

土木研究所資料

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

——中空ねじり単純せん断試験・中実三軸圧縮試験——

昭和59年 6 月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright ©(発行年西暦) by P. W. R. I.

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

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

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

——中空ねじり単純せん断試験・中実三軸圧縮試験——

フィルダム研究室

松 本 徳 久

渡 辺 和 夫

大 野 一 昭^{*}

^{*}佐藤工業(株)。昭和58年4月～昭和59年6月の間、(財)
土木研究センターからの部外研究員として在籍。

要 旨

ロック材料の強度変形特性、特に動的変形特性を求めるために製作した大型ねじり単純せん断試験装置を中心に以下の三項目についてとりまとめている。

- ① 単純せん断試験に関する既往の研究
- ② 大型ねじり単純せん断試験装置の機能・精度
- ③ 実材料を用いた試験方法・結果

前項の①については文献調査結果をとりまとめている。②については、実験室内で機能・精度確認試験を実施した結果、製作時仕様を十分に満足しており装置としての信頼性が確認できた。③については、標準砂を用いた静的せん断試験とロック材を用いた繰返し载荷試験を実施した。静的試験では既往の試験値と一致した結果が得られた。繰返し試験ではせん断ひずみが $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$ の範囲でのせん断ひずみとせん断弾性定数および減衰定数の関係と密度が変形性に与える影響が得られた。

キ ー ワ ー ド : ねじり単純せん断試験・ロック材料・フィル材料・動的変形特性・三軸
くり返し試験

目 次

1. ま え が き	1
2. 単純せん断試験に関する既往の研究	3
3. 大型せん断試験装置	16
3.1 設計の基本方針	16
3.1.1 装置に対する基本的条件	16
3.1.2 供試体に作用させる応力の大きさ	18
3.1.3 供試体の形状と大きさ	18
3.1.4 繰り返し载荷周波数の検討	22
3.1.5 制御試験項目および計測項目と精度	25
3.1.6 装置タイプの検討	26
3.1.7 側圧の加圧方式	28
3.1.8 装置基礎	29
3.2 試験装置の機能と構造	29
3.2.1 装置の基本構成	30
3.2.2 三軸圧力容器	30
3.2.3 側圧加圧装置	32
3.2.4 軸力载荷装置	32
3.2.5 ねじり载荷装置	34
3.2.6 制御・計測装置	40
3.2.7 動力装置	45
3.2.8 供試体作成装置	45
3.2.9 装置基礎およびその他	47
3.3 較正および精度の検定	47
3.3.1 各検出器の較正および精度の検定	47
3.3.2 制御精度の検定	64
3.4 供試体の応力・ひずみの計算	68
3.4.1 中空供試体における応力とひずみ	68
3.4.2 せん断応力 τ , せん断ひずみ γ	74
3.4.3 軸応力 σ_a , 側圧 σ_r	78
3.4.4 軸ひずみ ϵ_a , 体積ひずみ ϵ_v	78
3.4.5 主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 主応力方向 ψ	79
3.5 単純せん断変形に関する確認試験	80
3.5.1 試験目的	80
3.5.2 試験方法	81

3.5.3	試験結果	82
4.	豊浦砂を用いた予備試験	89
4.1	試験目的	89
4.2	試験材料	89
4.3	試験方法	89
4.3.1	試験ケース	89
4.3.2	供試体の作成方法	90
4.3.3	せん断試験方法	90
4.4	試験結果	98
4.4.1	静的試験結果	98
4.4.2	繰り返し試験結果	111
4.5	大型せん断試験装置を用いた静的試験における問題点	134
4.6	ま と め	140
5.	粗粒材料の繰り返し試験	143
5.1	試験目的	143
5.2	試験材料	143
5.2.1	搬入時材料フルイ分け	143
5.2.2	物理試験	143
5.2.3	試験粒度の設定	144
5.2.4	締固め試験	144
5.3	試験方法	147
5.3.1	せん断応力履歴に関する確認試験	147
5.3.2	試験ケース	151
5.3.3	供試体の作成方法	151
5.3.4	せん断試験方法	151
5.3.5	せん断ひずみの測定方法について	152
5.4	試験結果	152
5.4.1	繰り返し中実三軸圧縮試験結果	152
5.4.2	繰り返し中空ねじり単純せん断試験結果	158
5.4.3	中実および中空試験結果の比較	180
5.5	大型せん断試験装置を用いた繰り返し試験における問題点	202
6.	結論および今後の問題点	216
参考文献		225
参考資料 デジタイザを用いたデータ整理方法		229

1. ま え が き

我が国では、これまで多数のロックフィルダムが築造され、経済性あるいは地質的適合性などから、その数は今後も増加することが推定される。しかも、最近ではダム高が100mを超える大規模なロックフィルダムが数多く建設され、計画されている。したがって、ロックフィルダム堤体材料の物性を精度良く求めて、より合理的・経済的なロックフィルダムの設計・施工方法を確立することが必要である。

ロックフィルダム堤体の設計を行うに際しては、堤体材料の力学的物性を精度良く求めておく必要があり、特にダム堤体積の過半以上を占め、堤体の力学的安定性を分担しているロック材料についてその物性を知ることが必要である。求める力学的物性としては、主に静的応力状態でのせん断強さ(c, ϕ)、および動的応力状態での変形特性(G, h)がある。

堤体材料のせん断強さを求める室内大型試験としては、試験時の応力状態が明確で比較的安定した試験値が得られることから三軸圧縮試験が数多く採用されている。また、直接せん断試験も試験法および試験機の構造が単純で、せん断面上の垂直応力 σ_n 、せん断応力 τ が直接測定できるなどのために三軸圧縮試験に次いでよく普及している。一方、変形特性を求める試験としては、上記の三軸圧縮試験が用いられている。

実際の堤体の応力状態について考えると、せん断応力の増加によって主応力方向は連続的に回転して単純せん断変形状態（高さ方向のせん断ひずみ分布が一様であるような変形状態をいう）となる。これは静的な場合であって、動的な場合、つまり地震時の場合には上記のような応力ひずみ状態において地震によるランダムな繰り返し荷重が作用するものと考えられる。これに対して室内試験時の応力・ひずみ状態を考えると、三軸圧縮試験の場合、主応力方向は鉛直又は水平に固定され、軸対称ひずみ状態であり、上記の実際の堤体の応力・ひずみ状態とはかなり異なっている。また、単純せん断試験では、主応力方向が連続的に回転した単純せん断変形状態を再現することができる。しかし、直接せん断試験から発展してきたSGI型、Cambridge型の単純せん断試験は供試体境界端面に、せん断応力を十分に、または全く発生させ得ないとか、供試体隅角部での応力集中が生じやすいなど、実際には、単純せん断から程遠い状態になっている。そこで、最近では端面の影響のないendlessのねじり単純せん断試験が開発されてきた。この試験の特徴は

- ①供試体に与える応力(τ_{at} , σ_a , σ_r)をそれぞれ独立に制御できる。
- ②試験時の応力・ひずみの大きさが計測できる。
- ③供試体境界端面の影響のないendlessの中空円筒供試体である。
- ④単純せん断変形試験ができる。

などが挙げられる。このねじり単純せん断試験による研究は、主に砂を対象として静的、動的な強度および変形特性を求めるための試験が数多く行われている。しかし、粗粒材料を対象とした研究例はほとんどないのが現状である。

以上のことから、現実に近い応力状態における粗粒材料の強度、変形特性を求めるため、ねじり単純

せん断試験を行うことができる大型せん断試験装置を製作することにした。なお、装置の基本的な機能としては、従来法である三軸試験方法とねじり単純せん断試験方法の両方を行うことができ、また、それぞれ静的試験、繰り返し試験が可能であることとした。

そして、この大型せん断試験装置を用いて、以下の目的に従って予備試験を実施することにした。

- ①大型せん断試験装置の構造・機能が仕様を満足しているかどうかを確かめ、検出器の精度および制御精度を求めること。
- ②豊浦砂を用いて中実・中空供試体でそれぞれ静的試験・繰り返し試験を行い、試験機の信頼性を確かめること。
- ③粗粒材料を用いて繰り返し中実・中空試験を行い、動的な変形特性を求めると共に試験法の違いによる影響を調べること。

本報告書は大型せん断試験装置の設計の基本方針や機能・構造と予備試験結果についてとりまとめたものである。

2. 単純せん断試験に関する既往の研究

堤体材料の力学的特性を求めるためのせん断試験としては、一般的に三軸圧縮試験又は直接せん断試験が多く用いられている。三軸圧縮試験としては、直径 30～60 cm、高さ 60～120 cm の供試体寸法が数多く普及しており、供試体に加わる応力状態を明確に把握し得るし、また、構造が簡単で精度も良いという優れた長所を数多く持っている。また、直接せん断試験は試験法および試験機の構造が単純で、せん断面上の垂直応力 σ_N 、せん断応力 τ が直接測定できるなどのために三軸圧縮試験に次いでよく普及している。しかし、試料への過大な変形の拘束性、逐次破壊（せん断箱の前後端に応力集中が起こって生じる進行性破壊）、排水条件がコントロールできない、変形係数が測定できないなどの欠点を有している。

以上のような三軸圧縮試験や直接せん断試験などの室内試験の主な目的は原位置における堤体材料の強度変形特性を求めることにある。したがって、原位置の応力・ひずみ状態をできるだけ忠実に再現した試験を行うことが望ましい。

原位置の堤体材料の応力・ひずみ状態は図 2.1 に示すような状態であると考えられる。

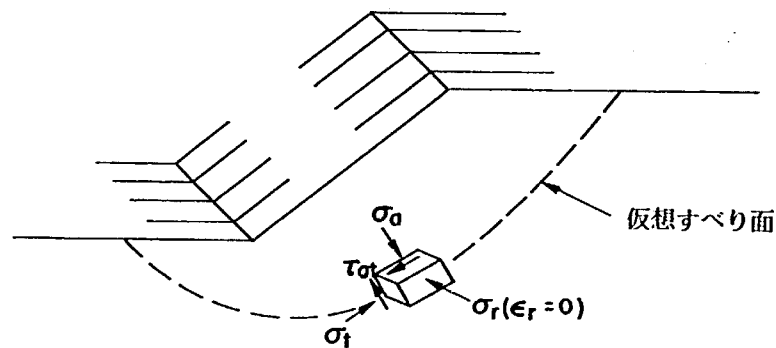


図 2.1 原位置の堤体材料の応力・ひずみ状態

この図から堤体内の要素の応力・ひずみ状態は①せん断応力 (τ_{at}) が作用することによって最大主応力方向 (σ_1) は鉛直方向から連続的に回転する。② $\sigma_a \neq \sigma_1 \neq \sigma_r$ の異方圧密状態である。③堤体の長手方向には変形の生じない ($\epsilon_r = 0$) 平面ひずみ状態である。④せん断応力 (τ_{at}) の作用によって単純せん断変形状態となると考えられる。このような原位置の応力・ひずみ状態を再現できる試験としては単純せん断試験がある。通常の三軸圧縮試験と単純せん断試験を比較すると次のようなことが言える¹⁾。

- ① 三軸圧縮試験では、試料の堆積時の水平面に対して 90° の方向に最大主応力 σ_1 の方向が向いているが、単純せん断試験では主応力 σ_1 の方向はせん断するに従って、鉛直方向から回転してゆき、やがて、破壊時には鉛直方向からおよそ 45° 傾いた方向になる。
- ② 三軸圧縮試験では、主応力方向は鉛直あるいは水平に固定されるのに対し、単純せん断試験では、せん断応力 τ の増加で主応力の方向が回転し、より原位置に近い条件下での強度・変形特性を調べ

ることができる。

- ③ 三軸圧縮では $\sigma_2 = \sigma_3$ の状態であるが、単純せん断では平面ひずみ状態であり、 $\sigma_2 \neq \sigma_3$ と考えられる。
- ④ 試験装置については、三軸圧縮では、構造が簡単で、精度も良く、応力状態も明確に把握し得るが、単純せん断ではせん断応力による回転モーメントが発生することによって変形の非一様性、上載圧の非一様が生じる。

このように単純せん断試験は、三軸圧縮試験に比べより原位置に近い応力・ひずみ状態を再現することはできるが、一面せん断試験などの宿命的な欠点（せん断応力による回転モーメント）を解消することはできない。そこで最近、上記のような欠点がないねじり単純せん断試験が開発されてきている。以上のように単純せん断試験は、一面せん断試験などから発展してきた単純せん断試験とねじり単純せん断試験に大別できる。前者には、ディスク状の供試体を用いたNGI型、SGI型単純せん断試験や直方体の供試体を用いたCambridge型単純せん断試験があり、後者には、中実あるいは中空円筒形の供試体を用いたねじり単純せん断試験がある。両者の試験の比較を表2.1に示す。

今までに開発された単純せん断試験機の特徴及び問題点を表2.2、2.3に示す。なお、この表をまとめる際には文献1) 土質学会編「ロックフィル材料の試験と設計強度」を参考にした。

表 2.1 単純せん断試験とねじり単純せん断試験の比較

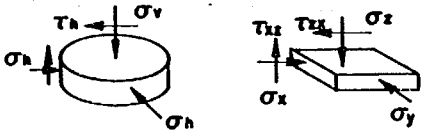
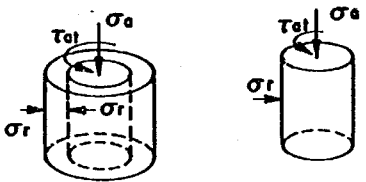
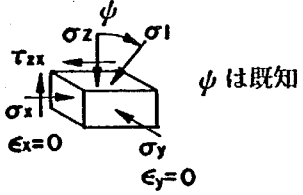
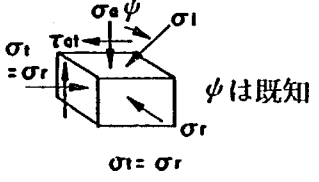
	単純せん断試験	ねじり単純せん断試験
供試体の形状	NGI 型 Cambridge 型 	中空タイプ 中実タイプ 
圧密状態	K ₀ 圧密でCambridge型の場合 K ₀ 値は既知であるがその他は未知	等方, 異方, K ₀ 圧密が可能で K ₀ 値は既知
制御成分	せん断応力 τ , 垂直応力 σ_N の2成分	せん断応力 τ_{at} , 軸応力 σ_a , 側圧 σ_r の3成分
主応力方向	Cambridge型の場合  ϕ は既知	 ϕ は既知
ひずみ状態	単純せん断変形 (Cambridge 型の場合 平面ひずみ変形)	単純せん断変形
特徴及び問題点	原位置との対応は良い 水平方向のせん断応力によって端部では鉛直方向のせん断応力が発生し得ないので, 直角を保とうと回転するため, 供試体中央のみ単純せん断変形をしている。(せん断応力の共役性が保たれていない。) また, これによって変形の非一様性, 上載圧の非一様性が生ずる。 NGI 型, SGI 型などは応力状態が不明確である。	左記のような端面の影響をなくしたエンドレスタイプである。(せん断応力の共役性は保たれている) τ, σ_a, σ_r の独立制御によっていろいろな応力状態を再現できる。 $\sigma_r = \sigma_t$ であり, この事がどのような影響を及ぼすか不明である。 τ_{at}, τ_{al} の分布が半径方向に非一様である。

表 2.2 単純せん断試験機の特徴及問題点

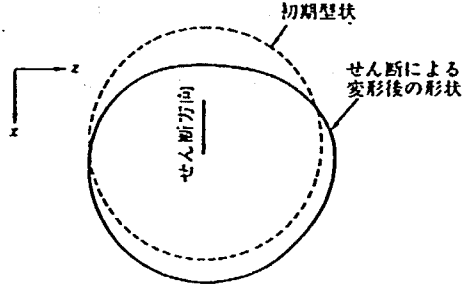
1	研究者名	L. Bjerrum, A. Landva ²⁾ (1966)	
	試験機の種類	NGI型単純せん断試験機 (図 2.2)	
	特徴	ワイヤーで補強したメンブレンを使用してせん断中常に断面積が一定となるようにしたもの	
	問題点	供試体端面にせん断応力が働かないので、必然的に応力の分布が極めて非一様になり、かつ主応力の大きさと方向も不明となる。 断面積が一定では周長が一定を保つだけで面積一定とは限らない。 排水条件が考慮できない。 供試体寸法 直径 8 cm, 高さ 1 cm	
		 図 2.3 NGI型単純せん断試験におけるせん断に伴う供試体断面形状の変化 (Budhu, 1980)³⁾	
2	研究者名	W. Kjellman ⁴⁾ (1951)	
	試験機の種類	SGI型単純せん断試験機 (図 2.4)	
	特徴	薄いアルミリングを重ねて供試体の横方向への変形を拘束しているもの	
	問題点	NGI型にも言えることであるが、せん断応力による回転モーメントが発生する結果 ⑤供試体に曲げ (回転) が生じやすく、供試体上下面の平行を保ったようなせん断を行うのが難しい。⑥この回転モーメントに対抗するために、必然的に上載圧分布の非一様性が生ずる。 試験を行う当り重要な点は、供試体の自由な収縮を許し、すべての上載圧が供試体の下端まで一様に加わるようにすること、またせん断応力は供試体には上下端面のみで伝えられるので、すべりが供試体上下端で生じないようにすることである。 供試体寸法 4.3 cm × 4.3 cm × 高さ 10 cm	

表 2.2 (つづき)

3	研究者名	K. H. Roscoe ⁵⁾ (1953)
	試験機の種類	Cambridge型単純せん断試験機 (図 2.5)
	特徴	直方体形状の供試体をロードセル付きの剛板でせん断応力, 垂直応力を加えるものでかなり複雑な機構をもっている。
	問題点	端面のマサツ力によってせん断応力を発生させているが, この端面にマサツがあるため端面にアーチングが生じ, 端面に対する垂直力や端面近くの水平面に対する垂直力が乱され, 応力分布が非一様になる。 (注) $\sigma_v = 25 \text{ psi}$ 数字はせん断応力 (psi) $a = 0.13$ $\sigma_v = 33 \text{ psi}$ ピーク時 垂直応力 $a = Sx/h$ 図 2.6 Cambridge 型単純せん断試験における境界応力の分布 (密づめ砂) (Stroud, 1971)⁶⁾ 供試体寸法 6 cm × 6 cm × 高さ 2 cm

表 2.3 ねじり単純せん断試験機の特徴及び問題点

1	研究者名	P. Habib ⁷⁾ (1953)
	試験機の種類	中実ねじり単純せん断試験機 (図 2.7)
	特徴	中央部がくびれた形状の中実供試体で死荷重によってトルクを与えている。
	問題点	半径方向の応力分布の非一様性が大 きいが、右図に示すように、$b =$ 0.22 での ϕ_0 は三軸圧縮における ϕ_0 より も大きいという妥当な結果を得て いる。 $\lambda = \frac{N_2 - N_1}{N_3 - N_1}$ $N_1 \leq N_2 \leq N_3$ N_1, N_2, N_3 は $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ のことである λ は $\lambda = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3}$ のことである 図 2.8 中実ねじり試験における ϕ_0 (Habib, 1953)⁷⁾
2	研究者名	B. B. BROMS, A. O. CASBARIAN ⁸⁾ (1965)
	試験機の種類	中空ねじり単純せん断試験機 (図 2.9)
	特徴	上下端面の張り出しのある中空円筒形の供試体を用い供試体上面を固定して、供試体をねじるために三軸セルそのものを回転させる型式である。
	問題点	この装置では中空供試体の内側と外側の圧力を等しくない状態で試験を行っている。 供試体寸法 外径 12.7 cm, 内径 7.62 cm, 高さ 25.4 cm
3	研究者名	P. V. Lade ⁹⁾ (1972)
	試験機の種類	中空ねじり単純せん断試験機 (図 2.10)
	特徴	図 2.10 に示すように高さに比べて径の大きな中空円筒形の供試体を用いて、4 つのオイルシリンダーによって载荷軸に取り付けられたアームをワイヤーで押し引きしてトルクを加えるものである。

表 2.3 (つづき)

問 題 点	平面ひずみ(PS), 三軸圧縮試験(TC)に比べ, 異常に大きなϕ_0となっているが, これは恐らくhが小さいためにこのような異常な結果が出たのであろう。 供試体寸法 外径 22 cm, 内径 18 cm, 高さ 5 cm	Monterey No. 0 Sand $D_r = 27\%$ TC □ 立方体 ○ 円筒型 $h/d = 2.5$ PS: 立方体 — PS: 直方体 $h/w = 2.3$ 破壊時の $\sigma_n = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ (kgf/cm²) 図 2.11 ねじり単純せん断試験 (TSS) における ϕ_0 と三軸圧縮試験 (TC) と平面ひずみ圧縮試験 (PS) での ϕ_0 の比較例 (Lade, 1972)⁹⁾
4 研究者名	吉見, 大岡¹⁰⁾ (1971)	
試験機のタイプ	リングねじりせん断試験機 (図 2.12)	
特 徴 特 徴	図 2.12 に示すように, 内径 240 mm, 巾 24 mm, 高さ 20 mm のリング形試料を用い, SGI 型と同様の薄いアルミ板を重ねて供試体の横方向の変形を常に拘束した状態でトルクを加える型式である。 しかも, 半径方向へのせん断ひずみ分布の非一様性を解消するために供試体の高さと半径の比が半径方向に一定にするように供試体高さを半径方向に変化させている。	
問 題 点	利根川砂のせん断強度を求めたのが, 図 2.13 である。ϕ_s の D_r に対する変化は PS・RT ともやや小さいが両者の一致度はよいようである。RT では粒子の半径方向への動きのない平面ひずみ状態でせん断しているため, また上下端面に発生する τ_{yz} が小さいためであろう。 供試体寸法 外径 28.8 cm 内径 24 cm 高さ 2 cm	利根川砂 $\phi_0 = \arctan \left(\frac{\tau}{\sigma_v} \right)$ (°) $\phi_0 = \arctan \left(\frac{\tau}{\sigma_v} \right)$ (°) 相 対 密 度 D_r (%) 図 2.13 平面ひずみ圧縮試験 (PSC) とリングねじり試験 (RT) における $\phi_s = \arctan(\tau_f / \sigma_v)$ の比較 (Yoshimi and Rishida, 1981)¹¹⁾

表 2.3 (つづき)

5	研究者名	石原・季 ¹²⁾ (1972), 石原・安田 ¹³⁾ (1975), 岩崎・龍岡・高木 ¹⁴⁾ (1977) 福島・龍岡・木下 ¹⁵⁾ (1981)
	試験機の種類	中実又は中空ねじり単純せん断試験機 (図 2.14~17)
	特徴	どの試験機も基本的には同型式で, 供試体の側面をメンブレンで覆い, 側圧 σ_r をかけることによって主応力の状態を知ることができるようにしたものである。
	問題点	供試体の半径方向のせん断応力・せん断ひずみの分布が非一様である。これは中空の薄肉供試体を用いることで基本的には解決される。 半径方向応力 σ_r と接線方向応力 σ_t は常に一致している。 福島ら (1981)¹⁵⁾ は, $d_o = 10 \text{ cm}$, $d_i = 6 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$ の十分高さの大きい中空円筒形の供試体を用いて, 豊浦砂の強度を求めて小田, 西⁴²⁾ (1978) の PSC と TC の結果と比較したのが図 2.18 である。TSS の ϕ_o と比較すべきものは PSC の $\delta = 45^\circ$ の ϕ_o であり, 両者はよい一致を示している。 豊浦砂 TSS: $\delta = 0.5$ $\delta = 45^\circ (e_o = 0.67)$ PSC: $\delta = 0.22, 0.28, 0.45, 90^\circ$ TC: $\delta = 0.0 (e_o = 0.67)$ 内部摩擦角 ϕ_o (度) 破壊平均主応力 $\sigma_a = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 図 2.18 ねじり単純せん断試験, 平面ひずみ圧縮試験・三軸圧縮試験における ϕ_o の比較 (福島ら, 1981)¹⁵⁾
	供試体寸法	石原・季: 直径 5 cm, 高さ 10 cm 石原・安田: 外径 10 cm, 内径 6 cm, 高さ 7 cm 岩崎・龍岡・高木: 外径 10 cm, 内径 6 cm, 高さ 10 cm 福島・龍岡・木下: 外径 10 cm, 内径 6 cm, 高さ 20 cm

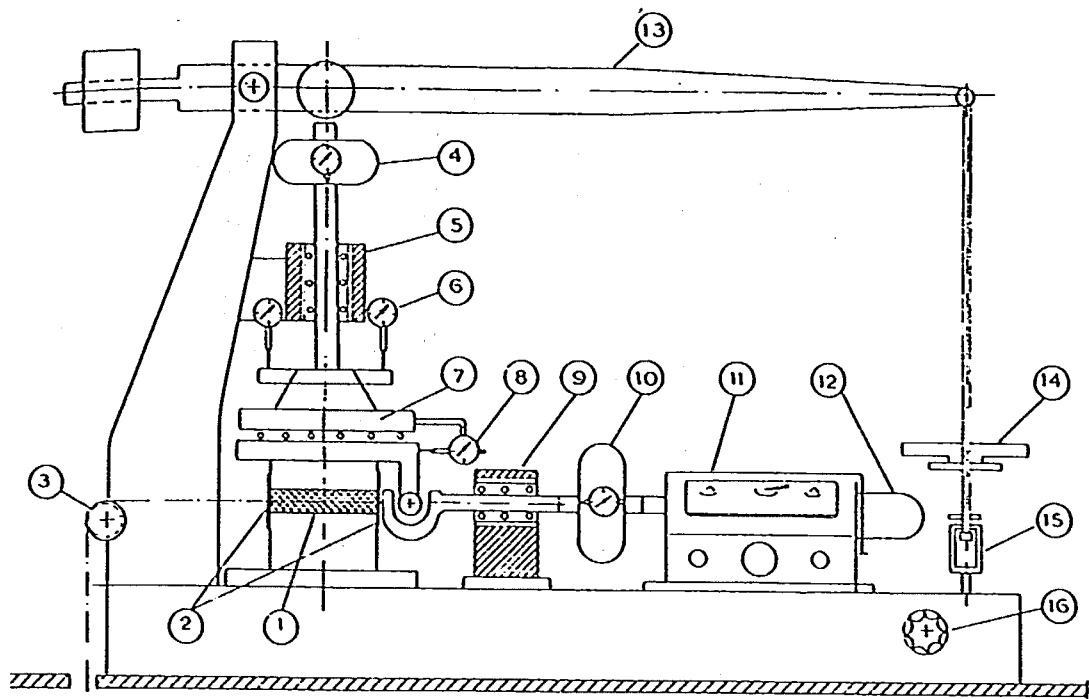
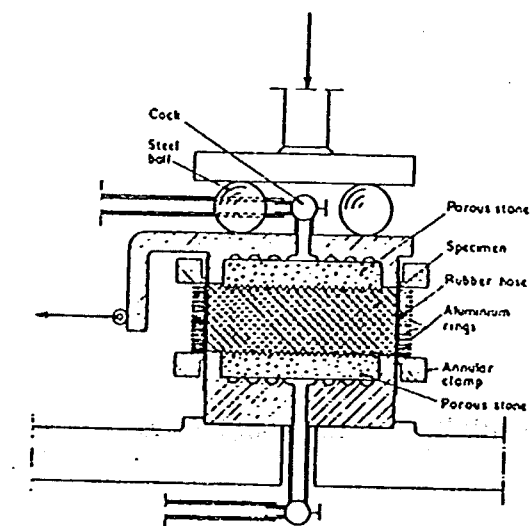
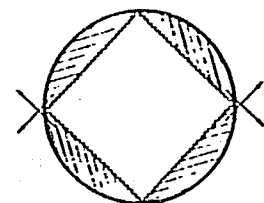


Fig. 5. General principle of direct simple-shear apparatus, design 1965
 1 Sample 2 Reinforced rubber membrane 3 Wheels for applying dead load 4 Load gauge for vertical load
 5 Ball bushing 6 Dial gauges for measurement of vertical deformation 7 Sliding box 8 Dial gauge for
 measurement of horizontal deformation 9 Ball bushing 10 Load gauge for horizontal force 11 Gear box
 12 Exchangeable servogear motor 13 Lever arm 14 Weights 15-16 Clamping and adjusting mechanism used
 for constant-volume tests

図 2.2 NGI 型単純せん断試験機²⁾



S.G.I. routine apparatus: section through central part



S.G.I. research apparatus:
 cross-section of central part

図 2.4 SGI 型単純せん断試験機⁴⁾

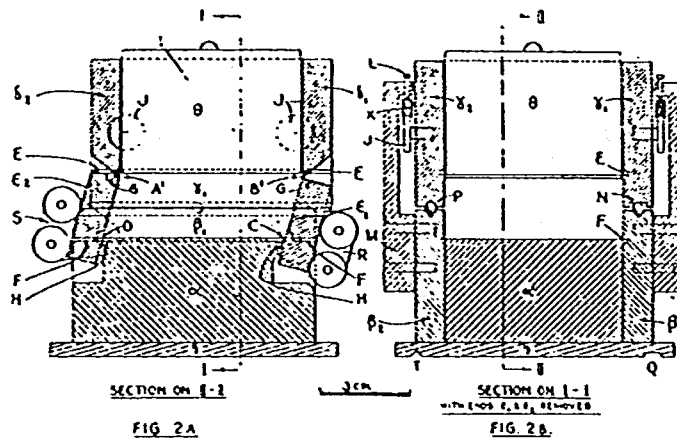


図 2.5 Cambridge型単純せん断試験機⁵⁾

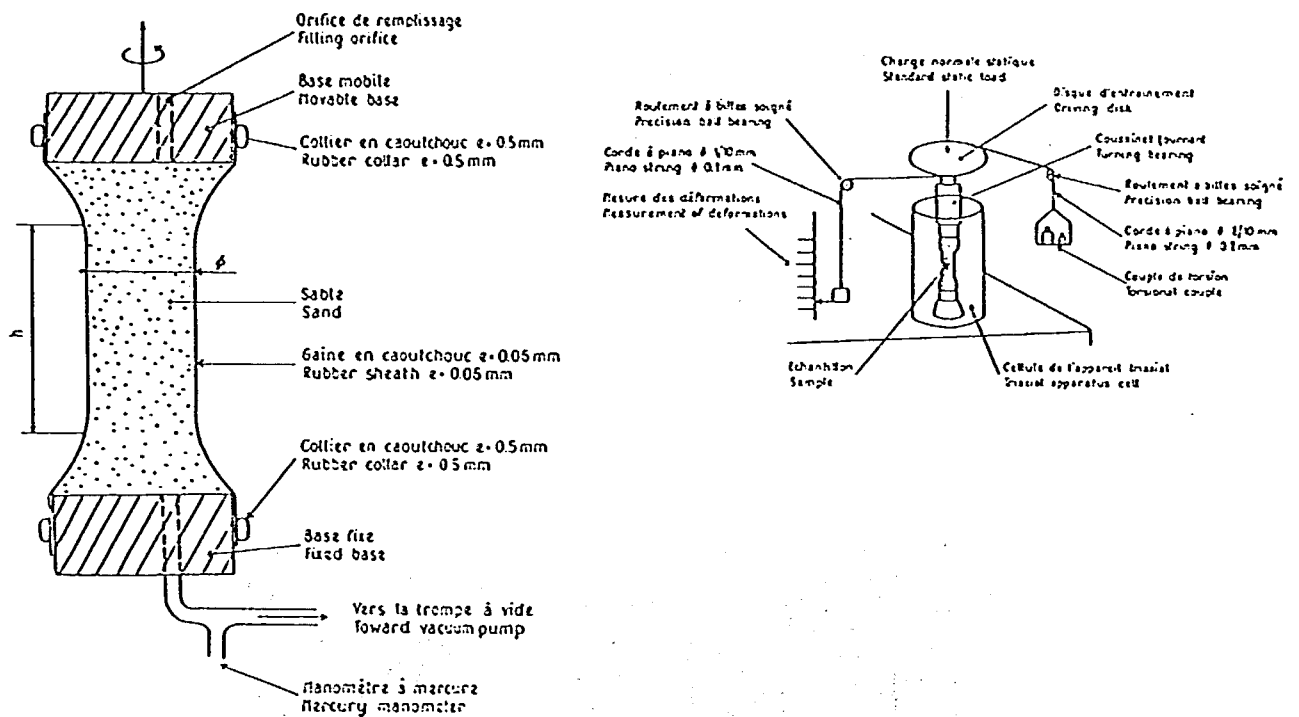


図 2.7 P. Habib の中実ねじり単純せん断試験機⁷⁾

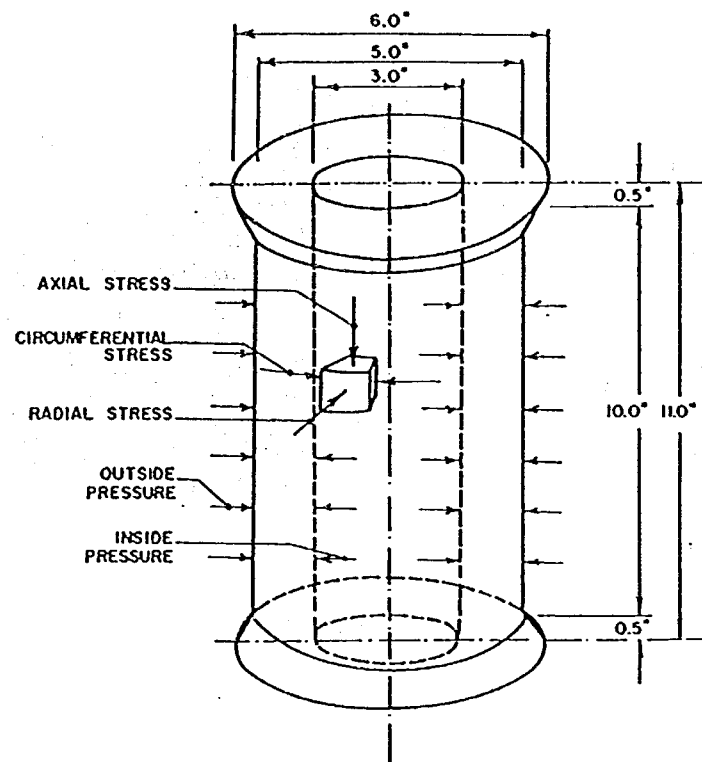


FIG. 1. Dimensions of test member.

図 2.9 BROMS and CASBARIAN の中空ねじり単純せん断試験機⁸⁾

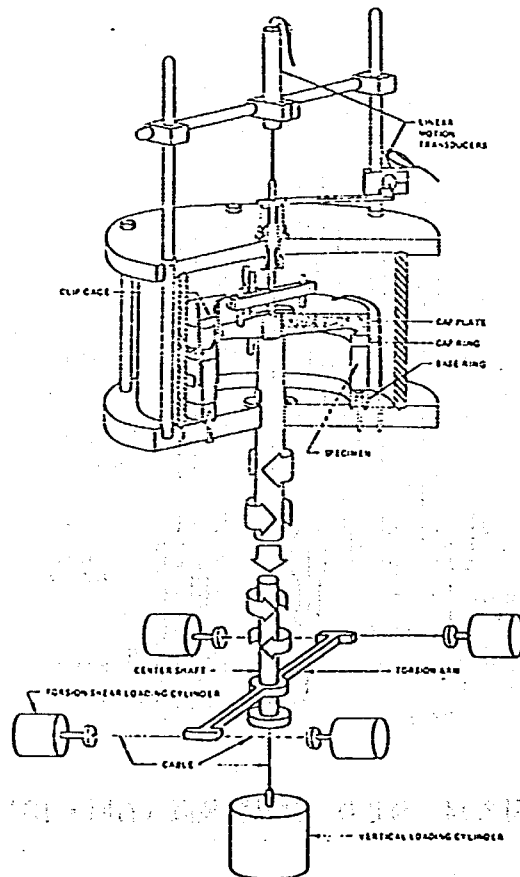


FIG. 1—Torsion shear apparatus with 5-cm-tall specimen.

図 2.10 P. V. Lade の中空ねじり単純せん断試験機⁹⁾

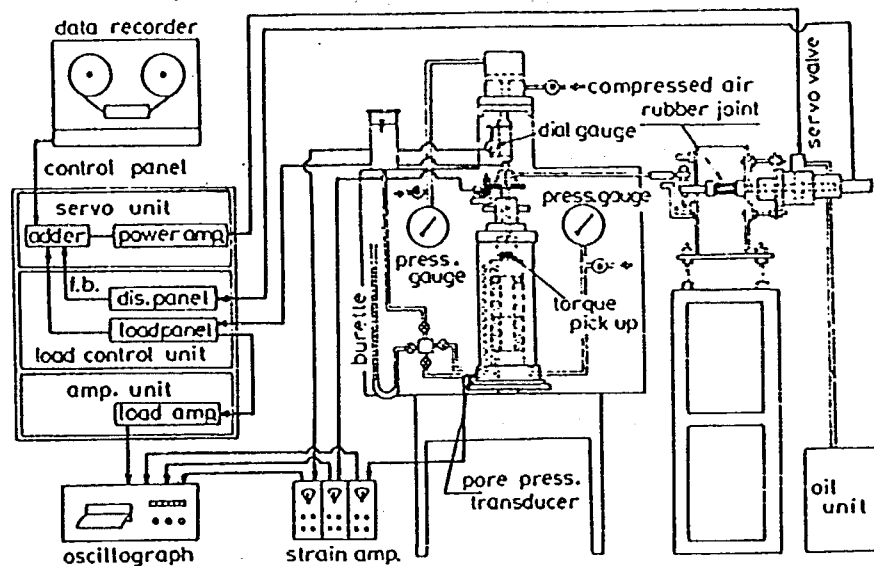


図 2.15 ねじり単純せん断試験機 (石原・安田)¹³⁾

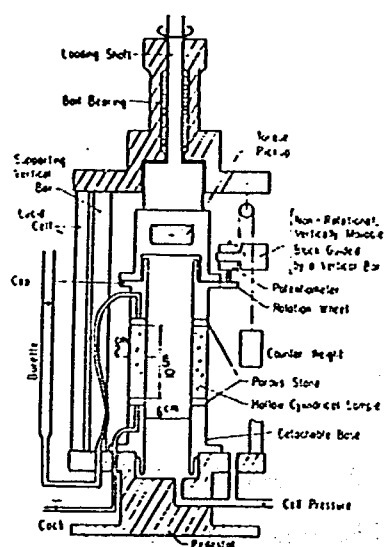


図 2.16 ねじり単純せん断試験機
(岩崎・龍岡・高木)¹⁴⁾

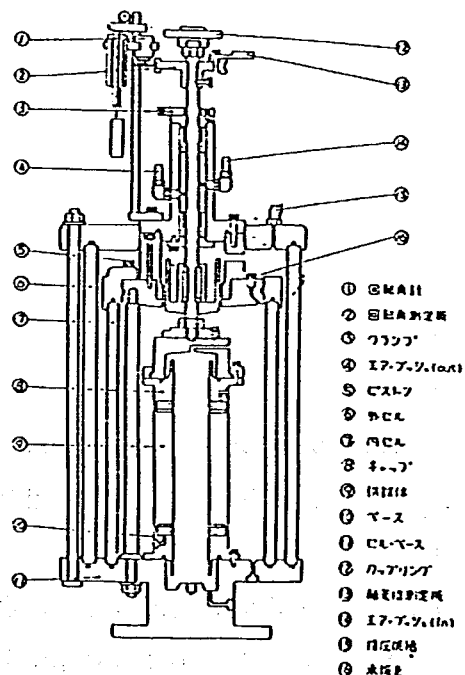


図 2.17 ねじり単純せん断試験機
(龍岡・福島ら)¹⁵⁾

3. 大型せん断試験装置

3.1 設計の基本方針

本試験装置の設計時に考慮した事項は下記のとおりである。

- (1) 装置の構造が単純であること。
- (2) 高い計測精度が得られること（計測は供試体の直近で行う）。
- (3) 装置の操作が簡単であること。
- (4) 実験準備作業段階で極力、省力化を計ること。
- (5) 装置が大型となることから安全性が高いこと。
- (6) 装置の点検・整備が容易であること。

以下に基本的な検討項目・内容について記述する。

3.1.1 装置に対する基本的条件

装置に対する基本的な条件としては、粗粒材料の力学的物性を求めることから最大粒径が25mm程度以上について試験可能なことを考慮した。

その他、装置の製作仕様の決定に当たって基本的に支配したものとして下記の項目・条件がある。

- (1) 予算額
- (2) 設置場所

設置場所はコンクリート床実験室（1F）で床面積がほぼ $6\text{ m} \times 6\text{ m} = 36\text{ m}^2$ 有る。また、実験室内には最大荷重3tf・床版からの釣上げ高4mのXYクレーンが設備されている。

- (3) 環境条件

温度：5～35℃

湿度：40～90%

- (4) 使用電源

動力：AC 200 V $\pm$ 10 V，3相 50 Hz，最大 30 kW

制御・計測：AC 100 V $\pm$ 10 V，単相 50 Hz，最大 20 kW

- (5) 使用水

装置に供給する使用水は水道水とし、水道法に基づき管理された水質とする。

上述した基本条件を考慮して図3.1に示す手順によって装置仕様の検討を行った。

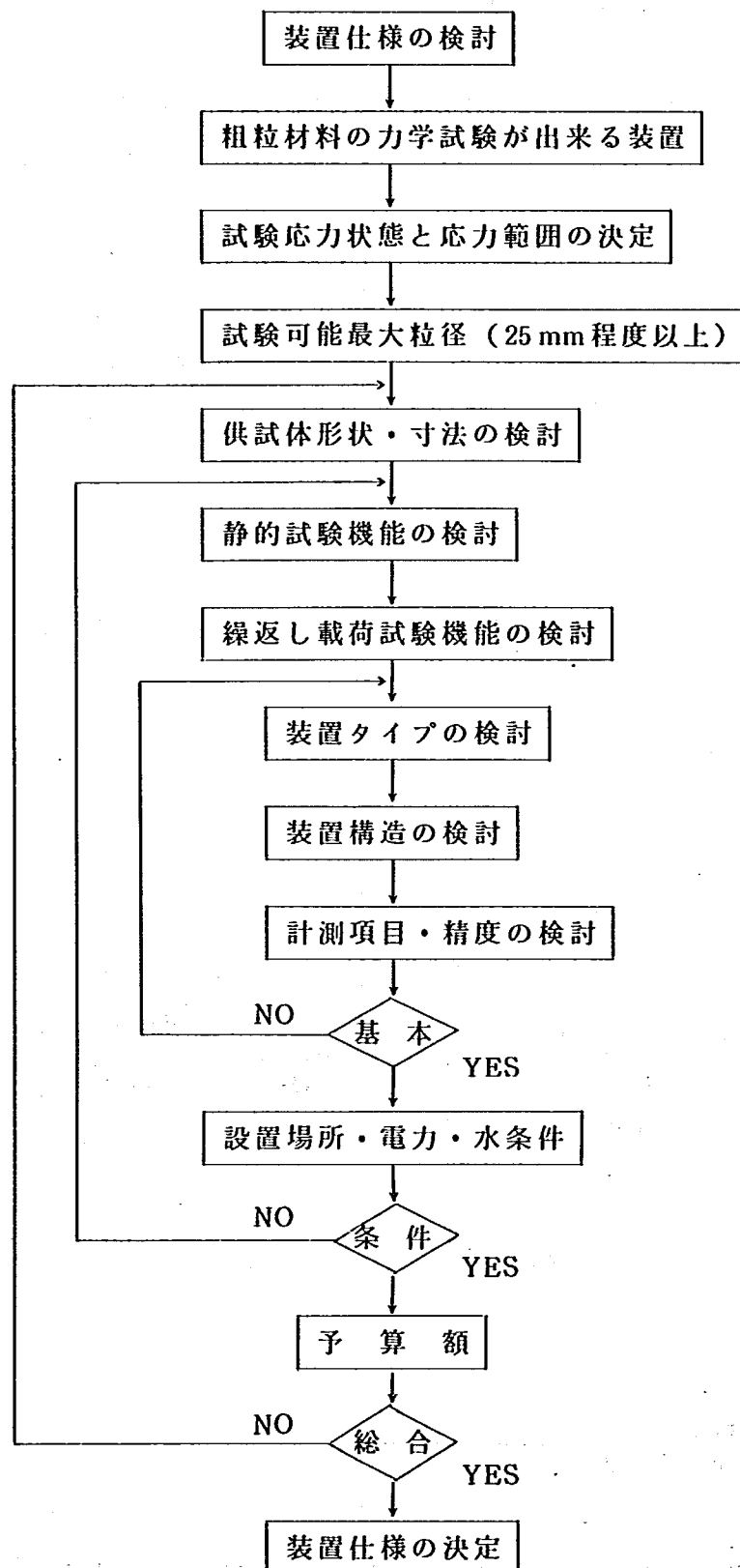


図3.1 装置仕様決定までの手順

3.1.2 供試体に作用させる応力の大きさ

(1) 試験側圧の大きさ

側圧の最大値は、堤高100 m級のフィルダムを考慮した。堤体底部の最大主応力の大きさはほぼ土柱重量に比例しているものと考え、最小主応力の大きさは、最大主応力の3分の1程度を想定・考慮した。

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \sigma_1 / 3 \quad \dots\dots\dots (3.1) \\ \sigma_1 &= \gamma_t \cdot H \quad \dots\dots\dots (3.2) \\ &= 2.0 \times 100 = 200 \text{ tf/m}^2 \end{aligned}$$

σ_1 : 最大主応力 (tf/m²)
 σ_3 : 最小主応力 (tf/m²)
 γ_t : 単位体積重量 (tf/m³)
 H : 土柱高さ (m)

$$\sigma_3 = \frac{200}{3} \div 67 \text{ tf/m}^2$$

$$\therefore \sigma_3 \div 6.7 \text{ kgf/cm}^2$$

以上の想定値を参考として試験可能最大側圧の大きさを7 kgf/cm²と決定した。

(2) 最大ねじりせん断応力の概算

せん断応力の概算は下記に示す、等方応力状態での最大ねじりせん断応力を対象に考えた。

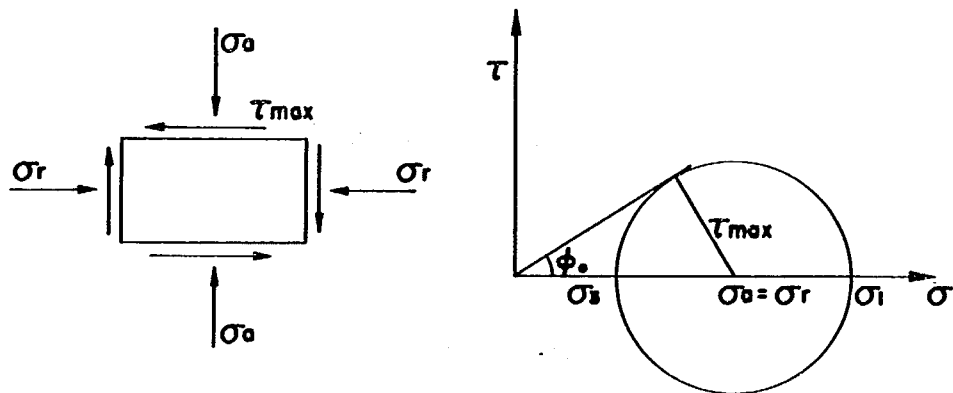


図3.2 考慮した応力状態

図3.2より

$$\phi_o = \sin^{-1} \frac{\tau_{\max}}{\sigma_a} \leq \frac{\pi}{2} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

の関係が求められる。

上式に「(1) 試験側圧の大きさ」で決定した側圧 $\sigma_r = \sigma_a = 7 \text{ kgf/cm}^2$ を代入して $\tau_{\max}$ を求めると $\tau_{\max} = 7 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

3.1.3 供試体の形状と大きさ

中空円筒形供試体を用いたねじり単純せん断試験方法を対象として以下の2点について検討を加えた。

(1) 供試体の外径と高さの関係

供試体の高さ方向に生ずるせん断ひずみの一定分布を考えると (高さ)/(外径) が大きい方が供試体端面の影響が少ないと考えられる。

(2) 供試体の内径と外径の比

供試体の半径方向に生ずるせん断応力・せん断ひずみは非一様であることが想定されるため、破壊試験を対象とした場合には試験精度に対応した半径比を決定する必要があると考えられる。

最初に供試体の外径と高さの比率について検討を加えた。供試体の外径と高さに着目した既往の比較試験(乾燥砂試料)として外径10 cm, 内径6 cmの中空供試体の高さを2・4・10・20 cmと変化した結果の報告¹⁶⁾がある。比較試験結果より、安定して一定の試験値を得るためには供試体の高さは供試体外径のほぼ1倍以上が望ましいと結論されている。

次に、上述した(2)の供試体の外径と内径の比を検討するために1つの仮定を採用してせん断応力の分布について考えてみることにする。

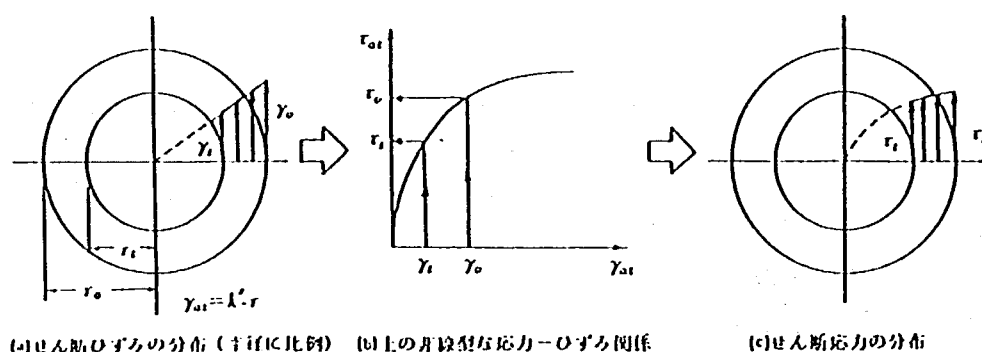


図 3.3 せん断応力, せん断ひずみの非一様性¹⁷⁾

その仮定とは、図 3.3 に示すように①せん断ひずみは半径方向に比例している。②せん断ひずみとせん断応力の関係は非線型の関係が有る。③①と②より半径方向にせん断応力は非線型に分布している。③の非線型分布を次式の様に双曲線関数で表わすことが出来るものとする¹⁷⁾。

$$\tau = \frac{r}{a + b \cdot r} \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

ここに

τ : せん断応力

r : せん断ひずみ

τ_{max} : 最大せん断応力

G_i : 初期せん断弾性定数

$$a = \frac{1}{G_i}$$

$$b = \frac{1}{\tau_{max}}$$

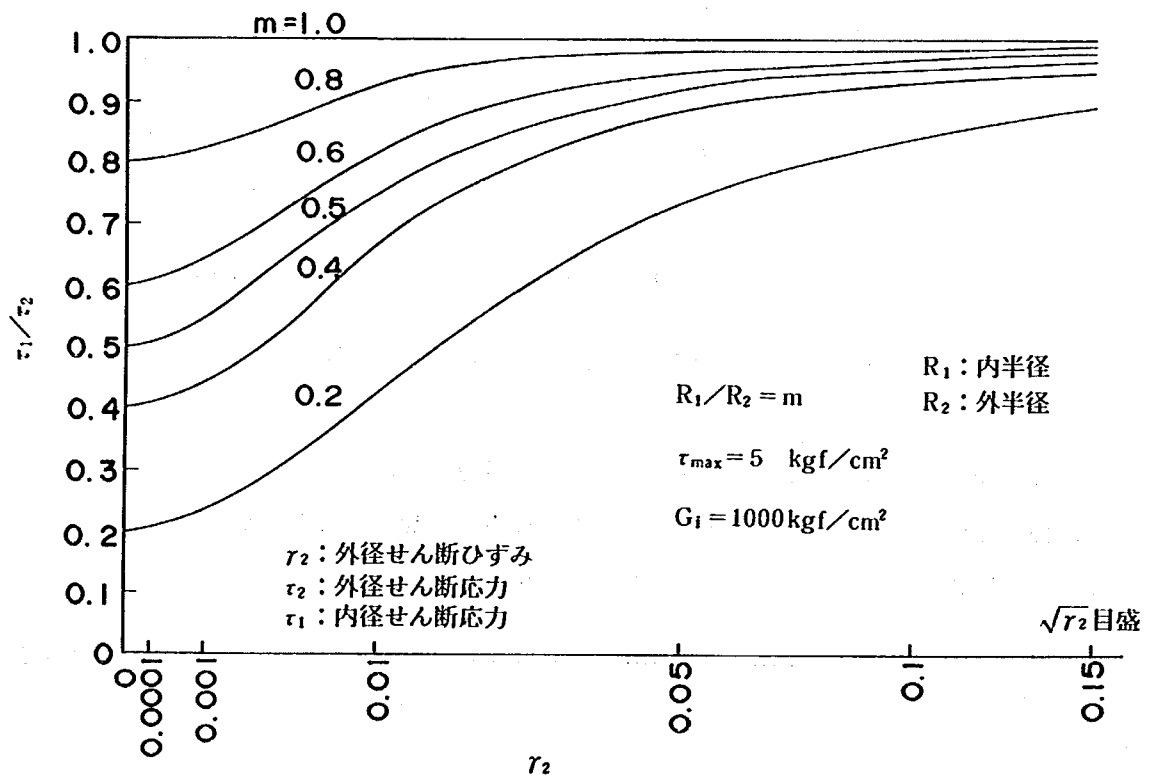
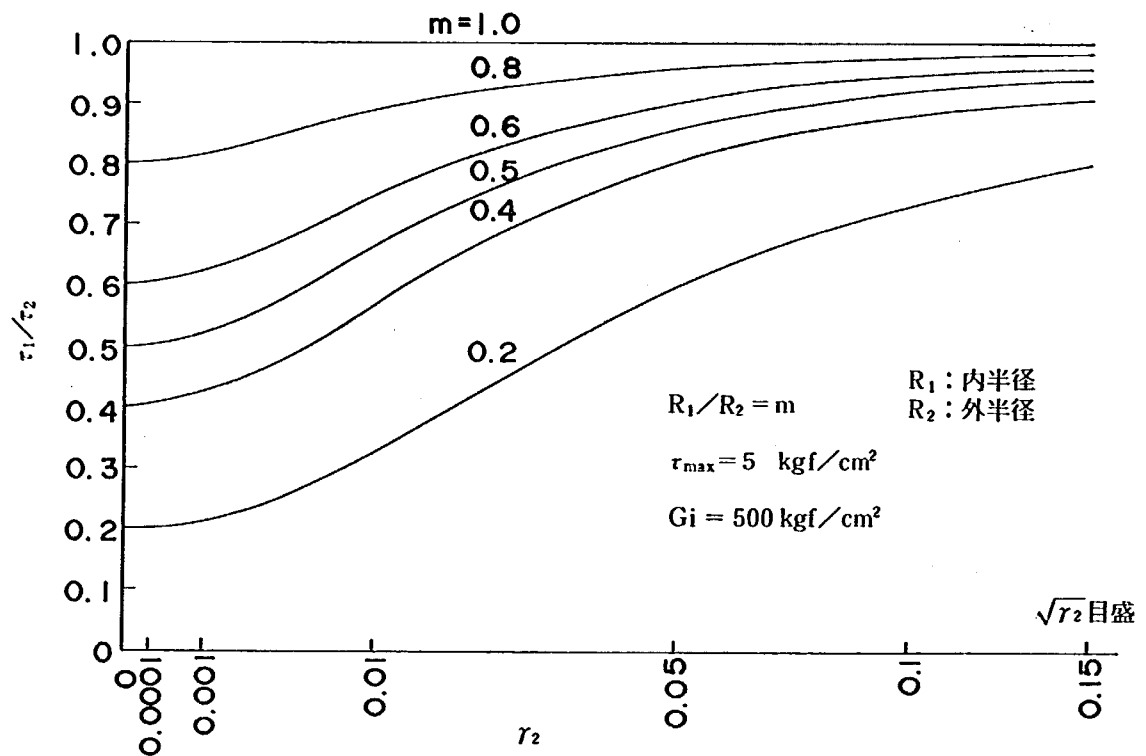


図 3.4 R_1/R_2 , r , τ_1/τ_2 の関係 (中空ねじり単純せん断)

式 (3.4) より式 (3.5) が得られる。

$$\tau_1/\tau_2 = m \cdot \frac{a + b \cdot r_2}{a + b \cdot m \cdot r_2} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに

R_1, R_2 : 内半径および外半径

τ_1, τ_2 : 内半径および外半径におけるせん断応力

r_2 : 外半径上でのせん断ひずみ

m : R_1/R_2

式 (3.4) および式 (3.5) より、供試体半径方向のせん断応力分布は、①せん断ひずみの大きさ、②材料のせん断強度の大きさと変形性に影響されることがわかる。

図 3.4 に式 (3.5) より求めた $\tau_{\max} = 5 \text{ kgf/cm}^2$ で G_i が 500 kgf/cm^2 と 1000 kgf/cm^2 の場合での $r \cdot m$ および τ_1/τ_2 の関係を示す。図にみられるようにせん断ひずみの小さな時には、 τ_1/τ_2 の値は R_1/R_2 に大きく影響され一様なせん断ひずみ分布を考える場合には問題がある。しかし、せん断ひずみが 7~8 % 程度と大きな時には、 R_1/R_2 が 0.5 以上の条件で τ_1/τ_2 の値がほぼ 0.9 程度以上の値を示すものと考えられる。以上のことから、繰返し载荷試験のような小さなひずみ範囲を対象とする場合にはせん断応力の一様分布が満足されない。しかし、最大せん断応力を求める試験のように比較的大きなせん断ひずみが生ずる試験では、 $R_1/R_2 \geq 0.5$ を満足すればせん断応力の分布が試験値に与える影響は少ないものと考えられる。

その他の条件としては、供試体寸法と試験許容最大粒径の関係がある。粗粒材料を対象とした三軸試験で一般に採用されている供試体直径の 5 分の 1 程度を最大粒径とすることを基本的な考え方とした。以上の条件をまとめると下記のとおりである。

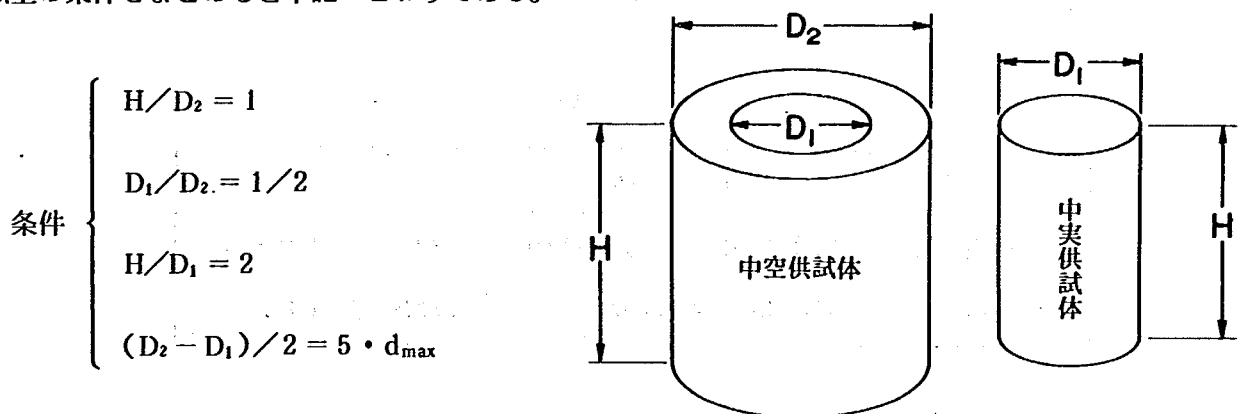


図 3.5 供試体の形状

上記の条件で $\tau_{\max} = 7 \text{ kgf/cm}^2$ を载荷するに必要なトルク (T) を求めると表 3.1 のとおりとなる。なお、トルクの算出式 (3.6) は、供試体半径方向に一定のせん断応力分布を仮定して導いたものである。

表 3.1 ねじり载荷用トルクの概算

$d_{\max}$ (mm)	$5 \cdot d_{\max} = \frac{D_2 - D_1}{2}$	D_1	$D_2 = H$	T (tf・m)
63.5	約 32 cm	約 64 cm	128 cm	約 34
50.8	約 25 cm	約 51 cm	102 cm	約 17
38.1	約 19 cm	約 38 cm	76 cm	約 7

$$T = \frac{2 \pi \tau (R_2^3 - R_1^3)}{3} \dots\dots\dots (3.6)$$

T : トルク

τ : せん断応力

R_1 : $D_1 / 2$

R_2 : $D_2 / 2$

粗粒材料を試験対象材料としていることから、できるだけ大きな粒径材料が試験可能な大きな供試体が望ましいわけであるが、表 3.1 に示すように非常に大きなトルクを必要とする。また、「3.1.6 装置タイプの検討」で述べるように軸力载荷とねじり载荷が複合した場合には基本的に直線運動は可能であるが回転運動を拘束したスプライン軸機構が必要となる。しかし、国内での大型スプライン軸受けの製作実績および予算額等について十分に検討を加えた結果 7～8 tf・m のトルク力を本装置の最大载荷機能とした。表 3.2 に決定した試験供試体の形状・寸法を示す。

表 3.2 供試体の形状・寸法

形 状	寸 法	備 考
中空円筒形	内径 40 外径 80 高さ 80 cm	最大トルク 8 tf・m
中実円柱形	直径 40 高さ 80 cm	最大軸力 80 tf

3.1.4 繰返し载荷周波数の検討

堤高 100 m 級のフィルダム堤体の固有周期は、地震動による堤体実測挙動等から判断して 2～3 Hz 程度と考えられる。ここでは繰返し载荷方法を、電気油圧サーボ方式によることを前提として検討を加えた。

電気油圧サーボ方式に対する検討項目としては、①最大必要油流量、②油圧ポンプの駆動必要電力等がある。

繰返し载荷波形は図 3.6 に示すような正弦波形とする。供試体平均半径 30 cm の円周上での最大ねじり载荷せん断ひずみ振幅を 1×10^{-2} とすると、その時の変位量 h_0 は供試体の高さ 80 cm とひずみ振幅 1×10^{-2} の積で求められることから変位量 h_0 は ± 0.8 cm となる。また、トルク载荷アーム長を 75 cm とするとアーム先端での振幅 h_0 は ± 2 cm となる。

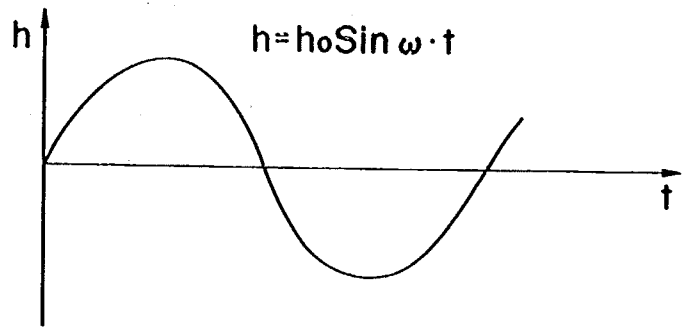


図 3.6 繰返し载荷波形

$$\begin{aligned} h &= h_0 \sin \omega \cdot t \\ &= h_0 \sin 2\pi \cdot f \cdot t \quad \dots\dots\dots (3.7) \end{aligned}$$

ω : 円振動数
 t : 経過時間
 f : 周波数

式 (3.7) より最大速度 $v_{\max}$ は式 (3.8) より求められる。

$$\begin{aligned} v &= \frac{dh}{dt} = h_0 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos 2\pi \cdot f \cdot t \\ \therefore v_{\max} &= h_0 \cdot 2\pi \cdot f \quad \dots\dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

式 (3.8) に $h_0 = 2$ cm, $f = 2$ Hz を代入すると

$$v_{\max} = 25.1 \text{ cm/sec}$$

同様に $h_0 = 2$ cm, $f = 0.3$ Hz を代入すると

$$v_{\max} = 3.8 \text{ cm/sec}$$

となる。

次に油圧ポンプの動力 L_0 を算出¹⁸⁾ すると下記のとおりである。

$$L_0 = \frac{P \cdot Q}{10200 k_1} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

L_0 : 油動力 (kW)
 P : 油の圧力 (kgf/cm²)
 k_1 : 油動効率 (0.75) Q : 吐出量 (cm³/sec)

最初に 8 tf・m のトルクを発生するため必要なアーム先端荷重を求めると下記のとおりである。

$$P_0 = \frac{8 \times 10^5}{2 \times 75}$$

$\div 5400$ kgf (2 本のアームで载荷するものとする)

油の圧力 P は 210 kgf/cm² 定格ポンプを使用するものとすれば载荷用ピストンの必要断面積 A は下記のとおりである。

$$A = \frac{P_0}{k_z P} = \frac{5400}{0.8 \times 210} \div 32 \text{ cm}^2 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

k_z : 油圧効率 (0.8)

以上の数値および算出式によって油動力 L_o を求めると表 3.3 のとおりである。

表 3.3 ねじり繰返し载荷時の油動力の概算

75 cm アーム 先端振幅	載 荷 周波数	ピストン 断面積	最大吐 出量 Q cm^3/sec	式(3.9)より求め た油動力 L_o
$\pm 2 \text{ cm}$	2 Hz	$2 \times 32 \text{ cm}^2$	1606	44 kW
	0.3 Hz		243	6.7 kW

同様に中実供試体試験時の場合について検討を行う。供試体高さ 80 cm に対して軸方向ひずみを 1×10^{-2} 与えた時を考えることにする。また、軸方向最大荷重を 80 tf 载荷可能な油圧ピストンによって軸方向に繰返し载荷試験を行うものとする。計算の進め方はねじり繰返し载荷時の場合に行った方法と同じである。

$h_o = 0.8 \text{ cm}$, $f = 2 \text{ Hz}$ のとき $v_{\max} = 10.0 \text{ cm/sec}$

$h_o = 0.8 \text{ cm}$, $f = 0.3 \text{ Hz}$ のとき $v_{\max} = 1.5 \text{ cm/sec}$

ピストンの必要断面積 $A \div 480 \text{ cm}^2$

表 3.4 中実繰返し载荷時の油動力の概算

軸方向 変位振幅	載 荷 周波数	ピストン 断面積	最大吐出量 Q	式(3.9)より求め た油動力 L_o
$\pm 0.8 \text{ cm}$	2 Hz	480 cm^2	$4800 \text{ cm}^3/\text{sec}$	131.8 kW
	0.3 Hz		$720 \text{ cm}^3/\text{sec}$	19.8 kW

表 3.4 に中実供試体での繰返し载荷試験時に必要な最大油動力の概算結果を示す。

最大油動力は変位量 h_o ・油圧力 P ・油動効率 k_t が一定ならば周波数 f に比例するわけであるが、表 3.3、表 3.4 に示す概算値より①実験室内の既存動力最大容量 30 kW、②実験室内にある既設試験装置の同時使用、等を考慮すると、繰返し载荷周波数の最大は 0.3 Hz が限界であると判断した。

上記の検討結果、表 3.3 および表 3.4 を考慮すると定格容量 5.5 kW および 22 kW の油圧ポンプを使用することによって油動力を確保することが出来るものと判断した。

図 3.7 に周波数 f と载荷ひずみ DL との関係で表わした限界性能曲線を示す。

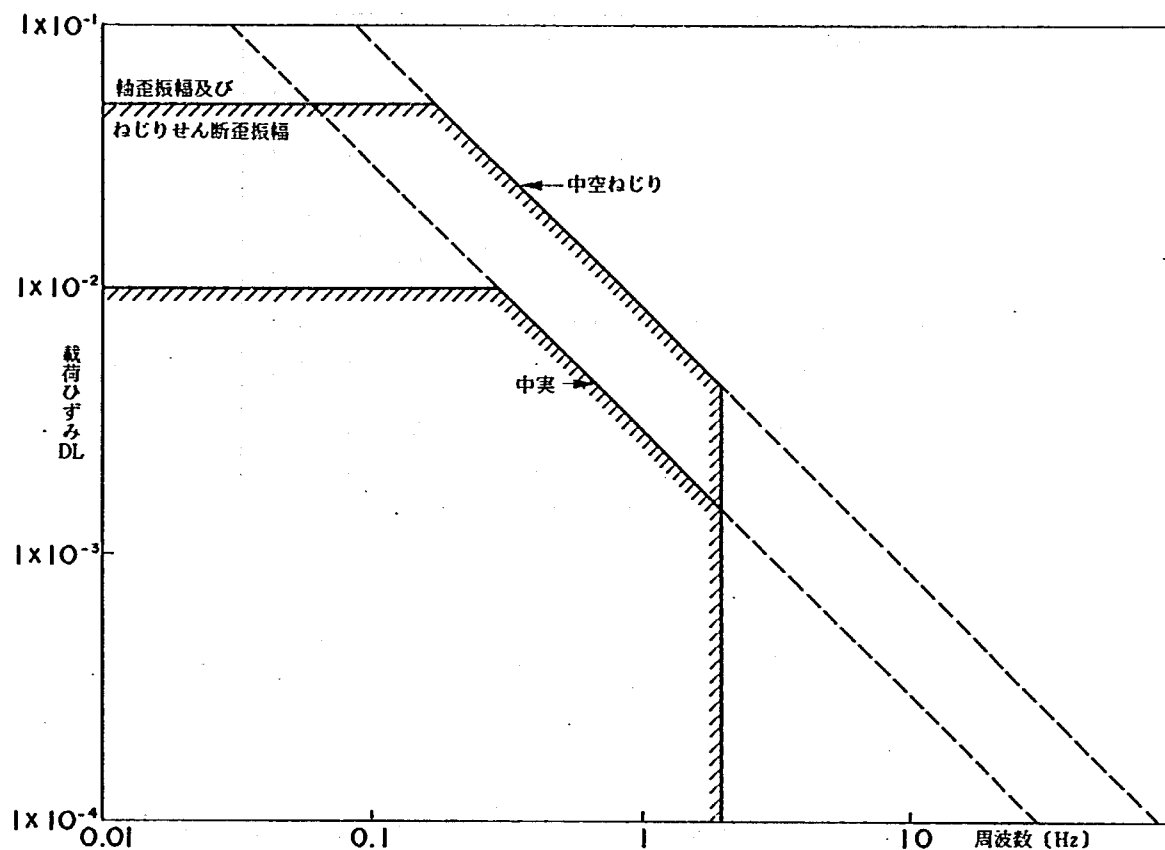


図 3.7 载荷装置使用限界図

3.1.5 制御試験項目および計測項目と精度

制御装置は、基本的に下記の項目について設定制御・試験できるものとした。

- 1) 中空円筒形供試体の静的ねじりせん断試験及び繰返しねじりせん断試験が行えること。
- 2) 中実円柱形供試体の軸方向に対して圧縮、伸張及び繰返し载荷試験が行えること。
- 3) 軸方向応力および変位
- 4) 側 圧
- 5) ねじり応力および変位
- 6) 繰返しねじり振幅（正弦波形・中空供試体）
- 7) 繰返し軸载荷振幅（正弦波形・中実供試体）
- 8) 等方圧密・異方圧密・K。圧密

計測記録装置は、表 3.5 の項目について計測記録できるものとした。また、各項目についてのフルスケール精度については、現状の計測技術・精度について十分に調査・検討を加えるとともに安定して計

測可能と考えられる値とした。

表 3.5 計測のフルスケール精度

計測項目	静的载荷試験	繰返し载荷試験
軸 力	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下
側 圧	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下
ト ル ク	$\pm 0.5 \% F_s$ 以下	$\pm 0.5 \% F_s$ 以下
軸変位量	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下
体積変化量	$\pm 0.4 \% F_s$ 以下	$\pm 0.4 \% F_s$ 以下
ねじり角	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下
間 隙 圧	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下
ねじり変位量	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下	$\pm 0.3 \% F_s$ 以下

3.1.6 装置タイプの検討

試験装置の基本的なタイプを選定することは最も重要なことである。装置が大型であるためタイプの相違によって①試験精度、②試験効率、③装置の安定性、④製作費、等に大きな影響を与える結果となる。

多くの検討項目の中で本装置のタイプ決定に当って最初に考慮・検討した項目は以下の2点である。

- 1) 同じ装置を使用して三軸試験・ねじり単純せん断試験の二種類の試験が可能な装置とする。
- 2) 大型のねじり単純せん断試験装置の製作実績が無いため、技術面での問題点の有無とその対応策の検討。

特に2)の検討項目では、ねじりのトルク発生・伝達機構と軸力・トルクの検出方式が重点となった。

図 3.8 に検討対象となった载荷方式の概略を示す。また各タイプの長所・短所を以下に示す。

(1) 中実供試体を対象とした場合

① 三軸圧力容器の分類

①-1 分離型 (I-a, I-b)

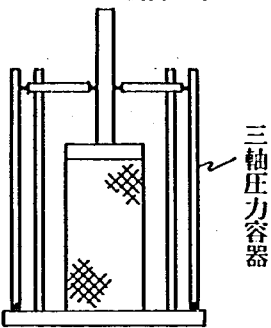
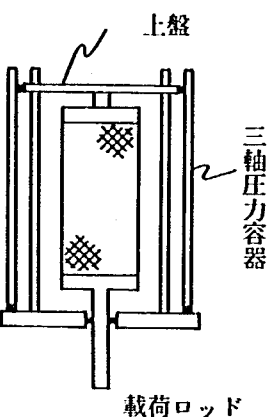
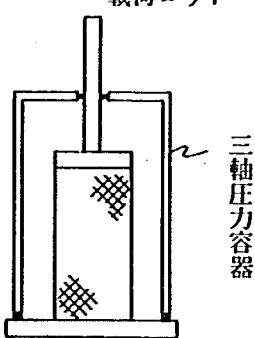
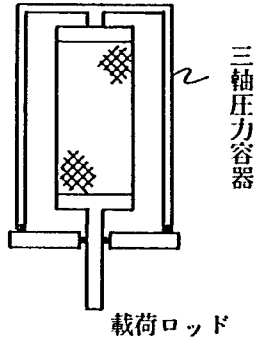
载荷ロッドとペディスタルの結合が容易であるが、供試体を三軸室底盤にセットする時には、三軸室上盤を取り外すかまたは供試体をスライドしてセットすることが必要となる。

①-2 一体型 (II-a, II-b)

三軸室底盤上で供試体を作成する場合または外部で供試体を作成した後に三軸室底盤上にセットする場合の作業が容易である。しかし、载荷ロッドと上部ペディスタルの結合方法に工夫が必要である。

② 軸力载荷方式の比較

① 中実供試体を対象とした場合

	軸力 載荷 装置 が上部に有る場合	軸力 載荷 装置 が下部に有る場合
圧力容器の 側壁と上盤 が分離して いる場合	I-a 	I-b 
圧力容器の 側壁と上盤 が一体の場 合	II-a 	II-b 

② 中空供試体を対象とした場合

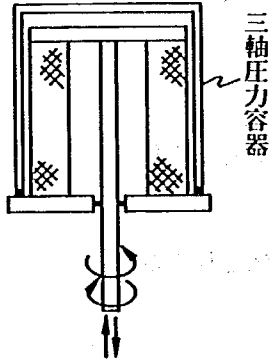
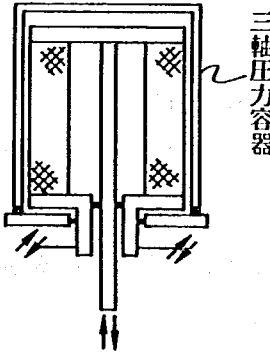
	供 試 体 上 部 端 面 よりトルクを載荷する場合	供 試 体 下 部 端 面 よりトルクを載荷する場合
圧力容器の 側壁と上盤 が一体の場 合	I-A 	I-B 

図 3.8 載荷方式の検討

軸荷重・載荷装置を装置の上部に設けるよりも下部に設けた方が、装置全体の安定性・点検整備・実験作業の容易・安全性の点で有利である。

(2) 中空供試体を対象とした場合

① 三軸圧力容器

本装置の場合には、最大軸力 80 tf・最大トルク 8 tf・m と大きな力を供試体を与えることから各々の載荷装置が大型となる。したがって装置全体のバランス・安全性を考慮すると載荷装置の位置については当然ながら下部に設けた方が良い。また、載荷装置を下部に設けることによって載荷用ロッドが三軸圧力容器を貫かないので三軸圧力容器は一体型で良いことになる。

② 軸力・トルク載荷方式

載荷方式 I-A では、同じ載荷ロッドで軸力とねじり力を伝達することから、直線と回転載荷が可能な載荷装置が必要であるとともに大型のスプライン軸（図 3.9 参照）が必要である。載荷方式 I-B では、軸力とねじり力伝達ロッドが別々であるため、載荷装置が I-A に比較してやや大型となるがトルクの伝達経路が短いため制御の点では有利である。またスプライン軸については、I-A に比較して I-B タイプの方が、構造面での制約が少ない。

上記の比較検討結果より、中実タイプ II-b と中空タイプ I-B を組合せた載荷方式を基本とした。

トルクの発生・伝達は繰返し載荷試験とトルクの大きさを考慮して復動油圧ピストンにより発生した力をアームを利用して伝達する方式を基本とした。

また、中空供試体試験での軸力・トルクの計測方式については、限られた三軸室内のスペース等を考慮すると 1 個の検出器によって軸力とトルクが同時に測定可能な 2 分力計方式とすることを基本とした。検出器の形状・大きさおよび構造等については、三軸室の構造および計測位置を考慮して決定するものとした。

3.1.7 側圧の加圧方式

側圧の加圧方式としては一般に下記の 2 方式が考えられる。

① 水圧方式

空気圧または油圧を水圧に変換して供試体を与える。

② 空気圧方式

空気圧を直接的に供試体を与える。

供試体の体積変化量および三軸室容積が大きくなることから試験時の安全性・供試体体積変化の測定等を考慮すると、空気圧方式に比較して水圧方式の方が有利なことから側圧の加圧方式は油圧を水圧に変換する方式を採用することとした。

Ⓐ：ねじり力を伝達する。
Ⓑ：軸力を伝達する。

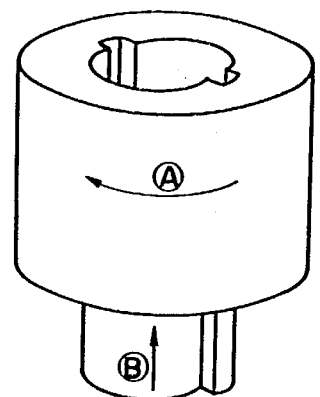


図 3.9 スプラインの概念図

3.1.8 装置基礎

装置の全体姿勢としては、実験作業の安全性と効率を考慮すると装置の载荷部分は極力、床面より下方にあることが望ましい。また作業範囲は床面と同一平面上で行なえることが望ましい。以上の点からすると装置の基礎はピット方式となることが想定されるがピットの大きさ等については装置の点検整備に必要な作業スペースも考慮した形状と寸法を選択することを基本とした。

3.2 試験装置の機能と構造

「3.1 設計の基本方針」に基づき検討を加えた結果、下記の対象供試体試験について表 3.6 に示す試験機能を満す装置とした。

- ① 外径 80 cm ・ 内径 40 cm ・ 高さ 80 cm の中空円筒供試体についてねじり単純せん断試験を行う。
- ② 直径 40 cm ・ 高さ 80 cm の中実供試体について圧縮・伸張試験を行う。
- ③ ①についてはせん断応力、②については軸方向応力を繰返し载荷（正弦波形）する試験および単調载荷試験を行う。

表 3.6 制御設定範囲

項 目	範 囲
1. 軸方向载荷 (1) 変位制御の時 (2) 軸歪振幅 (3) 軸応力振幅 (4) 振幅周波数	2 ~ 8 mm/min 最大 $\pm 1 \times 10^{-2}$ 最大 $\pm 20 \text{ kgf/cm}^2$ D. C ~ 0.3 Hz
2. 軸方向応力 (σ_1) (1) 载荷保持の時 (2) 応力制御の時	0 ~ 21 kgf/cm ² 0.2 ~ 3 kgf/cm ² /min
3. 側 圧 (σ_3) (1) 加圧保持の時 (2) 側圧制御の時	0 ~ 7 kgf/cm ² 0.2 ~ 1 kgf/cm ² /min
4. σ_1/σ_3	0.2 ~ 3
5. ねじり速度 (1) 変位制御の時 (2) 応力制御の時	0.8 ~ 8 mm/min (半径 30 cm の円周上) 0.2 ~ 1 kgf/cm ² /min
6. ねじりせん断歪振幅	$\pm 1 \times 10^{-4} \sim \pm 1 \times 10^{-2}$
7. ねじりトルク振幅	0 ~ $\pm 6 \text{ tf} \cdot \text{m}$
8. ねじりトルク及び せん断歪振幅周波数	D. C ~ 0.3 Hz
9. ねじりトルク力	0 ~ 8 tf · m
10. 供試体の高さ制御	$\pm 1 \text{ mm}$
11. そ の 他	K。圧密

3.2.1 装置の基本構成

装置の構造・機能・精度・点検整備等に関して技術的な面で検討を加えるために装置の基本構成を下記ののとおりとした。

- ① 三軸室（三軸圧力容器）
- ② 側圧加圧装置
- ③ 軸力載荷装置
- ④ ねじり載荷装置
- ⑤ 制御・計測装置
- ⑥ 動力装置
- ⑦ 供試体作成装置
- ⑧ 装置基礎およびその他

図3.10に装置本体の構造概略を示すとともに以下に各部装置の構造について概略の説明を行うことにする。

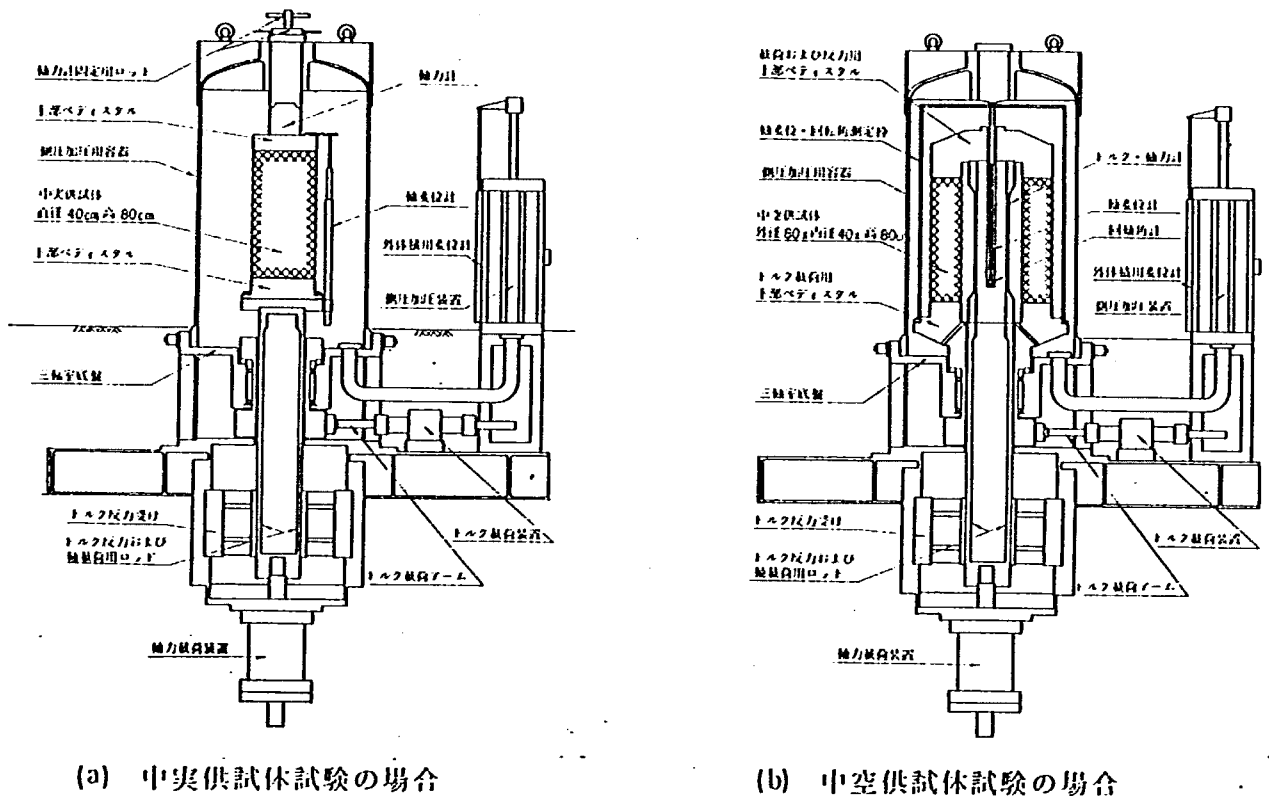


図3.10 大型せん断試験装置の構造概略

3.2.2 三軸圧力容器

三軸圧力容器の概略構造を図3.11に示す。

容器は鋼製の円筒形（一重タイプ）である。三軸室の底盤と容器の固定は、三軸室底盤円周上から24

枚の固定用キーがエアシリンダーによって内側に作動できるようになっており（写真3.1）、その固定用キーが三軸圧力容器下部外周に設けてある溝（写真3.2）に嵌込まれて固定される。三軸圧力容器の移動はX-Yクレーンによって行う。

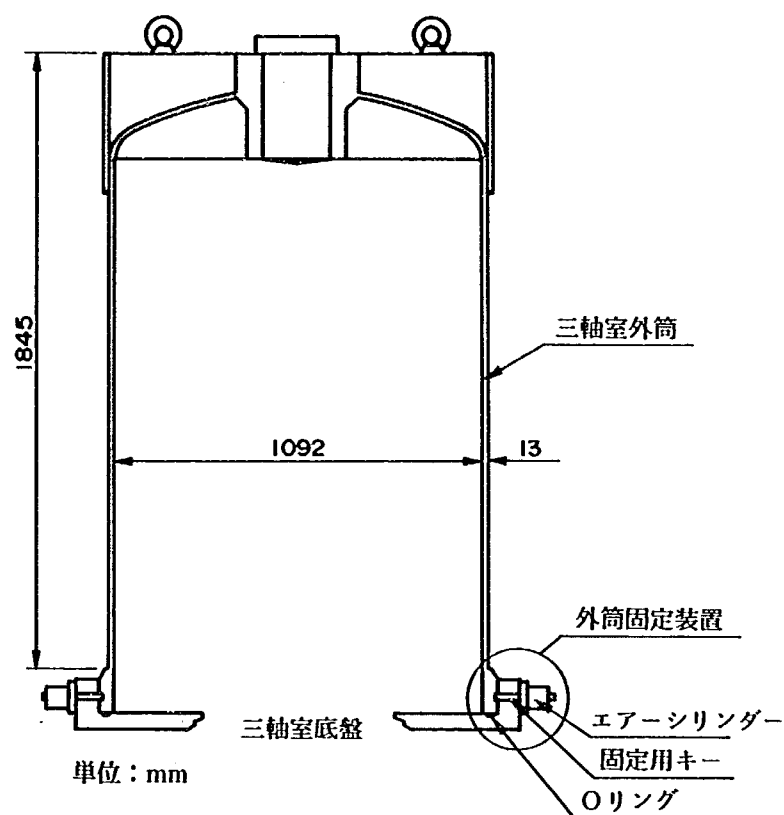


図 3.11 三軸圧力容器

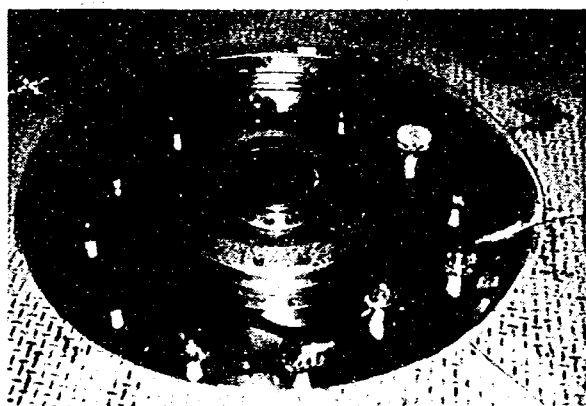


写真 3.1 三軸室底盤

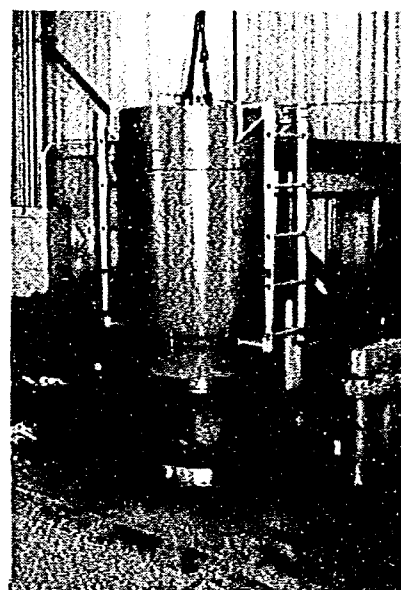


写真 3.2 三軸圧力容器

3.2.3 側圧加圧装置

側圧加圧装置の概略構造を図 3.12, 写真 3.3 に示す。

三軸圧力容器内の供試体には水圧によって側圧を与える方式を採用しており、装置は、中央に水圧発生用のシリンダーがありその両側に油圧によって作動するシリンダーが設けてある。両側の油圧シリンダーによって発生した力を中央のシリンダーに伝達することによって水圧に変換されるものである。

この方式を採用した主な理由は、試験中の供試体および圧力経路の体積変化量 50 リットルを設計容量としたためである。体積変化量が 50 リットルと大きいことからシリンダーのストロークが大きくなり、一般に採用されている水圧発生シリンダーと油圧シリンダーを直列にすると装置全体が長大になり設置方法・実験準備作業等の面で不利な点があるためである。

装置の制御は電気油圧サーボ方式によっている。

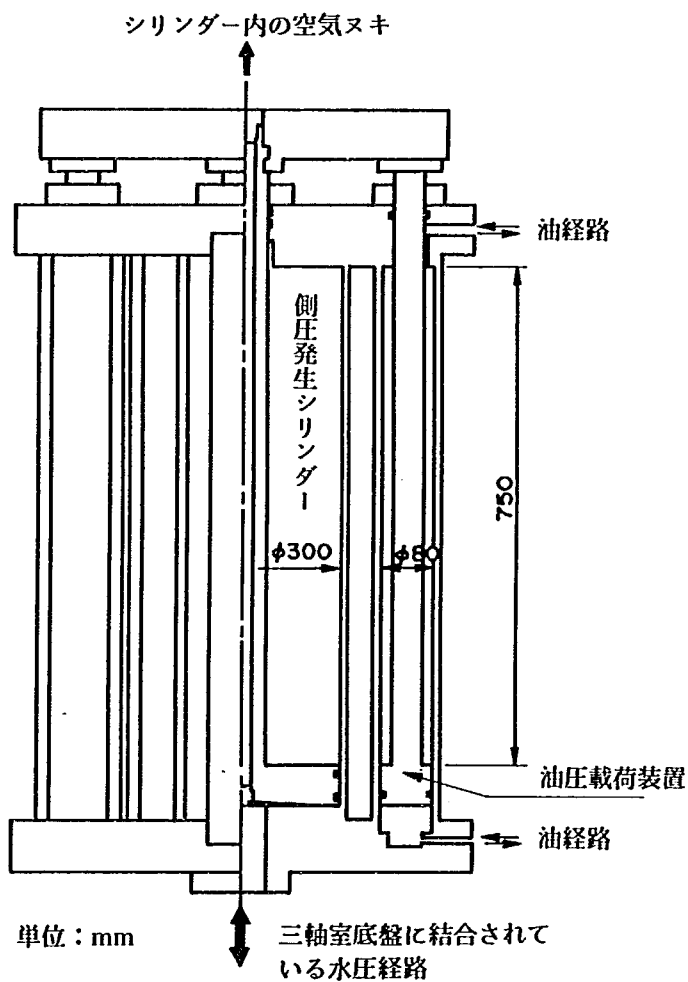


図 3.12 側圧加圧装置

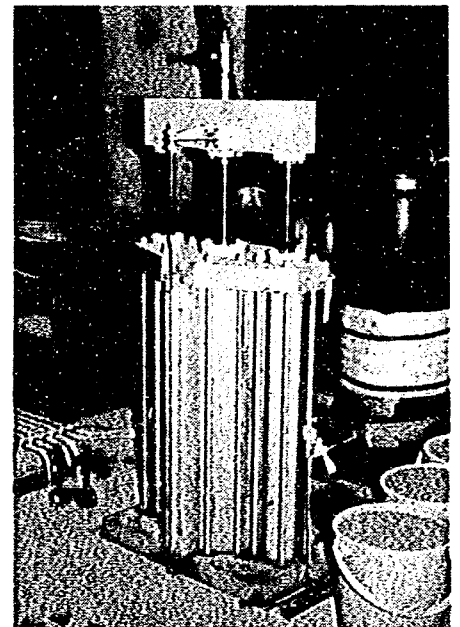


写真 3.3 側圧加圧装置

3.2.4 軸力载荷装置

軸力载荷装置は、図 3.10 に示したように装置中心の最下部に固定されている。装置は複動タイプの油圧シリンダーであり電気油圧サーボ方式によって制御している。中実供試体試験の場合には軸载荷用ロ

ッドに力が伝達されて供試体下部ペディスタルより上向きに载荷する。中空供試体試験の場合には軸载荷用ロッドとトルク・軸力計および上部ペディスタルに力が伝達されて上部ペディスタルより下向きに载荷する。

中実供試体試験時の上部ペディスタルの固定方法に関する概略構造を図3.13, 写真3.4に示す。

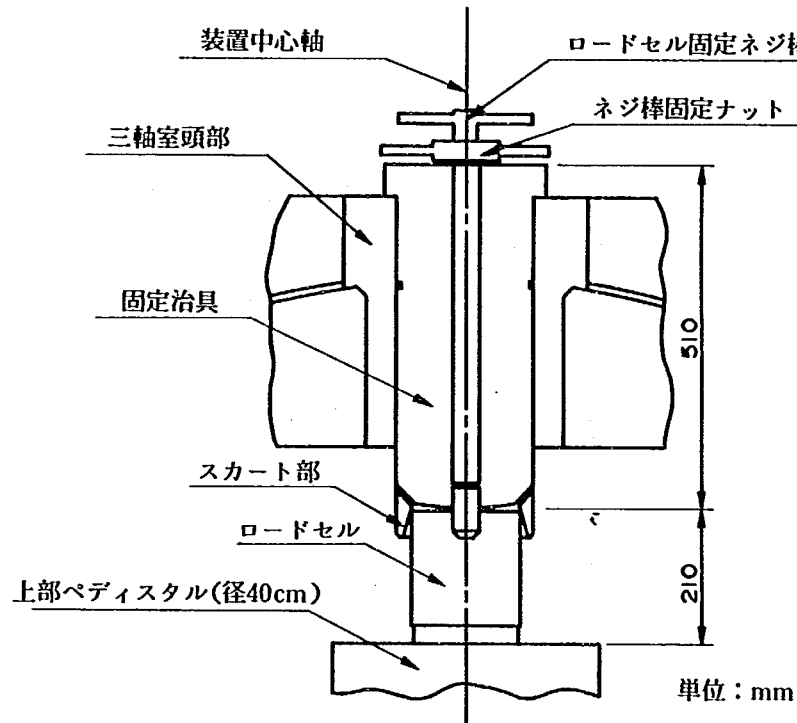


図 3.13 供試体上部の連結機構 (中実供試体)

中実供試体試験の場合には軸力を下部より载荷する方式であることと伸張試験も行うことから供試体の上部ペディスタルを固定する必要がある。

本装置では供試体の軸方向反力は三軸容器で受ける方式としている。図3.10に示した中実供試体試験の状態のように軸载荷用ロッドの上部に試験前の供試体をセットする。上部ペディスタルには軸力検出用のロードセルが固定して取り付けられている。また、三軸室天井中央には固定用治具が取り付けられている。

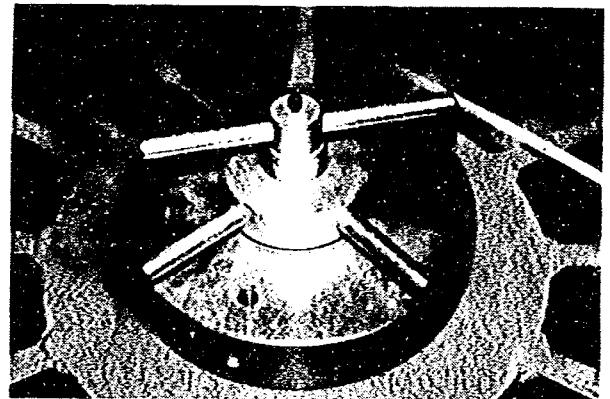


写真 3.4 上部固定ネジ部

軸力制御により供試体 (真空吸引状態) を上降させてロードセルによってタッチ荷重を検出して所定の荷重を作用させた状態とする。次に、ロードセル固定ネジ棒をロードセル頭部に設けてあるネジ穴に

ねじ込んでからネジ棒固定ナットによりロードセル固定ネジ棒を固定治具に締付けて固定する。

3.2.5 ねじり载荷装置

ねじり载荷を行うためのトルク発生载荷装置の概略構造を図3.14、写真3.5に示す。

本装置は、中空供試体の下部端面にねじり力を作用させる方式を採用している。装置としては、供試体下部ペディスタルを回転するために下部ペディスタルにトルク载荷アームが2本（180度対称）取り

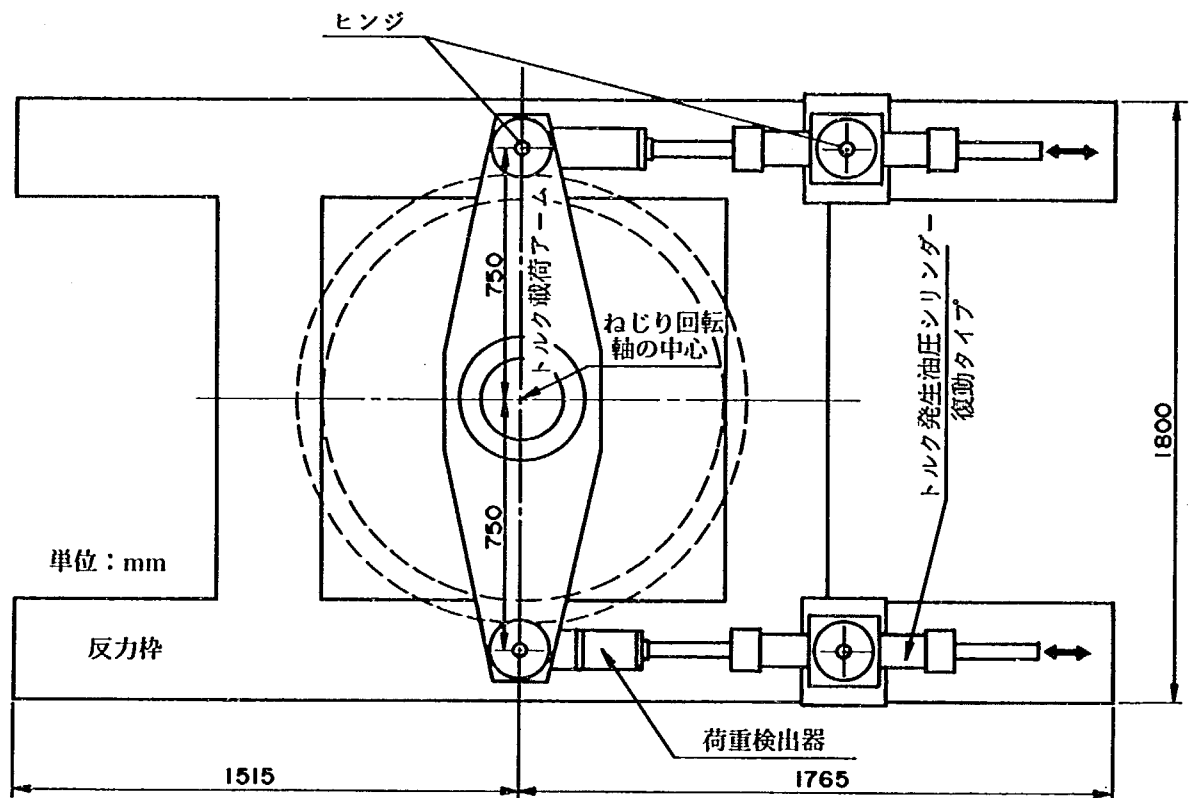


図3.14 トルク発生・载荷装置

付けられている。

トルク発生用の载荷油圧シリンダーは反力枠上に固定して設けてあるが、一定長のトルク载荷アームに力を作用させるためにねじり回転に伴って力の作用方向が変化することになる。したがって、トルク载荷アーム先端部および载荷油圧シリンダー本体支持部は鉛直軸方向に対して回転可能（ヒンジ）な軸受けとしてある。

トルク発生油圧シリンダーは繰返し载荷（力の作用方向が逆転する）試験を考慮して復動タ



写真3.5 ねじり载荷装置

タイプの構造となっており、2個の油圧シリンダーの形状・寸法は同じものである。また、左右のトルク
 载荷アーム先端部での作用力の平均化を計るために電気油圧サーボによる制御油圧経路は図3.15に示す
 ようにしてある。

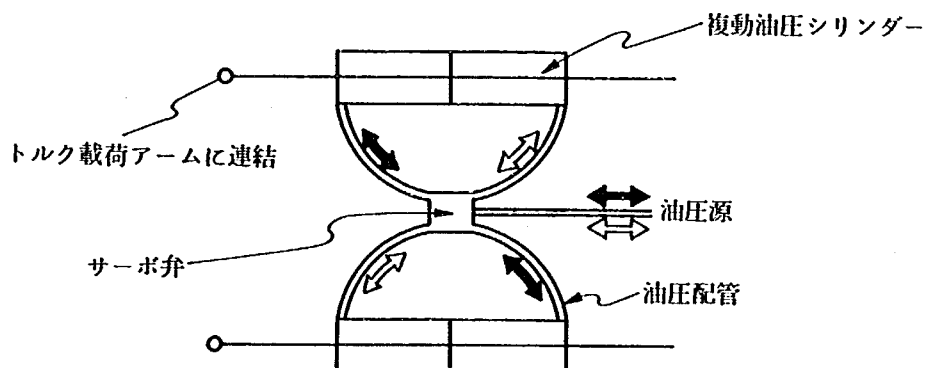


図3.15 トルク制御用油圧経路の概要

試験時トルクの検出は、計測用のトルク計によって行なわれるが、試験時にトルク载荷アーム先端に
 作用している力の大きさまたは、計測用のトルク計の検証を行なうためのロードセルが組み込まれている。

(1) トルク・軸力検出器

中空供試体試験用トルク・軸力検出器の概略構造を図3.16、写真3.6に示す。

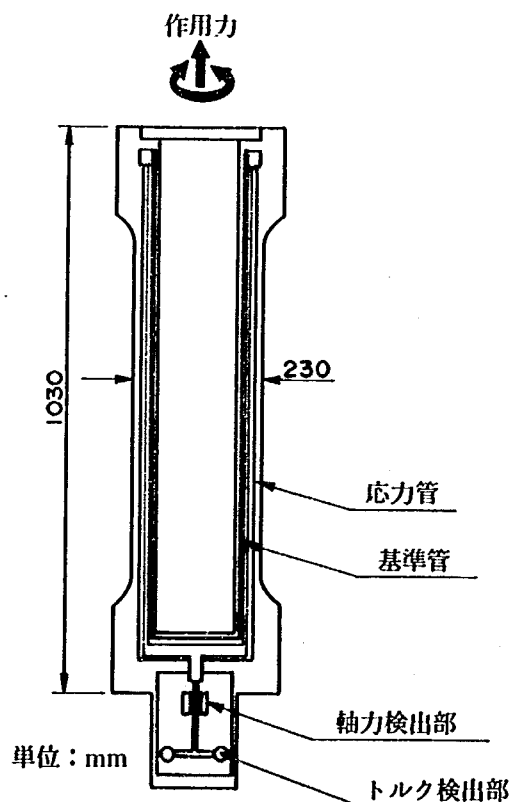


図3.16 トルク・軸力検出器（二重管式）

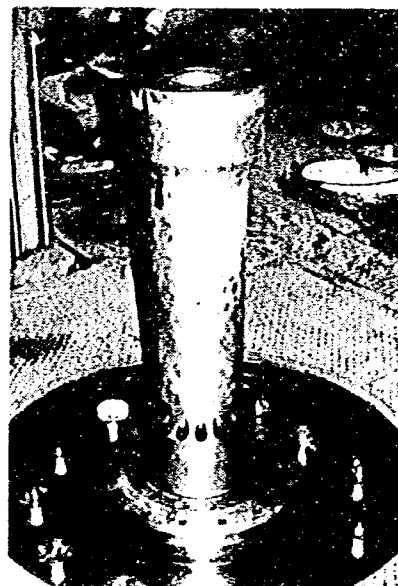


写真3.6 トルク・軸力検出器

1 個の検出器によって同時に 2 成分を検出しようとした場合には相互の影響がなく独立して精度良く計測できることが理想である。本検出器の場合には、後述する載荷試験によって相互の影響が無いことが確認されている。しかし、検出器が大きい事、2 重管方式を採用していることによって特に検出器の内部と外部の温度差が大きく変化した場合に測定値に与える影響が大きい事が短所であり今後の改良課題である。

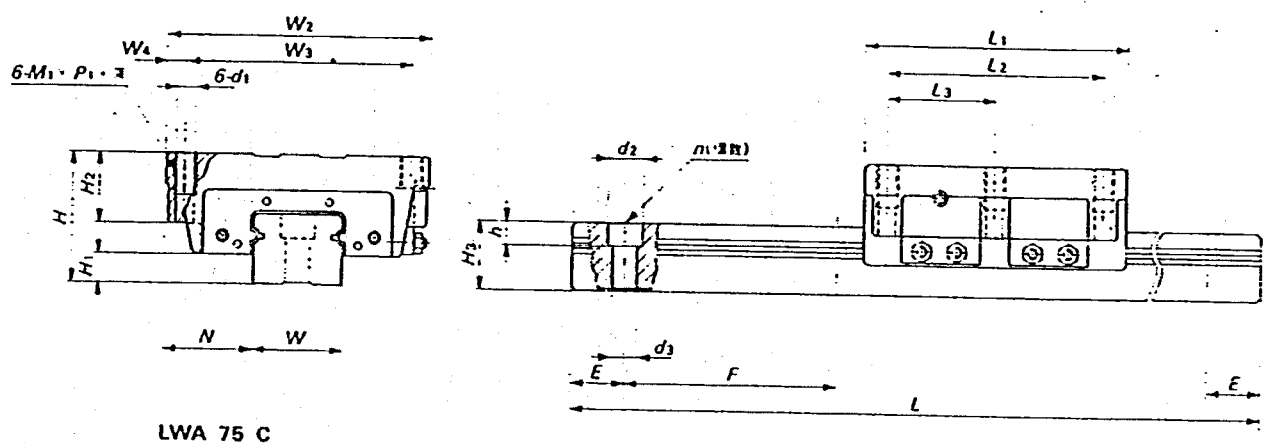
本装置で、最も技術面で検討を加えたのがトルクの反力受け部である。検討項目としては、図 3.10に示したように中空供試体試験の場合には、同一のロッドを利用して供試体の軸力载荷とねじり



反力機能を満足する必要がある。したがって軸力・トルク・軸荷用ロッドは、上下の移動が可能であるが、回転を拘束した構造とする必要がある。

上下移動可能で回転を拘束したトルク反力受け部の概略構造を図3.17に示す。

反力は、軸力・トルク・軸荷軸に固定したトルク反力アーム2本（180度対称）の先端で受け持つ機構とした。トルク反力アーム先端で受け持つ反力の大きさは、最大設計トルク $8 \text{ tf} \cdot \text{m}$ の場合で約 8 tf となる。以上の耐力・機能を満足するものとして図3.18に示す。スライドユニットとトラックレールで構成されているリニアウェイ（日本トムソン株式会社）をトルク反力アーム先端およびトルク反力



呼び番号	アセンブリ寸法 mm							スライドユニット寸法 mm							
	H	H ₁	N	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	L ₁	L ₂	L ₃	d ₁	M ₁ × P ₁ × 深さ	H ₂	W	H ₃
<u>LWA 75 C</u>	110	25	72.5	—	220	190	15	220	180	90	15.7	M18 × 2.5 × 35	60	75	59

トラックレール寸法 mm						トラックレール取付け用 ボルト		基本静定格荷重	基本静定格荷重	静定格トルク
L (n)	d ₂	d ₃	h	E	F	ねじ	首下長さ mm	C kgf	C ₀ kgf	T ₀ kgf·m
1540(11)	29	20	19.5	70	140	M18 × 2.5	65	15600	18500	522
2000(14)	29	20	19.5	90	140					
3000(22)	29	20	19.5	30	140					

図3.18 スライドユニットとトラックレール

フレームに取り付けた構造とした。

反力受け部は、特にトルク载荷波形（本装置の場合には正弦波形）制御に影響を与える要因が大きいのでリニアウェイ部のガタが生じないように慎重に組立て・調整を行った。また、動作機能を確保するために可動部にはダストカバーを取り付けてある。

図3.19に中空供試体試験で粗粒材料について行った繰返しせん断応力制御試験時に得られた記録波形を示す。制御は約 $\pm 1 \text{ kgf/cm}^2$ のせん断応力载荷によって行った結果であるが、せん断応力およびトルク波形に大きな乱れが認められず本装置の反力機構は試験精度に影響を与えるような問題は無いものと判断される。また、その時の軸方向応力 σ_a の変動は $\pm 0.005 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

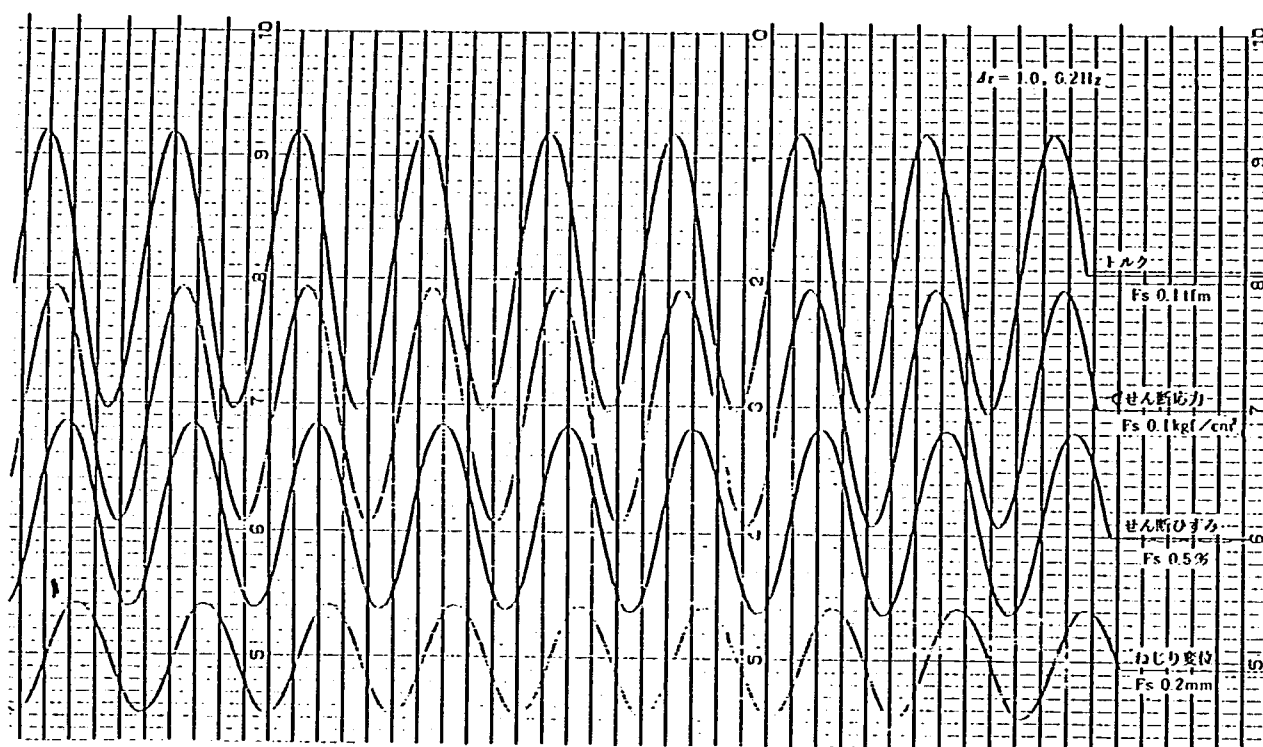


図3.19 せん断応力制御試験時の記録波形 ($\Delta\tau = \pm 1 \text{ kgf/cm}^2 \cdot f = 0.2 \text{ Hz}$)

(3) 供試体ねじり力伝達刃

中空供試体試験の場合には、供試体の端面にねじりせん断力を与えて供試体の高さ方向に一定のせん断ひずみが生じるようにすることが必要である。

ペディスタル表面と供試体端面の境界に相対変位を生じないようにせん断応力を伝達する方法としては、①ペディスタル表面に刃を取り付ける。②ペディスタルと試料を接着剤で固定する。等が考えられるが本装置の場合には①の方法を採用した。

写真3.7にねじり力伝達刃を取り付けた下部ペディスタルを示す。伝達刃は幅4.4 cm高さ4.4 cm

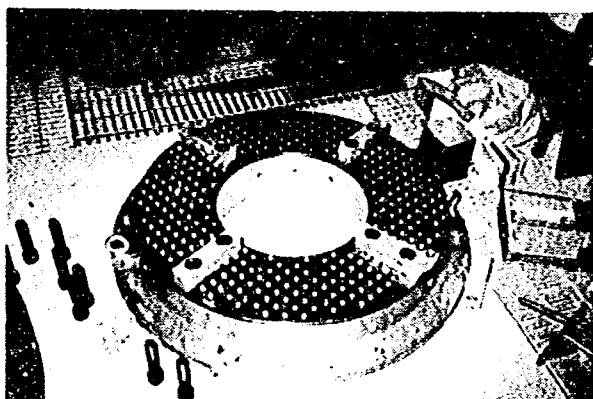


写真3.7 下部ペディスタルとねじり力伝達刃

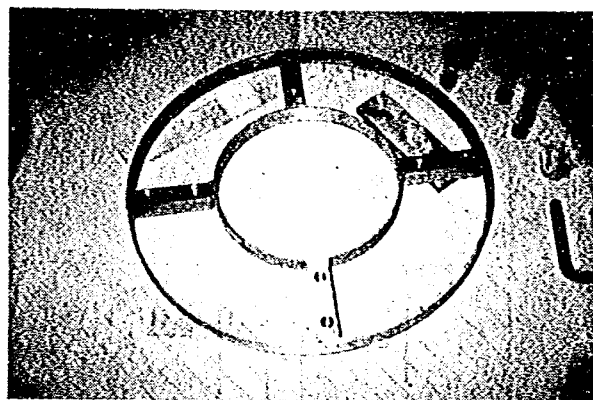


写真3.8 供試体上部のねじり力伝達刃



写真3.9 上部のねじり力伝達刃埋込み後

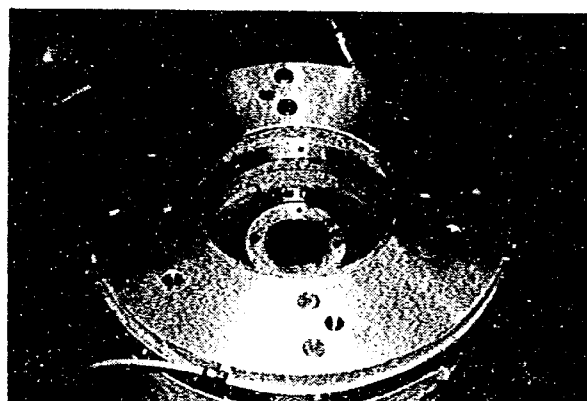


写真3.10 上部ペディスタル取り付け後

長さ 19 cm の短形のものでペディスタル表面にボルトで固定してある。刃の大きさは試験時に供試体端面に生じる最大せん断力とボルトの許容せん断応力によって決定したものである。また、刃の本数については確定されたものはないが 4 本としている。

写真 3.8 に供試体上部のねじり伝達刃を示す。上部の場合には、下部と同じ伝達刃を鋼製のリングで連結して刃の相互関係がずれないようにしてある。

写真 3.9 に供試体を締固めて作成した時の上部端面にねじり力伝達刃を試料と一緒に埋込んだ状態を示す。写真 3.10 は写真 3.9 の直後に上部ペディスタルを乗せてから図 3.20 に示すような方法でねじり力伝達刃と上部ペディスタルを固定した状態である。

後述する確認試験によって鋼製刃をペディスタル表面に固定することによって供試体が理想的なせん断変形を生じることが確認されている。

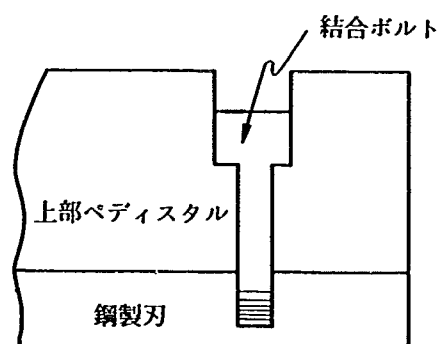


図 3.20 上部鋼製刃の結合

(4) ねじり上部反力盤の固定

中空供試体試験時の上部ねじり反力盤の概略構造を図 3.21、写真 3.11に示す。

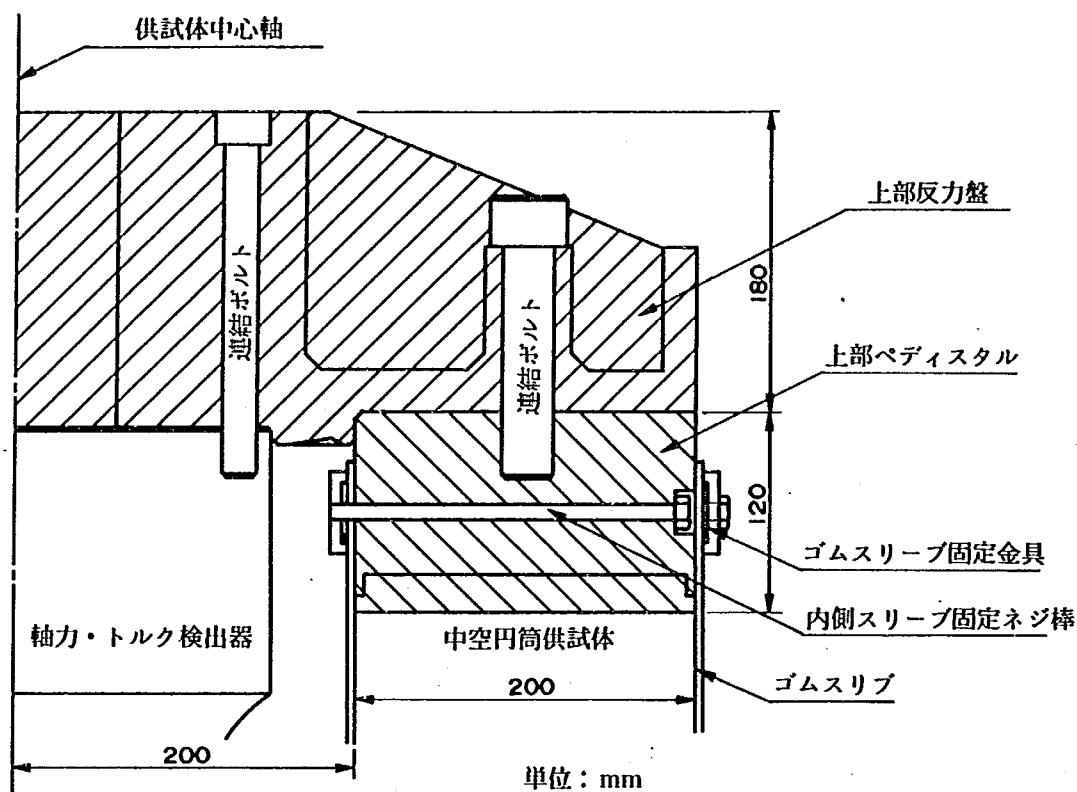


図 3.21 中空供試体試験時の上部反力盤およびペディスタル

作業手順としては、軸力・トルク検出器によって装置中心部のロッドを上限まで上昇させておく。次に軸力・トルク検出器の上端に上部反力盤を連結ボルトで固定する。固定後に軸力制御によって上部反力盤の下面が上部ペディスタル上面にタッチするまで载荷用ロッドを下降させ所定のタッチ荷重を作用させた状態で連結ボルトで上部反力盤と上部ペディスタルを固定する。

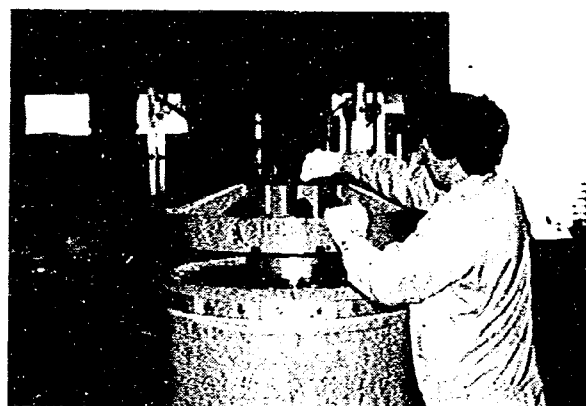


写真 3.11 ねじり上部反力盤

3.2.6 制御・計測装置

(1) 制御方式

試験時装置の駆動は電気油圧サーボ方式を採用している。試験時の制御項目を大別すると応力とひ

ずみ制御となる。応力とひずみ制御の場合には供試体の初期条件（直径・高さ・体積）を外部入力しておき、試験時に変動する項目についてはそれぞれ専用の検出器によって検出する。検出されてくる電圧から制御に必要な値をアナログ演算器で算出して制御電圧として出力することによって電気油圧サーボ弁（油研工業）をコントロールする方式を採用している。

繰返し载荷試験時（正弦波形を対象）の場合にはファンクションジェネレータ（発振器）によって制御電圧をコントロール出力している。図 3.22 に制御系統の概要を示す。

表 3.7 ファンクションジェネレータの仕様

発振周波数	0.001 ~ 100 kHz
正弦波ひずみ率	10 kHz 以下 0.5 %以内
出力電圧	最大 10 V / 50 Ω 抵抗負荷
出力減衰器	0, 20, 40 dB
DC オフセット	ON, OFF の 2 モード
備 考	(株)エヌエフ回路設計ブロック

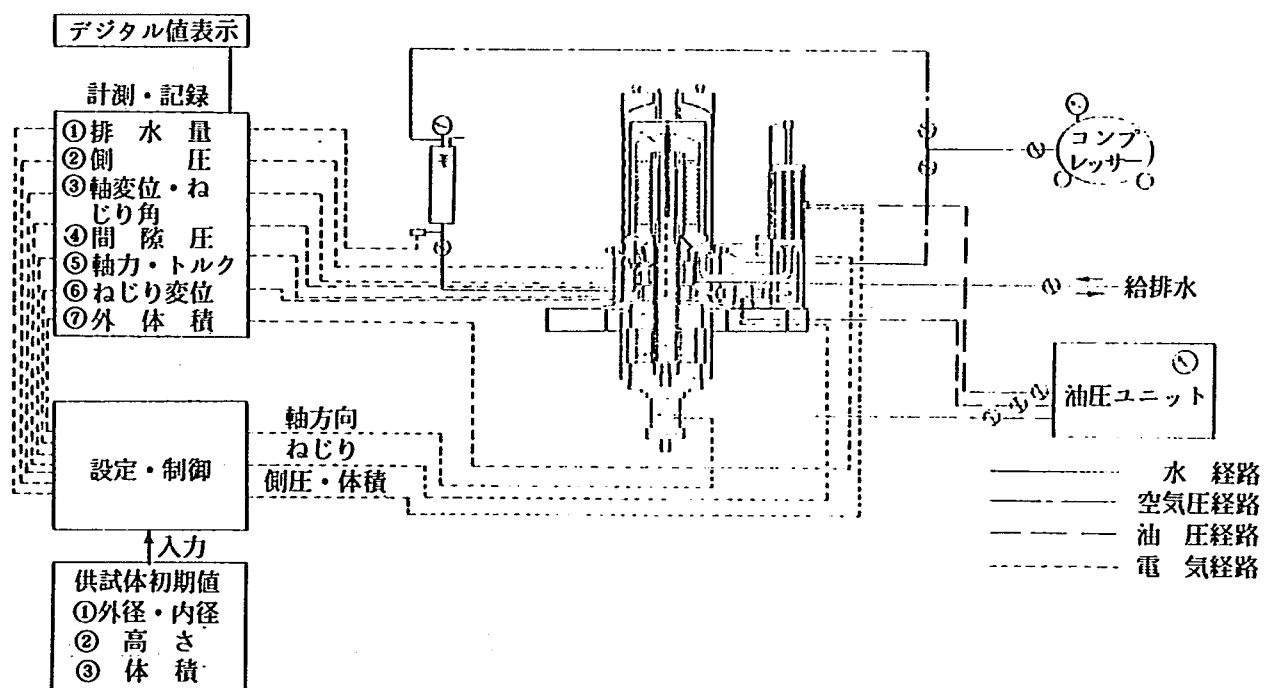


図 3.22 装置の制御系統の概要

(2) 計測項目

計測は各々の項目に応じた検出器専用の増幅器により記録器への信号入力が可能である。

表 3.8 に計測範囲を、表 3.9 に記録器の仕様を示す。

表 3.8 計測範囲

計測項目	静的载荷試験	繰返し载荷試験
軸 力	最大 80 tf	最大 30 tf
側 圧	最大 7 kgf/cm ²	最大 7 kgf/cm ²
トルク	最大 8 tf・m	最大 ± 6 tf・m
軸変位量	最大 120 mm	最大 50 mm
体積変化量	最大 50,000 cm ³	最大 20,000 cm ³
ねじり角	最大 30 度	最大 ± 2 度
間 隙 圧	- 1 ~ 7 kgf/cm ²	- 1 ~ 7 kgf/cm ²
ねじり変位量	最大 210 mm (供試体外周)	最大 ± 20 mm (供試体外周)

表 3.9 記録器

記録器	マルチコード	X-Y レコード
チャンネル数	8	1 ペン
記 録 幅	250 mm	380 mm × 254 mm
紙送り速度	最大 1200 mm/min	—
直 線 性	Fs の ± 0.3 % 以内	Fs の ± 0.25 % 以内
最大ペン速度	1300 mm/sec	X : 1500 mm/sec Y : 2000 mm/sec
入力フィルタ	- 40 dB	- 40 dB
備 考	渡 辺 測 器	

(3) 計測位置

中実供試体試験時と中空供試体試験時および両者に共通した計測位置について以下に示す。

① 中実供試体試験時

写真 3.12 に示すように三軸室内の供試体に対して軸力（最大 80 tf，差動トランス式，坂田電機 ㈱）は供試体の上端で軸変位（最大 120 mm，差動トランス式，SCHAEVITZ）は供試体上下のペディスタル間で測定している。

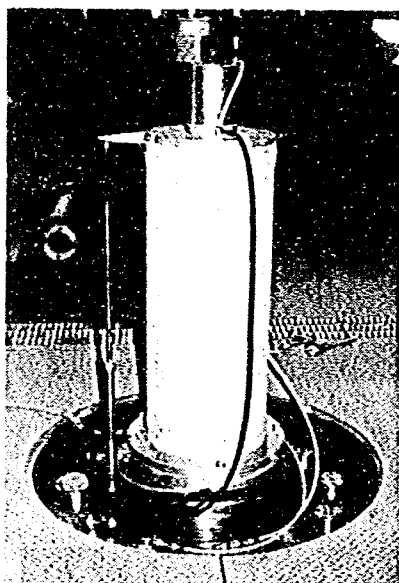


写真 3.12 中実供試体の軸力と
軸変位の測定

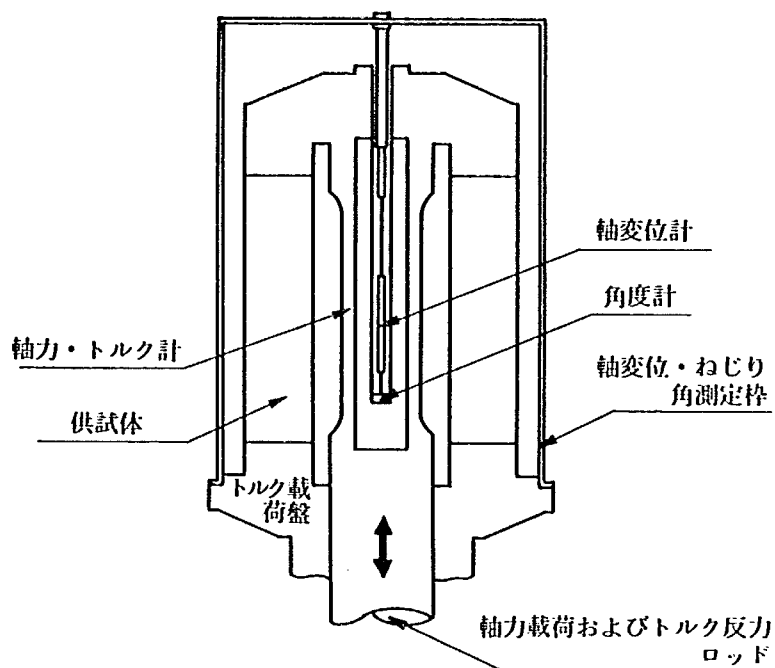


図 3.23 中空供試体の測定

② 中空供試体試験時

図 3.23に軸荷重・軸変位・トルク・ねじり角の測定位置を示す。

軸力（最大 80 tf，差動トランス式，坂田電気㈱）とトルク（最大 8 tf・m，差動トランス式，坂田電機㈱）は 1 個の検出器によって供試体の中心で測定している。



写真 3.13 中空供試体試験時の
軸変位・ねじり角計測棒



写真 3.14 計測棒を下ロディスタルに
固定して検出器を取り付けた状態

軸変位（最大120 mm，差動トランス式，SCHAEVITZ）とねじり角度（最大30度，差動トランス式，SCHAEVITZ）は供試体の中心で，写真 3.13，3.14に示すような測定棒を基準としてトルク反力ロッドの変位量が測定値に介入しないように相対変位量として測定している。

その他，トルク载荷盤のねじり変位（最大 210 mm）量は，写真 3.15に示すように三軸室内で载荷盤の半径 40 cmの円周上の変位をワイヤーでポテンショメーター（みどり測器㈱）に伝達して測定している。

③ 共通した計測

側圧（最大 7 kgf/cm^2 ，ひずみゲージ式，日本アドテック㈱）と間隙圧（最大 $-1 \sim 7 \text{ kgf/cm}^2$ ，ひずみゲージ式，日本アドテック㈱）は写真 3.16に示すように三軸室の底盤に検出器を取り付けてある。間隙圧については，供試体ペディスタルから測定用の耐圧ホースで検出器と接続して測定している。外体積変化は側圧加圧装置の水圧シリリンダーの変位（最大 750 mm，ポテンショメーター，みどり測器㈱）を検出して体積量に換算している。

内体積変化（飽和試験時）は図 3.24に示すように供試体から出入りする水によって生ずる水頭圧の変化を差圧（最大 1000 mm H_2O ，静電容量式，大倉電気㈱）変化として検出して体積量に換算している。

④ その他

トルク载荷アーム先端に作用している力を検出するために荷重計（最大 6 tf，ひずみゲージ式，日本アドテック㈱）が取り付けられている。また，バックプレッシャー圧力の示圧を行うためのブルドン管（最大 10 kgf/cm^2 ，0.25 級，長野計器）を設備している。

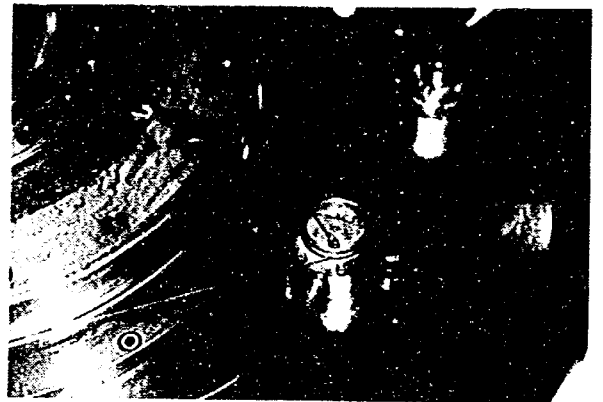


写真 3.15 中空供試体ねじり変位の測定

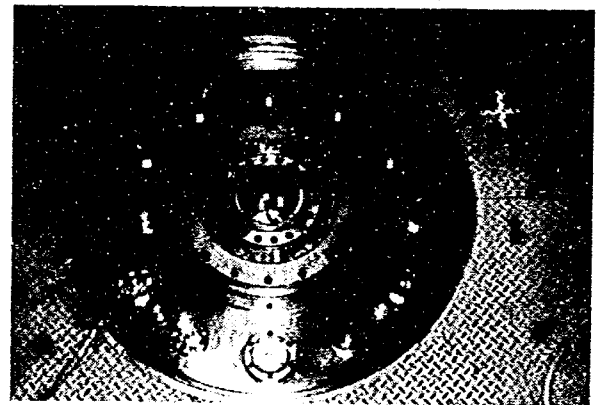


写真 3.16 側圧・間隙圧の測定（三軸室底盤）

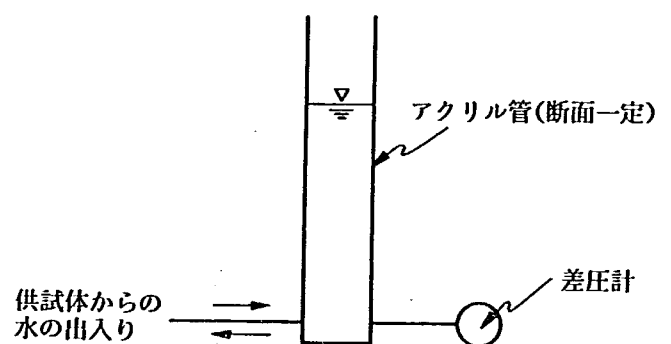


図 3.24 内体積の測定

3.2.7 動力装置

本試験装置機能を満足する動力源としては表 3.10に示す仕様の油圧ポンプを装備している。

表 3.10 使用油圧ポンプ

ポンプ回転数	960 r・P・m
定 格 油 圧	210 kgf/cm ²
吐出量・電力	最大 45.5 ℓ/min, 22 kW 最大 11.9 ℓ/min, 5.5 kW
電 源	AC 200 V, 50Hz
使 用 油	一般鉱物油

吐出量の異なる大小の油圧ポンプを装備しており、試験に必要な吐出量に合わせて選択して使用している。

3.2.8 供試体作成装置

(1) 供試体作成モールド

中実供試体作成モールドは鉄製で円周方向に4分割で高さ方向に2分割（2段）したものをボルトを利用して組立てる方法としている。

中空供試体作成モールドの概略構造を図 3.25、写真 3.17に示す。

中空供試体の場合には、外側のモールドと内側のモールドが必要である。外側のモールド

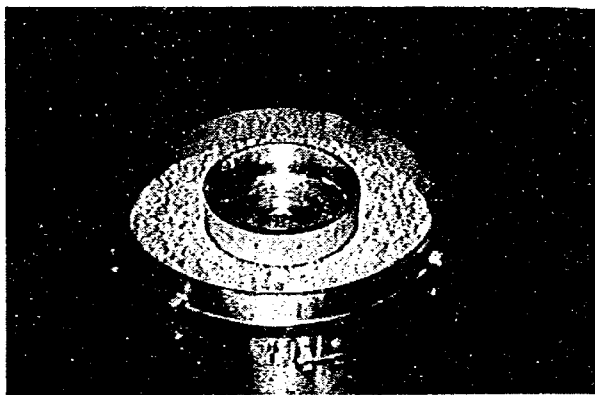


写真 3.17 中空供試体作成モールド

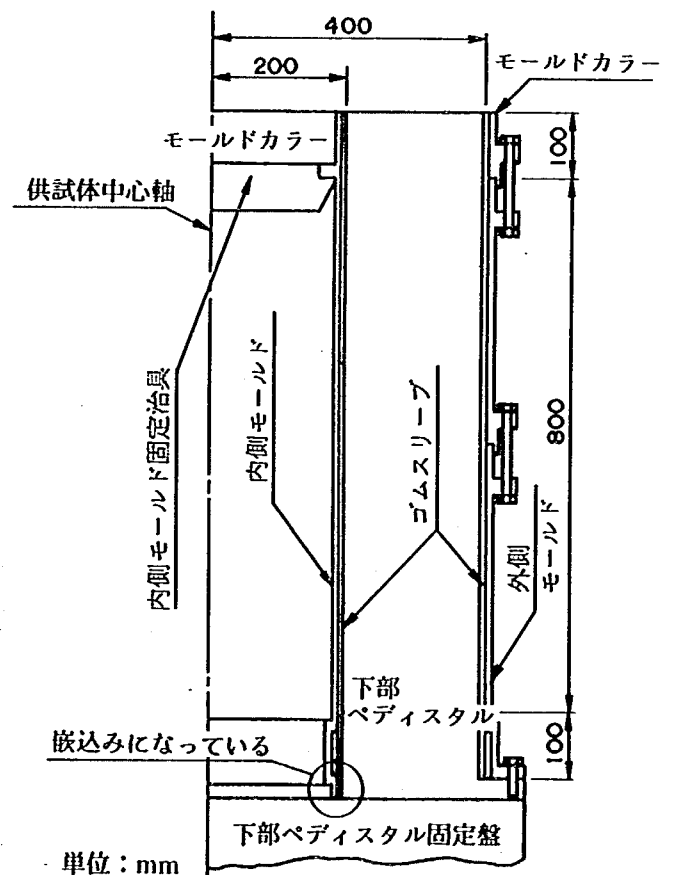


図 3.25 中空供試体作成モールド

ドは中実供試体の場合と同様に円周方向に4分割して高さ方向に2分割（2段）したものをボルトによって締付けて組立てる。内側モールドの場合には円周方向にのみ3分割したものをを用いている。図3.25に示すように内側モールドの下端が下部ペディスタル固定盤の溝に嵌込みになっている。また、上端部はモールドが内側に倒れないように円形の治具を用いて固定してある。モールドを取り除く時は、供試体を真空吸引した状態で外側の固定ボルトを外す。内側モールドの場合は、上部の固定治具を外してから3分割されているものを1片ずつ静かにチェーンブロックを利用して上方に引き抜くことによって取り除く。

中空および中実供試体作成モールドともモールド内壁面には試料締固め時にゴムスリーブが破損するのを防ぐためにゴムが貼付けてある。

(2) ゴムスリーブの固定

中実供試体および中空供試体のゴムスリーブは厚さ3mmの生ゴムを使用している。

中実供試体のゴムスリーブの固定方法は上部および下部ペディスタル側面にゴムスリーブを紐状に切断したもので人力によって締付ける方法によっている。

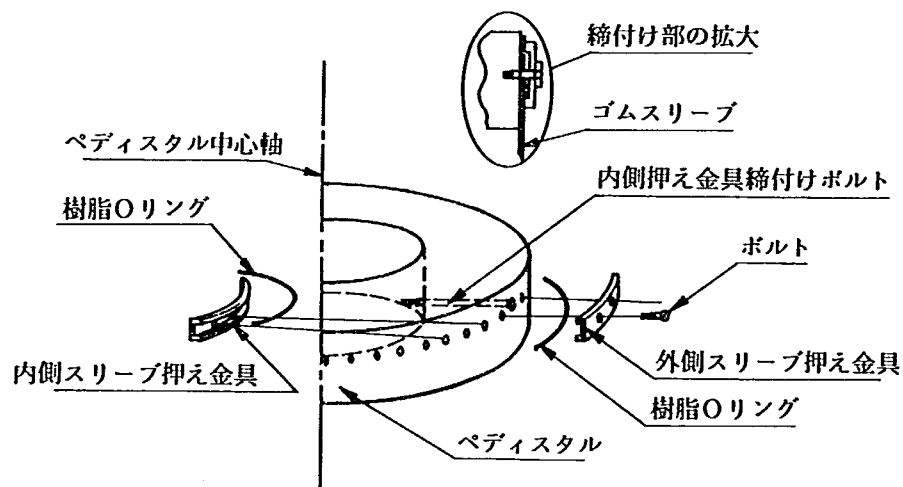


図3.26 中空供試体ゴムスリーブ固定方法

中空供試体の場合には図3.26、写真3.18に示す方法で固定している。内側および外側のゴムスリーブとも凹形の金具と樹脂系Oリングを用いてボルトで締付けて固定している。

最初に内側のゴムスリーブをペディスタルの内壁面に外壁から貫通している穴をとおして内側スリーブ押え金具（4枚）をボルトで締付け固定する。次に内側と同様に外側のゴムスリーブはスリーブ押え金具（12枚）をボルトで締付けて固定する。

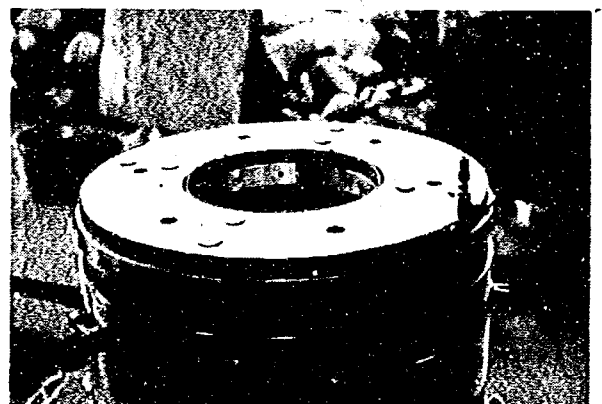


写真3.18 中空供試体のゴムスリーブ固定

3.2.9 装置基礎およびその他

中実供試体および中空供試体の作成は、三軸室底盤上でモールドを組立てた状態で行うことが出来る。作成後は油圧回転真空ポンプ（排気速度 150 ℓ/min ）によって吸引した状態でモールドを取り除く。また試験終了後には、下部ペディスタル固定ボルトを外して供試体全体を、実験室内に設備されている X-Y クレーン（最大 3 tf）によってつり上げて移動し、三軸室外で解体する方式としている。

その他、三軸圧力容器固定用エアーシリンダーの作動およびバックプレッシャー加圧用の圧力源としてベビーコンプレッサー（最大圧 9.5 kgf/cm^2 ，タンク容量 80 ℓ ，2.2 kW）が付属してある。

図 3.27 に装置基礎の形状寸法を示す。基礎は鉄筋コンクリートであり装置の全重量を 10tf として設計してあるとともに実験時の作業性を考慮してピットの深さ（装置の高さ位置と床面の関係）を決定した。

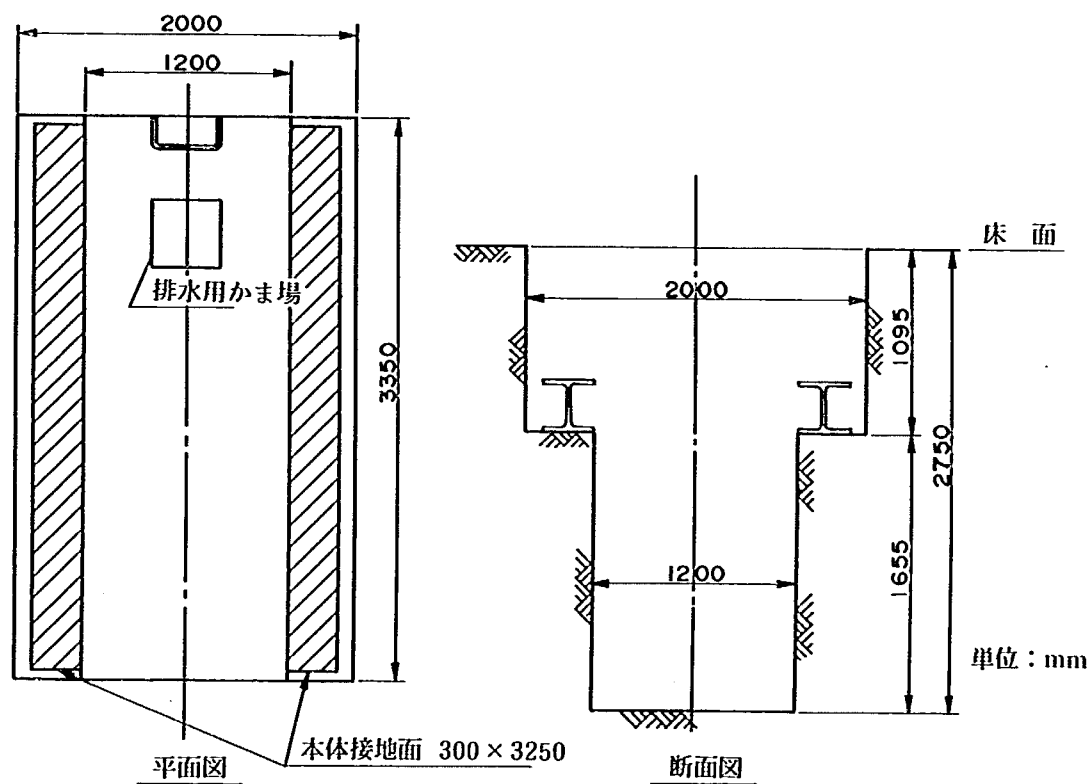


図 3.27 装置基礎

3.3 較正および精度の検定

3.3.1 各検出器の較正および精度の検定

精度のよい試験を行うためには、あらかじめ各検出器の精度の検定をしておく必要がある。そこで、各検出器の最大容量（仕様の範囲）の検定は前述の仕様に従ってメーカーが行い、また実験室内では、できる範囲内で小さな容量（最小容量）について検定を行うことにした。検定結果は両者を併せて記すことにする。なお、メーカーの検定結果には＊，実験室内で行った検定結果には＊＊と示す。また、現地組立の際に較正した検出器もあるので、その較正方法についても述べる。

最大容量の精度は次のようにして求めた。

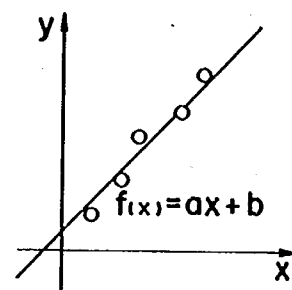
- ① データから1次回帰直線を求める

$$f(x) = ax + b$$

- ② 誤差=測定値-1次回帰直線値

$$\Delta y_{\max} = y_i - f(x_i)$$

- ③ 精度 = $\frac{\Delta y_{\max}}{FS} \times 100\%$ (3.11)



また、最小容量の誤差は次のようにして求めた。

$$\text{誤差 } \Delta y_{\max} = \text{測定値} - \text{設定値 (与えた真値)} \quad \text{..... (3.12)}$$

検定結果の一覧表を表 3.11に示す。

(1) 中空用軸力・トルク計

- ① 中空用軸力計 (P = 80 tf)

中空用軸力計は試験機の構造上、引張計として用いるので引張用の校正・検定を行わなければならない。したがって、鋼管製の模擬試料 (SGP 450 A, 外径 457.2 mm, 内径 441.4 mm, 肉厚 7.9 mm, 長さ 1135 mm) を用いてあらかじめ万能アムスラー試験機 (100 tf, 精度 ± 0.2 tf, 島津製作所製) によって圧縮校正を行って、その荷重 P ~ ひずみ $\Delta \epsilon$ 関係を用いて中空用軸力計を校正および検定した。(図 3.28 参照)

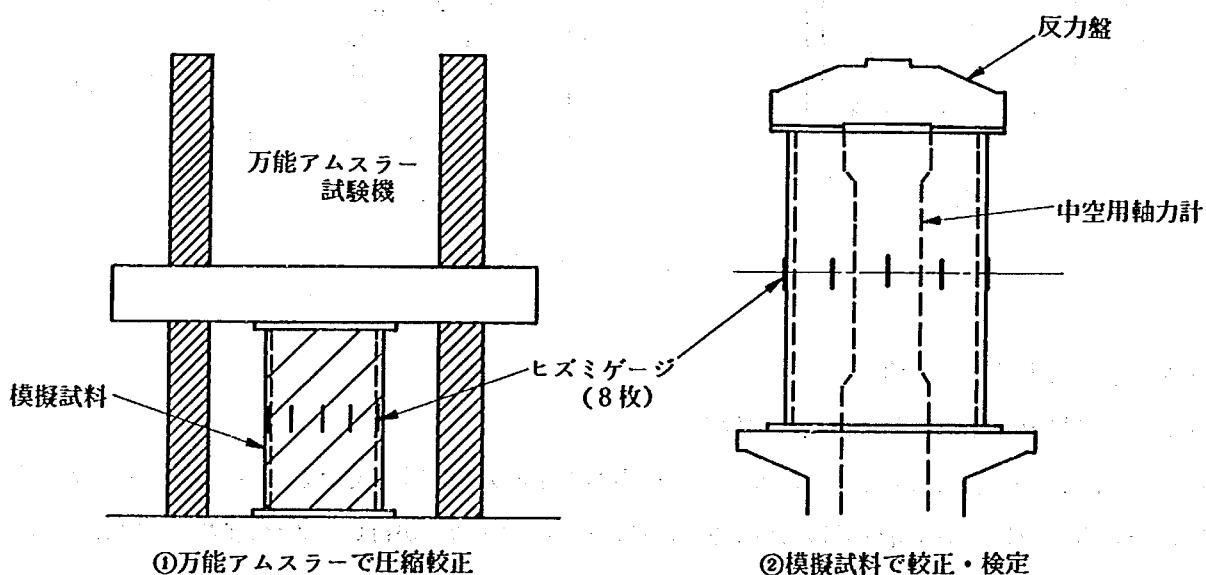


図 3.28 中空用軸力計の校正・検定方法

表3.11 検 定 結 果 一 覧 表

検 定 項 目	検 出 器 の 概 要				最 大 容 量 の 検 定		最 小 容 量 の 検 定	
	最 大 容 量	検 出 方 法	型 式	製 作 会 社	精 度	検 定 器	誤 差	検 定 器
中空用軸力計	80 tf	差動トランス式	——	坂 田 電 機	$\pm 0.36\%/FS$	精度 $\pm 0.15\%/FS$ の 模 擬 試 料	——	——
中実用軸力計	80 tf	"	PV-160L	"	$\pm 0.11\%/FS$	精度 0.2 tf の 万能アムスラー試験機	$\pm 20\text{ kgf}$	死荷重($\sim 340\text{ kgf}$)
トルク計	8 tf $\cdot$ m	"	PV-300T	"	$\pm 0.25\%/FS$	精度 $\pm 0.13\%/FS$ の 検 証 用 荷 重 計	$\pm 8\text{ kgf}\cdot\text{m}$	" ($\sim 360\text{ kgf}$)
中空用軸変位計	120 mm	"	LV-1202W	SCHAEVITZ	$\pm 0.08\%/FS$	精度 0.1 mm の 測 長 器	——	——
中実用軸変位計	120 mm	"	LV-1201W	"	$\pm 0.13\%/FS$	"	$\pm 0.07\text{ mm}$	ダイヤルゲージ (1/100 mm) ($\sim 1\text{ mm}$)
微小変位計	3 mm	"	——	宝 電 研	$\pm 1.53\%/FS$	精度 1/1000 mm の マイクロメーター	——	——
ねじり角度計	30 度	"	FV-30T	SCHAEVITZ	$\pm 0.04\%/FS$	精度 $\pm 10''$ の ロータリーエンコーダー	——	——
ねじり変位計	200 mm	ポテンシオメータ式	CPP-45B	緑 測 器	$\pm 0.29\%/FS$	精度 $\pm 0.04\%/FS$ の ね じ り 角 度 計	$\pm 0.09\text{ mm}$	ダイヤルゲージ (1/100 mm) ($\sim 30\text{ mm}$)
側 圧 計	7 kgf/cm ²	ひずみゲージ式	KP/7B	日本アドテック	$\pm 0.25\%/FS$	精度 $\pm 0.25\%/FS$ の 精密ブルドン管式圧力計	$\pm 0.02\text{ kgf/cm}^2$	精度 $\pm 0.05\%/FS$ の 圧力検定器($\sim 7\text{ kgf/cm}^2$)
間 隙 水 圧 計	-1 $\sim$ 7 kgf/cm ²	"	KP/7B	"	$\pm 0.10\%/FS$	"	$\pm 0.01\text{ kgf/cm}^2$	"
外体積変化計	50 ℓ	ポテンシオメータ式	LP-750FX	緑 測 器	$\pm 0.21\%/FS$	精度 0.1 mm の 測 長 器	——	——
内体積変化計	50 ℓ	ダイヤフラム型	HP 1000	大 倉 電 気	$\pm 0.13\%/FS$	精度 10 cc の メスシリンダー	$\pm 70\text{ cc}$	精度 10 cc の メスシリンダー($\sim 7\ell$)

校正および検定に使用した模擬試料の精度（最小読み取り荷重／フルスケール）を求めると以下のようになる。

ひずみゲージは8枚を直列につなぎ、出力を8倍にして用いている。したがって、ひずみ測定器の読み取り精度を 5μ とすると、ひずみゲージの測定精度 $\Delta\epsilon$ は $\Delta\epsilon = 5\mu/8 = 0.63\mu$ となる。

模擬試料の誤差 $\Delta P_{\min}$ は

$$P_{\min} = E \cdot \Delta\epsilon \cdot A = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \times 0.63 \times 10^{-6} \times 90.64 \text{ cm}^2 \\ \div 120 \text{ kgf}$$

$$\therefore \text{模擬試料の精度} = 120 \text{ kgf} / 80 \text{ tf} = 0.15 \% / \text{FS}$$

したがって、模擬試料は校正・検定するには十分の精度を持っていると考えられる。

校正するために用いた $P \sim \Delta V$ 関係（ひずみ $\Delta\epsilon$ の代わりに出力電圧 ΔV を用いた）を図3.29に示す。また、検定結果を図3.30に示す。この結果から、中空用軸力計の最大容量の精度は $^* \pm 0.36 \% / \text{FS}$ である。

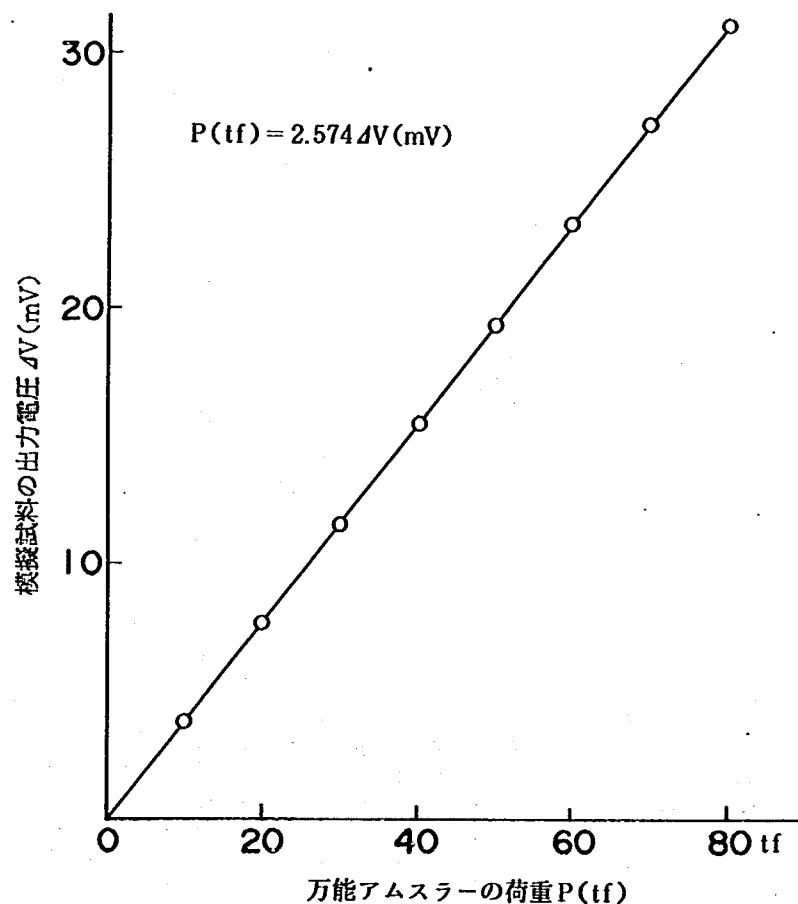


図3.29 $P \sim \Delta V$ 関係

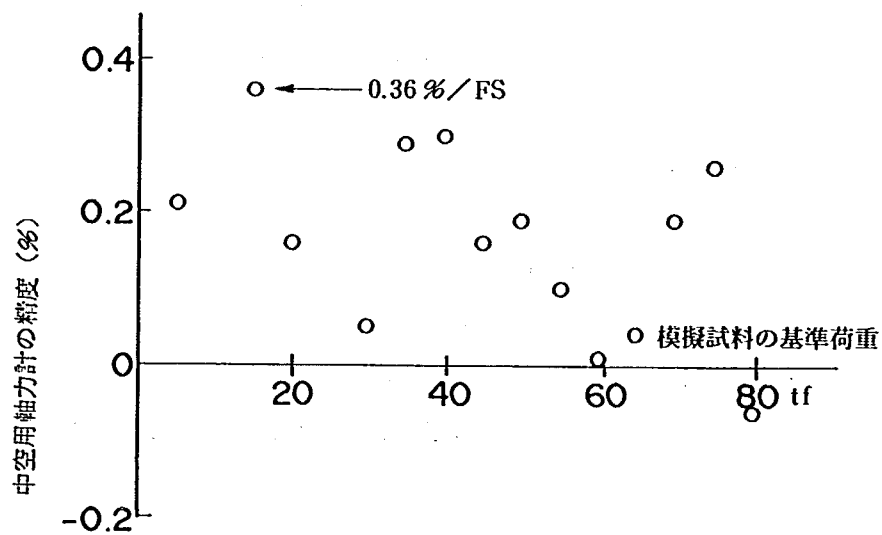


図 3.30 中空用軸力計の検定結果

② トルク計 ($T = 8 \text{ tf} \cdot \text{m}$)

図 3.31 に示すように、トルク载荷アームの先端部に検証用荷重計 ($P = 6 \text{ tf}$) を設置し、この荷重計によって校正・検定した。なお、検証用荷重計は前述の万能アムスラー試験機によって検定した。校正・検定方法は模擬試料をねじり駆動盤上に設置し、回転に伴い摩擦の生じるもの (たとえ

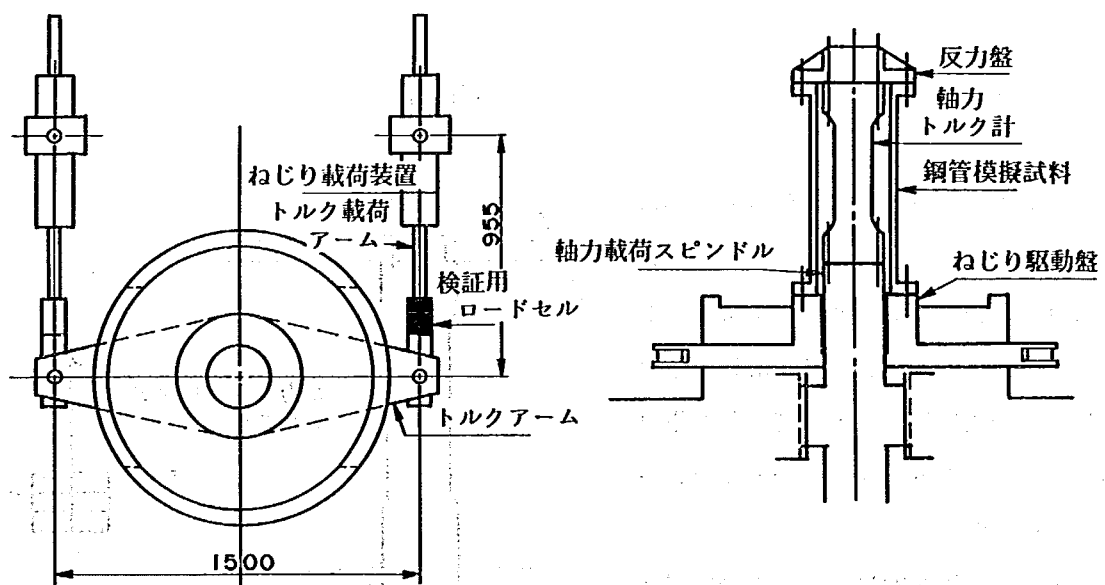


図 3.31 トルク計の校正・検定方法

ば防水シールなど)をできるだけ取り除いた状態で、トルクを載荷し、検証用荷重計の値から下記の計算方法(図 3.32 参照)によってトルク T を求め、校正・検定するという方法で行った。

検証用荷重計の精度から求めたトルク計の精度は以下の通りである。

検証用荷重計の精度 $\pm 0.13\% / FS$

$$\Delta P = 6 \text{ tf} \times 0.13\% = 7.8 \text{ kgf}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= 2 \cdot \Delta P \cdot L \cdot \cos \theta = 2 \times 7.8 \text{ kgf} \times 75 \text{ cm} \times \cos 6.656^\circ \\ &= 1162 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \div 11.6 \text{ kgf} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

したがって、トルクの精度は

$$\text{トルクの精度} = 11.6 \text{ kgf} \cdot \text{m} / 8 \text{ tf} \cdot \text{m} = 0.15\% / FS$$

検証用荷重計によってトルクの校正・検定するには十分な精度を持っている。

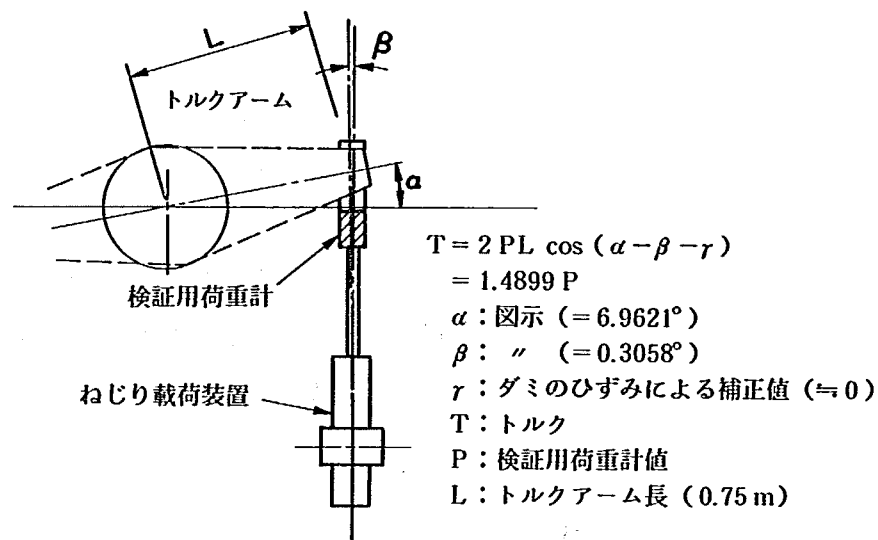


図 3.32 トルクの計算方法

また、トルク計の最小容量 (0 ~ 360 kgf・m) の検定方法は図 3.33 に示すように軸力載荷スピンドルの頭部に長さ 2 m の U 型鋼 (125 × 63 × 7 mm) を取り付け、その両端にワイヤーで重りを下げることによってトルクを載荷するという方法で行った。

検定結果を図 3.34 に示す。この結果から、トルク計の最大容量の精度は $^* \pm 0.25\% / FS$ となり、また最小容量 (0 ~ 360 kgf・m) の誤差は $^{**} \pm 8 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ となった。

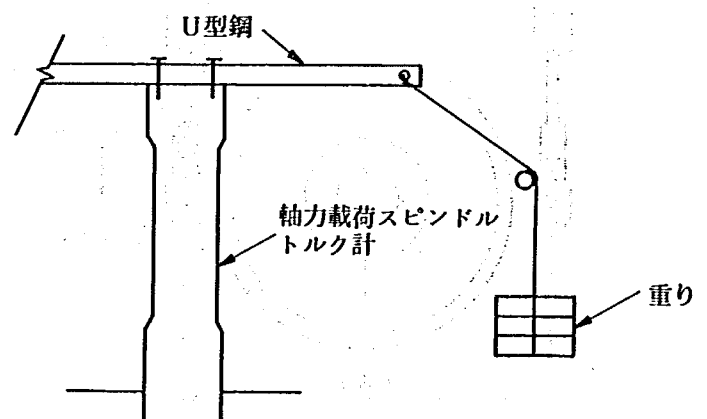


図 3.33 トルク計の検定方法 (最小容量)

③ 中空用軸力・トルク計の相互影響試験

軸力・トルク計は1個の検出装置によって供試体に作用する異なる2種類の力を検出する方式を採用している。したがって作用力が軸力とトルクの検出値相互に与える影響を求める試験を実施した。

相互影響を求める試験は、実材料供試体の代りに鋼管製の模擬試料(SGP 450A, 肉厚 7.9 mm, 長さ 1135 mm)を試験装置の載荷・反力盤にボルトで固定して軸力またはトルクを載荷して行った。

① 軸力載荷がトルクに与える影響

トルクを零制御状態にしておき軸力を段階的に増加および減少してその時のトルクアーム先端に取り付けてある検証用ロードセルの値を調べた。

トルクの零制御はトルク計の出力値によって実行していることから軸力載荷によって見掛けのトルク出力が現われれば検証用ロードセルの出力値に変化が現われることになる。また、本装置では、検証用ロードセルの出力値 (tf) に 1.49 m を乗じた値がトルク (tf・m) 値に等しくなる (3.3.1の(1)を参照)。

試験結果を図 3.36 に示す。軸力 80 tf の時に検証用ロードセル出力値による換算トルクで最大 0.052 tf・m が現われておりせん断応力に換算すると 0.044 kgf/cm² 程度となる。

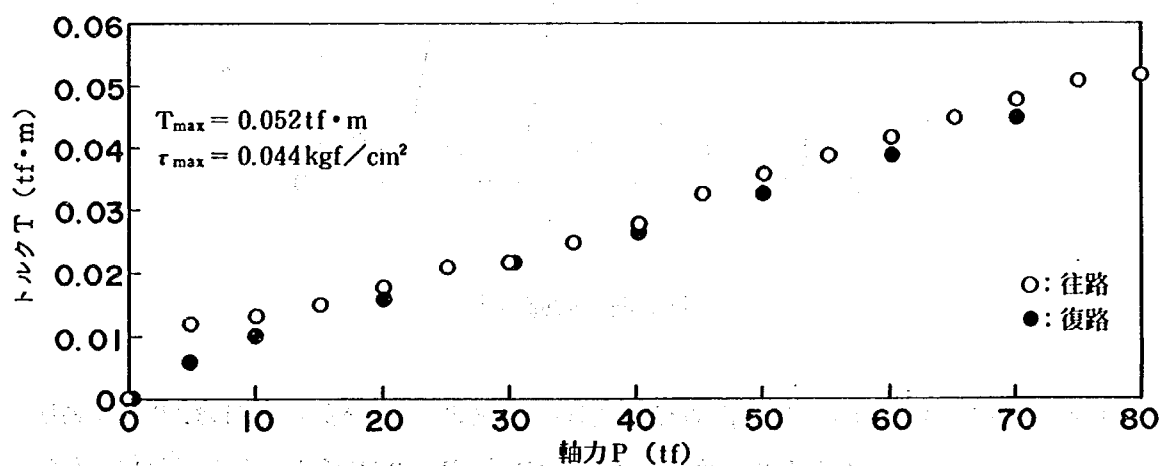


図 3.36 軸力載荷がトルクに与える影響

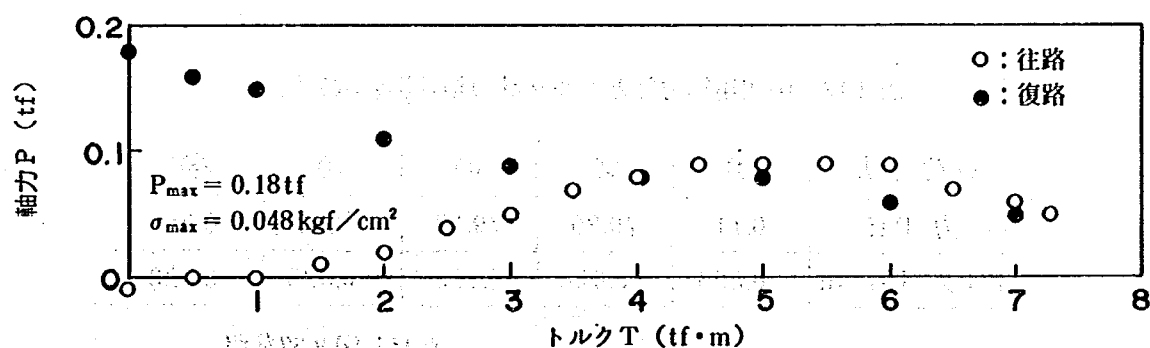


図 3.37 トルク載荷が軸力に与える影響

⑥ トルク載荷が軸力に与える影響

軸力載荷用の油圧経路を閉じて軸力を無負荷状態にしており、段階的にトルクを載荷・除荷してその時の軸力出力値について調べた。

試験結果を図 3.37 に示す。トルク除荷時に最大 0.18 tf の見掛軸力が現われており軸方向応力に換算すると 0.048 kgf/cm^2 程度となる。

以上、軸力・トルクの相互影響を求める試験を行った。しかし、試験時の載荷力が大きいこと、また試験装置本体と鋼管模擬試料を用いて試験したこと、特に鋼管模擬試料上下端載荷部の平行度および鋼管模擬試料の載荷時の変形状態が試験値に影響を与えている事も考えられるため真の軸力・トルク相互の影響については不明であるが、検出器自体の相互影響は本試験値よりは少ないものと考えられる。

次に軸力計とトルク計の制御時の相互影響を調べるため、図 3.38 に示すような載荷方法で試験を行うことにした。なお、試験条件はできるだけ繰り返し試験と同様となるように制御方法を共に応力制御とした。

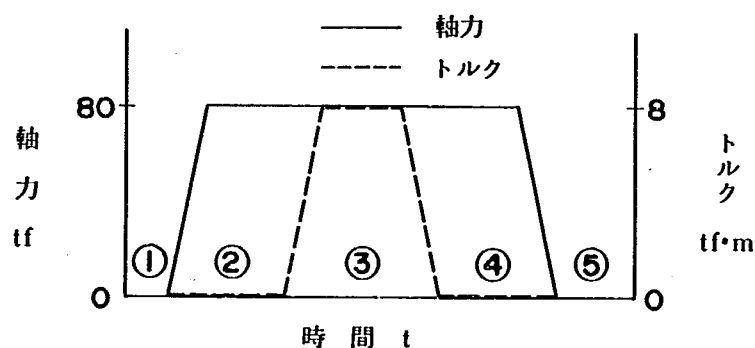


図 3.38 載荷方法

試験結果を表 3.12 に示す。軸力約 80 tf を載荷したときのトルクの変動幅 ΔT は $\Delta T=0$ であり、また、トルク約 8 tf・m を載荷したときの軸力の変動巾 ΔP は $\Delta P=0.02 \text{ tf}$ とほとんど変化しなかった。したがって、中空用軸荷重とトルクの相互影響はほとんどなかったと言える。

表 3.12 中空用軸力計とトルク計の相互影響試験結果

載荷方法	①	②	③	④	⑤
軸 力 $P \text{ tf}$	0.11	79.20	79.18	79.20	0.08
トルク $T \text{ tf} \cdot \text{m}$	-0.020	-0.020	8.165	-0.023	-0.023

ただし図 3.37 参照

(2) 中実用軸力計 ($P = 80 \text{ tf}$)

中実用軸力計の最大容量は前述の万能アムスラー試験機によって検定した。最小容量 ($0 \sim 340 \text{ kgf}$) については死荷重によって直接荷重を载荷するという簡単な方法で検定した。

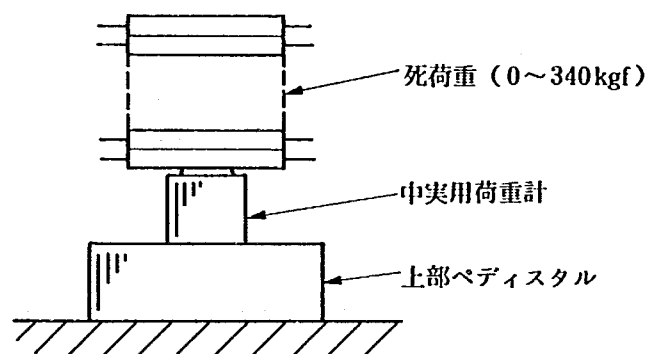


図 3.39 中実用軸力計の検定方法 (最小容量)

検定結果を図 3.40 に示す。この結果から、中実用荷重計の最大容量の精度は $^* \pm 0.11\% / \text{FS}$ となり、また、最小容量 ($0 \sim 340 \text{ kgf}$) の誤差は $^{**} \pm 20 \text{ kgf}$ となった。

(3) 中空用軸変位計 ($H = 120 \text{ mm}$)

中空用軸変位計の最大容量の検定は測長器 (1000 mm , 精度 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 坂田電機製) を用いて行った。

検定結果を図 3.41 に示す。この結果から、中空用軸変位計の最大容量の精度は $^* \pm 0.08\% / \text{FS}$ である。

(4) 中実用軸変位計 ($H = 120 \text{ mm}$)

中実用軸変位計の最大容量は前述の測長器によって検定した。また、最小容量 ($0 \sim 1 \text{ mm}$) については図 3.42 に示すように万力を用いてダイヤルゲージ ($1/100 \text{ mm}$) によって検定した。

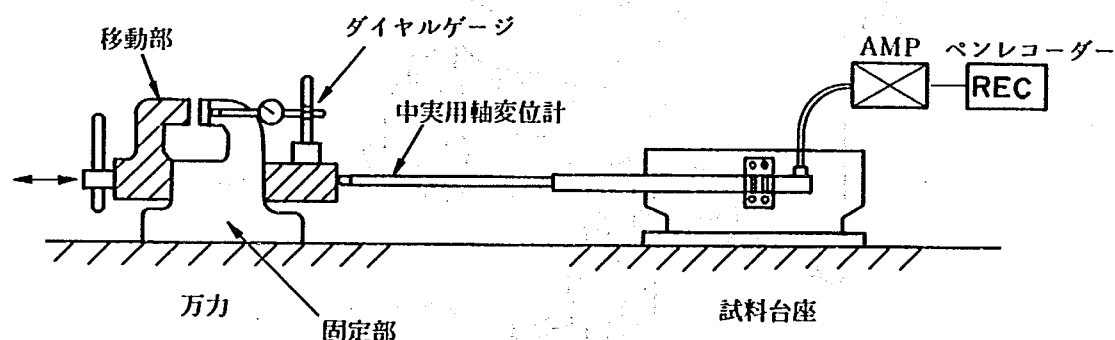


図 3.42 中実用軸変位計の検定方法

検定結果を図 3.43 に示す。この図より、中実用軸変位計の最大容量の精度は^{*} $\pm 0.13\% / \text{FS}$ となり、最小容量 (0~1 mm) の誤差は^{**} $\pm 0.07 \text{ mm}$ となった。

(5) 微小変位計 ($\Delta h = 30 \text{ mm}$)

この微小変位計は、ねじり角度計が故障したための代替品で、最大容量 30 mm の差動トランスタイプの変位計である。微小変位計の検定はマイクロメーター (ストローク 25 mm, 精度 1/1000 mm, 三豊製作所製) によって行った。

図 3.44 に示す検定結果より、微小変位計の精度は^{**} $\pm 1.53\% / \text{FS}$ ($\pm 4.6 / 100 \text{ mm}$) である。

(6) ねじり角度計 ($\theta = 30^\circ$)

高分解度型のロータリーエンコーダー (360°, 精度 $\pm 10''$ HEIDENHAIN 社製) を用いて、図 3.45 に示す方法で検定した。

図 3.46 の検定結果より、ねじり角度計の精度は^{*} $\pm 0.04\%$ となった。

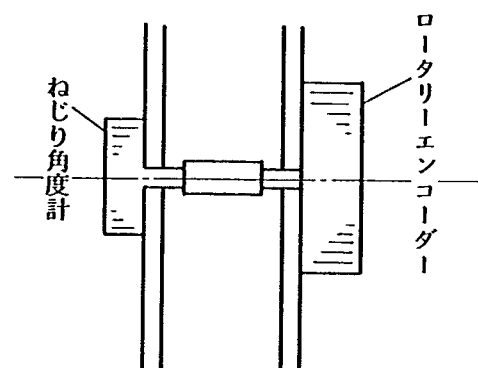


図 3.45 ねじり角度計の検定方法

(7) ねじり変位計 ($\Delta D_\theta = 200 \text{ mm}$)

ねじり変位計の校正及び最大容量の検定は上記の精度の良いねじり角度計によって行った。ねじり変位は $R = 40 \text{ cm}$ (外径) 上の変位であるのでねじり角度からの換算式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \Delta D_\theta &= \frac{\theta \pi}{180} \times 400 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (3.13) \\ &= 6.9813 \theta \text{ mm} \quad (\theta : \text{度}) \end{aligned}$$

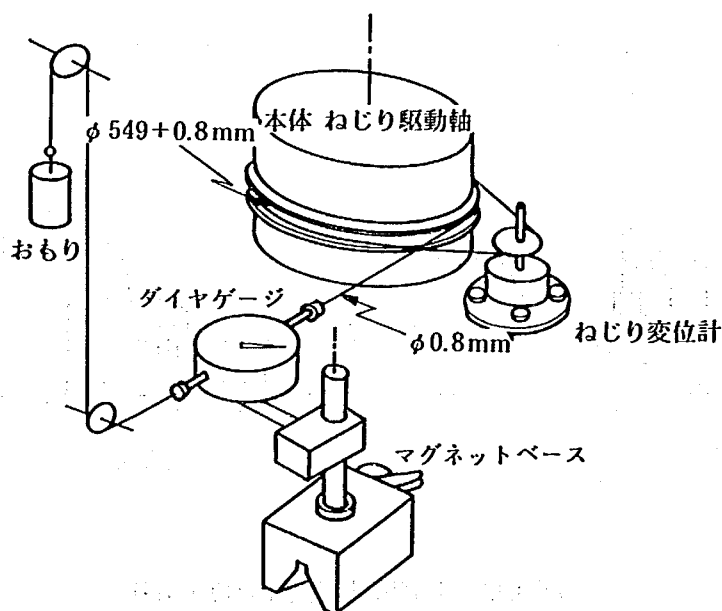


図 3.47 ねじり変位計 (ΔD_θ) の検定方法

ねじり変位計の最小容量の検定方法は図 3.46 に示すようにダイヤルゲージ (1/100 mm) によって行った。

検定結果を図 3.48 に示す。この図からねじり変位計の最大容量の精度は $^*\pm 0.29\%/FS$ であり、最小容量 (0~30 mm) の誤差は $^{**}\pm 0.09\text{ mm}$ である。

(8) 側圧計及び間隙水圧計 ($\sigma_3 = 7\text{ kgf/cm}^2$, $P_w = -1 \sim 7\text{ kgf/cm}^2$)

精密ブルドン管式圧力計 (0.25 級, 10 kgf/cm^2 , 精度 $\pm 0.25\%/FS$, 長野計器) と分銅荷重を油圧に変換して載荷する基準重錘型圧力計 (圧力検定器, 0~35 kgf/cm^2 , 精度 $\pm 0.05\%$, 双葉測器製作所製) を用いて側圧計及び間隙水圧計の検定を行った。

検定結果を図 3.49~51 に示す。この図より、側圧計及び間隙水圧計の精度はそれぞれ $^*\pm 0.25\%/FS$, $^*\pm 0.10\%/FS$ であり、側圧計及び間隙水圧計の誤差はそれぞれ $^{**}\pm 0.02$, $^{**}\pm 0.01\text{ kgf/cm}^2$ である。

(9) 外体積変化計 ($\Delta V = 50\text{ }\ell$)

外体積変化計は側圧シリンダー (内径 $\phi 300$) の変位を変位計 (0~75 cm) によって測定して求めている。したがって、外体積変化計の較正は、測長器によって検定した変位計を用いて、下記の換算式によって行った。

$$\begin{aligned}\Delta V &= \Delta L \cdot A = \Delta L \cdot \frac{\pi \cdot 30^2}{4} \\ &= 706.86 \cdot \Delta L \text{ cm}^3 \dots\dots\dots (3.14)\end{aligned}$$

図 3.52 に示す検定結果より、外体積計の最大容量の精度は $^*\pm 0.29\%/FS$ である。

(10) 内体積変化計 ($\Delta V_{IN} = 50\text{ }\ell$)

内体積変化計はメスシリンダー (精度 10 cc, 容量 1000 m ℓ) を用いて、較正及び検定した。

図 3.53 に示す検定結果より、内体積変化計の最大容量の精度は $^*\pm 0.13\%/FS$ であり、また最小容量 (0~7 ℓ) の誤差は $^{**}\pm 70\text{ cc}$ である。

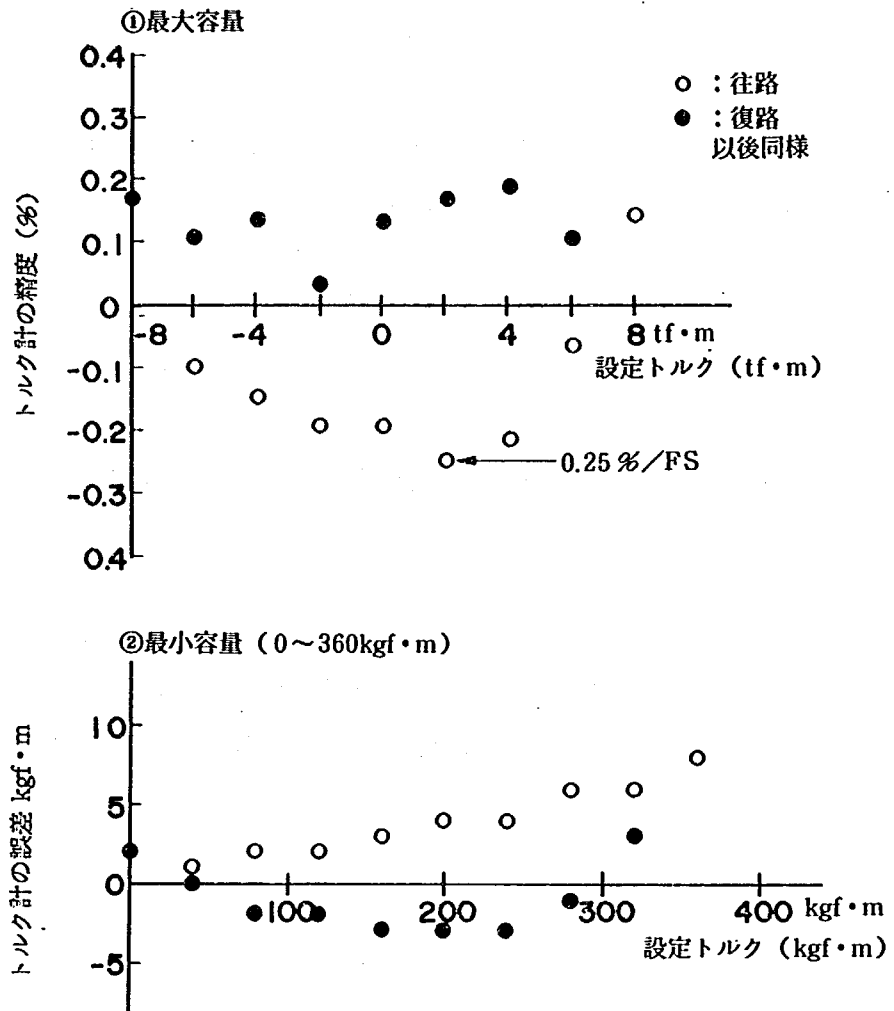


図 3.34 トルク計の検定結果

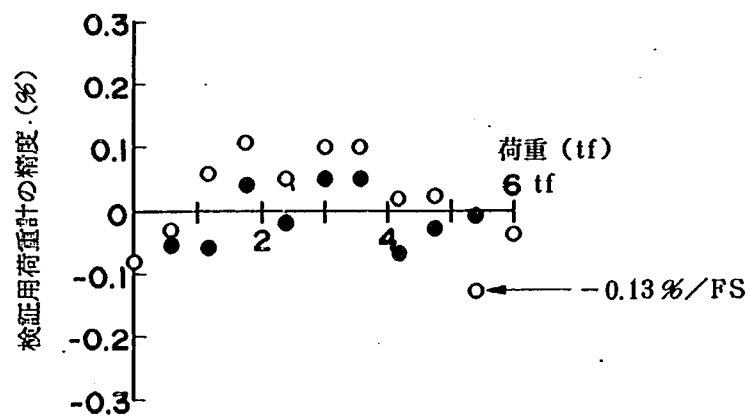


図 3.35 検証用荷重計の検定結果

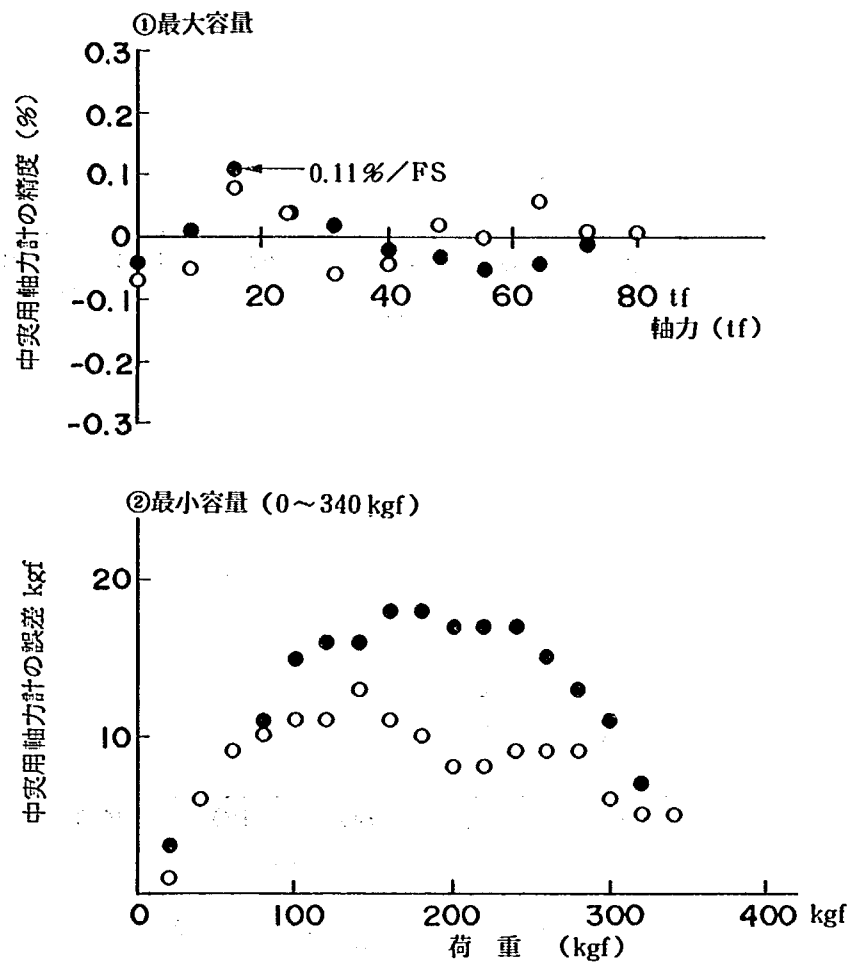


図 3.40 中実用軸力計の検定結果

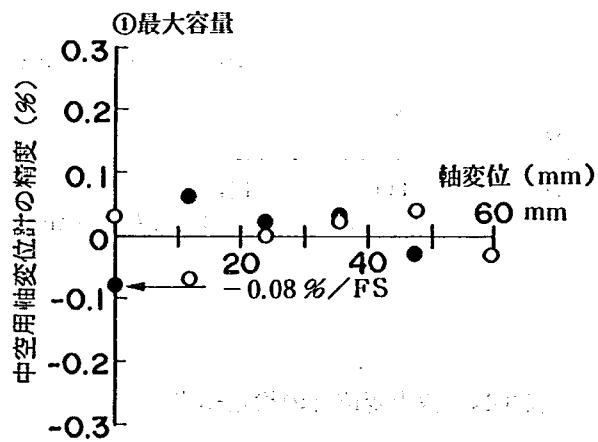


図 3.41 中空用軸変位計の検定結果

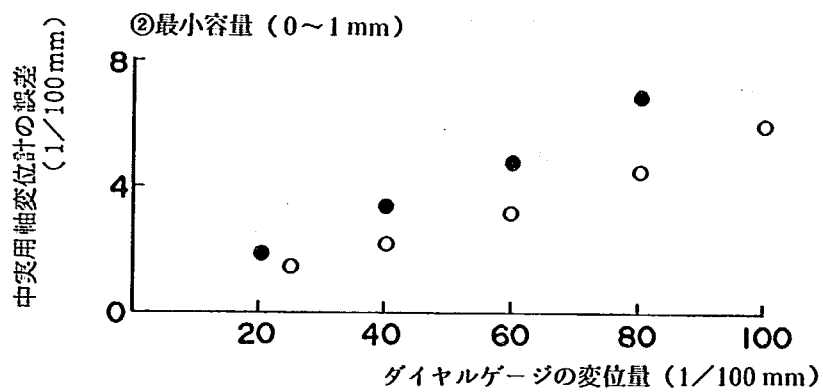
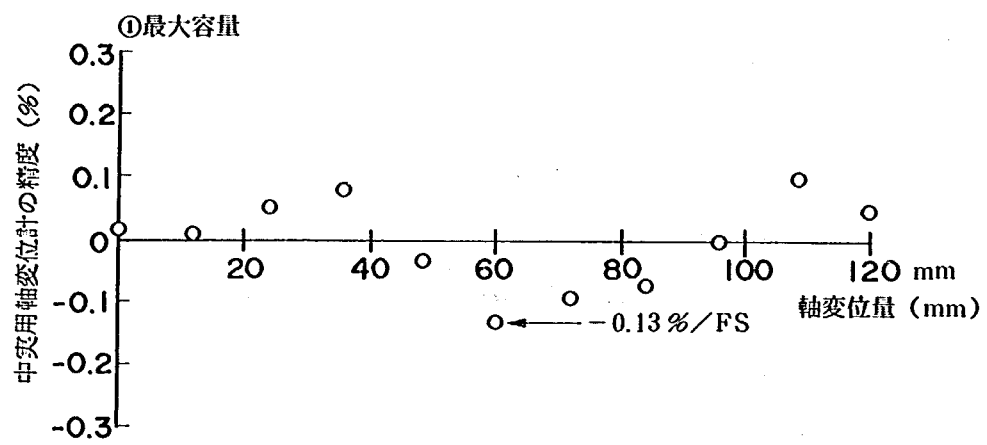


図 3.43 中実用軸変位計の検定結果

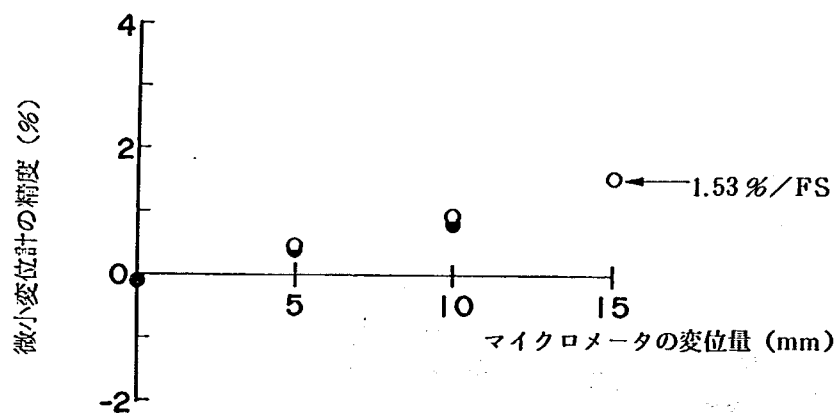


図 3.44 微小変位計の検定結果

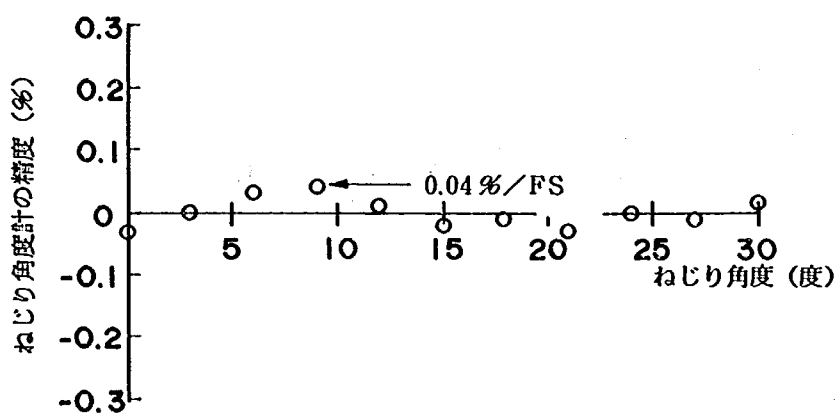


図 3.46 ねじり角度計の検定結果

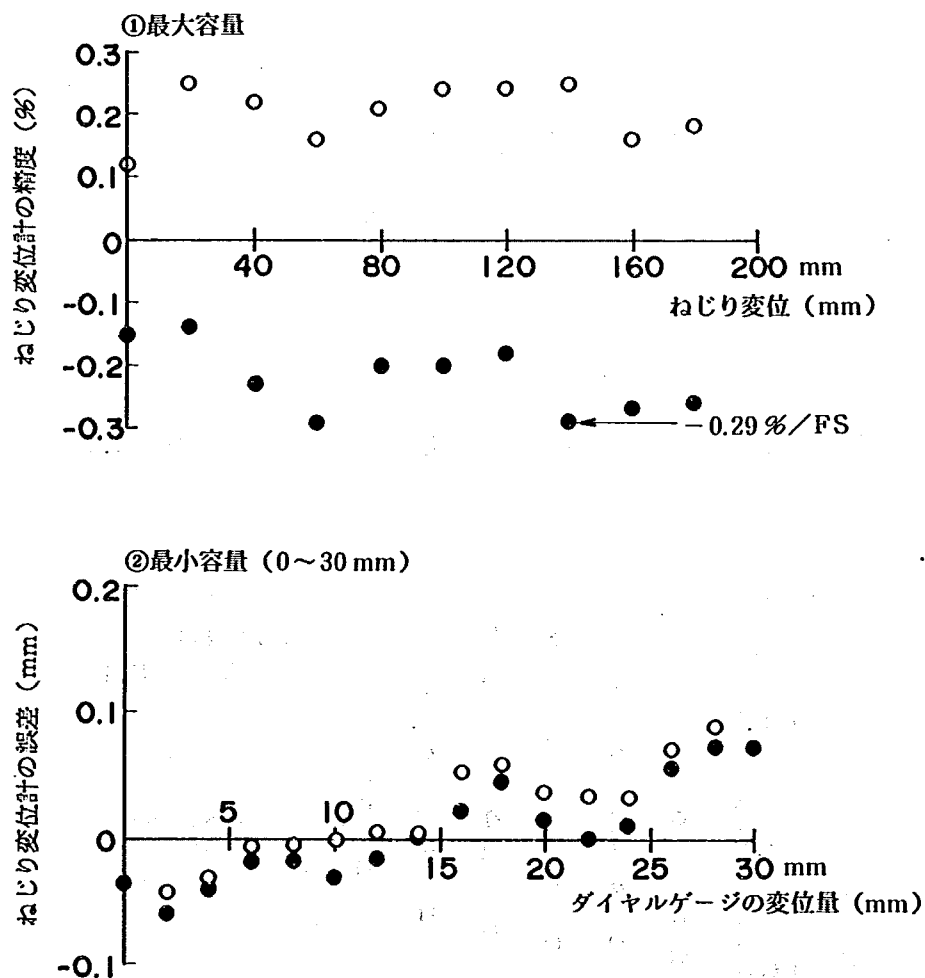


図 3.48 ねじり変位計の検定結果

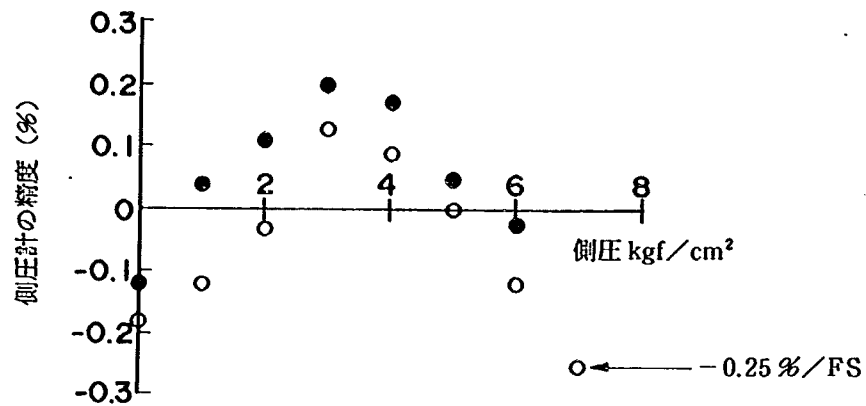


図 3.49 側圧計の検定結果 (精密ブルドン管式圧力計による)

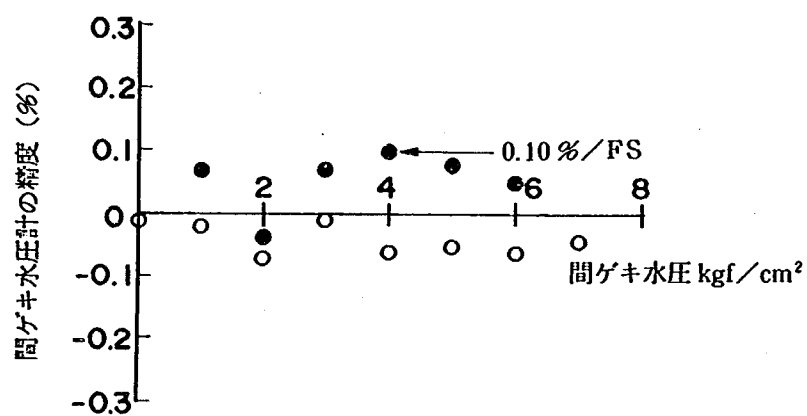


図 3.50 間隙水圧計の検定結果 (精密ブルドン管式圧力計による)

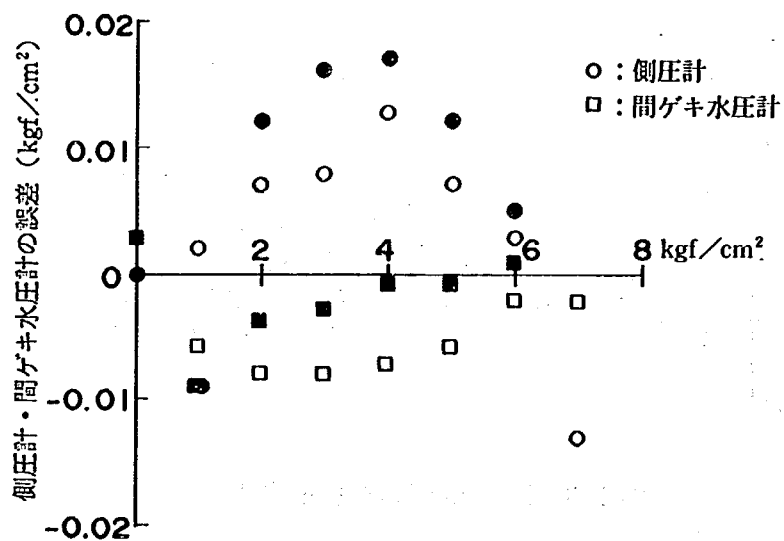


図 3.51 側圧計及び間隙水圧計の検定結果 (圧力検定器による)

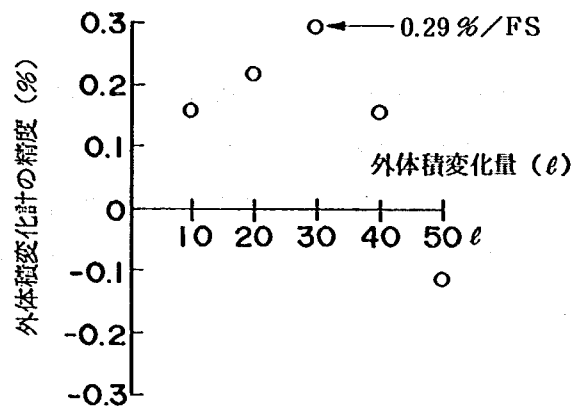


図 3.52 外体積変化計の検定結果

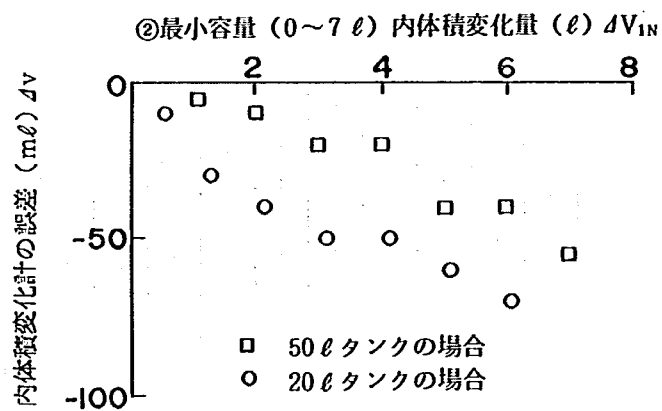
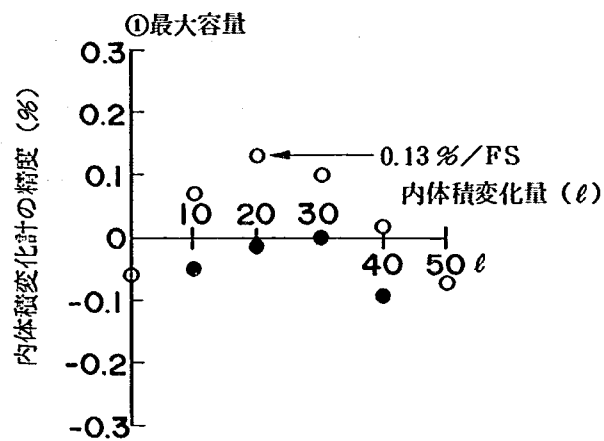


図 3.53 内体積変化計の誤差

3.3.2 制御精度の検定

本試験機は、せん断応力 τ_{at} 、軸応力 σ_a 、側圧 σ_r などの応力とせん断ひずみ γ_{at} 、軸ひずみ ϵ_a 、などのひずみをそれぞれ独立に制御することができる。また、圧密制御では等方・異方・ K_0 などが可能である。精度の良い試験を行うためには検出器の検定と同様に上記の制御項目についても検定する必要がある。ここでは、静的、繰り返し試験において用いられる静的軸ひずみ、せん断ひずみ、繰り返し軸応力、せん断応力制御、圧密制御について検定した結果を以下に示す。

(1) 静的軸ひずみ制御

軸ひずみ制御は実際に供試体かあるいは模擬試料を用いなければ制御することはできない。したがって、豊浦砂を用いた静的試験の場合の制御結果を表 3.13 に、制御波形を図 3.54 に示す。

表 3.13 静的軸ひずみ制御結果

No	設定ひずみ速度 A	実測ひずみ速度 B	誤差 $(A-B)/A \times 100$
①	0.5 %/min	0.5053 %/min	1.0 %
②	"	0.5060 %/min	1.2 %

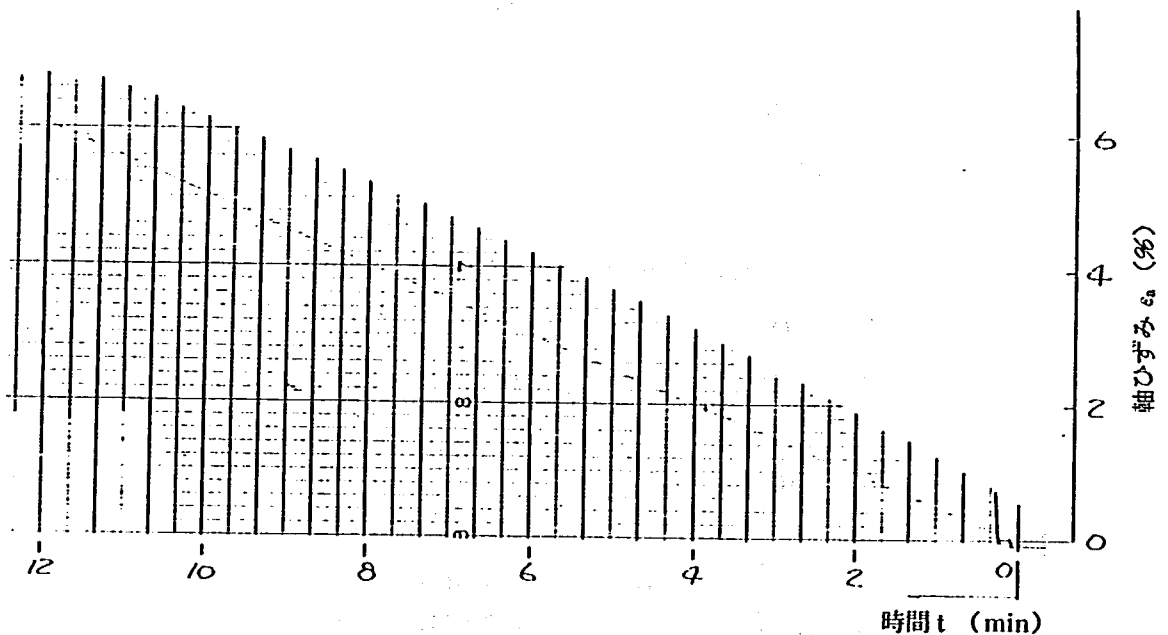


図 3.54 静的軸ひずみ制御波形 (中実試験)
(表 3.13 の②の場合)

表 3.13 に示すように、誤差はほぼ 1 % 程度であり、また $\epsilon_a \sim t$ 曲線もほぼ直線的に増加しているので、実用上十分な精度を持っていると思われる。

(2) 静的せん断ひずみ制御

せん断ひずみ制御はねじり変位 ΔD_θ (半径40 cm上のねじり変位) を用いて行っている。したがって、半径30 cm円周上でのせん断ひずみ r_{at} は次式によって求められる。

$$r_{at} = \frac{\Delta D_\theta \cdot 3/4}{H_0} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

ただし、

H_0 : 初期高さ (= 80 cm一定)

制御結果を表 3.14に、制御波形を図 3.55に示す。

表 3.14 静的せん断ひずみ制御の制御結果

No	設定ひずみ速度 A	実測ひずみ速度 B	誤差 $\frac{(A-B)}{A} \times 100 \%$	無負荷又は負荷
①	0.1 %/min	0.0991 %/min	0.90 %	無負荷
②	0.5 %/min	0.5155 %/min	- 3.10 %	負荷 $\tau_{max}=0.84\text{kgf/cm}^2$
③	0.5 %/min	0.4725 %/min	- 5.50 %	負荷 $\tau_{max}=0.95\text{kgf/cm}^2$
④	1.0 %/min	1.0007 %/min	0.07 %	無負荷

①、④は無負荷であり、②、③は豊浦砂を用いて試験した時の結果である。誤差は、①、④の場合 0.1 %以下であるが、②、③の場合約 3 %以上とかなり大きくなっている。これは、無負荷、負荷の違いによるものと考えられる。また、 $r_{at} \sim t$ 曲線はほぼ直線分布となっている。

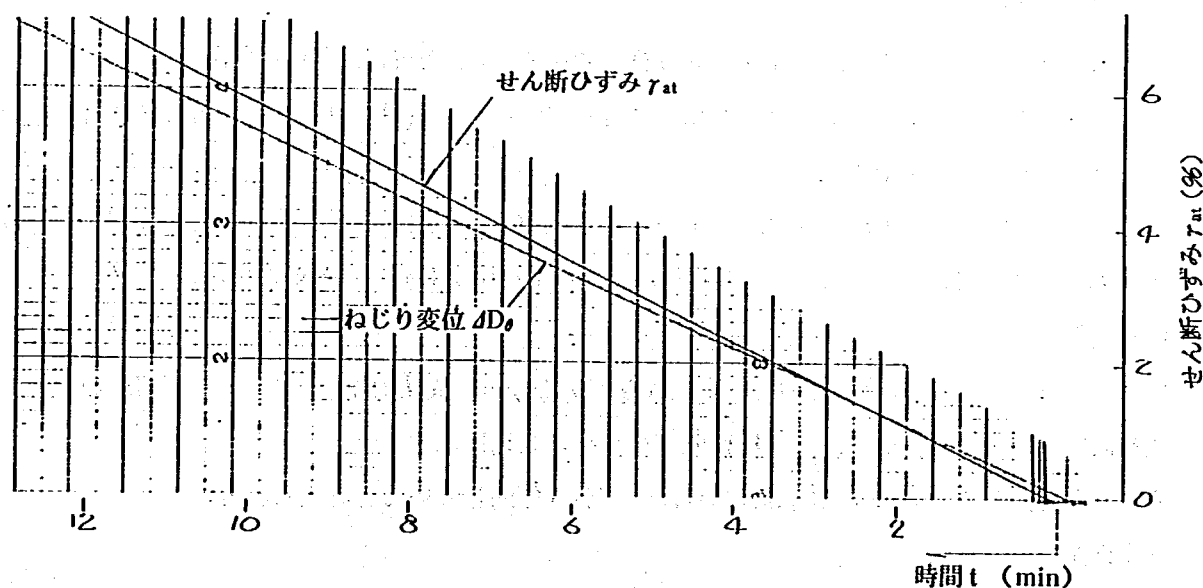
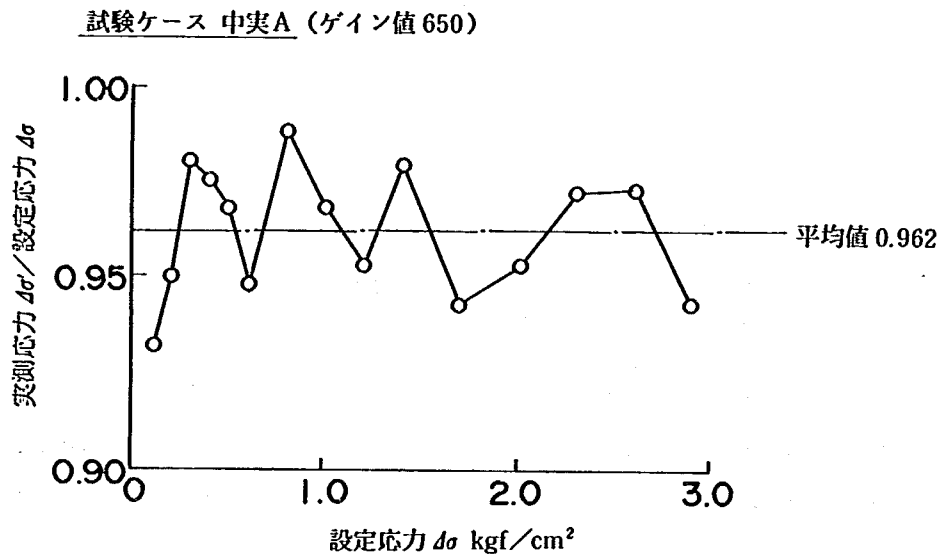


図 3.55 静的せん断ひずみ制御波形 (中空試験)
(表 3.14の③の場合)

(3) 繰り返し軸応力制御

繰り返し軸応力制御は実際に供試体か、あるいは模擬試料を用いなければ制御することはできない。したがって、粗粒材料による繰り返し試験を実施した時の制御結果を図3.56に示す。なお、繰り返し軸応力制御の制御命令にはファンクションジェネレーターを用いている。



実測応力 $\Delta\sigma'$ と設定応力 $\Delta\sigma$ の比 $\Delta\sigma' / \Delta\sigma$ は一定していないで、平均値 $\Delta\sigma' / \Delta\sigma = 0.962$ に対して ± 0.03 程度のバラツキがある。したがって、実測応力 $\Delta\sigma'$ は設定応力 $\Delta\sigma$ に対して $0.93 \sim 0.99$ の範囲にあることが確かめられた。また、 $\Delta\sigma' / \Delta\sigma$ はゲイン値によっても変化すると考えられる。

(4) 繰り返しせん断応力制御

繰り返しせん断応力制御は、トルクから計算して求めたせん断応力を用いて行い、くり返しの制御命令はファンクションジェネレーターを用いて行っている。図3.57に粗粒材料による繰り返し試験を実施した時の制御結果を示す。

実測応力 $\Delta\tau'$ と設定応力 $\Delta\tau$ の比 $\Delta\tau' / \Delta\tau$ は $\Delta\tau = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 以上になると、ほぼ一定値 ($\Delta\tau' / \Delta\tau = 0.96$ 程度) になる。また、 $\Delta\tau' / \Delta\tau$ はゲイン値によっても変化すると考えられる。

(5) 圧密制御

圧密制御としては等方、異方、 K_0 圧密制御などができる。異方圧密の場合には圧縮、伸張共に応力比を設定して用いる。等方、異方圧密制御結果を表3.15に示す。

表3.15から、等方、異方圧密制御はほぼ設定どおり作動していると考えられる。

(6) 安定性試験

試験機を長時間使用した場合、各計測項目がどのように変動するかを確かめるため、安定性試験を実施した。

試験ケース 中空A-2 (ゲイン値310)

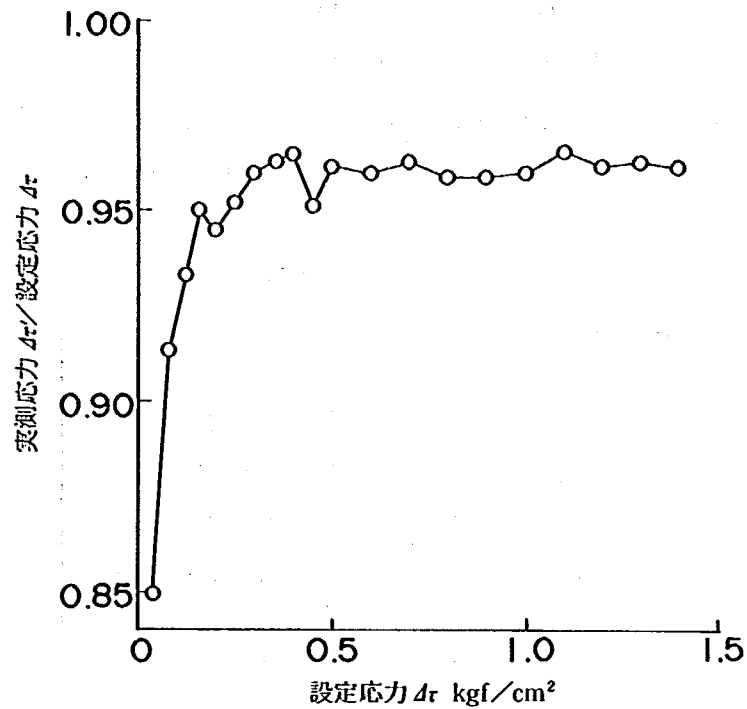


図 3.57 $\Delta\tau'/\Delta\tau \sim \Delta\tau$ の関係

表 3.15 等方、異方圧密制御結果

等方圧密制御

設定等方圧 kgf/cm ²	0	1	2	3	4	5	6	7
軸応力 σ_a kgf/cm ²	0	1.02	2.01	3.42	4.02	5.02	6.03	7.01
側 圧 σ_r kgf/cm ²	0	1.012	1.999	3.408	4.006	5.006	6.018	6.989

ただし、最終設定等方圧は 7 kgf/cm² とし、途中の各設定等方圧はマニュアルで停止してモニター値 σ_a , σ_r を求めた。

異方圧密制御

設定側圧 kgf/cm ²	圧縮($\sigma_1/\sigma_3=3$)		伸張($\sigma_3/\sigma_1=3$)	
	0	2	0	2
軸応力 σ_1 kgf/cm ²	0	5.99	0	0.71
側 圧 σ_3 kgf/cm ²	0	1.996	0	2.095

試験方法は中空供試体を用い、真空圧 $P_w = -0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 程度を作用させて供試体を自立させ、三軸室は被せない状態で試験機を夜間運転させるという方法で実施した。なお、制御は軸力-ひずみ、トルク-ひずみ、であり計測時間は19:30～翌9:30とした。

試験結果を表3.16に示す。この結果から各計測項目の変動巾は小さく、試験機は安定していると言える。なお、軸応力 σ_a がやや大きいがこれは温度による影響と思われる。

表 3.16 安定性試験結果

計測項目	最大変動巾
軸 応 力 σ_a	0 ～ 0.2 kgf/cm ²
軸 ひ ず み ϵ_a	0 ～ 2×10^{-6}
ト ル ク T	-0.04 ～ 0.045 tf・m
せん断ひずみ γ_{at}	$-7.5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$
ねじり変位 ΔD_θ	0 ～ 0.02 mm

3.4 供試体の応力・ひずみの計算

供試体に作用する荷重あるいは変形を測定して供試体の応力・ひずみが求められる。計算する際には応力・ひずみ分布が一様であるとして計算しているが、実際は完全に一様ではなく、ある程度差があることに注意しなければならない。

3.4.1 中空供試体における応力とひずみ

中空供試体における応力とひずみを弾性体の力学により以下整理しておく。弾性学の基本的な均合い式等は、Timoshenko and Goodier の “Theory of Elasticity” 第2版 (1951年)¹⁹⁾ によることとし、以下の項目末の () 内の頁は同書の参照部分を示す。ただし以下は圧縮応力を正としているので同書とはせん断応力の正の方向が異なる。

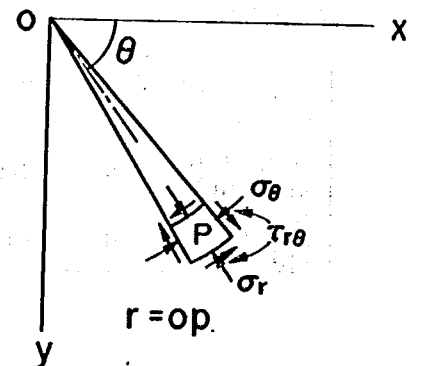
(1) 極座標系 (2次元) における応力とひずみの一般式 (pp. 55-57) (pp. 65-66)

図3.58の極座標系における均合いの方程式は、物体力が働いていないとき、 r 方向について

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad \dots\dots (3.16)$$

θ 方向について

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad \dots\dots (3.17)$$



直角座標系と極座標系の対応は、

図 3.58

$$\left. \begin{aligned}
 r^2 &= x^2 + y^2 \\
 \theta &= \arctan \frac{y}{x} \\
 \frac{\partial r}{\partial x} &= \frac{x}{r} = \cos \theta \\
 \frac{\partial r}{\partial y} &= \frac{y}{r} = \sin \theta \\
 \frac{\partial \theta}{\partial x} &= -\frac{y}{r^2} = -\frac{\sin \theta}{r} \\
 \frac{\partial \theta}{\partial y} &= \frac{x}{r^2} = \frac{\cos \theta}{r}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.18)$$

極座標系によるひずみは (u : r 方向変位, v : θ 方向変位),

$$\left. \begin{aligned}
 \epsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\
 \epsilon_\theta &= \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \\
 \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.19)$$

(2) 中空供試体が等しい内外圧 P_r を受けたとき (pp. 58-60)

図 3.59 の応力状態は,

極座標系で

$$\sigma_r = \sigma_\theta = P_r \dots\dots\dots (3.20)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \dots\dots\dots (3.21)$$

直角座標系で

$$\sigma_x = \sigma_y = P_r \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\sigma_{xy} = 0 \dots\dots\dots (3.23)$$

(3) 一様な軸圧縮力 P_z を受けるとき (pp. 245-246)

図 3.60 では

$$\sigma_z = P_z \dots\dots\dots (3.24)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0 \dots\dots\dots (3.25)$$

極座標系では

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0 \dots\dots\dots (3.26)$$

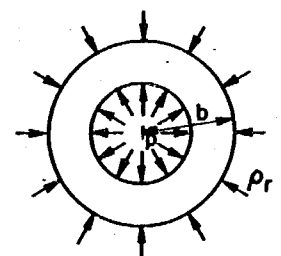


図 3.59

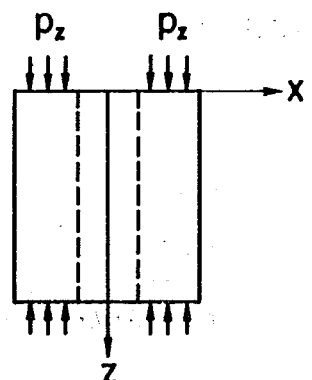


図 3.60

(4) 端面にねじりモーメント M_t を受けたとき (pp. 249-250)

図 3.61 において初等的な弾性理論では、せん断応力 τ は中心からの半径 r に比例し z に無関係と考える。

$$\tau_{z\theta} = G \cdot \theta \cdot r \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

ここに

θ : z 方向単位長さ当りのねじれ角

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.28)$$

また、 τ を x, y 軸に平行な成分に分解すると、

$$\tau_{yz} = G\theta r \frac{x}{r} = G\theta x \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

$$\tau_{zx} = -G\theta r \frac{y}{r} = -G\theta y \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

このときねじりモーメント M_t は

$$\begin{aligned} M_t &= \int_a^b \tau_{z\theta} 2\pi r^2 dr \\ &= \frac{1}{2} \pi G\theta (b^4 - a^4) \quad \dots\dots\dots (3.31) \end{aligned}$$

円筒の極 2 次モーメント I_p は

$$I_p = \frac{\pi}{2} (b^4 - a^4) \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

I_p を使うと式 (3.31) は

$$M_t = G \cdot I_p \cdot \theta$$

式 (3.27), (3.33) から

$$\tau_{z\theta} = \frac{M_t}{I_p} r \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

(5) 以上の(2),(3),(4)の応力を同時に受けたときは重ね合わせて

直角座標系では

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= P_r \\ \sigma_y &= P_r \\ \sigma_z &= P_z \\ \tau_{xy} &= 0 \\ \tau_{yz} &= G \cdot \theta \cdot y = \frac{M_t}{I_p} y \\ \tau_{zx} &= -G \cdot \theta \cdot x = -\frac{M_t}{I_p} x \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

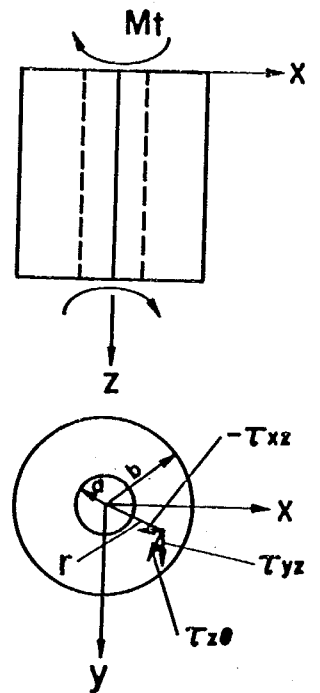


図 3.61

極座標系では

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= P_r \\ \sigma_\theta &= P_r \\ \sigma_z &= P_z \\ \tau_{r\theta} &= 0 \\ \tau_{z\theta} &= \tau = \frac{M_t}{I_p} r \\ \tau_{zr} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.36)$$

以上において中空供試体中のひずみは

直角座標系において、式 (3.35) より

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [P_r - \nu(P_r + P_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [P_r - \nu(P_r + P_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = \frac{1}{E} (P_a - 2\nu P_r) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} = 0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} = \theta x \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} = -\theta y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.37)$$

極座標系では、式 (3.36) を使って

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [P_r - \nu(P_r + P_z)] \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] = \frac{1}{E} [P_r - \nu(P_r + P_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] = \frac{1}{E} (P_a - 2\nu P_r) \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{G} \tau_{r\theta} = 0 \\ \gamma_{z\theta} &= \frac{1}{G} \tau_{z\theta} = \theta r \\ \gamma_{zr} &= \frac{1}{G} \tau_{zr} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.38)$$

(6) 中空供試体に繰り返しトルクを与え、供試体のせん断剛性率 G と減衰定数 h を求めるとき

このような試験では、 $r_{z\theta}$ は通常小さく、 τ は初等的な弾性理論にしたがって r に比例して分布していると考えられる。したがって、式 (3.38) の第5式

$$r_{z\theta} = \frac{1}{G} \tau_{z\theta}$$

より G を求めるが、このとき、 $r_{z\theta}$ と $\tau_{z\theta}$ について中空断面中央の値

$$\text{すなわち } r = \frac{1}{2}(a+b) \text{ における } (r_{z\theta})_m \text{ と } (\tau_{z\theta})_m \quad (\tau_{z\theta})_m = \frac{1}{2}(a+b) \frac{M_t}{I_p} \quad (3.39)$$

を使って表示する場合と、 r, τ の分布の加重平均、すなわち

$$\left. \begin{aligned} (r_{z\theta})_{av} &= \frac{\int_a^b r_{z\theta} dA}{\int_a^b dA} = \frac{2}{3} \frac{b^2 + ba + a^2}{b+a} \theta \\ (\tau_{z\theta})_{av} &= \frac{\int_a^b \tau_{z\theta} dA}{\int_a^b dA} = \frac{2}{3} \frac{b^2 + ba + a^2}{b+a} \cdot \frac{M_t}{I_p} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.40)$$

を用いて $r-\tau$ の関係を表示する2方法が考えられるが、ここでは、加重平均すなわち式 (3.40) により $r-\tau$ を表示することとする。その理由は弾性体であれば、式 (3.39) と (3.40) のどちらでも全く同一の G が得られるが、今実験しようとしている G が r により変る材料では (ある小さな r の振幅の範囲では弾性的とみなす)、得られた G がどのレベルの r に対応するかを表示する必要がある、このときには、半径中央の r よりも面積平均の r の方が合理的と考えられるからである。

なお、本試験機の場合、 $b = 40 \text{ cm}$ 、 $a = 20 \text{ cm}$ であるから、式 (3.39)、(3.40) より

$$(r_{z\theta})_m = 30.0 \theta$$

$$(r_{z\theta})_{av} = 31.1 \theta$$

となり、

$$(r_{z\theta})_{av} = 1.037 (r_{z\theta})_m$$

となる。

(7) 中空供試体に単調に増加するトルクを与え供試体のせん断強度を求めるとき

供試体が粗粒材料であるとき r と τ の関係は図 3.62 に示すように非線型であり、 r が数%程度となったときには、 τ は供試体内の半径方向に一樣な分布をしていると仮定できよう。そこでこの一定のせん断応力を $(\tau_{z\theta})_c$ と書くを与えたトルク M_t との間に

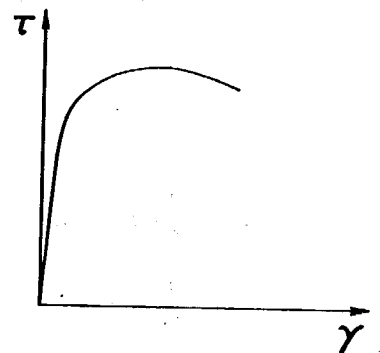


図 3.62

$$M_t = \int_a^b 2\pi \cdot r \cdot (\tau_{z\theta})_c \cdot r dr$$

$$= \frac{2}{3} \pi (\tau_{z\theta})_c (b^3 - a^3) \quad \dots\dots\dots (3.41)$$

式 (3.41) より $(\tau_{z\theta})_c$ を M_t から求めると

$$(\tau_{z\theta})_c = \frac{3 M_t}{2\pi \cdot (b^3 - a^3)} \quad \dots\dots\dots (3.42)$$

このときのせん断歪 $\gamma_{z\theta}$ は、 r に比例して分布していると考えているが、その代表的なひずみとしては式 (3.40) の第1式を採用するものとする。すなわち

$$(\gamma_{z\theta})_{av} = \frac{2}{3} \frac{b^2 + ba + b^2}{b + a} \theta \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

なおせん断応力の弾性分布を仮定したとき平均半径における応力 $(\tau_{z\theta})_m$ 、面積加重平均位置における $(\tau_{z\theta})_{av}$ は、

$$(\tau_{z\theta})_m = \frac{M_t}{I_p} \frac{1}{2} (b + a) = \frac{1}{\pi (b^2 + a^2) (b - a)} M_t \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

$$(\tau_{z\theta})_{av} = \frac{M_t}{I_p} \frac{2}{3} \frac{b^2 + ba + a^2}{b + a}$$

$$= \frac{4 (b^2 + ba + a^2)}{3\pi (b + a) (b^4 - a^4)} M_t \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

本試験の場合 $b = 40 \text{ cm}$ 、 $a = 20 \text{ cm}$ とし、式 (3.43)、(3.44)、(3.45) より数値を求め比較すると、

$$(\tau_{z\theta})_m = 0.964 (\tau_{z\theta})_{av}$$

$$(\tau_{z\theta})_c = 1.033 (\tau_{z\theta})_{av}$$

であることがわかる。

次にひずみ γ が大きく、 $\tau_{z\theta}$ が r 方向に一樣な値 $(\tau_{z\theta})_c (= \tau$ と書く) であるとき $r = \text{const}$ 面内の主応力 σ_1 、 σ_3 を求める。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_\theta + \sigma_z}{2} + \sqrt{\tau_{z\theta}^2 + \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_z}{2}\right)^2} = \frac{P_r + P_z}{2} + \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{P_r - P_z}{2}\right)^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_\theta + \sigma_z}{2} - \sqrt{\tau_{z\theta}^2 + \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_z}{2}\right)^2} = \frac{P_r + P_z}{2} - \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{P_r - P_z}{2}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

主応力の方向は、 α を主応力と水平面とのなす角度として

(時計回り正、ただし図 3.61 において中空供試体の外側より見たエレメントでは、図 3.63 のように図 3.61 の座標まで正の方向の $\tau_{z\theta}$ は負となるから、 η 軸では $\tau_{z\theta}$ の符号を変えている。)

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{ATAN} 2 \frac{-\tau_{z\theta}}{\frac{1}{2} (\sigma_\theta - \sigma_z)} = \frac{1}{2} \text{ATAN} 2 \frac{-2\tau}{P_r - P_z} \quad \dots\dots\dots (3.47)$$

(ただしここにATAN 2とは、計算プログラムフォートランのATAN 2の定義と同じ意味である。つまりATAN 2は -180° から 180° までの値を取り、分母と分子の符号を含めて計算される。)

もし、ここで τ , P_r , P_z , τ で供試体が破壊したとするとモールの破壊説で $c=0$ とし ϕ のみ材料としてそのときの ϕ を ϕ_0 と書くと、

$$\begin{aligned}\phi_0 &= \arcsin \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_f \\ &= \arcsin \frac{2\sqrt{\tau^2 + \left(\frac{P_r - P_z}{2} \right)^2}}{P_r + P_z} \dots\dots (3.48)\end{aligned}$$

すべり面は主応力の働いている面と $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ の面に発生する。(図3.64)

また、 $P_r = P_a$ のときは式(3.47)から $\alpha = -45^\circ$ であるから、水平と $-\frac{\phi}{2}$ の角度をなしている。

なお、3.4.1で用いている記号と3.4.1以降で用いている記号の対応関係を以下に示す。

$\sigma_z = P_z = \sigma_a$ 軸応力

$\sigma_\theta = P_r = \sigma_r$ 側圧

$\tau_{z\theta} = \tau_{at}$ (又は τ) セン断ひずみ

$(\tau_{z\theta})_m = \tau_{av}^1$ " (平均半径位置における)

$(\tau_{z\theta})_{av} = \tau_{av}^2$ " (面積の加重平均としたとき)

$\tau_{z\theta} = \tau_{at}$ (又は τ) セン断応力

$(\tau_{z\theta})_c = \tau_{av}^3$ " (一定分布のとき)

$(\tau_{z\theta})_m = \tau_{av}^1$ " (弾性分布, 平均半径位置)

$(\tau_{z\theta})_{av} = \tau_{av}^2$ " (" 面積の加重平均位置)

$a = D_i$ 供試体の内径

$b = D_o$ " の外径

$M_t = T$ トルク

$\alpha = \phi$ 主応力と水平面のなす角度

3.4.2 セン断応力 τ ・セン断ひずみ r

セン断ひずみ r は半径に比例した分布をしており、次式で求められる。

$$r = \frac{\pi \cdot \theta}{180 \cdot H} \cdot R = K(\theta) \cdot R \dots\dots\dots (3.49)$$

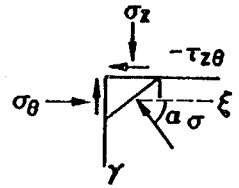


図 3.63

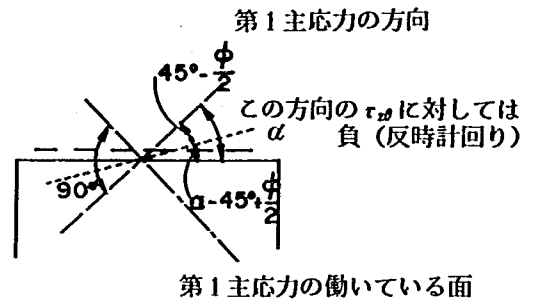


図 3.64

θ : 回転角 (度)

R : 半 径 (cm)

H : 供試体高さ (cm)

したがって、供試体半径方向のせん断ひずみ分布の非一様性は供試体の半径比によって決まり、本試験機の場合には、外径 R_o / 内径 $R_i = 0.5$ である。

また、せん断応力 τ は次式で表わせる。

$$\begin{aligned}\tau &= G(r) \cdot r(R) \\ &= G(r) \cdot K(\theta) \cdot R \quad \dots\dots\dots (3.50)\end{aligned}$$

せん断応力の半径方向の分布の非一様性の程度は

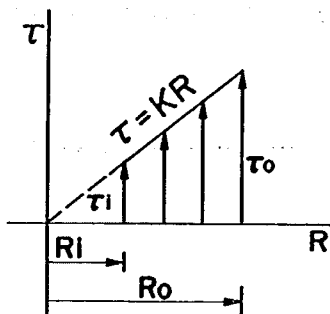
$$\frac{\tau_i}{\tau_o} = \frac{G(r_i)}{G(r_o)} \frac{R_i}{R_o} \quad \dots\dots\dots (3.51)$$

となり、半径比 R_i/R_o と材料特性によって非一様性は決定される。したがって、半径比 $R_i/R (=0.5)$ が 1.0 に近いほど、つまり中空薄肉供試体であるほど、せん断応力の半径方向分布は一様となる。また、粗粒材料は図 3.3 (pp. 19 参照) に示すように非線型を示すために、供試体半径方向のせん断応力分布は非一様となる。この非一様性は、せん断ひずみが小さいほど大きく、また、せん断ひずみが大きいほど小さくなる。福島 (1982)²⁰⁾ によると「せん断ひずみ r が 5% 以上になれば、ほとんど一様とみなせる」と示されている。しかし、ねじり単純せん断試験ではトルク T だけを測定しているので、せん断応力分布を仮定して、トルクの力のつり合いから、せん断応力を求めなければならない。

(1) せん断応力

これまでいろいろな研究者が採用しているせん断応力の計算方法を以下に示す。

① 弾性分布と仮定した場合



$$\begin{aligned}T &= \int_{R_i}^{R_o} 2\pi R \cdot \tau \cdot R \, dR = 2\pi k \int_{R_i}^{R_o} R^3 \, dR \\ &= \frac{\pi k}{2} (R_o^4 - R_i^4) \quad \dots\dots\dots (3.52)\end{aligned}$$

$$\therefore K = \frac{2T}{\pi(R_o^4 - R_i^4)} \quad \dots\dots\dots (3.53)$$

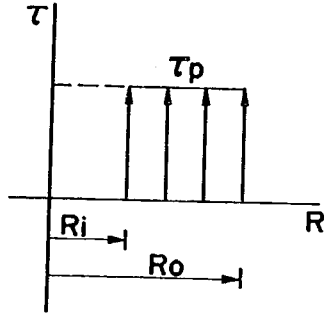
平均半径 $\bar{R} (= \frac{R_o + R_i}{2})$ の位置におけるせん断応力 τ_{av}^1 は、

$$\tau_{av}^1 = K\bar{R} = \frac{T}{\pi(R_o^2 + R_i^2)(R_o - R_i)} \quad \dots\dots\dots (3.54)$$

また、面積の重み付き平均のせん断応力 τ_{av}^2 は

$$\begin{aligned}\tau_{av}^2 &= \frac{\int \tau dA}{\int dA} = \frac{\int_{R_i}^{R_o} \tau \cdot R dR}{\int R dR} = \frac{2k}{3} \frac{(R_o^3 - R_i^3)}{(R_o^2 - R_i^2)} \\ &= \frac{4(R_o^3 - R_i^3)T}{3\pi(R_o^2 - R_i^2)(R_o^4 - R_i^4)} \dots\dots\dots (3.55)\end{aligned}$$

② 剛一完全塑性分布と仮定した場合



$$\begin{aligned}T &= \int_{R_i}^{R_o} 2\pi R \cdot \tau_p \cdot R dR = 2\pi \tau_p \int_{R_i}^{R_o} R^2 dR \\ &= \frac{2}{3} \pi \cdot \tau_p \cdot (R_o^3 - R_i^3) \dots\dots\dots (3.56)\end{aligned}$$

$$\tau_{av}^3 = \tau_p = \frac{3T}{2\pi(R_o^3 - R_i^3)} \dots\dots\dots (3.57)$$

③ 両者の平均としたとき

$$\tau_{av}^4 = \frac{\tau_{av}^1 + \tau_{av}^3}{2} \dots\dots\dots (3.58)$$

以上の3つの計算方法のうちどの方法が妥当であるかについては福島(1982)²⁰⁾が詳細な計算を行って求めている。それによると τ_{av}^3 が最も妥当であり、 $r_{at} > 1\%$ での τ_{av}^3 と理論値(双曲線関数によって求めた τ)との差は0.5%以下であるとしている。また、静的なねじり単純せん断試験の場合、最大せん断応力に到達するときのせん断ひずみは図3.69(pp. 83)に示された例からもわかるように数%以上でありそのときのせん断応力分布は前述したように一様な剛一完全塑性分布であると考えられる。

以上のことから、本研究では、せん断応力の計算方法は、供試体半径方向のせん断応力分布を剛一完全塑性分布と仮定して求めた次式を用いることにする。

$$\tau_{at} = \tau_{av}^3 = \frac{3T}{2\pi(R_o^3 - R_i^3)} \dots\dots\dots (3.59)$$

各計算方法の比較を行うと以下ようになる。

$$\tau_{av}^2 / \tau_{av}^1 = 1.0370, \quad \tau_{av}^3 / \tau_{av}^1 = 1.0714, \quad \tau_{av}^4 / \tau_{av}^1 = 1.0357$$

なお、小さなせん断ひずみ ($\gamma < 10^{-3}$) を対象とする繰返し試験ではせん断応力の分布はほぼ弾性分布と考えられるので、 τ_{av}^1 、 τ_{av}^2 を採用する方法が良いと思われる。しかし、本研究では前述したように静的試験および繰返し試験共に τ_{av}^3 を採用してせん断応力を求めている。

(2) せん断ひずみ

平均半径位置におけるせん断ひずみ γ_{av}^1 は

$$r_{av}^1 = \frac{\pi \theta}{180 \cdot H} \cdot \frac{(R_o + R_i)}{2}$$

$$= K(\theta) \cdot \frac{(R_o + R_i)}{2} \dots\dots\dots (3.60)$$

面積の重さ付き平均とした場合には

$$r_{av}^2 = \frac{\int r dA}{\int dA} = \frac{\int_{R_i}^{R_o} r \cdot R dR}{\int_{R_i}^{R_o} R dR} = \frac{2 K(\theta)}{3} \cdot \frac{(R_o^3 - R_i^3)}{(R_o^2 - R_i^2)} \dots\dots\dots (3.61)$$

せん断ひずみ r の場合、本研究における $R_o = 40 \text{ cm}$, $R_i = 20 \text{ cm}$ を代入して計算すると、両者の差 $\left(\frac{r_{av}^2 - r_{av}^1}{r_{av}^1} \right)$ は約 3.7 % と小さいため、平均半径におけるせん断ひずみ r を採用することにする。

$$r_{av}^1 = 30 K(\theta)$$

$$r_{av}^2 = 31.111 K(\theta)$$

$$\frac{r_{av}^2 - r_{av}^1}{r_{av}^1} \times 100 = 3.7 \%$$

(3) 供試体の半径変化量 ΔR

試験中の供試体の外径 R_o 、内径 R_i は変数であるため、供試体の半径変化量 ΔR を導かなければならない。ここでは、 ΔR を外径、内径位置において共に等しいとして以下のように求めた。

$$V_o = H_o \cdot \pi (R_o^2 - R_i^2) \dots\dots\dots (3.62)$$

$$V = \pi \cdot (H_o - \Delta H) \{ (R_o - \Delta R)^2 - (R_i + \Delta R)^2 \} \dots\dots\dots (3.63)$$

$$\Delta V = V_o - V$$

$$= \pi H_o (R_o^2 - R_i^2) - \pi (H_o - \Delta H) (R_o^2 - R_i^2 - 2 \Delta R R_o - 2 \Delta R R_i) \dots\dots\dots (3.64)$$

$$\Delta R = \frac{R_o^2 - R_i^2}{2 (R_o + R_i)} - \frac{H_o (R_o^2 - R_i^2) - \Delta V / \pi}{2 (H_o - \Delta H) (R_o + R_i)}$$

$$= \frac{R_o - R_i}{2} \left\{ 1 - \frac{H_o}{H_o - \Delta H} (1 - \epsilon_v) \right\} \dots\dots\dots (3.65)$$

ただし

R_o : 初期供試体外半径 ΔR : 半径変化量

R_i : " 内半径 ϵ_v : 体積ひずみ

H_o : " 高 さ

V_o : " 体 積

V : 変化後の供試体体積

ΔV : 体積変化量

ΔH : 高さ変化量

3.4.3 軸応力 σ_a , 側圧 σ_r

軸応力は供試体に作用する軸方向の力のつりあいから計算される。図 3.65 に示すように試験機の構造上、軸差応力は次式で求められる。

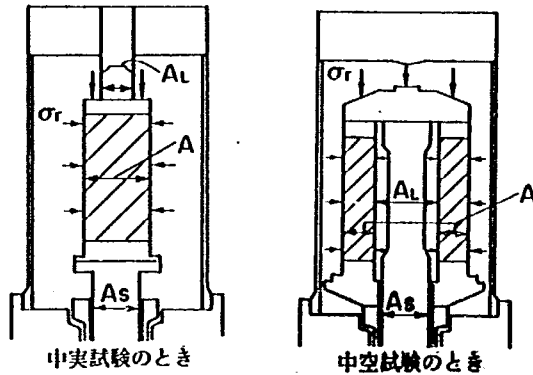


図 3.65 中実、中空試験の概略構造図

$$\sigma_a - \sigma_r = (P - \sigma_r A_L) / A \quad \cdots \cdots (3.66)$$

P : 軸力計の荷重

A_L : " の断面積

A : 供試体の "

また、試験中の供試体の断面積 A は変化し、次式で求められる。

$$A = \frac{V_0 - (\Delta V \pm \Delta H A_s)}{H_0 - \Delta H} \quad \cdots \cdots (3.67)$$

V_0 : 供試体の初期体積 $\pm \Delta H A_s$: 軸ピストンの貫入量 H_0 : 供試体の初期高さ

ΔV : " の体積変化 $\oplus$ 中空 $\ominus$ 中実 ΔH : " 軸変位置

したがって、軸応力 σ_a は次式で求められる。

$$\sigma_a = \frac{(P - \sigma_r A_L) (H_0 - \Delta H)}{V_0 - (\Delta V \pm \Delta H A_s)} + \sigma_r \quad \cdots \cdots (3.68)$$

なお、供試体の自重及び供試体上の上部ベディスタル、荷重計（中実試験のとき）の自重は小さいので無視することにする。

また、供試体に作用する側圧 σ_r は、供試体の中央位置を基準とする。したがって、側圧は試験機の底盤位置で測定しているので供試体の中央位置までの高さ分（= 1.1 m）の水圧を補正しなければならない。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r^A - \Delta \sigma_r & \sigma_r^A &: \text{側圧計の測定値} \\ &= \sigma_r^A - 0.11 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} & \Delta \sigma_r &: \text{補正值} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (3.69)$$

3.4.4 軸ひずみ ϵ_a , 体積ひずみ ϵ_v

軸ひずみ ϵ_a , 体積ひずみ ϵ_v は次式で求められる。

$$\epsilon_a = \Delta H / H_0 \times 100 \text{ (\%)} \quad \cdots \cdots (3.70)$$

$$\epsilon_v = \Delta V / V_0 \times 100 \text{ (\%)} \quad \cdots \cdots (3.71)$$

なお、 ΔV は 2 つの補正を行っている。1 つはピストン貫入量 $\pm \Delta H \cdot A_s$ （ ΔH : 軸変位置, A_s : ピストン断面積）であり、中空試験の場合には $\oplus$ とし、中実試験の場合には $\ominus$ とした。他方は三軸室の見かけの体積変化で側圧 σ_r との関数となっており、その補正量は適時変更が可能となっている。

また、動的ポアソン比 ν_d は上記の軸ひずみ ϵ_a 、体積ひずみ ϵ_v を用いて次のように計算される。

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2 \epsilon_r$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} (\epsilon_v - \epsilon_a)$$

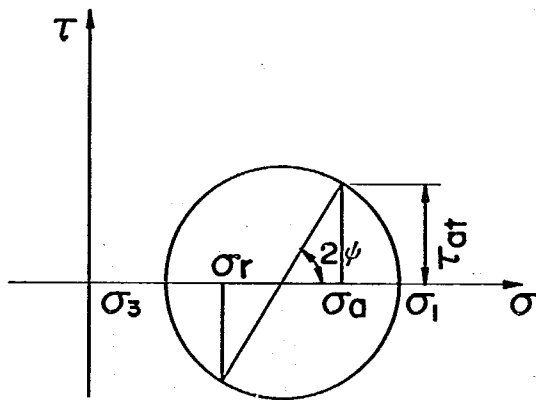
$$\therefore \nu_d = -\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_a}\right) \quad \dots\dots\dots (3.72)$$

ただし ϵ_r : 半径方向ひずみ

3.4.5 主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 主応力方向 ψ

主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 主応力方向 ψ は前述の $\tau_{at}, \sigma_a, \sigma_r$ を用いて、モール・クーロンの応力円から次式で求められる。

主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$



$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 \text{ 又は } \sigma_3 &= \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} \pm \sqrt{\tau_{at}^2 + \left(\frac{\sigma_a - \sigma_r}{2}\right)^2} \\ \sigma_2 &= \sigma_r \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.73)$$

平均主応力 σ_m

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a + 2 \sigma_r}{3} \quad \dots\dots\dots (3.74)$$

主応力方向

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2 \tau_{at}}{\sigma_a - \sigma_r} \quad \dots\dots\dots (3.75)$$

本研究におけるせん断試験方法は軸応力 σ_a 、側圧 σ_r 一定 ($\sigma_a = \sigma_r$) の定圧試験であるので上式は簡単となり、以下ようになる。

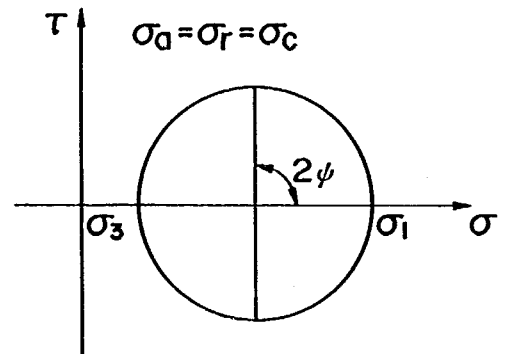
$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_c + \tau_{at} \\ \sigma_2 &= \sigma_c \\ \sigma_3 &= \sigma_c - \tau_{at} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.76)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_c \quad \dots\dots (3.77)$$

$$\psi = 45^\circ \text{ (一定)} \quad \dots\dots\dots (3.78)$$

また、中実試験のときは次のようになる

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_c + d\sigma_1 \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = \sigma_c \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.79)$$



$$\sigma_m = \sigma_c + \frac{\Delta \sigma_1}{3} \dots\dots\dots (3.80)$$

$$\psi = 0^\circ \dots\dots\dots (3.81)$$

3.5 単純せん断変形に関する確認試験

3.5.1 試験目的

従来の単純せん断試験では、せん断応力の共役性が保たれていないため、図 3.66 に示すように非一様な単純せん断変形状態となる。つまり、供試体に加えられるせん断応力に対して供試体端部側面でこれに釣り合う鉛直方向のせん断応力が発生し得ないので、供試体端部側面は直角を保とうとして供試体中央部分のみ単純せん断変形することになる。しかし、ねじり単純せん断試験では図 3.67 に示すように、せん断応力の共役性が保たれているため理想的な単純せん断変形状態（供試体の高さ方向のせん断ひずみの分布が一様であること）となると考えられる。しかし、ここで、問題となることは、せん断応力が供試体上下端面のみで伝えられるため、すべりが生じる可能性があることである。SGI 型単純せん断試験機などでは、試験材料である粗粒材料を可動端に張り付けたり、載荷板に刃型などを設置して上下方向に高周波で振動させて埋め込んだ例などがある。そこで、本研究では供試体上下端面の処理を図 3.68 に示すように 2 通りの方法を考え、供試体上下端面ですべりが生じることなく、理想的な単純せん断変形状態となるかどうかを調べる目的で静的中空ねじり単純せん断試験を実施した。

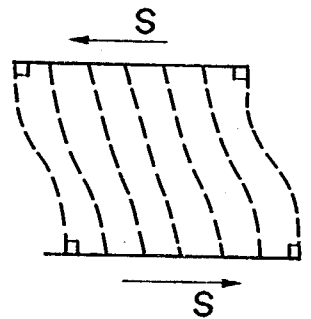


図 3.66 単純せん断試験の供試体の変形状態

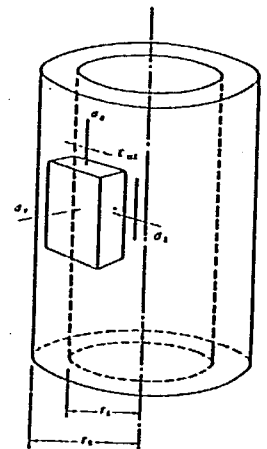


図 3.67 ねじり単純せん断試験の供試体

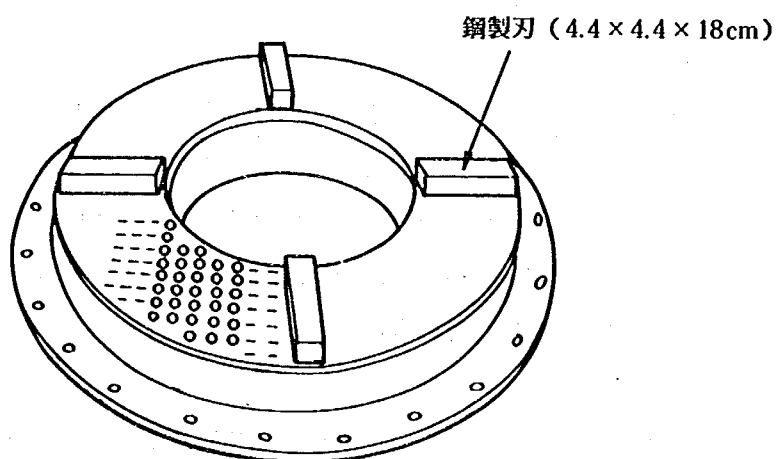
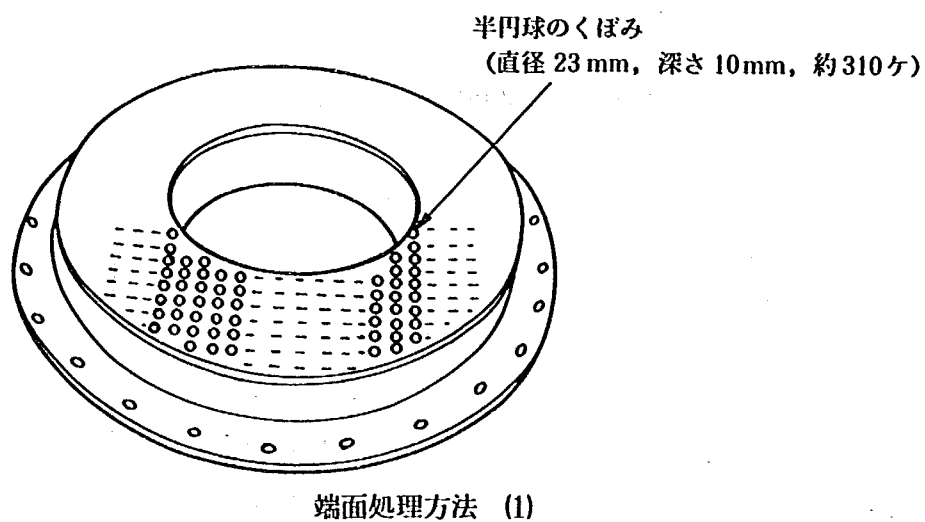


図 3.68 端面処理方法 (2)

3.5.2 試験方法

試験材料として、粗粒材料(栃木県那珂川水系寺山ダム安山岩)を用いた。試験材料の諸数値を表 3.17 に示す。

表 3.17 試験材料の諸数値

物 性 値	G_g	Q	ω
	2.706	1.59 %	0.80 %
粒 度	D_{max}	D_{min}	U_c
	38.1 mm	0.84 mm	7

供試体の作成方法は、締固め総数を 6 層として電動ランマー (全負荷打撃数 950 打/分, 重量 33kgf) によって所定の密度となるように締固めた。なお、前述の端面処理方法(2)の場合には、6 層目に試料といっしょに鋼製刃を埋め込み、締固めを行った後、上部ベディスタルと鋼製刃を連結するという方

法で供試体を作成した。

中空ねじり単純せん断試験の試験方法を表 3.18 に示す。

表 3.18 試験方法

試験方法	圧密排水・不飽和
側圧負荷方法	真空ポンプによる吸引
試験側圧	$\sigma_3 = -0.94 \text{ kgf/cm}^2$
試験密度	$e_0 = 0.336$ (DENSE)
せん断方法	せん断ひずみ制御 (0.5%/min)

なお、詳細な試験方法は 4.3.3. (1) を参照のこと。

3.5.3. 試験結果

端面処理方法(1)の場合、写真 3.19 に示すように供試体上端面付近ですべりが生じ、上端面から 4～5 cm の範囲のみ変化し、その他はほとんど変形していないことがわかる。このように供試体上端面付近ですべりが生じた原因は、①供試体上部ほど密度が小さいこと、②締固めによって細粒分は下の方へ落ち、上部ほど粒度分布が悪いこと、③したがって、試料と端面の接触面積は小さいことなどが考えられる。したがって、上下端面に半円球のくぼみをつけるという端面処理方法(1)はせん断応力を伝えるには不十分であることがわかった。

端面処理方法(2)の場合、写真 3.20 に示すようにせん断ひずみ $\gamma = 6\%$ では格子状に引いた縦・横線は直線的に変形しており、かなり理想に近い単純せん断変形状態を示している。また、 $\gamma = 10\%$ ではすでにすべり線が生じており、そのすべり線の方法は水平面より、約 20° 程度傾いた方向となっている。図 3.69 のせん断応力～せん断ひずみ曲線をみると、最大せん断応力 $\tau_{\max}$ は $\gamma = 8\%$ 程度のところで生じており、その時の供試体の変形状態を見ると、すべり線が生じる前後であることがわかる。なお、 $\sigma_a = \sigma_r \div 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ であるのに対して、 $\tau_{\max} \div 1.3 \text{ kgf/cm}^2$ とかなり大きいのは、タッチ荷重および上部ペディスタルの重量による軸応力の増加分 $\Delta\sigma_a$ が大きいので異方圧密状態となったためと考えられる。以上のことから、端面処理方法(2)の場合には十分にせん断応力を伝えることができ、理想に近い一様な単純せん断変形状態が生じることが確認された。

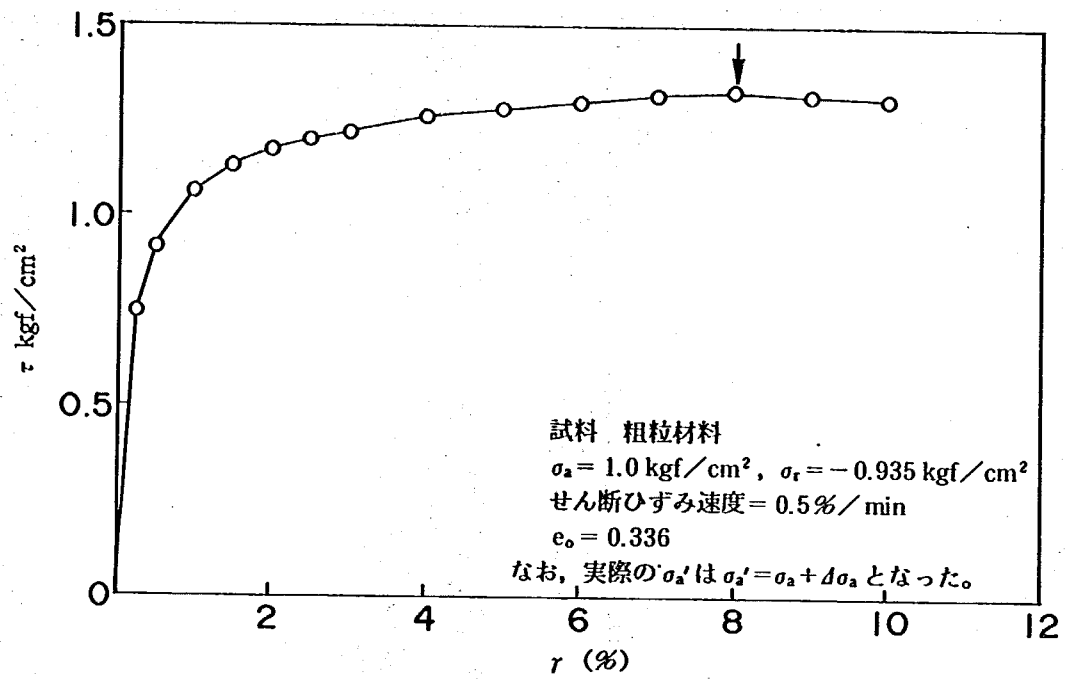
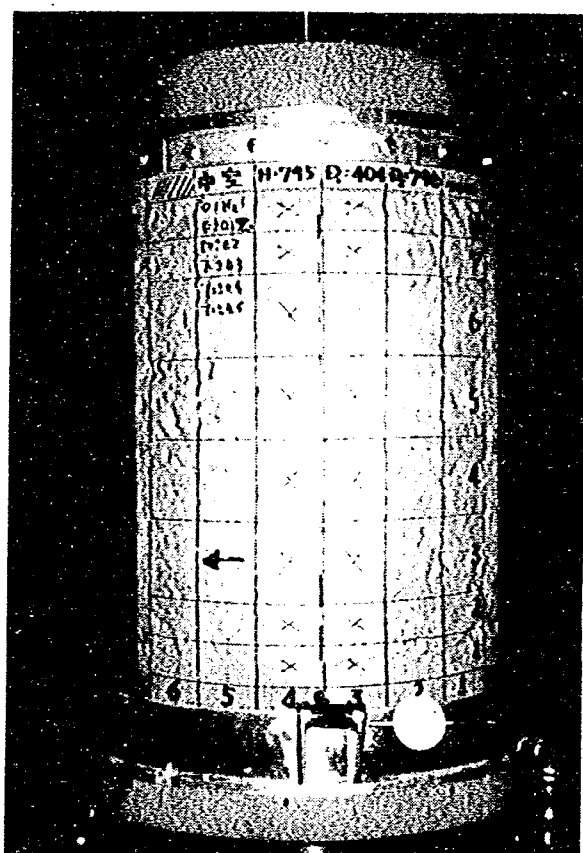
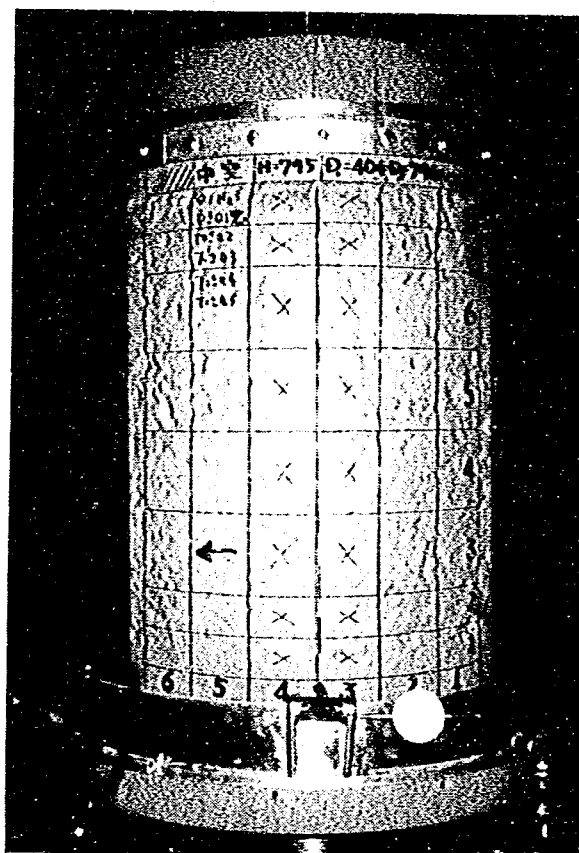


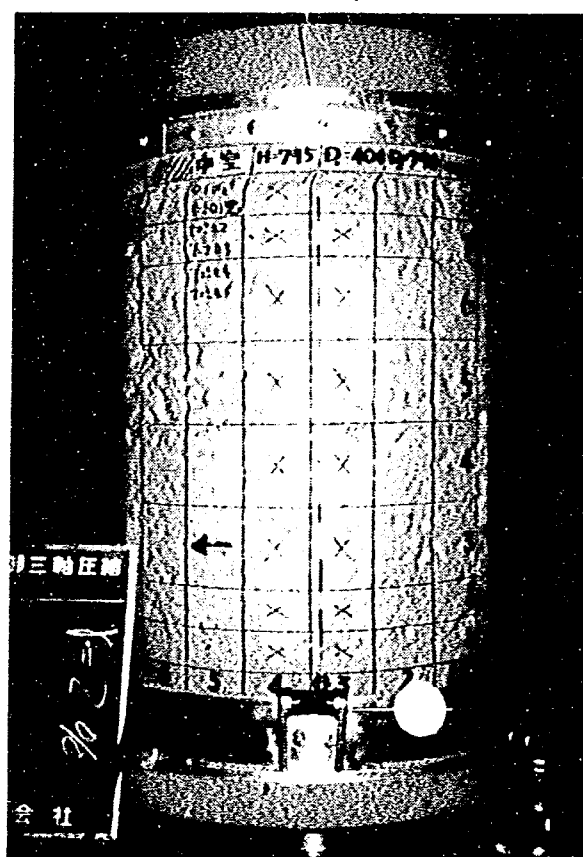
図 3.69 静的中空ねじり単純せん断試験結果



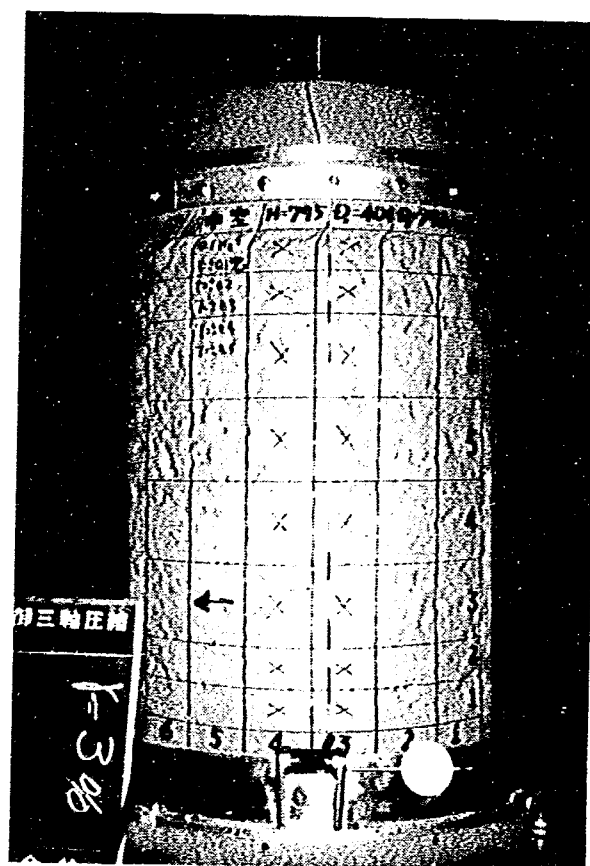
(試験前)



($r = 1\%$)



($r = 2\%$)



($r = 3\%$)

写真 3.19 端面処理方法(1)による試験結果

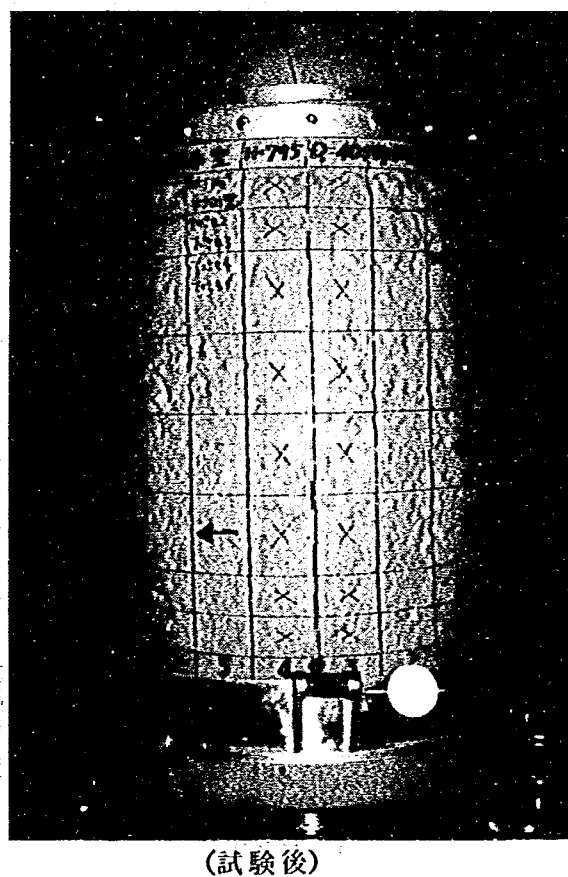
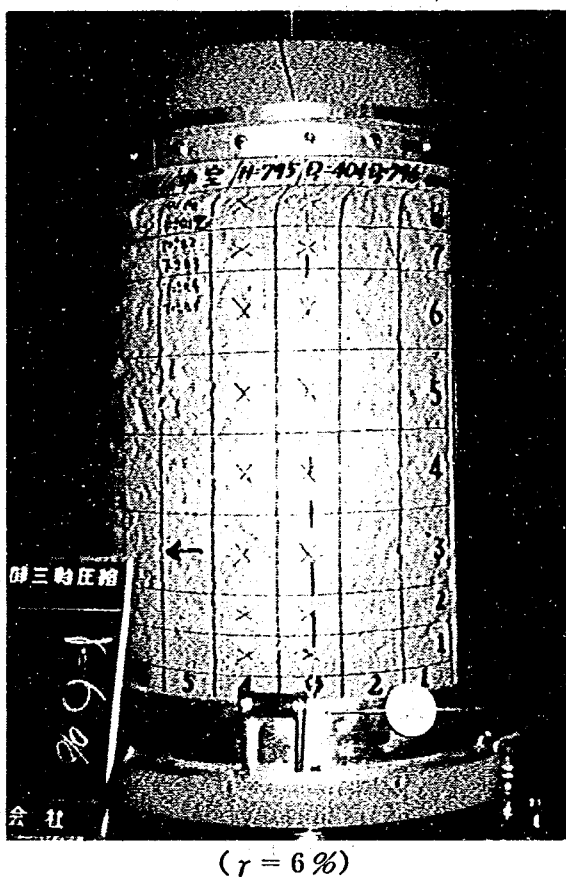
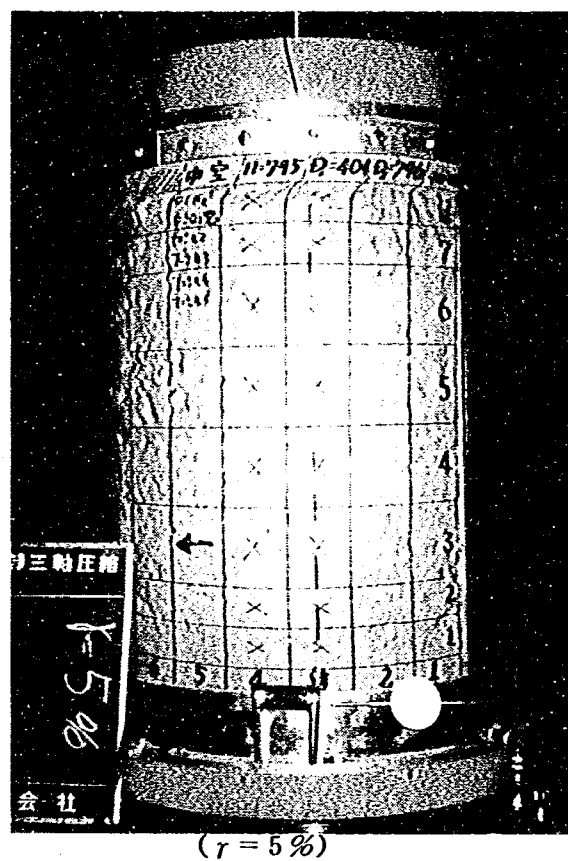
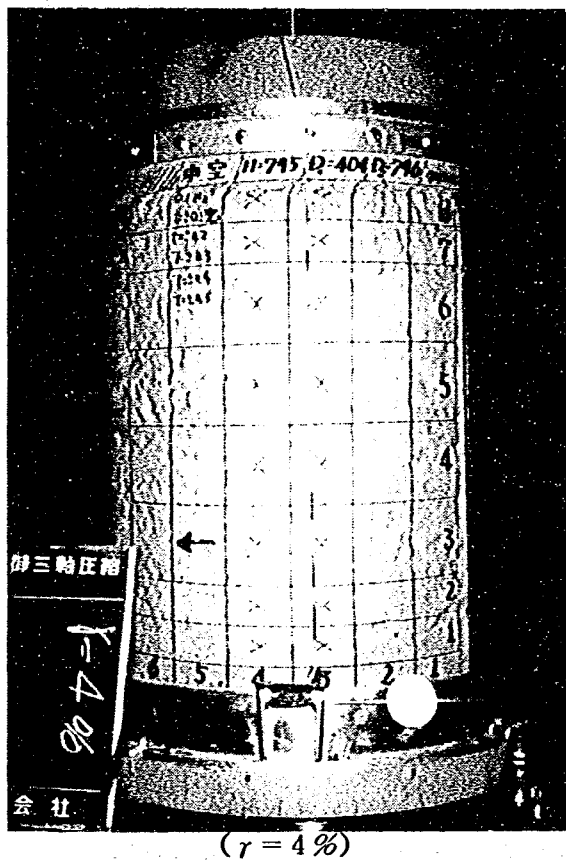
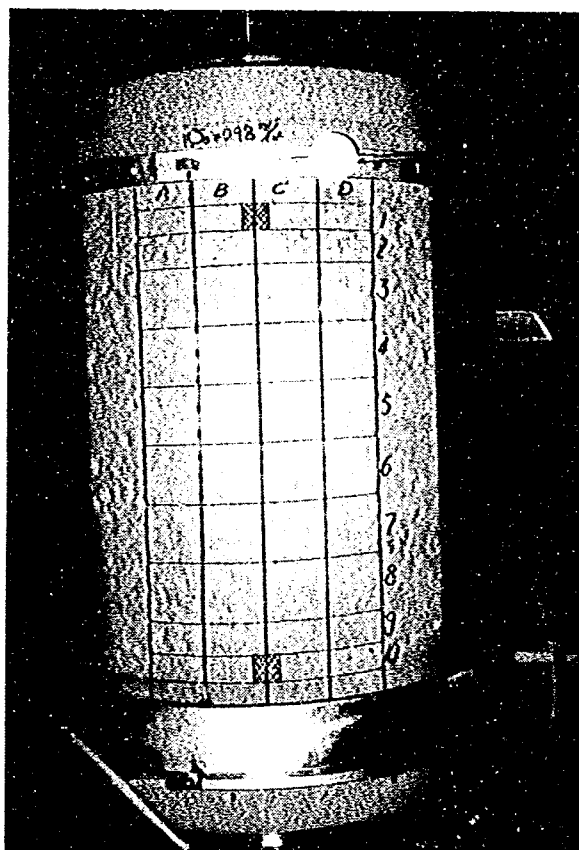
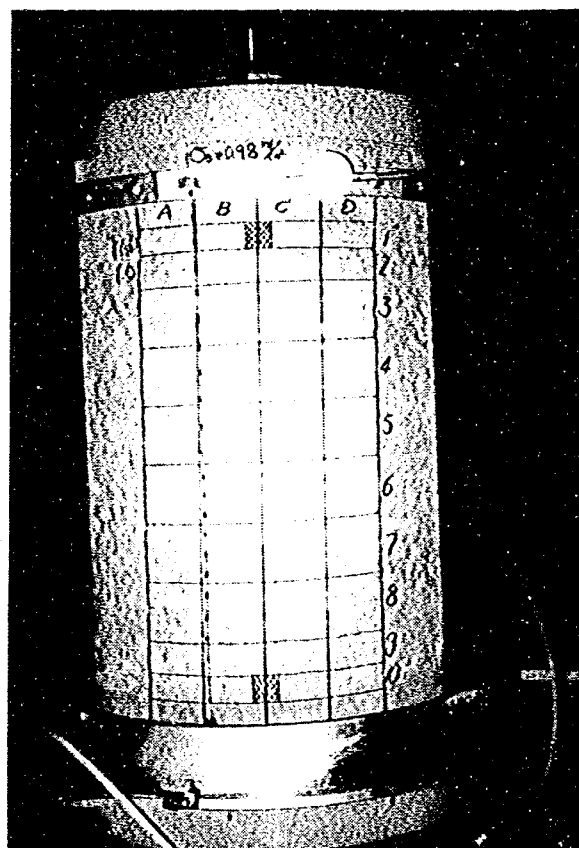


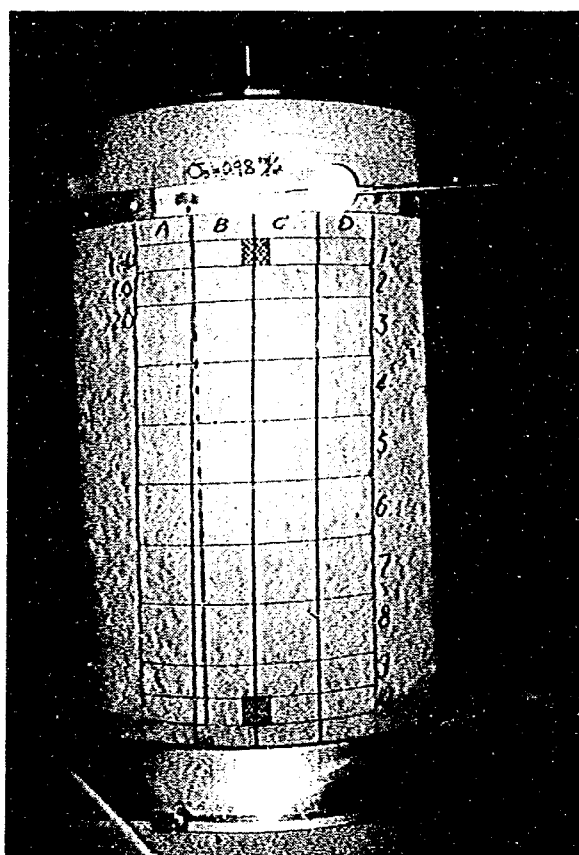
写真 3.19 端面処理方法(1)による試験結果



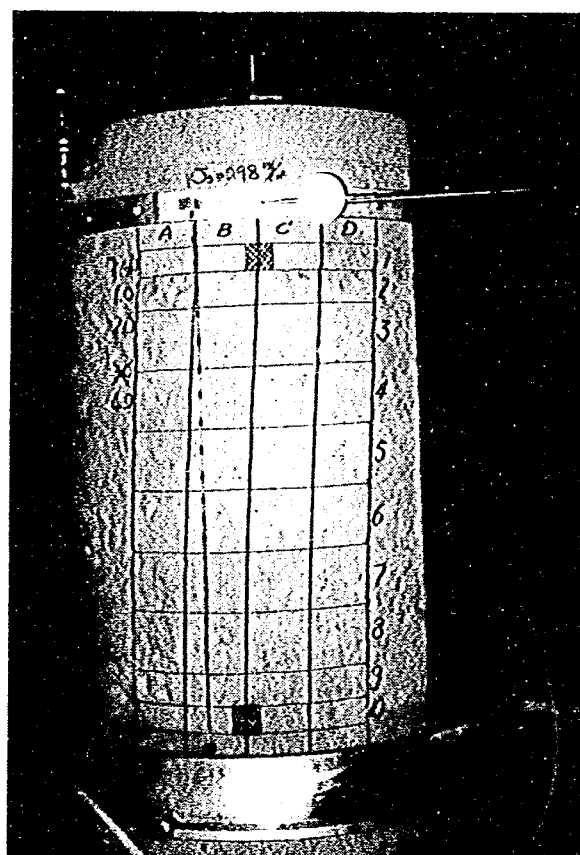
(試験前)



($r = 1\%$)

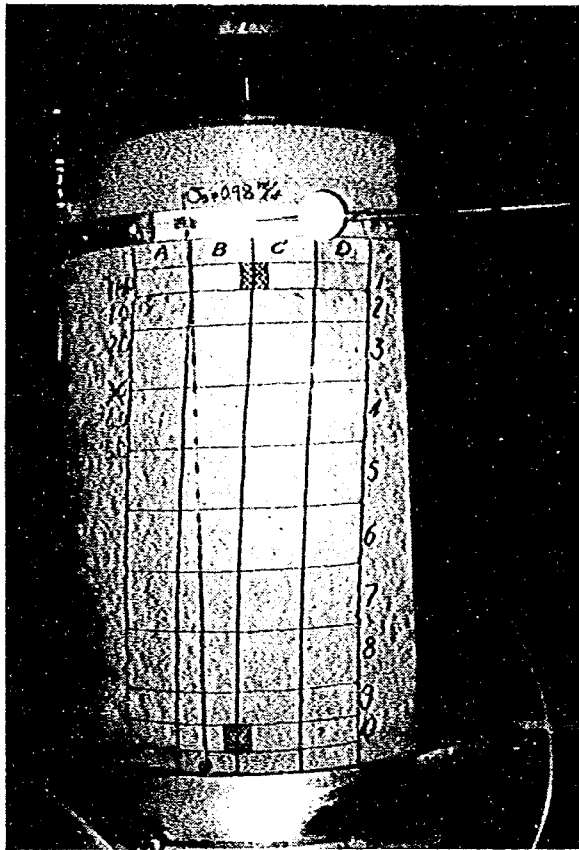


($r = 2\%$)

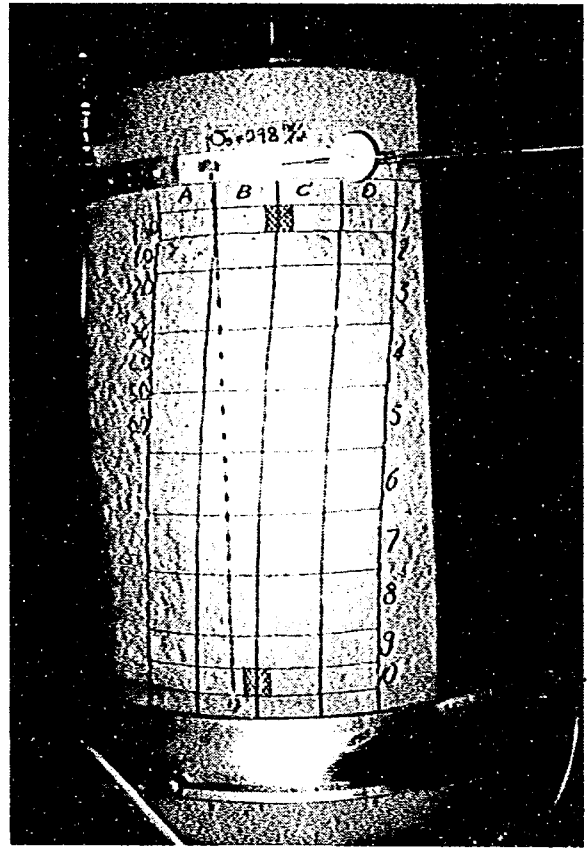


($r = 4\%$)

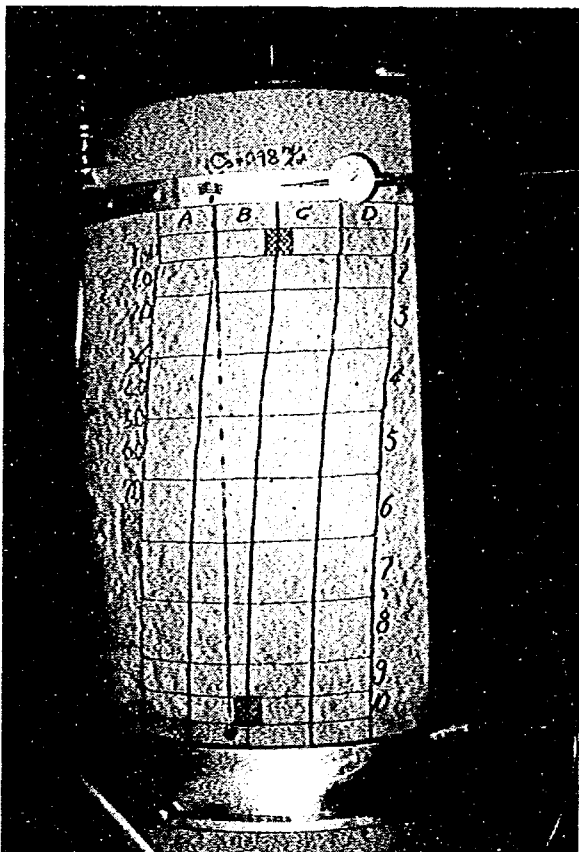
写真 3.20 端面処理方法(2)による試験結果



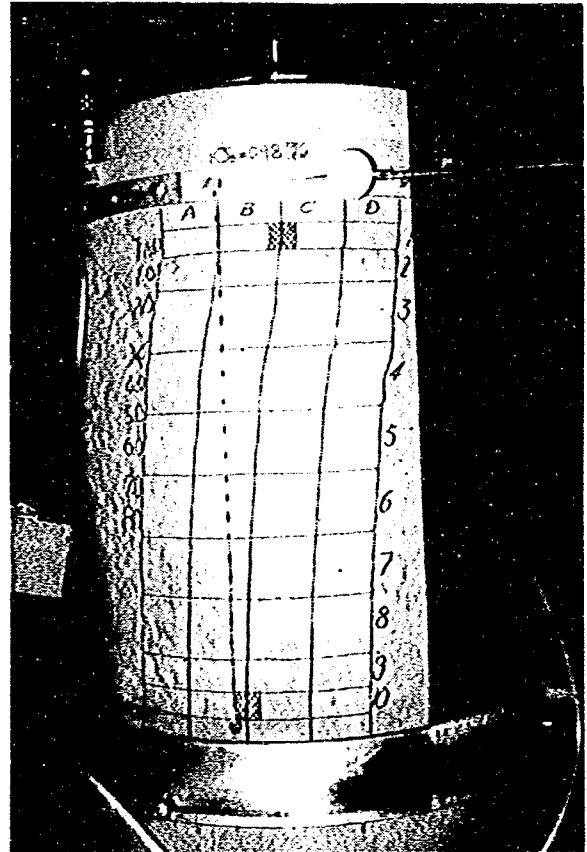
($r = 5\%$)



($r = 6\%$)

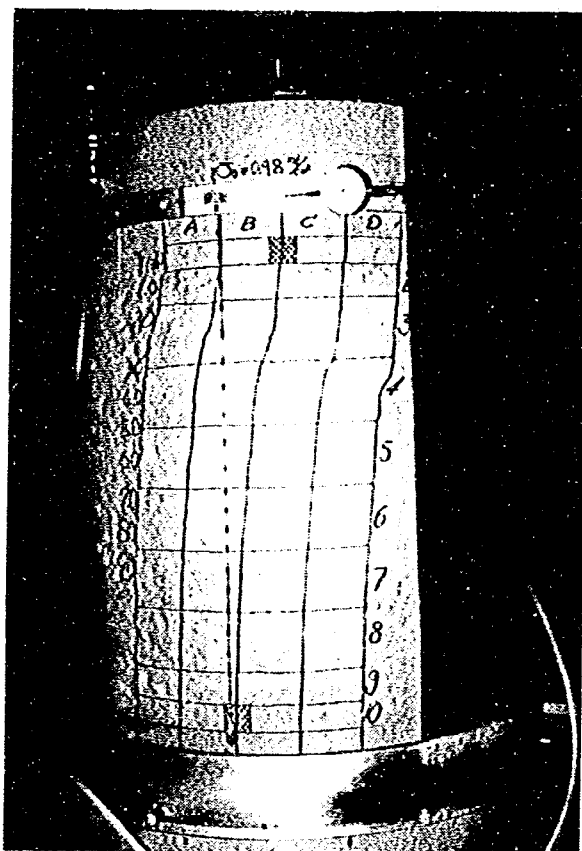


($r = 7\%$)

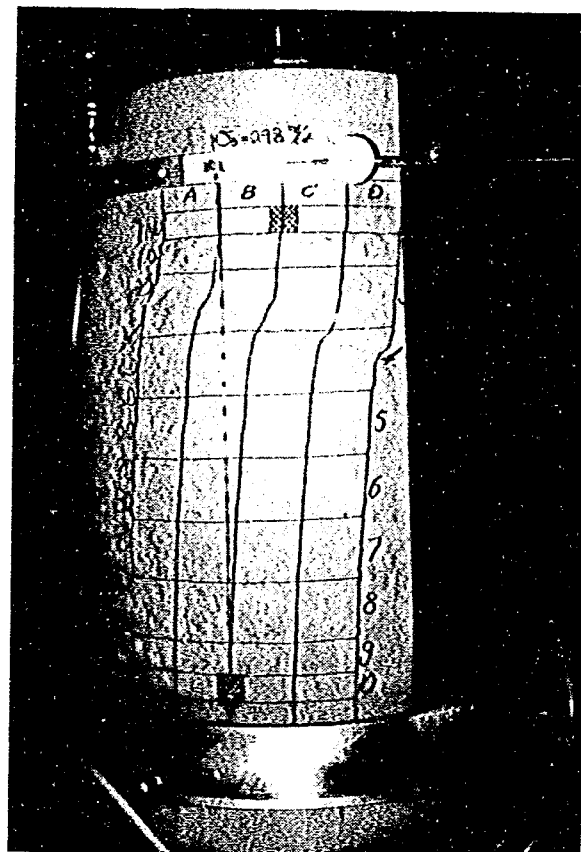


($r = 8\%$)

写真 3.20 端面処理方法(2)による試験結果



($r = 9\%$)



($r = 10\%$)

写真 3.20 端面処理方法(2)による試験結果

4. 豊浦砂を用いた予備試験

4.1 試験目的

大型せん断試験装置による粗粒材料のせん断試験を行う前に、物性値の既知な材料を用いて試験方法や試験機の特長などについて調べておく必要がある。そこで、従来から砂の強度・変形性を調べるためによく使われている豊浦標準砂（以後、豊浦砂という）を用いて、試験方法や供試体の大きさの違いによる影響、あるいは試験機の特長（構造、せん断方法、精度など）などについて調べる目的で、静的試験、及び繰返し試験を実施した。

静的試験としては供試体寸法 $D5 \times H10$ cm, $D10 \times H20$ cm, $D40 \times H80$ cm の中実三軸圧縮試験（以後、中実試験という）と $D80-40 \times H80$ cm の中空ねじり単純せん断試験（以後、中空試験という）を実施し、また、繰返し試験としては供試体寸法 $D40 \times H80$ cm の繰返し中実試験と $D80-40 \times H80$ cm の繰返し中空試験を実施した。なお、中空試験は拘束圧一定の定圧試験であるため、最大主応力方向は $\psi = 45^\circ$ 一定である。

4.2 試験材料

試験材料としては、豊浦砂を用いた。

豊浦砂の物性値を表 4.1 に示す。

表 4.1 豊浦砂の物性値

項 目	単 位	物性値	備 考
比 重 G_s	gf/cm ³	2.65	JIS. A. 1202 による
含 水 比 w	%	0.11	JIS. A. 1203 による
最大間隙比 $e_{\max}$		0.981	漏斗法による
最小間隙比 $e_{\min}$		0.632	水平打撃法による
平均粒径 D_{50}	mm	0.162	文献 20) より
均等係数 U_c		1.46	"

なお、各試験ともに、新鮮な豊浦砂を用いた。

4.3 試験方法

4.3.1 試験ケース

静的試験の場合は、砂の強度特性に最も影響の大きい間隙比をパラメータとし、拘束圧 ($\sigma_c = 1.0$

kgf/cm²)を統一して試験を実施した。また、繰返し試験の場合は拘束圧をパラメータとし、間隙比($e_o = 0.70$)を統一して試験を実施した。試験ケースを表4.2に示す。

表4.2 試験ケース

試験名	試験ケース	供試体寸法 cm	せん断試験の種類	パラメーター	供試体本数
静 的 試 験	D 5	D 5 × H10	中実試験	$e_o = 0.70 \sim 0.77$	3
	D10	D10 × H20	〃	$e_o = 0.65 \sim 0.73$	4
	D40	D40 × H80	〃	$e_o = 0.68, 0.71$	2
	D80-40	D80-40 × H80	中空試験	$e_o = 0.69, 0.74$	2
繰返し 試験	D40	D40 × H80	繰返し 中実試験	$\sigma_c = 1, 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$	1
	D80-40	D80-40 × H80	繰返し 中空試験	〃	1

4.3.2 供試体の作成方法

D5, D10の供試体の作成方法は締固め層数3層とし、締固め用突棒によって所定の密度となるように締固めするという方法で行った。またD40の中実供試体、D80-40の中空供試体の作成方法を図4.1～4に示す。

4.3.3 せん断試験方法

(1) 静的試験

中実試験は土質工学会基準「土の三軸試験方法(案)²¹⁾」に準拠して実施した。また、中空試験は中実試験とできるだけ同様の方法で実施した。せん断試験の試験条件を表4.3に示す。

表4.3 静的試験の試験条件

試験ケース	D 5	D10	D40	D80-40
供試体寸法 cm	D 5 × H10	D10 × H20	D40 × H80	D80-40 × H80
せん断試験の種類	三軸圧縮試験			ねじり単純せん断試験
供試体の状態	不飽和・気乾状態 ($w < 1\%$)			
排水条件	圧密・排水試験(CD試験)			
せん断試験方法	軸ひずみ制御			せん断ひずみ制御
載荷速度	$\epsilon_a = 0.5\%/\text{min}$			$r_{at} = 0.5\%/\text{min}$
試験拘束圧	$\sigma_c = \sigma_r = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$			$\sigma_c = \sigma_a = \sigma_r = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
試験間隙比	$e_o = 0.65 \sim 0.77$			$e_o = 0.69, 0.74$

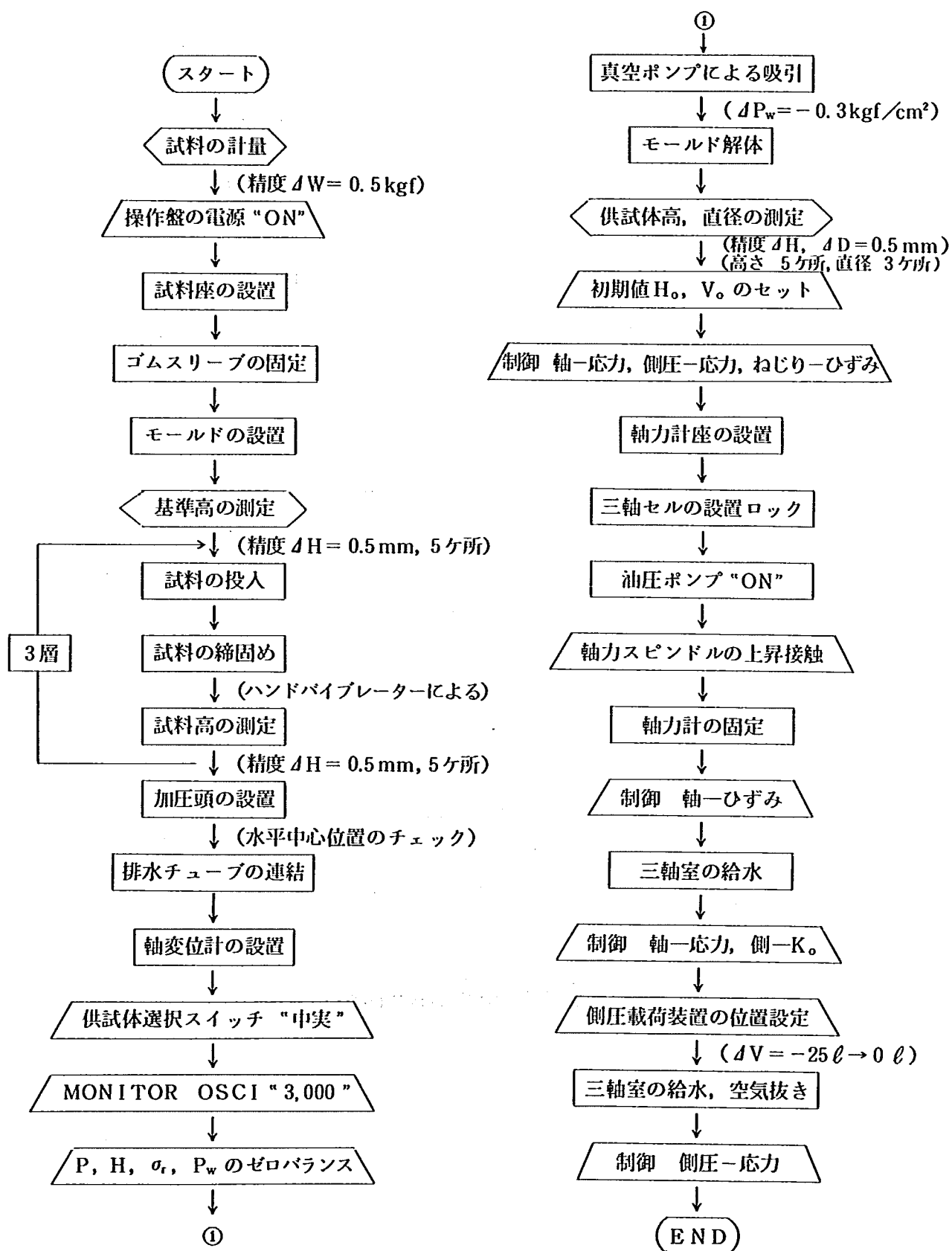


図 4.1 D40の中実供試体の作成方法

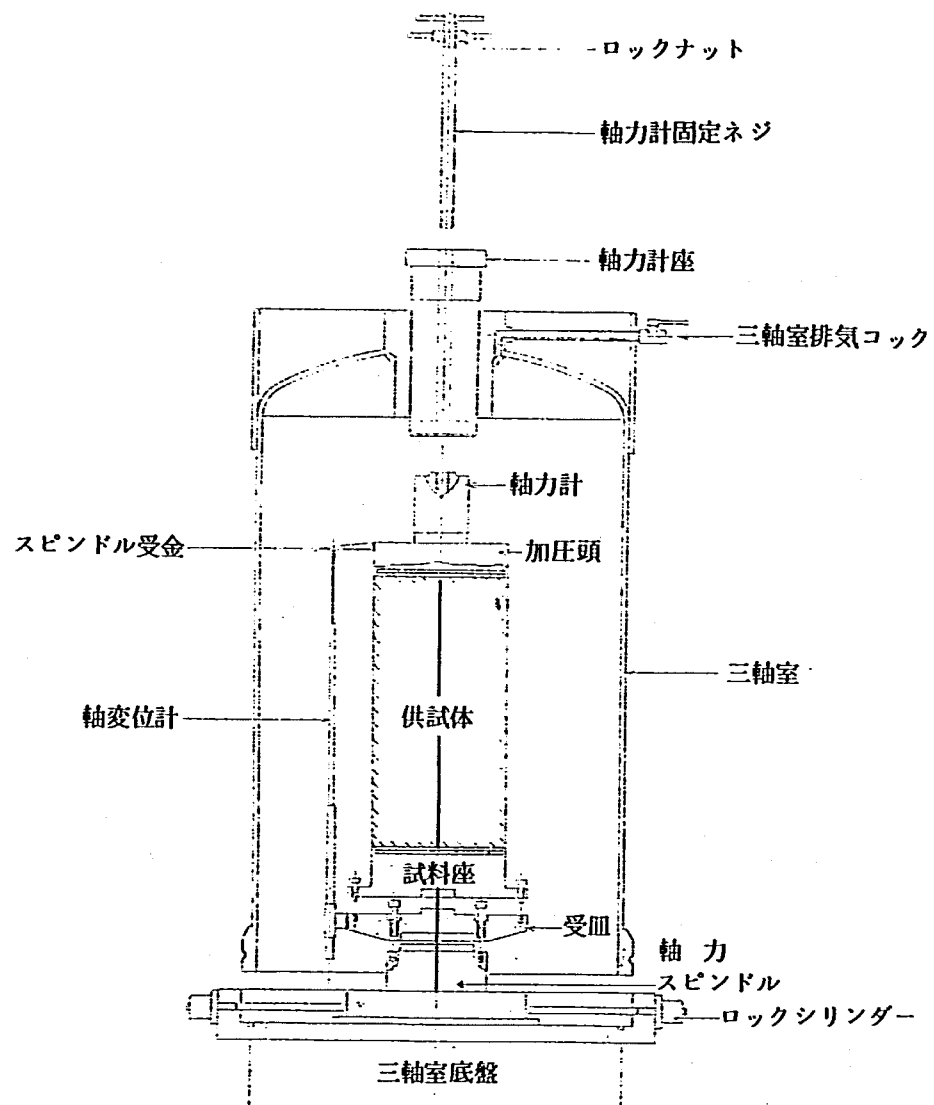


図 4.2 中実試験の組立図

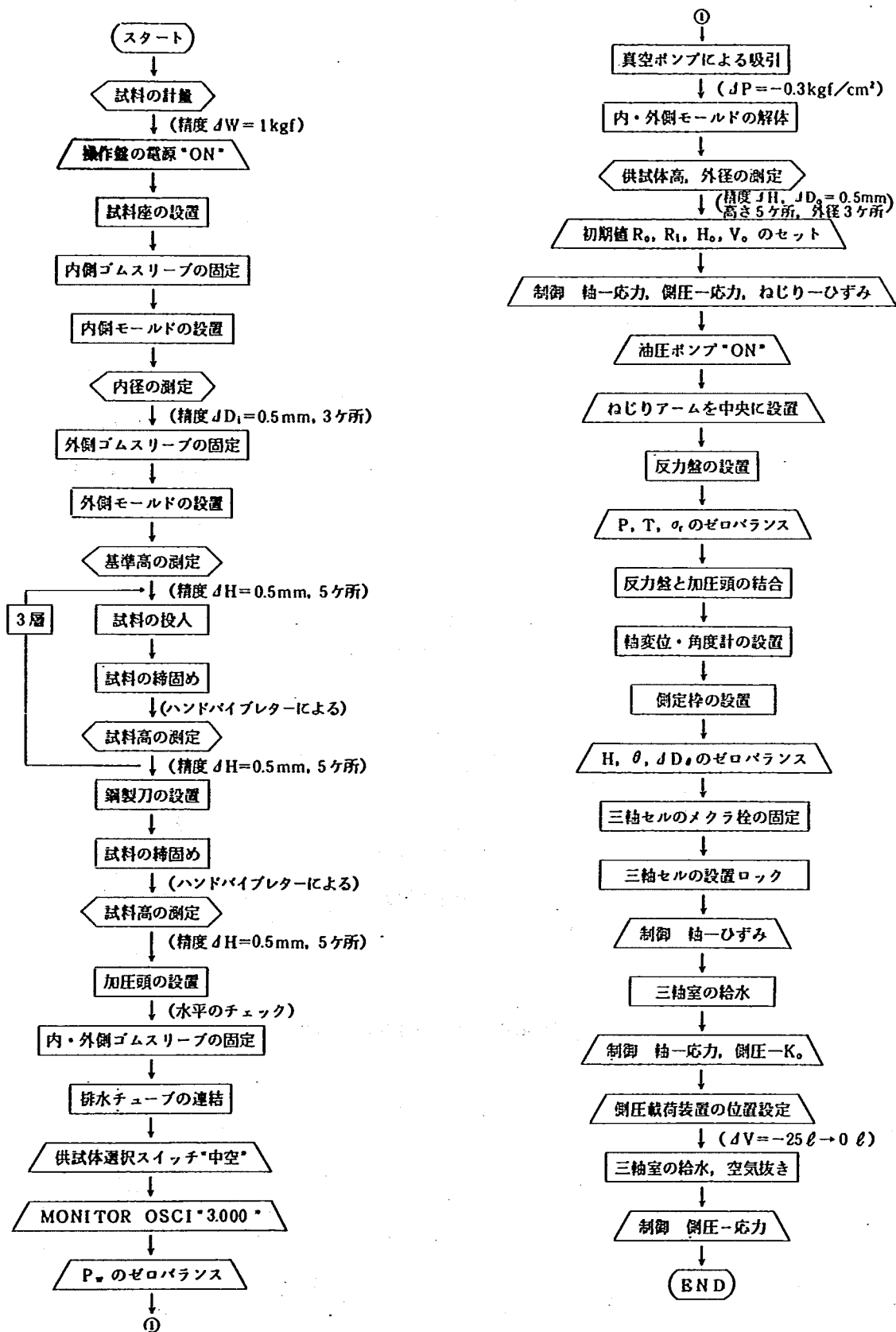


図 4.3 D80-40の中空供試体の作成方法

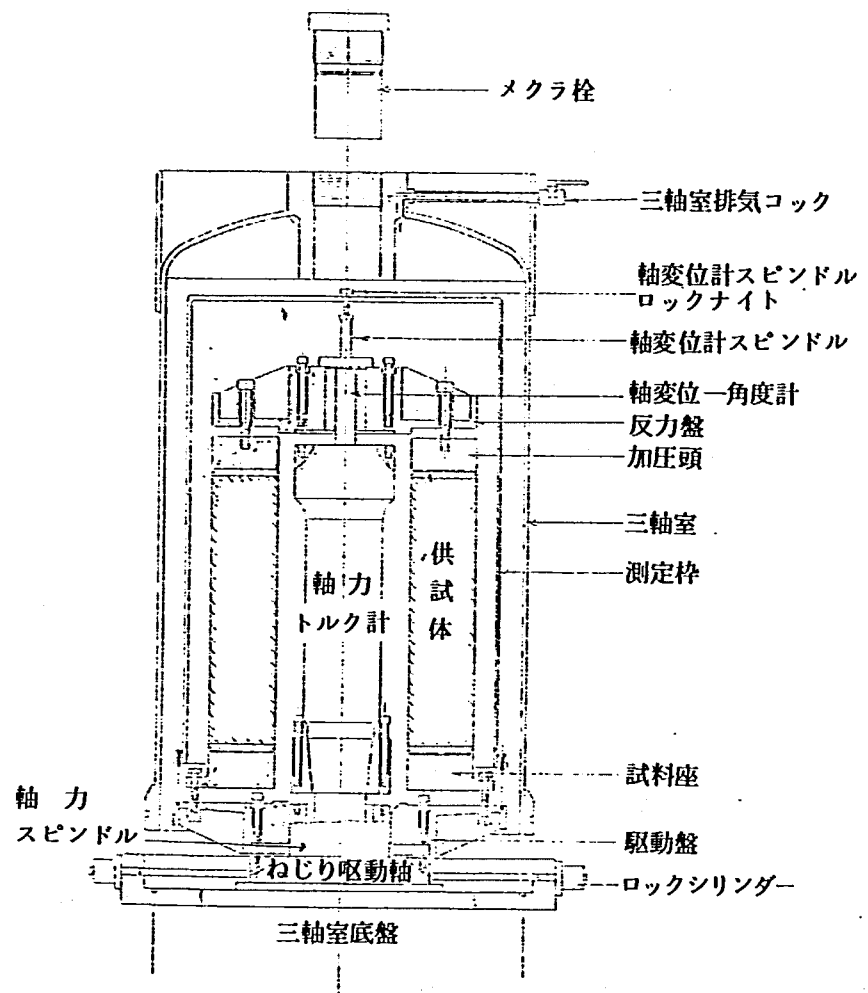


図 4.4 中空試験の組立図

また、詳細なせん断試験方法を図 4.5 に示す。

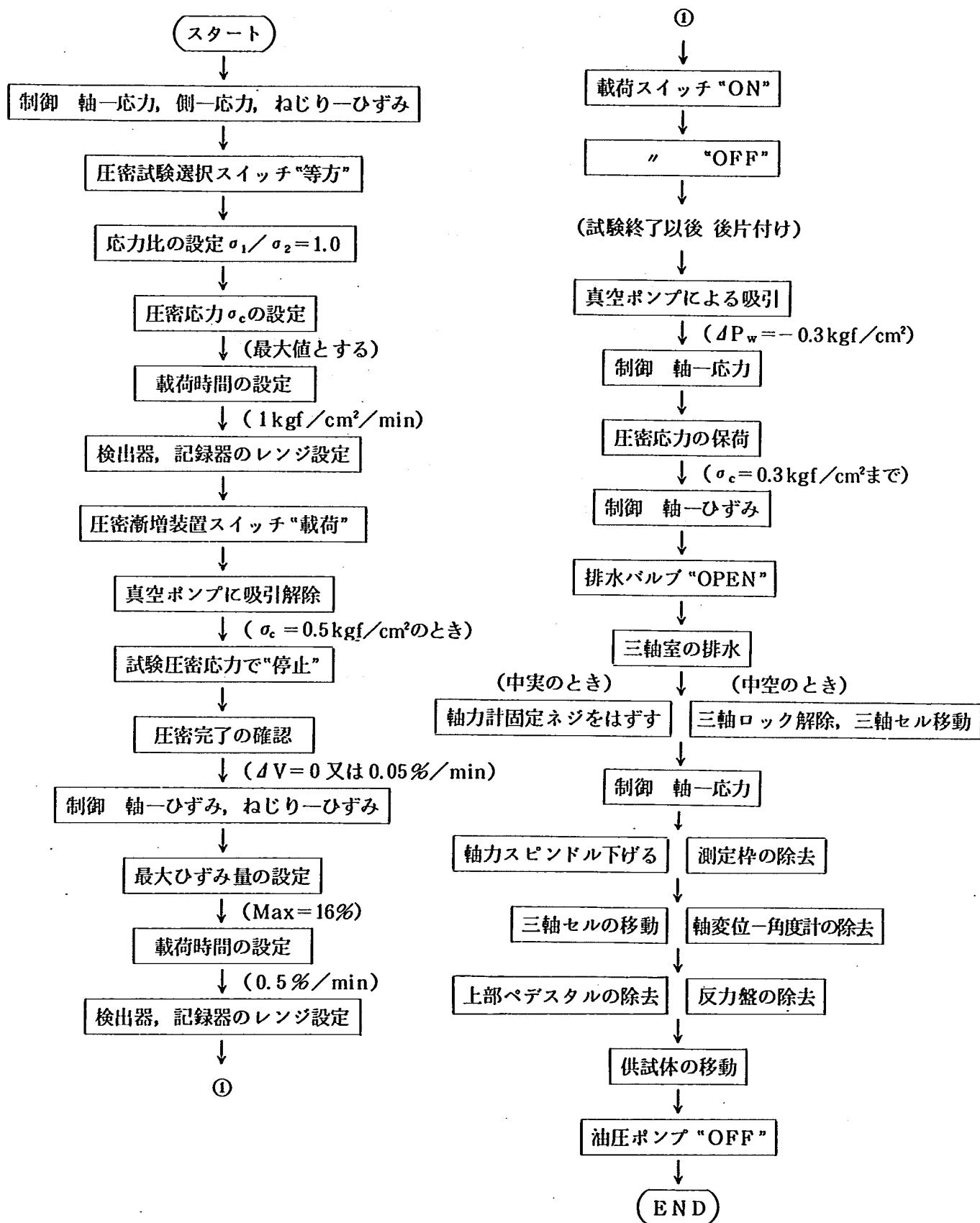


図 4.5 静的試験の試験方法

(2) 繰り返し試験

繰り返し試験は拘束圧を増加させながら、それぞれの試験拘束圧で、繰り返し応力を載荷し、繰り返し試験を実施した。なお、繰り返し応力によって生じるせん断ひずみは、 $10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-3}$ の範囲内とした。繰り返し試験の試験条件を表 4.4 に示す。

表 4.4 繰り返し試験の試験条件

試験ケース	D40	D80-40
供試体寸法 cm	D40×H80	D80-40×H
せん断試験の種類	繰り返し 三軸圧縮試験	繰り返しねじり 単純せん断試験
供試体の状態	不飽和、気乾状態 ($w < 1\%$)	
排水条件	圧密・排水試験 (C D 試験)	
繰り返しせん断 試験方法	軸応力制御	せん断応力制御
振巾波数	$f = 0.2 \text{ Hz}$ の正弦数	
繰り返し回数	$N = 11$ 回	
試験拘束圧	$\sigma_c = 1, 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$	
試験間隙比	$e_o = 0.70$	

また、詳細なせん断試験方法を図4.6に示す。

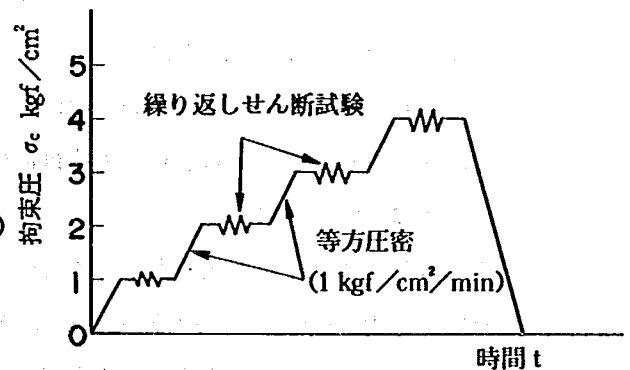
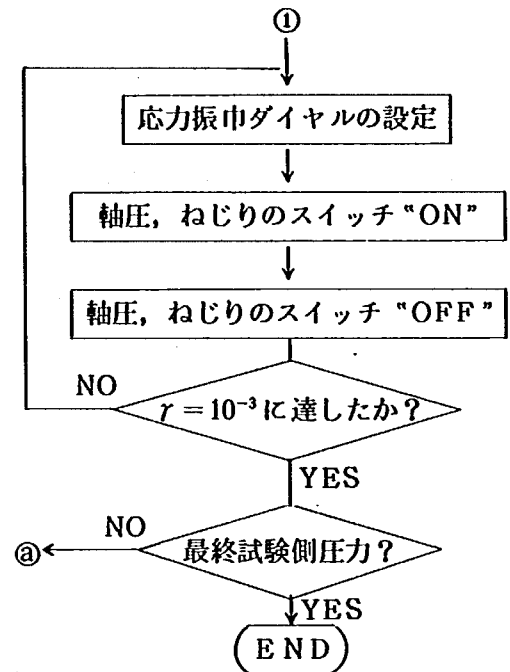
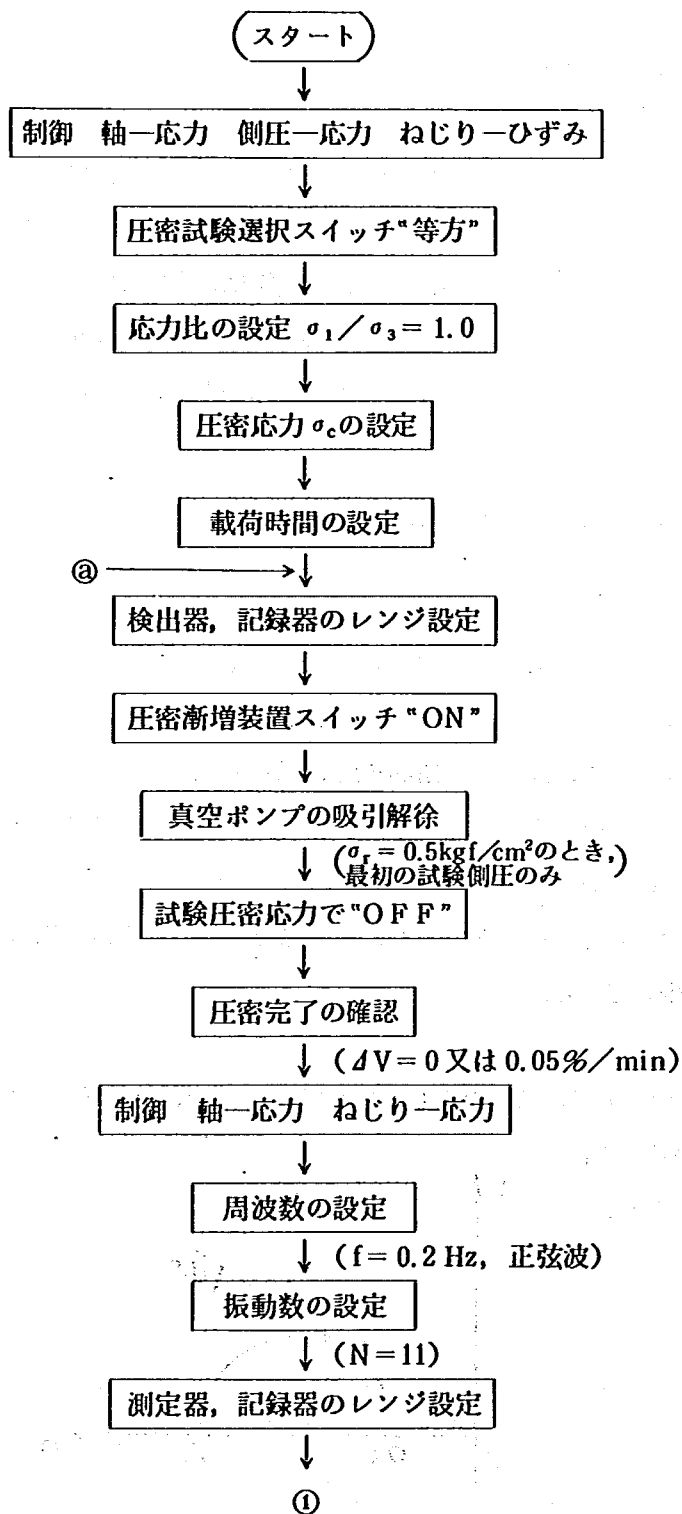


図4.7 繰返し試験の順序

図4.6 繰返し試験の試験方法

4.4 試験結果

4.4.1 静的試験結果

(1) 三軸圧縮試験結果

D 5, D10, D40の三軸圧縮試験結果をまとめて表 4.5 に示す。

① 圧密過程について

圧密後間隙比 e_c と初期間隙比 e_o の比 e_c/e_o の関係を示したのが図 4.8 である。この図によると、供試体直径が大きいほど e_c/e_o は 1.0 に近い、つまり圧密による体積変化は小さいということである。また、初期間隙比 e_o による差はなく、ほぼ一定である。これは、供試体の直径が大きいほど、側壁の面積と供試体体積の比が小さいこと ((4.1) 式参照)、また、ゴムスリーブの厚さは直径が大きいほど厚いため、側圧による供試体側壁の凹凸へのくい込み量が小さいためと考えられる。

$$\frac{\text{側壁の面積}}{\text{供試体体積}} = \frac{\pi D H}{1/4 \pi D^2 H} = \frac{4}{D} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

② 応力比～ひずみ曲線について

拘束圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ に設定して試験を行ったが、表 4.5 に示すように 最大 $\pm 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 程度のバラツキがある。したがって、縦軸は応力比 σ_1/σ_3 として拘束圧の影響をなくし、応力比とひずみの関係を示したのが図 4.9, 4.10 である。この図から初期間隙比 e_o が小さいほど、応力比 σ_1/σ_3 は大きく、最大応力比時の圧縮ひずみは小さくなっている。また、D10, D40 共にひずみが十分に大きくなると、応力比はほとんど同様の値となっている。D40 の $e_o = 0.684$ の場合、 $\epsilon_s \approx 8\%$ 付近で応力比が急減しているのは、おそらくすべりが生じたためと思われる。その他の場合にはピークを過ぎてなだらかに応力比は減少している。

③ せん断強度について

せん断強度を比較する指標として内部摩擦角 ϕ 。(有効応力として)を用いる。内部摩擦角 ϕ は最大軸差応力 $((\sigma_1 - \sigma_3)_f)$ 時のモールの応力円の座標原点を通る接線が水平となす角度であり、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \phi_o &= \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \\ &= \sin^{-1} \frac{\sigma_1/\sigma_3 - 1}{\sigma_1/\sigma_3 + 1} \end{aligned}$$

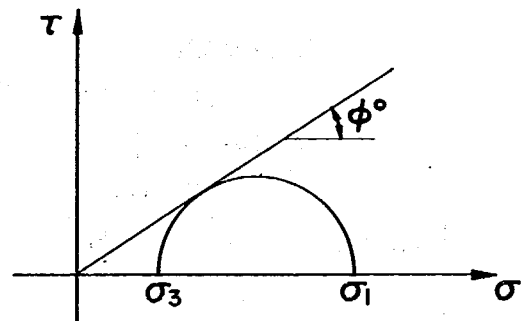


図 4.11, 4.12 は ϕ_o と e_o および e_c の関係を示したものである。間隙比 e_o , e_c の増加に従って、 ϕ_o は減少する傾向を示している。 e_o に着目した図 4.11 の場合、同一間隙比で比較すると、供試体直径 D 5 の場合が最も大きく、次に D40, 最も小さいのは D10 であり、それぞれの差は約 1° 程度となっている。D 5 の場合、図 4.8 に示すように、 e_c/e_o が小さいため (圧密とメンブレンの貫入

表 4.5 三軸圧縮試験結果一覧表

試 験 ケース	拘束圧 σ_c kgf/cm ²	初期乾 燥密度 γ_d g/cm ³	間 隙 比				破 壊 時					ϕ_o 度	変形係数		ダイレ タンシ ー係数 ($\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_a$) _f
			初 期 e_o	圧密後 e_c	破壊時 e_f	e_c/e_o	($\sigma_1 - \sigma_3$) kgf/cm ²	ϵ_f %	($\Delta V/V_o$) _f %	(σ_1/σ_3) _f	σ_{mf} kgf/cm ²		割線 E_f kgf/cm ²	E_{so} kgf/cm ²	
D 5	0.99	1.560	0.699	0.630	0.657	0.901	3.77	4.2	-1.6	4.81	2.27	41.0	232	90	-0.76
	1.00	1.518	0.746	0.668	0.705	0.895	3.20	8.1	-2.2	4.20	2.07	38.0	212	40	-0.42
	1.00	1.494	0.774	0.699	0.748	0.903	3.17	8.9	-2.9	4.17	2.06	37.8	206	36	-0.41
D10	0.94	1.602	0.654	0.629	0.664	0.962	3.72	3.4	-2.1	4.97	2.32	41.7	933	110	-0.74
	1.01	1.584	0.673	0.652	0.685	0.969	3.75	3.8	-2.0	4.71	2.24	40.5	938	99	-0.67
	1.13	1.562	0.700	0.670	0.700	0.957	3.96	4.3	-1.8	4.50	2.17	39.5	990	92	-0.55
	1.28	1.535	0.727	0.692	0.714	0.952	4.03	4.4	-1.3	4.15	2.05	37.7	672	92	-0.43
D40	1.00	1.574	0.684	0.684	0.723	1.000	3.83	4.8	-2.3	4.83	2.28	41.1	960	80	-0.64
	1.03	1.549	0.711	0.706	0.743	0.993	3.61	4.6	-2.1	4.50	2.17	39.6	742	78	-0.56

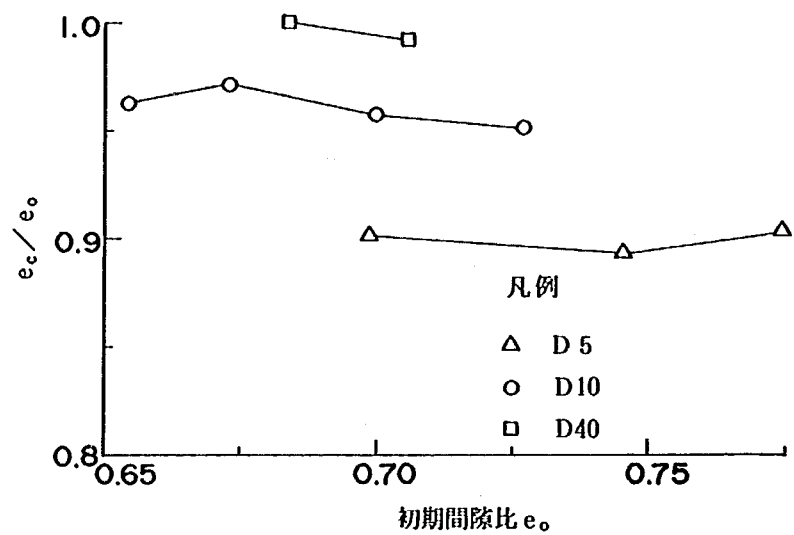


図 4.8 $e_c/e_o \sim e_o$ の関係

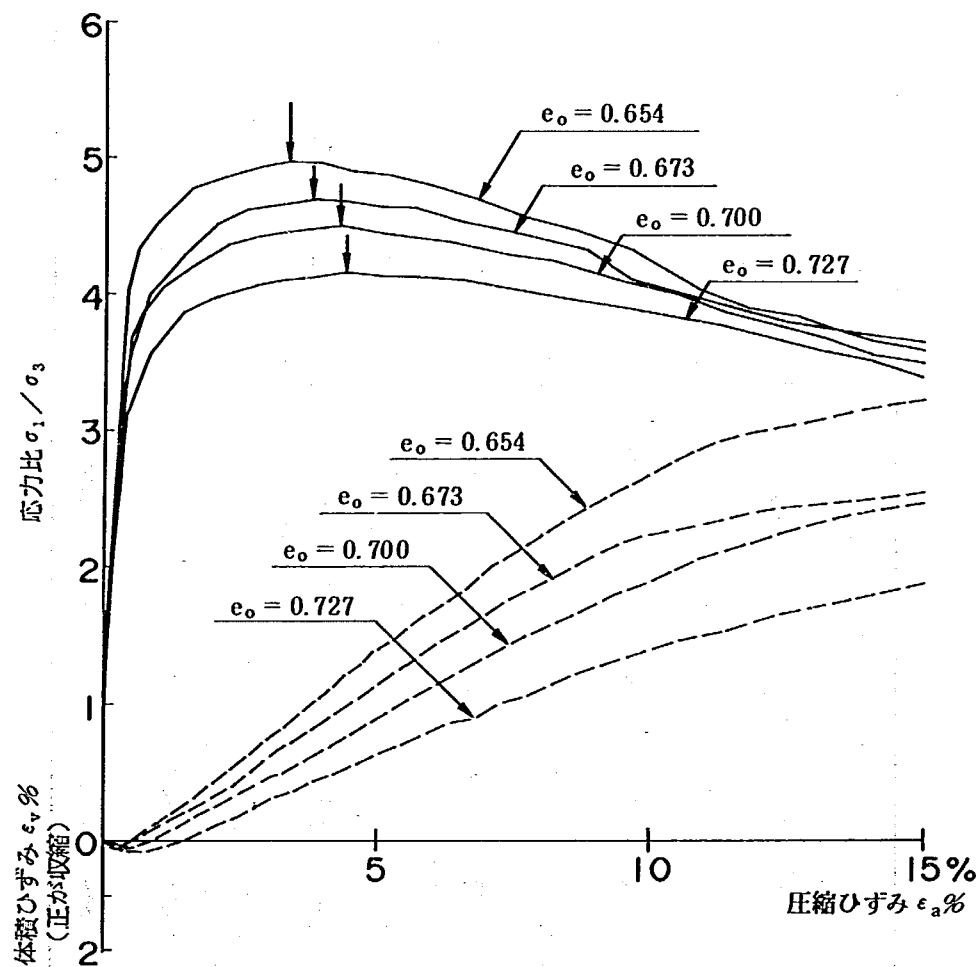


図 4.9 D10の応力比～ひずみ曲線

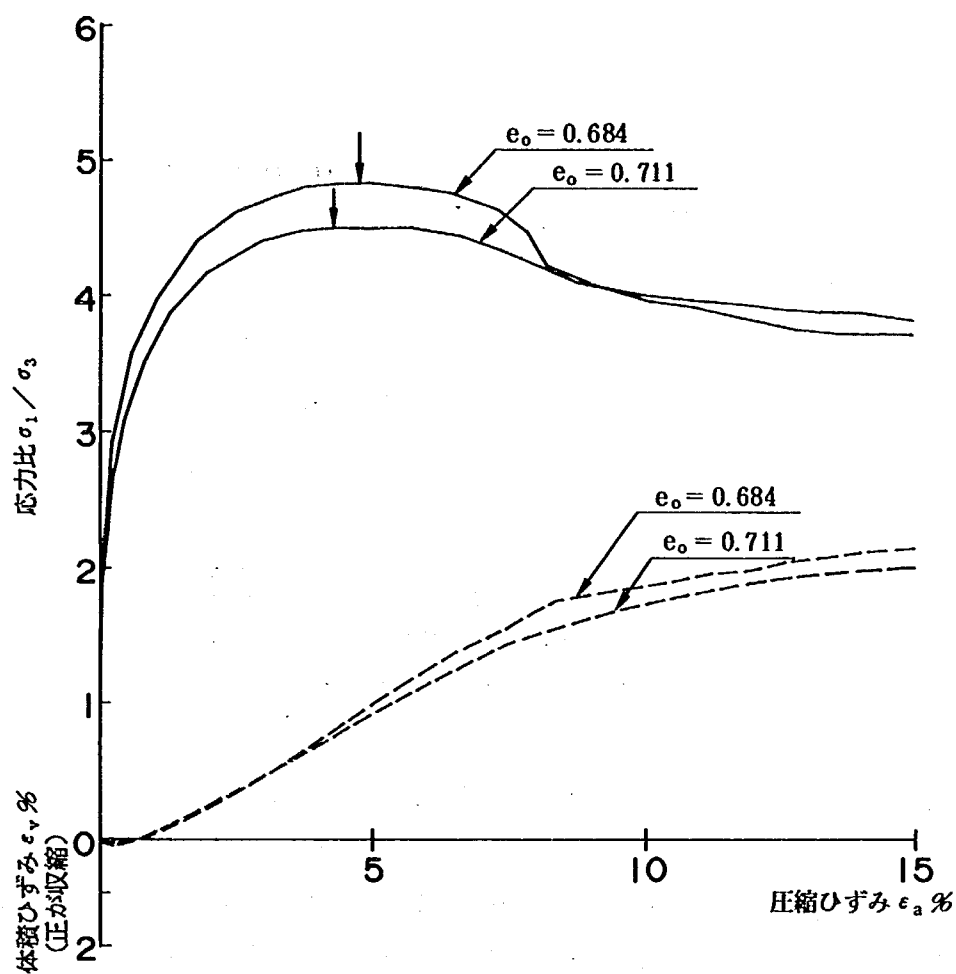


図 4.10 D40の応力比～ひずみ曲線

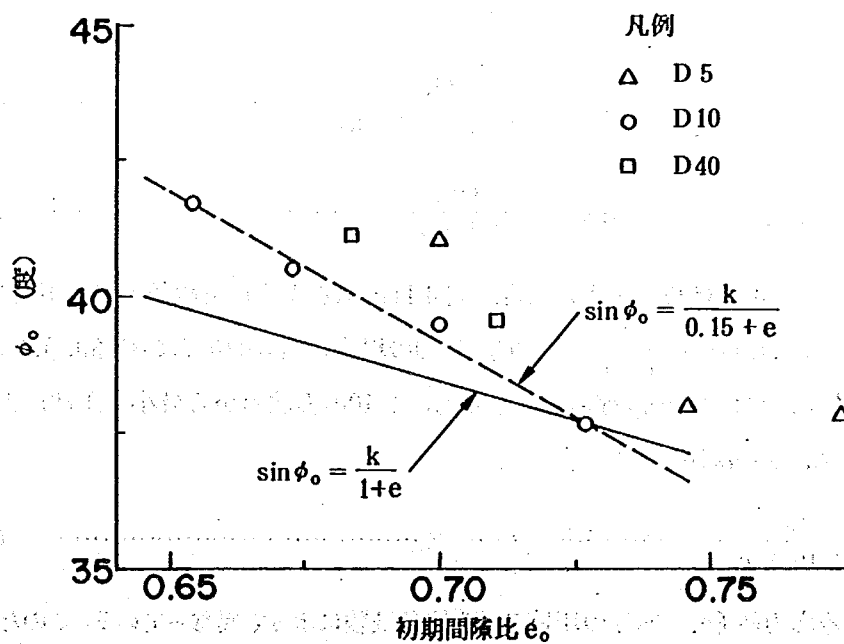


図 4.11 $\phi_o \sim e_o$ の関係

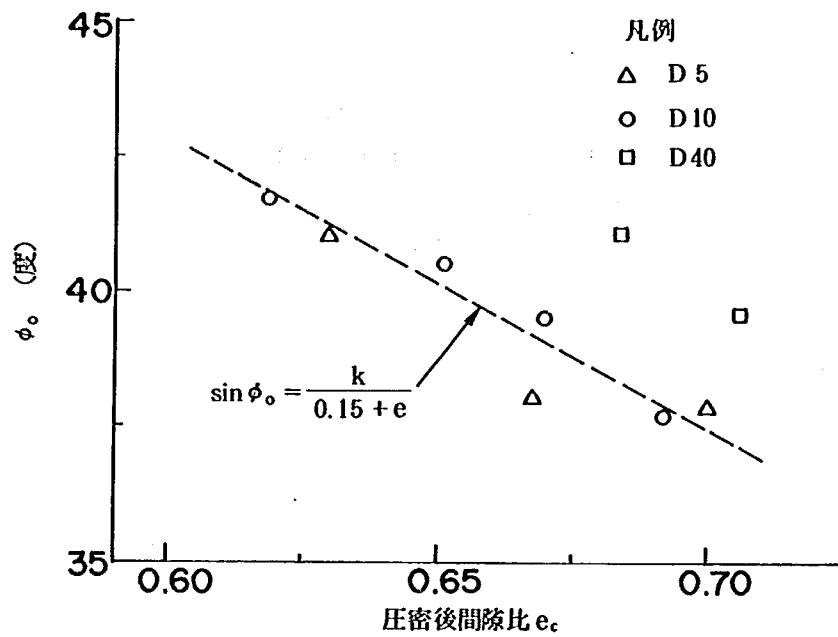


図 4.12 $\phi_0 \sim e_c$ の関係

量によるものと思われる) に ϕ_0 が大きくなったのであろう。また、 e_c に着目した図 4.12 の場合、D5、D10 は良く近似している。D40 については e_c で整理すると、D10 との差はさらに拡がり、約 2° 程度となった。以上のように D40 の ϕ_0 が D10 より約 $1^\circ \sim 2^\circ$ 程度大きい理由としては試験誤差、供試体寸法の違い、供試体の作成方法、ゴムスリーブによる拘束などが考えられる。

内部摩擦角 ϕ と間隙比 e の関係式では最上の式²⁾が良く用いられる。

$$\text{平面応力} \quad \sin \phi = \frac{k}{1 + e} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\text{三軸のとき} \quad \sin \phi = \frac{3k_t}{2(1 + e) + k_t} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\text{平面ひずみのとき} \quad \sin \phi = \frac{3k_p}{2(1 + e)} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

(4.2) 式を本研究にあてはめて考えた場合、図 4.11 に示すように実験値と勾配が異なるので、(4.2) 式を変形して、 $\sin \phi = \frac{k}{a + e}$ として、D10 の場合の実験値に合わせるように a を求めると次のようになる。(なお、 a は図中の直線の勾配を示し、D10 の実験値から最小 2 乗法によって 1 次回帰直線の勾配を求め、 a を決定した)

$$\sin \phi = \frac{k}{0.15 + e} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

また、最大軸差応力時 $(\sigma_1 - \sigma_3)_l$ の圧縮ひずみは各試験によって異なっている。このため $(\sigma_1 - \sigma_3)_l$ によって ϕ_0 を求めるとそれぞれ異なった供試体変形時に発揮される強度を比較することになる。そこで同一圧縮ひずみにおける ϕ_{0i} (圧縮ひずみが i % のときの ϕ_0) をプロットしたのが図 4.13 である。

この図から圧縮ひずみ ε_a が 2% のときは、間隙比との相関は極めて良いが、 ε_a が 4% になると相関が悪くなっていることがわかる。

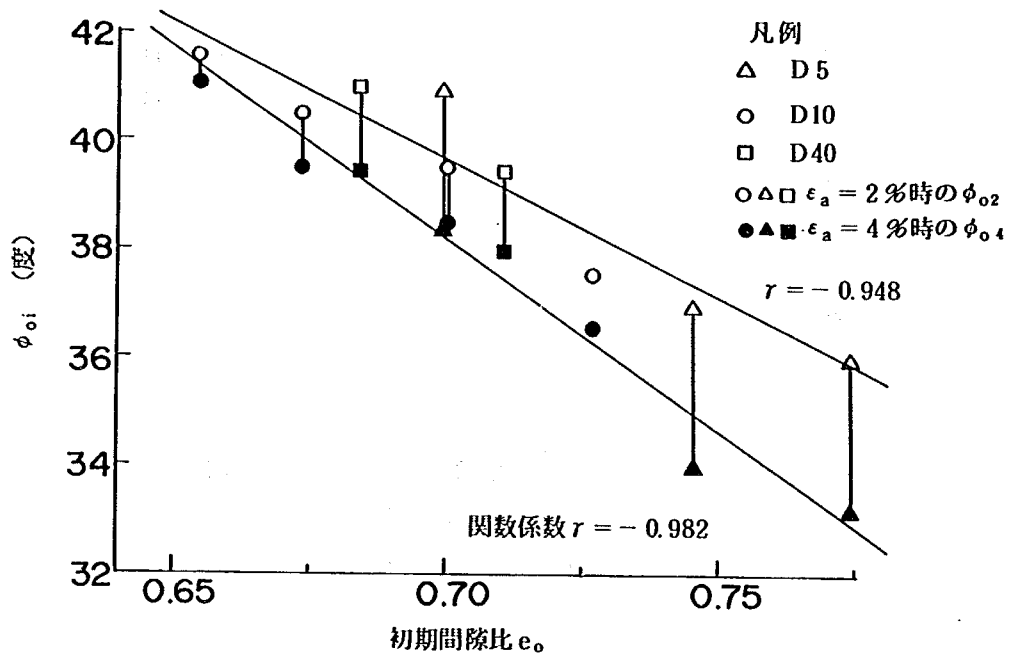


図 4.13 同一圧縮ひずみ時の $\phi_{oi} \sim e_o$ の関係

④ 変形性について

割線弾性係数 E_f , $E_{50} \sim e_o$ の関係を図 4.14, 4.15 に示す。

なお、 E_f 及び E_{50} は図 4.16 に示すように定義されるものとする。

E_f , E_{50} 共に間隙比が増加するに従って減少する傾向にある。図 4.14 の D5 の場合、他と比べ極端に小さな値を示しているが、これは供試体の作成方法の違いによるものと考えられる。 E_{50} と e_o の相関関係は良く、供試体寸法の違いによる影響は認められない。

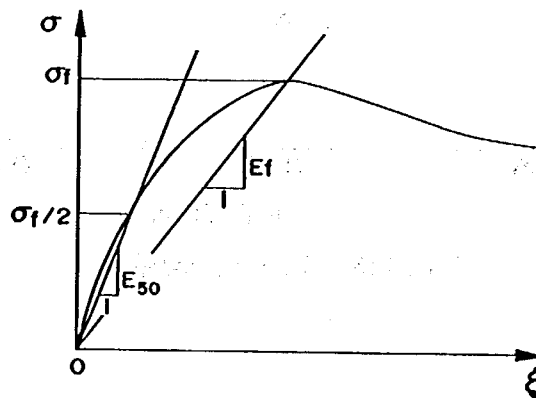


図 4.16 E_f 及び E_{50} の定義

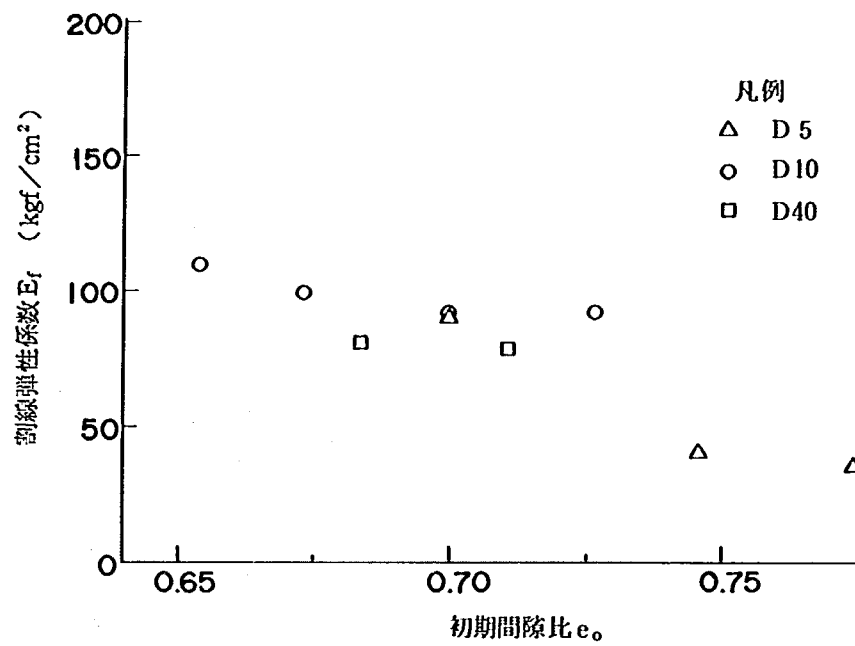


図 4.14 $E_r \sim e_o$ の関係

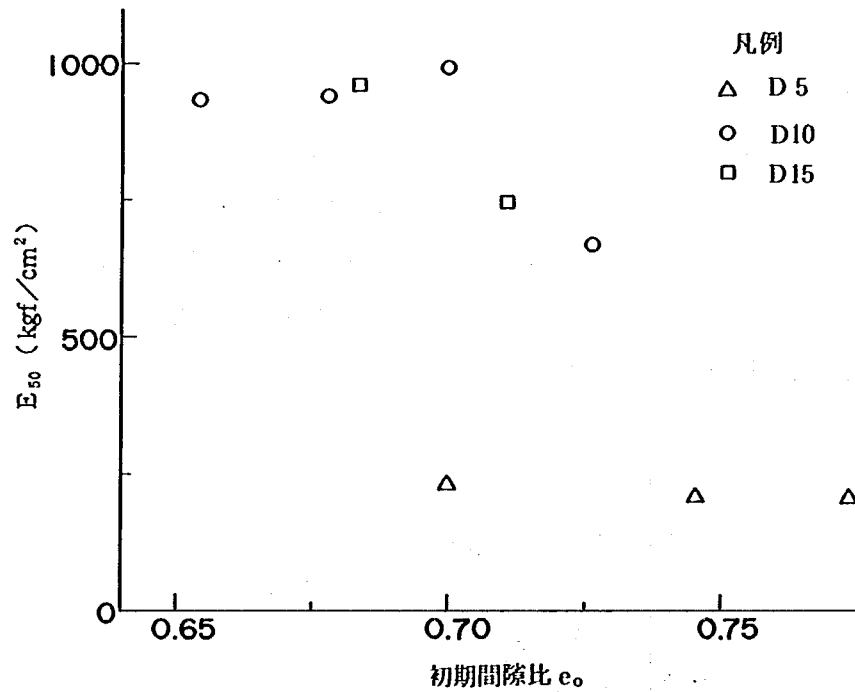


図 4.15 $E_{50} \sim e_o$ の関係

⑤ 体積変化について

図 4.11 に示すように e_0 が小さい（密）ほど、 ϕ_0 が大きい、これは主に砂のダイレイタンス現象に起因していると考えられる。密な砂ほど体積が膨張し、そのために消費される内部エネルギーが大きいために強度が大きくなるのであろう。

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 $(d\epsilon_v/d\epsilon_a)_f$ を求め、 $\phi_0 \sim (d\epsilon_v/d\epsilon_a)_f$ 関係を図 4.17 に示す。なお、ダイレイタンス係数 $(d\epsilon_v/d\epsilon_a)_f$ は図 4.9、4.10 において最大軸差応力時の $\epsilon_v \sim \epsilon_a$ 曲線の勾配として求められる。ダイレイタンス係数の増加によって直線的に ϕ_0 は増加している。また、ダイレイタンス係数と e_0 の関係を図 4.18 に示す。間隙比 e_0 が大きいほど、ダイレイタンス係数は小さくなっている。以上のように、ダイレイタンス係数は砂の強度に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

⑥ 他の研究機関との比較

土質工学会せん断試験法委員会が行った小名浜砂の一斉試験の結果²⁰⁾を図 4.19 に示す。小名浜砂は豊浦砂とよく類似した砂である。この図から、せん断試験法によって ϕ_0 は大きく異なることがわかる。砂の異方性や直接せん断試験の特有の欠点（変形の拘束性、応力集中による進行性破壊）などが大きく影響しているのであろう。また、三軸圧縮試験の場合でも $4^\circ \sim 5^\circ$ のバラツキはあるようである。

次に他の研究機関の行った試験結果と比較することにする。豊浦砂について他の研究機関が行った三軸圧縮試験の試験方法及び条件を表 4.6 に示す。豊浦砂の物性値（比重 e_{max} 、 e_{min} など）には大差がない。供試体の大きさは直径 5 cm が最も多く、最小 3.5 cm、最大 30 cm で行っている例も

ある。せん断強度の計算方法は ϕ_0 と ϕ_d の場合があるが、粘着力 C が小さいことから両者同様に扱うことにする。他の研究機関が行った豊浦砂の三軸圧縮試験結果を図 4.20 に示す。それぞれ三軸試験機あるいは供試体寸法及び作成方法などが異なるにもかかわらず、かなり良い相関関係が認められる。ほとんどのデータは 1 次回帰直線との差は約 $\pm 1^\circ$ 程度以内に入っている。ただ、Na 6（東大生研）のデータはすべて上限に位置しているが、これは e_0 を圧密後の間隙比を用いているためと考えられる。

本研究で行われた三軸圧縮試験結果は間隙比の小さい範囲でしか行っていないが、他の研究機関と比較すると良い一致度を示しており、バラツキの範囲内（約 $\pm 1^\circ$ 程度）に入っている。また、小名

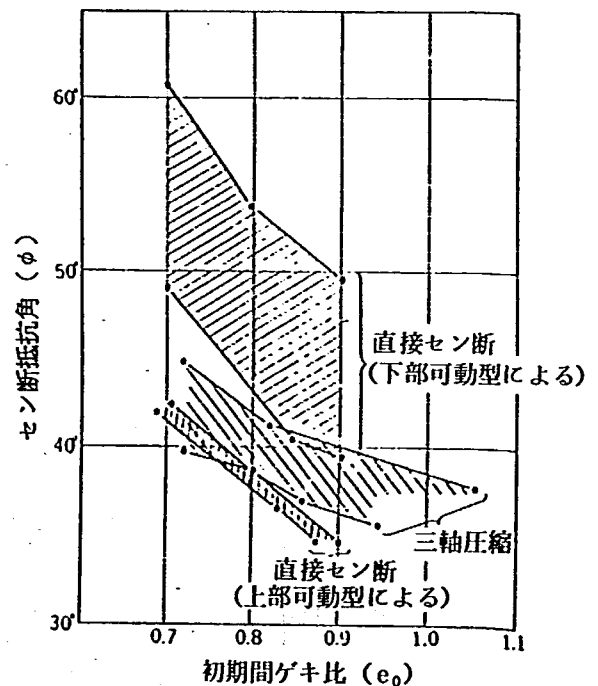


図 4.19 直接せん断と三軸圧縮の比較

浜砂の一斉試験結果に比べバラツキの範囲は小さく、比較的精度の良い試験が行われたのではないかと考えられる。

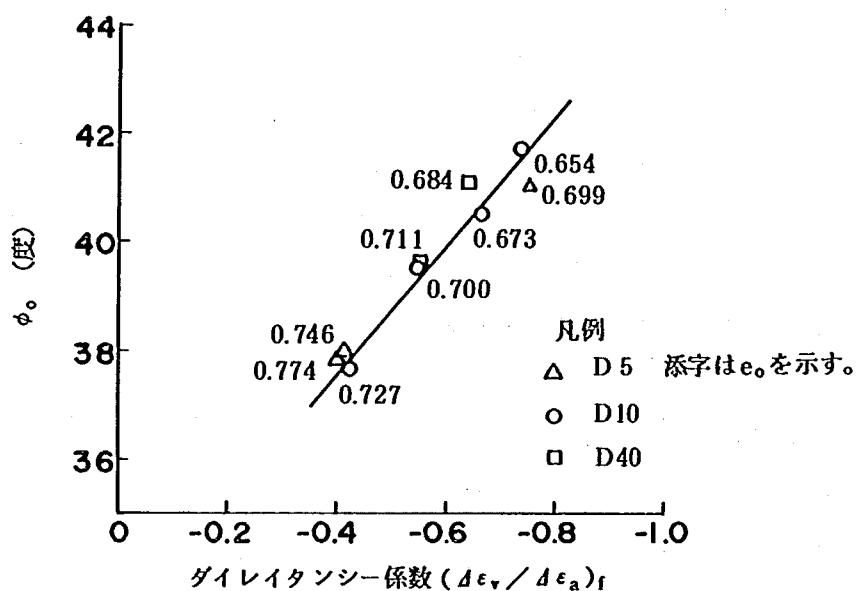


図4.17 $\phi_0 \sim$ ダイレイタンス係数 $(\Delta \epsilon_v / \Delta \epsilon_a)_x$ の関係

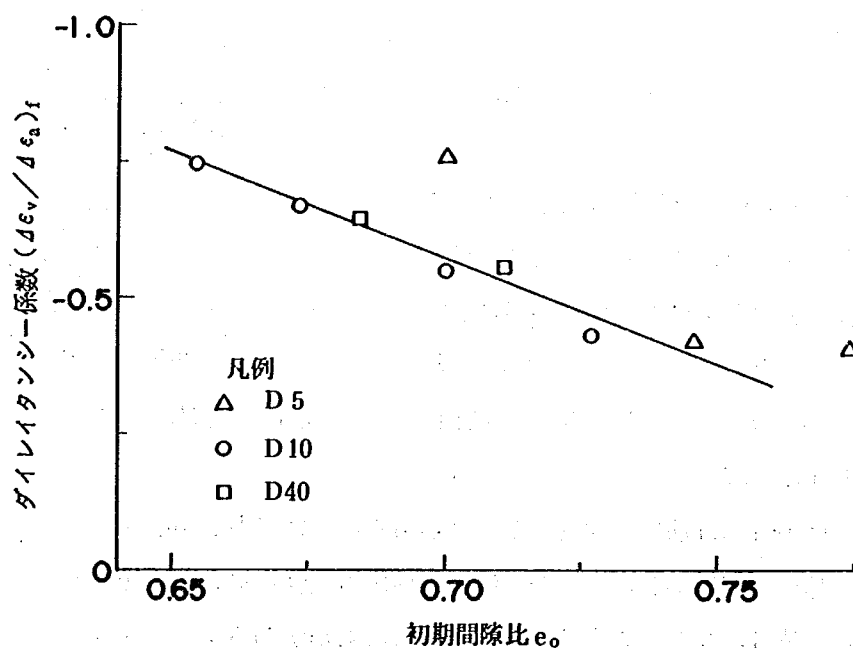


図4.18 ダイレイタンス係数 $(\Delta \epsilon_v / \Delta \epsilon_a)_x \sim e_0$ の関係

表 4.6 他の研究機関の試験方法及び条件

No.	研究機関名	試験材料	物 性 値	乾燥 or 飽和	供試体 の大きさ	供試体の 作成方法	試験側圧	ひずみ 速度	ϕ_o or ϕ_d	参 考 文 献
1	名古屋大学 (市原, 松沢) 1970	豊浦砂	$G_s=2.65$ $e_{max}=0.969$ $e_{min}=0.609$ $D_{50}=0.16$ $U_c=1.41$	乾 燥	5×10 cm	木づちで たたいて 締固めた	$\sigma_3=0.5,$ 1.0, 2.0 kg/cm	1 min/分	ϕ_d	土木学会論文報告書 ²⁴⁾ 第 173号, p47~59
2	国鉄技研 (渡辺, 鈴木) 1973	"	$G_s=2.64$ $D=0.105 \sim 0.25$ mm	"					ϕ_d	第 8 回 ²⁵⁾ 土質工学研究発表会 p 149~152
3	東北大学 (諸戸, 須藤) 1975	"	$G_s=2.65$ $e_{max}=0.96$ $e_{min}=0.602$	"	$D=3.5, 5$ 7.10 cm $H/D \approx 2$				ϕ_o	第20回 ²⁶⁾ 土質工学シンポジウム p 109~112
4	山口大, 九大 (三浦, 山内) 1971	"	$G_s=2.646$ $U_c=1.5$ $e_{max}=0.91$ $e_{min}=0.58$	飽 和	D 5 cm H 12.5 cm	タンパに よる突固 め	$\sigma_c=1.0$ kg/cm	0.5%/min	ϕ_o	土木学会論文報告集 ²⁷⁾ 第 193号 p 69~79
5	大阪市立大学 (三笠, 高田) 1975	"	$G_s=2.65$ $e=0.95 \sim 0.66$	乾 燥	5×10 cm		"		ϕ_o	第20回 ²⁸⁾ 土質工学シンポジウム p 87~96
6	東大生研 (龍岡, 1982)	"	$G_s=2.64$ $e=0.977 \sim 0.605$		7.5×14 cm		"		ϕ_o	「ロックフィル材料の ¹⁾ 試験と設計強度」 土質工学会
7	鹿児島大学 (春山, 1972)	"	$G_s=2.65$ $e=0.974 \sim 0.650$	飽 和	5×12.5 cm	木づちに よる締固 め			ϕ_d	第27回 ²⁹⁾ 土木学会講演会 1972, p 97~100
8	阿木川ダム	"		乾 燥	30×60 cm				ϕ_d	「最新フィルダム工学」 ³⁰⁾ p64

凡 例

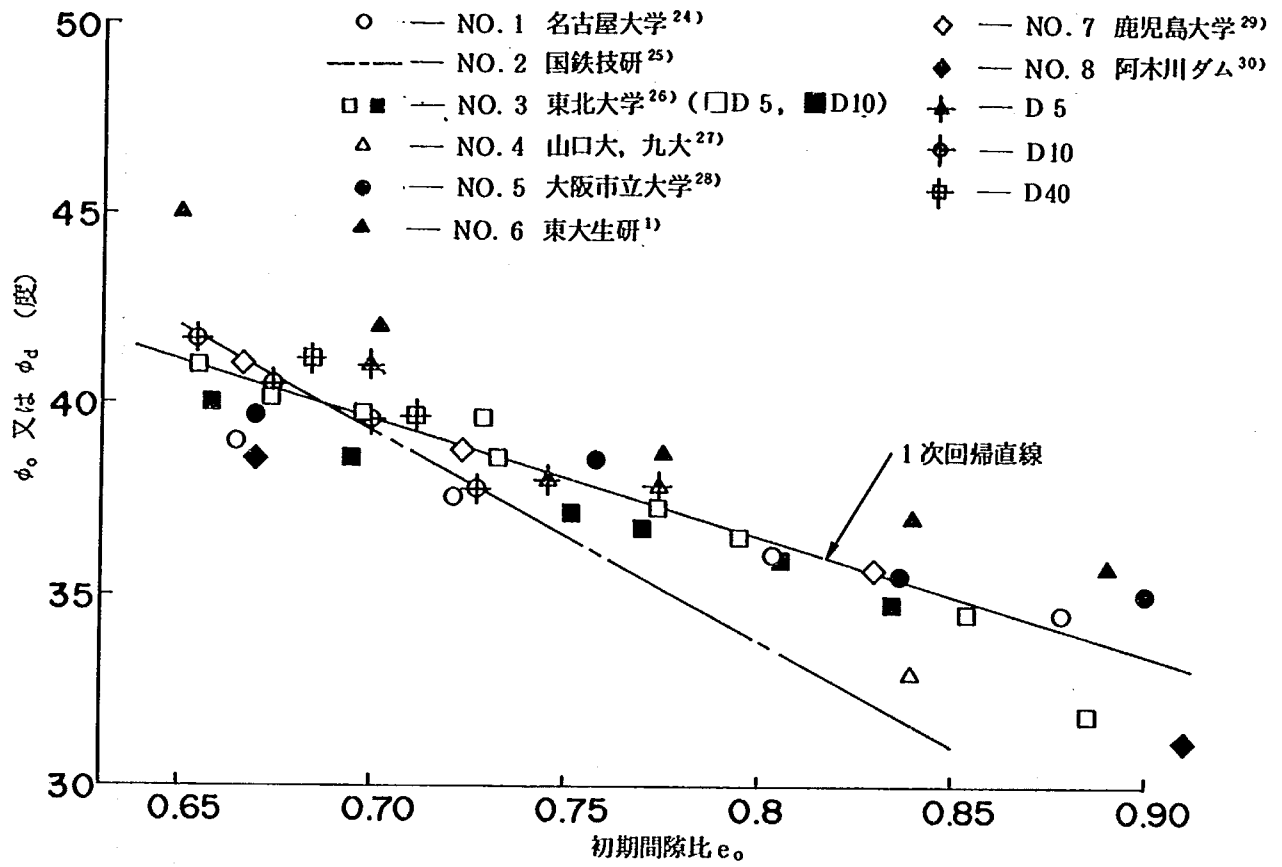


図 4.20 他の研究機関の三軸圧縮試験結果との比較

(2) ねじり単純せん断試験結果

ねじり単純せん断試験結果を表 4.7 に示す。

表 4.7 ねじり単純せん断試験結果一覧表

ケース	軸 圧 σ_a kgf/cm ²	側 圧 σ_r kgf/cm ²	r_d	間 ゲ キ 比				τ_f kgf/cm ²	τ_f %	ϵ_{af} %	ϵ_{vf} %	ϕ_0 度
				e_o	e_c	e_f	e_c/e_o					
$e_o=0.68$	1.24	1.00	1.572	0.686	0.644	0.674	0.939	0.944	15.0	1.02	-1.83	59.04
$e_o=0.74$	1.13	1.00	1.523	0.740	0.734	0.742	0.992	0.837	15.0	-0.13	-0.46	53.84

なお、 $\sigma_a = \sigma_r = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ で試験する予定であったが、タッチ荷重（反力盤を上部ベDESTALを連結する際に作用する荷重）がかなり大きな荷重（0.5～1.0tf 程度）となったため、軸応力 σ_a は 1.24, 1.13 kgf/cm² となり、やや異方圧密状態となった。

せん断ひずみ γ とせん断応力 τ_{af} 、体積ひずみ ϵ_v 、軸ひずみ ϵ_a の変化を図 4.21, 22 に示す。せん断応力～せん断ひずみ曲線は中実試験結果（図 4.10 参照）とは異なり、明確なピークは現れなかった。

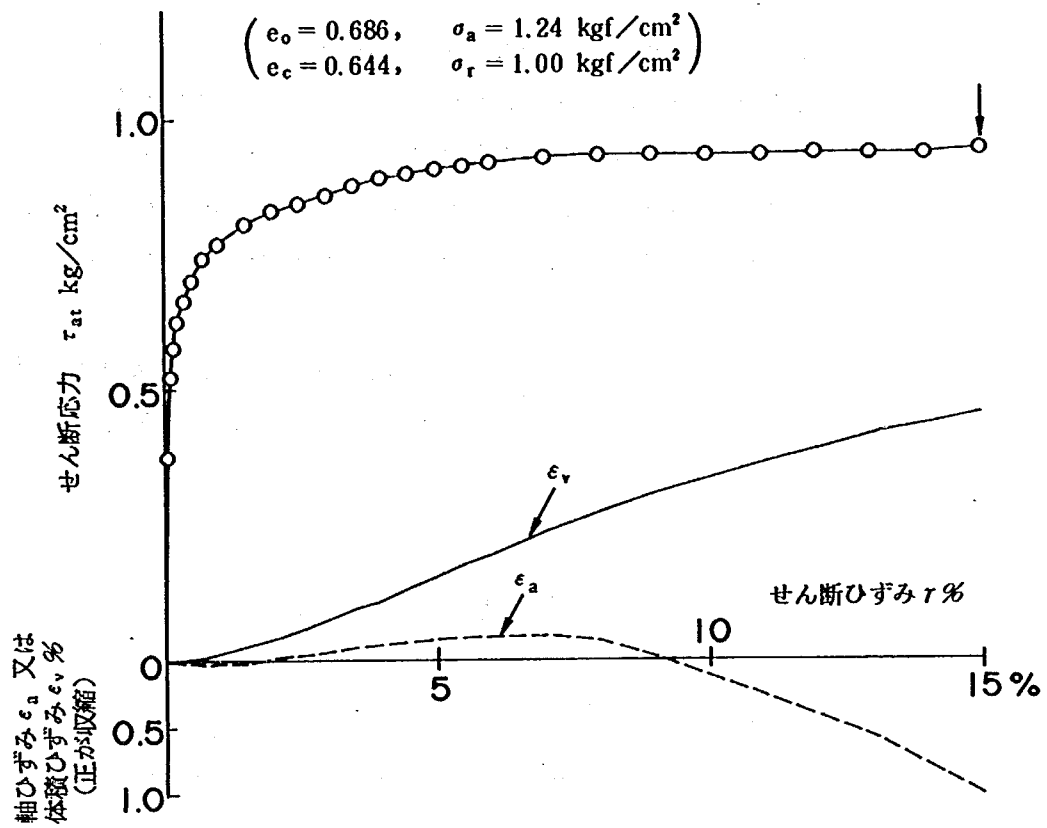


図 4.21 D80-40のせん断応力～せん断ひずみ曲線 ($e_o = 0.686$)

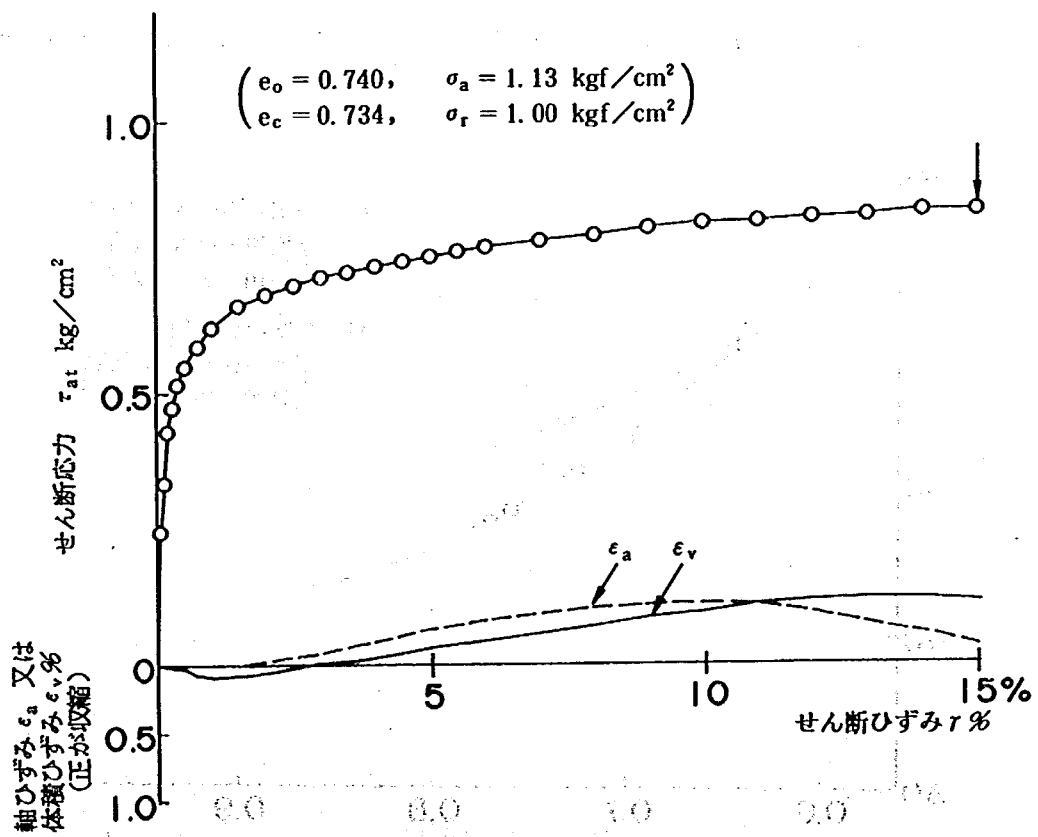


図 4.22 D80-40のせん断応力～せん断ひずみ曲線 ($e_o = 0.740$)

これは、中実と中空試験では破壊形式が異なるためと考えられる。前者は1本のすべり線に応力が集中し、荷重が低下するが、後者は中空供試体であるため複数のすべり線が生じやすく、応力集中を起こすことは少ない。また、密度の違いによって体積変化は異なり、密な方 ($e_o = 0.68$) が、より大きく膨張する傾向を示している。面積ひずみ ϵ_A ($\epsilon_A = \epsilon_v - \epsilon_a$) は、 $e_o = 0.74$ の場合にはほとんど変化ないが、 $e_o = 0.68$ の場合にはせん断ひずみ r の増加と共に ϵ_A も増加し、8%を過ぎると急増し、 $r = 15\%$ 時には、約3%弱にまで達する。

内部摩擦角 ϕ_o と圧密後間隙比 e_c の関係を図4.23に示す。内部摩擦角 ϕ_o は、最大せん断応力時の Mohr の応力円の座標原点を通る接線が水平となす角度であり、次式を用いて求める。

$$\sin \phi_o = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\sigma_1 \text{ 又は } \sigma_3 = \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} \pm \sqrt{\tau_{at}^2 + \left(\frac{\sigma_a - \sigma_r}{2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\therefore \sin \phi_o = \frac{\sqrt{\tau_{at}^2 + \left(\frac{\sigma_a - \sigma_r}{2}\right)^2}}{\frac{\sigma_a + \sigma_r}{2}} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

この図から間隙比が小さいほど、 ϕ_o は大きくなることがわかる。また、図中の○は龍岡らの中空ねじり試験結果³¹⁾であり、飽和豊浦砂の排水試験結果である。龍岡らの結果と比較すると $e_c = 0.64$

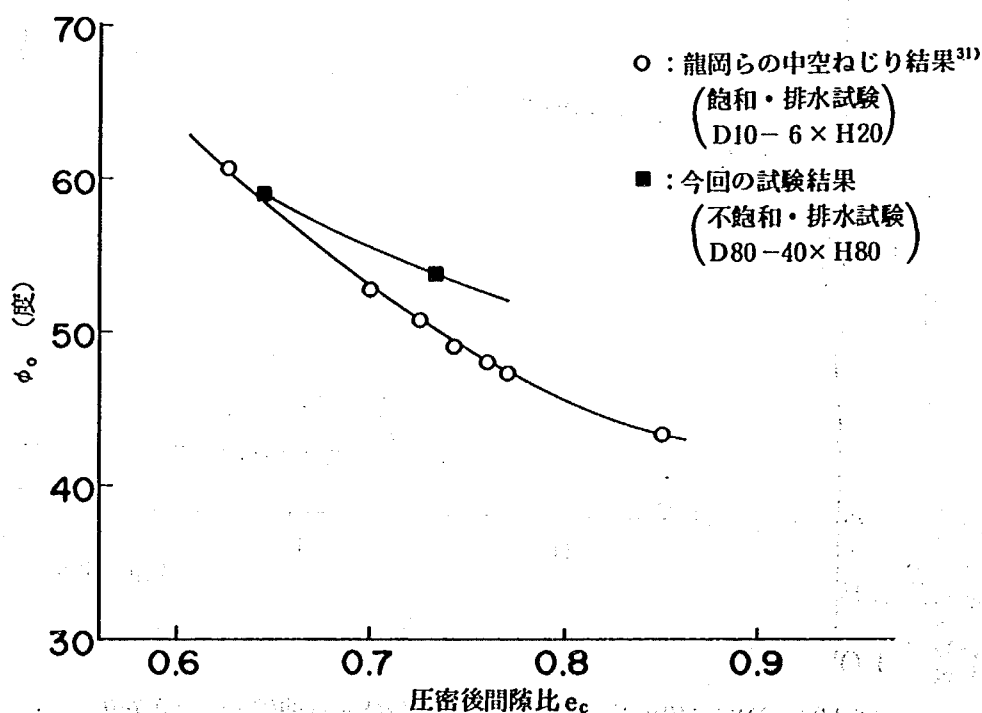


図4.23 $\phi_o \sim e_c$ の関係 (中空試験)

の場合にはほぼ同程度の値を示しているが、 $e_c = 0.73$ の場合には約 3° 程度差がある。これは試験装置や供試体の作成方法、飽和、不飽和の違い、あるいは供試体内の密度の不均一性が影響しているのではないかと考えられる。また、供試体の直径と e_c/e_o の関係は前述したように(図4.8参照) 直径が大きいほど e_c/e_o が大きいので、上記のように e_c で比較するよりは e_o で比較した方が良いのではないかと考えられる。

4.4.2 繰返し試験結果

繰返し試験時の間隙比の変化を表4.8に示す。

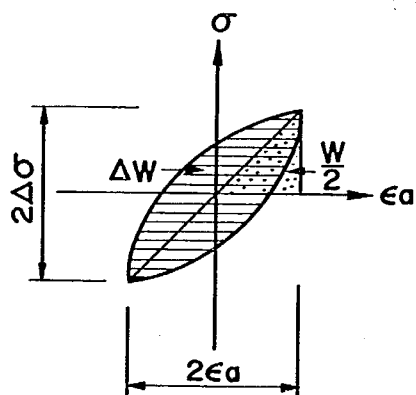
表4.8 繰返し試験時の間隙比の変化

試験ケース	初期乾燥 密度 r_d	初期間隙比 e_o	圧 密 後 間 隙 比		
			$\sigma_c = 1.0$ kgf/cm ²	$\sigma_c = 2.0$ kgf/cm ²	$\sigma_c = 4.0$ kgf/cm ²
D40	1.554	0.705	0.704	0.702	0.699
D80-40	1.522	0.741	0.737	0.732	0.728

動的な変形特性であるせん断弾性定数 G 、減衰定数 h は中実試験の場合には軸応力～軸ひずみ、中空試験の場合にはせん断応力～せん断ひずみのヒステリシスカーブから算出した。なお、繰返し載荷回数は11回とし、10回目のデータを採用した。

G 、 h の計算方法を以下に示す。

・中実試験の場合



$$\nu_d = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_a} \right) \dots (4.9)$$

$$E = \Delta\sigma / \epsilon_a \dots (4.10)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu_d)} \dots (4.11)$$

$$r = (1 + \nu_d) \epsilon_a \dots (4.12)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \dots (4.13)$$

ただし

ν_d : 動的ポアソン比

ϵ_v : 体積ひずみ

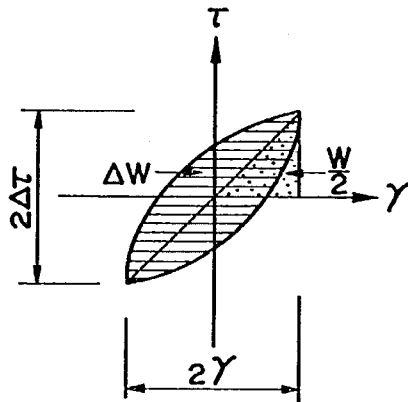
ϵ_a : 軸ひずみ

$\Delta\sigma$: 軸応力振幅

E : 弾性係数

r : せん断ひずみ

・中空試験の場合



$$G = \Delta\tau / \gamma \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

ただし

$\Delta\tau$: せん断応力振幅

γ : せん断ひずみ

データ整理方法は、試験で得られたヒステリシスカーブから、スケールによって応力、ひずみを読み取ってGを求め、hはカーブを5～10等分して面積を求めることによって計算した。

なお、せん断弾性定数Gの定義は、試料を粘弾性体と考えると図4.24に示すように最大ひずみ時の勾配となる³²⁾ (①の勾配) 本試験結果の場合、ヒステリシスカーブはほとんどの場合でカーブの先端がとがっている形を示しているため、最大ひずみ時に最大応力となるが、ひずみが多い場合にはカーブの先端が楕円形になる場合がある。このような場合には最大ひずみ時の応力を判読しにくいので、データ整理上は①'の勾配をGとして求めることにした。

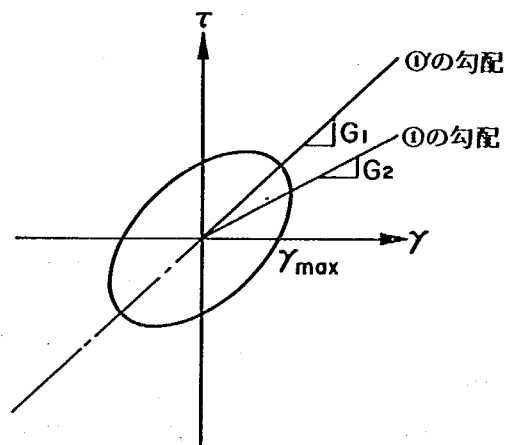


図 4.24 G の定義

(1) 典型的なヒステリシスカーブについて

中実、中空試験の典型的なヒステリシスカーブを図4.25、4.26に示す。検出器の精度およびヒステリシスカーブの形から推定して信頼できるデータ範囲は、せん断弾性定数Gの場合、せん断ひずみ $\gamma \geq 5 \times 10^{-5}$ 程度、減衰定数hの場合、せん断ひずみ $\gamma \geq 1 \times 10^{-4}$ 程度であると考えられる。

中実試験の場合、図4.27に示すように、ひずみ ϵ_a が大きくなるとヒステリシスカーブは三日月形に

中実試験 ($\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合)

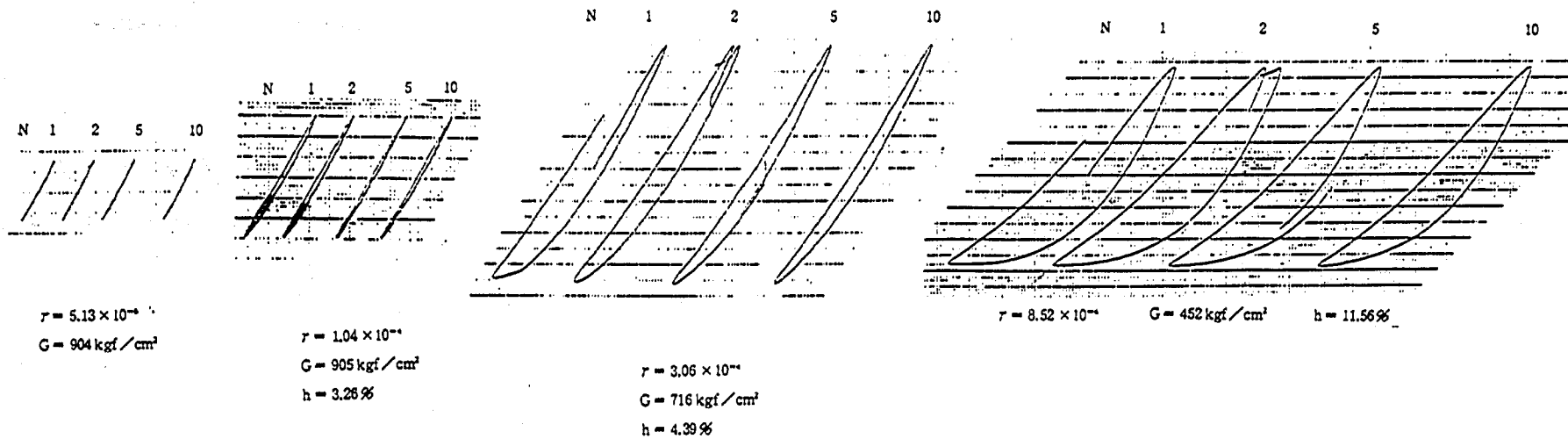


図 4.25 典型的なヒステリシスカーブ (その 1)

中空試験 ($\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合)

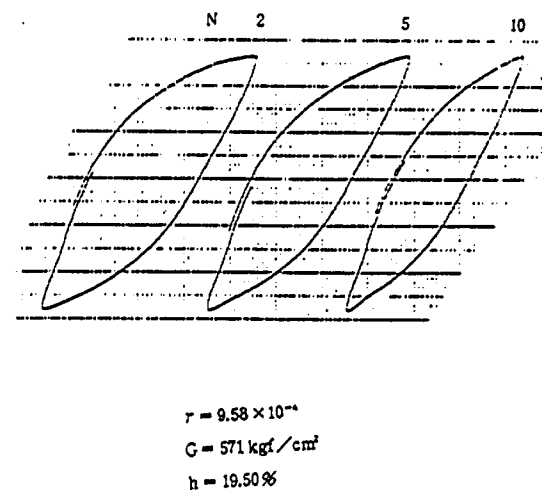
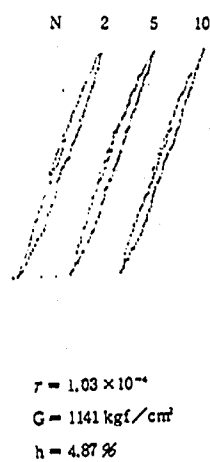
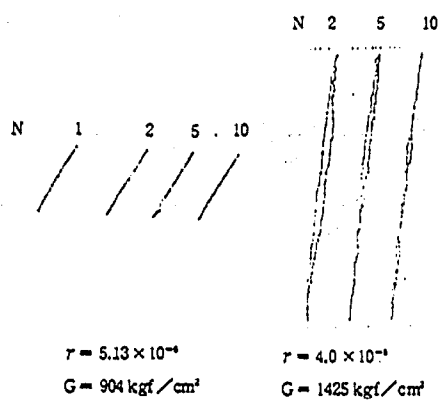


図 4.26 典型的なヒステリシスカーブ (その 2)

なる傾向がある。これは三軸圧縮応力状態（カーブの上半分）での最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ よりも、三軸伸張応力状態（カーブの下半分）での最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ の方が大きくなり、ひずみ ϵ_a も大きくなるので三日月形になると考えられる。圧縮側と伸張側の応力状態では G , r は異なるが、それぞれの G は $G \sim r$ 曲線上に示すと、平均的な $G \sim r$ 曲線の傾向から大きくはずれることはないと安田ら³¹⁾は報告している。

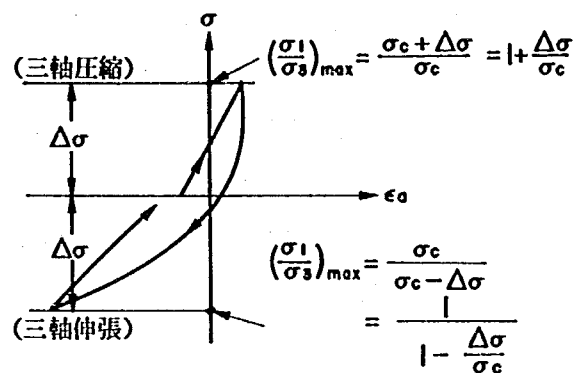


図 4.27 三軸圧縮・伸張試験でのヒステリシスカブの模式図³⁰⁾

また、中空試験の場合はせん断応力の繰り返し载荷

によって主応力方向が回転ないし逆転するのみで最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ は変わらないので、ヒステリシスカブは三日月形にはならないと考えられる。

中実試験・中空試験共に载荷回数 N の増加によってカーブの傾きは増加し（このことはせん断弾性定数 G の増加を意味する）、またカーブの面積は小さくなっている（このことは減衰定数 h の減少を意味する）。

(2) せん断弾性定数 G , 減衰定数 h

① せん断ひずみの影響について

図 4.28, 4.29 はやや密な豊浦砂 ($e_0 = 0.70$) について拘束圧を $\sigma_c = 1, 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$ に設定して繰り返し試験を実施した時のせん断弾性定数 G とせん断ひずみ r の関係を示したものである。砂の $G \sim \log r$ 曲線の一般的な傾向として、 $r \approx 10^{-4}$ までは G の r の増加に対する低下率は小さく、 $r \approx 10^{-4}$ をこえると G の r の増加に対する低下率は急増し、 G は急激に減少してゆく。本試験結果の場合中空試験では、 G は $r < 5 \times 10^{-5}$ ではバラツキが大きく、 $r \geq 5 \times 10^{-4}$ 以後は直線的に減少している。また、中実試験では、 G は $r \approx 10^{-4}$ まではほぼ一定値を示し、 $r \geq 10^{-4}$ 以後急速に減少している。中実試験の場合は上記の一般的な傾向と良く一致しているが、中空試験の場合は r の小さい範囲でやや異なった傾向を示している。以上のように両者の結果はせん断試験方法の違いによる影響が顕著に現われている。このようにせん断ひずみが小さいほど、中実と中空試験の差が開くという現象の原因としては検出器の精度、せん断応力の計算方法（中空試験の場合）、供試体の作成方法、せん断試験方法（主応力条件の違い、異方性の影響など）などが考えられる。

$G \sim \log r$ 曲線から $r = 10^{-5}$ 時の G を外挿して求め、これを G_0 として $G/G_0 \sim \log r$ 関係をプロットしたのが、図 4.30, 4.31 である。中空試験の場合、 r の増大によってほぼ直線的に減少しており、また拘束圧の増加によってその傾きは減少している。中実試験の場合、 $r \approx 10^{-4}$ をすぎて急速に減少している。また拘束圧の増加によって基本的カーブの形を維持したまま、右側へ移動してゆく傾向を示している。

$h \sim \log r$ 曲線は図 4.32, 33 に示すように r の増加と共に急速に増加している。 $r \leq 10^{-4}$ では検出器の精度上算出不可能であるが、他の研究者によると一定値に収束すると指摘されている。中実

中空試験を比較すると中実試験の方が1～2%程度小さい。また、拘束圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は、他の拘束圧に比べやや大きな値を示しているが、これは供試体の密度の不均一性や試験装置のなじみの問題が影響しているのであろう。

② 拘束圧の影響について

せん断弾性定数 G は、図4.28, 4.29に示すように拘束圧による依存性が明確に現われている。また、図4.34は縦軸に間隙比の影響を除くために G を $\alpha = \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ で除した値とし、横軸に拘束圧をとって、両対数グラフ上にせん断ひずみ r をパラメーターとしてプロットしたものである。この図から、拘束圧の増加と共に G/α は直線的に増加し、その直線の傾きはせん断ひずみ r の増大と共に増加してゆくことがわかる。

一般に G と σ_c の関係は次式によって表わすことができる。

$$G \propto (\sigma_c)^{m(r)} \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

$m(r)$ は図4.34における直線の傾きであり、 r との関係を示したのが、図4.35である。 $m(r)$ はきれいな砂の場合、0.4～0.5に収束すると言われている。³²⁾ 今回の試験の場合は中実、中空試験ともに約0.4程度に収束するようである。

また $h \sim \log \sigma_c$ 関係を示したのが図4.36であるが、拘束圧による依存性が明確に示されており、 G と同様に次式によって h と σ_c の関係が現わすことができる。

$$h \propto (\sigma_c)^{n(r)} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

図4.36から、 σ_c の増加によって h は減少し、その傾きは $n(r)$ で示され、 $n(r) \sim \log r$ 関係を示したのが図4.37である。 $r = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲では r の増加によって直線的に増加している。

③ 間隙比の影響について

G と e の関係については $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ という関数形を用いて各研究者がいろいろ提案している。

$$G = K(r) \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \cdot (\sigma_c)^{m(r)} \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

龍岡,³²⁾ 国生³⁴⁾らの提案式と比較したのが、図4.38であり、今回の試験結果はいずれの場合よりも上回っている。上式を適用して主なせん断ひずみにおける $K(r)$ と $m(r)$ を求めると表4.9に示すようになる。

表4.9 $K(r)$ と $m(r)$

せん断ひずみ r	中空試験		中実試験	
	$K(r)$	$m(r)$	$K(r)$	$m(r)$
10^{-5}	1450	0.37	750	0.42
10^{-4}	950	0.49	710	0.43
10^{-3}	490	0.71	330	0.71

④ 載荷回数の影響について

一般に載荷回数 N が大きくなるほど、せん断弾性定数 G は多少増大し、 h は減少する傾向が見られる。中空試験の場合の載荷回数の影響を示したのが、図 4.39 である。せん断ひずみ r や $r \leq 5 \times 10^{-5}$ の場合はバラツキが大きい、 $r \geq 5 \times 10^{-5}$ の時には、ほとんど差はなく、 G_1/G_0 で比較すると $\pm 5\%$ 程度の範囲内に収まるものと思われる。載荷回数 N の増大によって G は大きくなる場合もあるが、また小さくなる場合もあり、一定した傾向を示していない。また、減衰定数 h は G に比べ、載荷回数 N の影響が大きく現われている。図 4.40 に示すように、せん断ひずみ r の増大とともに $N=2$ と $N=10$ の差は拡がり、 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ $r < 5 \times 10^{-4}$ のときに約 $4 \sim 5\%$ に達する。しかし、拘束圧が大きくなるに従ってその差は縮小する傾向を示している。

⑤ G と h の関係について

Hardin Drnevich³⁵⁾ は、Lazan の弾塑性体の $G \sim h$ 関係の理論を土に適用して次式を導いている。

$$h = h_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \dots\dots\dots (4.19)$$

ただし $G_{\max}$: 最大せん断弾性定数

$h_{\max}$: $G = 0$ のときの h

この関係式によると、 $G \sim h$ 関係は e 、 σ_c 、 r の値によらない一義的なものであることがわかる。龍岡ら³⁶⁾ が豊浦砂について求めた $G/G_0 \sim h$ 関係の平均曲線 (G_0 は $r = 10^{-6}$ 時の G) と今回の試験結果 (G_0 は $r = 10^{-5}$ 時の G) を比較したのが図 4.41 である。中実、中空試験結果ともに平均曲線より下回っており、 G/G_0 が小さいほど h の差はひろがっている。

⑥ 他の研究機関の試験との比較

他の研究機関の試験例を表 4.10 に示す。試験例としては、今回の試験とできるだけ同一の条件で行なわれているものだけを集めた。試験法としては共振法、三軸試験、ねじりせん断などの単純せん断試験によって行なわれている。他の研究機関の試験結果に今回の試験結果をプロットしたのが図 4.42～45 である。せん断弾性定数 $G \sim \log r$ 関係では拘束圧 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、試験法の違いによって、2 つのグループに分かれる傾向を示している。1 つは単純せん断試験グループであり、他の 1 つは三軸グループである。今回の試験結果も中実試験結果の場合は電中研の三軸試験結果とはほぼ同程度の値であり、また中空試験結果は建設省土研のねじりせん断試験結果⁴⁾ などに近い値を示している。また、 $h \sim \log r$ 関係ではねじりせん断などの単純せん断試験グループの方が、三軸グループより大きく、今回の試験結果も同様の傾向を示している。拘束圧 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は、 G 、 h ともに建設省土研のねじりせん断試験結果と中空試験結果には若干の差がある。

(3) 動的ポアソン比について

中実試験の場合、くり返し載荷時の軸ひずみ ϵ_a と体積ひずみ ϵ_v を用いて次式によって動的ポアソン比を求めた。

表 4.10 他の研究機関の試験例

No.	研究機関名	試験法	試料	飽和、乾燥	供試体寸法	σ'_m	σ_1/σ_3	e_c	文献名
1	建設省土研 (龍岡、岩崎ら)	共振法	豊浦砂	乾燥	D 10-6, H 25	1.0	1.0	0.690	建設省 土研資料 1080号 ¹⁴⁾
2	"	ねじりせん断	"	"	D 10-6, H 10	"	"	0.709	" ¹⁴⁾
3	電 中 研 (国生、桜井ら)	三 軸	"	飽 和	D 5, H 10	"	"	0.696	電中研報告 379002号 ³⁴⁾
4	鹿 島 建 設 (原、清田)	単純せん断	"	乾 燥	D 10.8, H 3	"	"	0.715 ~ 0.733	日米天然会議 耐風耐震 ³⁷⁾ 構造専門部会 第11回合同部会
5	東 工 大 (畑中)	リングせん断	"	"	D 28.8-24, H 2	"	"	0.715 ~ 0.760	"
6	竹 中 工 務 店 (鈴木、杉本)	三 軸	"	"	D 5, H 10	"	"	約 0.73	"
7	大阪市立大学 (中川、中屋ら)	ねじりせん断	"	飽 和	D 5, H 10	2.0	"	0.688	第14回土質工学研究発表 ³⁸⁾ 会

$$\nu_d = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_a} \right) \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

図 4.46 は、 $\nu_d \sim \log r$ の関係を示したものである。 r の増加とともに ν_d は減少して $r = 10^{-4}$ 付近で最小値に達し、それ以後は微増している。豊浦砂についての他の研究例³⁵⁾ (図 4.47 参照) では上記の傾向と同様に $\nu_d \sim \log r$ 曲線は下に凸形を示しており、試験法の違いあるいは供試体の飽和、不飽和の違いによって 0.2 ~ 0.5 程度までバラツキの範囲は大きい。

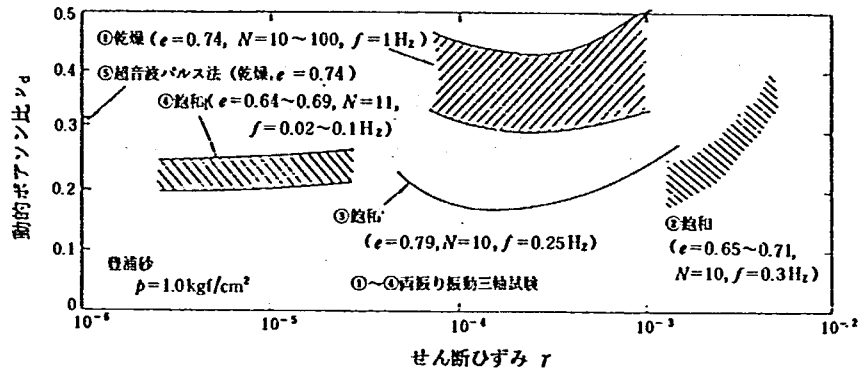


図 4.47 豊浦砂の動的ポアソン比³⁵⁾

(4) 中空と中実試験結果の比較

中空と中実試験結果を比較する前に、試験方法・条件について共通点及び相異点を明確にしておく必要がある。

表 4.11 に示すように、試料条件、供試体の作成方法やくり返し载荷条件などは同一条件とした。また、それぞれの相異点が G 、 h にどのような影響を与えるかについては研究例が少なく、今後の研究課題であろう。

さて、以上のことを考慮しながら、中空と中実試験結果を比較することにする。中空と中実試験の $G \sim \log r$ を図 4.48 に示す。初期間隙比 e_0 は中空試験の方が約 0.036 ほど大きいにもかかわらず、各拘束圧ともに中空試験の方が中実試験よりも上回っている。中実試験の G は中空試験の G に対して各拘束圧によって多少の差はあるが、 $10^{-4} \leq r \leq 10^{-3}$ の範囲では約 80% 程度である。また、 G_0 ($r = 10^{-5}$ 時の G) で正規化した $G/G_0 \sim \log r$ 曲線を図 4.49 に示す。この図から中空試験と中実試験では全く異なったカーブを示し、中空試験では r の増大とともに直線的に減少し、また、中実試験では $r = 10^{-4}$ を過ぎて急減していることがわかる。砂の場合の一般的な $G/G_0 \sim \log r$ 曲線と比較すると本試験における $G/G_0 \sim \log r$ 曲線は中実試験の方がより近い傾向を示している。図 4.42 に示した他の研究機関の試験例からもねじりせん断試験などの単純せん断試験の方が三軸試験より G_0 (初期せん断弾性定数) に漸近する傾向が小さいようである。この原因としては検出器の精度、せん断応力の計算方法 (中空試験の場合)、せん断試験方法 (主応力条件の違い、異方性の影響など) などが考えられる。

表 4.11 共通点と相違点

共通点	○ 同一の豊浦乾燥砂を用いた。 $G_s = 2.65$, $U_c = 1.41$, $e_{\max} = 0.981$, $e_{\min} = 0.632$ ○ 試料の目標間隙比は $e_0 = 0.70$ とした。 ○ 締固め方法はハンドバイブレーターによって3層で行った。 ○ 試験拘束圧は $\sigma_c = 1, 2, 4 \text{ kgf/cm}^2$ とした。 ○ 振幅波形は周波数 $f = 0.2 \text{ Hz}$ の正弦波とした。
相 異 点	○ 供試体寸法が異なる。 中空供試体 $D80-H80 \text{ cm}$ 中実供試体 $D40-H80 \text{ cm}$ ○ 制御方法が異なる。中空試験はせん断応力制御であるのに対して中実試験は軸応力制御である。 ○ くり返し試験時の平均主応力が異なる。 中空試験 $\sigma_m = \sigma_c$ (一定) 中実試験 $\sigma_m = \sigma_c \pm \frac{\Delta \sigma}{3}$ ○ 中実試験の場合、主応力方向は試料の堆積面に対して 90° 又は 0° であるが、中空試験の場合は 45° 方向に近く、回転している。 ○ 中実試験では、$\sigma_2 = \sigma_3$ (圧縮側) 又は $\sigma_2 = \sigma_1$ (伸張側) であるが、中空試験では $\sigma_2 \neq \sigma_3$ 及び $\sigma_2 \neq \sigma_1$ である。 ○ せん断弾性定数 G を求める計算方法は、中実試験では動的ポアソン比 ν_d を介して求めるのに対して、中空試験では直接せん断応力 τ とせん断ひずみ γ から求める。

また、図 4.50 に示した減衰定数 h は中空試験の方が中実試験よりも大きく、 $r = 5 \times 10^{-4}$ 時で比較すると、中空と中実試験の差 ($h_{\text{中空}} - h_{\text{中実}}$) は $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ のとき約 4%、 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ のとき約 1%、 $\sigma_c = 4 \text{ kgf/cm}^2$ のとき約 2% 程度である。したがって低拘束圧ほど中空と中実試験の差は大きいことがわかる。以上のように、 h は中実よりも中空試験の方が大きいということは、検出器の精度、せん断ひずみの測定方法、供試体の作成方法、せん断試験方法などが原因として挙げられる。

* なお、図中の直線又は曲線は測定データに近似させたものである。
以後すべての図について同様である。

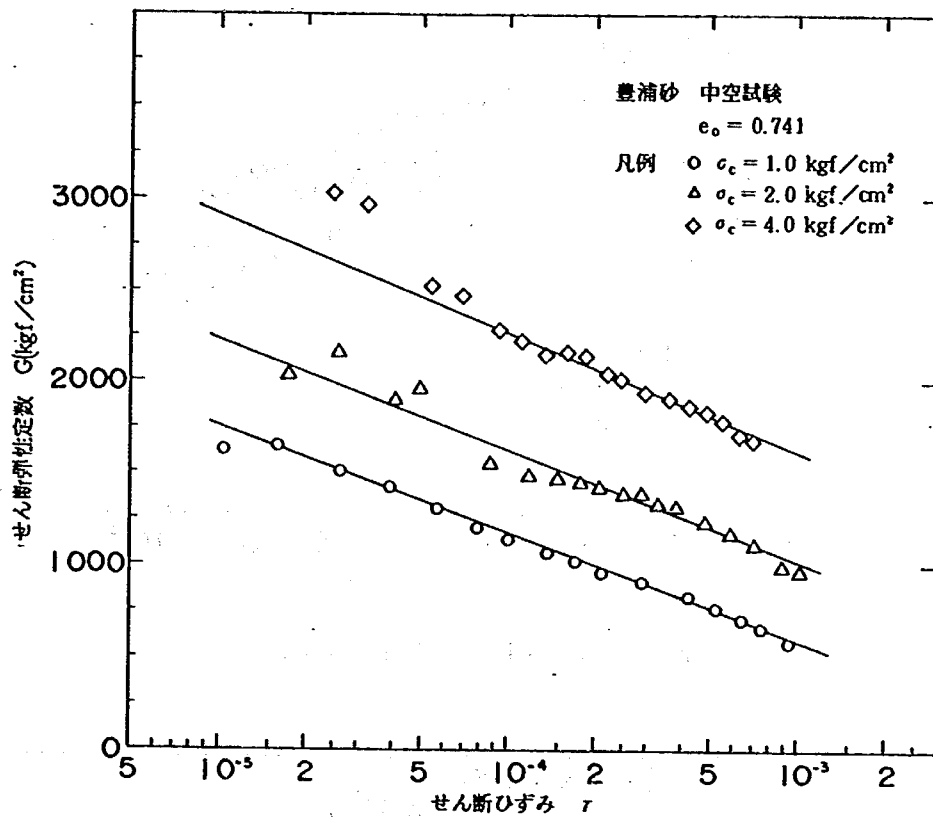


図 4.28 $G \sim \log \gamma$ 関係 (中空試験)

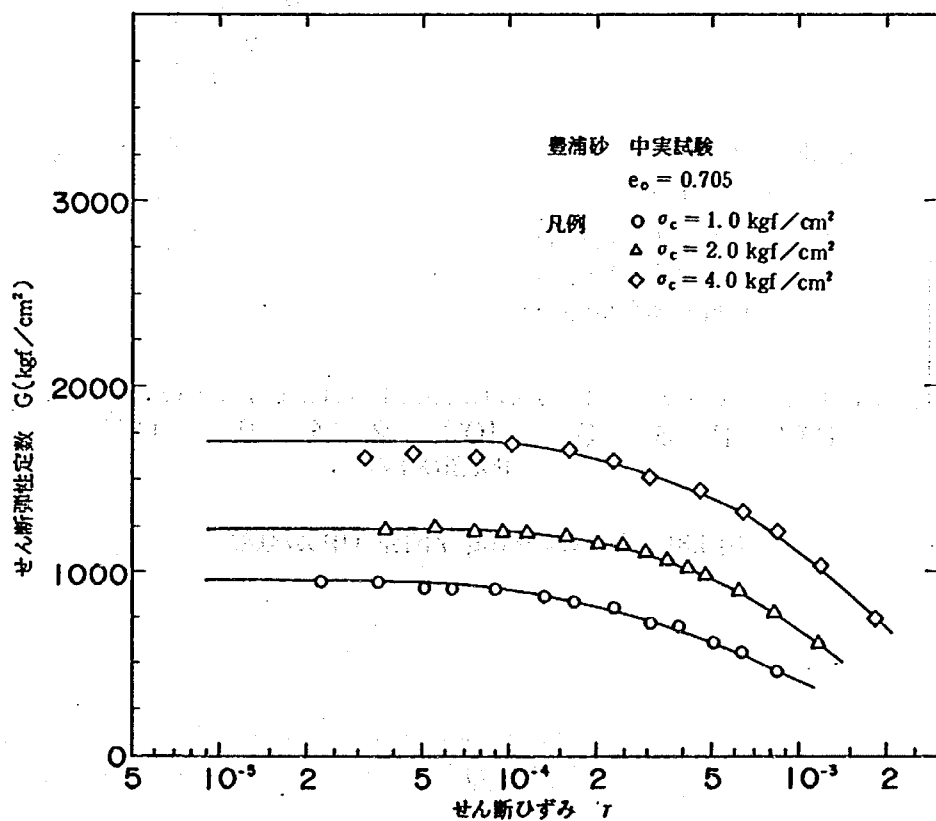


図 4.29 $G \sim \log \gamma$ 関係 (中実試験)

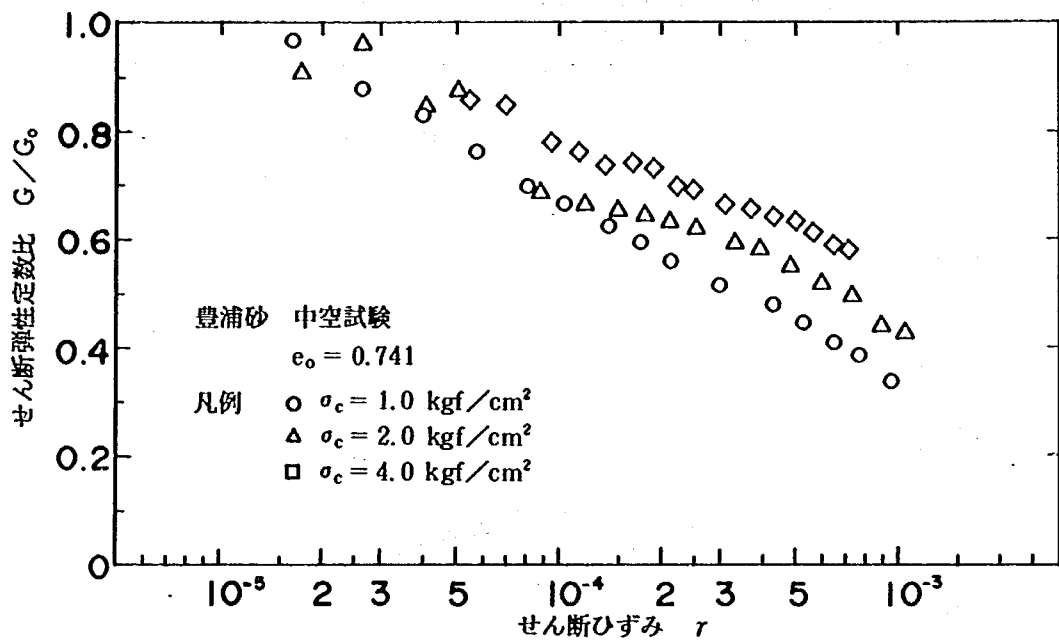


図 4.30 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (中空試験)

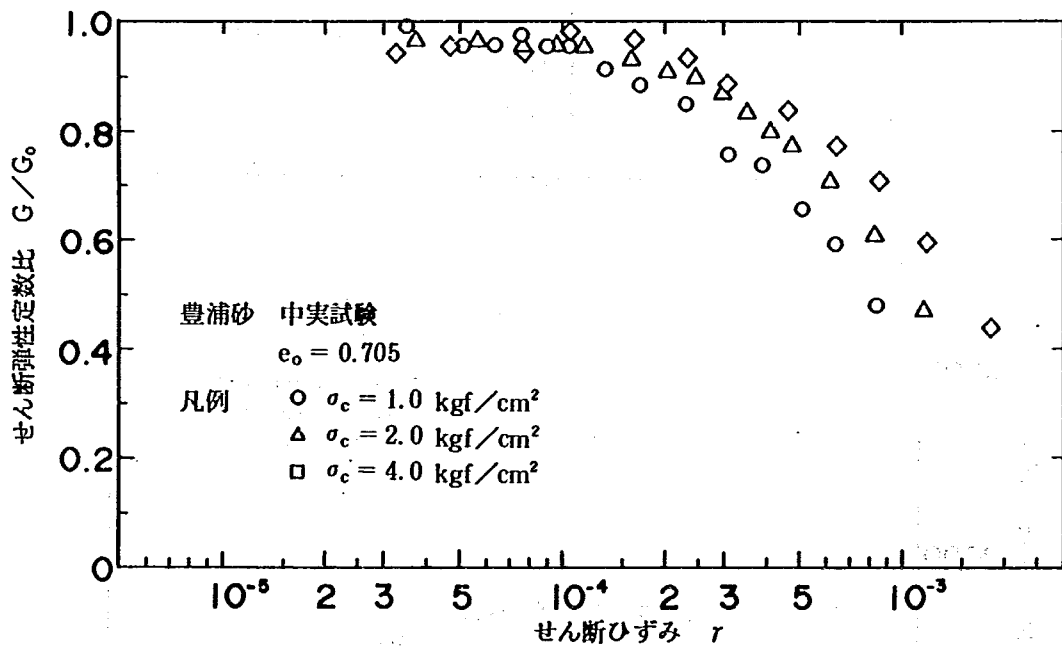


図 4.31 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (中実試験)

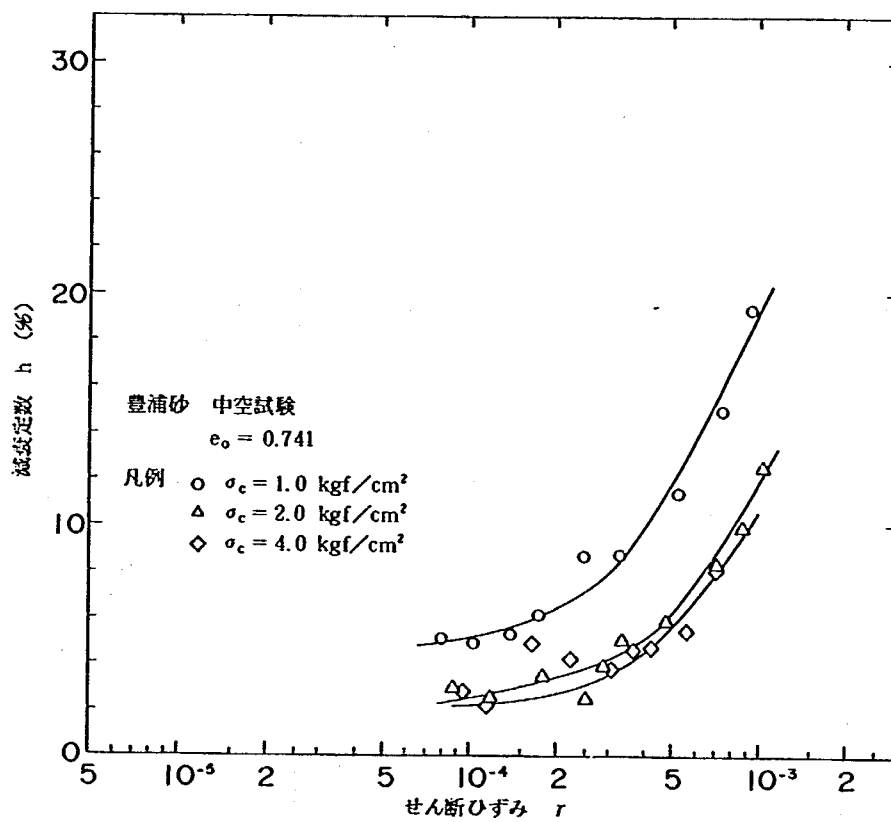


図4.32 $h \sim \log r$ 関係 (中空試験)

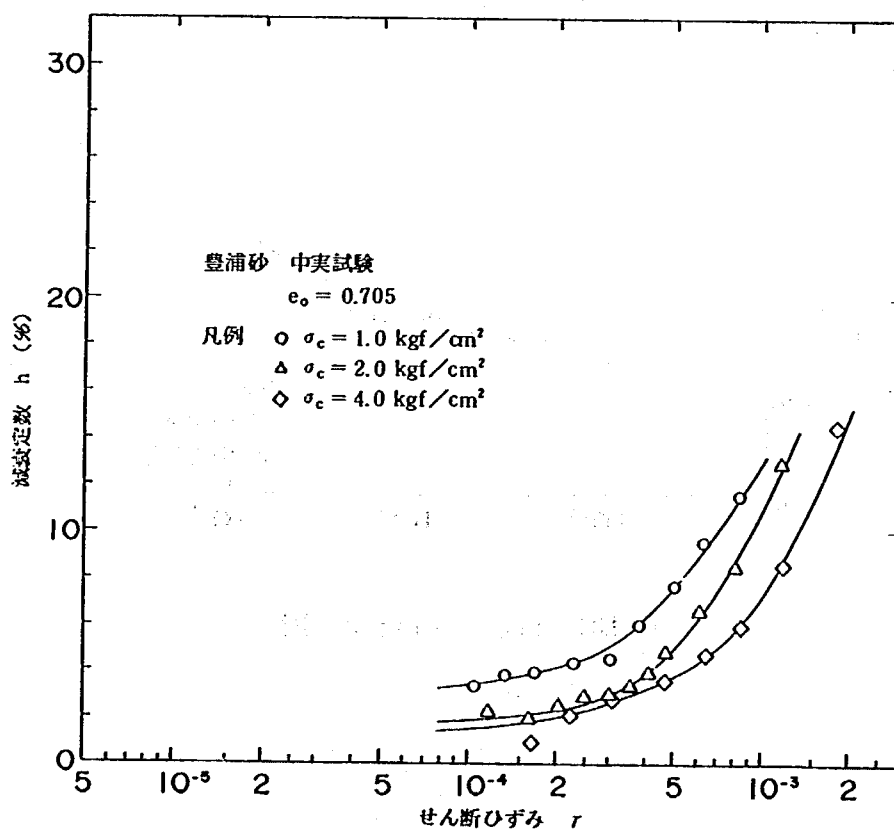


図4.33 $h \sim \log r$ 関係 (中実試験)

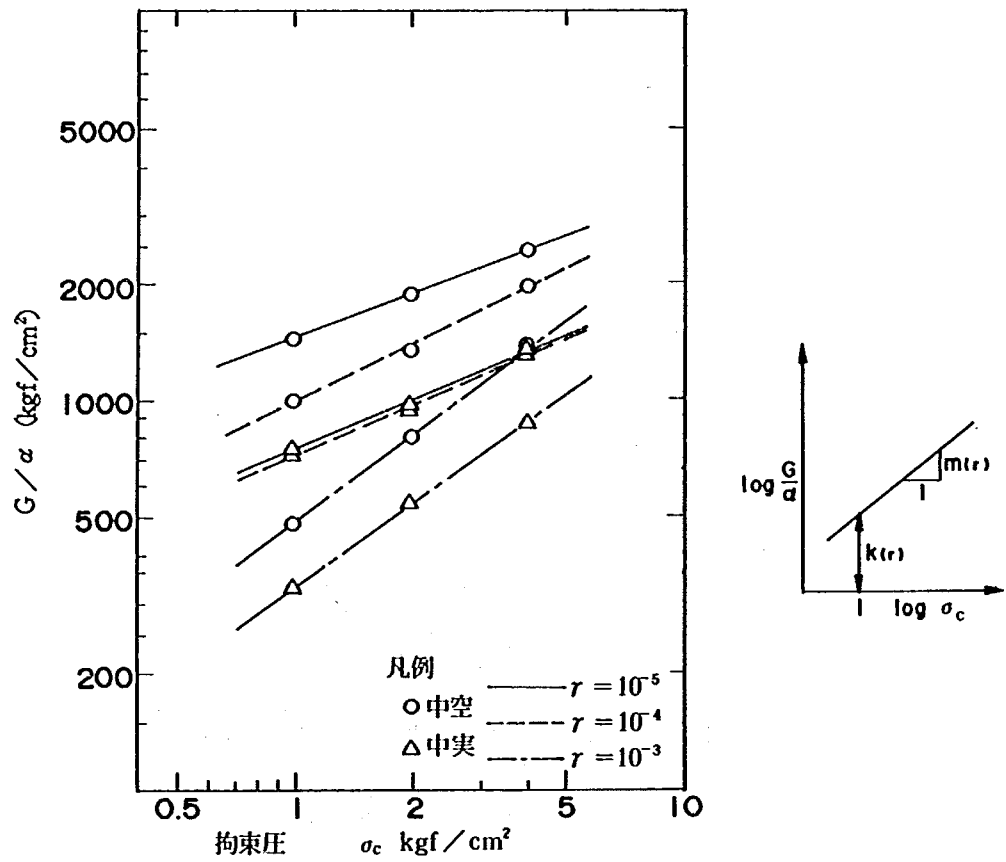


図 4.34 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係 ($\alpha = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$)

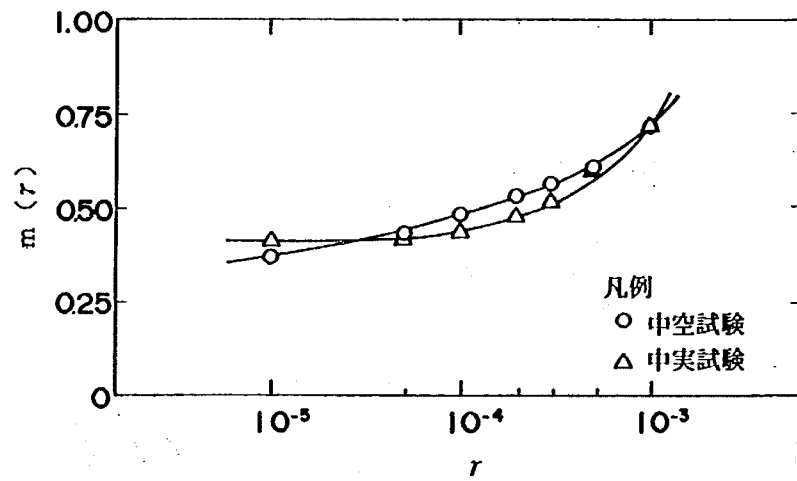


図 4.35 $m(r) \sim \log r$ 関係

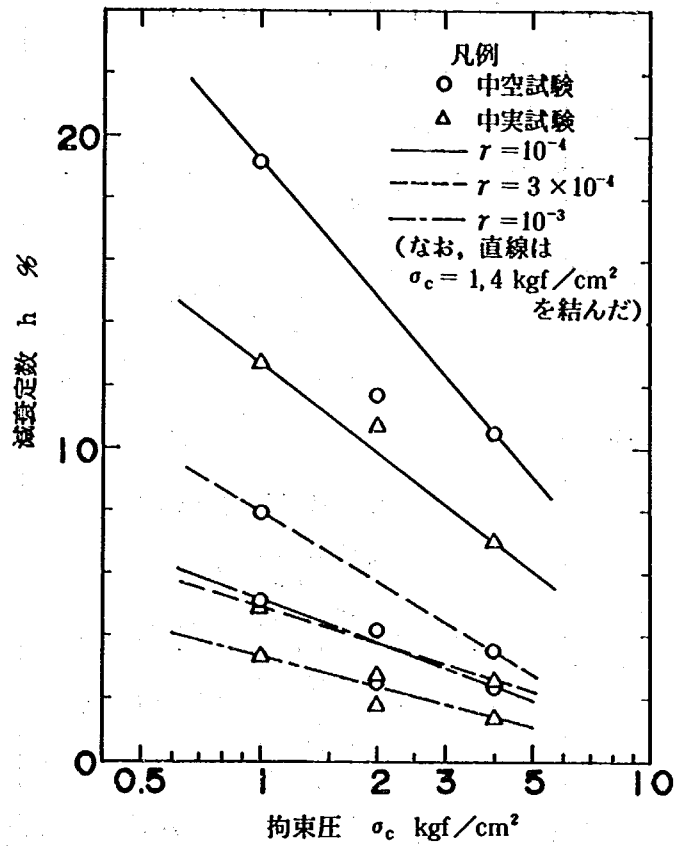


図 4.36 $h \sim \sigma_c$ 関係

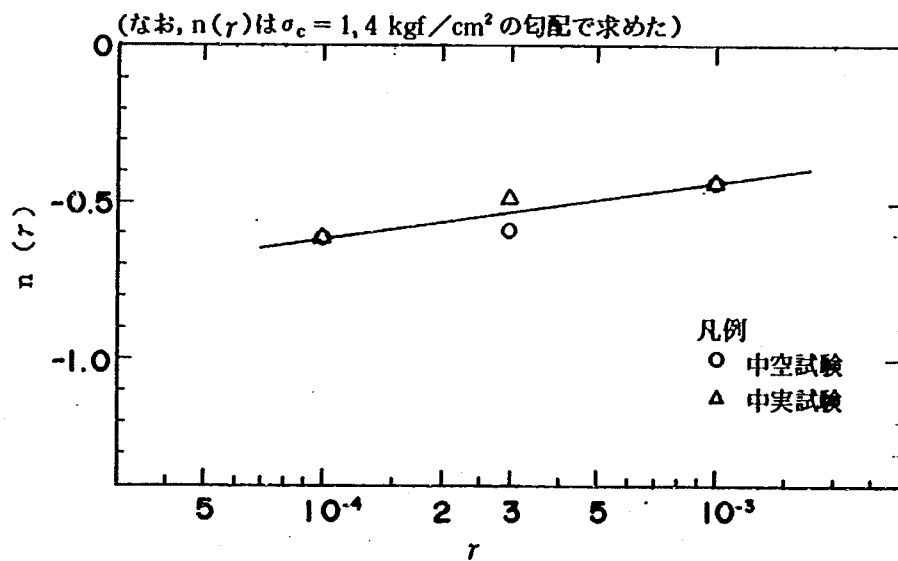


図 4.37 $n(r) \sim \log r$ 関係

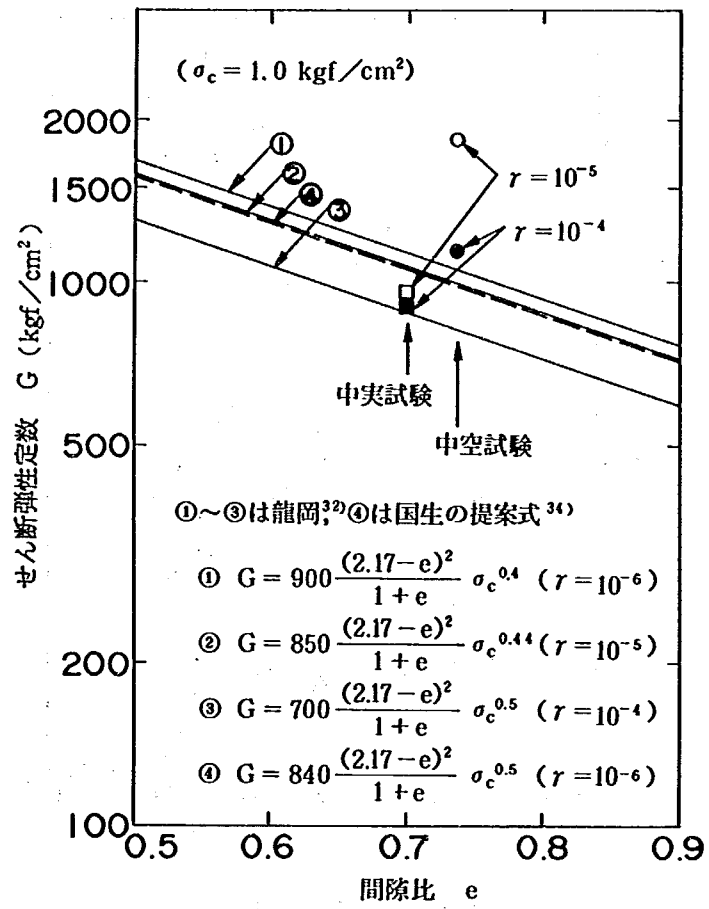


図4.38 $G \sim e$ 関係

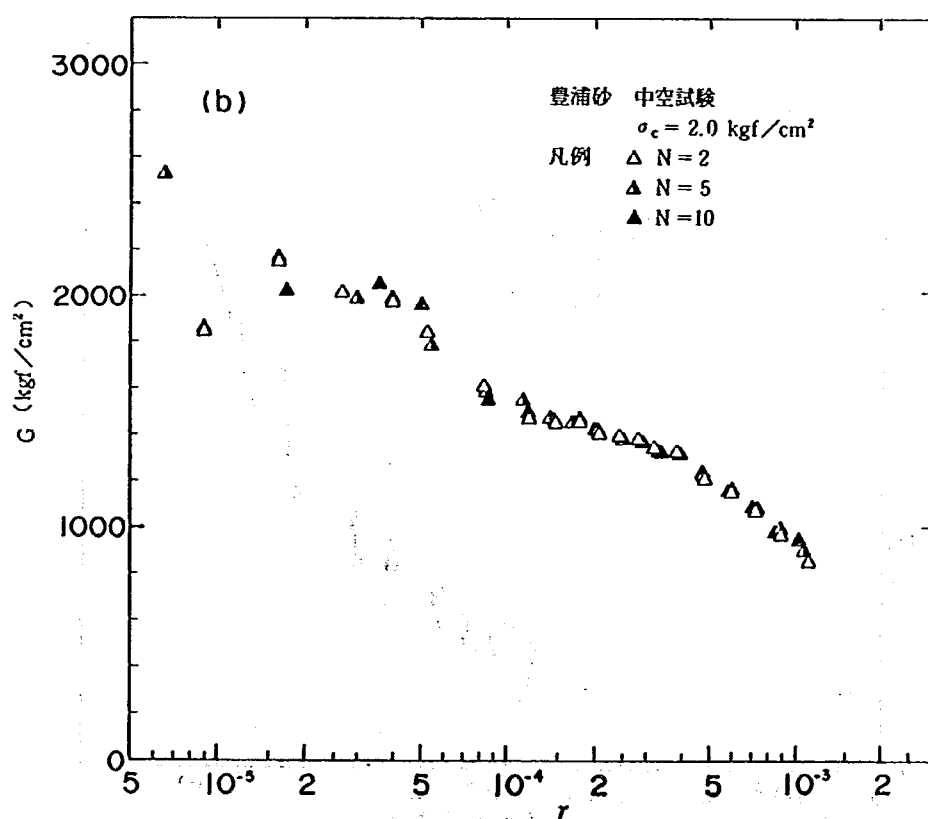
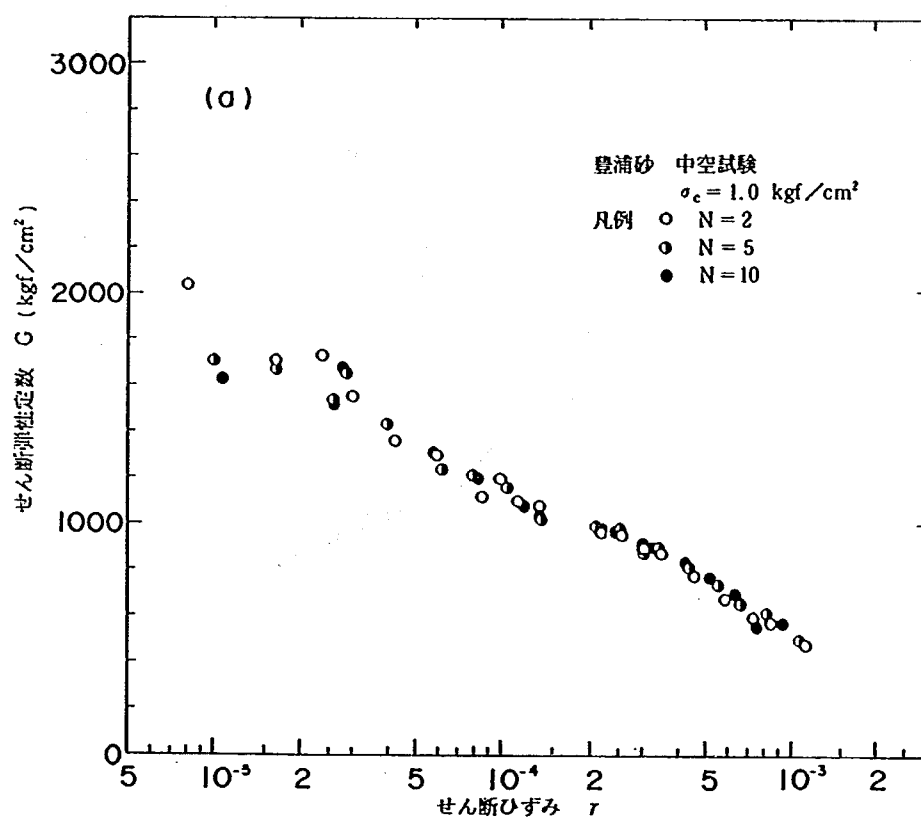


図 4.39 N による $G \sim \log r$ 関係の変化 (中空試験)

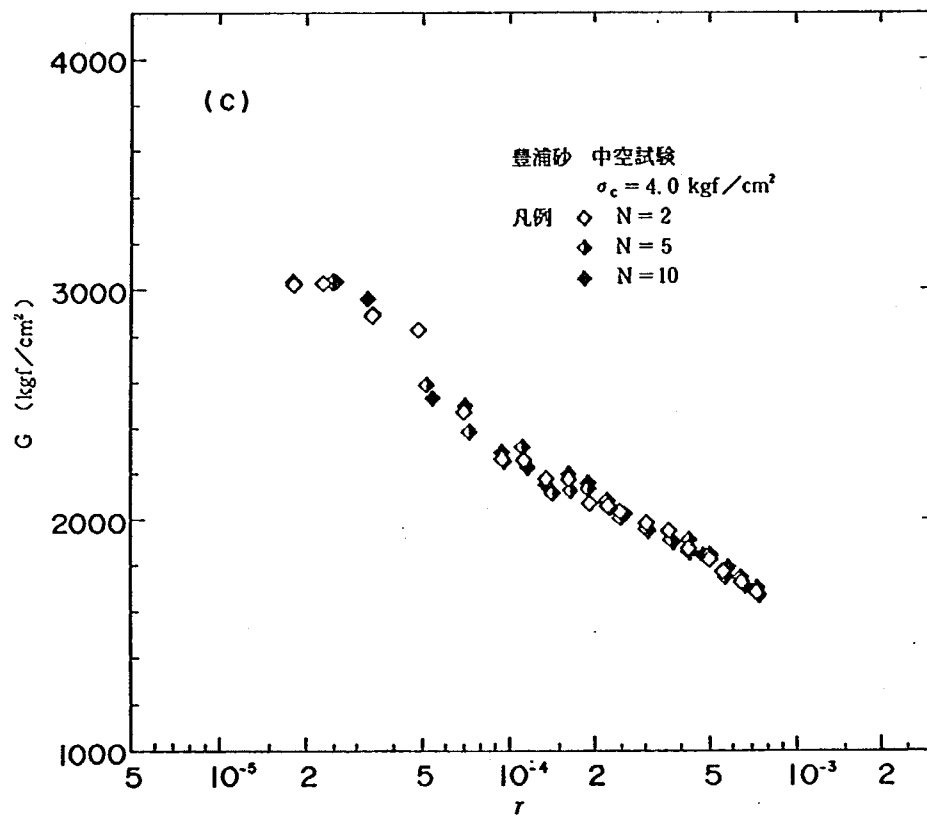


図 4.39 N による $G \sim \log r$ 関係の変化 (中空試験)

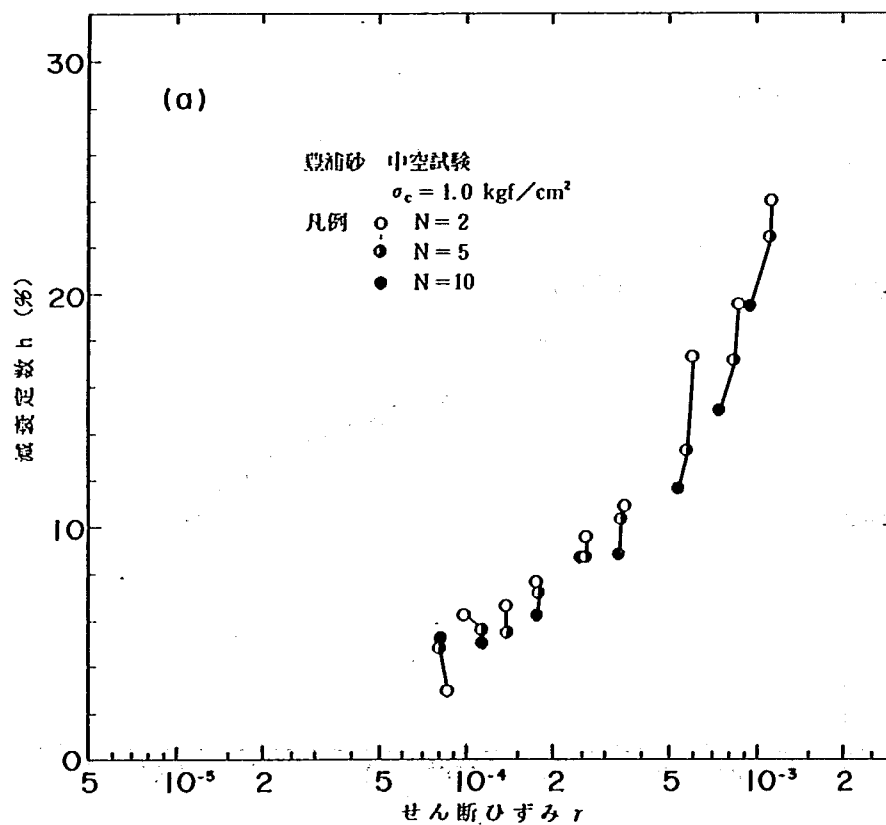
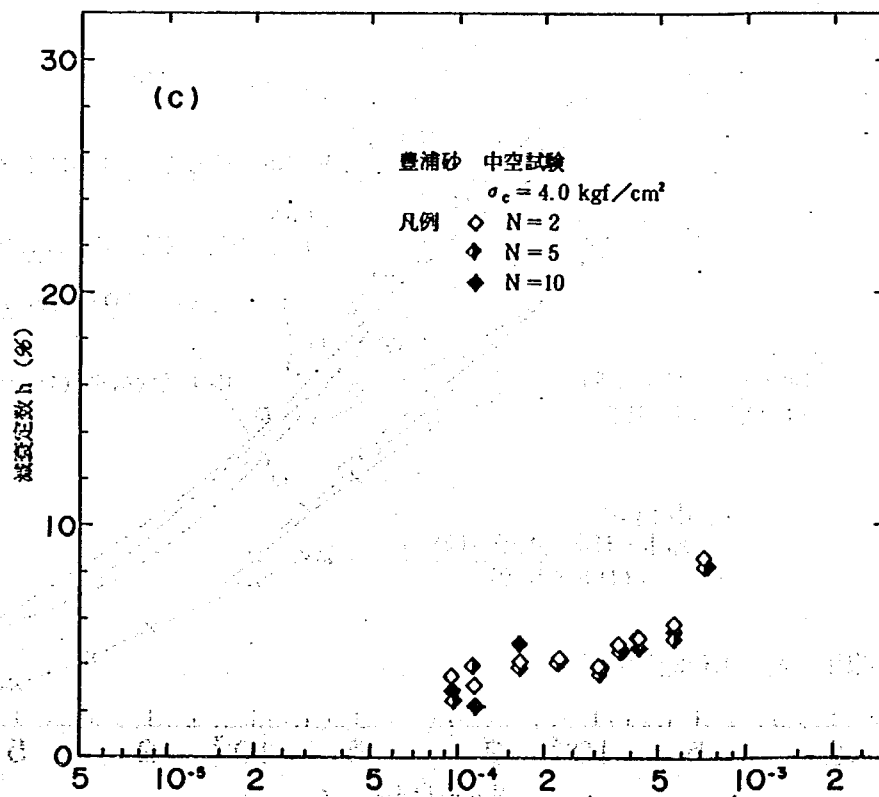
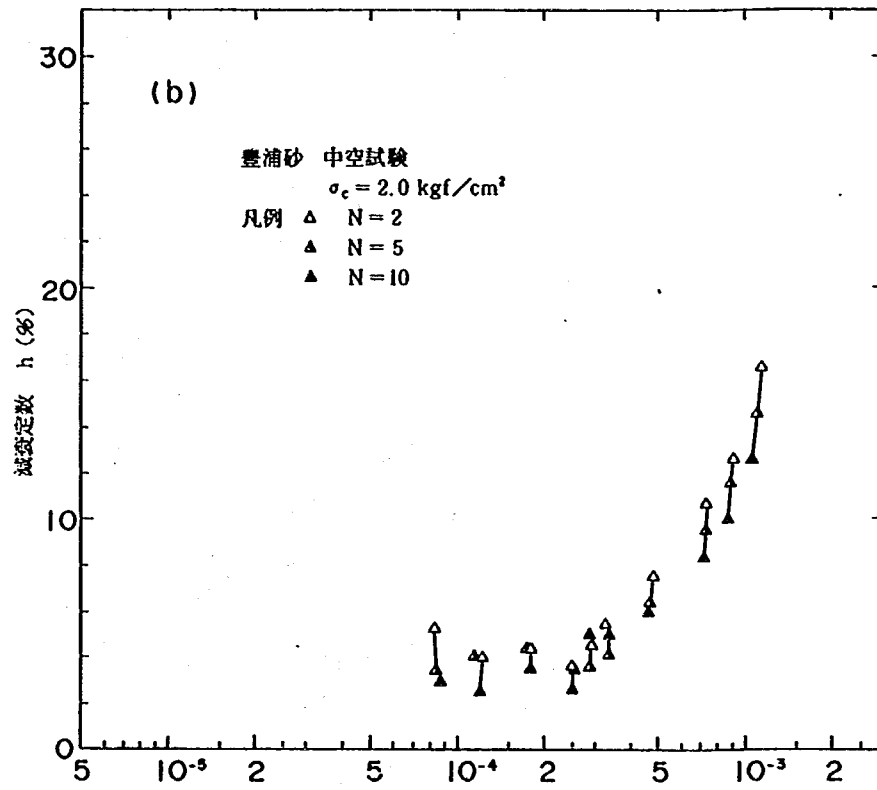


図 4.40 N による $h \sim \log r$ 関係の変化 (中空試験)



(単位: $\log r$ のみ) 図 4.40 N による $h \sim \log r$ 関係の変化 (中空試験)

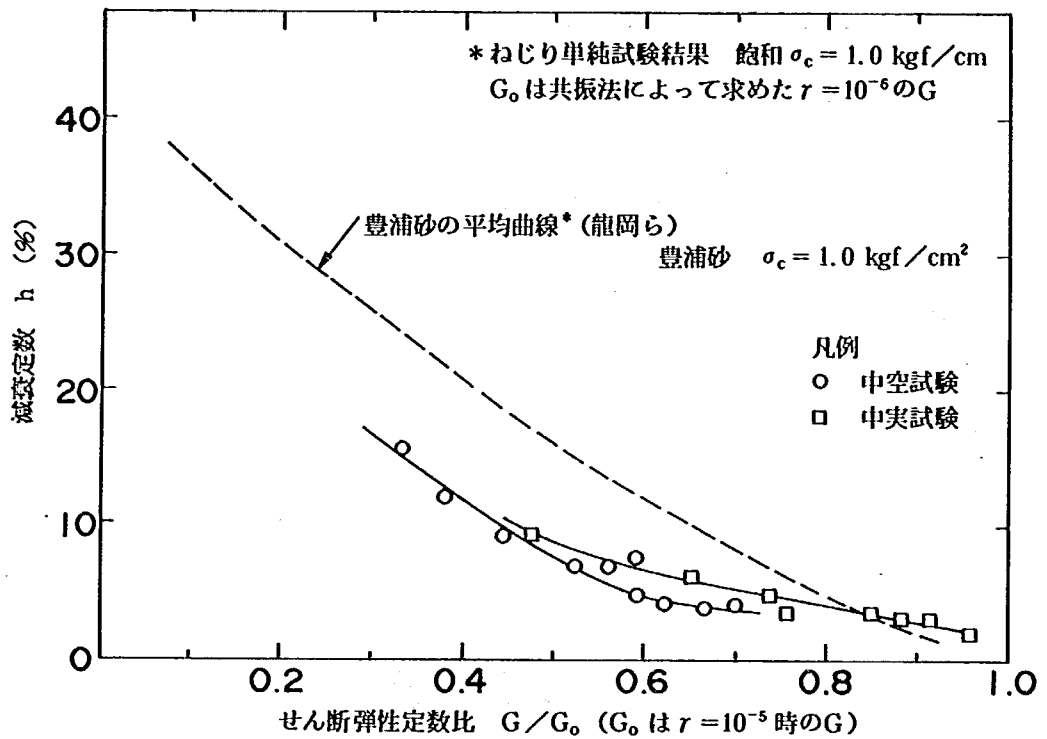


図 4.41 $h \sim G/G_0$ 関係

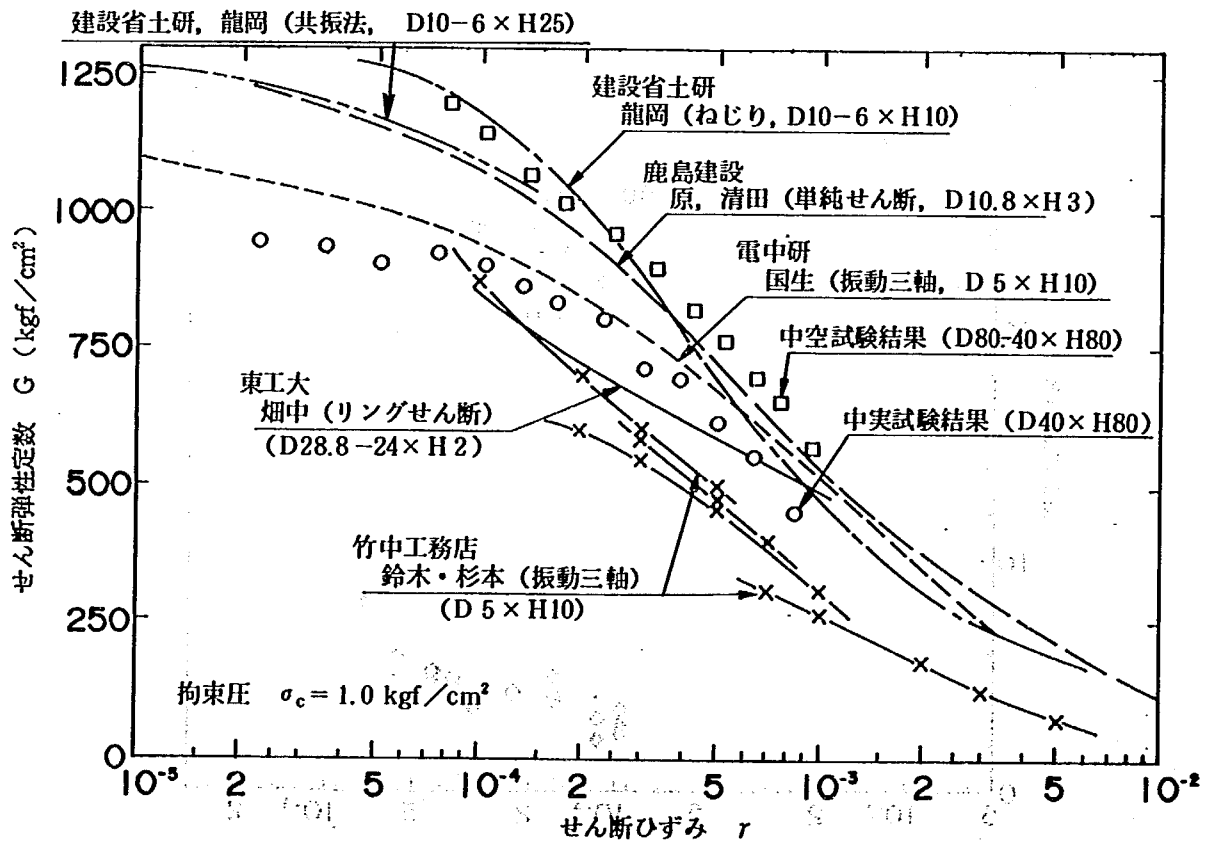


図 4.42 他の研究機関の試験例との比較 (その 1 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $G \sim \log r$ 関係)

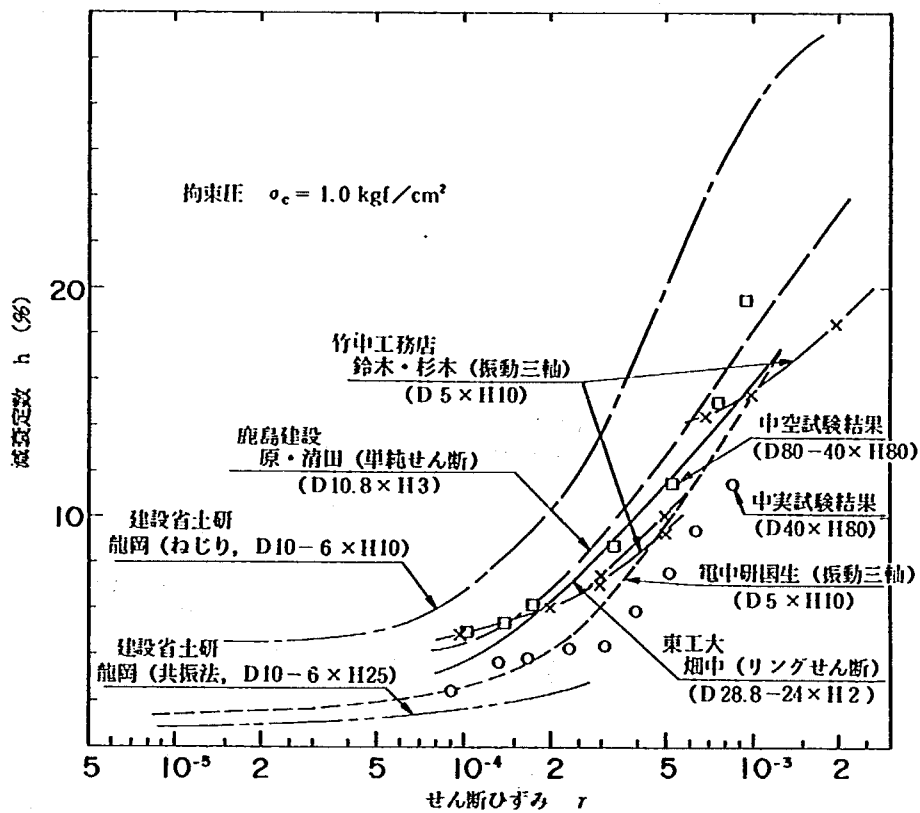


図 4.43 他の研究機関の試験例との比較 (その 2 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $h \sim \log r$ 関係)

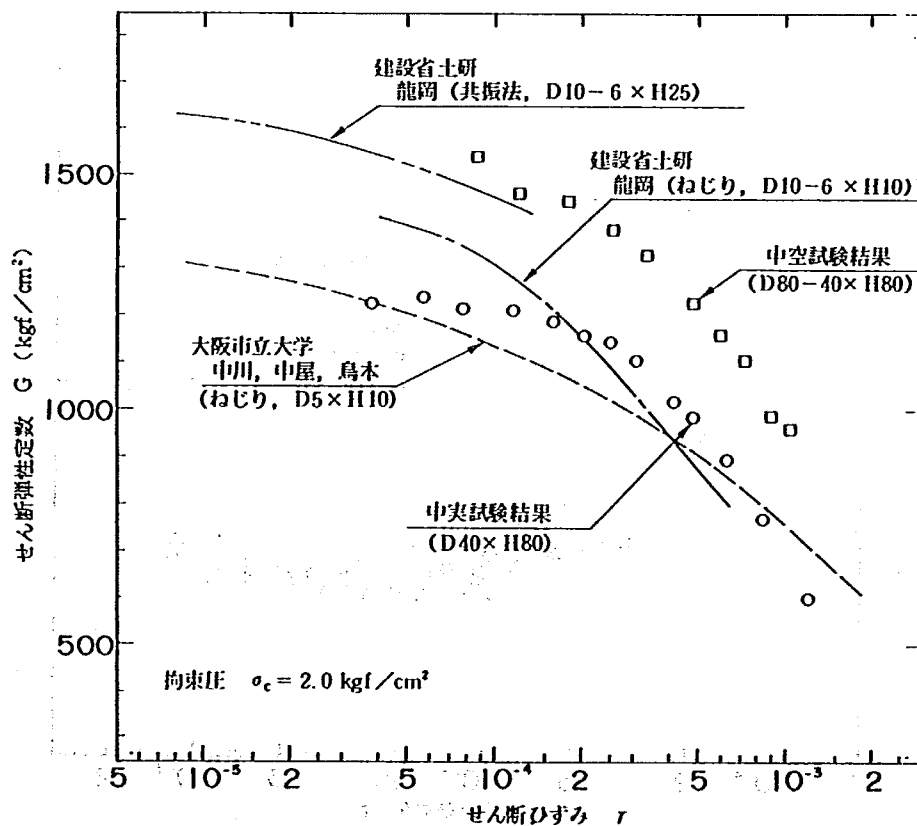


図 4.44 他の研究機関の試験例との比較 (その 3 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $G \sim \log r$ 関係)

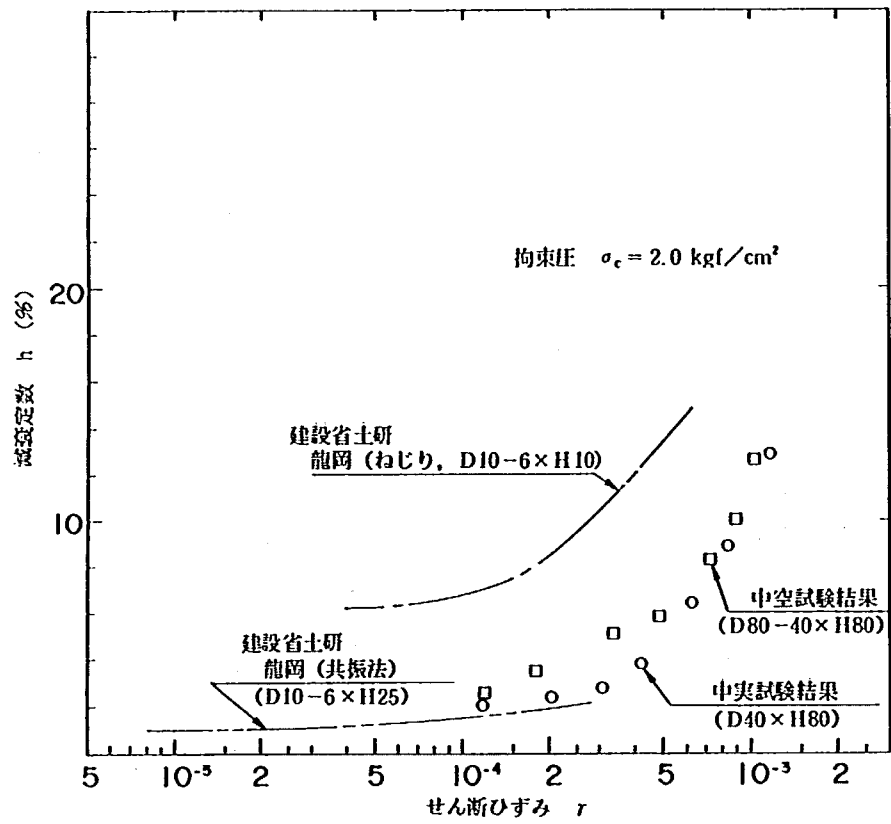


図 4.45 他の研究機関の試験例との比較 (その 4 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ $h \sim \log r$ 関係)

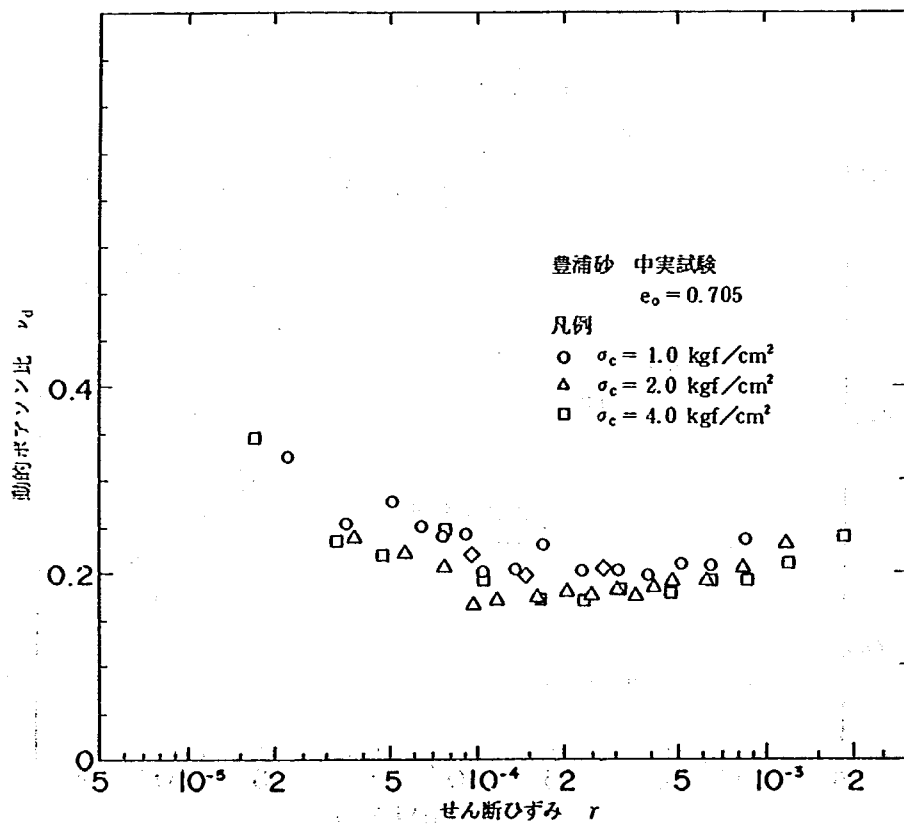


図 4.46 $\nu_d \sim \log r$ 関係

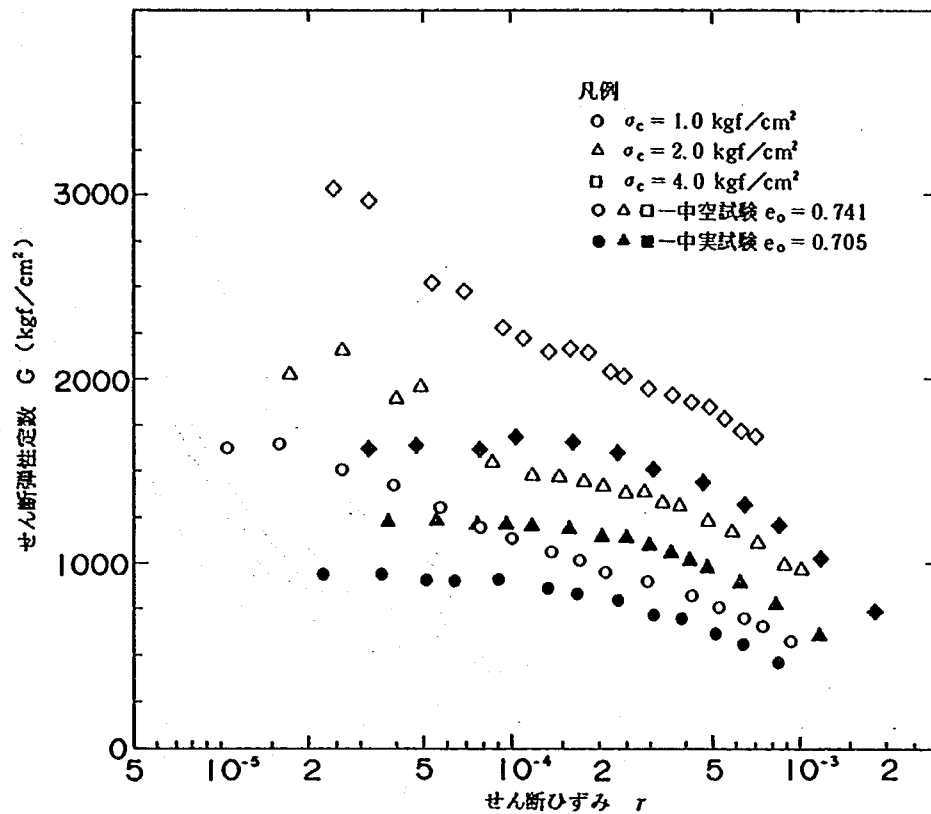


図 4.48 中空と中実の比較 (その 1, $G \sim \log r$ 関係)

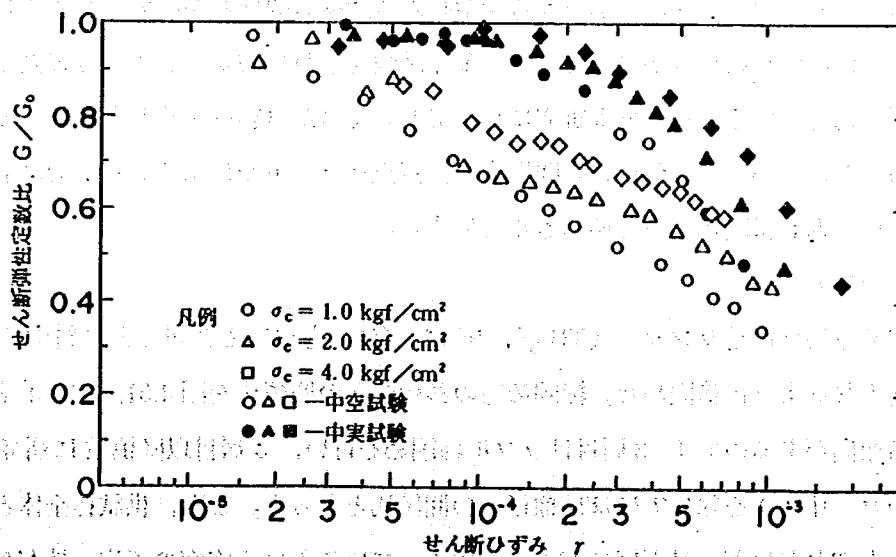


図 4.49 中空と中実の比較 (その 2, $G/G_0 \sim \log r$ 関係)

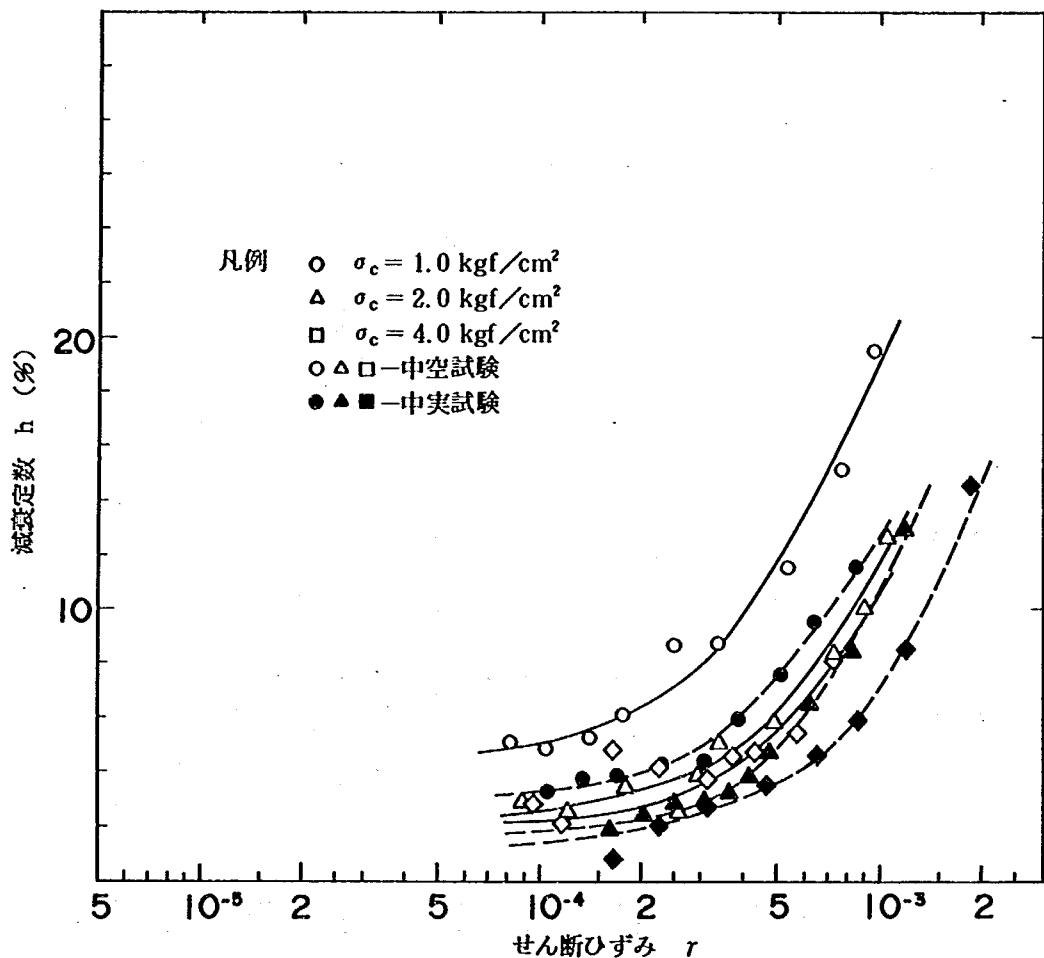


図 4.50 中空と中実との比較 (その 3, $h \sim \log r$ 関係)

4.5 大型せん断試験装置を用いた静的試験における問題点

中空ねじり単純せん断試験を行うことができる大型せん断試験装置はわが国ではじめて開発・製作されたもので、試験機の特長や試験方法などは今後数多く試験を重ねて解明、あるいは確立していかなければならない問題であると思う。そこで本研究においてもいくつか試験を実施したので、その中で試験機の特長や試験方法などについて気がついた問題点や注意点などを下記に示す。ここでは静的試験について述べ、5.5で繰り返し試験について述べることにする。

(1) 締固め方法について

供試体の締固め方法は電動ランマー (33kgf, 950 打/分) を用いて各層ごとと試料面の高さを測定して所定の密度となるように締固めた。締固め時の各層ごとの間隙比を図 4.51, 52 に示す。通常の場合、締りすぎる傾向があるので 1, 2 層目はラフに締固めを行い、3 層目以降慎重に所定の密度となるように締固めた。中空 A を除いてはほぼ目標通りの間隙比となった。また、供試体全体としては所定の密度であるかも知れないが、最下層ほどよく締固まっているという密度の不均一性が存在することを忘れてはならない。特に中空試験の場合、第 6 層目に鋼製刃を入れるため、所定の密度に締固める

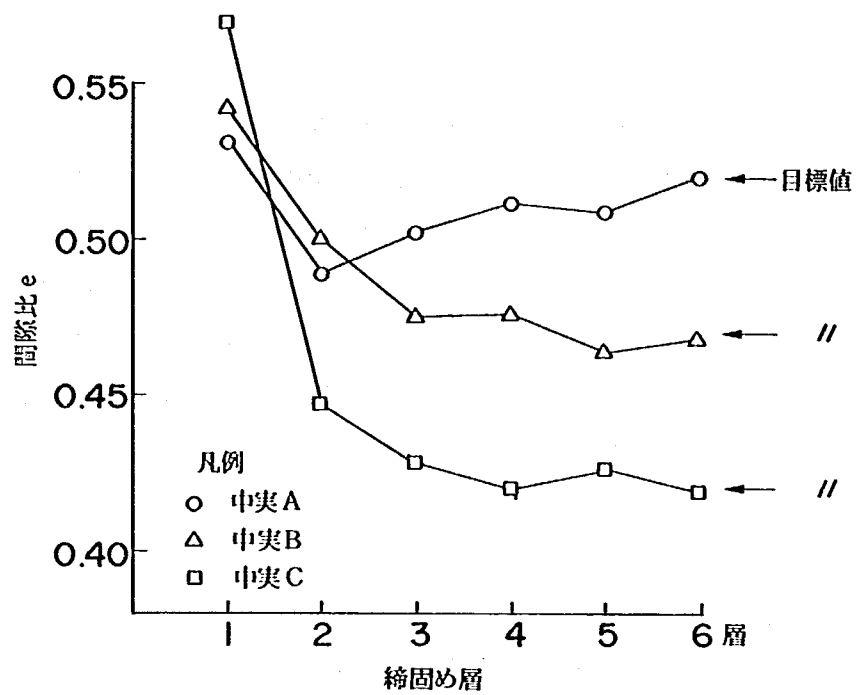


図 4.51 締固め時の間隙比の変化 (中実試験)

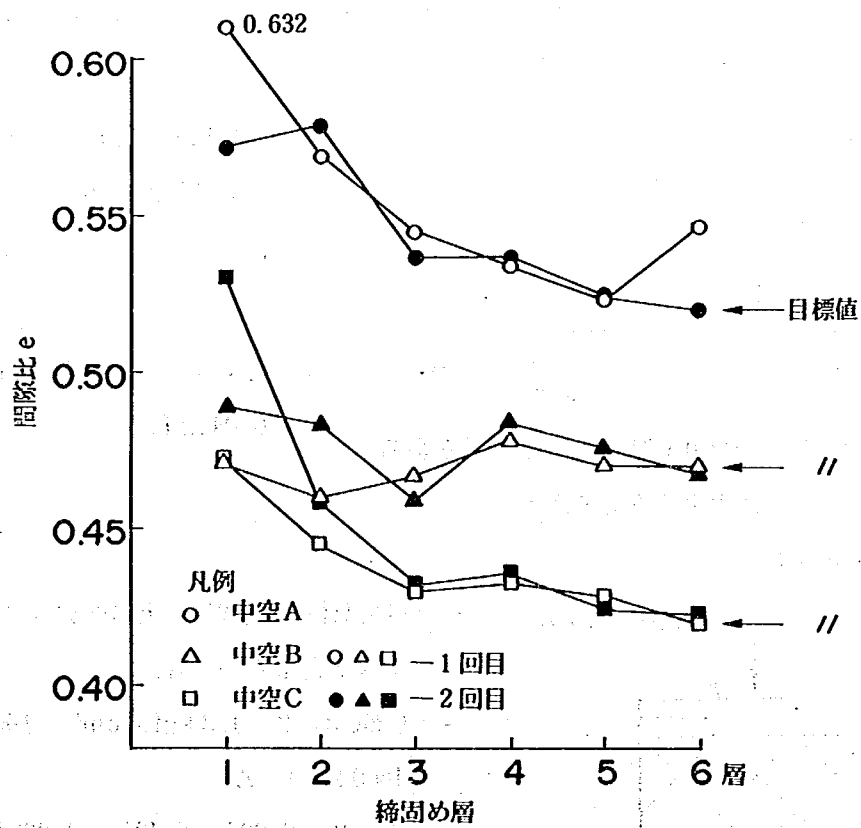


図 4.52 締固め時の間隙比の変化 (中空試験)

ことは非常にむずかしい。

(2) 圧密について

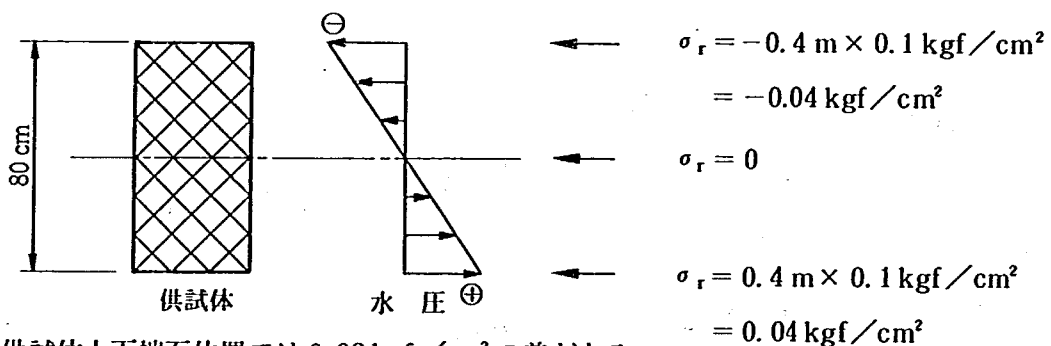
初期間隙比 e_o と圧密後空隙比 e_c の比 e_c/e_o は同じ初期間隙比 e_o であっても供試体の作成方法の違いなどによって微少に異なる場合がある。また、同一の拘束圧では e_o が大きいほど、 e_c/e_o は小さくなると考えられる。また、 e_c/e_o は供試体側壁のゴムスリーブの貫入量によっても大いに影響されるものと思われる。本研究での $e_c/e_o \sim e_o$ の関係を図 4.53, 54 に示す。豊浦砂の場合では供試体寸法が小さいほど、 e_c/e_o は小さく、初期間隙比 e_o による影響は見られない。また粗粒材料の場合も、どの試験ケースにおいても e_c/e_o は 0.975～0.985 の範囲に入って大差がなく、初期間隙比 e_o の影響はうけていないようである。(やや右下りの傾向は見られるが)

したがって、供試体自身の圧密量は小さく、圧密量の大部分は供試体側壁へのゴムスリーブの貫入量による圧密量ではないかと考えられる。

(3) 初期設定について (σ_a , σ_r)

せん断試験開始時の軸応力 σ_a 、側圧 σ_r の初期設定は基準高をどこにするか、又は試験機の構造などによって変わってくる。本研究の場合、供試体高さが大きいため、水重の影響が無視できず σ_r はどの高さを基準とするかによって大きく変わってくる。また σ_a は試験装置全体が大きいため、供試体の重量や上部ペダスタルの重量など無視できないほど大きく、また、反力盤と上部ペダスタルの連結時のタッチ荷重も加わり、せん断試験開始時に供試体に作用する軸荷重はかなり大きなものとなっている。

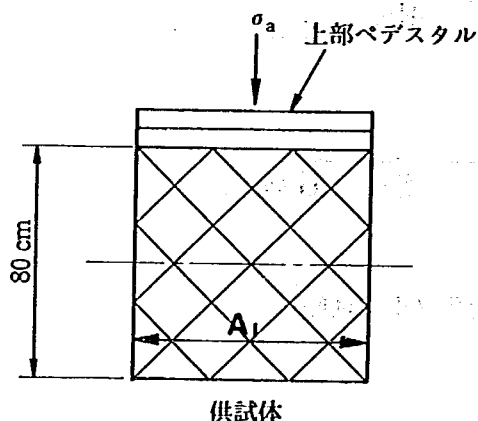
① 側圧 σ_r (供試体中央位置で考える)



供試体上下端面位置では 0.08 kgf/cm^2 の差がある。

② 軸応力 σ_a (供試体中央位置で考える)

① 中空試験の場合



$$\begin{aligned}\sigma_a &= (\text{供試体の重量 } W_1 + \text{上部ペダスタルの重量 } W_2 + \text{タッチ荷重 } W_3) / A_i \\ &= (300 \text{ g} / 2 \times 1.8 \text{ kgf/cm}^3 + 100 \text{ kgf} + 500 \sim 1000 \text{ kgf}) / A_i \\ &= 0.072 + 0.027 + 0.133 \sim 0.265 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 0.23 \sim 0.36 \text{ kgf/cm}^2\end{aligned}$$

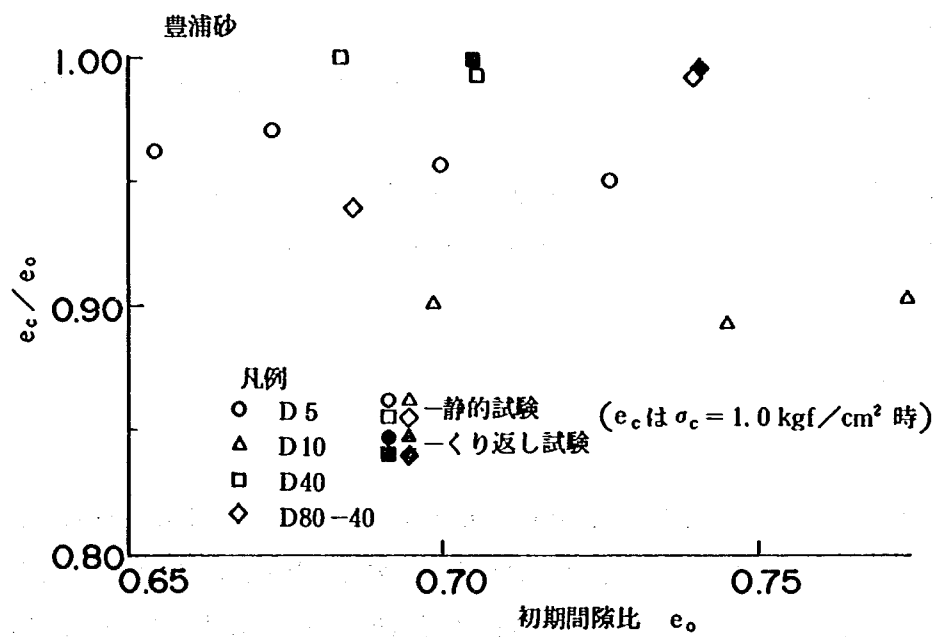


図 4.53 $e_c/e_0 \sim e_0$ の関係 (豊浦砂)

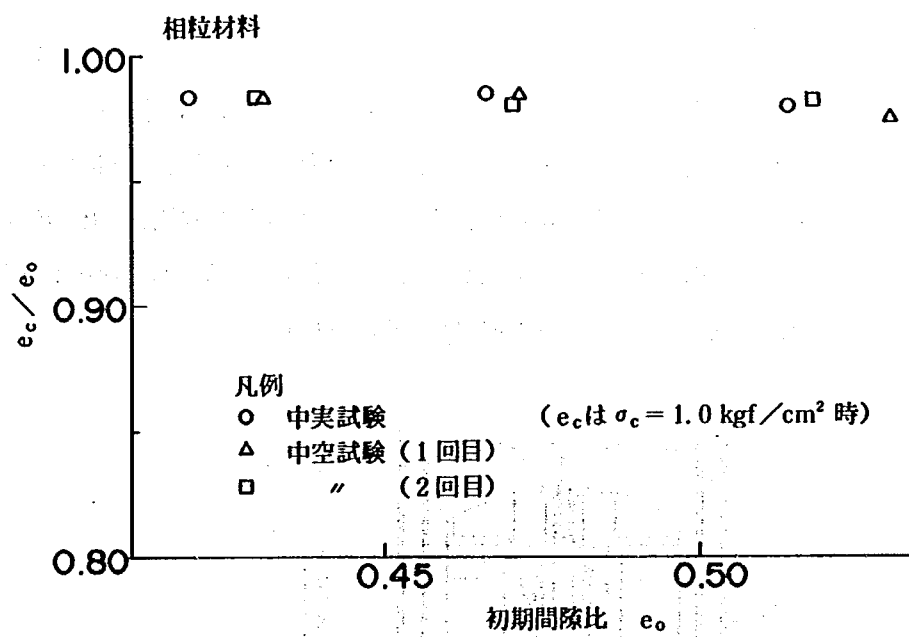
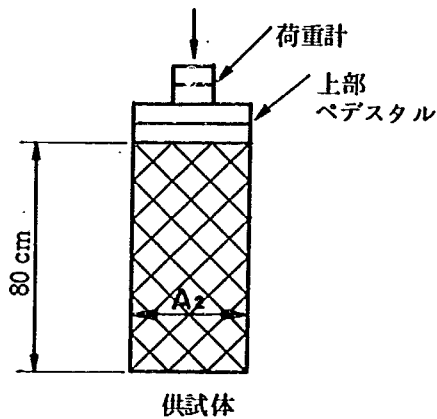


図 4.54 $e_c/e_0 \sim e_0$ の関係 (相粒材料)

⑥ 中実試験の場合



$$\begin{aligned}\sigma_a &= (100 \ell / 2 \times 1.8 \text{ gf/cm}^3 + 60 \text{ kgf} + 100 \sim 300 \text{ kgf}) \\ &\quad / A_2 \\ &= 0.072 + 0.048 + 0.080 \sim 0.239 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 0.20 \sim 0.36 \text{ kgf/cm}^2\end{aligned}$$

タッチ荷重による軸応力が最も大きく、 $0.08 \sim 0.27 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であり、その他は合せても約 0.1 kgf/cm^2 程度である。したがって、供試体中央位置で考えた場合の供試体に作用する軸応力は $\sigma_a = 0.20 \sim 0.36 \text{ kgf/cm}^2$ となってこれを補正しなければ静的強度に大きく影響してくるものと考えられる。また、動的変形特性へ及ぼす影響は平均主応力 σ_m が一定であるならば、せん断弾性定数 G は応力比によらない³⁵⁾ことから小さいと考えられる。

(4) 温度応力による影響

中空用軸力計の検出方式は図 4.55 に示すように载荷荷重による検出器自身のひずみを差動トランスタイプの変位計を用いて求めるという方法である。したがって、三軸室内に水を供給するとき、外気温と水温の温度差によって検出器にひずみが生じ、見かけの軸力が発生することになる。その 1 例を図 4.56 に示す。なお、本図において σ_r は図 4.55 における底盤に設置した側圧計の出力値であり、三軸室に水が満たされるに従って軸荷重 σ_a も上昇している様子が認められる。したがって、試験する際には水の供給後軸力計が十分に安定した後、試験を開始するようにした。

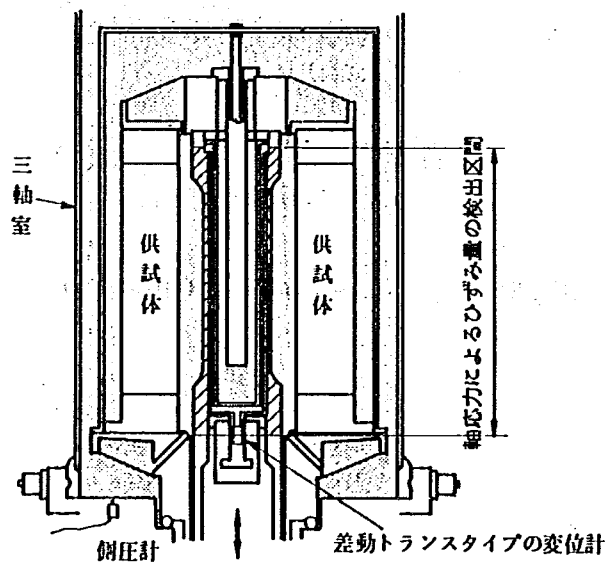


図 4.55 中空用軸荷重計の検出方式

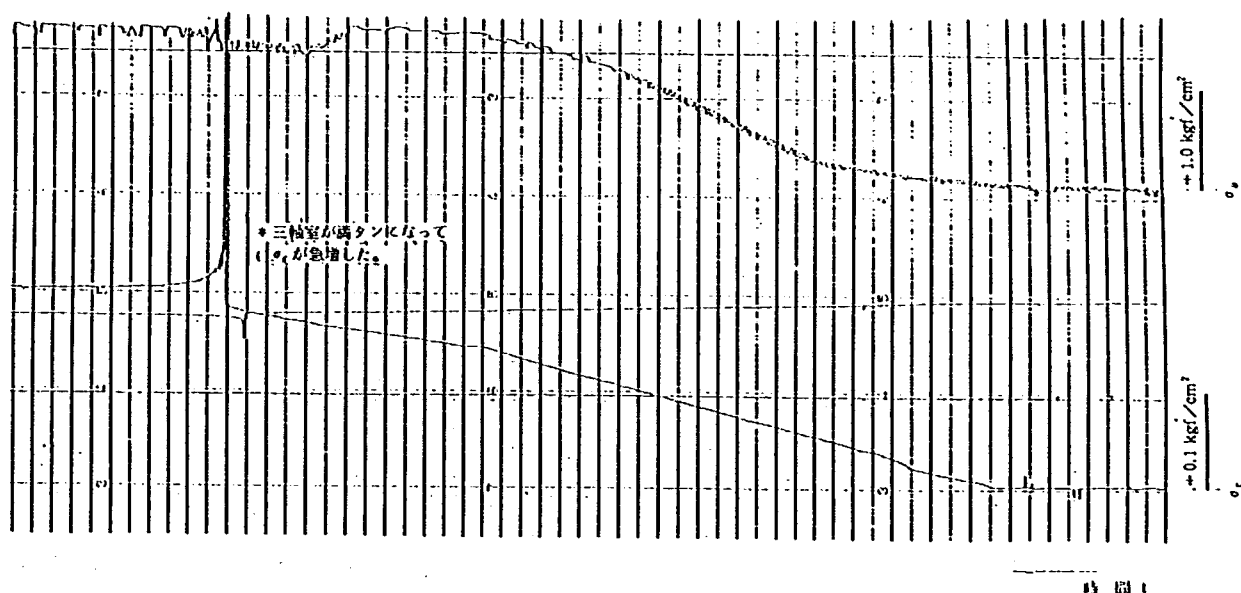


図 4.56 温度応力による σ_a , σ_r の変化

(5) 試験方法上の注意点

① 鋼製刃の位置

上部鋼製刃は上部ペDESTALと連結するため、上部ペDESTALとゴムスリーブの穴の位置関係から鋼製刃の位置は決まってくる。鋼製刃の正しい位置を図 4.57 に示す。

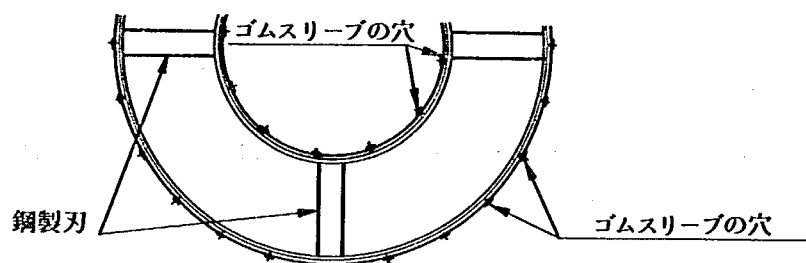


図 4.57 鋼製刃の正しい位置

② 中実用軸力計の中心位置の設定及び上部ペDESTALの水平度のチェック

中実試験の場合、軸力計を軸力計固定ネジによって固定するので中心軸が合っていないと、固定できなくなってしまうことがある。したがって、供試体作成時に軸力計の位置をできるだけ中心位置に合せるとともに、上部ペDESTALをできるだけ水平として偏心荷重が作用しないようにすべきである。

また、中空試験の場合、上部ペDESTALが水平でないと反力盤と固定する際に、上部ペDESTALが持ち上げられ、供試体上部に空隙を生じることになる。したがって、供試体作成時には上部ペDESTALをできるだけ水平にしなければならない。

③ トルクアームの位置

ねじり角度計の最大容量は $\pm 15^\circ$ (合計 30°) であり、せん断ひずみ $r = 15\%$ 時のねじり角度は約 23° であるため、トルクアームの位置が中心位置の場合にはねじり角度計の最大容量を越えてしまうことになる。したがって、トルクアームの位置はあらかじめねじり角度が -8° 以下の位置に設定しておく必要がある。

④ 制御切換

応力 $\leftrightarrow$ ひずみの制御切換はチェックメーターとモニター値をできるだけ0に近い状態で行えば、切換によるショックもほとんどなく、問題はないが、軸力と側圧の制御方法に一定の対応関係があるので注意する必要がある。というのは、側圧がK。制御の場合、 V_o/H 。一定の制御を行っているので、軸力を軸ひずみ制御で ΔH を動かすと、 ΔV が変動してしまう。また、その逆に ΔV を動かせば、軸ひずみ ΔH が変動してしまうことになる。したがって、側圧がK。制御の場合、軸力の制御は必ず応力制御にしておかなければならない。

⑤ せん断ひずみ速度の計算方法

せん断ひずみ制御はねじり変位 ($R = 40\text{ cm}$ 上の変位) を用いて行っており、せん断ひずみの速度を設定する場合のせん断ひずみは次式で求められる。

$$r_s = \frac{\Delta D_\theta \times 30/40}{H'} \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

($H' = 80\text{ cm}$ 一定)

一方、計測されるせん断ひずみ r はねじり角度を用いて次式によって求められる。

$$r = \frac{\theta \pi}{180^\circ} \cdot \frac{30^{\text{cm}}}{H} \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

以上のように、制御するときのせん断ひずみ r_s と計測されるせん断ひずみ r は異なっていることに注意しなければならない。

⑥ モールドの解体

外側モールドは4枚1組の上下2段で組立てられているが、解体する場合、4ヶ所のボルトを平均的にゆるめていかないと、4枚が1度にはずれて落下することがあるので注意を要する。

4.6 まとめ

大型せん断試験装置の特性や試験方法を調べる目的で、豊浦乾燥砂を用いて中実三軸圧縮試験及び中空ねじり単純せん断試験による静的試験及びくり返し試験を実施した結果をまとめると以下ようになる。

(1) 試験方法について

① 中実試験

ア) 試験方法についてはほとんど問題ない。ただ、供試体が大きいのので σ_a 、 σ_c などの初期設定値を精度よく求めなければならない。

② 中空試験

- ア) 締固めは電動ランマーを用いて行ったがほとんど問題なかった。
- イ) 鋼製刃を入れることによって、理想に近い単純せん断変形状態を生じさせることができた。
- ウ) 供試体が大きいので σ_a , σ_r などの初期設定値を精度よく求めなければならない。
- エ) 温度応力の影響, トルクの伝達について, せん断ひずみの測定方法 (繰り返し試験のとき) などについて多少問題があった。
- オ) マニュアル制御, 圧密速度制御, くり返し制御などの操作は簡単で使いやすい。

(2) 静的試験結果について

① 中実試験

- ア) 応力～ひずみ曲線では, 密なほど明瞭なピークが見られ, ひずみが大きくなると密度に関係なく応力は一定値に収束するようである。
- イ) $\phi_o \sim e_o$ 関係では D40 は D10 より約 1° 大きく, また $\phi_o \sim e_c$ 関係では約 2° 大きい。
- ウ) 他の研究機関の試験例と比較すると, D40 はバラツキの範囲 (約 $\pm 1^\circ$ 程度) に入っている。
($\phi_o \sim e_o$ 関係)
- エ) ひずみが小さいときの $\phi_o \sim e_o$ の相関関係はよいが, ひずみが大きくなると差が生じる。

② 中空試験

- ア) 応力～ひずみ曲線では, 明瞭なピークが見られなかった。
- イ) 龍岡らのねじり結果と比較すると, $e_o = 0.64$ ではほぼ同様であるが $e_o = 0.73$ で約 3° の差がある。これは試験装置や供試体の作成方法の違いなどによるものであろう。

(3) くり返し試験結果について

① $G, h \sim \log r$ 関係について

- ア) G は, 中実では $r = 10^{-4}$ をすぎて急減しているが, 中空では r の増大とともに直線的に減少している。
- イ) 他の研究機関の試験例と比較すると, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合, 中実とは三軸グループと, 中空は単純せん断グループと良く近似している。
- ウ) h は中空の方が中実より 1～4% 程度大きく, 低拘束圧ほど差が大きい。

② $G, h \sim \sigma_c$ 関係について

- ア) G は拘束圧の依存性が明瞭に認められ, $G \propto (\sigma_c)^{m(r)}$ の $m(r)$ は約 0.4 程度に収束するようである。
- イ) また, h も拘束圧の依存性が見られる。

③ $G \sim h$ 関係について

- ア) 中実, 中空ともに龍岡らの平均曲線よりも下回り, G/G_o が小さいほど h の差はひろがる傾向を示している。

④ 载荷回数 N について (中空試験)

ア) $N = 2, 5, 10$ の G を比較すると, $r \geq 5 \times 10^{-4}$ の場合, $N = 10$ に対して $\pm 5\%$ 程度の範囲内に収まっている。

イ) h の場合, ひずみが大きいほど, N による影響が現われている。

5 粗粒材料の繰返し試験

5.1 試験目的

地震の多い地域に築造されるダムなどは通常の設計に加えて、動的解析に基づく詳細な耐震設計が必要である。しかし、ロックフィルダムの主材料である粗粒材料の動的な変形及び強度特性については、材料の粒径が大きいため、大きな供試体による試験が必要であるが、その試験例は少なく、未だ不明な点が数多い。そこで、大型せん断試験装置を用いて粗粒材料の動的変形特性(G , h)を求めると共に中空ねじり単純せん断試験、中実三軸圧縮試験の試験方法の違いによる影響を調べる目的で繰返し試験を実施した。

繰返し試験は、せん断ひずみ、拘束圧、間隙比、載荷回数などをパラメーターとして、現実との対応の良い中空ねじり単純せん断試験と通常の中実三軸圧縮試験によって実施した。

5.2 試験材料

試験材料は、現在建設中である七ヶ宿ダム(東北地方建設局)の原石山横坑内より採取した石英安山岩を使用した。繰返し試験に先立ち、実施した試験項目について、試験方法と試験結果を以下に示す。

5.2.1 搬入時材料フルイ分け

試験するに先立ち、搬入材料をJIS A. 1204により、粒径38.1mm～0.84mmまでの6粒径階に分類し、それに並行して天日乾燥によって含水比 $w < 3\%$ となるようにした。

5.2.2 物理試験

試験材料の物性値を求めるための物理試験としては、比重試験、吸水量試験、および含水量試験を実施した。比重・吸水量試験は、粒径4.76mm以上については粗骨材の比重および吸水量試験JIS A. 1110に準拠して実施し、また粒径4.76mm以下については土粒子の比重試験JIS A. 1202に準拠して実施した。含水量試験はJIS A. 1203に準拠して実施した。

試験結果一覧表を表5.1に示す。なお、表中の比重・吸水率は以下の定義によるものである。
表乾比重 G_a 、絶乾比重 G_b 、真比重 G_g 、吸水率 Q

$$G_a = \frac{B}{B-C}, \quad G_b = \frac{A}{B-C}, \quad G_g = \frac{A}{A-C}, \quad Q = \frac{B-A}{A} \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

ここで、 A ：絶乾重量、 B ：表乾重量、 C ：水中重量

表5.1から、真比重(G_g)は、2.76～2.81、絶乾比重(G_b)は、2.49～2.54、吸水率(Q)は3.07～4.48%で安山岩としては、一般的な値である。代表物性値としては、粒径別重量百分率による重みつき平均値として求め、表5.2に示す。なお、間隙比はすべて絶乾比重(G_b)を用いて求めた。

表 5.1 物理試験結果一覧表

粒 径 (mm)	通過百 分率%	表乾比 重 G_a	絶乾比 重 G_b	真比重 G_o	吸水率 (%) Q	含水比 (%) w
38.1~25.4	23	2.619	2.541	2.756	3.072	2.20
25.4~19.1	13	2.610	2.523	2.764	3.457	2.33
19.1~9.52	25	2.608	2.511	2.779	3.834	2.57
9.52~4.76	17	2.597	2.485	2.797	4.483	2.83
4.76~2.00	15			2.806		2.81
2.00~0.84	7			2.795		2.94

表 5.2 代表物性値

含水比	w	2.56 %
比 重	G_b	2.579
吸水率	Q	3.69 %

5.2.3 試験粒度の設定

通常の三軸圧縮試験の許容最大粒径 $D_{\max}$ は供試体直径の $1/5$ とされている。したがって、中空試験の最大粒径 $D_{\max}$ は、中空供試体の最小寸法 20 cm の $1/5$ として $D_{\max} = 38.1$ mm とした。また、中実試験の場合も最大粒径 $D_{\max}$ は 38.1 mm とした。一方、試験粒度分布は、原石山横坑内で採取した時に得られた粒度分布³⁹⁾を基本として、最大粒径 $D_{\max} = 38.1$ mm の相似粒度分布になるように設定した。試験粒度分布を図 5.1 に示す。

5.2.4 締固め試験

粗粒材料の締固まり特性を求め、供試体作成時の密度設定の参考とする目的で締固め試験を実施し、また、締固め試験後の破砕率を知るために粒度試験を実施した。

締固め試験は、電動ランマーを用いて、表 5.3 に示す仕様で行った。

試験手順は試料の絶乾重量を 150 kgf として図 5.1 に示す試験粒度分布となるように試料調整する。締固めの層数は 6 層とし、1 層ごとの締固めを 7 回(周囲 6 回、中央 1 回)に分け、できるだけ均等になるように締固める(図 5.2 参照)。

締固め後の密度は、試料高さを 9 点(図 5.3 に示す)測定した平均値と、モールド直径、試料の絶乾重量より求めた。締固め試験は締固め時間を変えて、6 試料行い、 $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ 、 $e \sim$ 締固め時間曲線を求めた。

締固め試験結果を図 5.4、5.5 に示す。図 5.4 は $e_{\max}$ を求めた時の試料を用いて、2 sec(×7 回)ごと締固めた際の $e \sim$ 締固め時間曲線である。この図から、 $e_{\min}$ となる締固め時間は 12 sec(×7 回)と推定

表 5.3 締固めの仕様

電 動 ラ ン マ ー	全負荷打撃数：950 打/分 本 体 重 量：33 kgf 加 圧 盤 径：18 cm
試 料 絶 乾 重 量	150 kgf
締 固 め 層 数	6 層
モ ー ル ド 寸 法	径 40 cm × 高さ 80 cm
締固めエネルギー	締固め時間で調節
締固め時間(1 層)	0, 2, 4, 6, 8, 12 × 7 秒/層

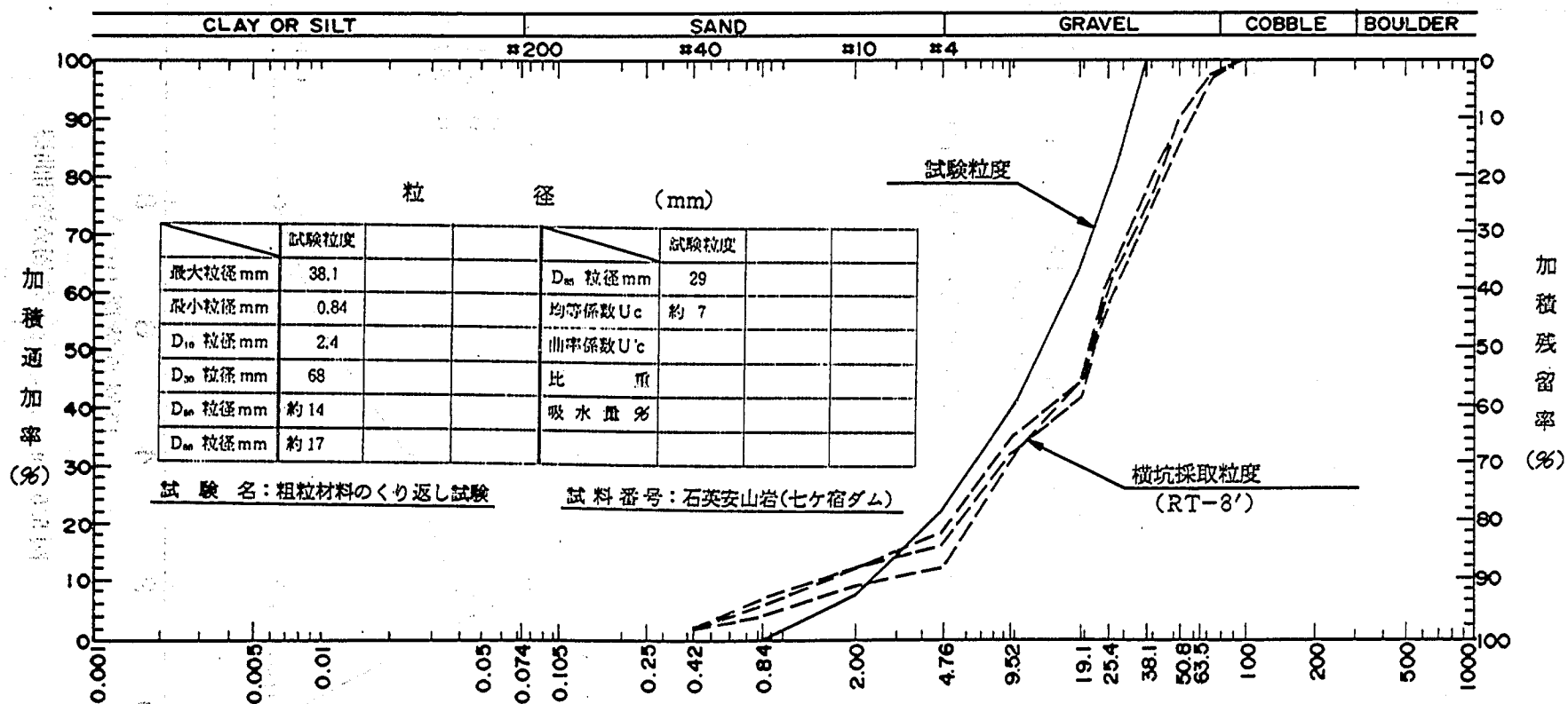


図 5.1 試 験 粒 度 分 布

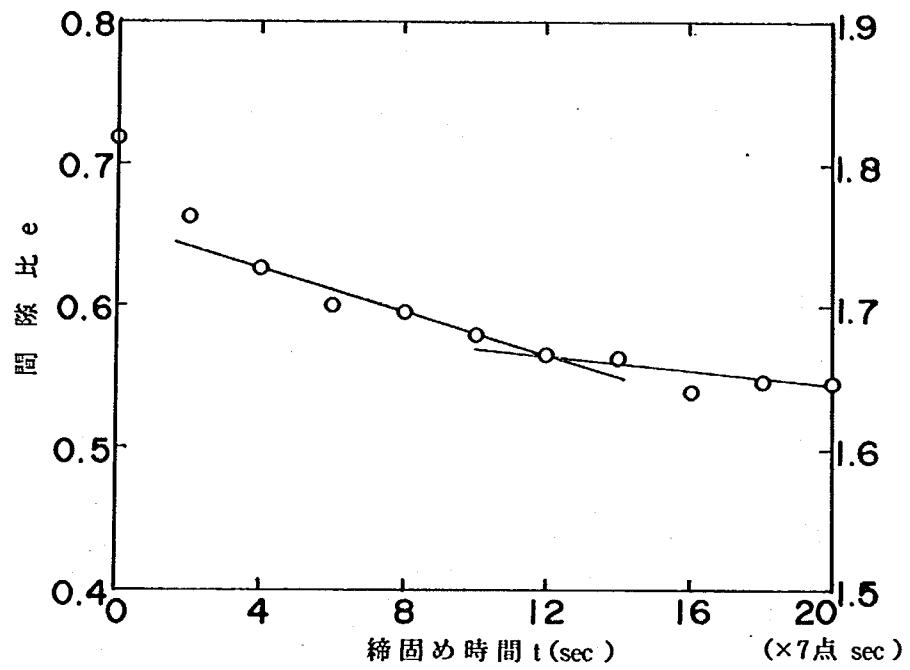


図 5.4 e_{max} 試料を用いた $e \sim$ 締固め時間曲線

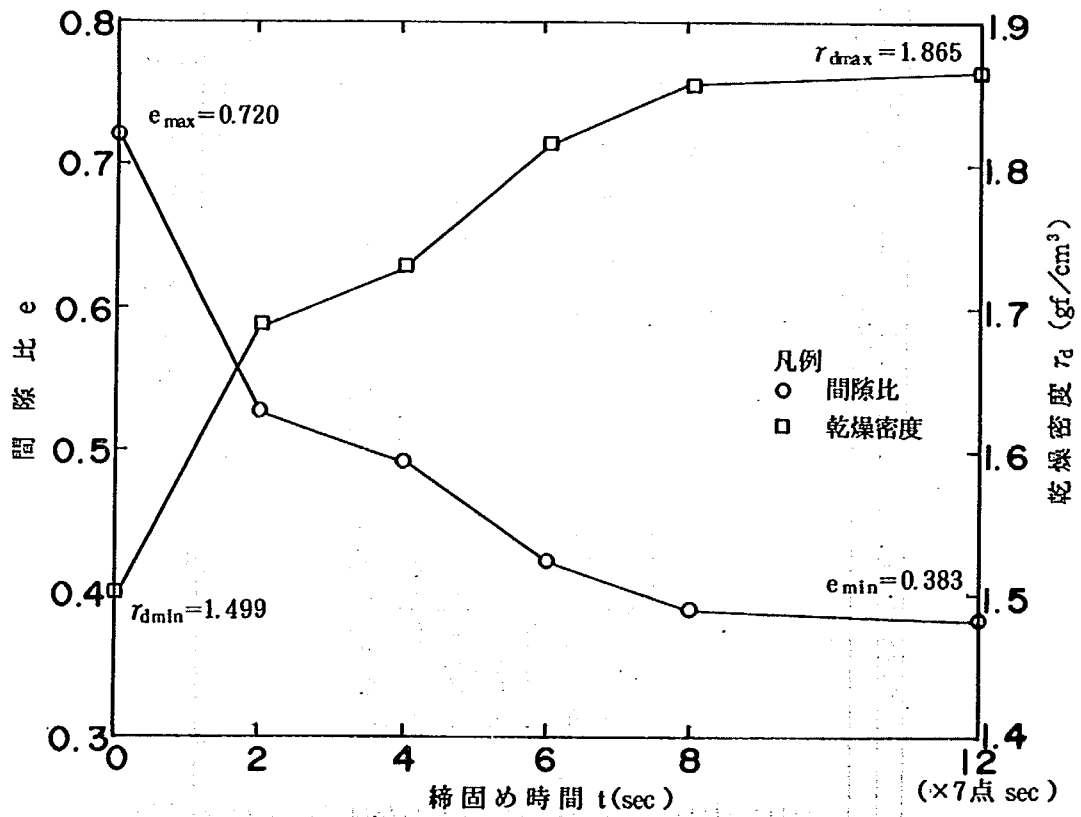


図 5.5 e_{max} , e_{min} , $e \sim$ 締固め時間曲線

できる。また図 5.5 は $e_{\max}$, $e_{\min}$, $e \sim$ 締固め時間曲線であり、この図から、 $e_{\max} = 0.720$, $e_{\min} = 0.383$ が得られた。

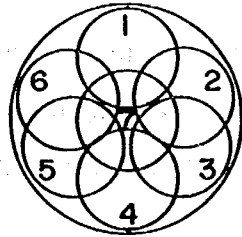


図 5.2 締固め位置

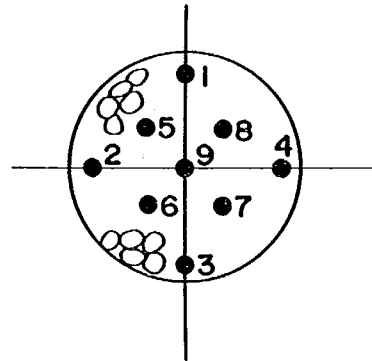


図 5.3 試料高さ測定位置

破碎率を求める粒度試験は、 $e_{\min}$ を求めた締固め試験後の試料について行い、破碎率は試験前の粒度分布と試験後の粒度分布の差を求め、Marsal の定義⁴⁰⁾により表現した。

粒度試験結果を図 5.6 に示す。締固め試験後の破碎率は $\pm 4.8\%$ となり、「七ヶ宿ダムフィル材料試験」³⁹⁾ (土研資料 1974 号)において実施された締固め後の粒度試験結果 5.5% とほぼ同様となった。

岩 種 安山岩
締固パターン 12秒×7回/層

平均比重 2.579
粒 度 $U_c = 7$

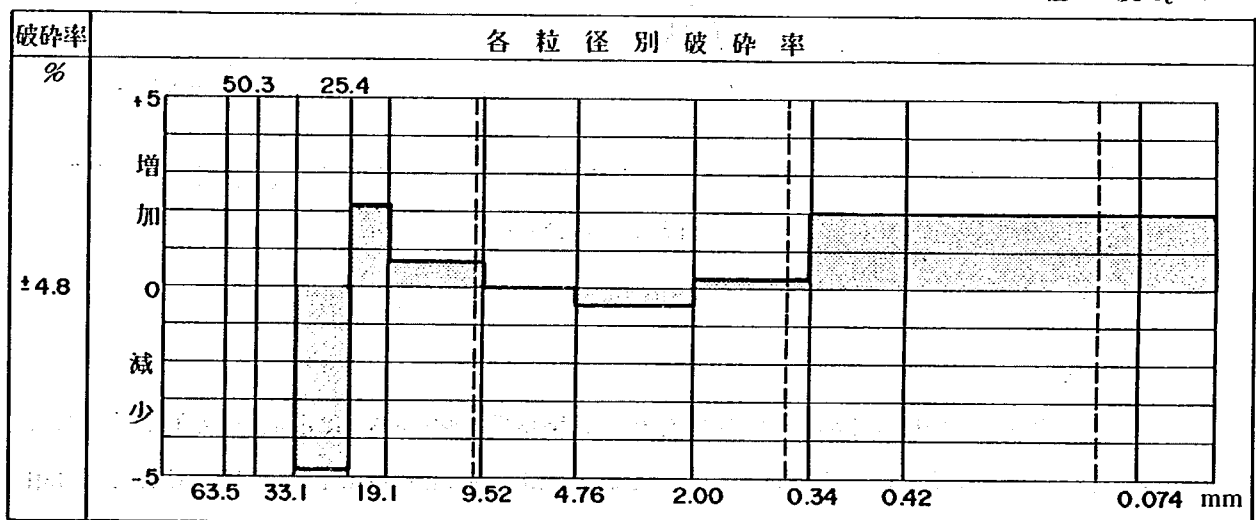


図 5.6 粒度試験結果図

5.3 試験方法

5.3.1 せん断応力履歴に関する確認試験

通常の三軸試験などでは、1 拘束圧につき 1 供試体で試験が行われるが、本試験装置による中実、中

中空試験では、供試体の寸法が大きいため限られた時間と予算の中では数多くの試験を行うことはできない。したがって、多くの信頼できるデータを得るための試験方法について下記に示す内容の確認試験を実施した。

(1) 試験目的

1 供試体で順次、拘束圧を増加させながら、せん断ひずみ γ を $10^{-5} \sim 10^{-3}$ の範囲内で繰り返し载荷試験を行うと、2 回目以降の拘束圧の場合には、前回の繰り返し载荷試験の影響を受けることが考えられる。したがって、次に示す試験方法によってせん断応力履歴がせん断弾性定数 G 、減衰定数 h に与える影響を求めることにした。

(2) 試験方法

試験方法は図 5.7 に示すように 2 回の予備圧密を行った後、各拘束圧ごとに定められたせん断ひずみが生じるようなせん断応力で往復の繰り返し载荷試験を行い、往路と復路の G 、 h を比較してせん断応力履歴の影響を求めることにした。

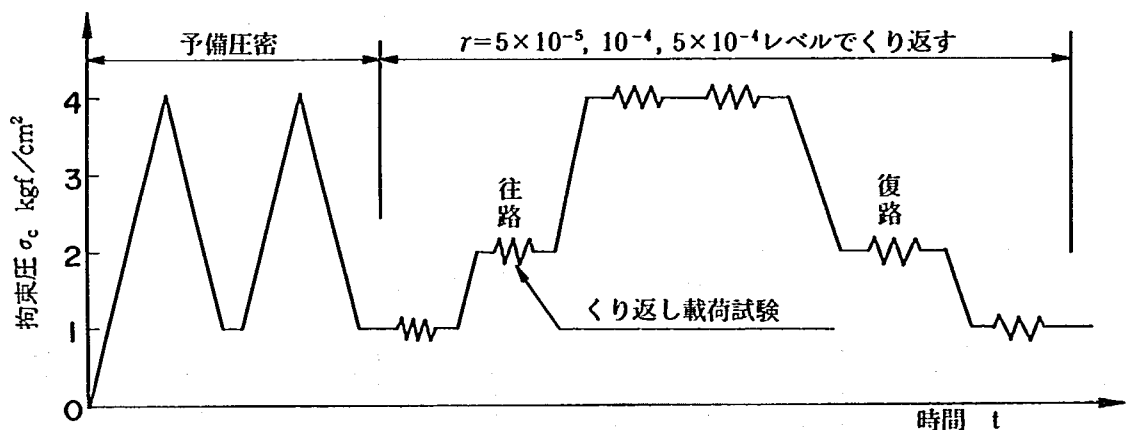


図 5.7 試験方法

(3) 試験結果

せん断応力履歴の影響を求めるための中実、中空試験結果を図 5.8, 5.9 に示す。せん断弾性定数 G の場合、往復の差は中実、中空ともに $\gamma < 10^{-4}$ で最大 $200 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\gamma \geq 10^{-4}$ で最大 100 kgf/cm^2 と小さく、測定値に対する比率は約 5 % 以内であり、有意な差は認められなかった。また、減衰定数 h の場合、往復の差は中実、中空ともに、最大 2 ~ 3 % となり、せん断ひずみ γ が大きくなるとその差は減少する傾向を示している。以上のように、この試験方法の場合にはせん断応力履歴が G 、 h に与える影響は顕著に認められなかった。したがって、予備圧密を加えた場合には同一供試体で拘束圧を変化させて繰り返し試験を行ってもせん断応力履歴の影響がないことがわかった。ただし、本試験の場合には予備圧密は加えていない。

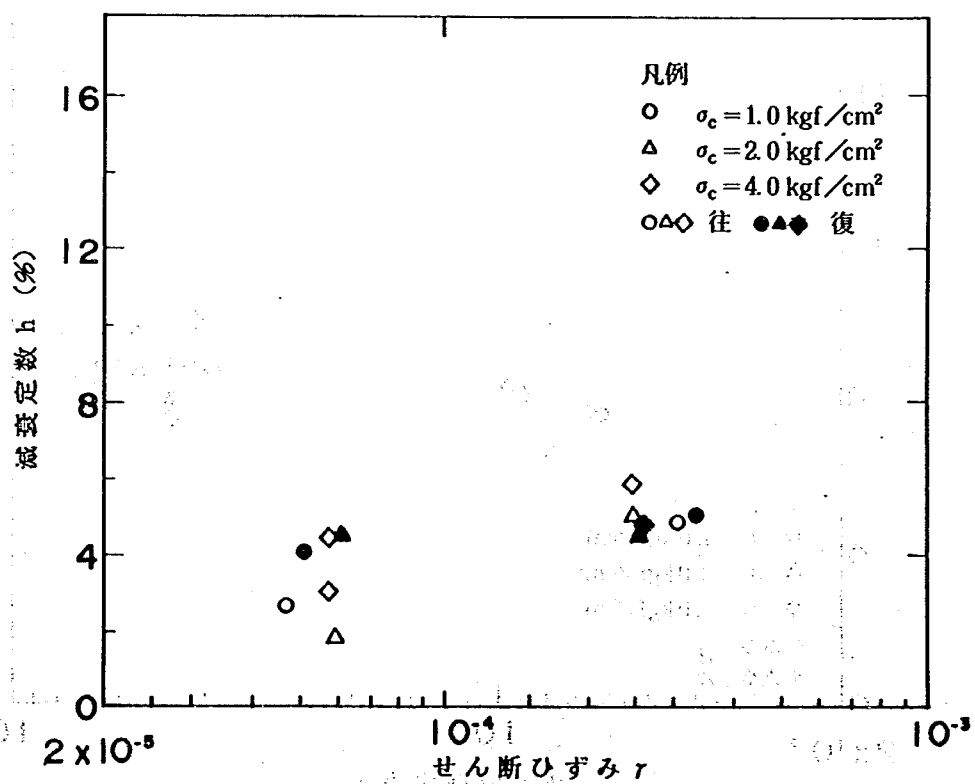
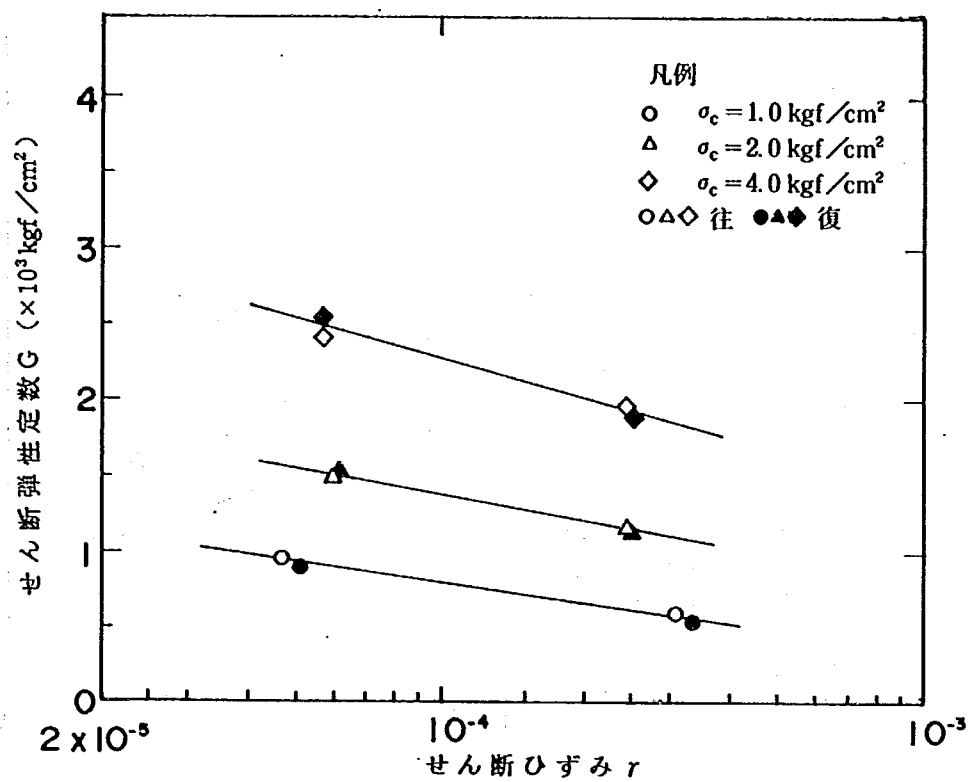


図 5.8 応力履歴に関する確認試験結果 (中実試験)

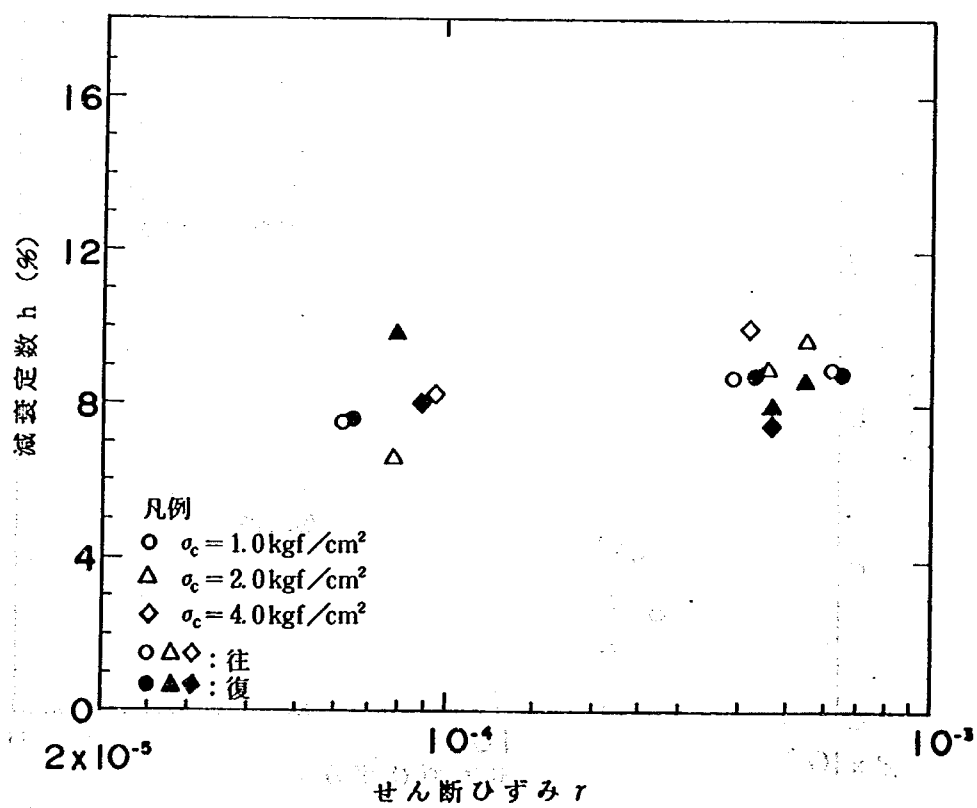
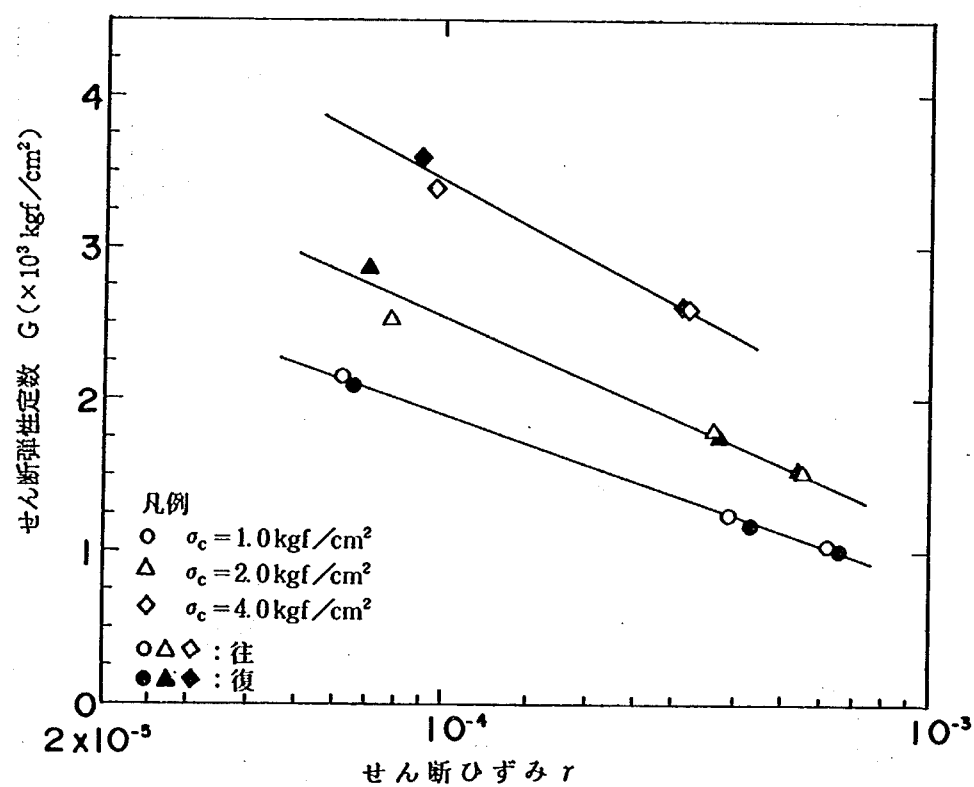


図 5.9 応力履歴に関する確認試験結果 (中空試験)

5.3.2 試験ケース

粗粒材料の動的変形特性(G , h)に影響を及ぼす要因としては次のようなものがあげられる³²⁾。

- ①せん断ひずみ, ②拘束圧, ③密度, ④载荷回数, ⑤粒度分布, ⑥圧密主応力比, ⑦初期せん断応力, ⑧異方性, ⑨排水条件, ⑩供試体の作成方法, ⑪その他

これらの中で, 特に影響が大きいと思われる①②③④に着目して試験ケースを表 5.4 に示すように設定した。なお, 中空試験は試験の再現性を確かめるため, 同一条件で 2 回行うことにした。

表 5.4 試験ケース

試験	No.	G_0 で求めた目標間ゲキ比	目標せん断ひずみ	拘束圧	载荷回数
中空試験	A-1	$e_0=0.52$ ($D_r=89\%$)	10^{-5} $\downarrow$ 10^{-3}	1, 2, 3, 4 kgf/cm ²	11 回
	A-2	"			
	B-1	$e_0=0.47$ ($D_r=74\%$)			
	B-2	"			
	C-1	$e_0=0.42$ ($D_r=59\%$)			
	C-2	"			
中実試験	A	$e_0=0.52$ ($D_r=89\%$)			
	B	$e_0=0.47$ ($D_r=74\%$)			
	C	$e_0=0.42$ ($D_r=59\%$)			

5.3.3 供試体の作成方法

供試体の作成方法は 4.3.2 で示した方法とほとんど同様であるが, 唯一異なる点は締固めを行うのに電動ランマー(950 打/分, 重量 33 kgf)を用いることである。なお, 供試体作成上, 特に注意すべきことは, 以下のとおりである。

- ① 試料の投入はハンドスコップで落差を与えないように静かに, かつ均等に行うこと。
- ② 各層ごと必ず決められた高さまで締固めを行い, 密度の不均一性をできるだけないようにすると, 特に密度の小さい場合にはむずかしいので注意を要する。
- ③ 6 層目の試料面はできるだけ水平になるように締固めること, その際, 締固めすぎないようにすること。

5.3.4 せん断試験方法

せん断試験方法を表 5.5 に示す。

詳細なせん断試験方法は 4.3.3 に示した方法と同様である。

表 5. 5 試験方法

項 目	中 空 試 験	中 実 試 験
供試体の大きさ	D 80 - 40 × H 80 cm	D 40 × H 80 cm
せん断試験の種類	繰返しねじり単純せん断試験	繰返し三軸試験
供試体の状態	不飽和状態($w < 3\%$)	
排水条件	圧密排水試験	
制御方法	せん断応力制御	軸応力制御
振幅波形	$f = 0.2 \text{ Hz}$ の正弦波	
試験拘束圧	$\sigma_c = 1, 2, 3, 4 \text{ kgf/cm}^2$	
試験間ゲキ比	$e_0 = 0.42, 0.47, 0.52$	

5. 3. 5 せん断ひずみの測定方法について

中空試験の場合のせん断ひずみの測定方法は、試験ケース中空 A-1, C-1 についてはねじり角度計を用い(図 5.10(a)に示す), またその他の試験ケースについては微小変位計を用いた(図 5.10(b)に示す)。これは試験の途中でねじり角度計が故障したため、代替品として微小変位計を用いることにしたためである。

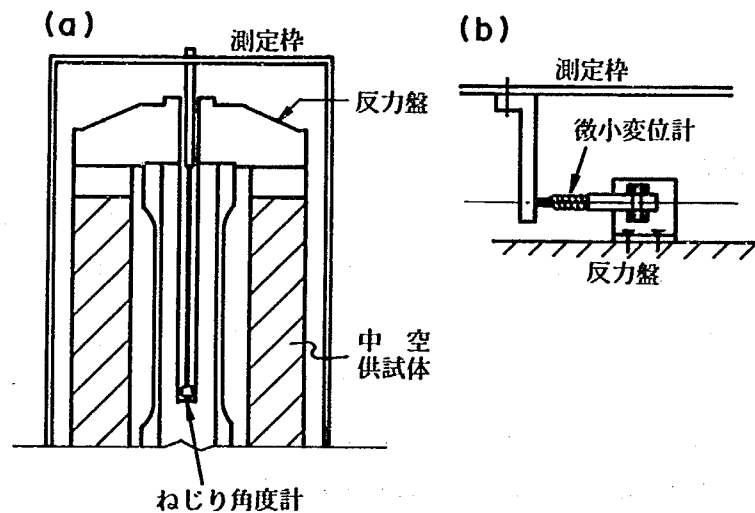


図 5.10 せん断ひずみの測定概要図

5. 4 試験結果

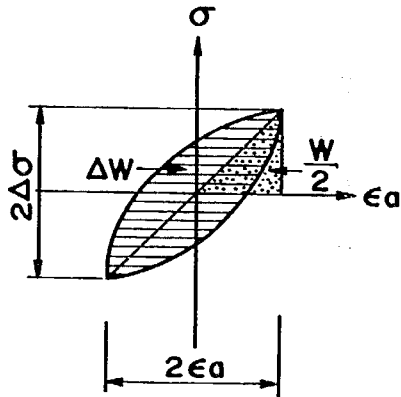
5. 4. 1 繰返し中実三軸圧縮試験結果

繰返し試験時の間隙比の変化を表 5.6 に示す。

せん断弾性定数 G , 減衰定数 h は応力～ひずみのヒステリシスカーブから下記の式を用いて算出した。なお、繰返し载荷回数は 11 回とし、10 回目のデータを採用した。

表 5.6 繰り返し試験時の間隙比の変化

試験No.	初期乾燥 密度 r_d	初期間ゲ キ比 e_o	圧 密 後 間 隙 比 e_c			
			$\sigma_c=1.0\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_c=2.0\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_c=3.0\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_c=4.0\text{kgf/cm}^2$
A	1.703	0.514	0.504	0.496	0.486	0.478
B	1.758	0.467	0.460	0.450	0.442	0.435
C	1.817	0.419	0.414	0.409	0.404	0.401



$$\nu_d = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_a} - 1 \right) \quad (4.9)$$

$$E = \Delta \sigma / \epsilon_a \quad (4.10)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu_d)} \quad (4.11)$$

$$r = (1+\nu_d) \epsilon_a \quad (4.12)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (4.13)$$

ただし、 ν_d ：動的ポアソン比、 ϵ_a ：軸ひずみ、 ϵ_v ：体積ひずみ、 $\Delta \sigma$ ：軸応力振幅、 E ：弾性係数

なお、データ整理はディジタル化(Tektronix 4081 Graphic System)を用いて行った。詳細については参考資料を参照のこと。

(1) 典型的なヒステリシスカーブについて

中実試験の典型的なヒステリシスカーブとペンレコーダーの出力結果を図 5.11, 12 に示す。

豊浦砂の場合と同様に、せん断ひずみ r が大きくなると、ヒステリシスカーブは三日月形になる傾向を示す。これは 4.4.2 で述べたように圧縮側と伸張側の応力比の違いによるものであろう。せん断ひずみ $r = 5 \times 10^{-5}$ のヒステリシスカーブを見ると、 G は求められるが h は求めるのが困難であることがわかる。検出器の精度から考えて信頼できるデータの範囲は G の場合 $r \geq 5 \times 10^{-5}$ 、 h の場合 $r \geq 10^{-4}$ であると思われる。

また、図 5.12 は中実 A、 $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $r = 1.02 \times 10^{-4}$ 時のペンレコーダーの出力結果であるが、繰り返し制御項目である軸応力の波形は圧縮側、伸張側ほぼ対称であり、 $N=11$ まで変化はない。軸ひずみ ϵ_a は繰り返し応力が小さいため、圧縮・伸張側ではほぼ同様であるが、中心軸は徐々に圧縮側へ移動していく様子が見られる。また軸ひずみ波形のピーク付近に乱れが生じているのがわかる。動的ポアソン比 ν_d を求めるのに必要な体積変化 ΔV の変化は圧縮側で収縮、伸張側で膨張を示し、また側圧 σ_r はほとんど変化はなく(変化量は 0.01 kgf/cm^2 以下)、安定していることがわかる。

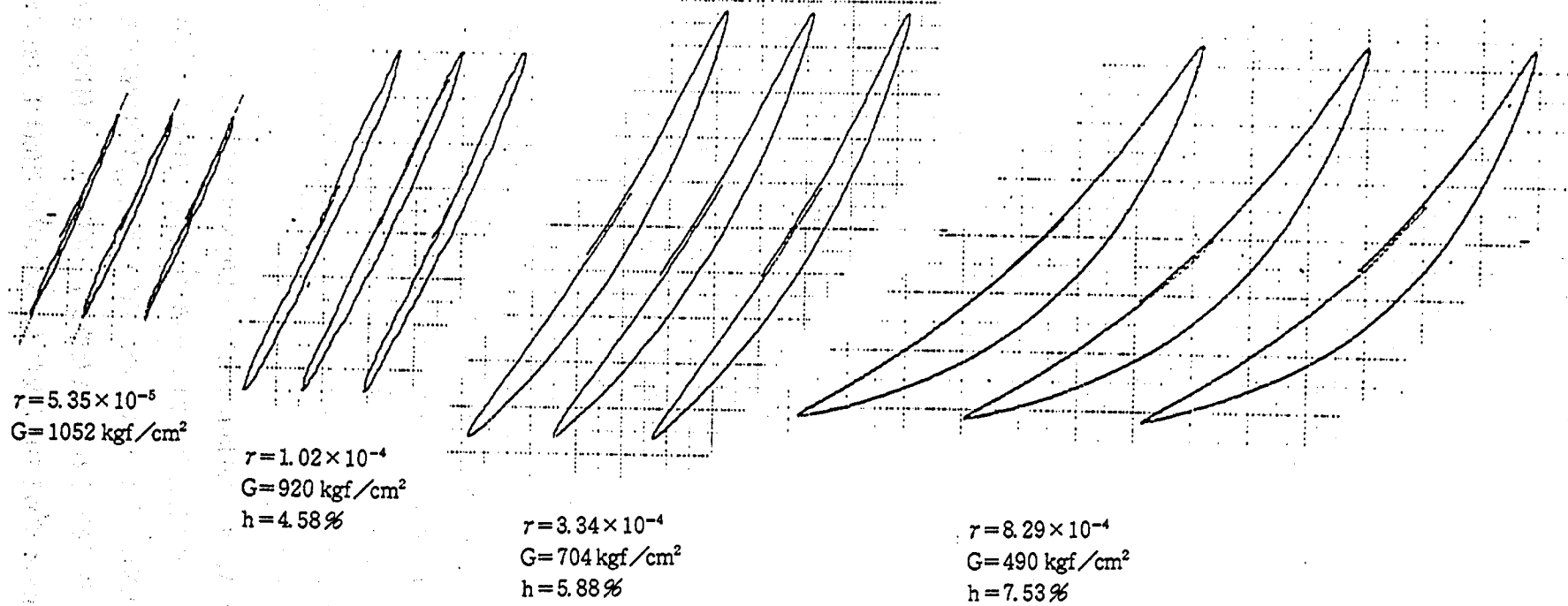


図 5.11 典型的なヒステリシスカーブ (中実 $A e_0 = 0.514$, $\sigma_c = 1.0$ kgf/cm²)

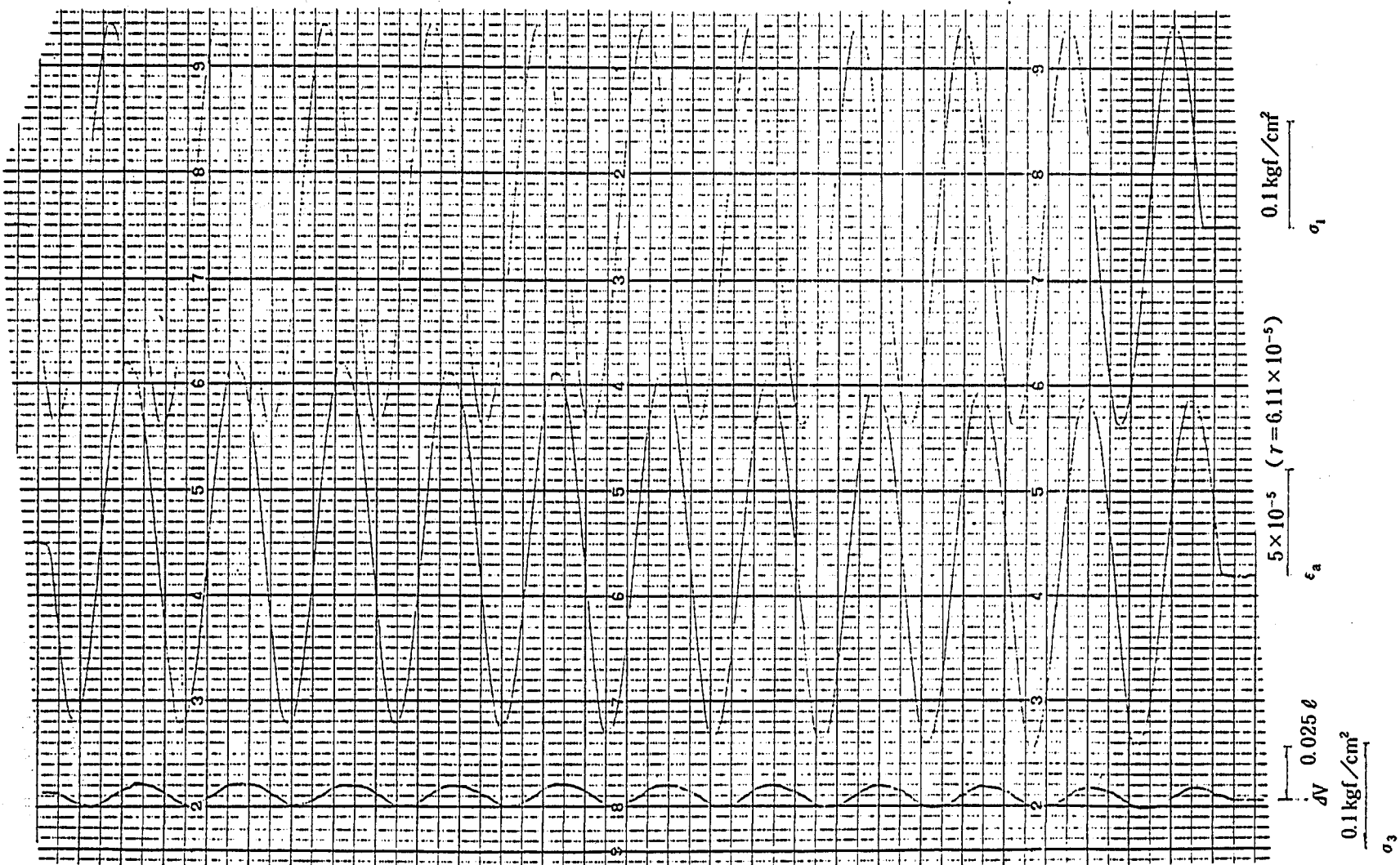


図 5.12 ペンレコーダーの出力結果 (中実A $e_o=0.514$, $\sigma_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\Delta\sigma=0.2 \text{ kgf/cm}^2$)

(2) せん断弾性定数G, 減衰定数h

① せん断ひずみの影響について

図 5.13～15は間隙比を変えて繰り返し試験を実施した時のせん断弾性定数 $G \sim \log r$ 関係を示したものである。粗粒材料の G はせん断ひずみの増加と共に減少しているが、豊浦砂のように急減するのではなく、なだらかに減少しているのが特徴である。また、初期せん断弾性定数 G_0 へ収束する傾向が見られる。

せん断ひずみ $r = 10^{-5}$ 時の G を外挿によって求め、 G_0 とし、 $G/G_0 \sim \log r$ 関係を図 5.16～18に示す。拘束圧による影響は中実B, C, Aの順に現われており、中実Bの場合にはほとんど影響なく、同一の $G/G_0 \sim \log r$ 曲線を示しているが、中実Aの場合には拘束圧の増加によって右側へシフトする傾向がある。また、 $G/G_0 = 0.5$ となるせん断ひずみは中実Aで $r = 4 \sim 6 \times 10^{-4}$ 、中実B, Cで $r = 6 \sim 8 \times 10^{-4}$ であり、密なほど右側へ移動するようである。豊浦砂と粗粒材料(中実B)の $G/G_0 \sim \log r$ 関係を比較したのが図 5.19である。豊浦砂の場合は $r = 10^{-4}$ を過ぎて急減しているのに対して、粗粒材料の場合はより小さなせん断ひずみレベルから減少傾向が現われている。

一方、減衰定数 h とせん断ひずみ r の関係を図 5.20～22に示す。 h はせん断ひずみが小さいほどバラツキが大きい、全体的な傾向としてせん断ひずみの増大によって h は増加している。供試体の密度によっても異なるが $r = 10^{-4}$ 時 $h = 3 \sim 5\%$ から、 $r = 10^{-3}$ 時には $h = 7 \sim 9\%$ と増加している。

② 拘束圧の影響について

せん断弾性定数 G と拘束圧 σ_c の関係を両対数グラフに示したのが図 5.23である。縦軸は間隙比の影響を除くため $\alpha = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ で除した G/α を用いている。この図から拘束圧の増加とともに G/α は直線的に増加していることがわかる。一般に G と σ_c の関係は次式で表わすことができる。

$$G \propto (\sigma_c)^{m(r)} \quad (5.2)$$

拘束圧 σ_c の指数 $m(r)$ は図中の直線の勾配を示し、せん断ひずみとの関係を図 5.24に示す。 $m(r)$ はせん断ひずみの増大と共に増加してゆき、 $r = 10^{-3}$ では $r = 10^{-5}$ に比べ約0.1～0.15程度増加している。また、試験ケース中実Cは中実A, Bに比べ、約0.2程度小さくなっており、間隙比の小さい方が $m(r)$ は小さく、せん断ひずみと同程度に間隙比の影響をうけることがわかった。

また、減衰定数 h は図 5.25に示すように拘束圧の増加によって h は減少しているが、 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係ほど拘束圧による影響は明瞭ではない。特に拘束圧 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以上の場合には、拘束圧による h の差は小さい。また、減衰定数 h の場合も $h \propto (\sigma_c)^{n(r)}$ と表わすことができ $n(r)$ とせん断ひずみ r の関係を図 5.26に示す。中実Cの場合にはせん断ひずみ r が小さいほど $n(r)$ は小さくなる傾向がある。

③ 間隙比の影響について

せん断弾性定数 G と圧密後間隙比 e_c の関係を図 5.27に示す。砂の場合、 G と e の関係は e が増大

するとGは減少すること、また $(2.17-e)^2/(1+e)$ なる関数形を適用して次式で表わしうることが知られている³³⁾。

$$G = K(r) \cdot \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{m(r)} \quad (5.3)$$

しかし、図 5.27を見ると上記の傾向とは異なり、中折れ現象を示している。また $G/(\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係を図 5.28に示し、図中に $(2.17-e)^2/(1+e)$ の関数形を示す。試験ケース中実A、中実Cは $(2.17-e)^2/(1+e)$ の関数形と良く近似しているが、中実Bは下回っており、せん断ひずみが小さいほど $(2.17-e)^2/(1+e)$ の関数形との差は大きくなる傾向を示している。以上のような試験結果にバラツキのある原因は供試体内の密度の不均一性とくに供試体上下端面付近の密度の不均一性が大きな原因であると考えられる。

また(5.3)式を適用してせん断ひずみ $r=10^{-5}$ 時のGを求める実験式を表わすと次のようになる。

表 5.7 $r=10^{-5}$ 時のGを求める実験式

試験ケース	e_c	Gを求める実験式
中 実 A	0.514	$G = 720 \frac{{}^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.66} {}^{*1}$
中 実 B	0.467	$G = 520 \frac{{}^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.77} {}^{*1}$
中 実 C	0.419	$G = 770 \frac{{}^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.54} {}^{*1}$

*1 $G/\sigma \sim \sigma_c$ 関係から求めた

*2 $\sigma_c = 4 \text{ kgf/cm}^2$ 時のGに(5.3)式を適用して求めた

また、減衰定数hと圧密後間隙比 e_c の関係を図 5.29に示す。各せん断ひずみにおいて多少の変動はあるが、試験誤差を考えると間隙比の影響はほとんどないと言える。

④ 繰り返し回数Nの影響について

最も間隙比の大きい中実Aについて繰り返し回数 $N=2, 5, 10$ のG、 $h \sim \log r$ 関係を図 5.30, 5.31に示す。せん断弾性定数Gの場合、一般に繰り返し回数の増大によってGは増加することが知られている。本研究の場合、Nの増加によってGは増加したり、減少したりまちまちである。また繰り返し回数NによるGの差は $N=10$ に対して最大 $\pm 5\%$ 程度であり、拘束圧が大きくなると差は増大する傾向にある。しかし、Gに対するNの影響は小さいと言える。

また、減衰定数hの場合、せん断ひずみが大きくなるとNの増加によってhは減少することがわかる。

⑤ せん断弾性定数Gと減衰定数hの関係について

前述したようにHardin Drnevich³⁹⁾はGとhの関係を次式で表わし、 e 、 σ_c 、 r の値によらない一義的なものであるとしている。

$$h = h_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right) \quad (5.4)$$

ここで、 $G_{\max}$: 最大せん断弾性定数、 $h_{\max}$: $G = 0$ のときの h

G と h の関係を図 5.32, 33 に示す。横軸には $r = 10^{-5}$ 時の G_0 で正規化した G/G_0 を用いている。図 5.32 は中実 A の場合であるが、 $G/G_0 < 0.8$ の場合には拘束圧による影響は見られず、直線的な分布をしている。また、図 5.33 は拘束圧 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合を示したものであるが、密度による影響は認められない。したがって、 G/G_0 又は h が求められれば、他方はこの関係を用いて推定することができる。

⑥ 動的ポアソン比について

体積変化 ΔV と軸ひずみ ϵ_a から求めた動的ポアソン比 ν_d とせん断ひずみ r の関係を図 5.34～36 に示す。 $r \leq 10^{-4}$ ではバラツキが大きい、 $r \geq 10^{-4}$ ではどのケースの場合もほぼ 0.15～0.20 の範囲に入っており、せん断ひずみによる影響はなく、ほぼ一定値を示している。また、拘束圧による影響が見られ、拘束圧が増加すると動的ポアソン比は減少している。

5.4.2 繰り返し中空ねじり単純せん断試験結果

繰り返し試験時の間隙比の変化を表 5.8 に示す。

表 5.8 繰り返し試験時の間隙比の変化

試験No.	初期乾燥 密度 r_d	初期間隙 比 e_0	圧 密 後 間 隙 比			
			$\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_c = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$
中空A-1	1.685	0.531	0.518	0.504	0.493	0.485
中空A-2	1.699	0.518	0.509	0.496	0.489	0.483
中空B-1	1.752	0.472	0.465	0.454	0.449	0.443
中空B-2	1.753	0.471	0.462	0.451	0.443	0.435
中空C-1	1.807	0.427	0.420	0.413	0.408	0.404
中空C-2	1.810	0.425	0.418	0.411	0.406	0.401

せん断弾性定数 G 、減衰定数 h は、せん断応力 τ ～せん断ひずみ r のヒステリシスカーブから下記の式を用いて算出した。なお、繰り返し载荷回数は 11 回とし、10 回目のデータを採用した。

なお、トルク計、ねじり角度計などの検出器の精度から考えると、データの信頼できるせん断ひずみ範囲は $r \geq 5 \times 10^{-5}$ であると考えられる。また、応力履歴の影響を考慮して繰り返し試験は $r = 10^{-3}$ 程度のせん断ひずみが生じるまでとした。しかし、拘束圧が大きくなると、 $r = 10^{-3}$ に達しない場合があるが、これはトルク伝達部のボルトのゆるみのため、大きなせん断応力を载荷することは不可能であるためである。しかし、現在では改善策を検討し、早急に改良する予定である。

*なお、図中の直線又は曲線は測定データに近似させたものである。
以後すべての図について同様である。

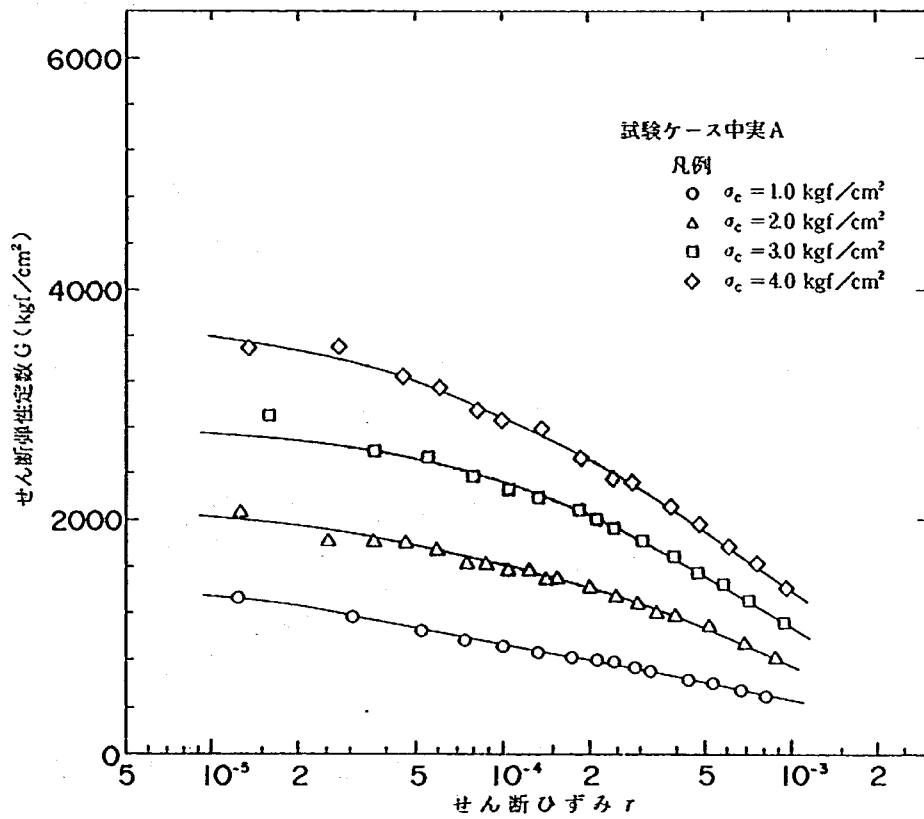


図 5.13 $G \sim \log r$ 関係 (a)

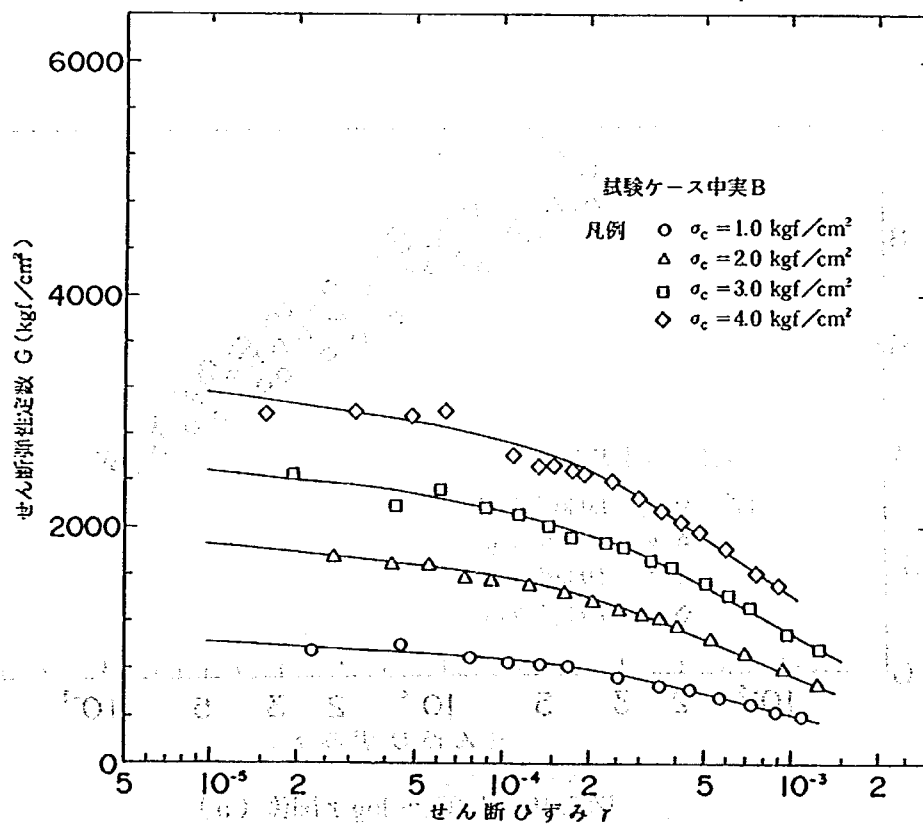


図 5.14 $G \sim \log r$ 関係 (b)

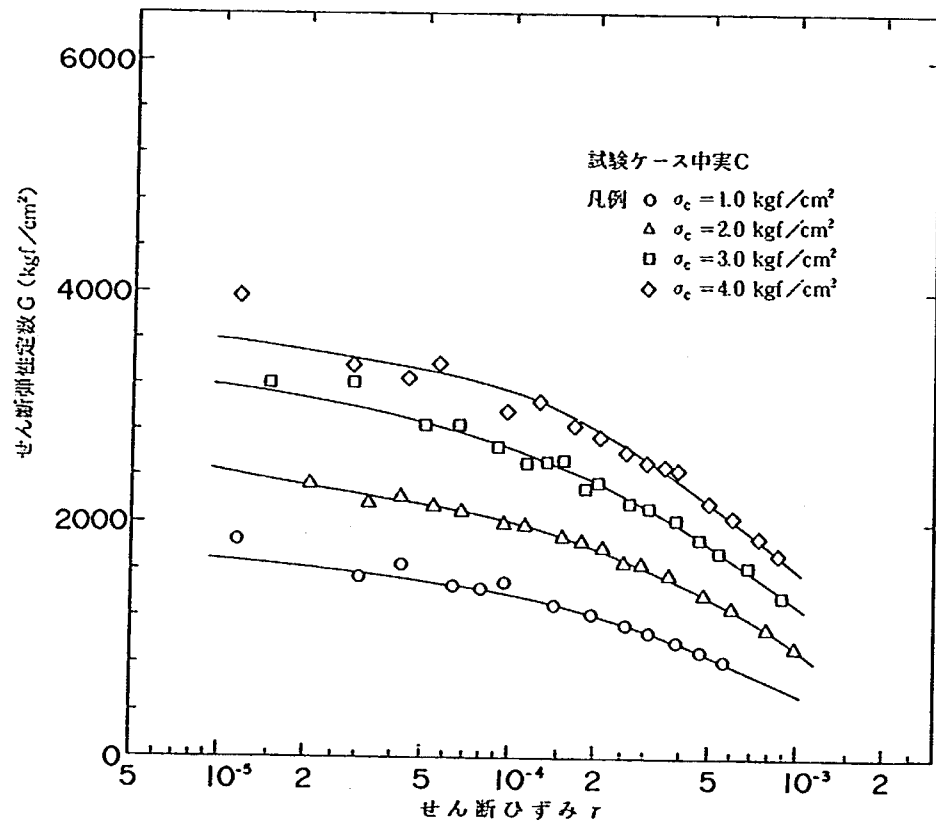


図 5.15 $G \sim \log r$ 関係 (c)

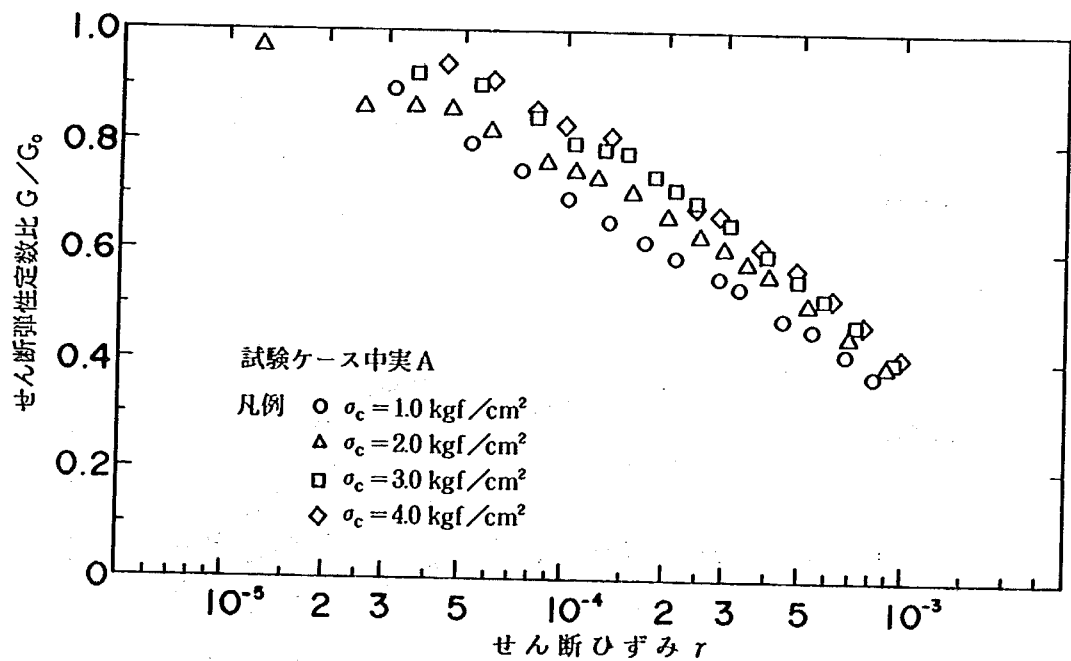


図 5.16 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (a)

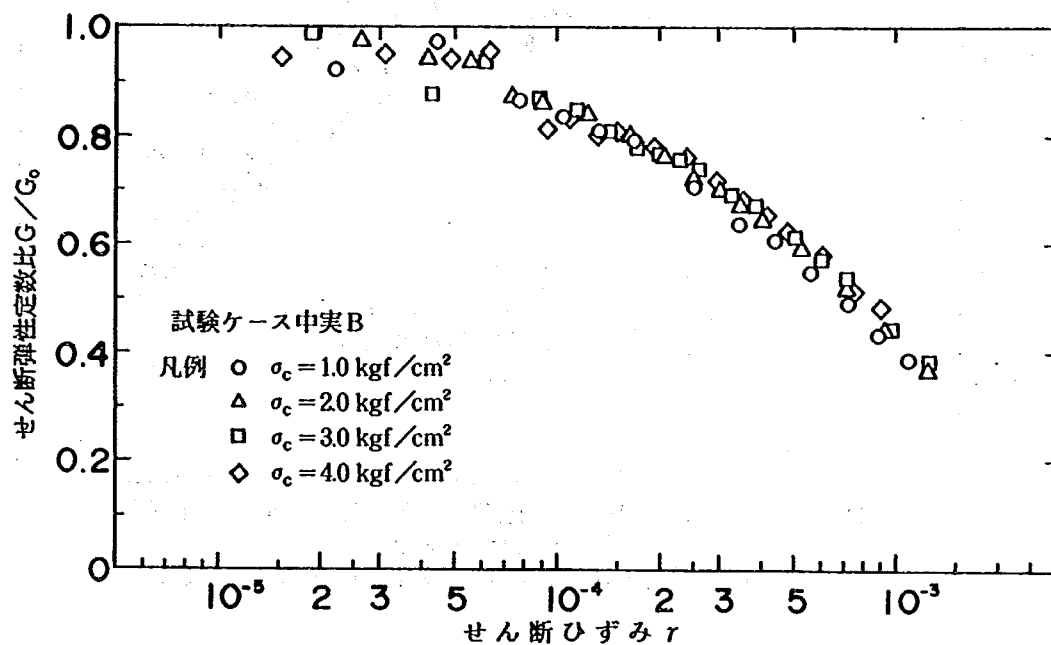


図 5.17 $G/G_0 \sim \log \gamma$ 関係 (b)

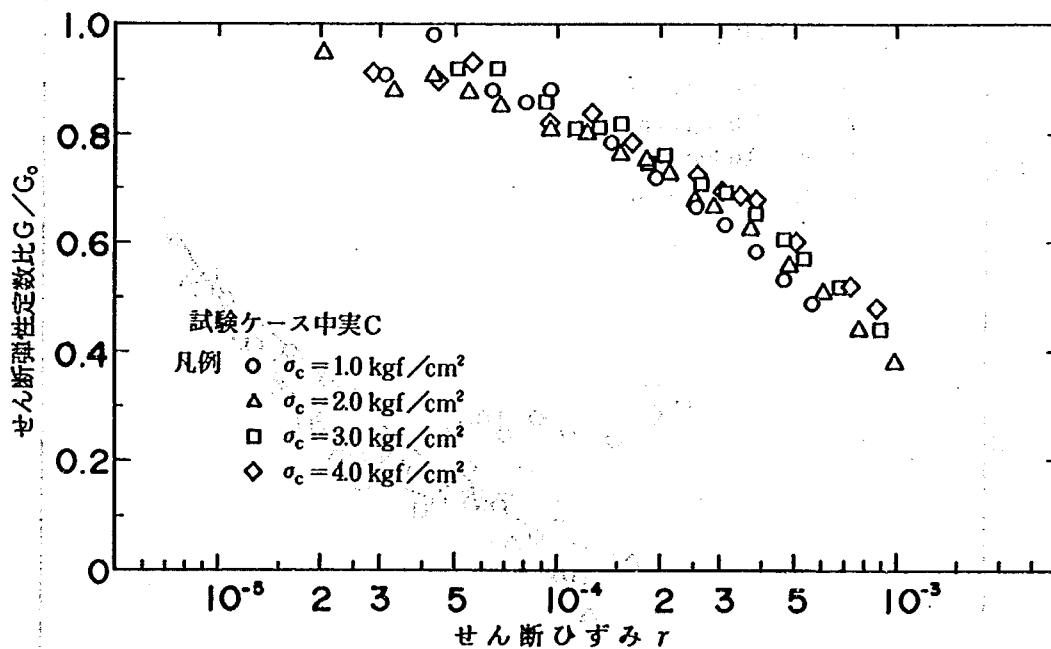


図 5.18 $G/G_0 \sim \log \gamma$ 関係 (c)

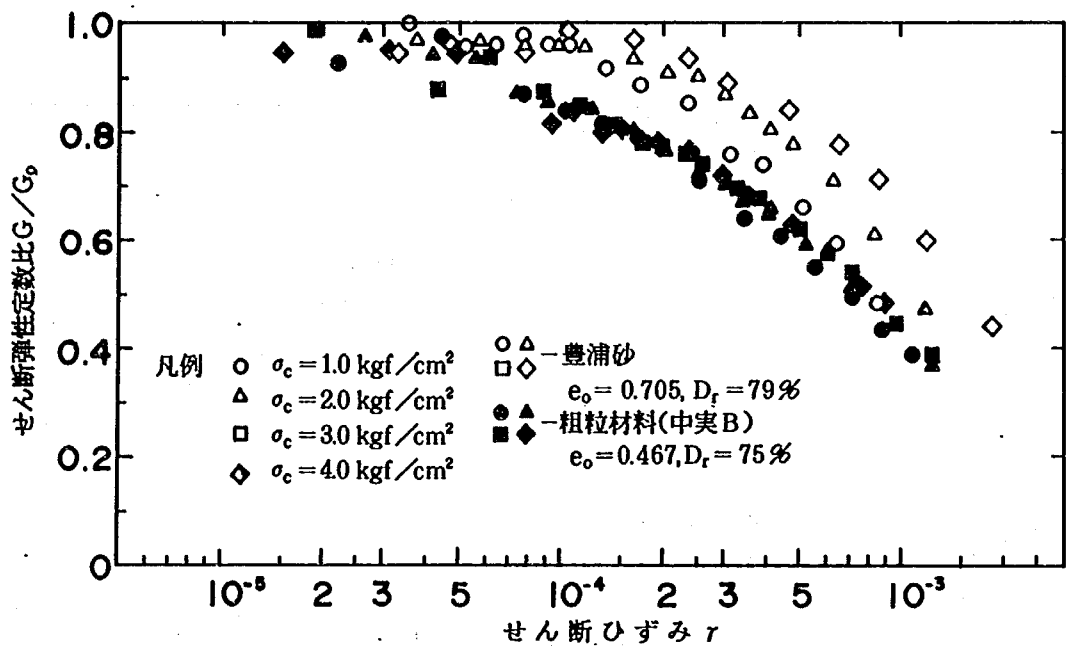


図 5.19 豊浦砂と粗粒材料の比較 ($G/G_0 \sim \log r$ 関係)

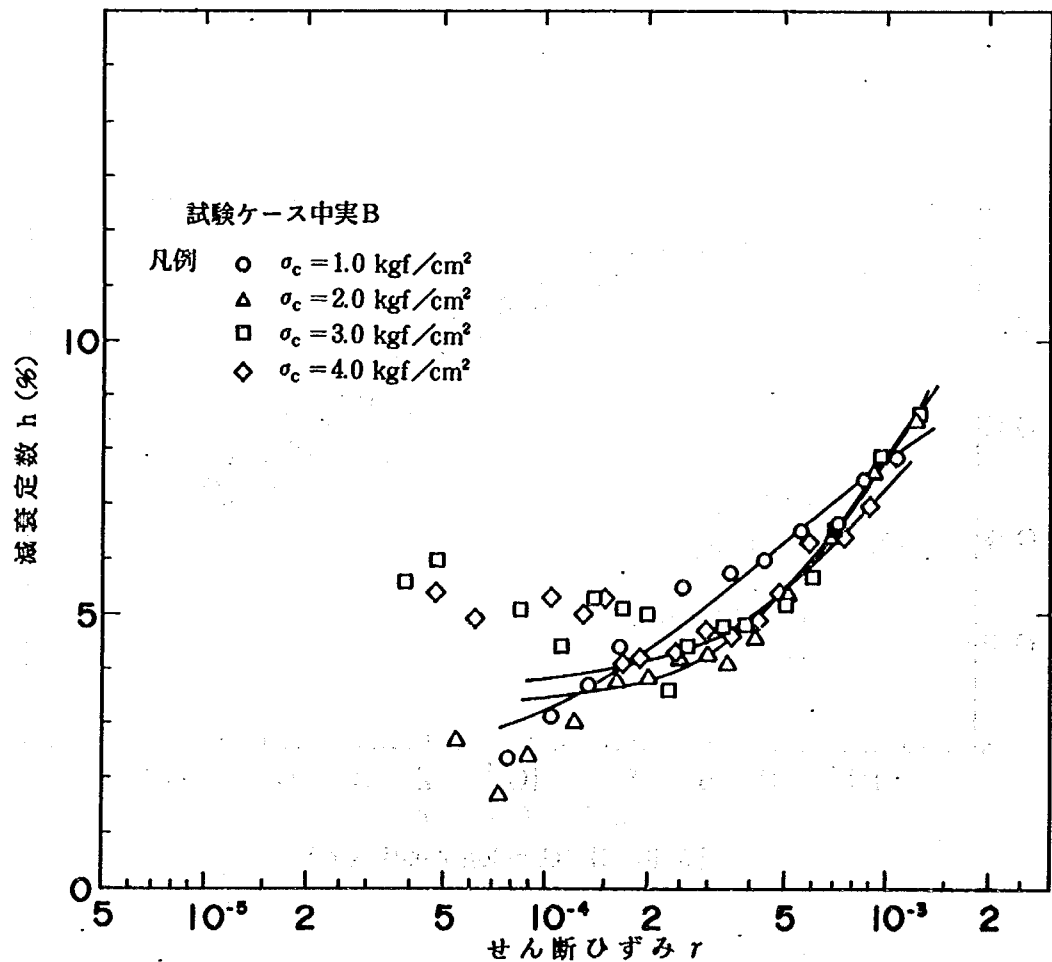


図 5.20 $h \sim \log r$ 関係 (a)

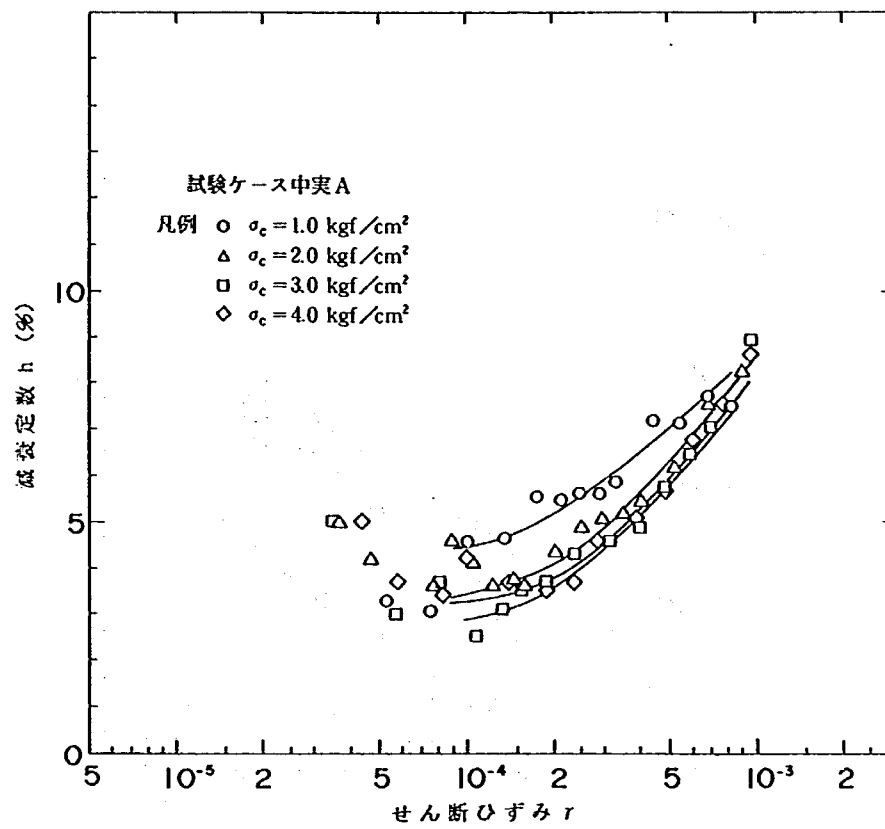


図 5.21 $h \sim \log r$ 関係 (b)

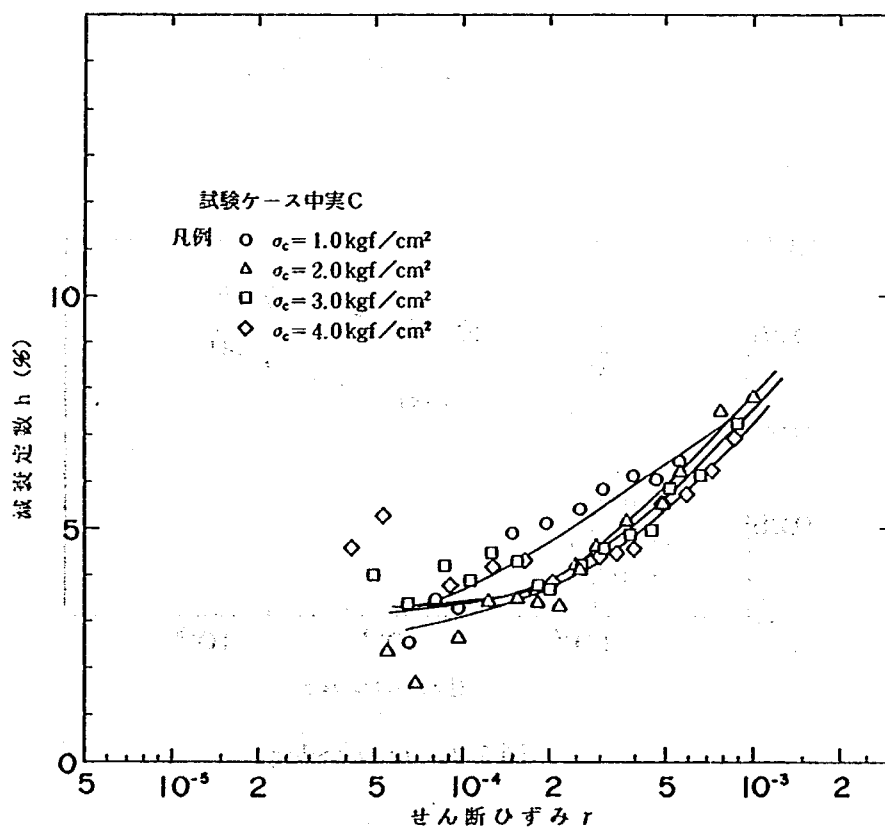


図 5.22 $h \sim \log r$ 関係 (c)

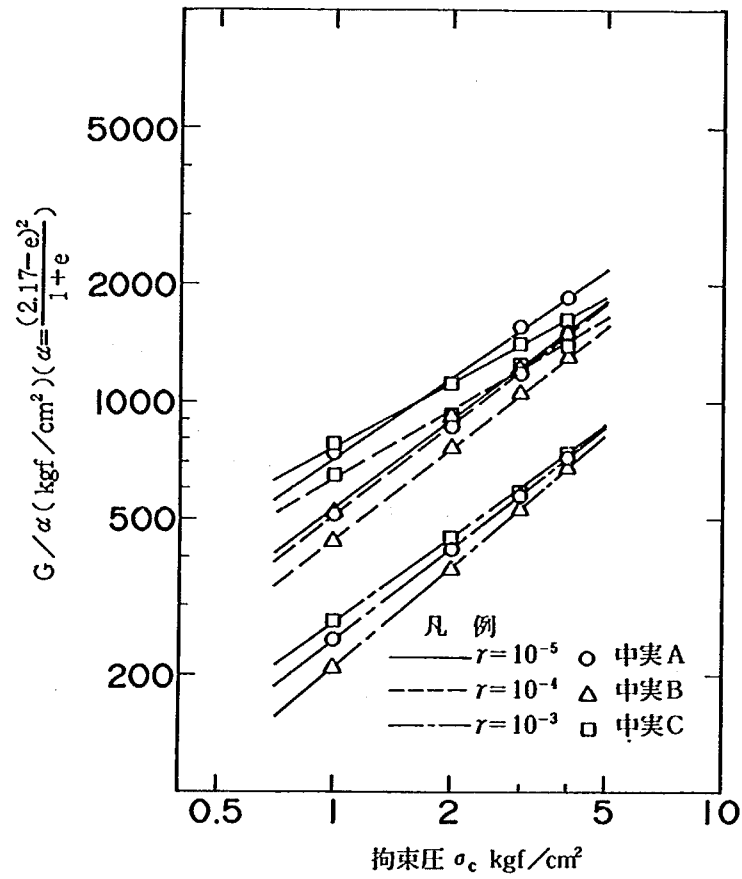


図 5.23 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係

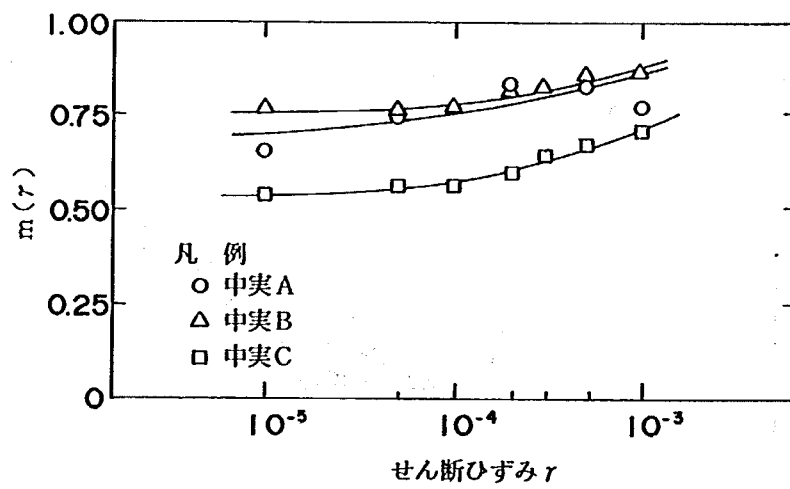


図 5.24 $m(r) \sim \log r$

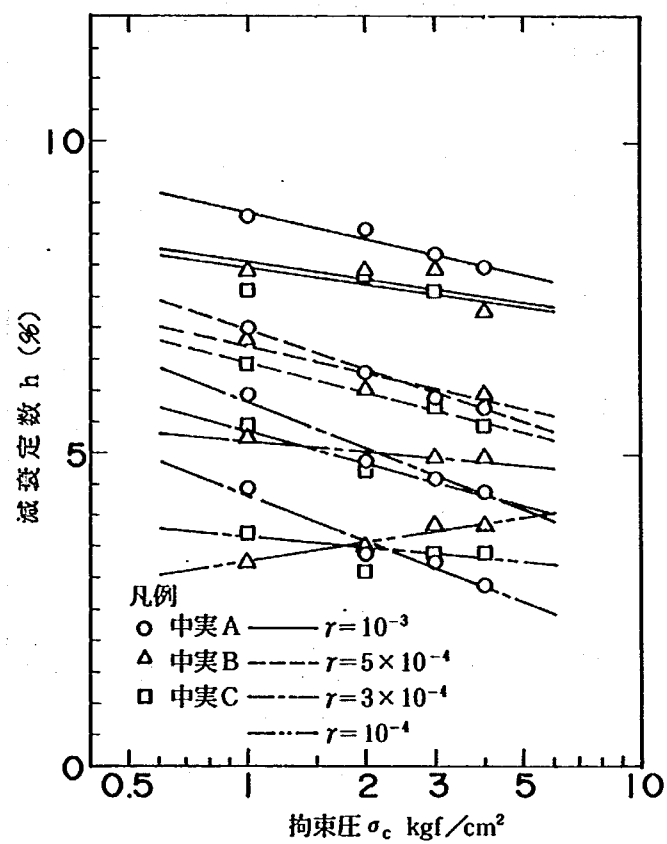


図 5.25 $h \sim \sigma_c$ 関係

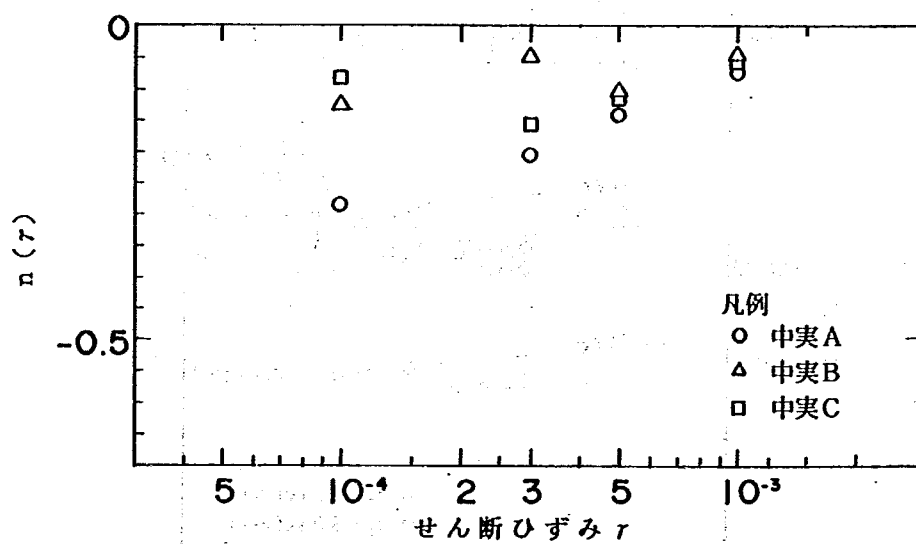


図 5.26 $n(r) \sim \log r$ 関係

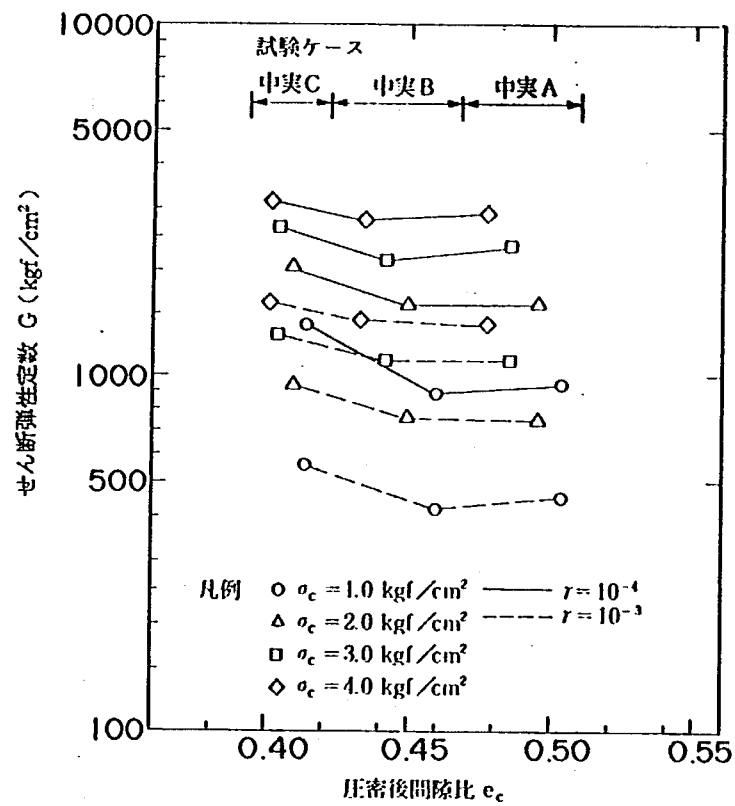


図 5.27 $G \sim e_c$ 関係

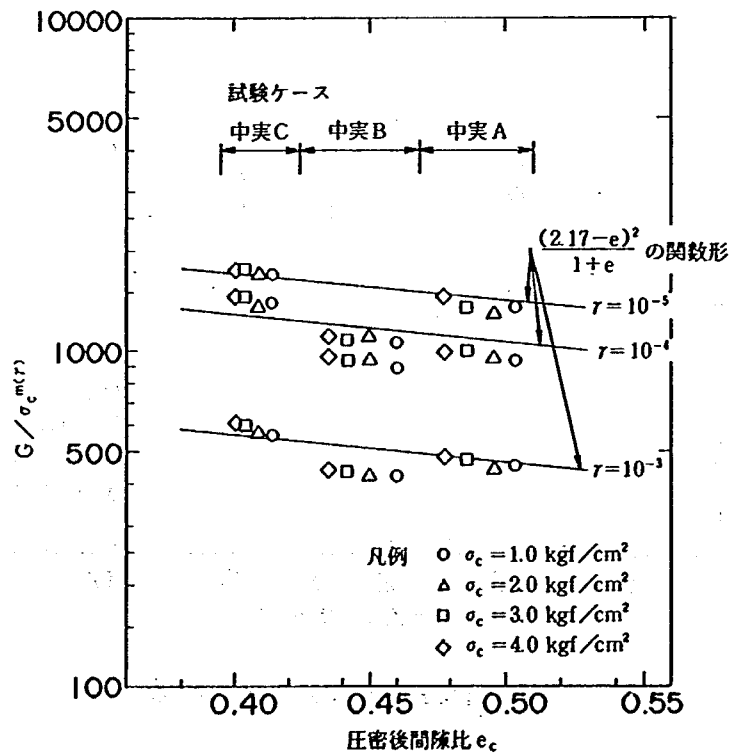


図 5.28 $G / (\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係

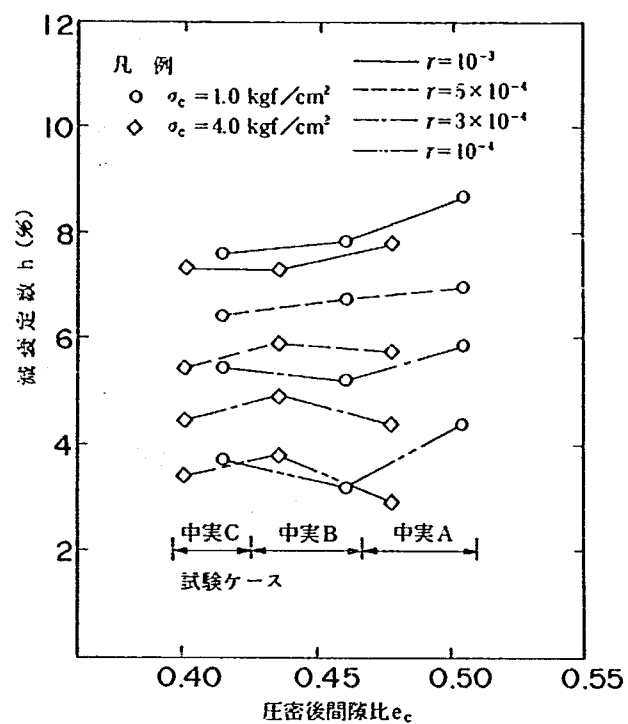


図 5.29 $h \sim e_c$ 関係

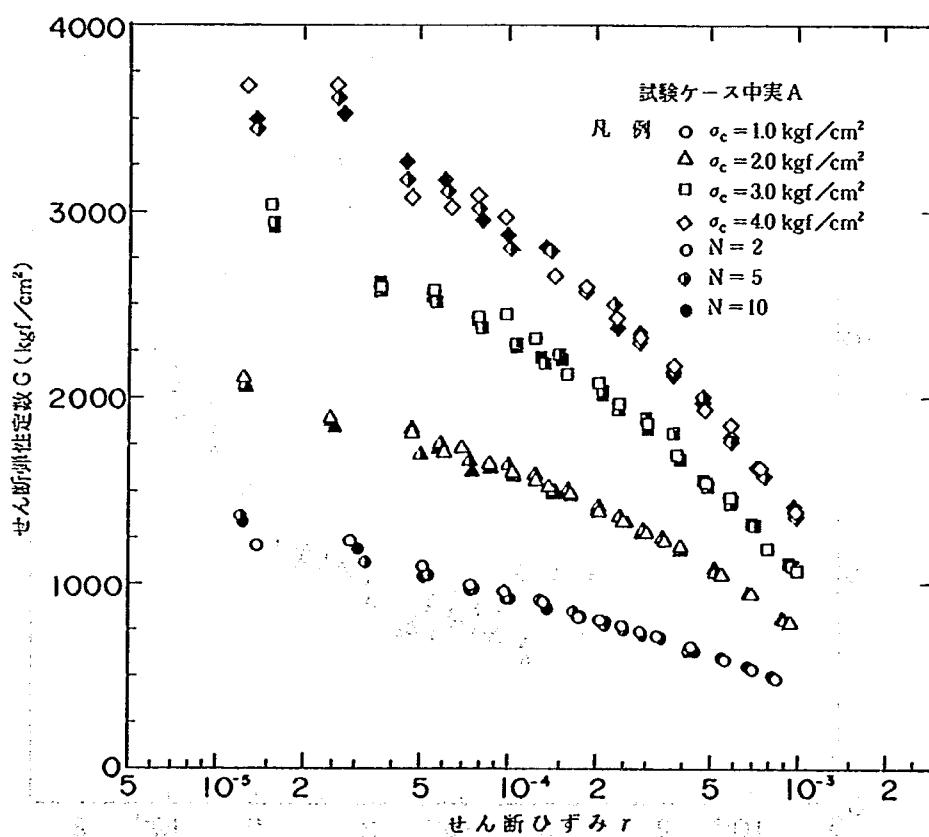


図 5.30 N による $G \sim \log r$ 関係の変化

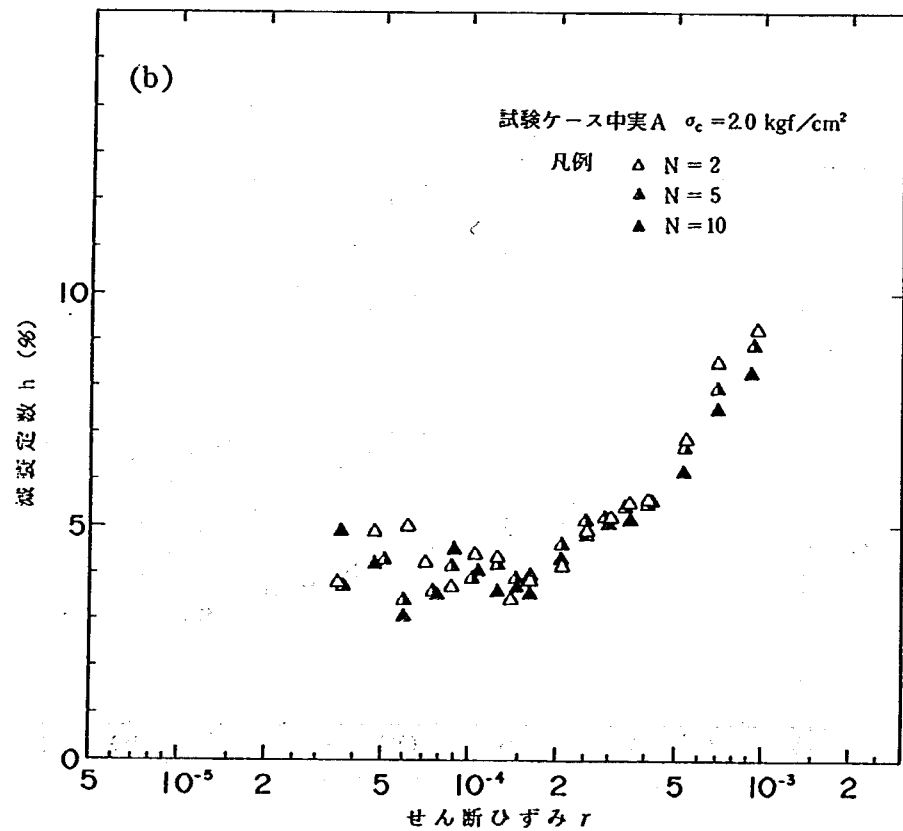
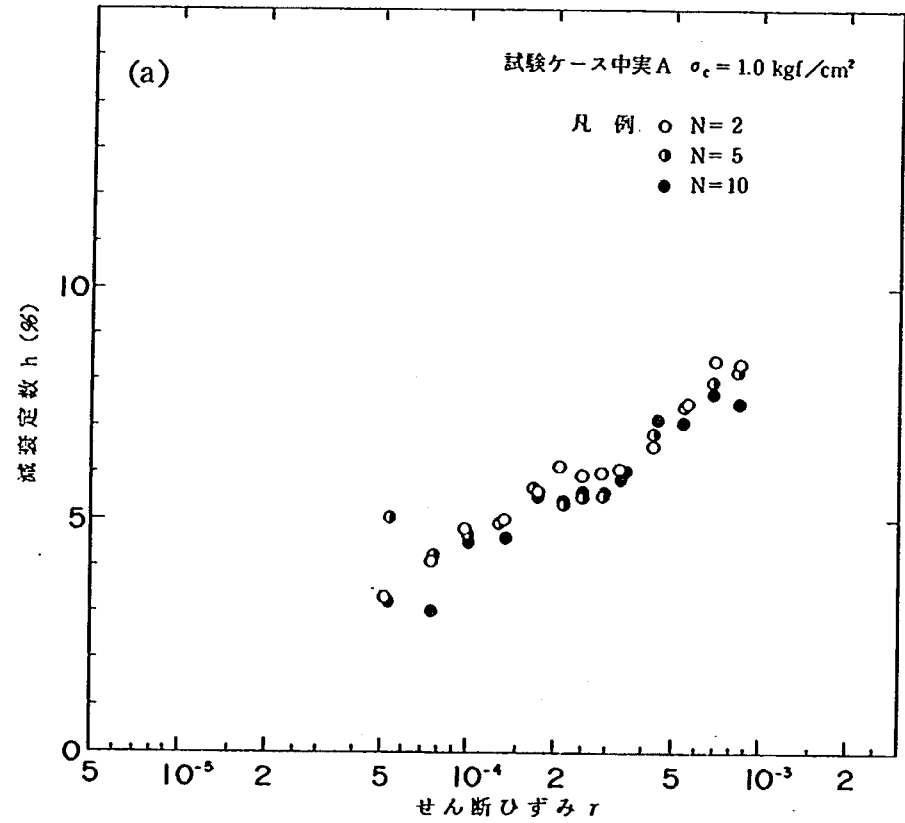


図 5.31 N による $h \sim \log r$ 関係の変化 (a), (b)

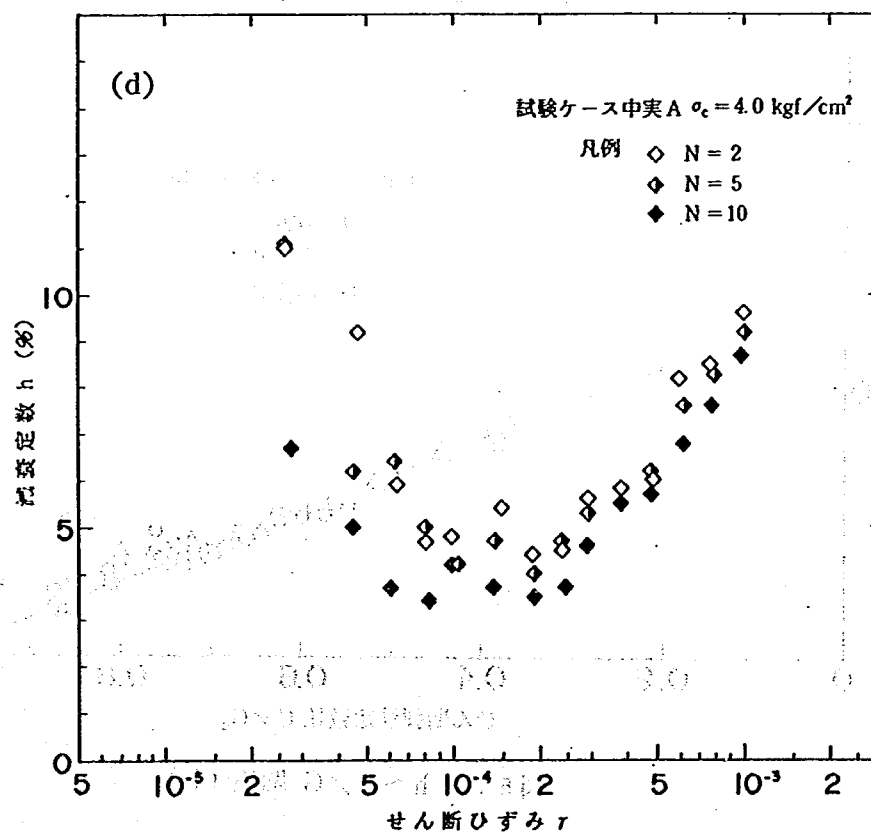
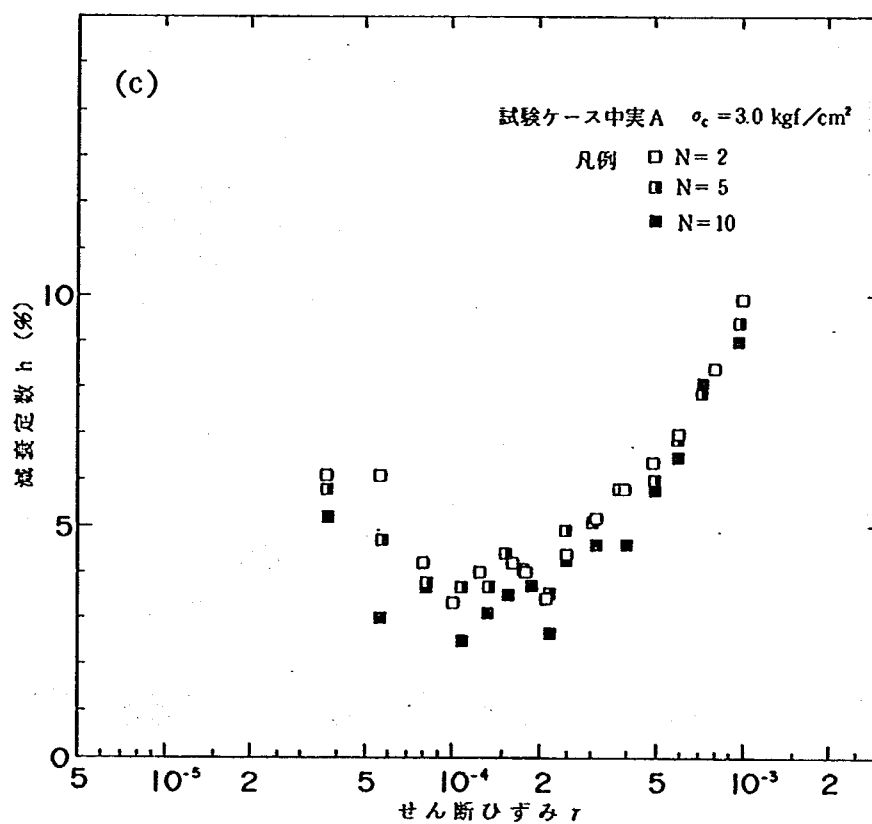


図 5.31 Nによる $h \sim \log r$ 関係の変化(c), (d)

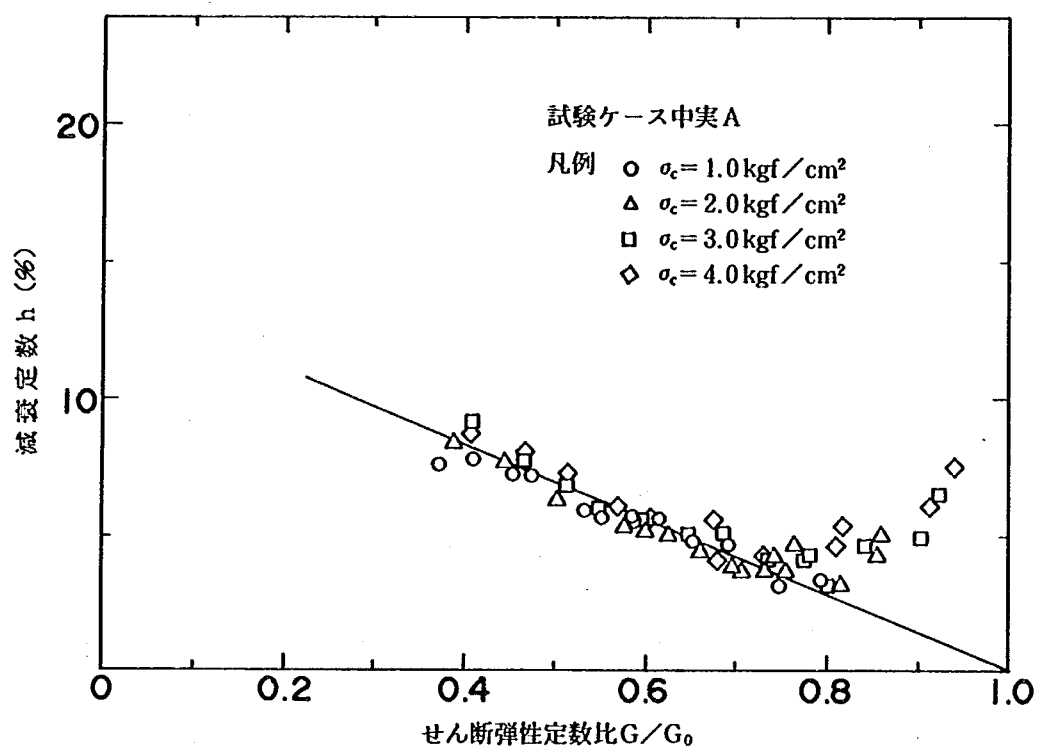


図 5.32 $h \sim G/G_0$ 関係 (a)

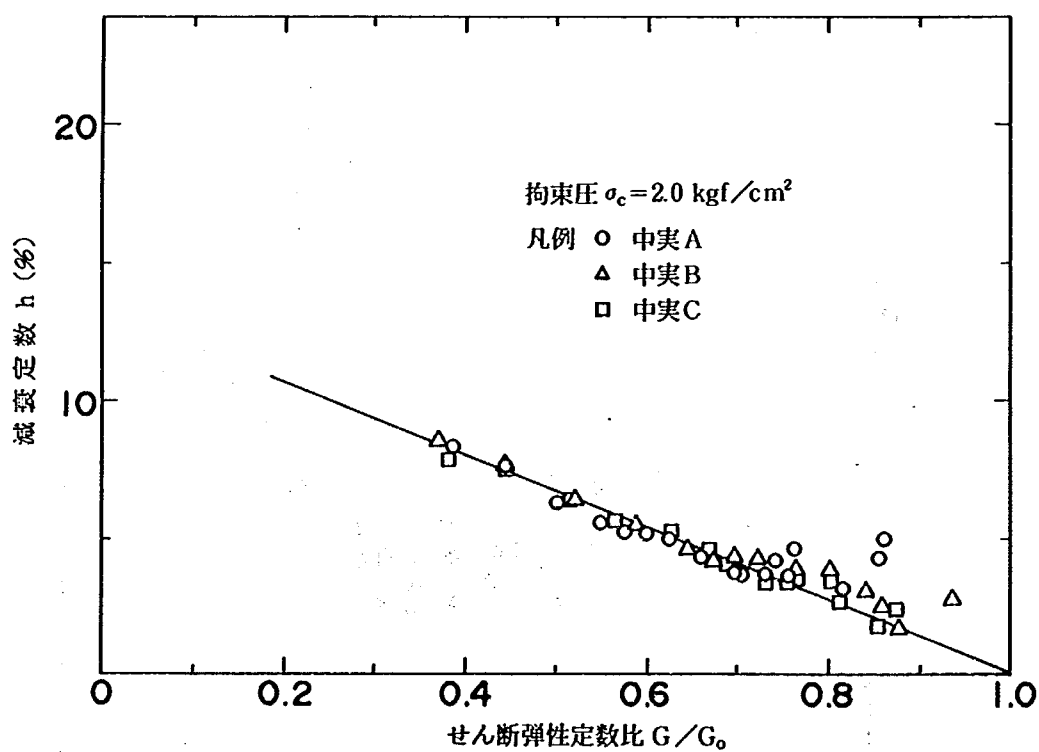


図 5.33 $h \sim G/G_0$ 関係 (b)

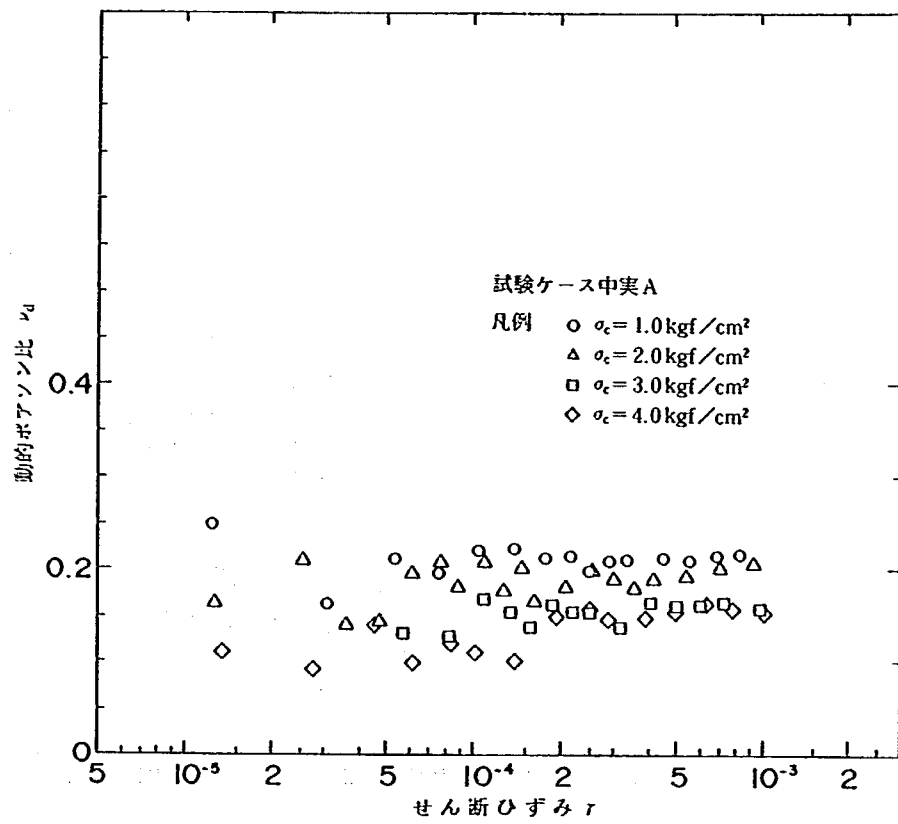


図 5.34 $\nu_d \sim \log r$ 関係 (a)

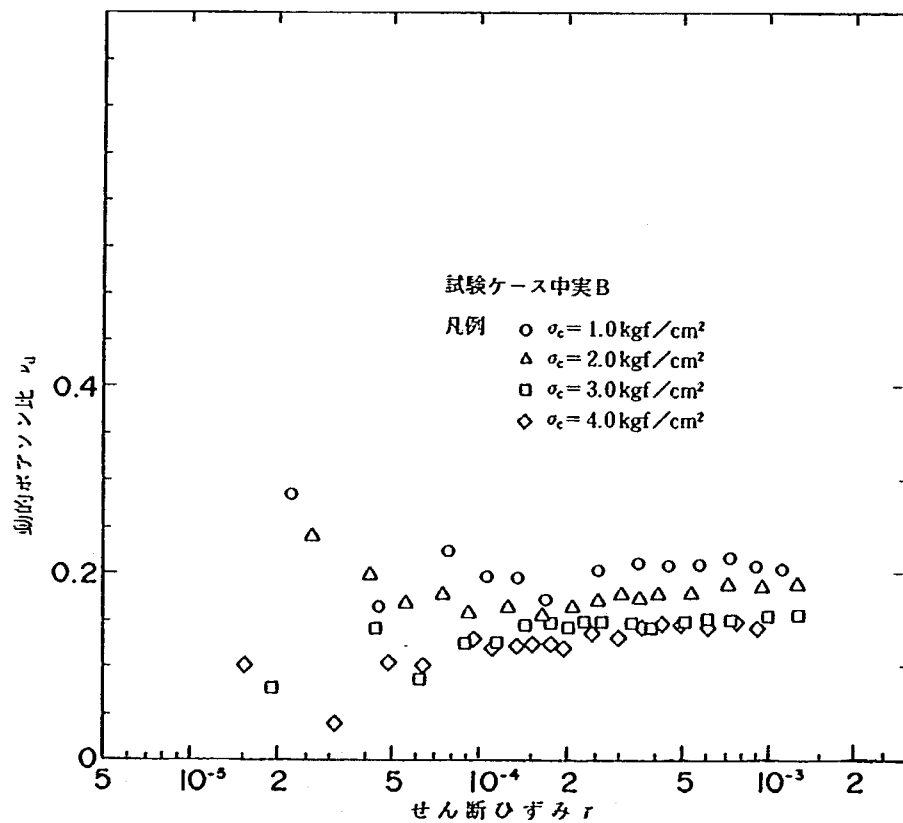


図 5.35 $\nu_d \sim \log r$ 関係 (b)

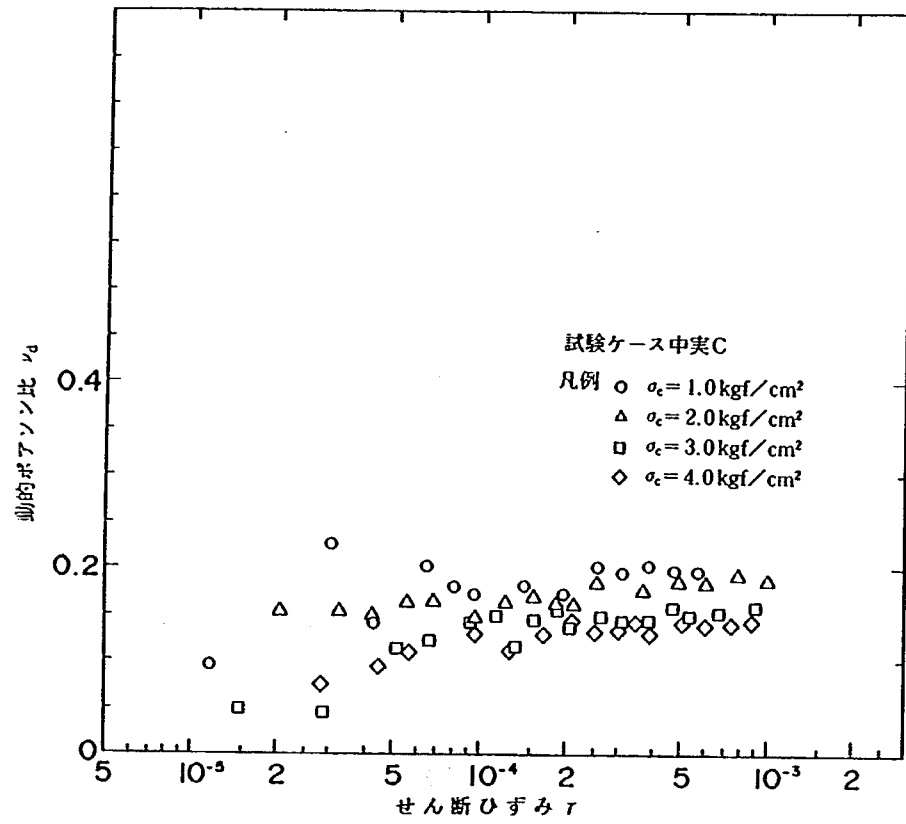
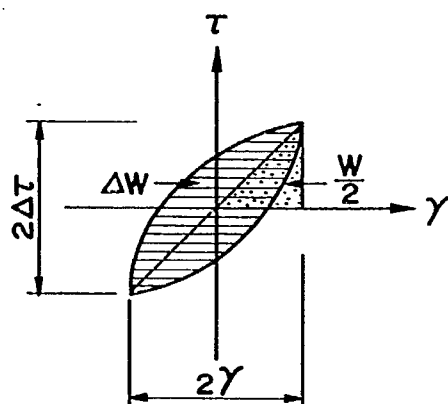


図 5.36 $\nu_d \sim \log r$ 関係 (c)

データ整理は、ディジタルイザ(Tektronix 4081 Graphic System)を用いて行った。詳細については参考資料を参照のこと。



$$G = \Delta \tau / \gamma \quad (4.14)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (4.15)$$

ただし、 $\Delta \tau$: せん断応力振幅
 γ : せん断ひずみ

(1) 典型的なヒステリシスカーブ

中空試験の典型的なヒステリシスカーブとペンレコーダーの出力結果を図 5.37～39 に示す。図 5.37 はねじり角度計によってせん断ひずみを求めた場合で、試験ケース中空 A-1, 中空 C-1 がこの方法によって行った。また、図 5.38 は差動トランスタイプの微小変位計を用いてせん断ひずみを求めた場合で、試験ケース中空 A-2, 中空 B-1, 2, 中空 C-2 がこの方法によって行った。

中空試験のヒステリシスカーブは、中実試験のように三日月形にはならず、カーブの勾配(ピークとピークを結んだ直線)に対して、ほぼ対称形となっている。これは、中実試験では圧縮側と伸張側で主応力比 σ_1/σ_3 が異なるのに対して、中空試験では主応力 σ_1/σ_3 は変わらず、主応力方向が回転ないし、逆転するのみであるためと考えられる。

ねじり角度計による方法の場合のヒステリシスカーブは電氣的なノイズのためと思われる波形の乱れがある。一方、微小変位計による方法の場合、 $r \leq 10^{-4}$ では変位の遅れ現象が見られ、減衰定数 h に影響を及ぼすものと思われる。この原因としては測定方法、供試体の作成方法、せん断試験方法などが考えられる。

図 5.39 はペンレコーダーの出力結果の一例である。繰り返し制御項目であるせん断応力の波形はほぼ上下対称の正弦波形である。しかし、中立軸付近で力の作用方向が変化するとき波形の乱れがあるが、これは、トルク伝達部のボルトのゆるみが主な原因であると考えられる。ねじり変位の波形はピーク付近で左右対称ではなく変位の遅れのあることがわかる。軸応力 σ_a 、側圧 σ_r は全く安定しており、一方軸ひずみ ϵ_a 、体積変化 ΔV は繰り返し回数の増加と共にそれぞれ圧縮方向及び収縮方向へ変化してゆき、試験ケース中空 A-2 の場合、試験前後では $\Delta \epsilon_a = 0.67\%$ 、 $\Delta V = 7.87\%$ 程度差がある。

(2) せん断弾性定数 G 、減衰定数 h

① せん断ひずみの影響について

中実試験の場合と同様に間隙比を変えて 2 回づつ実施した時のせん断弾性定数 $G \sim \log r$ 関係を

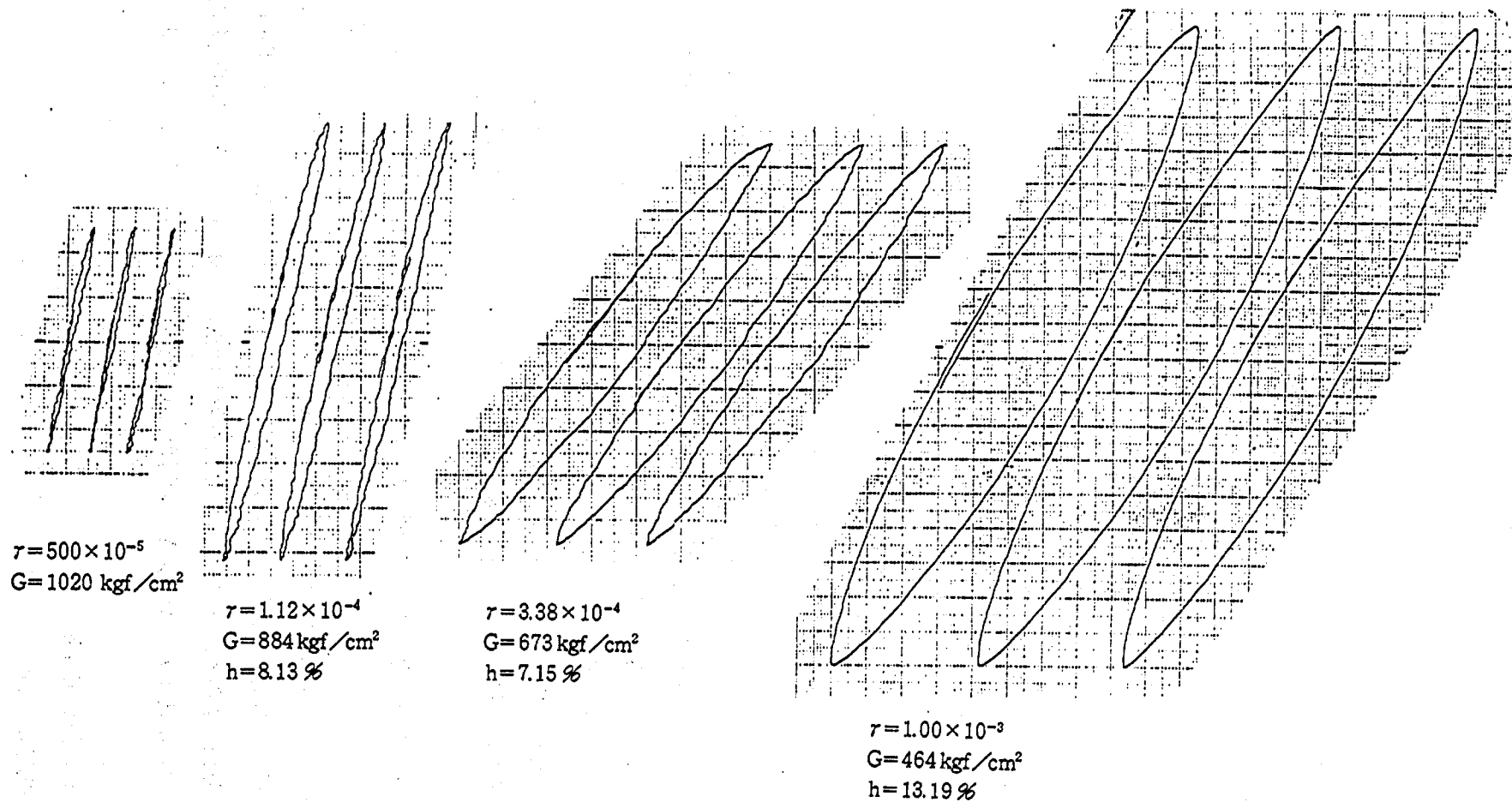


図 5.37 典型的なヒステリシスカーブ (a)

(ねじり角度計による方法, 中空 A-1, $e_0 = 0.531$, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

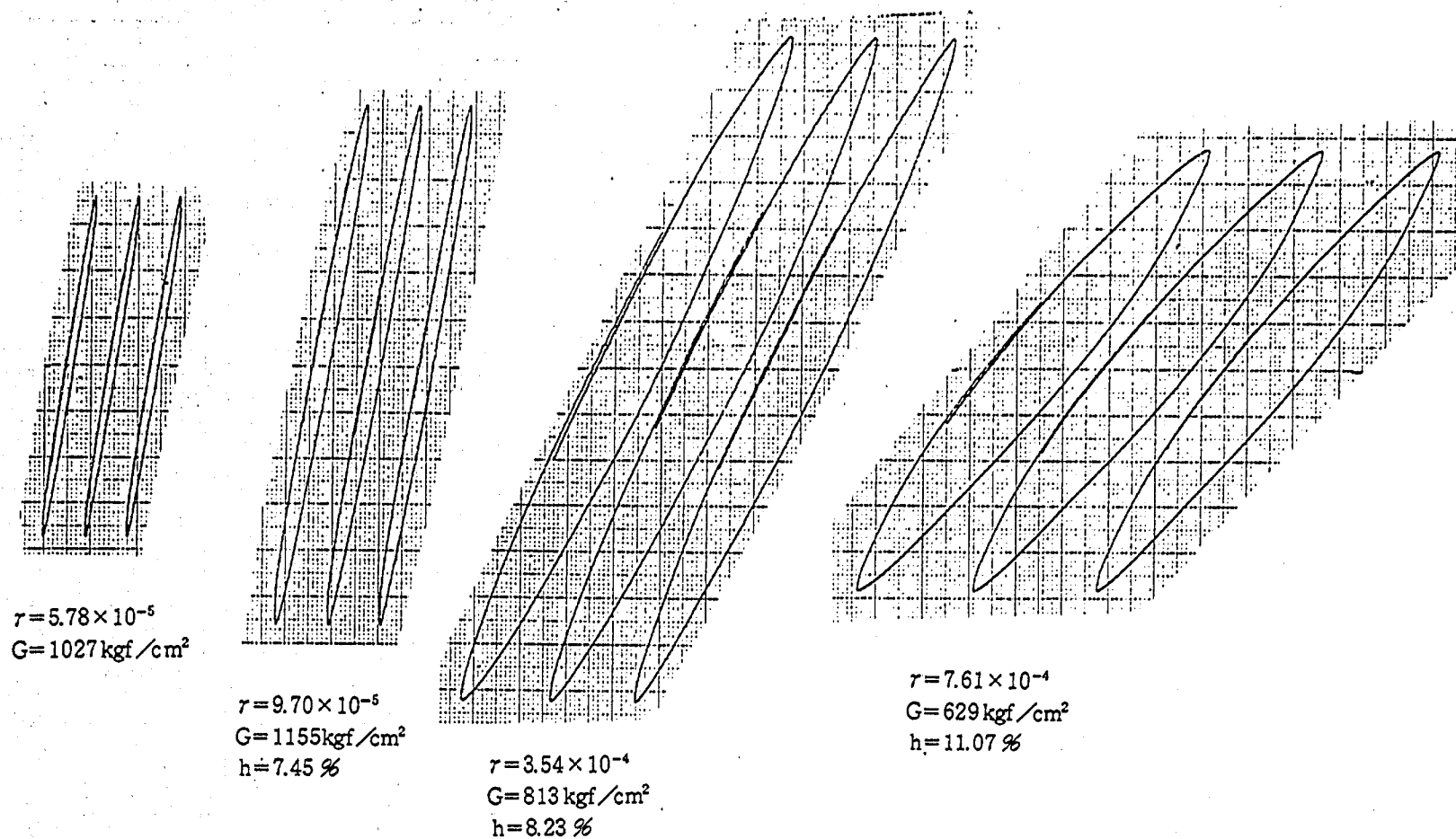


図 5.38 典型的なヒステリシスカーブ (b)

(微小変位計による方法, 中空 A-2, $e_0 = 0.518$, $\sigma_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

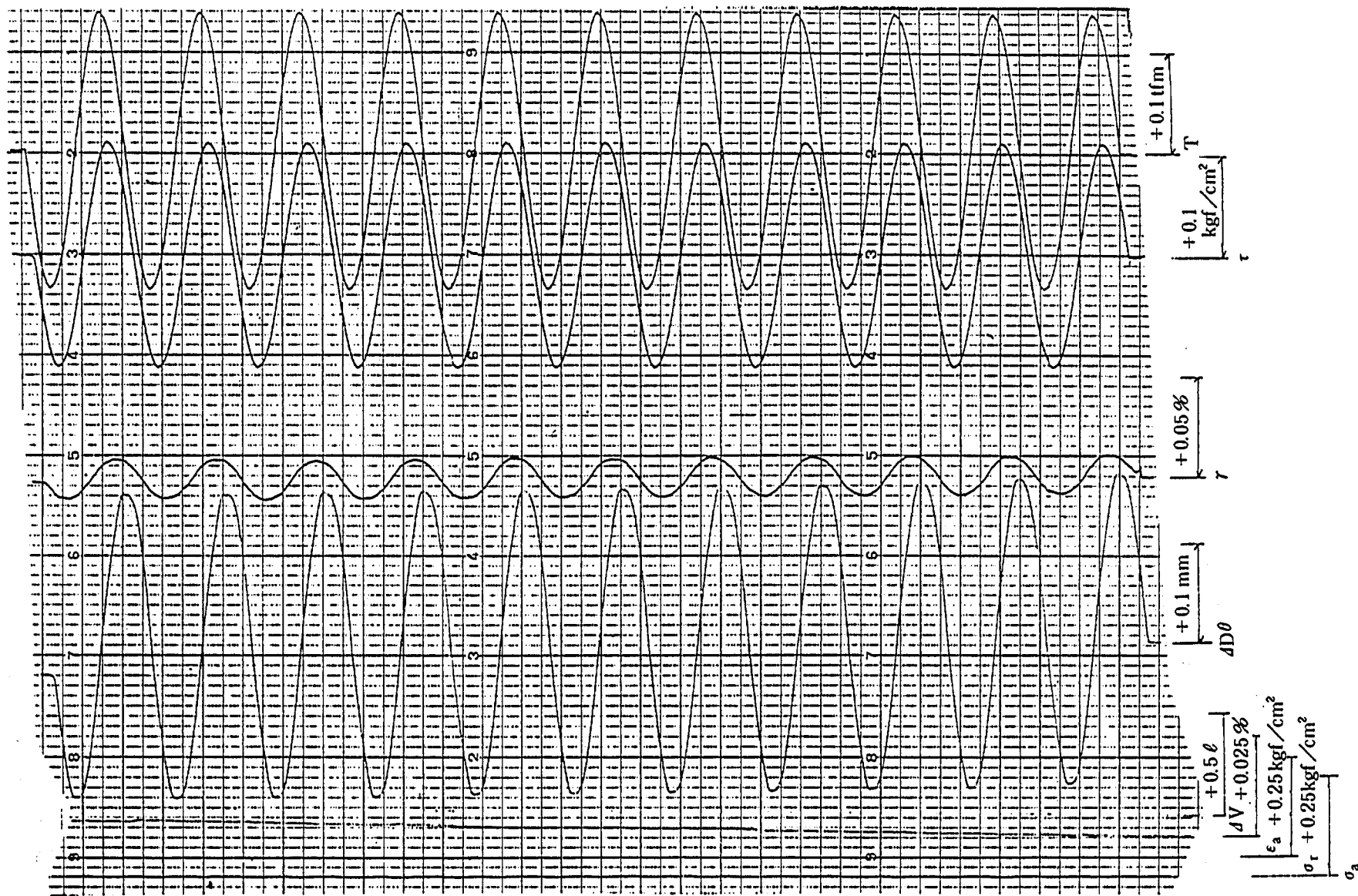


図 5.39 ペンレコーダーによる出力結果

(中空 A - 2, $e_o = 0.518$, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\Delta\tau = 0.12 \text{ kgf/cm}^2$)

図 5.40～42 に示す。 $G \sim \log r$ 曲線はどの試験ケースも直線的な分布を示し、せん断ひずみ r の小さい場合、初期せん断弾性定数 G_0 に収束する傾向は見られない。1 回目と 2 回目の試験結果を比較すると、中空 A の場合が最も差が大きく、その差は 2 回目の測定値に対して 10～20% ($\sigma_c = 4.0 \sim 1.0$ kgf/cm² のとき) 程度あり、拘束圧が大きくなると差は小さくなっている。また、中空 B、C の場合では差は小さく、5% 以内である。したがって、間隙比の小さい方が試験の再現性は良いと言える。間隙比の大きい場合には、供試体の作成方法による影響が現れ、供試体の密度が不均一になるためと思われる。特に中空試験の場合では、供試体の両端面に鋼製刃 (4.4 cm 角 - 4 本) を入れるために、均一な密度となるように供試体を作ることは非常にむずかしいため、試験の再現性が悪くなると考えられる。

また、 $G \sim \log r$ 曲線から $r = 10^{-5}$ 時の G を外挿して求め G_0 とし、 $G/G_0 \sim \log r$ 関係をプロットしたのが図 5.43～48 である。中空 A の場合は、拘束圧による影響を受けずに直線分布している。一般に G は $G = K(r)(2.17 - e)^2 / 1 + e \cdot (\sigma_c)^{m(r)}$ と表わすことができるのでせん断弾性定数比 G/G_0 は以下ようになる。

$$G/G_0 = \frac{K(r)}{K(r)_{G_0}} \cdot (\sigma_c)^{m(r) - m(r)_{G_0}} \quad (5.5)$$

したがって、拘束圧の影響を受けないということは $m(r) - m(r)_{G_0} = 0$ であり、 $m(r)$ がせん断ひずみによって変化せず、ほぼ一定値であることが推定できる。中空 B、C の場合には拘束圧の増加によって直線分布の勾配がわずかずつ小さくなっているのがわかる。 $G/G_0 = 0.5$ となるせん断ひずみは中空 A では $r = 3 \times 10^{-4}$ であるのに対して、中空 B、C で拘束圧の増加によって $r = 2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ へと変化している。

また、 $G \sim \log r$ 関係は $10^{-5} \leq r \leq 10^{-3}$ の範囲では直線分布であるので次式を用いて表わすことができる。

$$G = -A(\sigma_c, e) \cdot \log(r/10^{-6}) + B(\sigma_c, e) \quad (5.6)$$

係数 A、B は拘束圧、間隙比によって影響されるものと考えられ、係数 A は直線の勾配を、また係数 B は $r = 10^{-6}$ 時の G を示す。なお、上式は $r = 10^{-6}$ 時の G_0 を推定するものではなく、あくまで $10^{-5} \leq r \leq 10^{-3}$ の G を表わすものである。上式を適用して求めた係数 A、B を図 5.50～52 に示す。図 5.53 は係数 A、 $B \sim \sigma_c$ の関係を示したもので、かなり良い相関関係を示している。また、図 5.54 は係数 A、 $B \sim e$ の関係を示したもので、拘束圧が小さいほど右下りの傾向 (間隙比の影響が大きい) がある。

一方、減衰定数 $h \sim \log r$ 関係を図 5.55～57 に示す。 $h \sim \log r$ 曲線は、どの試験ケースの場合も下に凸型の分布を示し、最下点付近のせん断ひずみは $r = 2 \times 10^{-4}$ 前後である。砂の場合の一般的な $h \sim \log r$ 曲線はせん断ひずみの減少と共に h も低下し、ある値に収束するが、本試験結果の場合には異なり、せん断ひずみが小さくなると再び h は増加する傾向を示している。この原因については、電中研の国生ら²⁾は接触型変位計を用いると上記のような下に凸型のカーブを示すと報告している。

本試験結果の場合、試験ケースA-1, C-1は非接触タイプのねじり角度計を用い、その他の試験ケースは接触タイプの変位計を用いているが、両方の場合について同様の現象が現われていることから接触変位計を用いたことだけが主な原因ではなさそうである。その他考えられる原因としては材料特性、せん断試験方法、測定方法、供試体の作成方法などが挙げられる。詳しくは5.4.3中空、中実の比較のところで述べることにする。

② 拘束圧の影響について

間隙比の影響を除くため $\alpha = (2.17 - e)^2 / 1 + e$ で除した G/α と拘束圧 σ_c の関係を両対数グラフ上にプロットしたのが図5.58~60である。拘束圧が増加するのに従って、直線的に G/α は増大しており、試験の再現性の良い中空B, Cの場合は1回目と2回目の差は小さいが、中空Aではやや差が大きいようである。また G と拘束圧の関係は $G \propto (\sigma_c)^{m(r)}$ で表わすことができ、図中の直線の勾配である $m(r)$ とせん断ひずみの関係を図5.61に示す。この図から間隙比が小さいほど、 $m(r)$ は小さく、中空Cの場合には豊浦砂の場合と同程度の $m(r) \approx 0.5$ に収束する傾向がある。また、中空Aの場合はせん断ひずみによる $m(r)$ の変化は小さく、 $G/G_0 \sim \log r$ 曲線の傾向とも一致するようである。

また、減衰定数 h と拘束圧 σ_c の関係を図5.62~64に示す。試験ケースA-1を除いて他の試験ケースの場合は拘束圧の増加によって h は減少する傾向が見られるが、 G/α と σ_c の関係ほど明瞭ではない。拘束圧 $\sigma_c = 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の h の差は約2%程度と大きく、 $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ をこえると、 h の差は約1%以下となり、拘束圧による影響は小さい。

③ 間隙比の影響について

せん断弾性定数 G と圧密後間隙比 e_c の関係を図5.65, 5.66に示す。中空Bの場合には拘束圧によってやや大きいところもあるが、 $G \sim e_c$ 関係の全体的な傾向として間隙比の増加によって G は減少している。特に拘束圧の小さい方がその傾向は明瞭に表われているようである。砂の場合の G と e の関係は $(2.17 - e)^2 / 1 + e$ の関数形を適用して次式で表わしうることが知られている。

$$G = K(r) \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma_c)^{m(r)} \quad (5.7)$$

図5.67, 68は $G/(\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ の関係を示し、図中に $(2.17 - e)^2 / 1 + e$ の関数形を示している。中空B, 中空Cは良く近似しているが、中空Aは若干下回っており、せん断ひずみが大きくなると $(2.17 - e)^2 / 1 + e$ の関数形との差は小さくなっている。

また、せん断ひずみ $r = 10^{-5}$ 時の G を上記の実験式で表わすと表5.9に示すとおりである。

減衰定数 h と圧密後間隙比 e_c の関係を図5.69, 5.70に示す。 h の場合は試験の再現性が悪いためバラツキが大きく、 h と e_c の関係においても一定の傾向はつかみにくい。

④ 繰返し回数の影響について

最も間隙比の大きい試験ケース中空A-1について繰返し回数 $N = 2, 5, 10$ の $G, h \sim \log r$ 関係を図5.71, 72に示す。繰返し回数 N が増えても G はほとんど変化せず、 N による G の差は $N =$

10に対して2～3%以内にとどまっている。また、NによるGの差はせん断ひずみが小さいほど、また、拘束圧が大きいほど大きくなる傾向がある。これはヒステリシスカブにおいてGが大きいほど縦軸に対する横軸の比率が小さくなるためデータ整理上の読み取り誤差の影響が大きくなるのではないと思われる。

また、減衰定数hの場合は、せん断ひずみが小さい($r=10^{-4}$ 付近)とNによるhの差は最大2～3%と大きい、せん断ひずみが $r=3\sim4\times10^{-4}$ 以上になると、Nによるhの差は小さくなり約1%程度である。この原因としては、供試体の作成方法や、上下端面の鋼製刃の影響あるいは検出器の精度などが考えられるが、減衰定数はバラツキが大きく実際のところは良くわからないのが実状である。

表 5.9 $r=10^{-5}$ 時のGを求める実験式

試験ケース	e_0	Gを求める実験式
中空 A	0.518～0.531	$G = 850 \frac{^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.80} \text{ } ^{*1}$
中空 B	0.471～0.472	$G = 1080 \frac{^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.60} \text{ } ^{*1}$
中空 C	0.425～0.427	$G = 1175 \frac{^{*2}(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_c)^{0.50} \text{ } ^{*1}$

*1 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係から求めた。

*2 $\sigma_c = 4 \text{ kgf/cm}^2$ 時のGに(5.7)式を適用して求めた。

⑤ せん断弾性定数Gと減衰定数hの関係について

せん断弾性定数比 G/G_0 と減衰定数hの関係を図 5.73, 74に示す。前述したようにHardin・Drnevich³⁵⁾はGとhの関係は e , r , σ_c の値によらない一義的なもので次式で表わせるとしている。

$$h = h_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (5.8)$$

ここで、 $G_{\max}$: 最大せん断弾性定数, $h_{\max}$: $G=0$ のときのh

中実試験では $G/G_0 < 0.8$ の場合、ほぼ直線分布を示していたが、中空試験では下に凸型の分布を示している。これは、 $h \sim \log r$ 関係でせん断ひずみが小さくなると(G/G_0 は大きくなる)hは増加するためである。また、 $G/G_0 \sim h$ 関係は中実試験と同様に拘束圧および間隙比による影響は小さいようである。

(3) 繰り返し試験後の破砕率

試験ケース中空C-2($e_0 = 0.425$)の繰り返し試験後の試料を用いて破砕率を求めるための粒度試験を実施した。なお、破砕率は試験前の粒度分布と試験後の粒度分布の差を求め、Marsal の定義⁴⁰⁾により表現した。

粒度試験結果を図 5.75に示す。繰り返し試験後の破砕率は±4.3%となり、締固め試験後の破砕率±4.8%とほとんど変らなかった。したがって、繰り返し試験による試料の破砕はほとんどが供

試体作成時の締固めによるもので、繰返しせん断試験による試料の破碎はなかったと言える。

試験ケース名 中空-C-2

岩 種 安山岩

締固パターン 電動ランマー締固め($e_0=0.425$)

平均比重 2.579

粒 度 $U_c = 7$

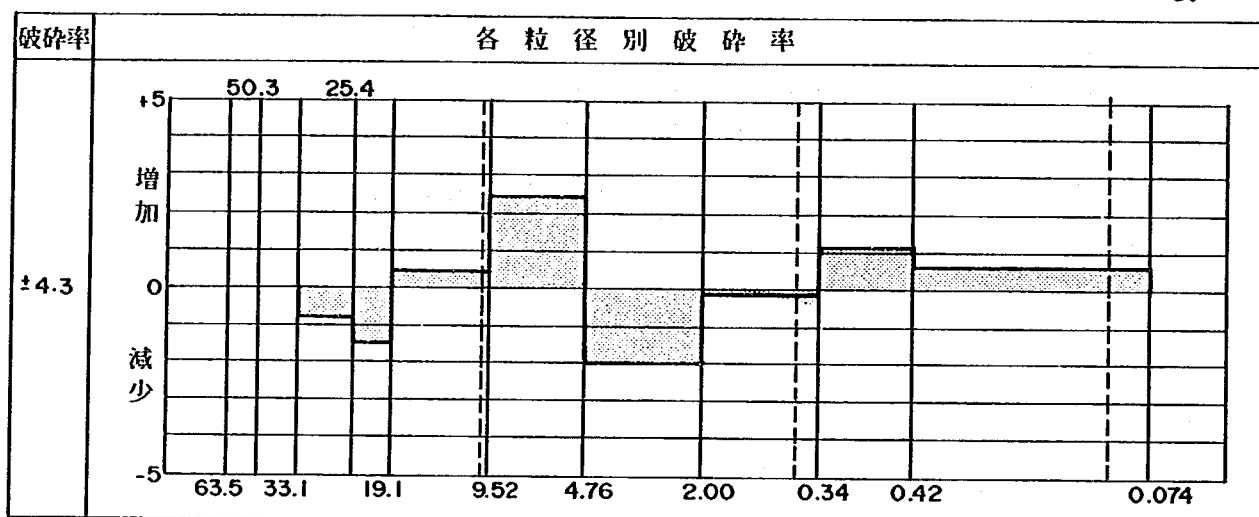


図 5.75 粒度試験結果図

5.4.3 中実および中空試験結果の比較

試験結果を比較する前に、試験方法、条件について共通点及び相異点を明確にしておく必要がある。

〔共通点〕

○同一の試料(粗粒材料, 安山岩)を用いた。

$$\bar{G}_b = 2.579, \bar{w} = 2.56\%, \bar{Q} = 3.69\%$$

○同一の最大粒径, 粒度分布とした。

$$U_c = 7, D_{\max} = 38.1 \text{ mm}, D_{\min} = 0.84 \text{ mm}$$

$$e_{\max} = 0.720, e_{\min} = 0.383 \text{ (D 40 のモールドによる締固め試験結果より)}$$

○試料の目標間隙比は $e_0 = 0.52, 0.47, 0.42$ とした。

○締固め方法は電動ランマーによって行い, 層数は 6 層とした。

○試験拘束圧は $\sigma_c = 1, 2, 3, 4 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

○振幅波形は周波数 $f = 0.2 \text{ Hz}$ の正弦波とした。

〔相異点〕

○供試体寸法が異なる。

中空供試体 D 80 — 40 × H 80 cm

中実供試体 D 40 × H 80 cm

※なお、図中の直線は測定データに近似させたものである。
以後すべての図について同様である。

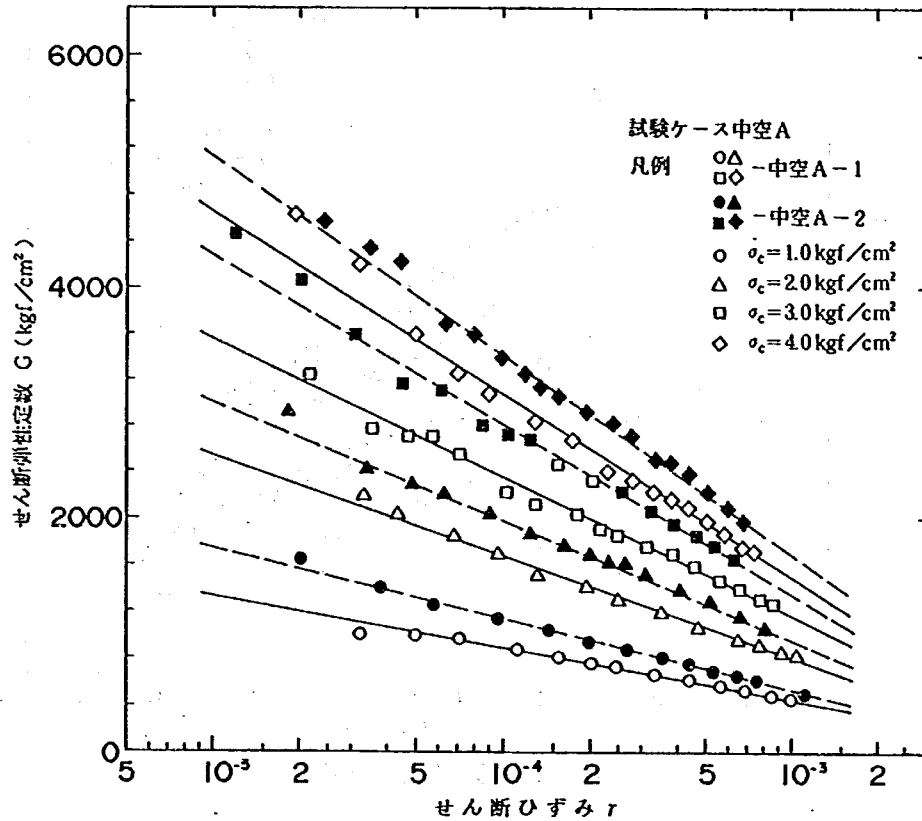


図 5.40 $G \sim \log \gamma$ 関係 (a)

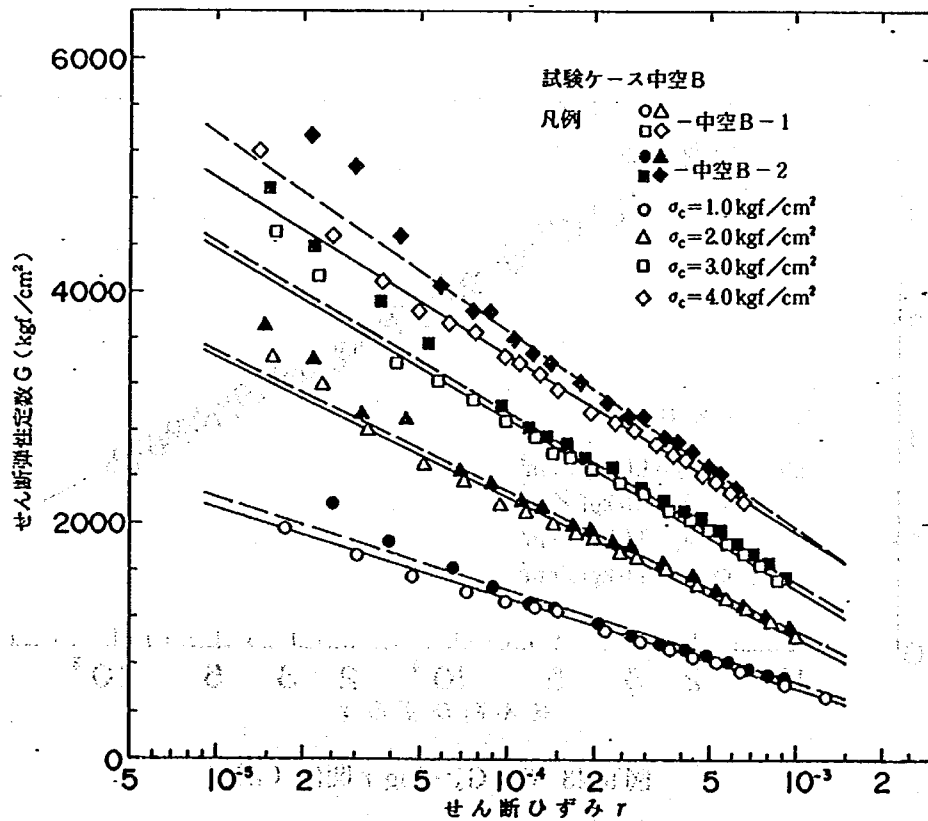


図 5.41 $G \sim \log \gamma$ 関係 (b)

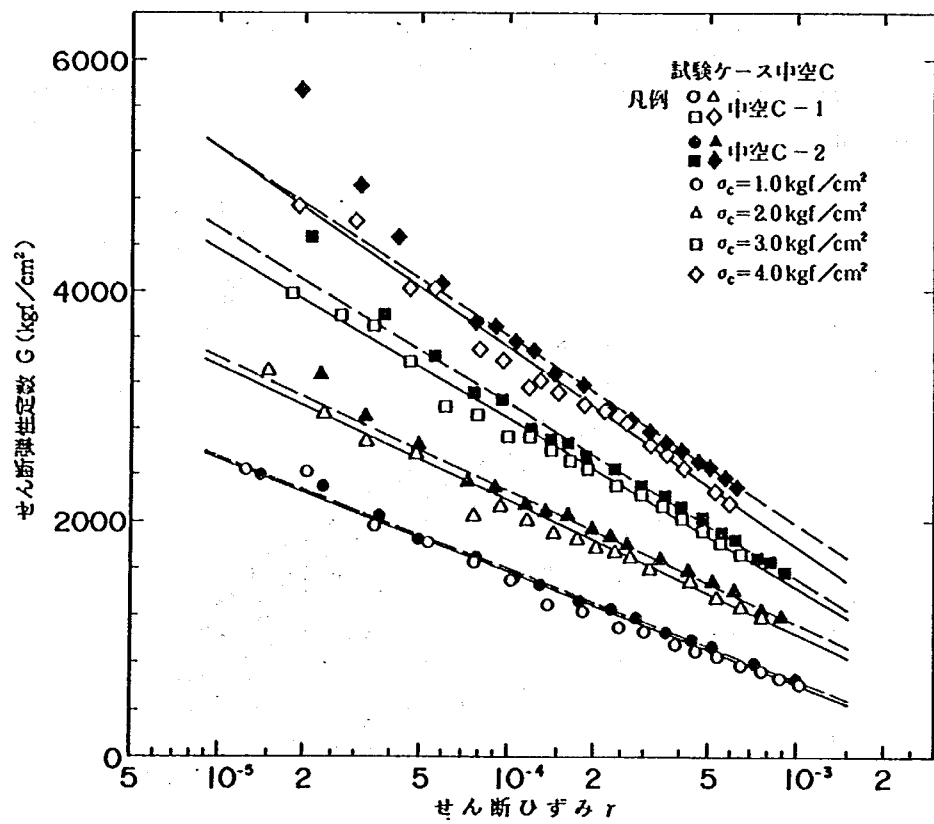


図5.42 $G \sim \log r$ 関係 (c)

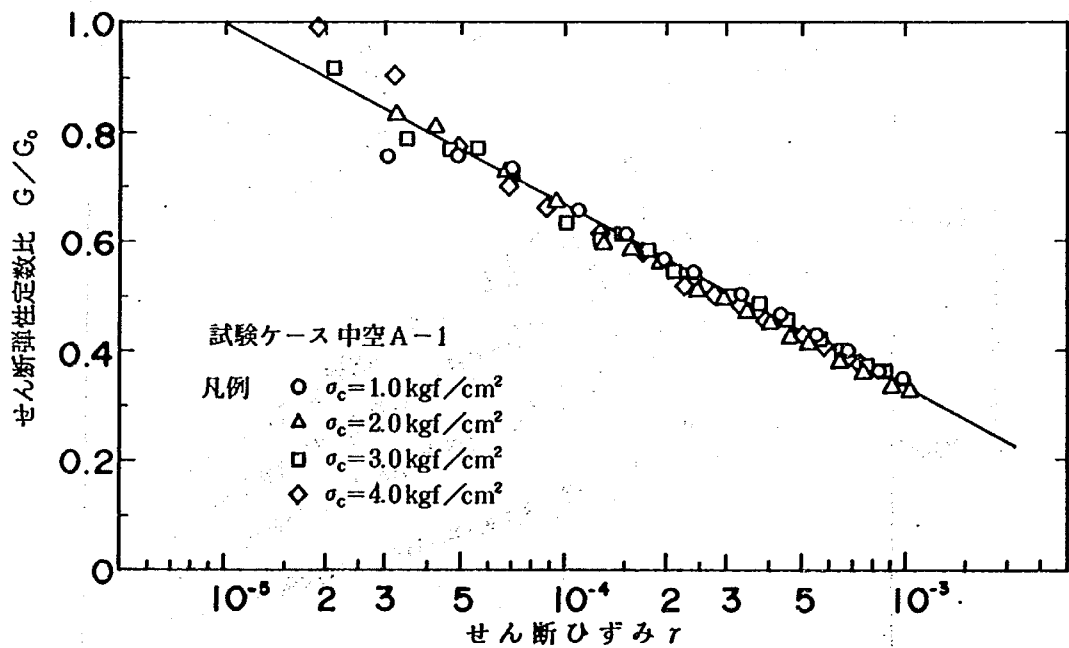


図5.43 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (a)

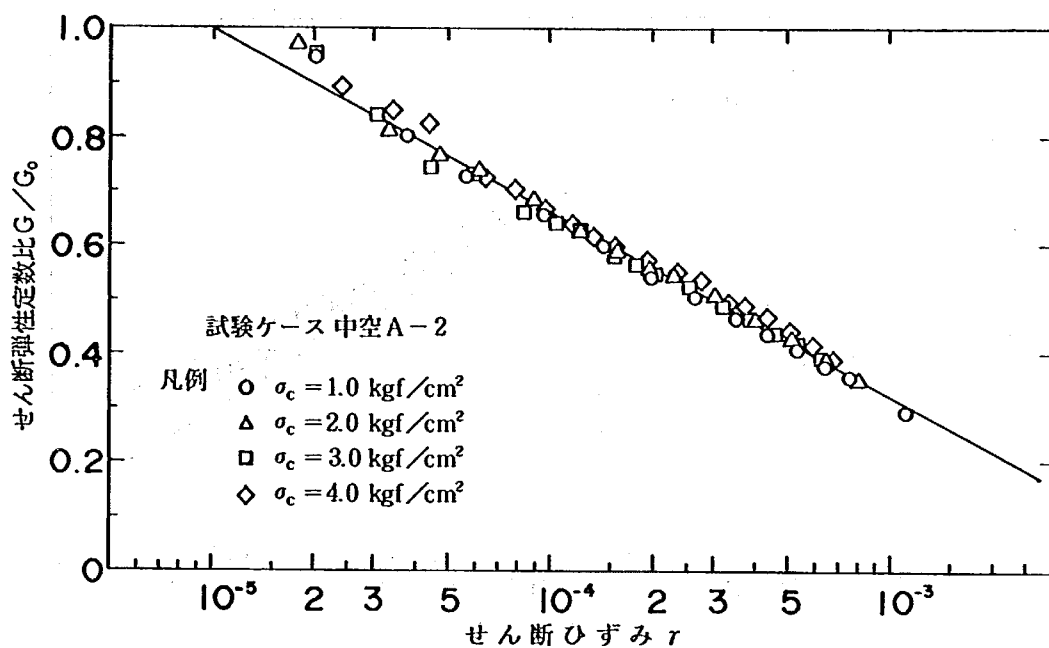


図 5.44 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (b)

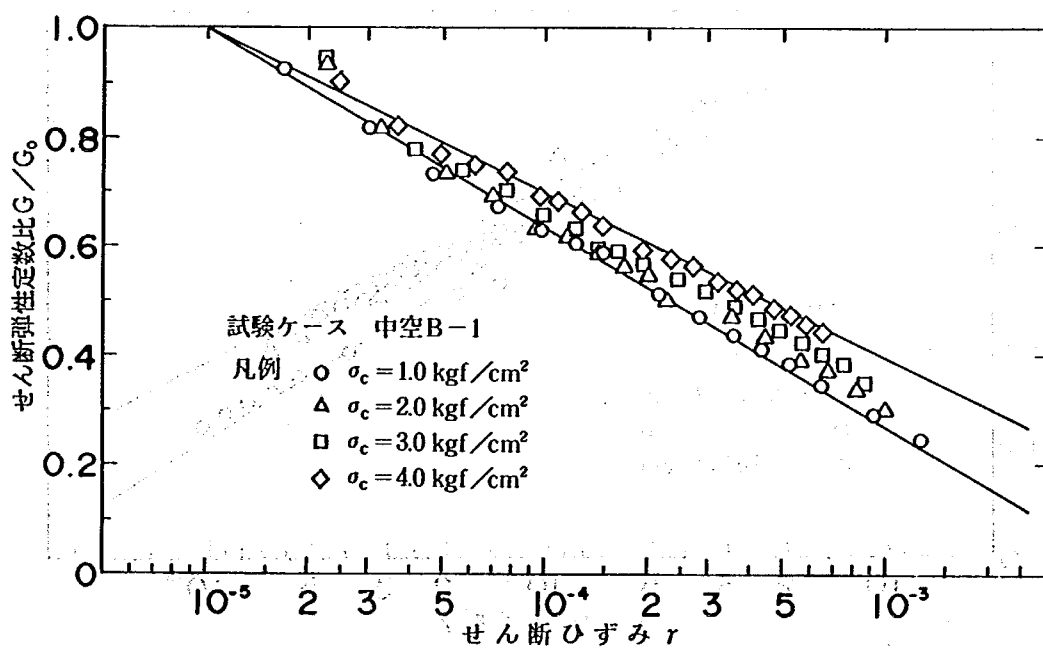


図 5.45 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (c)

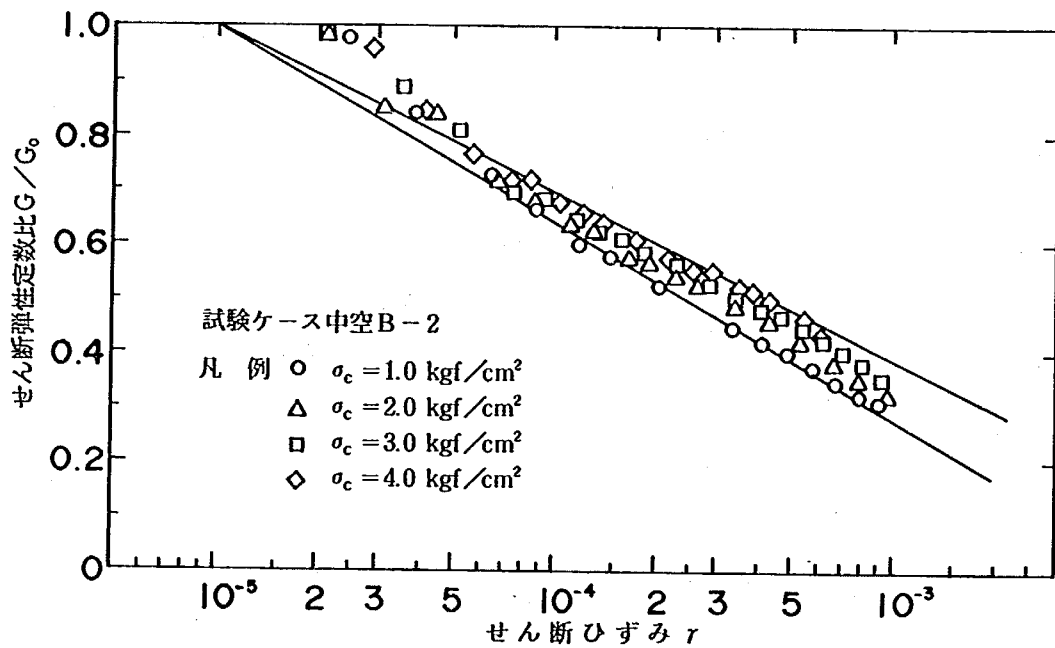


図 5.46 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (d)

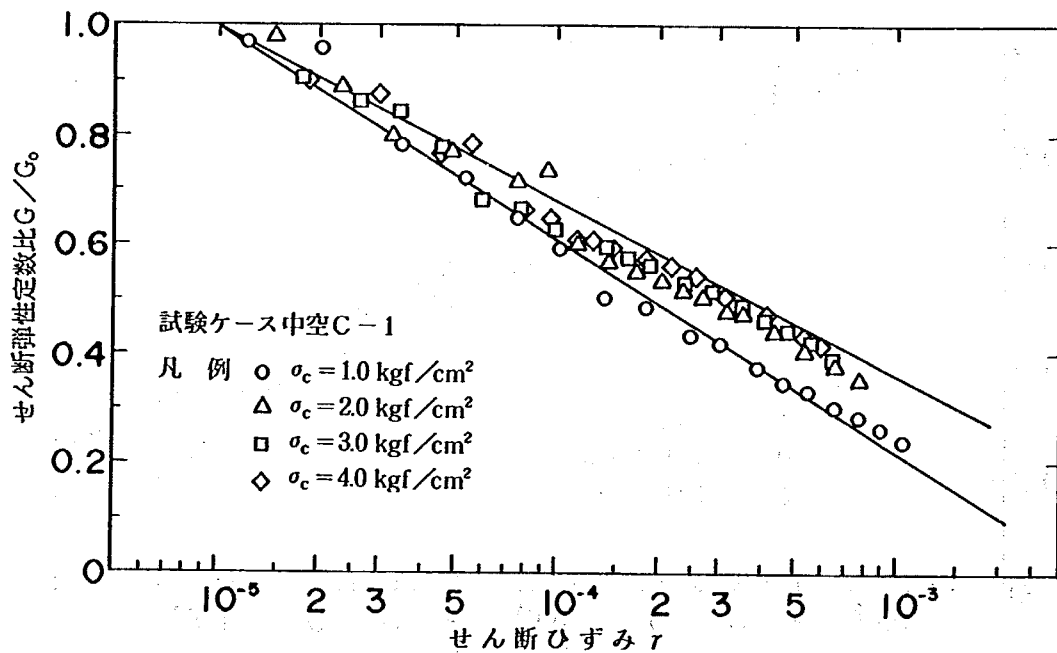


図 5.47 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (e)

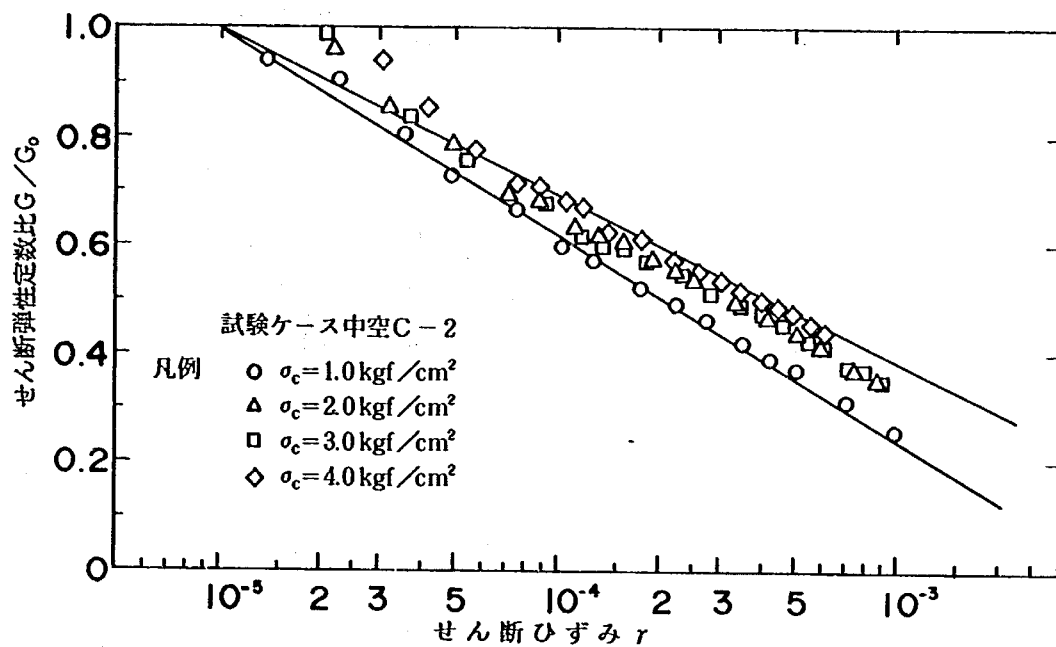


図 5.48 $G/G_0 \sim \log \gamma$ 関係 (f)

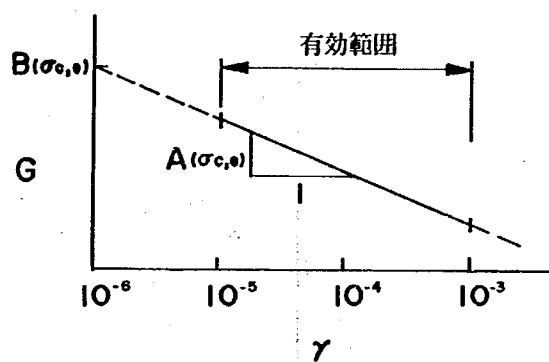


図 5.49 (5.6) 式の模式図

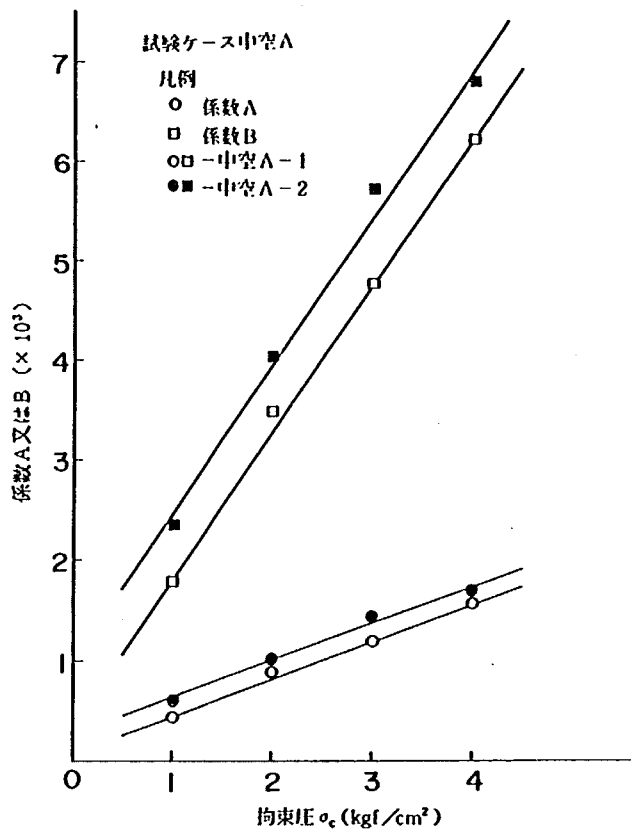


図 5.50 係数 A, B $\sim \sigma_c$ 関係 (a)

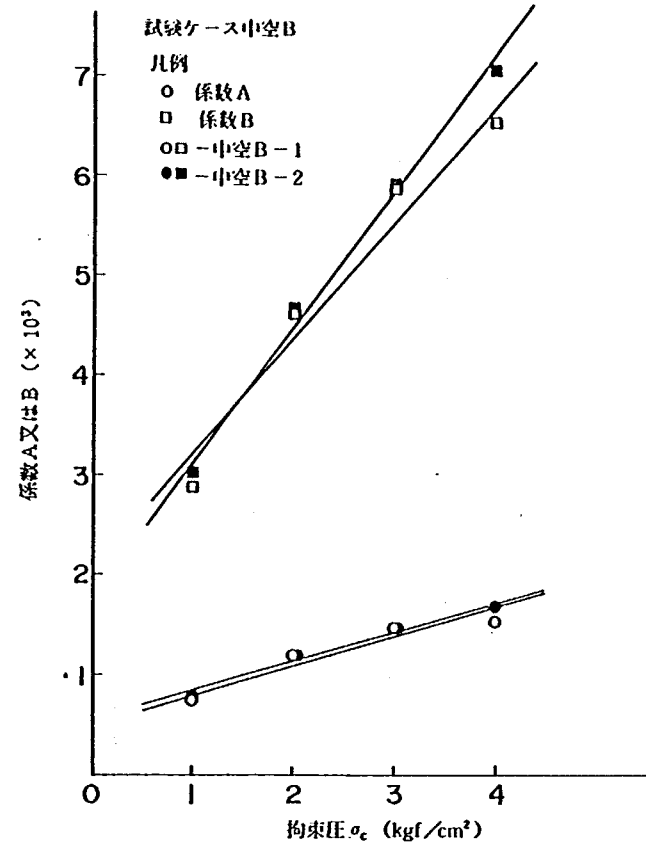


図 5.51 係数 A, B $\sim \sigma_c$ 関係 (b)

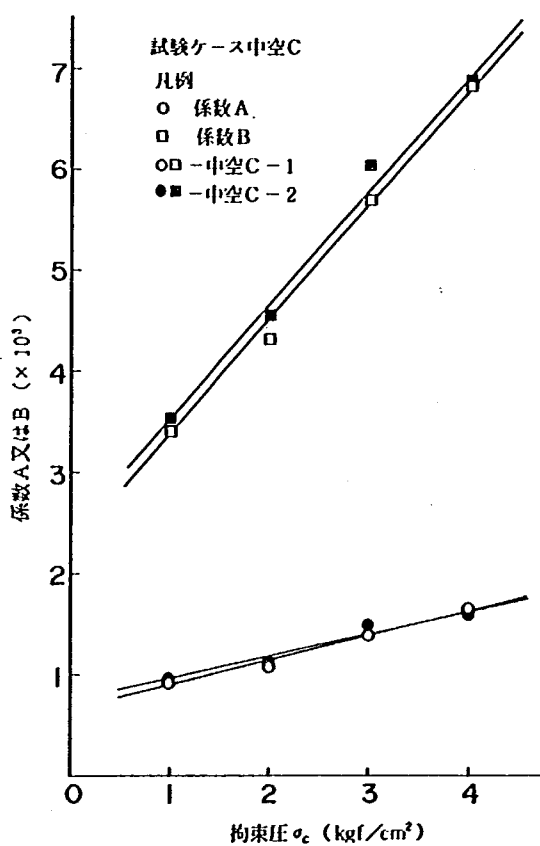


図 5.52 係数 A, B $\sim \sigma_c$ 関係 (c)

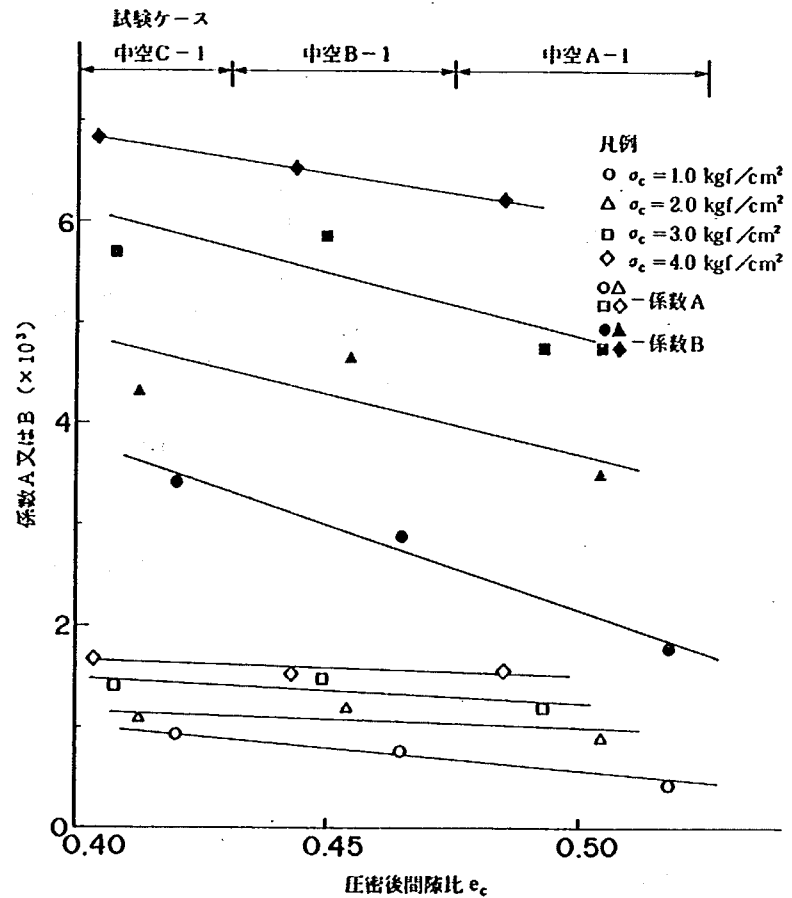


図 5.53 係数 A, B $\sim e_c$ 関係 (1回目)

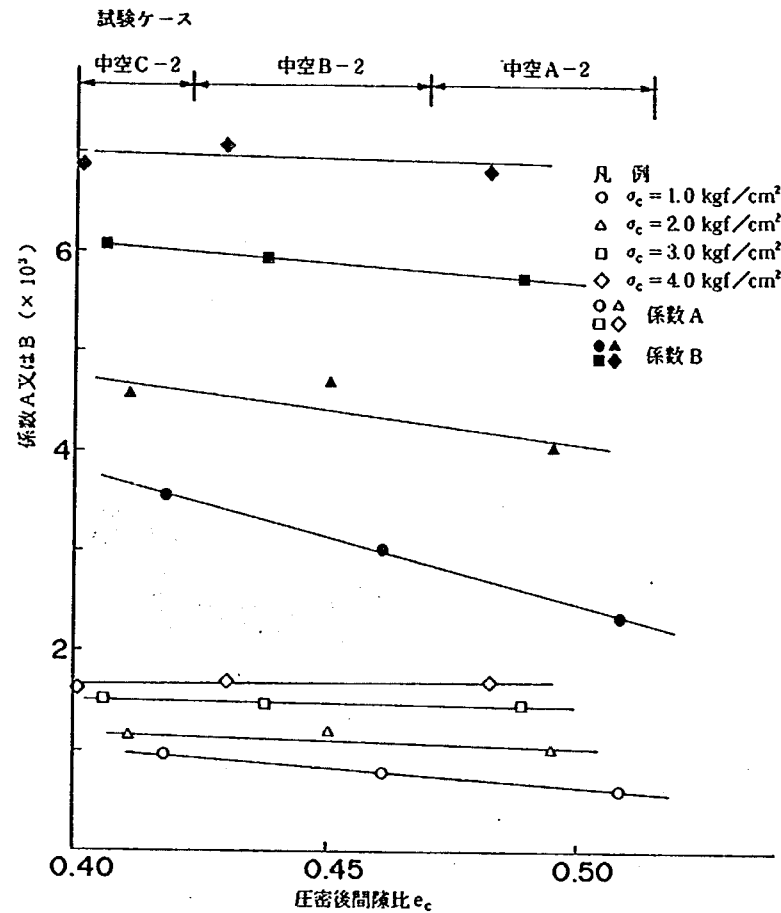


図 5.54 係数 A, B $\sim e_c$ 関係 (2 回目)

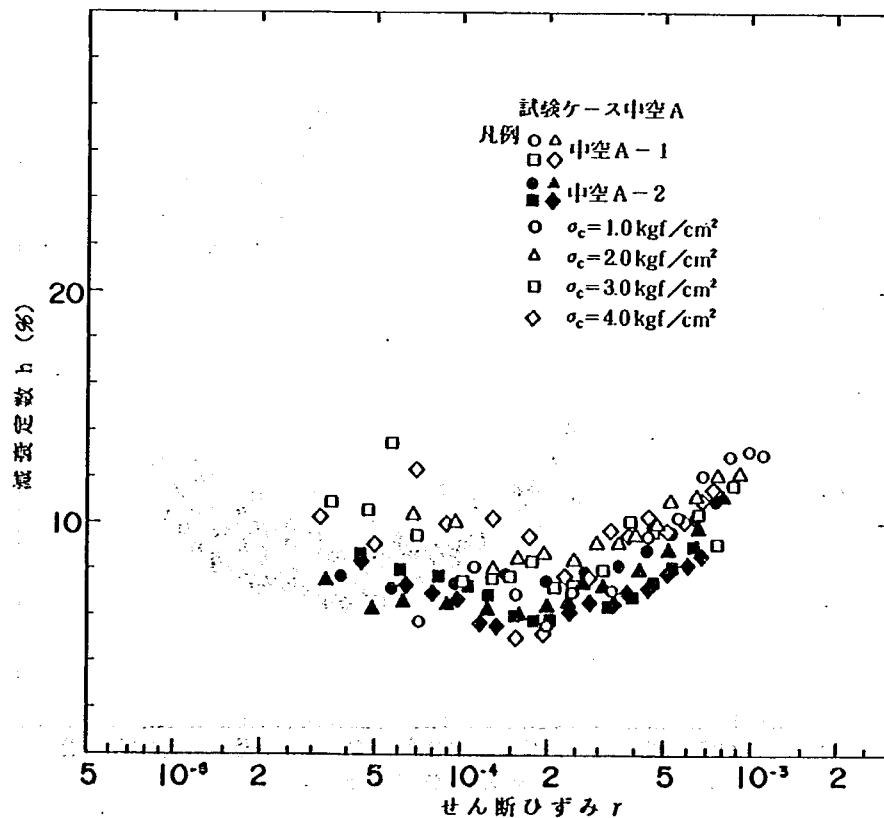


図 5.55 $h \sim \log r$ 関係 (a)

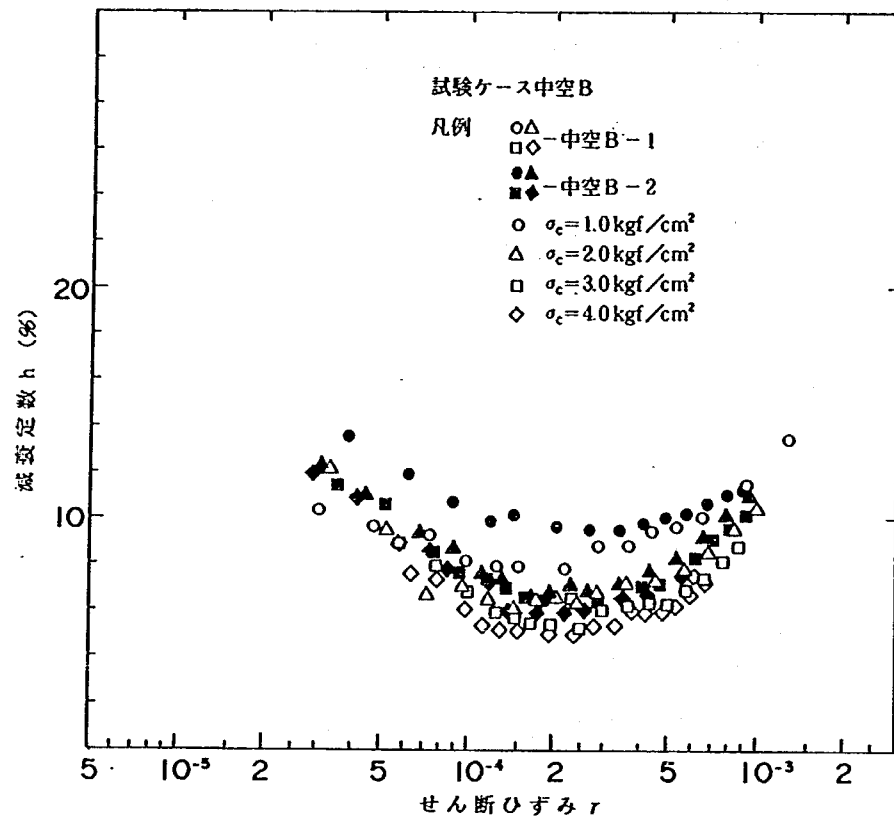


図 5.56 $h \sim \log r$ 関係 (b)

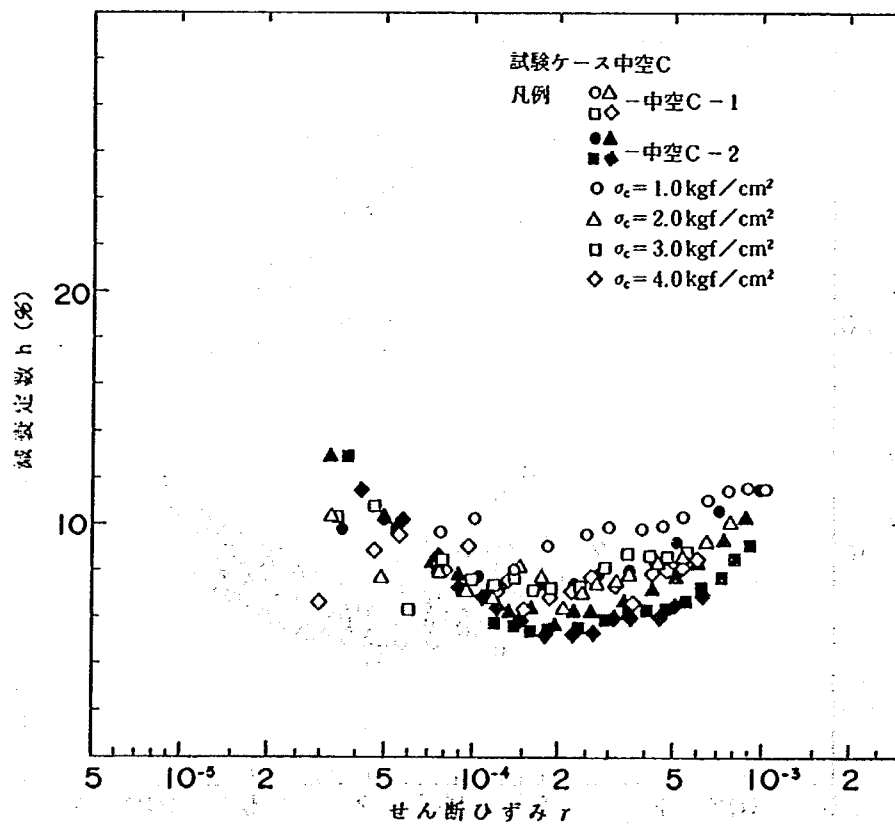


図 5.57 $h \sim \log r$ 関係 (c)

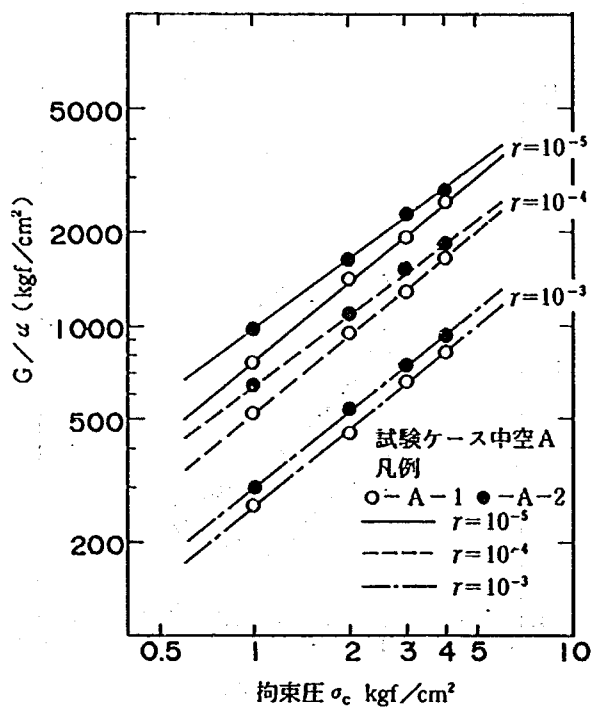


図 5.58 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係 (a)

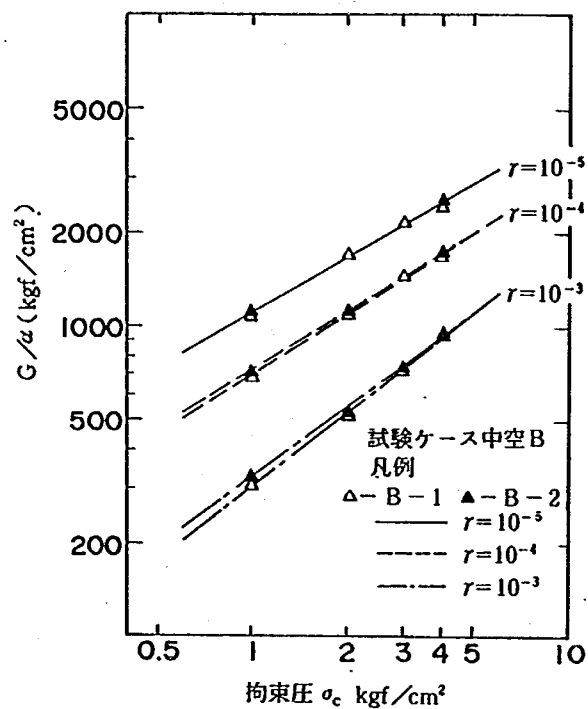


図 5.59 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係 (b)

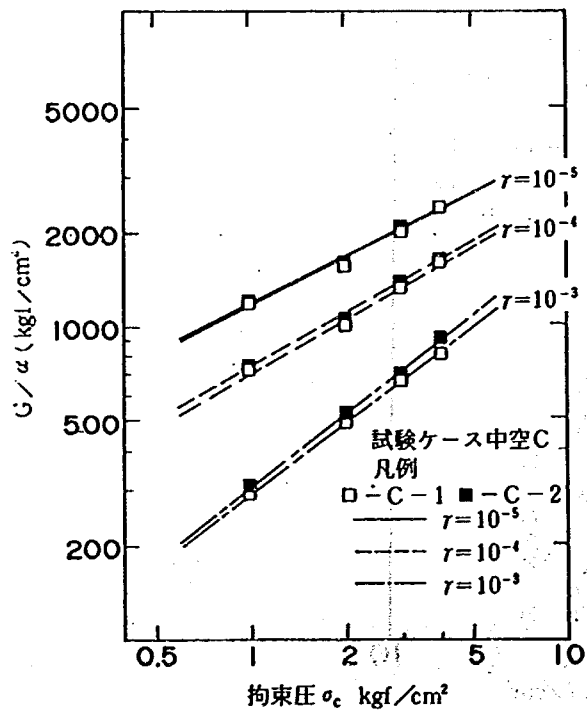


図 5.60 $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係 (c)

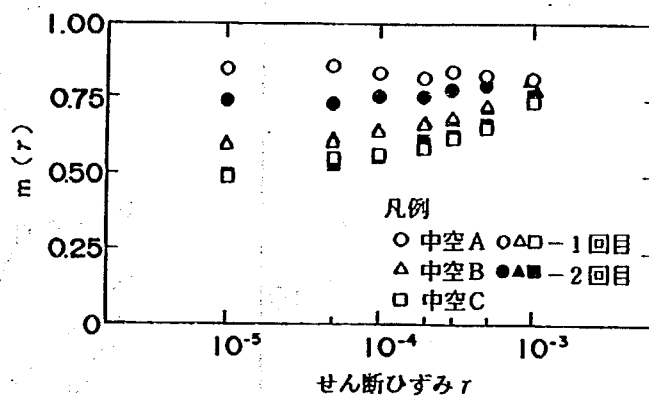


図 5.61 $m(r) \sim \log r$ 関係

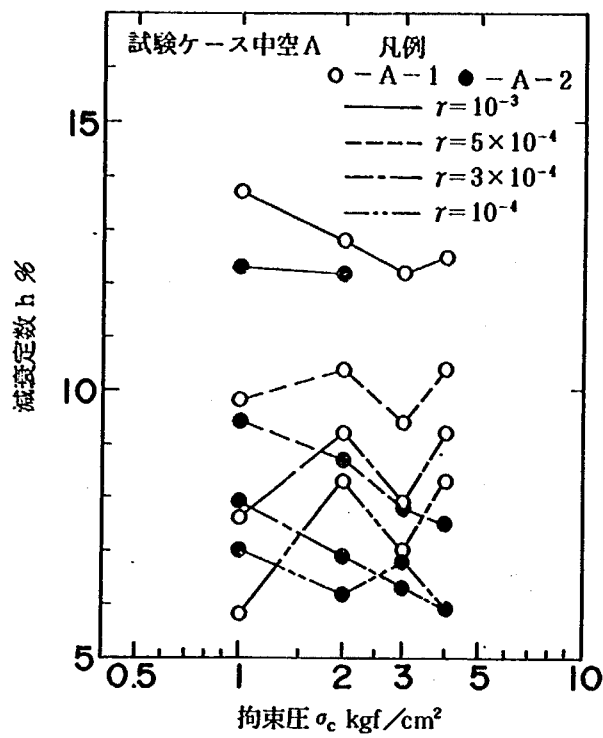


図 5.62 $h \sim \sigma_c$ 関係 (a)

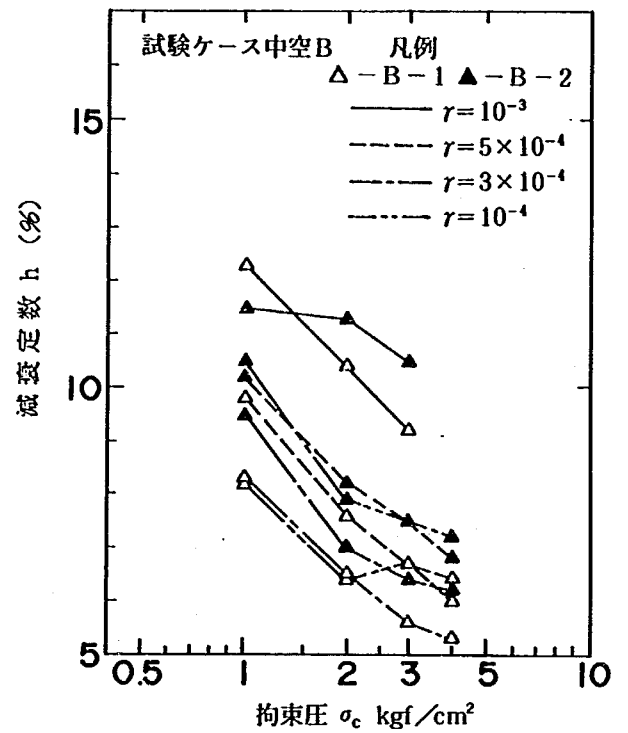


図 5.63 $h \sim \sigma_c$ 関係 (b)

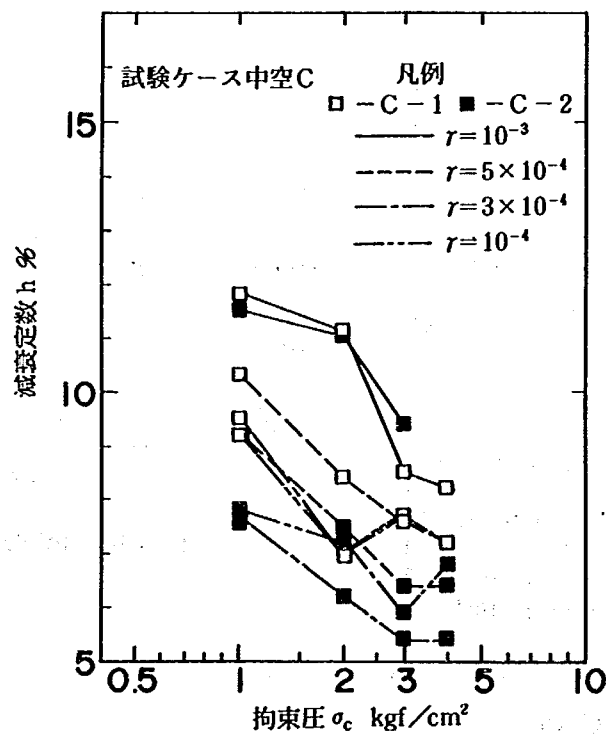


図 5.64 $h \sim \sigma_c$ 関係 (c)

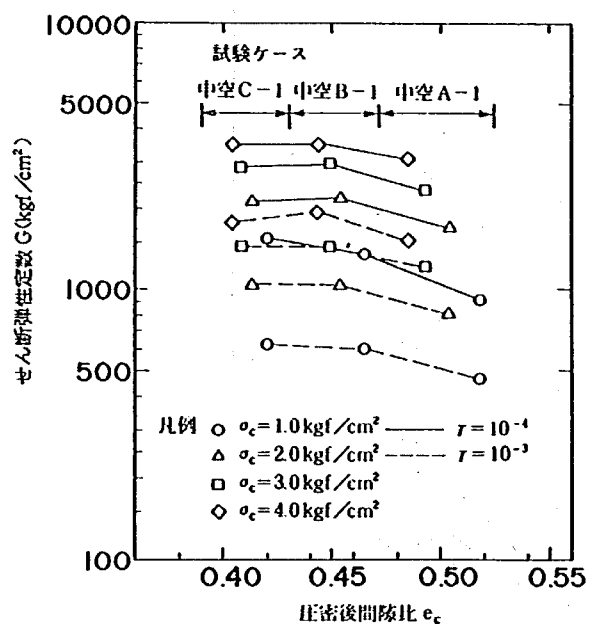


図 5.65 $G \sim e_c$ 関係 (a)

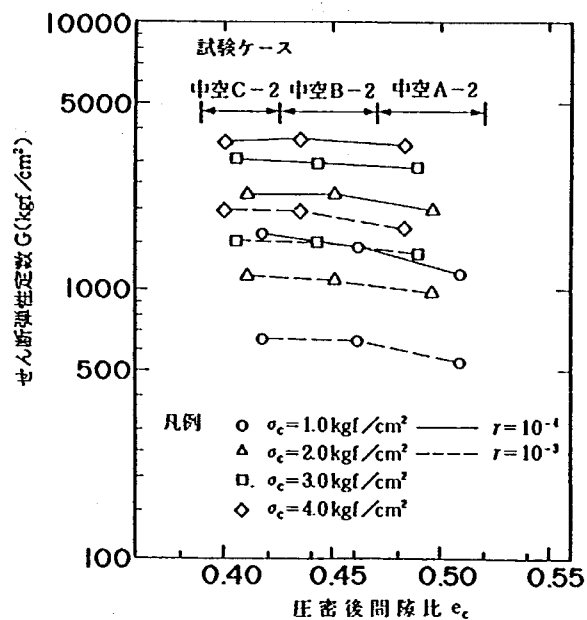


図 5.66 $G \sim e_c$ 関係 (b)

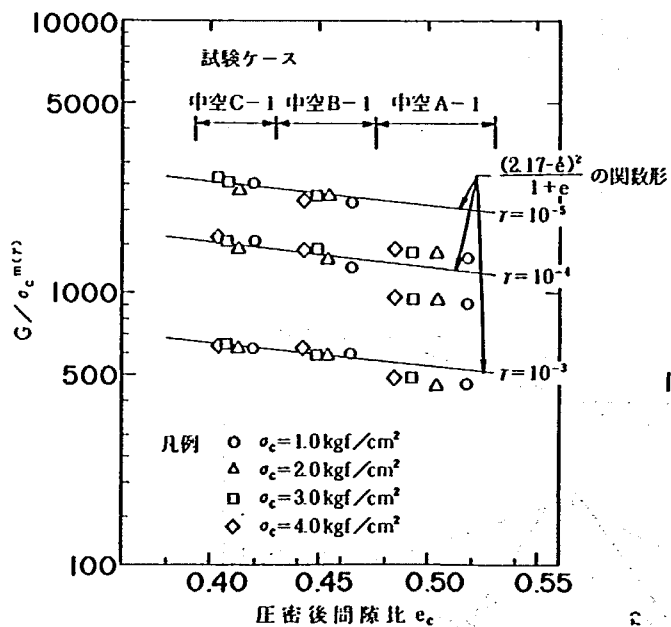


図 5.67 $G / (\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係 (a)

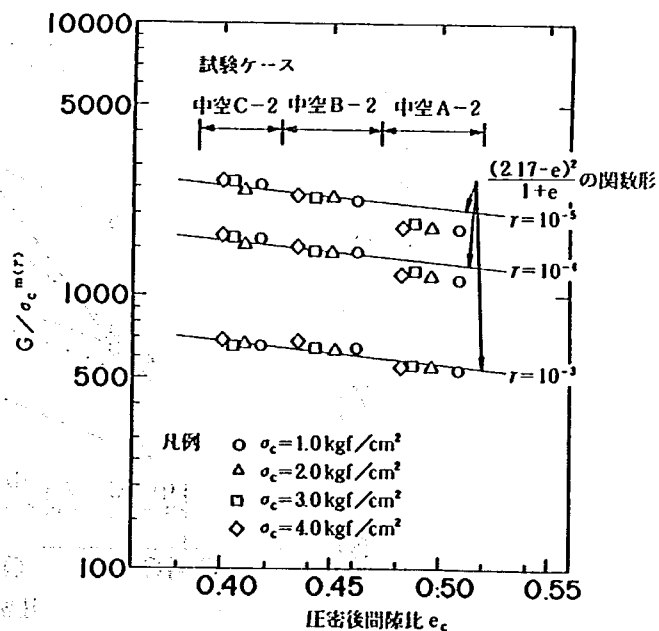


図 5.68 $G / (\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係 (b)

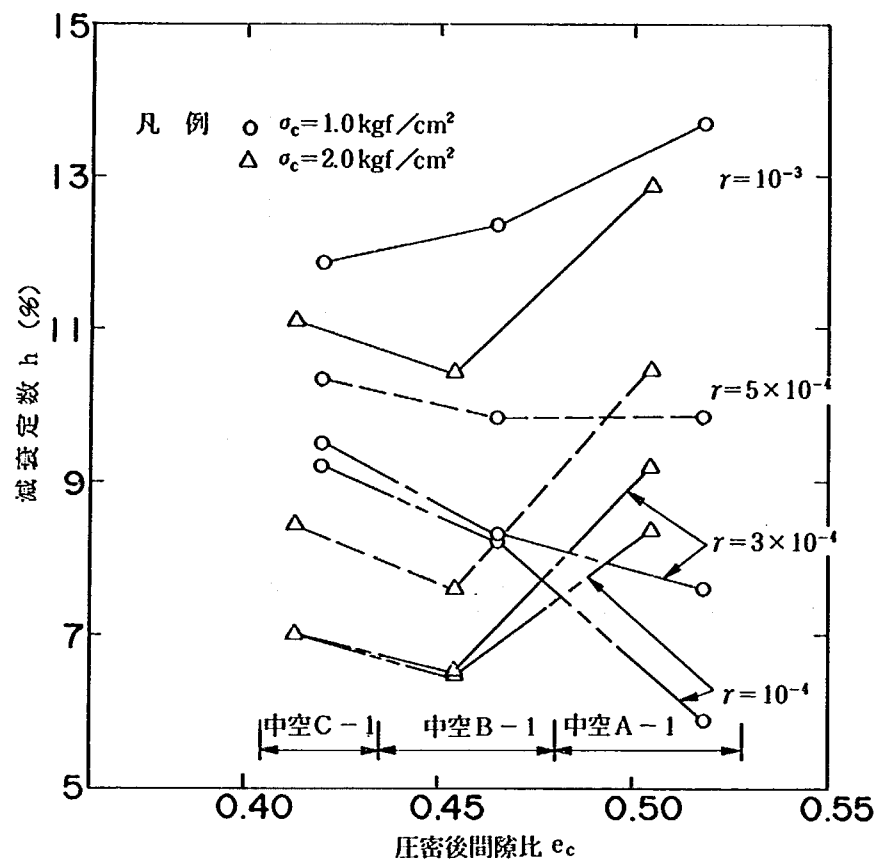


図 5.69 $h \sim e_c$ 関係 (a)

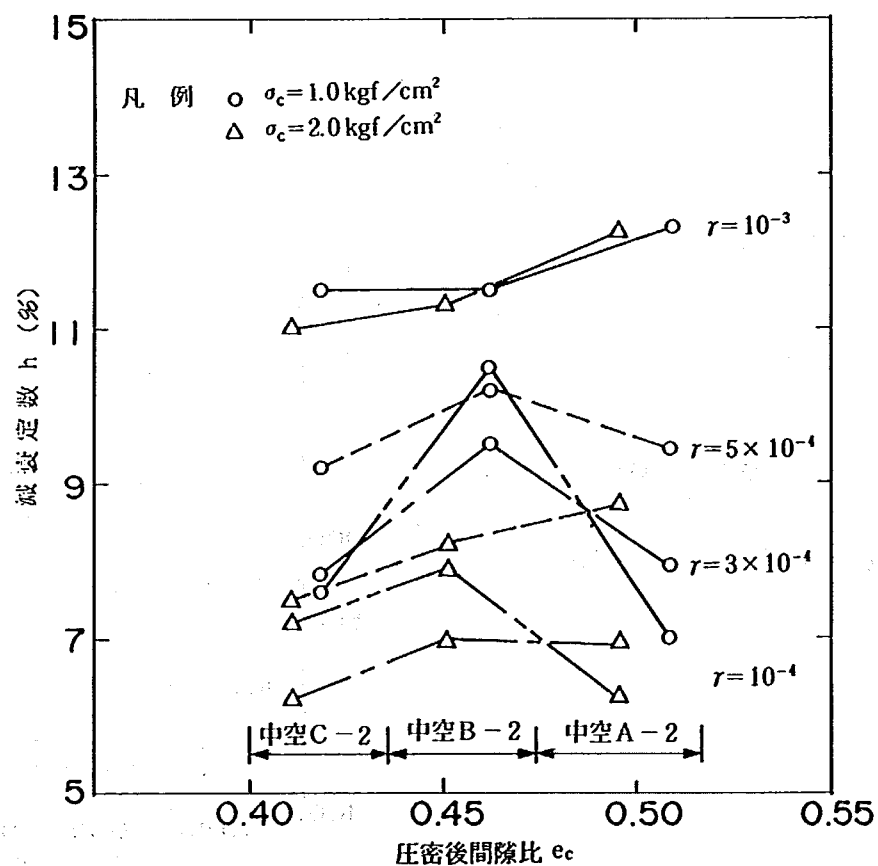
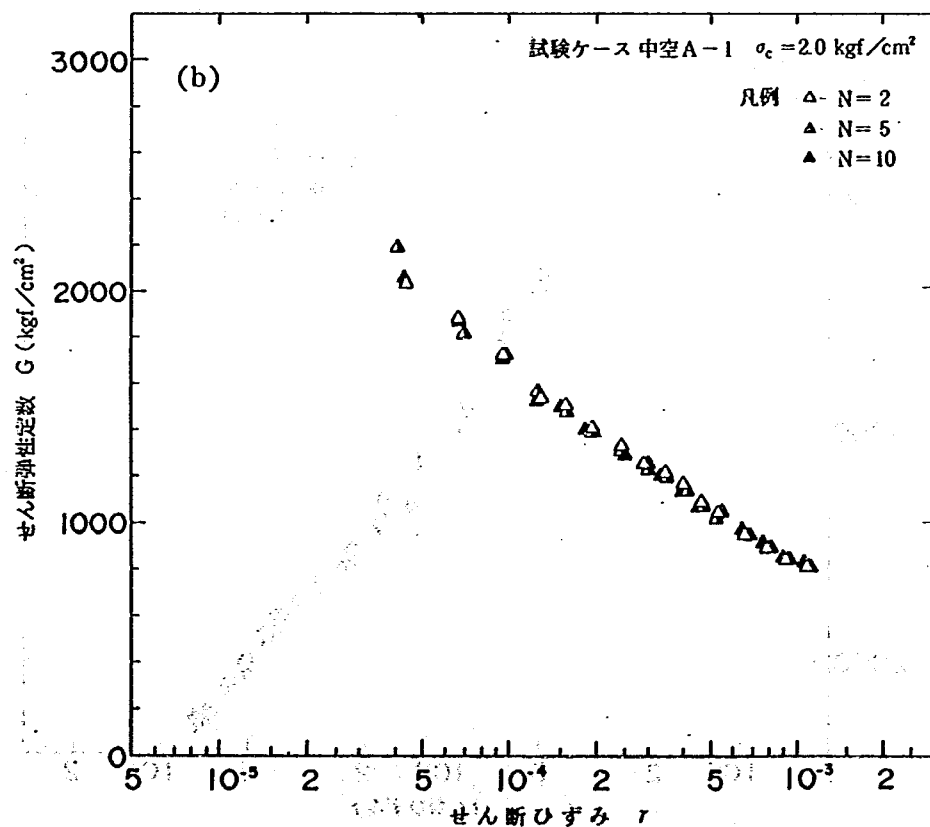
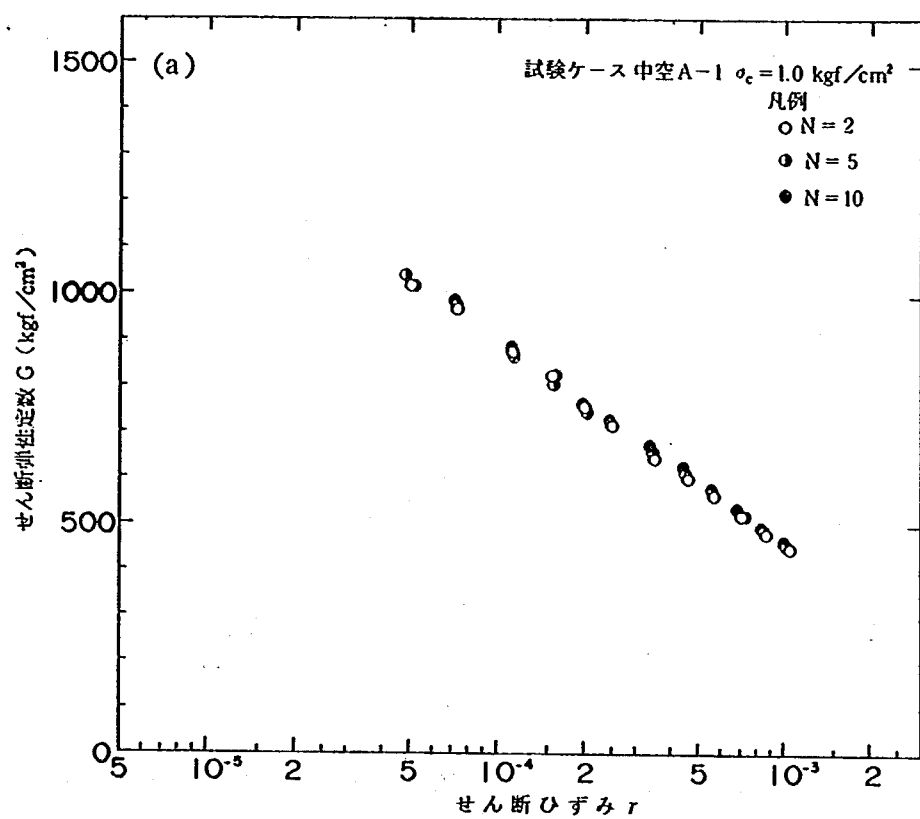


図 5.70 $h \sim e_c$ 関係 (b)



(b) 図 5.71 N による $G \sim \log r$ 関係の変化(a), (b)

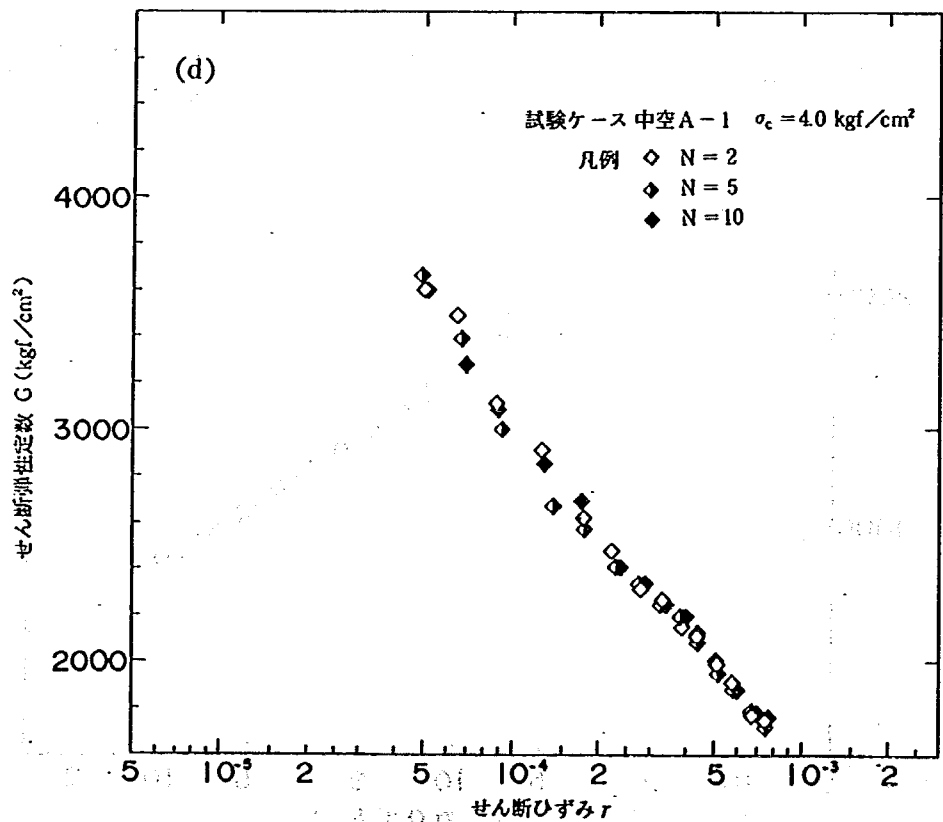
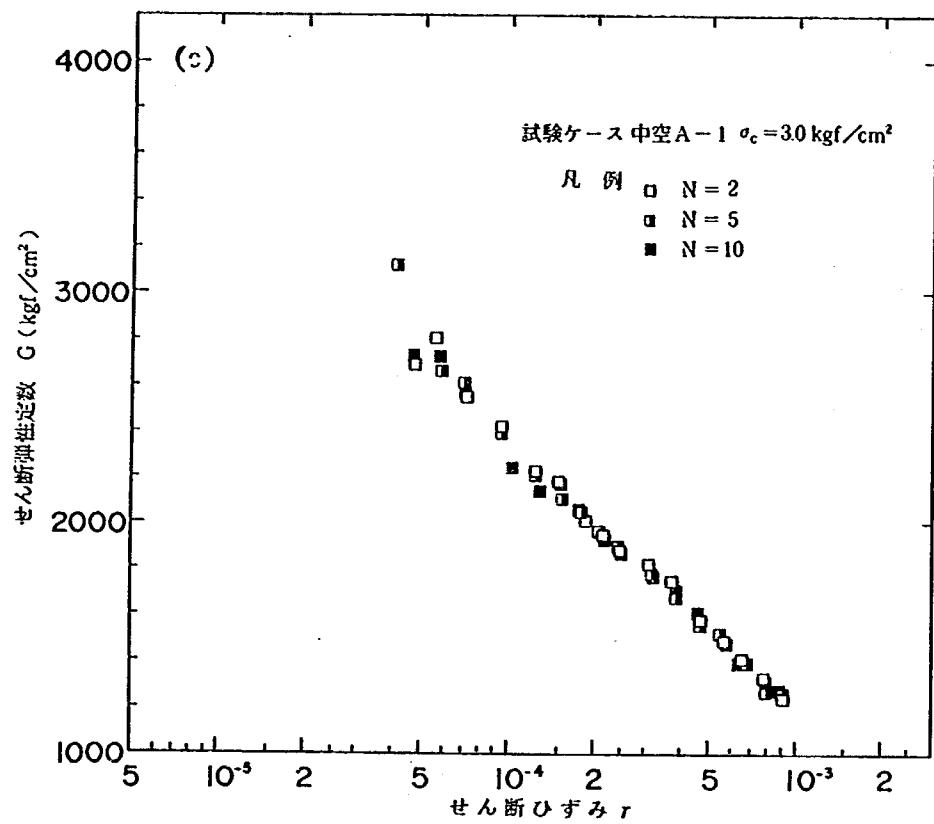


図 5.71 N による $G \sim \log r$ 関係の変化(c), (d)

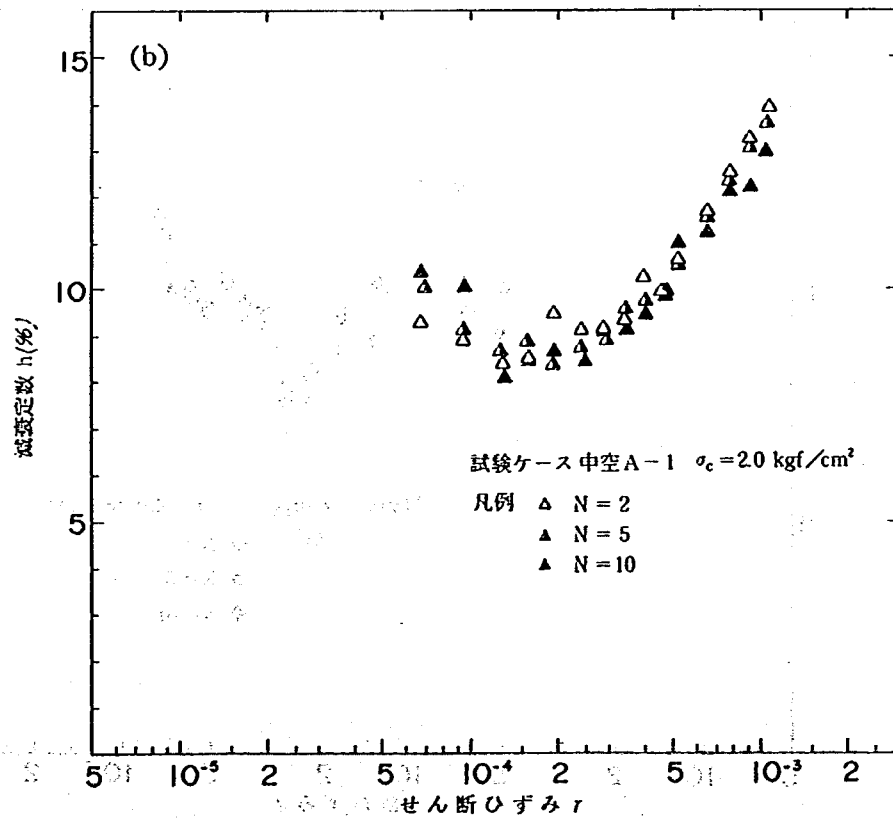
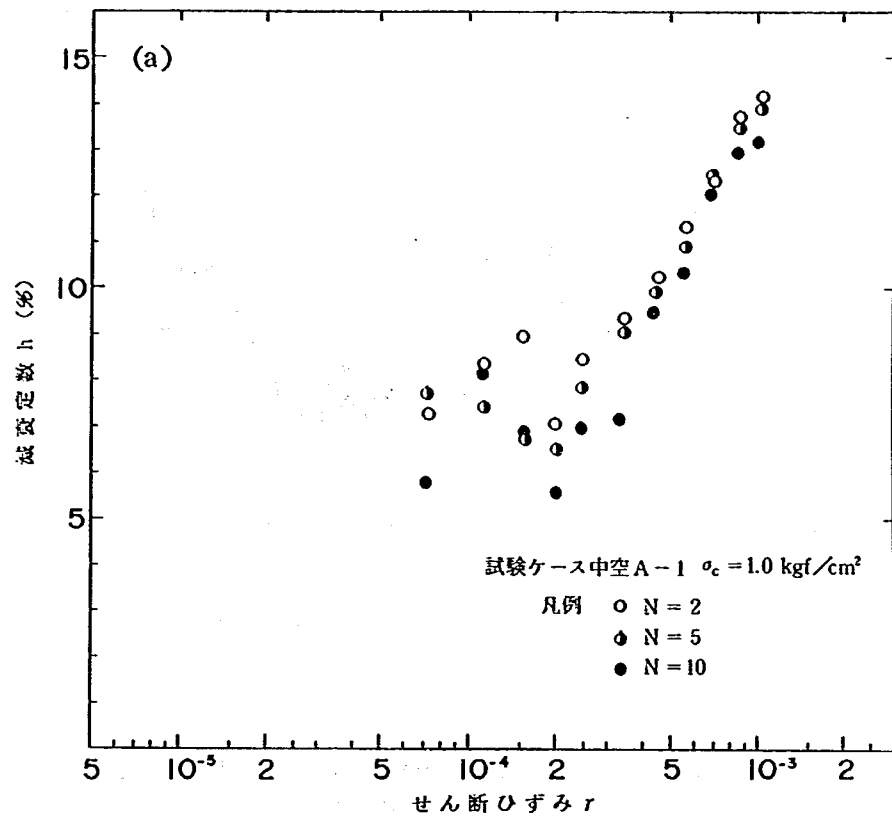


図 5.72 N による $h \sim \log \gamma$ 関係の変化 (a), (b)

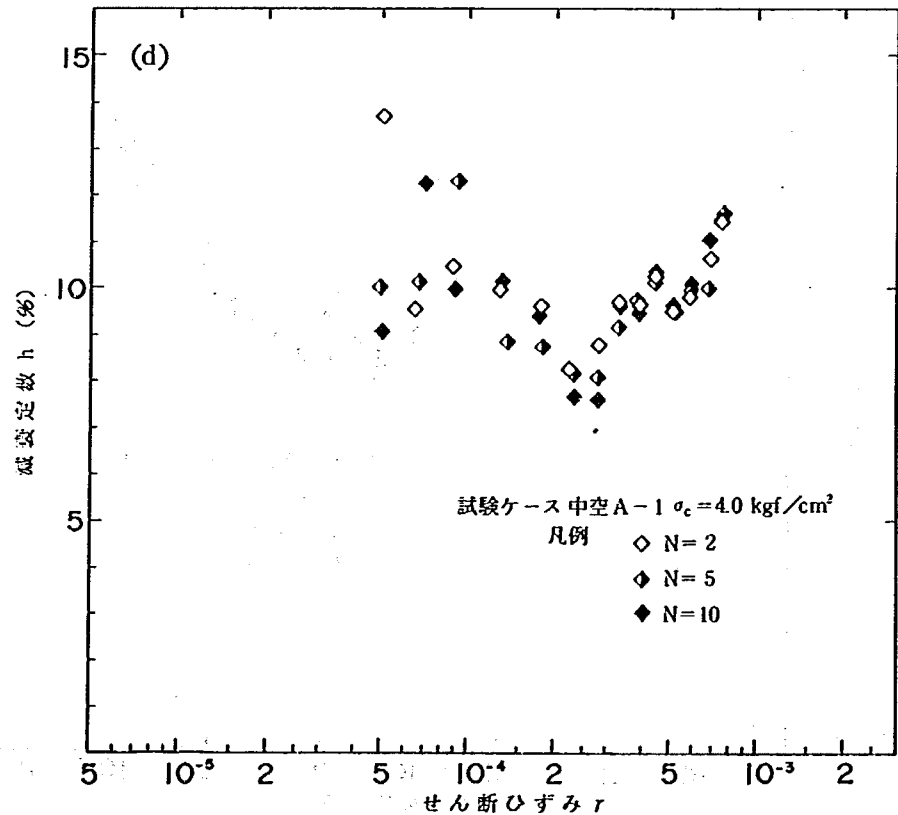
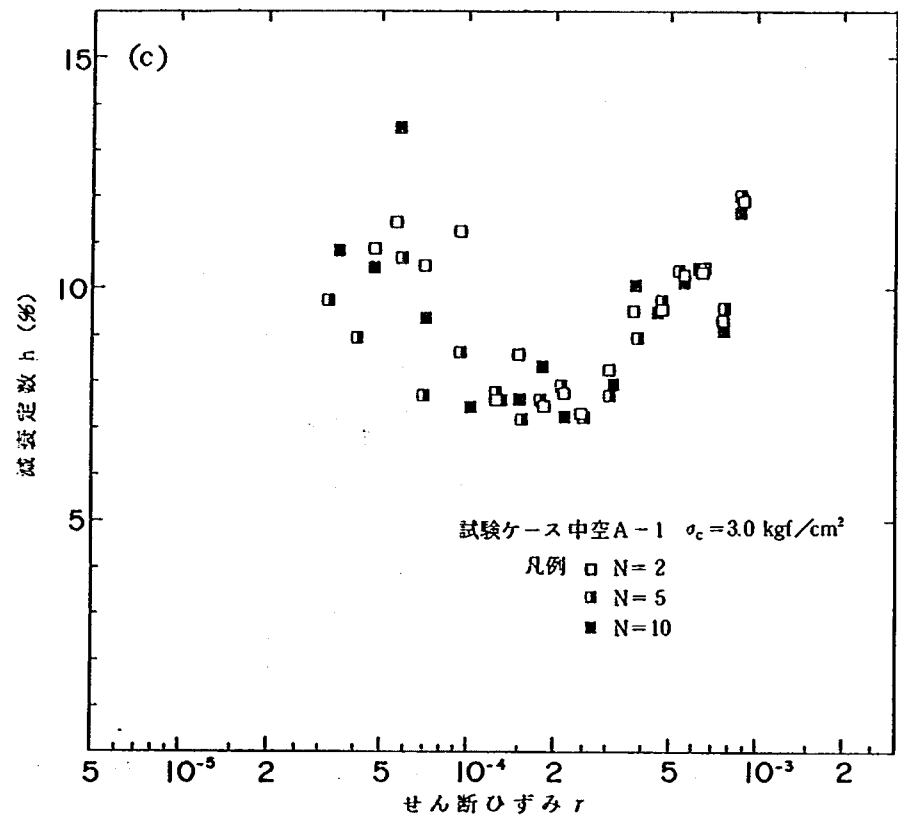


図 5.72 N による $h \sim \log r$ 関係の変化 (c), (d)

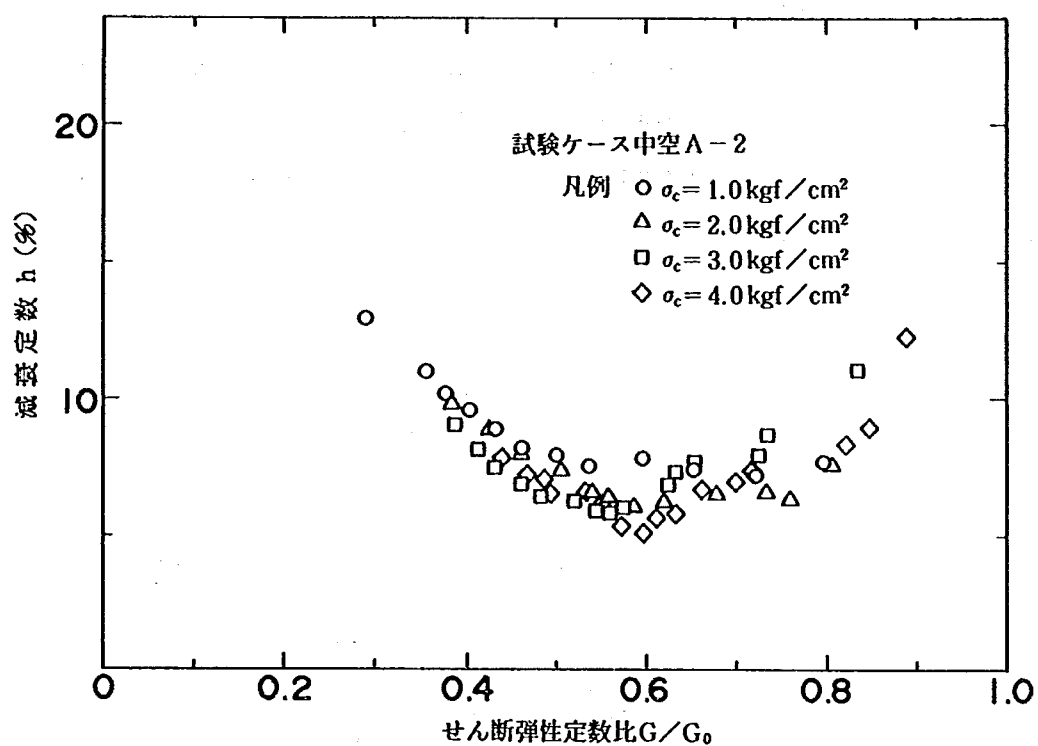


図 5.73 $h \sim G/G_0$ 関係 (a)

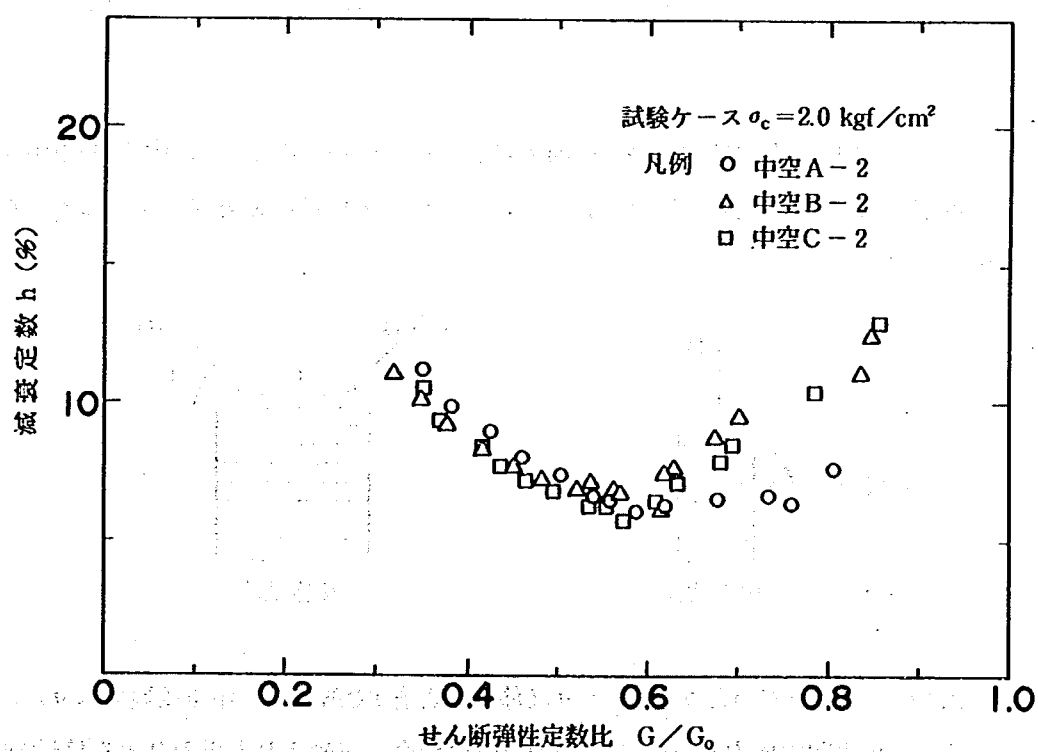


図 5.74 $h \sim G/G_0$ 関係 (b)

○相体密度が異なるかも知れない。

D 40 × H 80 cm モールドによる締固め試験結果によると $e_{\max} = 0.720$, $e_{\min} = 0.383$

D 80 — 40 × H 80 cm については締固め試験を実施していない。

○制御方法が異なる。中空試験はせん断応力制御であるのに対して中実試験は軸応力制御である。

○繰り返し試験時の主応力条件が異なる。

中 実 試 験

圧縮のとき

$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma$$

$$\sigma_2 = \sigma_c$$

$$\sigma_3 = \sigma_c$$

$$\sigma_m = \sigma_c + \frac{\Delta\sigma}{3}$$

伸張のとき

$$\sigma_1 = \sigma_c$$

$$\sigma_2 = \sigma_c$$

$$\sigma_3 = \sigma_c - \Delta\sigma$$

$$\sigma_m = \sigma_c - \frac{\Delta\sigma}{3}$$

中 空 試 験

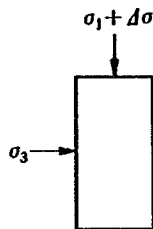
$$\sigma_1 = \sigma_c + \Delta T_{at}$$

$$\sigma_2 = \sigma_c$$

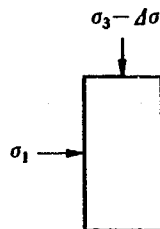
$$\sigma_3 = \sigma_c - \Delta T_{at}$$

$$\sigma_m = \sigma_c$$

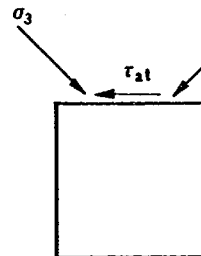
σ_m : 平均主応力



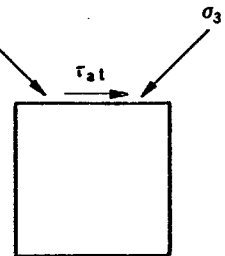
圧縮のとき



伸張のとき

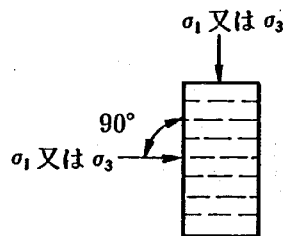


右回り

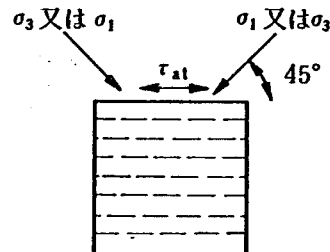


左回り

○中実試験の場合、主応力方向は試料の堆積面に対して 90° 又は 0° であるが、中空試験の場合は 45° 方向近くに回転している。小田らの結果⁴²⁾によると、主応力と堆積面の方向の違いによって強度が異なると報告している。



中実試験



中空試験

○中実試験では $\sigma_2 = \sigma_3$ (圧縮のとき), $\sigma_2 = \sigma_1$ (伸張のとき) であるが、中空試験では $\sigma_2 \neq \sigma_3$ 及び $\sigma_2 \neq \sigma_1$ である。この中間主応力 σ_2 の影響は静的試験の場合、三軸よりも平面ひずみ試験結果の方が強度は大きいということに現われている。

○せん断弾性定数 G を求める計算方法は、中実試験では動的ポアソン比 ν_d を介して求めるのに対して、

中空試験では直接せん断応力 τ_a とせん断ひずみ γ から求める。

上記のように、試料条件、供試体の作成方法や繰返し载荷条件などは同一条件とした。また、それぞれの相異点が G, h にどのような影響を与えるかについては研究例が少なく、不明確な点が多いため今後の研究を待たなければならない。しかし、静的な試験結果から動的な性質を推定することはある程度可能であると思われる。ここで、破壊時の平均主応力と初期間隙比を一致させて中空試験、中実試験と平面ひずみ試験結果¹⁶⁾を比較したのが図 5.76 である。この図から中空の ϕ は中実の ϕ よりも大きく、また平面ひずみの $\delta = 45^\circ$ (σ_1 と堆積面のなす角度) の場合の ϕ に近い傾向を示している。中空と中実の ϕ が異なる理由は、①堆積面の関係では中空では $\delta = 45^\circ < 90^\circ$ であるから ϕ は小さい。②中間主応力の関係では $b = 0.5 > 0$ (b : 中間主応力係数 $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$) であるから ϕ は大きいと相反する傾向のあることが挙げられるが、実際の試験結果では、破壊時の平均主応力に対して中空の ϕ が中実の ϕ よりも大きいという結果になっている。このことから、せん断弾性定数 G は中実よりも中空の方が大きいことが推定できる。また、減衰定数 h は中空の方が小さいことが推定できる。

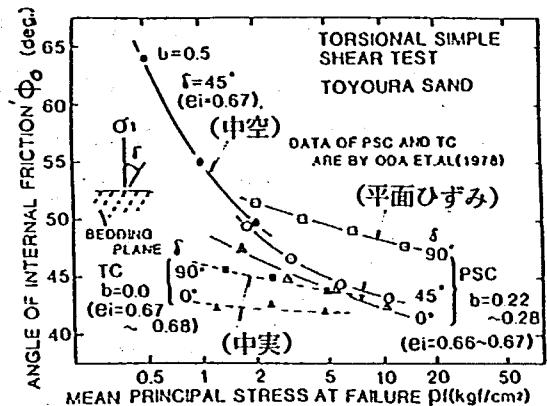


図 5.76 中空、中実、平面ひずみ試験結果の比較(龍岡ら)¹⁶⁾

第 4 章において豊浦砂を用いて繰返し試験を実施

した結果、① G は中空の方が中実よりやや大きく、せん断ひずみが小さいほど中空と中実の差はひろがる、②他の研究機関の試験例と比較すると $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、中空は単純せん断グループと、中実とは三軸グループと良く近似している、③ h は中空の方が中実より大きく、上記の推定とは逆の傾向を示している、ということがわかった。

さて、以上のことを考慮しながら、粗粒材料の繰返し中実、繰返し中空試験結果を比較することにする。

(1) せん断弾性定数 G について

図 5.77 に $G/(\sigma_c)^{m(e)} \sim e_c$ 関係を示す。 $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形を適用して相関関係を見ると、中実試験の場合、中実 A、中実 C は良く近似しているが、中実 B はやや小さく、せん断ひずみが小さいほど $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形との差は大きくなる傾向を示している。また、中空試験の場合、どの試験ケースについても $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形に良く近似しているが、せん断ひずみが小さくなると中空 A がやや小さくなっている。したがって $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形と良く近似しているのは中実試験の場合、中実 A、中実 C であり、中空試験の場合、中空 B、中空 C である。

(2) 次に $G \sim \log \gamma$ 関係を図 5.78 ~ 80 に示す。試験ケース A ($e_c = 0.52$) では、中実 A と中空 A-1 が各拘束圧ともに良い一致を示している。しかし、中空の $G \sim \log \gamma$ 曲線は直線分布を示し、中実では G に収束する傾向が見られるので、せん断ひずみが小さくなるほど両者の差はひろがる傾向を

示している。試験ケースB ($e_0 = 0.47$)では各拘束圧ともに中実が中空を下回っており、せん断ひずみ $r = 10^{-4}$ 時で比較すると、中実と中空の差は約 $500 \sim 800 \text{ kgf/cm}^2$ 程度(拘束圧が大きいほど大きい)であり、これは中空B-2に対して22~36%程度である。しかも、両者の差はせん断ひずみが小さくなるほど大きくなっている。試験ケースC ($e_0 = 0.42$)では中空の方が中実よりやや大きい試験の再現性から考えるとほぼ等しいと言える。せん断ひずみ $r = 10^{-4}$ 時で比較すると、中空と中実の差は約 $100 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$ 程度(拘束圧が大きいほど大きい)であり、これは中空C-2に対して約7~8%程度である。以上のことから中空の方が中実よりやや大きいか又は等しく、また中空の $G \sim \log r$ 曲線は直線分布を示し、中実はG₀に収束しているため、せん断ひずみが小さくなると両者の差はひろがる傾向であることが認められた。豊浦砂の場合にも同様の現象が現われたが、この原因としては、検出器の精度、せん断応力の計算方法(中空試験の場合)、供試体の作成方法、せん断試験方法(主応力条件の違いや異方性の影響など)などが考えられる。このうち、主なものはせん断応力の計算方法であると考えられる。本研究におけるせん断応力の計算方法は供試体半径方向のせん断応力分布を一定分布(剛-完全塑性分布)としてトルクから求めている。しかし、せん断ひずみの小さい場合($r \leq 1\%$)にせん断応力分布は弾性分布に近くなり、供試体半径位置によってせん断応力は異なると考えられる。両者の計算方法を比較すると前者の方が約7%程度大きい(3.4.2を参照)。したがって、本研究において採用している計算方法ではGを過大評価していることになると思われる。以上のことから、せん断強度を求める静的試験ではせん断応力分布を一定分布として、また、変形特性を求める繰り返し試験では弾性分布としてせん断応力を計算するべきであると思われる。なお、他の研究機関で採用している計算方法の例をあげると、東大生研龍岡¹⁴⁾と大成建設真島、山下¹⁵⁾は繰り返し試験において上述の両方の計算方法の平均値を採用し、また東大生研福島¹⁶⁾は静的試験において一定分布の式を採用している。

せん断ひずみ $r = 10^{-5}$ 時のGで正規化した G/G_0 と $\log r$ の関係を図5.81~83に示す。この図から、中実試験の場合にはせん断ひずみが $r \leq 5 \times 10^{-5}$ までは減少率が小さいが $r \geq 5 \times 10^{-5}$ では直線的かあるいは減少率がやや増加しながら G/G_0 が小さくなるという分布を示している。一方、中空試験の場合には、せん断ひずみ $r = 10^{-5}$ 付近からせん断ひずみの増大にしたがってほぼ直線的に減少している。 $G/G_0 \sim \log r$ 関係へ及ぼす拘束圧の影響は中空A-2、中実Bを除いてやや認められる程度である。 $G/G_0 = 0.5$ となるせん断ひずみ r は中実試験では $r = 5 \sim 8 \times 10^{-4}$ であるのに対して中空試験では $r = 3 \sim 4 \times 10^{-4}$ で約2倍の差がある。

$G/\alpha (\alpha = \frac{(2.17-e)^2}{1+e}) \sim \sigma_c$ の関係から、 $m(r)$ を求め、 $m(r) \sim \log r$ 関係を図5.84に示す。試験ケースAと中実Bの場合、 $m(r)$ はせん断ひずみによる影響は小さく、 $m(r) = 0.75 \sim 0.85$ の範囲にある。試験ケースCの場合は中実と中空試験と共に良く近似しており、せん断ひずみが小さくなると、 $m(r) \div 0.5$ 程度に収束する傾向を示している。したがって、間隙比が小さい方が $m(r)$ は小さく、また中空、中実の違いによる影響が認められなかった。

(2) 減衰定数 h について

減衰定数 $h \sim \log r$ 関係を図 5.85 ~ 87 に示す。G については中空試験の方が大きいにもかかわらず、 h はどの試験ケースの場合も中空試験の方が中実試験よりも上回っている。試験ケース B, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合を除いて中空と中実試験の差は約 2 % 程度であるが、せん断ひずみが $r \leq 2 \times 10^{-4}$ ではさらにひろがる傾向を示している。このように中空試験の場合 $r \leq 2 \times 10^{-4}$ の範囲では r が小さいほど h は増加している理由はヒステリシスカーブを見ると変位の遅れ(くり返し応力の反転時に応力の減少又は増加に伴って変位が生じないこと)のためにカーブが平行四辺形になることにあると思われる。この原因としては次のことが考えられる。

- ① 材料特性 ② せん断試験方法 ③ 検出器の精度
- ④ 測定方法 ⑤ 供試体の作成方法

このうち、①については同一の試料を用いていること、③については同様の精度であることから原因から除外される。④について考えると図 5.88 に示すように中実試験の場合、軸変位計によって上下ペダスタル間の変位を測定し、また中空試験の場合、ねじり角度計と微小変位計の 2 通りの方法で測定した。

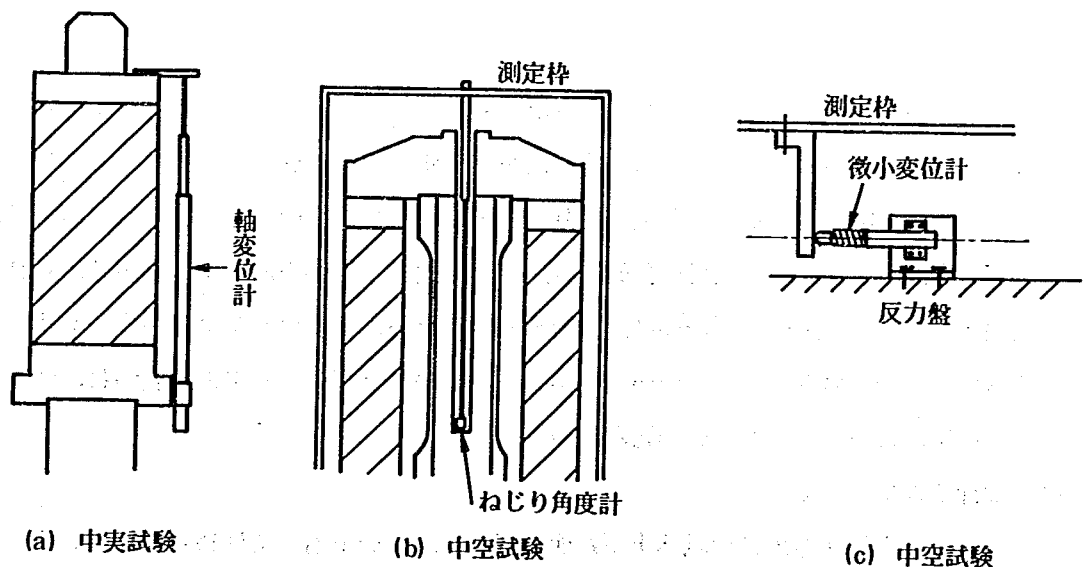


図 5.88 せん断ひずみの測定方法

ねじり角度計の場合、測定棒とつながるロッドの曲がりによって、また微小変位計の場合、鉄芯の中心軸の傾きによって変位の遅れが生じる原因になると思われる。②、⑤については、中空試験の場合には供試体上下端面に鋼製刃を入れてせん断応力を伝える構造になっているので、鋼製刃付近の断面を考えると、図 5.89 に示すようになる。したがって、せん断応力の载荷側の面は試料と密着しているが、裏面はごくわずかなクリアランスが生じ载荷方向が逆転した場合、このわずかなクリアランスのために荷重が急減し、応力～ひずみのヒステリシスカーブが平行四辺形になるのではな

いかと考えられる。

(3) G と h の関係について

$G/G_0 \sim h$ 関係を図 5.90 に示す。試験ケース中空 A-2 の場合の $G/G_0 \leq 0.6$ と中実 A の場合、 $G/G_0 \leq 0.8$ の $G/G_0 \sim h$ 関係は、ほぼ同様の直線分布となっている。中空の場合の $G/G_0 = 0.6$ と中実の場合の $G/G_0 = 0.8$ というのは図 5.81 の $G/G_0 \sim \log r$ 関係ではせん断ひずみ r がそれぞれ

$r = 1.5 \times 10^{-4}$ 、 $r = 1 \times 10^{-4}$ 付近であり、これは図 5.85 から $h \sim \log r$ 曲線が最下点を示す付近のせん断ひずみであることがわかる。したがって、せん断ひずみの増加にしたがって h も増加するという範囲では、 $G/G_0 \sim h$ 関係は中実、中空共に拘束圧や間隙比に影響されない同様の分布傾向を示している。

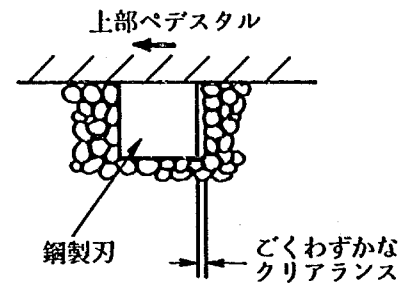


図 5.89 鋼製刃付近の断面

5.5 大型せん断試験装置を用いた繰り返し試験における問題点

4.5 と同様に試験機の特長や試験方法などについて気がついた問題点及び注意点などを下記に示す。

ここでは繰り返し試験について述べる。

(1) 締固め方法について

供試体の締固め方法は電動ランマーを用いて行った。供試体内の密度の変化を考えると、最下層ほどよく締まっているという密度の不均一性が存在する。繰り返し試験によって生じるせん断ひずみは $r = 10^{-5} \sim 10^{-3}$ とごく小さな量であり、上記のような密度の不均一性、特に力を伝える上下端面付近の密度のバラツキが試料の動的な変形特性に大きく影響を及ぼすことが考えられる。特に中空試験においては供試体上下端面に鋼製刃を入れるため、密度のバラツキが生じやすく、目標密度がゆるいほど所定の密度にするのがむずかしい。そのことが試験結果にも表われ、図 5.40～42 に示すように密度の小さい方が試験の再現性が悪い。

(2) 端面処理について

ここでいう端面処理は供試体上下端面の凹凸を細粒分でもって埋めることをいう。粒度分布の悪い材料の場合、供試体上下端面の凹凸が大きくなり、動的な変形特性へ影響を及ぼすことが考えられる。特に中空試験の場合、供試体上下端面に鋼製刃があり、この鋼製刃によってせん断応力を伝えるため、端面処理の影響は中実試験より大きいものと思われる。しかし、静的試験の場合、端面処理による粗粒材料の強度定数に及ぼす影響はほとんどないという報告⁴⁾もある。

(3) トルクの伝達について

中空試験の場合、供試体解体時にトルク伝達面を見ると、円周上に細いスジが数本生じている。また、ペンレコーダーに出力された繰り返しせん断応力の波形を見ると、中立軸付近で力の作用方向が変化するとき波形の乱れが生じている。これらはいずれもトルク伝達部のボルトのズレのために生じたものと思われる。トルクの伝達は面摩擦によって伝えられ、ボルトの締付け力によって

*なお、図中の直線は測定データに近似させたものである。
以後すべての図について同様である。

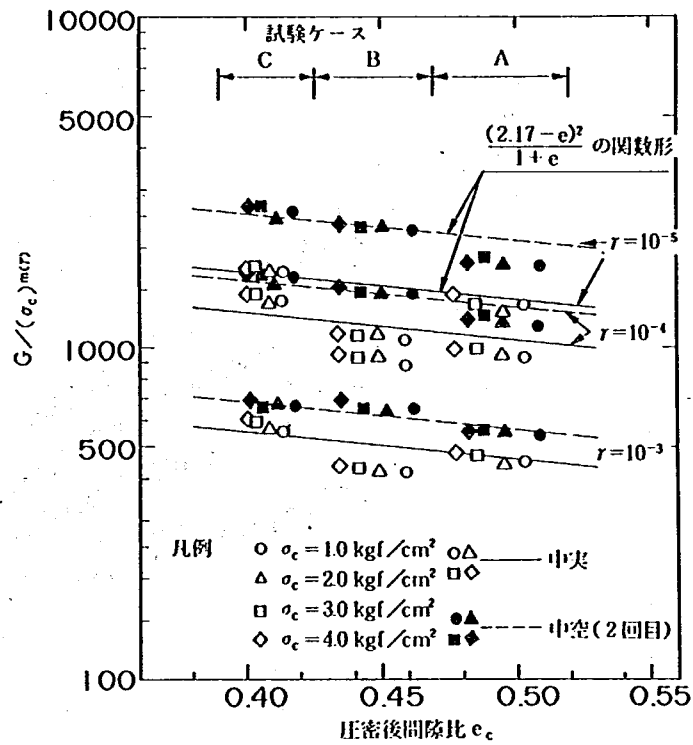


図 5.77 $G/(\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係

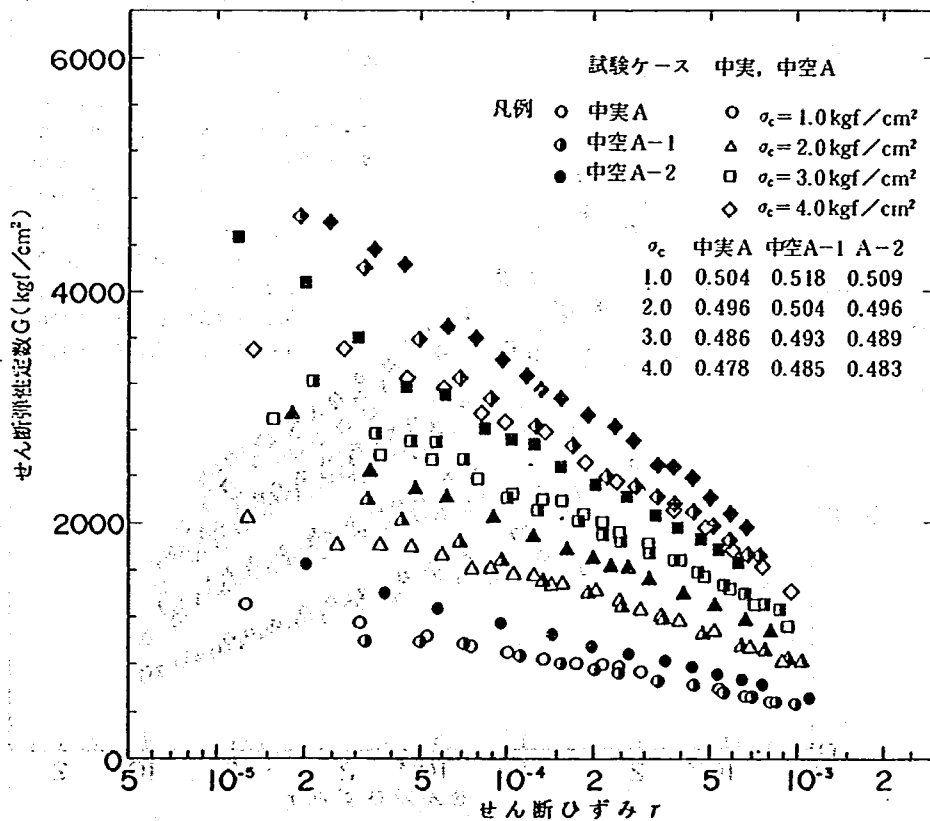


図 5.78 $G \sim \log r$ 関係 (a)

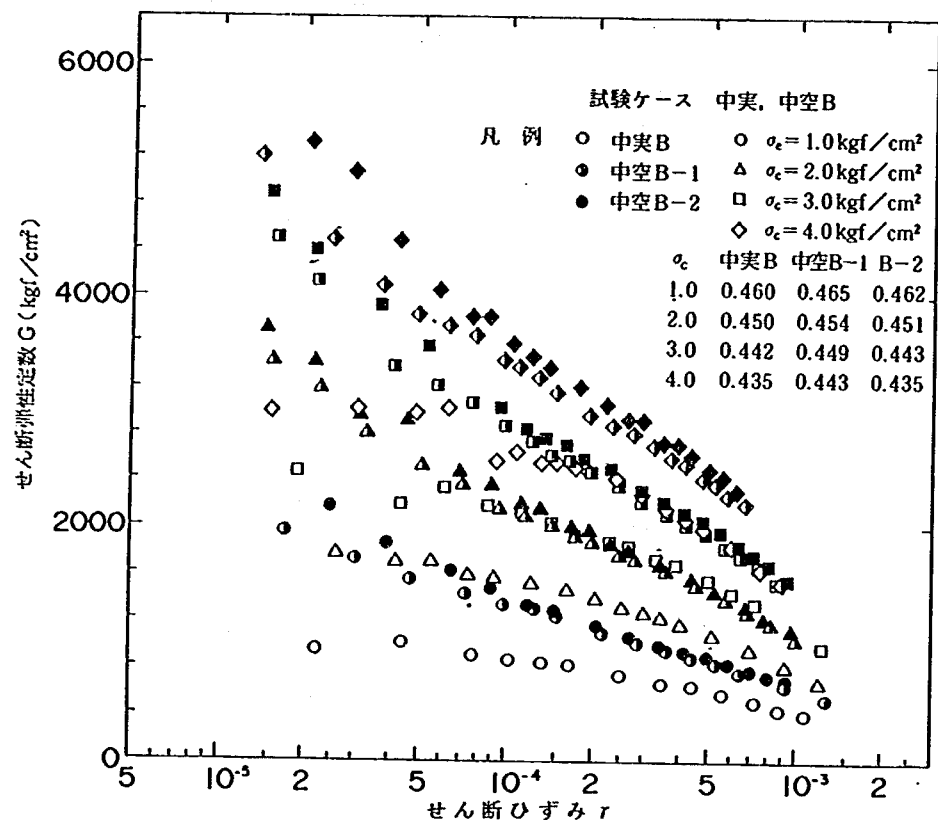


図5.79 $G \sim \log r$ 関係 (b)

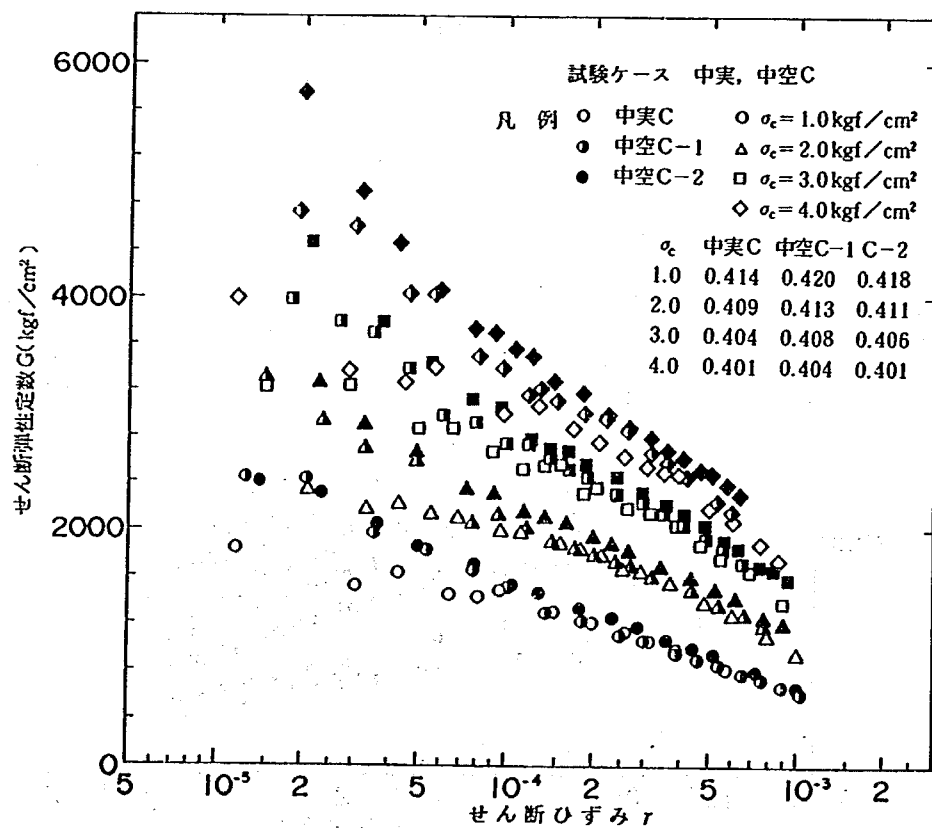


図5.80 $G \sim \log r$ 関係 (c)

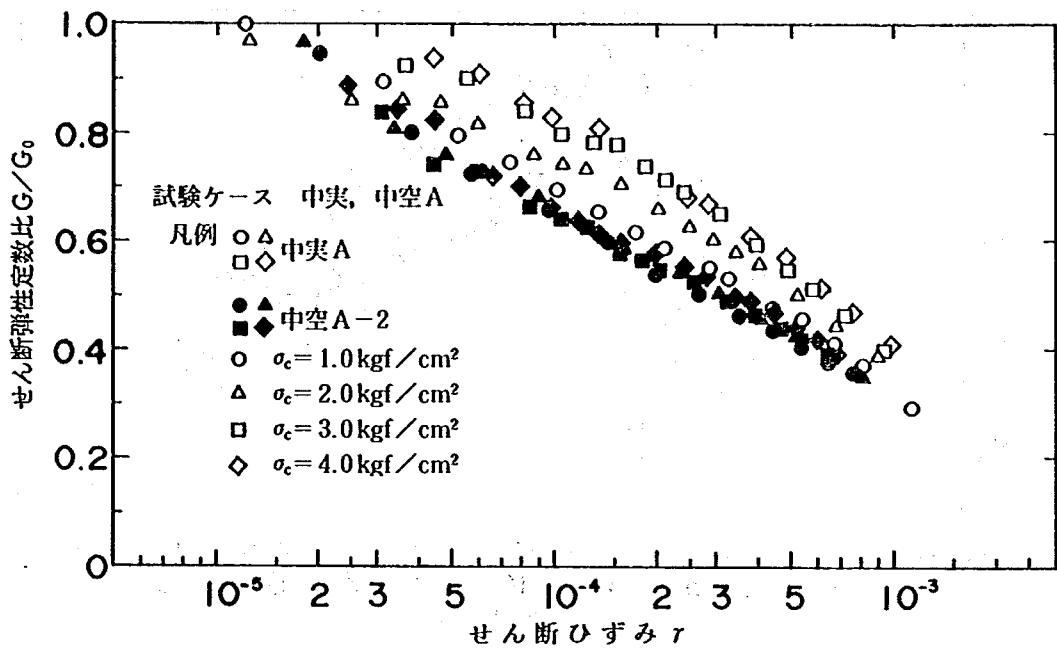


図 5.81 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (a)

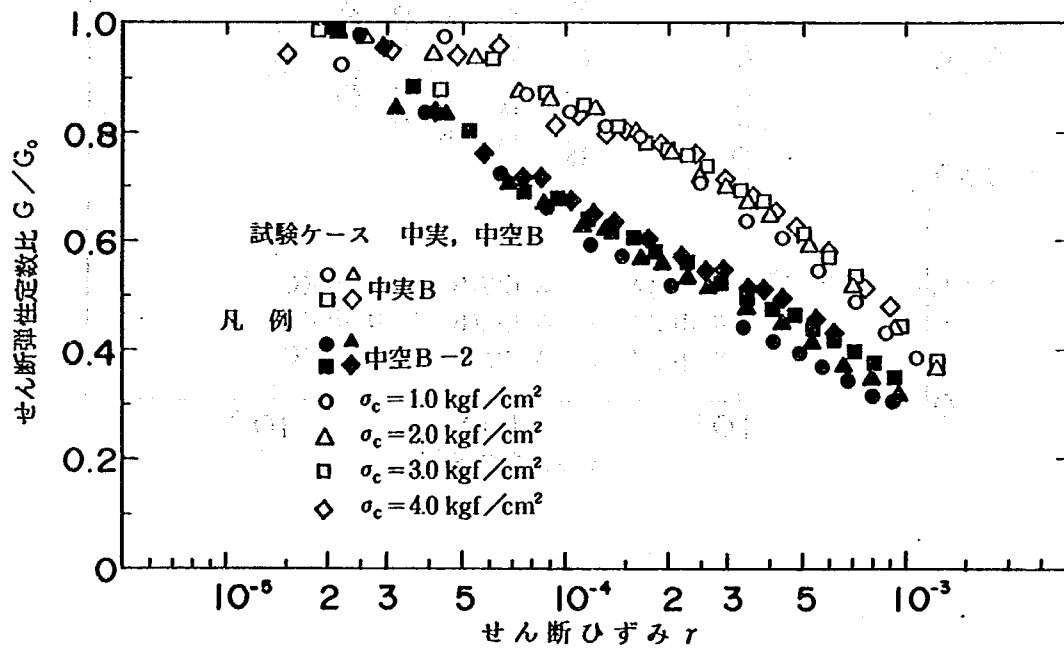


図 5.82 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (b)

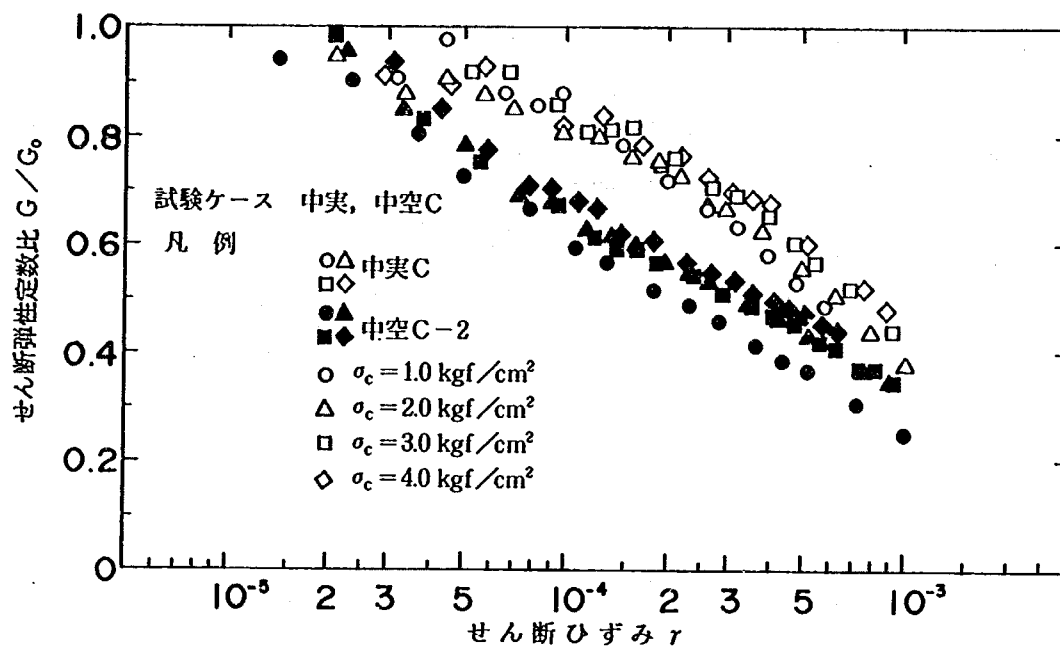


図 5.83 $G/G_0 \sim \log r$ 関係 (c)

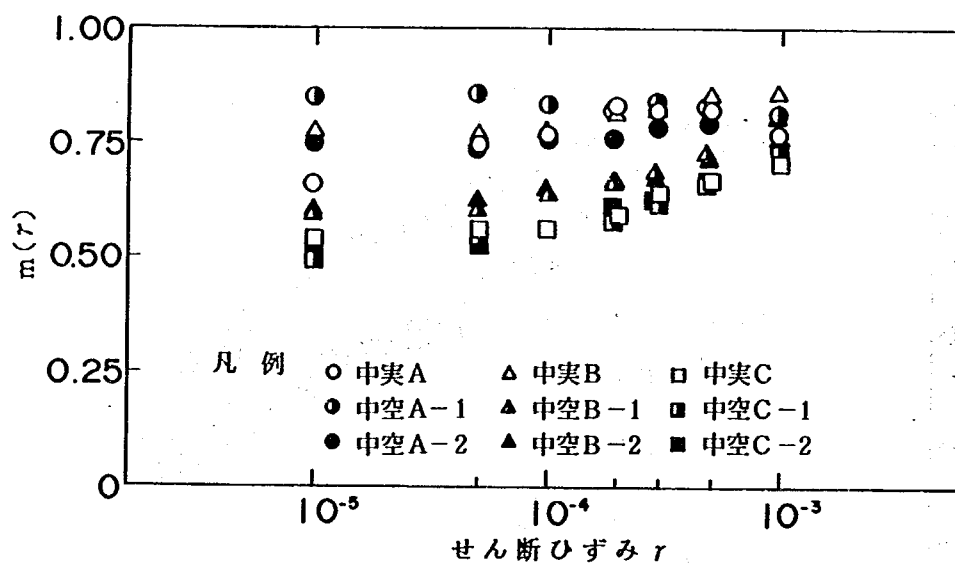


図 5.84 $m(r) \sim \log r$ 関係

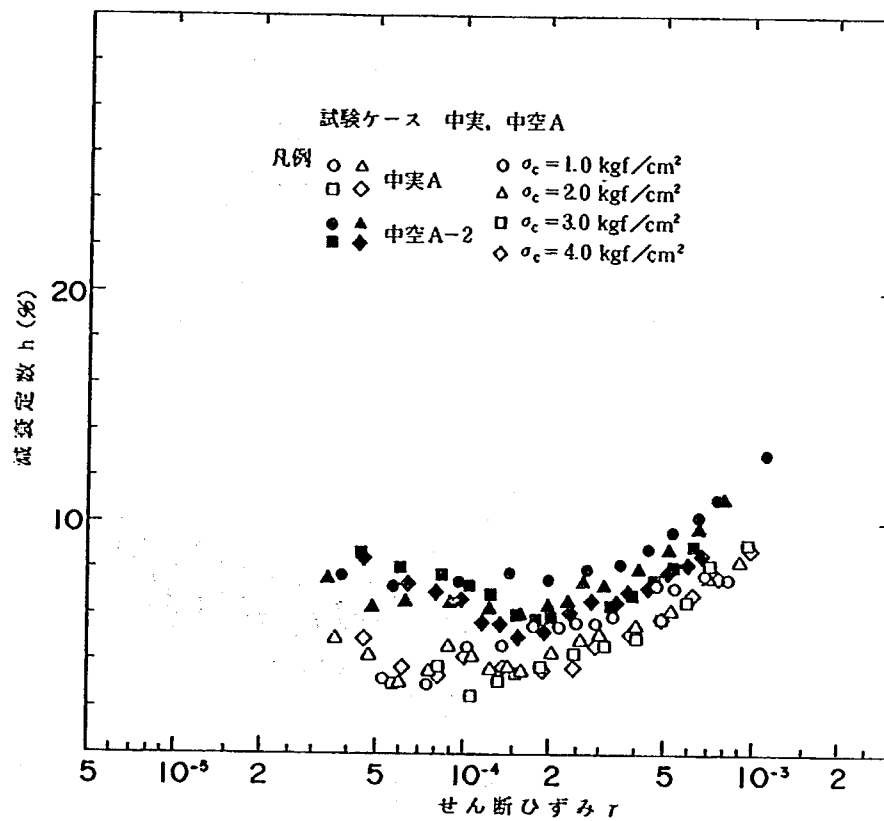


図 5.85 $h \sim \log r$ 関係 (a)

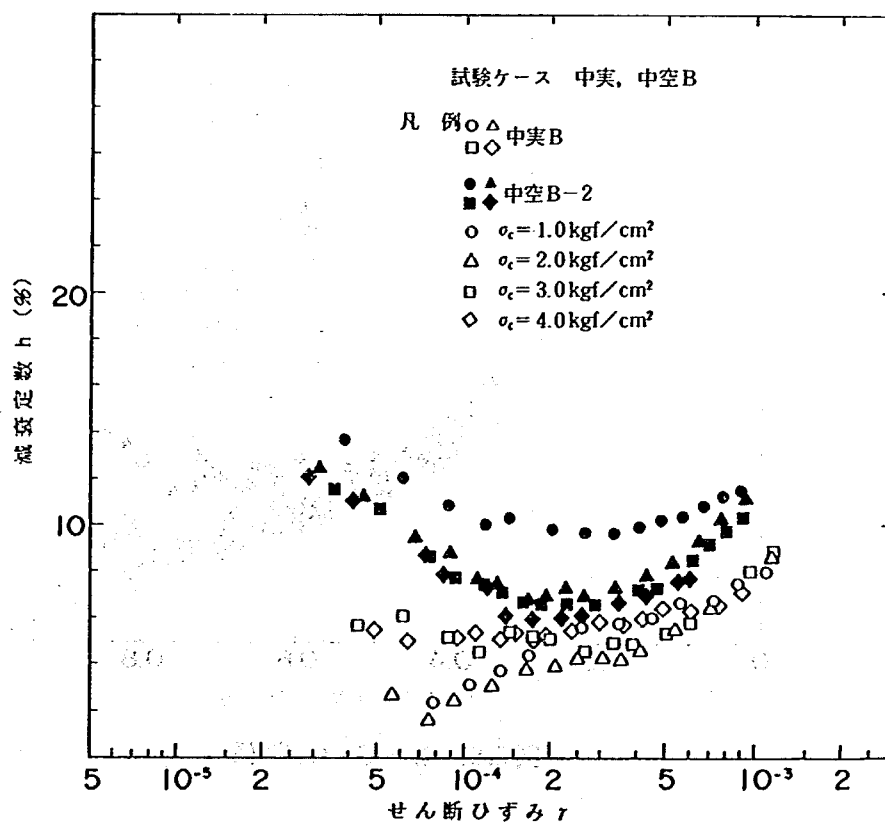


図 5.86 $h \sim \log r$ 関係 (b)

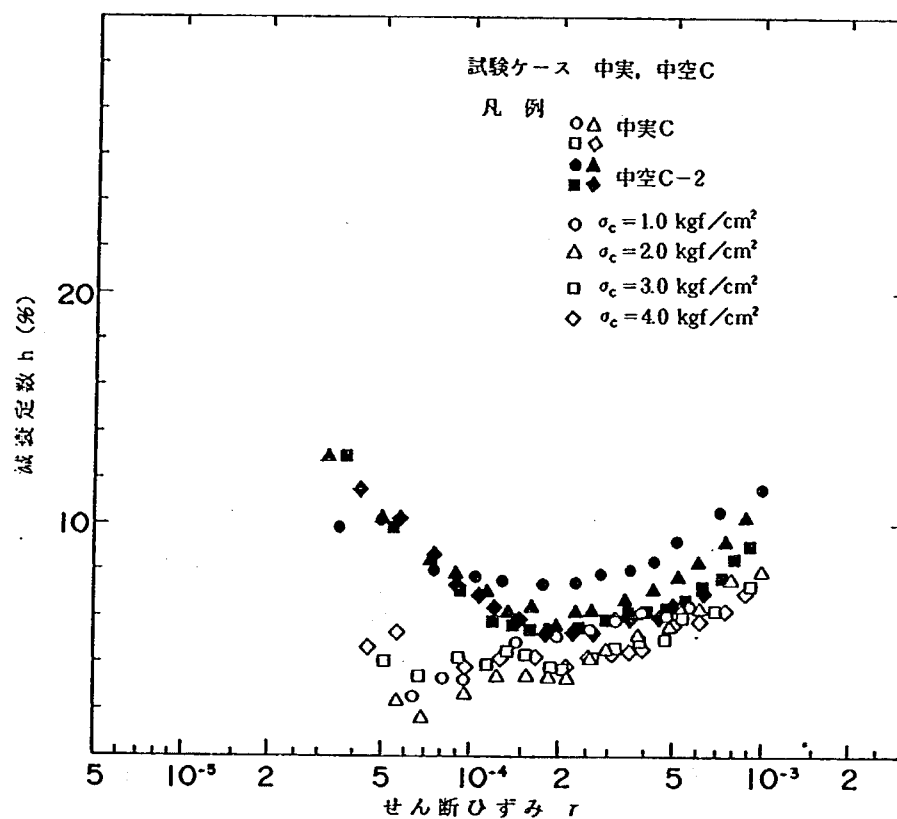


図5.87 $h \sim \log r$ 関係 (c)

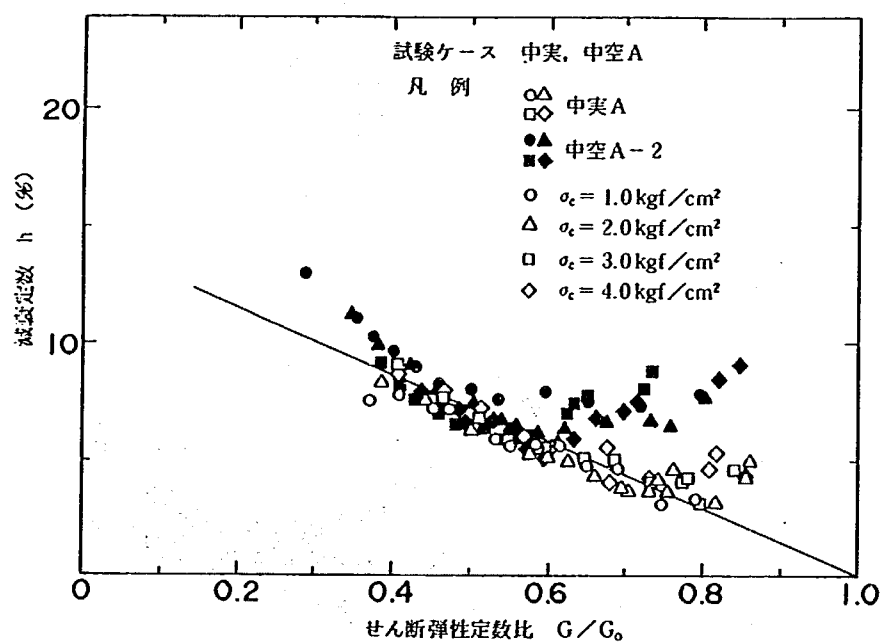


図5.90 $h \sim G/G_0$ 関係

摩擦力を増大しているが、ボルトには必ずわずかなクリアランスがあり、これが悪影響を及ぼしていると考えられる。以上のことから最大せん断応力は制限せざるを得なかった。しかし、現在では改善策を検討し、早急に改良する予定である。

(4) アンプのノイズ

検出器の精度は、検出器自身、ケーブル、アンプ、出力機器などの総合精度として求められるものである。ここでは、アンプのノイズがどの程度かを調べることにした。

調査方法は中空試験後の供試体を利用して、制御はすべて停止状態にしておき(ただし、油圧ポンプは作動中である)、ペンレコーダーの出力レンジを最大(1mV/FS)にして各計測項目を出力させた。

調査結果は表5.10に示す。アンプのノイズが特に大きいのはせん断ひずみ γ と軸ひずみ ϵ_a の変位関係で0.2~0.45mV程度であり、その他の項目は0.03~0.10mV程度であった。

表5.10 アンプのノイズ

計測項目	T	τ	γ	ΔD_θ	σ_a	σ_r	ϵ_a	ΔV
アンプのレンジ	tf 1	kgf/cm ² 1	% 1	mm 2	kgf/cm ² 5	kgf/cm ² 5	% 0.5	ℓ 10
フルスケールの電圧値	mV 100	"	"	"	"	"	"	mV 100
アンプのノイズ	mV 0.086	mV 0.072	mV 0.45	mV 0.097	mV 0.028	mV 0.03	mV 0.19	mV 0.056
制御方法	応力	応力	ひずみ	ひずみ	応力	応力	ひずみ	—

(5) XYレコーダーのレンジ切換の影響

動的な変形特性G, hはXYレコーダーに出力された応力~ひずみのヒステリシスカブから求めた。したがって、X方向(ひずみ)、Y方向(応力)のレンジの設定によって、データの読み取り誤差は大きく影響されてくるものと思われる。

試験ケースB-1を例にとって調べた結果を表5.11、図5.91, 5.92に示す。表5.11はくり返し試験時の設定レンジであり、図5.91, 5.92はレンジ切換時を图示したものである。

(6) ゴムスリーブの影響について

ゴムスリーブ(厚さ3mm)は供試体の周囲を被っているので載荷応力の何%かは分担しているものと考えられる。そこで、下記に示すように、あるせん断ひずみ時における載荷荷重 ΔP 、 ΔT とゴムスリーブによる分担力 ΔP_m 、 ΔT_m を求め、補正する必要があるかどうかを検討した。なお、ゴムスリーブは完全弾性体($E=30\text{kgf/cm}^2$)で、供試体と一体に変形すると仮定して求めた。

表 5.11 くり返し試験時の設定レンジ

拘束圧 σ_c kgf/cm ²	せん断ひずみ r_{at}	設定レンジ mV/cm		拘束圧 σ_c kgf/cm ²	せん断ひずみ r_{at}	設定レンジ mV/cm	
		X 方向	Y 方向			X 方向	Y 方向
1.0	1.72×10^{-5}	0.5	1.0	3.0	1.61×10^{-5}	0.5	1.0
	3.07				4.17		
	4.69				5.82		2.0
	7.24				9.99		
	9.85				1.46×10^{-4}		5.0
	1.25×10^{-4}		2.0		1.94		
	1.50				2.97	1.0	
	2.17				3.61		
	3.59				4.24		
	4.36	1.0	5.0		4.95		10.0
	5.25				5.71		
	6.47				6.54		
	9.18				7.53		
	1.28×10^{-3}	2.0			8.76		
2.0	1.56×10^{-5}	0.5	1.0	4.0	1.41×10^{-5}	0.5	1.0
	3.33				3.70		
	7.12		2.0		6.34		2.0
	1.17×10^{-4}				9.79		
	1.73	1.0	5.0		1.12×10^{-4}		5.0
	2.43				1.51		
	3.57				2.34		
	4.52				3.68	1.0	10.0
	5.72				4.76		
	6.83				5.28		
	8.32	2.0	10.0		5.91		
	1.01×10^{-3}				6.57		

② 中実試験

試験ケース 中実 A, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $r = 1.02 \times 10^{-4}$, $G = 920 \text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.221$ のとき

載荷荷重 $\epsilon_a = r / (1 + \nu) = 8.35 \times 10^{-5}$

$$E = G \cdot 2(1 + \nu) = 2247 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\Delta\sigma = E \cdot \epsilon_a = 0.188 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\Delta P = \Delta\sigma \cdot A = 236 \text{ kgf}$$

ゴムスリーブによる分担力

$$\Delta\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_a = 2.51 \times 10^{-3}$$

$$\Delta P_m = \Delta\sigma_m \cdot A_m = 0.0475 \text{ kgf}$$

$$\therefore \Delta P : \Delta P_m \div 5000 : 1$$

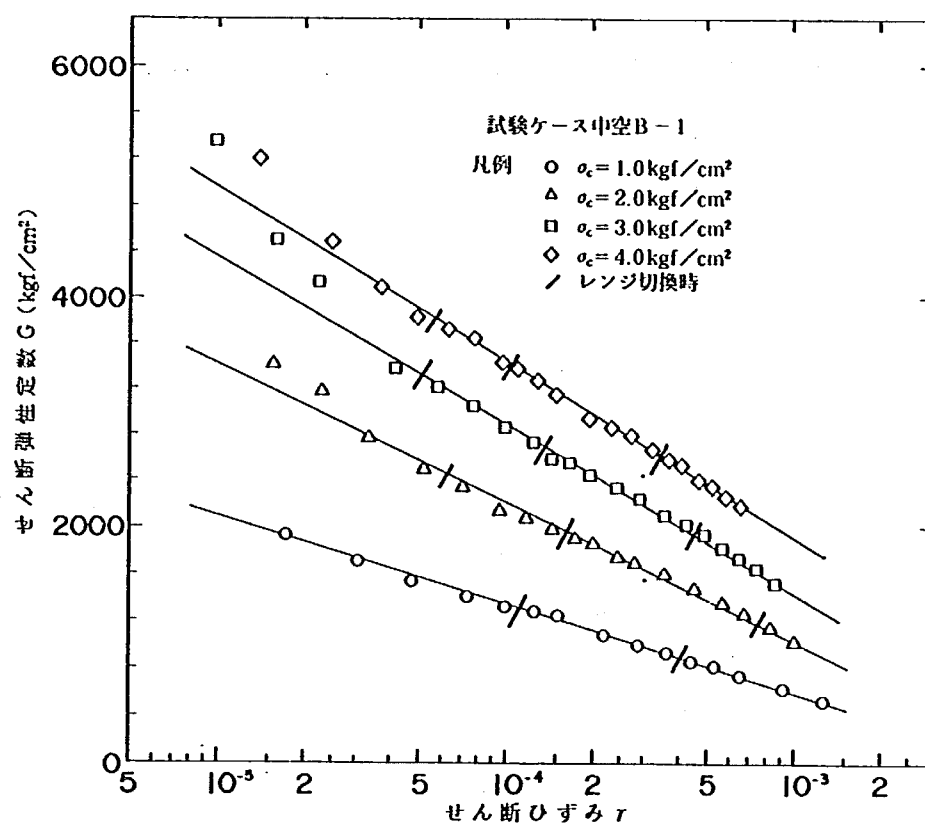


図 5.91 レンジ切換の影響 ($G \sim \log \gamma$ 関係)

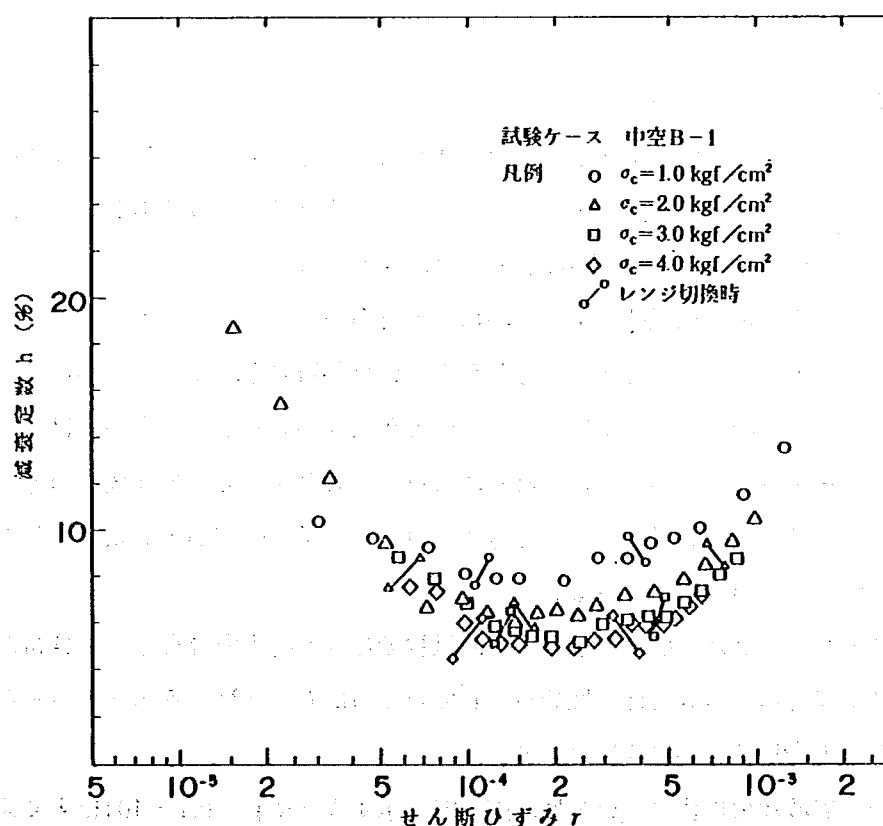


図 5.92 レンジ切換の影響 ($h \sim \log \gamma$ 関係)

⑥ 中空試験

載荷トルク ΔT とゴムスリーブによる分担力 ΔT_m は次式によって求められる。

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{2}{3} \pi (R_o^3 - R_i^3) \Delta \tau_{at} \\ \Delta T_m &= 2 \pi t_m (R_o \Delta \tau_o + R_i \Delta \tau_i) \\ &= \frac{2 \pi t_m G_m}{R} \cdot (R_o^2 + R_i^2) r_{at}\end{aligned}$$

ただし, $\Delta \tau_o = G_m \cdot r_o$

$$\begin{aligned}&= G_m \cdot r_{at} \cdot \frac{R_o}{R} \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{2} (R_o + R_i)\end{aligned}$$

試験ケース 中空 A-1, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $r_{at} = 1.12 \times 10^{-4}$, $G = 884 \text{ kgf/cm}^2$,

$\Delta \tau_{at} = 0.099 \text{ kgf/cm}^2$ のとき

$$\begin{aligned}\text{載荷トルク } \Delta T &= \frac{2}{3} \pi (R_o^3 - R_i^3) \Delta \tau_{at} \\ &\div 11600 \text{ kgf} \cdot \text{cm}\end{aligned}$$

ゴムスリーブによる分担力 ($G_m = 90 \text{ kgf/cm}^2$)

$$\begin{aligned}\Delta T_m &= \frac{2 \pi \cdot t_m \cdot G_m}{R} (R_o^2 + R_i^2) \cdot r_{at} \\ &= 0.76 \text{ kgf} \cdot \text{cm}\end{aligned}$$

$$\therefore \Delta T : \Delta T_m = 15000 : 1$$

以上のようにゴムスリーブによる分担力はごく小さく, 補正する必要のないことがわかった。

(7) セン断応力の計算方法について

せん断応力の計算方法は供試体半径方向のせん断応力分布を一定としてトルクから求めている。しかし, 試料の応力～ひずみ関係から考えると, 供試体半径方向のせん断応力分布が一定となるのはせん断ひずみが大きい(数%以上)範囲であり, 繰り返し試験のように $r \leq 1\%$ のせん断ひずみを対象としている場合には供試体の半径方向に台形分布を示していると考えられる。3.4.2 に示すようにせん断応力分布を弾性分布と仮定したとき(台形分布)と, 剛-完全塑性分布と仮定したとき(一定分布)ではせん断応力は約 7% ほど後者の方が大きい。しかし, 真の値はこの両者の間にあり, せん断ひずみが小さいほど前者に近いと考えられる。したがって, 現在後者の方法でせん断応力を求めているので G は過大評価していると考えられ, 中空試験の方が中実試験よりもせん断弾性定数 G が大きい原因の一つと考えられる。

以上のことから, セン断強度を求める静的試験ではせん断応力分布を一定分布として, また変形特性を求める繰り返し試験では弾性分布としてせん断応力を計算するべきであると考えられる。

(8) 繰り返し応力の周波数の影響について

砂の場合, 周波数の影響については, 図 5.93 に示すように $f = 0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ と変えても G には影響しないことが知られている⁴⁹⁾。そこで, 粗粒材料についても周波数の影響を調べるため, 繰り返し

応力の周波数を $f = 0.02, 0.2 \text{ Hz}$ の 2 種類に変えて、繰り返し中空試験を実施した結果を図 5.94, 95 に示す。

この図から、G の場合、 $r = 10^{-4}$ まではほとんど同様であるが、 $r = 10^{-4}$ をこえると若干差が出てくるようである。また、h の場合、 $r = 5 \times 10^{-4}$ までは同様の値を示しているが、 $r = 5 \times 10^{-4}$ をこえると約 2% 程度の差が生じている。したがって、繰り返し応力の周波数の影響はせん断ひずみの小さい場合に表われるという結果が得られた。なお、上記の差は応力履歴の影響も考えられる。

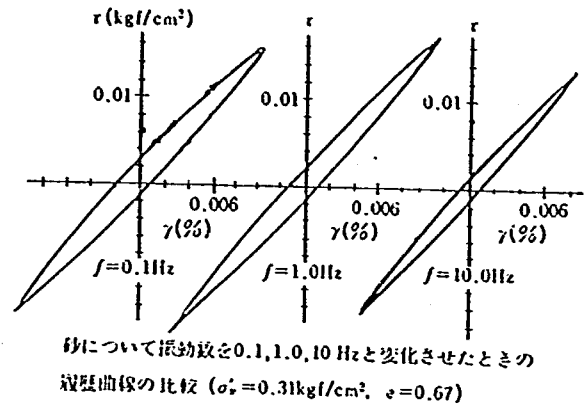


図 5.93 動的単純せん断試験における履歴曲線と載荷速度の関係(原・清田⁴⁵⁾)

(9) 載荷回数 N の影響について

$N = 2, 5, 10$ の影響については、5.4.1, 5.4.2 のところで述べたようにほとんど影響のないことがわかった。そこで $N \geq 10$ 以上の載荷回数の影響を調べるため、繰り返し試験後の供試体を用いて $N = 100$ までの繰り返し試験を実施したので、その結果を図 5.96 に示す。

この図から、G は載荷回数の増加によってわずかずつ増大し、 $N = 60$ で最大値を示し、その後はほとんど変化しなかった。 $G_{\max}$ に対する変化率は $N = 2 \sim 10$ では約 1% 程度であったものが、 $N = 2 \sim 100$ では約 5~6% と増加している。一方、h は載荷回数の増大によってわずかずつ減少する傾向を示し、その変化率は $h_{\max}$ に対して $N = 2 \sim 10$ では約 10%， $N = 2 \sim 100$ では約 21% となっている。

(10) データ整理方法について

データ整理はディジタイザ (Tektronix 4081 Graphic System) を用いて行った。しかし、せん断ひずみが小さい場合 ($r \leq 8 \times 10^{-5}$)、ディジタイザでは読み取り誤差が大きくなるためスケールによってデータを読み取って G を求めた。そして $r \approx 8 \times 10^{-5}$ 付近の場合はスケールとディジタイザの両方の方法によって行い、互いにチェックするようにした。

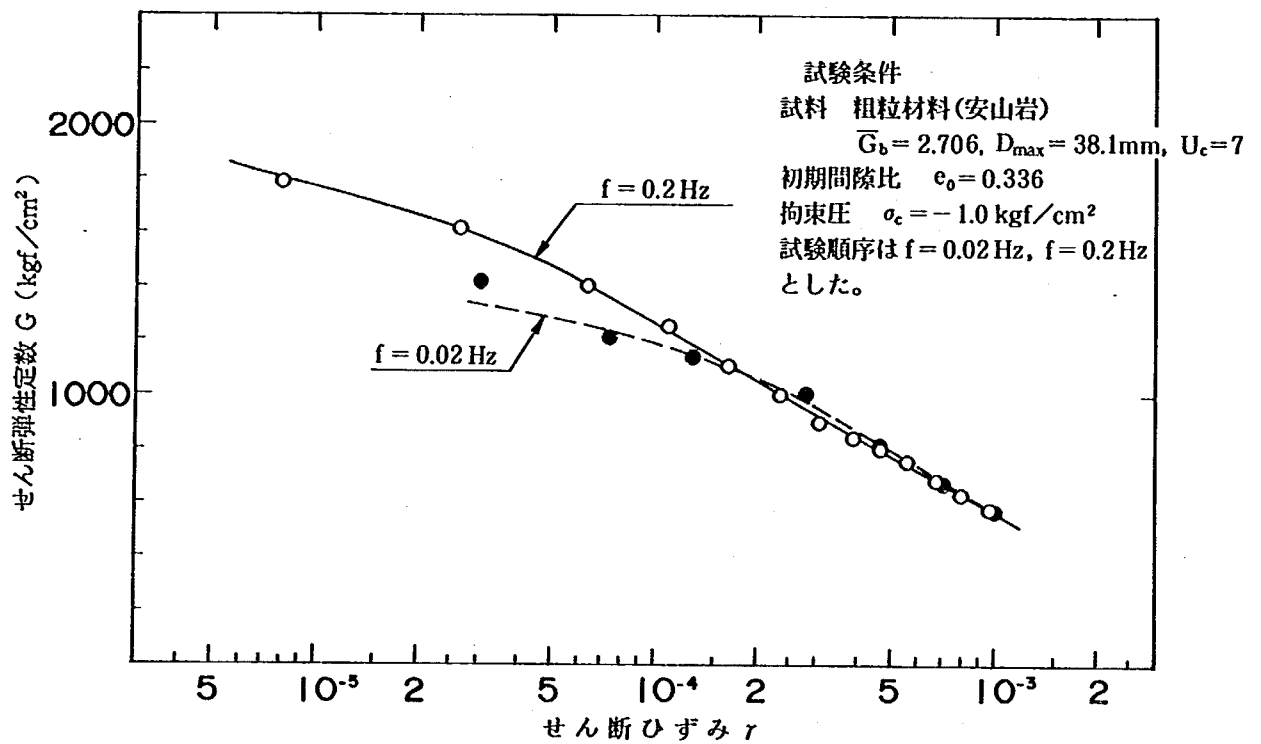


図 5.94 周波数の影響 ($G \sim \log r$ 関係)

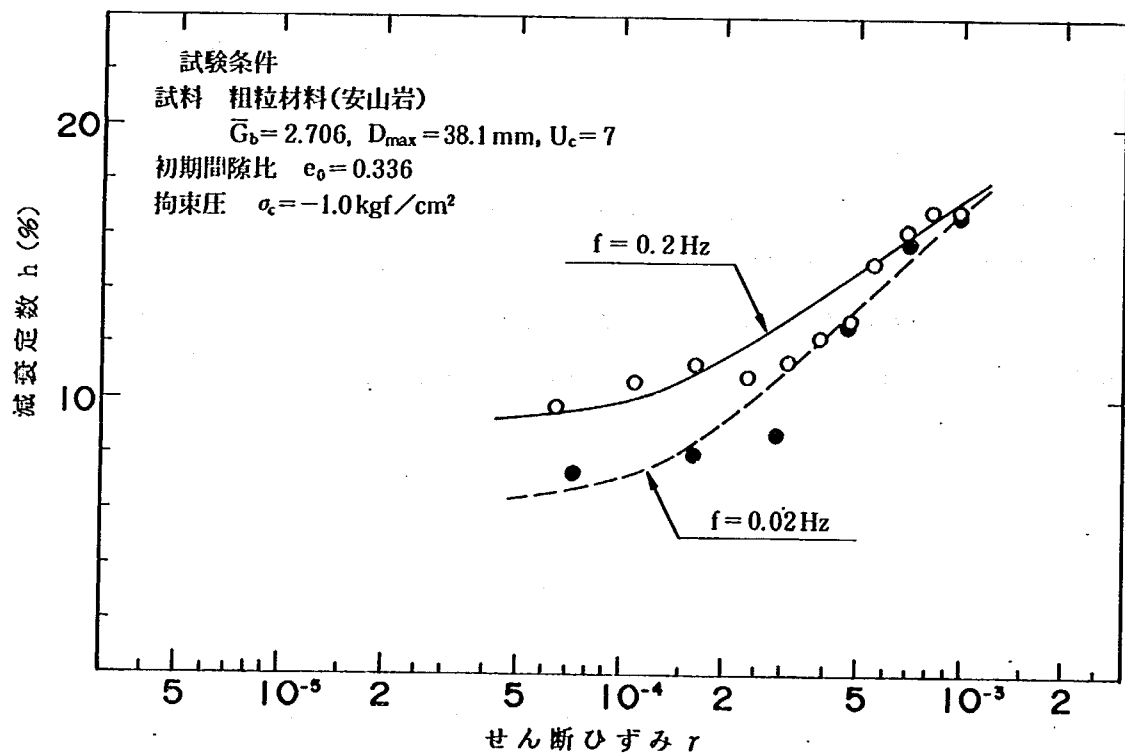


図 5.95 周波数の影響 ($h \sim \log r$ 関係)

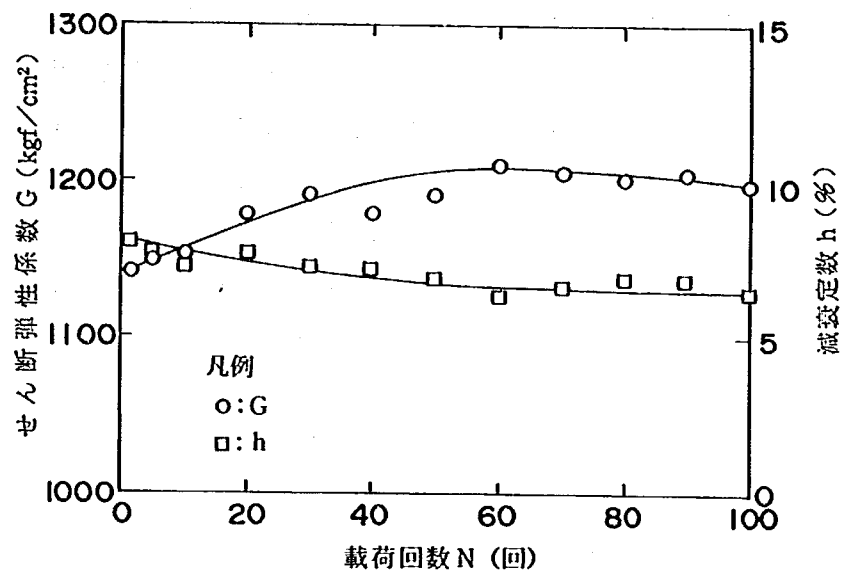


図 5.96 载荷回数の影響 (G, h ~ N 関係)

6. 結論及び今後の問題点

粗粒材料のせん断強さを求める室内試験としては、比較的応力状態が明確で精度も良く、構造が簡単な三軸試験機が多く用いられている。しかし、現実の応力状態との対応を考えると主応力方向が固定されていること、 $\sigma_2 = \sigma_3$ (圧縮時)又は $\sigma_2 = \sigma_1$ (伸張時)であることなど異なる点が多い。そこで現実の応力状態である単純せん断状態を再現でき、しかも主応力方向は一定又は連続的に回転させることのできる中空ねじり単純せん断試験の可能な大型せん断試験装置を開発・製作した。そして、大型せん断試験装置の性能及び精度の検定を行い、豊浦砂を用いて静的及び動的な予備試験を実施して試験装置の信頼性を確かめ、さらに粗粒材料について動的な変形特性を求めると共に中実と中空試験の試験方法の違いによる影響を調べたところ以下のことが判明した。

(1) 大型せん断試験装置の性能及び精度の検定

① 中空試験における計測項目

- ① 中空用軸力計は精度 $\pm 0.15\%$ /FSの模擬試料を用いて校正及び検定したところ精度 $\pm 0.36\%$ /FSであった。
- ② トルク計は精度 $\pm 0.13\%$ /FSの検証用荷重計を用いて校正及び検定したところ精度 $\pm 0.25\%$ /FSであり、また死荷重による最小容量(0~360 kgf・m)の誤差は ± 8 kgf・mであった。
- ③ 中空用軸力計とトルク計は2分力計であるため、相互影響試験を実施したところ、互いに影響の及ぼさないことが確められた。
- ④ 中空用軸変位計は精度0.1mmの測長器を用いて検定したところ精度は $\pm 0.08\%$ /FSであった。
- ⑤ ねじり角度計は精度 $\pm 10''$ のロータリーエンコーダを用いて検定したところ精度は $\pm 0.04\%$ /FSであった。
- ⑥ ねじり変位計は上記の精度 $\pm 0.04\%$ /FSのねじり角度計を用いて検定したところ精度は $\pm 0.29\%$ /FSであり、精度1/100 mmのダイヤルゲージによる最小容量(0~30 mm)の誤差は ± 0.09 mmであった。
- ⑦ 微小変位計は精度1/1000 mmのマикроメータを用いて検定したところ精度は 1.53% /FSであった。

② 中実試験における計測項目

- ① 中実用軸力計は精度 $\pm 0.2\%$ の万能アムスラー試験機を用いて検定したところ精度は $\pm 0.11\%$ /FSであり、死荷重による最小容量(0~340 kgf)の誤差は ± 20 kgfであった。
- ② 中実用軸変位計は精度 ± 0.1 mmの測長器を用いて検定したところ精度は $\pm 0.13\%$ /FSであり、精度1/100 mmのダイヤルゲージによる最小容量(0~1 mm)の誤差は ± 0.07 mmであった。

③ 共通の計測項目

- ① 側圧計及び間隙水圧計は精度 $\pm 0.25\%$ /FSの精密ブルドン管式圧力計を用いて検定したところ

ろ精度はそれぞれ $\pm 0.25\%$ /FS, $\pm 0.10\%$ /FSであり, 精度 $\pm 0.05\%$ の圧力検定器による最小容量($0\sim 7\text{ kgf/cm}^2$)の誤差はそれぞれ $\pm 0.02\text{ kgf/cm}^2$, $\pm 0.01\text{ kgf/cm}^2$ であった。

⑥ 外体積変化計は精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ の測長器を用いて検定したところ精度は $\pm 0.29\%$ /FSであった。

⑦ 内体積変化計は精度 $\pm 10\text{ cc}$ のメスシリンダーを用いて検定したところ精度は $\pm 0.13\%$ /FSであり最小容量($0\sim 7\text{ l}$)の誤差は $\pm 70\text{ cc}$ であった。

④ 制御精度の検定

① 静的軸ひずみ制御は豊浦砂を用いた試験結果によると誤差は約 $\pm 1\%$ 程度であり, 実用上十分な精度を持っている。

② 静的せん断ひずみ制御は無負荷のときの誤差は $\pm 1\%$ 以下であり, 豊浦砂を用いた場合の誤差は約 $\pm 6\%$ であった。

③ 繰り返し軸応力制御は粗粒材料を用いた試験結果によると実測応力は設定応力に対して $0.93\sim 0.99$ の範囲にある。

④ 繰り返しせん断応力制御は粗粒材料を用いた試験結果によると実測応力は設定応力に対してほぼ 0.96 と一定であった。

⑤ 圧密制御の検定

等方, 異方圧密制御試験を実施したところ, ほぼ設定どおり制御していることが確かめられた。

⑥ 安定性試験

安定性試験($19:00\sim$ 翌日 $9:30$)を実施したところ, 各計測項目の変動幅は $\Delta\sigma_a = \pm 0.2\text{ kgf/cm}^2$, $\Delta\epsilon_a = \pm 2 \times 10^{-6}$, $\Delta T = \pm 0.045\text{ tf}\cdot\text{m}$, $r_{at} = \pm 1 \times 10^{-4}$, $\Delta D\theta = \pm 0.02\text{ mm}$ であり, 安定していることが確認された。

⑦ 単純せん断変形に関する確認試験

供試体の変形状態が理想的な単純せん断変形状態となるかどうかを確認するため, 供試体上下端面を, ① 直径 23 mm , 深さ 10 mm の半円球のくぼみをつける方法, ② 4.4 cm 角, 長さ 19 cm の鋼製刃を4ヶ所設ける方法の2通りの方法を考え, 中空試験を実施した。試験結果は写真19, 20に示すように前者の方法では供試体上端面ですべりが生じ, 又後者の方法では理想に近い単純せん断変形状態が生じていることが確認された。

(2) 豊浦砂を用いた予備試験

豊浦砂($G_s = 2.65$, $w = 0.11\%$, $e_{\max} = 0.930$, $e_{\min} = 0.632$)を用いて大型せん断試験装置の特性や試験方法を調べるため, 中実, 中空試験による静的試験及び繰り返し試験を実施した。

① 試験方法について

② 中実試験

・試験方法についてはほとんど問題ない。ただ, 供試体が大きいので σ_a , σ_r などの初期設定値を精度よく求めなければならない。

⑥ 中空試験

- ・締固めは電動ランマーを用いて行ったがほとんど問題なかった。
- ・鋼製刃を入れることによって理想に近い単純せん断変形状態を生じさせることができた。
- ・供試体が大きいのので σ_a , σ_r などの初期設定値を精度よく求めなければならない。
- ・温度応力の影響, トルクの伝達についてせん断ひずみの測定方法(繰返し試験のとき)などについて多少問題があった。
- ・マニュアル制御, 圧密, 速度制御, 繰返し制御などの操作は簡単で使いやすい。

② 静的試験結果について

③ 中実試験

- ・応力～ひずみ曲線では, 密なほど明瞭なピークが見られ, ひずみが大きくなると密度に関係なく一定値に収束するようである。
- ・ $\phi_o \sim e_o$ 関係では D 40 は D 10 より約 1° 大きく, また $\phi_o \sim e_c$ 関係では約 2° 大きい。
- ・他の研究機関の試験例と比較すると, D 40 はバラツキの範囲(約 $\pm 1^\circ$ 程度)に入っている。($\phi_o \sim e_o$ 関係)
- ・ひずみが小さいときの $\phi_{oi} \sim e_o$ の相関関係はよいが, ひずみが大きくなると差が生じる。

⑥ 中空試験

- ・応力～ひずみ曲線では, 明瞭なピークが見られなかった。
- ・龍岡らのねじり試験結果と比較すると, $e_o = 0.64$ ではほぼ同様であるが, $e_o = 0.73$ で約 3° の差がある。これは, 試験装置や供試体の作成方法の違いなどによるものであろう。

③ 繰返し試験結果について

③ G, h ~ log r 関係

- ・G は, 中実では $r = 10^{-4}$ をすぎて急減しているが, 中空では r の増大とともに直線的に減少している。
- ・他の研究機関の試験例と比較すると, $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合, 中実は三軸グループと, 中空は単純せん断グループと良く近似している。
- ・h は中空の方が中実より 1 ~ 4 % 程度大きく, 低拘束圧ほど差が大きい。

⑥ G, h ~ σ_c 関係

- ・G は拘束圧の依存性が明瞭に認められ, $G \propto (\sigma_c)^{m(r)}$ の $m(r)$ は約 0.4 程度に収束するようである。
- ・また, h も拘束圧の依存性が見られる。

③ G ~ h 関係

- ・中実, 中空ともに龍岡らの平均曲線よりも下回り, G/G_o が小さいほど h の差はひろがる傾向を示している。

④ 載荷回数 N (中空試験の場合)

- $N = 2, 5, 10$ の G を比較すると, $r \geq 5 \times 10^{-4}$ の場合, $N = 10$ に対して $\pm 5\%$ 程度の範囲内に収まっている。

- h の場合, せん断ひずみが大きいほど, N による影響が現われている。

(3) 粗粒材料の繰り返し試験

東北地建七ヶ宿ダムの粗粒材料(安山岩; $\bar{G}_0 = 2.579$, $\bar{w} = 2.56\%$, $\bar{Q} = 3.69\%$, $e_{\max} = 0.720$, $e_{\min} = 0.383$)を用いて動的な変形特性を求めるため, および試験方法の違いによる影響を調べるため, せん断ひずみ r 拘束圧 σ_c , 間隙比 e , 載荷回数 N をパラメータとして繰り返し中実試験, および繰り返し中空試験を実施した。

① 中実試験結果

① G, $h \sim \log r$ 関係

- $G \sim \log r$ 曲線は豊浦砂のように $r = 10^{-4}$ をすぎて急減するのではなく, なだらかに減少しており, G_0 に収束する傾向がある。

- h はせん断ひずみが小さいほどバラツキが大きい, 全体的な傾向としてせん断ひずみの増大によって h は増加している。

② G/α , $h \sim \sigma_c$ 関係

- G/α は拘束圧の増加と共に直線的に増加し, その勾配である $m(r)$ はせん断ひずみが大きいほど大きく, また間隙比が小さいほど小さい。

- h は拘束圧の増加によって減少しているが $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係ほど明瞭ではない。

③ G, $h \sim e$ 関係

- $G/(\sigma_c)^{m(r)} \sim e_c$ 関係では中実 A, C が $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形とよく近似しているが, 中実 B はやや下回っている。

- $h \sim e_c$ 関係では間隙比による影響は小さい。

④ 載荷回数 N の影響

- G の場合, $N = 10$ に対する変動幅は最大 $\pm 5\%$ 以内であり, N による影響は小さいが, h はせん断ひずみが大きくなると N の増加によって h は減少している。

⑤ $G \sim h$ 関係

- $G/G_0 \sim h$ 関係は $G/G_0 < 0.8$ の場合, 拘束圧, 間隙比による影響は小さく, G/G_0 の減少によって h は直線的に増加している。

⑥ $\nu_d \sim \log r$ 関係

- せん断ひずみ $r \geq 10^{-4}$ では ν_d は $0.15 \sim 0.20$ の範囲に入っており, せん断ひずみによる影響はほとんどなく一定している。また拘束圧が大きいほど ν_d は小さくなっている。

② 中空試験結果

① G, $h \sim \log r$ 関係

- どの試験ケースの場合も $G \sim \log r$ 曲線は直線分布を示し、 G_0 に収束する傾向は見られない。
また、間隙比が小さいほど試験の再現性は良い。

- $h \sim \log r$ 曲線は下に凸型の分布を示し、最下点付近のせん断ひずみは $r \doteq 2 \times 10^{-4}$ 前後である。

⑥ G/α , $h \sim \sigma_c$ 関係

- $G/\alpha \sim \sigma_c$ 関係は中実と同様に直線分布を示し、 $m(r)$ は間隙比が小さい方が小さい。

- $h \sim \sigma_c$ 関係は $\sigma_c \geq 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、拘束圧による影響は小さい。

⑦ G , $h \sim e$ 関係

- 間隙比の増加と共に G は減少し、 $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形とは中実よりも比較的良い近似を示している。

- $h \sim e_c$ 関係はバラツキが大きく、一定の傾向はつかみにくい。

⑧ 載荷回数 N

- N による影響は G の場合は小さく、 h の場合は中実とは逆にせん断ひずみが小さい方が大きい。

⑨ $G \sim h$ 関係

- $G/G_0 \leq 0.6$ の場合、 G/G_0 の減少によって h は直線的に増加し、拘束圧、間隙比による影響は小さい。

⑩ 破碎率

- 繰り返し試験による試料の破碎は大部分供試体作成時の締固めによって生じ、繰り返しせん断試験による破碎はほとんどない。

③ 中実と中空試験結果の比較

中実と中空試験方法における共通点及び相異点を比較すると、共通点としては、試料条件、供試体の作成方法、繰り返し載荷方法などであり、相異点としては、供試体の大きさ、相対密度、制御方法、主応力条件、主応力方向と堆積面の角度、中間主応力、 G の計算方法などである。中実、中空試験結果を比較・検討した結果をまとめると以下のようになる。

③ $G \sim e_c$ 関係において $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ の関数形が中実、中空共に適用できる。

④ G は中空の方が中実よりもやや大きい。等しい。

⑤ $G \sim \log r$ 関係は中実の場合、 G_0 へ収束する傾向が認められるが、中空の場合、ほぼ直線分布を示して G_0 へ収束する傾向は認められない。

⑥ $G \propto (\sigma_c)^{m(r)}$ の $m(r)$ は中実、中空とも同様の傾向を示し、せん断ひずみが大きいほど大きく、間隙比が小さいほど小さい。

⑦ h は中空の方が中実より約 2 割程度大きい。

⑧ $G/G_0 \sim h$ 関係では、せん断ひずみ r の増加するのに従って h も増加する範囲では中実、中空共にほぼ同様の分布傾向を示す。

中空ねじり単純せん断試験を行うことができる大型せん断試験装置は、わが国でははじめて開発・製作されたもので、豊浦砂や粗粒材料を用いて静的、及び動的な中実、中空試験を実施して上記のような数多くの貴重なデータを得ることができた。しかし、粗粒材料を用いた中空試験ははじめての経験であるため、試験装置や試験方法などについていくつかの問題点のあることがわかった。したがって、今後の課題も含めていくつかの問題点を下記に示す。

(1) トルクの伝達について

トルクの伝達面を見ると、円周上に数本のスジが生じ、又せん断応力の制御波形は中立軸付近の力の作用方向が変化するとき乱れが生じている。これらはいずれもトルク伝達部のボルトのゆるみのためと考えられる。したがって、最大せん断応力は制限せざるを得なかった。しかし、現在では改善策を検討し、早急に改良する予定である。

(2) せん断ひずみの測定方法

中空試験におけるせん断ひずみの測定方法は長さ約110 cmのロッドを用いて実際に回転している測定棒とねじり角度計を剛結して検知している。したがって、このロッドの曲がりやねじれによってせん断ひずみは大きく影響される。ねじり角度計の精度は $\pm 0.04\%$ /FSと非常に良いがXYレコーダーに出力されたヒステリシスカーブの波形をみると必ずしも精度の良さが反映されていない。動的な変形特性を求める上でせん断ひずみの測定は非常に重要であり、せん断ひずみの測定方法について早急に検討し改善する予定である。

(3) 温度応力による影響について

中空用軸力計の検出方式は載荷荷重による検出器自身のひずみを差動トランスタイプの変位計を用いて求めているため、三軸室内に水を供給するとき、外気温と水温の温度差によって検出器にひずみが生じ、見かけの軸力が発生することになる。したがって、今後、中空用軸力計の検出方式をひずみゲージ式と併用して改良する予定である。

(4) 供試体の作成方法について

粗粒材料の場合の供試体の締固めは電動ランマーを用いて行ったが、最下層ほどよく締まっているという密度の不均一性が存在する。また、中空試験の場合には供試体上下端に鋼製刃を入れるため、密度のバラツキが生じやすく、目標密度がゆるいほど所定の密度にするのはむずかしい。また粒度分布の悪い材料の場合には供試体上下端面の凹凸が大きくなり、強度や変形特性へ影響を及ぼすことが考えられる。

(5) 初期設定について

試験装置が大きいので軸応力 σ_a や側圧 σ_r などせん断試験開始時の初期設定はどこを基準とするかによって大きく変わってくる。側圧 σ_r は供試体上下端面位置で 0.08 kgf/cm^2 の差がある。また軸応力 σ_a は、供試体中央位置で考えると、供試体の自重+上部ベDESTALの重量+タッチ荷重などが作用し、計算すると $0.20 \sim 0.36\text{ kgf/cm}^2$ にも達する。したがって、せん断試験開始時の応力状態をより精度よく求め、補正しなければならないと思われる。

(6) せん断応力の計算方法について

せん断応力の計算方法は、供試体半径方向のせん断応力分布を一定としてトルクからせん断応力を求めている。しかし、せん断応力～せん断ひずみ曲線はせん断ひずみが小さいときには急増し、せん断ひずみが大きくなると一定値に近づくため、供試体半径方向のせん断応力分布はせん断ひずみが大きい場合には一定であるけれど、せん断ひずみが小さい場合には半径によって異なった台形分布をしている。したがって、大きなせん断ひずみ($r = \text{数}\%$)を対象としている静的試験の場合には上記の計算方法が適しているが、小さなせん断ひずみ($r = 1\%$ 以下)を対象としている繰返し試験の場合には、上記の計算方法では過大評価していることになる。このことは中空試験の方が中実試験よりもせん断弾性定数 G が大きい原因の1つと考えられる。以上のことから、せん断強度を求める静的試験ではせん断応力分布を一定分布として、また変形特性を求める繰返し試験では弾性分布としてせん断応力を計算するべきであると考えられる。

フィルダム材料の中でも土質材料に比較して粒径の大きなもので構成されている粗粒材料の静的および繰返し載荷時の強度特性と変形特性を求めるために大型のせん断試験装置を製作した。製作した試験装置の機能確認のための予備試験を実施して一定の結論と問題点が整理された。問題点については早急に改良し、信頼性の高いデータを蓄積してフィルダムの解析・設計に反映させる考えである。

本大型せん断試験装置の製作に当っては、東京大学生産研究所の龍岡文夫助教授・福島伸二氏・山田真一氏に設計のポイント等に関して多くの御意見を頂いた。また装置の製作を担当した坂田電機(株)の田渡氏・和田氏には大変お世話になった。末筆ながら本装置に関係した多くの方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

1911

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：「ロックフィル材料の試験と設計強度」 1982.
- 2) L. Bjerrum, A. Landva (1966); "Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay" *Geotechnique* Vol. 16-1, pp. 1-20
- 3) M. Budhu (1979); "Simple Shear Deformation of Sand" Ph. D, Thesis, University of Cambridge
- 4) W. Kjellman (1951); "Testing the Shear Strength of Clay in Sweden" *Geotechnique* Vol. II, pp. 225-231
- 5) K. H. Roscoe (1953); "An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples" *Proc. of 3rd ICSMFE*, Vol. 1, pp. 186-191
- 6) M. A. Stroud (1971); "The Behaviour of Sand at Low Stress Levels in the Simple Shear Apparatus" Ph. D. Thesis, University of Cambridge
- 7) P. Habib (1953); "Influence de la variation de la contrainte principale moyenne sur la resistance au cisaillement des sols" *Proc of 3rd ICSMFE*, Vol. I, pp. 131-136
- 8) B. B. Broms, A. O. Casbarian (1965); "Effects of Rotation of the Principal Stress Axes and of the Intermediate Principal Stress on the Shear Strength" *Proc of 6th ICSMFE*, Vol. 1 pp. 179-183
- 9) P. V. Lada (1972); "Torsion Shear Apparatus for Soil Testing" STP 740, ASTM, pp. 145-163
- 10) 吉見吉昭, 大岡 弘(1971)：「リングねじりせん断試験機による飽和砂の液状化実験」第16回土質工学シンポジウム, pp. 27～32.
- 11) Y. Yoshimi, T. Kishida (1981); "Friction between Sand and Metal Surface" *Proc. of 10 ICSMFE*
- 12) K. Ishihara, S. Li (1972); "Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test" *Soils and Foundations*, Vol. 12, No 2, pp. 19-39
- 13) K. Ishihara, S. Yasuda (1975); "Sand Liquefaction in Follow Cylinder Torsion under Irregular Excitation" *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 13, pp. 1-17
- 14) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和(1976)：「広範囲なひずみ領域での砂の動的変形特性」建設省土木研究所資料第1080号.
- 15) 福島伸二, 龍岡文夫, 木下効志(1981)：「ねじり単純せん断試験における砂とガラスビーズの強度の拘束圧依存性」第16回土質工学研究発表会, pp.102～105.
- 16) 福島伸二, 中島 啓, 龍岡文夫(1980)：「ねじり単純せん断試験による砂の排水せん断特性」第15回土質工学研究発表会, pp.393～396.
- 17) R. L. Kondner (1963); "Hyperbolic Stress-Strain Response, Cohesive Soils" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 89
- 18) 油圧技術便覧編集委員会(1967)：「油圧技術便覧 — 新版 — 」日刊工業新聞社.
- 19) Timoshenko and Goodier (1951); "Theory of Elasticity"
- 20) 福島伸二(1982)：「ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の実験的研究」東京大学博士論文.
- 21) 土質工学会編(1979)：「土質試験法」 pp.495～522.
- 22) 最上武雄編(1969)：「土質力学」 技報堂, pp.998～1032.
- 23) 山田清臣(1965)：「砂のせん断に関する一斉試験」土と基礎, Vol. 13-2, pp.89～94.
- 24) 市原松平, 松沢 宏(1970)：「平面ひずみ状態と軸対称ひずみ状態における乾燥砂のせん断特性」土木学会論文報告集, 第173号, pp.47～59.
- 25) 渡辺 進, 鈴木 豊, 狭田彰二(1973)：「砂のせん断特性と粒子形状との関係」第8回土質工学研究発表会, pp.149～152.

- 26) 諸戸靖央, 須藤良清, 中村俊夫(1975); 「砂の三軸圧縮および三主応力試験における ϕ 」 第20回土質工学シンポジウム, pp.109~112.
- 27) 三浦哲彦, 山内豊聡(1971); 「高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について」 土木学会論文報告集, 第193号, pp.69~79.
- 28) 三笠正人, 高田直俊(1975); 「三軸および直接せん断試験結果の比較について」 第20回土質工学シンポジウム, pp.87~96.
- 29) 春山元寿(1972); 「シラスと砂のせん断特性の比較」 土木学会第27回年次学術講演会第3部, pp.97~100.
- 30) 社団法人電力土木技術協会編(1981); 「改訂新版 最新フィルダム工学」
- 31) 福島伸二, 龍岡文夫(1981); 「土のねじり単純せん断試験(Ⅲ)」 東大生産研究速報, 33巻9号, pp.94~97.
- 32) 土木学会編(1981); 「新体系土木工学 18土の力学(Ⅲ)」 技報堂, pp.195~255.
- 33) 安田 進(1976); 「振動三軸実験で求めた土の動的変形特性」 第11回土質工学研究発表会, pp.423~426.
- 34) 国生剛治, 桜井彰雄, 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 379002号.
- 35) B. O. Hardin, V. P. Drnevich (1972); "Shear modulus and damping in soils, Design equations and curves" J. SMFD, Proc. ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692
- 36) F. Tatsuoka, T. Iwasaki, Y. Takagi (1978); "Hysteretic Damping of Sands under Cyclic Loading and its Relation to Shear Modulus" Soils and Foundations, Vol. 18, No. 2, pp. 25-40
- 37) 大岡 弘, 伊藤幸爾郎(1979); 「乾燥砂と正規圧密粘土を用いた動的一斉試験結果」 7th Joint Meeting US-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, UJNR, 第11回合同部会, pp. 424~453.
- 38) 中川康一, 中屋真司, 島本 清(1979); 「砂質土のヤング率および剛性率の動的測定」 第14回土質工学研究発表会, pp.553~556.
- 39) 松本徳久, 渡辺和夫, 小川 優(1983); 「七ヶ宿ダムフィル材料試験報告」 建設省土木研究所資料第1974号.
- 40) R. J. Marsal (1972); "Mechanical Properties of Rockfill" Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, pp. 130-132
- 41) 国生剛治; 「土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答に関する研究」 東京大学博士論文.
- 42) 小田匡寛, 西寿三男(1978); 「砂の強度異方性」 第13回土質工学研究発表会, pp.389~392.
- 43) 真島正人, 山下丞二; 「ねじりせん断試験によるカオリン粘土の動的特性」 大成建設技術研究所報第13号, 1980.
- 44) 松本徳久, 渡辺和夫, 村上清基(1983); 「ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験・その2」 建設省土木研究所資料第2006号.
- 45) 原 昭夫, 清田芳治(1979); 「地盤振動解析のための土の動的性質の研究(せん断弾性定数, 減衰定数の振動数依存性)」 第14回土質工学研究発表会, pp.533~536.
- 46) 栗林栄一, 岩崎敏男, 龍岡文夫, 堀内俊一(1974); 「土の動的変形特性—共振法土質試験機による測定—」 建設省土木研究所資料第912号.
- 47) 福島伸二, 龍岡文夫(1980); 「土のねじり単純せん断試験(Ⅰ)」 東大生産研究速報, 32巻10号, pp.87~90.
- 48) 福島伸二, 龍岡文夫(1981); 「土のねじり単純せん断試験(Ⅱ)」 東大生産研究速報, 33巻8号, pp.91~93.

参 考 資 料

参考資料

ディジタイザを用いたデータ整理方法

1. 概 要

ディジタイザとは点の座標値を読み取る装置であり、そのデータはコンピュータに記憶されて解析が行われるものである。G, hのデータ整理はデータ数が多いため多大な時間と労力を要する。そこでデータ整理にディジタイザを用いて省力化を図ることにした。データ整理方法を簡単に示すと、まず、ディジタイザによってヒステリシスカurveの何点か座標値を読み取り、図-1に示すようにGの場合は応力の最大幅/ひずみの最大幅として求め、hの場合は面積差を求めることに計算した。

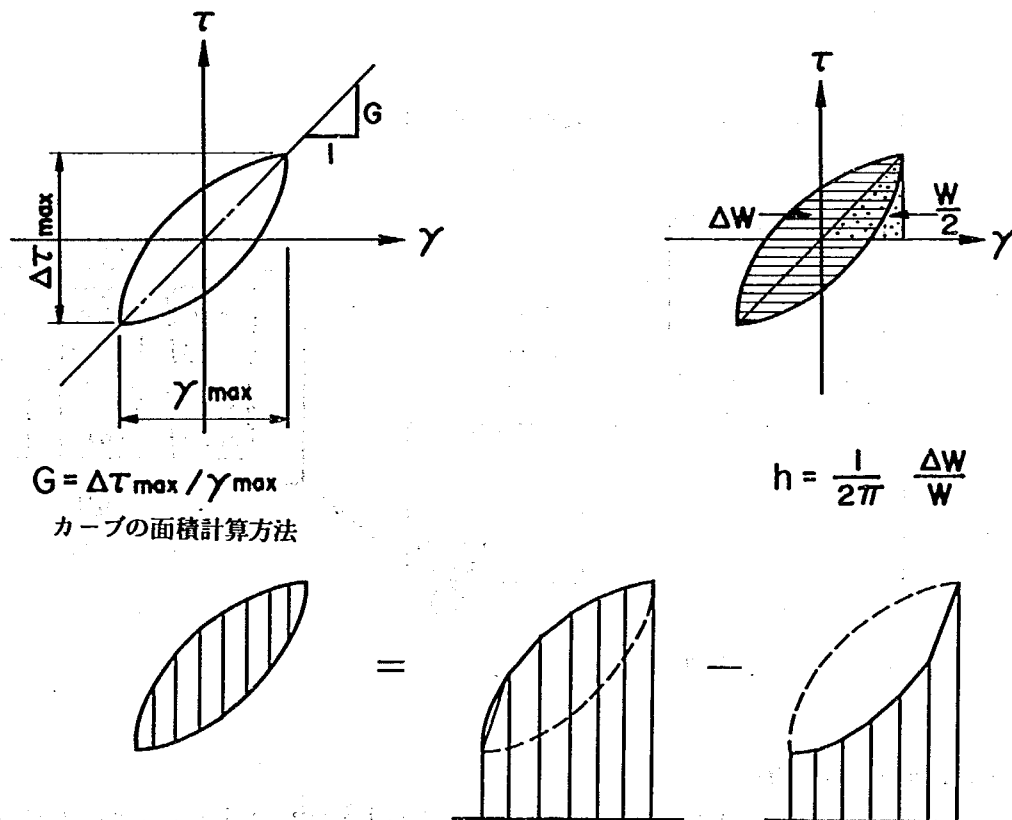


図-1 G, h の 計 算 方 法

なお、個人差がなく、精度よく行うためにディジタイザの点の読み取りはヒステリシスカurveの線の中心とし、又曲線部分は数多く、直線部分はラフに点をとるようにした。

2. ディジタイザの取扱方法

2.1 ディジタイザの起動と停止

(1) 起動方法

- ① 図-2の④の power sw④をON

- ② 図-2の③のpower swをON
- ③ " ④ "
- ④ ①のLOADランプが点灯したら②swをRUNにする。
- ⑤ " READYランプが点灯したら図-2のDのpower swをON
- ⑥ IPL用のカセットをDにセットした後、DのIPLボタンを押す。

(2) 停止方法

- ① **SHIFT** キーと **ESC** キーを同時に押す。
- ② **RESET PAGE** キーを押す、画面を消去する。
- ③ 図-2の④, ③, ②のpower swをOFF
- ④ ①の②swをLOADにする。
- ⑤ ①のLOADランプが点灯したら、power sw ②をOFF

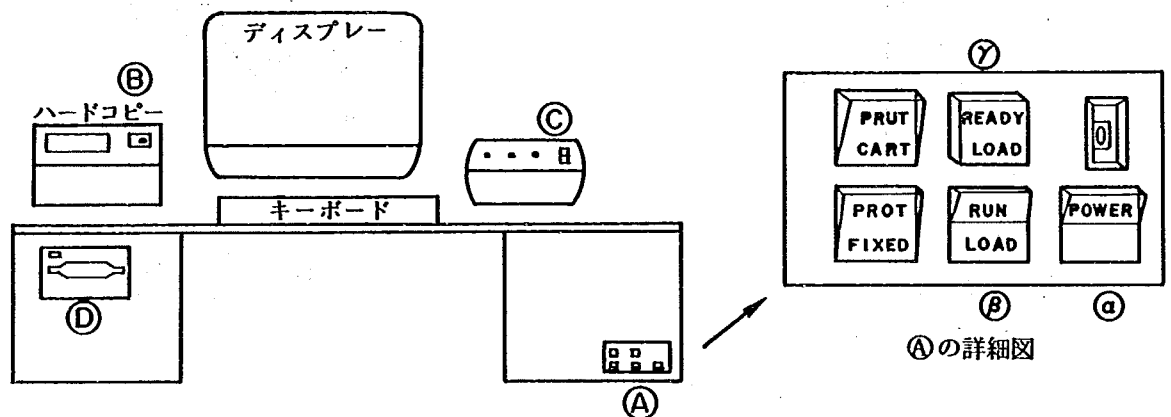
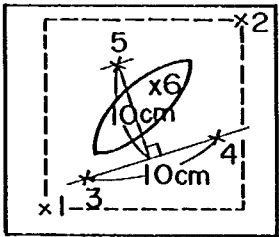
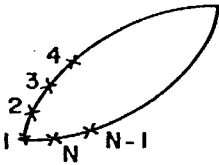


図-2. 装置の模式図

2.2 デジタイザの操作方法

入力はいしーボードから行い、入力した内容を実行するときは **RETURN** キーを押し(Ⓐと表示する)、修正するときは修正したい文字の所までカーソルを移動して **RUB OUT** キーを押し、そこから再び入力し直す。画面が消えたら **BACK SPACE** キーを押す。

キーボードからの操作方法	ディスプレイ上の内容
① 日, 月, 年を入力Ⓐ	DD—MMM—YY 12 JAN 84 画面 1
② 時, 分, 秒を入力Ⓐ	HH—MM—SS 19 55 30
③ RTLGOS Ⓐ	# RTLGOS 画面 2

キーボードからの操作方法	ディスプレイ上の内容	
④ RUN LOOP1	# RUN LOOP1	画面 3
⑤ ヒステリシスカークが $\Delta P \sim \Delta H$ のときは 1, $\sigma \sim \varepsilon$ のときは 2, $\tau \sim r$ のときは 3 を入力 $\odot$	INPUT Graph mode	画面 4
⑥ テスト名, 試験日を入力 $\odot$ (40文字まで)	TEST NAME, DATE	画面 5
⑦ 10cm 当りの ΔH , ε , r と ΔP , σ , τ を入力 $\odot$	X AXIS, Y AXIS	
⑧ 断面積, 高さ, ポアソン比を入力 $\odot$	Area, Height, PO	
⑨ 入力データの確認 "NO" 1 $\odot$ ⑥へ行く。 "YES" 0 $\odot$		画面 6
⑩ タブレットによって右図に示すように破線内で点を入力 注意 $\times 1, \times 2$ はカーブの範囲外にとること。 $\times 4$ は $\times 3$ から 10cm, $\times 5$ は $\times 3 - \times 4$ から 10cm, $\times 6$ はどこでもよいがループの中がよい。		画面 7
⑪ タブレットによってヒステリシスカークの点を入力。終点(N)にきたら RETURN キーを押す。200点まで。		画面 8
⑫ 50点以上のとき入力が停止するので次のようにする(2通りある)。 ⑦ 画面を消去して入力をつづける。 ① CTRL キーを押しながら N キーを3回押した後 R キーを押す。 次の操作へ行くかどうかの確認 "NO" 1 $\odot$ ⑥へ行く。 "YES" 0 $\odot$		
⑬ カーブの図示領域のレンジの設定 "NO" -1 $\odot$ 修正値を入力する。 "YES" -0 $\odot$		画面 9
⑭ 図示領域の最大値, 最小値を表示 0 $\odot$		画面 10
⑮ 計算結果の表示 レンジを変更するとき 9 $\odot$ ⑬へ行く OK のときコピーをとり次へ 1 $\odot$ 終了したいとき 0 $\odot$		画面 11

2.3 「LOOP 1」のプログラム

「LOOP 1」のプログラムを下記に示す。

画面5

Mode ----> Delio, P-Delio, H

TEST NAME-TEST

DATE-12/25 TEST-1

X AXIS CALIBRATION Disp/10(cal) -- (mm) 5.0000

Y AXIS CALIBRATION Force/10(cal) -- (Kg) 5000.0

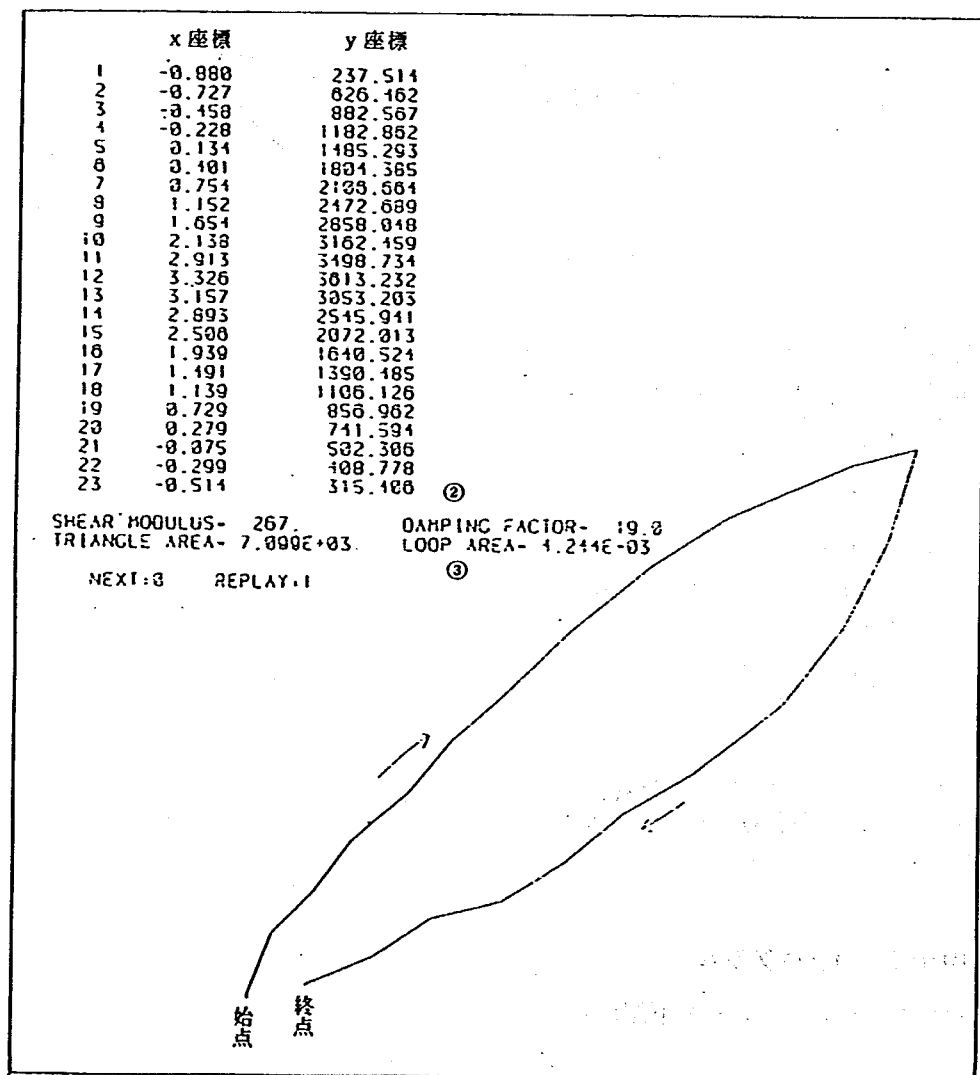
Area ----- 712.32 lca2:

Height ----- 50.224 lca1

PO ----- 0.25000

• _____ の値でよい場合には ○②

画面8



画面11

----- TEST NAME -----

TEST

DATE - 12/25 TEST-1

Diameter- 30.1 (cm)

Height - 59.2 (cm)

Area - 712.3 (cm²)

Poisson- 0.250

Delta P- 1688. (Kg)

Delta H- 2.103 (mm)

Ep-max -3.5507E-03

Sig-max- 2.37 (Kg/cm²)

E - 867.3 (Kg/cm²)

C - 266.9 (Kg/cm²)

r -1.1383E-03

n - 19.03 (x)

X-MIN-0.8700 X-MAX- 3.326

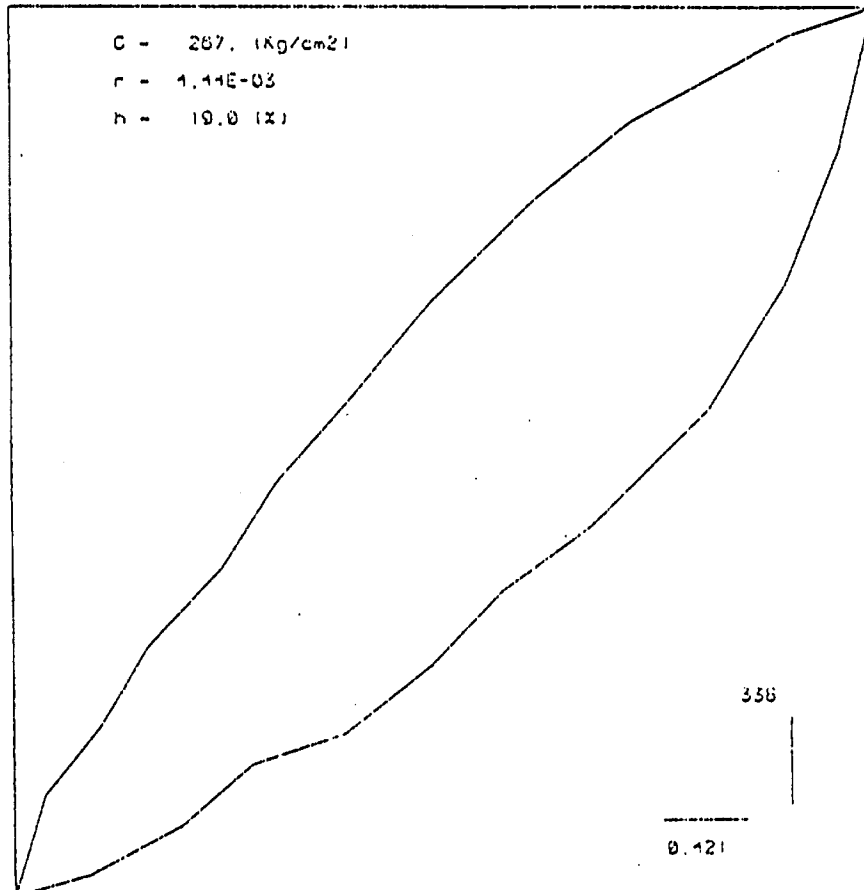
Y-MIN- 237.5 Y-MAX- 3613.

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

C - 267. (Kg/cm²)

r - 1.11E-03

n - 19.0 (x)



```

10 C PROGRAM LOOP FOR
20 IMPLICIT INTEGER*2(I-N,P)
30 DIMENSION ICCB(24),X(200),Y(200),A2(3),A3(4)
40 DIMENSION DATE(10),THAME(10),ANS(10)
50 INTEGER*4 IEO
60 TRACE IFS,ARCS,LABELS,RANGE
70 DATA IDELL/X'0720'/
80 DATA ICR/X'0020'/
90 DATA BRANK/4H /
100 DATA ZERO/1H0/
110 CALL ASSIGN(IGC,'.4')
120 CALL CLUT(1)
130 CALL CUBINI(IGCB)
140 CALL ATTACH(IGCB)
150 CALL ASSIGN(IBC,'.2')
160 CALL ASSIGN(KB,'.5')
170 CALL FILECLOOP,DATE,2,3,1SIAT)
180 C
190 DO 10 I=1,10
200 THAME(1)=BRANK
210 DATE(1)=BRANK
220 ANS(1)=BRANK
230 10 CONTINUE
240 DATA XCAL,YCAL,P0,P1/1.0,100.0,0.35,3.1415927/
250 DATA HEIGHT,AZEO,0.705,0/
260 DATA IPR,ISE,IIC/1,2,3/
270 C
280 CALL WRITEC(IDELL)
290 CALL ERASE
300 WRITE (1,90)
310 90 FORMAT (//////////H0,' INPUT Graph mode = ',
320 ' 1-Delta P-Delta P 2-Sigma-Epsilon 3-100 Gamma')
330 READ (1,*) IMODE
340 C
350 100 CALL WRITEC(IDELL)
360 CALL ERASE
370 IF (IMODE.EQ.1PR) WRITE (1,150)
380 IF (IMODE.EQ.1SE) WRITE (1,160)
390 IF (IMODE.EQ.1IC) WRITE (1,170)
400 150 FORMAT (////////H0,' Mode ----> Delta P-Delta P')
410 160 FORMAT (////////H0,' Mode ----> Sigma-Epsilon')
420 170 FORMAT (////////H0,' Mode ----> 100 Gamma')
430 C
440 WRITE (1,200) THAME
450 200 FORMAT (////////H0,' TEST NAME= ',10A4)
460 READ (1,200) ANS
470 200 FORMAT (10A4)
480 IF (ANS(1).EQ.ZERO) GO TO 210
490 DO 210 I=1,10
500 THAME(I)=ANS(I)
510 210 CONTINUE
520 C
530 WRITE (1,220) DATE
540 220 FORMAT (1H0,' DATE= ',10A4)
550 READ (1,200) ANS
560 200 FORMAT (10A4)

```

IPR=1 Delta P-Delta P
 ISE=2 Delta P-Delta P
 IIC=3 Delta P-Delta P

入力グラフの選定

テスト名の入力

答が0以外の時その答をテスト名の変数に代入する

日付の入力

```

570 IF (ANS(1).EQ.ZERO) GO TO 230
580 DO 230 I=1,10
590 DATE(1)=ANS(1)
600 230 CONTINUE
610 C
620 IF (IMODE.EQ.1PH) WRITE (1,300) XCAL
630 IF (IMODE.EQ.1SE) WRITE (1,305) XCAL
640 IF (IMODE.EQ.1TC) WRITE (1,310) XCAL
650 300 FORMAT (//1H0,' X AXIS CALIBRATION Diso/101cm) -- (mm)
660 +IPC12.S)
670 305 FORMAT (//1H0,' X AXIS CALIBRATION Stress/101cm) --
680 +IPC12.S)
690 310 FORMAT (//1H0,' X AXIS CALIBRATION e /101cm) --
700 +IPC12.S)
710 READ (1,*) AN
720 IF (AN.EQ.0.0) GO TO 350
730 XCAL=AN
740 350 CONTINUE
750 C
760 IF (IMODE.EQ.1PH) WRITE (1,320) YCAL
770 IF (IMODE.EQ.1SE) WRITE (1,325) YCAL
780 IF (IMODE.EQ.1TC) WRITE (1,330) YCAL
790 320 FORMAT (1H0,' Y AXIS CALIBRATION Force/101cm) -- (kg)
800 +IPC12.S)
810 325 FORMAT (1H0,' Y AXIS CALIBRATION Stress/101cm) -- (kg/cm2)
820 +IPC12.S)
830 330 FORMAT (1H0,' Y AXIS CALIBRATION Tau/101cm) -- (kg/cm2)
840 +IPC12.S)
850 READ (1,*) AN
860 IF (AN.EQ.0.0) GO TO 360
870 YCAL=AN
880 360 CONTINUE
890 C
900 IF (IMODE.EQ.1TC) GO TO 450
910 WRITE (1,400) A
920 400 FORMAT (//1H0,' Area ----- ,IPC12.S,(cm2)
930 READ (1,*) AN
940 IF (AN.EQ.0.0) GO TO 410
950 A=AN
960 410 CONTINUE
970 C
980 WRITE (1,420) HEIGHT
990 420 FORMAT (1H0,' Height ----- ,IPC12.S,(cm)
1000 READ (1,*) AN
1010 IF (AN.EQ.0.0) GO TO 430
1020 HEIGHT=AN
1030 430 CONTINUE
1040 C
1050 IF (IMODE.EQ.1TC) GO TO 450
1060 WRITE (1,440) PO
1070 440 FORMAT (1H0,' PO ----- ,IPC12.S)
1080 READ (1,*) AN
1090 IF (AN.EQ.0.0) GO TO 450
1100 PO=AN
1110 450 CONTINUE
1120 C
1130 CALL ERASE

```

x方向のキャリブレーションの入力

y方向のキャリブレーションの入力

入力グラフカーアの時断面積。ポアソン比。高さ入力をバスする

```

1140 WRITE (1,200) TNAME
1150 WRITE (1,220) DATE
1160 IF (IMODE.EQ.1PH) WRITE (1,300) XCAL
1170 IF (IMODE.EQ.1SE) WRITE (1,305) XCAL
1180 IF (IMODE.EQ.1TC) WRITE (1,310) XCAL
1190 IF (IMODE.EQ.1PH) WRITE (1,320) YCAL
1200 IF (IMODE.EQ.1SE) WRITE (1,325) YCAL
1210 IF (IMODE.EQ.1TC) WRITE (1,330) YCAL
1220 WRITE (1,400) A
1230 WRITE (1,420) HEIGHT
1240 IF (IMODE.EQ.1TC) WRITE (1,440) PD
1250 WRITE (1,721)
1260 CALL WRITEC(1DELL)
1270 READ (1,71) III
1280 IF (III.EQ.1) GO TO 100
1290 C
1300 721 FORMAT (1H0,' DO YOU WANT TO CHANGE THE INDEX
1310      CHANGE (PRESS "1", NO : PRESS "0")'
1320 C
1330      K=0
1340      XMIN=-1.0E20
1350      XMAX=-1.0E20
1360      YMIN=-1.0E20
1370      YMAX=-1.0E20
1380      II=0
1390 C
1400 C
1410 750 CALL WRITEC(1DELL)
1420 CALL ERASE
1430 WRITE (1,800)
1440 CALL WRITEC(1DELL)
1450 800 FORMAT (1H0,' 1. DEFINE TABLE INPUT AREA BY DIGITIZING
1460      THE LOWER LEFT THEN UPPER RIGHT CORNERS')
1470 CALL GINI(2,72,1STAT)
1480 IF (1STAT.NE.0) GO TO 750
1490 850 WRITE (1,900)
1500 900 FORMAT (1H0,' 2. SCALE TABLE BY DIGITIZING
1510      LEFT POINT')
1520 CALL WRITEC(1DELL)
1530 CALL GINI(2,0,0,1STAT,1X1,1Y1)
1540 IF (1STAT.LT.0) GO TO 750
1550 IF (1STAT.NE.0) GO TO 850
1560 AAX=0
1570 AAY=0
1580 C
1590 1050 WRITE (1,1100)
1600 1100 FORMAT (1H0,' 3. SCALE TABLE BY DIGITIZING
1610      LOWER RIGHT POINT --(Distance-101cm)')
1620 CALL WRITEC(1DELL)
1630 CALL GINI(2,0,0,1STAT,1X2,1Y2)
1640 IF (1STAT.LT.0) GO TO 750
1650 IF (1STAT.NE.0) GO TO 1050
1660 BBX=0
1670 BBY=0
1680 C
1690 1250 WRITE (1,1200)
1700 1200 FORMAT (1H0,' 4. SCALE TABLE BY DIGITIZING

```

入力データの確認

最大値、最小値、データ数の初期化

call GINI デジタイザーの初期化
入力範囲の設定 エラーをおとした場合
750へもどる

call GIN 座標の読みとり 原点入力

AAX, AAYは原点とするため(0.0)を代入

x軸上のキャリブレーション値の座標を入力

BB, BBX, BBYはx軸上のキャリブレーション値をとるため
(XCAL, 0)を代入

y軸方向のキャリブレーション値の座標入力

```

1710      UPPER RIGHT POINT --Distance=10(cm)
1720      CALL WRITEC(10ELL)
1730      CALL CINS(2,0,0,1,STAT,IX3,IY3)
1740      IF (1,STAT,LT,0) GO TO 750
1750      IF (1,STAT,NE,0) GO TO 1250
1760      CCY=YCAL
1770 C
1780      WRITE (1,1370)
1790      1370 FORMAT (1H0, ' DO YOU WANT TO DEFINE TABLET INPUT AREA
1800      AGAIN ? YES, INPUT OUT OF RANGE , NO, INPUT DEFINE AREA ' )
1810      CALL WRITEC(10ELL)
1820      CALL CINS(2,0,0,1,STAT,IDX,IDY)
1830      IF (1,STAT,NE,0) GO TO 750
1840 C
1850      AX=FLOAT(IX1)
1860      BX=FLOAT(IX2)
1870      AY=FLOAT(IY1)
1880      BY=FLOAT(IY2)
1890      CX=FLOAT(IX3)
1900      CY=FLOAT(IY3)
1910      I=0
1920      RL=1./SQRT((BX-AX)**2+(BY-AY)**2)
1930      COSS=(BX-AX)*RL
1940      SINN=(AY-AY)*RL
1950      CALX=(BX-AX)*RL
1960      CALY=CCY/((CX-AX)*SINN+(CY-AY)*COSS)
1970 C
1980      CALL ERASE
1990      J1=1
2000      I=1
2010      I1=1
2020      ICHAR=0
2030      IF (1,CT,1) GO TO 1900
2040      1850 CALL CINS(2,0,0)
2050      1900 CALL CINS(2,1,STAT,IXI,IYI)
2060      CALL READC(1,CHAR,0,1)
2070      IF (1,STAT,EO,0) GO TO 2000
2080      IF (1,CHAR,NE,1CR,AND,1,STAT,NE,0) GO TO 1900
2090      GO TO 7777
2100      2000 IF (1,EO,1) GO TO 2100
2110      CALL OPEN(1)
2120      CALL MOVE(0,IXLAST,IYLAST)
2130      CALL DRAVTO(IXI,IYI)
2140      CALL POST(1)
2150      IF (1,CT,1) GO TO 3200
2160      2100 CALL MOVE(0,IXI,IYI)
2170      IXLAST=IXI
2180      IYLAST=IYI
2190      CALL WRITEC(10ELL)
2200      GO TO 3300
2210      3200 CALL DRAVTO(IXI,IYI)
2220      IXLAST=IXI
2230      IYLAST=IYI
2240      225 CALL WRITEC(10ELL)
2250      3300 XTEMP=FLOAT(IXI)
2260      YTEMP=FLOAT(IYI)
2270      X(1)=1+(XTEMP-AX)*COSS-(YTEMP-AY)*SINN+CALX+AXX

```

x 軸方向のデータは関係ないため CCY=YCAL

座標設定がよい場合

← IDX, IDY はダミーデータ

← 定義領域外の場合 750 へもどる

スケール変換の前処理

回転, x, y 方向スケール計算

ループ座標・入力スタート

キーボードの入力を調べる

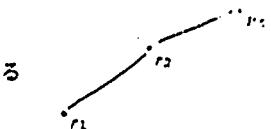
キーボードで **RETURN** キーが押されエラーがなければ 7777 へ

座標入力が 1 回目なら 2100 へ

2 回目以後なら直線を引く

1 回目は入力した座標値をディスプレイの座標系に代入する

入力された座標値をグラフ用紙の座標系に変換する



```

OLDpoint ← P1
draw (OLDpoint ~ P2)
OLDpoint ← P2
draw (OLDpoint ~ P3)
:
OLDpoint ← P(n-1)
draw (OLDpoint ~ P(n))

```

```

2280      Y(11)=(XTEND-AX)*SINH(YTEND-AY)*COS(1)*CALY*AA*Y
2290      IF (11.EQ.1) GO TO 3350
2300      IF (X(11).EQ.X(11)-11) GO TO 1050
2310      3350 WRITE(1,3500) 11,X(11),Y(11)
2320      C
2330      K=K+1
2340      IF (XMAX.GT.X(11)) GO TO 12
2350      XMAX=X(11)
2360      12 CONTINUE
2370      IF (XMIN.LT.X(11)) GO TO 13
2380      XMIN=X(11)
2390      13 CONTINUE
2400      IF (YMAX.GT.Y(11)) GO TO 14
2410      YMAX=Y(11)
2420      14 CONTINUE
2430      IF (YMIN.LT.Y(11)) GO TO 15
2440      YMIN=Y(11)
2450      15 CONTINUE
2460      C
2470      3500 FORMAT (15,F10.3,5X,F10.3)
2480      GO TO 1000
2490      C
2500      7777 S1=0
2510      11=11-1
2520      KK=11-1
2530      DO 5000 1=1,KK
2540      S1=S1+(Y(11)-11)*Y(11)*(X(11)-X(11))
2550      5000 CONTINUE
2560      S1=S1*(Y(11)+Y(11))*(X(11)+X(11))
2570      SX=(XMIN+XMAX)/2.0
2580      SY=(YMIN+YMAX)/2.0
2590      C
2600      DIA=SQRT(1.0+X/P1)
2610      DELTAP=(YMAX-YMIN)/2
2620      DELTAN=(XMAX-XMIN)/2
2630      GO TO (5010,5020,5030),INODE
2640      C
2650      5010 EPMAX=DELTAN/HEIGHT(0,1)
2660      SIGMAX=DELTAP/A
2670      E=SIGMAX/EPHAX
2680      C=E/2/(1.0+P0)
2690      GAMMA=EPHAX*(1.0+P0)
2700      GO TO 5100
2710      C
2720      5020 EPMAX=DELTAN
2730      SIGMAX=DELTAP
2740      E=SIGMAX/EPHAX
2750      C=E/2/(1.0+P0)
2760      GAMMA=EPHAX*(1.0+P0)
2770      GO TO 5100
2780      C
2790      5030 TAUMAX=DELTAP
2800      GAMMA=DELTAN
2810      C=TAUMAX/GAMMA
2820      C
2830      5100 CONTINUE
2840      AT=DELTAN*DELTAP*(0.5+1.0)

```

変換されたデータの最大値、最小値を求める

ループの面積を求める

} グラフ角に最大値、最小値の中心点を求める

直径計算

$\Delta P, \Delta H$ を $1/2$ にする

mode により計算をふりわけ

$\Delta P - \Delta H$ の E, G, τ 計算

$\sigma - \epsilon$ "

$\tau - \gamma$ "

H の計算

```

2050 H=ABS(S11/AT*100.0/PI
2060 C
2070 WRITE (1,7100) C,H,AT,S1
2080 7100 FORMAT (1H,'SHEAR MODULUS-',1PG10.3,' DAMPING FACTOR-',
2090 1PG10.3,' TRIANGLE AREA-',1PG10.3,' LOOP AREA-',1PG10.3)
2100 WRITE (1,6700)
2110 0700 FORMAT (1H0,' NEXT IO REPLAY,1')
2120 CALL CINT(2)
2130 0800 FORMAT (1H0,' END IO ,SAVE DATA AND REPLAY,1 DELETE DATA
2140 1 AND REPLAY,0 KEY IN')
2150 READ (1,1) NY
2160 IF (NY.EQ.1) GO TO 4000
2170 C
2180 X RANGE-DELTA H*2.0
2190 Y RANGE-DELTA H*2.0
2200 0900 CALL ERASE
2210 WRITE (1,6950) X RANGE,Y RANGE
2220 6950 FORMAT (1H0,'X-range',1PG14.4,' Y-range',1PG14.4)
2230 WRITE (1,721)
2240 CALL WRITEC(10ELL)
2250 READ (1,1) III
2260 IF (III.EQ.0) GO TO 6945
2270 WRITE (1,6905) X RANGE
2280 6905 FORMAT (1H0,'X-range',1PG12.5)
2290 READ (1,1) IAN
2300 IF (IAN.EQ.0) GO TO 6920
2310 X RANGE-AN
2320 6920 CONTINUE
2330 WRITE (1,6925) Y RANGE
2340 6925 FORMAT (1H0,'Y-range',1PG12.5)
2350 READ (1,1) IAN
2360 IF (IAN.EQ.0) GO TO 6940
2370 Y RANGE-AN
2380 6940 CONTINUE
2390 GO TO 5000
2400 6945 CONTINUE
2410 XMIN=SX-XRANGE/2.0
2420 XMAX=SX+XRANGE/2.0
2430 YMIN=SY-YRANGE/2.0
2440 YMAX=SY+YRANGE/2.0
2450 C
2460 CALL ERASE
2470 WRITE (1,7000) XMIN,YMIN,XMAX,YMAX
2480 7000 FORMAT (1H0,'MINX-',1PG14.4,' MINY-',1PG14.4,
2490 1H0,' MAXX-',1PG14.4,' MAXY-',1PG14.4)
2500 WRITE (1,721)
2510 CALL WRITEC(10ELL)
2520 READ (1,1) III
2530 IF (III.EQ.0) GO TO 7110
2540 WRITE (1,7010)
2550 7010 FORMAT (1H0,' INPUT X,Minimum')
2560 READ (1,1) XMIN
2570 WRITE (1,7020)
2580 7020 FORMAT (1H0,' INPUT Y,Minimum')
2590 READ (1,1) YMIN
2600 WRITE (1,7030)
2610 7030 FORMAT (1H0,' INPUT X,Maximum')

```

答を入力座標系の画面に表示

この答でよければ0 やりなおし1

やりなおしの場合4090へ

auto range用のデータの代入(full scale)

x, y 方向の range の確認

この値でよければ6945へ

0を入力すると前の値が保存される

座標系の最大値, 最小値計算

"表示

0の場合(表示された値でよい場合)7110へ

最大値, 最小値の入力

```

3420      READ (1,*) XMAX
3430      WRITE (1,7010)
3440 7010  FORMAT (1H0,'      INPUT Y,Max (mm)')
3450      READ (1,*) YMAX
3460 C
3470      GO TO 0000 7000
3480 7110 CONTINUE
3490      CALL ERASE
3500      XSCALE=10000.0/(XMAX-XMIN)
3510      YSCALE=10000.0/(YMAX-YMIN)
3520      IXMIN=INT(XMIN*XSCALE)
3530      IYMIN=INT(YMIN*YSCALE)
3540      IXMAX=INT(XMAX*XSCALE)
3550      IYMAX=INT(YMAX*YSCALE)
3560      CALL WINDOW(IXMIN,IXMAX,IYMIN,IYMAX)
3570      CALL VIEWPT(-10000,30000,-20000,20000)
3580      CALL MOVEJO (IXMIN,IYMIN)
3590      CALL DRAWJO (IXMIN,IYMAX)
3600      CALL DRAWJO (IXMAX,IYMAX)
3610      CALL DRAWJO (IXMAX,IYMIN)
3620      CALL DRAWJO (IXMIN,IYMIN)
3630 C
3640      IXSCAL=(IXMAX-IXMIN)
3650      IYSCAL=(IYMAX-IYMIN)
3660      XS10=(XMAX-XMIN)/10
3670      YS10=(YMAX-YMIN)/10
3680      ISXMIN=IXSCAL*3/4+IXMIN
3690      ISXMAX=IXSCAL/10+ISXMIN
3700      ISYMIN=IYSCAL/10+IYMIN
3710      ISYMAX=IYSCAL/10+ISYMIN
3720      ISXSPA=IXSCAL/12+IXMIN
3730      ISYSPA=IYSCAL/12+IYMIN
3740      CALL MOVEJO (ISXMIN,ISXSPA)
3750      CALL DRAWJO (ISXMAX,ISXSPA)
3760      CALL MOVEJO (ISYSPA,ISYMIN)
3770      CALL DRAWJO (ISYSPA,ISYMAX)
3780 C
3790      IX=INT(X(1)*XSCALE)
3800      IY=INT(Y(1)*YSCALE)
3810      CALL MOVEJO (IX,IY)
3820      DO 7230 I=2,11
3830      IX=INT(X(I)*XSCALE)
3840      IY=INT(Y(I)*YSCALE)
3850      CALL DRAWJO (IX,IY)
3860 7200 CONTINUE
3870      IX=INT(X(11)*XSCALE)
3880      IY=INT(Y(11)*YSCALE)
3890      CALL DRAWJO (IX,IY)
3900 C
3910      GO TO (7210,7220,7230) IMODE
3920 C
3930 7210 WRITE (1,7300) TNAME,IC
3940      WRITE (1,7302) GAMMA
3950      WRITE (1,7310) DATE
3960      WRITE (1,7312) H
3970      WRITE (1,7320) DIA
3980      WRITE (1,7330) HEIGHT

```

座標系の設定

グラフを出力する場合に枠を書く

右下のスケールを書く

ループを書く

モードにより7210, 7220, 7230へ行く

4H-4Pのデータの表示

```

3090 WRITE (1,7325) A
4000 WRITE (1,7340) PO
1010 WRITE (1,7341) DELTAP,DELTAL
1020 WRITE (1,7342) EPMAX
1030 WRITE (1,7344) SIGMAX
1040 WRITE (1,7350) C
1050 WRITE (1,7353) G
1060 WRITE (1,7370) GAMMA,YSIG
1070 WRITE (1,7380) H
1080 WRITE (1,7390) XMIN,XMAX
1090 WRITE (1,7400) XSIG
1100 WRITE (1,7410) YMIN,YMAX
1110 GO TO 7500

```

```

1120 C
7220 WRITE (1,7300) TNAME,C
1130 WRITE (1,7302) GAMMA
1140 WRITE (1,7310) DATE
1150 WRITE (1,7312) H
1170 WRITE (1,7320) DIA
1180 WRITE (1,7330) HEIOUT
1190 WRITE (1,7325) A
1200 WRITE (1,7340) PO
1210 WRITE (1,7345)
1220 WRITE (1,7342) EPMAX
1230 WRITE (1,7344) SIGMAX
1240 WRITE (1,7350) C
1250 WRITE (1,7353) G
1260 WRITE (1,7370) GAMMA,YSIG
1270 WRITE (1,7380) H
1280 WRITE (1,7390) XMIN,XMAX
1290 WRITE (1,7400) XSIG
1300 WRITE (1,7410) YMIN,YMAX
1310 GO TO 7500

```

```

1320 C
7230 WRITE (1,7500) TNAME,C
1330 WRITE (1,7502) GAMMA
1340 WRITE (1,7510) DATE
1350 WRITE (1,7512) H
1370 WRITE (1,7540)
1380 WRITE (1,7547)
1390 WRITE (1,7547)
1400 WRITE (1,7547)
1410 WRITE (1,7545)
1420 WRITE (1,7552) GAMMA
1430 WRITE (1,7554) TAPMAX
1440 WRITE (1,7540)
1450 WRITE (1,7560) C
1460 WRITE (1,7570) GAMMA,YSIG
1470 WRITE (1,7580) H
1480 WRITE (1,7590) XMIN,XMAX
1490 WRITE (1,7600) XSIG
1500 WRITE (1,7610) YMIN,YMAX

```

```

1510 C
1520 7300 FORMAT (12//100,'-----TEST NAME-----',10A4,
1530 'SX',C,'F7.0','(kg/cm2)')
1540 7302 FORMAT (100,15X,'C-',1PG10.2)
1550 7310 FORMAT (100,'DATE = ',10A4)

```

σ-ε のデータの表示

τ-γ のデータの表示

表示のための format 文

```

1500 7312 FORMAT (1H,45X,' b =',F7.1,' (X)')
1570 7320 FORMAT (1H,10X,'Diameter=',F8.1,' (cm)')
1500 7330 FORMAT (1H,10X,'Height =',F8.1,' (cm)')
1500 7325 FORMAT (1H,10X,'Area =',F8.1,' (cm2)')
1000 7340 FORMAT (1H,10X,'Poisson=',F5.3)
1010 7341 FORMAT (1H,10X,'Delta P=',IPCIO,4,' (Kg)'/1H,10X,'Delta H=',
1020 'IPCIO,4,' (cm)')
1030 7342 FORMAT (1H,10X,'E-modu =',IPCIO,4)
1040 7344 FORMAT (1H,10X,'Stg-mod=',F7.2,' (Kg/cm2)')
1050 7346 FORMAT (1H,10X,'1H,10X')
1060 7347 FORMAT (1H,10X)
1070 7348 FORMAT (1H,10X)
1080 7349 FORMAT (1H,10X)
1090 7350 FORMAT (1H,10X,' E =',F7.1,' (Kg/cm2)')
1700 7352 FORMAT (1H,10X,' r-max=',IPCIO,4)
1710 7354 FORMAT (1H,10X,' Tau-max=',F7.2,' (Kg/cm2)')
1720 7356 FORMAT (1H,10X,' G =',F7.1,' (Kg/cm2)')
1730 7370 FORMAT (1H,10X,' r =',IPCIO,4,00X,IPCIO,3)
1740 7380 FORMAT (1H,10X,' R =',F10.2,' (X)')
1750 7390 FORMAT (1H,10X,' X-MIN=',IPCIO,4,' X-MAX=',IPCIO,4)
1760 7400 FORMAT (1H,10X,' X-MIN=',IPCIO,3)
1770 7410 FORMAT (1H,10X,' Y-MIN=',IPCIO,4,' Y-MAX=',IPCIO,4)
1780 C
1790 7500 CONTINUE
1020 WRITE (1,6000)
1010 READ (1,11 NY
1020 IF (NY.EQ.9) GO TO 6000
1030 1100 J1-J1+1
1040 DO 20 L=J1,11
1050 20 WRITE(7,3500) L,X1(L),Y1(L)
1060 IF (NY.EQ.0) GO TO 4000
1070 GO TO 4110
1080 1090 11-J1
1090 4110 CONTINUE
1020 ICX=32767
1010 ICY=ICX
1020 ICVX=32767
1030 ICVY=24920
1040 CALL WINDOW (-ICX,ICX,-ICY,ICY)
1050 C CALL VIEWPT (-ICVX,ICVX,-ICVY,ICVY)
1060 CALL VIEWPT (-ICX,ICX,-ICY,ICY)
1070 GO TO 100
1080 1000 CONTINUE
1090 CALL CLOSE(7)
5000 CALL EXIT(0)
5010 STOP
5020 END
End of Page

```

ディスクにデータ(座標値のみ)を書き込む

ディスプレイ上の座標系を前の状態にもどす

プログラム終了

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
— 中空ねじり単純せん断試験・
中実三軸圧縮試験 —

ISSN 0386-5878
土研資料第2132号
昭和59年6月(1984)
松本徳久・渡辺和夫・
大野一昭

要 旨

中空供試体(外径80・内径40・高さ80cm)によるねじり単純せん断試験と中実供試体(直径40・高さ80cm)三軸試験より求めた標準砂とロック材料の動的変形特性についてとりまとめたものである。

キーワード：フィル材料，ねじり単純せん断試験，三軸繰返し試験，
ロック材料，標準砂，動的変形特性

郵便はがき

40円切
手
は
い
っ
て
下
さ
い

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所

フィルダム研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料2132号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏名

印