

土 木 研 究 所 資 料

粗粒材料の動的変形特性

——自動計測システムによる大型繰返し三軸試験——

平成6年10月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1994) by P. W. R. I.

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

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

粗粒材料の動的変形特性

——自動計測システムによる大型繰返し三軸試験——

フィルダム研究室 室 長 中村 昭
元 室 長 松本 徳久*)
前主任研究員 安田 成夫**)
研 究 員 岩下 友也
多賀 恭一
大久保雅彦***)
元部外研究員 荒川 昭治

要 旨

パソコンによる自動計測システムを導入した大型繰返し三軸試験により粗粒材料の動的変形特性に影響を及ぼす要因（間隙比，均等係数，拘束圧，主応力比およびひずみ依存性）について三国川ダム，寒河江ダム，三保ダムの堤体材料を用いて調査した。その結果，次の事柄が明らかとなった。

- 1) セン断弾性係数 G と拘束圧の関係は両対数で直線関係にある。
- 2) セン断弾性係数は主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=1.0\sim 2.0$ の間で単調増加傾向にある。
- 3) 減衰定数 h は，セン断弾性係数ほど明確ではないにしても拘束圧の影響を受ける。
- 4) ポアソン比 ν はセン断ひずみに対して，ほぼ一定値と考えられる。

キーワード：大型三軸試験，ロック材料，フィルター材料，セン断弾性係数，減衰定数，ポアソン比，自動計測システム

*) 現ダム部長

**) 現企画部企画課長

***）現中国地方建設局温井ダム工事事務所調査設計課

Dynamic Deformation Characteristics of Rockfill and Filter Materials

—Large-Scale Cyclic Triaxial Tests with Automatic Measuring System—

Akira NAKAMURA
Head, Fill-type Dam Division
Norihsa MATSUMOTO*)
Ex-Head, ditto
Nario YASUDA**)
Ex-Senior Research Engineer, ditto
Tomoya IWASHITA
Research Engineer, ditto
Kyoichi TAGA
Engineer, ditto
Masahiko OHKUBO***)
Ex-Engineer, ditto
Shoji ARAKAWA
Ex-Visiting Research Engineer, ditto

Synopsis

Void ratio, uniformity coefficient, confining stress, principal stress ratio and shear strain, which influence dynamic deformation characteristics of rockfill and filter materials, are investigated by using the large-scale cyclic triaxial test apparatus with automatic measuring system using personal computer. The conclusions are as follows:

- 1) The relation between shear modulus G and confining stress σ_c is in linear both in logarithmic scale.
- 2) Shear modulus has an inclination to increase gradually with the increase of principal stress ratio which ranges from 1.0 to 2.0.
- 3) Damping ratio h is also influenced by the confining stress as the case of shear modulus.
- 4) Poisson's ratio ν is nearly constant concerning the effect of shear strain.

Keywords : large-scale triaxial test, rockfill materials, filter materials, shear modulus, damping ratio, Poisson's ratio, automatic measuring system

- *) Director of Dam Department
**) Head, Planning Division, Planning and Investigation Department.
***) Investigation and Design Section, Nukui Dam Construction office, Chugoku Regional Construction Bureau

まえがき

ロックフィルダムの動的解析に用いる入力物性値は、原位置試験、室内試験結果等から決定している。粗粒材料の室内試験は、多大な労力を要することからその試験例は数少ない。

本報告は、大型繰返し三軸試験装置（供試体寸法：直径30cm×高さ60cm）を使って粗粒材料の動的変形特性（せん断弾性係数、減衰定数およびポアソン比）に影響を及ぼす要因（間隙比、均等係数、拘束圧、主応力比およびひずみ依存性等）について調査したものである。試験材料は、三国川ダム、寒河江ダムおよび三保ダムの3つのロックフィルダムの堤体材料（ロック材・フィルタ材の気乾・飽和材料）を用いている。

今回の報告書は前回の土木研究所資料第2146号「大型繰返し三軸試験を用いた粗粒材料の動的物性試験」の続編と位置づけられるものであるが、試験値の計測及び整理については、微小変位計測用のギャップセンサ、パーソナルコンピュータを導入した自動計測システムに依っている。

当研究室では、ロックフィルダムの堤体材料の繰返し三軸試験を実施してきており、^{1) 2) 3) 4) 5) 6)} この間、三軸試験装置の改良や検出器の精度の向上が図られた。今回パーソナルコンピュータを導入した自動計測システムが完成し、標準砂を用いて予備試験を実施したところ、一応の成果が得られた。さらには気乾供試体のみならず飽和した標準砂及び粗粒材料の試験を実施した。

記号の説明

D_{max}	; 材料の最大粒径
E	; 弾性係数
E_d	; 動弾性係数
e	; 間隙比
e_c	; 圧密後間隙比 (試験中間隙比)
e_{max}	; 最大間隙比
e_{min}	; 最小間隙比
e_0	; 初期間隙比
G	; せん断弾性係数
G_s	; 表乾比重
G_b	; 絶乾比重
G_g	; 真比重
G_{max}	; せん断弾性係数の最大値 ($\approx G_0$)
G_0	; 初期せん断弾性係数 (微小ひずみ時におけるせん断弾性係数)
h	; 減衰定数
h_{max}	; $G = 0$ のときの減衰定数
Q	; 吸水率
U_c	; 均等係数
ν_d	; 動的ポアソン比
V_p	; P波速度
V_s	; S波速度
γ	; せん断ひずみ
γ_r	; 基準ひずみ
ε_a	; 軸ひずみ
ε_r	; 半径方向ひずみ
ε_v	; 体積ひずみ
σ_c	; 拘束圧
σ_n	; 破壊面の垂直応力
σ_m	; 平均主応力
σ_1	; 第1主応力
σ_2	; 中間主応力
σ_3	; 第2主応力
σ_1/σ_3	; 主応力比
τ	; せん断応力
σ_a	; 軸応力
τ_t	; 破壊面のせん断応力
ϕ	; せん断抵抗角

目 次

まえがき

記号の説明

1. 大型繰返し三軸試験装置	1
1.1 試験装置の概要	1
1.2 検出器の検定	1
1.3 システムの概要	2
1.4 自動計測に関するフロー	3
1.5 試験値の精度	3
1.6 試験装置の改良	3
2. 予備試験	19
2.1 標準砂の物理的性質及び繰返し三軸試験	19
2.2 試験ケース	19
2.3 供試体作製手順	19
2.4 繰返し三軸試験方法	21
2.5 試験結果	22
3. 粗粒材料の動的変形試験	35
3.1 材料の粒度	35
3.2 材料の物理的性質	35
3.3 材料の締固め試験結果	36
3.3.1 目的	36
3.3.2 締固め試験結果	37
3.4 供試体密度の設定	37
3.5 試験条件	38
3.6 試験結果と考察	38
3.6.1 概要	38
3.6.2 ひずみ履歴の影響	38
3.6.3 間隙比の影響	38
3.6.4 均等係数の影響	39
3.6.5 拘束圧の影響	39
3.6.6 主応力比の影響	40
3.6.7 ひずみ依存性	41
3.6.8 岩質の違いによる影響	42
3.6.9 繰返し周波数の影響	43
3.6.10 せん断剛性率と減衰定数	43
4. 結論	97
参考文献	99
参考資料	101
1. 繰返し三軸試験に関するプログラムリスト	103
2. ピストン貫入量の影響	116

1. 大型繰返し三軸試験装置

1.1 試験装置の概要

本試験に用いた大型三軸装置は、表-1.1の主要諸元及び図-1.1の三軸装置概略図に示したように、供試体直径30cm、高さ60cmで、載荷方式は電気油圧サーボを用いており、通常のひずみ制御による単調載荷の三軸圧縮試験も行える繰返し載荷の三軸試験機である。また、軸受部とピストンの間をベアリングでガイドすることにより摩擦を軽減しており、さらにピストン断面積補償チャンバーにより、側圧による浮上がり防止及びピストンの貫入量補正を行える機構を備えている。繰返し荷重は、フィードバック制御によって正弦波、任意波形を油圧ポンプ（油圧：110kgf/cm²）で載荷し、最大10Hzまでの軸圧及び5Hzまでの側圧の同時載荷が可能な構造である。

本試験では周波数0.2Hzの正弦波で軸荷重を繰返し載荷することとした。また、電気的な自動計測は図-1.2の計測系統図に示すように検出器から増幅器を通し、パーソナルコンピュータを導入したシステムに直接記録した。

これらの試験に用いた検出器の主な仕様を表-1.2に示す。

試験装置の特徴は次に示す通りである。三軸試験装置のセルとピストン軸受部を分割することによって、油圧アクチュエーターと載荷ピストン及び試料キャップ、さらに試料台（ペDESTAL）と載荷台とが剛結される。したがって、繰返し荷重が圧縮側の片振り試験の他に、等方圧密状態から軸荷重を変動させ圧縮と伸長の2つの応力状態となる、いわゆる両振り試験が可能である。荷重計（ロードセル）については試料キャップに埋込式の耐水圧型圧縮引張兼用の20tf用及び10tf用を新設した。これによってピストン軸受部の摩擦やピストン自体の伸縮などの影響を取除き、供試体に作用する荷重が直接計測される。

さらに供試体直上で微小な軸変位を計測するために、渦電流を応用した非接触型の変位計を採用している。従来は、三軸セルの外部で接触型変位計で計測していたために、ピストン軸受け部の摩擦の影響あるいは接触型変位計の機械的摩擦やヒステリシスの影響を免れることが出来なかったが、非接触型変位計によりこれらの影響が解消された。

また、繰返し荷重下における動的体積変化をより精度よく求めるために、従来の差動トランス型変位計によるベロワラム式体積変化計を小型の非接触型変位計を使用したフロートタイプのものに変えた。

図-1.3に示すように、本装置は二重セル機構になっており、内側のセル内には金属箔を張り付けたフロートが浮かべてある。内側のセルは大型三軸試験機のセル内に接続されており、繰返し載荷試験時における供試体の体積変化量はフロートの上下移動量と内側セルの断面積との積から求められる。フロートの移動量は測定長20mmの非接触型変位計を用いて計測している。

粗粒材料の動的物性値は、気乾状態の供試体を用いて求められている。実際のダムでは、下流側のロックゾーンあるいは常時満水位標高以上の上流側ロックゾーンの物性値に相当する。一方、上流側ロックゾーンの浸水部の物性値については飽和状態の供試体を用いて実験を行う必要がある。そこで、飽和供試体での試験を可能にするために、図-1.4に示すように配管を工夫した。この配管によって気乾状態で作製された供試体にCO₂及び脱気水が通され飽和が行われる。

1.2 検出器の検定

大型繰返し三軸試験で使用する各検出器の精度を、増幅器を含む出力測定によって検定を行った。ただし、試験室内で検定を行えないものについては、検定成績書を採用した。また、試験内容からすると動的状態での検定が最も望ましいが、大がかりな装置を必要とするため、今回は静的条件で検定を実施した。

(1) 軸荷重

軸荷重測定用荷重計は、全く同じ形状・寸法で圧縮・引張兼用であり、10tf用と20tf用の2種類ある。ここでは試験に用いた10tf用荷重計のメーカー側の検定結果を図-1.5に示す。これは、荷重とヒズミゲージの出力～ひずみ($\mu = 10^{-6}$)関係であり、増幅器を介した結果ではない。仕様では $\pm 0.5\%$ FSとあるが、この検定結果ではフルスケール10tfとして $\pm 0.16\%$ ($\pm 16\text{kgf}$)の精度が確保されている。また、この荷重計はセル内に設置するためキャンセル機構を備えてはいるが、圧力によるゼロ点変動は拘束圧 5kgf/cm^2 の変化に対して 35kgf (軸応力 $\delta a \approx 0.05\text{kgf/cm}^2$)程度の値を示す。しかし、繰返し載荷状態では拘束圧一定のまま行うため、試験結果には影響を及ぼさないと考える。

(2) 軸変位

動的軸変位はセル内部の非接触型変位計で測定する。メーカーの検定では、空気中の金属の影響のない所で専用検定器(アクリル製)を用いて行っている。

試験時と同条件で水中において拘束圧をかけた場合の影響を調べた。変位計の専用増幅器の出力電圧値から求めた変位量を 2.5mm に設定し、拘束圧を $\sigma_c = 1.0\text{kgf/cm}^2$ から 6.0kgf/cm^2 まで変化させた時の変位量の変動を図-1.6に示す。この図から、非接触型変位計の変動は、ほとんどなく、水中での拘束圧の影響はほとんどないことが確認できた。

(3) 体積変化量

動的ポアソン比は、円柱供試体半径方向のひずみを供試体の体積ひずみから求め、間接的に測定する方法を用いている。動的体積変化量は微小なため、体積変化計は小型の非接触型変位計を使ったタイプのものにした。

検定は、体積変化計の給排水量をメスシリンダーで測定し、同時に体積変化計の増幅器を通した出力電圧値を測定する。検定の結果を図-1.7に示す。メスシリンダーの排水量を基準とした場合の誤差は、フルスケール(F.S.)に対して $\pm 5.0\%$ 以内となっている。

外体積変化で圧密量を測る場合、側圧の上昇に伴い三軸セル自体が膨張し、その分だけ体積変化が大きくなるためこの値を補正する必要がある。拘束圧による三軸セルの膨張量を測定した結果を図-1.8に示す。側圧は三軸装置に備え付けの最小目盛り 0.05kgf/cm^2 のブルドン管式圧力計で測り、三軸セルの膨張量は、差動トランス型体積変化計の出力電圧値を測定した。本試験の最大拘束圧 6kgf/cm^2 では、 210cm^3 程度の膨張が生じることになる。この結果をもとに、今回の試験における圧密時の体積変化量を補正している。

(4) 拘束圧

拘束圧は、セル底盤の外側に設置してあるヒズミゲージ式圧力計で自動計測している。検定は空圧調整弁につながるブルドンゲージ(最小目盛り 0.05kgf/cm^2)を基準として、圧力計の出力電圧から算定し、図-1.9に結果を示す。圧力計による側圧測定誤差は、 5kgf/cm^2 F.S.の場合ほぼ $\pm 0.05\text{kgf/cm}^2$ で常に圧力計 $\leq$ ブルドンゲージの傾向があることがわかる。

以上の検定結果をまとめると表-1.3に示すとおりである。

1.3 システムの概要

自動計測システムは、前述した試験機から出力された電圧値のサンプリング装置、A/D変換器及び記憶装置等で構成されており、全てパーソナルコンピュータによって制御される。システム概略図を図-1.10に示す。

ここでは、自動計測システムのフローに沿って、サンプリング、A/D変換及び物理値への変換等の手法や試験値の精度等について具体的に述べる。

なお、自動計測システムの各種機器の仕様については表-1.4に示すとおりである。

1.4 自動計測に関するフロー

図-1.11に自動計測システムのフローを示す。動的試験中は試験機にセットした検出器によって、軸荷重、軸変位、体積変化及び拘束圧を検出し、ノイズを取り除くためのフィルターを介して、A/D変換器に送り込む。さらに、A/D変換（アナログ値をデジタル値に変換）後は、電圧値としてパーソナルコンピュータに転送する。これを1拘束圧段階別に各ひずみレベル毎に整理し、デジタル値は外部記憶装置（ハードディスク）に記録する。さらに、試験終了後試験値をハードディスクから、パーソナルコンピュータに転送し、各物理量に変換し整理する。なお、これらは全てパーソナルコンピュータのプログラムソフトにより制御している。

この試験計測システムにより、試験結果の整理等の省力化、人為的誤差の排除、また、試験中の手作業も減らすことができ、かなりの利点がある。表-1.5に従来の方法との比較を示す。

1.5 計測値の精度

計測値の種類は、軸荷重、軸変位、体積変化及び拘束圧（又は間隙水圧）である。各々について、A/D変換器の最小単位（1mv）から分解能を算出し、動的物性値の信頼できる最小量を求めると以下表-1.6に示すとおりである。

1.6 試験値のサンプリングと整理

試験データは、次の4種類である。

- ・軸荷重
- ・軸変位
- ・体積変化
- ・側圧（間隙水圧）

試験及びサンプリングに関する条件は、以下のとおりである。

- ・波数 12波（1拘束圧段階の1荷重振幅当り）
- ・周波数 0.2 Hz（5秒/波）
- ・サンプリングタイム 10msec
- ・サンプリング波 10波目（応力～ひずみ関係が定常状態になった時）

上記条件において、サンプルデータの数、1拘束圧1荷重振幅で、 $12\text{波} \times 5\text{秒} / \text{波} \div 10\text{msec} = 6000$ データとなる。

このうち、必要な試験データは、応力～ひずみ関係がほぼ定常状態になる10波目の1波分である。そこで、この1波分をサンプリングする方法を以下に述べる。

各試験値は、A/D変換器の各チャンネル毎に貯えられる。それらのデータ（6000データ）はパーソナルコンピュータ内部記憶装置に記憶され、必要な1波分のデータがサンプリングされる。図-1.12に示すように軸荷重の正弦波を基に次の順序に従ってサンプリング及び整理する。

- 1). 全データ（6000点）から、10波目の範囲は4501点目から5000点目までである。
- 2). しかし、軸荷重の1波目の最初の点は必ずしも中立の状態からスタートしているとはかぎらないため、10波目の範囲を1)に示した範囲に固定することは危険である。よって、この範囲の前に100点、後に50

点分を増やし、抽出範囲を4401点～5050点とした。

3). サンプリングする範囲が決定すると、10波目の1波分を認識する。そのためには、試験データの正弦波の基準値を定め、試験値を修正する。修正値はデータの最大・最小値を求め、その中間値を算出し、次に全データから中間値を差し引くことによって求められる。

4). 10波目の最初の点は、修正した試験データの符号が(－)から(＋)に変化した点を、次に、修正した試験データの符号が(－)から(＋)に変化した点を最後の点と見なす。この両点の間を1波分と認識する。

5). 軸荷重のデータの1波分のサンプリング範囲が設定されると、同時刻対応した他の試験データを処理し、基準値を定める。なお、これらの試験データは、パーソナルコンピュータの外部記憶装置であるハードディスクに記録する。

必要な試験データが、各拘束圧段階の各荷重振幅別に得られたならば、次に目標とする動的変形特性(せん断剛性率 G 、減衰定数 h 、ポアソン比 ν)の算出方法を以下に示す。

1). 軸荷重から、軸方向応力を算出し、最大最小値から振幅を計算し、これを σ_a とする。

2). 軸変位から、軸方向ひずみを算出し、最大最小値から振幅を計算し、これを ε_a とする。

3). 1), 2)より、動弾性係数 $E_d (= \sigma_a / \varepsilon_a)$ を算出する。

4). 体積変化から、体積ひずみを算出し、最大最小値から振幅を計算し、これを ε_v とする。

5). 2), 4)より、ポアソン比

$$\nu (= \frac{1}{2} \times (1 - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_a})) \text{ を算出する}$$

6). 3), 5)より、せん断剛性率

$$G (= E_d / 2 (1 + \nu)) \text{ を算出する。}$$

7). 2), 5)より、せん断ひずみ

$$\gamma (= \varepsilon_a \times (1 + \nu)) \text{ を算出する。}$$

8). 1), 2)の軸方向応力～軸ひずみ関係のヒステリシスループの面積から、減衰定数 h を求める。

以上の手順に依って求めた例としてロック材のヒステリシスループ及び時刻歴を図-1.13、図-1.14に示した。

A/D変換器の分解能が減衰定数 h に与える影響を次に示す。時上の定数は、減衰定数 h は次式により算出される。(図-1.15参照)

$$h = \frac{1}{2\pi} \times \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (\%) \quad \dots (1.1)$$

ここに、 W_1 : ヒステリシスループで囲まれた面積

W_2 : $\sigma_a \times \varepsilon_a$ (図-1.15参照)

A/D変換器の分解能は1mvであることから、各試験値は最大±1mvの誤差を有することになる。

今、図-1.15において、軸ひずみ上で曲線ABC全体が-1mv、曲線CDA全体が±1mv、軸差応力（軸荷重）上で曲線ABC全体が±1mv、曲線CDA全体が-1mvの誤差が生じたものとしよう。なお、この場合、ヒステリシスループの面積のみが変化するものとする。よって、減衰定数h'は次式による。

$$h' = \frac{1}{2\pi} \times \frac{W_1 + \Delta W_1 + \Delta W_2}{W_2} \times 100 \quad (\%) \quad \dots(1.2)$$

$$= h + \Delta h \quad (\Delta h = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta W_1 + \Delta W_2}{W_2} \times 100 \quad (\%))$$

ここに、 ΔW_1 ：軸ひずみ上での誤差分

$$(\Delta W_1 = 2 \times \sigma_s \times \epsilon_s \times 2 = 4 \cdot \sigma_s \cdot \epsilon_s)$$

$\Delta \epsilon_s$ ：軸変位±1mvによる軸ひずみの誤差

$$(\Delta \epsilon_s = 1\text{mv} \times 1\text{mm} / v \div 600\text{mm} = 1.67 \times 10^{-6})$$

ΔW_2 ：軸差応力（軸荷重）

$$\text{上での誤差分 } 2 \times \epsilon_s \times \Delta \sigma_s \times 2 = 4 \cdot \epsilon_s \cdot \Delta \sigma_s$$

$\Delta \sigma_s$ ：軸荷重±1mvによる軸差応力上での誤差

$$(\Delta \sigma_s = 1\text{mv} \times 10\text{ton} / 5v \div 706.9\text{cm}^2 = 2.83 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2)$$

$$\Delta h = \frac{1}{2\pi} \times \frac{4\sigma_s \Delta \epsilon_s + 4\epsilon_s \Delta \sigma_s}{\sigma_s \times \epsilon_s} \times 100 \quad (\%) \quad \dots(1.3)$$

$$= \frac{4}{2\pi} \times \left(\frac{1.67 \times 10^{-6}}{\epsilon_s} + \frac{2.83 \times 10^{-3}}{\sigma_s} \right) \times 100$$

仮に、 $\epsilon_s = 1 \times 10^{-4}$ 、 $\sigma_s = 500 \text{ kgf/cm}^2$ とすると、 $\Delta h = 1.1\%$

以上から、軸ひずみ $\epsilon_s = 1 \times 10^{-4}$ におけるA/D変換器の分解能が減衰定数hに与える誤差分として最大1%程度である。

表-1.1 主要諸元

適用供試体寸法	$\phi 30 \times h 60\text{cm}$
加振方式	電気油圧サーボ方式
加振波形	正弦波, 三角波, 地震波
垂直負荷	最大圧縮 20tf
	最大引張 10tf
	周波数範囲 0.2~10Hz
側圧負荷	最大圧力 15kgf/cm ²
	周波数範囲 0.2~5 Hz

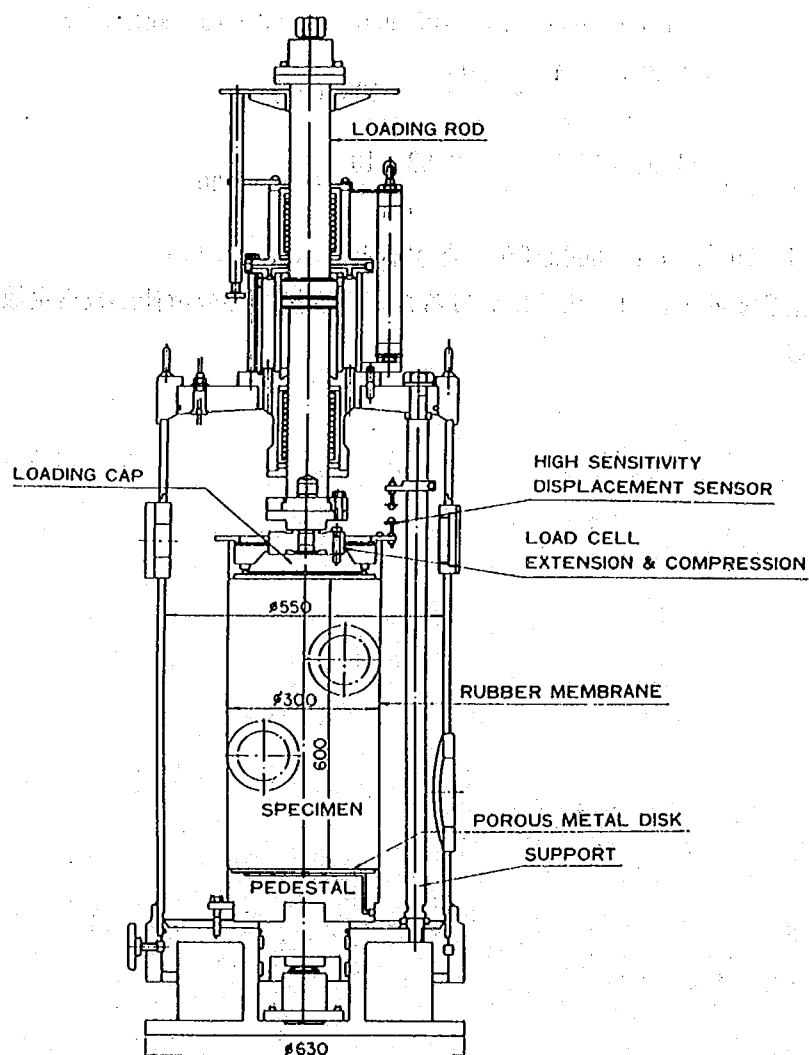


図-1.1 繰返し三軸試験機（三軸室概略図）

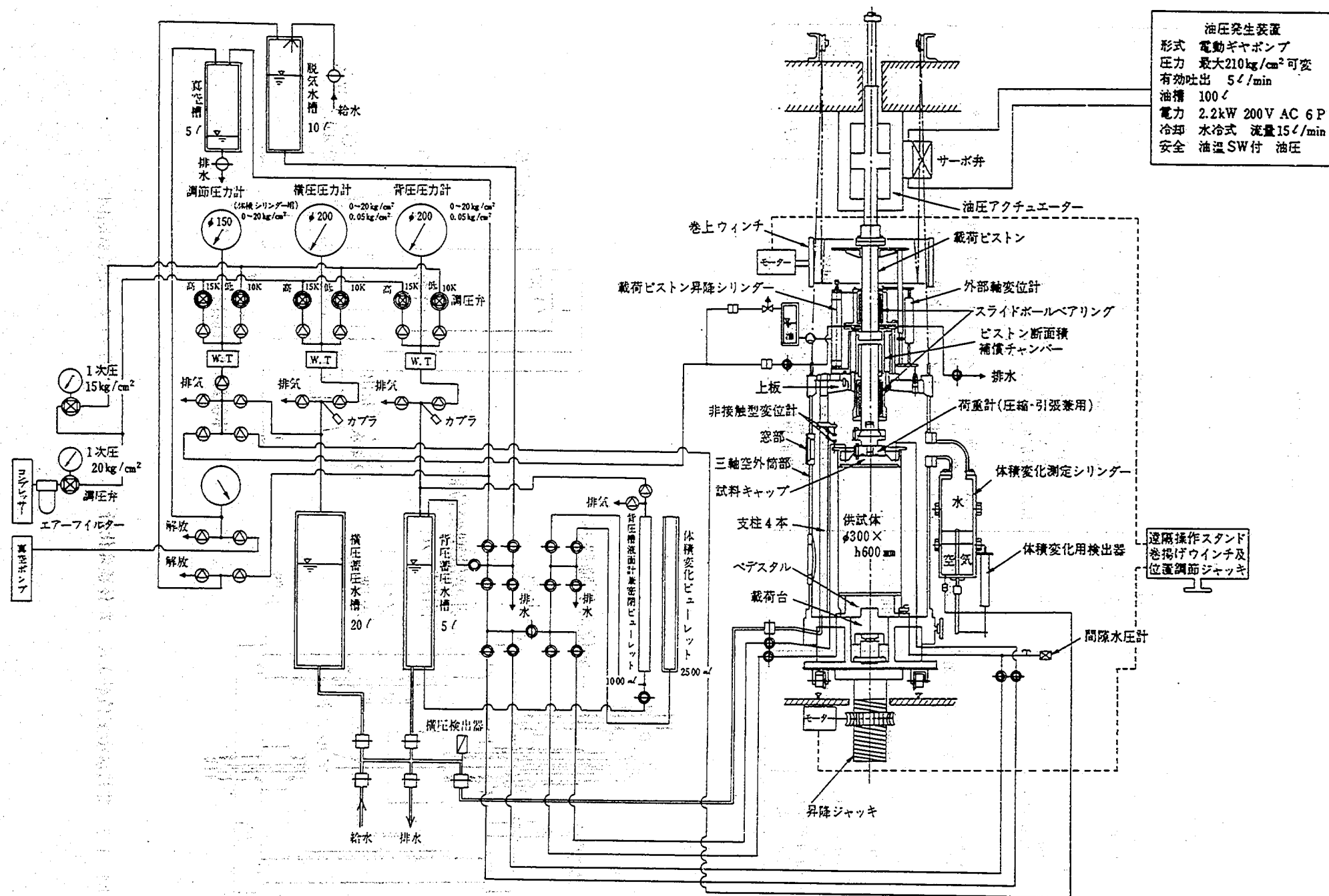


圖-1.2 三軸裝置配管系統圖

表-1.2 検出器の仕様

測定項目 (検出器)	メーカー	容量	主な仕様	測定位置
軸荷重 (荷重計)	B E E	・圧縮20tf (引張10tf) ・圧縮10tf (引張5tf)	形式: ヒズミゲージ型 LP-20(10)T 耐水圧密閉式 (15kgf/cm ²) 精度: A T T 1, 1/2, 1/5 各段 ±0.5%以内 形状寸法: φ150×50mm	セル内部 試料キャップに 埋込式
内部変位 (非接触型 変位計)	E M I C	5 mm	形式: 渦電流タイプ 多点折線リニアライザー回路 精度: 分解能 0.05% F. S. 非直線性 ±1% F. S.	セル内部 試料キャップに 埋込式
外部軸変位 (軸変位計)	新興通信工業	±20mm	形式: 差動トランス型 ID-3572-20 角型コアスプリング入り 精度: A T T 1, 1/2, 1/4 各段 ±0.5%以内	セル外部 軸受部とピストン 間を測定
側圧 (圧力計)	新興通信工業	20kgf/cm ²	形式: ヒズミゲージ型 PR-20C 精度: A T T 1, 1/2, 1/4 各段 0.5%以内	セル外側の底部
外体積変化 (変位計) 動的变化の 計測	電子応用	22mm	形式: 渦電流タイプ 多点折線リニアライザー回路 精度: 分解能 0.025% F. S. 非直線性 ±0.5% F. S.	体積変化計測用 セルに取り付け フロートの鉛直 変位を測定

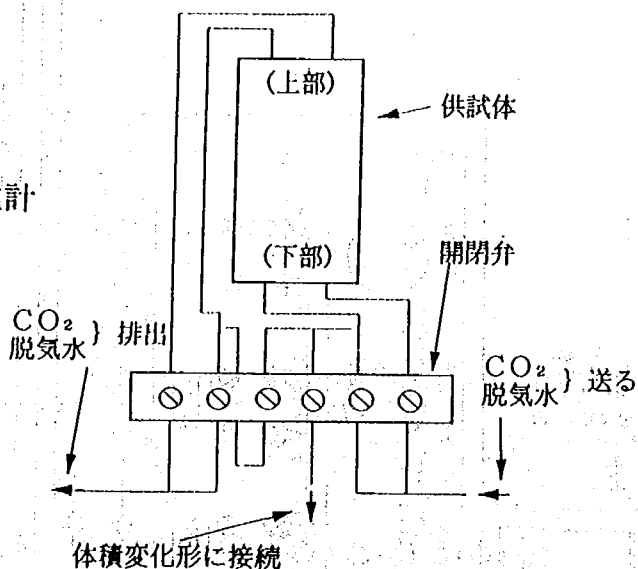
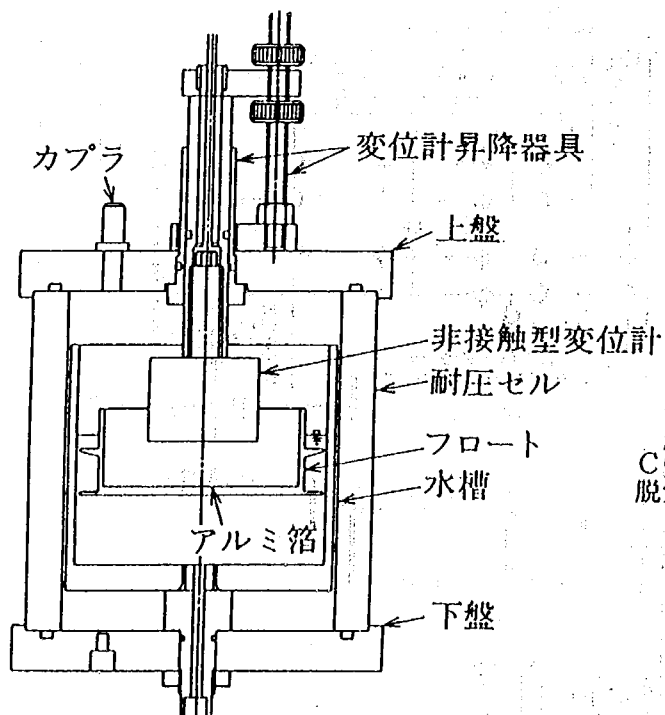


図-1.3 非接触型変位計を使った体積変化計

図-1.4 配管概略図

表-1.3 検定結果一覧表

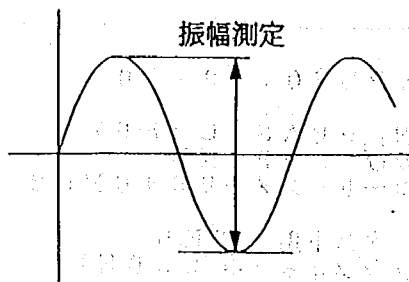
検定項目	最大容量	検出方式	検定容量	誤差	検定方法
軸荷重 (荷重計)	圧縮 10tf 引張 5tf	ヒズミゲージ型	10tf F.S.	$\pm 16\text{kgf}$ (仕様 $\pm 0.5\%$ F.S.)	メーカーの検定結果 荷重～出力ひずみ
軸変位 (非接触型 変位計)	25mm	コイルインダク タンス方式	$\Delta T T : 1/5$ 5mm = 5 V F.S.	$\pm 0.05\text{mm}$	検定装置のダイヤル ゲージ (1/100mm 精度)
側圧 (圧力計)	20kgf/cm ²	ヒズミゲージ型	$\Delta T T : 1/4$ 5 kgf/cm ² = 5 V F.S.	$\pm 0.05\text{kgf/cm}^2$	フルドンゲージ (0.05kgf/cm ² 目盛)

表-1.4 自動計画システム各機器の仕様

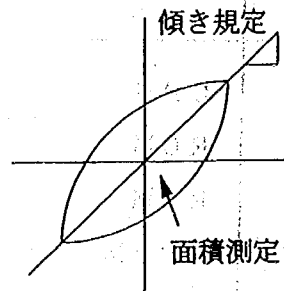
機 器 名	仕 様	
A/D変換器 (DRA-10A)	分解能	12bit
	サンプリング速度	0.5msecおよび1～1.00msec (1msec刻みで設定可)
	データ・メモリ	4KW/Ch. (4KW単位で 最大16KWまで増設可) ブリトリガデータ数を任意 設定可 電源OFF時の保持時間12H
フィルター (UFフィルタ)	多チャンネル	最大4
	フィルタ特性	Low-Pass High-Pass Band-Elimination 最大平坦 (バターワース) 位相直線 (ベッセル) チェビシェフ特性
パーソナル コンピュータ	CPU	$\mu\text{PD70116-10}$
	ROM	N ₁ -BASIC (86)
	RAM	及びモニタ96KB ユーザーズメモリ640MKB
	VRAM	テキスト用 12KB グラフィック用 256KB
CRT	テキスト表示	80文字×25行
	グラフィック表示	640×400ドット
ハードディスク (DS-9820)	データ容量	20MB
	アクセス時間	平均85msec
	バックアップ時間	約5分
8インチフロッピー	データ容量	1MB
プロッター	サイズ	最大A3版

表-1.5 従来の方法と当システムによる方法との比較

	従来の方法	当システムによる方法
試験中	試験値からサンプリングしたデータを2台のX-Yレコーダーを使って、時刻歴及び時刻歴曲線（ヒステリシスループ）を描き出す。 この作業を行うには、レンジの調整等に人手が2人必要となる。 試験のチェックは、試験中に時刻歴やヒステリシスループにより、同時にできる。	パソコンにより、軸荷重、軸変位、体積変化及び側圧をサンプリングタイム（10 msec）毎に、同時にサンプリングAD変換を行い、得られたデータはハードディスクに保存する。 このデータを基に試験値を物理値に変換し、時刻歴やヒステリシスループをCRT上に描き出す。 パソコンの制御により、全ての作業が行えるから人手は1人でよい。 試験のチェックはCRT上でできる。 ただし、パソコンの処理時間が加わるため、従来の方法よりも若干のロスタイムが生じることになる。（このロスタイムについては、プログラム作成言語を機械語にすることにより短縮できる。）
試験値の整理	下図のように、X-Yレコーダーにより描き出された時刻歴ヒステリシスループを基に、時刻歴の振幅の長さを測定し、またヒステリシスループの傾きや面積を測定することにより、動的変形特性を算出する。この作業は1試験当たり約三日を要する。	試験値をパソコンによって、数値配列として記憶することは、時刻歴として記憶されていることになる。またヒステリシスループは、この時刻歴のうち軸荷重と軸変位から、同一時刻の両者の値を対応させることにより、得られる。 よって動的変形特性は短時間のうちに得られる。これに要する時間は、2～3時間程度である。



(時刻歴)



(ヒステリシスループ)

表-1.6 計測器の精度

	精度
軸荷重	$\pm 1.41 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$
軸ひずみ	$\pm 1.67 \times 10^{-6}$
体積ひずみ	$\pm 3.14 \times 10^{-7}$ (13.3cc / 1volt)
側圧 (間隙水压)	$\pm 0.001 \text{ kgf/cm}^2$

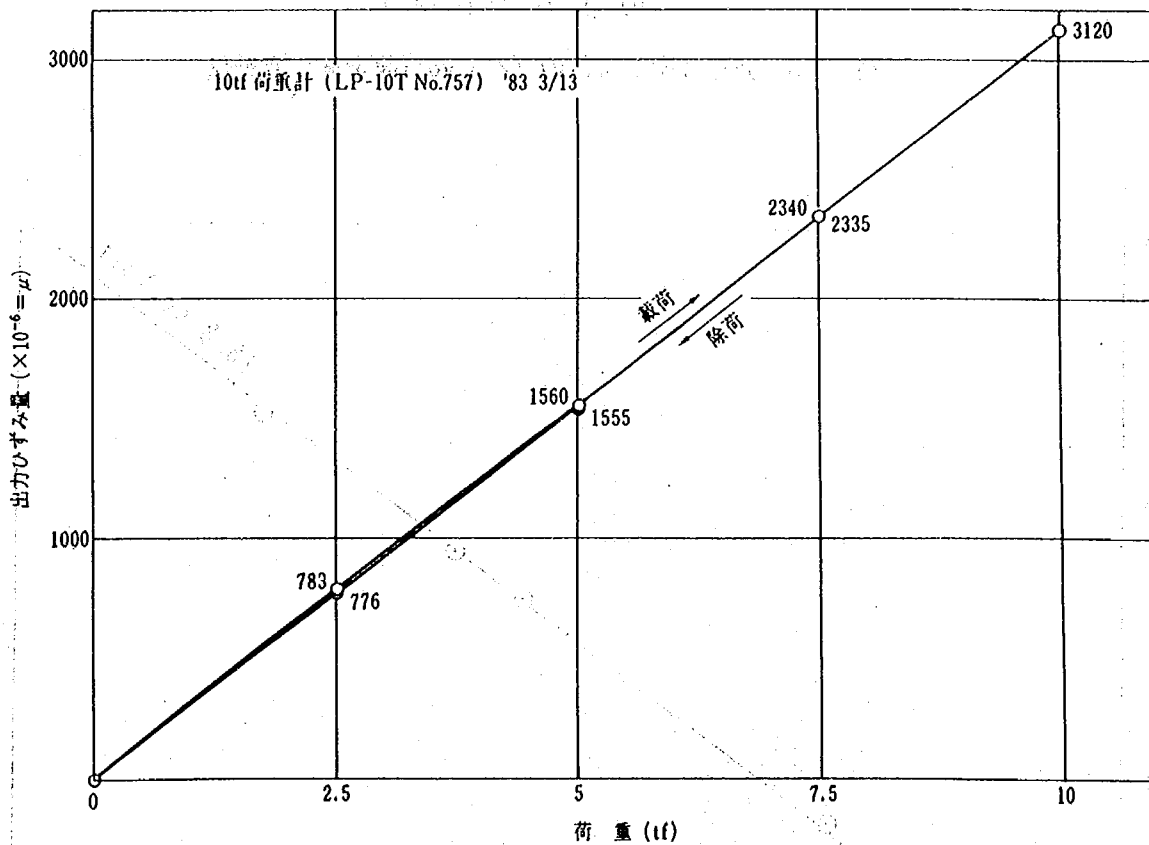


図-1.5 荷重計 (10tf) の検定結果

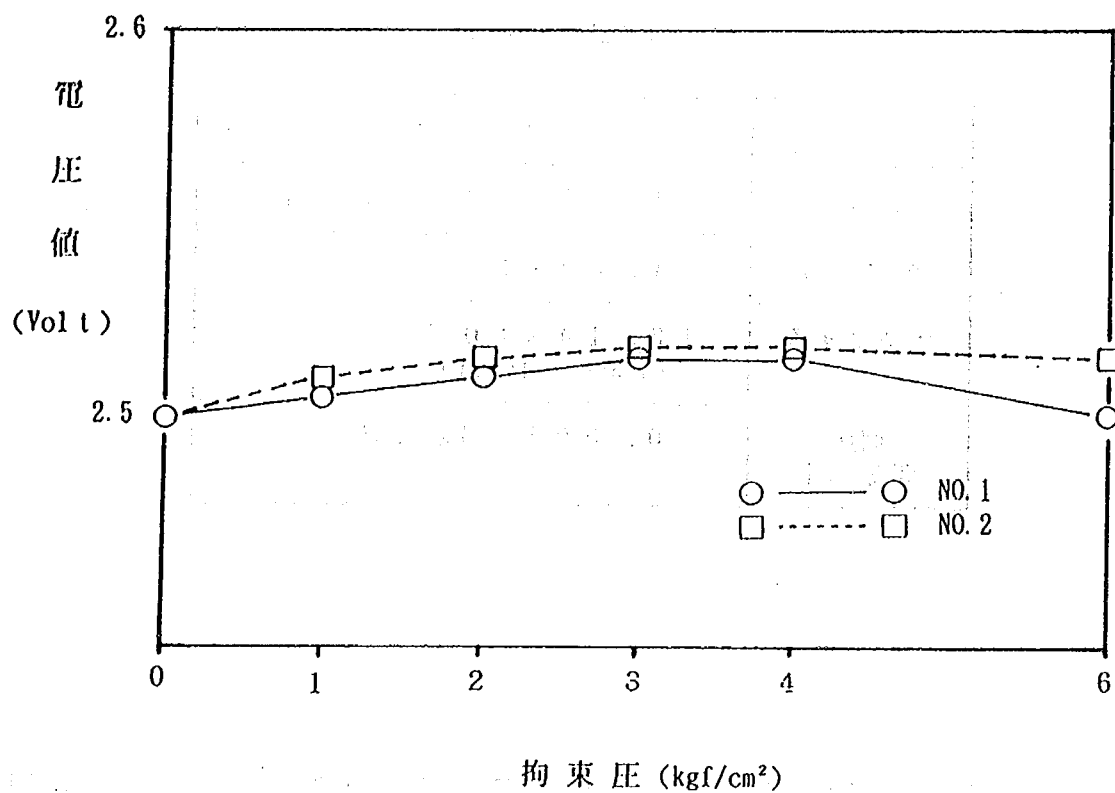


図-1.6 非接触型変位計の (2.5 volt設定後) 変動値

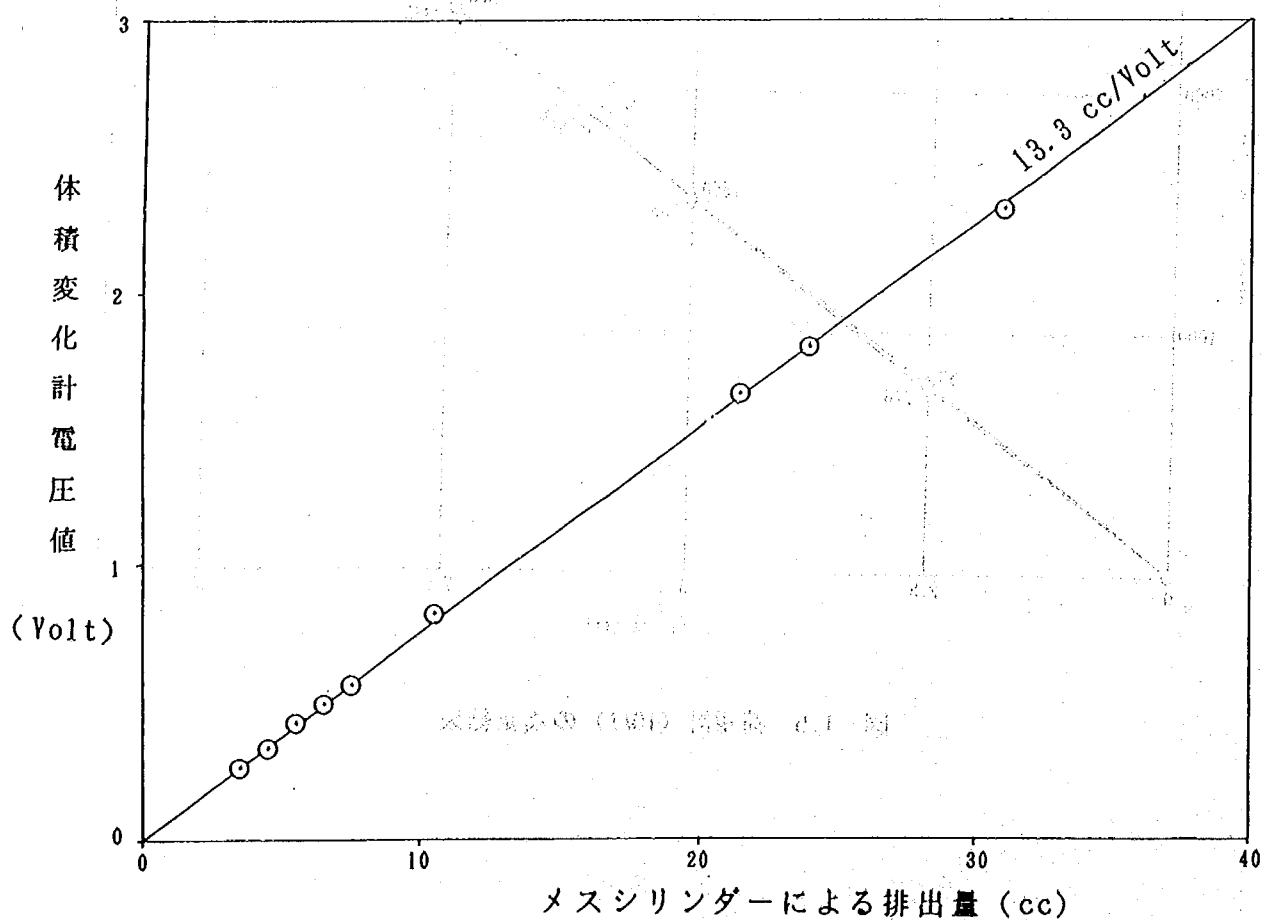


図-1.7 体積変化計の検定

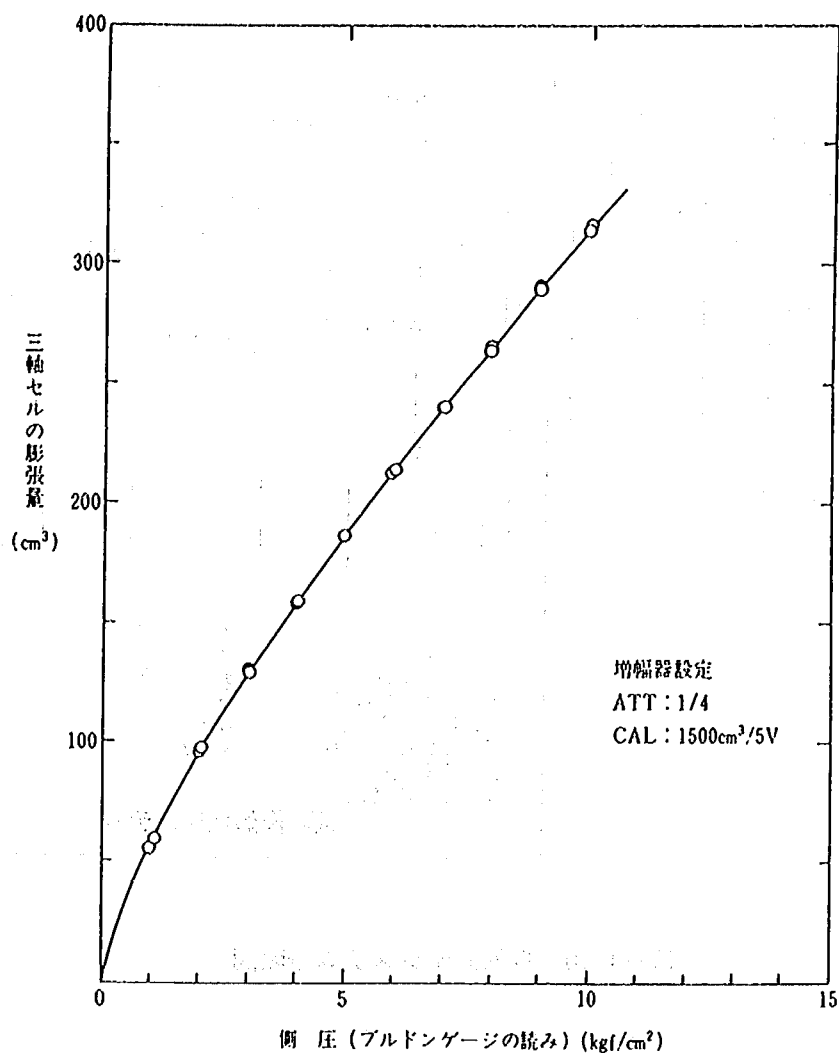


図-1.8 側圧による三軸セルの膨張量測定

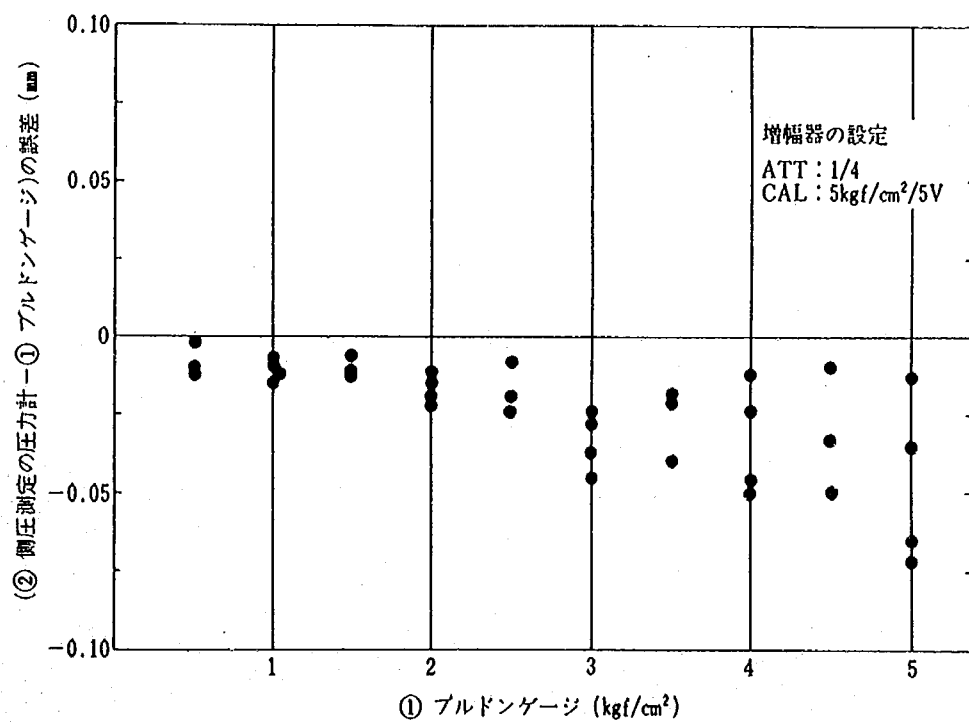


図-1.9 側圧計の検定

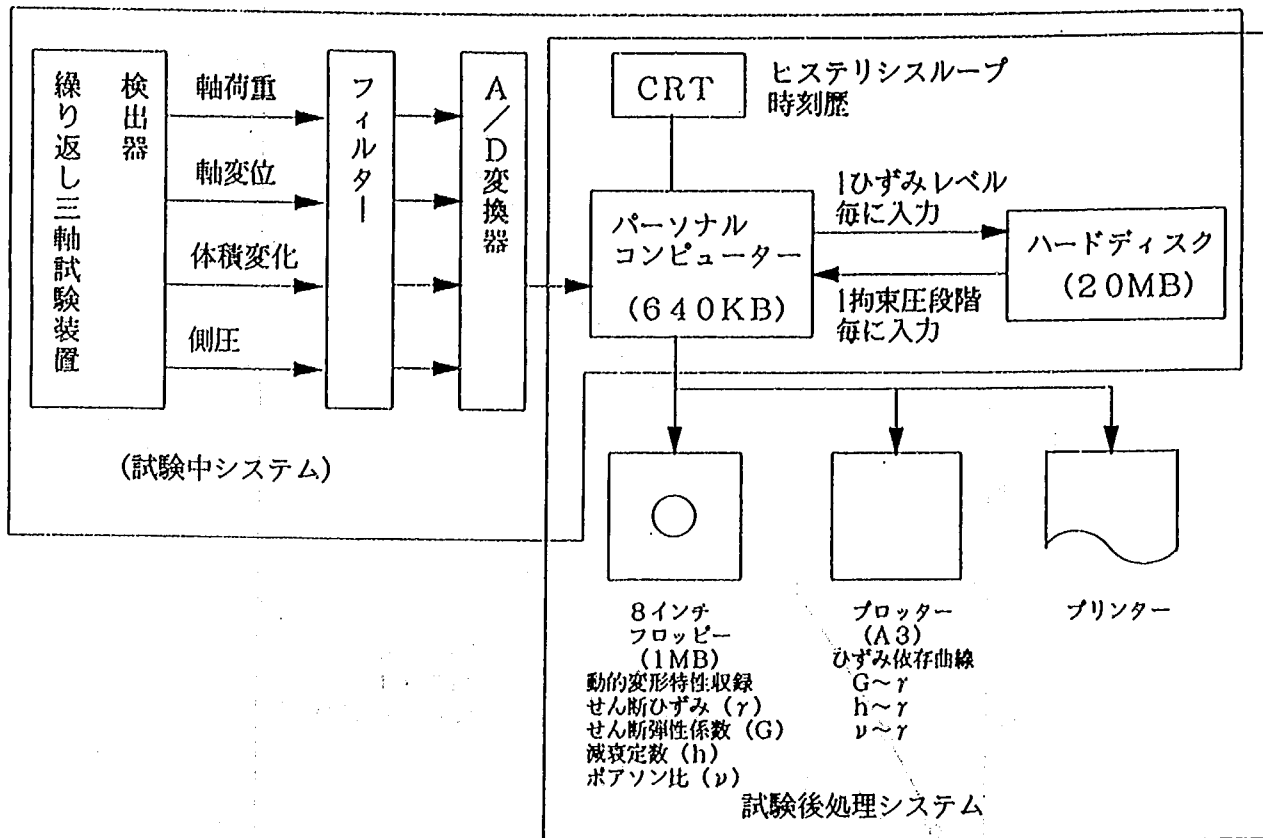


図-1.10 自動計測システム概略図

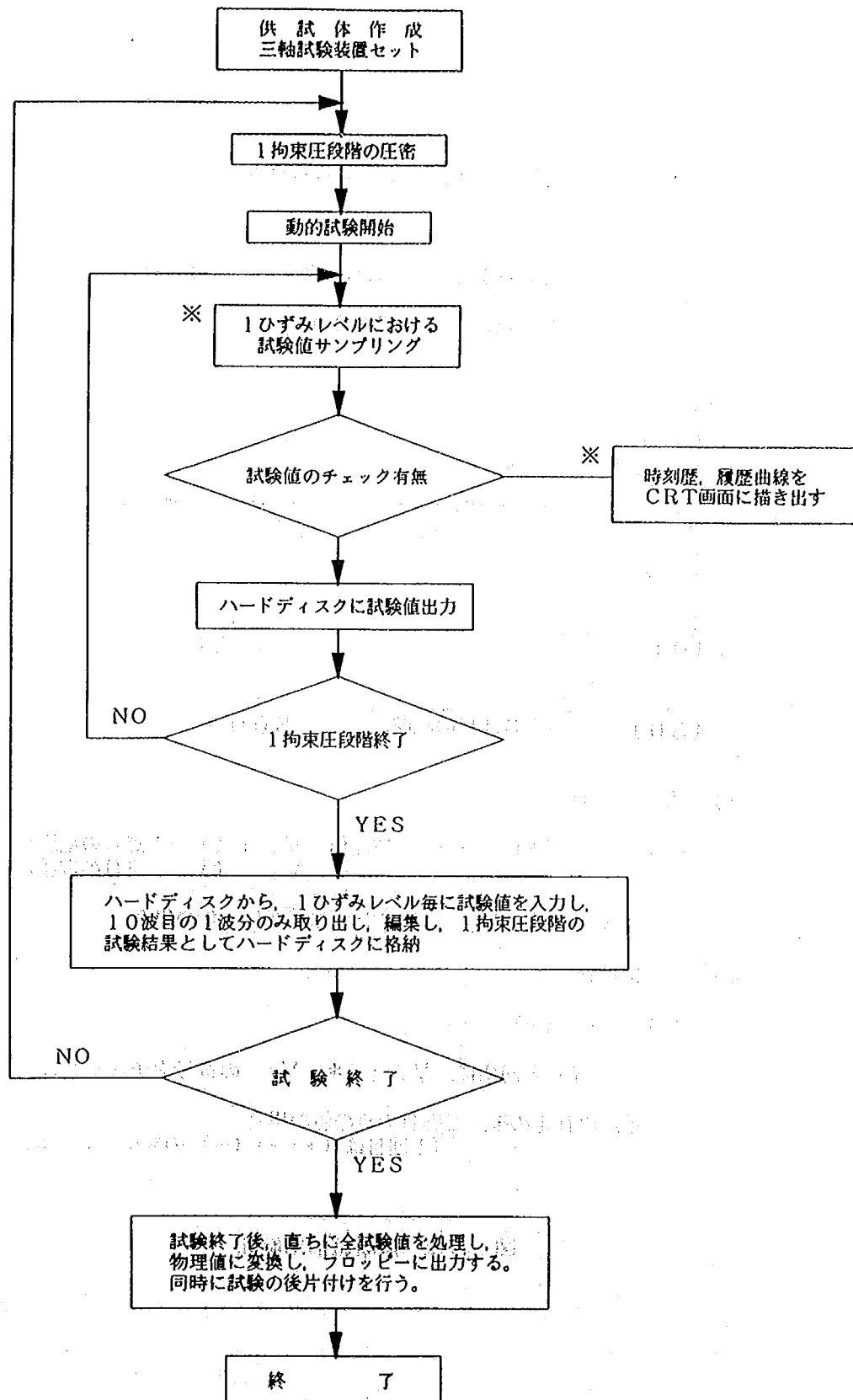
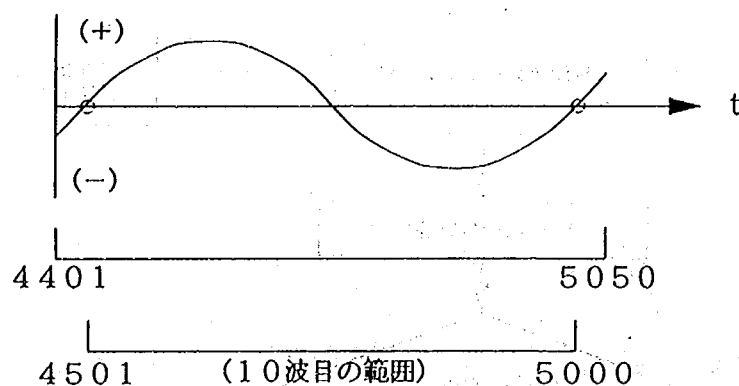


図-1.11 自動計測システムのフロー

- 軸荷重正弦波使用
- 周波数 0.2Hz (5.0秒/波)
- サンプルングタイム 10msec
- 全抽出点 5秒/波×12波÷10msec=6000点
- 着目抽出範囲

・ 10波目 …… 4401点 ~ 5050点 (650点)
 └─────────┬─────────┘
 (4501 ~ 5000)

・ 範囲判定法



イ) 始点の判定

(-) → (+) …… 電圧値 V_{i-1} ($i-1$ 点目の電圧)
 V_i (i 点目の電圧)

$V_{i-1} * V_i$ の符号をチェックし、負の場合

ロ) 終点の判定

(-) → (+)

イ)と同様に、 $V_{i-1} * V_i$ の符号をチェックし、

イ)の判定の後、二回目の負の値の場合

(1回目は (+) → (-) の変化点である。

図-1.12 試験値抽出範囲

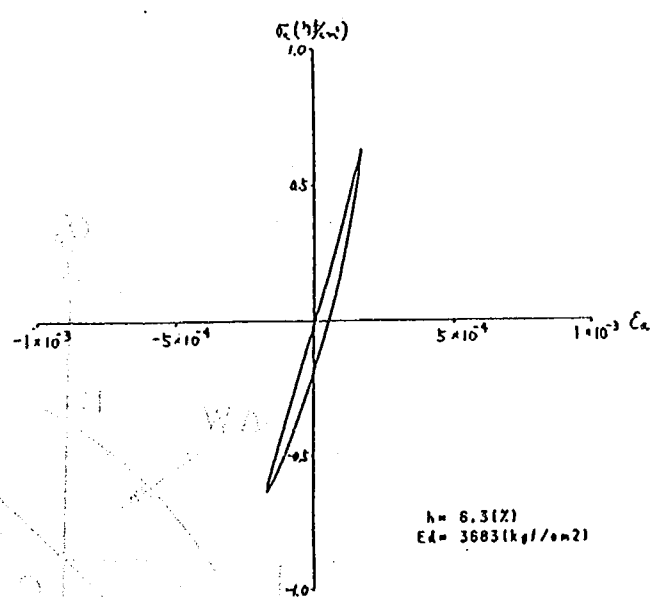
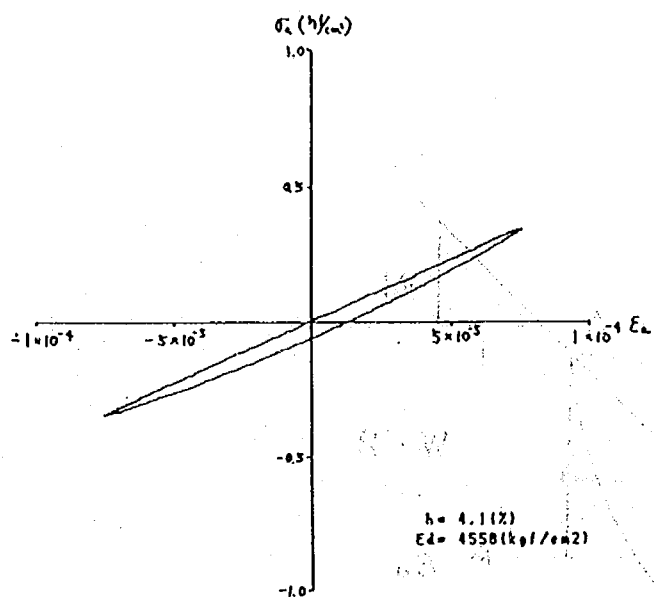
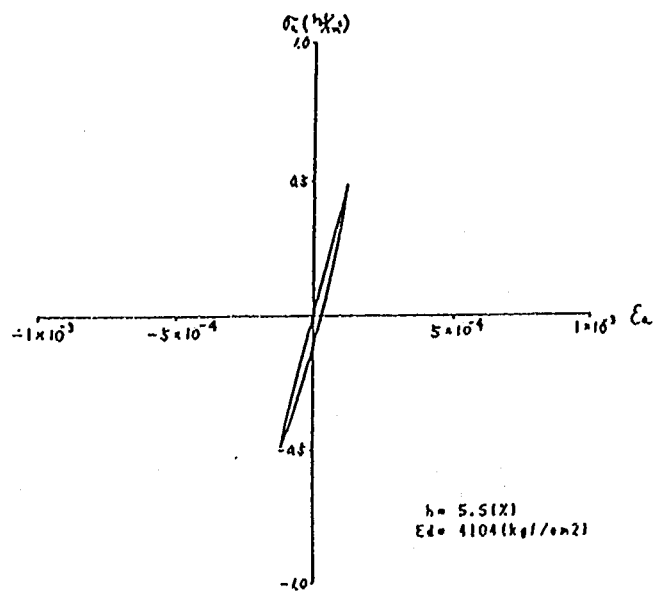
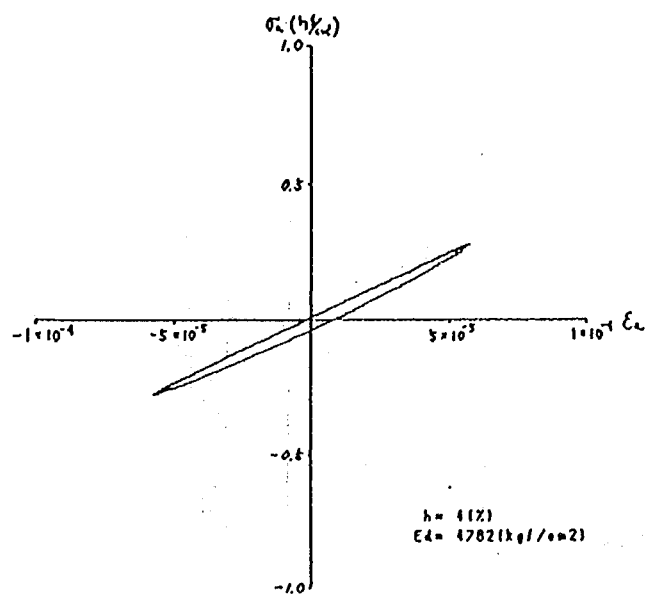


図-1.13 破砕ロック材の試験例（ヒステリシスループ）

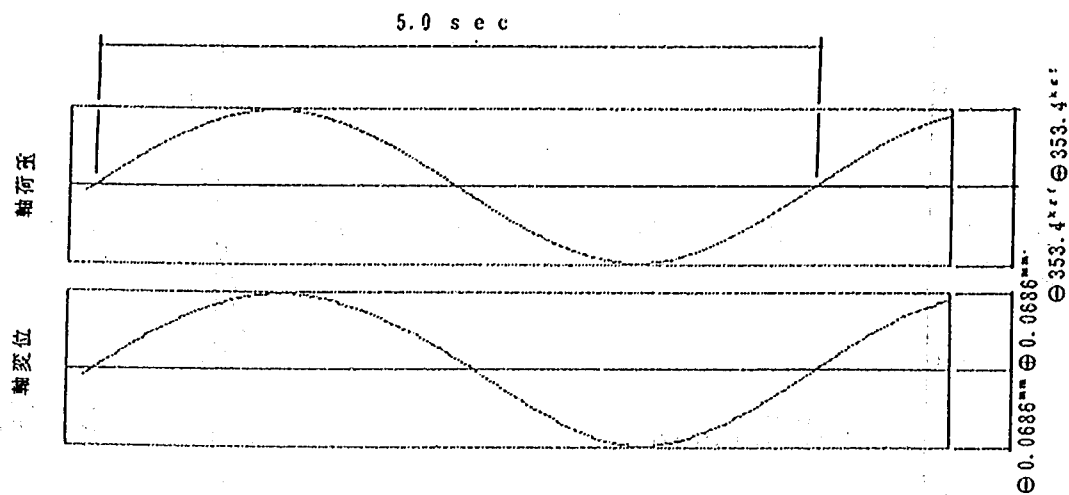


図-1.14 ロック材の試験例（時刻歴）

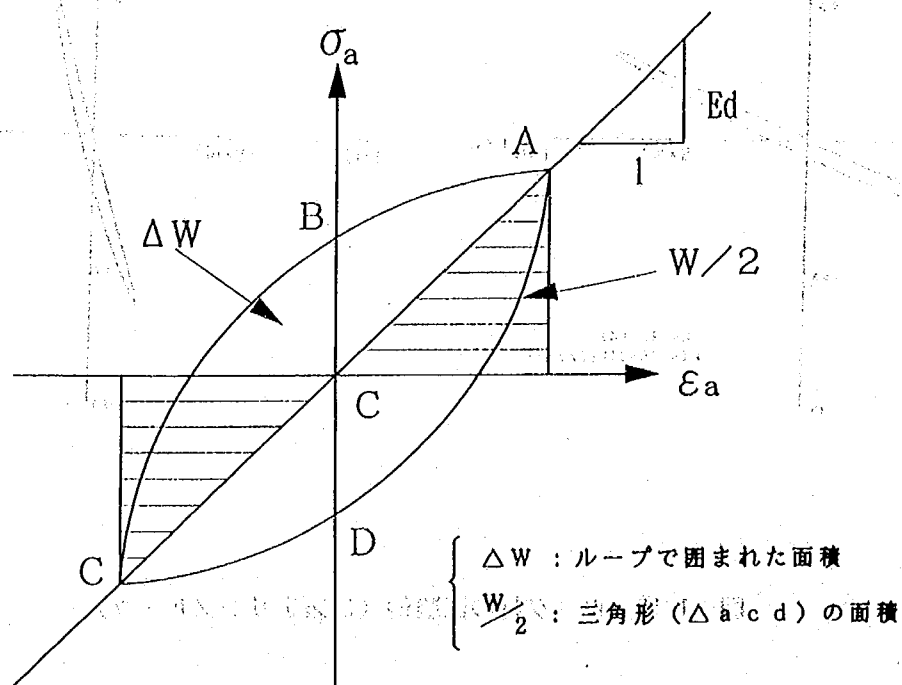


図-1.15 減衰定数の算出根拠図

2. 予備試験

自動計測システムを導入した大型繰返し三軸試験機による粗粒材料の試験を実施する予備段階として、従来から数多く試験がなされ、動的物性値がよく知られている豊浦標準砂を用いた試験を実施した。

これによって、今回始めて導入したパーソナルコンピュータ制御による自動計測のチェックや試験値の信頼度等について整理した。

なお、豊浦標準砂の動的物性値に関する詳細については、「土研資料第2146号大型繰返し三軸試験機を用いた粗粒材料の動的物性試験（P38～P53）」を参考にしている。

2.1 標準砂の物理的性質及び繰返し三軸試験

豊浦標準砂の物理的性質は、比重 $G_s = 2.644$ 、均等係数 $U_c = 1.3$ 、最大・最小間隙比 $e_{max} = 0.905 \cdot e_{min} = 0.595$ である。試料は気乾状態で直径 $\phi 30\text{cm} \times$ 高さ $h 60\text{cm}$ のモールド中に6層に詰め、小型ハンドバイブレータにより35秒/層ずつ締め付けた。供試体の設定密度は、相対密度 $D_r = 85\%$ のかなり密な状態を目標とした。さらに飽和供試体については、締め付けられた供試体に CO_2 を通し、その後脱気水を供試体の下部から上部へ通水して作製した。また、飽和度のチェックはスケンプトンのB係数（0.96以上）によって行った。

繰返し三軸試験は、まず最初に $\sigma_v = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ 及び 6.0kgf/cm^2 の順で拘束圧を変化させ、それぞれの圧密が完了した段階で繰返し载荷を実施した。

繰返し载荷は、荷重制御による正弦波とし、周波数 0.2Hz 、载荷回数を12波とし、定常状態に達した10波目の試験値から、せん断剛性率及び減衰定数を算定した。なお、標準砂の予備試験条件を表-2.1に示した。

2.2 試験ケース

予備試験の試験ケースは、表-2.2に示すとおりである。試験番号1は、従来の方法（ペンレコーダ使用）と自動計測システムを使った方法とを比較する目的で実施したものである。

また試験番号1、2及び3は、拘束圧の影響や主応力比の影響を調べるために実施したものである。

試験番号4は、拘束圧を $\sigma_v = 3\text{kgf/cm}^2, 6\text{kgf/cm}^2$ と昇圧し、次に 3kgf/cm^2 まで降圧し、応力履歴の影響を把握するために実施したものである。

さらに、試験番号5、6は、間隙比 e の影響を調べるために実施したものである。

試験番号7、8、9は、試験番号1、2、3に対応しており、粗粒材料の飽和による影響を調べることを目的としている。

2.3 供試体作製手順

供試体作製方法から試験機へのセットまでの手順を以下に示す。なお、ここでは飽和供試体の作製について述べているが、気乾供試体の作製は、この手順のうち供試体を飽和させる部分を除けばよい。

〈試料調整・供試体作製手順〉

- (1) 初期設定密度に必要な試料重量を算定し、試験粒度に従って各粒径毎に必要な量を6等分する。なお、重量測定には 1g 単位目盛の台秤を使用する。
- (2) 試料台（ペDESTAL）にメンブレン（厚さ約 2mm ）を装着し、供試体作製用2つ割りモールド（ $\phi 30\text{cm} \times h 60\text{cm}$ ）を装置する。
- (3) メンブレンをモールド上端部で折り返し、カラーを装着する。
- (4) 負圧（ -0.3kgf/cm^2 ）を用いて、モールドとメンブレンを密着させ、ろ紙を入れる。

- (5). 6層分に分割した粗粒材料の1層分の試料をさらに16等分し投入する。その際、落下高を極力小さくし、なるべく試料が平均的に分散するように心懸ける。
- (6). 各層毎に、豊浦砂の場合電動バイブレーターで、粗粒材料ではその表面に厚さ0.9cm 直径29cmの加圧盤(鉄板)を載せ、この上面を電気ハンマで所定の時間締固める。供試体の最終仕上がり高さを60cmに設定し、各層が目標高さになるように調整する。また、次層投入前には、締固め面を乱し、次層とのなじみを良くする。
- (7). 締固め終了後、カラーをはずす。
- (8). クレーンにより、モールドが付いたままの供試体を試験機下盤の上にセットする。
- (9). 供試体上面に試料キャップを設定し、メンブレンのシールを行う。その際、非接触型変位計固定用アクリルリングを取り付ける。
- (10). 供試体(上)の2箇所及び供試体(下)の2箇所にシンフレックスチューブを取り付ける。これらは、供試体の飽和あるいは、試験時の排水または排気のために用いる。
- (11). モールドとメンブレンの間の負圧を除去し、供試体を真空ポンプにより約0.3kgfで吸引し、自立させた後にモールドを注意深く解体する。
- (12). 供試体寸法を計測する。高さは4点、鋼尺により測定し、直径は π テープを使って上部から下部へ等間隔に5点測定する。なお、メンブレン厚さを差し引いて直径を求める。

〈試験装置へのセット〉

- (13). 底盤に4本の支柱を取り付けた後、上盤をクレーンを用いて支柱に固定する。
- (14). 非接触型変位計(G.S)のアンプ調整を行い、G.Sをアクリルリングに取り付ける。
- (15). キャップと载荷ピストンをボルトで剛結する。
- (16). クレーンを用いて三軸セルを供試体にゆっくり被せる。
- (17). 供試体を油圧ピストン装置側に移動し、側圧及び間隙水圧計測用のコードを接続する。
- (18). 三軸セル内に注水する。ただし、セル内水位はキャップの上端を越えた程度とする。なお、外体積変化量を測定する場合(気乾供試体)は、セル内を満水にし、配管内の気泡を取り除く。
- (19). 側圧(拘束圧)及び間隙水圧測定用アンプの電氣的及び機械的のバランスをとる。

〈供試体を飽和させる場合(20)～(28)〉

- (20). 供試体に拘束圧0.2kgf/cm²をかけ、同時に供試体内にCO₂を下部から上部に通す。ただし、CO₂のタンクの圧力は、0.05kgf/cm²とし、約12時間通す。
- (21). その後、供試体内に供試体体積の1～2倍の量の脱気水を下部から上部へ通す。ただし、その前に間隙水圧計付近の配管系の気泡を追いついておく。また、通水は約24時間とする。
- (22). 供試体が飽和したのを確認後、供試体と体積ビュレットを結合する。ただし、結合前には、接続部や配管内の空気を完全に抜き、脱気水で満たすようにする。
- (23). ダイアルゲージと体積ビュレットの初期値を記録する。
- (24). バルブを開き、拘束圧と背圧(B.P)を同時にかけ、双方の圧力が2.0kgf/cm²となった時点で止める。なお、圧力の上昇速度は、1.0kgf/cm²/分とする。
- (25). 次に、バルブを閉じ、非排水状態にする。この時の拘束圧と間隙水圧とを記録しておく。また、同時にダイアルゲージと体積ビュレットの値を記録する。
- (26). 供試体に作用している側圧のみを上昇させ、側圧が2.7kgf/cm²になった時点で止める。次に、アンプの数値が安定した段階で、側圧と間隙水圧の数値を記録する。
- (27). 拘束圧及び間隙水圧の増分から、スケンプトンのB係数 $=\Delta u / \Delta \sigma$ (Δu : 間隙水圧増分、 $\Delta \sigma$: 側

圧増分)を計算し、飽和度のチェックをする。

(28). $B > 0.96$ (飽和供試体であると判断)を確認した後、バルブをゆっくり開放し、排水状態にする。その後、試験段階に応じた有効拘束圧になるまで側圧を上昇させる。なお、 B 係数が満足しない場合は、 $B \cdot P$ を上昇させることにより対応する。

(29). この後、圧密(約30分間)を行う。

(30). 圧密終了後、ダイヤルゲージ及び体積ビュレットの値を記録する。

(31). 荷重用アンプのバランスをとる。

(32). 油圧ピストンの装置の油圧電源(緑色のボタン)を押し、ピストンを上昇させる。ただし油圧は後述の(34)の段階で上げる。

(33). 三軸試験機上昇装置に供試体を載せ浮上させる。

(34). 油圧ピストンの油圧を約 100kgf/cm^2 に上げる。

(35). 油圧ピストンと試験機を剛結させる。その後、载荷ピストン昇降シリンダーを下げる。

(36). 供試体と体積ビュレットの結合を、供試体と体積変化計の結合に切り換える。

(37). 体積変化計、非接触型変位計の初期値を調整する。

(38). 自動計測システムと各検出器の配線を確認する。

2.4 繰返し三軸試験方法

繰返し三軸試験の概要は、次に示すとおりである。

まず所定の拘束圧で圧密(等方または異方)を行った後、油圧アクチュエーターのピストンと载荷ピストンを剛結状態とする。この後、荷重振幅制御によって、周波数 0.2Hz の正弦波で軸荷重の繰返し载荷を行う。なお、拘束圧は1供試体につき数種類変化させるため、試験は小さな拘束圧から始め、荷重振幅を除々に増していき、せん断ひずみ γ が 5×10^{-4} 近くに達したなら、次の拘束圧へ進み、この手順を繰返し最終拘束圧段階まで行う。また、圧密及び繰返し载荷試験を通じて排気(飽和供試体の場合は排水)条件下で行う。

試験値は、パーソナルコンピュータを使用した自動計測システムによって、定常状態になった10波目の結果をサンプリング、A/D変換を行い求める。

繰返し三軸試験のケースは、表-2.2に示したように、主応力比 σ_1/σ_3 の影響を調べるために、 σ_1/σ_3 を変化させて試験を行う。したがって、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ の時は両振り試験を行い、 $\sigma_1/\sigma_3 \neq 1.0$ の時は片振り試験を行うことになる。片振り試験と両振り試験とは異方圧密($\sigma_1/\sigma_3 \neq 1.0$)とするか等方圧密($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$)とするかの違いとなる。

等方圧密と異方圧密の手順を以下に示す。

1). まず、所定の拘束圧となるように、あらかじめ調整してある側圧計の出力電圧値を見ながら、空圧調整弁により圧力を上昇させる。側圧の上昇速度は静的試験と同様 $1\text{kgf/cm}^2/\text{分}$ で増圧する。側圧の加圧方式は、空気圧制御の水圧変換方式である。

2). (等方圧密) 圧密後油圧アクチュエーターのピストンを下ろし、試験機の载荷ピストンと接触させる。この際、制御が微妙なため過大な軸荷重がかからないよう十分注意する。接触後、油圧ピストンと载荷ピストンをボルトで剛結する。

2'). (異方圧密) 圧密前に油圧アクチュエーターのピストンを下ろし、等方圧密と同様に注意して载荷ピストンと接触させ、両者をボルトで剛結する。その後側圧と軸荷重を所定の値になるまで同時に上昇させ、圧密を行う。なお、軸荷重計は、側圧キャンセル機構がついており、純粋に軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)だけを取り出すようになっている。従って加えるべき軸荷重 P は、次のようになる。

$$P = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot A$$

... (2.1)

ここに、 σ_1 : 設定軸応力

σ_3 : 設定側圧 (拘束圧)

A : 供試体断面積

3). 体積変化が一定値となるまで圧密を継続し、この変化量がゼロまたは0.05%/分以下を圧密終了基準とする。実際の圧密終了までの時間は、約30分程度である。

4). 圧密終了時点で体積ビュレット及び軸変位用のダイヤルゲージの値を読み取る。気乾供試体のため外体積変化を測定している場合には、その拘束圧での三軸セルの膨張量を補正し圧密後の間隙比を求める。

2.5 試験結果

図-2.1は、 G と γ の関係である。これは、繰返し三軸試験値のサンプリング及び処理を従来の方で処理したもの（黒塗りの記号）と自動計測しパーソナルコンピュータで処理したもの（白抜き記号）である。これより、両者の間には各拘束圧段階において大きな差が認められず、両者の測定結果はほぼ同程度であると考えられる。

図-2.2は、減衰定数 h と γ の関係である。これも図-2.1と同様に両者を比較したものであるが、 $\gamma > 2 \times 10^{-4}$ の範囲では両者の測定値はほぼ一致しているが、 γ が 2×10^{-4} 以下のひずみ領域では、従来の方で算出したものは大きなばらつきが認められた。一方、パーソナルコンピュータで処理した方はなめらかに変化していることがわかる。

以上のことから、自動計測システムによって処理した試験値は、従来の方によるものと同程度さらには、精度の向上が認められた。

図-2.3は、供試体の初期間隙比 e_0 を3種類（試験番号(1) $e_0=0.659$ 、(5) $e_0=0.735$ 、(6) $e_0=0.645$ ）について G のひずみ依存曲線を表したものである。これにより、 e が小さくなると σ_3 に無関係に G と e の関係を $\sigma_3=1.0\text{kgf/cm}^2$ について整理すると、図-2.4に示すとおりである。図中、破線は次式の e の関数を表したものである。

$$\alpha(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad \dots (2.2)$$

上式は、Hardin and Richart¹⁹⁾らの提案した関数で、 G の e に対する変化を良く説明できるとしている。

図-2.4に示した実線は、岩崎・龍岡²⁰⁾らが求めた豊浦標準砂の拘束圧 $\sigma_3=1.0\text{kgf/cm}^2$ における広範囲なひずみ領域の G と e の関係を表したものである。

これを次式に示す。

$$\begin{aligned} G &= 900 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times p^{0.4} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-6}) \\ G &= 850 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times p^{0.44} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-5}) \\ G &= 700 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times p^{0.5} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-4}) \end{aligned} \quad \dots (2.3)$$

ここに、 p : 拘束圧 (kgf/cm^2)

(岩崎・龍岡他、共振法)

本試験値と上式を比較すると、本試験値は20～25%大きめになっている。

また、国生ら²¹⁾が三軸試験装置を用いて求めたGとeの関係は次のとおりである。なお、Gや γ はポアソン比 ν を0.5と仮定して整理している。

$$G_0 = 840 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times (\sigma_c)^{0.5} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-4}) \quad \dots(2.4)$$

ここに、 σ_c ：拘束圧(kgf/cm²) (国生他、振動三軸)

本試験値(微小ひずみ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ におけるGの値を直接求めている)と上式とは直接比較できないが、本試験結果から、 $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ のGを推定(式(2.6)参照)し、また、本予備試験で求めた ν は概ね0.2であることから、これで式(2.6)を換算

$$\frac{1+0.2}{1+0.5} = \frac{1.0}{1.25}$$

すると、式(2.4)とほぼ同程度になることがわかる。

1つの供試体を用いて拘束圧を数段階変えて試験を行う場合、前段階の圧密や繰返し載荷試験による影響が予想される。砂を使った大型供試体($\phi 30\text{cm} \times h 70\text{cm}$)の繰返し三軸試験¹⁵⁾では、大ひずみ($\gamma = 1 \times 10^{-3}$)まで試験を行った後に求めた微小ひずみ時のGは、過去に大ひずみを受けていない試験の値よりも小さくなることが指摘されている。

図-2.5に、1供試体で平均主応力を $\sigma_m = 3.0, 6.0, 3.0\text{kgf/cm}^2$ の順序で変化させた(最大せん断ひずみを $\gamma = 5 \times 10^{-4}$ に規制した)場合のGのひずみ依存曲線を示す。これによれば、1供試体で σ_m を数段階変えて試験を行う場合、1平均主応力段階における γ はすくなくとも $\gamma = 5 \times 10^{-4}$ 程度以下では応力履歴の影響が表われないことが確認できた。

次に、Gに対する σ_m の影響を見てみる。図-2.6はGと σ_m (=拘束圧 σ_c)の関係を γ をパラメーターとして両対数グラフに表したものである。縦軸はeの影響を除くためにGを式(2.2)で除した値をとっているが両者の関係は両対数紙上で直線関係にある。一般には、図-2.7に示すように、広い範囲の γ に対してGと σ_m の関係は、両対数グラフ上で近似的に直線関係にあることが他の研究者により報告されており¹¹⁾、今回の試験も同じ結果を得た。

ひずみが大きくなるに従ってGはその絶対値が低下するとともに、気乾状態では σ_m に対する直線の勾配が大きくなる傾向にある。しかし、飽和状態では σ_m に対する勾配はそれほど変化はない。

これらのことはGと σ_m が式(2.5)なる比例関係で表せることを意味している。

$$G \propto (\sigma_m)^m \quad \dots(2.5)$$

図-2.8は、図-2.6に示した各ひずみレベルにおける直線の勾配(すなわち、 σ_m のべき乗数m)をプロットし、mの γ に対する関係を示したものである。同様に、他の研究者の試験結果も示した。

この図から、今回の気乾試験と国生ら¹⁰⁾の試験値を比較するとmの値そのものは若干異なるが、mの γ に対する変化の傾向は一致している。飽和試験では変化の割合が小さく、図-2.8に示したひずみ範囲ではmの値はほとんど一定と考えられる。また、岩崎ら¹¹⁾の試験結果とは傾向が若干異なっているが、共振法によって試験を行っており試験方法の違いによるものと考えられる。

次にGのひずみ依存性について調べてみる。図-2.9は、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ で飽和供試体のGのひずみ依存曲線である。なお、縦軸はGを微小ひずみ時におけるせん断剛性率 G_0 で除して基準化している。

ここで、上記 G_0 は、先に述べたようにeと σ_c (= σ_m ; 等方圧密の場合)から、次式で与えた。

$$G_0 = 670 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times \sigma_c^{0.52} \quad \dots(2.6)$$

$$G = 700 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times \sigma_c^{0.50} \quad \dots(2.7)$$

式(2.6)は、Hardin and Richart(1963)¹³⁾が粒子が丸く粒径のそろったOttawa砂の $e < 0.80$, $\gamma \leq 10^{-4}$ に対して求めた式(2.7)とほぼ一致している。図-2.9より、 G/G_0 は、ひずみの増加とともになめらかに低下していくのが理解できる。また、その低下の割合は、 σ_c の依存性がほとんど認められない。また、他の研究結果のひずみ依存曲線(図-2.10参照)¹⁾と比較すると、 G/G_0 のひずみの増加に伴う低下の割合は、小さめである。

図-2.9に示したなめらかな曲線は、Hardin and Drnevich²²⁾の提案した双曲線数式(式(2.8)参照)において、規準ひずみ $\gamma_r = 1.7 \times 10^{-3}$ としたときのものである。

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots(2.8)$$

ここに、 G_{max} : γ が非常に小さい時($\gamma \approx 0$)の G 。

γ_r : 規準ひずみで、 $G = G_{max}/2$ となる時の γ 。

図-2.11は、 G_0 と σ_1/σ_3 との関係を飽和・気乾の両状態について σ_c をパラメーターにしてプロットしたものである。なお縦軸は e の影響を除くために式(2.2)で除した値をとっている。飽和状態では、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.33$ 付近で G_0 のピークが現れている。一方、気乾状態の場合、このような傾向は認められない。これらを考えると、 G_0 の σ_1/σ_3 による明確な依存性があるとは言い難い。また、図-2.11から、飽和状態での G_0 は、気乾状態でのそのよりも小さめの値であることがわかる。これは、飽和により砂の粒子間の摩擦力が低下することによって変形し易くなり、 G_0 が小さくなったものと考えられる。

次に、 h は G に比べて測定精度の影響を大きく受けるために計測では細心の注意を要する。

今回行った予備試験における h のひずみ依存曲線を図-2.12に示す。 h は γ の増加とともに大きくなり、 γ が 1×10^{-4} を越えると増加程度が極めて大きくなる。この傾向は大岡・伊藤¹³⁾の研究結果に一致している。

h の拘束圧依存性は、図-2.13に見られるように明確に現れている。これは、図-2.12から各ひずみレベル毎に読み取ったものである。図-2.12から、 σ_m が大きくなると h が小さくなる傾向にあるがこれは、 G の低下に対応している。

次に、 h と G/G_{max} ($G_{max} = G_0$)の関係を図-2.14に示す。この図から、 h と G/G_{max} の関係は、 σ_m や γ の値によらず、ほぼ一義的に決まり直線関係にあることがわかる。このことは、国生らの研究例を示した図-2.15からも理解できる²⁶⁾。

表-2.1 豊浦標準砂の試験条件

材 料		豊 浦 標 準 砂	
物 性 値	比 重 G_s	2.644	
	均 等 係 数 U_c	1.3	
	最大間隙比 e_{max}	0.905	
	最小間隙比 e_{min}	0.595	
供 試 体	供試体寸法	$\phi 30\text{cm} \times h 60\text{cm}$	
	締固め方法	小型バイブレーターにより6層 (35秒/層)	
	初期密度	相対密度 D_{ro}	85% (50%)
		乾燥密度 γ_d	1.610gf/cm ³ (1.763)
		間 隙 比 e_o	0.642 (0.750)
圧 密	試 験 状 態	気乾・飽和	
	圧 密	等方圧密・異方圧密	
	拘 束 圧	$\sigma_m = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ 及び 6.0kgf/cm^2	
繰 返 し 載 荷	載 荷 方 法	両振り・片振り	
	制 御	荷重 (応力) 振幅制御	
	入 力 波	正 弦 波	
	周 波 数	0.2Hz	
	せん断ひずみ	$\gamma = 5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$	
	波 数	12波	
試験値サンプリング波		10波目	

注) 初期密度の欄の () 内数字は、間隙比の影響を調べるために設定したものである。

表-2.2 予備試験ケース

試験番号	試料状態	主応力比	拘 束 圧
		σ_1 / σ_3	平均主応力 σ_m (kgf/cm ²)
1	気乾	1.0	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0
2	"	1.33	"
3	"	2.0	"
4	"	1.0	3.0, 6.0, 3.0
5	"	1.0	1.0, 2.0, 3.0, 4.0
6	"	1.0	"
7	飽和	1.0	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0
8	"	1.33	"
9	"	2.0	"

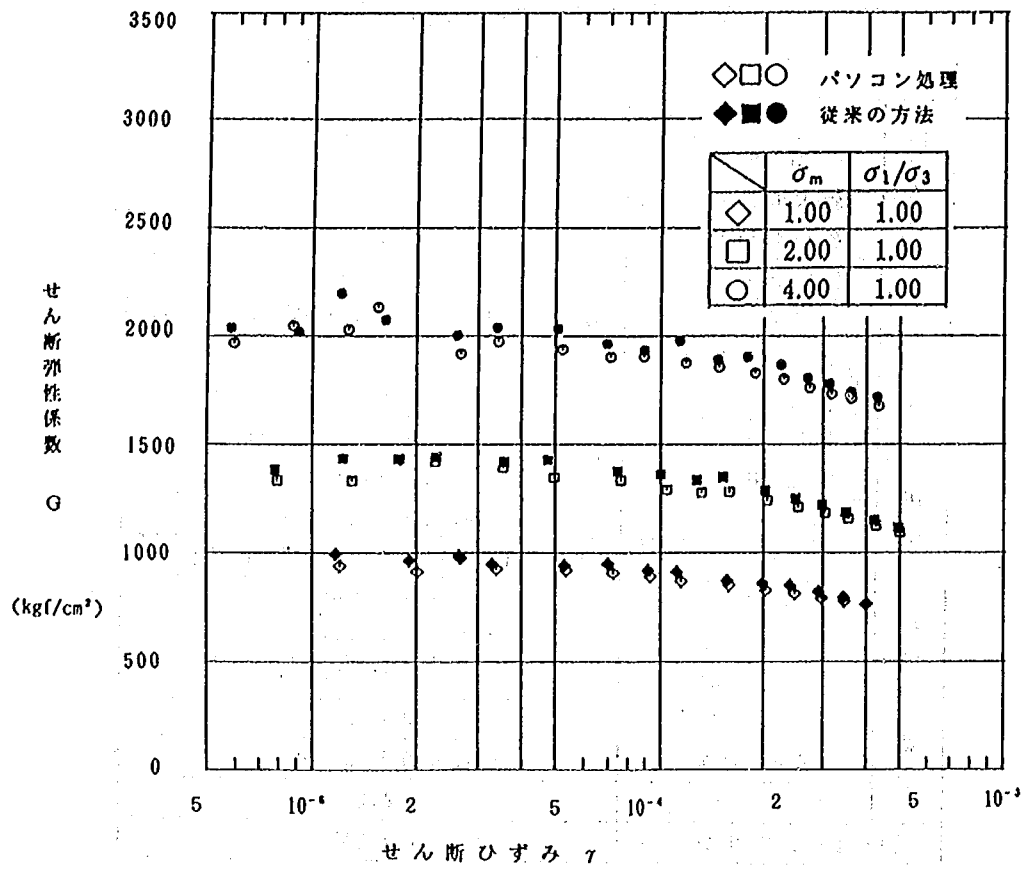


図-2.1 せん断弾性係数～せん断ひずみ

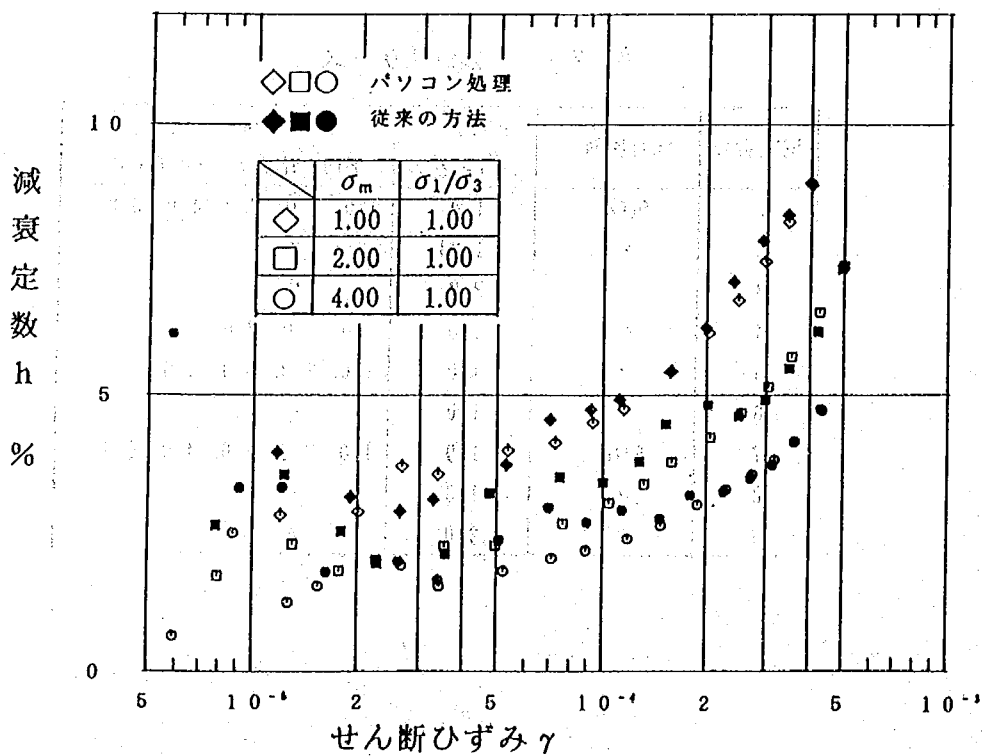


図-2.2 減衰定数～せん断ひずみ

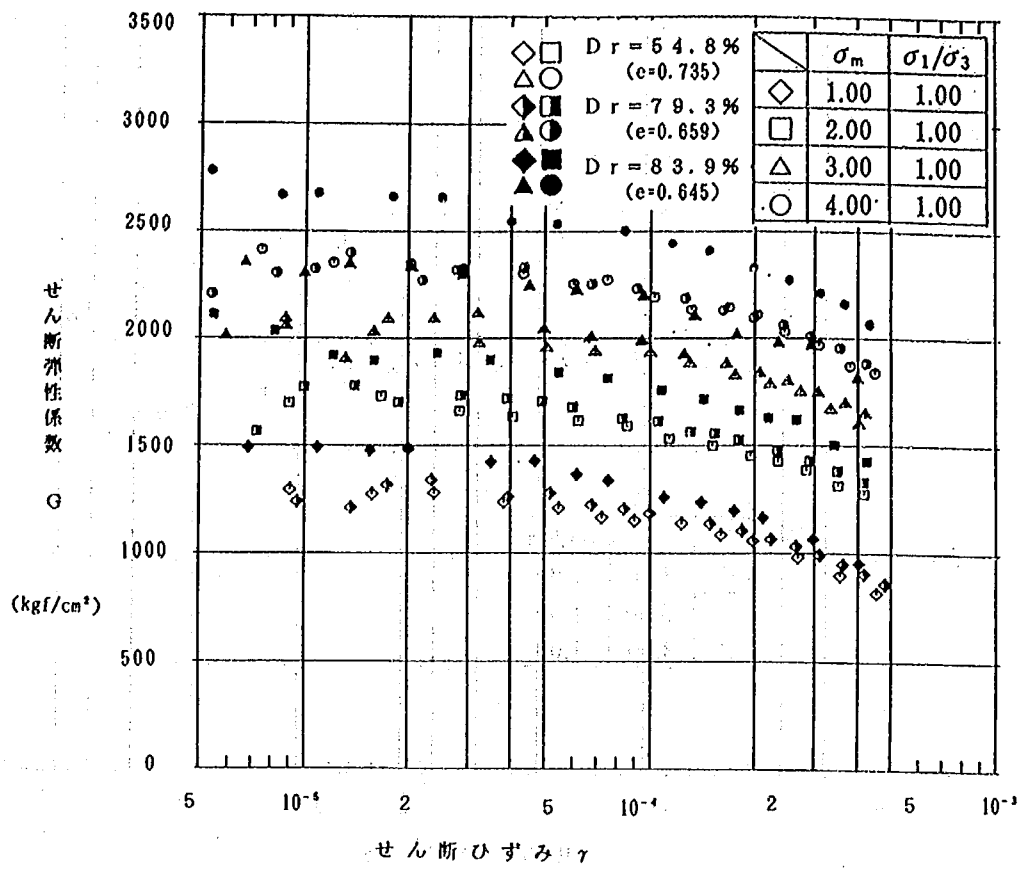


図-2.3 せん断弾性係数～せん断ひずみ

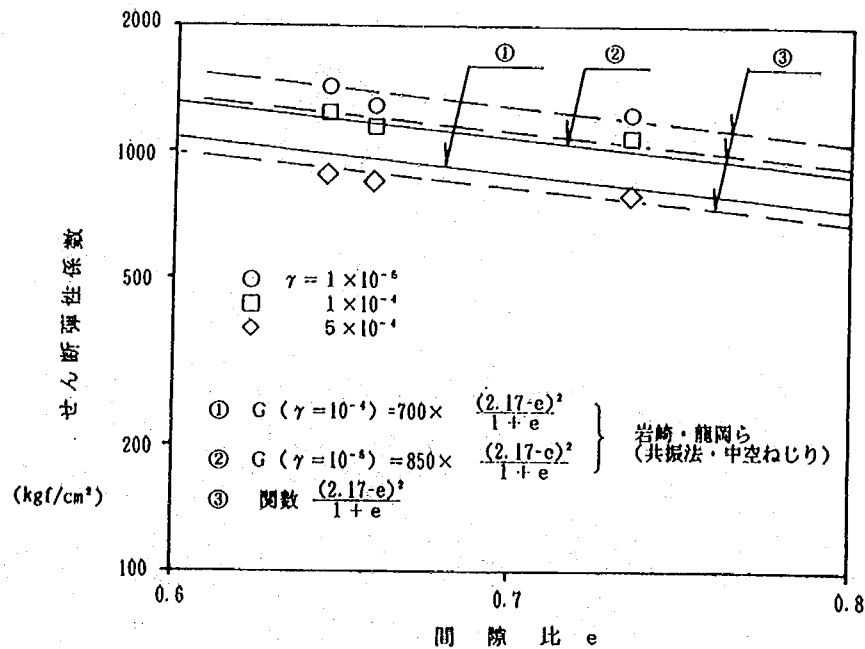


図-2.4 せん断弾性係数と間隙比の関係

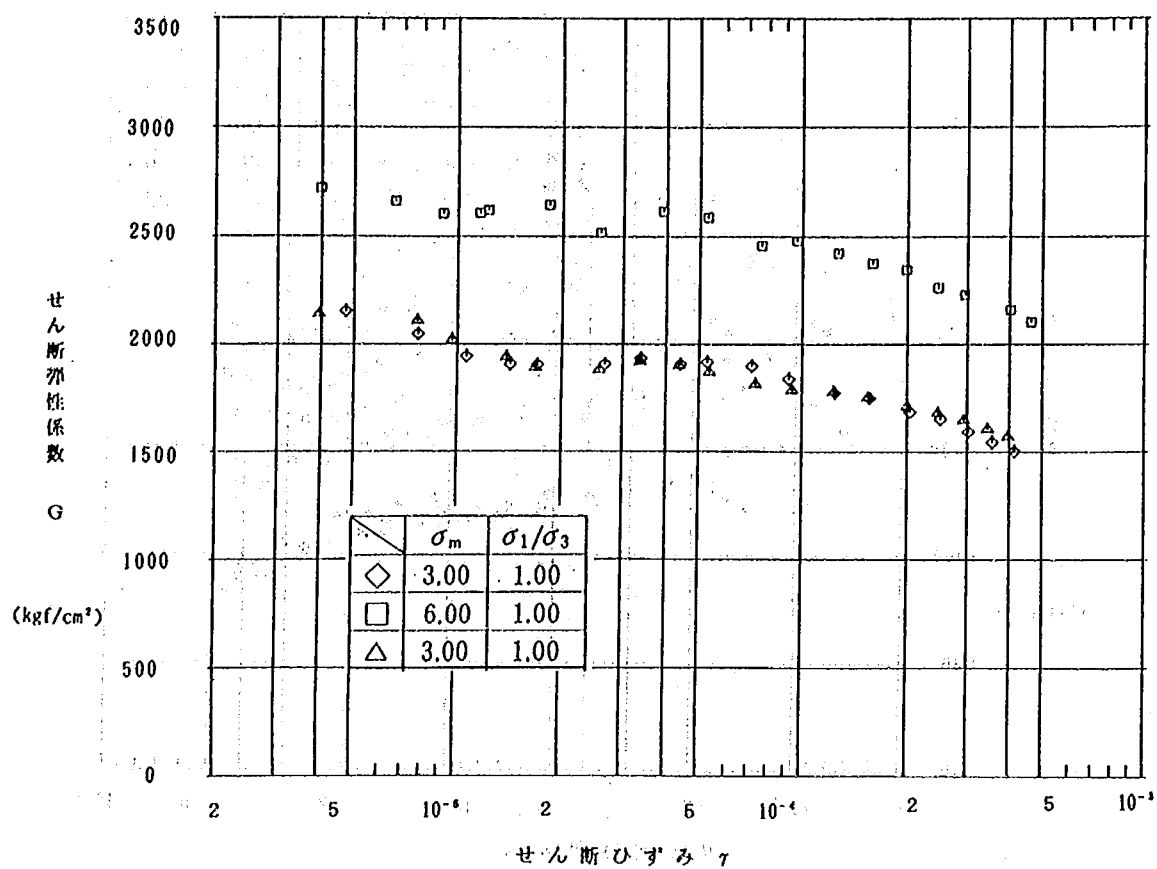


図-2.5 せん断弾性係数～せん断ひずみ

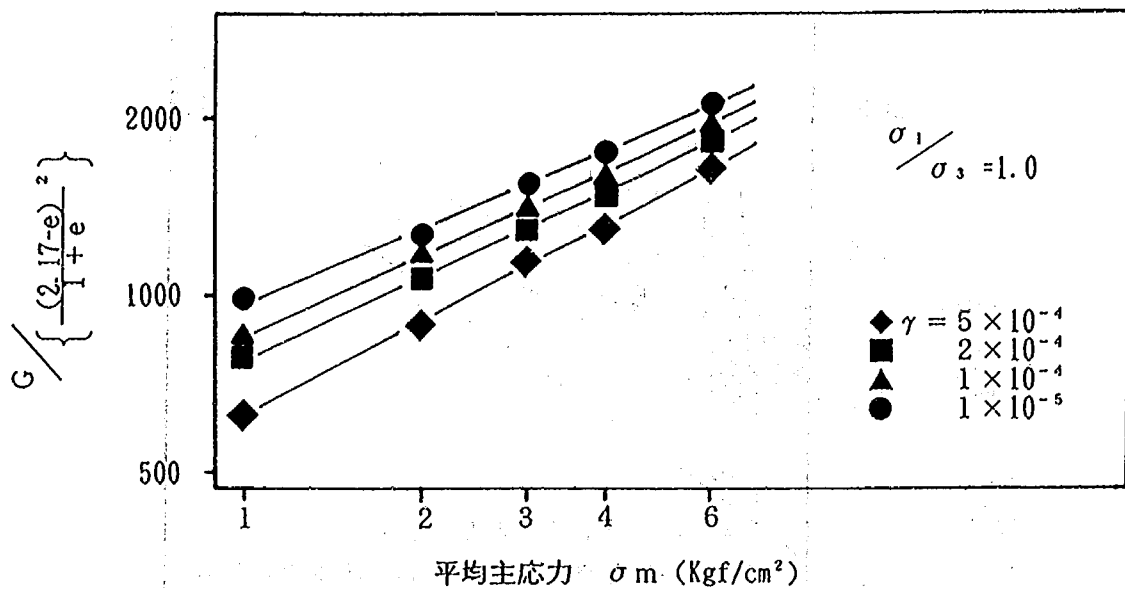


図-2.6(1) $G / \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \sim \sigma_m$ の関係 (気乾)

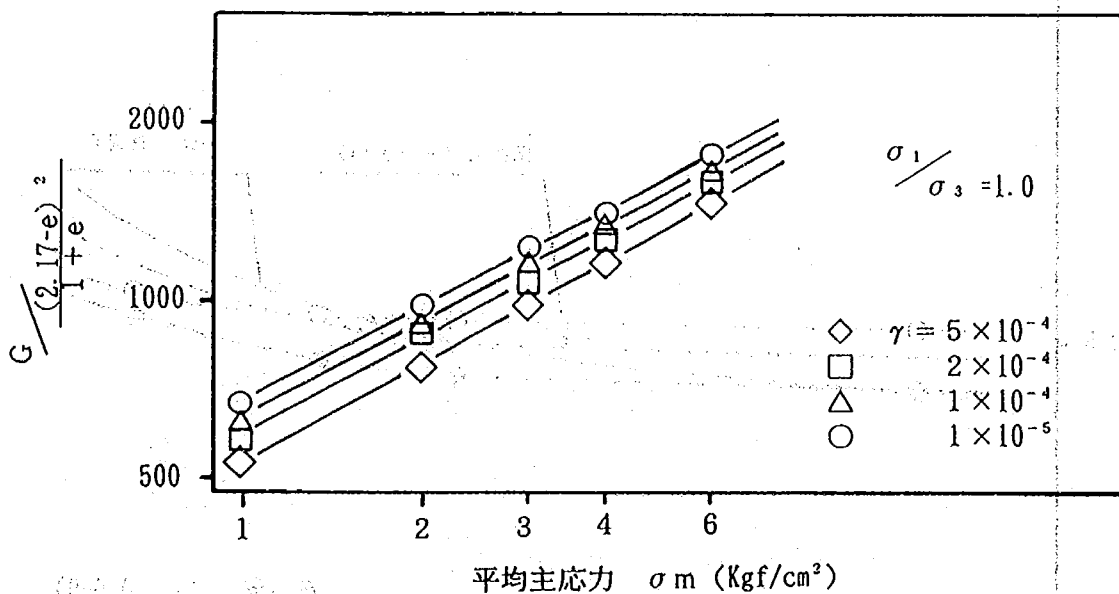


図-2.6(2) $G / \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \sim \sigma_m$ の関係 (飽和)

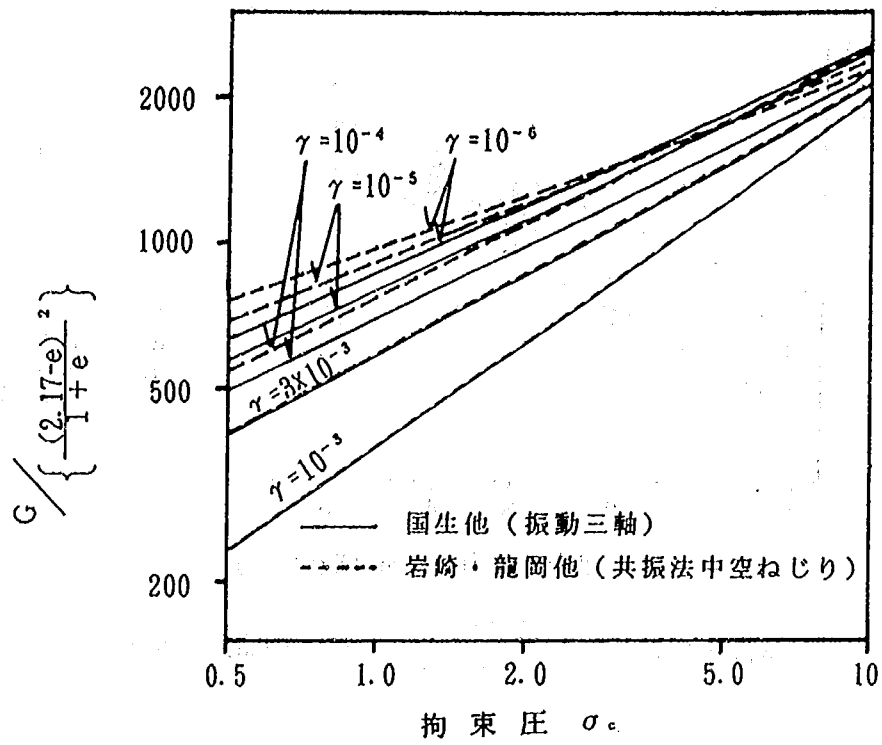


図-2.7 他の研究者によるGと σ_c の関係

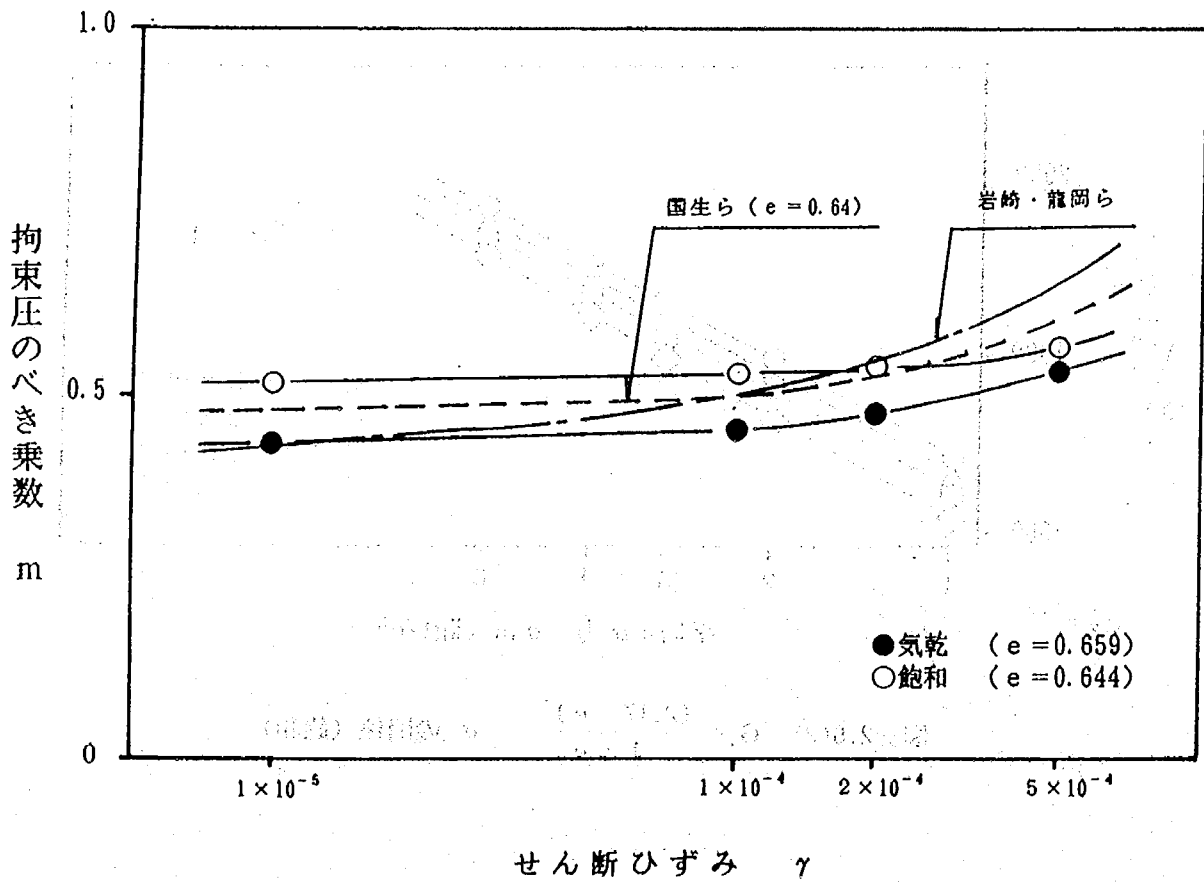


図-2.8 拘束圧のべき乗数とせん断ひずみの関係

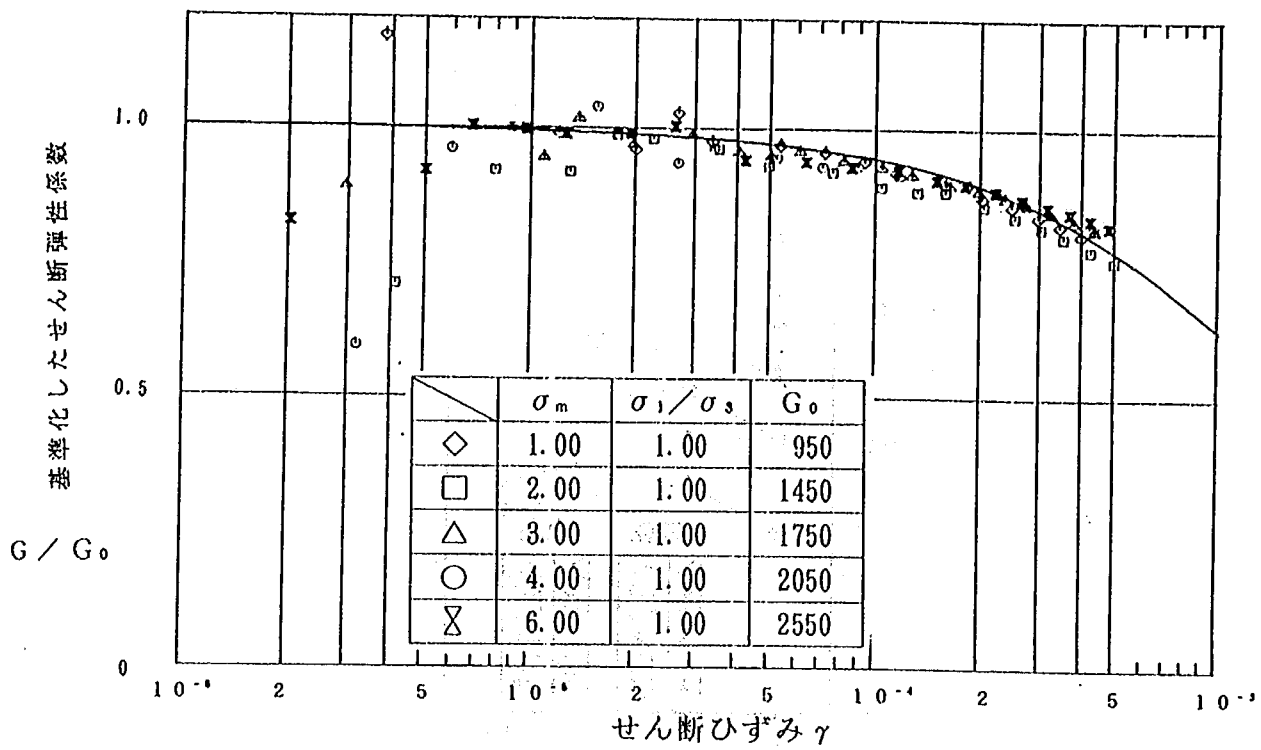


図 2. 図-2.9 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ

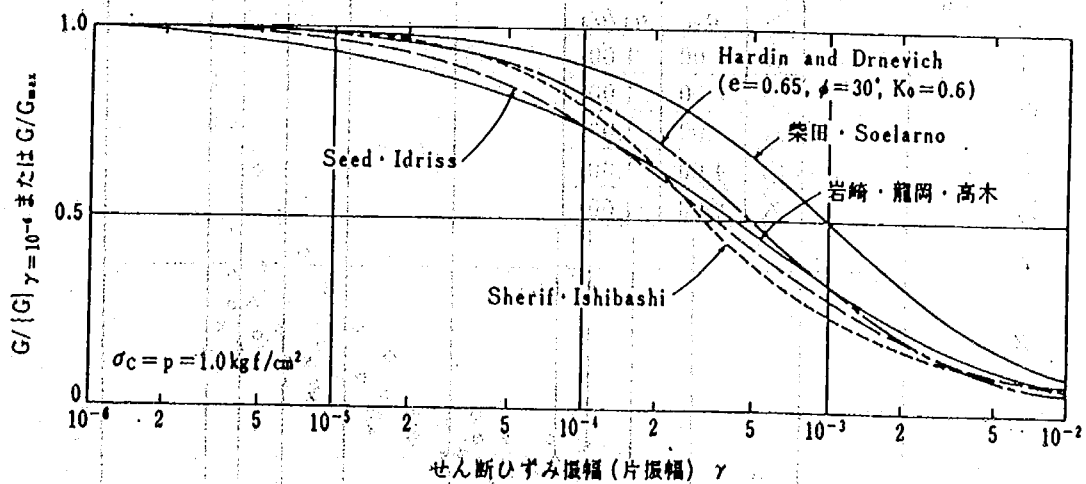


図-2.10 岩崎・龍岡²⁰⁾らがまとめたGのひずみ依存性の比較

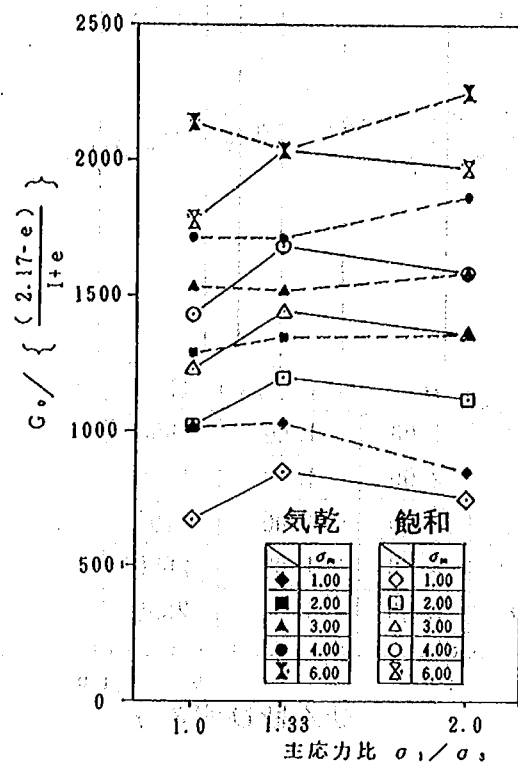


図-2.11 $G_o / \left\{ \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \right\} \sim \sigma_1 / \sigma_3$ の関係 (飽和)

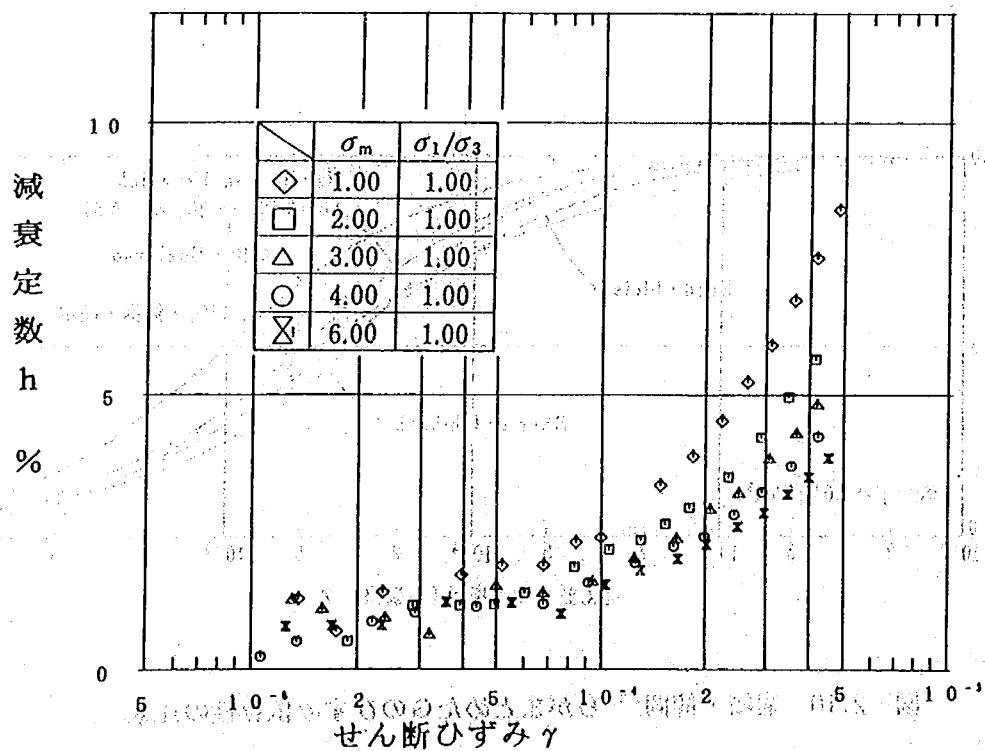


図-2.12 減衰定数～せん断ひずみ

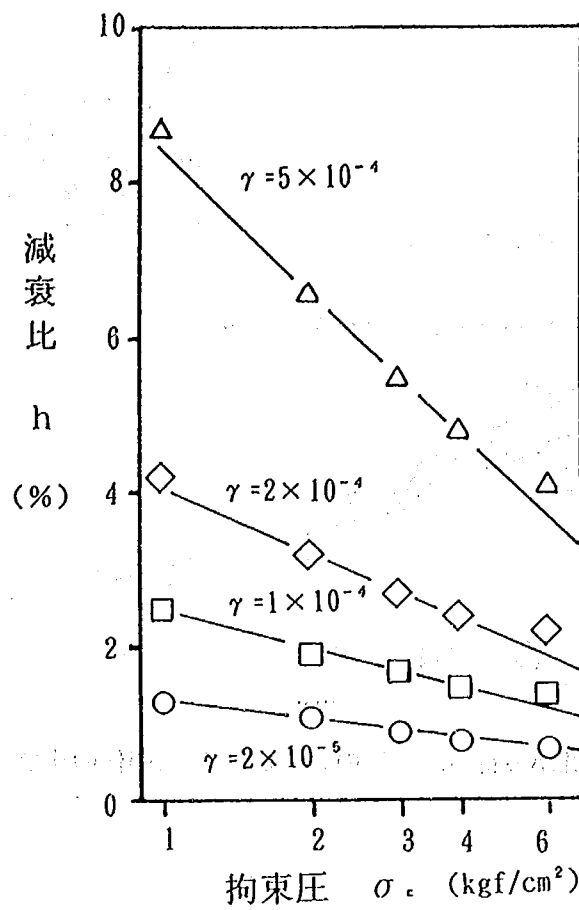


図-2.13 $h \sim \sigma_c$ の関係 ($\sigma'_1/\sigma^3=1.0$ 気乾)

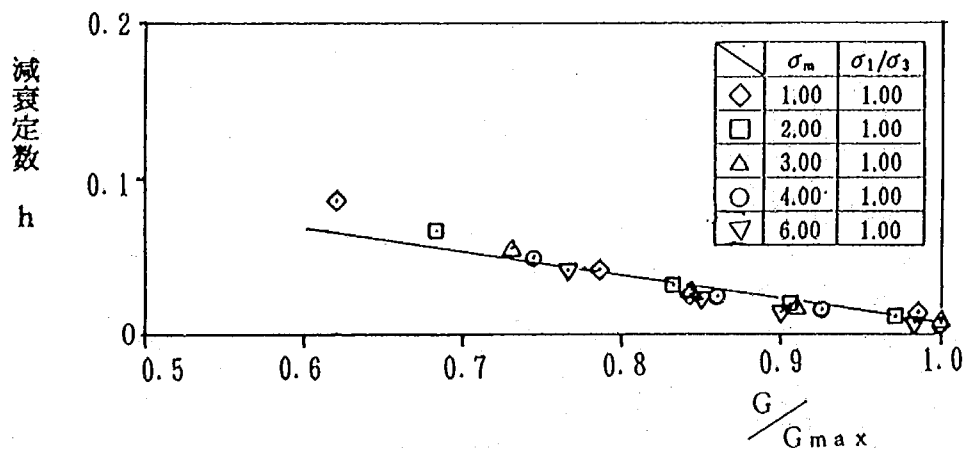


図-2.14 $h \sim G/G_{max}$ の関係 ($\sigma'_1/\sigma^3=1.0$, 気乾)

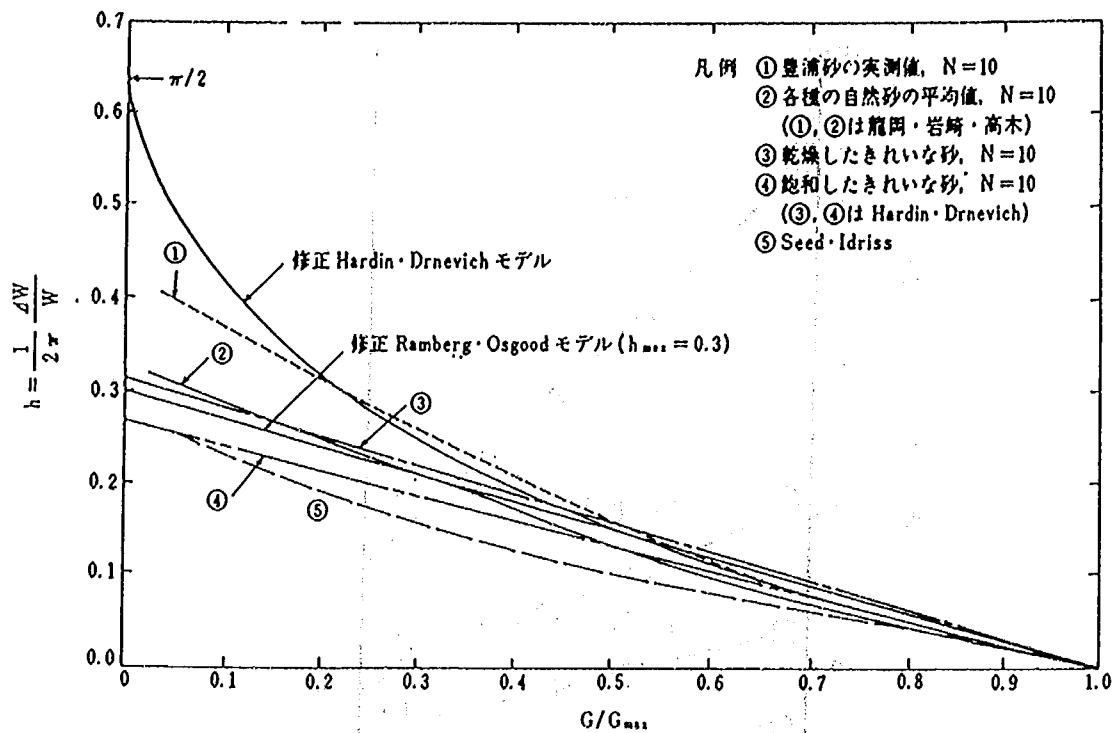


図-2.15 これまでの研究から得られた砂の $h \sim G/G_{max}$ 関係の比較 (龍岡による)

3. 粗粒材料の動的変形試験

3.1 材料の粒度

試験材料は、三国川ダム、寒河江ダム、三保ダムの3つのロックフィルダムの原石山から採取した。3ダムの諸元を表-3.1に示す。試験材料は、表-3.2に示すとおりである。試験材料は、全て原石山から採取し、天日乾燥を行って各粒径別にフルイ分け(JIS・A・1204)、供試体作製のための試料調整を行った。

各試験材料の粒度分布は、基本的には現場での粒度をそのまま試験に使用することが望ましいが、供試体寸法に対する最大粒径の制約があるため難しい。したがって、試験には相似粒度分布を用い、試料の最大粒径は、単調載荷の三軸試験と同様に供試体寸法(直径30cm)の1/5程度の63.5mmとした。

各試験材料の試験粒度、粒度分布図及び各粒度の性質を表-3.3、図-3.1、及び表-3.4に示す。

SAR: 三国川ダムロック材料, SR材; 寒河江ダムロック材料, MR材; 三保ダムロック材料

SAF: 三国川ダムロック材料, SF材; 寒河江ダムフィルタ材料

3.2 材料の物理的性質

各試験材料の物理的性質を把握するために、全粒径について、含水量試験(JIS・A・1203-1978)、粒径が4.76mm以上のものについては、比重・吸水量試験(JIS・A・1110-51)、粒径が4.76mm未満のものについては、比重試験(JIS・A・1202-1978)を実施した。

上記試験の結果を整理すると、表-3.5のとおりである。なお、表中の比重及び吸水量は以下の定義によるものであり、代表値としては粒度別重量百分率によって加重平均で求めた。

表乾比重 $G_s = B / (B - C)$

絶乾比重 $G_b = A / (B - C)$... (3.1)

真比重 $G_r = A / (A - C)$

吸水量 $Q = (B - A) / A \times 100 (\%)$

ただし、A: 絶乾重量

B: 表乾重量

C: 水中重量

なお、締固めた材料の飽和重量の算出には比重 G_b を用いる。粒径別に求めた各比重による、ある粒度分布材料の合成及び合成吸水率は次式によって求められる⁹⁾。

$$G = \frac{1}{\sum (f_i / G_i)} \quad \dots (3.2)$$

$$Q = \frac{\sum (f_i \cdot G_i)}{\sum (f_i \cdot G_i)} \quad \dots (3.3)$$

ここに、 G : 着目した比重による合成比重

f_i : 各粒径別重量百分率

G_i : 各粒径別に着目した比重

Q_i : 各粒径別の吸水率

また、各比重と合成吸水率の間には次の関係がある。

$$G_s = (1 + Q) G_b \quad \dots (3.4)$$

$$G_r = \frac{G_b}{1 - Q \cdot G_b} \quad \dots (3.5)$$

各粒度別の物理的性質について、図-3.2に示す。この図から、真比重 G_s は材料によっては粒径別にバラツキがあるが、全体的に見てほぼ一定値である。一方、表乾比重 G_m や絶乾比重 G_d は粒径が小さくなるに従って減少する傾向を示している。また、吸水量 Q は粒径が小さくなると若干増加傾向（SR材については顕著に増加している。）にある。このことは、図-3.3に示した吸水量と絶乾比重の関係からもわかるように、両者には強い負の相関関係が見られる。

式(3.5)からは、岩石を構成する鉱物粒子の真比重 G_s が同一である場合には、吸水量が大きくなると、すなわち空隙が大きくなると絶乾比重が小さくなることがわかる。

図-3.4は絶乾比重・表乾比重及び真比重の関係を示したものである。3者の違いは、SAR材やSAF材では小さいが、SR材ではかなり大きく。これは吸水量の違いによるものである。

3.3 材料の締固め

3.3.1 目的

試験材料の締固め試験を次の目的で行った。

1) 試験材料の締固め特性すなわち、締固めエネルギー時間に対する間隙比の変化及び最大最小間隙比を求める。

2) 締固めによる粒子破碎の程度を知る。

3) 繰返し三軸試験に用いる供試体の密度（間隙比）設定に用いる。

粗粒材料の相対密度試験方法は、今のところ基準化されておらず、従って供試体の締固め方法も各機関によってさまざまである。特に最小間隙比 e_{min} の測定方法には、締固め方法及び粒子の破碎とも関連して難しい点が多い。

そこで本試験では、現在当研究室で単調載荷の三軸試験に用いている供試体作製方法¹⁾に準じて締固め試験を行った。

締固め試験は、表-3.6に示した仕様を持つ図-3.5の電動ハンマを用いて供試体を6層に分け締固めた。試験材料は、表-3.7の締固め試験条件にあるように、繰返し三軸試験を実施するロック材、フィルタ材全てを気乾状態で行った。

以下に締固め試験の手順を述べる。

1) 3.1に示した粒度分布となるように材料を粒径毎に計量し、1供試体当りの絶乾重量で70~72kgを用意する。各々を6等分して混合し、これを1層分とする。また、重量測定には、1g単位目盛りの台秤を使用した。

2) 試料台（ペDESTAL）に厚さ約2mmのゴムスリーブ及び供試体作製用2つ割モールド（直径30cm×高さ60cm）をセットし、モールドの内径と初期高さをノギス又は鋼尺（スケール）で測定する。

3) 1層分の試料をさらに16等分し、ハンドスコップで落差を与えないように静かにモールドに投入する。

4) 締固めは直径約29cm厚さ約0.9cmの加圧盤（鉄板）を試料面に載せ、電気ハンマで所定の時間締固めた。締固めた試料は、次層投入前にエッジ等で締固め表面を乱し次層とのなじみを良くする。また、締固め時間は表-3.8のように変化させて行った。

5) 供試体の高さは各層の締固め前後に鉄板を載せ、図-3.6に示す5点で測定しこの平均値とする。測定には鋼尺を用い、最終層まで締固めた後に最終高さを測り、これから密度・間隙比を求める。締固めによる粒子破碎の程度を調べるために、各材料の締固め試験後（投入のみを除く）に粒度試験を実施した。

試験は締固めた供試体の全試料について、JIS-A・1204²⁾に従ってフルイ分けを行った。また、破碎率はMarsalの定義²⁾によって求めた。

3.3.2 締固め試験結果

締固め結果の一覧表を表-3.8に示す。図-3.7に示した締固めエネルギーと e または乾燥密度 γ_d の関係をみると、どの材料についても e の変化は、投入のみの状態から5秒/層の締固め状態までが顕著で、1層当たり5秒以上締固めたとしても e の大きな変化は認められない。

投入のみが最大間隙比 e_{max} 、40秒/層の締固め時が最小間隙比 e_{min} を与えるとして、相対密度 D_r と締固め時間の関係を図-3.8に示す。

この図から、各材料とともに相対密度 $D_r=85.0\%$ に締固めるには10秒/層前後の締固め時間で十分である。図-3.7のように材料によって e が大きく異なるが、図-3.8に示した相対密度で表現すると材料による違いはわずかであり、締固め時間の増加とともにほとんど同様の締固め傾向を示すことが理解できる。

e_{max} 、 e_{min} 及び $e_{max}-e_{min}$ と均等係数 U_c の関係をプロットしたのが図-3.9である。一般的に材料の粒度配合の良否、すなわち U_c の大小は締固め密度に大きな影響があり、しかも相関性が高いと言われているが、この図から、SR材を除けばその傾向が認められる。これは、SR材は吸水量の多い材料であり締固め時に骨材の破碎を生じ、密になりやすい傾向にあることが小さめの e になっている。

図-3.10は破碎率を表したもので確かに、SR材・SF材は、SAR材、SAF材に比べ破碎率が大きく、特にSR材は締固め時間の増加に伴って破碎率が大きくなっている。

3.4 供試体密度の設定

繰返し三軸試験の供試体の密度は、次のように設定した。すなわち現場における密度管理値や繰返し試験のしやすさ等を考慮して、 e_{max} 、 e_{min} から求まる相対密度 $D_r=85\%$ を目標にして初期間隙比を定めた。この値は、最大乾燥密度の95%以上に相当するものである。

供試体作製にあたり、目標の初期密度にするために必要な電気ハンマの締固め時間は、図-3.10より、概ね1層あたり概ね10秒程度である。

なお、上記の密度は、次式によるものとした。

$$\gamma_d = \frac{G_b \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad \dots(3.6)$$

ここに、 γ_d ：乾燥密度（gf/cm³）。

γ_w ：水の単位体積重量（gf/cm³）。

G_b ：材料の絶乾比重（各粒径の加重平均値）。

上記、絶乾比重 G_b は、以下の方法により求めたものである。

$$G_b = \frac{1}{(\sum f_i / G_{bi})} \quad \dots(3.7)$$

ここに、 f_i ：各粒度階における残留率。

G_{bi} ：各粒度階における絶乾比重（粒径4.76mm未満は真比重）。

締固め試験を含め、供試体初期密度を設定するのに用いる比重は、全て各粒度階の加重平均値で求めた絶乾比重を用いることにする。

繰返し三軸試験における供試体作製方法は、締固め試験の作製方法と同じで、供試体作製用モールド（φ30cm×h60cm）に各材料を電気ハンマ（重量33kgf、全負荷打撃数950打/分、図-3.5参照）によって所定

の初期設定密度になるように6層に分けて締固める。なお、供試体の設定密度を表-3.9に示す。

3.5 試験条件

各試験材料毎の試験条件を表-3.10に、また、試験ケースを表-3.11に示す。

3.6 試験結果と考案

3.6.1 概要

飽和及び気乾粗粒材料の試験結果について整理し、その動的変形特性（せん断剛性率 G 、減衰定数 h 及びポアソン比 ν ）に影響を及ぼすと予想される要因（ひずみ履歴、間隙比、均等係数、拘束圧、主応力比、ひずみ依存性、岩質の違い、及び試験周波数等）について以下に述べる²⁶⁾。

なお、岩質の違いによる動的変形特性への影響を検討するために、岩石の点載荷圧裂試験を実施した。

3.6.2 ひずみ履歴の影響

本試験は、1供試体について σ_m を数段階変化させ、1平均主応力段階における応力振幅の大きさを20程度変化させて試験を行っている。ここでは、ある σ_m 段階での最大せん断ひずみ γ_{max} が、次の σ_m 段階の試験値に及ぼす影響について検討した。

MR材（凝灰岩）を使用して最大せん断ひずみ γ_{max} を4ケース（① 1×10^{-4} 、② 2.5×10^{-4} 、③ 5.0×10^{-4} 、④ 1×10^{-3} ）変え、その違いによる影響を調べるため気乾状態で試験を行った。その結果、各拘束圧（ $\sigma_c = \sigma_3 = 2.0, 3.0, 4.0$ 及び 6.0 kgf/cm^2 ）についてせん断ひずみ $\gamma = 1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ における G に着目して、その値をプロットしたのが図-3.11である。なお、縦軸は e の影響を除くために関数 $\alpha(e) = (2.17 + e)^2 / (1 + e)$ で除した値 $G / \alpha(e)$ を用いた。

図-3.11から、 γ_{max} が大きくなると①～③の G は僅かながら大きくなる傾向を示しているが、その変化量は極めて少ない。しかしながら、④の G は極端に大きな値を示しているが、 γ_{max} がある程度以上大きくなると、ひずみ履歴の影響が顕著に生じることが考えられる。

以上から、ひずみ履歴の影響を極力小さくするために、各平均主応力段階において、 $\gamma_{max} = 5 \times 10^{-4}$ 程度としている。

3.6.3 間隙比の影響

粗粒材料の動的変形特性（ G 、 h 及び ν ）に与える e の影響について以下に述べる。砂質土の G に与える e の影響について多くの研究がなされており、図-3.12に G と e の関係を示す。

図中の各式は、①が柴田ら²³⁾による実験式である。超音波パルス法を用いて $D_{50} = 0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ の3種類の細粒分を含まないきれいな砂の G （ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ ）を測定し、式(3.5)を提案している。

$$\textcircled{1} \quad G = 420 \frac{7-3e}{1+e} \sigma_a^{0.5} \quad \dots(3.5)$$

②～④については、岩崎¹¹⁾らが、共振法土質試験機（高さ25cm、外径10cm内径6cmの中空供試体）を用いて15種類のきれいな砂について実験を実施した結果、せん断ひずみ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ 、 1×10^{-5} 、 1×10^{-4} におけるきれいな砂のせん断剛性率 G を近似的に次式で表せるとしている。

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{2} \quad G &= 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.40} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-6}) \\ \textcircled{3} \quad G &= 850 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.44} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-5}) \\ \textcircled{4} \quad G &= 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.50} \quad (\gamma = 1 \times 10^{-4}) \end{aligned} \right\} \dots (3.6)$$

⑤, ⑥は、Hardin and Richart¹⁹⁾が中実供試体の共振法土質試験を用い、 $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ に対するきれいな砂についてのものである。

$$\textcircled{5} \quad G = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.50} \quad \dots (3.7)$$

(粒子の丸いオタワ砂 $e < 0.80$)

$$\textcircled{6} \quad G = 330 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.50} \quad \dots (3.8)$$

(粒子の角ばった石英砕砂)

いずれの関係式においても、 G は e の減少(密度の増加)と共に増大する傾向は明かである。また、 G の e に対する変化は、ここに示した e についての幾つかの異なった関数形の間では大差なく、通常きれいな砂では、Richartや岩崎らが示した e の関数 $\alpha(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ によって良く説明できる²⁴⁾。

本試験では1供試体で数種の拘束圧段階の試験を実施しており、各拘束圧段階で圧密を行っていることから、これによる e の変化が認められる。その変化の範囲は少ないが、 e の影響を調べると以下のとおりである。

G を σ_m のべき数(3.6.5拘束圧の影響を参照。 G は σ_m のべき乗に比例する。)で除し、さらに上記の関数 $\alpha(e)$ で除した値 $G / \{\alpha(e) \cdot (\sigma_m)^m\}$ と e との関係を図-3.13に示す。 $G / \{\alpha(e) \cdot (\sigma_m)^m\}$ は、 e に対してほぼ一定値を示しており、砂質土等と同じように関数 $\alpha(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ で G の e に対する変化が説明できる。

3.6.4 均等係数の影響

今まで実施してきた試験において、表-3.12に示すように均等係数 U_c の異なる数種の材料の試験値が得られている。そこで、 U_c が G に与える影響について検討した。

図-3.14は、 $\sigma_1 / \sigma_3 = 1.0$ 、 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の G と U_c の関係を γ をパラメータにして両対数紙上にプロットしたものである。なお、縦軸は e の影響を除くために G を関数 $\alpha(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ で除した値を用いた。

この図から、 U_c が大きくなると G は小さくなる傾向を示している。しかしながら、 $U_c = 12$ 及び $U_c = 17$ の材料の G は、この傾向にはなく小さめの値を示している。これは、後述の岩質の違いによるものと考えられる。

次に、微小ひずみ時のせん断剛性率 G_0 から e と σ_3 ($=\sigma_m$)の影響を除いた $G_0 / \{\alpha(e) \cdot (\sigma_m)^m\}$ と U_c の関係を両対数で図-3.15に示す。この図からも上記のごとが考察される。また、図中実線(又は点線)で示した直線関係を仮定すると、 U_c が12, 17の材料は約20%程度小さめの値を表している。

3.6.5 拘束圧の影響

試験は、 $\sigma_1 / \sigma_3 = 1.0, 1.4, 2.0, 3.0$ について実施し、 σ_3 を σ_m に着目して、その影響を検討した。なお、三軸試験の場合、 σ_m は、次式で与えられる。

$$\sigma_s = \frac{1}{3} \times (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad \dots(3.9)$$

ところで、 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ の等方圧密の場合、 σ_m と σ_c が一致し、 $\sigma_c=\sigma_s=\sigma_3$ であることがわかる。

図-3.16は、 G と σ_s の関係を γ をパラメーターにして両対数でプロットしたものである。なお、各図の G の値は、それぞれのひずみ依存曲線（ $G \sim \gamma$ 曲線図）から読み取ったものである。

これらの図から、 G と σ_s の関係は両対数で直線関係にある。また、 γ が大きくなるにつれて、 G はその絶対値が低下するとともに、 G は σ_s の影響を受け勾配が大きくなっている。これら G と σ_s は、

$$G \propto (\sigma_s)^m \quad \dots(3.10)$$

なる比例関係で表され、べき乗数 m は、 γ の関数であり、 γ が大きくなると m が大きくなることを意味している。

図-3.16から、直線の勾配 m を求め、表-3.13にまとめた。なお、 $G = K \cdot \alpha(e) \cdot (\sigma_s)^m$ なる関係式にあてはめ、 K についても整理した。

図-3.17は、これまでに提案された砂や粗粒材料の小さなひずみ領域（ $\gamma \leq 1 \times 10^{-4}$ ）での $G/\alpha(e) \sim \sigma_s$ の関係と、 G を与える式を示したものである。これによると m の値は、微小ひずみではほとんど0.4～0.6の範囲をとることがわかる。

これに対して、今回実施した試験結果についてべき乗数 m と γ の関係を整理してみると図-3.18に示すとおりである。図-3.18(1)から、ロック材の m の値は0.45～0.85の範囲をとり、この中でも0.6以上が大半を占め上記の値よりもかなり大きな値を示している。

また、図-3.18(2)からフィルタ材の m の値は0.6～0.85の範囲を示しており、ロック材と同様に大きな値を示している。材料の違いによって若干差はあるが飽和ロック材料の m の値は、気乾ロック材料のそれに比べると γ に対して、変化は少ない。

以上のように、 G が σ_s の影響を大きく受け、しかも $(\sigma_s)^m$ に比例関係で表わせる。さらに m は、 γ の増加とともに大きくなる傾向にあり、これまでの研究と一致している。一方 m の値は従来の研究結果よりも大きな値が得られた。また、飽和材料の γ に対する m の変化量は、気乾材料のそれに比べると小さい。

次に、微小ひずみ時におけるせん断剛性率 G_0 と σ_s の関係を σ_1/σ_3 をパラメーターにして両対数で図-3.19に示す。縦軸は関数 $\alpha(e)$ で G_0 を除いたものである。上述したように、この図から、両者の関係は両対数で直線関係にあることがわかる。よって、 $G_0 = K \cdot \alpha(e) \cdot (\sigma_s)^m$ なる関係式が得られ、この式の定数 K 、 m を整理すると表-3.14のとおりである。

h と、 σ_s との関係を示したのが図-3.20であり、 h も σ_s の影響を少しではあるが受けているものと考えられる。また、値にバラツキがあるものでも、 $\sigma_s = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ と $\sigma_s = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ の値を比較した場合、その差が確認された。したがって、 σ_s は、 G に与える程のものではないが、 h も σ_s に依存していると考えられる。

3.6.6 主応力比の影響

G と σ_1/σ_3 との関係を知るために、前述の微小ひずみ時におけるせん断剛性率 G_0 と σ_1/σ_3 との関係を σ_s をパラメーターにしてプロットすると図-3.21となる。なお、図の縦軸は、 G_0 に対して e の影響を除くために、 $\alpha(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ で除した値 $G_0/\alpha(e)$ を用いた。

気乾ロック材料については、 σ_m が一定の場合 σ_1/σ_3 が大きくなるに従って、 G_0 は大きくなっている。一方、飽和ロック材料についても一部（斑れい岩）を除いて同じ傾向を示している。今、SAR材（斑れい岩）の飽和及び気乾状態の試験値について、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ における $G_0/\alpha(e)$ によって基準化したものをプロットすると図-3.22のとおりである。ここに、気乾状態の試験値は、上記の傾向を代表するものであるが、

飽和状態の試験値は異なる傾向を示している。これには、豊浦標準砂を用いた共振法土質試験結果²⁶⁾も示しているが、上に凸の傾向となっている。粗粒材料の気乾状態の試験値は、 σ_1/σ_3 が1.0~2.0の範囲で単調増加傾向を示しており、標準砂の傾向と同じと仮定すると、 σ_1/σ_3 が2.0を越えたところで最大値が存在する可能性がある。一方、飽和試験値では、 σ_1/σ_3 が1.4以下で最大値が存在する。

以上のことから、粗粒材料のGは、飽和、気乾状態に関係なく、 σ_1/σ_3 に対して上に凸の曲線になることが予想されるが、 σ_1/σ_3 に対するGの増加割合を示した図-3.23から考えて σ_1/σ_3 の影響を定量的に判断してGを与える関数として定式化するには無理がある。

3.6.7 ひずみ依存性

図-3.24は、Gと γ の関係である。Gは γ の増加に伴って徐々に低減している。そのうち、図-3.24(1)(2)は、SAR材（斑れい岩）の気乾及び飽和試験値である。また、図-3.24(3)(4)は、SR材（粗粒玄武岩）の気乾試験値である。

図-3.24(1)(3)は、ペンレコーダーにて描かれたヒステリシスループから手計算で求めたものであり、図-3.24(2)(4)は、パソコンを用いたシステムによって処理したものである（両者の試験値の比較については、2.4予備試験結果を参照）。図-3.24(1)(2)において、 $\gamma < 1 \times 10^{-5}$ の範囲ではばらつきがあるものの、一定値に近づいていく傾向が見られる。一方、 $\gamma < 1 \times 10^{-5}$ の範囲では、 γ の増加につれてGがなめらかに低減している。このように、微小ひずみ時のGが一定値に漸近する傾向やGが γ に対して低減する傾向は、砂質土や粘性土等の既往の研究結果と同様である。また、図-3.24(1)(2)と図-3.24(3)(4)を比較すると、前者は γ の増加に伴うGの低下の傾向は、上に凸のなめらかな曲線であるのに対し、後者は、やや直線的に低減している。粒度分布や密度の影響の他に岩質の違いによるものではないかと考えられる。このように、低下の割合が σ_m 、 σ_1/σ_3 、飽和・気乾の差及び岩質の違い等が低下の割合に及ぼす影響を検討するために、Gを G_{max} で基準化した係数 G/G_{max} のひずみ依存性について述べる。なお、 G_{max} は、微小ひずみ時の G_0 と同程度の値を有するものとした。図-3.25は、 G/G_{max} （ G/G_0 ）と γ との関係を表したものである。これらの図から、ロック材料（SAR材、SR材）の $\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ と 4.0 kgf/cm^2 の値とを比較するために、図-3.26に重ね合せて示した。図-3.26から、両材料とともに大きな σ_m では G/G_0 の低下の割合は小さい傾向にある。また、両材料とともに飽和状態のものは、気乾状態に比べると、 σ_m の違いによる差は、あまり認められなかった。また、岩質が異なるロック材料二種類（斑れい岩、粗粒玄武岩）の飽和試験値に着目すると、粗粒玄武岩の方が低減が早く低下はやや直線的である。これは、粗粒玄武岩が斑れい岩よりも硬さが劣り、試験中の繰り返し載荷による岩石の破砕によるものと考えられる。

次に、 G_{max} は、 $\gamma < 1 \times 10^{-5}$ の試験値から推定したが、次に、Hardin and Drnevich式²³⁾によって G_{max} を推定し、ひずみ依存曲線の数式化を試みた。図-3.27は、SAR材（斑れい岩）の飽和試験結果（ $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ ）から、 $1/G$ と γ との関係をプロットしたもので、これより、回帰直線を最小二乗法を用いて求め、この直線式のy切片と勾配から、 G_{max} と規準ひずみ γ_r を推定した。

なお, Hardin and Drnevich式(双曲線関数)は次式のとおりである。

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots(3.11)$$

ここに,

$G_{\max}$: γ が非常に小さい時のせん断弾性係数 G の値で, 実用上は $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ 程度のときの G の値と考えてよい。

γ_r : 規準ひずみ(reference strain)と呼ばれ, $G = G_{\max}/2$ となる時の γ である。

この双曲線関数の近似によって求めた $G_{\max}$ と, 目視で推定した G_0 を比較すると表-3.15に示すとおりである。この表から, 比較的飽和状態の試験値は比較的良く一致しており, 全体に目視による値の方が大きめである。また, 双曲線関数によって近似して求めた γ_r (表-3.16参照)と σ_m との関係を両対数紙上にプロットすると図-3.28となり, 全体的に見て両者に強い相関関係は認められない。

次に h のひずみ依存曲線を図-3.29に示す。 h は非常にバラツキが多く, $\gamma < 1 \times 10^{-5}$ の微小ひずみは弾性領域であるため, 0(零)に漸近していくと考えられる。しかし, 各図に見られるように, 約2~3%程度の値が得られているケースが多く, 微小ひずみ時の h の測定が極めて高い精度を要求するために測定誤差として表われたと考えられる。

図-3.29(1)(2)は, ロック材料(斑れい岩)の飽和状態の試験値($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0, 1.4$)であり, 図-3.29(3)(4)は, フィルタ材料(斑れい岩)の気乾及び飽和状態の試験値($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$)である。 h は, 各 σ_m 毎になめらかな曲線を示し, γ の増加とともに増大していく。また, 図-3.29(2)を除き, σ_m が大きくなると, h は小さな値を示している。以上から, h は G の場合ほど顕著でないにしてもひずみ依存性が表われていると考えられる。

ν のひずみ依存曲線を図-3.30に示す。図-30(1)は, ロック材料(斑れい岩)の気乾状態の試験値($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$)で, 図-3.30(2)は, 同材料の飽和状態の試験値である。

飽和状態の試験値は, $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ の範囲で若干下に凸の曲線を示しているが, 概ね各拘束圧別に一定値を示している。一方, 気乾状態の試験値の方はほとんど全ひずみ範囲で一定値を示している。また, その値は, 飽和状態の試験値の方が大きな値を示している。気乾と飽和状態で ν が異なっているが, 供試体条件あるいは排水条件に大きな相違がある。特に試料間隙内の水の動きについて検討する必要がある。

3.6.8 岩質の違いによる影響

岩質の違いによる動的変形特性への影響を調べるために点荷圧裂強度試験を実施した。SAR材(斑れい岩), SR材(粗粒玄武岩)について, 圧裂強度を50kgf/cm²ごとに段階分けし, その頻度を図-3.31に示す。

なお, 岩石の圧裂強度は, 次式²⁵⁾にて算出した。

$$\sigma_1 = 0.891 \times F/d^2 \quad \dots(3.12)$$

ここに, σ_1 : 圧裂強度 (kgf/cm²)。

F : 極限荷重 (kgf)。

d : 点荷間隔 (cm)。

図-3.31に示す度数分布から, SAR材はSR材に比べ圧裂強度が大きいと判断できる。圧裂強度の単純平均値を算出すると, 次のとおりである。

SAR材 146.3 kgf/cm² (133.9 kgf/cm²)

SR材 95.1 kgf/cm² (81.9 kgf/cm²)

()内は飽和状態

また、飽和ロック材料の場合（48時間湛水）図-3.31の頻度分布に示したように、頻度の最大値が一段階づつずれているが、強度低下の影響が考えられる。一方、表-3.17に示すように材料の比重、吸水量及び破碎率から考えても、SAR材がSR材よりも堅硬であることが理解できる。また、飽和による圧裂強度の低下もSAR材がSR材よりも小さいことがわかる。以上のように岩質の違い（岩石そのものの堅さの違い）によるGへの影響を調べてみると次のとおりである。

G_0 と σ_0 の関係をSAR材、SR材について気乾及び飽和の状態別にプロットすると図-3.32に示すとおりである。なお、 G_0 は e の影響を除くために $\alpha(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ なる関数で除した値を用い、 U_0 の違いによる影響を除くために、図-3.15（3.5.4均等係数の影響参照）から、補正量として約20%分SR材について割増したものである。この図から、Gは、堅硬な岩であるSAR材の方が大きな値を示している。また、飽和によるGの低下は、材質の違いによる顕著な差は認められないが若干、SR材の方が大きめである。

両材料とともに飽和によるGの低下が認められたが、これは、岩石間の接触面に水が浸透し、摩擦力が低下することによって、変形しやすくなることが一因と考えられる。また、 σ_0 が大きくなるにつれて飽和によるGの低下が小さくなっている。これは、 σ_0 の増加に伴い岩石間の接触力が高まり、水の浸透による影響が小さくなり供試体の変形しづらくなるものと考えられる。

3.6.9 繰返し周波数の影響

現在、動的変形試験の繰返し周波数は0.2Hzで行っている。しかし、実際には100m級のロックフィルダムの場合堤体の固有周波数は約2.0Hzである。一般に土質材料の動的変形特性は繰返し周波数に依存しないとされていることから、試験機の計測精度を考慮して0.2Hzとしている。そこで粗粒材料の周波数依存性がないことを確認するために、ここでは2.0Hzの繰返し周波数で試験を実施した（表-3.18参照）。

図-3.33に示した ν と γ との関係から、周波数2.0Hzの ν の値については、 γ や σ_m に関係なく、ほとんど0.5に近い値を示している。これは、高周波数であるために体積変化計への水の出入りが追従しきれないために体積変化量が正しく検出されなかったことが原因である。よって、 ν を介して算出したGや γ は、正確には算出できないため、周波数の違いによる正しい比較はできない。このため、体積変化量の測定値に関係ない動弾性係数 E_0 と軸ひずみ ϵ_0 の關係に着目して比較すると図-3.34のとおりである。

この図から、 E_0 には周波数の違いによる顕著な差異は認められなかった。今後、体積変化量の測定についても考え合わせると、従来から実施している周波数0.2Hzによる繰返し試験が妥当と考えられる。

3.6.10 セン断剛性率と減衰定数

Gとhとの關係を σ_0 をパラメーターにしてプロットすると、図-3.35のとおりである。この図は、G及びhのひずみ依存曲線から、 $\gamma = 4 \times 10^{-4}$, 2×10^{-4} , 1×10^{-4} , 5×10^{-5} , 1×10^{-5} における値をプロットしたものである。小さいひずみ領域でばらつきがあるものの、両者の間には直線關係があると判断される。

表-3.1 ダム及び貯水池諸元

ダム名	三 国 川	寒 河 江	三 保
型 式	中央コア型ロックフィルダム	中央コア型ロックフィルダム	土質しゃ水壁型ロックフィルダム
堤 頂 高	EL 439.5m	EL 405.0m	EL 325.0m
ダム 高	119.5m	112.0m	95.0m
堤 頂 長	419.5m	510.0m	587.7m
堤 頂 巾	10.0m	14.0m	15.0m
堤 体 積	6,280,000m ³	10,400,000m ³	5,816,000m ³
堤体法勾配	(上)1:2.4 (下)1:1.9	(上)1:2.9 (下)1:2.1	(上)1:3.4 (下)1:2.8
集水面積	7.62km ²	231.0km ²	158.5km ²
湛水面積	0.76km ²	3.4km ²	2.18km ²
総貯水容量	27,500,000m ³	109,000,000m ³	64,900,000m ³
有効貯水容量	19,800,000m ³	98,000,000m ³	54,500,000m ³
サーチャージ水位	EL 432.0m	EL 400.0m	EL 321.5m
常時満水位	EL 427.0m	EL 398.5m	EL 321.5m
最低水位	EL 394.0m	EL 341.5m	EL 282.3m

表-3.2 試験材料の一覧表

ダム名	材 料 名	岩 石 名	記 号
三国川ダム	ロック材	斑れい岩	SAR
	フィルター材	斑れい岩	SAF
寒河江ダム	ロック材	粗粒玄武岩	SR
	フィルター材	粗粒玄武岩	SF
三保ダム	ロック材	凝灰岩	MR

表-3.3 試験粒度

(単位は%)

材 料 粒 径	S A R		S R		M R		S A F		S F	
	残 留 率	加 積 過 過 率	残 留 率	加 積 過 過 率	残 留 率	加 積 過 過 率	残 留 率	加 積 過 過 率	残 留 率	加 積 過 過 率
63.6mm~50.8mm	10	90	6	94	6	96	6	94	—	—
50.8mm~38.1mm	10	80	10	84	9	86	8	86	—	—
38.1mm~25.4mm	24	56	19	65	12	74	11	76	10	90
25.4mm~19.1mm	15	41	14	51	9	65	8	67	6	84
19.1mm~9.52mm	21	20	22	29	18	47	17	50	13	71
9.52mm~4.76mm	10	10	11	18	12	35	14	36	12	59
4.76mm~2.00mm	6	4	6	10	9	26	14	22	16	43
2.00mm~0.84mm	4	0	7	3	6	18	9	13	15	28
0.84mm~0.42mm	—	—	3	0	8	10	4	9	8	20
0.42mm~0.25mm	—	—	—	—	10	0	3	6	4	16
0.25mm~0.105mm	—	—	—	—			4	2	16	0
0.105mm~0.074mm	—	—	—	—			2	0		

表-3.4 粒度の性質

材 料 名	ロック材			フィルター材	
	S A R	S R	M R	S A F	S F
岩 石 名	斑 れ い 岩	粗粒玄武岩	凝 灰 岩	斑 れ い 岩	
最大粒径	63.50mm	63.50mm	63.50mm	63.50mm	38.10mm
最小粒径	0.87	0.42	0.074	0.074	0.074
D ₁₀ 粒径	4.76	2.00	0.42	0.50	0.14
D ₃₀	13.00	9.80	3.00	3.30	0.94
D ₅₀	22.00	18.50	10.00	9.52	2.90
D ₆₀	29.00	22.90	16.00	15.00	5.00
D ₈₀	44.00	39.20	39.00	37.00	20.00
均等係数U _c	6.1	12	38	30	36
曲率係数U _c	1.2	2.2	1.3	1.5	1.2
比 重	2.951	2.509	2.754	2.999	2.669
吸 水 量%	0.875	5.214	1.125	0.651	5.276

表-3.5(1) 材料の物理的性質 (SAR)

項目 粒 径	重量百分率 (%)	表 乾 比 重 Ga	絶 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	含 水 比 W (%)	吸 水 量 Q (%)
63.5mm~50.8mm	10	3.021	3.003	3.057	0.20	0.587
50.8mm~38.1mm	10	3.005	2.987	3.041	0.24	0.599
38.1mm~25.4mm	24	2.998	2.976	3.042	0.23	0.724
25.4mm~19.1mm	15	2.970	2.943	3.025	0.25	0.919
19.1mm~9.52mm	21	2.954	2.923	3.015	0.27	1.038
9.52mm~4.76mm	10	2.878	2.839	2.955	0.31	1.389
4.76mm~2.00mm	6			2.988	0.30	
2.00mm~0.84mm	4			2.980	0.42	
0.84mm~0.42mm						
0.42mm~0.25mm						
0.25mm~0.105mm						
0.105mm~0.074mm						
加 重 平 均 値		2.974	2.951	3.021	0.26	0.875

表-3.5(2) 材料の物理的性質 (SAF)

項目 粒 径	重量百分率 (%)	表 乾 比 重 Ga	絶 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	含 水 比 W (%)	吸 水 量 Q (%)
63.5mm~50.8mm	6	3.031	3.016	3.062	0.30	0.501
50.8mm~38.1mm	8	3.063	3.045	3.098	0.25	0.562
38.1mm~25.4mm	11	3.013	2.997	3.044	0.20	0.522
25.4mm~19.1mm	8	2.987	2.972	3.019	0.19	0.519
19.1mm~9.52mm	17	3.009	2.982	3.052	0.17	0.681
9.52mm~4.76mm	14	3.006	2.979	3.061	0.18	0.907
4.76mm~2.00mm	14			3.039	0.25	
2.00mm~0.84mm	9			3.010	0.23	
0.84mm~0.42mm	4			3.009	0.26	
0.42mm~0.25mm	3			2.956	0.54	
0.25mm~0.105mm	4			2.944	0.64	
0.105mm~0.074mm	2			2.949	0.69	
加 重 平 均 値		3.012	2.999	3.037	0.25	0.651

表-3.5(3) 材料の物理的性質 (SR)

項目 粒 径	重量百分率 (%)	表 乾 比 重 Ga	絶 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	含 水 比 W (%)	吸 水 量 Q (%)
63.5mm~50.8mm	6	2.631	2.551	2.772	1.76	3.119
50.8mm~38.1mm	10	2.616	2.520	2.788	2.11	3.816
38.1mm~25.4mm	19	2.613	2.511	2.795	2.25	4.046
25.4mm~19.1mm	14	2.591	2.475	2.798	2.41	4.662
19.1mm~9.52mm	22	2.539	2.388	2.813	2.73	6.328
9.52mm~4.76mm	11	2.478	2.291	2.819	2.35	8.173
4.76mm~2.00mm	8			2.808	2.33	
2.00mm~0.84mm	7			2.774	3.00	
0.84mm~0.42mm	3			2.787	3.42	
0.42mm~0.25mm						
0.25mm~0.105mm						
0.105mm~0.074mm						
加 重 平 均 値		2.612	2.509	2.799	2.44	5.214

表-3.5(4) 材料の物理的性質 (SF)

項 目 粒 徑	重量百分率 (%)	表 乾 比 重 Ga	絕 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	含 水 比 W (%)	吸 水 量 Q (%)
63.5mm~50.8mm						
50.8mm~38.1mm						
38.1mm~25.4mm	10	2.707	2.658	2.794	0.96	1.832
25.4mm~19.1mm	6	2.693	2.631	2.803	1.18	2.332
19.1mm~9.52mm	13	2.677	2.604	2.810	1.31	2.806
9.52mm~4.76mm	12	2.646	2.554	2.812	1.42	2.806
4.76mm~2.00mm	16			2.814	1.41	
2.00mm~0.84mm	15			2.816	1.74	
0.84mm~0.42mm	8			2.845	1.93	
0.42mm~0.25mm	4			2.844	1.93	
0.25mm~0.105mm	16			2.820	2.17	
0.105mm~0.074mm				2.809	2.50	
加 重 平 均 值		2.762	2.669	2.815	1.34	5.276

表-3.5(5) 材料の物理的性質 (MR)

項 目 粒 徑	重量百分率 (%)	表 乾 比 重 Ga	絶 乾 比 重 Gb	真 比 重 Gg	含 水 比 W (%)	吸 水 量 Q (%)
63.5mm~50.8mm	5	2.770	2.749	2.809	0.07	0.780
50.8mm~38.1mm	9	2.763	2.739	2.807	0.08	0.883
38.1mm~25.4mm	12	2.760	2.733	2.807	0.13	0.963
25.4mm~19.1mm	9	2.772	2.746	2.818	0.15	0.926
19.1mm~9.52mm	18	2.747	2.717	2.802	0.19	1.118
9.52mm~4.76mm	12	2.721	2.674	2.807	0.22	1.774
4.76mm~2.00mm	9			2.796	0.24	
2.00mm~0.84mm	8			2.810	0.27	
0.84mm~0.42mm	8			2.816	0.28	
0.42mm~0.25mm	10			2.829	0.35	
0.25mm~0.105mm						
0.105mm~0.074mm						
加 重 平 均 值		2.773	2.754	2.809	0.36	1.125

表-3.6 ランマー仕様

全負荷打撃数	950 打撃/分
本 体 重 量	33kgf
加 圧 盤 直 径	約29cm

表-3.7 締固め試験条件

項 目	仕 様
試 験 材 料	ロック材 (SAR材、SR材、MR材) 、フィルタ材 (SAF材、SF材)
絶 乾 重 量	70~72 kgf
供試体寸法	直径30cm×高さ60cm
締固め機械	電動ランマー (表3.5、図3.5参照)
層 数	6層<1層約10cm>
締固め時間 (エネルギー)	0~80秒/層

表-3.8 締固め試験結果の一覧表

材 料	ランマーによる 締固めの時間	乾 燥 密 度 γ_d (t/m ³)	間 隙 比 e	相 対 密 度 Dr (%)	破 砕 率 B (%)
S A R Uc=6.1 Gb=2.95	投入のみ	$\gamma_{dmin}=1.745$	$e_{max}=0.691$	0	-----
	5秒/層×6層	2.058	0.434	75.1	± 1.6
	10	2.102	0.404	83.9	± 1.9
	20	2.143	0.377	91.8	± 2.2
	30	2.169	0.361	96.5	± 2.3
	50	2.187	$e_{min}=0.349$	100	± 2.3
S R Uc=12 Gb=2.509	投入のみ	$\gamma_{dmin}=1.605$	$e_{max}=0.563$	0	-----
	5秒/層×6層	1.953	0.285	73.0	± 4.3
	10	2.015	0.245	83.5	± 4.9
	15	2.040	0.230	87.4	± 6.1
	25	2.062	0.217	90.8	± 6.9
	40	2.122	$e_{min}=0.182$	100	± 8.0
M R Uc=38 Gb=2.754	投入のみ	$\gamma_{dmin}=1.855$	$e_{max}=0.485$	0	-----
	5秒/層×6層				
	80	2.336	$e_{min}=0.179$	100	± 4.3
S A F Uc=30 Gb=2.999	投入のみ	$\gamma_{dmin}=1.899$	$e_{max}=0.579$	0	-----
	5秒/層×6層	2.312	0.297	79.2	± 1.4
	10	2.359	0.271	86.5	± 1.8
	20	2.394	0.253	91.6	± 2.0
	30	2.434	0.232	97.5	± 2.1
	50	2.453	$e_{min}=0.223$	100	± 2.1
S F Uc=17 Gb=2.669	投入のみ	$\gamma_{dmin}=1.670$	$e_{max}=0.598$	0	-----
	5秒/層×6層	2.053	0.300	79.5	± 3.3
	10	2.100	0.271	87.2	± 2.9
	15	2.115	0.262	89.6	± 3.7
	25	2.159	0.236	96.5	± 3.8
	40	2.183	$e_{min}=0.223$	100	± 3.4

表-3.9 供試体の密度設定

試 験 材 料	略 式 名 称	相 対 密 度 Dr (%)	目 標 間 隙 比 e	目 標 乾 燥 密 度 γ_d (gf/cm ³)	ランマー 締固め時間 (sec/1層)	粒 度 (平均係数)
三国川ダムロック材 斑れい岩	S A R	85	0.401	2.106	8~12	63.5mm~0.84mm (Uc=6.1)
三国川ダムフィルター材 斑れい岩	S A F	85	0.276	2.305	8~12	63.5mm~0.074mm (Uc=30)
寒河江ダムロック材 粗粒玄武岩	S R	85	0.239	2.025	8~12	63.5mm~0.42mm (Uc=12)
寒河江ダムフィルター材	S F	85	0.279	2.087	8~12	38.1mm~0.074mm (Uc=36)
三保ダムロック材 凝灰岩	M R	85	0.225	2.248	8~12	63.5mm~0.074mm (Uc=38)

表-3.10 粗粒材料試験の条件

試験材料	材 料 名	ロック材			フィルター材	
	岩 石 名	斑れい岩	粗粒玄武岩	凝灰岩	斑れい岩	
	試 料 名	S A R	S R	M R	S A F	S F
	均 等 係 数 U	6.1	12	38	30	36
	粒径 dmax~dmin(mm)	63.5~0.84	63.5~0.42	63.5~0.074	63.5~0.074	38.1~0.074
供試体	供 試 体 寸 法	直径φ30cm×高さh 60cm				
	締 固 め 方 法	電動ランマー, 6層, 8~12秒/層				
	試 料 状 態	気乾・飽和				
	相対密度 Dro(%)	85.0%				
	間 隙 比 eo	0.401	0.239	0.225	0.276	0.279
圧密	圧 密	異方圧密または等方圧密				
	拘 束 条 件	1 供試体当り 5 段階 (σc=1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0kgf/cm ²) 変化させる。				
	主応力比 σ ₁ /σ ₃	1.0, 1.4, 2.0, (3.0)			1.0, 2.0	
	平均主応力 σ _m (kgf/cm ²)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0				
	圧 密 速 度	1.0 kgf/cm ² / 分				
	圧密完了基準	体積変化が0または0.5分(約30分程度)				
繰返し載荷	載 荷 方 法	片振りまたは両振り				
	制 御	軸荷重振幅制御				
	排 水 条 件	圧密排水(排気)				
	入 力 波	正弦波				
	周 波 数	0.2Hz				
	ひずみ範囲	γ ≤ 5×10 ⁻⁴				
	波 数	12波				
	記 録 波 数	10波目				

表-3.11 粗粒材料試験ケース (その1)

材 料	物 性 値	圧 密	両・片 振 り	試 験 名 飽・気乾	初期 値 Dro (%) $\gamma_{do}(g/cm^3)$ eo	拘 束 (圧 密) 条 件					試 験 数
						σ_1 (kgf/cm ²)	σ_3 (kgf/cm ²)	主応力比 σ_1/σ_3	σ_m (kgf/cm ²)	圧密後間隙比 e	
ロ ッ ク 材 斑 れ い 岩	d=63.5 ~0.84mm Uc=6.1 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.106g/cm^3$ eo=0.401 Gb=2.951	等 方 圧 密	両 振 り	SAR*1 飽和	84.2 2.104 0.401	1.06	1.06	1.00	1.06	0.391	3
						2.07	2.07	1.00	2.07	0.383	
						3.10	3.10	1.00	3.10	0.377	
						4.08	4.08	1.00	4.08	0.372	
						6.09	6.09	1.00	6.09	0.362	
	Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.106g/cm^3$ eo=0.401 Gb=2.951	異 方 圧 密	片 振 り	SAR*2 飽和	84.3 2.104 0.403	0.731	1.490	2.038	0.984	0.394	3
						1.475	2.991	2.028	1.980	0.386	
						2.226	4.511	2.027	2.988	0.381	
						2.981	5.984	2.007	3.982	0.376	
						4.482	9.060	2.021	6.008	0.369	
	Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.106g/cm^3$ eo=0.401 Gb=2.951	等 方 圧 密	両 振 り	SAR*3 飽和	84.4 2.104 0.402	0.73	1.49	2.04	0.98	0.394	補 足 試 験 1
						1.47	2.99	2.03	1.98	0.386	
						2.23	4.59	2.02	2.99	0.381	
						2.98	6.02	2.02	3.99	0.376	
						4.48	9.06	2.02	6.01	0.369	
ロ ッ ク 材 粗 粒 玄 武 岩	d=63.5 ~0.42mm Uc=12 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.025g/cm^3$ eo=0.239 Gb=2.509	等 方 圧 密	両 振 り	SR*1 飽和	83.9 1.935 0.297	1.06	1.06	1.00	1.06		3
						2.07	2.07	1.00	2.07		
						3.10	3.10	1.00	3.10		
						4.08	4.08	1.00	4.08		
						6.09	6.09	1.00	6.09		
	Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.025g/cm^3$ eo=0.239 Gb=2.509	異 方 圧 密	片 振 り	SR*2 飽和	84.0 1.935 0.297	0.87	1.23	1.42	0.99	0.288	3
						1.76	2.48	1.41	2.00	0.278	
						2.65	3.73	1.41	3.01	0.270	
						3.53	4.98	1.41	4.01	0.263	
						5.30	7.48	1.41	6.03	0.252	
	Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.025g/cm^3$ eo=0.239 Gb=2.509	等 方 圧 密	両 振 り	SR*3 飽和	84.0 1.935 0.297	0.73	1.48	2.03	0.98	0.291	3
						1.57	3.07	1.96	2.07	0.282	
						2.24	4.51	2.01	3.00	0.274	
						3.00	6.02	2.01	4.01	0.267	
						4.52	9.08	2.01	6.04	0.253	

表-3.11 粗粒材料試験ケース (その2)

材料	物性値	圧密	両・片振り	試験名 飽・気乾	初期値 Dro (%) $\gamma_{do}(g/cm^3)$ eo	拘束 (圧密) 条件					試験数
						σ_v (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	主応力比 σ_1/σ_v	σ_m (kgf/cm ²)	圧密後間隙比 e	
ロック材 凝灰岩	d=63.5 ~0.074mm Uc=38 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.248g/cm^3$ eo=0.255 Gb=2.754	等方圧密	両振り	MR*1 飽和	84.1	1.01	1.01	1.00	1.01	0.209	3
					2.269	1.99	1.99	1.00	1.99	0.204	
					0.214	3.00	3.00	1.00	3.00	0.200	
						4.01	4.01	1.00	4.01	0.196	
						6.01	6.01	1.00	6.01	0.192	
		異方圧密	片振り	MR*2 飽和	84.0	1.09	1.52	1.39	1.23	0.210	
					2.268	1.76	2.48	1.41	2.00	0.206	
					0.215	2.65	3.71	1.40	3.01	0.203	
						3.53	4.95	1.40	4.00	0.199	
						5.28	7.42	1.41	5.99	0.195	
				MR*3 飽和	83.5	0.74	1.47	1.99	0.98	0.212	
					2.265	1.49	2.99	2.01	1.99	0.207	
						2.25	4.50	2.00	3.00	0.204	
					0.216	3.00	6.02	2.01	4.01	0.200	
						4.52	9.04	2.01	6.03	0.193	
フィルター材 斑れい岩	d=63.5 ~0.074mm Uc=30 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.350g/cm^3$ eo=0.276 Gb=2.999	等方圧密	両振り	SAF-1 気乾	83.6	1.00	1.00	1.00	1.00	0.273	2
					2.340	2.01	2.01	1.00	2.01	0.268	
					0.282	3.00	3.00	1.00	3.00	0.265	
						4.00	4.00	1.00	4.00	0.262	
						6.03	6.03	1.00	6.03	0.259	
		異方圧密	片振り	SAF-2 気乾	84.5	0.75	1.50	2.00	1.00	0.270	
					2.346	1.52	3.02	1.97	2.02	0.263	
					0.278	2.23	4.51	2.02	2.99	0.260	
						3.00	6.03	2.01	4.01	0.256	
						4.52	9.07	2.01	6.03	0.253	
		等方圧密	両振り	SAF*1 飽和	81.7	0.992	0.992	1.000	0.992	0.283	2
					2.329	2.000	2.000	1.000	1.000	0.278	
						2.994	2.994	1.000	1.000	0.274	
					0.288	4.000	4.000	1.000	1.000	0.270	
						5.998	5.998	1.000	1.000	0.266	
		異方圧密	片振り	SAF*2 飽和	81.9	0.742	1.498	2.019	0.994	0.284	
					2.330	1.496	2.996	2.002	1.996	0.279	
						2.252	4.504	2.000	3.003	0.275	
					0.287	3.002	6.015	2.004	4.006	0.271	
						4.498	9.003	2.001	6.000	0.267	

表-3.11 粗粒材料試験ケース (その3)

材料	物性値	圧密	両・片振り	試験名 飽・気乾	初期値 Dro (%) γ_{do} (g/cm ³) e_o	拘束 (圧密) 条件					試験数
						σ_3 (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	主応力比 σ_1/σ_3	σ_m (kgf/cm ²)	圧密後間隙比 e	
ロック材 斑れい岩	d=63.5 ~0.84mm Uc=6.1 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.106$ g/cm ³ $e_o=0.401$ Gb=2.951	等方圧密	両振り	SAR-1 気乾	83.6	1.02 2.03 2.98 4.00	1.02 2.03 2.98 4.00	1.0 1.0 1.0 1.0	1.02 2.03 2.98 4.00	0.391 0.381 0.376 0.371	3
					0.405						
					84.2	0.882 1.744 2.682 3.528 0.403	1.243 2.482 3.759 4.962 7.467	1.409 1.399 1.401 1.406 1.409	1.002 2.010 3.041 4.006 6.021	0.393 0.384 0.378 0.373 0.366	
					83.6	0.754 1.528 2.281 3.034 0.405	1.522 3.060 4.560 6.114 9.065	2.019 2.003 1.999 2.015 2.020	1.010 2.039 3.041 4.061 6.013	0.395 0.387 0.382 0.377 0.372	
	d=63.5 ~0.42mm Uc=12 Dro=85.0% $\gamma_{do}=2.025$ g/cm ³ $e_o=0.239$ Gb=2.509	異方圧密	片振り	SR-1 気乾	83.7	1.00 2.01 3.03 4.03 0.244	1.03 2.04 3.09 4.11 6.07	1.03 1.01 1.02 1.02 1.00	1.01 2.02 3.05 4.06 6.06	0.236 0.230 0.226 0.222 0.217	
					82.7	0.88 1.78 2.684 3.576 0.248	1.25 2.49 3.75 5.00 7.48	1.42 1.40 1.40 1.40 1.40	1.00 2.02 3.04 4.05 6.06	0.242 0.237 0.234 0.230 0.225	
					82.2	0.74 1.52 2.30 3.03 0.250	1.48 3.01 4.55 6.03 9.04	2.00 1.98 1.98 1.99 1.98	0.99 2.02 3.05 4.03 6.05	0.244 0.237 0.232 0.226 0.220	
					81.9	0.593 1.20 1.798 2.400 0.251	1.789 3.593 5.367 7.150 10.77	3.032 2.994 2.985 2.979 2.958	0.992 1.998 2.988 3.983 6.107	0.246 0.241 0.236 0.231 0.224	
				SR-2 気乾	82.7	0.88 1.78 2.684 3.576 0.248	1.25 2.49 3.75 5.00 7.48	1.42 1.40 1.40 1.40 1.40	1.00 2.02 3.04 4.05 6.06	0.242 0.237 0.234 0.230 0.225	
					82.2	0.74 1.52 2.30 3.03 0.250	1.48 3.01 4.55 6.03 9.04	2.00 1.98 1.98 1.99 1.98	0.99 2.02 3.05 4.03 6.05	0.244 0.237 0.232 0.226 0.220	
					81.9	0.593 1.20 1.798 2.400 0.251	1.789 3.593 5.367 7.150 10.77	3.032 2.994 2.985 2.979 2.958	0.992 1.998 2.988 3.983 6.107	0.246 0.241 0.236 0.231 0.224	
					81.9	0.593 1.20 1.798 2.400 0.251	1.789 3.593 5.367 7.150 10.77	3.032 2.994 2.985 2.979 2.958	0.992 1.998 2.988 3.983 6.107	0.246 0.241 0.236 0.231 0.224	

表-3.11 粗粒材料試験ケース (その4)

材 料	物 性 値	圧 密	両・片 振 り	試 験 名 飽・気乾	初 期 値 Dro (%) γ_{do} (g/cm ³) e _o	拘 束 (圧 密) 条 件					試 験 数
						σ_3 (kgf/cm ²)	σ_1 (kgf/cm ²)	主応力比 σ_1/σ_3	圧宿間隙比 (kgf/cm ²)	圧密後間隙比 e	
ロ ック 材 凝 灰 岩	d=63.5 ~0.074mm	等 方 圧 密	両 振 り	MR-1 気乾	83.5	1.00	1.00	1.00	1.00	0.212	3
	Uc=38				2.265	2.018	2.018	1.00	2.018	0.208	
						3.018	3.018	1.00	3.018	0.206	
					0.216	4.402	4.042	1.00	4.042	0.203	
						6.042	6.042	1.00	6.042	0.200	
	Dro=85.0%	異 方 圧 密	片 振 り	MR-2 気乾	84.8	0.874	1.490	1.989	0.996	0.212	
	$\gamma_{do}=2.248$ g/cm ³				2.272	1.760	2.463	1.399	1.944	0.208	
	e _o =0.255					2.664	3.728	1.399	3.019	0.206	
	Gb=2.754				0.212	3.552	4.968	1.399	4.024	0.203	
						5.314	7.444	1.401	6.024	0.198	
			両 振 り	MR-3 気乾	84.2	0.743	1.449	1.950	0.978	0.209	
					2.268	1.506	3.015	2.002	2.009	0.205	
						2.278	4.541	1.993	3.032	0.201	
					0.214	3.035	6.061	1.997	4.044	0.196	
						4.523	9.071	2.006	6.039	0.191	
フ ィ ル タ ー 材 粗 粒 玄 武 岩	d=38.1 ~0.074mm	等 方 圧 密	両 振 り	SF-1 気乾	85.3	1.00	1.01	1.00	1.00	0.270	2
	Uc=38				2.089	2.00	2.02	1.01	2.01	0.266	
	Dro=85.0%					3.02	3.06	1.01	3.03	0.261	
					0.278	4.03	4.08	1.01	4.05	0.257	
						6.04	6.09	1.01	6.05	0.252	
	$\gamma_{do}=2.087$ g/cm ³	異 方 圧 密	片 振 り	SF-2 気乾	84.5	0.75	1.50	2.00	1.00	0.277	
	e _o =0.279				2.083	1.51	3.02	2.00	2.01	0.272	
	Gb=2.669					2.25	4.53	2.01	3.01	0.267	
					0.281	3.02	6.06	2.01	4.03	0.263	
						4.54	9.05	1.99	6.03	0.257	

表-3.12 各材料の均等係数と粒径範囲

材 料	均 等 係 数	粒径範囲 d _{max} ~d _{min} (mm)
ロ ッ ク 材 (斑れい岩)	6.1	63.5 ~ 0.84
フ ィ ル タ 材 (斑れい岩)	30.0	63.5 ~ 0.074
ロ ッ ク 材 (粗粒玄武岩)	12.0	63.5 ~ 0.42
フ ィ ル タ 材	17.0	38.1 ~ 0.074
ロ ッ ク 材 (凝灰岩)	38	63.5 ~ 0.074

表-3.13 各材料の $G = K \cdot \alpha(e) \cdot (\sigma_m)^m$ としての時の定数

材 料 名	飽和・気乾	主応力比 σ_1/σ_3	$\gamma = 5 \times 10^{-6}$		$\gamma = 5 \times 10^{-5}$		$\gamma = 1 \times 10^{-4}$		$\gamma = 2 \times 10^{-4}$		$\gamma = 5 \times 10^{-4}$	
			K	m	K	m	K	m	K	m	K	m
三国川ダム ロック材 (斑れい岩) $U_c = 6.1$	気 乾	1.0	1030	0.45	840	0.54	730	0.57	570	0.65	370	0.76
		1.4	1080	0.47	880	0.54	770	0.59	640	0.64	440	0.72
		2.0	1130	0.49	930	0.57	820	0.61	690	0.65	490	0.72
	飽 和	1.0	930	0.52	830	0.54	750	0.56	620	0.60	440	0.66
		1.4	880	0.60	730	0.63	640	0.66	530	0.72	400	0.76
		2.0	820	0.56	730	0.58	660	0.60	570	0.62	400	0.65
三国川ダム フィルター材 (斑れい岩) $U_c = 30$	気 乾	1.0	670	0.65	530	0.70	460	0.73	370	0.78	260	0.78
		2.0	810	0.73	670	0.74	600	0.75	490	0.79	370	0.79
	飽 和	1.0	580	0.69	480	0.73	420	0.75	360	0.76	230	0.86
		2.0	790	0.66	590	0.79	520	0.81	430	0.85	340	0.85
寒河江ダム ロック材 (粗粒玄武岩) $U_c = 12$	気 乾	1.0	640	0.52	480	0.63	410	0.65	330	0.72	230	0.79
		1.4	790	0.53	590	0.62	510	0.65	420	0.69	270	0.80
		2.0	770	0.65	620	0.67	530	0.69	430	0.73	290	0.83
		3.0	920	0.50	720	0.63	620	0.61	520	0.63	370	0.61
	飽 和	1.0	540	0.63	440	0.65	380	0.68	320	0.69	240	0.70
		1.4	620	0.55	510	0.57	440	0.65	350	0.70	260	0.74
		2.0	590	0.71	490	0.72	440	0.72	370	0.71	260	0.74
寒河江ダムフィルター材 $U_c = 17$	気 乾	1.0	580	0.59	500	0.61	420	0.65	360	0.69	260	0.73
		2.0	750	0.67	590	0.71	520	0.72	450	0.72	340	0.73
三保ダム ロック材 (凝灰岩) $U_c = 38$	気 乾	1.0	620	0.64	520	0.68	460	0.70	380	0.73	290	0.74
		1.4	680	0.67	550	0.67	470	0.73	390	0.77	300	0.80
		2.0	680	0.74	600	0.74	500	0.78	430	0.80	330	0.83
	飽 和	1.0	530	0.71	440	0.75	380	0.79	310	0.80	230	0.83
		1.4	590	0.77	480	0.78	420	0.79	360	0.81	250	0.86
		2.0	620	0.78	540	0.77	470	0.78	400	0.81	290	0.84

表-3.14 各材料の $G = K \cdot \alpha(e) \cdot (\sigma_m)^m$ とした時の定数

材 料	試料状態	主応力比 σ_1/σ_3	定数	
			K	m
三国川ダム ロック材 (斑れい岩) Uc=6.1	気 乾	1.0	1052	0.422
		1.4	1105	0.447
		2.0	1153	0.484
	飽 和	1.0	922	0.526
		1.4	878	0.604
		2.0	821	0.558
三国川ダム フィルター材 (斑れい岩) Uc=30	気 乾	1.0	708	0.620
		2.0	826	0.729
	飽 和	1.0	513	0.807
		2.0	827	0.628
寒河江ダム ロック材 (粗粒玄武岩) Uc=12	気 乾	1.0	649	0.575
		1.4	839	0.491
		2.0	763	0.665
		3.0	914	0.574
	飽 和	1.0	546	0.646
		1.4	615	0.622
		2.0	675	0.611
寒河江ダム フィルター材 Uc=17	気 乾	1.0	597	0.570
		2.0	852	0.576
三保ダム ロック材 (凝灰岩) Uc=38	気 乾	1.0	622	0.651
		1.4	692	0.660
		2.0	724	0.712
	飽 和	1.0	551	0.711
		1.4	654	0.693
		2.0	632	0.774

表-3.15 初期せん断弾性係数

材 料 名	飽和・気乾 別	主応力比 σ_1/σ_3	初 期 せん断弾性係数									
			$\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$		2.0		3.0		4.0		6.0	
			計 算 値	目 視	計 算 値	目 視	計 算 値	目 視	計 算 値	目 視	計 算 値	目 視
三国川ダム ロック材 (斑れい岩) $U_c=6.1$	気 乾	1.0	2180	2400	3120	3300	3760	4000	4300	4600	—	—
		1.4	2260	2500	3170	3500	3950	4200	4770	4850	6080	6550
		2.0	2290	2600	3450	3700	4400	4550	5150	5250	6370	6500
	飽 和	1.0	2190	2100	3050	3050	3740	3850	4410	4500	6040	6200
		1.4	1850	2000	2800	3050	3670	4000	4560	4800	6080	6200
		2.0	1830	1850	2810	2800	3280	3500	3930	4150	5230	5250
三国川ダム フィルター材 (斑れい岩) $U_c=30$	気 乾	1.0	1740	2000	2850	3150	3600	3900	4270	4900	5790	6400
		2.0	2140	2350	3660	3950	5060	5300	6430	6650	8420	—
	飽 和	1.0	1380	1400	2610	2600	3380	3500	4170	4400	5250	5700
		2.0	1930	2300	3230	3550	4440	4600	5760	5650	7630	—
寒河江ダム ロック材 (粗粒玄武岩) $U_c=12$	気 乾	1.0	1640	2000	2640	2920	3340	3570	4480	4700	6050	6050
		1.4	2140	2450	3370	3650	4420	4400	5760	4950	7990	6350
		2.0	2400	2320	3520	3560	4920	4800	6550	5980	8170	—
		3.0	2200	2830	3300	3900	4030	4950	4490	6700	6120	—
	飽 和	1.0	1410	1500	2120	2400	3030	3150	3410	3850	4720	5250
		1.4	1610	1730	2330	2550	3100	3280	3870	4420	5240	5420
		2.0	1710	1900	2620	2730	3660	3630	4310	4700	6190	6650
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
寒河江ダムフィルター材 $U_c=17$	気 乾	1.0	1400	1500	2070	2250	2380	2850	2880	3400	2980	4350
		2.0	1830	2150	2710	3100	3490	4000	4340	4950	5920	6900
三保ダム ロック材 (凝灰岩) $U_c=38$	気 乾	1.0	1780	1950	2700	3100	3720	4050	4610	4900	5760	6400
		1.4	1960	2200	2950	3450	4050	4550	5240	5600	7070	7500
		2.0	2080	2300	3190	3700	4510	5100	5810	6300	8240	8450
	飽 和	1.0	1580	1750	2790	2900	3640	3900	4200	4800	5800	6400
		1.4	1940	2100	3110	3300	4560	4500	4840	5600	7200	7700
		2.0	1900	2000	3300	3450	4540	4750	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表-3.16 基準ひずみ

材 料 名	飽和・気乾 別	主応力比 σ_1/σ_3	基 準 ひ ず み $\gamma_r (\times 10^{-4})$				
			$\sigma_m=1.0\text{kgf/cm}^2$	2.0	3.0	4.0	6.0
三国川ダム ロック材 (斑れい岩) Uc=6.1	気 乾	1.0	3.38	4.53	5.75	7.02	7.47 8.38
		1.4	3.68	5.74	7.01	6.95	
		2.0	4.77	6.25	6.50	7.19	
	飽 和	1.0	3.88	5.03	6.25	6.90	5.72
		1.4	4.80	6.24	6.71	6.48	6.42
		2.0	5.82	6.11	8.38	8.80	8.44
三国川ダム フィルター材 (斑れい岩) Uc=30	気 乾	1.0	3.58	4.16	5.02	5.40	4.33
		2.0	3.69	4.60	4.51	4.61	5.20
	飽 和	1.0	4.41	4.04	4.95	5.13	5.20
		2.0	3.94	4.80	5.33	5.06	5.83
寒河江ダム ロック材 (粗粒玄武岩) Uc=12	気 乾	1.0	3.57	3.87	4.70	4.32	4.26
		1.4	3.34	3.96	4.69	4.12	3.51
		2.0	3.95	4.36	3.55	3.20	3.00
		3.0	2.99	3.74	4.74	6.14	6.07
	飽 和	1.0	4.27	4.74	4.04	5.08	4.65
		1.4	3.84	4.56	4.75	4.71	4.88
寒河江ダムフィルター材 Uc=17	気 乾	1.0	3.98	3.69	4.00	3.53	3.96
		2.0	3.88	4.94	5.57	5.82	6.17
三保ダム ロック材 (凝灰岩) Uc=38	気 乾	1.0	4.73	5.51	5.45	5.92	7.78
		1.4	5.05	6.29	6.34	6.20	7.72
		2.0	5.17	7.01	7.10	7.28	7.09
	飽 和	1.0	4.18	3.94	4.50	5.48	4.01
		1.4	4.48	3.84	3.53	5.89	4.83
		2.0	4.30	4.44	4.59	2.64	5.65

表-3.17 材料の物理的性質

材 料 名	SAR材	SR材
岩 石 名	斑 れ い 岩	粗粒玄武岩
比 重	2.951	2.509
吸 水 率	0.875 %	5.214 %
破 砕 率	2.0 %	5.0 %
最大間隙比	0.691	0.744
最 小 間 隙	0.349	0.319
最 大 粒 径	63.5mm	63.5mm
最 小 粒 径	0.84mm	0.42mm
均 等 係 数	6.1	12.0
相 対 密 度	85 %	85 %

表-3.18 試験条件

材 料	三国川ダムロック材 (斑れい岩)	三国川ダムロック材 (斑れい岩)
主 応 力 比 σ_1/σ_3	1.0	1.0
平 均 主 応 力 σ_m	1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm ²	1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm ²
供試体初期間隙比 e	0.395	0.391
相 対 密 度 D_r	86.5 %	87.7 %
算 出 方 法	パソコンによる処理	ペンレコによる図から読み取る
周 波 数	2.0 Hz	0.2 Hz
試 料 状 態	気乾状態	気乾状態

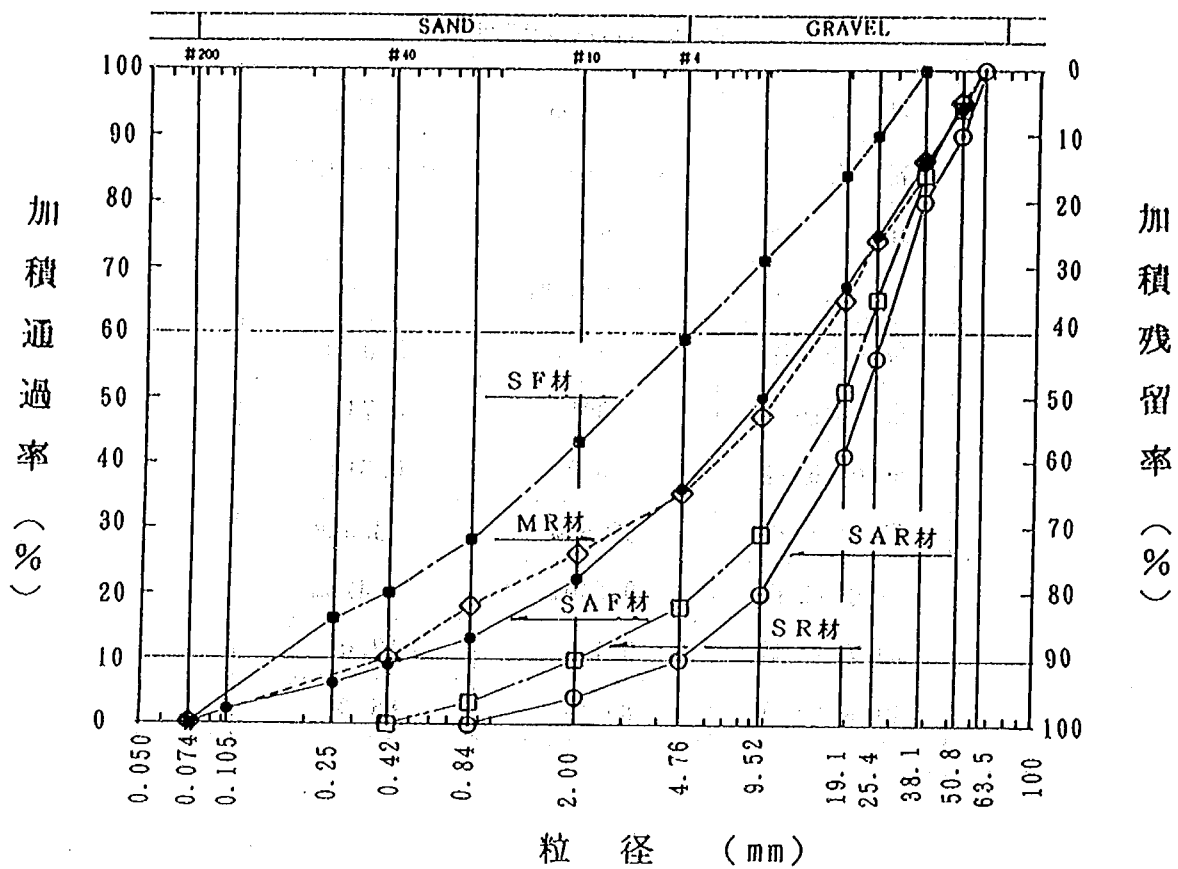


図-3.1 試験材料の粒度分布図

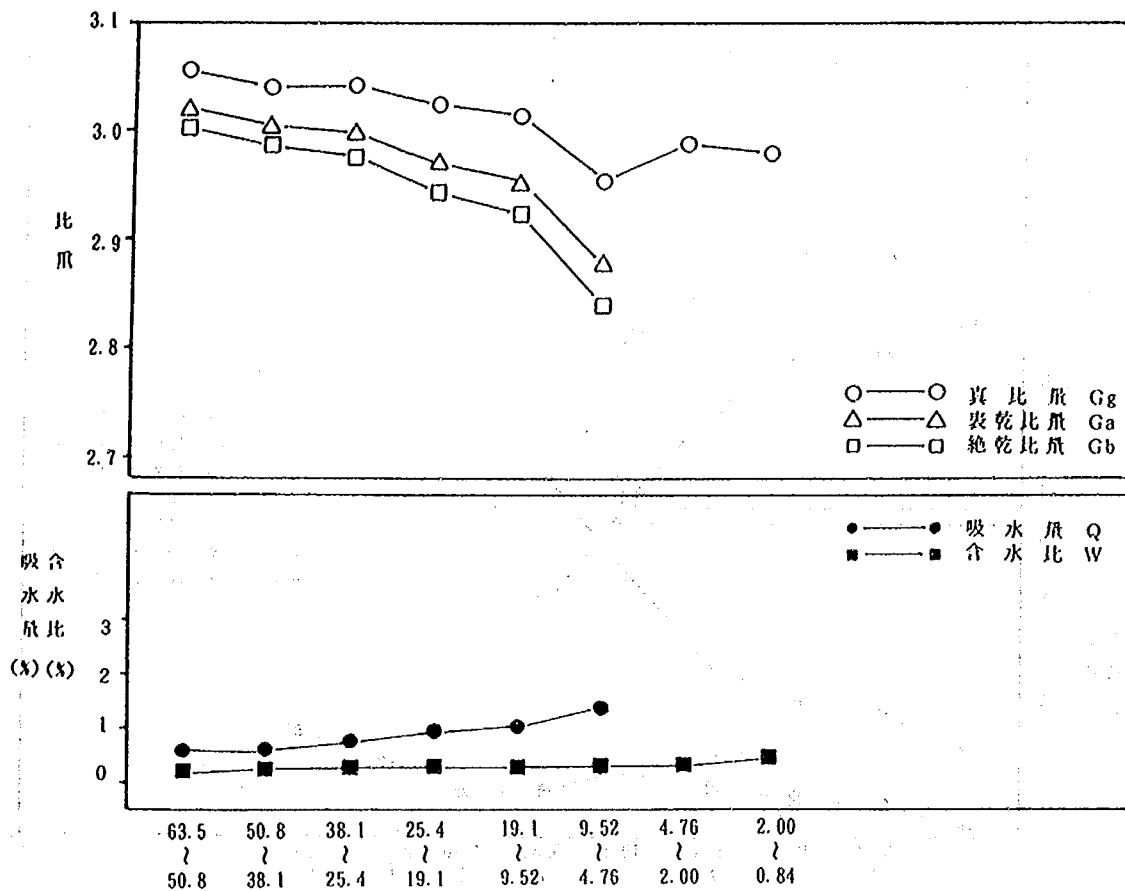


図-3.2(1) 粒径別の比重・含水比・吸水量 (SAR材)

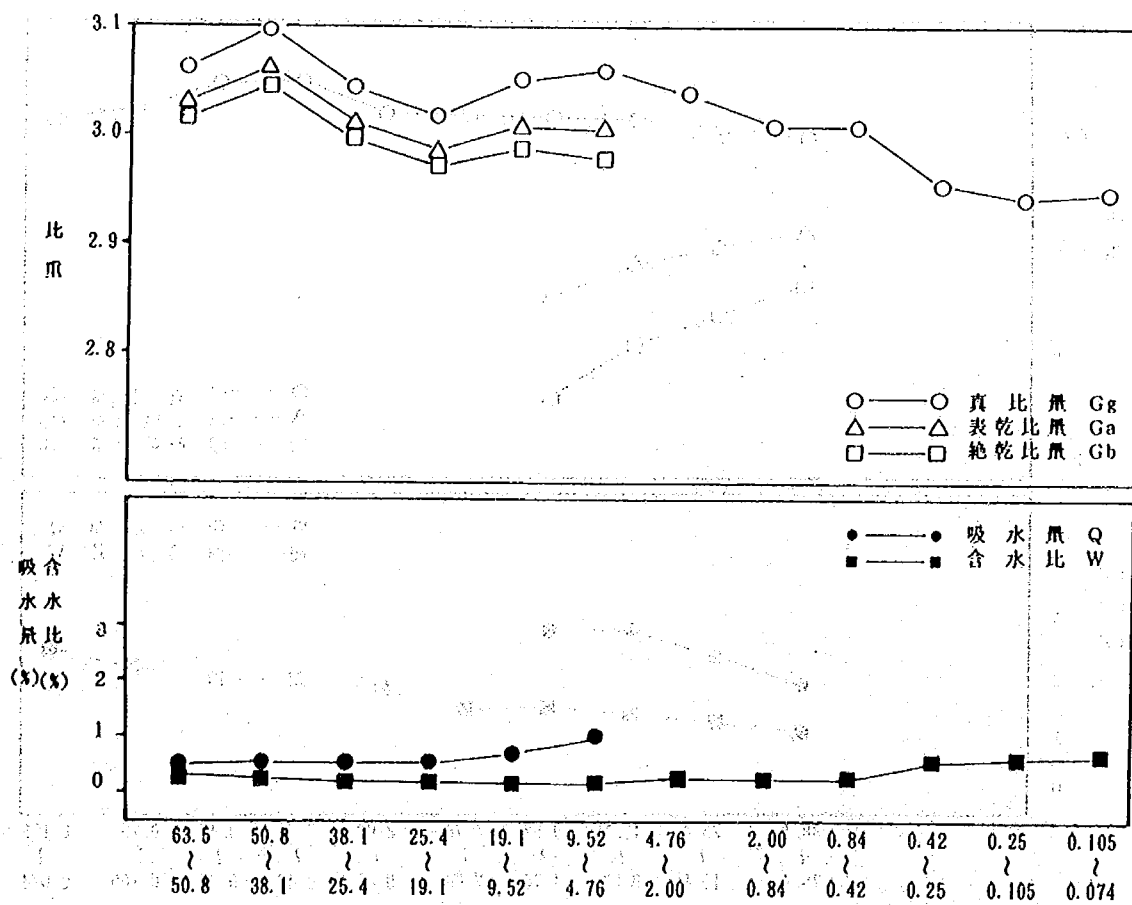


図-3.2(2) 粒径別の比重・含水比・吸水量 (SAF材)

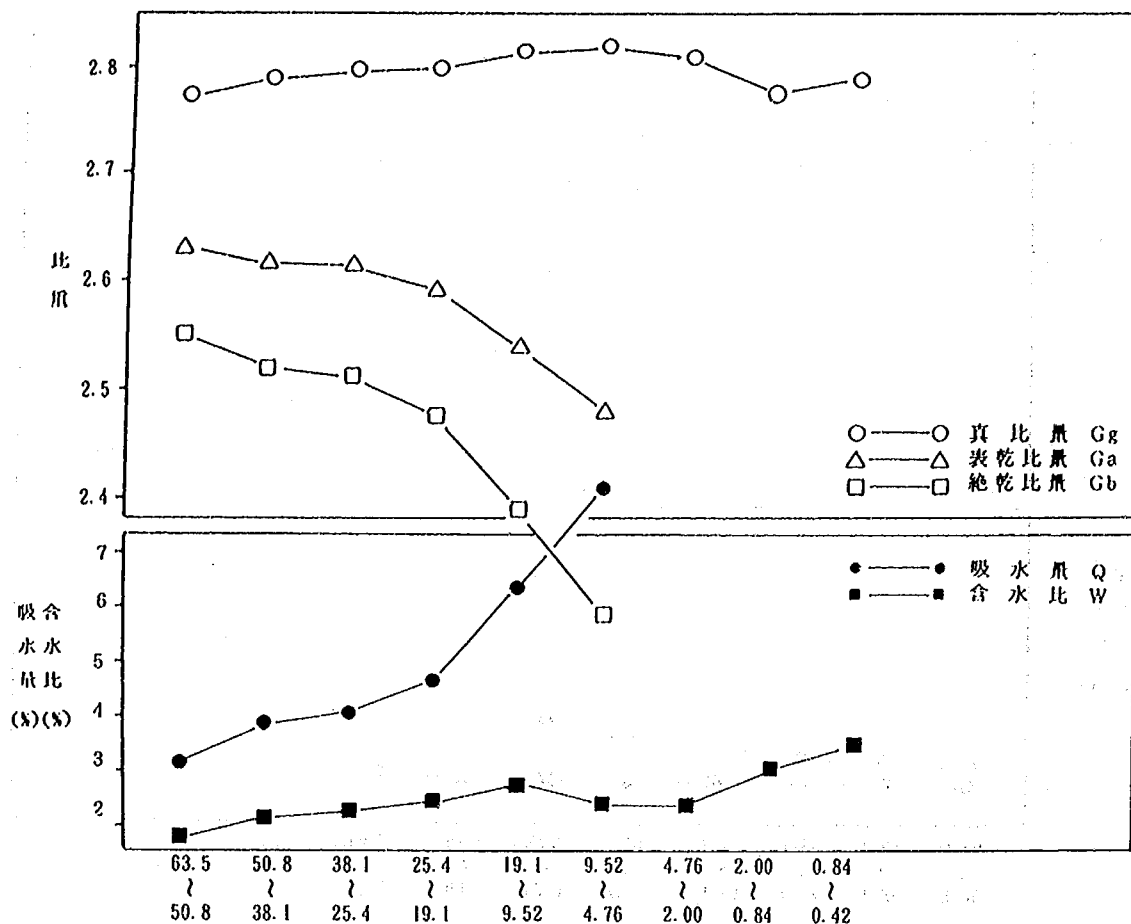


図-3.2(3) 粒径別の比重・含水比・吸水量 (SR材)

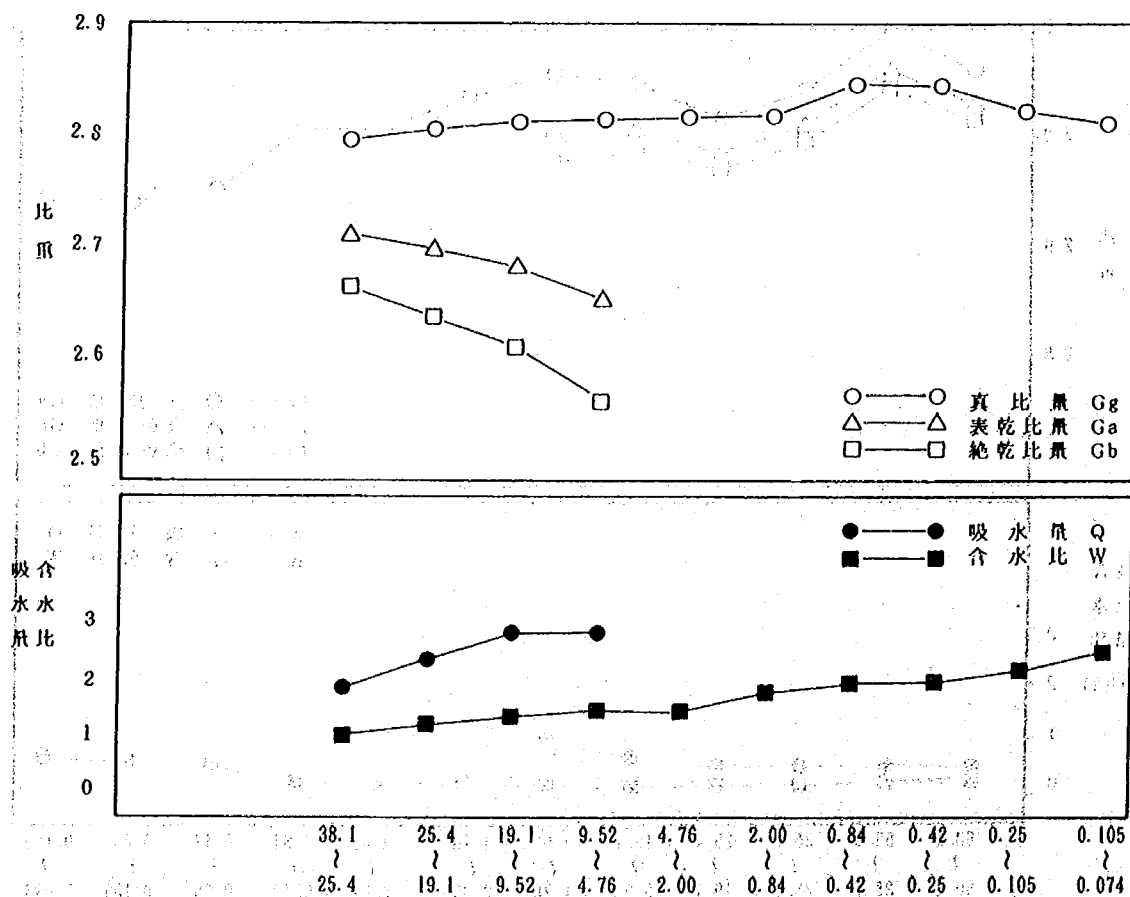


図-3.2(4) 粒径別の比重・含水比・吸水量 (SF材)

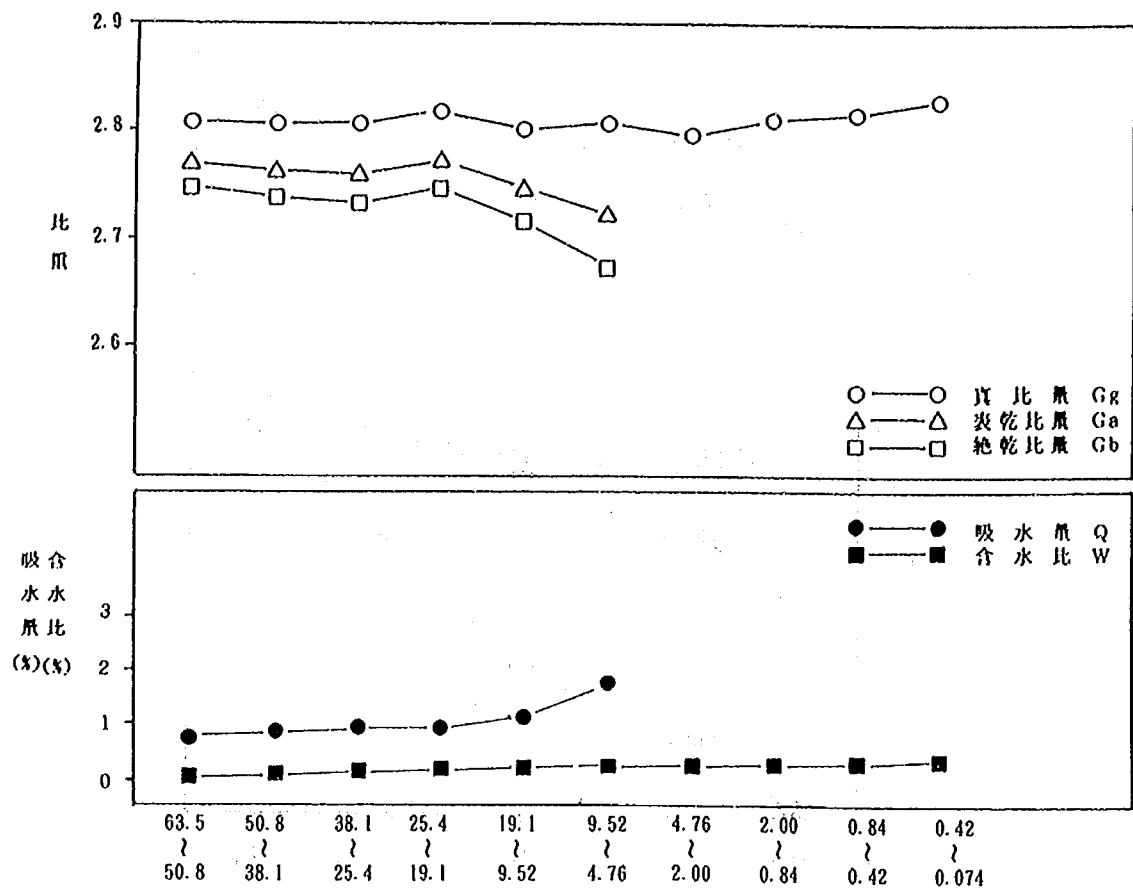


図-3.2(5) 粒径別の比重・含水比・吸水量 (MR材)

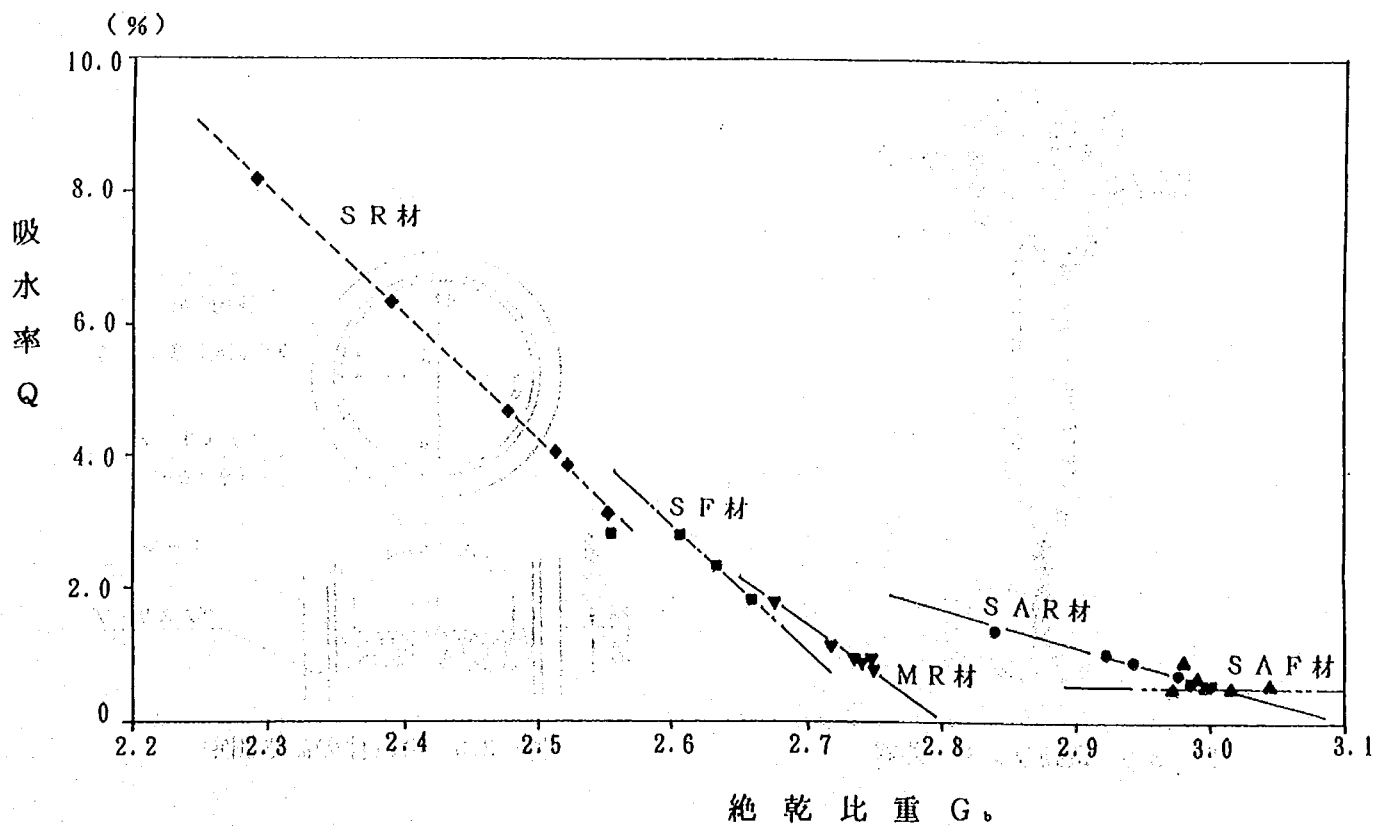


図-3.3 吸水量と絶対乾比重との関係

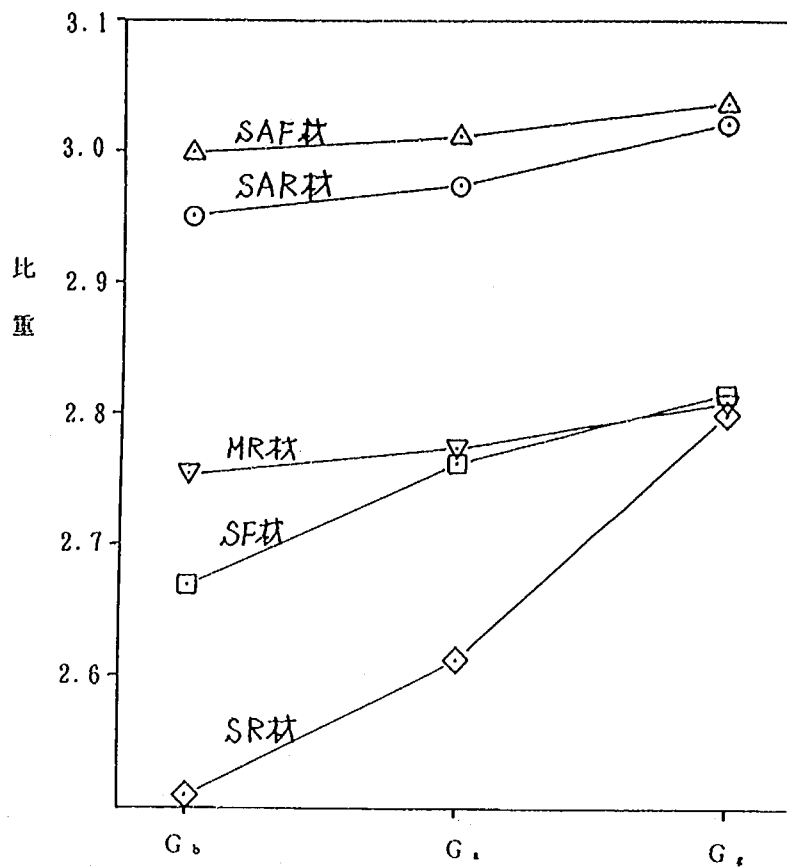


図-3.4 各材料の絶乾 (G_b)・表乾 (G_a)・真 (G_g) 比重

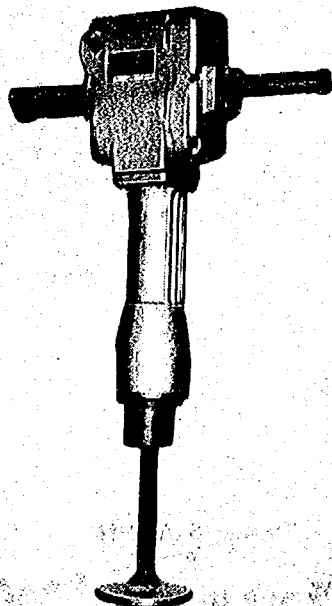


図-3.5 電動ランマー外観

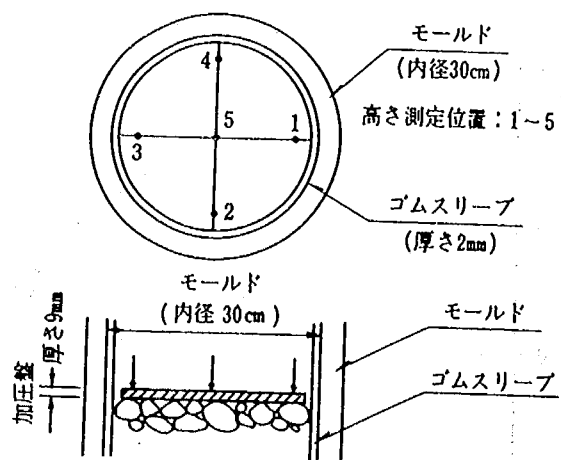


図-3.6 供試体の高さ測定

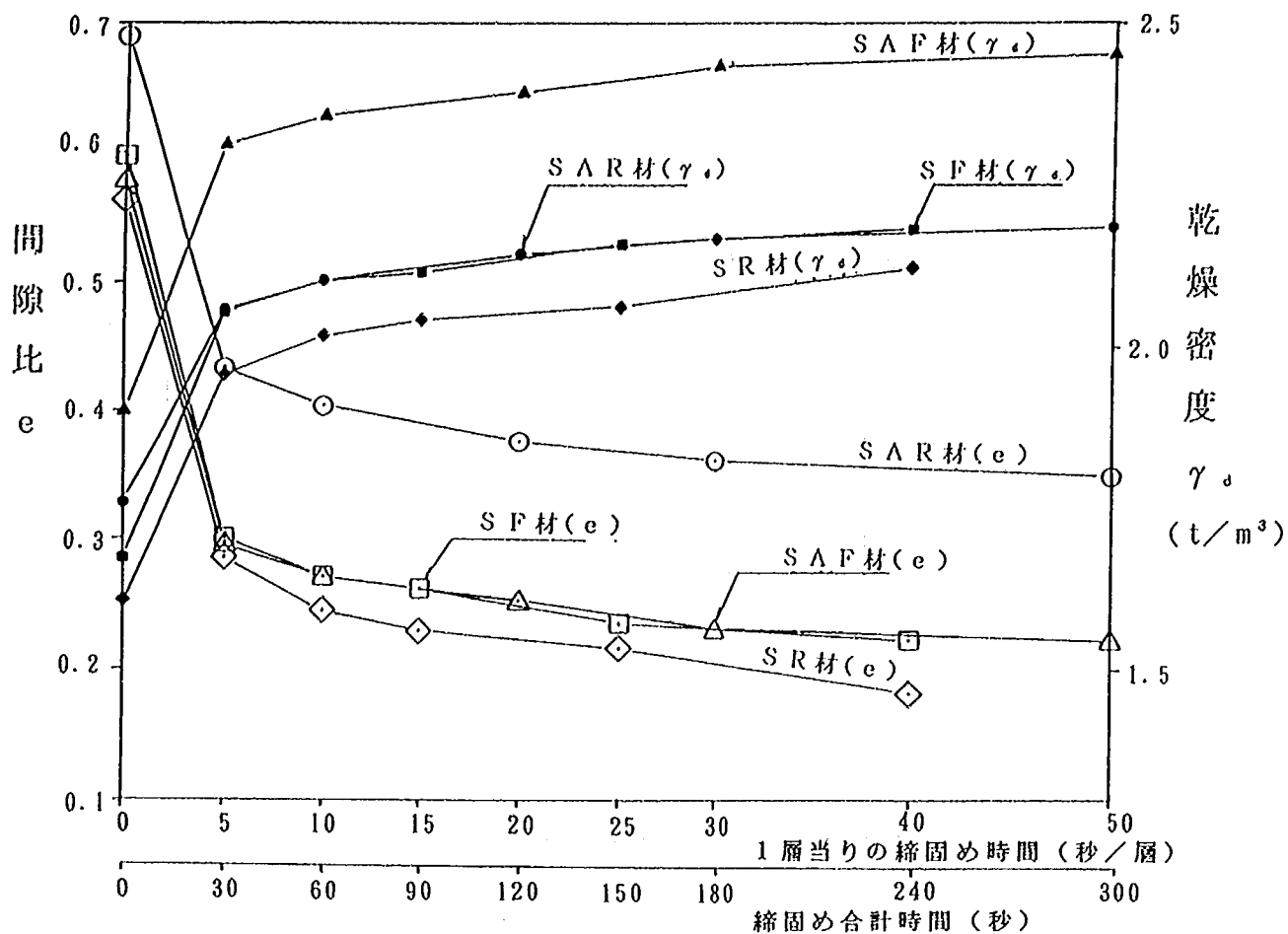


図-3.7 各材料の締固め試験結果

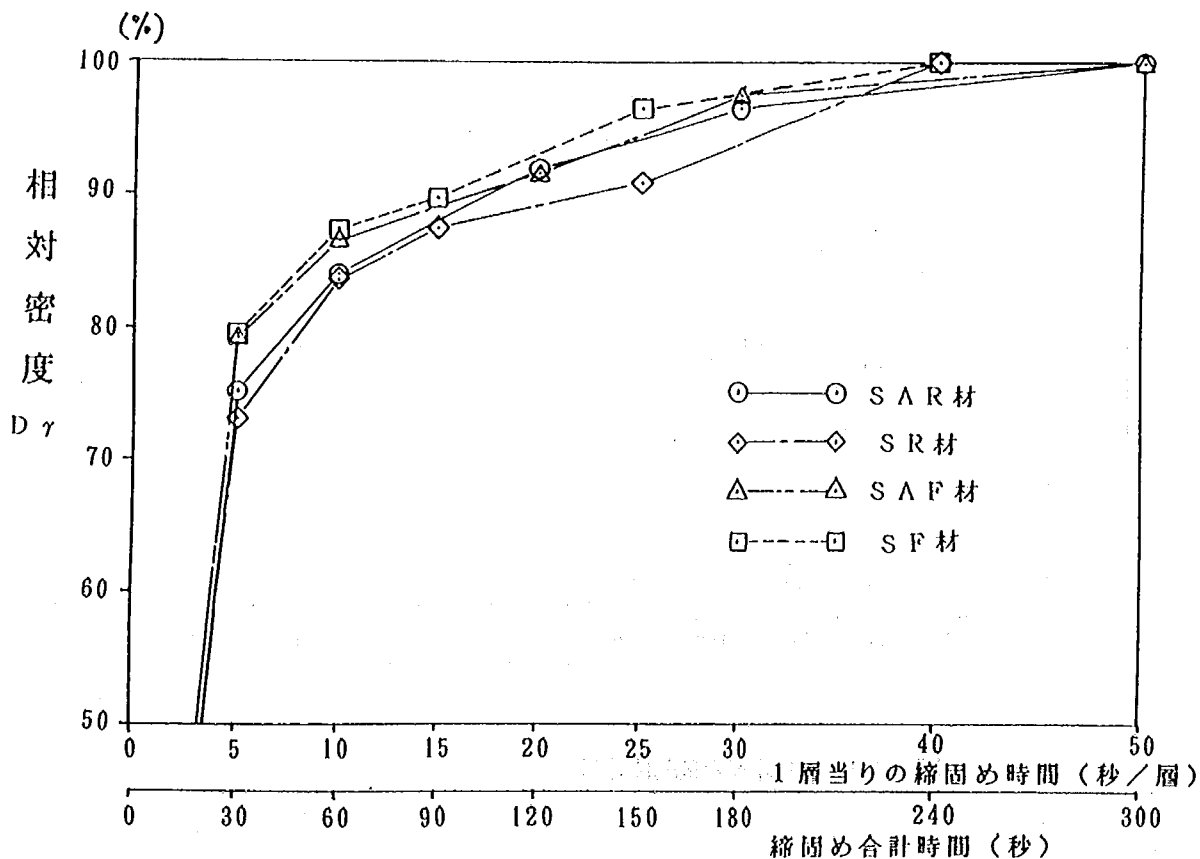


図-3.8 相対密度と締固め時間の関係

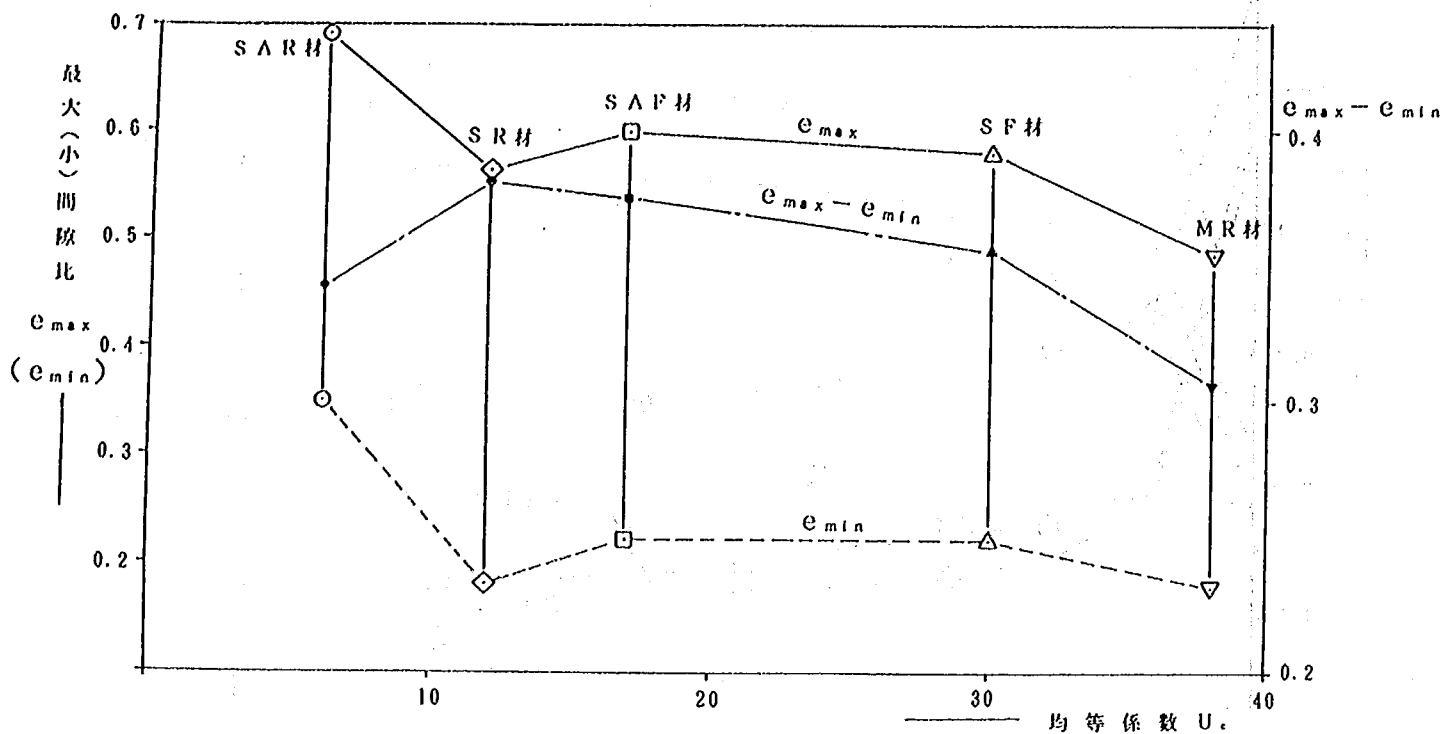


図-3.9 e_{max} , e_{min} , $e_{max} - e_{min}$ と U_c との関係

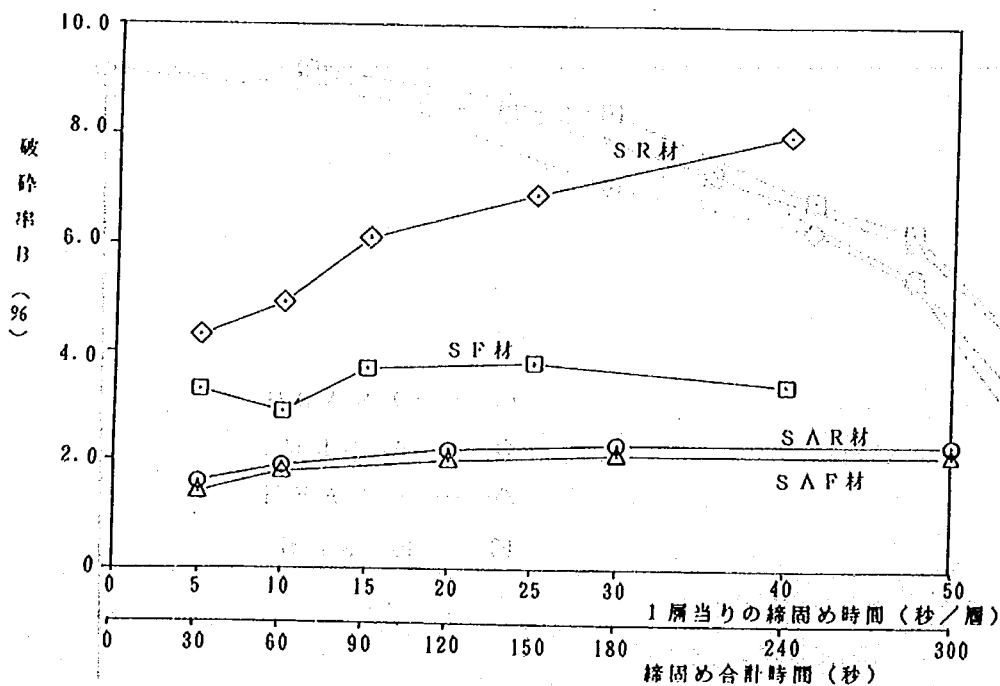


図-3.10 破碎率と締固め試験

$$G = \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$$

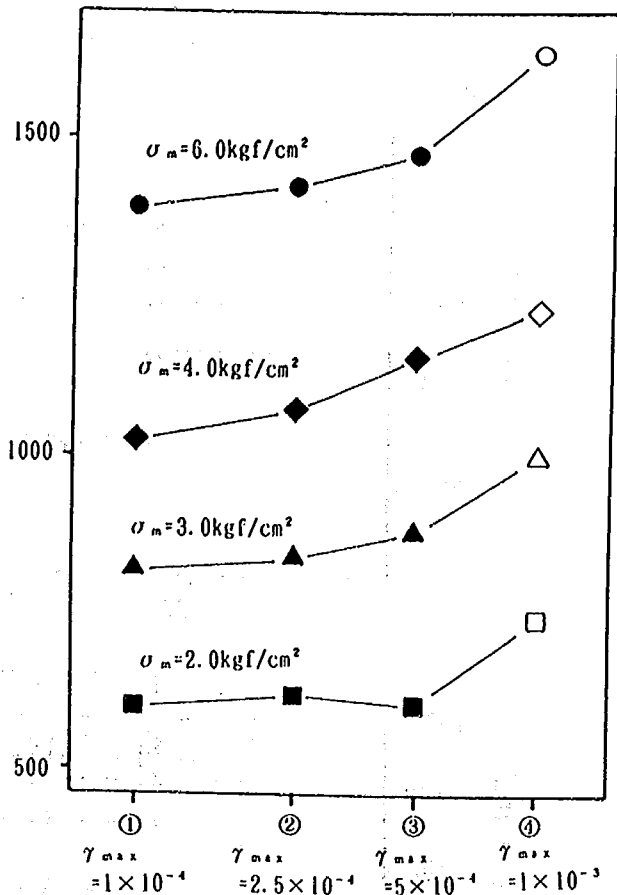


図-3.11 ひずみ履歴の影響

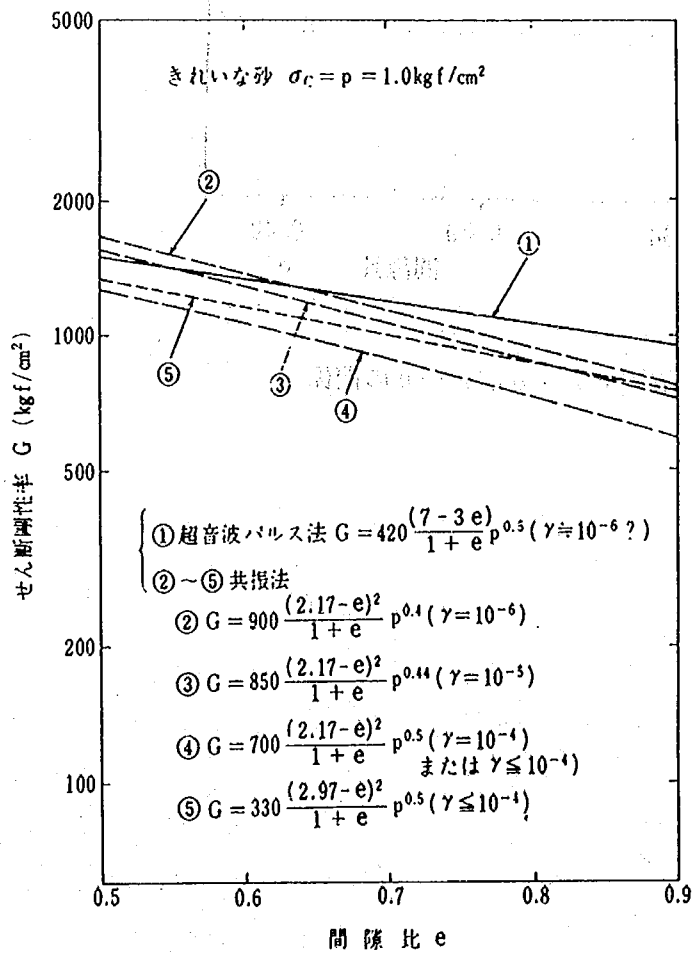


図-3.12 きれいな砂でのGとeとの関係 (龍岡ら²⁴⁾による)

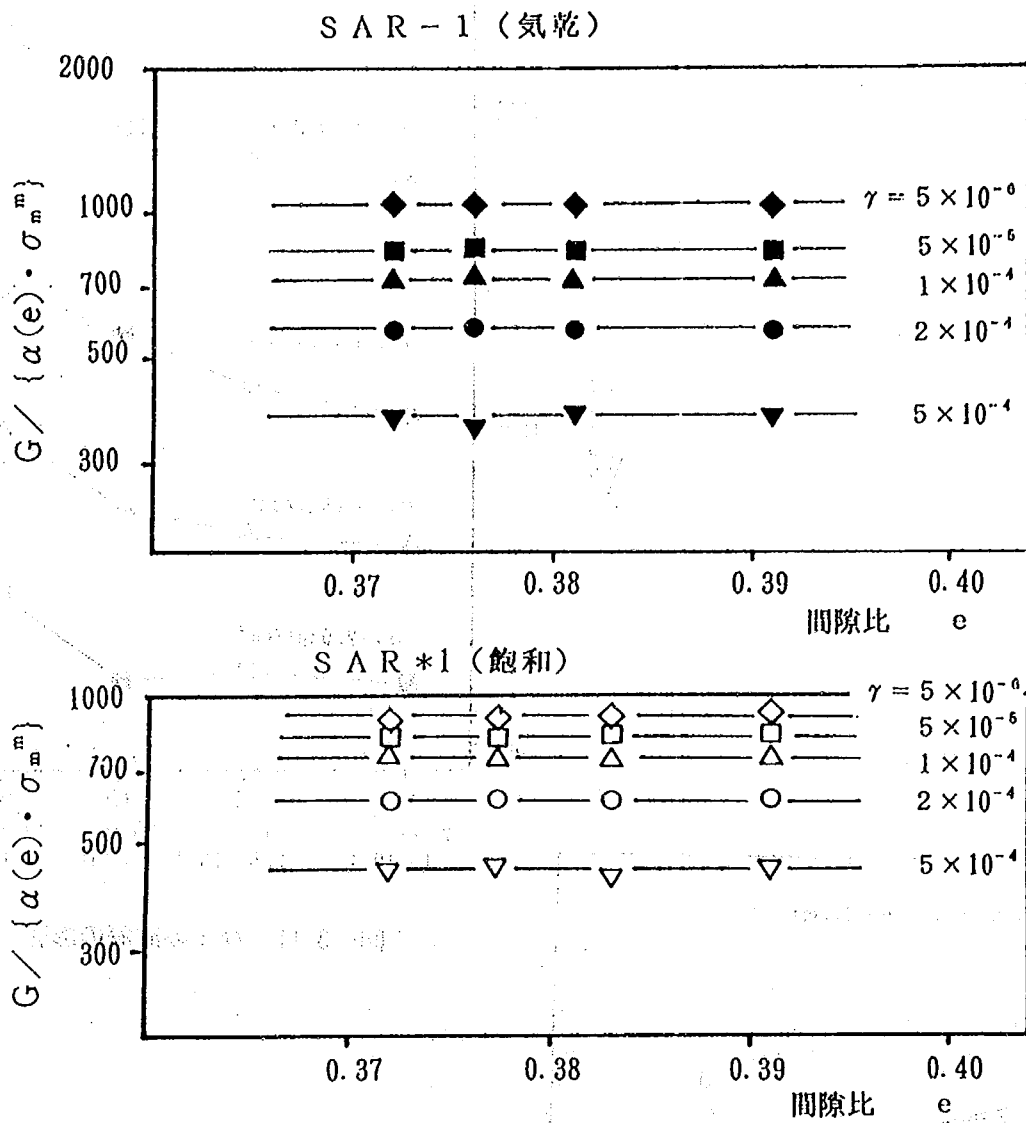


図3. 13 $G / \{\alpha(e) \cdot \sigma_m\} \sim e$ の関係

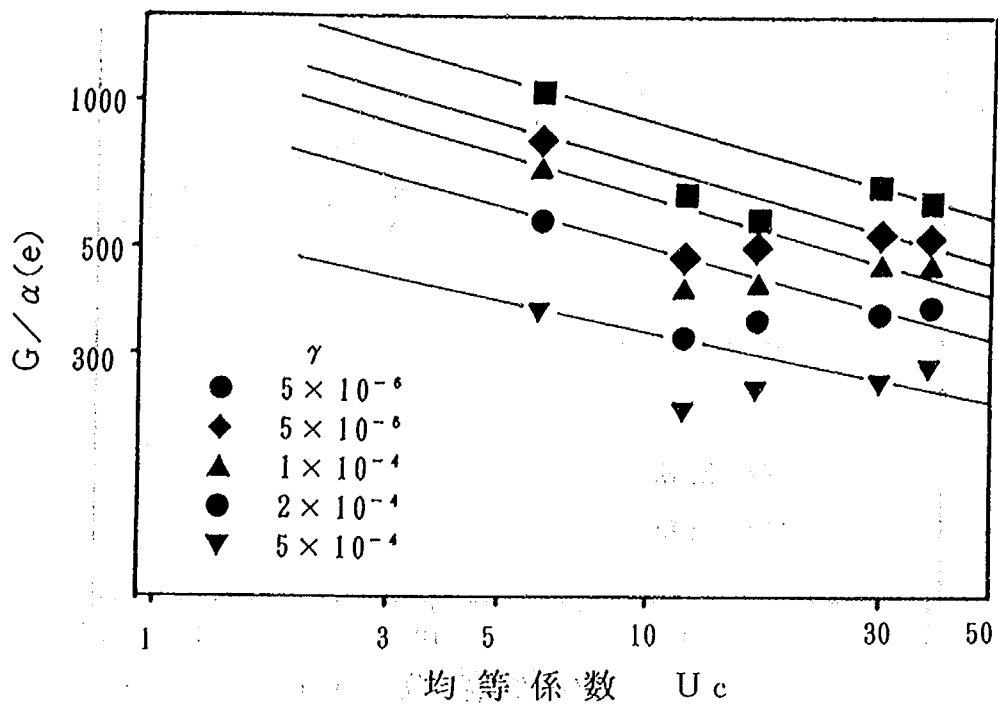


図-3.14(1) $G/\alpha(e) \sim U_c$ の関係 (気乾材料)

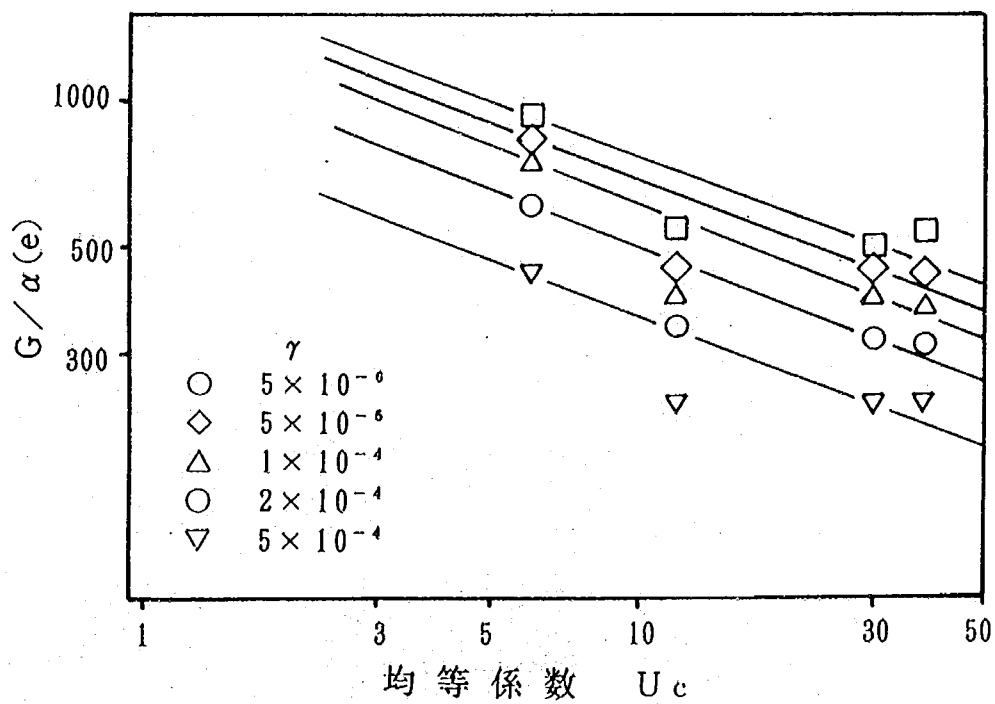


図-3.14(2) $G/\alpha(e) \sim U_c$ の関係 (飽和材料)

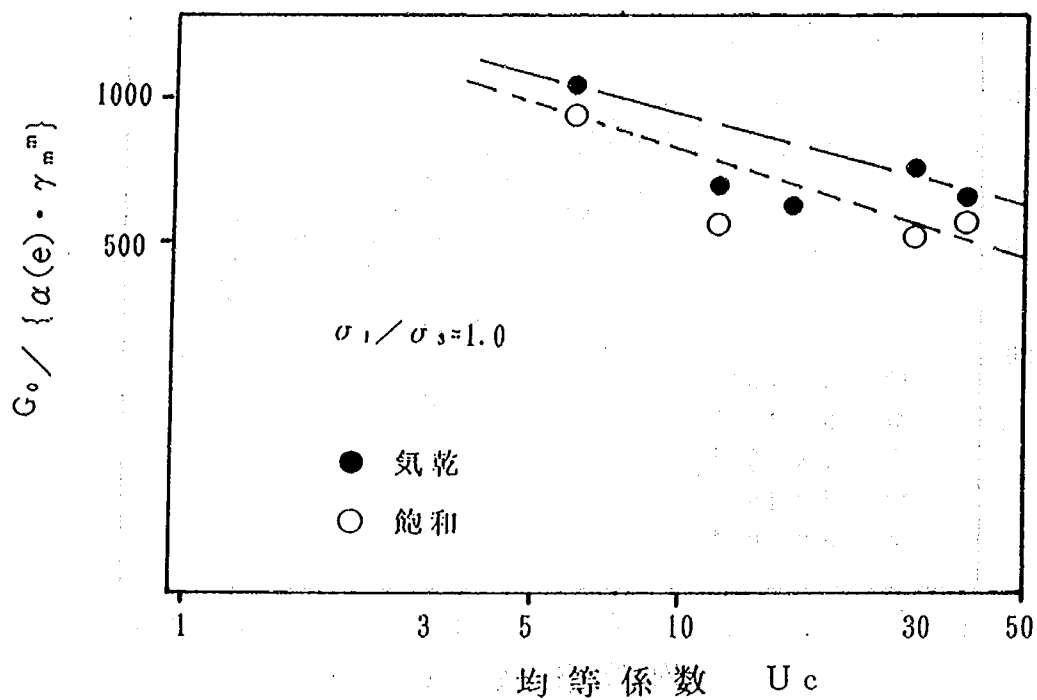


図-3.15 $G / \{\alpha(e) \sim \alpha_m\} \sim U_c$ の関係

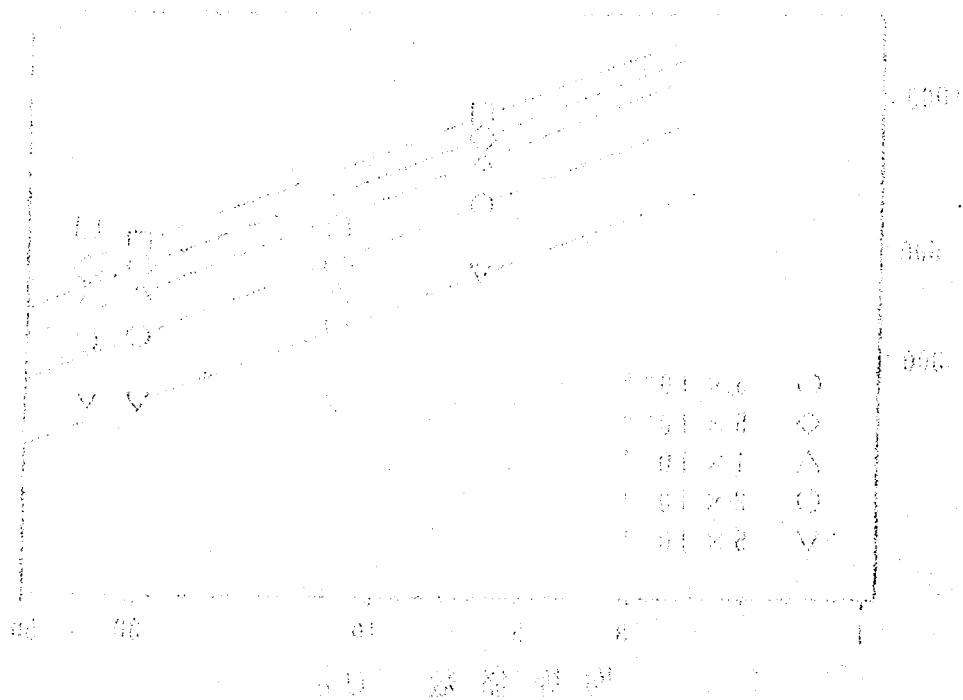


図-3.16 $G_0 / \{\alpha(e) \cdot \gamma_m\} \sim U_c$ の関係 (各々の α の値による)

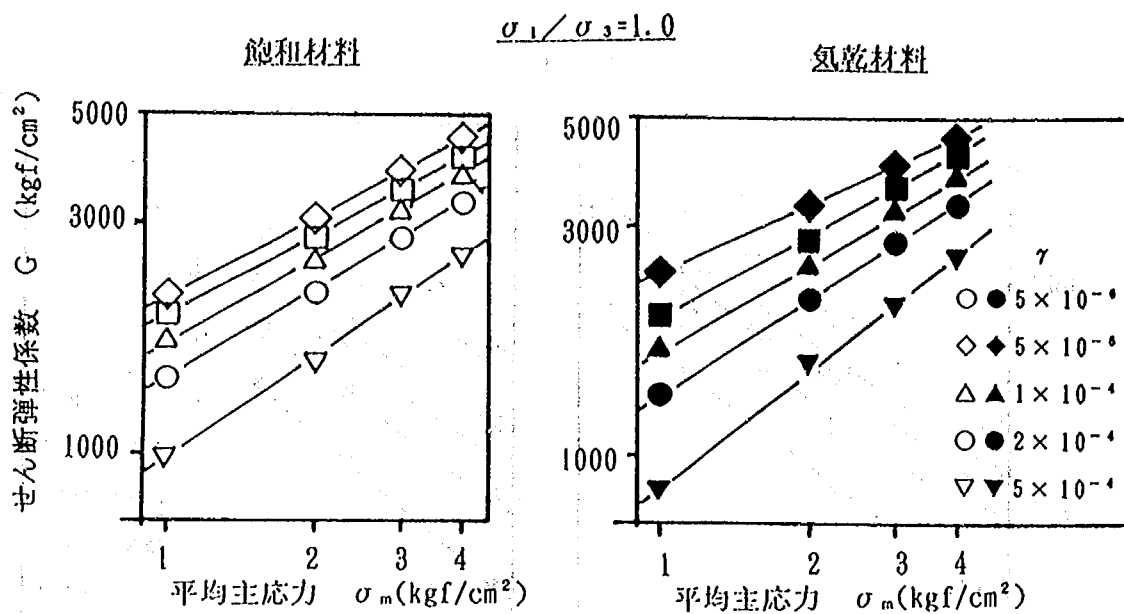


図-3.16(1) $G \sim \sigma_m$ の関係 (SAR材)

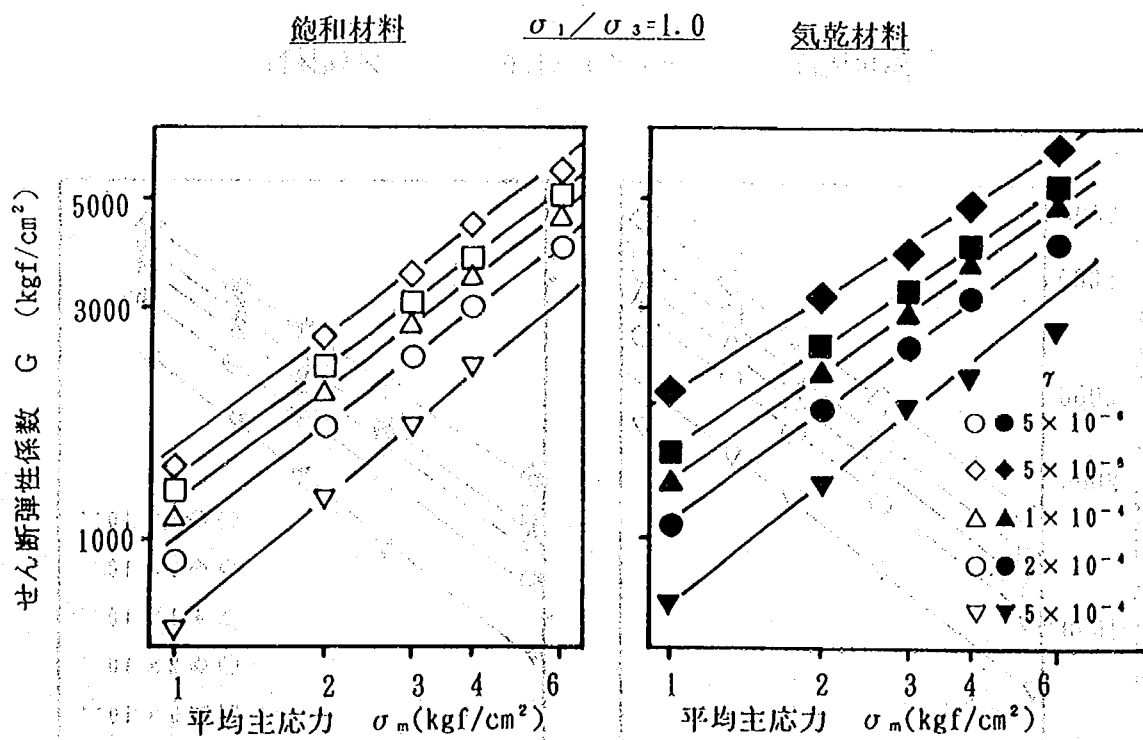


図-3.16(2) $G \sim \sigma_m$ の関係 (SAF材)

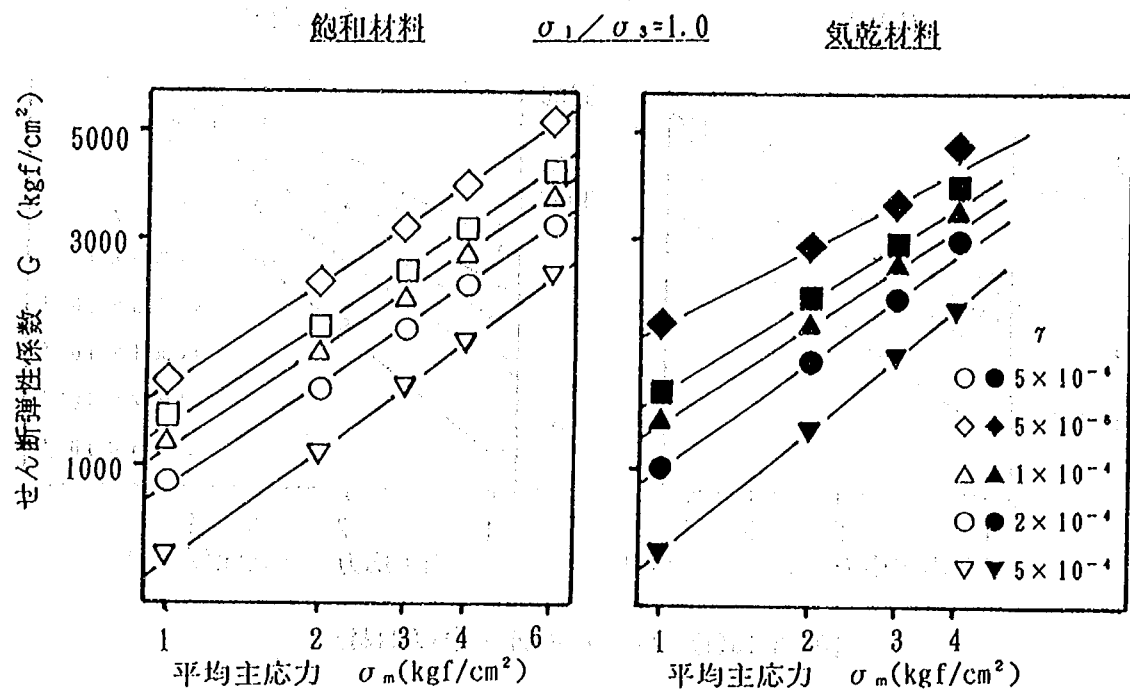


図-3.16(3) $G \sim \sigma_m$ の関係 (SR材)

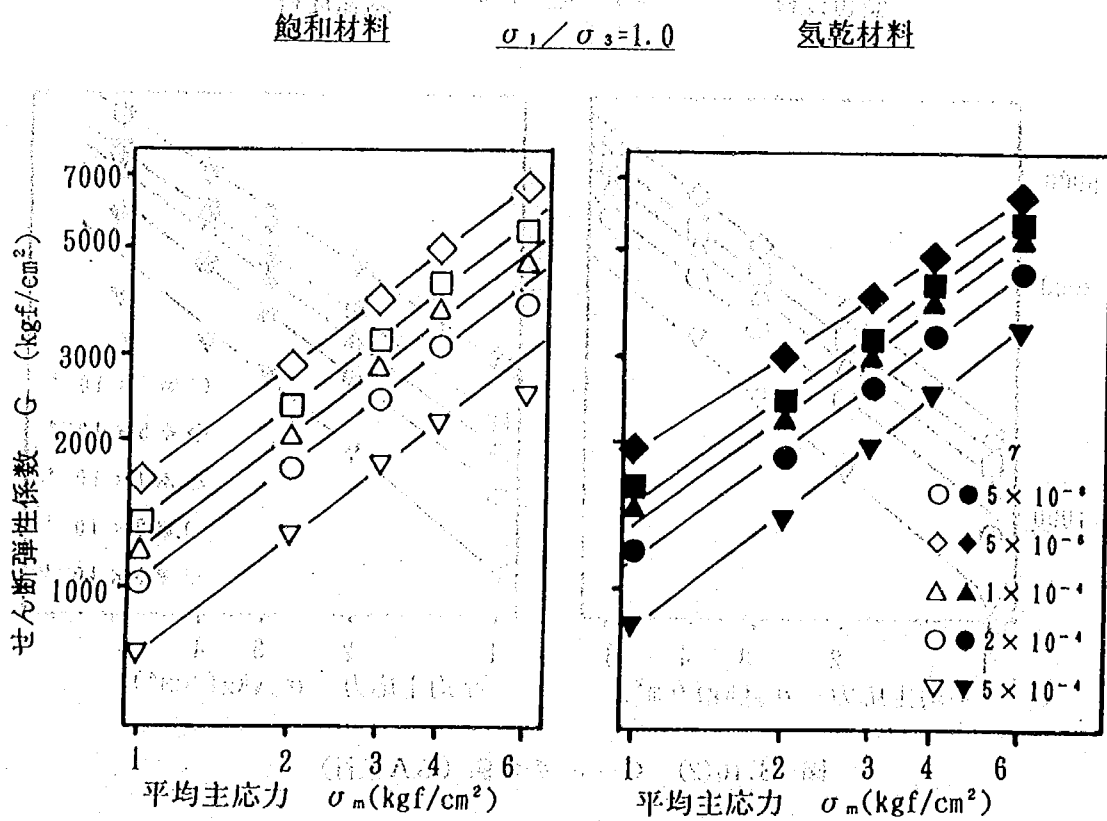
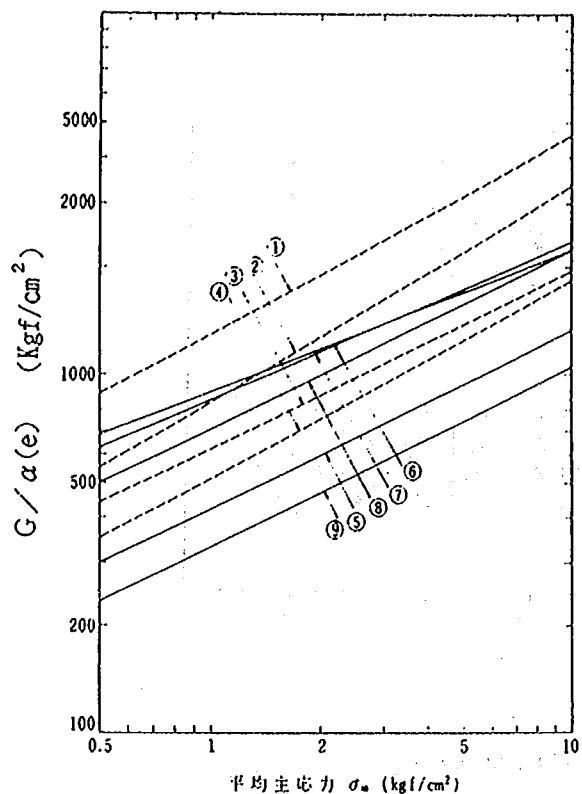


図-3.16(4) $G \sim \sigma_m$ の関係 (MR材)



- 粗粒材(破線)
- ① $G_0 = 1300 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.55}$ (国生地, 砕石材 $d_{max}=64\text{mm}$)^{15), 26)}
($\gamma=10^{-6}$, 動的三軸)
 - ② $G_0 = 840 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.6}$ (国生地, 円礫材 $d_{max}=76\text{mm}$)^{15), 26)}
($\gamma=10^{-6}$, 動的三軸)
 - ③ $G_0 = 538 \frac{(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma'_m)^{0.5}$ (渡辺他, 砕石 $d_{max}=9.52\text{mm}$)¹⁸⁾
($\gamma=10^{-6}$, 動的三軸)
 - ④ $G_0 = 440 \frac{(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma'_m)^{0.55}$ (馬場, 渡辺, 砕石 $d_{max}=9.52\text{mm}$)¹⁷⁾
(微小ひずみ, 動的三軸)
- きれいな砂(実線)
- ⑤ $G_0 = 420 \frac{7-3e}{1+e} (\sigma'_c)^{0.5}$ (柴田他, きれいな砂3種)²³⁾
($\gamma \leq 10^{-6}$, 超音波パルス法)
 - ⑥ $G_0 = 900 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.4}$ (岩崎, 龍岡他, 細粒分なく U_c 小の)^{20), 27)}
(きれいな砂 $\gamma=10^{-6}$, 共振法)
 - ⑦ $G = 850 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.44}$ (岩崎, 龍岡他, その他同上)^{20), 27)}
($\gamma=10^{-5}$)
 - ⑧ $G = 700 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.5}$ (岩崎, 龍岡他, $\gamma=10^{-4}$, その他同上)^{19), 20)}
(Hardin & Richart, $\gamma \leq 10^{-4}$, 共振法)²⁷⁾
(粒子の丸いオタワ砂)
 - ⑨ $G = 330 \frac{(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.5}$ (Hardin & Richart, 粒子の角ばった)¹⁹⁾
(石英砕砂 $\gamma \leq 10^{-4}$, 共振法)
- σ'_c : 有効拘束圧 (kgf/cm²)
 σ'_m : 有効平均主応力 (kgf/cm²) ③④ $\sigma'_m = \frac{2\sigma'_c + 2\sigma'_c}{3} = 1.33\sigma'_c$ とした,

図-3.17 セン断弾性係数Gまたは G_0 を与える各式と $G/\alpha(e) \sim \sigma_m$ の関係

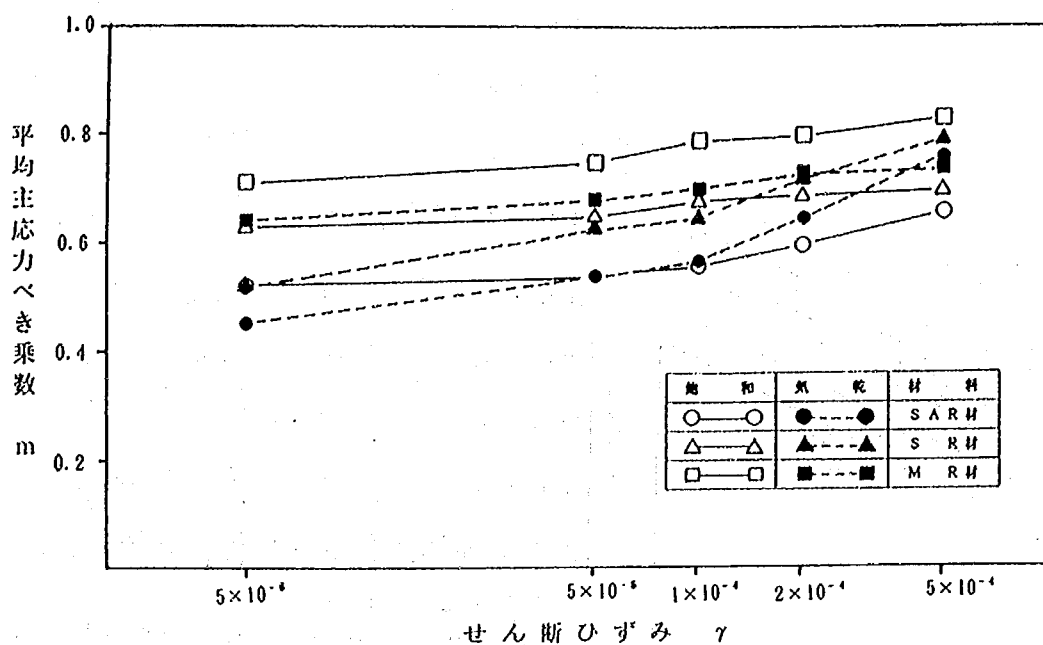


図-3.18(1) $m \sim \gamma$ の関係 (ロック材)

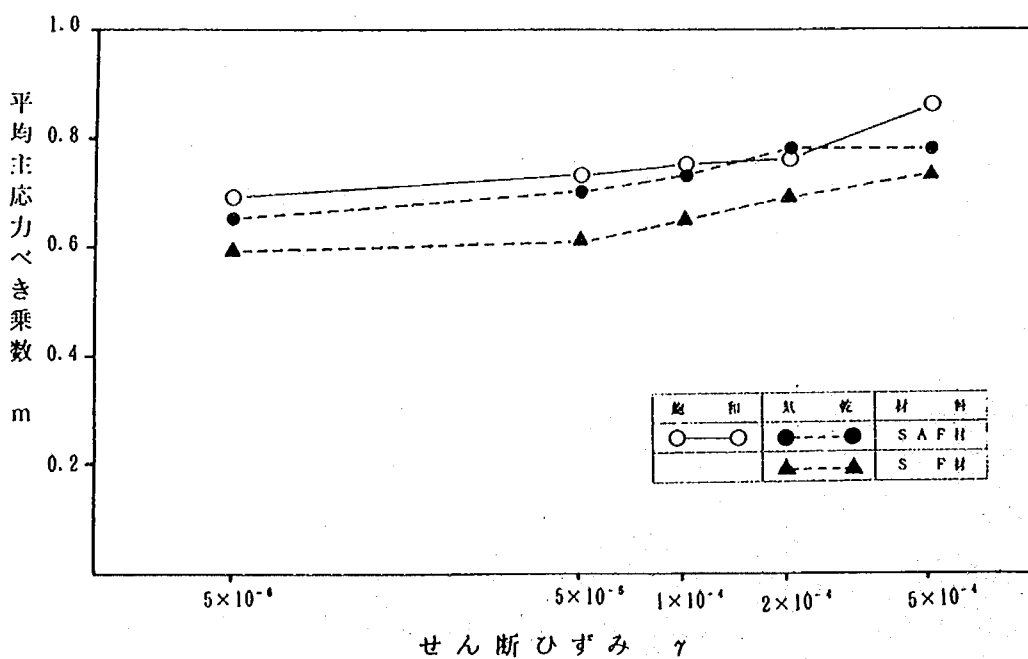


図-3.18(2) $m \sim \gamma$ の関係 (フィルター材)

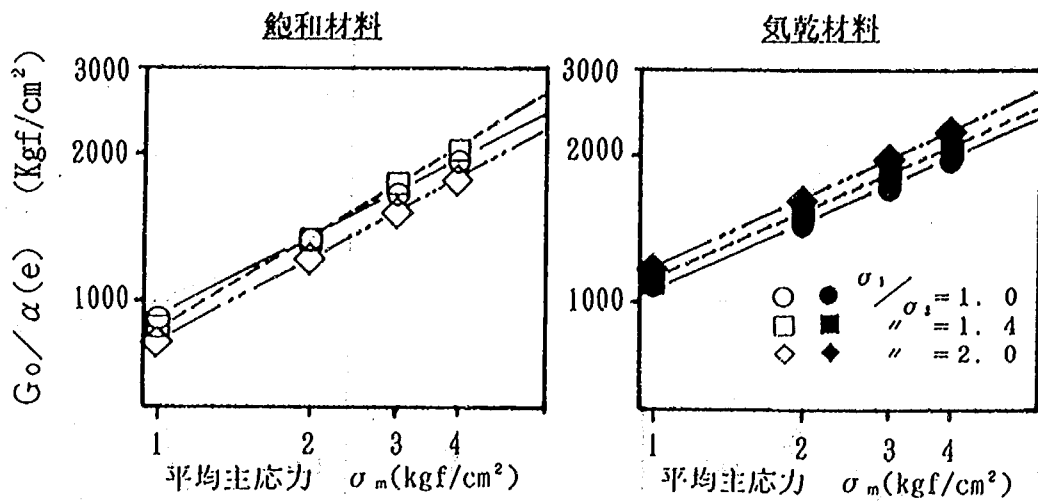


図-3.19(1) $G_0/\alpha (e) \sim \sigma_m$ の關係 (SAR材)

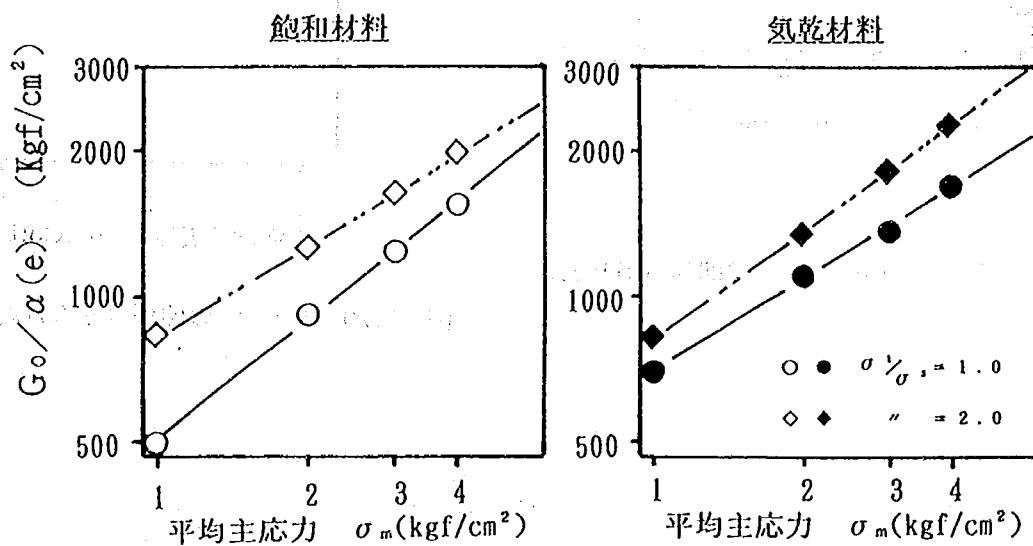


図-3.19(2) $G_0/\alpha (e) \sim \sigma_m$ の關係 (SAF材)

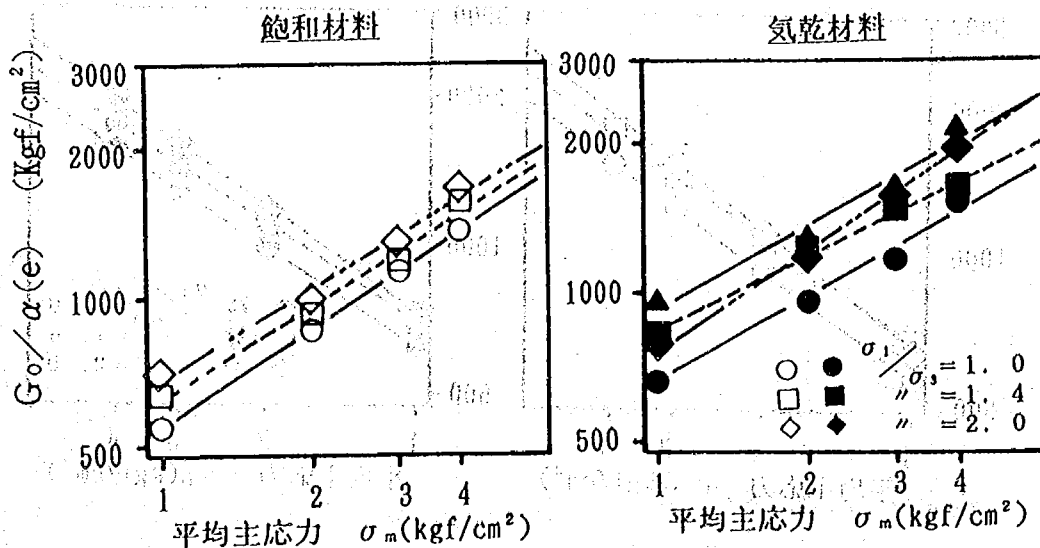


図-3.19(3) $G_0/\alpha (e) \sim \sigma_m$ の關係 (SR材)

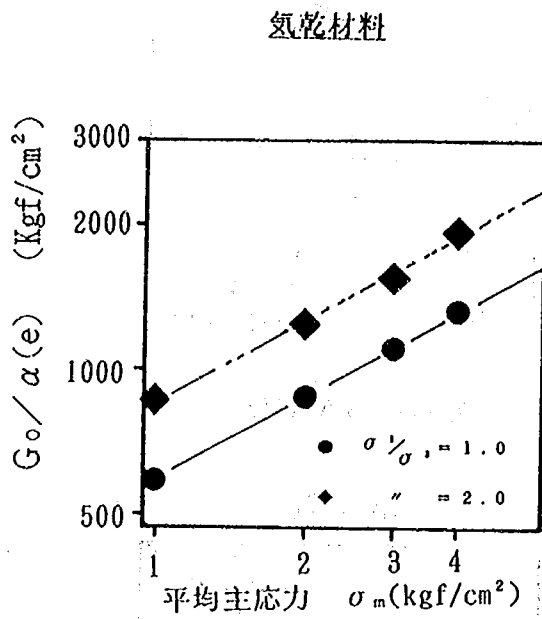


図-3.19(4) G_0/α (e) $\sim \sigma_m$ の関係 (SF材)

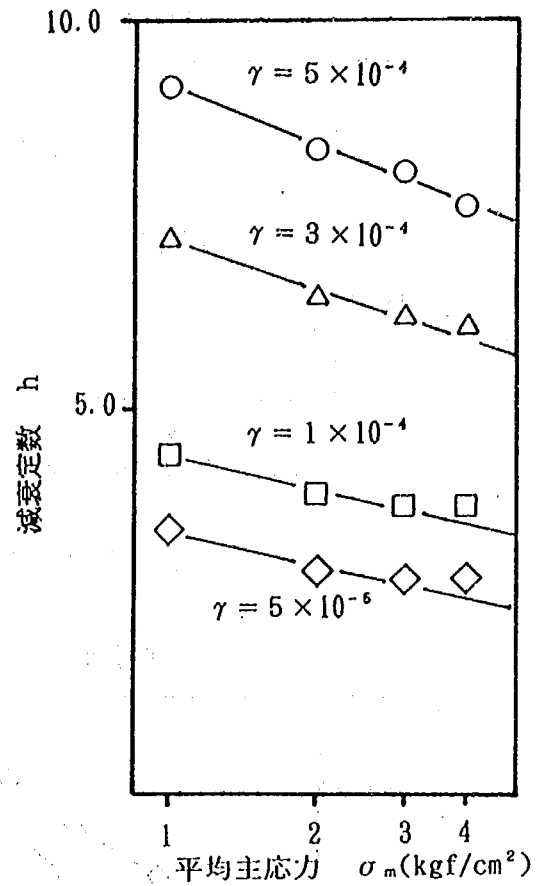


図-3.20 $h \sim \sigma_m$ の関係 (SAR材 飽和)

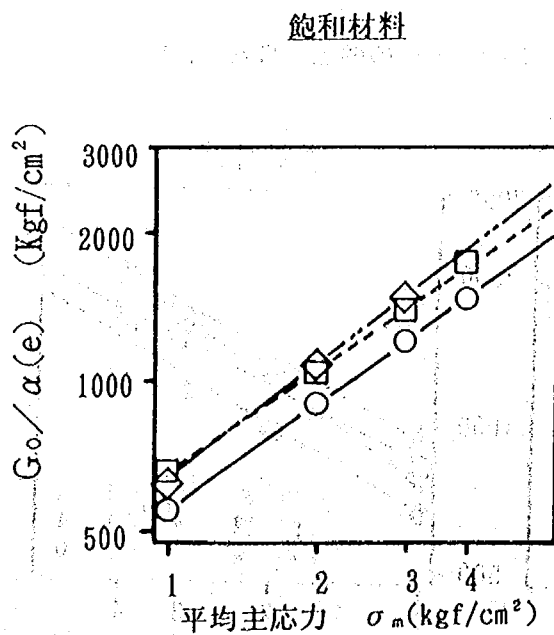
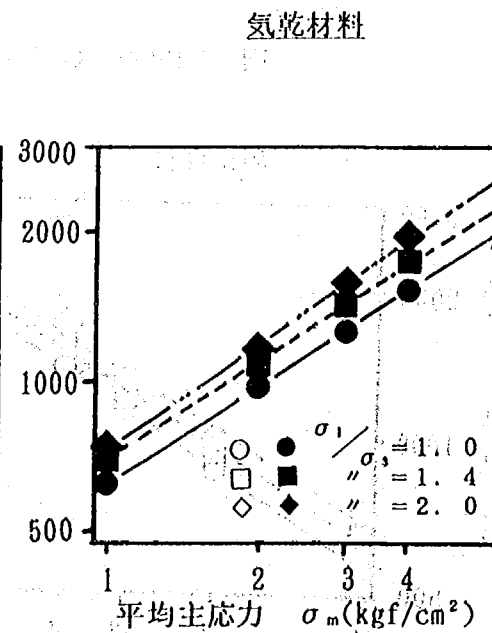


図-3.19(5) G_0/α (e) $\sim \sigma_m$ の関係 (MR材)



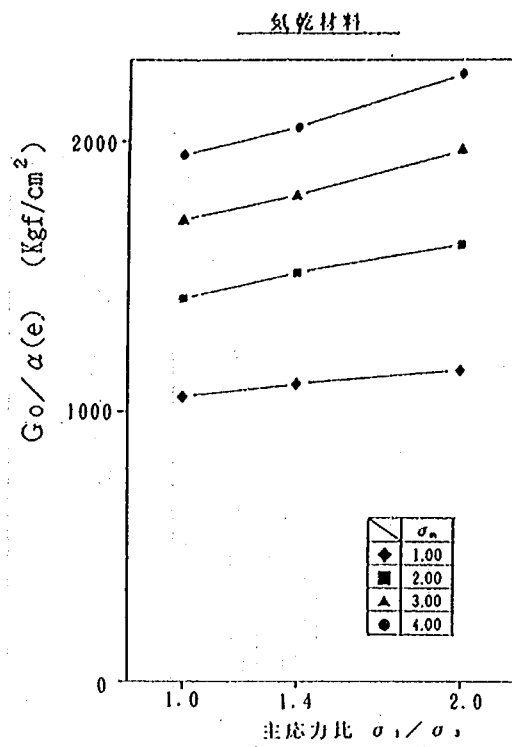
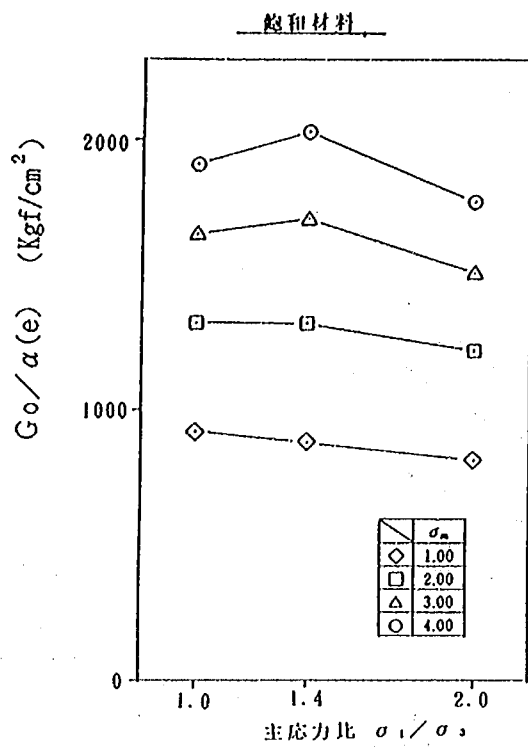


図-3.21(1) $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SAR材)

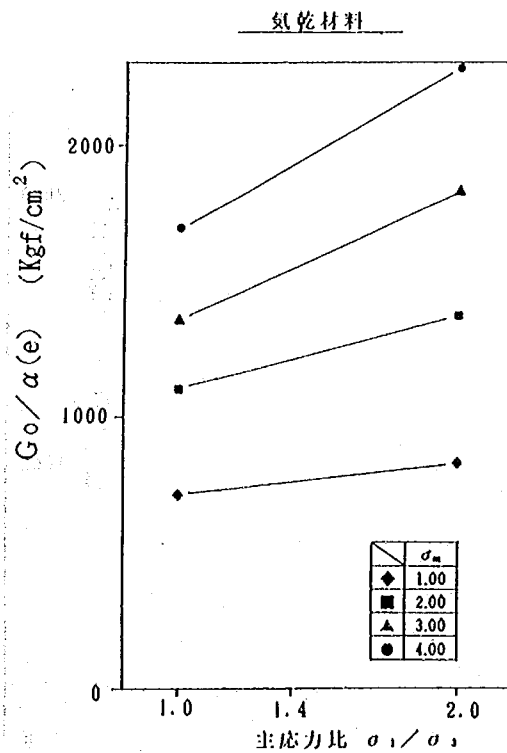
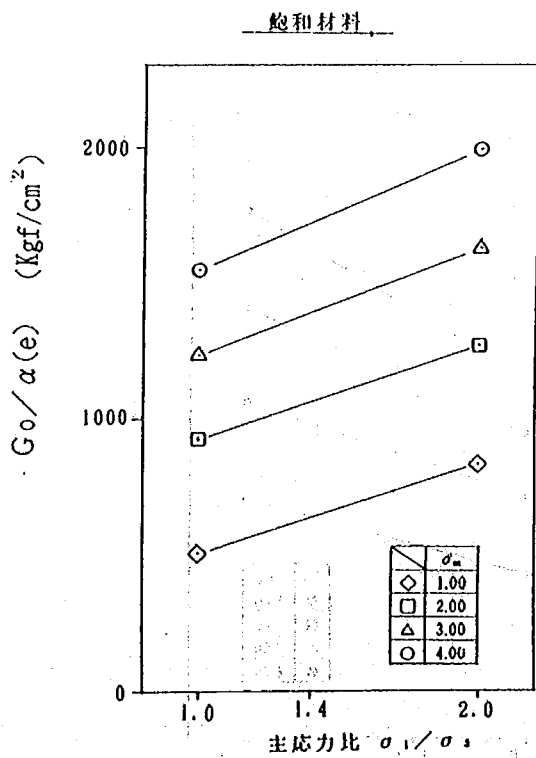
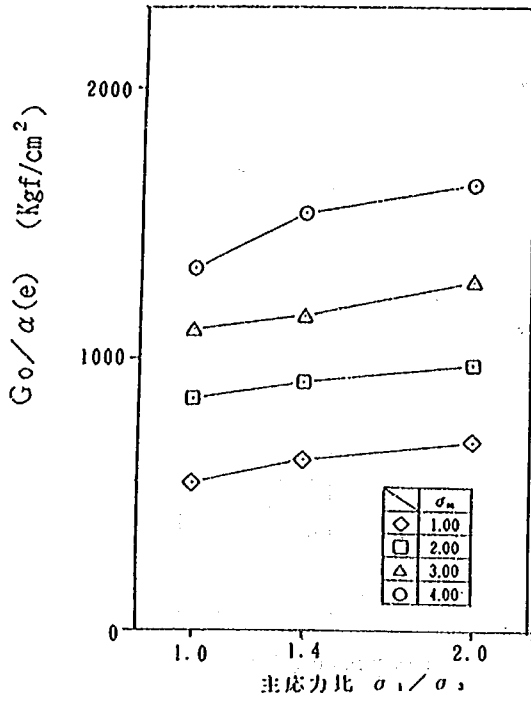


図-3.21(2) $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SAF材)

飽和材料



気乾材料

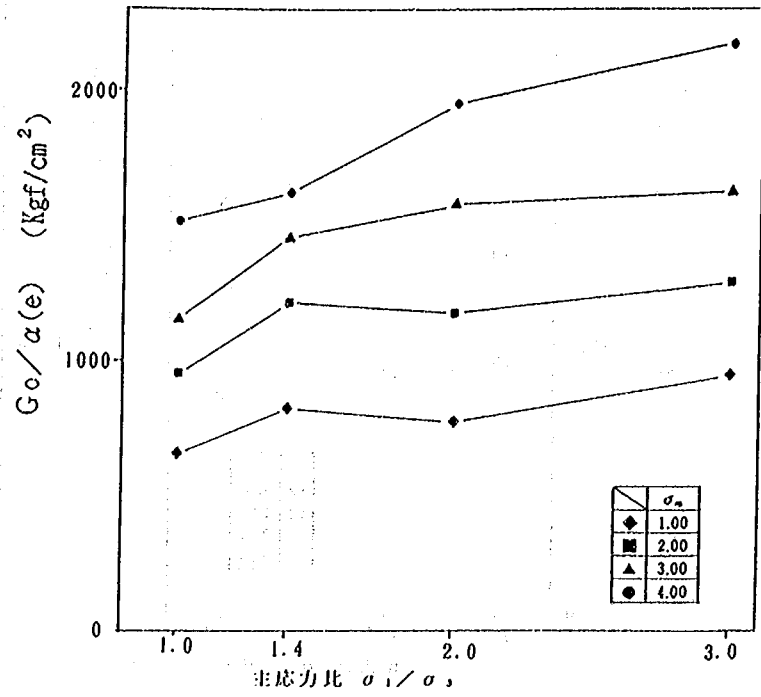


図-3.21(3) $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SR材)

気乾材料

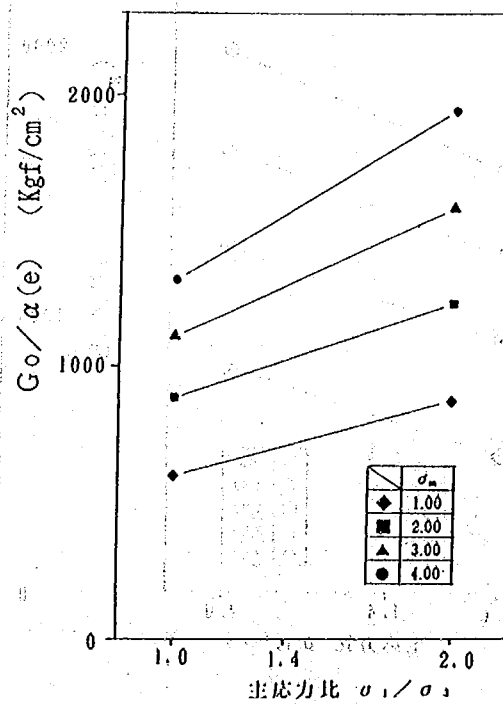


図-3.21(4) $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SF材)

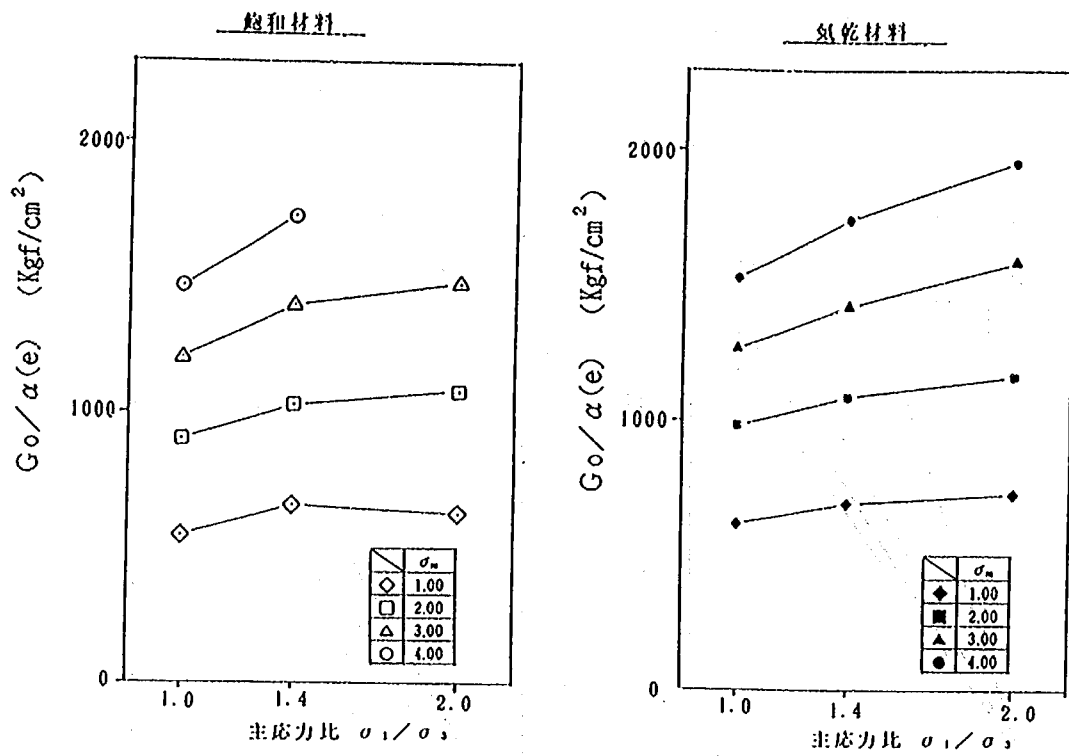


図-3.21(5) $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (MR材)

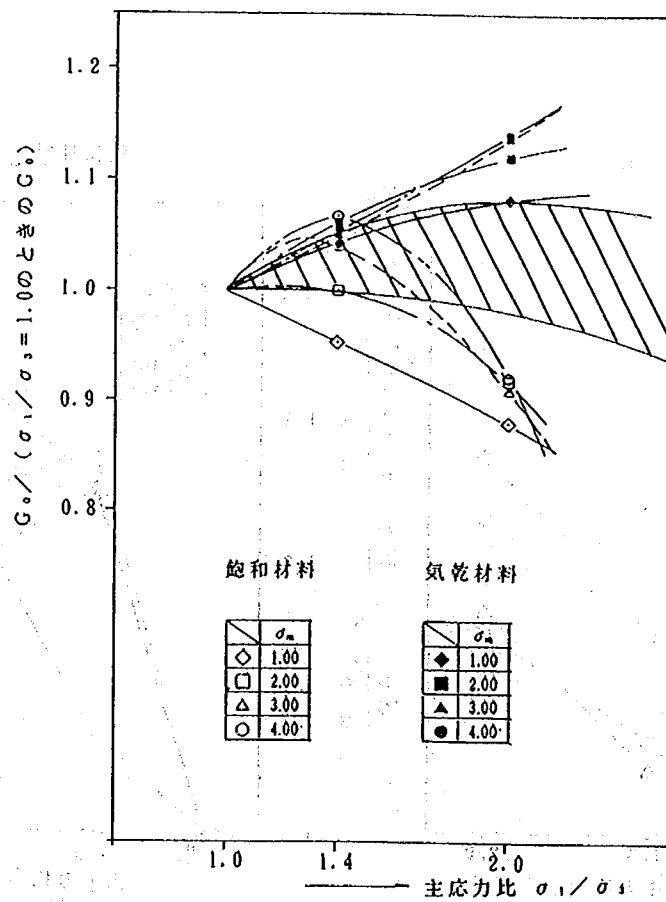


図-3.22 $G_0/G_0(\sigma_1/\sigma_3=1.0) \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SAR材)

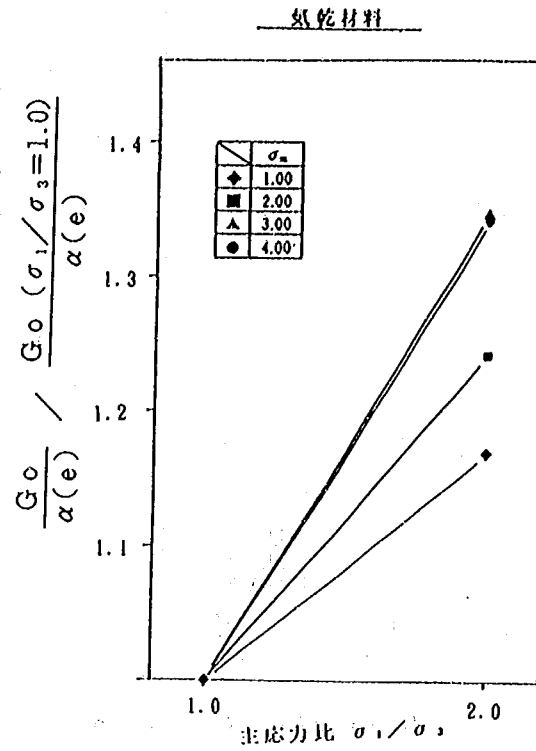
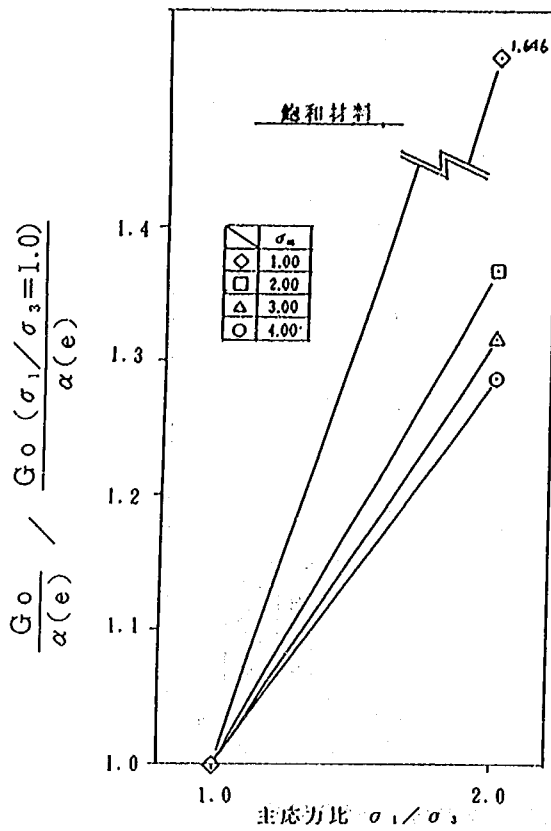


図-3.23(1) $\frac{G_o}{\alpha(e)} / \frac{G_o (\sigma_1/\sigma_3=1.0)}{\alpha(e)} \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SAF材)

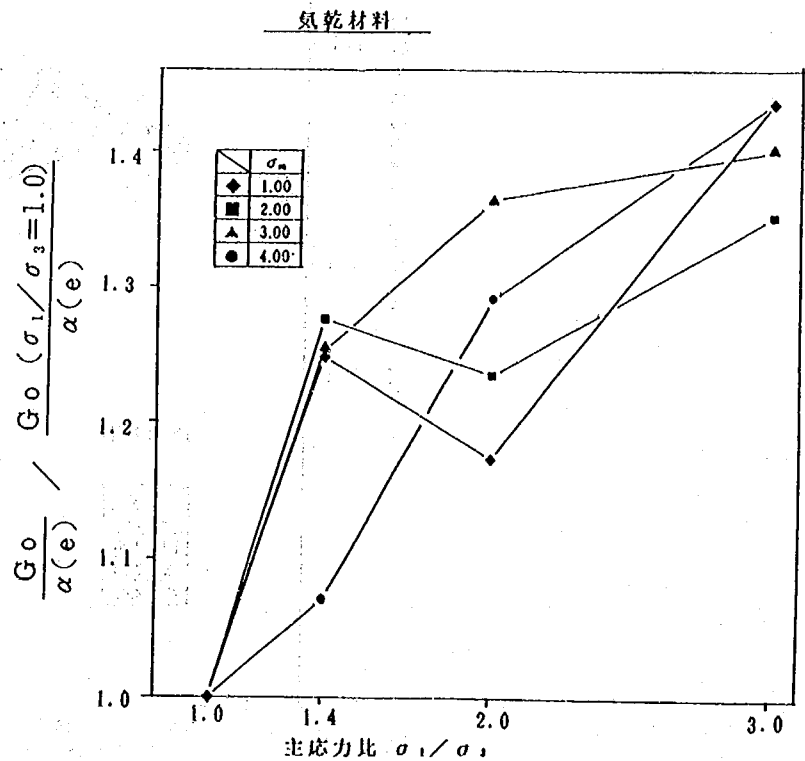
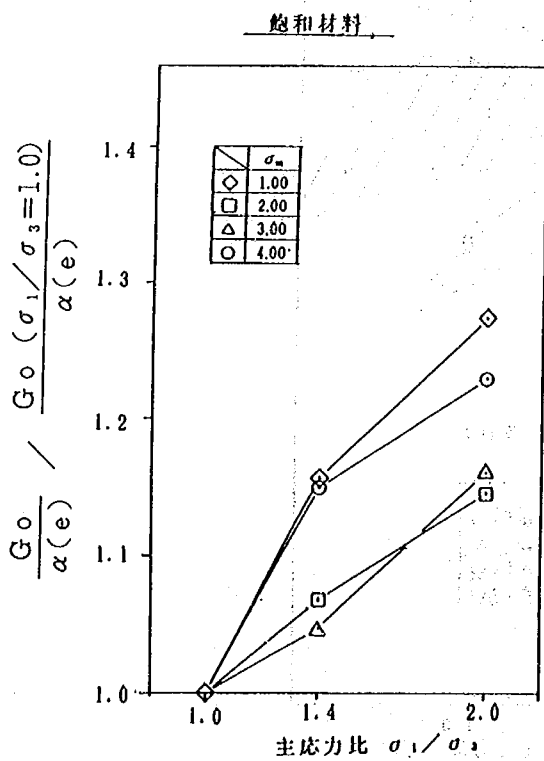


図-3.23(2) $\frac{G_o}{\alpha(e)} / \frac{G_o (\sigma_1/\sigma_3=1.0)}{\alpha(e)} \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SR材)

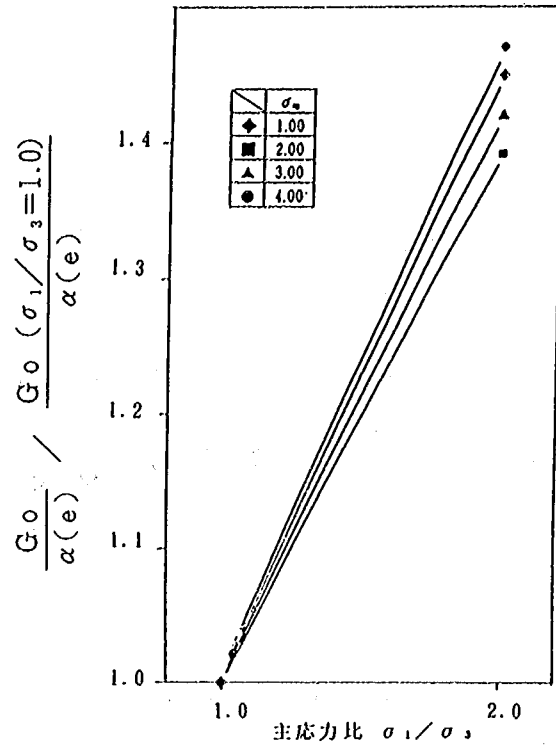


図-3.23(3) $\frac{G_0}{\alpha(e)} / \frac{G_0(\sigma_1/\sigma_3=1.0)}{\alpha(e)} \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (SF材)

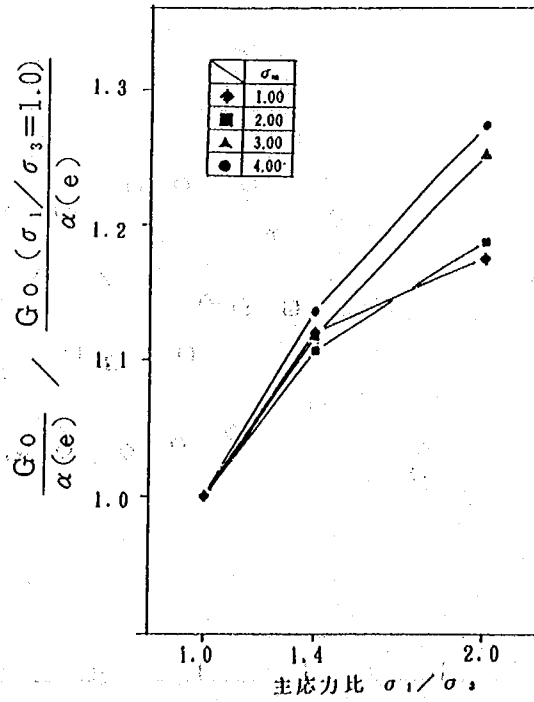
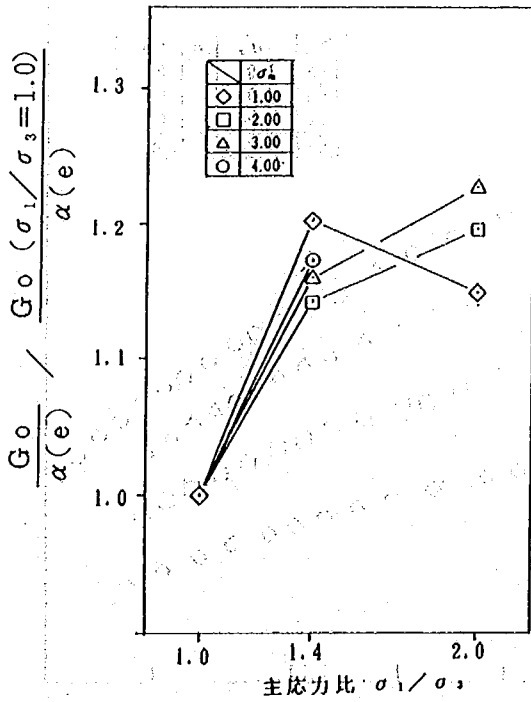


図-3.23(4) $\frac{G_0}{\alpha(e)} / \frac{G_0(\sigma_1/\sigma_3=1.0)}{\alpha(e)} \sim \sigma_1/\sigma_3$ の関係 (MR材)

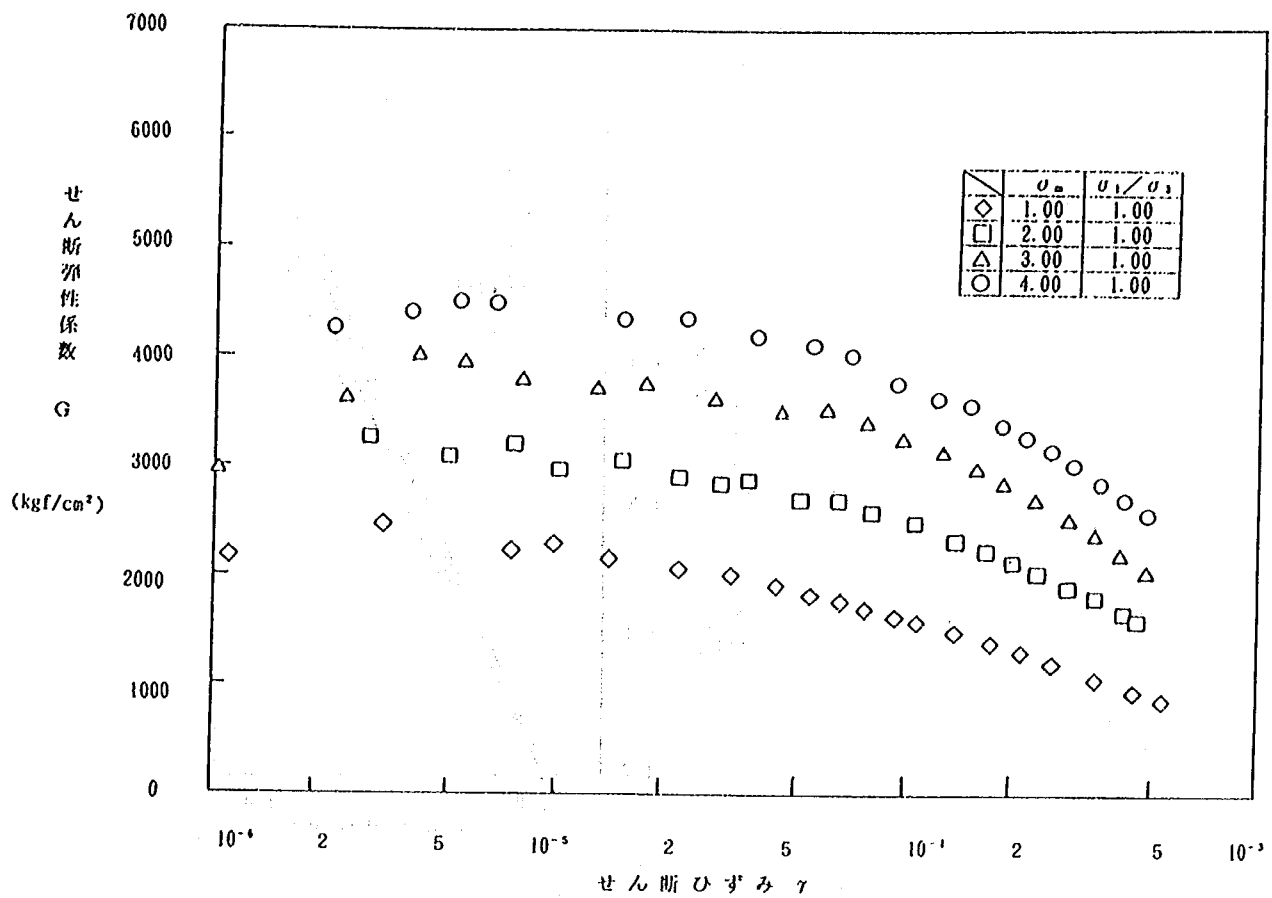


図-3.24(1) せん断弾性係数～せん断ひずみ (SAR材 気乾)

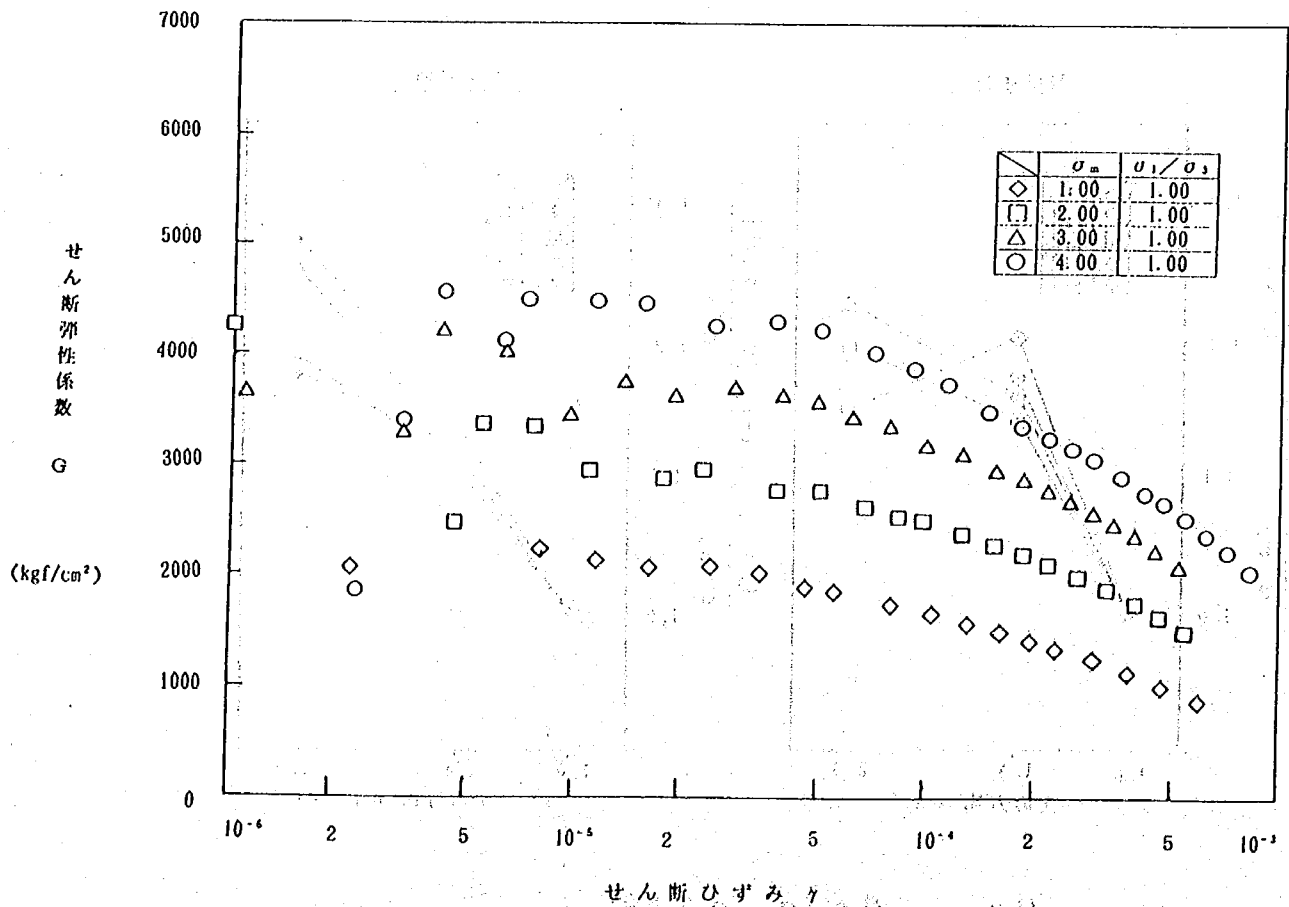


図-3.24(2) せん断弾性係数～せん断ひずみ (SAR材 飽和)

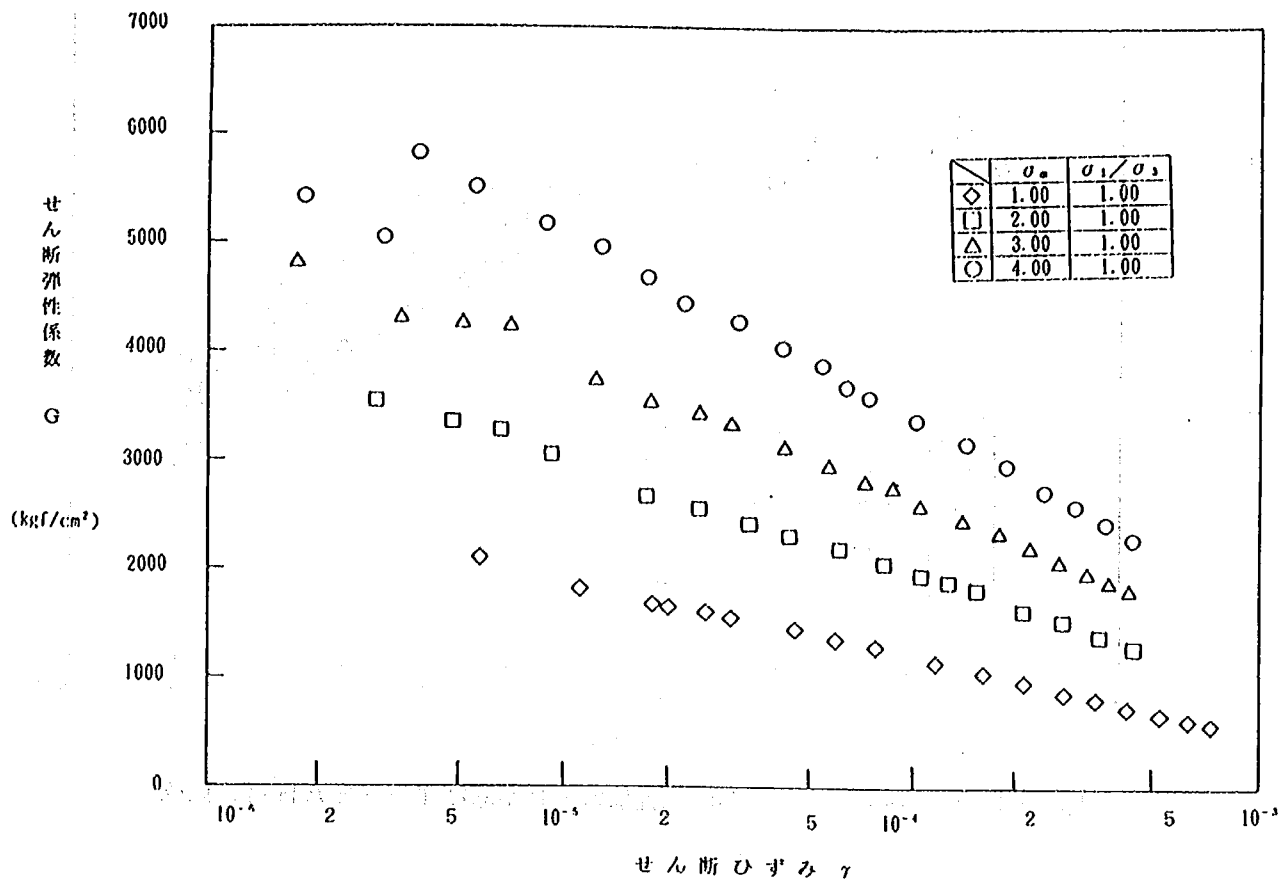


図-3.24(3) せん断弾性係数～せん断ひずみ (SR材 気乾)

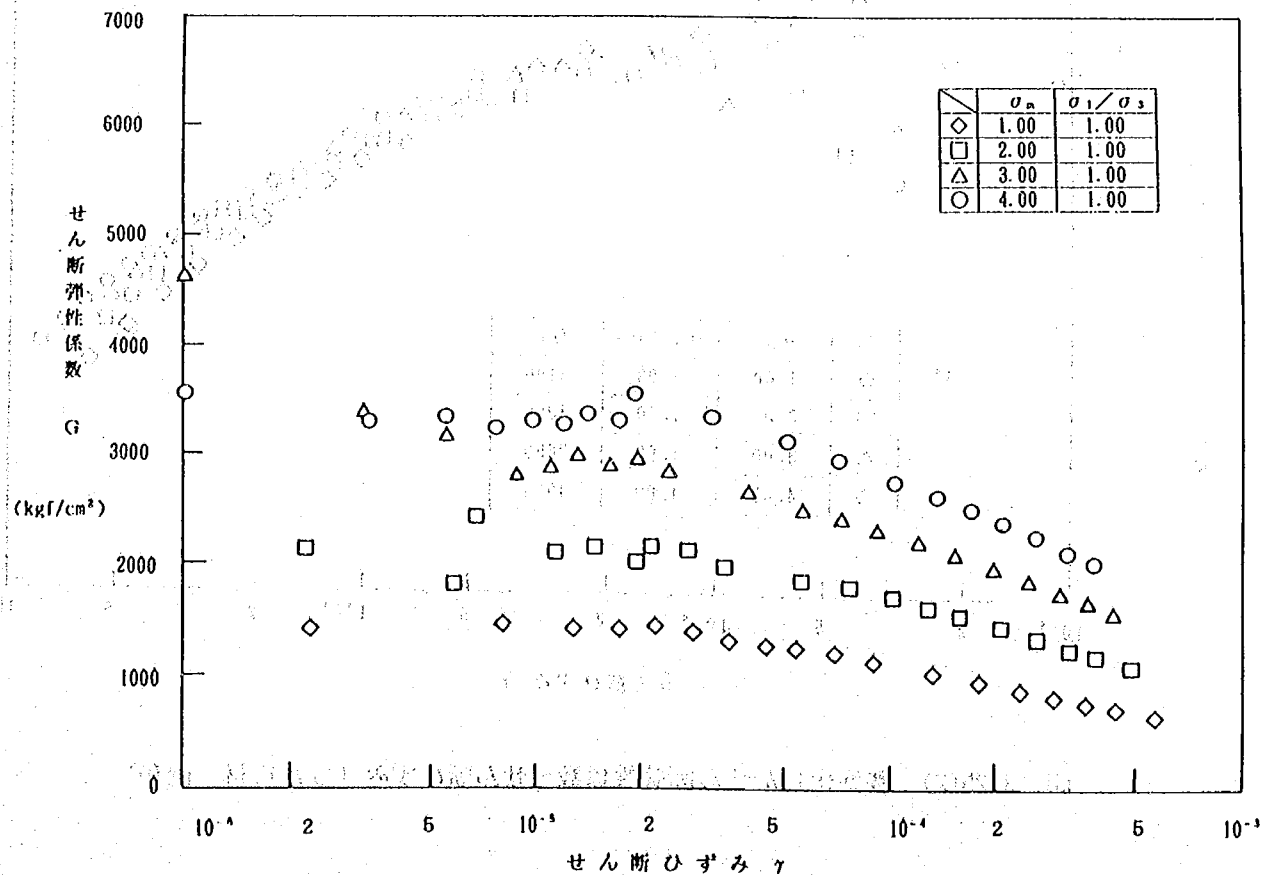


図-3.24(4) せん断弾性係数～せん断ひずみ (SR材 飽和)

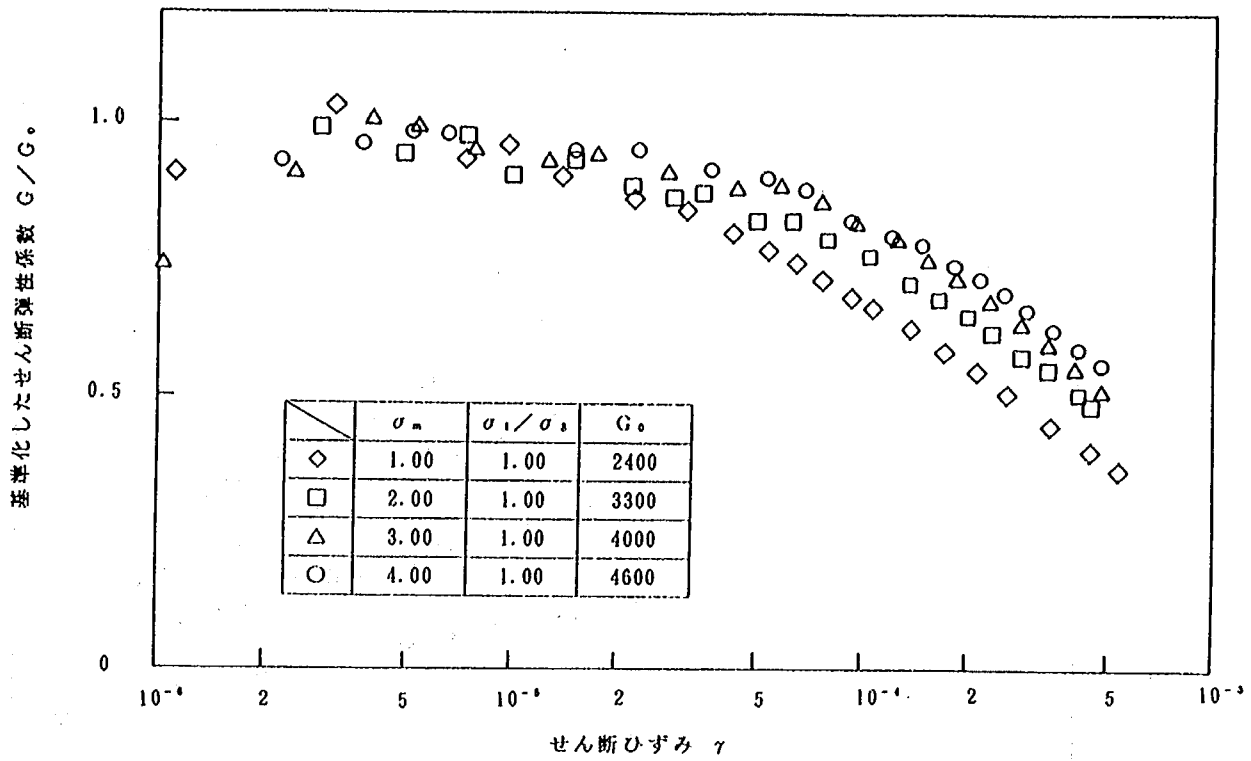


図-3.25(1) 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ (SAR材, 気乾)

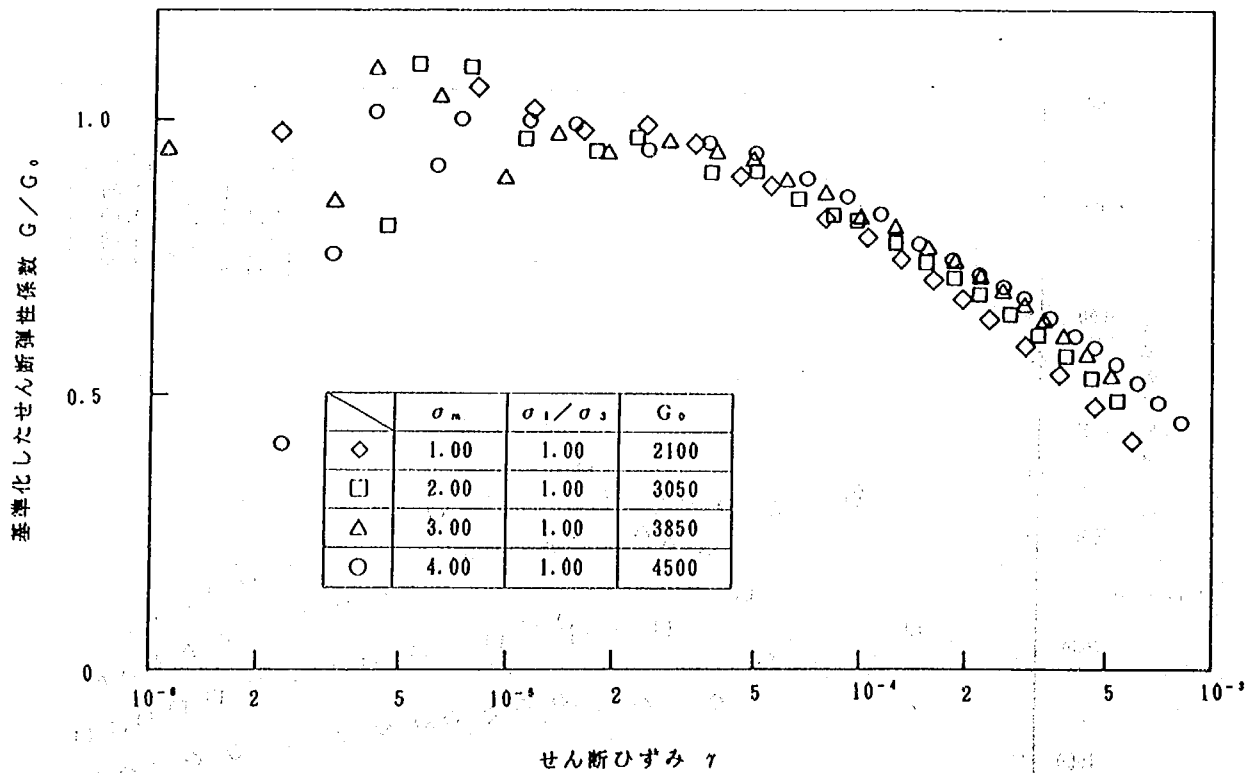


図-3.25(2) 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ (SAR材, 飽和)

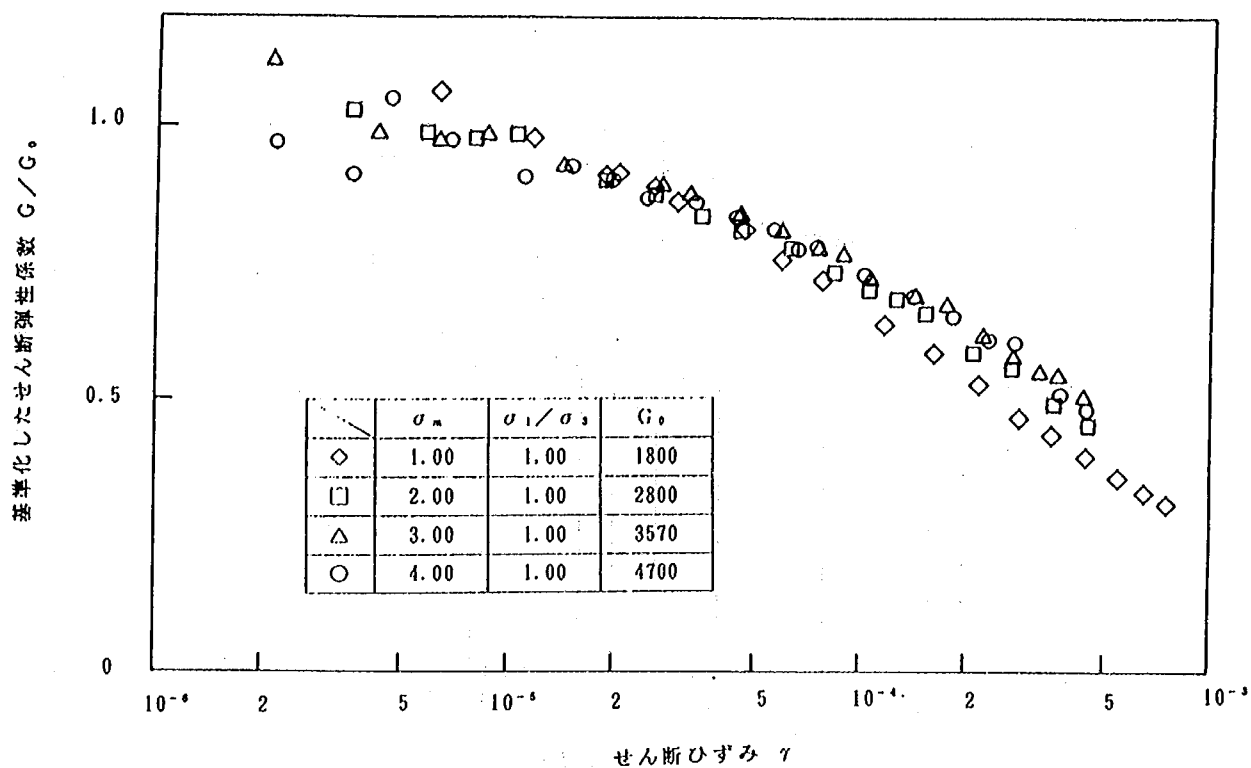


図-3.25(3) 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ (SR材, 気乾)

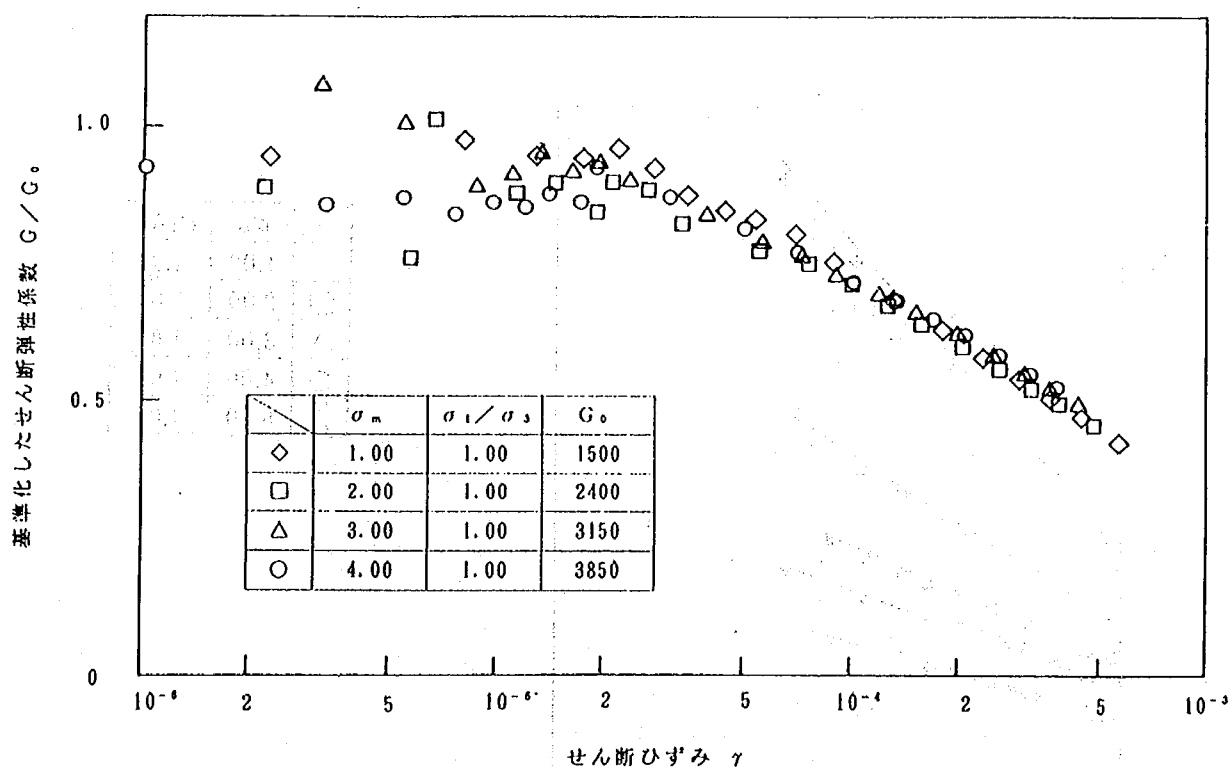


図-3.25(4) 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ (SR材, 飽和)

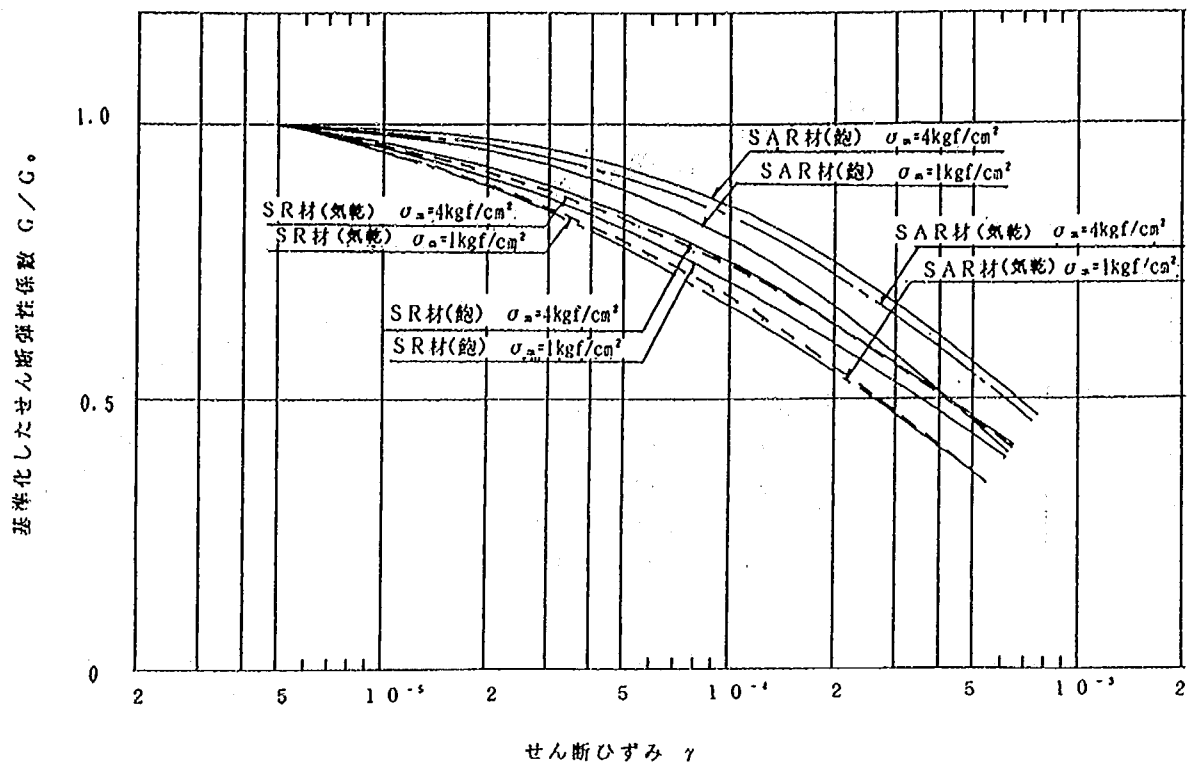


図-3.26 基準化したせん断弾性係数～せん断ひずみ

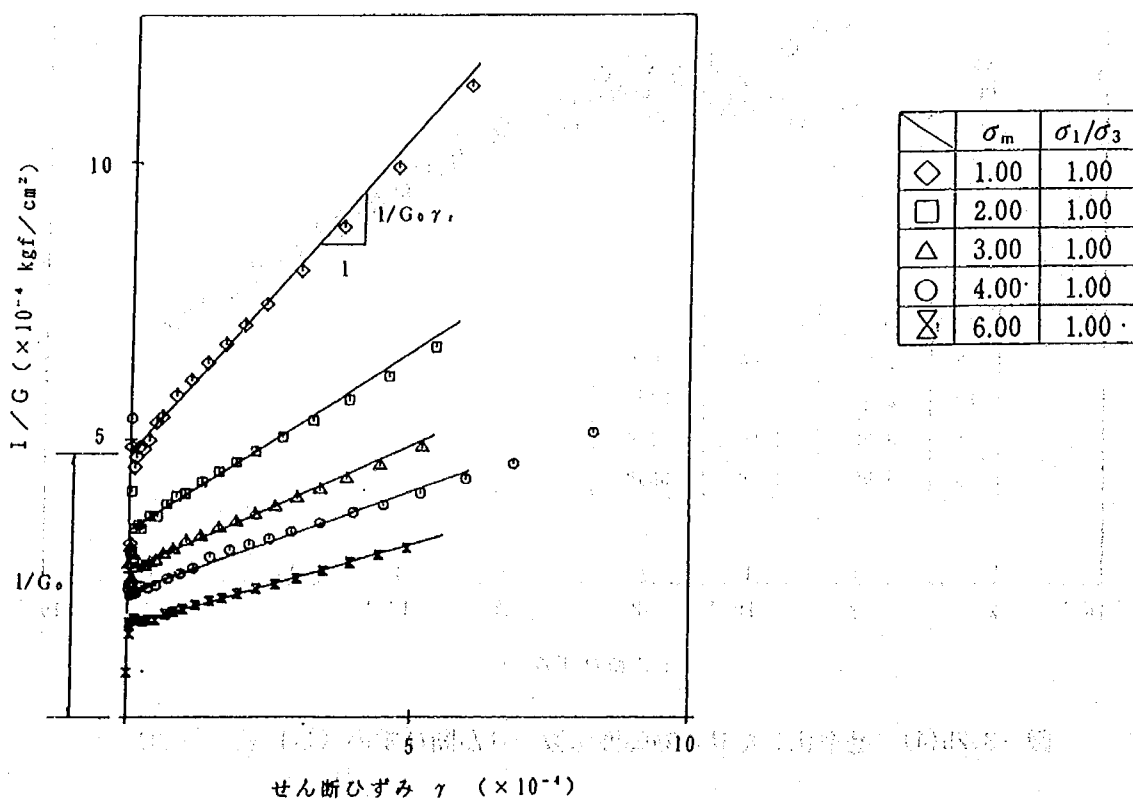
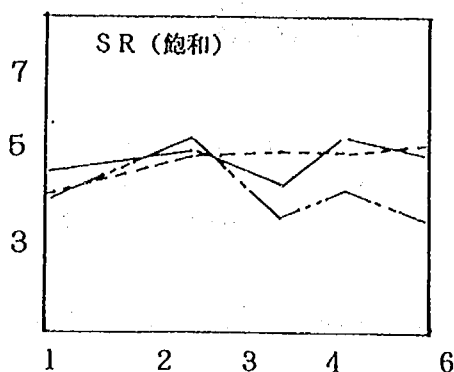
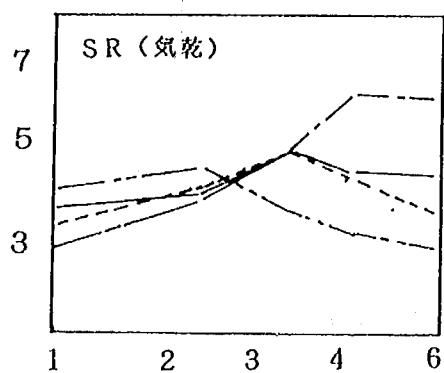
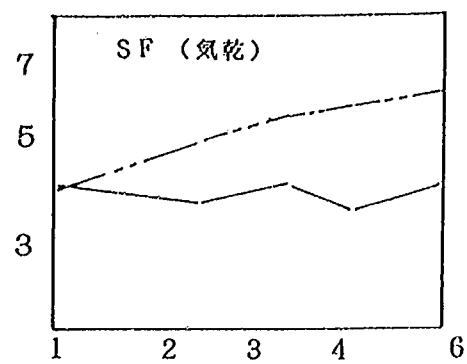
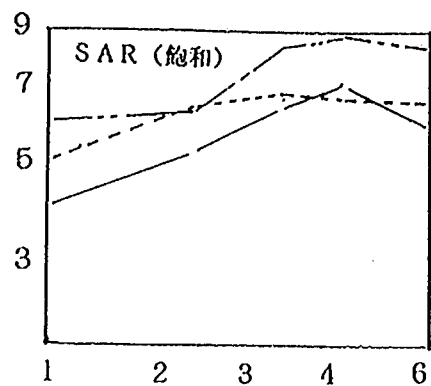
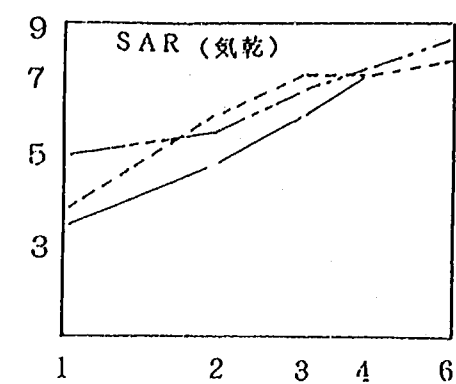


図-3.27 $1/G \sim \gamma$ (SAR材, 飽和)



$\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$
 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.4$
 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$
 $\sigma_1/\sigma_3 = 3.0$

横軸：平均主応力 σ_m (kgf/cm²)
 縦軸：せん断ひずみ (1×10^{-4})

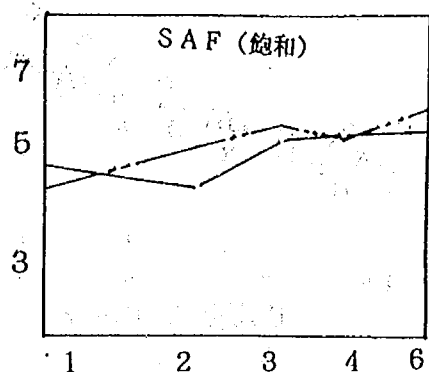
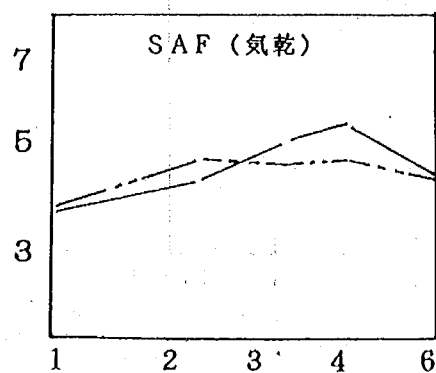
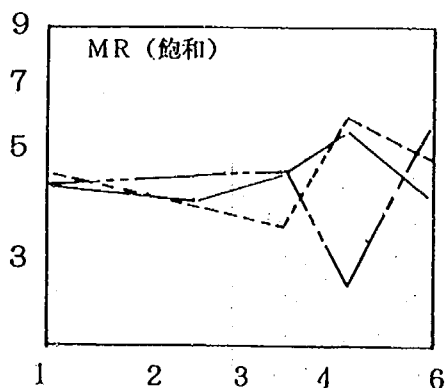
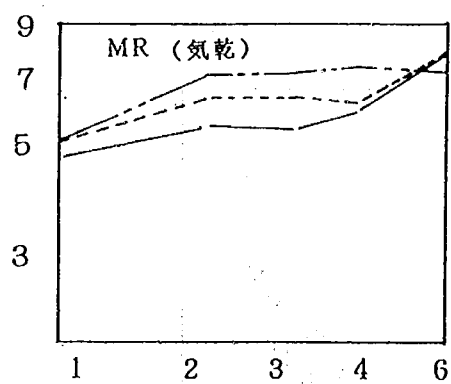


図-3.28 $\gamma_1 \sim \sigma_m$ の関係

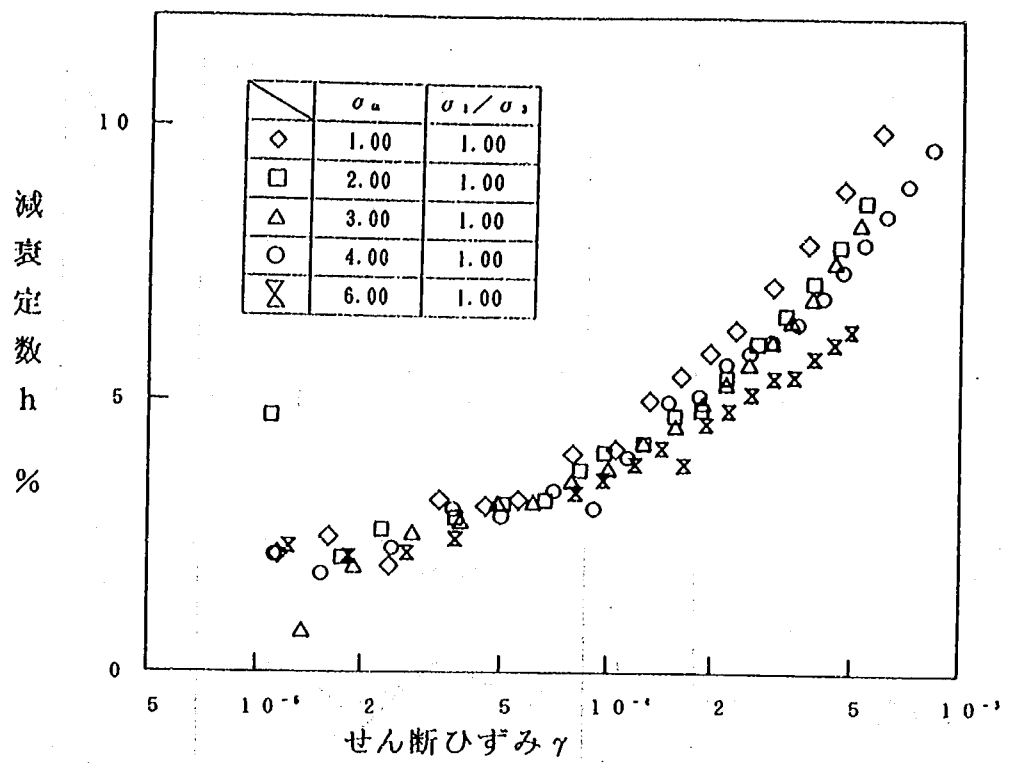


図-3.29(1) 減衰定数～せん断ひずみ (SAR材, 気乾)

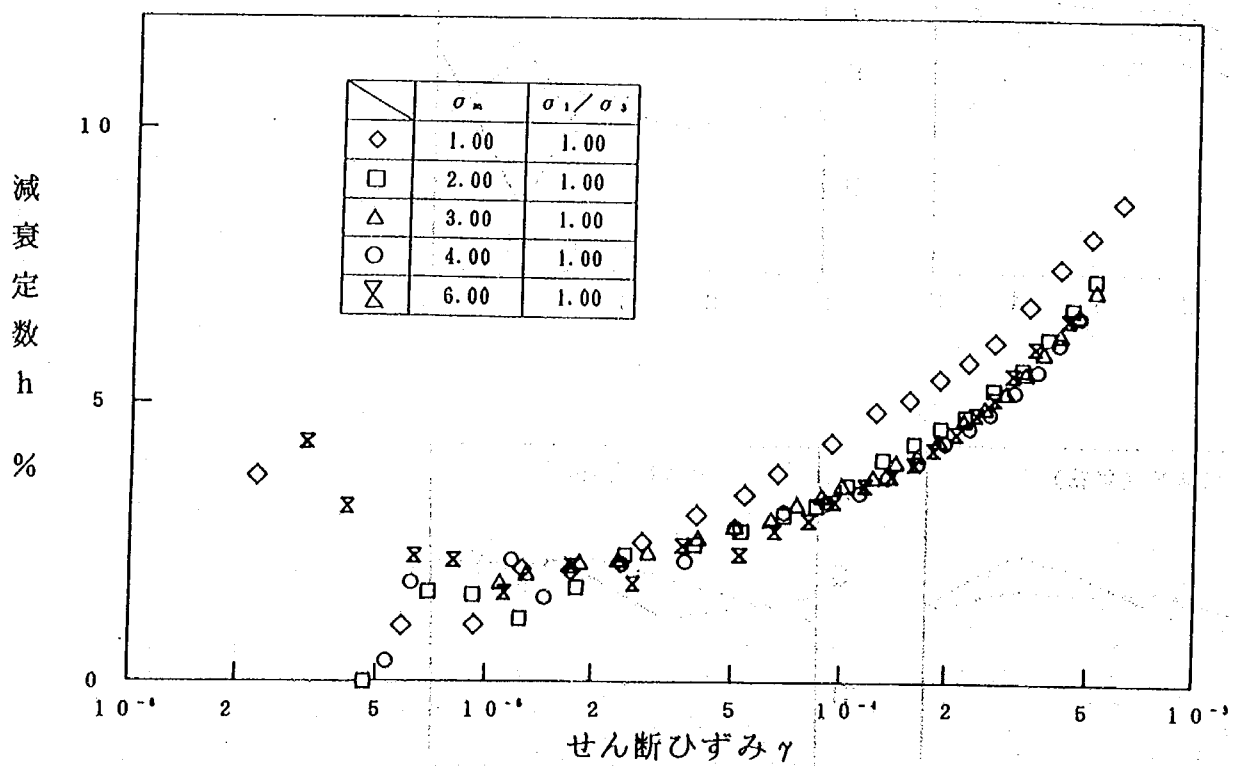


図-3.29(2) 減衰定数～せん断ひずみ (SAR材, 飽和)

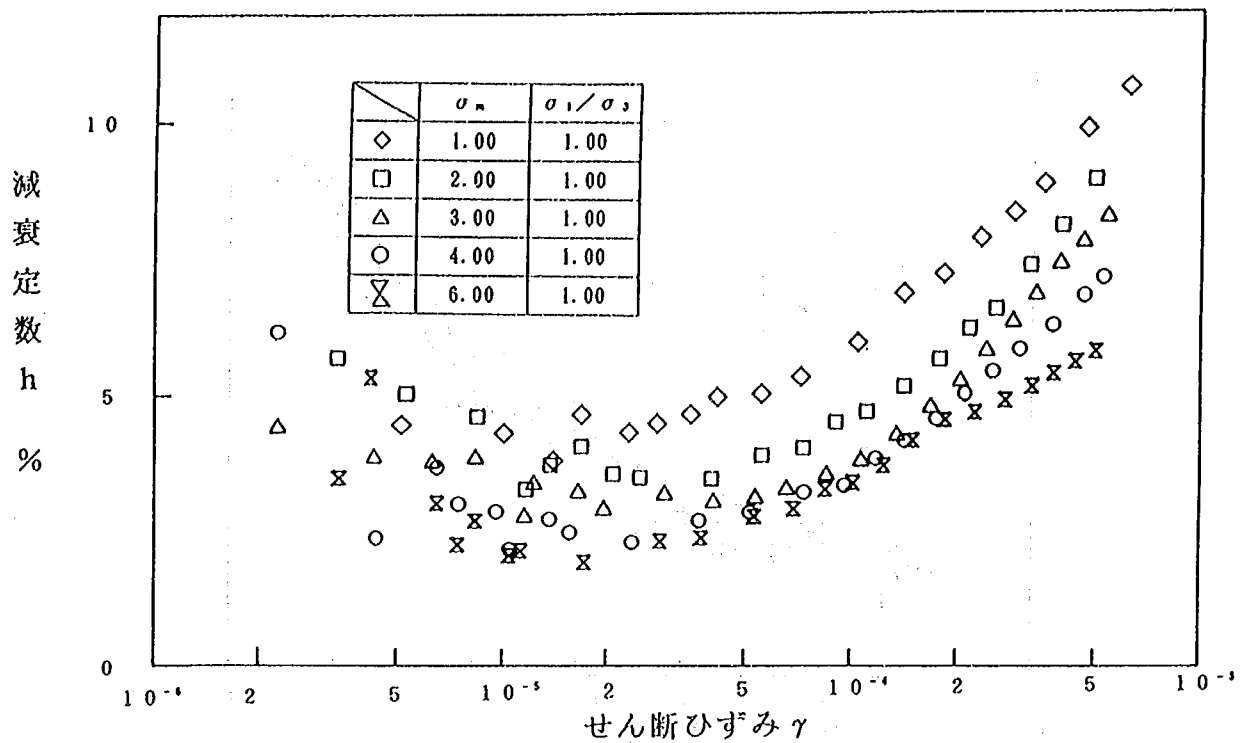


図-3.29(3) 減衰定数～せん断ひずみ (SAF材, 気乾)

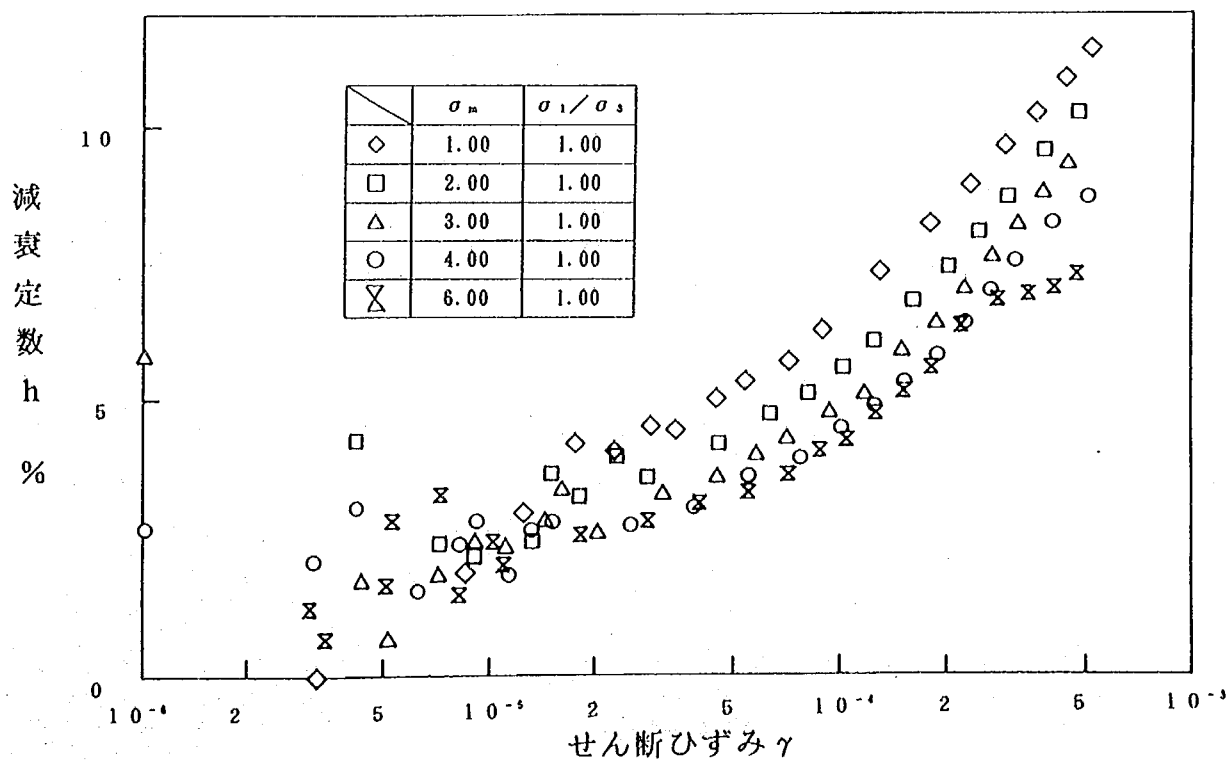


図-3.29(4) 減衰定数～せん断ひずみ (SAF材, 飽和)

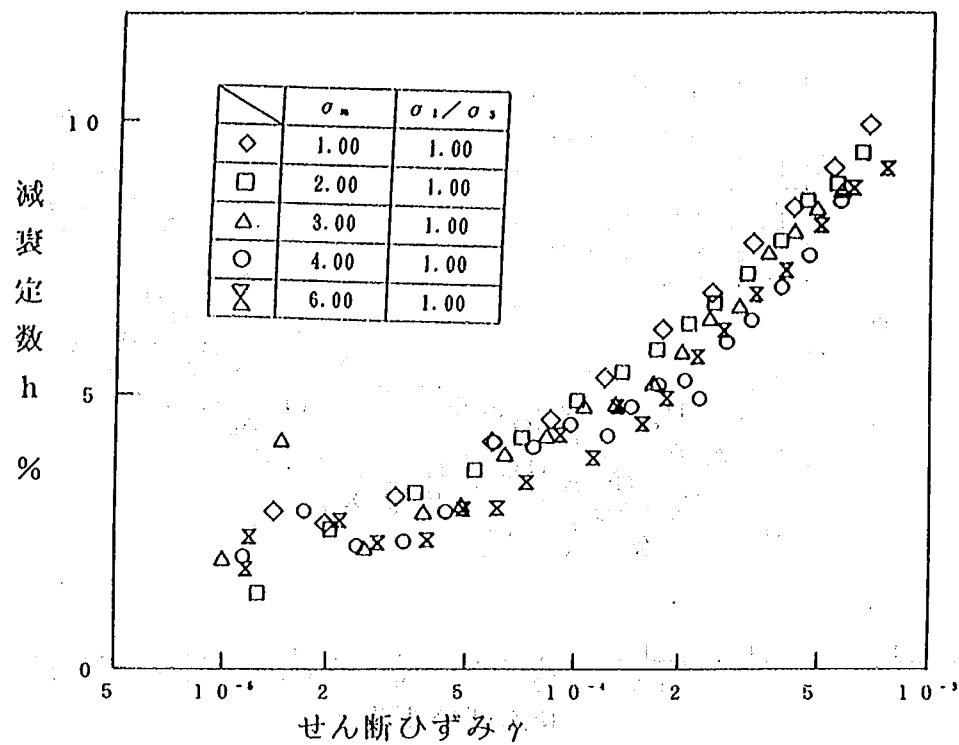


図-3.29(5) 減衰定数～せん断ひずみ (MR材, 気乾)



図-3.29(6) 減衰定数～せん断ひずみ (MR材, 気乾)

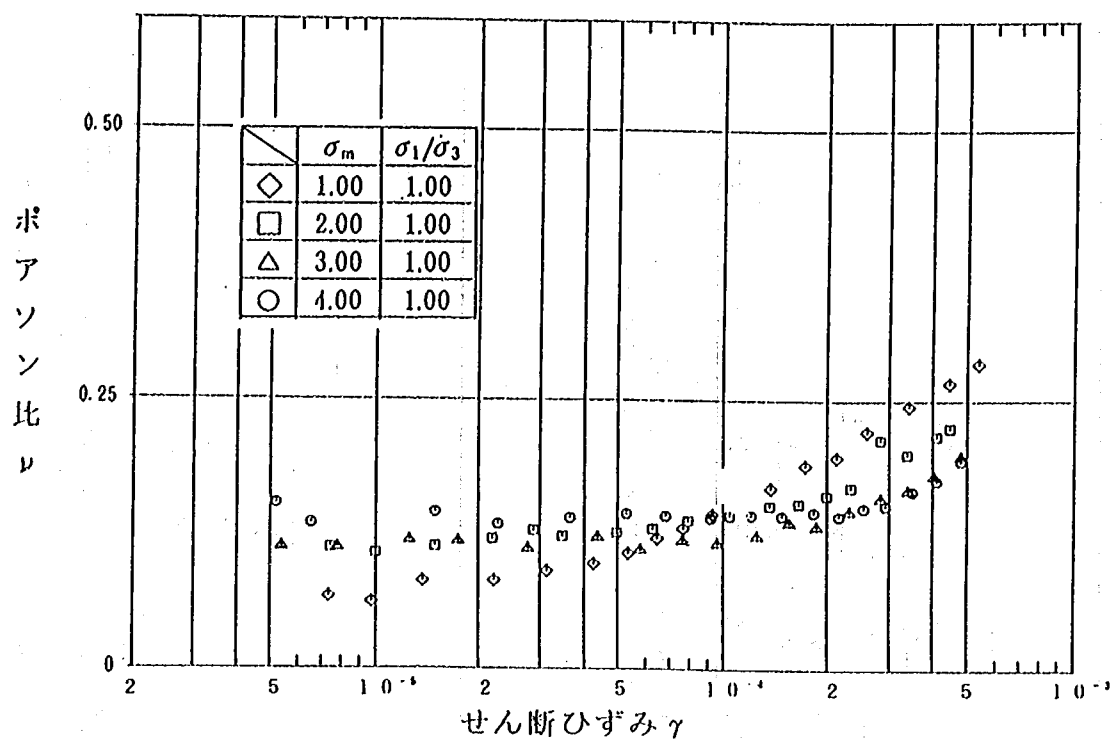


図-3.30(1) ポアソン比～せん断ひずみ (SAR材, 気乾)

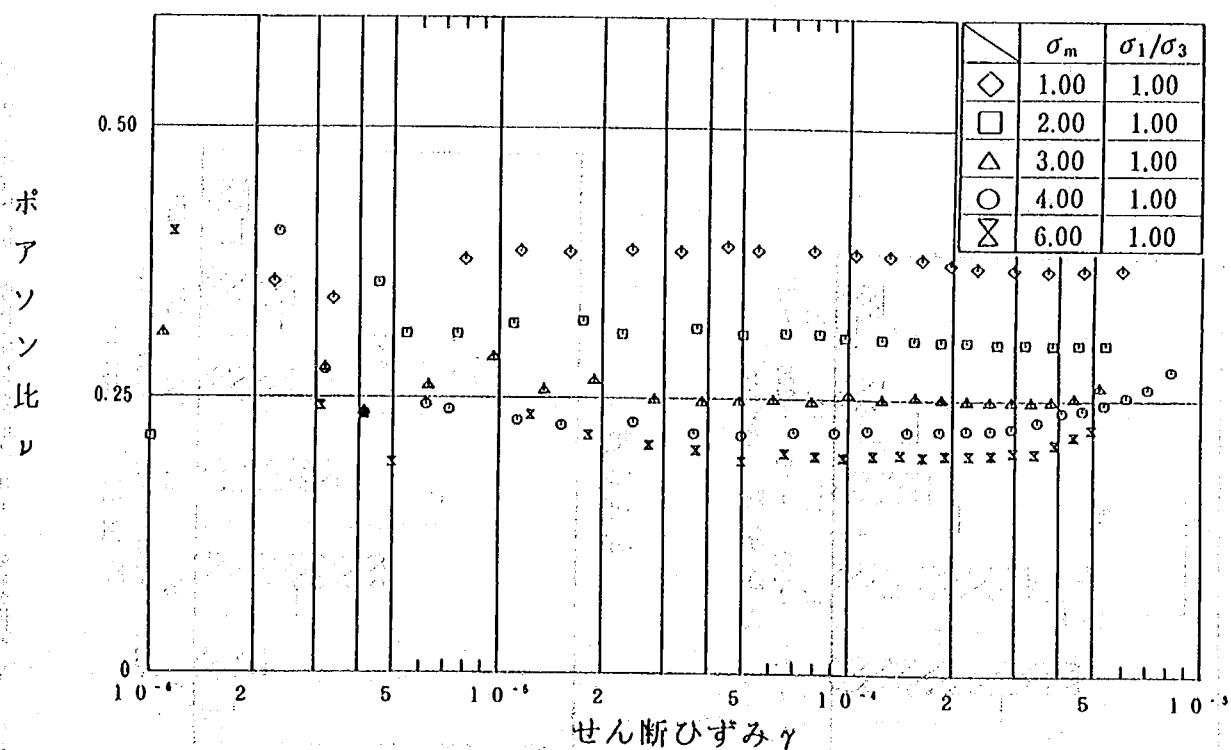


図-3.30(2) ポアソン比～せん断ひずみ (SAR材, 飽和)

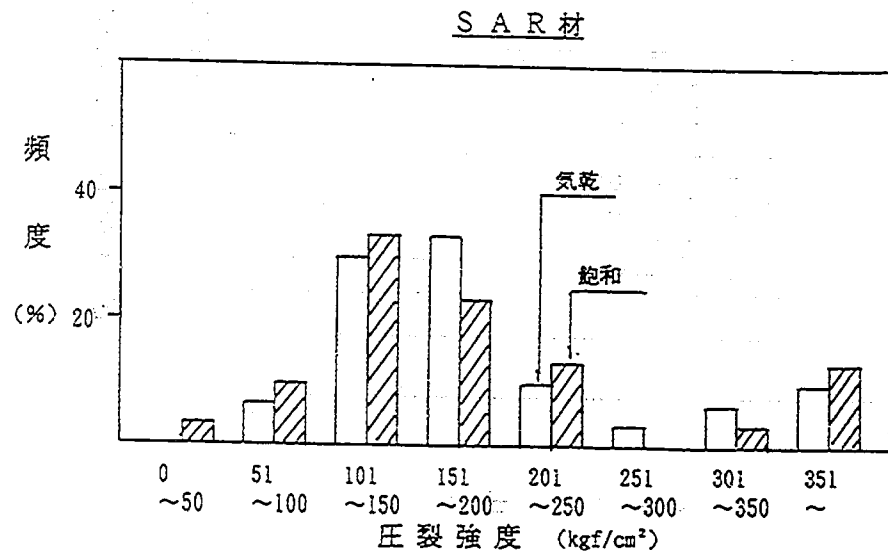
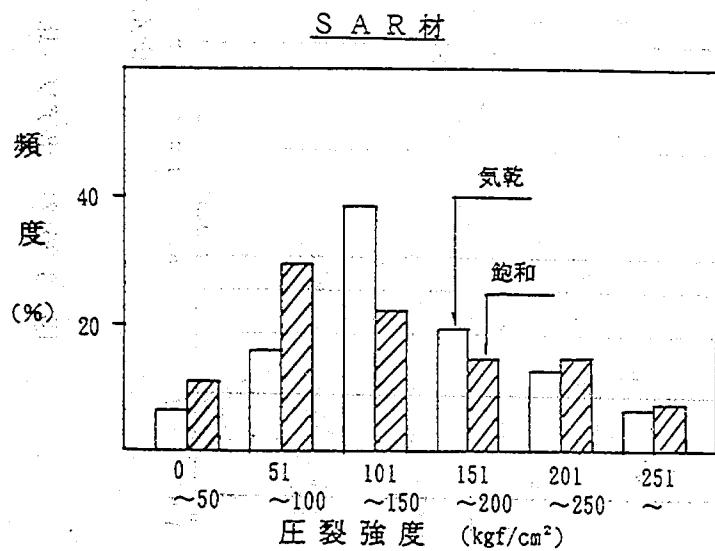
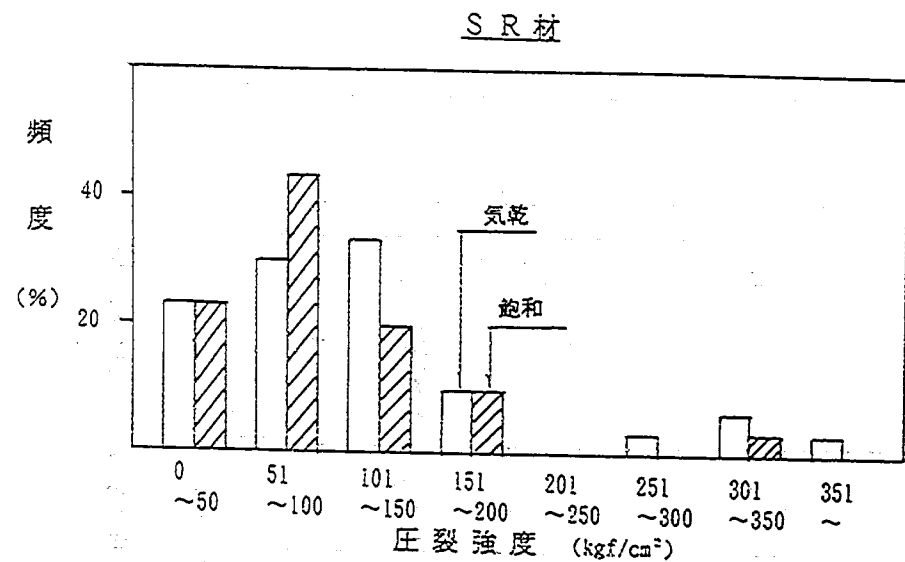
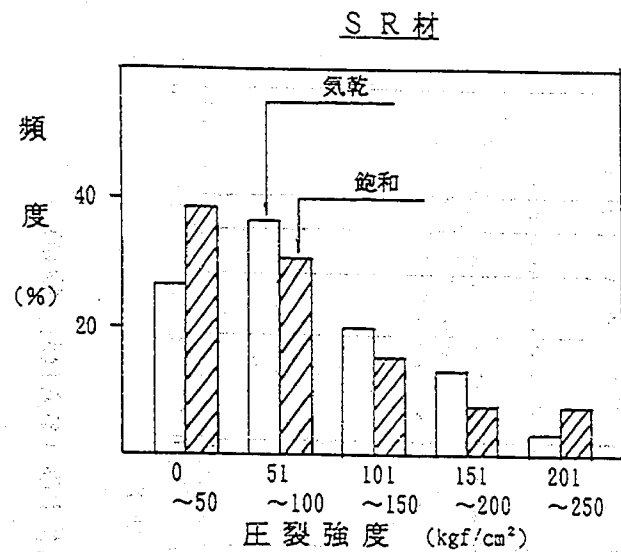
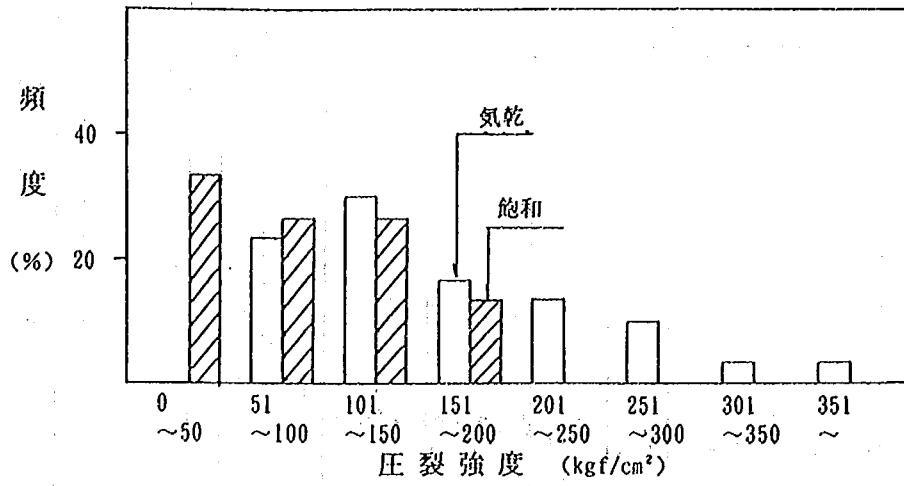


図-3.31(1) 点載荷試験による圧裂強度頻度図 (63.5~50.08mm)

図-3.31(2) 点載荷試験による圧裂強度頻度図 (50.8~38.1mm)

S R 材



S A R 材

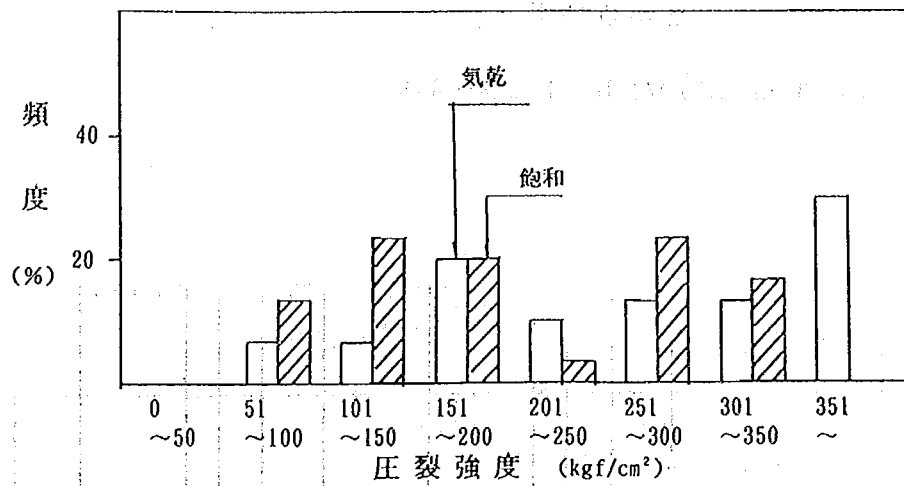
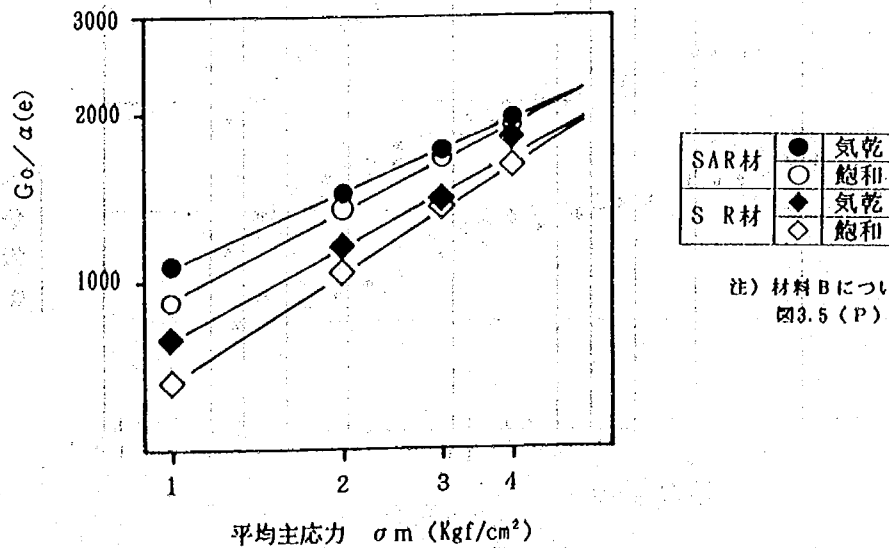


図 3 図-3.31(3) 点載荷試験による圧裂強度頻度図 (38.1~25.4mm)



SAR 材	$\bullet$	気乾
	$\circ$	飽和
S R 材	$\blacklozenge$	気乾
	$\diamond$	飽和

注) 材料 B については均等保政の影響を除くため
図3.5 (P) を参考にして補正した

図-3.32 $G_0/\alpha(e) \sim \sigma_m$ の関係

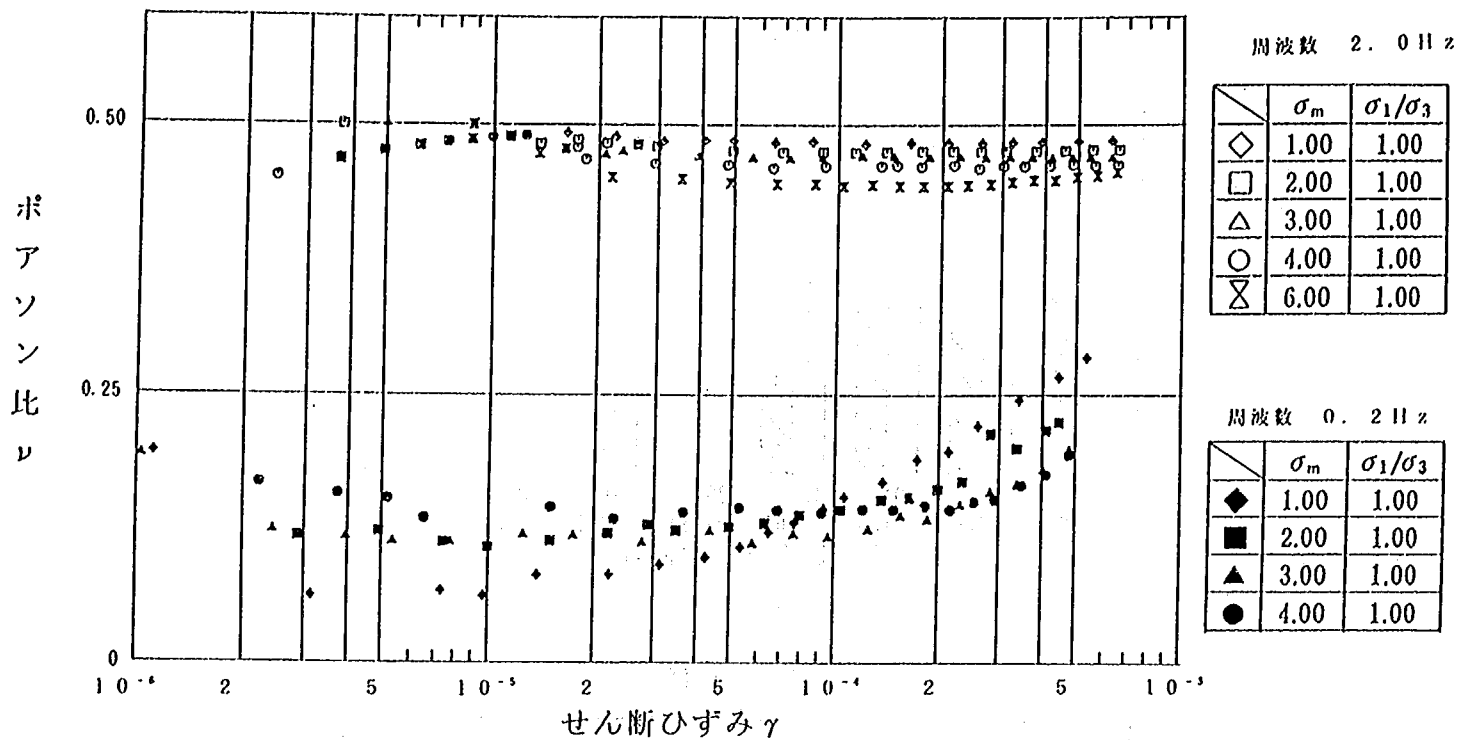


図-3.33 ポアソン比～せん断ひずみ

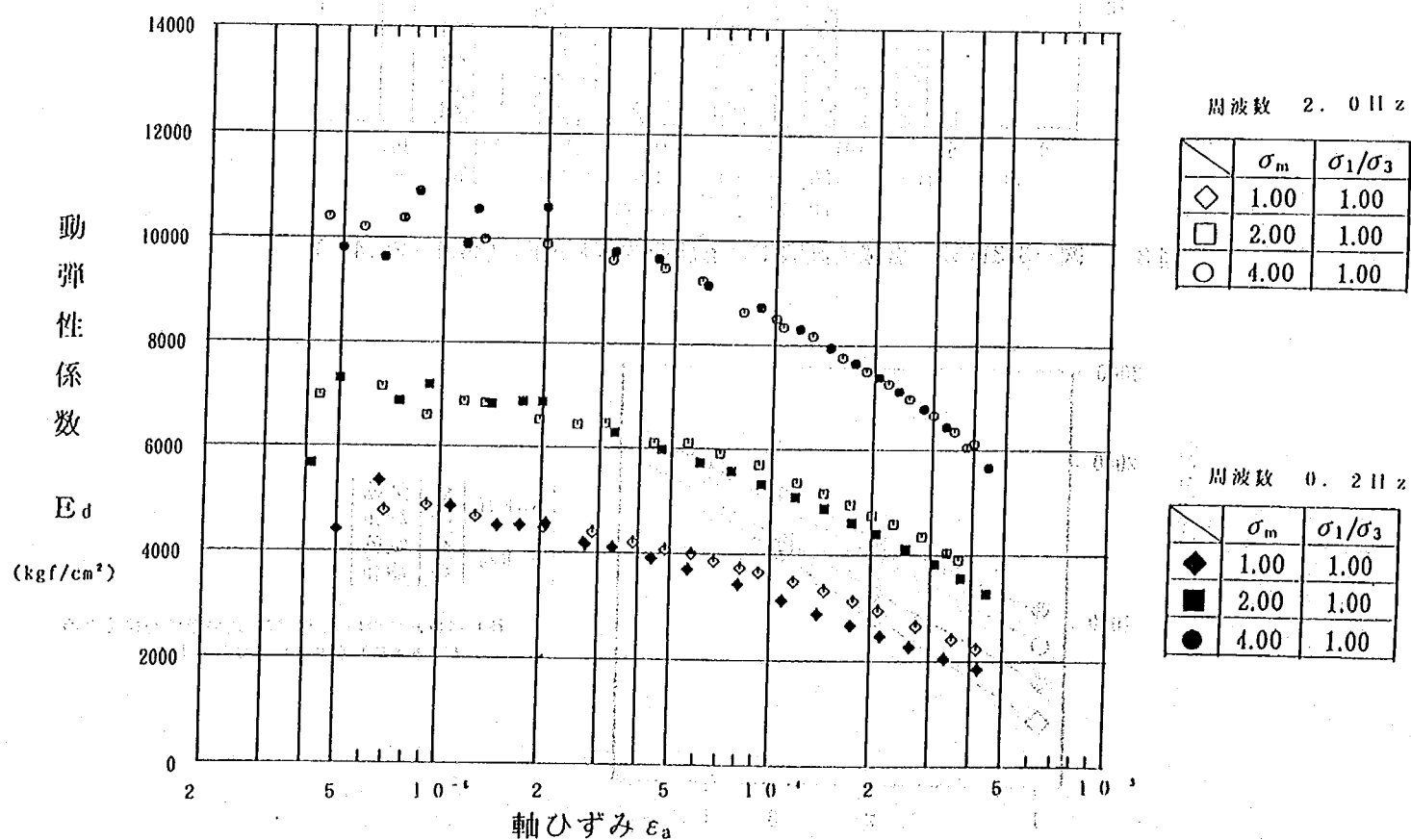


図-3.34 動弾性係数～軸ひずみ

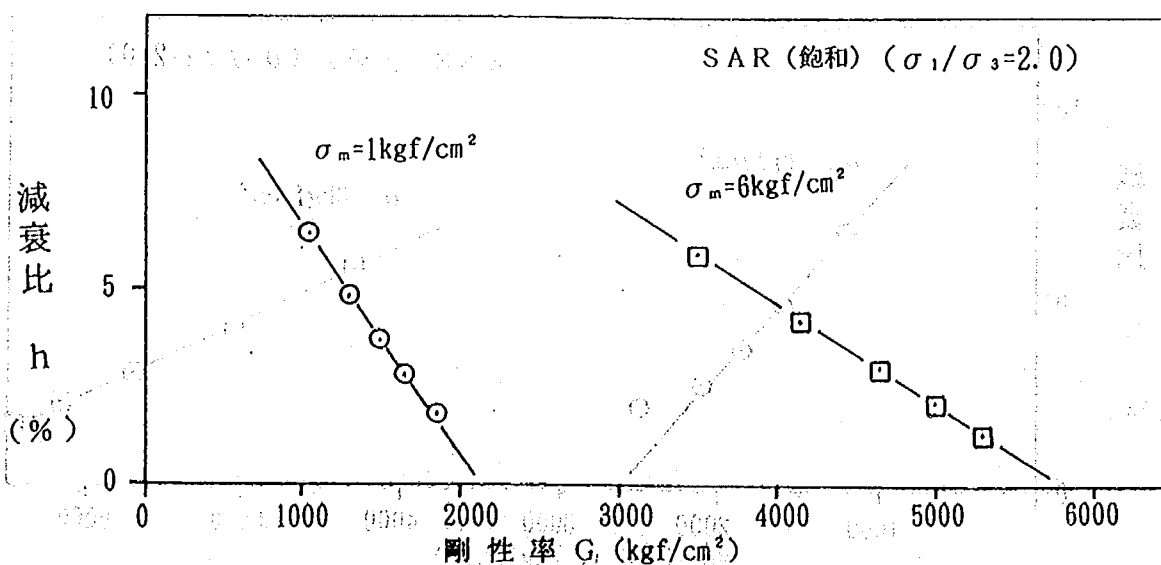
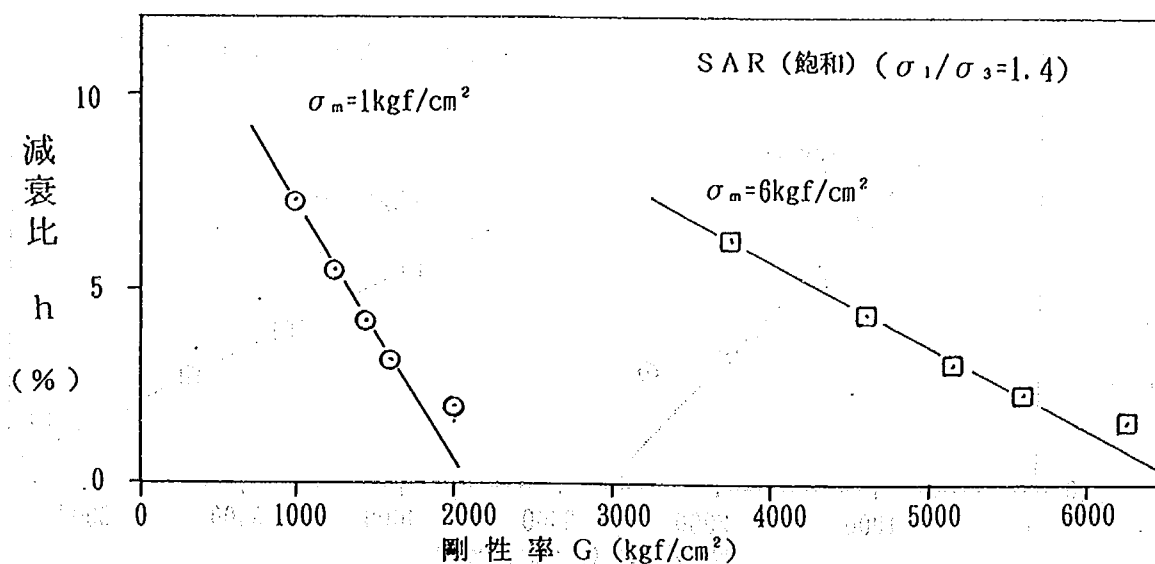
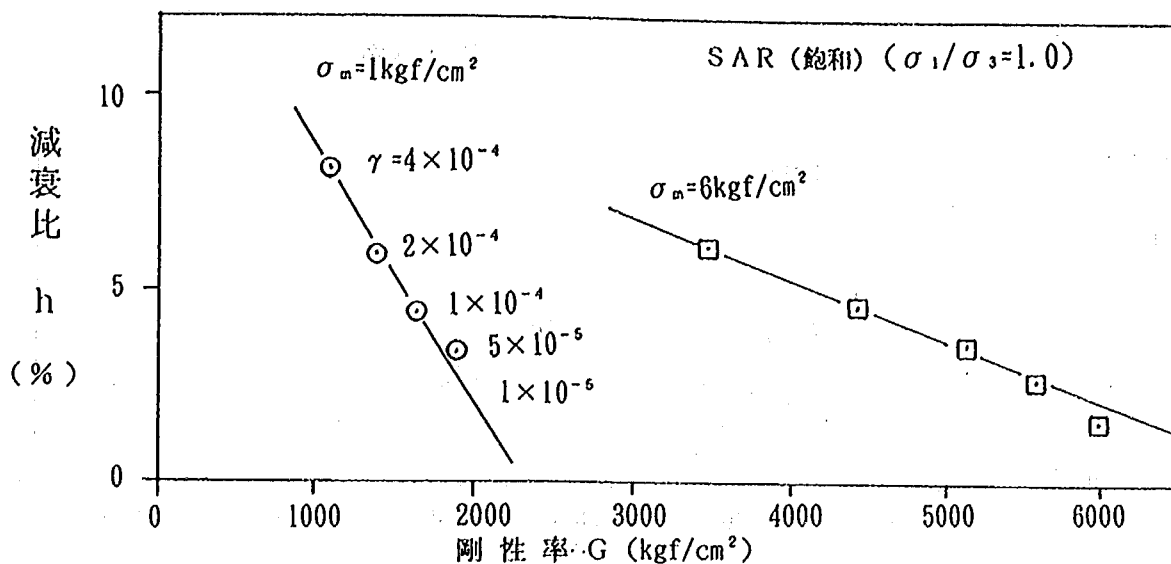


図-3.35(1) $G \sim h$ 関係 (SAR材, 飽和)

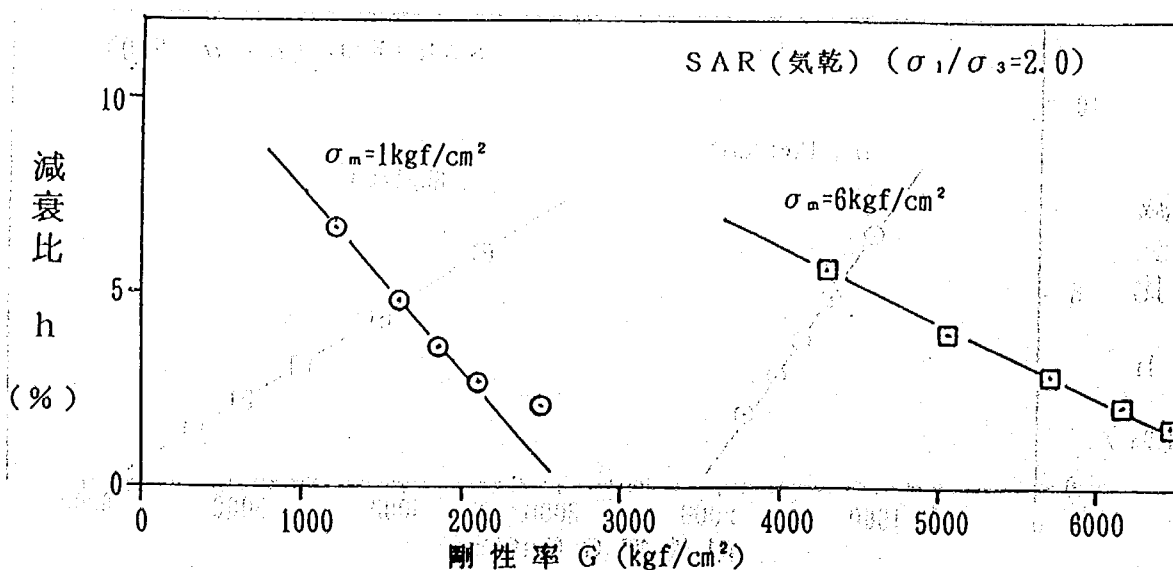
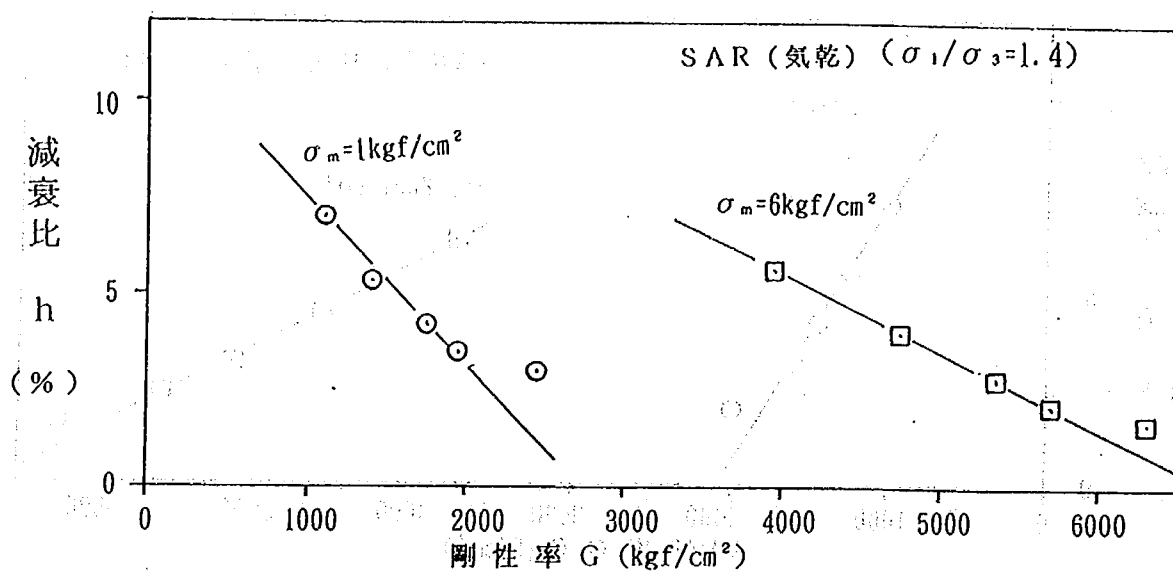
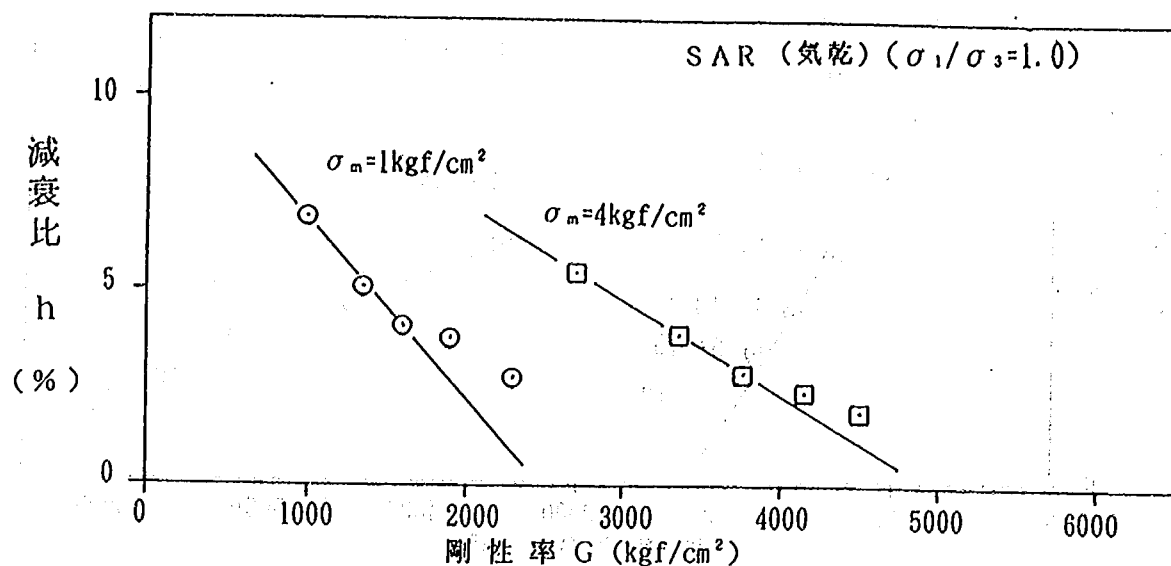


図-3.35(2) $G \sim h$ 関係 (SAR材, 気乾)

(○) $\sigma_m=1\text{kgf/cm}^2$ (□) $\sigma_m=6\text{kgf/cm}^2$

4 結論

豊浦標準砂の予備試験結果を、以下にまとめる。

- 1) 自動計測システムによる試験値の測定や処理は、従来の方法と同程度もしくはそれ以上の精度が得られ、迅速化が図れた。
- 2) G は e に依存しており、Hardin and Richartが提案した e の関数で説明できる。
- 3) 1 供試体で拘束圧を数段階変えて繰返し載荷試験を行うが、 γ が 5×10^{-4} 程度以下であれば繰返し載荷の影響が残らない。
- 4) G には σ_m による明確な依存性があり、 $G \propto (\sigma_m)^m$ なる関係が成立し、べき数 m は γ の変化に対してはほぼ一定値を示すことがわかった。
- 5) G は、飽和状態の方が気乾状態よりも小さめの値となる。
- 6) h は、 γ の増加に伴い増加し $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ を越えると増加の割合がさらに大きくなる傾向にある。
- 7) h は、 G のように明確でないが、拘束圧依存性が確認できた。
- 8) $h \sim G/G_{max}$ の関係は、他の研究例でも示されているように、直線関係を示す。

粗粒材料の動的変形特性の試験の結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 1 拘束圧段階における最大せん断ひずみ γ_{max} は、 5×10^{-4} 程度であれば、ひずみ履歴の影響のないことが確認された。
- 2) G と σ_m の関係は、両対数で直線関係にあり、 $G \propto (\sigma_m)^m$ なる関係式で表現できるべき乗数 m は γ の関数であり、微小ひずみ領域 ($\gamma \leq 1.0 \times 10^{-4}$) であれば一定値を示し、 γ の増加と共に緩やかに増加傾向にある。ただし、飽和ロック材料の場合は、気乾ロック材料に比べると γ に対する変化量は小さい。
- 3) h については、 G に比べ測定精度の影響を受け誤差が入りやすいが、 G ほど明確ではないにしても σ_m による依存性が認められた。
- 4) G は、 U_c が大きくなると小さくなる傾向を示している。
- 5) G は、 U_c を一定にした場合、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0 \sim 2.0$ の間で単調増加傾向（材料によってはピーク値が存在するものでもある。）を示しているが増加の割合は材料によってかなり差異が認められる。
- 6) G は、微小ひずみ範囲 ($\gamma < 1 \times 10^{-5}$) ではばらつきがあるが、 G_{max} に漸近していくようすが認められる。一方、 γ が増加するに従い、 G は低下し、 G の γ に対する依存性が明確に表れている。
- 7) また、 γ の増加に伴って G が低下する傾向は材料によって異なり、斑れい岩では上に凸のなめらかな低下曲線を示しているのに対し、粗粒玄武岩ではこれも低下の度合いが大きく、やや直線的に低減している。
- 8) G の低下の度合いは、 σ_m が大きい方が小さい傾向を示し、 σ_m の大きさによる G の低下の度合いの差は、気乾材料よりも飽和材料の方が少なめである。
- 9) h は、 γ の増加とともになめらかに増加する傾向を示し、 $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ を越えたところから急激に増加し、 h のひずみ依存性が確認できた。
- 10) ν は、 γ に対して下に凸の傾向を示しているが、ほとんど一定値と考えられる。なお、飽和ロック材料の方が気乾材料に比べ若干大きめの値を示した。
- 11) 斑れい岩及び粗粒玄武岩の2種類の岩について岩質の違いとして圧裂強度に着目し、点載荷試験を実施した結果、圧裂強度と G の関係について、次のことが確認できた。
(イ) 圧裂強度の大きい場合、 G も大きくなる。

(ロ) 岩石の飽和によって、圧裂強度が低下し同様にGも低下する。

(ハ) その低下の度合いは大差はないが、圧裂強度の小さい岩石が大きくなった。

12) 周波数が0.2Hz及び2.0Hzの試験から、両者の試験値(動弾性係数 E_d 、軸ひずみ ϵ_s)に差がなく、周波数の影響は認められなかった。

参考文献

- 1) 松本徳久, 安田成夫, 境野典夫(1984); 「大型繰返し三軸試験機を用いた粗粒材料の動的物性試験」, 土木研究所資料, NO. 2146.
- 2) 松本徳久, 安田成夫, 境野典夫(1985); 「粗粒材料の動的変形特性」, 土木学会第18回地震工学研究発表会講演集.
- 3) 松本徳久, 安田成夫, 境野典夫(1986); 「ロックフィル材料の動的変形特性試験」, 第21回土質工学研究発表会講演集.
- 4) 松本徳久, 安田成夫, 大久保雅彦(1986); 「粗粒材料の動的変形特性(その2)」, 第21回土質工学研究発表会講演集.
- 5) 松本徳久, 安田成夫, 大久保雅彦(1986); 「豊浦標準砂を用いた動的ポアソン比の検討」, 第21回土質工学研究発表会講演集.
- 6) 松本徳久, 安田成夫, 渡辺和夫; 「土質工学シンポジウム」
- 7) 松本徳久, 渡辺和夫, 村上清基(1983); 「ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験(その2)」, 土木研究所資料, No. 2006号.
- 8) 土質工学会編; 「土質試験法」
- 9) 土質工学会(1983); 「ロックフィル材料の試験と設計強度」
- 10) 国生剛治, 桜井彰雄, 江刺靖行(1979); 「三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用」, 電力中央研究所報告, No. 379002.
- 11) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和(1980); 「地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ) - 広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性 -」, 土木研究所報告, 第153号.
- 12) 柴田徹, Soelarno, D. S. (1975); 「繰返し载荷を受ける砂質土の応力・ひずみ特性」, 土木学会論文報告集, 第239号.
- 13) 大岡弘, 伊藤幸爾郎(1979); 「乾燥砂と正規圧密粘土を用いた動的一斉試験結果」, 7th Joint Meeting US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, 第11回合同部会.
- 14) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 吉田精一(1977); 「地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅰ) - 微小ひずみ領域における砂の動的変形特性 -」, 土木研究所報告, 第148号.
- 15) 国生剛治, 江刺靖行, 桜井彰雄(1980); 「広いひずみ範囲における粗粒材の動的変形特性と減衰特性」, 電力中央研究所報告, No. 380002.
- 16) 安田正幸, 緒方信英, 嶋田光明(1979); 「振動三軸試験によるコア材の動的変形特性」第14回土質工学研究発表会講演集.
- 17) Baba, K. and Watanabe, H. (1979); 「On a consideration for an earthquake-resistant design method for rockfill dams」, 13th ICOLD, Newdelhi, India.
- 18) 渡辺啓行; 「碎石の動的せん断変形係数・減衰比ならびに動的ポアソン比に関するバイリニアモデルによる考察」電力中央研究所報告, No. 377020,
- 19) Hardin, B. O. and Richart, F. E. Jr. (1963); 「Elastic wave velocities in granular soils」, Jour. of SMFD, proc. ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 33~65
- 20) 岩崎敏男, 龍岡文男, 高木義和(1980); 「地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ) - 広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性 -」, 土木研究所報告, 第153号
- 21) 国生剛治, 桜井彰雄, 江刺靖行(1979); 「三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用」, 第14回土質工学研究発表会講演集

- 22) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): 「 Shear modulus damping in soils: Design equation and curves」; Jour. SM FD, Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667~692
- 23) 柴田徹, 土岐憲三, 寺田邦雄(1969); 「砂中の弾性波速度について」, 第4回土質工学研究発表会講演集
- 24) 足立紀尚, 龍岡文夫(1979); 「土の力学(Ⅲ) -圧密・せん断・動的解析-新体系土木工学18」、技報堂出版
- 25) 平松良雄, 岡行俊, 木山英朗(1965); 「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, pp. 1024~1030
- 26) 国生剛治, 江刺靖行, 嶋田光明(1980); 「繰返し三軸試験による広いひずみ範囲での礫材の動的物性試験」, 第15回土質工学研究発表会講演集
- 27) Iwasaki, T., and Tatsuoka, F. (1977): 「 Effect of grain size and grading on dynamic shear moduls of sands, Soils and Foundations」 Vol. 17, No. 3, pp. 19~35,

参考資料

1. 繰返し三軸試験に関するプログラムリスト
2. ピストン貫入量の影響

19 卷

年六月八日...
...

1. 繰返し三軸試験に関するプログラムリスト

```

10 *****
20 **      THIS PROGRAM IS PIKUP OF      **
30 **      DYNAMIC TRIAXIAL TESTING RESULTS      **
40 **
50 **      BY ARAKAWA (1986.10)      **
60 *****
70
80
90 *****
100 HZT=21      '動的試験周波数 Hz
110 NCHA=4      'サンプリング チャネル数
120 DELTAT=.001 'サンプリング タイム 秒
130 NH=12      '試験波数
140 XN=30      '試験レベル最大数
150
160
170
180 N1=4401      'サンプリング開始組番号
190 N2=5050      'サンプリング終了組番号
200 TNN=N2-N1+1 'サンプリング ポイント数 (650)
210 N%=6000
220 *****
230 CLS 3
240 CONSOLE 0,25,0
250 DRNUMS="2:"
260 *****
270 ***** 使用している配列 及び 関数の宣言 *****
280 *****
290
300 DIM STITLE$(5)
310 DIM A(5),H(5),V(5),GAMD(5),E(5),DR(5)
320 DIM PLOAD%(TNN,XN),HDISP%(TNN,XN),VSTRA%(TNN,XN),QSIG3%(TNN,XN)
330 DIM SIG1(5),SIG3(5),SIGM(5),BUA(5),BUB(5),DGA(5),DGB(5),DLTC(5)
340 DIM DGD(5),DLTVB(5),DLTH(5),DLTV(5),DLTHD(5),DLTVE(5)
350 DIM POIS(XN),DAMR(XN),EPSR(XN),ELAS(XN),SHRH(XN),SHRE(XN)
360 DIM YY(TNN,NCHA),PEND(NCHA,XN),DD(NCHA),NSTA(4),VCHO(XN),ALP1(XN),ALP4(XN)
370 DIM YZ(TNN),YG(300,NCHA)
380 DIM PTM(5),POTE(XN,5)
390 DIM MPRG%(1023),D%(4*N%-1,NCHA),X%(N%-1)
400
410 READ ALP1(1),ALP2,ALP3,ALP4(1)
420 DATA 1000,1.0,13.30,2
430
440 FOR J=1 TO 5
450 READ PTM(J)
460 NEXT J
470 DATA 21,23,25,26,27
480
490 FOR J=1 TO 5
500 FOR I=1 TO PTM(J)
510 READ POTE(I,J)
520 NEXT I
530 NEXT J
540 DATA 2,4,6,8,10,12,14,17,20,25,30,40,50,60,70,80,90,105,120,135,150
550 DATA 2,4,6,8,10,12,14,17,20,30,40,50,60,70,85,100,115,130,150,170,190,210,230
560 DATA 2,4,6,8,10,12,14,17,20,30,40,50,60,75,90,110,130,150,170,190,210,230,250,275,300
570 DATA 2,4,6,8,10,12,14,17,20,30,45,60,80,100,120,140,165,190,215,240,270,300,330,360,390,420
580 DATA 2,4,6,8,10,12,14,17,20,30,45,60,80,100,120,140,165,190,215,240,270,300,330,360,390,420,450
590
600 *****
610 *****
620 LOCATE 5,5 : PRINT "メニューの選択" : BEEP
630 LOCATE 10,7 : PRINT "1 A/D変換"
640 LOCATE 10,8 : PRINT "2 データのチェック 時刻歴"
650 LOCATE 10,9 : PRINT "3 データの処理 ヒステリシスループ"
660 LOCATE 10,10 : PRINT "4 試験結果の作表"
670 LOCATE 15,12 : INPUT JCH
680 IF JCH=1 THEN 740
690 IF JCH=2 THEN GOSUB *JIKOKU
700 IF JCH=3 THEN GOSUB *HISTR
710 IF JCH=4 THEN GOSUB *SAKUH
720 IF JCH<1 OR JCH>4 THEN 670
730 GOTO 4950
740
750 DEF FNST$(X$)=RIGHT$("0"+RIGHT$(X$,LEN(X$)-1),2)
760
770 *****
780 ***** 日付, 時刻, タイトルの入力 *****
790 *****
800
810 CLS 3
830 T$=TIME$
840 CLS
850
860 LOCATE 20,5
870 PRINT"さあ カンパッヂ やりましょう !!!"

```

```

880 LOCATE 30,7
890 PRINT"動的三軸試験開始":BEEP
900 LOCATE 35,9
910 PRINT"試験開始年月日を入力してください"
920 LOCATE 40,10
930 INPUT DTITLE$
940 LOCATE 35,12
950 PRINT"試験開始時刻を入力してください"
960 LOCATE 40,13
970 INPUT TTITLE$
980 LOCATE 35,15
990 PRINT"試験名を入力してください"
1000 LOCATE 40,16
1010 INPUT TITLES$
1020 '
1030 LOCATE 10,17 : BEEP
1040 INPUT "次に進みますか (Y/N) ";P$
1050 IF P$="Y" THEN 1080
1060 IF P$="N" THEN 810
1070 GOTO 1020
1080 CLS
1090 '
1100 LOCATE 10,5
1110 INPUT "今回の試験は, *** 1, ..., 飽和試験*** -1 ";NCH
1120 LOCATE 15,10 : BEEP
1130 INPUT "次に進みますか (Y/N) ";P$
1140 IF P$="Y" THEN 1170
1150 IF P$="N" THEN 1100
1160 GOTO 1120
1170 CLS
1180 '
1190 '*****
1200 '***** 試験前供試体に関する入力 *****
1210 '*****
1220 '
1230 CLS
1240 LOCATE 10,5
1250 PRINT "供試体の大きさ, , 比重, を"
1260 LOCATE 15,8 : INPUT "断 面 積 : A0=",A(0)
1270 LOCATE 15,9 : INPUT "高      : H0=",H(0)
1280 LOCATE 15,10 :INPUT "重      : Wd=",WD
1290 LOCATE 15,11 :INPUT "比 重      : Gb=",GB
1300 LOCATE 15,12 :INPUT "間隙比(1) : Emax=",EMAX
1310 LOCATE 15,13 :INPUT "間隙比(2) : Emin=",EMIN
1320 '
1330 V(0)=A(0)*H(0)
1340 GAMD(0)=WD/V(0)
1350 E(0)=GB/GAMD(0)-1
1360 DR(0)=(EMAX-E(0))/(EMAX-EMIN)*100
1370 DLTVE(0)=0 : DGA(0)=0 : DGD(0)=0
1380 '
1390 LOCATE 10,15 : BEEP
1400 INPUT "次に進みますか (Y/N) ";P$
1410 IF P$="Y" THEN 1440
1420 IF P$="N" THEN 1230
1430 GOTO 1380
1440 CLS
1450 '
1460 '*****
1470 '***** 第一段階 -----> 第五段階 の 試験 *****
1480 '*****
1490 '
1500 I=0 : SIGV=0
1510 '
1520 I=I+1
1530 CLS
1540 LOCATE 10,1
1550 PRINT "では, これから, 第";I;PRINT USING "##";I;PRINT"段階の試験を開始しましょう"
1560 LOCATE 5,3 : PRINT "この試験段階でよければ-----0, 違っていればその段階の数字を入力して下さい.. ない."
1570 LOCATE 15,6 : INPUT JJJ
1580 IF JJJ=999 THEN 4960
1590 IF JJJ=0 THEN 1630
1600 I=JJJ
1610 CLS
1620 GOTO 1540
1630 '
1640 CLS
1650 LOCATE 10,6
1660 PRINT "ファイル名を入力してください"
1670 LOCATE 20,7 : INPUT FILE$
1680 LOCATE 10,9 : INPUT "ファイル名は正しいですか (Y/N) ";P$
1690 IF P$="Y" THEN 1720
1700 IF P$="N" THEN 1640
1710 GOTO 1680
1720 CLS

```

```

1730 '
1740 '*****
1750 '***** 上記入データのハードディスクへの出力 *****
1760 '*****
1770 '
1780 OPEN DRNUM$+FILE$ FOR OUTPUT AS #1
1790 PRINT #1,DTITLE$;" ";TTITLE$;" ";TITLE$
1800 PRINT #1,A(0);H(0);WD;GB;EMAX;EMIN
1810 PRINT #1,V(0);GAMD(0);E(0);DR(0)
1820 CLOSE #1
1830 '
1840 '*****
1850 '***** 供試体圧密前に関するデータの入力 *****
1860 '*****
1870 '
1880 CLS
1890 LOCATE 5,2 : PRINT "ファイル名 : ";FILE$
1900 LOCATE 15,4
1910 INPUT "サブタイトルを入力してください";STITLE$(I)
1920 LOCATE 10,7
1930 PRINT "圧密前の諸データを入力してください"
1940 LOCATE 12,8 : PRINT "校正電圧"
1950 LOCATE 15,9 : INPUT "ロードセル (ton/5volt)";ALP1(1) : ALP1(1)=ALP1(1)/5*1000
1960 LOCATE 15,10 : INPUT "側 圧 (kg/cm2/5volt)";ALP4(1) : ALP4(1)=ALP4(1)/5
1970 LOCATE 15,12 : INPUT "供試体体積 ビュレット値 :BUB=";BUB(I)
1980 LOCATE 15,13 : INPUT "供試体高さ ダイアルゲージ :DGB=";DGB(I)
1990 '
2000 LOCATE 10,15
2010 INPUT "次に進みますか (Y/N) ";P$
2020 IF P$="Y" THEN 2050
2030 IF P$="N" THEN 1880
2040 GOTO 2000
2050 CLS
2060 '
2070 '*****
2080 '***** 圧密開始 *****
2090 '*****
2100 '
2110 CLS
2120 IF I=1 THEN 2380
2130 DLTVE(I-1)=(SIGV+PEND(3,NKO)/1000)*ALP3
2140 SIGV=0
2150 '
2160 '*****
2170 '***** 供試体圧密後に関するデータの入力 *****
2180 '*****
2190 '
2200 CLS
2210 LOCATE 10,1
2220 PRINT "圧密後の諸データを入力してください"
2230 LOCATE 15,3 : INPUT "側圧(VOLT) : SIG-3=";SIG3(I)
2240 IF NCH=1 THEN 2500
2250 LOCATE 15,5 : INPUT "間隙水圧(VOLT) : BPRS =" ;BPRS
2260 LOCATE 15,7 : PRINT "等方圧密の場合は軸荷重を0"
2270 LOCATE 15,8 : PRINT "異方圧密の場合は軸荷重をVOLT値で入力して下さい"
2280 LOCATE 30,9 : INPUT " : SIG-1=";SIG1(I)
2290 LOCATE 15,11 : INPUT "供試体体積 ビュレット値 : BUA=";BUA(I)
2300 LOCATE 15,13 : INPUT "供試体高さ ダイアルゲージ : DGA=";DGA(I)
2310 '
2320 DLTC(I)=0
2330 IF NCH=-1 THEN 2590
2340 LOCATE 15,15 : INPUT "補 正 値 :DELTA-C=";DLTC(I)
2350 '
2360 DLTVB(I)=(BUB(I)-BUA(I))*NCH : DLTV(I)=DLTVB(I)-DLTC(I)+DLTVE(I-1)*NCH : DLTH(I)=DGA(I)-DGB(I)
2370 IF I=1 THEN 2630
2380 DGD(I-1)=DGB(I)
2390 DLTHD(I-1)=DGD(I-1)-DGA(I-1)
2400 V(I)=V(I-1)-DLTV(I):H(I)=H(I-1)-(DLTH(I)+DLTHD(I-1))/1000
2410 A(I)=V(I)/H(I)
2420 '
2430 IF NCH=1 THEN 2700
2440 SIG3(I)=(SIG3(I)-BPRS/1.1)*ALP4(1)
2450 GOTO 2710
2460 SIG3(I)=SIG3(I)*ALP4(1)
2470 SIG1(I)=SIG3(I)+SIG1(I)*ALP1(1)/A(I)
2480 SIGM(I)=(SIG1(I)+2*SIG3(I))/3
2490 GAMD(I)=WD/V(I)
2500 E(I)=GB/GAMD(I)-1
2510 DR(I)=(EMAX-E(I))/(EMAX-EMIN)*100
2520 '
2530 CLS 3
2540 PRINT "タイトル=";STITLE$(I)
2550 PRINT " 第一主応力=";SIG1(I);" 第三主応力=";SIG3(I);" 平均主応力=";SIGM(I)
2560 PRINT " (圧密前) (圧密後)
2570 PRINT " 体積ビュレット値 ";BUB(I);" ";BUA(I);" ";DLTVB(I)
2580 PRINT " ダイアルゲージ値 ";DGB(I);" ";DGA(I);" ";DLTH(I)
2590 PRINT

```

```

2840 PRINT " 三軸セル膨張による補正值 ";DLTC(I)
2850 PRINT
2860 PRINT " 動的試験後の体積変化量 ";DLTV(I)
2870 PRINT
2880 PRINT
2890 PRINT " (供 試 体) "
2900 PRINT " 体 積 ";V(I)
2910 PRINT " 高 さ ";H(I)
2920 PRINT " 面 積 ";A(I)
2930 PRINT " 乾 隙 比 ";GAMD(I)
2940 PRINT " 間 隙 比 ";E(I)
2950 PRINT " 相 対 密 度 ";DR(I)
2960 PRINT
2970 PRINT " (前 段 階) "
2980 PRINT " 動的試験後ダイヤルゲージ値";DGD(I-1)
2990 PRINT " 動的試験後軸方向変位量 ";DLTHD(I-1)
3000 PRINT " 動的試験時体積変化量 ";DLTVE(I-1)
3010 '
3020 '
3030 LOCATE 10,24 : BEEP
3040 INPUT "次に進みますか (Y/N) ";P$
3050 IF P$="Y" THEN 3080
3060 IF P$="N" THEN 2440
3070 GOTO 3030
3080 CLS
3090 '
3100 '*****
3110 '*** 動的三軸試験結果のA/D変換, 抽出, 及びハードディスクへの出力 ***
3120 '*****
3130 '
3140 LOCATE 20,5
3150 PRINT "では, !!!"
3160 '
3170 FOR J=1 TO 50
3180 IF J=1 THEN 3570
3190 LOCATE 10,5 : BEEP : PRINT "この試験段階を続けますか ?(Y/N)"
3200 LOCATE 15,6 : INPUT C$
3210 IF C$="Y" THEN 3550
3220 IF C$="N" THEN 3240
3230 GOTO 3190
3240 ' ** LOAD DISK **
3250 '
3260 MM%=J-1
3270 '
3280 FOR JJ=1 TO MM%
3290 FOR CHN=1 TO 4
3300 DSEG%=VARPTR(D%(0,CHN),1) : DEF SEG=DSEG%
3310 OFS%=VARPTR(D%(0,CHN))
3320 F$=DRNUM$+"FL"+MID$(STR$(JJ),2)+"-"+MID$(STR$(CHN),2)+".dat"
3330 BLOAD F$,OFS% : ADR=D%(0,CHN)
3340 NEXT CHN
3350 '
3360 OPEN DRNUM$+FILE$ FOR APPEND AS #1
3370 '
3380 IF JJ=1 THEN 3390 ELSE 3440
3390 PRINT #1,STITLE$(I)
3400 PRINT #1,SIG1(I);SIG3(I);SIGM(I);BUB(I);DGB(I)
3410 PRINT #1,BUA(I);DGA(I);DLTC(I)
3420 PRINT #1,DLTVB(I);DLTV(I);DLTH(I);V(I);H(I);A(I);GAMD(I);E(I);DR(I)
3430 PRINT #1,DGD(I-1);DLTHD(I-1);DLTVE(I-1)
3440 FOR K=N1 TO N2
3450 PRINT #1,D%(K,1);D%(K,2);D%(K,3);D%(K,4)
3460 NEXT K
3470 PRINT #1,PEND(1,JJ);PEND(2,JJ);PEND(3,JJ);PEND(4,JJ)
3480 PRINT #1,ALP1(JJ);ALP2;ALP3;ALP4(JJ)
3490 A$="CONTINUE"
3500 IF JJ=MM% THEN A$="END"
3510 PRINT #1,A$
3520 CLOSE #1
3530 NEXT JJ
3540 GOTO 1510
3550 '
3560 CLS
3570 '
3580 '
3590 '
3600 LOCATE 12,7 : PRINT"第";:PRINT USING "###";I :PRINT"段階-----第";:PRINT USING "###";J :PRINT "
レベル"
3610 LOCATE 15,10 : PRINT"ポテンシオメータ-を";POTE(J,I)/(ALP1(1)/1000) : LOCATE 40,10 : PRINT"に設定して下
さい"
3620 BEEP : ' LOCATE 22,11 : PRINT "校正電圧"
3630 IF J=1 THEN 3670
3640 ALP1(J)=ALP1(J-1)
3650 ALP4(J)=ALP4(J-1)
3660 '

```

```

3670 '
3680 '
3690 '
3700 '
3710 '
3720 '
3730 '*****
3740 '*****
3750 '***** データのサンプリング開始 *****
3760 '*****
3770 '*****
3780 '
3790 CSEG%=VARPTR(MPRO%(0),1) : DEF SEG=CSEG%
3800 RDBIN=VARPTR(MPRO%(0))
3810 PLOTXY=RDBIN+&H100
3820 '
3830 BLOAD "1:BDTSUB.BIN",RDBIN
3840 BLOAD "1:PLOTXY.BIN",PLOTXY
3850 '
3860 DRA=20
3870 '
3880 FOR CHN=2 TO 5
3890 D%(0,CHN-1)=N% : D%(1,CHN-1)=0 : D%(2,CHN-1)=32767 : D%(3,CHN-1)=-32767
3900 NEXT CHN
3910 FOR I%=0 TO N%-1 : X%(I%)=I% : NEXT I%
3920 IRO%=7
3930 ISET IFC : ISET REN
3940 CMD DELIM=0
3950 '
3960 PRINT @DRA ; "RES" : LINE INPUT @DRA ; AS
3970 PRINT @DRA ; "SET 2;5" : LINE INPUT @DRA ; AS
3980 PRINT @DRA ; "B.V 0" : LINE INPUT @DRA ; AS
3990 PRINT @DRA ; "MRY 6000;0" : LINE INPUT @DRA ; AS
4000 PRINT @DRA ; "CLK 10" : LINE INPUT @DRA ; AS
4010 PRINT @DRA ; "ETG"
4020 CLS 3
4030 LOCATE 12,7 : PRINT"第";:PRINT USING "##";I; :PRINT"段階-----第"; :PRINT USING "##";J; :PRINT "
レベル"
4040 LOCATE 10,15 : PRINT"三軸試験機のスイッチをONしてください !!!"
4050 PRINT"A/D変換のランプが、全て緑色に点燈すれば," : STOP
4060 '
4070 ' ** BDT COMMAND **
4080 '
4090 FOR CHN=2 TO 5
4100 PRINT @DRA ; "RES" : LINE INPUT @DRA ; AS
4110 C$="SET"+STR$(CHN)
4120 PRINT @DRA ; C$ : LINE INPUT @DRA ; AS
4130 PRINT @DRA ; "MRY 6000;0" : LINE INPUT @DRA ; AS
4140 PRINT @DRA ; "MRY ?" : LINE INPUT @DRA;D$
4150 PRINT @DRA ; "BDT "
4160 '
4170 WBYTE &H3F,&H40+DRA,&H20 ;
4180 DEF SEG=CSEG%
4190 NKO%=4
4200 CALL RDBIN(D%(NKO%,CHN-1),N%)
4210 PRINT @DRA ; "MRY 6000;0"
4220 PRINT @DRA ; "MAX" : LINE INPUT @DRA ; D$
4230 D%(2,CHN-1)=VAL(MID$(D$,3)) : ' MAX-DATA
4240 PRINT @DRA ; "MRY 6000;0"
4250 PRINT @DRA ; "MIN" : LINE INPUT @DRA ; D$
4260 D%(3,CHN-1)=VAL(MID$(D$,3)) : ' MIN-DATA
4270 D%(1,CHN-1)=CHN-1
4280 '
4290 PEND(CHN-1,J)=D%(4*N%-1,CHN-1)
4300 '
4310 NEXT CHN
4320 '
4330 PRINT TIMES$
4340 '
4350 CLS 3
4360 '
4370 LOCATE 12,5 : PRINT"第";:PRINT USING "##";I; :PRINT"段階-----第"; :PRINT USING "##";J; :PRINT "
レベル"
4380 LOCATE 7,8 : PRINT "1 軸荷重 (MAX)=";D%(2,1)/1000
4390 LOCATE 7,9 : PRINT " (MIN)=";D%(3,1)/1000
4400 LOCATE 7,10 : PRINT "2 軸変位 (MAX)=";D%(2,2)/1000
4410 LOCATE 7,11 : PRINT " (MIN)=";D%(3,2)/1000
4420 LOCATE 7,12 : PRINT " (せん断)="; :PRINT USING "##.###^";(D%(2,2)-D%(3,2))/1000/2/(H(I)*10
)*1.2
4430 LOCATE 7,14 : PRINT "3 体積化(MAX)=";D%(2,3)/1000 : LOCATE 35,14 : PRINT " (4.0 VOLT 以下) "
4440 LOCATE 7,15 : PRINT " (MIN)=";D%(3,3)/1000
4450 LOCATE 7,16 : PRINT "4 側 圧 (MAX)=";D%(2,4)/1000
4460 LOCATE 7,17 : PRINT " (MIN)=";D%(3,4)/1000
4470 LOCATE 5,18 : INPUT "体積変化計の0調節をしますか (Y/N)";P$
4480 IF P$="Y" THEN 4510
4490 IF P$="N" THEN 4530

```

```

4500 GOTO 4470
4510 LOCATE 7,20 : INPUT "調節量(VOLT)=";VCHO(J)
4520 GOTO 4540
4530 VCHO(J)=0
4540 LOCATE 5,21 : BEEP : INPUT "次に進みますか (Y/N) ";PS
4550 IF PS="Y" THEN 4580
4560 IF PS="N" THEN 4350
4570 GOTO 4540
4580 '
4590 CLS 3
4600 SIGV=SIGV+VCHO(J)
4610 '
4620 CLS 3
4630 LOCATE 10,10 : BEEP
4640 PRINT "今の実験のチェックをしますか ?(Y/N)"
4650 LOCATE 15,11 : INPUT PS
4660 IF PS="Y" THEN GOSUB *CHECK : GOTO 4690
4670 IF PS="N" THEN 4690
4680 GOTO 4630
4690 CLS 3
4700 LOCATE 5,5 : BEEP
4710 PRINT "今の実験を再度行いますか ?(Y/N)" : INPUT DS
4720 IF DS="Y" THEN 3550
4730 IF DS="N" THEN 4750
4740 GOTO 4700
4750 CLS 3
4760 '*****
4770 '*****
4780 '*****
4790 ' ** SAVE DISK **
4800 '
4810 FOR CHN=1 TO 4
4820 DSEG%=VARPTR(D%(0,CHN),1)
4830 DEF SEG=DSEG%
4840 OFS%=VARPTR(D%(0,CHN))
4850 FS=DRNUM$+"FL"+MID$(STR$(J),2)+ "-" +MID$(STR$(CHN),2)+ ".dat"
4860 BSAVE FS, OFS%, (4+N%)*2
4870 NEXT CHN
4880 '
4890 PRINT TIMES
4900 NKO=J
4910 '
4920 IF J=XN-1 THEN LOCATE 10,10 : PRINT "次のレベルでこの段階の試験を終了して下さい"
4930 '
4940 NEXT J
4950 '
4960 END
4970 '*****
4980 '***** 時刻歴 及び ヒステリシスのチェック *****
4990 '*****
5000 *CHECK
5010 ' ** GRAPH PLOT **
5020 '
5030 CONSOLE 0,25,0,1 : SCREEN 3,0,0,1
5040 '
5050 FOR CHN=1 TO 4
5060 IF CHN=1 OR CHN=3 THEN VIEW (0,20)-(449,169) : YO=0
5070 IF CHN=2 OR CHN=4 THEN VIEW (0,200)-(449,349) : YO=11
5080 WINDOW (0,-4)-(10,4) : CLS 3
5090 '
5100 LOCATE 0,YO
5110 FOR Y=-4 TO 4 : LINE (0,Y)-(10,Y),5 : NEXT Y
5120 FOR X=0 TO 10 : LINE (X,-4)-(X,4),5 : NEXT X
5130 LINE (0,-4)-(0,4),5 : LINE (0,0)-(10,0),5
5140 '
5150 LOCATE 60,YO+3 : PRINT "CHN =" ;CHN
5160 LOCATE 60,YO+4 : PRINT "N =" ;D%(0,CHN)
5170 LOCATE 60,YO+5 : PRINT "MAX =" ;D%(2,CHN)
5180 LOCATE 60,YO+6 : PRINT "MIN =" ;D%(3,CHN)
5190 LOCATE 60,YO+7 : PRINT "ADR =" ;ADR ; "," ;ADR+D%(0,CHN)-1
5200 '
5210 N%=D%(0,CHN) : MAX=D%(2,CHN) : MIN=D%(3,CHN)
5220 IF MAX=MIN THEN MAX=MIN+1
5230 WINDOW (0,MIN*1.2)-(N%-1,MAX*1.2)
5240 PSET (0,D%(NKO%,CHN))
5250 DEF SEG=CSEG%
5260 CALL PLOTXY(1R0%,X%(0),D%(NKO%,CHN),D%(0,CHN))
5270 '
5280 LOCATE 0,22
5290 VIEW (0,20)-(639,399)
5300 NEXT CHN
5310 '
5320 CLS 3
5330 '*****
5340 '***** HISTERISIS-LOOP *****

```

```

5350 '*****
5360 '
5370 CONSOLE 0,25,0
5380 WIDTH 80,25
5390 SCREEN 0,0,0,1
5400 WINDOW (0,0)-(639,199)
5410 VIEW (0,0)-(639,199)
5420 '
5430 FOR K=1 TO TNN
5440 YY(K,1)=D%(N1+K-1,1)*ALP1(J)/A(I)/1000
5450 YY(K,2)=D%(N1+K-1,2)*ALP2/(H(I)*10)/1000
5460 YY(K,3)=D%(N1+K-1,3)*ALP3/V(I)/1000
5470 YY(K,4)=D%(N1+K-1,4)*ALP4(J)/1000
5480 NEXT K
5490 '
5500 FOR K=1 TO 3 : BMAX=-999 : BMIN=999
5510 FOR II=1 TO TNN
5520 IF BMAX>YY(II,K) THEN 5530 ELSE BMAX=YY(II,K)
5530 IF BMIN<YY(II,K) THEN 5540 ELSE BMIN=YY(II,K)
5540 NEXT II
5550 BKIJUN=.5*(BMAX+BMIN)
5560 FOR II=1 TO TNN
5570 YY(II,K)=YY(II,K)-BKIJUN
5580 NEXT II : NEXT K
5590 K=0 : IZ=0
5600 FOR II=2 TO TNN : IF IZ=0 THEN 5610 ELSE IF II<IZ THEN 5670
5610 IF YY(II-1,1)*YY(II,1)>0 THEN 5670
5620 IF YY(II,1)<0 THEN 5670
5630 K=K+1 : IZ=II+450
5640 NSTA(K)=II
5650 IF K>=2 THEN 5680
5660 IF II>100 THEN NSTA(K)=2 : GOTO 5630
5670 NEXT II
5680 '
5690 K1=NSTA(1)
5700 K2=NSTA(2)
5710 FOR M=1 TO 3
5720 SMAX=-999 : SMIN=999
5730 FOR K=K1 TO K2
5740 IF SMAX>YY(K,M) THEN 5760
5750 SMAX=YY(K,M)
5760 IF SMIN<YY(K,M) THEN 5780
5770 SMIN=YY(K,M)
5780 NEXT K
5790 '
5800 IF M=1 THEN 5810 ELSE 5830
5810 SIGA=.5*(SMAX-SMIN):Y2=SMAX:Y1=SMIN
5820 GOTO 5870
5830 IF M=2 THEN 5840 ELSE 5860
5840 EPA=.5*(SMAX-SMIN) :X2=SMAX:X1=SMIN
5850 GOTO 5870
5860 IF M=3 THEN EPV=.5*(SMAX-SMIN)
5870 NEXT M
5880 '
5890 IF ABS(X2)>ABS(X1) THEN XA=ABS(X2) ELSE XA=ABS(X1)
5900 IF ABS(Y2)>ABS(Y1) THEN YA=ABS(Y2) ELSE YA=ABS(Y1)
5910 IF XA=0 THEN XA=100
5920 IF YA=0 THEN YA=100
5930 DX=100/XA : DY=100/YA
5940 '
5950 LOCATE 0,0
5960 PRINT "第"; : PRINT USING "##";J; : PRINT "-レベル" : LOCATE 50,1 : PRINT K1;K2
5970 LOCATE 32,2
5980 PRINT "第10波目"
5990 X0=300 : Y0=100
6000 LINE (0,Y0)-(639,Y0)
6010 LINE (X0,0)-(X0,199)
6020 FOR K=K1+1 TO K2
6030 XX1=X0+YY(K-1,2)*DX : YY1=Y0+YY(K-1,1)*DY
6040 XX2=X0+YY(K,2)*DX : YY2=Y0+YY(K,1)*DY
6050 LINE (XX2,YY2)-(XX1,YY1)
6060 NEXT K
6070 XX1=X0+YY(K2,2)*DX : YY1=Y0+YY(K2,1)*DY
6080 XX2=X0+YY(K1,2)*DX : YY2=Y0+YY(K1,1)*DY
6090 LINE (XX2,YY2)-(XX1,YY1)
6100 CLS 3
6110 RETURN
6120 '*****
6130 '*****
6140 '*****
6150 '
6160 '
6170 '***** JIKOKU-REKI *****
6180 *JIKOKU
6190 CLS
6200 LOCATE 10,10 : INPUT "FILE-NAME=";FILE$

```

```

6210 LOCATE 13,15 : PRINT"何段階目の試験値ですか ?"
6220 LOCATE 15,16 : INPUT I
6230 OPEN FILE$ FOR INPUT AS #1
6240 INPUT #1,DTITLE$,TTITLE$,TITLE$
6250 INPUT #1,A(O),H(O),WD,GB,EMAX,EMIN
6260 INPUT #1,V(O),GAMD(O),E(O),DR(O)
6270 '
6280 FOR J=1 TO 40
6290 IF J=1 THEN 6300 ELSE 6350
6300 INPUT #1,STITLE$(I)
6310 INPUT #1,SIG1(I),SIG3(I),SIGM(I),BUB(I),DOB(I)
6320 INPUT #1,BUA(I),DGA(I),DLTC(I)
6330 INPUT #1,DLTVB(I),DLTV(I),DLTH(I),V(I),H(I),A(I),GAMD(I),E(I),DR(I)
6340 INPUT #1,DGD(I-1),DLTHD(I-1),DLTVE(I-1)
6350 '
6360 FOR K=1 TO TNN
6370 INPUT #1,PLOAD%(K,J),HDISP%(K,J),VSTRA%(K,J),QSIG3%(K,J)
6380 NEXT K
6390 INPUT #1,PEND(1,J),PEND(2,J),PEND(3,J),PEND(4,J)
6400 INPUT #1,ALP1(J),ALP2,ALP3,ALP4(J)
6410 INPUT #1,A$
6420 IF A$="END" THEN 6450
6430 '
6440 NEXT J
6450 CLOSE #1
6460 '
6470 NKO=J
6480 '
6490 FOR J=1 TO NKO
6500 FOR K=1 TO TNN
6510 YY(K,1)=PLOAD%(K,J)
6520 YY(K,2)=HDISP%(K,J)
6530 YY(K,3)=VSTRA%(K,J)
6540 YY(K,0)=QSIG3%(K,J)
6550 NEXT K
6560 '
6570 '
6580 '***** VOLT値から物理値へ *****
6590 FOR K=1 TO TNN
6600 YY(K,1)=YY(K,1)*ALP1(J)/A(I)/1000
6610 YY(K,2)=YY(K,2)*ALP2/(H(I)*10)/1000
6620 YY(K,3)=YY(K,3)*ALP3/V(I)/1000
6630 YY(K,0)=YY(K,0)*ALP4(J)/1000
6640 NEXT K
6650 '
6660 CONSOLE 0,25,0
6670 WIDTH 80,25
6680 SCREEN 0,0,0,1
6690 WINDOW (0,0)-(639,199)
6700 VIEW (0,0)-(639,199)
6710 '
6720 LOCATE 0,0 : PRINT J;"-レベル"
6730 LOCATE 0,5 : PRINT"P"
6740 LOCATE 0,11: PRINT"H"
6750 LOCATE 0,17: PRINT"V"
6760 FOR K=1 TO 3
6770 LINE (50,35+(K-1)*48)-(50,75+(K-1)*48)
6780 LINE (50,55+(K-1)*48)-(450,55+(K-1)*48)
6790 NEXT K
6800 '
6810 '***** DELTA=20DOT-FULL *****
6820 FOR K=1 TO 3
6830 XO=50 :YO=55+(K-1)*48
6840 LINE (XO,YO)-(XO,YO)
6850 BMAX=-999 : BMIN=999
6860 FOR II=1 TO TNN
6870 IF BMAX>YY(II,K) THEN 6880 ELSE BMAX=YY(II,K)
6880 IF BMIN<YY(II,K) THEN 6890 ELSE BMIN=YY(II,K)
6890 NEXT II
6900 BKIJUN=.5*(BMAX+BMIN)
6910 FOR II=1 TO TNN
6920 YY(II,K)=YY(II,K)-BKIJUN
6930 NEXT II
6940 '
6950 BMAX=BMAX-BKIJUN
6960 BMIN=BMIN-BKIJUN
6970 '
6980 '
6990 BMAX=ABS(BMAX) : BMIN=ABS(BMIN)
7000 IF BMAX>BMIN THEN BETA=BMAX ELSE BETA=BMIN
7010 BETA=20/BETA
7020 FOR II=2 TO TNN STEP 2
7030 X1=XO+II*.5
7040 Y1=YO+YY(II,K)*BETA
7050 LINE -(X1,Y1)

```

```

7060 NEXT II
7070 NEXT K
7080 CLS 3
7090 NEXT J
7100 '
7110 RETURN
7120 '
7130 '
7140 '
7150 '*****
7160 '*****
7170 '***** HISUTERISHISU-LOOP *****
7180 '*****
7190 '*****
7200 *HISTR
7210 '
7220 CLS 3
7230 LOCATE 5,5 : INPUT "試験値の整理をしますか (Y/N) ";GS
7240 IF GS="Y" THEN 7270
7250 IF GS="N" THEN 7300
7260 GOTO 7220
7270 LOCATE 10,10 : INPUT "ファイル名を入力して下さい";FL$
7280 LOCATE 13,15 : INPUT "試験の段階数は、何段階ですか";LLL
7290 FOR I=1 TO LLL : FILES="2:"+FL$+"-"+MID$(STR$(I),2) : GOTO 7330
7300 LOCATE 10,10 : INPUT "FILE-NAME=";FIL$ : FILES="3:"+FIL$
7310 LOCATE 13,15 : PRINT"何段階目の試験値ですか ?"
7320 LOCATE 15,16 : INPUT I
7330 OPEN FILES FOR INPUT AS #1
7340 INPUT #1,DTITLES,TTITLES,TITLES
7350 INPUT #1,A(O),H(O),WD,GB,EMAX,EMIN
7360 INPUT #1,V(O),GAMD(O),E(O),DR(O)
7370 '
7380 FOR J=1 TO 40
7390 IF J=1 THEN 7400 ELSE 7450
7400 INPUT #1,STITLES(I)
7410 INPUT #1,SIG1(I),SIG3(I),SIGM(I),BUB(I),DGB(I)
7420 INPUT #1,BUA(I),DGA(I),DLTC(I)
7430 INPUT #1,DLTVB(I),DLTV(I),DLTH(I),V(I),H(I),A(I),GAMD(I),E(I),DR(I)
7440 INPUT #1,DGD(I-1),DLTHD(I-1),DLTVE(I-1)
7450 '
7460 FOR K=1 TO TNN
7470 INPUT #1,PLOAD%(K,J),HDISP%(K,J),VSTRA%(K,J),QSIG3%(K,J)
7480 NEXT K
7490 INPUT #1,PEND(1,J),PEND(2,J),PEND(3,J),PEND(4,J)
7500 INPUT #1,ALP1(J),ALP2,ALP3,ALP4(J)
7510 INPUT #1,AS$
7520 IF AS$="END" THEN 7550
7530 '
7540 NEXT J
7550 CLOSE #1
7560 '
7570 NKO=J
7580 '
7590 CONSOLE 0,25,0
7600 WIDTH 80,25
7610 SCREEN 0,0,0,1
7620 WINDOW (0,0)-(639,199)
7630 VIEW (0,0)-(639,199)
7640 '
7650 'FOR J=1 TO NKO
7660 'FOR K=1 TO TNN
7670 'PRINT I;J;K;PLOAD%(K,J)*ALP1(J)/A(I)/1000;HDISP%(K,J)*ALP2/(H(I)*10)/1000;VSTRA%(K,J)*ALP3/V(I)/1000
7680 'NEXT K
7690 'STOP
7700 'NEXT J
7710 '
7720 FOR J=1 TO NKO
7730 FOR K=1 TO TNN
7740 YY(K,1)=PLOAD%(K,J)
7750 YY(K,2)=HDISP%(K,J)
7760 YY(K,3)=VSTRA%(K,J)
7770 YY(K,4)=QSIG3%(K,J)
7780 NEXT K
7790 '
7800 '
7810 '***** VOLT値から物理値へ *****
7820 FOR K=1 TO TNN
7830 YY(K,1)=YY(K,1)*ALP1(J)/A(I)/1000
7840 YY(K,2)=YY(K,2)*ALP2/(H(I)*10)/1000
7850 YY(K,3)=YY(K,3)*ALP3/V(I)/1000
7860 YY(K,4)=YY(K,4)*ALP4(J)/1000
7870 NEXT K
7880 '
7890 FOR K=1 TO 3 : BMAX=-999 : BMIN=999
7900 FOR II=1 TO TNN

```

```

7910 IF BMAX>YY(II,K) THEN 7920 ELSE BMAX=YY(II,K)
7920 IF BMIN<YY(II,K) THEN 7930 ELSE BMIN=YY(II,K)
7930 NEXT II
7940 BKIJUN=.5*(BMAX+BMIN)
7950 FOR II=1 TO TNN
7960 YY(II,K)=YY(II,K)-BKIJUN
7970 NEXT II : NEXT K
7980 '
7990 K=0 : IZ=0
8000 FOR II=2 TO TNN
8010 IF II<IZ THEN 8070
8020 IF YY(II-1,1)*YY(II,1)>0 THEN 8070
8030 IF YY(II,1)<=0 THEN 8070
8040 K=K+1 : IZ=II+400
8050 NSTA(K)=II
8060 IF K>=2 THEN 8310
8070 NEXT II
8080 '
8090 IB=NSTA(1)
8100 IA=500-IB
8110 IF IA>1 THEN 8130
8120 NSTA(1)=1 : NSTA(2)=IB : GOTO 8310
8130 DCH=YY(1,1)
8140 FOR KG=1 TO IA
8150 IF DCH>YY(IB+KG-1,1) THEN 8180
8160 IA=KG-1
8170 GOTO 8220
8180 FOR M=1 TO 3
8190 YG(KG,M)=YY(IB+KG-1,M)
8200 NEXT M
8210 NEXT KG
8220 FOR KG=IB TO 1 STEP -1 : FOR M=1 TO 3
8230 YY(KG+IA,M)=YY(KG,M)
8240 NEXT M : NEXT KG
8250 FOR KG=1 TO IA : FOR M=1 TO 3
8260 YY(KG,M)=YG(KG,M)
8270 NEXT M : NEXT KG
8280 NSTA(1)=1
8290 NSTA(2)=500
8300 '
8310 K1=NSTA(1)
8320 K2=NSTA(2)
8330 FOR M=1 TO 3
8340 SMAX=-999 : SMIN=999
8350 FOR K=K1 TO K2
8360 IF SMAX>YY(K,M) THEN 8380
8370 SMAX=YY(K,M)
8380 IF SMIN<YY(K,M) THEN 8400
8390 SMIN=YY(K,M)
8400 NEXT K
8410 '
8420 IF M=1 THEN 8430 ELSE 8450
8430 SIGA=.5*(SMAX-SMIN):Y2=SMAX:Y1=SMIN
8440 GOTO 8490
8450 IF M=2 THEN 8460 ELSE 8480
8460 EPA=.5*(SMAX-SMIN):X2=SMAX:X1=SMIN
8470 GOTO 8490
8480 IF M=3 THEN EPV=.5*(SMAX-SMIN)
8490 NEXT M
8500 '
8510 ED=SIGA/EPA
8520 PO=.5*(1-EPV/EPA)
8530 GSH=.5*ED/(1+PO)
8540 HGM=EPA*(1+PO)
8550 WWW=SIGA*EPA
8560 '
8570 '
8580 DWW=0
8590 FOR K=K1+1 TO K2
8600 DWW=DWW+.5*(YY(K,1)+YY(K-1,1))*(YY(K,2)-YY(K-1,2))
8610 NEXT K
8620 DWW=DWW+.5*(YY(K1,1)+YY(K2,1))*(YY(K1,2)-YY(K2,2))
8630 HHH=DWW/WWW/(2*3.14159)*100
8640 '
8650 POIS(J)=PO
8660 DAMR(J)=HHH
8670 EPSR(J)=EPA
8680 ELAS(J)=ED
8690 SHRE(J)=GSH
8700 SHRH(J)=HGM
8710 '
8720 PRINT I,J,K,IA,IB,NSTA(1),NSTA(2)
8730 IF GS="Y" THEN 9000
8740 '*****
8750 '***** HISTERESIS-LOOP *****

```

```

8760 '*****
8770 '
8780 CLS 3
8790 IF ABS(X2)>ABS(X1) THEN XA=ABS(X2) ELSE XA=ABS(X1)
8800 IF ABS(Y2)>ABS(Y1) THEN YA=ABS(Y2) ELSE YA=ABS(Y1)
8810 IF XA=0 THEN XA=100
8820 IF YA=0 THEN YA=100
8830 DX=100/XA : DY=100/YA
8840 '
8850 LOCATE 0,0
8860 PRINT "第"; : PRINT USING "##";J; : PRINT "-レベル" : LOCATE 50,1 : PRINT K1;K2
8870 LOCATE 32,2
8880 PRINT "第10波目"
8890 XO=300 : YO=100
8900 LINE (0,YO)-(639,YO)
8910 LINE (XO,0)-(XO,199)
8920 FOR K=K1+1 TO K2
8930 XX1=XO+YY(K-1,2)*DX : YY1=YO+YY(K-1,1)*DY
8940 XX2=XO+YY(K,2)*DX : YY2=YO+YY(K,1)*DY
8950 LINE (XX2,YY2)-(XX1,YY1)
8960 NEXT K
8970 XX1=XO+YY(K2,2)*DX : YY1=YO+YY(K2,1)*DY
8980 XX2=XO+YY(K1,2)*DX : YY2=YO+YY(K1,1)*DY
8990 LINE (XX2,YY2)-(XX1,YY1)
9000 '
9010 '
9020 NEXT J
9030 '
9040 GOTO 9200
9050 '
9060 LPRINT STITLE$(I)
9070 LPRINT CHR$(27);">";
9080 LPRINT CHR$(27);"T";"14"
9090 LPRINT "
9100 LPRINT "
9110 LPRINT " | 番号 | 軸 重 | 弾性係数 | せん断重 | せん断弾性係数 | ボアソン比 |
9120 LPRINT " |
9130 LPRINT " | Ed | | h |
9140 '
9150 FOR J=1 TO NKO
9160 LPRINT " | ";LPRINT USING "#####";J;LPRINT " | ";LPRINT USING "#.#####";EPSR(J);LPRINT " | "
;LPRINT USING "#####";ELAS(J);LPRINT " | ";LPRINT USING "#.#####";SHRH(J);LPRINT " | ";LPRINT
USING "#####";SHRE(J);LPRINT " | ";
9170 LPRINT USING "##.##";DAMR(J);LPRINT " | ";LPRINT USING "##.##";POIS(J);LPRINT " | "
9180 LPRINT " |
9190 NEXT J
9200 '
9210 IF G$="N" THEN 9420
9220 '
9230 '*****
9240 '***** 図形処理データの作成 *****
9250 '*****
9260 '
9270 CLS 3
9280 IF I<>1 THEN 9340
9290 FG$="3:"*FL$ : OPEN FG$ FOR OUTPUT AS #1
9300 PRINT #1,FL$
9310 PRINT #1,LL$
9320 GOTO 9350
9330 '
9340 OPEN FG$ FOR APPEND AS #1
9350 PRINT #1 ,SIGM(I);SIG3(I);SIG1(I);E(I);E(I);NKO
9360 FOR J=1 TO NKO
9370 PRINT #1,EPSR(J);ELAS(J);POIS(J);DAMR(J)
9380 NEXT J
9390 CLOSE #1
9400 '
9410 NEXT I
9420 '
9430 RETURN
9440 '
9450 '
9460 '
9470 '*****
9480 '*****
9490 '***** 試験結果の作表 *****
9500 '*****
9510 '*****
9520 *SAKUH
9530 LOCATE 10,10 : INPUT "FILE NAME=";FILE$
9540 LOCATE 13,15 : PRINT "何段階目の試験値ですか ?"
9550 LOCATE 15,16 : INPUT I
9560 OPEN FILE$ FOR INPUT AS #1
9570 INPUT #1,DTITLE$,TTITLE$,TITLE$
9580 INPUT #1,A(0),H(0),WD,GB,EMAX,EMIN
9590 INPUT #1,V(0),GAMD(0),E(0),DR(0)

```

```

9600 '
9610 FOR J=1 TO 40
9620 IF J=1 THEN 9630 ELSE 9680
9630 INPUT #1,STITLE$(I)
9640 INPUT #1,SIG1(I),SIG3(I),SIGM(I),BUB(I),DGB(I)
9650 INPUT #1,BUA(I),DOA(I),DLTC(I)
9660 INPUT #1,DLTVB(I),DLTV(I),DLTH(I),V(I),H(I),A(I),GAMD(I),E(I),DR(I)
9670 INPUT #1,DGD(I-1),DLTHD(I-1),DLTVE(I-1)
9680 '
9690 FOR K=1 TO TNN
9700 INPUT #1,PLOAD%(K,J),HDISP%(K,J),VSTRA%(K,J),QSIG3%(K,J)
9710 NEXT K
9720 INPUT #1,PEND(1,J),PEND(2,J),PEND(3,J),PEND(4,J)
9730 INPUT #1,ALP1(J),ALP2,ALP3,ALP4(J)
9740 INPUT #1,AS$
9750 IF AS$="END" THEN 9780
9760 '
9770 NEXT J
9780 CLOSE #1
9790 '
9800 '
9810 LPRINT CHR$(27);">";
9820 LPRINT CHR$(27);"T";"14"
9830 LPRINT"
-----
9840 LPRINT" | 試験ケース ; ";:LPRINT USING "&"&";TITLE$;:LPRINT "
| Gb=";:LPRINT USING "###.###";GB;:LPRINT " cmax=";:LPRINT USING "###.###";EMAX;:LPRINT " | 備考
| "
9850 LPRINT" | -----
| "
9860 LPRINT" | 試験月日 ; 昭和 月 日 | Wd=";:LPRINT USING "###.###";WD;:L
PRINT" | emin=";:LPRINT USING "###.###";EMIN;:LPRINT " | "
9870 LPRINT" | -----
| "
9880 LPRINT" | 較 | ロードセル | TON/5VOLT | VO=";:LPRINT USING "#####";V(O)
;:LPRINT " | r d0=";:LPRINT USING "###.###";GAMD(O);:LPRINT " | "
9890 LPRINT" | 正 | -----
| "
9900 LPRINT" | 電 | 側 圧 | Kg/cm2/5VOLT | HO=";:LPRINT USING "###.###";H(O)
;:LPRINT " | e0=";:LPRINT USING "###.###";E(O);:LPRINT " | "
9910 LPRINT" | 圧 | -----
| "
9920 LPRINT" | | GAIN | | AO=";:LPRINT USING "###.###";A(O)
;:LPRINT " | Dr0=";:LPRINT USING "###.###";DR(O);:LPRINT " | "
9930 LPRINT" | -----
| "
9940 FOR I=1 TO 5
9950 LPRINT" | S3 =" ;:LPRINT USING "###.###";SIG3(I);:LPRINT " S1 =" ;:LPRINT USING "###.###";SIG1(I);:LPRI
NT " | Sm =" ;:LPRINT USING "###.###";SIGM(I);:LPRINT " S1/S3 =" ;:LPRINT USING "###.###";SIG3(I);
9960 LPRINT " | 動的試験時の動体変化電圧 | S3の電圧 | "
9970 LPRINT" | -----
| "
9980 LPRINT" | 圧密前 Bu1B=";:LPRINT USING "#####";BUB(I);:LPRINT " | 圧密前 DG1B=";:LPRINT USI
NG "#####";DGB(I);:LPRINT " | "
9990 LPRINT" | -----
| "
10000 LPRINT" | 圧密後 Bu1A=";:LPRINT USING "#####";BUA(I);:LPRINT " | 圧密後 DG1A=";:LPRINT US
ING "#####";DOA(I);:LPRINT " | "
10010 LPRINT" | -----
| "
10020 LPRINT" | *VB1 =Bu1B-Bu1A | *H1 =DG1A-DG1B | -----
| "
10030 LPRINT" | =";:LPRINT USING "#####";DLTVB(I);:LPRINT " | =";:LPRINT USING
"#####";DLTH(I);:LPRINT " | "
10040 LPRINT" | *C1 =";:LPRINT USING "#####";DLTC(I);:LPRINT " | 動的試験後D DG1D=";:LP
RINT USING "#####";DGD(I);:LPRINT " | VOLT | "
10050 LPRINT" | -----
| "
10060 LPRINT" | *V1 =*VB1-*C1 | *H1D=DG1D-DG1A | V1=";:LPRINT USING "#####";V(I)
;:LPRINT " | r d1=";:LPRINT USING "###.###";GAMD(I);:LPRINT " | 備考
| "
10070 LPRINT" | -----
| "
10080 LPRINT" | =";:LPRINT USING "#####";DLTV(I);:LPRINT " | =";:LPRINT USING
"#####";DLTHD(I);:LPRINT " | H1=";:LPRINT USING "###.###";H(I);:LPRINT " e1=";:LPRINT US
ING "###.###";E(I);:LPRINT " | "
10090 LPRINT" | -----
| "
10100 LPRINT" | V1 =VO-*V1 | H1 =HO-*H1/1000 | A1=";:LPRINT USING "###.###";A(I)
;:LPRINT " | Dr1=";:LPRINT USING "###.###";DR(I);:LPRINT " | "
10110 LPRINT" | -----
| "
10120 NEXT I
10130 RETURN

```


2. ピストン貫入量による影響

ピストン貫入量の影響を知るために、供試体を取り除いた状態で、他の条件は同一として、3波分軸方向に振動させ、その時の軸変位量と体積変化量をサンプリングした。この結果、両者の関係を各拘束圧段階別にプロットしたものを図-1に示した。

この図から、軸変位量に対して体積変化量が生じている。これは、ピストンの貫入量のキャンセル機構に若干の誤差が含まれている。このため、これが試験値に及ぼす影響量を調べる。

図-1に示すように、ほとんどの点が破線の範囲内にある。そのほば、中央のラインで両者の関係を代表させると、 $\Delta V = 40 \times \Delta H$ なる関係式を得る。今、体積変化量 $\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2$ にすると、ポアソン比は、次のように計算される。

ここに、 ΔV_1 ：真の体積変化量

ΔV_2 ：誤差量

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_s}\right) \\ &= \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_s} \times \frac{\Delta V}{V}\right) \\ &= \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_s} \times \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{V}\right) \\ &= \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_s} \times \frac{\Delta V_1 + 40 \times \Delta H}{V}\right) \\ &= \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_s} \times \frac{\Delta V_1}{V} - \frac{1}{\varepsilon_s} \times \frac{40 \times \Delta H}{V}\right) \\ &= \nu_0 - \frac{1}{2} \times \frac{40 \times \Delta V_1}{\Delta H / H \times A \times H}\end{aligned}$$

(A：供試体断面積，H：供試体高さ)

$$\begin{aligned}&= \nu_0 - \frac{1}{2} \times \frac{40}{A} \\ &= \nu_0 - 0.028\end{aligned}$$

$$\left(A = \frac{\pi}{4} \times (30)^2 = 706.9 \text{ cm}^2 \text{ より}\right)$$

よって、ポアソン比は、軸ひずみ 1.6×10^{-6} では ± 0.014 の誤差が含まれることになる。

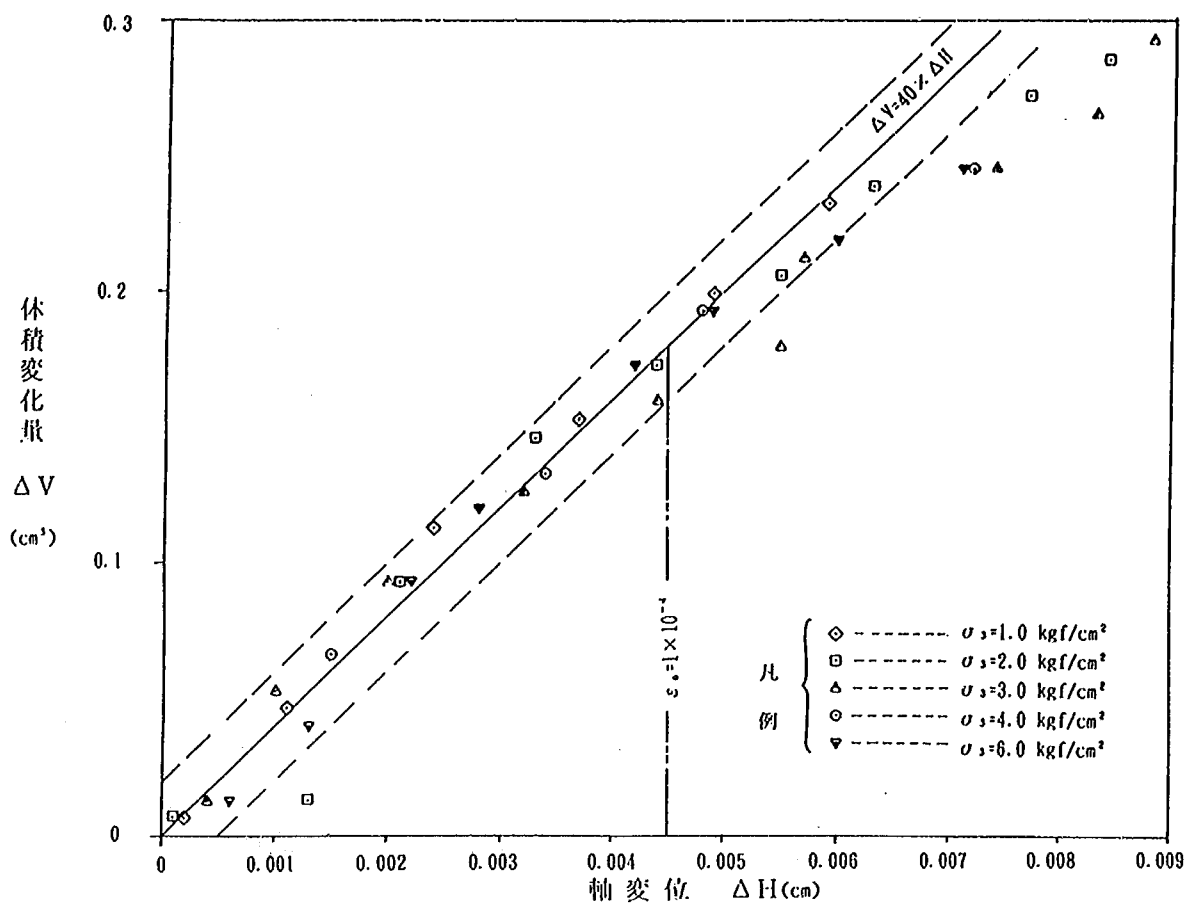


図-1 ピストン貫入量の補正量

粗粒材料の動的変形特性

—自動計測システムによる大型繰返し三軸試験—

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3312号

平成 6 年 10 月(1994)

フィルダム研究室 室長

前主任研究員

元部外研究員

中村 昭

安田成夫

多賀恭一

荒川 昭治

元室長 松本徳久

研究員 岩下友也

大久保雅彦

要 旨

パソコンによる自動計測システムを導入した大型繰返し三軸試験により粗粒材料の動的変形特性に影響を及ぼす要因(間隙比, 均等係数, 拘束圧, 主応力比およびひずみ依存性)について三國川ダム, 寒河江ダム, 三保ダムの堤体材料を用いて調査した。その結果, 次の事柄が明らかとなった。

- 1) せん断弾性係数 G と拘束圧の関係は両対数で直線関係にある。
- 2) せん断弾性係数は主応力比 $\sigma_1/\sigma_2=1.0\sim 2.0$ の間で単調増加傾向にある。
- 3) 減衰定数 h は, せん断弾性係数ほど明確でないにしても拘束圧の影響を受ける。
- 4) ボアソン比 ν はせん断ひずみに対して, ほぼ一定値と考えられる。

キーワード: 大型三軸試験, ロック材料, フィルター材料, せん断弾性係数, 減衰定数, ボアソン比, 自動計測システム

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
フィルダム研究室 行

No. 60

土研資料第3312号

No. 60

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3312号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名



土木研究所資料第3312号