

I S S N 0386-5878

土研資料第2146号

土 木 研 究 所 資 料

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

昭和59年12月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © 1985 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なってはならない。

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

ダム部 フィルダム研究室 松 本 徳 久
安 田 成 夫
境 野 典 夫*

* 飛鳥建設(株)技術研究所。昭和58年4月～昭和59年9月
の間御土木研究センターからの部外研究員として在籍。

要旨

ロックフィルダムの堤体材料である、ロック材・フィルター材の動的物性値（剛性率・減衰定数）を広いひずみ範囲について求めるために、繰返し三軸せん断試験を行った。供試体寸法は、直径 ϕ 30cm×高さ h60cmで試験材料は、七ヶ宿ダム（現在建設省東北地方建設局が建設中）の原石山から採取した。試験機に改良を施し変位計・荷重計を三軸セル内に設置した。

剛性率は 5×10^{-5} 付近の微小ひずみまで求まるようになり、試験値の再現性もよくなり、またひずみの増加に伴う剛性率の低下割合も既往の研究結果に一致した。減衰定数は 5×10^{-4} 以上のひずみ領域ではひずみの増加とともに増加し、拘束圧の影響が僅かに現われるようになり、総体的に試験値の精度及び信頼性の向上がはかれた。

キーワード：繰返し三軸せん断試験、粗粒材料、剛性率、減衰定数、堤体材料、ロック
フィルダム

目 次

1. まえがき	1
2. 目 的	2
3. 大型繰返し三軸試験装置	3
3.1 装置の概要	3
3.2 装置の改良	6
3.3 検出器の検定	10
3.4 剛性率・減衰定数の計算	15
4. 試験材料	17
4.1 材料の粒度決定	17
4.2 物理的性質	19
4.3 締固め試験	23
5. 試験方法	31
5.1 供試体密度の設定	31
5.2 供試体作成手順	32
5.3 繰返し三軸試験方法	33
5.4 試験ケース	36
6. 予備試験	38
6.1 豊浦砂の物性値と繰返し三軸試験方法	38
6.2 結果と考察	39
7. 粗粒材料の試験結果	54
7.1 改良前後の比較	54
7.2 試験値の再現性	59
7.3 間隙比の影響	65
7.4 平均主応力の影響	69
7.5 ひずみ依存性	76
7.6 主応力比の影響	90
7.7 均等係数の影響	95
7.8 剛性率と減衰定数	96
8. 結論及び今後の問題点	99
参 考 文 献	101

1. ま え が き

土質材料は一般に繰返しせん断力が加わった時に、応力～ひずみの関係が強い非線型性を示すため、これらの動的変形特性を把握することは、耐震設計上重要な課題となっている。特に、フィルダムに用いられる様な粗粒材料を扱う場合には、多大な労力を要することから試験例も数少ない。そこで、本試験においては、改良を加えた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、まず、豊浦砂による予備試験で試験値の整合性を確認した上で、七ヶ宿ダムのロック材・フィルター材の動的物性値（剛性率・減衰定数）を比較的広範囲なひずみ領域について求めたものである。

2. 目 的

試験に用いた三軸試験装置は、これまで軸荷重が圧縮側だけの片振り専用機構であったものを昭和57年度に、三軸セルを分割し、載荷ピストンから試料キャップまで全て剛結できる構造に改良した。これによって両振り試験が可能となり、地震時における堤体要素の交番応力状態に近づくことができた。さらに、非接触型変位計と荷重計を三軸セル内に設置し、試験値に及ぼすピストンの摩擦等による機械的な誤差の影響を取り除いた。この様な改良を加えた大型繰返し三軸試験装置を使って、七ヶ宿ダムのフィル材料の剛性率あるいは減衰定数を、比較的広範囲なひずみ領域にわたって連続的に精度良く求めること。そして、これらのひずみ依存曲線にもとづいて動的解析への適用性を考えることを目的として今回の試験を実施した。

この目的にそって、次の様な項目について試験結果の検討を行ったものである。

- ① 豊浦砂を用いた予備試験による従来の研究との整合性の確認
- ② 改良前と改良後の試験値の比較
- ③ 試験値の再現性についての検討
- ④ 剛性率及び減衰定数に影響を及ぼす幾つかの要因（間隙比，平均主応力，ひずみ依存性，主応力比，粒度等）についての検討
- ⑤ 微小ひずみ時の剛性率（初期剛性率 G_0 ）の予測とHardin-Drnevich式の適用性

3. 大型繰返し三軸試験装置

3.1 試験装置の概要

本試験に用いた大型三軸装置は、表 3.1 主要諸元及び図 3.1 三軸室概略図に示した様に、供試体径 30 cm、高さ 60 cm で、載荷方式は電気油圧サーボ方式で、通常のひずみ制御による静的三軸圧縮試験も行える繰返し三軸試験機である。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、更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¹⁾を備えている。繰返し荷重は、手動またはミニコンによって正弦波、任意波形を油圧ポンプ (120~180 kgf/cm²) で載荷し、最大 10 Hz までの軸圧および 5 Hz までの側圧の同時載荷が可能な構造である。しかし、本試験では改良後の基礎的実験である事や、大型多目的三軸試験機 (昭和 57 年度、フィルダム研究室において製作)²⁾との比較を行う事等の点を考慮し、周波数 0.2 Hz の正弦波で軸荷重のみを繰返し載荷する事とした。また、電氣的な自動計測は図 3.3 計測系統図に示す様に検出器から増幅器を通し、ペンレコーダーに履歴曲線及び時刻歴を直接記録した。これらの試験に用いた検出器の主な仕様を表 3.2 に示した。

表 3.1 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 20 tf
	最大引張 10 tf
	周波数範囲 0.2~10 Hz
側圧負荷	最大圧力 15 kgf/cm ²
	周波数範囲 0.2~5 Hz

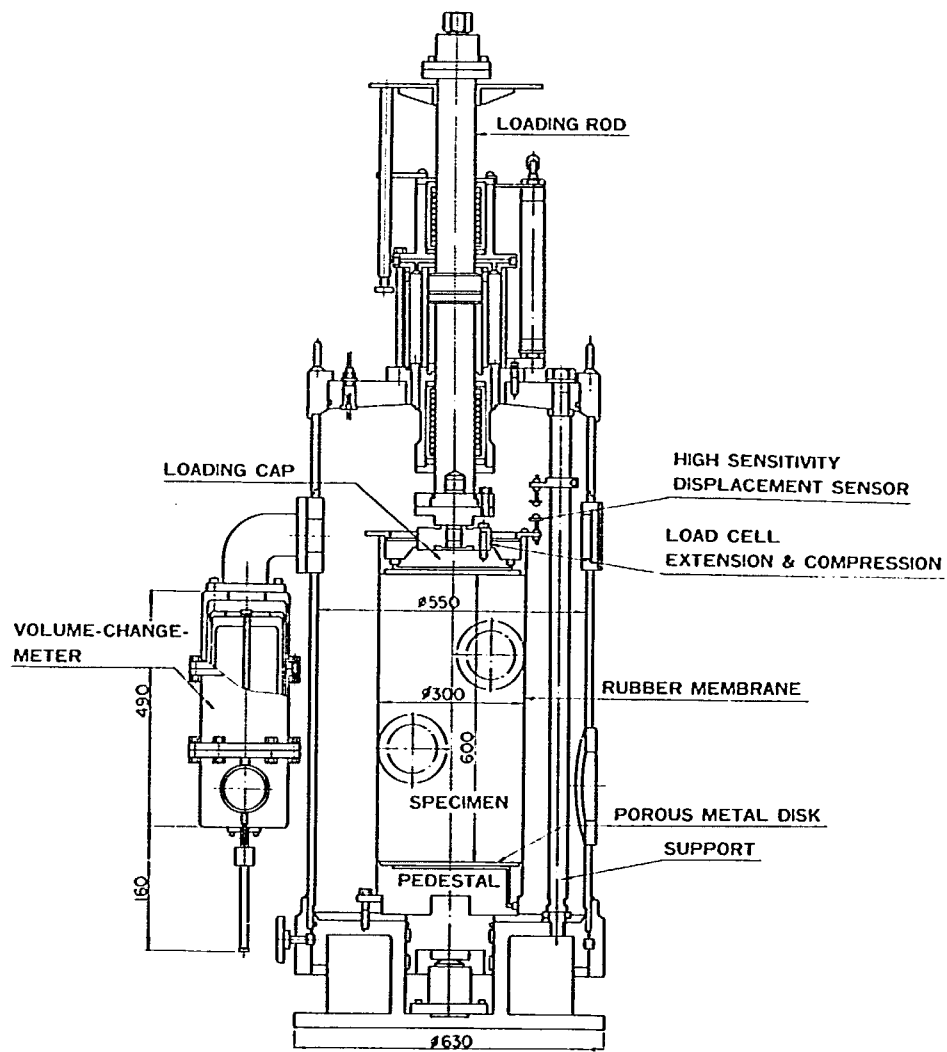
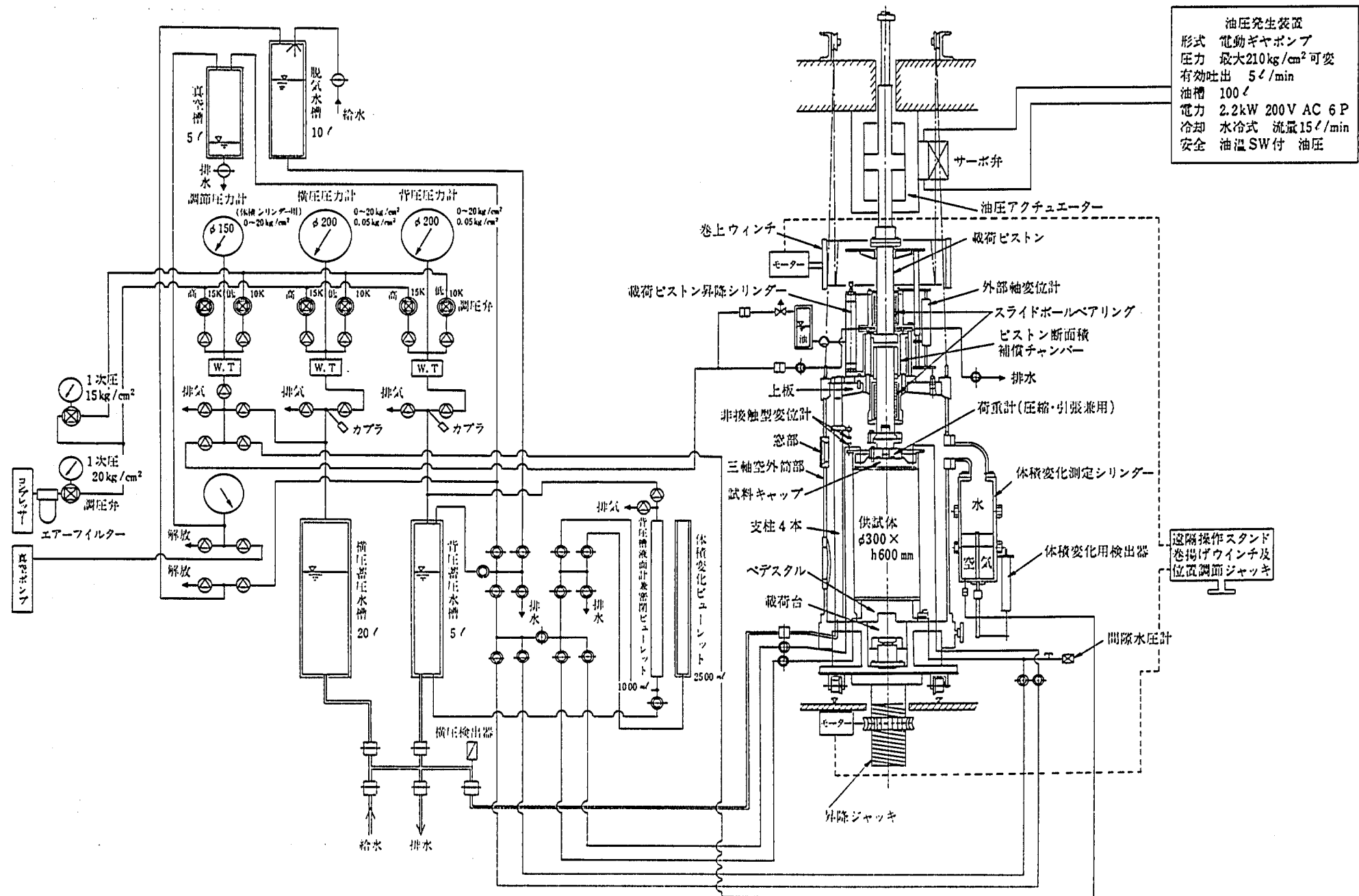


図 3.1 繰返し三軸試験機（三軸室概略図）



3.2 試験機の改良

改良前においては、三軸セルと軸受け部が一体構造となっており、油圧アクチュエーターと载荷ピストン及び試料キャップがそれぞれ分離していた。そのため、軸圧の繰返し载荷は圧縮側領域だけのいわゆる片振り試験専用の機構となっていた。¹⁾しかし、実際には地震時のせん断応力は、圧縮と伸張応力状態が交番すると考えられるため、堤体要素へ適用するには伸張状態の試験ができる必要が有る。さらに、室内試験としても、異方圧密状態で初期せん断力が働いていると応力条件が複雑になり、ひずみが一方向に流れやすく履歴曲線が得にくくなると言われている。²⁾

また、改良前の試験機では軸荷重や軸変位をセル外で測定していたため、载荷ピストン等軸受け部の摩擦やガタ、あるいは接触型変位計に見られる機械的摩擦やヒステリシス特性の影響を受け、せん断ひずみ $\gamma = 10^{-4}$ のオーダー以下では信頼性のあるデータが得られなかった。

これらの点を考慮し、

- 1) 伸張試験ができる三軸室の構造
- 2) 荷重計及び変位計を三軸室内に納め、できるだけ供試体に近い位置で直接測れる構造

の2点について、繰返し三軸試験機の改造を昭和57年度に実施した。改良後の試験機を表3.1、図3.1、図3.2に、また改良した検出器の仕様及び計測の系統図を表3.2、図3.3に示した。

表3.2 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)	BEE	・圧縮20 tf (引張10 tf) ・圧縮10 tf (引張 5 tf)	形式：ヒズミゲージ型 LP-20 (10) T 耐水圧密閉式 (15 kgf/cm ²) 側圧キャンセル機構付 精度：ATT 1, 1/2, 1/4 各段±0.5%以内 形状寸法：φ150×50 mm	セル内部 試料キャップに 埋込式
内部軸変位 (非接触型 変位計)	BISON (検出器)	25 mm (±12.5 mm)	形式：検出器～ソイルストレインゲージ 非接触、耐水圧式 (15 kgf/cm ²) 増幅器～IVB型DV付 多点折線リニアライザー回路付 精度：ATT 1, 1/2, 1/4 各段±0.5%以内 形状寸法：φ25×5 mm (検出器)	セル内部 試料キャップと 支柱に設置
外部軸変位 (軸変位計)	新興通信 工業	±20 mm	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：ATT 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	20 kgf/cm ²	形式：ヒズミゲージ型 PR-20 C 精度：ATT 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)	ケイソク	6000 cm ³	形式：ベロフラムシリンダーの変位測定 差動トランス型 KID/250T 精度：ATT 1, 1/2, 1/4 各段0.5%以内	体積変化シリン ダーに取付け鉛 直変位を測定

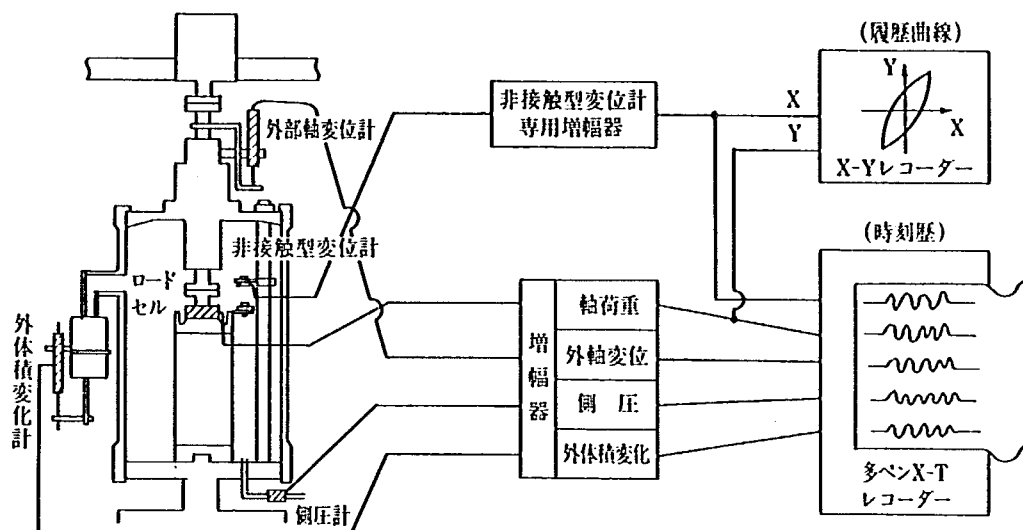


図 3.3 計測系統図

改良内容は次の様になる。

1) 三軸のセルと軸受部を分割し、アクチュエーターと载荷ピストン及び試料キャップ、さらに試料台（ペデスタル）と载荷台とを剛結できる様にした。従って、片振り試験の他に、通常行われている等方圧密状態から軸荷重を変動させ圧縮と伸張の2つの応力状態を加えるいわゆる両振り試験が可能となった。

2) 試料キャップに埋込式の耐水圧型圧縮引張兼用20tfまたは10tfの荷重計（ロードセル）を新設し、軸受部の摩擦などの影響を取除いた。

3) 耐水圧15kgf/cm²、直径25mmの励振用と受振用の1対からなる非接触型変位計を試料キャップ上及びセル内に設けたステンレス製の支柱にそれぞれ取付け供試体直上で軸変位を計測した。これによって通常の接触型変位計に見られる様な機械的摩擦やヒステリシスが全くなり、精度の高い微小変位の測定ができる。

試験データは、図 3.3 の計測系統図に示す様に時刻歴（波形記録）と履歴曲線（ヒステリシスループ）の2系統で記録した。各電気計測項目の時刻歴（波形）の記録例を図 3.4 に、また、予備試験（豊浦砂）、ロック材、フィルター材、各材料についての大型三軸装置を用いた繰返し载荷試験により得られた履歴曲線（ヒステリシスループ）の代表的例を図 3.5～図 3.7 に示した。波形記録をみると、油圧サーボの荷重振幅制御による荷重波形はきれいな正弦波状を示している。この例では荷重振幅が設定値に対してやや不足しており、微小～大荷重をとるため材料の種類や供試体の密度によって制御ゲインの調節が難しいことを表わしている。履歴曲線（ループ）の記録例では、各材料ともに、せん断ひずみ振幅（片振幅） $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ 以下の領域ではノイズが目立ちループ形が乱れている。このひずみ領域では剛性率Gがかなり求められる程度で、後に述べる様にバラツキが大きく一定の傾向が見られない。従って、改良後の本試験における機械的な精度は $\gamma \approx 5 \times 10^{-6}$ がほぼ限界と考えられる。また改良後、非接触型変位計を用いたことによって、接触型変位計を使用した時の様な不感帯がなく、なめらかな履歴曲線が得られている。さらにひずみレベルが 10^{-8} 近くになると、三軸装置固有の問題である応力状態の非対称性の特徴が目立ちはじめ、伸張状態で大きなひずみが生ずることによってループが三日月形の様になる傾向がみられる。^{4),5)}

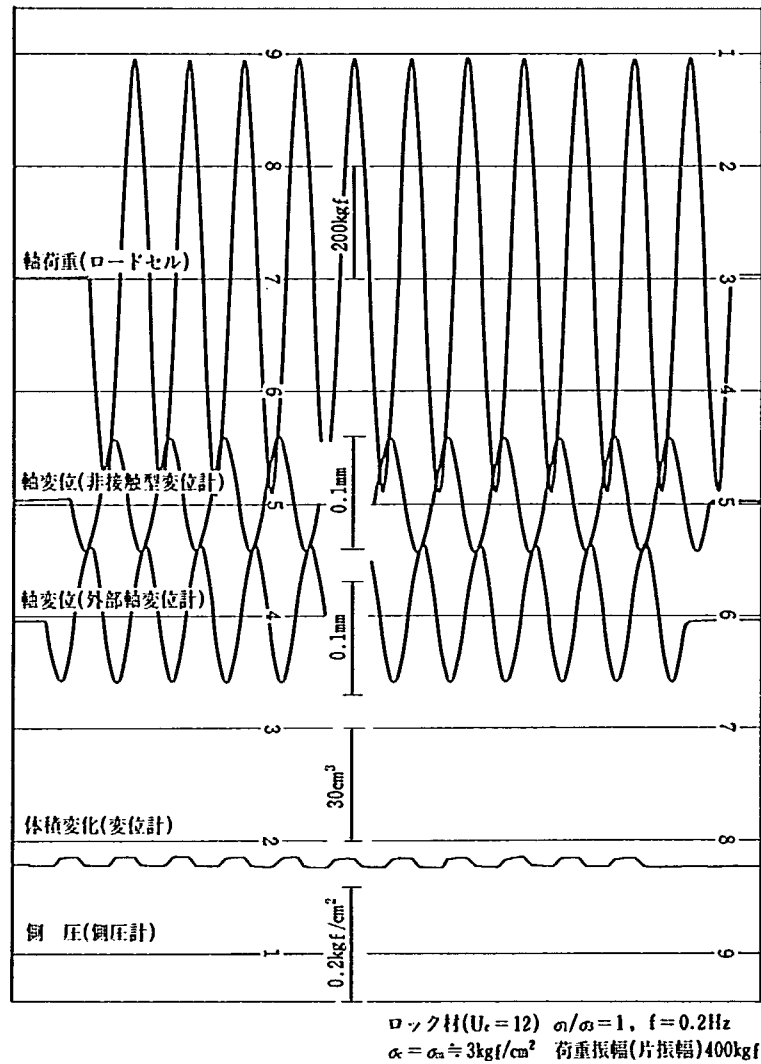


図 3.4 波形(時刻歴)の記録例

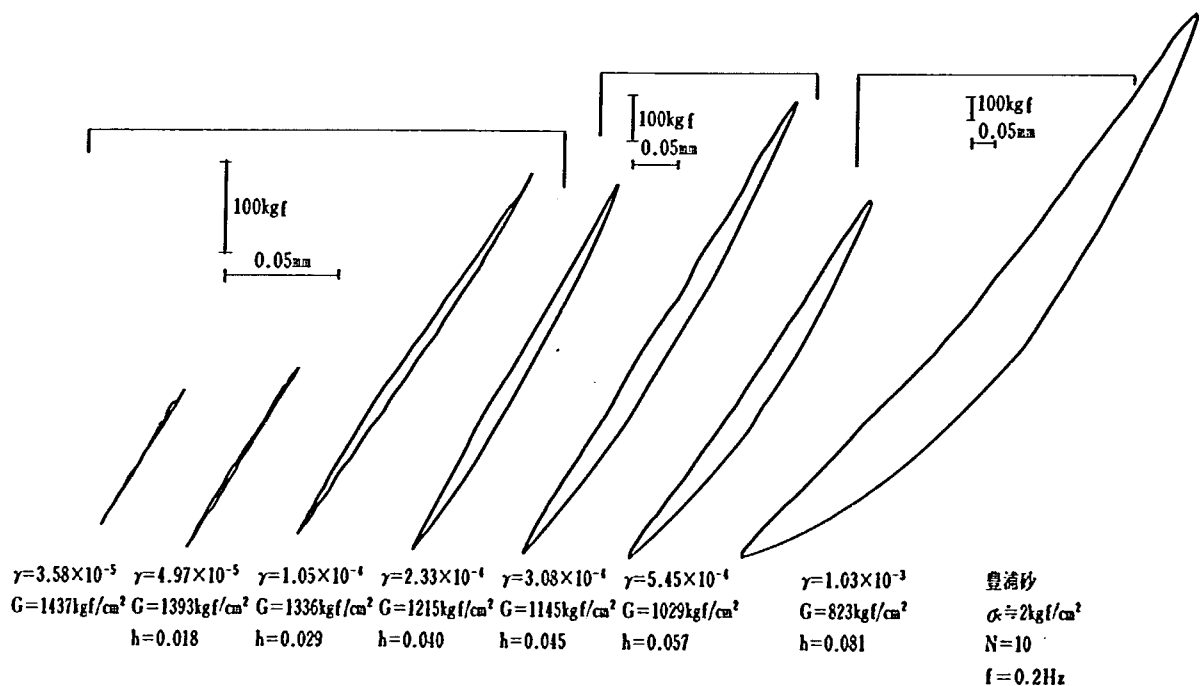


図 3.5 豊浦砂のXYレコーダーによるヒステリシスループ記録例

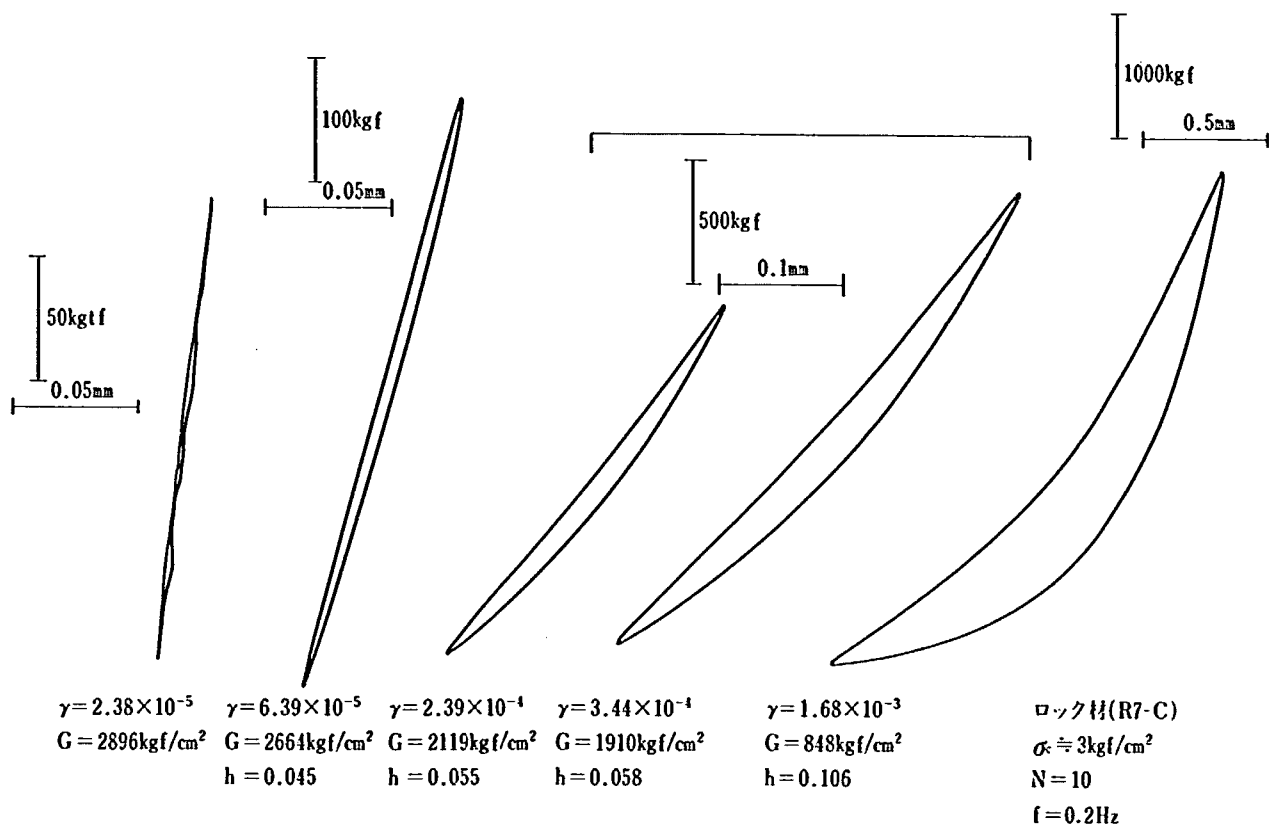


図 3.6 ロック材のXYレコーダーによるヒステリシスループ記録例

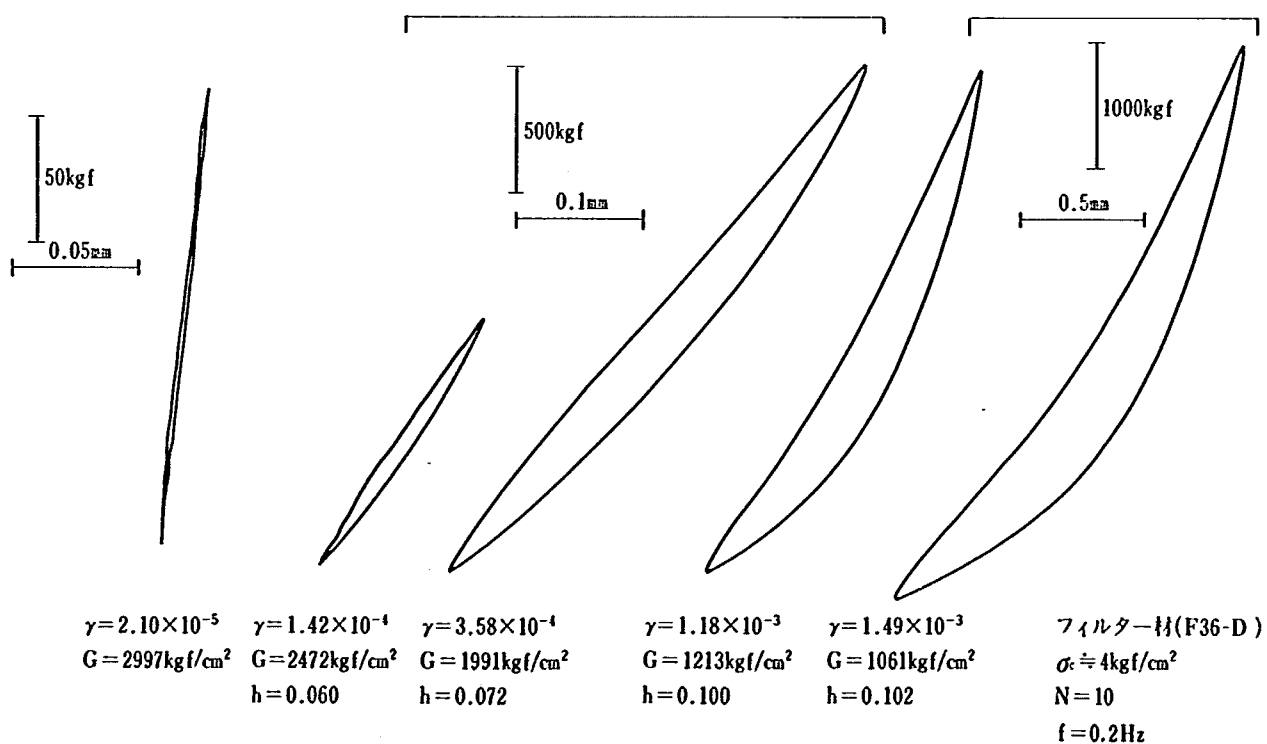


図 3.7 フィルター材のXYレコーダーによるヒステリシスループ記録例

3.3 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、試験室内で検定を行えないものについては、メーカー（㈱誠研舎）の検定結果を採用した。また、試験内容から言って動的状態での検定が最も望ましいが、これは非常に困難な点が多い為今回は静的条件で検定を実施している。

(1) 軸 荷 重

死荷重による検定が最適と考えられる⁶⁾が、荷重計の最大容量（10 tf、20 tf）が大きい為適当な検定装置がなく実施できなかった。軸荷重測定用荷重計は、全く同じ形状・寸法で圧縮・引張兼用の10 tf用と20 tf用2種有るが、ここでは、試験で用いた10 tf荷重計のメーカー側の検定結果を図3.8に示す。これは、荷重とヒズミゲージの出力ひずみ（ $\mu=10^{-6}$ ）の関係であり、増幅器を含めた結果ではない。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10 tfとして $\pm 0.16\%$ （ ± 16 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側圧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5 kgf/cm²で32 kgf（軸応力 $\sigma_a \div 0.05$ kgf/cm²）程度の値を示す。しかし、繰返し载荷状態では側圧一定のまま行う為、動的試験には影響を及ぼさないとと思われる。

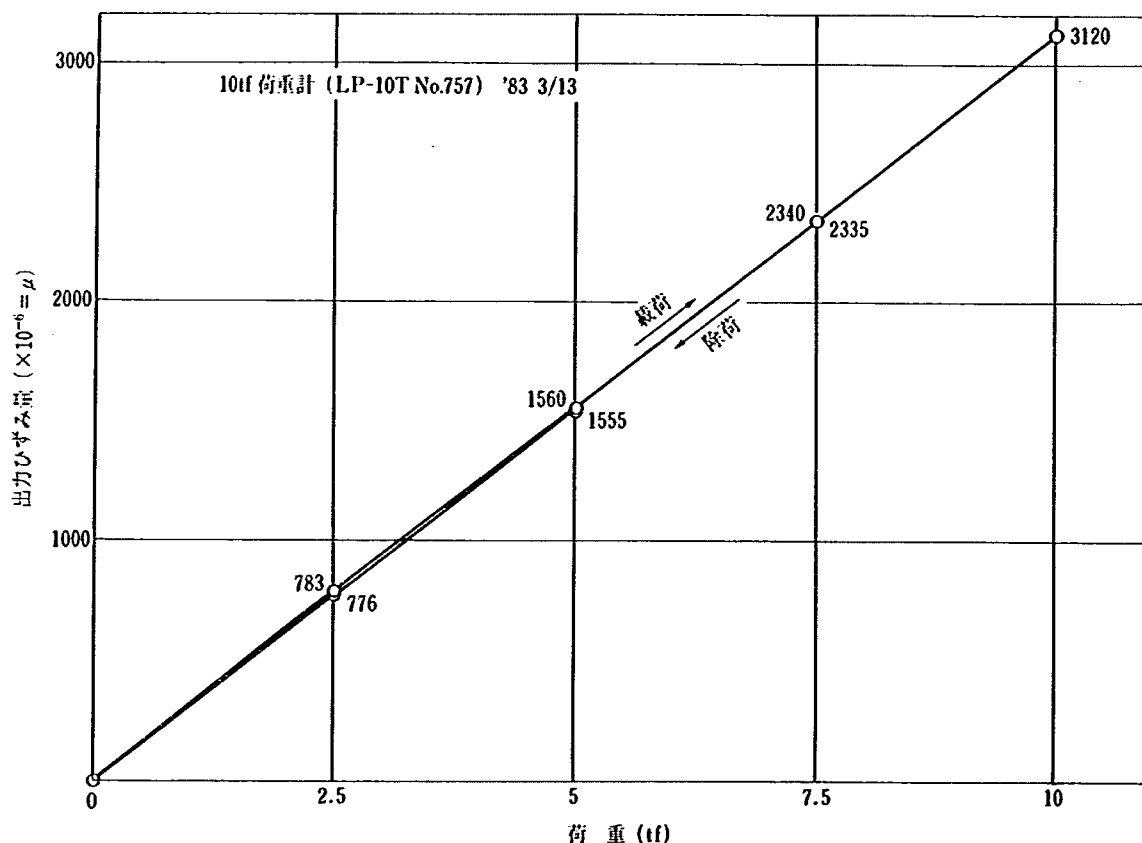


図 3.8 荷重計（10 tf）の検定結果

(2) 軸 変 位

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。しかし実際の試験では、変位計の取付支柱あるいは三軸セル等ステンレス鋼製の近傍で計測する為これらの影響が考えられる。そこで、実際の試験位置で検定を行える装置を作製し検定を行った。

この検定装置は実際の試験と同じ位置に1対の検出器を設置でき、三軸セルをかぶせてセルの窓部から手動でマイクロメーターを操作し変位量をダイヤルゲージ(精度 $1/100\text{mm}$)で読み取るものである。窓部を開放する為、検定時には空気中で行うことになる。図3.9、図3.10に検定結果を示す。これらは、試験時に使用するアッテネーター(ATT) $1/5$ とし、 5mm フルスケール(F.S.)の状態での結果を示している。

また、図中の D_0 は1対の検出器間の初期離間距離を表わし、このタイプの変位計では $D_0=20\sim 25\text{mm}$ の間でかなり自由に選べるのが特長である。

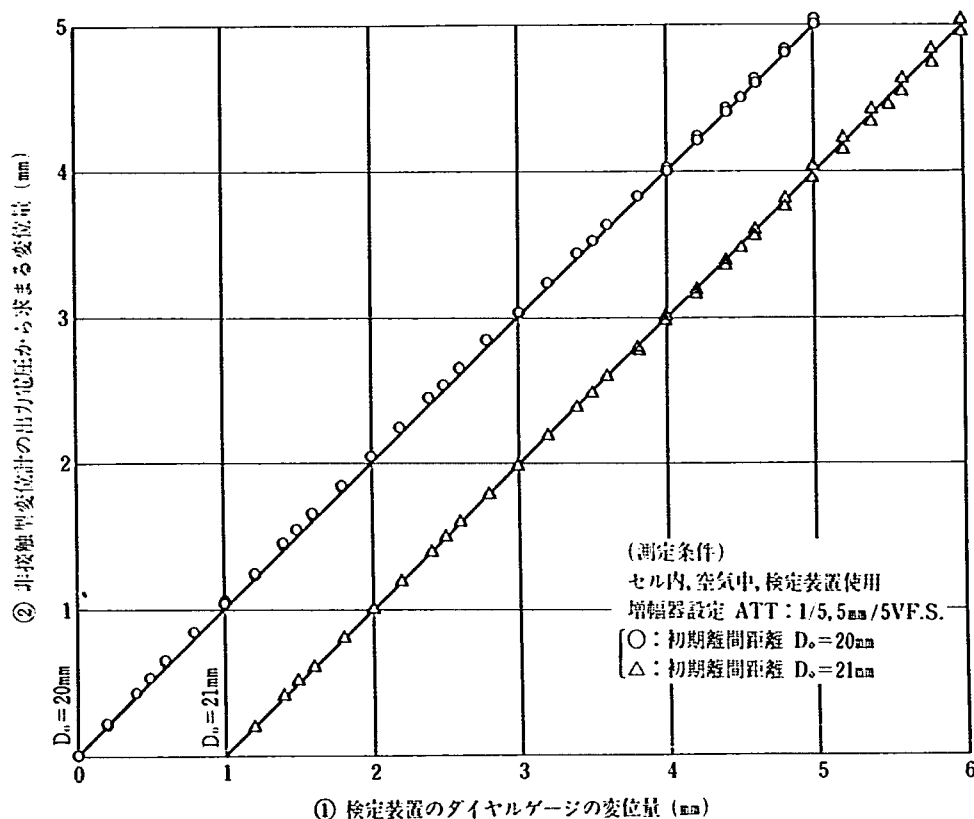


図 3.9 非接触型変位計の検定(1)

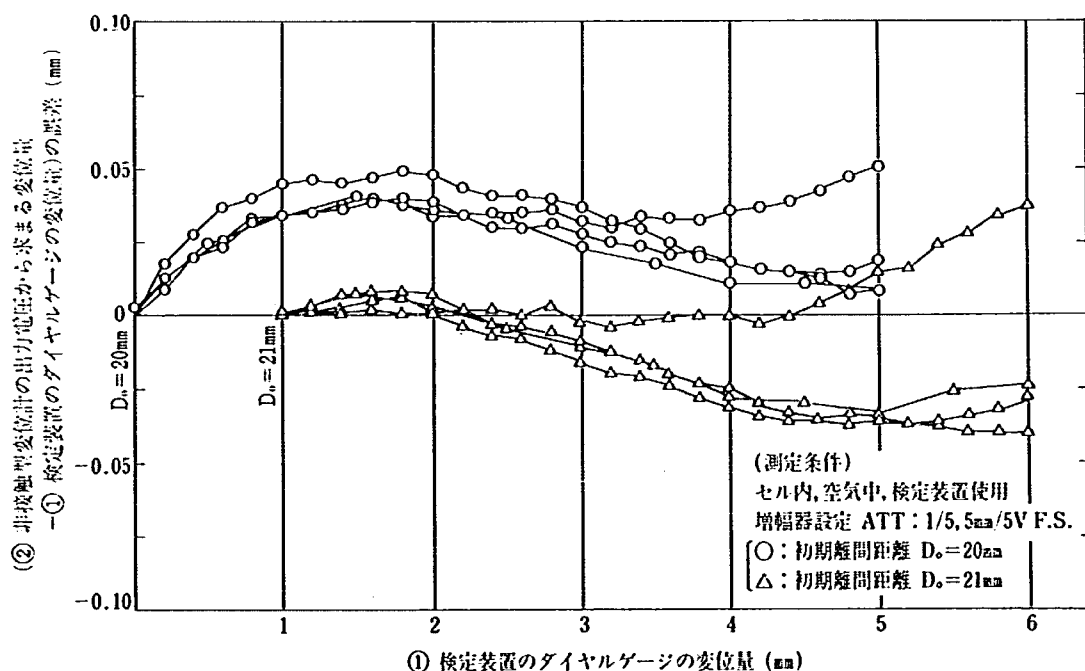


図 3.10 非接触型変位計の検定(2)

図 3.9 は、検定装置のダイヤルゲージの読み①と、変位計の専用増幅器を通して得られる出力電圧から求めた変位量②の関係で、図 3.10 では横軸は前図と同じ①で、縦軸にはダイヤルゲージの値を基準と考えた誤差分 (②-①) をとっている。専用増幅器を含めた非接触型変位計の精度は、フルスケール (F.S.) 5mm に対し $\pm 0.05\text{mm}$ で、 $\pm 1\%$ F.S. の範囲におさまっている。動的な繰返し载荷時には、絶対変位量よりも変位振幅 (相対的変動) の精度が重要となる。従って、実際の試験においては圧密等による変位量を予測し、相対的な誤差の変動幅が少ない部分 (ex. $D_0 = 20\text{mm}$ の時の $1 \sim 3\text{mm}$, $D_0 = 21\text{mm}$ の時の $0 \sim 2\text{mm}$) での使用をこころがけ、精度の良い試験を目指した。

(3) 体積変化

外体積変化計は、2重ベロフラム式の体積変化シリンダーの変位量から測定するものである。検定は三軸セル内を満水にし、 $0.2 \sim 1\text{kgf/cm}^2$ 程度の側圧を加えた状態で最上部の排水コックから一定量ずつ排水する。この排水量をメスシリンダーで正確に測り、同時に体積変化計の増幅器を通した出力電圧をデジボルメーターで測定する。体積変化計の最大容量は $6,000\text{cm}^3$ と大きい為試験時の体積変化量も考慮し、 $ATT = 1/4$, $1,500\text{cm}^3 = 5\text{V F.S.}$ とした場合の検定結果を図 3.11 ~ 図 3.12 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、 $\pm 15\text{cm}^3$ でフルスケール (F.S.) に対し $\pm 1\%$ 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りこの値を補正する必要がある。そこで、側圧による三軸セルの膨張量を測定した結果が図 3.13 である。側圧は、三軸装置に備え付けの最小目盛 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体積変化計の出力電圧を測定した。本試験の最大側圧 (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。

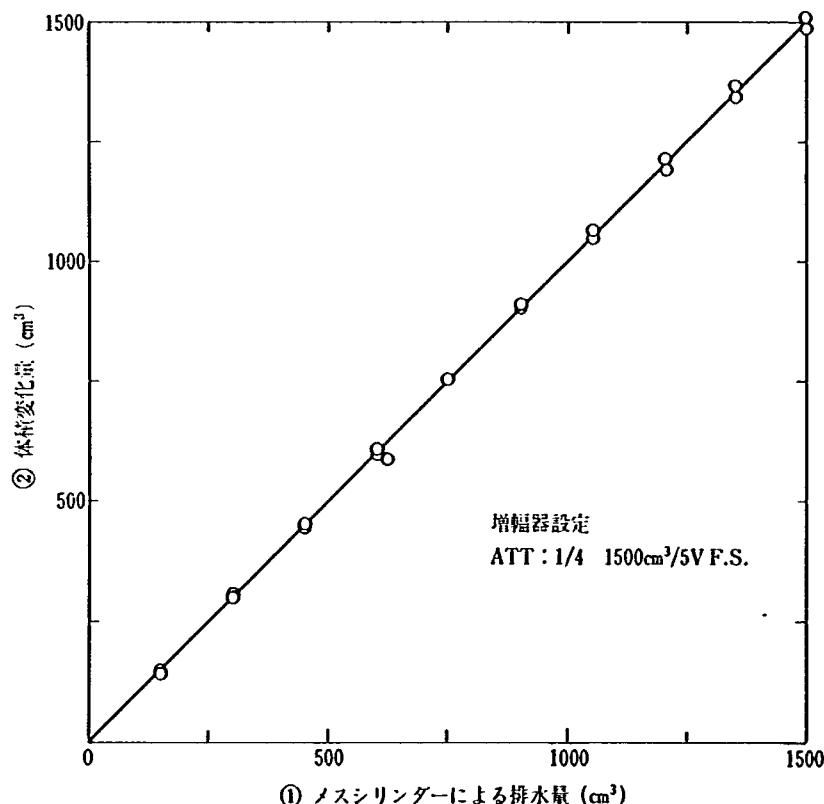


図 3.11 体積変化計の検定 (1)

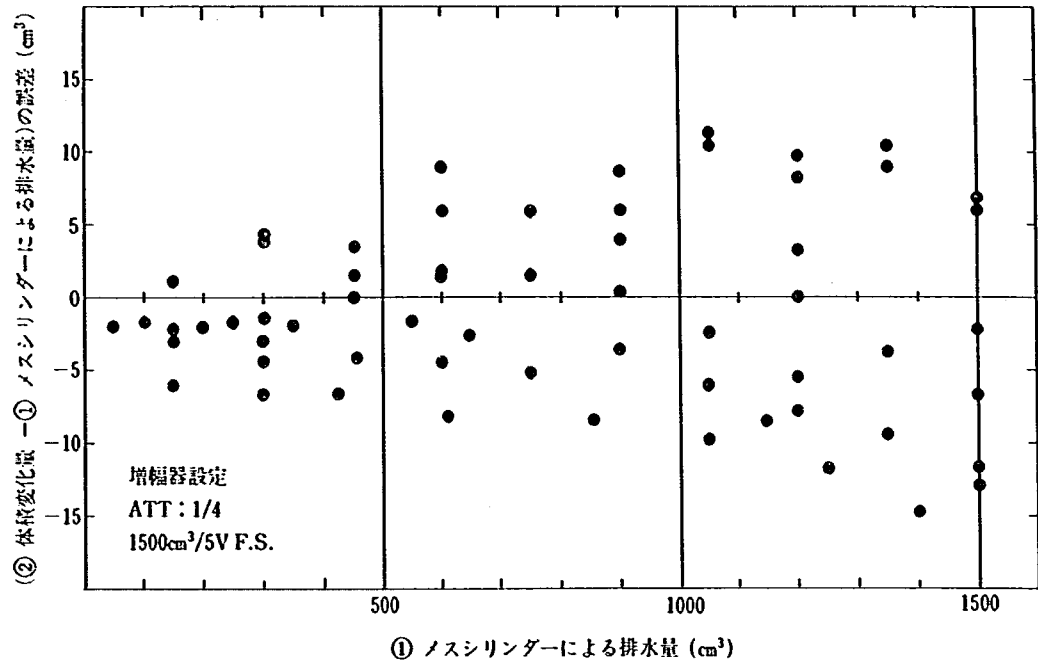


図 3.12 体積変化計の検定 (2)

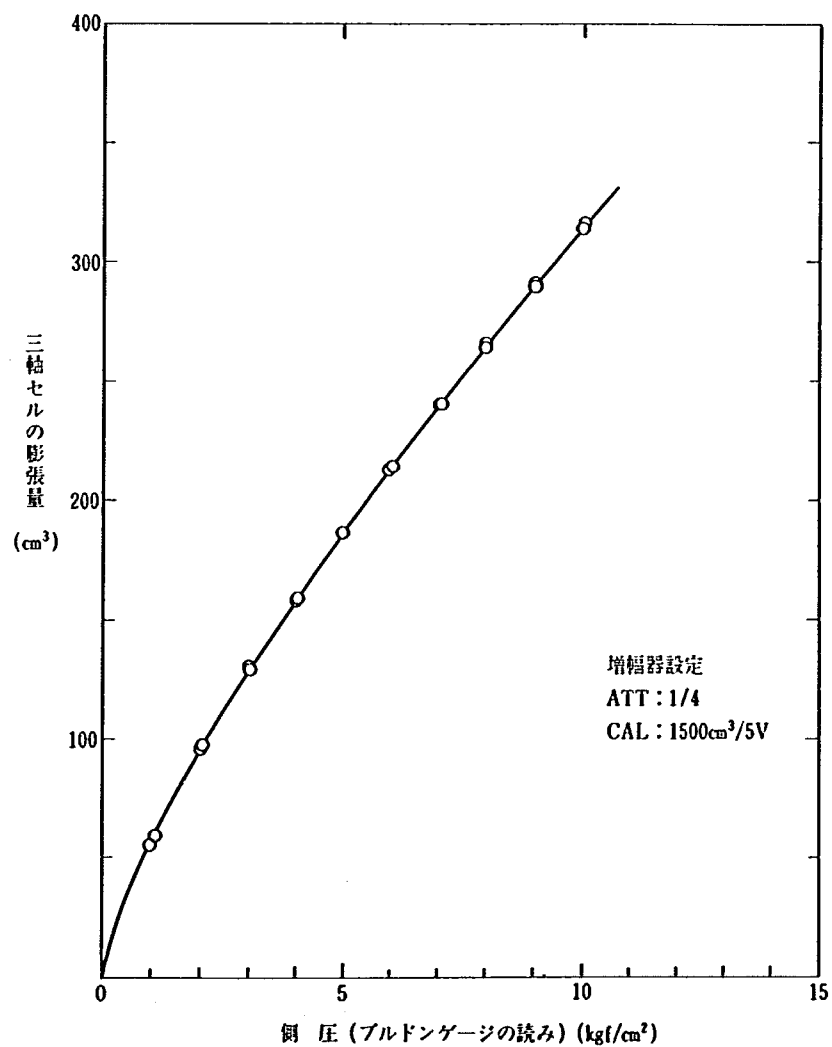


図 3.13 側圧による三軸セルの膨張量測定

(4) 側 圧

側圧は、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するもので、検定は空圧調整弁につながるブルドンゲージ（最小目盛 0.05 kgf/cm^2 ）を基準として、圧力計の出力電圧を測定したもので、図 3.14 に結果を示す。圧力計による側圧測定誤差は、 5 kgf/cm^2 F.S. の場合は $\pm 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ 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。

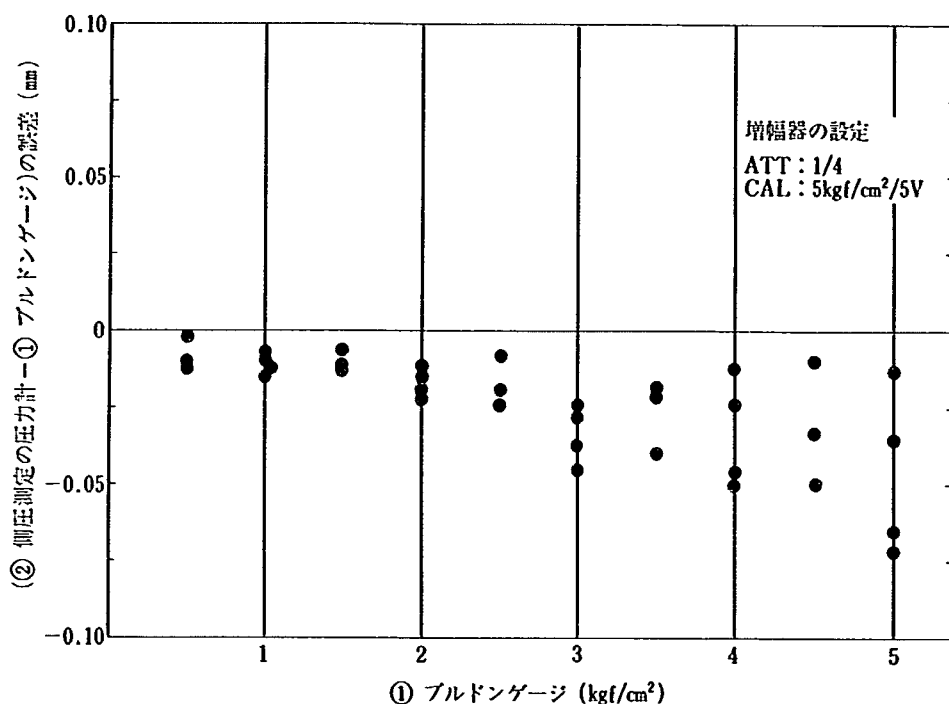


図 3.14 側圧計の検定

以上の検定結果をまとめて表 3.3 に示した。

表 3.3 検定結果一覧表

検定項目	最大容量	検出方式	検 定 時 設 定 容 量	誤 差	検 定 方 法
軸 荷 重 (荷 重 計)	圧縮 10 tf) (引張 5 tf)	ヒズミゲージ型	10 tf F.S.	$\pm 16 \text{ kgf}$ (仕様 $\pm 0.5\%$ FS)	メーカーの検定結果 荷重 $\sim$ 出力ひずみ
軸 変 位 (非接触型 変位計)	25 mm	コイルインダク タンス方式	ATT: 1/5 5 mm = 5V F.S.	$\pm 0.05 \text{ mm}$	検定装置のダイヤル ゲージ (1/100 mm 精 度)
体 積 変 化 (体積変化計)	6,000 cm ³	差動トランス型	ATT: 1/4 1,500 cm ³ = 5V F.S.	$\pm 15 \text{ cm}^3$	メスシリンダー (1 cm ³ 目盛) による 排水量測定
側 圧 (圧 力 計)	20 kgf/cm ²	ヒズミゲージ型	ATT: 1/4 5 kgf/cm ² = 5V F.S.	$\pm 0.05 \text{ kgf/cm}^2$	フルドンゲージ (0.05 kgf/cm ² 目盛)

3.4 剛性率及び減衰定数の計算

試験データは、多ペンレコーダーに時刻歴（波形記録）、XYレコーダーには履歴曲線（ヒステリシスループ）を記録した。履歴曲線は軸変位（X軸）と軸荷重（Y軸）を記録紙（方眼）上に描かせ、この変位～荷重のループから剛性率 G や減衰定数 h を算出した。まず、図3.15の頂点 a, b を結ぶ直線の傾きから動弾性係数 E_d を求め、次式^{1),2)}から剛性率 G 及びせん断ひずみ振幅 γ を計算した。

$$E_d = \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta \epsilon_a} \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

E_d : 動弾性係数 (kgf/cm^2)

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \epsilon_a} \right) \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$\Delta \sigma_a$: 繰返し応力振幅 (kgf/cm^2)

$\Delta \epsilon_a$: 軸ひずみ振幅

$$G = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$\Delta \epsilon_v$: 体積ひずみ振幅

ν : 動的ポアソン比

$$\gamma = (1+\nu) \Delta \epsilon_a \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

G : 剛性率 (kgf/cm^2)

γ : せん断ひずみ振幅

さらに、減衰定数 h は図3.15に示す ΔW と $W/2$ の面積比から次の様に求めた。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

h : 減衰定数

ΔW : ループで囲まれた面積

$W/2$: 三角形の面積
($\triangle acd$)

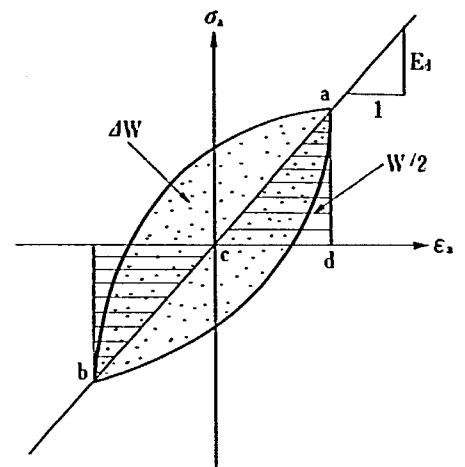


図3.15 繰返し载荷による応力・ひずみの履歴曲線

ループの面積 ΔW を算術的に求めることは容易でない為、ここでは土木研究所電算室のデジタイザーを使って、簡単なループの面積計算プログラムを作成し、剛性率 G や減衰定数 h を求めた。計算手順は、履歴曲線（ヒステリシスループ）の記録紙をデジタイザー上に乗せ、タブレットでループ上を正確になぞりながら、数十点座標を読み取る。計算結果は、ループ形状及び G, γ, h の値を1ループごとにディスプレイに出力し、ハードコピーで記録をとる。デジタイザーを使った計算結果の例を図3.16に示す。

----- TEST NAME -----
R7-C-2 S3=2 POT-200

Diameter = 29.8 (cm)
Height = 59.6 (cm)
Area = 695.8 (cm²)

Delta P = 1009 (kg)
Delta H = 0.2480 (mm)

Ep-max = 4.1594E-04
Sig-max = 1.45 (kgf/cm²)

E = 3486.1 (kgf/cm²)
G = 1340.8 (kgf/cm²)
 $\gamma = 5.4072E-04$

h = 7.04 (%)

X-MIN = 0.2034 X-MAX = 0.7966
Y-MIN = -1336. Y-MAX = 3664.

END : 0 ,SAVE DATA AND REPLAY : 1 ,DELETE DATA AND REPLAY : 9 KEY IN

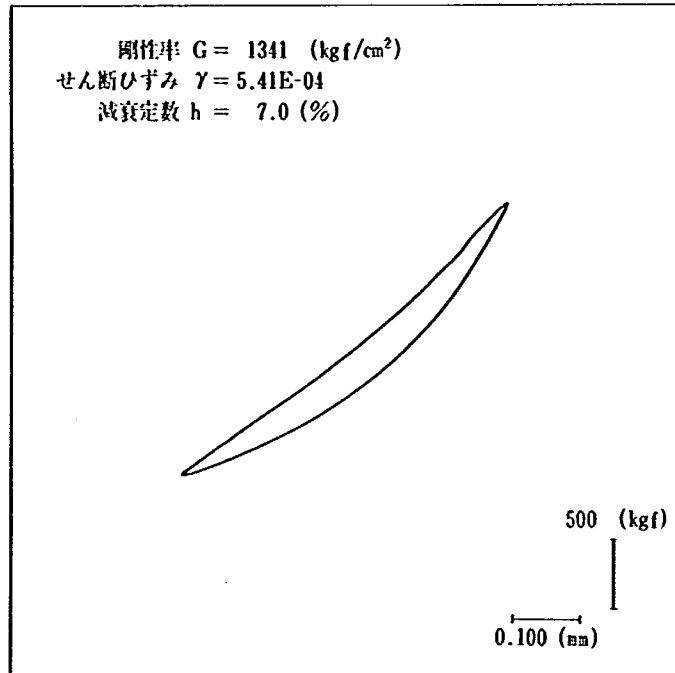


図 3.16 デジタイザーによる G , h の計算出力例

4. 試験材料

4.1 材料の粒度決定

試験材料は、東北地方建設局が建設中の高さ93mのセンターコア型ロックフィルダムである七ヶ宿ダムのロック材とフィルター材を用いた。ロック材は原石山（ありや山）の安山岩、フィルター材は長崎平における旧河床砂礫である。但し予備試験では、豊浦標準砂を使用している。搬入材料は天日乾燥によって気乾状態とし、各粒径毎にふるい分け（JIS・A・1204）、供試体作成のための試料調整を行った。

繰返し試験においても、静的三軸試験と同様最大粒径に左右され则认为られる。静的試験では、一般に、最大粒径と供試体径の比が1:5以下であれば影響はほとんどないと考えられる⁸⁾ ため、本試験においても供試体径300mmに対して最大粒径を63.5mm以下とした。

この点を前提として、次の様に各材料の試験粒度を決定した。

ロック材・ $U_c = 12$ （R-12材）

試験機改良前の昭和55・56年度に七ヶ宿ダムロック材の動的三軸試験を実施しており、改良によってどのような結果が得られるか比較検討する意味で、材料の粒度は同一とすることが望ましい。改良前の試験では、横坑採取粒度（ありや山、安山岩）を参考としており、最大粒径63.5mmとすると、均等係数 $U_c = 7 \sim 20$ の範囲に分布している。平均的粒度を考えるとほぼ均等係数 $U_c = 12$ となり、これを代表粒度曲線としている。今回の試験でもこれと同じ最大粒径 $d_{max} = 63.5mm$ 、均等係数 $U_c = 12$ の粒度を採用した。

ロック材・ $U_c = 7$ （R-7材）

昭和57年度の静的三軸試験⁹⁾ではR-12材と同じ様に、横坑採取粒度の分布範囲から最大粒径 $d_{max} = 63.5mm$ で、均等係数 $U_c = 7$ と20の2通り実施している。また昭和57年度に当研究室で製作した大型多目的三軸試験装置²⁾（ $\phi 40 \times h 80cm$ 中実三軸と外径80～内径40× $h 80cm$ 中空ねじりせん断でそれぞれ静的及び動的試験が可能な装置である。）による動的試験と比較しやすい様に、共通材料で同じ粒度分布とした。この際中空供試体の最小幅（20cm）の制約から最大粒径 $d_{max} = 38.1mm$ とする必要があった。また均等係数の大きい材料であると細粒分が多くなることや、試験の容易さ等を考慮して、均等係数 $U_c = 7$ とした。従って、今回の試験粒度は横坑採取粒度の均等係数 $U_c = 7$ を用い、最大粒径 $d_{max} = 38.1mm$ とした相似粒度を採用した。

フィルター材・ $U_c = 36$ （F-36材）

基本的には、現場粒度をそのまま室内試験に使用できれば良いが、最大粒径の制約等から難かしい。また、室内試験用に最大粒径を決め相似粒度とすると、細粒分が多くなり過ぎて試験時の排気性及び、細粒分が多いことによる粗粒材料としての試験対象粒度（砂・礫分を対象）条件に問題がある。これらの点と、静的三軸試験における粒度を参考にして、粒径範囲 $d_{max} \sim d_{min} = 38.1mm \sim 0.074mm$ 、均等係数 $U_c = 36$ とした。

試験に用いた各材料の粒径加積曲線を図4.1に、これらの最大・最小粒径、均等係数等及び加積通過率・残留率等の値を表4.1、表4.2に示した。

表 4.1 粒度の性質

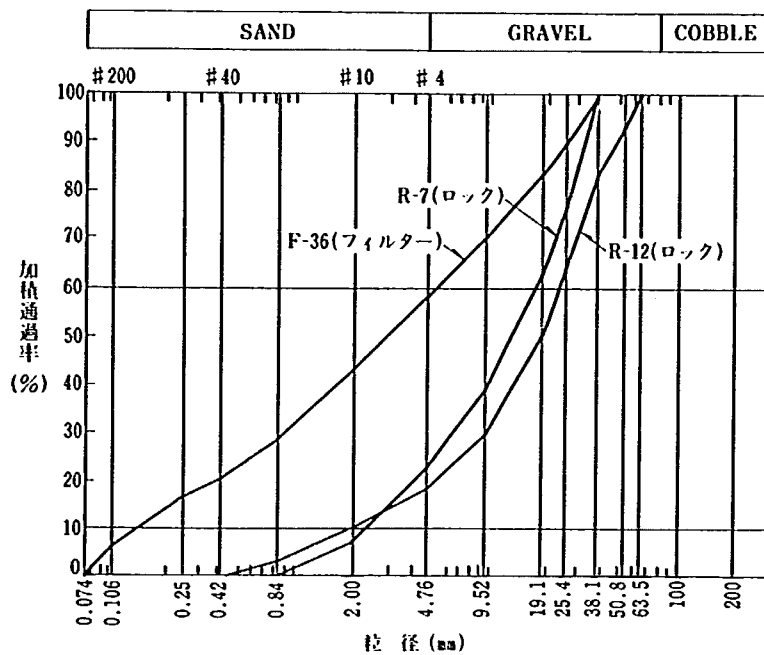


図 4.1 試験材料の粒度分布

	ロック材 (安山岩)		フィルター材
	R-12	R-7	F-36
最大粒径 d_{max}	63.5	38.1	38.1
最小粒径 d_{min}	0.42	0.84	0.074
D_{10} 粒径 d_{10}	2.0	2.4	0.14
D_{15} 粒径 d_{15}	10	6.8	0.92
D_{50} 粒径 d_{50}	19	14	2.8
D_{60} 粒径 d_{60}	23	17	5.0
D_{95} 粒径 d_{95}	40	29	20
均等係数 U_c	12	7	36
曲率係数 U_c	2.2	1.1	1.2
比 重	2.575	2.579	2.571
吸水率 %	3.48	3.67	4.87
含水量 %	2.3	2.4	1.2

表 4.2 試験粒度

材 料 粒 径 d (mm)	ロ ッ ク 材 (安 山 岩)				フ ィ ル タ ー 材 (旧河床砂礫)	
	$R-12$ ($U_c=12$)		$R-7$ ($U_c=7$)		$F-36$ ($U_c=36$)	
	残留率 (%)	加積通過率 (%)	残留率 (%)	加積通過率 (%)	残留率 (%)	加積通過率 (%)
63.5 ~ 50.8	6	100	—	—	—	—
50.8 ~ 38.1	10	94	—	—	—	—
38.1 ~ 25.4	19	84	23	100	10	100
25.4 ~ 19.1	14	65	13	77	6	90
19.1 ~ 9.52	22	51	25	64	13	84
9.52 ~ 4.76	11	29	17	39	12	71
4.76 ~ 2.00	8	18	15	22	16	59
2.00 ~ 0.84	7	10	7	7	15	43
0.84 ~ 0.42	3	3	0	0	8	28
0.42 ~ 0.25	0	0	—	—	4	20
0.25 ~ 0.105	—	—	—	—	10	16
0.105 ~ 0.074	—	—	—	—	6	6
0.074 以下	—	—	—	—	0	0

4.2 物理的性質

4.2.1 試験方法

各材料の物理的性質を把握するために表4.3に示す項目及び方法¹⁰⁾によって試験を行った。

比重・吸水量試験は、粒径4.76mm以上については、JIS・A・1110に従い水浸48時間以上、乾燥24時間以上とし、粒径4.76mm以下についてはJIS・A・1202に準拠した。また含水量は全粒径を対象とし、試験料搬入時と天日乾燥後（気乾状態含水比 $w \div 2\%$ 程度を目標）に、JIS・A・1203の方法で測定した。

表4.3 試験方法

試 験	規 格	対 象 粒 径
含 水 量 試 験	JIS A 1203-1978	全 粒 径
粗粒材の比重及び吸水量試験	JIS A 1110-51	4.76 mm 以上
土 粒 子 の 比 重 試 験	JIS A 1202-1978	4.76 mm 以下

4.2.2 試験結果

材料の物理的試験結果の一覧表を表4.4、表4.5に示す。なお表中における比重・吸水率は以下の定義によるものであり、代表値として粒径別重量百分率による重み付き平均で求めた。^{11), 9)} また、粒径別物性値を図4.3、図4.4に示した。

$$\cdot \text{表乾比重: } G_a = \frac{B}{B-C} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

$$\cdot \text{絶乾比重: } G_b = \frac{A}{B-C} \quad \dots\dots\dots (4-2) \quad \begin{array}{l} A: \text{絶乾重量} \\ B: \text{表乾重量} \end{array}$$

$$\cdot \text{真 比 重: } G_g = \frac{A}{A-C} \quad \dots\dots\dots (4-3) \quad C: \text{水中重量}$$

$$\cdot \text{吸 水 率: } Q = \frac{B-A}{A} \times 100 (\%) \quad \dots\dots (4-4)$$

表4.4 物理試験結果 ロック材, $U_c=7, 12$ (安山岩)

粒 径 d (mm)	重量百分率 (%)		ロック材 (ありや山・安山岩) $U_c=7, 12$				
	R-7材	R-12材	表乾比重 G_a	絶乾比重 G_b	真 比 重 G_g	含水比*2 w (%)	吸 水 率 Q (%)
63.5~50.8	—	6	2.627	2.561	2.743	1.44	2.59
50.8~38.1	—	10	2.624	2.550	2.754	1.72	2.90
38.1~25.4	23	19	2.619	2.541	2.756	2.04	3.07
25.4~19.1	13	14	2.610	2.523	2.764	2.14	3.46
*1 19.1~9.52	25	22	2.608	2.511	2.779	2.58	3.83
9.52~4.76	17	11	2.597	2.485	2.797	2.54	4.48
4.76~2.00	15	8	—	—	2.806	2.73	—
2.00~0.84	7	7	—	—	2.795	2.74	—
0.84~0.42	—	3	—	—	2.798	2.52	—
ロック材 $U_c=7$ 加重平均値			$\overline{G_b}=2.579$	$G_{s(-20)}=2.795$		2.41	3.67
ロック材 $U_c=12$ 加重平均値			$\overline{G_b}=2.575$	$G_{s(-20)}=2.796$		2.28	3.48

表 4.5 物理試験結果 フィルター材, $U_c=36$ (旧河床砂レキ)

粒 径 d (mm)	重量百分率 (%)	フィルター材 (旧河床砂レキ) $U_c=36$				
	F-36 材	表乾比重 G_a	絶乾比重 G_b	真比重 G_g	含水比*2 w (%)	吸水率 Q (%)
38.1~25.4	10	2.524	2.421	2.698	1.51	4.23
25.4~19.1	6	2.499	2.387	2.690	1.58	4.72
19.1~9.52	13	2.490	2.373	2.688	1.30	4.94
9.52~4.76	12	2.469	2.342	2.682	0.87	5.40
*1 4.76~2.00	16	—	—	2.678	0.79	—
2.00~0.84	15	—	—	2.685	0.82	—
0.84~0.42	8	—	—	2.707	1.22	—
0.42~0.25	4	—	—	2.722	1.50	—
0.25~0.105	10	—	—	2.748	1.89	—
0.105~0.074	6	—	—	2.751	1.95	—
フィルター材 $U_c=36$ 加重平均値		$\bar{G}_b=2.571$	$\bar{G}_s(-20)=2.716$		1.23	4.87

*1: D_{60} 粒径 *2: 試験時含水比

測定結果を簡単にまとめると次の様になる。

	絶乾比重 G_b	表乾比重 G_a	真比重 G_g	吸水率 Q (%)
ロック材 (安山岩)	2.49~2.56	2.60~2.63	2.74~2.80	2.6~4.5
フィルター材 (河床砂礫)	2.34~2.42	2.47~2.52	2.68~2.75	4.2~4.5

図 4.3, 図 4.4 の粒径別のバラツキをみると, ロック材, フィルター材共に真比重 G_g は粒径が小さくなるに従いほぼ同じかわずかな上昇傾向にあり, 表乾比重 G_a 絶乾比重 G_b は逆に減少する傾向にある。また吸水率 Q は, 粒径が小さくなると大きくなる傾向を示している。この事は, 図 4.5 の絶乾比重 G_b と吸水率 Q の関係から明らかな様に, 両者の間には強い負の相関を持っていることがわかる。一般に, 絶乾比重 G_b と真比重 G_g 及び吸水率 Q の間には,

$$G_b = \frac{1}{Q + 1/G_g} \dots\dots\dots (4-4)$$

なる関係が成り立ち, 岩石を構成する鉱物粒子の真比重がほぼ同一である場合には, 吸水率が大きくなる即ち岩石中の空隙が多くなることにより, 絶乾比重が小さくなることわかる。¹¹⁾ この様な相関性は, 以前の七ヶ宿ダムのロック材にもみられ, 今回の試験でも同様な結果が得られている。

これまでに行った七ヶ宿ダムのロック材の結果^{9), 12)}と比較したものは, 図 4.5 及び図 4.6 の D_{60} 粒径の各比重値である。安山岩のロック材としては以前の結果と比べると, 比重は小さめで吸水率は大きめの値を示し, やや劣る材料ではあるが, その他の材料 (流紋岩・風化流紋岩・石英安山岩) と比べると比重が大きく, ロック材料として一般的には良質な材料であると言える。フィルター材はロック材に比べ絶乾比重は小さく, 吸水率は大きな値を示している。

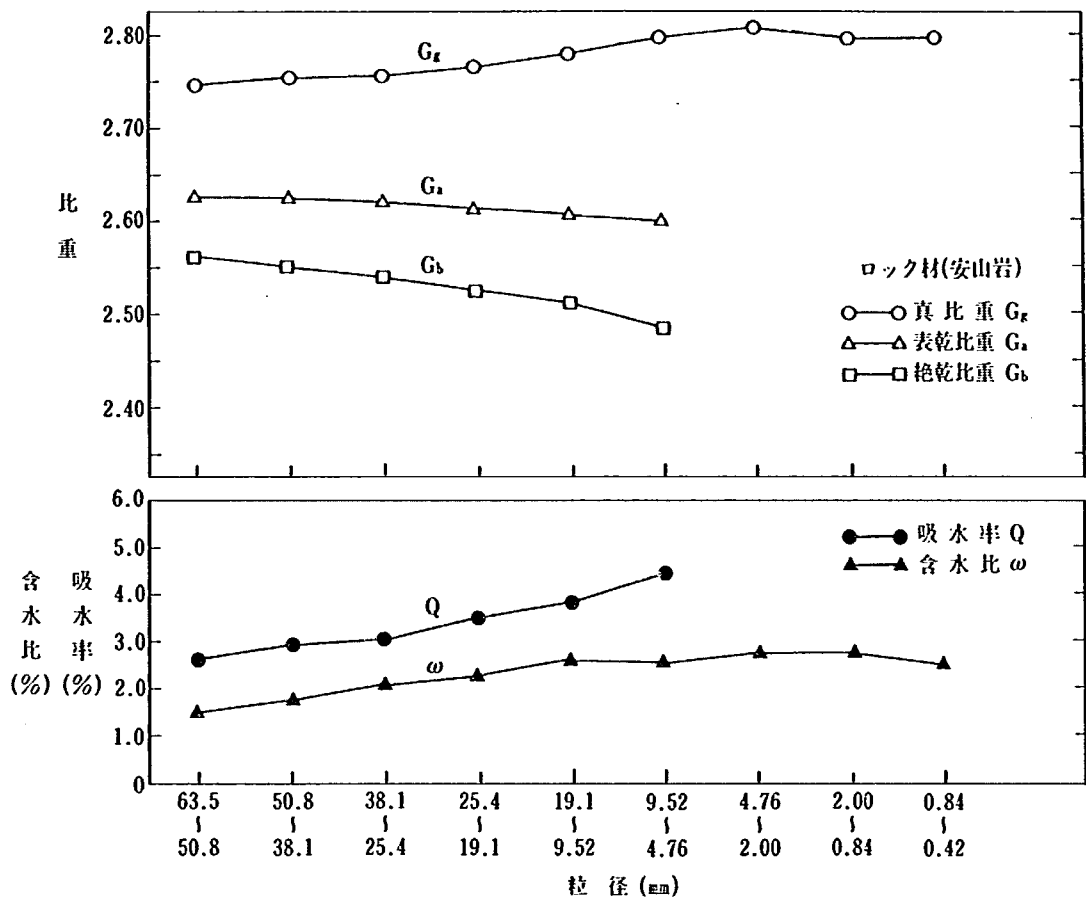


図 4.3 ロック材の粒径別 比重・吸水率・含水比

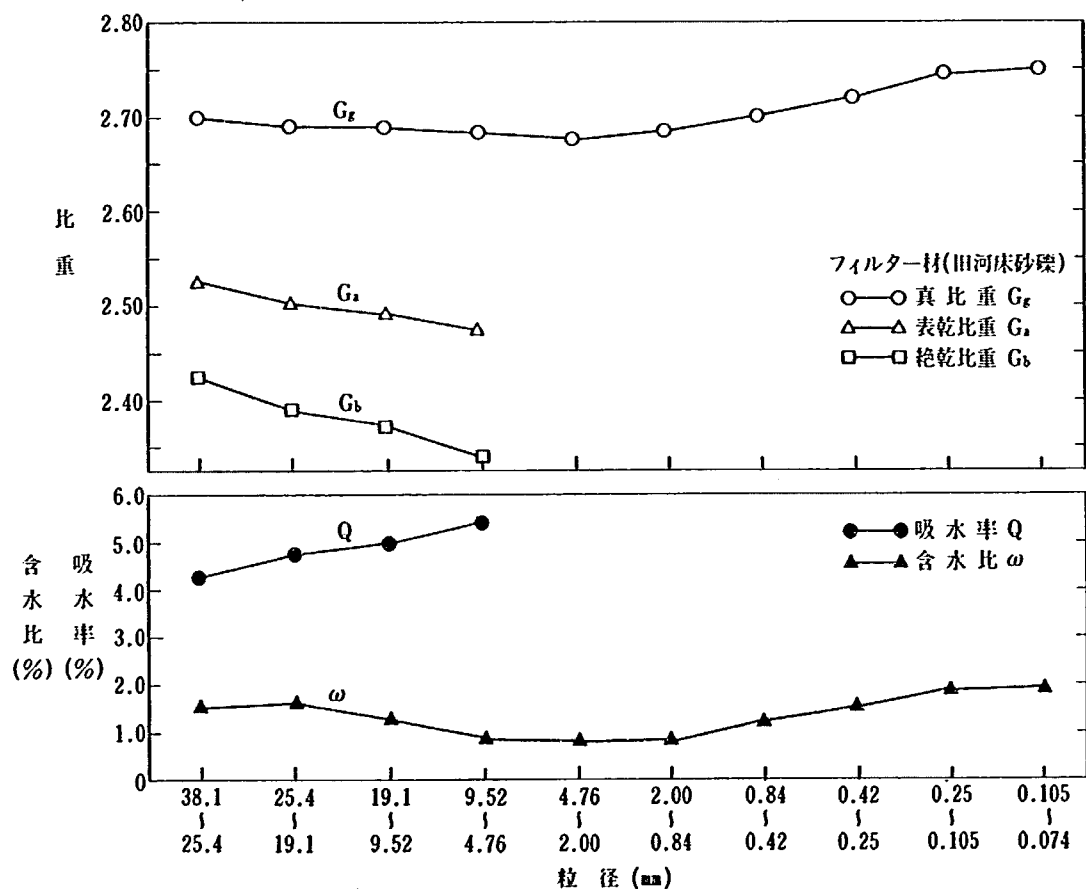


図 4.4 フィルター材の粒径別 比重・吸水率・含水比

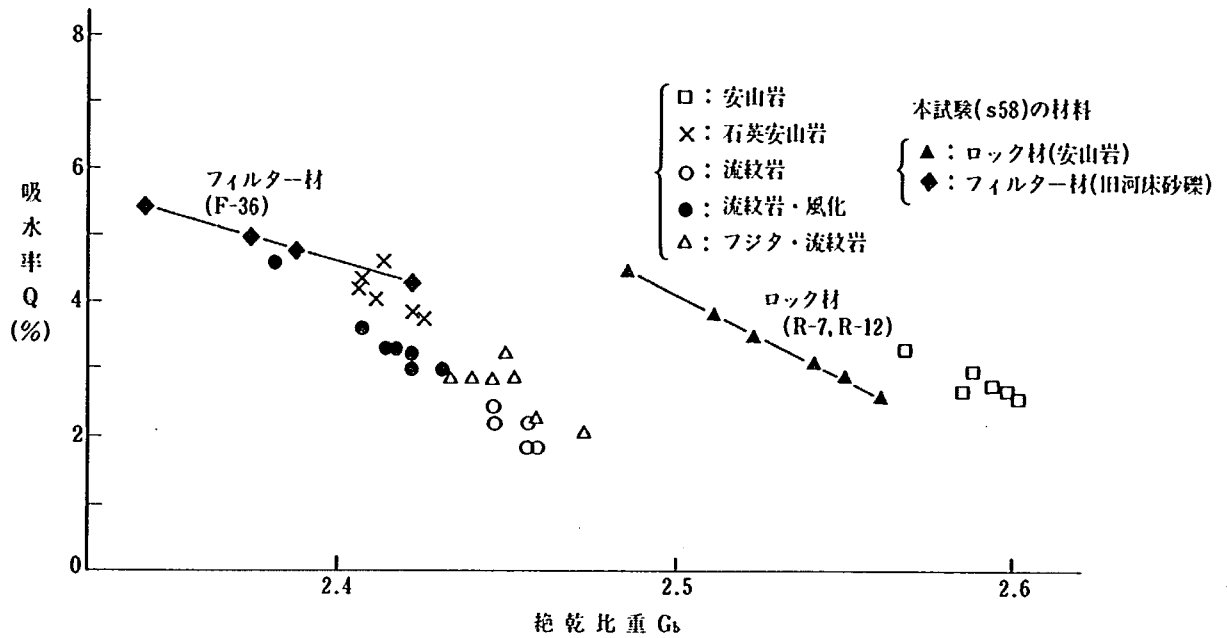


図 4.5 吸水率と絶乾比重の関係
(これまでの七ヶ宿ロック材との比較)

含水比については、試料搬入時にロック材で1.7～2.9%，フィルター材が1.1～3.3%であったが、試験時期が冬期であったためか、屋外での天日乾燥（4～7日程度）でも以下の様にそれほど低下しなかった。

	搬入時 w (%)	気乾後 w (%)
ロック材	1.7～2.9	1.4～2.7
フィルター材	1.1～3.3	0.8～2.0

当初、試験含水比を1%程度と考虑していたが、実際には、ロック材 $w = 2.3 \sim 2.4\%$ ，フィルター材 $w = 1.2\%$ 程度の平均含水比で試験を実施することになった。

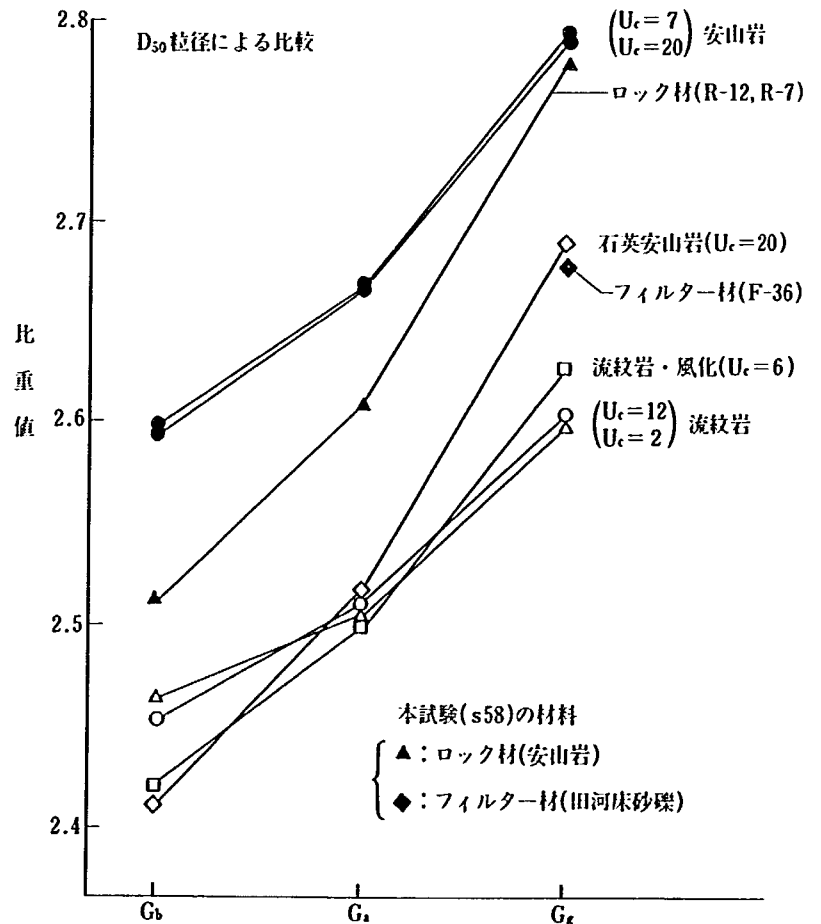


図 4.6 D_{50} 粒径による代表物性値の比較図
(これまでの七ヶ宿ロック材との比較)

4.3 締固め試験

4.3.1 目的及び方法

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・最小間隙比を決め、相対密度の定義（表 4.6）により相対密度を求める。

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）の参考にする。

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まちまちである。特に最小間隙比（ e_{min} ）の測定法には、締固め方法及び粒子破碎性とも関連して難しい点が多い。そこで本試験では、現在当研究室で静的大型三軸試験に用いられている供試体作成方法⁸⁾に準じて締固め試験を行った。

締固め試験は、表 4.7 の様な仕様を持つ図 4.7 の電動ランマーを用いて 6 層に締固めた。試験材料は、表 4.8 の締固め条件にある様に、三軸試験を実施するロック材（ $U_c = 12, 7$ ）フィルター材（ $U_c = 36$ ）の 3 種類全て気乾試料で行った。以下に締固め試験の手順を述べる。

表 4.7 ランマー仕様

全負荷打撃数	950 打撃 / 分
本体重量	33 kgf
加圧盤直径	約 29 cm

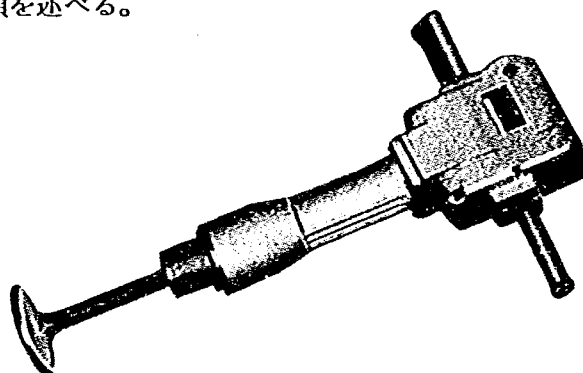


図 4.7 電動ランマー外観

① 図 4.1 に示した粒度分布となる様に材料を粒径毎に計量し、1 供試体当りの絶乾重量で 70～72 kgf

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。但しロック材（R-12, R-7）の場合、投入のみ（締固め時間 0 秒/層）では絶乾重量 65 kg とし、5 層投入とした。また重量測定には、1 g 単位目盛の台秤を使用した。

② 試料台（ペDESTAL）に厚さ約 2 mm のゴムスリーブ及び供試体作成用 2 つ割モールド（直径 30 × 高さ 60 cm）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。

表 4.6 相対密度表

相対密度 D_r (%)	締固まり状態
0 ~ 15	Very Loose
15 ~ 35	Loose
35 ~ 65	Medium
65 ~ 85	Dense
85 ~ 100	Very Dense
e_{max} : 最大間隙比 e_{min} : 最小間隙比 e : 目標間隙比	$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (\%)$

③ 1層分の試料をさらに16等分し、ハndsコップで落差を与えない様に静かにモールドに投入した。

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、電動ランマー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した。また締固め時間は次の様に変化させて行った。

（一層当りの 締固め時間）	（層数）	（1 供試体当りの 合計締固め時間）
投入のみ（0秒/層）	5層	0秒 → e_{max}, rd_{min} を求める
3 秒/層	6層	30秒
10 秒/層	6層	60秒
15 秒/層	6層	90秒
20 秒/層	6層	120秒
40 秒/層	6層	240秒 → e_{min}, rd_{max} を求める

⑤ 供試体の高さは各層の締固め前後に鉄板を載せ、図4.8に示す5点で測定しこの平均値とした。測定にはバーニヤ付き鋼尺を用い1/10mmまで読み取った。最終層まで締固めた後最終高さを測り、これから密度・間隙比を求めた。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）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・1204¹⁰⁾に従ってふるい分けを行った。また破碎率は、Marsalの定義^{13),11)}によって求めた。

表4.8 締固め試験条件

項 目	仕 様
試 験 材 料	ロック材 (R-12, R-7), フィルター材 (F-36)
絶 乾 重 量	70~72 kgf
供試体寸法	直径30×高さ60 cm
締固め機械	電動ランマー（表4.7, 図4.7 参）
層 数	6層<1層 約10 cm>
締固め時間 (エネルギー)	0~40 秒/層

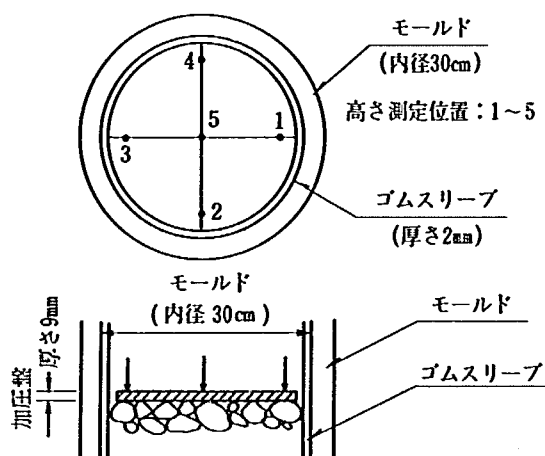


図4.8 供試体の高さ測定

4.3.2 締固め試験結果

締固め試験（粒子破砕率を含む）結果一覧表を表 4.9 に示す。結果から最大・最小間隙比等を見ると以下の様になる。

	(名称)	U_c	$\bar{G}_b$	e_{max}	e_{min}	$e_{max}-e_{min}$	破砕率 B^* (%)
ロック材	R-12	12	2.575	0.735	0.327	0.408	2.9 (2.7~3.0)
ロック材	R-7	7	2.579	0.775	0.369	0.406	3.6 (3.2~3.6)
フィルター材	R-36	36	2.571	0.546	0.283	0.263	5.7 (4.4~6.5)

* 破砕率 B は Marsal の定義¹³⁾により求め e_{min} を求めた時の値と () にその測定値の範囲を示す。

図 4.9 の締固め時間（エネルギー）と間隙比 e 又は乾燥密度 γ_d (g/cm^3) の関係でみると、投入のみ（締固め時間 0 秒/層）から 5 秒/層における間隙比（密度）の減少は、ロック材が $\Delta e \approx 0.32 \sim 0.33$ に対しフィルター材は $\Delta e = 0.19$ と小さく、間隙比の差に違いが見られる。しかし、これも投入のみが最大間隙比 e_{max} を、また 40 秒/層が最小間隙比 e_{min} を与えるとして、相対密度 D_r で表わした図 4.10 で見ると分る様に、5 秒/層の時の締固まり程度は、ロック材で $D_r = 78 \sim 82\%$ フィルター材で $D_r = 73\%$ で大差なく、少ない締固め時間でかなり密詰めの供試体が作成できる。また、全体をみても材料による違いはわずかで、締固め時間の増加に伴いほとんど同様の締固め傾向を示すことがわかる。

表 4.9 締固め試験結果一覧表

材 料	ランマーによる 締固め時間	乾 燥 密 度 γ_d (g/cm^3)	間 隙 比 e	相 対 密 度 D_r (%)	破 砕 率 B (%)	備 考
ロック材 R-12 $U_c = 12$ $\bar{G}_b = 2.575$	投入のみ	γ_{dmin} 1.484	e_{max} 0.735	0	—	
	5 秒/層×6 層	1.819	0.415	78.4	± 2.7	
	10 "	1.880	0.370	89.5	± 2.9	
	15 "	1.900	0.355	93.1	± 3.0	
	20 "	1.905	0.352	93.9	± 2.9	
	40 "	γ_{dmax} 1.941	e_{min} 0.327	100	± 2.9	
ロック材 R-7 $U_c = 7$ $\bar{G}_b = 2.579$	投入のみ	γ_{dmin} 1.453	e_{max} 0.775	0	—	
	5 秒/層×6 層	1.793	0.439	82.4	± 3.2	
	10 "	1.797	0.436	83.1	± 3.5	
	15 "	1.825	0.414	88.7	± 3.3	
	20 "	1.844	0.399	92.4	± 3.3	
	40 "	γ_{dmax} 1.884	e_{min} 0.369	100	± 3.6	
フィルター材 F-36 $U_c = 36$ $\bar{G}_b = 2.571$	投入のみ	γ_{dmin} 1.663	e_{max} 0.546	0	—	
	5 秒/層×6 層	1.899	0.354	73.0	± 4.5	
	10 "	1.960	0.312	89.0	± 4.4	
	15 "	1.963	0.310	89.7	± 4.7	
	20 "	1.982	0.297	94.7	± 6.5	
	40 "	γ_{dmax} 2.004	e_{min} 0.283	100	± 5.7	

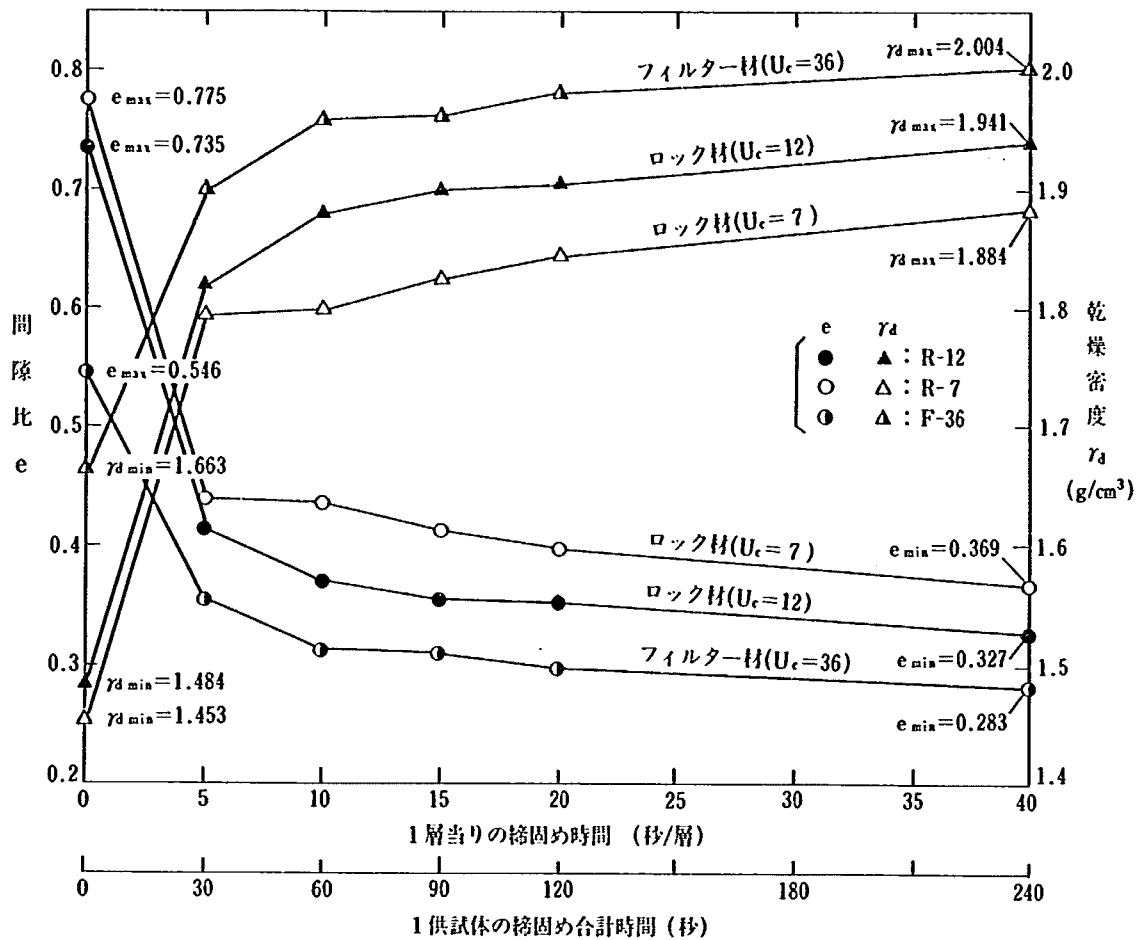


図 4.9 各材料の締固め試験結果

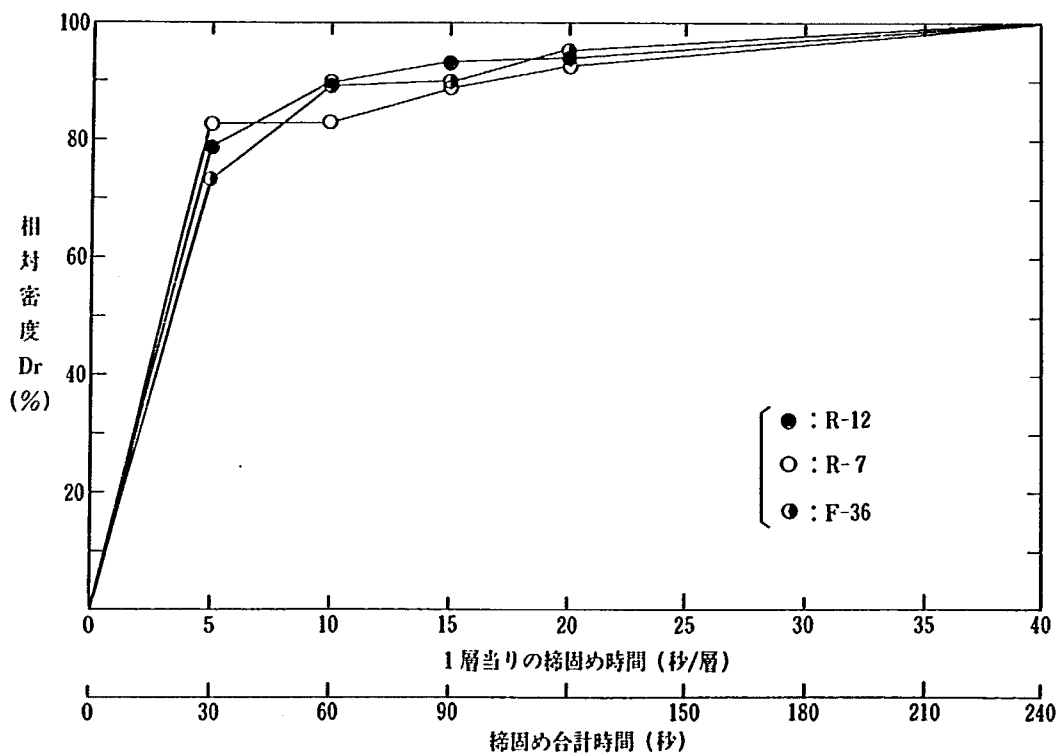


図 4.10 相対密度と締固め時間の関係

これまでの七ヶ宿ダムのロック材（流紋岩・風化流紋岩・石英安山岩・安山岩）^{9),12)}と比較したのが、図 4.11 $e_{max}-e_{min}$ 、図 4.12 $e-U_c$ 、図 4.13 $(e_{max}-e_{min})-U_c$ で、これまで当研究室で実施した各種ロック材料の最小間隙比 e_{min} と均等係数 U_c の関係をまとめたのが図 4.14 である。

以前の七ヶ宿ダムロック材と比較すると、本試験の結果は同程度の均等係数を持つ材料と比べ、最大間隙比 e_{max} 、最小間隙比 e_{min} とともに大きな値となっている。これまでの締固め試験は、主として振動テーブルを用いており、締固め装置、方法あるいはエネルギー等が違うために単純に比較することはできない。しかし、今回の電動ランマー（33 kgf, 950 打撃/分）による締固め時間は、最大40秒/層で最小間隙比 e_{min} を決めているので、さらに長時間締固めれば従来の結果に近づく可能性はある。

一般に材料の粒度配合の良否、すなわち均等係数の大小は締固め密度に大きな影響が有り、しかも相関性が高い。¹¹⁾ 図 4.14にある様に従来の結果では岩種による差がほとんどなく、最小間隙比 e_{min} （最大密度 γd_{max} ）は均等係数 U_c に依存している。今回の結果でもロック材、フィルター材を通して、均等係数が大きくなれば最小間隙比 e_{min} は小さくなっている。すなわち良い粒度配合の粗粒材料は、同じ締固めエネルギーでも良く締固まり、高い密度が得られることがわかる。

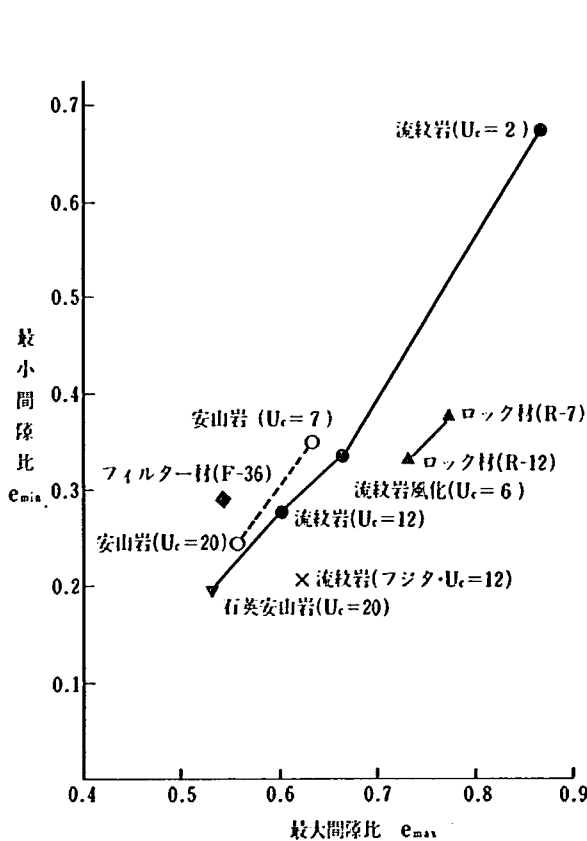


図 4.11 最大・最小間隙比図
(これまでの七ヶ宿ロック材との比較)

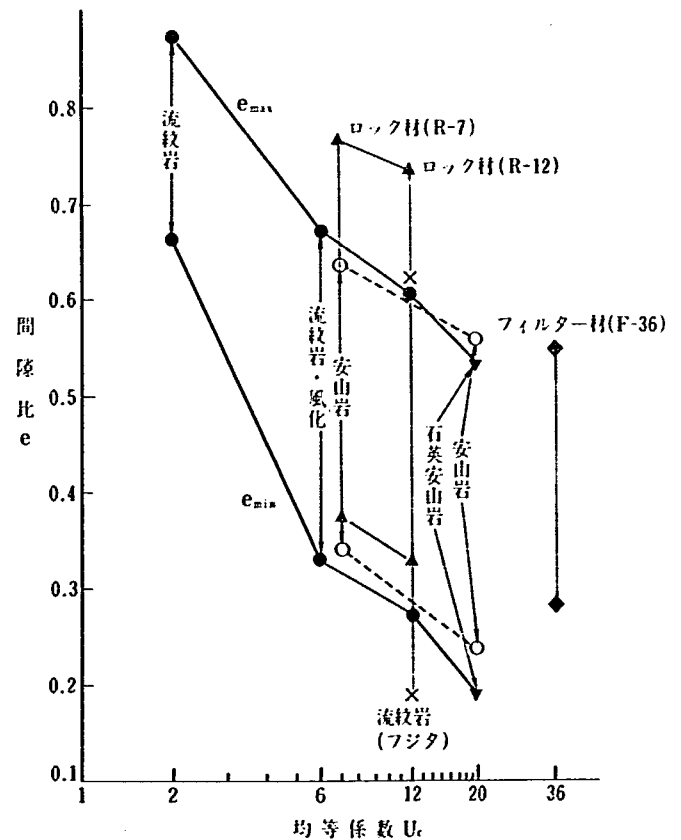


図 4.12 均等係数と間隙比
(これまでの七ヶ宿ロック材との比較)

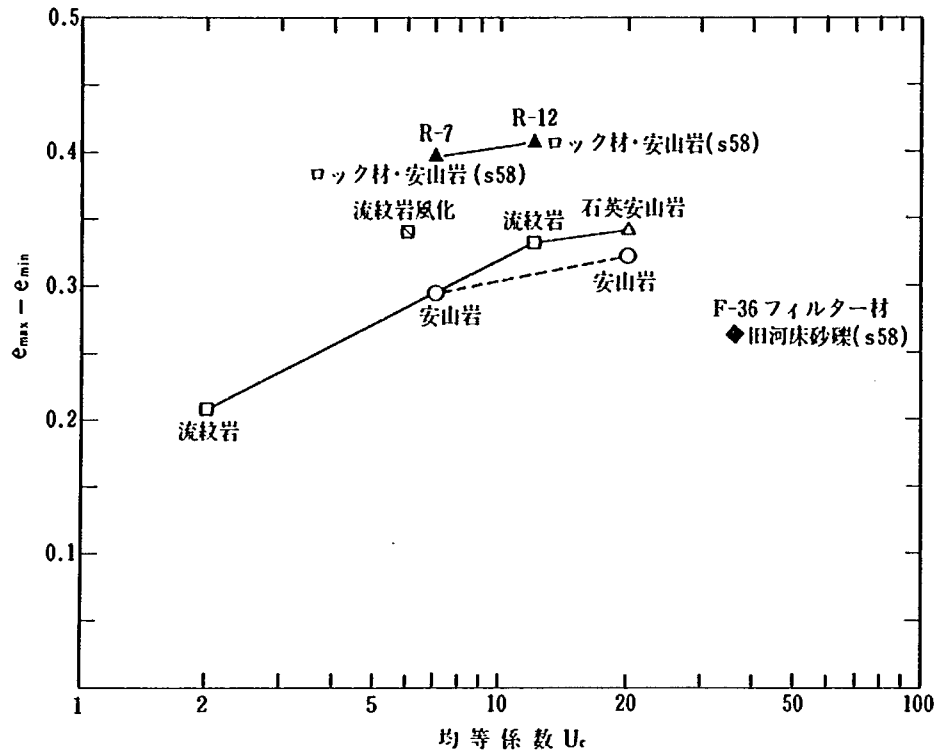


図 4.13 均等係数と最大・最小間隙比の差
(これまでの七ヶ宿ロック材との比較)

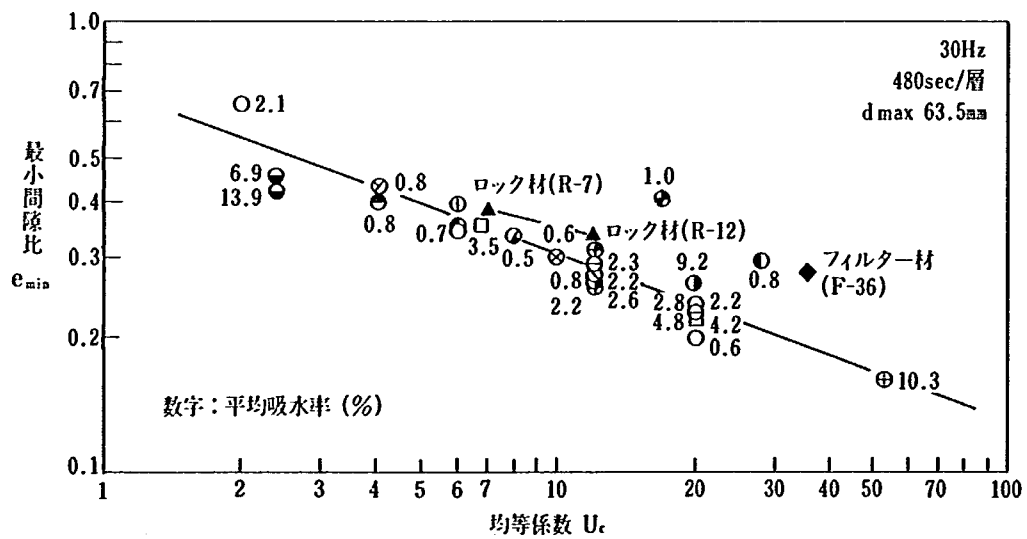


図 4.14 均等係数と最小間隙比
(当研究室で扱った他のロック材との比較)

次に、締固めによる粒子の破碎率の変化を図4.15に示した。一般に同じ材料であれば、締固め時間（エネルギー）の増加と共に破碎率が大きくなる。¹¹⁾ ロック材（R-12材、R-7材）は、締固め時間5秒/層でMarsalの破碎率 $B=3\%$ 前後有り、その後40秒/層まで締固めても2.7～3.6%とほとんど増加していない。しかし、フィルター材（F-36材）では、バラツキはあるが締固め時間の増加とともに破碎率も大きくなっていく傾向がみられる。ロック材のR-7材とR-12材で比較すると、わずかながらR-12材の方がR-7材より破碎率が低く、同じ材料では均等係数の大きい（粒度の良い）方が破碎されにくいことを示している。これは一般的な傾向で、粒度組成が良く締りやすい粒状材料では粒子間接点数が多くなり、そのために各接点で負担される力の大きさが相対的に軽くなるために、粒子の破碎率も小さくなるものと考えられる。¹¹⁾ しかし、ロック材とフィルター材を比べると、後者の均等係数 $U_c=36$ と前者に比べ大きいにもかかわらず破碎率が4.5～6.5%と大きくなっている。一般には、河床礫の様な材料はよく円磨・淘汰されており、これに対して発破や機械掘削で取られる粒状材料は、角張った粒子であるばかりでなく淘汰も乏しく硬軟の粒子が混材している。このために前者は後者に比べ締りやすく、かつ粒子破碎も小さくなるとされている。また、破碎率の大小に影響を与える要因としては、一般に材料の硬軟、最大粒径、均等係数（粒度組成の良否）等があげられる。

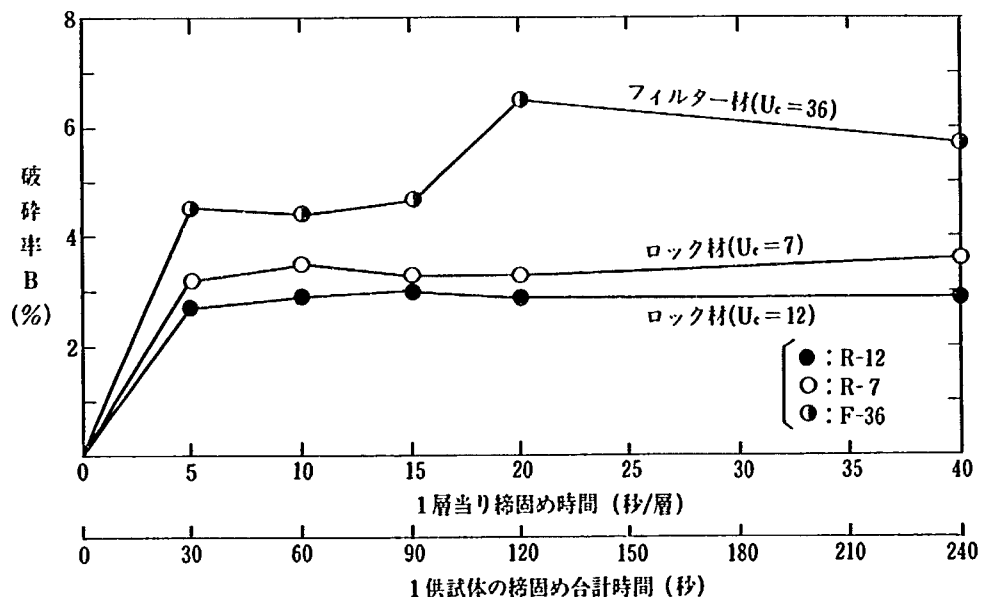


図 4.15 破碎率と締固め時間の関係

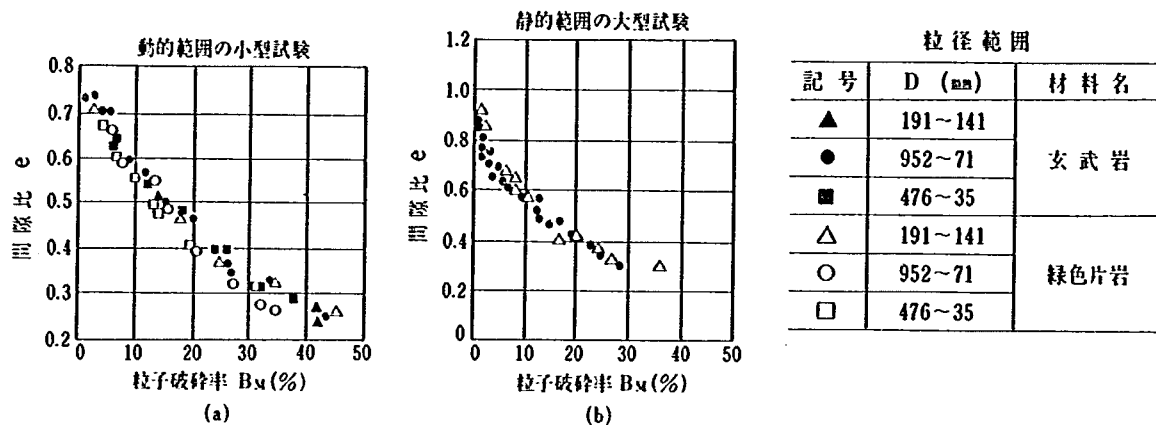


図 4.16 締固め後の間隙比と粒子破碎の関係 (赤司ら, 1980)^{14), 11)}

今回のフィルター材 (F-36) は河床砂礫であり, 最大粒径も R-12 材 (63.5 mm) に比べ 38.1 mm と小さく, しかも均等係数が最も大きい材料であり, 試験を実施した 3 材料では最も破碎されにくい条件を持っている。それにもかかわらず, ロック材よりも破碎率が大きい点に疑問が残る。この理由として考えられるのは, 材料の硬軟を一軸試験や点載荷試験等で確認していないためはっきりとは言えないが, フィルター材は河床砂礫と言っても段丘堆積物であり, 風化・変質の進んだ軟質な構成粒子が多かったことが考えられる。また, 破碎率の小さい (10% 以下) 部分では試験誤差の影響が大きく, 細粒分の多いフィルター材ではふるい分け時の誤差が入りやすかったものと考えられる。

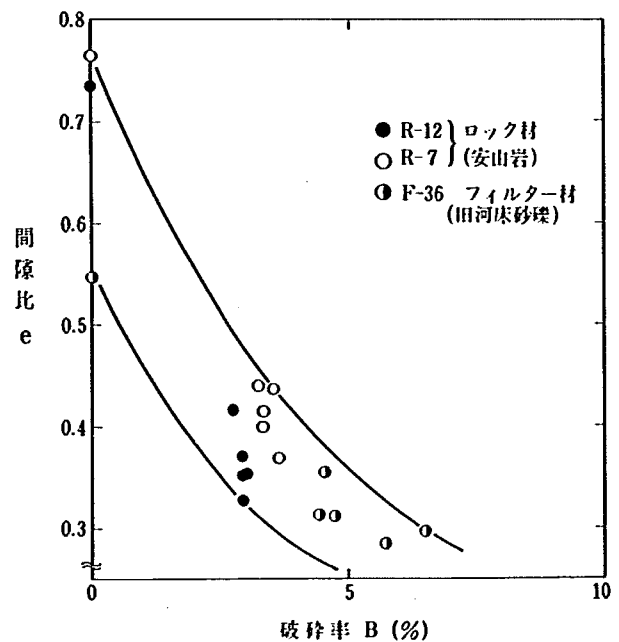


図 4.17 締固め後の間隙比と破碎率の関係

また, 締固め時の間隙比 e と粒子破碎率 B の関係を図 4.17 に示した。赤司ら (1980)^{14), 11)} によれば (図 4.16), 締固め後の間隙比は材質・粒度に関係なく粒子破碎と良好な相関を示すとされ, 今回の結果もフィルター材は特に良い相関性があり, 粗粒材料の締固めに粒子破碎の影響が大きいことを物語っている。

5. 試験方法

5.1 供試体密度の設定

各材料（ロック材-R-12・R-7，フィルター材-F-36）の締固め試験結果を参考にして，繰返し三軸試験の供試体の初期密度を決めた。

一般に，動的物性値（剛性率 G ，減衰定数 h ）に影響を及ぼす要因のひとつに密度（間隙比）があげられる。しかし，今回の試験においては試料数が多く（R-12，R-7，F-36の3種），試験ケース数に制限がある事等の理由から，各材料共設定密度を1種類とした。

密度の設定にあたっては，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，締固め試験の最大・最小間隙比から求まる相対密度 $D_r=85\%$ （かなり密な状態）を目標の初期間隙比とした。この値は，最大乾燥密度 $\gamma_{d_{max}}$ （ e_{min} を求めた時の密度）の95%以上の密度に相当する。尚ロック材・ $U_c=7$ （R-7材）では，同一材料の大型多目的三軸試験装置の結果²⁾と比較できるように，この間隙比 $e=0.42$ に合せた。これは $\phi 40\text{cm}$ の締固め試験では相対密度 $D_r=85\%$ に相当するが，本試験によれば $D_r=87.4\%$ となる。

供試体作製にあたり，各材料の設定初期密度にするために必要な電動ランマーの締固め時間は，図4.9，図4.10から1層当り，7～14秒/層（×6層）程度でよいことになる。表5.1に各材料の供試体の設定密度を一覧表として示した。

表5.1 供試体の設定密度

材 料	名 称	相対密度 $D_{ro}(\%)$	目標間隙比 e_o	目標乾燥密度 $\gamma_{do}(\text{g/cm}^3)$	締固め時間 ×6層(秒/層)
ロ ッ ク 材	R-12	85	0.388	1.854	7～8
	R-7	87.4	0.420	1.816	13～14
フ ィ ル タ ー 材	F-36	85	0.322	1.944	7～8

これらの密度は以下の定義^{11),8)}によるものとした。

$$\text{間隙比 } e = \frac{\gamma_w \cdot \bar{G}_b}{\gamma_d} - 1 \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

γ_w : 水の密度

γ_d : 供試体の乾燥密度

$\bar{G}_b$: 材料の合成絶対乾比重

ここで，合成絶対乾比重 $\bar{G}_b$ は物性値の項でも示した加重平均値で次式による。

$$\bar{G}_b = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{G_{bi}}} \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

f_i : 各粒度階における残留率

G_{bi} : 各粒度階における絶対乾比重

(粒径 4.76mm 以下は真比重 G_g を用いた)

締固め試験を含め，以後の供試体の間隙比の算定にはすべてこの合成絶対乾比重 $\bar{G}_b$ を用いている。

5.2 供試体作製手順

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（ $\phi 30\text{ cm} \times h 60\text{ cm}$ ）に、各材料を電動ランマー（重量 33 kgf 、全負荷打撃数 950 打/分、図 4.7）によって所定の所期設定密度になる様 6 層に分けて締固める。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。

＜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（図 4.1 参）に従って各粒径毎に必要な量を 6 等分して計算する。なお重量測定には 1 g 単位目盛の台秤を使用した。

② 試料台（ペDESTAL）に内側ゴムスリーブ（厚さ約 2 mm ）及び供試体作製用 2 つ割りモールド（直径 $\phi 30 \times$ 高さ $h 60\text{ cm}$ ）をセットし、モールド内径と初期高さを測定する。

③ 1 層分の試料をさらに 16 等分し、ハンドスコップ等で落差を与えない様に静かに投入する。投入はなるべく試料が平均的に分散する様にした。

④ 試料表面に厚さ 0.9 cm 直径 29 cm の加圧盤（鉄板）を載せ、この上面を電動ランマーで所定の時間締固めを行った。供試体の最終仕上り高さを 60 cm に設定し各層が目標高さになる様に調整した。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した。

⑤ 各層の投入後及び締固め後に鉄板の上から供試体高さを 5 点測定し、平均値から密度を算定した。測定にはバーニヤ付きの鋼尺を用い $1/10\text{ mm}$ まで読みとった。また最終層（6 層目）は表面が水平となるよう十分注意しながら締固めを行った。

⑥ モールド付き供試体を、手動リフトラ（最大積載重量 350 kgf ）を用いて試験機の載荷台へ静かに設置する。

⑦ 供試体上面に試料キャップ（荷重計はすでに取付けてある）を水平に載せ、内側ゴムスリーブをゴムチューブのバンドを用いて装着する。

⑧ 供試体を真空ポンプにより約 $20\text{ cm Hg} \approx 0.26\text{ kgf/cm}^2$ 以下で吸引し、自立させた後にモールドを解体した。この状態で再び供試体高さ及び直径を測定し、この値を初期値とした。高さは円周直角方向に 4 点、鋼尺により測定し、試料台及び試料キャップの厚みを差し引いて求めた。直径は内側ゴムスリーブの上から π テープを使って上部～下部に等間隔に 5 点測定し、スリーブ厚を差し引いて求めた。

⑨ 外側ゴムスリーブ（2 枚目）をスリーブ拡大器によって自立供試体に被せ、水もれをおこさないようチューブのゴムバンドで上下部試料台に十分締付けた。この際供試体に衝撃荷重等を与えて乱さない様十分に注意を払った。

＜試験装置へのセット＞

⑩ 底盤に 4 本の支柱を取付けた後軸受け部の上盤をクレーンを用いて支柱に設置した。載荷ピストンを静かに下ろし、試料キャップとボルトで剛結する。

⑪ 試料キャップのプレートアタッチメント（アクリル樹脂製）と支柱に取付けてあるアームアタッチメント（アクリル樹脂製）に非接触型変位計をセットする。この際、専用スペーサー（アクリル樹脂

製)を用いて初期離間距離や中心軸を調節する。

⑫ クレーンを使って三軸外筒部(セル)をゆっくり被せる。この際排水コックの邪魔にならない様に外体積変化シリンダーの位置を決める。

⑬ 載荷枠の油圧ピストンを上昇させておき、レール上を静かに移動させながら三軸装置を載荷枠の直下に設置する。

⑭ 空気・水系統の配管(シンフレックスチューブ)を接続し各検出器の結線及びセットを行う。

⑮ 側圧測定用の間隙水圧計のゼロ調整及びキャリブレーションを行い測定可能な状態とする。

⑯ 上盤の軸受け部にある水抜きバルブ(2箇所)にシンフレックスチューブを接続し、排水できる状態でバルブを解放しておき、三軸セル内に水道水を供給した。水道水は水圧が $3\sim 4\text{ kgf/cm}^2$ にもなるため、給水バルブで流量を絞りながら、側圧計の出力電圧値で 0.2 kgf/cm^2 以下となる様にゆっくりと給水した。

⑰ 三軸セル内に給水されたら、接続部や配管内の気泡をフラッシングして、できるだけ取り除く。この時バルブで給排水を繰返ししながら、体積変化シリンダーのピストンを一定位置になる様に調節する。

⑱ 給水完了後にダイヤルゲージで軸変位量の読みと、側圧計の読みを記録する。

⑲ 間隙水圧計以外の各検出器の増幅器のバランス調整を行い、さらに、ペンレコーダー(時刻歴の記録用)及びX-Yレコーダー(ヒステリシスループの記録用)を調整し、記録準備を完了する。

5.3 繰返し三軸試験方法

フィル材料(ロック材やフィルター材等)のような粗粒材料についての動的試験の実施例は、供試体や試験装置が大きくなる事から数少なく、しかも動的物性値を求める試験方法も統一されていないのが現状である。今回の試験では、これまで研究されてきた^{5),16),21),23),29)etc} 砂や粗粒材^{3),25),26),27)etc}の試験例を参考に、試験目的にそって繰返し三軸試験を実施した。

繰返し三軸試験方法の概要は次の通りである。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載荷ピストンあるいは三軸室全体を固定し、全て剛結合状態とする。この後荷重振幅制御によって、周波数 0.2 Hz 正弦波で軸荷重の繰返し載荷を行う。拘束圧は1供試体で数種類変化させるため、試験は小さな拘束圧から始め、荷重振幅を適度に増してゆき、せん断ひずみで $\gamma=10^{-3}$ 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。繰返し荷重と変位等の関係は、ペンレコーダーに履歴曲線(ヒステリシスループ)及び時刻歴の2方式で記録した。なお材料は全て気乾状態で用い、圧密及び繰返し載荷を通じて排水(排気)条件で行った。表5.2に繰返し三軸試験の条件を示した。

次に、繰返し三軸試験内容についてやや詳細に述べる。R-12材(ロック材・ $U_c=12$)は、試験装置改良前に七ヶ宿ダムのロック材で片振り試験(主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=2, 3$)を行っており、この結果と比較するために粒度を同じとし片振り試験を実施した。また、主応力比 σ_1/σ_3 の影響や他の材料との比較のため、両振り試験($\sigma_1/\sigma_3=1$)も実施した。これ以外の材料(R-7材・F-36材)については応力状態を

表 5.2 繰返し三軸試験条件

試験材料	材 料 ・ 岩 質	ロック材（ありや山，安山岩） フィルター材（長崎平，旧河床砂礫）		
	材 料	ロ ッ ク 材		フィルター材
	試 料 名	R-12	R-7	F-36
	均 等 係 数 U_c	12	7	36
	粒径 $d_{max} \sim d_{min}$ (mm)	63.5～0.42	38.1～0.84	38.1～0.074
供 試 体	供 試 体 寸 法	直径 $\phi 30\text{cm}$ ×高さ $h 60\text{cm}$		
	締 固 め 方 法	電動ランマー，6層，7～14秒/層		
	試 料 状 態	気乾 ($w \div 2\%$)・不飽和		
	(試 料 名)	R-12	R-7	F-36
	相対密度 D_{ro} (%)	85	87.4	85
	間 隙 比 e_o	0.388	0.420	0.322
圧 密	圧 密	異方圧密または等方圧密		
	拘 束 条 件	1供試体あたり5段階変化させる		
	(圧 密)	異 方 圧 密	等 方 圧 密	
	主応力比 σ_1/σ_3	2	1	
	平均主応力 σ_m (kgf/cm ²)	1.3・2・3・4・6	1・(1.3)・2・3・4・6	
	圧 密 速 度	1 kgf/cm ² /min		
	圧密完了基準	体積変化が0または0.5%/min		
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	不飽和・圧密排水 (排気)		
	入 力 波	正 弦 波		
	周 波 数	0.2 Hz		
	ひ ず み 範 囲	$\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$		
	波 数	12 波		
	記 録 波 数	5波目・10波目 (10波目を解析)		

単純化し, 結果のバラツキを少なくする目的で, 等方圧密で両振り試験を実施した。この様に, 片振り試験と両振り試験とは異方圧密 ($\sigma_1/\sigma_3 \neq 1$) とするか等方圧密 ($\sigma_1/\sigma_3 = 1$) の違いであり, 両振り試験では, 試料を等方圧密した状態から軸荷重を変動させて圧縮と伸張の 2 つの応力状態を繰返し与えるものである。これは, 今回三軸セルを分割し, 载荷部〜供試体を全て剛結することによって可能となったものである。

等方圧密と異方圧密の手順を以下に述べる。

① まず, 所定の拘束圧 (側圧) となる様に, 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, 空圧調整弁を手動で動かし圧力を上昇させる。側圧の上昇速度 (すなわち圧密速度) は静的試験と同様 1 kgf/cm²/min で増圧した。側圧の加圧機構は, 体積変化シリンダーの 2 重ベロフラムを介した空気圧制御水圧変換方式である。側圧上昇の際, 0.5 kgf/cm² 程度に達するまでに, 供試体自立の真空吸引圧を

徐々に解放してゆく。

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、試験機の載荷ピストンとタッチングさせる。この際制御が微妙なため過大な軸荷重がかからない様十分注意する。タッチング後、油圧ピストンと載荷ピストンをボルトで剛結する。

②' (異方圧密) 側圧が所定の値になった後、サーボコントローラー (制御盤) を調節しながらゆっくり油圧ピストンを下げ、載荷ピストンにタッチングし剛結した後 (片振り試験では必ずしも剛結する必要はない)、さらに設定荷重となる様に荷重を加える。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、次の様になる。

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

σ_1 : 設定軸応力
 σ_3 : 設定側圧 (拘束圧)
 A : 供試体断面積

③ 圧密過程においては、軸荷重・軸変位・体積変化・側圧の経時変化を記録した。また圧密時の軸変位は、三軸セル外に取付けたダイヤルゲージ (1/100 mm 目盛) を主に読み取った。

④ 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 %/min 以下を圧密終了基準とした。

⑤ 圧密終了時点で体積変化量の出力電圧値及び軸変位量をダイヤルゲージで読みとり、その側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た。

小型供試体 (直径 ≤ 10 cm) の動的試験では、1つの供試体につき1拘束圧で試験する^{16), 5), 23)} etc のが一般的である。これは供試体の作製が容易な事、そして応力履歴の影響が少ない等の点で望ましい方法と言える。しかし、本試験は取扱う材料が粗粒材であることから、供試体が大きく試験装置も大がかりとなって、多大な労力を必要とする。このような時間的あるいは経済的理由から試験供試体数に限度があるため、今回は1供試体で拘束圧を小～大へ5段階程度変化させて行った。そして、各拘束圧下で $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-3}$ のひずみにわたり連続的に剛性率と減衰定数を求めたものである。

入力波は、最も標準的に用いられている正弦波とした。周波数は、レコーダーのペンの追従速度、データレコーダーやトランジェントコンバーター等を介して記録した時のノイズの拡大、さらに周波数の相異が砂の $G \cdot h$ にはほとんど影響のない点を考慮して 0.2 Hz を採用した。

繰返し載荷の記録は、ペンレコーダーに軸荷重、軸変位 (非接触型変位計、セル外小変位計)、体積変化、側圧の時刻歴をとり、X-Yレコーダーには軸荷重と軸変位 (非接触型変位計) の履歴曲線を描かせた。載荷回数は各荷重振幅において12波行い、このうち5波目と10波目の履歴曲線を記録した。これまでの他の研究によれば $G \cdot h$ は載荷回数の影響を受けるが、10波目以降では G に対する影響は小さくなる^{4), 29)}。そこで、今回の試験では $G \cdot h$ 共10波目の記録を代表値として解析した。

5.4 実験ケース

繰返し三軸試験の試験供試体数は、予備試験を除くと全部で10ケースである。このうち E, F の 2 ケースは、A～D 8 ケースの結果から判断して補足試験を行ったものである。

実施した試験ケースの一覧を表 5.3 に示した。A～D の各ケースの拘束条件の組合せは以下の通りとした。R12-A の片振り試験の主応力比は、以前の七ヶ宿試験と同様 $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ とした。

		<主応力比 σ_1/σ_3 >	<平均主応力 $\sigma_m = (\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3)/3$ (kgf/cm ²)>
本 試 験	R12-A	2	1.33, 2, 3, 4, 6
	R12-B	1	1, (1.33), 2, 3, 4, 6
	R7-C		
	F36-D		
補 足 試 験	R12-E	1	3, 6
	R12-F	($\sigma_m = 3$) 1.10, 1.33, 1.46	3
		($\sigma_m = 6$) 1.07, 1.26, 1.40	6

補足試験は R-12 材を用い、平均主応力一定のもとで主応力比 σ_1/σ_3 をいくつか変化させ、この影響をみるために行ったものである。

表 5.3 大型繰返し三軸試験ケース

材 料	物 性 値	圧 密	片両 振振 りり	供 試 体 No	初 期 値 D_{ro} (%) γ_{do} (g/cd) e_o	拘 束 (圧 密) 条 件					試 験 数	備 考
						σ_3 (kgf/cd)	σ_1 (kgf/cd)	σ_1/σ_3	σ_n (kgf/cd)	圧密後 間隙比 e		
ロック材 R-12	$d=63.5\sim 0.42\text{ mm}$ $U_c=12$ $\overline{G_b}=2.575$ $D_{ro}=85\%$ $\gamma_{do}=1.855\text{ g/cd}$ $e_o=0.388$	異 方 圧 密	片 振 り 試 験	R12-A-1	84.1	0.97	1.97	2.03	1.30	0.386	2	
					1.850	1.49	3.00	2.01	1.99	0.380		
					0.392	2.23	4.47	2.00	2.98	0.373		
						3.00	5.99	2.00	4.00	0.367		
						4.50	9.02	2.00	6.01	0.360		
				R12-A-2	84.6	0.98	1.98	2.02	1.31	0.384		
					1.853	1.51	3.00	1.99	2.01	0.376		
					0.390	2.24	4.49	2.00	2.99	0.369		
						3.00	6.00	2.00	4.00	0.362		
						4.50	9.01	2.00	6.00	0.355		
		等 方 圧 密	両 振 り 試 験	R12-B-1	85.8	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	1.30	0.371	2	
					1.859	$\int$	$\int$	$\int$	2.00	0.365		
					0.385	$\int$	$\int$	$\int$	3.00	0.357		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.00	0.352		
						$\int$	$\int$	$\int$	6.01	0.344		
				R12-B-2	84.6	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	1.31	0.377		
					1.853	$\int$	$\int$	$\int$	2.01	0.373		
					0.390	$\int$	$\int$	$\int$	3.01	0.365		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.00	0.356		
						$\int$	$\int$	$\int$	6.00	0.348		
		等 方	両 振 り	R12-E-1	84.6	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	2.99	0.368	補 足 試 験 2	
					1.852	$\int$	$\int$	$\int$	6.00	0.354		
					0.390	$\int$	$\int$	$\int$				
				R12-F-1	85.0	2.91	3.166	1.10	2.98	0.364		
					1.855	2.71	3.599	1.33	3.00	0.363		
					0.388	2.60	3.808	1.47	3.00	0.363		
ロック材 R-7	$d=38.1\sim 0.84\text{ mm}$ $U_c=7$ $\overline{G_b}=2.579$ $D_{ro}=87.4\%$ $\gamma_{do}=1.816\text{ g/cd}$ $e_o=0.420$	等 方 圧 密	両 振 り 試 験	R7-C-1	86.5	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	1.00	0.412	2	
					1.811	$\int$	$\int$	$\int$	2.16	0.401		
					0.424	$\int$	$\int$	$\int$	3.02	0.393		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.03	0.390		
						$\int$	$\int$	$\int$	5.97	0.381		
				R7-C-2	87.7	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	0.98	0.398		
					1.818	$\int$	$\int$	$\int$	1.99	0.390		
					0.419	$\int$	$\int$	$\int$	2.98	0.382		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.02	0.376		
						$\int$	$\int$	$\int$	6.00	0.370		
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				
フィルタ 材 F-36	$d=38.1\sim 0.074\text{ mm}$ $U_c=36$ $\overline{G_b}=2.571$ $D_{ro}=85\%$ $\gamma_{do}=1.945\text{ g/cd}$ $e_o=0.322$	等 方 圧 密	両 振 り 試 験	F36-D-1	84.0	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	0.99	0.320	2	
					1.940	$\int$	$\int$	$\int$	2.01	0.314		
					0.325	$\int$	$\int$	$\int$	3.01	0.307		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.00	0.302		
						$\int$	$\int$	$\int$	6.01	0.297		
				F36-D-2	83.3	$=\sigma_n$	$=\sigma_n$	1.00	1.01	0.323		
					1.938	$\int$	$\int$	$\int$	2.01	0.316		
					0.327	$\int$	$\int$	$\int$	3.01	0.310		
						$\int$	$\int$	$\int$	4.00	0.305		
						$\int$	$\int$	$\int$	6.00	0.300		
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				
						$\int$	$\int$	$\int$				

6. 予 備 試 験

6.1 豊浦砂の物性値と繰返し三軸試験方法

大型繰返し三軸装置による粗粒材料の試験に先立ち、それにより得られる剛性率と減衰定数が、従来用いられている小型三軸装置 ($\phi \leq 10\text{cm}$) やねじり単純せん断装置による値との一致度を確認しておくことは、データの整合性と試験機の信頼性を見るために重要なことである。そこで、今回は他の研究例が多く比較検討がしやすいことから、豊浦標準砂を用いて予備試験を行った。試験は3ケース実施したが、信頼性のあるものが1ケースのみであり、この結果を示す。

豊浦砂の物理的性質(物性値)は比重 $G_s = 2.645$ 、均等係数 $U_c = 1.4$ 、最大・最小間隙比 $e_{max} \sim e_{min} = 0.977 \sim 0.605$ (龍岡ら⁶⁾ 土質工学会案による方法)とした。試料は気乾状態で、 $\phi 30 \times h 60\text{cm}$ のモールド中に3層に詰め、小型ハンドバイブレーターにより1~2分/層ずつ締固めた。供試体の設定密度は、相対密度 $D_r = 85 \sim 90\%$ 程度のかなり密な状態を目標とした。繰返し三軸試験の方法・手順は、基本的には粗粒材料(ロック材・フィルター材)の場合と同じであり、等方圧密後両振り試験を行った。まず最初に $\sigma_m = \sigma_c = 1.0, 2.0, 4.0$

kgf/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時点で繰返し載荷を行いせん断ひずみ $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$ の範囲で測定を行った。繰返し載荷は、荷重制御により正弦波形を与え、周波数 0.2 Hz、載荷回数を10波とした。10波目の記録から剛性率・減衰定数を求めた。豊浦砂の物理的性質を含む予備試験の条件を表 6.1 にまとめて示した。

表 6.1 試験条件(予備試験)

材		料		豊 浦 標 準 砂		
物 性 値	比 重 G_s		2.645			
	均 等 係 数 U_c		1.4			
	最大間隙比 e_{max}		0.977			
	最小間隙比 e_{min}		0.605			
供 試 体	供 試 体 寸 法		直径 $\phi 30 \times$ 高さ $h 60\text{ cm}$			
	締 固 め 方 法		ハンドバイブレーター，3層，1～2分/層			
	初期密度	相対密度 D_{ro}	90.9 %	1 供試体 (ケース)		
		乾燥密度 γ_{do}	1.614 g/cm^3			
		間 隙 比 e_o	0.639			
圧 密	試 料 状 態		気乾・不飽和・圧密排水 (排気)			
	圧 密		等 方 圧 密 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$			
	拘 束 圧	$\sigma_c = \sigma_m$ (kgf/cm^2) <目標値>/<測定値>		σ_1/σ_3	圧密後 e	
		1.0 / 0.96				
		2.0 / 2.06				
		4.0 / 3.90				
	繰返し載荷	方 法		両 振 り		
制 御		荷重 (応力) 振幅制御				
入 力 波		正 弦 波				
周 波 数		0.2 Hz				
ひ ず み 範 囲		$\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$				
波 数		10 波				

6.2 結果と考察

今回の予備試験では、密詰め豊浦砂のデータが1ケースだけではあるが、この結果と通常用いられている小型試験装置による研究結果と比較検討しておくことは重要である。

図6.1, 図6.2は、剛性率 G 及び減衰定数 h とせん断ひずみ(片振幅) γ の関係いわゆるひずみ依存曲線を示したもので、片対数グラフ上に拘束圧($\sigma_m = \sigma_c = 1, 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$)をパラメーターとして10波目の値をプロットしたものである。各拘束圧で剛性率 G , 減衰定数 h 共に $\gamma = 10^{-4}$ よりひずみが小さくなるとある一定の値に漸近する傾向が得られ、一般に言われている土質材料のひずみ依存曲線の形^{7), 4), 5), 16)}と良く似ている。また $G \sim \gamma$ 関係では $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-3}$ のオーダーに対応した剛性率 G の連続的な変化が求められている。しかし、 $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ 以下のひずみレベルではばらつきが目立ち、図3.5に示した様に履歴曲線(ヒステリシスループ)にノイズの影響があるため、信頼性はやや劣るようである。同様に減衰定数 h についても $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ より小さなひずみでは、ノイズによってループが乱され滑らかでないもので、 h を求めるのが難しい状態であった。また、拘束圧の影響は剛性率 G 及び減衰定数 h 共に明確に現われており、同じひずみで比べると拘束圧の減少に伴い G は小さく、 h は大きくなる。すなわち、拘束圧が小さい程 γ の増加に対する G の減少率、 h の増加率は大きく、従って拘束圧が小さい程 $G \cdot h$ のひずみ依存性が大きいことがわかる。これも従来結果と同じ傾向である。

拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ における $G \cdot h$ のひずみ依存曲線を、他の研究結果と比較したのが図6.3, 図6.4である。図中に示してある様に他の研究は、小型繰返し三軸試験をはじめ、ねじり単純せん断、単純せん断、リングせん断、共振法等、試験方法あるいは供試体形状も様々である。しかし、これらは $G \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 共にばらついてはいるが、ある範囲の幅をもった形で表わされる。図中にはさらに、当研究室が製作した大型多目的試験装置²⁾を用いた、豊浦砂の中実試験($\phi 40 \times h 80 \text{ cm}$)と中空ねじりせん断試験(外径 $\phi_{OUT} 80 \text{ cm}$ —内径 $\phi_{IN} 40 \text{ cm} \times h 80 \text{ cm}$)の $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の結果を参考のため示してある。 $G \sim \gamma$ 曲線では、今回の予備試験 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$, $e = 0.63$ の結果(●印)を、 G が間隙比の関数 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ に比例すると考え、他の研究における圧密後間隙比を $e \rightleftharpoons 0.70$ 程度と予想して整理してある。予備試験の値を補正した $G \sim \gamma$ の関係(⊕印)は他の繰返し三軸(振動三軸)装置の結果と近い傾向を示し、特に国生ら⁵⁾の結果に近い。また当研究室の大型多目的三軸装置の中実試験($\phi 40 \times h 80 \text{ cm}$)結果とも良く一致している。 $h \sim \gamma$ 曲線では、大きなひずみにおける h の増加がやや少なめであるが、 G と同様振動三軸装置を用いた他の研究結果と近い値を示している。この様に、今回の豊浦砂による予備試験結果は、従来の研究と定性的傾向は良く一致しており、データの整合性、試験装置の信頼性について、ほぼ確認できたと考えられる。

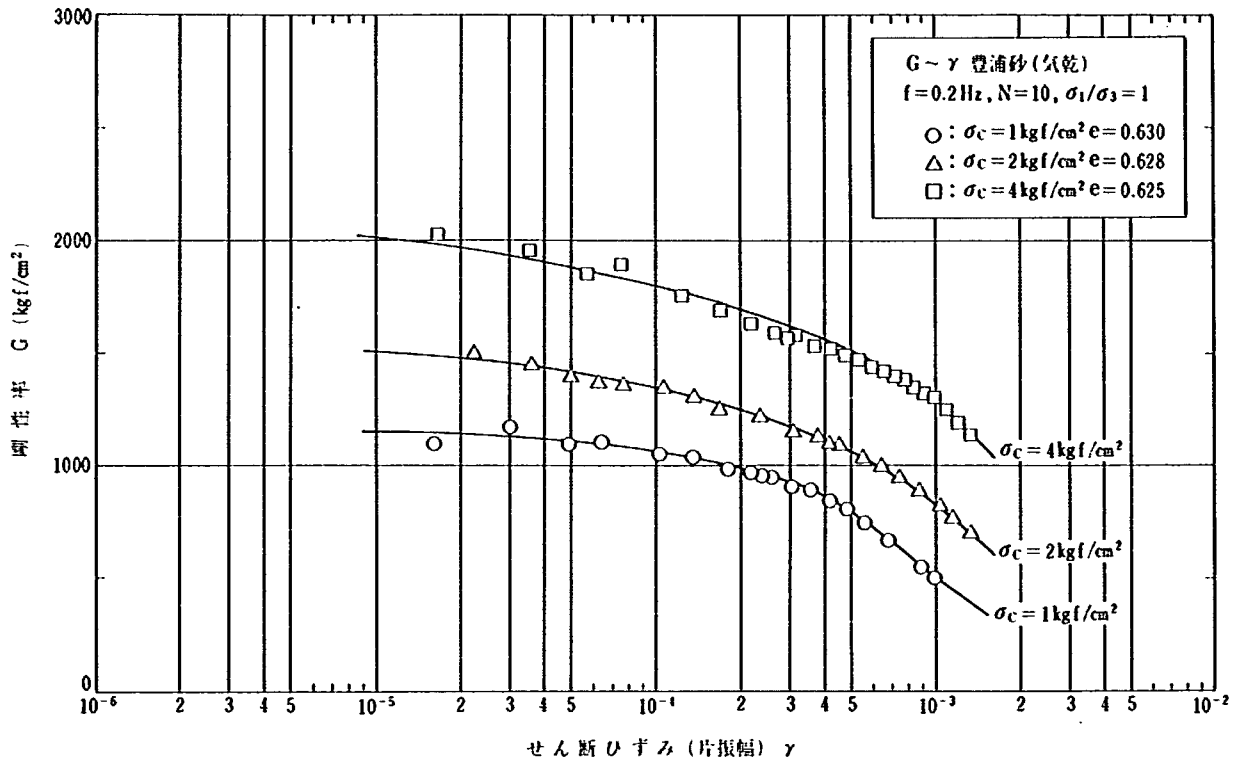


図 6.1 剛性率 G のひずみ依存性 (豊浦砂 $\sigma_c = 1 \sim 4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)

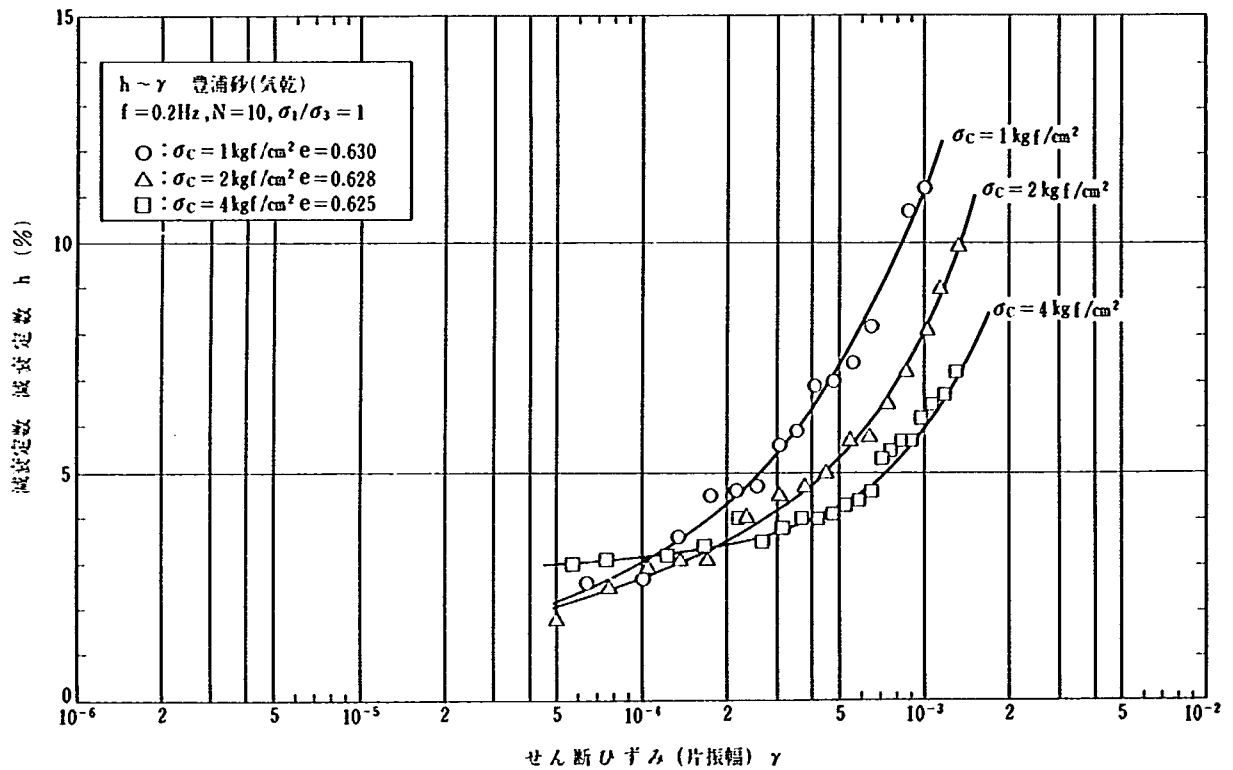


図 6.2 減衰定数 h のひずみ依存性 (豊浦砂 $\sigma_c = 1 \sim 4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)

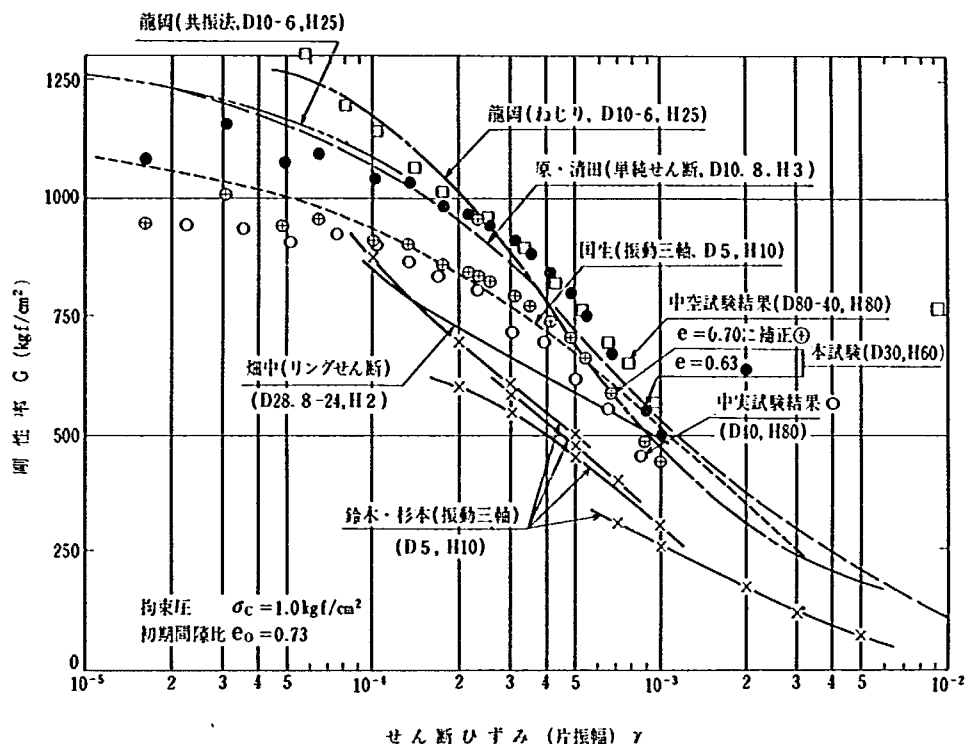


図 6.3 本試験と他の研究による剛性率 G のひずみ依存性の比較 (豊浦砂)

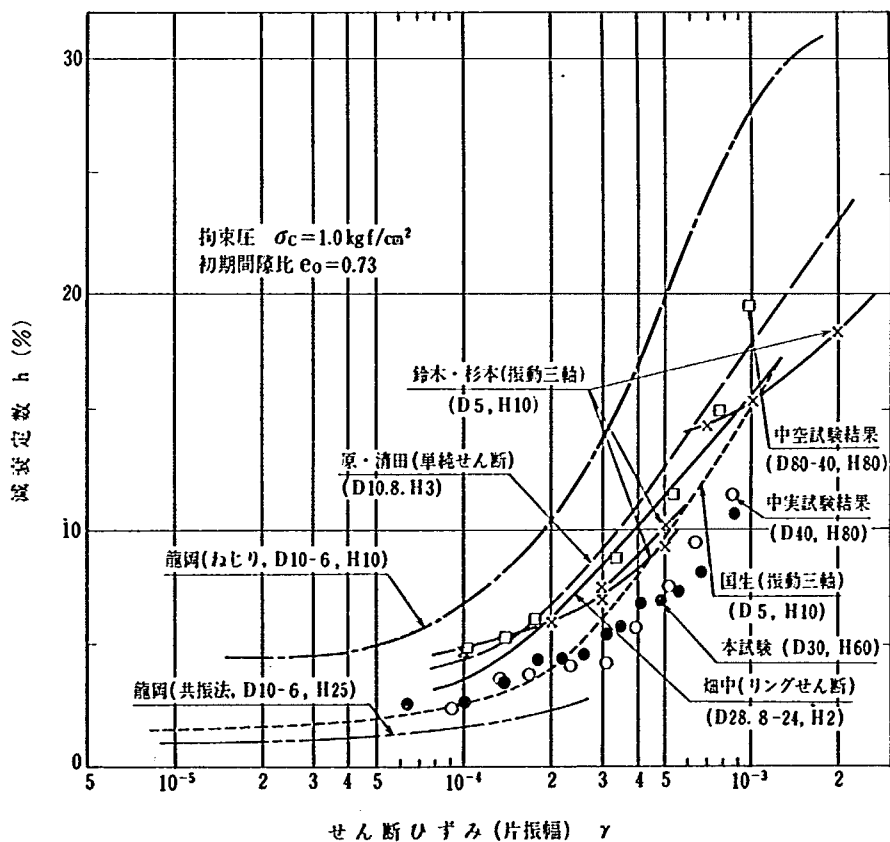


図 6.4 本試験と他の研究による減衰定数 h のひずみ依存性の比較 (豊浦砂)

これまでは、豊浦砂の剛性率 G 、減衰定数 h のひずみ依存曲線について既往の研究と比較し、試験値の整合性や信頼性について概要を述べてきた。次に、 $G \cdot h$ に影響を及ぼす個々の要因をとり上げ、やや詳細にその影響を調べてみる。

従来の研究によれば、砂質土の剛性率 G や減衰定数 h に影響を及ぼす要因は、密度・拘束圧・ひずみの大きさ・粒度分布・主応力比・載荷回数等が主なものとされている。^{2), 3)} まず、密度すなわち間隙比に着目してみると、岩崎・龍岡^{15), 16)} や国生ら^{5), 20)} による豊浦砂の研究によれば、Richart らの³²⁾ 提案した間隙比の因子

$$F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \quad \dots\dots\dots (6-1)$$

で G の e に対する変化の仕方を良く説明できるとしている。予備試験は1ケースだけであり、拘束圧 $\sigma_m = \sigma_c = 1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ でわずかに $e = 0.630 \sim 0.625$ と変化しているだけである。従って、本来の間隙比 e の違いによる影響はわからないが、他の研究による G と e の関係のどこに試験値がプロットされるかで G の値を比較できる。図 6. 5 は、岩崎・龍岡ら^{15), 16)} が求めた豊浦砂の拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ における広範囲のせん断ひずみ γ に対する G と e の関係を直線で示し、予備試験の結果と比較したものである。岩崎・龍岡らは、この関係から(6-1)式の関数はかなり広いひずみまで適用できるであろうとしており、予備試験による G の値はせん断ひずみ $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲では、岩崎・龍岡らの結果と近い値を示している。同様に図 6. 6 は、微小ひずみ $\gamma = 10^{-6}$ における G と e の関係で拘束圧をパラメーターとして示したもので、岩崎・龍岡ら^{16), 18)} と国生ら^{5), 20)} の提案した次の2式を図中の実線及び破線で示してある。

$$G_{\gamma=10^{-6}} = G_0 = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.40} \quad (\text{岩崎・龍岡他, 共振法}) \quad \dots\dots\dots (6-2)$$

$$G_{\gamma=10^{-6}} = G_0 = 840 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.60} \quad (\text{国生他, 振動三軸}) \quad \dots\dots\dots (6-3)$$

予備試験では、微小ひずみ $\gamma = 10^{-6}$ での G ($= G_0$) が直接求められていない。そこで、後に述べる方法によって G_0 を推定し比較した。これによると、最初の拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ での剛性率 G_0 は上の2式に近いが、これ以降の拘束圧においては、上式で得られる G_0 よりかなり低い値が得られた。これは、 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ で、比較的大きなひずみ $\gamma = 10^{-3}$ 程度まで繰返し載荷を行ったことによる、供試体への影響があったものと考えられる。国生ら⁵⁾によれば、豊浦砂を用いて、1供試体で拘束圧を数段階変えて得られた G と、1供試体につき1拘束圧の結果とは良く一致している。ただ、拘束圧を変化させた試験は、微小ひずみに対応した物性を求めたもので、いずれも $\gamma = 4 \times 10^{-6}$ 以下のひずみレベルであり、後に求める物性値に与える影響はないものと考えている。また、砂を使った大型供試体 ($\phi 30 \times h 70 \text{ cm}$) の繰返し三軸試験³⁾においては、大きなひずみまで試験を行った後微小ひずみ試験で得られる G は、明らかに微小ひずみ試験だけの値よりも小さく、大ひずみ試験による供試体への攪乱の影響が現われているとしている。この様に、豊浦砂の様な粒径のそろったきれいな砂を用いて、1供試体で多段階に拘束圧を変えて動的物性値を求める場合には、繰返し載荷による影響が残らない程度のひずみレベルの範囲で行う必要があると考えられる。

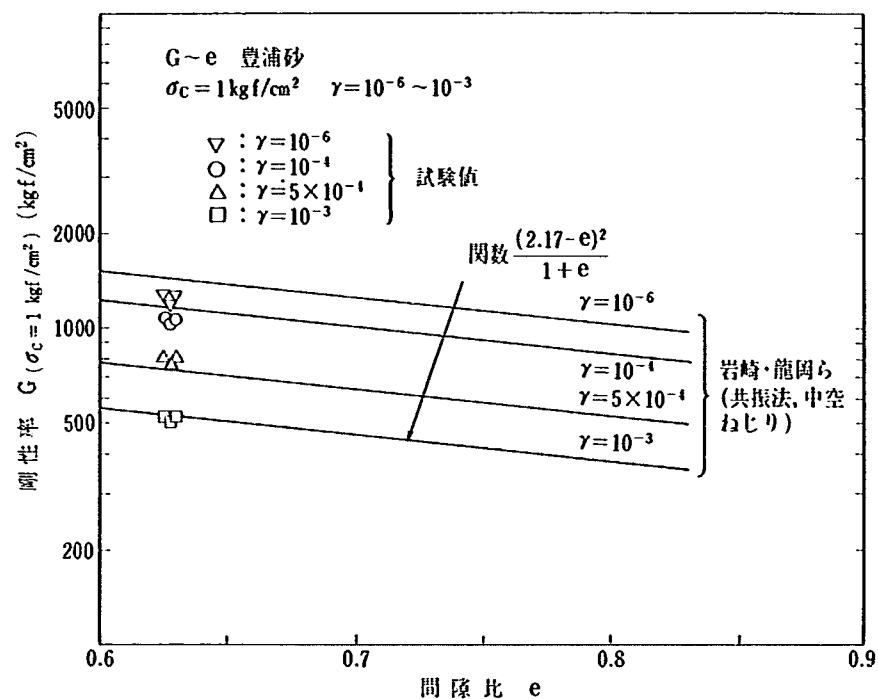


図 6.5 豊浦砂の G と e の関係と岩崎・龍岡らの結果の比較

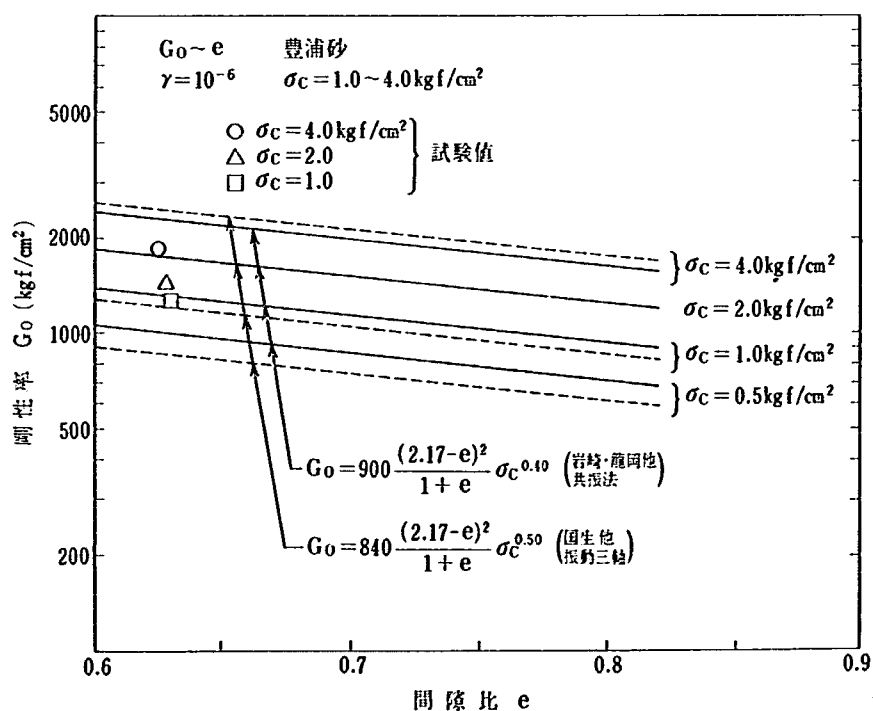


図 6.6 本試験と他の研究による $G_o \sim e$ の関係の比較

次に剛性率 G に対する拘束圧の影響をみてみる。図 6.7 は、豊浦砂の剛性率 G と平均主応力 $\sigma_m =$ 拘束圧 σ_c の関係をせん断ひずみ γ をパラメーターとして両対数グラフに表わしたものである。また、図 6.8 は同様の関係を岩崎・龍岡ら^{4),6)}あるいは国生ら⁵⁾が示したものである。ここで、縦軸は間隙比の違いによる影響を除くために G を(6-1)式 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ で除した値をとっている。また図 6.7 における G の値は、図 6.1 のひずみ依存曲線から読み取ったもので、この値を各ひずみごとに両対数グラフ上で直線近似して示してある。一般には、図 6.8 の岩崎・龍岡や国生が示す様に、広い範囲のひずみに対して剛性率 G と平均主応力 σ_m (拘束圧 σ_c)の関係は、両対数グラフ上で近似的に直線関係にある。そして、ひずみが大きくなるに従い剛性率 G はその絶対値が低下するとともに、拘束圧に対する勾配が大きくなることからわかる。これらの事は剛性率 G と拘束圧 $\sigma_m = \sigma_c$ が

$$G \propto (\sigma_c)^m \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

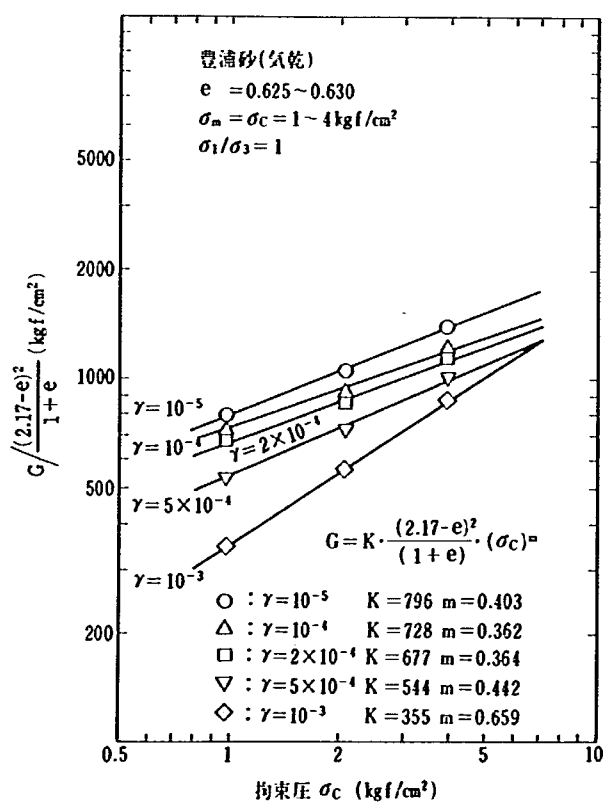


図 6.7 豊浦砂の $G / \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$ と σ_c の関係 (試験結果)

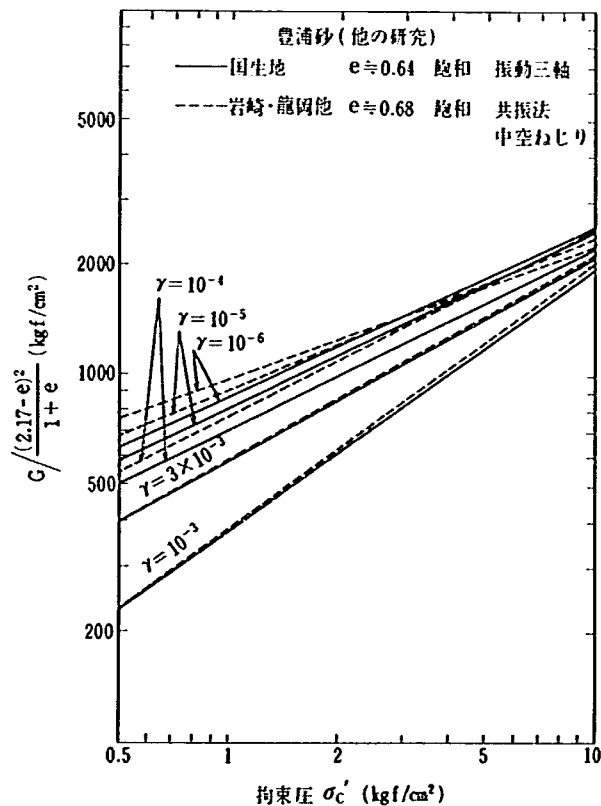


図 6.8 岩崎・龍岡ら、国生らによる豊浦砂のひずみをパラメーターとした G と σ'_c の関係

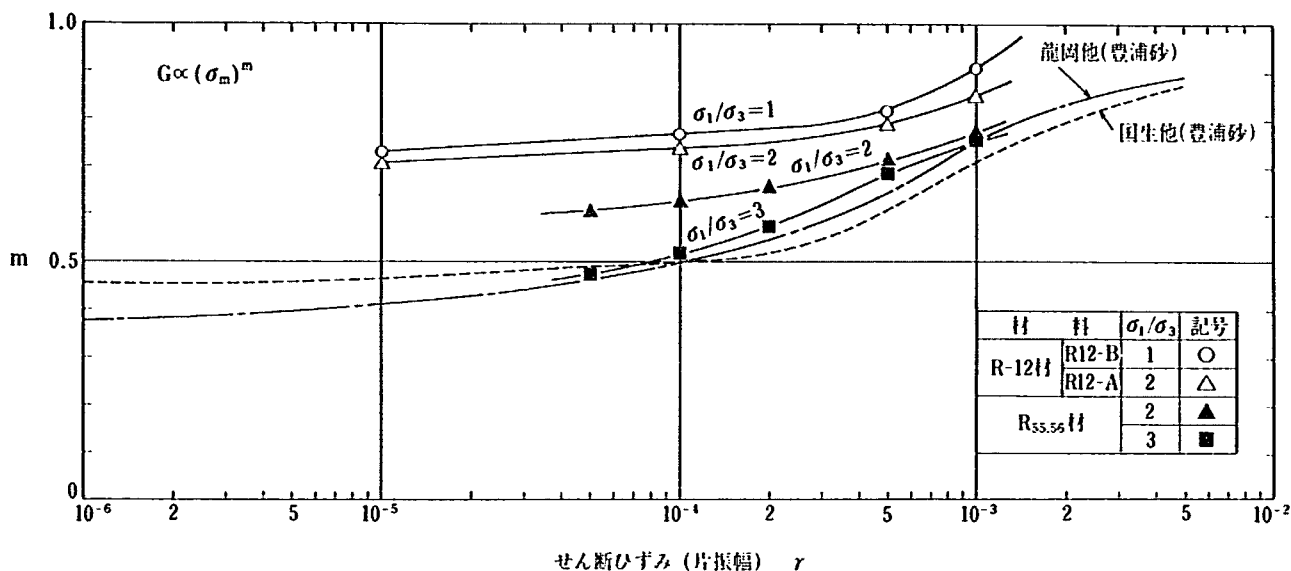


図 6.9 豊浦砂のべき乗 m と r の関係

なる比例関係で表わせることを意味している。(6-4)式のべき乗数 m は、図 6.7、図 6.8における直線の勾配で、せん断ひずみ r の関数であり、この増加に伴い m が大きくなることを示している。べき乗数 m のせん断ひずみ r による変化を、岩崎・龍岡ら、国生らの研究と比較したのが図 6.9である。 m と r の関係は、研究者によってかなり幅があるが、 $r=10^{-4}$ を越えると m の値が急激に増加する傾向はほぼ共通している。今回の予備試験の結果は、前に述べた様に拘束圧の増大に伴う G の増加率が小さいため、べき乗数 m も各ひずみにおいて、岩崎・龍岡らや国生らの結果と比べ相当低い値を示している。しかし m の絶対値を考慮しなければ、ひずみの増大に伴い、べき乗数 m が増してゆくことや、 $r=10^{-4}$ を越えると m が急増する傾向がみられ、定性的には、これまでの研究とはほぼ一致していると考えられる。

次に剛性率 G のひずみ依存性について検討すると、図 6.10、図 6.11は豊浦砂の剛性率 G がひずみの増加によってどの様に減少してゆくかをみたものである。図 6.10では、拘束圧 $\sigma_c=1 \text{ kgf/cm}^2$ における $G-r$ 曲線を岩崎・龍岡ら^{16),29)}と国生ら⁵⁾の結果と比較し、図 6.11では拘束圧 $\sigma_c=2 \text{ kgf/cm}^2$ の値を岩崎・龍岡ら^{16),29)}の結果と比較している。これらの図の縦軸は、各試験間での間隙比 e と拘束圧 σ_c のばらつきによる影響を除くために、剛性率 G の試験値を次式 G^* で除し正規化してある。

$$G^* = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.50} \dots\dots\dots (6-5)$$

(6-5)式は、Hardin and Richart (1963)³²⁾が丸い粒径のそろったOttawa砂の $e < 0.80$ 、 $r \leq 10^{-4}$ に対して求めた実験式であり、岩崎・龍岡ら^{4),18)}も15種のきれいな砂についての実験から、せん断ひずみ $r=10^{-4}$ における剛性率 G は近似的に(6-5)式と同一式で表わせることを示している。予備試験の $\sigma_c=1 \text{ kgf/cm}^2$ における G のひずみ依存性は、図 6.3でも示したように、振動三軸試験から得た国生らの結果と良く一致しており、 $r=10^{-4}$ 以上のひずみでは、国生らと岩崎・龍岡らの結果が大差ないため、これらと近いひずみ依存曲線となっている。図 6.11の $\sigma_c=2 \text{ kgf/cm}^2$ の予備試験結果は、岩崎・龍岡らのひずみ依存曲線よりもかなり低い値を示し、 $r=5 \times 10^{-4}$ を越えるとしだいに近づいてゆく傾向

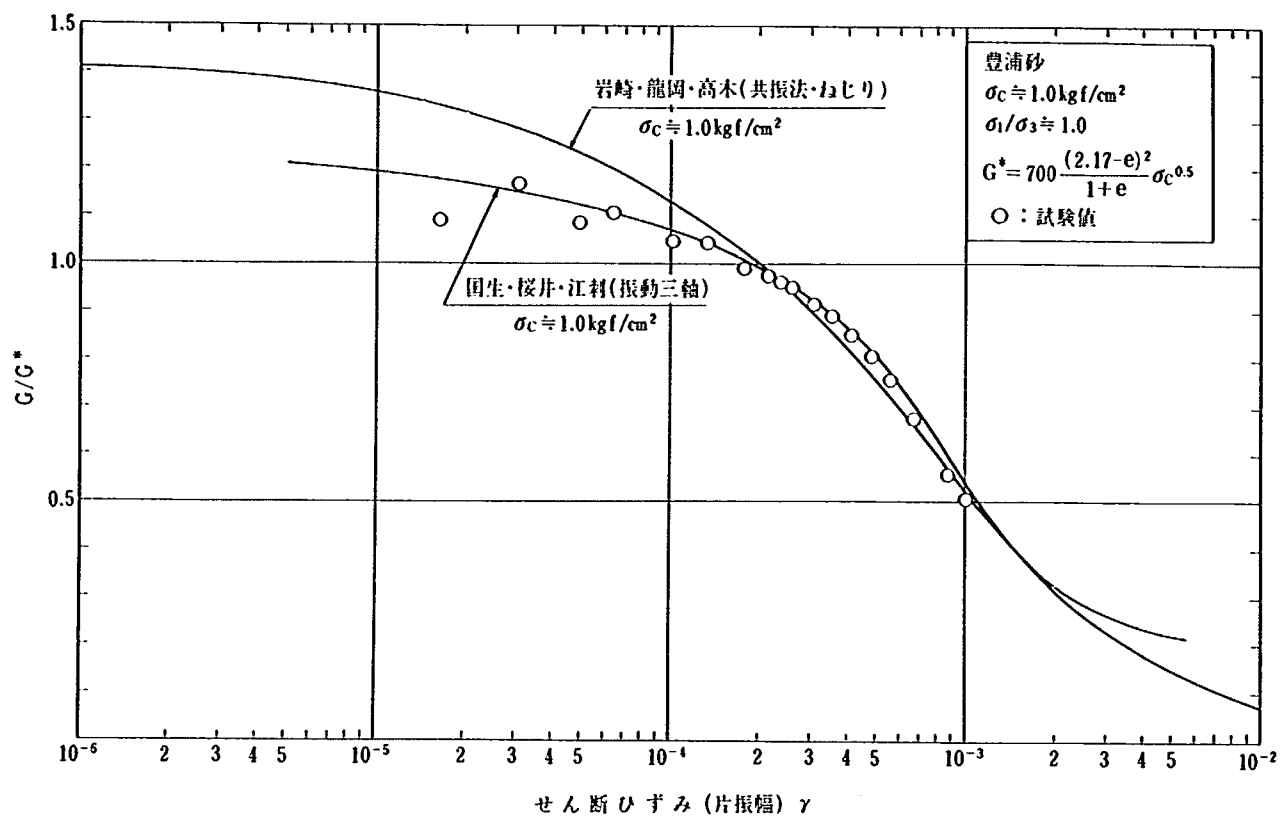


図 6.10 $G/G^* \sim \gamma$ (豊浦砂 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$), 他の研究との比較

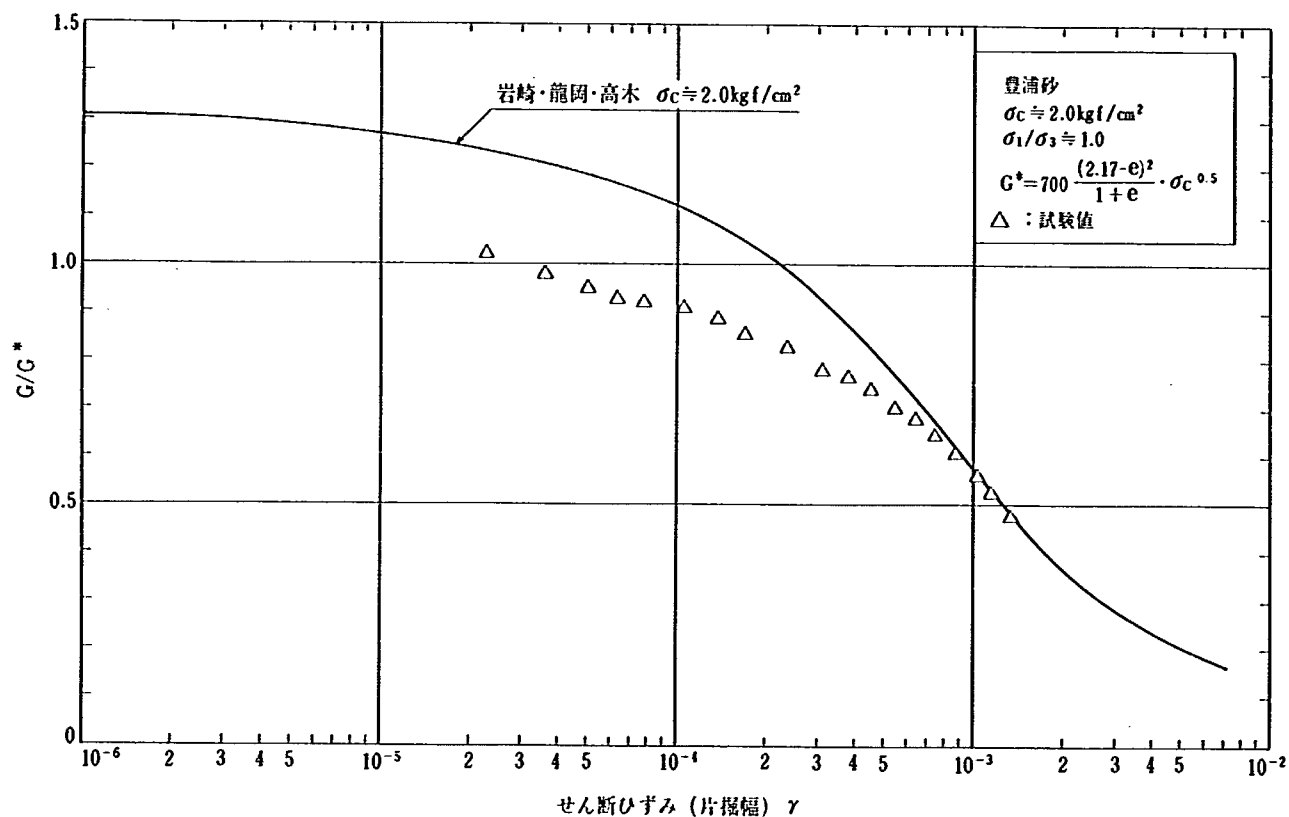


図 6.11 $G/G^* \sim \gamma$ (豊浦砂 $\sigma_c = 2 \text{ kgf/cm}^2$), 他の研究との比較

がみられる。これらの事は、今回の1ケースの結果だけで結論的な事は言えないが、前にも述べたように最初の拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ において、 $\gamma \approx 10^{-3}$ の大きなひずみレベルまで繰返し载荷を与えたことによる影響を受けたためと考えられる。

今回の予備試験で得られた剛性率 G はせん断ひずみで $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$ の範囲であり、信頼性のあるデータは $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以上であると思われる。このように、繰返し三軸試験装置を用いて、微小ひずみ($\gamma \leq 10^{-5}$)における剛性率 $G_0 = G_{max}$ を実験により直接求めることは、一般に容易なことではない。そこで、緒方らの用いた方法²⁵⁾すなわちHardin and Drnevich³³⁾(1972)の双曲線式によって $G \sim \gamma$ 曲線が近似できると仮定して、 G_0 、 γ_r を推定するものである。Hardin and Drnevich³³⁾は、砂の剛性率のひずみ依存性の形が次式の様な双曲線関数で表現されることを示している。

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots\dots\dots (6-6)$$

ここで G_{max} は γ が非常に小さい時($\gamma \approx 0$)の G であり、実用上は $\gamma = 10^{-5}$ のときの G と考えてよく、また γ_r は規準ひずみ(reference strain)と呼ばれるもので、 $G = G_{max}/2$ となる時のひずみ γ に相当する。(6-6)式を次の様に変形し、図6.12に示す切片と勾配から G_0 と γ_r を推定した。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_0 \cdot \gamma_r} \cdot \gamma \quad \dots\dots\dots (6-7)$$

この様にして得られた G_0 及び γ_r と、拘束圧 $\sigma_c = \sigma_m$ の関係を図6.13～図6.15に示した。 G_0 は間隙比 e と拘束圧 σ_c の関数と考えられ、図6.14から今回の豊浦砂の G_0 は次式で表わされることがわかった。

$$G_0 = 854 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \cdot (\sigma_c)^{0.258} \quad \dots\dots\dots (6-8)$$

同様に規準ひずみ γ_r も拘束圧の関数と考えられ、図6.15より次の様な関係が得られた。

$$\gamma_r = 7.62 \times 10^{-4} \cdot (\sigma_c)^{0.794} \quad \dots\dots\dots (6-9)$$

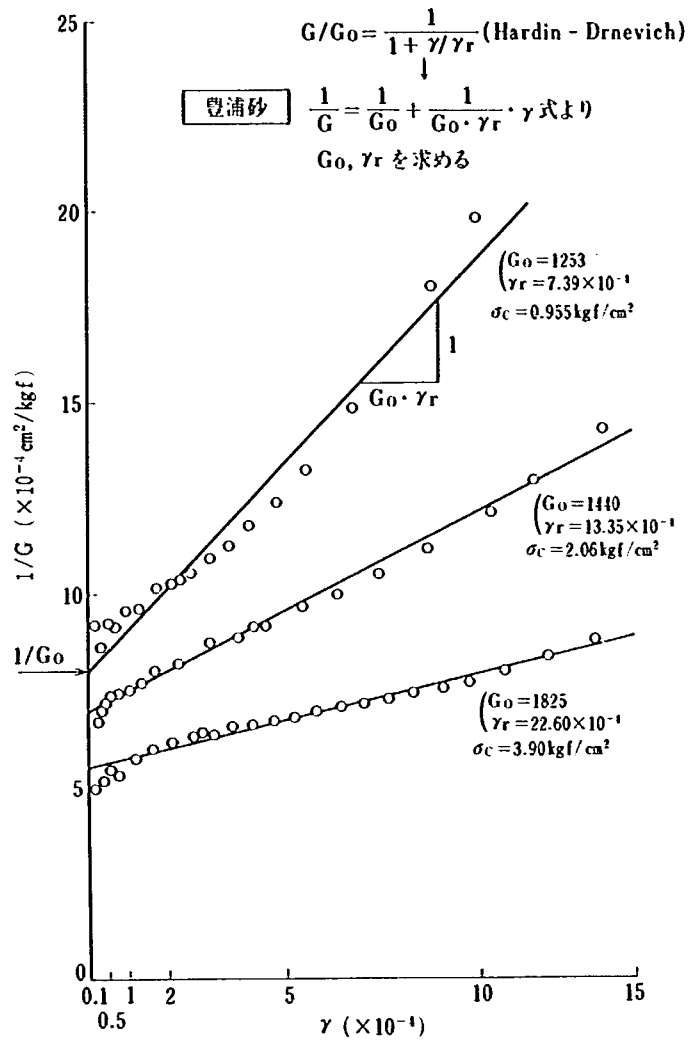


図 6.12 豊浦砂の G_0 、 γ_r の推定

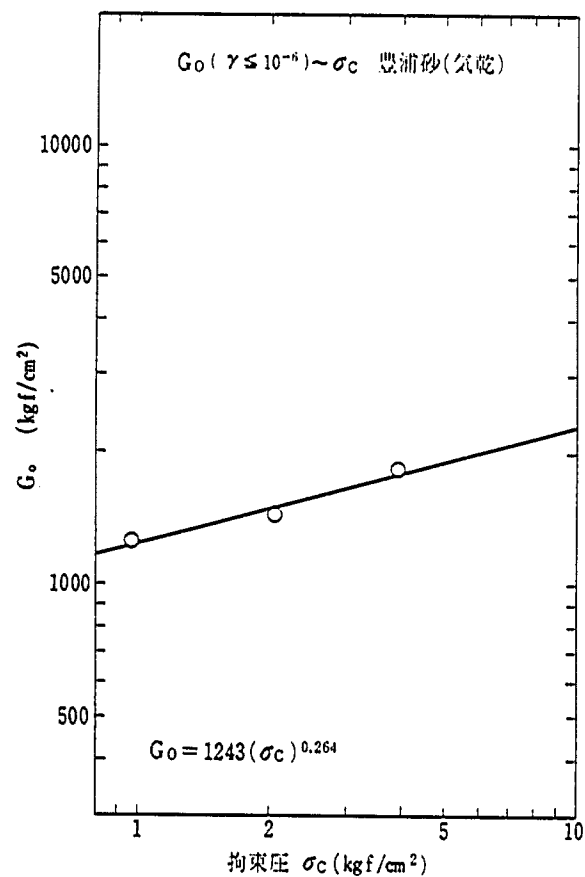


図 6.13 推定した G_0 と σ_c の関係

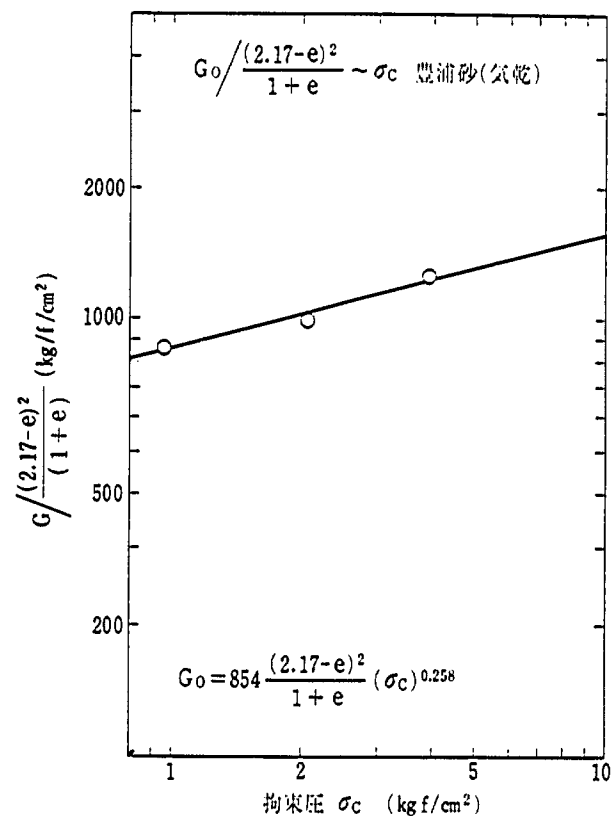


図 6.14 $G_0 / \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ と σ_c の関係

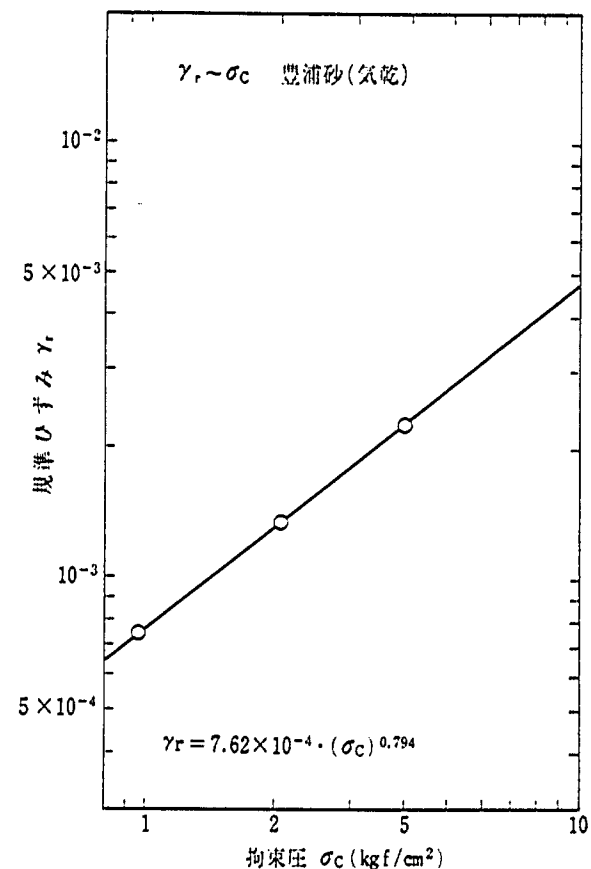


図 6.15 推定した γ_r と σ_c の関係

以上の結果から拘束圧 $\sigma_c = 1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ における $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線の数式表示と試験値の合致性をみたのが図 6.16 である。これによると、数式曲線と実測値は $\gamma = 10^{-4}$ 以上ではほぼ一致しているが、これより小さなひずみ領域ではばらつきが大きい。これは図 6.12 $1/G \sim \gamma$ の関係で G_0 , γ_r を推定する際、試験値として信頼性があると考えられる $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以上のひずみ範囲を中心に直線近似したため、比較的大きなひずみ領域での合致性が良くなったものと考えられる。

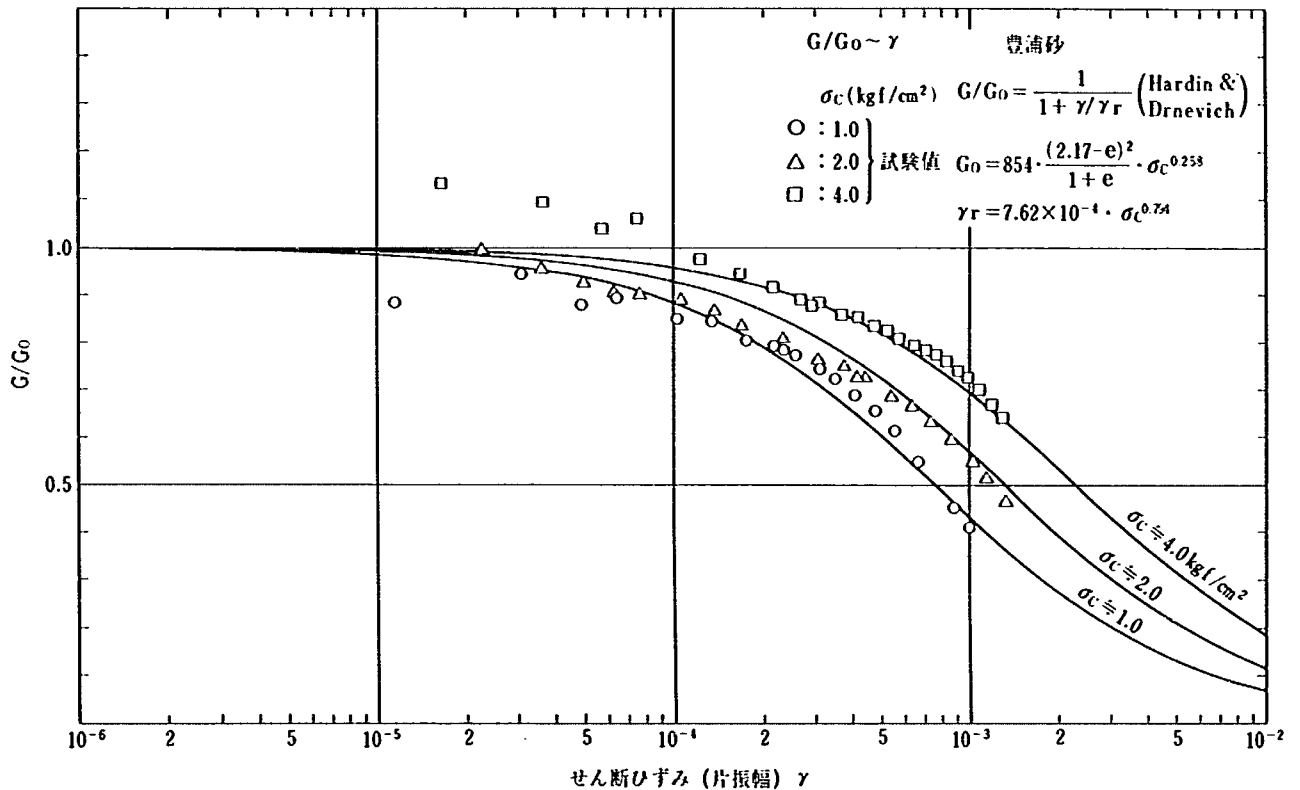


図 6.16 Hardin-Drnevich 式による $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線と実測値との比較

図 6.17 は、これまでに提案された砂に関する剛性率 G のせん断ひずみ γ に対する低下曲線（ひずみ依存曲線）を拘束圧 1 kgf/cm^2 について、龍岡^{4), 16)} がとりまとめたグラフである。各曲線は、

- ① 柴田・Soelarno²¹⁾
- ② Hardin・Drnevich³³⁾ ($e = 0.65$, $\phi = 30^\circ$, $K_0 = 0.6$)
- ③ 岩崎・龍岡・高木^{16), 18)}
- ④ Seed・Idriss³¹⁾
- ⑤ Sherif・Ishibashi³⁵⁾

らが示したもので、柴田・Soelarno による曲線を除けば差は小さいと言える。また、せん断ひずみが $\gamma = 10^{-4}$ までは G の γ の増加に対する低下率は小さく、 $\gamma = 10^{-4}$ を越えると G は γ に対して急速に減少してゆく傾向は、試験の種類の違い、砂の違い、载荷方法の違いがあっても共通していることがわかる。

図 6.18は、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線の拘束圧の違いによる変化の仕方を、国生ら^{5),20)}が岩崎・龍岡¹⁶⁾らの実験結果と比較して示したものである。拘束圧は $0.2 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で示してある。この図あるいは図 6.16をみても、 G_0 により正規化した剛性比 G/G_0 とせん断ひずみの関係は、拘束圧が増すにつれてその基本的な形を保ったままグラフ上を右側にずれる傾向を示している。この様に豊浦砂のようなきれいな砂の場合、拘束圧が明らかに剛性率のひずみ依存性に影響を与えていることがわかる。

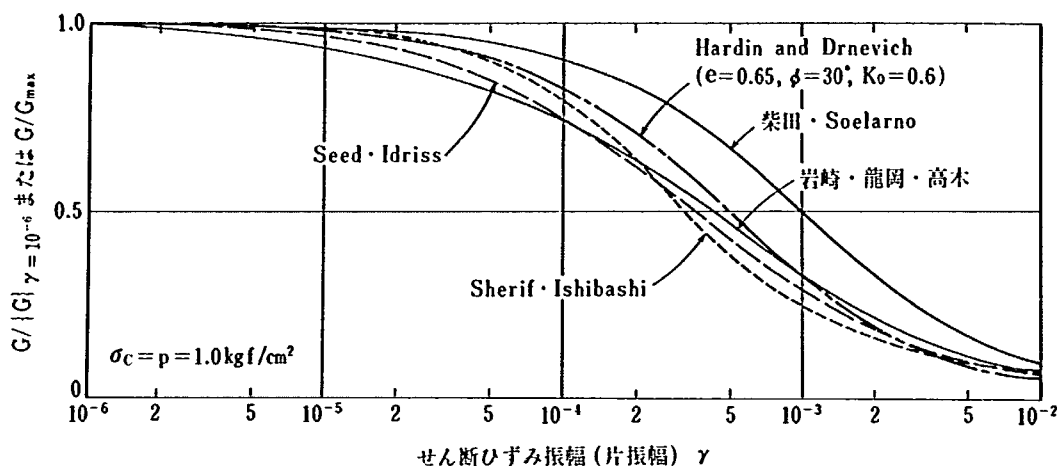


図 6.17 岩崎・龍岡らがまとめた G のひずみ依存性の比較^{4),16)}

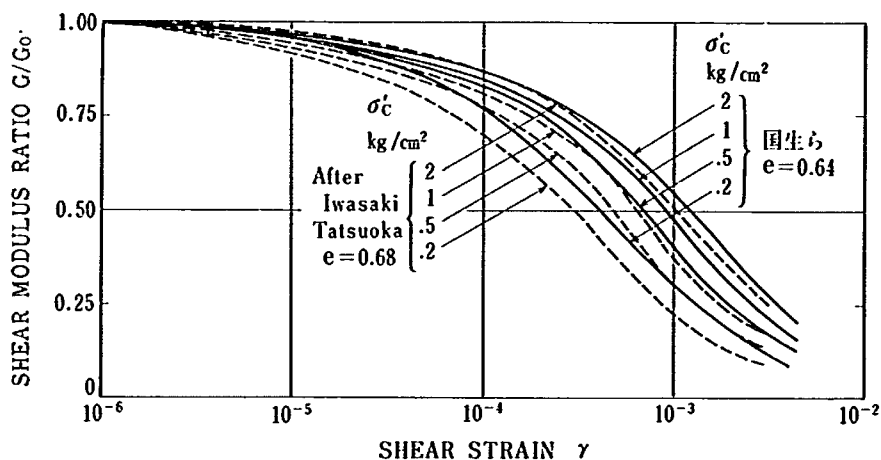


図 6.18 国生らが生した岩崎・龍岡らによる $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線との比較⁵⁾

これまでは剛性率 G に影響を与える諸要因について述べてきたが、次に減衰定数 h に対する影響因子について考える。

まず、密度すなわち間隙比については、図 6.19に示すように今回の試験結果だけでは明らかではない。図中に龍岡ら^{4),16)}の結果を示した様に、砂の場合、減衰定数 h に及ぼす間隙比 e の影響は、一般にきわめて小さいことがわかる。次に拘束圧 σ_c の影響をみたのが図 6.20で、ひずみをパラメーターとして h と σ_c の関係を示してある。この図及び図 6.2の h のひずみ依存曲線を見ると、豊浦砂の様なきれいな砂では、拘束圧の違いによる影響は明確に現われており、同じひずみ γ で比べると拘束圧の増加に伴い、減衰定数 h は G とは逆に減少することがわかる。図 6.20の $h \sim \sigma_c$ の近似直線の勾配は、 $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ でひずみが増加すると大きくなる傾向がみられる。

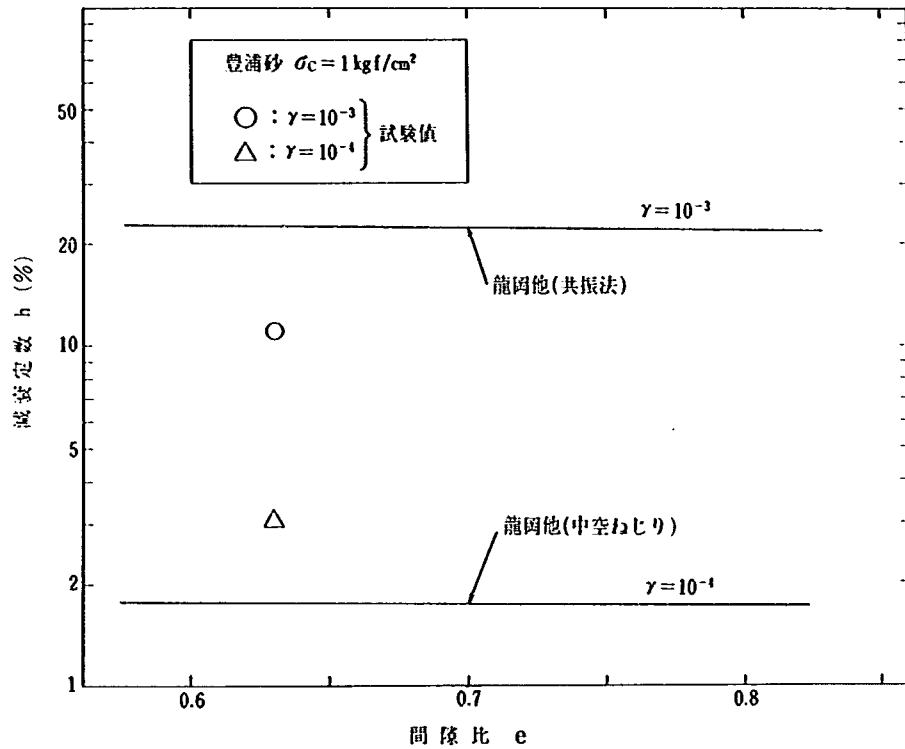


図 6.19 龍岡他の豊浦砂の $h \sim e$ 関係との比較

せん断ひずみ γ の影響すなわち減衰定数 h のひずみ依存性に関するこれまでの研究例は、剛性率 G に関するデータよりも少ない。図 6.21 は、国生⁵⁾ が砂の $h \sim \gamma$ 曲線についてこれまでの研究と比較したもので、同様に図 6.22 は、龍岡⁴⁾ が大岡らの図²³⁾ に加筆してまとめた豊浦砂の減衰定数 h である。いずれの図でも減衰定数 h のひずみ依存性は、研究者によってかなりばらつきが大きく、 G の値に比べ h の値は実験的に誤差が入りやすいことを示している。しかし、減衰定数 h はせん断ひずみ γ の増加に伴って大きくなり、ひずみが $\gamma = 10^{-4}$ を越えると増加程度が著しくなる傾向は共通している。

次に、減衰定数 h と剛性率 G の関係をみると、図 6.23 は龍岡らがまとめた $h \sim G/G_{max} (= G_0)$ の関係と他の研究を比較したものである。また図 6.24 には、今回の予備試験による豊浦

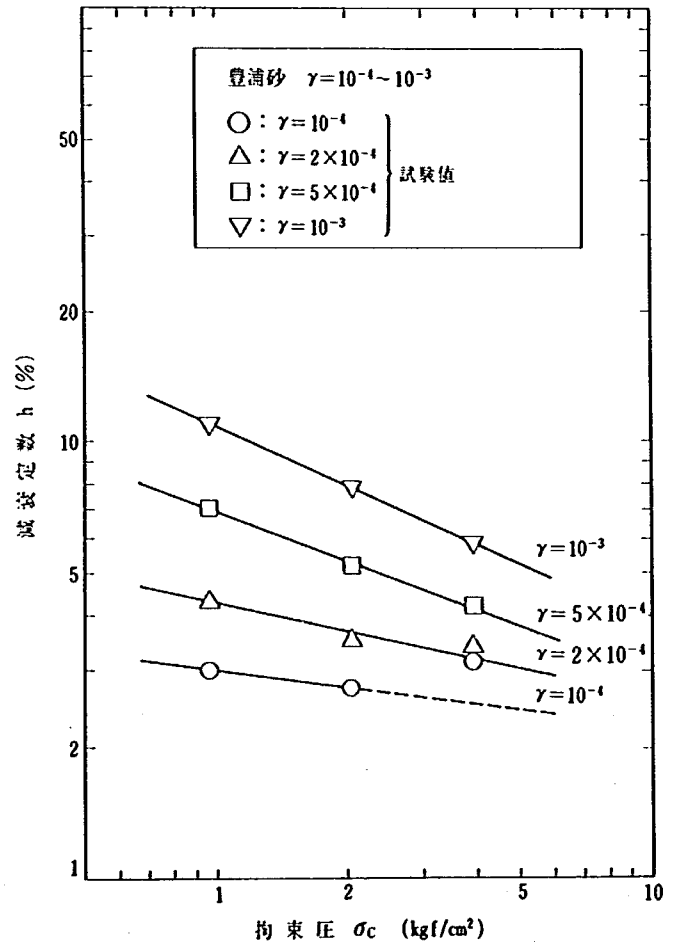


図 6.20 豊浦砂における h の拘束圧の依存性

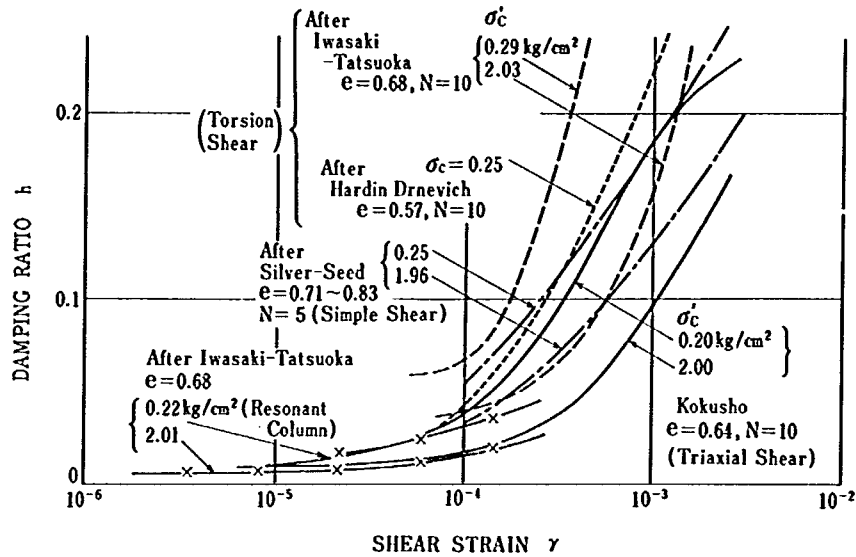


図 6.21 これまでの研究による h のひずみ依存性 (国生ら⁵⁾ による)

砂の $h \sim G/G_{max} (=G_0)$ の関係を示した。図 6.23 における龍岡・岩崎ら¹⁹⁾ による各種の自然砂の $h \sim G/G_{max}$ の関係 (実線) は、全体の平均的関係となっている。図 6.24 によれば $h \sim G/G_{max}$ の関係は、間隙比、拘束圧、せん断ひずみの値によらず、ほぼ一義的に決り直線的関係にあることがわかる。

豊浦標準砂を使った予備試験結果と、これまでの豊浦砂を含む砂についての研究と比較したところ、拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の試験値は、剛性率 G ・減衰定数 h ともに三軸試験装置を用いた結果と近い値が得られ、特に剛性率 G のひずみ依存性

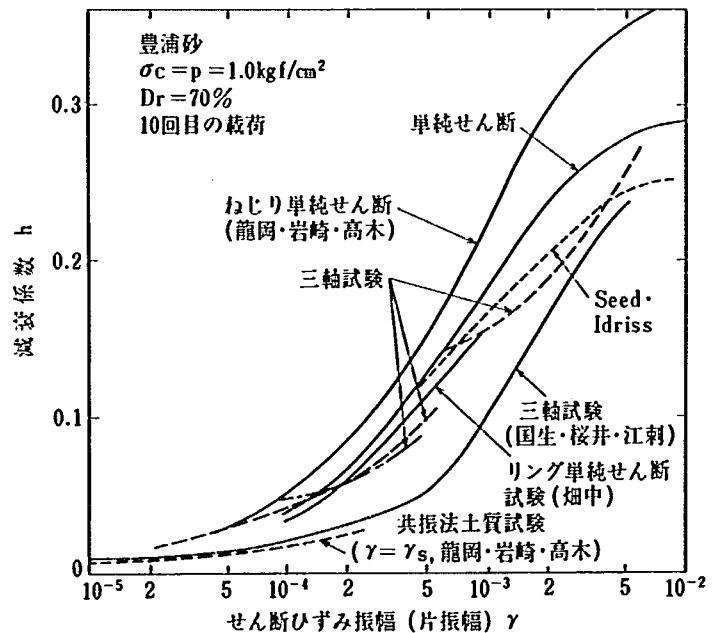


図 6.22 龍岡が大岡らの図に加筆してまとめた h のひずみ依存性 (豊浦砂)⁴⁾

については、国生らによる小型振動三軸試験 ($\phi 5 \times h 10 \text{ cm}$) 結果^{5), 20)} と良く一致している。しかし、拘束圧 $\sigma_c = 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$ になると、剛性率 G 、減衰定数 h ともに同じひずみにおいて他の研究結果より低い値を示し、最初の拘束圧 $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ において、 $\gamma = 10^{-3}$ の大きなひずみまで繰返し载荷を行ったことによる試料に与えた乱れの影響が現われたものと思われる。しかし、全体としてみると豊浦砂を用いたこれまでの研究と定性的にはよく似た傾向が得られている。この様に直径 30 cm 、高さ 60 cm の供試体の大型三軸試験装置で得られる、豊浦砂の剛性率 G や減衰定数 h は、従来用いられてきた小型の三軸試験や中空ねじりせん断試験、共振法等による動的物性値と基本的には整合性が確保されており、データの信頼性も高いと考えられる。

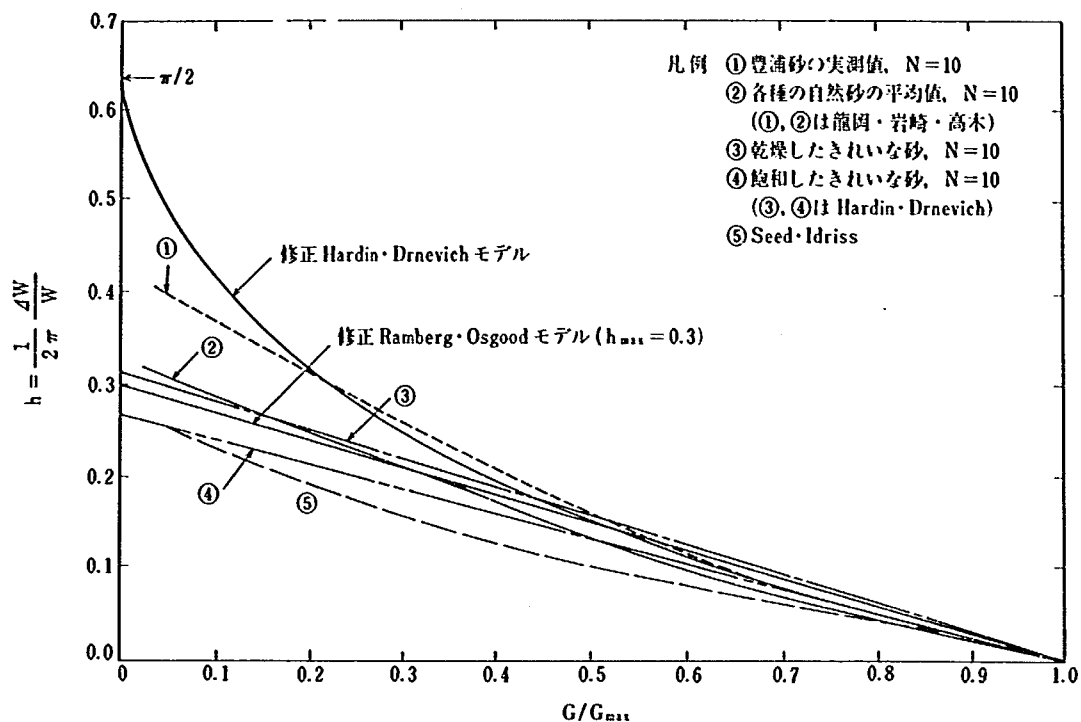


図 6.23 これまでの研究から得られた砂の $h \sim G/G_{max}$ 関係の比較 (龍岡⁴⁾による)

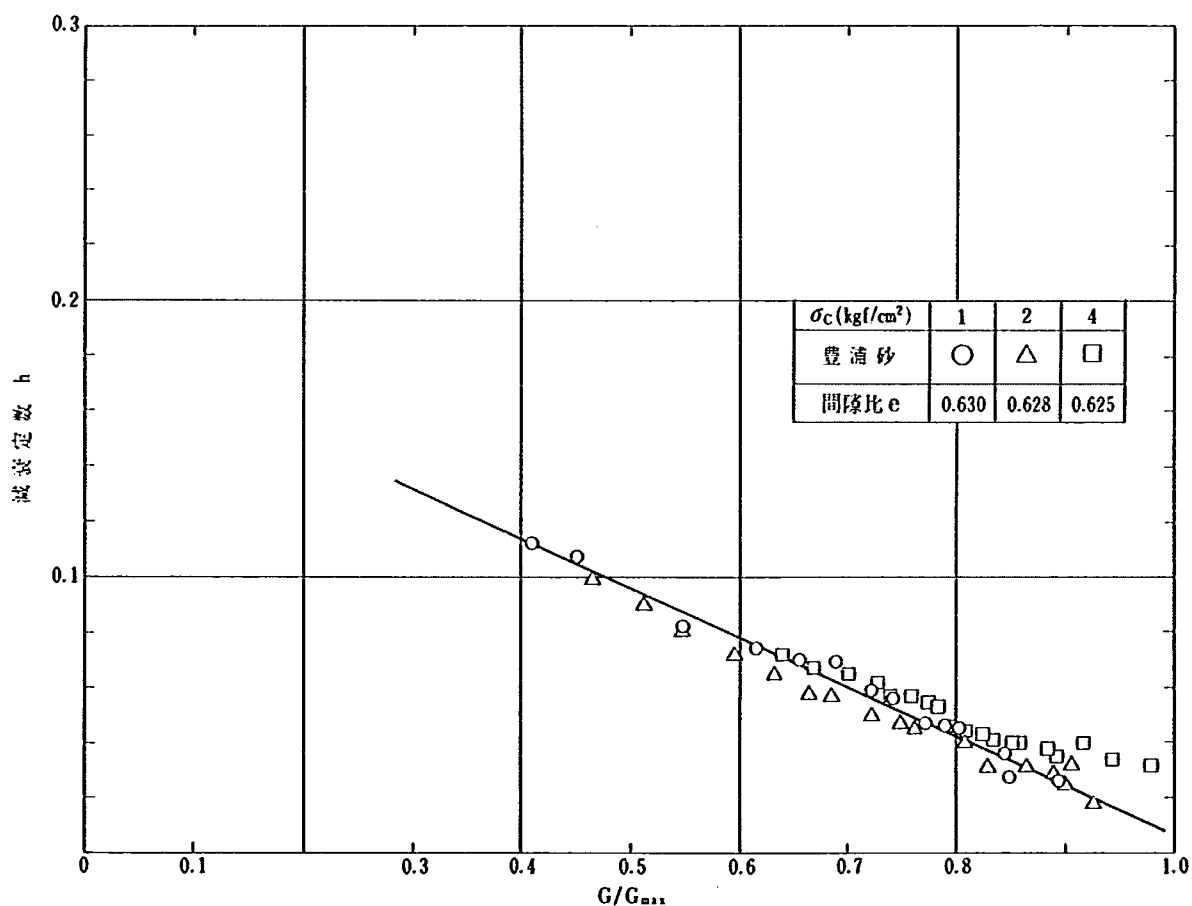


図 6.24 豊浦砂の減衰定数と剛性率の関係

7. 粗粒材料の試験結果

7.1 改良前後の比較

大型繰返し三軸装置改良前の昭和55・56年度に、本試験と同じ七ヶ宿ダムのロック材（安山岩）の動的試験を行っている。これらと試験条件をほぼ一致させた改良後のロック材の試験（R-12材，片振り）結果とを比較検討し次に述べる。

試験材料の物性値及び試験条件を比較したのが表 7.1 である。今回の R-12 材の粒度は，昭和55・56年度に用いたロック材（以後 R55・56材とする。）と試験条件を合わせる意味で同じものを使用した。

表 7.1 改良前後における試験条件の比較

材 料（岩 質）			七ヶ宿ダム ロック材（安山岩）	七ヶ宿ダム ロック材（安山岩）
実施年度・試料名			s55・56年度，R55・56材	s58年度，R-12材
物 性 値	比 重 G_b		2.677	2.575
	吸 水 率 Q (%)		1.8～3.1	2.6～4.5
	均 等 係 数 U_c		12	12
	粒径 $d_{max} \sim d_{min}$ (mm)		63.5～0.42	63.5～0.42
	最大間隙比 e_{max}		0.747	0.735
	最小間隙比 e_{min}		0.267	0.327
供 試 体	供 試 体 寸 法		$\phi 30 \times h 60 \text{ cm}$	$\phi 30 \times h 60 \text{ cm}$
	締 固 め 方 法		ハンドバイブレーター 6層，2～4分/層	電動ランマー 6層，7～8秒/層
	初期 設定 密度	相 対 密 度 D_{ro} (%)	85 (一部，63%，20% についても実施)	85
		γ_{do} (g/cm ³)	2.001	1.854
		e_o	0.338	0.388
圧 密	試 料 状 態		不飽和・気乾・圧密排水	不飽和・気乾・圧密排水
	圧 密		異 方 圧 密 1供試体 1拘束圧	異 方 圧 密 1供試体当り多拘束圧
	主応力比 σ_1/σ_3		2, 3	2
	平均主応力 σ_m (kgf/cm ²)		1.3, 2, 4	1.3, 2, 3, 4, 6,
	圧密後 間隙比 e	σ_m (kgf/cm ²)	$\sigma_1/\sigma_3 = 2$	$\sigma_1/\sigma_3 = 3$
		1.3	0.320～0.326	0.325～0.327
		2	0.300～0.320	0.384～0.386
		4	0.305～0.318	0.312～0.315
	試験供試体数		13	7
繰返し载荷	制 御		荷重（応力）振幅制御	荷重（応力）振幅制御
	入 力 波		正 弦 波	正 弦 波
	周 波 数 f		2 Hz	0.2 Hz
	ひ ず み 範 囲		$\gamma = 2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3}$	$\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$
	解 析 波 数 N		10 波	10 波

両材料共、同じ原石山（ありや山）の安山岩ではあるが、物性値は若干異なる様である。R55・56材は、比重が大きく吸水率は小さめで、R-12材よりもやや良質な材料と思われる。締固め試験の最大・最小間隙比（ $e_{max} \cdot e_{min}$ ）についても、R55・56材では振動テーブルを用いており、装置・方法・締固めエネルギー等の違いが表われたものと思われる。これらの相異は、供試体の初期密度を両者共に相対密度 $D_{r0}=85\%$ に設定したにもかかわらず、R55・56材で $e_0 \approx 0.34$ 、R-12材で $e_0 \approx 0.39$ のように初期間隙比に差を生じさせる結果となった。また、供試体作製に使った締固め機械は以前はハンドバイブレーターであったが、今回は電動ランマー（表 4.6、図 4.7 参照）によって締固めた。繰返し載荷条件についてみると、まず周波数が異なっている。以前は主に周波数 2 Hz とし、トランジェント・コンバーターを介しヒステリシスループを記録したが、今回は、剛性率の周波数依存性がわずかである事や、レコーダーのペン追従速度の制約等から 0.2 Hz で試験を行った。また R55・56材では 1 供試体 1 拘束圧で行っているが、今回は 1 供試体当り拘束圧を幾つか変えて行った。

図 7.1、図 7.2 は、主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=2$ 、 $\sigma_m=1.3, 2.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の剛性率 G と減衰定数 h のひずみ依存性を、R55・56材と R-12材で比較したものである。また R55・56材では主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=3$ でも実施しており、この時の $G \sim \gamma$ 曲線を図 7.3 に、さらに R55・56材の試験で $\gamma=10^{-4}$ 以下のひずみになると急激に G が増大する傾向のある例を図 7.4 に示した。

まず図 7.1 の $G \sim \gamma$ 曲線において、改良前後の主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=2$ の結果は、各拘束圧で比較的近い値を示している。供試体の間隙比は R55・56材の方が小さく密な状態であることから、一般的には、R55・56材の剛性率が R-12材と比べ大きくなると考えられる。試験結果は R55・56材が R-12材と比べ $\sigma_m=1.3 \text{ kgf/cm}^2$ ではやや大きめ、 $\sigma_m=2.0 \text{ kgf/cm}^2$ ではほぼ同じ、さらに $\sigma_m=4.0 \text{ kgf/cm}^2$ では小さめな値を示している。これらの事は R55・56材が 1 拘束圧 / 1 供試体に対し、R-12材では 1 供試体当りの拘束圧を変化させている点や、試験材料の相異等の影響が考えられる。ただ、応力やひずみ履歴の影響がない最初の拘束圧 $\sigma_m=1.3 \text{ kgf/cm}^2$ だけみると、R55・56材の剛性率 G が大きめであることは妥当性がある。また R-12材の $G \sim \gamma$ 曲線は、砂や粗粒材のこれまでの研究結果と同様 $\gamma=10^{-4}$ よりひずみが小さくなると一定値に漸近する傾向がある。これに対し R55・56材では、試験ひずみ範囲がやや狭いが、ひずみの減少と共に片対数グラフ上で直線的な G の増加傾向がある。また図 7.4 に示した例の様に、セン断ひずみが $\gamma=10^{-4}$ より小さくなると、 G が急激に増してゆくような結果も得られており、明らかに改良前の三軸セル外部に設置した荷重計、あるいは接触型変位計特有の影響があるものと考えられる。国生ら⁵⁾によれば、外部荷重計でのピストン等の機械的摩擦の影響は微小ひずみ領域においては避けられないとしている。また従来の接触型変位計では、それ自身の持つ摩擦特性による不感帯が存在し、実際より小さな変位量しか検出できず、みかけ上剛性率 G は急上昇する。そして減衰定数 h は、ヒステリシスループがバイリニア型になることによって、ひずみの減少と共に増大する様な傾向を見せるとしている。これらの点からみて、改良前における試験値の信頼性は、せん断ひずみ振幅（片振幅）で $\gamma=10^{-4}$ 程度が限界と考えられる。一方、ヒステリシスループの形や剛性率・減衰定数のひずみ依存曲線からみて、変位計や荷重計に改良を施した結果、 $\gamma=5 \times 10^{-6}$ のひずみ領域まで、信頼性の高い測定が可能になったと考えられる。

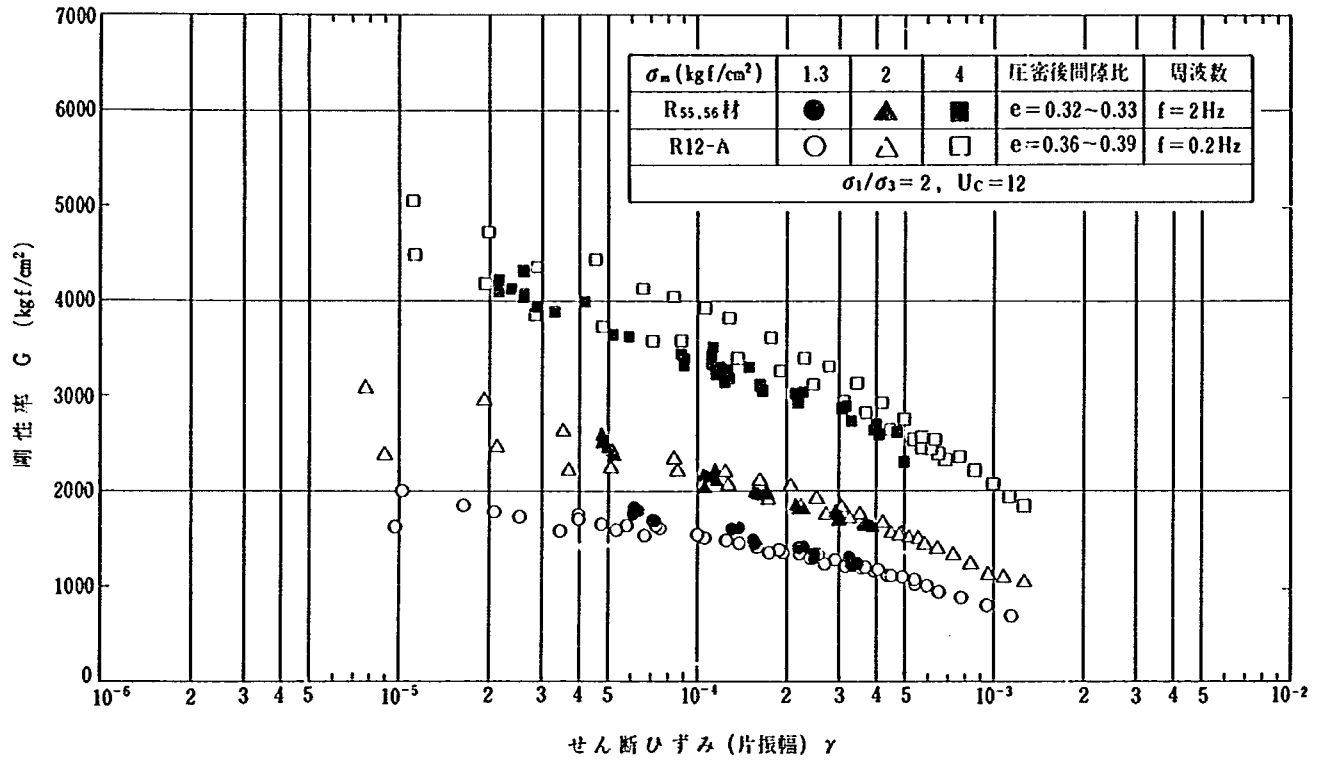


図 7.1 改良前後の $G \sim \gamma$ 曲線の比較

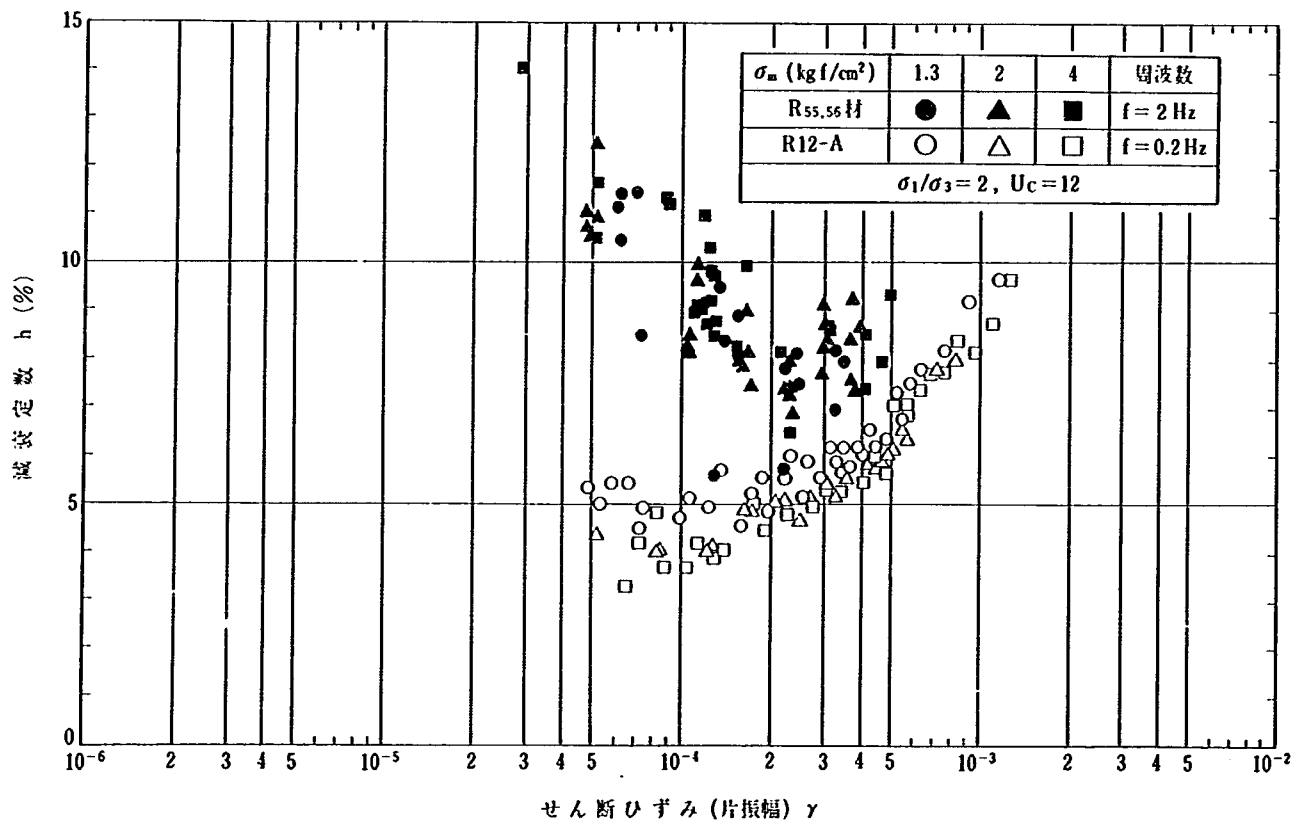


図 7.2 改良前後の $h \sim \gamma$ 曲線の比較

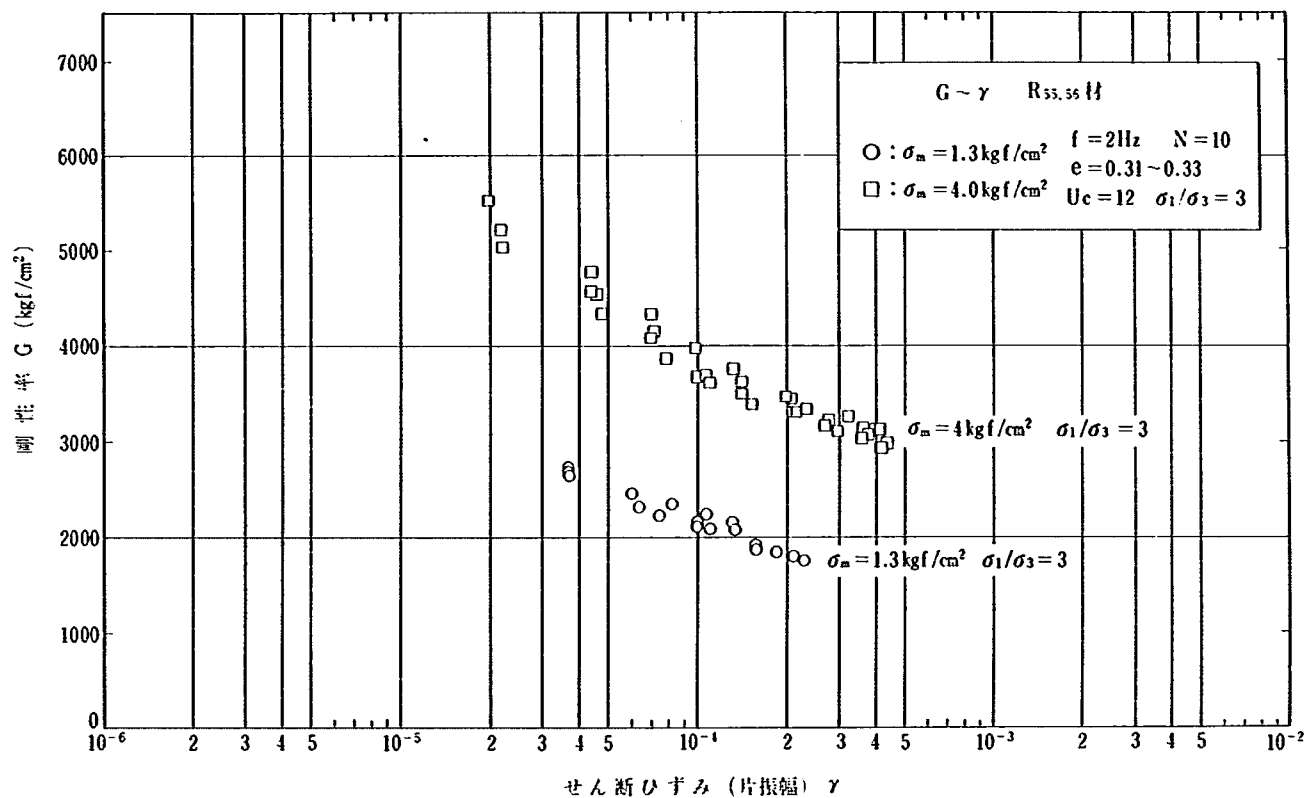


図 7.3 R55・56材, $\sigma_1/\sigma_3 = 3$ の $G \sim \gamma$ 曲線

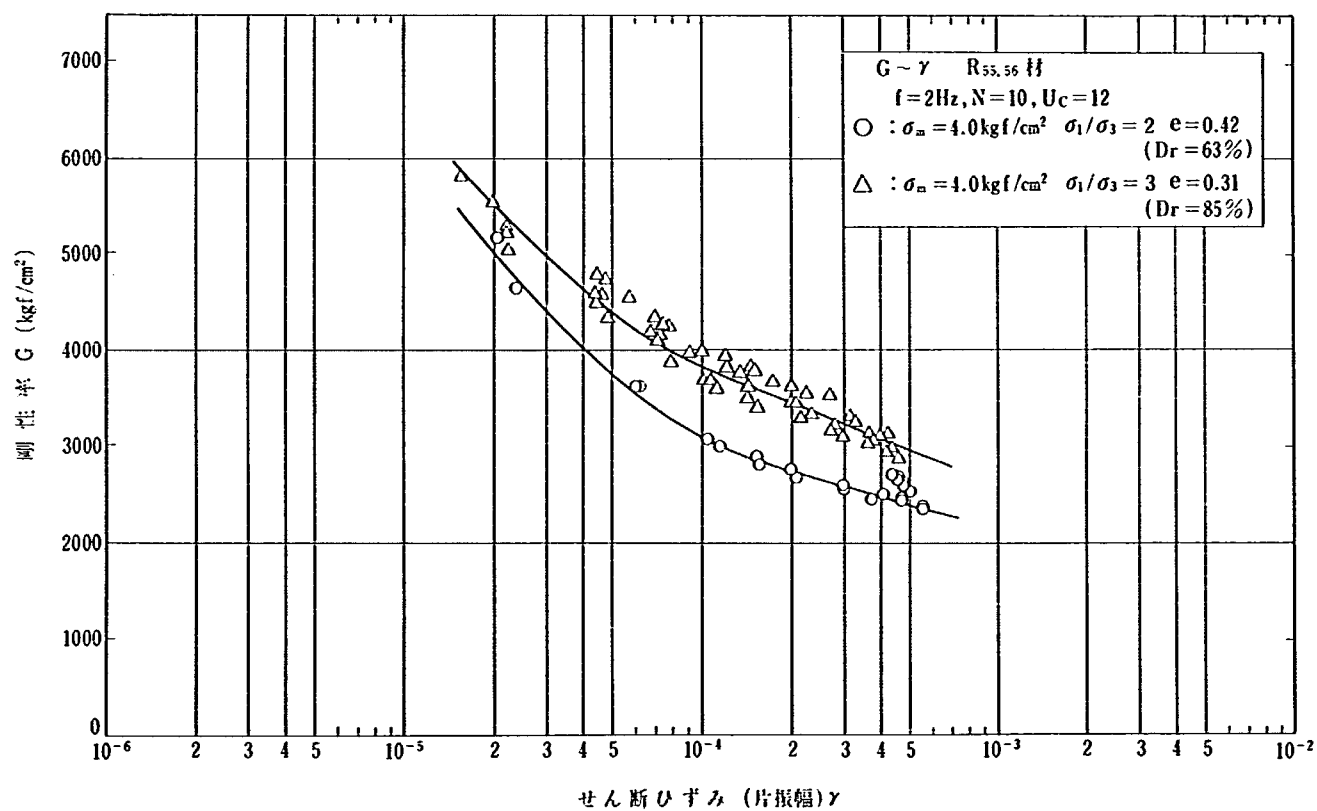


図 7.4 微小ひずみ領域で G が急増する $G \sim \gamma$ 曲線の例

R 55・56材における主応力比の影響を図 7.1 $\sigma_1/\sigma_3=2$ と図 7.3 $\sigma_1/\sigma_3=3$ で比較すると、平均主応力 σ_m 一定のもとでは、主応力比が増すと剛性率 G も大きくなる傾向がみられる。

次に、図 7.2 の減衰定数 h のひずみ依存性をみると、改良後の曲線（R-12材）は拘束圧の影響がはっきりしないが、ひずみの増加に伴って h が増大しており、従来の研究^{3),25),26)} と傾向的に合っている。これに対し改良前（R-12材）は、 $\gamma=2\times 10^{-4}$ 以上で h が横ばいあるいはやや増加の傾向があるが、バラツキが大きく値も大きめである。さらに $\gamma=2\times 10^{-4}$ よりひずみが小さくなると、一般傾向とは逆に減衰定数 h が急激に増加するような結果となっている。これは前述のごとく、変位計のヒステリシス特性等が大きく影響しているものと思われる。

以上のように、大型繰返し三軸装置の荷重計と非接触型変位計を三軸セル内に設置し、供試体直上で測定できるように改良した結果、精度の高い信頼性のある動的物性値（剛性率 G ，減衰定数 h ）が、これまでより小さなひずみ領域（ $\gamma \leq 5 \times 10^{-5}$ ）まで測定可能となり、しかも連続的になめらかなひずみ依存曲線が得られるようになった。

7.2 試験値の再現性

粗粒材料の繰返し試験は、剛性率や減衰定数の再現性をみるため、各材料、同一条件で2ケース（供試体）ずつ試験を実施した。この2ケースの試験結果を同じグラフ上で比較したのが、図7.5～図7.12に示した剛性率及び減衰定数のひずみ依存曲線である。

まず剛性率の再現性についてみると、片振り試験（R-12材、 $\sigma_1/\sigma_3=2$ 、R12-A-1～2）では、最初の拘束圧 $\sigma_m = 1.3 \text{ kgf/cm}^2$ における再現性は良好だが、2段階目以降の拘束圧になると剛性率 G の値に差が生じ、拘束圧の増加に従い差が拡大し、また小さいひずみ領域での差が大きく、ひずみが増すにつれ差は縮まる傾向にある。これは、R12-A-1とR12-A-2とは測定ひずみ範囲が異なっている（R12-A-1では $\gamma \sim 7 \times 10^{-4}$ 、R12-A-2では $\gamma \sim 1.3 \times 10^{-3}$ ）事がひとつの要因と考えられ、ひずみ履歴の違いが、2段階目以降の拘束圧における G に影響を及ぼしていると思われる。図7.6～図7.8の両振り試験では、バラツキの大きいR-7材を除いて片振り試験ほどの違いはなく、拘束圧 $\sigma_m = \sigma_c = 1 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲での再現性は比較的良いと考えられる。また前にも述べたように、剛性率 G は微小ひずみではノイズの影響でループが乱れており、バラツキが大きい試験値としての信頼性が確保されるのは、 $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ 以上のひずみ領域であると考えられる。

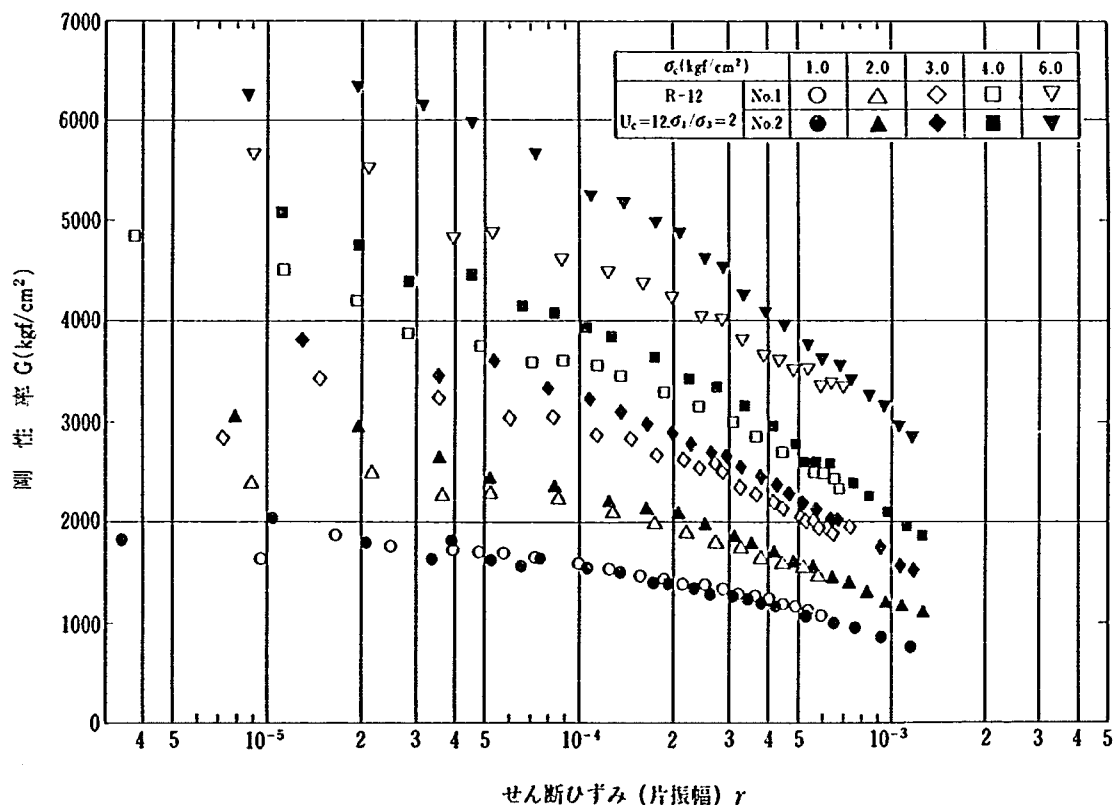


図7.5 剛性率のひずみ依存曲線（ロック材R-12、 $\sigma_1/\sigma_3=2$ ）

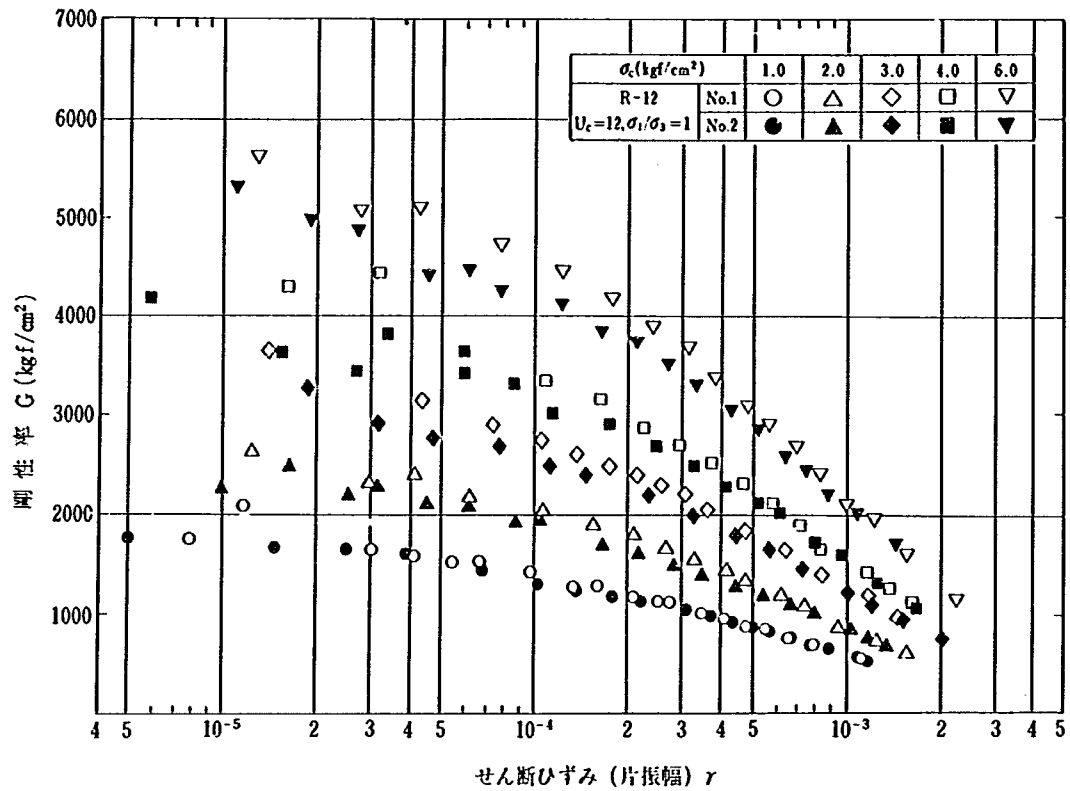


図 7.6 剛性率のひずみ依存曲線 (ロック材 R-12, $\sigma_1/\sigma_3=1$)

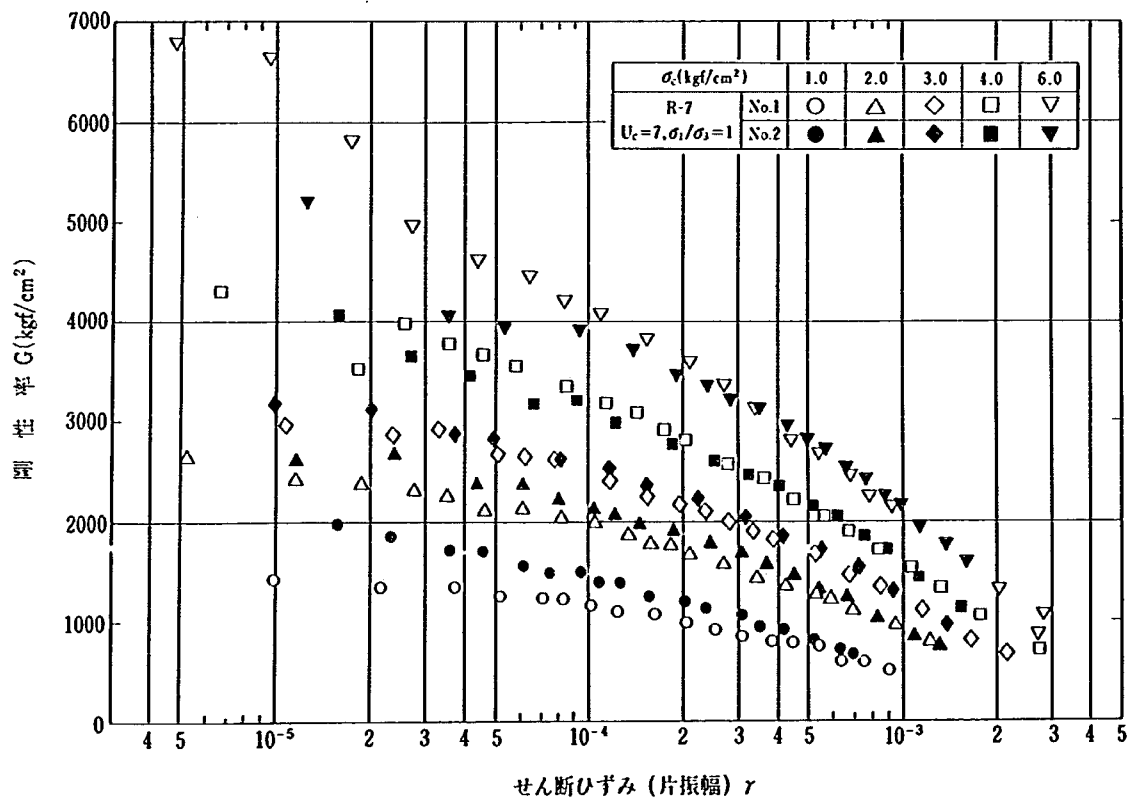


図 7.7 剛性率のひずみ依存曲線 (ロック材 R-7)

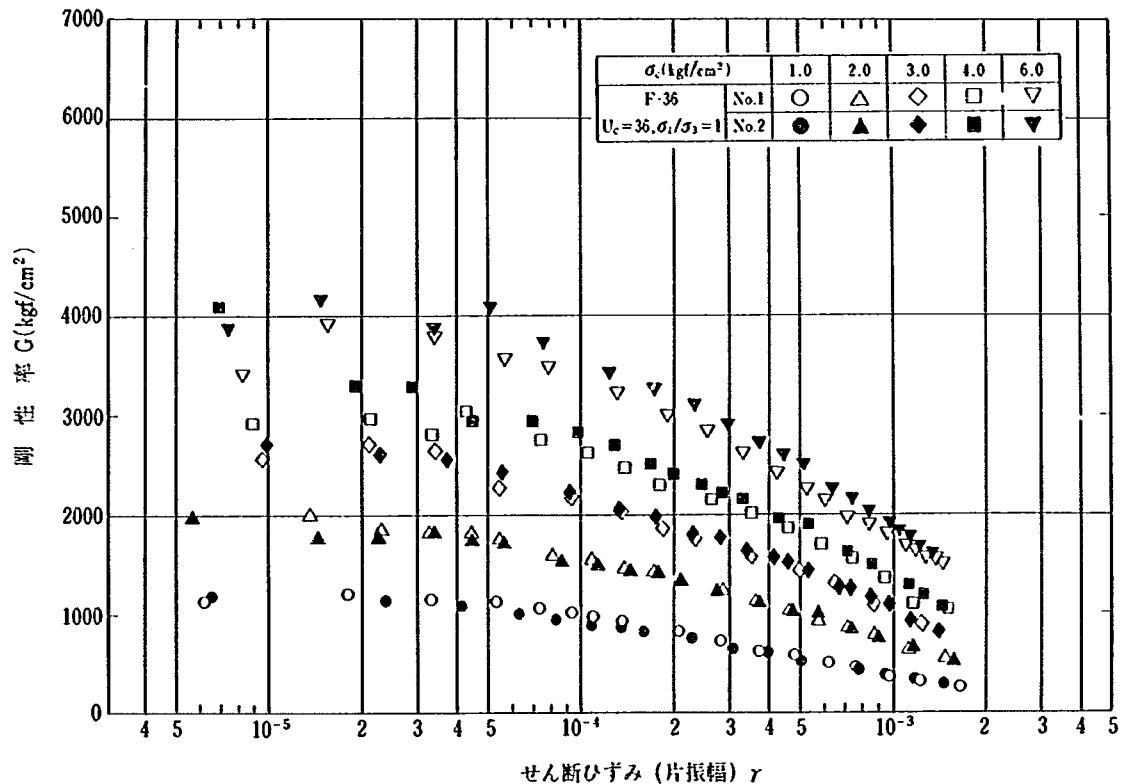


図 7.8 剛性率のひずみ依存曲線 (フィルター材 F-36)

一方、減衰定数についてみると、再現性以前の問題として、個々のデータのバラツキが剛性率に比べ大きく、拘束圧の違いによる差も明瞭でない。このため各拘束圧での再現性について、はっきりとした事は言えない。ただ、試験拘束圧範囲における減衰定数 h の値はほぼ同様な帯状の範囲に分布しており、この点では再現性があるとも考えられる。また、ひずみ依存性は砂等の既往の研究と同様 $\gamma=10^{-4}$ 以下では一定値に落ち着く傾向があり、 $\gamma=10^{-4}$ を境にひずみの増加と共に h が急激に大きくなる傾向がいずれの場合もみられる。減衰定数の拘束圧依存性は、前述のようにバラツキが大きくあまりはっきりとはしないが、図 7.13 の R7-C-1 の例のように $\sigma_c=1\sim4$ kgf/cm² で拘束圧の違いが明確なものもあり、全体的にみても拘束圧が大きくなる程、同じひずみに対する減衰定数 h の値は小さくなる傾向があるようである。

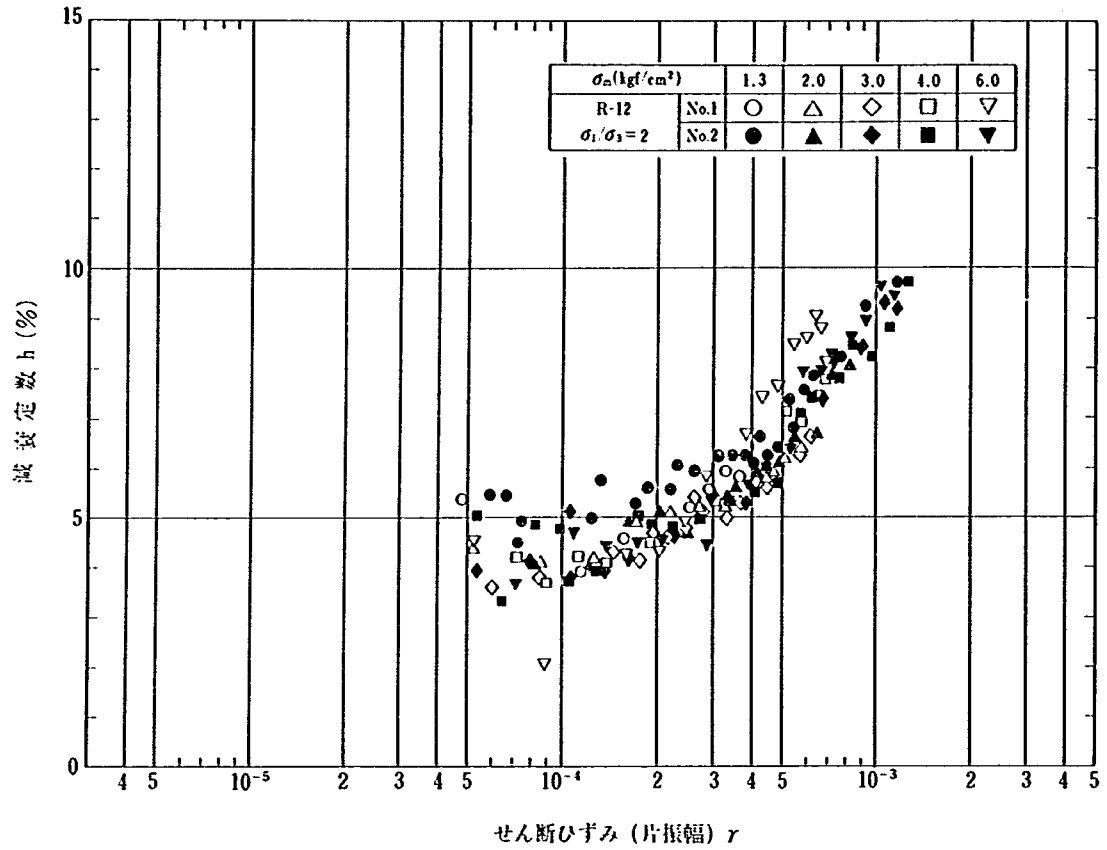


図 7.9 減衰定数のひずみ依存曲線 (ロック材 R-12, $\sigma_1/\sigma_3=2$)

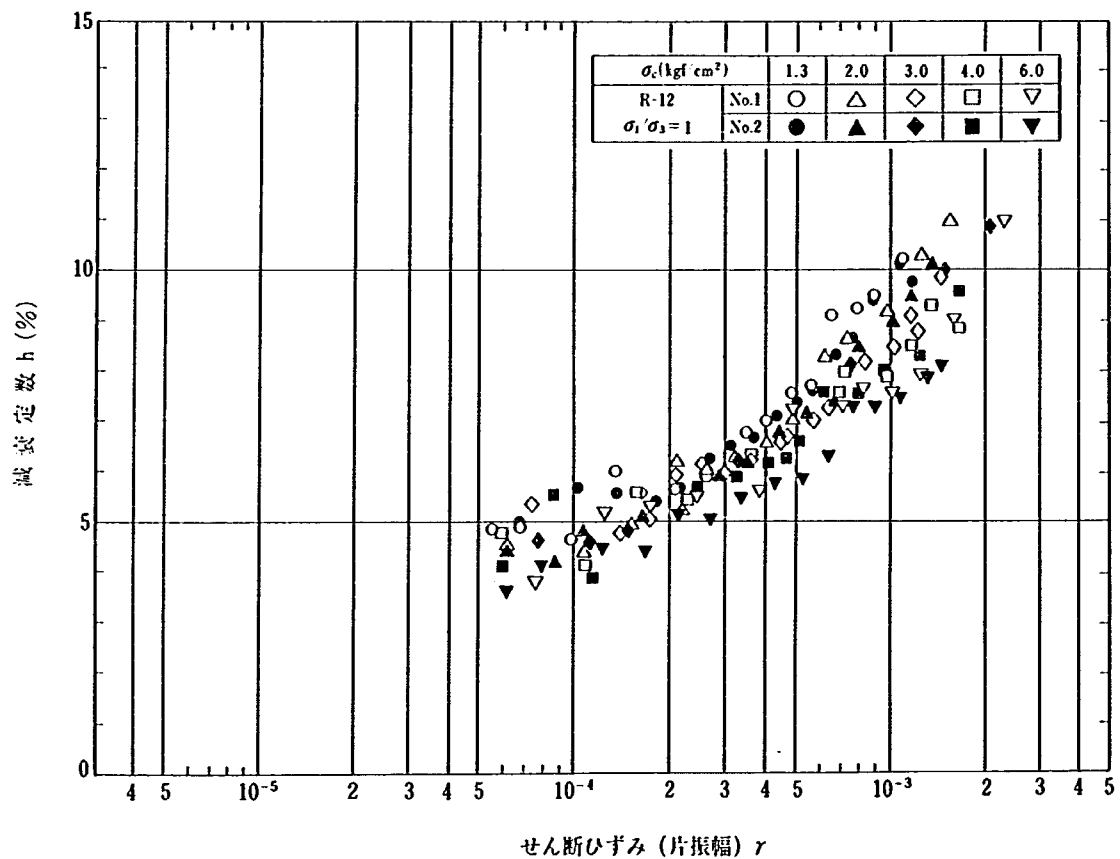


図 7.10 減衰定数のひずみ依存曲線 (ロック材 R-12, $\sigma_1/\sigma_3=1$)

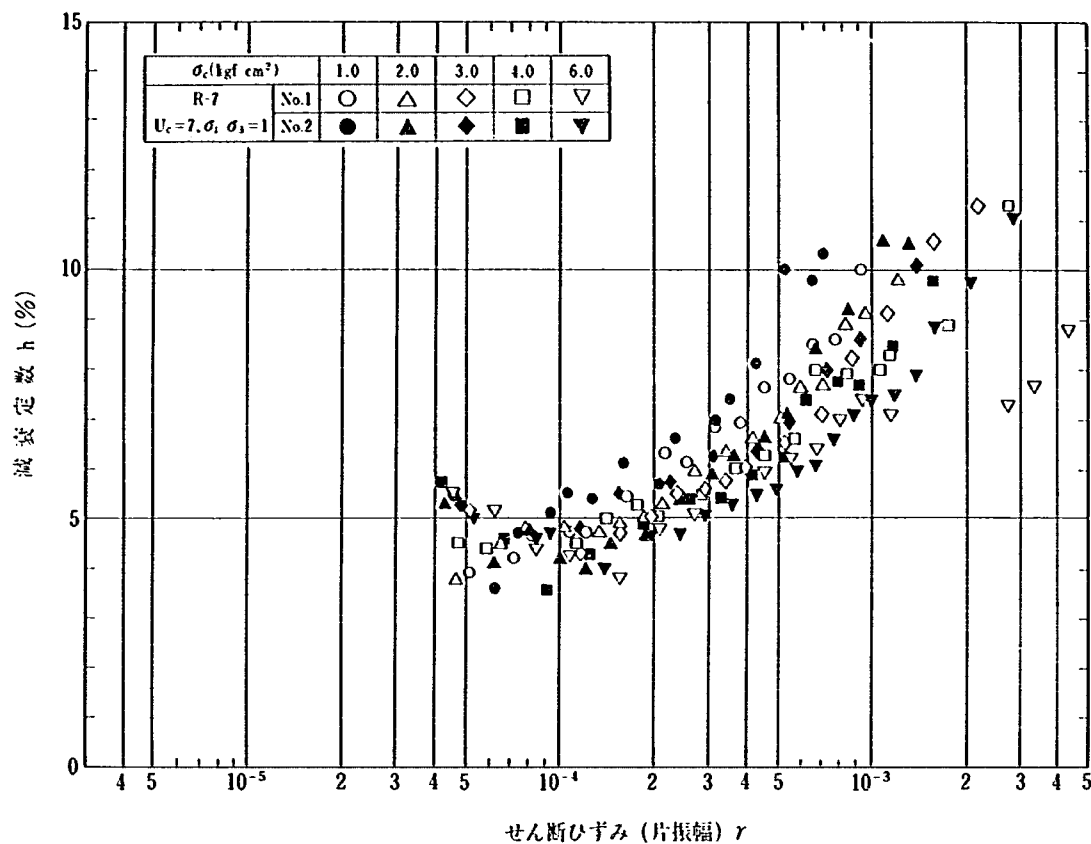


図 7.11 減衰定数のひずみ依存曲線 (ロック材 R-7)

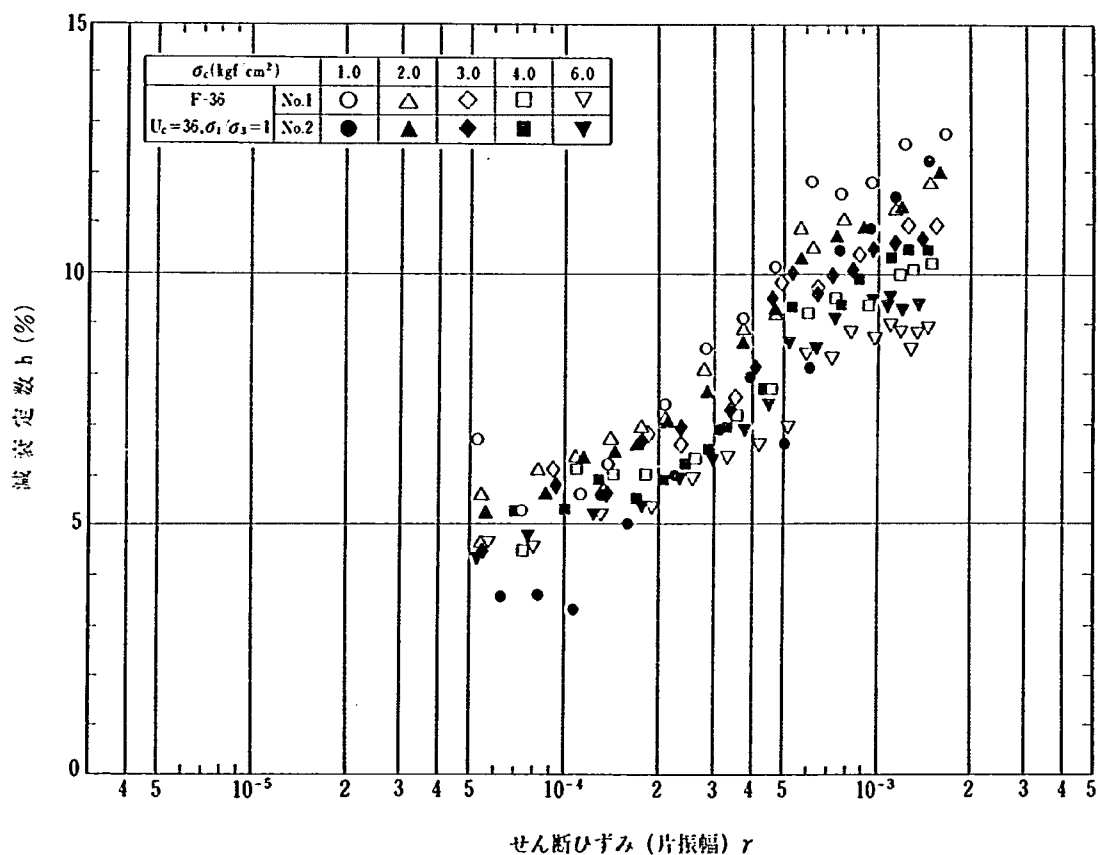


図 7.12 減衰定数のひずみ依存曲線 (フィルター材 F-36)

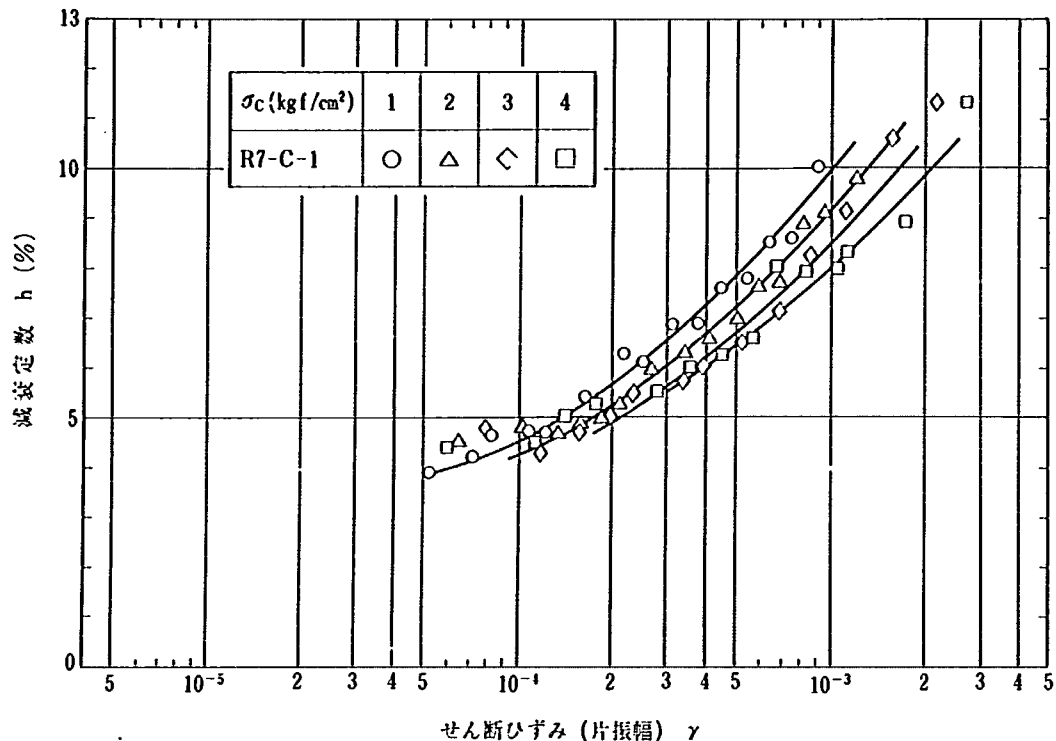


図 7.13 拘束圧依存性が明確な $h \sim \gamma$ 曲線の例

剛性率 G と減衰定数 h の再現性について簡単にまとめると以下のようなになる。

- ① 片振り試験（異方圧密後繰返し载荷）における剛性率 G の再現性があまり良くない。
- ② 両振り試験（等方圧密後繰返し载荷）では、概ね剛性率 G の再現性が良いと言える。
- ③ 減衰定数 h は試験値のバラツキが大きく、 G の値に比べると実験的誤差が入りやすく測定が難しいことがわかる。個々の試験値の再現性は、バラツキのためはっきりしないがデータの分布範囲をみれば、比較的再現性があるとも言える。
- ④ 大局的にみれば減衰定数 h は拘束圧依存性があるようだが、剛性率 G にあられる程明確ではなく、砂等と比べ粗粒材料は h の拘束圧依存性が小さいようである。

試験条件を揃えた 2 ケースの試験結果から、 $G \cdot h$ の再現性についてみたわけであるが、再現性の良否に影響する種々の原因は、それらが複雑に影響しあっているものと考えられる。例えば、载荷端面の整形状態や密度の違い、応力またはひずみ履歴の影響、大ひずみにおける伸張側のループ形状の相異、さらに解析時の誤差（特に h の場合）等があげられる。これらがデータの再現性やバラツキに影響し合い、その程度を個々に把握してゆくことは難しい点も多いが、今後さらに検討を要する課題であると考えられる。

7.3 間隙比の影響

砂質土や粘性土の動的物性値（剛性率 G ・減衰定数 h ）に影響を与える要因については、これまで多くの研究がなされているが、このうち間隙比・拘束圧（平均主応力）・ひずみ・主応力比・粒度分布等に着目し、粗粒材についてそれらの影響度合いを調べこれ以降の項で順を追って述べる。

砂質土の剛性率 G に与える間隙比 e の影響については、多くの研究がなされており、図 7.14 の G と e の関係^{4), 6)} が示されている。図中の各式は、①が柴田²²⁾ による超音波パルス法を用いた $D_{50} = 0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ の 3 種の細粒分を含まないきれいな砂の剛性（ $\gamma \approx 10^{-6}$ ）を測定して、次の実験式を提案している。

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

②～④は岩崎・龍岡^{18), 16)} らが、中空供試体を用いた共振法土質試験で細粒分を含まない均等係数 U_c の小さなきれいな砂に対し、各ひずみにおいて、粒子形状によらず次式で G を表わせるとしている。

$$\textcircled{2} \quad G = 900 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} \sigma_c^{0.4} \quad (\gamma = 10^{-6} \text{ に対して}) \dots\dots\dots (7-2)$$

$$\textcircled{3} \quad G = 850 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} \sigma_c^{0.44} \quad (\gamma = 10^{-5} \text{ に対して}) \dots\dots\dots (7-3)$$

$$\textcircled{4} \quad G = 700 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} \sigma_c^{0.5} \quad (\gamma = 10^{-4} \text{ に対して}) \dots\dots\dots (7-4)$$

④、⑤は、Hardin・Richart³²⁾ が中実供試体の共振法土質試験で、 $\gamma \leq 10^{-4}$ に対するきれいな砂についてのもので、

$$\textcircled{4} \quad G = 700 \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)} \sigma_c^{0.5} \quad (\text{粒子の丸いオタワ砂 } (e < 0.80) \text{ に対して}) \dots\dots\dots (7-5)$$

$$\textcircled{5} \quad G = 330 \frac{(2.97-e)^2}{(1+e)} \sigma_c^{0.5} \quad (\text{粒子の角ばった石英砕砂に対して}) \dots\dots\dots (7-6)$$

いずれの関係式においても、剛性率 G は間隙比 e の減少（密度の増加）と共に増大する傾向は明らかである。また、 G の e に対する変化の仕方は、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大差なく、通常のかきれいな砂では、Richart や岩崎らが示した e の関数 $F(e) = (2.17-e)^2/(1+e)$ によって良く説明できるとされている^{4), 16)}

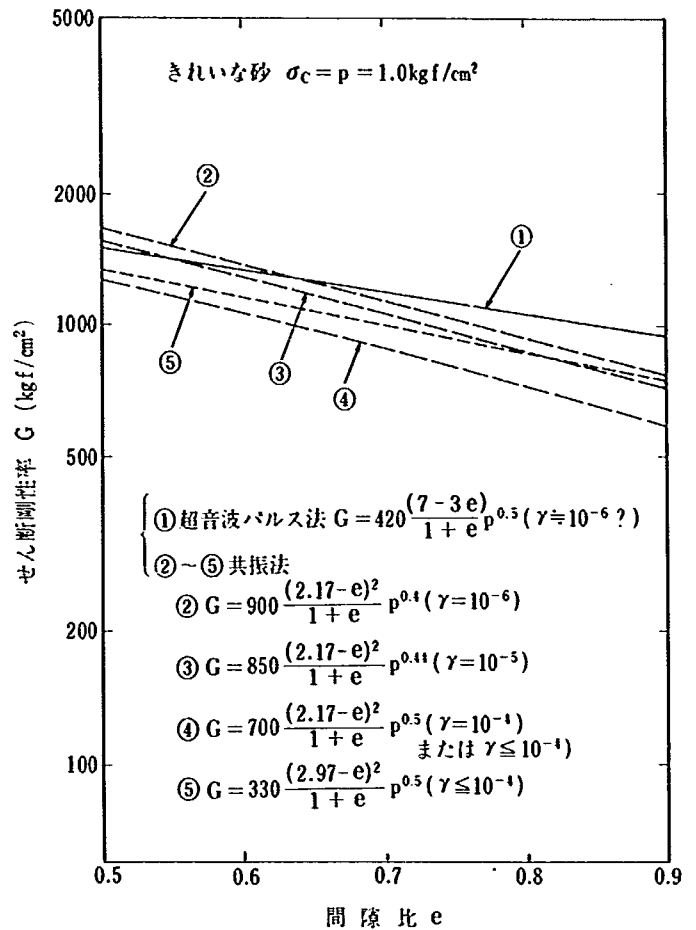


図 7.14 きれいな砂での G と e との関係（龍岡ら⁴⁾ による）

今回行った粗粒材料の試験では、同一材料に対して1種類の間隙比しか設定していないため、間隙比 e の違いによる剛性率 G の変化を説明するのには十分とは言えない。しかし、拘束圧の変化に伴う間隙比の違いがあるため、各材料の、それぞれのせん断ひずみレベルに対して平均主応力 $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の剛性率 G と間隙比 e の関係を示してみたのが図 7.15 である。 $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 以外の結果から $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の G を得るために、 G を $(\sigma_m)^m$ で除し拘束圧の違いによる差を除いてある。この時のべき乗数 m は、次項で述べる剛性率 G と平均主応力 σ_m の関係から求めた値を用いている。なお、ここで用いられている粗粒材料の間隙比は、全て (5-2) 式に示した合成絶対乾比重 $\bar{G}_d$ で計算したものである。さらに初期間隙比 e_0 に対し e は、圧密後即ち繰返し載荷直前の間隙比を示している。圧密後の間隙比はロック材の R-12 材が $e = 0.34 \sim 0.39$ 、R-7 材が $e = 0.37 \sim 0.41$ 、フィルター材 F-36 材で $e = 0.30 \sim 0.32$ と各材料とも変化幅が小さいが、 $G \sim e$ の関係においてはロック材 (R-12 材、R-7 材) とフィルター材 (F-36 材) のグループに分かれる。フィルター材はロック材に比べ同じひずみでも剛性率 G が小さく、間隙比が小さく密度が大きいからと言って、必ずしも剛性率 G が大きいとは限らないことがわかる。従って、間隙比 e だけで材料の違う剛性率 G を評価するのは困難であり、材料の構成粒子の硬軟・粒子形状の相異なるの影響も含めて検討する必要があると考えられる。またロック材の片振り試験 (R-12 材・ $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ 、R12-A) の G が他と比べ大きめであるが、これを除くロック材、フィルター材の G は、バラツキはあるものの全体として $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$ のひずみに対し、間隙比の関数 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ にほぼ比例した関係が得られている。

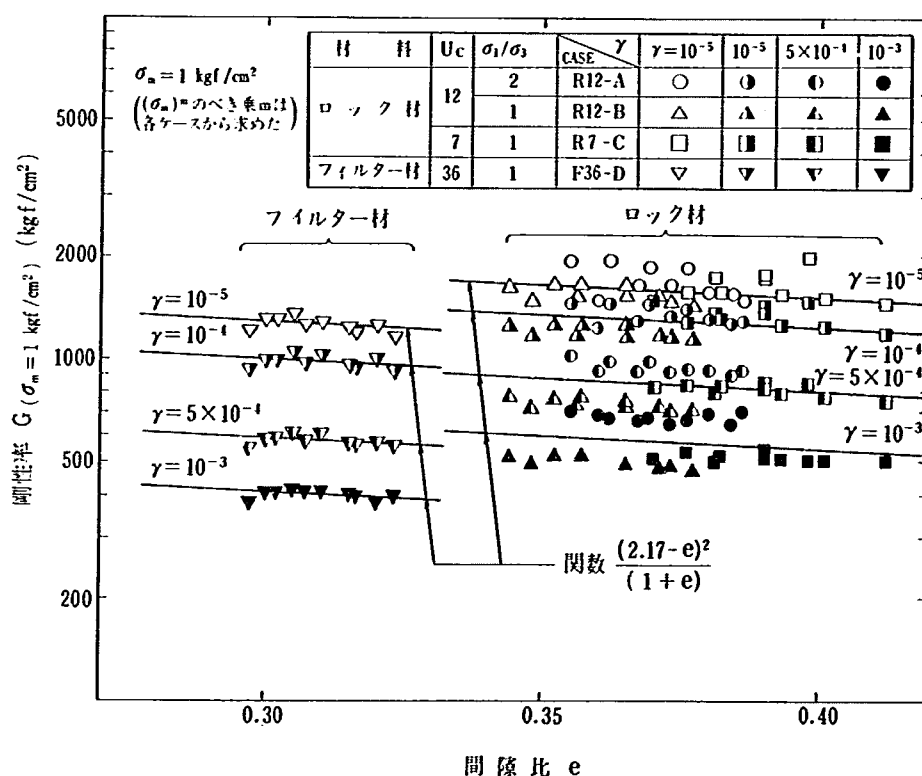


図 7.15 ロック材・フィルター材の G と e の関係

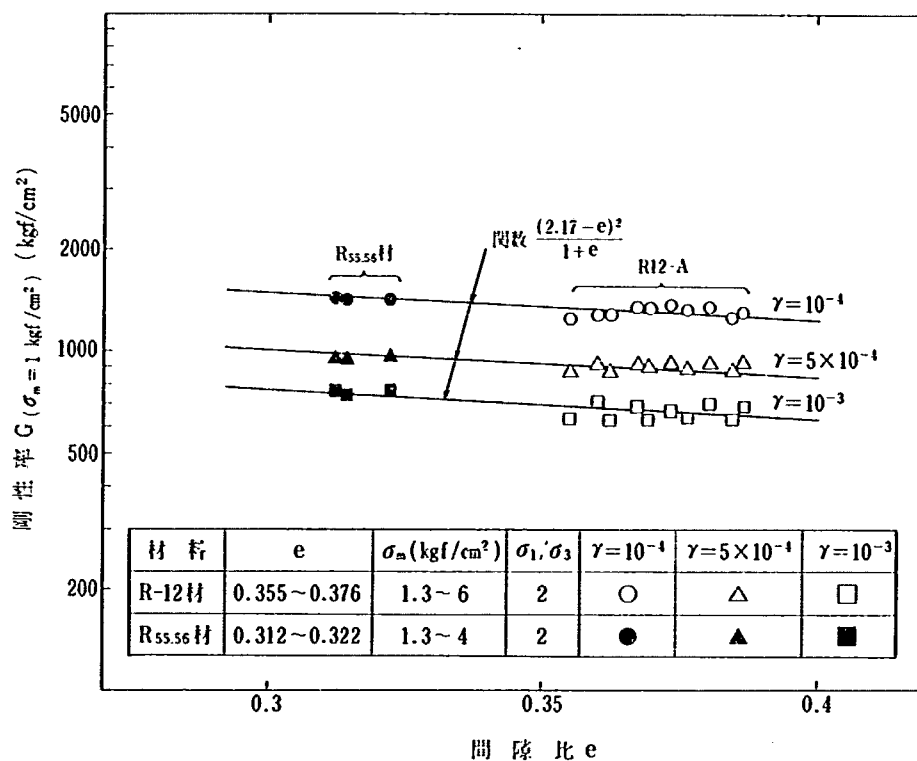


図 7.16 R55・56材の G と e の関係

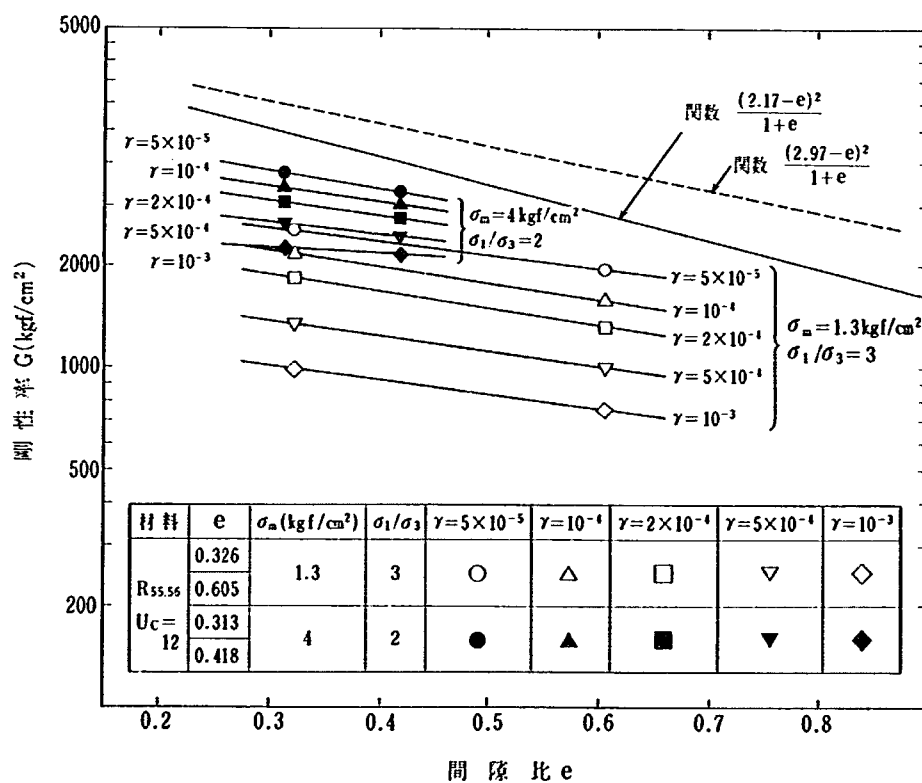


図 7.17 R-12材と R55・56材における G と e の関係

改良前の昭和55・56年度の試験（R55・56材）における間隙比の影響をみたのが図7.16である。このR55・56材では $\sigma_m = 1.3 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_1/\sigma_3 = 3$ の条件で相対密度 $D_r = 85\%$ と20%, また $\sigma_m = 4 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ で, $D_r = 85\%$ と63%に密度を変えた試験を行っており, この結果を示している。 e の違いによる G の変化は傾向的には合っているが, e の関数 $(2.17-e)^2/(1+e)$ や $(2.97-e)^2/(1+e)$ より勾配が緩く e の影響が小さい結果となっている。

図7.17は主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 2$, 平均主応力 $\sigma_m = 1.3 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ の条件で行ったR55・56材とR-12材の結果を比較したものである。それぞれの G は, 図7.15と同様 $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の値に補正してある。この図からも $(2.17-e)^2/(1+e)$ の関数は, $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ のひずみで G と e の関係を良く説明できることがわかる。

以上のように今回の粗粒材料を使った試験結果では, 間隙比の違いが小さく G と e の関係を十分に説明しきれないが, 一応砂等の他の研究結果と同様, 密度の増大（間隙比の減少）に伴い剛性率 G は増加する傾向にあり, G と e の間にはほぼ $G \propto (2.17-e)^2/(1+e)$ の関係が成り立つことがわかった。

減衰定数 h に対する間隙比 e の影響を $\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ におけるロック材・フィルター材及び予備試験の豊浦砂で比べたのが図7.18である。一般に, きれいな砂では h に及ぼす e の影響はきわめて小さい⁴⁾, ¹⁶⁾と考えられ, 同図でも $\gamma = 10^{-3}$ の結果は豊浦砂を含めても e の影響がほとんどないことがわかる。間隙比 e の相異よりも, h 自身の測定値のバラツキの方が大きいようであり, 豊浦砂の G が多少低めの値であることを考えれば, ロック材・フィルター材ともに間隙比 e の影響はほとんどみられないことがわかる。

G や h に及ぼす間隙比 e の影響については, 同一材料において e の違いを考慮した試験を行って, さらに検討する必要があると思われる。

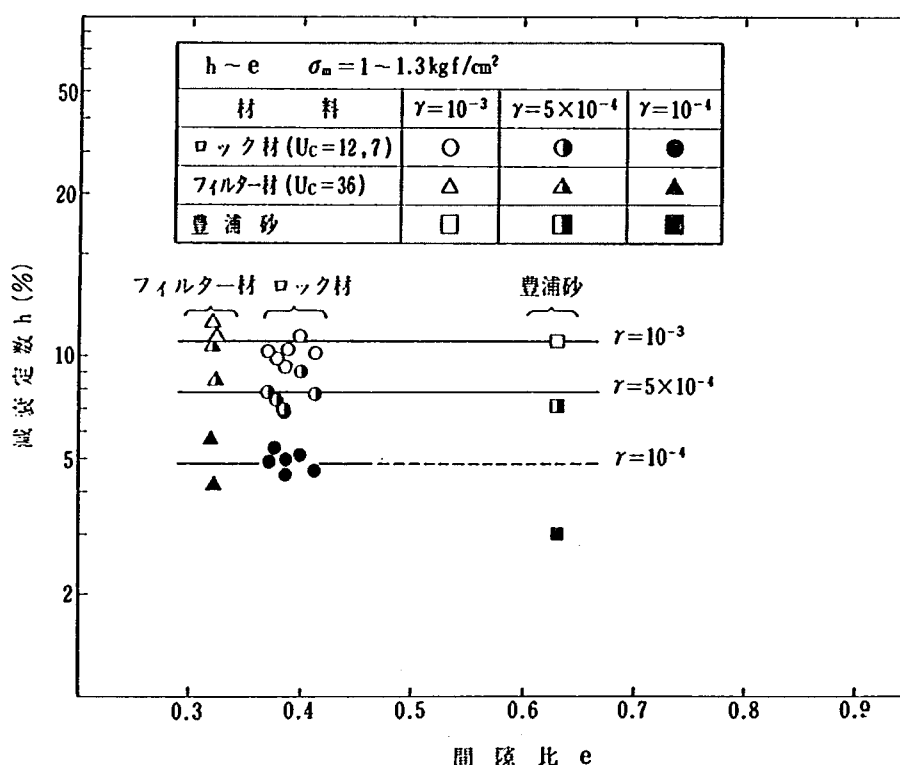


図7.18 各材料の減衰定数 h に及ぼす間隙比 e の影響

7.4 平均主応力の影響

今回の試験では、主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=1$ 以外のケースを実施しているため、拘束圧 σ_c を平均主応力 σ_m に着目して整理しその影響をみたものである。従って、片振り試験では主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 \neq 1$ であり、 $\sigma_m = (\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3)/3$ で示される平均主応力で整理し、一方両振り試験では主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=1$ であることから上式で表わされる平均主応力と拘束圧は一致し、 $\sigma_m = \sigma_c = \sigma_3$ となることがわかる。

図 7.19(a)~(d)は、各ケースの剛性率 G と平均主応力 σ_m の関係で、せん断ひずみ γ をパラメーターとして両対数グラフに表わしたものである。また同様に図 7.20(a)~(h)及び図 7.21(a)~(d)には、縦軸の G を $(2.17 - e)^2/(1 + e)$ で除し e の違いによる影響を除いたものと、 σ_m の関係を示してある。図 7.20(a)~(h)は各試験ケース（1 供試体）の結果で、図 7.21(a)~(d)は同一条件で行った 2 ケースの結果を 1 つのグラフに表わしたものである。なお各図中における剛性率の値は、それぞれのひずみ依存曲線 ($G \sim \gamma$ 曲線) から読み取ったものである。

各ケースにおける $G \sim \gamma$ 曲線の再現性の良否が、同一条件での 2 ケースの結果にバラツキを生じさせてはいるが、いずれの場合も $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-3}$ のひずみ範囲では G と σ_m は、両対数グラフ上でほぼ直線関係にあることがわかる。また、ひずみが大きくなるに従って剛性率 G は、その絶対値が低下するとともに平均主応力 σ_m に対する勾配が大きくなり、剛性率の平均主応力（拘束圧）依存性が明確に表われている。これらは G と σ_m が、

$$G \propto (\sigma_m)^m \quad \dots\dots\dots (7-7)$$

という比例関係で表わされ、^{4), 35), 16), 3)} べき乗数 m はひずみの関数であり γ が増すと増大することを意味している。

図 7.22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 ($\gamma \leq 10^{-4}$) での $G/F_{(a)} \sim \sigma_m$ の関係と、剛性率 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。これに対し図 7.23 ~ 図 7.25 のべき乗数 m とせん断ひずみ γ の関係 (図中、豊浦砂を用いた龍岡ら^{16), 29)} と国生ら³⁾ の結果を実線と破線で示してある。) でみると、今回の結果は R-7 材の Na 2 (R7-C-2) を除いてロック材・フィルター材とも $m = 0.65$ 以上の大きな値を示している。また豊浦砂のようなきれいな砂では、 m は $\gamma = 10^{-4}$ を境にして急激に増加する傾向にあるが、今回の粗粒材料 (ロック材・フィルター材) ではそれほどはっきりせず、小さいひずみから m の値が大きいこともあって、 $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-3}$ の範囲では $m = 0.65 \sim 0.85$ まで徐々に増加している。

以上のように、剛性率 G が拘束圧 (平均主応力) の影響を大きく受け、しかも $(\sigma_m)^m$ と比例関係で表わせ、さらにべき乗数 m がひずみの増加とともに大きくなる傾向を示す点では、これまでの研究と一致しているが、べき乗数 m は従来よりも大きめな値が得られ、剛性率 G の拘束圧依存性が小さなひずみ領域からより顕著に現われる傾向がみられた。

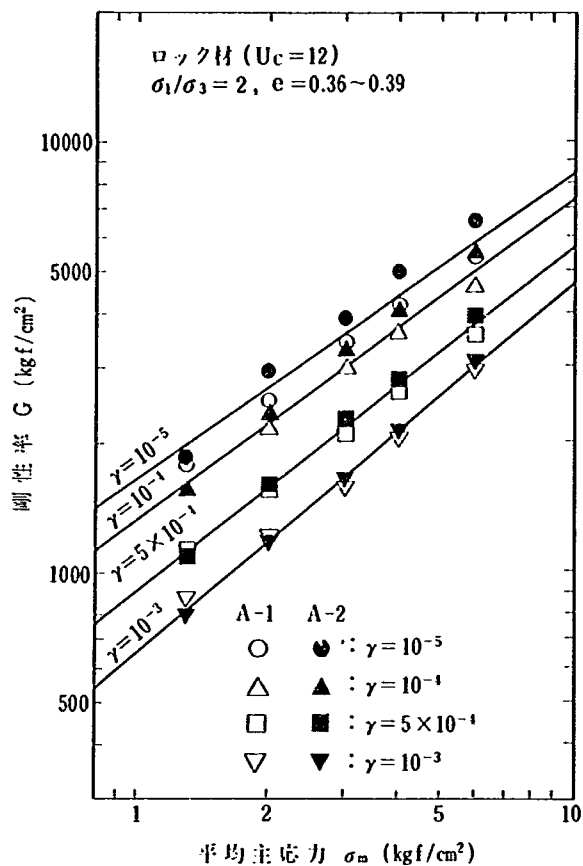


図 7.19(a) G と σ_m の関係 (R 12-A)

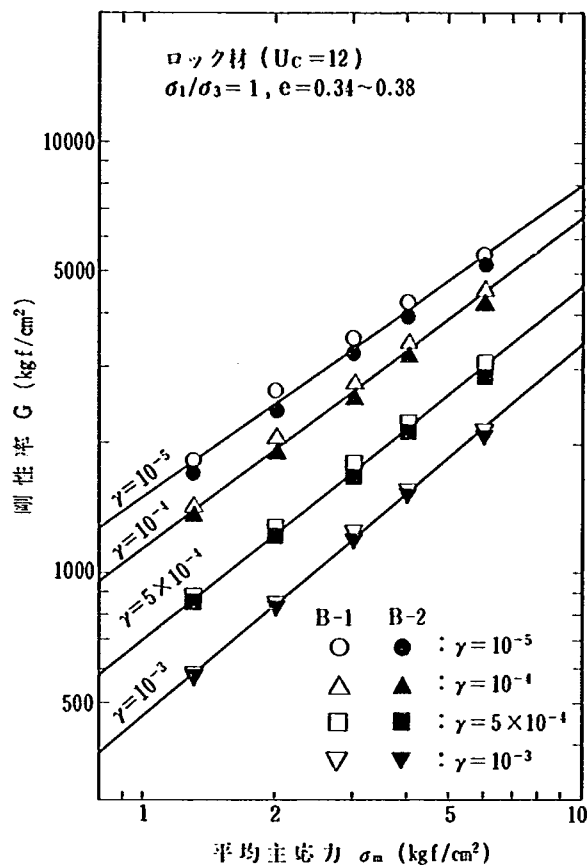


図 7.19(b) G と σ_m の関係 (R 12-B)

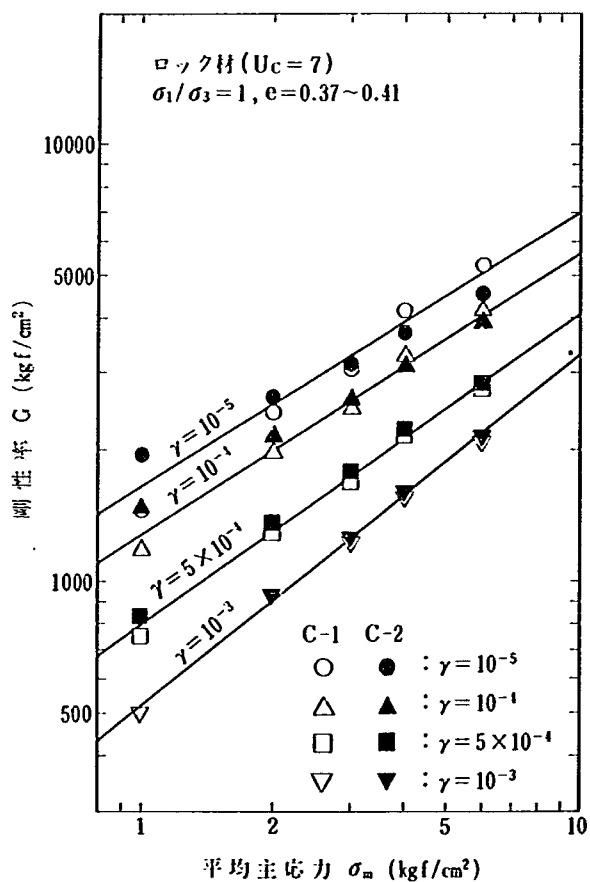


図 7.19(c) G と σ_m の関係 (R 7-C)

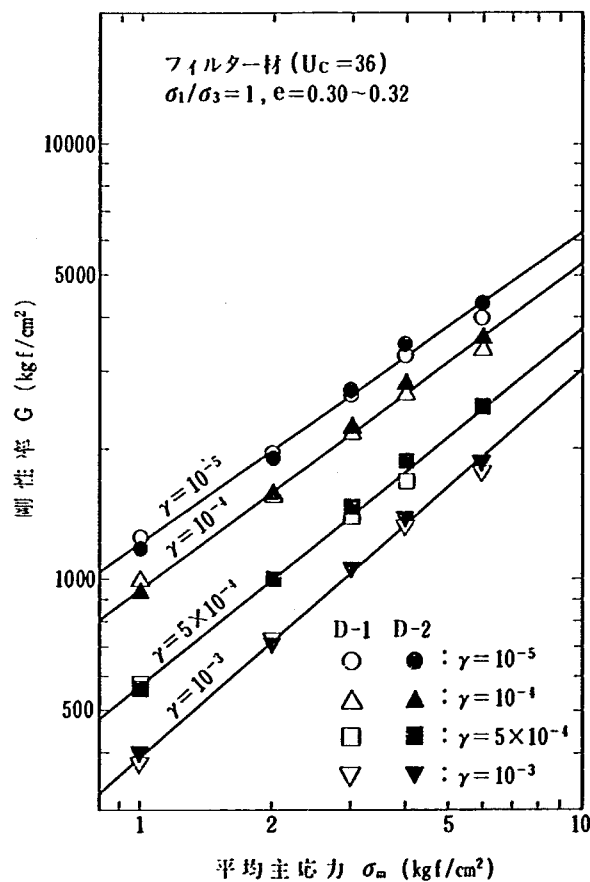


図 7.19(d) G と σ_m の関係 (F 36-D)

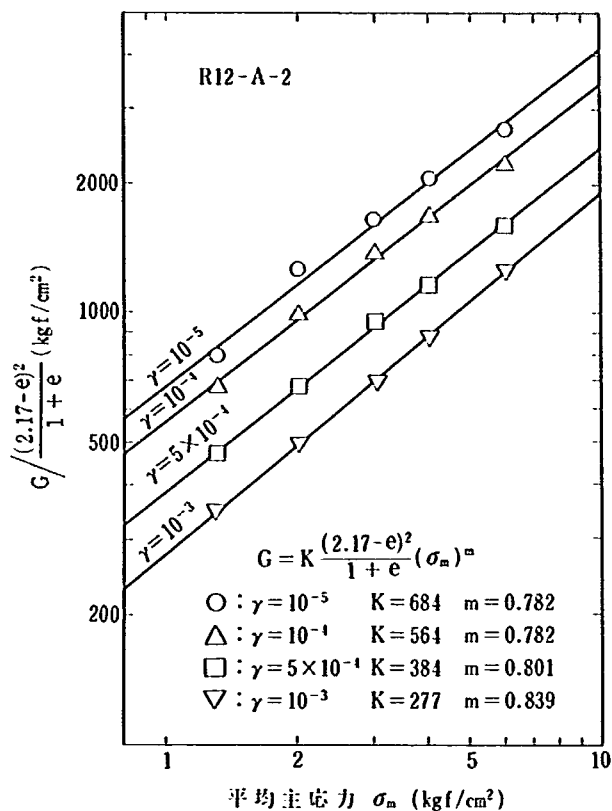
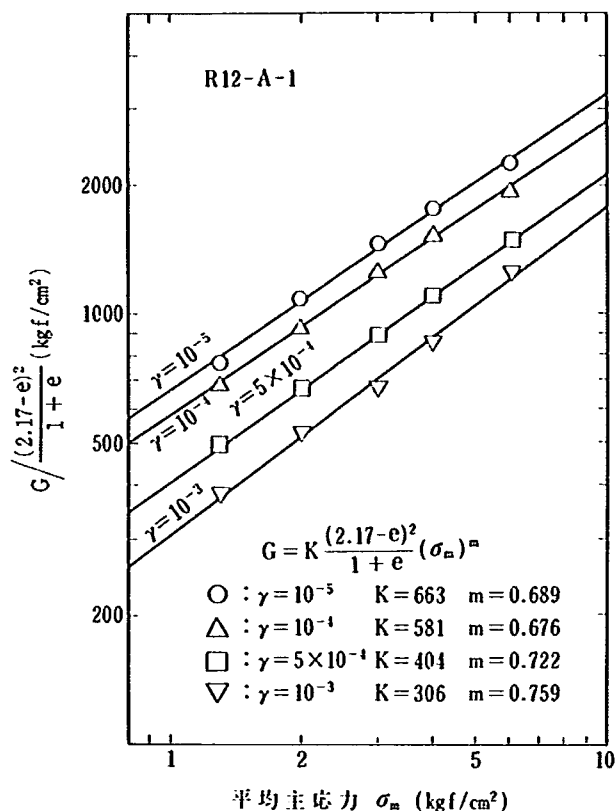


図 7.20(a) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-A-1)

図 7.20(b) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-A-2)

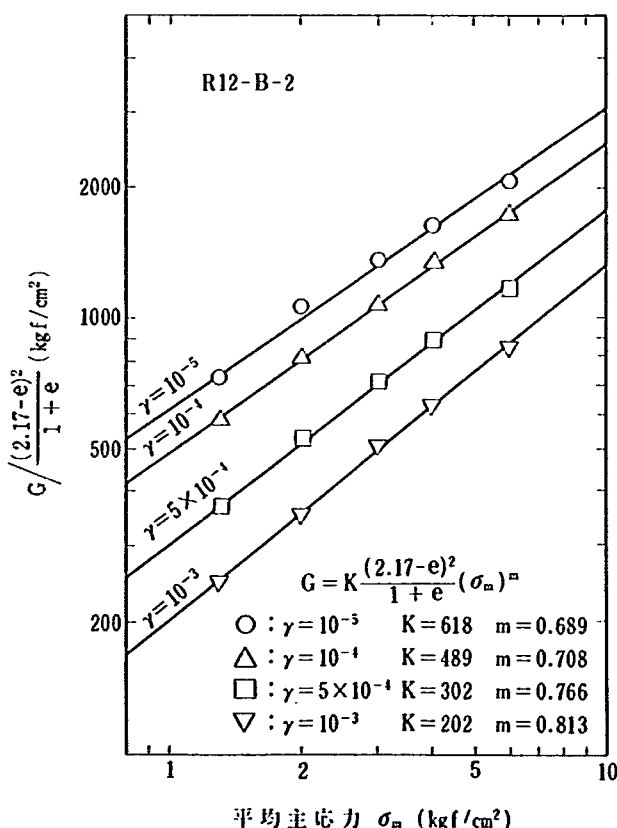
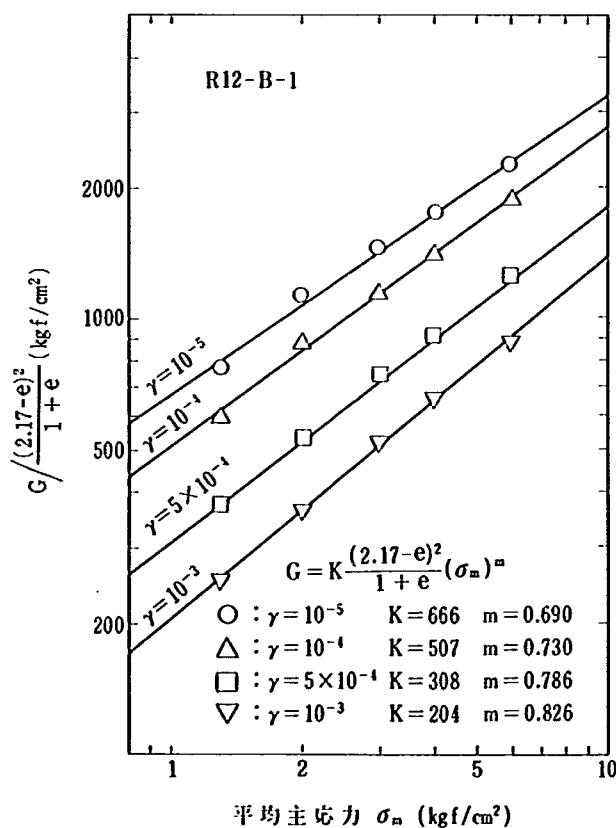


図 7.20(c) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-B-1)

図 7.20(d) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-B-2)

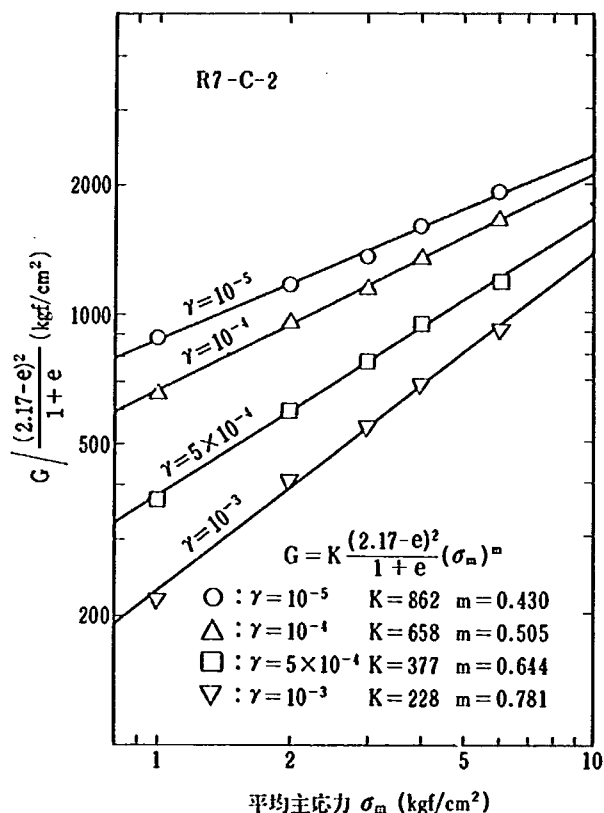
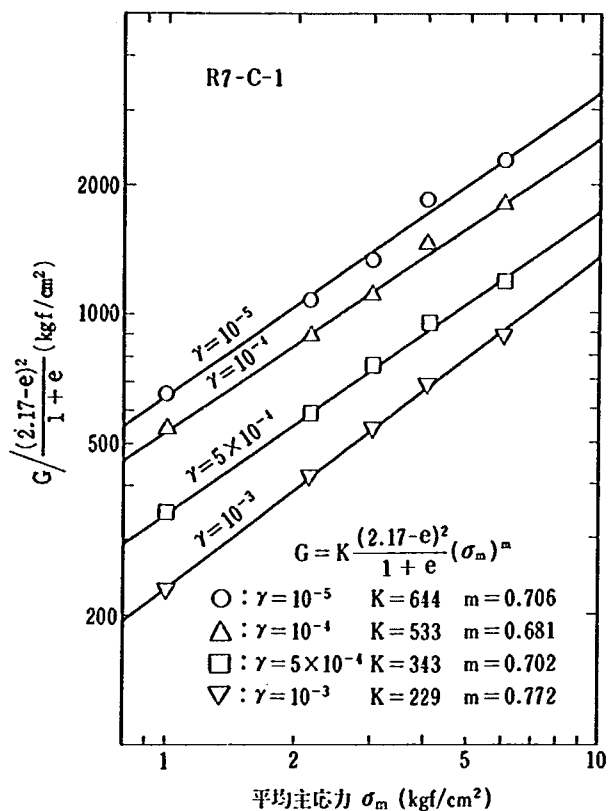


図 7.20(e) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R 7-C-1) 図 7.20(f) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R 7-C-2)

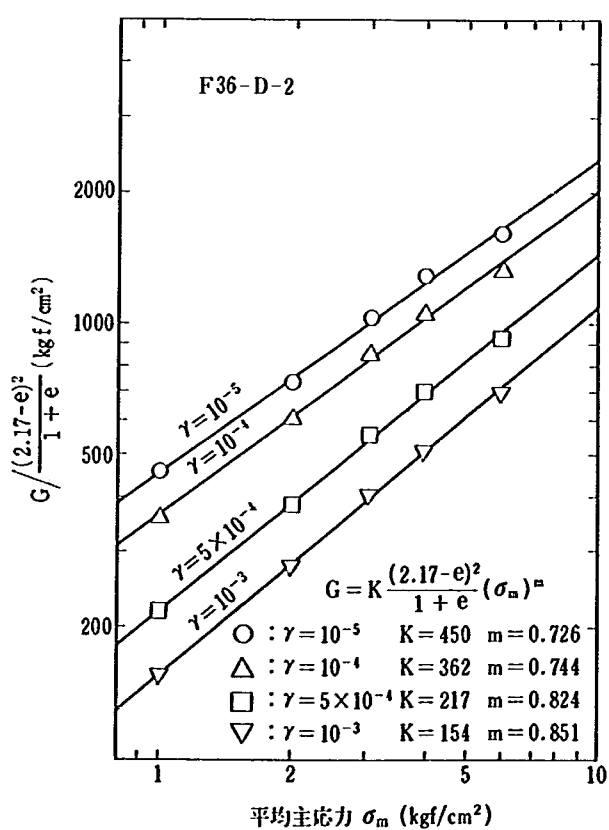
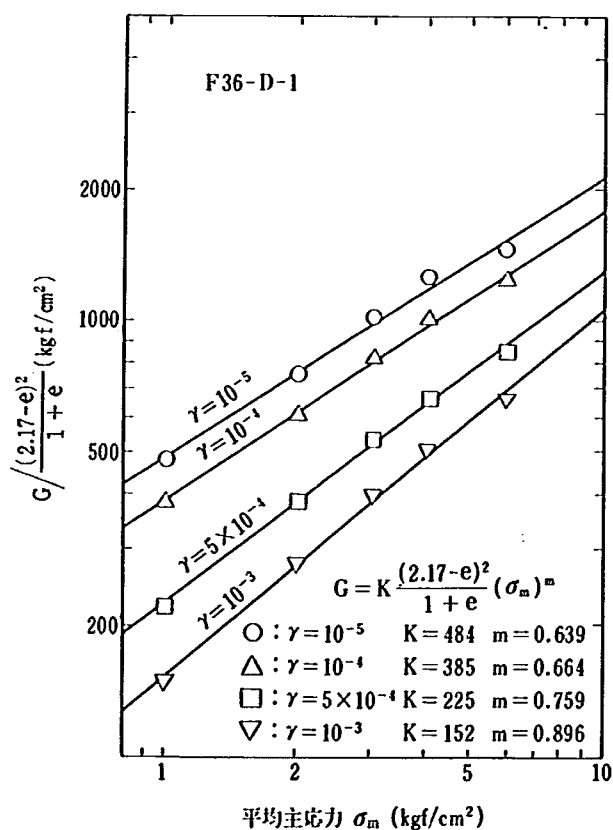


図 7.20(g) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (F 36-D-1) 図 7.20(h) $G / \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (F 36-D-2)

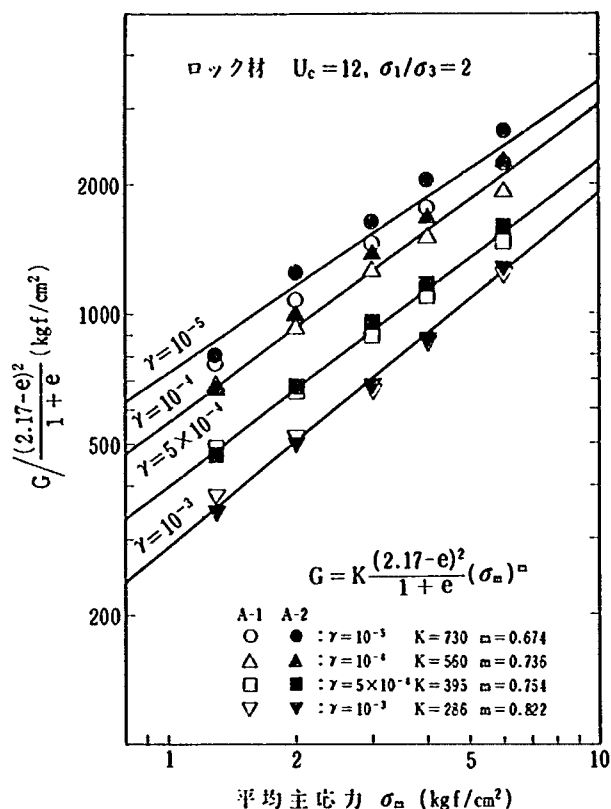


図 7.21 (a) $G/\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-A)

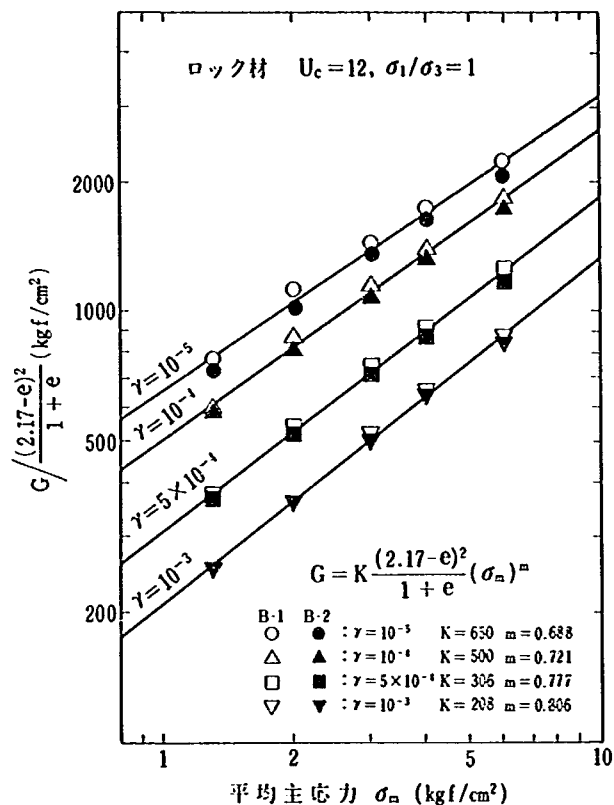


図 7.21 (b) $G/\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R12-B)

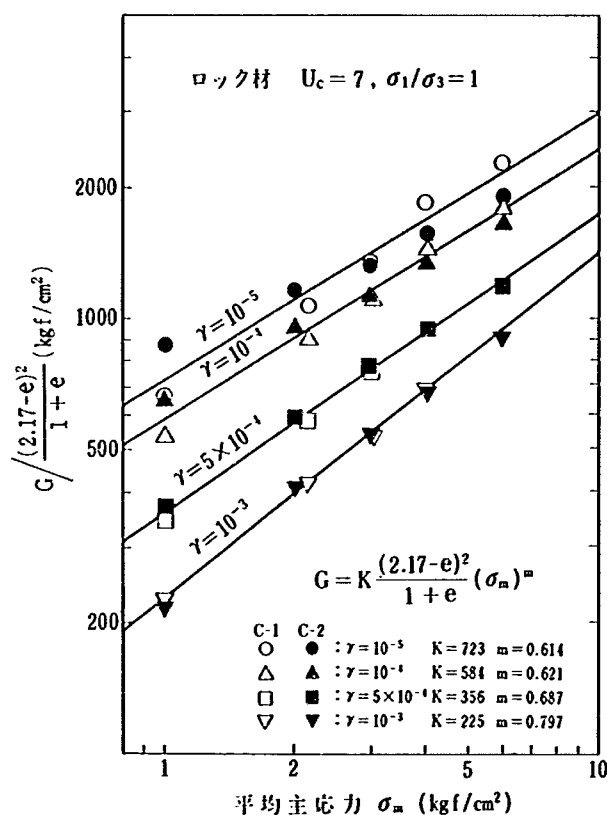


図 7.21 (c) $G/\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (R7-C)

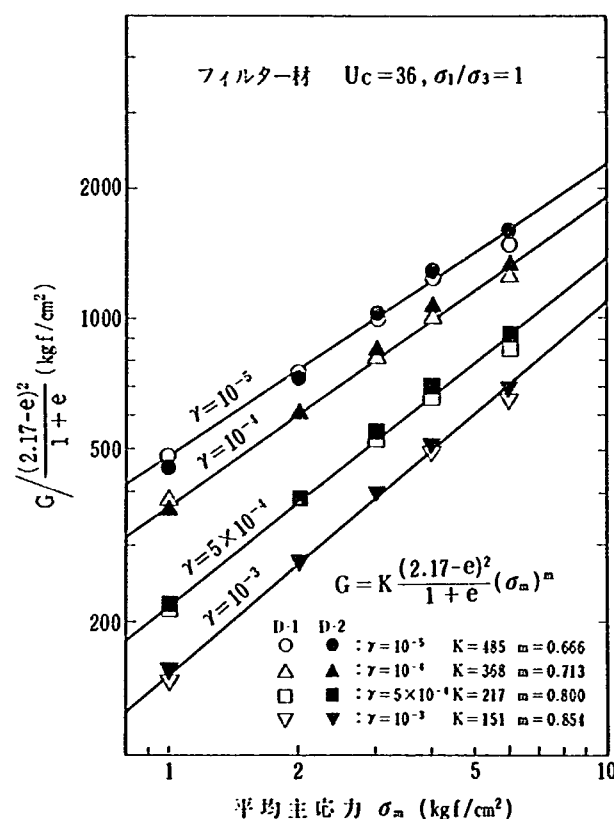


図 7.21 (d) $G/\frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$ と σ_m の関係 (F36-D)

減衰定数 h に対する拘束圧（平均主応力）の影響については h の測定値にバラツキが大きく、各拘束圧での $h \sim \gamma$ 関係で代表曲線を決定することが難かしいため、 h と σ_m の関係には示していない。ただ、図 7.13 の例にあるように、各拘束圧で比較的是っきりと $h \sim \gamma$ 曲線が異なるケースもみられ、また全体的にも $h \sim \gamma$ 曲線は $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ と $\sigma_m = 6 \text{ kgf/cm}^2$ で比較すれば、前者は後者に比べひずみの増加に伴う h の増加割合が大きいことがわかる。いずれにしても、平均主応力 σ_m は剛性率 G に与える程ではないが、減衰定数 h にも影響を及ぼしていることがわかり、減衰定数 h の拘束圧依存性が確認できたと考えられる。

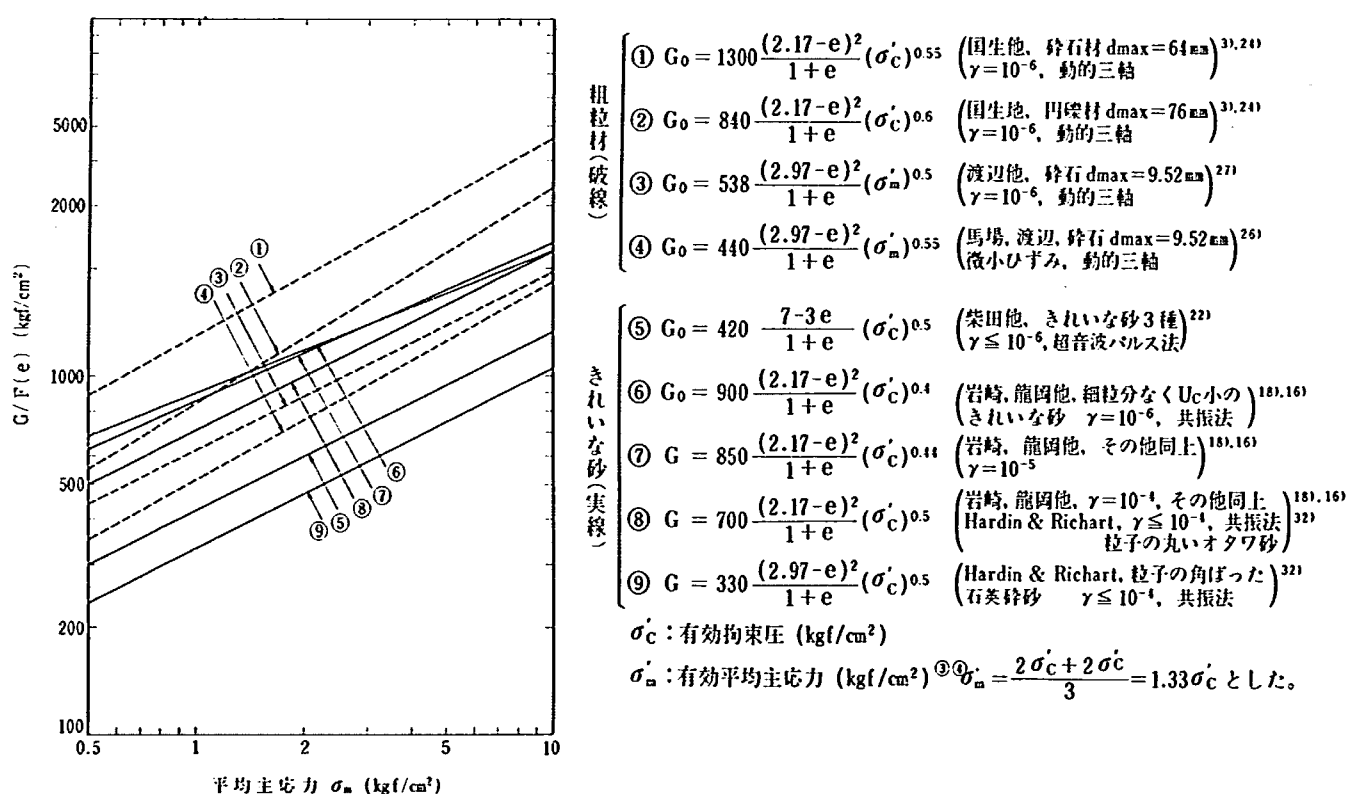


図 7.22 剛性率 G または G_0 を与える各式と $G/F(e) \sim \sigma_m$ の関係

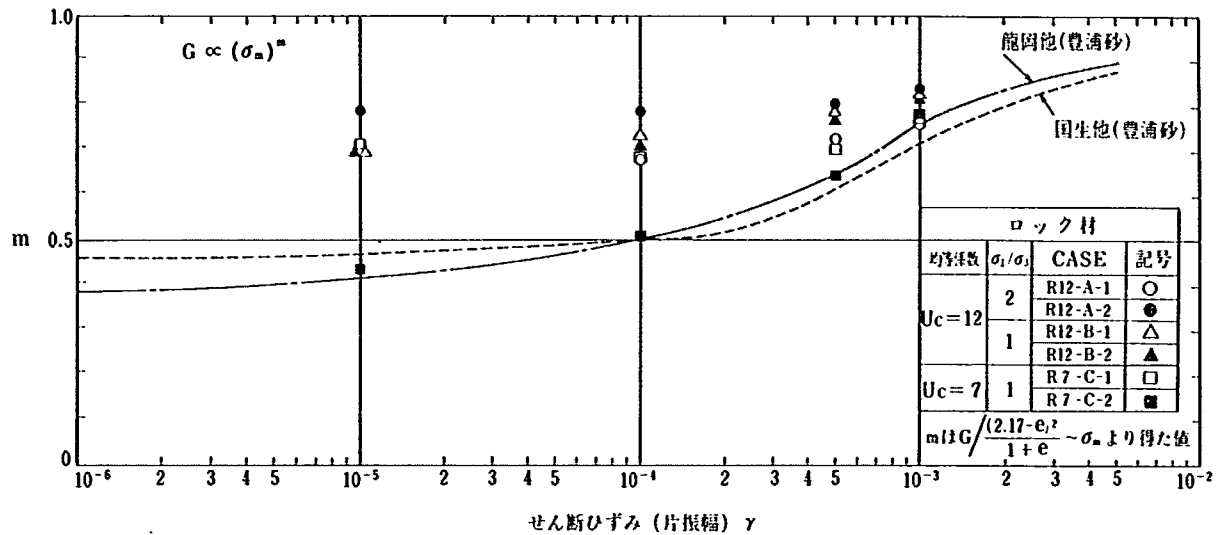


図 7.23 べき乗 m と γ の関係 (ロック材)

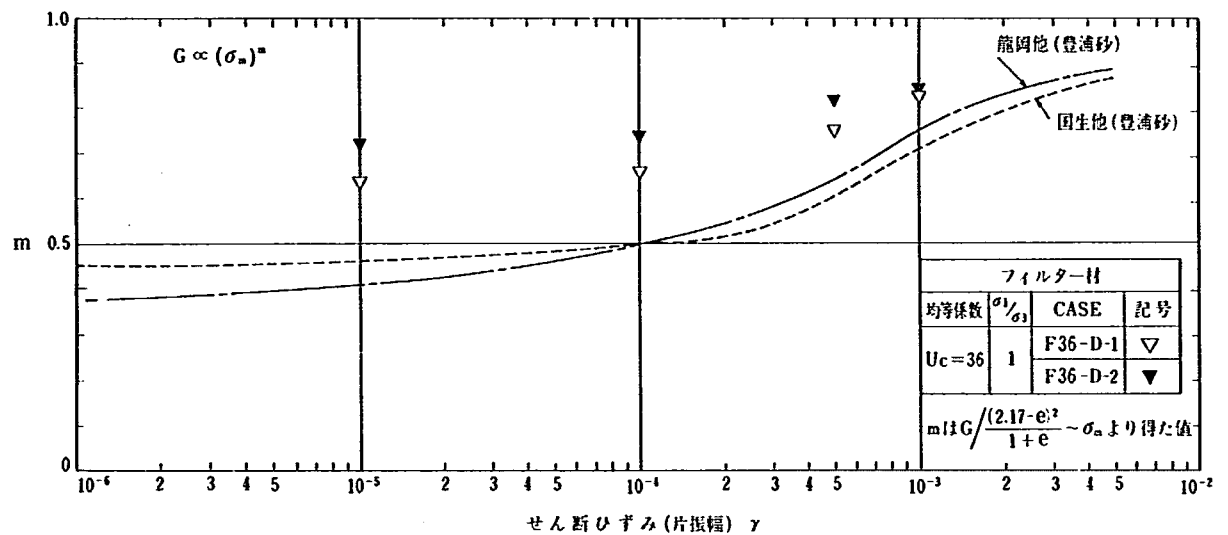


図 7.24 べき乗 m と γ の関係 (フィルター材)

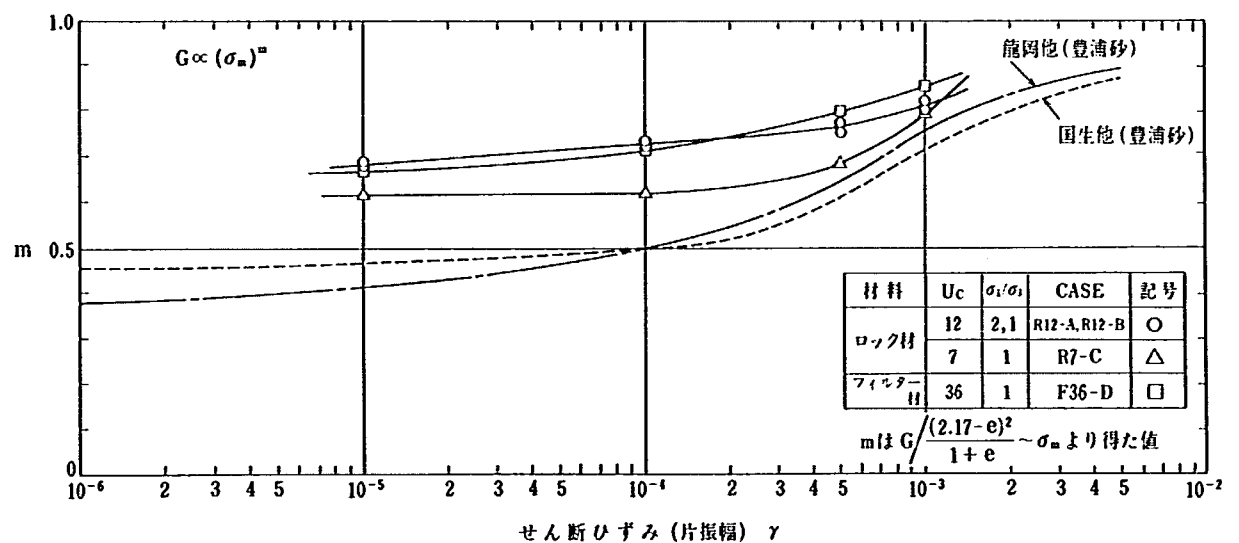


図 7.25 べき乗 m と γ の関係 (ロック材, フィルター材, 各ケースの平均曲線)

7.5 ひずみ依存性

すでに、剛性率 G のひずみ依存曲線($G \sim \gamma$ 曲線)を示し、ひずみの増加に伴う G の変化について若干ふれたが、ここではさらに正規化した剛性率 G のひずみ依存性について考えてみる。今回の試験における測定精度は、ほぼ $\gamma = 10^{-5}$ 以上のひずみ領域と考えられるため、 $\gamma \leq 10^{-5}$ 程度の微小ひずみでの初期剛性率 $G_{max} = G_0$ を $G \sim \gamma$ 曲線を見て直接外挿して求めることは難しい。そこで、外推可能と思われる最小ひずみ $\gamma = 10^{-5}$ における G (これを $G_{\gamma=10^{-5}}$ とする)を求め、それぞれのひずみの剛性率 G をこの $G_{\gamma=10^{-5}}$ で除して整理し、ひずみの増加に伴う G の減少程度の違いをみたものである。図7.26、図7.27は両振り試験($\sigma_1/\sigma_3 = 1$)におけるロック材及びフィルター材の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線であり、試験拘束圧の最小($\sigma_m = \sigma_c = 1$ または 1.3 kgf/cm^2)と最大($\sigma_c = 6 \text{ kgf/cm}^2$)の場合を示している。また同様に図7.28には、予備試験での豊浦砂の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線を示した。これによれば、今回用いたロック材やフィルター材のような粗粒材料においても、 $\gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3}$ のひずみで G の連続的な変化が測定できており、しかも G のひずみに対する非線型曲線の形や微小ひずみになるに従い G が一定値に漸近する傾向は、既往の研究結果と良く一致している。また $\sigma_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ と 6 kgf/cm^2 で比較すると、バラツキはあるが前者に比べ後者の曲線は、グラフ上で右側にずれる傾向を示している。図2.26～図2.28に示したロック材・フィルター材・豊浦砂の試験拘束圧範囲における、 $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線の変化幅を1枚のグラフに重ねて描いたのが図7.29である。ロック材とフィルター材の曲線はほぼ同じような範囲にあり、豊浦砂と比較すると G のひずみに対する低下が早くからみられることがわかる。以上のように拘束圧が G のひずみ依存曲線に与える影響は、ロック材・フィルター材ともにバラツキはあるが、砂等と同様拘束圧 σ_c が大きい程正規化した $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ グラフ上でカーブが右側に位置する傾向がみられ、ひずみに依存した G の低下が豊浦砂に比べ小さなひずみレベルから顕著になることがわかった。

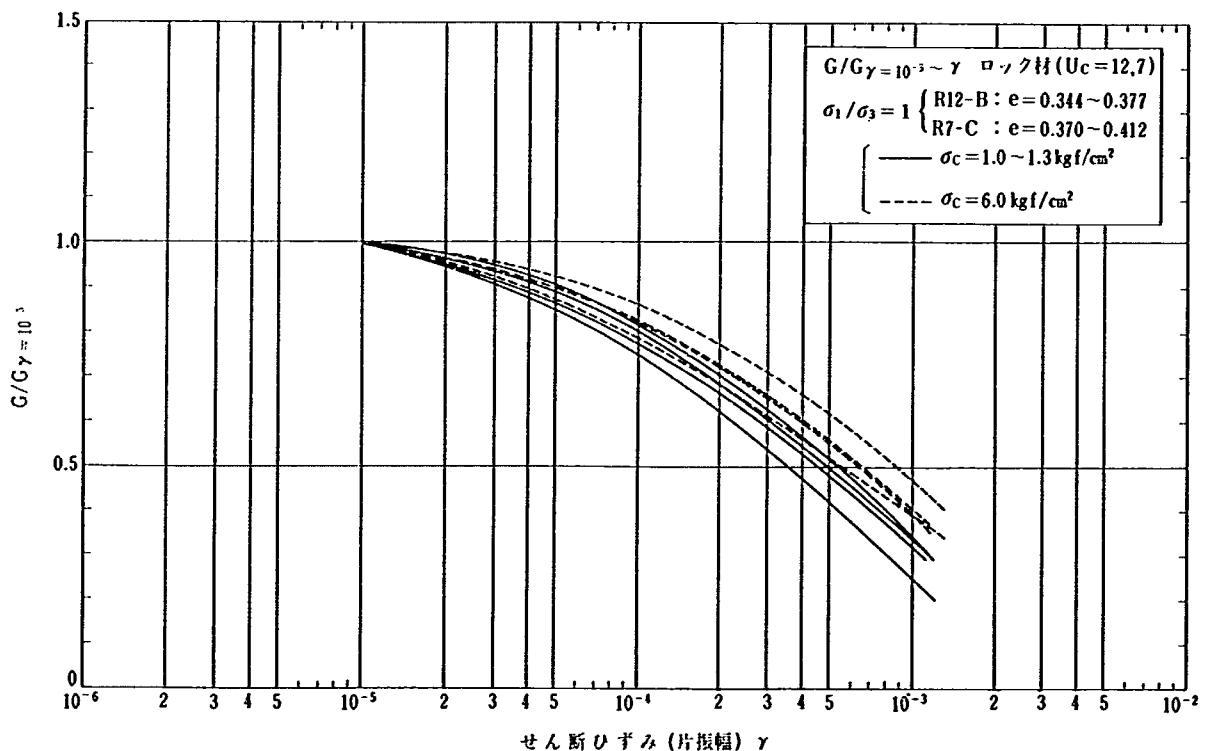


図 7.26 ロック材 ($U_c=12.7$, $\sigma_1/\sigma_3=1$) の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線

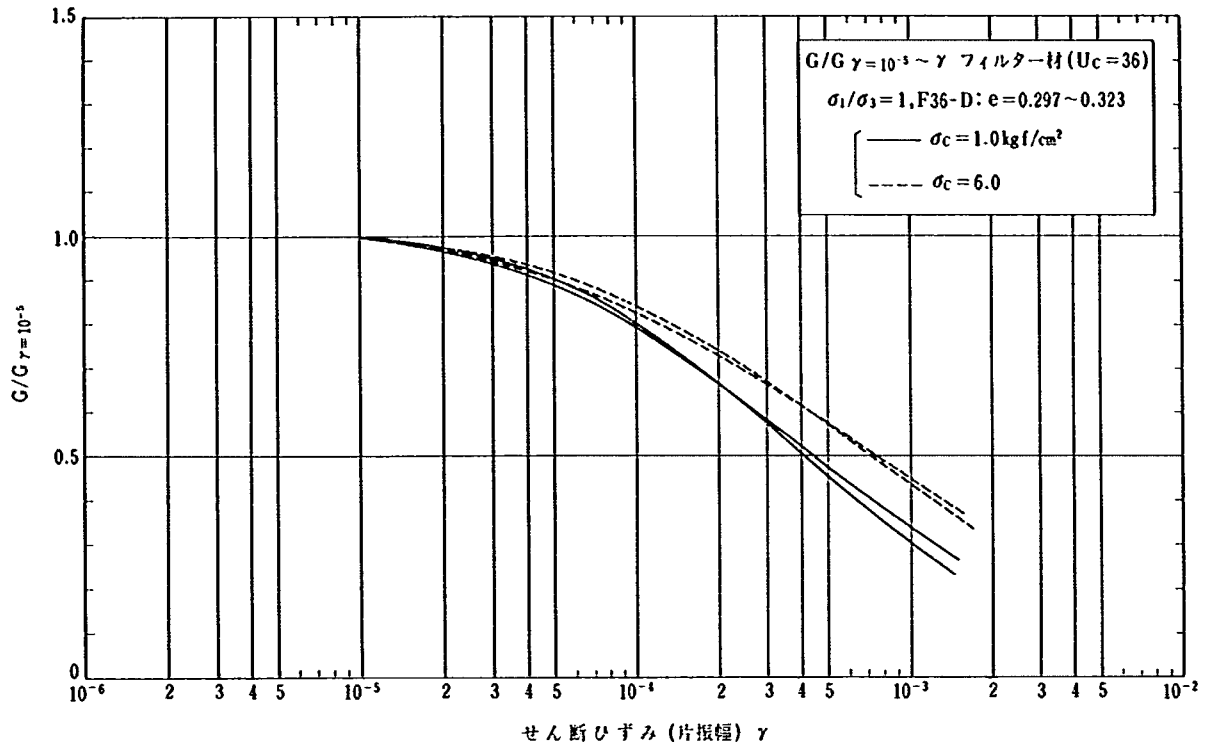


図 7.27 フィルター材 ($U_c=36$) の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線

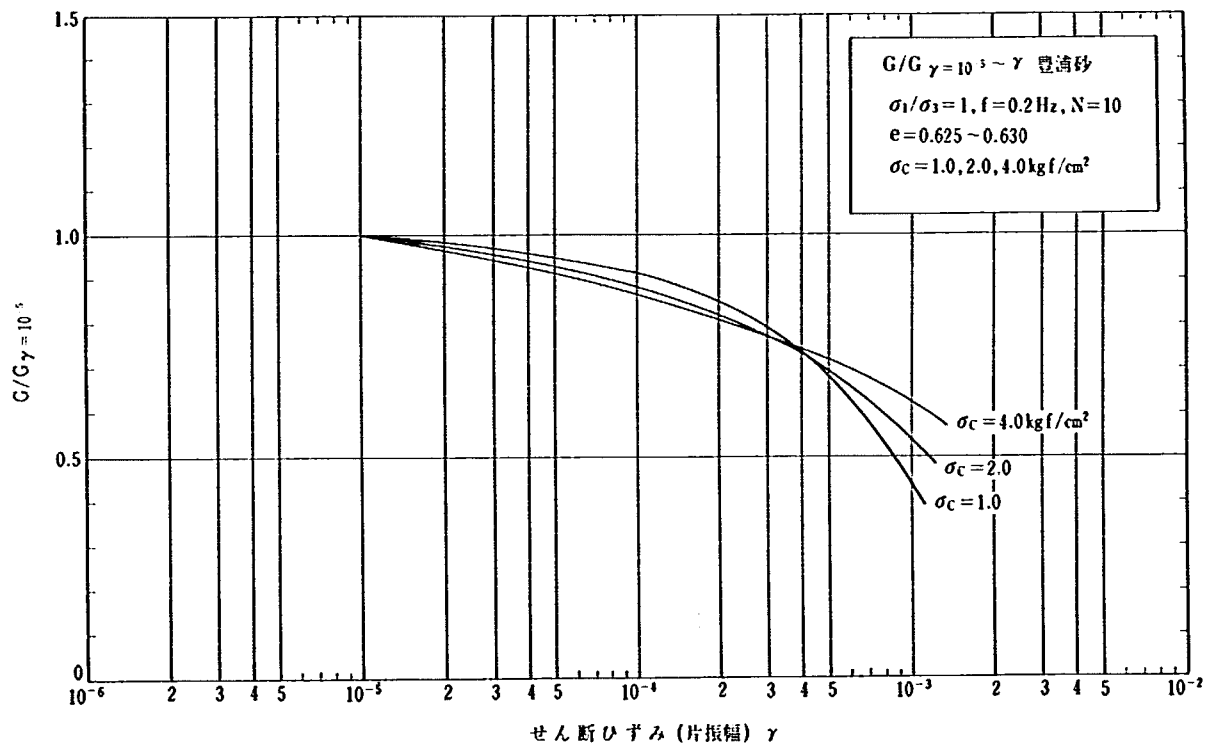


図 7.28 豊浦砂の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線

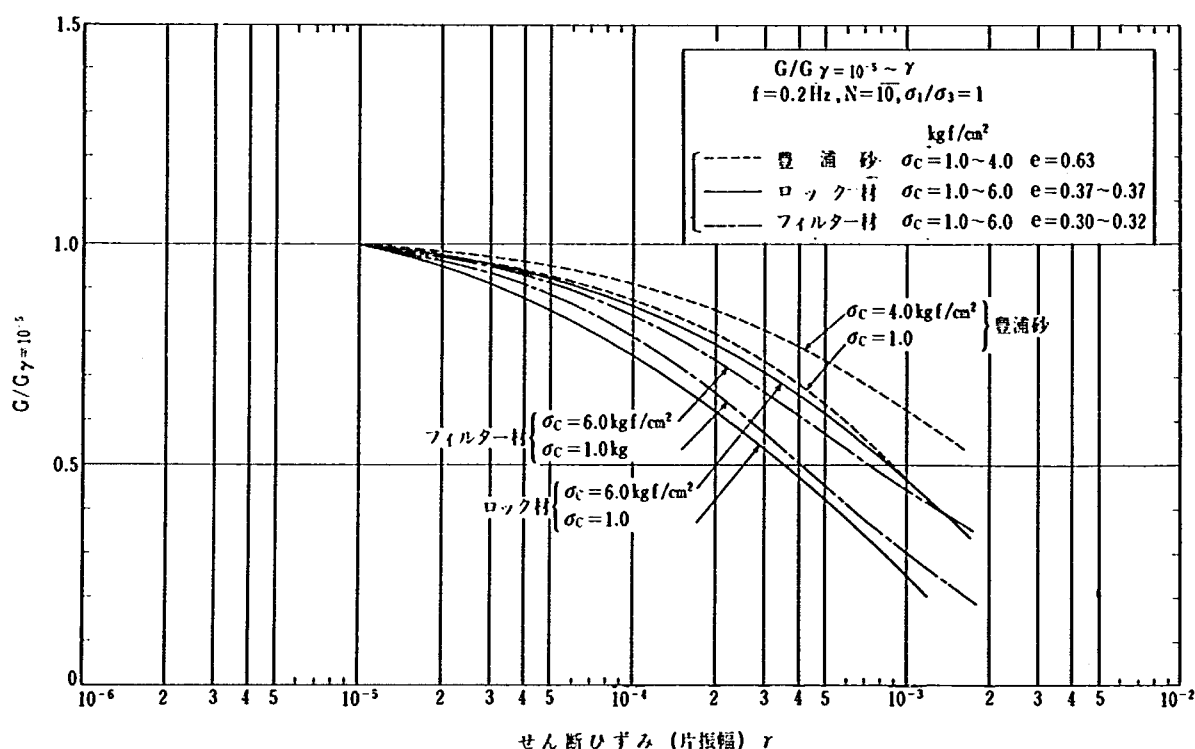


図 7.29 各材料の $G/G_{\gamma=10^{-5}} \sim \gamma$ 曲線の比較

前述のように、繰返し三軸試験機を使って微小ひずみ $\gamma \leq 10^{-6}$ の初期剛性率 $G_{max} = G_{\gamma=10^{-6}} = G_0$ を試験により直接求めることは容易ではない。そこで、予備試験の場合と同様、緒方らが用いた方法²⁵⁾ に従い、Hardin-Drnevich 式³³⁾ によって初期剛性率 G_0 を推定し、ひずみ依存曲線の数式化を試みた。

図 7.30 (a)~(h) は各ケースの $1/G$ と γ の関係で、この切片と勾配から初期剛性率 G_0 と規準ひずみ γ_r を推定した。 $1/G \sim \gamma$ における回帰直線は、精度的に信頼性のある $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以上のひずみに重点を置き求めている。このように得られた G_0 及び γ_r と平均主応力 σ_m の関係を示したのが図 7.31 ~ 図 7.33 である。図 7.32 の $G_0 / (2.17 - e)^2 / (1 + e) \sim \sigma_m$ の関係において、初期剛性率 G_0 は G 同様両対数グラフ上ではほぼ直線関係にあり、今回の結果はロック材とフィルター材の 2 つのグループに分けて考え、それぞれの G_0 を表わす式は次のようになる。

$$\text{ロック材 (R-12 材, R-7 材)} \quad G_0 = 649 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma_m)^{0.65} \quad \dots\dots\dots (7-8)$$

$$\text{フィルター材 (F-36 材)} \quad G_0 = 435 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma_m)^{0.66} \quad \dots\dots\dots (7-9)$$

上式で G_0 の σ_m に対する勾配は $m = 0.65 \sim 0.66$ で、ロック材とフィルター材の差はなく、 $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の G_0 はフィルター材の方が 30% 程小さくなることがわかる。また G_0 を推定する際に、 $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以上のひずみに着目して求めているためか、 $G - \gamma$ 曲線を外捜して求めた $G_{\gamma=10^{-5}}$ 値よりも小さなものが多かった。

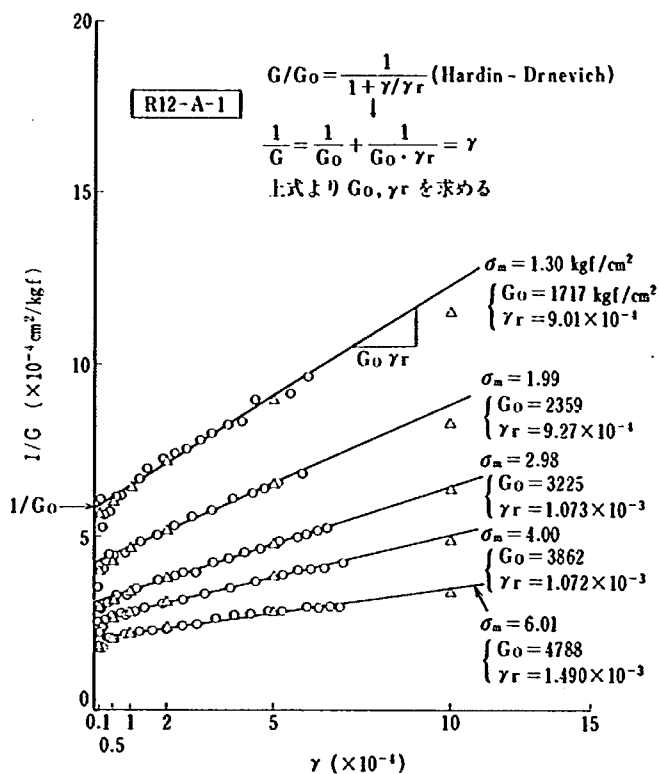


図 7.30(a) G_0, γ_r の推定 (R12-A-1)

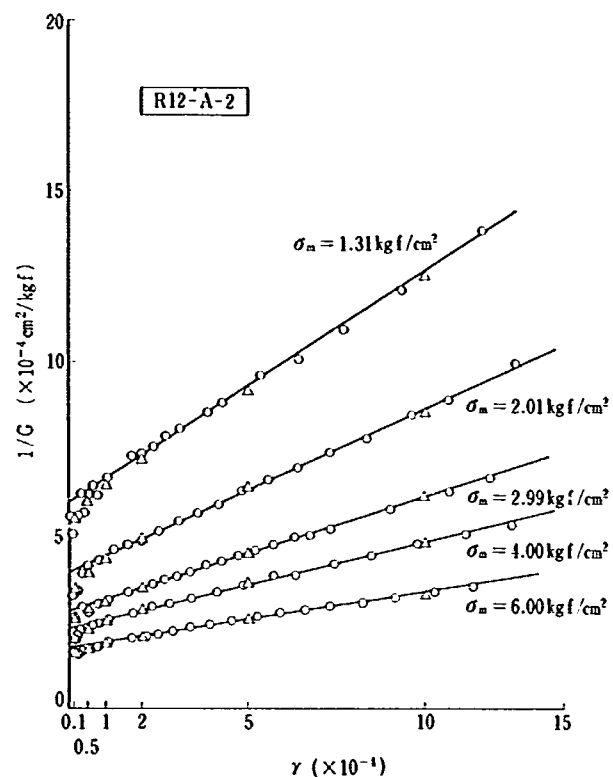


図 7.30(b) G_0, γ_r の推定 (R12-A-2)

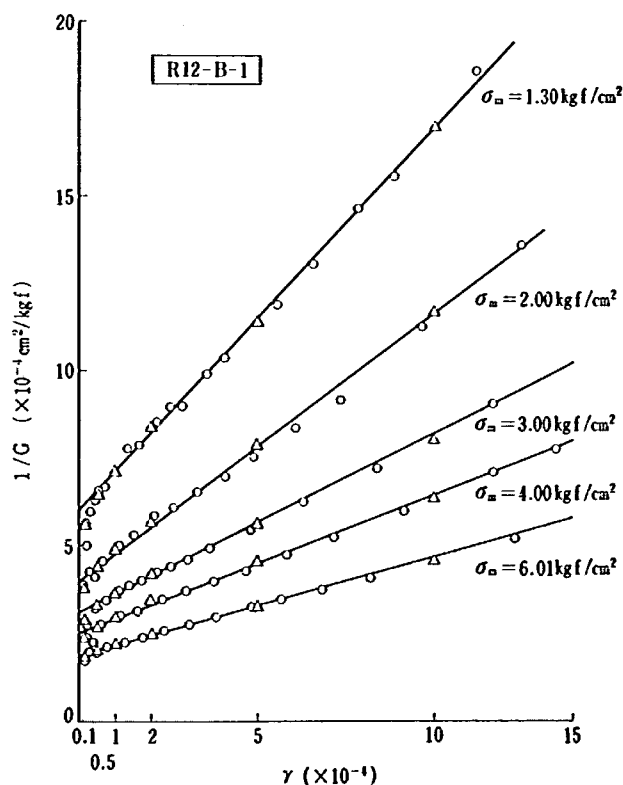


図 7.30(c) G_0, γ_r の推定 (R12-B-1)

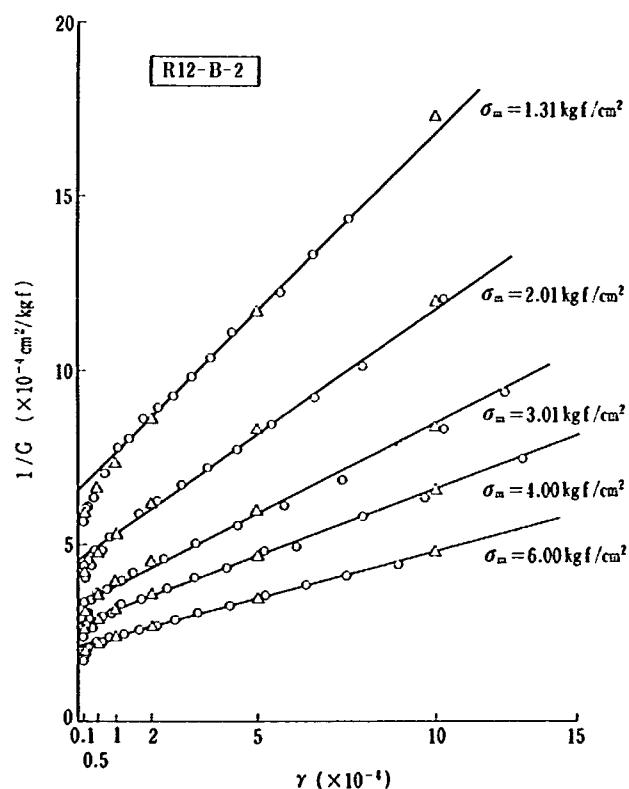


図 7.30(d) G_0, γ_r の推定 (R12-B-2)

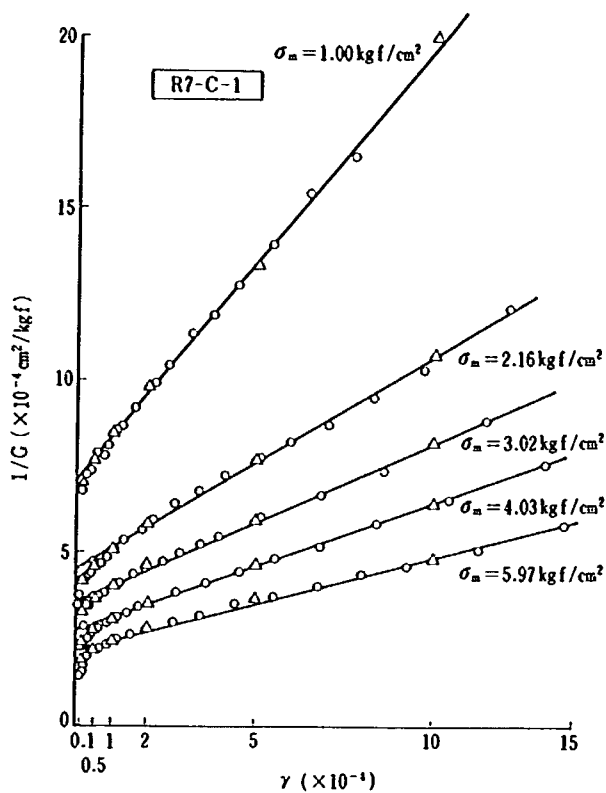


図 7.30(e) G_0, γ_r の推定 (R7-C-1)

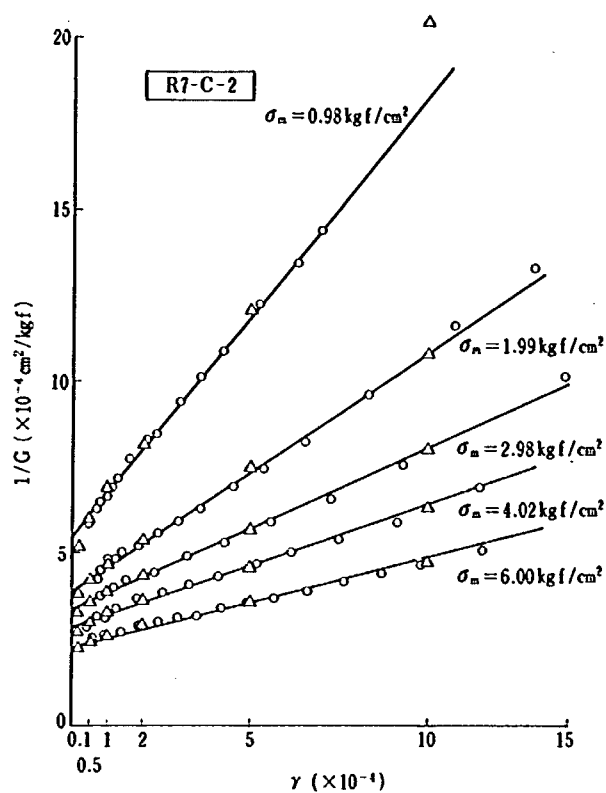


図 7.30(f) G_0, γ_r の推定 (R7-C-2)

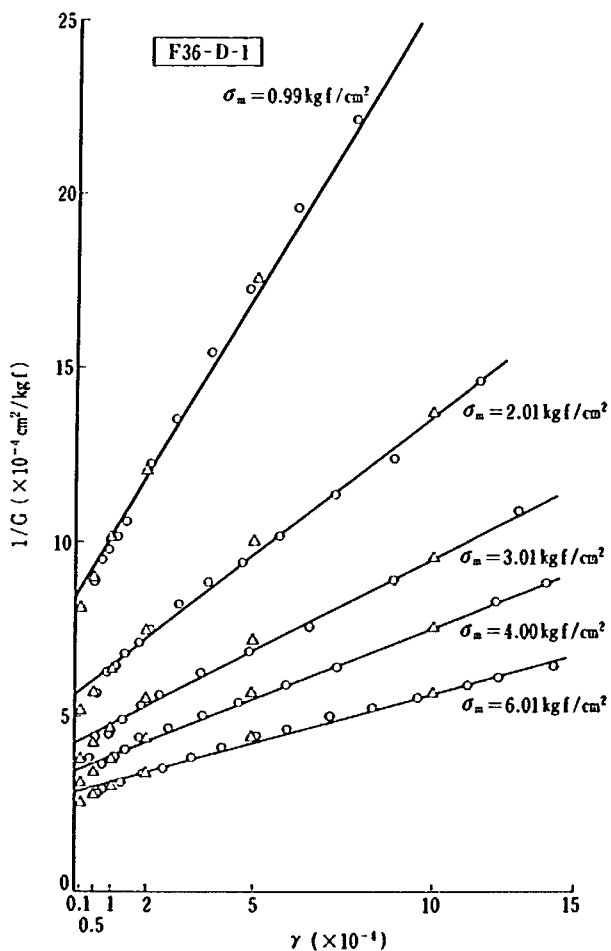


図 7.30(g) G_0, γ_r の推定 (F36-D-1)

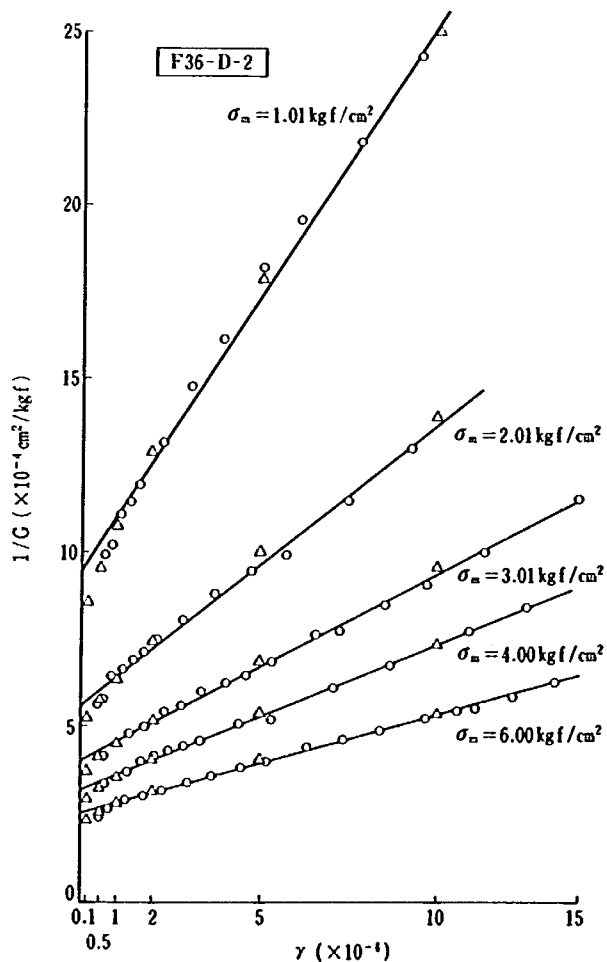


図 7.30(h) G_0, γ_r の推定 (F-36-D-2)

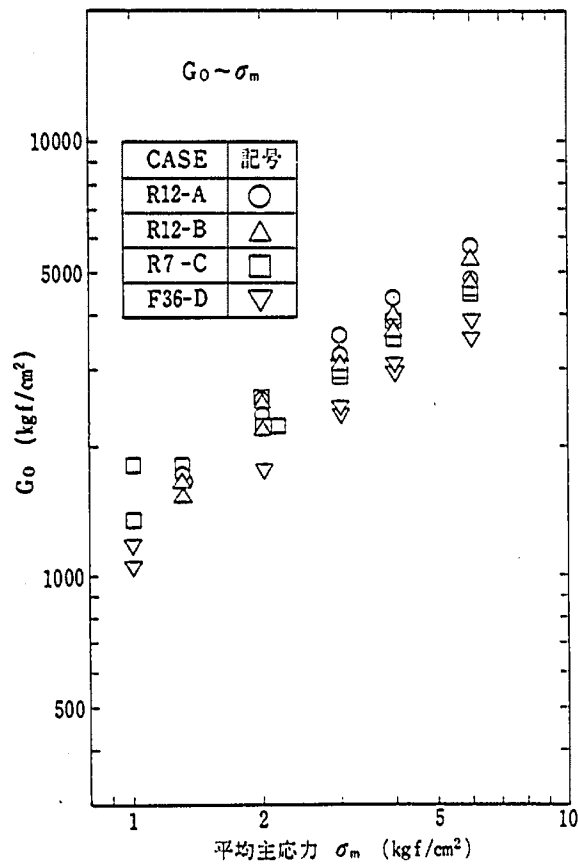


図 7.31 推定した G_0 と σ_m の関係

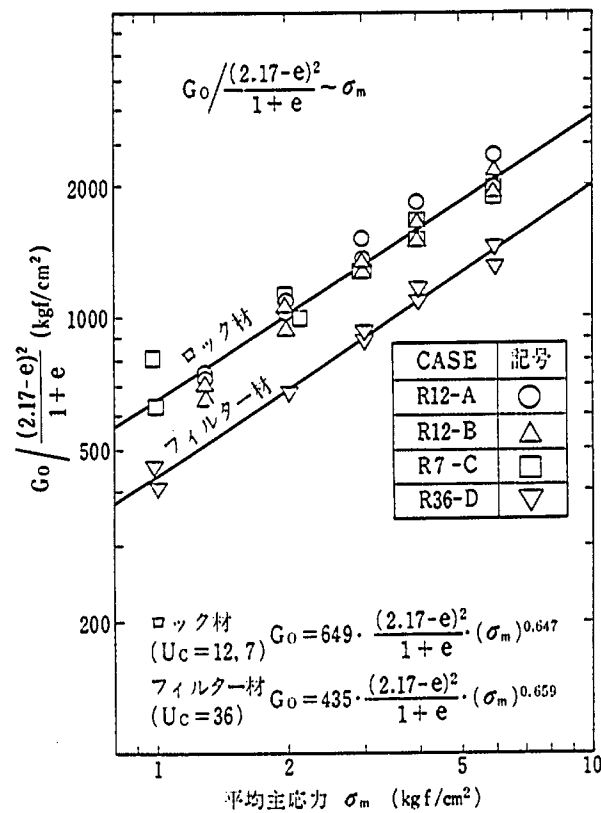


図 7.32 $G_0 / \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ と σ_m の関係

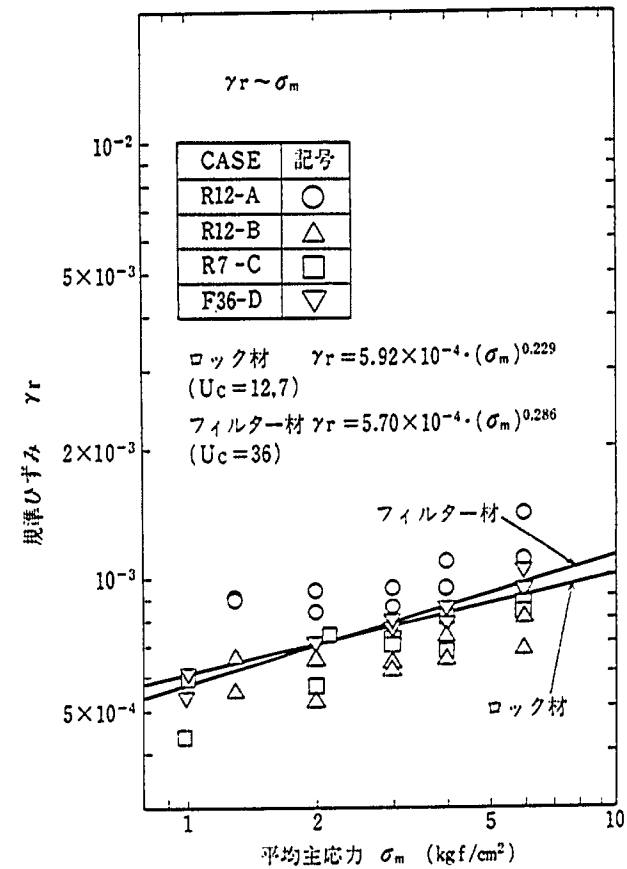


図 7.33 推定した γ_r と σ_m の関係

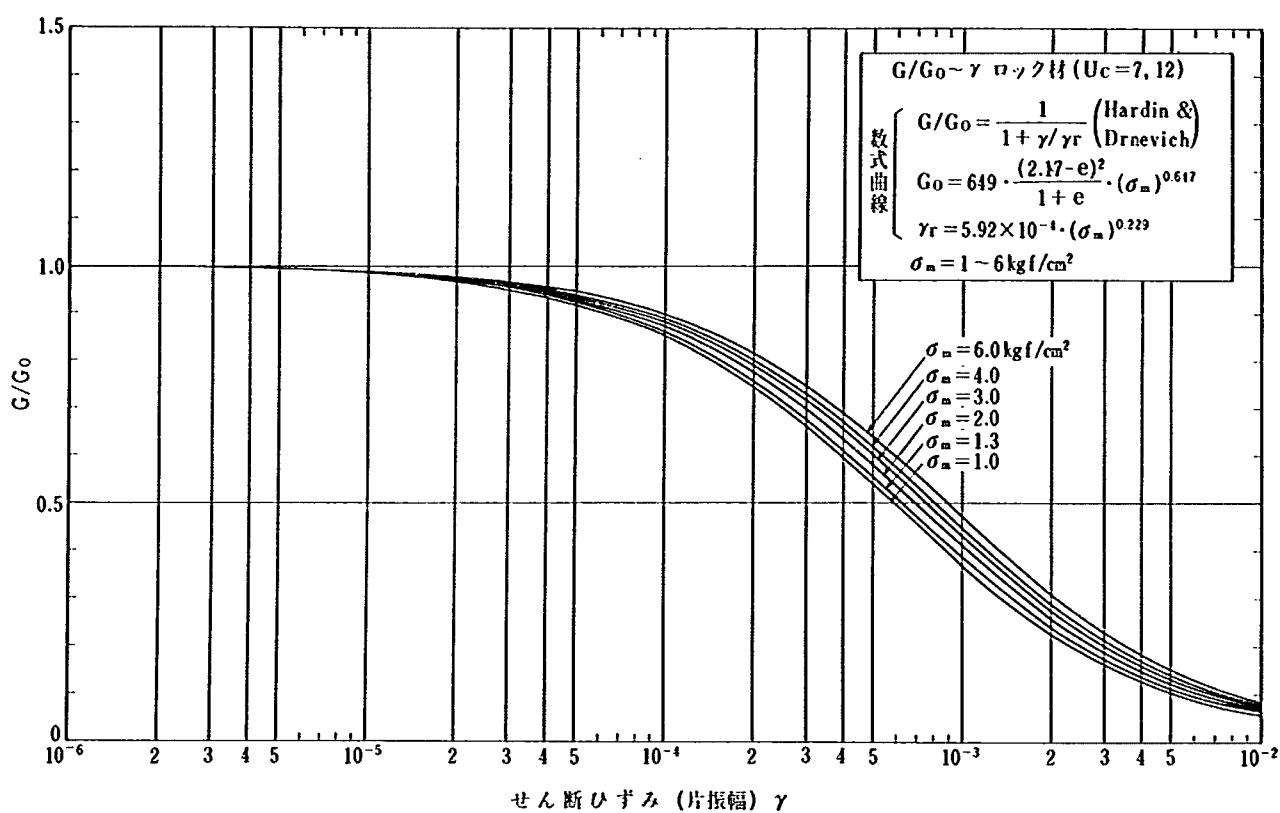


図 7.34 Hardin-Drnevich の式による $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材 $U_c = 7, 12$)

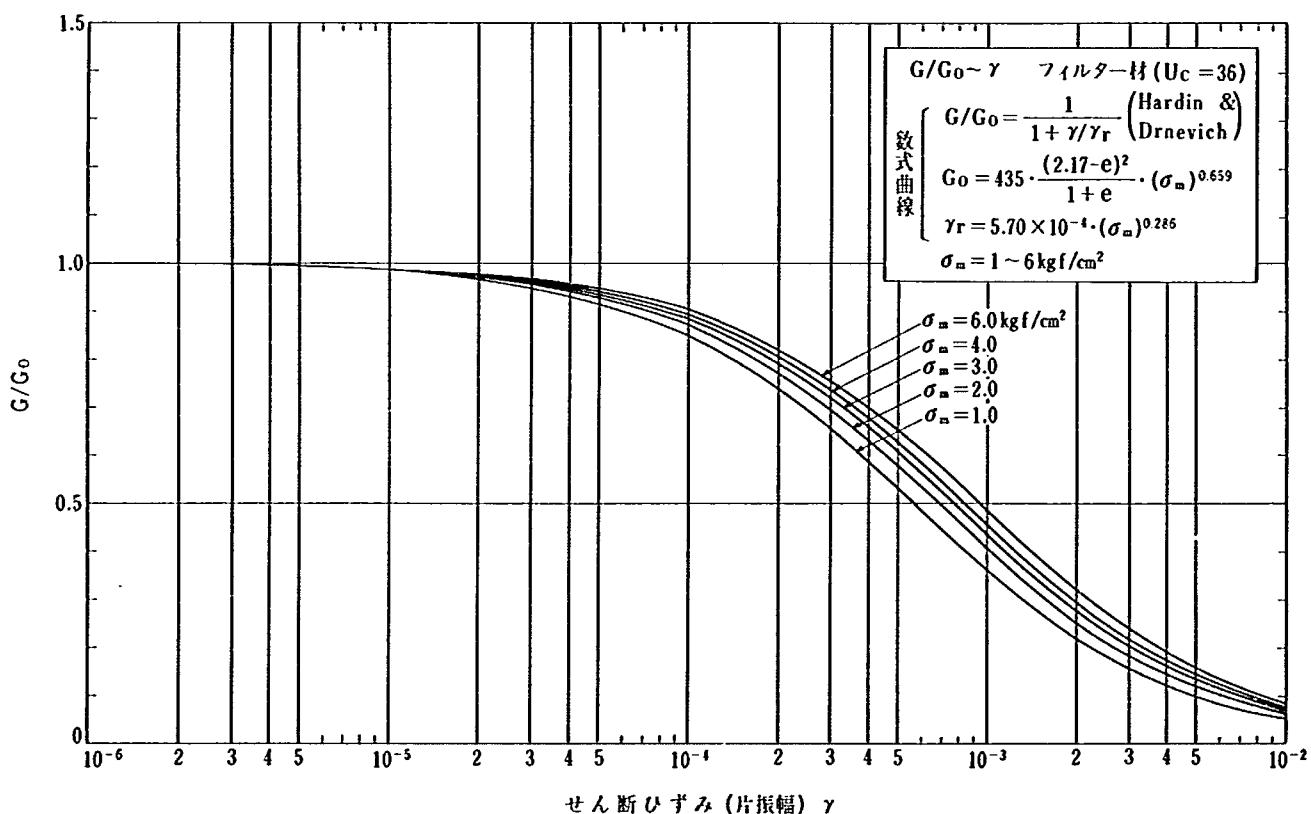


図 7.35 Hardin-Drnevich の式による $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルター材 $U_c = 36$)

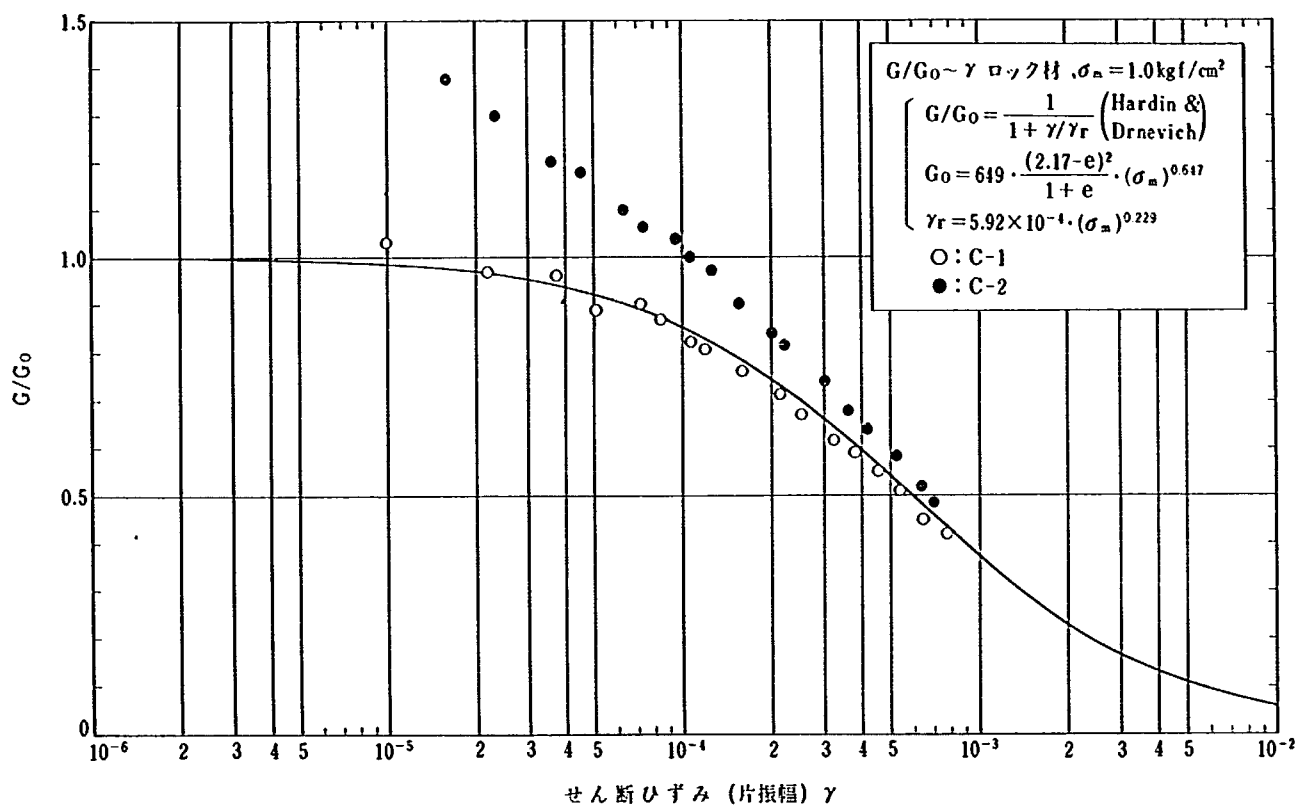


図 7.36(a) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

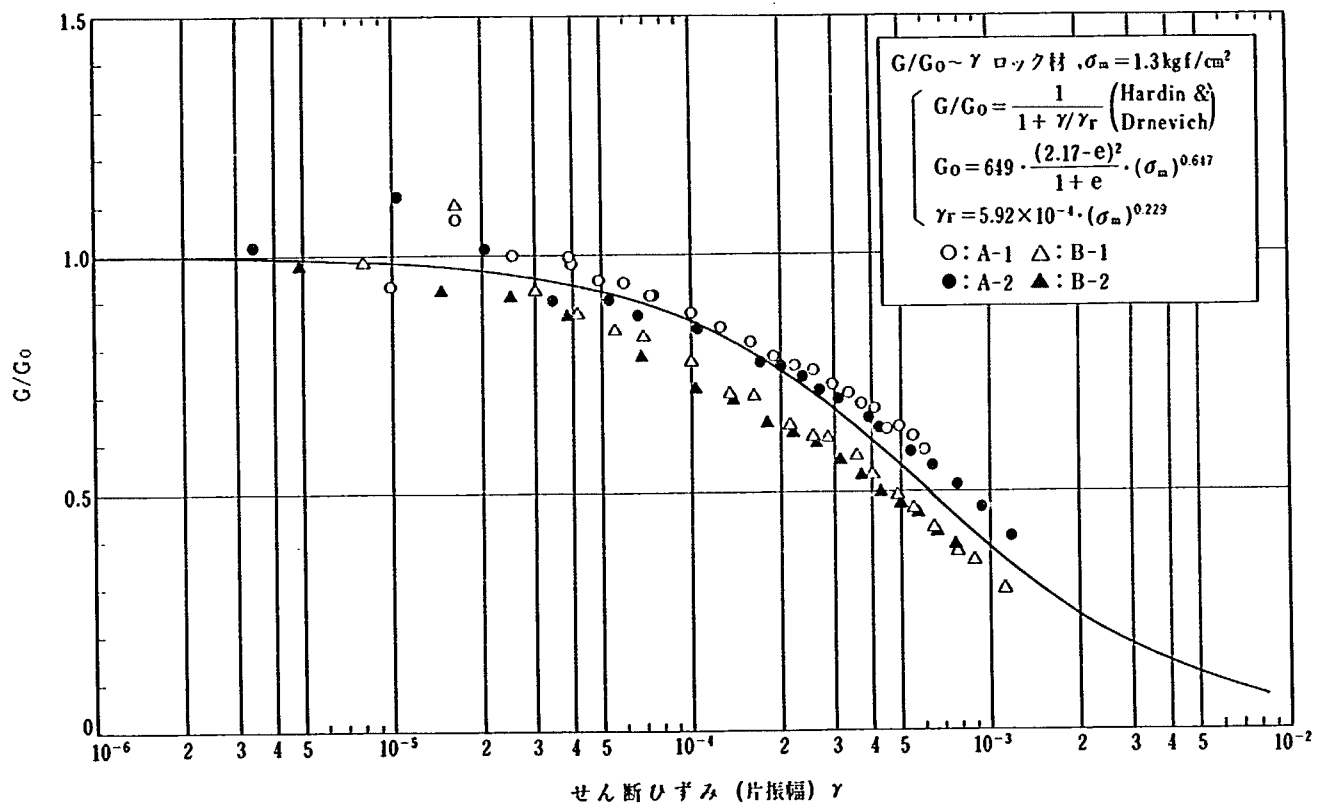


図 7.36(b) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 1.3 \text{ kgf/cm}^2$)

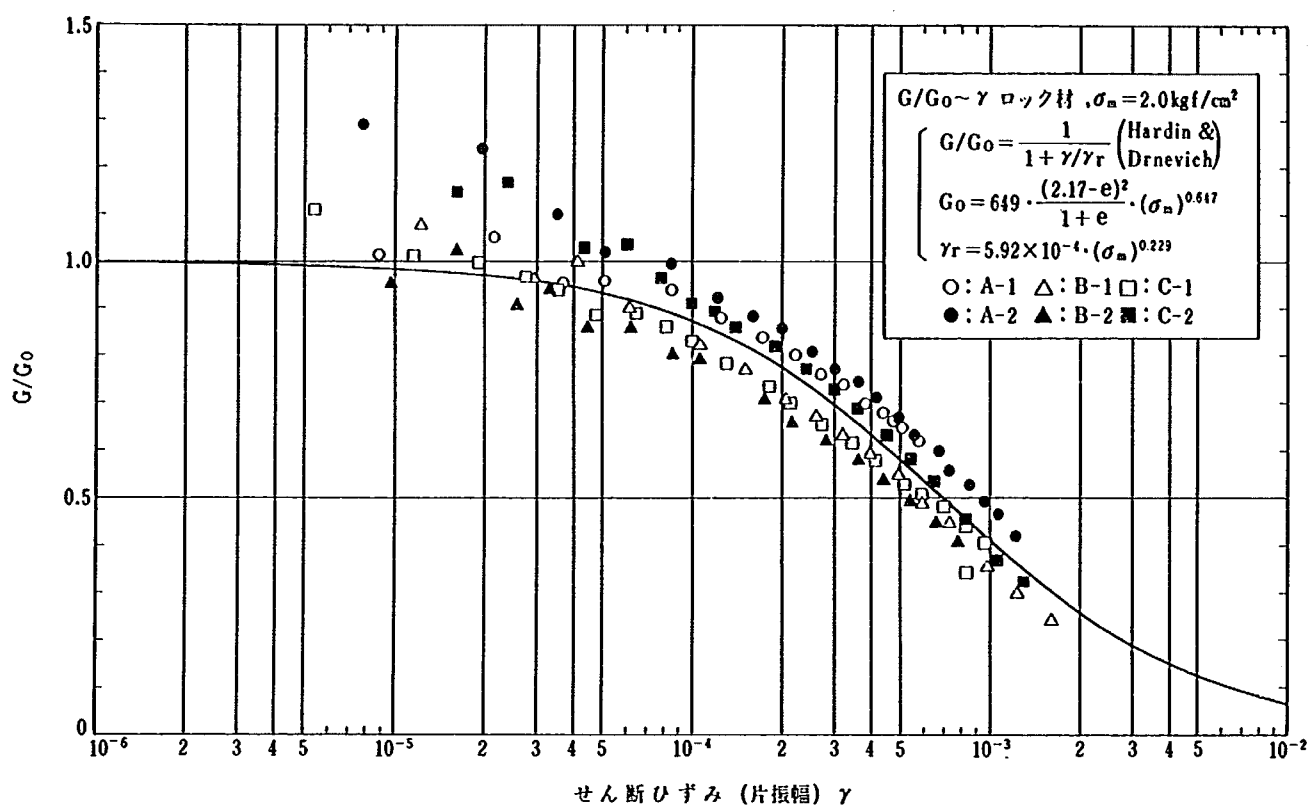


図 7.36(c) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

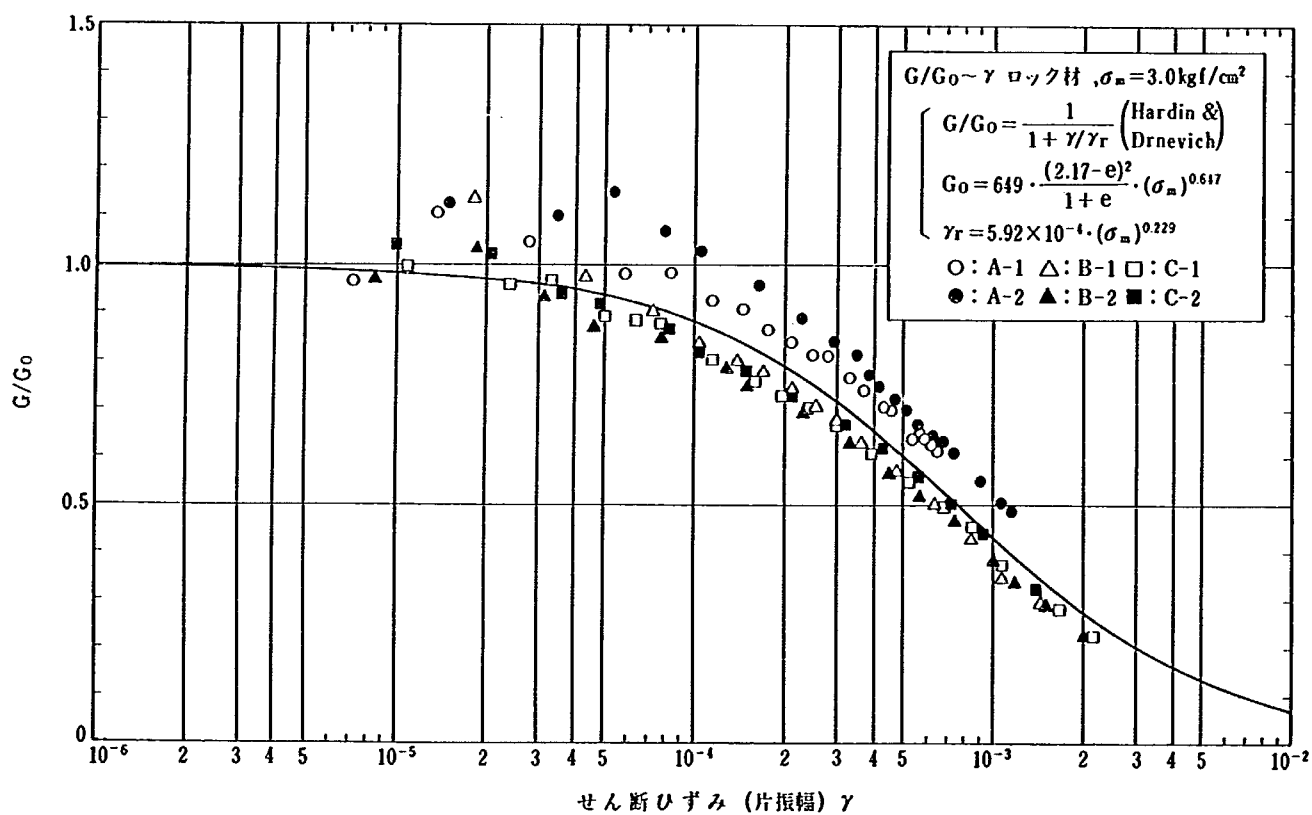


図 7.36(d) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$)

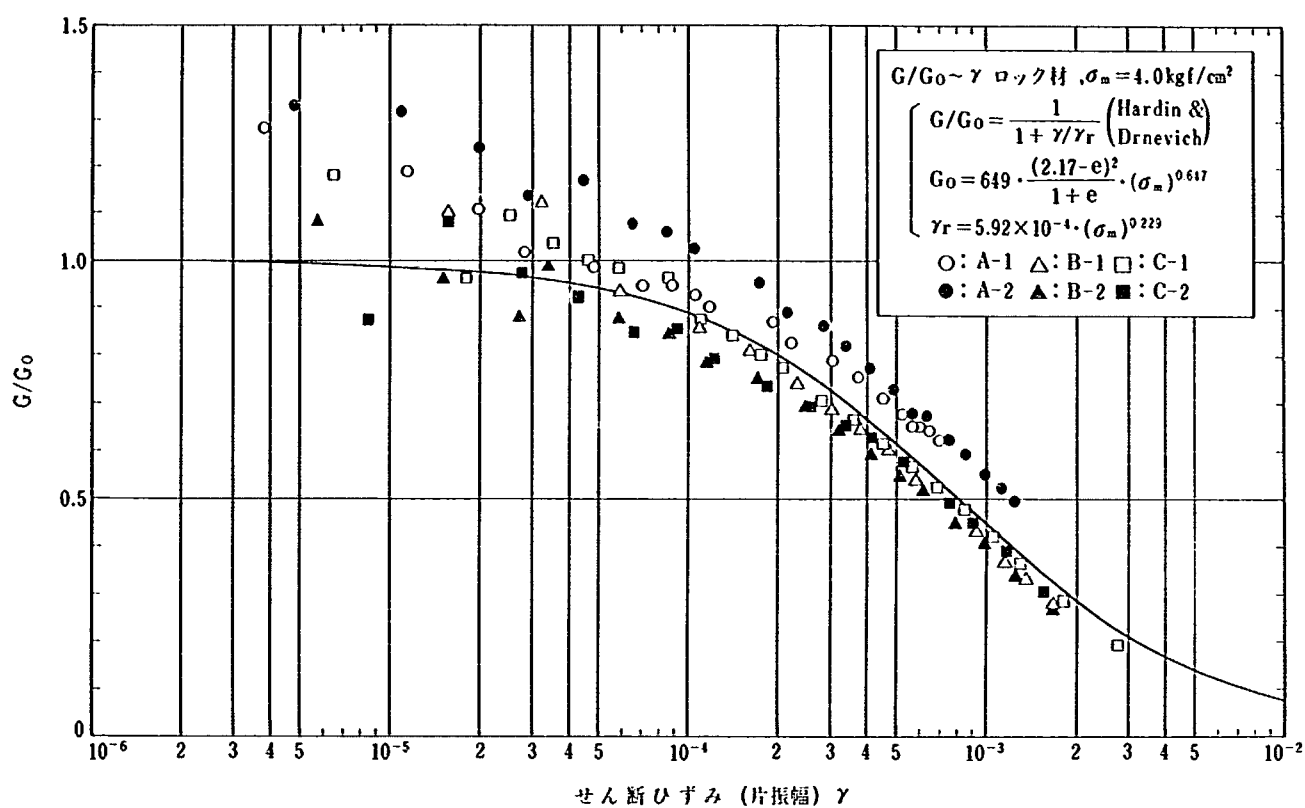


図 7.36(e) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

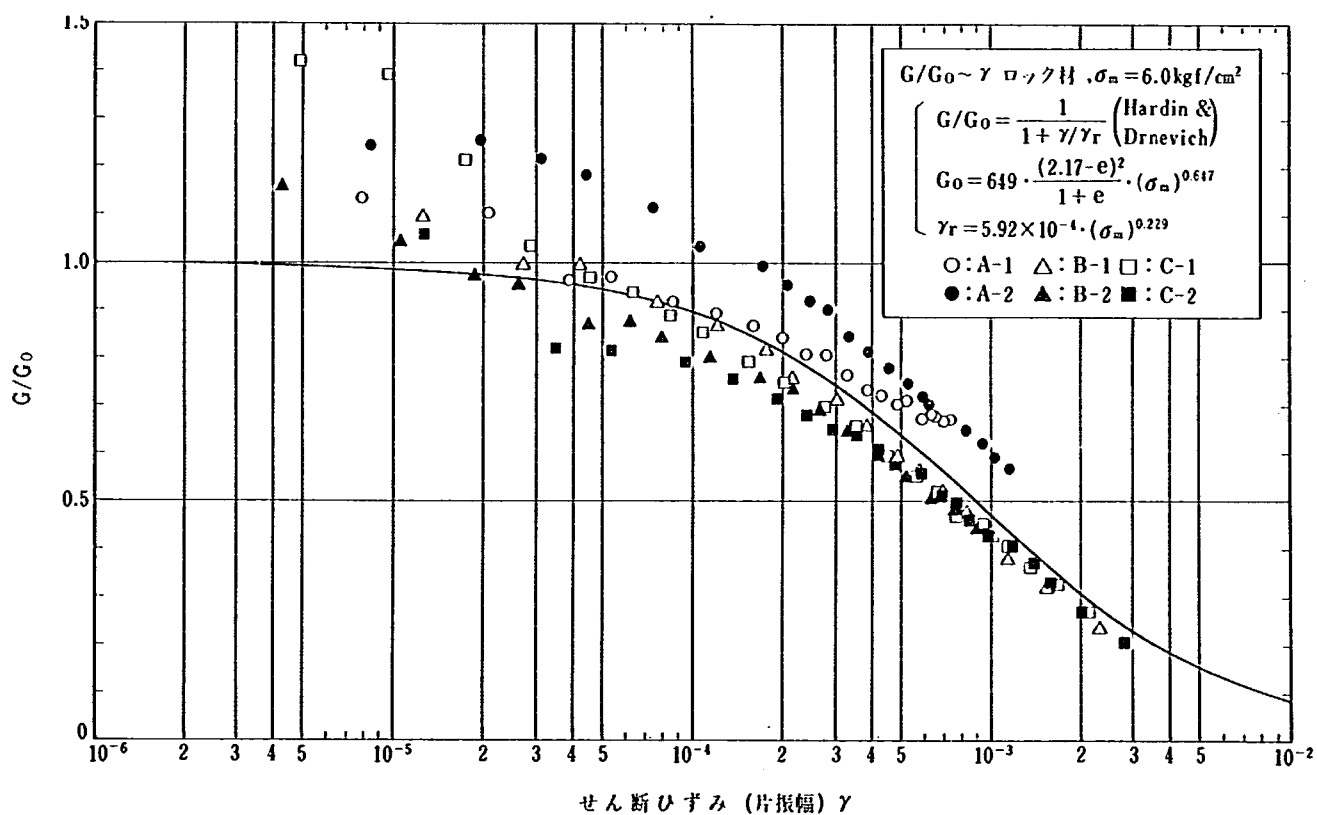


図 7.36(f) $G/G_0 \sim \gamma$ (ロック材, $\sigma_m = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$)

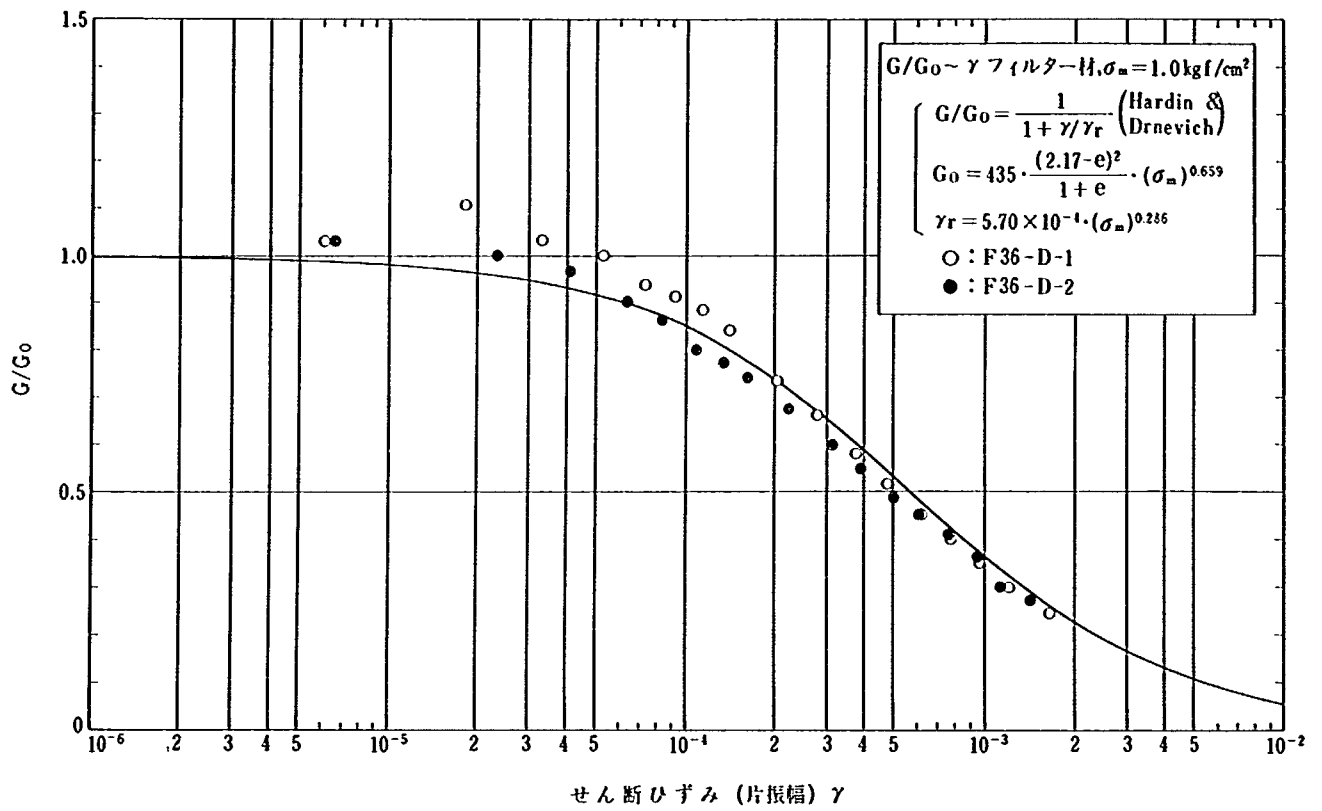


図 7.37(a) $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルタ材, $\sigma_m = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

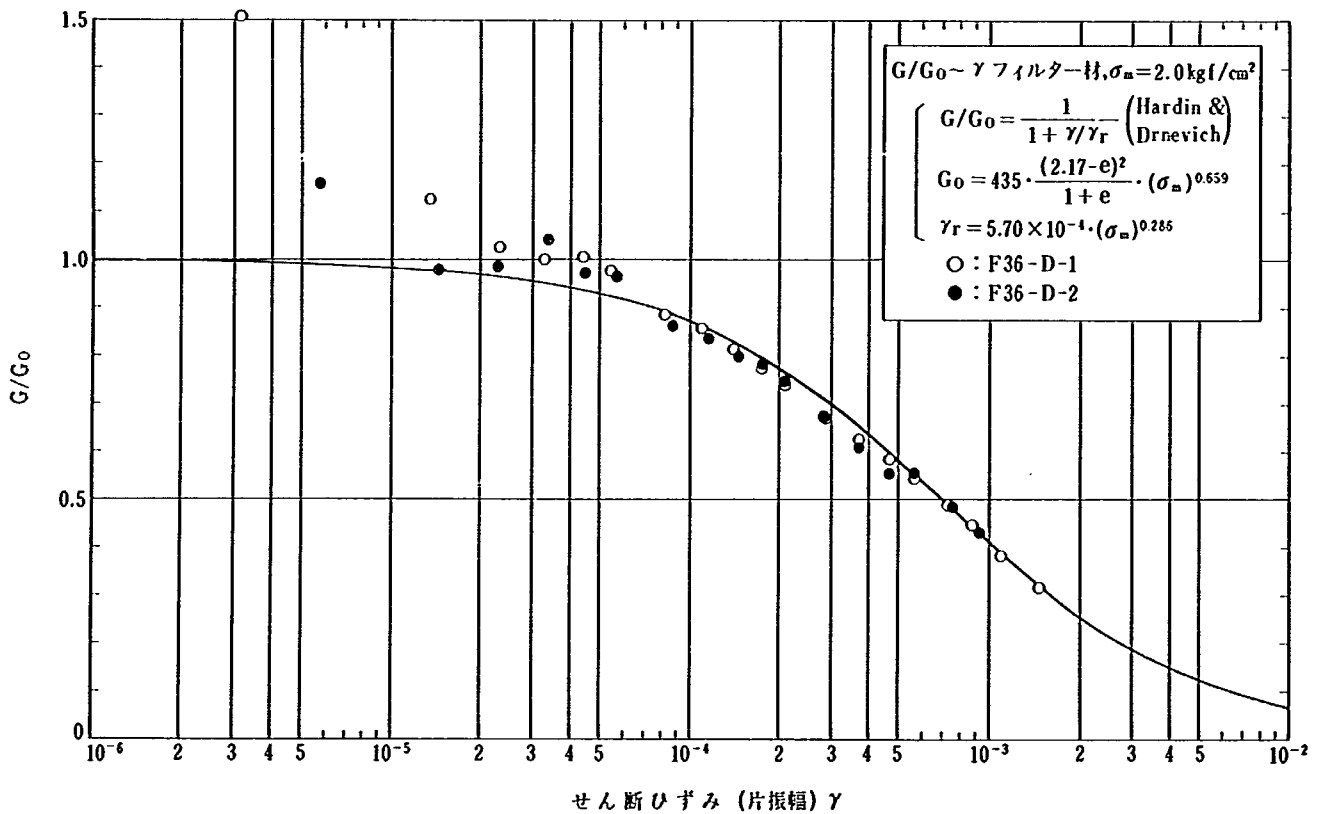


図 7.37(b) $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルタ材, $\sigma_m = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)

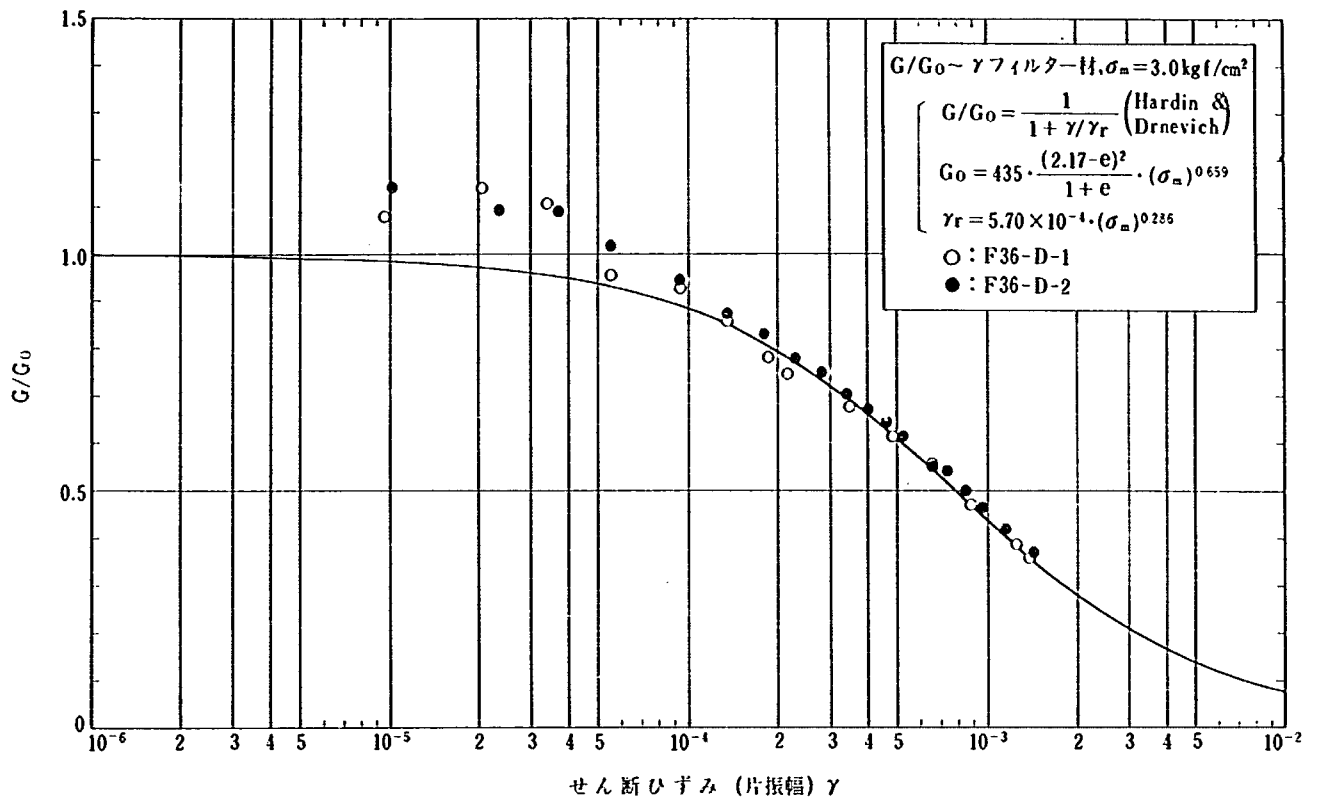


図 7.37(c) $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルター材, $\sigma_m = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$)

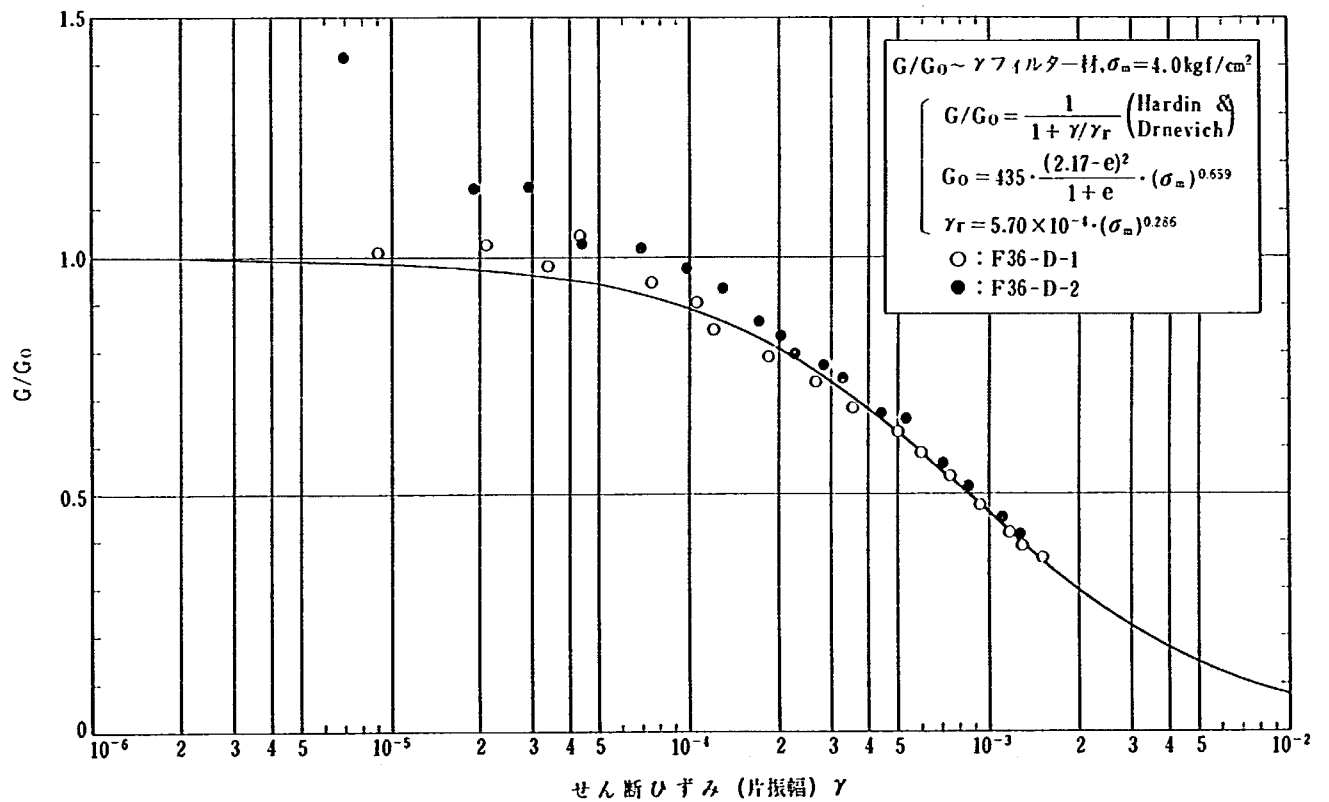


図 7.37(d) $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルター材, $\sigma_m = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

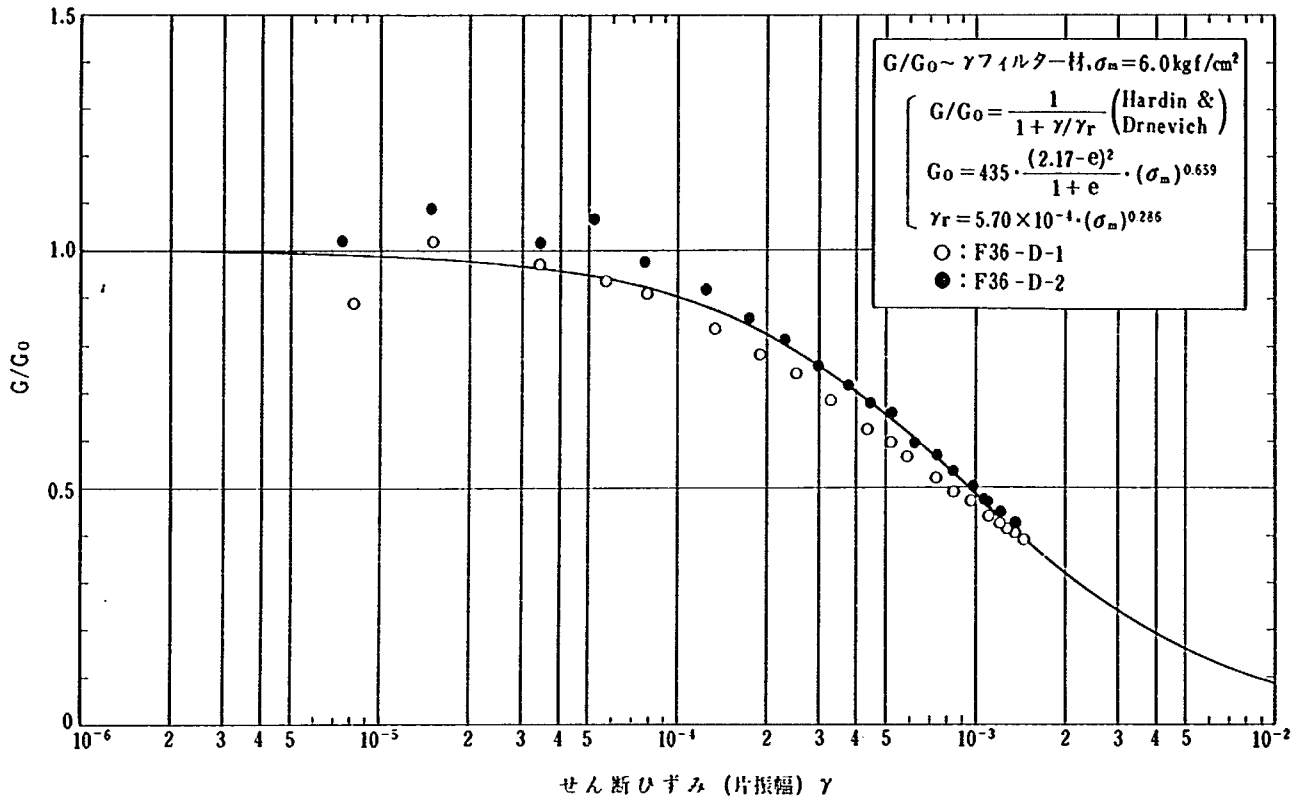


図 7.37(e) $G/G_0 \sim \gamma$ (フィルター材, $\sigma_m = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$)

次に、規準ひずみ γ_r は Hardin-Drnevich の双曲線式³³⁾

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \dots\dots\dots (7-10)$$

において、 G の値が G_0 の半になるひずみを示し、拘束圧の関数となっていることが図 7.33 の $\gamma_r \sim \sigma_m$ の関係からわかる。この結果では大きなバラツキが認められるが、一応 σ_m の関数と考えロック材とフィルター材でそれぞれ直線近似すると、次式のような関係が得られた。

$$\text{ロック材 (R-12 材, R-7 材)} \quad \gamma_r = 5.92 \times 10^{-4} \times (\sigma_m)^{0.229} \quad \dots\dots\dots (7-11)$$

$$\text{フィルター材 (F-36 材)} \quad \gamma_r = 5.70 \times 10^{-4} \times (\sigma_m)^{0.286} \quad \dots\dots\dots (7-12)$$

以上のようにして得られた $G_0 \cdot \gamma_r$ から、ロック材とフィルター材の数式による剛性率のひずみ依存曲線 $G/G_0 \sim \gamma$ を示したのが図 7.34, 図 7.35 である。また、これらの数式曲線と実測値の合致性を調べたのが、図 7.36(a)~(f) (ロック材) と図 7.37(a)~(e) (フィルター材) である。これらを見ると、ロック材でも片振り試験 ($\sigma_1/\sigma_3 = 2$, R12-A) の値は、どの拘束圧においても両振試験 ($\sigma_1/\sigma_3 = 1$, R12-B, R7-C) のグループとは異なっており、しかもグラフ上で上側へのずれが大きい。これは主応力比 σ_1/σ_3 の違いが影響しているものと思われ、数式化グループをさらに分けて考えれば合致性が良くなるであろう。また、 $\gamma = 10^{-4}$ 以下のひずみでは数式曲線と実測値の差が目立ち、特に R7-C-1 の $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ のようなケースもみられるが、これ以上のひずみになるとロック材・フィルター材共に、数式曲線と実測値とは比較的合致していると考えられる。

このように、剛性率のひずみ依存性にHardin-Drnevich の双曲線式をあてはめてみたところ、一部に合致性の良くない所もあるが、全体的には今回のロック材・フィルター材の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を、 $\gamma = 10^{-4}$ 以上のひずみ領域においてこの双曲線式でほぼ表示できることがわかった。

図7.38は減衰定数 h のひずみ依存曲線が、拘束圧によって変化する範囲をロック材・フィルター材及び豊浦砂の結果を合せて同一グラフ上で比較したものである。図7.9～図7.12あるいは図6.2にも示したように、拘束圧の違いによって $h \sim \gamma$ 曲線はそれぞれある幅を持った帯状の範囲に分布しているが、ひずみが $\gamma \approx 5 \times 10^{-4}$ までは h は豊浦砂が最も小さく、次にロック材、フィルター材の順になっている。これ以上のひずみ、特に $\gamma = 10^{-3}$ 以上になると h は急激に大きくなるとともに、各材料の分布範囲は近付いてくる傾向がある。

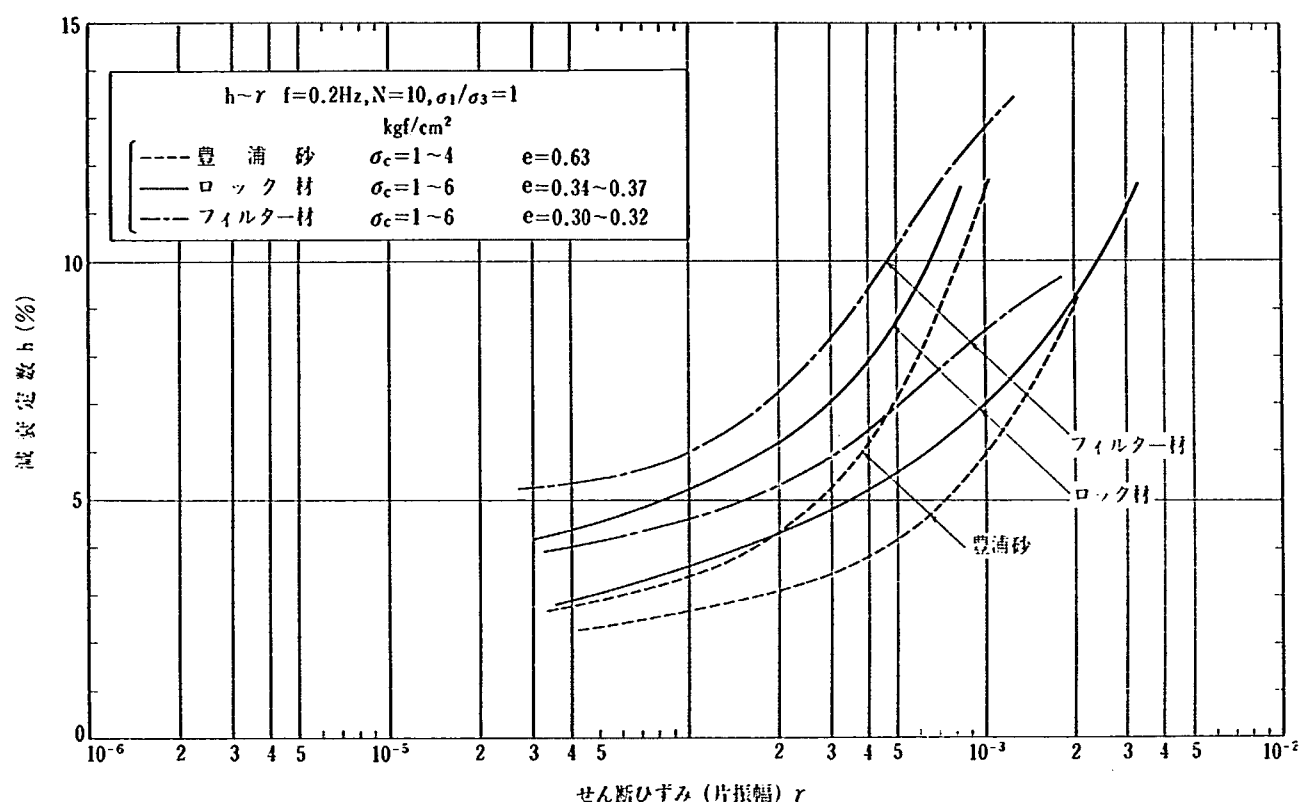


図 7.38 各材料の $h \sim \gamma$ の関係

7.6 主応力比の影響

主応力比 σ_1/σ_3 の影響については、今回の試験の中でロック材 (R-12材) で $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ と $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ の場合を実施しているが、さらに同じ R-12材を使って主応力比を細かく変えて比較してみたのが、補足試験 (R12-E, R12-F) の 2 ケースである。

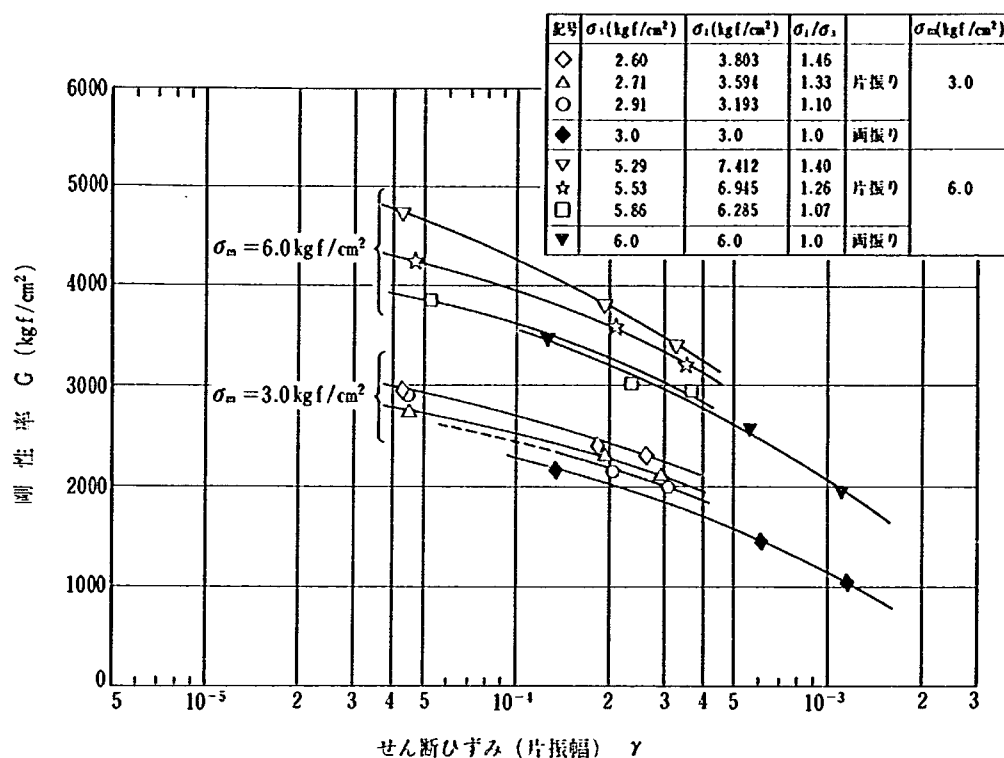


図 7.39 主応力比を変えた $G \sim \gamma$ 曲線 (R-12材)

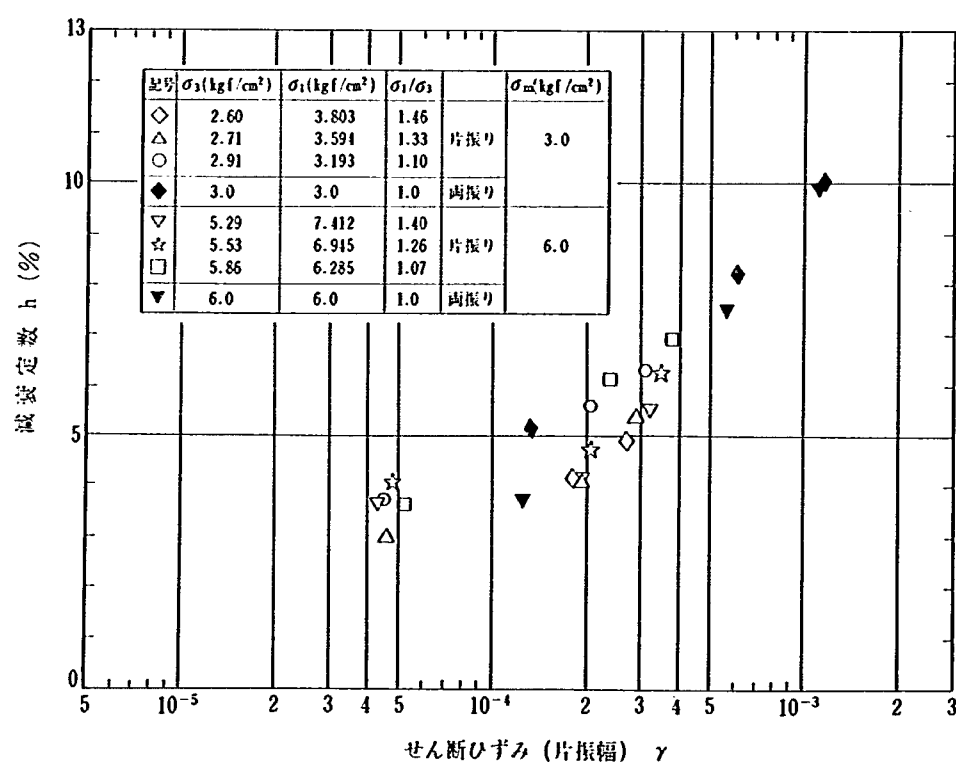


図 7.40 主応力比を変えた $h \sim \gamma$ 曲線 (R-12材)

図 7.39, 図 7.40 は, 平均主応力 $\sigma_m = 3, 6 \text{ kgf/cm}^2$ と一定に保ったまま主応力比を $\sigma_1/\sigma_3 \approx 1.0 \sim 1.5$ ま で変えた時の $G \cdot h$ のひずみ依存曲線である。図 7.39 によれば $\sigma_1/\sigma_3 \approx 1.0 \sim 1.5$ の範囲では, 主応力比 の増加とともに G は大きくなる傾向にある。また図 7.40 をみると, 今回の結果からは h に与える主応力 比の影響は, ほとんどないことがわかる。

図 7.39 の $G \sim \gamma$ 曲線から, 共通のひずみ $\gamma = 2 \times 10^{-4}$ における G と σ_1/σ_3 の関係 を示したのが図 7.41 である。図中縦軸には $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ における G を基準にして, $\sigma_1/\sigma_3 \neq 1$ における G との比をとっており, また, $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ の値は R-12 材の 2 ケースを示 している。

これによれば $\sigma_m = 3, 6 \text{ kgf/cm}^2$ いずれの 場合も, $\sigma_1/\sigma_3 = 1 \sim 2$ の間では主応力比 の増加に伴って剛性率も増してゆくことが わかる。

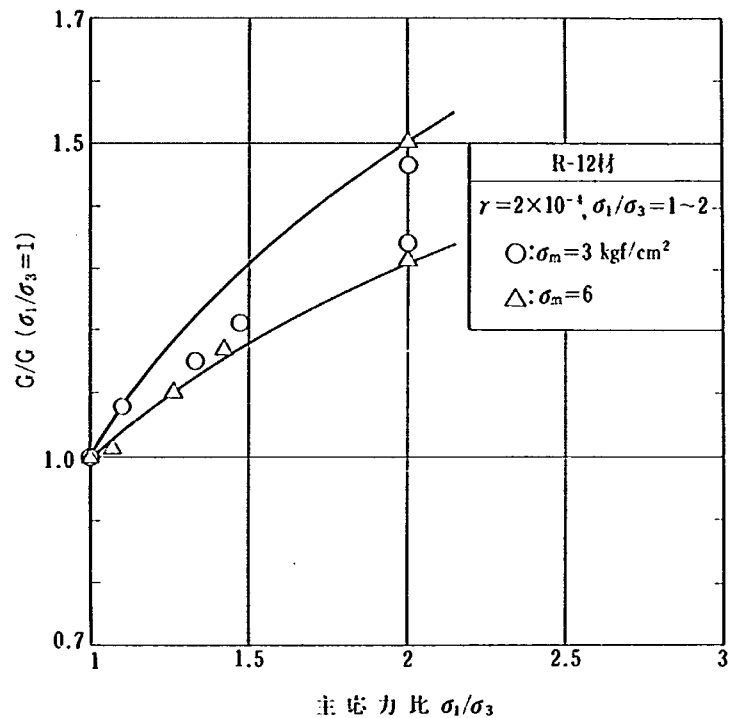


図 7.41 G に与える主応力比の影響
 $G/G (\sigma_1/\sigma_3=1 \text{ のとき}) \sim \sigma_1/\sigma_3$ (R-12 材)

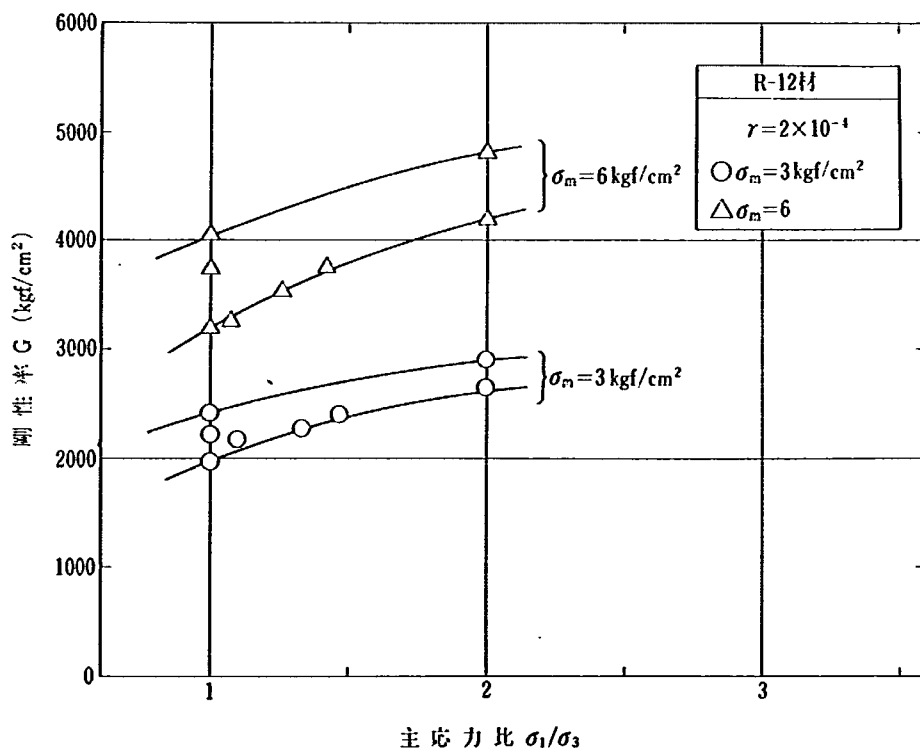


図 7.42 G に与える主応力比の影響 $G \sim \sigma_1/\sigma_3$ (R-12 材)

次に、改良前の R55・56 材で主応力比を $\sigma_1/\sigma_3 = 2, 3$ に変えて試験を行っており、これらと R-12 材、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1, 2$ の結果を比較してみる。図 7.43, 図 7.44 は、R55・56 材の $G \sim \sigma_m$ の関係である。またこれらの結果と、R-12 材 ($\sigma_1/\sigma_3 = 1, 2$) の結果を $G \sim \sigma_m$ の両対数グラフで比較したのが図 7.45(a)~(c) である。 $\gamma = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ のいずれのひずみにおいても、主応力比 σ_1/σ_3 が大きくなると G が増す結果が得られ、特に、低い平均主応力 ($\sigma_m = 1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$) ではこの傾向が強いようである。しかし、これも R-12 材と R55・56 材での材料の相異や試験条件の違い等を考慮したうえで比較しないと、明確なことは言えない。図 7.46 は σ_m のべき乗数 m のひずみに対する変化を R-12 材と R55・56 材で比較したもので、 σ_1/σ_3 が大きくなるに従い m が小さくなり、龍岡ら¹³⁾ や国生ら¹⁹⁾ が示した豊浦砂の結果に近づく傾向がみられる。

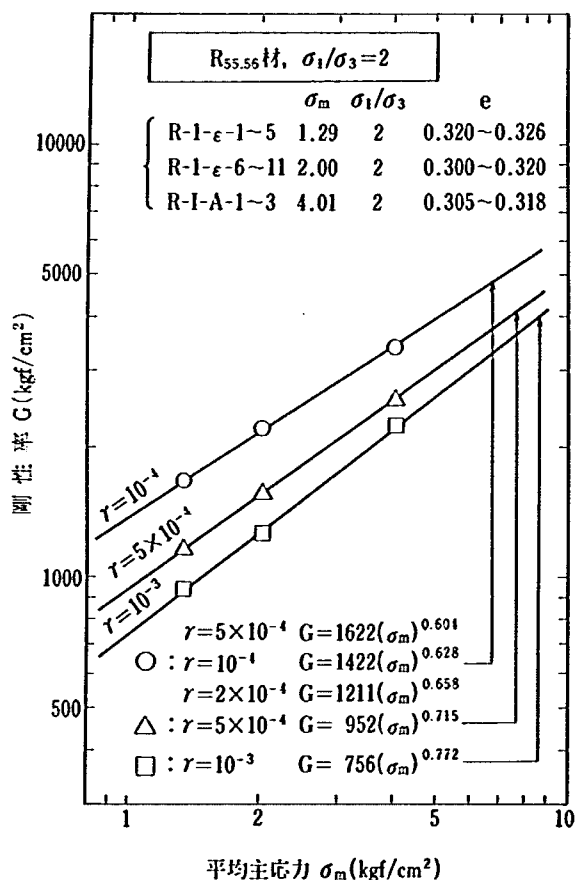


図 7.43 R55・56 材の G と σ_m の関係 ($\sigma_1/\sigma_3 = 2$)

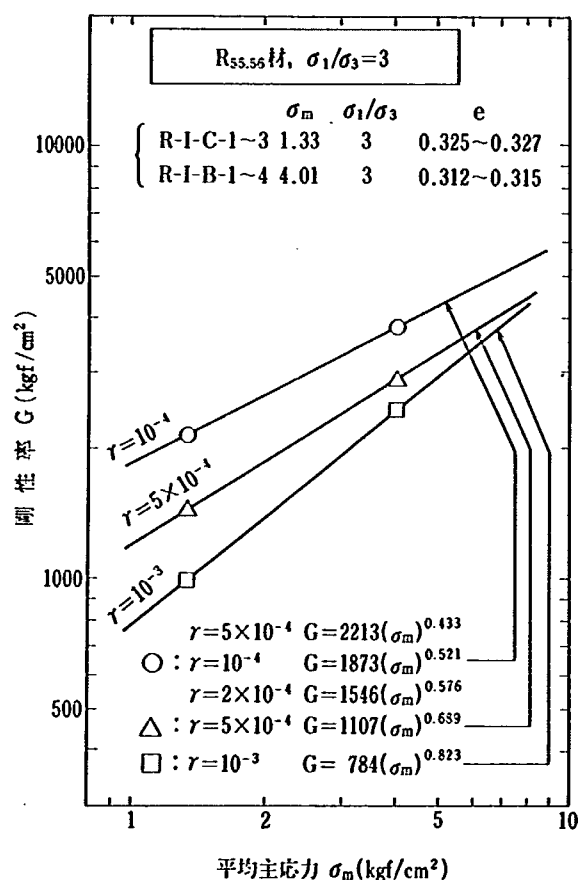


図 7.44 R55・56 材の G と σ_m の関係 ($\sigma_1/\sigma_3 = 3$)

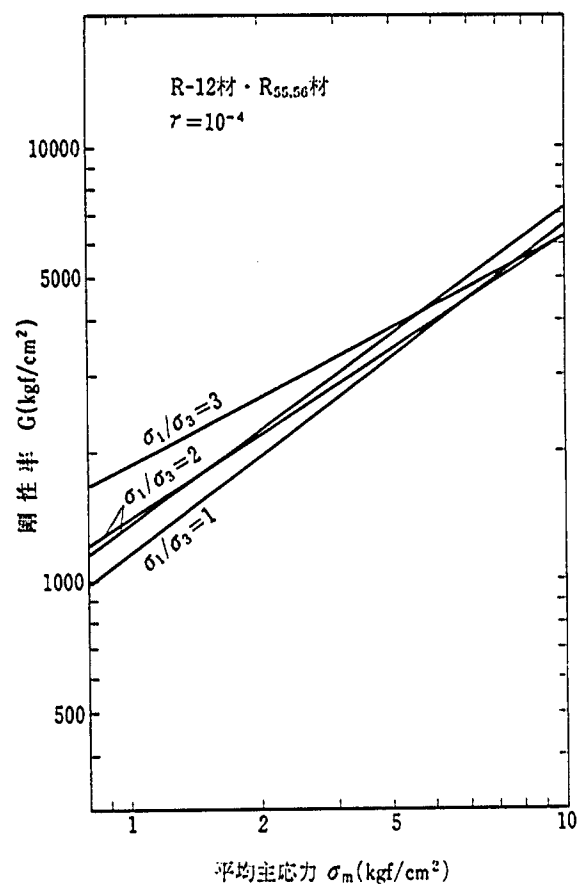


図 7.45 (a) $G \sim \sigma_m$ の主応力比の違い
($\gamma = 10^{-4}$)

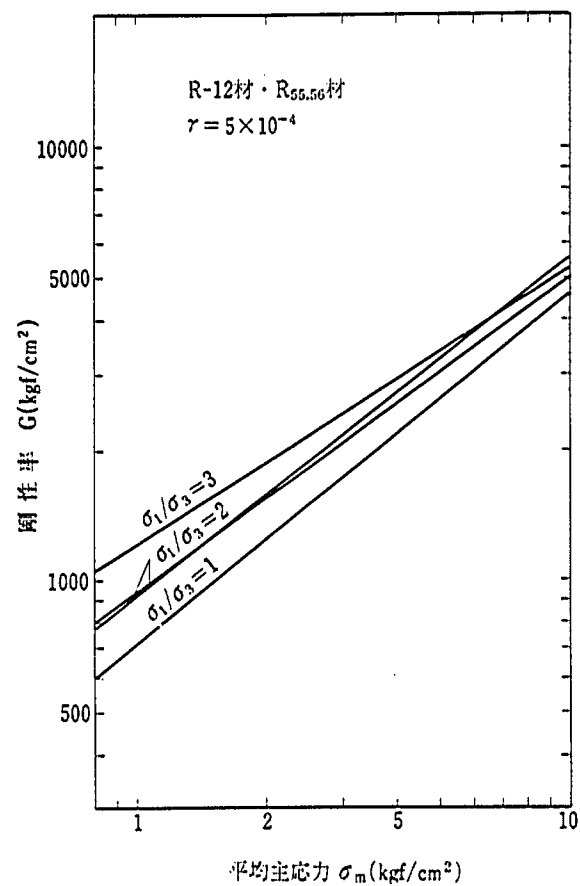


図 7.45 (b) $G \sim \sigma_m$ の主応力比の違い
($\gamma = 5 \times 10^{-4}$)

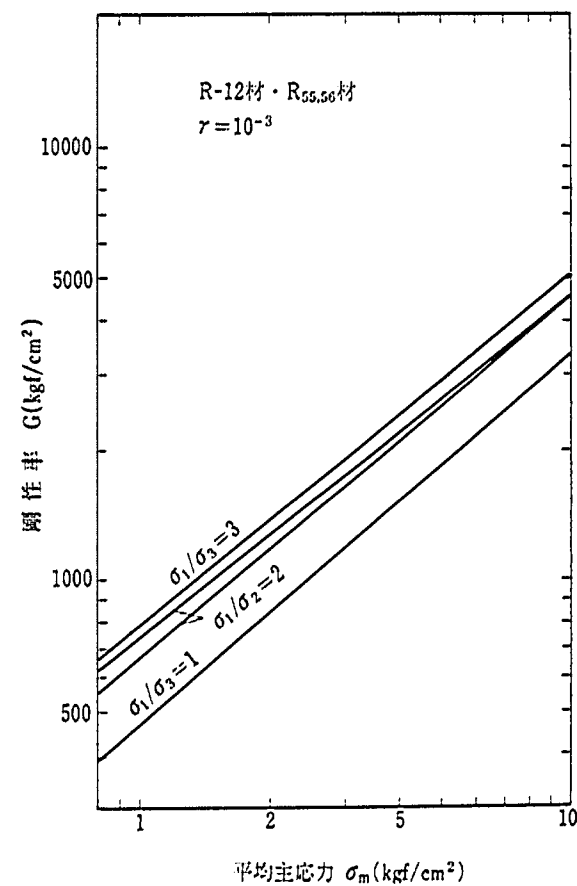


図 7.45 (c) $G \sim \sigma_m$ の主応力比の違い
($\gamma = 10^{-3}$)

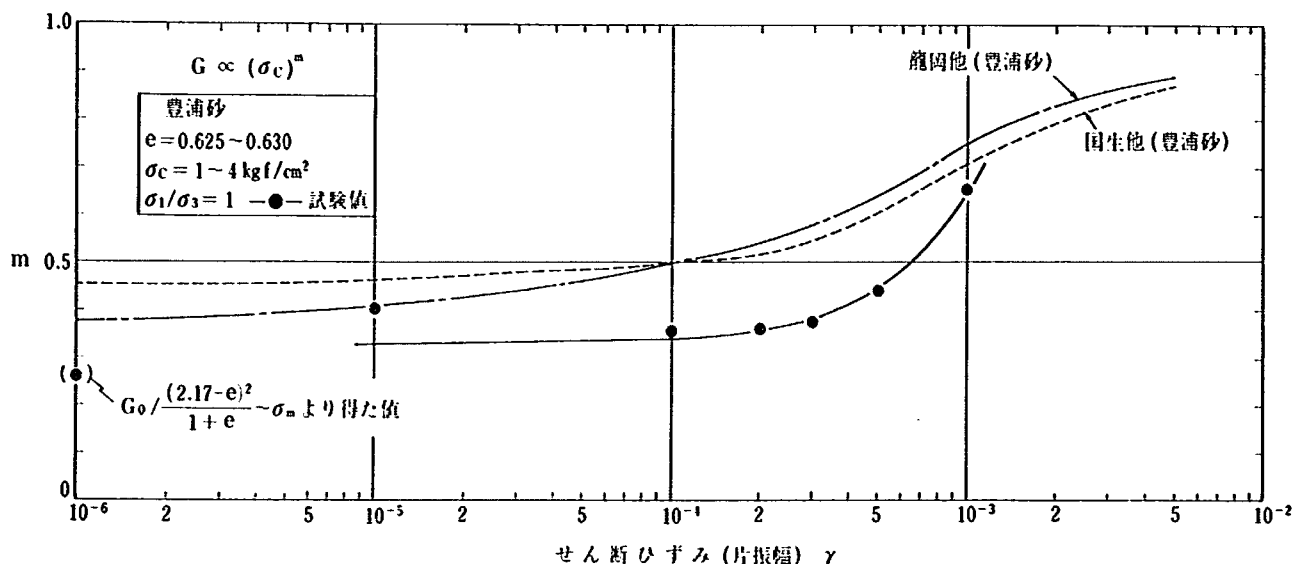


図 7.46 主応力比の違いによるべき乗 m と γ の関係

図 7.41 のように $G/G_{(\sigma_1/\sigma_3=1)}$ で整理する場合、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ における G がばらついていると基準となる G を決めにくい。そこで、 G の値そのものと主応力比 σ_1/σ_3 の関係で示したのが図 7.42, 図 7.47 である。R-12 材の主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ での結果にややバラツキがみられるが、いずれにしても今回の粗粒材（ロック材, $U_c = 12$ ）の繰返し三軸試験では、主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 1 \sim 2$ の間では剛性率 G は増加する傾向にあることがわかった。これは両振り試験（ $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ ）に比べ片振り試験（ $\sigma_1/\sigma_3 \neq 1$ ）では、繰返し荷重が与えられるたびに軸ひずみが圧縮側へ移行し、供試体が締固まり密な状態が形成されるためではないかと考えられる。

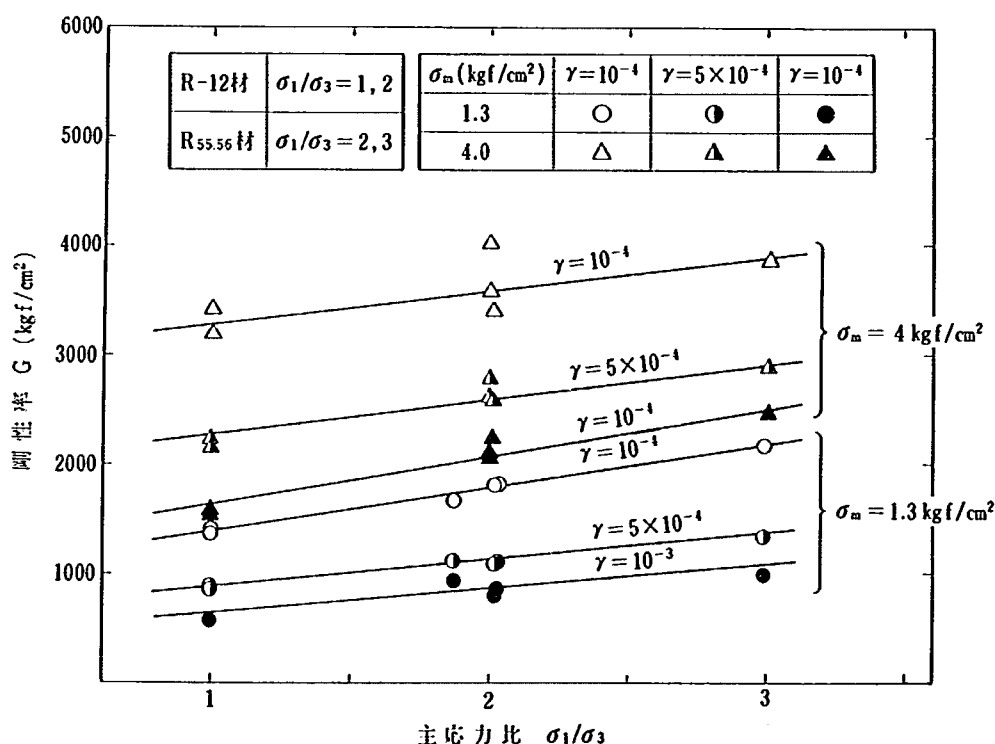


図 7.47 G に与える主応力比の影響 $G \sim \sigma_1/\sigma_3$ (R-12, R55・56 材)

7.7 均等係数の影響

今回の試験では、表 7.2 に示すような均等係数 U_c の異なる数種の材料の結果が得られている。そこでこの均等係数の違いに着目し、剛性率に与える影響について調べてみた。

表 7.2 試験材料

材 料	均等係数 U_c	粒径範囲 $d_{max} \sim d_{min}$ (mm)
豊浦標準砂	1.4	0.42 ~ 0.074
ロック材 (安山岩)	7	38.1 ~ 0.84
ロック材 (安山岩)	12	63.5 ~ 0.42
フィルター材 (旧河床砂レキ)	36	38.1 ~ 0.074

図 7.48 は $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$, $e = 0.40$ とした時の G と U_c の関係を両対数表示したものである。個々の剛性率の値は拘束圧や間隙比が異なるため単純に比較できないので、間隙比は関数 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ 、また平均主応力は $(\sigma_m)^m$ を用いて、それぞれ $e = 0.4$, $\sigma_m = 1 \text{ kgf/cm}^2$ の G に補正した値で示してある。材料の相異を均等係数だけでとらえるのはやや問題ではあるが、均等係数 U_c が大きくなれば比較的広いひずみ範囲で、剛性率 G は減少する傾向がみられる。

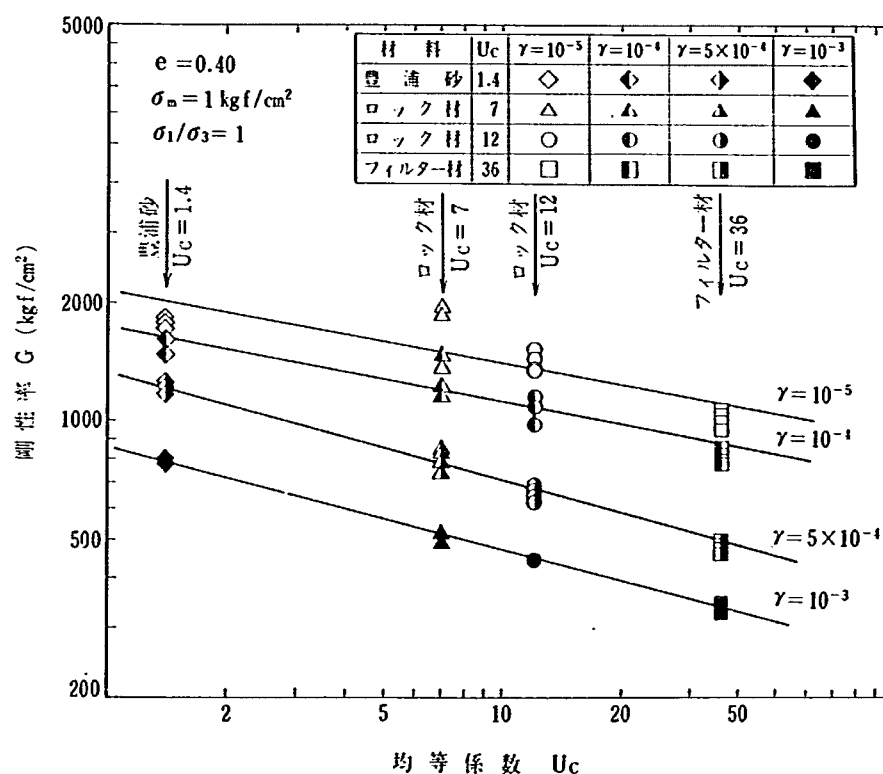


図 7.48 均等係数と剛性率の関係

7.8 剛性率と減衰定数

剛性率 $G/G_{max}(=G_0)$ と減衰定数 h の関係は、予備試験の項でも述べたように砂の場合、間隙比・拘束圧・ひずみ等の値によらずほぼ一義的に決るものであるとされている^{4),16)}

図 7.49～図 7.52は、ロック材・フィルター材における $G/G_{max} \sim h$ の関係を示している。この時の $G_{max}=G_0$ と考え、前に述べた方法で推定した G_0 を用いて整理してある。微小ひずみすなわち $G/G_{max}=0.9$ 以上ではバラツキが大きい、これ以下になると G の減少に伴い h は増大し、拘束圧や間隙比に左右されず狭い帯状の範囲にすべて入り、直線に近い関係が得られている。

また図 7.53は、ロック材($\sigma_1/\sigma_3=1$)、フィルター材に豊浦砂の結果を加え、 $G/G_{max} \sim h$ の分布範囲を比較したものである。 G の減少に伴う h の増加割合は豊浦砂が最も大きく、次にフィルター材、ロック材の順となっている。

一般に試験誤差の入りやすい h の推定は、間隙比・拘束圧・ひずみ等の影響を受けない $G/G_{max} \sim h$ の関係をを利用して $G/G_0 \sim r$ の関係が得られていれば、可能であると考えられる。

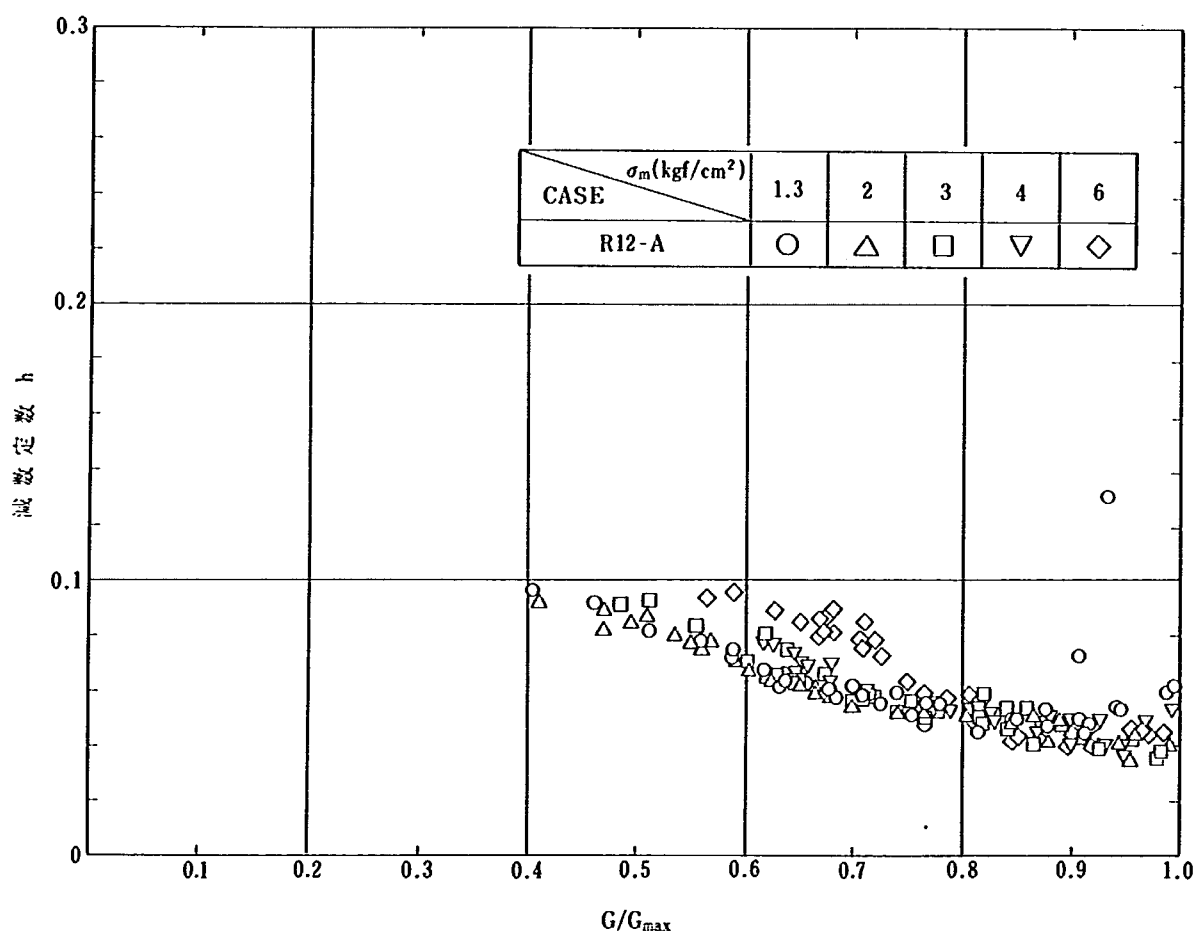


図 7.49 h と G/G_{max} の関係 (R-12材, $\sigma_1/\sigma_3=2$)

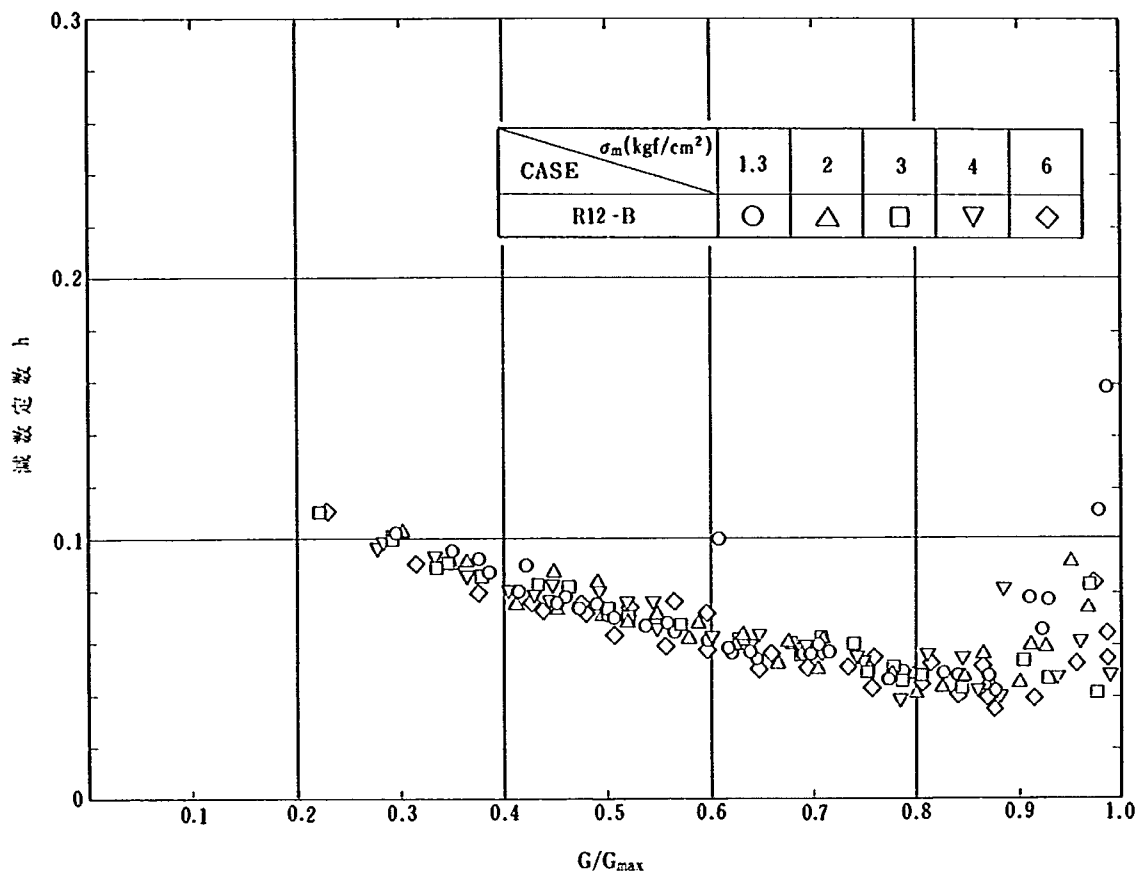


図 7.50 h と G/G_{max} の関係 (R-12材, $\sigma_1/\sigma_3 = 1$)

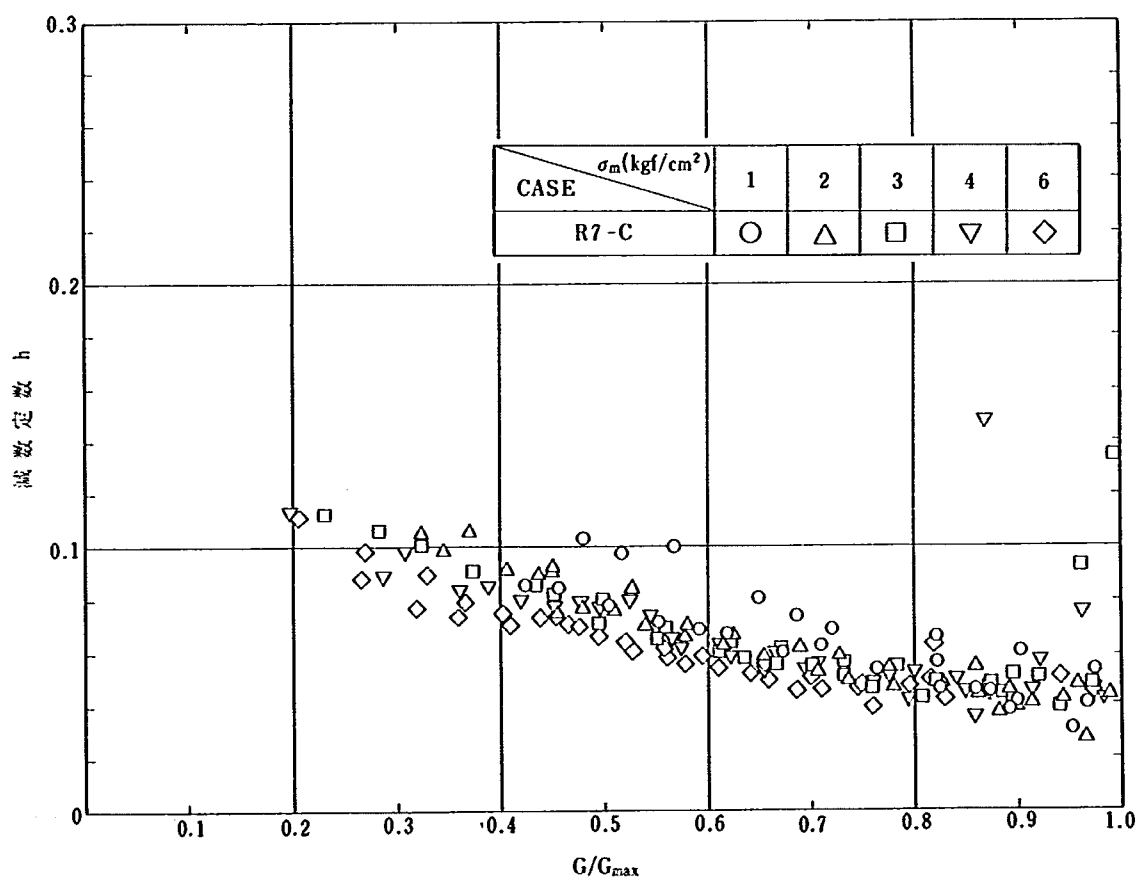


図 7.51 h と G/G_{max} の関係 (R-7材)

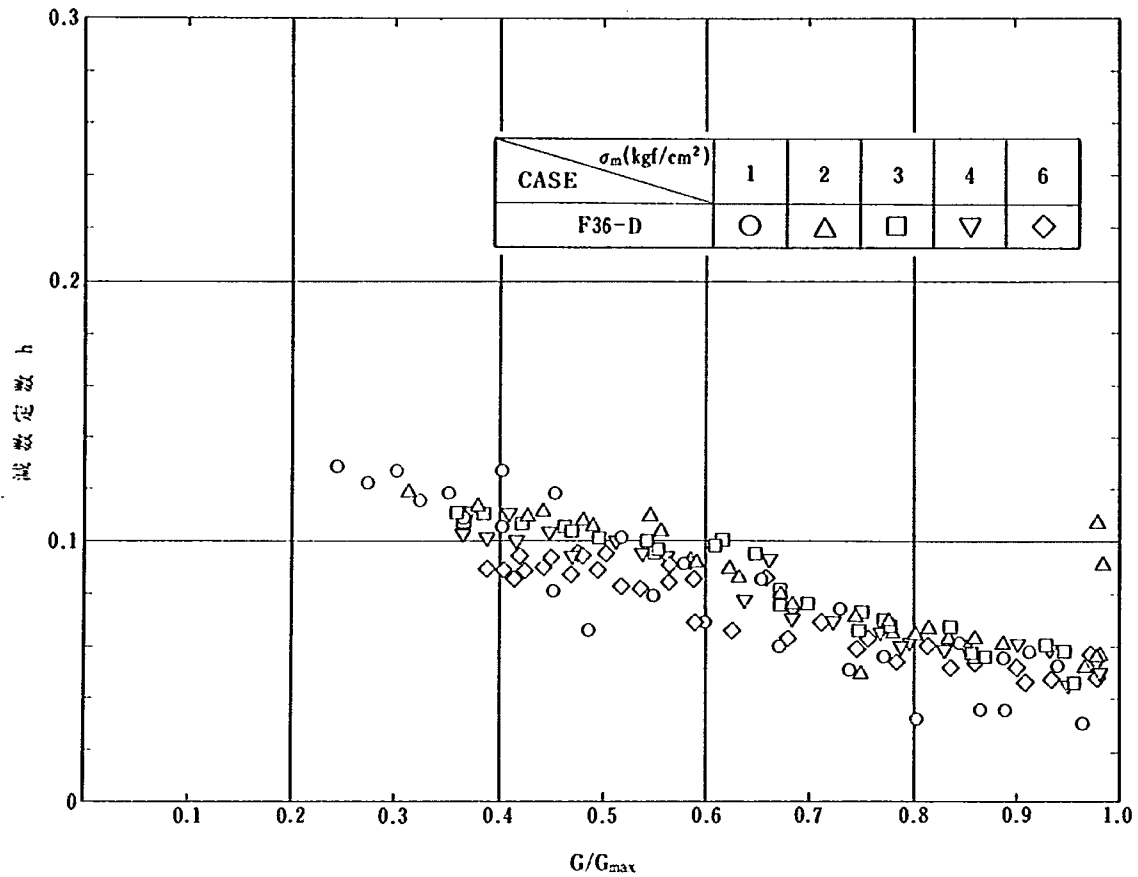


図 7.52 h と G/G_{max} の関係 (F-36材)

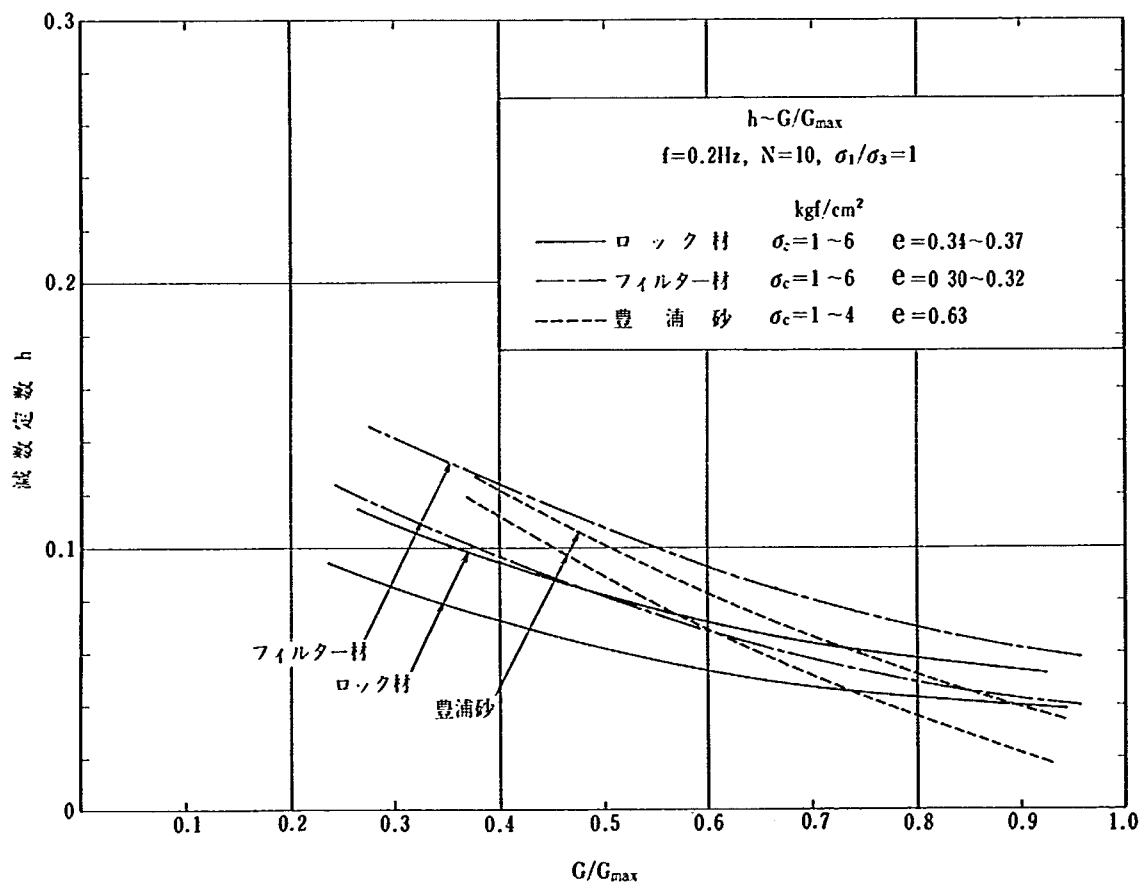


図 7.53 各材料の $h \sim G/G_{max}$ の関係の比較

8. 結論及び今後の問題点

改良前の三軸装置では、機械的摩擦やガタ・ヒステリシス特性等の影響により、 $\gamma=10^{-4}$ 以下の小さなひずみ領域での精度ある物性値測定は困難であった。そこで大型繰返し三軸装置の軸ひずみと軸荷重の検出部に改良を加え、今回、七ヶ宿ダムのフィル材料（ロック材・フィルター材）を使って、 $\gamma=5\times 10^{-5}\sim\gamma=10^{-3}$ のひずみ範囲にわたる剛性率 G と減衰定数 h の測定が可能となった。これらの試験結果をまとめると次のようになる。

- ① 豊浦砂の予備試験では、最初の拘束圧 $\sigma_c=1\text{ kgf/cm}^2$ の $G\sim\gamma$ 曲線は、三軸装置を用いた従来の研究（特に国生ら（ $\phi 5\times h 10\text{ cm}$ 振動三軸）の結果）と良く一致しているが、2段階目以降の拘束圧になると、応力またはひずみ履歴が影響しているためか、他の研究よりも低い剛性率 G となった。従って豊浦砂のようなきれいな砂の場合、1供試体で多拘束条件の繰返し試験を行うには、この影響の残らないひずみレベルの範囲で実施する必要があると考えられる。剛性率 G ・減衰定数 h 両者共、ひずみ依存性や拘束圧の影響が明確に現われており、三軸装置・中空ねじりせん断・共振法等による同じ砂の他の研究結果と定性的には一致しており、基本的には整合性が確保され測定値の信頼性も高いと考えられる。
- ② 改良前においては、 $\gamma=10^{-4}$ 以下のひずみでは試験値の信頼性が乏しかったが、試験装置の変位計と荷重計に改良を施すことによって、 $\gamma=5\times 10^{-5}$ 程度の微小ひずみまで精度の高い物性値測定が可能となった。
- ③ ロック材・フィルター材では同一条件で2ケースの試験を行い試験値の再現性を調べたところ、剛性率 G については、主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=1$ の両振り試験の再現性は比較的良好であるが $\sigma_1/\sigma_3\neq 1$ の片振り試験ではあまり良くない。これは片振り試験でのひずみが一方向に流れやすいことや、応力またはひずみ履歴の影響等が考えられるが、明確には言えない。また、減衰定数 h は再現性を問題とする以前にデータのバラツキが大きく試験誤差や解析誤差が入りやすいと考えられる。同一条件における試験値の再現性は、試験装置の精度や信頼性を左右する重要な問題であるが、現状では試験条件を厳密に統一することは不可能に近く、試験方法とも関連して今後さらに検討を要する課題である。
- ④ 今回の試験での間隙比（密度）の変化幅はわずかではあるが、この範囲ではロック材、フィルター材共に砂等と同様、ほぼ間隙比の関数 $(2.17-e)^2/(1+e)$ で剛性率 G を表わせる様である。減衰定数 h に対しては従来の研究と同様、間隙比 e の影響はわずかであることがわかった。
- ⑤ 剛性率 G に対して平均主応力 σ_m あるいは拘束圧 σ_c の影響は明確に現われており、同一ひずみにおいて σ_m の増加に伴い G も増大する。そして、 G と $(\sigma_m)^m$ とは比例関係にあり、ひずみが大きくなるに従い σ_m あるいは σ_c に対する勾配 m は増大し、従来の研究結果と一致している。べき乗数 m の値は、ロック材・フィルター材共にこれまでの粗粒材料に関する他の研究と比べやや大きい値が得られた。減衰定数 h に対する影響については、豊浦砂の様に明らかでなくバラツキが大きい、 σ_m の増加と共に h が減少するケースもあり剛性率に対する程ではないが、影響を及ぼしている。

- ⑥ $G/G_{\gamma=10^{-8}} \sim \gamma$ 曲線、又は $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、微小ひずみになるに従って G_0 へ収束する傾向が得られるようになった。また平均主応力 σ_m の上昇に伴いグラフ上で曲線が右側にずれる傾向が得られた。さらにロック材・フィルター材の同曲線において、ひずみに依存した剛性率 G の低下は、豊浦砂等と比べ小さなひずみレベルから顕著になることがわかった。これらの傾向は、粗粒材を用いた他の研究とも一致している。剛性率 G のひずみ依存曲線に Hardin-Drnevich の双曲線式をあてはめ、 G_0 、 γ_r を推定し数式化を試みたところ、片振り試験 ($\sigma_1/\sigma_3 = 2$) を除けば、 $\gamma = 10^{-4}$ 以上のひずみではほぼ同式によって表わせることがわかった。減衰定数 h のひずみ依存性については、ひずみが大きくなるに従って増大する傾向は他の研究結果と一致しており、試験拘束圧の範囲で $h \sim \gamma$ 曲線を材料ごとに比較すると、豊浦砂が最も小さく、次にロック材、フィルター材の順となっているが、 $\gamma = 10^{-3}$ 以上になると h の分布範囲は近づく。
- ⑦ 主応力比 σ_1/σ_3 が剛性率 G に与える影響は、三軸装置を用いた場合ロック材 ($U_c = 12$) では $\sigma_1/\sigma_3 = 1 \sim 2$ の範囲で主応力比の増加に伴い G が大きくなる結果が得られた。これは、片振り試験において、軸ひずみが圧縮側へ進行したことによるものと考えられる。また、減衰定数 h に対する主応力比 σ_1/σ_3 の影響はほとんどないことがわかった。
- ⑧ 今回の試験材料に限って考えれば、材料の相異を均等係数 U_c に着目すると、比較的広いひずみにおいて均等係数が大きくなると剛性率 G は減少する傾向が得られた。
- ⑨ 減衰定数 h と剛性率 G の関係は、平均主応力 σ_m (拘束圧 σ_c) やせん断ひずみ γ 、間隙比 e に関係なく一義的に決り、 $h \sim G/G_0$ 曲線において狭い帯状の分布を示しほぼ直線的な関係が得られる。

以上の様に改良を施した大型繰返し三軸試験装置を使った今回の試験によって、粗粒材料の動的物性値（剛性率・減衰定数）を求めることができた。しかし、実際の材料の性質や粒度の相異あるいは応力条件の違い等、さらに明らかにすべき点が多く残っている。今後以下についての検討を進め、さらに多くのデータを蓄積する必要があると考えられる。

- a) $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 以下の微小ひずみにおける G 、 h を精度よく求め試験値の信頼性や再現性を良くする。そして、原位置弾性波試験から得られる G_0 との対応を考える。
- b) 粗粒材料の剛性率・減衰定数に影響を及ぼす諸要因について、さらに試験を実施し詳細な検討を行う。
- c) 粗粒材料の剛性率及び減衰定数のひずみ依存曲線の数式化についての検討。
- d) 繰返し三軸試験と中空ねじり試験 ($\phi_{out} 80 - \phi_{in} 40 \times h 80 \text{ cm}$) との相互関係についての検討。
- e) 飽和試料に対する試験の実施と、粗粒材料の液状化の可能性についての検討。

参 考 文 献

- 1) 貞弘文佳・米崎文雄：繰返し三軸用計測装置の改良とデーター処理システムの開発，土と基礎，Vol. 31, No 7, 1983.
- 2) 松本徳久・渡辺和夫・大野一昭：大型せん断試験装置を用いた標準砂とロック材料の動的変形特性試験，土木研究所資料，第 2132 号，1984.
- 3) 国生剛治・江刺靖行・桜井彰雄：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 380002，1980.
- 4) 龍岡文夫・足立紀尚：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，pp.195~256，1979.
- 5) 国生剛治・桜井彰雄・江刺靖行：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 379002，1979.
- 6) 龍岡文夫・山田真一：土の動的性質および実験法（第 2 回） — 議義と実習 — ，生研セミナーテキスト（コース 89），1983-10.
- 7) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿児島出版会，1976.
- 8) 松本徳久・渡辺和夫・村上清基：ロック材料の最大粒徑に着目した三軸圧縮比較試験・その 2，土木研究所資料，第 2006 号，1983.
- 9) 松本徳久・渡辺和夫・小川優：七ヶ宿ダムフィル材料試験報告，土木研究所資料，第 1974 号，1983.
- 10) 土質工学会編：土質試験法，1979.
- 11) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，1982.
- 12) 北条紘次・播田一雄・小川優：フィルダム材料の性質に関する試験（七ヶ宿ダム），土木研究所資料，第 1507 号，1979.
- 13) Marsal, R.J: Mechanical properties of rockfill. Engineering, Casagrande Volume, pp.130~132, 1972.
- 14) 赤司六哉・高田真・相馬明：ロック材料の締固めについて，第 15 回土質工学研究発表会，講演集，1980.
- 15) 岩崎敏男・龍岡文夫・高木義和：広範囲なひずみ領域での砂の動的せん断変形特性 — 低周波動的せん断試験装置の開発 — ，土木研究所資料，第 1080 号，1976-3.
- 16) 岩崎敏男・龍岡文夫・高木義和：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 — ，土木研究報告，第 153 号，1980-3.
- 17) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.: Sear moduli of sand under cyclic torsional shear loading, Soils and Foundations, Vol. 18, No 1, pp.39~56, 1978.

- 18) Iwasaki, T., Tatsuoka, F.: Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soils and Foundations*, Vol.17, No 3, pp.19~35, 1977.
- 19) Tatsuoka, F., Iwasaki, T. and Takagi, Y.: Hysteretic damping of sands and its relation to shear modulus, *Soils and Foundations*, Vol.18, No 2, pp.25~40, 1978.
- 20) 国生剛治・桜井彰雄・江刺靖行：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，1979.
- 21) 柴田徹・Soelarno, D.S.: 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，1975.
- 22) 柴田徹・土岐憲三・寺田邦雄：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，1969.
- 23) 大岡弘・伊藤幸爾郎：乾燥砂と正規圧密粘土を用いた動的一斉試験結果，11th Joint Meeting, US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, 第11回 合同部会，1979.
- 24) 国生剛治・江刺靖行・嶋田光明：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，1980.
- 25) 安田正幸・緒方信英・嶋田光明：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，1979.
- 26) Baba, K・Watanabe, H: On a consideration for an earthquake-resistant design method for rockfill dams 13th, ICOLD, Newdelhi, India, 1979.
- 27) 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, 1978.
- 28) 畑野正・渡辺啓行：粘土・砂・碎石の動的・静的粘弾性定数ならびにポアソン比について，土木学会論文報告集 第164号，1964-4.
- 29) 岩崎敏男・龍岡文夫・吉田精一：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——，土木研究報告，第148号，1977-3.
- 30) 栗林栄一・岩崎敏男・龍岡文夫・堀内俊一：土の動的変形特性——共振法土質試験機による測定——，土木研究所資料，第912号，1974-3.
- 31) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report of Earthquake Engineering Research Center, Rep. No EERC 70-10, University of California, 1970.
- 32) Hardin, B.O. and Richart, F.E. Jr: Elastic wave velocities in granular soils, *Jour. of SMFD, Proc. ASCE*, Vol.89, No SM1, pp.33~65, 1963.

- 33) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.: Shear modulus damping in soils: Design equation and curves. Jour.SMFD, Proc.ASCE, Vol.98, No SM7, pp.667~692, 1972.
- 34) Sherif, M.A. and Ishibashi, I.: Dynamic shear moduli for dry sands. Jour of GTD, Proc.ASCE, Vol.102, NoGT11, pp.1171~1184, 1976.
- 35) 土質工学会編: 土質地震工学, pp.41~59, 1983.

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

ISSN 0386-5878
土研資料第2146号
昭和59年12月(1984)
建設省土木研究所

要旨 供試体寸法 $\phi = 30\text{cm}$, $h = 60$ の大型繰返し三軸試験機により、粗粒材料の動的変形特性（剛性率及び減衰定数）を $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$ のせん断ひずみ範囲について求めた。

キーワード：繰返し三軸せん断試験，粗粒材料，剛性率，減衰定数，堤体材料，ロックフィルダム



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム部フィルダム研究室

御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2146 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印