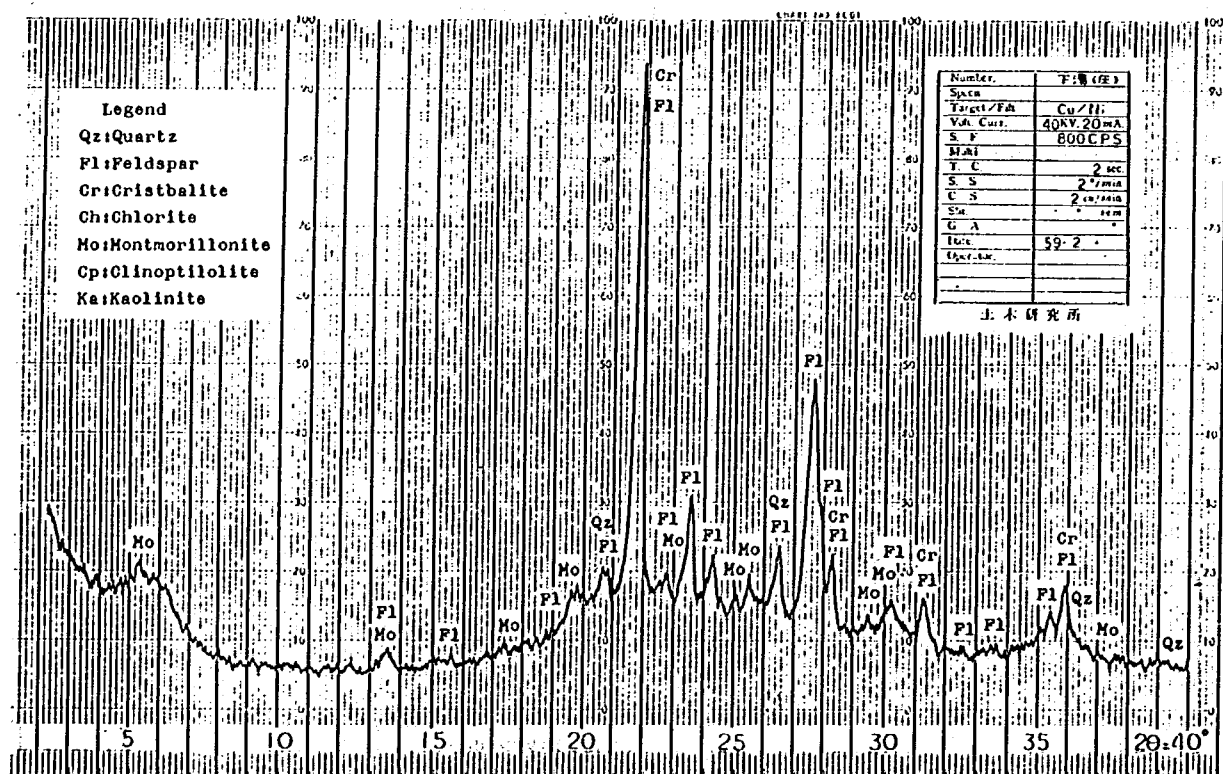
l_4 : 膨張時の寸法

表-7 含有鉱物

記号	供試体名	岩 種	含 有 鉱 物
M	下 湯(黒)	変質安山岩	Feldspar (Plagioclase) Opal Montmorillonite
N	下 湯(灰)	砂質凝灰岩	Quartz Feldspar Cristbalite Montmorillonite
O	浅瀬石川・I	砂質凝灰岩	Quartz Feldspar (Plagioclase) Pyroxene Montmorillonite
P	浅瀬石川・II	軽石質凝灰岩	Quartz Feldspar (Plagioclase) Orthopyroxene Amphibole Mica clay mineral Montmorillonite
Q	浅瀬石川・法面	軽石質凝灰岩	Quartz Feldspar (Plagioclase) Pyroxene Amphibole Clinoptilolite Montmorillonite
R	久 吉	細粒凝灰岩(変質)	Feldspar (Plagioclase) Cristbalite Montmorillonite
S	七ヶ宿	礫質凝灰岩	Quartz Feldspar (Orthoclase, Plagioclase) Opal Calcite Kaolinite Chlorite Montmorillonite
T	鋸 南	泥質砂岩	Quartz Feldspar (Plagioclase, Alkali feldspar) Clinopyroxene Calcite Mica clay mineral Kaolinite Montmorillonite

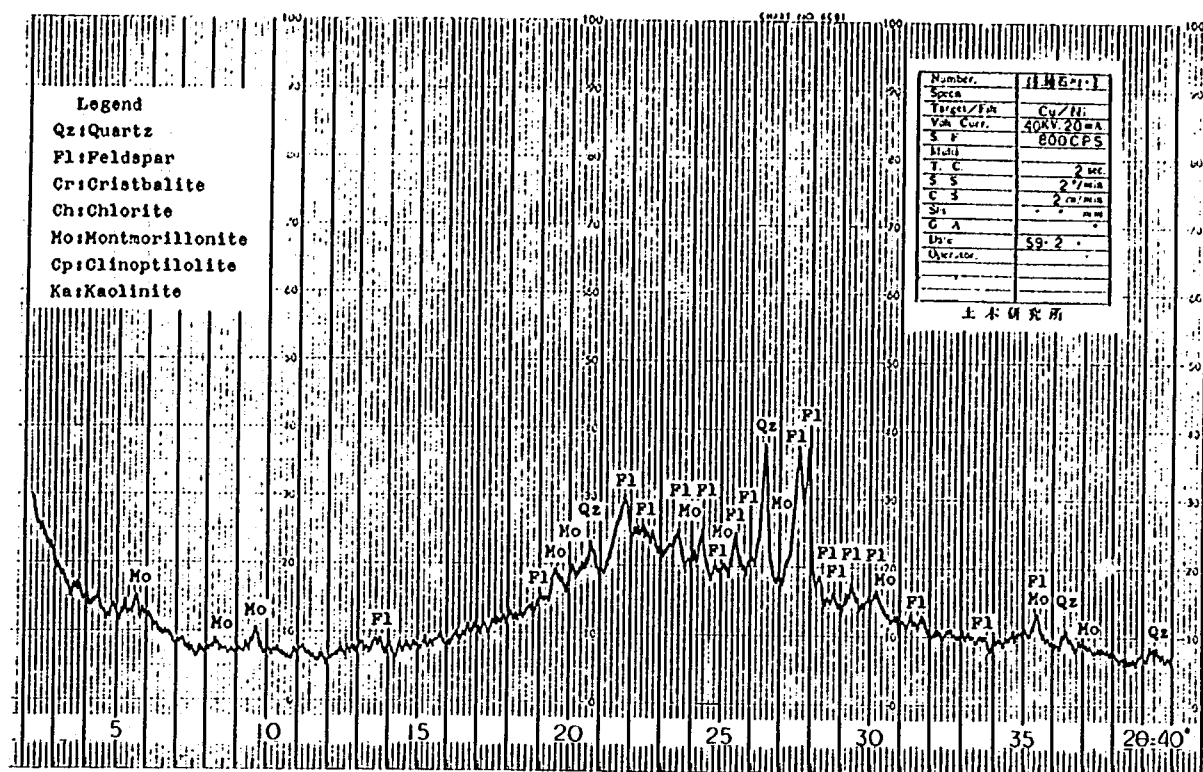


(M) 下湯(黒)

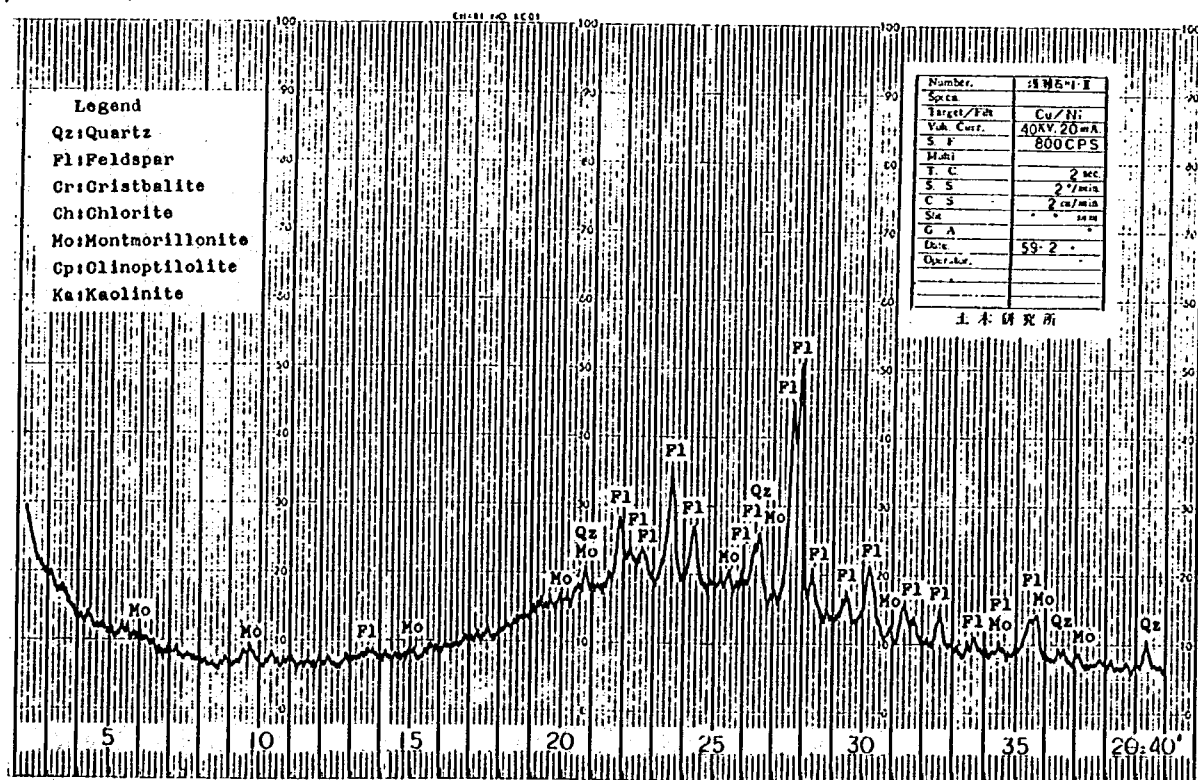


(N) 下湯(灰)

図一 10 (1) 粉末 X 線回折チャート

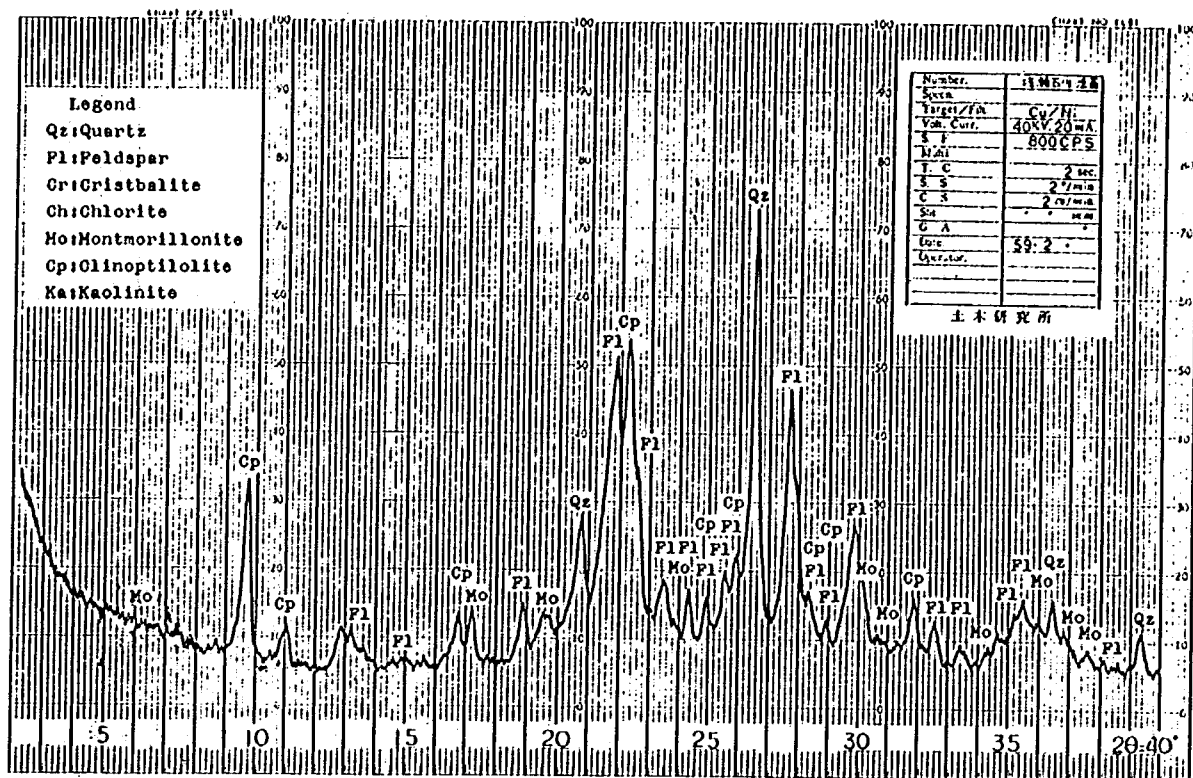


(O) 浅瀬石川・I

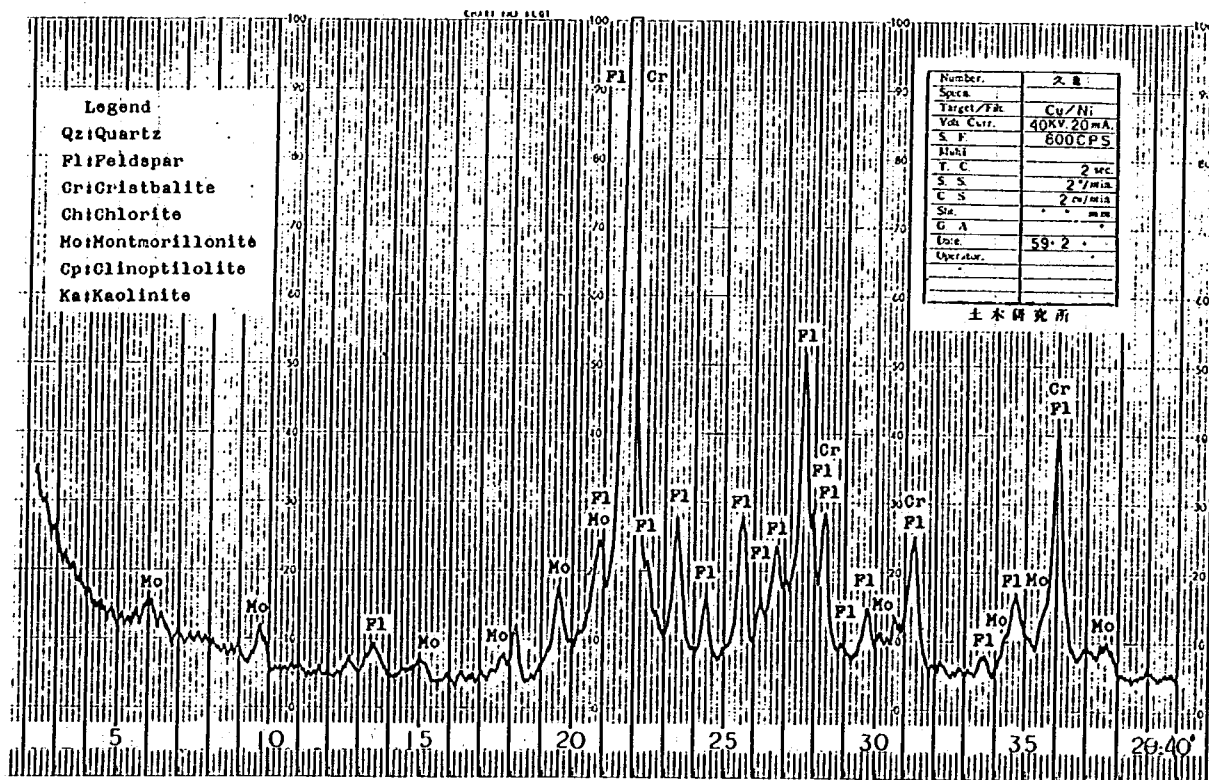


(P) 浅瀬石川・II

図-10(2) 粉末X線回折チャート

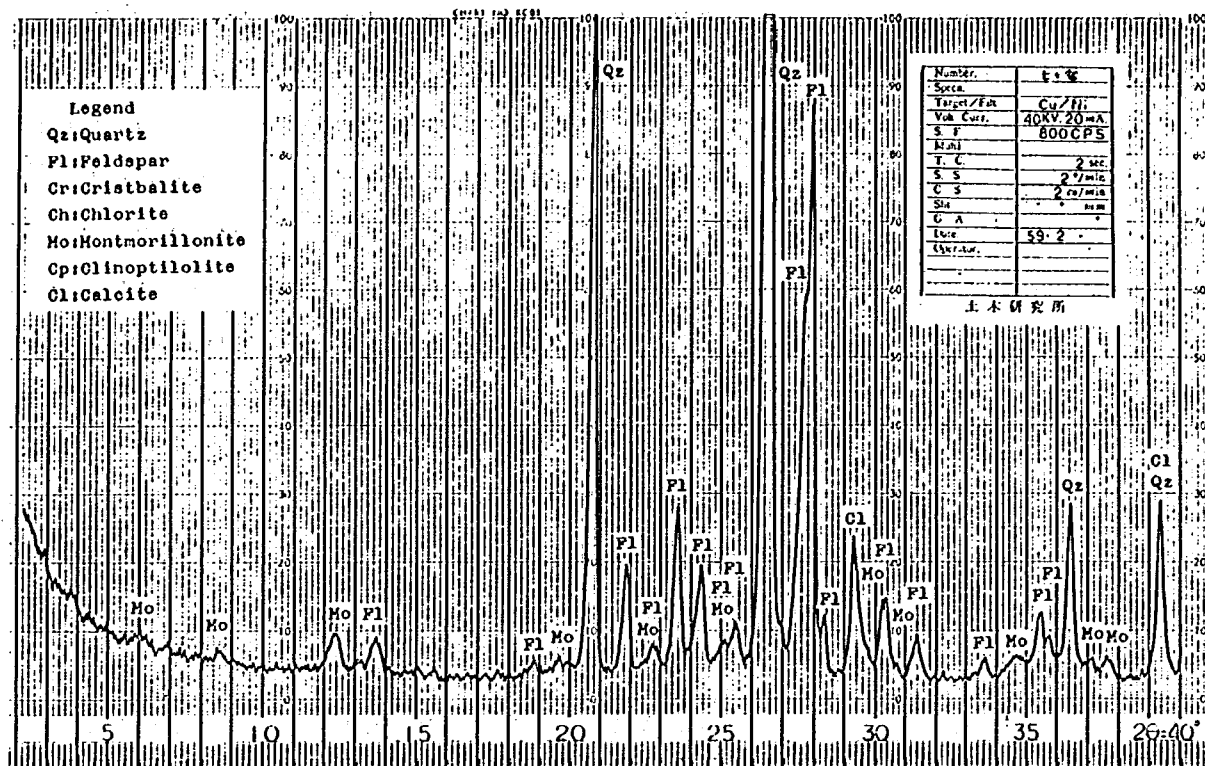


(Q) 浅瀬石川・法面

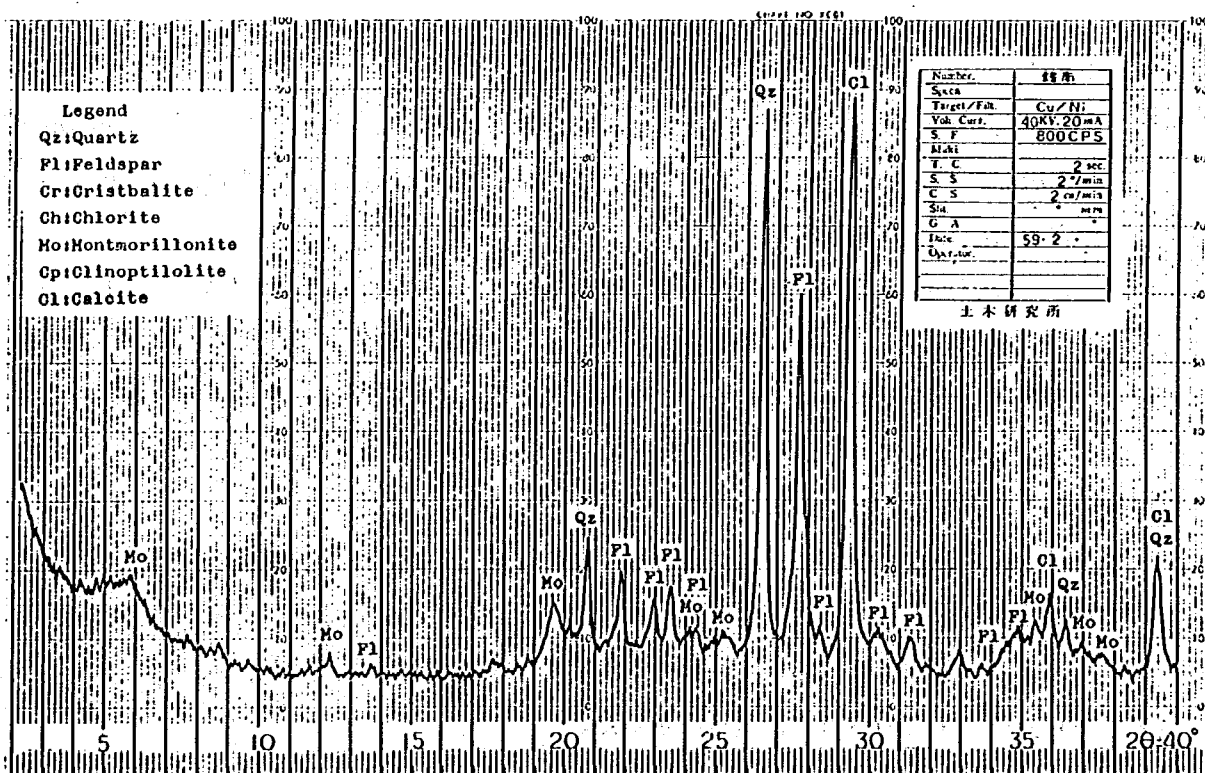


(R) 久吉

図-10(3) 粉末X線回折チャート



(S) 七ヶ宿



(T) 鋸南

図一 10(4) 粉末 X 線回折チャート

膨張率の現われ方には3つのタイプがある。1つは(M)下湯(黒)で初期飽和度の低下とともに一気に膨張して上に凸となる曲線を描く。また、(N)下湯(灰)、(T)鋸南に代表されるように、初期飽和度の低下とともにゆるやかに膨張し、さらに初期飽和度の低下が進むと急激に膨張する下に凸の曲線を描くものがある。もう1つは、ほぼ直線的に上昇するか、全く膨張しないものである。

図-12ではほとんどの岩種で膨張率の最大値は4%以内となっている。(M)下湯(黒)の膨張率は初期飽和度 Sri 100%から上昇し始め、しだいにその勾配がゆるやかになり、4%で留まる。(N)下湯(灰)、(Q)浅瀬石川・法面、(T)鋸南は下に凸の曲線で同じ傾向を示すが、その膨張率の最大値は(T)鋸南が最も大きく8%である。また、この3岩種と比較すると(N)下湯(灰)、(Q)浅瀬石川・法面が初期飽和度 Sri 100%直下で膨張率が増加し始めているが、(T)鋸南は初期飽和度 Sri 80%付近まで低下しないと膨張率は増え始めない。(P)浅瀬石川・Ⅱ、(S)七ヶ宿の膨張率はほぼ0%とみなすことができる。(O)浅瀬石川・Ⅰ、(R)久吉の膨張率はほぼ直線的に増加する。

iii) 針貫入勾配

針貫入勾配は、ポケットペネトロメータの先にとりつけた直径1mm、長さ10mmの針を岩石に貫入させ、その時の貫入量(cm)と貫入力量(kgf)を記録して次式で算出する。

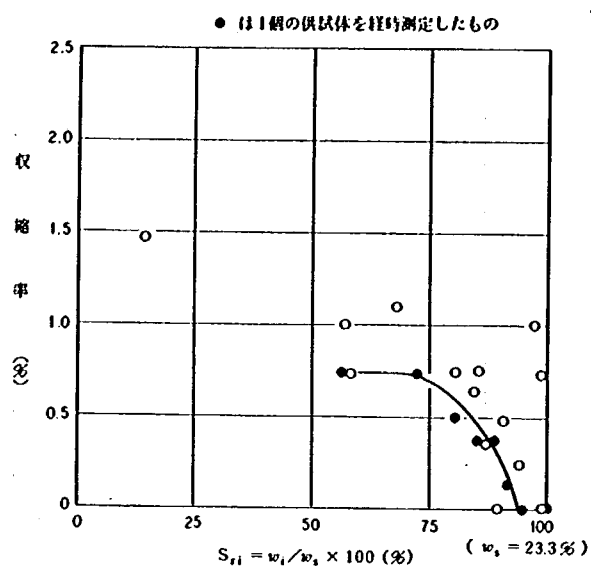
$$\text{針貫入勾配 (kgf/cm)} = \frac{\text{貫入力量 (kgf)}}{\text{貫入量 (cm)}}$$

図-13 (M)~(T)に針貫入勾配と初期飽和度 Sri の関係を示す。

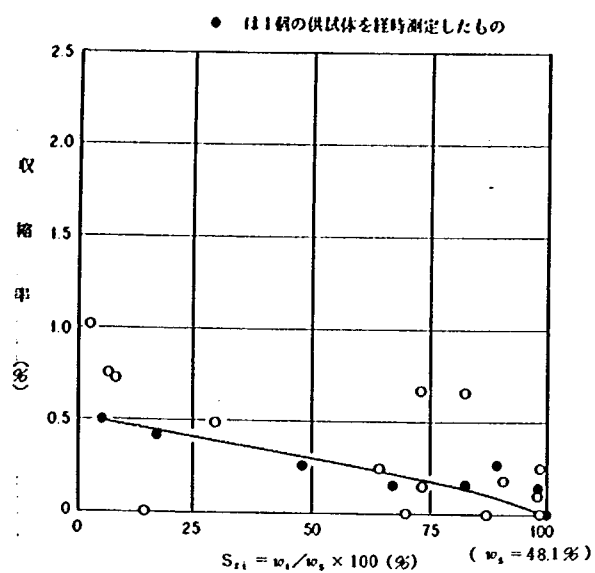
図-13中の白丸は水浸前の初期飽和度 Sri 調整時の供試体乾燥過程で、黒丸は膨張量測定後(水浸7日め)に測定したものである。なお、(M)下湯(黒)は、供試体が硬質または貫入によって亀裂が生じ、測定不可能なものである。

同図黒丸によれば、膨張率が比較的大きく、初期飽和度 Sri が100%直下で膨張を開始する(M)下湯(黒)、(N)下湯(灰)は針貫入勾配の低下も著しい。そして針貫入勾配が0まで低下することは、スレーキングが著しく、泥状化まで至ることを示している。逆に初期飽和度 Sri が0%付近になっても針貫入勾配が0にならない(P)浅瀬石川・Ⅱ、(S)七ヶ宿は膨張率が著しく小さく、スレーキングの程度も弱いことを示している。

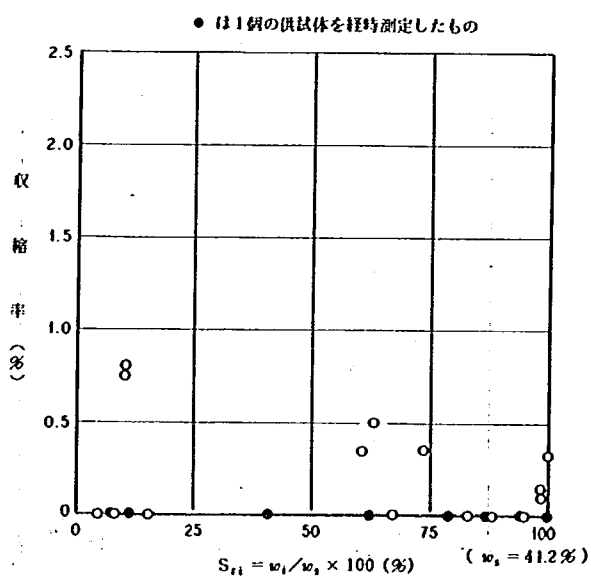
土木学会「軟岩の調査・試験指針」によれば、この針貫入勾配と一軸圧縮強度にはよい相関があるとされ、関係式も見出されている。しかし、本試験で用いた供試体のほとんどを占めている凝灰岩(まれに礫質)のような岩種ではばらつきが大きく相関性は求められない。また、本試験ではデータ数の不足等もあり、そこまでの検討には至らなかった。



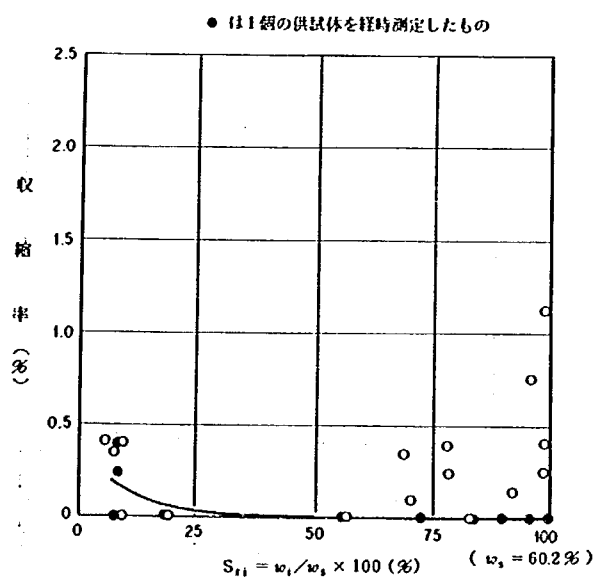
(M) 下湯(黒) <変質安山岩>



(N) 下湯(灰) <砂質凝灰岩>

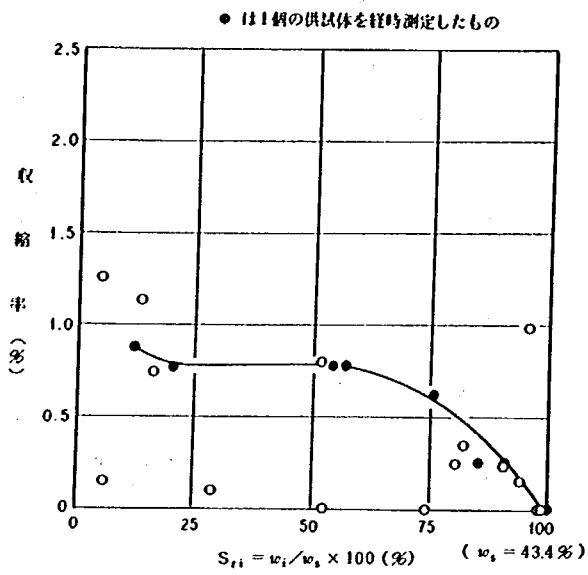


(O) 浅瀬石川・I <砂質凝灰岩>

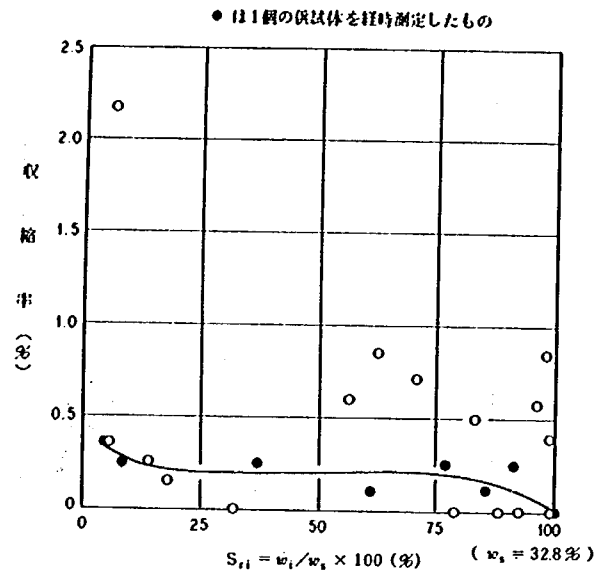


(P) 浅瀬石川・II <軽石質凝灰岩>

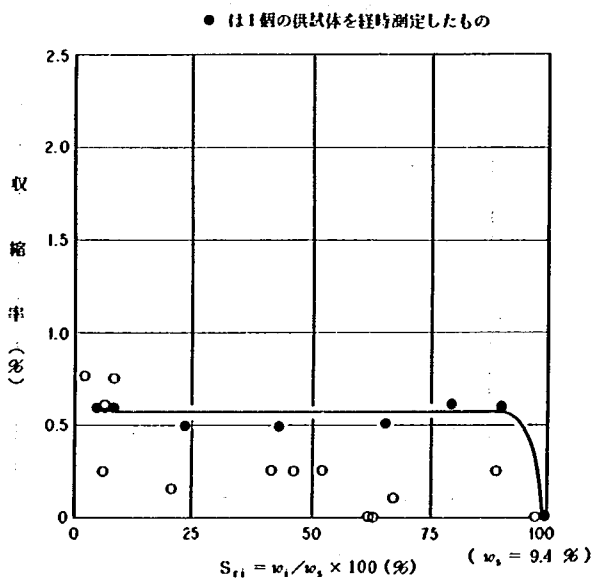
図-11(1) 初期飽和度と収縮率



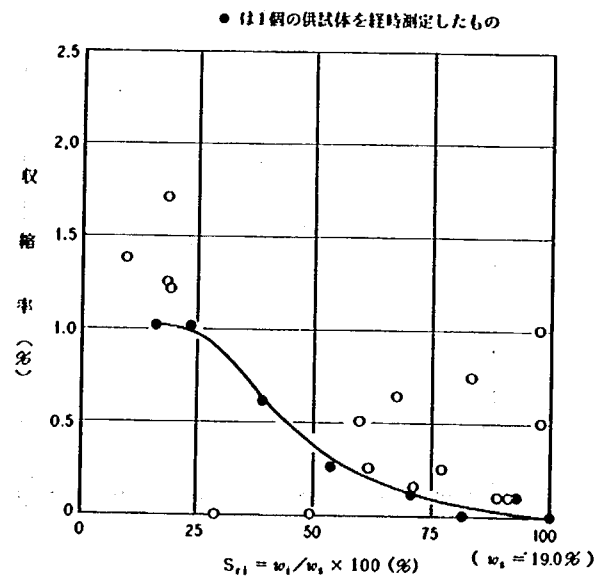
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩(変質)>

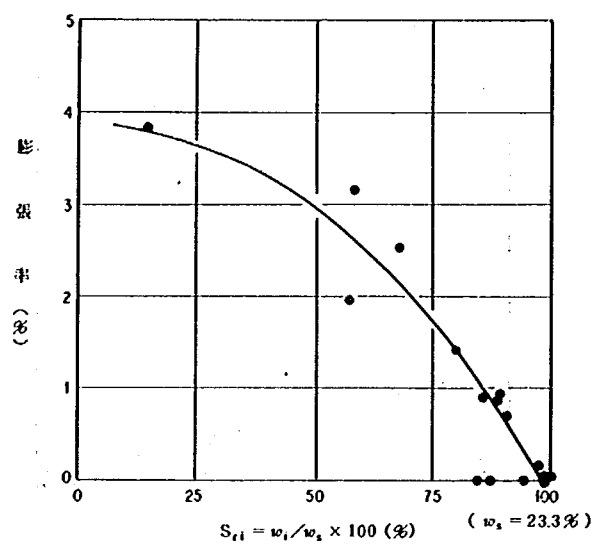


(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>

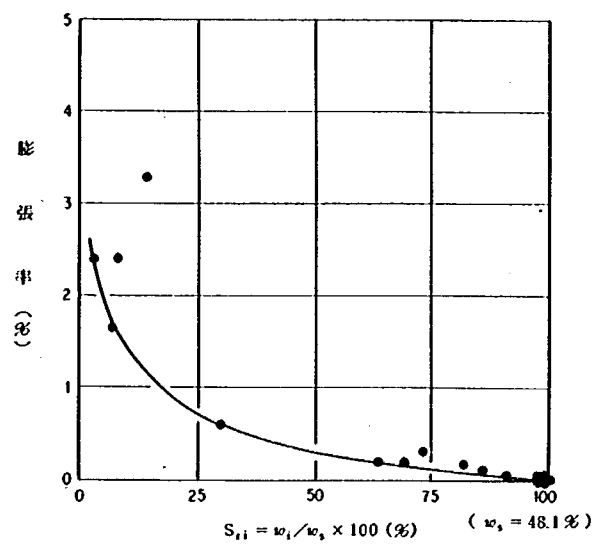


(T) 鋸南<泥質砂岩>

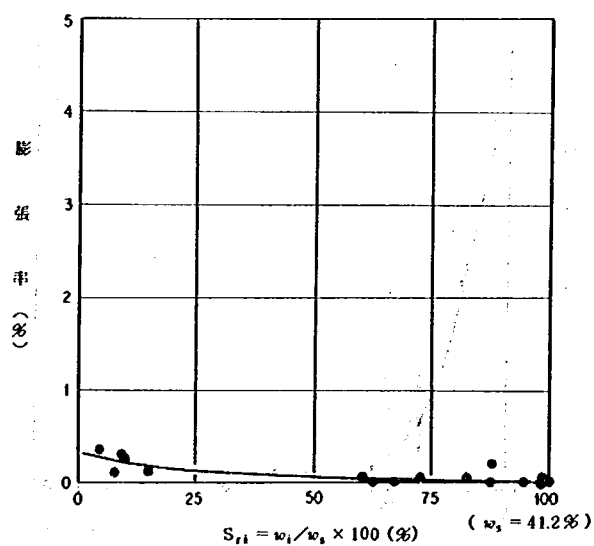
図-11(2) 初期飽和度と収縮率



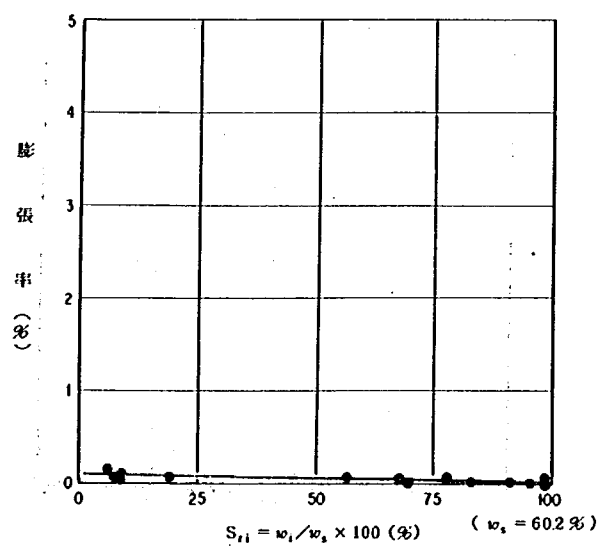
(M) 下湯(黒)＜変質安山岩＞



(N) 下湯(灰)＜砂質凝灰岩＞

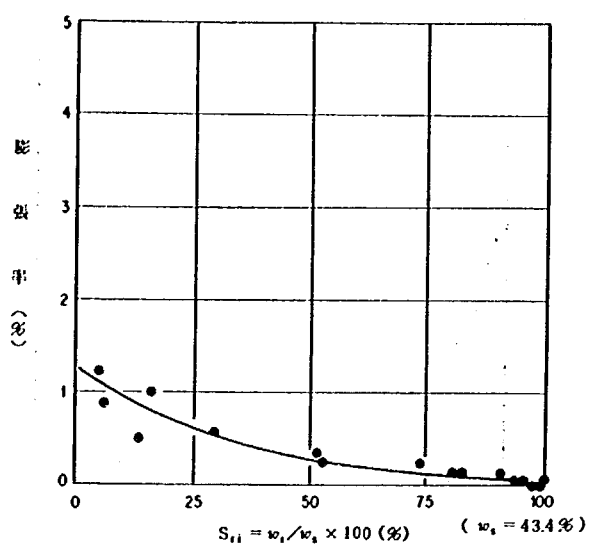


(O) 浅瀬石川・Ⅰ＜砂質凝灰岩＞

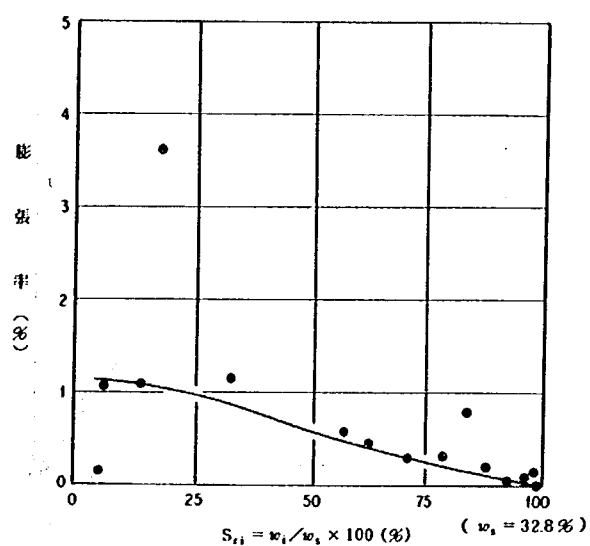


(P) 浅瀬石川・Ⅱ＜軽石質凝灰岩＞

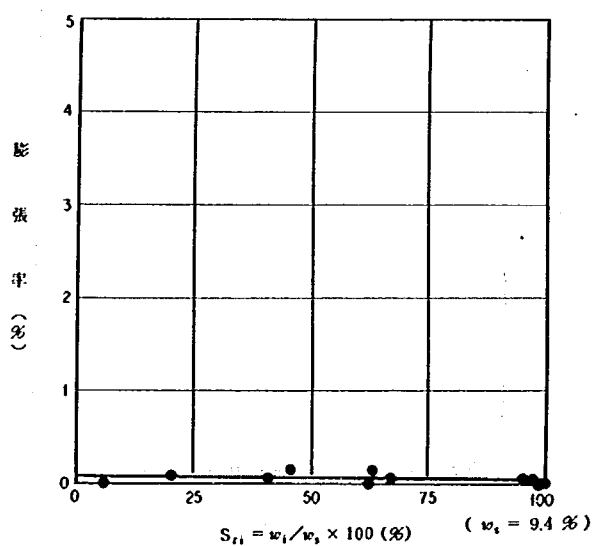
図-12(1) 初期飽和度と膨張率



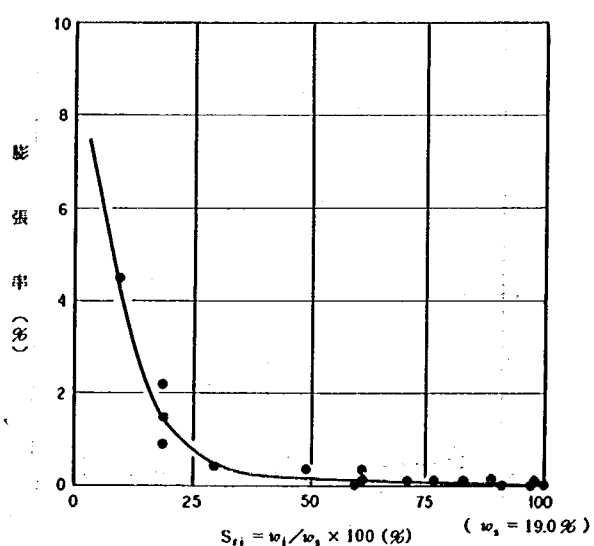
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩(変質)>

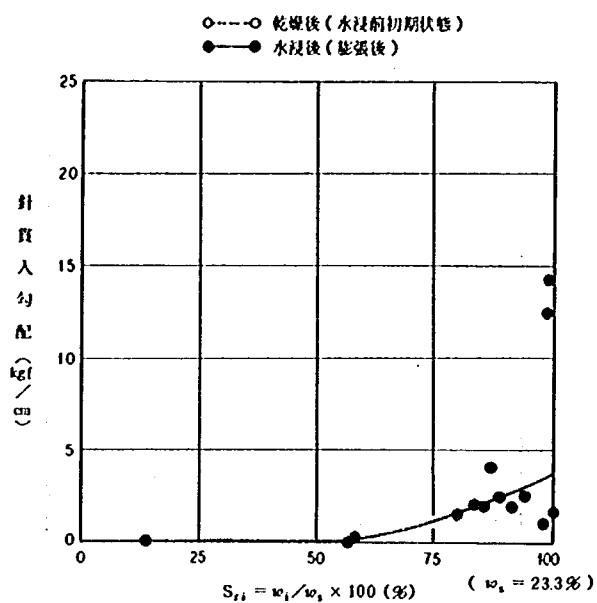


(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>

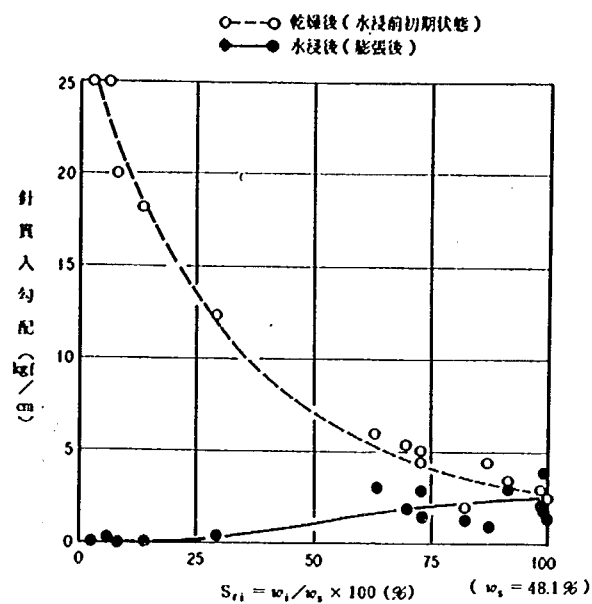


(T) 鋸南<泥質砂岩>

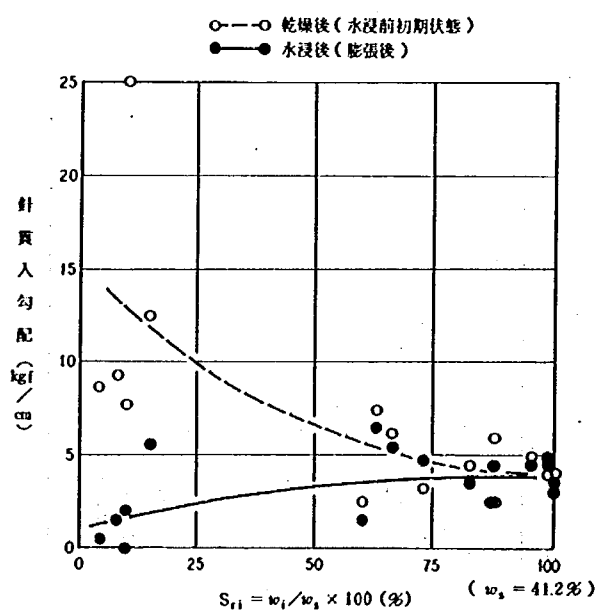
図-12(2) 初期飽和度と膨張率



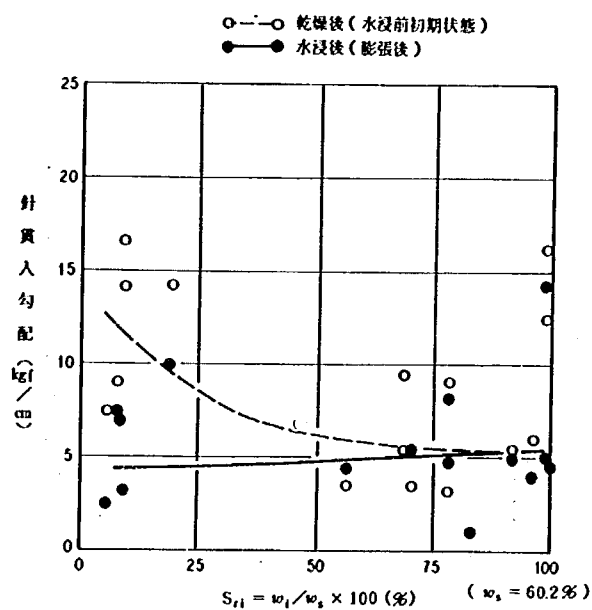
(M) 下湯 (黒) <変質安山岩>



(N) 下湯 (灰) <砂質凝灰岩>

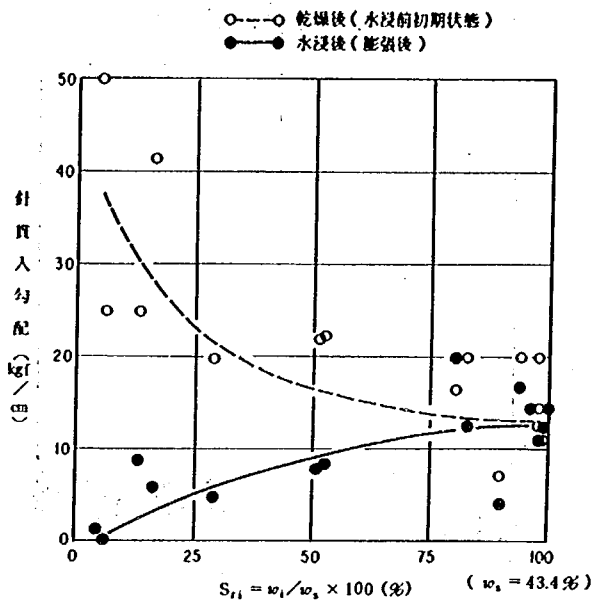


(O) 浅瀬石川・I <砂質凝灰岩>

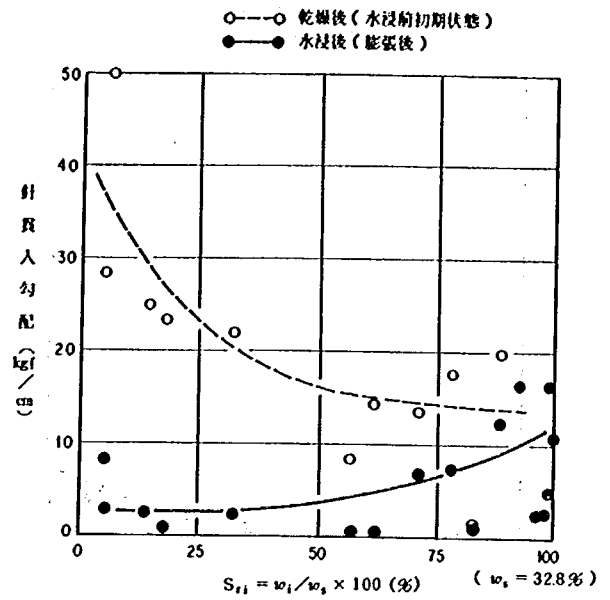


(P) 浅瀬石川・II <軽石質凝灰岩>

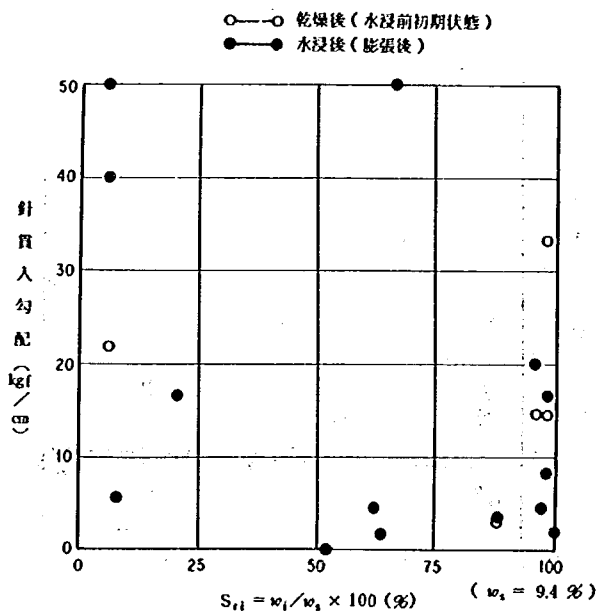
図-13(1) 初期飽和度と針貫入勾配



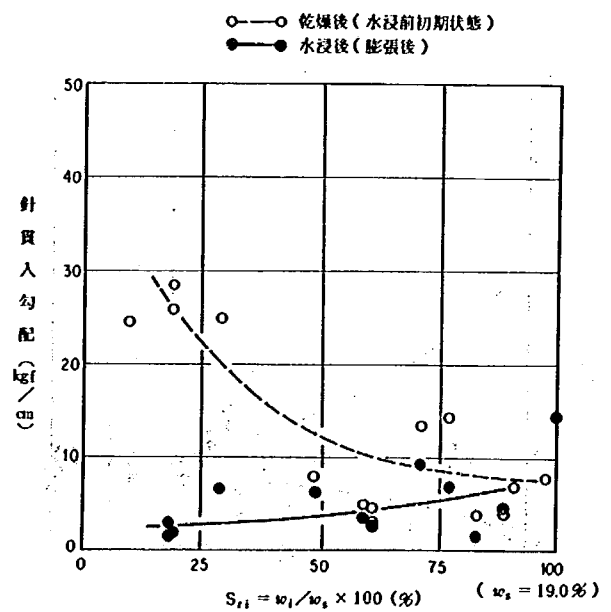
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩 (変質)>



(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>



(T) 鋸南<泥質砂岩>

図-13(2) 初期飽和度と針貫入勾配

4.4 スレーキング試験

i) クラック密度

初期飽和度 S_{ri} とクラック密度の関係を示したのが図-14 (M) ~ (T) である。クラック密度は、クラック数を層理と直交する方向に数え、1 cm 巾当りの数を示している。

図-14 によるとクラックを生ずるものと、生じないものがある。クラックを生じているのは (M) 下湯 (黒), (N) 下湯 (灰), (R) 久吉で、他はほとんどクラックを生じない。(M) 下湯 (黒) は初期飽和度 S_{ri} がおよそ 83% から急激にクラック数が増大し、数えきれない程 (便宜上無限の記号で示した) になり、(N) 下湯 (灰) では初期飽和度 S_{ri} がやはり 83% からクラック数が増大し始めるが (M) 下湯 (黒) よりはややゆるやかになっている。この 2 岩種はほぼ泥状化することを示しており、(R) 久吉は数個の団塊に分割する程度である。

ii) 崩壊試料の粒度分布

図-15 (M) ~ (T) はスレーキングした供試体の粒径を $10 \cdot 5 \cdot 2$ mm ふるいによってふるい分けした結果を重量百分率で表わしたもので、横軸は初期飽和度 S_{ri} である。

(M) 下湯 (黒), (N) 下湯 (灰) が、ふるい分けによって崩壊しているとみなされる初期飽和度は i) で述べたクラック数の急激に増大する点と差がないことがわかる。(R) 久吉についてもそのことは共通している。

iii) スレーキング指数 (土木学会: 1980)

図-16 (M) ~ (T) は初期飽和度 S_{ri} とスレーキング指数の関係を示すものである。スレーキング指数についての詳細は土木学会「軟岩の調査・試験指針」に、また、スレーキング指数とスレーキングの程度は土研資料第 1930 号「軟岩の吸水劣化試験」にも掲載してある。

(M) 下湯 (黒), (N) 下湯 (灰) は泥状化まで至り、スレーキング指数 4 を示すが、(R) 久吉では細片化で留まっている。(N) 下湯 (灰) では初期飽和度 S_{ri} 0% 付近でもすべてが完全に泥状化せず、部分的に細片化しており、(R) 久吉でも初期飽和度 S_{ri} 0% で変化しないものから細片化するものまでがあり、同一岩種内でも供試体によってばらつきのあることがわかる。

iv) 吸水含水比

吸水含水比は膨張量・スレーキング試験の水浸終了後の重量と絶乾重量で算出される吸水後の含水比であり、次式を用いて求める。

$$\text{吸水含水比 (\%)} = \frac{W_4 - W_5}{W_5} \times 100$$

W_4 : 水浸後の重量

W_5 : 絶乾重量

図-17 (M) ~ (T) は初期飽和度 S_{ri} と吸水含水比の関係を示したものであり、黒丸は膨張量、白丸はスレーキング試験で得た値である。

同図中の白丸について、スレーキング試験におけるクラック密度・崩壊試料の粒度分布・スレーキング指数でほとんどスレーキングしないとしたものは飽和含水比 w_s とあまり変わらない。一方黒丸で示したものはほとんど全岩種で飽和含水比 w_s 付近に留まっている。吸水含水比が増加しているのは(M)下湯(黒)と(N)下湯(灰)の側方を拘束しないで供試体の全面から吸水させたものである。

(M)下湯(黒)と(N)下湯(灰)を比較すると、白丸で示した吸水含水比が増加を開始する初期飽和度 S_{ri} が(M)下湯(黒)の方がやや高く80%, (N)下湯(灰)で65%程度であり、いずれもスレーキング指数でいう細片化が進む時点と一致している。

4.5 浸透能試験

現場における掘削面・貯水池・湖岸等スレーキングによる劣化や崩壊は雨水や地下水の浸透・蒸発に伴う岩石中の水分移動と密接な関わりを持つものと考えられる。本試験は、そのような岩石の基本的な性質を調べるため、水分の浸透量を測定した。

図-18は各供試体の経過日数毎の蒸発量を累計して断面積で除して、単位面積当りで示したものである。累計蒸発量が大きいのは(P)浅瀬石川・Ⅱ, (Q)浅瀬石川・法面, (N)下湯(灰)で、逆に小さいのは(T)鋸南, (S)七ヶ宿, (M)下湯(黒)である。この前者3岩種はいずれも表-5の湿潤密度が 1 g/cm^3 台であり、後者3岩種は 2 g/cm^3 台となっている。密度が小さいものは蒸発量が多い傾向がある。

図-19は区分蒸発量を前回測定時との重量差で測定して断面積で除し、単位面積当りに換算したもので、右縦軸は更にそれを時間で除したものを示した。

図-18で一定の傾き、図-19で水平となっている岩種は、蒸発量が一定となっていることを示し、供試体内部の含水状態が落ちついていることを示す。密度が比較的高く、蒸発量の小さい(M)下湯(黒), (S)七ヶ宿, (T)鋸南は、早いうちに蒸発量が安定しているが、それ以外は20日前後にならないと安定していない。このことは、密度の低い岩種(軽石混じりの凝灰岩等)では蒸発量が大きくばらつきやすいことを示している。

図-20は25日浸透後の各供試体の含水比とそれを飽和度 S_r に換算したものの分布を示している。同図中でサンプル番号1が湿潤側で、10が乾燥側、最左端は飽和含水比 w_s である。

含水比分布では、飽和含水比 w_s の高い岩種が、その低下が著しいように見える。しかし、実際は飽和度分布に表わされているように乾燥側での乾燥が著しいのは(N)下湯(灰)が $S_r 50\%$, (S)七ヶ宿が $S_r 60\%$ となっている。

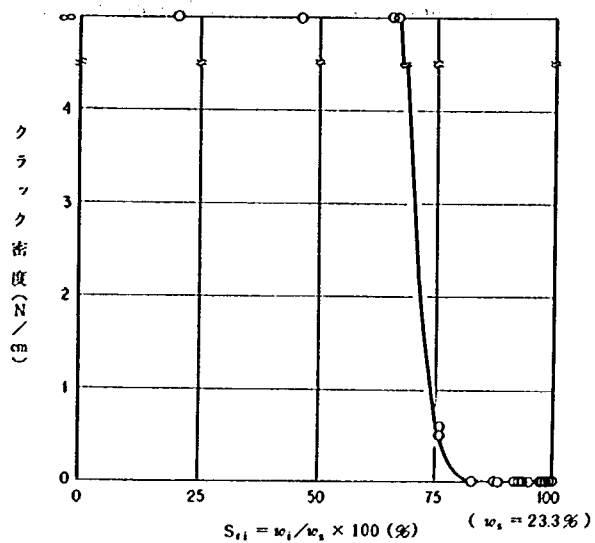
4.6 膨張圧試験

図-21(a)は(D)所司原における試験結果を示したもので、横軸は初期飽和度 S_{ri} , 縦軸は膨張圧と吸水含水比である。

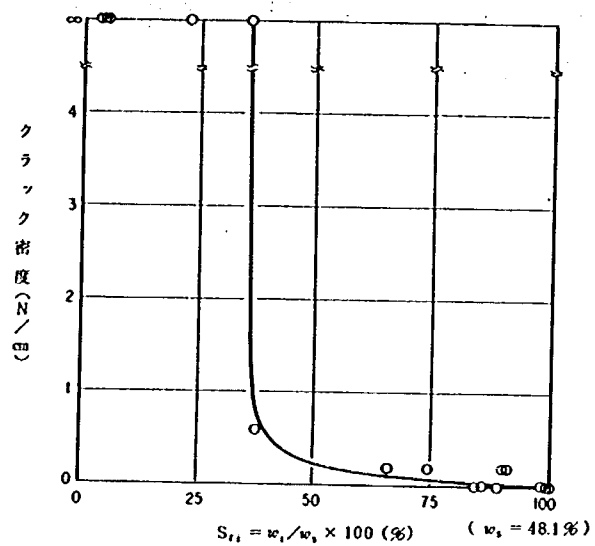
膨張圧は初期飽和度 S_{ri} の低下とともに増大し、最大 9.3 kgf/cm^2 を示す。逆に、吸水含水比は初期

飽和度 S_{ri} の低下とともにやや低下する傾向にあり、初期飽和度 S_{ri} 0%では13%となる。

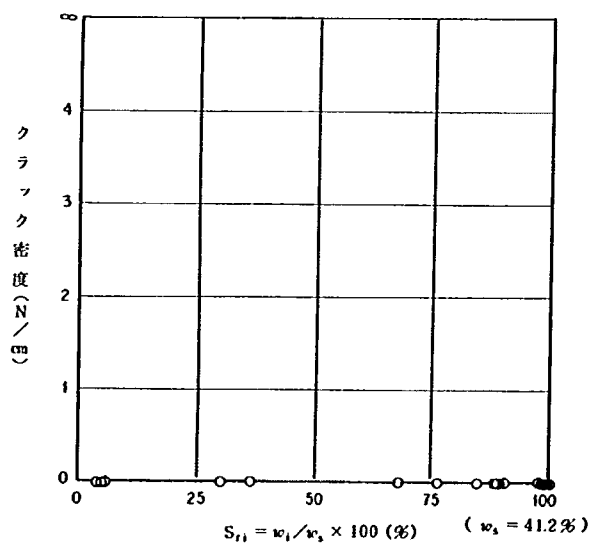
図-21(b)は吸水含水比と膨張圧の関係を示したものである。同図より、吸水含水比が低下すると膨張圧は増大する。



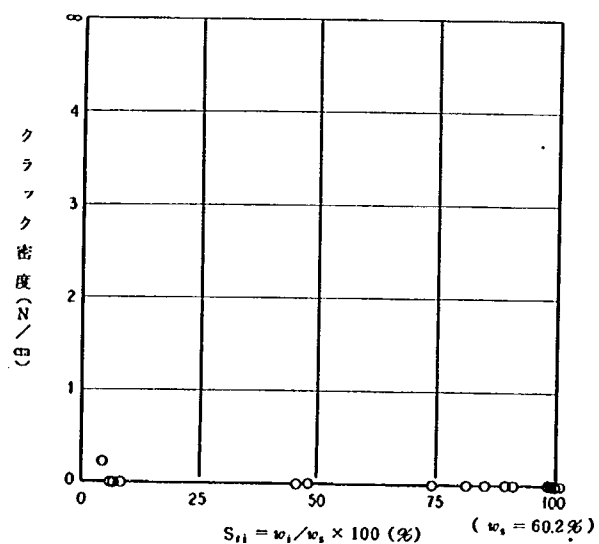
(M) 下湯(黒) <変質安山岩>



(N) 下湯(灰) <砂質凝灰岩>

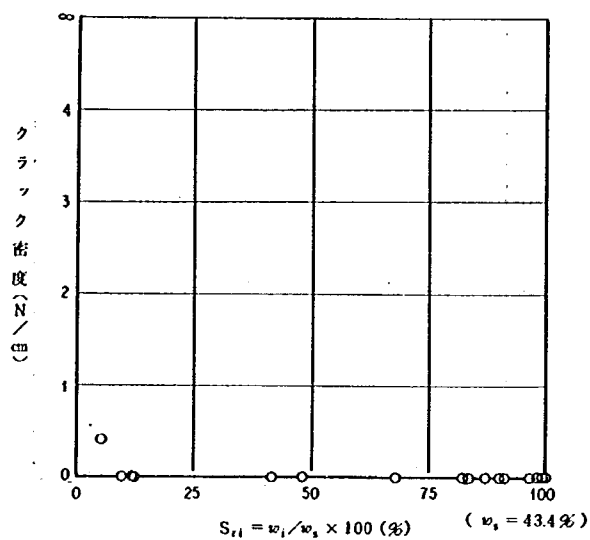


(O) 浅瀬石川・I <砂質凝灰岩>

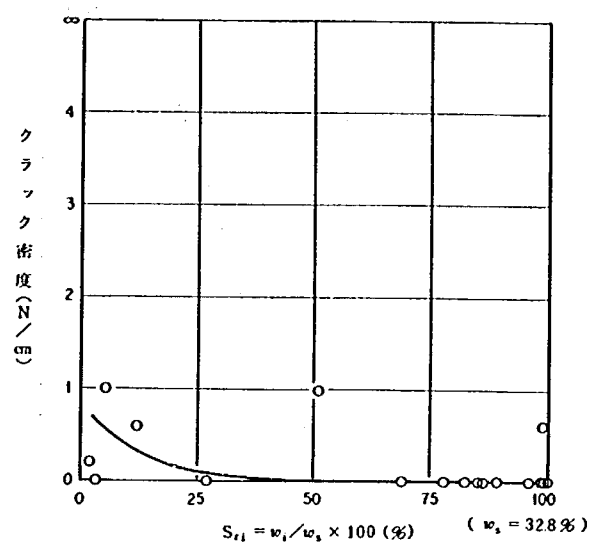


(P) 浅瀬石川・II <軽石質凝灰岩>

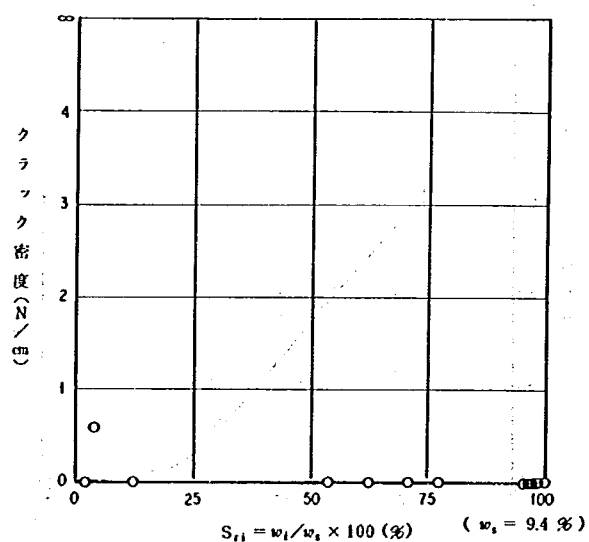
図-14(1) 初期飽和度とクラック密度



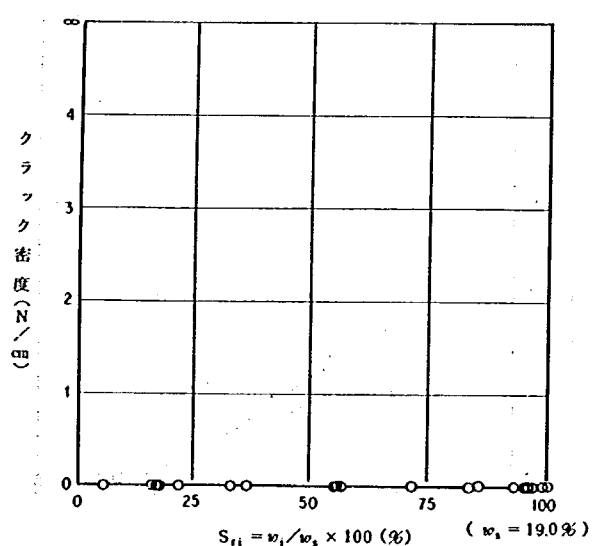
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩(変質)>

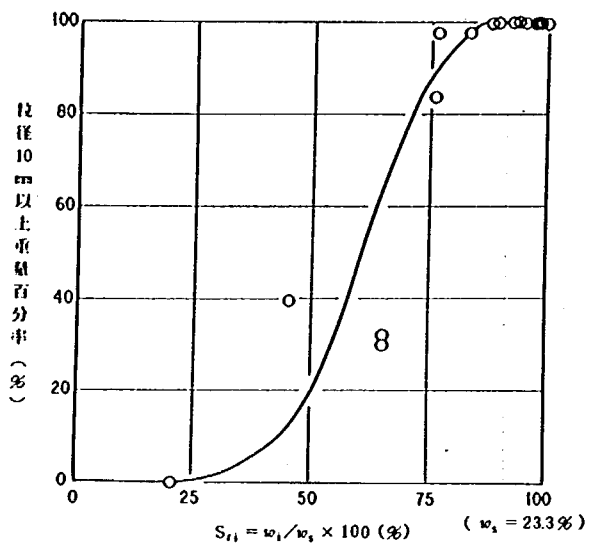


(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>

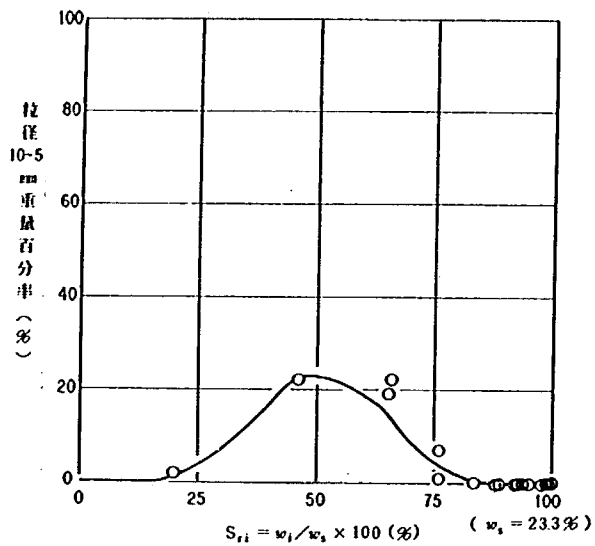


(T) 鋸南<泥質砂岩>

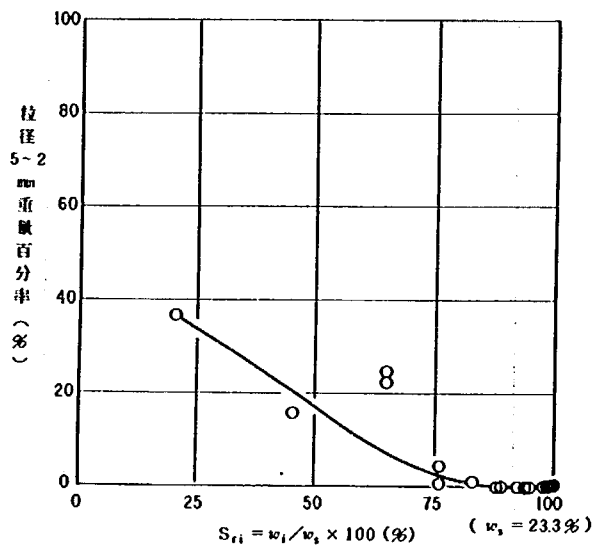
図-14(2) 初期飽和度とクラック密度



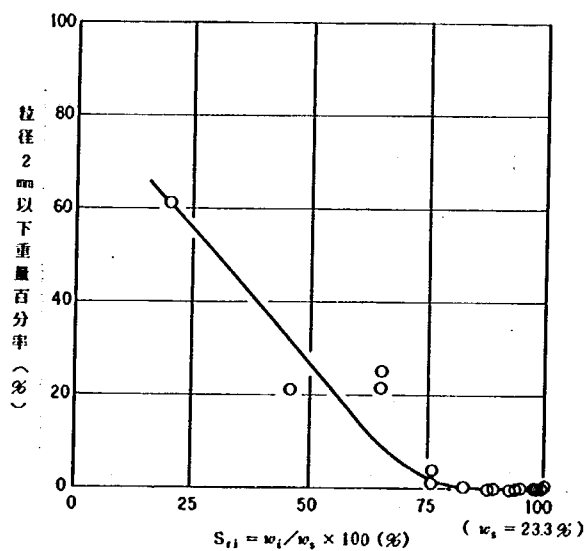
(M) 下湯 (黒) ①



(M) 下湯 (黒) ②

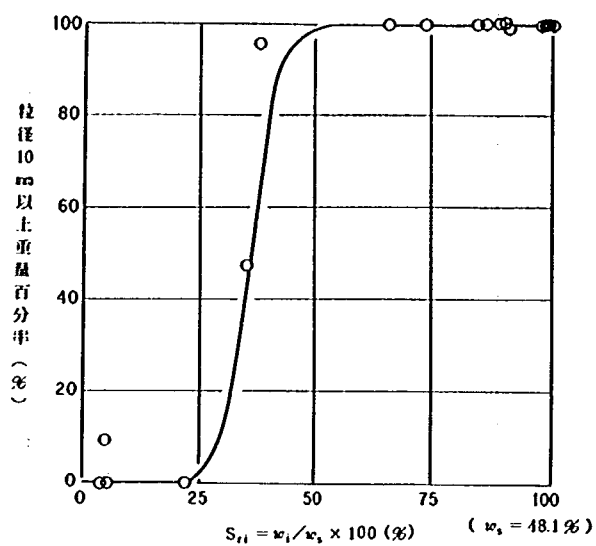


(M) 下湯 (黒) ③

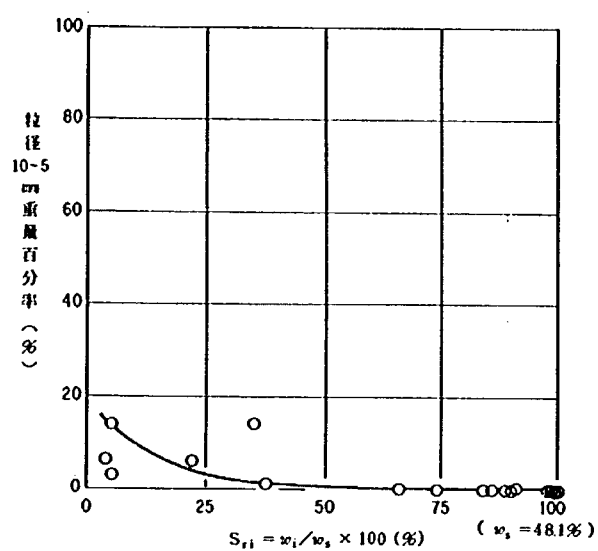


(M) 下湯 (黒) ④

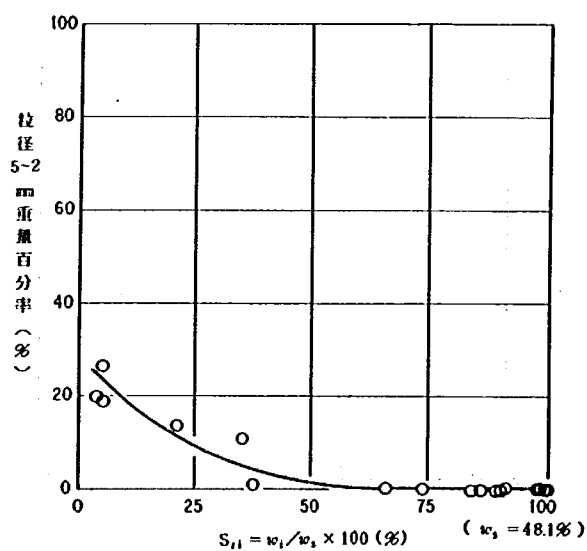
図-15(1) 初期飽和度と崩壊粒度<M>



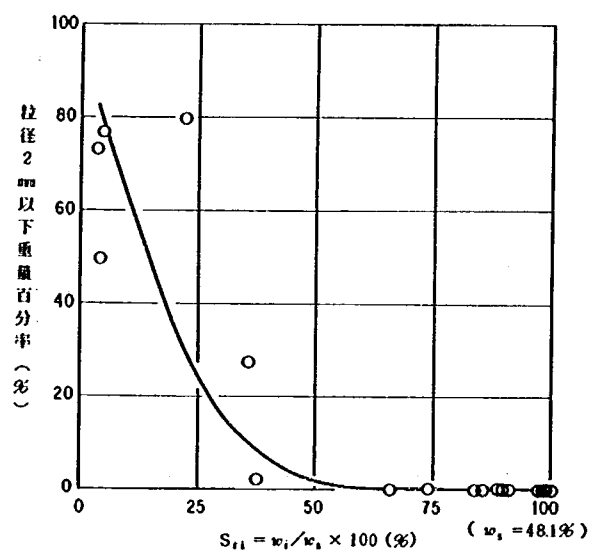
(N) 下湯 (灰) ①



(N) 下湯 (灰) ②

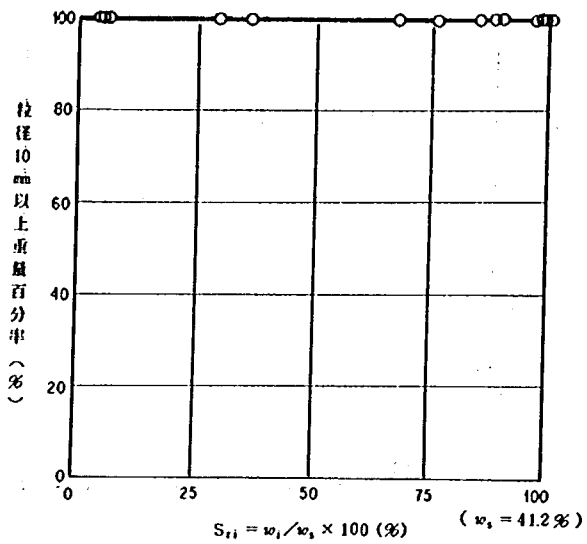


(N) 下湯 (灰) ③

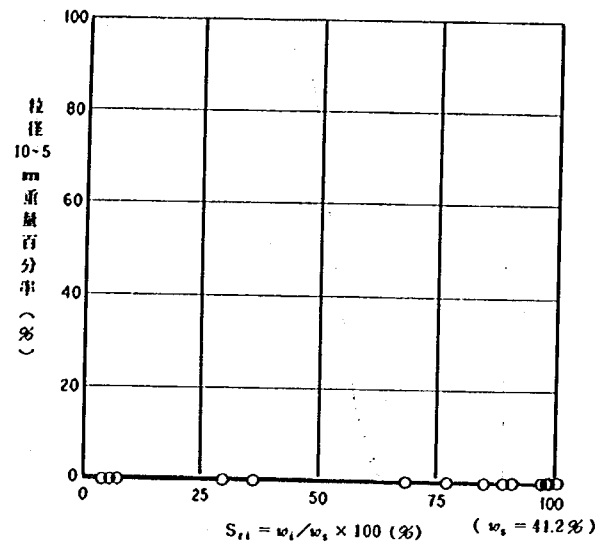


(N) 下湯 (灰) ④

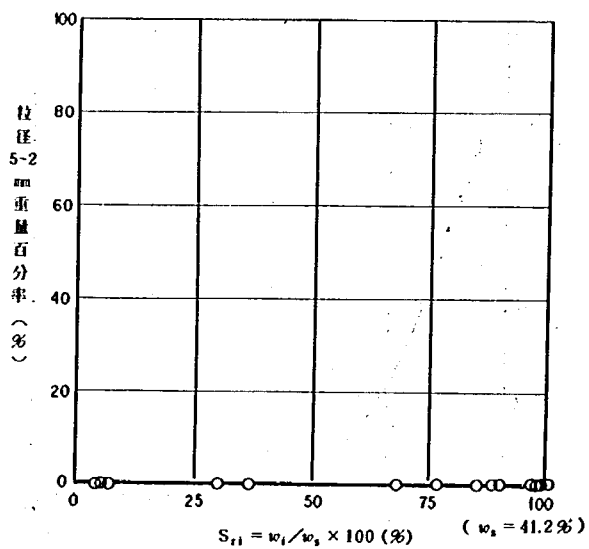
図-15(2) 初期飽和度と崩壊粒度<N>



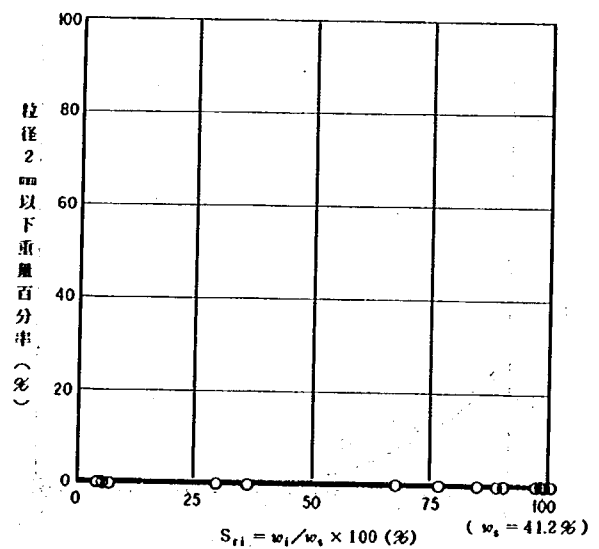
(O) 浅瀬石川・I ①



(O) 浅瀬石川・I ②

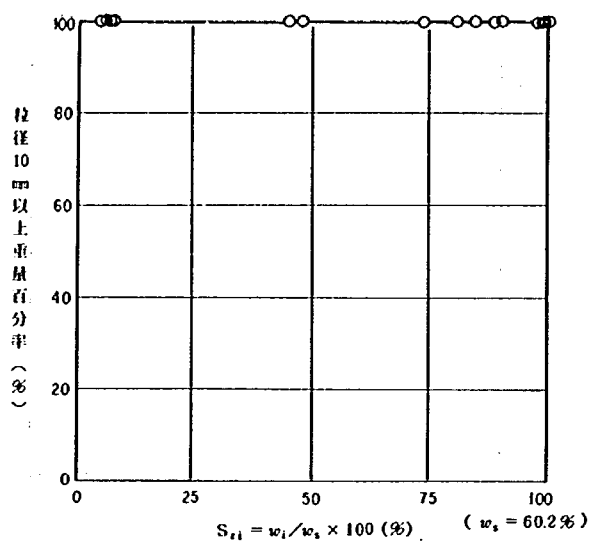


(O) 浅瀬石川・I ③

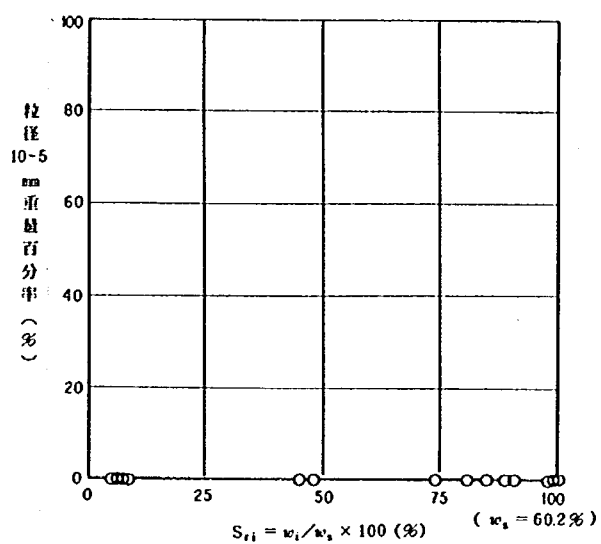


(O) 浅瀬石川・I ④

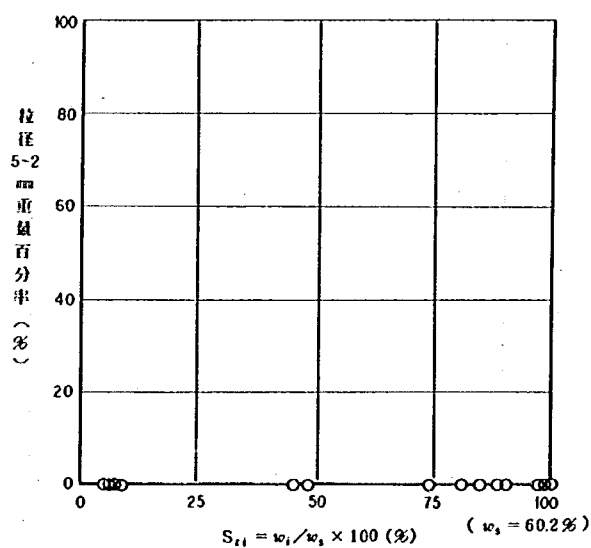
図-15(3) 初期飽和度と崩壊粒度<O>



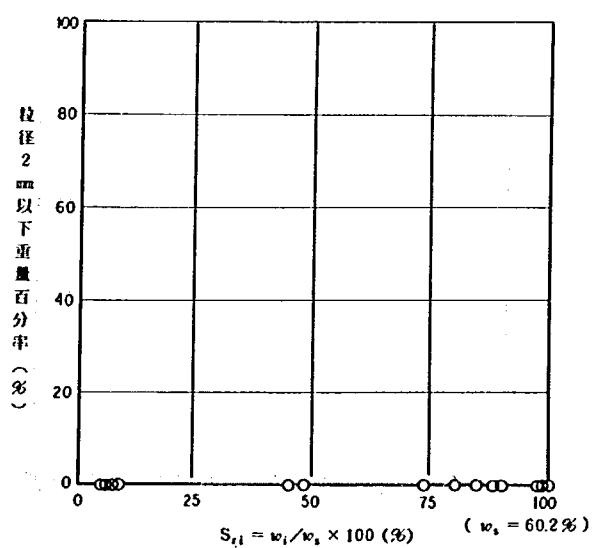
(P) 浅瀬石川・II ①



(P) 浅瀬石川・II ②

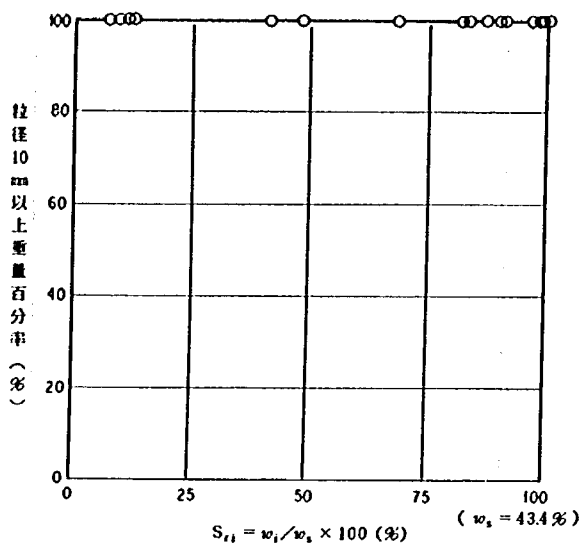


(P) 浅瀬石川・II ③

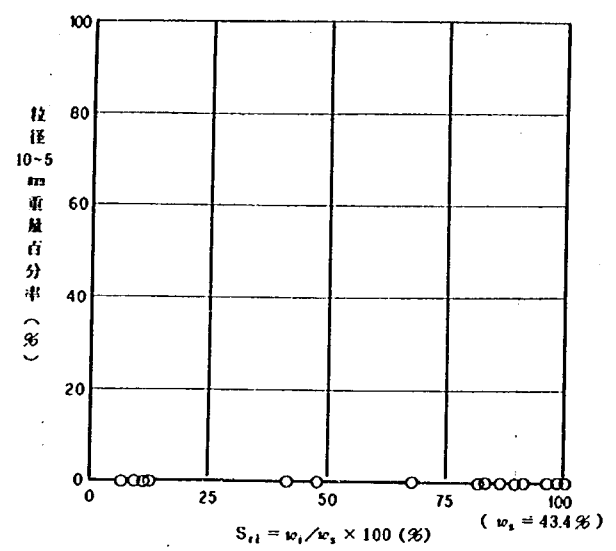


(P) 浅瀬石川・II ④

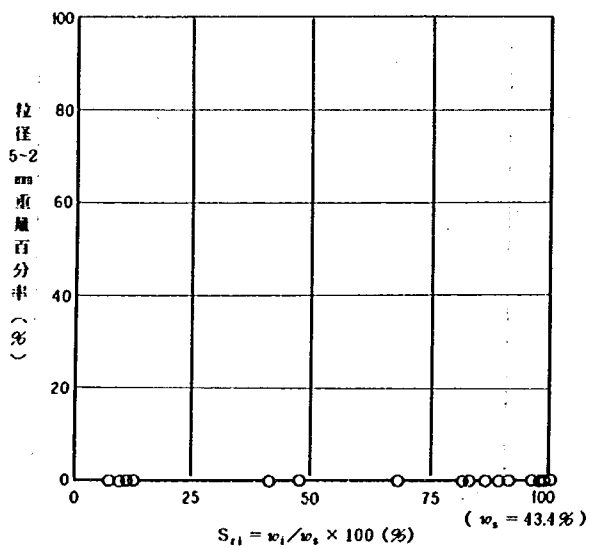
図-15(4) 初期飽和度と崩壊粒度<P>



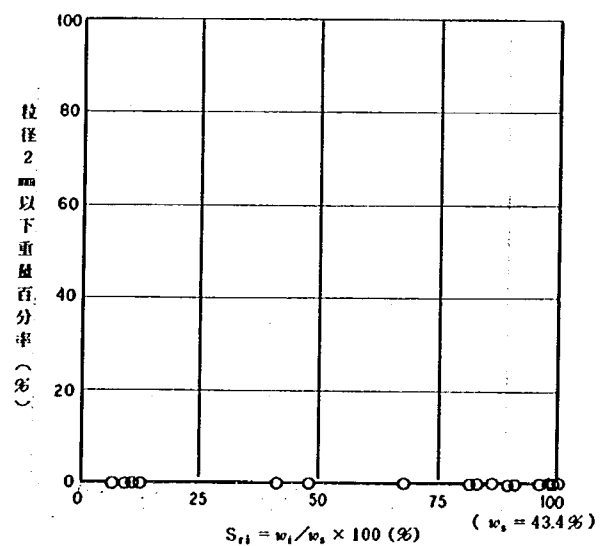
(Q) 浅瀬石川・法面 ①



(Q) 浅瀬石川・法面 ②

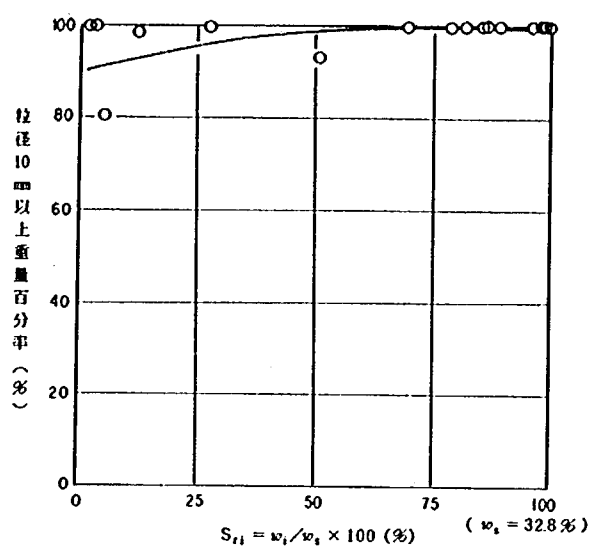


(Q) 浅瀬石川・法面 ③

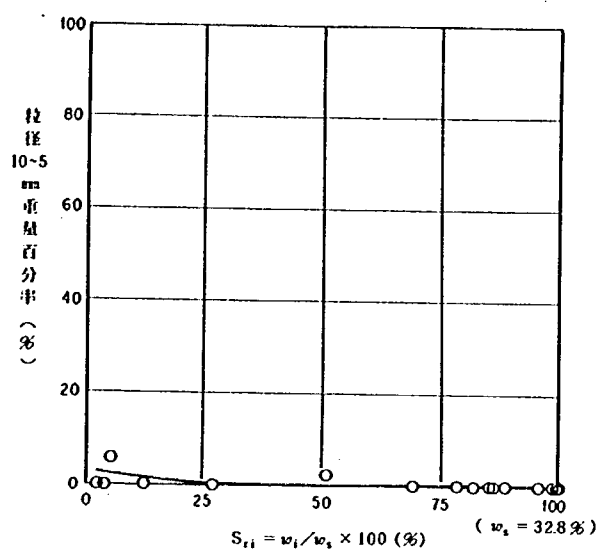


(Q) 浅瀬石川・法面 ④

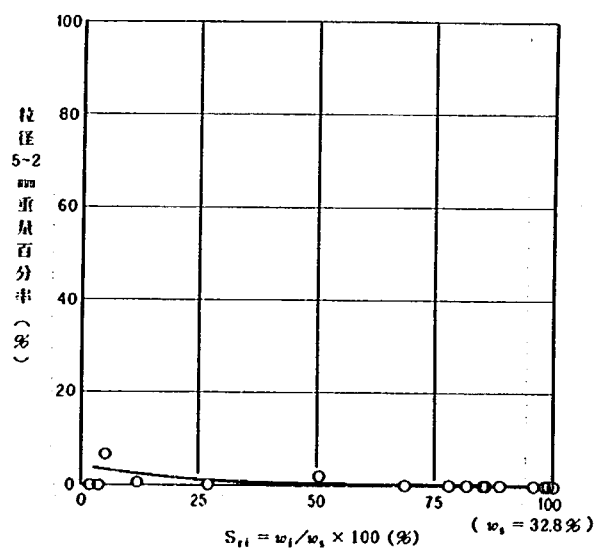
図-15(5) 初期飽和度と崩壊粒度<Q>



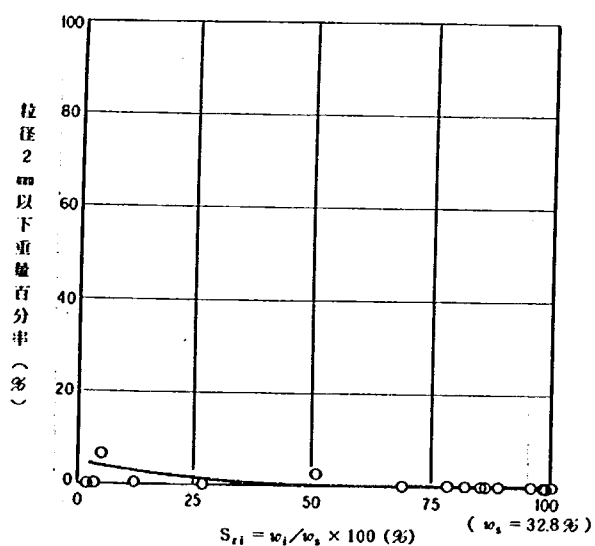
(R) 久 吉 ①



(R) 久 吉 ②

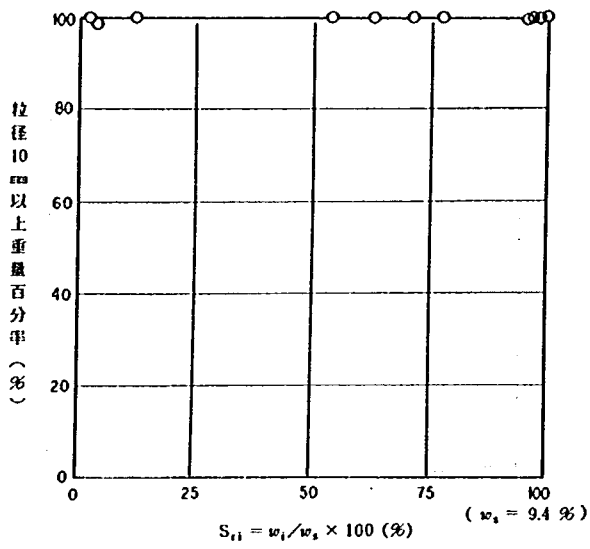


(R) 久 吉 ③

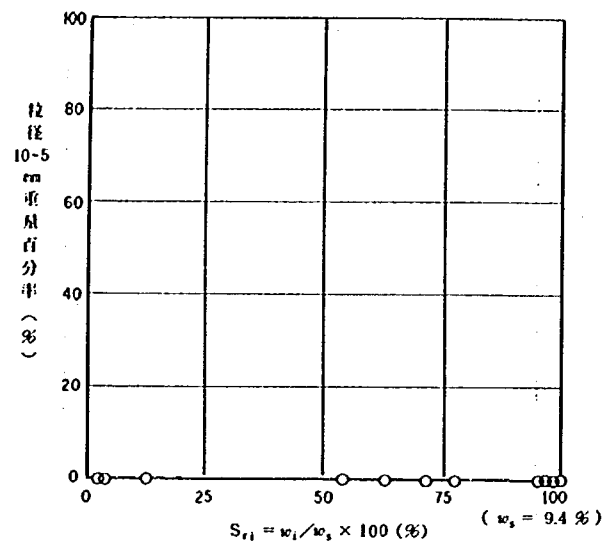


(R) 久 吉 ④

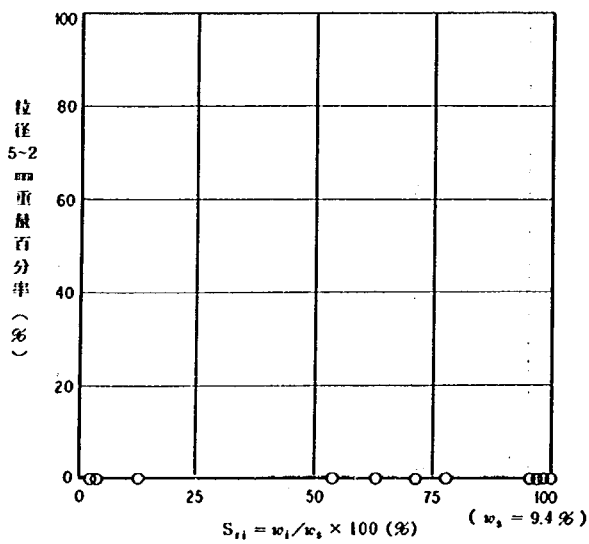
図-15(6) 初期飽和度と崩壊粒度<R>



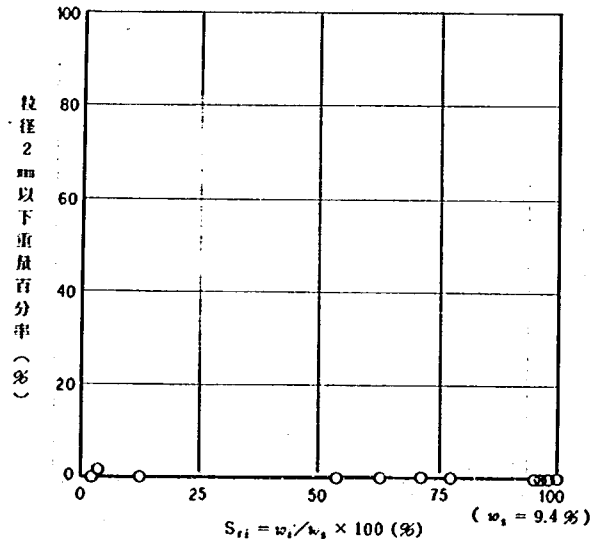
(S) 七ヶ宿 ①



(S) 七ヶ宿 ②

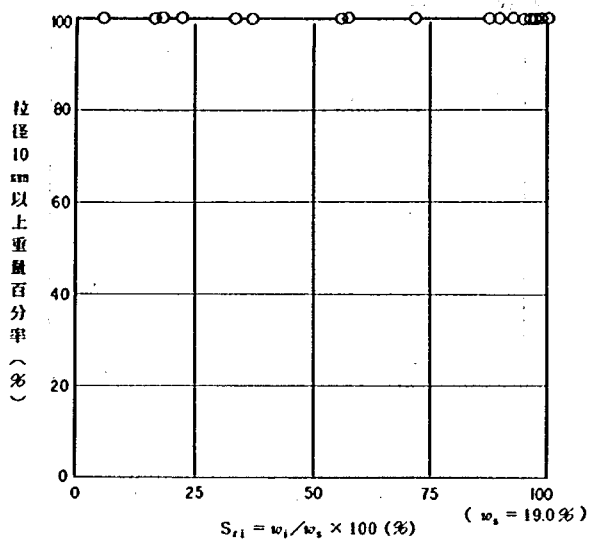


(S) 七ヶ宿 ③

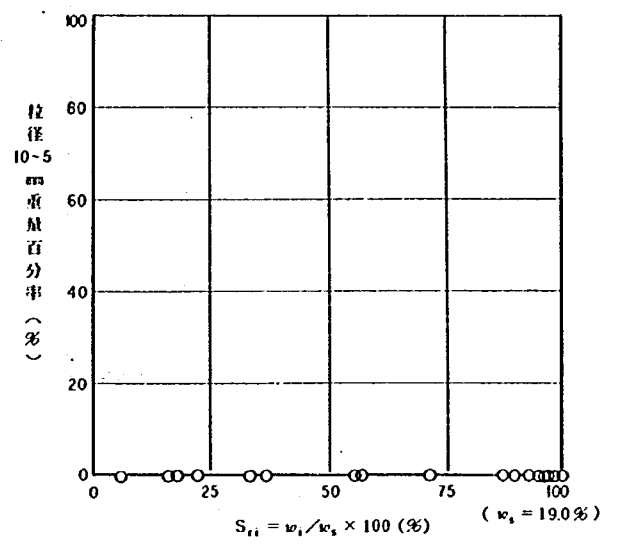


(S) 七ヶ宿 ④

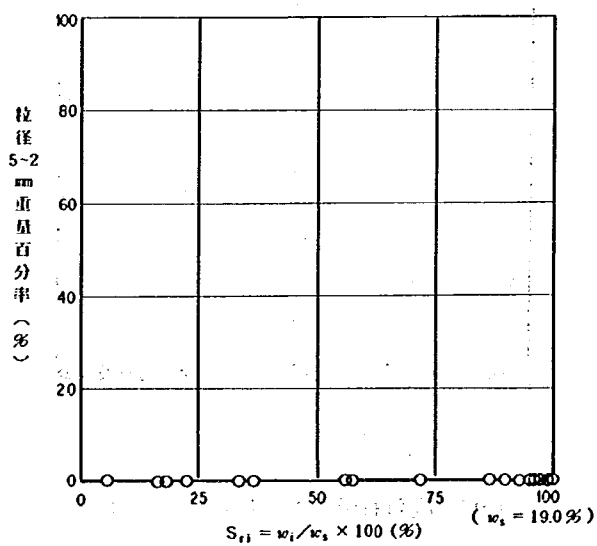
図-15(7) 初期飽和度と崩壊粒度<S>



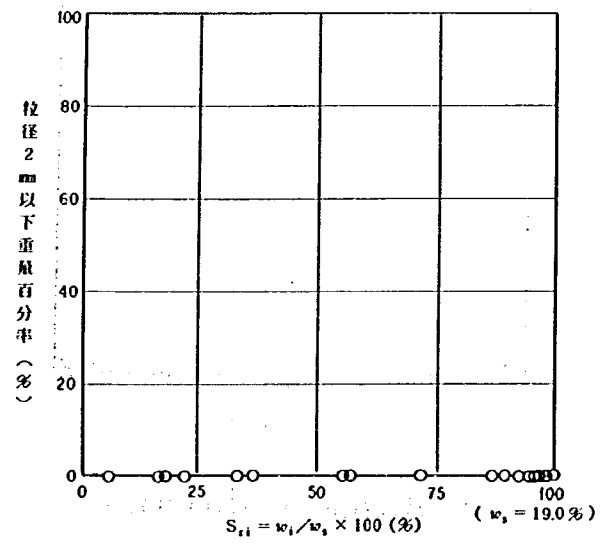
(T) 鋸 南 ①



(T) 鋸 南 ②

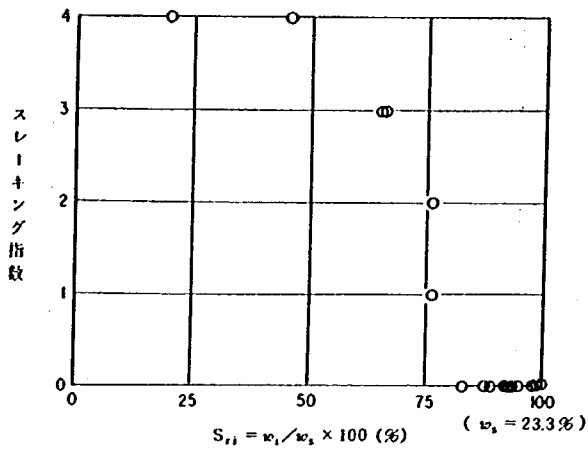


(T) 鋸 南 ③

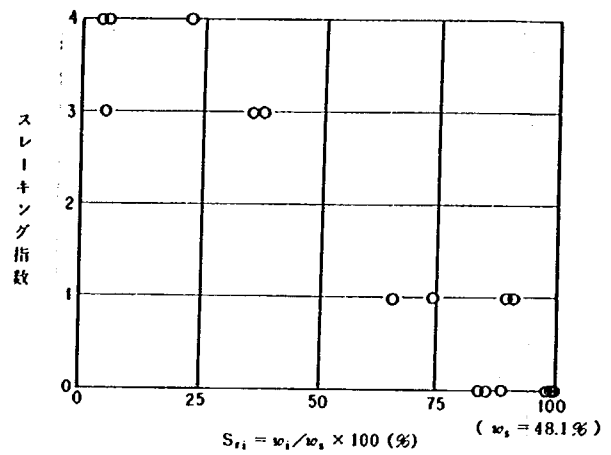


(T) 鋸 南 ④

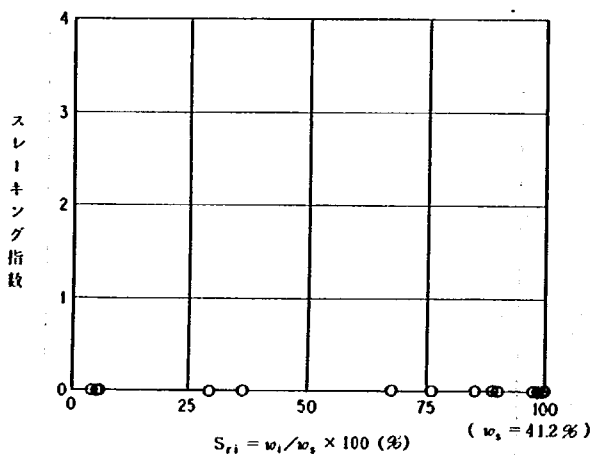
図-15(8) 初期飽和度と崩壊粒度<T>



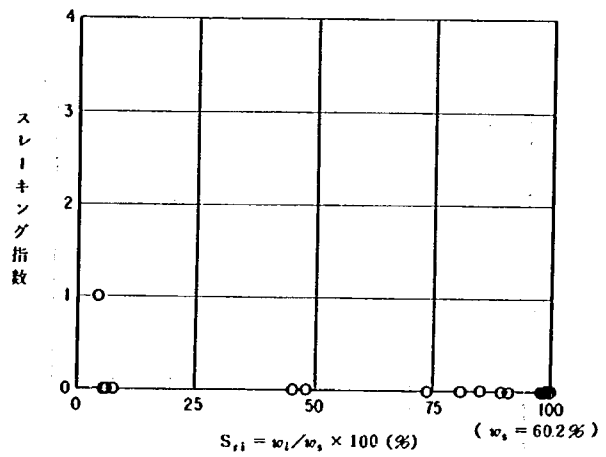
(M) 下湯(黒) <変質安山岩>



(N) 下湯(灰) <砂質凝灰岩>

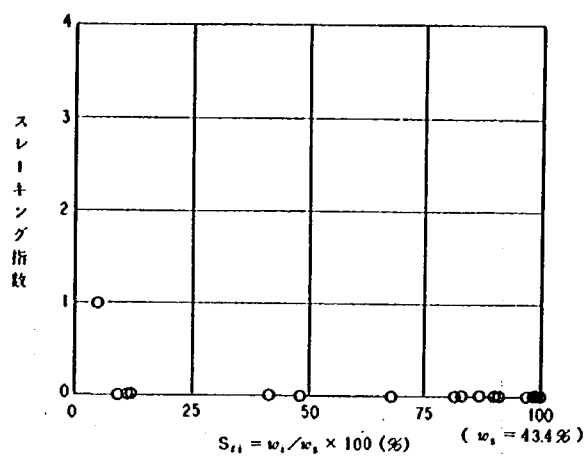


(O) 浅瀬石川・I <砂質凝灰岩>

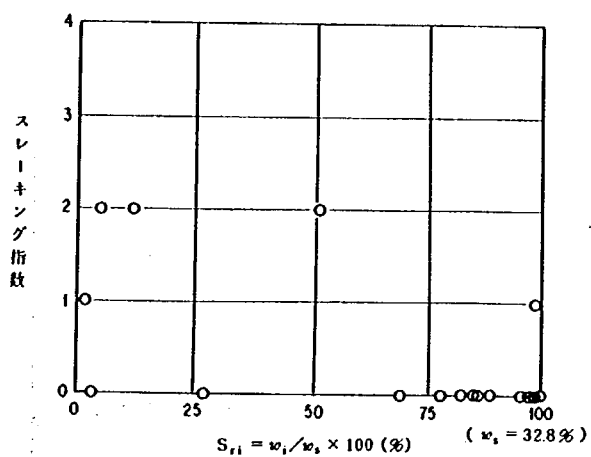


(P) 浅瀬石川・II <軽石質凝灰岩>

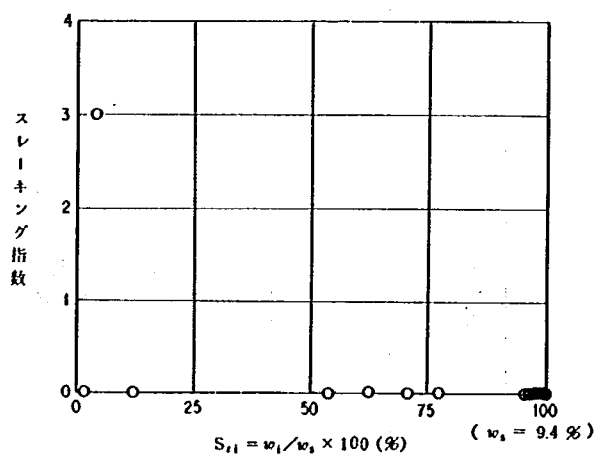
図-16(1) 初期飽和度とスレーキング指数



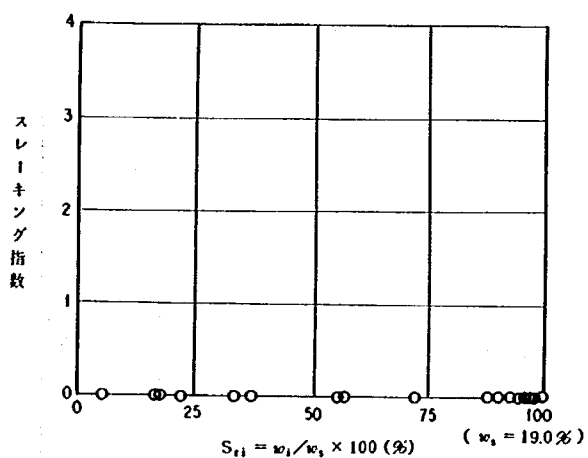
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩(変質)>

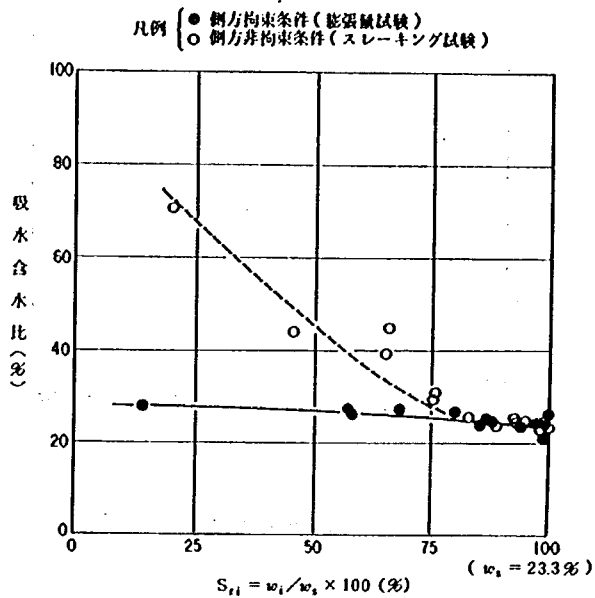


(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>

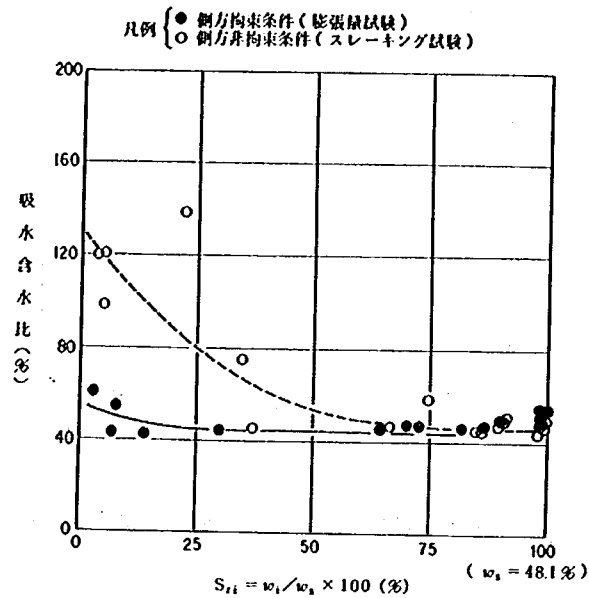


(T) 鋸南<泥質砂岩>

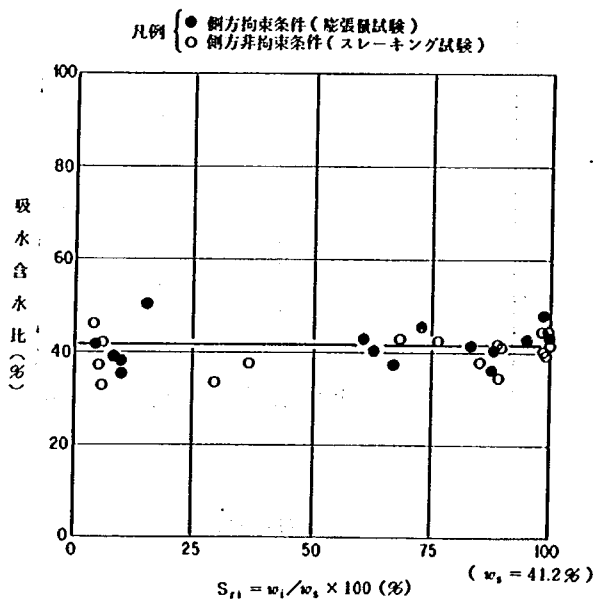
図-16(2) 初期飽和度とスレーキング指数



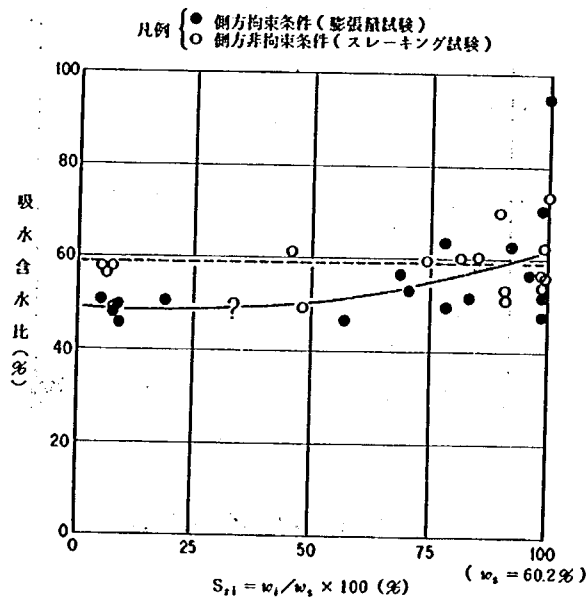
(M) 下湯 (黒) <変質安山岩>



(N) 下湯 (灰) <砂質凝灰岩>

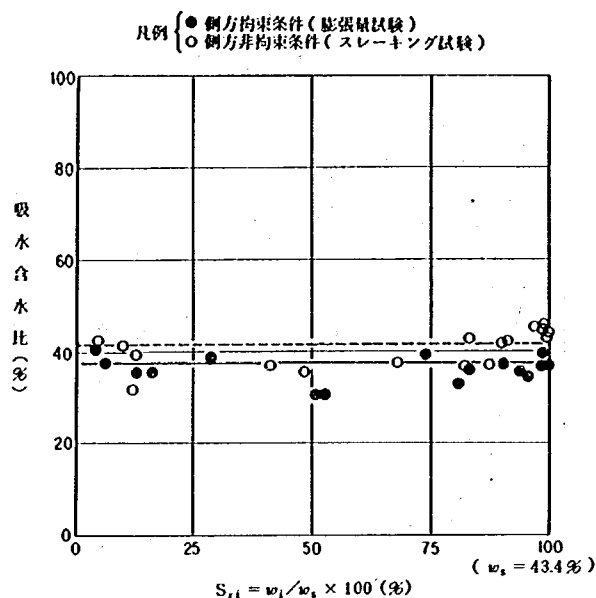


(O) 浅瀬石川・I <砂質凝灰岩>

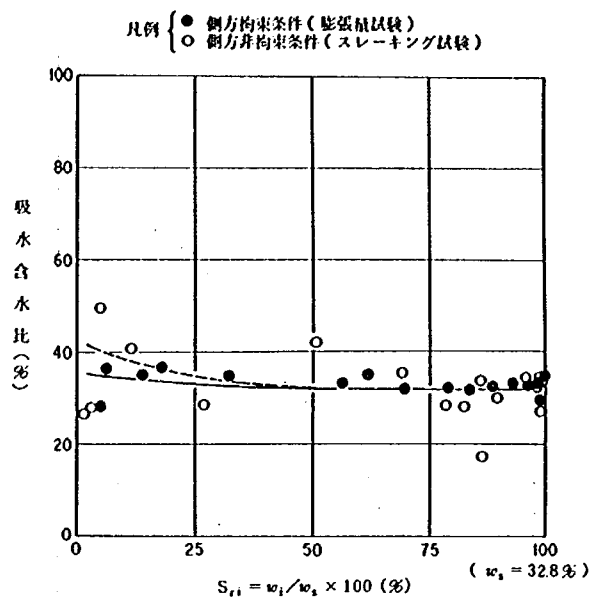


(P) 浅瀬石川・II <軽石質凝灰岩>

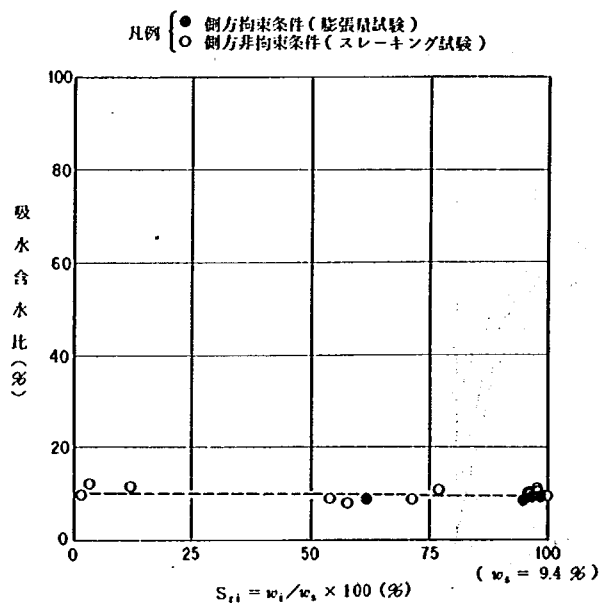
図-17(1) 初期飽和度と吸水含水比



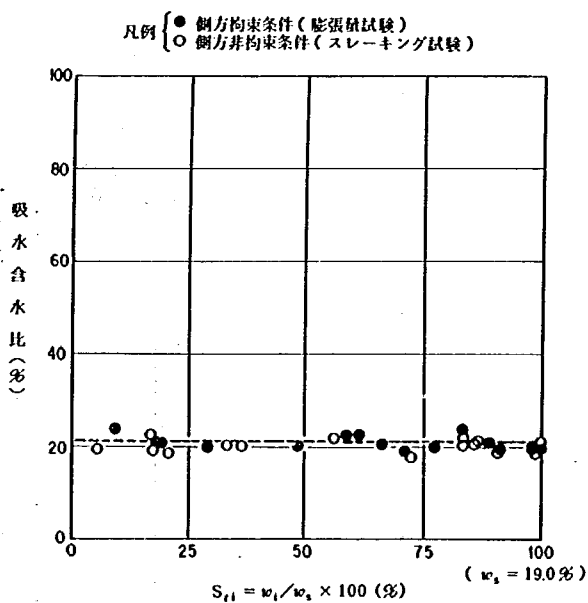
(Q) 浅瀬石川・法面<軽石質凝灰岩>



(R) 久吉<細粒凝灰岩 (変質)>



(S) 七ヶ宿<礫質凝灰岩>



(T) 鋸南<泥質砂岩>

図-17(2) 初期飽和度と吸水含水比

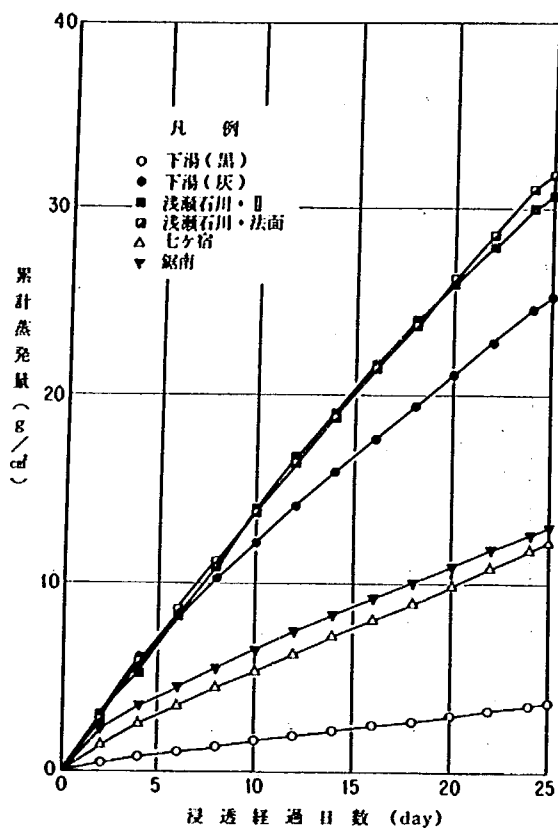


図-18 累計蒸発量曲線

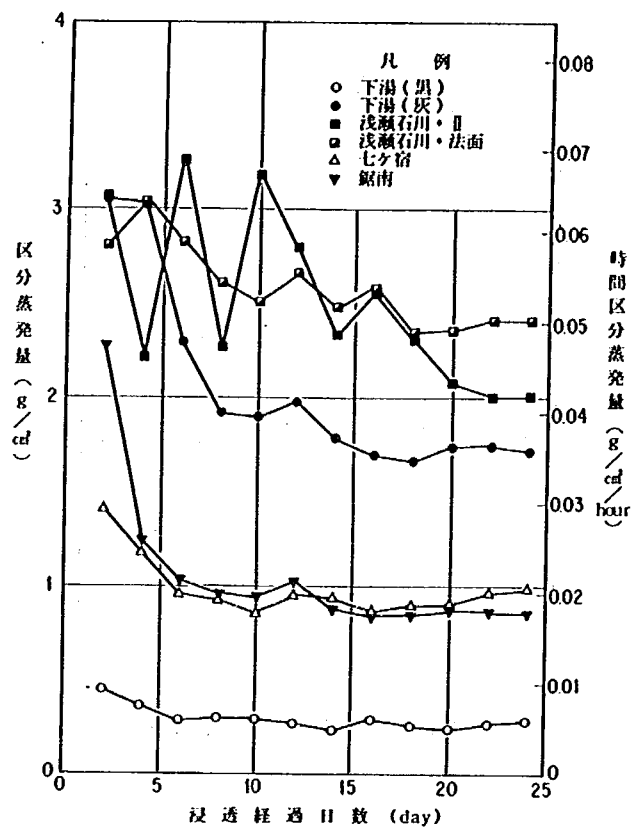


図-19 区分蒸発量曲線

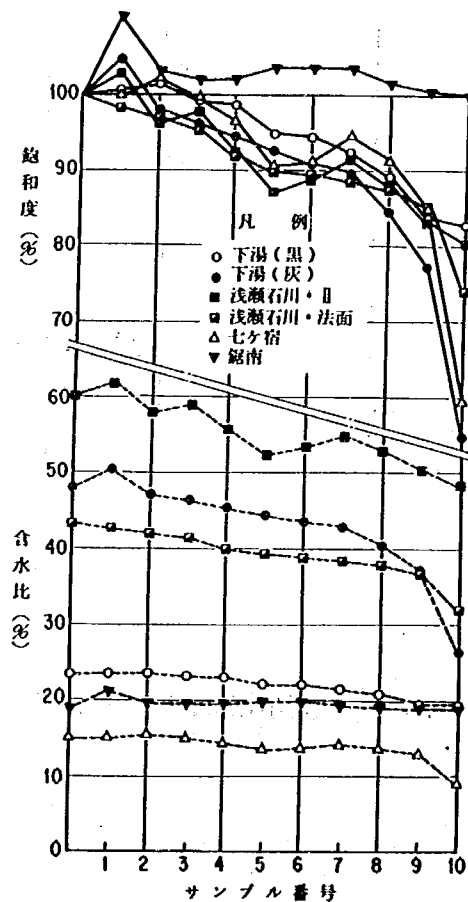
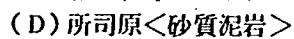


図-20 25日経過後の含水比・飽和度分布



吸水含 水 比 (%)	膨 張 壓 (kgf / cm²)
12	8.2
15	9.2
15	7.0
16	3.5
18	4.4
18	0.8
20	1.5
21	0.7
22	0.3
23	0.1
25	0.0

(D) 所司原<砂質泥岩>

図-21(b) 膨張圧試験結果

5. 考 察

膨張量・スレーキング試験によって得られた結果を相互に比較すると次のようなことがわかる。

膨張率(図-12)・クラック密度(図-14)・スレーキング指数(図-16)・吸水含水比(図-17)は互いに密接に関わっており、これらの指標が増大を開始するところの初期飽和度は概ね一致する。また、スレーキング指数とクラック密度・吸水含水比には、ある程度の相関もあると考えられる。

浸透能試験の結果とスレーキング試験結果を比較すると次のようなことがいえる。

(N)下湯(灰)がスレーキング試験(図-14・15・16)によって崩壊を開始するのは初期飽和度 S_{ri} が 83 % 以下に低下した時である。すなわち、浸透能試験における(N)下湯(灰)の供試体を再度水浸すると、乾燥側から 2 cm 程度が容易に崩壊するであろうと予想される。同様に(M)下湯(黒)をみると先端が崩壊するか否かというところであろう。

収縮率(図-11)と膨張率(図-12)を比較すると、収縮率にはばらつきが大きく正確には比例はしないが、全体的には収縮率の大きいものが膨張率も大きい。

図-21(a)・(b)の膨張圧と吸水含水比を比較すると次のようなことが考えられる。膨張圧の発生は、飽和状態から乾燥した供試体が、乾燥収縮した分膨張しようとして起こる。したがって、初期飽和度 S_{ri} が 0 % に近い供試体ほど収縮量が大きいので膨張圧も大きいことになる。しかし、もとの大きさに戻ろうとしても押えつけられてしまう試験機の機構が原因となって戻ることができず、体積の回復がない。だから吸水含水比がもとの飽和含水比 w_s までに至らないことになると思われる。

同様に図-12に示された膨張率と図-17の吸水含水比の(M)下湯(黒)について考えると、膨張率は比較的大きいのにその時の吸水含水比は飽和含水比 w_s とはほぼ変りない。このことは膨張量試験の側方拘束が供試体の自由な膨張に少なからず影響していることを表わしている。

吸水含水比は、スレーキングを起こす時の供試体形状に大きく関わることをわかる。すなわち、スレーキング試験のほぼ“崩壊”に対して、膨張量試験では“一次元的な膨張”であり、さらに膨張圧試験では全面拘束により“膨張を許さない”という条件が吸水含水比を増加させない原因となっている。

6. ま と め

以上の試験結果をまとめると次のことがいえる。

- ① 凝灰岩等ではばらつきは大きい、収縮率の大きい岩種は膨張率も大きい。
- ② 吸水含水比は供試体の見かけの体積と密接に関わる。吸水含水比は、膨張量試験（側方拘束条件）の数%の膨張率ではほとんど飽和含水比 w_s で変化しないが、膨張率が数十%になると増加する傾向がある。一方スレーキング試験で崩壊まで至ったものは吸水含水比が大きい。
- ③ 膨張率・吸水含水比は、視覚的な指標で変化ない微小な劣化の程度も表わせる利点がある。
- ④ クラック密度は、著しい劣化を生じ泥状化した岩種を表現しにくい。
- ⑤ 崩壊試料の粒度分布として用いたふるい分けは、粒径分類という定量的な方法で表現するので、視覚的な指標に比べて精度は良い。しかし、岩石を構成する鉱物粒子の径の大小で異なることと、小さな劣化（例えば $\phi 5$ cmの供試体にクラック1本というような）に対して適用しにくい。
- ⑥ スレーキング指数は劣化を定性的に表現するには簡便で良い。小さな劣化に対しても適用できる。しかし、礫を含む岩種では最大限に劣化しても“指数4”の泥状化には至らないこともある。
- ⑦ 浸透能試験と膨張量・スレーキング試験の組み合わせにより、実際の現場の法面等の浸食量等が予測できる可能性がある。
- ⑧ 膨張圧は収縮率と密接に関わる。膨張圧は乾燥収縮した供試体が元の飽和状態の寸法に戻ろうとする時発生するものである。したがって乾燥収縮しないものは膨張圧も発生しない。

スレーキングを起こす岩種において、膨張率・吸水含水比・スレーキング指数・クラック密度・崩壊試料の細粒化は、初期飽和度 S_{ri} の低下に伴って増大する傾向にある。岩種毎のスレーキング特性を把握し、著しい劣化の進行を妨げるには、指標が立ち上りを示す点の飽和度 S_r を把握する必要があることは前報告（土研資料第1930号）でも述べたとおりである。したがって、今回用いた8岩種では（M）下湯（黒）と（N）下湯（灰）を飽和度およそ83%以下に低下しなければ、著しい劣化は起こらないといえる。

今回用いた岩種は凝灰岩が大部分であった。凝灰岩は特に礫まじり等であると、供試体毎に微妙に性質が異なってしまう可能性が多く、ばらつきが大きくなり、スレーキング指標に一定の傾向がつかめないこともある。この種の岩を試験するには、試験数を多くするなどの工夫が必要である。

謝 辭

本資料をまとめるにあたり、試料採取および既存資料の提供において多大な御協力をいただいた各ダム関係各位に心からお礼申し上げる。

軟岩の吸水劣化試験(その2)

ISSN0386-5878

土研資料 第2067号

昭和59年3月(1984)

桑原啓三・平野 勇・神保 悟

キーワード:スレーキング, 軟岩, 吸水劣化, 膨張

要 旨

第三紀以降の軟岩を供試体として吸水劣化試験等を行い, スレーキング現象を定量的に把握するための試験方法の検討を行った。



