

砂質土の動的せん断定数について

大原 資生*・周藤 宜二**

Experimental Study on Dynamic Shear Constants of Cohesionless Soils

Sukeo ŌHARA and Yoshiji SUDŌ

Abstract

It is important on a seismic design of foundation to study dynamic soil properties. In this study, shear modulus and hysteretic damping of dense dry sands were obtained using the dynamic simple shear test apparatus.

From these results, it is clear that shear modulus, hysteretic damping and volume change are dependent on the shear strain and the vertical stress. We considered that the hysteretic loops change to ellipse type from bilinear type with the increment of the shear strain, therefore "skeleton", which is the relation between the restoring force and the deformation, is varied with the shear strain.

1. 緒 言

土構造物、一般の建築物や基礎地盤が、地震力、車両荷重などの種々の動的外力を受けた場合、いかなる応答を示すかを調べることは、耐震工学上きわめて重要な問題であり、応答解析にあたり、土の動的特性を究明することは基本的事項であると考えられる。

一般に、土の動的性質を研究する場合、基礎となるものは、土の応力-ヒズミ特性より評価される変形係数、せん断変形であれば剛性率とエネルギー消散に起因する減衰定数を求めることである。

そこで、本研究では、砂質土の剛性率と減衰定数の特性を研究するために、動的単純せん断試験機を用いて実験を行なった結果について述べたものである。

2. 実験に用いた試料および実験条件

実験に用いた試料は、豊浦細砂、新宮粗砂、マサ土である。マサ土は、宇部市郊外で採取したもので、十分空気乾燥させた後、ときほぐし器具でくだいて2mmフルイを通過したものを使った。各試料の粒径加積曲線を Fig. 1 に、また、物理的性質を Table 1 に示す。

今回行なった実験は、すべて空気乾燥、密詰めで行なった。一般に、同一の砂では剛性率は間ゲキ比によって異なると報告されており、各鉛直圧で詰め方を変え、圧密後の試料高が同じになるようにする。各試料の間ゲキ比、各鉛直圧での圧密終了時間を Table 2 に示す。

なお、間ゲキ比のばらつきは、各試料で ± 0.01 以内とし、その範囲からはずれるものは除外する。

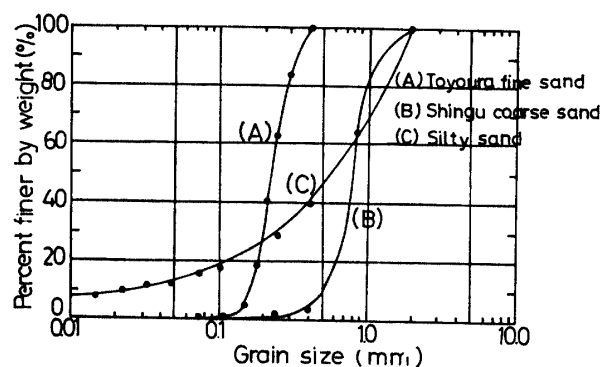


Fig. 1 Grain size distribution curves

* 山口大学土木工学科

** 琉球大学理工学部土木工学科

Table 1 Soil properties used in these tests

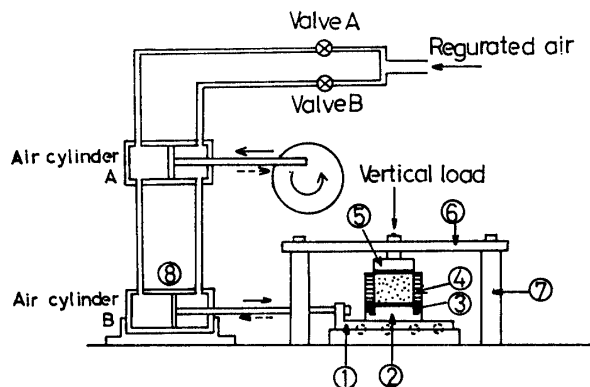
	Toyoura fine sand	Shingu coarse sand	Silty sand
Specific gravity, G_s	2.63	2.64	2.60
50% Grain size, D_{50} (mm)	0.225	0.83	0.58
Uniformity coefficient, C_u	1.48	1.34	25.7
Maximum void ratio, e_{max}	1.04	0.89	0.88
Minimum void ratio, e_{min}	0.67	0.57	0.50

Table 2 Test conditions

	Time of consolidation (min.)			Dry density, γ_d (g/cm^3)	Void ratio, e	Relative density, D_r (%)
	$\sigma_v=0.5$ (kg/cm^2)	$\sigma_v=1.0$ (kg/cm^2)	$\sigma_v=2.0$ (kg/cm^2)			
Toyoura fine sand	2	6	12	1.55	0.70	92
Shingu coarse sand	2	4	10	1.64	0.61	88
Silty sand	5	16	28	1.67	0.56	84

3. 実験装置および実験方法

今回の実験に用いられた試験機は、われわれの研究室で試作された応力制御型の動的単純せん断試験機であり、Fig. 2 に概略的機構を示す。せん断箱は Kjellmann 型であり、供試体は直径が 75mm、厚さが 20mm の円板状であり、せん断箱内に装着したゴムスリーブの中に収められる。その外側には厚さ 2mm、内径 75.6 mm、外径 96mm のアクリルリングが 12~14 枚積み重ねられた状態ではめられる。



- ① Horizontal carriage ⑤ Top cap
 ② Pedestal ⑥ Top plate to fix top cap
 ③ Ring holder ⑦ Columns to support top plate
 ④ Plastic ring ⑧ Double acting air cylinder

Fig. 2 Mechanism of dynamic simple shear test apparatus

上部加圧板は水平方向には固定された状態となっており、下部加圧板が試料台に固定され、この試料台に押し引きの力が加わるので、供試体にせん断力が加わることになる。この押し引きの力は、複働式エアシリンダーの左右の圧力室の圧力を交替的に高めることによって生ずる。

すなわち、Fig. 2 に示すように、最初に、A, B 2 個のエアシリンダーのピストンを中立位置におき、バルブ A, B を開いて所定の空気圧を 2 つのエアシリンダーの左右の圧力室に入れる。その後バルブ A, B を閉じ、エアシリンダー A のピストンロッドは回転板の偏心軸に固定してあり、この回転板をモーターにより回転させることによって、エアシリンダー B のピストンロッドに正弦波状に押し引きの力が生ずる。この力の大きさは、エアシリンダーに入れる空気圧と、偏心軸の偏心度を変化させることによって変えられる。そしてその力は、試料台とピストンロッドの接手部に取り付けてある板ばねに生ずるヒズミを、それに接着している抵抗線ヒズミゲージで測定することによって求められる。

また、供試体に生ずるせん断ヒズミは、試料台の水平変位を差動変圧型の変位計で測定し、それを供試体の高さで除して求める。

繰返しせん断力とせん断変位は X-Y レコーダーで記録し、鉛直変位はダイヤルゲージで直接読み取る。なお、繰返しせん断力の波形は正弦波で周期は 2 秒で、鉛直圧は 0.5, 1.0, 2.0 (kg/cm^2) の場合をそれぞれの試料で行なった。

4. 実験結果とその考察

4.1 動的剛性率, 体積変化率と履歴減衰定数について

Fig. 3 (a), (b) に実験結果の記録例を示す. Fig. 3 (a) は試料が豊浦細砂で鉛直圧 $\sigma_v=0.5(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の場合である. 繰返し回数 $n=3$ のときせん断ヒズミ $\gamma=0.104(\%)$ で今回の実験ではヒズミが大きい方に含まれる. 一方, Fig. 3(b) は試料が新宮粗砂で鉛直圧 $\sigma_v=2.0(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の場合であり, $n=3$ のとき $\gamma=0.0243(\%)$ でヒズミが小さい方に含まれる. これらの例のように, ヒズミが大きくなるにともなってバイリニヤー型から楕円型の履歴曲線に変化する. そして

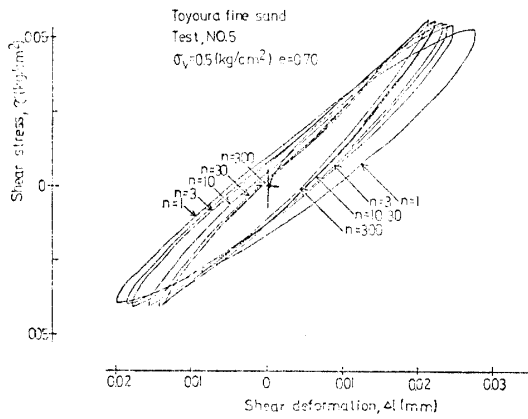


Fig. 3(a) Test result

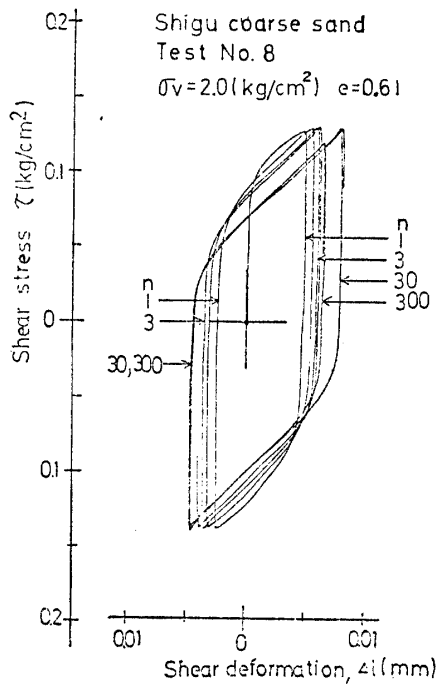


Fig. 3(b) Test result

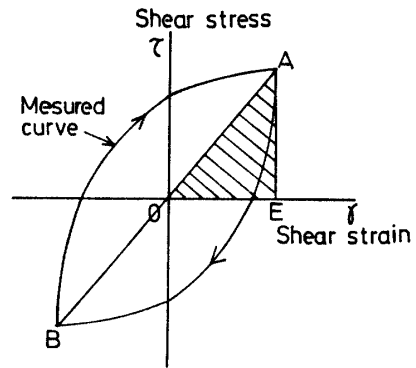


Fig. 4 Equivalent hysteretic stress-strain property

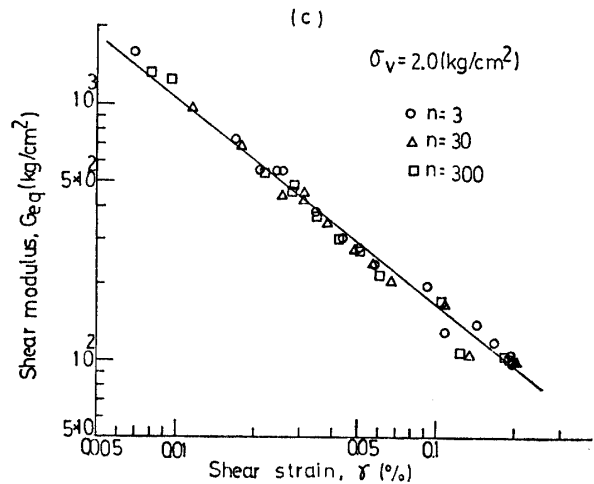
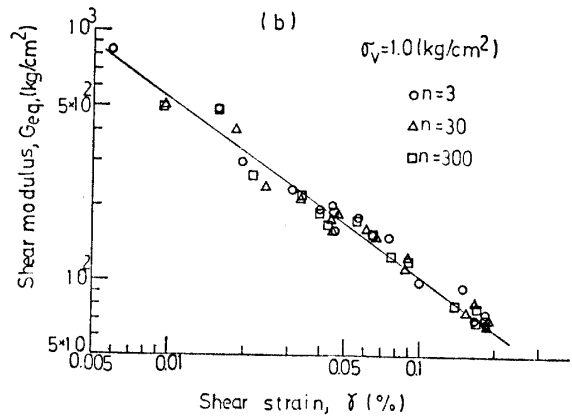
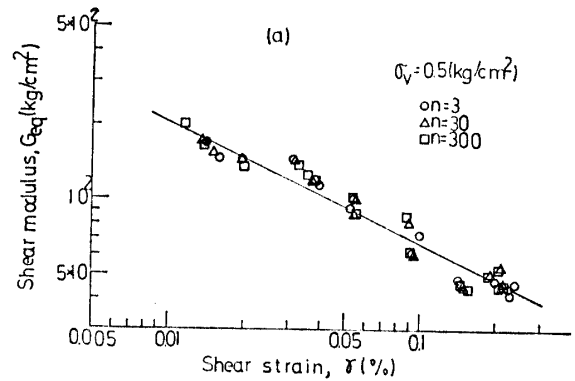


Fig. 5 Relationship between shear modulus and shear strain (Shingu coarse sand, $e=0.61$)

その境界となるせん断ヒズミは各鉛直圧で異なり、また試料によっても変わる。

一般に、土の応力-ヒズミ関係は非線形であり、ヒズミが 10^{-4} 程度以上になると土は弾塑性体としての変形を示し、繰返し負荷に対して大きな履歴曲線を描く。この履歴曲線から剛性率、減衰定数を評価する場合、一般に等価線形モデルに置き換えられている。その方法を Fig. 4 に示す。すなわち、履歴曲線の A 点と B 点を結ぶ直線の勾配を等価剛性率 (G_{eq}) とし、履歴による減衰は、振動の 1 サイクル中に履歴曲線の囲む面積分だけのエネルギーが消失するという考えに基づき、等価履歴減衰定数 (b_{eqh}) は次式で示される。

$$h_{eqh} = \Delta W / 4\pi W \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 ΔW は履歴曲線の囲む全面積、 W は ΔOAE の面積である。

等価剛性率とせん断ヒズミの関係を新宮粗砂の場合について整理したのが Fig. 5 である。Fig. 5 の (a), (b), (c) は、鉛直圧がそれぞれ $\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.0$ (kg/cm^2) である。また、せん断ヒズミ $\gamma = 0.01, 0.05, 0.1$ (%) のときの等価剛性率と鉛直圧の関係を Fig. 6 に示す。したがって、等価剛性率はせん断ヒズミが大きくなれば指数的に減少し、鉛直圧が大きくなれば指数的に増加する。この傾向は豊浦細砂、マサ土の場合についても現われ、次式のような実験式を提案することができる。

$$G_{eq} = C\sigma_v^n / \gamma^m \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 G_{eq} : 等価剛性率、 γ : せん断ヒズミ、 σ_v : 鉛

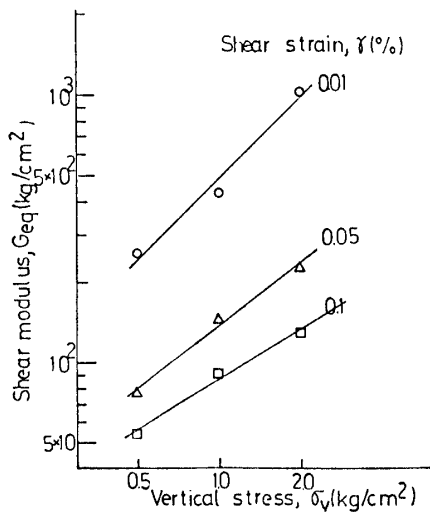


Fig. 6 Shear modulus-vertical stress at different shear strain (Shingu coarse sand, $n=30$, $e=0.61$)

直圧、 m, n : べき定数、 c : 定数である。

m の値はせん断ヒズミの大きさにより、また n の値は鉛直圧の大きさによって変わるのでその変化の様子をそれぞれ Fig. 7, 8 に示す。また、それぞれの試料で 1 つの実験式を得るために各定数の値を最小二乗法によって定めたものを Table 3 に示す。

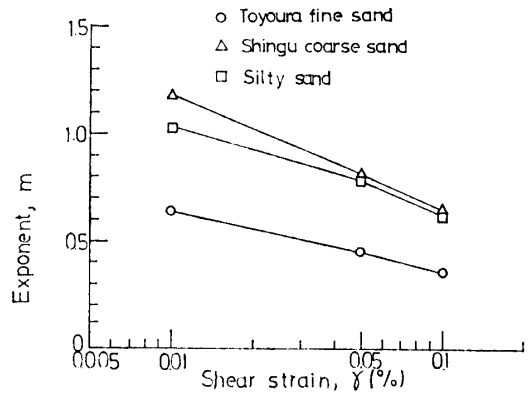


Fig. 7 Effect of shear strain on measured exponent, m

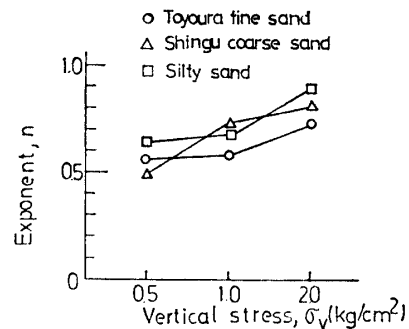


Fig. 8 Effect of vertical stress on measured exponent n

Table 3 Constants of equation (2)

	c	m	n
Toyoura fine sand	0.952	0.484	0.619
Shingu coarse sand	1.01	0.884	0.672
Silty sand	0.442	0.807	0.758

体積変化率は、キャップの沈下量を読み取るように取り付けられたダイヤルゲージで測定した。圧密後のダイヤルゲージの読みより各負荷回数後のダイヤルゲージの読みを差し引き、この高さを ΔH とすれば、今回の装置では供試体の断面積は変化しないので、高さ変化率 $\Delta H/H$ と体積変化率 $\Delta V/V$ は同じものとなる。

新宮粗砂について体積変化率とせん断ヒズミの関係を示したのが Fig. 9 である。Fig. 9 の (a), (b), (c) は、

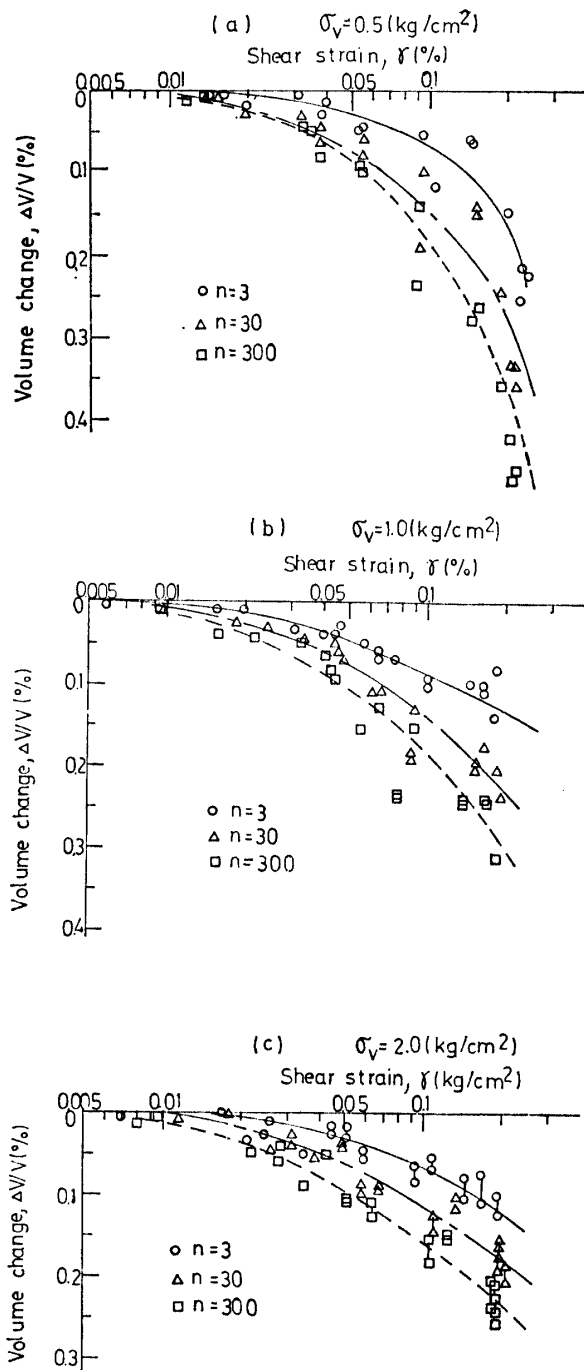


Fig. 9 Relationship between volume change and shear strain (Shingu coarse sand, $e=0.61$)

鉛直圧がそれぞれ $\sigma_v=0.5, 1.0, 2.0(\text{kg}/\text{cm}^2)$ であり、体積変化率はすべて収縮側である。1つの実験では、繰返し回数の増加にともなって体積変化率は増加するが、この傾向はせん断ヒズミが大きいほど著しい。また、繰返し回数 $n=30$ (回)で、せん断ヒズミ $\gamma=0.02, 0.05, 0.1(\%)$ のときの体積変化率と鉛直圧との関係を示したのが Fig. 10 である。鉛直圧が大きくなるにつれて体積変化率は減少し、また、せん断ヒズミが大きい場合がせん断ヒズミが小さい場合に比べて鉛直圧

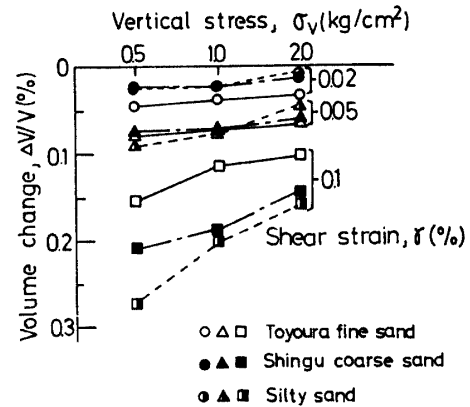


Fig. 10 Effect of shear strain on volume change-vertical stress

の増加にともなう体積変化率の減少割合が大きい。したがって、せん断ヒズミが大きいほど鉛直圧が体積変化率に与える影響が大きく、また、鉛直圧の大きい場合はヒズミによる体積変化の増加割合が小さいことは注目される。

豊浦細砂、新宮粗砂、マサ土とも、ヒズミが小さいときは体積変化率の大きさ、鉛直圧の増加にともなう体積変化率の減少割合はほぼ同じであるが、せん断ヒズミが大きくなると体積変化率の大きさは豊浦細砂が最も小さく新宮粗砂、マサ土の順に大きくなっている。したがって、せん断ヒズミが小さいときは供試体の粒径が異なっても砂粒子の移動量が小さく、それほど体積変化率に影響を与えないが、せん断ヒズミが大きくなると砂粒子が絶えず移動し攪乱されるので体積変化率が大きくなることはわかるが、それが粒径によって異なる点は明らかでない。ただ平均粒径が大きい砂ほど間ゲキの大きい骨格構造をくむことが原因でないかと考えられる。

次に、等価履歴減衰定数とせん断ヒズミの関係を新宮粗砂の場合について示したのが Fig. 11 である。履歴減衰定数はせん断ヒズミが大きくなるにともなって減少し、また、繰返し回数 $n=3\sim 30$ (回)までの減少割合が大きく、せん断ヒズミが大きくなるとその減少割合が大きい。他の豊浦細砂、マサ土についても値は異なるが同じような傾向が得られた。せん断ヒズミ $\gamma=0.02, 0.05, 0.1(\%)$ のときの履歴減衰定数と鉛直圧との関係を示したのが Fig. 12 であり、鉛直圧が大きくなると履歴減衰定数は大きくなる。

他の研究者によれば、履歴減衰定数はせん断ヒズミが大きくなれば増加し、鉛直圧が大きくなれば減少すると報告している。しかし、今回の実験ではこれと逆の実験結果が得られたが、これは履歴曲線がヒズミが大きくなるにつれてバイニリヤー型から楕円型に変わ

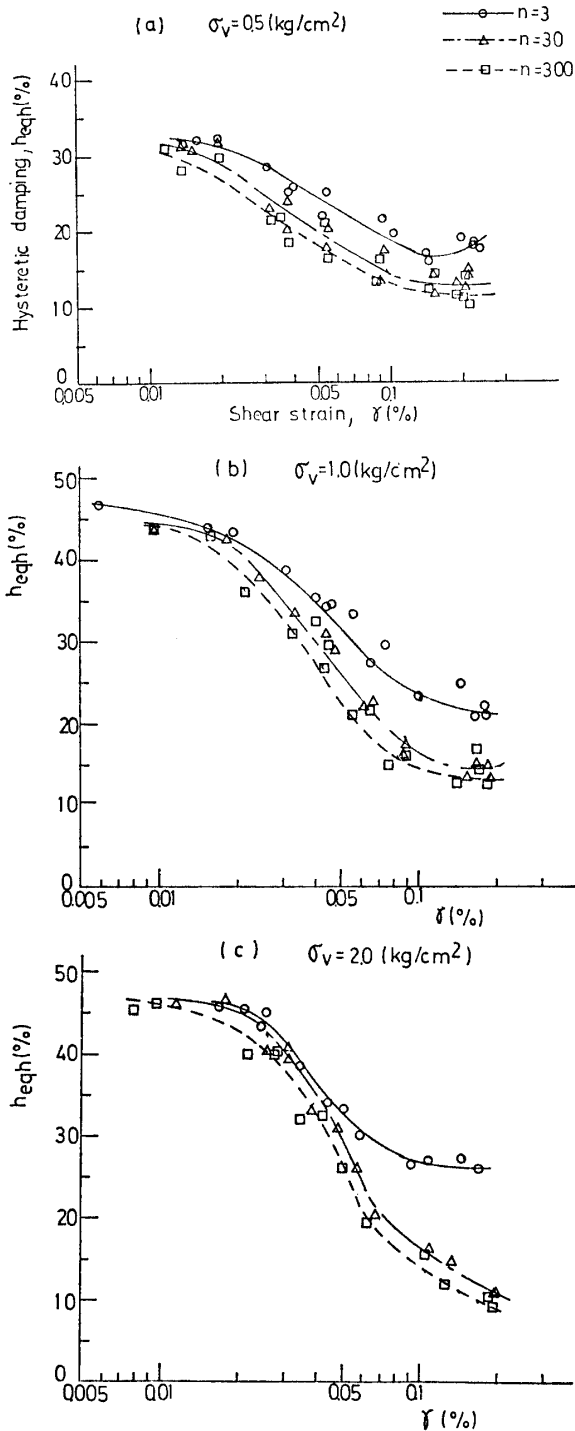


Fig. 11 Relationship between hysteretic damping and shear strain (Shingu coarse sand)

ったためである。この原因は、せん断ヒズミが小さいとき、圧密後に形成された初期の砂粒子の骨格構造が強制せん断力が小さいためにほとんどくずされず、強制せん断力に対して砂粒子の骨格構造のエネルギー消散が大きく、せん断ヒズミが大きくなると強制せん断力に対して砂粒子が移動しやすく強度が弱くなり、エネルギー消散が小さくなるためであると考えられる。

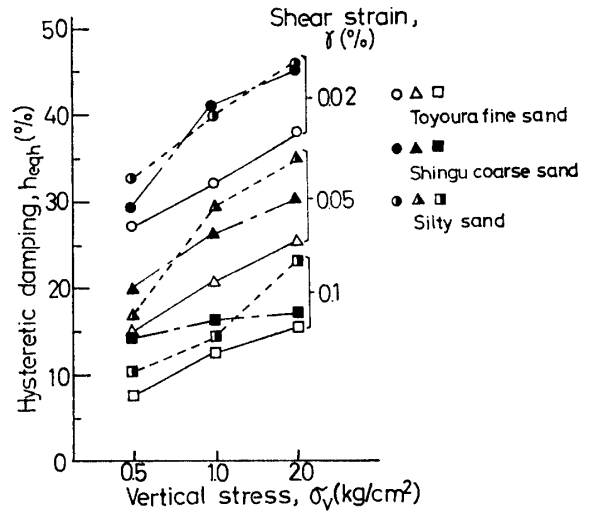


Fig. 12 Relation between hysteretic damping and vertical stress

また、鉛直圧が大きくなると同じせん断ヒズミを生ずるのに砂粒子が移動しにくく、砂粒子相互間のエネルギー消散が大きくなるものと考えられる。

4.2 スケルトン (Skeleton) の変化

試料が豊浦細砂で、鉛直圧 $\sigma_v = 1.0 (\text{kg/cm}^2)$ 、繰返し回数 $n = 30$ (回) のときの実験結果から数個取り出して履歴曲線を図示したのが Fig. 13 である。これからせん断ヒズミの大小によって履歴曲線の変化の様子がわかる。

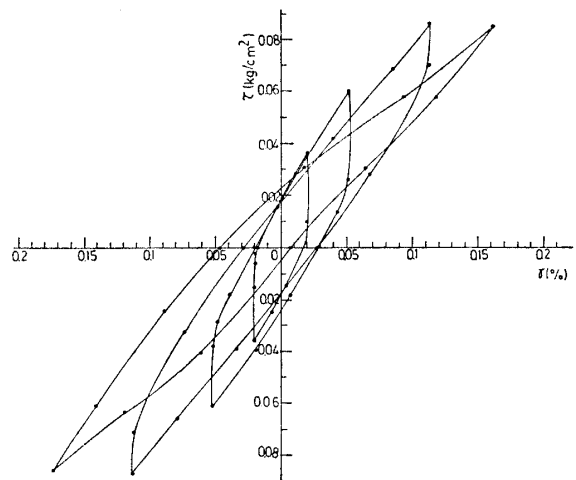


Fig. 13 Relationship between shear stress and shear strain (Toyouura fine sand, $n = 30$)

式(1)では、Skeleton を履歴曲線の頂点を結ぶ直線に置換しているが、一般に Skeleton はわからず、また、臨界減衰係数は線形系の場合のように $C_{cr} = 2\sqrt{mk}$ (m : 質量, k : 反力係数) では表わされない。Fig. 13 からわかるように、パイリニャー型の履歴曲線では上

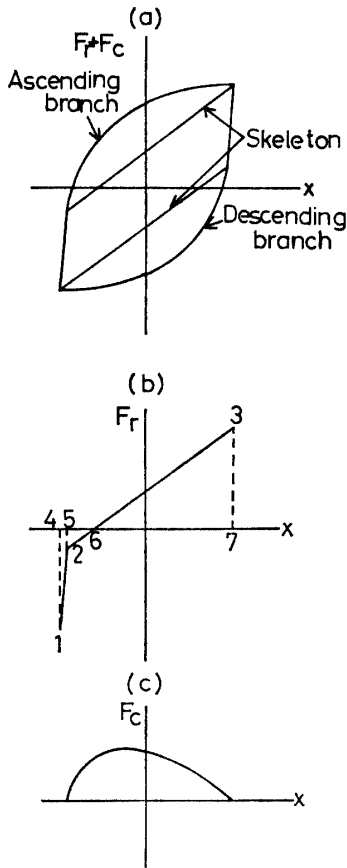


Fig. 14 Determination of skeleton

昇時と下降時で Skeleton が異なり, Fig. 14 に示すように曲線の初期直線部分からはずれる点を境に2つの直線を考え, これを Skeleton とする. いま, 上昇曲線のみを考えると Fig. 14(a) の履歴曲線は (b) と (c) に分離することができ, 上昇時に Skeleton に蓄積されるエネルギーは

$$W_1 = \Delta 145 + \Delta 256 + \Delta 367 \quad \dots\dots(3)$$

で表わされ, 式(1)の ΔW に相当するエネルギーは (c) の面積で与えられる. 下降曲線でも同様なことを行ない両者の和を $W, \Delta W$ とする. なお, Fig. 14(a) で示すように Skeleton に囲まれる四辺形の面積は, 砂粒子の骨格構造で消耗されるエネルギーと考えられる. セン断ヒズミが大きくなると砂粒子の骨格で消耗されていたエネルギーは, 逆にヒズミエネルギーとして蓄えられ Skeleton は1点と3点を結ぶ直線となると考えられる. このように Skeleton を仮定すれば, バイリニャー型と楕円型の履歴曲線を統一的に評価できるが数量的に履歴減衰定数を決定することができないが, 履歴減衰定数は $\Delta W/W$ の値で決まるので, 実験結果から数個取り出して計算した. 新宮粗砂についてエネルギー比とせん断ヒズミの関係を Fig. 15 に示

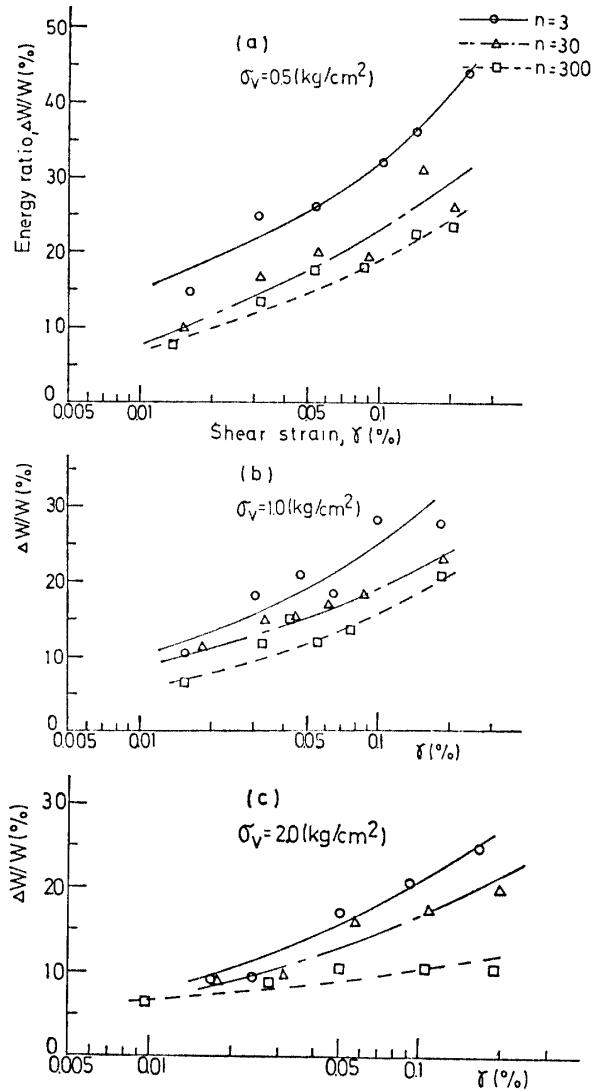


Fig. 15 Relationship between energy ratio and shear strain (Shingu coarse sand)

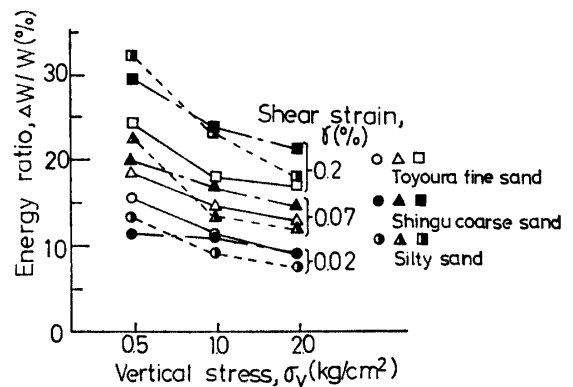


Fig. 16 Energy ratio-vertical stress at different shear strain ($n=30$)

す. また繰返し回数 $n=30$ (回) でせん断ヒズミ $\gamma=0.02, 0.07, 0.2(\%)$ のときのエネルギー比と鉛直圧との関係を Fig. 16 に示す.

これらの図から、せん断ヒズミが大きくなるにつれてエネルギー比は大きくなり、繰返し回数が増加すれば小さくなる。したがって、せん断ヒズミが大きくなるにつれて砂粒子の骨格構造で消耗されるエネルギーが小さくなり、蓄積エネルギーの増加へと変わっていることを示している。また、鉛直圧が大きくなるにもなってエネルギー比は減少しており、鉛直圧が大きくなると砂粒子の骨格構造が強固になり骨格で消耗されるエネルギーが大きくなることを示している。

Fig. 14(b) で点2と点3を結ぶ直線の勾配を修正剛性率として表わし、修正剛性率とせん断ヒズミの関係を新宮粗砂について示したのが Fig. 17 である。なお、繰返し回数は $n=30$ (回) のときについてのみ示したものである。また、せん断ヒズミ $\gamma=0.02, 0.1$ (%) のときの修正剛性率と鉛直圧との関係を Fig. 18 に示す。これらはそれぞれ Fig. 5, 6 と比べて直線の勾配はゆるやかである。

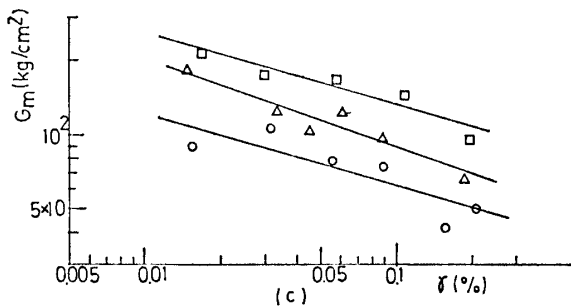


Fig. 17 Relationship between modified rigidity and shear strain (Shingu coarse sand, $n=30$)

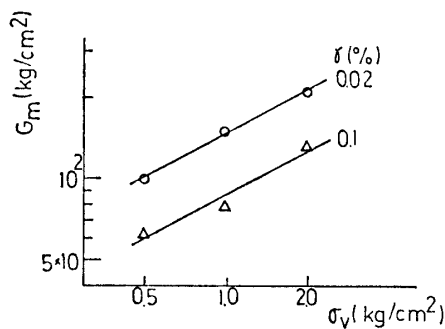


Fig. 18 Modified rigidity-vertical stress at different shear strain (Shingu coarse sand, $n=30$)

4.3 砂質土の構成式 (柴田の提案式の検討)

柴田は、応力またはヒズミ振幅が小さい場合、すなわち、飽和砂では過剰間ゲキ水圧が微小であり、乾燥砂では密度変化が無視できるほど少ない場合の砂質土

の構成式として次式を提案している。

$$\frac{\sqrt{\sigma_c}}{G} = \frac{\sqrt{\sigma_c}}{G_{0i}} + \frac{1}{\beta} \frac{\gamma}{\sqrt{\sigma_c}} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 G : 等価剛性率, G_{0i} : 初期剛性率, σ_c : 拘束圧, γ : せん断ヒズミである。

新宮粗砂について $\sqrt{\sigma_c}/G$ と $\gamma/\sqrt{\sigma_c}$ の関係を Fig. 19 に示す。 σ_c は今回の実験では K_0 圧密状態であるので $K_0=1$ と仮定して決定した。等価剛性率を用いた場合、 $\gamma/\sqrt{\sigma_c}$ がある程度小さくなると $\sqrt{\sigma_c}/G$ が直線より下がる。これは、バイリニャー型の履歴曲線が記録されるところで、せん断応力-せん断ヒズミ関係が双曲線近似できないためと考えられる。

Fig. 19 より $\sqrt{\sigma_c}/G_{0i}$, β を求めることができる。 $G_{0i}/\sqrt{\sigma_c}$ は間ゲキ率 (n) が大きくなるほど小さくなり、 $\beta = \tau_f/\sigma_c$ (τ_f : せん断強度) であり、内部マサツ角に対応する値でこれも間ゲキ率の増大にもなって小さくなる。したがって、 $G_{0i}/\sqrt{\sigma_c}$ と β は密度に関係し両者の比を一定とすれば Fig. 20 のように示される。また、柴田は、 G_{0i} について次式を得ている。

$$G_{0i} = 4200(0.67 - n)\sqrt{\sigma_c} \quad \dots\dots(5)$$

式(5)に基づき $G_{0i}/\sqrt{\sigma_c}$ と n の関係を Fig. 21 に示す。

柴田の提案した砂質土の構成式は、

$$\frac{G}{F(n)} = \frac{\sqrt{\sigma_c}}{1 + 10^3 \times \frac{\gamma}{\sqrt{\sigma_c}}} \quad \dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{共振円柱法 } F(n) &= 4200(0.67 - n) \\ \text{単純せん断法 } (K_0=1) F(n) &= 2100(0.67 - n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

であるが、今回行なった実験結果より、等価剛性率 (G_{eq}) を用いた場合

$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{F(n)} &= \frac{\sqrt{\sigma_c}}{1 + 1.8 \times 10^3 \times \frac{\gamma}{\sqrt{\sigma_c}}} \\ F(n) &= 1000(0.67 - n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

修正剛性率を用いた場合

$$\left. \begin{aligned} \frac{G}{F(n)} &= \frac{\sqrt{\sigma_c}}{1 + 7 \times 10^2 \times \frac{\gamma}{\sqrt{\sigma_c}}} \\ F(n) &= 500(0.67 - n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

が得られた。柴田の提案式と比較して諸係数が異なっており、その原因は不明でさらに数多くの実験を行なって確かめる必要がある。

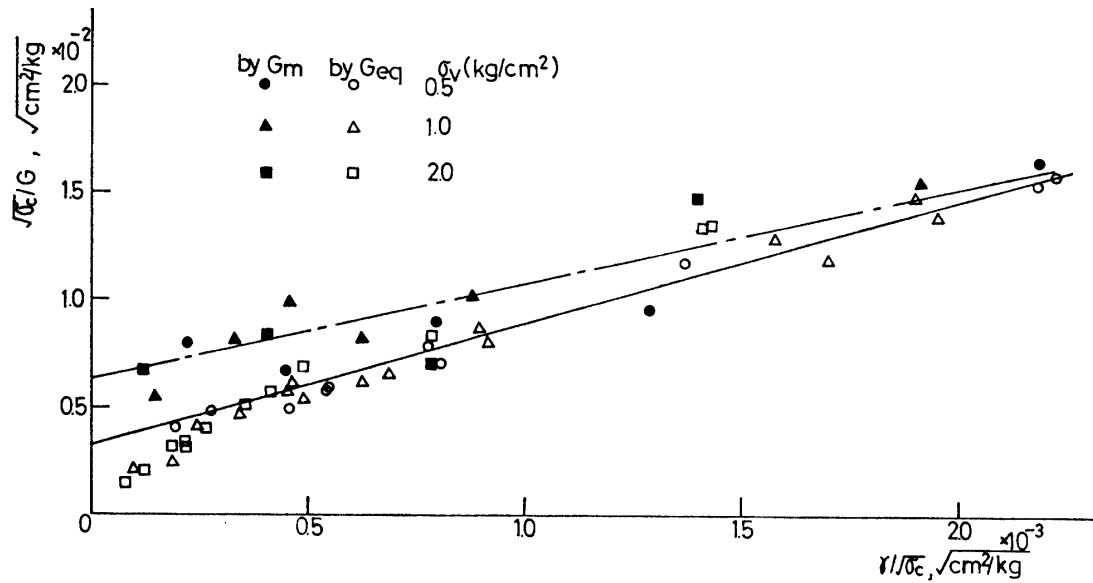


Fig. 19 Relationship between $\sqrt{\epsilon}/G$ and $\gamma/\sqrt{\sigma_c}$ (Shingu coarse sand, $n=30, e=0.61$)

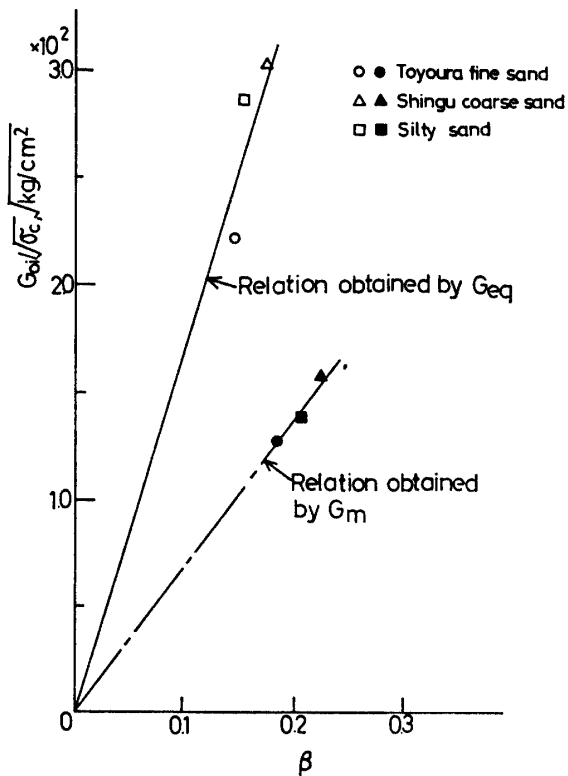


Fig. 20 Relationship between $G_{0i}/\sqrt{\sigma_c}$ and β

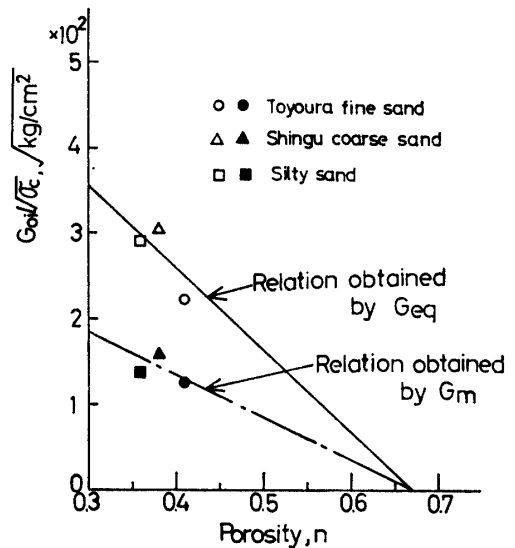


Fig. 21 Relationship between $G_{0i}/\sqrt{\sigma_c}$ and porosity

5. 結 論

動的単純せん断試験機を用いて密詰め乾燥砂質土の動的せん断定数等を調べ、実験結果より次の事柄が得られた。

- (1) セン断ヒズミが増加するにともなって履歴曲線はバイリニア型から楕円型に変化し、この現象は、せん断ヒズミが小さいとき、圧密後に形成された砂粒子の骨格構造がせん断力が小さいためにほとんどくずれず、せん断力が大きくなるにともなって骨格はくずれ砂粒子の相対移動が大きくなるからだと考えられる。
- (2) 線形材に置換して動的せん断定数を求めた。等価剛性率はせん断ヒズミが大きくなると指数的に減少

し、鉛直圧が大きくなると指数的に増加する。また、履歴減衰定数を求める際、履歴曲線がバイリニヤー型の場合線形材に置換するのに不都合がある。バイリニヤー型と楕円型の履歴曲線を統一的に評価するために Fig. 14 に示すような Skeleton を仮定し、エネルギー比 ($\Delta W/W$) によって評価した。その結果、エネルギー比はせん断ヒズミが大きくなると増加し、鉛直圧が大きくなると減少する。このことはとりもなおさずせん断ヒズミが大きくなると Skeleton が弱くなり、鉛直圧が大きくなると強くなることを示している。

(3) 体積変化率 ($\Delta V/V$) は、せん断ヒズミが大きくなると増加し、鉛直圧が大きくなると減少する。また、新宮粗砂、マサ土は豊浦細砂に比べてせん断ヒズミが大きくなると体積変化率が大きく、平均粒径が大

きい砂ほど間ゲキの大きい骨格構造となると考えられる。

参 考 文 献

- 1) M. L. Silver, H. B. Seed "Deformation characteristics of sands under cyclic loading" Proc. of ASCE, Vol. 97, No. SM. 8 (1971)
- 2) 柴田徹, D.S. Socarno. "繰返しを受ける砂質土の応力・ヒズミ特性" 土木学会論文報告集, 第239号 (1975)
- 3) L.S. Jacobsen "Damping in composite structures" Proc. of the 2th World Conf. on earthquake engineering, Tokyo Japan (1960)
- 4) 大原資生・安永文夫・藤井信夫 "乱さないシラスの動的特性" 土質工学会論文報告集, Vol. 14, No. 4 (1974)

(昭和51年3月25日 受理)