

土 木 研 究 所 資 料

粗粒材料の動的変形特性における 影響因子の評価

平成8年1月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1996) 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、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

粗粒材料の動的変形特性における 影響因子の評価

フィルダム研究室	室 長	中 村 昭
	研 究 員	岩 下 友 也
	前部外研究員	高 橋 三津彦*

要 旨

本資料は、フィルダムのロック材に用いられる輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）および砂岩3種類の岩種の粗粒材料に対して、繰返し変形特性三軸試験を実施し、その結果をまとめたものである。試験は供試体寸法直径300mm×高さ600mmの大型振動三軸試験機を用い、試験条件として密度、拘束圧、粒度分布、排水条件、飽和条件、および主応力比をパラメータとして変化させて行った。それらのパラメータが粗粒材料の動的変形特性に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：粗粒材料、動的変形特性、繰返し三軸試験、せん断剛性率、減衰定数

*部外研究員在職期間（平成5年4月から6年9月まで）

Parametric Study on Dynamic Deformation Characteristics of Rockfill Materials

by

Akira NAKAMURA

Head of Fill Dam Division

Tomoya IWASHITA

Research Engineer, Fill Dam Division

and

Mitsuhiko TAKAHASHI

Former Visiting Research Engineer, Fill Dam Division

Synopsis :

This memorandum describes the dynamic deformation characteristics of rockfill materials. Schalstein, block schalstein and sand stone were prepared for the testing materials. Cyclic triaxial tests were carried out using large-scale testing apparatus of which size is 30 centimeters in diameter and 60 centimeters in height. The relative density, confining pressure, grain size distribution, saturation and principal stress ratio of the specimens, and drainage condition during cyclic loading were varied. It was analyzed how the testing conditions affected the dynamic deformation characteristics of rockfill materials.

Key Words : Rockfill Materials, Dynamic Deformation Characteristics,

Cyclic triaxial tests, Shear Modulus, Damping Ratio

まえがき

世界有数の地震国であるわが国において、重要かつ大規模な構造物であるフィルダムの耐震信頼性を向上させることは、非常に有意義なことである。数値計算による地震応答解析の技術が普及向上しつつあるが、それに伴って入力物性値の高精度化が図られなければその意義も大幅に減ずる。

フィルダムの堤体の大部分を占め、堤体の力学的安定性を受け持つロック材としての粗粒材料の動的物性は要素試験の通常大型三軸試験により推定される。しかし、その供試体寸法が大型になることもあり、これまで、粗粒材料の動的変形特性におよぼす試験条件等の影響を系統的に研究した事例は少ない。そこで、粗粒材料の動的変形特性における影響因子を明らかにし、解析に反映させる必要がある。

本資料では、フィルダムのロック材として使用を予定されている材料と同じ原石山から採取した材料を使用して、相対密度（間隙比）、拘束圧、粒度分布、岩種、排水条件、飽和条件、および主応力比を各々変化させて大型三軸圧縮試験機による繰返し三軸試験を実施し、それぞれのパラメータの動的変形特性に及ぼす影響を調査した。

目 次

まえがき

1. 試験装置	1
1.1 試験装置の概要	1
1.2 豊浦砂による予備試験	2
1.2.1 試験方法および条件	2
1.2.2 試験結果	2
2. 試験材料	10
2.1 試験材料の概要	11
2.2 締固め試験	11
2.2.1 試験方法	11
2.2.2 締固め試験結果	11
2.3 材料の破砕率	12
2.3.1 試験方法	12
2.3.2 試験結果	12
3. 繰返し三軸試験	27
3.1 供試体作製, 飽和方法	27
3.2 試験方法	27
3.3 繰返し三軸試験結果	28
3.3.1 ひずみ依存性	28
3.3.2 密度の影響	30
3.3.3 拘束圧の影響	30
3.3.4 粒度分布の影響	31
3.3.5 岩種の影響	32
3.3.6 排水条件の影響	32
3.3.7 飽和条件の影響	32
3.3.8 主応力比の影響	33
3.3.9 せん断剛性率 G と減衰定数 h の関係	34
4. まとめ	142
参考文献	144
謝 辞	146

1. 試験装置

1.1 試験装置の概要

試験装置は供試体寸法が直径 300mm × 高さ 600mm の供試体を有する大型三軸圧縮試験装置を使用した。その概要図を図-1.1に、試験装置の仕様を表-1.1に示す。この装置は、電気油圧サーボ方式により正弦波並びに任意波形で軸方向に一定の繰返し（動的）応力を与えることができるものである。

動的載荷の方法としては、初期載荷を行った後にその初期載荷応力以下の動的応力を載荷することにより繰返し荷重が圧縮側のみになる、いわゆる片振り試験の他に、アクチュエータとピストンロッドと供試体上部キャップ、および試料台（ペDESTAL）と載荷台を剛結することにより、等方圧密状態から軸荷重を変動させ圧縮と伸張の2つの応力状態が可能となる、いわゆる両振り試験が可能である。

また、試験に用いた検出器（センサー類）の主な仕様を表-1.2に示す。荷重計（ロードセル）については、三軸セル外部に容量 1000kN のものを設置した他に、三軸セル内部に耐水圧型圧縮引張兼用の容量 100kN または 200kN のものが設置可能となっている。これにより、ピストン軸受け部の摩擦等の影響を全く受けることなく、供試体に作用する荷重を直接測定することができる。

供試体の微小変位は、ギャップセンサーまたは差動トランスで測定した。この微小変位計は図-1.1に示すように固定点を三軸セル内の底板から立ち上げた支柱に取り付けており、これと供試体上部のキャップとの相対変位量を計測している。そのため、三軸セル頂板の動きと独立しており、載荷ピストンとセル頂板の摩擦あるいは拘束圧の変動によるセル頂板の変位の影響を避けることができる。また、この試験装置には動的微小体積変化計を備えており、動的ポアソン比の測定が可能である。したがって排水状態で試験を実施する際に、ポアソン比を仮定することなく、弾性係数 E および軸ひずみ ϵ からせん断剛性率 G およびせん断ひずみ γ を求めることができる。なお、体積変化量の測定は、飽和供試体の場合は二重管ビューレット（200cc）と差圧計により内体積の変化を測定し、不飽和（気乾）供試体の場合は三軸セル内に設置された二重セル内の水位変動を容量 0.5kPa の半導体ゲージ式差圧計で計測することにより外体積の変化を測定することで行った。

これらの検出器で計測された物理量はすべてアンプを介して電圧に変換され、さらに A/D コンバータによってデジタル数値に変換された後、パソコンに入力された。これにより、高い周波数でサンプリングすることが可能になった上、データの処理が即時に行えるようになった。パソコンおよび A/D コンバータの仕様を表-1.3に示す。

この試験に使用した A/D コンバータは、表-1.3にもみられるようにホールド回路等の付属した完全同時サンプリング可能なものではなく、各チャンネルを逐次スキャンしていくタイプのものであるため、各チャンネル間にわずかではあるがサンプリング時間差が生じる。メーカーによれば、チャンネル間の時間差は $7.2 \mu \text{ sec}$ とのことであるが、繰返し載荷の周波数によっては減衰定数の測定に影響することも懸念されるので、バネダミーを用いて確認試験を行った。載荷周波数は、実際の繰返し三軸試験では 0.1Hz で載荷する

ことを考慮して、0.05, 0.1, 0.5Hz とし、片振幅がほぼ 1×10^{-4} 付近で計測を行った。その結果、各周波数とも履歴減衰はほぼ 0 で、周波数依存性は無く、計測のチャンネル時間差は今回の試験の載荷周波数範囲では問題とならないことは確認してある。

また、粗粒材料の締固め試験および繰返し三軸試験の供試体作製の締固めには振動ランマーを用いた。その仕様を表-1.4に示す。

1.2 豊浦砂による予備試験

1.2.1 試験方法および条件

大型三軸試験装置、サンプリング装置等の正常な動作を確認するため、その物性が比較的明らかとなっている豊浦標準砂を用いて予備試験を実施した。試験は静的試験と繰返し三軸試験とし、試験条件は、当研究室保有の別の大型三軸試験装置を用いて実施した試験^{1) 2)}と同一である。使用した豊浦砂の物性値を表-1.5に、試験条件を表-1.6に示す。

静的三軸試験は、気乾試料を使用してCD試験を行った。制御方式はひずみ速度一定制御とし、ひずみ速度は0.1%/minとした。供試体は初期間隙比 e_0 を0.70, 0.79とし、間隙比0.79の供試体については、試験値の再現性を確認するため同一条件で2供試体分試験を実施した。拘束圧0.1MPaで等方圧密した後、載荷を行った。

繰返し三軸試験は気乾試料を間隙比0.63（相対密度89.1%）となるように締固め、拘束圧0.1MPaで等方圧密した後、排気条件で繰返し載荷を行った。載荷波形は正弦波とし、載荷周波数は0.2Hzとした。また、計測値のサンプリングは載荷1周期あたり100点計測できるようにするため、サンプリング周波数を20Hzに設定した。

1.2.2 試験結果

静的三軸試験結果を図-1.2~1.4に示す。初期間隙比 e_0 と内部摩擦角 ϕ_0 の関係について松本ら¹⁾により種々の供試体寸法にて試験された結果と今回の試験結果を比較したものが図-1.2である。供試体寸法によらず、今回の試験結果は松本ら¹⁾の関係とよく一致していることがわかる。図-1.3には初期間隙比 e_0 と変形係数 E_{s0} の関係について同様な比較を行ったものを示す。供試体直径が50mmのものについては多少の差がみられるが、100mmおよび400mmのものと今回の試験（径300mm）の結果はよく一致している。これは、供試体寸法の小さいものほど供試体表面積の体積に対する比率が大きくなることおよびメンブレンの厚みが薄くなることによりメンブレン・ペネトレーションの影響を受けやすくなることや、一般に供試体寸法が小さくなると供試体端面の面積も小さく、供試体寸法の大きいものと同程度の端面の乱れでもベッディングエラーの影響をより大きく受けること等の理由により、供試体直径が50mmのものの E_{s0} が実際の値よりも過小評価されているものと考えられる。なお、今回使用したメンブレンは厚さ $t=2.0\text{mm}$ である。また、初期間隙比 e_0 と最大軸差応力時の軸ひずみ増分と体積ひずみ増分の比であるダイレイタンス係数 $(\Delta \varepsilon_v / \Delta \varepsilon_1)$ の関数 η の関係について示したものが図-1.4であるが、傾向は全体によく一致している。以上に

より、静的三軸試験に関しては今回の試験は過去に他の試験装置により行われた種々の供試体寸法の三軸試験をよく再現していると判断される。また、初期間隙比 0.79 の 2 供試体については、上記の各項目についてよく一致しており、再現性も良好であることが確認された。

繰返し三軸試験の結果について、松本ら²⁾による試験結果と比較したものが図-1.5および図-1.6である。図にみられるようにせん断剛性率 G 、減衰定数 h とも今回の試験結果は過去において他の試験装置（供試体直径 300mm）で同一試験条件により得られた松本ら²⁾の結果とよく一致している。減衰定数に関しては、松本らの試験より精度良い微小変位計を用いていることよりさらに微小なひずみ範囲まで値が得られており、 $\gamma = 1 \times 10^{-5}$ 以下の範囲ではほぼ 0 の値をとることから、精度良く計測が行われていることが窺われる。

以上より、豊浦砂による三軸試験装置の動作、計測システム、および試験精度の確認を実施した結果、良好な結果を得ることが出来た。

表-1.1 試験機の仕様

軸 圧 力	静 的 1000kN 動 的 $\pm 200\text{kN}$
加 振 方 式	電 気 油 圧 サ ー ボ 方 式
ス ト ロ ー ク	$\pm 20\%, -10\%$
動 的 発 信 器	(株) BEE 社 製 EO-210-P1 0.01Hz $\sim$ 100Hz $\times$ 1 $\sim$ 1/1000
拘 束 圧	最 大 (水 圧 置 換 時) 2.0MPa 空 圧 時 最 大 1.0MPa
背 圧	最 大 1.0MPa
大 型 三 軸 室	供 試 体 寸 法 $\phi 300 \times h 600\text{mm}$ 耐 垂 直 荷 重 1000kN 耐 横 圧 3.0MPa

表-1.2 検出器の仕様

センサー名	容量	測定方式	メーカー・型式	備 考
内部荷重計	100kN	ひずみゲージ	誠研舎 LP-10T-H50	圧縮・引張共
内部荷重計	200kN	ひずみゲージ	誠研舎 LP-20T-H50	圧縮・引張共
外部荷重計	1000kN	ひずみゲージ	MINEBEA C2S1-100T	圧縮のみ
間隙水圧計	1.0MPa	ひずみゲージ	共和電業 PGM-10KE	
横圧計	2.0MPa	ひずみゲージ	共和電業 PGM-20KE	
差圧計	10kPa	ひずみゲージ	共和電業 PD-100GA	内体積 (2重管ビュレット) ビュレットは2500,1000,200cc
差圧計	0.5kPa	半導体ゲージ	バリダイン DP-15	外体積
軸変位計	$\pm 0.5\text{mm}$	差動トランス	坂田電気 LV-2-4N	精度 0.5%/FS 増幅アンプ AV-0301
軸変位計 (キャップセンサー)	$\pm 0.3\text{mm}$	渦電流式	電子応用 PU-03,PU-05	分解能 $0.5 \mu\text{m}$ 精度0.5%/FS 変換器 AEC-5505

表-1.3 試験データのサンプリングシステムの仕様

機 器 名	仕 様
A/Dコンバータ	メーカー・型式：カノーパス ADMX-98FX 分解能：16bit チャンネル数：8ch差動/16chシングルエンド （今回は16chシングルエンドで使用） 最高サンプリング周波数：128kHz 入力電圧範囲：±10V/±5V/±2V/±1V 0～10V/5V/2V/1V 絶対誤差/直線性誤差：±0.1%/±0.01%以下 デジタル入力/出力：4bit/4bit(TTLレベル)
パーソナル コンピュータ	メーカー・型式：NEC PC-9801FS/U2 CPU：i386™SXクロック約20MHz ROM：BIOSおよびN88-BASIC(86)96KB メモリ：ユーザーズメモリ 1.6MB テキスト用VRAM 12KB グラフィック用VRAM 256KB フロッピーディスク：3.5インチ 2台内蔵 ハードディスク：120MB増設

表-1.4 振動ランマーの仕様

項 目	仕 様
製 造 元	株式会社 マキタ
打 撃 数	毎分 1000回
全 長	825mm
質 量	29.1kg（ランマーは除く）
ランマー径	φ 200mm

表-1.5 豊浦砂の物性値

項 目			物 性 値
粒 度 特 性	粗 砂 分	(%)	0.3
	細 砂 分	(%)	99.6
	最大粒径	(mm)	0.85
	60%粒径 D_{60}	(mm)	0.23
	50%粒径 D_{50}	(mm)	0.20
	30%粒径 D_{30}	(mm)	0.16
	10%粒径 D_{10}	(mm)	0.12
	均等係数 U_c		1.9
	曲率係数 $U_{c'}$		0.93
土粒子の密度 ρ_s			(g/cm^3) 2.640
締 固 め 特 性	最大密度 ρ_{dmax}	(g/cm^3)	1.658
	最小密度 ρ_{dmin}	(g/cm^3)	1.361
	最小間隙比 e_{min}		0.592
	最大間隙比 e_{max}		0.940

表-1.6 豊浦砂の試験条件一覧表

項 目		条 件		
静 的 試 験	供試体寸法 (mm)	$\phi 300 \times h600$		
	相対密度 (%)	69.0	43.1	43.1
	乾燥密度 (g/cm^3)	1.553	1.475	1.475
	間隙比	0.70	0.79	0.79
	圧密条件	等 方 圧 密		
	排水条件	排 気		
	飽和条件	気 乾		
	拘束圧 (MPa)	0.10		
	ひずみ速度 (%/min)	0.1		
繰 返 し 変 形 特 性 三 軸 試 験	供試体寸法 (mm)	$\phi 300 \times h600$		
	相対密度 (%)	89.1		
	乾燥密度 (g/cm^3)	1.620		
	間隙比	0.630		
	圧密条件	等 方 圧 密		
	排水条件	排 気		
	飽和条件	気 乾		
	拘束圧 (MPa)	0.10		
	制御方式	応 力 制 御		
	載荷波形	正 弦 波		
	載荷周波数 (Hz)	0.2		
	繰返し回数	11回		
	採用波数	10波目		
	サンプリング周波数 (Hz)	20		
	微小変位計	差動トランス型		

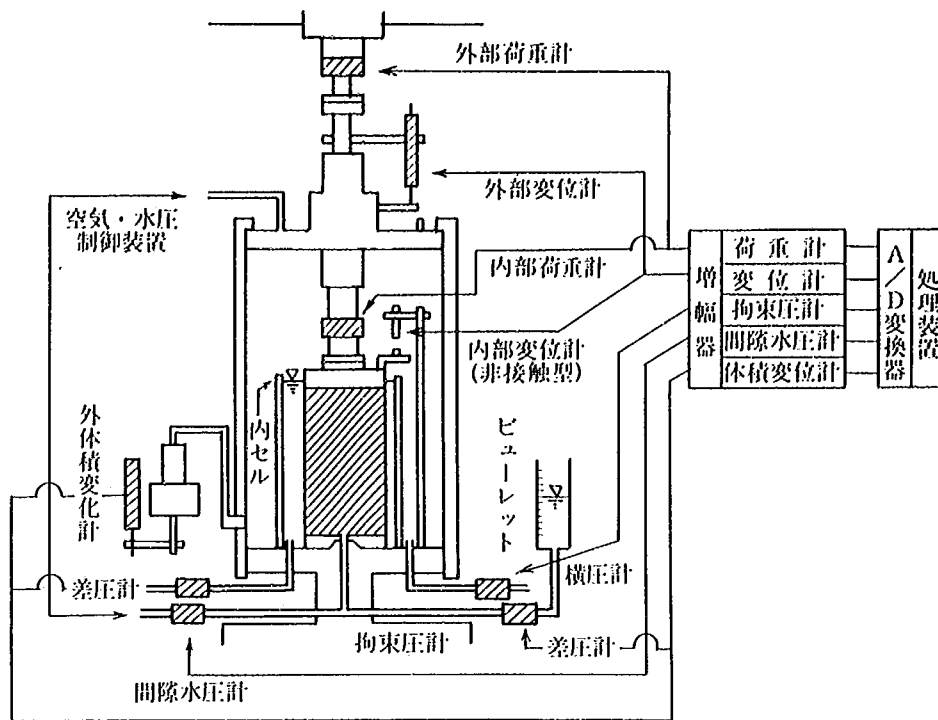


図-1.1 大型振動三軸試験装置の概要

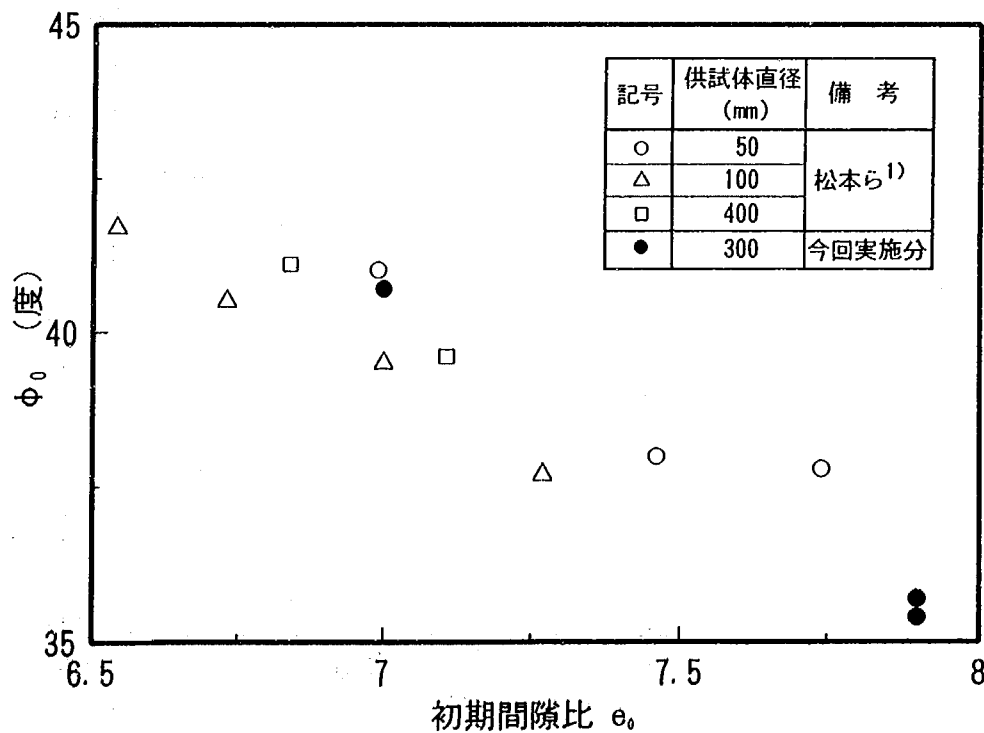


図-1.2 豊浦砂の内部摩擦角 ϕ_o ~ 初期間隙比 e_o 関係

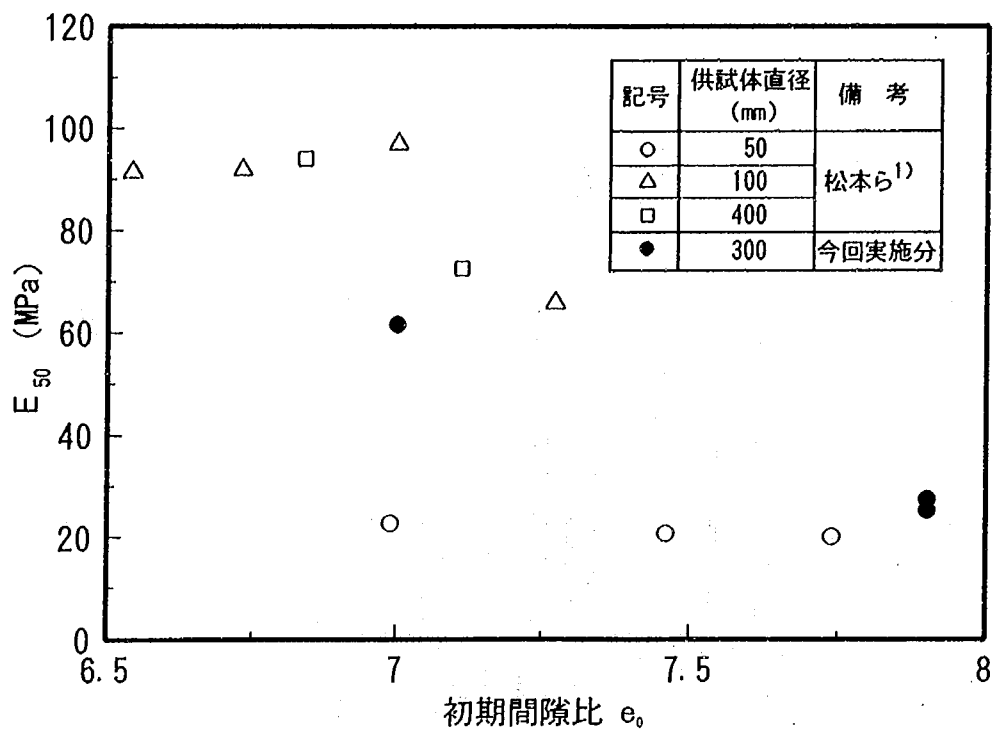


図-1.3 豊浦砂の変形係数 E_{50} ～初期間隙比 e_0 関係

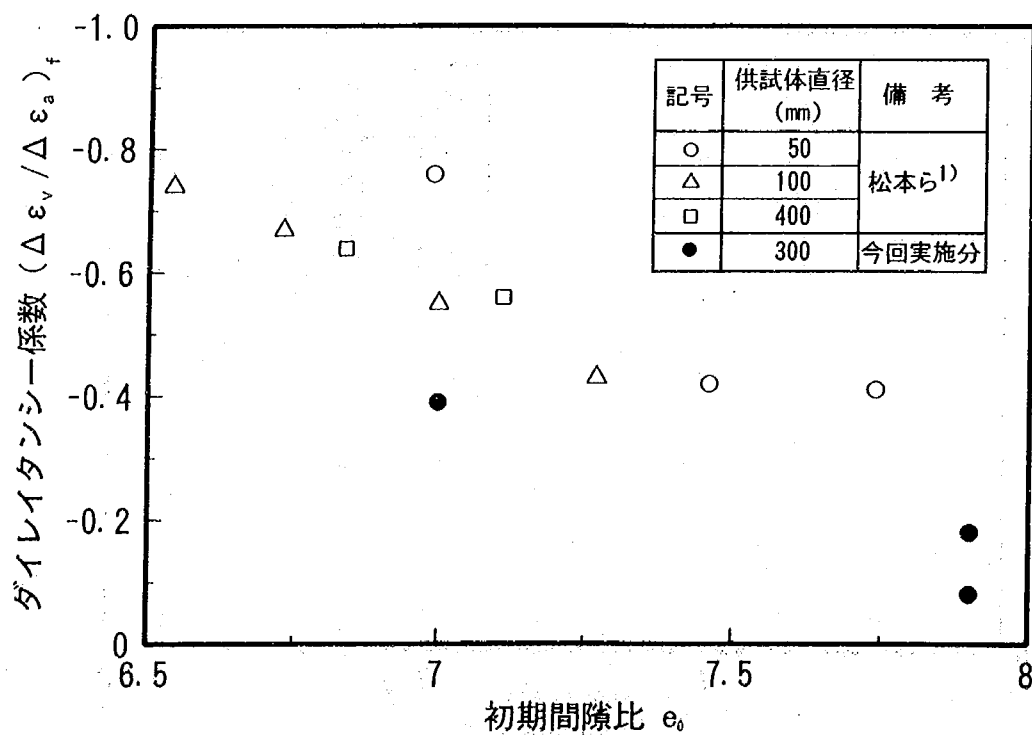


図-1.4 豊浦砂のダイレイタンス係数 $(\Delta \epsilon_v / \Delta \epsilon_a)_x$ ～初期間隙比 e_0 関係

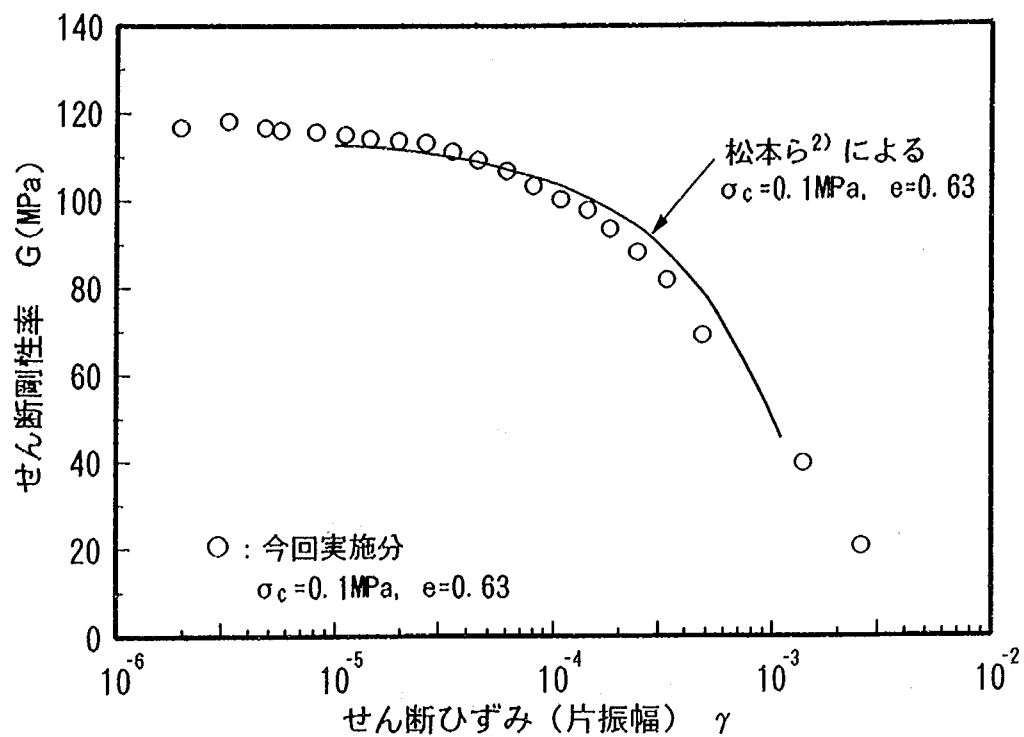


図-1.5 豊浦砂の $G \sim \gamma$ 関係

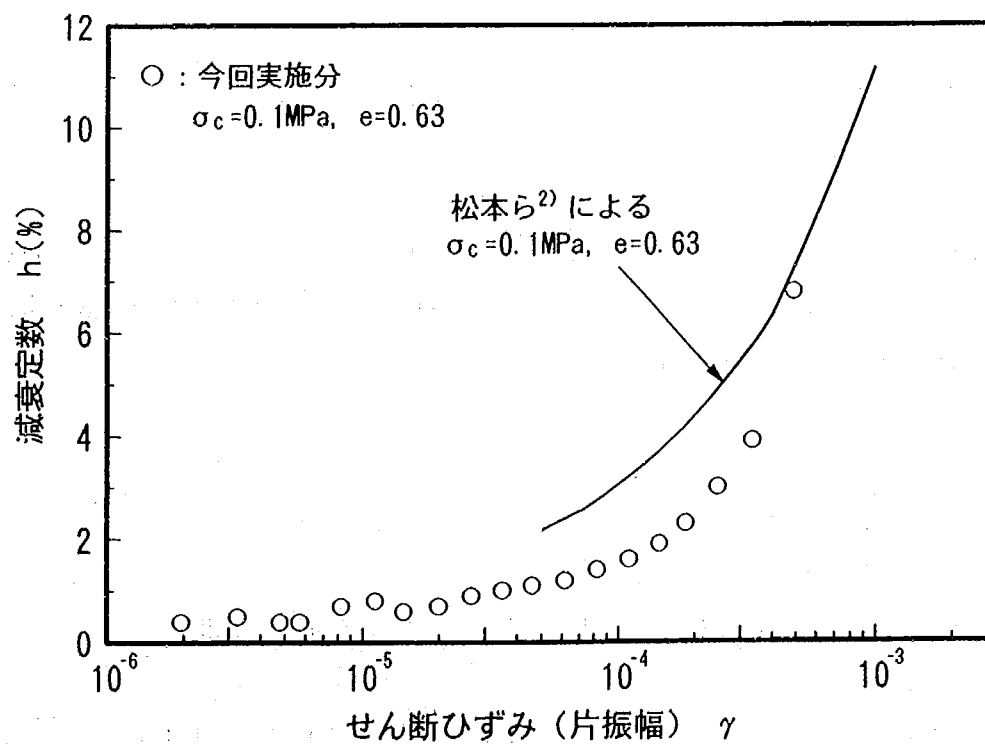


図-1.6 豊浦砂の $h \sim \gamma$ 関係

2. 試験材料

2.1 試験材料の概要

試験に用いた材料は、フィルダムのロック材採取予定地点の原石山横坑から採取されたもので、岩種は輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）および砂岩の3種類である。それぞれに対して粒度調整を行い、A粒度とB粒度の2種類の粒度分布のものを用意した。A粒度は均等係数 $U_e=10.5$ で、B粒度は $U_e=4.6$ である。その粒径加積曲線を図-2.1に示す。この最大粒径 D_{max} は供試体直径が300mmであることを考慮して、 $D_{max}=63.5\text{mm}$ とした。

また、それぞれの岩種の物理的性質を把握するために、粒径が4.75mm未満のものについては土粒子の密度試験(JIS A 1202)を、4.75mm以上のものについては粗骨材の比重および吸水率試験(JIS A 1110)を実施した。

上記試験の結果を整理したものを図-2.2に示す。なお、図中の比重および吸水量は以下の定義による。

$$\begin{aligned} \text{表乾比重} \quad G_s &= B / (B - C) \\ \text{絶乾比重} \quad G_b &= A / (B - C) \quad \text{----- (2.1)} \\ \text{真比重} \quad G_g &= A / (A - C) \\ \text{吸水量} \quad Q &= (B - A) / A \times 100 \quad (\%) \\ \text{ここで、} \quad A &: \text{絶乾重量} \\ \quad \quad B &: \text{表乾重量} \\ \quad \quad C &: \text{水中重量} \end{aligned}$$

また、供試体の間隙比や相対密度等を求めるために、各材料の合成比重が必要となる。これを上記の試験結果から求めたものが、表-2.1である。合成比重 G は、各材料において各粒度階の加重平均値で求めることとし、以下の方法より求めたものである。

$$G = \frac{1}{(\sum f_i / G_{bi})} \quad \text{----- (2.2)}$$

ここに、 f_i : 各粒度階における残留率

G_{bi} : 各粒度階における絶乾比重（粒径4.75mm未満は真比重）

これらの図および表によれば、輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩（塊状）は各粒度階において比重がほぼ等しいが、砂岩は全体的に比重が前記の2種よりも低めとなっている。そのため合成比重でも砂岩が他の2種よりも低めの値となった。また、吸水率は輝緑凝灰岩が各粒度階において高く、以下、輝緑凝灰岩（塊状）、

砂岩の順に低くなっている。真比重と表乾比重・絶乾比重の値の差の大きさも上記と同様の順で小さくなっているが、これは吸水率の影響を受けているためと考えられる。

2.2 締固め試験

2.2.1 試験方法

試験材料の締固め試験を次の目的で行った。

- 1) 締固め特性すなわち、締固めを行った時間に対する間隙比の変化および最大・最小間隙比 (c_{max} , c_{min}) を求める。
- 2) 締固めによる粒子破砕の程度を知る。
- 3) 繰返し三軸試験に用いる供試体の密度(間隙比)設定に用いる。

現在、粗粒材料の締固め試験方法は基準化されていないため、今回は次のような試験手順に従って簡易的な試験を実施した。なお、使用したモールドは内径 300mm × 高さ 600mm のもので、上部に同一の内径のカラーがセットできるようになっている(図-2.3参照)。

- ①最小間隙比を仮定し、そのとき供試体高さが 600mm となるような供試体乾燥重量を設定する。
- ②各々の粒度分布別に使用重量を求め、それを 6 等分し、1 層分の使用重量とする。
- ③あらかじめふるい分けてある材料を②で求められた重量分だけ採取し、各粒度階のものを合わせてよく混合し、1 層分の材料を作成する。
- ④これをモールドの中に投入する。ただし、あまり高いところから投げ落とさないように、また、投入時に押さえつけないように注意する。さらに、粒径の大きい礫は均等な配置となるようにする。
- ⑤材料の投入直後に図-2.4に示されるような位置で材料の表面の高さを測定し、その層の最小密度(最大間隙比)を計算する。
- ⑥材料の表面に、モールド内径よりもわずかに小さい直径の鉄板を敷き、その上から1.1で述べた振動ランマーを当てて締固めを行う。その際、1 分ごとに供試体の表面の高さを測定し、密度および間隙比を計算する。
- ⑦締固めが 5 分間を経過したところで締固めを終了し、供試体の表面の高さを測定してその層の密度および間隙比を計算する。これをその層の最大密度(最小間隙比)とする。
- ⑧以上、③～⑦の操作を 6 層分繰返し、各々の層の密度、間隙比を平均してその材料の最大、最小密度および最小、最大間隙比を求める。
- ⑨ 6 層の締固めが終了したらモールドを解体し、試験材料の全量を回収してふるい分けを行い、粒度分布を求める。
- ⑩締固め前の粒度分布との差を求め、Marsal³⁾の方法により破砕率の計算を行う。

2.2.2 締固め試験結果

締固め試験結果を図-2.5(a)～2.10(a)および表-2.2に示す。この図によれば、どの材料および粒度にお

いても締固めによる密度の増加は締固め開始後1分でほとんど終了していることがわかる。その後も密度の増加は徐々に進行しているが、これは締固めによる粒子の相対位置の再配分よりもむしろ粒子破碎の影響を大きく受けていると考えられる。

一般に、 U_c が10以上の土はそれ以下の土に比べて締固められやすい^(例えば4)といわれているが、今回の試験でもA粒度が $U_c=10.5$ で、B粒度は $U_c=4.6$ であることから、いずれの岩種においてもA粒度の密度がB粒度の密度を上回っているのはこの傾向と一致しているといえる。

また、その際の試験前後の粒度分布の変化と破碎率を図-2.5(b)~2.10(b)および表-2.2に示す。今回の材料の中では、砂岩のA粒度のものが他のものよりもやや破碎率が低く、砂岩は吸水率が低いことも考えると揮緑凝灰岩や塊状揮緑凝灰岩よりも多少堅硬であるといえる。

2.3 材料の破碎率

2.3.1 試験方法

繰返し三軸試験時の真の供試体粒度分布を調べるため、すなわち、供試体作製時にどの程度の粒子破碎が起こっているのかを確認するため、実際に繰返し三軸試験に使用する供試体と全く同様の方法で材料を締固め、材料の破碎率を測定した。その試験方法を以下に記す。なお、使用したモールドは繰返し三軸試験で供試体の作製に使用したものと同一のもので、内径300mm×高さ600mmの二つ割りモールドである。また、粒度はA粒度のもので相対密度を90%とし、1供試体あたり6層に分割して締固めた。

- ①下部試料座にゴムスリーブをセットする。
- ②モールドを組立て、真空ポンプでゴムスリーブを引き、モールドに密着させる。
- ③あらかじめ粒度ごとに計量し、混合しておいた1層当たりの試料をモールドに投入する。なお、この際、粒径の大きい礫が均等に分布するよう注意した。
- ④振動ランマーで締固めを行う。締固めは試料が均一に締まるように試料とランマーの間に厚さ20mm、直径290mmの鉄板を敷いて行った。
- ⑤試料表面の高さを測定し、所定の高さに達していない場合、さらに締固めた。
- ⑥層間の密着を図るために試料の表面を攪乱し、次層の試料を投入する。
- ⑦上記③~⑥の操作を6層分繰返し行った。
- ⑧全体の締固めが終了したら、規定の高さになっていることを確認した後モールドを解体し、材料の全量を回収した。
- ⑨全量をふるい分けし、各ふるい目での残留量を求めた。
- ⑩ Marsal³⁾の方法により破碎率を求めた。

2.3.2 試験結果

供試体締固め前後の粒径加積曲線を図-2.11に、各岩種別の破碎率を表-2.3に示す。なお、表-2.3には既往の研究でロック材料に対して行われた締固め試験^{2) 5)}で求められた破碎率の一例も示している。これによると、今回の材料(揮緑凝灰岩、揮緑凝灰岩(塊状)、砂岩)は安山岩、斑れい岩および緑色凝灰岩よりも破碎率が幾分高めであるが、粗粒玄武岩よりも低めとなっている。ただし、破碎率の高さは各岩種の構成

粒子の硬度に依存するほか、粒子の形状、締固め方法、粒度分布等さまざまな要因に影響を受けている。表-2.3に示した材料はすべて破碎して採取されたいわゆる碎石であり、粒子形状は角礫状となっている。なお、今回の使用材料の破碎率試験では、メンブレン（ゴムスリーブ）を装着して締固めを行っているが、他の材料では直接モールドに投入して締固めを行っている。

表-2.1 合成比重の算出

粒径 (mm)	残留率 (%)		輝緑凝灰岩			輝緑凝灰岩 (塊状)			砂岩		
	A 粒度(f_{iA})	B 粒度(f_{iB})	比重	$f_{iA}/100G_{bi}$	$f_{iB}/100G_{bi}$	比重	$f_{iA}/100G_{bi}$	$f_{iB}/100G_{bi}$	比重	$f_{iA}/100G_{bi}$	$f_{iB}/100G_{bi}$
63.5 ~ 50.8	2.4	5	2.807	0.009	0.018	2.8	0.009	0.018	2.656	0.009	0.019
50.8 ~ 38.1	2.6	7.5	2.8	0.009	0.027	2.813	0.009	0.027	2.658	0.010	0.028
38.1 ~ 25.4	5.5	15.5	2.781	0.020	0.056	2.834	0.019	0.055	2.656	0.021	0.058
25.4 ~ 19.1	7.5	14	2.773	0.027	0.050	2.852	0.026	0.049	2.649	0.028	0.053
19.1 ~ 9.5	14	30.5	2.768	0.051	0.110	2.82	0.050	0.108	2.628	0.053	0.116
9.5 ~ 4.8	25	16.5	2.74	0.091	0.060	2.831	0.088	0.058	2.633	0.095	0.063
4.8 ~ 2.0	20	9	2.947	0.068	0.031	3.025	0.066	0.030	2.746	0.073	0.033
2.0 ~ 0.84	12.2	1.2	2.918	0.042	0.004	3.024	0.040	0.004	2.749	0.044	0.004
0.84 ~ 0.42	3.8	0.4	2.93	0.013	0.001	3.127	0.012	0.001	2.766	0.014	0.001
0.42 ~ 0.25	2.4	0.2	2.953	0.008	0.001	3.048	0.008	0.001	2.787	0.009	0.001
0.25 ~ 0.105	1.9	0.1	2.93	0.006	0.000	3.129	0.006	0.000	2.773	0.007	0.000
0.105 ~ 0.074	0.6	0	2.948	0.002	0.000	3.047	0.002	0.000	2.756	0.002	0.000
0.074 ~	2.1	0.1	2.954	0.007	0.000	3.001	0.007	0.000	2.762	0.008	0.000
合成比重				2.834	2.789		2.915	2.849		2.686	2.653

表-2.2 締固め試験結果一覧

岩 種	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$		最小乾燥密度 $\rho_{dmin}(g/cm^3)$		破砕率 (%)	
	A 粒度	B 粒度	A 粒度	B 粒度	A 粒度	B 粒度
輝緑凝灰岩	2.324 (0.219)	2.076 (0.343)	1.857 (0.526)	1.707 (0.634)	8.4	9.3
輝緑凝灰岩 (塊状)	2.428 (0.201)	2.158 (0.320)	1.910 (0.526)	1.736 (0.641)	7.1	8.5
砂 岩	2.220 (0.210)	1.959 (0.354)	1.765 (0.522)	1.608 (0.650)	5.8	9.4

注：下段()内は間隙比

表-2.3 各ロック材料 (碎石) の破砕率一覧

岩 種	破 砕 率 (%)	均 等 係 数	1層あたり締固 め時間 (sec)
輝緑凝灰岩	4.5	10.5	80
輝緑凝灰岩 (塊状)	5.2	10.5	90
砂 岩	4.8	10.5	60~70
安 山 岩 ²⁾	2.9 3.6	12 7	40 40
斑れい岩 ⁶⁾	2.3	6.1	50
粗粒玄武岩 ⁶⁾	8.0	12	40
緑色凝灰岩 ⁶⁾	4.3	38	80

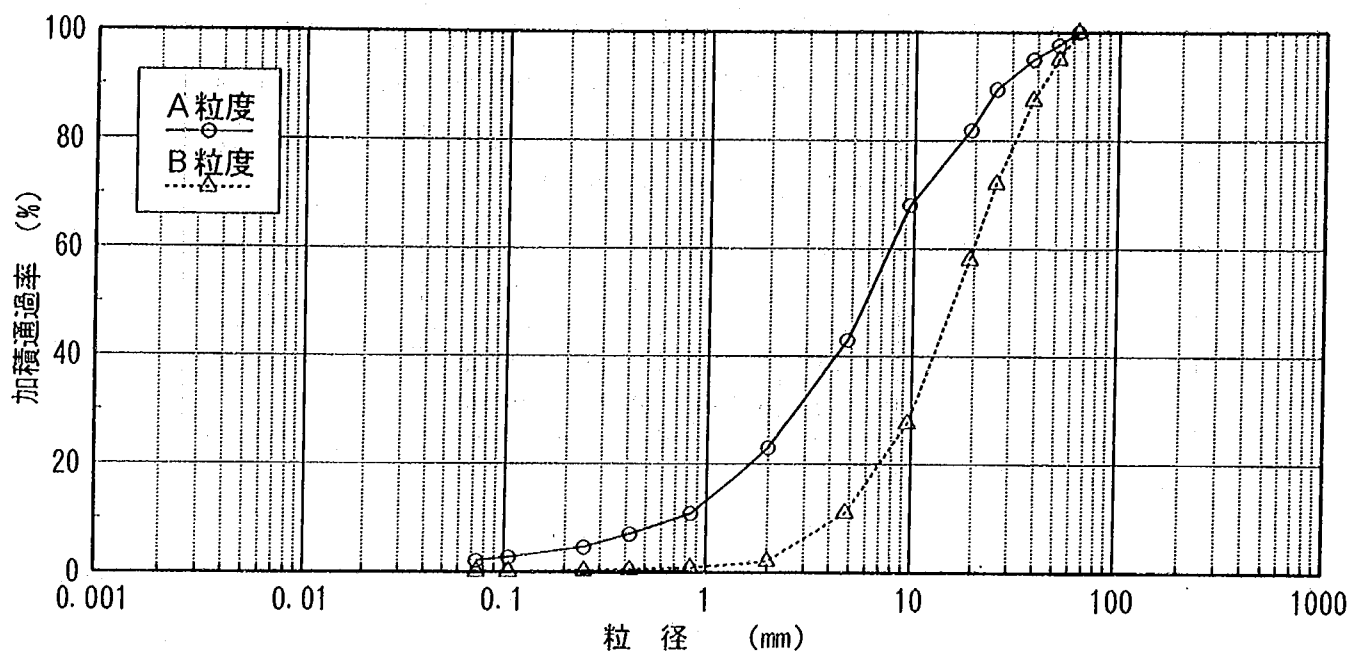


図-2.1 試験材料の粒度分布

輝緑凝灰岩

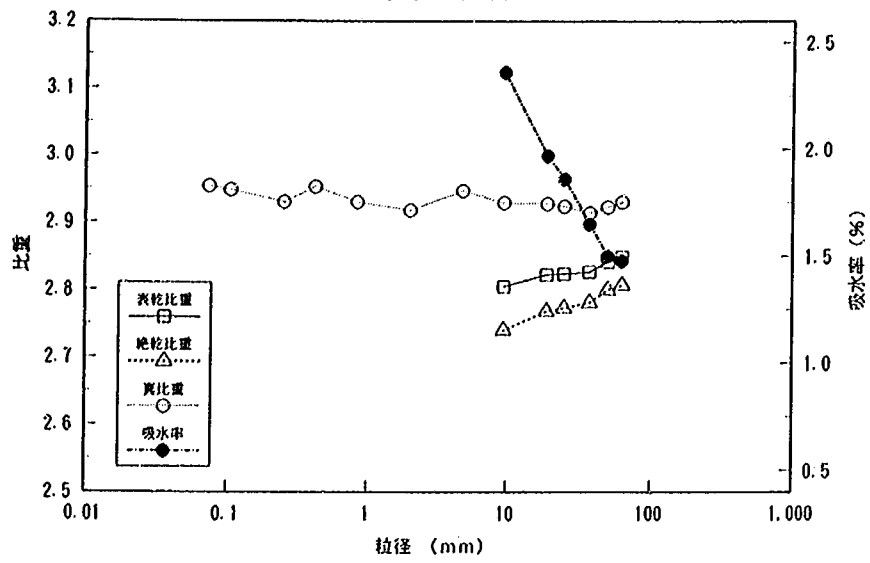


図-2.2(a) 比重および吸水率（輝緑凝灰岩）

輝緑凝灰岩（塊状）

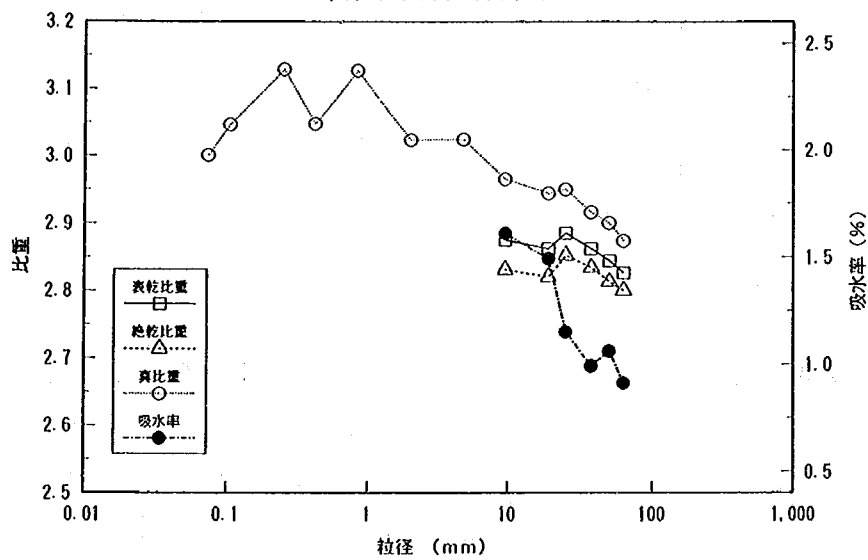


図-2.2(b) 比重および吸水率（輝緑凝灰岩（塊状））

砂岩

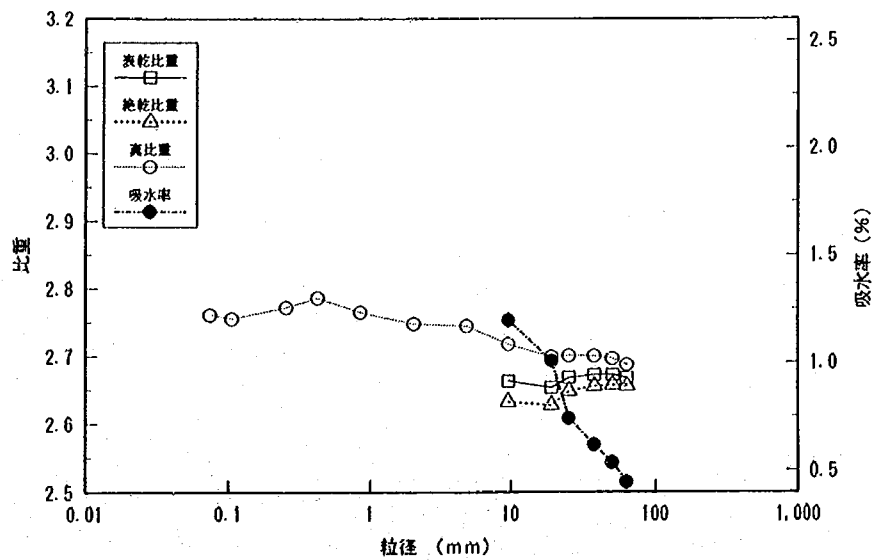


図-2.2(c) 比重および吸水率（砂岩）

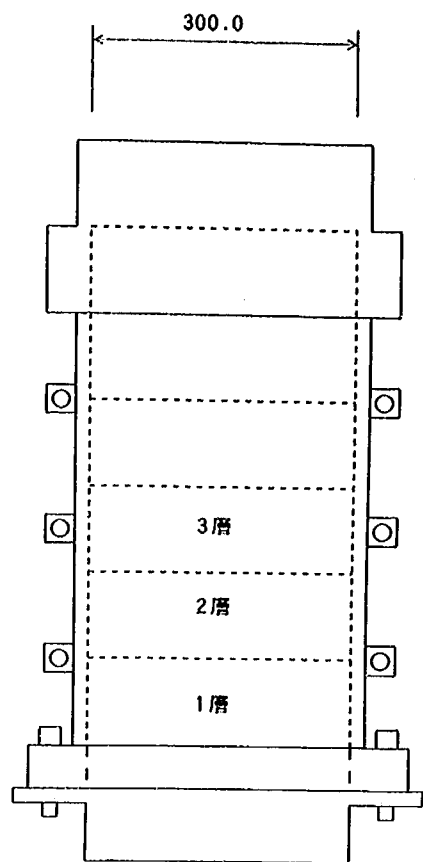


図-2.3 試験用モールド

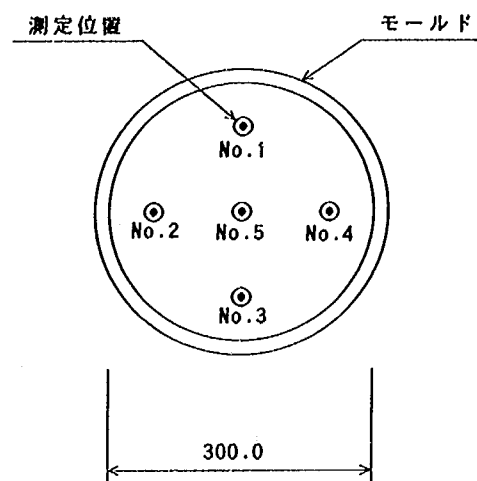
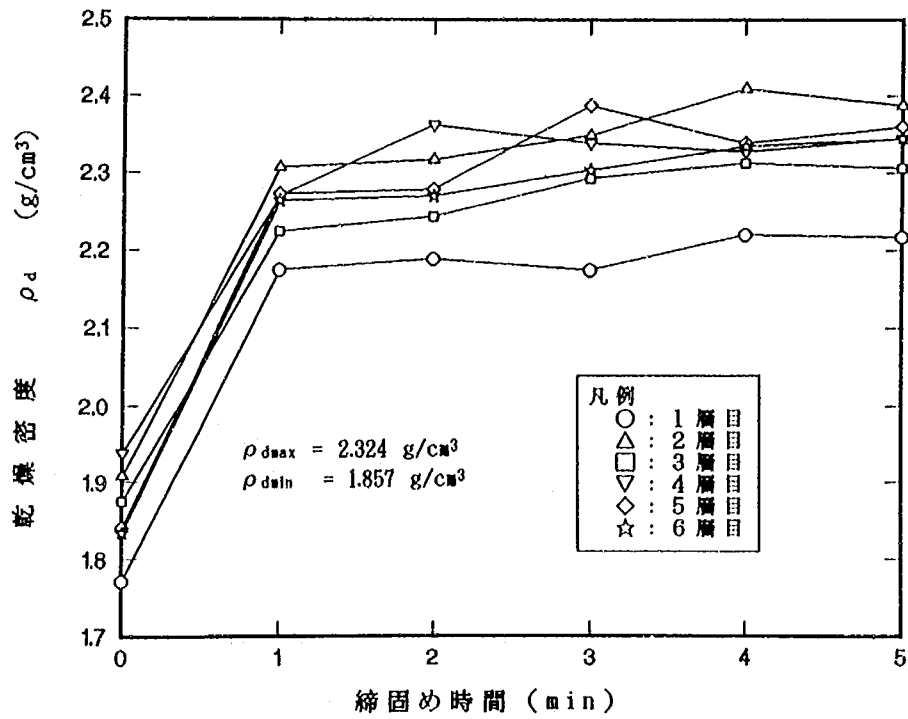
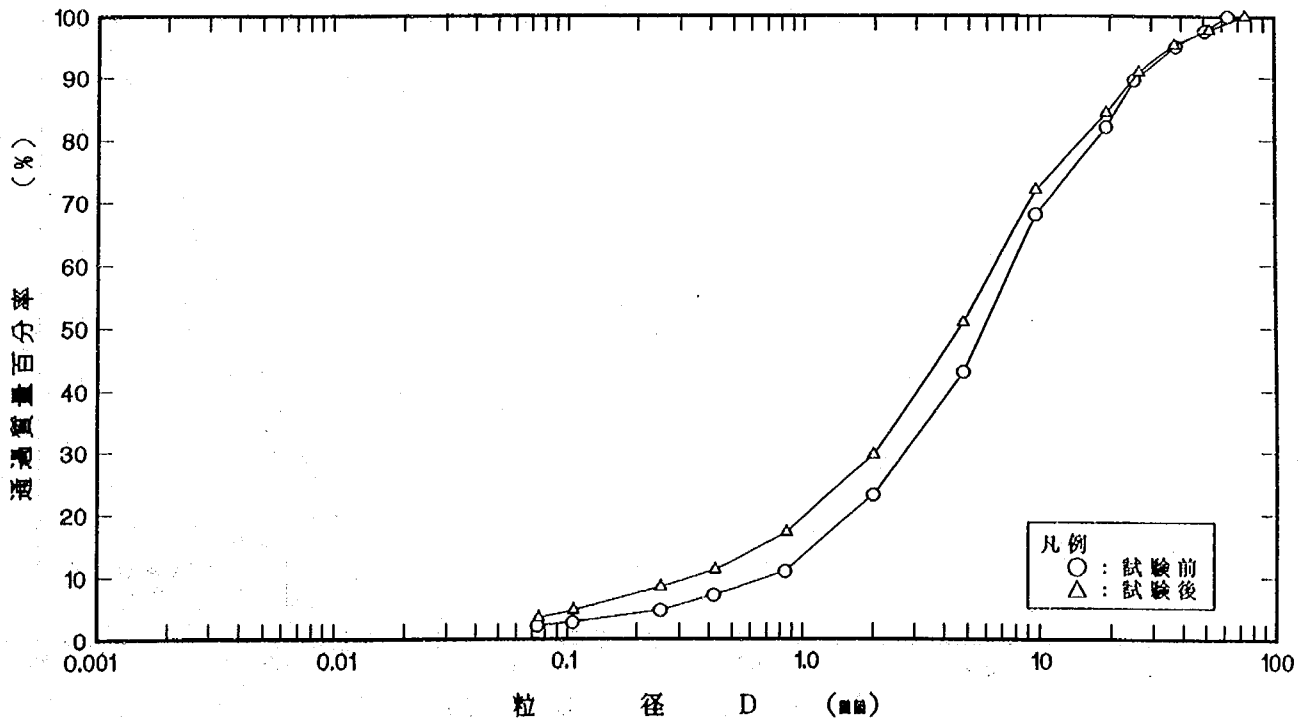


図-2.4 層厚測定位置

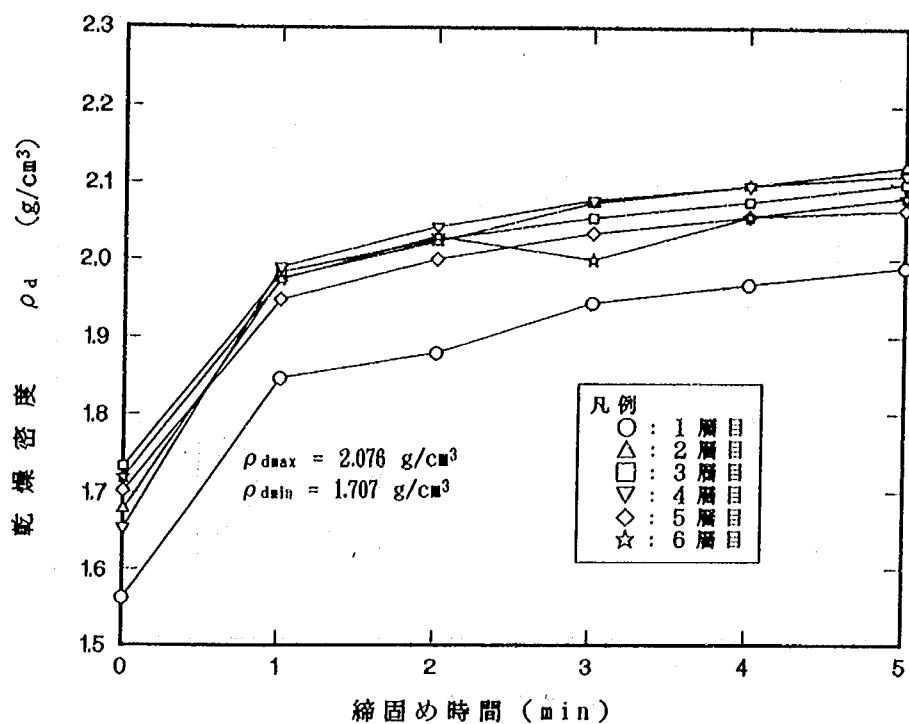


(a) 乾燥密度と締固め時間の関係

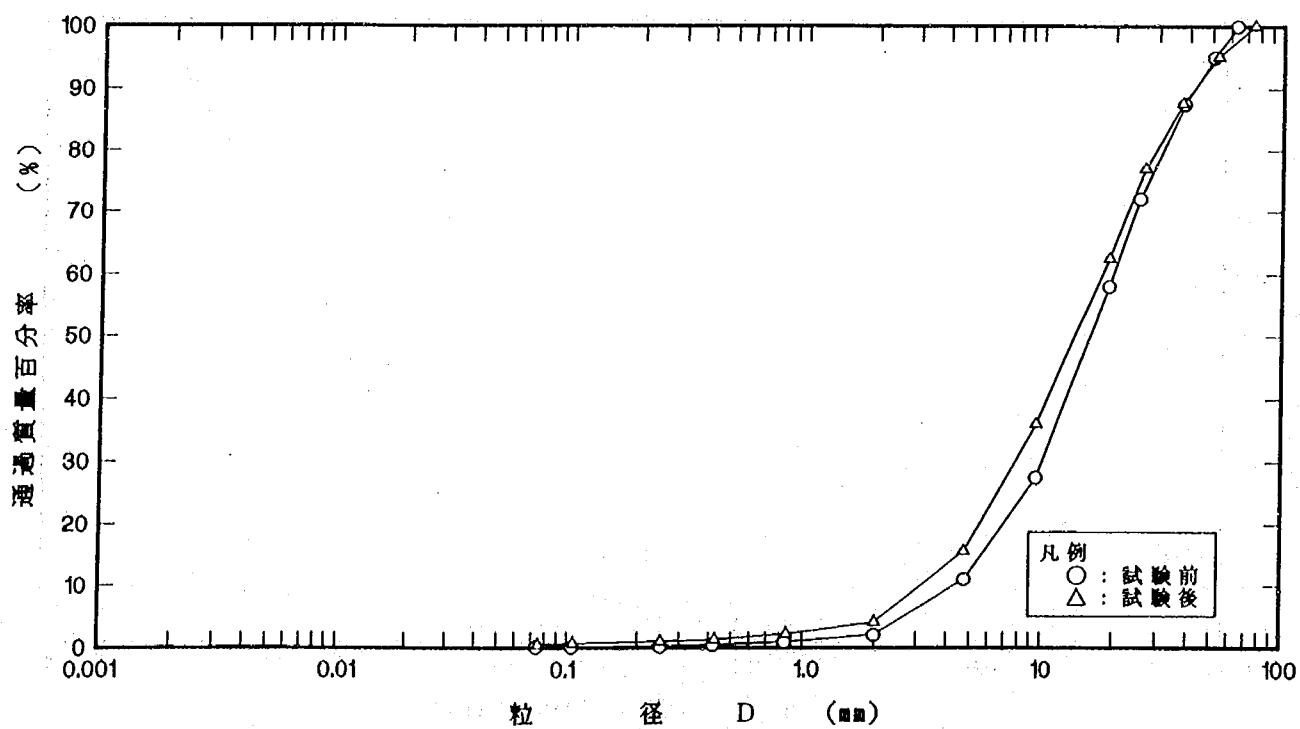


(b) 粒径加積曲線

図-2.5 締固め試験結果 (輝緑凝灰岩 A 粒度)

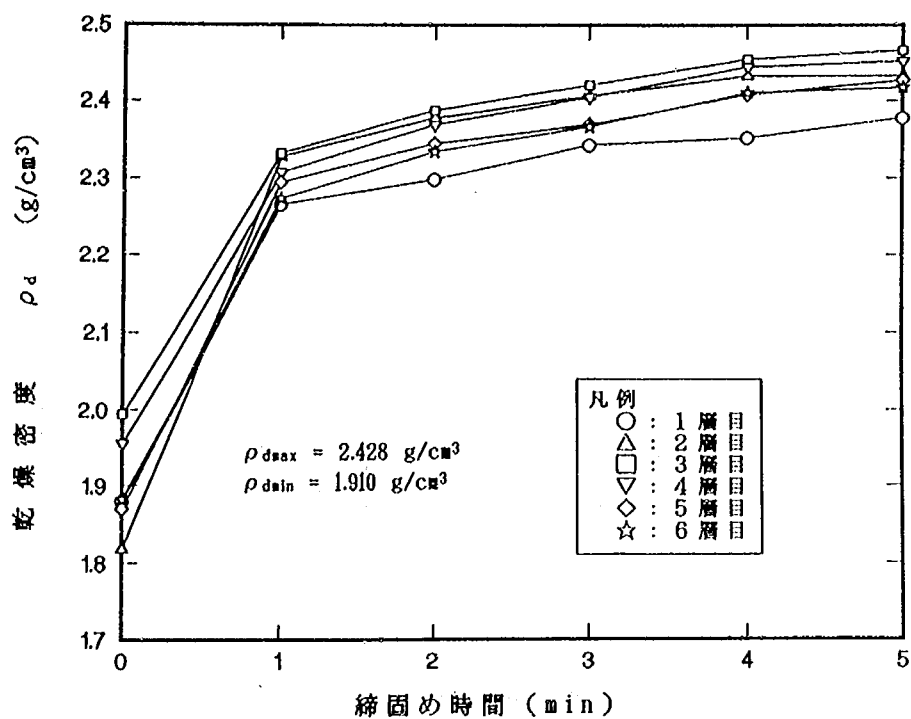


(a) 乾燥密度と締固め時間の関係

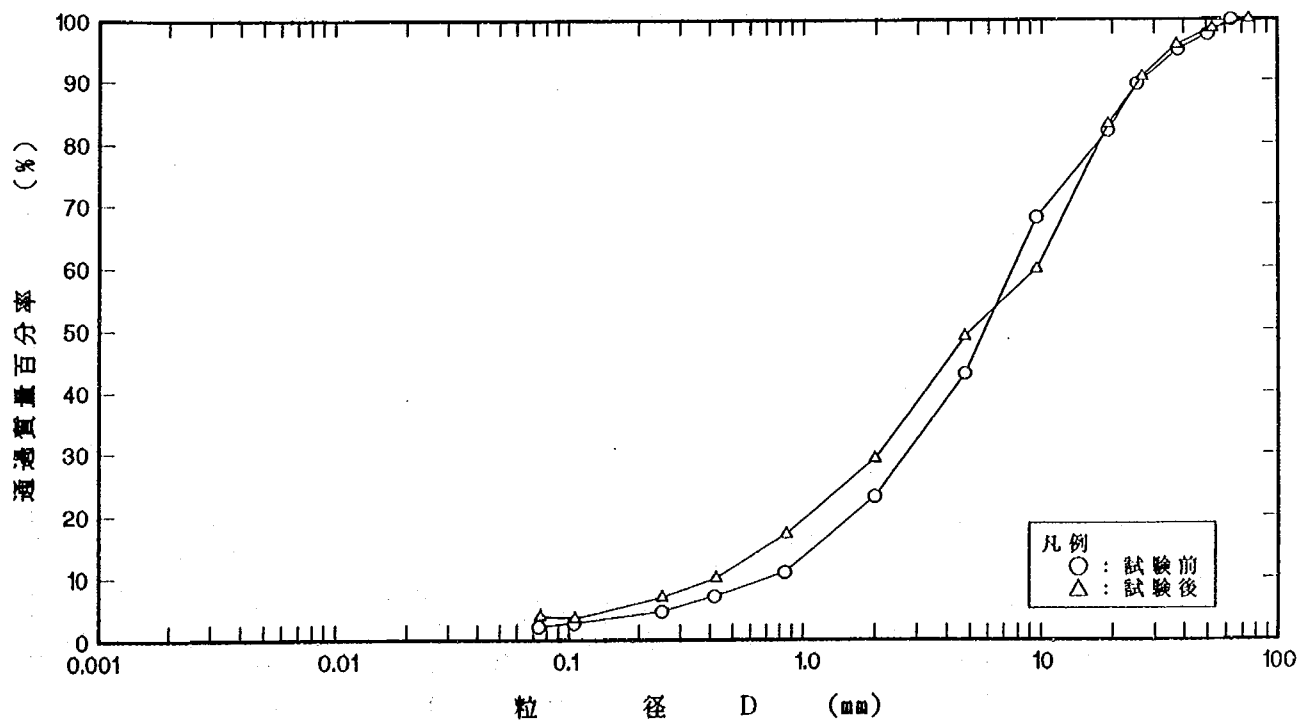


(b) 粒径加積曲線

図-2.6 締固め試験結果 (輝緑凝灰岩 B 粒度)

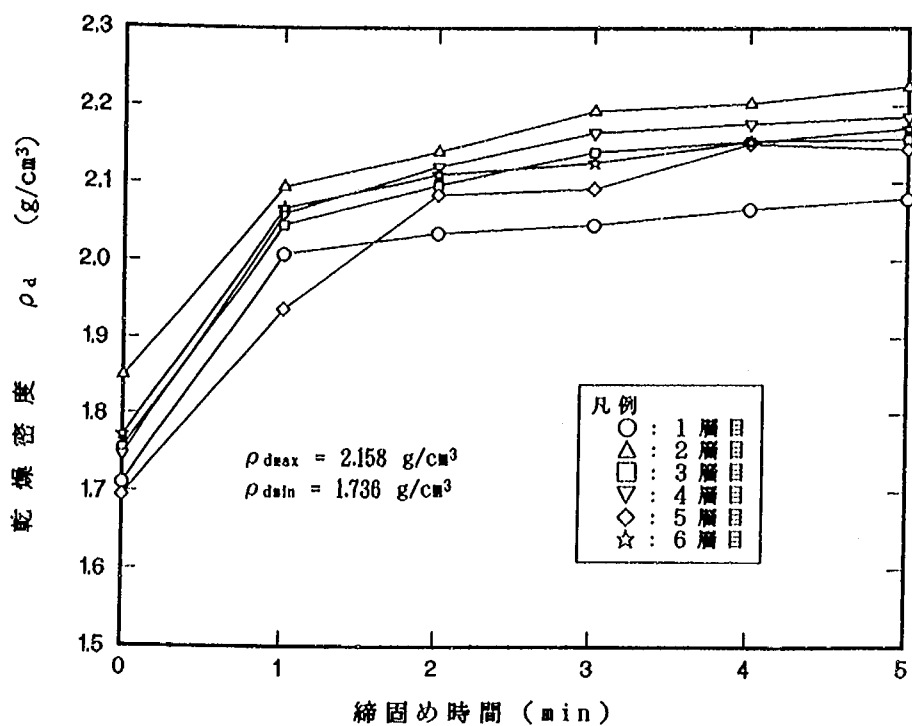


(a) 乾燥密度と締固め時間の関係



(b) 粒径加積曲線

図-2.7 締固め試験結果 (輝緑凝灰岩 (塊状) A 粒度)



(a) 乾燥密度と締固め時間の関係

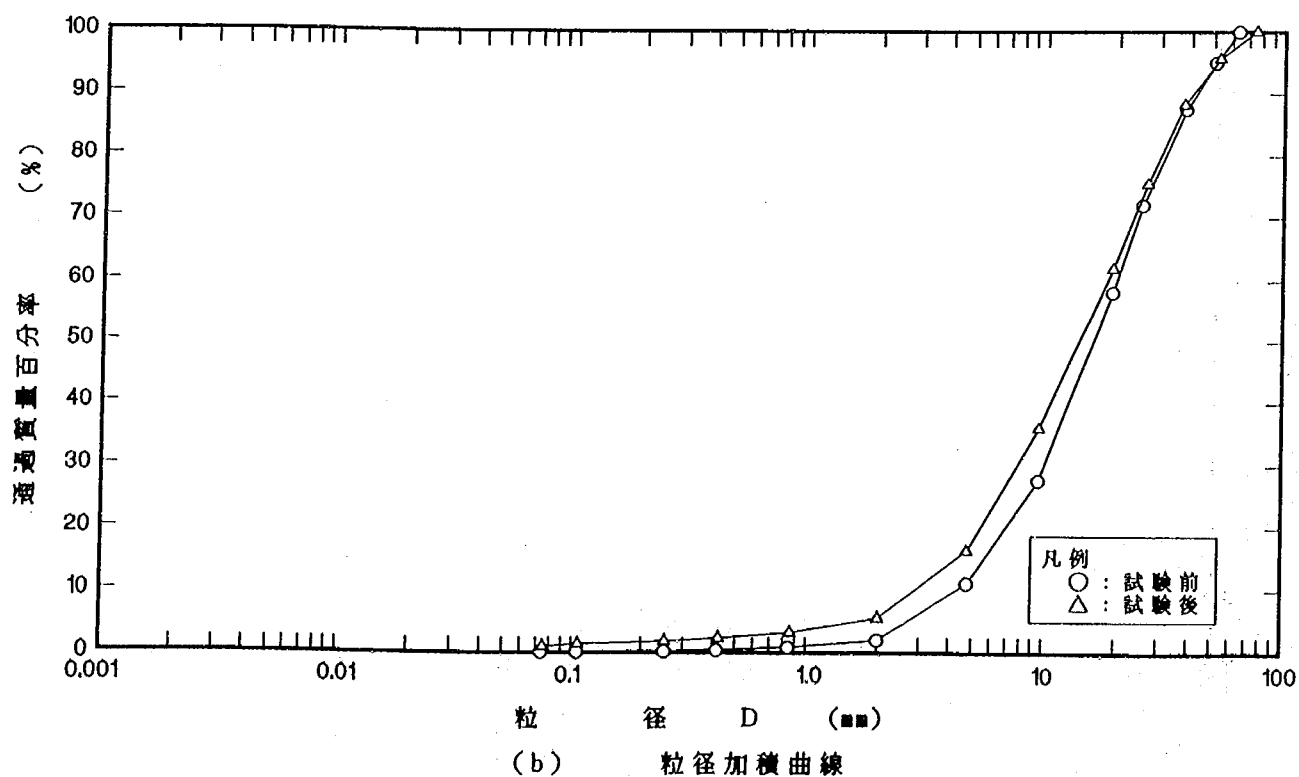
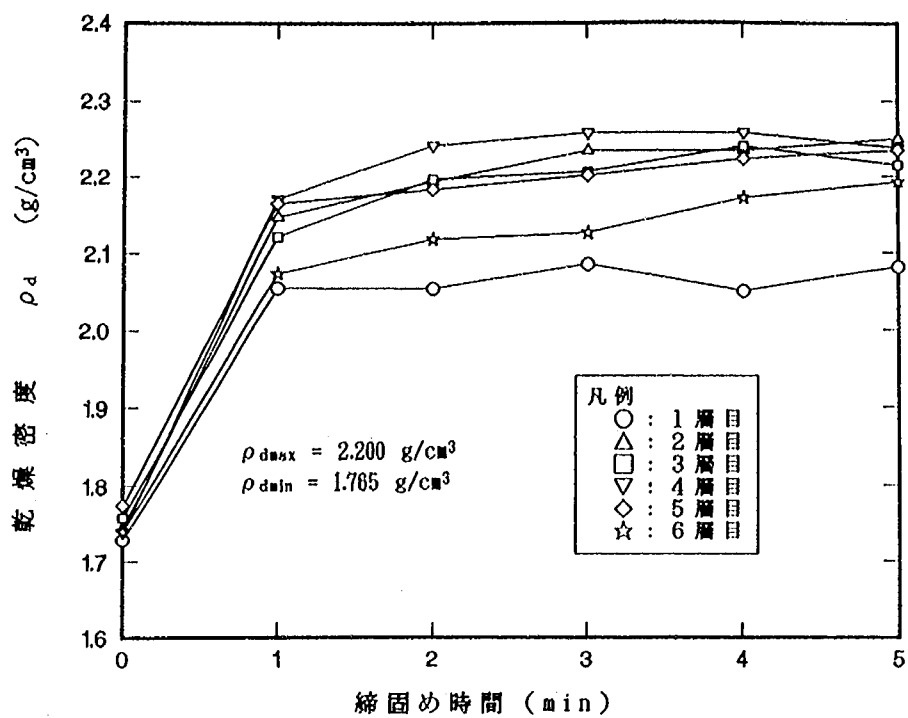
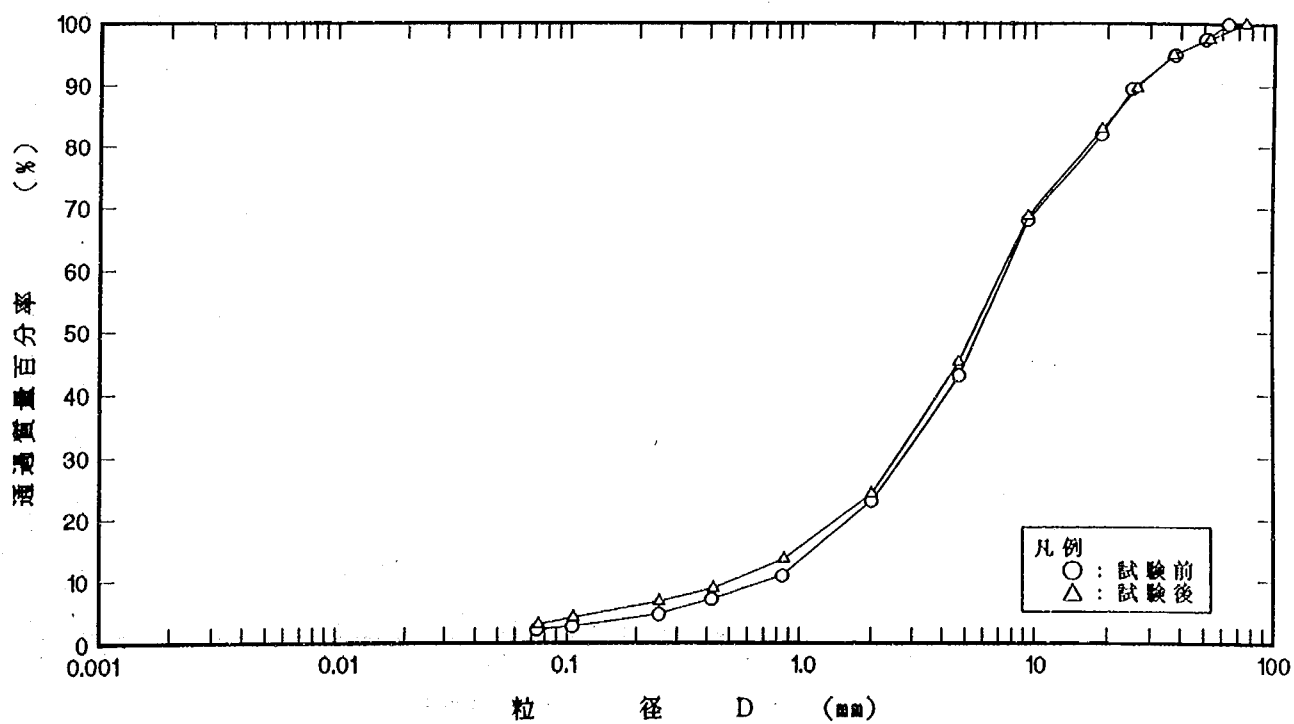


図-2.8 締固め試験結果 (輝緑凝灰岩 (塊状) B 粒度)

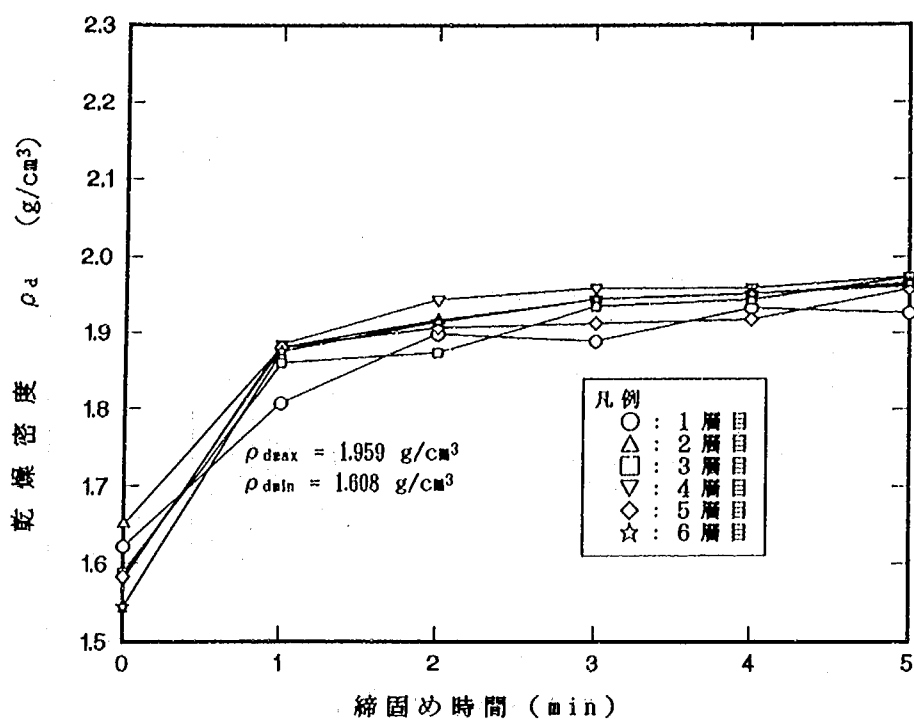


(a) 乾燥密度と締固め時間の関係

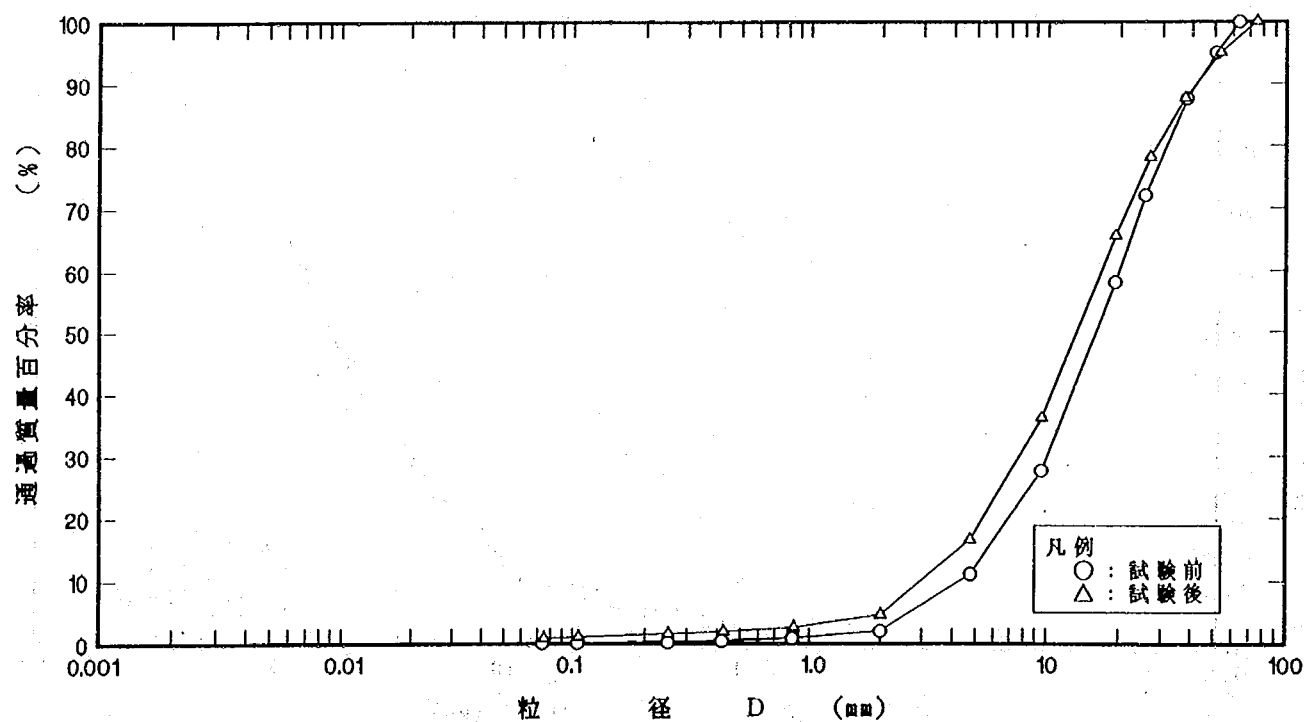


(b) 粒径加積曲線

図-2.9 締固め試験結果 (砂岩 A 粒度)



(a) 乾燥密度と締固め時間の関係



(b) 粒径加積曲線

図-2.10 締固め試験結果 (砂岩 B 粒度)

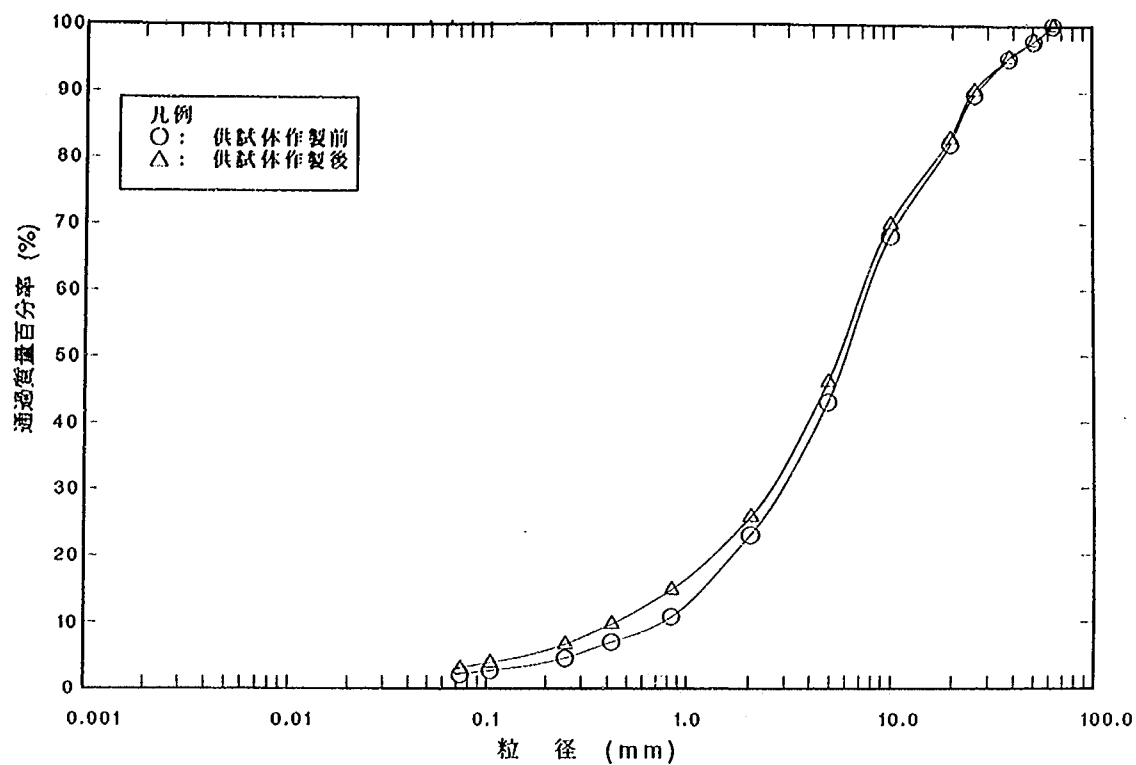


図-2.11(a) 供試体作製前後の粒度分布の変化（輝綠凝灰岩）

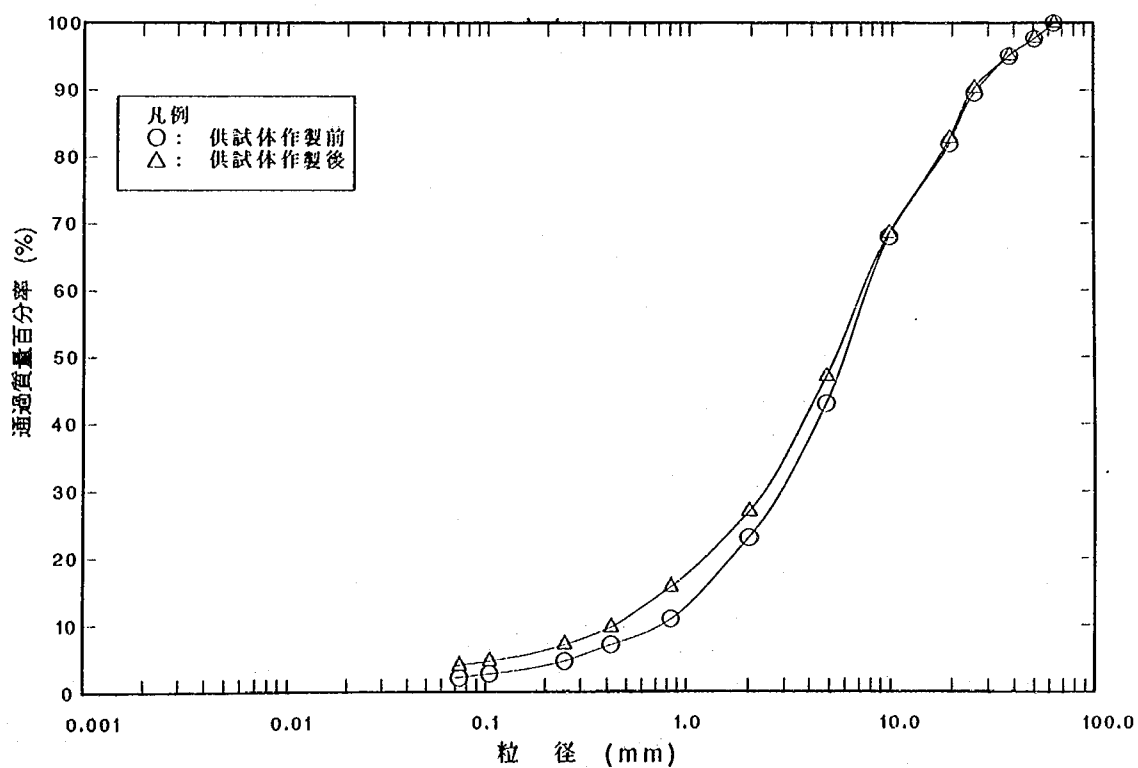


図-2.11(b) 供試体作製前後の粒度分布の変化（輝綠凝灰岩（塊状））

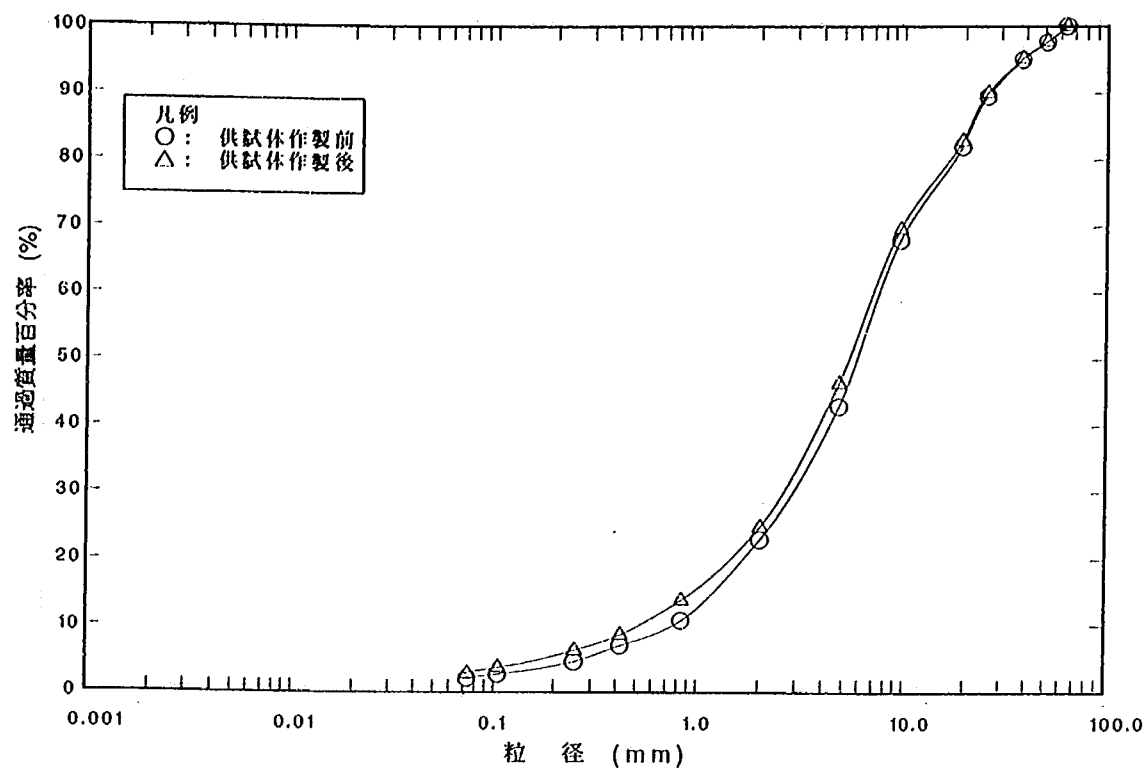


図-2.11(c) 供試体作製前後の粒度分布の変化 (砂岩)

3. 繰返し三軸試験

3.1 供試体作製、飽和方法

供試体は内径 300mm × 高さ 600mm の二つ割りモールドを用い、1 供試体当たり 6 層に分けて所定の密度になるように振動ランマーで締固めて作製した。

以下に供試体作製、試験装置へのセットおよび飽和方法の手順を示す。

- ①下部試料座にゴムスリーブをセットする。
- ②モールドを組立て、真空ポンプでゴムスリーブを引き、モールドに密着させる。
- ③あらかじめ粒度ごとに計量し、混合しておいた 1 層当たりの試料をモールドに投入する。なお、この際、粒径の大きい礫が均等に分布するよう注意した。
- ④振動ランマーで締固めを行う。締固めは試料が均一に締まるように試料とランマーの間に厚さ 20mm、直径 290mm の鉄板を敷いて行った。
- ⑤試料表面の高さを測定し、所定の高さに達していない場合、さらに締固めた。
- ⑥層間の密着を図るために試料の表面を攪乱し、次層の試料を投入する。
- ⑦上記③～⑥の操作を 6 層分繰返し行った。
- ⑧载荷キャップを上部にセットし、ゴムスリーブをゴム紐で締め付ける。
- ⑨三軸室へセットし、供試体内部に -30kPa の負圧を加える。
- ⑩2 枚目のゴムスリーブをかぶせ、シールする（B 粒度のみ）。
- ⑪三軸室外筒を設置し、三軸室に水を満たす。
- ⑫拘束圧を 30kPa 加えると同時に供試体内部の負圧を解放する。
- ⑬CO₂を約 15kPa の圧力で供試体下部から 3 時間程度通気する。
- ⑭脱気水を水頭差約 2m(20kPa) で供試体下部から通水する。
- ⑮背圧を 0.2MPa 加える。
- ⑯B 値を計測し、B 値 ≥ 0.95 を確認し、拘束圧を加え、圧密を行う。

3.2 試験方法

繰返し三軸試験は図-3.1に示すようなステージテストとした。すなわち、ある拘束圧 σ_c' で圧密し、圧密完了後、繰返し応力を段階的に大きくしてゆき、その時のせん断ひずみ γ が 5×10^{-4} 付近まで達すると次の拘束圧段階へ進み、同様の操作を繰り返すかたちで実施した。繰返し载荷の方式は応力制御とし、0.1Hz の正弦波により载荷した。1 ステージ当たり 12 回载荷を繰返し、そのうちの 10 波目をせん断剛性率、減衰定数、ポアソン比の算出データとして採用した。各ステージでの拘束圧は 0.10, 0.20, 0.29, 0.39, 0.59MPa の順に上昇させた。試験実施条件一覧を表-3.1に示す。

また、表-3.2に供試体条件を示す。このように、各々の岩種において排水条件、飽和条件、粒度分布、相対密度および主応力比をそれぞれ変化させて繰り返し三軸試験を行った。この中で、主応力比を変化させたものは少し注意を要する。今回の試験ではすべて有効拘束圧 σ_c' を一致させたため、例えば $\sigma_c' = 0.10\text{MPa}$ 、 $\sigma_1 / \sigma_3 = 2.0$ という場合は、 $\sigma_1 = 0.20\text{MPa}$ 、 $\sigma_3 = 0.10\text{MPa}$ となる。

試験時の各測定データのサンプリングは载荷1周期あたり100点の計測値が得られるようにサンプリング周波数10Hzで行った。そのデータはA/D変換された後、パソコンのハードディスクに収録された。A/Dコンバータの分解能は16ビットであり、解析に十分な精度を有している。しかしながら、微小ひずみ領域のデータには高周波数の電氣的ノイズが含まれていることが多く、このノイズをデータ処理前に除去しなければならない。そのため、繰返し载荷周波数の10倍以上の高周波数成分(1Hz以上)と1000分の1以下の長周期成分(0.0001Hz以下)をFFTバンドパスフィルターで取り除いた。FFTフィルターによる処理例を図-3.2に示す。このように、FFTフィルター処理を行うことにより電氣的ノイズが取り除かれなめらかなループが得られた。

せん断剛性率 G とせん断ひずみ γ は、(3.1)～(3.3)式に示すように、体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_1 から求めたポアソン比 ν_d を介して変形係数 E および軸ひずみ ϵ_1 から求めた。

$$\nu_d = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_1} \right] \quad \text{----- (3.1)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu_d)} \quad \text{----- (3.2)}$$

$$\gamma = \epsilon_1 (1 + \nu_d) \quad \text{----- (3.3)}$$

また、減衰定数(履歴減衰定数) h は図-3.3に示されるような W 、 ΔW を使用して次式により求めた。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \text{----- (3.4)}$$

3.3 繰返し三軸試験結果

3.3.1 ひずみ依存性

各岩種別、試験条件別のせん断剛性率 G とせん断ひずみ γ の関係を図-3.4～3.6に示す。ほとんどの試験結果において微小ひずみ領域($\gamma = 1.0 \times 10^{-6}$ 程度以下)でせん断剛性率が一定値に収束しており、微小領域でのひずみの測定が良好であることが窺える。

さらに、これらの図から読みとった初期せん断剛性率 G_0 ($\gamma = 1.0 \times 10^{-6}$ のときの G)により G を正規化したせん断剛性率比(G/G_0)と γ との関係を図-3.7～3.9に示す。これらの曲線を岩種ごとに平均し

たものを礫およびロック材の粗粒材料と砂についての他の研究結果と比較する。(G/G_0) $\sim\gamma$ 関係を比較したものが図-3.10である。図-3.10に付記した他の研究結果としては、Yasuda and Matsumoto⁶⁾はロックフィルダム(七ヶ宿ダム)の石英安山岩質のロック材の角礫材、中村ら⁵⁾はロックフィルダム(三国川ダム)の斑れい岩質のロック材の角礫材・ロックフィルダム(寒河江ダム)の粗粒玄武岩質のロック材の角礫材、Hynes et al.⁷⁾はFolsomDam材料の円礫材、Seed et al.⁸⁾はグラベルフィルダム(Oroville Dam)のシェル材である円礫材とロックフィルダム(Pyramid Dam)のシェル材である角礫材、Konno et al.⁹⁾は洪積砂礫層の再構成材、Shibuya et al.¹⁰⁾は攪乱した isomi 砂礫、Hatanaka et al.¹¹⁾は洪積の東京礫層の再構成材、および社本ら¹²⁾は洪積の万田野砂礫層の再構成材を用いた繰返し三軸試験結果である。また Iwasaki et al.¹³⁾は拘束圧 0.10MPa での $D_{50}=0.162\sim 0.99\text{mm}$ のきれいな砂、シルト砂の再構成試料での共振法土質試験と繰返し中空ねじり単純せん断試験による結果である。本研究材料のせん断剛性率比結果は、付記した他の粗粒材料のひずみ依存曲線のほぼ中間程度に位置している。また、材料別にみると、礫材よりもやや下回っており、ロック材料とほぼ同等の値をとっている。本研究結果の3岩種について岩種別に比較すると、輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩(塊状)の(G/G_0)は砂岩のものよりひずみ依存による減衰傾向が大きい。

各条件での減衰定数 h とせん断ひずみ γ の関係を図-3.11~3.13に示す。全体的に微小領域($\gamma=1.0\times 10^{-5}$ 程度以下)では減衰定数は一定値に収束し、せん断ひずみが増加するにしたがって減衰定数も増加しており、既往の粗粒材料における研究結果^{9), 11), 2)}の傾向と同様である。せん断ひずみ γ が 1.0×10^{-5} 程度以下の微小せん断ひずみ領域での値は一部にバラツキが見られるもののほぼ安定しており、概ね2~5%程度を示している。これは豊浦砂等に見られるものよりやや高めの値となっているが、1.2.2および図-1.6に示されるように同一の試験機を使用しての豊浦砂に対する試験ではほぼ0となっており、ピストンの摩擦やサンプリング時間のずれ等、試験機、測定システムに起因する試験誤差ではないことは確認されている。図-3.11~3.13の曲線を岩種ごとに平均したものと礫およびロック材の粗粒材料についての他の研究結果と同一図に示したものが図-3.14である。本研究材料の減衰定数は他の研究結果より特に微小ひずみ領域において大きく、その傾向は輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩(塊状)で大きい。

各条件でのポアソン比 ν_v とせん断ひずみ γ の関係を図-3.15~3.17に示す。ポアソン比はほぼ一定値となっているが、せん断ひずみが大きくなってくると($\gamma>5\times 10^{-5}$)、ひずみの増大に伴って上昇するものがある。また、一部に大きなバラツキを示すものもあり、測定を慎重に行うことが必要であることがわかる。特に今回の試験では微小体積変化の測定に二重管式ビュレットを使用しているが、体積変化が大きくなってくるとビュレット内での水面の移動速度が速くなり、ビュレット管内面への水滴の付着や差圧計計測孔周辺の流れによる水圧の乱れ等の要因により計測が不正確となることが想定される。これを避けるためには、体積ひずみの大きさに合わせて適切な内径のビュレットに切り替え、水面の移動速度を一定以上に上げないようにするか、上記の問題に影響されないような別の測定方法による装置を使用する必要があると考えられる。ポアソン比の値はほぼ0.1から0.3程度に分布しており、他の粗粒材料に対する繰返し三軸試験の結果¹⁾^{6) 14) 15)}と同様となっている。

ところで、せん断剛性率 G およびせん断ひずみ γ は(3.2), (3.3)式に示されるように、弾性係数 E および軸ひずみ ε_1 からポアソン比 ν_v を介して求められる。すなわち、試験から直接求められるのは弾性係数 E 、軸

ひずみ ϵ および減衰定数 h である。これら、 E と ϵ および h と ϵ の関係の例を各岩種について図-3.18 ~ 3.19 に示す。

3.3.2 密度の影響

岩崎ら¹⁰⁾ や国生ら¹⁷⁾ による豊浦砂、粗粒材料の研究によれば、Hardin et al.¹⁸⁾ の提案した間隙比 e の関数 $\alpha = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ を用いて次式のように表し、 G の σ_c' に対する変化をかなり広いひずみ領域にわたって良く説明できるとしている。

$$\frac{G}{P_{at}} = K(\gamma) \cdot \alpha \cdot \left[\frac{\sigma_c'}{P_{at}} \right]^{m(\gamma)} \quad \text{----- (3.5)}$$

ここで、 $K(\gamma)$ 、 $m(\gamma)$ は材料の種類により決まる係数であり、材料ごとにひずみの大きさの関数として定義される。また、 G および σ_c' は大気圧 P_{at} ($=0.101325\text{MPa}$) で除し、無次元化している。

粗粒材料に対して (3.5) 式を適用した研究結果^{13) 14) 15)} では、この式の適用性は良好である。そこで、今回の粗粒材料の試験結果に対しても、この (3.5) 式の関係を活用し、間隙比の影響を取り除くために、特にせん断ひずみ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ における (G_0 / P_{at}) を α で除したものと (σ_c' / P_{at}) の関係を各岩種毎に示したものが図-3.20 である。各岩種とも回帰直線と各データとの相関性は高く、(3.5) 式を本研究での粗粒材料に適用したことの妥当性が確認され、異なる相対密度のものでも α で除すことによりせん断剛性率が一致するようになり、同一の取り扱いができることがわかる。また、図-3.21 は拘束圧の影響を避けるため G / P_{at} を (σ_c' / P_{at}) ^{$m(\gamma)$} で除したものと間隙比 e の関係を示したものであるが、各計測値は相対密度の違いにかかわらず $K(\gamma) \cdot \alpha$ で示される曲線によく一致している。以上により、本研究で対象とした締固め度合いの高い相対密度が 80 ~ 90% の範囲では (3.5) 式を適用することにより相対密度の異なる材料でも統一的に取り扱えることがわかる。

図-3.22 に相対密度 80% および 90% における減衰定数とせん断ひずみの関係を示す。相対密度が 80% から 90% の範囲では相対密度が異なっても減衰定数に与える影響は少なく、ほぼ一致した。

3.3.3 拘束圧の影響

(3.5) 式の関係を活用し、代表 4 せん断ひずみにおける間隙比の影響を取り除き無次元化したせん断剛性率 (G / P_{at}) / α と無次元化した拘束圧 (σ_c' / P_{at}) の関係を示したものが図-3.23 ~ 3.25 である。また、このときの各試験条件での $K(\gamma)$ および $m(\gamma)$ を表-3.3 に示す。ここで、 $m(\gamma)$ は図中の回帰直線の傾きを表しており、いずれの試験条件においても正の値を示している。このことは、拘束圧が増加するとせん断剛性率が上昇する傾向にあることを表している。

さらに、岩種別に $m(\gamma)$ とせん断ひずみ γ の関係を表したのが図-3.26 ~ 3.28 である。龍岡¹⁹⁾ によってまとめられた、豊浦砂での $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係を図-3.29 に、中村ら⁵⁾ による他岩種の粗粒材料の $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係を図-3.30 に示した。この $m(\gamma)$ の増加の大きさ、すなわち $m(\gamma) - m(\gamma = 10^{-6})$ (ここ

に、 $m(\gamma=10^{-6})$ はせん断ひずみ $\gamma=1.0 \times 10^{-6}$ のときの m を表す) は、せん断剛性率の拘束圧依存の程度を表しており、 $m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})$ が正に大きいほど G の γ の増大に対する減少の程度が小さくなる。すなわち、(3.5) 式の両辺をそれぞれ $\gamma=1 \times 10^{-6}$ のときの値で除すと、

$$\frac{G}{G_0} = \frac{K(\gamma)}{K(\gamma=10^{-6})} \cdot \left(\frac{\sigma_{c'}}{P_{at}} \right)^{n(\gamma)-n(\gamma=10^{-6})} \quad \text{..... (3.6)}$$

このとき、 $K(\gamma)/K(\gamma=10^{-6})$ は $\sigma_{c'}=P_{at}$ のときの G/G_0 であるので、

$$\frac{G}{G_0} = \left[\frac{G}{G_0} \right]_{\sigma_{c'}=P_{at}} \cdot \left(\frac{\sigma_{c'}}{P_{at}} \right)^{n(\gamma)-n(\gamma=10^{-6})} \quad \text{..... (3.7)}$$

これにより、 $m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})$ の大きさが G の拘束圧依存性の程度を表していることがわかる¹⁹⁾。本研究で試験した粗粒材料は豊浦砂や岩種の異なる粗粒材料と同様にせん断ひずみ γ が増大するにしたがって $m(\gamma)$ が増加している。つまり、 G に拘束圧依存性があり、 G の γ の増大に対する減少の程度が小さくなっている。

減衰定数 h についても、 e の関数 $\beta=(0.4+1.5 \times e)^{2.0}$ を用いることによって $h \sim \sigma_{c'}$ 関係は次式により表される。

$$h = L(\gamma) \cdot \beta \cdot (\sigma_{c'}/P_{at})^{n(\gamma)} \quad \text{..... (3.8)}$$

今回の試験結果に対して上式の適用性を確認するため、 h/β と $(\sigma_{c'}/P_{at})$ の関係を各岩種について示したものが図-3.31~3.33である。図に示されるように、回帰直線と各データの相関は $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_{c'}/P_{at})$ 関係ほどではないが、(3.8) 式の適用の妥当性が確認された。また、回帰直線の傾きである $n(\gamma)$ と γ の関係を岩種別にまとめたものを図-3.34に、各試験条件での $L(\gamma)$ と $n(\gamma)$ を表-3.4に示す。 $n(\gamma)$ は0に近い値を取っている。つまり、減衰定数は拘束圧の影響は小さいといえる。龍岡¹⁹⁾によると、砂における $n(\gamma)$ は負の値をとり、 γ が 10^{-4} あたりで -0.5 であり、 γ の値がそれより大きくなると大きくなるとしている。つまり、減衰定数は γ が微小範囲では拘束圧依存性がある。今回の粗粒材料における試験では h の測定精度の問題からか、砂における $n(\gamma)$ とは大きく異なる結果となった。

3.3.4 粒度分布の影響

中村ら⁵⁾ は、本研究の岩種とは異なる粗粒材料を用いて、均等係数 U_e とせん断剛性率の関係について、均等係数が5~40程度の範囲では均等係数が大きくなるにつれてせん断剛性率が低下する傾向にあることを明らかにしている(図-3.35)。本研究の試験結果について、間隙比と拘束圧の影響を取り除くため、(3.5) 式により、 G_0 を α および $\sigma_{c'}^{m(\gamma)}$ で除したものと U_e の関係を岩種ごとに示したのが図-3.36である。今回の試験材料についても中村らの結果と同様に U_e が4から10程度の範囲では U_e が増加するとともに G_0 は低下している。

3.3.5 岩種の影響

本研究の試験に使用した輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）および砂岩の3岩種のせん断剛性率と拘束圧の関係について比較した一例を図-3.37に示す。これらは相対密度 $Dr=80\%$ 、 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ の排水、飽和条件のもので、A粒度とB粒度に対する試験結果である。ただし、せん断剛性率 G は間隙比の影響を取り除くため、(3.5)式を用いて、 α で除している。また、せん断剛性率、拘束圧とも無次元化するため大気圧 P_{at} で除している。このように、 $\gamma=1.0 \times 10^{-6}$ 程度のひずみが微小な領域では輝緑凝灰岩と輝緑凝灰岩（塊状）は同程度のせん断剛性率を示しているが、砂岩の値はやや低めのものとなっている。しかし、ひずみが増大し、 $\gamma=1.0 \times 10^{-3}$ 程度に達すると三者とも同程度のせん断剛性率となっている。

また、それぞれのせん断剛性率の拘束圧依存性を調べるため、 $m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})$ とせん断ひずみ γ の関係を示した一例を図-3.38に示す。これは、相対密度 $Dr=80\%$ および 90% に対するもので、A粒度およびB粒度、 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ の排水、飽和条件となっている。粒度分布の差による違いはあまり見られないが、岩種別では、拘束圧依存性の大きい（すなわち、拘束圧の増大に伴い、 γ の増大に対する G の減少の程度が小さくなる）方から輝緑凝灰岩（塊状）、砂岩、輝緑凝灰岩の順となっている。ただし、 $Dr=80\%$ では輝緑凝灰岩のB粒度の拘束圧依存性が最も大きくなっている。

減衰定数について岩種による比較を行った例を図-3.39に示す。A粒度については岩種の差による減衰定数の違いは明確には見られないが、B粒度に関しては減衰定数の大きい方から順に輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）、砂岩となっている。

3.3.6 排水条件の影響

(3.5)式より、間隙比の影響を取り除いた初期せん断剛性率 G_0 ($\gamma=1.0 \times 10^{-6}$ のときの G) と拘束圧 σ_3' の関係について、各岩種ごとに載荷試験中の排水条件の影響を比較したものが図-3.40である。これによると輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩（塊状）では非排水条件よりも排水条件のものの方が初期せん断剛性率が高くなっているが、砂岩については非排水条件の方が高くなっている。ただし、3岩種とも非排水条件では初期せん断剛性率は同程度となっている。

せん断剛性率の拘束圧依存性を表す $m(\gamma) - m(\gamma=1 \times 10^{-6})$ とせん断ひずみ γ の関係を図-3.41に示す。図より、非排水条件のものがやや依存性が大きい傾向にある。

減衰定数については砂岩を使用して排水と非排水を比較したものを図-3.42に示す。測定されたひずみ範囲では非排水条件の方が減衰定数が若干小さくなっている。

3.3.7 飽和条件の影響

安田ら²¹⁾は粗粒材料として斑れい岩および粗粒玄武岩を用いて、飽和させた供試体と不飽和（気乾）の供試体に対して繰返し三軸試験を行った。その結果、図-3.43に示すように、いずれの岩種の材料においても飽和させたときの初期せん断剛性率は不飽和条件下のものより10%程度小さくなったと報告している。その原因として、飽和することにより岩石間の接触面に水が浸透し、摩擦力が低下することによって変形が

容易になると推定している。

今回の試験における間隙比の影響を取り除いた初期せん断剛性率と拘束圧の関係を図-3.44に示す。今回の試験では砂岩が上記に記した安田らの試験結果と同様の傾向を示し、飽和条件の初期せん断剛性率が気乾条件より低下しているが、輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩（塊状）は飽和、気乾条件ともほぼ同程度の初期せん断剛性率となっている。各岩種について飽和材料と気乾材料の繰返し三軸試験前後の粒度分布の変化を図-3.45に、破碎率を表-3.5に示す。

表-3.5に示されるように、破碎の大部分は供試体作製時に生じている。しかし、繰返し三軸試験実施中にも若干破碎は生じており、輝緑凝灰岩と輝緑凝灰岩（塊状）では気乾材料と飽和材料の破碎率がほぼ等しいが、砂岩については飽和材料の破碎率が気乾材料のそれを上回っている。このことにより、水浸により粒子の破碎が生じやすい材料は飽和により初期せん断剛性率が低下することが考えられる。ただし、破碎率試験はかなりバラツキが大きいと考えられ、各岩種毎の僅かな破碎率の差については試験のバラツキの範囲内にあるとも考えられる。

飽和状況によるせん断剛性率の拘束圧依存性への影響を見るために、 $m(\gamma) - m(\gamma = 1 \times 10^{-6})$ とせん断ひずみ γ の関係を図-3.46に示す。図より、飽和、気乾条件の別による拘束圧依存性の差は認められない。

砂岩において飽和条件が減衰定数に及ぼす影響を表したものが図-3.47である。ひずみの大小に拘わらず、飽和条件の減衰定数が気乾条件のそれを若干上回っている。

3.3.8 主応力比の影響

各岩種において、主応力比の違いが間隙比の影響を取り除いた初期せん断剛性率と平均主応力 σ_m' の關係に与える影響を示したものが図-3.48である。龍岡¹⁹⁾によれば、平均主応力が同じであり、 $\sigma_v' > \sigma_h'$ であれば、砂質土のせん断剛性率はあまり主応力比の影響は受けないとしている。今回の試験で各岩種において主応力比 $\sigma_1/\sigma_3=2$ の初期せん断剛性率の $\sigma_1/\sigma_3=1$ の初期せん断剛性率に対する比率を示したものが図-3.49である。ここで、今回の試験では異方圧密を行う場合、圧縮側のみとしており、そのため垂直応力 σ_v' は常に最大主応力 σ_1 と一致し、水平応力 σ_h' は常に最小主応力 σ_3 と一致している。そこで、本文中では主応力比 σ_1/σ_3 と表記している場合、すべて σ_v'/σ_h' を意味している。なお、今回の試験では拘束圧 σ_c' を一致させているため平均主応力 σ_m' は主応力比が異なると一致しない。そのため、 $\sigma_1/\sigma_3=2$ の初期せん断剛性率については $\sigma_1/\sigma_3=1$ と同じ平均主応力 σ_m' のときの値を図-3.48の回帰直線から読みとっている。また、図-3.49にはきれいな砂を用いた共振法土質試験結果¹⁹⁾も付記しているが、今回の試験結果はそれよりもかなり広い範囲となっている。岩種別には輝緑凝灰岩がほぼ1.0程度で、輝緑凝灰岩（塊状）はそれを上回り、砂岩は1.7～1.8程度とかなり大きい。

主応力比によるせん断剛性率の拘束圧依存性への影響を見るために、 $m(\gamma) - m(\gamma = 10^{-6})$ とせん断ひずみ γ の関係を図-3.50に示す。図より、輝緑凝灰岩および砂岩ではほぼ影響はみられないが、輝緑凝灰岩（塊状）では $\sigma_1/\sigma_3=1$ の方が $\sigma_1/\sigma_3=2$ よりも拘束圧依存性が高い傾向にある。

減衰定数に関しては、図-3.51に示されるように、主応力比の影響はほとんど受けていない。

3.3.9 セン断剛性率 G と減衰定数 h の関係

Hardin and Dmervich²²⁾ は土の G と h の関係を次式で表し, e, σ_c, γ の値によらない一義的な関係であるとしている.

$$h = h_{\max} \left[1 - \frac{G}{G_{\max}} \right] \quad \text{----- (3.9)}$$

ここに, $G_{\max}$: 最大せん断剛性率

$h_{\max}$: $G = 0$ のときの h

今回の粗粒材料の試験結果に対して (3.9) 式の適用性を検討するため, h と $G/G_{\max}$ の関係を示したのが 図-3.52 である. ただし, $G_{\max}$ として $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ における G_0 を用い, また, G/G_0 および h は試験値のバラツキをなくすために, それぞれ $G/G_0 \sim \gamma$ 図 (図-3.7~3.9), $h \sim \gamma$ 図 (図-3.11~3.13) で平均的な回帰曲線から読みとった. 図中には (3.9) 式による直線も示している. 図-3.52 から, (3.9) 式との相関性はあまり良くないが, $0.5 < G/G_0 < 0.8$ の範囲では (3.9) 式の直線との相関性は比較的良好である. しかし, $0.8 < G/G_0 < 1.0$ の範囲では, 微小ひずみ領域において減衰定数 h が 0 に収束しないことが影響し, (3.9) 式の直線から h が大きい方へはずれている. また, 輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩 (塊状) では主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ のケースは他のケースと比較し, h が大きい.

表-3.1 試験条件一覧表

項 目	条 件
供 試 体 寸 法	$\phi 300\text{mm} \times H600\text{mm}$
有 効 拘 束 圧	0.10, 0.20, 0.29, 0.39, 0.59 MPa
背 圧	0.20 MPa (飽和条件時)
載 荷 波 形	正 弦 波
載 荷 周 波 数	0.1 Hz
繰 返 し 回 数	12 回
採 用 波 数	10 波 目
サンプリング周波数	10 Hz
制 御 方 式	応力制御

表-3.2 供試体条件一覧表

岩 種	排水条件	飽和条件	粒度分布	D_r (%)	σ_1/σ_3	微小変位計
輝緑凝灰岩	排 水	飽 和	A	80	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	A	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	A	90	2.0	ギャップセンサー
	排 気	気 乾	A	90	1.0	ギャップセンサー
	非排水	飽 和	A	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	B	90	1.0	差動トランス
	排 水	飽 和	B	80	1.0	差動トランス
輝緑凝灰岩 (塊状)	排 水	飽 和	A	80	1.0	差動トランス
	排 水	飽 和	A	90	1.0	差動トランス
	排 水	飽 和	A	90	2.0	ギャップセンサー
	排 気	気 乾	A	90	1.0	ギャップセンサー
	非排水	飽 和	A	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	B	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	B	80	1.0	ギャップセンサー
砂 岩	排 水	飽 和	A	80	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	A	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	A	90	2.0	ギャップセンサー
	排 気	気 乾	A	90	1.0	ギャップセンサー
	非排水	飽 和	A	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	B	90	1.0	ギャップセンサー
	排 水	飽 和	B	80	1.0	ギャップセンサー

表-3.3 各試験条件でのK (γ), m (γ) 一覧表

岩 種	排水条件	飽和条件	粒度分布	D _r (%)	σ_1/σ_3	$\gamma = 1 \times 10^{-6}$		$\gamma = 1 \times 10^{-5}$		$\gamma = 1 \times 10^{-4}$		$\gamma = 1 \times 10^{-3}$	
						K	m	K	m	K	m	K	m
輝緑 凝灰岩	排水	飽和	A	80	1.0	853	0.548	825	0.549	576	0.548	169	0.718
	排水	飽和	A	90	1.0	931	0.418	842	0.451	566	0.522	187	0.646
	排水	飽和	A	90	2.0	995	0.640	942	0.648	635	0.692	208	0.925
	排気	気乾	A	90	1.0	844	0.496	796	0.505	568	0.532	246	0.697
	非排水	飽和	A	90	1.0	704	0.475	672	0.499	435	0.606	86	0.945
	排水	飽和	B	90	1.0	1258	0.562	1144	0.580	711	0.606	191	0.706
	排水	飽和	B	80	1.0	1025	0.605	962	0.613	600	0.712	134	1.223
輝緑 凝灰岩 (塊状)	排水	飽和	A	80	1.0	895	0.617	835	0.622	532	0.687	116	1.176
	排水	飽和	A	90	1.0	881	0.575	803	0.611	494	0.694	119	1.066
	排水	飽和	A	90	2.0	1460	0.522	1408	0.516	991	0.553	387	0.814
	排気	気乾	A	90	1.0	884	0.607	841	0.606	571	0.649	169	0.990
	非排水	飽和	A	90	1.0	645	0.494	615	0.511	422	0.596	91	0.969
	排水	飽和	B	90	1.0	1183	0.528	1100	0.556	730	0.615	179	1.003
	排水	飽和	B	80	1.0	1242	0.454	1163	0.466	783	0.545	224	0.833
砂岩	排水	飽和	A	80	1.0	461	0.573	457	0.572	368	0.589	172	0.677
	排水	飽和	A	90	1.0	550	0.485	545	0.482	457	0.493	169	0.770
	排水	飽和	A	90	2.0	1091	0.526	1038	0.542	774	0.587	370	0.786
	排気	気乾	A	90	1.0	660	0.560	641	0.563	478	0.635	182	0.942
	非排水	飽和	A	90	1.0	647	0.462	625	0.475	458	0.552	141	0.915
	排水	飽和	B	90	1.0	1042	0.423	993	0.439	733	0.513	286	0.712
	排水	飽和	B	80	1.0	966	0.417	923	0.435	643	0.540	243	0.739

表-3.4 各試験条件での $L(\gamma)$, $n(\gamma)$ 一覧表

岩 種	排水条件	飽和条件	粒度分布	D _r (%)	σ_1/σ_3	$\gamma = 5 \times 10^{-6}$		$\gamma = 1 \times 10^{-6}$		$\gamma = 5 \times 10^{-5}$		$\gamma = 1 \times 10^{-4}$	
						L	n	L	n	L	n	L	n
輝緑 凝灰岩	排水	飽和	A	80	1.0	5.073	0.020	5.434	0.011	9.331	0.004	11.663	0.032
	排水	飽和	A	90	1.0	3.196	0.330	3.651	0.272	6.320	0.161	7.841	0.192
	排水	飽和	A	90	2.0	5.857	0.142	6.421	0.161	9.444	0.247	11.755	0.257
	排気	気乾	A	90	1.0	3.959	0.009	4.446	-0.027	6.573	-0.017	7.959	0.027
	非排水	飽和	A	90	1.0	4.121	0.100	5.002	0.020	7.934	-0.084	9.821	-0.085
	排水	飽和	B	90	1.0	5.014	0.056	5.444	0.077	8.337	0.071	10.254	0.059
	排水	飽和	B	80	1.0	5.723	0.148	6.470	0.092	9.176	0.029	11.126	0.037
輝緑 凝灰岩 (塊状)	排水	飽和	A	80	1.0	6.002	-0.035	6.293	-0.042	9.624	-0.072	11.595	-0.024
	排水	飽和	A	90	1.0	5.882	-0.076	6.244	-0.062	9.177	-0.041	10.980	-0.009
	排水	飽和	A	90	2.0	4.909	0.149	5.318	0.128	7.410	0.196	8.989	0.261
	排気	気乾	A	90	1.0	4.268	0.120	4.900	0.065	7.258	-0.043	9.187	-0.066
	非排水	飽和	A	90	1.0	4.455	-0.131	4.900	-0.128	6.985	-0.092	8.479	-0.071
	排水	飽和	B	90	1.0	4.271	-0.113	4.488	-0.088	6.654	-0.049	8.068	-0.002
	排水	飽和	B	80	1.0	3.325	0.080	3.752	0.025	5.684	-0.018	7.092	-0.014
砂岩	排水	飽和	A	80	1.0	4.531	0.044	4.781	0.026	6.504	-0.026	7.813	-0.031
	排水	飽和	A	90	1.0	4.823	-0.061	5.002	-0.064	6.644	-0.034	8.240	-0.041
	排水	飽和	A	90	2.0	3.564	0.001	3.974	0.015	6.019	0.055	7.496	0.104
	排気	気乾	A	90	1.0	2.863	-0.014	3.084	-0.005	5.526	-0.064	7.133	-0.069
	非排水	飽和	A	90	1.0	3.287	0.056	3.670	0.033	5.577	-0.017	6.866	-0.031
	排水	飽和	B	90	1.0	3.553	-0.041	3.671	-0.041	4.870	-0.085	6.088	-0.111
	排水	飽和	B	80	1.0	4.137	-0.219	4.519	-0.214	6.297	-0.123	7.768	-0.084

表-3.5 気乾、飽和条件の繰返し変形三軸試験による破砕率の比較（ Δ 粒度， $Dr=90\%$ ）

岩 種	供試体作製時	変 形 試 験 後	
		気乾条件	飽和条件
輝緑凝灰岩	4.5%	4.5% (0.0%)	5.0% (0.5%)
輝緑凝灰岩（塊状）	5.2%	6.5% (1.3%)	5.5% (0.3%)
砂 岩	4.8%	5.5% (0.7%)	7.6% (2.8%)

注：下段（ ）内は供試体作製時との差

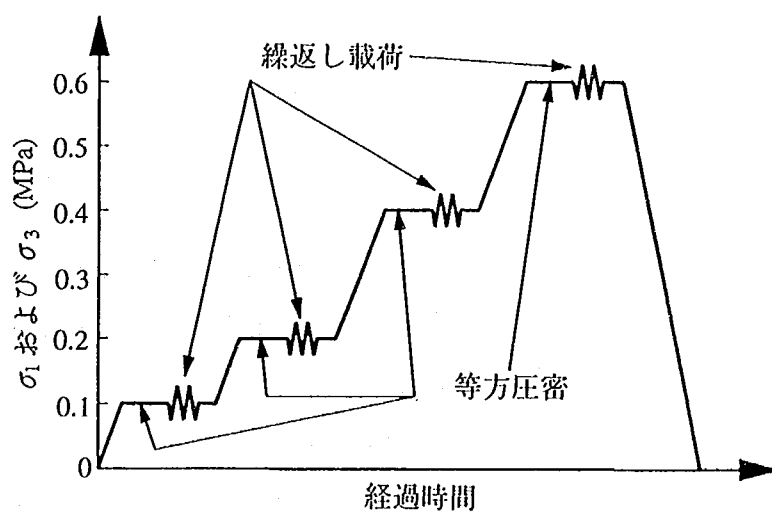


図-3.1 ステージテスト概念図

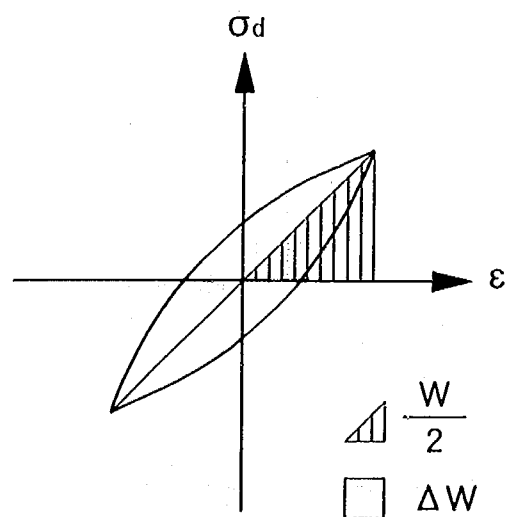


図-3.3 減衰の定義

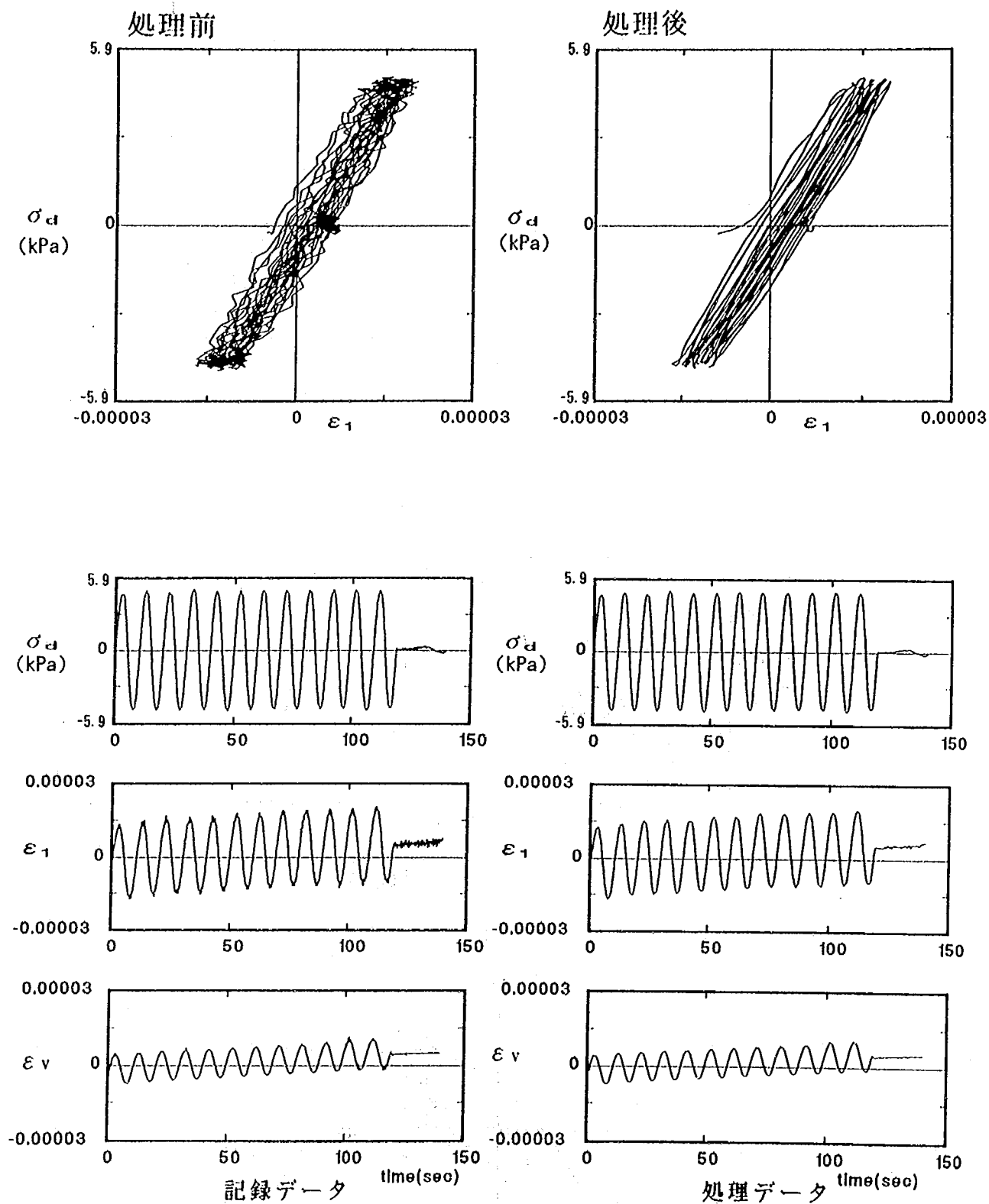


図-3.2 FFTバンドパスフィルターによるノイズの処理例
(砂岩, A粒度, $D_r=80\%$, 排水, 飽和, 主応力比1.0, $\sigma_3=0.10\text{MPa}$, step3)

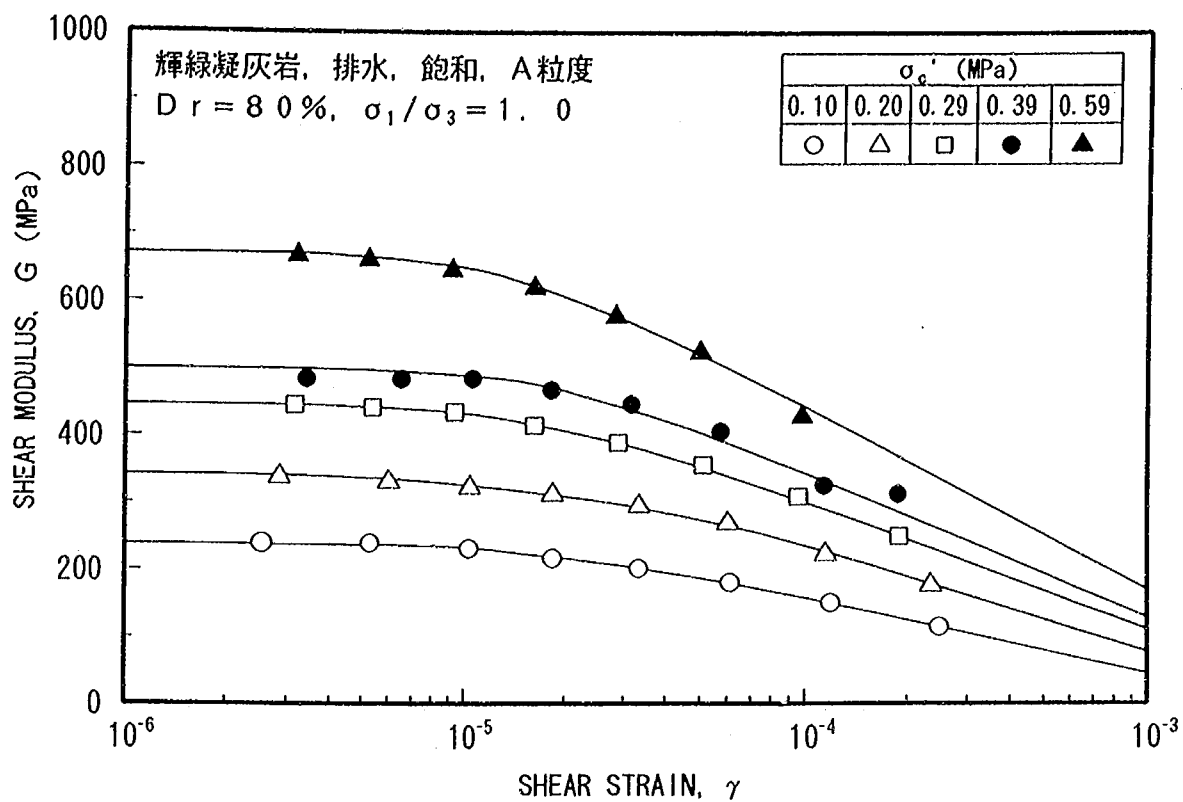


図-3.4(a) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

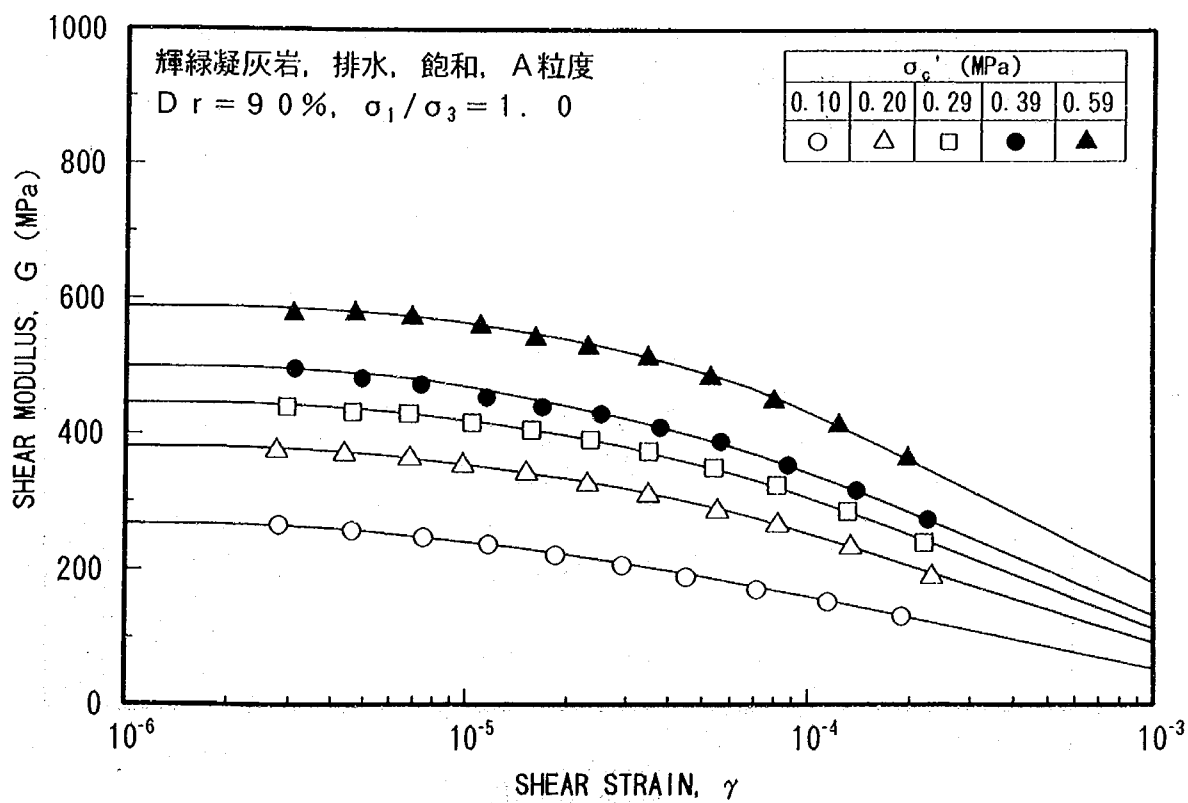


図-3.4(b) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

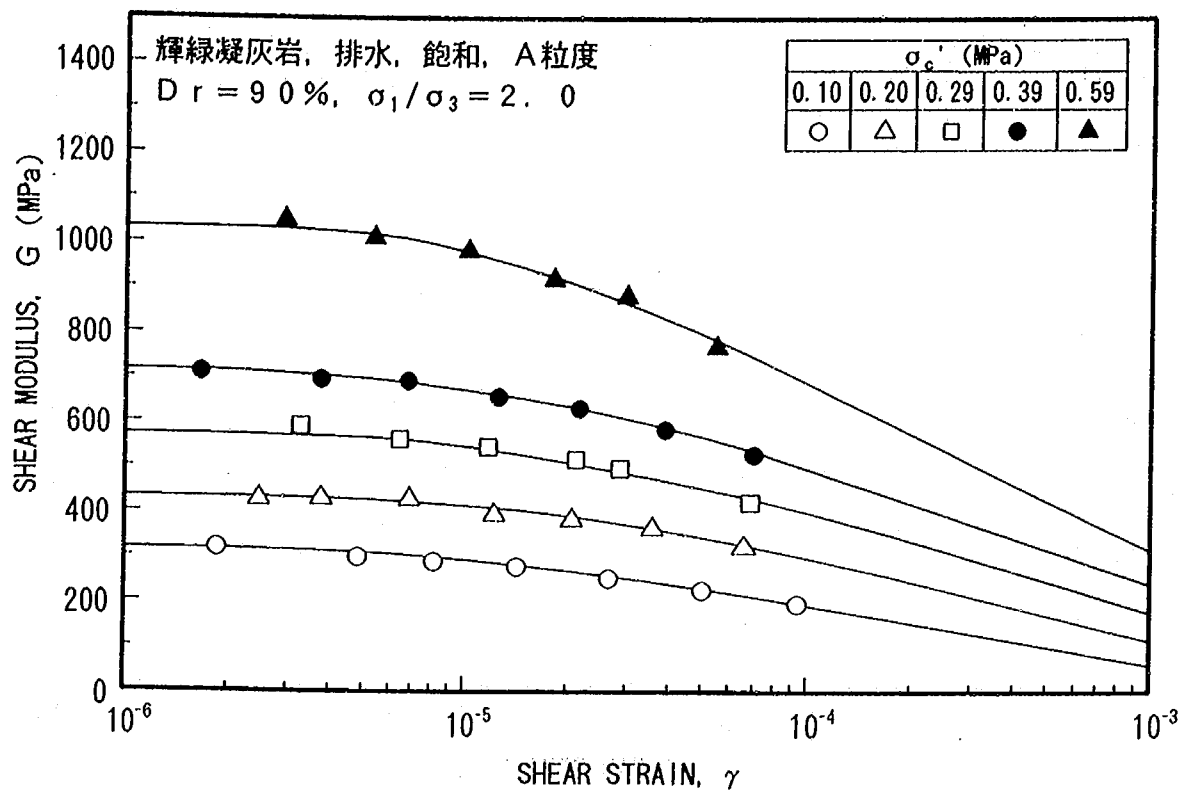


図-3.4(c) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

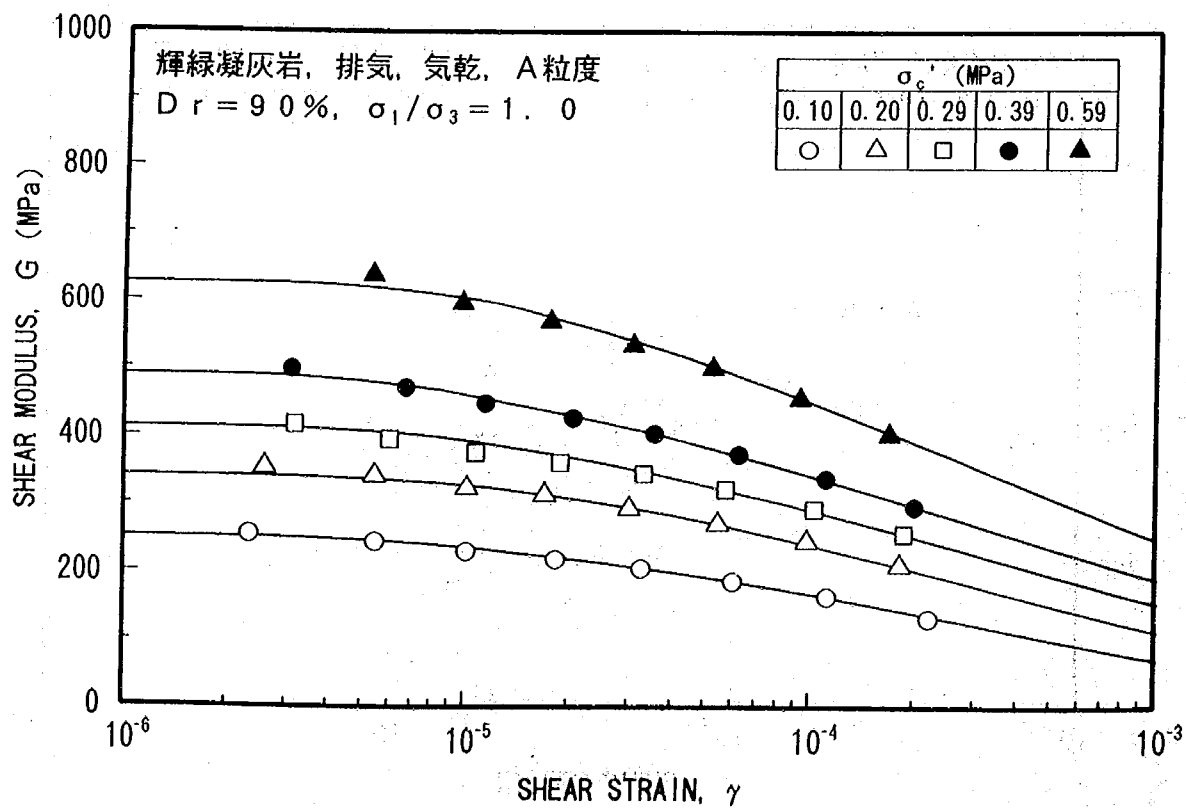


図-3.4(d) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

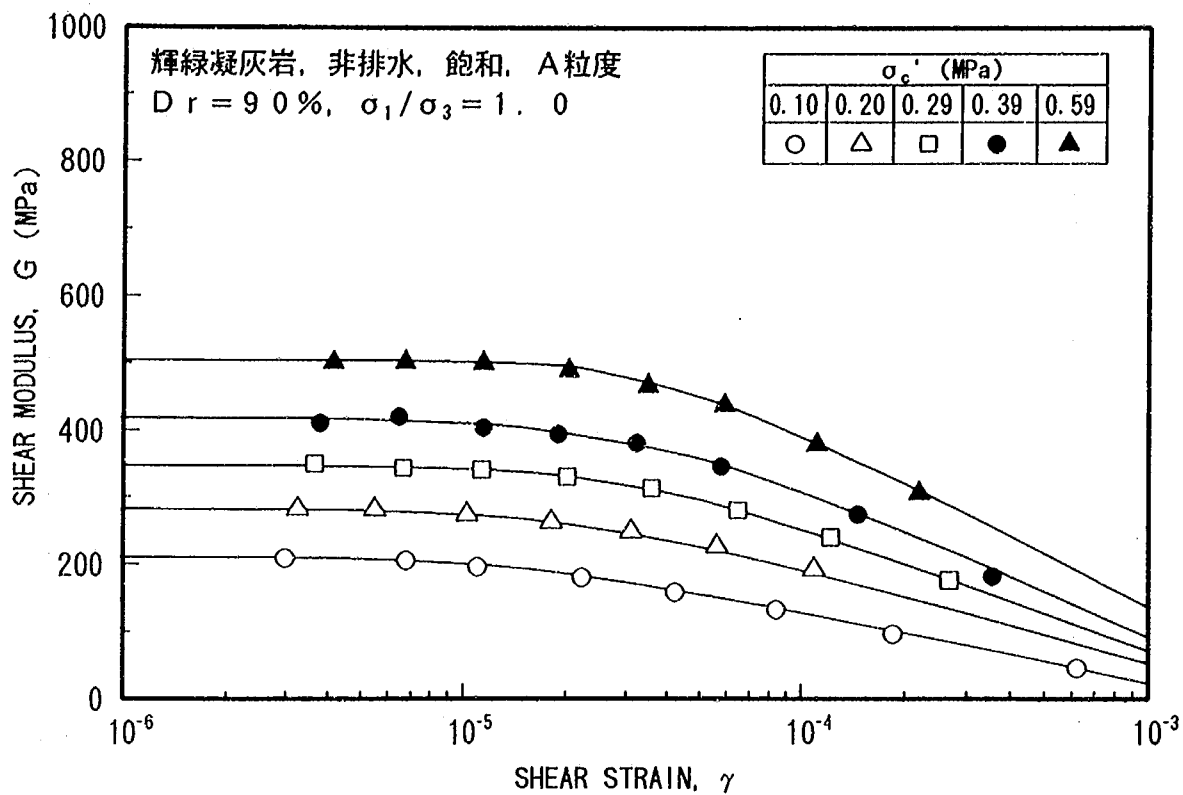


図-3.4(e) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

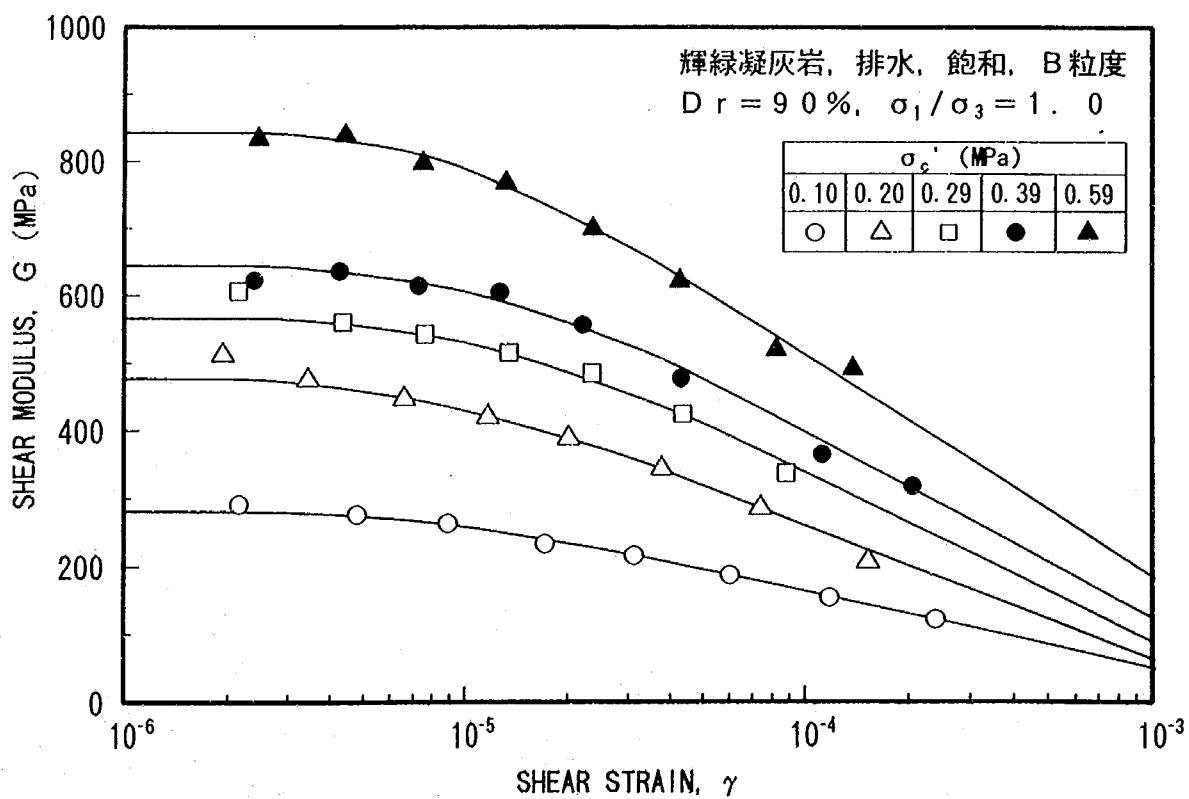


図-3.4(f) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

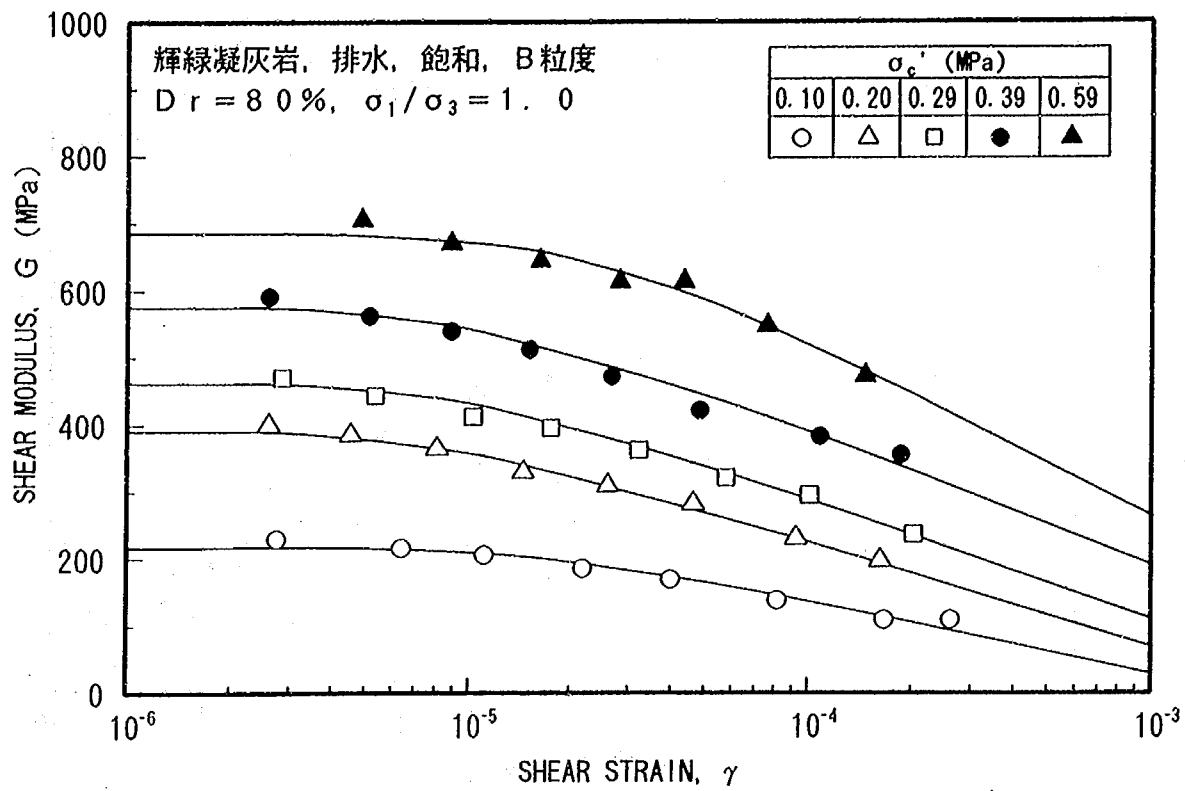


図-3.4(g) $G \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

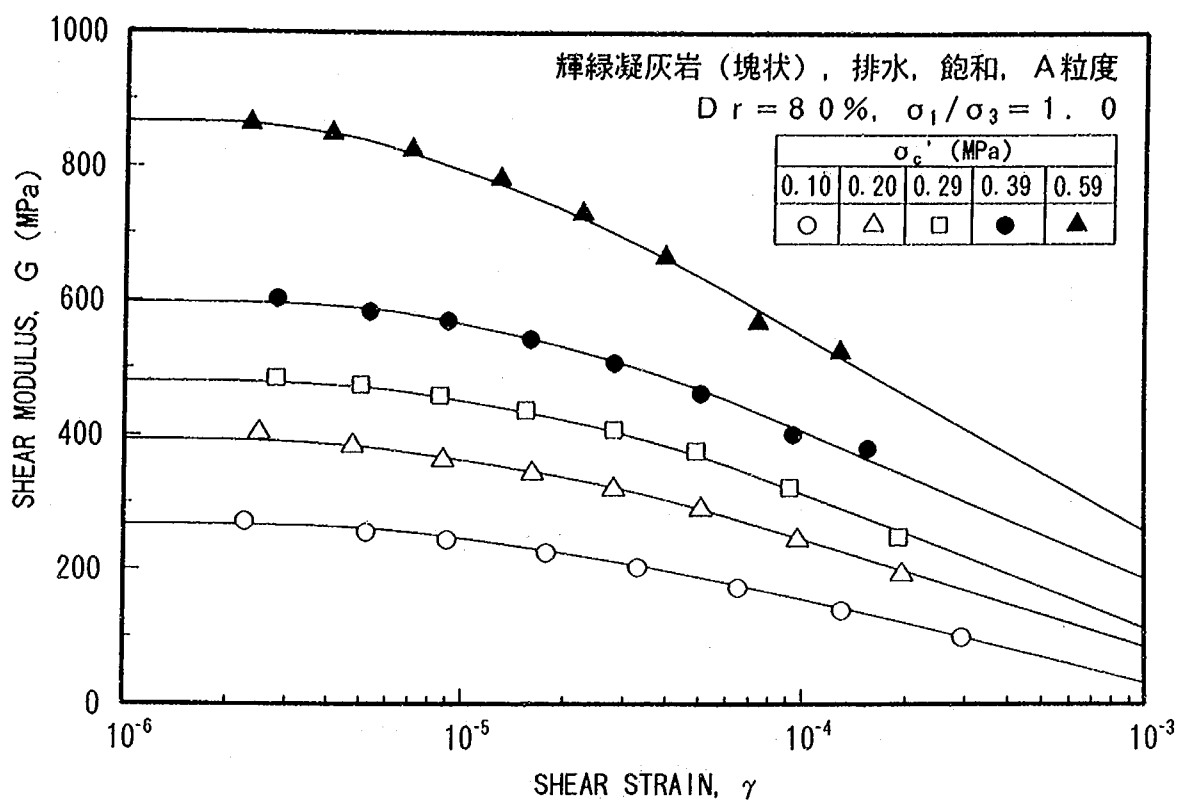


図-3.5(a) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

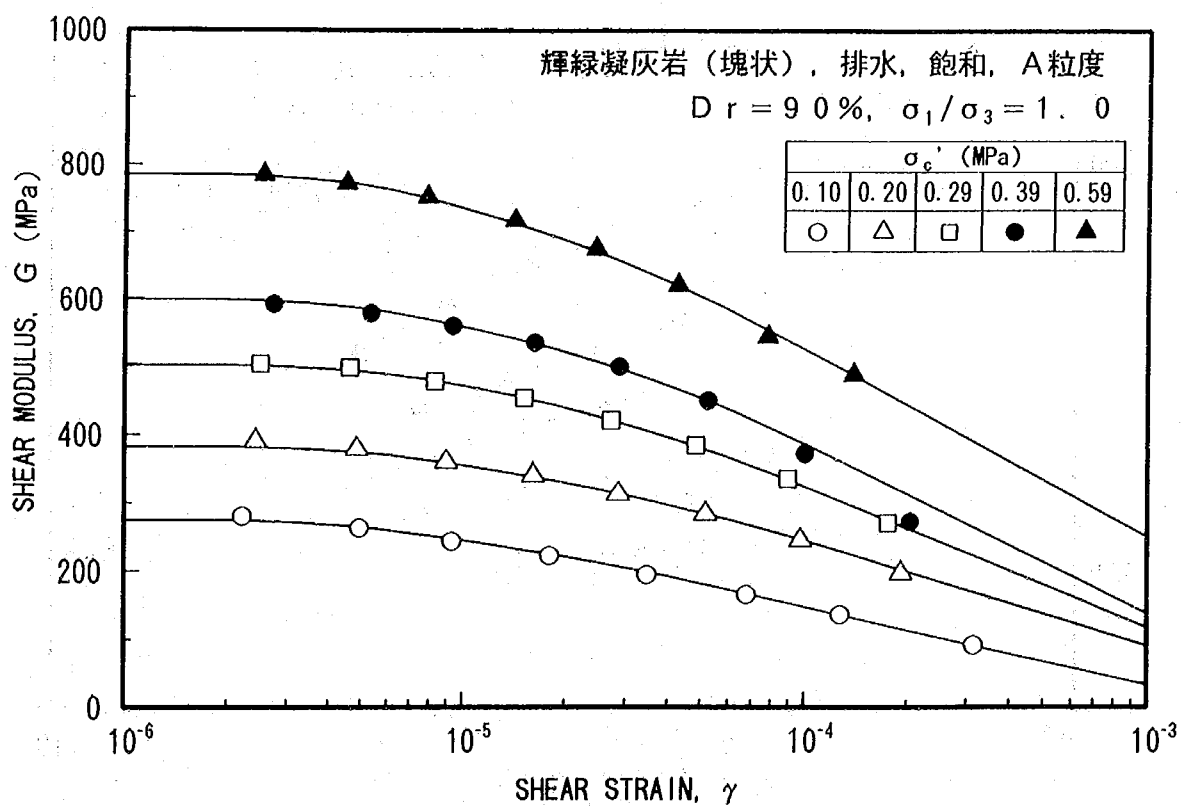


図-3.5(b) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

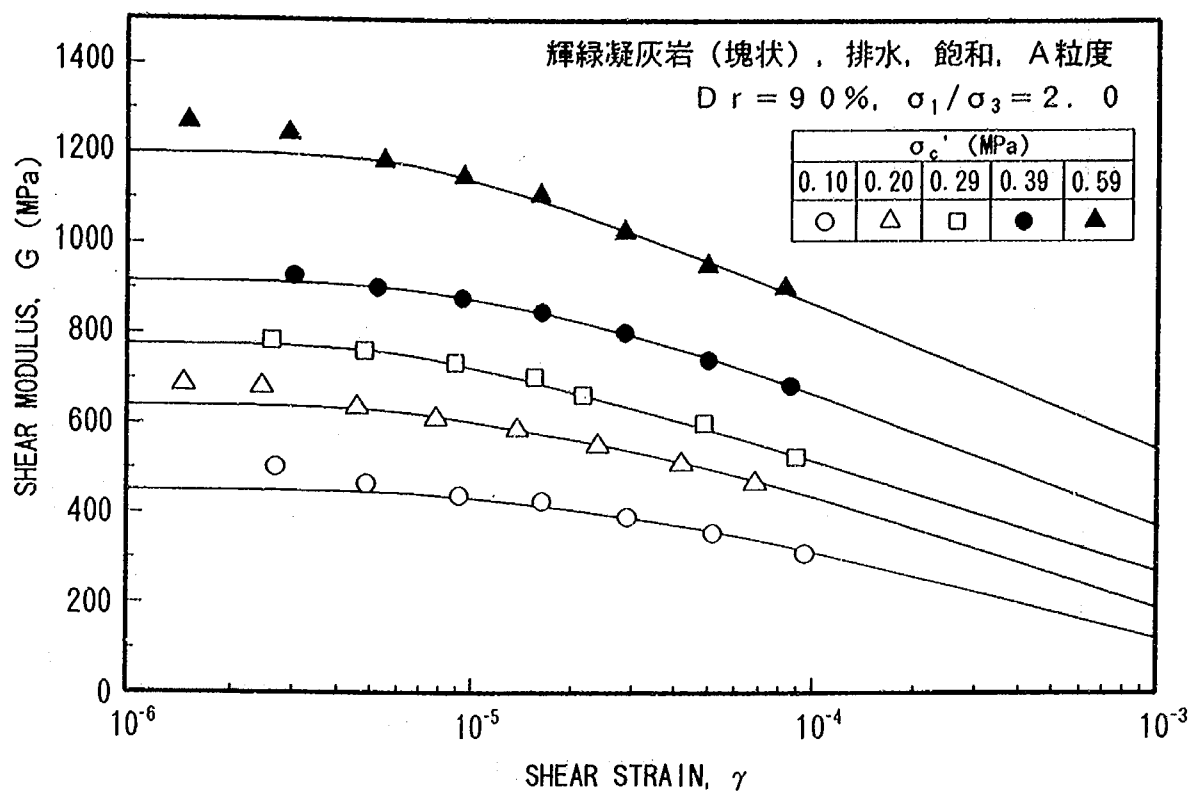


図-3.5(c) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

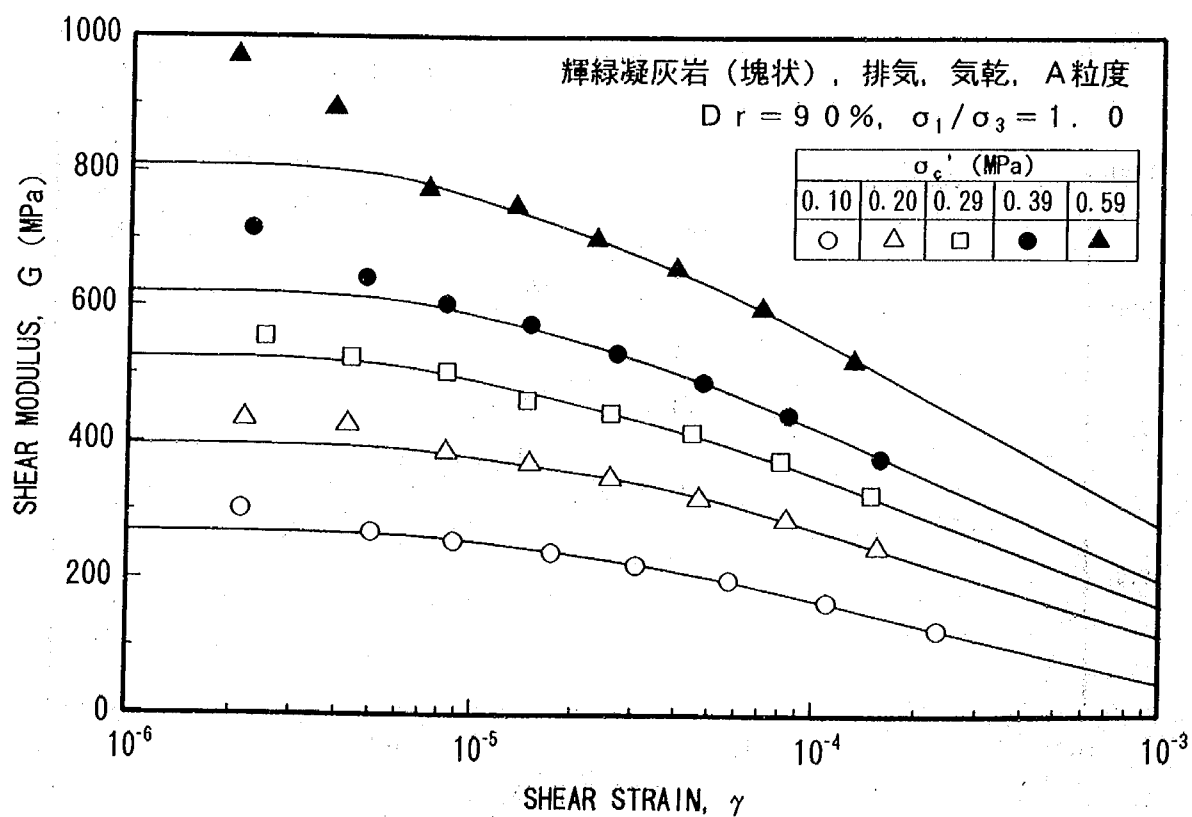


図-3.5(d) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

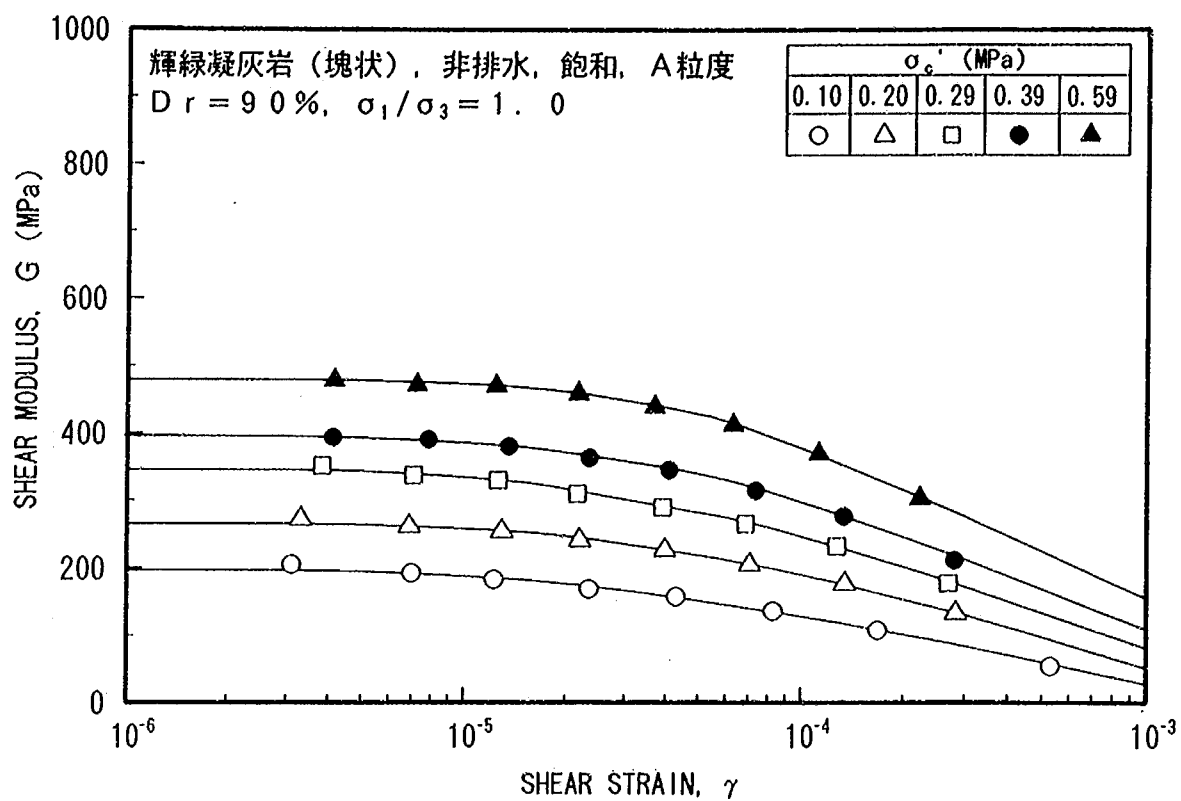


図-3.5(e) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

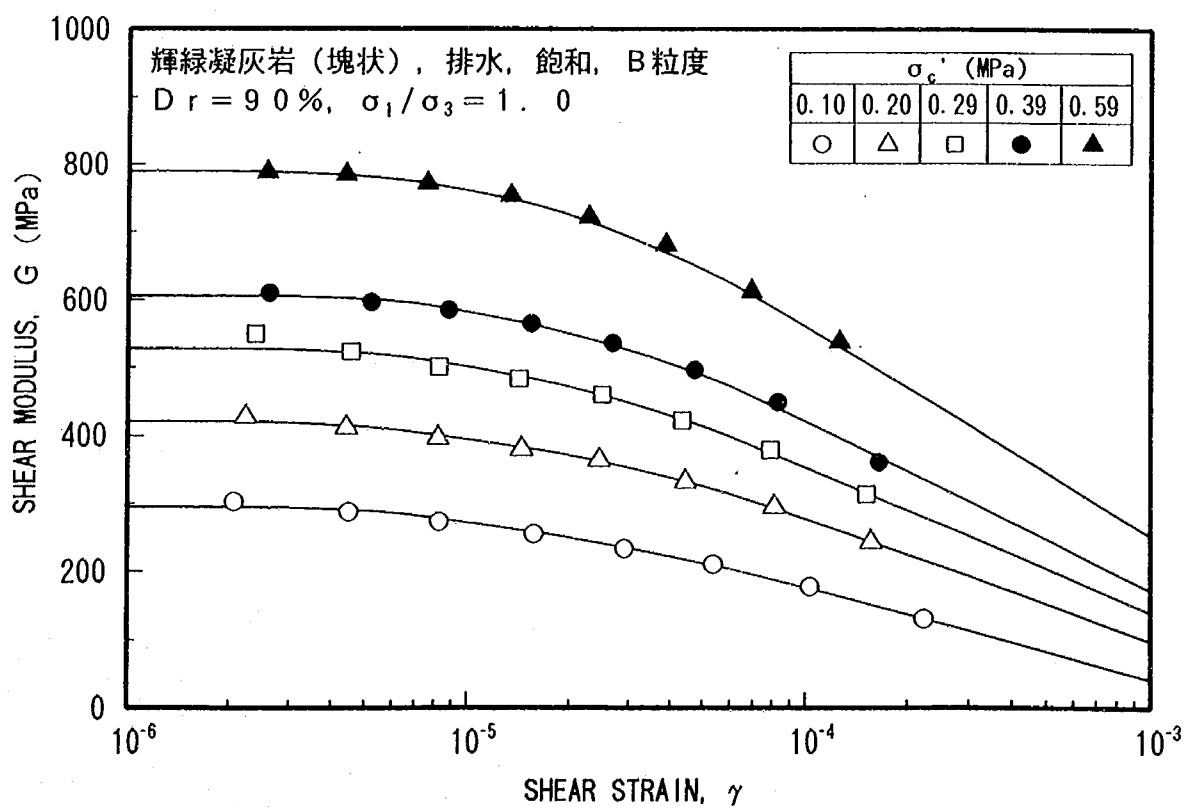


図-3.5(f) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

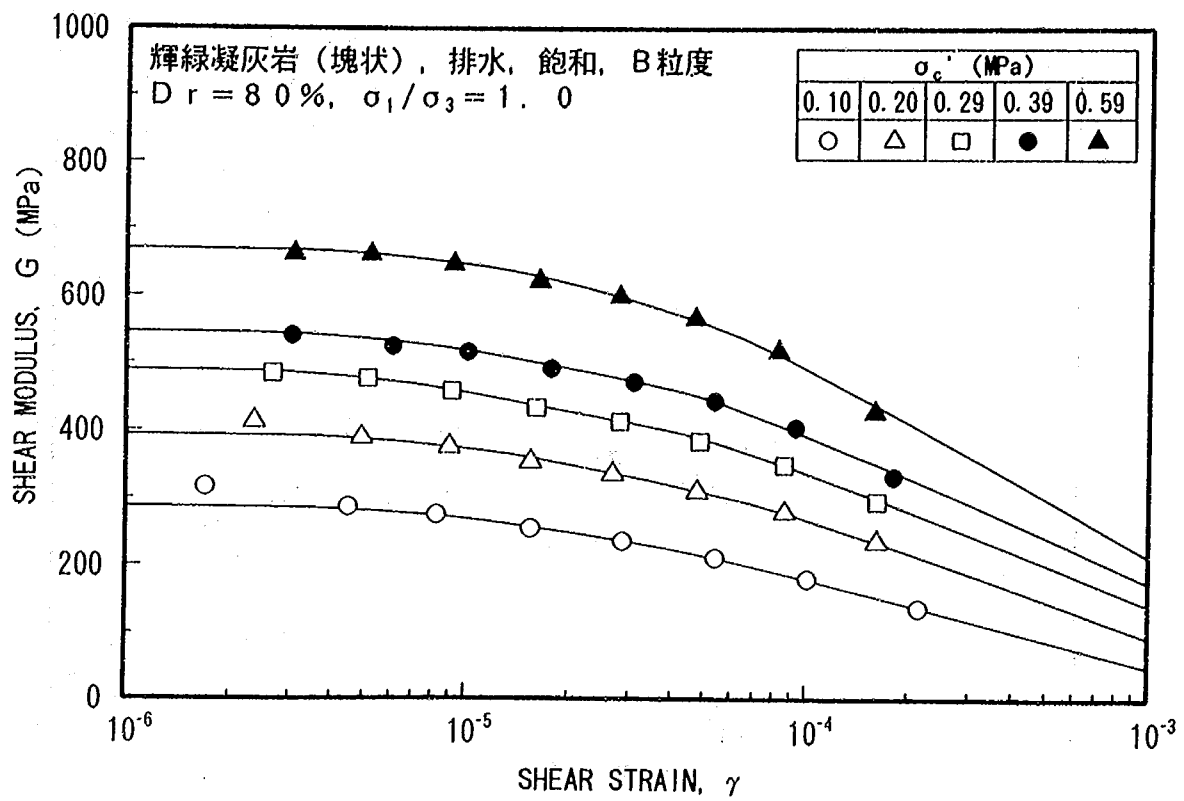


図-3.5(g) $G \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

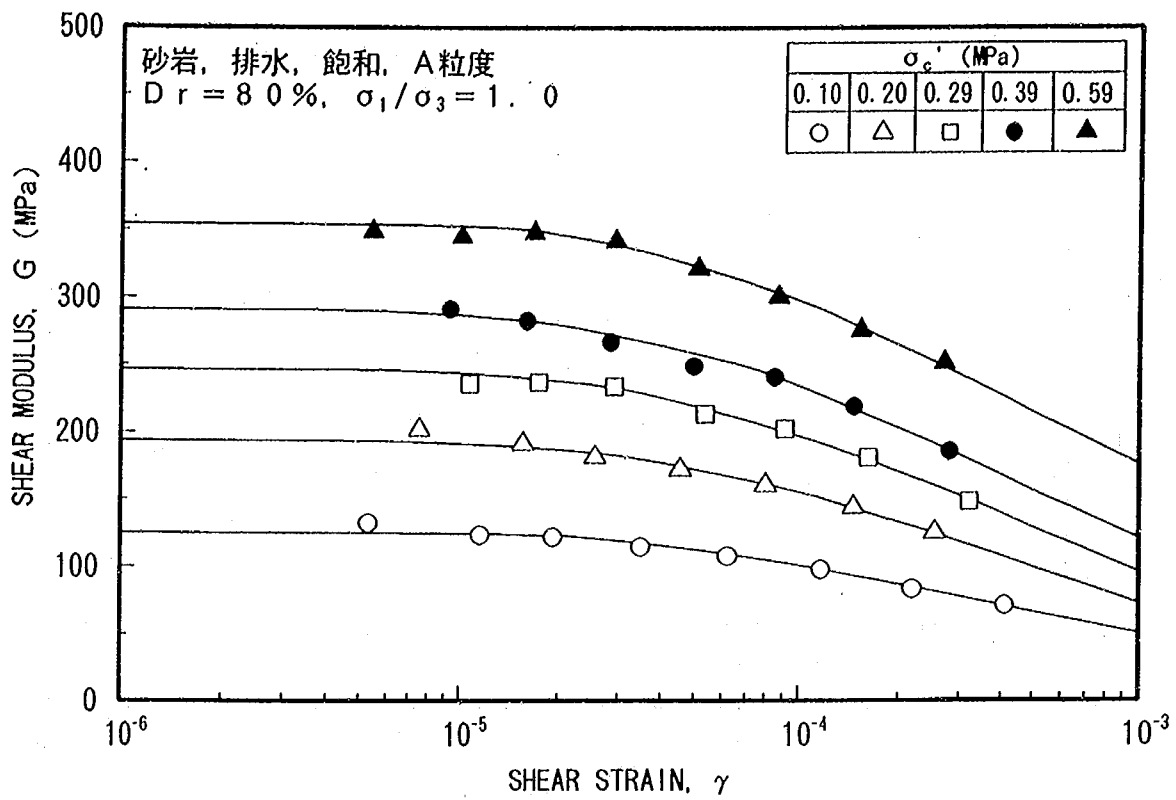


図-3.6(a) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

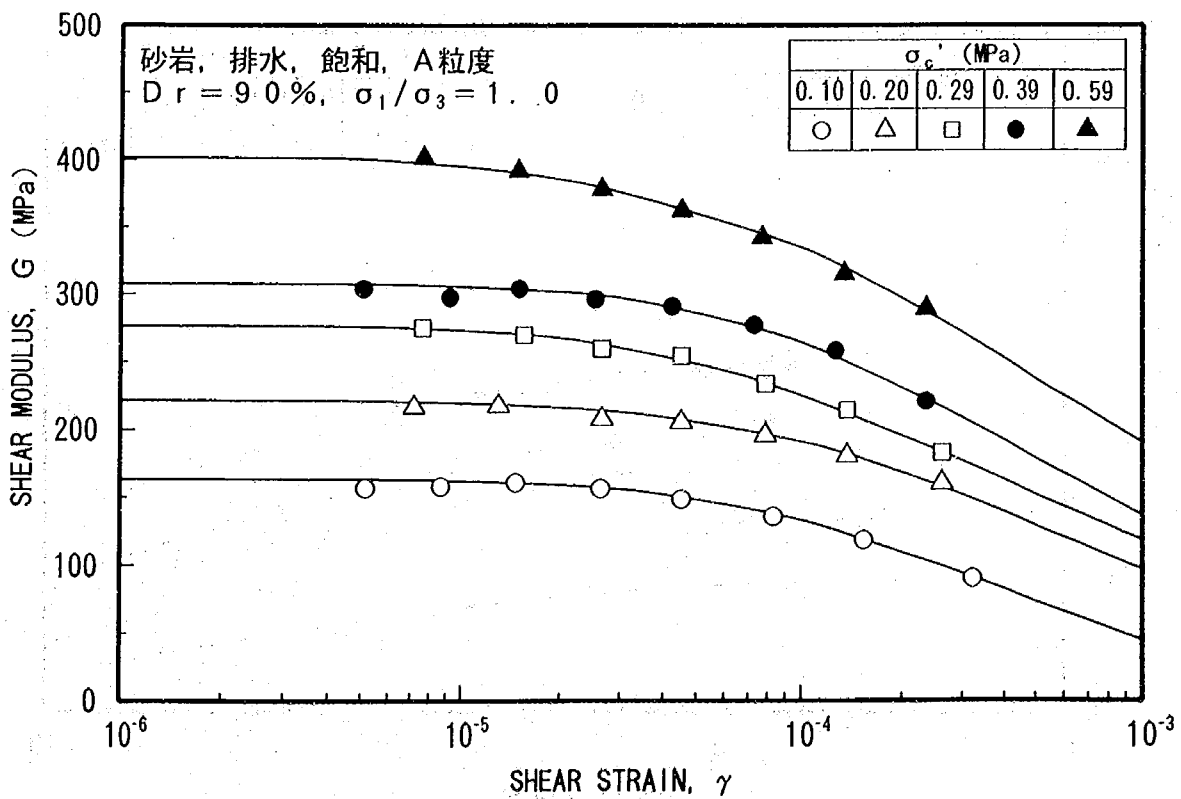


図-3.6(b) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

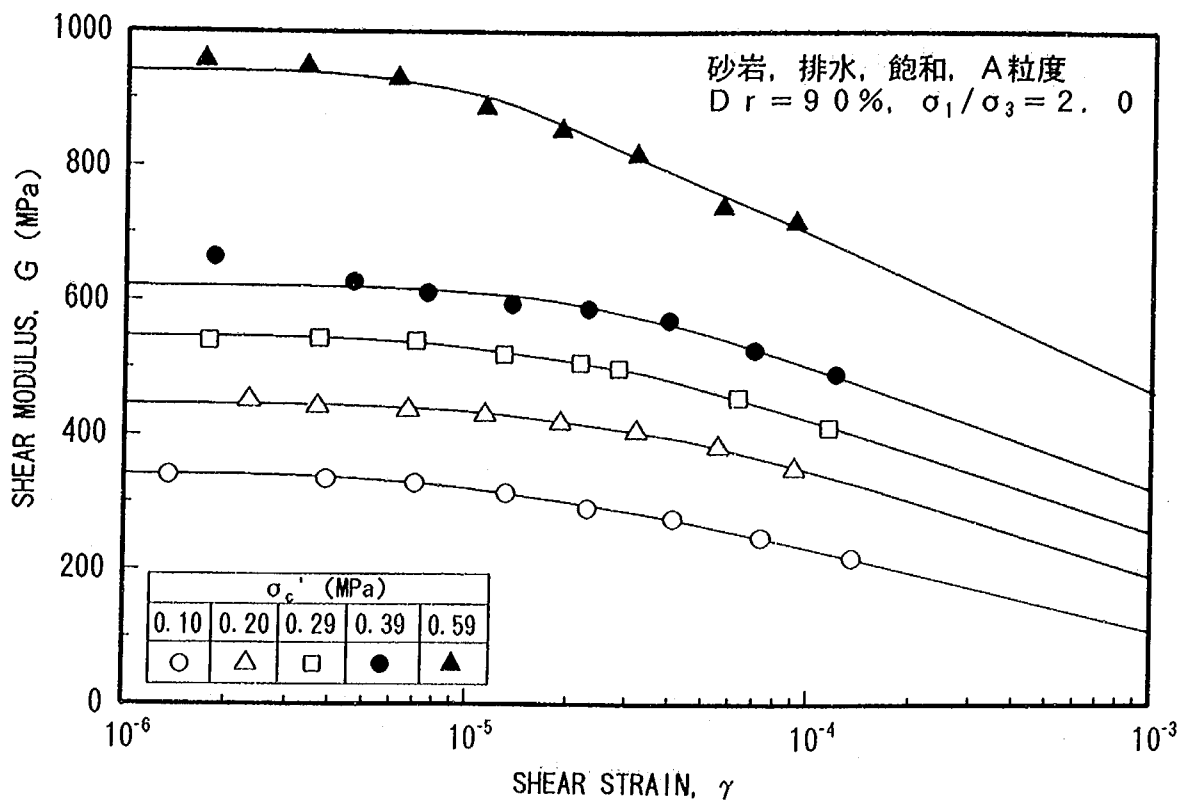


図-3.6(c) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

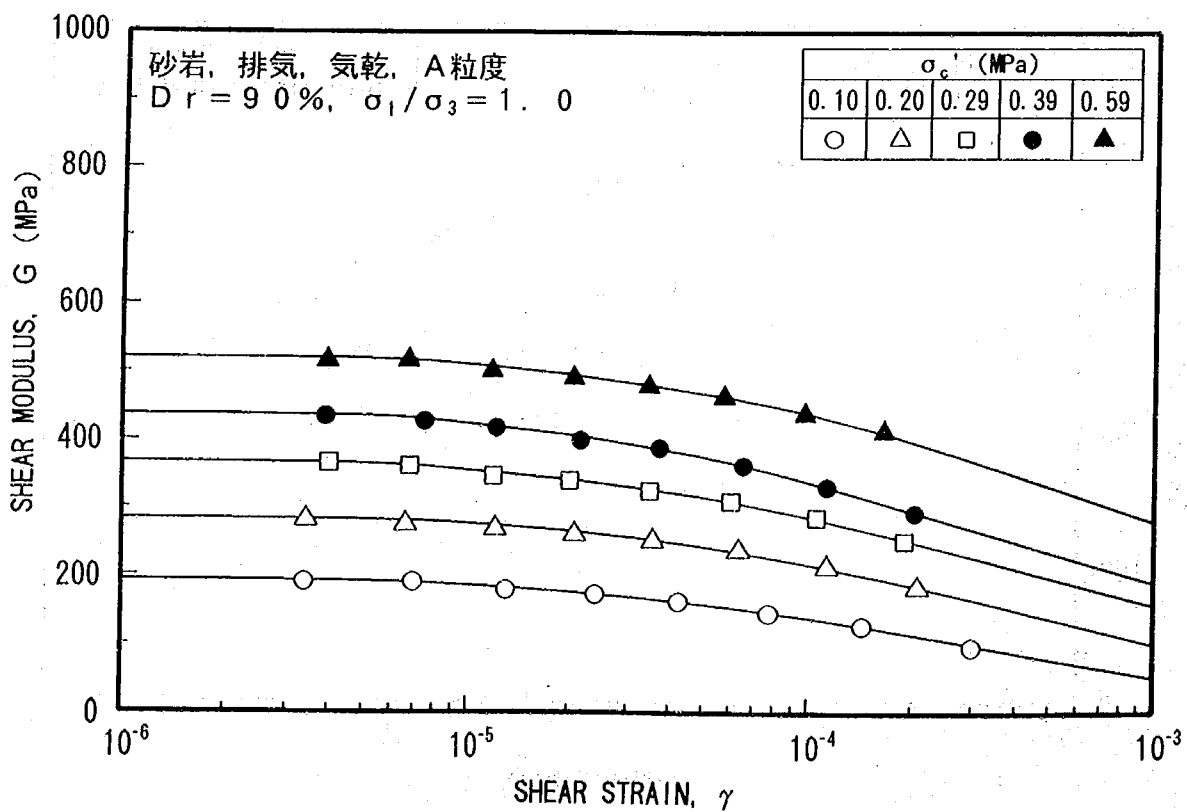


図-3.6(d) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

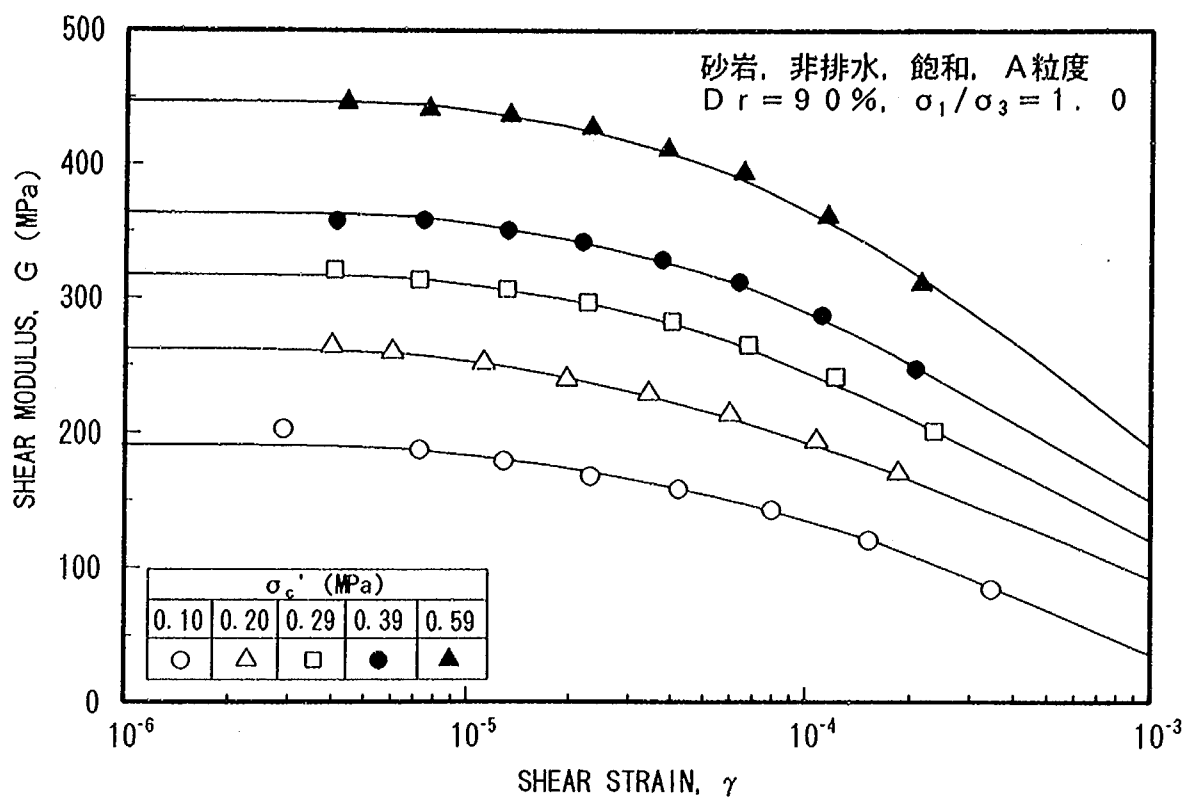


図-3.6(e) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

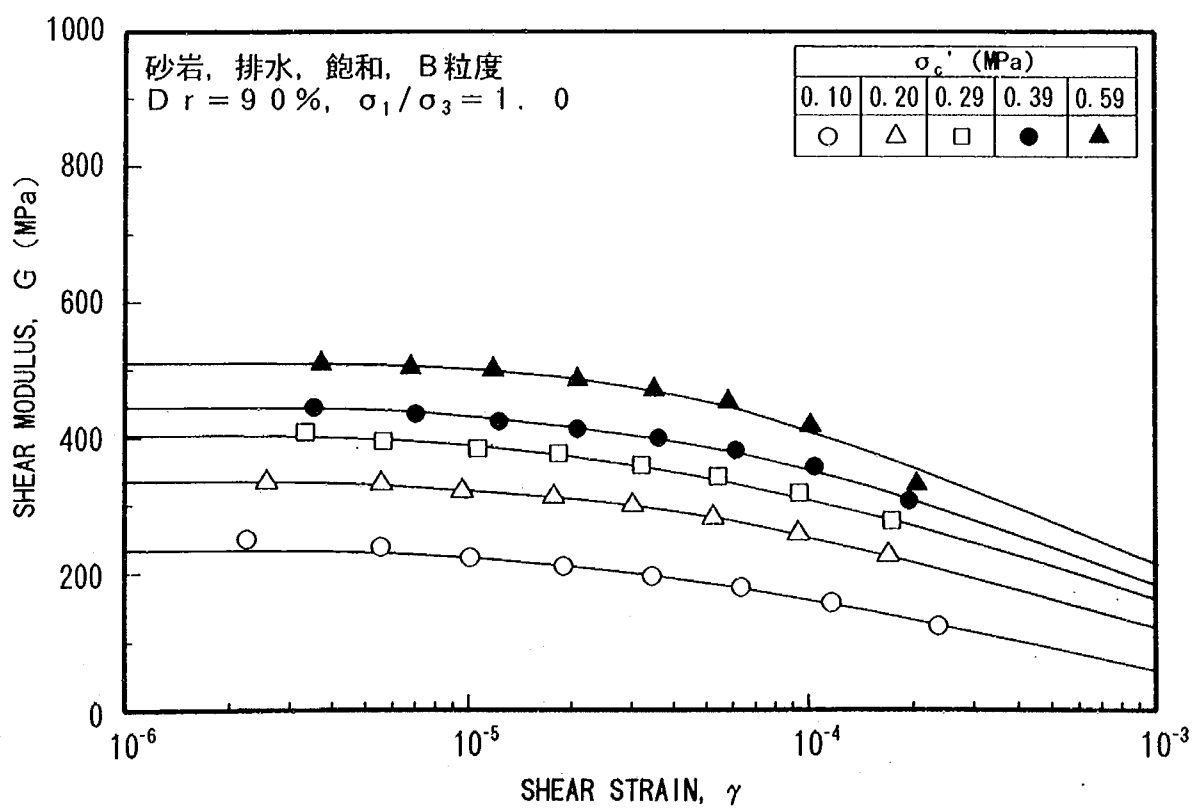


図-3.6(f) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

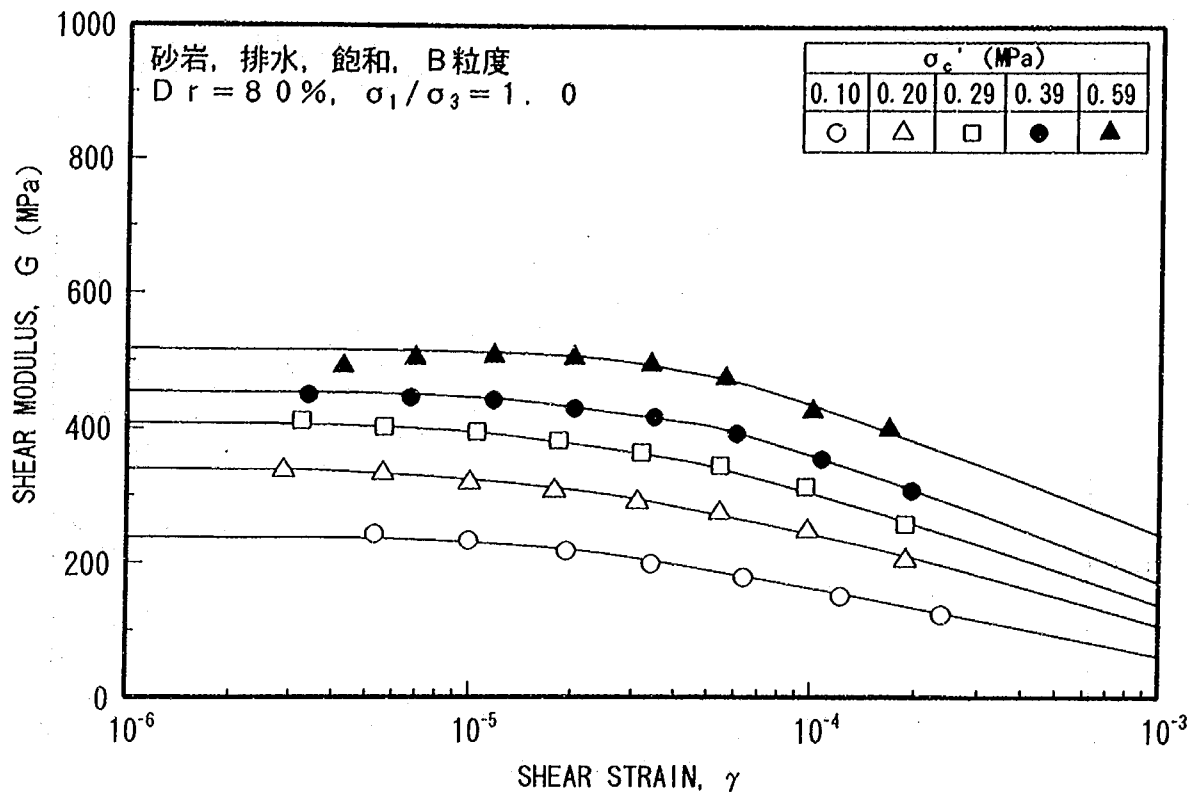


図-3.6(g) $G \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

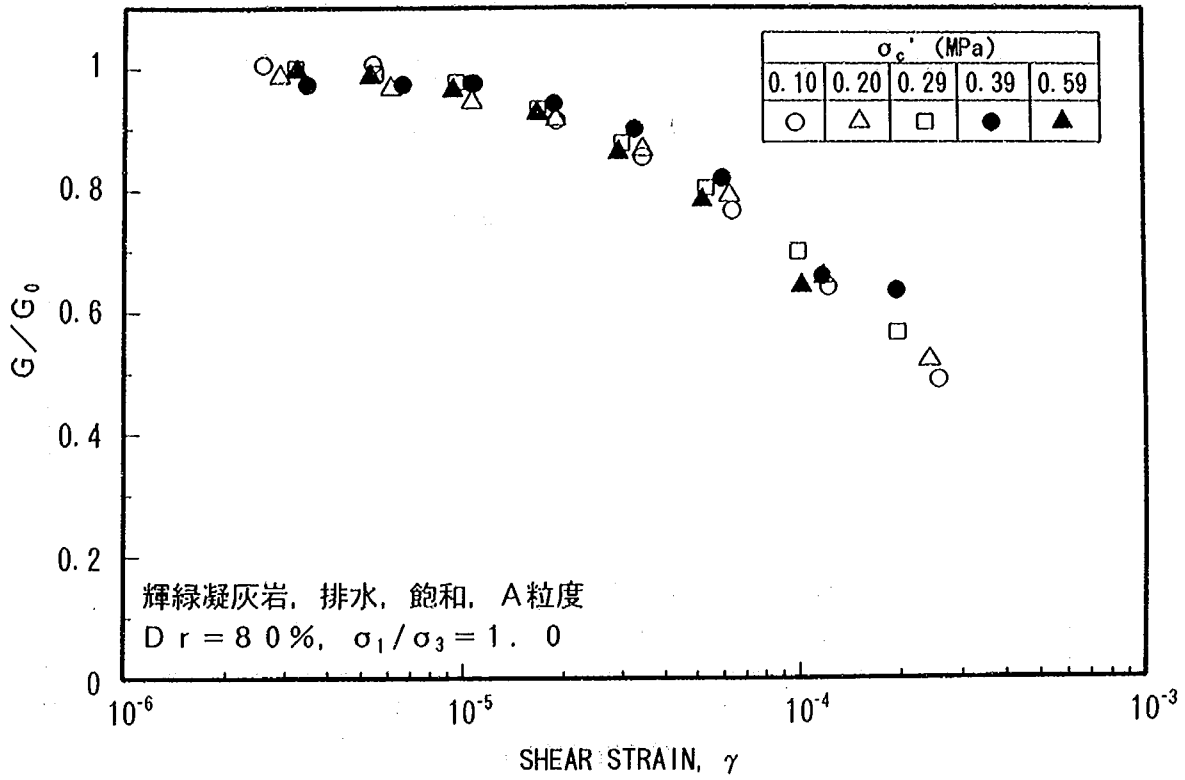


図-3.7(a) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

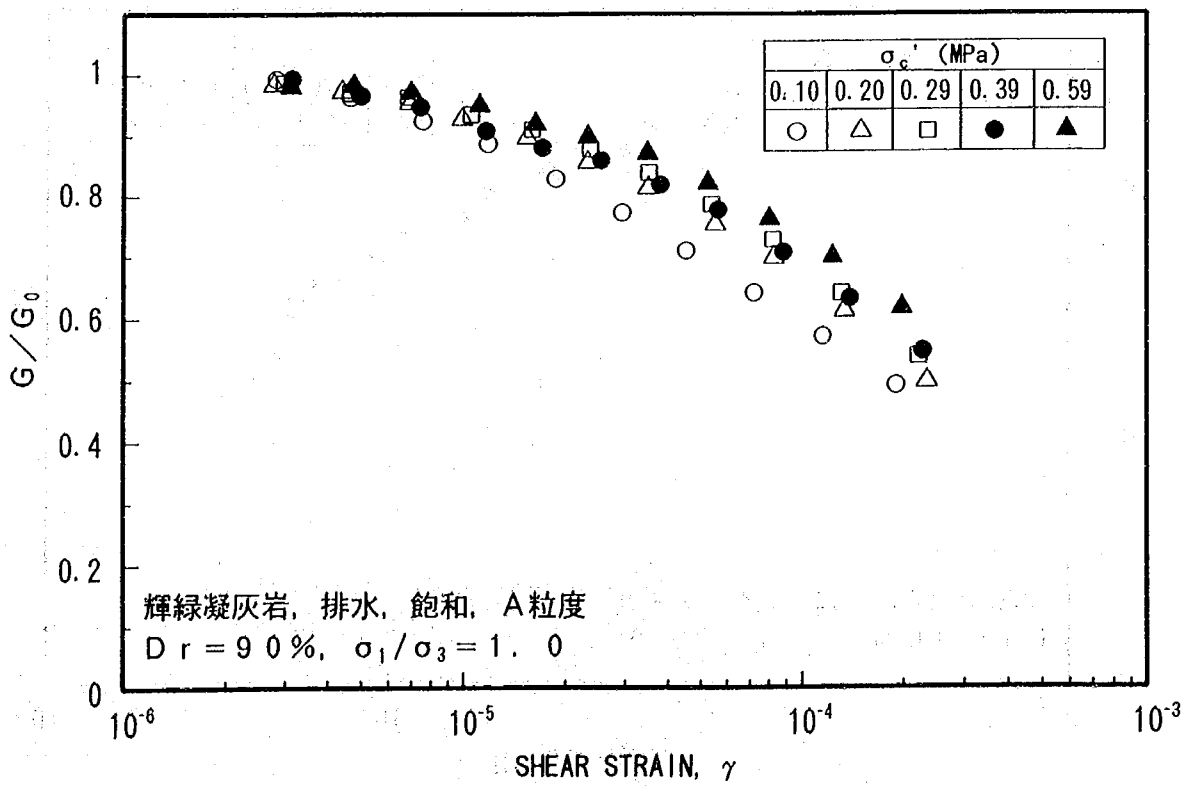


図-3.7(b) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

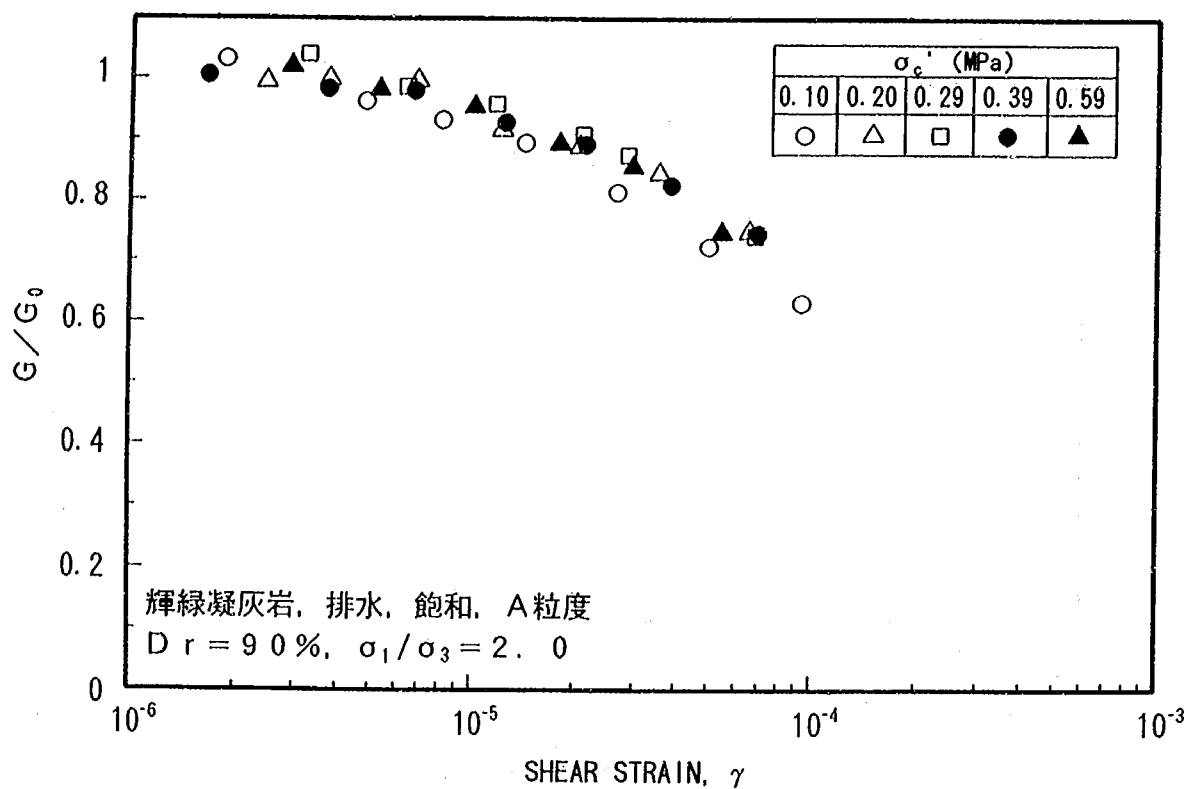


図-3.7(c) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

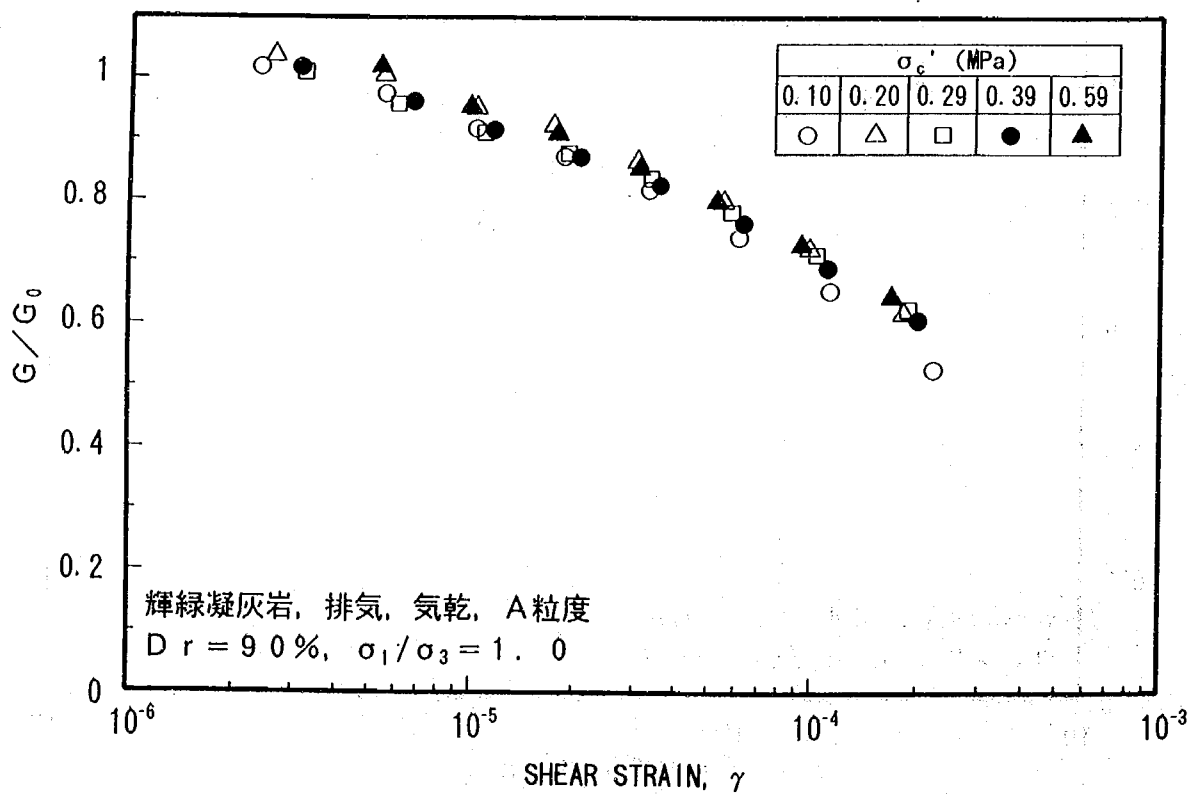


図-3.7(d) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

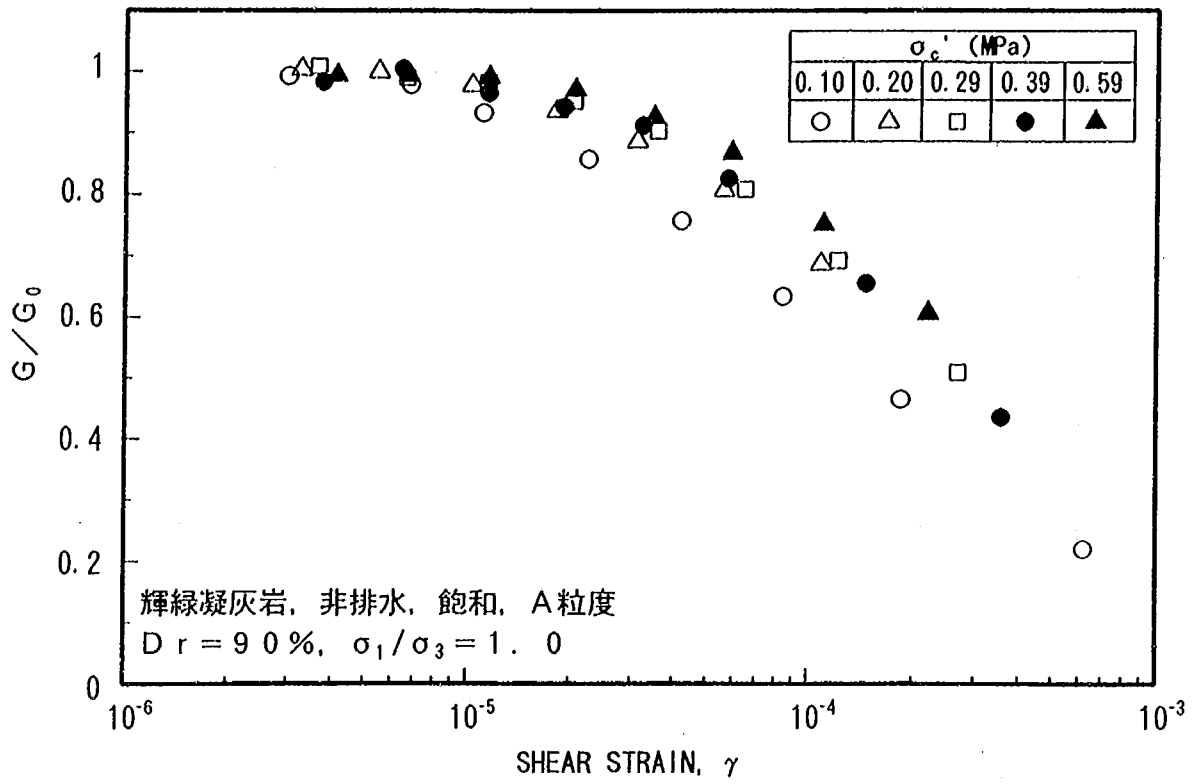


図-3.7(e) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

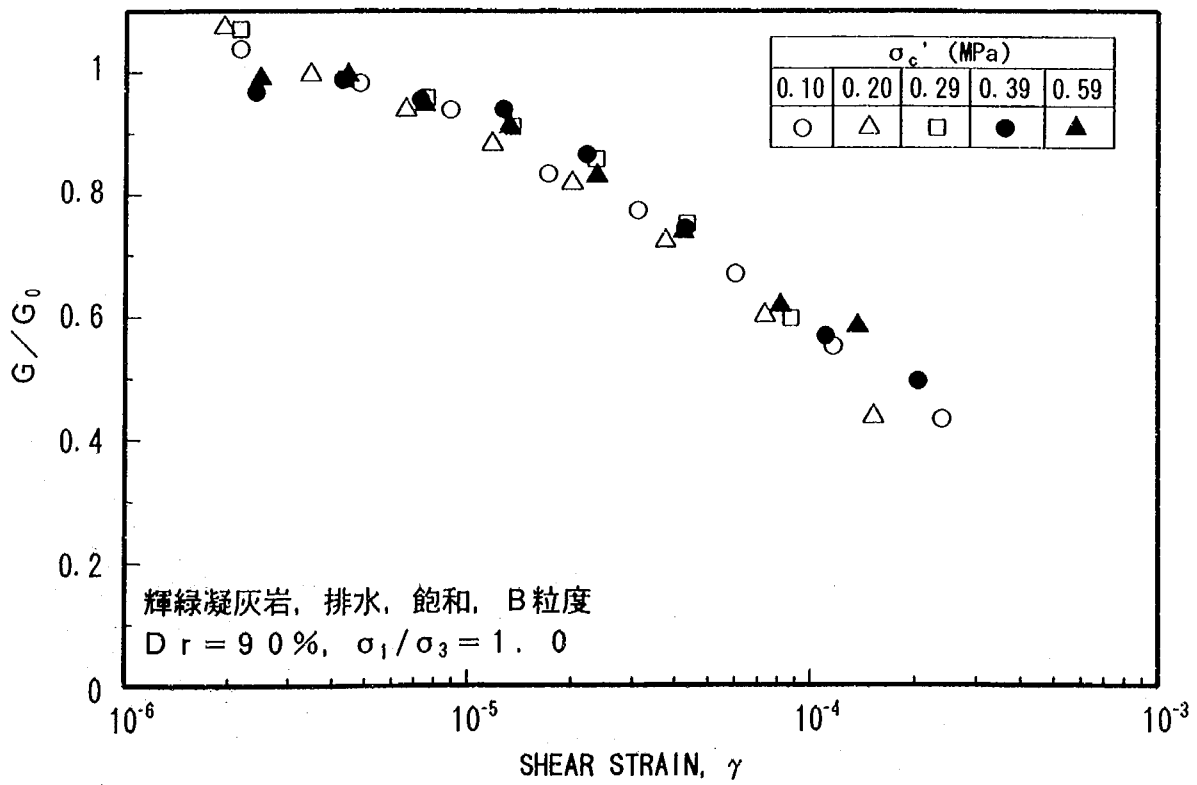


図-3.7(f) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

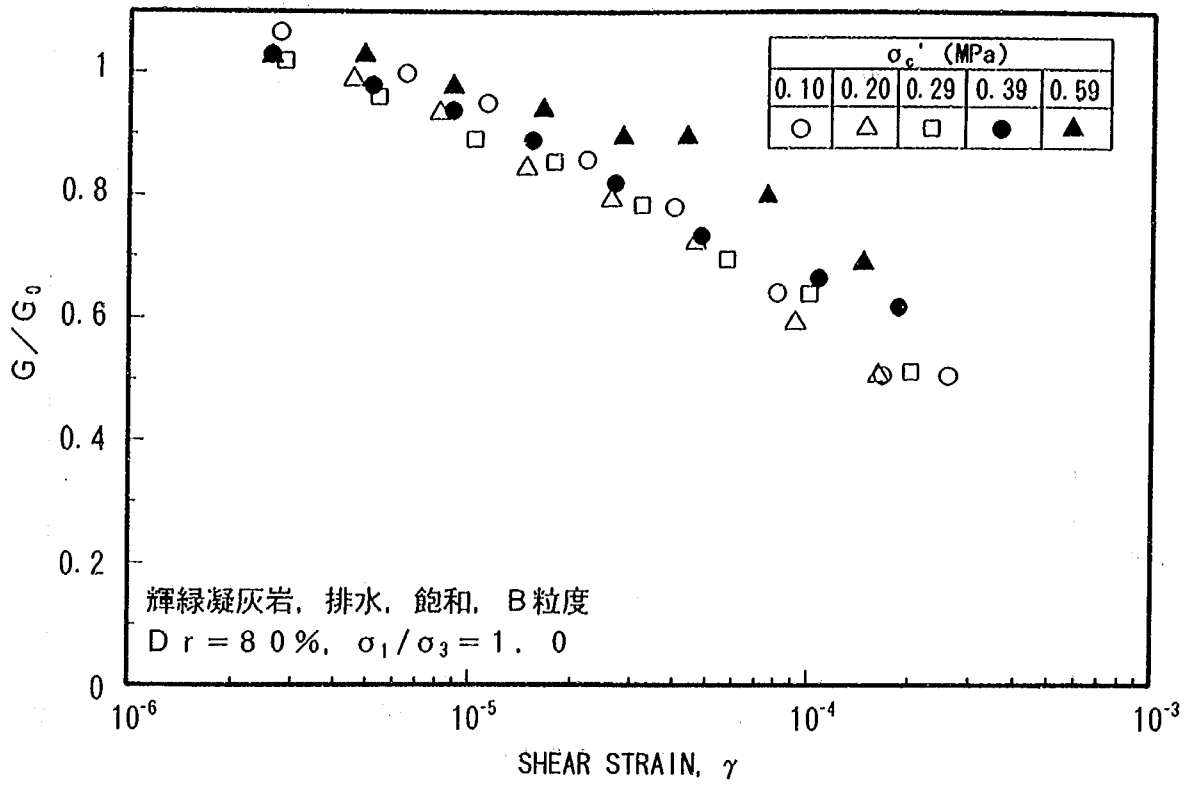


圖-3.7(g) $G/G_0 \sim \gamma$ 關係 (輝綠凝灰岩)

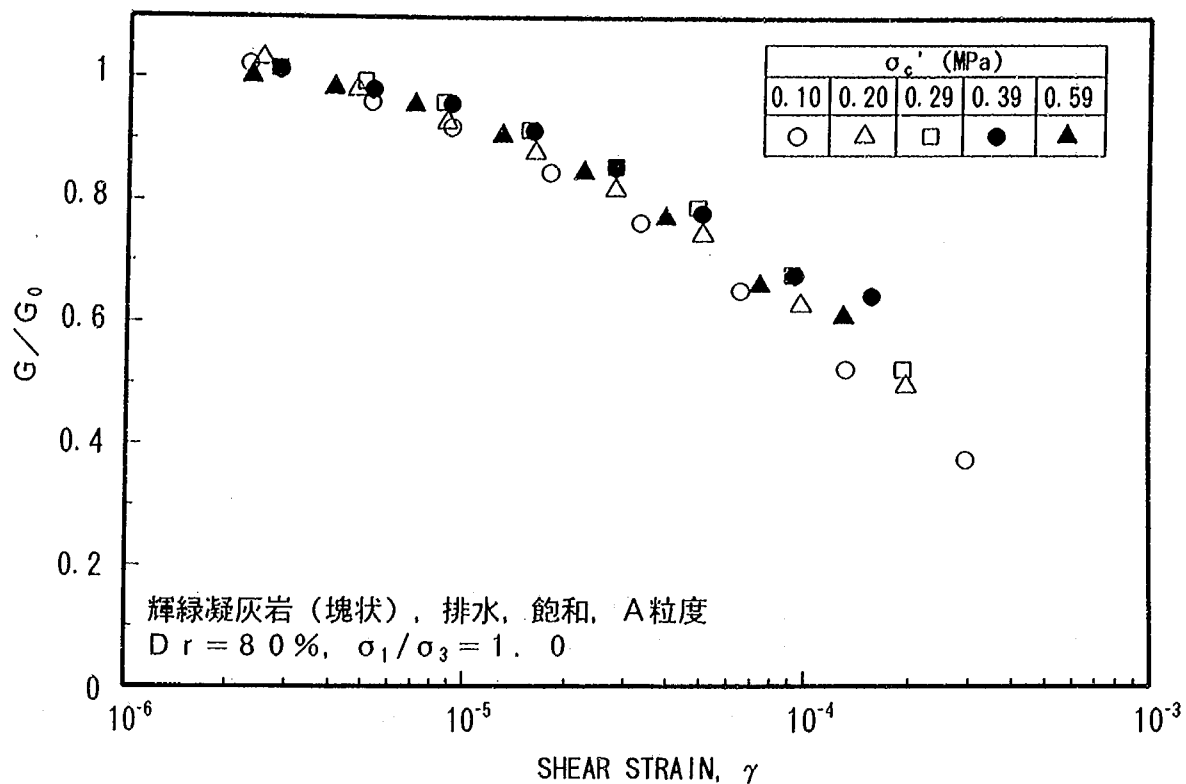


図-3.8(a) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

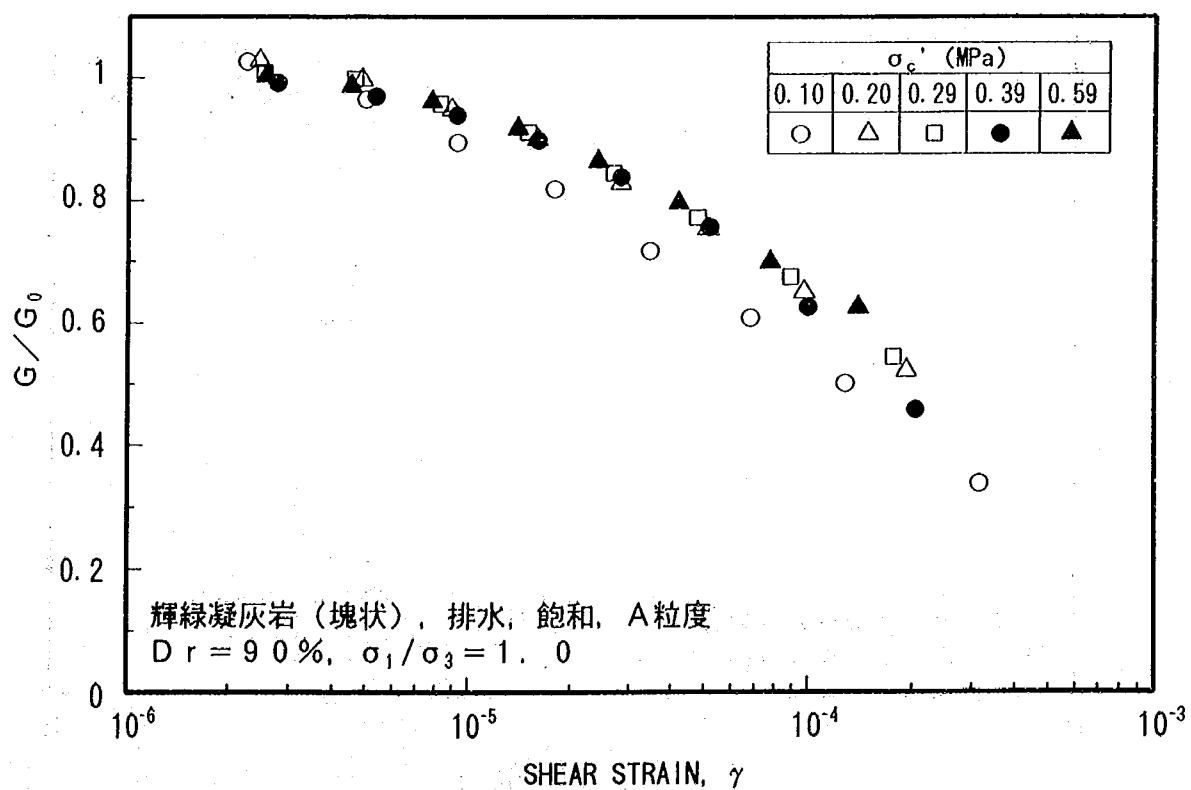


図-3.8(b) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

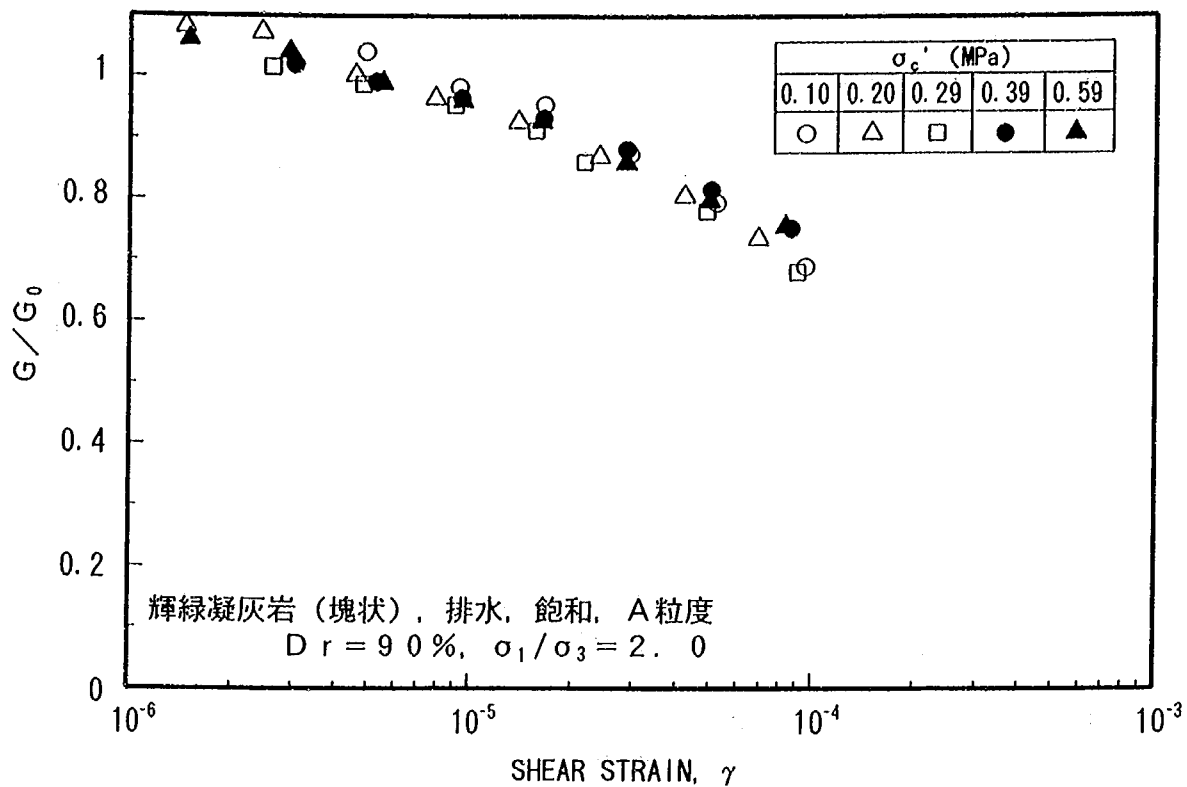


図-3.8(c) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

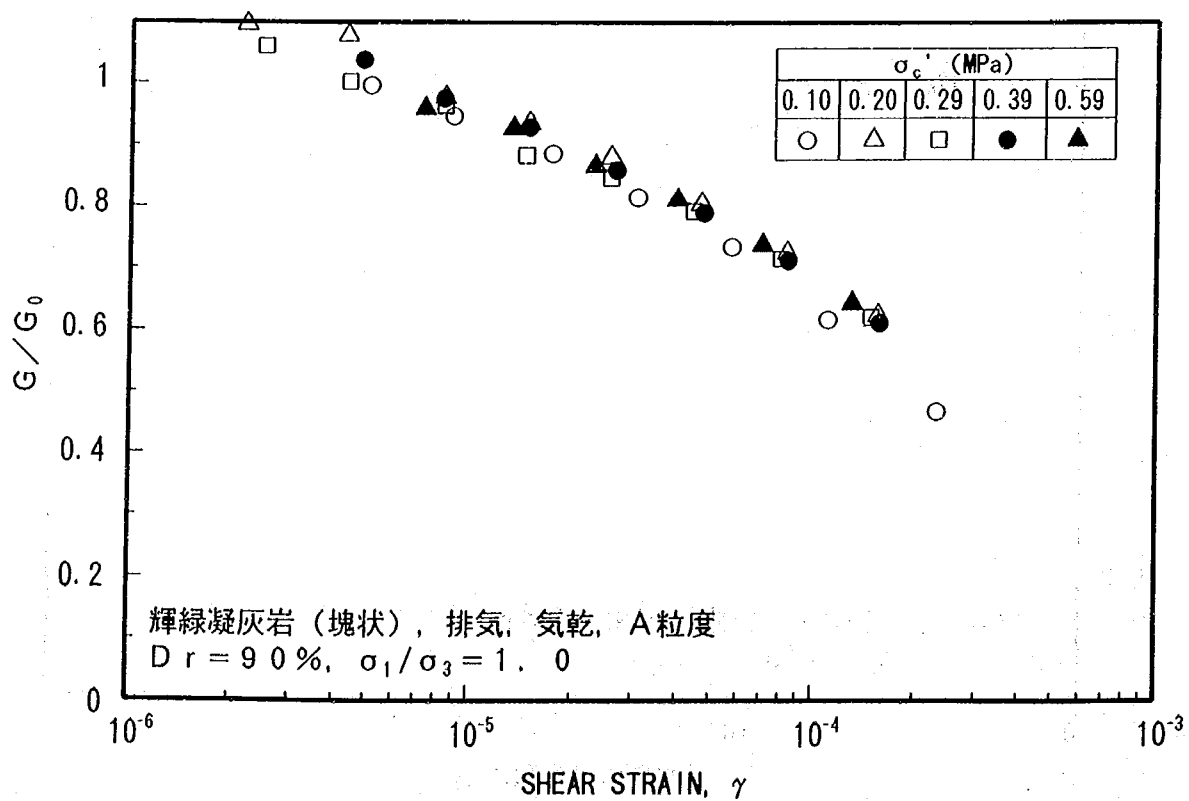


図-3.8(d) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

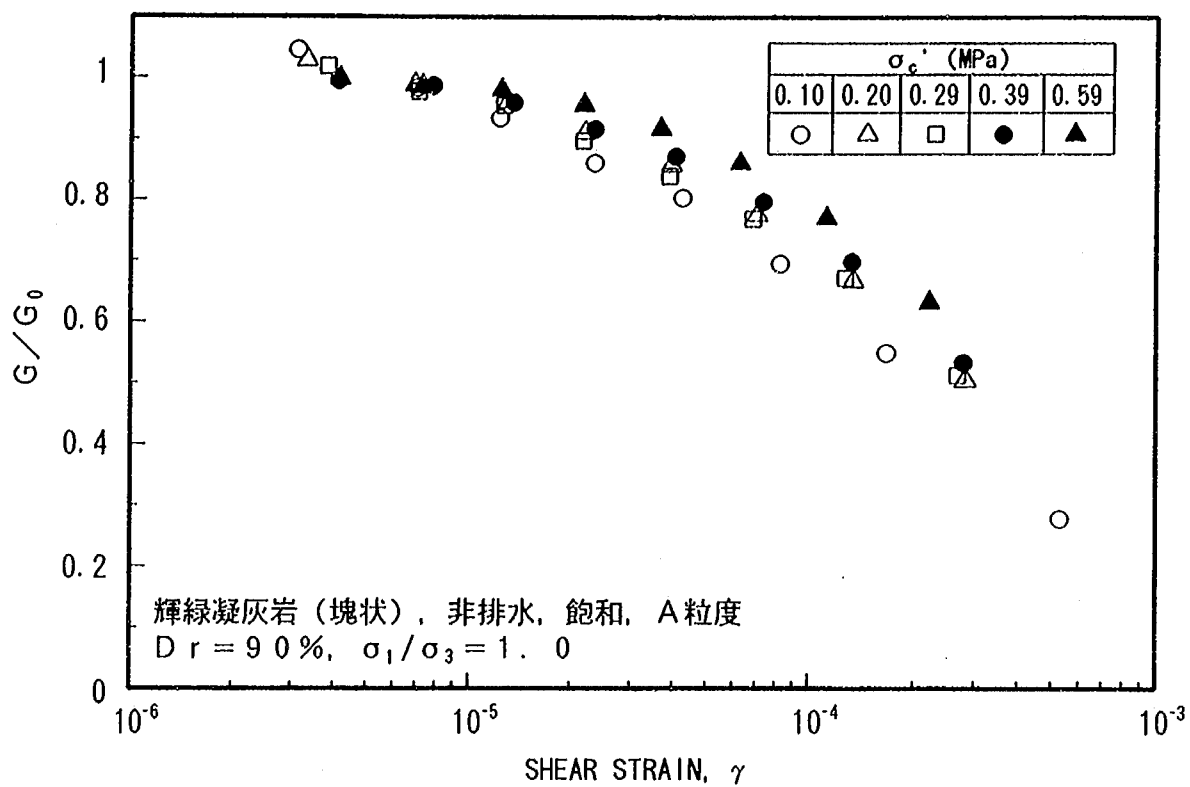


図-3.8(e) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

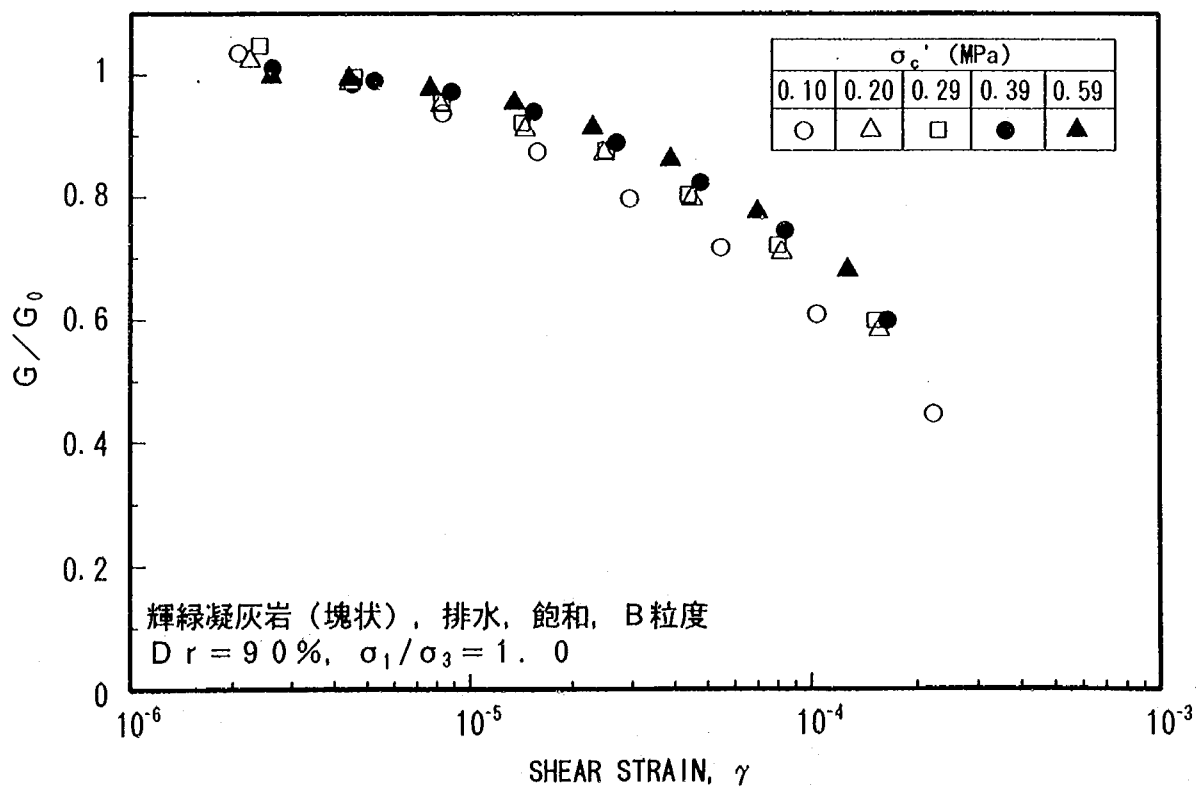


図-3.8(f) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

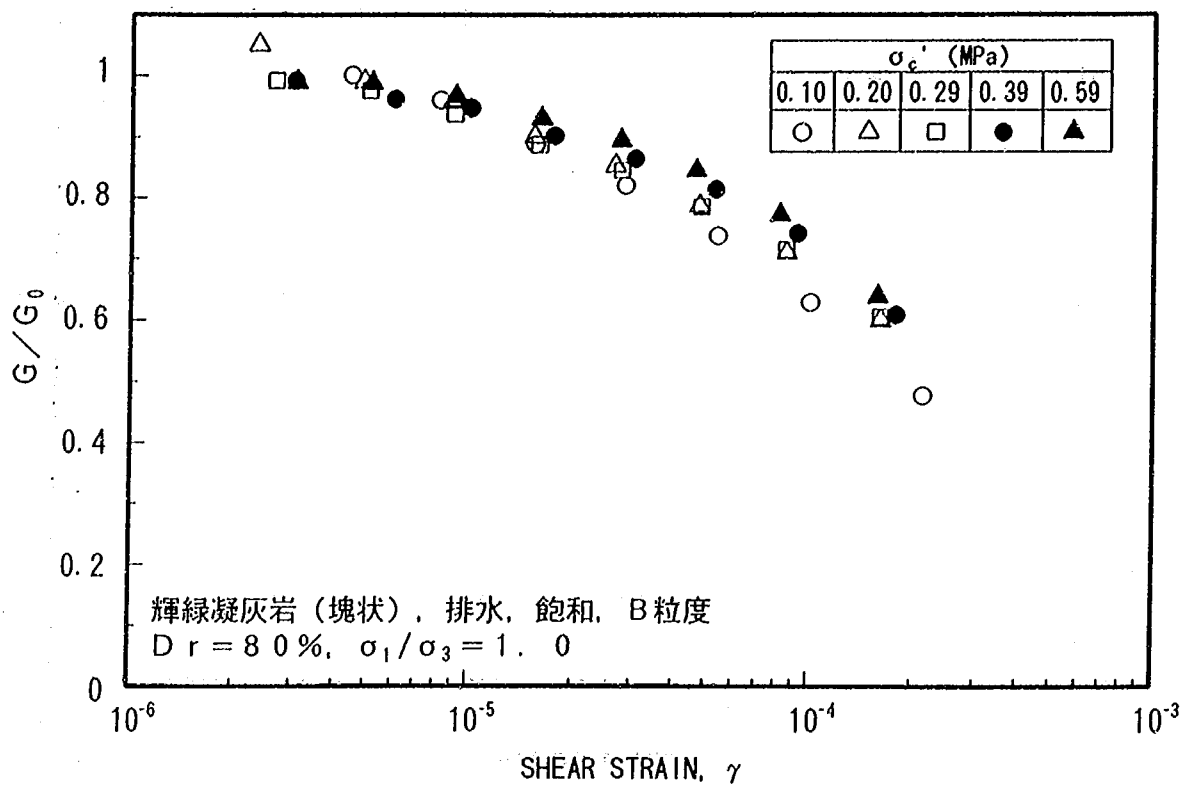


図-3.8(g) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

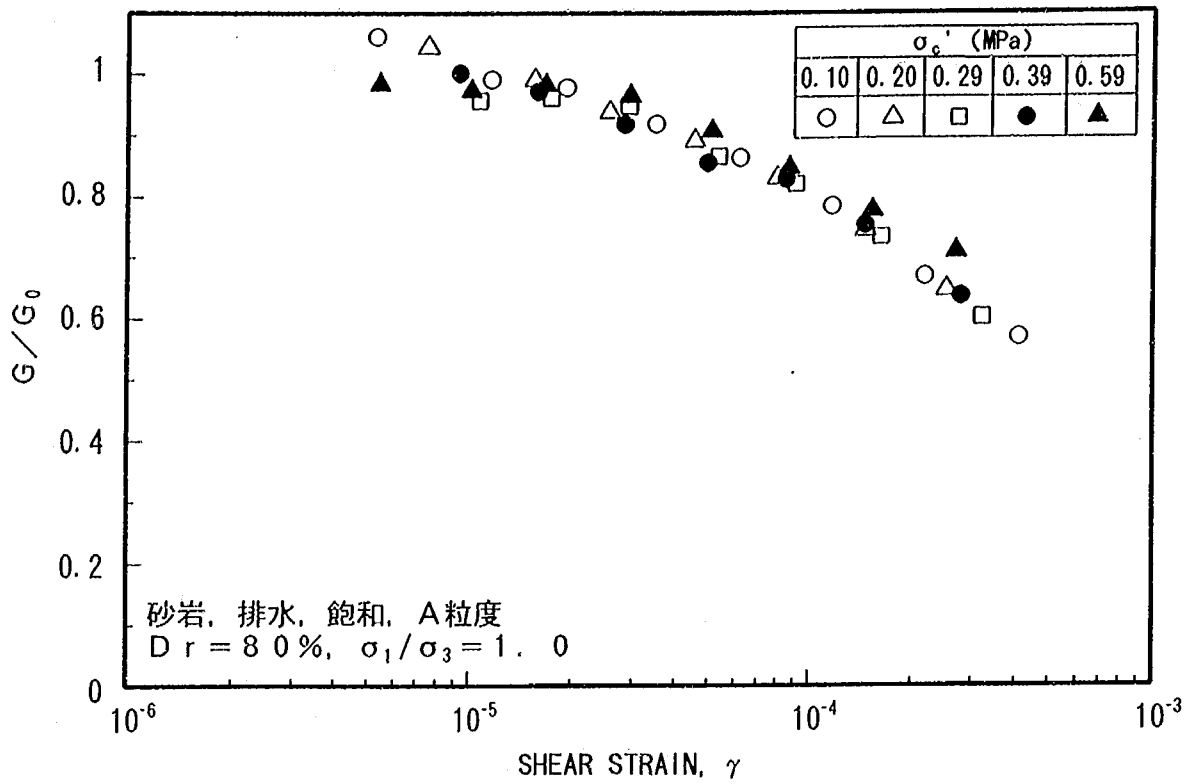


図-3.9(a) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

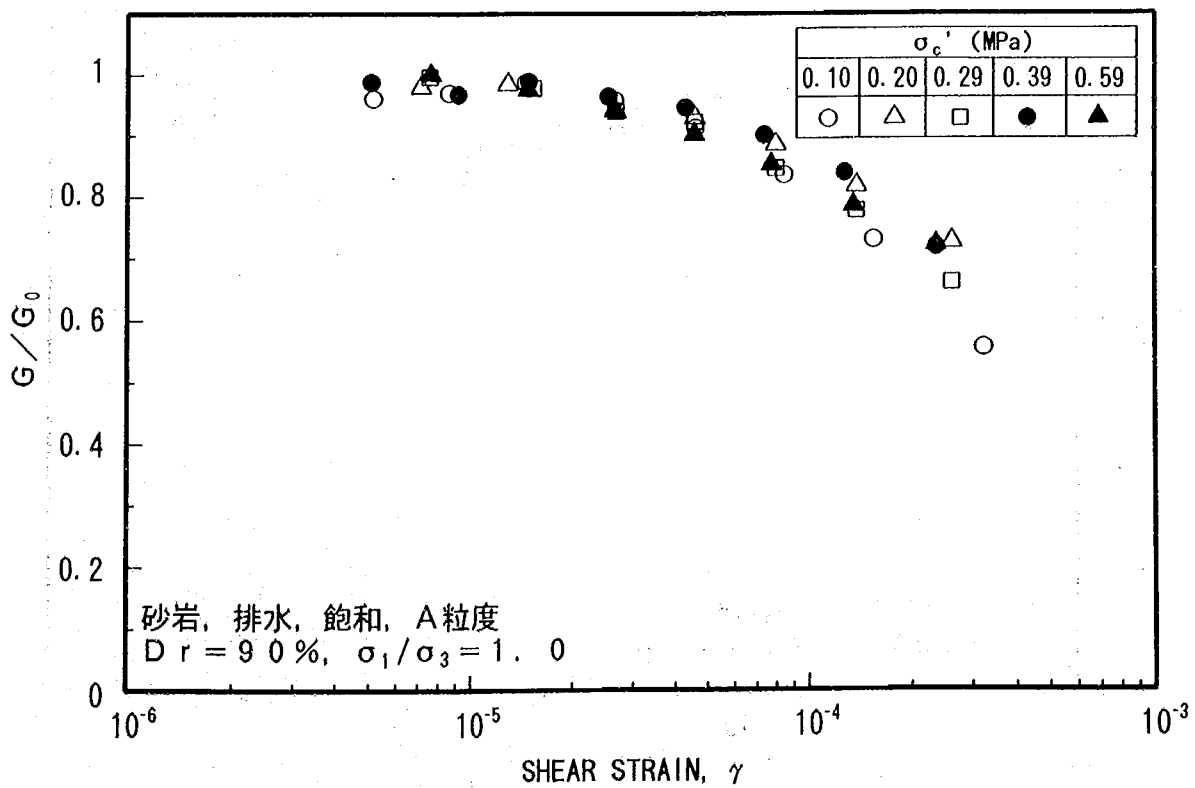


図-3.9(b) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

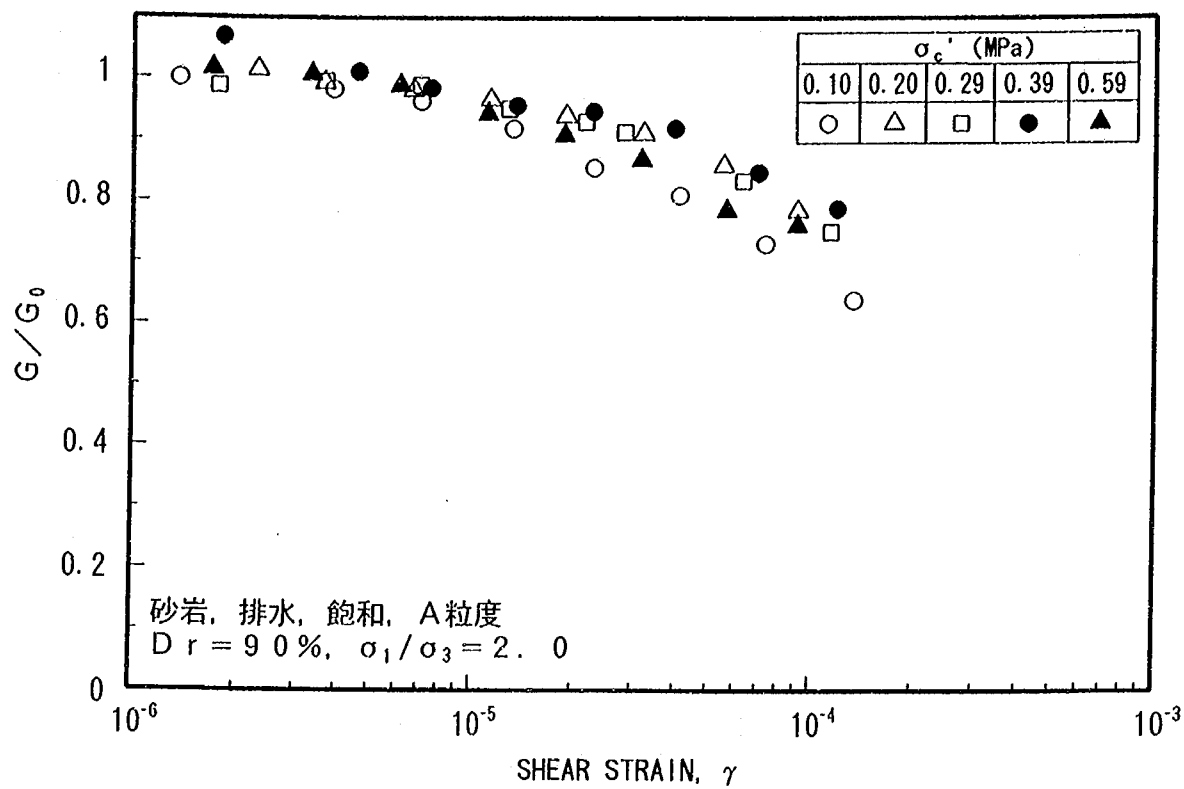


図-3.9(c) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

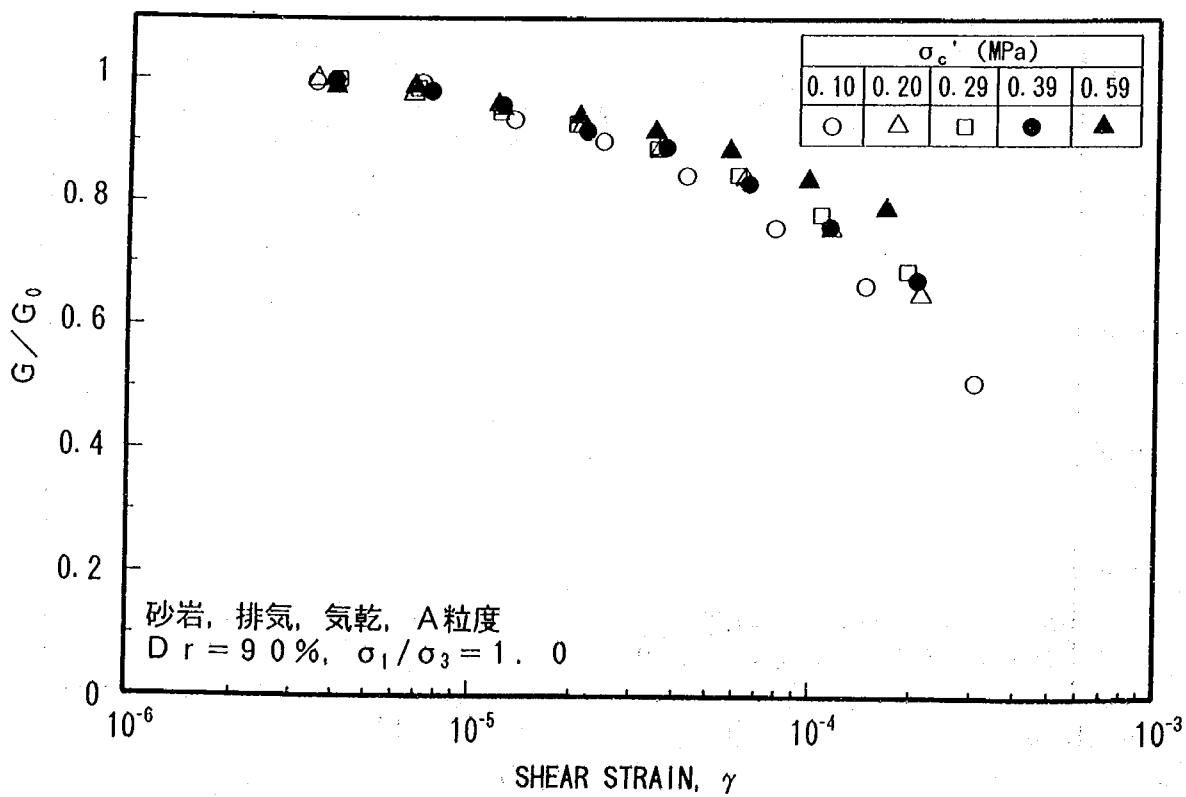


図-3.9(d) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

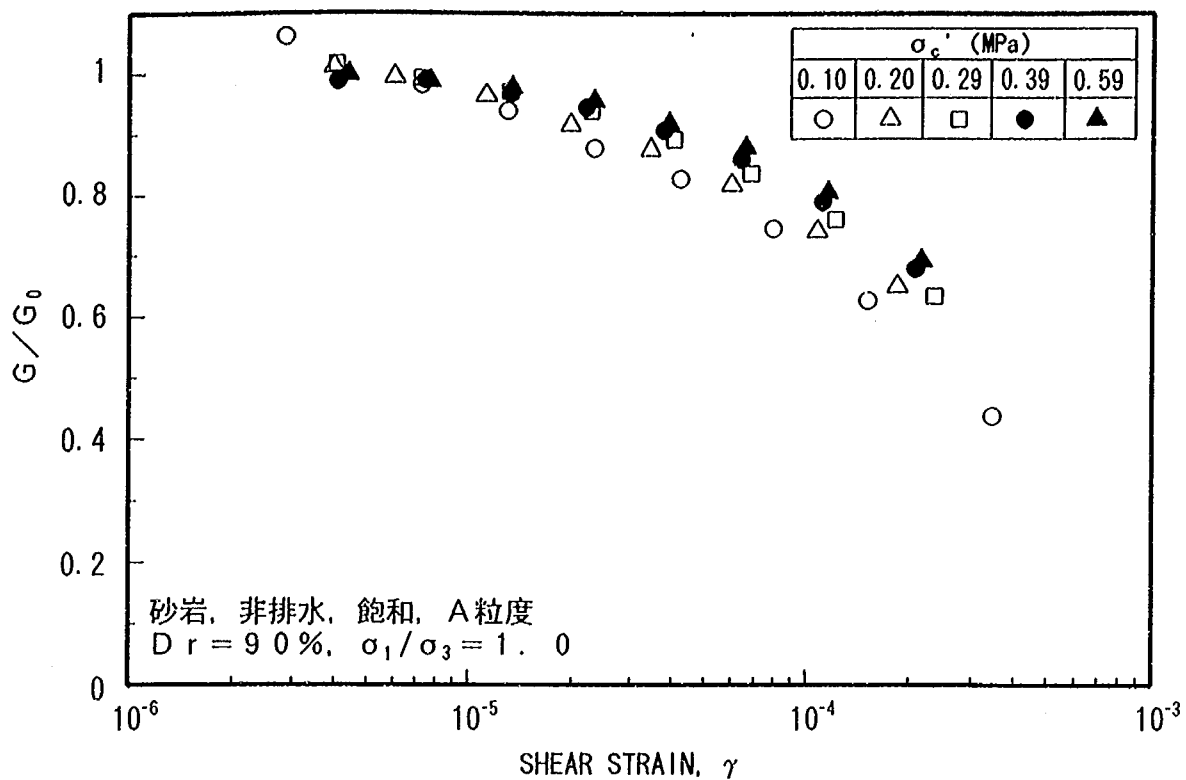


図-3.9(e) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

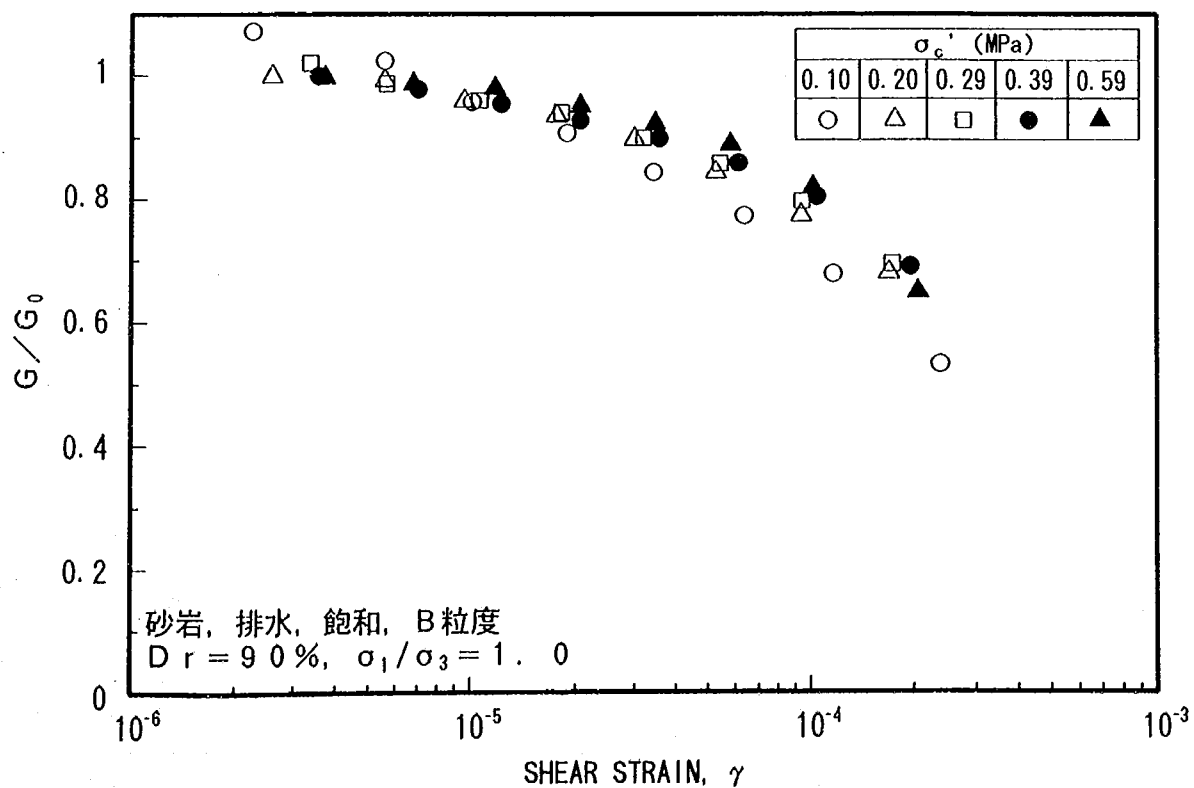


図-3.9(f) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

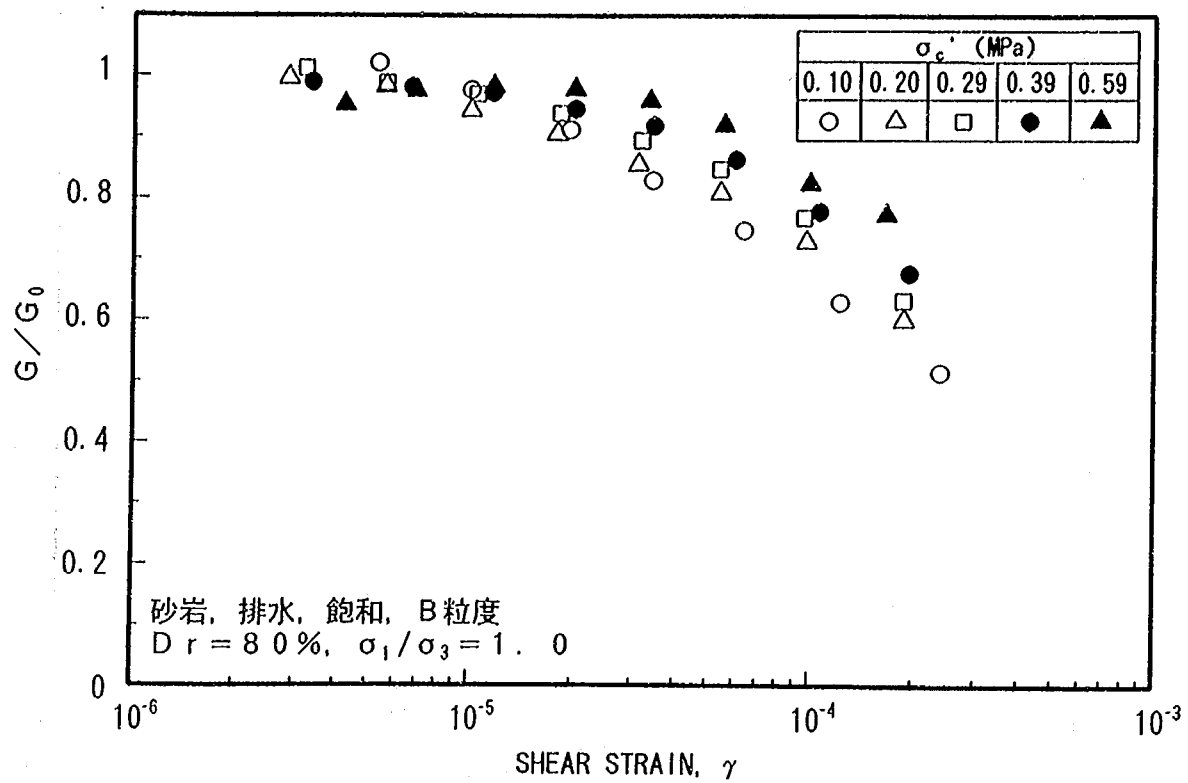
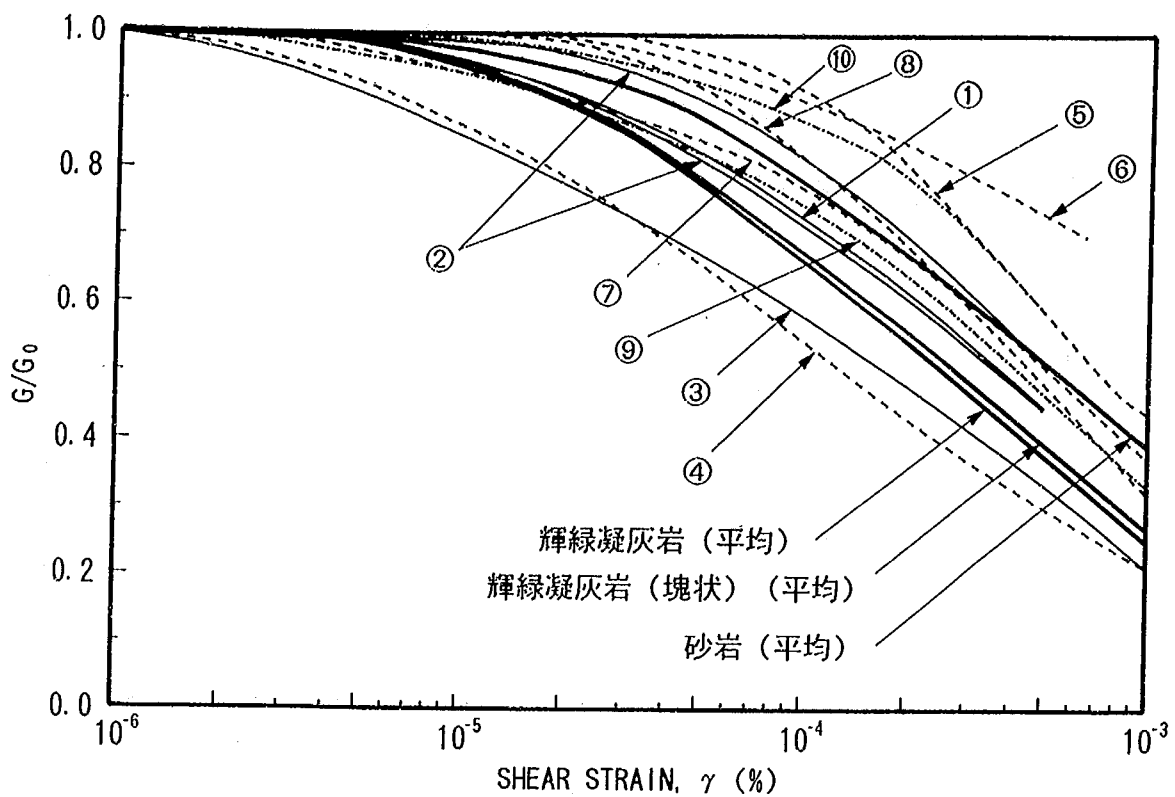


図-3.9(g) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (砂岩)



番号	研究者	供試体直径 (cm)	高さ (cm)	材料	最大粒径 (mm)	試験方法
①	Yasuda and Matsumoto ⁶⁾	40	80	ロック材料	38.1	繰返し三軸
②	中村ら ⁶⁾	30	60	ロック材料	63.5	繰返し三軸
③	Hynes et al. ⁷⁾	38.1	97.8	ロック材料	76.2	繰返し三軸
④	Seed et al. ⁸⁾	30.5	73.7	砂礫	50.8	繰返し三軸
⑤	Konno et al. ⁹⁾	30	60	砂礫	110	繰返し三軸
⑥	Shibuya et al. ¹⁰⁾	30	60	砂礫	6.65(D ₆₀)	繰返し三軸
⑦	Hatanaka et al. ¹¹⁾	30	60	砂礫	90	繰返し三軸
⑧	社本ら ¹²⁾	30	60	砂礫	—	繰返し三軸
⑨	Iwasaki et al. ¹³⁾	6(内径) 10(外径)	25	砂	0.162~	共振法
		6(内径) 10(外径)	10		0.99(D ₆₀)	繰返しねじり
⑩	本予備試験 (1.2.2)	30	60	豊浦砂	0.85	繰返し三軸

注：D₆₀は平均粒径

図-3.10 他の粗粒材料と砂の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係と今回の試験の平均値の比較

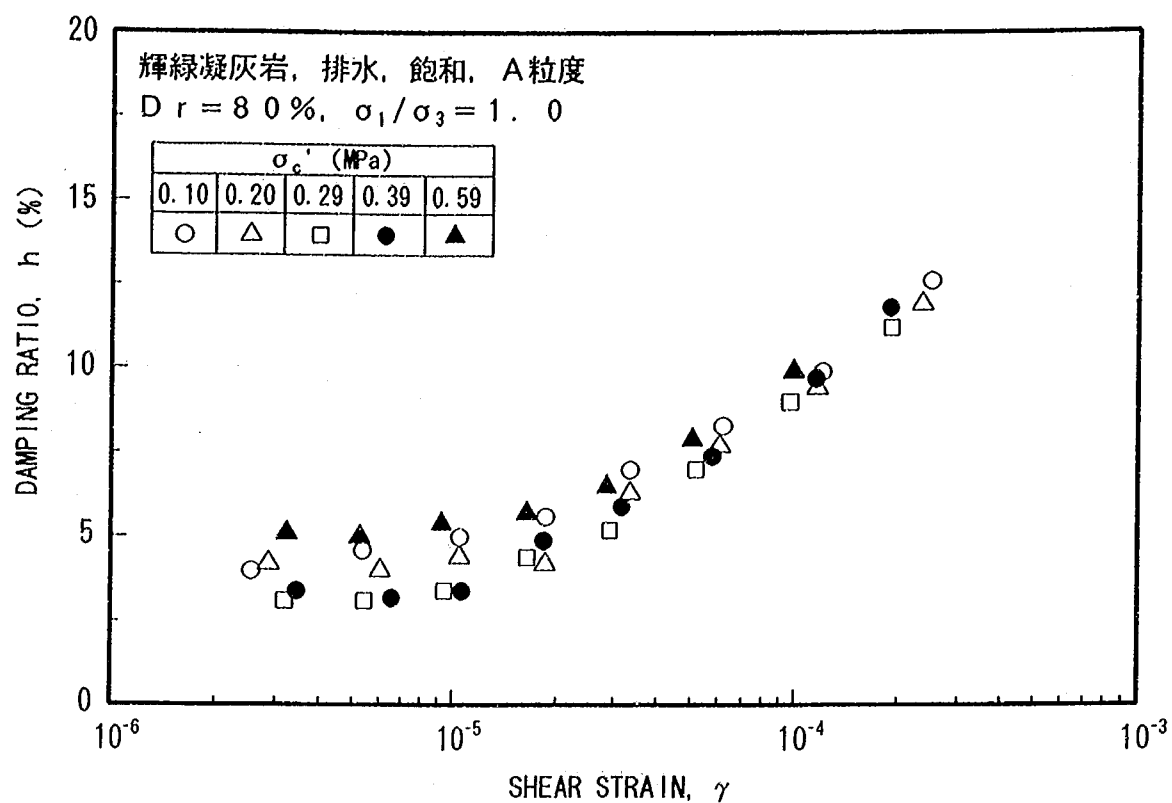


図-3.11(a) $h \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

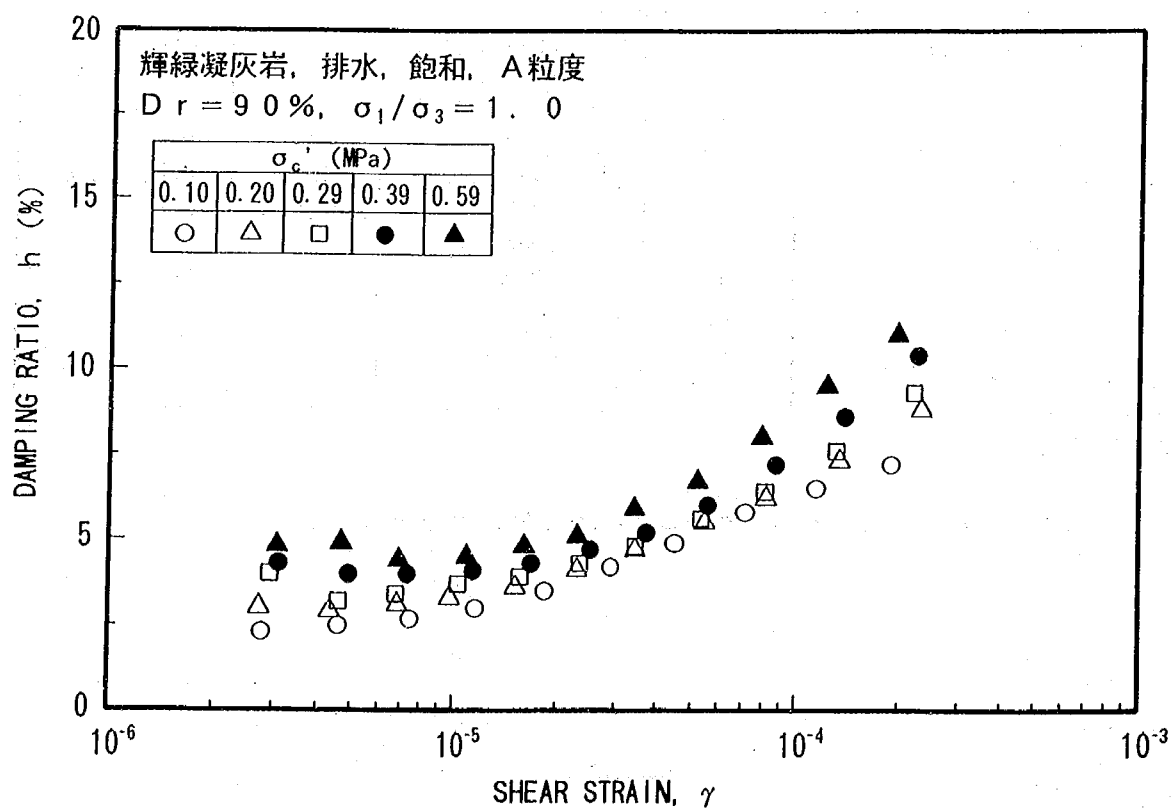


図-3.11(b) $h \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

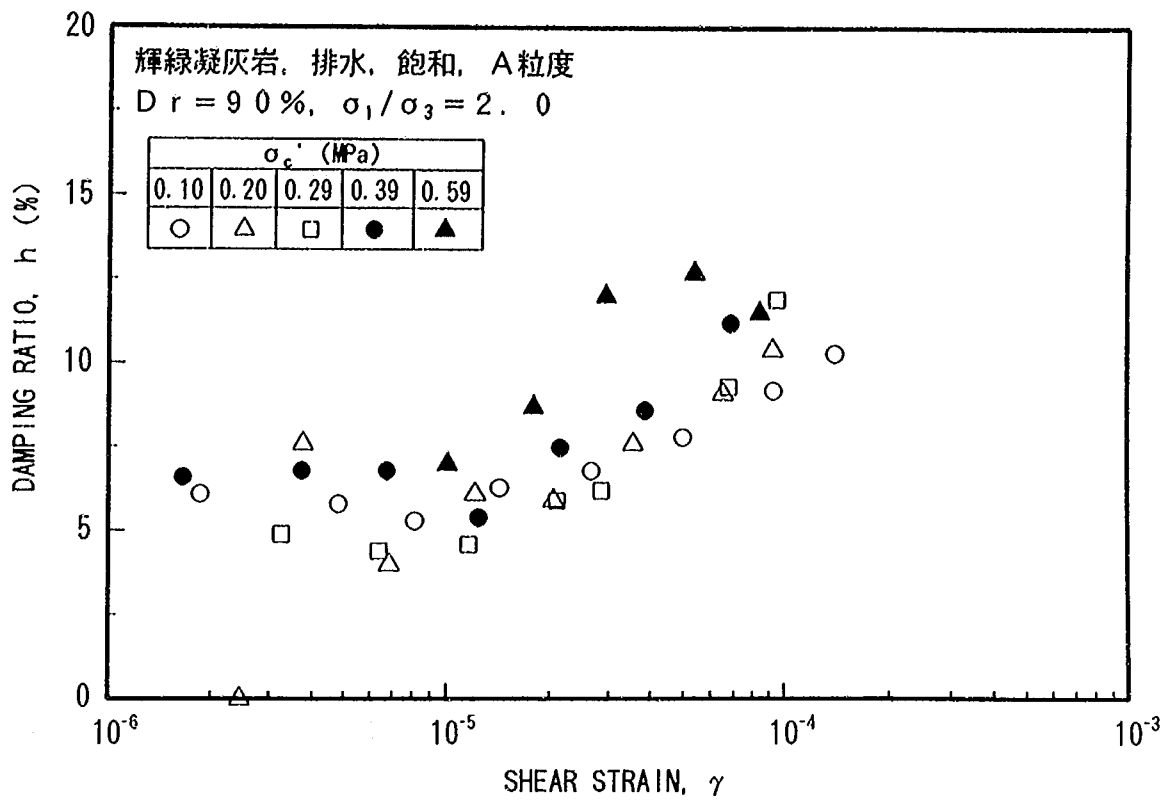


図-3.11(c) $h \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

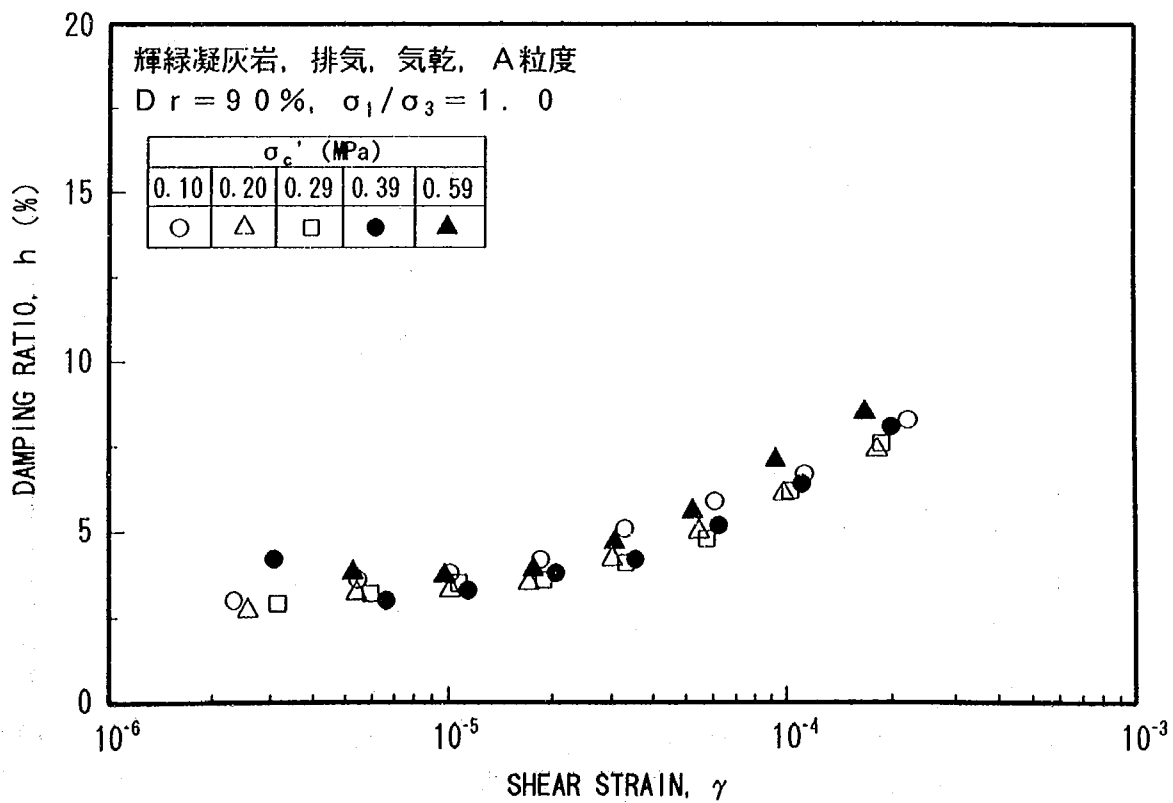


図-3.11(d) $h \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

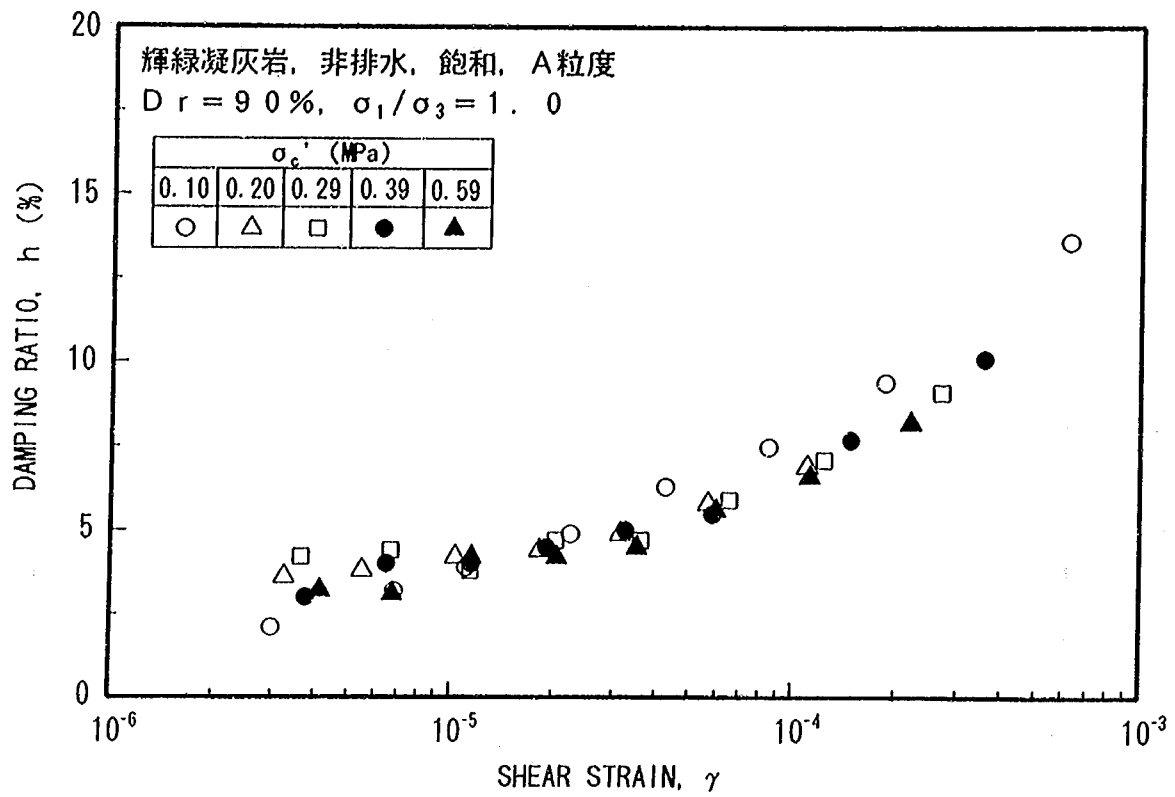


図-3.11(e) $h \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

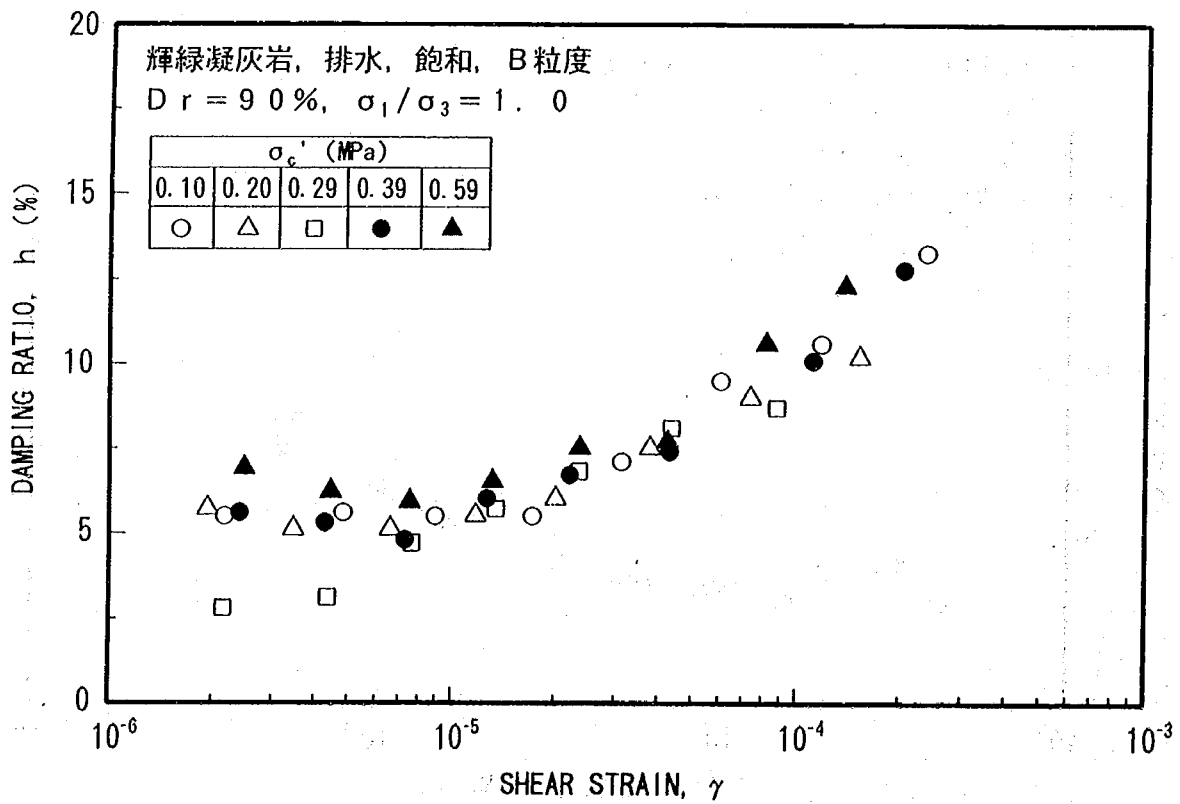


図-3.11(f) $h \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

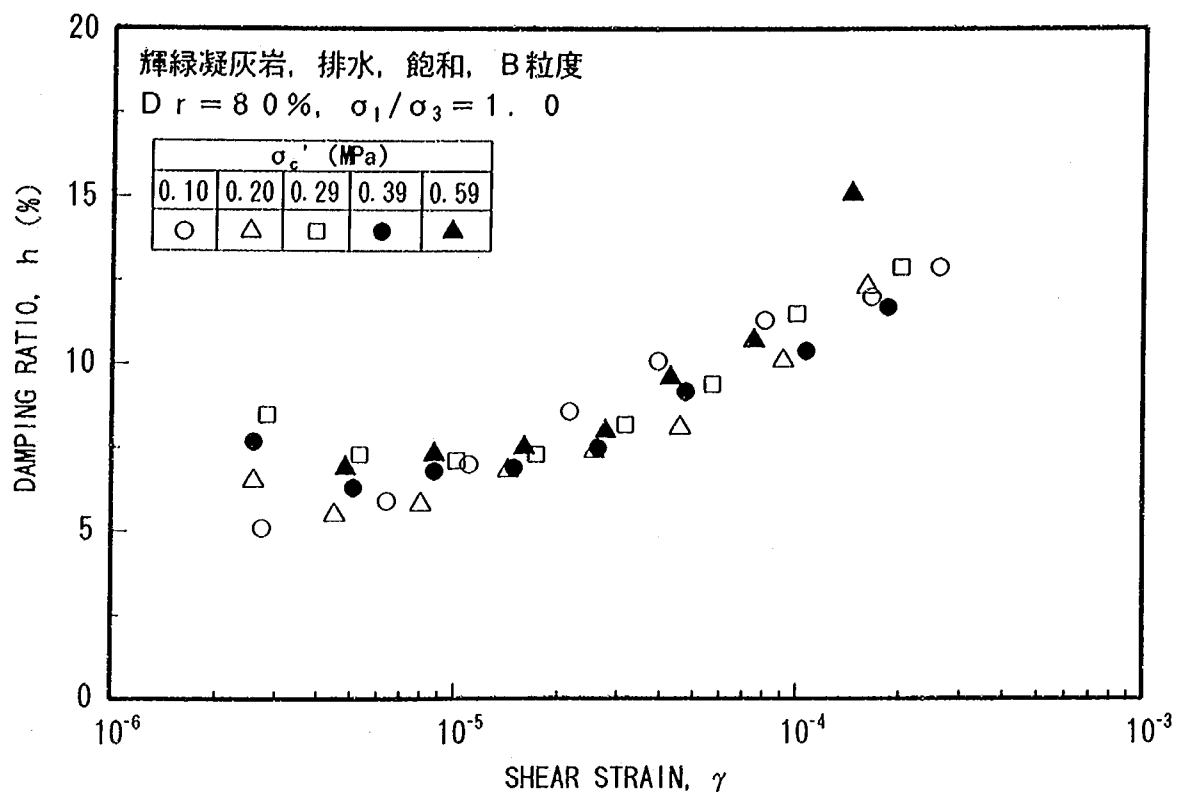


図-3.11(g) $h \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

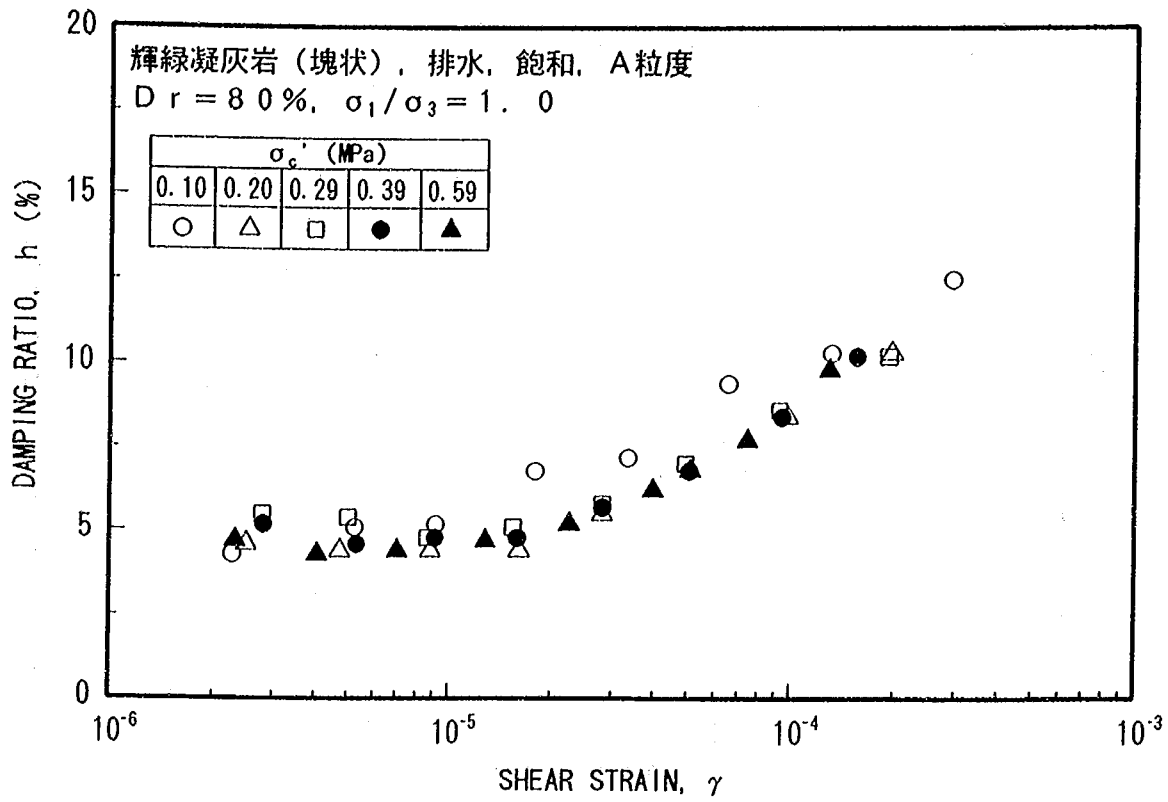


図-3.12(a) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

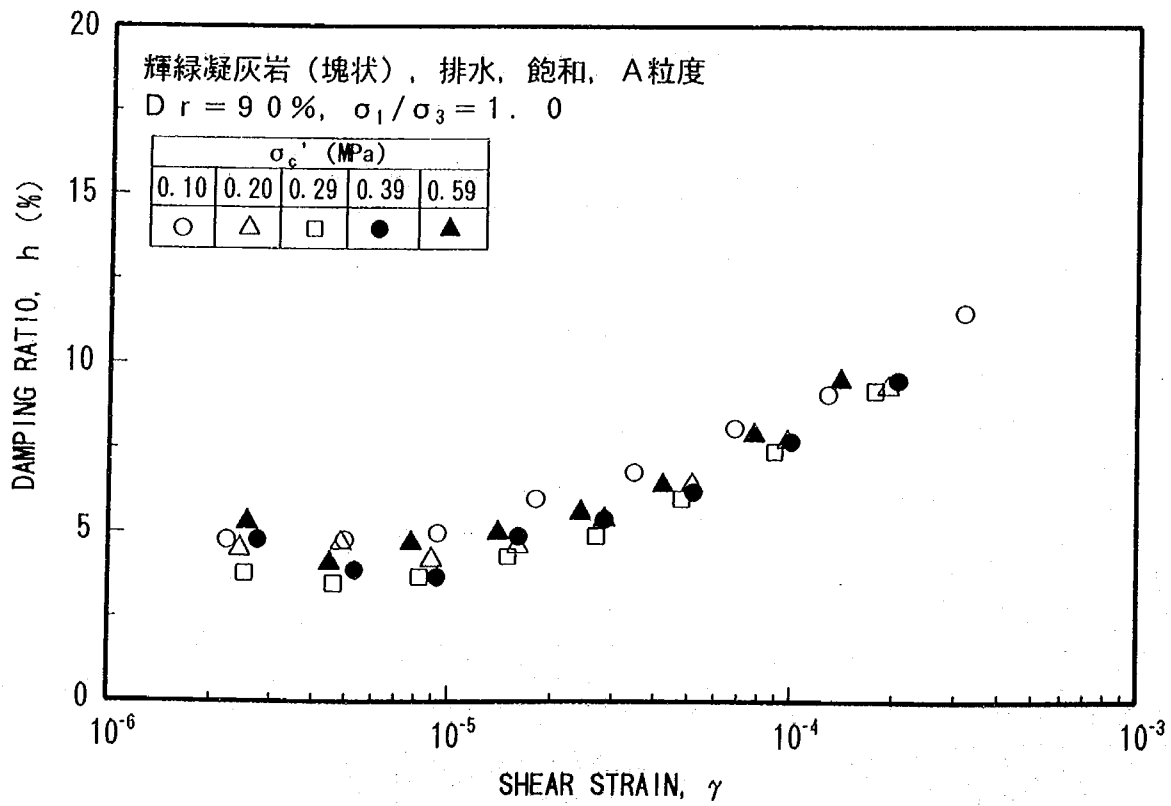


図-3.12(b) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

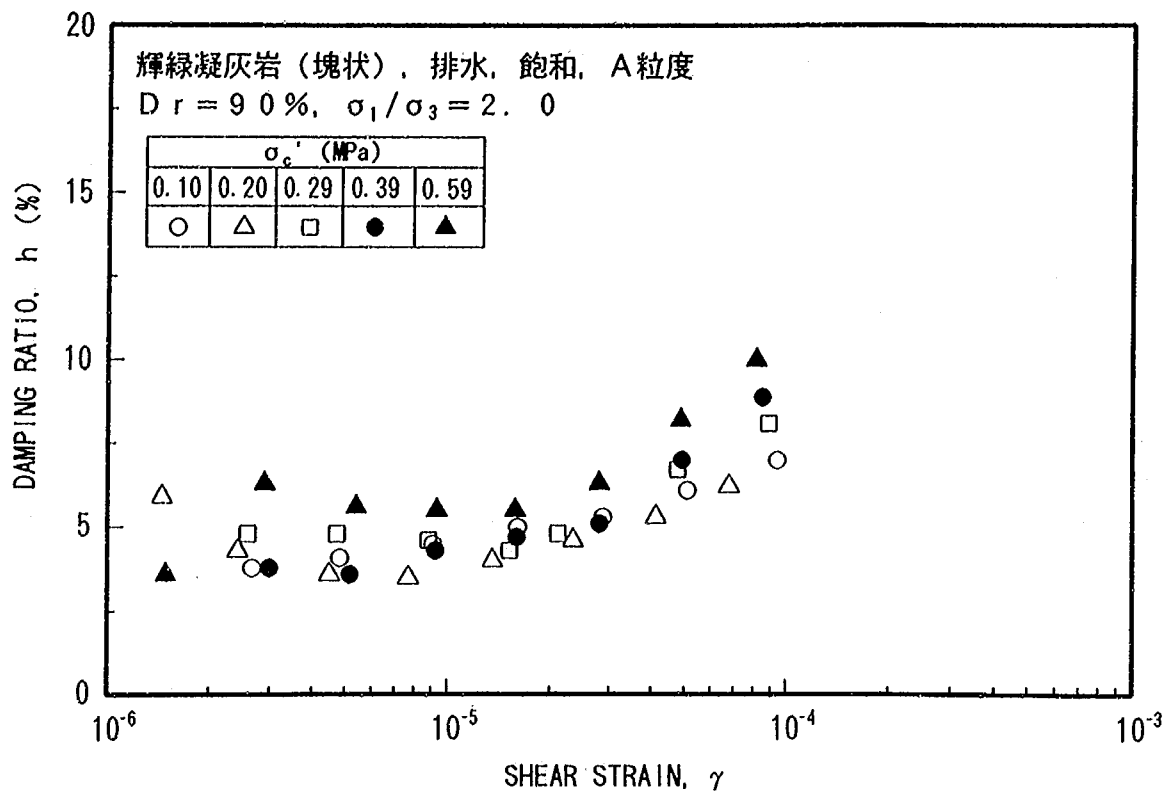


図-3.12(c) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

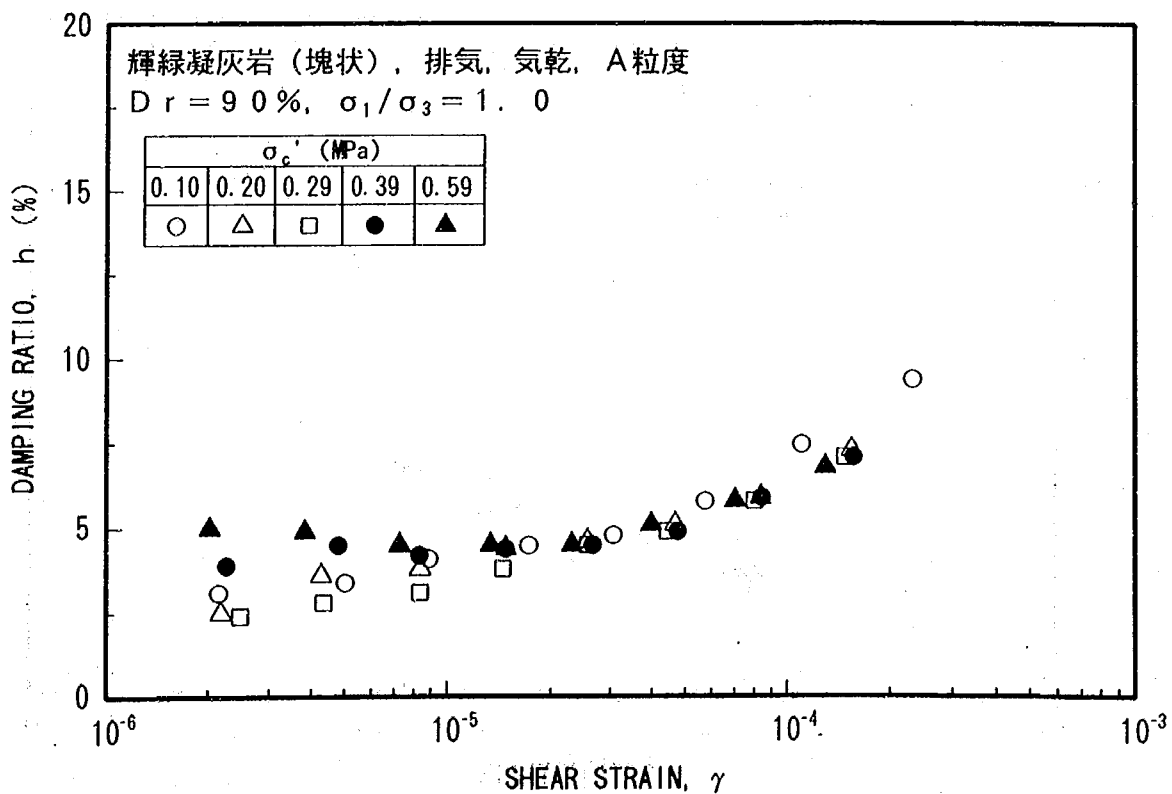


図-3.12(d) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

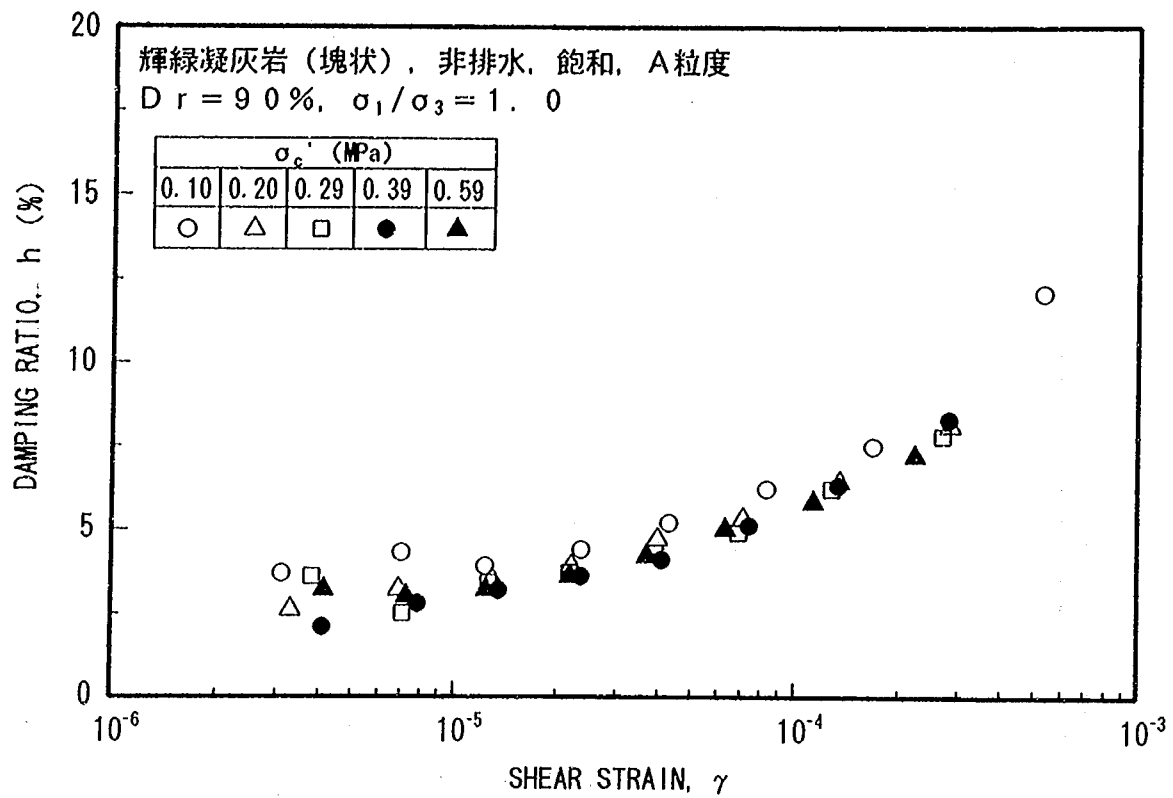


図-3.12(e) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

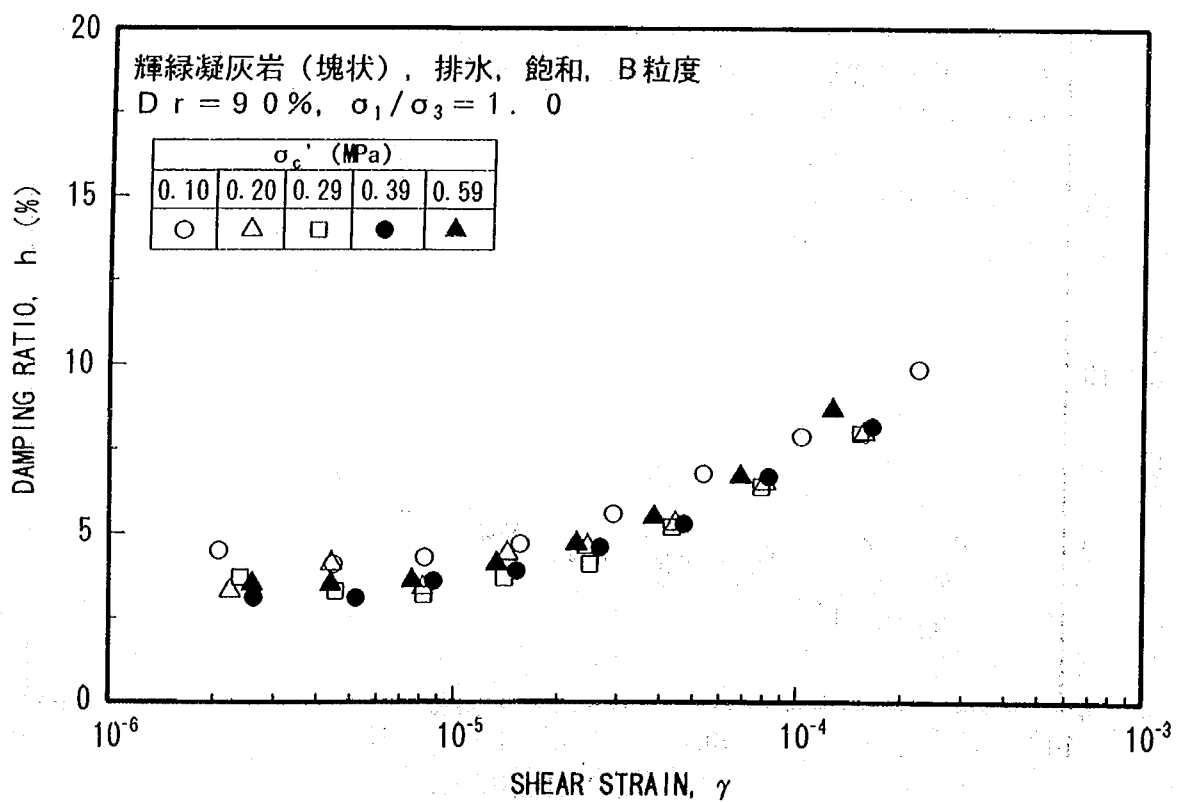


図-3.12(f) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

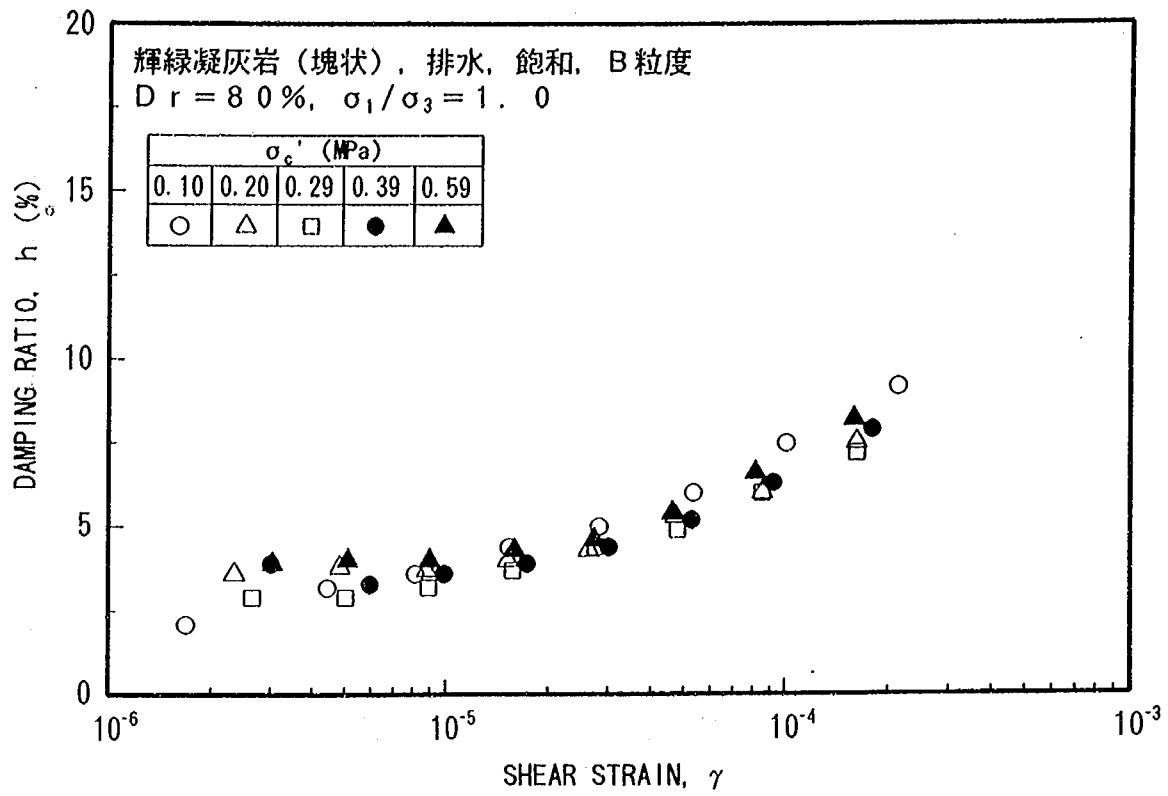


図-3.12(g) $h \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

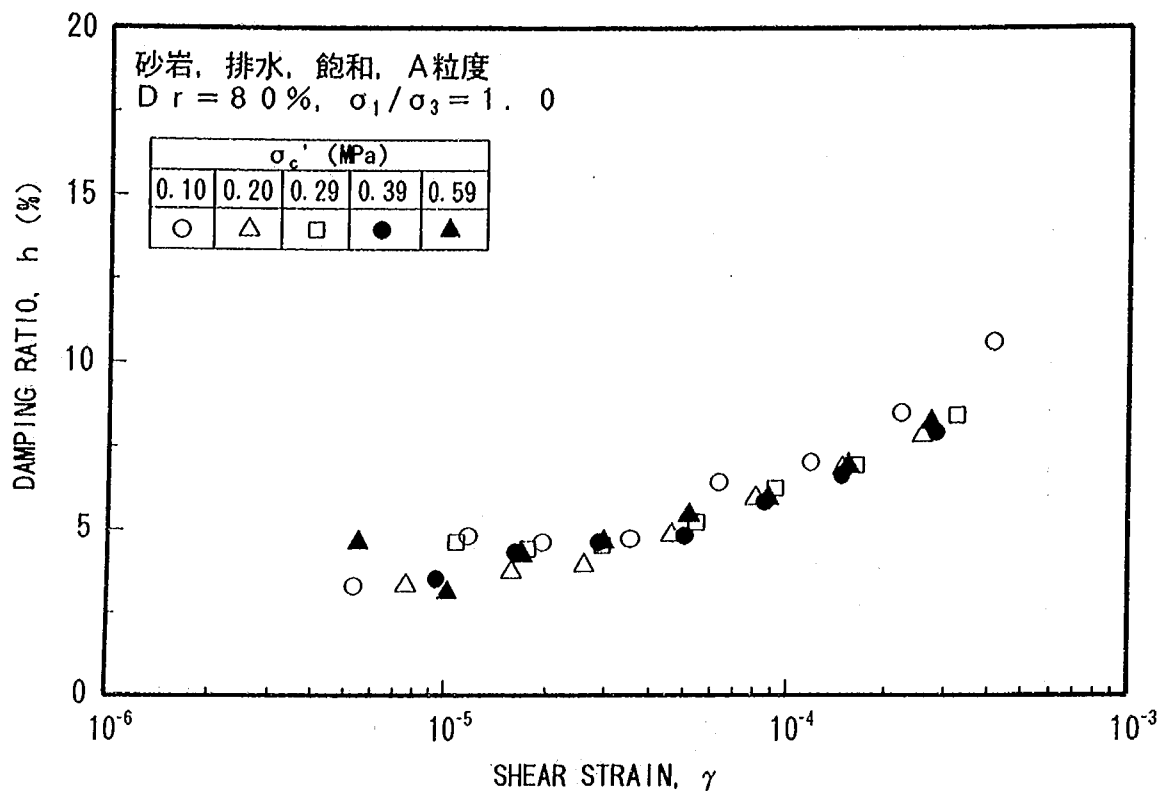


図-3.13(a) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

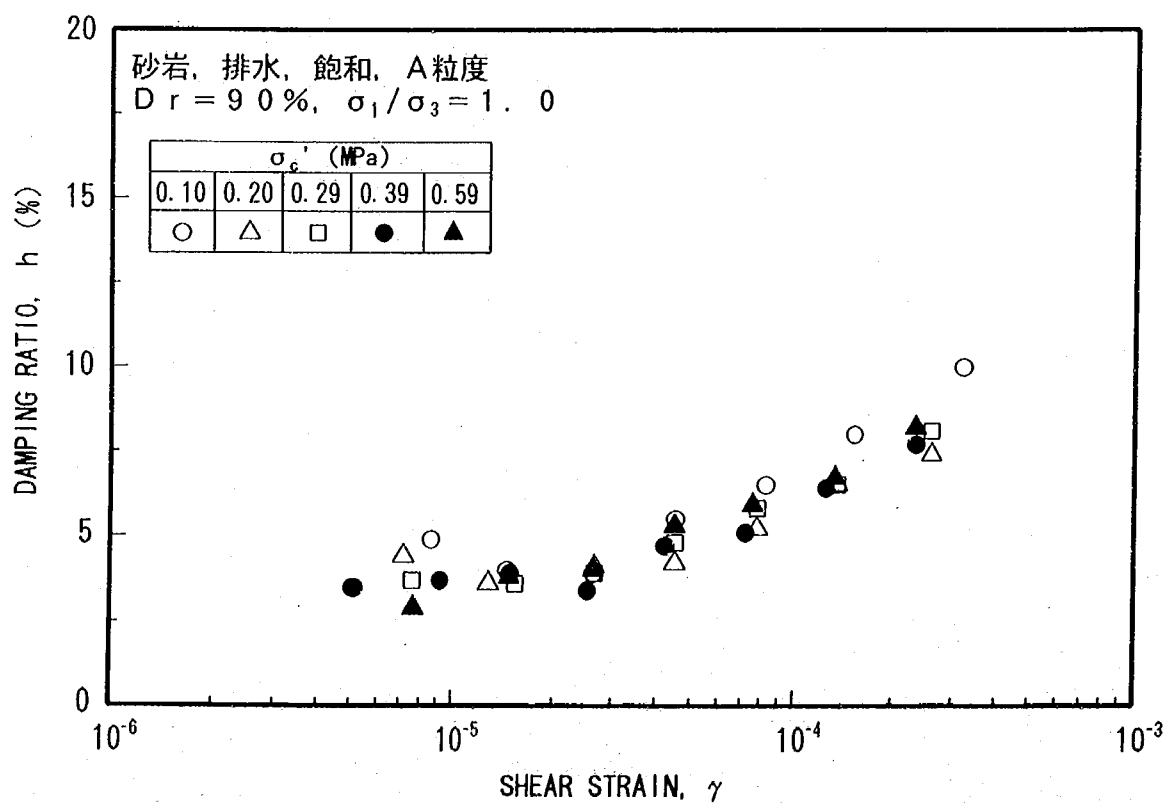


図-3.13(b) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

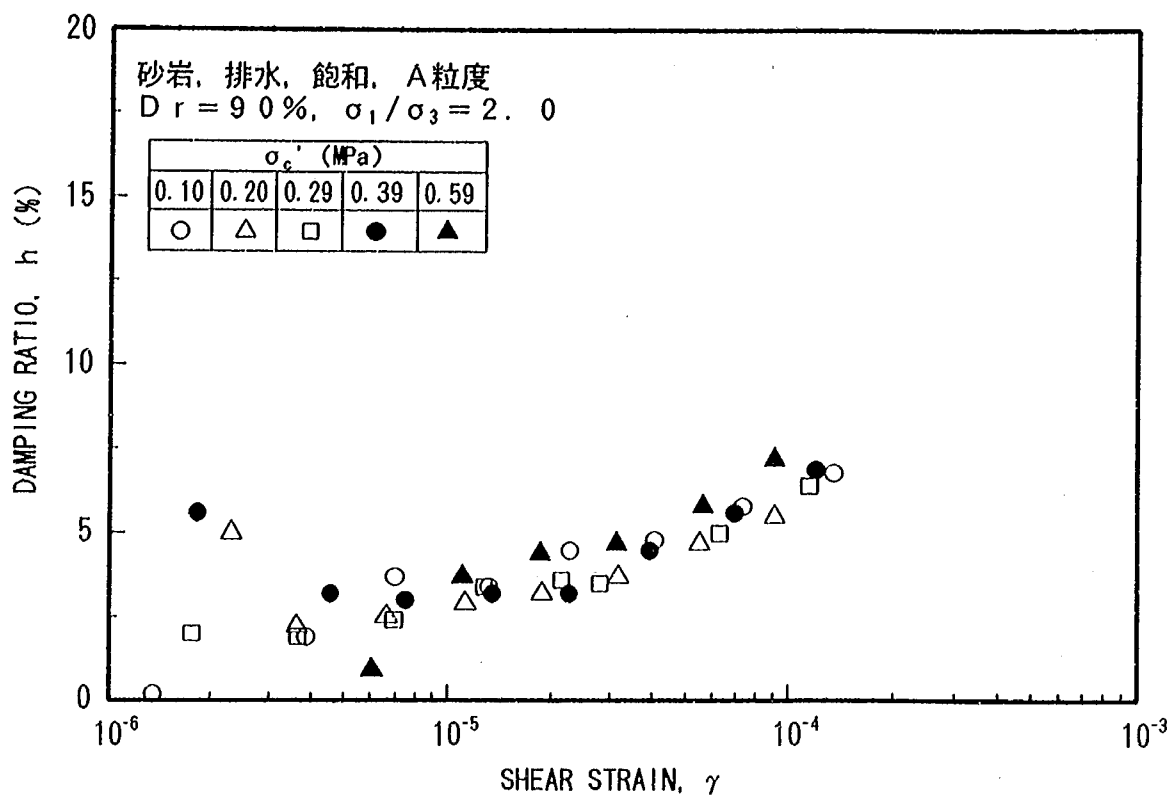


図-3.13(c) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

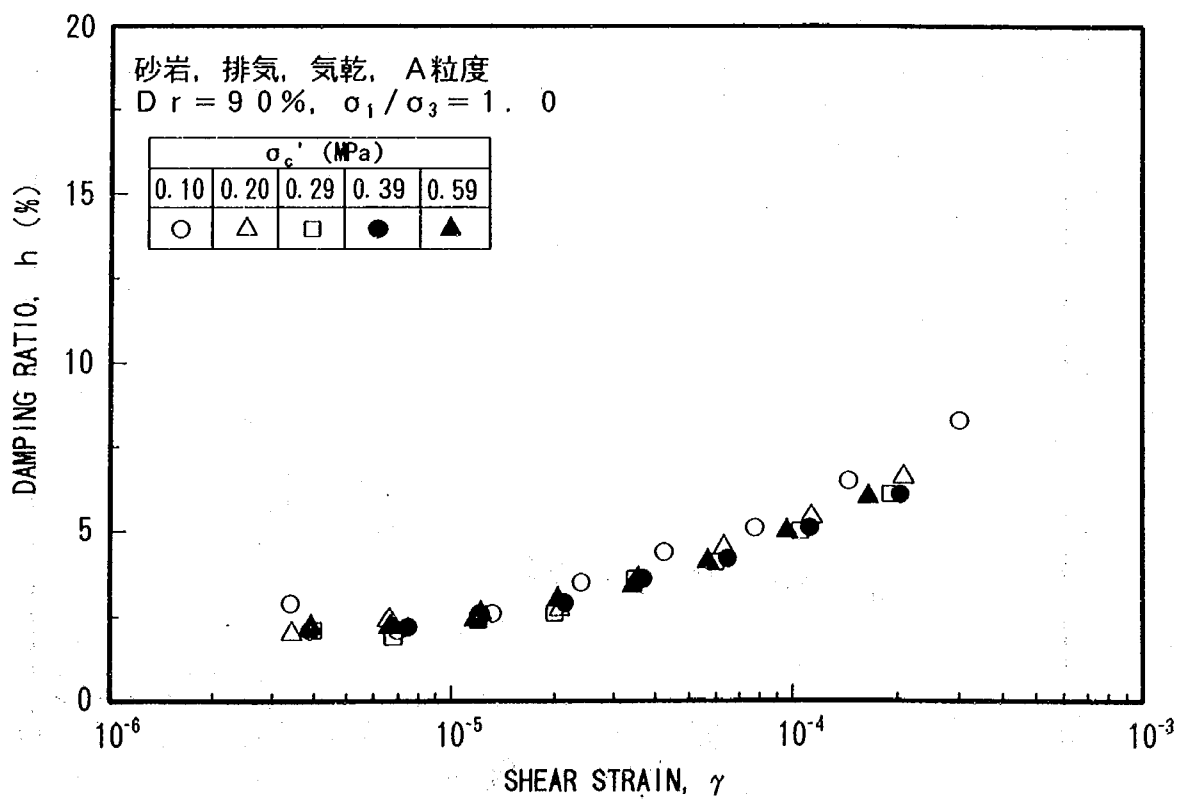


図-3.13(d) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

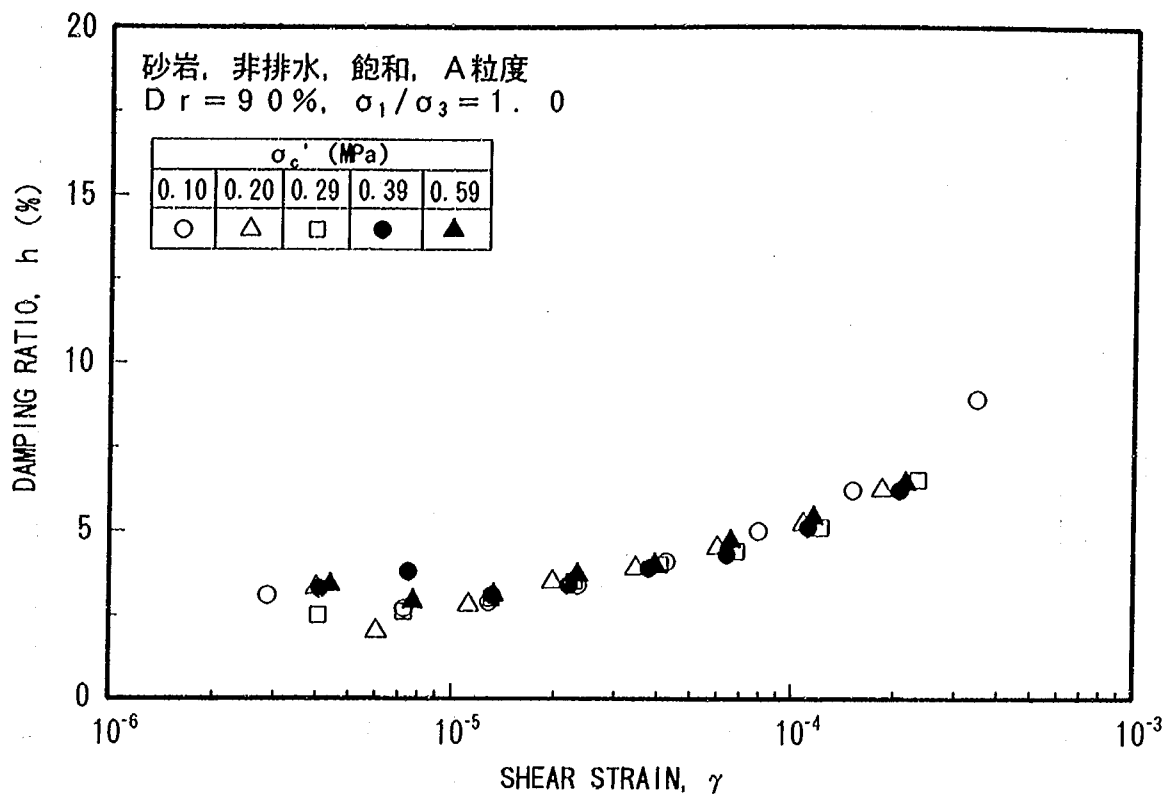


図-3.13(e) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

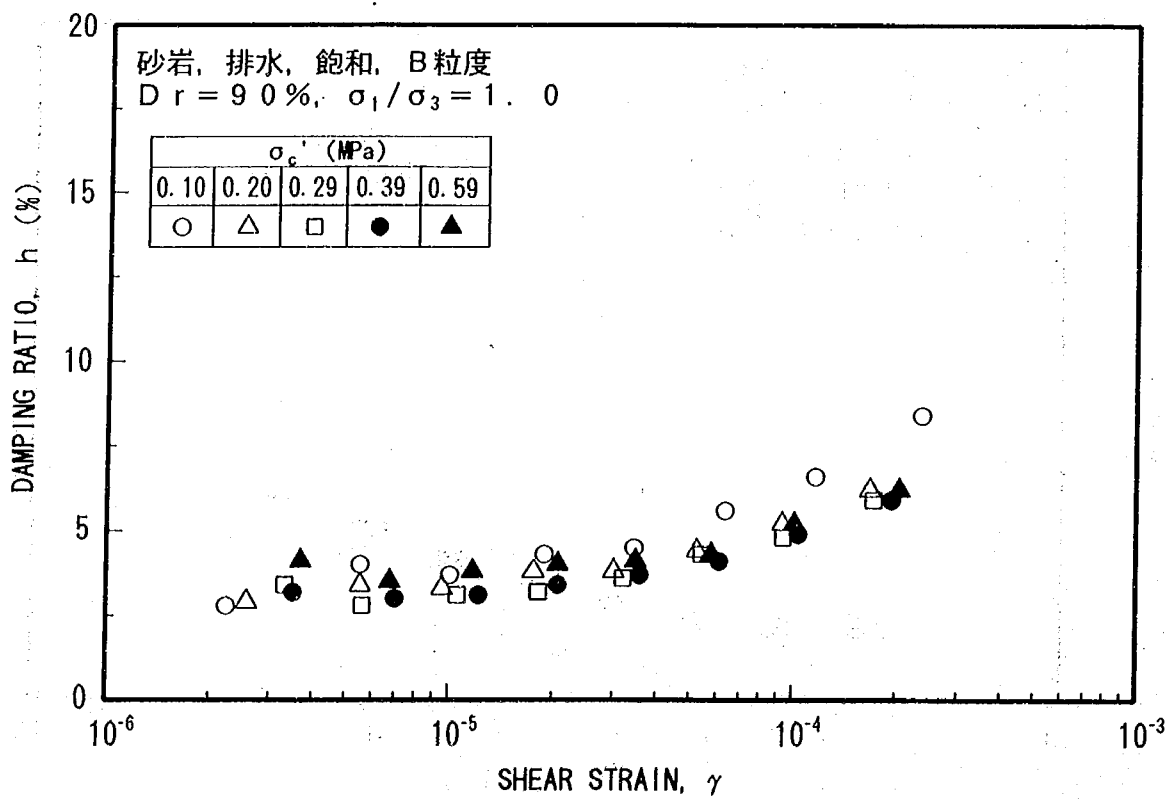


図-3.13(f) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

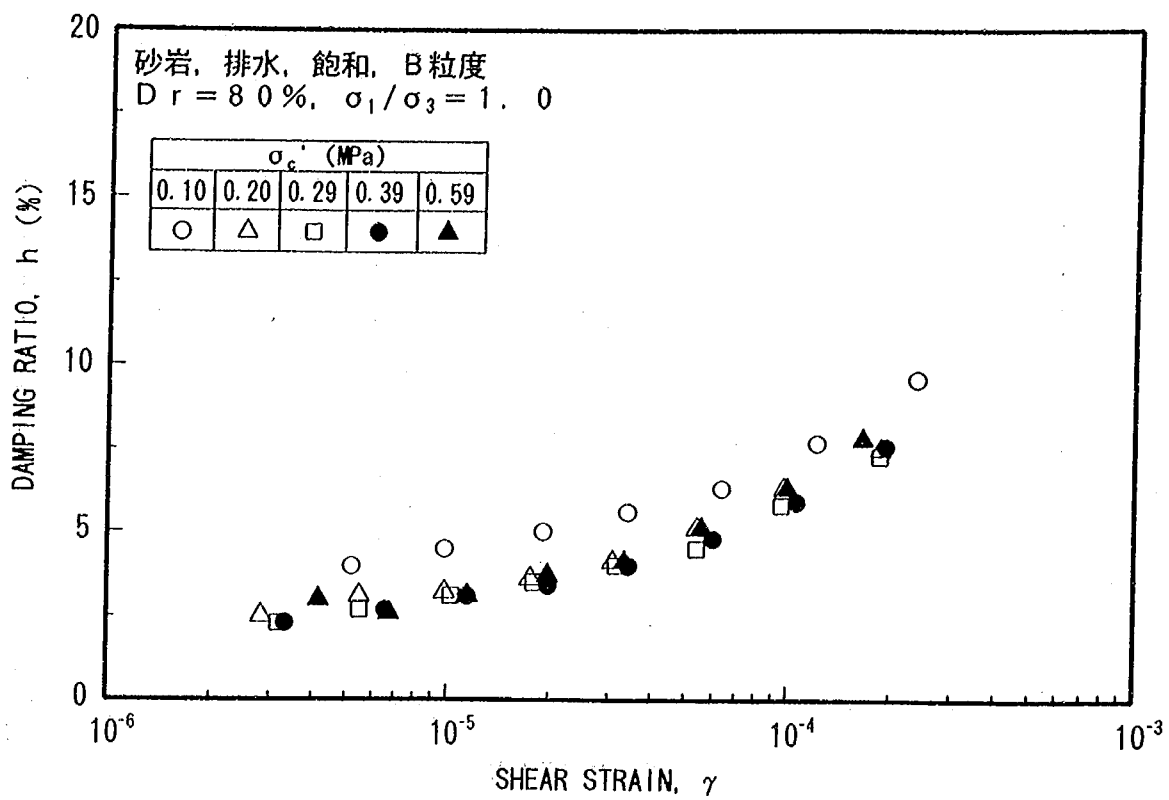
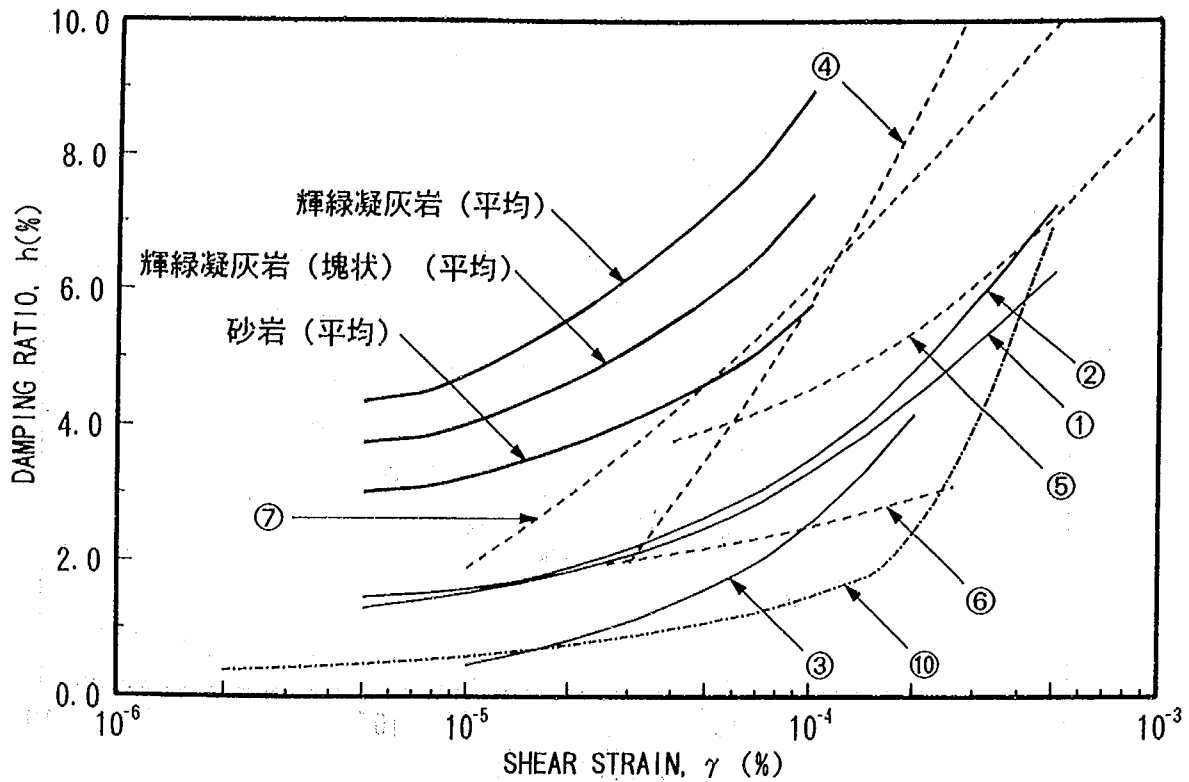


図-3.13(g) $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)



番号	研究者	供試体直径 (cm)	高さ (cm)	材料	最大粒径 (mm)	試験方法
①	Yasuda and Matsumoto ⁶⁾	40	80	ロック材料	38.1	繰返し三軸
②	中村ら ⁶⁾	30	60	ロック材料	63.5	繰返し三軸
③	Hynes et al. ⁷⁾	38.1	97.8	ロック材料	76.2	繰返し三軸
④	Seed et al. ⁸⁾	30.5	73.7	砂礫	50.8	繰返し三軸
⑤	Konno et al. ⁹⁾	30	60	砂礫	110	繰返し三軸
⑥	Shibuya et al. ¹⁰⁾	30	60	砂礫	6.65(D ₅₀)	繰返し三軸
⑦	Hatanaka et al. ¹¹⁾	30	60	砂礫	90	繰返し三軸
⑧	社本ら ¹²⁾	30	60	砂礫	—	繰返し三軸
⑨	Iwasaki et al. ¹³⁾	6(内径) 10(外径)	25	砂	0.162~	共振法
⑩	本予備試験 (1.2.2)	6(内径) 10(外径)	10	砂	0.99(D ₅₀)	繰返しねじり
⑩	本予備試験 (1.2.2)	30	60	豊浦砂	0.85	繰返し三軸

注：D₅₀は平均粒径

図-3.14 他の粗粒材料と砂の $h \sim \gamma$ 関係と今回の試験の平均値の比較

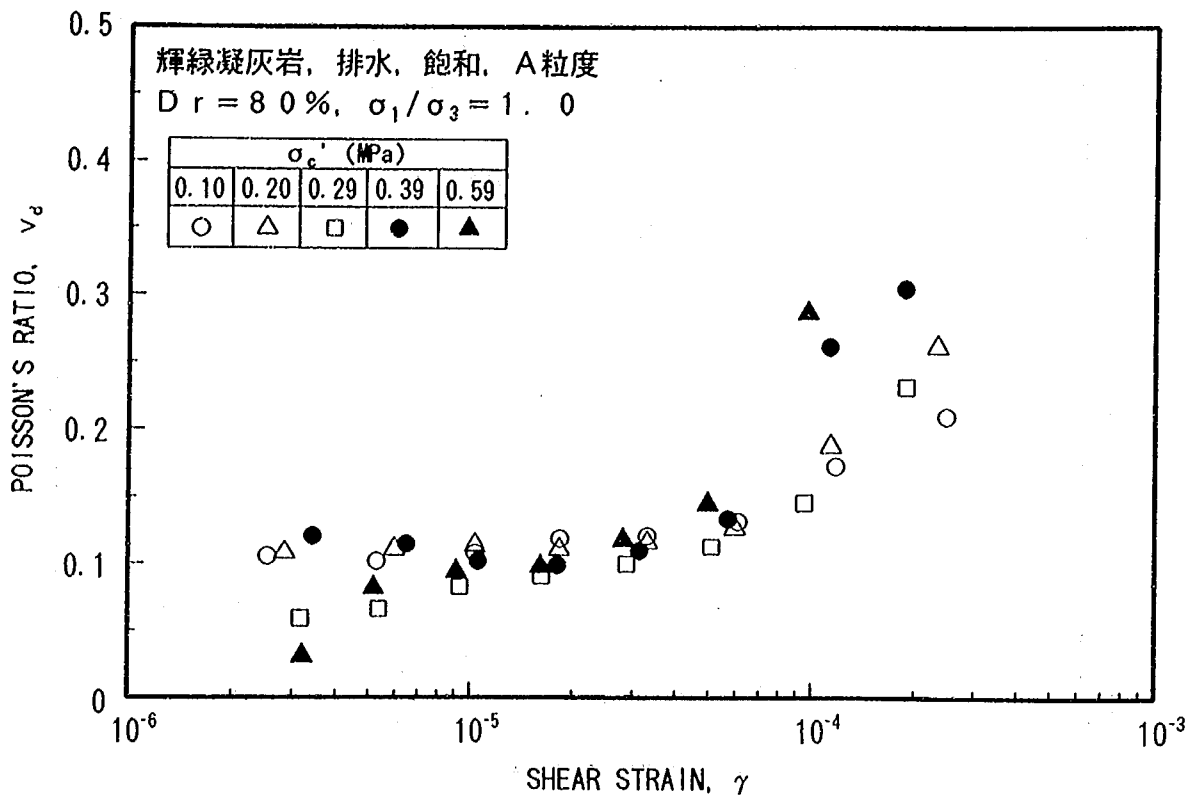


図-3.15(a) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

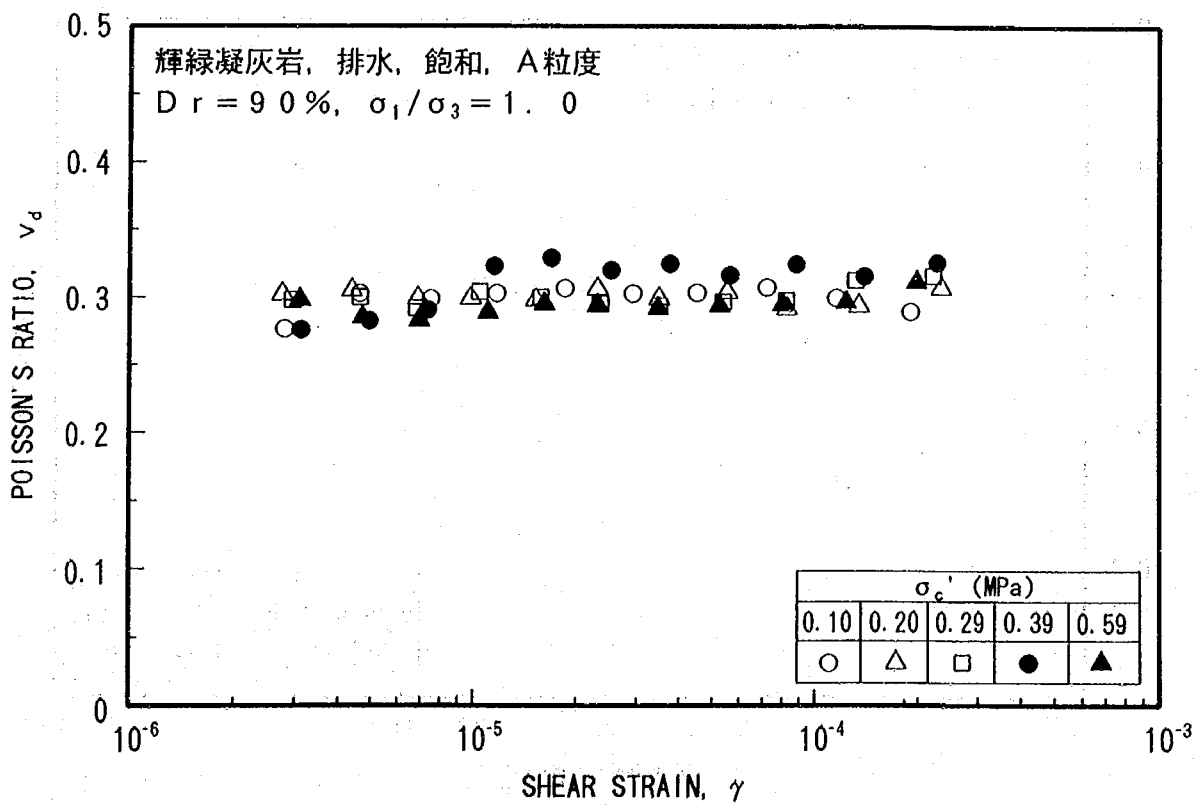


図-3.15(b) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

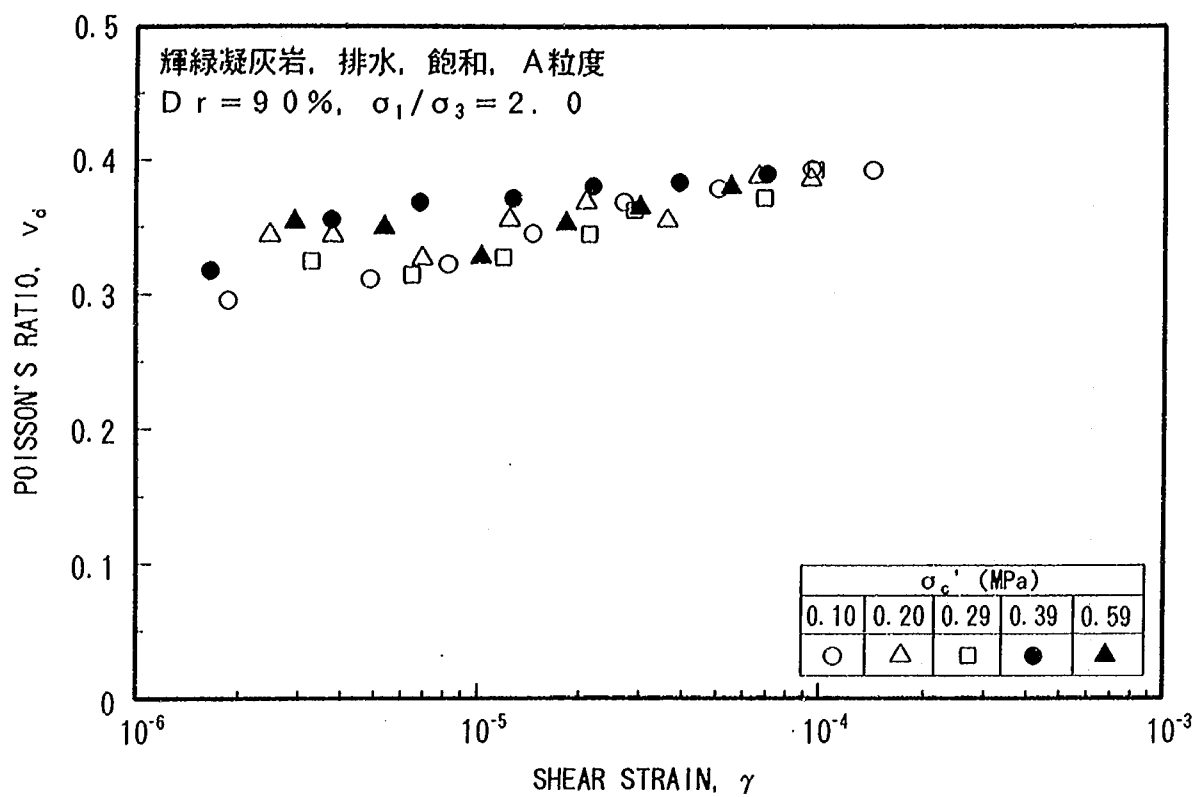


図-3.15(c) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

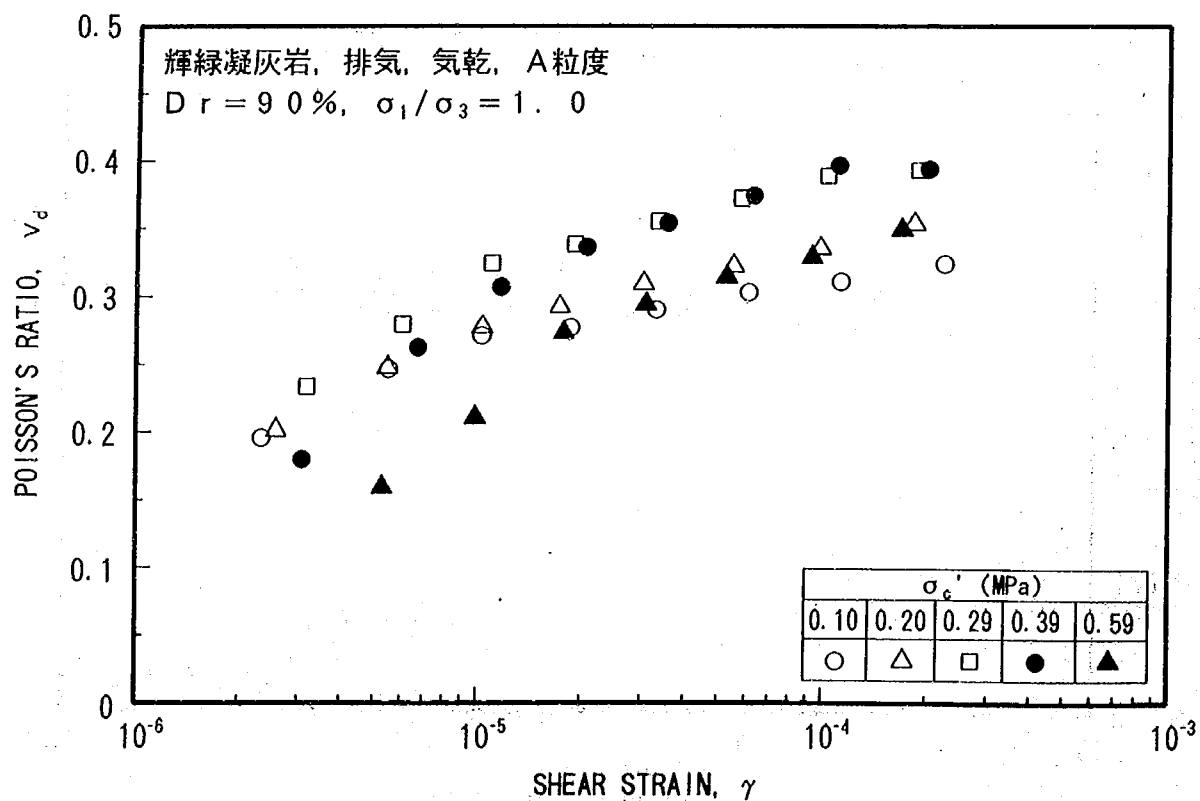


図-3.15(d) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

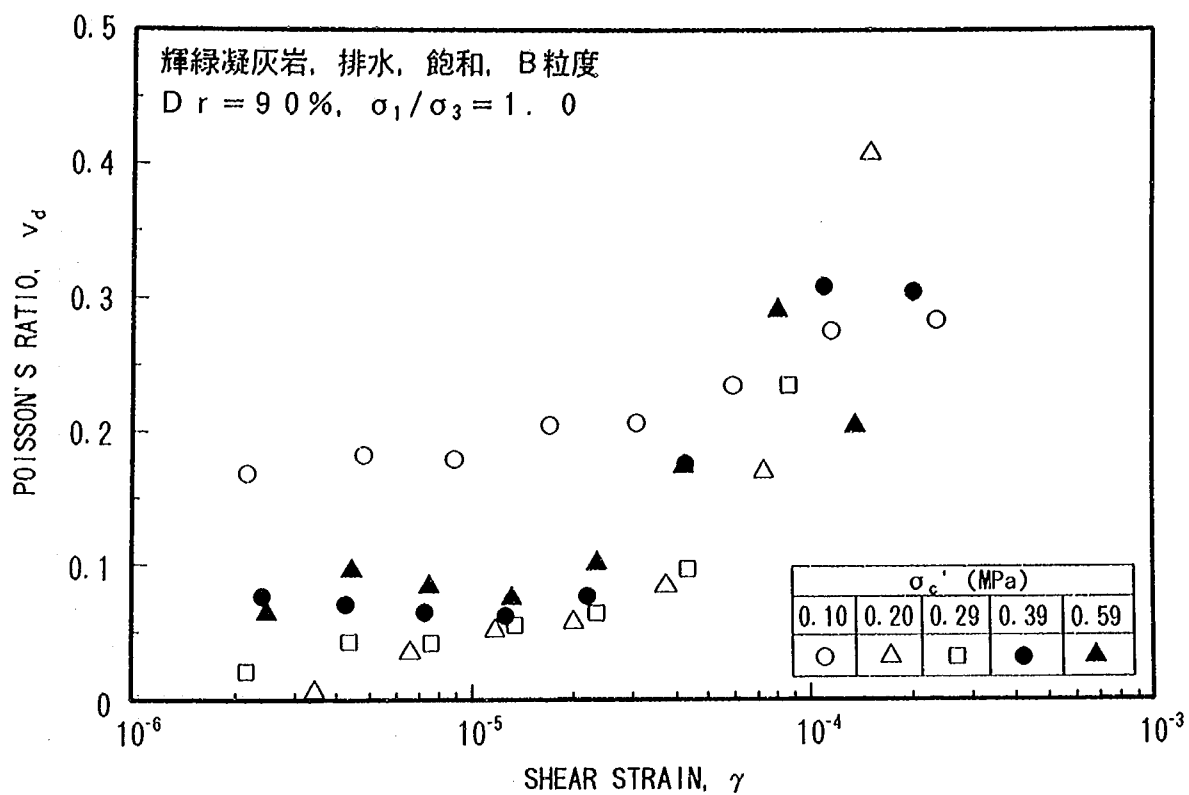


図-3.15(e) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

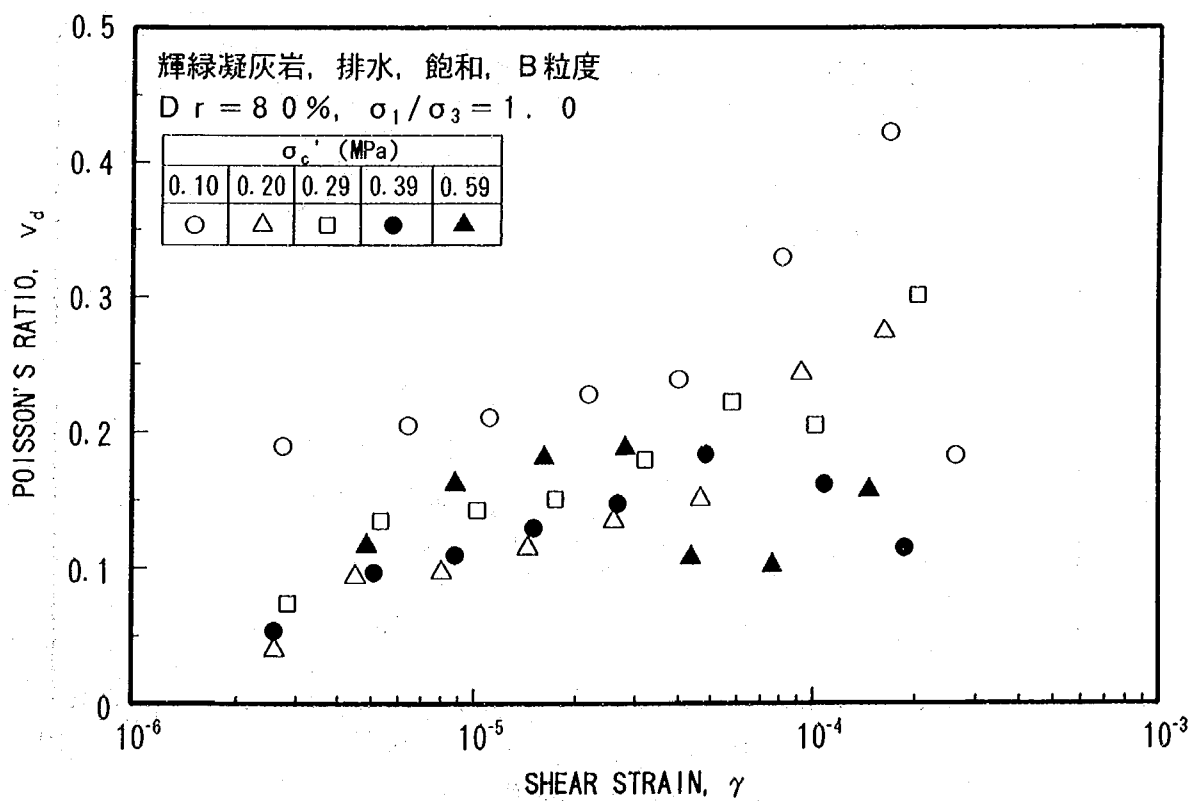


図-3.15(f) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (輝綠凝灰岩)

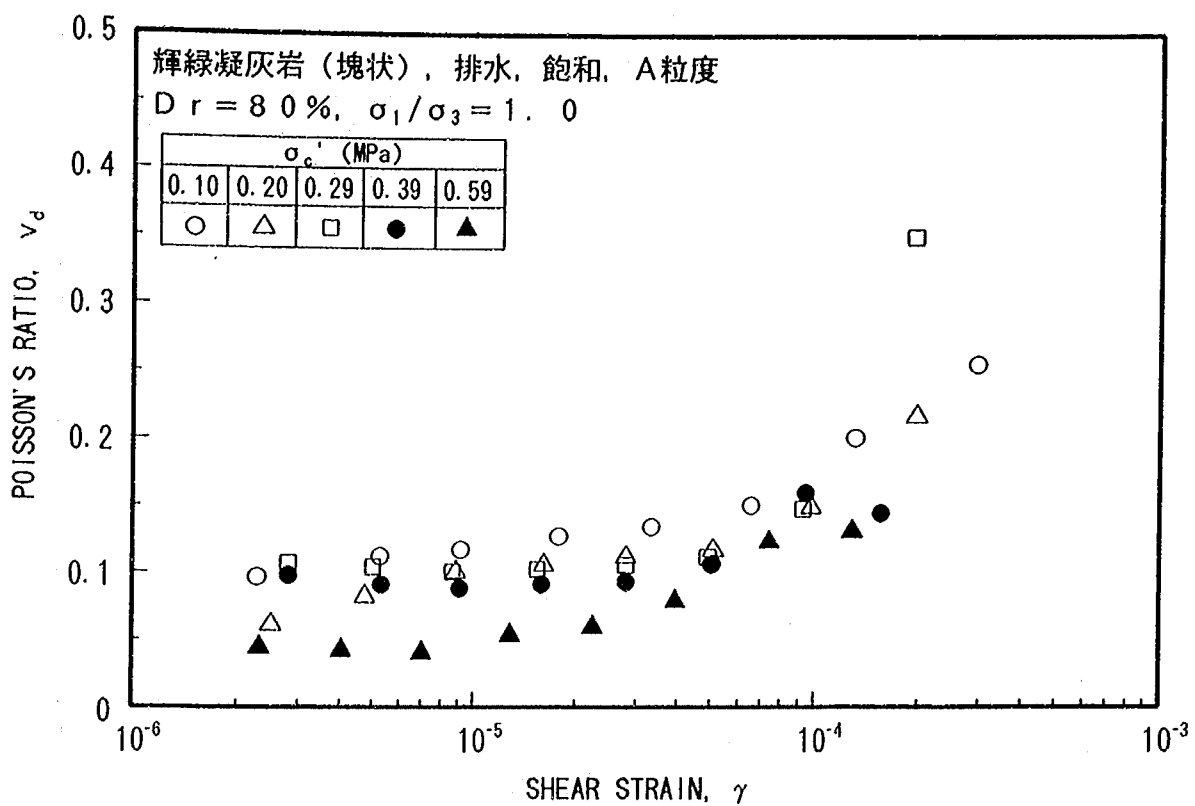


図-3.16(a) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

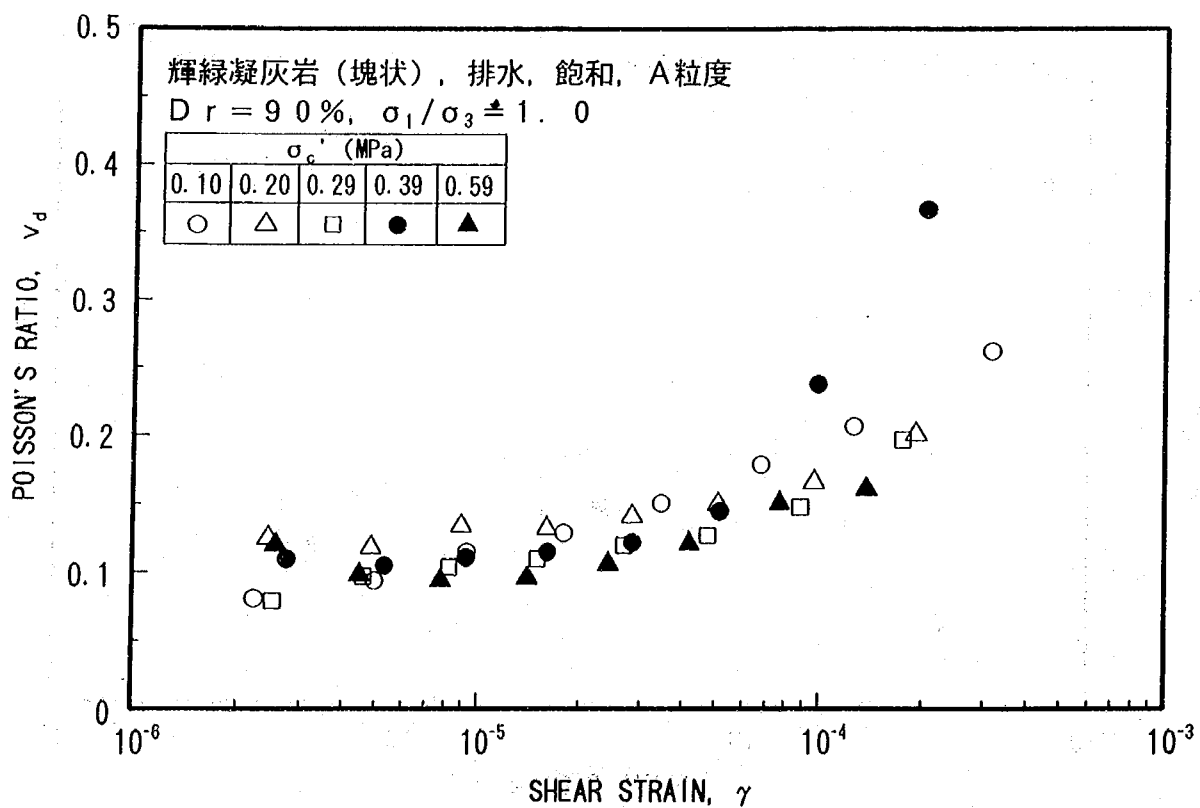


図-3.16(b) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

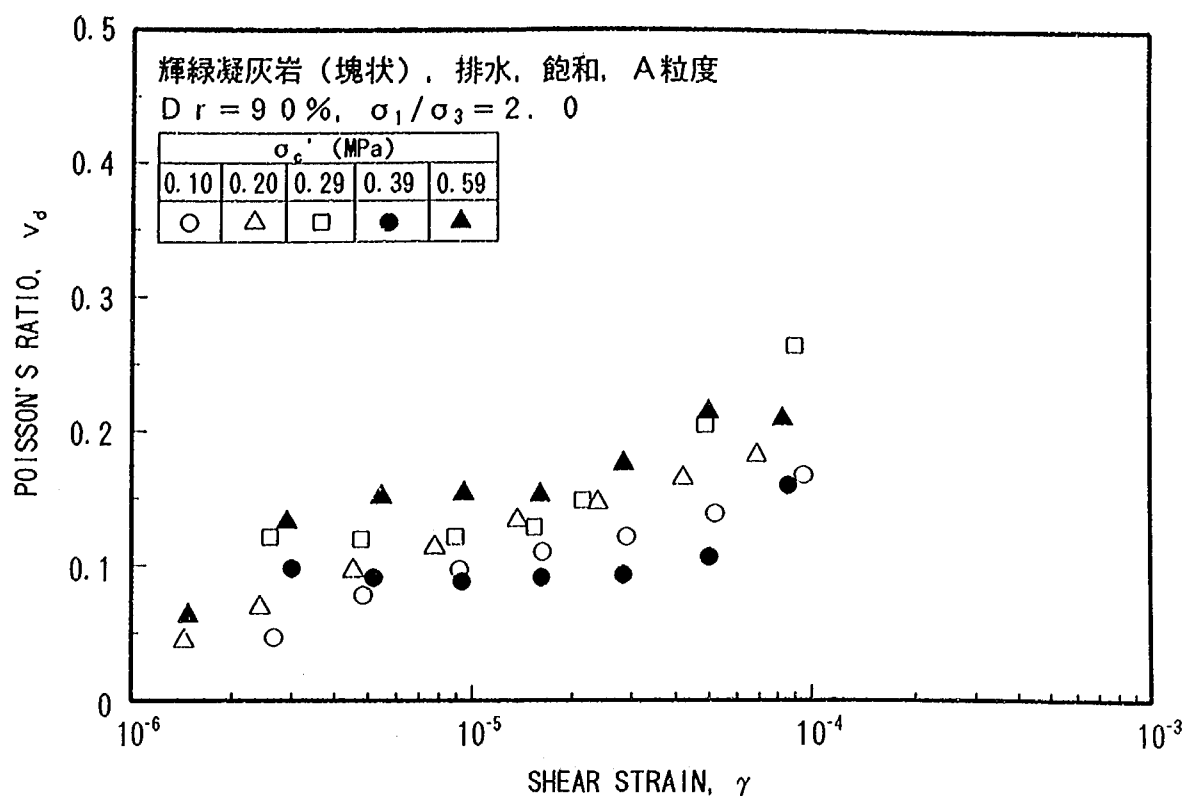


図-3.16(c) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

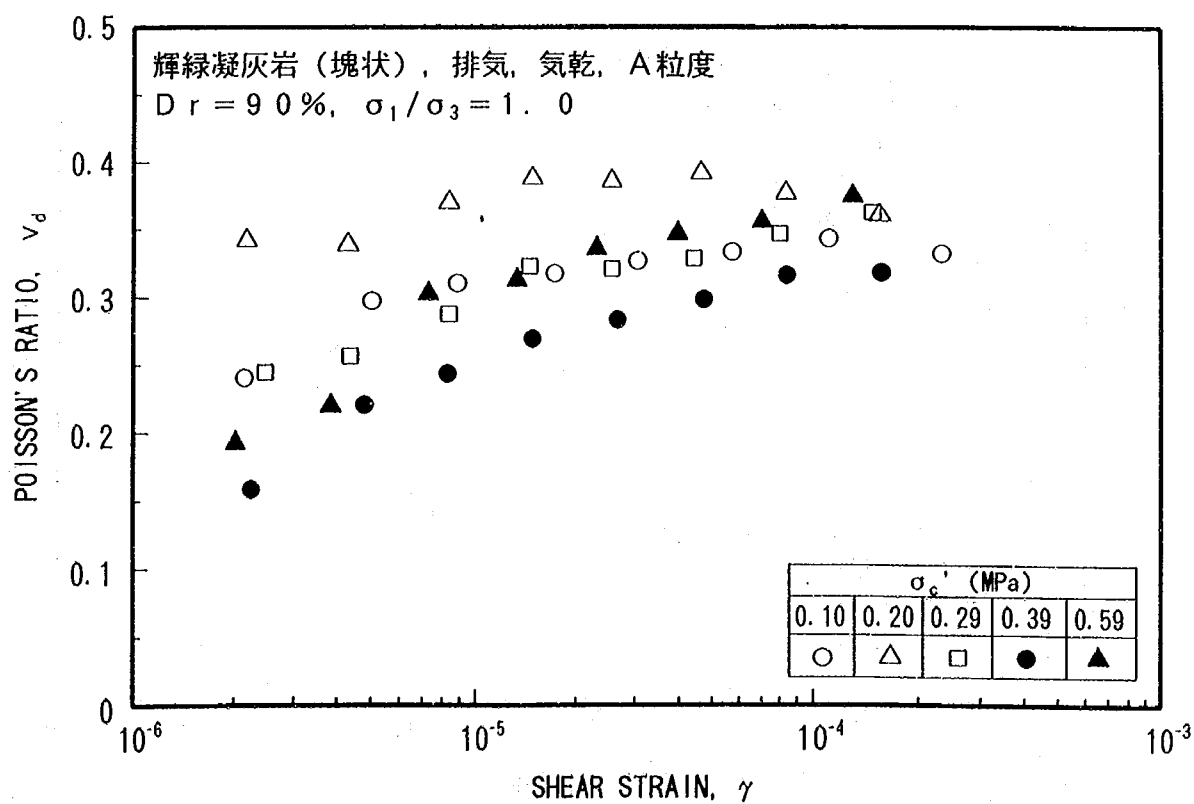


図-3.16(d) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊状））

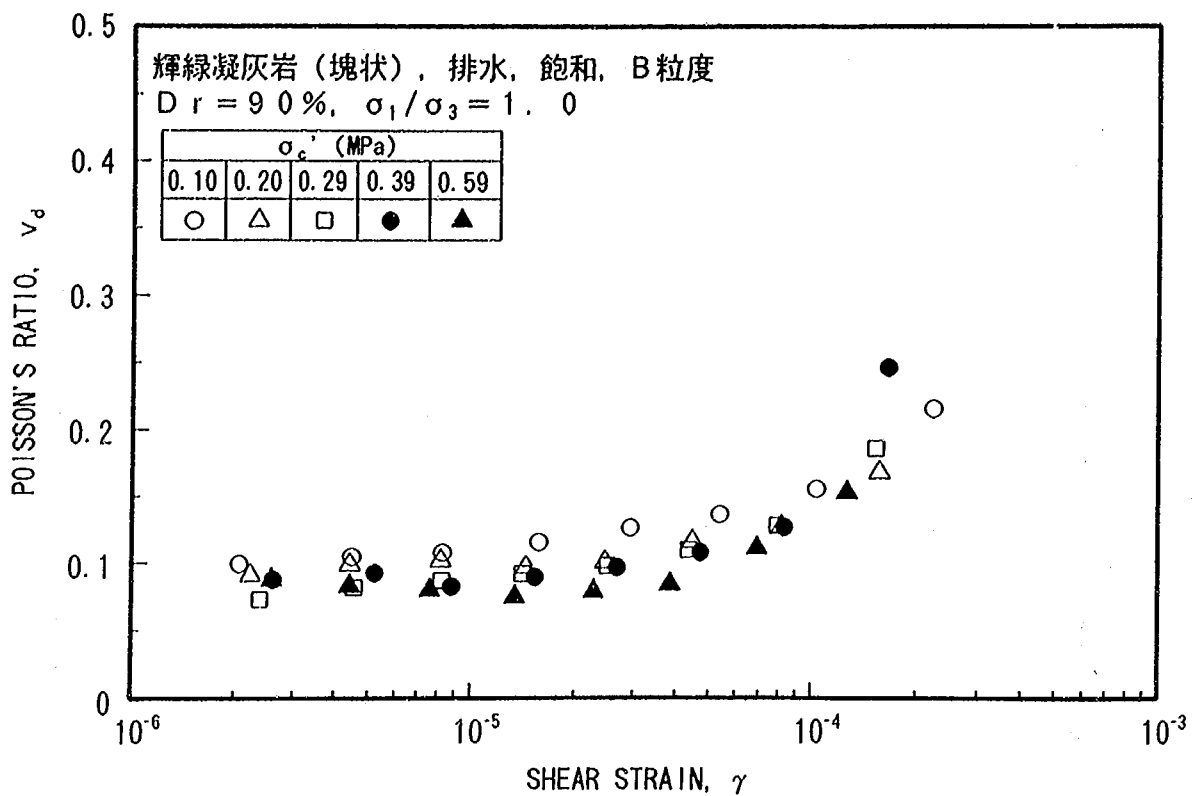


図-3.16(e) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

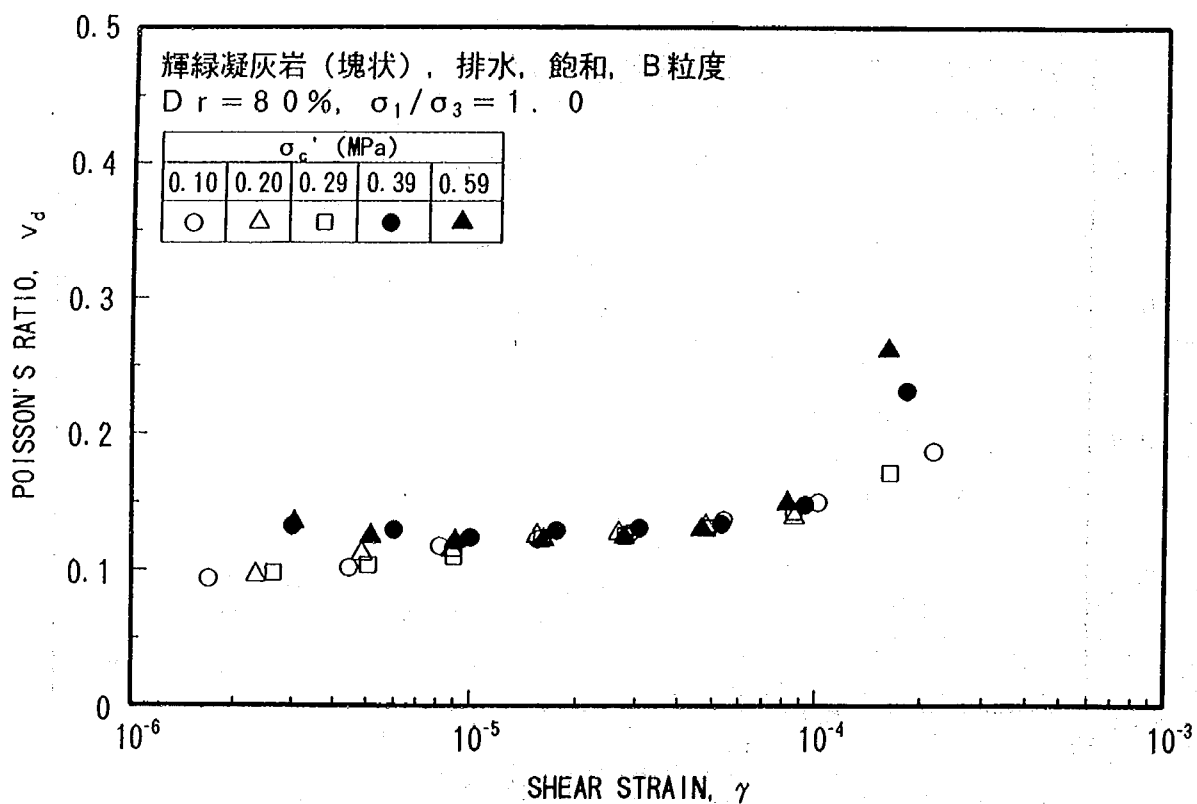


図-3.16(f) $\nu_d \sim \gamma$ 関係（輝綠凝灰岩（塊狀））

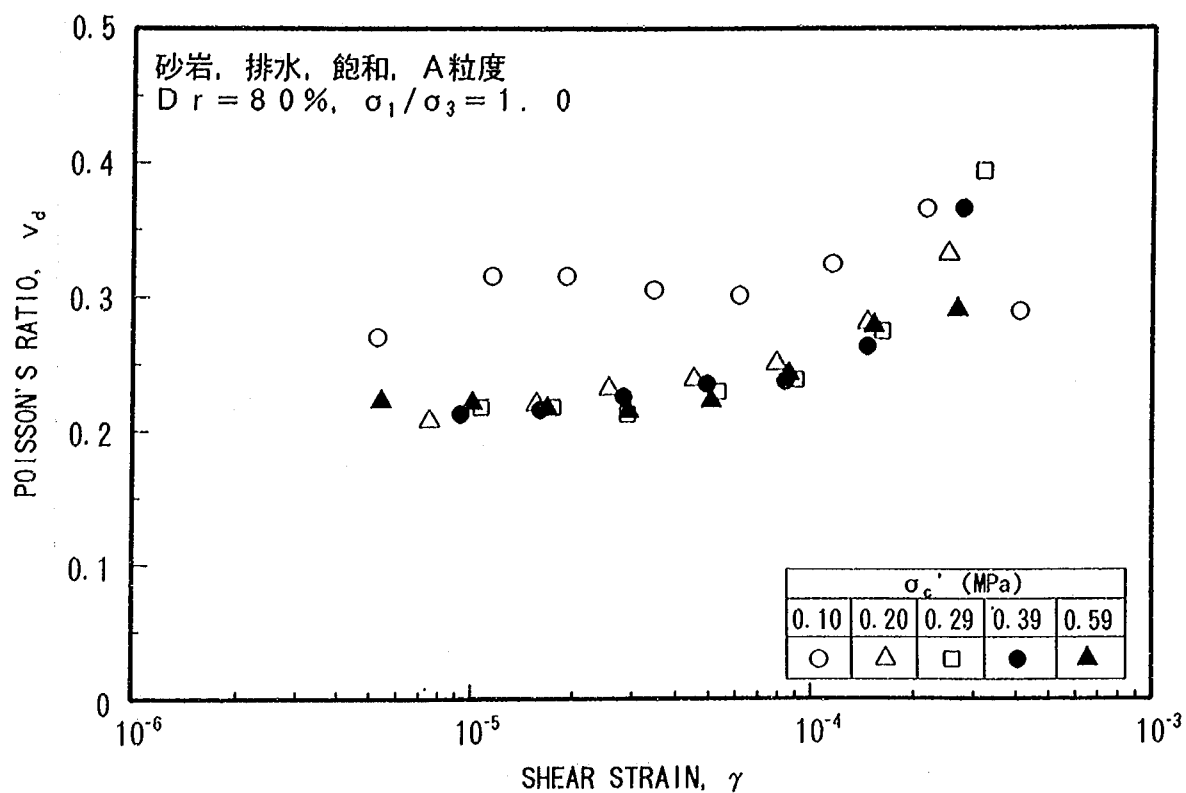


図-3.17(a) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

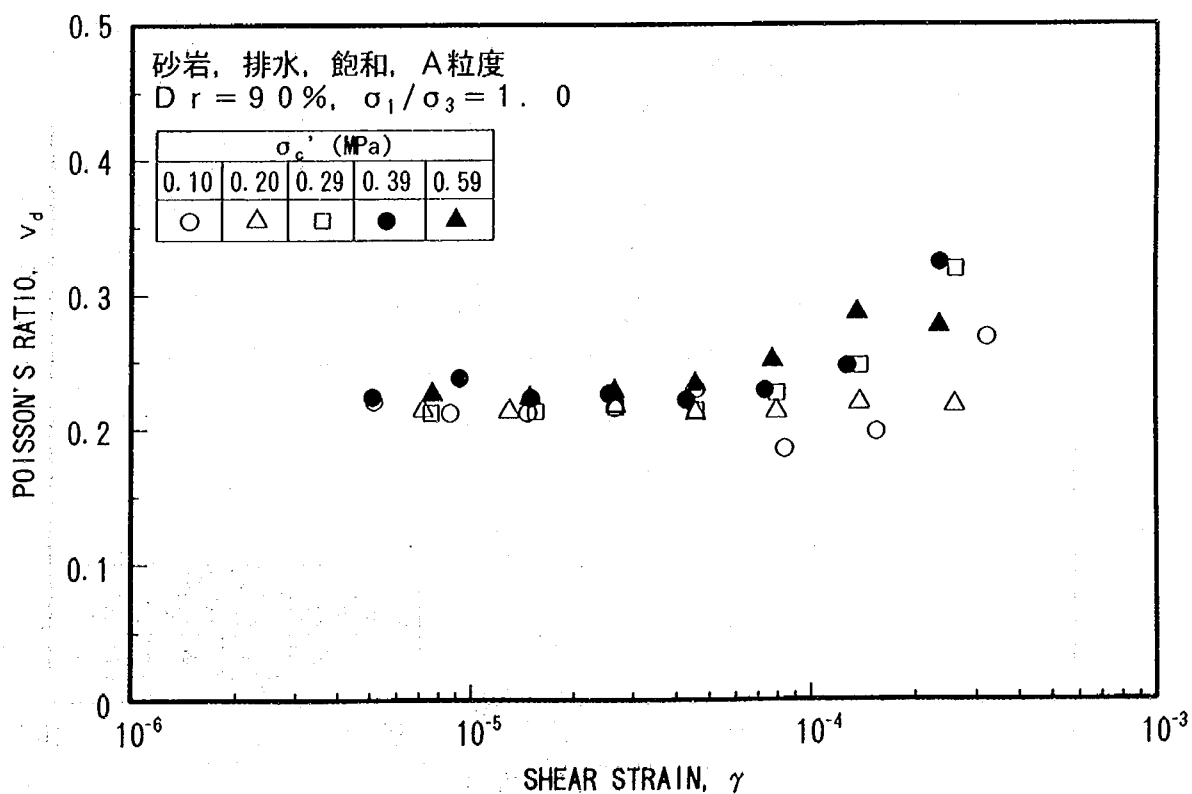


図-3.17(b) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

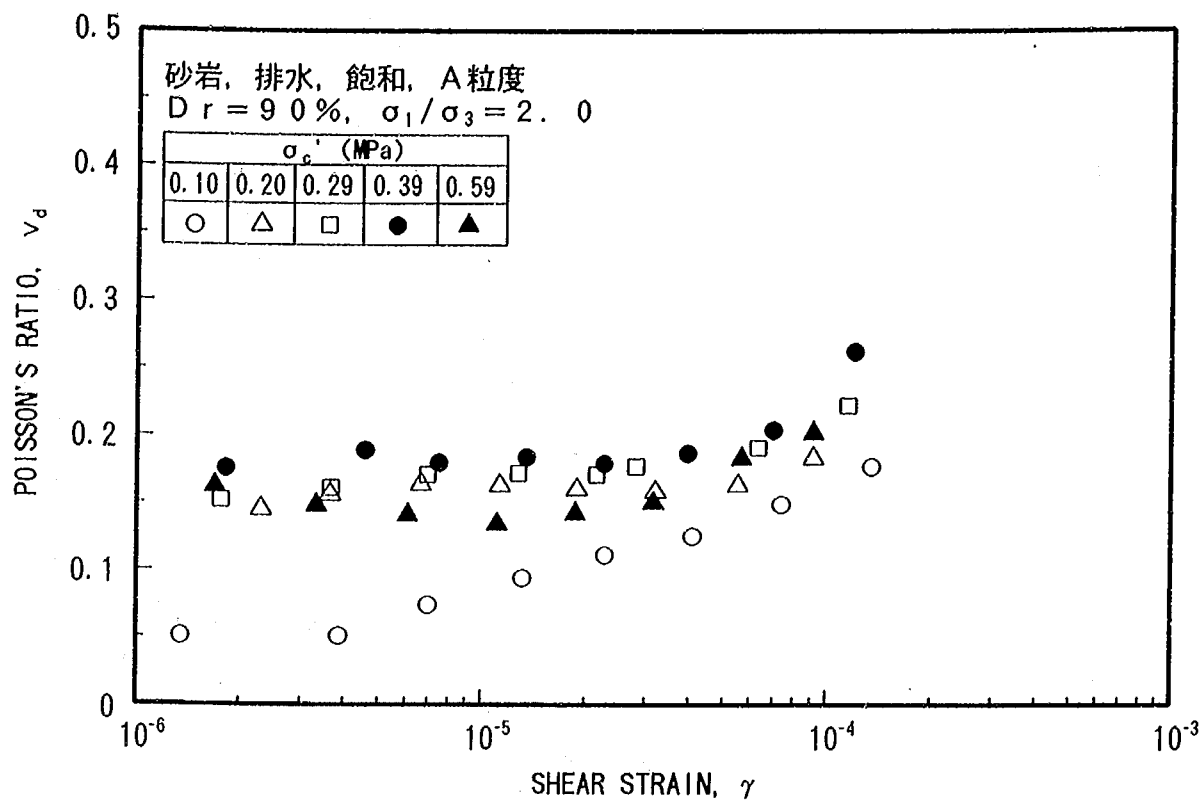


図-3.17(c) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

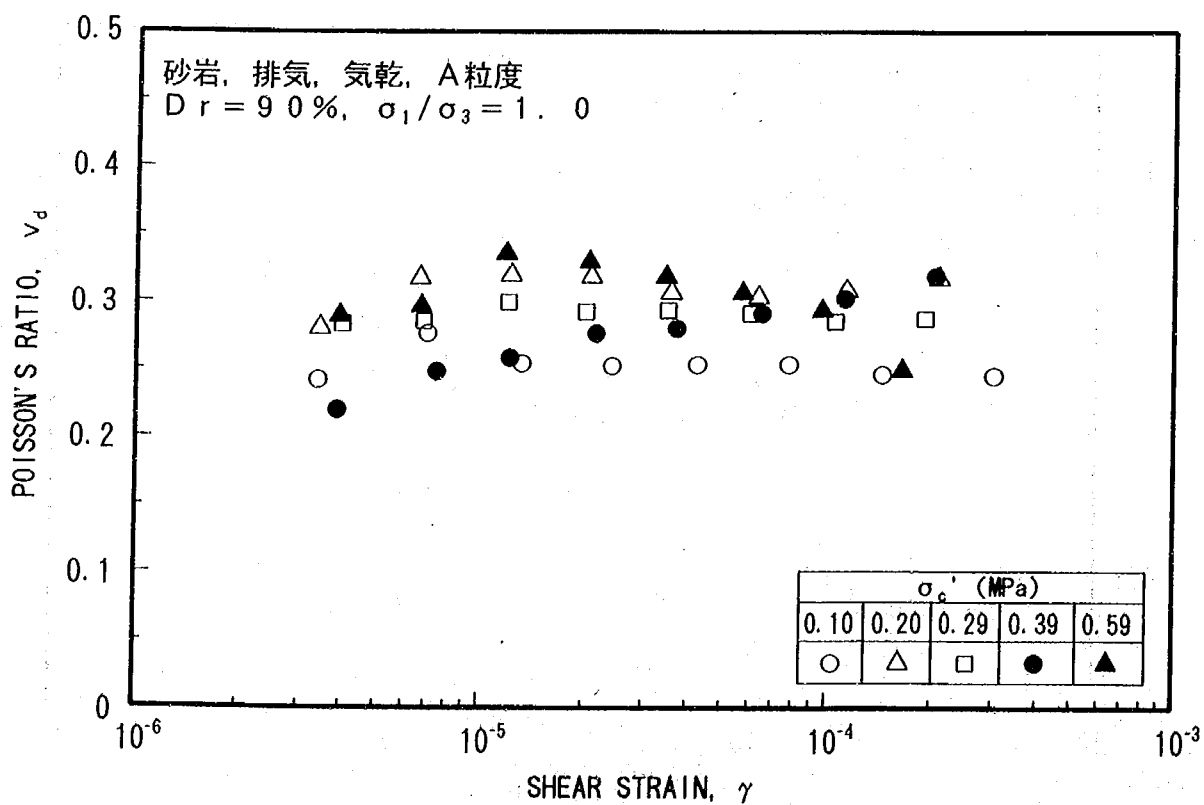


図-3.17(d) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

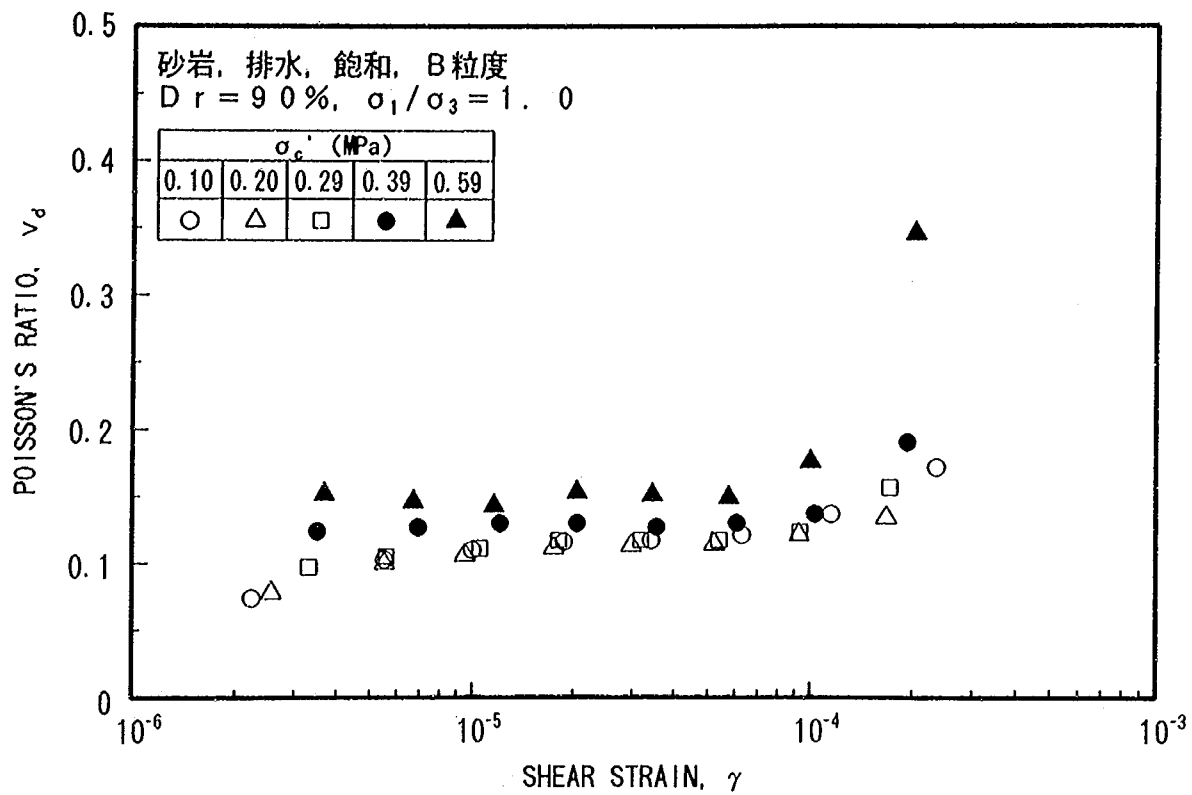


図-3.17(e) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

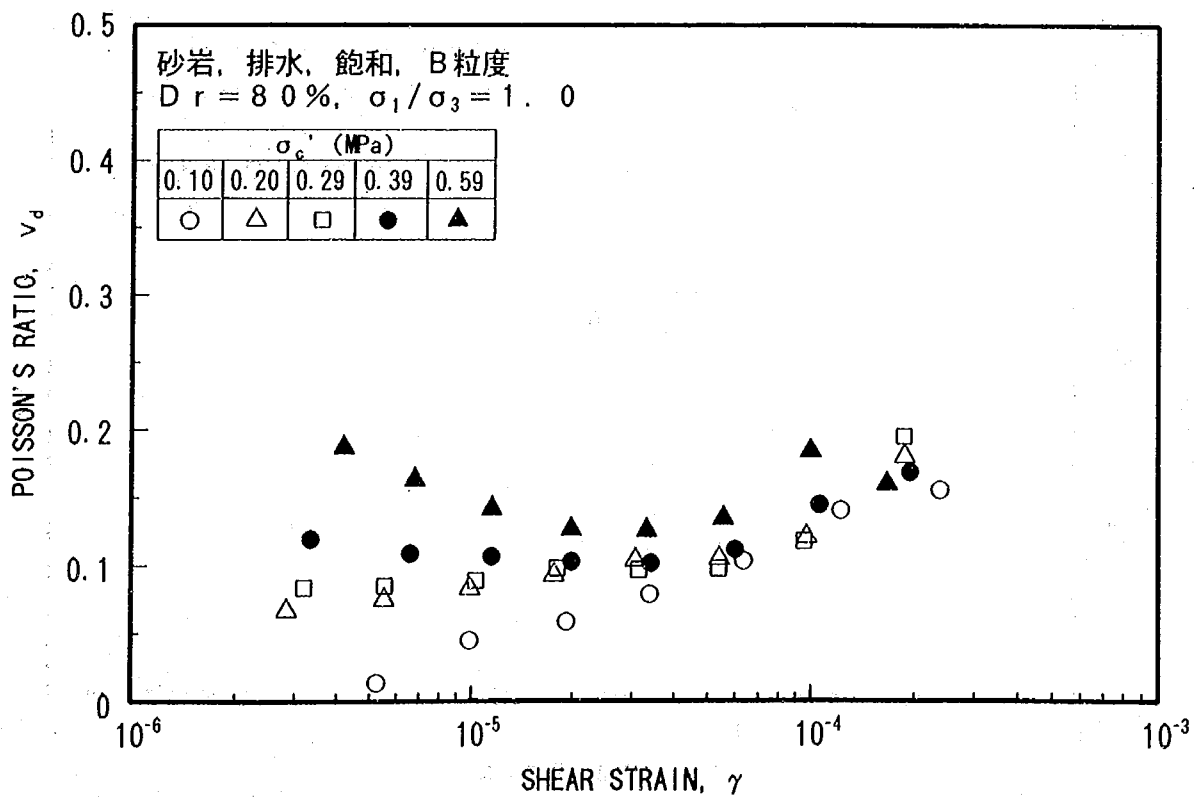


図-3.17(f) $\nu_d \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

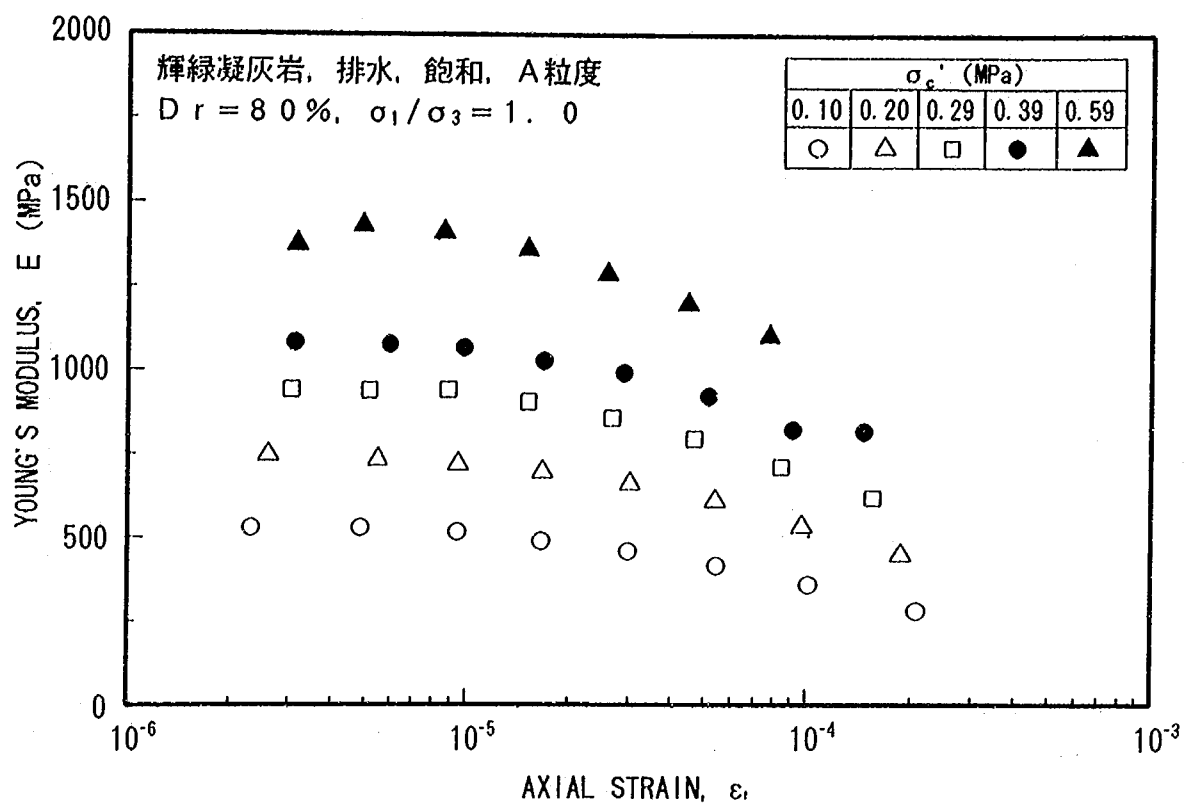


図-3.18(a) $E \sim \epsilon_1$ 関係 (輝綠凝灰岩)

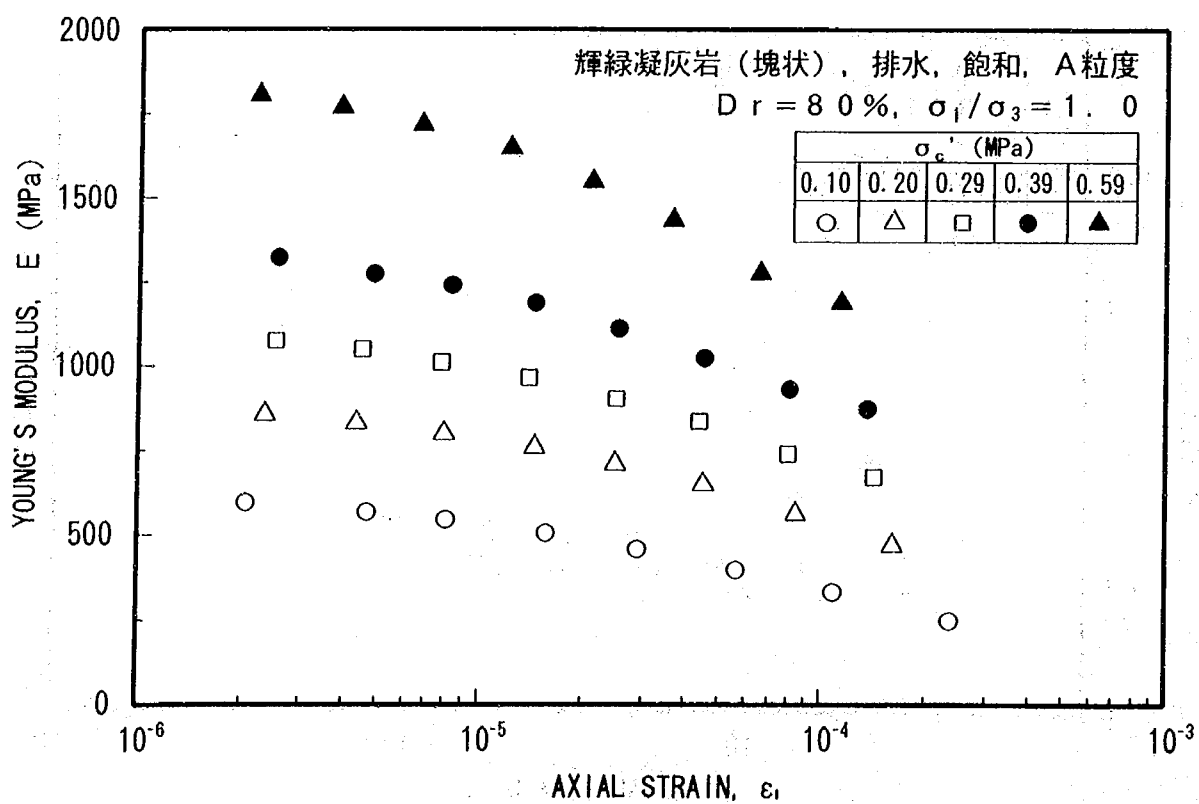


図-3.18(b) $E \sim \epsilon_1$ 関係 (輝綠凝灰岩 (塊状))

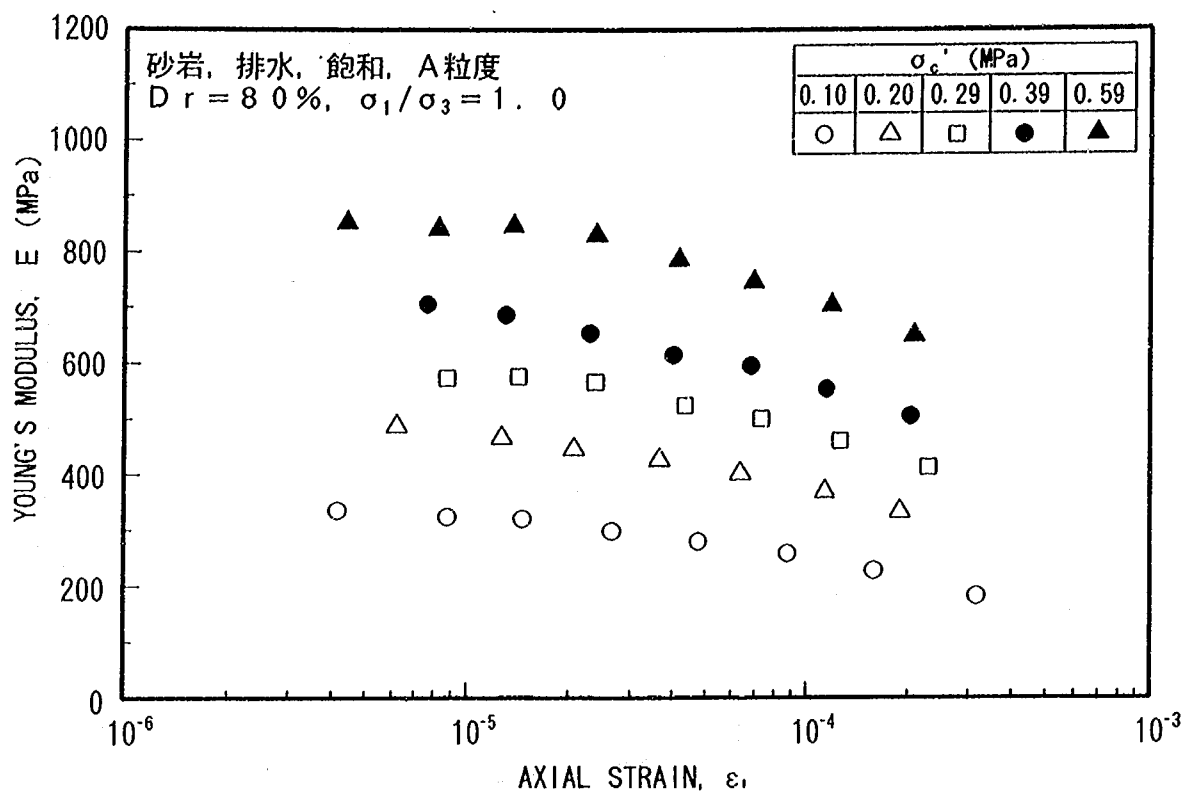


図-3.18(c) $E \sim \epsilon_1$ 関係 (砂岩)

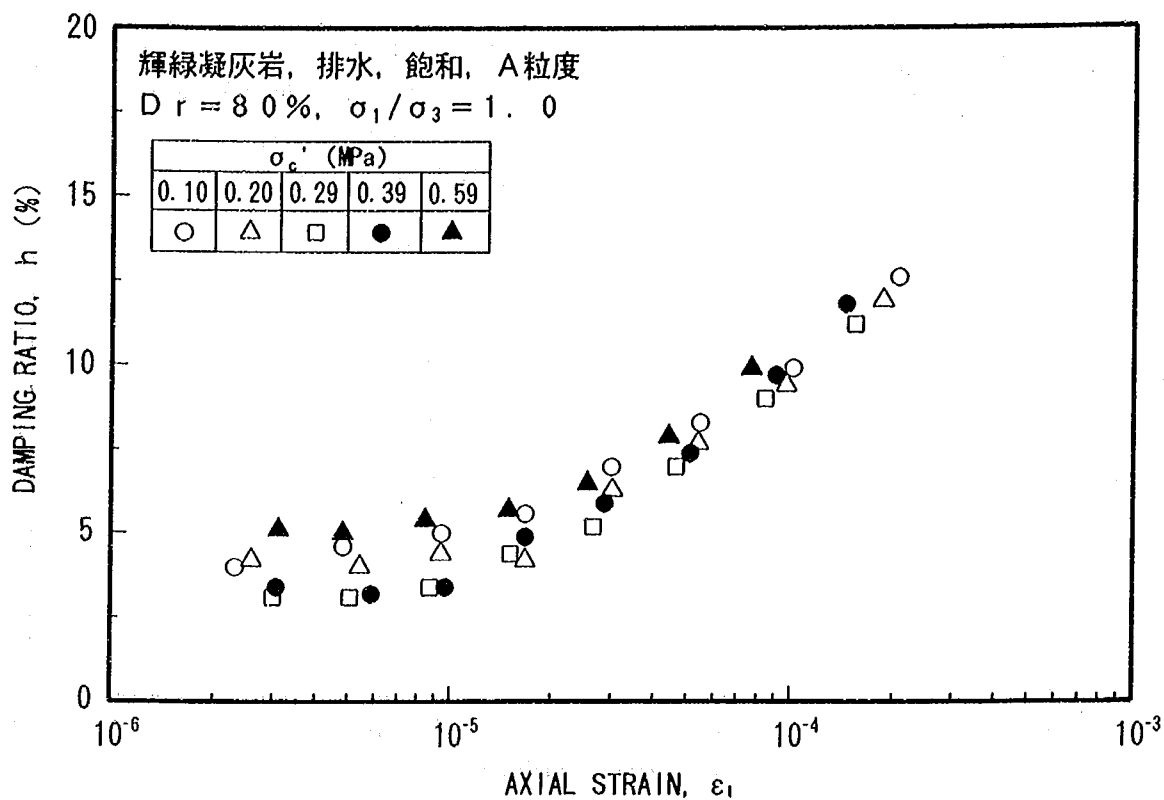


図-3.19(a) $h \sim \varepsilon_1$ 関係 (輝緑凝灰岩)

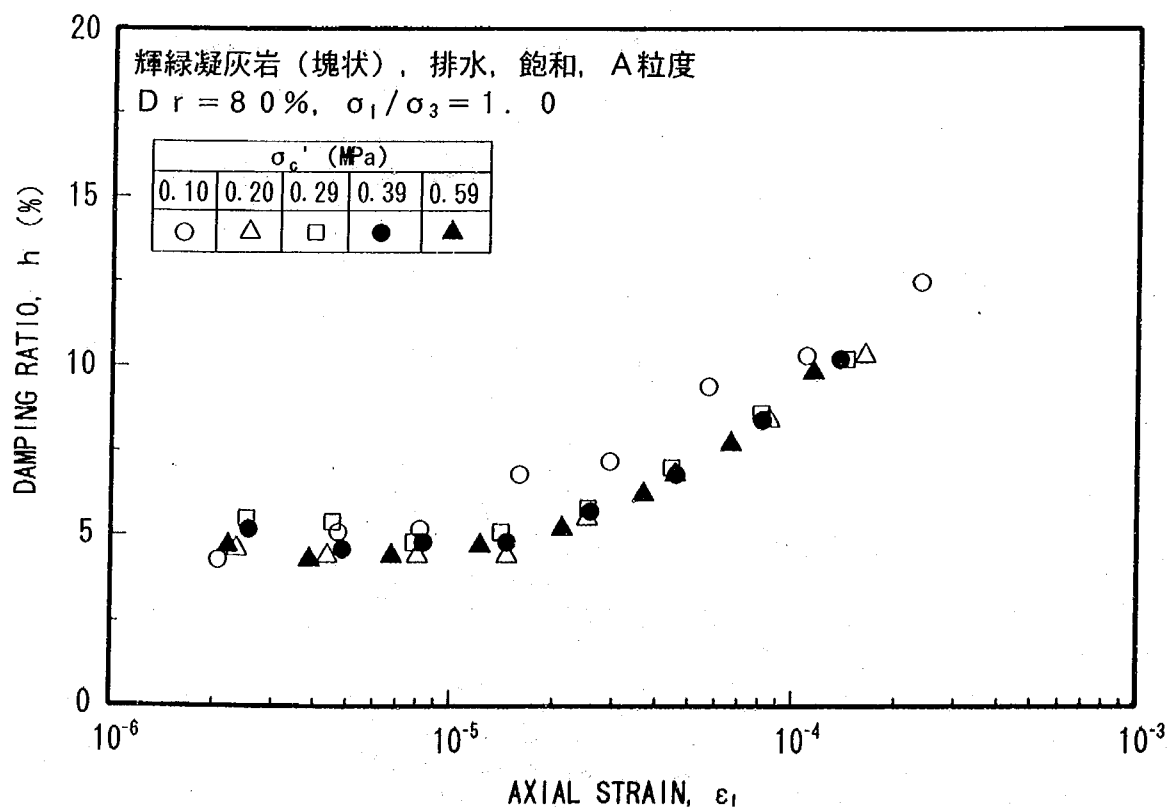


図-3.19(b) $h \sim \varepsilon_1$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

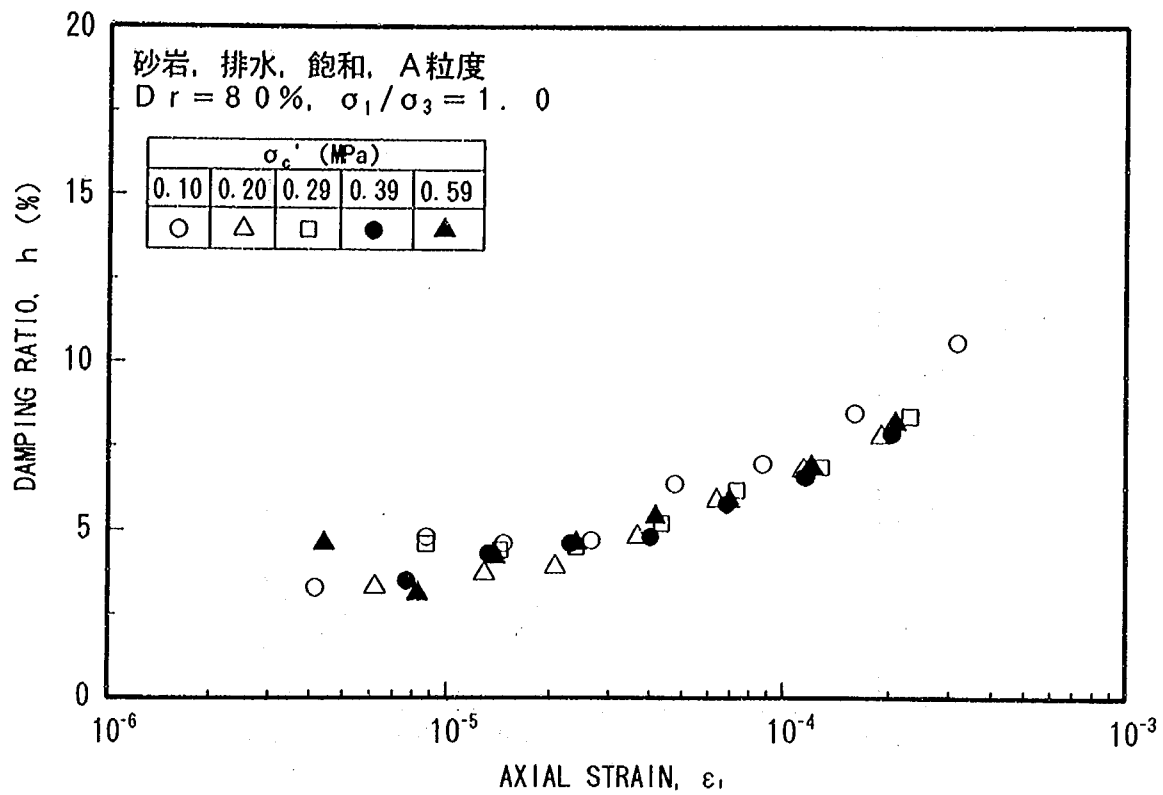


図-3.19(c) $h \sim \epsilon_1$ 関係 (砂岩)

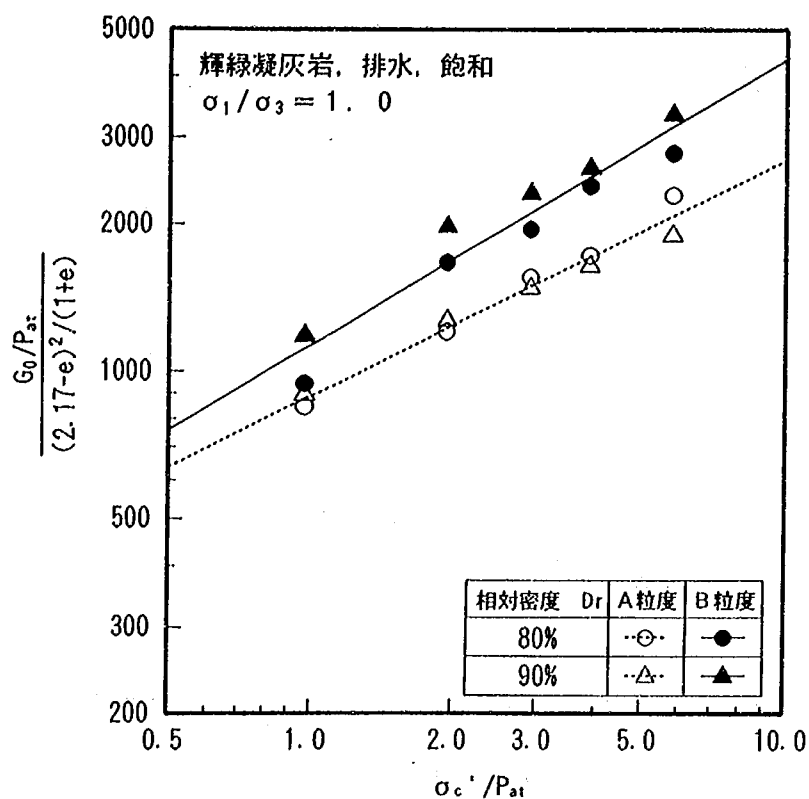


図-3.20(a) 相対密度の異なる供試体の $(G_0/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

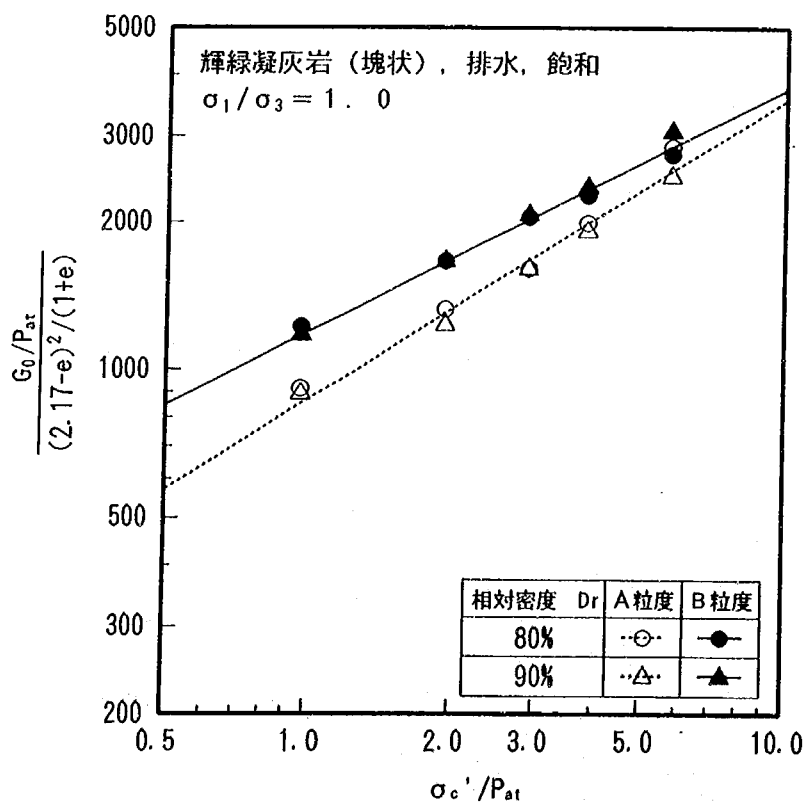


図-3.20(b) 相対密度の異なる供試体の $(G_0/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

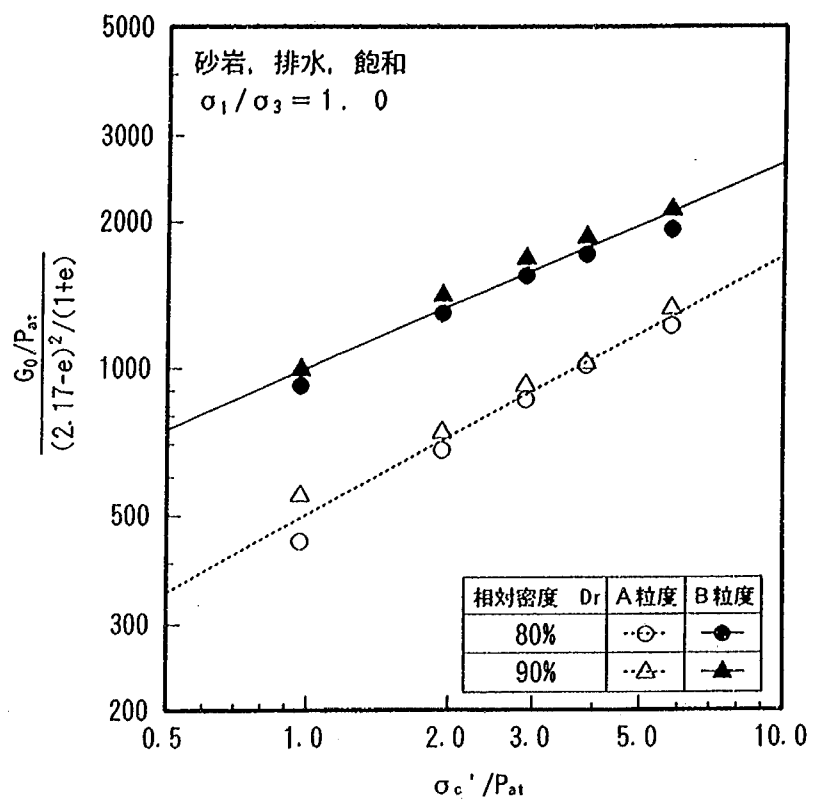


図-3.20(c) 相対密度の異なる供試体の $(G_0/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

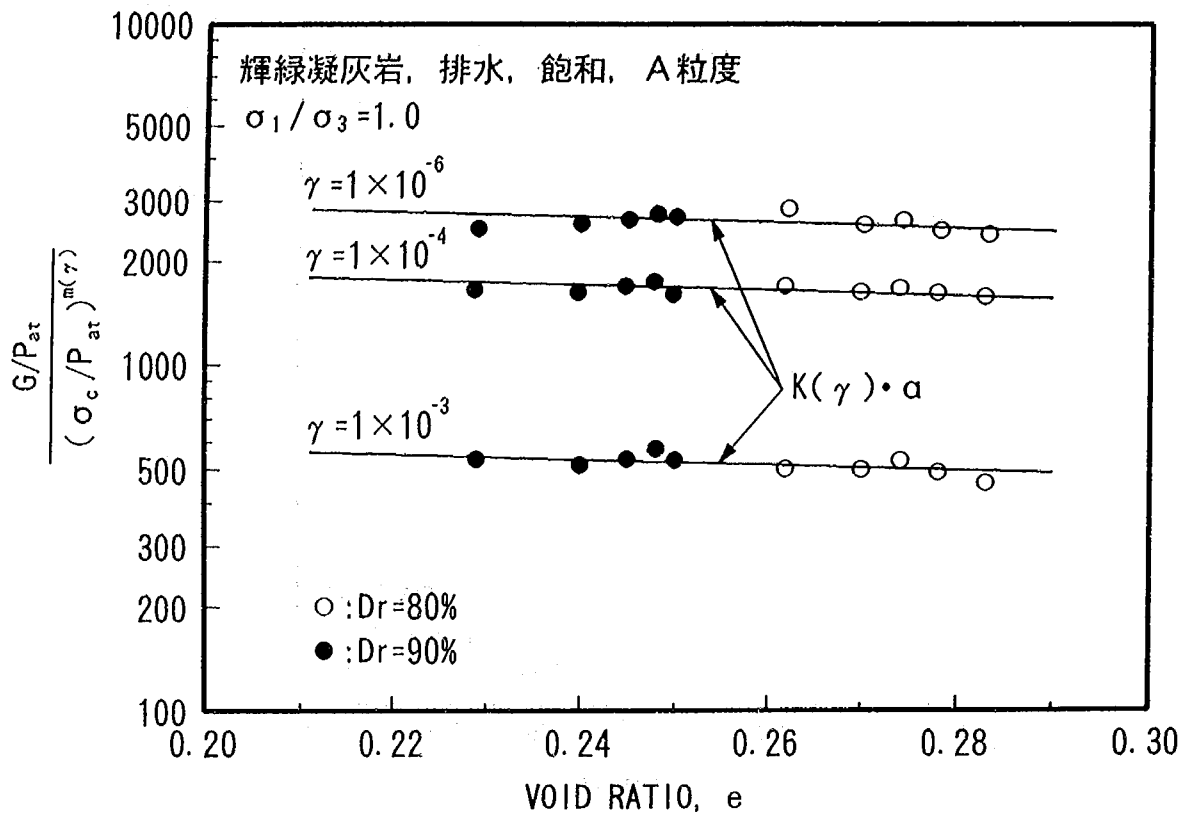


図-3.21(a) 拘束圧の影響を除いたGとeの関係(輝緑凝灰岩)

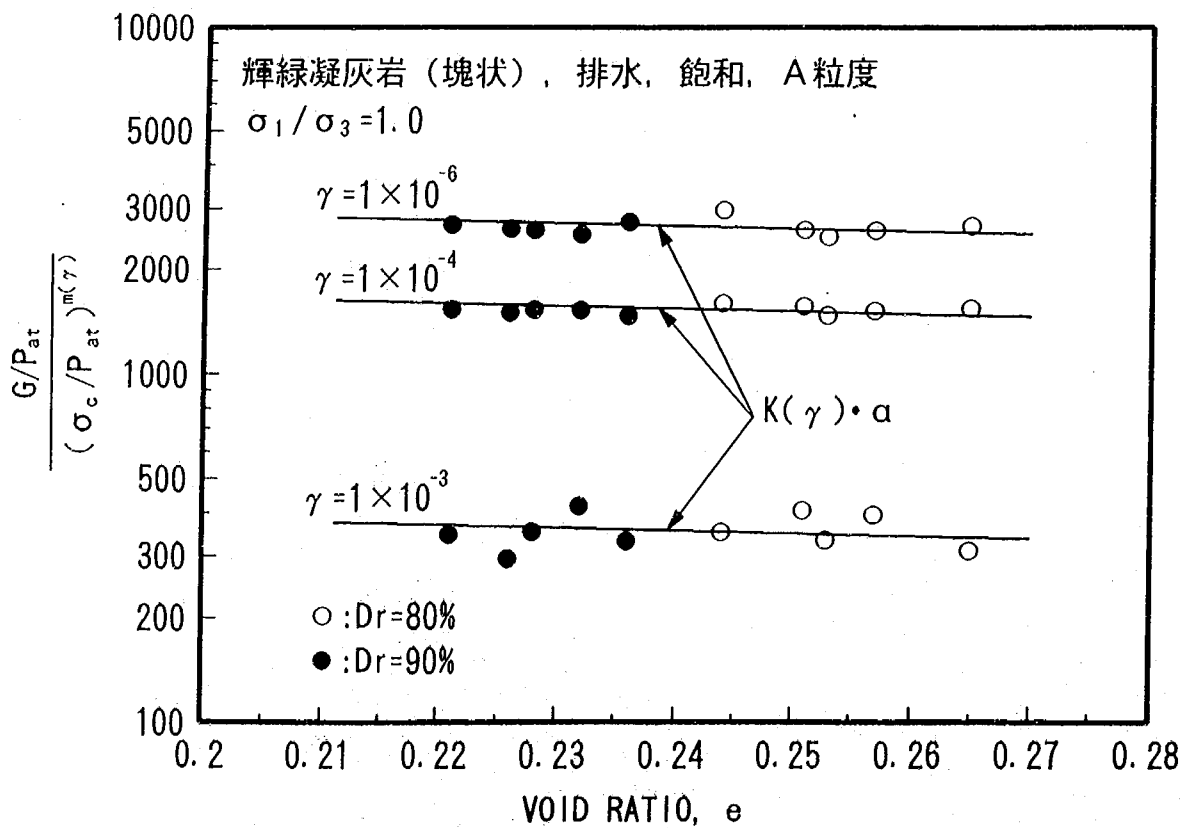


図-3.21(b) 拘束圧の影響を除いたGとeの関係(輝緑凝灰岩(塊状))

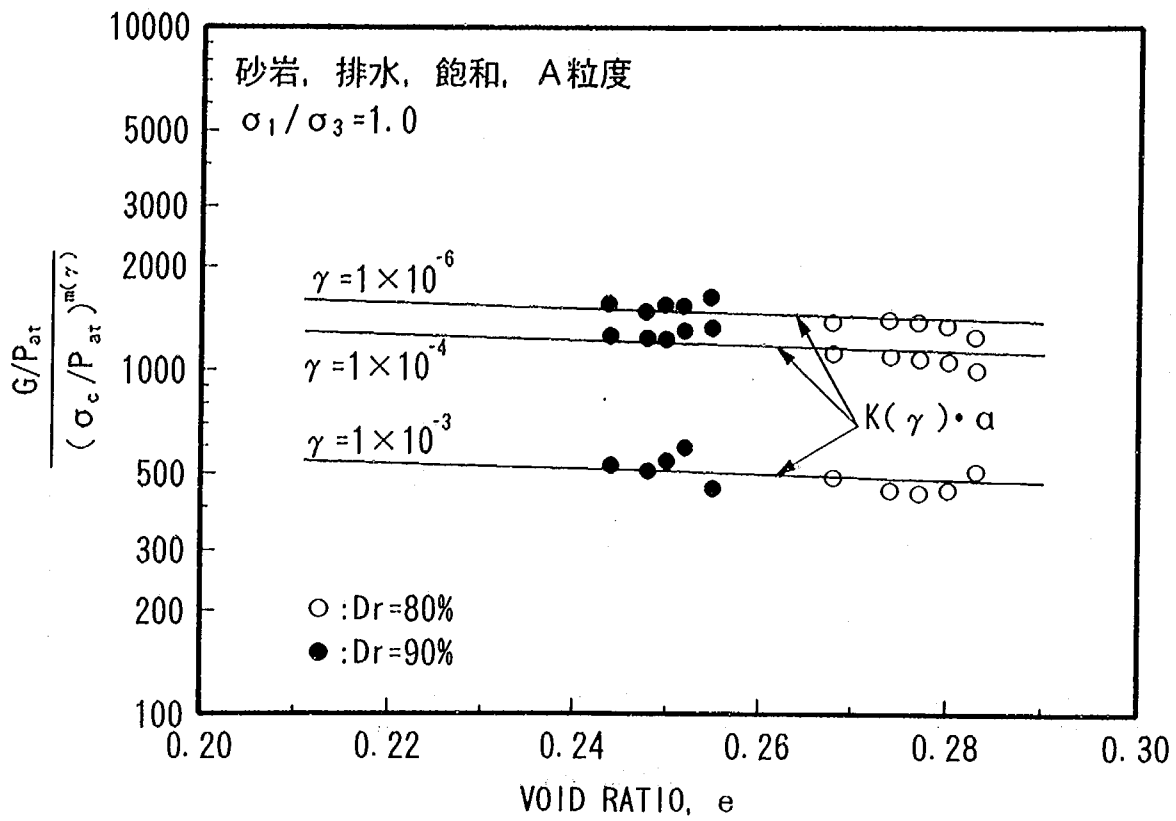


図-3.21(c) 拘束圧の影響を除いたGとeの関係(砂岩)

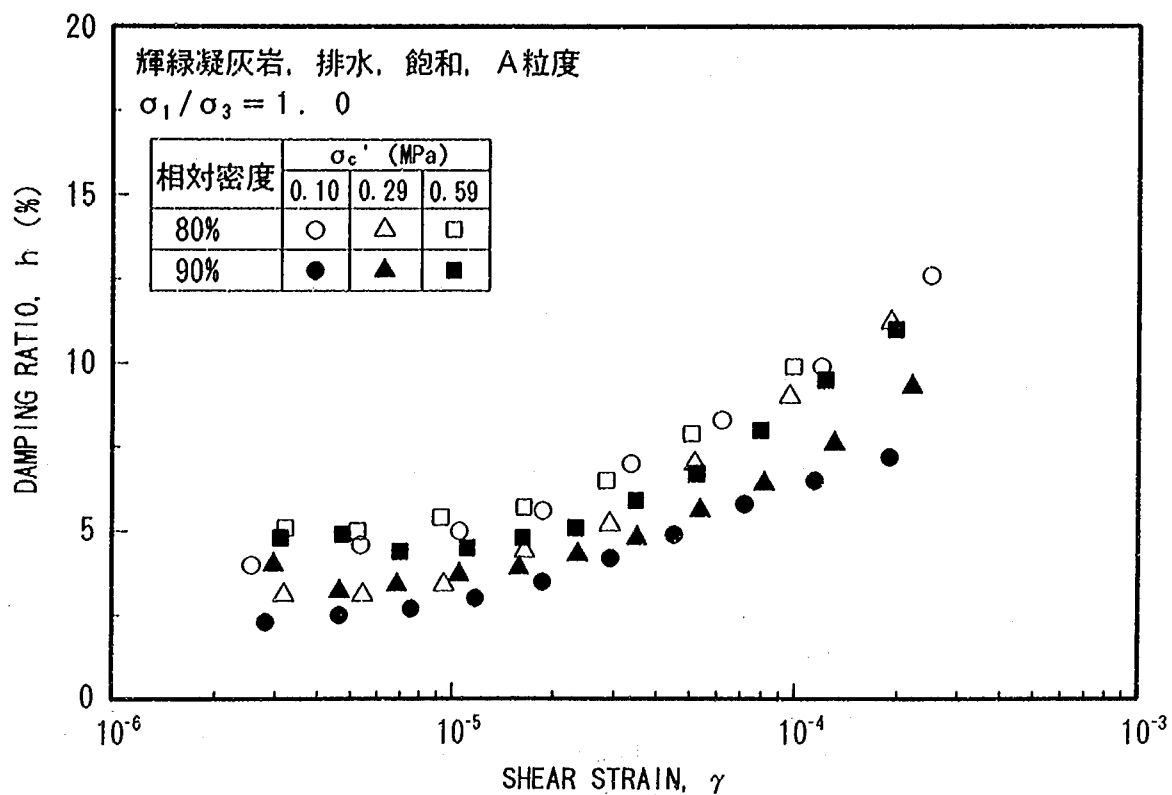


図-3.22(a) 相対密度が異なる供試体の $h \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

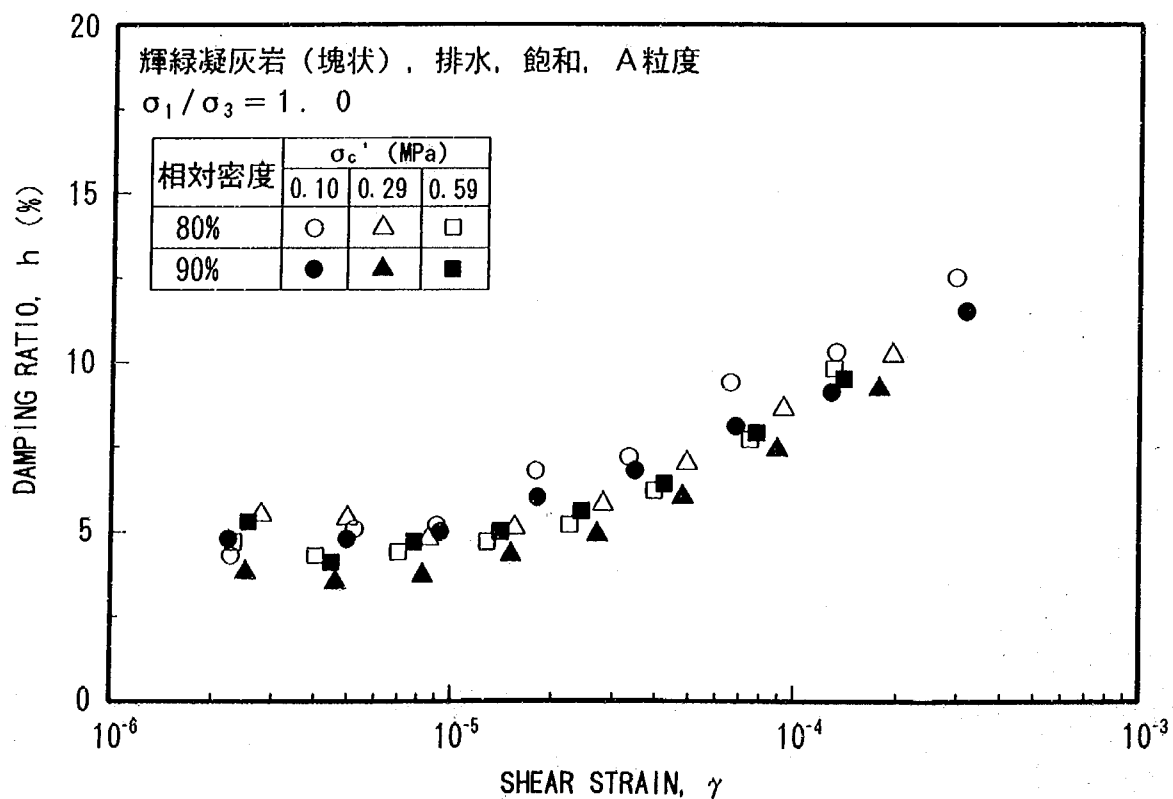


図-3.22(b) 相対密度が異なる供試体の $h \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

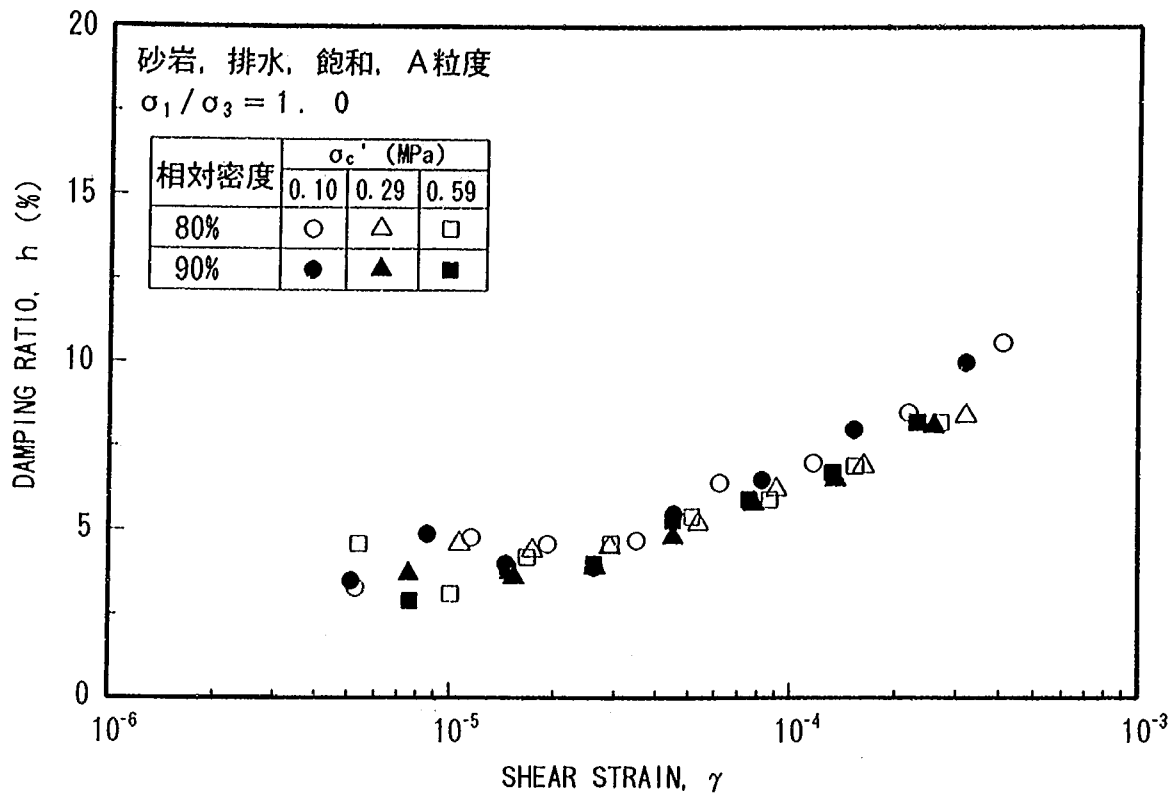


図-3.22(c) 相対密度が異なる供試体の $h \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

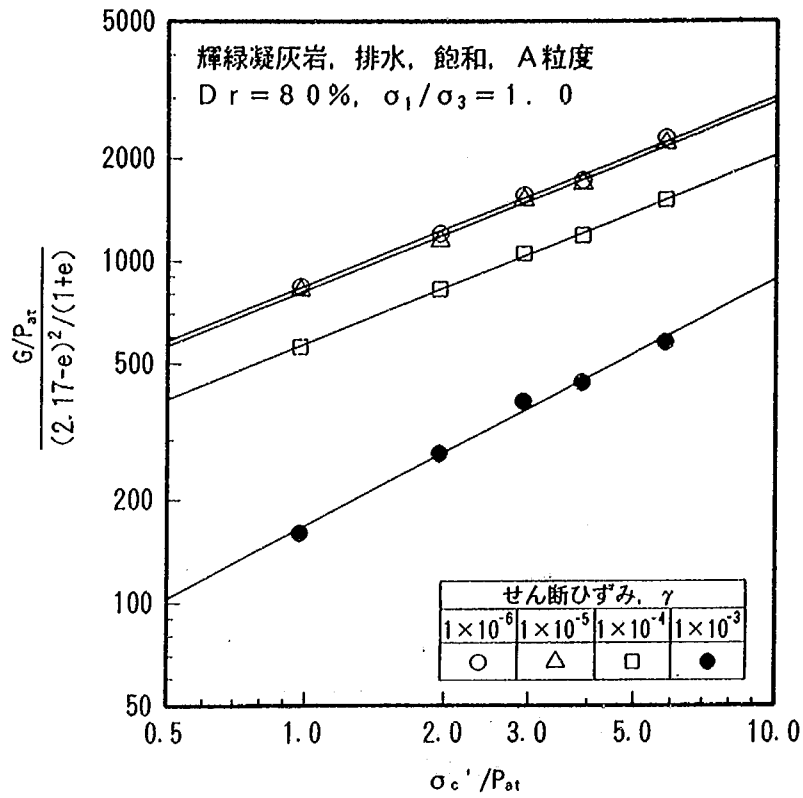


図-3.23(a) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

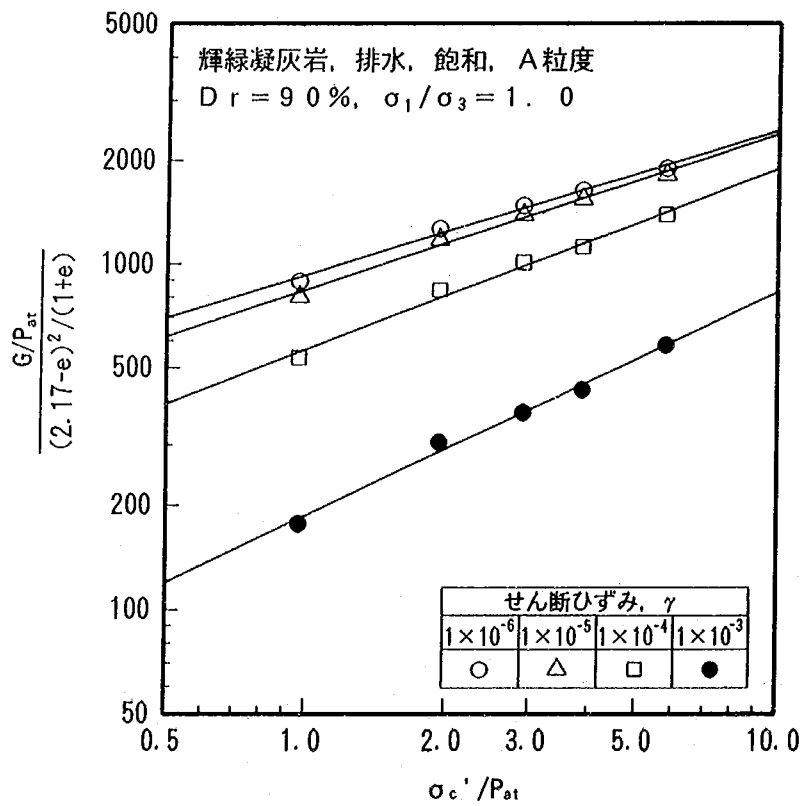


図-3.23(b) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

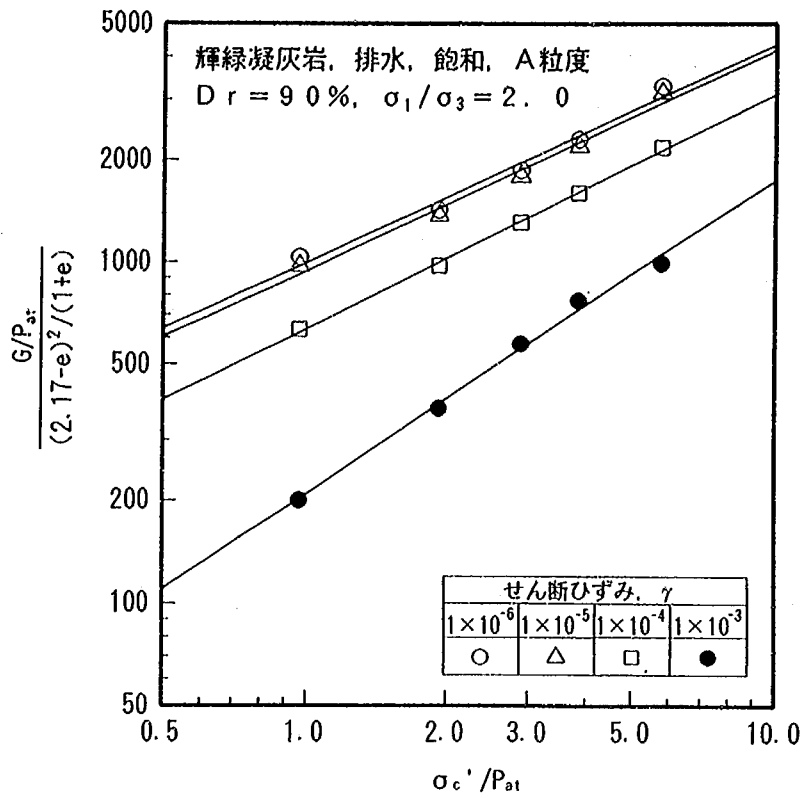


図-3.23(c) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

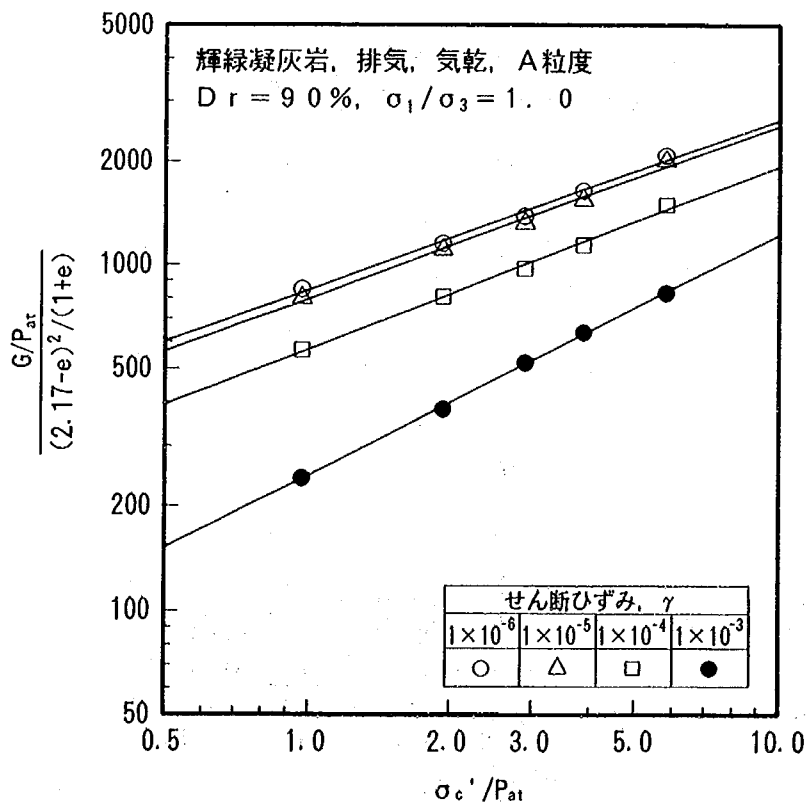


図-3.23(d) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

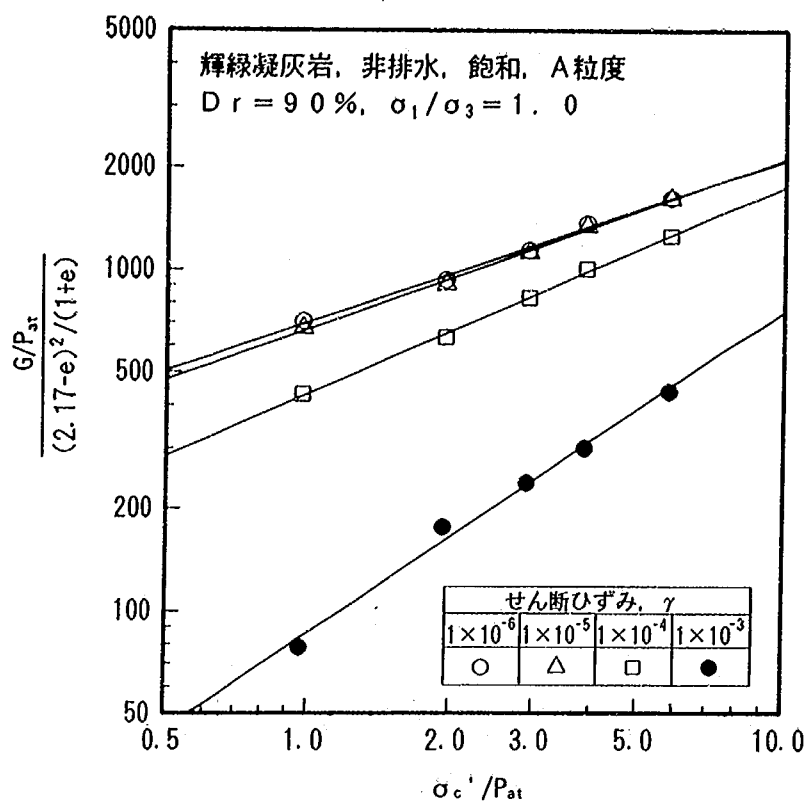


図-3.23(e) $(G/P_{st})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{st})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

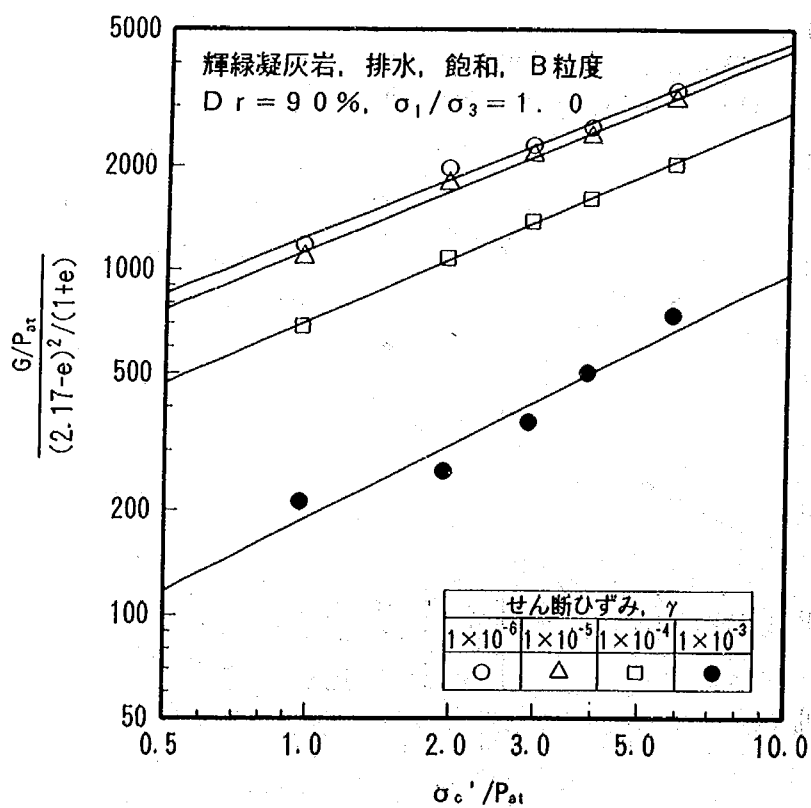


図-3.23(f) $(G/P_{st})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{st})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

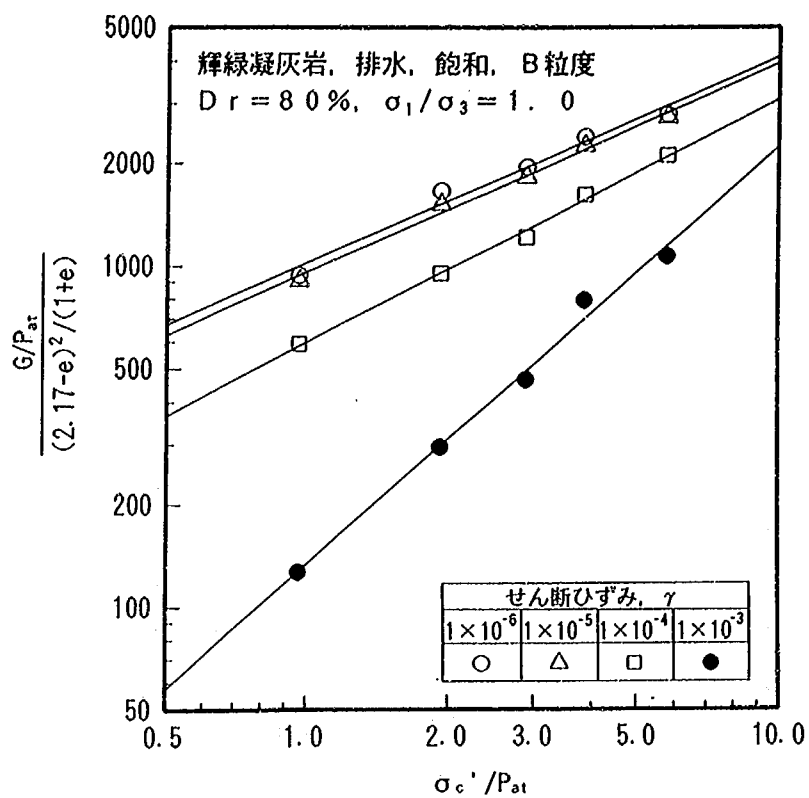


図-3.23(g) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

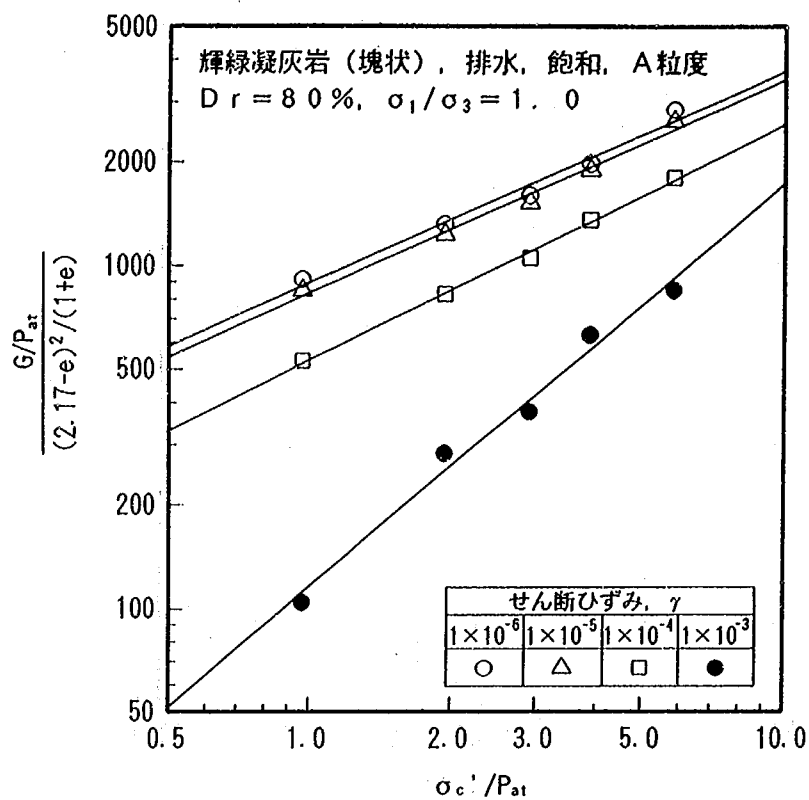


図-3.24(a) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

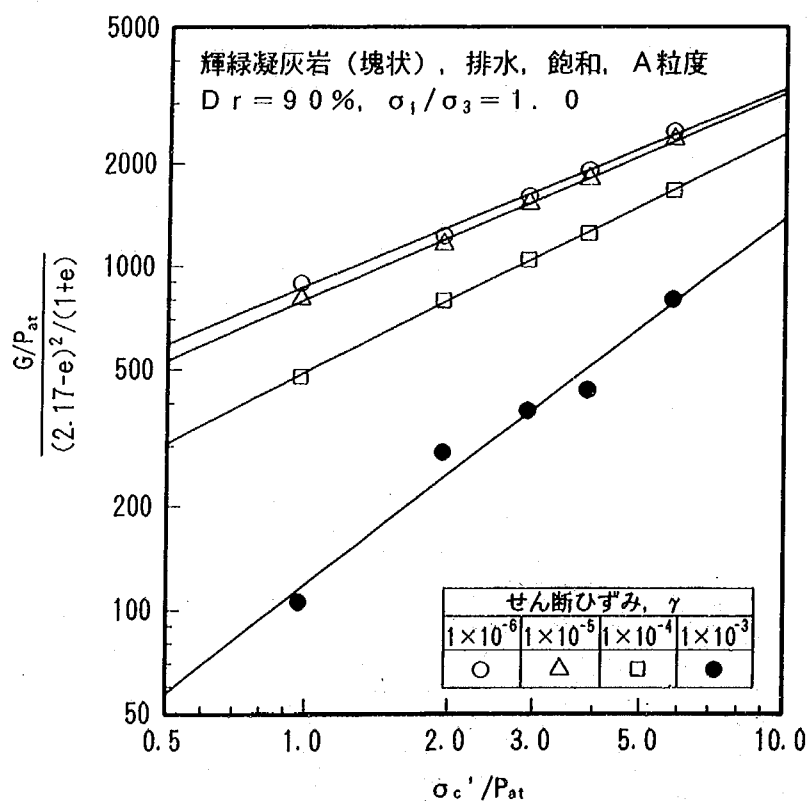


図-3.24(b) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

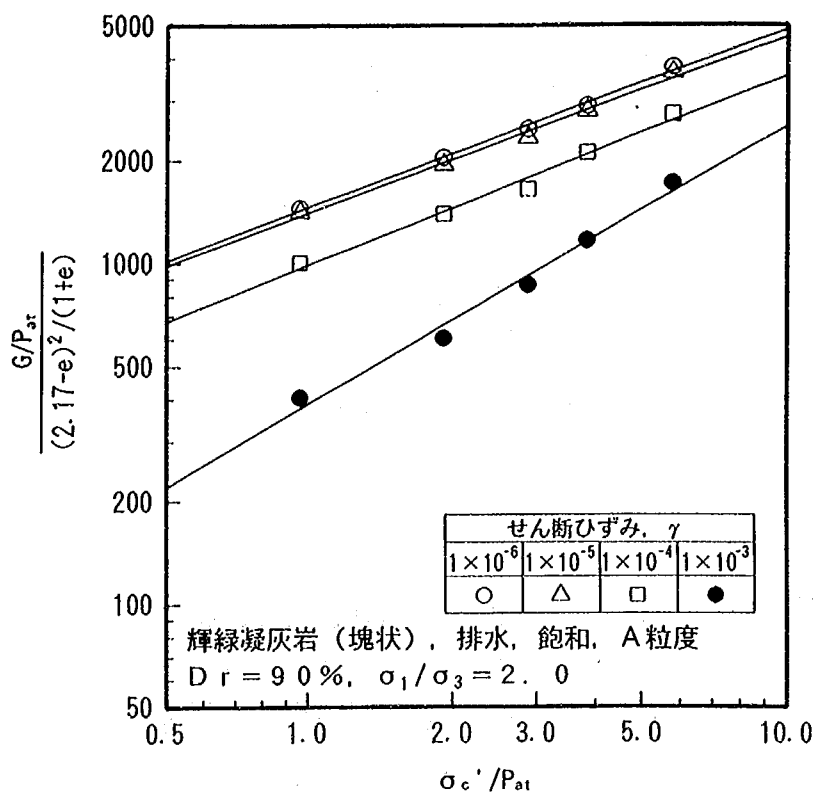


図-3.24(c) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

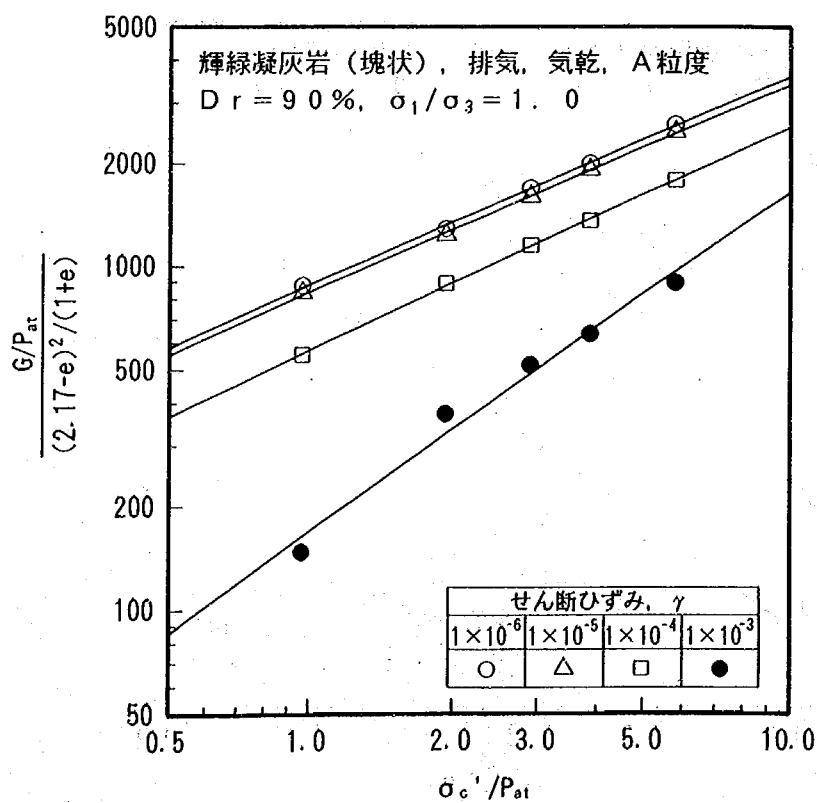


図-3.24(d) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

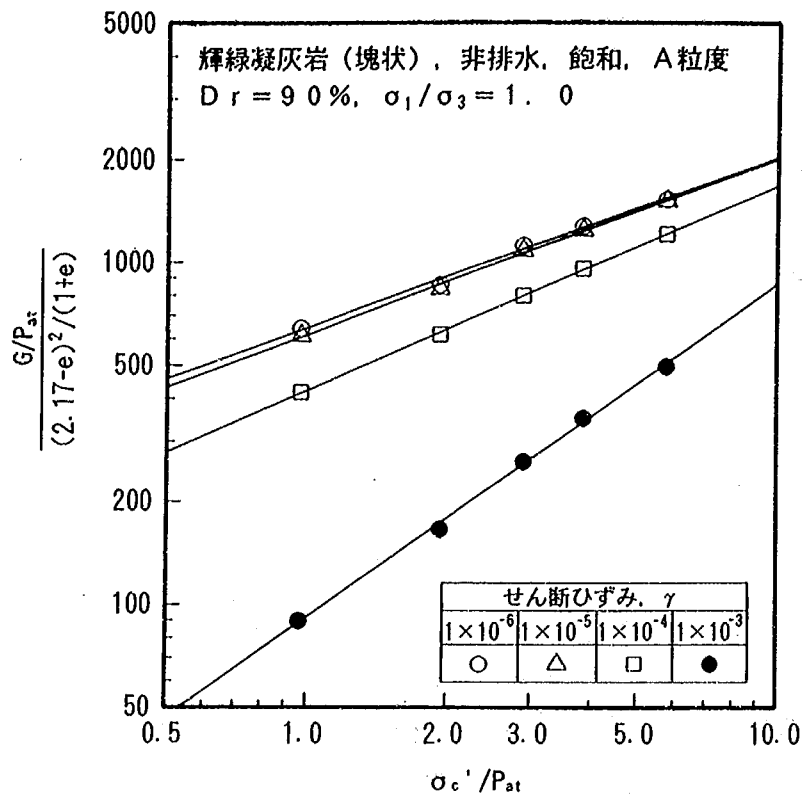


図-3.24(e) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

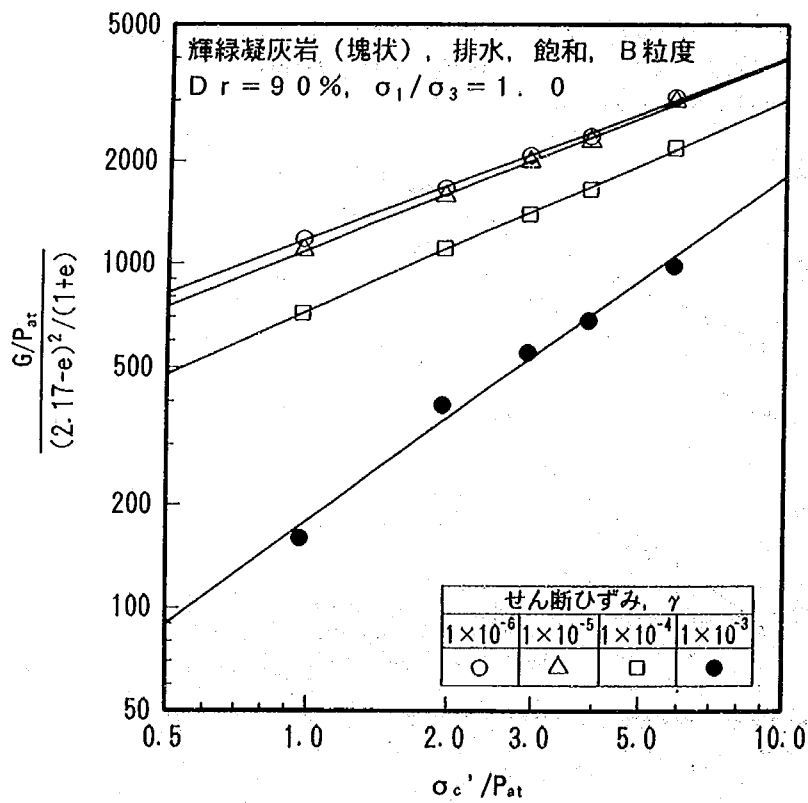


図-3.24(f) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

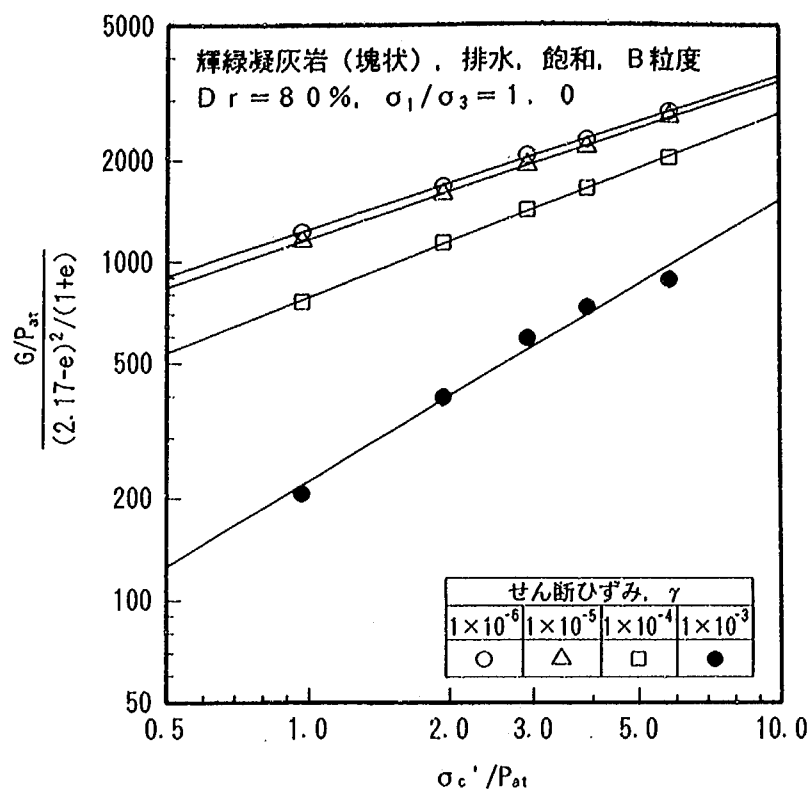


図-3.24(g) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

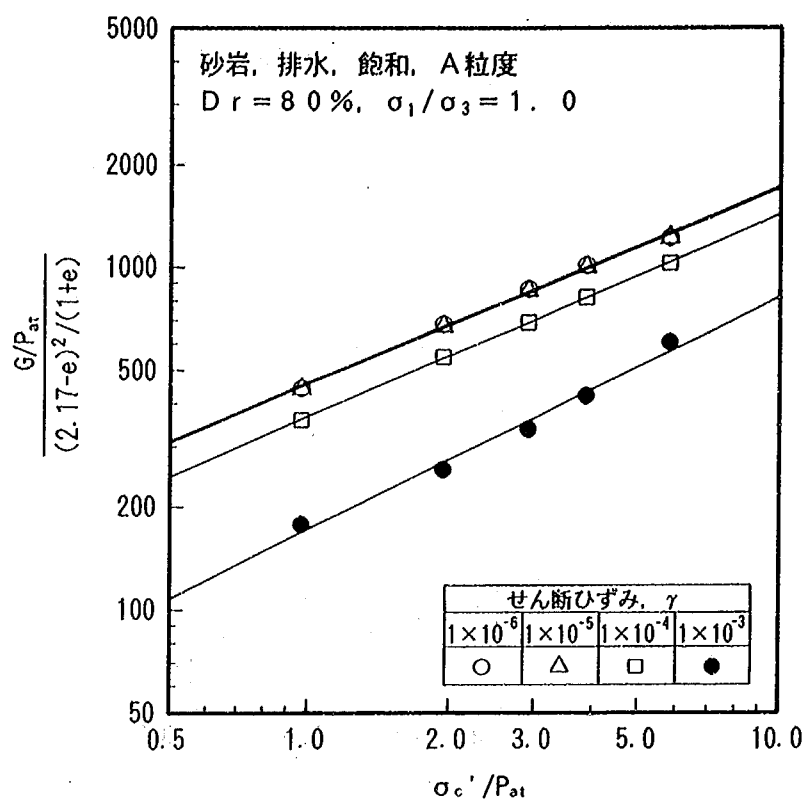


図-3.25(a) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (砂岩)

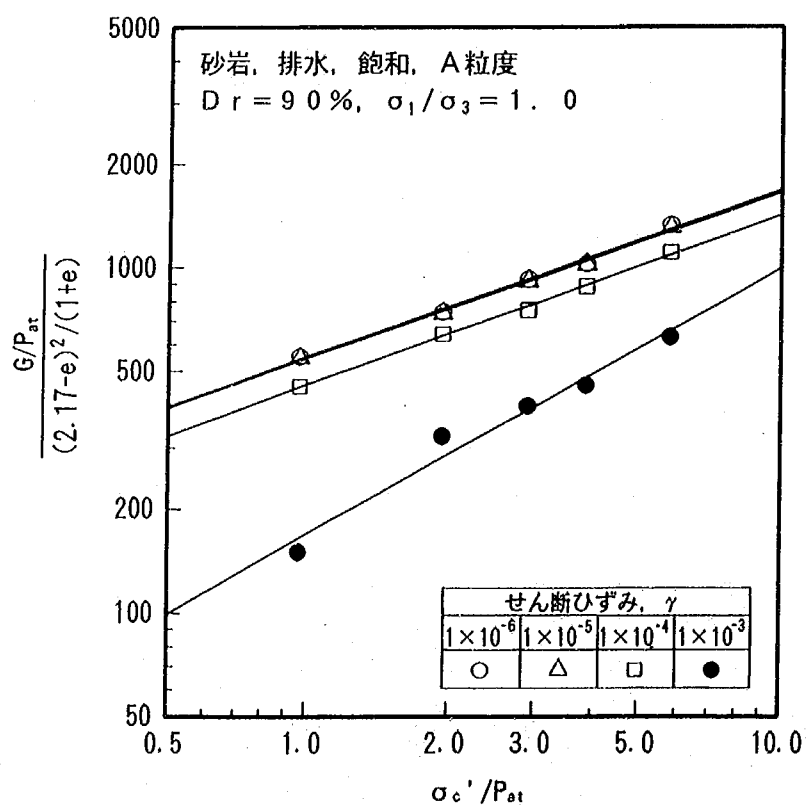


図-3.25(b) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (砂岩)

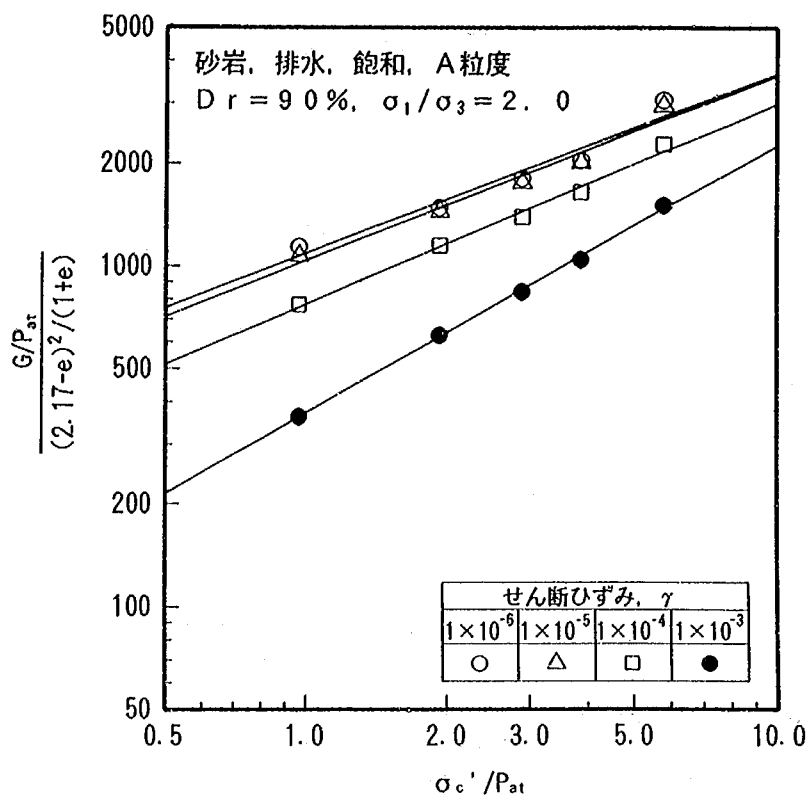


図-3.25(c) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

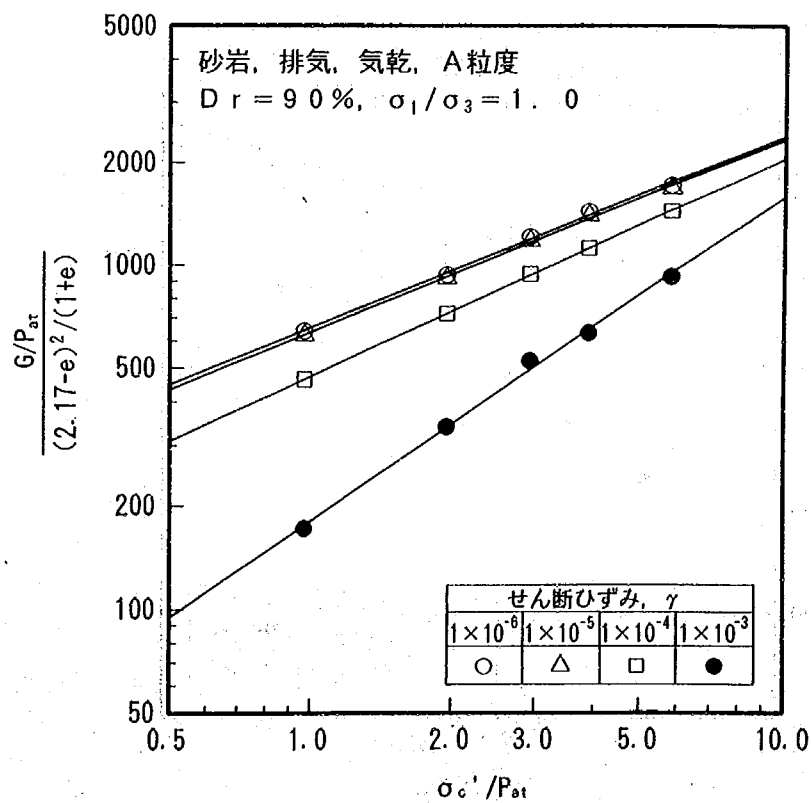


図-3.25(d) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

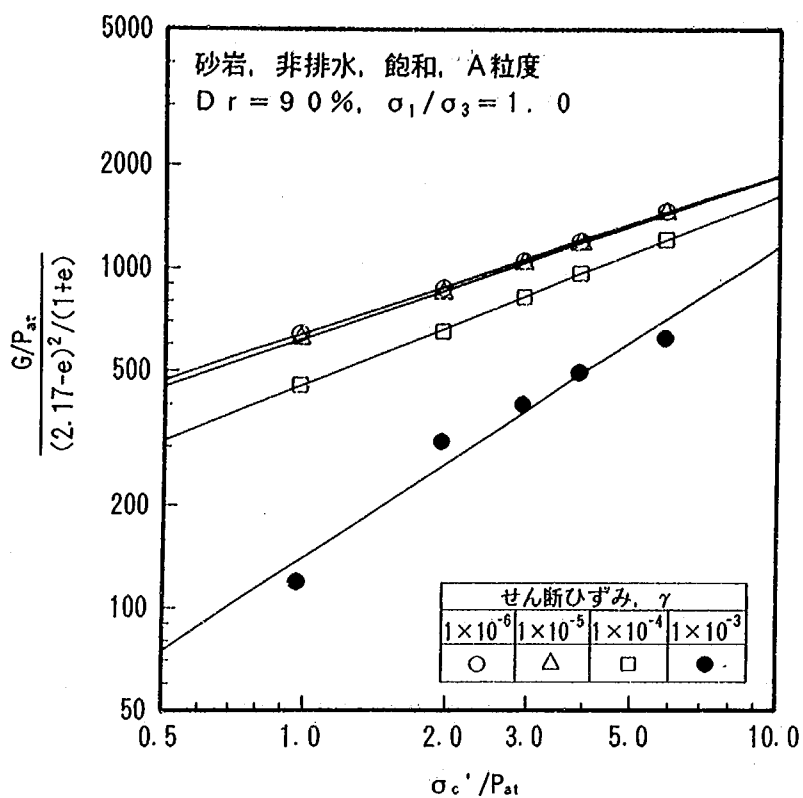


図-3.25(e) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

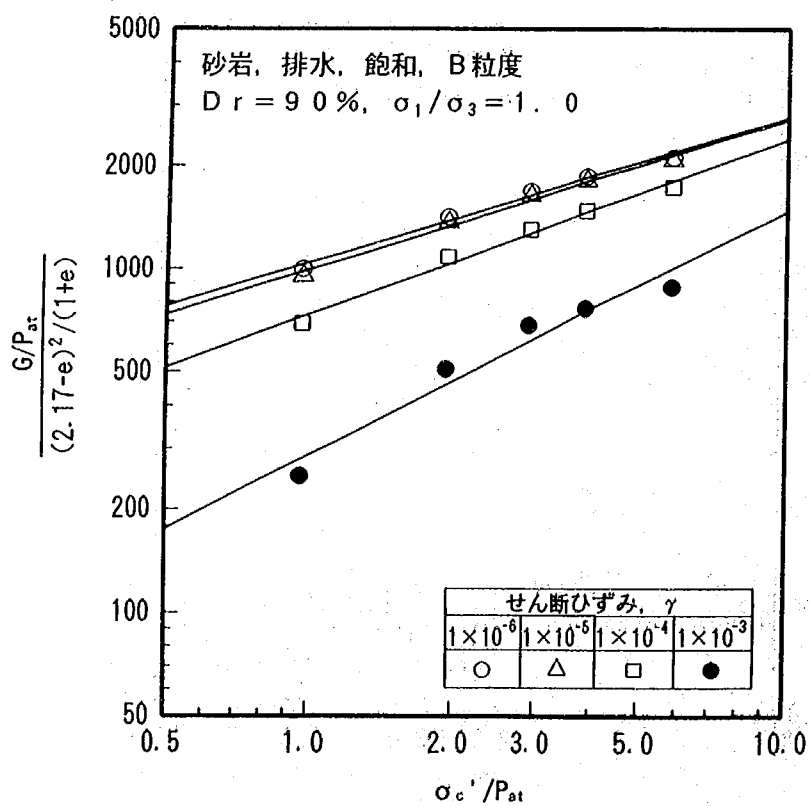


図-3.25(f) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

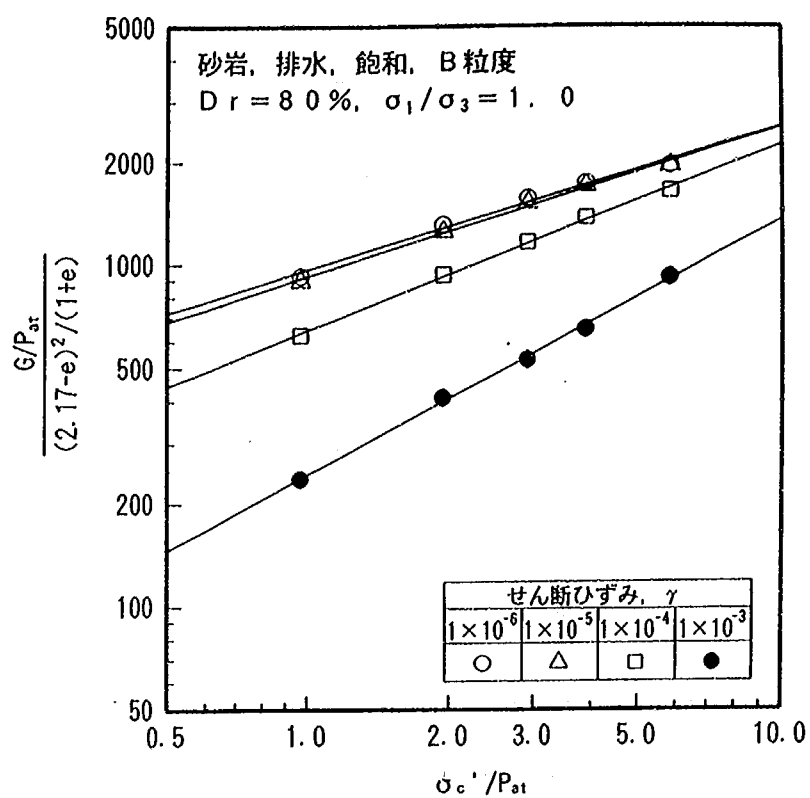


図-3.25(g) $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (砂岩)

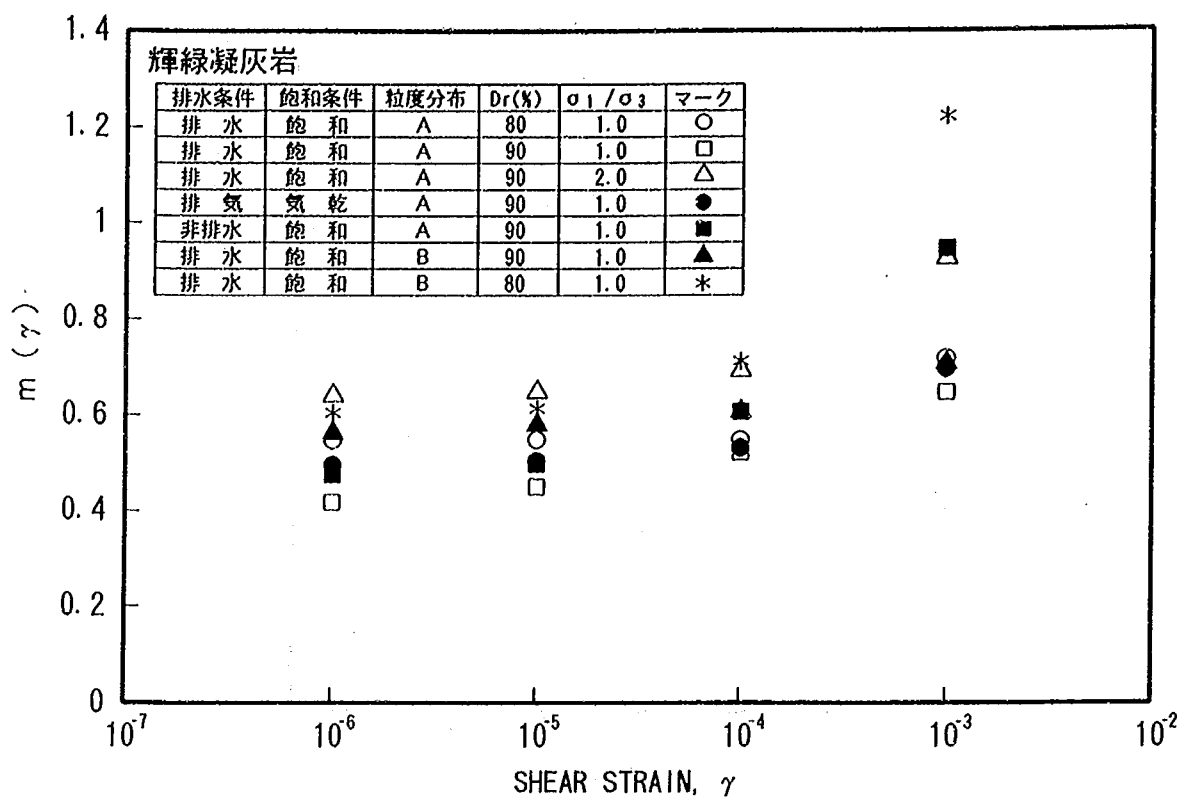


図-3.26 $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

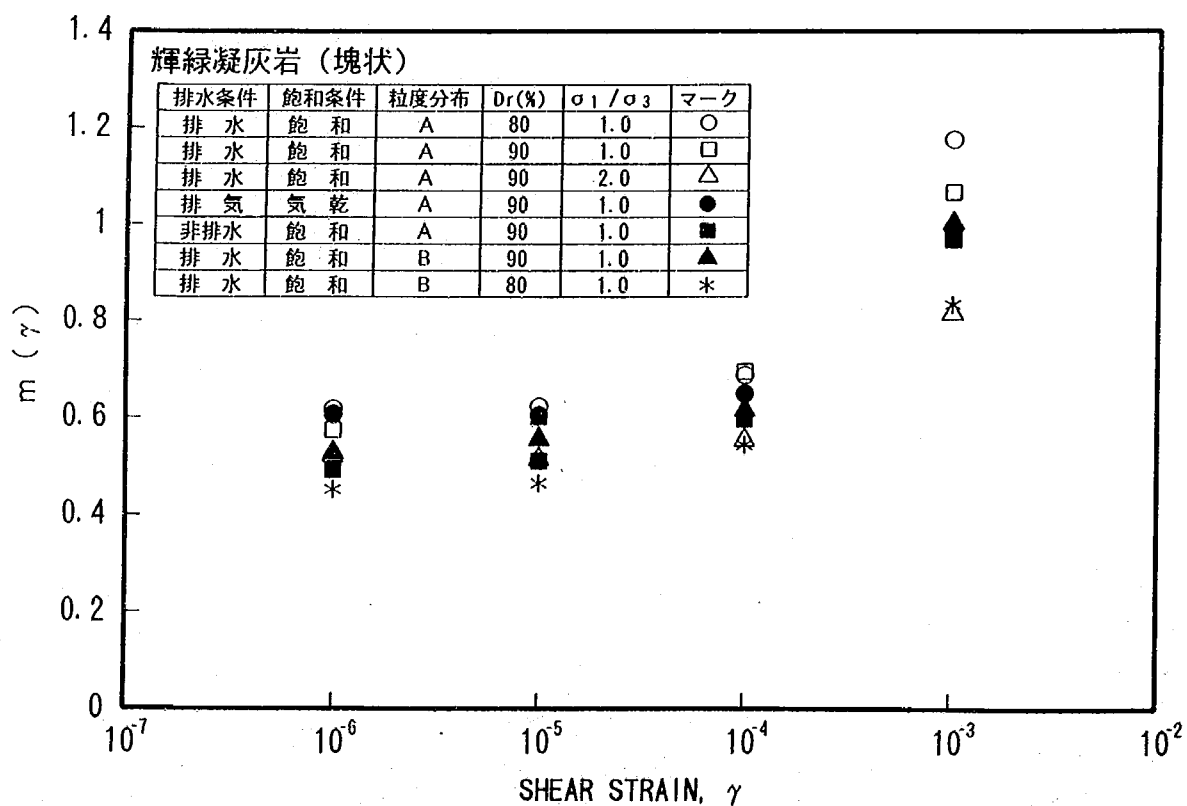


図-3.27 $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

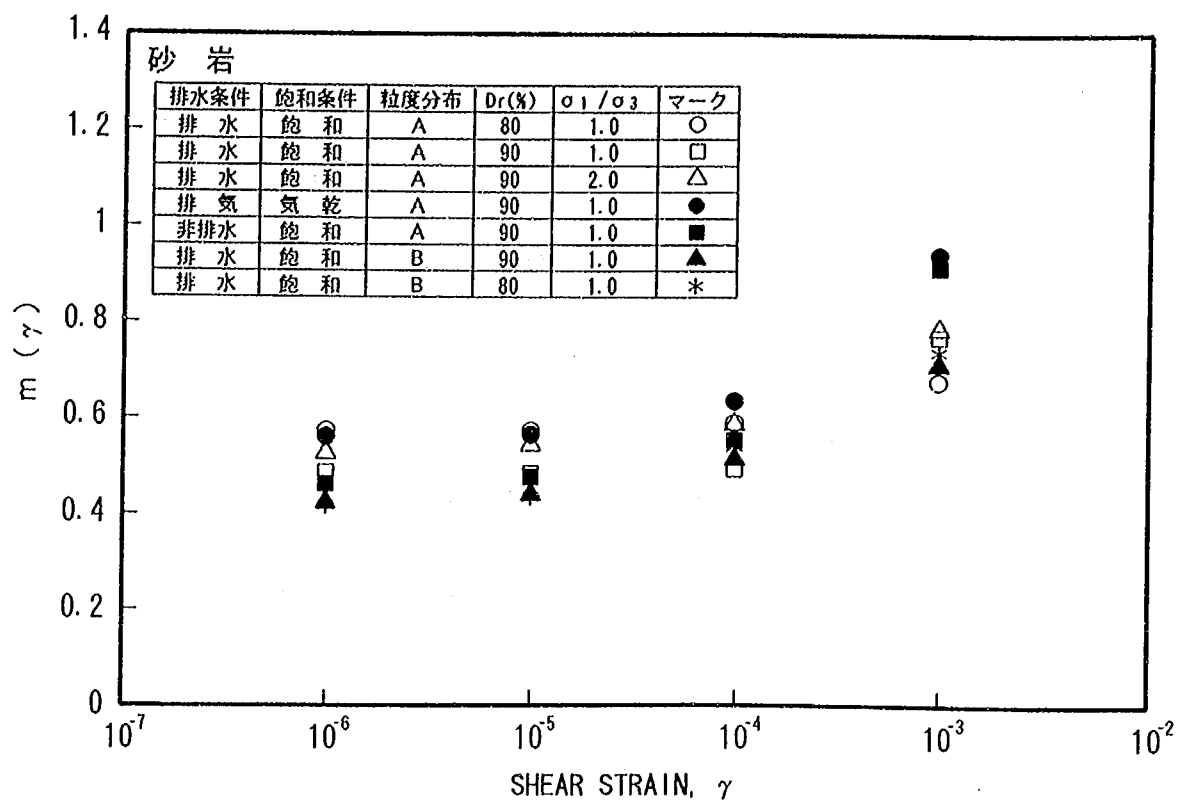


図-3.28 $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

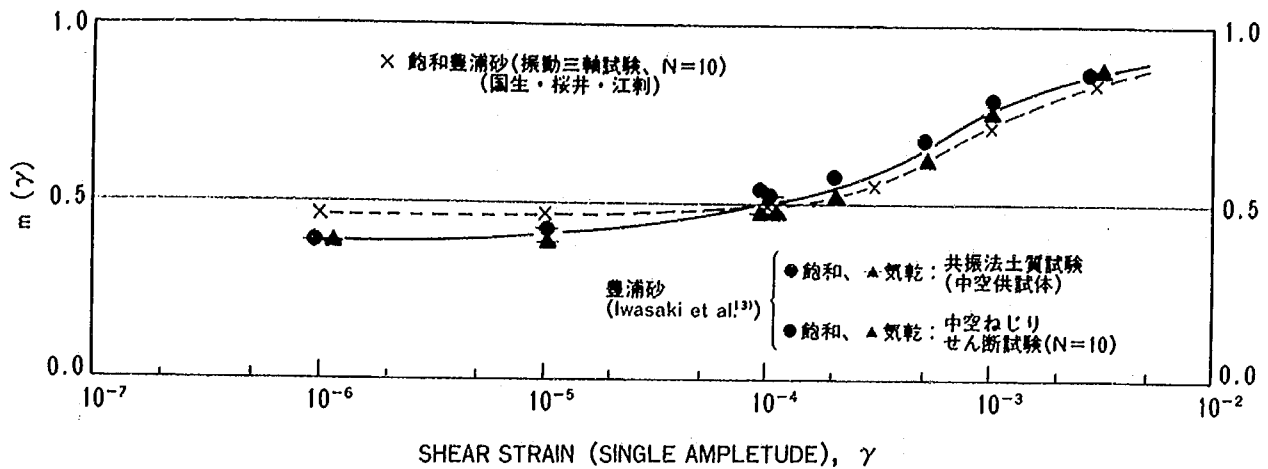


図-3.29 豊浦砂の $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (龍岡¹⁹⁾)

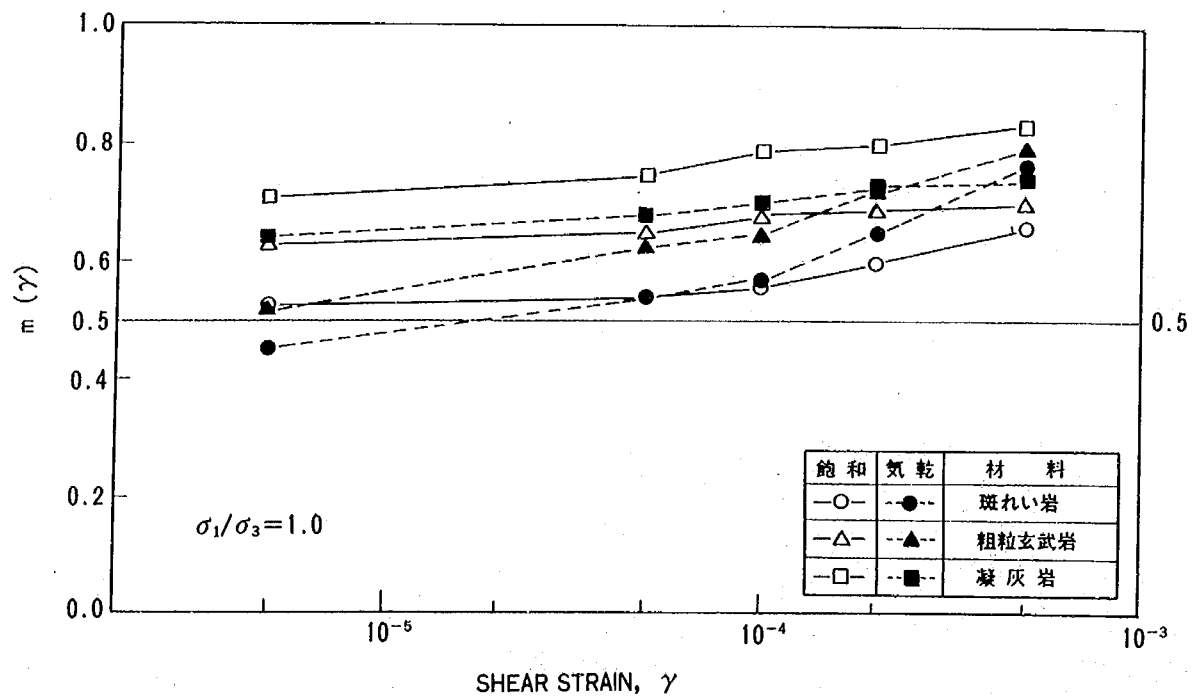


図-3.30 他岩種の粗粒材料における $m(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (中村ら⁵⁾)

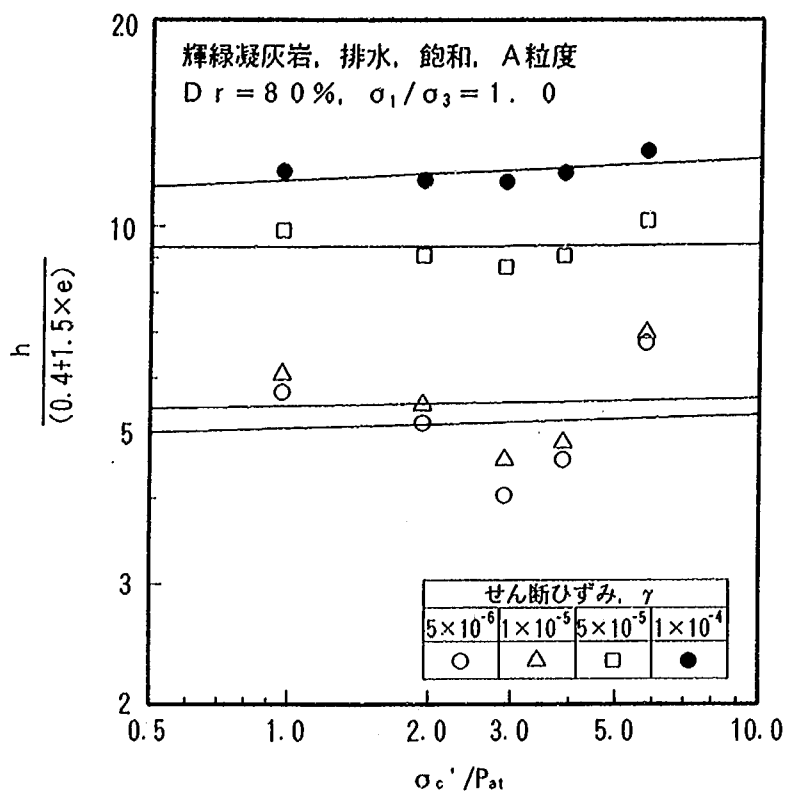


図-3.31(a) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

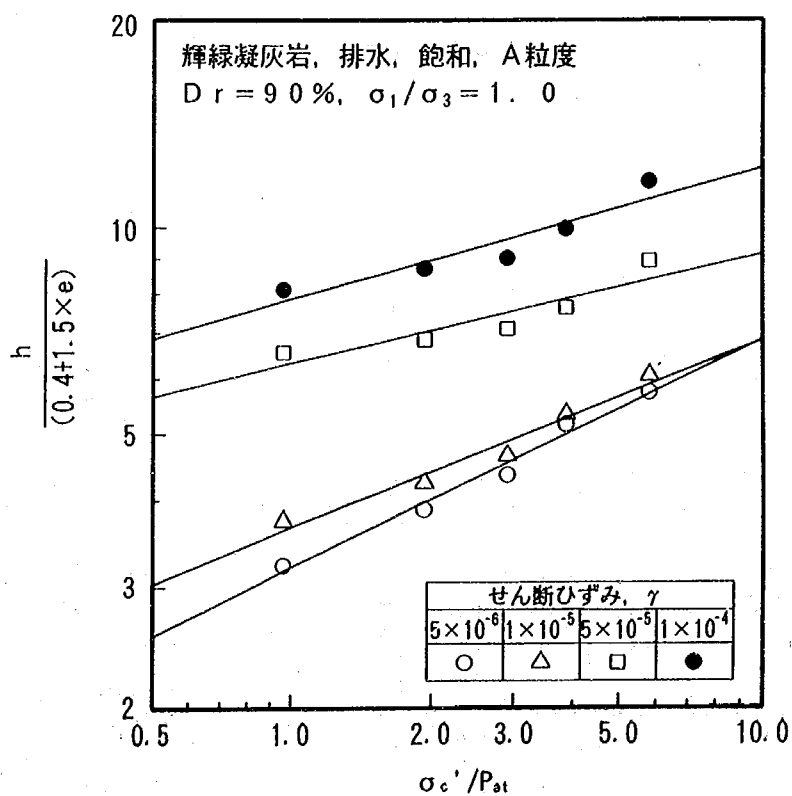


図-3.31(b) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

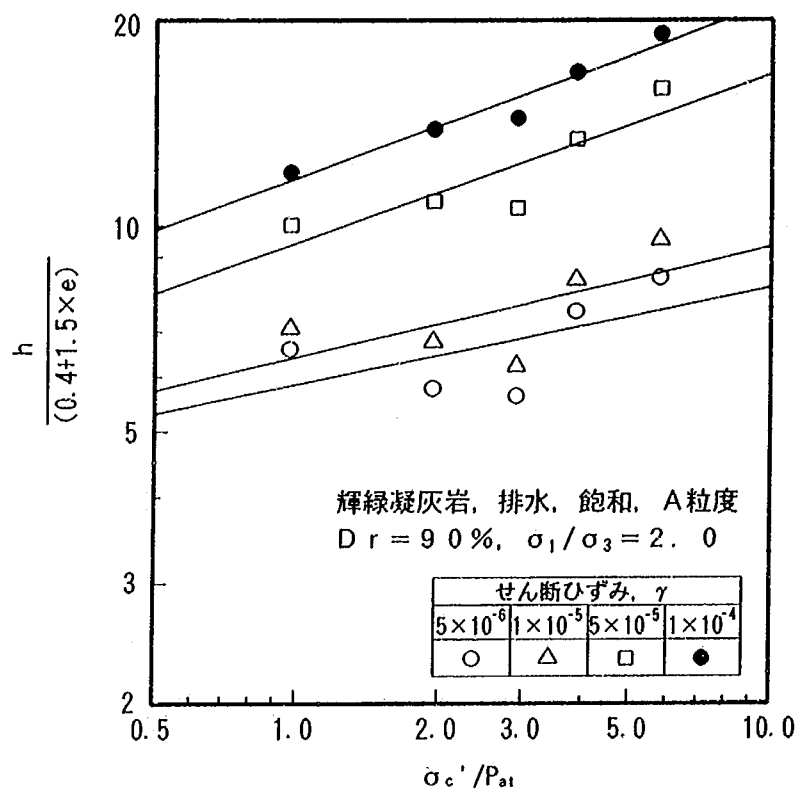


図-3.31(c) $h/\beta \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝綠凝灰岩)

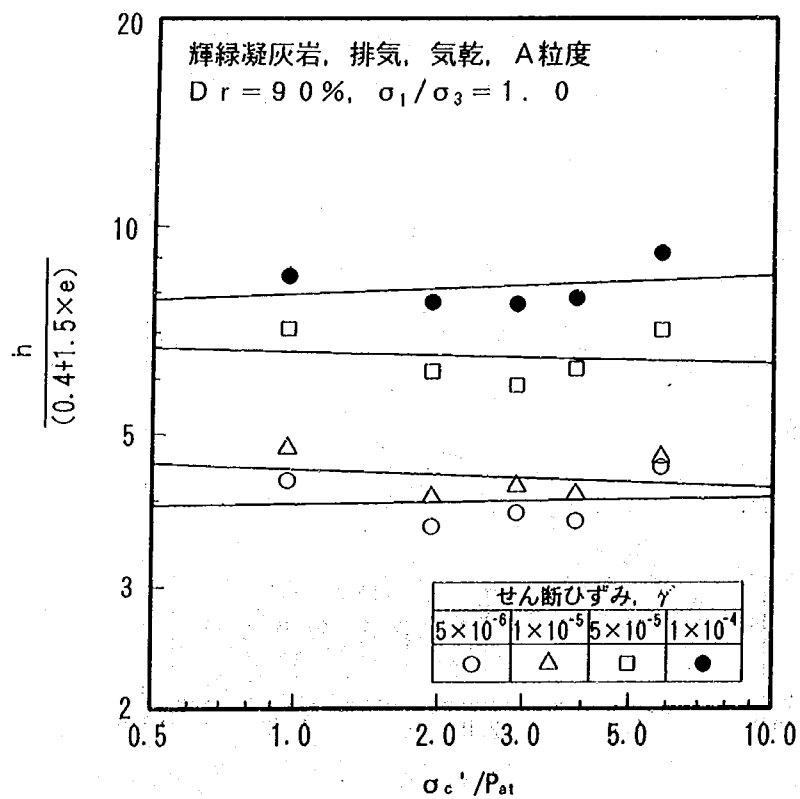


図-3.31(d) $h/\beta \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係 (輝綠凝灰岩)

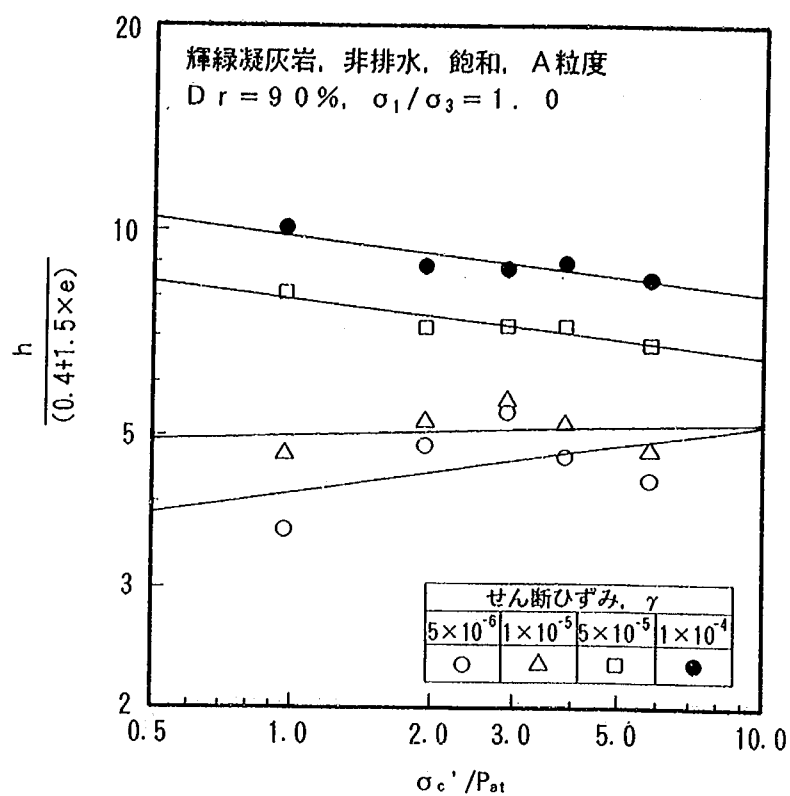


図-3.31(e) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

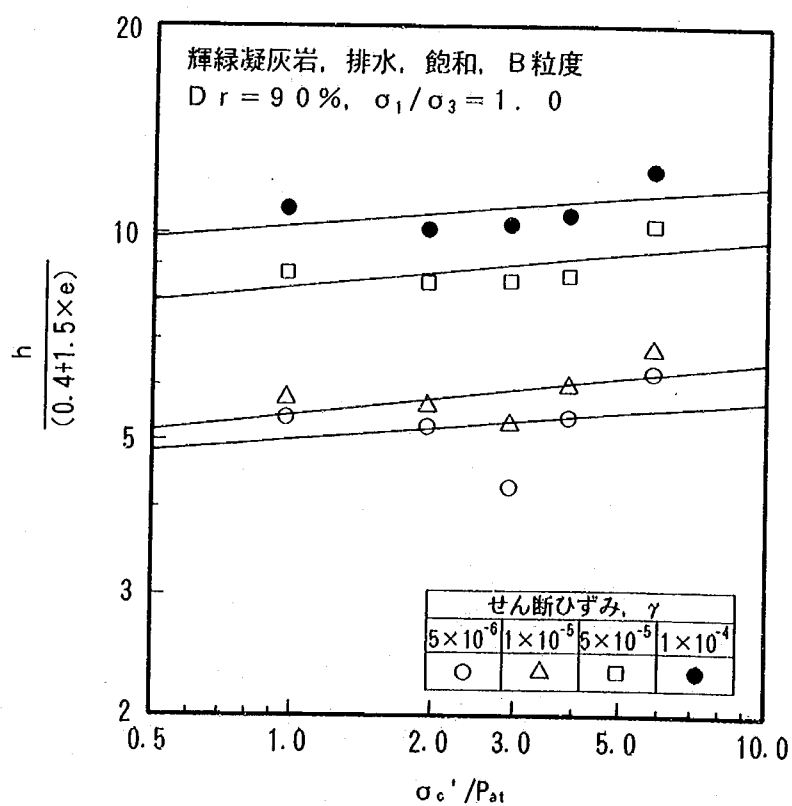


図-3.31(f) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

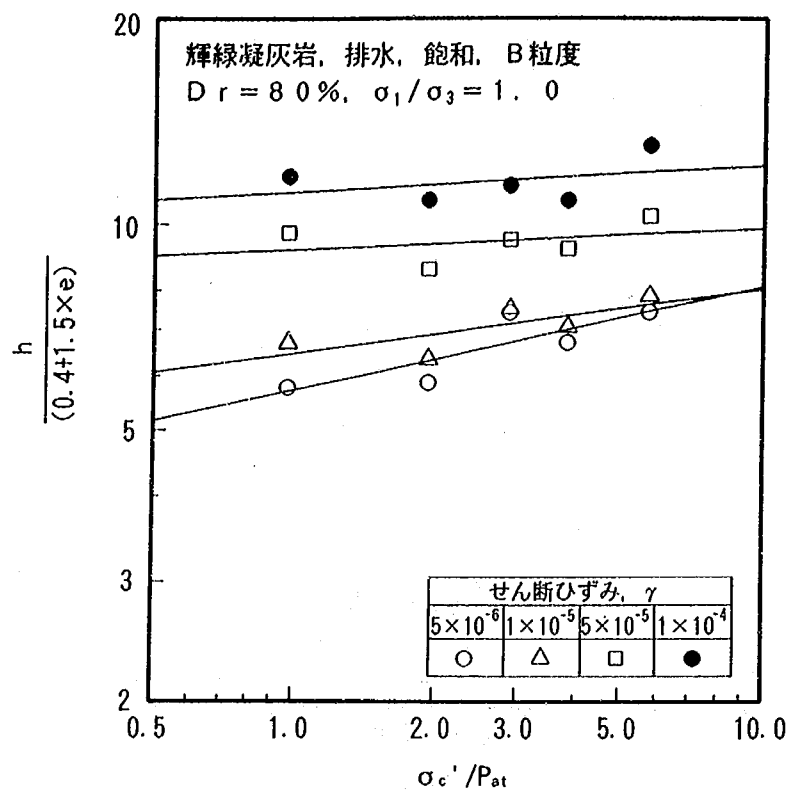


図-3.31(g) $h/\beta \sim (\sigma_e'/P_{at})$ 関係 (輝緑凝灰岩)

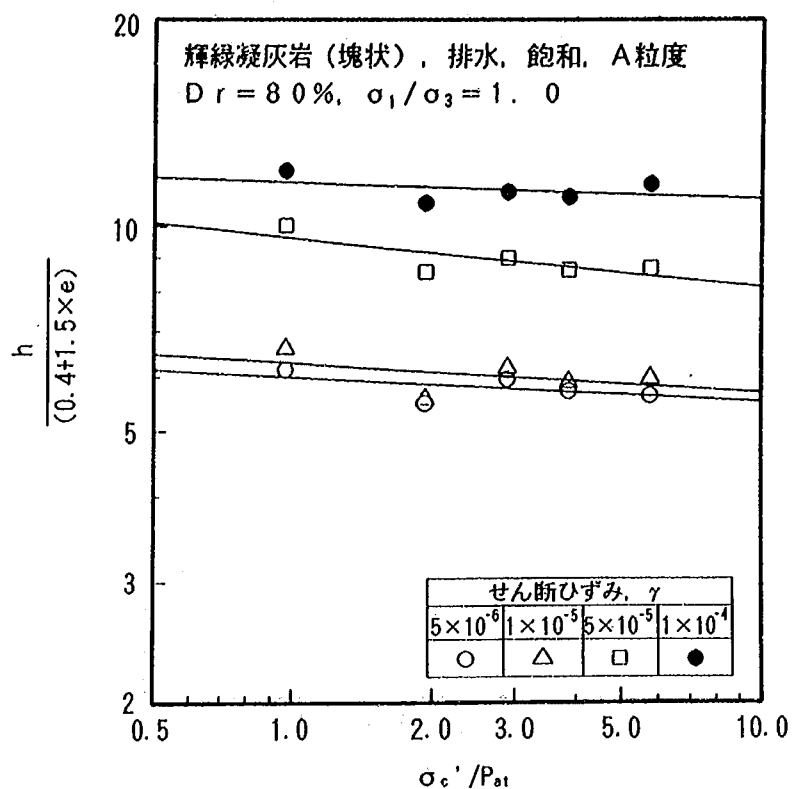


図-3.32(a) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{\sigma 1})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

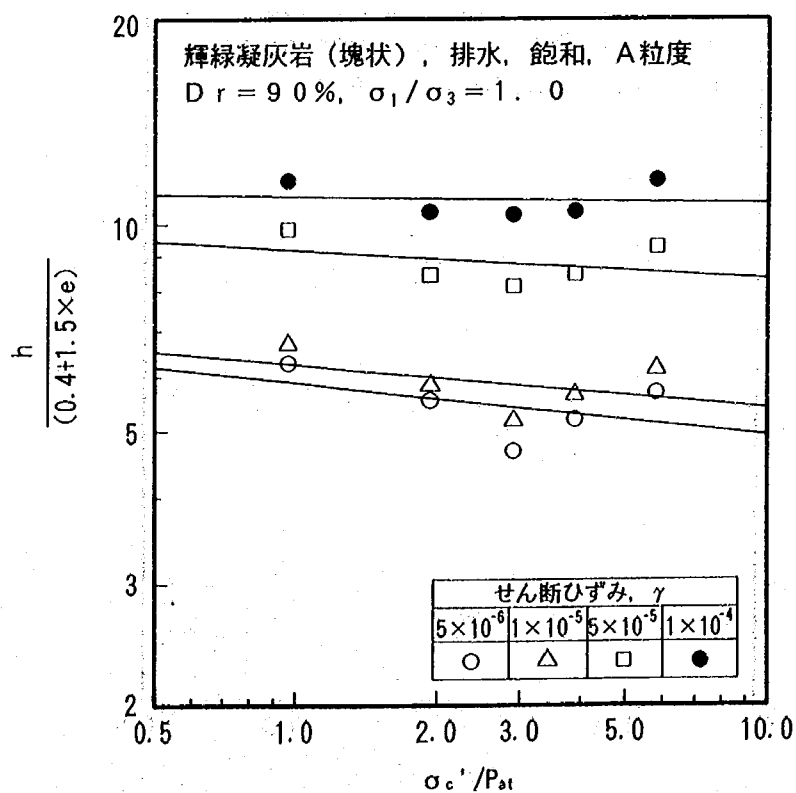


図-3.32(b) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{\sigma 1})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

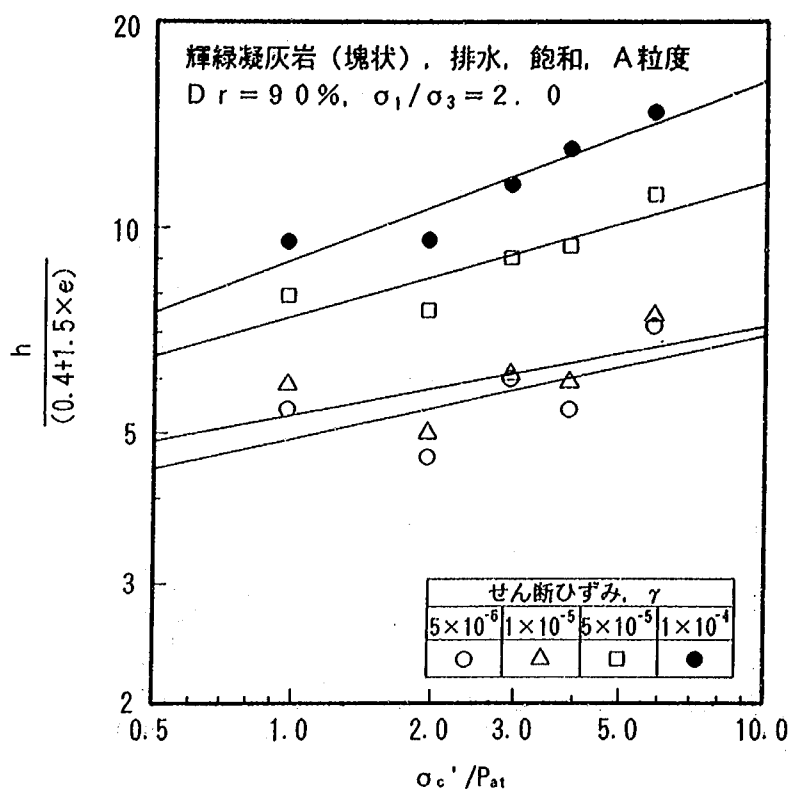


図-3.32(c) $h/\beta \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

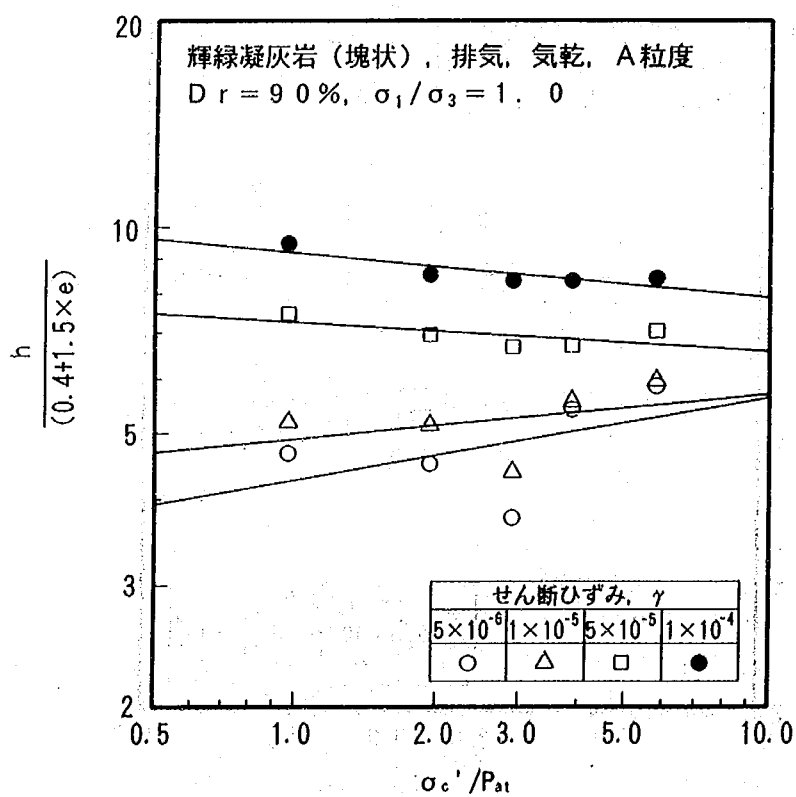


図-3.32(d) $h/\beta \sim (\sigma_c'/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

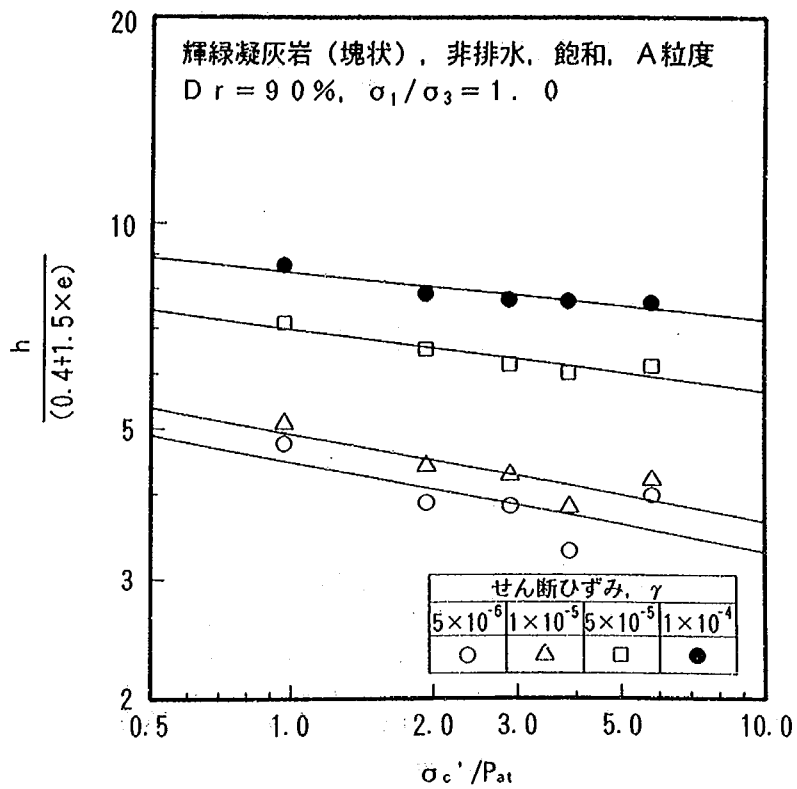


図-3.32(e) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

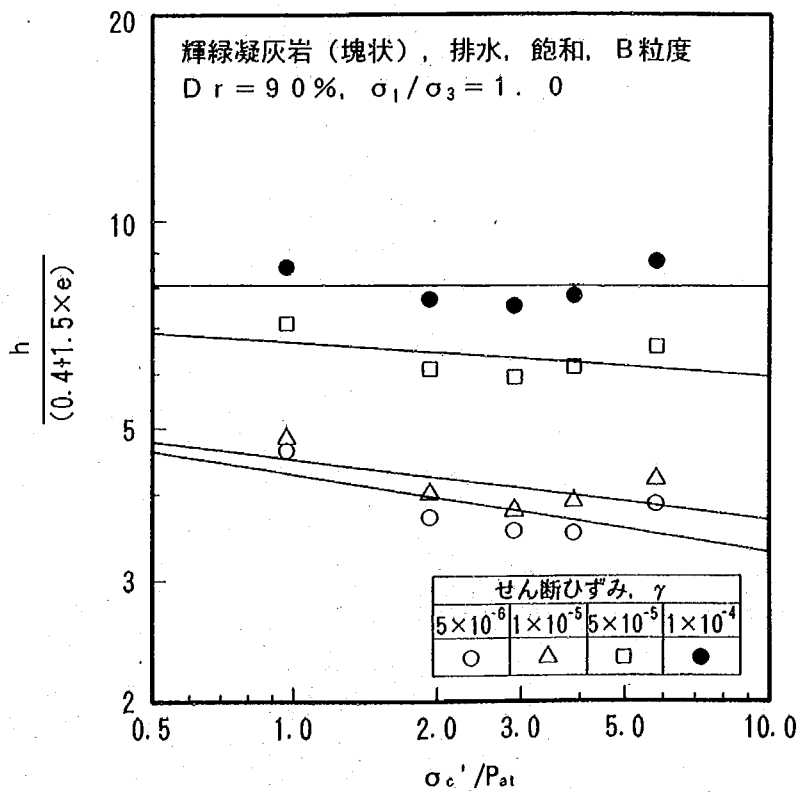


図-3.32(f) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

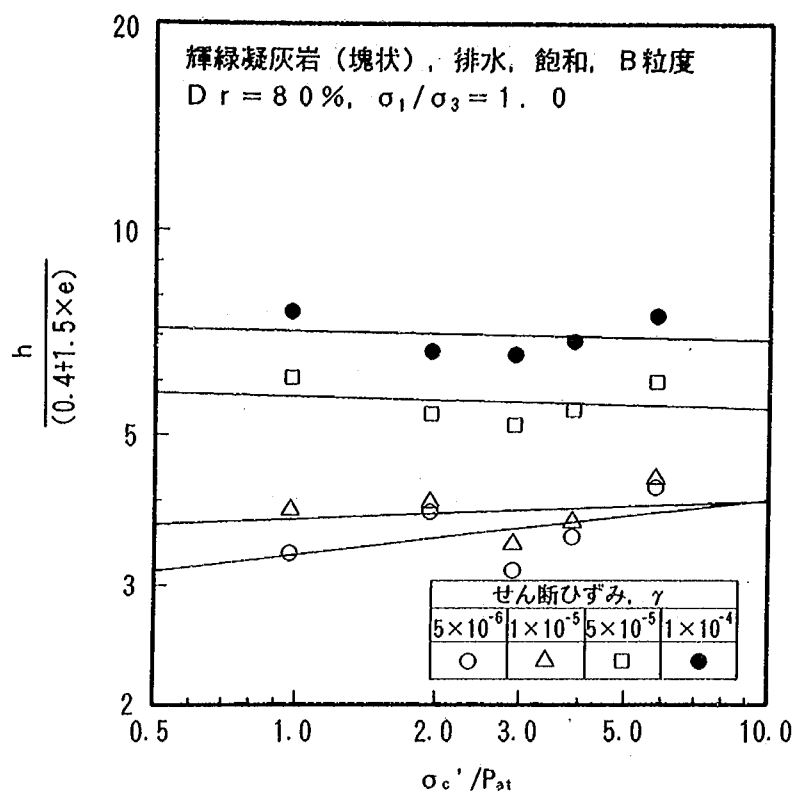


図-3.32(g) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係（輝緑凝灰岩（塊状））

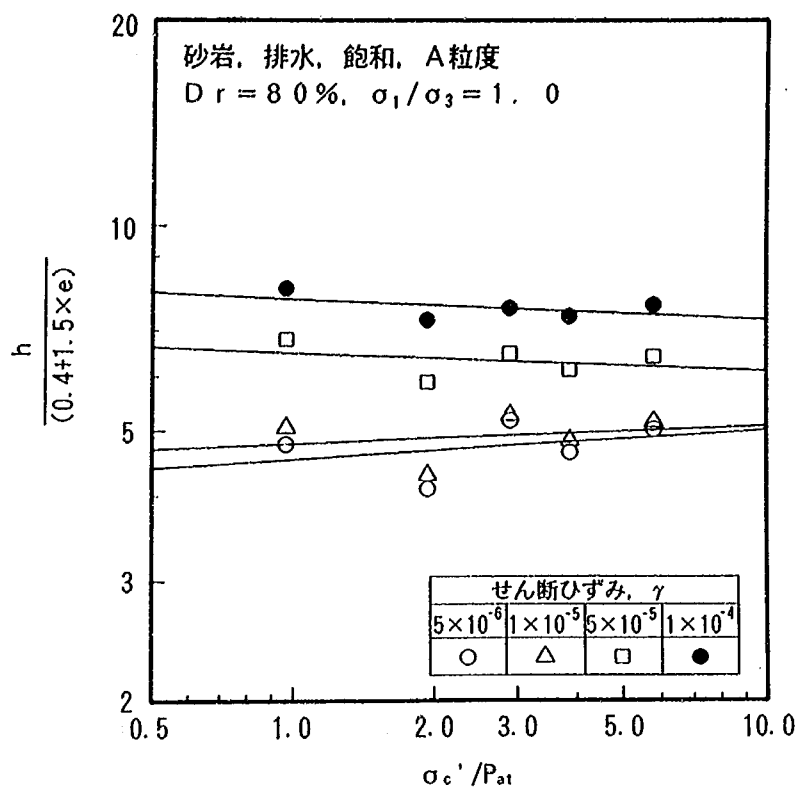


図-3.33(a) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

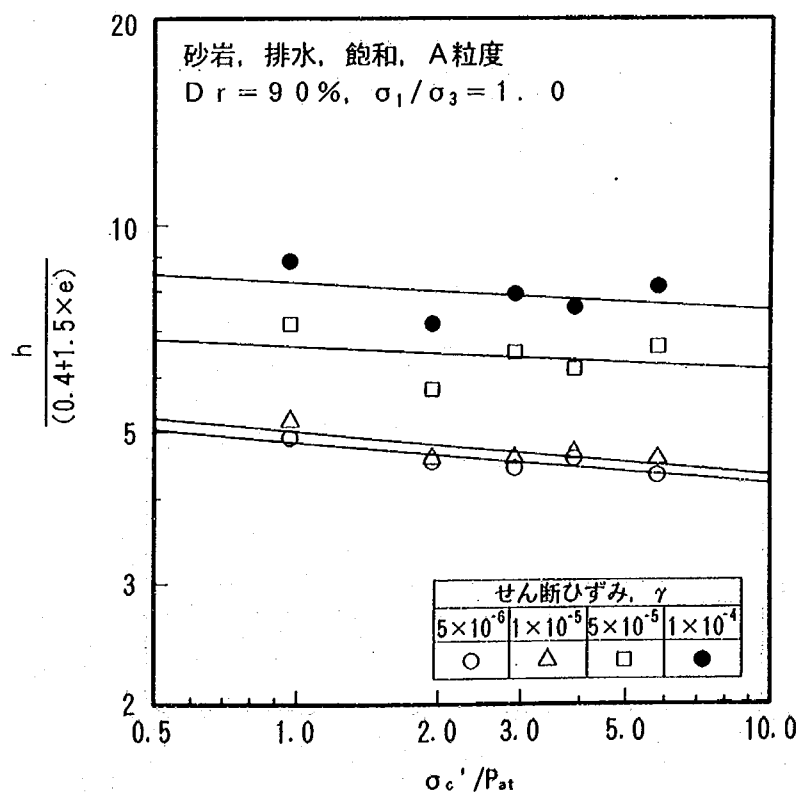


図-3.33(b) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

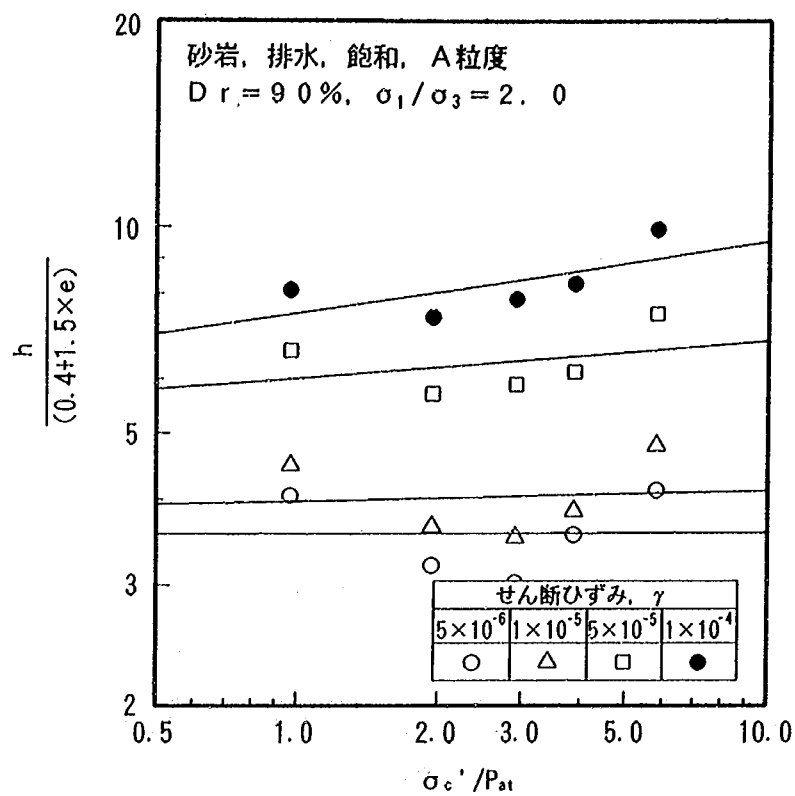


図-3.33(c) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

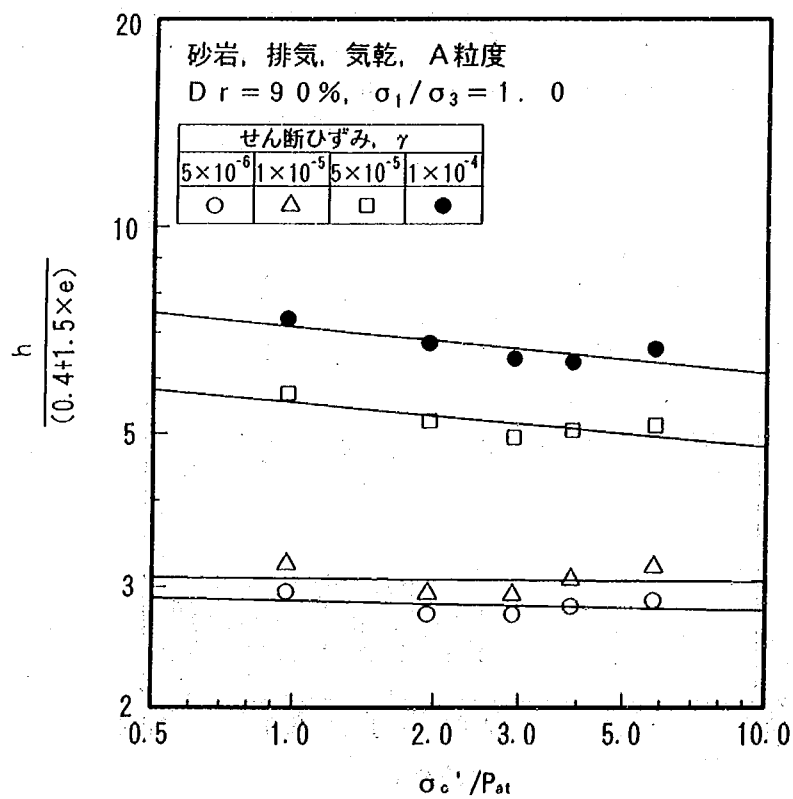


図-3.33(d) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

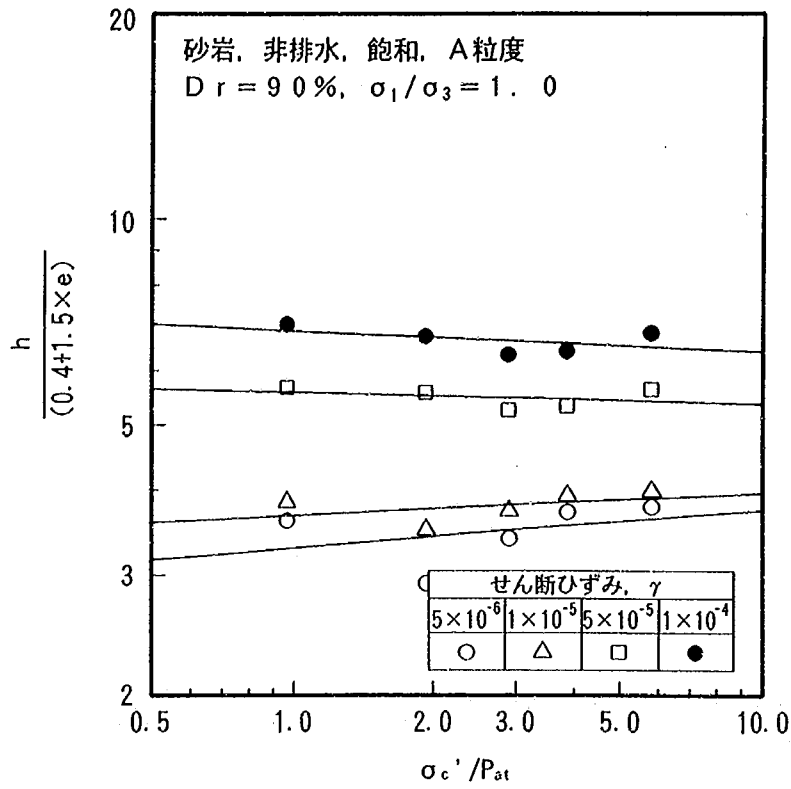


図-3.33(e) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

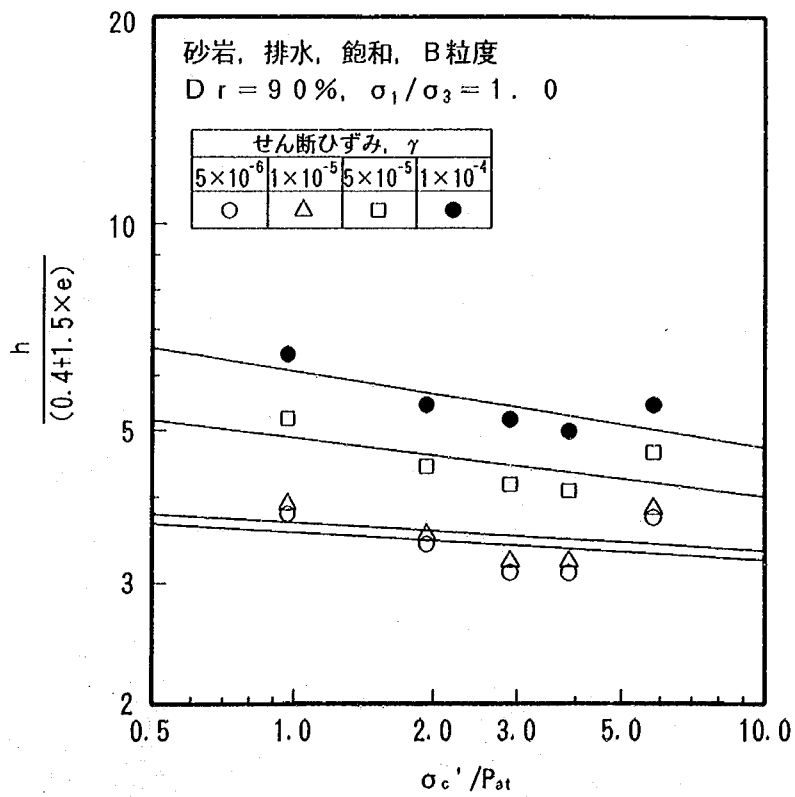


図-3.33(f) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

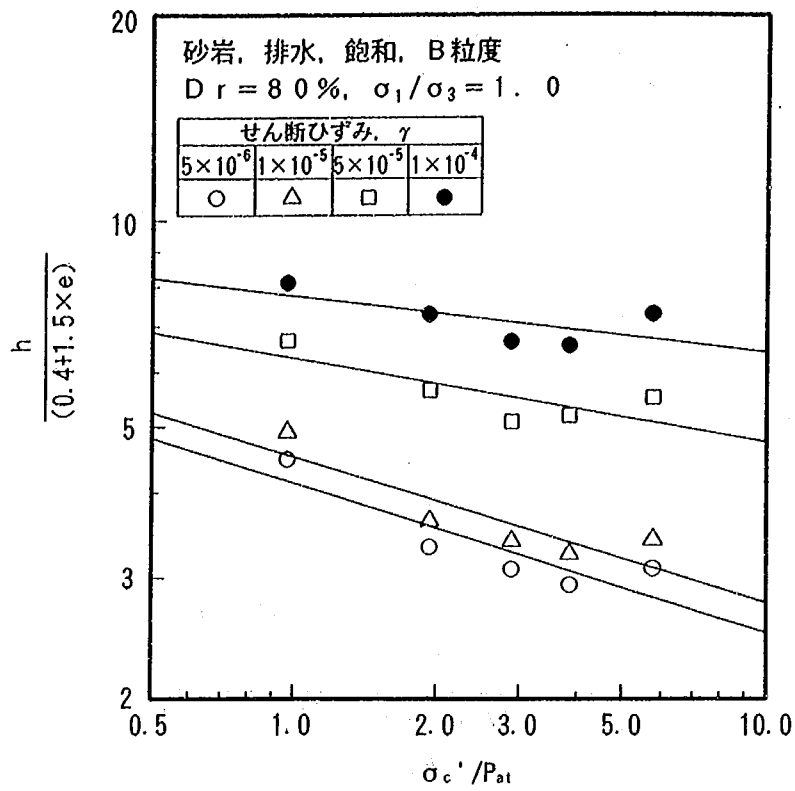


図-3.33(g) $h/\beta \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (砂岩)

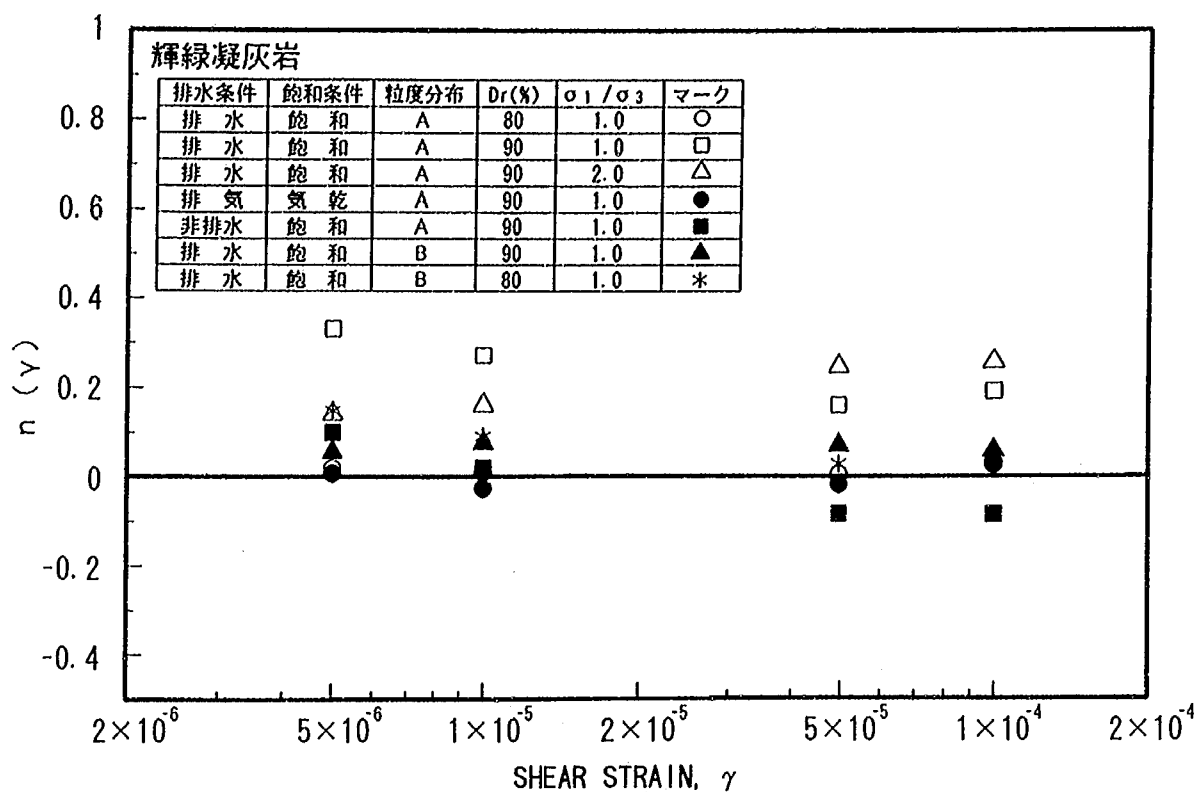


図-3.34(a) $n(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩)

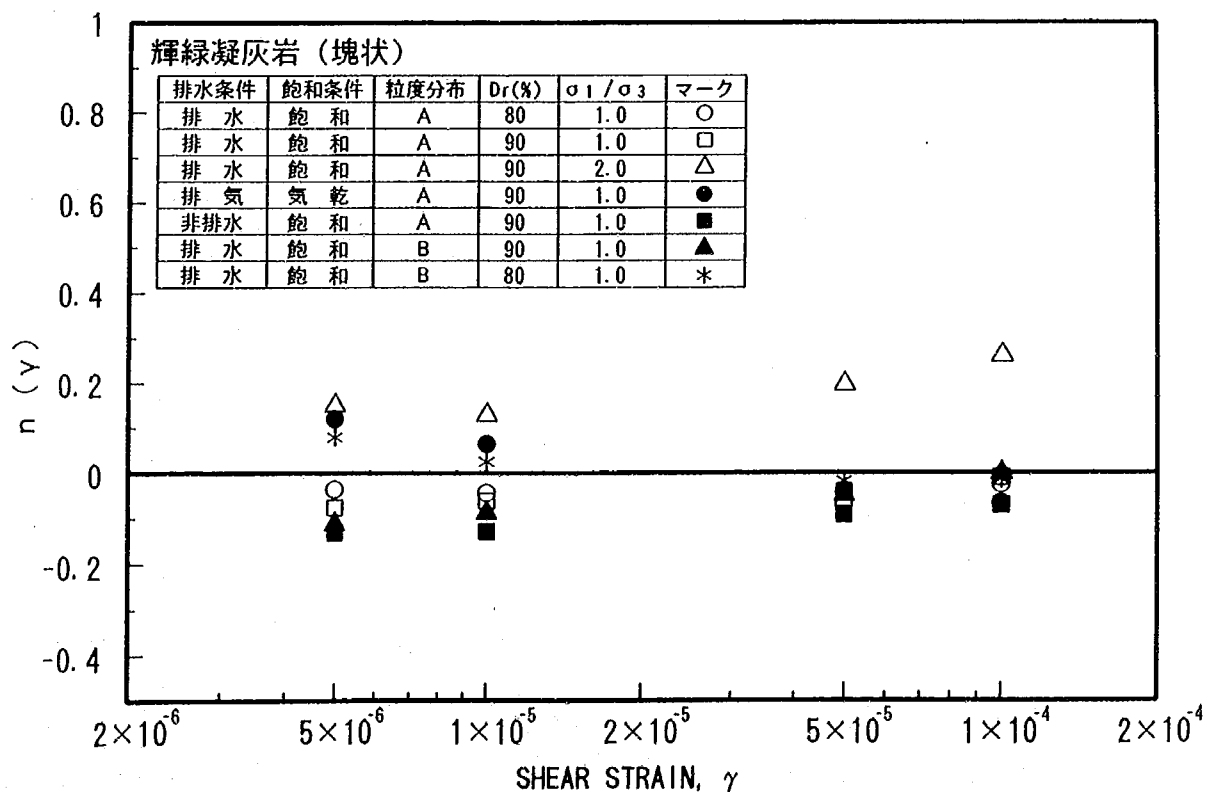


図-3.34(b) $n(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

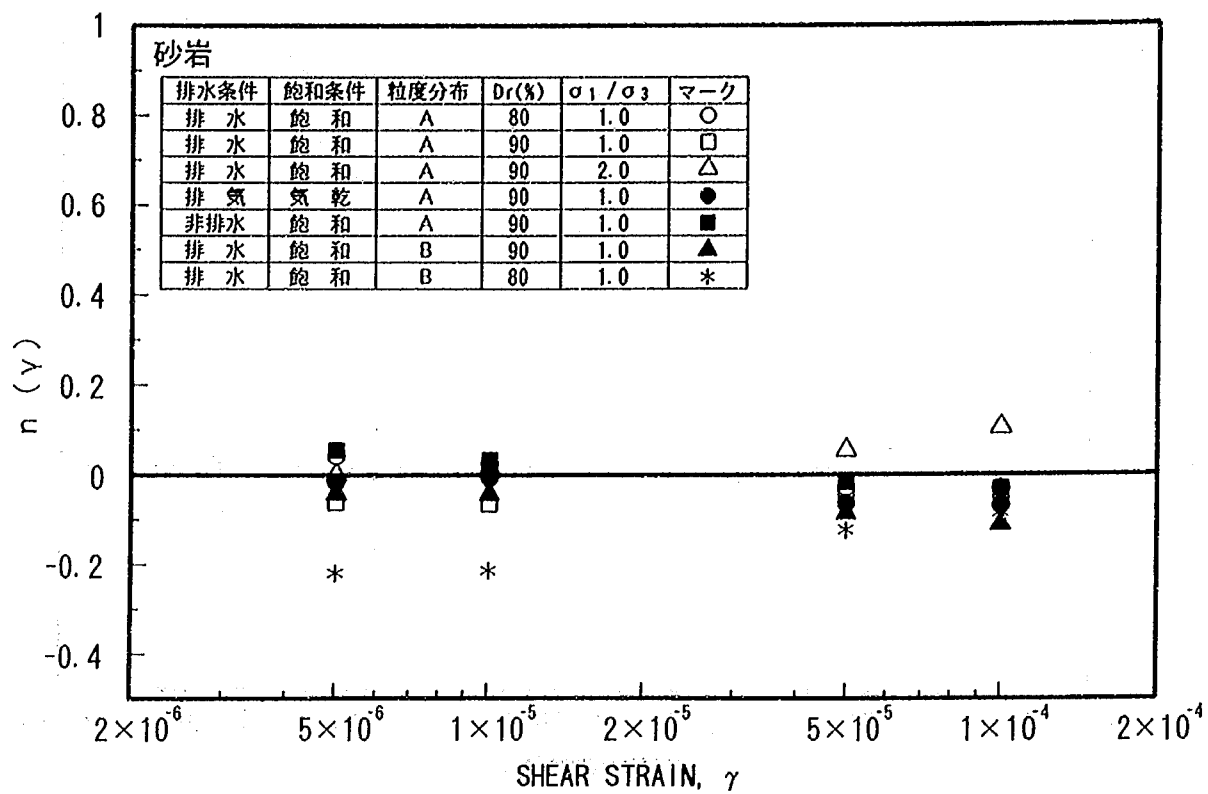


図-3.34(c) $n(\gamma) \sim \gamma$ 関係 (砂岩)

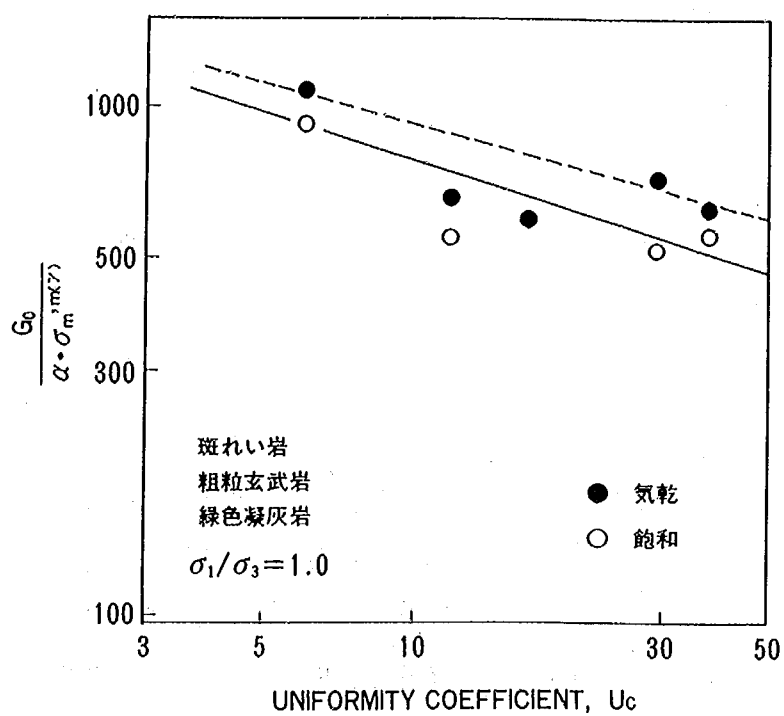


図-3.35 他岩種の粗粒材料の $G_0 / \{ \alpha \cdot \sigma_m'^m(\tau) \} \sim U_c$ の関係 (中村ら⁵⁾)

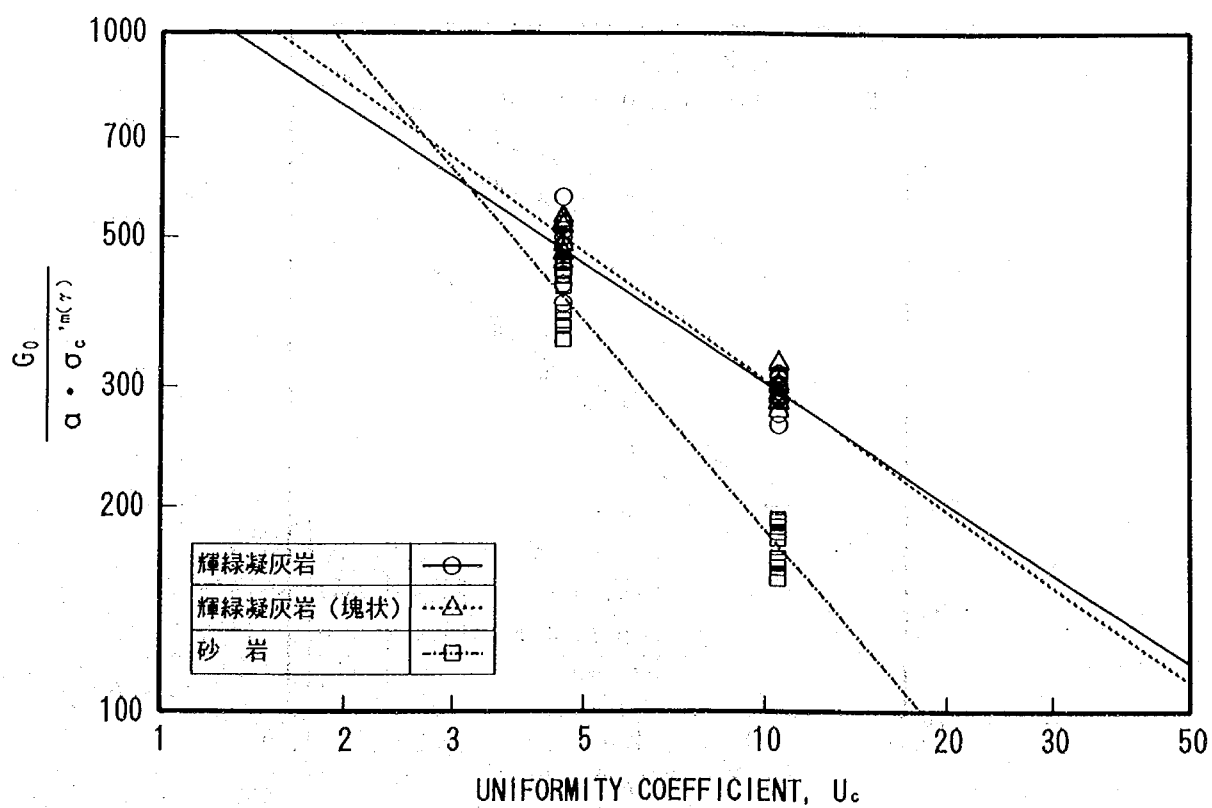


図-3.36 $G_0 / \{ \alpha \cdot \sigma_c'^m(\tau) \} \sim U_c$ の関係

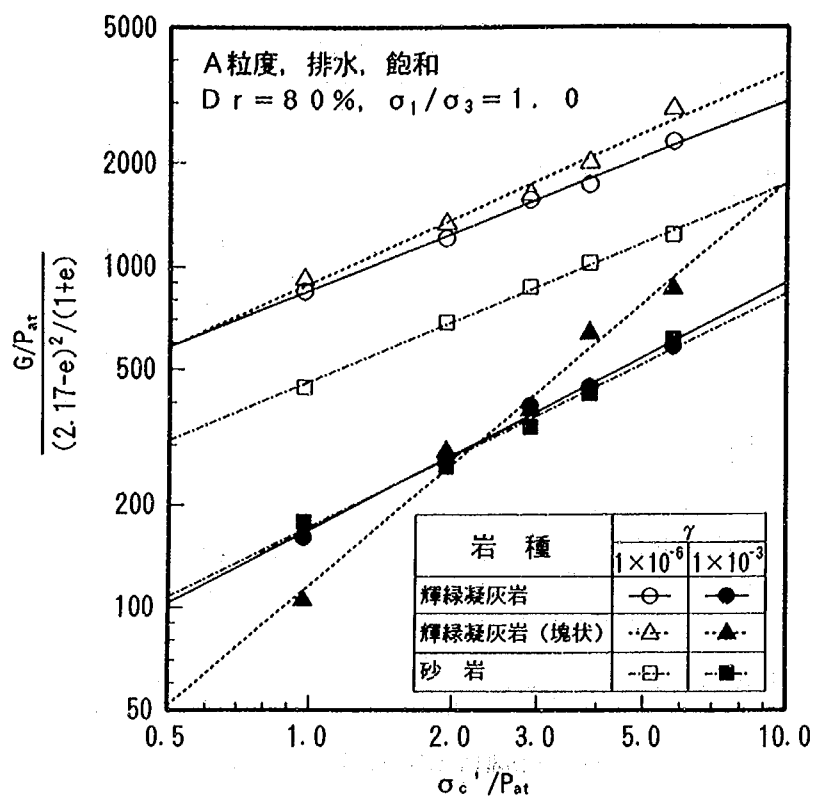


図-3.37(a) 各岩質の $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (A粒度)

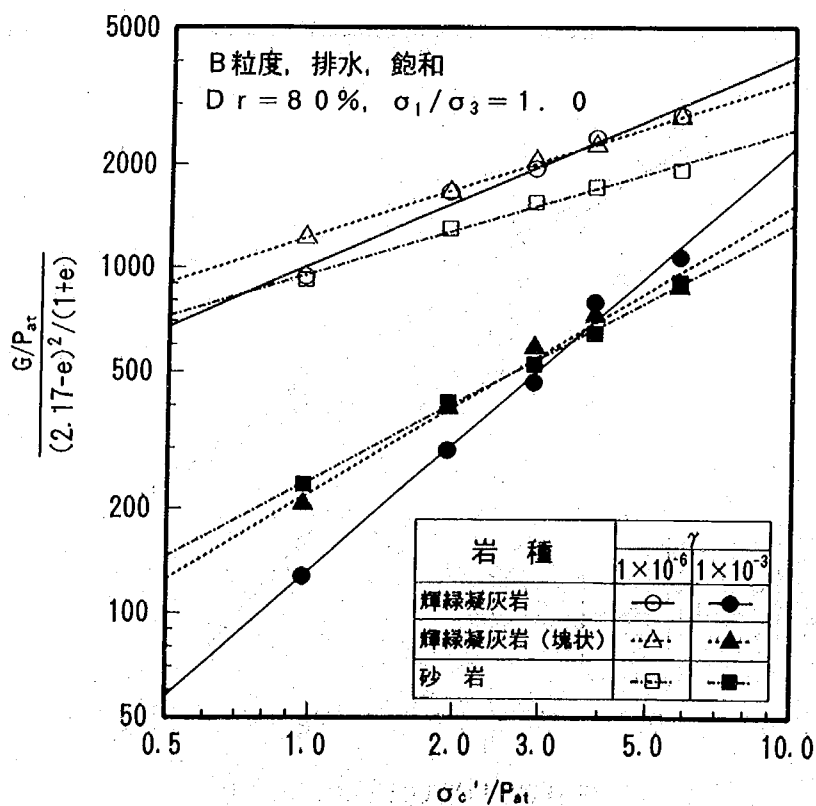


図-3.37(b) 各岩質の $(G/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_c/P_{at})$ 関係 (B粒度)

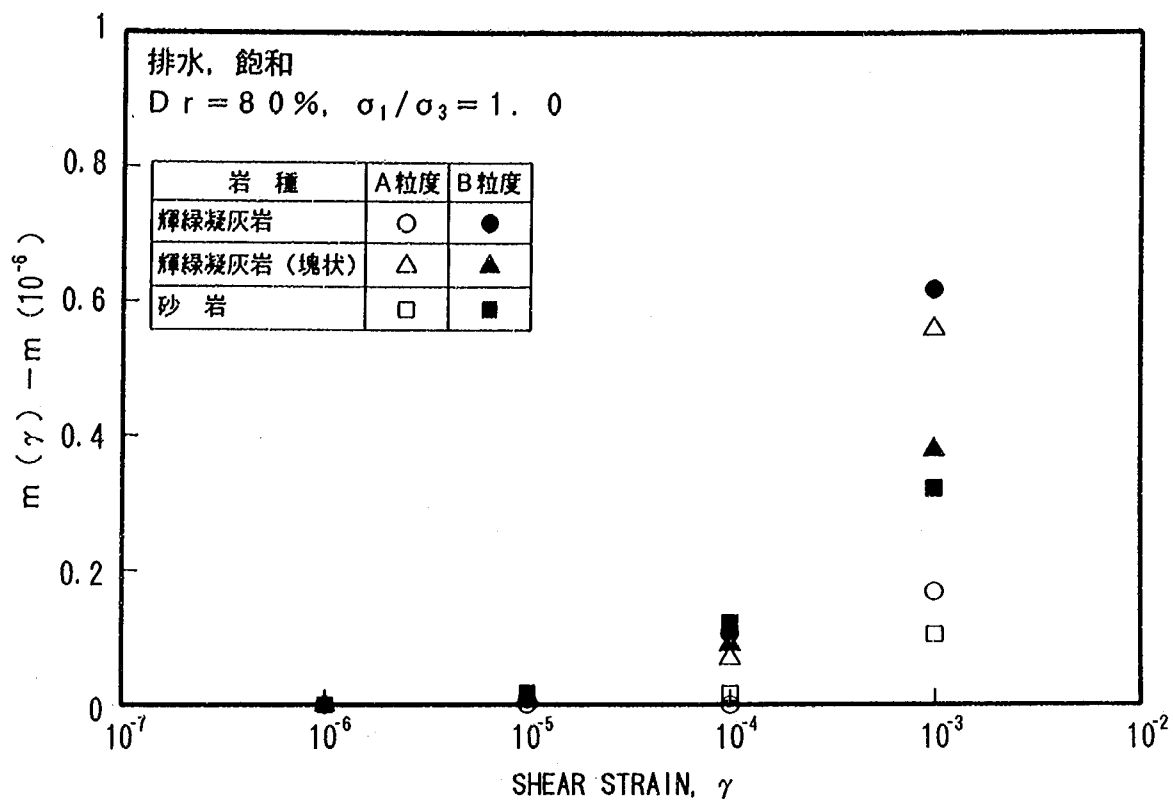


図-3.38(a) 各岩質のGの拘束圧依存性比較 (Dr=80%)

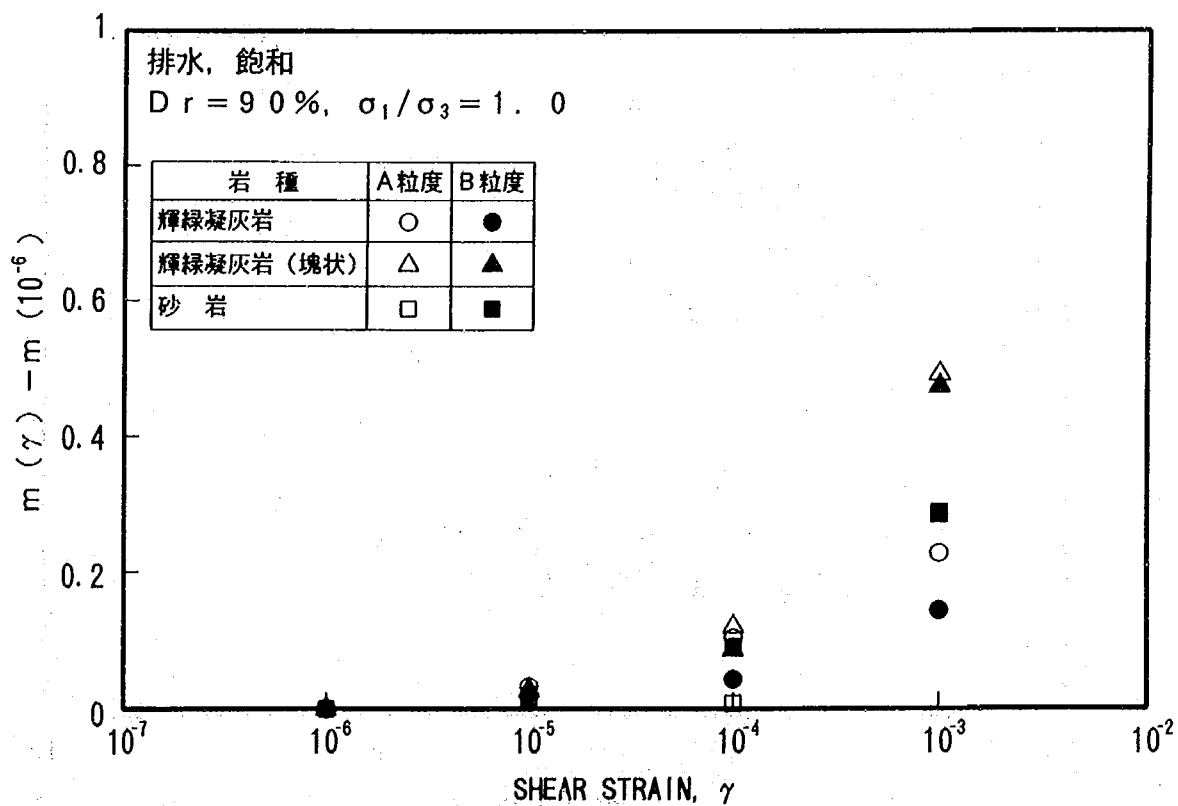


図-3.38(b) 各岩質のGの拘束圧依存性比較 (Dr=90%)

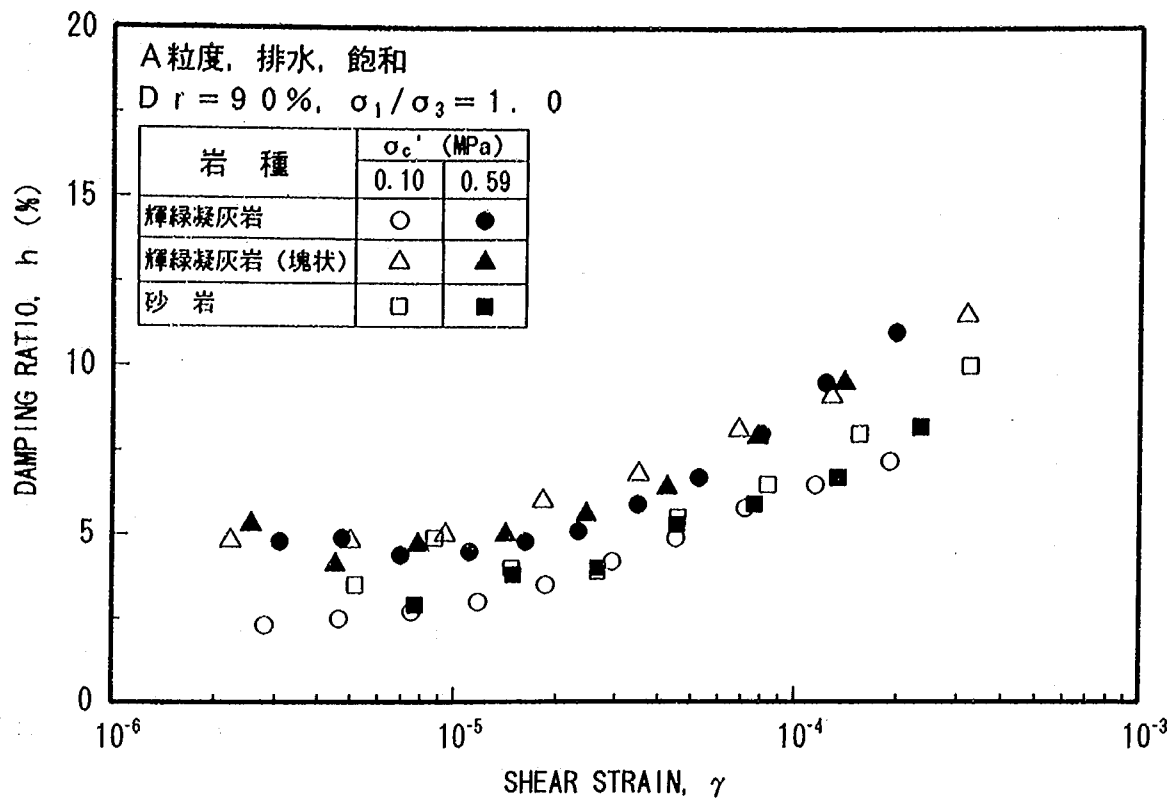


図-3.39(a) 各岩質の $h \sim \gamma$ 関係 (A 粒度)

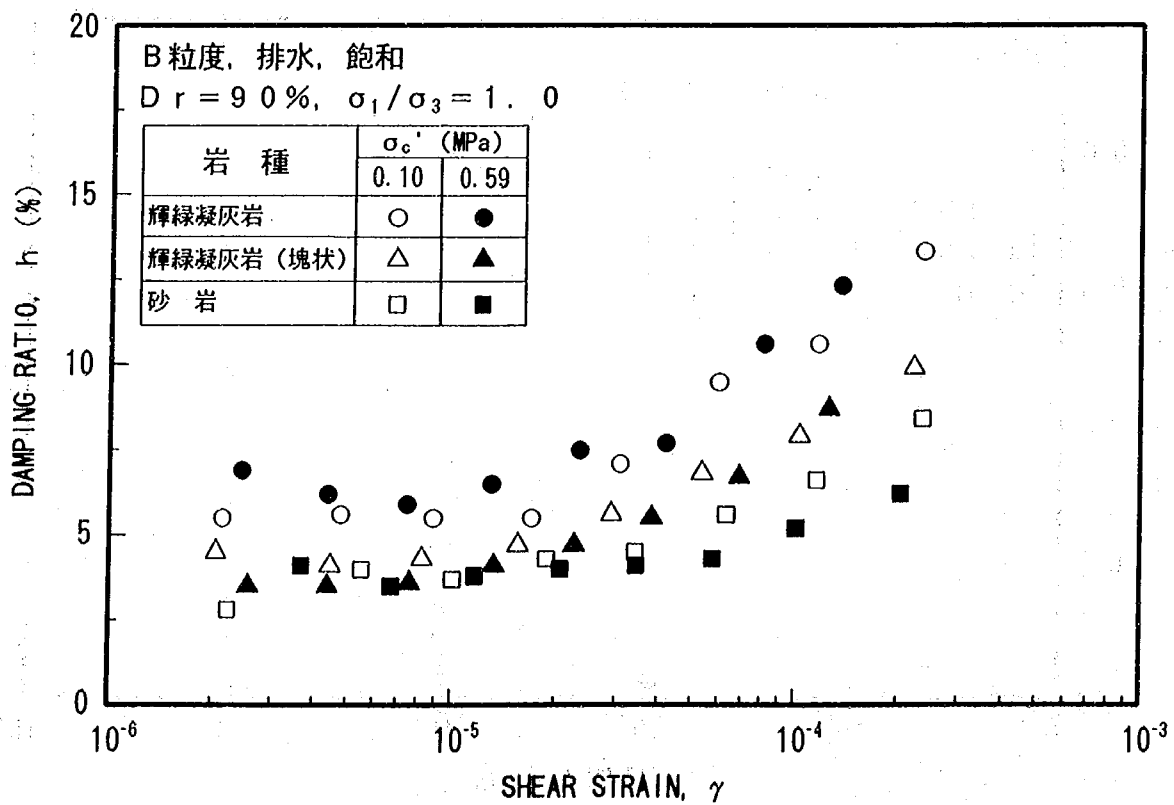


図-3.39(b) 各岩質の $h \sim \gamma$ 関係 (B 粒度)

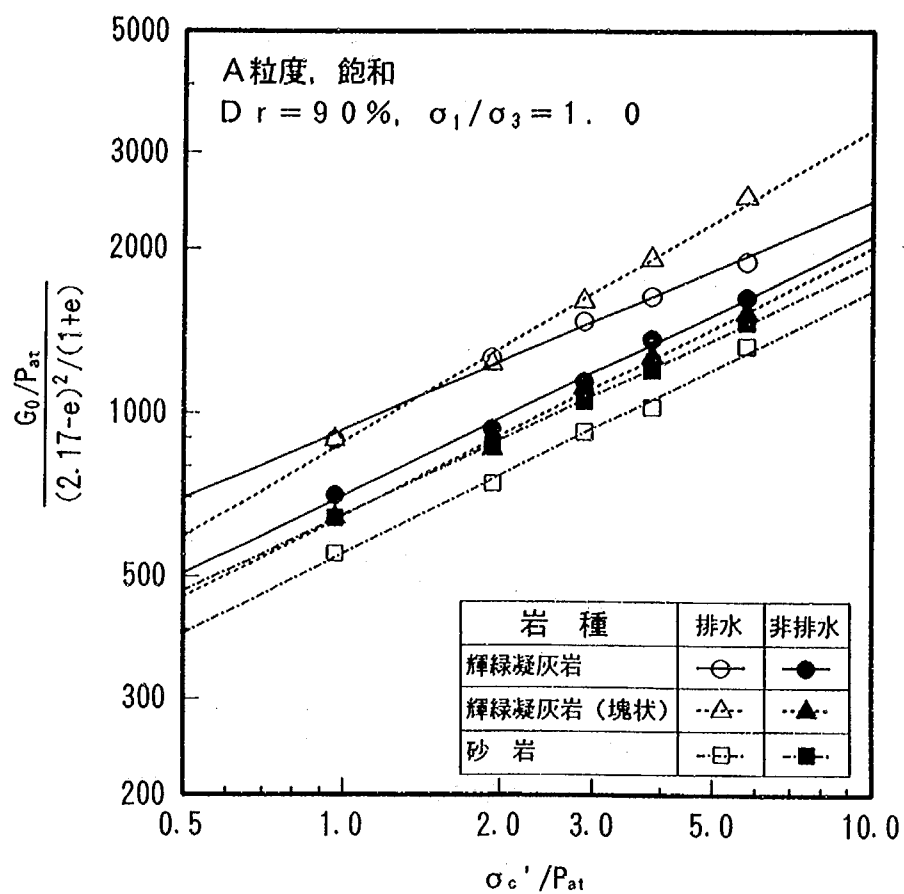


図-3.40 排水・非排水条件による初期せん断剛性率の比較

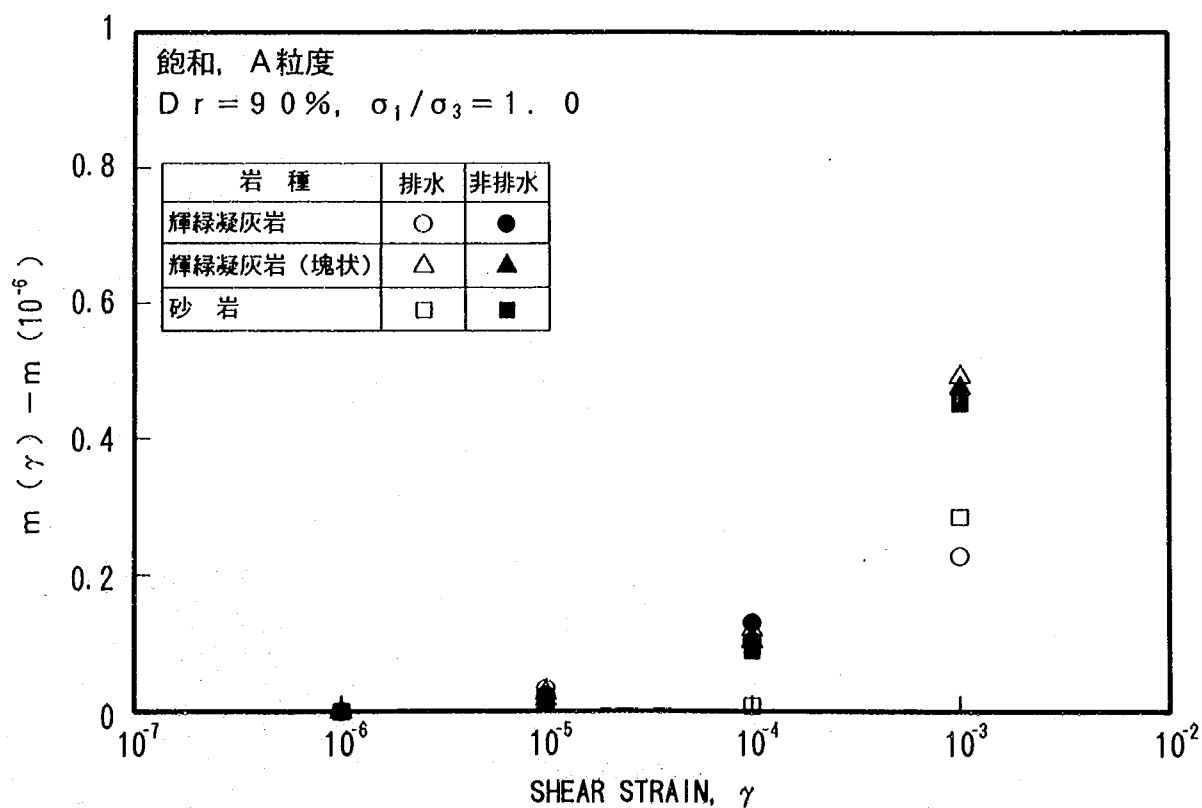


図-3.41 排水・非排水条件によるせん断剛性率の拘束圧依存性の比較

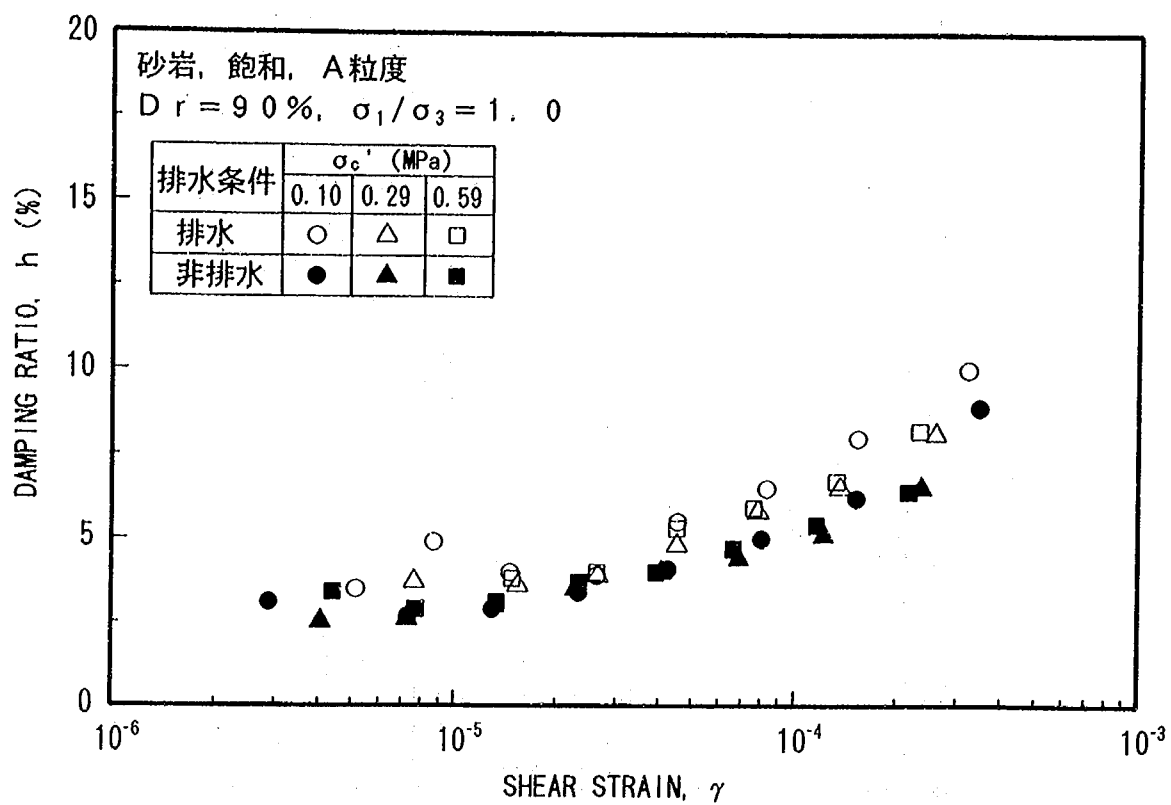


図-3.42 排水・非排水条件による減衰定数の比較

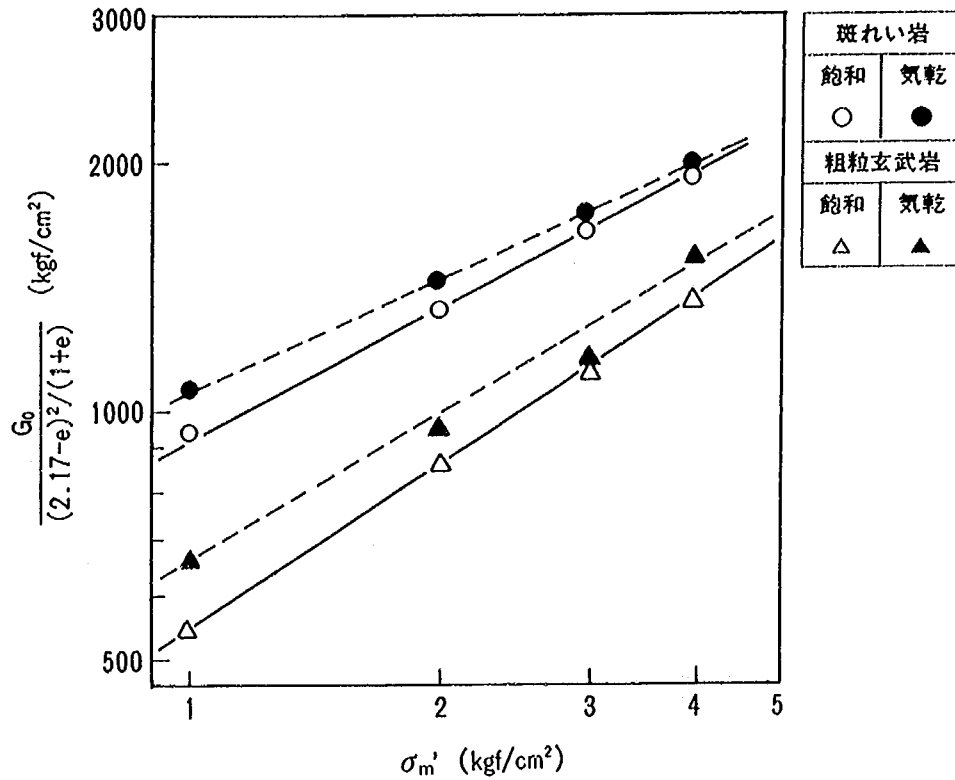


図-3.43 他岩種の粗粒材料の飽和条件の違いによる G_0 の比較 (安田ら²¹⁾)

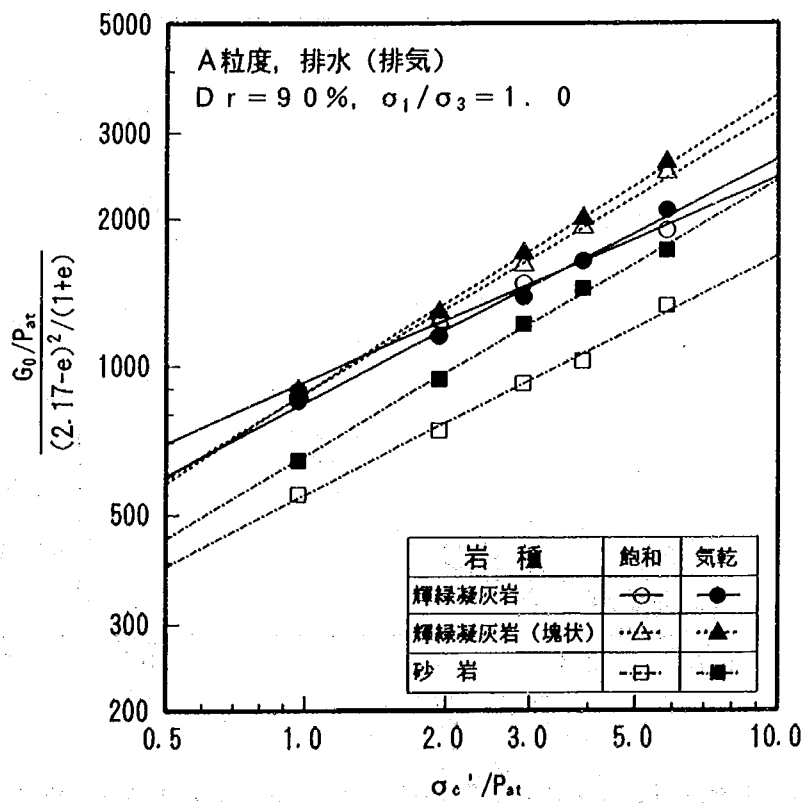


図-3.44 飽和・気乾条件による初期せん断剛性率 G_0 の比較

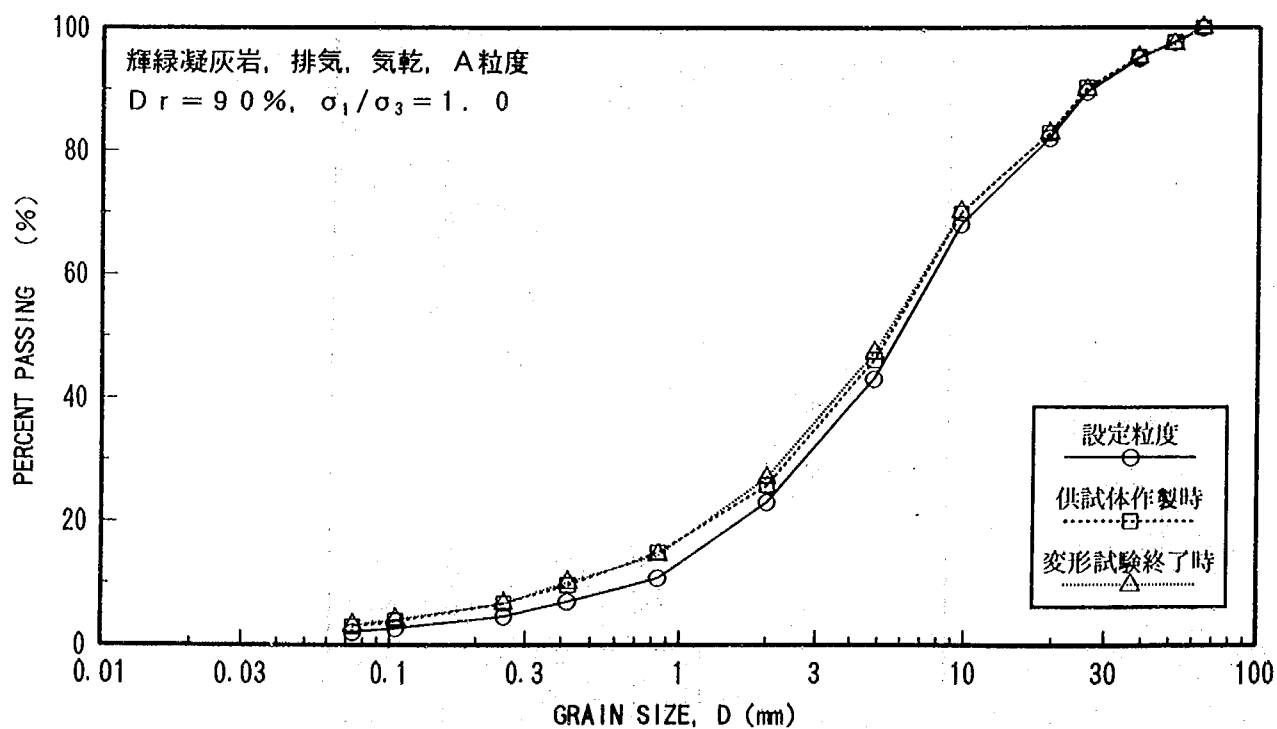
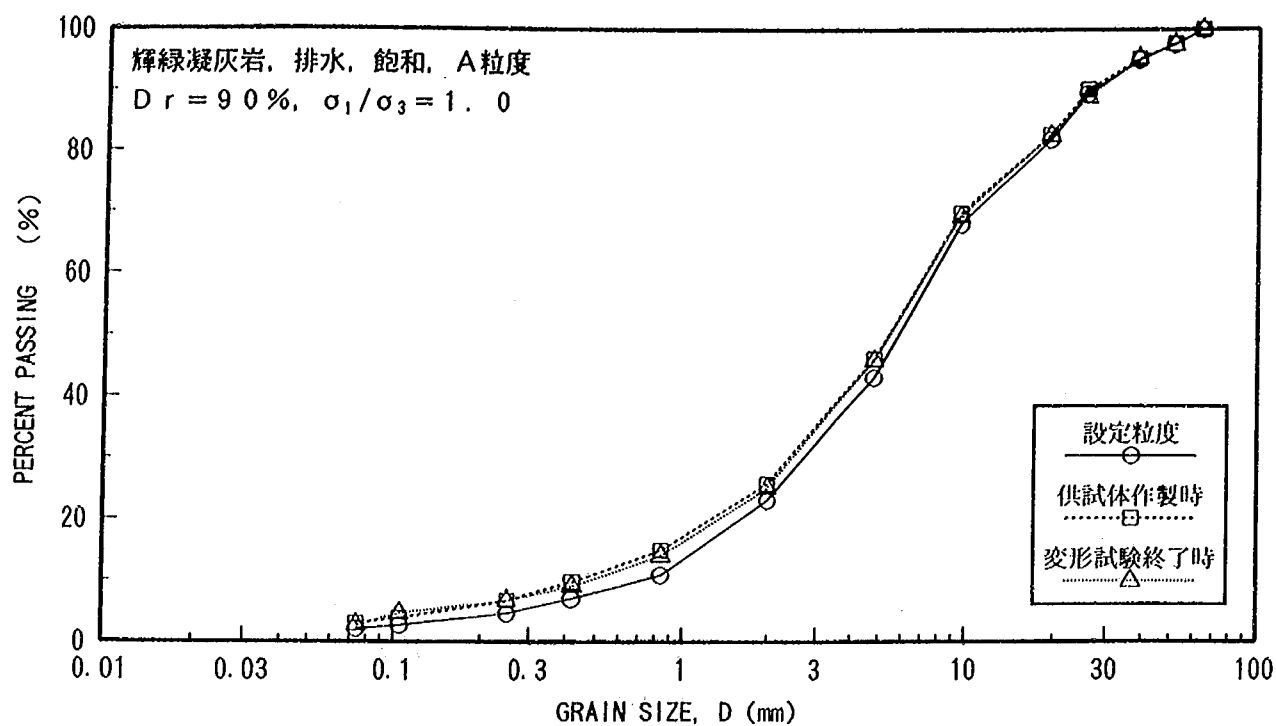


図-3.45(a) 飽和・気乾条件による繰返し三軸試験前後の粒度分布の変化 (輝緑凝灰岩)

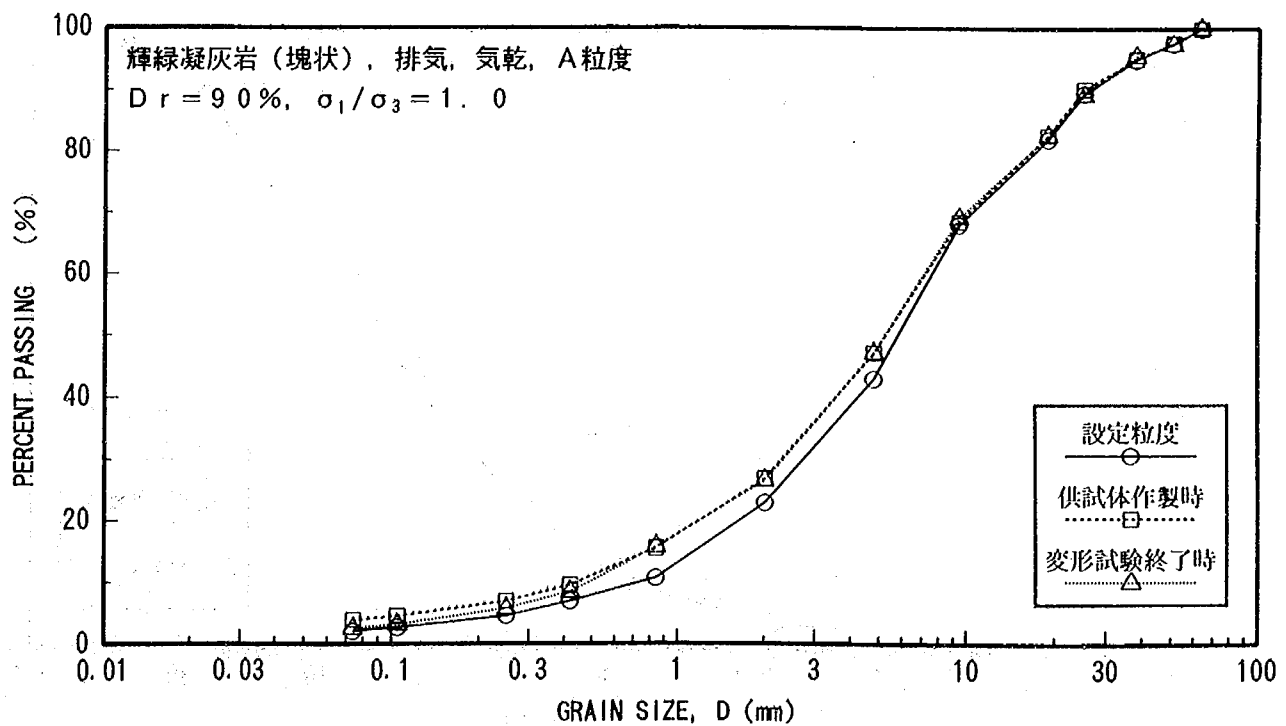
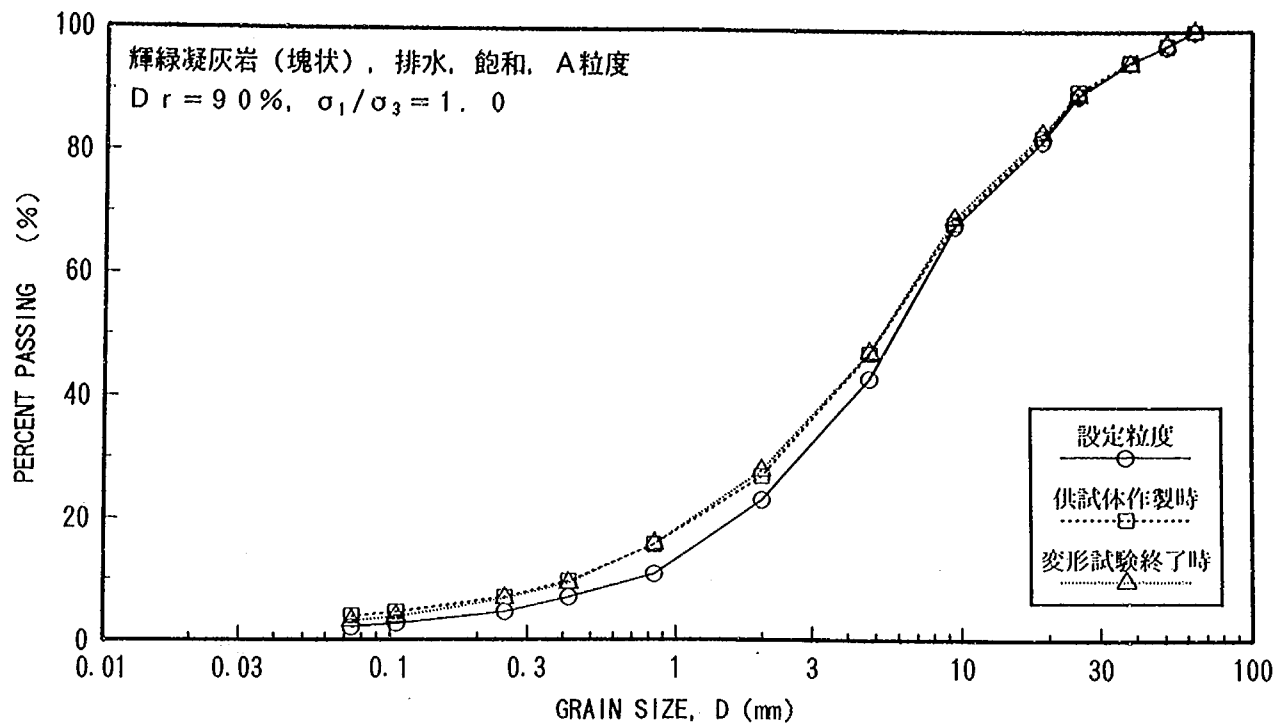


図-3.45(b) 飽和・気乾条件による繰返し三軸試験前後の粒度分布の変化（輝緑凝灰岩（塊状））

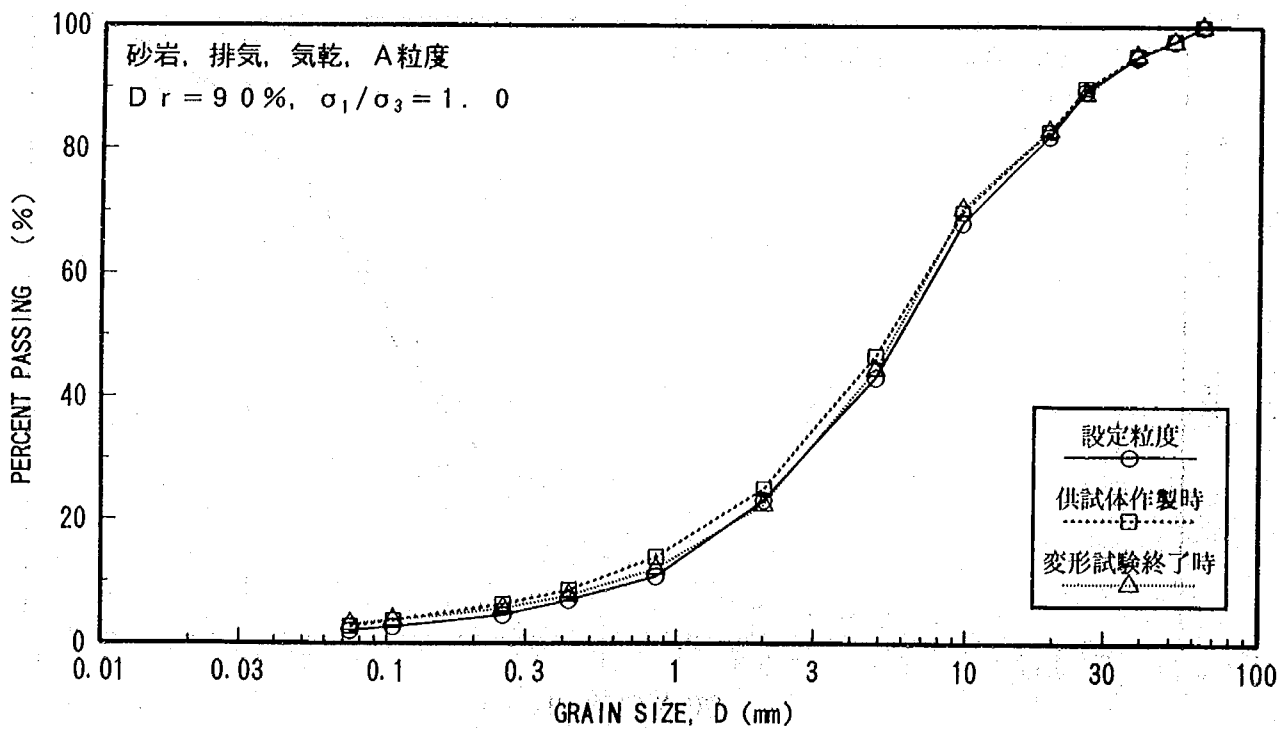
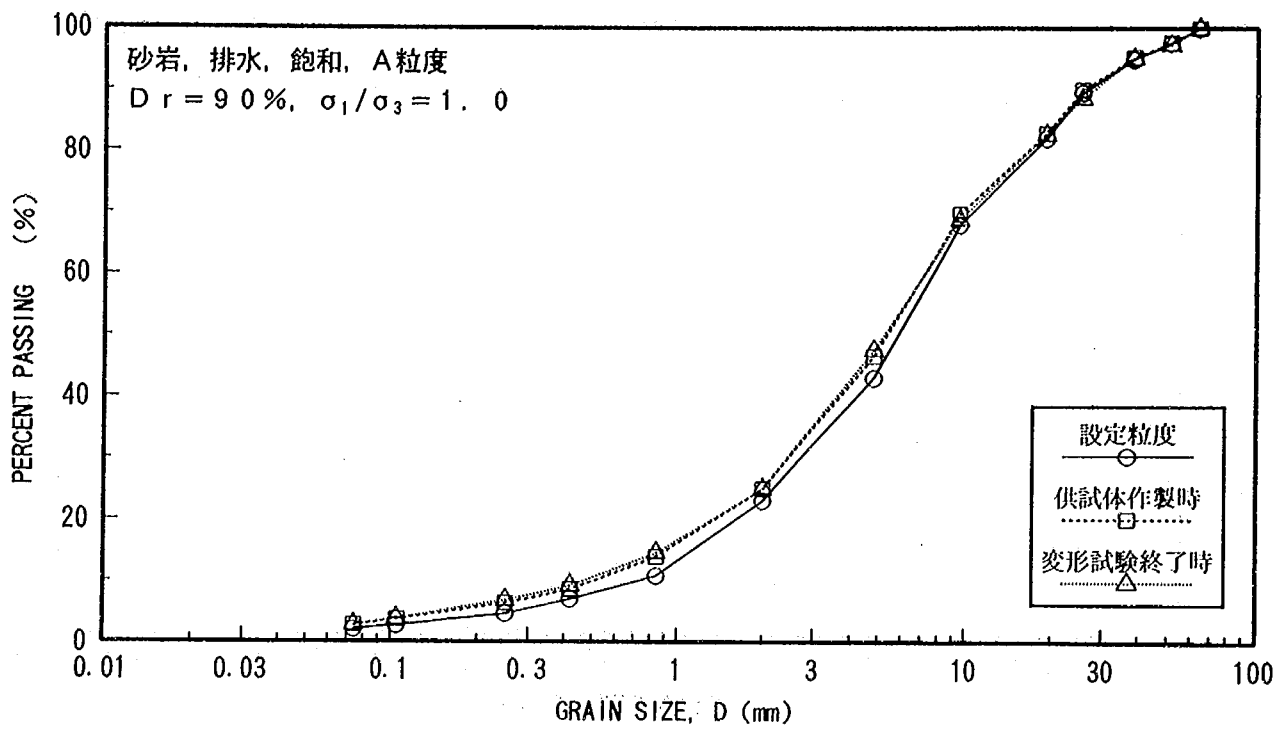


図-3.45(6) 飽和・気乾条件による繰返し三軸試験前後の粒度分布の変化(砂岩)

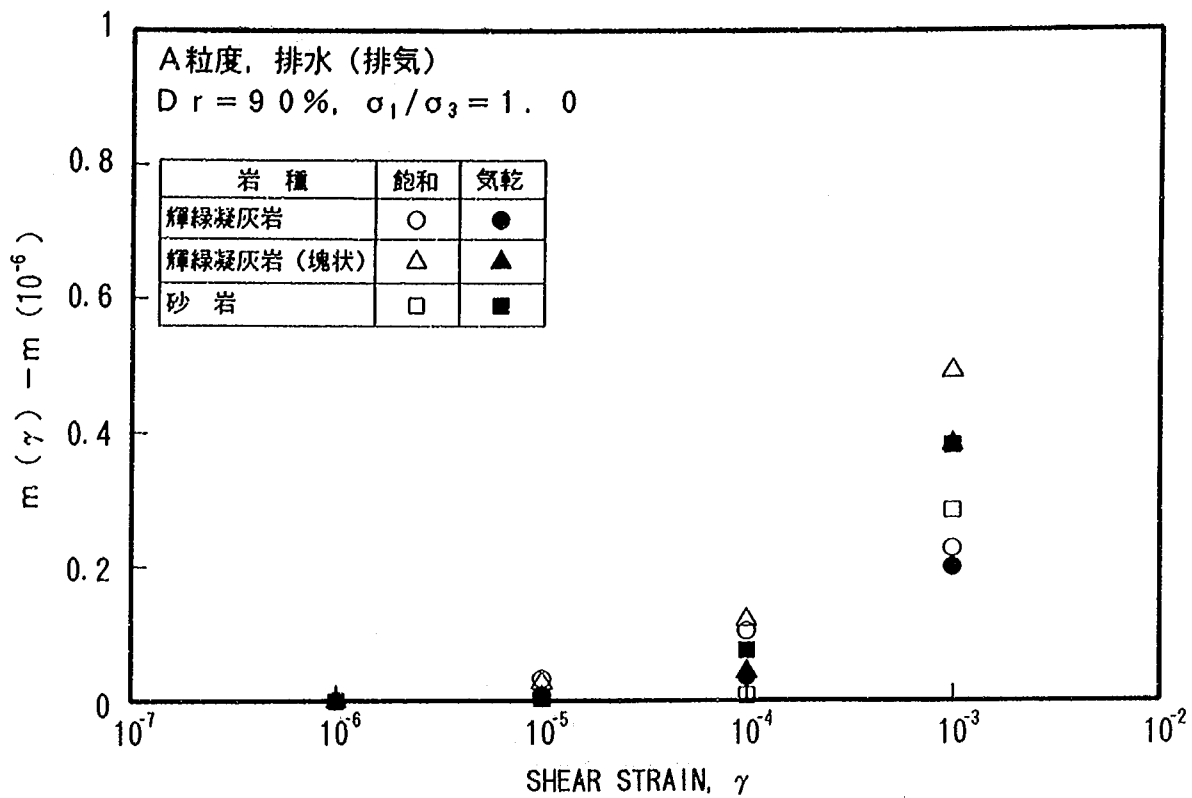


図-3.46 飽和・気乾条件によるせん断剛性率の拘束圧依存性の比較

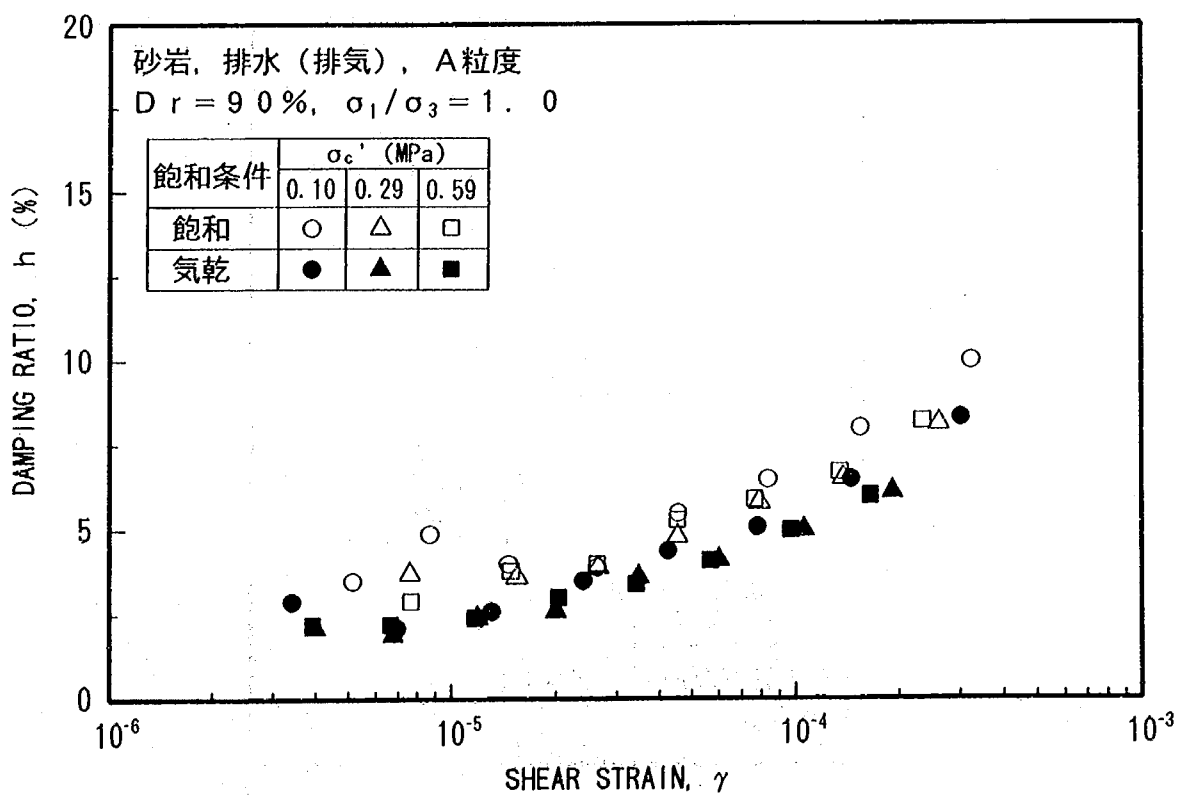


図-3.47 飽和・気乾条件による減衰定数の比較

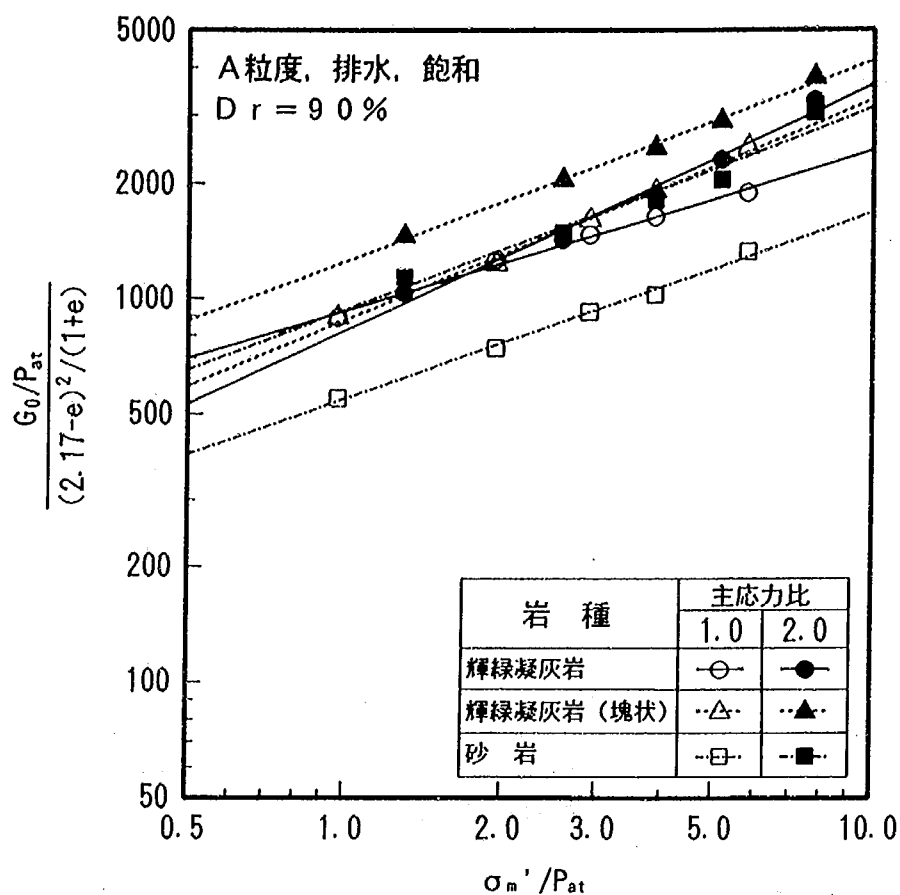


図-3.48 主応力比の差による $(G_0/P_{at})/\alpha \sim (\sigma'_m/P_{at})$ 関係の比較

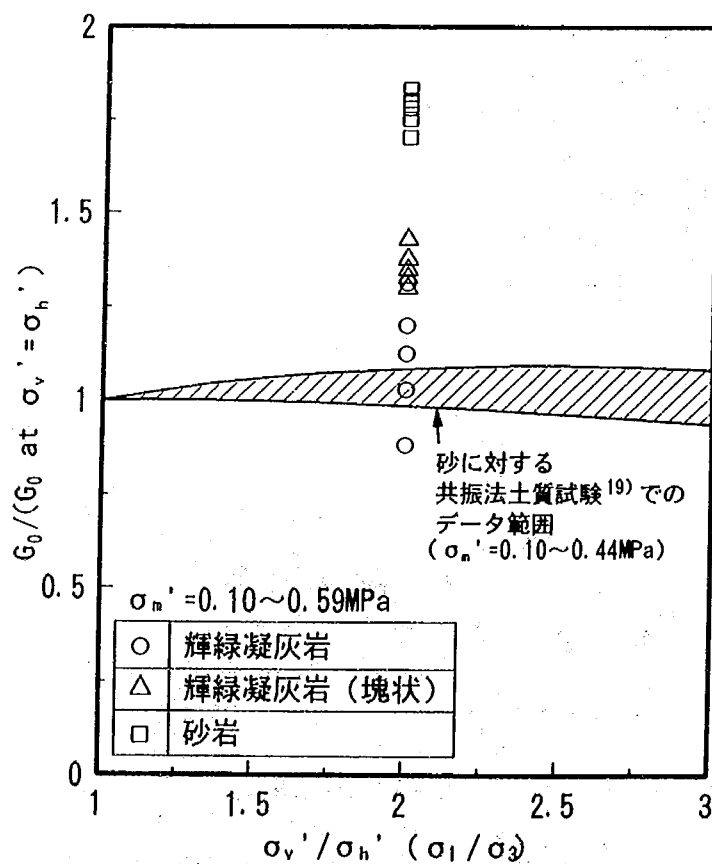


図-3.49 初期せん断剛性率 G_0 におよぼす主応力比の影響

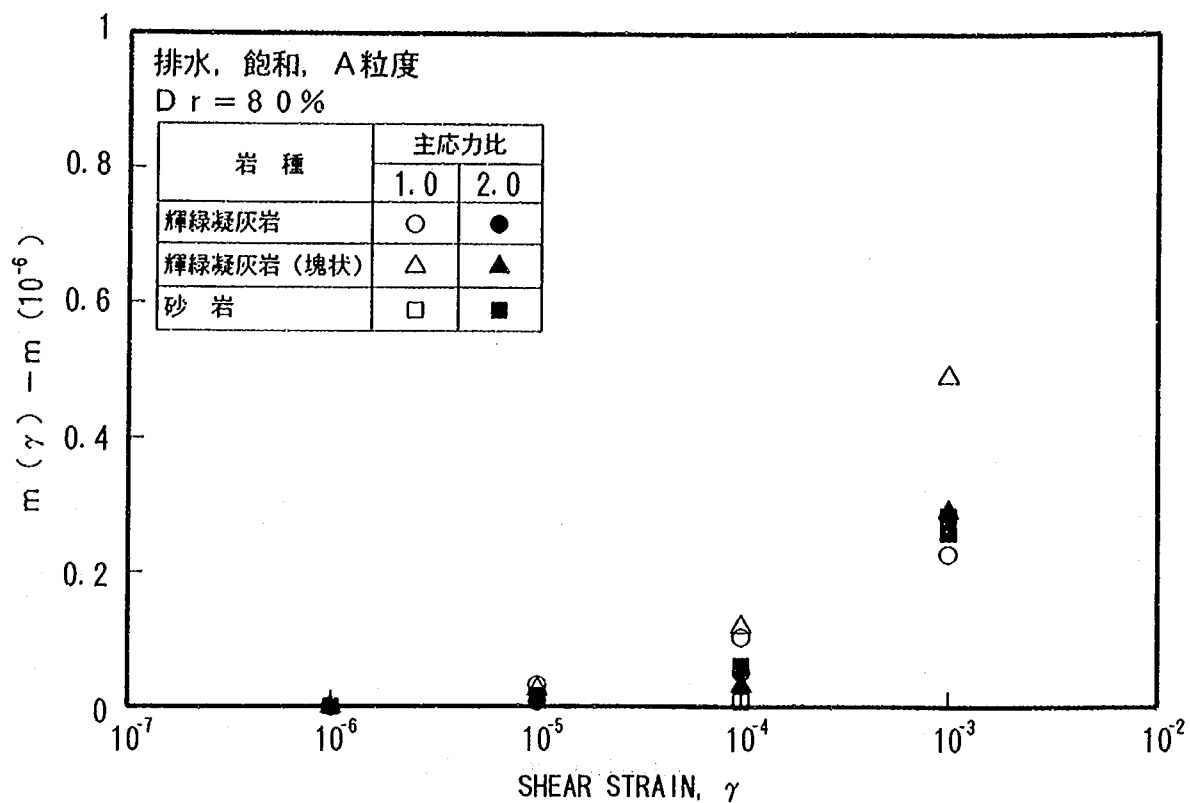


図-3.50 主応力比の違いによるせん断剛性率の拘束圧依存性の比較

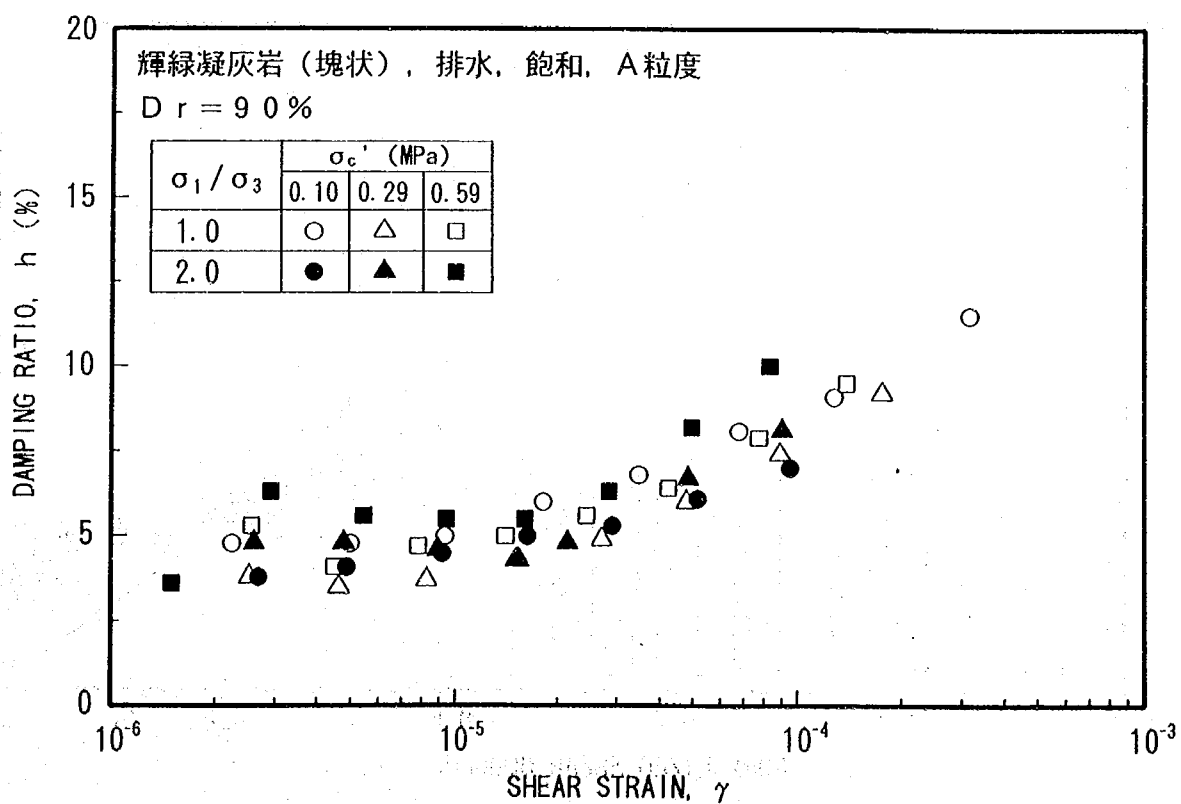


図-3.51 主応力比の違いによる減衰定数の比較

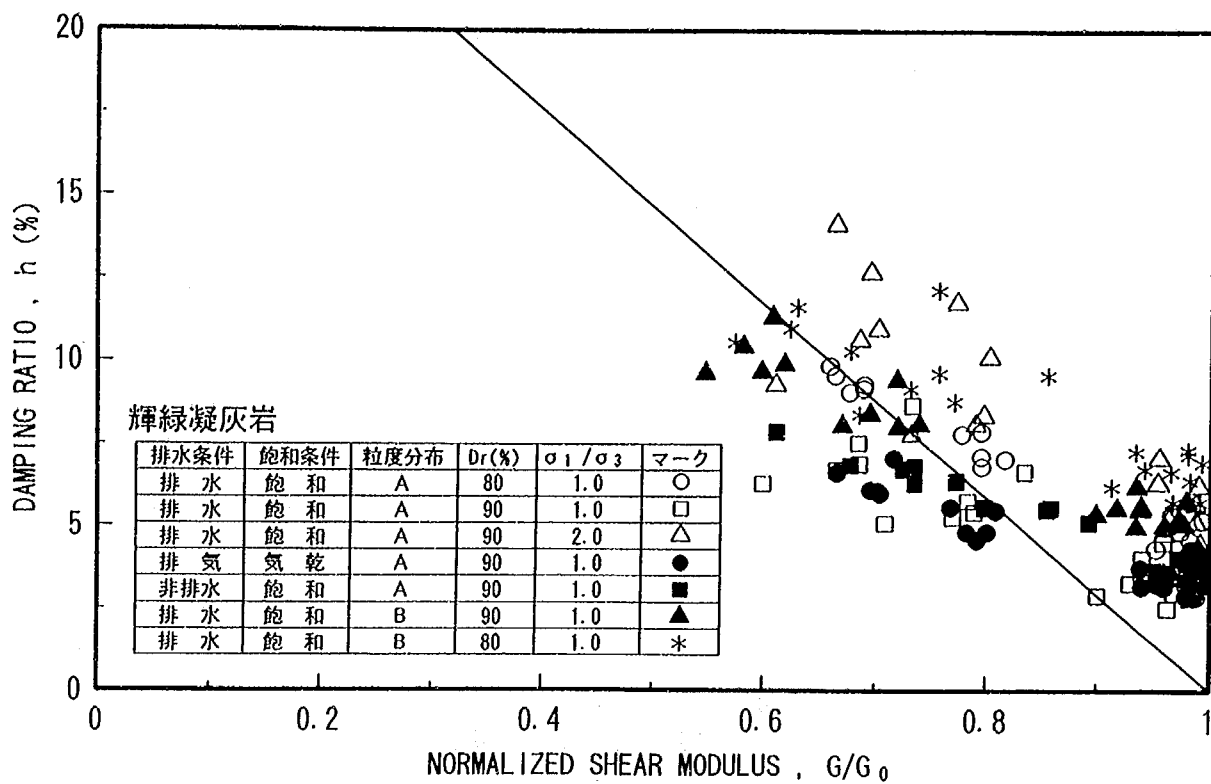


図-3.52(a) $h \sim G/G_0$ 関係 (輝緑凝灰岩)

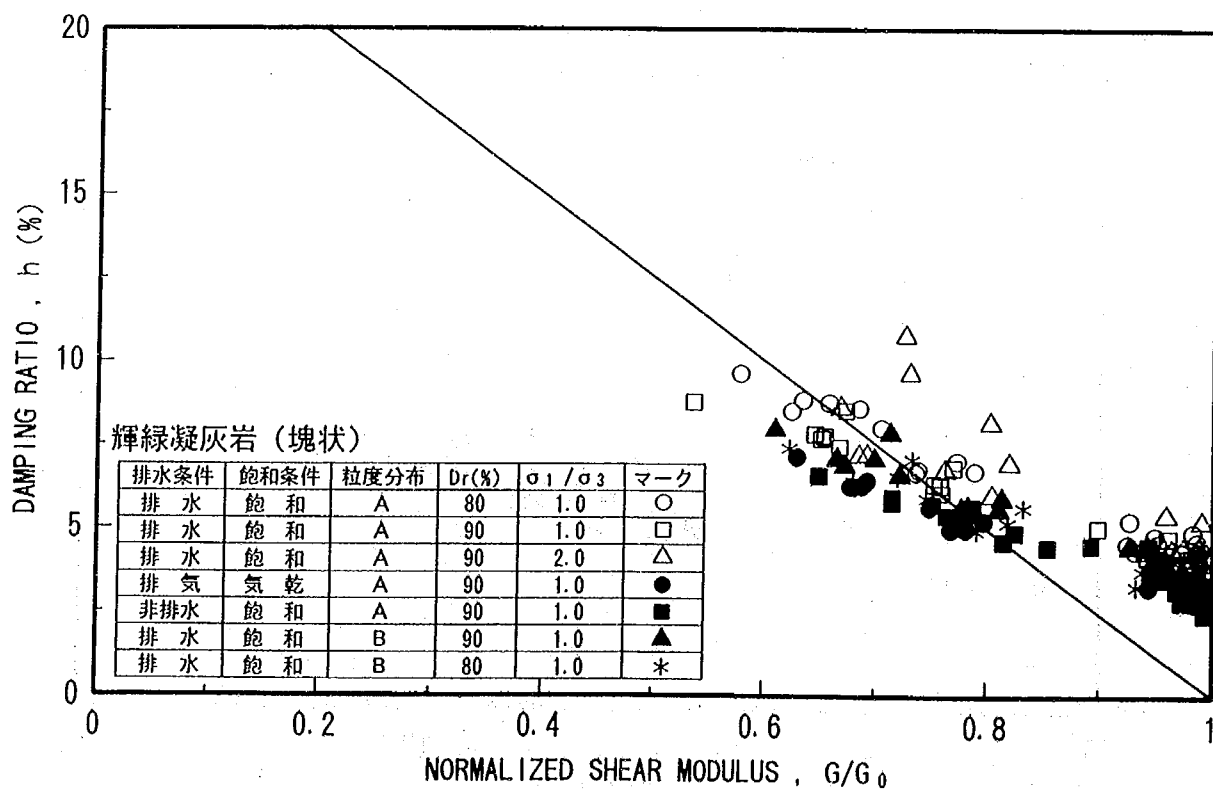


図-3.52(b) $h \sim G/G_0$ 関係 (輝緑凝灰岩 (塊状))

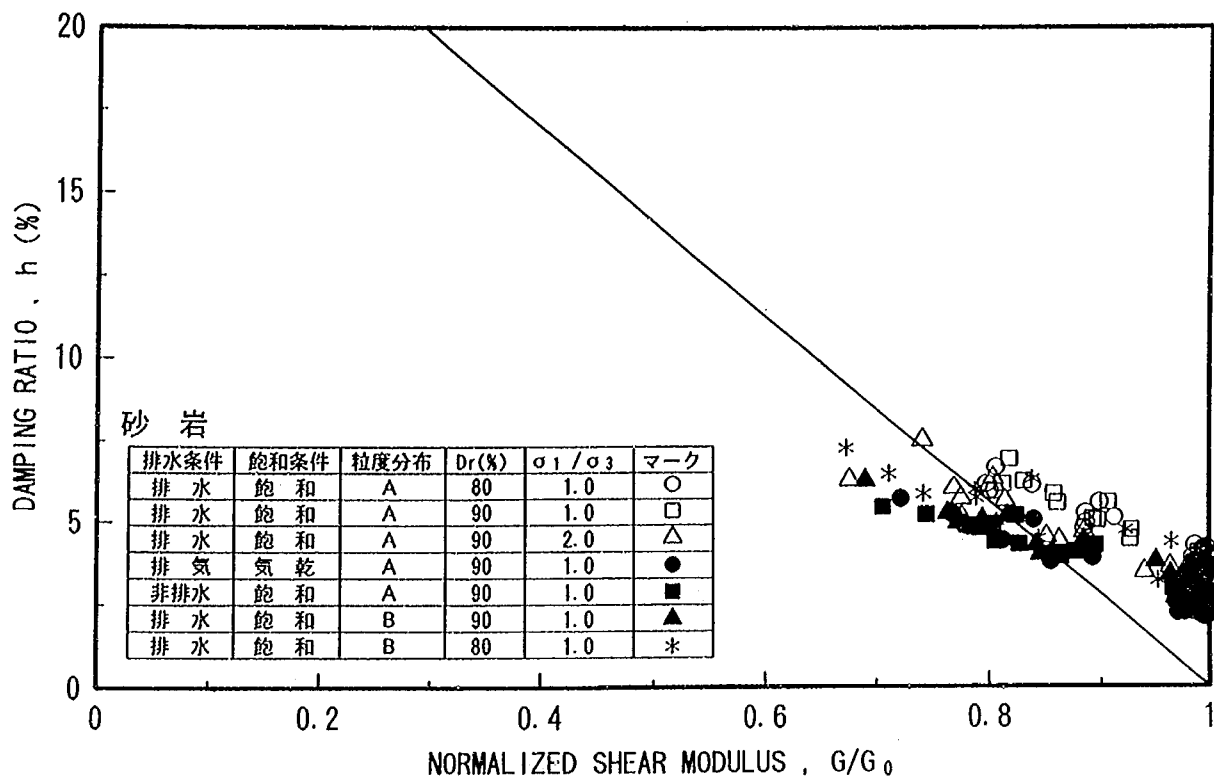


図-3.52(c) $h \sim G/G_0$ 関係 (砂岩)

4. ま と め

本研究では、フィルダムのロック材に用いられる輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）および砂岩の3種類の岩種の粗粒材料に対して、密度、拘束圧、粒度分布、排水条件、飽和条件、および主応力比を変化させて繰返し三軸試験を実施し、それらパラメータが粗粒材料の動的変形特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。試験は供試体寸法直径 300mm × 高さ 600mm の大型振動三軸試験機により実施した。各パラメータの影響は以下のようにまとめられる。

- ①ひずみ依存性： せん断剛性率比 G/G_0 のせん断ひずみ γ 依存曲線は従来の粗粒材料における研究結果とほぼ一致した。しかし、減衰定数 h のせん断ひずみ γ 依存曲線については今回用いた粗粒材料における試験結果は従来の粗粒材料における研究結果より幾分大きい。
- ②密度、拘束圧の影響： せん断剛性率 G と間隙比 e ・拘束圧 σ_c の関係は、相対密度が 80 ~ 90%、せん断ひずみ $\gamma = 1 \times 10^{-6} \sim 10^{-3}$ の範囲では、Hardin らの提案式 (3.5) 式との相関性は良好である。また、 G には拘束圧依存性があり、 γ の増大に対する G の減少の程度が小さくなっている。これは、他の粗粒材料やきれいな砂の試験においても同様の傾向が確認されている。減衰定数 h と間隙比 e ・拘束圧 σ_c の関係は、相対密度が 80 ~ 90%、 $\gamma = 1 \times 10^{-6} \sim 10^{-3}$ の範囲では、(3.8) 式との相関性は比較的良好である。
- ③粒度分布の影響： 粒度分布による影響については、3 岩種とも均等係数 U_c が 4 ~ 10 程度の範囲では均等係数が大きくなるにつれてせん断剛性率が低下する傾向を示している。これは、他岩種の斑れい岩、粗粒玄武岩および緑色凝灰岩の粗粒材料においても同様の傾向が確認されている。
- ④岩種の影響： 材料の岩種により、せん断剛性率 G は大きく影響を受ける。輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩（塊状）および砂岩では $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ 付近で輝緑凝灰岩と輝緑凝灰岩（塊状）の G はほぼ同じ値となるが、砂岩はやや小さくなっている。しかし、 $\gamma = 1 \times 10^{-3}$ 付近では 3 岩種とも同程度の値となる。また、減衰定数は $U_c = 4.6$ の粒度分布の場合は岩種間で差があるが、 $U_c = 10.5$ の場合ではほとんど差はなかった。
- ⑤排水条件の影響： 3 岩種の初期せん断剛性率 G_0 は非排水条件で載荷した場合は同程度の値を示すが、排水条件の場合は輝緑凝灰岩と輝緑凝灰岩（塊状）では非排水条件よりも大きくなり、砂岩では小さくなる。また、減衰定数については排水条件の場合の方が非排水条件下よりも僅かに大きくなる。
- ⑥飽和条件の影響： 輝緑凝灰岩および輝緑凝灰岩（塊状）では、試験供試体の飽和・気乾状態によるせん断剛性率の差は認められなかった。砂岩では、飽和させた供試体で繰返し試験したせん断剛性率は気乾状態での結果よりも小さくなった。
- ⑦主応力比の影響： 輝緑凝灰岩では主応力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ のときの初期せん断剛性率 G_0 は $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ の

ときの G_0 とほぼ同程度であるが、砂岩では $\sigma_1 / \sigma_3 = 2$ のときの G_0 の方が 1.8 倍程度、輝緑凝灰岩（塊状）では 1.5 倍程度であった。

- ⑧せん断剛性率と減衰定数の関係： G と h の関係は Hardin and Dmievich により (3.9) 式が提案されているが、ひずみレベルが大きい領域に相当する $0.5 < G / G_0 < 0.8$ の範囲では (3.9) 式との相関性は比較的良好であった

参考文献

- 1) 松本徳久, 渡辺和夫, 大野一昭 (1984): 大型せん断装置を用いた標準砂とロック材料の動的変形特性試験 - 中空ねじり単純せん断試験・中実三軸圧縮試験 -, 土木研究所資料, 第 2132 号
- 2) 松本徳久, 安田成夫, 境野典夫 (1984): 大型繰返し三軸試験機を用いた粗粒材料の動的物性試験, 土木研究所資料, 第 2146 号
- 3) Marsal, R.J. (1972): Mechanical properties of rockfill, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, pp.109-200.
- 4) 土質工学会 (1990): 土質試験の方法と解説, pp.63
- 5) 中村昭, 松本徳久, 安田成夫, 岩下友也, 多賀恭一, 大久保雅彦, 荒川昭治 (1994): 粗粒材料の動的変形特性 - 自動計測システムによる大型繰返し三軸試験 -, 土木研究所資料, 第 3312 号
- 6) Yasuda, N and Matsumoto, N (1993): Dynamic deformation characteristics of sands and rockfill materials, Canadian Geotechnical Journal, No.30, pp.747-757.
- 7) Hynes, M.E., Wahl, R.E., Donaghe, R.T. and Tsuchida, T. (1988): Seismic stability evaluation of Folsome Dam and reservoir project, Report No.4 Mormon Island auxiliary dam-phase I, Technical report GL-87-14, Corps of Engineers, Department of the army, WES.
- 8) Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1984): Moduli and damping factors for Dynamic analysis of cohesionless soils, Report No.EERC84-14, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- 9) Konno, T, Ishihara, K, Suzuki, Y, Akino, K, Iizuka, S, and Tateishi, A (1993): Gravelly soil properties by field and laboratory tests, Proceedings of Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering at St.Louis, pp.575-594.
- 10) Shibuya, S., Kong, X.J., and Tatsuoka, F. (1990): Deformation characteristics of gravels subjected to monotonic and cyclic loading. Proceedings of 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.771-776.
- 11) Hatanaka, M., Suzuki, Y., Kawasaki, T. and Endo, M. (1988): Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed gravel, Soils and Foundations, Vol.28, No.4, JSSMFE, pp.57-68.
- 12) 松本康広, 西尾伸也, 馬場幸吉, 後藤 茂, 玉置克之, 赤川 敏 (1986): 凍結採取された不覚覧砂礫試料の動的強度変形特性, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.89-94.
- 13) Iwasaki, T., Tatsuoka, F and Takagi, Y (1978): Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, Soils and Foundations, Vol.18, No.1, pp.39-56.
- 14) 松本徳久, 安田成夫, 木下 靖, 大久保雅彦 (1991): ロック材料の動的変形特性とせん断強度, 土木研究所資料, 第 2932 号
- 15) 中村昭, 安田成夫, 太田直之, 高橋三津彦 (1995): 凍結採取法による不攪乱砂礫材料の静的強度及び動的変形・強度特性, 土木研究所資料, 第 3325 号

- 16) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 須藤秀雄 (1977): 砂のせん断変形係数に与える応力条件の影響, 第 12 回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.413-416
- 17) 国生剛治, 桜井彰生, 江刺靖生 (1979): 三軸試験装置を用いた微小ひずみから大ひずみまでの土質動的試験法の開発と砂の物性試験への適用, 電力中央研究所報告, No.379002 号
- 18) Hardin, B.O., and Richart, F.E.J. (1963): Elastic wave velocities in granular soils, Journal of SMFD, Proceedings of ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.33-65
- 19) 龍岡文夫 (1979): 第 3 章 土の動的変形特性, 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.
- 20) 松本徳久, 安田成夫, 大久保雅彦, 木下靖 (1990): 粗粒材料のせん断強度と動的変形特性, 土木学会論文集, No.424/ III -14, pp.95-104
- 21) 安田成夫, 荒川昭治, 大久保雅彦, 松本徳久 (1987): 材料の相違による飽和粗粒材料の動的変形特性への影響, 第 19 回地震工学研究発表会, 土木学会, pp.217-220.
- 22) Hardin, B.O., and Dmievich, V.P. (1972): Shear modulus and damping in soils, Design equations and curves, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of ASCE, Vol.98, No.SM7, pp667-692.

謝 辞

本研究を行うにあたり、前フィルダム研究室主任研究員 安田 成夫氏（現企画部企画課長）には、試験計画等において適切なお助言を賜りました。ここに、記して謝意を表します。

粗粒材料の動的変形特性における
影響因子の評価

I S S N 0386 - 5878
土木研究所資料 第3404号
平成 8 年 1 月 (1996年)

フィルダム研究室 室 長 中 村 昭
研 究 員 岩 下 友 也
前部外研究員 高 橋 三津彦

要 旨

本資料は、フィルダムのロック材に用いられる輝緑凝灰岩、輝緑凝灰岩(塊状)および砂岩3種類の岩種の粗粒材料に対して、繰返し変形特性三軸試験を実施し、その結果をまとめたものである。試験は供試体寸法直径300mm×高さ600mmの大型振動三軸試験機を用い、試験条件として密度、拘束圧、粒度分布、排水条件、飽和条件、および主応力比をパラメータとして変化させて行った。それらのパラメータが粗粒材料の動的変形特性に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：粗粒材料、動的変形特性、繰返し三軸試験、せん断剛性率、減衰定数

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室
御 中

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3404 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名

印

土木研究所資料第3404号

