

I S S N 0386—5878
土 研 資 料 第 1620 号

土 木 研 究 所 資 料

七ヶ宿ダム岩石材料耐久性試験（その1）

昭和55年12月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

Copyright © (1980) Fiscalyear by P.W.R.I.

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

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

ま え が き

七ヶ宿ダムは宮城県阿武隈水系白石川に洪水調節、かんがい、都市用水の確保等を目的として計画されている高さ93m、総貯水量1.09億 m^3 のロックフィルダムである。当ダムでは設計値を得るため堤体材料に関する調査試験を実施中であるがこの報告書は東北地方建設局七ヶ宿ダム工事事務所の依頼により、ロック材料およびリップラップ材料として予定の岩石について凍結融解試験を中心とした各種材料試験を行なった結果について報告するものである。

昭和55年12月

建設省土木研究所地質化学部

地質研究室	室長	菅原	捷
研究員		中村	康夫
		加藤	則男
		石塚	克巳

目 次

ま え が き

1. 試 験 目 的	1
2. 試 験 概 要	1
3. 供 試 体	3
4. 試 験 結 果	4
4. 1 物理・力学試験結果	4
4. 2 X線回折試験結果	17
4. 3 強熱減量試験結果	18
4. 4 耐久性試験結果	18
5. 考 察	22
5. 1 重量損失の経時変化	22
5. 2 吸水率，乾燥密度の経時変化	24
5. 3 動弾性係数の経時変化	27
5. 4 ショア硬度の経時変化	33
5. 5 各種物理・力学量の初期値と耐久性の関連	34
附 図	37
附 録 写 真	97

1. 試験目的

原石山（野沢倉山）の流紋岩およびダム軸左岸（洪水吐掘削すり）の石英安山岩より採取された供試体について凍結融解試験を中心とした各種材料試験を行ない耐久性を調査することによって同岩石のロック材およびリップラップ材としての適用性を検討することを目的とした。

2. 試験概要

土木研究所地質研究室所有の全自動三槽独立制御型凍結融解風化試験装置を使用し、岩石供試体の凍結融解を所定のプログラムに従って繰返し、各種物理量の経時変化を測定した。さらに初期状態において、各種物理、力学試験を実施し、それらの量と岩石の耐久性について検討を加えるとともに、薬液による安定性試験および曝露試験を行なった。主な試験項目は次のとおりである。

1) 密度、有効間隙率、吸水率試験

建設省土木試験基準（案）（以下KDKと略す）S0501-1968岩石の密度、含水比、飽和度、有効間隙率、吸水率試験方法の規定に準拠した。

2) ショア硬度試験

KDK第5章岩石 ショア硬度試験 の規定に準拠し、D型のショア硬度試験機を使用した。1供試体につき100点の打撃を行ない、平均値、標準偏差、歪度、尖度等を求めた。ただし、SR-I、SR-IIは表面の凹凸が激しいので、良好な部分のみを20回打撃しその平均値を求めた。なお、歪度、尖度は次式で示され、それぞれ分布のかたより、集中度を表わす。

$$\text{歪度} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n} / s^3$$

$$\text{尖度} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{n} / s^4$$

ただし、 x_i : 測定値

n : 測定個数

$\bar{x}$: 平均値

s : 標準偏差

3) 共振法による動弾性係数試験

JISA1127-1958 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断係数および動ポアソン比試験方法の規定に準拠して行なった。

4) X線回折試験

下記条件下でX線粉末回折試験を実施した。試料は全岩試料で無処理である。

管 球	Cu	走査範囲	$2\theta = 4^\circ \sim 40^\circ$
フィルタ	Ni	走査速度	$2^\circ/\text{min}$

電 圧 40 KV

記録紙速度 20 mm/min

電 流 30 mA

5) 強熱減量試験

指頭にざらざらを感じなくなるまでメノウ乳鉢ですりつぶした粉末約2gを試料とし、土質工学会基準 土の強熱減量試験方法 1968に従って試験を行なった。ただし、電気マッフル炉を使用し、強熱温度は800℃、強熱時間を2時間とした。

6) 一軸圧縮試験

KDK S 0502-1968 岩石の一軸圧縮試験方法の規定に準拠した。

7) 点载荷試験

こぶし大の非整形試料を用い点载荷試験を行なった。载荷点間隔をD、破壊荷重をPとするとPoint Load Index (P.L.I.) は次式で定義される。

$$P.L.I. = \frac{P}{D^2} (Kg/cm^2)$$

8) 凍結融解試験

試験槽内の温度を自動制御できる空気循環式の凍結融解試験装置を使用し、直径5cm、長さ10cmの円柱状供試体を図-1に示すゴム容器中に水浸状態で入れ下記の条件下で試験を実施した。

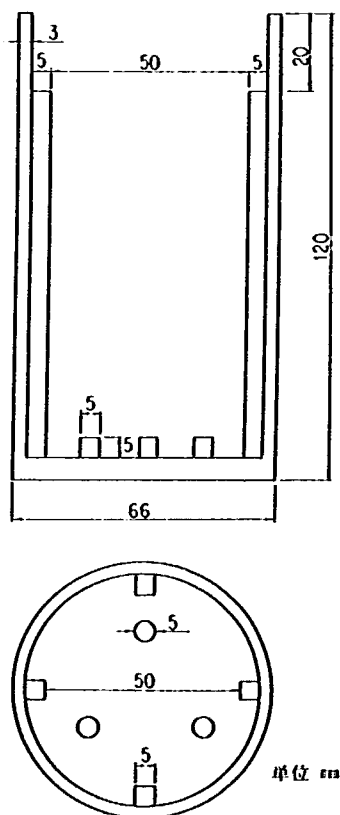


図-1 ゴム容器

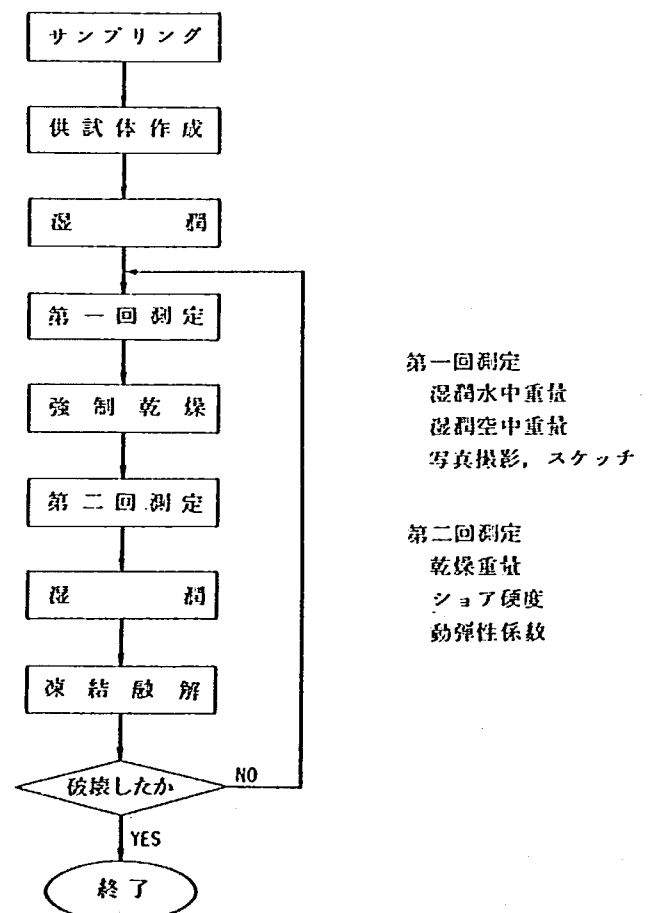


図-2 試験の流れ図

槽内最高（最低）温度	+15℃（-15℃）
温度上昇（下降）速度	30℃/時間
最高最低温度持続時間	2時間
1 サイクル当り時間	6時間
日当りサイクル数	4 サイクル

図-2 に試験の流れを、表-1 に測定項目を示す。測定は0, 12, 24, 36, 72, 108, 144, 216, 288 および 360 サイクルにおいて実施し、360 サイクルで試験終了とした。

9) 安定性試験

JIS A 1122-1976 硫酸ナ

トリウムによる骨材の安定性試験方法に準拠した。ただし薬液は硫酸ナトリウムを用い、供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱状のものとし、ゴム容器は図-1に示すものを使用した。5回の操作終了後損失重量および動弾性係数比を求めるとともに崩壊状況を記録した。

10) 曝露試験

自然環境下における劣化状況を知る

ために、凍結融解試験に用いたのと同じ形状・寸法の供試体を土木研究所屋上に排水条件下で曝露している。測定項目は、密度、吸水率、有効間隙率、ショア硬度、動弾性係数および供試体観察（写真、スケッチ）である。なお曝露試験は昭和55年度以降も継続する予定である。写真-1に試験状況を示す。

表-1 測定項目

初期測定	経時測定
供試体の記載、スケッチ	同 左
写真撮影	"
密度、有効間隙率、吸水率	" → 重量損失
ショア硬度	"
動弾性係数	"
引張強度（点荷試験）	
圧縮強度	
X線回折	
強熱減量	

3. 供 試 体

試験には野沢倉山原石山およびダム軸左岸より採取されたポーリングコアから、直径5cm、長さ10cmの円柱状供試体を作成して用いた。供試体の事務所側の分類は野沢倉山原石山の流紋岩、ダム軸左岸の石英安山岩の新鮮なものおよび風化をうけているものの計3種類であるが、土研側でそれぞれSR、SR-I、SR-IIと記号をつけた。SRは比較的緻密であるが微細なクラックが多数発達している流

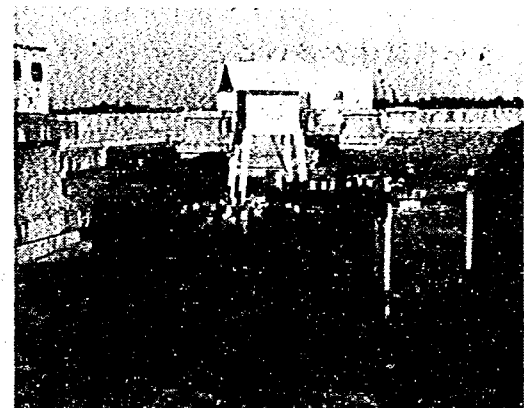


写真-1 曝露試験状況

紋岩である。SR-I、SR-II は比較的大きい石英（直径 5 mm 程度）および長石（直径 2 mm 程度）の斑晶を含んでいる石英安山岩である。図-3 は野沢倉山附近、また図-4 はダム軸左岸附近の地質平面図上に試料採取位置をプロットしたものである。また、点載荷試験用の供試体は、図-3 の試掘横坑および図-4 のボーリング孔から採取したこぶし大の非整形試料を用いた。表-2 に各種試験に用いた供試体の個数を示す。

表-2 各種試験に用いた供試体個数（個）

試験項目 供試体	凍結融解試験	一軸圧縮試験	点載荷試験	X線回折試験	安定性試験	強熱減量試験
SR	20	5	34	2	10	2
SR-I	18	9	23	2	9	2
SR-II	18	9	24	2	9	2

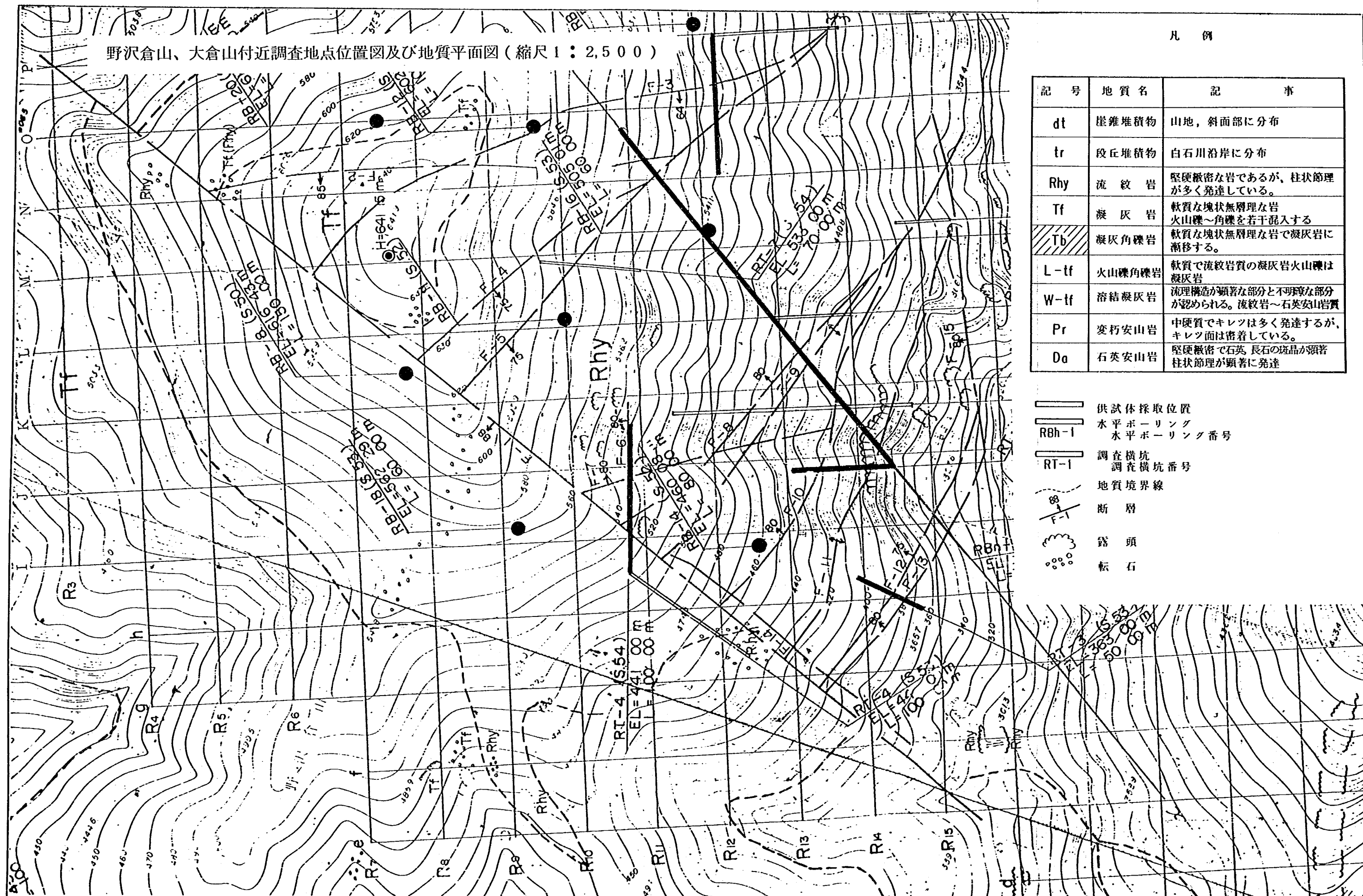
4. 試験結果

4.1. 物理・力学試験結果

図-5 はそれぞれ乾燥密度、有効間隙率、吸水率のヒストグラムを示す。同図(1)に示されるように乾燥密度に関しては、SR-II（風化）は巾の広いなめらかな分布を示し $2.29 \sim 2.34$ (g/cm^3) とかなり低い値が極大値となっている。SR-I（新鮮）も巾の広い分布であるが、やや不規則な分布を示し、極大値も 2 つ存在するが、 $2.49 \sim 2.54$ (g/cm^3) に最大値をもっている。SR は非常に分布が狭く、 $2.39 \sim 2.49$ (g/cm^3) の間にほとんど集中している。同図(2)、(3)は互いに同様な分布を示し、SR-I、SR-II、SR について乾燥密度と同様なことが言える。図-6 は動弾性係数のヒストグラムを示したものである。SR-I、II は巾の広い分布をもち、最大値も同一 ($2.50 \sim 3.05 \times 10^5 \text{ Kg}/cm^2$) であるが、SR-I の方がより偏平な分布を示し、SR-II より弾性波速度の大きい供試体が多いことを示している。SR は極めて集中性が良く、 $4.70 \sim 5.80 \times 10^5 \text{ Kg}/cm^2$ の間にほとんど分布している。図-8 は P・L・I のヒストグラムを示したものである。SR-I、II は同一の分布巾を示すが、SR-II の方がより偏平である。SR は全体に値が高く、巾広い分布を示している。

なお、一軸圧縮試験については供試体個数が少なかったのでヒストグラムには示していない。

附図-1、2 にそれぞれ一軸圧縮試験における応力-歪線図、破壊状況のスケッチを示す。



図－3 試料採取位置（地質平面図）

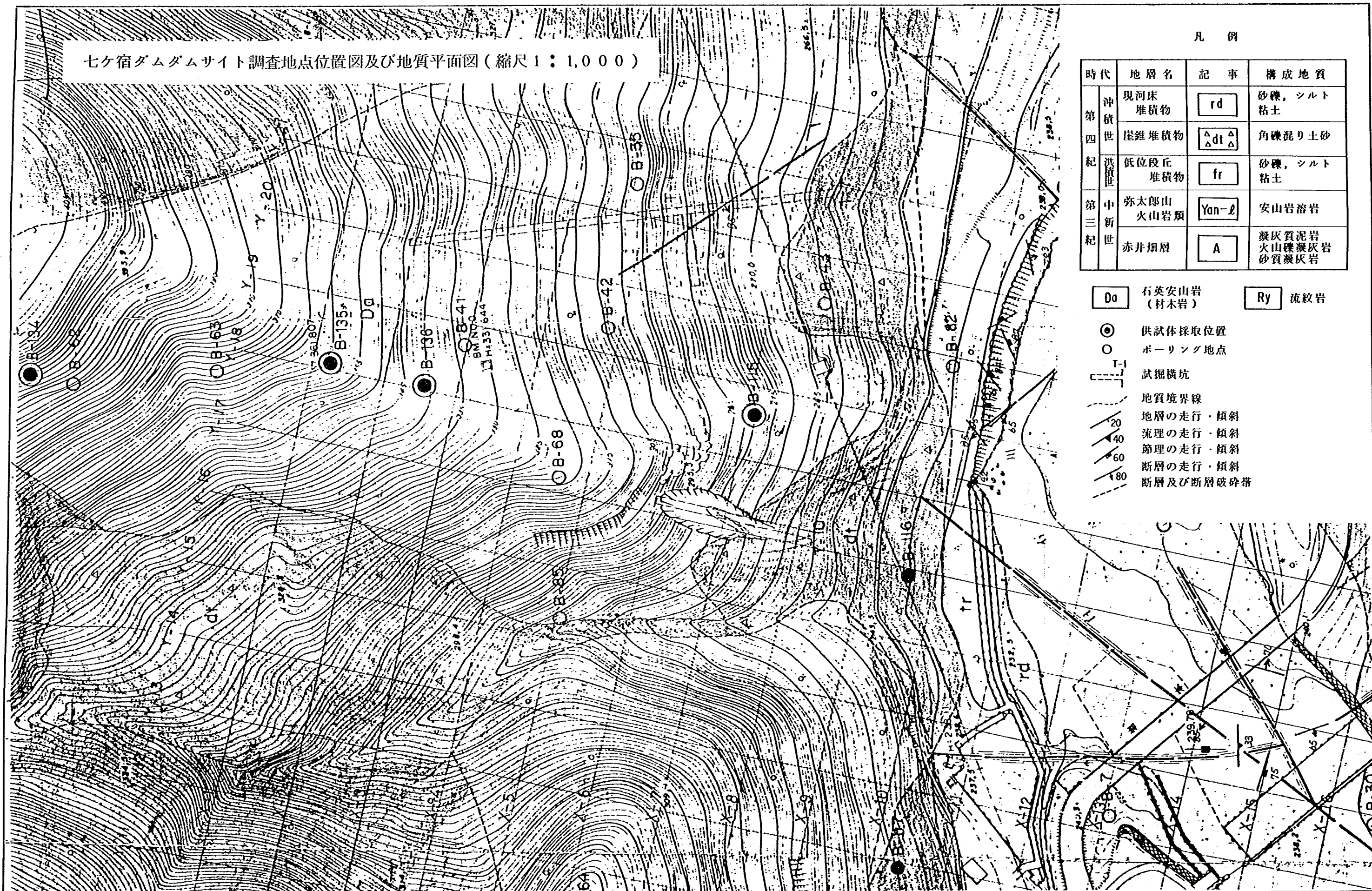


図-4 試料採取位置（地質平面図）

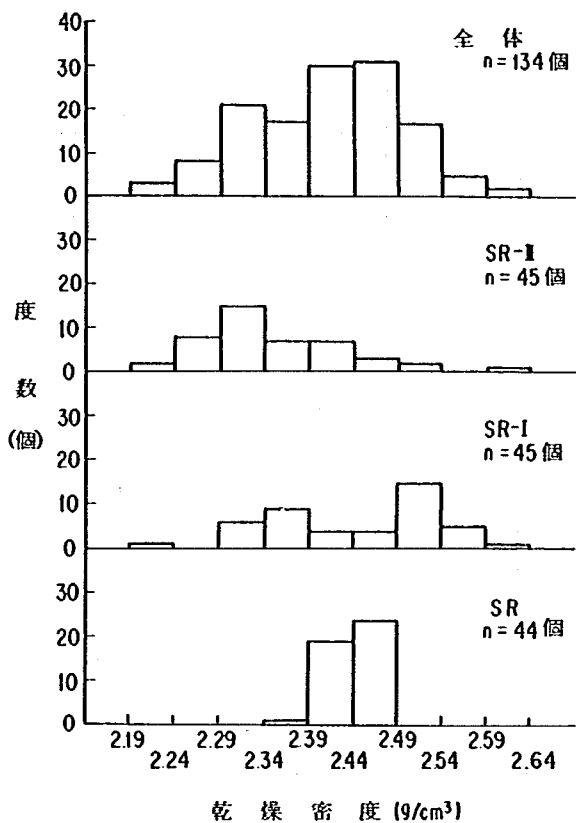


図-5 (1) 乾燥密度のヒストグラム

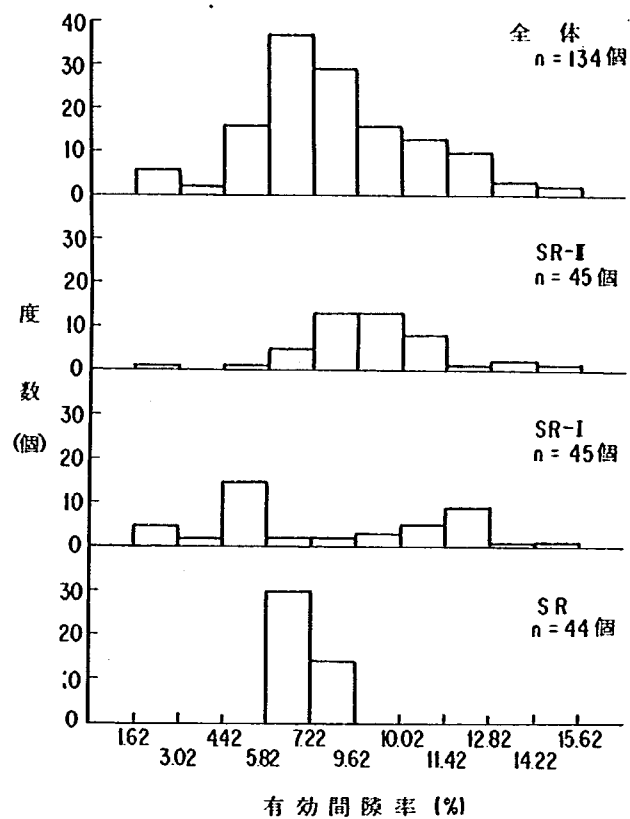


図-5 (2) 有効間隙率のヒストグラム

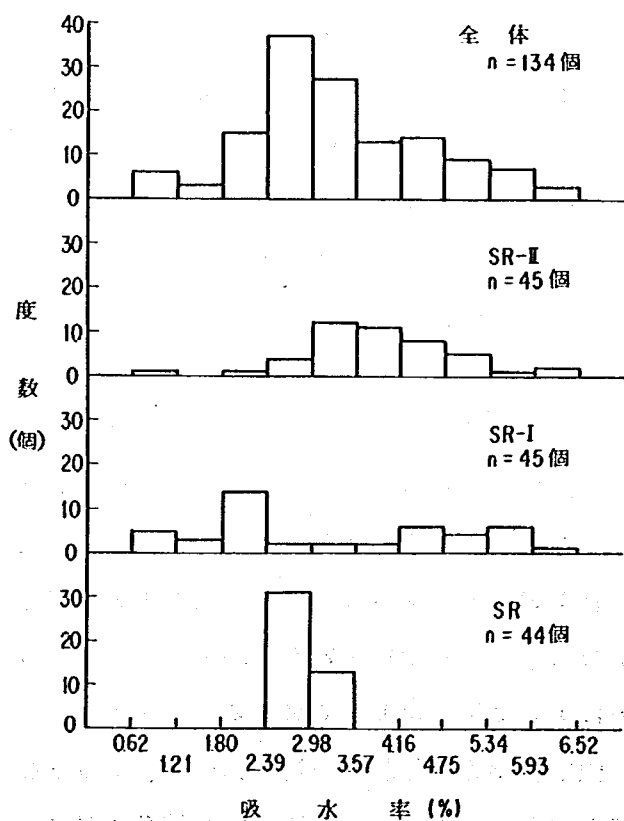


図-5 (3) 吸水率のヒストグラム

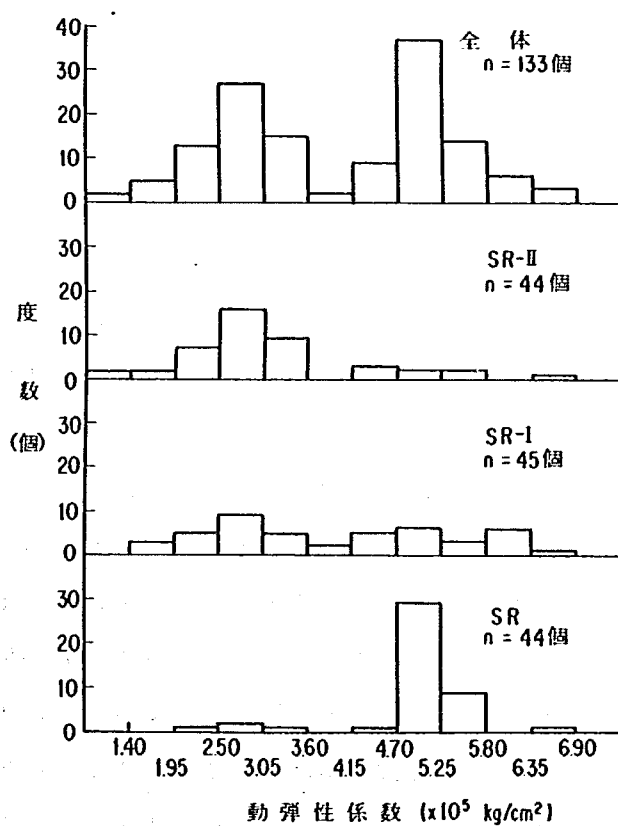


図-6 動弾性係数のヒストグラム

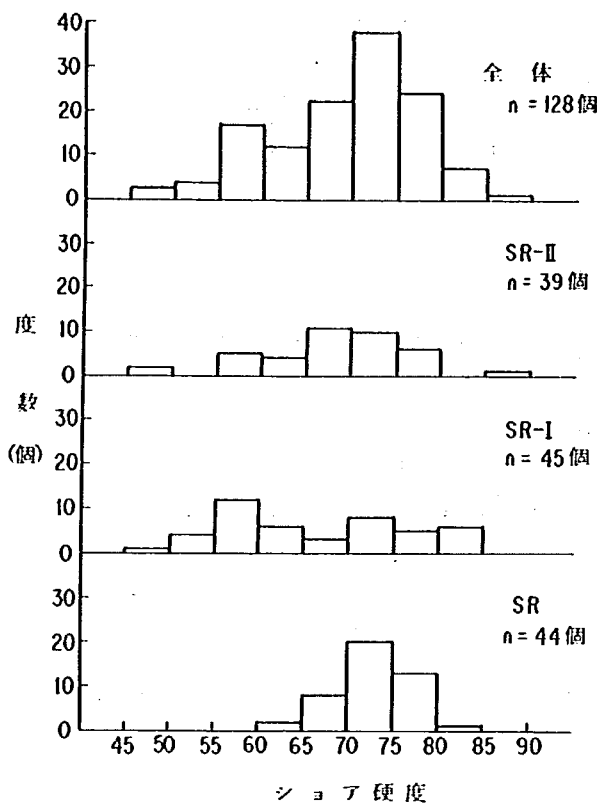


図-7 ショア硬度のヒストグラム

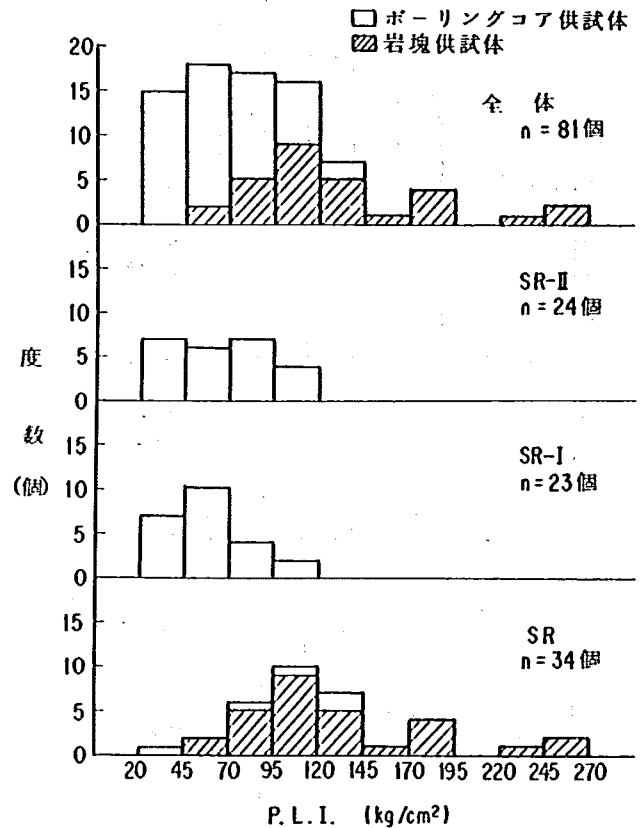


図-8 P. L. I. のヒストグラム

以上の物理、力学量の相互関係を示したのが図-9～12である。図-9は吸水率と有効間隙率の関係を示したものである。定義から明らかなように両者の間には密接な関係があるが、その分布域は供試体によって異なっている。図-10は吸水率と乾燥密度の関係を示したものである。かなり密接な関係が認められるが、SR-IIはややばらつきが大きい。図-11は吸水率と動弾性係数の関係を示したものである。同図に示されるように、SR-Iには両者の間に密接な関係が認められるが、SR-IIは非常にばらつきが大きく、SRは非常に狭い範囲に分布しており明瞭な関連を求めることは困難である。図-12は吸水率とショアの硬度の関係を示したものである。SR-IおよびSR-IIには両者の間にほぼ直線関係が認められるがSRには明瞭な関係を認めがたい。これは図-5(3)、図-7に示されるように、SRの吸水率およびショア硬度の分布が極めて狭い範囲に限定されているためであると考えられる。図-13はP.L.I.と吸水率の関係を示したものであるが、図-10と同様な傾向が認められる。この原因も吸水率の分布が狭い範囲に限定されているうえ、微細なクラックが多数発達しており、その入り方によって強度が著しく異なるためであると思われる。図-14,15,16はそれぞれ吸水率と一軸圧縮強度、動弾性係数と一軸圧縮強度、ショア硬度とP.L.I.の関係を示したものである。三者ともばらつきは大きい、ほぼ一定の関係が認められる。

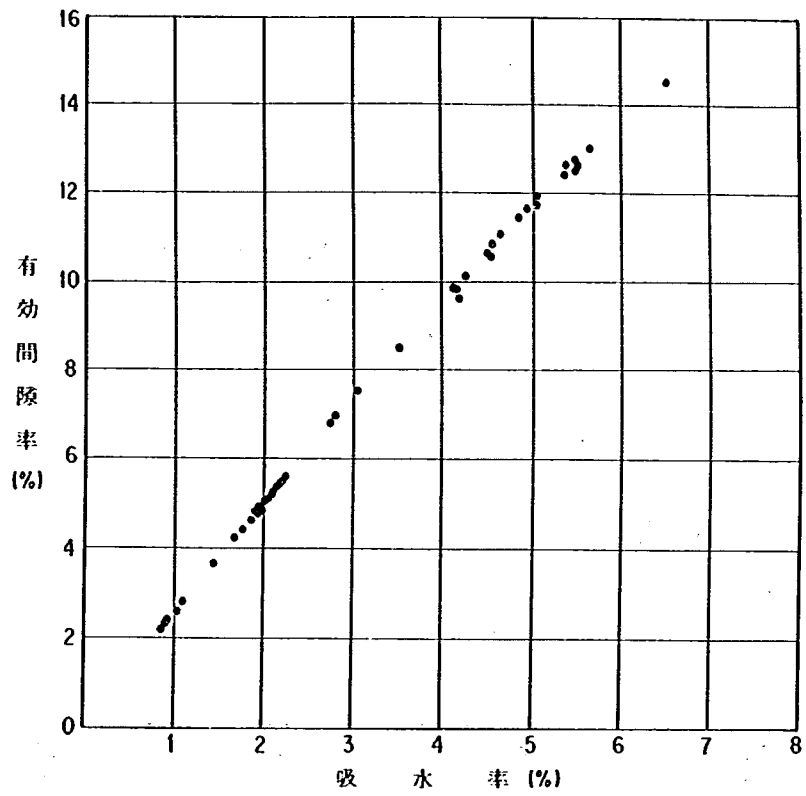


図-9 (1) 吸水率と有効間隙率の関係 (SR-I)

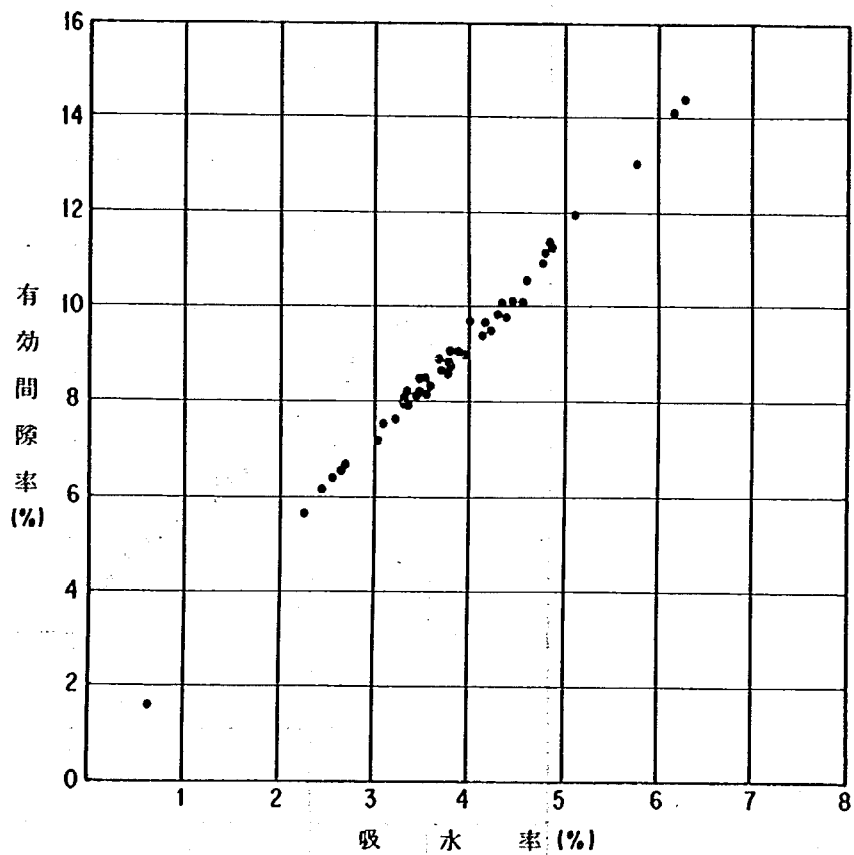


図-9 (2) 吸水率と有効間隙率の関係 (SR-II)

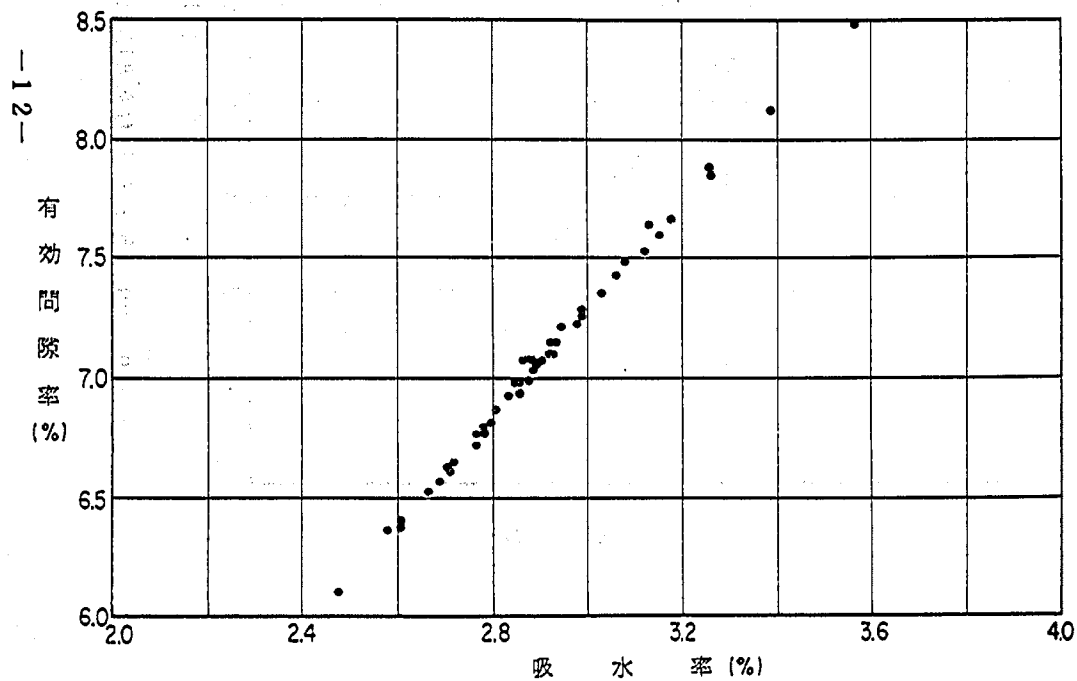


図-9 (3) 吸水率と有効間隙率の関係 (SR)

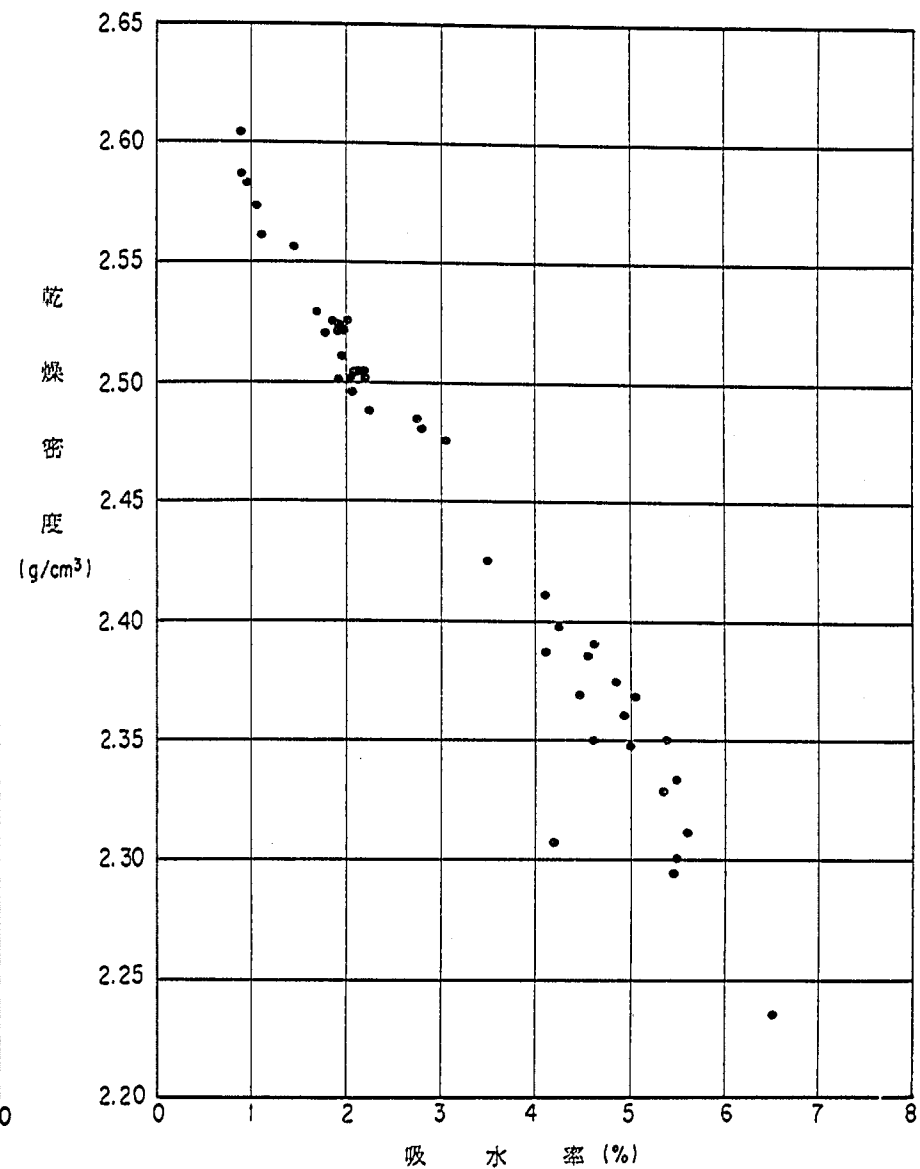


図-10 (1) 吸水率と乾燥密度の関係 (SR-I)

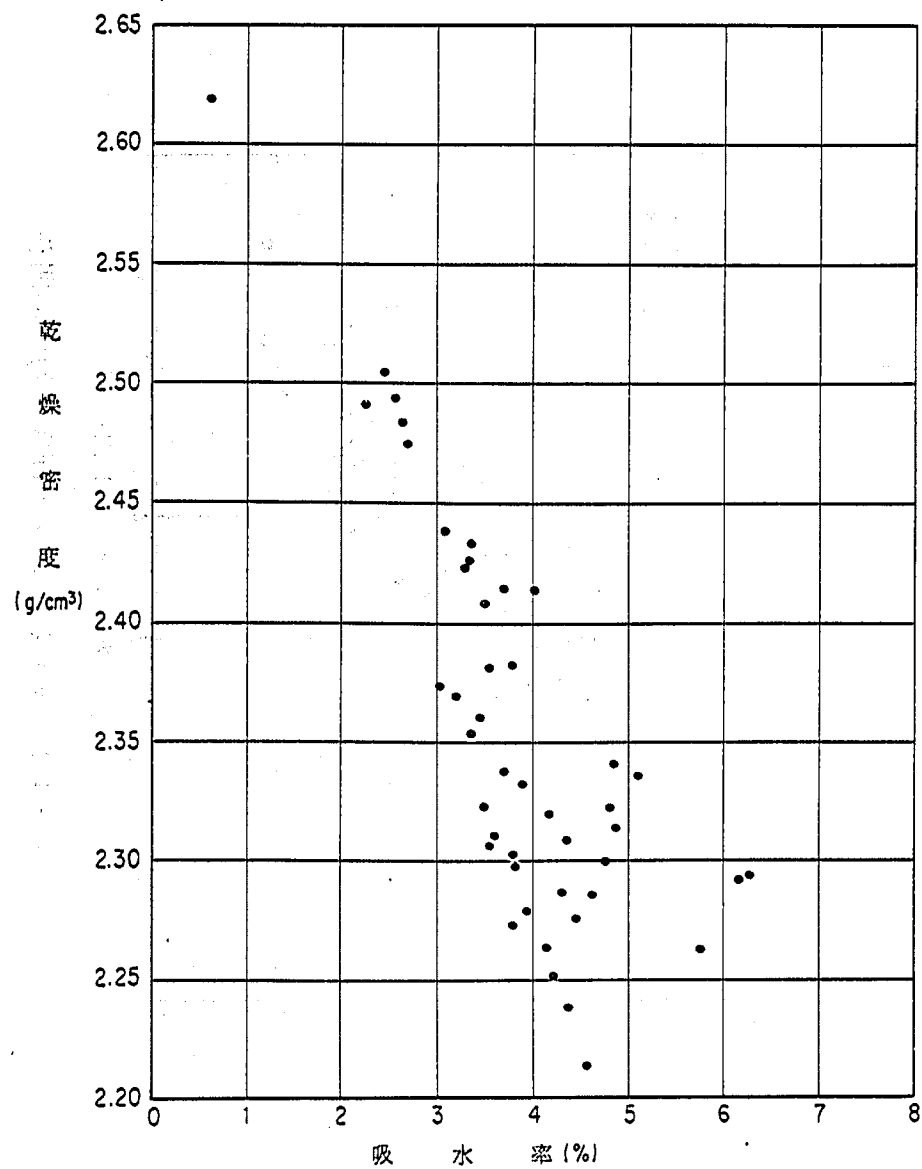
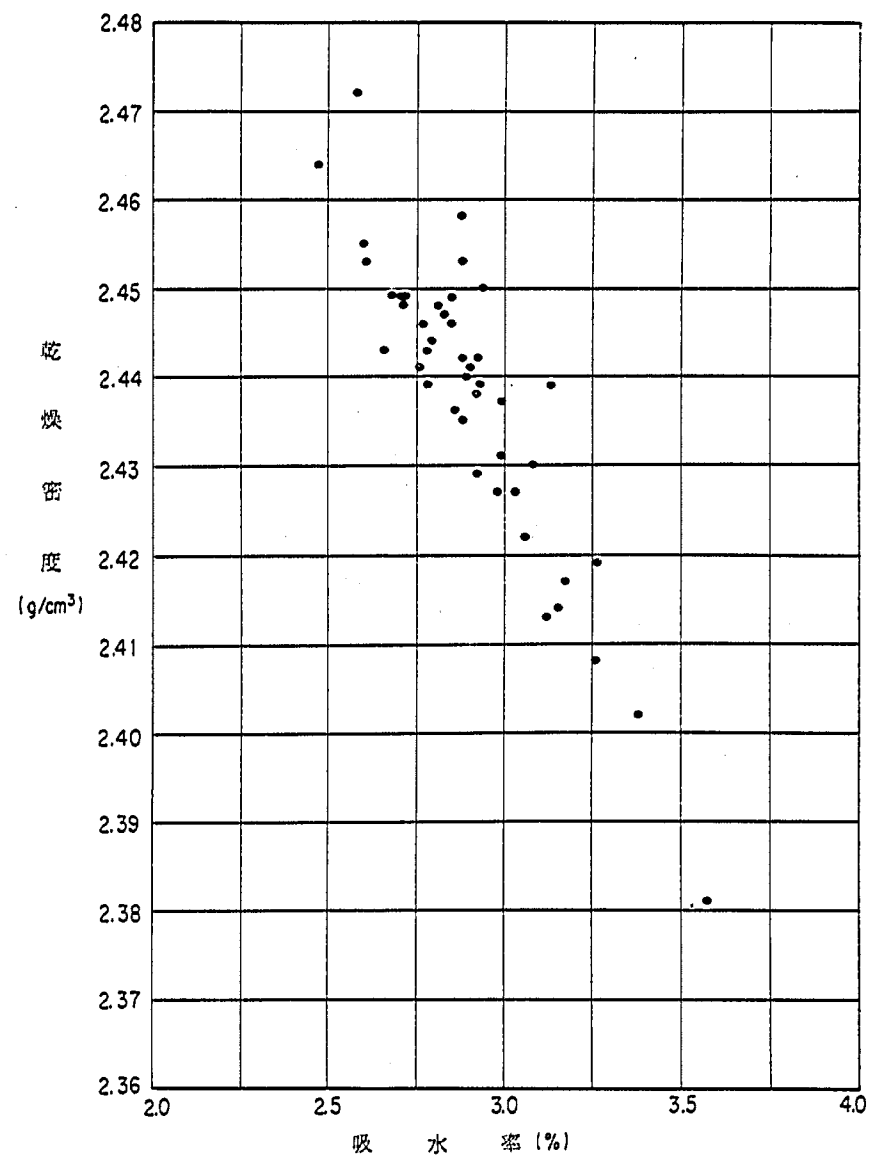
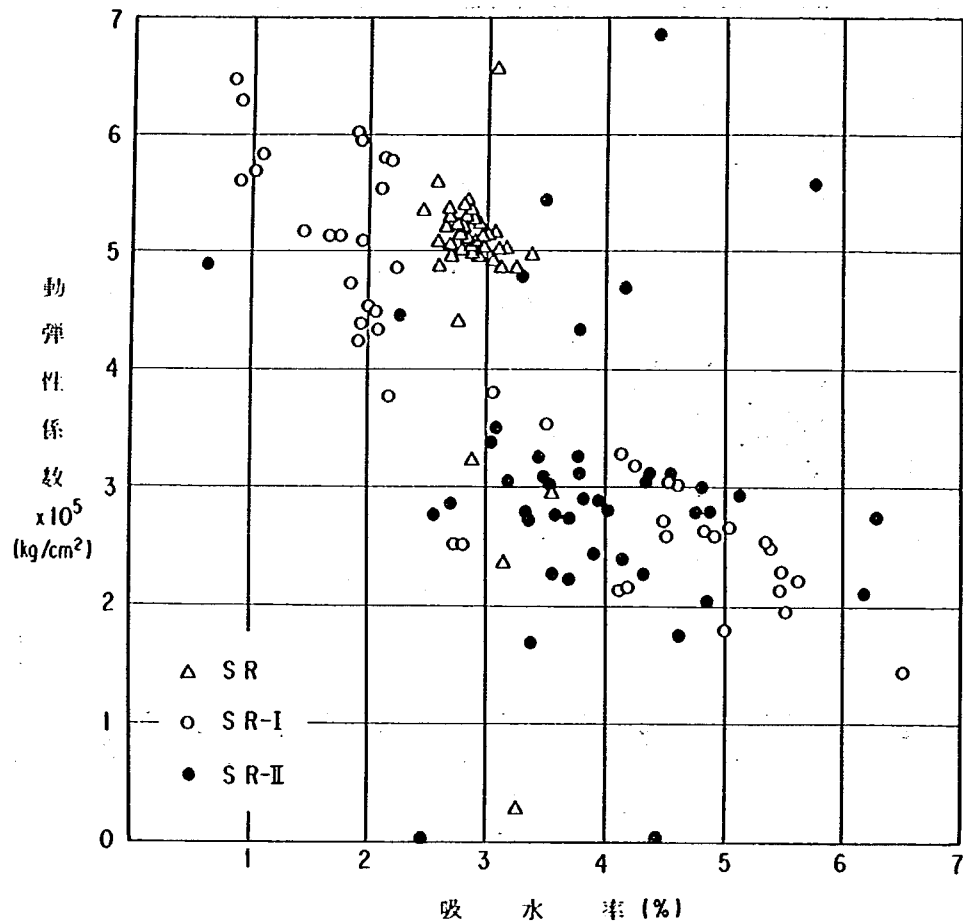
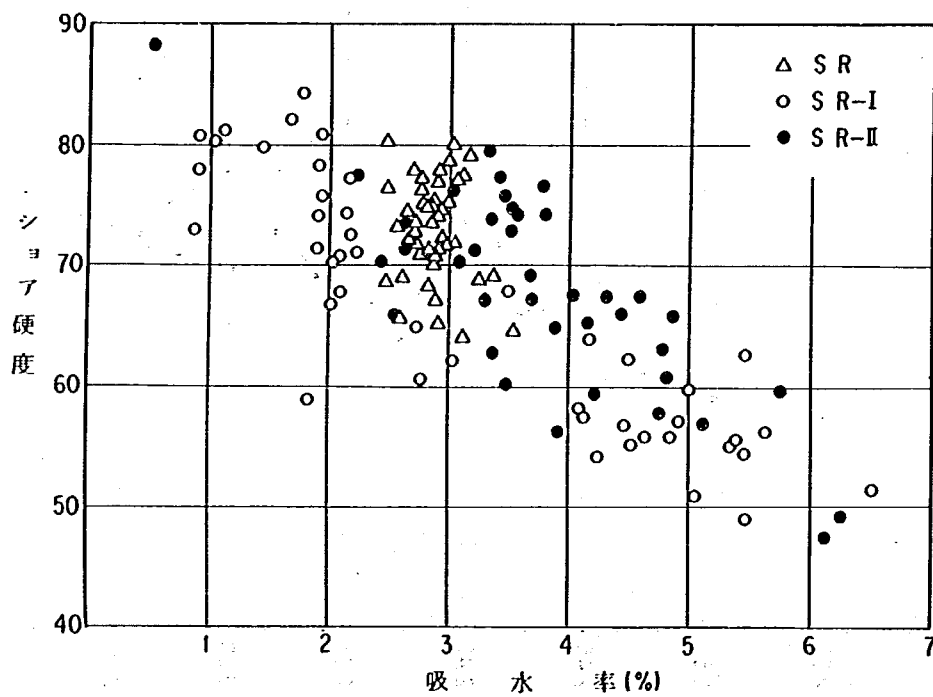


図-10 (2) 吸水率と乾燥密度の関係 (SR-II)





図一 1 1 吸水率と動弾性係数の関係



図一 1 2 吸水率とショア硬度平均値の関係

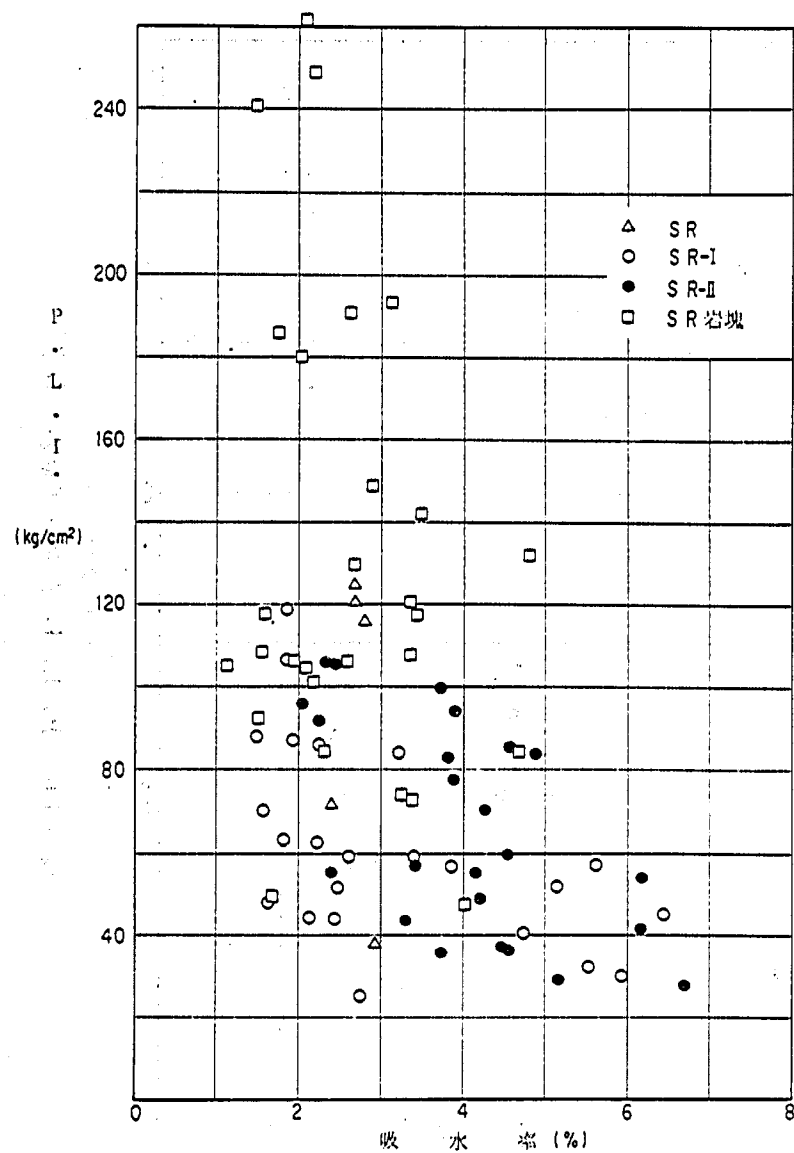


図-13 吸水率とP. L. I. の関係

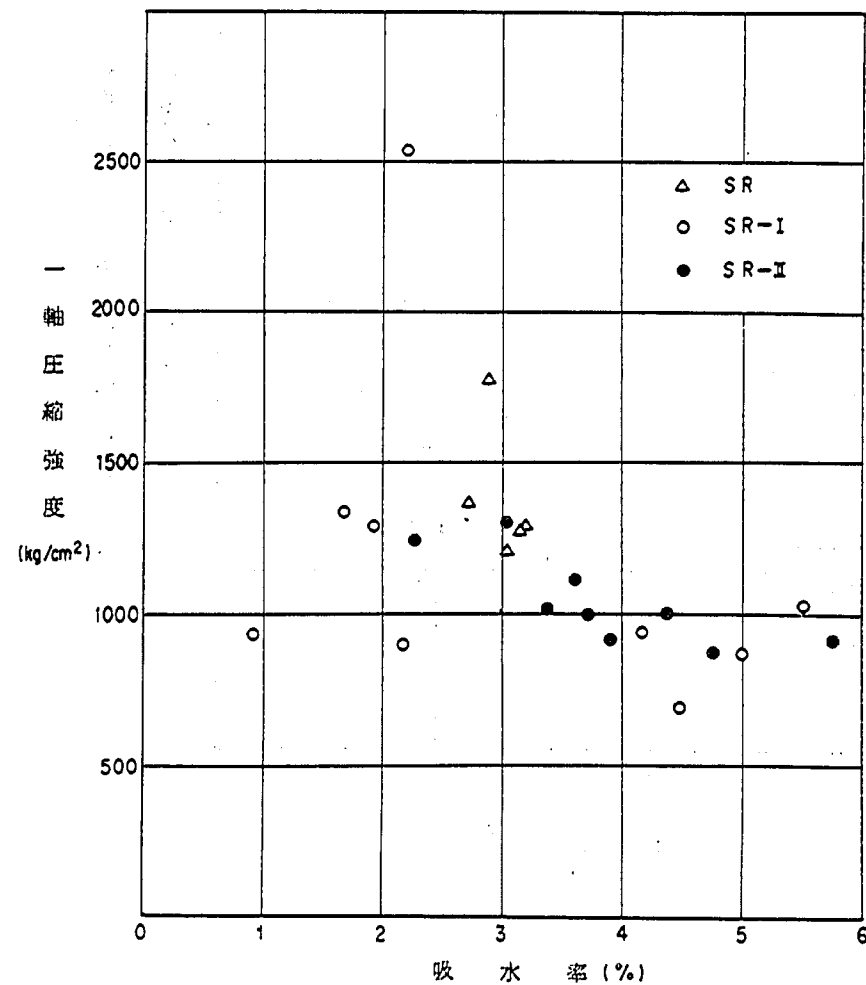


図-14 吸水率と一軸圧縮強度の関係

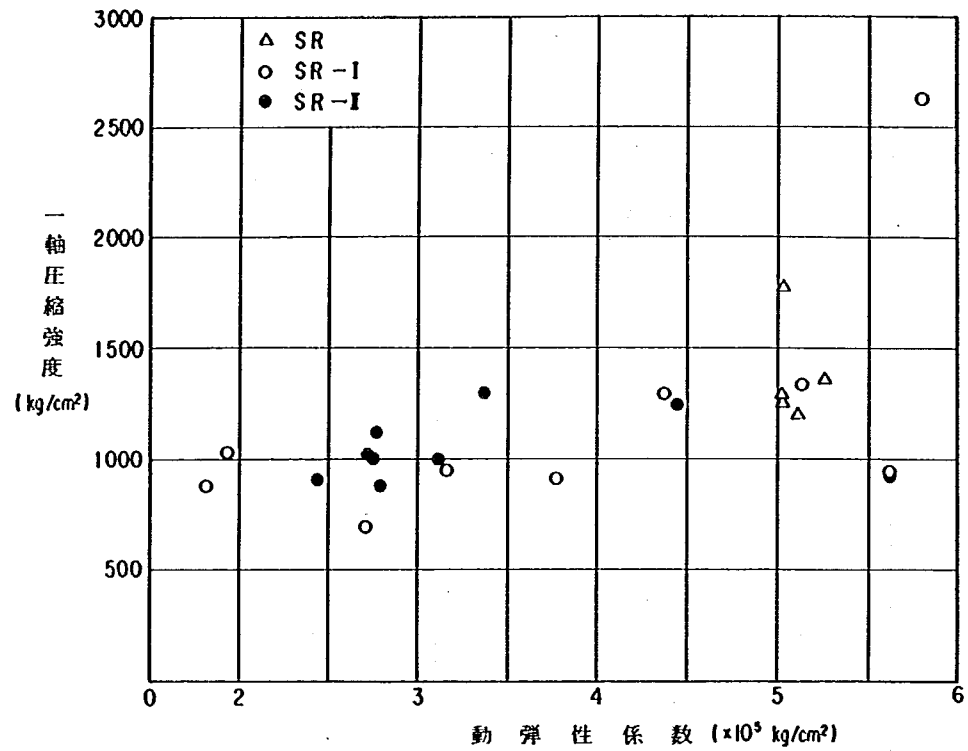


図-15 動弾性係数と一軸圧縮強度の関係

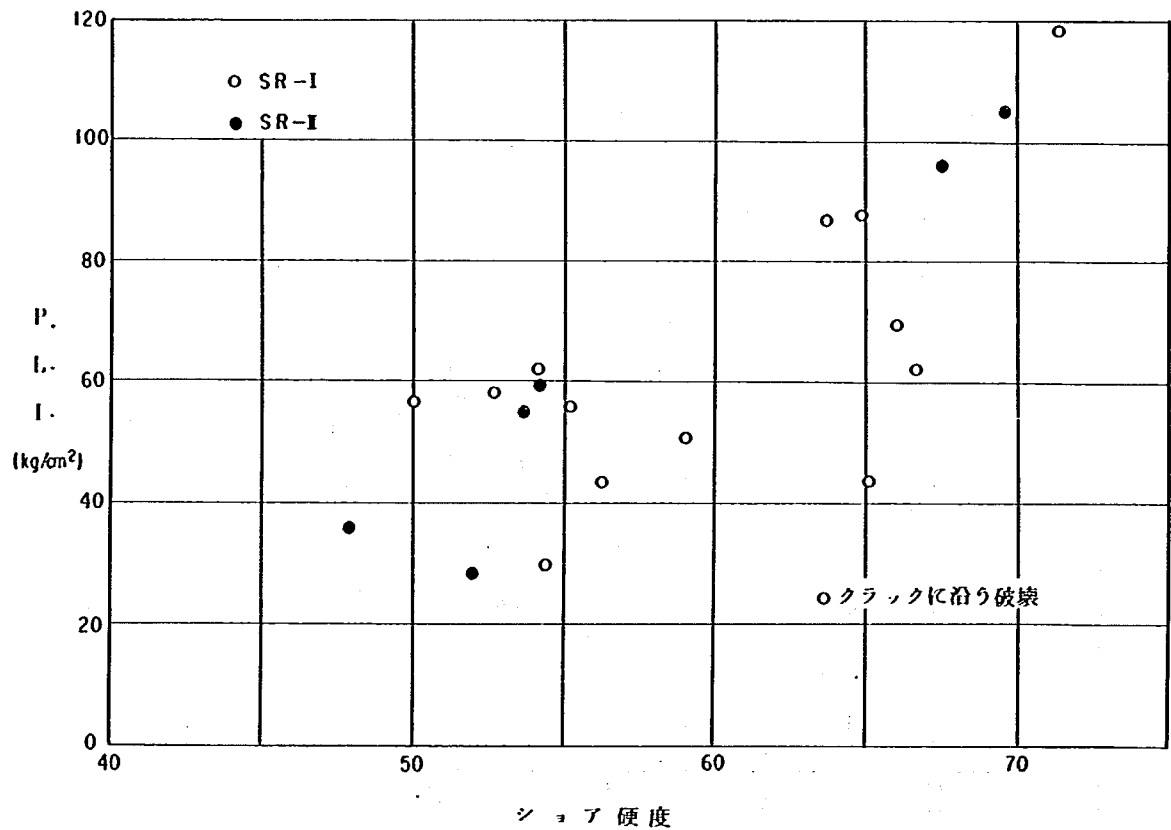


図-16 P. L. I. とショア硬度の関係

以上の物理・力学試験結果を総合したのが表-3である。

表-3 供試体の物理的・力学的性質

項目 供試体	乾燥密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	動弾性係数 $\times 10^3 (Kg/cm^2)$	ショア硬度	一軸圧縮強度 (Kg/cm^2)	P.L.I. (Kg/cm^2)
SR	2.438	2.907	7.083	5.110	73.0	1378	125
	0.017	0.215	0.477	0.198	4.1	201	54
SR-I	2.447	3.209	7.701	3.897	66.2	1008	61
	0.095	1.612	3.614	1.455	10.0	201	24
SR-II	2.353	3.850	8.994	3.124	67.8	1048	65
	0.084	1.005	2.182	0.915	8.2	140	25

注) 上段：平均値

下段：標準偏差

但し、SR-I、SR-IIのショア硬度は

良好な部分を20回測定した値である。

4.2. X線回折試験結果

SR-I、SR-IIおよびSRの3タイプより、吸水率の小さい供試体と大きい供試体を選び、X線回折試験を行なった。附図-3はその回折チャートを示し、表-4はその解析結果をまとめたものである。同表には後述の凍結融解試験における耐久性との関連も示しておいた。SRは石英、長石が主な構成鉱物で他に耐久性に多少問題のあるとされる方解石、緑泥石を含んでいる。附図-3および表-4より明らかなように吸水率の大小による鉱物組成の差は認められず、二次鉱物と考えられる緑泥石の含有量も微量である。したがってSRが耐久性に劣るのは鉱物組成に問題があるのではなく、微細なクラックの発達によるためである。SR-I、SR-IIも石英、長石が主な構成鉱物でその他にローモンタイト、モンモリロナイト、方解石、緑泥石、雲母類が吸水率と密接な関連をもって含まれている。これ等の中で岩石の耐久性に悪影響を与えるといわれるローモンタイトおよびモンモリロナイトの含有量がやや高いSR-I-12、SR-II-28が凍結融解試験における耐久性も劣っていることがわかる。

表-4 X線回折試験結果

SR-I-1、SR-II-2にもこれ等の鉱物が含まれているが、その量は微量で耐久性も良好である。すなわち、SR-IおよびSR-IIの耐久性は鉱物組成と密接な関連をもっていると言える。

しかしこのような傾向は風化度の異なる同一岩種の供試体についてのみ言えることであって、異種の岩石について全て言えるとは限らない。

項目		岩種		SR-I		SR-II		SR	
供試体番号				1	12	2	28	22	19
吸水率 (%)				0.869	6.514	2.263	6.268	2.474	3.565
耐久性				良	劣	良	劣	劣	劣
構成 鉱物	石	英	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	長	石	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎
	雲	母		○	△	○			
	方	解	△	△	△	○	△	△	△
	緑	泥	△	△	△	○	△	△	△
	モンモリロナイト		△	△	△	○			
	ローモンタイト			○					

注) ◎多量、○少量、△微量

4.3. 強熱減量試験結果

強熱減量試験において、800℃に加熱することによって失われるものとして、有機物、化合水、結晶水等が考えられ、強熱減量が多いということはこれらの含有量が多いことを示している。表-5は各岩種から代表的な供試体2個を選び試験した結果である。図-17(1)(2)は強熱減量と吸水率、動弾性係数との関係をプロットしたものである。同図より概略的傾向として、吸水率が大きいほど、また動弾性係数が小さいほど強熱減量が大きいことがわかる。また、風化しているSR-IIの方がSR-Iよりも強熱減量が大きくなっている。SRにはこのような傾向は認められない。これはクラックの影響によるものと考えられる。以上のように強熱減量試験は結晶水等の含有量の目安となり、耐久性について何等かの参考にはなるが、強熱減量だけで耐久性の判定はできない。

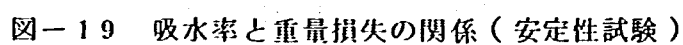
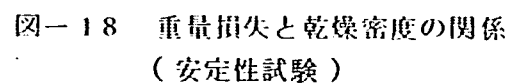
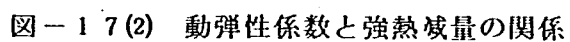
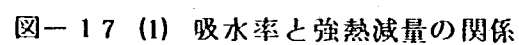
表-5 強熱減量試験結果

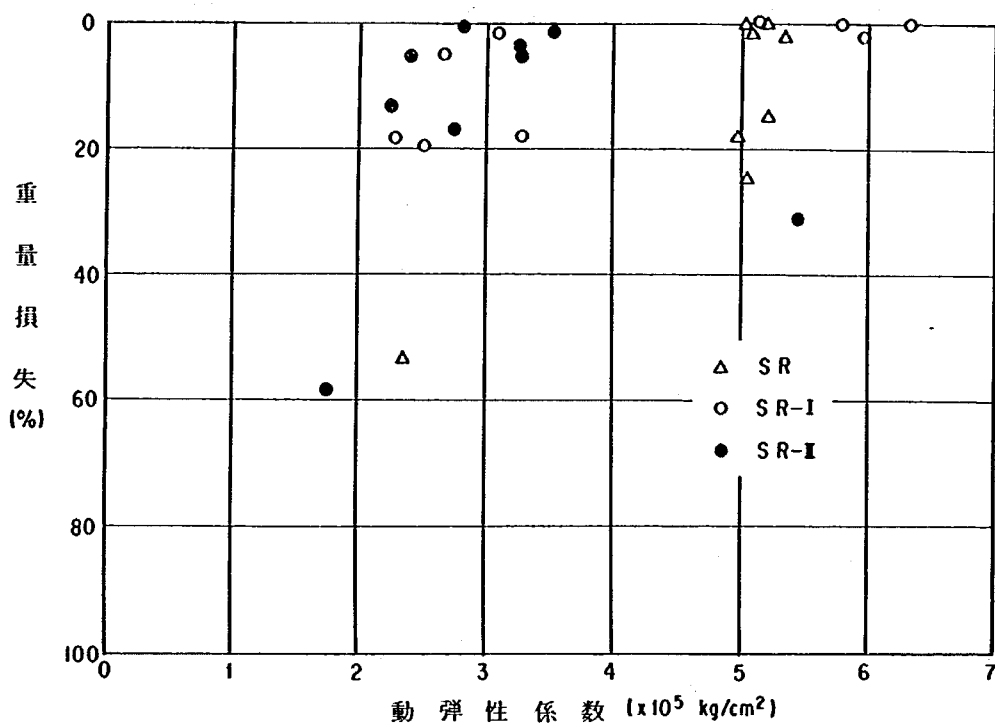
供試体 番 号	ルツボの重量 W_1 (g)	試料とルツボ の 重 量 W_2 (g)	強熱後の試料 とルツボの重量 W_3 (g)	強 熱 減 量 $\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100$ (%)	吸 水 率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	動弾性係数 (Kg/cm ²) $\times 10^3$
SR-19	17.7734	19.7850	19.7685	0.82	3.5652	2.3813	294.0
" 22	18.8362	20.8390	20.8137	1.26	2.4741	2.4644	535.0
SR-I-1	18.2824	20.4878	20.4807	0.32	0.8694	2.6043	649.0
" 12	18.7057	20.6867	20.6335	2.69	6.5135	2.2347	144.0
SR-II-2	18.0009	20.0183	19.9658	2.60	2.2630	2.4896	447.0
" 28	19.0366	21.0724	20.9920	3.95	6.2676	2.2927	276.0

4.4. 耐久性試験結果

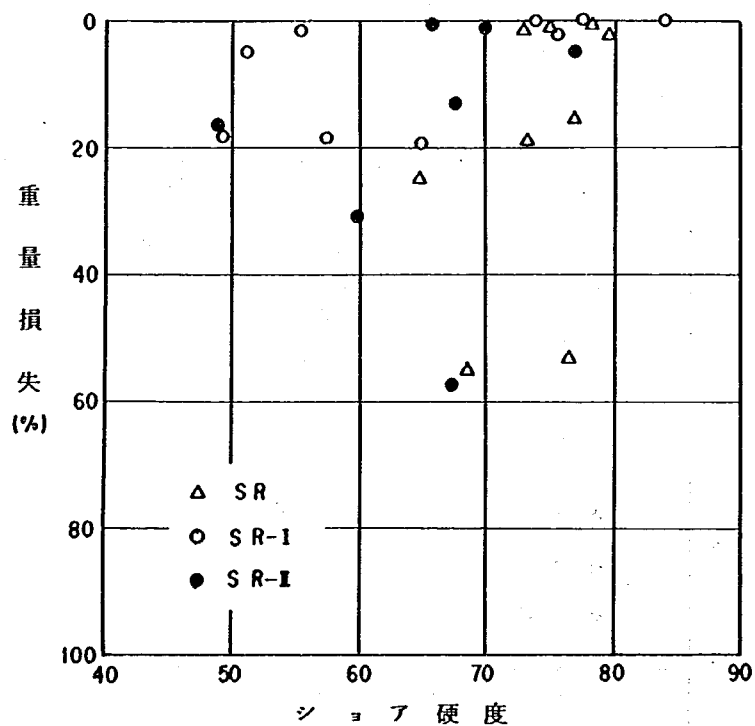
4.4.1. 薬液による安定性試験

図-18, 19, 20, 21 安定性試験における重量損失と乾燥密度、吸水率、動弾性係数、ショア硬度の関係を示したものである。それぞれ同じような傾向を示しているので、ここでは吸水率と重量損失(図-19)について述べる。同図に示されるように、吸水率が小さい程耐久性は





図一 20 動弾性係数と重量損失の関係 (安定性試験)



図一 21 重量損失とショア硬度の関係 (安定性試験)

良好で、耐久性の良否判定の基準値としてSR-Iで2.5%、SR-IIで4.2%を採用することができる。しかし同図に示されるように、ばらつきが大きく精度上問題が残る。SRは吸水率が狭い範囲に集中しており、耐久性との間に関連は認められない。概略傾向として安定性試験における耐久性はSR-Iが最も良好で、続いてSR-II、SRの順となるが、SR-Iには耐久性の劣る供試体も混在しており、SR-IとSR-IIで決定的な差異は認められない。これは後述する凍結融解試験結果とほぼ同一の結果である。

図-22は動弾性係数および吸水率と耐久性について示したものである。同図には吸水率が低く、動弾性係数が高い供試体程耐久性が良いことが示されている。またSR-Iは耐久性の良好なものと劣悪なものが混在している。SR-IIも耐久性の良否の判別ができるが、SR-Iほど明瞭ではなく両者は比較的接近している。SRは吸水率、動弾性係数とも分布範囲がせまく耐久性との関連もまったく認められないので図示していない。

以上、薬液による安定性試験結果について述べてきたが、薬液が供試体の中心部まで浸透せず、表面付近にのみその効果が表われている等の欠点があり、試験方法としては後述の凍結融解試験の方が耐久性判定試験としてより良い方法と考えられる。

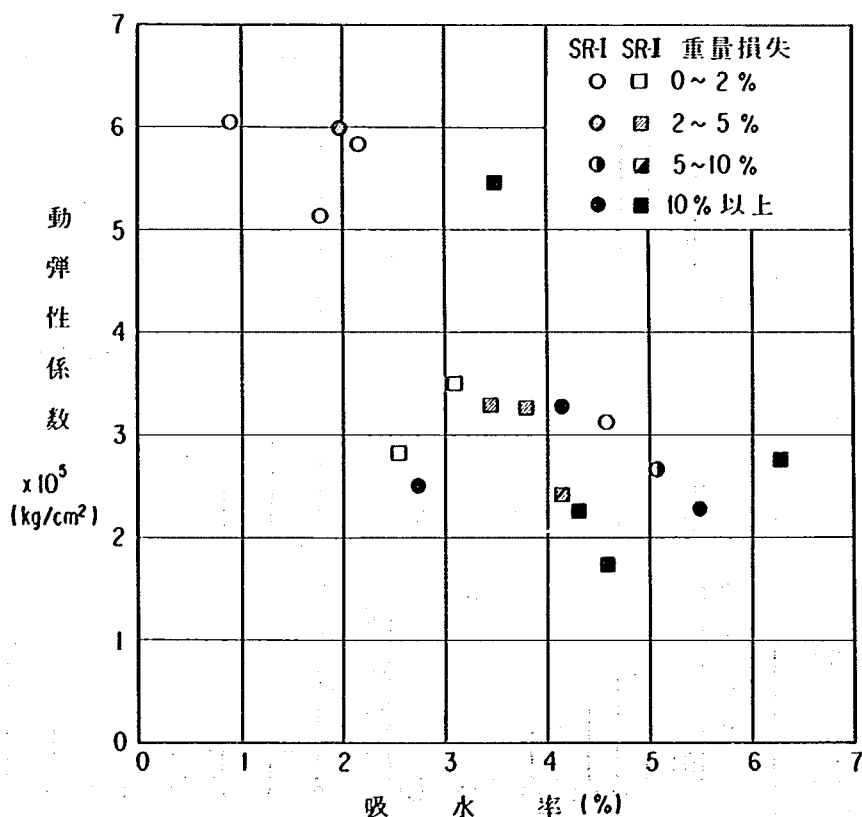


図-22 吸水率と動弾性係数と重量損失の関係（安定性試験）

4.4.2 凍結融解試験結果

附図－４に凍結融解試験における重量損失、吸水率、乾燥密度、動弾性係数比の経時変化を示す。
ただし、重量損失および動弾性係数比は以下のように定義した。

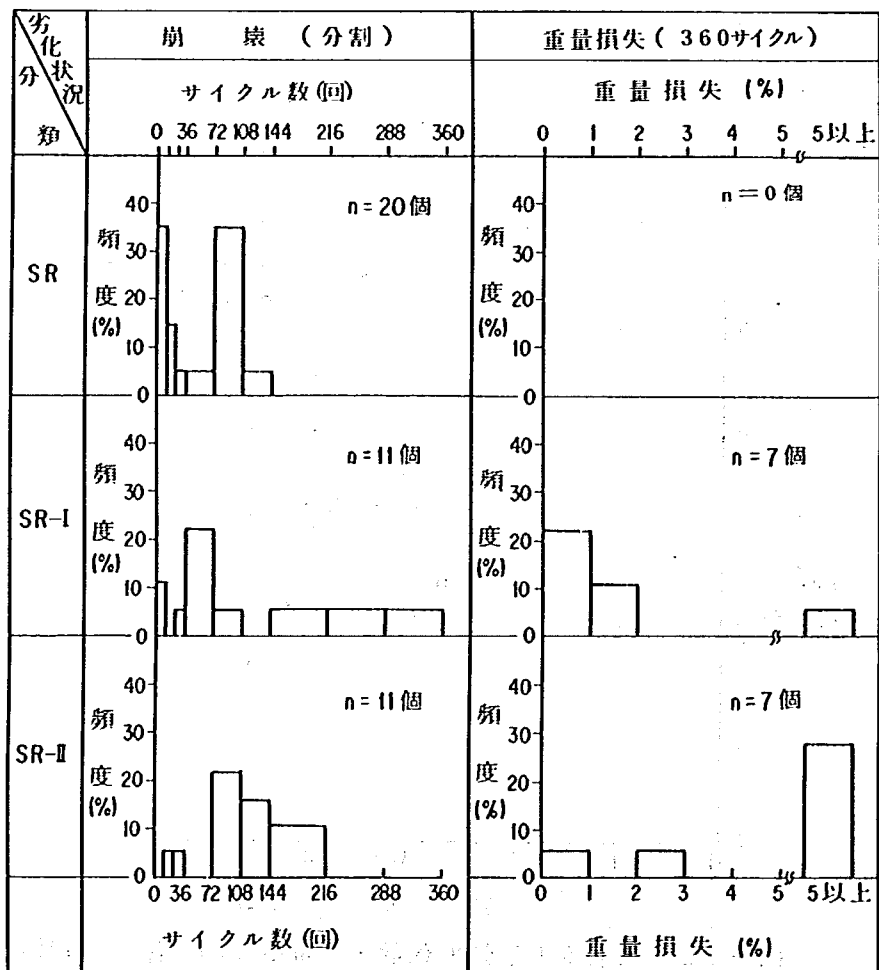
$$\text{重量損失} = \frac{\text{試験開始前の乾燥重量} - \text{測定時の乾燥重量}}{\text{試験開始前の乾燥重量}} \times 100 (\%)$$

$$\text{動弾性係数比} = \frac{\text{測定時における動弾性係数}}{\text{初期状態における動弾性係数}} \times 100 (\%)$$

5. 考 察

5.1. 重量損失の経時変化

供試体の重量損失についてまとめたのが図－２３である。同表左の崩壊の欄はそのサイクルに到るまでに崩壊した供試体の全体に対するパーセントを示している。したがって同表左欄に関しては、出現頻度数が多い程、しかも左側（サイクル数の少ない方）に出現する程耐久性は劣ると言える。この



図－２３ 重量損失のまとめ（凍結融解試験）

観点から言えば、SRは144サイクル以内に全て崩壊しており耐久性は劣る。その中でも0～36サイクルにかけて崩壊するものと36～144サイクルにかけて崩壊する2つのグループが認められる。SR-Iは崩壊するものは大部分72サイクル以内に崩壊しており、SR-IIはかなり広い範囲にばらついているが、72～216サイクルで崩壊が起るものが多い。したがって崩壊を起こすタイズに関しては、SR-Iの方がSR-IIより耐久性は劣ると判断される。

次に崩壊を生じなかった供試体については重量損失で評価することにする。右欄は360サイクルにおける重量損失のヒストグラムである。重量損失が少ない程耐久性が良好であるから、右欄左側に出現する回数が多い程耐久性に優れている。この観点から言えば、凍結融解に対する耐久性はSR-Iが最も良好で、SR-II、SRの順となる。しかし、右欄に出現するということは、本質的に耐久性が良好であるということを示し、左欄に出現するということは耐久性に問題があるということを示している。左欄、右欄を総合すると、耐久性の順序は以下のように結論できる。最も耐久性が劣るのはSRであり、続いてSR-II、最も良好なのはSR-Iである。ただしSR-Iは耐久性に劣るものが含まれているため、この区別が必要である。

現在までの経験によると108サイクルにおける重量損失が10%未満の供試体は、その後劣化は進行するが劣化速度は緩慢で耐久性には問題がないといえる。このことは図-23においても示され、耐久性の劣る供試体はほとんど108サイクルにいたるまでに崩壊している。しかしSR-IIについては108～144サイクルにおいて崩壊している例も認められる。以上のことを考慮し、108サイクルにおける重量損失10%を基準にして耐久性を判断することにするが、これは108サイクルにおける重量損失10%を基準にして耐久性を判断することにするが、これは108サイクルで崩壊が起こっているか否かと同一になる。表-6はこのような観点から供試体の耐久性を分類したものである。W₁₀₈は108サイクル

における重量損失を示す。同表よりSRは耐久性に劣ることがわかる。SR-Iは耐久性の劣るものと良好なものがほぼ同数ずつ存在している。しかし図-23に示されるように、両者の差が極端であり、

表-6 耐 久 性 の 分 類

分類 \ 耐久性	良 (W ₁₀₈ < 10%)	劣 (W ₁₀₈ ≥ 10%)
SR	5.0	95.0
SR-I	55.6	44.4
SR-II	66.7	33.3

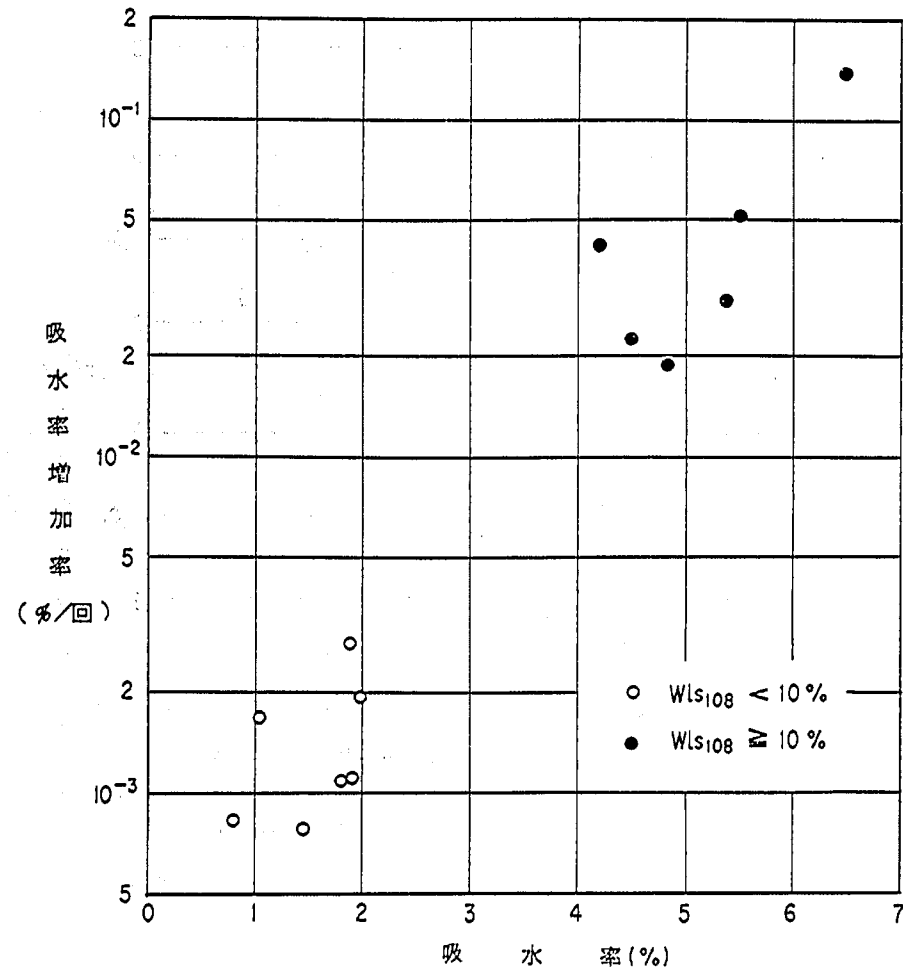
この区分を適正に行なうことができれば最も耐久性にすぐれた材料を選定することができる。SR-IIは表-6に示すように耐久性の良好な供試体がSR-Iより多くなっている。しかしSR-I程の差は見られず、重量損失もSR-Iより大きいものの方が多い。したがってSR-Iよりやや耐久性には劣るが、極端に耐久性の劣る供試体(72サイクル以内で崩壊)はSR-Iより少ないので、

実用上はSR-Iより優れた材料となる可能性がある。

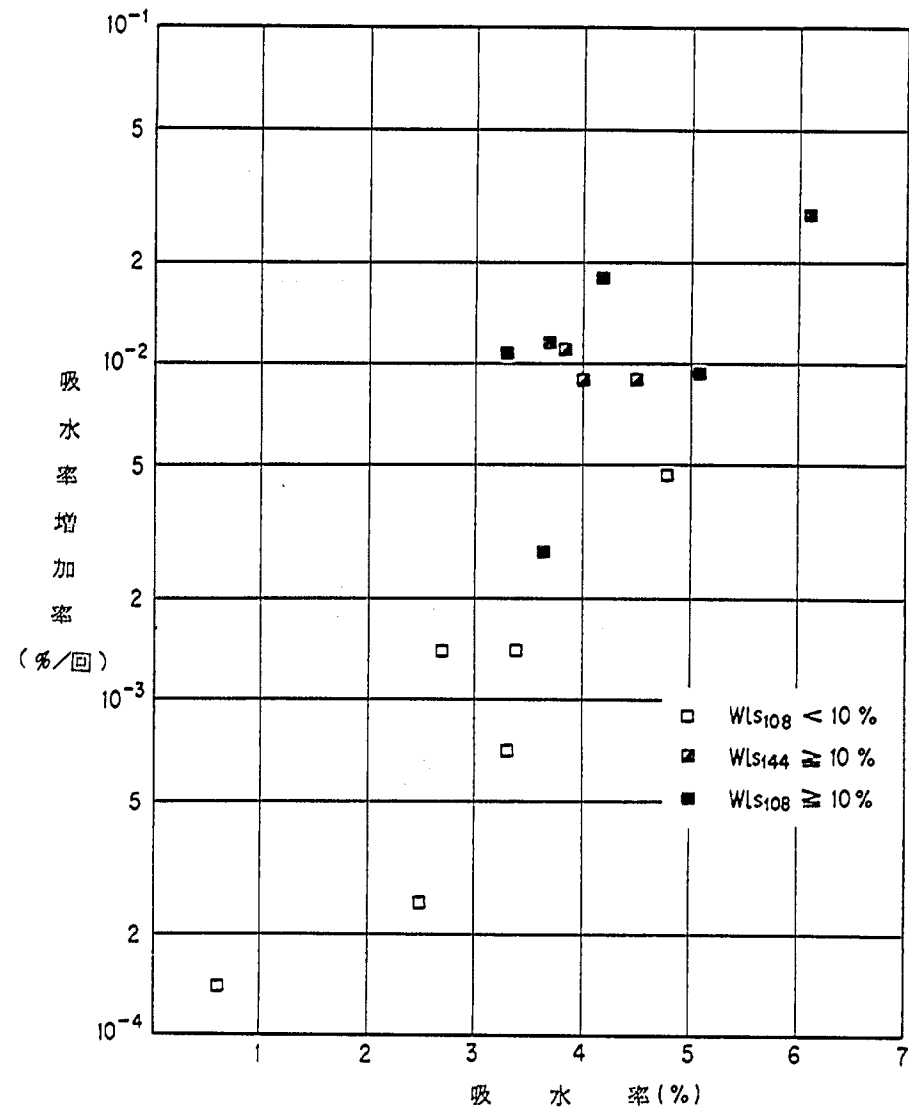
次にそれぞれの岩種の劣化形式について考察すると、SRの重量損失曲線は不連続な階段状を示している。つまり、基質そのものは劣化せずクラックに沿って分割しており岩石の耐久性がクラックの強度に支配されている。SR-I、SR-IIは比較的なめらかな重量損失曲線となっている。これは、基質そのものが劣化し表面から徐々に剝離（マサ状）していることを示し、岩石の耐久性は基質を構成する各粒子間の結合力に支配される。

5.2. 吸水率、乾燥密度の経時変化

附図-4に示すように、ほとんど全ての供試体の吸水率は、凍結融解の繰り返しとともに基質、クラック等が緩むため直線的に増加している。また、乾燥密度は直線的に減少している。この増加率および減少率は供試体により異なり、初期の吸水率、乾燥密度とともに耐久性と密接な関連をもっている。すなわち、初期吸水率が高く、増加率が大きいほど耐久性は劣り、また乾燥密度に関しては初期乾燥密度が小さく、減少率が大きいほど耐久性は劣る傾向がある。図-24は、このような観点から初期吸水率値と吸水率増加率（吸水率の経時変化曲線の勾配）の関係を耐久性との関連から示したものであり、前述の議論より $W_{ls108} = 10\%$ を耐久性判断の基準とした。ただしSR-IIは144サイクルで3個崩壊しているので同図では区別して示している。同図(1)はSR-Iについて示したものであるが、耐久性の劣るものと良好なものが明瞭に区別できる。またこれらの区別は初期吸水率だけでも可能であり、さらに凍結融解試験をある程度（36サイクル）行なえば完全にできる。SR-II（同図(2)）も耐久性の劣るものと良好なものがきれいに分かれているが、SR-Iに比べ両者は比較的接近しており、両者の区別はある程度の困難を伴う。また耐久性が良好なものでもSR-Iに比較し吸水率がやや高い。同図(3)はSR-IとSR-IIを同時にプロットしたもので、多少の例外はあるが耐久性の劣る供試体は吸水率3%以上、吸水率増加率 1×10^{-2} 以上に分布している。また同図からわかるように、SR-Iは耐久性が極端に良好なものと劣るものに分かれており、その間にSR-IIが分布している。SRは吸水率が2.5~3.3%にほとんど集中し、吸水率増加率はSR-I、SR-IIの耐久性の良好な範囲に相当しているが、144サイクル以内ですべて崩壊している。同図(4)はSRについて吸水率増加率と耐久性の関係をj知るために $W_{ls36} = 10\%$ を判定基準としてプロットしたものである。同図から明らかなように両者の関係は全く認められない。このようにクラックから分割するタイプの岩石に関して吸水率増加率を用いる手法は有効でないといえる。



図一 2 4 (1) 吸水率と吸水率増加率の関係 (SR-I)



図一 2 4 (2) 吸水率と吸水率増加率の関係 (SR-II)

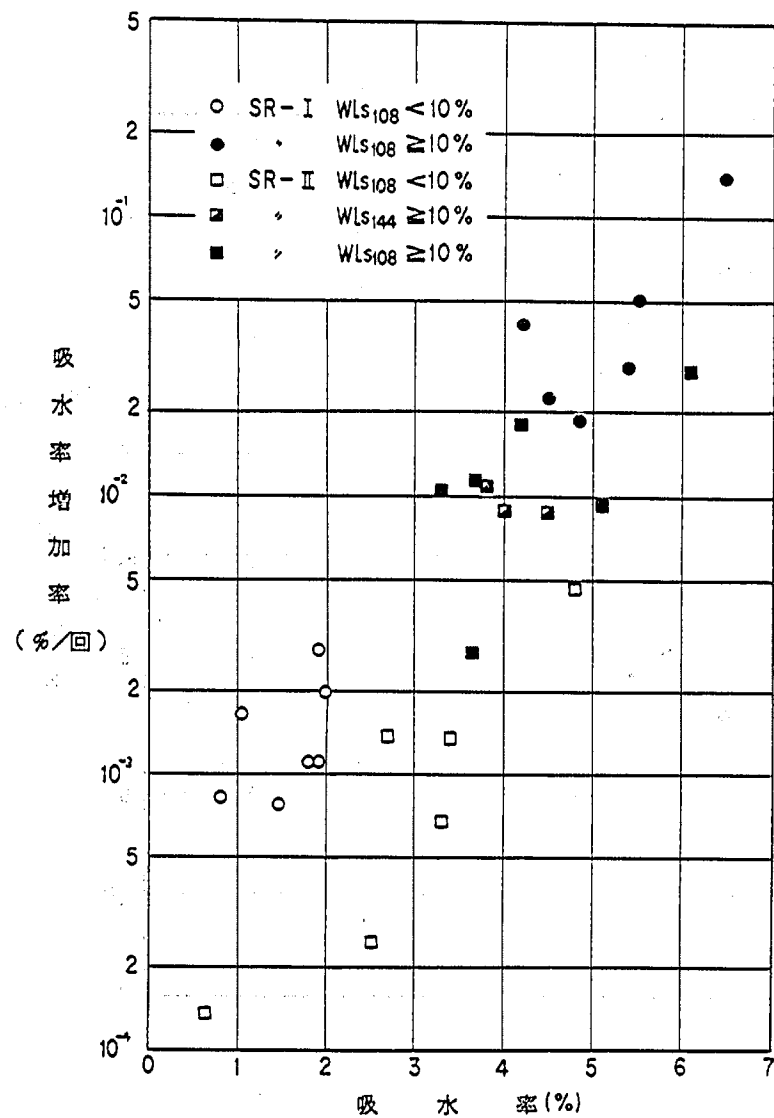


図-24 (3) 吸水率と吸水率増加率の関係

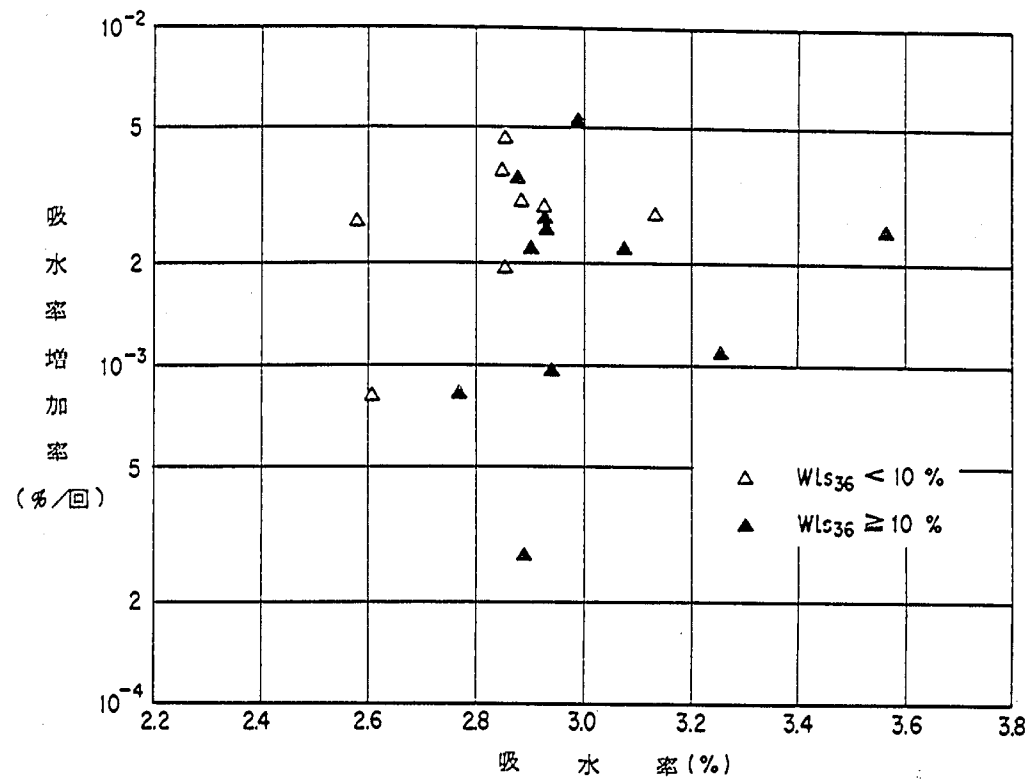


図-24 (4) 吸水率と吸水率増加率の関係 (SR)

図-25は、初期乾燥密度と乾燥密度減少率（乾燥密度の経時変化曲線の勾配）の関係を、耐久性との関連から示したものである。乾燥密度が大きい供試体ほど勾配が小さい傾向を示している。SR-I（同図(1)）は耐久性の劣るものと良好なものが明瞭に分かれている。SR-II（同図(2)）も両者がきれいに分かれているが、比較的接近しておりSR-Iほど明瞭ではない。同図(3)はSR-IとSR-IIを同一図上にプロットしたものであるがSR-Iは極端に耐久性の良好なものと劣るものがありその間にSR-IIが存在していることがわかる。また、多少の例外はあるが乾燥密度 2.42 g/cm^3 以下、乾燥密度減少率 10^{-4} 以上の供試体の耐久性は劣っている。しかし、吸水率～吸水率増加率に比較しバラツキが大きくなっている。

5.3 動弾性係数の経時変化

動弾性係数比の経時変化に関しては、コンクリートの凍結融解試験で重要視されており、劣化を示す指標とされている。すなわち、ASTM規格では相対動弾性係数（＝動弾性係数比）が60%になった時点で試験終了と規定している。しかし附図-4に示すように、岩石の場合耐久性に優れている供試体でも、凍結融解の初期段階で急激な減少を示しているものがあり、コンクリートと同様に扱うことは、岩石の耐久性を過少評価することになる。このことを示しているのが図-26である。縦軸は初期動弾性係数を、横軸は動弾性係数比が60%以下になったサイクルを示している。360サイクルにおいても60%以上の値を保っているものも、便宜上360サイクルにプロットしてある。SR-I（同図(1)）は36サイクルを越えて60%に達しない供試体は $W_{15108} < 10\%$ が全てであり、耐久性の良好な供試体は動弾性係数比が60%に低下するサイクルが遅く（216サイクル以上）、初期値も高い（ 3.5×10^5 以上）。SR-II（同図(2)）は72サイクルを越えて60%に低下しない供試体は $W_{15108} < 10\%$ が全てである。また144サイクルを越えて60%に低下していない供試体は全て360サイクルにいたっても60%に低下していない。しかし、SR-Iと異なり初期値がほぼ等しいのに、耐久性の良好なものと劣るものが存在している。同図(3)はSR-IとSR-IIを同一図上にプロットしたものであるが、前述の吸水率や乾燥密度に比較し、SR-IとSR-IIにはあまり差が見られない。SRは144サイクルまでに全て崩壊しているが、動弾性係数比と耐久性の関連をみるため、 $W_{1536} = 10\%$ を基準にしてプロットしたのが同図(4)である。同図より、 $W_{1536} \geq 10\%$ の供試体は全て12サイクルまでに60%以下になっていることがわかる。したがって、この種のタイプの供試体（クラックから分割して崩壊していくタイプ）については動弾性係数が判定基準の1つとして使えると考えられる。しかしSR-I、SR-IIに見られるように、耐久性が良好な場

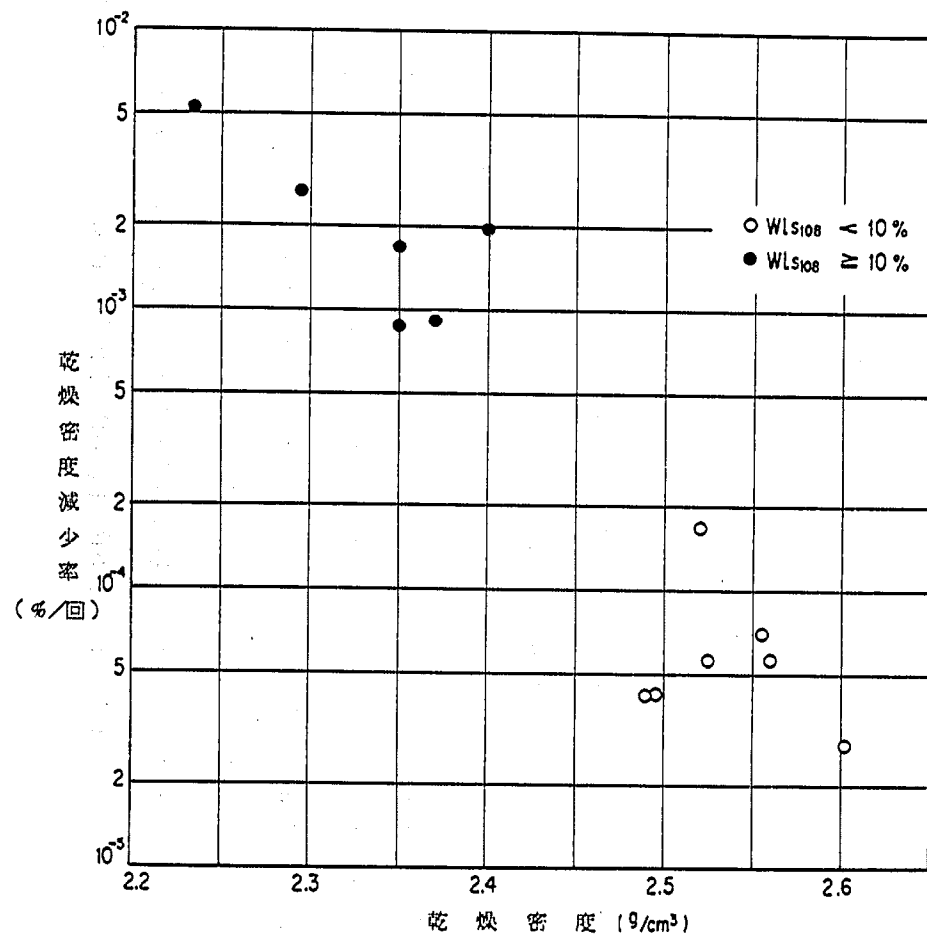


図-25 (1) 初期乾燥密度と乾燥密度減少率の関係 (SR-I)

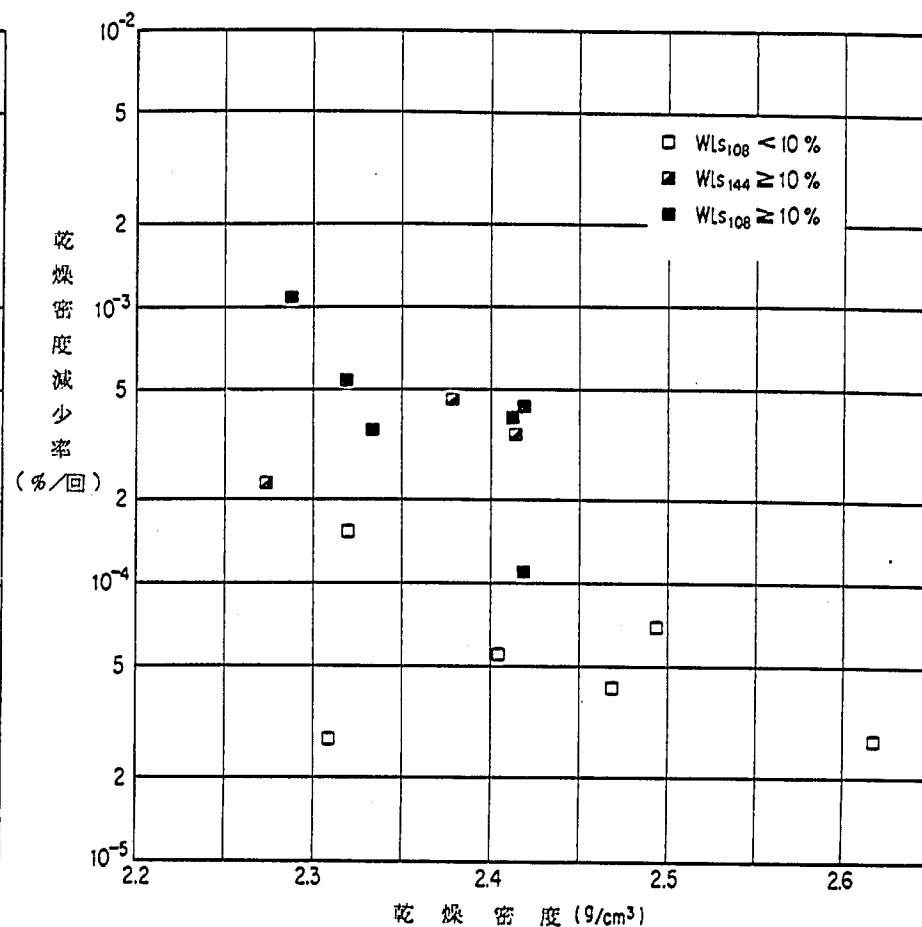
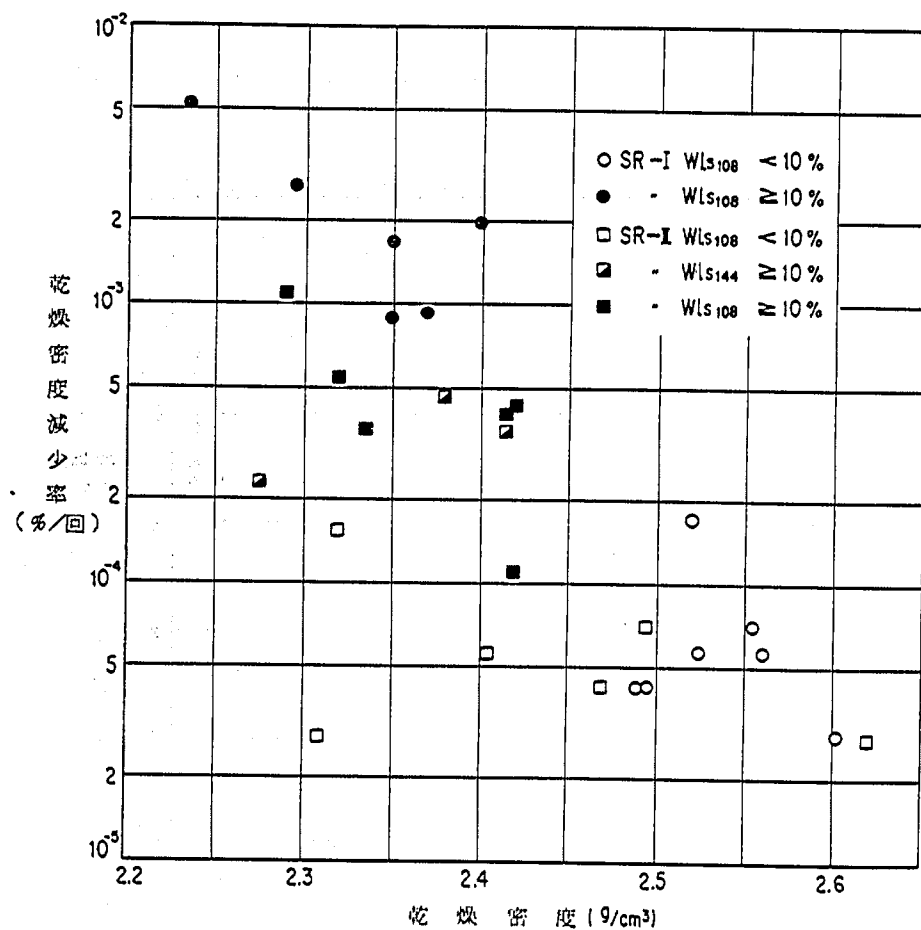
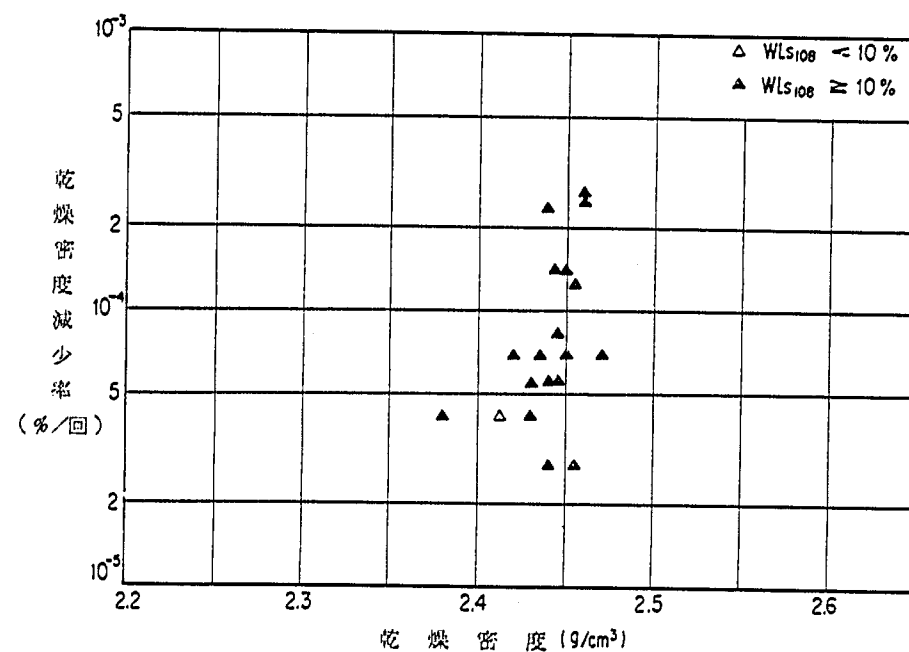


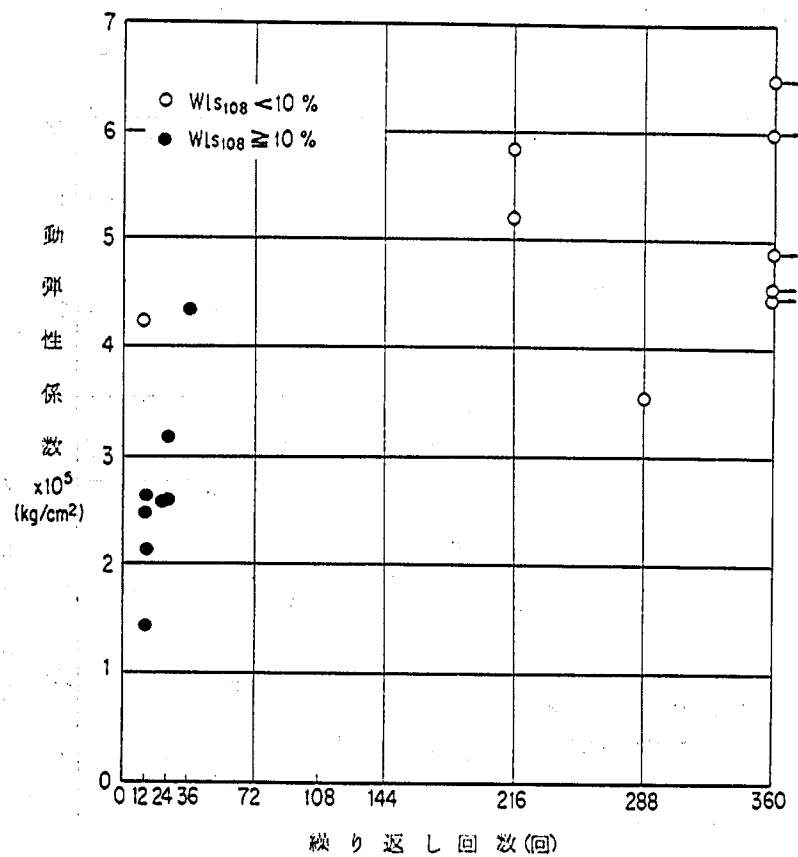
図-25 (2) 初期乾燥密度と乾燥密度減少率の関係 (SR-II)



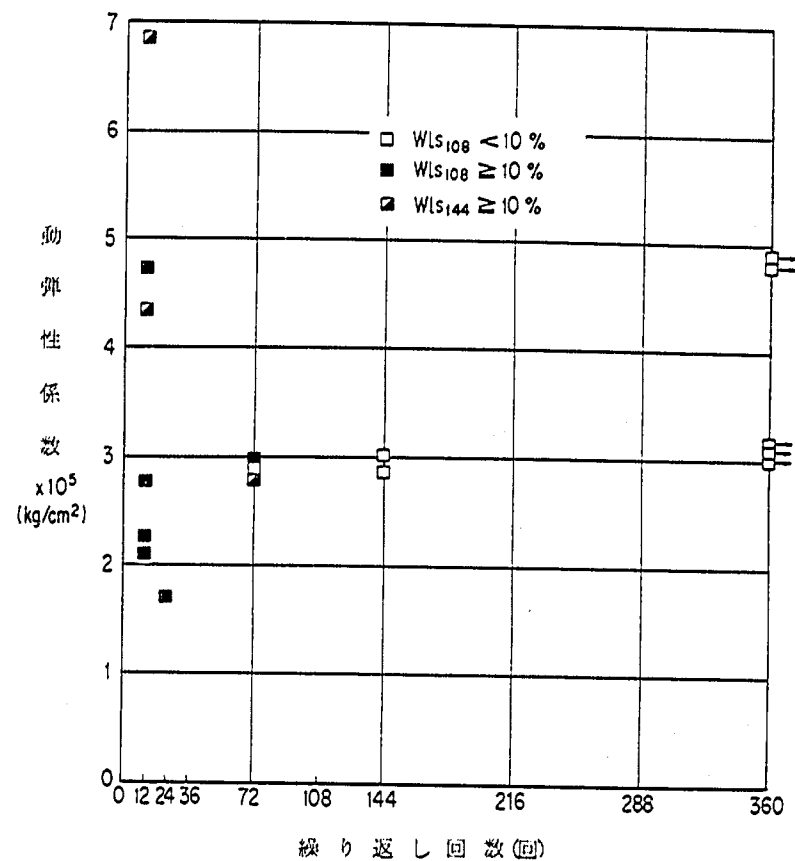
図— 25 (3) 初期乾燥密度と乾燥密度減少率の関係



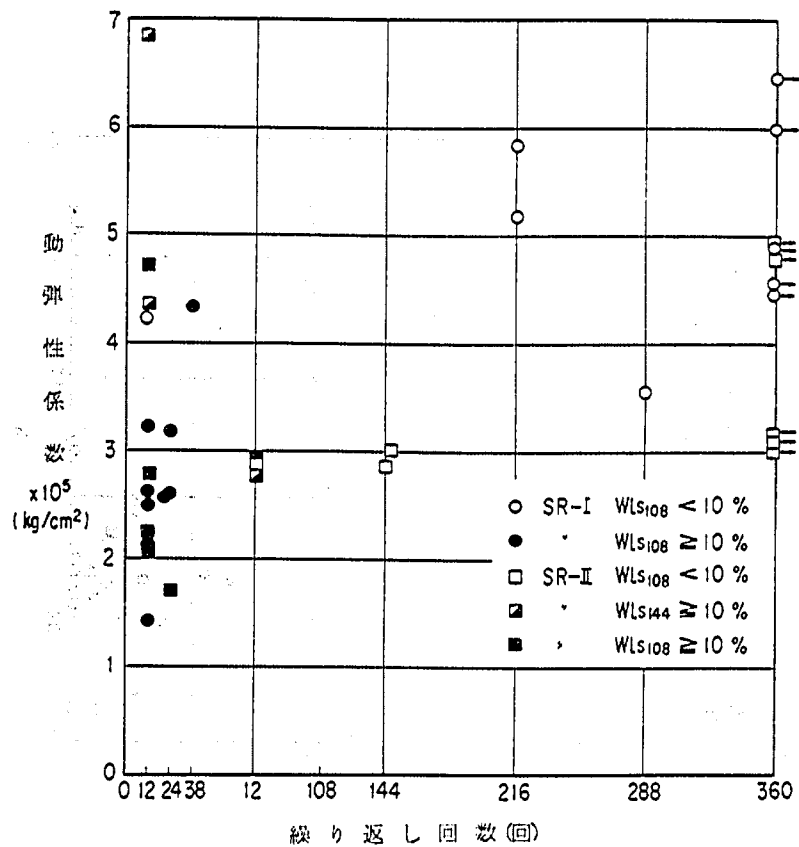
図— 25 (4) 初期乾燥密度と乾燥密度減少率の関係 (SR)



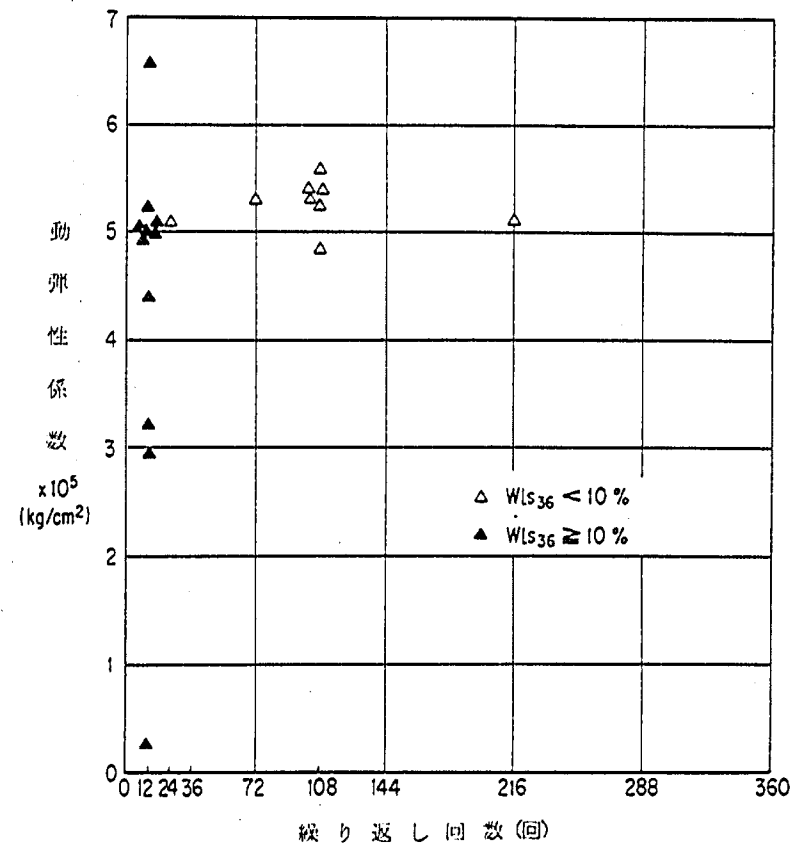
図一 26 (1) 初期動弾性係数と 60%低下サイクルの関係 (SR-I)



図一 26 (2) 初期動弾性係数と 60%低下サイクルの関係 (SR-II)



図一 26 (3) 初期動弾性係数と 60% 低下サイクルの関係



図一 26 (4) 初期動弾性係数と 60% 低下サイクルの関係 (SR)

合でも初期に動弾性係数が急激な減少を示す供試体がある。したがって、動弾性係数比が初期に急激に減少を示すということは耐久性の劣る岩石を識別するための必要条件であって、十分条件ではないことに注意しなければならない。

動弾性係数減少率も岩石の耐久性に何等かの関係があると考えられる。附図－４に示すように、動弾性係数は指数関数的に減少している。したがって、各岩種毎に(1)式に示すような曲線回帰を行ない、その特性について検討を加えた。

$$y = 100 - a x^b \dots\dots\dots(1)$$

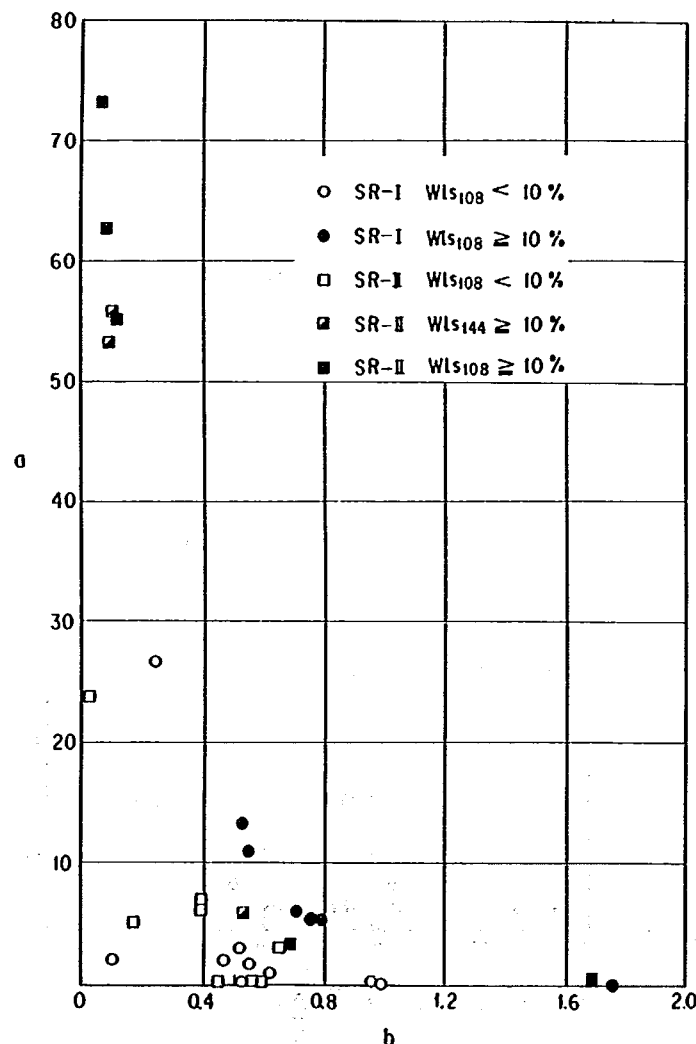
ただし y : 動弾性係数比 (%)

x : 繰り返し回数 (サイクル)

a, b : 定数

各供試体の a を縦軸に、 b を横軸にとり $W_{108} = 10\%$ を基準にプロットしたのが図－２７である。同図より明らかなように a, b が大きい供試体の耐久性は劣っている。

また、耐久性の良好なものと劣るものが明瞭に分かれているが、両者は比較的接近している。



図－２７ a と b の関係

図-28は、縦軸に36サイクルにおける動弾性係数比を横軸に36サイクルにおける動弾性係数比の減少率曲線の接線勾配（前述の(1)式より求めた）をとり、 $W_{15108} = 10\%$ を耐久性の基準としたものである。同図より、動弾性係数比60%以上、接線勾配0.3以下の耐久性は良好であることがわかる。また耐久性の劣る供試体ではSR-IとSR-IIの相異が顕著である。つまりSR-Iは接線勾配が大きくSR-IIは小さい。これはSR-Iの耐久性の劣る供試体は動弾性係数の減少が著しく、SR-IIは比較的ゆるやかであるということを示している。

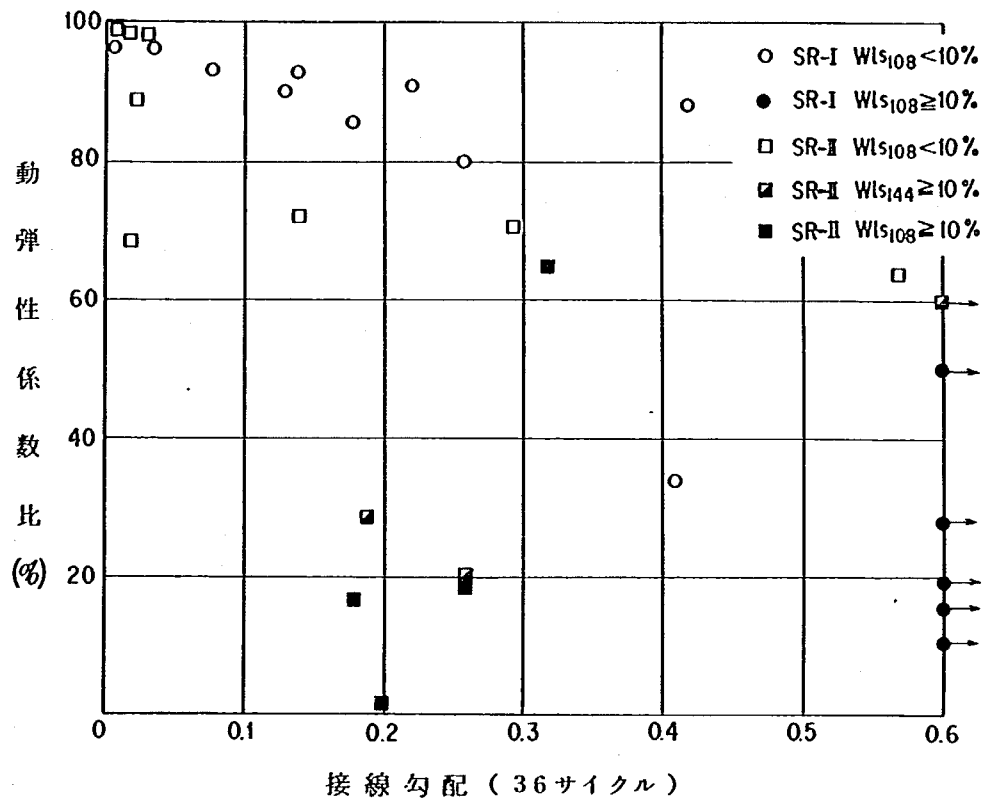


図-28 動弾性係数比と動弾性係数減少率の関係

5.4. ショア硬度の経時変化

ショア硬度の経時変化は、凍結融解の繰返しに伴ない、平均値が減少し標準偏差が増加していくと考えられるが、附表-6あるいは附図-5からわかるように、ばらつきが大きくショア硬度だけで耐久性を判断することは困難である。概略的傾向として、ショア硬度の減少率が大きい程耐久性は劣っている。しかし、初期値の大小による耐久性の優劣はつけられない。つまり、斑晶あるいは石基自体が固くてもその結合力が弱ければ耐久性は劣ることになる。したがってショア硬度は他の物理量の経時変化と比較して耐久性判定の一手段とすることが望ましい。

5. 5. 各種物理・力学量の初期値と耐久性の関連

岩石の耐久性は、凍結融解試験を行ない各種物理量、力学量の経時変化から総合判断することが、最も精度の高い方法である。しかし、時間あるいは経費等の制約から各種物理量、力学量の初期値と耐久性が関連づけられるならば、実用上極めて便利な指標となる。以下はそのような観点から検討した結果である。

5. 5. 1. 吸水率、乾燥密度と耐久性の関連

SR-Iは5.2でも述べたように、耐久性の良好なものと劣るものが明瞭に分かれており、初期値でも両者を区別することができる。図-24(1)および図-25(1)から吸水率が4%以下、乾燥密度 2.4 g/cm^3 以上の供試体の耐久性は $WIs_{108} < 10\%$ で耐久性にすぐれている。SR-IIは図-24(2)、および図-25(2)から、吸水率3.5%以下、乾燥密度 2.42 g/cm^3 以上の供試体の耐久性は $WIs_{108} < 10\%$ ですぐれている。しかし、耐久性の良好なものと劣るものが比較的接近して分布しており、SR-Iに比較し精度的に劣る。また上述の判定基準では例外もいくつか存在している。SRは密度、吸水率の分布範囲が狭いうえ全て崩壊しているため、耐久性との関連はつかめない。

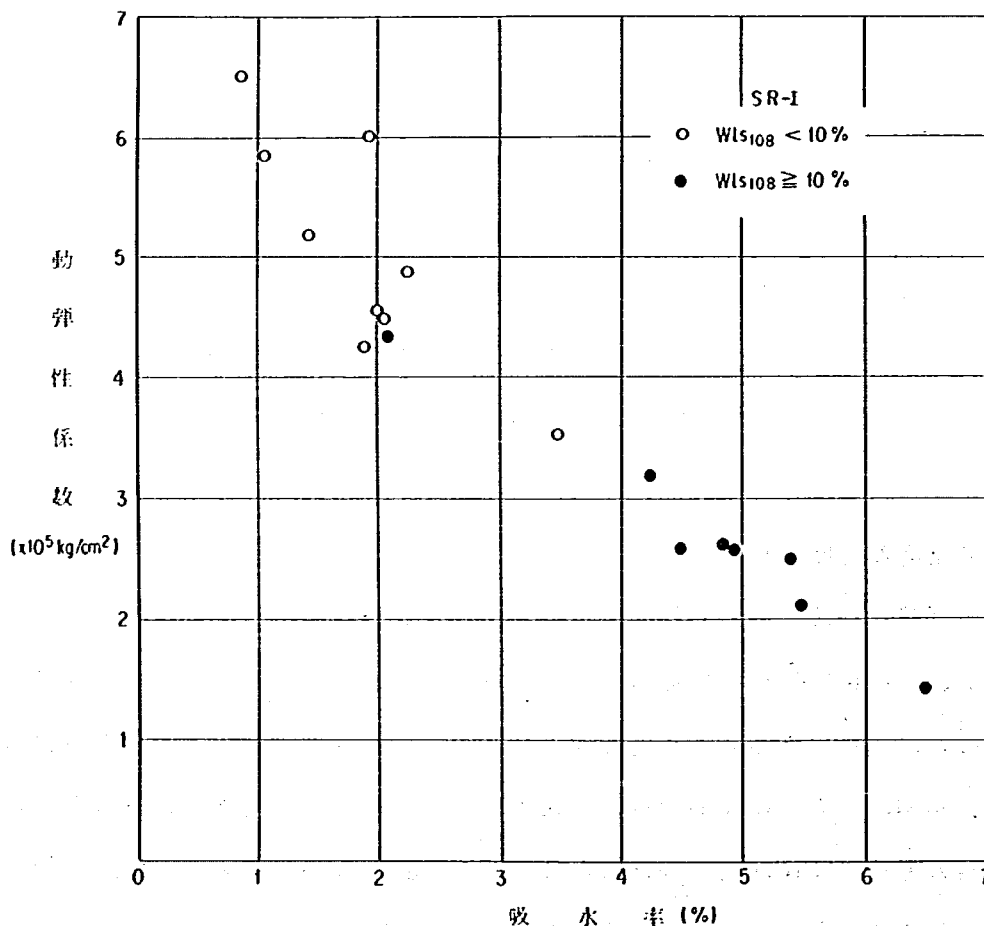


図-29 (I) 動弾性係数と耐久性の関係 (SR-I)

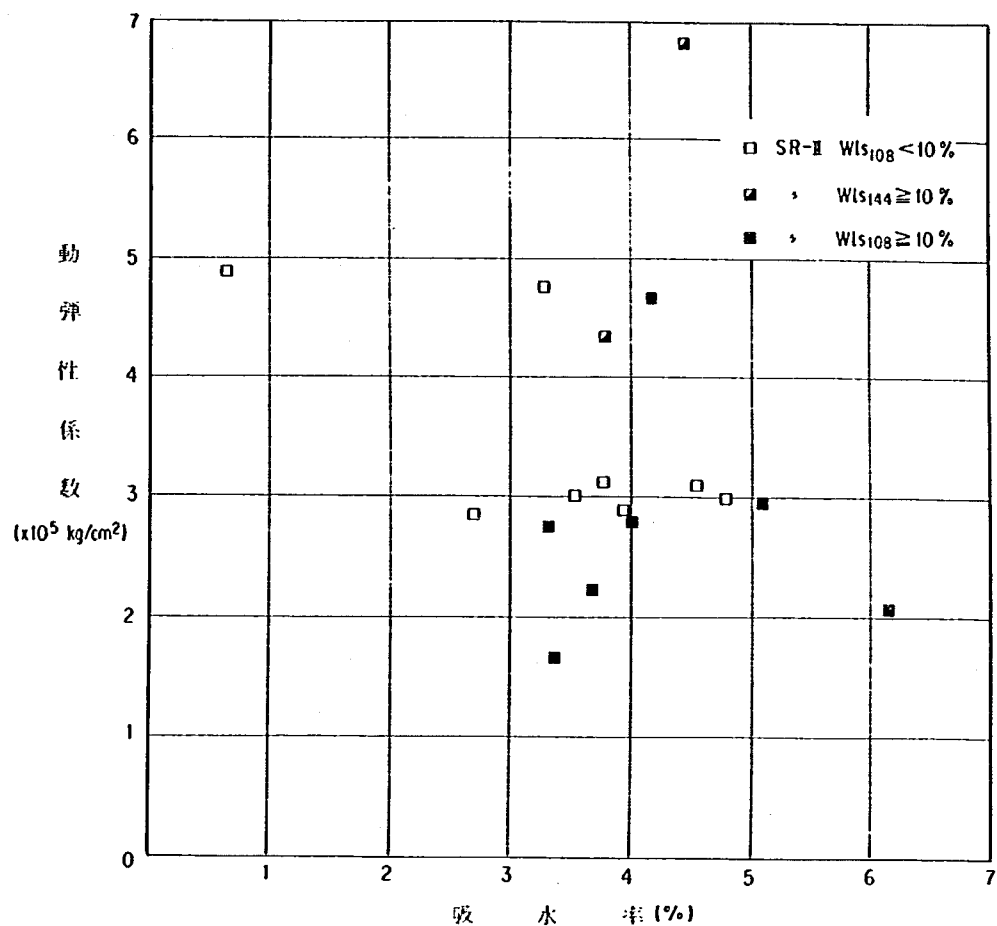


図-29 (2) 動弾性係数と耐久性の関係 (SR-II)

5.5.2. 動弾性係数と耐久性の関連

図-29は動弾性係数と耐久性の関連について示したものである。同図よりSR-Iは 3.5×10^5 髯、SR-IIは 3×10^5 髯以上の耐久性は良好であるといえるが、いくつかの例外もある。またSR-IIは耐久性の良好なものと劣悪なものが接近しており、精度的に問題がある。

5.5.3. 耐久性のまとめ

本試験結果より、供試体の初期状態における物理、力学量と耐久性の関係をまとめると表-7のようである。(SRは144 サイクル以内で全て分割しているので除いている。)しかし、前述の議論でも明かのように、これらの手法は極めて大まかなものであり、例外も存在し、耐久性の指標として正確な判断を下すには問題がある。今回はロック材及びリップラップ材としての適否を同一試験法で判定しようとしたが、SRのように物理、力学量と耐久性との関連がつかめにくい材料については、こ

の手法は適応性に問題があり、今回の条件のもとでの凍結融解試験結果からは、リップラップ材としては不適に近いものと思われる。

表-7 耐久性が良好 ($W_{loss} < 10\%$) な供試体の物理的性質

項目 分類	乾燥密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	動弾性係数 (Kg/cm^2)
SR-I	2.40 以上	3.5 以下	3.5×10^3 以上
SR-II	2.42 以上	4.0 以下	3×10^3 以上

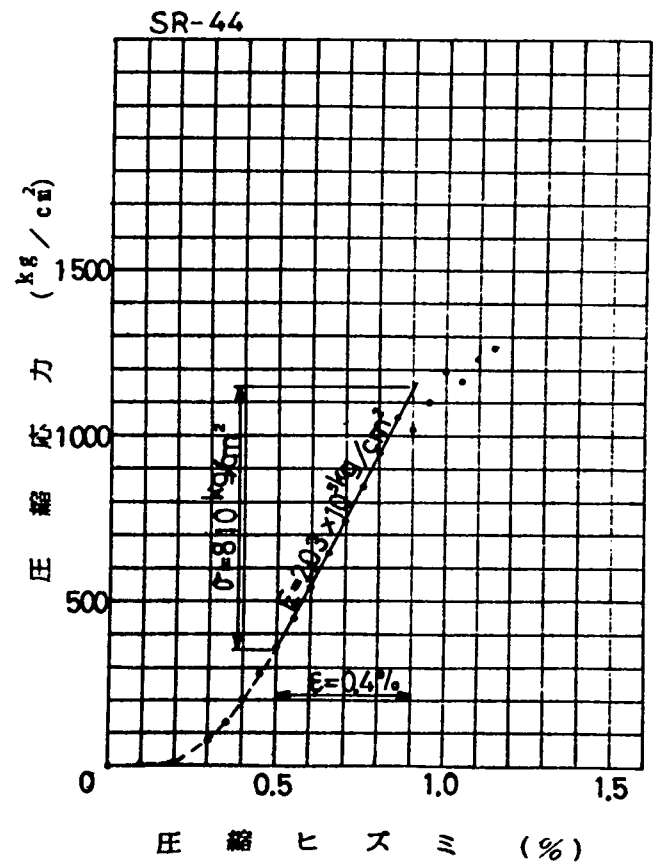
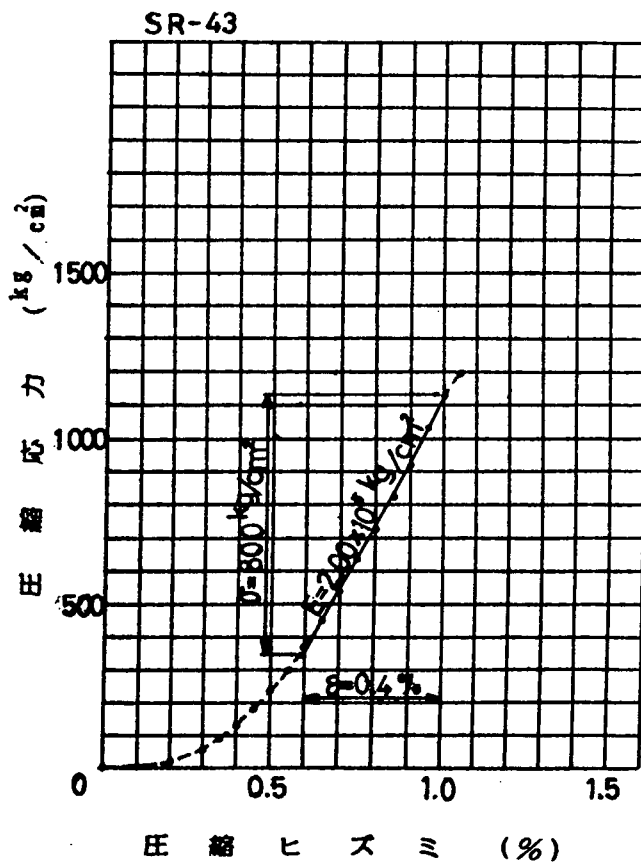
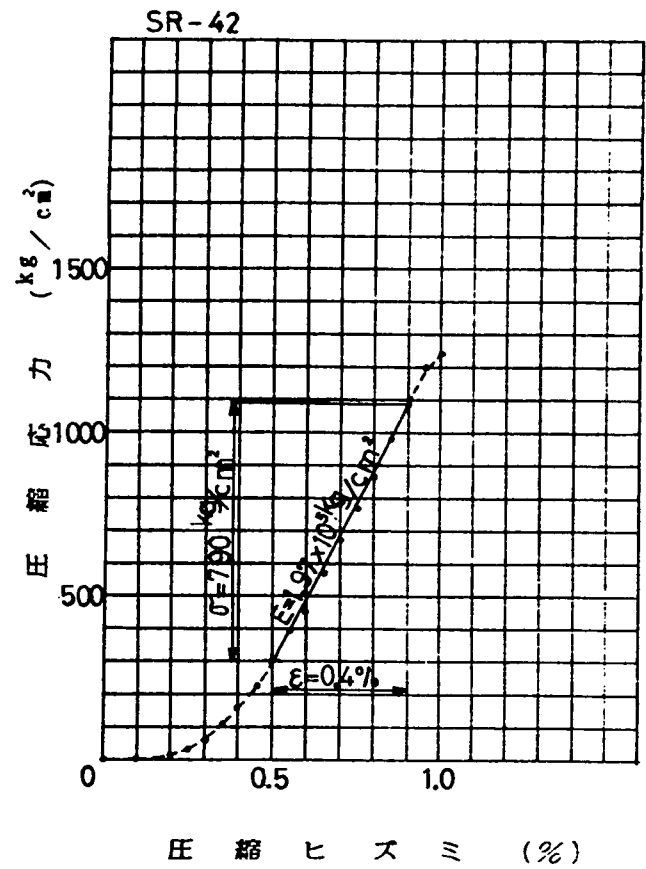
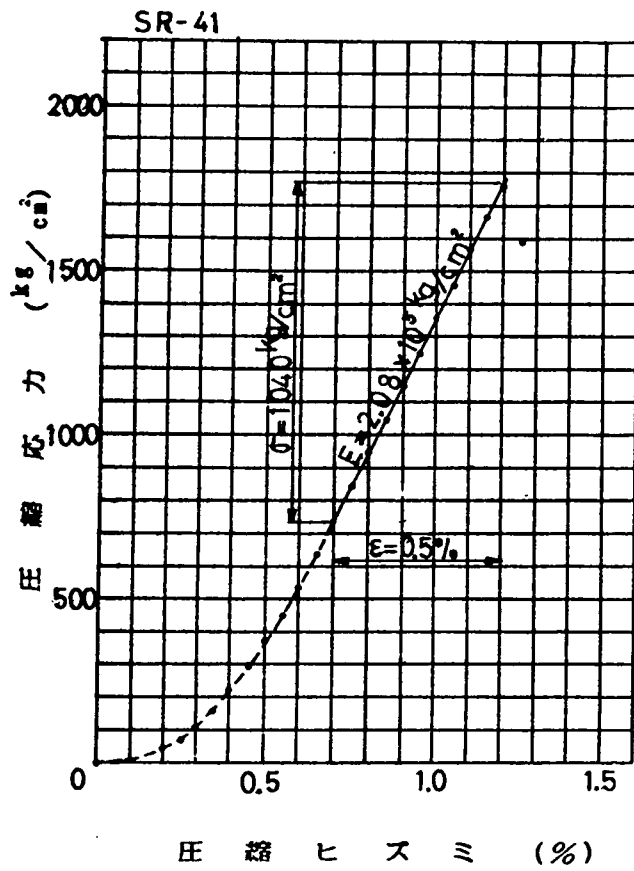
なお、今回の試験に供した試料が部分的なものであり今後は原石山全体の耐久性を評価すべく原石山等のサンプリング範囲を拡大して、代表的試料を採取しさらに綿密な試験を行ない、ロック材およびリップラップ材としての適用性を検討する必要がある。

なお、本試験を実施するに当り、試料の採取、既存資料の使用等に関して、七ヶ宿ダム工事々務所の関係各位には多大なる協力をしていただいた。記して感謝いたします。

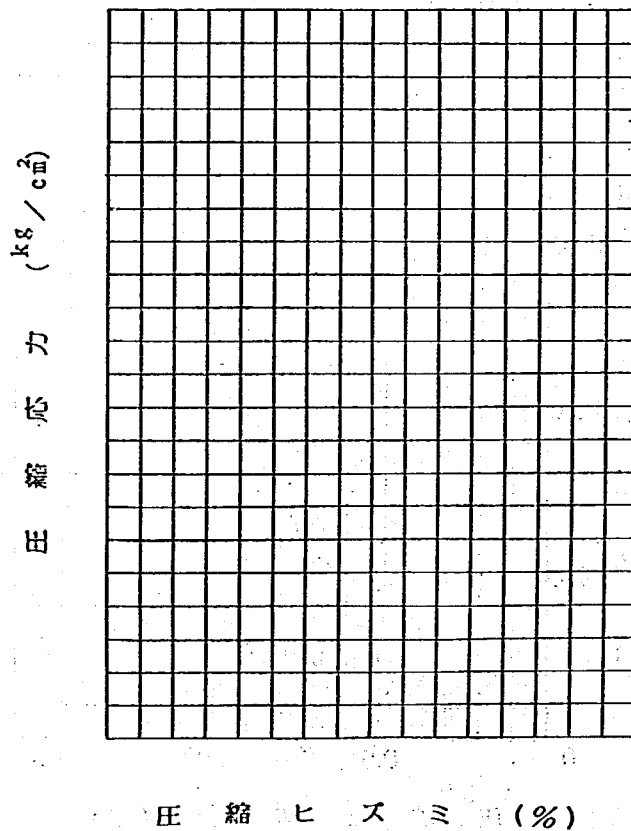
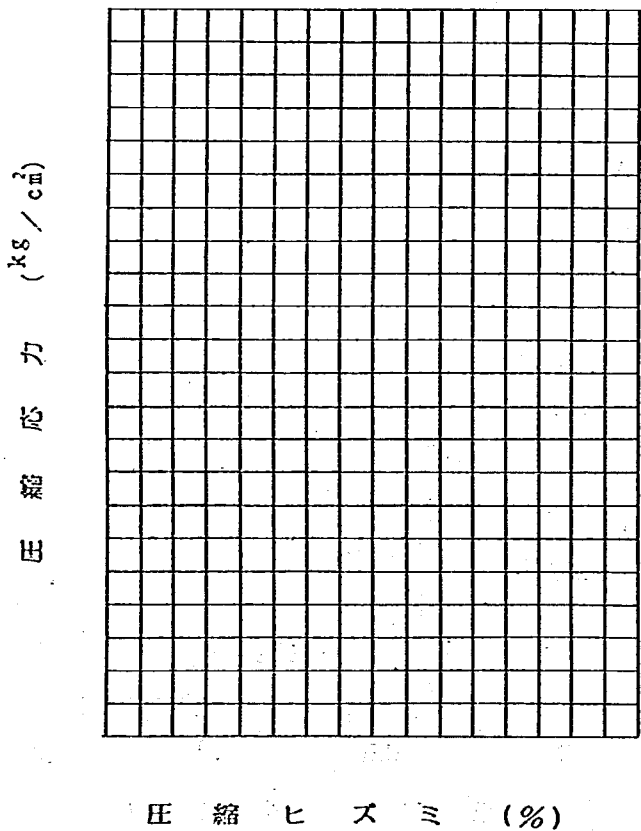
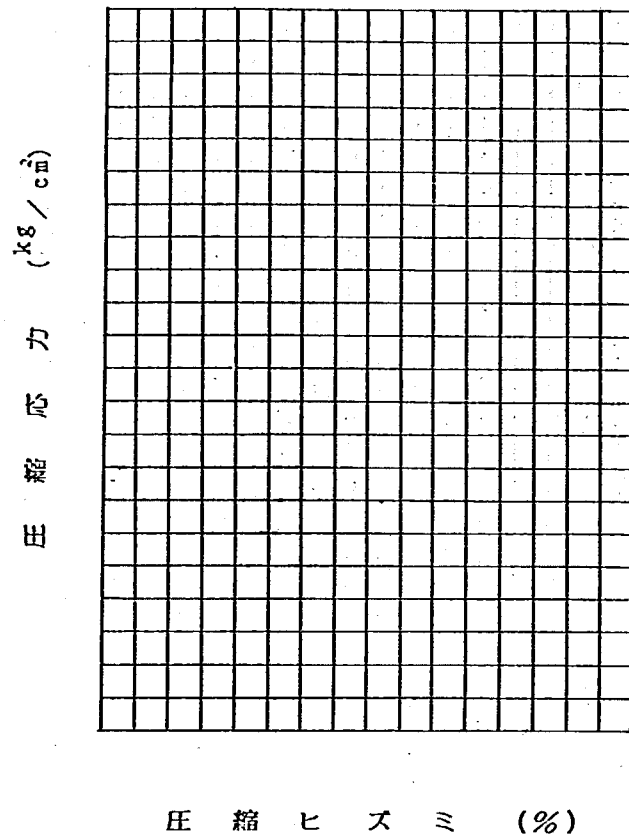
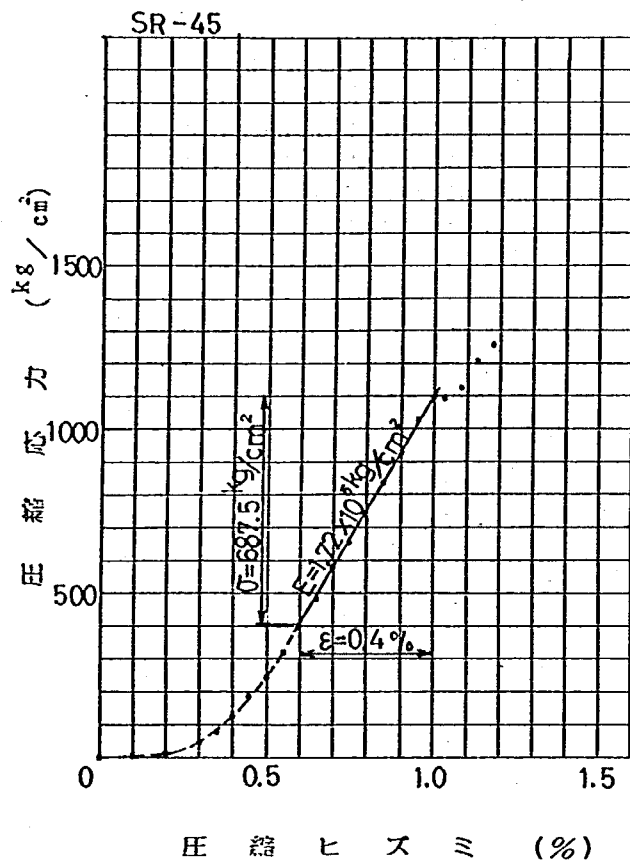
なお、本試験を実施するに当り、試料の採取、既存資料の使用等に関して、七ヶ宿ダム工事々務所の関係各位には多大なる協力をしていただいた。記して感謝いたします。

附図一 1 一軸圧縮試験における応力一歪曲線

一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)

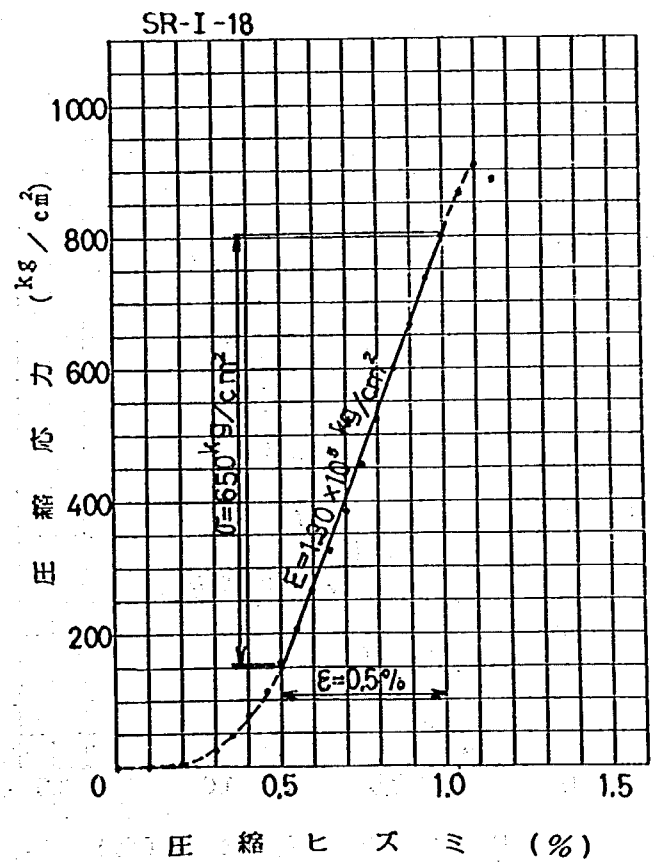
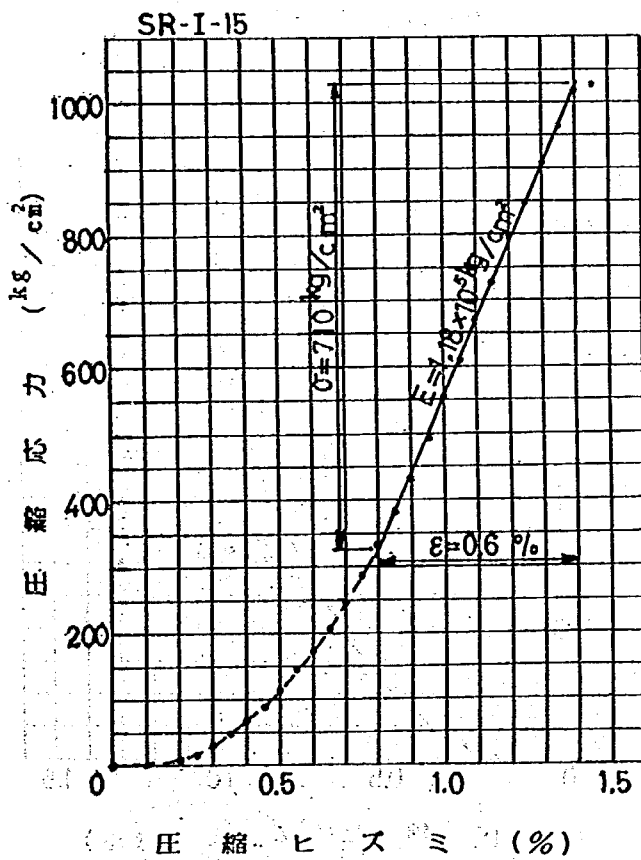
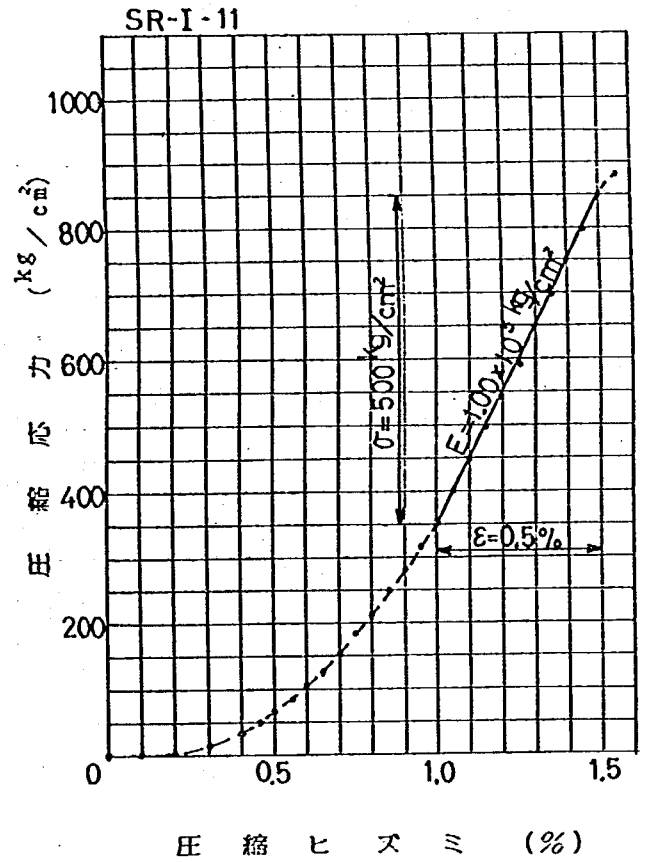
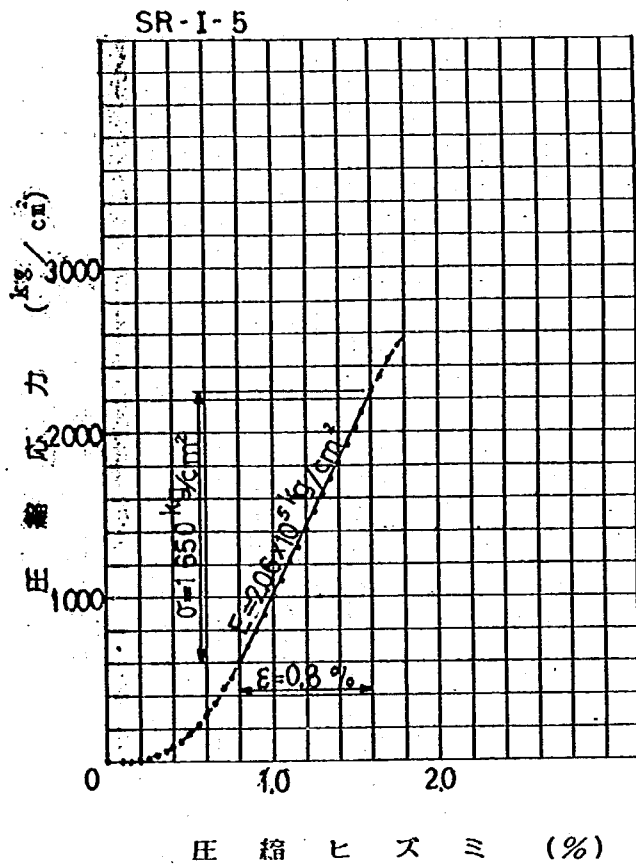


一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)

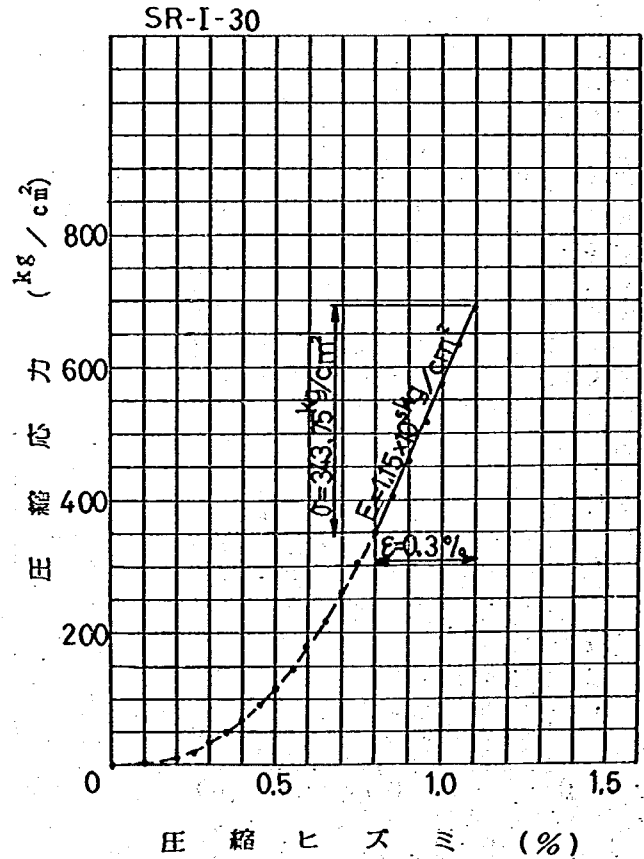
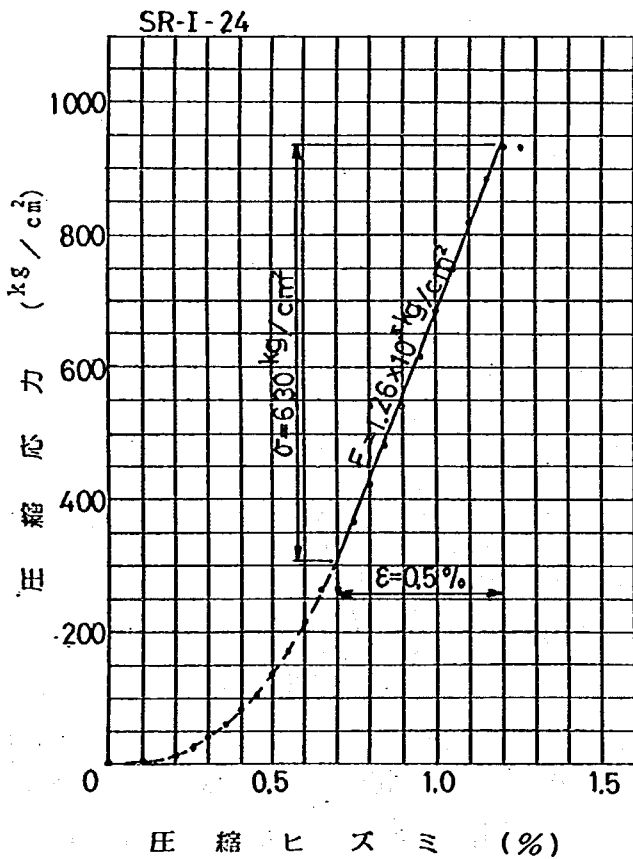
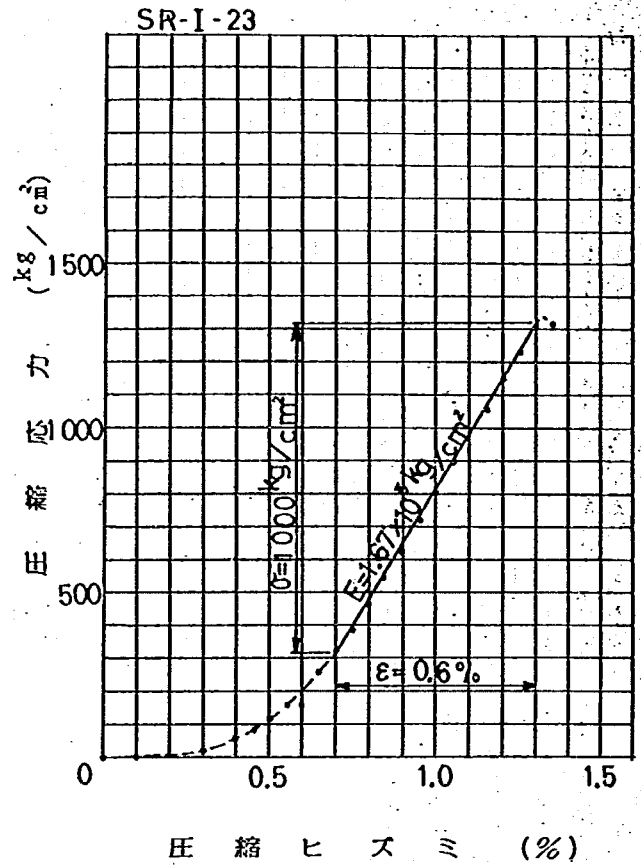
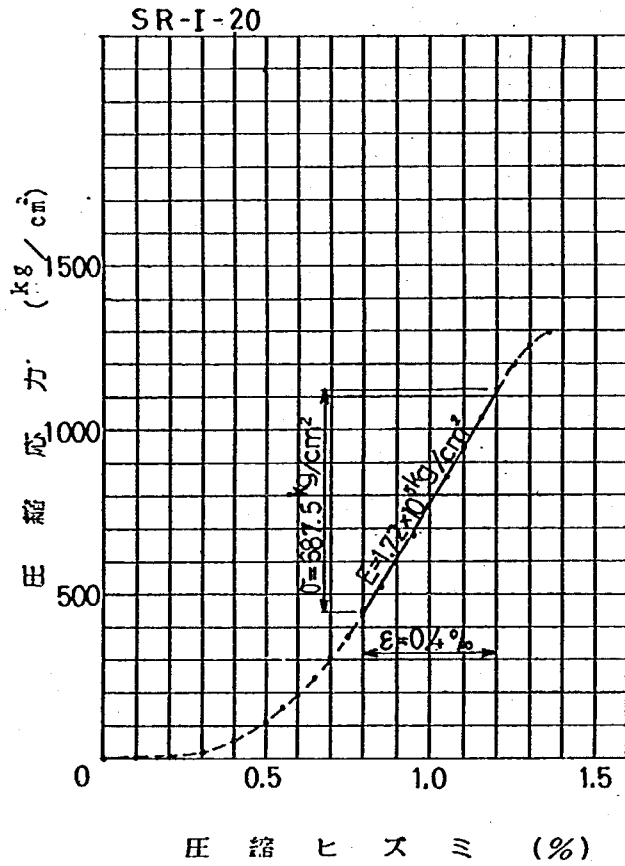


一軸圧縮試験

(応力～ひずみ曲線)

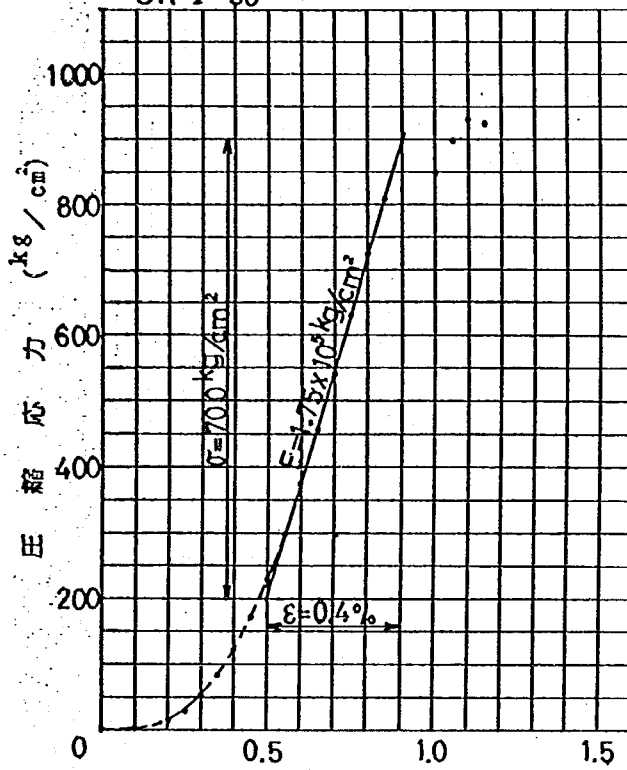


一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)



一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)

SR-I-38



圧縮応力 (kg/cm²)

圧縮ヒズミ (%)

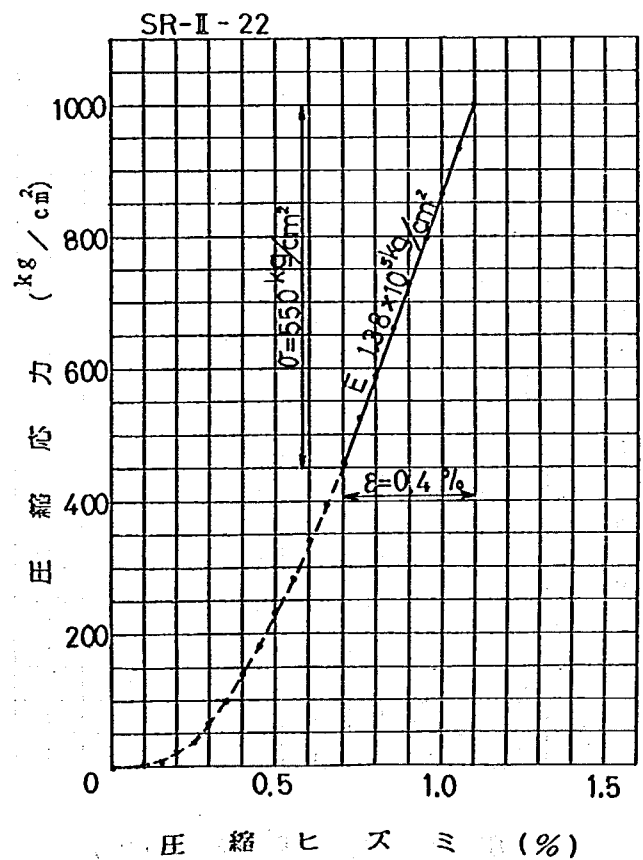
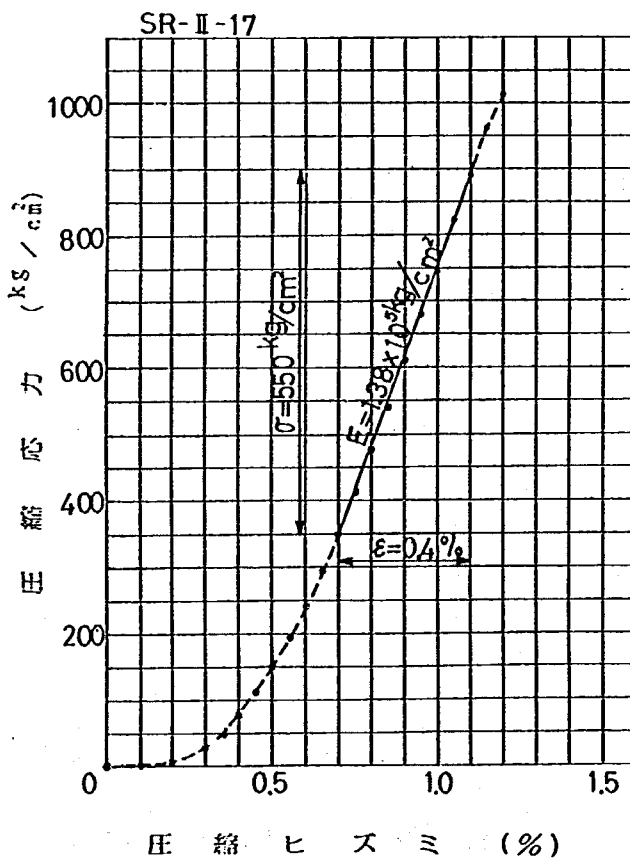
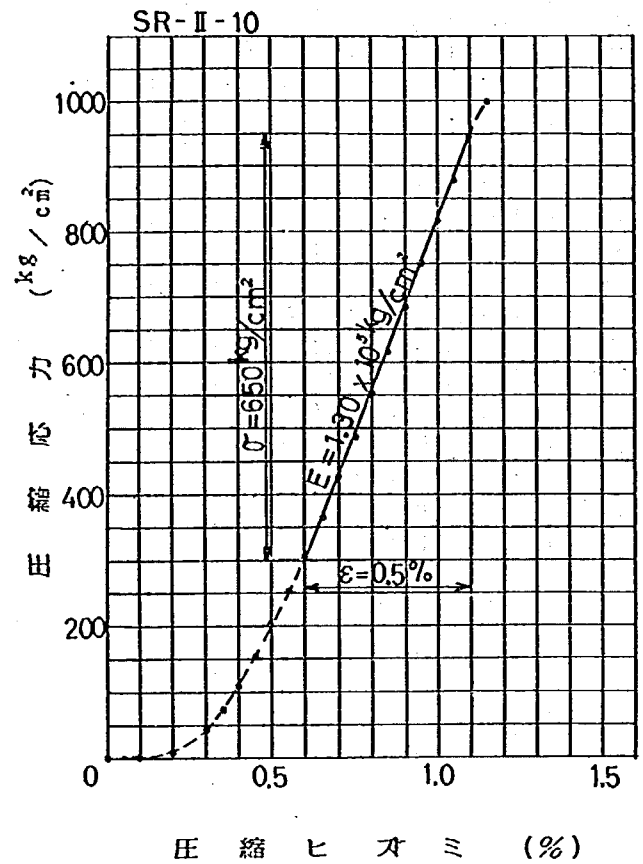
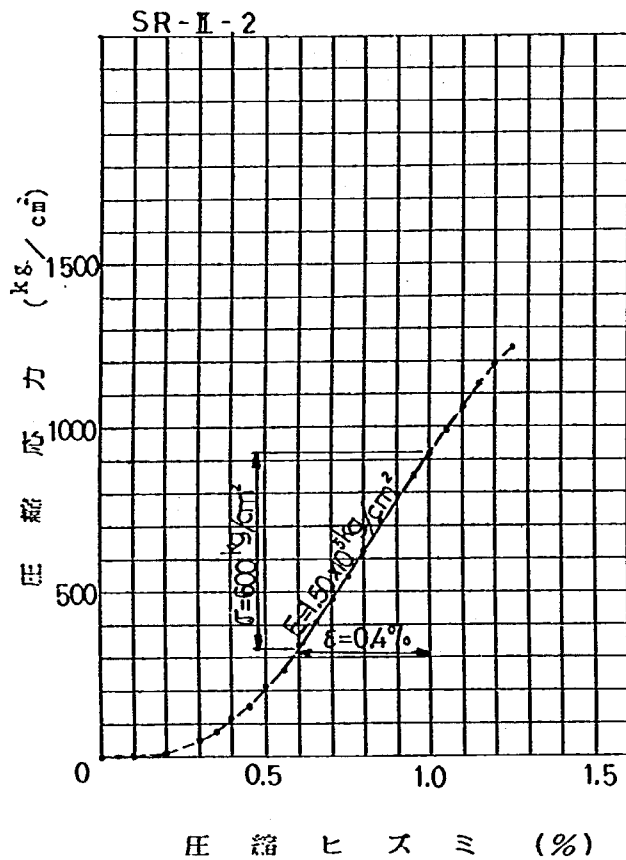
圧縮応力 (kg/cm²)

圧縮応力 (kg/cm²)

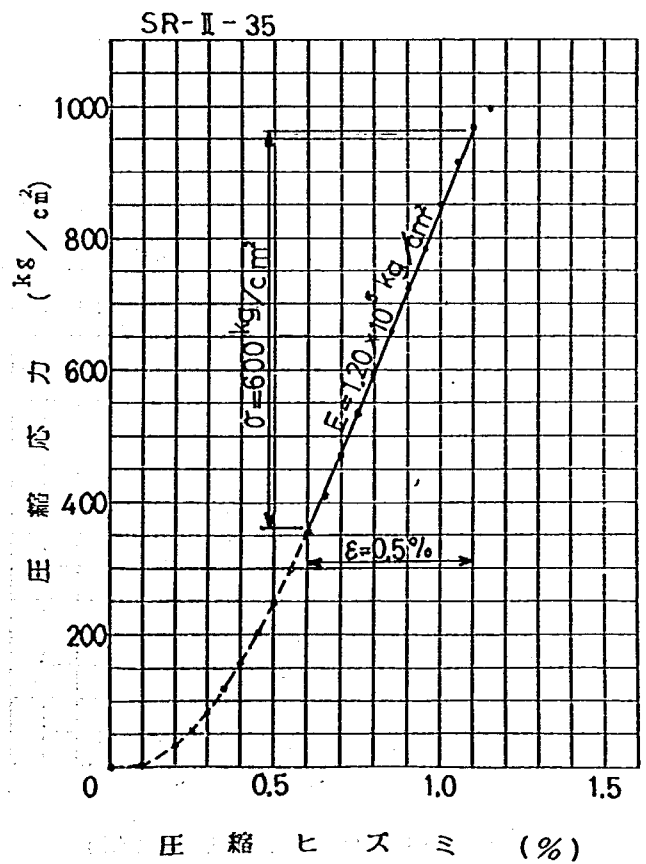
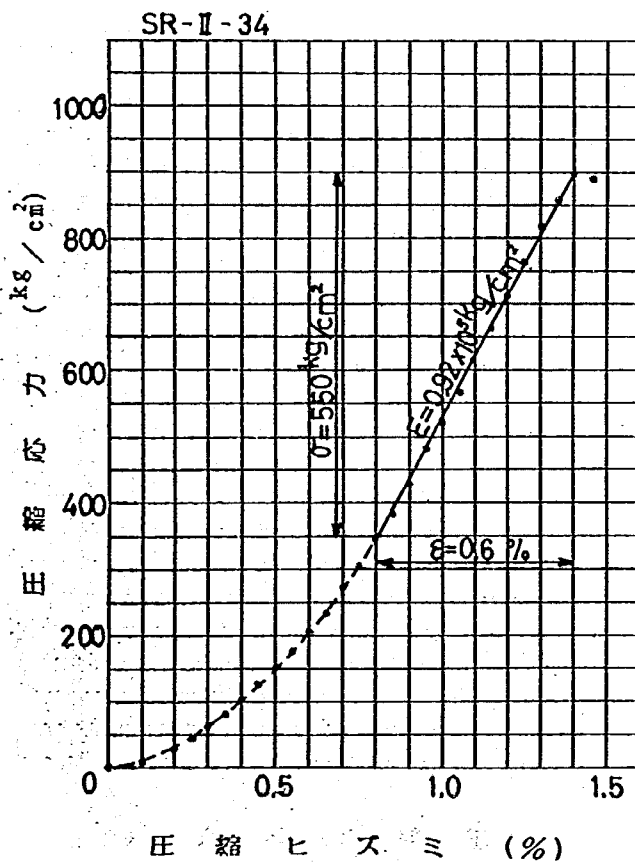
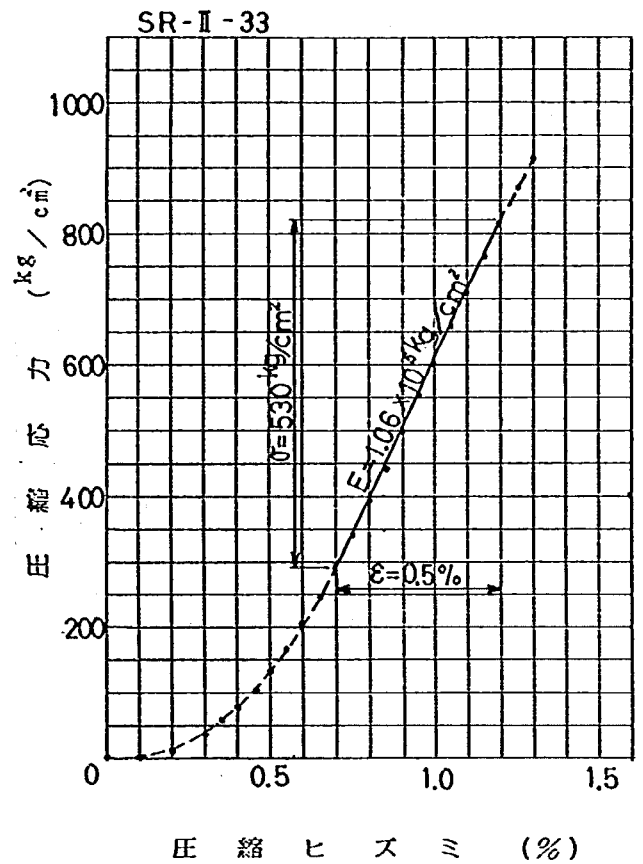
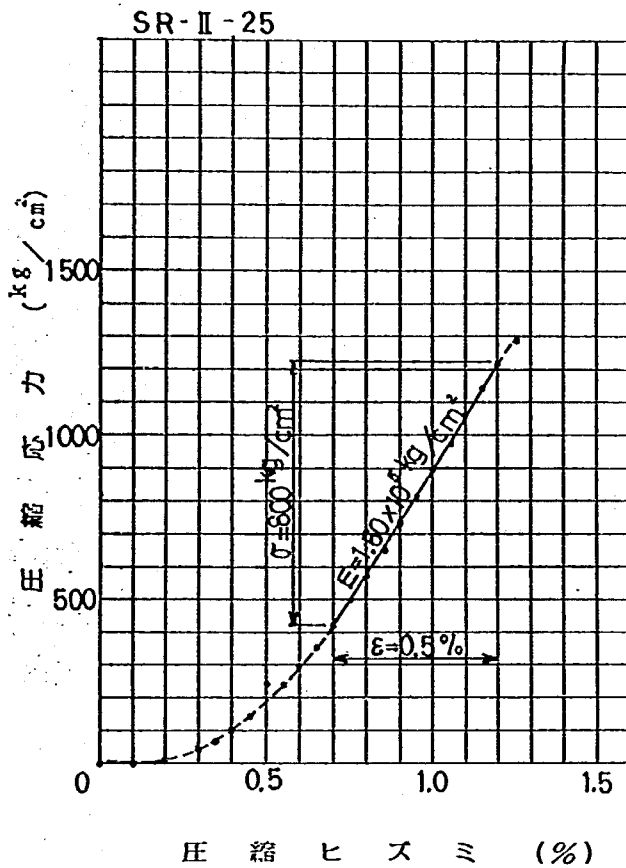
圧縮ヒズミ (%)

圧縮ヒズミ (%)

一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)

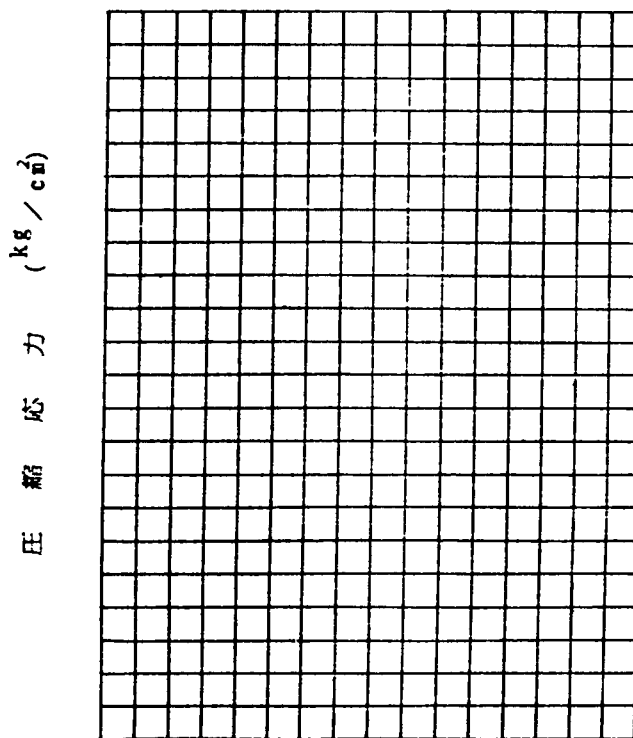
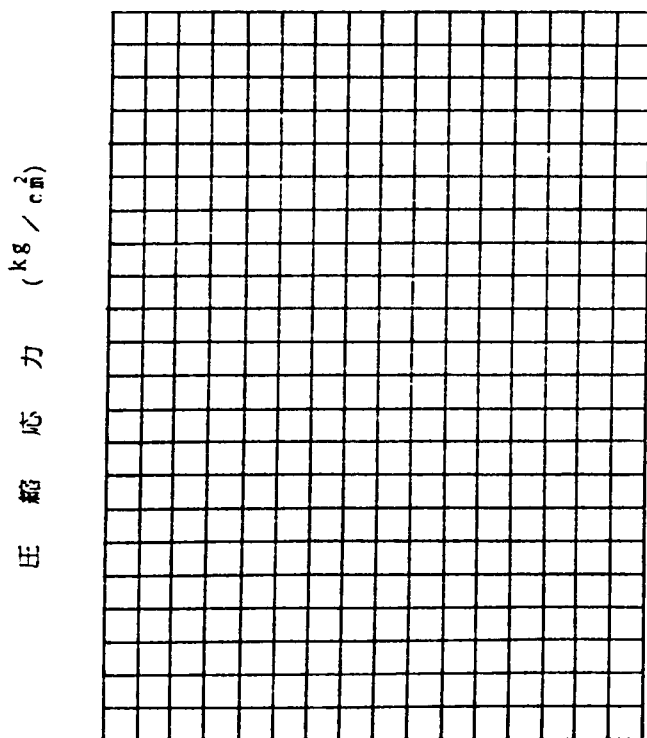
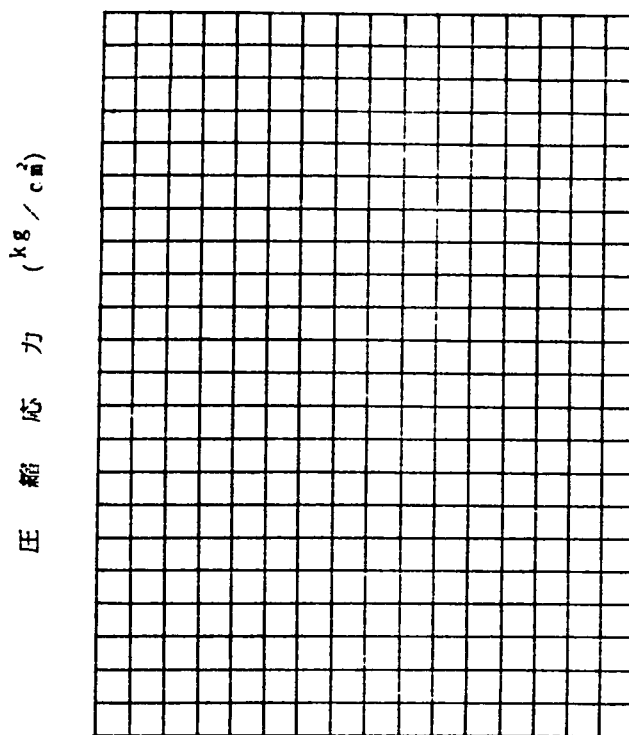
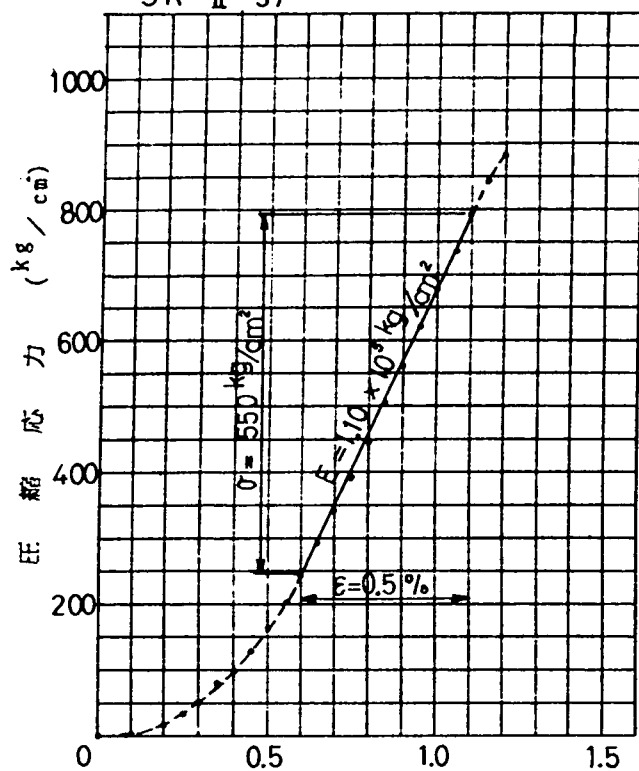


一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)



一軸圧縮試験 (応力～ひずみ曲線)

SR-II-37



圧縮ヒズミ (%)

圧縮ヒズミ (%)

附図－２ 一軸圧縮試験の破壊状況図

SR-41



SR-42



SR-43



SR-44



SR-45



SR-I-5



SR-I-11



SR-I-15



SR-I-18



SR-I-20



SR-I-23



SR-I-24



SR-I-30



SR-I-38



SR-II-2



SR-II-10



SR-II-17



SR-II-22



SR-II-25



SR-II-33



SR-II-34



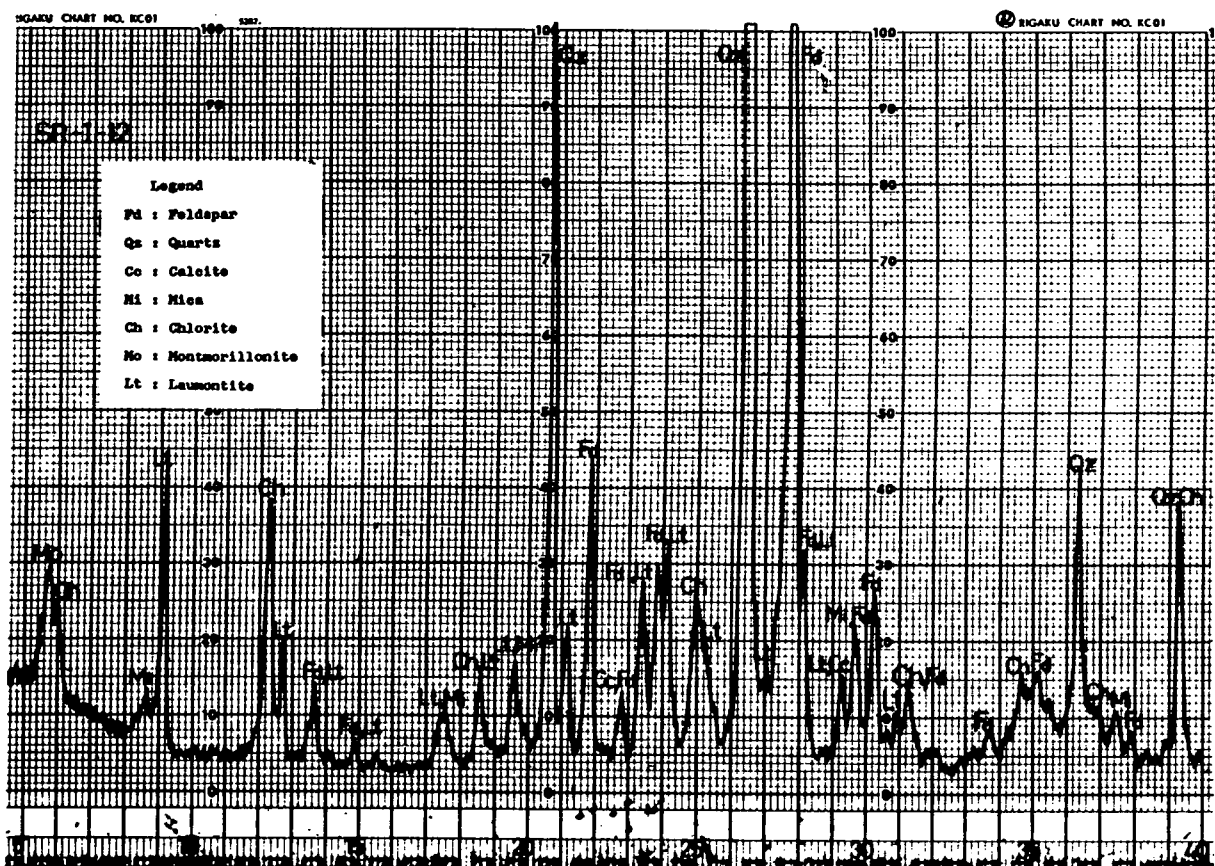
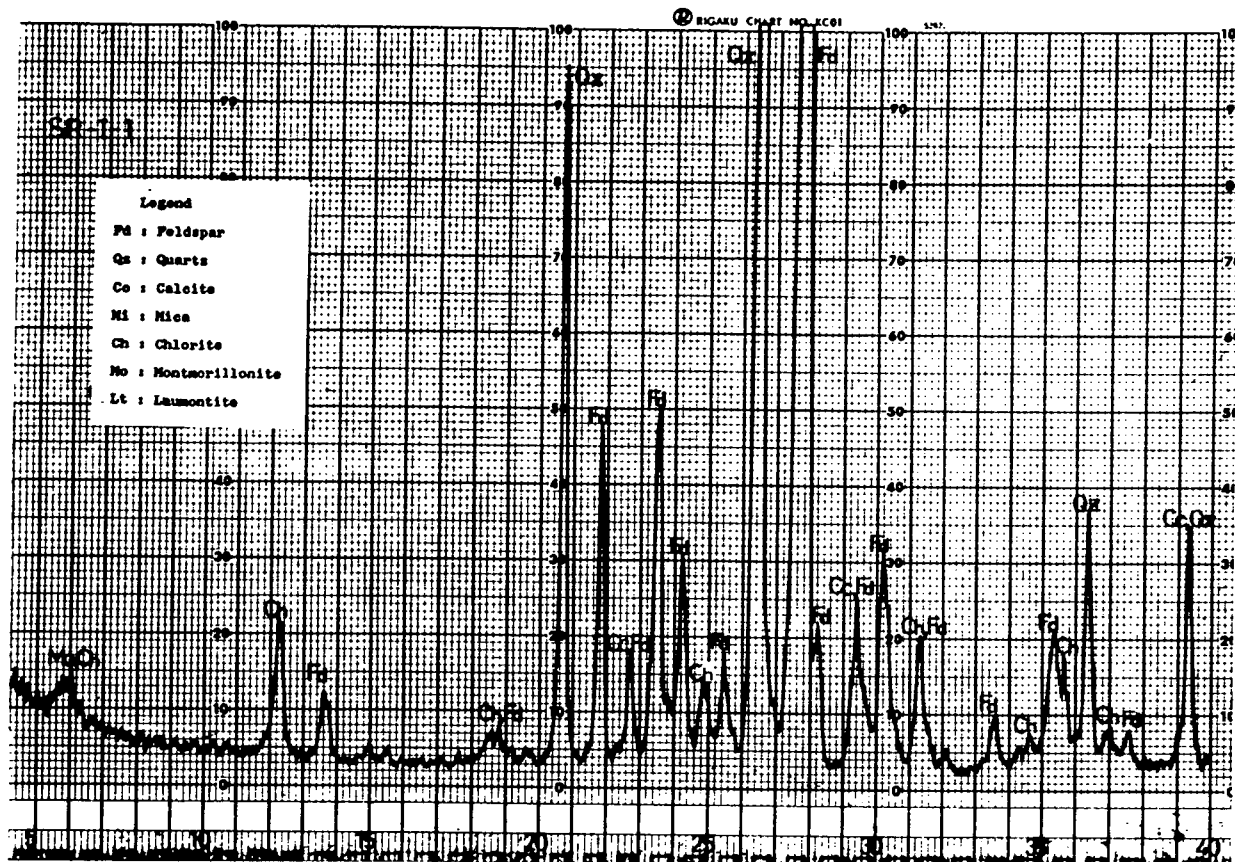
SR-II-35

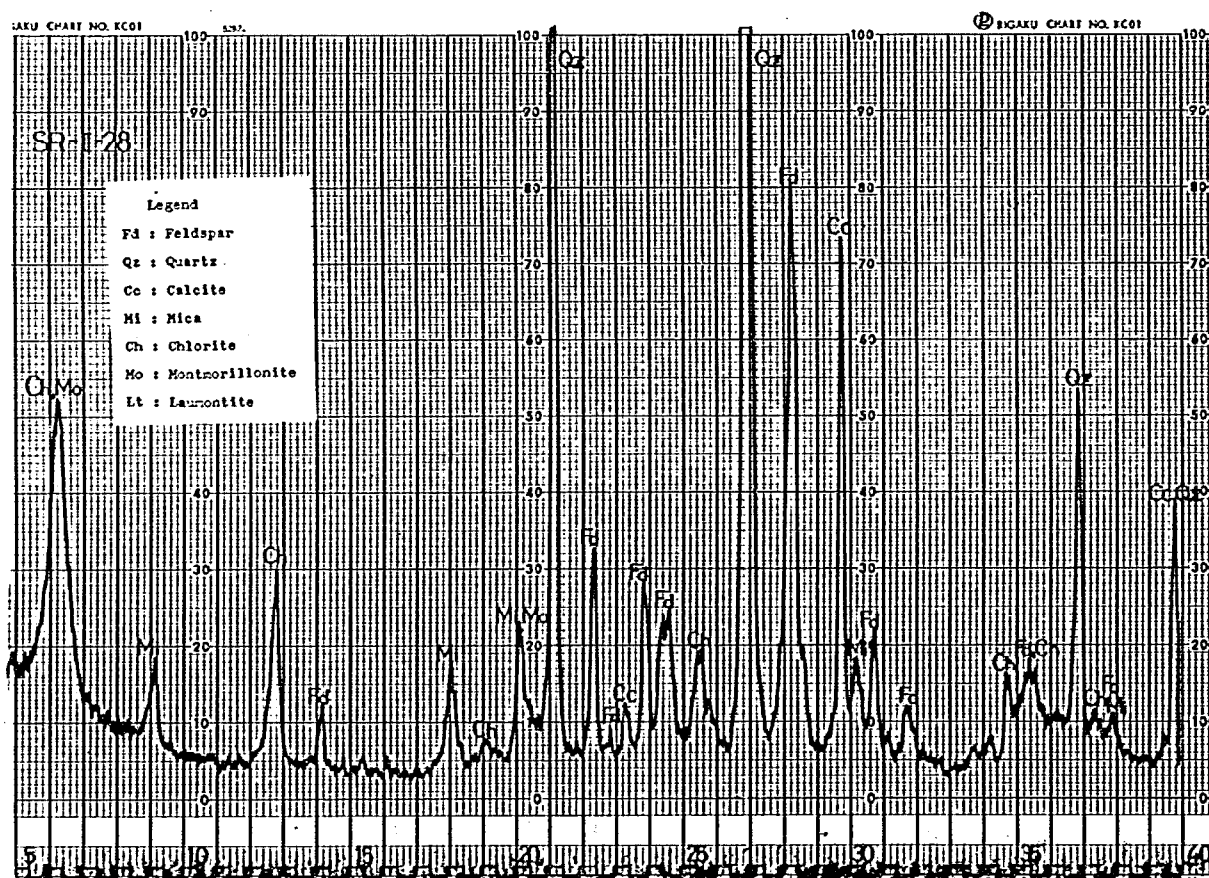
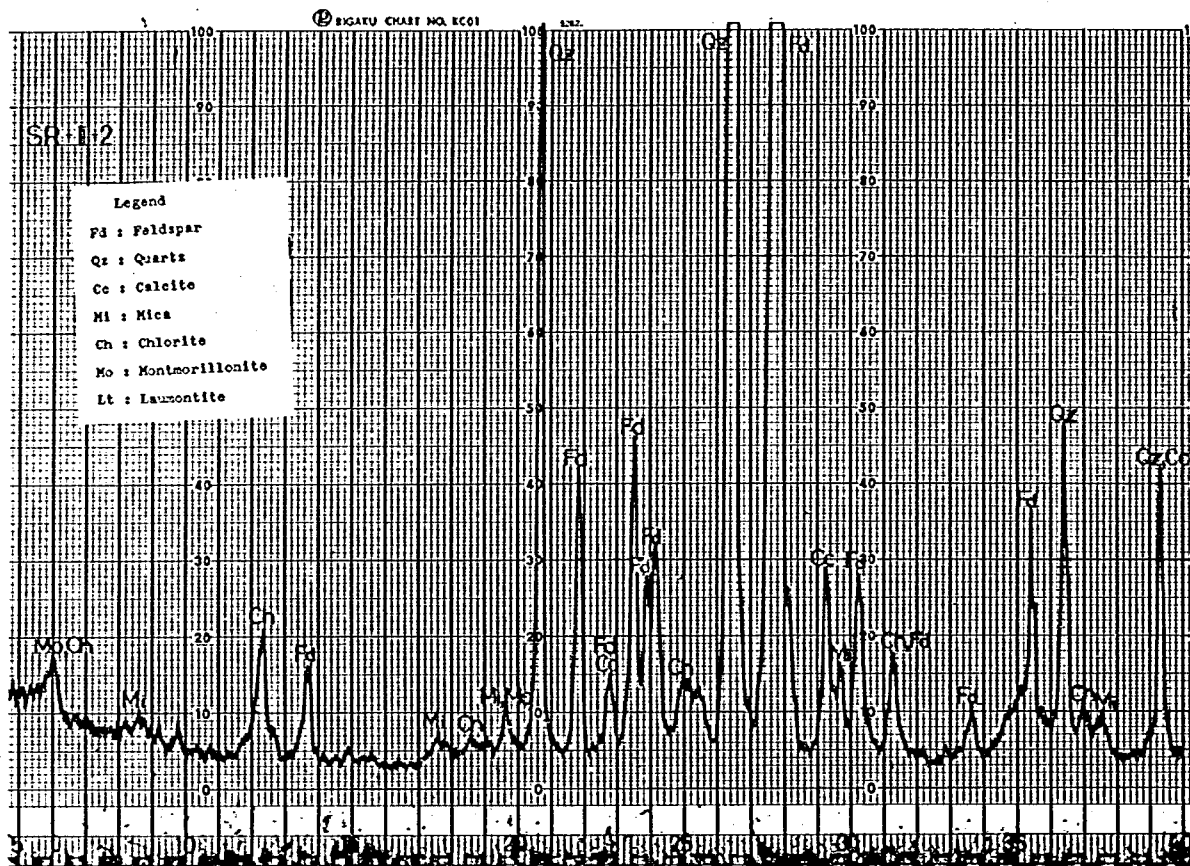


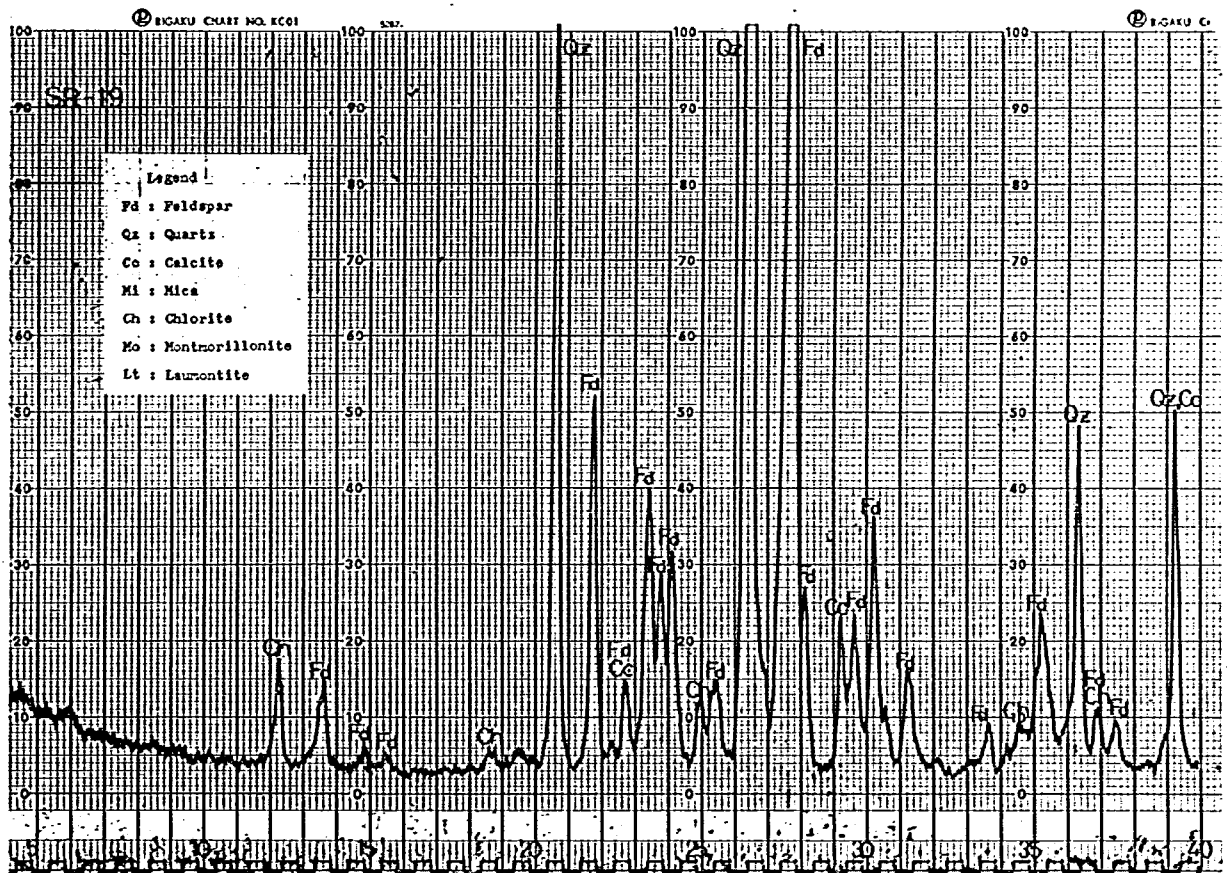
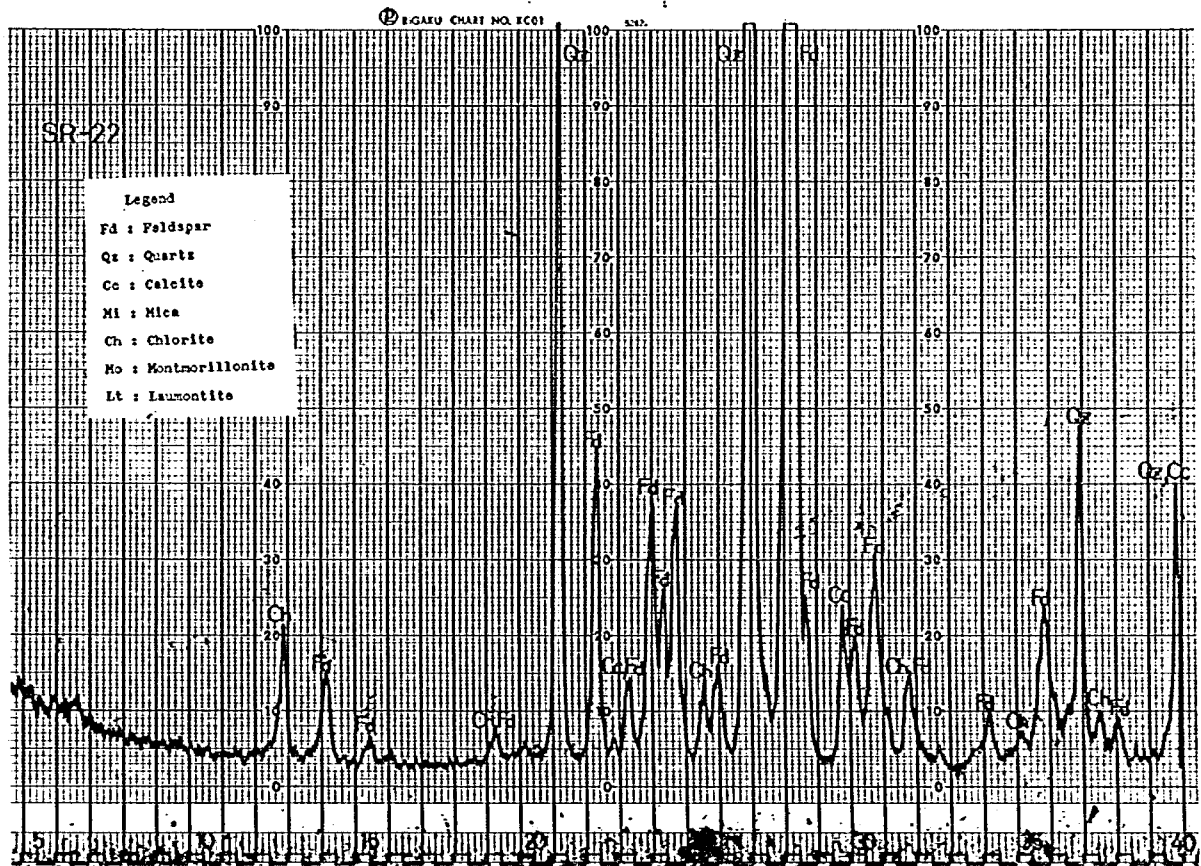
SR-II-37



附図一 3 X線回折チャート



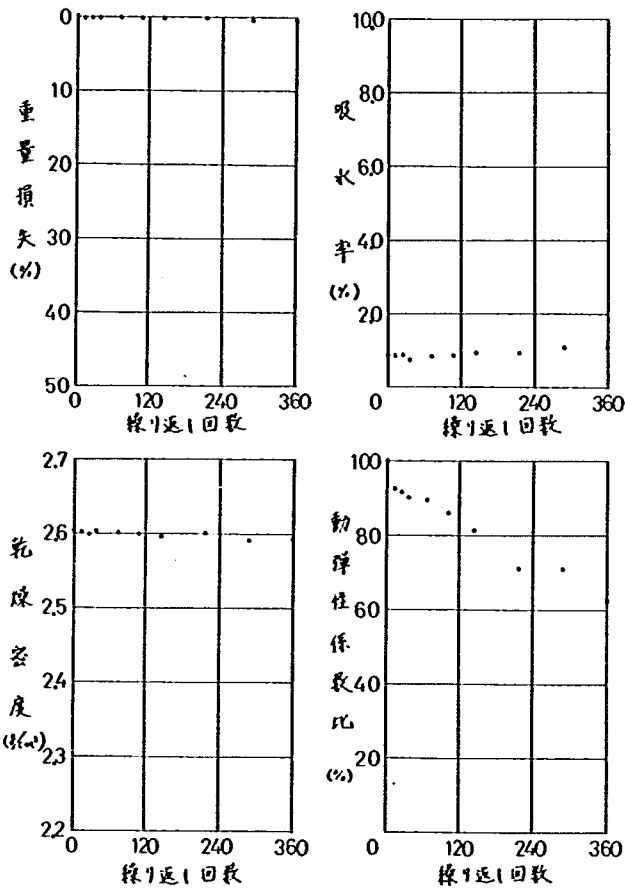




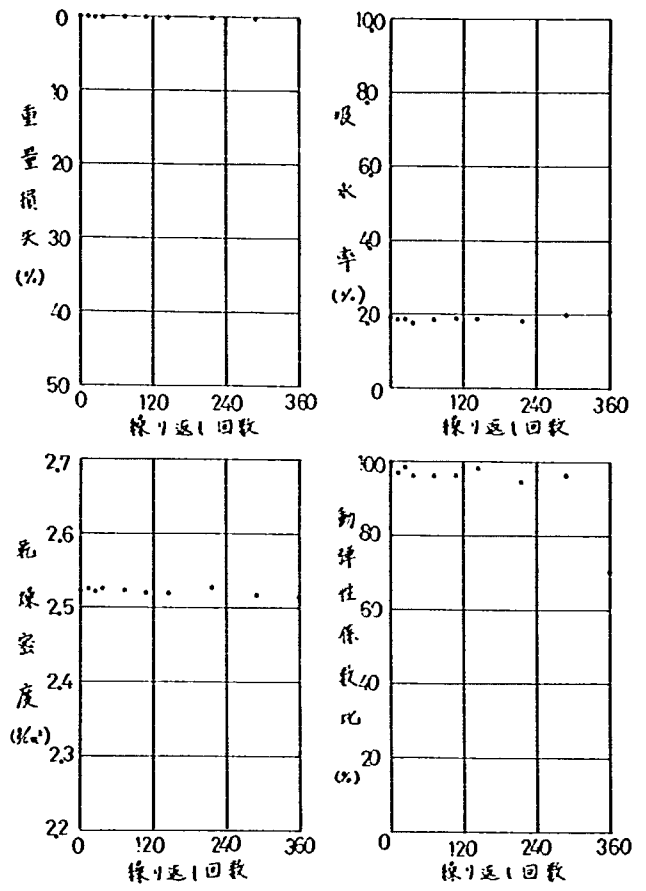
附図－４ 凍結融解試験における各種物理量の経時変化

附圖－4 (1) SR- I

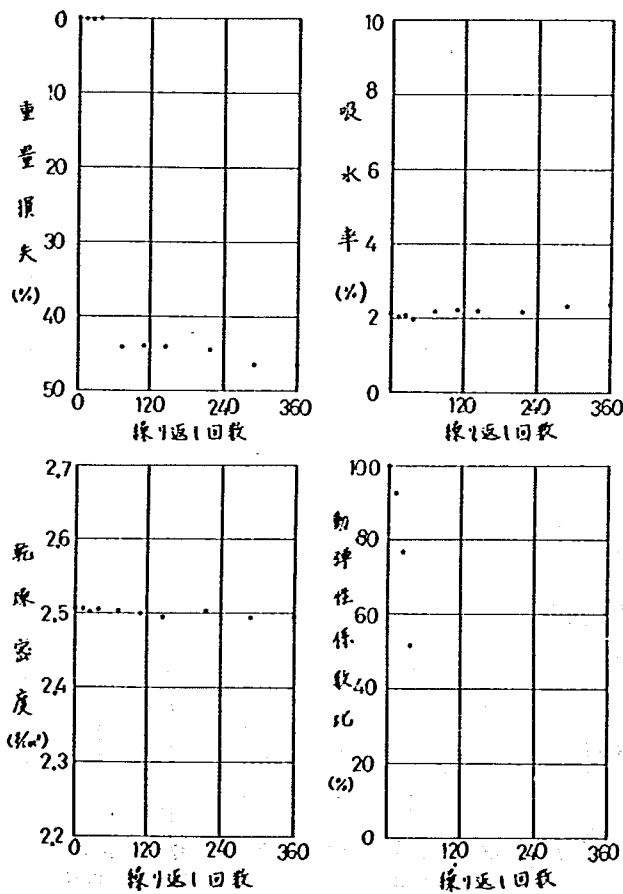
SR-I-1



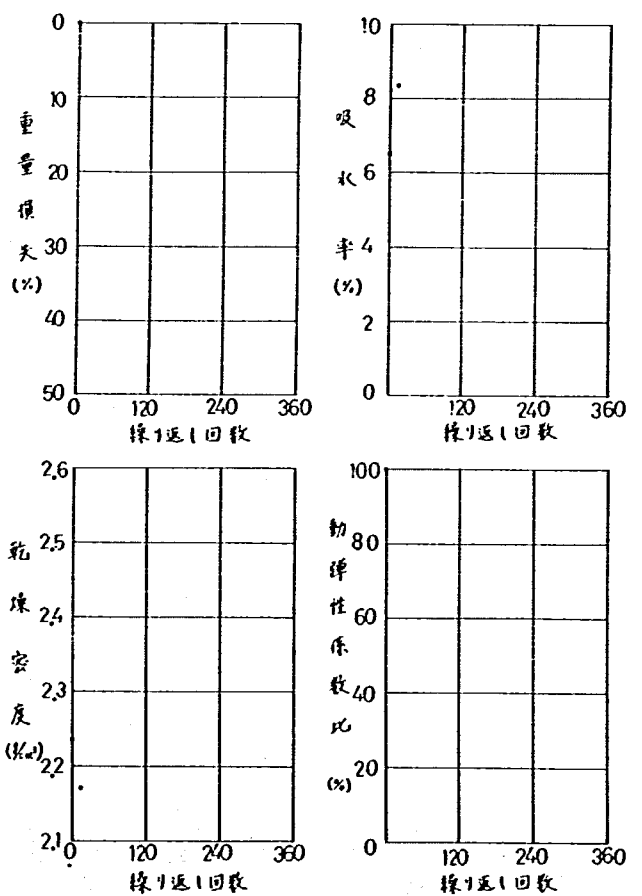
SR-I-4



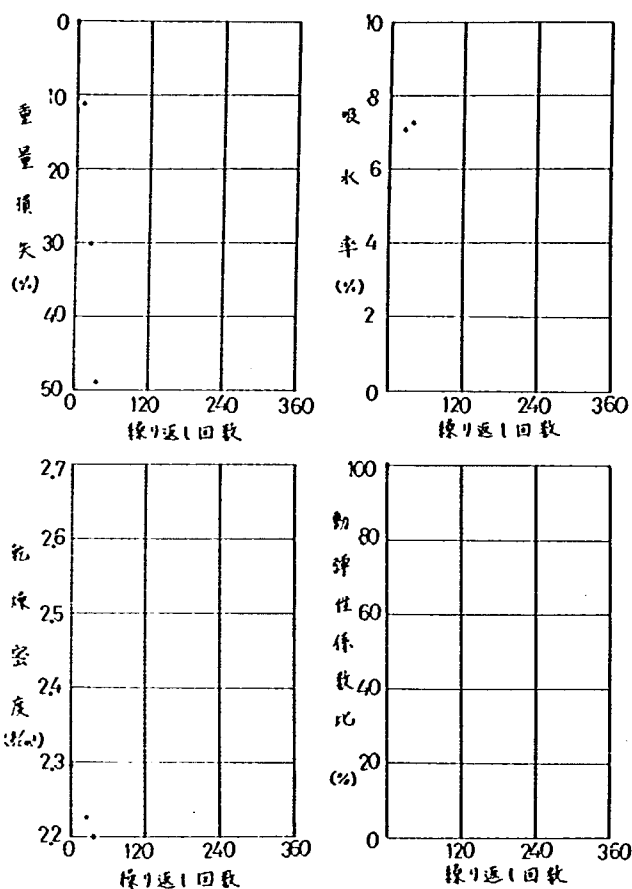
SR-I-7



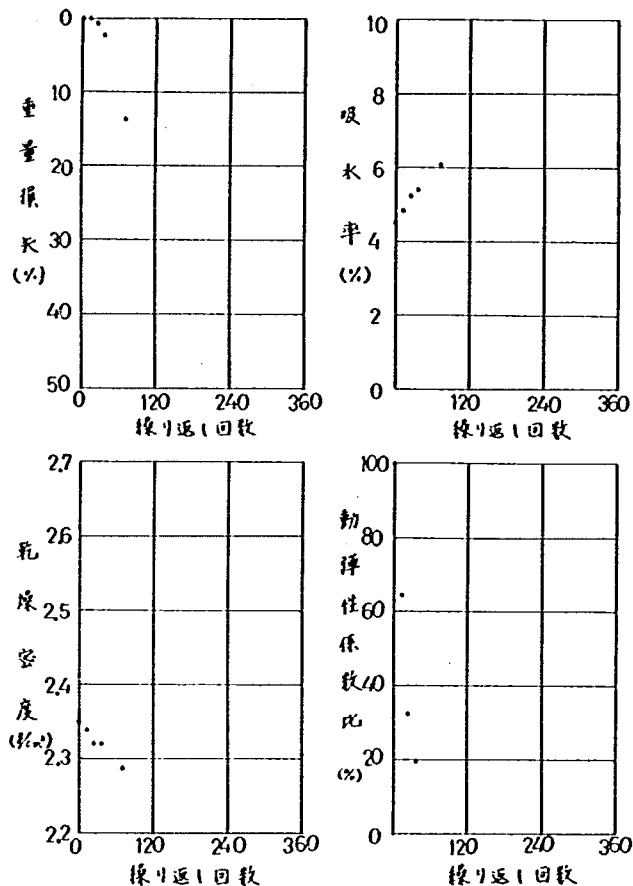
SR-I-12



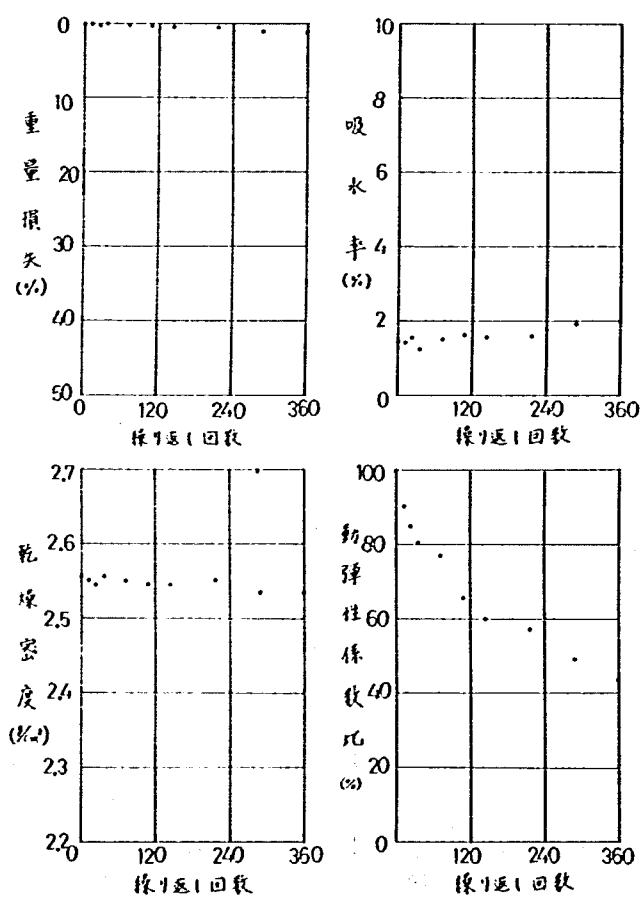
SR-I-13



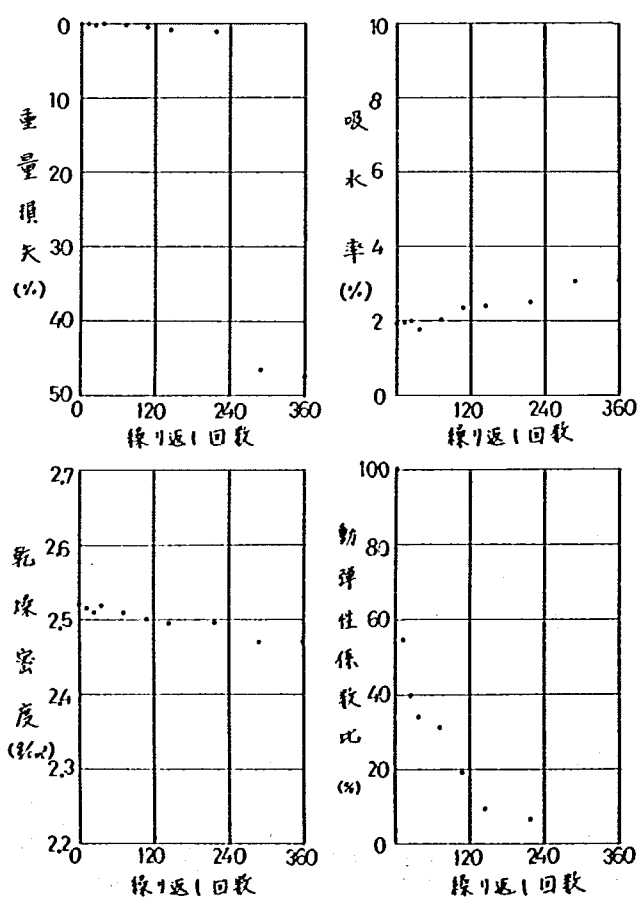
SR-I-14



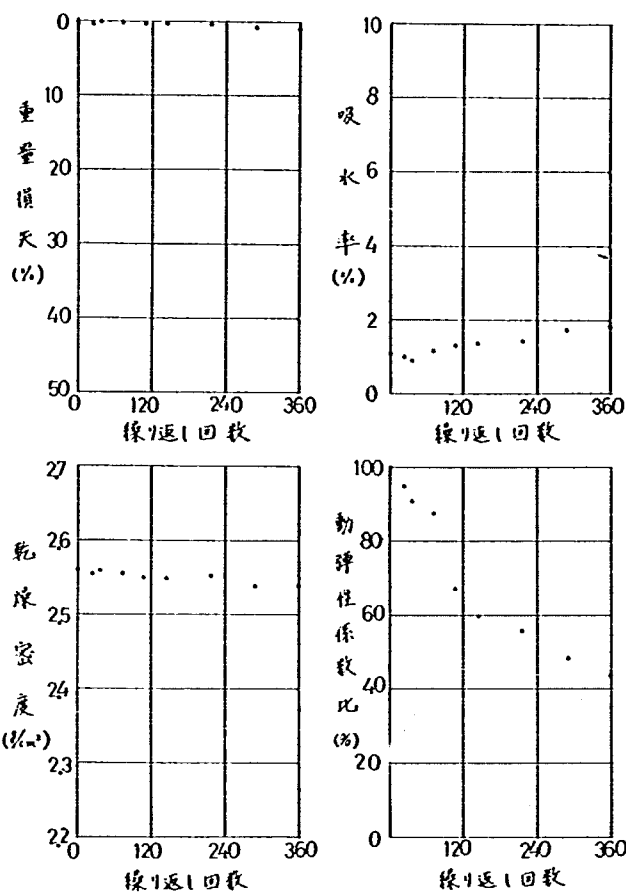
SR-I-17



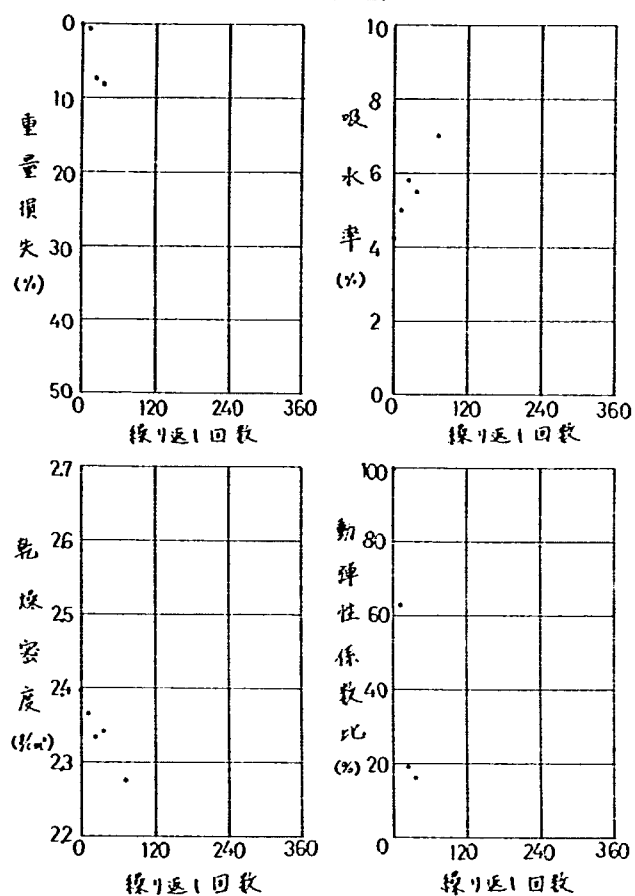
SR-I-19



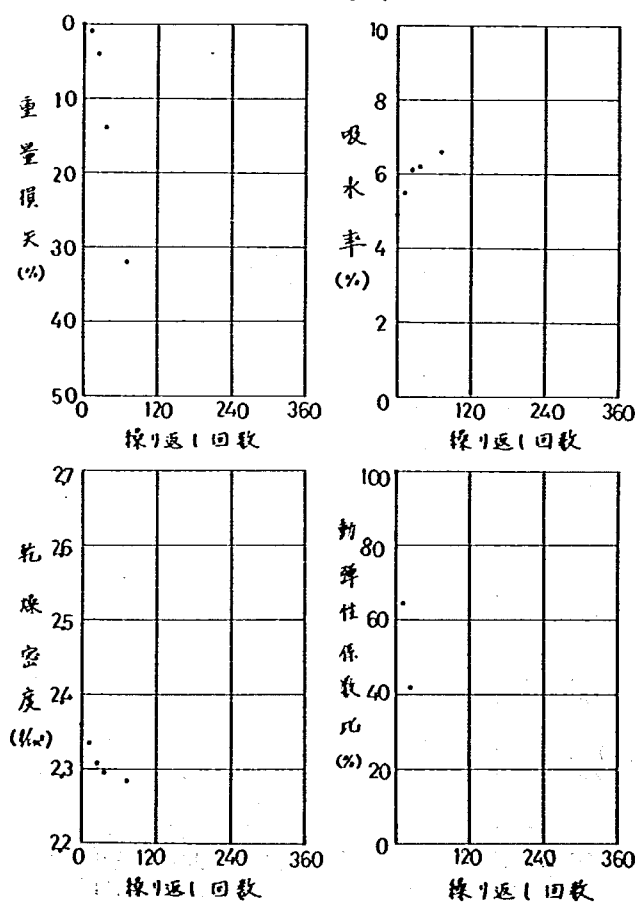
SR-I-22



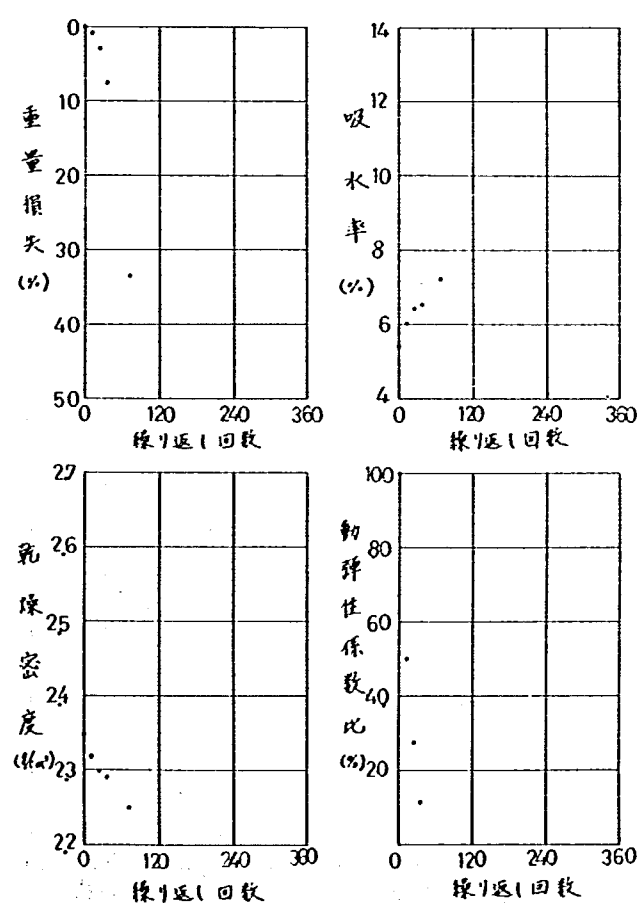
SR-I-27



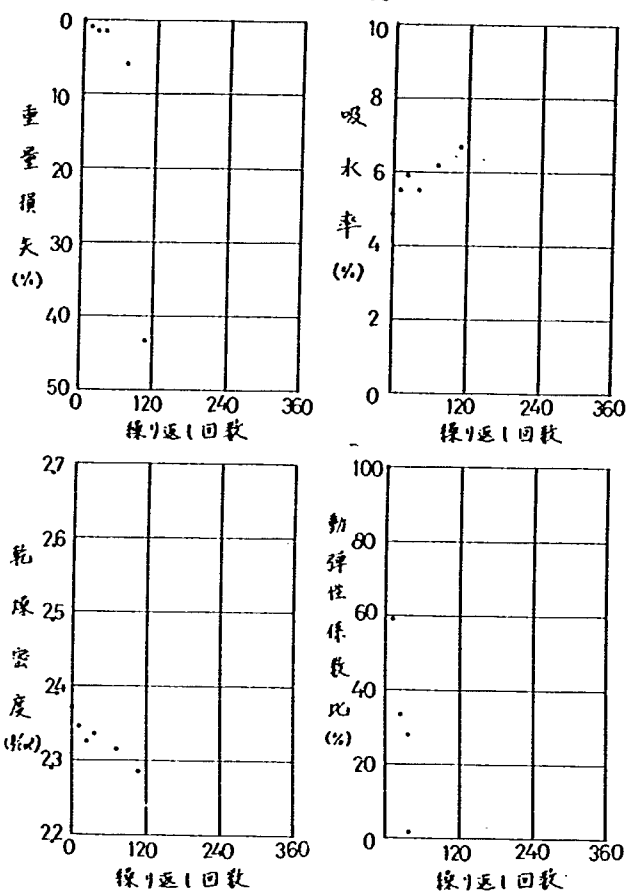
SR-I-28



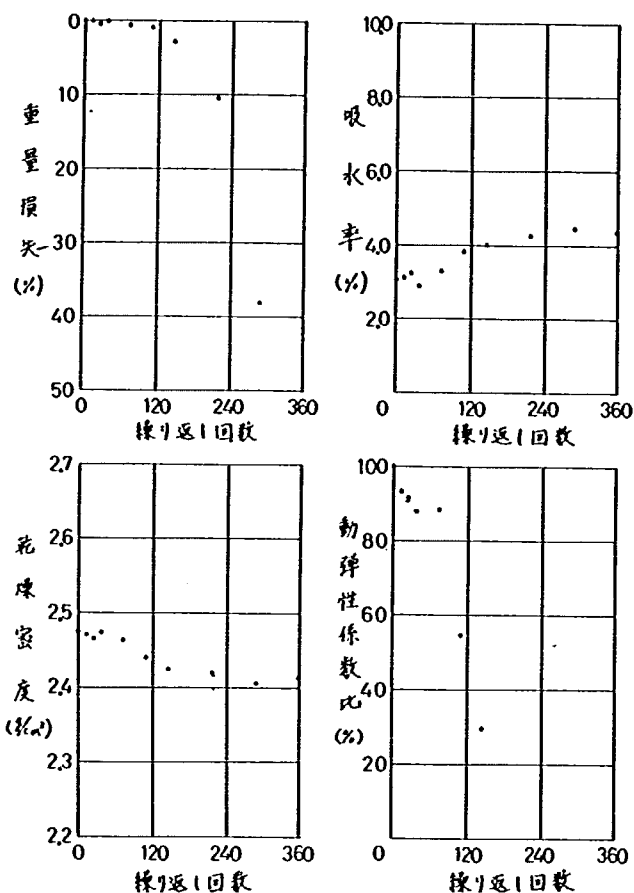
SR-I-35



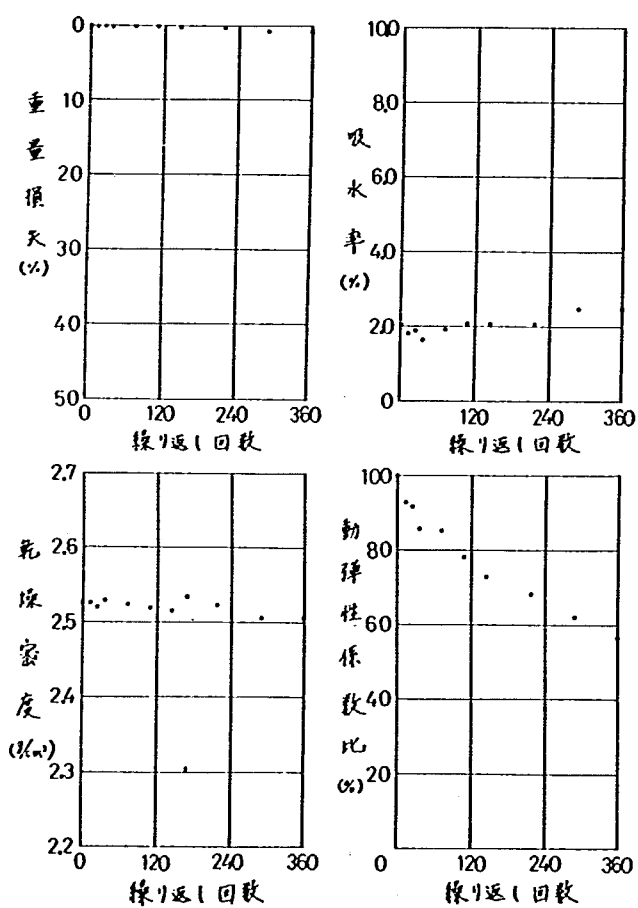
SR-I-36



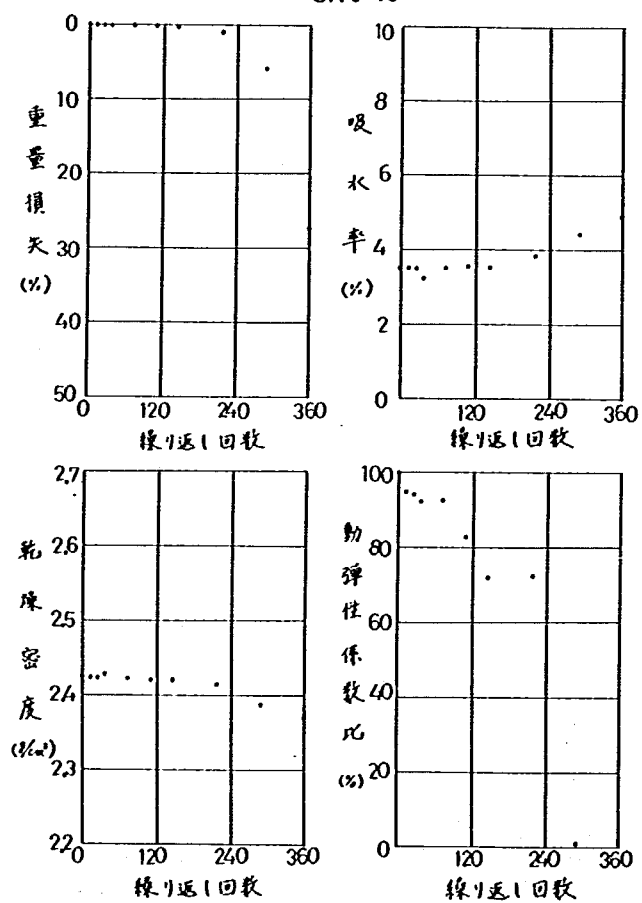
SR-I-39



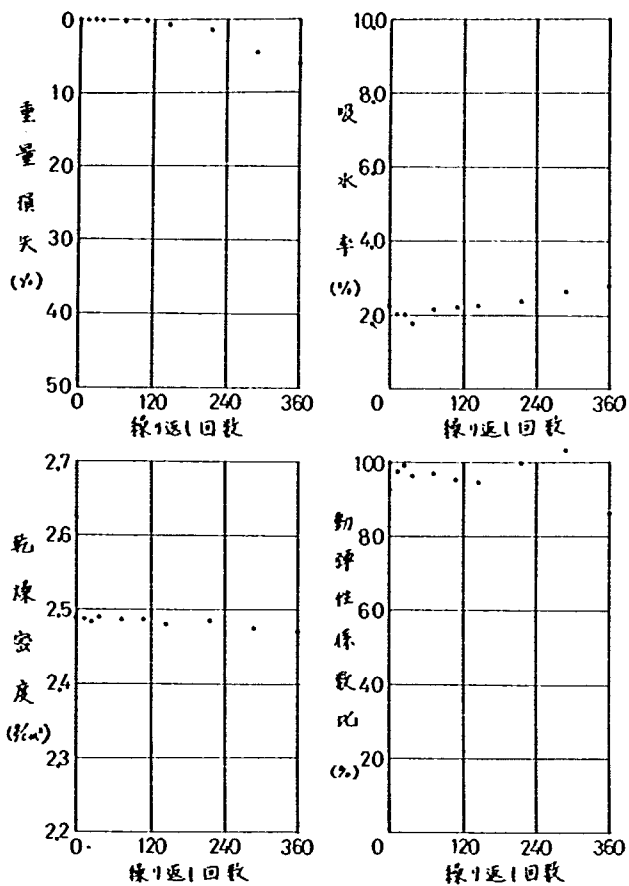
SR-I-40



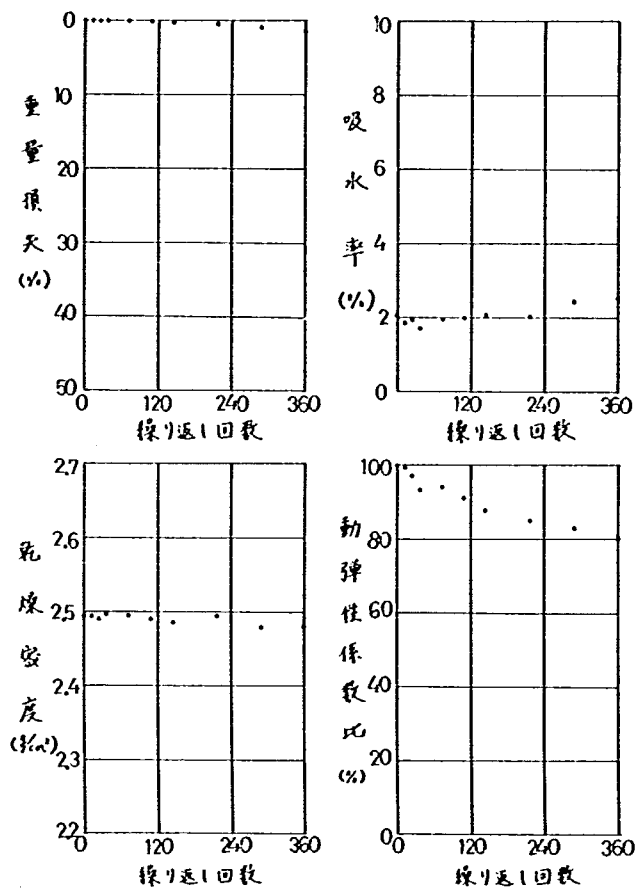
SR-I-43



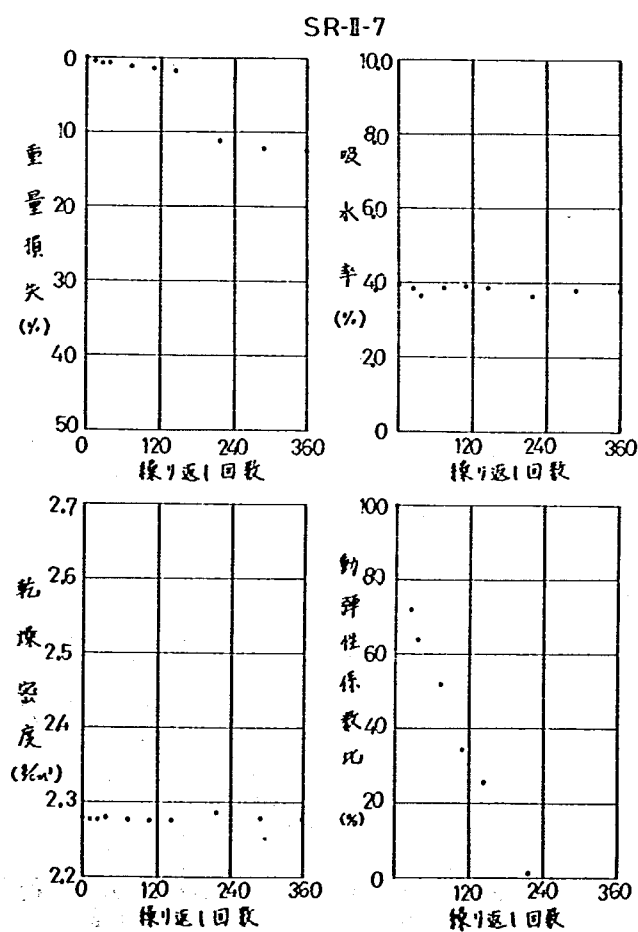
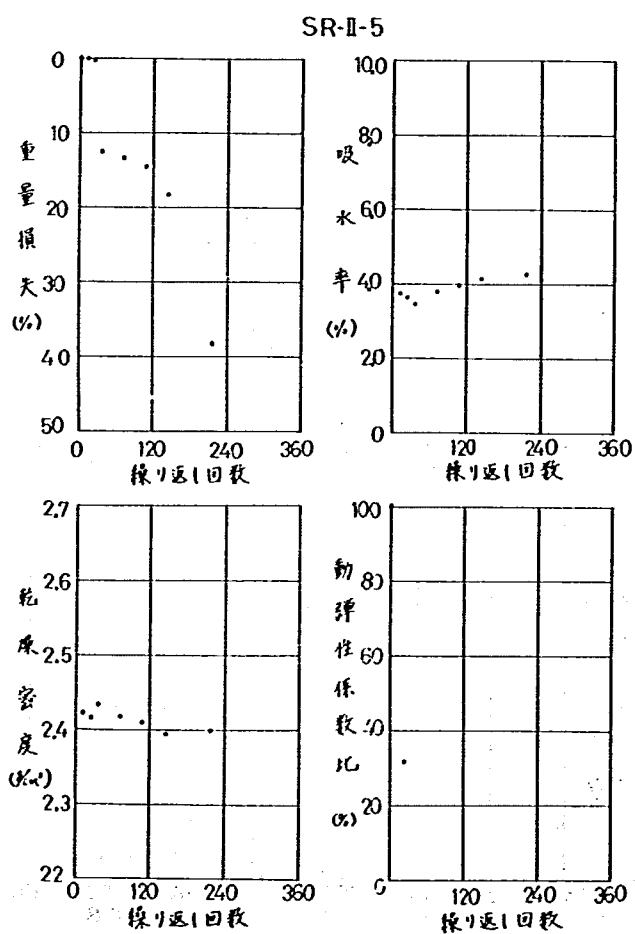
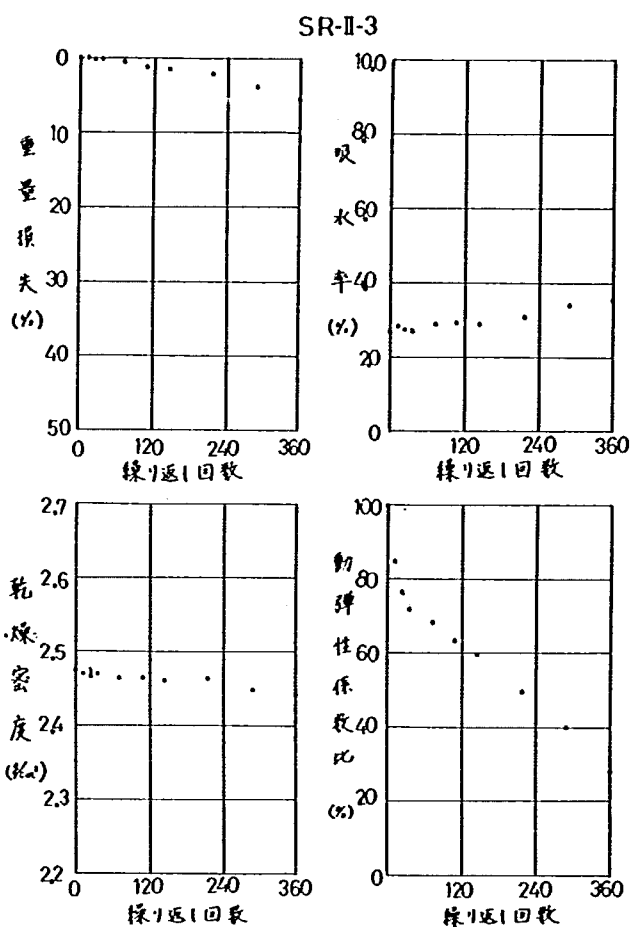
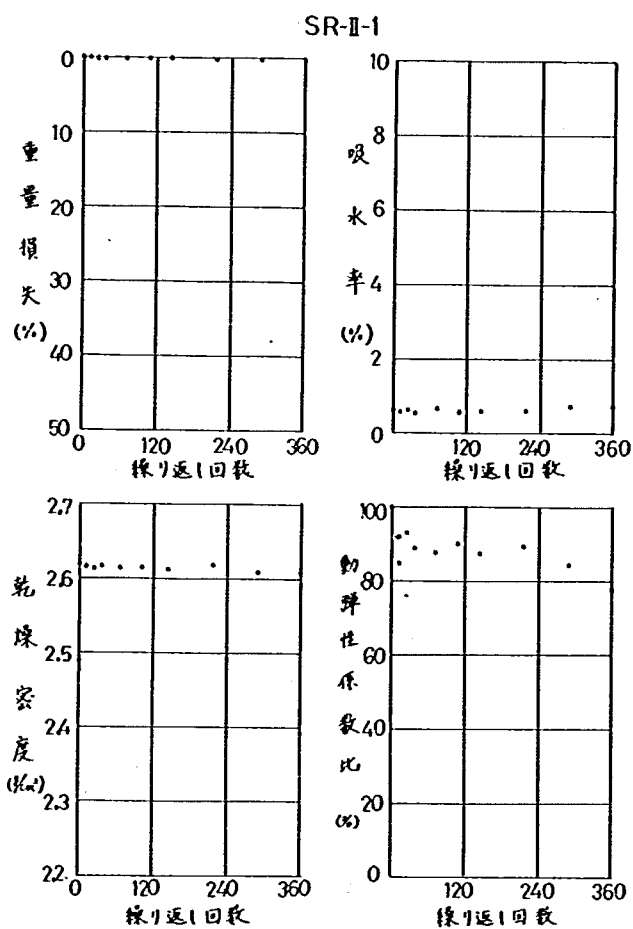
SR-I-44



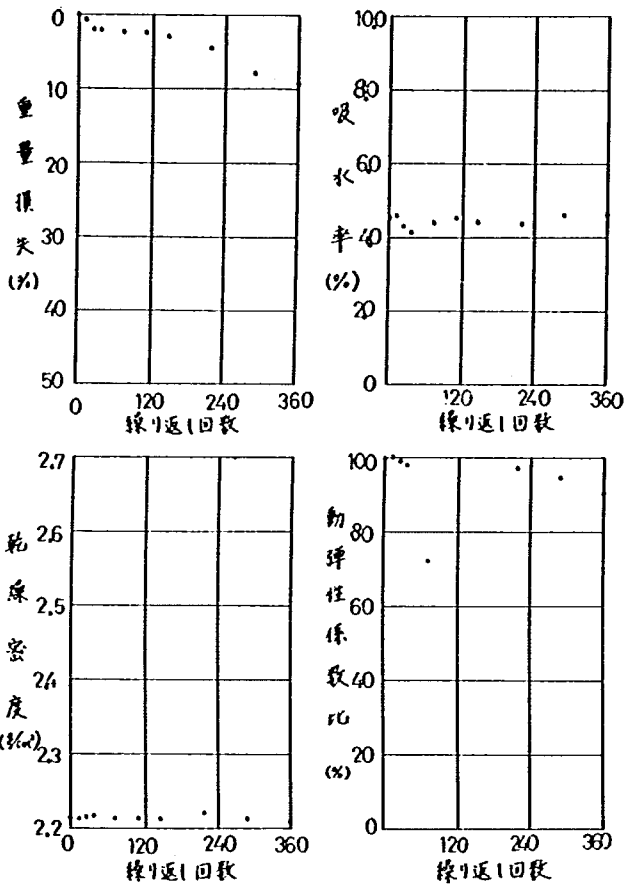
SR-I-45



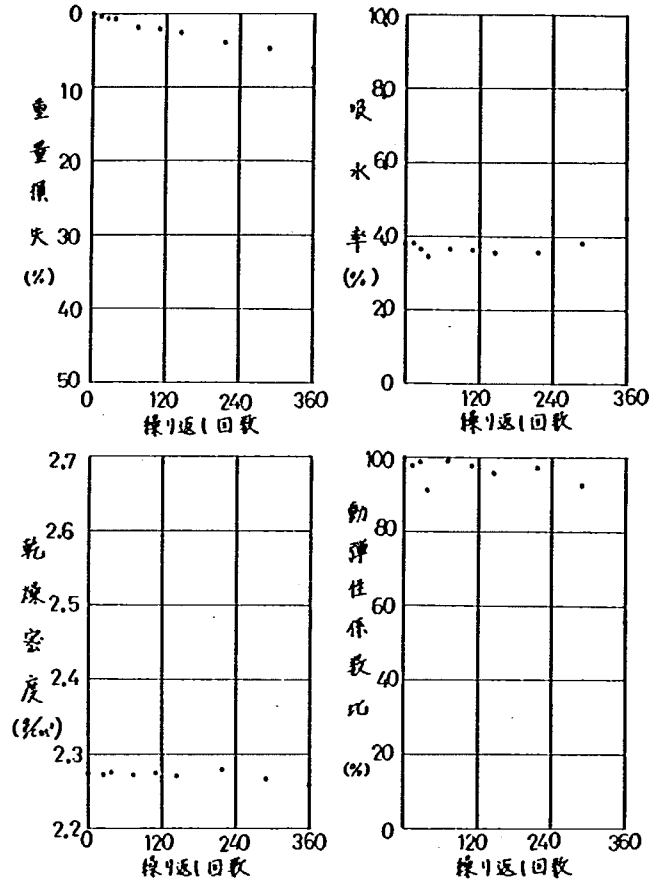
附圖—4 (2) SR-II



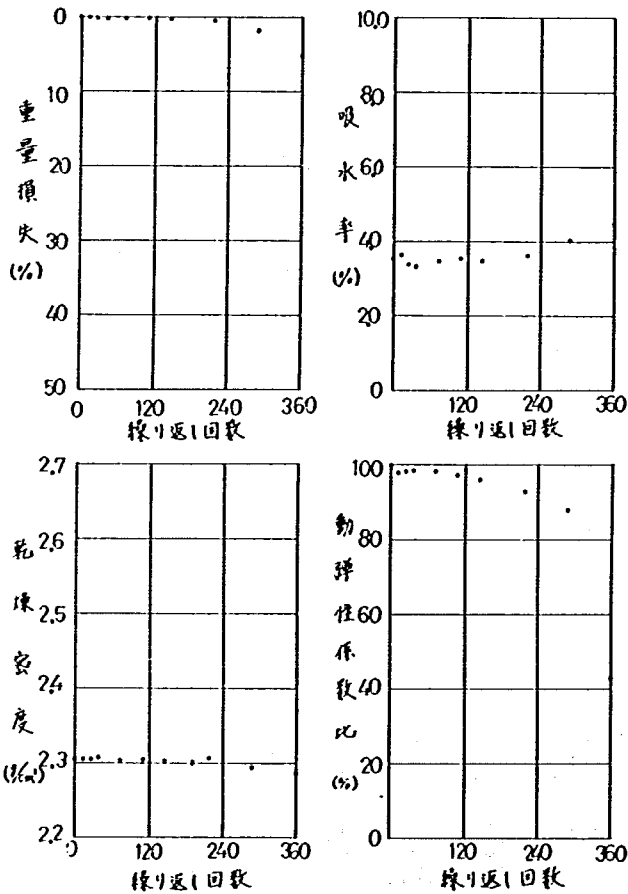
SR-II-12



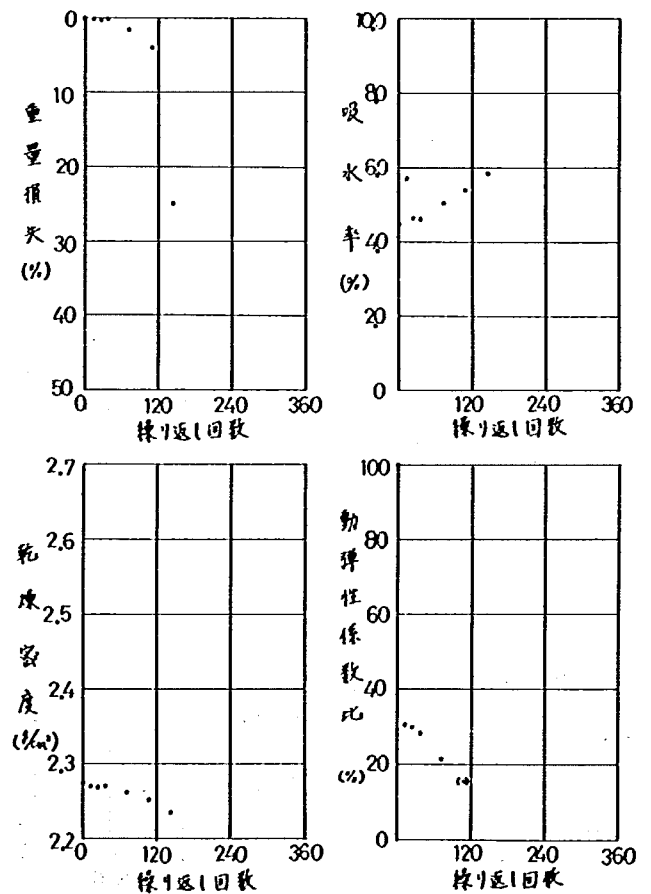
SR-II-13



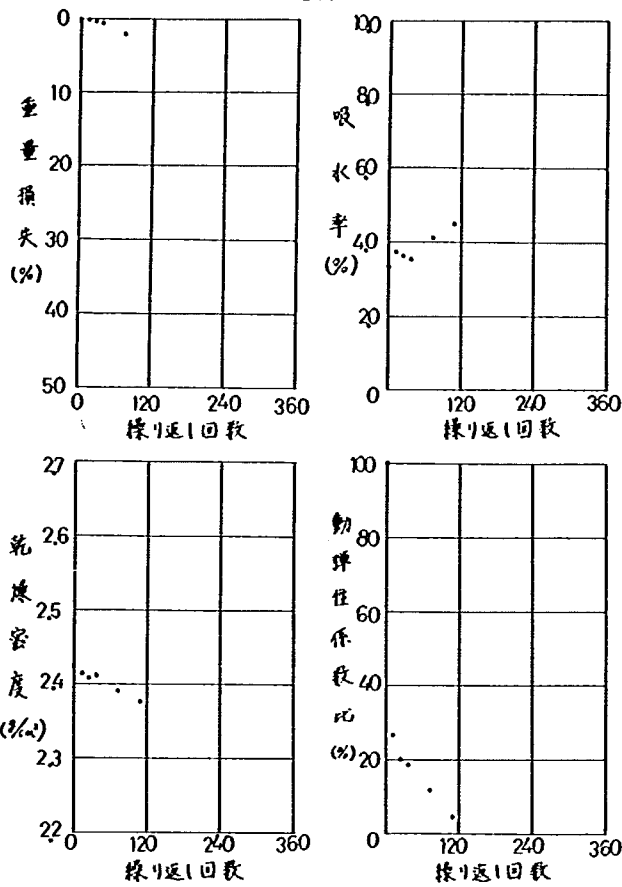
SR-II-16



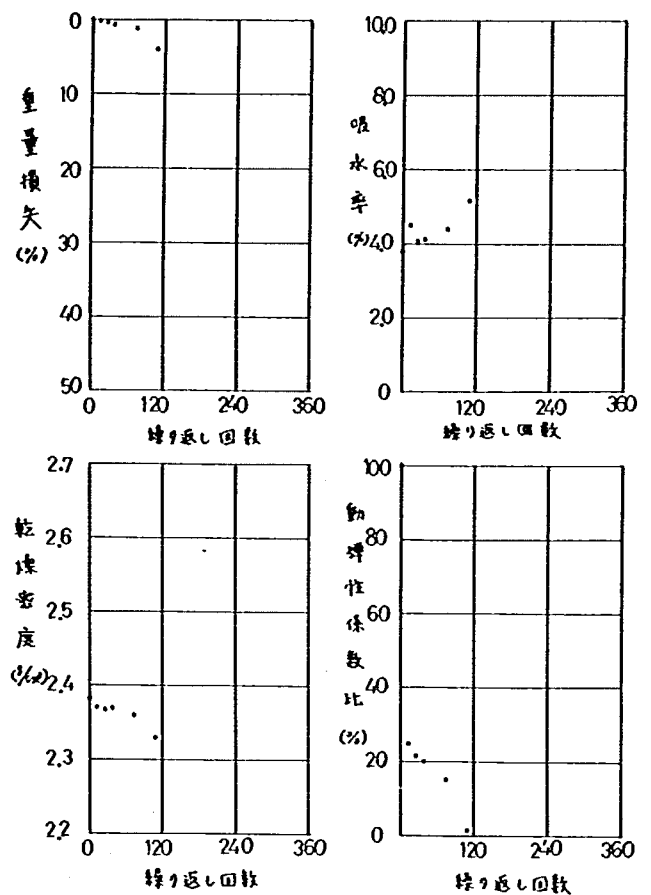
SR-II-19



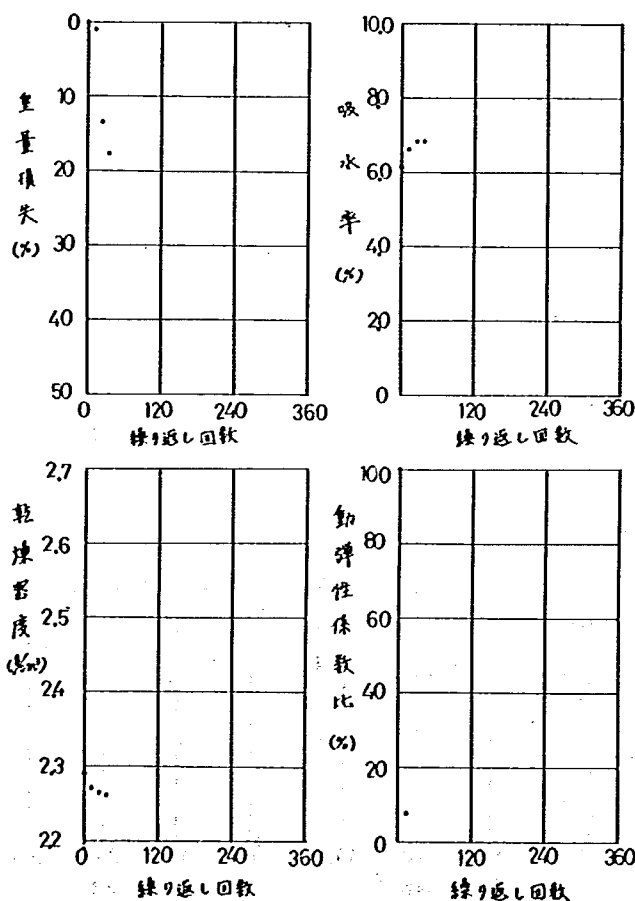
SR-II-26



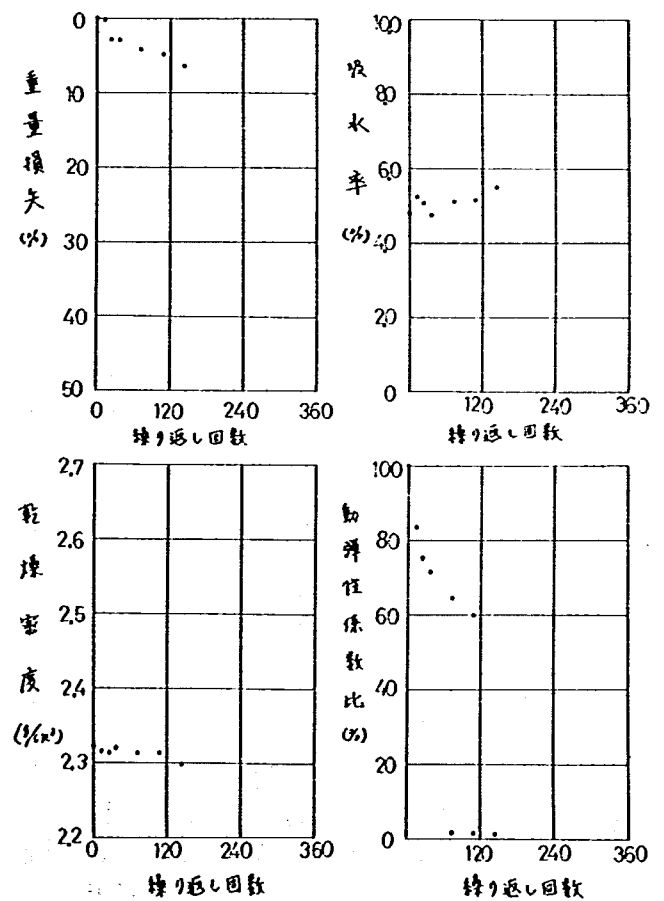
SR-II-27



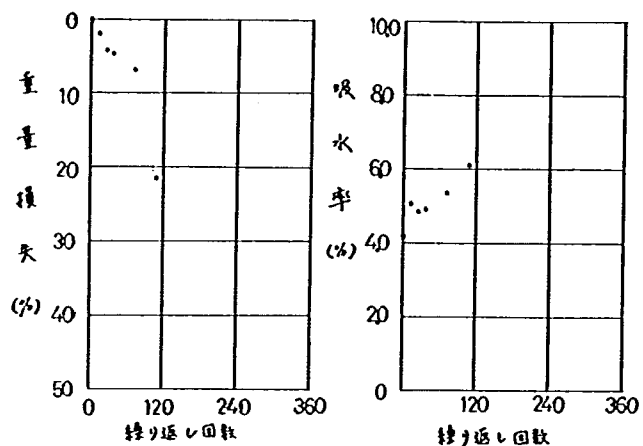
SR-II-29



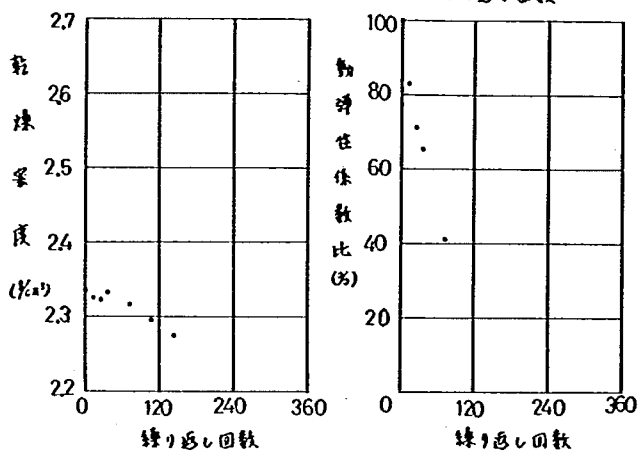
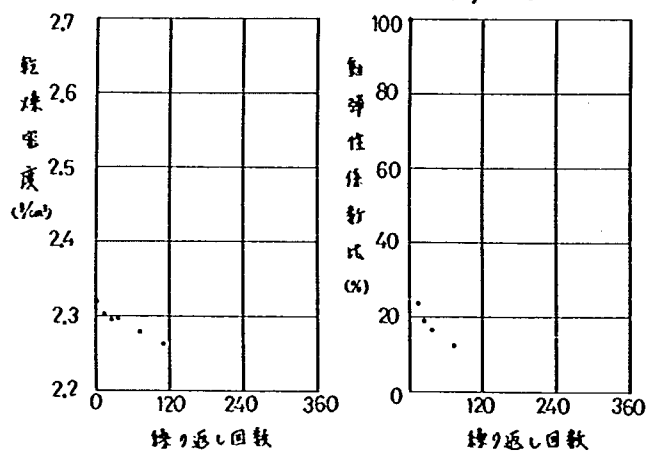
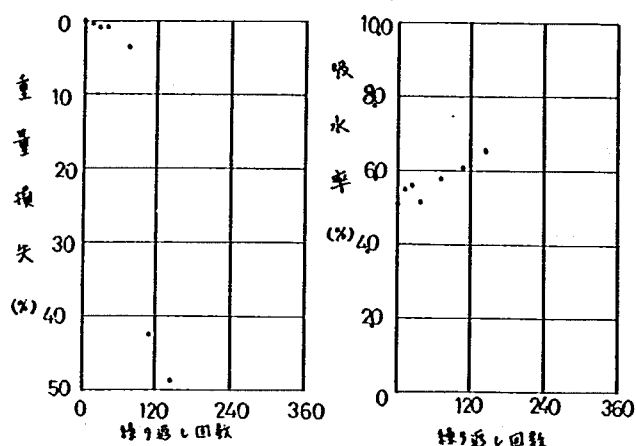
SR-II-30



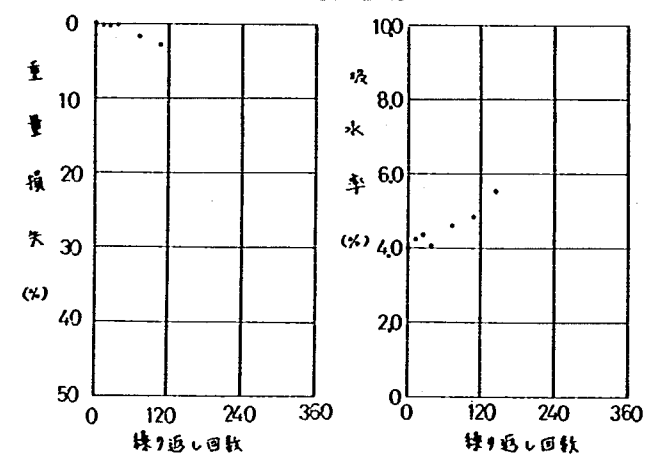
SR-II-36



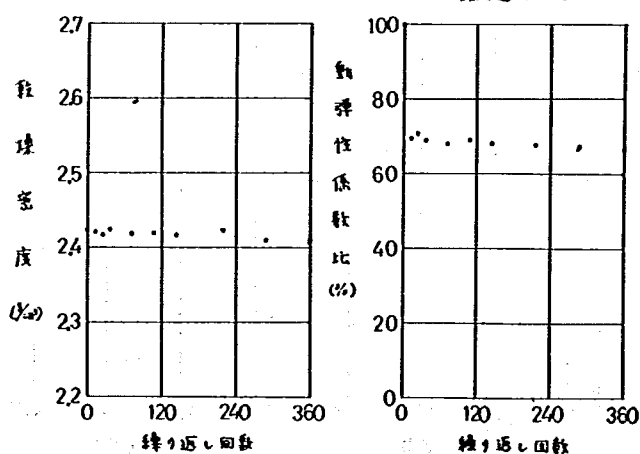
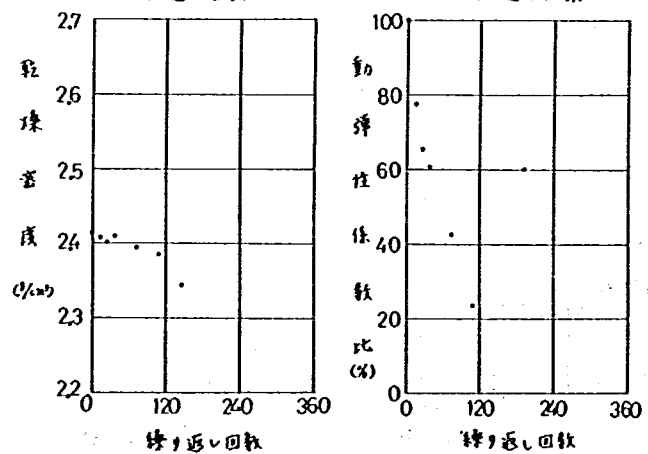
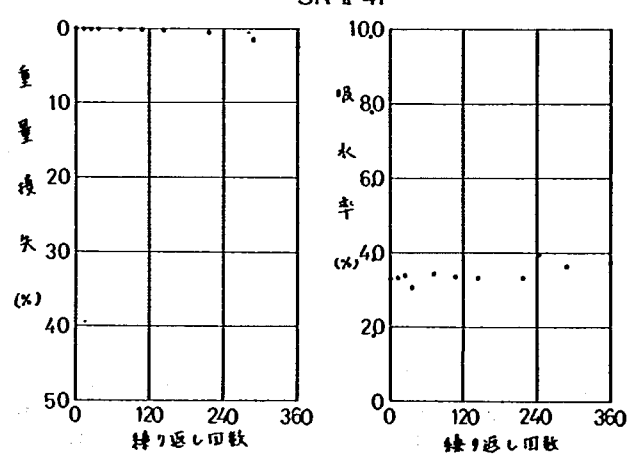
SR-II-38



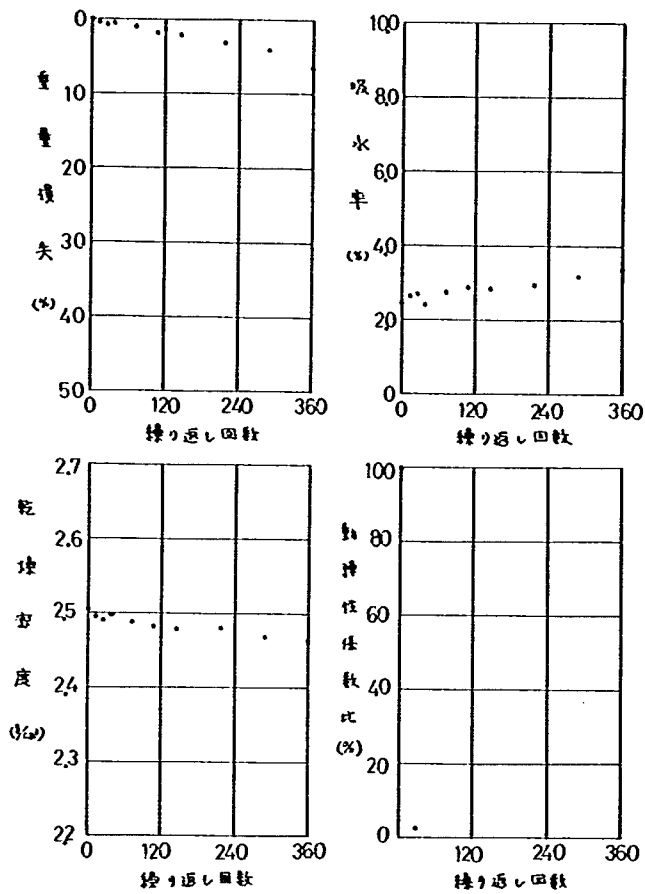
SR-II-40



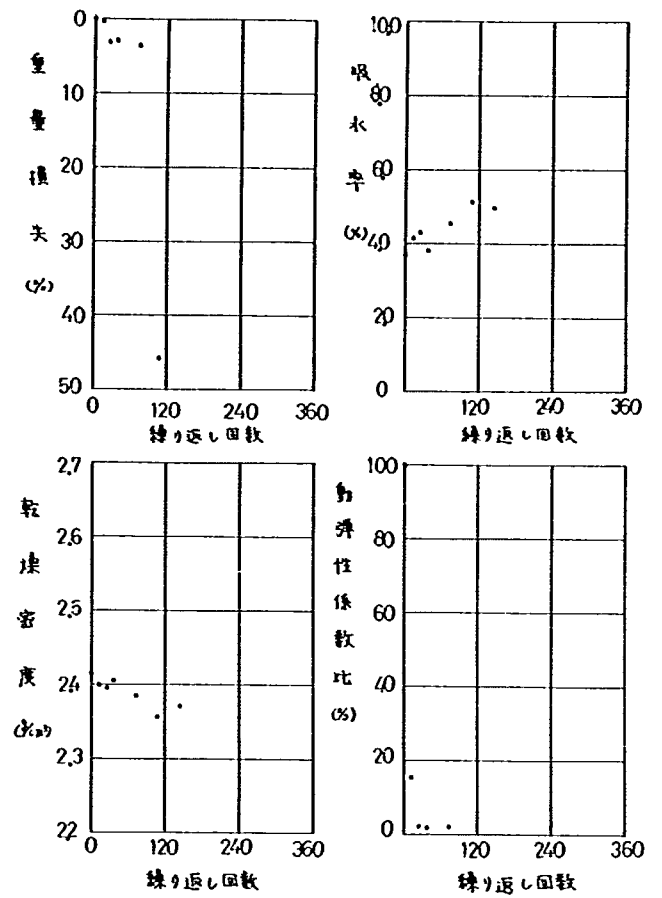
SR-II-41



SR-II-42

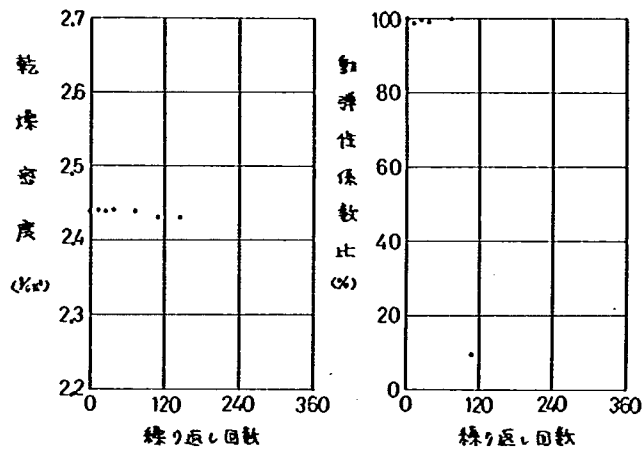
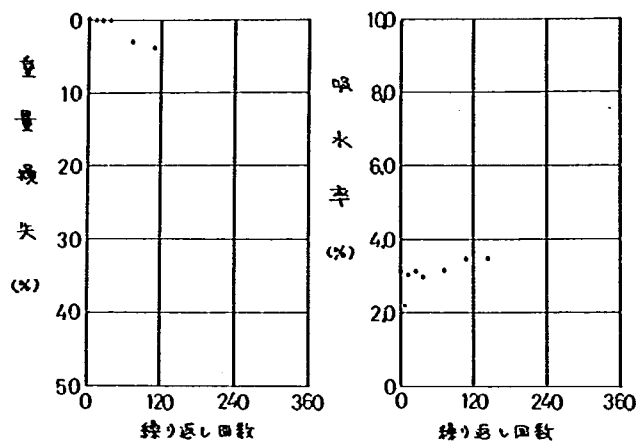


SR-II-45

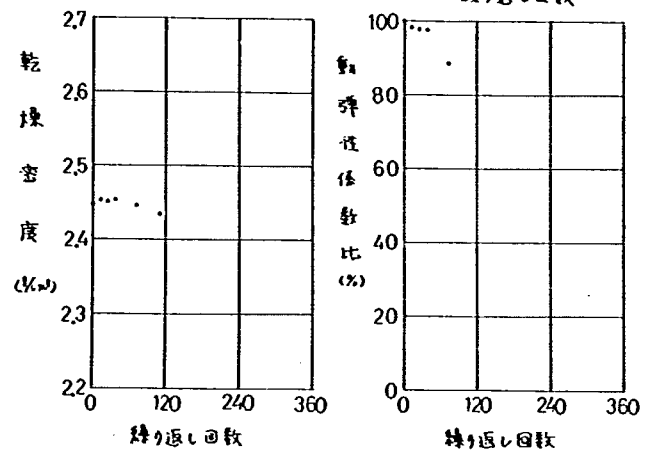
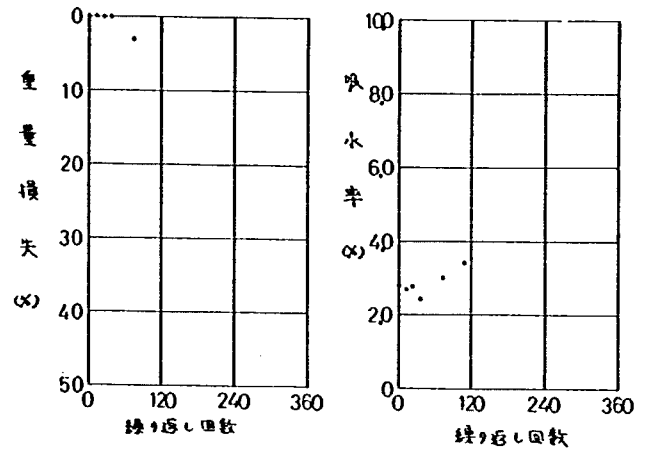


附圖－4 (3) SR

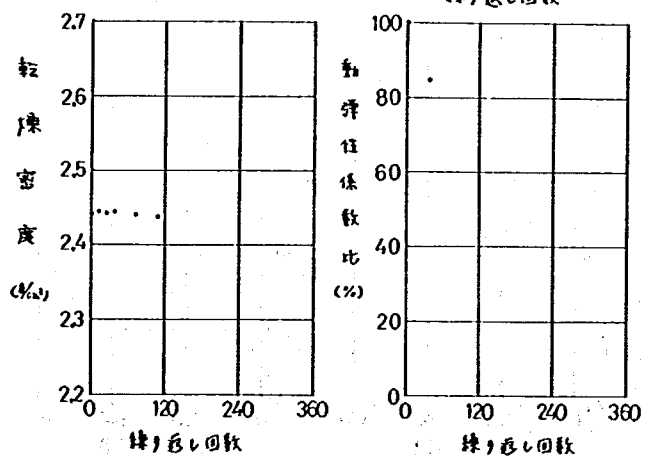
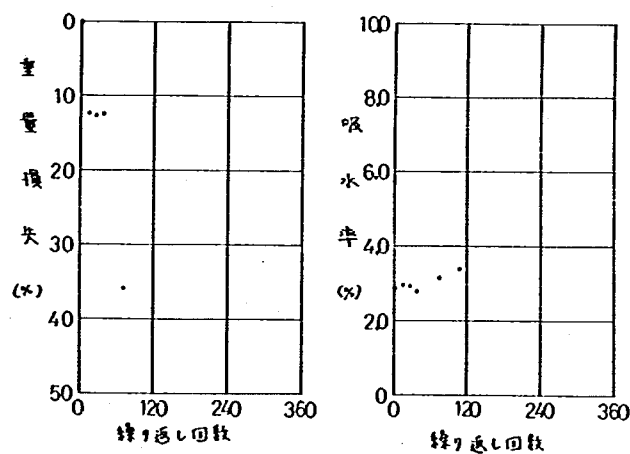
SR-1



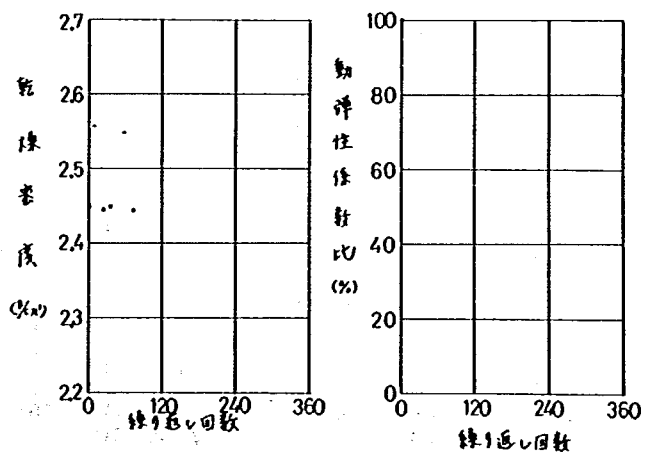
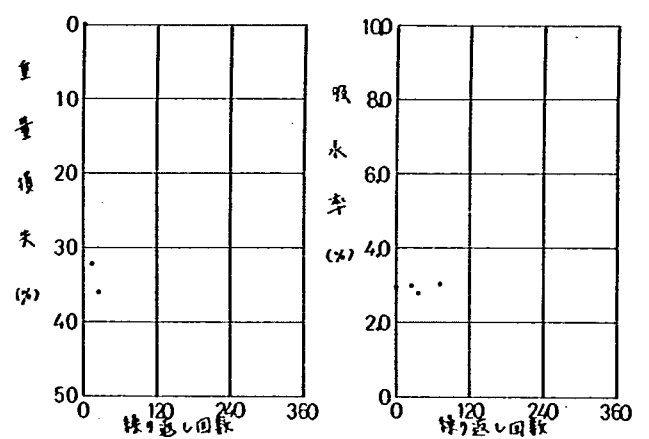
SR-2



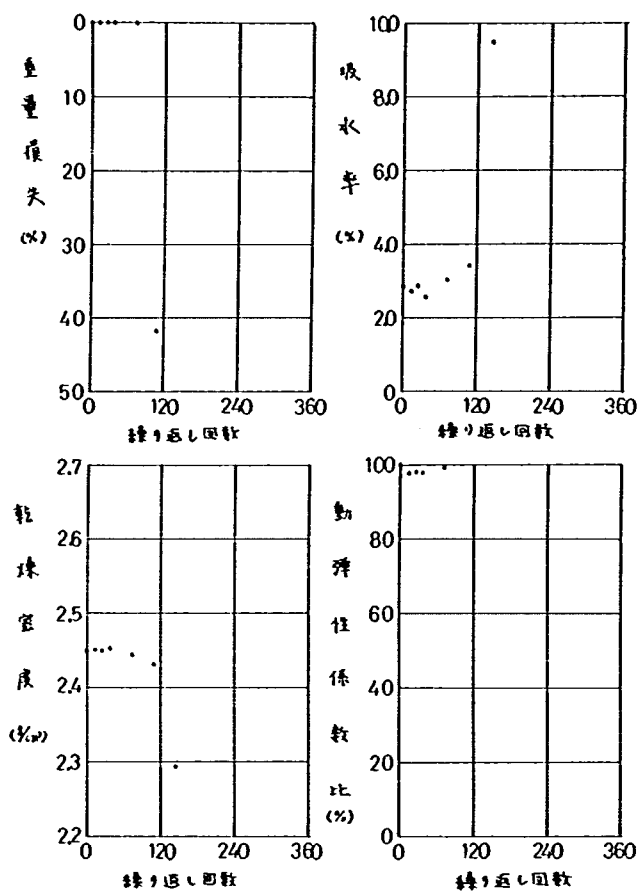
SR-3



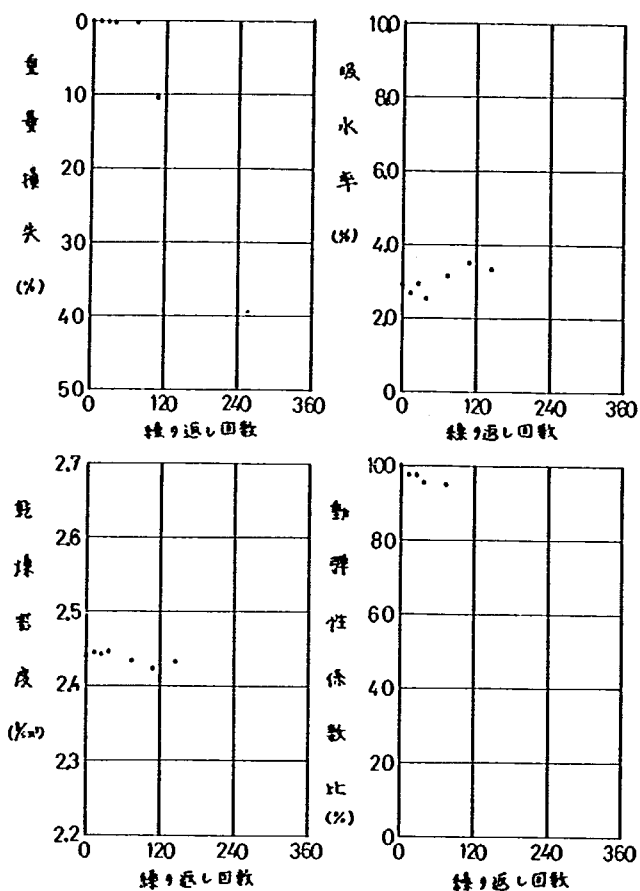
SR-4



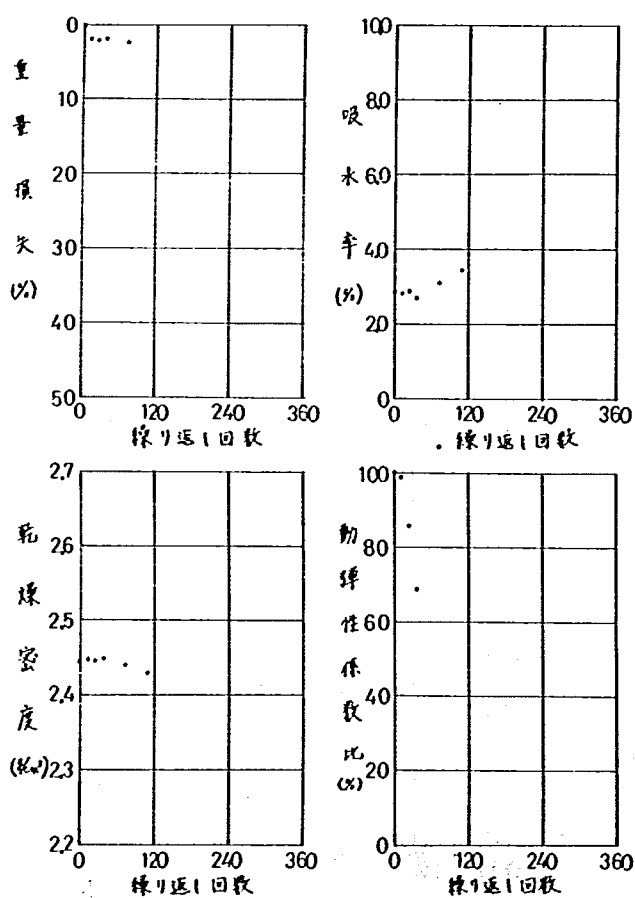
SR-5



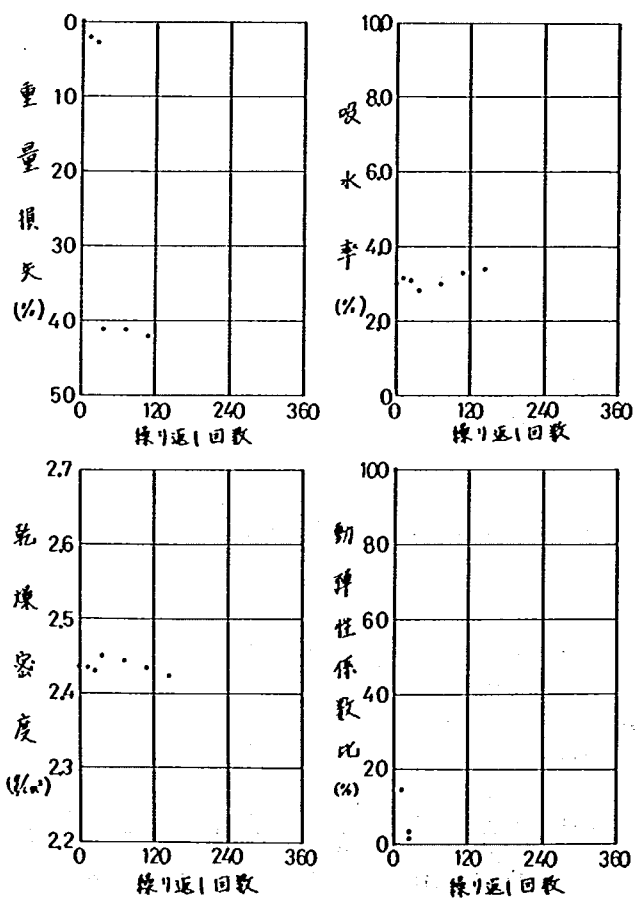
SR-6



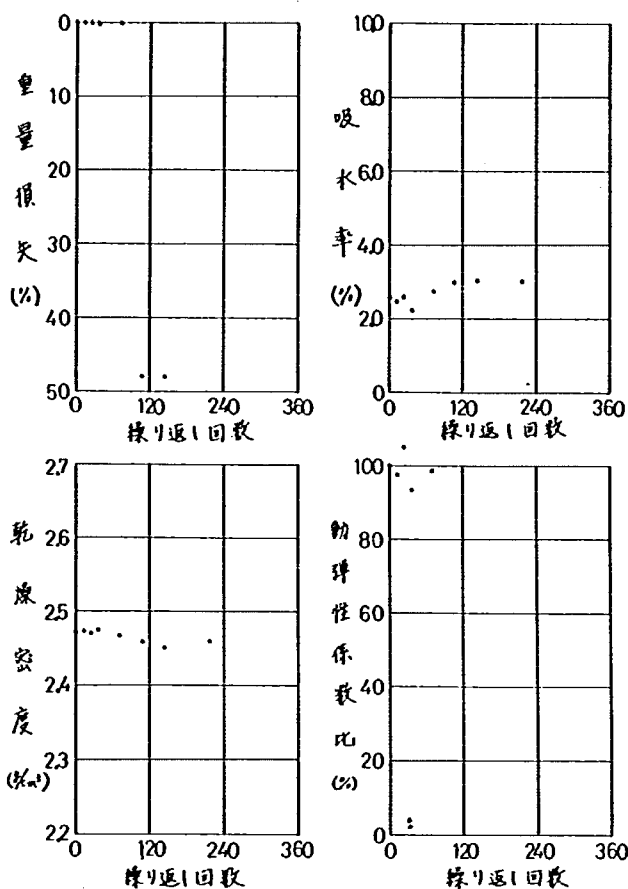
SR-7



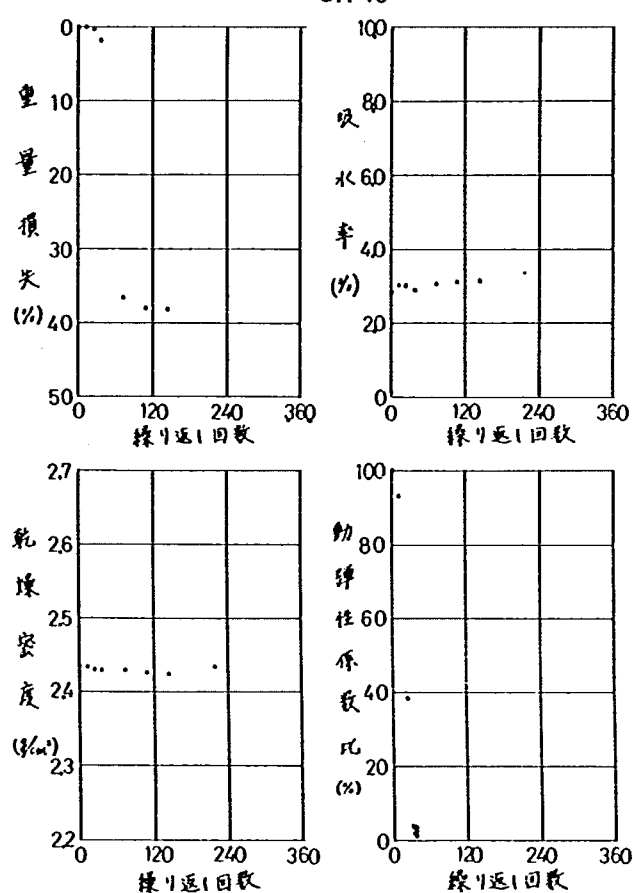
SR-8



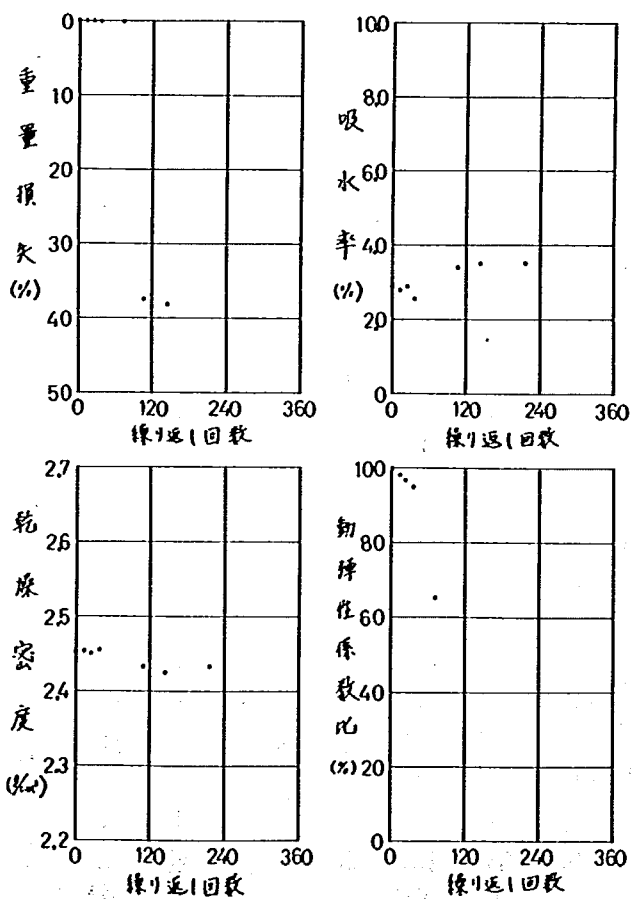
SR-9



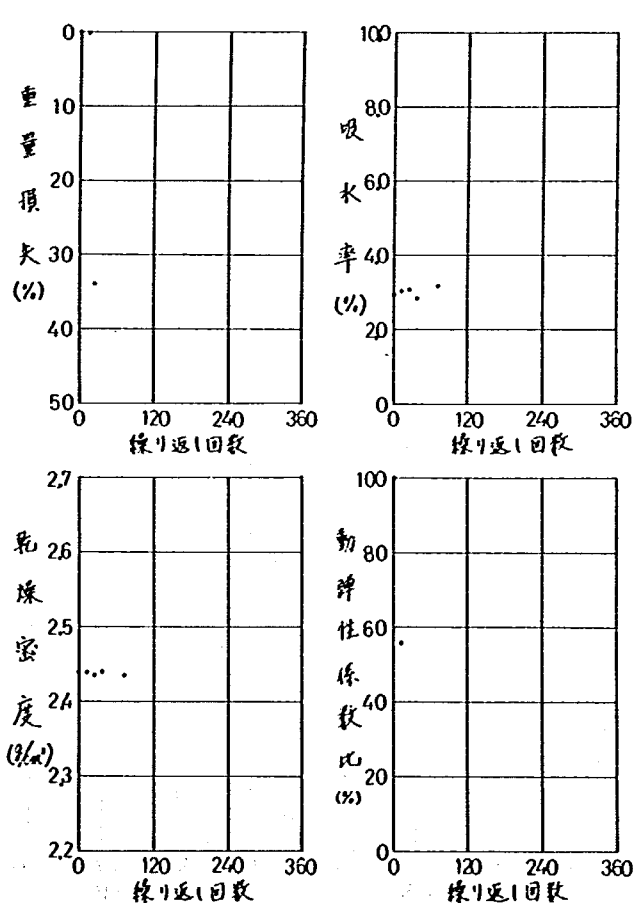
SR-10



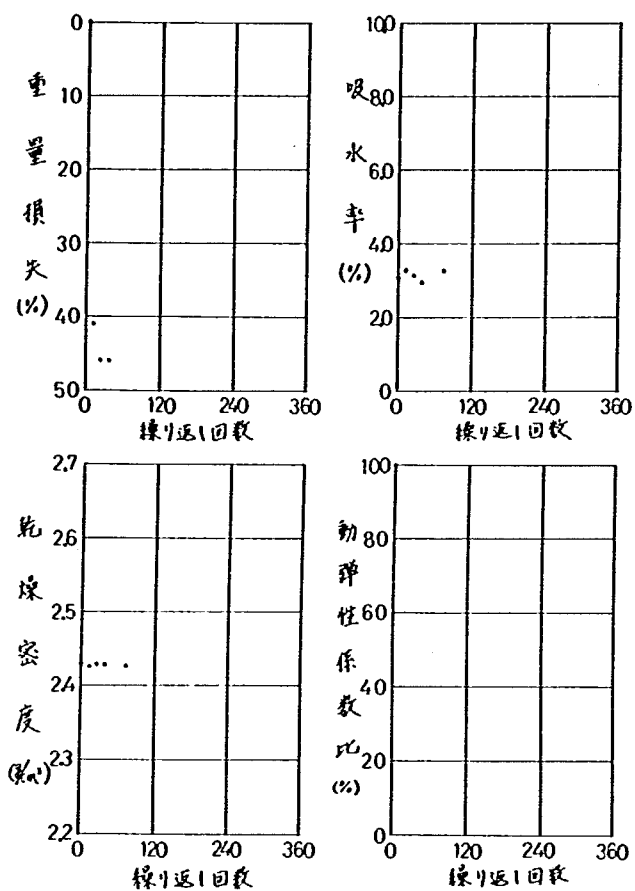
SR-11



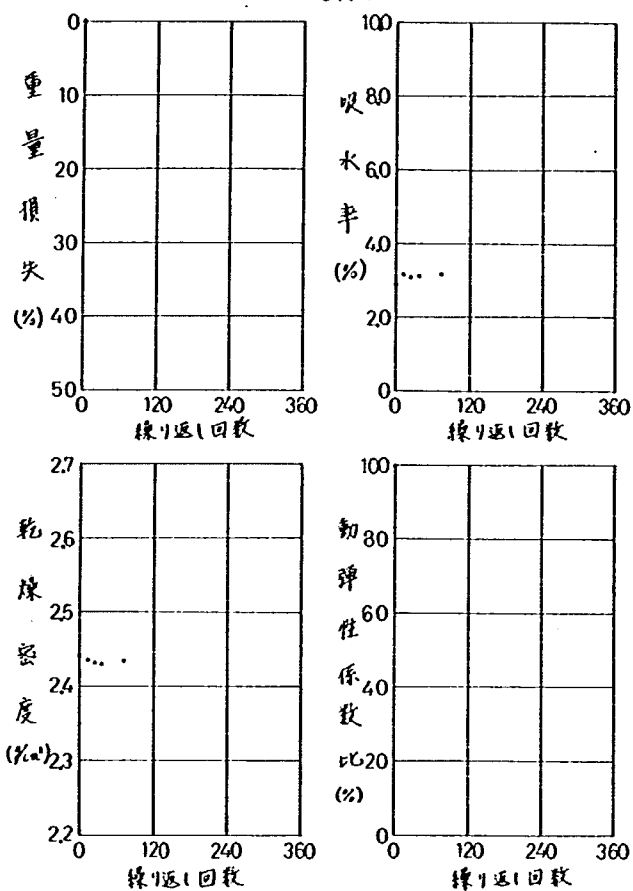
SR-12



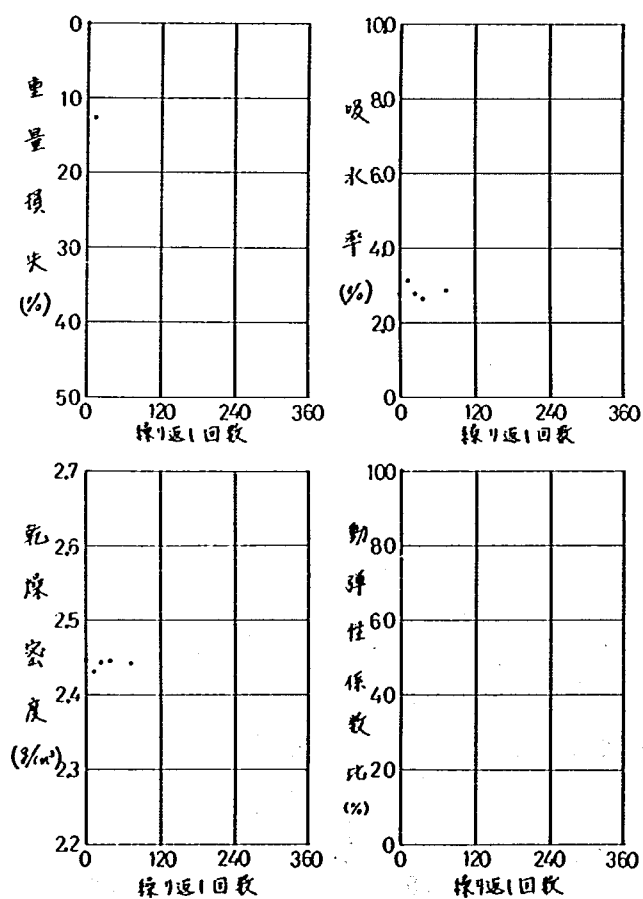
SR-13



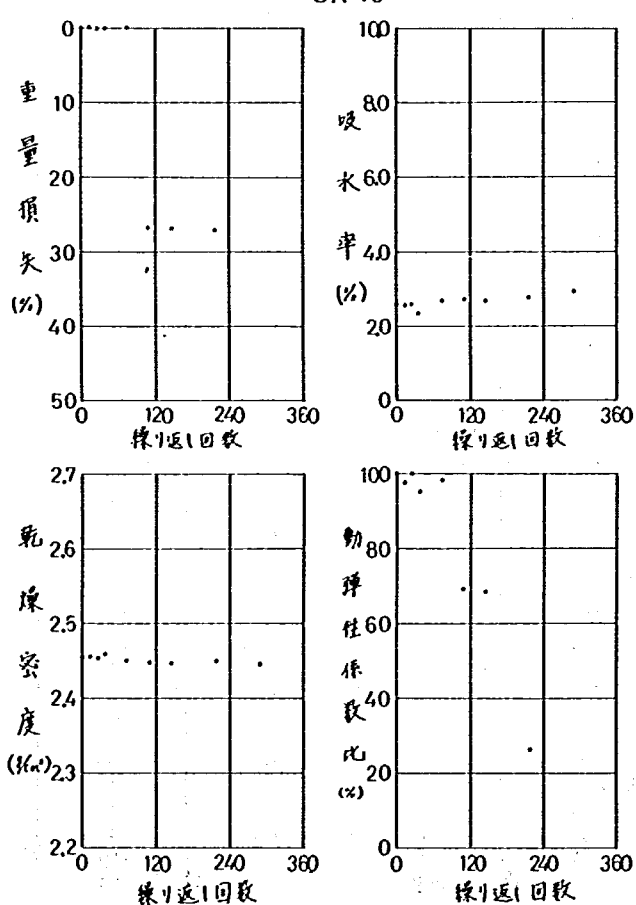
SR-14



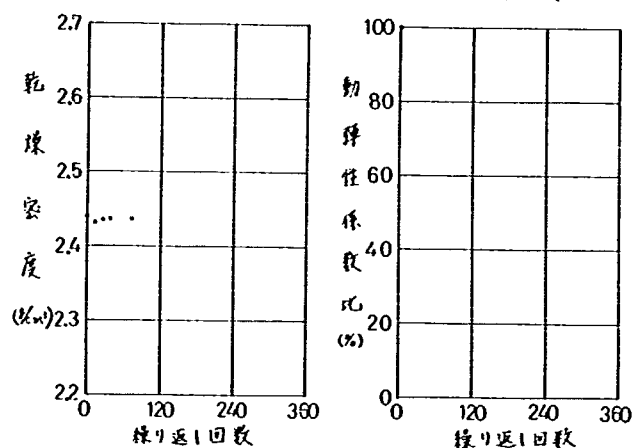
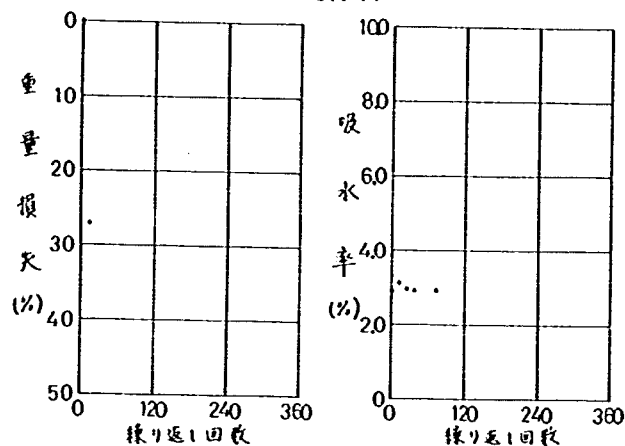
SR-15



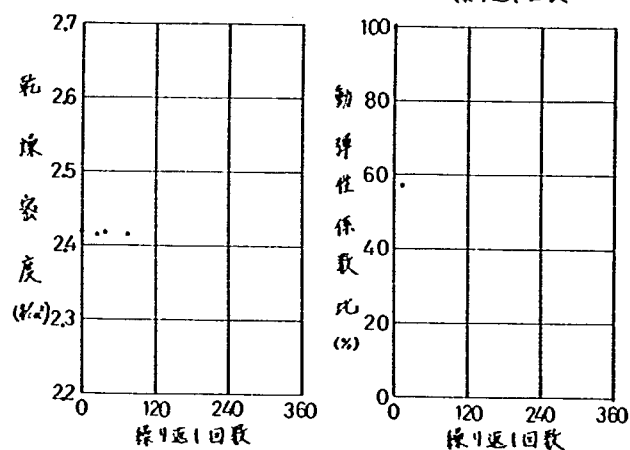
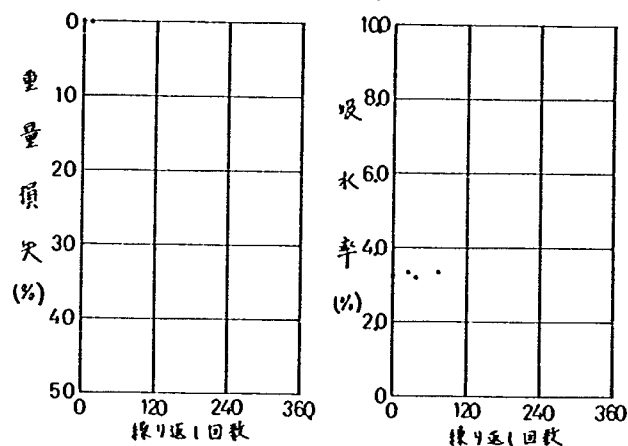
SR-16



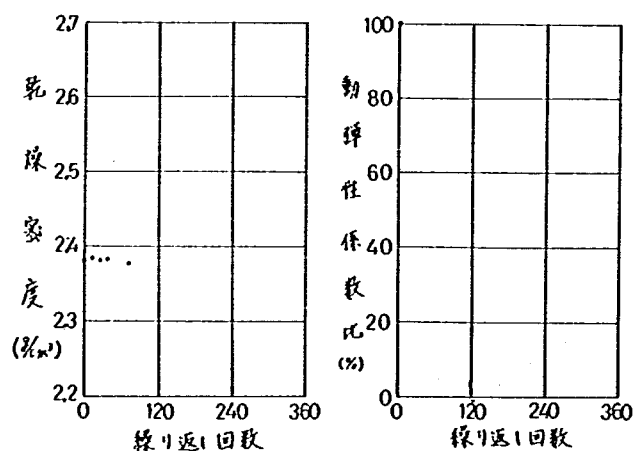
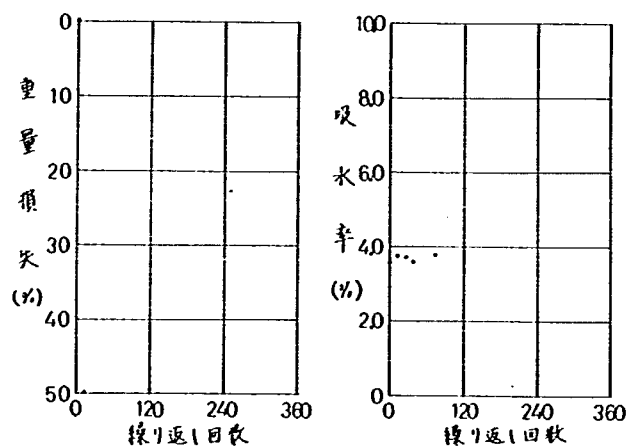
SR-17



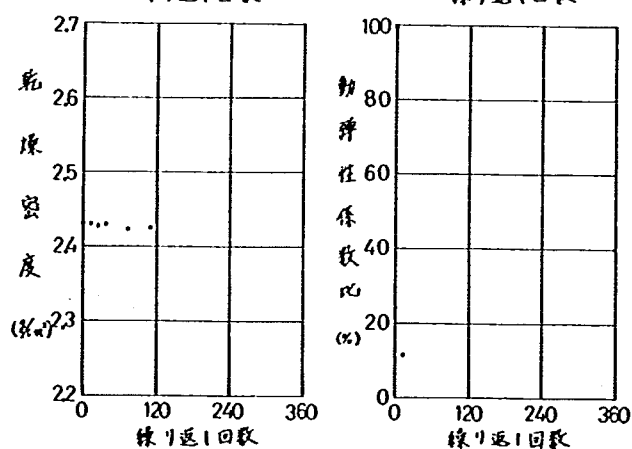
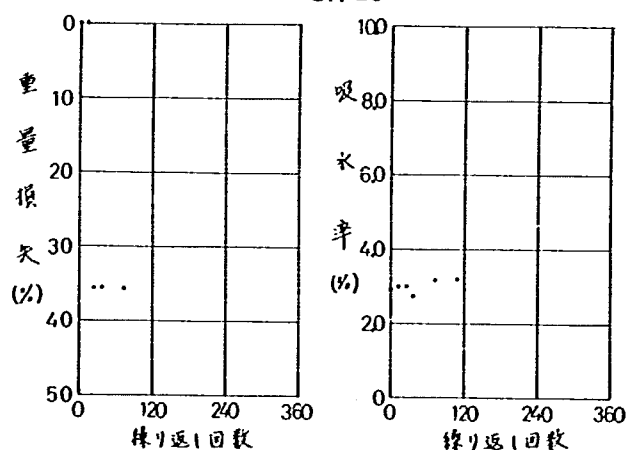
SR-18



SR-19

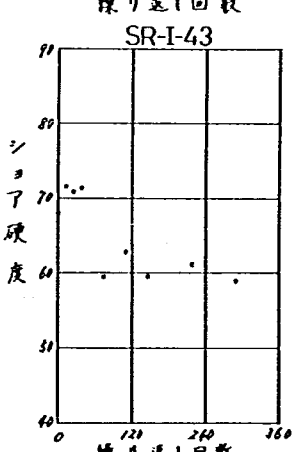
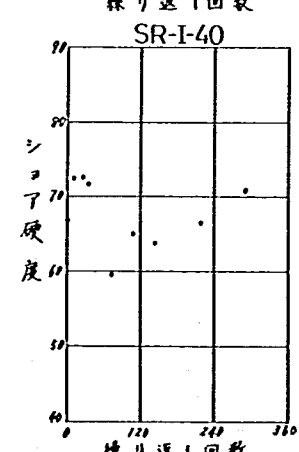
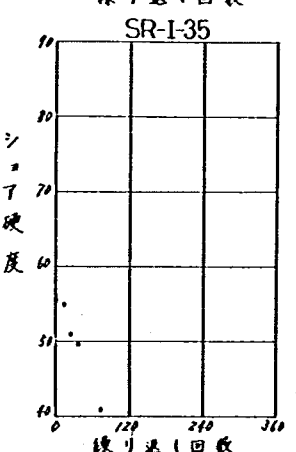
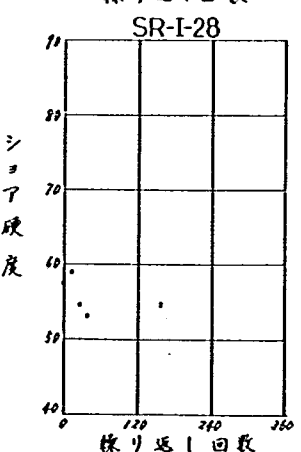
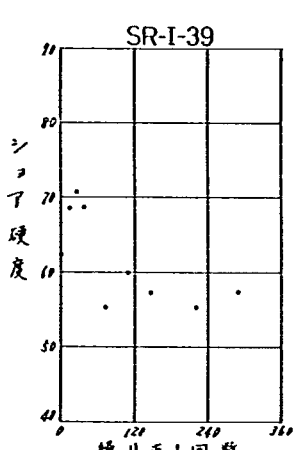
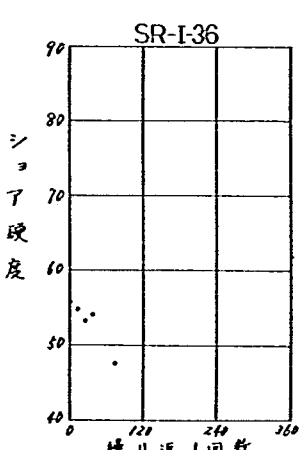
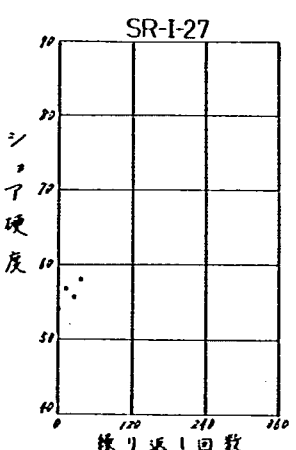
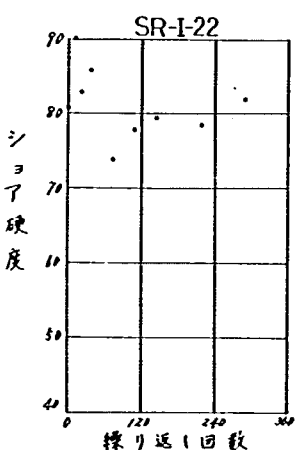
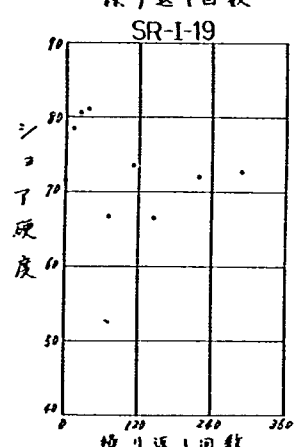
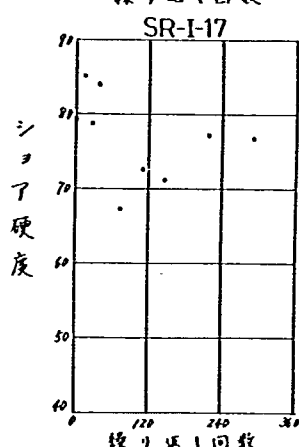
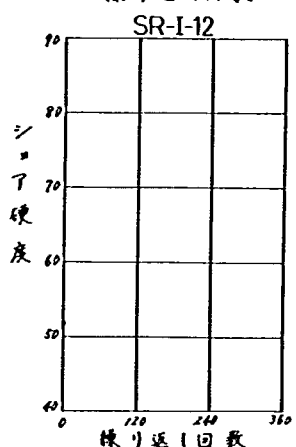
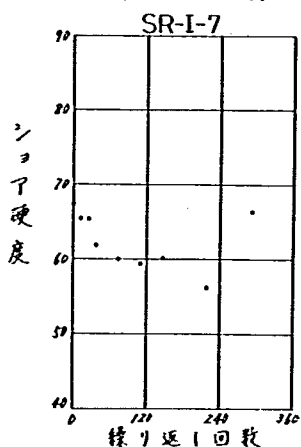
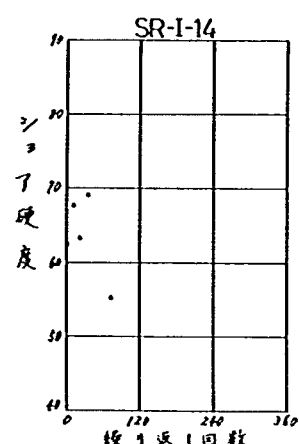
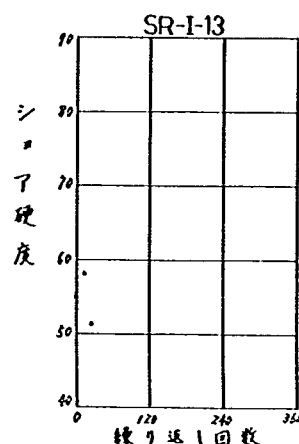
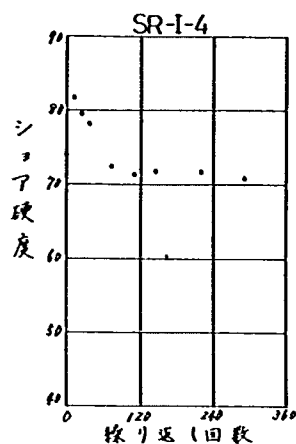
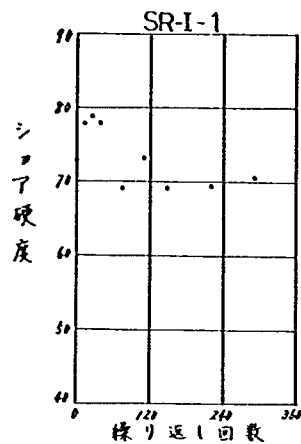


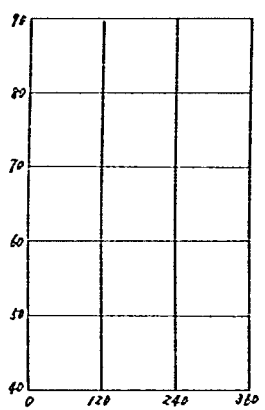
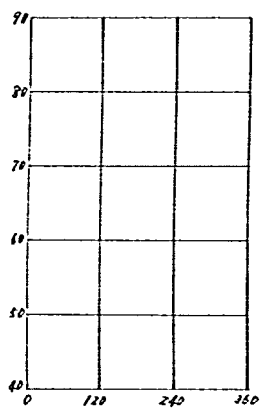
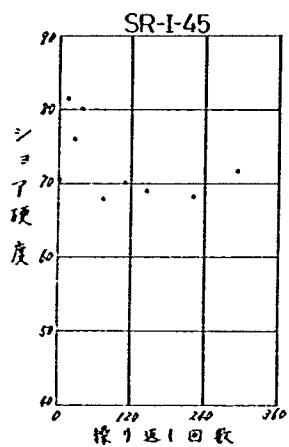
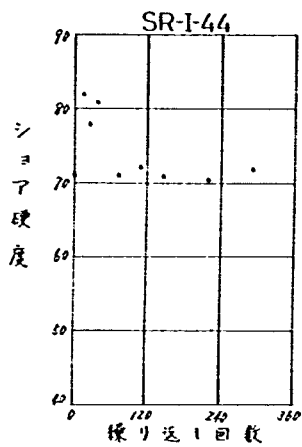
SR-20



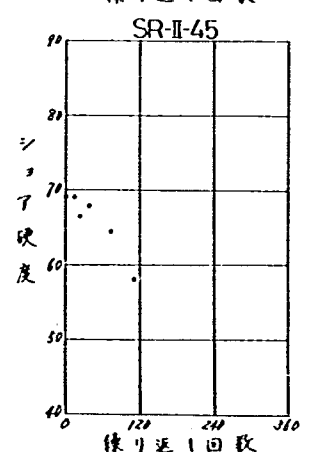
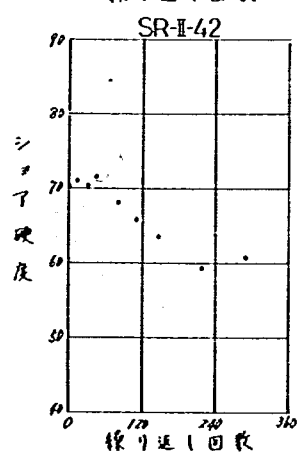
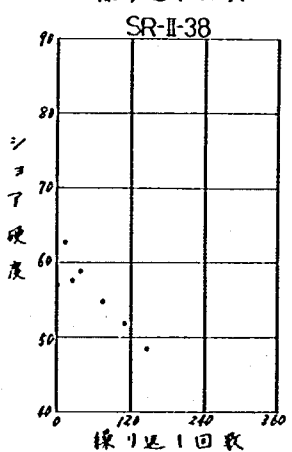
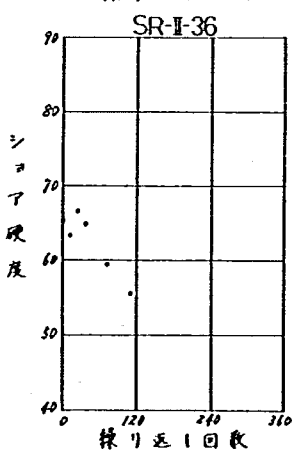
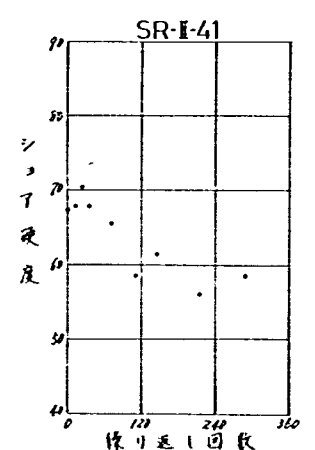
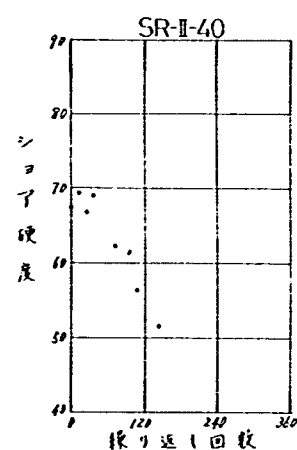
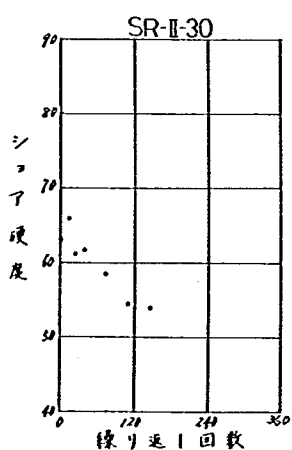
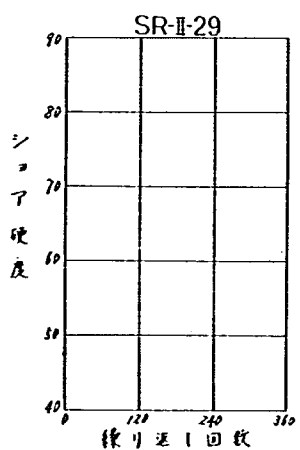
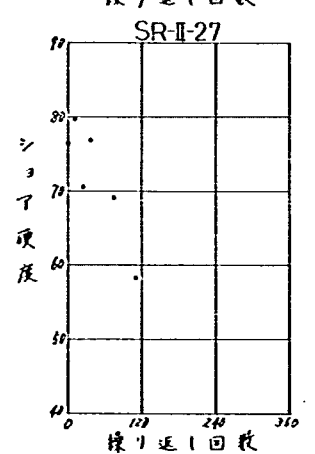
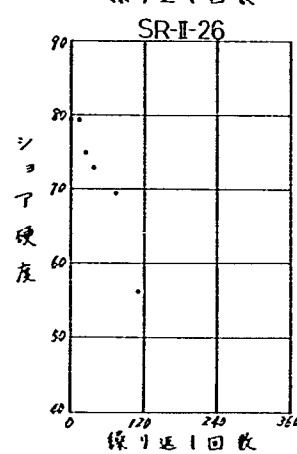
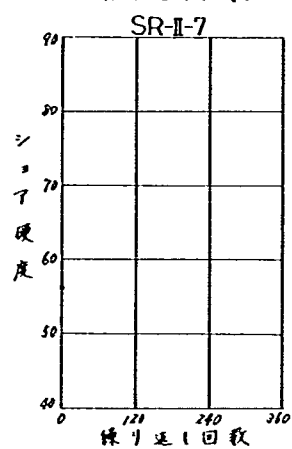
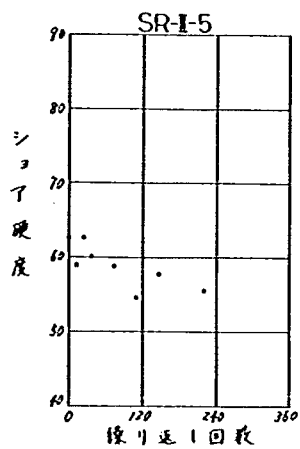
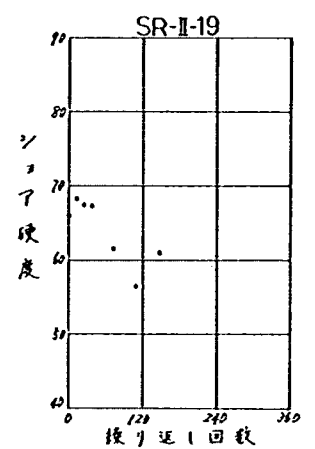
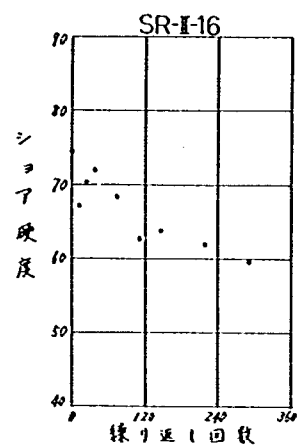
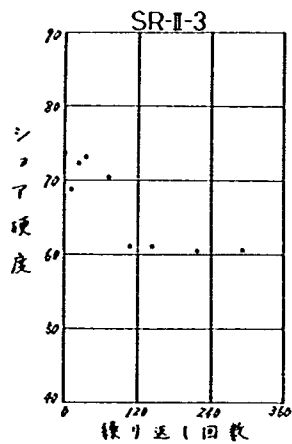
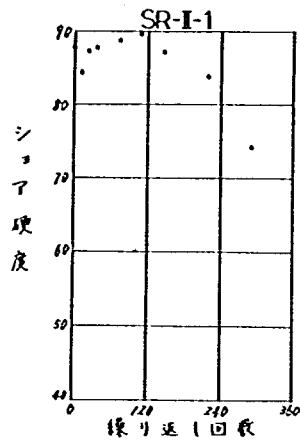
附図－5 凍結融解試験におけるショア硬度の経時変化

附圖－5 (1) SR- I

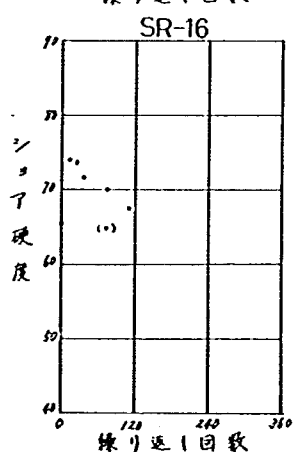
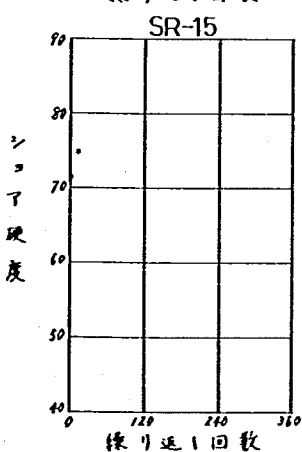
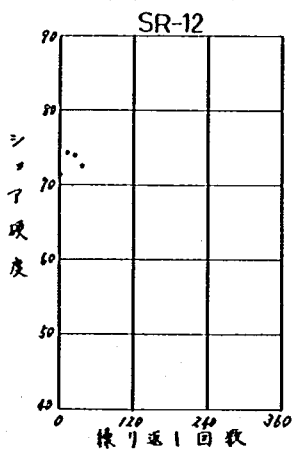
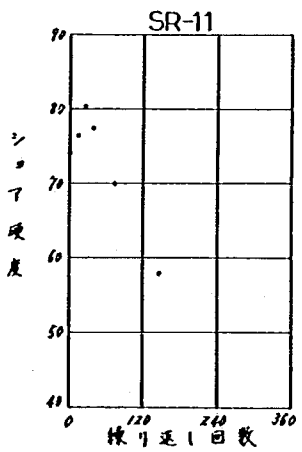
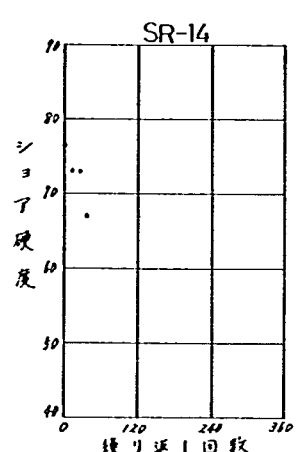
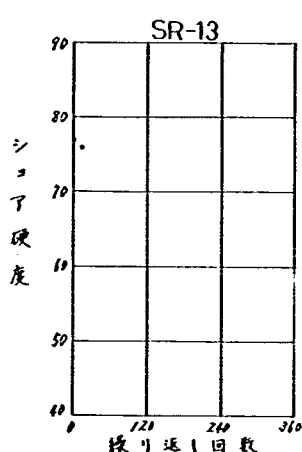
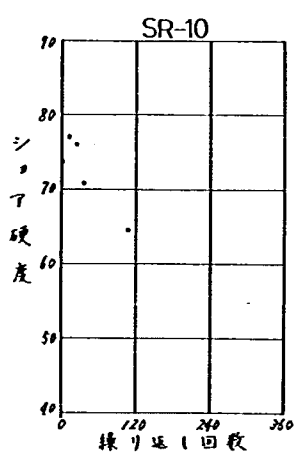
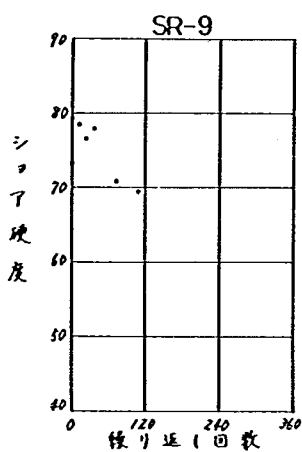
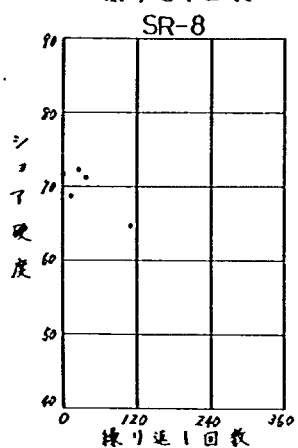
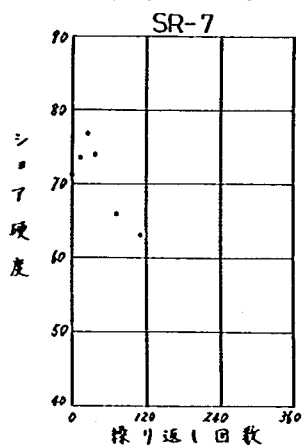
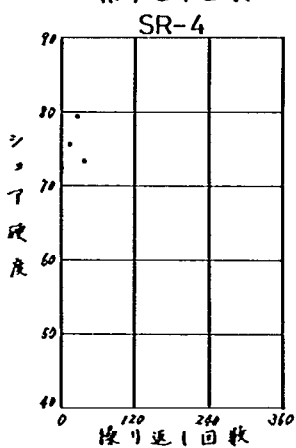
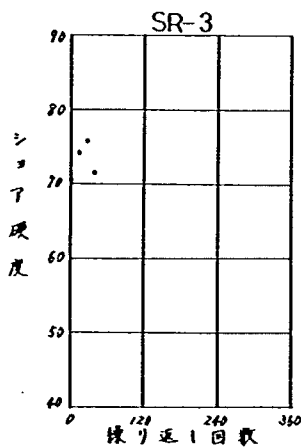
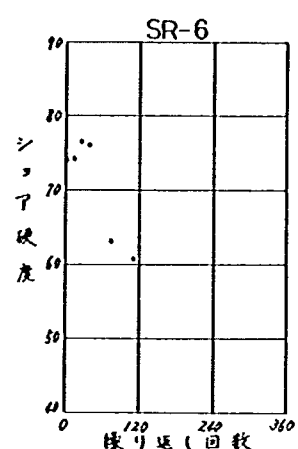
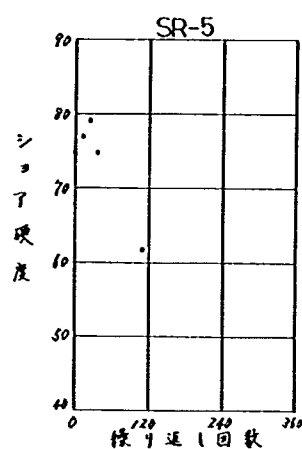
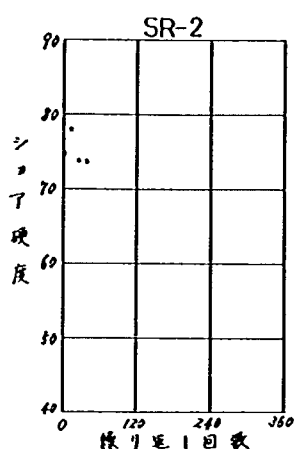
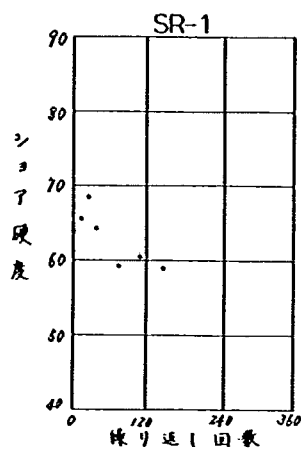


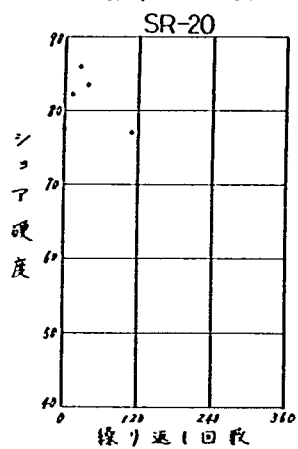
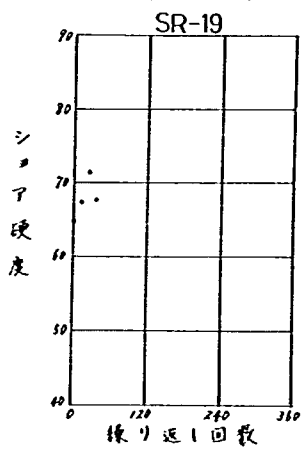
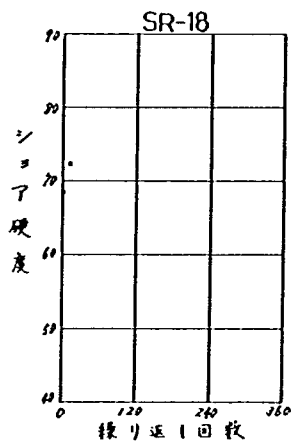
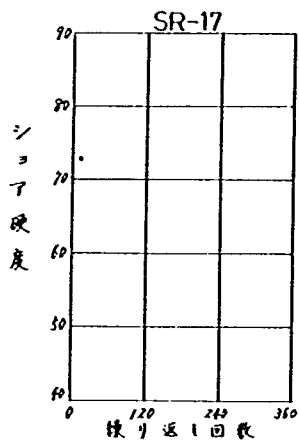


附圖—5 (2) SR-II



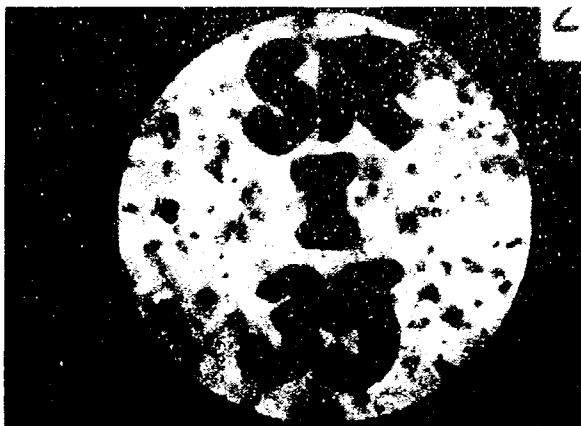
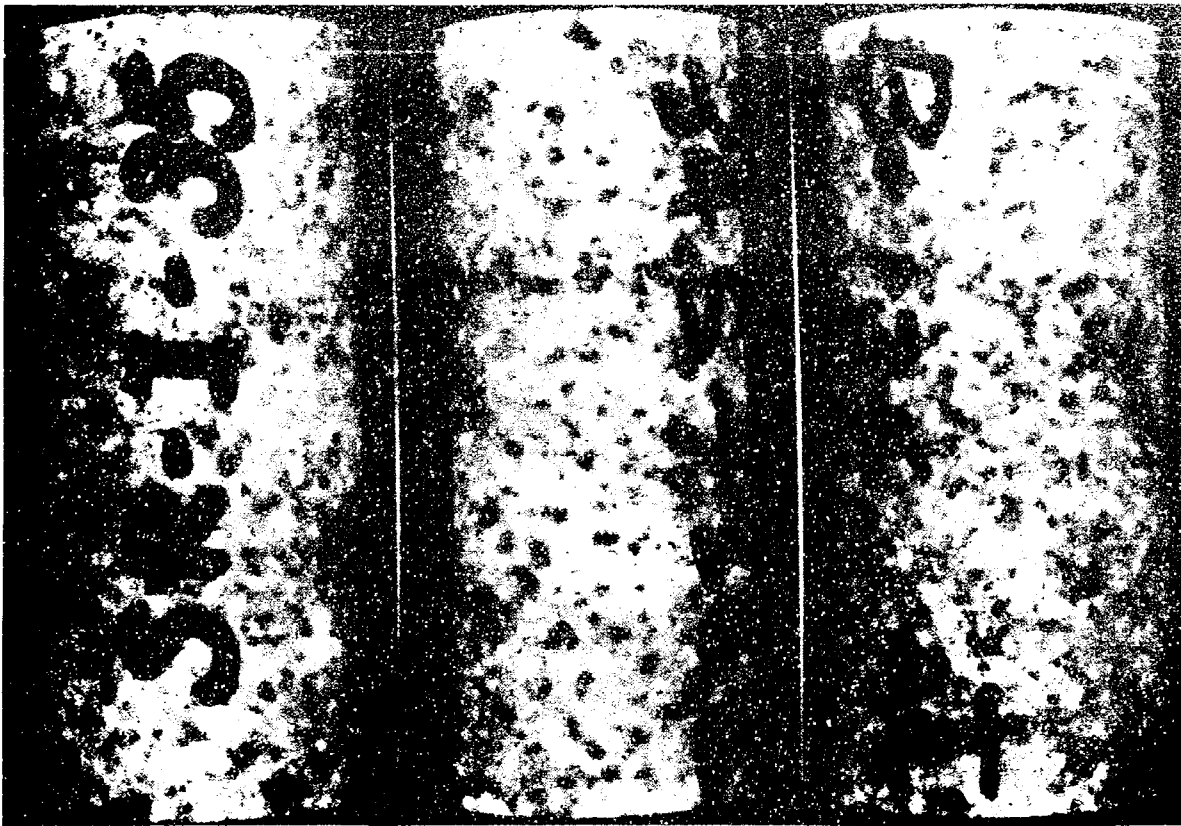
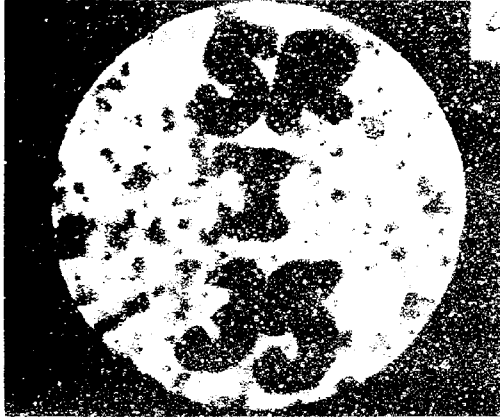
附圖—5 (3) SR



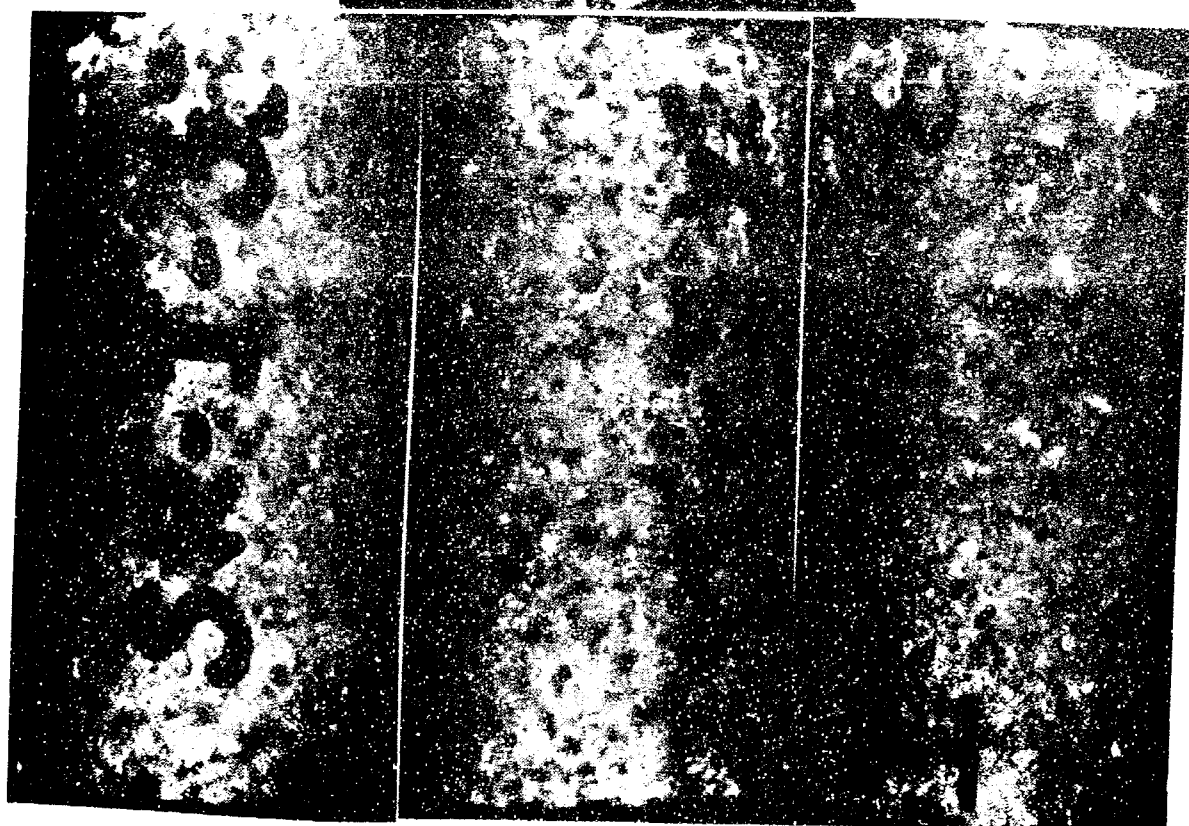
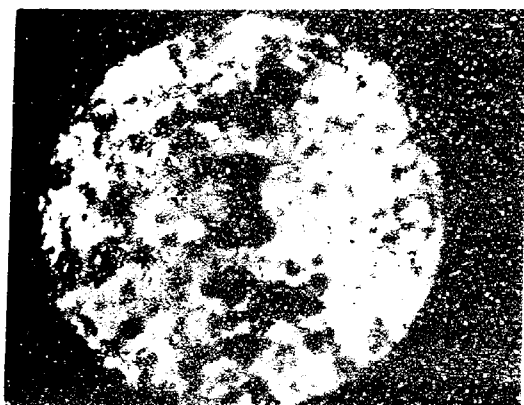


附 錄 寫 真

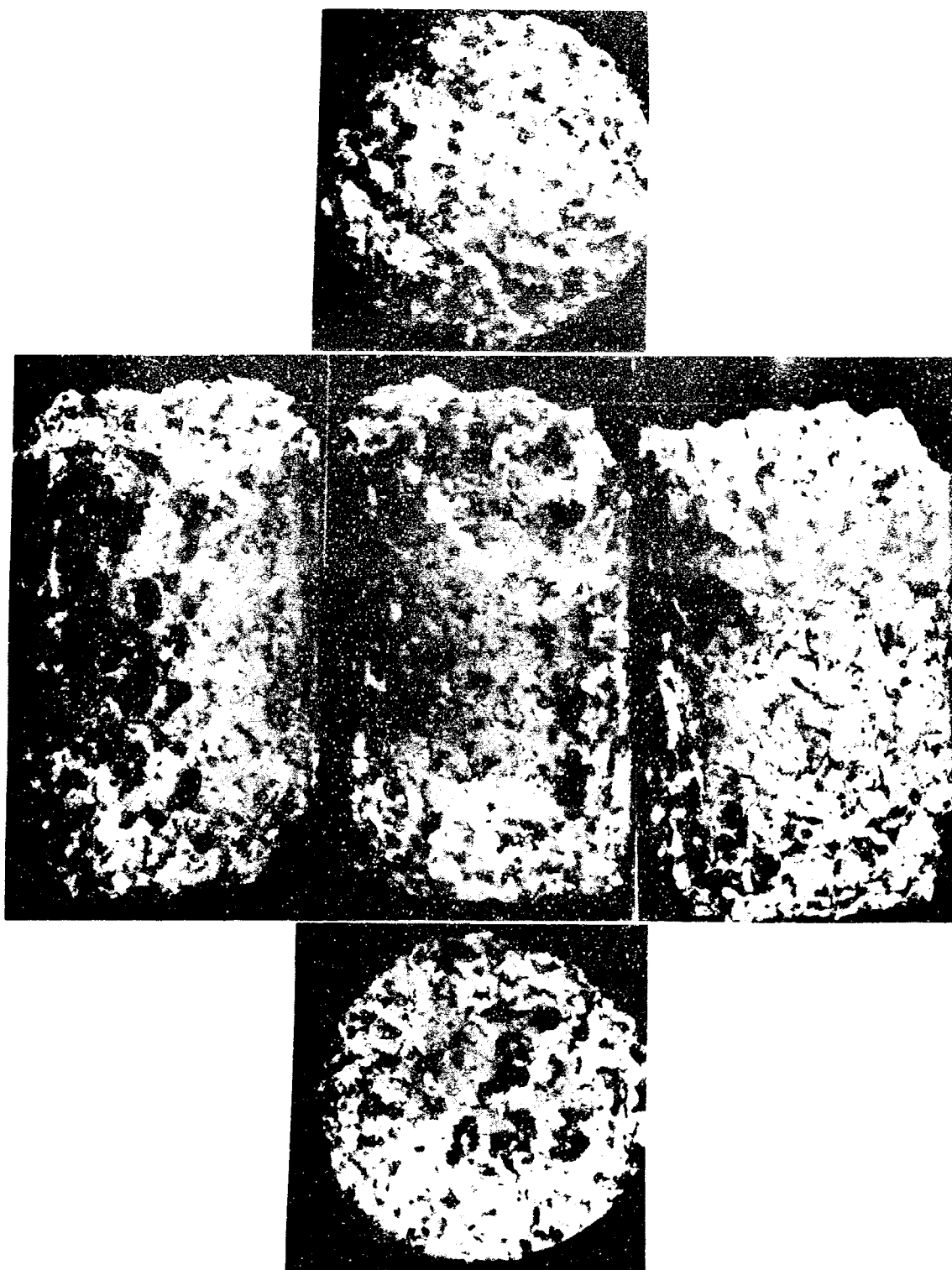
S R - I - 3 5 - 0 サイクル



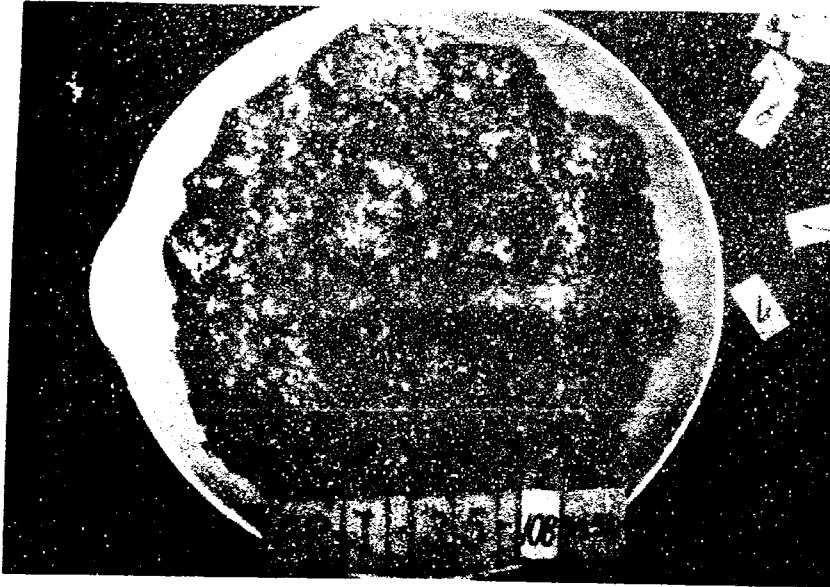
S R - I - 3 5 - 2 4 サイクル



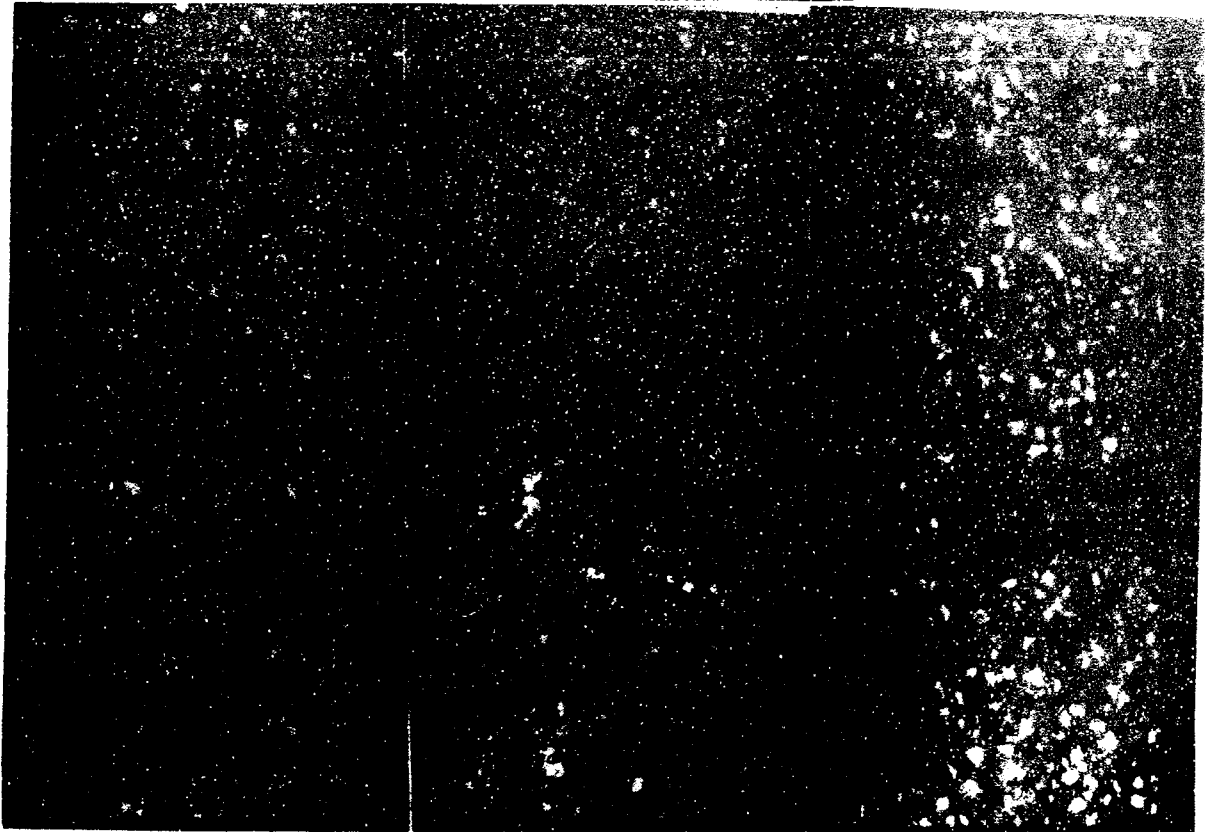
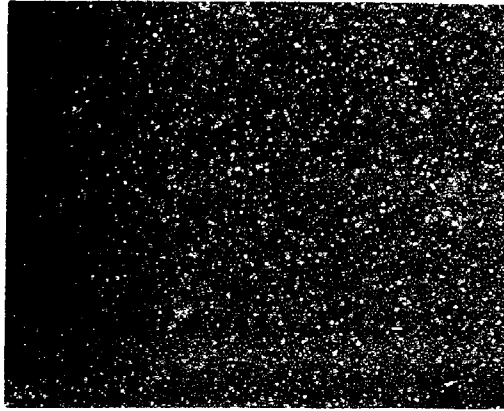
S R - I - 3 5 - 7 2 サイクル



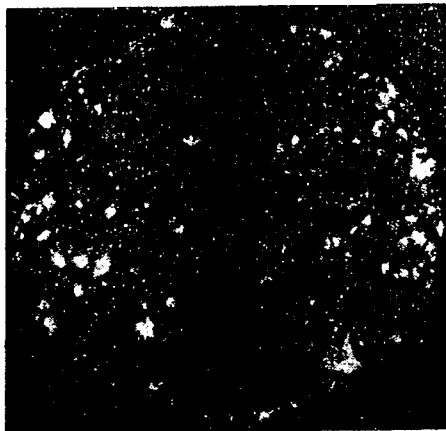
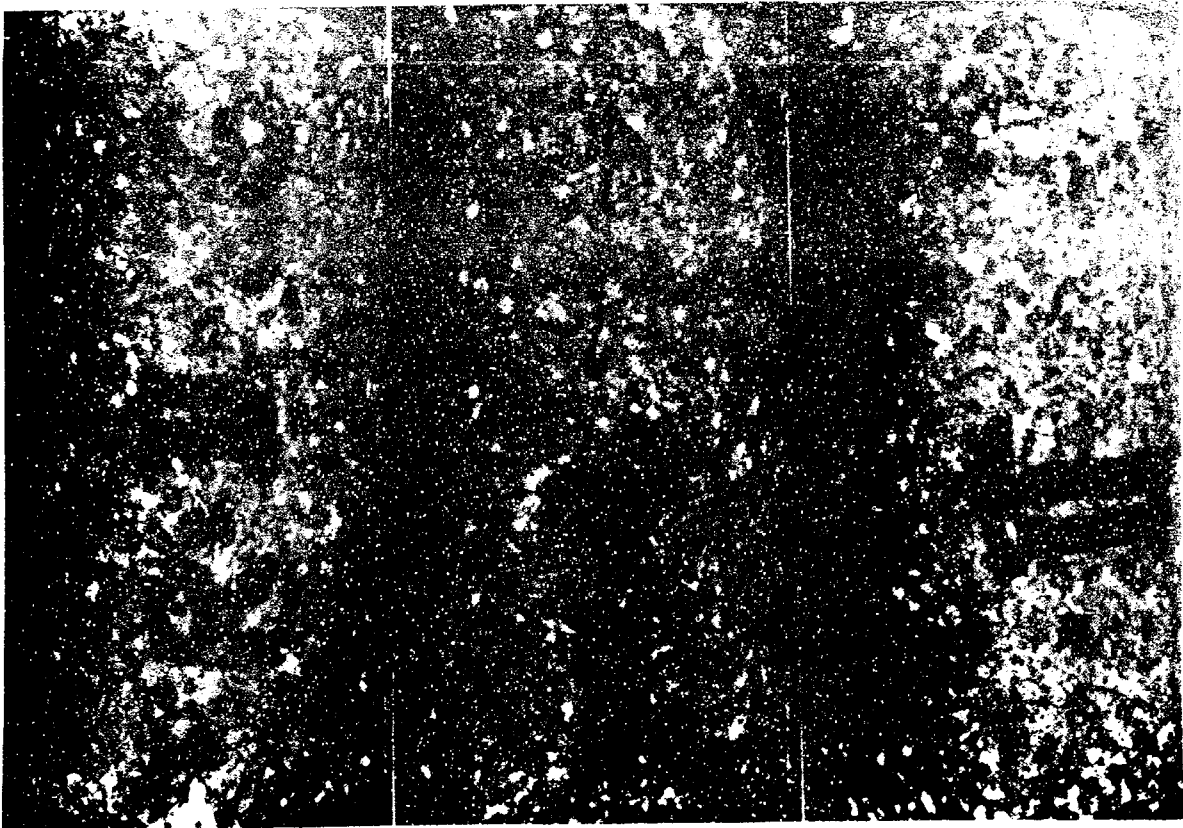
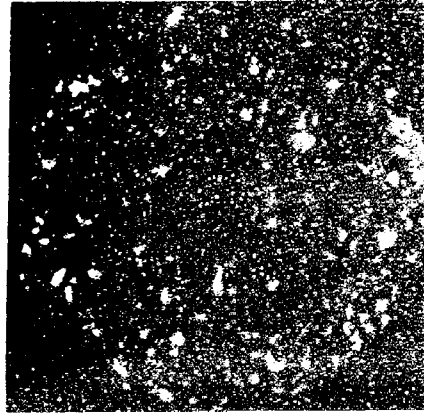
S R - 1 - 3 5 - 1 0 8 サイクル

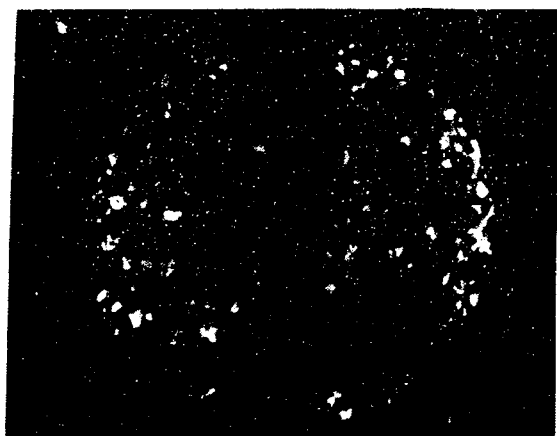
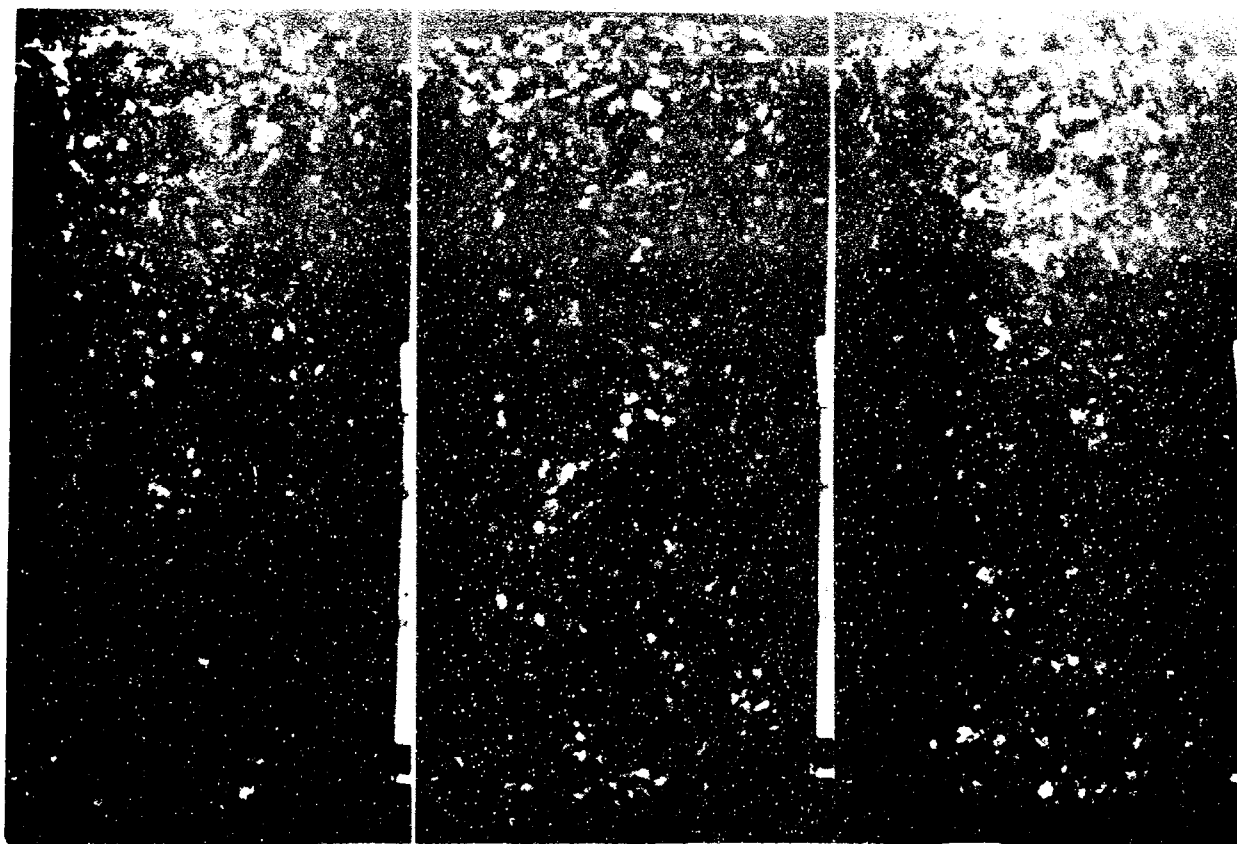
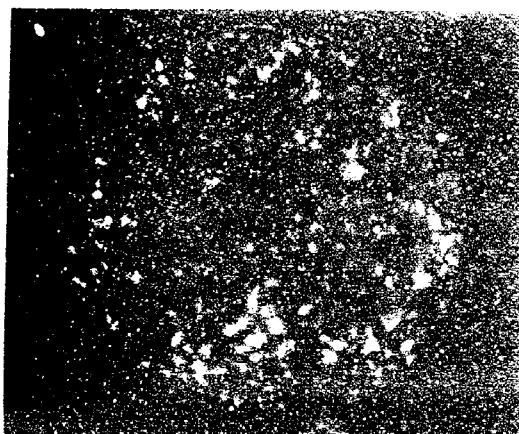


S R - Ⅱ - 2 6 - 0 サイクル

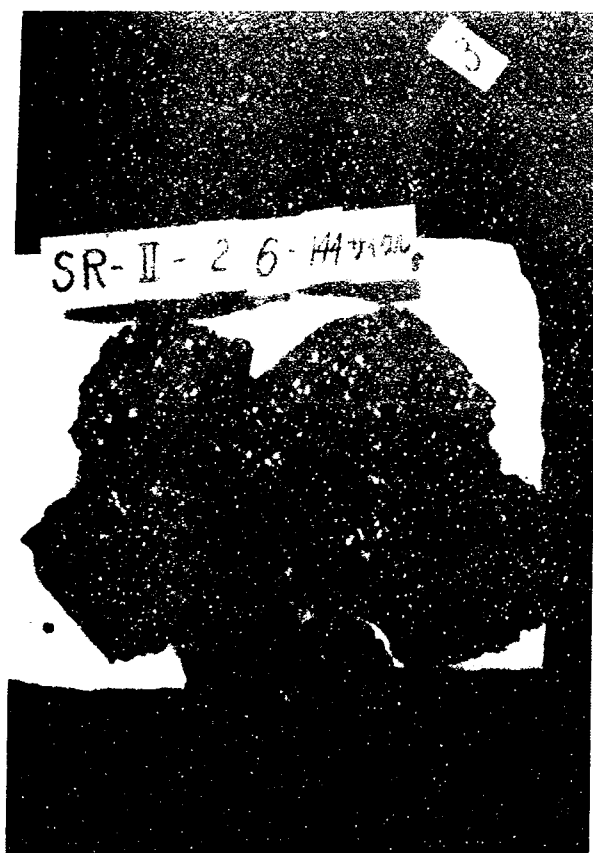


S R - Ⅱ - 2 6 - 7 2 サ イ ク ル

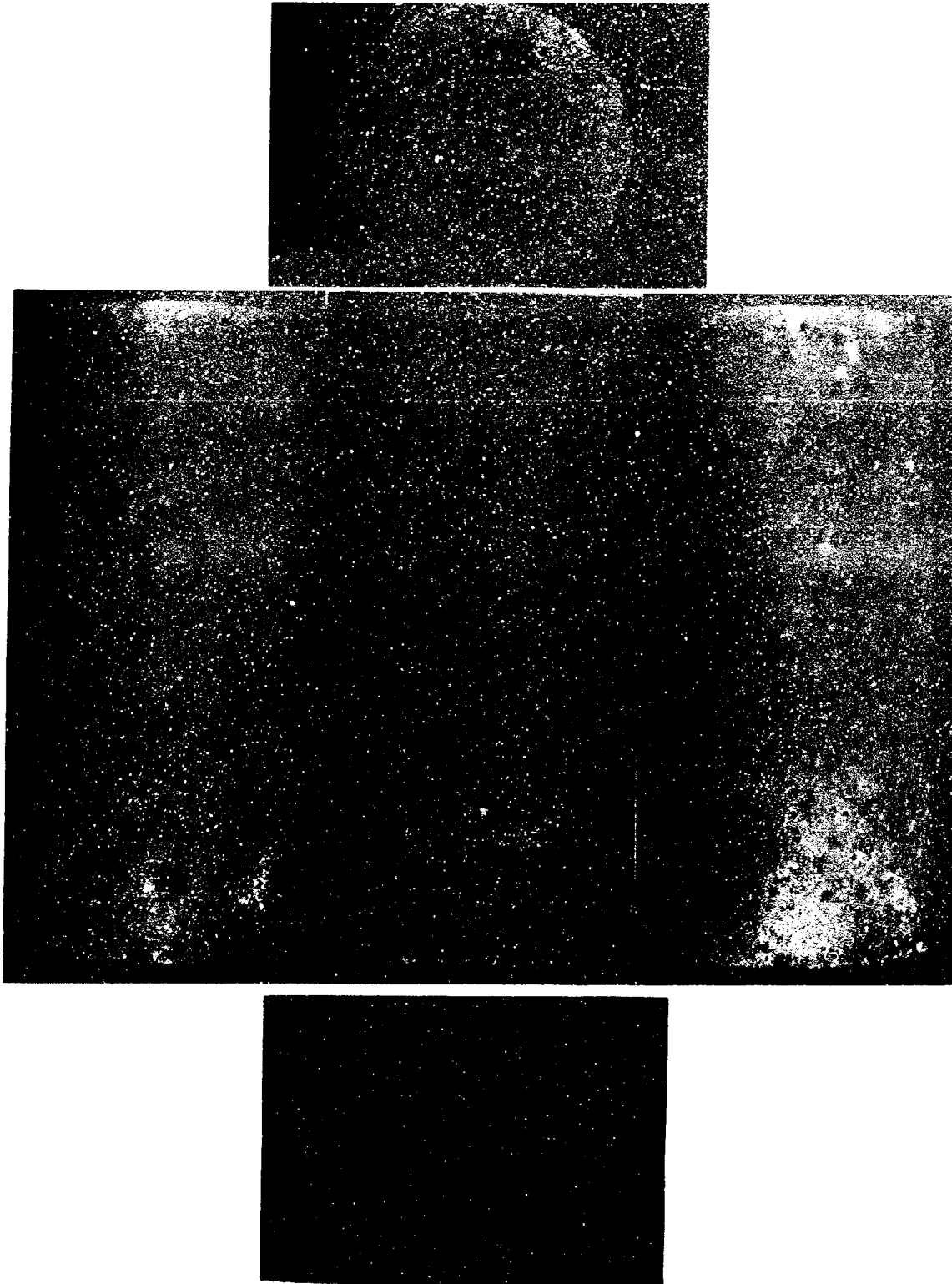


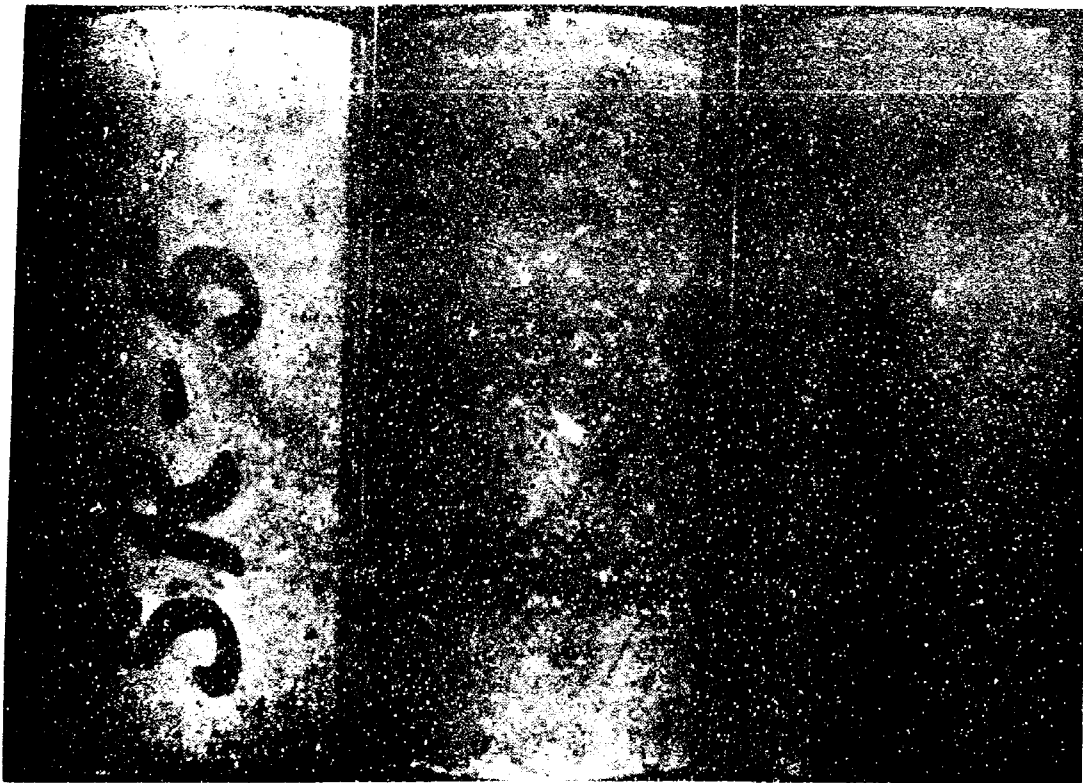


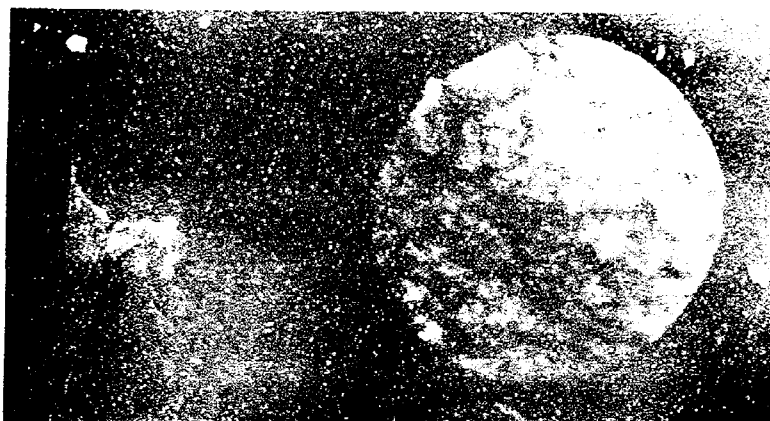
SR-Ⅱ-26-144サイクル



S R - 5 - 0 サイクル







S R - 5 - 1 4 4 サイクル



七ヶ宿ダム岩石材料耐久性試験(その1)

ISSN0386-5878

土研資料第1620号

昭和55年12月(1980)

菅原 捷, 中村康夫, 加藤則男, 石塚克巳

キーワード 石英安山岩, 流紋岩, 凍結融解試験, 耐久性, 経時変化, 重量損失

要 旨 七ヶ宿ダムでロック材およびリップラップ材料として予定されている石英安山岩と流紋岩の耐久性について検討するため凍結融解試験を中心とした各種試験を行なった結果について報告する。



郵便はがき

305-□□

20円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所
地質研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第1620号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

