

023

土研資料第1304号

土木研究所資料

共振法による不攪乱粘土の動的変形係数の測定

昭和53年3月

建設省土木研究所
動土質研究室

まえがき

地盤および土構造物が地震、交通荷重、機械振動等の動的荷重を受けた時の応答を求めるためには動的解析を行なう必要があり、動的解析を行なうに当っては地盤の動的性質を知ることが不可欠である。地盤の動的性質を大きく分けると動的強度特性と動的変形特性に分けられるが、ここでは動的変形特性について取り上げる。

土の動的変形特性を表わす方法としていろいろのものがあるが、動的せん断弾性係数 G および減衰比 h (振幅が指数関数的に減少する振動においては1周期毎の振幅は等比級数的に減ずる。その一定比を減衰比という。)を用いるのが一般的である。

一般に土の G および h の値はせん断歪、拘束圧、間隙比、過圧密比等に依存するが、特に歪依存性は動的解析における非線型性の問題として重要である。砂の動的変形係数についてはこれまでに数多くの研究成果が発表されているが、⁽¹⁾⁽²⁾等微小歪における粘土のデータはまだ非常に少ないのが現状である。ここではせん断歪が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ という微小範囲における不攪乱冲積粘土の歪依存性について、共振ねじり試験機 (Resonant Column Apparatus) による実験 (以下においては共振法と呼ぶ) 結果を示し、従来より提案されている式との比較検討を行なうと共に、塑性指数、拘束圧等の影響についても述べる。また現場 PS 検層より求められた G の値と室内実験結果を比較し考察を加える。

最後に試料採取に当って御協力いただいた建設省中国技術事務所の方々に感謝の意を表する。

昭和53年3月

動土質研究室	沢	田	健	吉
	谷	口	栄	一
	小笠原			久
	館	山		悟

目 次

ま え が き

1. 土の変形特性に関する基本的事項	1
2. 実験装置の概要および測定原理	3
3. 実 験 試 料	10
4. 実 験 方 法	12
5. キャリブレーション	18
6. 実験結果および考察	20
7. 結 論	37
参 考 文 献	38

1. 土の変形特性に関する基本的事項

繰り返しせん断力または繰り返しせん断変形を受ける土の応力・歪関係を模式的に書くと図1-1のようなヒステリシス・ループになる。このループを表現する方法はいろいろあるが、次の2つのパラメーターを用いて表わす方法が一般的である。

G : せん断弾性係数 (Shear Modulus)

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} : \text{損失係数 (Loss Coefficient)}$$

ここに W : 物体の内部に貯えうる歪エネルギーの最大値

ΔW : 1回のヒステリシス・ループで失われるエネルギー

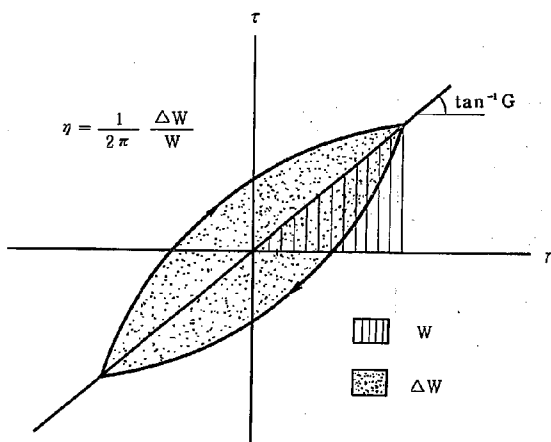


図1-1 典型的な土のヒステリシスループ
(速度非依存型)

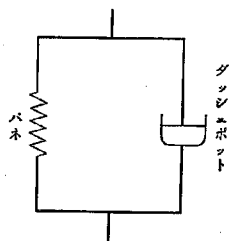


図1-2 Voigtモデル

G は図1-1に示されるように応力および歪が最大となる点と原点を結ぶ直線の勾配と定義する。一般に土の応力・歪関係は非線型性を持っているが、図1-1の G および η と同じ値を持つ仮想的な線型物質を考える。このような等線型物質はVoigtモデルで表わすことができ、そのヒステリシス・ループは図1-3のようになる。Voigtモデルの減衰は速度依存型(即ち載荷速度によってヒステリシス・ループの形が変り G , η の値も変化する。)であり、一方土の履歴減衰は速度非依存型であるので、両者の減衰は異っているが、共振時即ち物質が固有振動数で振動している場合には次のような関係が成り立つ。⁽³⁾

$$h = \frac{1}{2} \eta \quad (1-1)$$

ただし、 h : Voigtモデルに対して定義される減衰比

共振ねじり試験機による実験では等価線型物質の G および h を測定することになるが、 h については共振時の値であるために式(1-1)により実際の土の損失係数 η と結びつけられるのである。

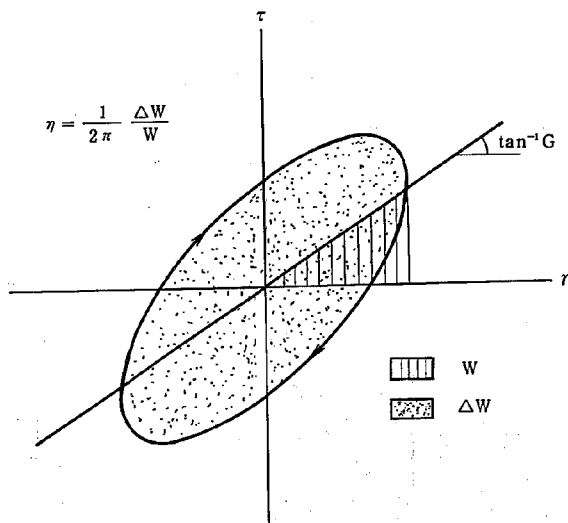


図1-3 等価線型物質のヒステリシスループ
(速度依存型)

2. 実験装置の概要および測定原理

実験に用いた共振ねじり試験機は建設省土木研究所動土質研究室に設置されているものである。

構造の概要を図2-1に示す。加振方法としては、供試体の下端を固定し、上端にねじり加振を与える方

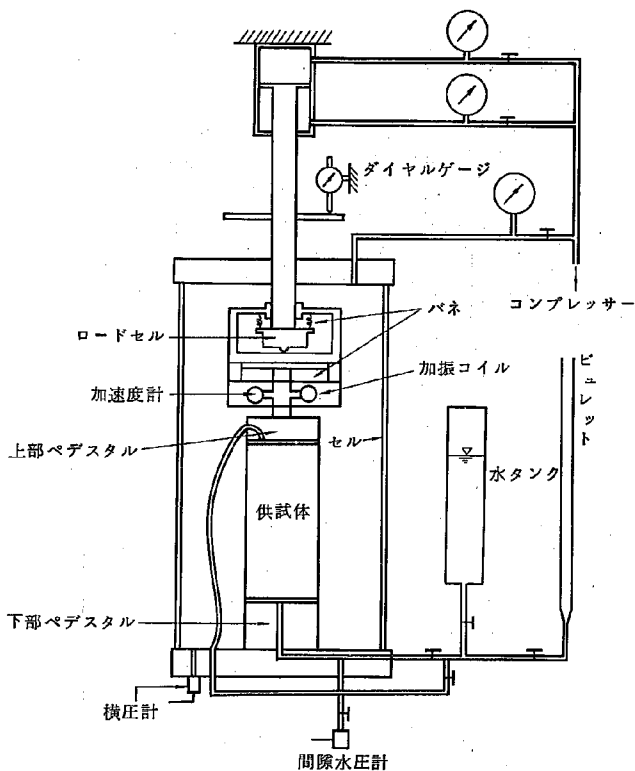


図2-1 共振ねじり試験機概要

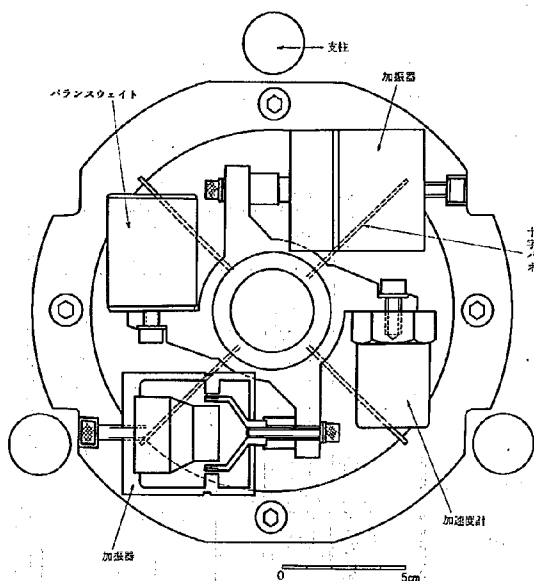


表 2-1 加速度計の仕様

寸 法	直径 34 mm, 長さ 48 mm の円柱形
重 量	500 g
測 定 範 囲	0 ~ 200 G
タ イ プ	圧 電 型
出 力	500 mV/G
共 振 振 動 数	6 KHz
測 定 可 能 振 動 数	0.1 Hz ~ 5 KHz

法を採用している。供試体は直径 7 cm, 高さ 15 cm の中実円柱であり, 供試体の拘束圧として空気圧を作用させる。また軸圧は供試体上部より油圧によって独立に作用させることができる。拘束圧は最小目盛 20 g/cm² のブルドン管を用いて測定し, 軸圧はロードセル (最大 500 kg で測定可能) によって測定し, 電磁オシログラフに記録する。

図 2-2 に供試体に強制ねじり力を与える加振ヘッドの部分を示す。加振ヘッドは十字板ばねと 2 個の電磁式加振器より成っており, これによって交番偶力を発生させて供試体に繰返しねじり力を与えることがで

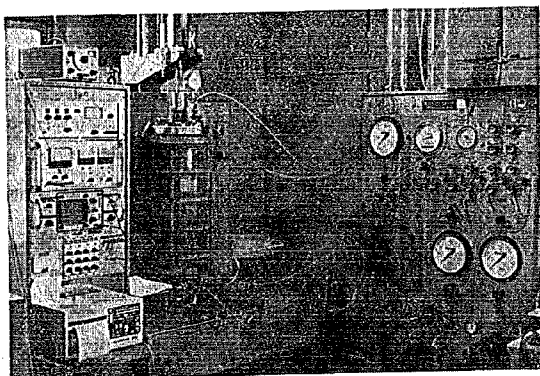


写真 2-1 共振おじり試験機

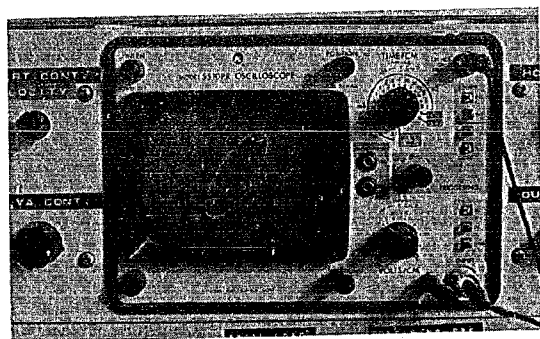


写真 2-2 電磁オシロスコープ
(共振状態ではない)

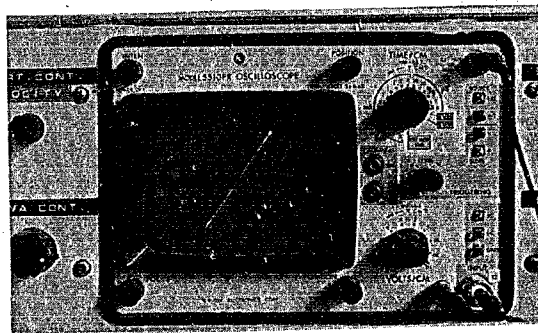


写真 2-3 電磁オシロスコープ
(共振状態になっている)

きる。そして加振器の電磁石に流れる電流を制御することにより、加振力を制御することができる。また加振ヘッドには表2-1に示す高感度の加速度計が取り付けられており、供試体の応答加速度を電磁オシログラフに記録する。

実際の実験においては共振時の加速度と振動数を測定するのであるが、共振状態は次のようにして見出す。写真2-2、2-3に見られるように電磁オシロスコープの縦軸にねじり加振力を、横軸に供試体上端の応答速度（実際は加振ヘッドで測定）を入れるとリサージュ図形を描く。共振時には加振力と供試体の応答変位の位相差が $\frac{\pi}{2}$ になるので加振力と応答速度の位相差は π （あるいは0）になる。従って共振時には写真2-3のようにリサージュ図形は直線となる。

実験中の供試体の軸方向変位は最小目盛0.01mmのダイヤルゲージで測定し、供試体の間隙水圧は間隙水圧計（測定範囲0～7 kg/cm²）により測定し、電磁オシログラフに記録する。

次に共振法による土のGおよびhの測定原理については文献1)(4)(5)に述べられているが、ここで簡単に触れておく。

(a) Gの測定法

共振法では供試体の上部に強制ねじり力を加えるので、供試体は一次元のせん断振動をするものと考えられる。

一次元せん断振動の基礎方程式は次式のように表わされる。

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial x} \quad (2-1)$$

ただし ρ : 密度, $\bar{u}$: 複素表現したせん断変位

t : 時間, $\bar{\tau}$: 複素表現したせん断応力

x : 波動方向の座標

前節で述べたように、振動数を固定すれば土の応力歪関係は等価線型モデルの応力歪関係で置き換えることができる。今Voigtモデルのような線型粘弾性モデルを考えるとその応力歪関係は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= (G + iG') \bar{\gamma} \\ &= G \left(1 + i \frac{G'}{G} \right) \bar{\gamma} \\ &= G (1 + i\eta) \bar{\gamma} \end{aligned} \quad (2-2)$$

ただし G : 損失率 (Loss Modulus)

$i = \sqrt{-1}$, $\bar{\gamma}$: 複素表現されたせん断歪

$\eta = G'/G$

またせん断歪は

$$\bar{\gamma} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (2-3)$$

と表わされる。式(2-2)、(2-3)を式(2-1)に代入すると、

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = G(1+i\eta) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \quad (2-4)$$

となる。式(2-4)が等価線型モデルの1次元せん断振動の基礎方程式である。

次に図2-3に示すように供試体の半径方向の座標を r とすると、せん断変位 $\bar{u}$ は

$$\bar{u}(x, r, t) = r \cdot \bar{\theta}(x, t) \quad (2-5)$$

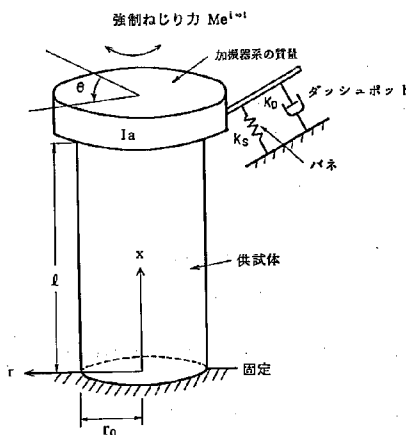


図2-3 供試体・加振器系のモデル

と表わされる。ただし $\bar{\theta}$ は複素表現された供試体の回転角である。式(2-5)を式(2-4)に代入すると、

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial t^2} = G(1+i\eta) \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} \quad (2-6)$$

となる。式(2-6)が供試体の基本運動方程式であり、この方程式を次に示す境界条件の下で解けば G を決定することができる。

(境界条件)

$$1) \text{ 下端 } (x=0) \text{ で } \bar{\theta} = 0 \quad (2-7)$$

$$2) \text{ 上端 } (x=l) \text{ で } \bar{T} = \bar{R} \quad (2-8)$$

ただし l は供試体の高さ、 $\bar{T}$ は供試体上端に加えられるねじり力であり、次式で表わされる。

$$\bar{T} = -I_a \frac{\partial^2 \bar{\theta}_l}{\partial t^2} + K_D \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial t} - K_S \bar{\theta}_l + M e^{i\omega t} \quad (2-9)$$

I_a : 供試体上部に取りつけた加振器系の質量慣性モーメント

K_D : 図2-3に示す装置自体の減衰定数

K_S : 図2-3に示す装置自体のバネ定数

$M e^{i\omega t}$: 強制ねじり力

$\bar{\theta}_l$: $x = l$ における $\bar{\theta}$

また $\bar{R}$ は供試体の抵抗力であり、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \int_0^{r_0} \bar{T} \Big|_{x=l} \cdot 2\pi r dr \\ &= \int_0^{r_0} G(1+i\eta) \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial x} \cdot 2\pi r^2 dr \\ &= J \cdot G(1+i\eta) \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial x} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$J = \int_0^{r_0} 2\pi r^2 dr$: 供試体の断面2次モーメント

従って式(2-9)、(2-10)を式(2-8)に代入すると、 $x = l$ における境界条件は次式ようになる。

$$-I_a \frac{\partial^2 \bar{\theta}_l}{\partial t^2} + K_D \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial t} - K_S \bar{\theta}_l + M e^{i\omega t} = JG(1+i\eta) \frac{\partial \bar{\theta}_l}{\partial x} \quad (2-11)$$

境界条件(2-7)、(2-11)の下で式(2-4)を解けば G を求めることができる。 G は測定された共振振動数、供試体長さ、断面2次モーメント、供試体密度等の関数となるが複雑な形となるので電子計算機を用いて繰り返し計算により求める。

(b) h の測定法

共振状態にある供試体に対して突然強制加振力を除去し、自由振動をさせて供試体の減衰定数を決定する。自由振動記録より、次式で定義される対数減衰率 δ_S を求める。

$$\delta_S = \ell_n \frac{a_n}{a_{n+1}} \quad (2-12)$$

ただし a_n, a_{n+1} : 自由振動記録の $n, n+1$ 番目の振幅

実際に δ_S を求める際には振幅が時間と共に指数関数的に減少すると仮定して5~10周期分のデータを用いて平均的な δ_S を計算する。

ここで注意しなければならないのは δ_S は供試体と加振器等の装置を合わせた系全体の対数減衰率であり、供試体だけの対数減衰率 δ を求めるためには、装置自体の対数減衰率 δ_A を補正しなければならない。

B.O.Hardin^(a)によると、 δ 、 δ_s 、 δ_A の間には次式のような関係がある。

$$\delta = \delta_s (1 + S) - \delta_A S \quad (2-13)$$

ただし $S = \frac{32K_s l}{\pi C_m G d^4} \quad (2-14)$

ここに C_m ：モードファクター（文献(6)の図6参照）

d ：供試体の直径

前節で述べたように共振時には土の応力歪関係は等価線型モデルで置き換えることができ、供試体の履歴減衰を表わす損失係数 η 、等価線型モデルの粘性減衰を表わす等価粘性減衰比 h および式(2-13)の δ の間には次のような関係が成り立つ。

$$\frac{1}{2} \eta = h \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (2-15)$$

以下においてはデータは全て等価粘性減衰比 h の形でまとめることにする。

3. 実験試料

実験試料は岡山県倉敷市の国道予定地においてボーリングにより得られた不攪乱冲積粘土である。ボーリングはAとBの2本実施したが(径86mm)、図3-1にその土質柱状図を示す。地下水位は図3-1に示すように地表より1.1mの深さにあり、採取した粘土は全て飽和粘土であると考えられる。

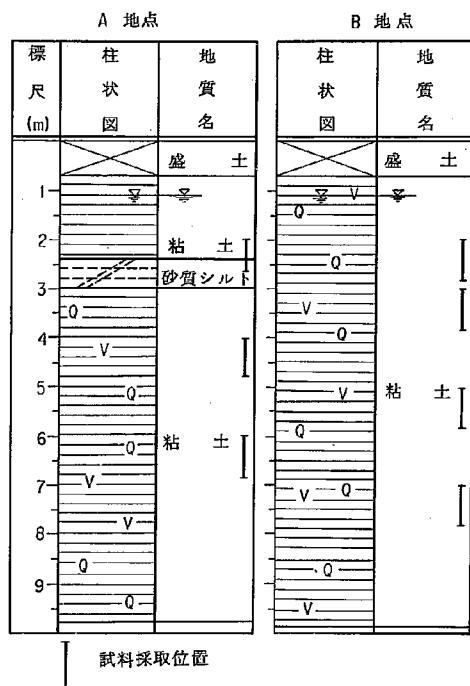


図3-1 土質柱状図(岡山)

実験に用いた試料はAのボーリングより3本、Bのボーリングより4本の計7本であり、それらの土質諸定数を表3-1に示す。試料の飽和度は100%に近く、塑性指数 I_p はA-1の試料だけが特に小さいが、残りは30~50程度の値となっている。また試料の自然含水比は液性限界に近い値を示しており、かなり軟い粘土であることがわかる。

表3-1(a) 土質諸定数

試料記号	土質	深さ (m)	有効土かぶり 圧 (kg/cm^2)	単位体積 重量 (g/cm^3)	比重 G_s	含水比 W (%)	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	塑性指数 I_P	間隙比 e	飽和度 S_r (%)
A-1	粘土質 ローム	2.11	0.276	1.78	2.71	37.53	37.5	200	17.5	1.09	93.1
A-2	シルト質 ローム	4.37	0.419	1.62	2.68	61.10	65.8	227	43.1	1.66	98.4
A-3	粘土	6.34	0.536	1.59	2.69	65.23	69.3	260	43.3	1.79	98.7
B-1	シルト質 粘土ローム	2.25	0.278	1.73	2.68	47.04	56.9	230	33.9	1.29	98.1
B-2	粘土	3.38	0.354	1.60	2.69	64.27	77.0	246	52.4	1.77	97.8
B-3	粘土	5.38	0.472	1.58	2.68	73.63	72.2	247	47.5	1.95	100.0
B-4	シルト質 粘土	7.42	0.592	1.60	2.69	67.31	74.7	226	52.1	1.82	99.6

表3-1(b) 粒度分布

	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	B-4
砂分(%)	40.5	7.5	6.0	7.5	5.5	6.5	7.5
シルト分(%)	38.5	56.5	52.0	65.5	54.0	54.0	58.5
粘土分(%)	21.0	42.0	42.0	27.0	40.5	39.0	34.0

4. 実験方法

4.1 供試体の準備

シンウォールチューブ（外径78mm，内径75mm，長さ1m）によって採取された不攪乱粘土試料を押出器を用いて取り出し，写真4-1に示すようにワイヤーソーを用いて直径70mm，高さ150mmの円柱形に成形する。成形された試料は写真4-2～10の手順で三軸室内にセットする。なお上部・下部ベダスタルには写真4-2に見られるように6枚のリン青銅の刃（高さ1.5mm）の付いたポーラスストーンがつけ

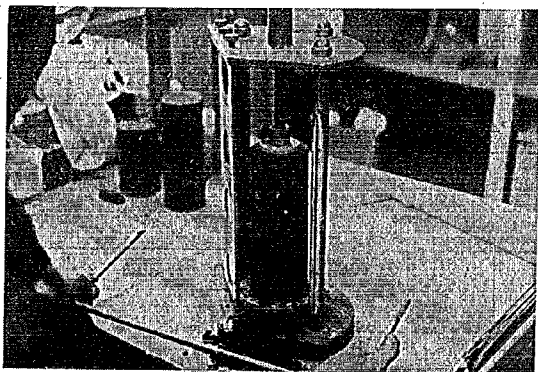


写真4-1 ワイヤーソーを用いて試料を成形する。

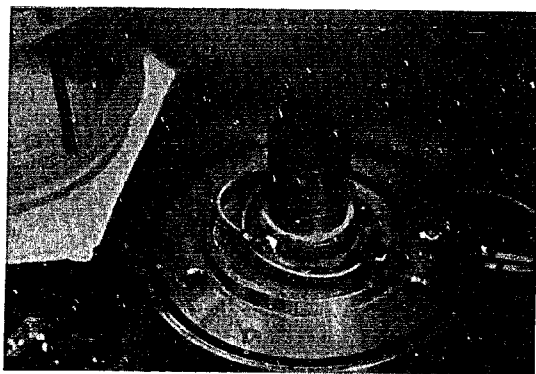


写真4-2 下部ベダスタル（6枚の刃が付いている）のポーラスストーンを飽和させる。

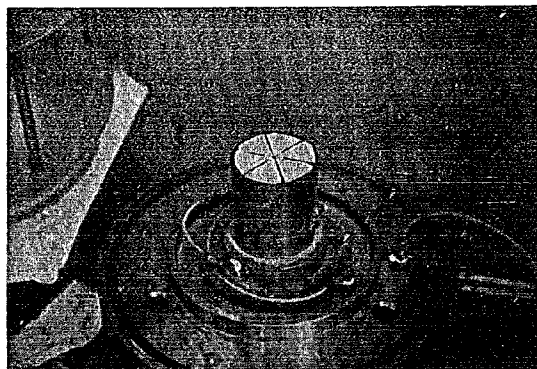


写真4-3 下部ペダスタルの上にも紙を敷く。

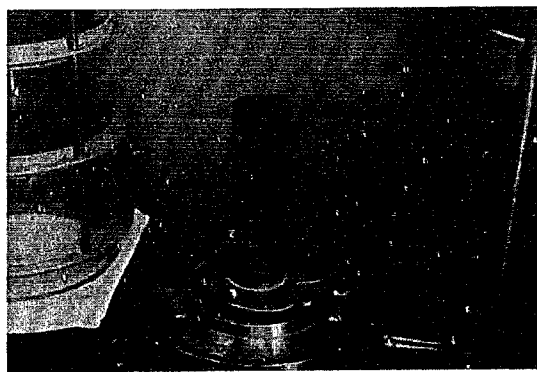


写真4-4 供試体を下部ペダスタルの上に設置する。



写真4-5 供試体にメンブレンをかぶせる。



写真4-6 Oリングで固定する。なお金具についている
Oリングは上部固定用のものである。

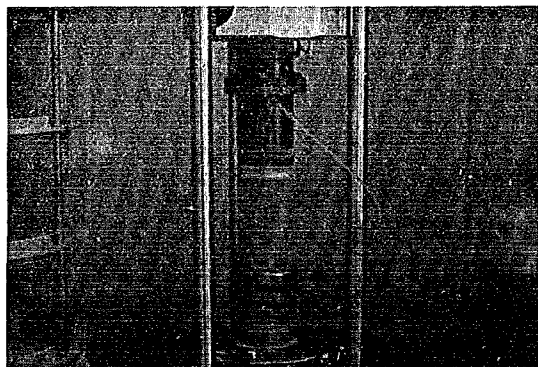


写真4-7 ロッドを立て、加振器、上部ペダスタルを静かにおろす。

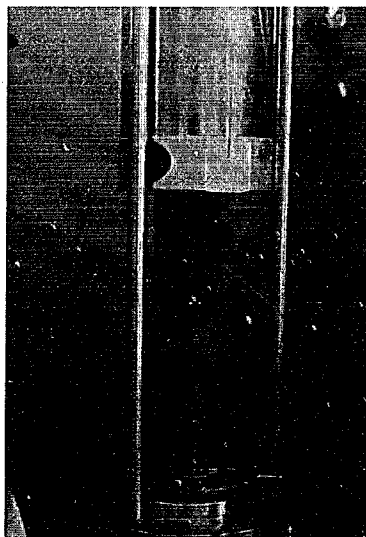


写真4-8 供試体と上部ペダスタルを固定する。

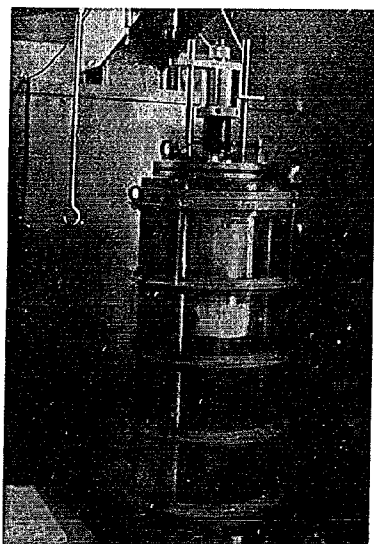


写真4-9 セルをかぶせる。

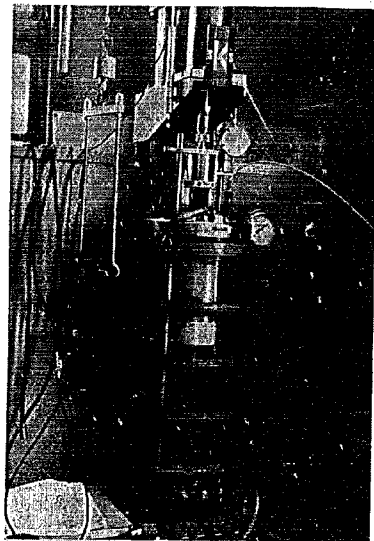


写真4-10 軸を上部のシリンダーに固定する。

られており、供試体とペDESTALの固定を良くしている。

4.2 圧密過程

供試体を三軸室内にセットした後、試料を採取した現場の応力状態と同じ平均主応力を持つ等方圧を空気圧により供試体に作用させて24時間圧密を行なった。即ち試料が現場で軸応力 σ_1 、横応力 $K_0\sigma_1$ を受けていたとすると、三軸室内では

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + 2K_0\sigma_1}{3} \quad (4-1)$$

なる圧力を等方に作用させた。ここに K_0 は静止土圧係数であり、この値を知ることが必要であるが、一般に沖積粘土では0.5程度の値が妥当であると言われているので、今回の実験では $K_0 = 0.5$ とした。

今回用いた試料の圧密係数および90%圧密に要する時間が表4-1に示されているが、後者の値は最も長いもので約16時間であるので、24時間圧密を行なえば1次圧密は十分終了していると考えられる。

表4-1 圧密係数および90%圧密に要する時間

ボーリング 番号	深さ (m)	圧密圧力 (kg/cm ²)	圧密係数 C_v (cm ² /日)	90%圧密に要する時間 (時間)
A	2.0~2.7	0.2~0.4	819	1.8
	4.0~4.8	0.4~0.8	140	10.3
	6.0~6.85	0.4~0.8	164	8.8
B	3.0~3.85	0.2~0.4	175	8.3
	5.0~5.85	0.4~0.8	903	16.0
	7.0~7.85	0.4~0.8	136	10.6

注1) 圧密圧力は有効土かぶり圧に対応する圧力をとっている。

注2) 90%圧密に要する時間は $t = \frac{H^2}{T_v C_v}$ より求めた。ただし、 H ：供試体の高さの半分、

T_v ：圧密時間係数(90%に対して0.933とした)

試料を圧密した後、せん断歪 γ が $5 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ の範囲において歪の小さい方から順に G および h を測定した。なおせん断歪の代表値としては供試体の半径の中心より $\frac{2}{3}$ の点の値を用いている。

一般的に粘土の動的せん断弾性係数 G の値は加振回数増加と共に減少する傾向があるが、せん断歪が 10^{-4} より小さい範囲においてはほとんど影響がないものと考えられる。⁽⁷⁾ 今回の実験における共振振動数は50~60Hzであり、約20秒間加振したので加振回数は約1000回である。

5. キャリブレーション

5.1 ロードセル

供試体の代りにブルービングリングを三軸室内にセットし、ロードセルのキャリブレーションを行なった。図5-1に測定結果を示す。5回測定を行なった結果、平均値として $58.6 \times 10^{-6} \text{ kg}$ を得た。

5.2 装置のバネ定数 K_S 、減衰定数 K_D および質量慣性モーメント I_A

K_S および K_D を測定するために、図5-2に示すように試験装置だけの状態および付加質量を付けた状態で共振振動数を測定した。付加質量としては直径10cm、高さ2.2cmの円柱形のしんちゅう板を用いた。付加質量のない時の共振振動数を f_a 、付加質量のある時の共振振動数を f_t とすると、 f_a 、 f_t は次のように表わされる。

$$2\pi f_t \approx \sqrt{\frac{K_S}{I_A + I_A}} \quad (5-1)$$

$$2\pi f_a \approx \sqrt{\frac{K_S}{I_A}} \quad (5-2)$$

ただし K_S : 装置(加振器系)のバネ定数

I_A : 装置(加振器系)の質量慣性モーメント

I_A : 付加質量の質量慣性モーメント

計算により $I_A = 18.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}^2$ であつた。式(5-1)、(5-2)より

$$K_S = \frac{I_A (2\pi f_t)^2}{1 - \left(\frac{f_t}{f_a}\right)^2} \quad (5-3)$$

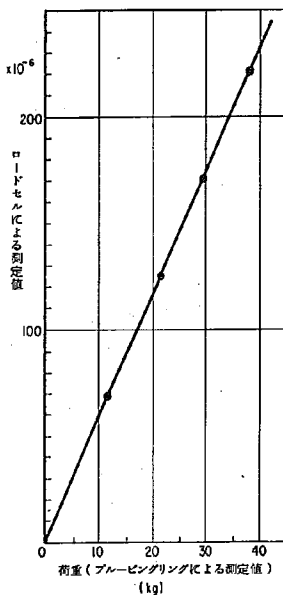
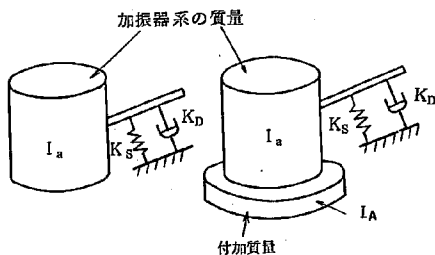


図5-1 ロードセルのキャリブレーション



(a) 試験装置だけの場合 (b) 付加質量を付けた場合

図5-2 加振器系のバネ定数 K_S および質量慣性モーメント I_A のキャリブレーション

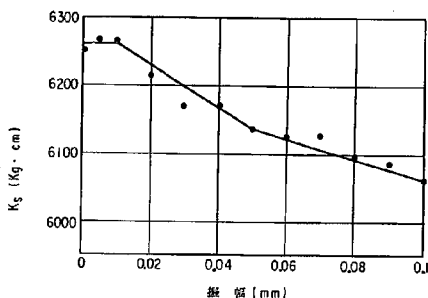


図 5-3 K_s の実測値と近似直線

となる。図 5-3 に実測の f_a , f_t を用いて式 (5-3) より求めた K_s を示す。 K_s はねじり振動の振幅によって若干変化しており、加速度計が設置されている位置 (中心より 5 cm) のねじり振幅を u として K_s を次のように近似した。

$$\left. \begin{aligned} u < 0.01 \text{ mm のとき} & K_s = 6262 \text{ (kg·cm)} \\ 0.01 \text{ mm} \leq u < 0.05 \text{ mm のとき} & K_s = -3125u + 6293 \\ 0.05 \text{ mm} \leq u \text{ のとき} & K_s = -1520u + 6213 \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

また式 (5-2), (5-3) より I_A は

$$I_A = \frac{f_t^2}{f_a^2 - f_t^2} I_A \quad (5-5)$$

となる。実測の f_a , f_t より I_A を求めると I_A はねじり振幅に関係なくほぼ一定値となり、 $I_A = 537 \text{ g·cm}^2 \text{ sec}^2$ であった。

次に装置の減衰定数 K_D は

$$K_D = \frac{\delta_A}{\pi} \sqrt{I_A \cdot K_s} \quad (5-6)$$

で表わされる。ただし δ_A は装置だけの対数減衰率。 δ_A の実測値はねじり振幅にあまり関係なく、ほぼ 0.011 であった。式 (5-6) 中の K_s は振幅によって変化するので、 K_D も振幅に依存するが、 K_D の変化は G の計算を行なう際にあまり影響をもたないことがわかっているので、⁽⁹⁾ K_s の代表値として微小振幅における値 $K_s = 6262 \text{ kg·cm}$ とする。そうすると式 (5-6) より

$$\begin{aligned} K_D &= \frac{0.011}{\pi} \times \sqrt{0.0537 \times 6262} \\ &= 0.0642 \text{ (kg·cm·sec)} \end{aligned}$$

となる。

6. 実験結果および考察

6.1 Gと γ の関係

表6-1～6-14に測定結果を、図6-1に動的せん断弾性係数Gとせん断歪 γ の関係についての実験結果を示す。A-1, A-2, B-1についてはせん断歪の増大と共にGの値が減少する傾向が見られるが、

表6-1 供試体の重量・寸法

試 料 名		A - 1			
実 験 年 月 日		1977 年 6 月 3 日			
供試体の重量		974.3g			
供試体の寸法	外 径 [mm]	7.100	7.050	7.040	平均 7.010
		6.860	7.070	6.960	
	高 さ [mm]	14.160	14.160	平均 14.160	
		14.160	14.160		
供試体の体積		547.0 cm ³			

表6-2 測定結果 (A-1)

番号	側圧, 軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸 歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数G (kg/cm ²)	No 1のGを1と した時の比 率
1	0.184	0.183	0.13	57.50	0.0060	148×10 ⁻⁶	70.2	1.000
2	0.184	0.186	0.13	57.48	0.0110	272×10 ⁻⁶	69.9	0.995
3	0.184	0.186	0.13	57.42	0.0310	769×10 ⁻⁶	68.9	0.981
4	0.184	0.187	0.13	57.34	0.0595	148×10 ⁻⁵	67.6	0.962
5	0.184	0.187	0.13	57.14	0.124	311×10 ⁻⁵	64.2	0.914
6	0.184	0.188	0.13	56.53	0.325	832×10 ⁻⁵	57.3	0.816
7	0.184	0.188	0.13	56.10	0.620	161×10 ⁻⁴	55.1	0.785

表6-3 供試体の重量・寸法

試 料 名		A - 2			
実験年月日		1977年6月6日			
供試体の重量		924.4 g			
供試体の寸法	外径(cm)	6.960	6.930	6.955	平均 6.946
		6.985	6.930	6.915	
	高さ(cm)	15.050	15.050	平均 15.050	
		15.050	15.050		
供試体の体積		570.3 cm ³			

表6-4 測定結果 (A-2)

番号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸重 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数G (kg/cm ²)	N1のGを1と した時の比率
1	0.279	2023	1.34	57.68	0.00290	66×10^{-7}	83.2	1.000
2	0.279	2011	1.34	57.68	0.00565	128×10^{-6}	83.2	1.000
3	0.279	2008	1.33	57.68	0.0112	255×10^{-6}	83.2	1.000
4	0.279	2004	1.33	57.68	0.0320	730×10^{-6}	83.2	1.000
5	0.279	1999	1.33	57.67	0.0640	146×10^{-5}	83.0	0.997
6	0.279	1997	1.33	57.54	0.126	289×10^{-5}	80.5	0.967
7	0.279	1990	1.32	57.20	0.382	886×10^{-5}	78.4	0.942
8	0.279	1979	1.31	56.82	0.657	154×10^{-4}	76.2	0.915

表 6-5 供試体の重量・寸法

試料名		A - 3			
実験年月日		1977年6月7日			
供試体の重量		895.5 g			
供試体の寸法	外径(mm)	6.960	6.900	6.960	平均 6.950
		6.950	6.960	6.940	
	高さ(mm)	14.880	14.800	平均 14.830	
		14.820	14.800		
供試体の体積		561.8 cm ³			

表 6-6 測定結果 (A-3)

番号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸 歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪 80×10^{-7}	せん断弾 性係数G (kg/cm ²)	No 1 の G を 1 と した時の比率
1	0.357	0.452	0.30	57.15	0.00335	80×10^{-7}	67.6	1.000
2	0.357	0.452	0.30	57.15	0.00582	1.39×10^{-6}	67.6	1.000
3	0.357	0.452	0.30	57.15	0.0118	2.83×10^{-6}	67.6	1.000
4	0.357	0.452	0.30	57.15	0.0302	7.24×10^{-6}	67.6	1.000
5	0.357	0.452	0.30	57.15	0.0610	1.46×10^{-5}	67.6	1.000
6	0.357	0.452	0.30	57.13	0.120	2.88×10^{-5}	67.3	0.985
7	0.357	0.452	0.30	57.00	0.345	8.31×10^{-5}	68.5	1.014
8	0.357	0.452	0.30	56.75	0.595	1.45×10^{-4}	68.4	1.012

表6-7 供試体の重量・寸法

試 料 名		B - 1			
実 験 年 月 日		1 9 7 7 年 6 月 9 日			
供試体の重量		9 7 9.3 g			
供試体の寸法	外 径 (mm)	6.945	6.900	6.885	平均 6.918
		6.975	6.905	6.900	
	高 さ (mm)	15.095	15.095	平均 15.095	
		15.095	15.095		
供試体の体積		5 6 7.4 cm ³			

表6-8 測定結果 (B-1)

番号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数G (kg/cm ²)	No.1のGを1と した時の比率
1	0.186	0.062	0.04	57.08	0.00337	7.9×10^{-7}	71.0	1.000
2	0.186	0.046	0.03	57.08	0.00580	1.36×10^{-6}	71.0	1.000
3	0.186	0.046	0.03	57.08	0.0121	2.85×10^{-6}	71.0	1.000
4	0.186	0.046	0.03	57.08	0.0315	7.41×10^{-6}	71.0	1.000
5	0.186	0.046	0.03	57.06	0.0630	1.48×10^{-5}	70.6	0.995
6	0.186	0.046	0.03	56.96	0.132	3.12×10^{-5}	68.7	0.968
7	0.186	0.046	0.03	56.67	0.305	7.28×10^{-5}	66.5	0.936
8	0.186	0.041	0.03	56.28	0.610	1.48×10^{-4}	64.9	0.913

表 6-9 供試体の重量・寸法

試 料 名		B - 2			
実 験 年 月 日		1977 年 6 月 10 日			
供試体の重量		911.5 g			
供 試 体 の 寸 法	外 径 (mm)	6.965	6.920	6.905	平均 6.930
		6.905	6.920	6.945	
	高 さ (mm)	15.145	15.145	平均 15.145	
		15.145	15.145		
供試体の体積		570.7 cm ³			

表 6-10 測 定 結 果 (B-2)

番 号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸 歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数 G (kg/cm ²)	No 1 の G を 1 と した時の比率
1	0.236	0.659	0.44	56.58	0.00295	69 × 10 ⁻⁷	61.3	1.000
2	0.236	0.657	0.43	56.58	0.00595	140 × 10 ⁻⁶	61.3	1.000
3	0.236	0.657	0.43	56.58	0.0116	276 × 10 ⁻⁶	61.3	1.000
4	0.236	0.657	0.43	56.57	0.0315	749 × 10 ⁻⁶	61.1	0.997
5	0.236	0.657	0.43	56.57	0.0622	148 × 10 ⁻⁵	61.1	0.997
6	0.236	0.657	0.43	56.48	0.128	305 × 10 ⁻⁵	59.5	0.970
7	0.236	0.657	0.43	56.27	0.376	903 × 10 ⁻⁵	60.1	0.980
8	0.236	0.657	0.43	56.07	0.602	146 × 10 ⁻⁴	60.6	0.988

表6-11 供試体の重量・寸法

試 料 名		B - 3			
実験年月日		1977年6月13日			
供試体の重量		904.4 g			
供試体の寸法	外径(mm)	6.980	6.930	6.880	平均 6.948
		7.000	7.000	6.900	
	高さ(mm)	15.130	15.140	平均 15.130	
		15.120	15.130		
供試体の体積		573.7 cm ³			

表6-12 測定結果 (B-3)

番号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数G (kg/cm ²)	No.1のGを1と した時の比率
1	0.315	0.327	0.22	56.95	0.00240	5.7×10^{-7}	65.5	1.000
2	0.315	0.330	0.22	56.96	0.00540	1.28×10^{-6}	65.7	1.003
3	0.315	0.330	0.22	56.95	0.0134	3.17×10^{-6}	65.5	1.000
4	0.315	0.331	0.22	56.95	0.0304	7.18×10^{-6}	65.5	1.000
5	0.315	0.332	0.22	56.94	0.0635	1.50×10^{-5}	65.3	0.997
6	0.315	0.332	0.22	56.92	0.121	2.86×10^{-5}	65.0	0.992
7	0.315	0.332	0.22	56.74	0.370	8.81×10^{-5}	65.9	1.005
8	0.315	0.333	0.22	56.54	0.690	1.65×10^{-4}	67.4	1.029

表6-13 供試体の重量・寸法

試 料 名		B - 4			
実験年月日		1977年6月15日			
供試体の重量		910.1 g			
供 試 体 の 寸 法	外 径 (mm)	6.910	6.900	6.930	平均 6.915
		6.950	6.890	6.910	
	高 さ (mm)	15.180	15.170	平均 15.173	
		15.170	15.170		
供試体の体積		569.8 cm ³			

表6-14 測定結果 (B-4)

番号	側圧・軸圧 (kg/cm ²)	軸方向変位 (mm)	軸歪 (%)	共振振動数 (Hz)	共振時の 加速度(G)	せん断歪	せん断弾 性係数 G (kg/cm ²)	No 1 の G を 1 と した時の比率
1	0.395	0.610	0.40	57.28	0.00230	54×10^{-7}	73.5	1.000
2	0.395	0.618	0.41	57.28	0.00560	1.31×10^{-6}	73.5	1.000
3	0.395	0.619	0.41	57.28	0.0117	2.73×10^{-6}	73.5	1.000
4	0.395	0.620	0.41	57.27	0.0315	7.35×10^{-6}	73.3	0.997
5	0.395	0.621	0.41	57.27	0.0620	1.45×10^{-5}	73.3	0.997
6	0.395	0.622	0.41	57.26	0.121	2.83×10^{-5}	73.1	0.995
7	0.395	0.623	0.41	57.07	0.350	8.23×10^{-5}	73.4	0.999
8	0.395	0.625	0.41	56.86	0.640	1.51×10^{-4}	74.6	1.015

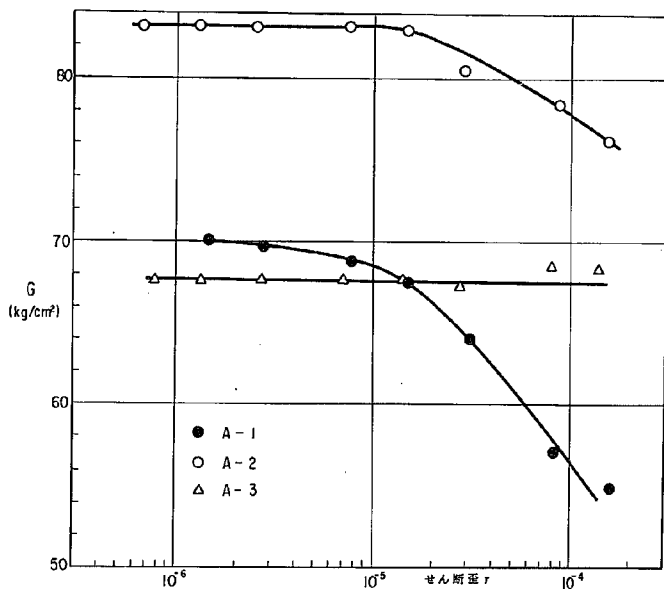


図 6-1(a) G と r の関係 (A地点)

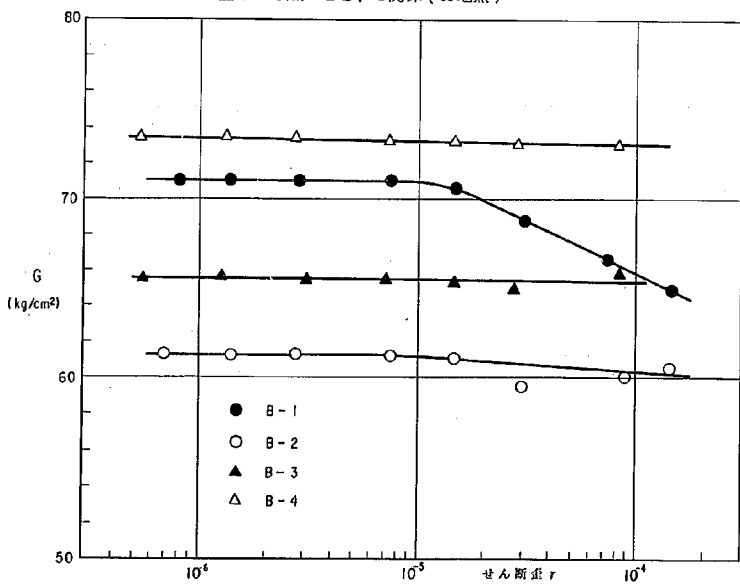


図 6-1(b) G と r の関係 (B地点)

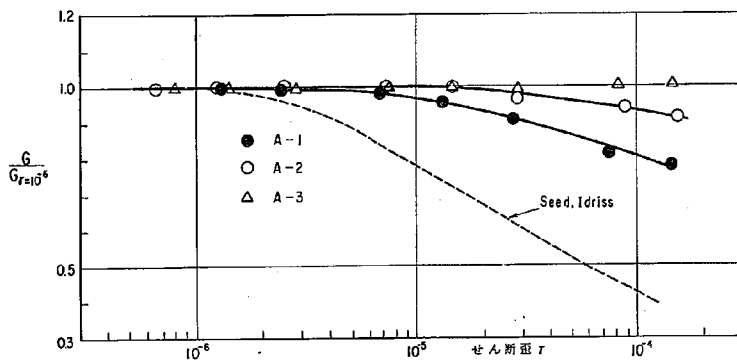


図 6-2(a) $\frac{G}{G_{r=10^{-6}}}$ と r の関係 (A地点)

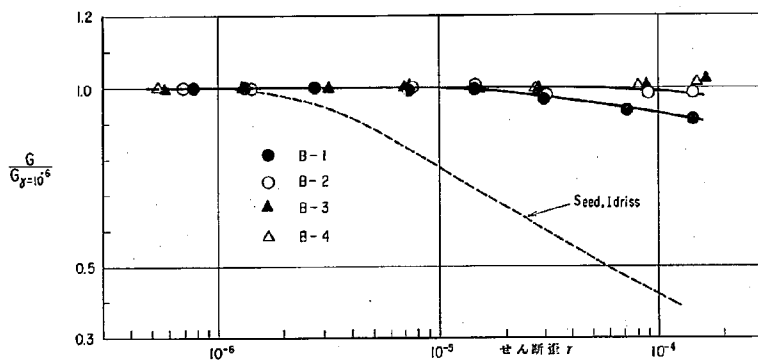


図 6-2(b) $\frac{G}{G_{r=10^{-6}}}$ と r の関係 (B地点)

その他の試料では r が 10^{-4} より小さい範囲において G はほとんど歪に依存していない。このことをもう少しわかり易く示すために $r = 10^{-6}$ における G を1とした場合の G と r の関係を示したのが図6-2である。図6-2において試料採取深さが浅いもの程、 r の増大による G の減少率が大いという傾向が見られる。この原因の1つとして浅い所の試料は拘束圧が小さいということが考えられる。龍岡等⁽⁷⁾は砂について拘束圧が小さい程 G の減少率が大いという結果を得ており、このような傾向が粘土についてもあてはまるのではないと思われる。

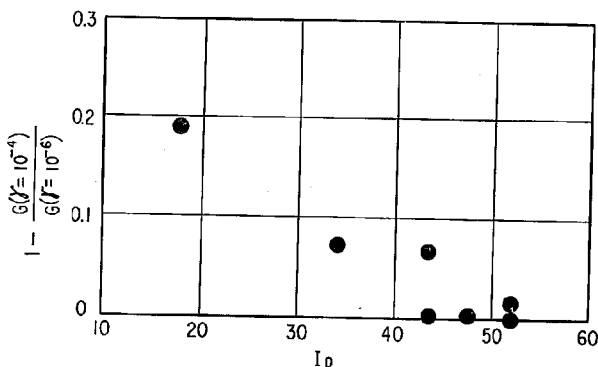


図6-3 G の r に対する減少率と塑性指数 I_p の関係

図6-3は各試料の塑性指数 I_p とせん断歪に対する G の減少率

$$1 - \frac{G_{r=10^{-4}}}{G_{r=10^{-6}}} \quad (6-1)$$

の関係を表わしている。これによると I_p が大きくなる程 G の減少率が小さくなっている。即ち粘土分含有量が多いもの程 G の減少率が小さいということになる。

次に G と r の関係についてのHardin, Drnevich⁽⁸⁾の提案式およびSeed, Idriss⁽⁹⁾の提案曲線と今回の結果を比較する。Hardin, Drnevichは土のヒステリシス・ループに関する考察より次のような式を提案した。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + r_h} \quad (6-2)$$

ただし

$$r_h = \frac{r}{r_r} [1 + a \cdot \exp(-b \frac{r}{r_r})] \quad (6-3)$$

$$r_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} = \frac{\frac{1}{2} S_u}{G_{\max}} \quad (6-4)$$

ここに a , b は定数であり、飽和粘土に対しては

$$\left. \begin{aligned} a &= 1 + 0.25 \log N \\ b &= 1.3 \end{aligned} \right\} \quad (6-5)$$

で与えられる。 N は繰返し载荷回数である。また S_u は一軸圧縮強度、 $\tau_{\max}$ は最大せん断強度、 $G_{\max}$ は最大せん断弾性係数であり、次式で与えられる。

$$G_{\max} (\text{kg/cm}^2) = 326 \frac{(297 - e)^2}{1 + e} (\text{OCR})^k \bar{\sigma}_0^{\frac{1}{2}} \quad (6-6)$$

ここに e : 間隙比 OCR : 過圧密比 K : 定数 $\bar{\sigma}_0$: 平均主応力 (kg/cm^2)

図 6-4 は実験値と Hardin, Drnevich の式、Seed, Idriss の曲線を比較したものである。実験値の $G_{\max}$ としては r が最小の時の値をとっている。また今回の粘土は圧密試験の結果より正規圧密粘土であると考えられるので OCR = 1 としている。実験値はいずれも 2 つの提案曲線よりも G の減少率が小さ

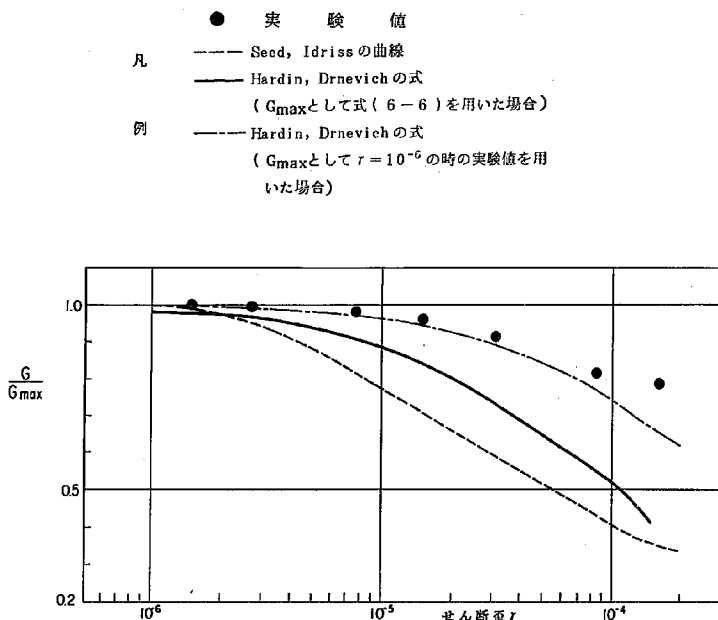


図 6-4 (a) A - 1

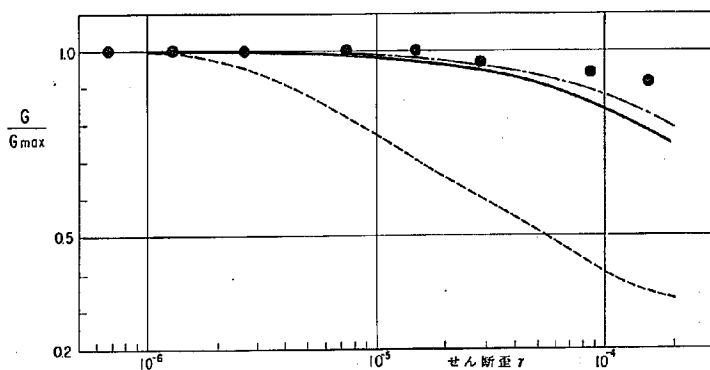


図 6-4(b) A-2

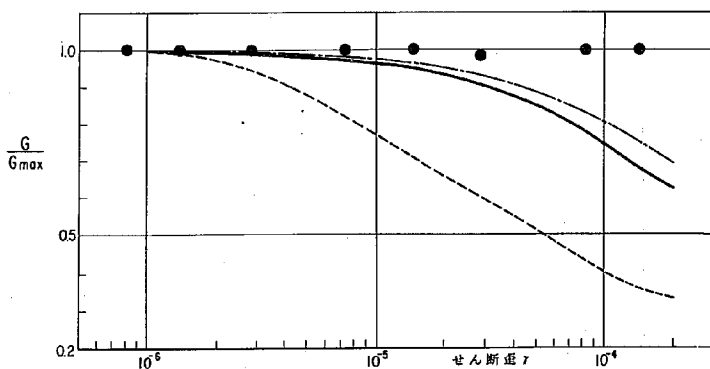


図 6-4(c) A-3

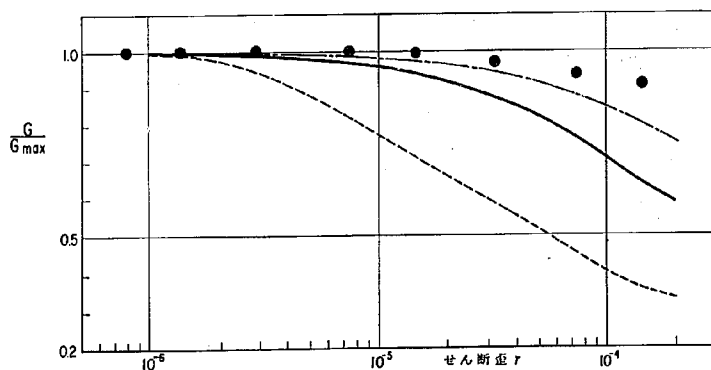


図 6-4(d) B-1

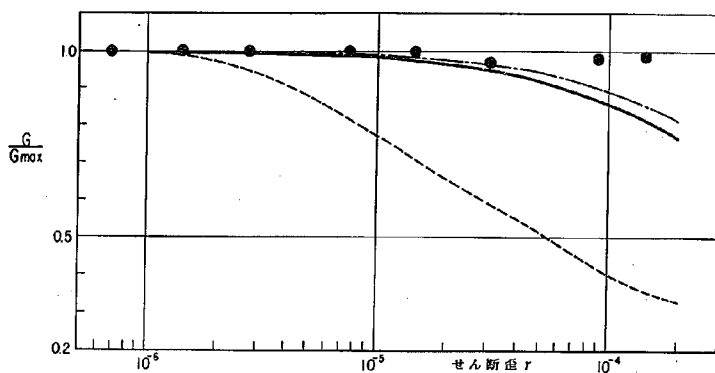


図 6-4(e) B-2

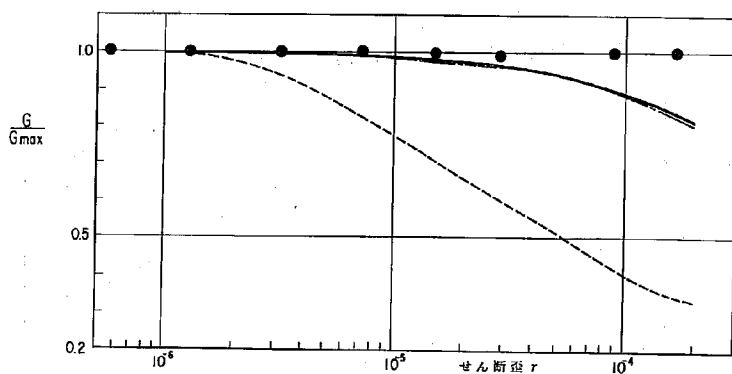


図 6-4(f) B-3

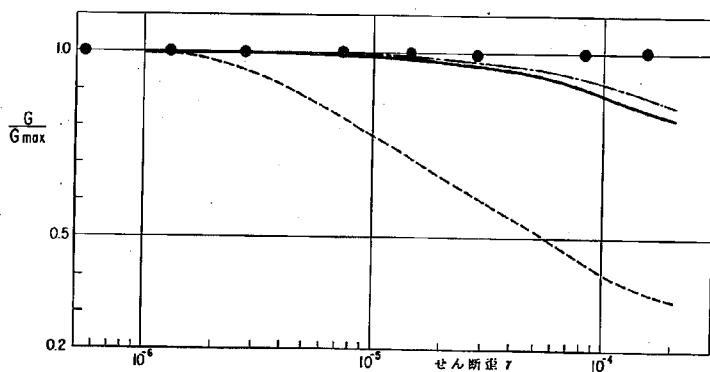


図 6-4(g) B-4

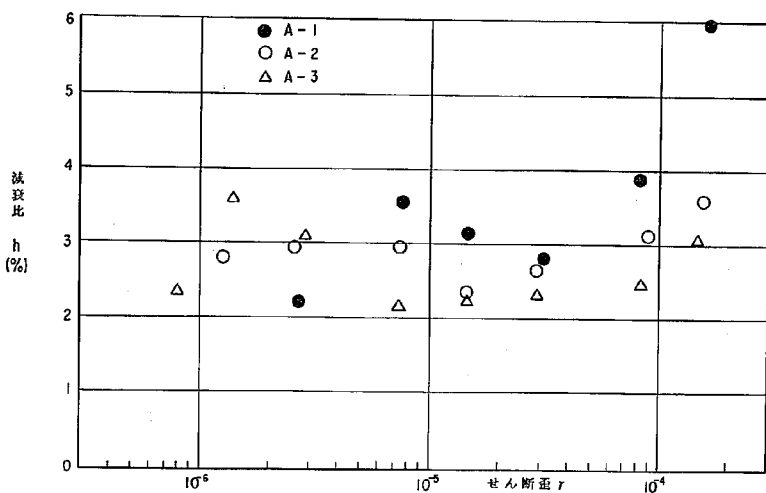


図 6-5(a) h と r の関係 (A 地点)

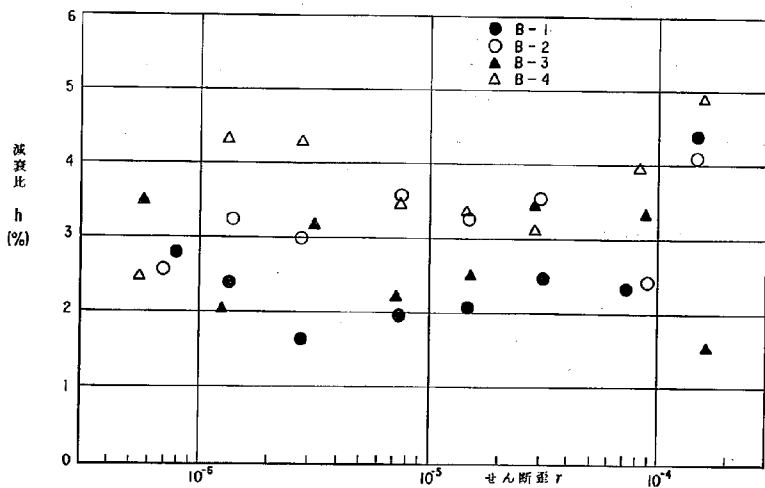


図 6-5(b) h と r の関係 (B 地点)

くなっている。Seed, Idriss の曲線は個々の土の性質を考慮せずに、飽和粘土の平均的な G と γ の関係を表わしたものであるが、今回の実験結果から見る限りでは γ に対する G の減少率が大き過ぎるように思われる。また Hardin, Drnevich の式 (図 6-4 の実線) は Seed, Idriss の曲線よりは G の減少率が小さくなっているが、実験値よりは大きくなっている。このような差違の原因の 1 つとして式 (6-6) による $G_{\max}$ の推定値が実際の値より大きくなっていることが考えられる。表 6-15 は実験値において一応 $G_{\max}$ と考えられる $\gamma = 10^{-6}$ の時の G と、式 (6-6) による計算値を比較したものであるが、後者の値の方がかなり大きくなっているケースもある。それで $G_{\max}$ として $\gamma = 10^{-6}$ の時の G の値をとった時の式 (6-2) の関係が図 6-4 の一点鎖線で表わされている。このようにすると、Hardin, Drnevich の式の値はより実験値に近いものとなる。従って粘土について Hardin, Drnevich の式を用いる場合には $G_{\max}$ の値の精度について注意を要する。

表 6-15 式 (6-6) による $G_{\max}$ の計算値と実験値の比較

番 号	$\gamma = 10^{-6}$ における G の実験値 (kg/cm^2)	式 (6) による $G_{\max}$ の計算値 (kg/cm^2)
A-1	70.3	236.5
A-2	83.2	111.1
A-3	67.6	97.2
B-1	71.0	172.8
B-2	61.2	82.3
B-3	65.6	64.5
B-4	73.5	96.1

6.2 h と γ の関係

図 6-5 に試料の減衰比 h とせん断歪 γ の関係についての実験結果を示す。 h の値は γ が 10^{-6} から 10^{-4} の範囲内で多少の変動はあるがだいたい一定の値となっている。A-1, 2, 3 については h が 2~4 % の範囲内に入っており、B-1, 2, 3, 4 についても 2~5 % の範囲内に入っている。ただ γ が 10^{-4} 付近において h の値が γ の増大と共に若干増加する傾向が見られる。また各試料の h と γ の関係について明瞭な差を見出すことは困難である。

6.3 現場 PS 検層より求められた G と室内実験より求められた G の比較

粘土試料を採取したボーリング孔を利用して現場において PS 検層を実施し、地盤の P 波・S 波速度を測定した。測定方法はピックアップをボーリング孔内に固定し、地表面をかげやで叩くことによって P 波を発生させ、また板叩き法により S 波を発生させ、その波動をピックアップで測定した。測定は 50 cm の深さ毎に実施した。地盤の S 波速度が求まると、地盤を弾性体と仮定して (この仮定は PS 検層が行なわれるような微小歪の範囲ではほぼ成立する) 次式により G が計算される。

$$G = \rho V_s^2 \quad (6-7)$$

ここに ρ : 地盤の密度, V_s : S 波速度

図 6-6 は PS 検層より求められた G と、室内実験における $\gamma = 10^{-6}$ (PS 検層における歪レベルはほぼ 10^{-6} 程度であろうと推定される) における G を比較したものである。図 6-6 より室内実験で求められた G の値は PS 検層の結果に比べて 5~40 % 小さくなっている (表 6-16)。この差の原因とし

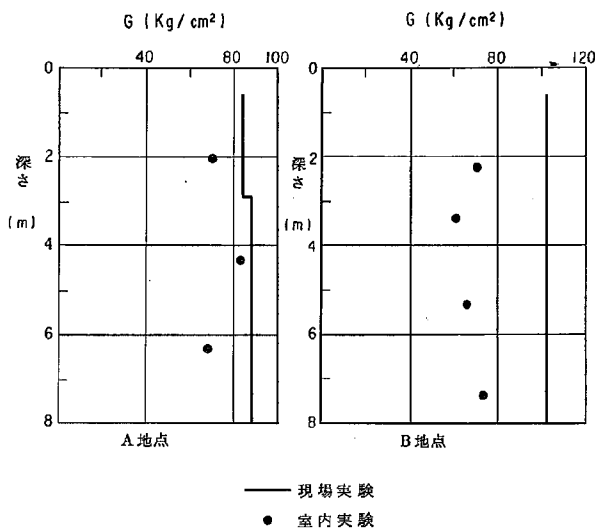


図 6-6 現場実験と室内実験の G の比較

表 6-16 現場実験と室内実験の G の比較

試料番号	室内実験より 求められた G (kg/cm²) ①	現場 P S 検層よ り求められた G (kg/cm²) ②	$\frac{②-①}{②}$ (%)
A-1	70.0	85	17.6
A-2	83.2	87.5	4.9
A-3	66.8	87.5	23.7
B-1	71.0	101	29.7
B-2	61.2	101	39.4
B-3	65.7	101	35.0
B-4	73.5	101	27.2

ていろいろのことが考えられるが、主要な原因は圧密時間、 K_0 のとり方および試料の乱れにあると思われる。従来より指摘されているように⁽⁴⁾粘土の G の値は圧密時間と共に单调増加する。筆者等⁽⁵⁾は沖積粘土について一次圧密終了後においても二次圧密によって G の値がかなり増加するという結果を得ている。現場地盤の G を推定するのにどのくらいの圧密時間をとればよいかということはむずかしい問題であり、K.H. Stokoe等⁽²⁾は室内実験において現場（埋立地）と同じ圧密度になる時の値を採用しており、D. G. Anderson等⁽⁶⁾は圧密時間が20年の時の G の値を室内実験から外挿するのがよいと言っているが、今のところ確立された方法はない。

K_0 は今回は0.5と仮定したが、実験精度を上げるためには K_0 のとり方について今後検討してゆかなければならない。

今回の現場実験と室内実験の結果は5～40%の差があったが、上に述べたような諸要因を考慮し、現場PS検層における誤差も考え合せると、今回の室内実験の精度はそれほど悪いものではないと考えられる。⁽³⁾ちなみにR.W. Cunney等⁽⁷⁾は粘土についての共振法による室内実験と現場実験の差が+50%～-50%あったという報告をしている。

7. 結 論

今回の実験で得られた結論を以下に記す。

- ① 沖積粘土のGの値はせん断歪 γ の増大と共に減少する傾向があるが、 γ が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲においては減少率はあまり大きくない。
- ② せん断歪の増大によるGの減少率は試料採取深さの浅いもの程大きいという結果を得たが、今回の実験だけでは拘束圧の影響なのか、塑性指数の影響なのかまた他の因子が関係しているのか結論付けることは困難である。
- ③ Seed, Idriss の提案曲線はGの γ に対する減少率を過大に見積っているようである。Hardin, Drnevich の提案式もGの減少率が若干過大であるが、 G_{max} として実測値を用いるとGの減少率が実験値と一致する場合もある。
- ④ 減衰比hの値は γ が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ の範囲においてはだいたい一定の値であり、今回の沖積粘土では2～4%である。
- ⑤ 現場PS検層より測定されたGと、室内の共振ねじり試験より求められたGを比較すると、後者が5～40%小さい値となっていたが、圧密時間あるいは K_0 のとり方、試料の乱れ等を考えるとむを得ないものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 吉田精一 "地盤の動的変形特性に関する実験的研究I" 土木研究所報告第148号, 1977
- (2) B.O. Hardin, F.E. Richart, Jr., "Elastic Wave Velocities in Granular Soils," Proc. of ASCE, SM1, 1963
- (3) R. Dobry, "Damping in Soils: Its Hysteretic Nature and the Linear Approximation," Research Report R70-14, MIT, 1970
- (4) 土質工学会編, "土と構造物の動的相互作用," 土質基礎工学ライブラリー9, 1973
- (5) 栗林栄一, 岩崎敏男, 龍岡文夫, 堀内俊一, "土の動的変形特性 — 共振法土質試験機による測定" 土木研究所資料第912号, 1974
- (6) B.O. Hardin, "Suggested Methods of Test for Shear Modulus and Damping of Soils by the Resonant Column," ASTM STP 479, 1970
- (7) D.G. Anderson, F.E. Richart, Jr., "Effects of Straining on Shear Modulus of Clays," Proc. of ASCE, GT9, 1976
- (8) B.O. Hardin, V.P. Drnevich, "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves," Proc. of ASCE, SM7, 1972
- (9) H.B. Seed, I.M. Idriss, "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses," Report No. EERC 70-10, Univ. of California, 1970
- (10) D.G. Anderson, R.D. Woods, "Comparison of Field and Laboratory Shear Moduli," Proc. of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, 1975
- (11) 谷口栄一, 沢田健吉, 小笠原久, "共振法による不攪乱粘性土のせん断弾性係数の測定" 土木学会第31回年次学術講演会概要集3, 1976
- (12) K.H. Stokoe, K.G. Abdel-razzak, "Shear Moduli of Two Compacted Fills," Proc. of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, 1975
- (13) 沢田健吉, 谷口栄一, 小笠原久, 館山悟, "共振法による不攪乱粘性土のせん断弾性係数の測定" 第12回土質工学研究発表会, 1977
- (14) R.W. Cunney, Z.B. Fry, "Vibratory In Situ and Laboratory Soil Moduli Compared," Proc. of ASCE, SM12, 1973