

土 木 研 究 所 資 料

広範囲な歪領域での砂の動的せん断変形特性

—低周波動的せん断試験装置の開発—

昭和51年3月

建設省土木研究所

振 動 研 究 室

広範囲な歪領域での砂の動的せん断変形特性

—低周波動的せん断試験装置の開発—

1976年3月

振動研究室

岩崎敏男

龍岡文夫

高木義和

目 次

I 序 論	1
II 実験方法	2
1 実験装置及び計測器のキャリブレーション	2
1-1 装置全体の概要	2
1-2 荷重・制御装置	2
1-2-1 軸荷重装置	2
1-2-2 トルク負荷装置	3
1-2-3 拘束圧負荷装置	3
1-3 計測装置及びキャリブレーション	4
1-3-1 垂直荷重計 (ロードセル)	4
1-3-2 トルク計	5
1-3-3 回転角計 (ポテンショメータ)	6
1-3-4 垂直変位計 (ダイヤルゲージ, 変位計)	7
(a) 軸変位のキャリブレーション	7
(b) 軸変位計測部の水平誤差の補正	7
(b-1) ダイヤルゲージ	7
(b-2) 変位計 (LVDT)	8
1-3-5 体積歪	9
1-3-6 電磁オシログラフ	9
1-3-7 X-Yレコーダ	10
2 実験手順	11
2-1 乾燥砂の場合	11
(1) ゴムスリーブの検定	11
(2) 内モールドの組立て	11
(3) 外モールドの組立て	12
(4) 砂づめ、重量の測定	12
(5) 供試体の自立	14

(6)	供試体の各種寸法の測定	14
(7)	外わくの取り付け	14
(8)	回転角計(ポテンシヨメータ)のセット	15
(9)	回転角計、トルク計垂直荷重計のキャリブレーション	16
(10)	セルの組み込み	16
(11)	供試体の等方圧縮	17
2-2	飽和砂の場合	17
(1)	ゴムスリーブの検定	17
(2)	内モールドの組立て	17
(3)	外モールドの組立て	17
(4)	砂づめ、重量の測定	17
(5)	供試体の自立	18
(6)	供試体各部寸法の測定	19
(7)	外わくの取り付け	19
(8)	回転角計(ポテンシヨメータ)のセット	19
(9)	回転角計、トルク計、垂直荷重計のキャリブレーション	19
(10)	セルの組み込み	19
(11)	供試体の等方圧縮	19
3	くりかえしねじり試験	20
3-1	試験方法	20
3-2	使用した砂の特性	21
4	計算式及び処理プログラムの説明	22
4-1	側 圧 (σ_r)	22
4-2	軸 応 力 (σ_a)	22
4-3	平均主応力 (p)	22
4-4	軸 歪 (ε_a)	23
4-5	体 積 歪 (v)	23
4-6	間 隙 比 (e)	23
4-7	せん断応力 (τ)	23
4-7-1	せん断応力 (τ) のトルク力 (T) からの換算式	23

4-8 応力比 (n)	26
4-9 セン断歪 (γ)	26
4-10 セン断変形係数 (G)、セン断歪振幅 (γ)	27
4-11 処理プログラム (ラインプリンターによる打出し)	27
5 処理プログラム用データ作成方法	37
5-1 表Ⅱ-1 (供試体の各種計測値) について	37
5-2 表Ⅱ-2 (回転角) について	37
5-3 表Ⅱ-3 (トルク力) について	37
5-4 表Ⅱ-4 (軸荷重) について	37
5-5 表Ⅱ-5 (軸変位) について	37
5-6 表Ⅱ-6 (圧縮試験データ) について	37
5-7 表Ⅱ-7 (くりかえしねじり試験データ) について	38
6 セン断変形係数 (G) の整理	40
7 履歴減衰係数 (η) の整理	40
Ⅲ 実験結果	42
1 共振法土質試験機による豊浦砂の実験結果	42
2 低周波動的セン断試験機による豊浦砂の実験結果	42
2-1 セン断変形係数 (G)	43
2-2 履歴減衰係数 (η)	43
3 共振法土質試験と低周波動的セン断試験の実験結果の比較	44
3-1 G (セン断変形係数) - γ (ひずみ量) 曲線	44
3-2 P (拘束圧) と G の関係	45
3-3 η (履歴減衰係数) - γ 曲線	45
Ⅳ 結 論	47
Ⅴ あとがき	48
Ⅵ 参考文献	48

I 序 論

地盤及び盛土構造物の地震動に対する応答解析を数値計算で行ったり、模型実験（振動砂箱実験、振動台による大型盛土実験）の結果を解析するときには、土の変形係数（ G , η ）が必要となる。この土の変形係数を現場で求める方法には、現場における弾性波探査がある。ところが弾性波探査で生ずる歪は非常に小さく 10^{-6} 程度である。一方強震時の歪レベルは $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度である。土の変形係数は歪レベルに強く依存することが知られているから弾性波探査（ 10^{-6} ）の値より、強震時（ $10^{-4} \sim 10^{-2}$ ）での土の変形係数を合理的に求めるためには $r = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ の範囲の歪レベルの変形係数の歪依存性を求めておかなくてはならない。

このためにまず振動研究室では昭和47年度に共振法土質試験機を開発した。共振法土質試験機を用いると $r = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ 程度での変形係数を求めることができる。（参考文献1.2.3）弾性波探査でのS波速度 V_s から求めた G の値と、その現場から採取した試料による共振法土質試験の値とは歪レベルを考慮するとよく一致することがわかっている。（参考文献4.5）

更に振動研究室において昭和49年に本資料で報告する低周波動的セン断試験機を歪レベルで $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$ までの土の変形係数を求めるのを目的として開発した。今までにも強震時（歪レベル $10^{-4} \sim 10^{-2}$ ）における土の変形係数を求める室内実験は数多く行なわれてきた。ところが一般には装置の精度が悪く誤差の影響が大きすぎて実用に適するものが少ない。そこで新たに製作した低周波動的セン断試験機では、歪測定用に分解能の良いポテンショメータ及び高倍率のアンプを用い、又、回転角及びトルク力をセルの中でしかも供試体直上で測定することにより測定の精度を向上させた。また中空供試体を採用し、単純セン断で生ずるような歪の非一様性が生じないようにした。（参考文献6.7）

本資料では、装置の詳細、解析法及びこの試験機の精度の確認と豊浦砂における $r = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ の G (Kg/cm^2)、 η の値を求めることを主目的として行った実験の結果を報告する。

II 実験方法

1. 実験装置及び計測器のキャリブレーション

1-1 装置全体の概要（低周波動的せん断試験機）

本装置は写真 II-1 に示すように、計測装置及び歪制御装置（図中左）、試験機本体（中）、荷重制御装置（右）からなっている。軸力、トルク力は空気圧を油圧に変換することにより与え、また拘束圧は空気圧により与える。中空円筒の供試体を用い拘束圧は供試体の中空部と外側の圧力が常に等しくなるように与える。軸力はこれとは独立に与える。従って $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ 以外の異方応力状態を作ることできる。又、この試験機で使用する水は蒸留水とし透明樹脂製、容量 5 ℓ の脱気水槽で脱気した。

1-2 荷重負荷・制御装置

1-2-1 軸荷重装置

この装置は、供試体に垂直応力を与えるものである。概略は図 II-1 に示す。垂直荷重用シリンダはペロフラムシール式を使用しており、A、B 2 槽の制御部から成っている。B 槽は主にピストン部の平衡を保つために使用する。

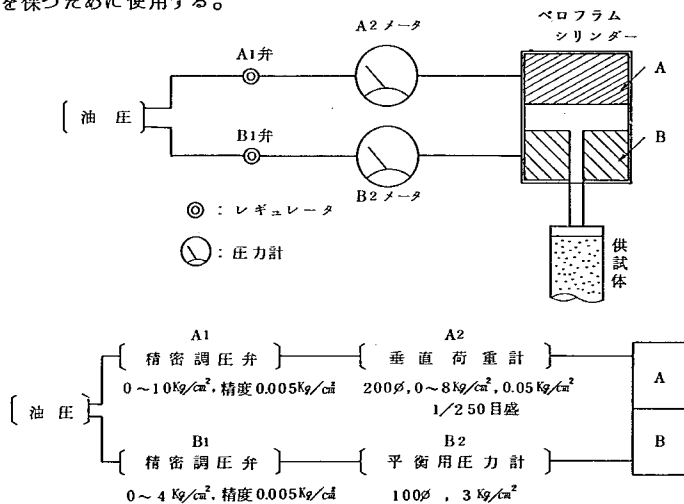
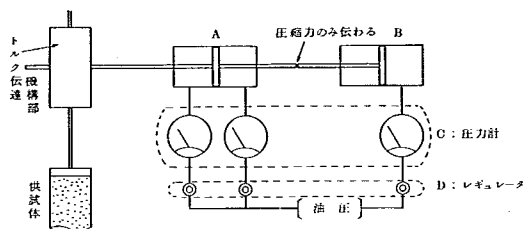


図 II-1 軸荷重装置

1-2-2 トルク負荷装置

この装置は図Ⅱ-2に示すように供試体にくりかえしねじり力を与えるものである。本装置はソレノイド（繰り返し負荷弁）を用いることにより動的くりかえし試験（応力制御、歪制御）もできる。

今回の実験ではこの動的くりかえし装置は主に高次のくりかえしねじり試験（ $N \geq 30$ ）の場合にのみ用いた。 $N = 10$ までの試験でのねじり力は、レギュレータを手動で操作することにより与えた。構造は軸荷重装置と同じである。



A：動負荷シリンダ（ペロフラムシール式， $100\text{Kg}/4\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，容量 500Kg-cm ）

B：静負荷添加用シリンダ（ペロフラムシール式， $100\text{Kg}/4\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）

C：精密圧力計（ 150ϕ ， $0 \sim 6\text{Kg}/\text{cm}^2$ ， $1/120$ 目盛）

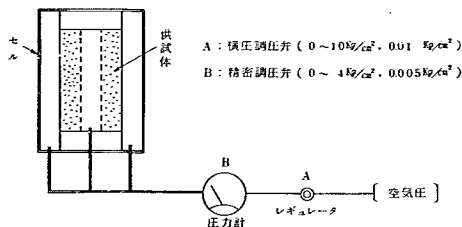
D：精密調圧弁（ $0 \sim 4\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，最小目盛 $0.005\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）

図Ⅱ-2 トルク負荷装置

ここでB部は片振幅のくりかえしねじり試験を行なう場合に用いるものでBシリンダに圧力をかけた場合、図Ⅱ-2において圧縮力（トルク力）が左へかかる場合のみにA部圧力分に加圧される。よってこのA、B両部圧力の組合せによって両振幅、片振幅など色々なくりかえし載荷状態を作ることができる。

1-2-3 拘束圧負荷装置

この装置は供試体に拘束圧を与えるものである。概略は図Ⅱ-3に示す。このように拘束圧は供試体の内側と外側とで常に等しくなるように与えた。



図Ⅱ-3 拘束圧制御装置

1-3 計測装置及びキャリブレーション

計測装置の概略を図Ⅱ-4のブロックダイアグラムに示す。トルク力、回転角の測定に誤差が入らないようにセルの中に測定装置を入れかつ供試体直上で測定した。回転角測定に分解能のよいポテンシオメータを使用した。これらのことが、本試験機の精度を高め従来困難とされていた $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 程度の極微小歪での測定を可能にした。以下に計測類の説明及びキャリブレーション結果を示す。

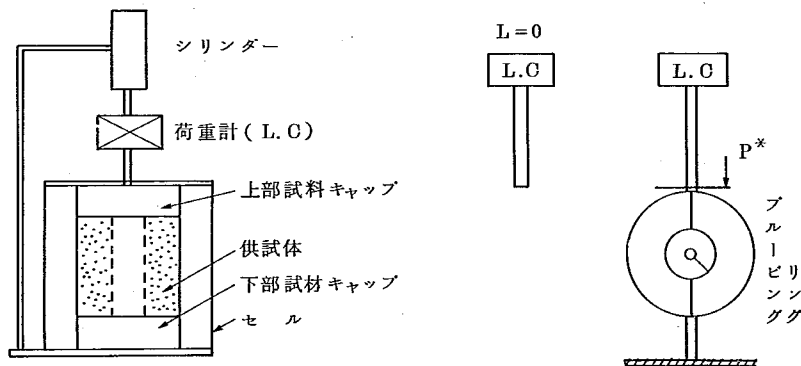
1-3-1 垂直荷重計

測定は次の流れで行なう。

〔垂直荷重計〕 → 〔アンプ〕 → 〔オシロ〕 $\left\{ \begin{array}{l} \text{計測長 } L \text{ より} \\ \text{軸荷重算定} \end{array} \right.$

荷重計は昭和測器のRCB-500型を使用した。以下に本試験機に組み込まれた時の荷重計のキャリブレーションと較正式を示す。

キャリブレーションは、図Ⅱ-5(右)に示すようにブルーピングリングで行なった。図Ⅱ-6にブルーピングリングの更正直線を示す。図Ⅱ-5を用いて求めた荷重計(L.C)の出力 β (10^{-8} ストレイン)と P^* (Kg)の関係を図Ⅱ-7(小荷重)、図Ⅱ-8(大荷重)として示す。ここで P^* は接合点から下の上部試材キャップ等の重さ(5.5 Kg)がない時の値である。



図Ⅱ-5 垂直荷重計キャリブレーション

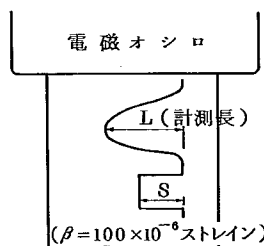
これより、

$$\left. \begin{array}{l} \text{増荷時} (dP^* > 0) \quad P^* = 0.251 \beta \\ \text{減荷時} (dP^* < 0) \quad P^* = 0.251 \beta + 3.26 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

が求まる。ここで3.26 (Kg)は供試体までの垂直荷重伝達部の摩擦力の量であり、ピストンを上下させその読みの差より求めた。(1)式に接合点から下の上部試材キャップ等の重さ(5.5 Kg)を加味すれば軸荷重 P は

$$\left. \begin{array}{ll} \Delta P > 0 & P = 0.251\beta + 5.5 \\ \Delta P < 0 & P = 0.251\beta + 8.8 \end{array} \right\} \left(\text{ただし、}\beta \text{は上部試料キャップを} \right. \dots\dots\dots (2) \\ \left. \text{つけていない時にゼロ} \right)$$

となり、この(2)式をオシロ上の読み L (cm) で表わすと



$$\left. \begin{array}{ll} \Delta P > 0 & P = \frac{25.1}{S} L + 5.5 \\ \Delta P < 0 & P = \frac{25.1}{S} L + 8.8 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (II-1)$$

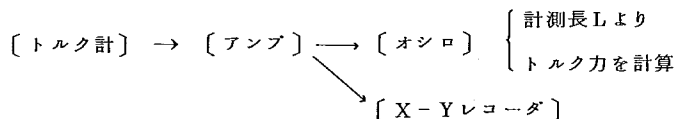
注) S はアンプの GAIN が 100×10^{-6} の時のオシロペーパ上の値。この値はアンプのアテネーションを変えれば変わる。又、 L は上部試料キャップをつけていないときにゼロである。

図 II - 9

となり、この(II-1)式をデータ処理プログラムでの垂直荷重算定式として使用した。

1-3-2 トルク計

トルク力の測定は次のようにして行なう。



トルク計は新興通信工業の151-46型を使用した。この計器では、 500 Kg-cm は 1485×10^{-6} ストレインに相当するので、 100×10^{-6} ストレインは 33.67 Kg-cm に相当する。

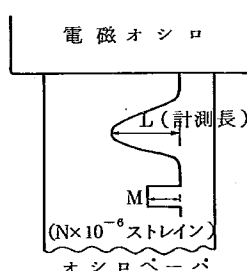


図 II - 10

よって

$$T (\text{トルク力}) = \frac{(L \times N) / 100.0}{M} \times 33.67 (\text{Kg-cm}) \dots\dots\dots (II-2)$$

となる。ここで M はアンプの各倍率 ($1/1$, $1/2$, $1/5$, $1/10$, $1/20$) における $N \times 10^{-6}$ ストレインでのオシロ上の読みである。

この(II-2)式をデータ処理プログラムでのトルク力の換算式とした。トルク力の測定をセルの中でしかも供試体直上で行なったことであり、これによりトルク力伝達部における摩擦力の影響をまったく入らないようにすることができた。この摩擦力は、この種の実験装置では通常問題になるものである。

回転角計は新興電気 K・K の MODEL 1608 回転角度検出器を使った。測定は次のようにして行った。

回転角 θ （度）は、図Ⅱ-11に示すように供試体直上で計測した。これにより、回転角 θ （度）はオシロ上の読みより、

となる。ここでMは、角度メータ（最大 50° ，最小読み 0.02° ）で読んだメータ上の読み（度）である。Nは電磁オシログラフの各レンジ（10，9，8，7，6，5，4，3，2，1）での角度Mにおける時のオシロペーパー上の読み（cm）である。aは押接輪と上部試料キャップの直径の比であり機械的倍率（5又は2.5）である。

— 6 —

倍率の高いX-Yレコーダを使うことにより、供試体頂部の外周で1 μm の変位がオシロ上では2 cm以上に、X-Yレコーダ上では10 cm以上の動き(倍率 10^5)に拡大することができる。これらのことが本試験機の精度を高め $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 程度までの極微小歪での測定を可能にした。

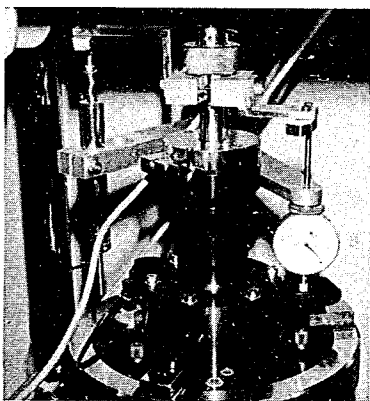
1-3-4 垂直変位計(ダイヤルゲージ(D.G)、変位計(LVDT))

(a) 軸変位のキャリブレーション

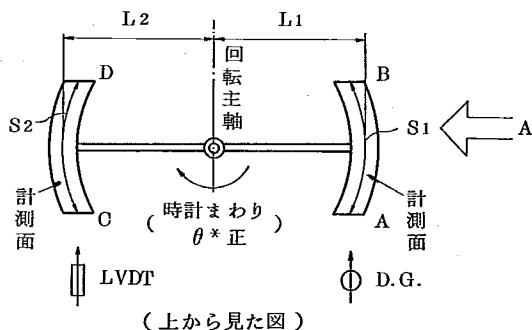
図II-12~15に示すように軸変位は供試体直上(②、③)と試験時計測部(①)とでは、機械のひずみ等によって $P = 300\text{Kg}$ で0.02 cmの差がある。又、Pとこの差の関係は線型である。よって測定部の軸変位(計測変位)から供試体の本当の軸方向圧縮 ΔH^* を求めるために(II-4)式を用いた。

$$\begin{aligned} \Delta H^* &= \Delta H - \frac{0.02}{300} P \quad (\Delta H: \text{計測長}) \\ &= \Delta H - 0.00007P \end{aligned} \quad \text{(II-4)}$$

(b) 軸変位計測部の水平誤差による補正

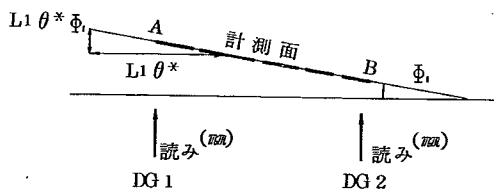


写真II-2



図II-16

軸変位計測には、写真II-2、図II-16に示すような器具を用いるため計測面の水平誤差を補正してやらねばならない。ただし、計測面は平面である。



ϕ_1 ; 計測面の水平面からの傾き(ラジアン)

図II-17 (図II-16でA方向から見た図)

b-1 ダイヤルゲージ(D.G)を用いる場合

図II-16参照。

注) ダイヤルゲージは黒数字を読む。

(下がると増加)

よって、A点、B点でのダイヤルゲイジの読みDG1、DG2から

$$\phi_1 = \frac{DG2 - DG1 \text{ (mm)}}{S1 \text{ (mm)}}$$

となる。(∵ $\tan \phi \approx \sin \phi \approx \phi$) ここで、S1はAB間の距離である。回転主軸の θ^* 度の回転により補正すべき値は $L1 \cdot \theta^* \cdot \phi_1$ であるから、これを(II-4)式へ代入すると(ダイヤルゲイジによる高さの変化 ΔH は圧縮が正)

$$\begin{aligned} \Delta H^{**} &= \Delta H^* - L1 \theta^* \phi_1 \\ &= \Delta H - 0.00007P - L1 \theta^* \phi_1 \dots\dots\dots (II-5) \end{aligned}$$

ただし $\begin{cases} L1 = 8.66 \text{ cm}, S1 = 62.6 \text{ mm (II-16 参照)} \\ \theta^* \text{ は真のねじり角 (右→正) である。} \end{cases}$

b-2. 変位計 (LVDT)

変位計 (LVDT) は新興通信工業のIDS-2T型を使用した。(写真II-2, 図II-16を参照のこと。)

この計器では、

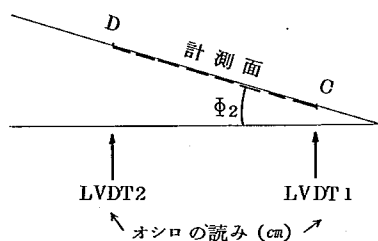
$$4598 \times 10^{-6} \text{ マイクロ} = 10 \text{ mm だから}$$

$$100 \times 10^{-6} \text{ マイクロ} = 0.2175 \text{ mm となる。}$$

これより変位計の計測面の水平からの傾きは、図-II-18を参照して、

$$\phi_2 = \frac{LVDT2 - LVDT1 \text{ (cm)}}{S2 \text{ (mm)}} \times \frac{0.2175 \text{ (mm)}}{ADGAIN(1) \text{ (cm)}} \dots\dots (3)$$

ここで、ADGAIN(1)はAT Tの倍率を1とした時のキャリブレーションのオシロペーパー上の読み (cm)。(図-II-19 参照) S2は図II-16に示す変位計の計測面長である。ここで θ^* が正の方向に動くときLVDTはCの方向に向うから、 $\phi_2 > 0$ ならばLVDTは下へ押しつけられるから、 ΔH は過大評価される。よって(3)式と(II-4)式から、真の高さ変化は、



注) 下方変位を正とする。

図 II - 18

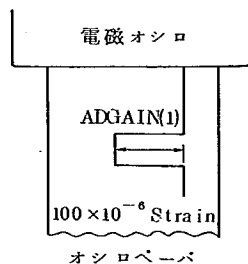


図 II - 19

$$\begin{aligned} \Delta H^{(cm)}_{**} &= \Delta H^{(cm)}_* - L_2 \cdot \theta^{(ラジアン)} \cdot \Phi_2 \\ &= \Delta H^{(cm)}_* - 0.00007P - L_2 \cdot \theta^* \cdot \Phi_2 \end{aligned} \quad \text{..... (II-6)}$$

$$\text{ここで} \begin{cases} L_2 = 11.03 \text{ cm} \\ S_2 = 62.6 \text{ mm} \end{cases}$$

この (II-5), (II-6) 式をデータ処理プログラムの軸変位算定式として使用した。

1-3-5 体積歪

ビューレットは (容量 25 ml, 最小目盛 0.1 ml) と (容量 5 ml, 最小目盛 0.05 ml) の 2 本を使用し測定はメニスカスの下面で行なった。

体積歪 v は (圧縮正)

$$v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad \text{..... (II-7)}$$

ここで $\Delta V = B_2 - B_1$

B_2 : 圧縮完了時のビューレットの読み

B_1 : 計測時のビューレットの読み

V_0 : 圧密完了時の体積

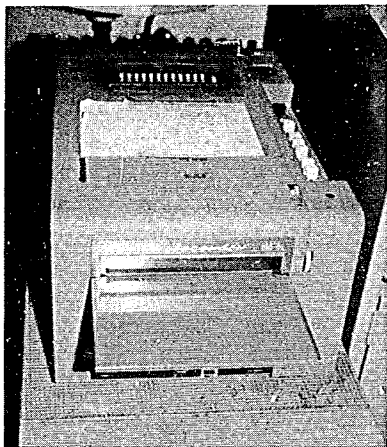
となり、この (II-7) 式はデータ処理プログラムで体積歪算定式として使用した。

1-3-6 電磁オシログラフ

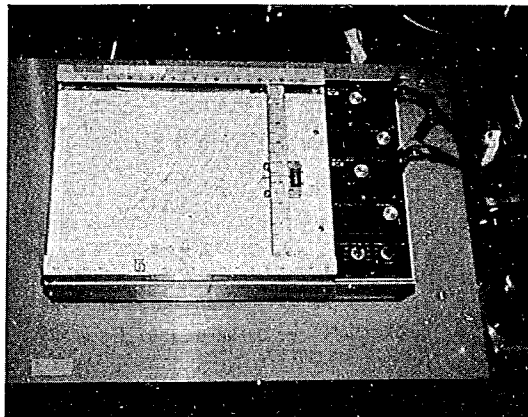
写真 (II-3) に示す電磁オシログラフは軸力; P 、トルク力; T 、軸変位; ΔH 、回転角; θ の記録に用いた。

1-3-7 X-Yレコーダ

写真(Ⅱ-4)に示すX-Yレコーダはトルク力; T 、回転角; θ の記録に用い、これにより描かれた履歴曲線より履歴減衰係数 η を求めた。



写真Ⅱ-3 電磁オシログラフ



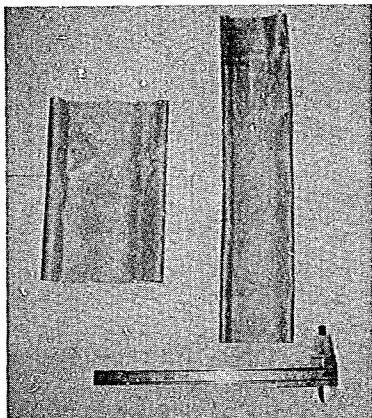
写真Ⅱ-4 X-Yレコーダ

2. 実験手順

2-1 乾燥砂の場合

(1) ゴムスリーブの検定

写真Ⅱ-5に示すゴムスリーブを用いた。写真Ⅱ-6のようにゴムスリーブ内に水を入れ、穴があいていないか確かめる。次に外ゴム厚を測定する。(ノギス)



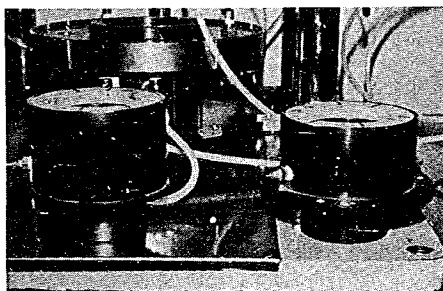
写真Ⅱ-5 ゴムスリーブ



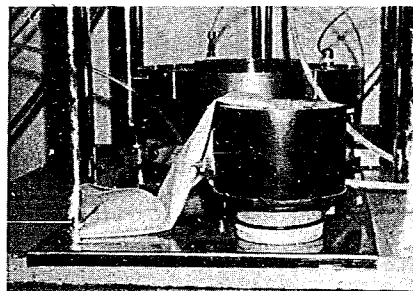
写真Ⅱ-6 ゴムスリーブの検定

(2) 内モールドの組み立て

写真Ⅱ-7の左は試料キャップ、右は試料台である。まず、下部試料台に内ゴムスリーブを取り付ける。(写真Ⅱ-9)次に下部試料台を底板に固定する。次に写真Ⅱ-9のように、内モールドを下部試料台に組み立てる。ここで内ゴムスリーブがやぶれないように気をつける。

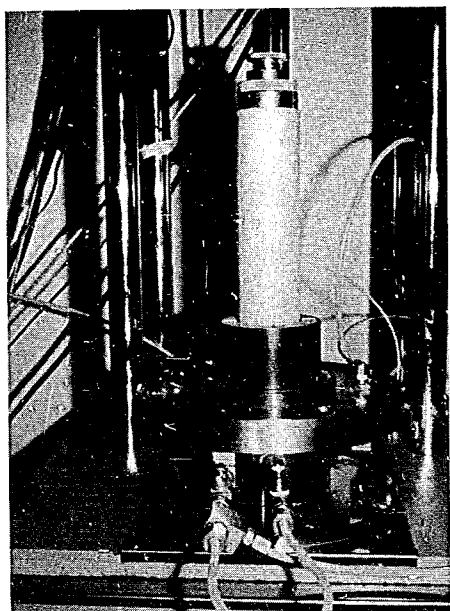


写真Ⅱ-7 試料キャップ、試料台

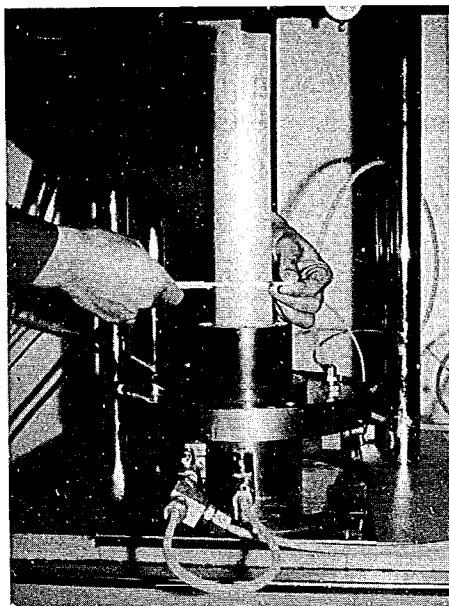


写真Ⅱ-8 ゴムスリーブの取付け

次に、写真Ⅱ-10のように、直径（供試体内径）を6ヶ所測定する。



写真Ⅱ-9 内モールドの組み立て



写真Ⅱ-10 内径測定

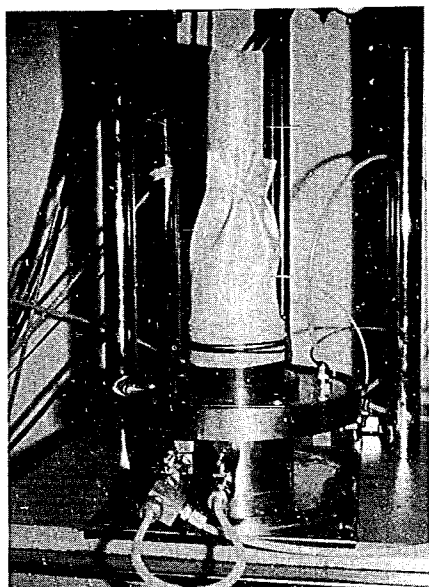
(3) 外モールドの組立て

写真Ⅱ-11のように、外ゴムスリーブを下部試料台に取り付け、次に写真Ⅱ-12のように、その外側に外モールドを組み立てる。（外ゴムスリーブに傷をつけないよう気をつける。）真空圧により外モールドにゴムスリーブを密着させる。

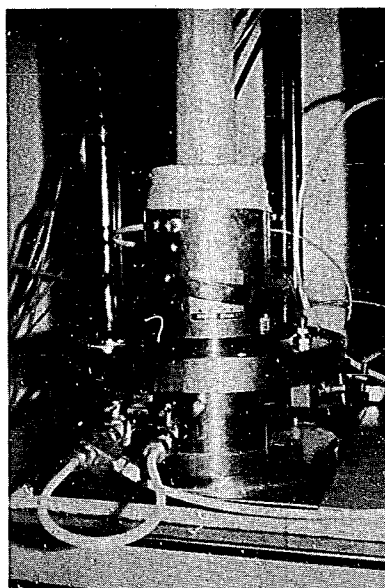
(4) 砂づめ・重量の測定

乾燥炉で乾燥しデシケータに貯蔵しておいた砂を取り出し、砂＋容器の重量を測定し、その後、スプーンを使ってモールド内にそそぎ込む。（写真Ⅱ-13）

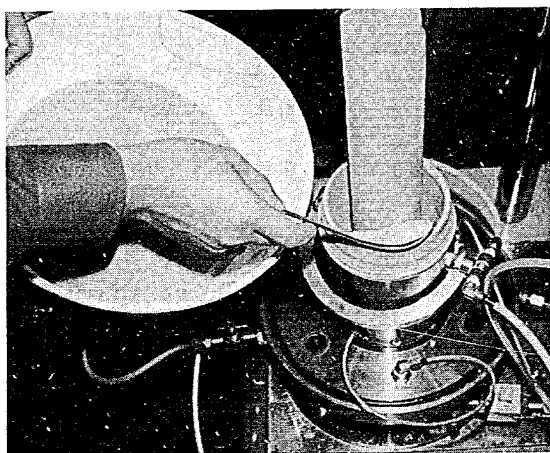
試料はすべて木槌を使って外モールドを叩くことにより密づめとした。この時、砂を外にこぼさないことが大切である。つめ終わったら残った砂＋容器の重量を測定する。その後、上部試料キャップを取り付け、ゴムバンドによりゴムスリーブと上部試料キャップを密着する。（写真Ⅱ-14）



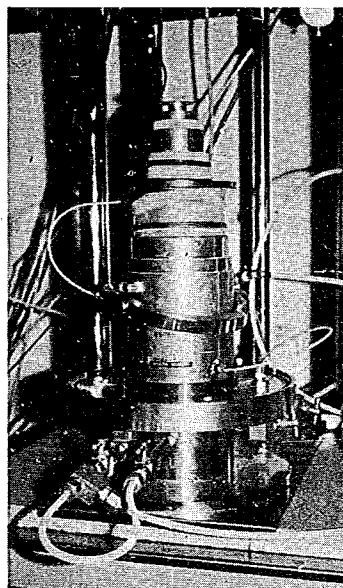
写真Ⅱ-11 外ゴムスリーブの取り付け



写真Ⅱ-12 外モールドの組み立て



写真Ⅱ-13 砂づめ、(乾燥砂)



写真Ⅱ-14 上部試料キャップの取り付け

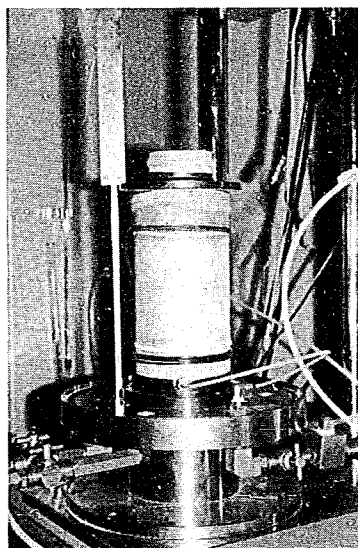
(5) 供試体の自立

供試体を自立させるために、モールド内に真空ポンプにより負圧（約 -1.0 Kg/cm^2 ）をかける。この時、ゴムスリーブに穴があいていたり、ゴムスリーブと上部試料キャップ、下部試料台との密着が不足していると、供試体は自立しない。この時は、もう一度(1)~(4)を行なう。供試体の自立を確かめた後、外モールド、内モールドを、ゴムスリーブに十分注意してはずす。

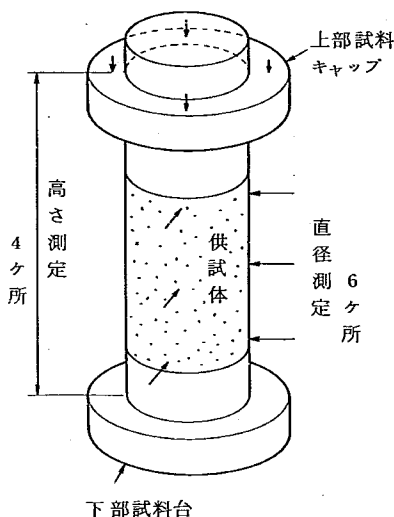
(6) 供試体の各種寸法の測定

ノギスにより、高さ（上部試料キャップ頂点より低面まで）4ヶ所、直径6ヶ所を測定する。

（写真Ⅱ-15、図Ⅱ-20）



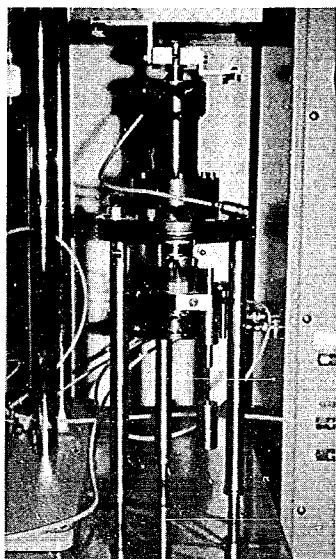
写真Ⅱ-15 供試体の高さ測定



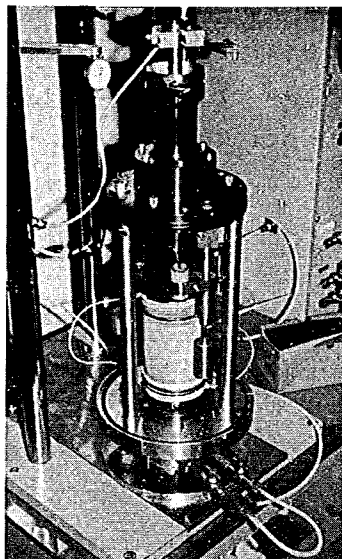
図Ⅱ-20 供試体の寸法の測定

(7) 外わくの取り付け

図Ⅱ-21に三軸室の構造を示す。この三軸室は次の以下の手順で組み立てる。まず、写真Ⅱ-16に示す外わくを供試体に接続させる（写真Ⅱ-17）。この時供試体に外わくがふれないよう注意する。上部試料キャップとトルクヘッドを、3本のネジにより結合させる。この結合部がトルク力を供試体に伝えるので、しっかり結合させる必要がある。



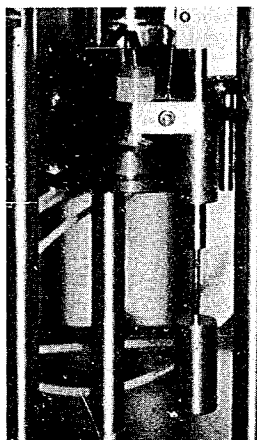
写真Ⅱ-16 外 外 く



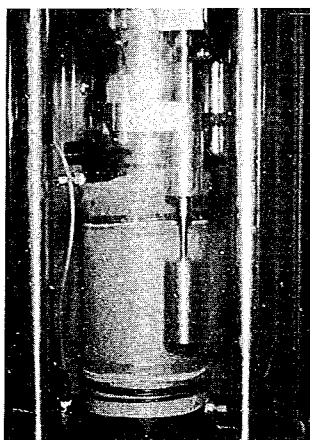
写真Ⅱ-17 外わくの取り付け

(8) 回転角計（ポテンショメーター）のセット

回転角計（写真Ⅱ-18）の押接輪を上部試料キャップにセットする。（写真Ⅱ-19）供試体の回転角（ひずみ量）を正確に回転角計に伝えるために、上部試料キャップと回転角計の押接輪との接触は十分とる必要がある（図Ⅱ-22）。接触がゆるすぎると供試体のひずみを正確に回転角計に伝えることはできない。

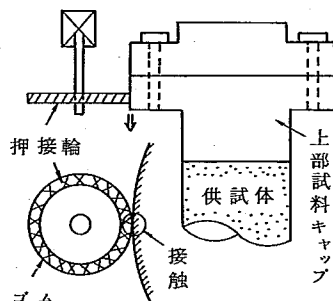


写真Ⅱ-18
回転角計（ポテンショメータ）



写真Ⅱ-19
回転角計（ポテンショメータ）
のセット

回転角計（ポテンショメータ）



図Ⅱ-22 回転角計の原理

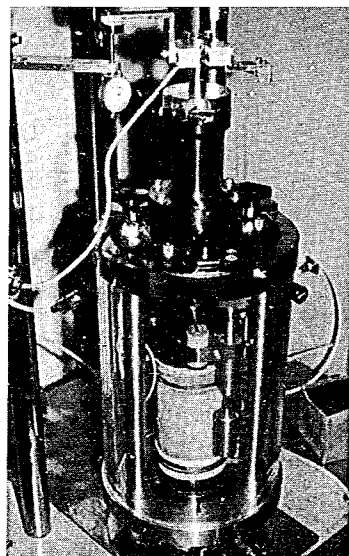
(9) 回転角計、トルク計、軸荷重計のキャリブレーション

回転角計をセットした後、計測器のキャリブレーションを行なう。

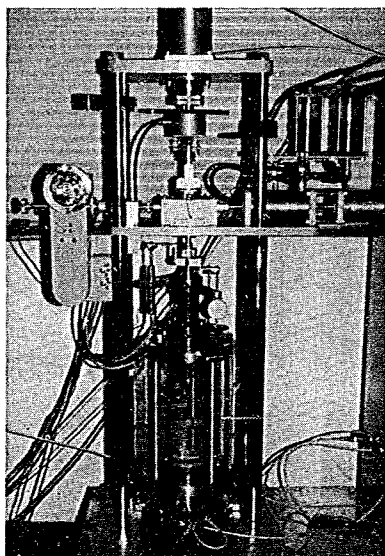
- a): 回転角計のキャリブレーションでは、所定の回転角が電磁オシロベーパー上で何cmの動きになるかを記録する。具体的には表Ⅱ-2のことを行なう。感度の切り換えは電磁オシロのアテネータ(1~10)で行なう。RANGEはアンプのアテネータの拡大率をあらわし、 10^0 を基準とする。キャリブレーション終了後、回転角計の押接輪を手で動かして角度を0(中心)点に合わせしておく必要がある。
- b): トルク計のキャリブレーションでは、表Ⅱ-3に示すようにアンプの基準発振電圧(GAIN)を記録しておく。感度の切り換えはアンプのアテネータで行なう。トルク計の感度の選定は後の計測の仕易さに大きく影響するので十分注意する。
- c): 軸荷重計のキャリブレーションでは、表Ⅱ-4に示すように基準発振電圧(GAIN)を記録する。感度の切り換えはアンプで行なう。

(10) セルの組み込み(拘束圧負荷装置)

写真Ⅱ-20に示すように、セルをかぶせた後、拘束圧を約 0.2 Kg/cm^2 与え、その後、供試体内の真空力を解除することにより、供試体は真空力による拘束から側圧による拘束になる。この後、今までに組み立てた三軸室を低周波動的セン断試験機本体へセットする。写真Ⅱ-21(セット時に供試体へ軸荷重をかけすぎないように注意する。)軸変位(供試体)を測定するためにダイヤルゲージ及び変位計をセットし、初期値を測定する。この後ピストンの上下方向の拘束をはずす。これにより実験装置の組み立てが終了する。



写真Ⅱ-20 セルのセット

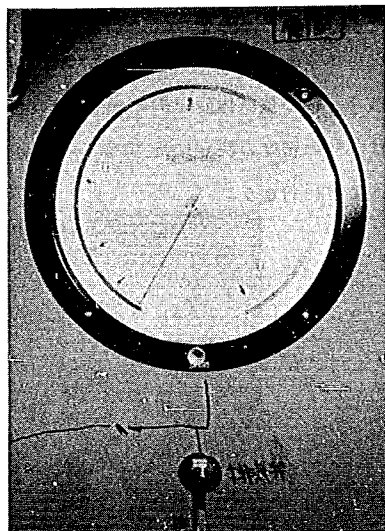


写真Ⅱ-21 本体へセット

(11) 供試体の等方圧縮

供試体を等方圧縮 ($\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$) にするために、軸荷重と拘束圧を同時に加えて所定の圧力状態まで加圧していく拘束圧の値はブルドンゲージにより定め軸力はメータにより定める。所定の圧力状態になった時点で軸方向変位、測定用ダイヤルゲージ、軸力、拘束圧を測定する。

この後、くりかえしねじり試験を行なう。
以上が乾燥砂による実験装置のセット方法である。
次に、飽和砂による実験装置セット方法を示す。



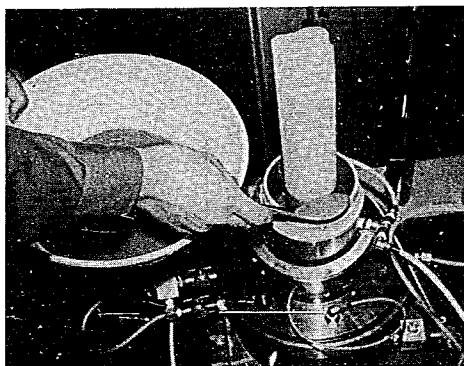
写真Ⅱ-22 精密ブルドンゲージ

2-2. 飽和砂の場合

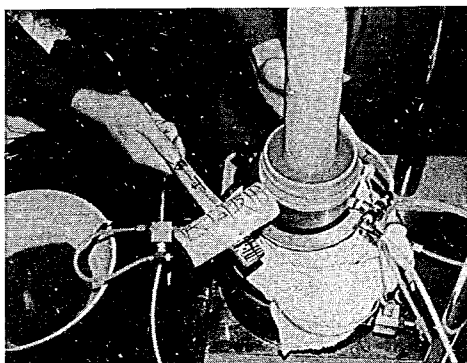
(1), (2), (3)の手順は乾燥砂の場合と同じである。

(4) 砂づめ及び重量の測定

組み立てたモールド内に脱気水をはり、十分脱気した飽和砂をスプーンでモールド内にそそぎ込む。この時、砂を空気に触れさせないように十分気をつける。

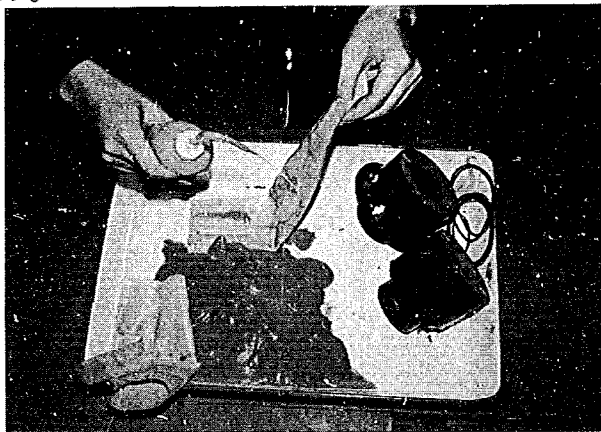


写真Ⅱ-23
飽和供試体を作るために砂を詰めている状況



写真Ⅱ-24
外モールドを叩くことにより密づめに行っている状況

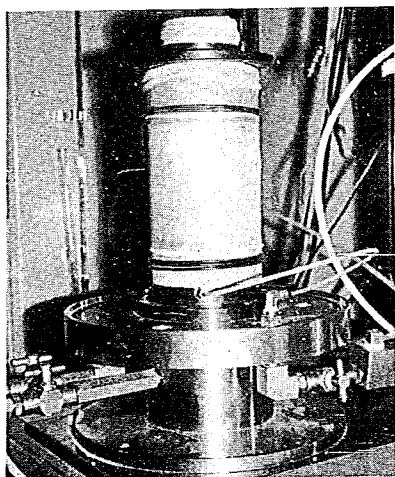
今回の実験では、砂はすべて木槌を使って外モールドを叩くことにより密づめとした。その後、上部試料キャップを取りつける。この時、供試体内に気泡が入らないよう十分注意する。砂の重量は実験終了後の供試体砂を炉乾燥し測定した。このため、供試体作成時に砂をつめる時の砂のこぼしは供試体の密度の決定には関係ないが、供試体解体時の砂の集収には十分注意して取りこぼさないように行なう。



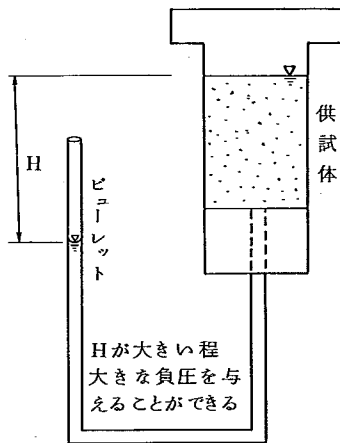
写真Ⅱ-25 供試体分解時の砂の収集（飽和砂）

(5) 供試体の自立

ビューレット内の水面を供試体の位置より低くさせることにより、供試体内に負圧（約 -0.05 Kg/cm^2 ）を生じさせ供試体を自立させる。ビューレットの水面が安定せず水面が上昇するときは、ゴムスリーブの欠損及びゴムスリーブと試料台、試料キャップの密着不足が生じているから、(1)~(4)をもう一度行なう。



写真Ⅱ-26 自立した飽和供試体



図Ⅱ-23 飽和供試体の自立

供試体の自立を確かめた後、内、外モールドをゴムスリーブを欠損させないようにして十分注意してはす。

(6) 供試体各部寸法の測定

乾燥砂と同じ。ただし、ビューレット（体積変化測定用）の初期値も測定。ビューレットは 25 ml、5 ml 用を使用した。

(7)～(11) は、乾燥砂の場合と同じである。ただし、(11) ではビューレットの値の測定も含む。

3. くりかえしねじり試験

3-1. 試験方法

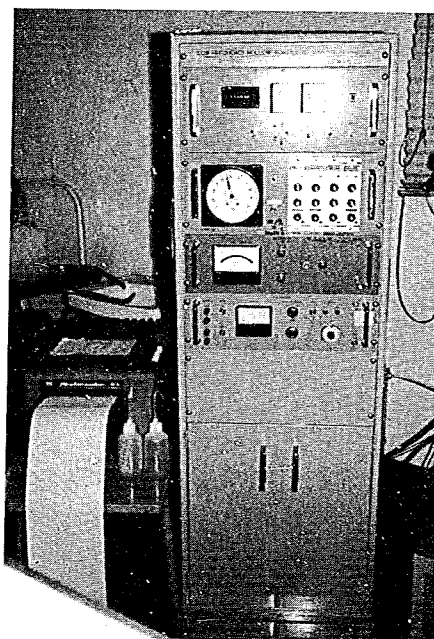
低周波動的セン断試験では1つの供試体で、1つの拘束圧のみの実験を行った。

①まず、 5×10^{-5} 程度の歪振幅を選定する。これは、X-Yレコーダでだいたいの目安を立てることによって行なう。歪レベルの最小値を 5×10^{-5} 程度としたのは、共振法土質試験機の測定可能最大歪振幅が 2×10^{-4} 程度なので、これとの関連性をもたせるためと、この歪の大きさが低周波動的セン断試験機による履歴減衰係数(η)の値を算定できるX-Yレコーダの精度から来るほぼ限界であるからである。



写真Ⅱ-27

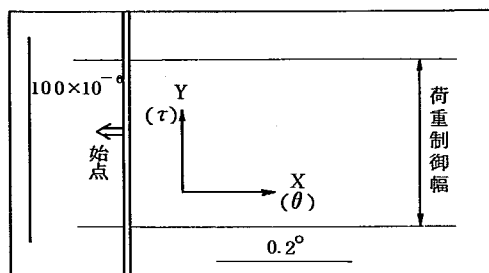
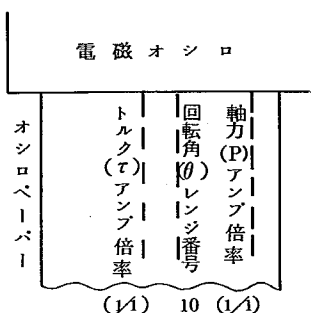
X-Yレコーダを用いた荷重振幅一定
とした手動による荷重制御状況



写真Ⅱ-28

電磁オシロによる記録状況
(歪制御装置と共に示す)

②トルク、ひずみ、軸力の感度を①に合わせて選び、これらを電磁オシロ、X-Yレコーダに図Ⅱ-24のように設定した。又、ダイヤルゲージ、ビューレット(飽和の場合のみ)の値も読む。



X-Yレコーダでの記録面

図 II-24

③ くりかえし試験はセン断荷重振幅一定の荷重制御とし $f \approx 0.1 \text{ Hz}$ 程度で各歪レベルごと 10 回くりかえし行った。くりかえし荷重幅は、X-YレコーダのY軸長を目やすに行った(写真II-27)。電磁オシロは紙おくり速度 10 mm/s で流し続けた。X-Yレコーダはくりかえし1回ごとにループがかさならないようにX軸方向に少しづつずらしていった。このようにして、電磁オシロ、X-Yレコーダで記録した典型的な記録を図II-25に示す。

④ 以上のことを $\gamma = 10^{-2}$ 程度(破壊の寸前)まで何段階か行なった。歪レベルの選定は、前歪の約倍とした。

⑤ 計測は電磁オシロ(軸力、トルク力、回転角)を主体とし、各歪レベルごとにダイヤルゲージ、ビューレット(飽和の場合)の値を読んだ。履歴減衰係数(η)はX-Yレコーダに記録されたループより求めた。(計算式はII-7の履歴減衰係数(η)の整理を参照)

3-2 使用した砂の特性

豊浦砂 ($G_s = 2.64$, $D_{10} = 0.12 \text{ mm}$, $D_{60} = 0.175 \text{ mm}$, $U_c = 1.46$, $e_{\max} = 0.96$, $e_{\min} = 0.64$) を使用した。 $e_{\max}$, $e_{\min}$ は空気乾燥状態で求めた。

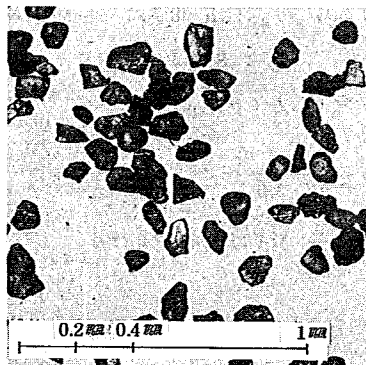
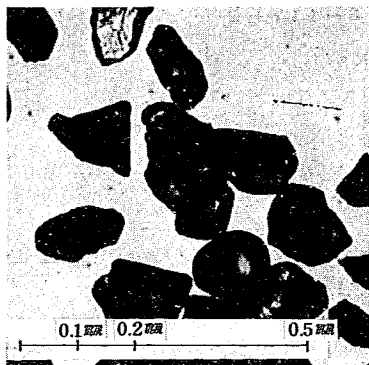


写真 II-29 豊浦砂の顕微鏡写真

4. 計算式及び処理プログラムの説明

このプログラムの目的は $G \sim \gamma$ 曲線を描くために必要な G (せん断変形係数)、 γ (せん断歪振幅) を求めることである。そのために必要な諸数値 [側圧 (σ_r)、軸応力 (σ_a)、平均主応力 (p)、軸歪 (ε_a)、体積歪 (v)、間隙比 (e)、せん断応力 (τ)、応力比 (n)、せん断歪 (γ)] の計算式及びプログラミングを以下に示す。処理プログラムは図 II-26 に示す。

4-1. 側 圧 (σ_r)

側圧は実験開始前の精密ブルドンゲージでの読みとする。

(プログラム) MAIN : 36 行目

4-2. 軸応力 (σ_a)

$$\sigma_a = \frac{P + \sigma_r (A - A_o)}{A} \quad \text{..... (II-8)}$$

ここで、 A_o : 上部試料キャップの面積: 50.64 cm^2

A : 計測時の供試体の面積 = V/H

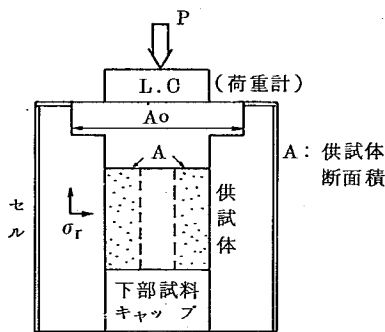
V , H は変位量を加味した値

ここで P は、II (1-3-1) 垂直荷重計の

(II-1) 式より

$$\text{if } p > 0 \quad P = \frac{25.1}{S} L + 5.5$$

$$\text{if } p < 0 \quad P = \frac{25.1}{S} L + 8.8$$



II-27 模型図

である。

(プログラム) σ_a : (II-8) 式 MAIN : 118 ~ 119 行目

P : SUBROUTINE - AXLOD に示す。

4-3. 平均主応力 (p)

$$p = \frac{2\sigma_a + \sigma_r}{3.0} \quad \text{..... (II-9)}$$

(プログラム) MAIN の 120 行目

4-4. 軸歪 (ϵ_a)

$$\epsilon_a = \Delta H^{**} / H_0 \quad \text{..... (II-10)}$$

H_0 : 試験前の供試体の高さ

ここで、 ΔH^{**} は II (1-3-4) (垂直変位計) での (II-5), (II-6) 式より

$$\Delta H^{**} \text{ (cm)} \text{ (ダイヤルゲージ)} = \Delta H - 0.00007P - L_1 \cdot \theta^* \cdot \phi_1$$

$$\Delta H^{**} \text{ (cm)} \text{ (変位計)} = \Delta H - 0.00007P - L_2 \cdot \theta^* \cdot \phi_2$$

である。

(プログラム) ϵ_a (II-10) 式: MAIN の 84~87 行目

ΔH^{**} : SUBROUTINE - AXDISP に示す。

4-5. 体積歪 (v)

v は、II (1-3-5) ビューレット (体積歪) の (II-7) 式より

$$v = \Delta V / V_0 \quad \text{..... (II-11)}$$

(プログラム) MAIN の 88~91 行目

4-6. 間隙比 (e)

$$e = V_v / V_s = V / V_s - 1 = G_s \cdot V / W - 1 \quad \text{..... (II-12)}$$

$$\text{ここで} \begin{cases} G_s: \text{比重 (g/cm}^3\text{)} \\ V = V_0 - \Delta V \text{ (cm}^3\text{)} \\ W: \text{炉乾燥重量 (g) である。} \end{cases}$$

(プログラム) MAIN の 88~89, 121 行目

4-7. セン断応力 (τ)

τ は実験によって直接求められるところのトルク力 (T) から計算した。

4-7-1. セン断応力 (τ) のトルク力 (T)

からの換算式

静的ねじり試験より応力~歪曲線は、図 II-

22 に示すようになることが知られている。そ

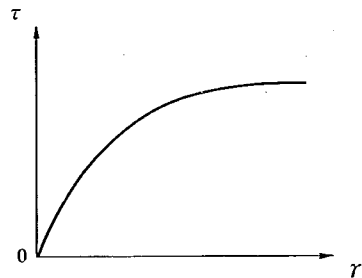


図 II-28

こで、

(a) 歪が非常に小さく τ が γ にほぼ比例するときと、

(b) 歪が非常に大きく τ が γ によらず一定のとき

の両極端について $\tau \sim T$ の関係について求めてみると次のようになる。

(a) τ が歪量 γ に比例する場合 (弾性変形するとき)

$$\tau \text{ の平均値 : } \tau_{av} \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = S \text{ (Kg)} / A \text{ (cm}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

半径上に微小区間 dr を考えると、(1)より

$$S = \int_{r_1}^{r_2} \tau \cdot 2\pi r \cdot dr \quad \dots\dots\dots (2)$$

又、

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \tau \cdot 2\pi r \cdot r \cdot dr \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで τ は半径 r に比例するから

$\tau = k \cdot r$ とおくと(2)、(3)より

$$S = k \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 \cdot dr = \frac{2\pi}{3} k (r_2^3 - r_1^3) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$T = k \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^3 \cdot dr = \frac{\pi}{2} k (r_2^4 - r_1^4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4)と(5)より

$$S = \frac{2}{3} (r_2^3 - r_1^3) \frac{2T}{(r_2^4 - r_1^4)} = \frac{4T(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^4 - r_1^4)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6)式を(1)式へ代入すると、

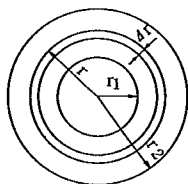
$$\tau_{av1} = S/A = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{(r_2^3 - r_1^3)}{(r_2^4 - r_1^4)} T \quad \dots\dots\dots (7)$$

(b) τ が γ によらず一定の場合 (完全塑性変形するとき)

$\tau = \tau_{av2}$ として(2)、(3)式へ代入すると、

$$S = \int_{r_1}^{r_2} \tau_{av2} \cdot 2\pi r \cdot dr = \tau_{av2} \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \tau_{av2} \cdot 2\pi r^2 \cdot dr = \tau_{av2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi (r_2^3 - r_1^3) \quad \dots\dots\dots (9)$$



図II-29 中空供試体

(8), (9)式より、

$$S = \frac{3}{2} \cdot \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{(r_2^3 - r_1^3)} T \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_{av2} = S/A = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{(r_2^3 - r_1^3)} T \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで(7), (11)式に近似的に $r_2 = 5$, $r_1 = 3$ を代入して、

$$\tau_{av1} = 0.004779 \cdot T$$

$$\tau_{av2} = 0.004872 \cdot T$$

となり、その差は微小である。よって、 r の広い範囲に対して、 τ_{av1} と τ_{av2} の平均値を τ としてもよい。従って、

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{4(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)(r_2^4 - r_1^4)} \cdot T + \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{(r_2^3 - r_1^3)} \right\} \quad \dots\dots\dots (\text{II-13})$$

(プログラム) MAIN の 114~117 行目

ここで、 T はII(1-3-2)トルク計の(II-2)式より

$$T = \frac{(L \times N)/100.0}{M} \times 33.67 \text{ (kg-cm)} \text{ である。}$$

(プログラム) MAIN の 104 行目

SUBROUTINE - TORK に示す。

ところが上記に示した r_1 (供試体内周半径)、 r_2 (供試体外周半径)は、変数であるため r_2 , r_1 を求める式を導びかなくてはならない。

(c) r_2 , r_1 の換算式

$$V = V_0(1-\nu) = \pi/4 \cdot (D_{20}^2 - D_{10}^2) H_0(1-\nu) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$H = H_0(1-\epsilon_a)$ より

$$\begin{aligned} V &= H_0(1-\epsilon_a) \frac{\pi}{4} \left[\{ D_{20}(1-\epsilon_r) \}^2 - \{ D_{10}(1-\epsilon_r) \}^2 \right] \\ &= H_0(1-\epsilon_a) \frac{\pi}{4} \left[(D_{20}^2 - D_{10}^2)(1-2\epsilon_r) \right] \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここで ϵ_r は軸直角方向歪である。

(12), (13) 式より

$$1 - \nu = (1 - \varepsilon_a)(1 - 2\varepsilon_r)$$

$$\varepsilon_r = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{1 - \nu}{1 - \varepsilon_a}\right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

よって、

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{D_{10}}{2} (1 - \varepsilon_r) = \frac{D_{10}}{2} \left\{ 1 + \frac{1 - \nu}{1 - \varepsilon_a} \right\} \\ r_2 &= \frac{D_{20}}{2} (1 - \varepsilon_r) = \frac{D_{20}}{2} \left\{ 1 + \frac{1 - \nu}{1 - \varepsilon_a} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (\text{II-14})$$

ここで $\left\{ \begin{array}{l} \nu, \varepsilon_a \text{ は、(II-10), (II-11) 式参照} \\ D_{10} \text{ (内径), } D_{20} \text{ (外径) は、供試体形成時の直径である。} \end{array} \right.$

(プログラム) MAIN の 93~98 行目

4-8. 応力比 (n)

$$n = \tau / \sigma_a \quad \dots\dots\dots (\text{II-15})$$

(プログラム) MAIN の 119~122 行目

4-9. セン断歪 (r)

$$r = \frac{\theta^* (r_1 + r_2)}{2H} \quad \dots\dots\dots (\text{II-16})$$

ここで $\left\{ \begin{array}{l} \theta^* = \pi / 180 \cdot \theta \\ \theta : \text{II(1-3-3) 回転角計の (II-3) 式に示す。} \\ r_1, r_2 \text{ は (II-14) 式に示す。} \\ H = H_0 (1 - \varepsilon_a) \\ \left\{ \begin{array}{l} H_0 : \text{供試体初期高さ} \\ \varepsilon_a : \text{(II-10) 式に示す。} \end{array} \right. \end{array} \right.$

(プログラム) r : MAIN の 92~99行目

θ^* : SUBROUTINE - THITA, MAIN: 78~81

4-10. セン断変形係数 (G), セン断歪振幅 (γ)

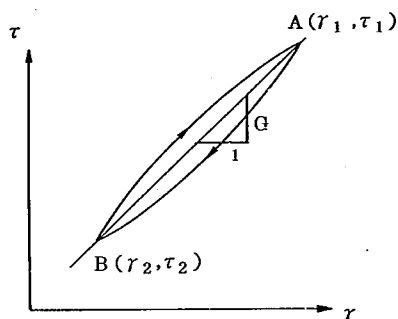


図 II-30 より

$$\gamma = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)}{2} \quad \dots\dots\dots (\text{II}-17)$$

(プログラム) MAIN: 145 ~ 146 行目

$$G = \frac{(\tau_1 - \tau_2)/2}{\gamma} \quad \dots\dots\dots (\text{II}-18)$$

ここで γ は片振幅である。

(プログラム) MAIN: 147 ~ 148 行目

図 II-30

4-11. 処理プログラム (ラインプリンターによる打出し)

電算による γ, G の打出し

NO.	STRAIN	G
1	0.0000691	888.58
2	0.0000519	1046.12
3	0.0000497	1091.61
4	0.0000475	1175.60
5	0.0001164	875.01
6	0.0000970	1009.13
7	0.0000906	1066.69
8	0.0000906	1088.46
9	0.0002390	800.57
10	0.0001830	969.87
11	0.0001680	986.71
12	0.0001723	996.26
13	0.0006446	530.96
14	0.0004963	676.17
15	0.0004748	727.76
16	0.0004555	758.65
17	0.0013162	347.23
18	0.0011308	401.14
19	0.0009283	477.89
20	0.0008776	516.89
21	0.0025254	215.76
22	0.0023070	227.40
23	0.0022059	253.07
24	0.0020257	195.90
25	0.0050006	131.28
26	0.0052365	122.74
27	0.0048261	135.30
28	0.0038491	172.30

P = 1.044

図Ⅱ-26 データ処理プログラム

01-13-76 13.496 *****

```

C *****
C *
C *
C * PROGRAM FOR PROCESSING DATA OF LOW CYCLIC DYNAMIC
C * TORSIONAL TESTS
C * --- EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH SECTION, P.W.R.I. ---
C *
C *****
行数 C *****
10 C ***** MAIN *****
    DIMENSION CELLP2(300),STAX(300),STM(300),ALPHTI(300),
    *VS(300),E(300),TAU1(300),GAMMA(300),ST(300)
    DIMENSION HAXLOD(5),HLV(5),HTHITA(10),HTORK(5)
    DIMENSION THILA(10),TRLA(5),ALLA(5),ADLA(5)
    PAI=3.1416
15    100 READ(5,1000) KK
    1000 FORMAT(15)
    IF(KK.EQ.0) GO TO 9999
    GO TO (11,12,13,14,15,16,17),KK
20    11 CALL INTIA (DIH,DOH,HOH,WEIGHT,VOLUME,SG,BIV,PAI)
    GO TO 100
    12 CALL THITA(HTHITA,ATTM,THILA)
    GO TO 100
    13 CALL TORK(HTORK,TRLA)
    GO TO 100
25    14 CALL AXLOAD(HAXLOD,P1,ALMO,ALLA)
    GO TO 100
    15 CALL AXDISP(DIFAI,VLFBI,HLV,JHAN2,DIV,ADLA)
    GO TO 100
30    16 CALL CONSOL(HOH,DIV,VOLUME,WEIGHT,HI,VI,BI,BIV,SG,DGO,P1,ALMO,P2)
    GO TO 100
    17 CONTINUE
    PL1=DGO
    I=0
35    50 I=I+1
    READ(5,1) CELLP2(I),IPATT,PMETA,POSRO,IHATT,
    *HOSRO,HDIGA,BURET2,IRANGE,ISATT,TOSRO,TMETA,
    *IFATT,TFOSRO
    1 FORMAT(F5.1,3X,I2,2F5.1,3X,I2,F5.1,F10.3,F5.2,I5,
40    *3X,I2,2F5.1,3X,I2,F5.1)
    IF(CELLP2(I).LT.0.0001) GO TO 51
    IF(MOD(I-1,5).EQ.0) WRITE(6,5)
    IF(MOD(I-1,45).EQ.0) WRITE(6,3)
45    3 FORMAT(1H1,////,4X,'CELL PR.',8X,'AXIAL LOAD (P)',13X,
    *'AXIAL DISP. (DH)',7X,'DV (CC)',9X,'TORSIONAL ANGLE',13X,
    *'TORSIONAL FORCE',16X,'ATT.',5X,'METER',4X,'OSCILLO',5X,
    *'ATT.',4X,'OSCILLO',4X,'D.G.',6X,'BURETTE',3X,'RANGE',2X,
    *'ATT.',1X,'OSCILLO',2X,'METER',7X,'ATT.')
    WRITE(6,2) CELLP2(I),IPATT,PMETA,POSRO,IHATT,
50    *HOSRO,HDIGA,BURET2,IRANGE,ISATT,TOSRO,TMETA,
    *IFATT,TFOSRO
52    2 FORMAT(5X,F5.2,6X,'1/',I2,2(5X,F5.1),6X,'1/',I2,5X,F5.1,4X,F6.3,

```

01-13-76 13.496 *****

```

行数
53 *2X,F10.3,5X,12,4X,12,2(3X,F5.2),7X,'1/' ,12,4X,F5.2)
    PL=HDIGA
55    PLL=HDIGA-PL1
    I1=IPATT
    IF(I1.NE.20.AND.I1.GT.3) I1=2+I1/5
    IF(I1.EQ.20) I1=5
60    IF(I.EQ.1) PALS1=POSRO-ALLA(I1)
    IF(PLL.LT.0.0001) AXLODP=(POSRO-ALLA(I1)-PALS1)*HAXLOD(I1)+8.8+P2
    IF(PLL.GT.0.0001) AXLODP=(POSRO-ALLA(I1)-PALS1)*HAXLOD(I1)+5.5+P2
    IF(ABS(POSRO).LT.0.0001.AND.PLL.GT.0.0001)
    *AXLODP=P1*(PMETA-ALMO)+5.5
    IF(ABS(POSRO).LT.0.0001.AND.PLL.LT.0.0001)
65    *AXLODP=P1*(PMETA-ALMO)+8.8
    PL1=HDIGA
    I1=IHATT
    IF(I1.NE.20.AND.I1.GT.3) I1=2+I1/5
    IF(I1.EQ.20) I1=5
70    IF(I.EQ.1) PALS2=HOSRO-ADLA(I1)
    DH=(HOSRO-ADLA(I1)-PALS2)*HLV(I1)+(DGO-DIV)/10.0
    IF(JHAN2.EQ.1) DH=(HDIGA-DIV)/10.0
    P=AXLODP
    LO=8.66
75    IF(JHAN2.EQ.2) LO=11.03
    I2=I1-ISATT
    IF(I.EQ.1) PALS3=TOSRO-THILA(I2)
    IF(ATTM.LT.0.01) ATTM=1.0
    THITB=PA1/180.0/ATTM
80    THITB=THITB*((TOSRO-THILA(I2)-PALS3)*HHTHITA(I2))
    THITB=THITB*IRANGE/10.0
    FAI=DTFAI
    IF(JHAN2.EQ.2) FAI=VLFAI
    H=H0H-DH+0.0007*P/10
    H=H+LO*THITB*FAI
85    DH=HI-H
    AIPTHI(1)=DH/HI
    DV=R1-BURET2
    VLM=VI-DV
90    HGT=H
    VS(1)=DV/VI
    H=HI*(1-AIPTHI(1))
    D1I=D1H
    D2I=D0H
95    D2I=D2I**2-D1I**2
    R=2*VLM/HGT/D2I/PA1
    R1=D1I/2.0*(0.5+R)
    R2=D2I/2.0*(0.5+R)
    GAMMA(1)=THITB*(R1+R2)/2.0/H
100    I1=IFATT
    IF(I1.NE.20.AND.I1.GT.3) I1=2+I1/5
    IF(I1.EQ.20) I1=5
    IF(I.EQ.1) PALS4=TFOSRO-TRLA(I1)
104    T=(TFOSRO-TRLA(I1)-PALS4)*HTORK(I1)

```

```

01-13-76 13.496 *****
行数
105 R12=R1**2
    R13=R1**3
    R14=R1**4
    R22=R2**2
    R23=R2**3
110 R24=R2**4
    RR3=R23-R13
    RR2=R22-R12
    RR4=R24-R14
    TAU=3.0*RR2*RR4
115 TAU=4.0*RR3/TAU
    TAU=TAU+3.0/RR3/2.0
    TAU1(I)=0.5/PAI*TAU*T
    AREA=VLM/HGT
    STAX(I)=(P+CELLP2(I)*(AREA-50.64))/AREA
120 STM(I)=(STAX(I)*2.0+CELLP2(I))/3.0
    F(I)=VLM *SG/1000.0/WEIGHT-1.0
    ST(I)=TAU1(I)/STAX(I)
    GO TO 50
51 NDK=I-1
125 STM1=0.0
    DO 119 I=1,NDK
    IF(MOD(I-1,5).EQ.0) WRITE(6,5)
    5 FORMAT(50X)
    IF(MOD(I-1,45).EQ.0) WRITE(6,4)
130 4 FORMAT(1H1,////,5X,'***** TEST RESULTS *****',//,
    *5X,'CELL PR.',5X,'AXIAL STRESS',9X,'M.S.',5X,'AXIAL STRAIN',5X,
    *'VOL. STRAN',5X,'VOID RATIO',4X,'SHEAR STRESS',2X,'STRESS RATIO',
    *2X,'SHEAR STRAIN',/,3(5X,'(KG/CM**2)'),50X,'(KG/CM**2)')
    WRITE(6,6) CELLP2(I),STAX(I),STM(I),AIPHI(I),VS(I)
135 *E(I),TAU1(I),ST(I),GANMMA(I)
    6 FORMAT(4X,3(F10.3,5X),2(F10.6,5X),F10.4,2(5X,F10.4),4X,F10.7)
    STM1=STM1+STM(I)
119 CONTINUE
8 FORMAT(////,46X,'NO.',8X,'STRAIN',12X,'G')
140 WRITE(6,8)
    NDK1=(NDK-1)/2
    DO 120 I=1,NDK1
    I1=I*2
    I2=I1+1
145 S=(GANMMA(I1)-GANMMA(I2))/2.0
    S=ABS(S)
    G=(TAU1(I1)-TAU1(I2))/S/2.0
    G=ABS(G)
    WRITE(6,7) I,S,G
150 7 FORMAT(46X,I2,7X,F10.7,5X,F10.2)
120 CONTINUE
    STM1=STM1/NDK
    WRITE(6,9) STM1
155 9 FORMAT(///,50X,'P=',F10.3)
    GO TO 100
9999 CONTINUE
STOP
158 END

```

01-13-76 13.497 **** 1 *****

```

行数
1 C***** 1 *****
  SUBROUTINE INTIA(DIH,DOH,HQH,WEIGHT,VOLUME,SG,BIV,PAI)
  DIMENSION IDATE(3),IRECO(10),ISAND(4),HTO(4),
5  *DIAIN(6),DIAOUT(6),KSAND(4)
  CHARACTER JSK*12,JTK*20
  READ(5,1) IDATE,IRECO
  1 FORMAT(3A4,3X,10A4)
  WRITE(6,30) IDATE,IRECO
  30 FORMAT(1H1,///,11X,'DATE OF TEST',8X,'RECORDER',/,
10  *10X,3A4,3X,10A4,/)
  READ(5,7) KSAND,KSC,KT,SG,SW1,SW2,THICRU,BIV
  2 FORMAT(4A4,3X,I1, 9X,I1,/,F7.4,/,2F10.4,5X,F5.2,15X,F5.2)
  IF(KSC.EQ.1) JSK='HAIR-DRIED'
  IF(KSC.EQ.2) JSK='HNSATURATED'
  IF(KSC.EQ.3) JSK='11HNSATURATED'
15  IF(KT.EQ.1) JTK='20HTRIAXIAL COMPRESSION'
  IF(KT.EQ.2) JTK='19HSTATIC TORSION TEST'
  IF(KT.EQ.3) JTK='20HDYNAMIC TORSION TEST'
  WEIGHT=SW1-SW2
  20  WRITE(6,31) KSAND,JSK,JTK,SG,WEIGHT
  31 FORMAT(15X,'SAND',10X,'SAND CONDITION',9X,'TEST',10X,'SPECIFIC G.'
  *4X,'WEIGHT(KG)',/,10X,4A4,4X,A12,3X,
  *A20,3X,F5.3,5X,F10.4,/)
  READ(5,3) DIAIN
  25  3 FORMAT(6F10.4)
  READ(5,3) HTO
  READ(5,3) DIAOUT
  DI=0
  DO=0
  HO=0
  30  DO 100 I1=1,6
  DT=DI+DIAIN(I1)
  DO=DO+DIAOUT(I1)
  IF(I1.LE.4) HO=HO+HTO(I1)
  35  100 CONTINUE
  DIH=DT/6.0
  DOH=DO/6.0-THICRU/10.0
  HOH=HO/4.0-12.915
  WRITE(6,32) DIH,DOH,HQH,THICRU,BIV
  40  32 FORMAT(6X,'INSIDER DIA.',5X,'OUTSIDER DIA.',7X,'HEIGHT.',8X
  *'W. THICKNESS',6X,'BURETTE INITIAL VALUE',/, 4X,3(F10.4,'(CM)',4X)
  *,5X,F5.2,'(MM)',11X,F5.2,'(CC)',/)
  VOLUME=HOH*PAI/4.0*(DOH**2-DIH**2)
  RETURN
  45  END

```

01-13-76 13.498 **** 2 ****

行数

```
1 C***** 2 *****
  SUBROUTINE THITA(HTHITA,ATTM,THILA)
  DIMENSION HTHITA(10),THILA(10)
  WRITE(6,3)
5   3 FORMAT(//,5X,'CALIBRATION FOR TORSIONAL ANGLE',//,6X,'ATTAINATOR NO
    *',4X,'THITA BY METER(DEGREE)',5X,'ZERO (CM)',5X,
    *'AT GAIN(CM)',9X,'L (CM)')
    DO 100 I=1,10
    HTHITA(I)=0.0
10  READ(5,1) NAT,THI,THILA(I),THILB
    1 FORMAT(15,3F10,3)
    THIL=THILB-THILA(I)
    IF(THIL.GT.0.001) HTHITA(I)=THI/THIL
    WRITE(6,2) NAT,THI,THILA(I),THILB,THIL
15  2 FORMAT(10X,15,10X,F10.3,15X,3(F10.3,5X))
100 CONTINUE
    READ(5,4) ATTM
    4 FORMAT(F5.1)
    WRITE(6,10) ATTM
20  10 FORMAT(10X,'MECHANICAL AMPLIFICATION',F5.1,/)
    RETURN
22  END
```

01-13-76 13.499 **** 3 *****

行数	1	C***** 3 *****
		SUBROUTINE TORK(HTORK,TRLA)
		DIMENSION HTORK(5),TRLA(5)
		WRITE(6,3)
5	3	FORMAT(//,5X,'CALIBRATION FOR TORSIONAL FORCE',/,6X,
		*'ATT. OF AMP.',4X,'GAIN',5X,'ZERO (CM)',5X,
		*'AT GAIN(CM)',9X,'L (CM)')
		DO 100 I=1,5
		HTORK(I)=0.0
10		READ(5,1) NTR,NTRGAN,TRLA(1),TRLB
	1	FORMAT(15,5X,15,5X,2F10.3)
		TRL=TRLB-TRLA(1)
		IF(TRL.GT.0.001) HTORK(I)=NTRGAN/100.0*33.67/TRL
		WRITE(6,2) NTR,NTRGAN,TRLA(1),TRLB,TRL
15	2	FORMAT(11X,'1/',12,5X,15,'E-6',2X,3(F10.3,5X))
	100	CONTINUE
18		RETURN
		END

01-13-76 13.499 **** 4 *****

行数

```

1 C***** 4 *****
  SUBROUTINE AXLOAD(HAXLOD,P1,AMLO,ALLA)
  DIMENSION HAXLOD(5),ALLA(5)
  WRITE(6,3)
5  3 FORMAT(//,5X,'CALIBRATION FOR AXIAL LOAD',//
    *35X,'READ OF OSCILLO.',29X,'METER',//6X,'ATT. OF AMP.',5X,
    *'GAIN',5X,'ZERO (CM)',5X,'AT GAIN(CM)',9X,'L (CM)',3X,
    *'ZERO (X)',2X,'GAIN (X)')
  DO 100 I=1,5
  HAXLOD(I)=0.0
10 IF(I.EQ.1) READ(5,1) NAL,LGAIN,ALLA(I),ALLB,AMLO,AMLG
  IF(I.NE.1) READ(5,1) NAL,LGAIN,ALLA(I),ALLB
  1 FORMAT(15,5X,15,5X,4F10.3)
  ALL=ALLB-ALLA(I)
15 IF(ALL.GT.0.001) HAXLOD(I)=25.1*LGAIN/100.0/ALL
  IF(I.EQ.1) WRITE(6,2) NAL,LGAIN,ALLA(I),ALLB,ALL,AMLO,AMLG
  IF(I.NE.1) WRITE(6,2) NAL,LGAIN,ALLA(I),ALLB,ALL
  2 FORMAT(11X,'1/',12,5X,15,'E-6',2X,3(F10.3,5X),2(F5.2,5X))
100 CONTINUE
20 P1=25.1/(AMLG-AMLO)
  RETURN
22 END

```

01-13-76 13.500 **** 5 *****

行数

```

1 C***** 5 *****
  SUBROUTINE AXDISP(DIFAI,VLFBI,HLV,JHAN2,DIV,ADLA)
  DIMENSION HLV(5),ADLA(5)
  WRITE(6,1)
5   1 FORMAT(//,5X,'CALIBRATION FOR AXIAL DISP.'//,
  *29X,'LEFT',11X,'RIGHT')
  READ(5,2) DG1,DG2
  READ(5,2) VLDT1,VLDT2
10  2 FORMAT(20X,2F10.3)
  DIFAI=(DG2-DG1)/62.6
  VLFBI=0.0347*(VLDT2-VLDT1)
  WRITE(6,3) DG1,DG2,VLDT1,VLDT2
15  3 FORMAT(19X,'D.G.',1X,F10.3,' (MM)',F10.3,' (MM)',/,
  *19X,'LVDT',1X,F10.3,' (CM)',F10.3,' (CM)',//,
  *15X,'ATT. OF AMP.',5X,'GAIN',5X,
  *'ZERO (CM)',5X,'AT GAIN(CM)',9X,'L (CM)')
  DO 100 I=1,5
  HLV(I)=0.0
  READ(5,4) NAD,LGAIN,ADLA(I),ADLB
20  4 FORMAT(15,5X,15,5X,2F10.3)
  ADL=ADLB-ADLA(I)
  IF(I.EQ.1.AND.ADL.GT.0.0001) VLFBI=VLFBI/ADL
  IF(ADL.GT.0.001) HLV(I)=0.0002175*LGAIN/ADL
  WRITE(6,5) NAD,LGAIN,ADLA(I),ADLB,ADL
25  5 FORMAT(20X,'1/',12,6X,15,'E-6',2X,3(F10.3,5X))
100 CONTINUE
  READ(5,7) DIV,JHAN2
  WRITE(6,6) DIV
30  6 FORMAT(//,10X,'INITIAL VALUE OF DIAL GAGUE',F10.3)
  7 FORMAT(F10.3,/,15)
  RETURN
32  END

```

01-13-76 13.500 **** 6 *****

行数

```

1 C***** 6 *****
  SUBROUTINE CONSOL(HOH,DIV,VOLUME,WEIGH1,HI,VI,BI,BIV,SG,DGO,
    *P1,AMLO,P2)
  WRITE(6,3)
5   3 FORMAT(/,5X,'ISOTRO. CONSOL. TEST',/,12X,'CELL PR.',5X,
    *'AXIAL LOAD',4X,'AXIAL DISP.',2X,'BURETTE',21X,
    *'HEIGHT(CM)',3X,'VOLUME (CM**3)',9X,'E')
    I=0
50  I=I+1
10  READ(5,1) CELLP1,AXLOD,AXDISP,BUREI1
    1 FORMAT(3F10.3,F5.2)
    IF(CELLP1.LT.0.001) GO TO 51
    P2=P1*(AXLOD-AMLO)
    HEIGHT=HOH-(AXDISP-DIV)/10.0-0.0007*P2
15  VOLUME=VOLUMEI-BIV+BUREI1
    VR=VOLUME*SG/1000.0/WEIGHT-1.0
    HI=HEIGHT
    VI=VOLUME
    BI=BURET1
20  DGO=AXDISP
    WRITE(6,2) CELLP1,AXLOD,AXDISP,BURET1,HEIGHT,VOLUME,VR
    2 FORMAT(10X,3(F10.3,5X),F5.2,20X,3(F10.3,5X))
    GO TO 50
25  51 CONTINUE
    RETURN
    END

```

5. 処理プログラム用データ作成方法

5-1. 表Ⅱ-1（供試体の各種計測値）について

表Ⅱ-1に示すもの（砂の重量、ビュレットの初期値、内径、外径、高さ）は、供試体形成時にそのつど測定し書き込む。ゴムスリーブ厚は供試体外径測定の場合、ゴムスリーブの上から測るので後で差引いてやるために必要となる。

5-2. 表Ⅱ-2（回転角）について

表Ⅱ-2に示すねじり角（ θ ）のキャリブレーションの値は、供試体形成後のキャリブレーションの値を、オシロペーパーより読み書き込む。今回は、機械的倍率は5.0のみを使用した。

5-3. 表Ⅱ-3（トルク力）について

（2）に同じ。

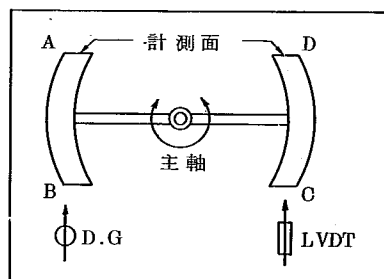
5-4. 表Ⅱ-4（軸荷重）について

（2）に同じ。

5-5. 表Ⅱ-5（軸変位）について

（2）に同じ。ただし、ダイヤルゲージ、変位計の測定面の水平誤差によるキャリブレーションは、次のようにする。

供試体にねじり力を与えるため軸変位測定面を右図のようにした。このため、測定面 $\overline{AB}$ 、 $\overline{CD}$ の水平面からの誤差を、測定面は平面であるものとして修正を加えたため、計測面端〔ダイヤルゲージ（A, B）, 変位計（C, D）〕の計測値が必要である。（詳しくはⅡ（1-3-4）を参照のこと）

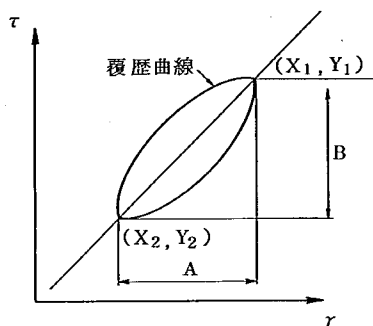


図Ⅱ-31

5-6. 表Ⅱ-6（圧縮試験データ）について

表Ⅱ-6は $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ 状態の圧縮終了時の値である。（一度に所定の圧縮状態にせず数段階に区切って徐々に圧縮を行ない、そのつど値を書き込む。）

5-7. 表Ⅱ-7 (くりかえしねじり試験データ)について

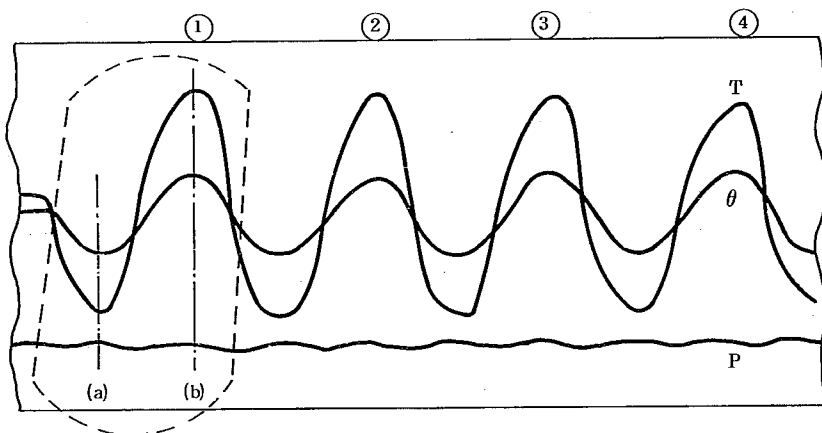


図Ⅱ-32

せん断変形係数Gは図Ⅱ-32に示すように、

$$G = B/A = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad \text{で求める。}$$

このためGを求めるために必要な値はT, θ とも最大値(X_1, Y_1), 最小値(X_2, Y_2)があればよい。よって、図Ⅱ-33のオシロペーパーの略図に示すように、(a), (b)点の値があれば求められる。



図Ⅱ-33 オシロペーパーの略図 (P, θ , T)

内が1ループ(1回のくりかえし)である。

よって、1回のくりかえしに必要なT, θ , Pの値は(a), (b)2点での値である。

以下に表Ⅱ-7のデータシートの書き方を示す。

測圧 (σ_r) : 等方圧縮終了時の拘束圧で精密ブルドンゲージの読みとする。

軸荷重 (P) : メータとオシロの2方法があり、どちらか一方の値を書き込む。オシロの場合は(a)の値を書き込む。オシロは図Ⅱ-27に示すように記録データは連続的である。メータの値は、各歪レベルでのくりかえし載荷開始時の値とする。

軸変位 (ΔH) : ダイアルゲージとオシロの2方法があり、どちらか一方の値を書き込む。オシロは記録データが連続的であり、ダイアルゲージの値は、各歪レベルでのくりかえし載荷開始時の値である。

ねじり角 (θ) : オシロペーパーとメーターの2方法があるが、一般にはオシロペーパーの値を用いる。

図II-33における(a)の値を書き込む。

ねじり力 (T) : すべてオシロペーパーによる。図II-33における(a)の値を書き込む。

ここで、オシロペーパーでの読みはすべてcm単位とする。

次に、図II-33の(b)においても上記のことを行なう。よって1つのGの値を求めるために、データが2行必要である。これら(2行対)をすべてのループについて行ないデータシートに書き込む。

以上の値を電算にかける(処理プログラムはII章4を参照のこと)と、表II-8に示すように γ ・Gの値が得られる。このセン断歪振幅(γ)、セン断変形係数(G)の値より以下に示す解析を行なった。

表II-8 電算による γ ・Gの打ち出し

NO.	STRAIN	G
1	0.00000691	888.58
2	0.00000519	1046.12
3	0.00000497	1091.61
4	0.00000475	1175.60
5	0.00001164	875.01
6	0.00000970	1009.13
7	0.00000906	1066.69
8	0.00000906	1088.46
9	0.00002390	800.57
10	0.00001830	969.87
11	0.00001680	986.71
12	0.00001723	996.26
13	0.00006446	530.96
14	0.00004963	676.17
15	0.00004748	727.76
16	0.00004555	758.65
17	0.00013162	347.23
18	0.00011308	401.14
19	0.00009283	477.89
20	0.00008776	516.89
21	0.00025254	215.76
22	0.00023070	227.40
23	0.00022059	233.07
24	0.00020257	195.90
25	0.0050006	131.28
26	0.0052365	122.74
27	0.0048261	135.30
28	0.0038491	172.30

$$P = 1.044$$

尚、オシロペーパーでの読みは、読み取り者が定めた原線を基線としcm単位で読む。又、アンプの倍率(T, P, ΔH)、アテネータ番号(θ)を誤らないよう注意することが必要である。

6. セン断変形係数 (G) の整理

- (1) 電算により求めた各歪における G の値 (10 個) を片対数グラフに $G \sim \gamma$ くりかえし回数: N 図として、図 II-34、35 のようにプロットし、最小二乗法により直線を引く、これによりデータのばらつきを円滑化する。
- (2) このようなグラフの直線上から $N=1, 5, 10$ の G の値を読み取り $G \sim \gamma$ 図として整理、プロットした例が図 II-36 である。この図は低周波動的セン断試験の G の値を、歪レベルで示したものであり、このグラフを作成するにあたり I ~ VIII まで 8 段階の歪レベルの実験を各歪レベルで 10 回づつくりかえし行っている。

7. 履歴減衰係数 (η) の整理

- (1) 図 II-37 に示すような X-Y レコーダにより記録された各歪レベルでのループから $N=1, 2, 5, 10$ のループをトレーシングペーパーに書きうつす。(図 II-38)
- (2) 履歴減衰係数 η の値は図 II-39 に示すように

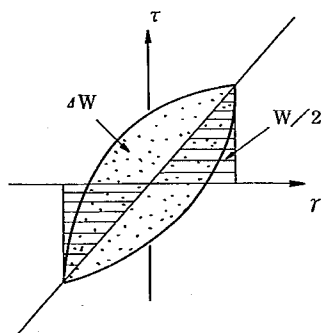


図 II-39

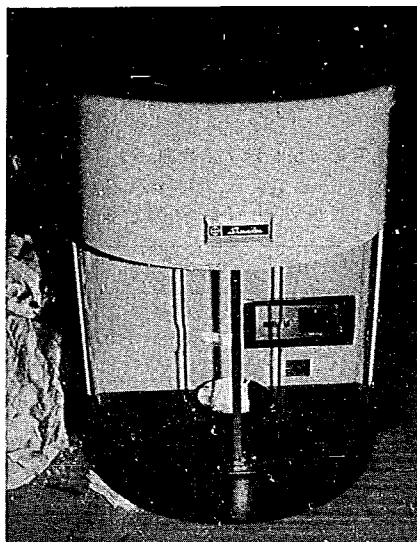
$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad \text{で求められる。}$$

履歴減衰係数 (η) を求めるためには、 ΔW , W の値を知らなくてはならない。

そこで図 II-31 のようにトレーシングペーパーに写したループを二部コピーし  (ΔW) と  (W) に裁断し、この ΔW と W の重量を直視式自動天秤 (写真 II-30) により測定する。

これにより $\eta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$ の値を求めた。ここで ΔW , W は重量である。

- (3) このようにして求めた各段階の歪レベルでのくりかえし回数： $N = 1, 2, 5, 10$ での η の値をプロットした例が図Ⅱ-40である。



写真Ⅱ-30 直視式自動天秤

Ⅲ 実験結果

1. 共振法土質試験機による豊浦砂の実験結果

まず共振法土質試験機で行った実験結果を示す。表Ⅲ-1は実験リストである。

表Ⅲ-1 共振法土質試験実験リスト

	記号	拘束圧 (Kg/cm^2)	間隙比	G	η
飽和	RS1	$p = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0$	$e = 0.66$	Ⅲ-1	Ⅲ-2
	RS2	"	$e = 0.70$	Ⅲ-3	Ⅲ-4
乾燥	RD1	$p = 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0$	$e = 0.67$	Ⅲ-5	
	RD2	"	$e = 0.68$	Ⅲ-6	Ⅲ-7
	RD3	"	$e = 0.69$	Ⅲ-8	Ⅲ-9
				図番号	

実験は全て、 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ の応力状態で行った。

共振法土質試験の実験方法は文献-1を参照されたい。共振法での試料断面形状は低周波と同じく外径10cm、内径6cmであり高さは2.5cmである。

共振法土質試験では、1つの供試体で各種の拘束圧の実験を行った。ここで上記実験リストの飽和2実験、乾燥3実験の結果を図Ⅲ-1～Ⅲ-9に示す。ここでGの値はいかなる修正も加えていない。共振法土質試験機のセン断変形係数(G)、減衰係数を求めるための解析方法は文献-1を参照されたい。このデータは後に、低周波動的セン断試験のデータと比較に用いる。

2. 低周波動的セン断試験機による豊浦砂の実験結果

表Ⅲ-2に示す一連の実験を行った。乾燥で $p = 1.0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ で、(B)の実験は $N = 300$ まで実験を行ったが他は全て $N = 10$ である。

今回は $N = 300$ 回までのくりかえしねじり試験を次の方法により行った。 $N = 10$ 回までは先に述べた方法と同じである。 $N = 20 \sim 30$ 回の間はソレノイド(繰り返し負荷弁)により応力制御一定とした動的くりかえし載荷を行い、30回目に応力制御を手動に切り換え、先に述べた方法で更に10回のくりかえしねじり試験を行った。 $N = 100, 300$ までについても同様にして行った。こ

の $N = 300$ 回までのくりかえし試験は拘束圧 $p = 1.0$ (Kg/cm^2) で1つの供試体で行った。

表 III - 2 低周波動的セン断試験リスト

拘束圧	乾 燥 砂	飽 和 砂
0.2 (Kg/cm^2)	$p = 0.29$, $e = 0.673$	$p = 0.289$, $e = 0.615$
	G (III-10) , η (III-11)	G (III-22) , η (III-23)
0.5 (Kg/cm^2)	$p = 0.53$, $e = 0.70$	$p = 0.526$, $e = 0.64$
	G (III-12) , η (III-13)	G (III-24) , η (III-25)
1.0 (Kg/cm^2)	(A) $p = 1.085$, $e = 0.681$	$p = 1.049$, $e = 0.617$
	G (III-14) , η (III-15)	G (III-26) , η (III-27)
	(B) $p = 1.05$, $e = 0.709$	
	G (III-16) , η (III-17)	
2.0 (Kg/cm^2)	$p = 2.058$, $e = 0.666$	$p = 2.064$, $e = 0.617$
	G (III-18) , η (III-19)	G (III-28) , η (III-29)
	$p = 2.047$, $e = 0.677$	$p = 2.042$, $e = 0.605$
	G (III-20) , η (III-21)	G (III-30) , η (III-31)
		$p = 2.052$, $e = 0.59$
		G (III-32) , η (III-33)

注) 下段の G (III-N) , η (III-M) は図番号である。

2-1. セン断変形係数 (G)

低周波動的セン断試験では、1つの供試体で1つの拘束圧での実験をII章の2.3の方法で行い、このデータをII章の4.5.6の方法に従って整理した。この結果を $G \sim \gamma$ 曲線として図示した。(図-10.12.14.16.18.20.22.24.26.28.30.32) ここで G の値はいかなる修正も加えていない。

2-2. 履歴減衰係数 (η)

履歴減衰係数 (η) の値は、II章の7に示すようにすべて X-Y レコーダに記録されたループより求めた。 $\eta \sim \gamma$ 曲線として図示した。(図-11.13.15.17.19.21.23.25.27.29.31.33) ここで示した結果から以下の解析を行った。

3. 共振法土質試験と低周波動的セン断試験での実験結果の比較

以下の整理で用いた低周波動的セン断試験の G , η の値は、すべて上記Ⅲ(1-2, 2-2)で示したグラフでのくりかえし回数 $N=10$ の値を用いた。

3-1. セン断変形係数 (G) $\sim \gamma$ 曲線

同じ拘束圧 σ_r の実験で同じ密詰め供試体を作成しても、軸方向 σ_a の若干の変化、間隙比 e の若干のはらつきは避け得ない。データの比較を同じ e , 同じ p に対して行うためにはデータの何らかの正規化を行う必要がある。一方、共振法土質試験機では、セン断歪振幅(片振幅) $\gamma = 10^{-4}$ に対して、豊浦砂のように粒度のそろったシルト分以下を含まない「きれいな砂」では広い範囲の間隙比に対して、次の実験公式が成り立つことが分っている(参考文献3, 5)。

$$G^* = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p^{0.5} \quad \text{..... (Ⅲ-1)}$$

(Kg/cm²)

そこで次のようにして修正、正規化を行った。

例えば、図Ⅲ-32には(Ⅲ-1)式を用いて、 G が $\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$ に比例するものとして、 $e =$

0.59 から $e = 0.68$ に変化したら、どの程度値が変化するか示してある。図Ⅲ-34~37には、各拘束圧での G の値を実際の各試験での p , e を(Ⅲ-1)式に代入して得られる G^* の値で正規化した値: G/G^* と γ の関係を示す。 $\gamma = 10^{-4}$ では G/G^* は 1.0 よりやや大きな値となっている。

図Ⅲ-34~37は、いずれの拘束圧でも次のことが成り立っていることを示している。

①共振法土質試験及び低周波動的セン断試験の両試験において、豊浦砂の G は飽和及び乾燥状態によらない。

②両試験での G は、 $\gamma = 10^{-4}$ あたりでよく一致している。両試験は測定原理が大きく異なっている。共振法では(供試体+付加装置)系の共振振動数 f_r から G を求める。この場合 f_r は 50~100 Hz である。一方、低周波では直接測定した τ , γ から G を求める。くりかえし周期 f は約 0.1 である。共振法では、 f が大きいから、くりかえし回数 $N=2000 \sim 4000$ での G を求めていることになるが、低周波では $N=10$ の値を図Ⅲ-43~37にプロットしてある。しかし N の G におよぼす影響は、図Ⅲ-43に示す低周波動的試験の結果によると、 $\gamma = 10^{-4}$ あたりではきわめて小さい。従って、 N の影響は $\gamma = 10^{-4}$ では小さいとすれば、仮りに f の影響が全くないとすれば、

図Ⅲ-34～37で $\gamma = 10^{-4}$ あたりで低周波の G ($N = 10$)が、共振法の G ($N = 2000 \sim 4000$)より若干小さいだけであることは納得がいく。従って全体として見れば、豊浦砂の場合、歪速度の違い(この場合は f の違い)は、 G の値に影響をおよぼさないとと言える。

3-2. 拘束圧 p と G の関係

p の値と G の値の関係をまとめたものが図Ⅲ-38, 39)である。図Ⅲ-38, 39では、各試験の e の値は若干のばらつきがあるので(Ⅲ-1)式に従って $e = 0.68$ でないものは、 G の値は $\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$ に比例するものとして修正を加えてある。この図によると、飽和、乾燥とも $\gamma = 10^{-4}$

で共振法と低周波の G の値はよく一致することがわかる。又、グラフが扇形をしていることから $\gamma > 10^{-4}$ で G の値は著しい歪依存性を持っており、拘束圧 p が小さい程その傾向が強いことがわかる。このことを定量的に示したのが図Ⅲ-40である。ここで m は $G = K \cdot p^m$ とおいた時の p のべきであり、図Ⅲ-38, 39での直線の傾きである。 $\gamma = 10^{-4}$ で $m = 0.5$ というのは、 G は $p^{0.5}$ に比例するということである。 $\gamma = 5 \times 10^{-3}$ 付近で m は1.0に漸近しているが、これは G は p とほぼ比例するということである。これらのことは、 γ の増加に対する G の減小率は、 p が小さいほど大きくなることを示している。例えば図Ⅲ-38で $p = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$ の場合、 γ が 10^{-6} から 3×10^{-3} に増加すると G の値は約 700 Kg/cm^2 から 50 Kg/cm^2 に減少し、その減小率は約 $1/14$ である。一方、 $p = 2 \text{ Kg/cm}^2$ では、 $\gamma = 10^{-6}$ で $G = 1650 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\gamma = 3 \times 10^{-3}$ で $G = 400 \text{ Kg/cm}^2$ で、減小率は約 $1/4$ である。このことを G/Go (Go は $\gamma = 10^{-6}$ での G の値) $\sim \gamma$ 図として示したのが図Ⅲ-41, Ⅲ-42である。図に示すように p が小さい程、 G の γ の増加に対する減小率は大きい。

ここでくりかえし回数 N の G におよぼす影響を考えてみよう。図Ⅲ-43によると、くりかえし回数の増加と共に G は増加していき、その程度は γ が大きい程大きい。従って図Ⅲ-41, Ⅲ-42の $G/Go \sim \gamma$ 関係は N のとりかたによって変わってくる。とくに γ の大きいときは変わり方が大きい。これまでの図は $N = 10$ で整理してあるが、他の N についての関係は図Ⅲ-43の関係をを用いて求めることができる。

3-3. 履歴減衰係数(η) $\sim \gamma$ 曲線

図Ⅲ-44, 図Ⅲ-45はそれぞれ飽和、乾燥の場合の $\eta \sim \gamma$ 曲線を各拘束圧別に示したものである。この η の値はすべて $N = 10$ の値を使用した。この両図は p が小さい程、 η が大きいことを示している。図Ⅲ-46は $p = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$ における共振法と低周波の η の値を比較したものである。低周波の η の値は $N = 10$ の値を使用した。 η の値は共振法土質試験によると e の影響をうけないことがわかっているので、 η の e についての修正はしていない。又、 η の値のばらつきが大きいわりに p の

1.0 Kg/cm²からのずれは小さいから η の p についての修正もしていない。図Ⅲ-46は両試験それぞれにおいて豊浦砂の η の値が飽和、乾燥によらないことを示している。しかしGの場合と異なり $r = 10^{-4}$ 付近で両試験法による η の値が大きく異なっている。他の拘束圧(p)の場合も含めて η について整理したのが図Ⅲ-47, 48である。両図での η の値は $N = 10$ を用いてある。図Ⅲ-47, 48に示すように全ての p の値に対して、 $r = 10^{-4}$ における両試験法の η の値には著しい差異が認められる。ではなぜ $r = 10^{-4}$ 付近で低周波による η の値が共振法による値よりもかなり大きいのであろうか。その原因として、

- 1) 低周波動的せん断試験における機械的誤差。
- 2) 歪速度の違い。
- 3) くりかえし回数(N)の違い。

などが考えられる。

ではまず、くりかえし回数(N)が η に及ぼす影響について考えてみよう。図Ⅲ-43によると、Gの場合とは異なり $r = 10^{-4}$ 付近でも N の増加による η の減少は無視できないことがわかる。特に $N > 300$ でも η は N の増加によって減少する傾向にあることを示している。従って共振法の $N = 2000 \sim 4000$ に対する η の値は低周波の $N = 10$ における η の値よりもはるかに小さくなる可能性があり、 N を一致させて両試験法の η の値を比較すれば、かなり一致する可能性がある。現在の段階では両試験法による η の値の差は何によるかは決定的な結論は得られていないが、少なくとも $r = 10^{-4}$ 付近でも η の値はGの場合とは異なり、くりかえし回数(N)の影響を強く受けることは確かである。

尚、図Ⅲ-43によると、Gの場合とは異なり r が大きくなるとくりかえし載荷回数 N が η に及ぼす影響は逆に小さくなっていくことは注目すべきである。

次に、 p の η におよぼす影響を若干検討してみよう。例えば、図Ⅲ-44によると $r = 10^{-3}$ で、 $p = 0.289 \text{ Kg/cm}^2$ で、 $\eta_{N=10} = 0.32$ 、 $p = 2.034 \text{ Kg/cm}^2$ で、 $\eta_{N=10} = 0.17$ で前者は約2倍である。このことは拘束圧が小さいと減衰はかなり大きくなることを意味している。これは拘束圧が小さい程Gの r の増加に対する減小率が大きくなることに対応している。これらのことは、土の非線型性を考慮した応答解析を行う際に考慮に入れる必要のあることである。

IV 結 論

1. 実験装置（低周波動的セン断試験機）の精度の確認

本装置では、従来の試験機で問題になっていたフリクシヨンの影響及びひずみ量測定における機械的誤差を除去するために、回転角（ひずみ量）の測定に分解能の良いポテンショメーター、及び倍率の高いアンプを使い、なおかつセルの中に測定装置を入れ、供試体直上で測定した。このことが本試験機の精度を高め、従来困難とされていた $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 程度の極微小歪での τ , γ の直接的測定を可能にした。これにより求められた G の値が共振法土質試験機で求めた G の値と $\gamma = 10^{-4}$ 付近でよく一致することがわかった。これにより本装置の精度は $\gamma = 5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$ までの G の測定に十分なことがわかった。

2. 豊浦砂の $G \sim \gamma$ 曲線

低周波動的セン断試験機の開発によって、豊浦砂の $\gamma = 5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$ までの $G \sim \gamma$ 曲線が求められた。共振法土質試験の実験結果と合わせて、 $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ までの豊浦砂における $G \sim \gamma$ 曲線が求められた。 G における両試験の結果は良く合うことがわかった。又、拘束圧が小さい程、 γ の増加に対する G の減小率は大きく、従って拘束圧が小さい程、 G の歪依存性が大きい。

3. 豊浦砂の $\eta \sim \gamma$ 曲線

低周波動的セン断試験機により求めた $\gamma = 5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$ までの η の値と共振法土質試験機で求めた $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-4}$ までの η の値より豊浦砂における $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-2}$ までの $\eta \sim \gamma$ 曲線が求められた。ところが η における両試験法の結果は $\gamma = 10^{-4}$ 付近で異なっている。現在の段階では、両試験法による η の値の差は何によるかは決定的な結論は得られてはいないが、くりかえし回数(N)が大きく影響していることは確かである。又、拘束圧が小さい程 η の値は大きくなる。

V あとがき

現在の段階では、実験としては豊浦砂の密づめ供試体で $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ の実験しか行っていない。今後はゆるづめの豊浦砂、他の砂についても実験を継続していく予定である。

尚、本装置の製作段階にあたって、栗林栄一耐震研究室長の御指導を得た。又、実験は千葉工大 4 年田山淳一氏に手伝っていただいた。末筆ながら感謝の意を表します。

VI 参考文献

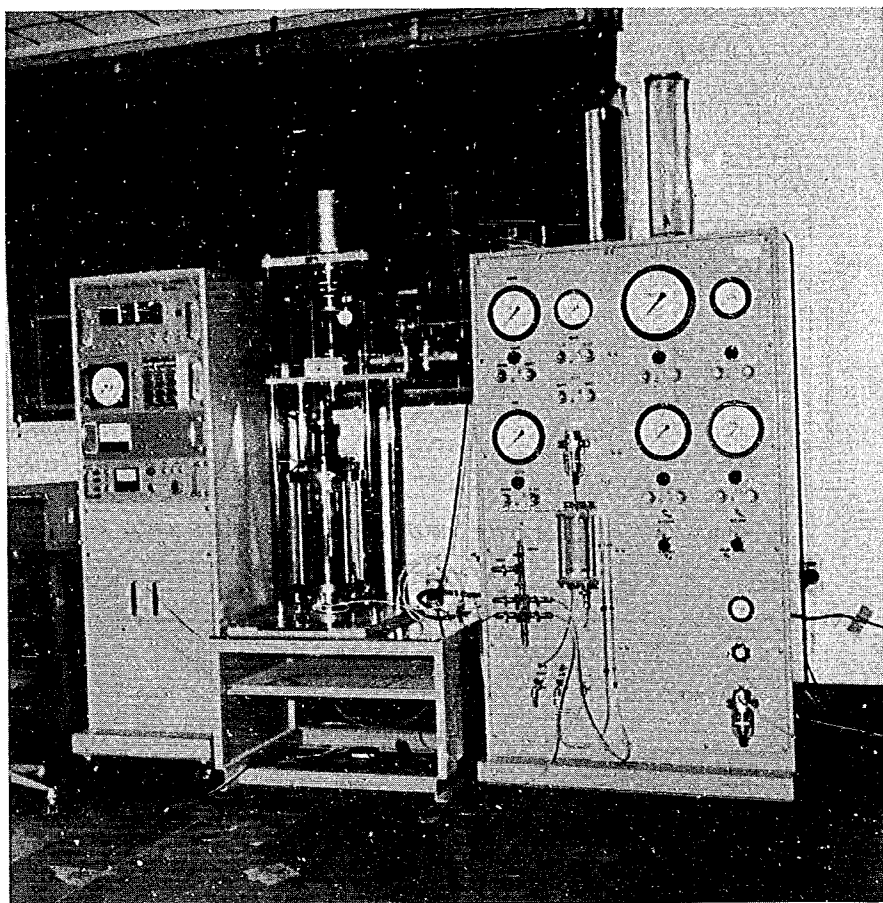
1. 栗林, 岩崎, 龍岡, 堀内 (1974, 5) 土木研究所資料第 912 号 "土の動的変形特性",
2. Kuribayashi, Iwasaki and Tatsuoka (1975) "Effects of Stress-strain Conditions on Dynamic Properties of Sands," Jour. of JSCE No. 10.
3. 岩崎, 龍岡, 吉田 (1975, 10) "砂の変形特性の現場測定と室内実験," 第 30 回土木学会研究発表会第 III 部
4. 龍岡, 吉田, 河俣 (1976, 1) "砂のせん断変形係数に及ぼす粒度分布特性等の影響," 1976 年第 3 回土木学会関東支部大会
5. 岩崎, 龍岡 (1975, 1) "土の動的性質の現場測定と室内実験," 1975 年 日本地震工学会シンポジウム
6. Ishihara, K. and Li, S., (1972): Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test," Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, June
7. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P., (1972) "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects," ASCE., SM 6, June.

付 図 目 次

写真Ⅱ- 1	低周波動的セン断試験機の全体写真	53
図Ⅱ- 4	低周波動的セン断試験機のブロックダイアグラム	54
図Ⅱ- 6	ブルーピングリング較正直線(大荷重)	54
図Ⅱ- 7	ロードセルのキャリブレーション(小荷重)	55
図Ⅱ- 8	ロードセルのキャリブレーション(大荷重)	55
図Ⅱ-12	軸変位のキャリブレーション その1	56
図Ⅱ-13	軸変位のキャリブレーション その2	56
図Ⅱ-14	軸変位のキャリブレーション その3	57
図Ⅱ-15	軸変位のキャリブレーション その4	57
図Ⅱ-17	低周波動的セン断試験機の三軸室	58
表Ⅱ- 1	データ用紙	59
表Ⅱ- 2	データ用紙(つづき)	60
表Ⅱ- 3	データ用紙(つづき)	61
表Ⅱ- 4	データ用紙(つづき)	61
表Ⅱ- 5	データ用紙(つづき)	62
表Ⅱ- 6	データ用紙(つづき)	63
表Ⅱ- 7	データ用紙(つづき)	64
図Ⅱ-25	典型的な $\tau \sim \gamma$ 履歴曲線	65
図Ⅱ-34	典型的な $G \sim$ くりかえし回数: N 関係(その1)	66
図Ⅱ-35	典型的な $G \sim$ くりかえし回数: N 関係(その2)	66
図Ⅱ-36	典型的な $G \sim \gamma$ 関係	67
図Ⅱ-37	その1 $X-Y$ レコーダーでの記録($\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 程度)	68
図Ⅱ-37	その2 $X-Y$ レコーダーでの記録($\gamma = 3 \times 10^{-2}$ 程度)	68
図Ⅱ-38	$X-Y$ レコーダーの記録のコピー(その1)	69
図Ⅱ-38	$X-Y$ レコーダーの記録のコピー(その2)	69
図Ⅱ-40	典型的な η のデータ	70
図Ⅲ- 1	共振法土質試験での G の値(飽和)	71
図Ⅲ- 2	共振法土質試験での η の値(飽和)	71

図Ⅲ- 3	共振法土質試験でのGの値(飽和)	72
図Ⅲ- 4	共振法土質試験での η の値(飽和)	72
図Ⅲ- 5	共振法土質試験でのGの値(乾燥)	73
図Ⅲ- 6	共振法土質試験でのGの値(乾燥)	74
図Ⅲ- 7	共振法土質試験での η の値(乾燥)	74
図Ⅲ- 8	共振法土質試験でのGの値(乾燥)	75
図Ⅲ- 9	共振法土質試験での η の値(乾燥)	75
図Ⅲ-10	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$)	76
図Ⅲ-11	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	76
図Ⅲ-12	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$)	77
図Ⅲ-13	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	77
図Ⅲ-14	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)	78
図Ⅲ-15	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	78
図Ⅲ-16	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)	79
図Ⅲ-17	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	79
図Ⅲ-18	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	80
図Ⅲ-19	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	80
図Ⅲ-20	低周波動的セン断試験でのGの値(乾燥, 密づめ, $P = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	81
図Ⅲ-21	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	81
図Ⅲ-22	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$)	82
図Ⅲ-23	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	82
図Ⅲ-24	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$)	83
図Ⅲ-25	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	83
図Ⅲ-26	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)	84
図Ⅲ-27	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	84
図Ⅲ-28	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	85
図Ⅲ-29	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	85
図Ⅲ-30	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	86
図Ⅲ-31	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	86
図Ⅲ-32	低周波動的セン断試験でのGの値(飽和, 密づめ, $P = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	87
図Ⅲ-33	低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値(")	87

図 III-34	$G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 0.2 \text{ Kg/cm}^2$)	88
図 III-35	$G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 0.5 \text{ Kg/cm}^2$)	89
図 III-36	$G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)	90
図 III-37	$G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)	91
図 III-38	$G \sim p$ 関係 (飽和砂)	92
図 III-39	$G \sim p$ 関係 (空気乾燥砂)	92
図 III-40	$m \sim \gamma$ 関係	92
図 III-41	$G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 飽和)	93
図 III-42	$G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 空気乾燥)	93
図 III-43	G, η におよぼすくりかえし回数 N の影響	94
図 III-44	$\eta \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 飽和)	95
図 III-45	$\eta \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 飽和)	96
図 III-46	両試験での η の比較 ($p = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$)	97
図 III-47	η と p の関係 (飽和)	98
図 III-48	η と p の関係 (空気乾燥)	98



写真Ⅱ-1 低周波動的セン断試験機の全体写真

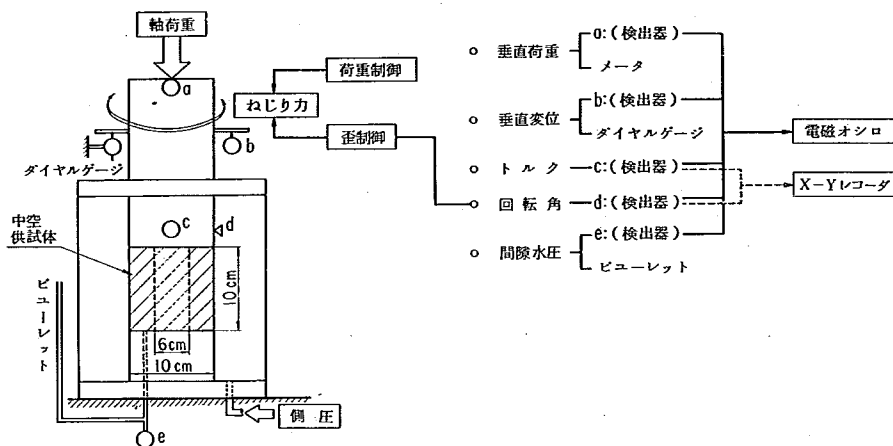


図 II-4 低周波動的セン断試験機のブロックダイアグラム

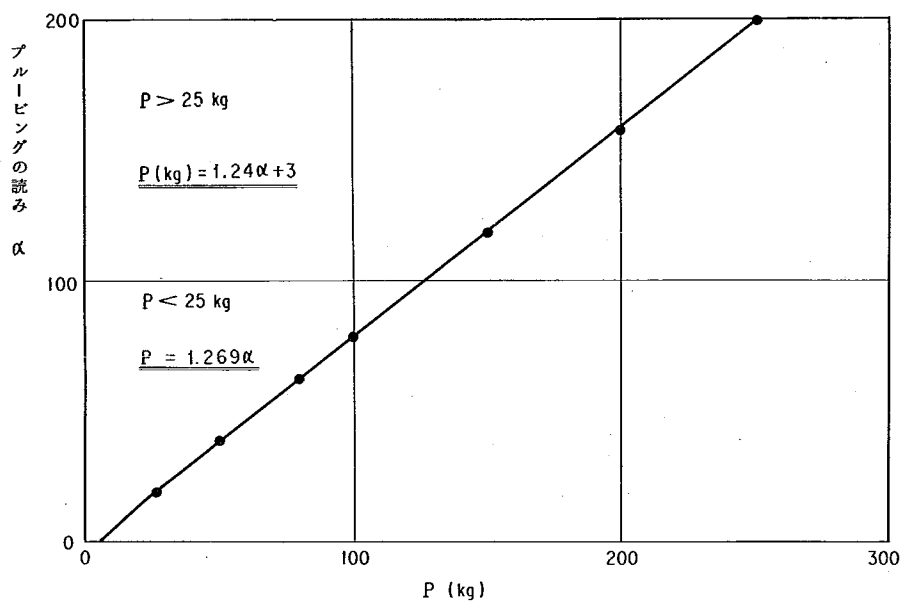


図 II-6 ブルーピングリング校正直線 (大荷重)

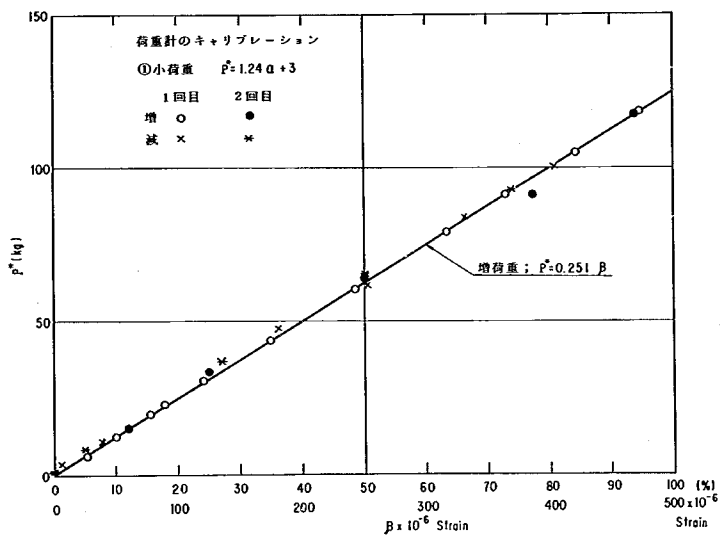


図 II-7 ロードセルのキャリブレーション (小荷重)

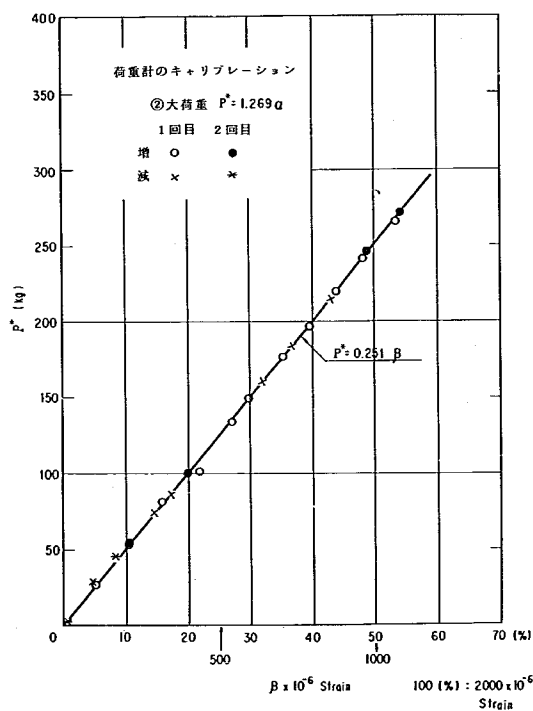


図 II-8 ロードセルのキャリブレーション (大荷重)

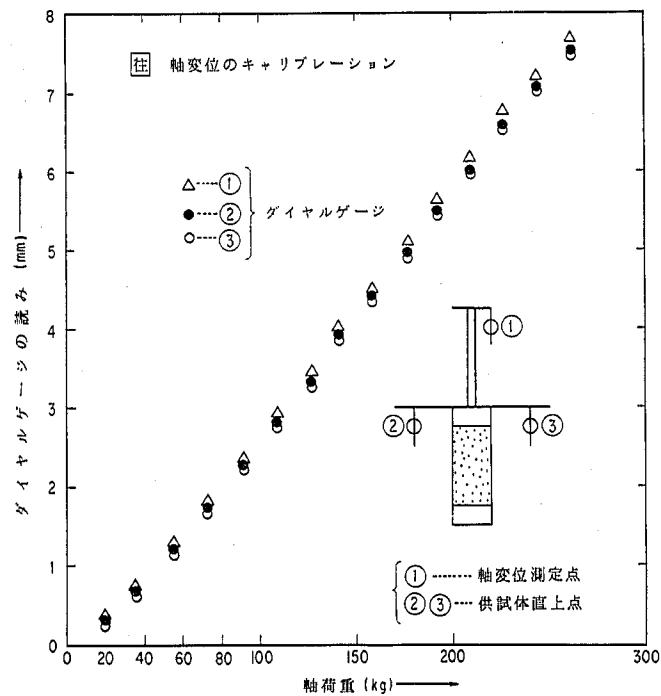


図 II-12 軸変位のキャリブレーション その1

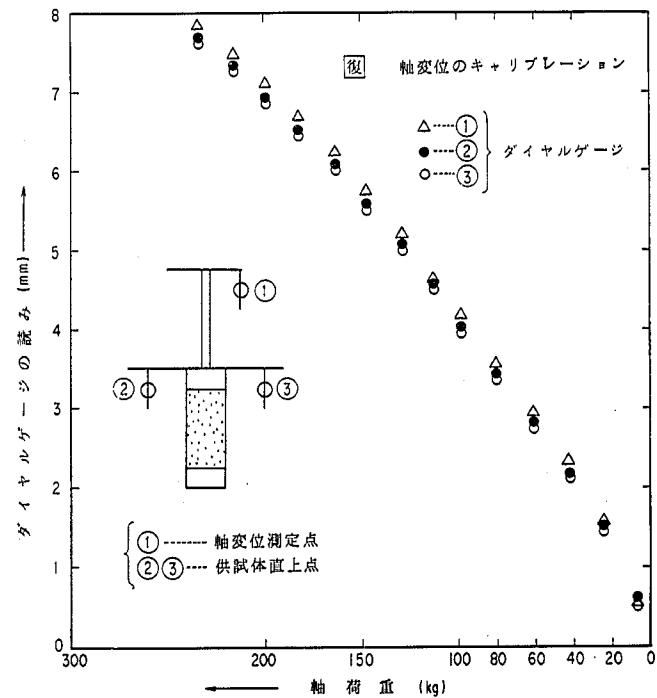


図 II-13 軸変位のキャリブレーション その2

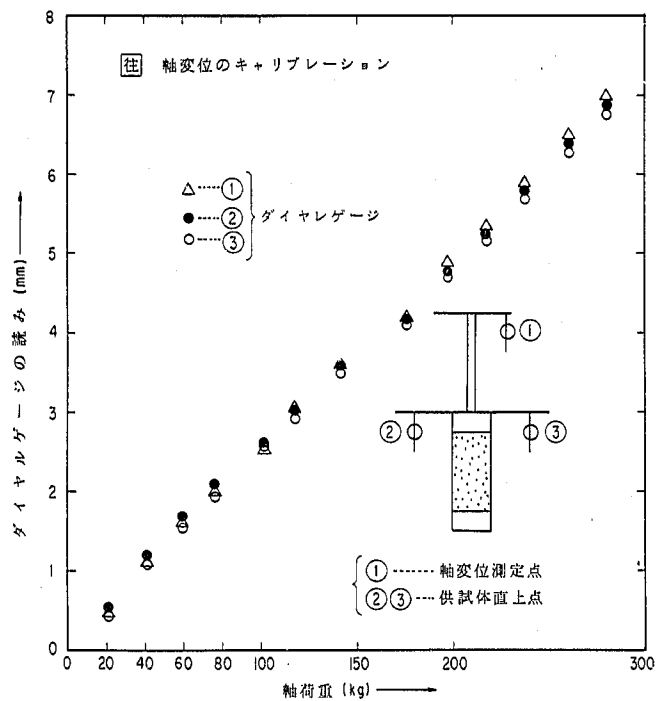


図 II-14 軸変位のキャリブレーション その3

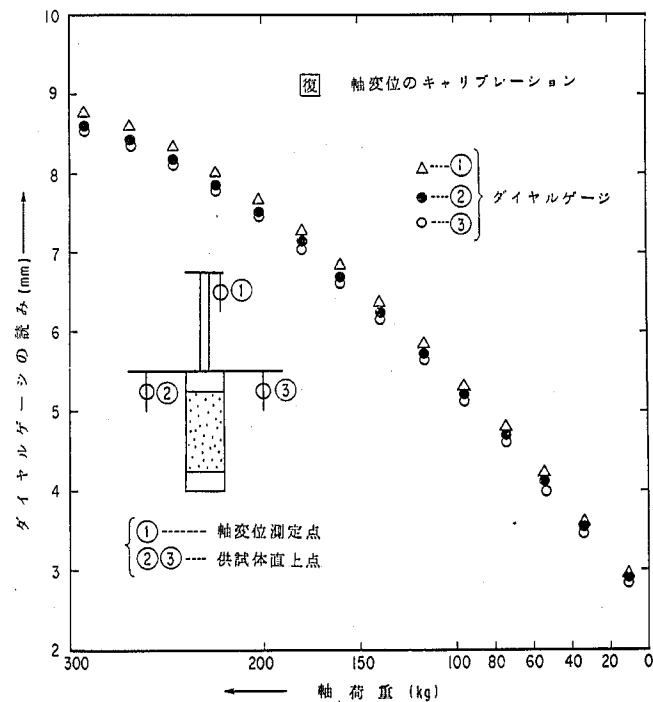


図 II-15 軸変位のキャリブレーション その4

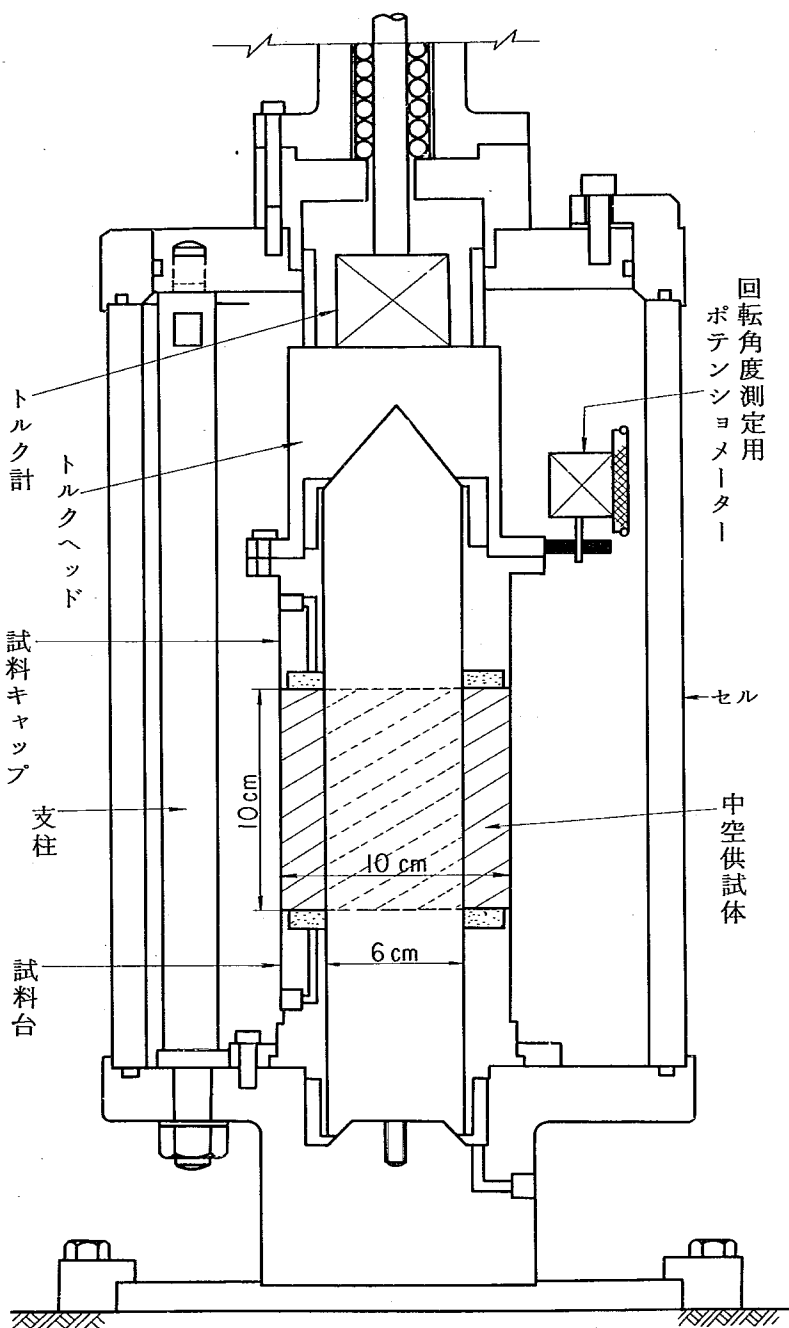


図 II - 17 低周波動的セン断試験機の三軸室

表Ⅱ-1 データ用紙

1 低周波動的せん断試験データ用紙 (建設省土木研究所、振動研究室)

試験日

測定者

砂の種類¹²

16

砂の状態

20

試験の種類

30

55

砂の状態 = 1 ; 空気乾燥, 2 ; 飽和, 3 ; 不飽和

試験の種類 = 1 ; 三軸圧縮試験, 2 ; 静的ねじり試験, 3 ; 動的ねじり試験

砂の比重

7

試験前 (Kg) 試験後 (Kg)

10

20

ゴムの厚さ (mm)

25

30

(2枚)

ビュレットの初期値 (CC)

45

50

内径 (cm)

高さ (cm)

10

20

30

40

50

60

外径 (cm)

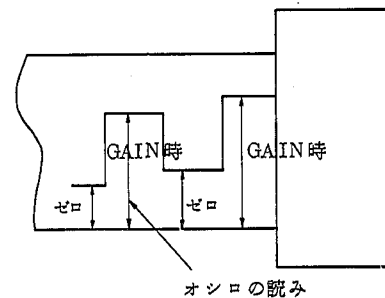
表Ⅱ- 2 データ用紙(つづき)

2

ねじり角 θ のキャリブレーション

⊕ RANGE は 10° を基準とする。

アテネター 番 号	メーターの読み (度)	オシロの読み ゼロ (cm)	GAIN時 (cm)
10	.	.	.
9	.	.	.
8	.	.	.
7	.	.	.
6	.	.	.
5	.	.	.
4	.	.	.
3	.	.	.
2	.	.	.
1	.	.	.
5	15	25	35



機械的倍率 (5.0 or 2.5)

5

表Ⅱ-3 データ用紙(つづき)

3

ねじり力 T の キャリブレーション

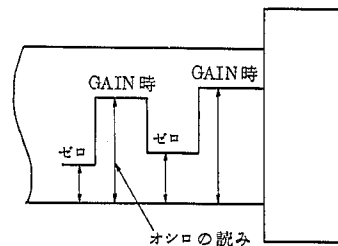
アンプの倍率

1 /	1
1 /	2
1 /	5
1 /	10
1 /	20

5

GAIN	オシロの読み (cm) ゼロ	GAIN時
$\times 10^{-6}$		
$\times 10^{-6}$		
$\times 10^{-6}$		
$\times 10^{-6}$		
$\times 10^{-6}$		

11 15 21 30 31 40



表Ⅱ-4 データ用紙(つづき)

4

軸荷重 P の キャリブレーション

アンプの倍率

1 /	1
1 /	2
1 /	5
1 /	10
1 /	20

5

GAIN	オシロの読み (cm) ゼロ	GAIN時	メーターの読み (%) ゼロ	GAIN時
$\times 10^{-6}$				
$\times 10^{-6}$				
$\times 10^{-6}$				
$\times 10^{-6}$				
$\times 10^{-6}$				

11 15 21 30 31 40 50 60

($100 \times 10^{-6} = 25.1 \text{ kg}$ の読みとする)

この値は

* $\sigma_r = 1\%$ まで等方圧縮するときは、45%以下。

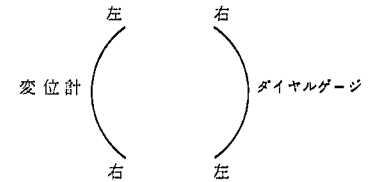
* $\sigma_r = 2\%$ まで等方圧縮するときは、20%以下とすること。

表Ⅱ-5 データ用紙(つづき)

5

軸変位 ΔH のキャリブレーション

	左	右	
ダイヤルゲージ			(mm)
変位計			(cm)
	21	30	40



アンプ倍率は $1/1$ とする, $GAIN = 100 \times 10^{-6}$

アンプの
倍率

1 /	1
1 /	2
1 /	5
1 /	10
1 /	20
	5

GAIN

	$\times 10^{-6}$
	$\times 10^{-6}$
	$\times 10^{-6}$
	$\times 10^{-6}$
	$\times 10^{-6}$
	$\times 10^{-6}$
11	15

オシロの読み (cm)

ゼロ GAIN時

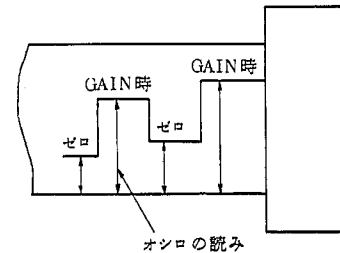
21	30	40

ダイヤルゲージ初期値

	(mm)
	10

5

1 ; ダイヤルゲージを使った時, 2 ; 変位計を使った時,



表Ⅱ- 6 データ用紙(つづき)

6 压 密 试 验 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)

10 (AXLOD)		20		30		35	
側 圧 σ_r	軸 荷 重 P	軸 変 位 ΔH	体積変化 ΔV				
メーターの読み (%)	メーターの読み (%)	ダイヤルゲージの読み (mm)	ビューレット (cc)				

(注) セン断直前のダイヤルゲージ、ビューレットの読みを書き込むこと。

(等方圧縮の時の P (Kg) 及び, メーターの読み)

$$P = \frac{25.1}{\text{AMLG-AMLO}} (\text{AXLOD-AMLO}) + 5.5$$

AMLG : 1/1 で 100×10^{-6} のときのメーターの読み

AMLO ; ゼロの読み

AXLOD: 等方圧縮中のメーターの読み

$$AXLOD = \frac{P-5.5}{25.1} (AMLG-AMLO) + AMLO$$

$\sigma_r \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$	$P \text{ (Kg)}$	$\sigma_r \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$	$P \text{ (Kg)}$
0.1	5.06	1.6	81.02
0.2	10.12	1.7	86.02
0.3	15.19	1.8	91.15
0.4	20.26	1.9	96.22
0.5	25.32	2.0	101.28
0.6	30.38	2.1	106.34
0.7	35.45	2.2	111.41
0.8	40.51	2.3	116.47
0.9	45.58	2.4	121.54
1.0	50.64	2.5	126.60
1.1	55.70	2.6	133.66
1.2	60.77	2.7	136.73
1.3	65.83	2.8	141.79
1.4	70.90	2.9	146.86
1.5	75.96	3.0	151.92

表Ⅱ-7 データ用紙(つづき)

試 験 デ ー タ

[illegible]

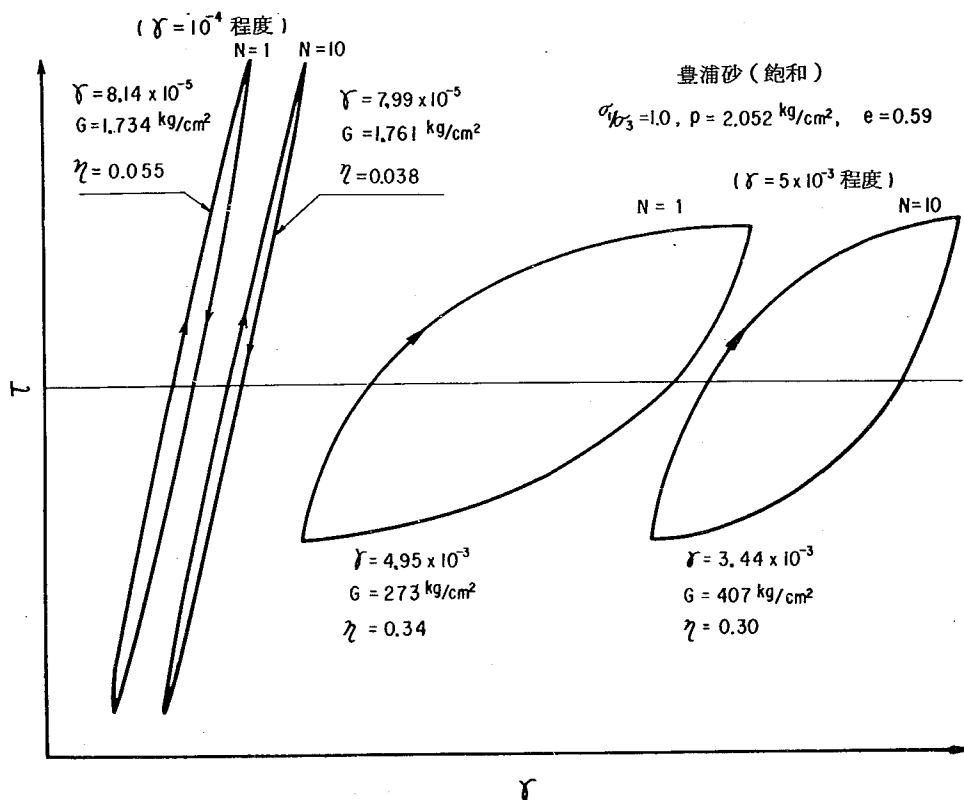


図 II-25 典型的な $\tau \sim \gamma$ 履歴曲線

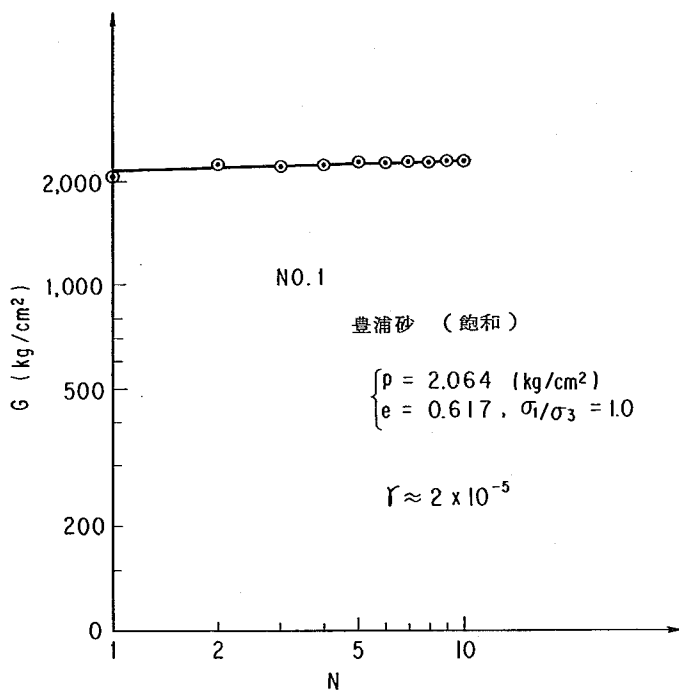


図 II - 34 典型的な $G \sim$ くりかえし回数: N 関係 (その 1)

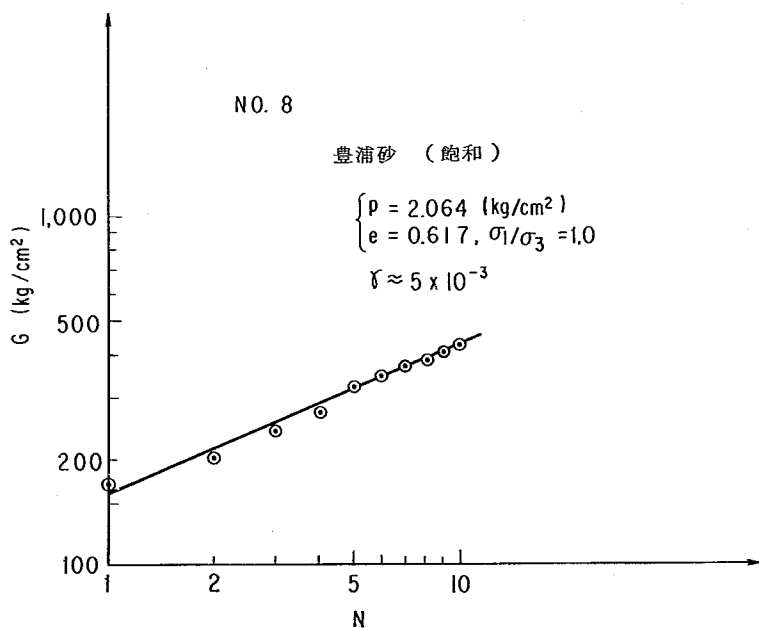


図 II - 35 典型的な $G \sim$ くりかえし回数: N 関係 (その 2)

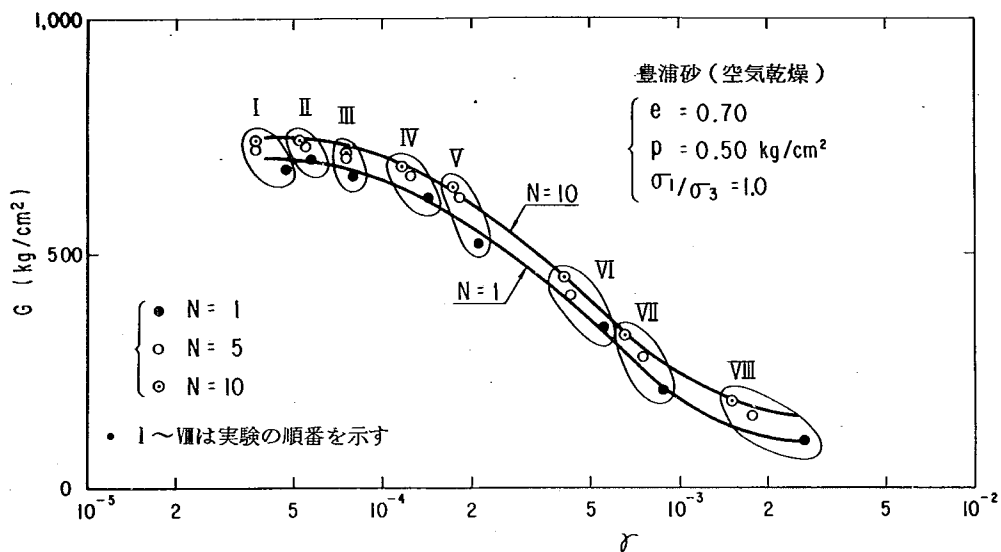


図 II - 36 典型的な $G \sim \gamma$ 関係

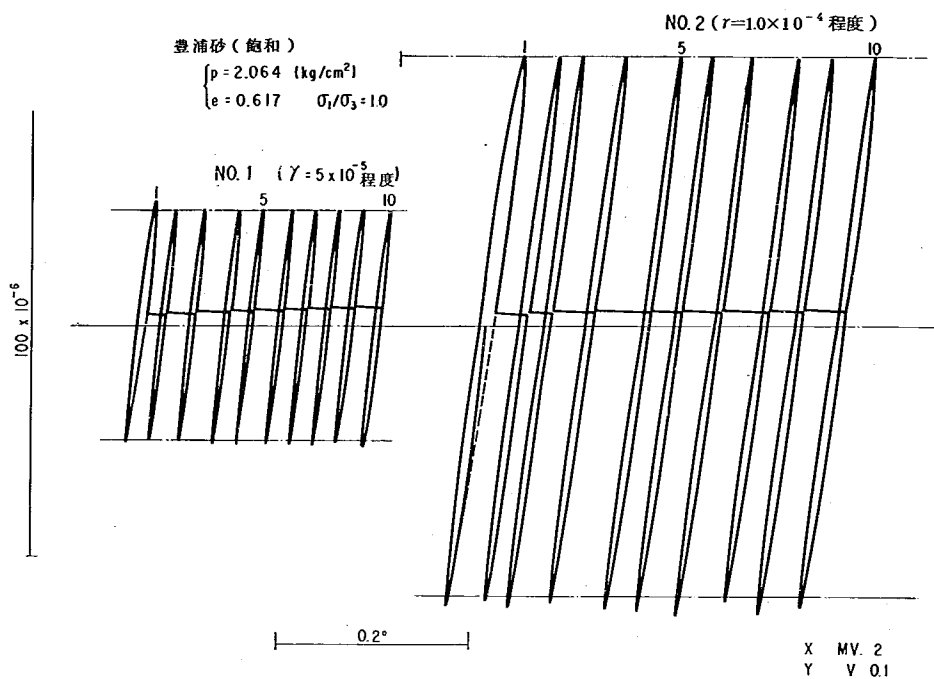


図 II-37 その2 X-Yレコーダーでの記録 ($\gamma = 3 \times 10^{-2}$ 程度)

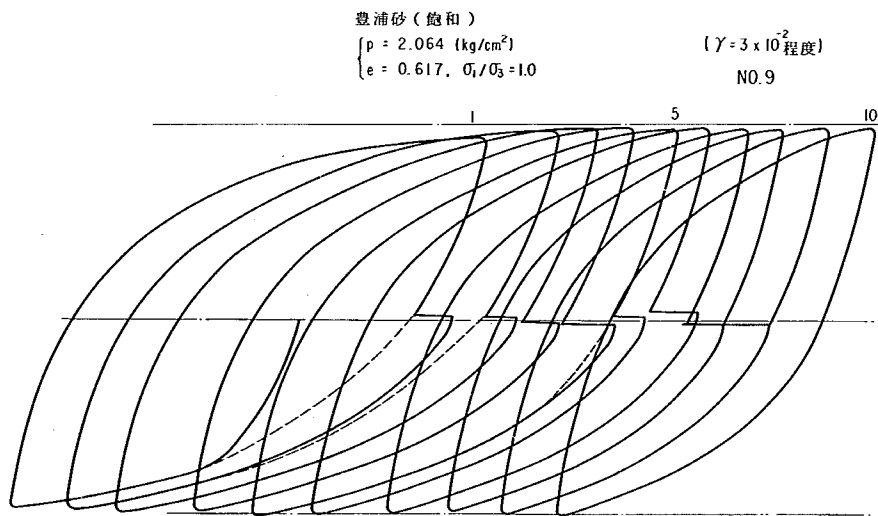
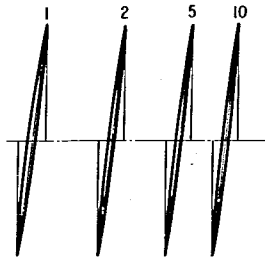


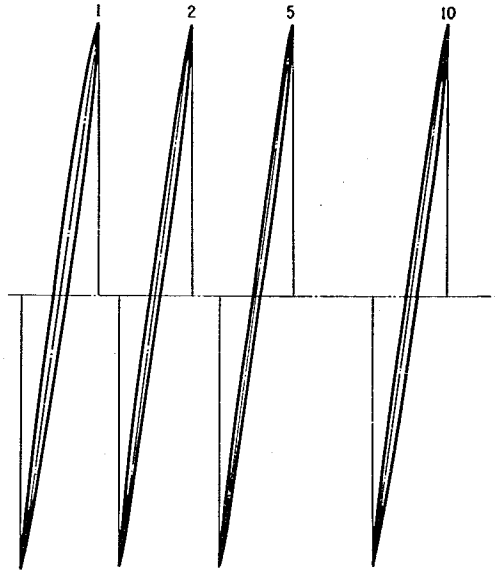
図 II-37 その1 X-Yレコーダーでの記録 ($\gamma = 5 \times 10^{-5}$ 程度)



NO. 1

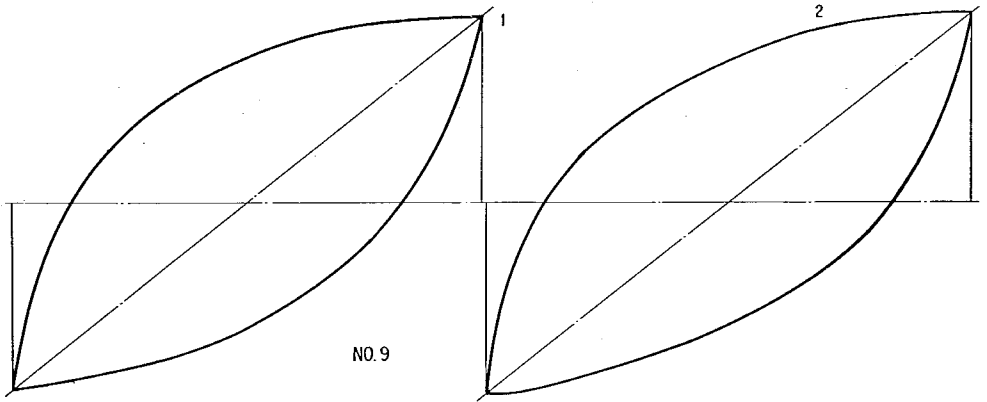
豊浦砂（飽和）

$$\begin{cases} \rho = 2.064 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ e = 0.617, \sigma_1/\sigma_3 = 1.0 \end{cases}$$



NO. 2

図 II - 38 X-Yレコーダーの記録のコピー（その1）



NO. 9

豊浦砂（飽和）

$$\begin{cases} \rho = 2.064 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ e = 0.617, \sigma_1/\sigma_2 = 1.0 \end{cases}$$

図 II - 38 X-Yレコーダーの記録のコピー（その2）

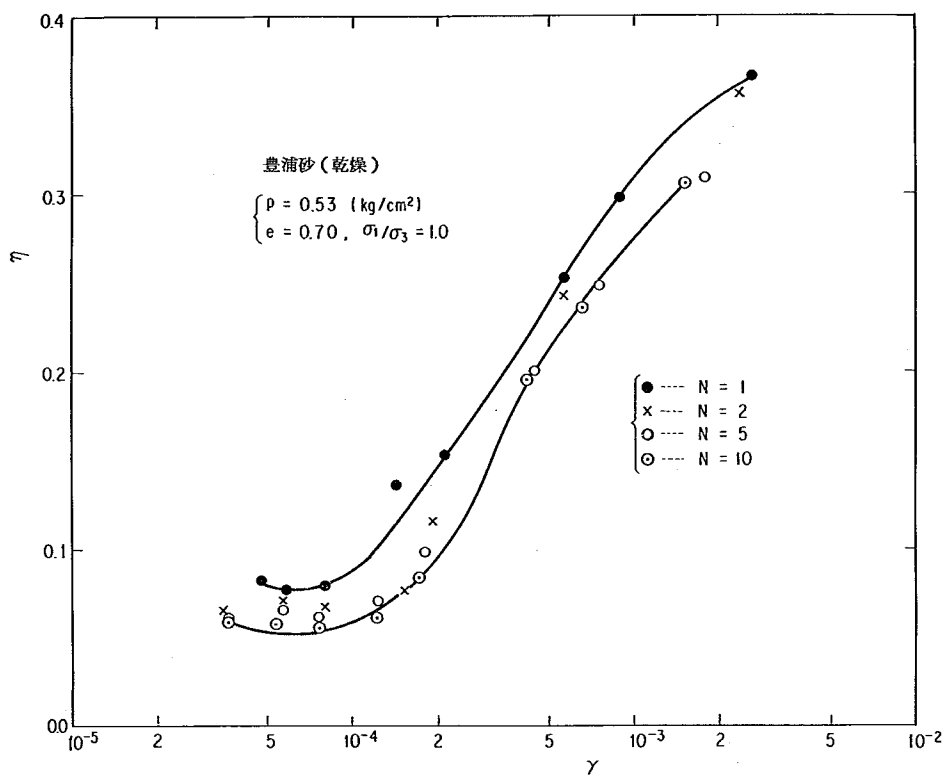


図 II-40 典型的な η のデータ

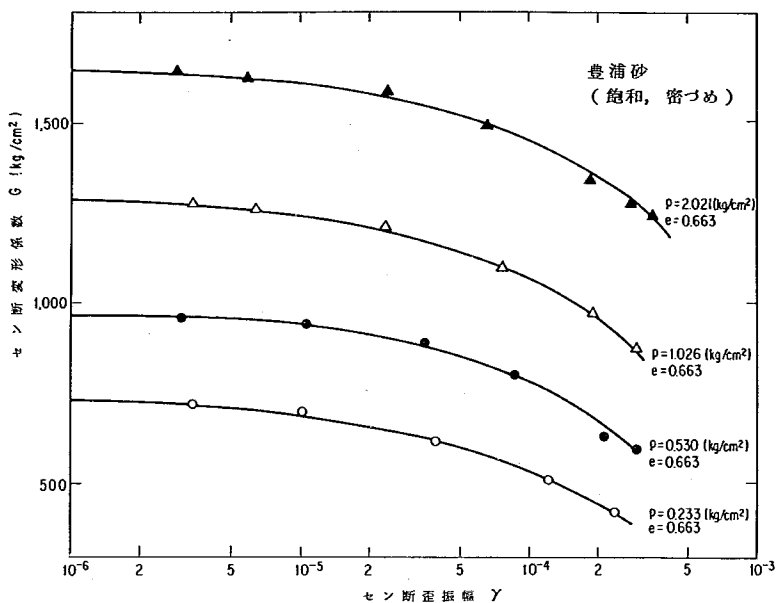


図 III- 1 共振法土質試験での G の値 (飽和)

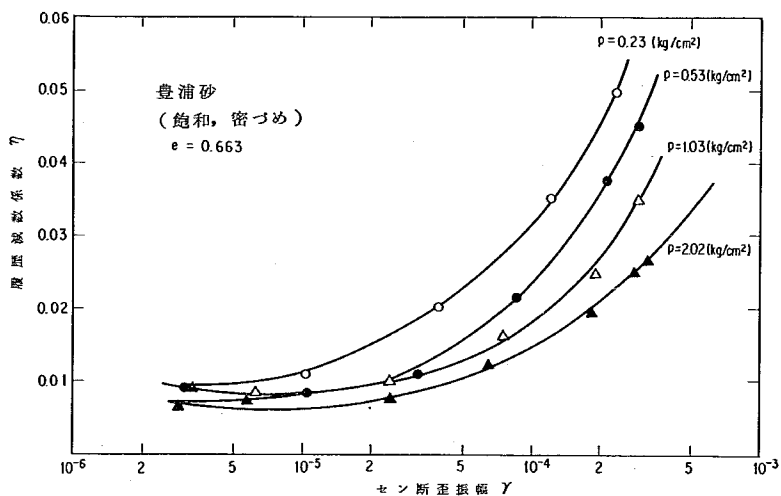


図 III- 2 共振法土質試験での η の値 (飽和)

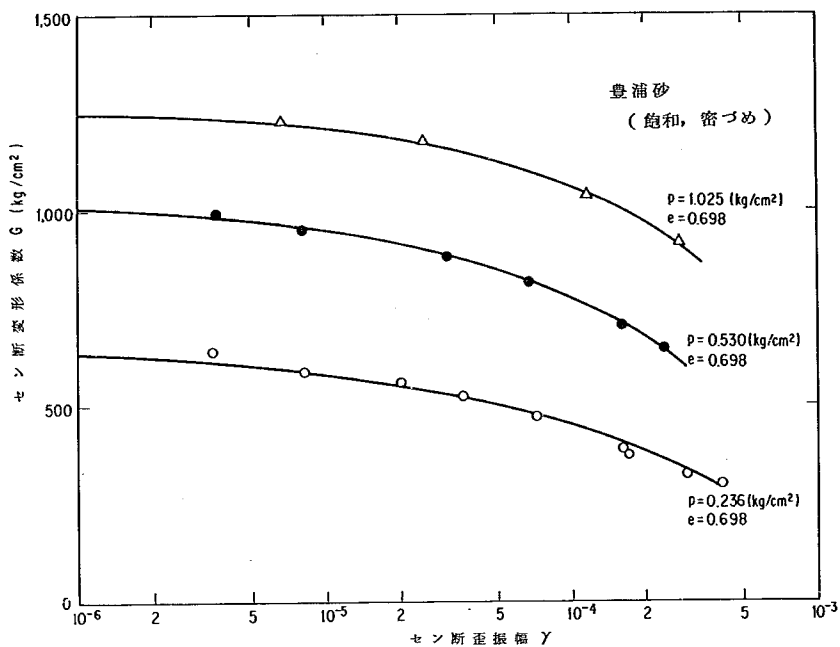


図 III - 3 共振法土質試験での G の値 (飽和)

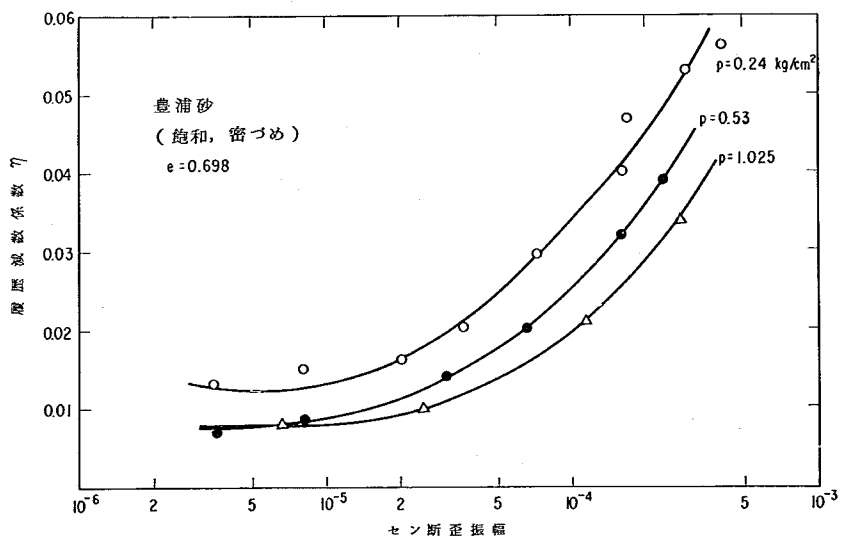


図 III - 4 共振法土質試験での η の値 (飽和)

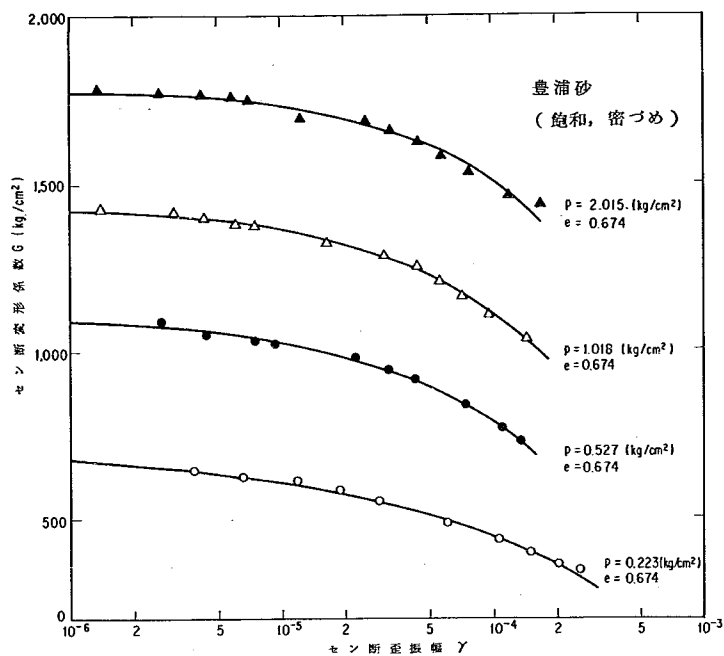


図 III - 5 共振法土質試験での G の値 (乾燥)

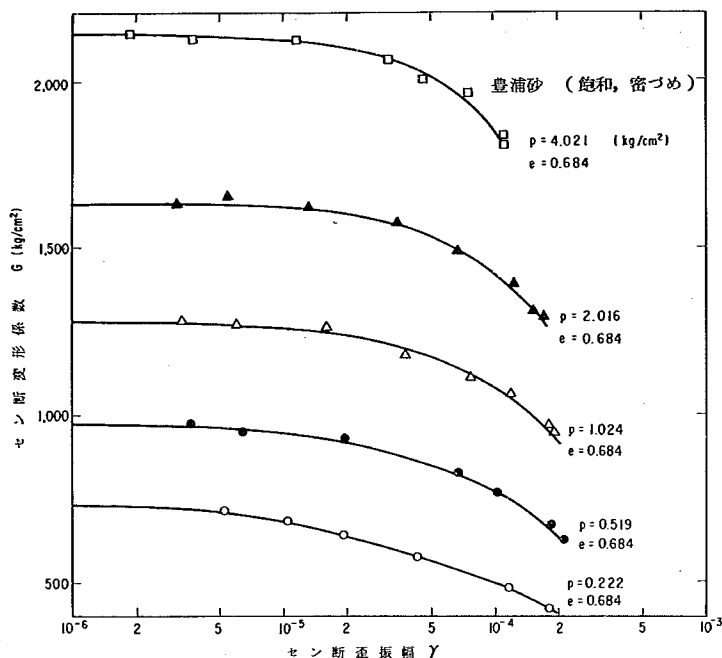


図 III- 6 共振法土質試験での G の値 (乾燥)

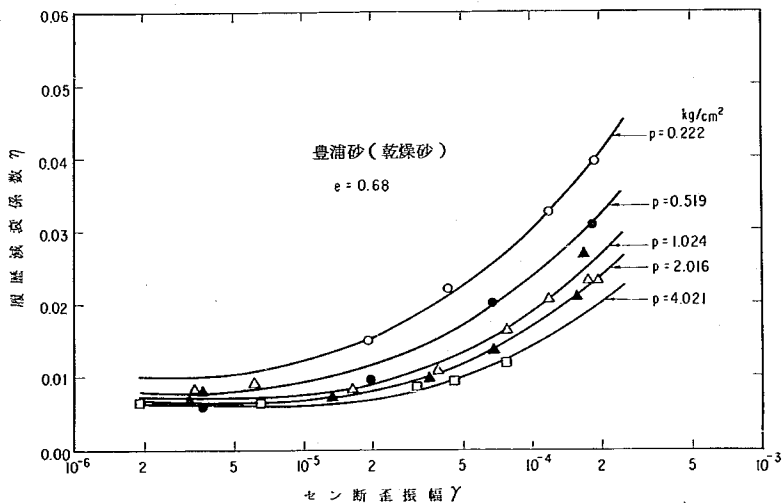


図 III- 7 共振法土質試験での η の値 (乾燥)

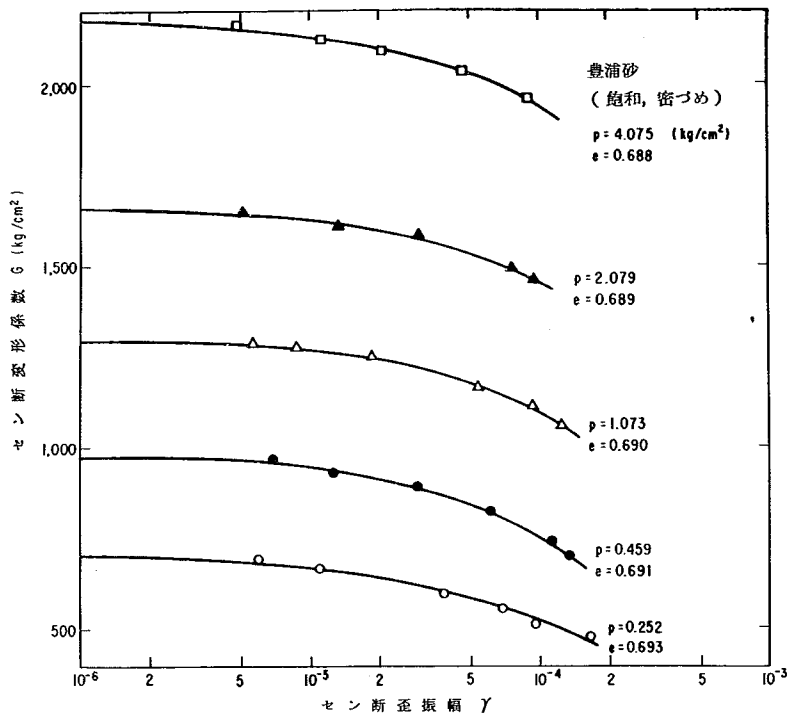


図 III- 8 共振法土質試験での G の値 (乾燥)

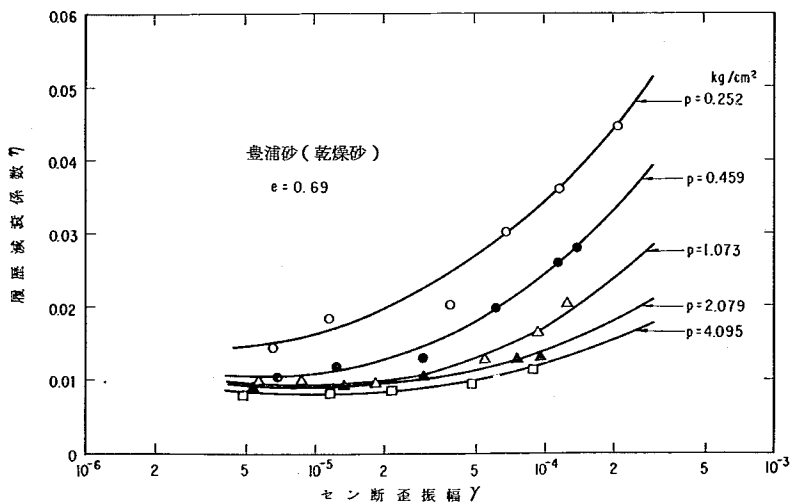


図 III- 9 共振法土質試験での η の値 (乾燥)

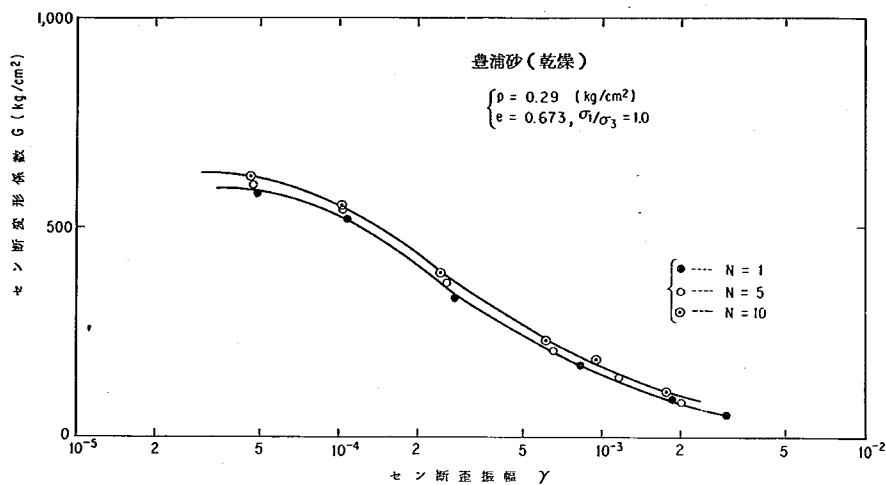


図 III-10 低周波動的せん断試験での G の値

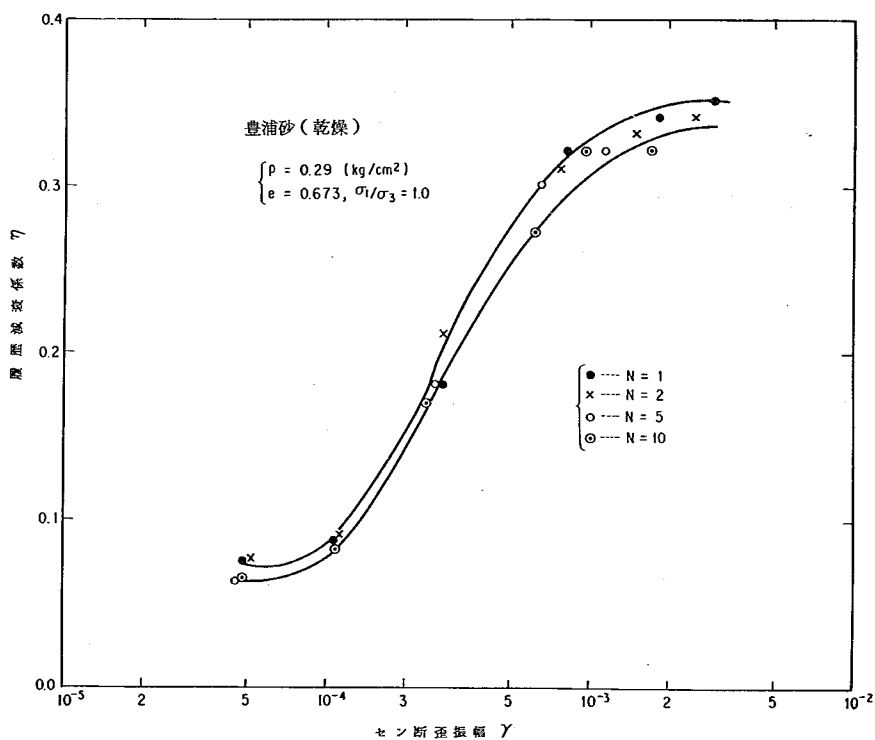


図 III-11 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

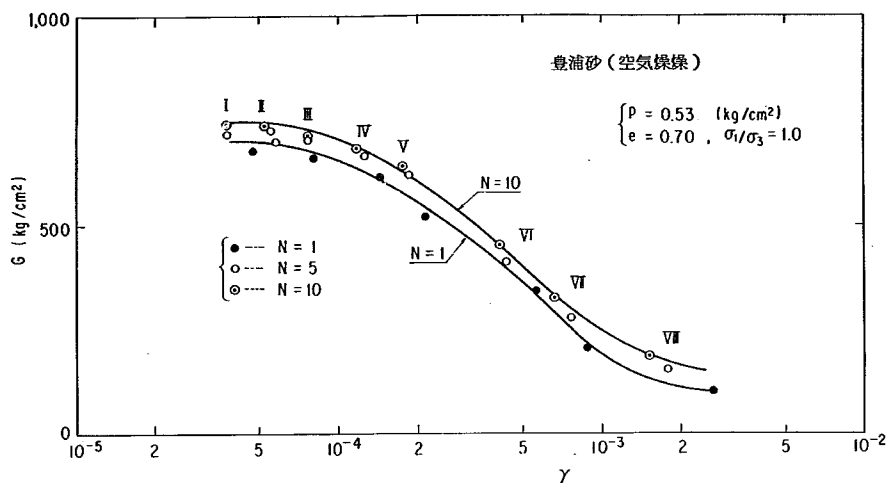


図 III-12 低周波動的セン断試験での G の値

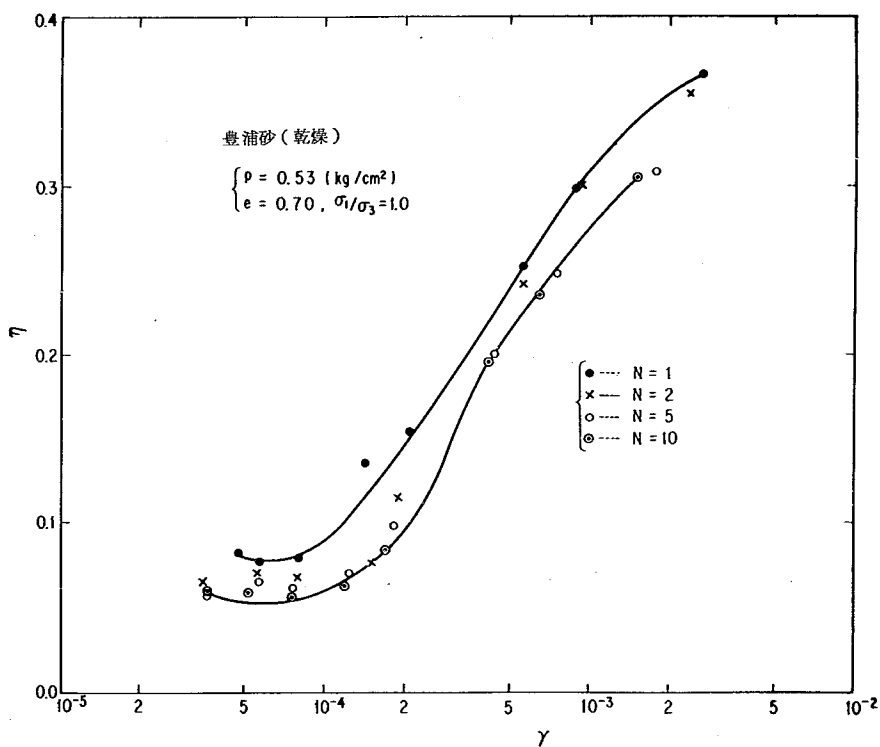


図 III-13 低周波動的セン断試験での履歴減衰係数 η の値

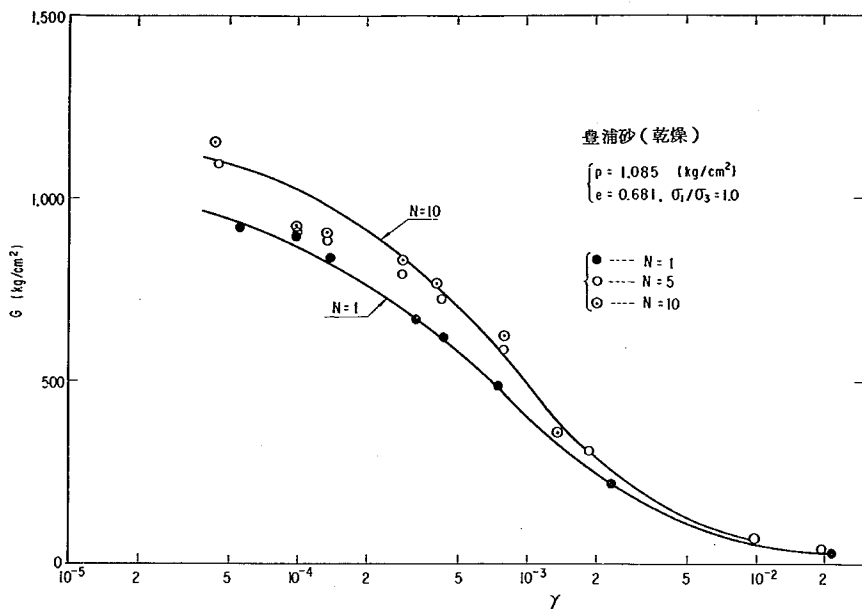


図 III-14 低周波動的せん断試験での G の値

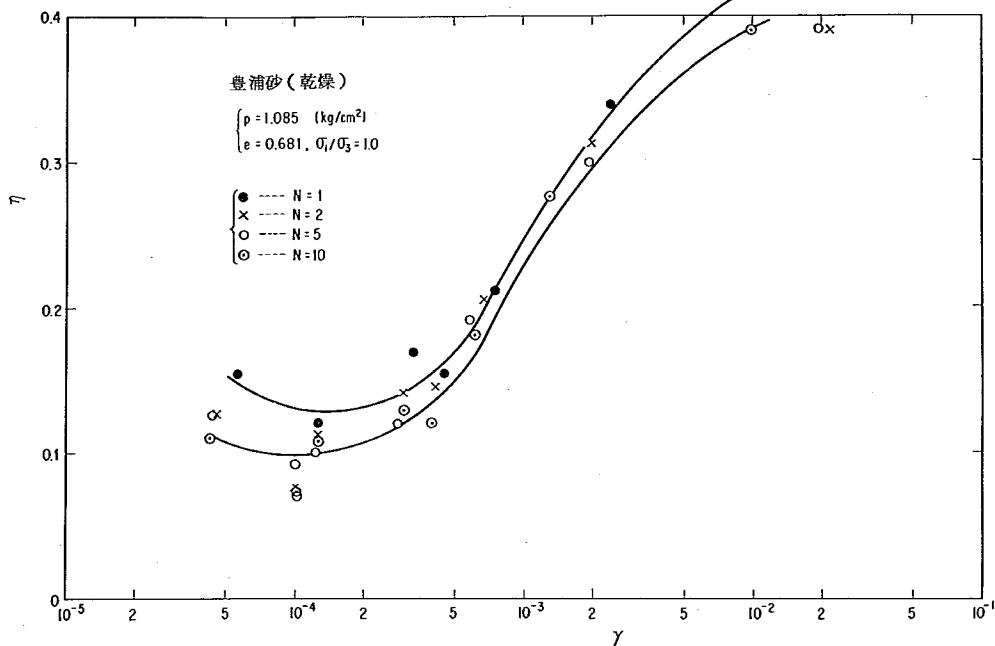


図 III-15 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

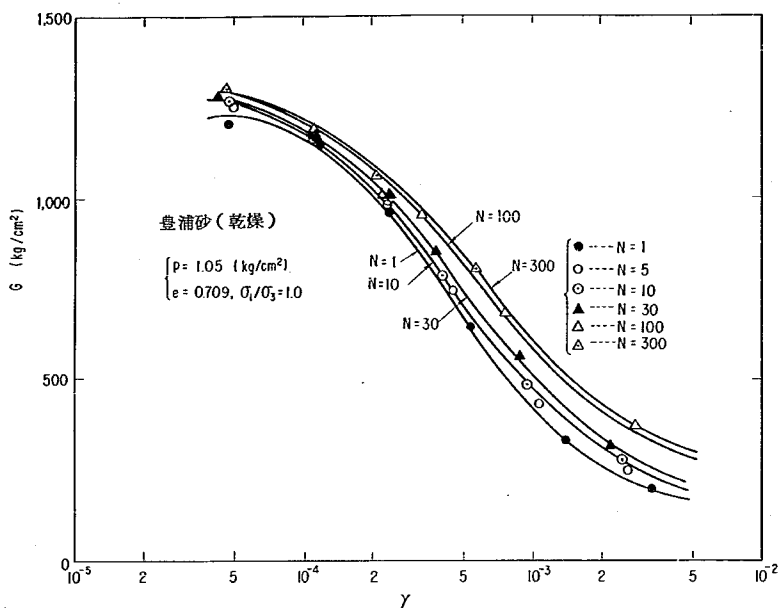


図 III-16 低周波動的せん断試験での G の値

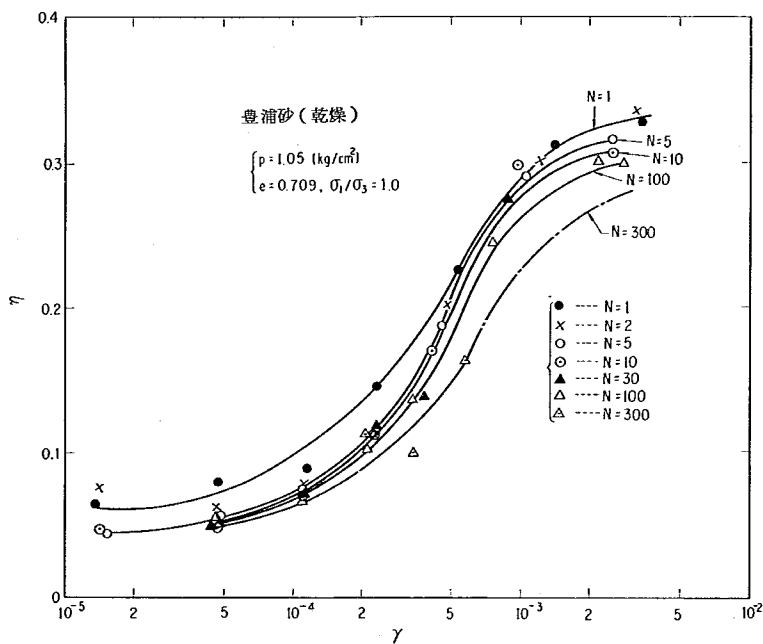


図 III-17 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

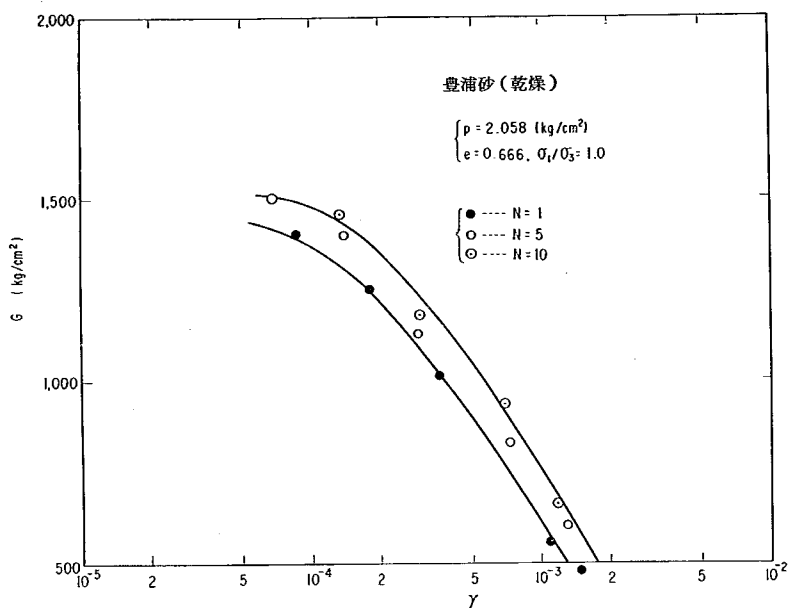


図 III-18 低周波動的せん断試験での G の値

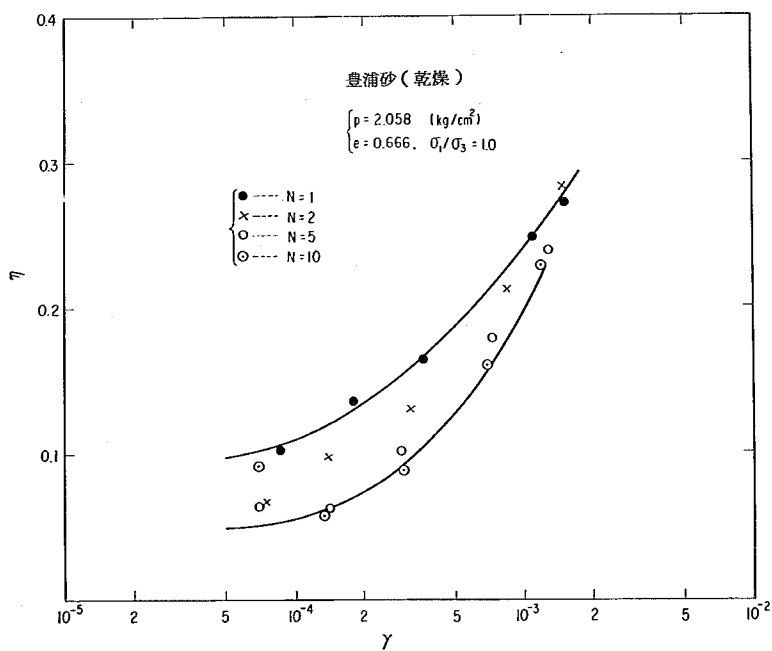


図 III-19 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

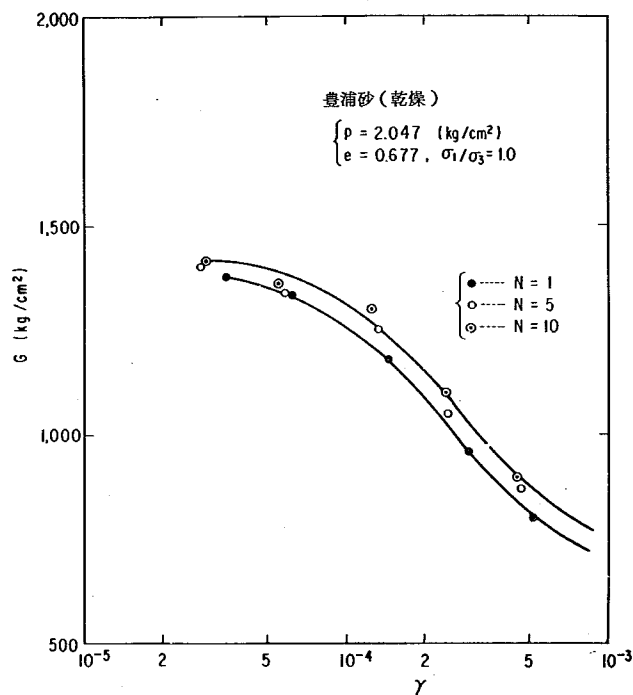


図 III-20 低周波動的せん断試験での G の値

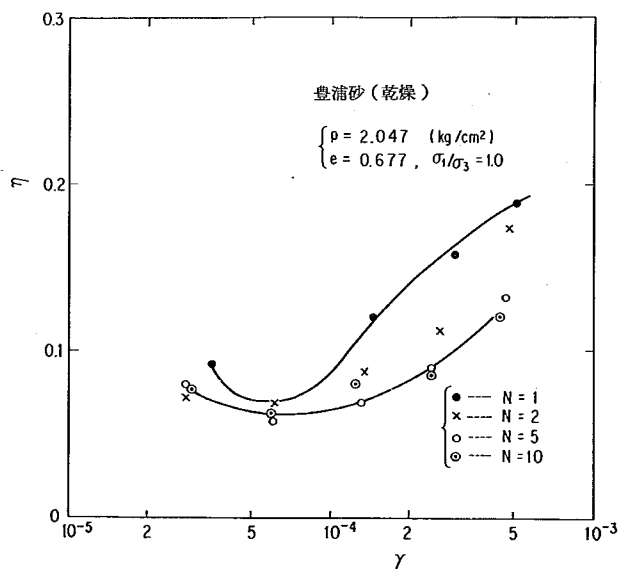


図 III-21 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

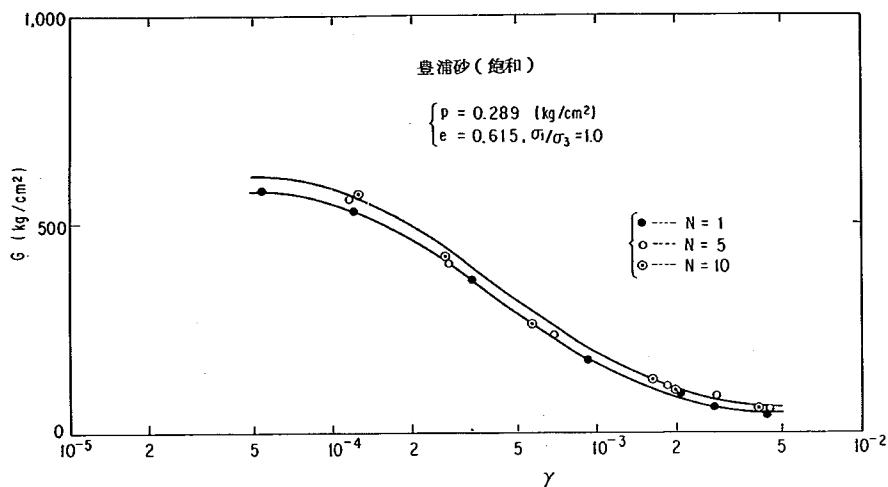


図 III-22 低周波動的せん断試験での G の値

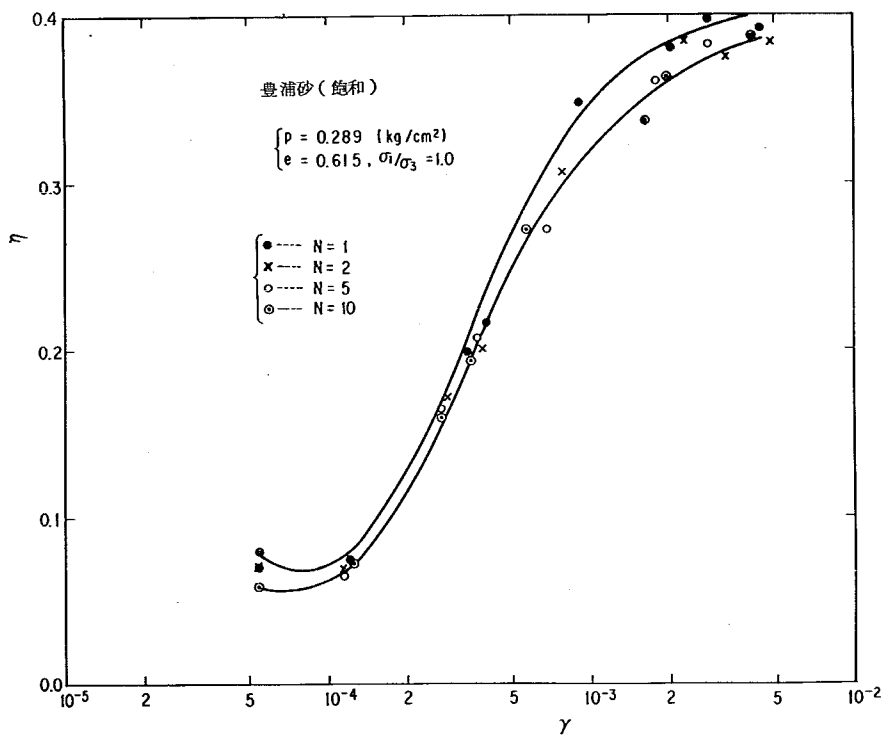


図 III-23 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

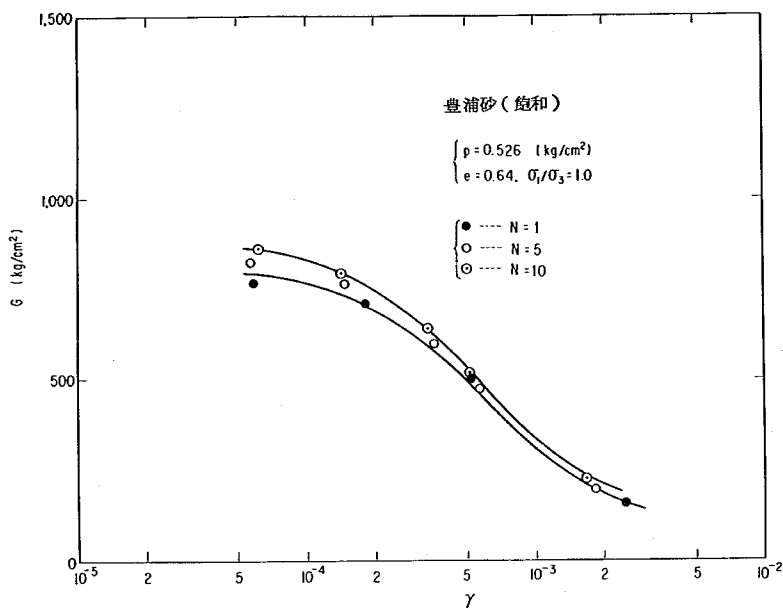


図 III-24 低周波動的せん断試験での G の値

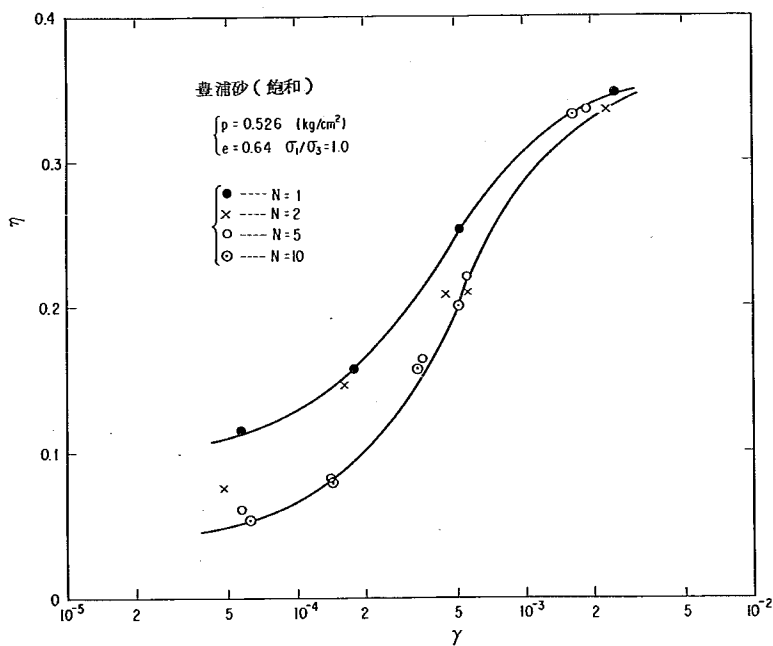


図 III-25 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

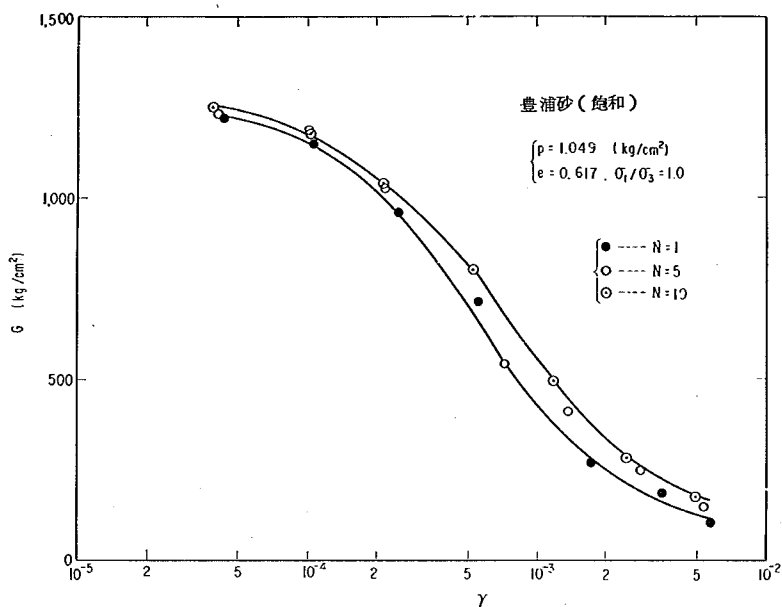


図 III - 26 低周波動的せん断試験での G の値

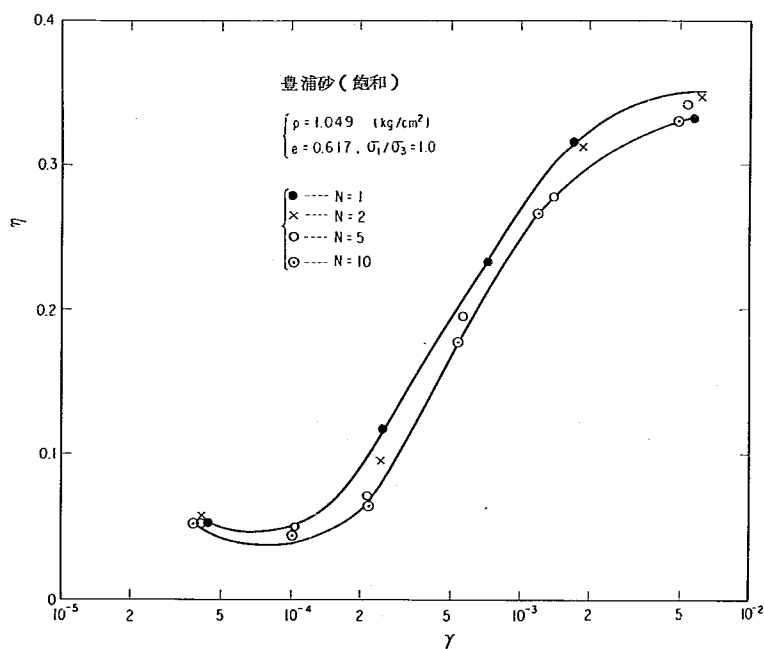
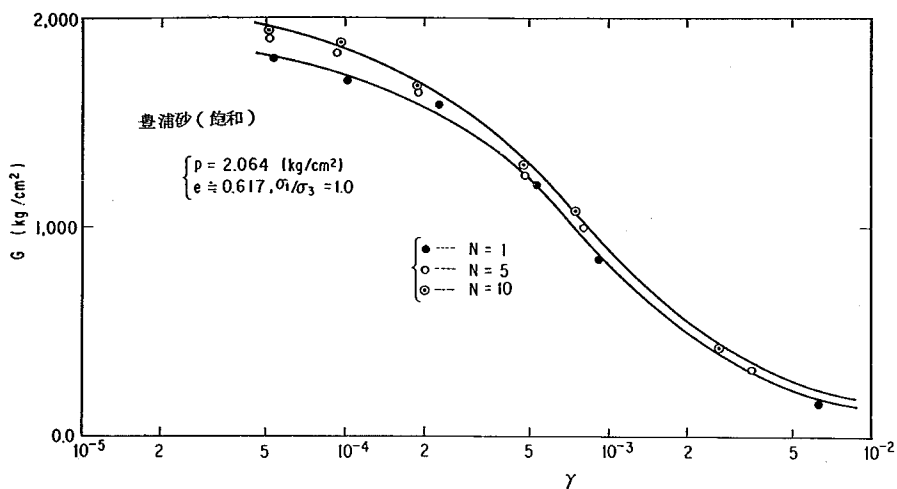
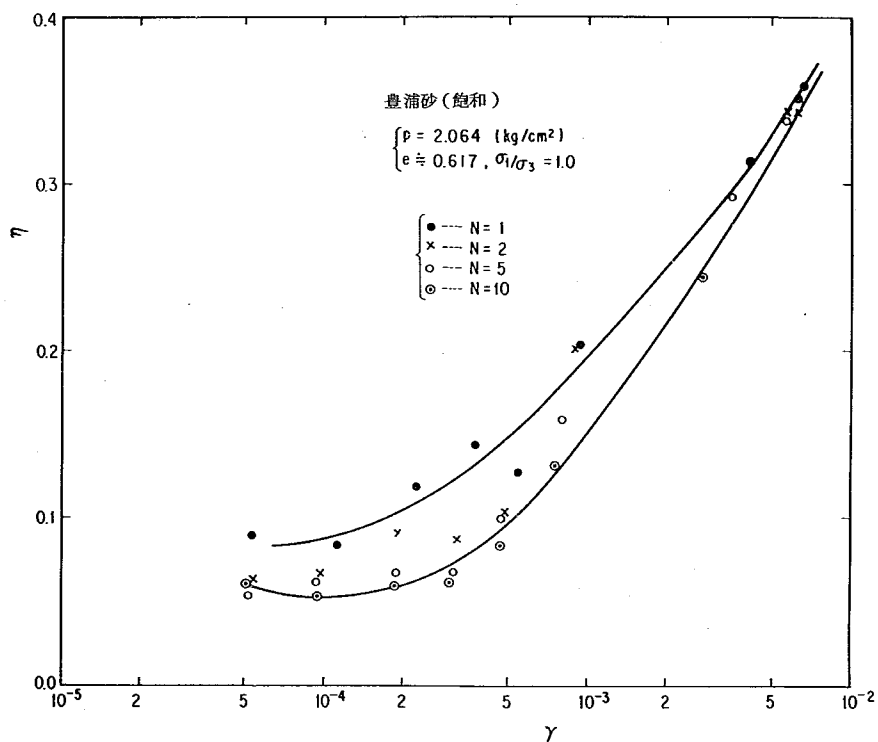


図 III - 27 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値



図Ⅲ-28 低周波動的せん断試験でのGの値



図Ⅲ-29 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数ηの値

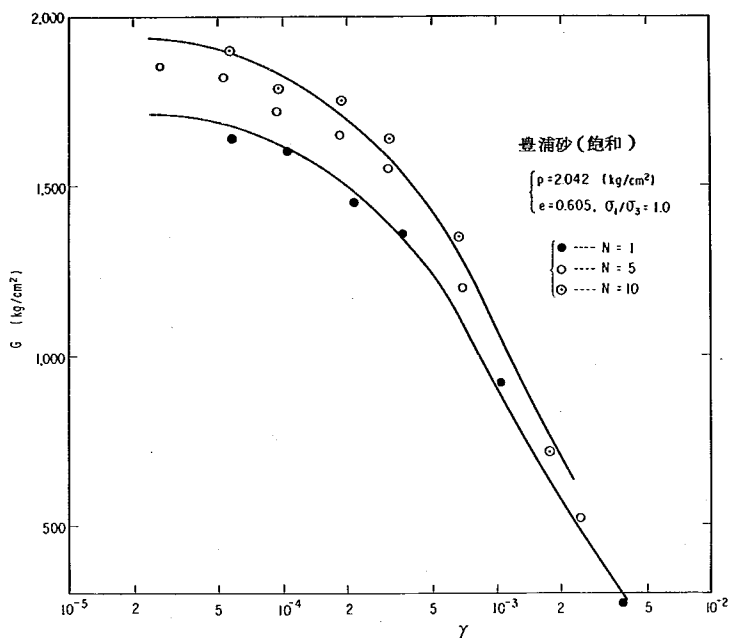


図 Ⅲ- 30 低周波動的せん断試験での G の値

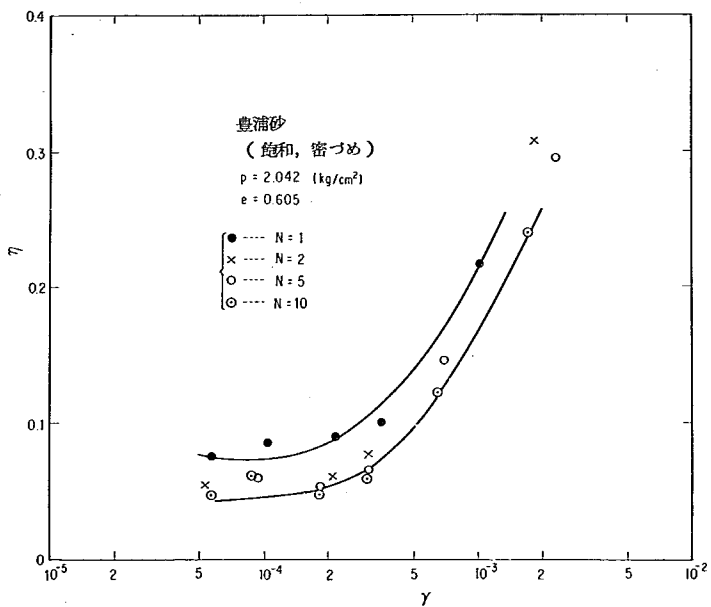


図 Ⅲ- 31 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

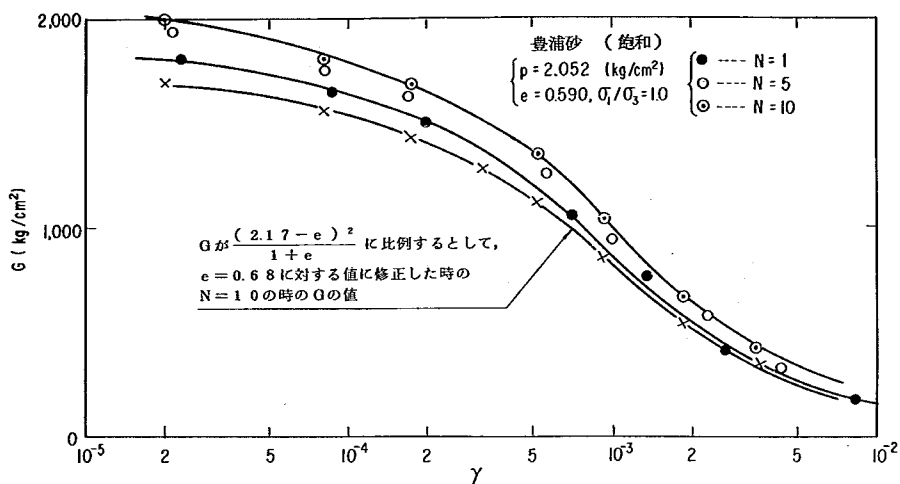


図 III-32 低周波動的せん断試験での G の値

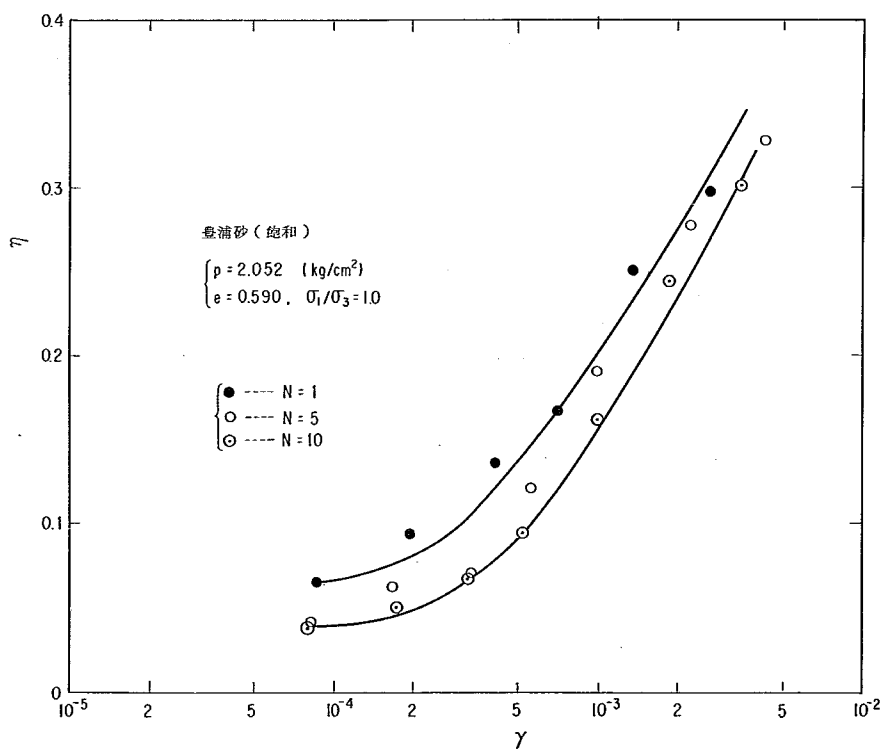


図 III-33 低周波動的せん断試験での履歴減衰係数 η の値

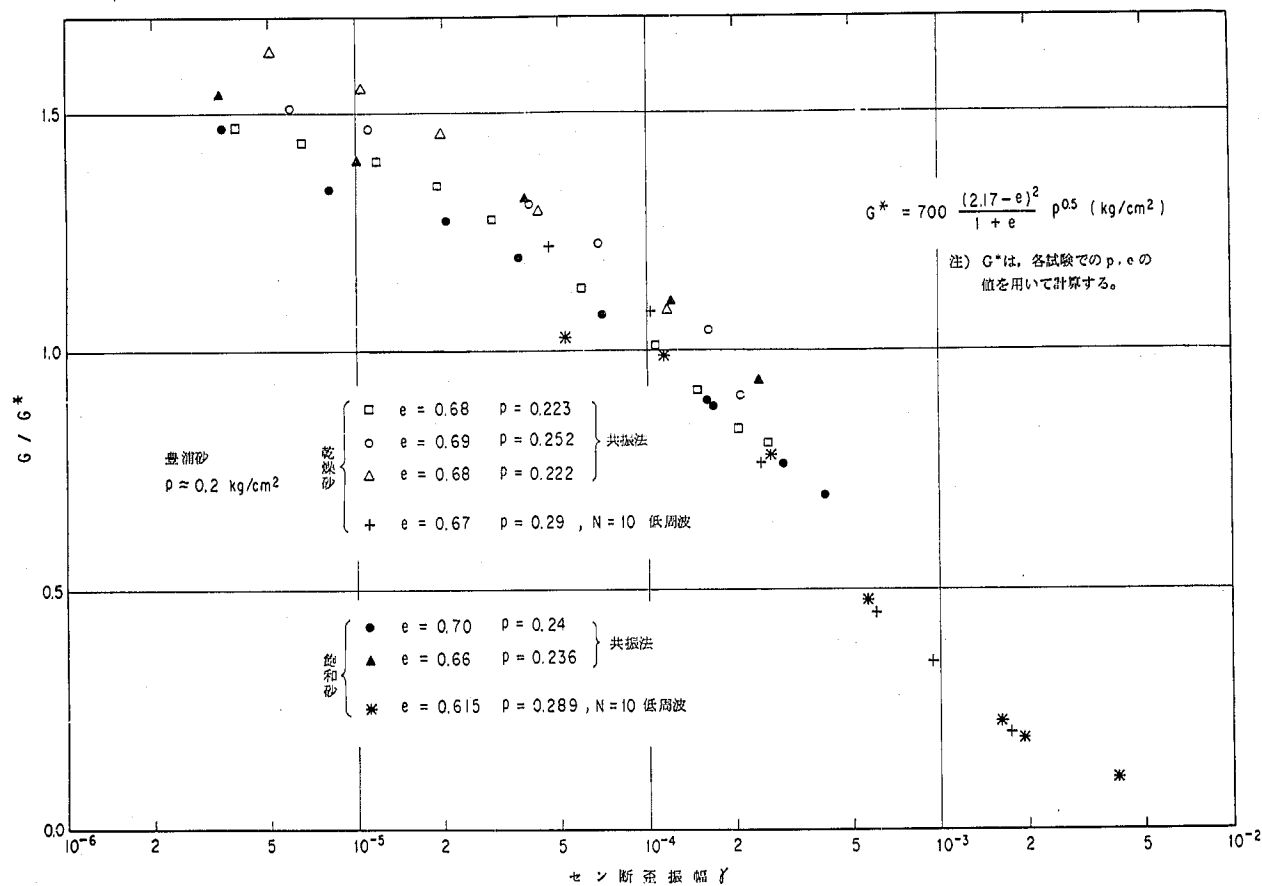


図 III - 34 $G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 0.2 \text{ kg/cm}^2$)

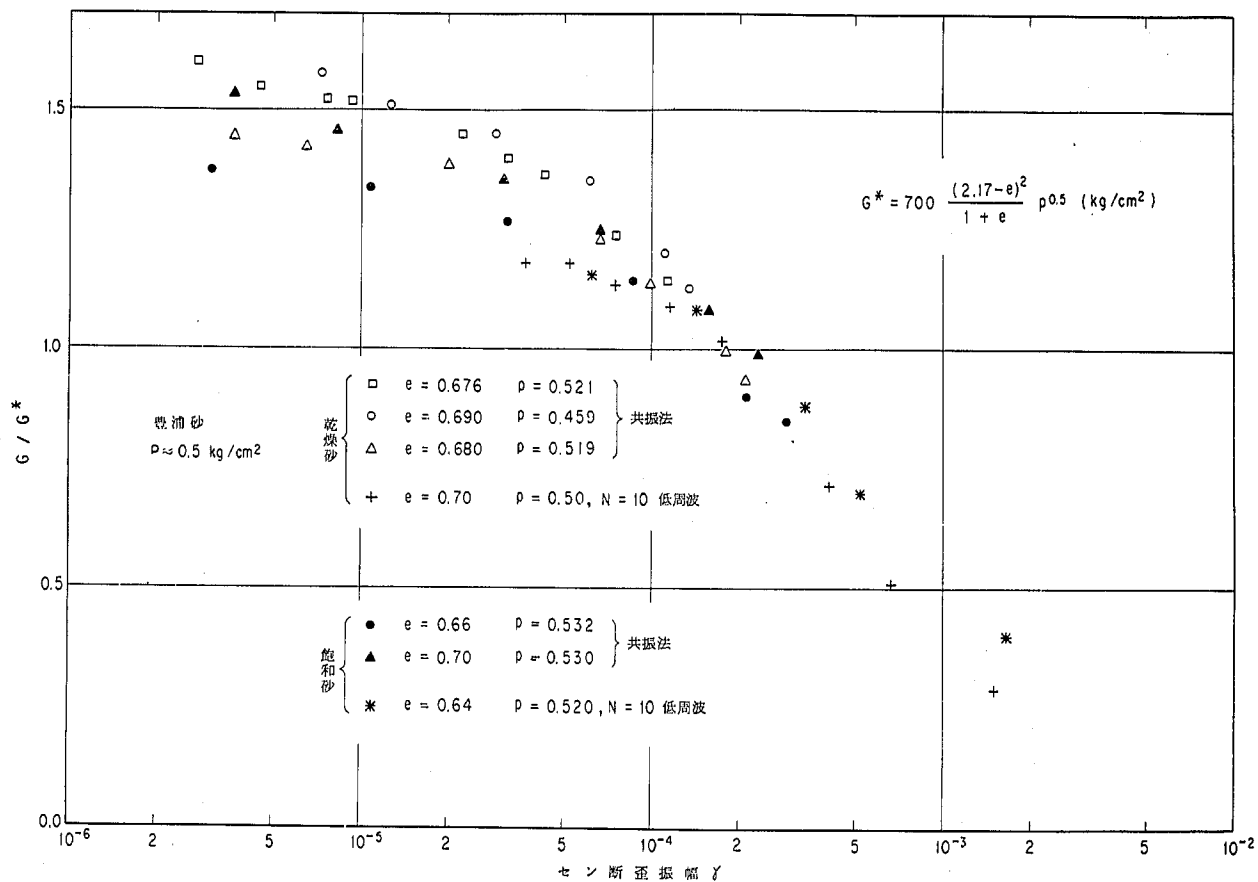
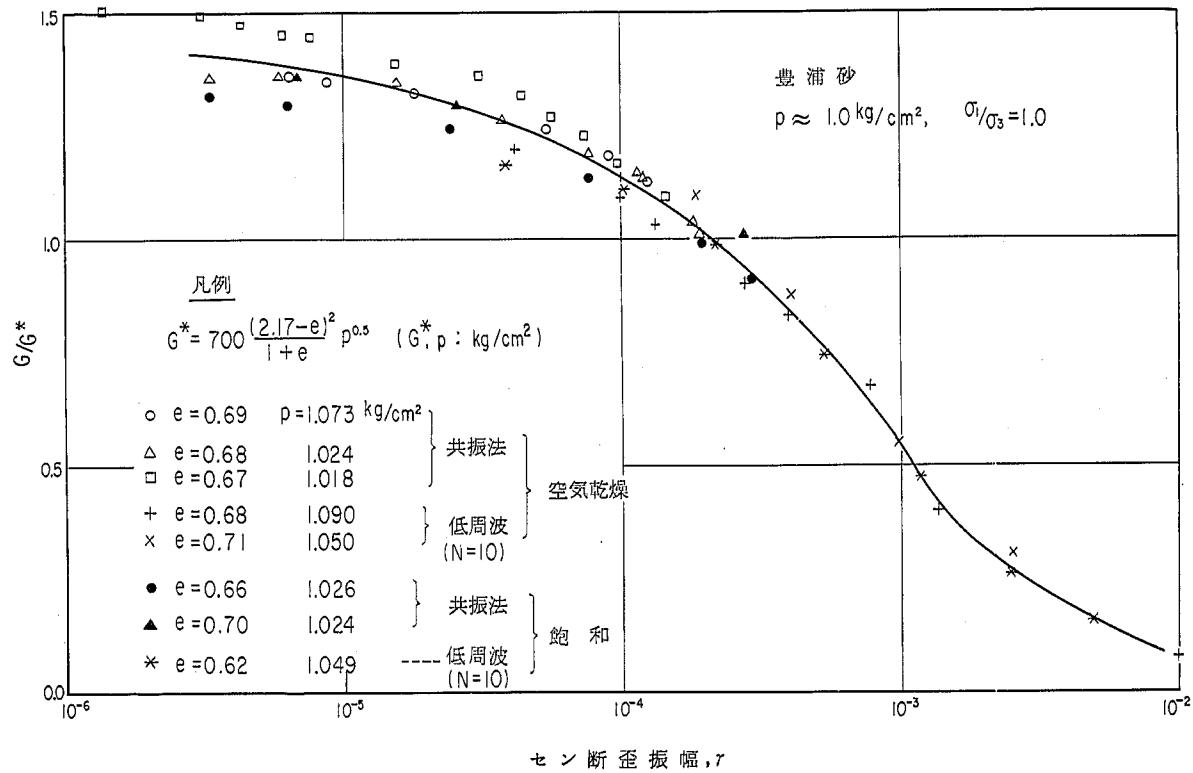
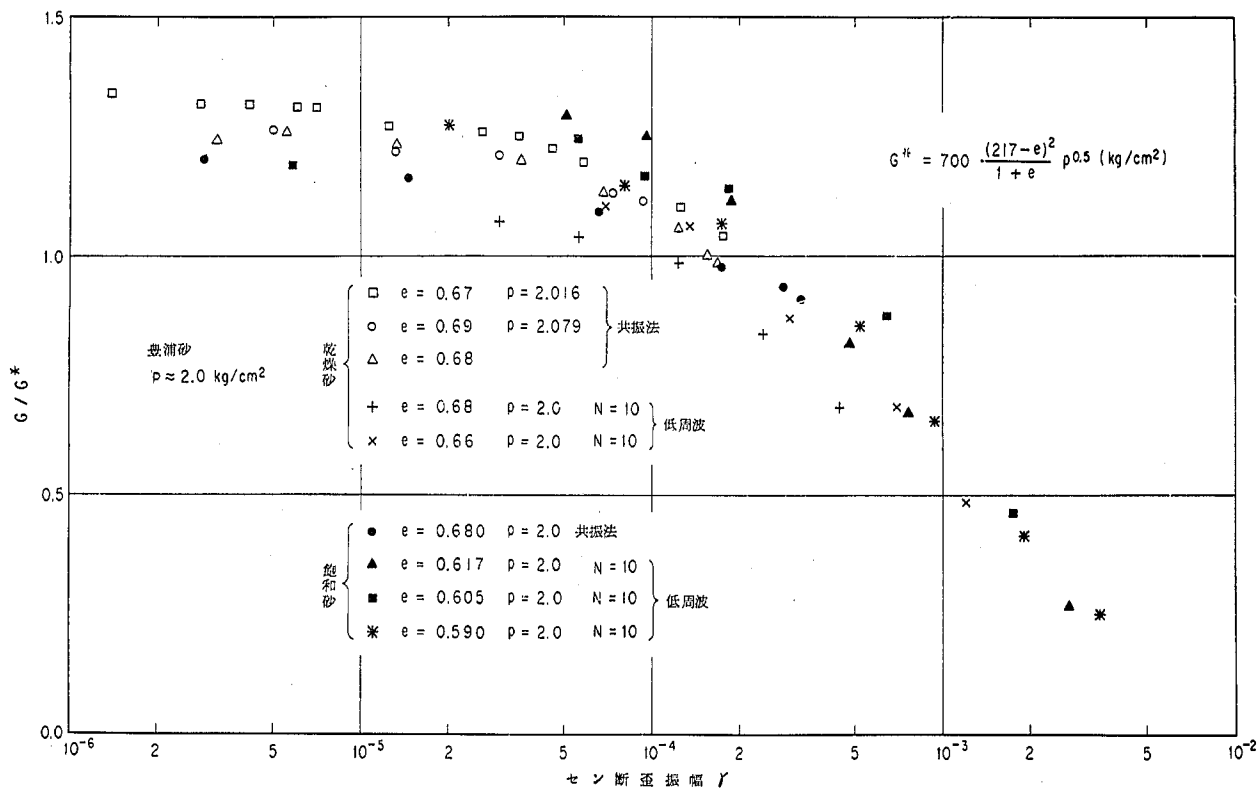


図 III-35 $G / G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 0.5 \text{ Kg/cm}^2$)



図Ⅲ-36 $G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2$)



図Ⅲ-37 $G/G^* \sim \gamma$ 関係 ($p \approx 2.0 \text{ Kg/cm}^2$)

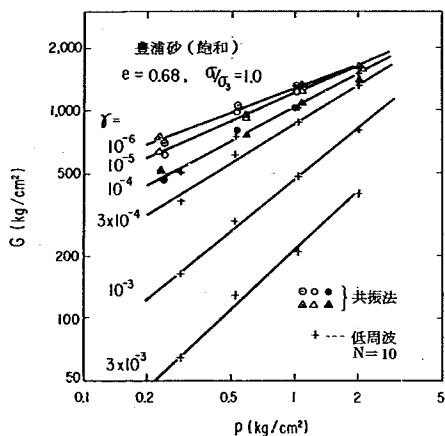


図 Ⅲ - 38 $G \sim p$ 関係 (飽和砂)

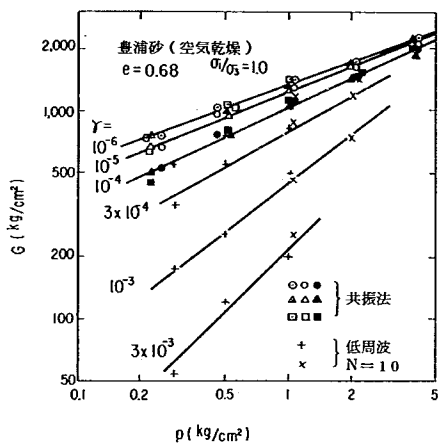


図 Ⅲ - 39 $G \sim p$ 関係 (空気乾燥砂)

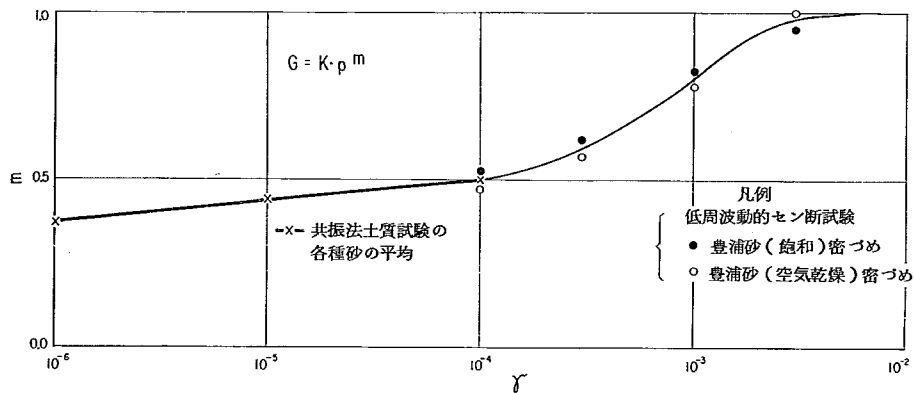


図 Ⅲ - 40 $m \sim \gamma$ 関係

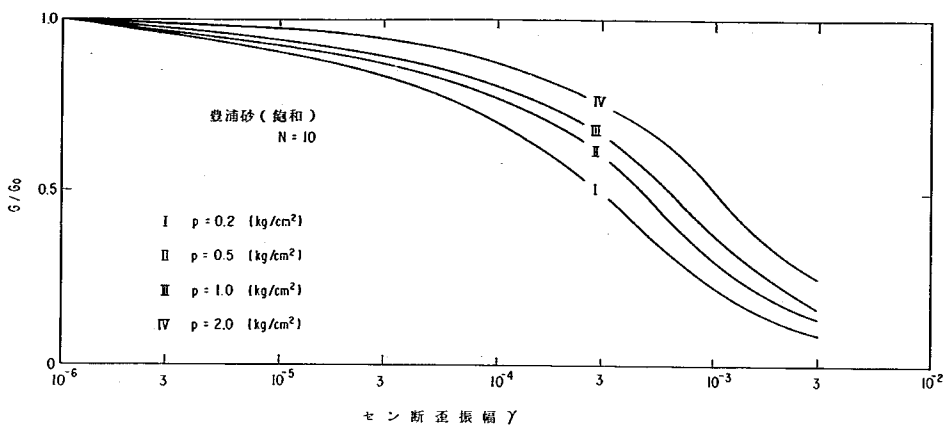


図 III-41 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 飽和)

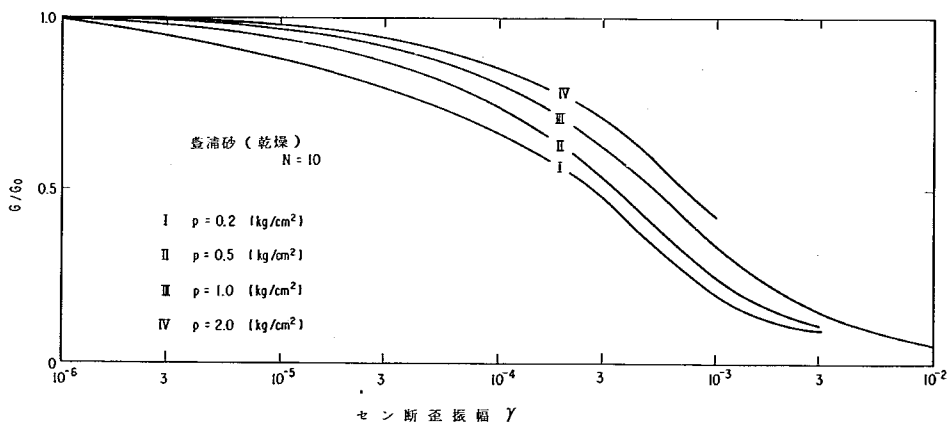


図 III-42 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密づめ, 空気乾燥)

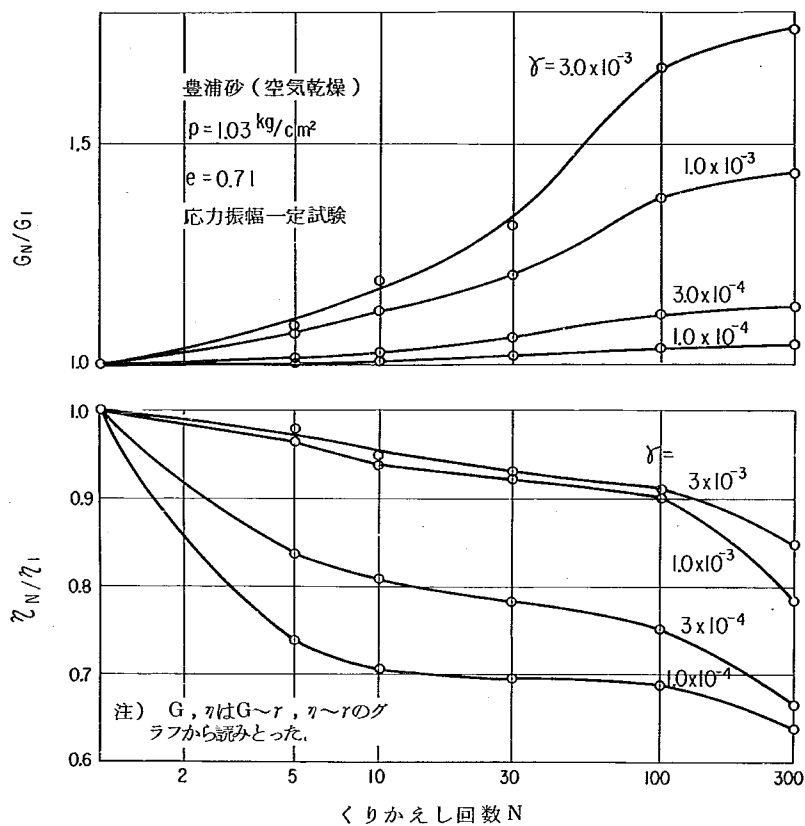


図 III-43 G, η におよぼすくりかえし回数 N の影響

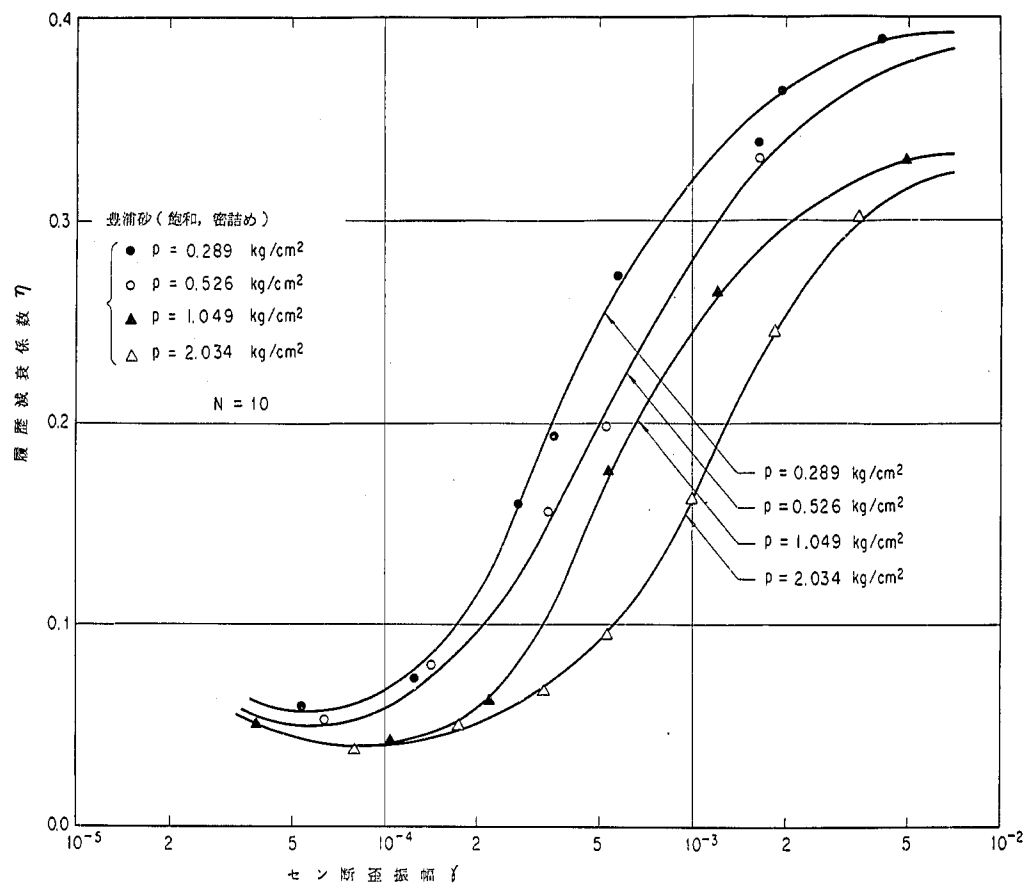


図 III-44 $\eta \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密詰め, 飽和)

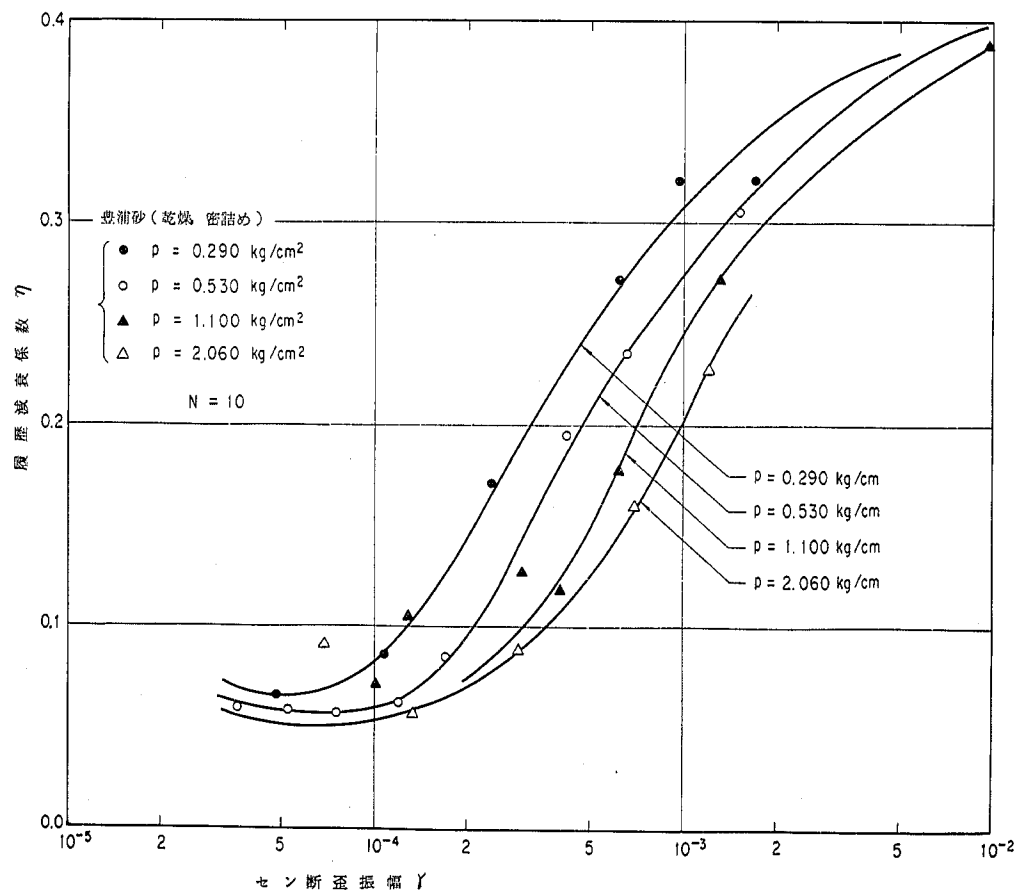
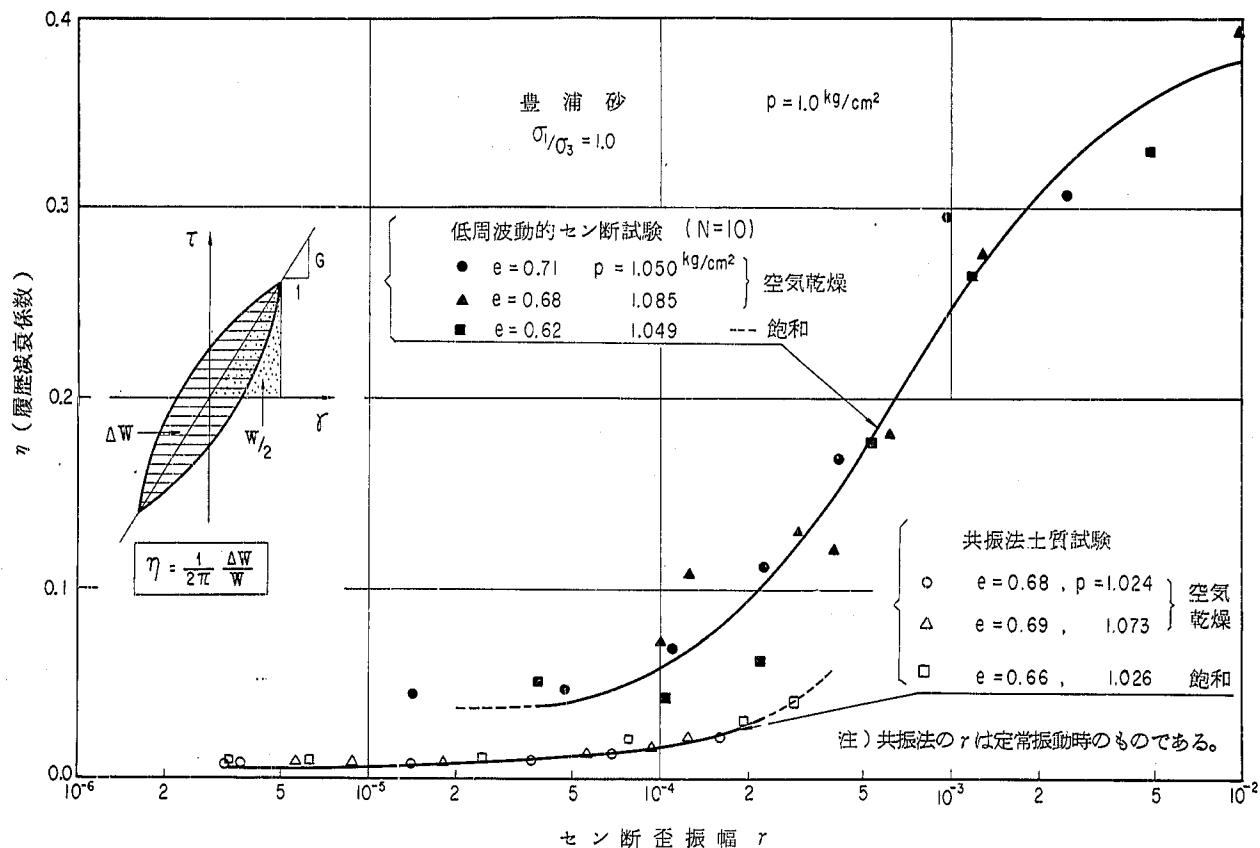


図 III-45 $\eta \sim \gamma$ 関係 (豊浦砂, 密詰め, 飽和)



図Ⅲ-46 両試験での η の比較 ($p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$)

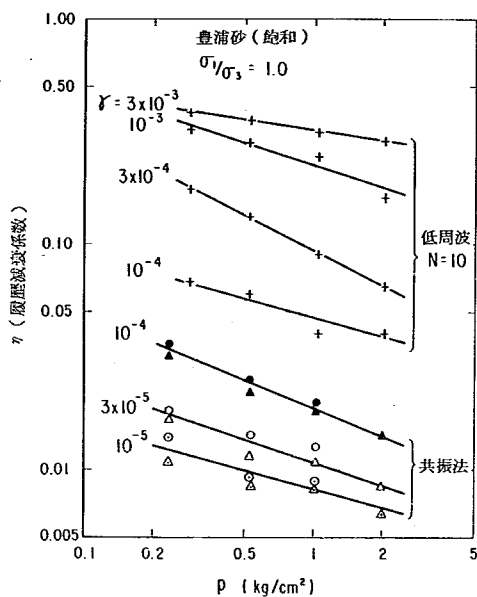


図 Ⅲ- 47 η と p の関係 (飽和)

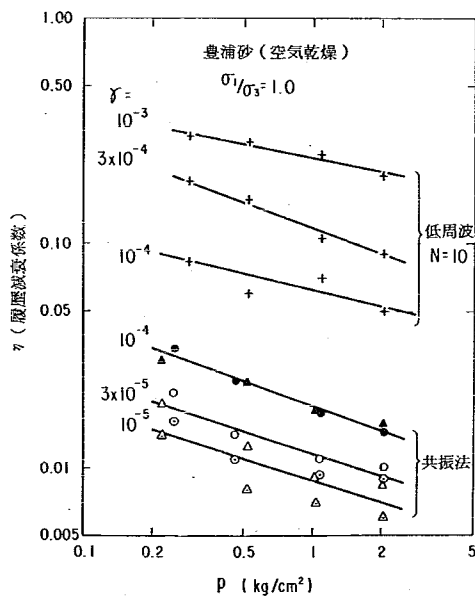


図 Ⅲ- 48 η と p の関係 (空気乾燥)